Wed. May 31, 2023

Room A

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-01] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (1)

座長:磯部 大吾郎(筑波大学)
9:30 AM - 10:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-01-01] Seismic Risk Assessment with Fragility Function using the City-scale Numerical Simulation
*湯 東暘[1]、Sukulthanasorn Naruethep[1]、野村 怜佳[1]、森口 周二[1]、野島 和也[2]、櫻庭 雅明[2]、寺田 賢二郎[1]（1. 東北大学、2. 日本工営株式会社）
9:30 AM - 9:45 AM

[A-01-02] 建物と家具の統合モデルを用いた EPS緩衝材による棟間衝突被害低減効果の評価
*古谷野 真輝[1]、磯部 大吾郎[1]（1. 筑波大学）
9:45 AM - 10:00 AM

[A-01-03] A simulation on rainfall-earthquake induced landslide over wide area using the limit equilibrium method
*Iskandar Iskandar[1]、Daichi Sugo[1]、Dolojan Nilo[1]、Nomura Reika[1]、Moriguchi Shuji[1]、Terada Kenjiro[1]、Muslim Dicky[2]、Arifianti Yukni[3]、Afif Haunan[4]、Pamela Pamela[4]（1. Tohoku University、2. Padjadjaran University、3. National Research and Innovation Agency (BRIN)、4. Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation of Indonesia (PVMBG)）
10:00 AM - 10:15 AM

[A-01-04] 深層カーネル学習サロゲートモデルによる高次元不確定性をもつ構造信頼性解析の効率化
*才田 大聖[1]、Muhammad Rashid[1]、西尾 真由子[1]（1. 筑波大学）
10:15 AM - 10:30 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-02] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (2)

座長:浅井 光輝(九州大学)
10:45 AM - 11:45 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-02-01] 品質工学を用いた木造住宅実大振動台実験のデータ同化
*難波 宗功[1]、中川 貴文[1]、五十田 博[1]、角 有司[2]、滝野 敦夫[3]（1. 京都大学、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 大阪工業大学）
10:45 AM - 11:00 AM

[A-02-02] 鉄筋コンクリート構造建屋の地震時損傷挙動再現解析
*田中 栄次[1]（1. 清水建設株式会社）
11:00 AM - 11:15 AM

[A-02-03] パレットラックシステムの進行性崩壊防止に関する数値解析的研究
*謝 氷清[1]、磯部 大吾郎[1]（1. 筑波大学）
11:15 AM - 11:30 AM

[A-02-04] 地震時の建物一棟解析と VRシミュレータの開発
*楊 全宜[1]、Yan Meng[1]、磯部 大吾郎[1]（1. 筑波大学）
11:30 AM - 11:45 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-03] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (3)

座長:市村 強(東京大学)
1:15 PM - 2:45 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-03-01] (キーノート講演)粒子法と ASI-Gauss法のカップリングに基づく波浪-骨組構造連成解析
*大村 浩之[1]、三目 直登[1]、浅井 光輝[2]、磯部 大吾郎[1]（1. 筑波大学、2. 九州大学）
1:15 PM - 1:45 PM

[A-03-02] µ(l)レオロジーモデルを用いた粒状流の完全陰解法型 SPH解析
*岡野 翔大[1]、森川 ダニエル[2]、大﨑 春輝[1]、浅井 光輝[1]（1. 九州大学、2. 海洋研究開発機構）
1:45 PM - 2:00 PM

[A-03-03] 弾性変形を考慮した浮体の運動方程式における遅延関数の効果について
*眞鍋 尚[1]、坂本 大樹[1]、室井 謙吾[1]（1. みずほリサーチ&テクノロジーズ）
2:00 PM - 2:15 PM

[A-03-04] 複数浮体の動揺解析における遅延関数の効果について
*坂本 大樹[1]、眞鍋 尚[1]、室井 謙吾[1]（1. みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社）
2:15 PM - 2:30 PM

[A-03-05] Wide-area river simulation using 1-m mesh resolution for sediment and flood damage prediction
*Arce-Acuna Marlon[1]、青木 尊之[1]、Shima Hirona[2]、Maya Yoshida[2]（1. Tokyo Institute of Technology、2. Sabo &Landslide Technical Center）
2:30 PM - 2:45 PM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-04] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (4)

座長:樫山 和男(中央大学)
3:00 PM - 4:30 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-04-01] (キーノート講演)斜面安定解析結果を用いた豪雨

による広域斜面崩壊の即時予測

*外里 健太[1]、野村 怜佳[2]、森口 周二[2]、寺田 賢二郎[2]（1. 八戸工業大学、2. 東北大学）

3:00 PM - 3:30 PM

[A-04-02] 有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析

*宮内 暖季[1]、深澤 一志[1]、樫山 和男[1]（1. 中央大学）

3:30 PM - 3:45 PM

[A-04-03] 下水道の簡易的なモデル化による内水氾濫解析手法の開発

*紺野 矩彦[1]、小笠原 敏記[1]（1. 岩手大学）

3:45 PM - 4:00 PM

[A-04-04] Implementing 2D shallow water equations to simulate debris flows using SPH

*Dolojan Nilo[1]、野村 怜佳[1]、森口 周二[1]、寺田 賢二郎[1]（1. 東北大学）

4:00 PM - 4:15 PM

[A-04-05] ロバスト主成分分析に基づく沖合津波観測点配置の最適化

*藤田 真粋[1]、野村 怜佳[1]、大竹 雄[1]、越村 俊一[1]、森口 周二[1]、寺田 賢二郎[1]（1. 東北大学）

4:15 PM - 4:30 PM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-05] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (5)

座長:吉村 忍(東京大学)

4:45 PM - 6:00 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-05-01] (キーノート講演)多様なシナリオデータベースの融合による津波リスク同定

*野村 怜佳[1]、大竹 雄[1]、森口 周二[1]、越村 俊一[1]、LeVeque Randall[2,1]、寺田 賢二郎[1]（1. 東北大学、2. ワシントン大学）

4:45 PM - 5:15 PM

[A-05-02] 風力発電風車の配置最適化問題への量子コンピューティング適用

*川原 仁志[1]、佐藤 富一[1]、門脇 高広[1]、里見 英俊[1]（1. 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）

5:15 PM - 5:30 PM

[A-05-03] 都市型水害解析ソフトウェアの開発とその基礎的検証

*高椋 恵[1]、眞鍋 尚[1]、溝内 秀男[1]（1. みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社）

5:30 PM - 5:45 PM

[A-05-04] デイサービス施設における排泄介助マルチエージェントシミュレーション

*高木 碧[1]、藤井 秀樹[1]、内田 英明[2]、吉村 忍[1]（1. 東京大学、2. 大阪大学）

5:45 PM - 6:00 PM

Thu. Jun 1, 2023

Room A

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-06] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (6)

座長:北 栄輔(名古屋大学)

9:00 AM - 10:15 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-06-01] 沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

*丹司 尊[1]、内田 英明[2]、藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1]（1. 東京大学、2. 大阪大学）

9:00 AM - 9:15 AM

[A-06-02] EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

*田中 瑞基[1]、内田 英明[2]、吉村 忍[1]、藤井 秀樹[1]、丹司 尊[1]（1. 東京大学、2. 大阪大学）

9:15 AM - 9:30 AM

[A-06-03] 移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

*大島 航星[1]、長谷川 浩志[1]（1. 芝浦工業大学）

9:30 AM - 9:45 AM

[A-06-04] レベル4の MaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

*小幡 快世[1]、鈴木 隆介[1]、長谷川 浩志[1]（1. 芝浦工業大学）

9:45 AM - 10:00 AM

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman[1]、山田 修也[1]、玉城 龍洋[2]、*北 栄輔[1]（1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校）

10:00 AM - 10:15 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-07] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (7)

座長:藤井 秀樹(東京大学)

10:30 AM - 11:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-07-01] 被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

*今井 星太[1]、宮村 倫司[1]（1. 日本大学）

10:30 AM - 10:45 AM

[A-07-02] ミクロ交通流シミュレータへの CAV挙動の実装

*稲葉 陽樹[1]、藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1]（1. 東京大学）

10:45 AM - 11:00 AM

[A-07-03] 高速道路合流部における動的ハイブリッド交通流

シミュレーション

今井 陽[1]、*藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1] （1. 東京大学）

11:00 AM - 11:15 AM

[A-07-04] 自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

*惣野 源也[1]、長谷川 浩志[1] （1. 芝浦工業大学）

11:15 AM - 11:30 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-01] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (1)

座長:磯部 大吾郎(筑波大学)

Wed. May 31, 2023 9:30 AM - 10:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-01-01] Seismic Risk Assessment with Fragility Function using the City-scale Numerical Simulation

*湯 東暘[1]、Sukulthanasorn Naruethep[1]、野村 怜佳[1]、森口 周二[1]、野島 和也[2]、櫻庭 雅明[2]、寺田 賢二郎[1] （1. 東北大学、2. 日本工営株式会社）

9:30 AM - 9:45 AM

[A-01-02] 建物と家具の統合モデルを用いた EPS緩衝材による棟間衝突被害低減効果の評価

*古谷野 真輝[1]、磯部 大吾郎[1] （1. 筑波大学）

9:45 AM - 10:00 AM

[A-01-03] A simulation on rainfall-earthquake induced landslide over wide area using the limit equilibrium method

*Iskandar Iskandar[1]、Daichi Sugo[1]、Dolojan Nilo[1]、Nomura Reika[1]、Moriguchi Shuji[1]、Terada Kenjiro[1]、Muslim Dicky[2]、Arifianti Yukni[3]、Afif Haunan[4]、Pamela Pamela[4] （1. Tohoku University、2. Padjadjaran University、3. National Research and Innovation Agency (BRIN)、4. Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation of Indonesia (PVMBG)）

10:00 AM - 10:15 AM

[A-01-04] 深層カーネル学習サロゲートモデルによる高次元不確定性をもつ構造信頼性解析の効率化

*才田 大聖[1]、Muhammad Rashid[1]、西尾 真由子[1] （1. 筑波大学）

10:15 AM - 10:30 AM

Proceedings of Computational Engineering Conference JSCES
Vol. 28, 2023 May

Seismic Risk Assessment with Fragility Function using the City-scale Numerical Simulation

Dongyang Tang [1), Naruethep Sukulthanasorn [2), Reika Nomura [3), Shuji Moriguchi [4), Kazuya Nojima [5), Masaaki Sakuraba [6) and Kenjiro Terada [7)

[1)Graduate student, (Civil and Environmental Engineering, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan, E-mail: tang.dongyang.r3@dc.tohoku.ac.jp)
[2)Assistant Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
[3)Assistant Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
[4)Associate Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
[5)Visiting Associate Professor, Nippon Koei Co., Ltd.
[6)Visiting Professor, Nippon Koei Co., Ltd.
[7)Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)

This study presents a framework for assessing the seismic risk of buildings using a city-scale numerical simulation combined with sensor observations. In the proposed framework, the Stochastic Green Function is utilized to generate a range of ground motions. A part of Sendai City, Japan, is selected as the target area, and the Integrated Earthquake Simulation (IES) is employed to evaluate the seismic response of buildings. The fragility curve is then used to construct for each building based on the numerical simulation results. Furthermore, sensor data is incorporated using feature perception techniques such as Proper Orthogonal Decomposition (POD) and sparse learning to predict peak ground acceleration across the entire city area. Finally, seismic risk assessment is performed for each building using the corresponding fragility curve. This comprehensive approach provides valuable insights into urban earthquake resilience and helps to inform strategies for mitigating seismic risk.

Key Words : *seismic risk assessment, city-scale numerical simulation, sensor observations, Fragility Function, Proper Orthogonal Decomposition*

1. INTRODUCTION

Developing accurate models to estimate, predict, and control complex phenomena is a challenge in many fields. Although advanced technology allows for massive data collection, like seismic and environmental data, the multi-dimensional nature and varying timescales make real-time processing difficult. This issue hinders quick state estimation for fast, efficient control.

Dimension reduction offers a promising solution to this issue, as many natural science systems exhibit dominant low-dimensional patterns that can effectively explain high-dimensional data. Proper orthogonal decomposition (POD)[2] has emerged as a systematic approach to determine a low-dimensional approximation of high-dimensional data, enabling the exploitation of significant low-dimensional patterns based on efficient reduced-order models. This data-driven sensing approach has led to the development of sparse sensor placement algorithms.

In the context of urban seismic risk assessment, an integrated approach that combines city-scale simulation, sensor observations, and dimension reduction techniques is essential for understanding the potential impacts of earthquakes on city-scale infrastructure. This study presents a city-scale fragility assessment method that addresses the challenges associated with processing large amounts of data, considering uncertainties in building response, and incorporating dimension reduction techniques.

Utilizing the Stochastic Green's function for seismic wave generation and the Integrated Earthquake Simulation (IES)[6] for wide-area city simulations, this method provides valuable seismic motion data, including peak ground acceleration and building response. IES, linked to a Geographic Information System (GIS), incorporates earthquake motion simulation, structural response simulation, and response behavior simulation, contributing vast amounts of data crucial for the data-driven techniques employed in this study.

The proposed method applies POD and sparse learning to process the extracted features and predict overall peak ground acceleration based on local building sensor data. Finally, fragility assessment is conducted using the city-wide predictions, allowing for a comprehensive evaluation of earthquake damage in urban areas.

2. Numerical Simulation

(1) Integrated Earthquake Simulation(IES)

IES[6] is a program that is linked to a Geographic Information System (GIS) and incorporates earthquake motion

simulation, structural response simulation, and response behavior simulation **Fig.1**.

Wave propagation simulation: It outputs synthesized earthquake waves based on the fault mechanism. The propagation of waves passing through the crust is calculated, and the amplification of waves near the surface is calculated taking into account the non-linear characteristics of the 3-dimensional topographical effect and the shallow soil layer.

Structural response simulation: It calculates the response for all structures in the targeted area, including residential buildings, concrete infrastructure structures, geological structures, transportation networks, etc. It is necessary to choose an appropriate analysis method depending on the structure of the building.

Response behavior simulation: It is possible to analyze evacuation from building damage, crisis management, and restoration plans.

In this study, wave propagation simulation for the amplification of waves near the surface and the structural response simulation were used. Regarding the structural response simulation, IES provides three modules: Single Degree of Freedom model (SDOF), Multi Degree of Freedom model (MDOF), and One Component Model (OCM). In this study, the analysis was performed using MDOF. Input files for building floors and structures were created using GIS and other tools, and the response of the structure can be output by inputting seismic motions and other factors.

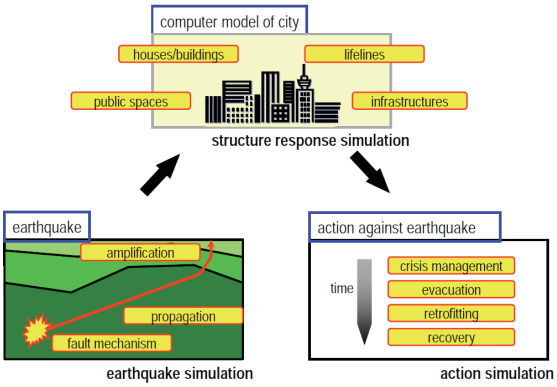


Fig. 1 Flow of IES[6]

(2) Stochastic Green's Function

The Stochastic Green's function method expands on the empirical Green's function method, which was initially introduced by Irikura[7] using a superposition technique. The empirical Green's function method relies on observed records as Green's functions, presuming that the deep and shallow subsurface structures at the observation point are already integrated into the observed records. On the other hand, this method serves as an effective alternative when appropriate observation records cannot be obtained.

In the application of the Stochastic Green's function method by Dan and Sato[4], the fault surface is segmented into small subfaults, and Boore's[1] Stochastic source model is taken into account for each subfault to compute the Green's functions. The deep subsurface structure is treated as a one-dimensional layered structure for ground response analysis. Random phase characteristics are attributed to this Green's function, and waveform synthesis is conducted in accordance with Irikura[7] to derive the seismic waveforms when the entire fault experiences rupture. This study utilizes a program provided by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.

(3) Target Area

In this study, the simulations are performed using the fault parameters of the Nagamachi-Rifu published by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. **Fig.2** displays the locations of the element faults employed in the Stochastic Green's function method, with the first asperity highlighted in red and the second asperity in blue. The second asperity was kept constant, while the position of the asperity was shifted to consider different 30 scenarios.

The Stochastic Green's function method assigns random phase differences to waveforms for each subfault before superimposing the outcomes. As a result, the earthquake waveform shape and the maximum inter-story drift angle of each building may vary based on the utilized random number sequence. To address this variation, analyses were conducted with five different random number sequences for each scenario, producing a total of 150 calculation result sets.

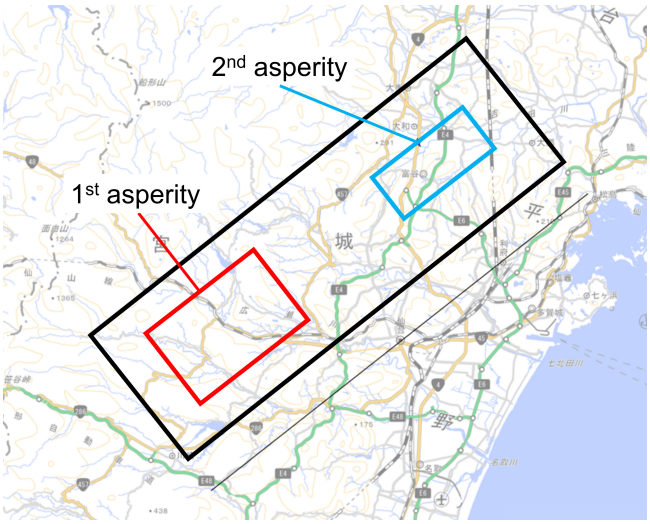


Fig. 2 Asperity of Nagamachi-Rifu fault

3. Fragility, Proper Orthogonal Decomposition, Sparse Learning

(1) Fragility Function

Fragility functions[8] are derived from a structural assessment of the system (in the case of analytical form). In simpler terms, fragility can be defined as the susceptibility of a structure to break or be damaged.

Fragility curve is a general term and may be referred to 2D "fragility curve" or 3D "fragility surface". Basically, there are three ways to get a fragility function, Incremental Dynamic Analysis(IDA), Multi Strip Analysis, Cloud Analysis.

Fragility curve is a continuous function showing the probability of exceedance of a certain limit state(LS) for a specific level of ground motion intensity measure(IM).

$$Fragility = P[LS|IM = im] \tag{1}$$

(2) Cloud Analysis

Cloud analysis[3] uses the linear regression in the logarithmic scale by least squares to establish the relationship between engineering demand parameter (EDP) and IM as follows:

$$\begin{aligned} &E[\ln EDP \mid IM] = \ln \mu_d = \ln a + b \ln IM \\ &\sigma_d = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} (\ln EDP_j - \ln \mu_d)^2 / (N-2)} \end{aligned} \tag{2}$$

given IM, $EDP_j = EDP$ obtained from the j-th ground motion, a and b = regression coefficients; and N = number of ground motions. The fragility function is expressed as the damage probability that EDP exceeds the pre-defined value threshold for each limit state (LS) conditional on IM, which can be derived based on the above linear relationship between EDP and IM under the lognormal probability distribution

$$\begin{aligned} &P_f[EDP \geq LS \mid IM, \eta, \beta] \\ &= \Phi\left\{\frac{\ln(\mu_d) - \ln(LS)}{\sigma_d}\right\} = \Phi\left\{\frac{\ln(IM) - \ln(\eta)}{\beta}\right\} \end{aligned} \tag{3}$$

where $\Phi(\cdot)$ = standard normal cumulative distribution function (CDF); η = median of the fragility function, i.e, $ln(\eta) = [ln(LS) - ln(a)]/b$; and β = dispersion of the fragility function, i.e., $\beta = \sigma_d/b$. Note that Eq.3 is a two parameter (η and β) fragility function given IM.

Limit state refers to a specific level of damage or failure that is used to define fragility functions. In this case, the limit states of "moderate" and "severe" were chosen from HAZUS[5] to develop the fragility functions.

(3) Proper Orthogonal Decomposition(POD)

Proper Orthogonal Decomposition(POD)[2] is an analysis technique that can extract modes from numerical analysis results, allowing for mode decomposition based on the theory of principal component analysis. It also enables dimension reduction by extracting only the dominant components from the calculated modes and reconstructing the original data with a small number of modes. Let $\boldsymbol{x}_i$ (n-dimensional) be the simulation result for a certain case i, and define the data $\boldsymbol{X}$ by arranging N cases in a row direction.

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} | & & | \\ \boldsymbol{x}_1 & \cdots & \boldsymbol{x}_N \\ | & & | \end{bmatrix} \tag{4}$$

In this study, since the data dimension is larger than the number of cases ($N << n$), $\boldsymbol{X}$ and $\boldsymbol{X}^T$ are multiplied to reduce the dimension, and the covariance matrix $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X}$ is defined, and eigenvalue decomposition is performed. Let λ_j and v_j be the obtained eigenvalues and eigenvectors, respectively, and let V be a matrix in which the eigenvectors are arranged in column direction. Using these, consider the singular value decomposition [5] of X as follows:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T \tag{5}$$

Here, $\boldsymbol{\Sigma}$ is a matrix in which the square root of the eigenvalues are arranged in diagonal elements, and $\boldsymbol{U}$ is a matrix in which the spatial modes u_j are arranged in column direction. Also, by transforming equation (2), the numerical analysis result x_i of a certain case i can be expressed as a linear combination of coefficients α and spatial modes u_j as follows:

$$\boldsymbol{x}_i = \sum_{j=1}^{N} (\sqrt{\lambda_j} v_{ij}^T) \boldsymbol{u}_j = \sum_{j=1}^{N} z_{ij} \boldsymbol{u}_j \tag{6}$$

Here, the error for each building is defined by the following equation, where $\hat{x}$ is the calculation result by the surrogate model and x is the numerical analysis result by IES.

$$error(\%) = \frac{|\hat{x} - x|}{x} \times 100 \tag{7}$$

From **Fig.3**, it can be seen that the error is generally kept

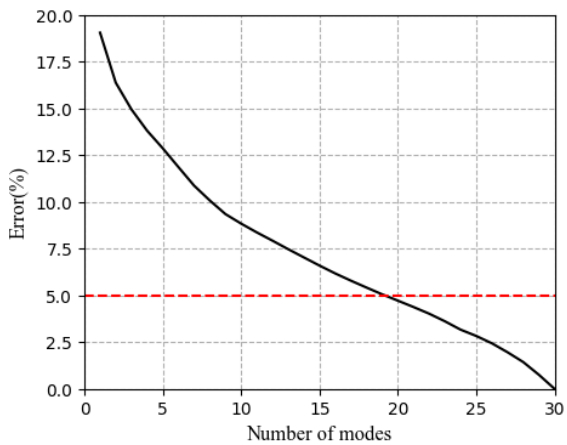


Fig. 3 Error for different number of modes

below 5%. Although there are buildings with errors of 20% or more, this is because the values were originally small, making them susceptible to the effects of reducing the number of modes. Overall, highly accurate results were obtained. Therefore, After dimension reduction, the principal components still retain most of the information in the data.

(4) Sparse Learning[9]

We consider the linear system given by

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{U}\boldsymbol{z} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{z} \tag{8}$$

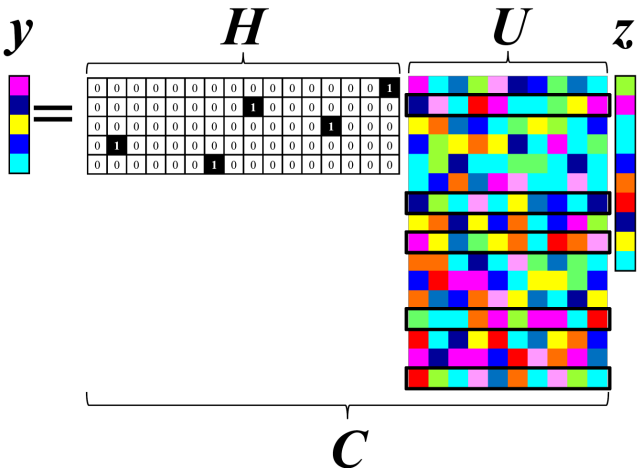


Fig. 4 Graphical image for sensor matrix H[9]

Fig. 5 Part of Aoba-ku, Sendai

where $\boldsymbol{y} \in R^p$, $\boldsymbol{H} \in R^{p\times n}$, $\boldsymbol{U} \in R^{n\times r}$, $z \in R^r$, and $\boldsymbol{C} \in R^{p\times r}$ are the observation vector, the sparse sensor location matrix, and the sensor candidate matrix, the latent state vector, and the measurement matrix ($\boldsymbol{C} = \boldsymbol{HU}$), respectively. Here, the element corresponding to the sensor location is unity and the others are 0 in each row of $\boldsymbol{H}$. In addition, p, n, and r are the number of sensors, the number of spatial dimensions, and the number of latent state variables, respectively. The system above represents the problem of choosing p observations out of n sensor candidates for the estimation of the state variables. The various sensor selections can be expressed by changing H and by selecting row vectors as sensors from the sensor candidate matrix $\boldsymbol{U}$. A graphical image of the foregoing equation is shown in **Fig.4**.

The estimated parameters $\hat{z}$ can be obtained by the pseudo-inverse operation when uniform independent Gaussian noise $N(0, \sigma^2\boldsymbol{I})$ is imposed on the observations as follows:

$$\hat{z} = \begin{cases} \boldsymbol{C}^T\left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{C}^T\right)^{-1}\boldsymbol{y} & p \le r \\ \left(\boldsymbol{C}^T\boldsymbol{C}\right)^{-1}\boldsymbol{C}^T\boldsymbol{y} & p > r \end{cases} \tag{9}$$

Furthermore, sensor selection based on POD is a data-driven approach without the requirement for governing equations. Such data-driven sensing generally needs to determine the optimal sensor locations from a large amount of candidates. Hence, we define a fast greedy optimization method for high performance computing or feedback control:

$$\text{maximize } f_D, \quad f_D = \begin{cases} \det\left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{C}^{\boldsymbol{T}}\right) & (p \le r) \\ \det\left(\boldsymbol{C}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{C}\right) & (p > r) \end{cases} \tag{10}$$

4. Seismic Risk Assessment

The Seismic Risk Assessment's objective targets a section of Aoba-ku in Sendai City, comprising 30,000 buildings **Fig.5**. Simulated seismic wave data and geographic information from the area are incorporated into the analysis.

With 150 scenarios generated from 30 scenarios each containing 5 random phases, these are divided into test and training sets. One of the 30 scenarios and its 5 corresponding ground motions are extracted. For each building, 145 sets of corresponding peak ground acceleration(PGA) and inter-story drift angles are simulated by IES. Using cloud analysis, with PGA as IM and inter-story drift angle as EDP, fragility functions for all buildings are calculated.

For all 30×5 data sets, the average of each group is taken, yielding $29 + 1$ sets of data, which serve as training and testing sets for POD and sparse learning. Proper Orthogonal Decomposition (POD) and sparse learning are employed for feature extraction. POD acquires the principal bases $\boldsymbol{U}$ of the peak ground acceleration data for the 29 cases, followed by sparse learning application to calculate and obtain new coefficients $\hat{z}$. Genetic algorithms is used for determining the optimal sensor placement.

Once sensor placement points are established, the acceleration map for the entire wide-area region can be inferred in the event of another earthquake, using the peak ground acceleration data collected from the sensors. Reconstruction error through sparse learning decreases with increasing sensor numbers but reaches an even level when the number of sensors hits 20, indicating a saturation point for further sensor additions **Fig.6**.

Assuming earthquake data is obtained through sensors, the acceleration data corresponds to the reserved test case. Balancing accuracy and sensor count, 20 sensors are deployed, and only the acceleration values from buildings with sensors are used as observation data. This approach enables prediction of the peak ground acceleration (PGA) map for the entire city area.

Upon PGA map prediction, a fragility assessment is conducted. By utilizing previously established fragility functions for all buildings and the known intensity measure (IM) – the PGA map – two distinct levels of fragility maps are generated under the current earthquake scenario: moderate, severe.

The two figures **Fig.7 Fig.8** show the fragility under four different limit conditions calculated using the pga map ob-

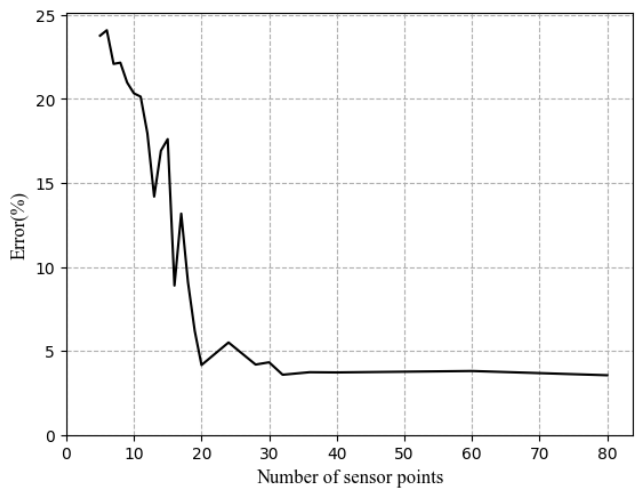


Fig. 6 Error for different number of sensor points

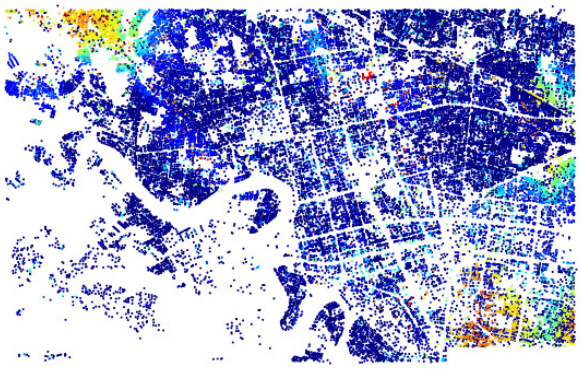


Fig. 7 Probability of damage at the moderate level

Fig. 8 Probability of damage at the severe level

tained from the data measured by sensors during an earthquake.

5. Conclusion

This study presents a method for assessing city-scale earthquake damage by combining simulations, sensor data, and dimension reduction techniques. It involves four steps: generating seismic waves, simulating city-scale effects, perceiving features with POD and sparse learning, and assessing fragility.

The method provides crucial seismic data for the entire city, but further research should consider building uncertainty and increasing sensor numbers. Using POD and sparse learning helps predict peak ground acceleration from local sensor data, although having too few sensors can affect accuracy.

Fragility assessment is done by analyzing city-scale peak ground acceleration predictions. Fragility functions are created using building response, cloud analysis, and HAZUS limit states. To improve reliability, future work should consider a broader range of ground motion. In summary, this method advances efforts to develop accurate models for complex phenomena like seismic risk assessment. By addressing data processing challenges, uncertainty, and incorporating dimension reduction techniques, it can help improve urban resilience against earthquakes.

REFERENCES

[1] Boore, D M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.

[2] Berkooz, G, Philip, H, and John, L L.: The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.25, No.1, pp.539-575, 1993.

[3] Cornell, C A., Jalayer, F., Hamburger, R O., Foutch, D A.: Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. Journal of Structural Engineering, Vol.128, No.4, pp.526-533, 2002.

[4] Dan, K., and Sato, T.: Strong Motion Prediction by Semi-empirical Method Based on Variable-slip Rupture Model of Earthquake Fault. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.509, pp.49-60, 1998.

[5] FEMA.: HAZUS-MH MR5 Technical Manual - Earthquake Model. U.S. Department of Homeland Security, 2010.

[6] Hori, M and Tsuyoshi, I.: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster. Journal of Seismology Vol.12, pp.307-321, 2008.

[7] Kojiro, I.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function. Journal of Geography (Chigaku Zasshi). Vol.110, No.6, 1986.

[8] Saouma, V E., and Mohammad, A H.: Fragility Functions. Aging, Shaking, and Cracking of Infrastructures. Springer, Cham, 2021.

[9] Nakai, K., Yamada, K., Nagata, T., Saito, Y., and Nonomura, T.: Effect of Objective Function on Data-Driven Greedy Sparse Sensor Optimization. IEEE Access Vol.9, pp.46731-46743, 2021.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

建物と家具の統合モデルを用いたEPS緩衝材による棟間衝突被害低減効果の評価

Evaluation on Seismic Pounding Damage Reduction Effect of EPS Cushioning Material Using Integrated Model of Building and Furniture

古谷野真輝[1)]，磯部大吾郎[2)]
Masaki Koyano and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: koyano.masaki.ay@alumni.tsukuba.ac.jp)
2) 博(工) 筑波大学 教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp）

In this research, the effect of two types of EPS cushioning materials with different foam ratio and thicknesses in reducing seismic pounding damage was verified by conducting seismic pounding analysis using an integrated model of building and furniture. As a result, it was clarified that overturning behavior of furniture was different when different EPS cushioning materials were installed. It was also shown that the acceleration response was more suppressed when the EPS cushioning material was deformed to the plateau region, compared to the case when the deformation remained in the elastic region. On the other hand, the yielded ratio was suppressed in the low-rise model, but was increased in the high-rise model.

Key Words: *Seismic pounding analysis, EPS material, Furniture, ASI-Gauss code*

1.　序論

日本は世界有数の地震大国であり，近い将来に南海トラフ巨大地震や首都直下型地震といった大規模地震が起こることが予想されている．日本の都市部では，大小様々なビルが極めて短い間隔で立ち並んでおり(図-1)，それぞれのビルが異なる固有周期を持つため，異なる揺れ方をする．地震発生時には，これらのビル同士が棟間衝突を起こし，構造部材や内部の什器に対し，大きな被害が生じる可能性が指摘されている．

隣接した建物の棟間衝突による被害を抑制する方法の一つとして，EPS（Expanded Polystyrene）と呼ばれる発泡材を緩衝材としてビルの側面に設置することが検討されており，棟間衝突によって発生する被害を抑制できることが先行研究[1]で示されている．しかし，棟間衝突が発生した場合にビル内の什器類がどのような挙動を示すかについては不明であり，EPS材の棟間衝突被害低減効果を評価する上で，地震動と衝突による建物内の家具への影響を調査することは重要である．

本研究では，EPS材の材料特性を考慮した上で，EPS緩衝材を側面に設置した2棟の高さの異なる隣接した中高層ビルと家具をはり要素でモデル化し，それらを統合的に解析することができる有限要素解析プログラムを開発することで，棟間衝突解析を行った．そして，各建物の応答加速度，塑性化率（全柱・梁の要素数に対する塑性化した要素の割合），家具の転倒挙動についてEPS緩衝材の有無，EPS緩衝材の厚さと発泡倍率を変更した場合で比較し，その衝撃緩和効果を評価した．有限要素解析手法には，衝突解析において実績があり，最小限の要素分割で骨組構造物の挙動を解くことができる，ASI-Gauss法[2]を用いた．

図-1 隣接したビルの様子
（東京・銀座一丁目）

2.　EPS材のモデル化

EPS材は弾性領域では線形的な応力変化が起きるが，プラトー領域では非線形的な応力変化が起きる．本研究では，EPS材の準静的一軸圧縮試験結果（積水化成品工業（株）提供）に基づき，発泡倍率ごとにひずみと弾性係数を対応させたデータベースを作成し，除荷時のひずみ値に応じてデータベースを参照し，逐次的に弾性係数を更新する．これにより，プラトー領域における応力-ひずみ関係を表現した．

また，EPS 材のひずみ速度依存性は，解析中に計算されたひずみ速度に応じて降伏応力を変化させることで表現する．本研究では，次式に示すCowper-Symondsの式[3]を用いて降伏応力を計算した．

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{1}$$

ここで，σ_0は準静的圧縮時の降伏応力，Dとqは材料固有の係数である．本研究では，準静的圧縮時の降伏応力として，発泡倍率33倍のEPS材をひずみ速度0.001667 [/s]で一軸圧縮試験を行った際の結果を用い，$D = 9.3555$，$q = 2.2019$と決定した．

さらに，ひずみ履歴特性については，発泡倍率33倍のEPS材に対する一軸繰返し載荷試験結果をもとに，除荷時のひずみ量に依存する再載荷時の弾性係数の近似式を構築し用いた．構築した近似式を以下に示す．

$$\frac{E}{E_0} = -8.7603{\varepsilon_{ul}}^3 + 11.65{\varepsilon_{ul}}^2 - 5.3334\varepsilon_{ul} + 1.1591 \tag{2}$$

ここで，E_0は初期弾性係数，ε_{ul}は除荷時のひずみである．プラトー領域到達後に除荷の判定が行われた際には，その時間ステップでのひずみ値を保存し，その値を上式に代入することで再載荷時の弾性係数を得る．なお，除荷時の弾性係数は再載荷時と同値とした．

本研究では，EPS 緩衝材をはり要素でモデル化するにあたり，EPS 材の軸方向圧縮特性を表現するためのEPS要素と，緩衝材の形状を表現するフレーム要素の2種類の要素を組み合わせた．フレーム要素は建築物との接触判定および接触力の伝達を行うための仮想的な要素であり，接触の誤判定および接触力の過小評価を防ぐために，硬い弾性材料としている．

3. 家具の接触表現

本研究では，家具と床・壁面間の接触はペナルティ接触理論に基づき，接触判定された要素に対し，2 種類の接触力を作用させることで表現した．1 つ目は次式に示すペナルティ力F_Pであり，要素間で構成される接触面の法線方向のみに作用する．

$$\boldsymbol{F_P} = \alpha\left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{n}}{\|\boldsymbol{n}\|},\ if\ l \le L \tag{3}$$

ここでαはペナルティ定数，qはペナルティ指数，$\boldsymbol{n}$は接触面の法線ベクトルである．また，lは要素間の最短距離，Lは接触する 2 つの要素の部材幅の平均値である．2 つ目の接触力は次式に示す動摩擦力$\boldsymbol{F_D}$であり，接触面の接線方向と法線方向に作用する．

$$\boldsymbol{F_D} = \boldsymbol{F_T} + \boldsymbol{F_N},\ if\ l \le L \tag{4}$$

下付き添え字$\boldsymbol{T}$，$\boldsymbol{N}$は，それぞれ接触面に対する接線方向成分および法線方向成分であることを表す．次式に示すように，$\boldsymbol{F_T}$，$\boldsymbol{F_N}$は$\boldsymbol{v}$のそれぞれの方向成分$\boldsymbol{v_T}$，$\boldsymbol{v_N}$に対して逆方向に作用する．

$$\boldsymbol{F_T} = -\mu\alpha\left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v_T}}{\|\boldsymbol{v}\|},\ if\ l \le L \tag{5}$$

表-1 家具モデルの諸元

寸法 [mm]			重量 [kg]	重心位置 [mm]			静止摩擦係数
W	D	H		w	d	h	
600	417	1800	30	300	278.9	888.9	0.297

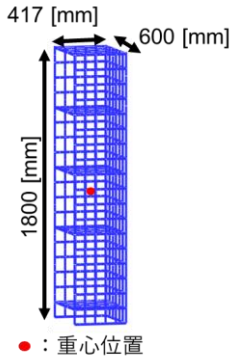


図-2 家具モデルの概観

$$\boldsymbol{F_N} = -D_C\left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v_N}}{\|\boldsymbol{v}\|},\ if\ l \le L \tag{6}$$

本研究では，先行研究[4][5]で有効な値として示されている，ペナルティ定数αは対象物の重量[kgf]と同値，ペナルティ指数qは1.0，減衰に関する係数D_Cはαの120 %と設定し，動摩擦係数は実験前に計測された静止摩擦係数の80 %とした．また，壁との摩擦係数は，床と接触する際の摩擦係数と同じ値を用いた．

本研究で用いる家具モデルの諸元を表-1に，概観を図-2に示す．本棚を想定してモデル化を行っており，構成部材毎に密度を調整することで重心を表現している．

接触判定は，面の単位法線ベクトルと接触要素と面上の点を結ぶベクトルの内積を計算することで接触要素と面との距離を求めている．面の法線ベクトルを用いて接触要素の面からの距離を求めることで，面の傾きを考慮した接触力計算を行うことができ，床や壁が傾きを伴いながら，激しく動くような状況での家具の挙動を表現することが可能となる．

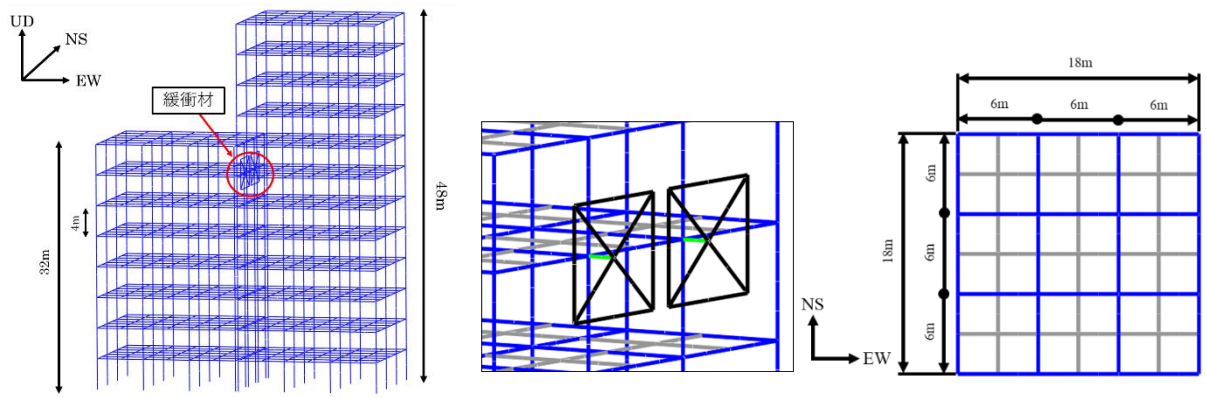
4. 棟間衝突解析

4.1 隣接した2棟の中高層ビルのモデル化

本研究では，EPS緩衝材の棟間衝突被害の低減効果について評価を行うために，異なる固有周期を持つ，隣接した2棟の中高層ビルのモデル化を行う．図-3にそのモデルを示す．解析モデルは階高4.0 [m]，スパン長6.0 [m]で共通となっており，それぞれ8層3×3スパン，12層3×3スパン，棟間距離は200 [mm]である．また、構造部材は線形Timoshenkoはり要素を用いてモデル化しており，1部材4要素分割としている．

柱部材，梁部材は共にSS400とし，柱部材は角型鋼管，梁部材はH型鋼としている．

床部材ははり要素で十字状にモデル化しており，厚さ300 [mm]，幅3000 [mm]，材料は普通コンクリートである．



(a) 立体図　(b) 緩衝材付近拡大図　(c) 平面図

図-3 建物モデルの概観

床荷重を最上階では3530 [N/m^2]，それ以外の階は4903 [N/m^2]としている．固有周期は，EW方向，NS方向共に低層モデルが0.93 [s]，高層モデルが1.37 [s]である．ベースシア係数は低層モデルが0.232，高層モデルが0.167である．

4.2 解析条件

本研究では，厚さと発泡倍率を調整することで，衝撃緩和効果の異なる2つのEPS緩衝材を設定し，それぞれを設置した場合で棟間衝突被害にどのような差が現れるかを検証した．

1つ目は発泡倍率33倍で厚さが30 [mm]のEPS緩衝材である．発泡倍率33倍のEPS材は剛性が高く，弾性限界も高いのが特徴である．そのため，発生するひずみ量が小さく，EPS緩衝材を薄く設計することができ，隣接する建物とのクリアランスを確保することができる．さらに，ひずみがプラトー領域まで進行しづらいため，永久変形が起こりにくく，取り換え回数を抑えることができる．しかし，ひずみがプラトー領域まで進行しづらいことで，エネルギー吸収量が少ないというデメリットがある．

2つ目は発泡倍率が85倍で厚さが100 [mm]のEPS緩衝材である．発泡倍率33倍のEPS材と比べ剛性が低く，弾性限界も低いのが特徴である．そのため，ひずみがプラトー領域まで進行しやすく，エネルギー吸収量が発泡倍率33倍のEPS材よりも大きくなる．しかし，ひずみがプラトー領域を超え，緻密化領域まで進行してしまう可能性があるため，十分な厚みを確保する必要があり，永久変形発生による取り換え回数が多くなるというデメリットがある．

EPS緩衝材の寸法は幅5000 [mm]，高さ4000 [mm]とし，大きな衝突が予想される8階部分の低層モデル側壁面の柱梁接合部に計2枚設置している．入力地震波には，1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸波を用いる．本研究では問題を単純化するためにEW方向成分のみの一軸加振とし，EPS緩衝材の衝撃緩和効果を評価しやすくするために入力地震波倍率を80%とした．最大加速度は494 [Gal]，卓越周期は0.39 [s]である．

4.3 解析結果

EPS緩衝材未設置の場合と発泡倍率33倍，厚さ30 [mm]のEPS緩衝材を設置した場合の低層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した図を図-4から図-6に示す．これらの図より，EPS緩衝材を設置することで低層モデル側の応答加速度は大幅に抑えられるが，衝突後の応答速度と応答変位が増加してしまうことが確認できる．

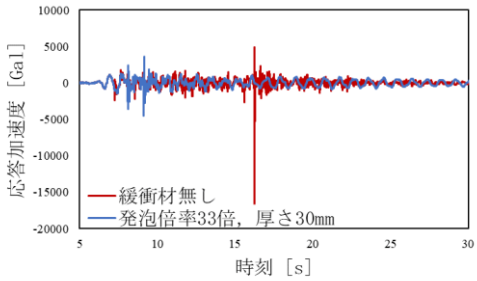


図-4 EW 方向応答加速度（低層モデル）

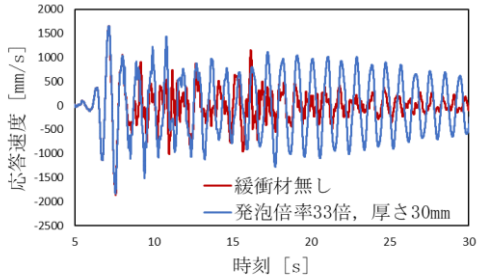


図-5 EW 方向応答速度（低層モデル）

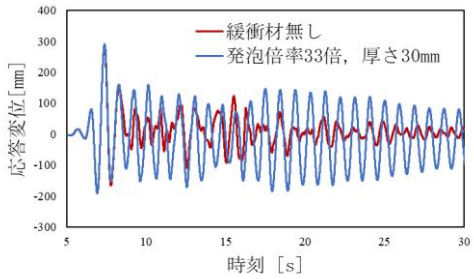


図-6 EW 方向応答変位（低層モデル）

EPS緩衝材未設置の場合と発泡倍率33倍，厚さ30 [mm]のEPS緩衝材を設置した場合の高層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した

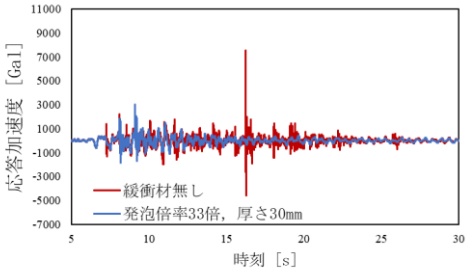


図-7 EW 方向応答加速度（高層モデル）

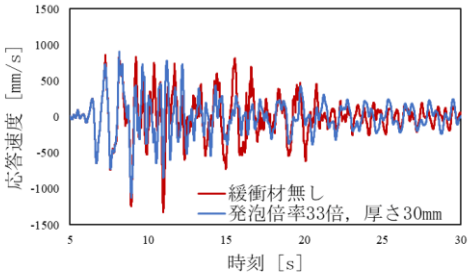


図-8 EW 方向応答速度（高層モデル）

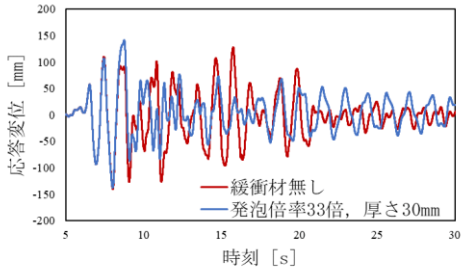


図-9 EW 方向応答変位（高層モデル）

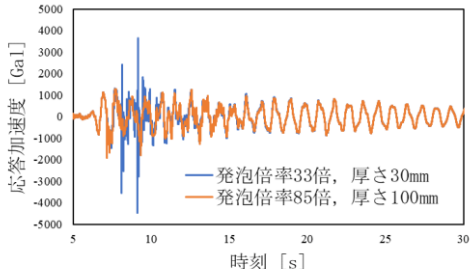


図-10 EW 方向応答加速度（低層モデル）

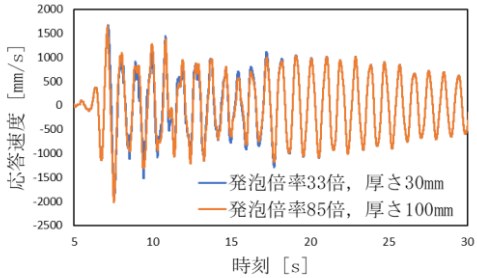


図-11 EW 方向応答速度（低層モデル）

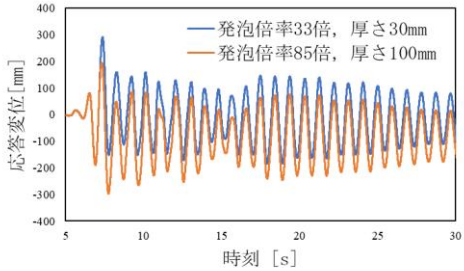


図-12 EW 方向応答変位（低層モデル）

図を図-7から図-9に示す．これらの図より，EPS緩衝材を設置することで高層モデル側の応答加速度が大幅に抑えられ，衝突直後の応答速度と応答変位についても抑えられることが確認できる．

次に，低層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した図を図-10から図-12に示す．図-10より，発泡倍率85倍，厚さ100 [mm]のEPS緩衝材を設置した方が応答加速度をより抑えることができていることが確認できる．応答速度については大きな差は無く，応答変位はEPS緩衝材の厚みの分，西側に移動していることが図-11および図-12から確認できる．

さらに，高層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した図を図-13から図-15に示す．図より，発泡倍率85倍，厚さ100 [mm]のEPS緩衝材を設置した方が応答加速度，応答速度，応答変位を抑えられていることが確認できる．

解析終了時の低層モデルと高層モデルのそれぞれの塑性化率を図-16に示す．低層モデル側に関しては，発泡倍率85倍，厚さ100 [mm]の方が塑性化率を抑えられているが，高層モデル側では発泡倍率85倍，厚さ100 [mm]の方が高くなっていることが確認できる．これは，低層モデル側では衝突部分での塑性化がより抑えられた分，EPS緩衝材によって吸収しきれなかったエネルギーが高層モデル側の部材の塑性化という形で現れたものと考えられる．

解析終了時の家具の様子を図-18と図-19に示す．発泡倍率33倍，厚さ30 [mm]を設置した場合は全ての家具が転倒することが確認された．一方で，発泡倍率85倍，厚さ100 [mm]を設置した場合は高層モデル側の5階に設置した家具が転倒せず，家具の挙動にも相違が生じることが確認された．

5. 結論

本研究では，建物と家具の統合モデルを用いて棟間衝突解析を行うことで，発泡倍率と厚さが異なる2種類のEPS緩衝材の棟間衝突被害低減効果を検証し，建物の応答，塑性化率，家具の挙動の観点から評価を行った．

その結果，棟間衝突発生時の家具の転倒挙動が明らかとなり，異なるEPS緩衝材を設置した場合に家具が異なる転倒挙動を示すことが確認された．また，ひずみが弾性領域で留まるEPS緩衝材を設置した場合と比べ，ひずみがプラトー領域まで達するEPS緩衝材を設置した場合には，より建物の応答を抑えられることが示された．一方で，塑性化率は低層モデル側では抑えられるが，高層モデル側は増加してしまうことが示された．

EPS緩衝材のひずみが弾性領域内に留まる場合でも，棟間衝突に伴う応答加速度を大きく減少させることが示されているため，低発泡倍率で薄いEPS緩衝材を設置することで，十分な棟間衝突被害抑制効果を得ながら，クリアラ

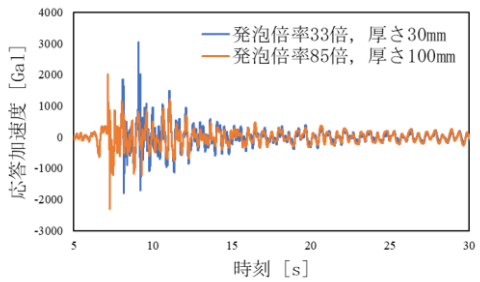


図-13 EW 方向応答加速度（高層モデル）

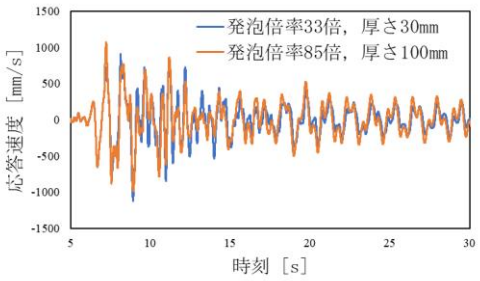


図-14 EW 方向応答速度（高層モデル）

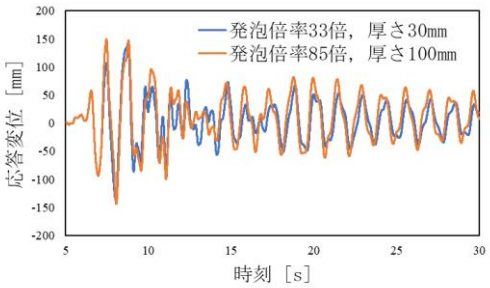


図-15 EW 方向応答変位（高層モデル）

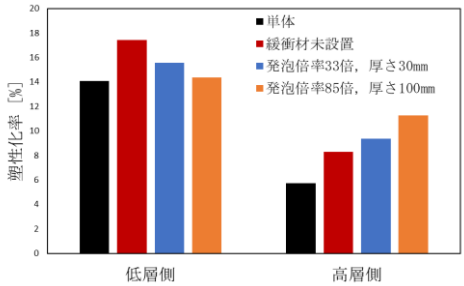


図-16 各棟の解析終了時の塑性化率

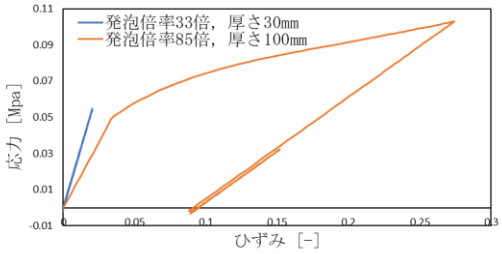


図-17 EPS 緩衝材の応力-ひずみ線図

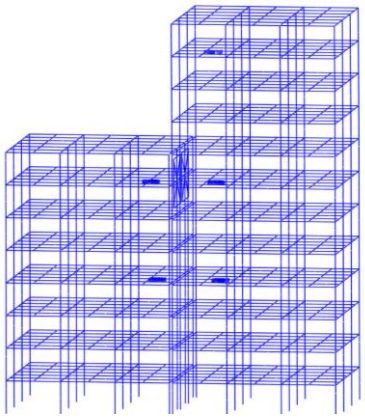


図-18 解析終了時の家具の様子
（発泡倍率 33 倍，厚さ 30 mm）

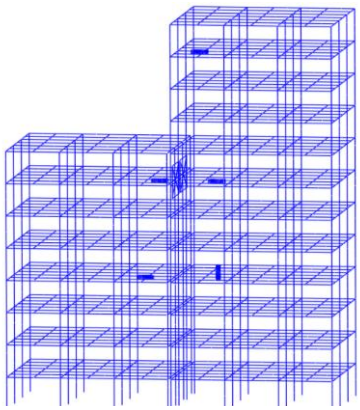


図-19 解析終了時の家具の様子
（発泡倍率 85 倍，厚さ 100 mm）

ンスを確保し，メンテナンス頻度を抑える使い方も選択肢として考えることができる．

参考文献

[1] D. Isobe and T. Shibuya: Preliminary Numerical Study on the Reduction of Seismic Pounding Damage to Buildings with Expanded Polystyrene Blocks, *Engineering Structures*, 252, 113723, 2022.

[2] 磯部大吾郎: はり要素で解く構造動力学　建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで，丸善出版，2020.

[3] N. Jones : *Structural Impact*, Cambridge University Press, 1989.

[4] 荻野 弘明，山下 拓三，金子 美香，磯部 大吾郎：家具・什器の地震時挙動を再現する有限要素解析手法の開発，日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，第 717 号, pp. 1687-1697, 2015.

[5] 磯部 大吾郎，山下 拓三，田川 浩之，金子 美香，高橋 徹，元結 正次郎：有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析，日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，第 718 号, pp. 1891-1900, 2015.

Proceedings of Computational Engineering Conference JSCES
Vol. 28, 2023 May

A simulation on rainfall-earthquake induced landslide over wide area using the limit equilibrium method

Iskandar[1)] Daichi Sugo[2)] Nilo Dolojan[3)] Reika Nomura[4)] Shuji Moriguchi[5)] Kenjiro Terada[6)] Dicky Muslim[7)] Yukni Arifiani[8)] Haunan Afif[9)] Pamela[10)]

1) Graduate student (Civil and Environmental Engineering, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan, E-mail: iskandar.q3@dc.tohoku.ac.jp)
2) Graduate student (Civil and Environmental Engineering, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
3) Phd. student (Civil and Environmental Engineering, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan,)
4) Assistant Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
5) Associate Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
6) Professor (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 980-0845, Sendai, Japan)
7) Associate Professor (Geological Engineering Faculty, Padjadjaran University, 45363, Sumedang, Indonesia)
8) Researcher (National Research and Innovation Agency (BRIN), 40135, Bandung, Indonesia)
9) Earth Scientist (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation of Indonesia (PVMBG), 40122, Bandung, Indonesia)
10) Map Surveyor (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation of Indonesia (PVMBG), 40122, Bandung, Indonesia)

In this study, we conduct a slope stability analysis in a wide area considering two effects of rainfall and earthquake. The event of interest is the earthquake that occurred in Cianjur, Indonesia on November 21, 2022. Three-dimensional slope stability analysis was performed using the Hovland method, which is a type of limit equilibrium method, in consideration of rainfall, topography, and geological information. The result shows that due to seismic force, the safety factor decreases over the entire slope.

Key Words : *earthquake, Hovland, landslide, , rainfall*

1. INTRODUCTION

Landslide is a common type of natural disaster, and it frequently occurs in Indonesia as well as in the Asia-Pacific Region. During a decade period from 2009 to 2018, 5129 landslides occurred in Indonesia. These landslides claimed the lives of 5920 people, injured 2164 people, and more than thousands of houses were displaced.

Rainfall and earthquakes are two most prevalent natural causes of landslides. In the area which characterized as a seismically active zones, earthquake played as a solely role in triggering most of the pre-existing landslide. It significantly increased their magnitude and frequency and finally exacerbated their likelihood and destruction capability. Post-earthquake landslide types are mainly rock and soil slides with shallow or moderate thickness. At the same time, the earthquake made many slopes unstable and produced abundant loose sediments and deposits, which are likely to be transformed into landslides or debris flow under subsequent intense rainfall.

Around 90% of all landslides occur during periods of heavy rainfall, making rainfall one of the most important causes of landslide occurrences. Rainfall has a negative impact on slope stability because it not only makes rock masses more saturated, which reduces their shear strength, but it also results in increased pore water pressure [1)].

There are two types of methods in landslide risk assessment, the first one is a statistical method, based on causal factors, and the second is a numerical analysis method that requires dynamic calculation. As an example of statistical methods, Rasyid [2)] discusses the relationship between multiple factors and slope failure by frequency ratio and logistic regression.

Regarding the numerical analysis method, a simple alternative method based on dynamic theory. Methods based on limit equilibrium theory are widely used for the evaluation of slope stability, but their accuracy and performance for actual phenomena, especially under three-dimensional conditions, have not been sufficiently verified. Therefore, in this study the

3D Hovland [3] method was applied to real terrain where there was a lot of collapse due to heavy rains and earthquakes.

2. METHOD

(1) Groundwater Condition

In this study, the groundwater conditions were set as conditions in which the surface layer was completely saturated. Drawdown of an external water level is usually impairing the stability of slope. Rapid variations in the water level may result in pore pressure gaps and an increased hydraulic gradient. Reduced slope stability may result from such pore-pressure gaps and a diminished or absent sustaining water load[4].

(2) Factor of Safety Calculation

Slope stability is extremely important consideration in the desigh and contruction of earth dams. In this study the factor of safety (FoS) was calculated using the Hovland method which is a three-dimensional slope stability analysis method based on the limit equilibrium method. A single column element and the forces acting on it are shown in Figure 1[5]. T_{ij}, N_{ij} and W_{ij} are respectively the shear force, the total normal force and the weight on the base of the column element, and Q_{ij} is the summation of intercolumn forces acting on the sides of the column element. The directions of the applied force of T_{ij}, N_{ij} and W_{ij} are given below by the following unit vector (t_{ij}, n_{ij} and eg).

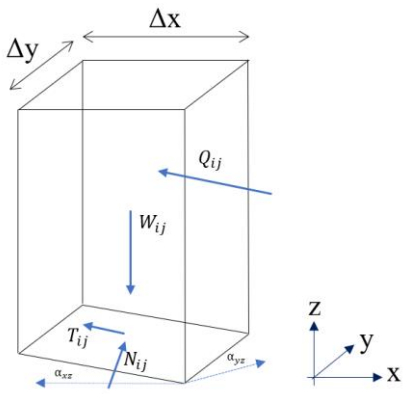


Figure. 1 Force acting on a divided column

$$n_{ij} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix},\ t_{ij} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix},\ eg = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2.1) Hovland method

The Hovland method ignores the internal forces acting between the soil columns[6]. In Hovland method, Q_{ij} is assumed to be zero, which mean there are no side force. The formula for the Hovland method is shown below[7]:

$$FoS = \frac{\sum_i \sum_j \left\{ cA + \left(W_{ij} n_{ij} - u_{ij} A n_{ij}^2 \right) tan\phi \right\}}{W_{ij} \mathrm{ij}} \quad (2)$$

where c is cohesion, A is bottom area of the soil and ϕ is internal friction angle.

Next, we describe the modeling of the effects of seismic ground motion. In this study, the horizontal seismic coefficient vector (k) is introduced as a horizontal vector on the xy plane, and the horizontal force is taken into account by multiplying it by the split column weight. The direction of the design horizontal seismic coefficient vector is assumed to be the entire slide.

$$FoS = \frac{\sum_i \sum_j \left\{ cA + \left(W_{ij} (-e_g + k_I) n_{ij} \right) - u_{ij} A \left(\left(-e_g + k_I \right) n_{ij} \right)^2 \right) tan\phi \right\}}{W_{ij} (e_g + k_I) t_3} \quad (3)$$

(3) Validation

This study uses ROC (Receiver Operating Characteristic) curves for quantitative comparative verification. The ROC is described and investigated by many authors [8)9)]. The ROC curve is widely used in the medical field, and it is a technique that has applications in the machine learning field. An outline of the evaluation procedure is described below.

First, multiple evaluation points are randomly set in the target area and classified into the following four categories.

- True Positive (TP) → Unstable cell within actual landslide. Predict landslide successfully
- False Positive (FP) → Unstable cell not within actual landslide. Predicts landslide unsuccessfully
- True Negative (TN) → Stable cell not within actual landslide. Predicts stable area successfully
- False Negative (FN) → Stable cell within actual landslide. Predicts stable area unsuccessfully

ROC is constructed by obtaining the sensitivity and specificity of the model at different classification thresholds. Sensitivity, or true positive rate, is given as the proportion of negatives correctly identified.

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP+TN}$$
$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (4)$$

The global accuracy metric for a given model in an ROC curve is given by the area under the curve (AUC). ROC-AUC value ranges from 0 to 1. An AUC value 0.5, represented by a diagonal line, depicts a random classifier with no discrimination between classes. Curves plotted above the diagonal line (AUC > 0.5) would represent better classifiers, with improving discriminative power as AUC approaches 1.

3. NUMERICAL EXAMPLE

(1) Study Area

The study area is in Cianjur Regency, West Java Province, Indonesia, shown in Figure 2. On 21 November 2022 at 6:21:10 UTC (13:21:10 local time), an earthquake of 5.6 Magnitudes at a shallow depth of 10 km hit this region, triggering landslide and causing buildings to collapse. The actual location of the landslide is shown in red in Figure 2. The epicenter of the earthquake was on land, Long 107.05 E, Lat 6.84 S, about 9.65

km south-west of Cianjur. The Digital Elevation Model (DEM) was provided by Geospatial Information of Indonesia with spatial resolution 10 meter in the area 3 x 3 km.

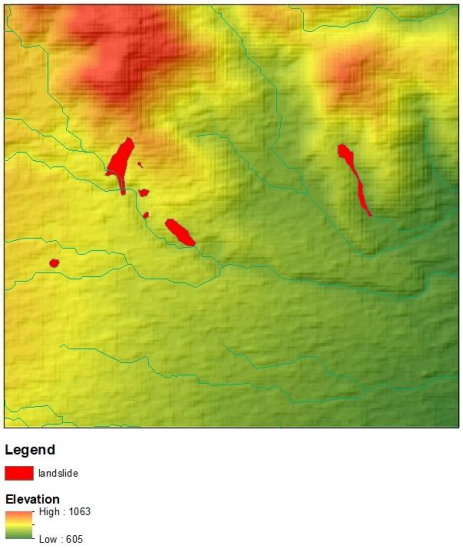


Fig. 2 Study area in Cianjur Regency, West Java, Indonesia

(2) Result and discussion

Parameters for soil properties were obtained through lab test results from soil samples in the study area (table 1). The size of the design horizontal seismic coefficient vector (k) calculated from the following formula[10]:

$$k = \frac{a_{max}}{g} \qquad (5)$$

Where a_{max} is the peak ground acceleration (PGA) which equal to the maximum ground acceleration that occurred during earthquake. The PGA in Cugenang District, Cianjur Regency, West Java is 0.212 g (2.12 m/s2 or 212 gal). Then we get the maximum horizontal seismic coefficient k = 0.216. It is also assumed to be constant over the target area.

Table 1. soil properties at study area

Cohesion (kpa)	0.196133
Friction angle (degree)	32.7

Fig. 3 and 4 show the safety factor distribution during both normal and earthquake condition. Due to seismic force, the safety factor decreases over the entire slope, and the area at risk of collapse is widely distributed over entire slope, showing the same tendency as the actual collapse.

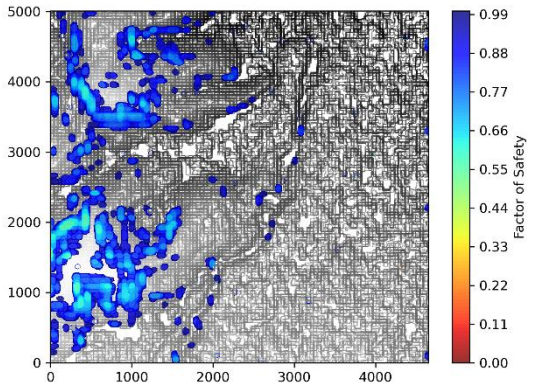


Fig. 3 Distribution of collapse in normal condition

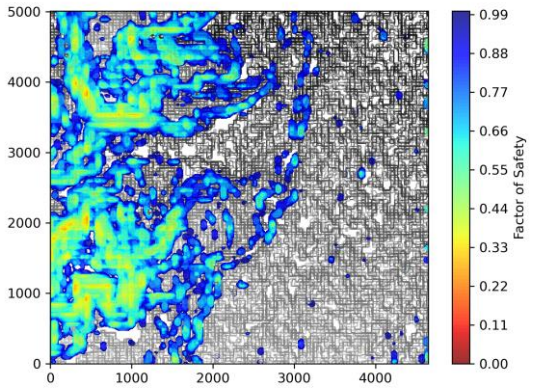


Fig. 4 Distribution of collapse in earthquake condition

On Fig.5 we can see the AUC value of target area is 0.701 and consistent with the actual landslide distribution to some extent. The analysis in Cugenang also assumes that the distribution of soil is uniform and seismic ground motions is also uniform, and it is possible that the assumptions regarding these calculation conditions affect the analysis results. Since areas below 1 can be found everywhere, it is thought that the Hovland method tends to overestimate.

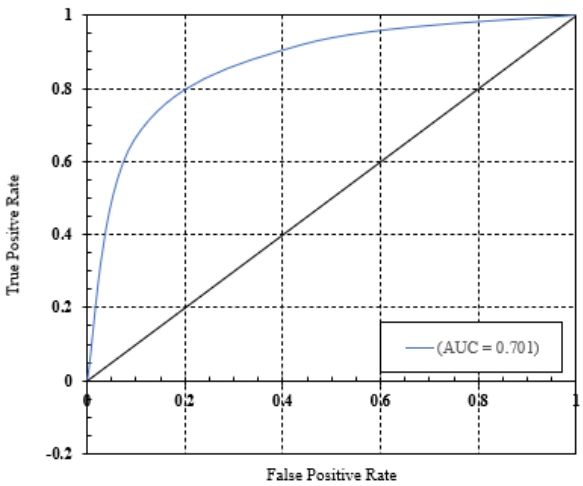


Fig. 5 ROC curve of slope stability result during an earthquake in Cianjur Regency

4. CONCLUSION

In this study, Cianjur Regency was affected by 5.6 M earthquake on 21 November 2022. Slope stability analysis in wide area was performed using 3D Hovland method, a limit equilibrium method, and comparison with the actual landslide. In this study, the groundwater condition is set as fully saturated condition. Soil parameter and seismic force used in the analysis are set as a spatial uniform condition. The result shows that due to seismic force, the safety factor decreases over the entire slope, and the area at risk of collapse is widely distributed over entire slope, showing the same tendency as the actual collapse. The groundwater condition is a critical factor for slope stability analysis. However, changes in groundwater level are affected by hydrogeological conditions, rainfall, and land cover. Future research should place an emphasis on groundwater data collection and groundwater modeling so that input data can more closely represent the actual groundwater condition

5. ACKNOWLEDGMENT

The writer wishes to acknowledge the permission given by the Geological Agency of Indonesia and Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency (BMKG) of Indonesia to use information from project.

REFERENCES

[1] Yang, Zhihua: Post-earthquake rainfall-triggered Slope Stability Analysis in the Lushan Area, J. Mt. Sci. (2015) 12(1): 232 – 242

[2] Rasyid, Abdul Rachman, et al: Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslide susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia, Geoenvironmental Disasters (2016) 3:19, DOI 10.1186/s40677-016-0053-x.

[3] Hovland, H. John: Three-Dimensional Slope Stability Analysis Method, JOURNAL OF THE GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION, Vol. 103 No.GT9, pp.971-986, 1997

[4] Johansson, Jens: Impact of Water-Level Variations on Slope Stability, Luleå University of Technology, 2014.

[5] Ahmed, Aly et al: Assessment of 3D Slope Stability Analysis Methods Based on 3D Simplified Janbu and Hovland Methods, Int. J. Geomech., pp. 81-89, 2012.

[6] Saneiki, Fujita et al: Three-dimensional limit equilibrium slope stability analysis on real slope failures caused by heavy rain and earthquake.

[7] Daichi, Sugo et al: A slope stability analysis over large area using Hovland's method and 3D simplied Bishop's method, 土木学会 第24回応用力学シンポジウム講演概要集gf（2021年5月）

[8] He H, Garcia EA: Learning from imbalanced data. IEE Trans Knowl Data Eng 21(9):1263-1284, 2009.

[9] Dolojan, Nilo Lemuel J. et al: Mapping method of rainfall-induced landslide hazards by infiltration and slope stability analysis, Landslides 6 (18), 2039–2057, 2021.

[10] J. D. Bray and T. Travasarou, "Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacements," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133 (2007): 381–92

10:15 AM - 10:30 AM (Wed. May 31, 2023 9:30 AM - 10:30 AM Room A)

[A-01-04] 深層カーネル学習サロゲートモデルによる高次元不確定性をもつ構造信頼性解析の効率化

*才田 大聖[1]、Muhammad Rashid[1]、西尾 真由子[1] （1. 筑波大学）

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-02] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (2)

座長:浅井 光輝(九州大学)

Wed. May 31, 2023 10:45 AM - 11:45 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-02-01] 品質工学を用いた木造住宅実大振動台実験のデータ同化

*難波 宗功[1]、中川 貴文[1]、五十田 博[1]、角 有司[2]、滝野 敦夫[3] （1. 京都大学、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 大阪工業大学）

10:45 AM - 11:00 AM

[A-02-02] 鉄筋コンクリート構造建屋の地震時損傷挙動再現解析

*田中 栄次[1] （1. 清水建設株式会社）

11:00 AM - 11:15 AM

[A-02-03] パレットラックシステムの進行性崩壊防止に関する数値解析的研究

*謝 氷清[1]、磯部 大吾郎[1] （1. 筑波大学）

11:15 AM - 11:30 AM

[A-02-04] 地震時の建物一棟解析と VRシミュレータの開発

*楊 全宜[1]、Yan Meng[1]、磯部 大吾郎[1] （1. 筑波大学）

11:30 AM - 11:45 AM

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

品質工学を用いた木造住宅実大振動台実験のデータ同化

Data Assimilation Method of Full-Scale Shaking Table Tests of Wooden Houses

難波宗功[1)]，中川貴文[1)]，五十田博[1)]，角有司[2)]，瀧野敦夫[3)]
Tokikatsu Namba, Takafumi Nakagawa, Yuji Kado, Atsuo Takino, and Hiroshi Isoda

1) 京都大学生存圏研究所 木質構造科学分野（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

2) 宇宙航空研究開発機構（〒305-8505 茨木県つくば市千現2-1-1）

3) 大阪工業大学 工学部 建築学科（〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1）

The data assimilation for seismic performance of wooden structure is important to estimate the performance accurately and predict the damage in seismic event. We have developed the data assimilation method for seismic performance of wooden structure. In this study, we adapted the machine learning and SHAP for numerical analysis that conducted in the data assimilation.

Key Words : *Data Assimilation, Quality Engineering, Orthogonal Table, Machine Learning, SHAP*

1.　はじめに

阪神淡路大震災以降、木造住宅の耐震性能の把握を目的とした実大振動台実験が多く実施されている。実験で得た知見は構造解析などのシミュレーションにフィードバックし、再現解析すなわち「データ同化 : 試験とシミュレーションとの合わせ込み」が出来ている事が重要である。筆者等は、品質工学の考えを用いて、高精度かつ少ない労力で可能な木造住宅の振動台実験のデータ同化手法の研究を進めてきた[例えば1),2)]。この手法では、直交表で解析パラメータを作成し、それを基に解析を実行する。そのため、大量の解析結果を基にパラメータ探索を行うが、この解析結果を有効に利用できればパラメータの感度分析等も可能である。本報では、機械学習を用いることで、データ同化のプロセスで実施した大量の解析結果を分析し、その手法についての検証結果について報告する。

2.　時刻歴応答解析概要

本研究で対象とした実大振動台実験は国土交通省補助事業「三階建て木造軸組構法の設計法検証事業」の一環として実施されたものである[3)]。試験体は 4 体あり、それぞれの壁量や接合部、その配置等が異なる。解析対象とする試験体はそのうち、試験体 1、2（図-1）であり、同じ平面・立面プランを有するが、接合部の設計が異なる。いずれも平面の寸法が 4.55m×10.01m、軒高さ 8.905m の三階建て木造軸組構法建築物である。試験体 1 は壁の許容せん断耐力に基づき N 値計算によって接合部に必要とされる引張耐力が設計されており、試験体 2 は地震力が作用した際の存在応力によって接合部の引張耐力が設計されている。そのため、試験体 1 に比べて試験体 2 の方がより軽微な接合部仕様となっている。N 値計算では、実際に柱に生じる引き抜き力を、その柱の左右に配置されている耐力壁の壁倍率の差をもとに計算する。一方、存在応力による接合部設計では、C0=0.2 の水平力を作用させた際に柱に生じる引張力を算定し、その引張力に見合う接合部が選択され、N 値計算にくらべ、接合部に生じる引張力は小さくなる設計法である。

柱、梁、土台には構造用集成材、筋かいには構造用単板積層材が用いられた。垂木などには構造用製材を用い、軸組の接合は、ほぞや蟻掛け等の継手仕口を接合金物で補強するほか、一部の梁端部には梁受け金物を使用した。横架材端部の接合部補強には羽子板ボルト(Z マーク金物)、柱頭柱脚接合部には短期許容引張耐力 Ta=6kN、10kN のビス止め金物（P06、P10）、Ta=15kN、20kN のビス止めホールダウン金物（H15、H20）等を用いた。鉛直構面は、断面 45mm×90mm の筋かい耐力壁のほか、石膏ボード、サイディングを釘打ちした。水平構面は、梁及び受材に厚さ 24mm の構造用合板の四周を N75@150mm 以下で釘打ちする仕様とした。

入力地震動として、限界耐力計算における第二種地盤の極稀地震に相当する応答スペクトルに適合するように作成された 20 秒間の人工地震動（以下、BSL）を用いた。実大振動台実験においては、試験体 1 と 2 の 2 棟を並べて BSL90%→BSL160%の順で試験体短辺方向に地震動が入力された。

図-1 実大振動台実験（左：試験体１、右：試験体２）

試験体 1 については 3 質点せん断系モデルとし、ロッキング挙動が確認された試験体 2 については 3 質点せん断系モデルに回転バネを付した解析モデルを作成した（図-2）。せん断バネの復元力特性は、文献４）の改良 EPHM を用いて設定した。

(a) 試験体１　　(b) 試験体２

図-2 解析モデル

文献４）の改良 EPHM は、初期骨格曲線と履歴特性を詳細に設定できる復元力特性である。まずは振動台実験で得られた層の荷重変形からそのパラメータを定義した。初期骨格曲線については K_0、K_d、K_x、F_0、F_x、f_x、δ_x の計 7 個のパラメータ、履歴特性については K_{fi}、$K_{\lambda u}$、$\lambda_{\lambda u}$、$X_{\lambda u}$、γ_u、γ_l の計 6 個のパラメータで定義される。各層別の値を振動台実験結果から設定した。パラメータの詳細については、文献４）を参照にされたい。

3. データ同化手法

データ同化手法は、筆者等が検証してきた手法を採用する。以下、図3に示すデータ同化手法の概要を述べる。詳細については、文献１）、２）を参照にされたい。

(1) パラメータの作成

変動範囲を定めて、解析パラメータを変動させる。解析モデルはせん断バネと回転バネで構成されているが、その入力パラメータを変動させることとした。まずは実大振動台実験に合うような解析パラメータを手作業で設定し、その前後で変動させることとした。パラメータの組み合わせは、JAXAの品質工学ルールJIANT[5)]を用い、24パラメータを11水準で変動させることとし、2つの直交表L121を用いて14641ケースの組み合わせを作成した。

(2) 解析の実行

前項で作成した14641ケースの解析を実行した。

(3) 解析結果と実験結果の比較

3つの評価指標で解析と実験結果を比較する。14641ケースを自動で、その解析結果と実験結果の差を評価するための評価指標である。

a) 適合率 FIT (%)

適合率は、システム同定分野で広く利用されている評価指標である。(1)式で定義される。

$$\mathrm{FIT}=\left\{1-\frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(y(k)-\hat{y}(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(y(k)-\bar{y})^2}}\right\}\times 100\ (\%) \qquad (1)$$

ただし、$y(k)$：時刻kでの測定値(実験結果)、$\hat{y}(k)$：時刻kでの予測値(解析結果)、$\bar{y}$：測定値(実験結果)の平均とする。(1)式の右辺第二項は、RMSEを測定値の標準偏差で規格化したもので、NRMSE(Nomalized-RMSE)と呼ばれる。適合率は測定値の標準偏差を上回った場合に負の値となる。実験と解析値が完全に一致した場合、最大値100%となる。

b) 相関係数 r

相関係数rは、(2)式で定義される。

$$r=\frac{\sum_{k=1}^{N}(y(k)-\bar{y})(\hat{y}(k)-\bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(y(k)-\bar{y})^2\sum_{k=1}^{N}(\hat{y}(k)-\bar{\hat{y}})^2}} \qquad (2)$$

これは、実験結果と解析結果の相関性を数値で示したものである。最大値1、最小値0であり、最大値1に近づくほど解析結果と実験結果の差が小さい評価指標である。

c) Index of Agreement

Index of Agreementは、(3)式で定義される。

$$d_j=1-\frac{\sum_{k=1}^{N}|y(k)-\hat{y}(k)|^j}{\sum_{k=1}^{N}(|y(k)-\bar{y}|+|\hat{y}(k)-\bar{y}|)^j} \qquad (3)$$

最大値1、最小値0であり、最大値1に近づくほど解析結果と実験結果の差が小さいと言える評価指標である。

3つの評価指標で解析と実験結果を比較する。14641ケースを自動で、その解析結果と実験結果の差を評価するための指標である。評価する解析結果は、1～3層の層間変形及び層せん断力である。

(4) パラメータの絞り込み

品質工学における要因効果図を用いることで、パラメータの変動範囲を絞り込む。

本研究では、（１）～（４）のサイクルを4回繰り返すことでデータ同化を試みた。

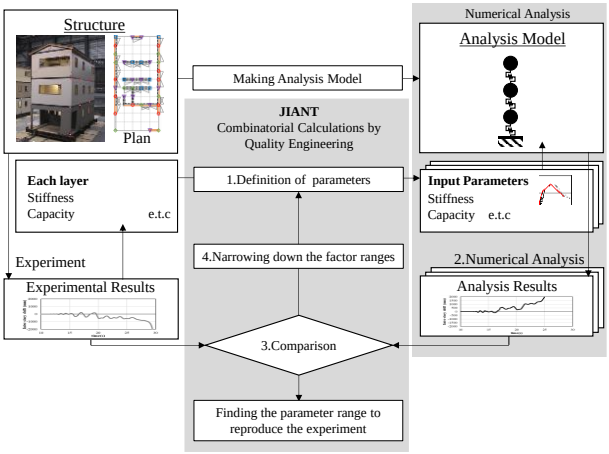
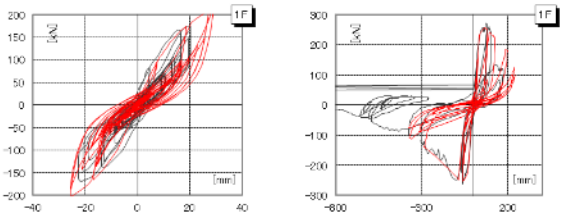


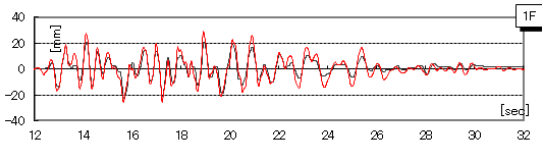
図-3 データ同化手法概要

4. データ同化結果

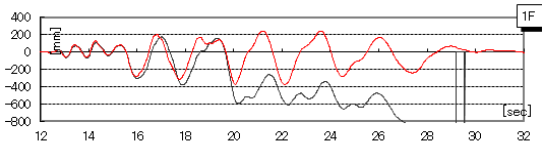
試験体1についてのデータ同化前の解析結果を図-4に、データ同化後の解析結果を図-5に示す。BSL90%加振時の1層層間変形の時刻歴応答結果より、データ同化前には変形を過大評価していたが、データ同化後にはかなり適合していることが分かる。BSL160%加振時では、データ同化前後の変化が顕著で、特に16秒後の解析結果と実験結果の差が小さくなったことが分かる。試験体2についても同様の結果が得られた。



(a) 1層荷重変形（BSL90%）　(b) 1層荷重変形（BSL160%）

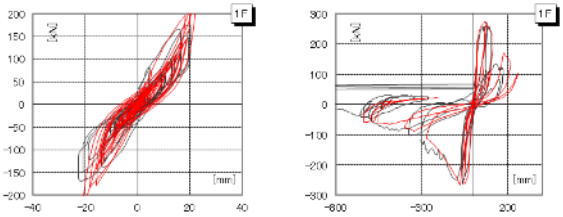


(c) 1層層間変形時刻歴応答（BSL90%）

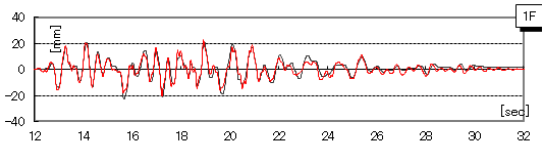


(d) 1層層間変形時刻歴応答（BSL160%）

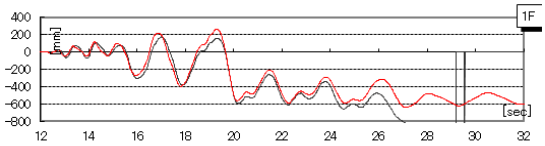
図-4 データ同化前の解析結果



(a) 1層荷重変形（BSL90%）　(b) 1層荷重変形（BSL160%）



(c) 1層層間変形時刻歴応答（BSL90%）



(d) 1層層間変形時刻歴応答（BSL160%）

図-5 データ同化後の解析結果

5. SHAPによる解析結果の分析

SHAPはSHapley Additive exPlanationsの略称で、モデルの予測結果における各変数の寄与を求めるための手法である。本研究では、解析結果の実験結果に対する精度における各解析パラメータの寄与を求めるために用いた。[6)]

時刻歴応答解析等の多くの計算量を必要とする構造解析については、その応答予測のために、機械学習が用いられることがある。または、構造最適化等において、特徴分析に用いられることもある。機械学習の利用には様々な用途が考えられるが、今回はデータ同化のプロセスで計算した複数の解析結果を有効に利用するために、まずSHAPを適用した。

まずは、SHAPについての概要について説明する。説明変数$X = (X_1, \dots, X_{24})$をそれぞれの解析結果における24個の変動パラメータ、説明変数$Y = (Y_1, \dots, Y_6)$を1～3層の層間変形及び層せん断力の精度を示す評価指標とする。14641ケースの解析結果をまず機械学習モデルで学習させる。そのモデルにおける予想値を$\hat{Y}$とする。そして、(4)式のように、それぞれの説明変数による和に変換する。

$$\hat{Y} = \emptyset_0 + \sum_{j=1}^{24} \emptyset_j \tag{4}$$

足し算に変換することで、それぞれの解析パラメータの寄与に分解できる。それぞれのパラメータによる足し算に分解した結果をまとめ、14641ケースの点をプロットし、大きく変動するものの順番（以下、重要度）に並べた図が後に示すsummary plotである。

以下、分析結果について示す。なお、分析対象としたのは、フロー1巡目で実施した14641件の解析結果である。14641件の解析結果をまず機械学習モデル（LightGBM）で学習させた。その後、SHAPに変換し分析を試みた。なお、これらはpythonのライブラリを用いた。

(1) 3つの評価指標の比較

BSL90%入力時の一層層間変形に関して、図-6に横軸・横軸をFIT、r、Index of agreementとして変更し、それぞれの組み合わせにおける相関性を示す。どの指標に関しても正の相関があることが確認されたが、FITに関してはその値の変動がかなり大きく、非常に低い値も混在している。前章で示した(4)パラメータの絞り込みに用いた要因効果図では、非常に低い値があると正しい評価ができないことが予想されるため、絞り込みの際には、Index of Agreementを用いることとした。

また、図-8にSHAPのsummary plotを示す。横軸は目的変数（本報では、FIT、r、Index of agreement）に対する各解析パラメータの寄与、すなわち(4)式左辺第二項を示す。縦軸は、その寄与の大きさによって並べ替えをした各パラメータの名称であり、14641件の解析結果すべてをプロットした図である。色はパラメータの大小を示し、青から赤になるにつれ、パラメータは大きい値である。

図-8(a)~(c)より、上位2位のパラメータは同じであるが、3位以下は貢献度が小さいためか、順序は異なっていた。また、総じて、履歴特性ではなく、初期骨格曲線に関するパラメータが上位にランクした傾向であった。

(2) 1～3層層間変形、層せん断力の比較

BSL90%入力時の一層層間変形及び層せん断力に関して、図-7にそれぞれの組み合わせにおける相関性を示す。総じて、正の相関が確認された。特に、一層層せん断力および層層間変形に関しては、その傾向が顕著である。

図-8(c)~(e)より、どの層の層間変形に関しても、一層の

パラメータが上位にあることが分かる。一層のパラメータが二層、三層の解析結果に大きく影響しているためと考えられる。また、図-8(c)、(f)より、一層層間変形と層せん断力は上位4位のパラメータが一致していた。

(3) 加振波による違い

図-8(c)、(g)より、BSL90%加振時には各パラメータの寄与の差が大きかったが、BSL160%加振時には全体的な寄与のばらつきが相対的に小さくなった。各層の変形が大きく、より多くのパラメータが解析結果に与える影響が大きくなったためと考えられる。

(4) フロー経過による比較

図-8(c)、(h)より、横軸（SHAP value）が約-0.25~0.05が、4巡目には-0.4から0.1となり、サイクルを経ることで横軸の広がりが小さくなる結果が得られた。本報のデータ同化結果は、品質工学における要因効果図を用いてパラメータ範囲を絞り込んだ結果であるが、より重要度の高いものから絞り込みを行うべきと言える。

6. まとめ

今回は、データ同化のプロセスで実施した解析についてSHAPによる分析を行った。結果、目的変数を解析の実験結果に対する精度とした場合の各パラメータの影響度を確認できた。パラメータの絞り込みには、これまでと同様に品質工学の考えを取り入れ、Index of agreementによる要因効果図を用いたが、これによってパラメータを絞りこむことが可能と言え、SHAPによる分析はパラスタ等にも応用可能と期待する。

謝辞: 本研究は京都大学・大阪工業大学・奈良女子大学・JAXAによる共同研究「品質工学を用いた木造住宅倒壊解析シミュレーションのデータ同化手法の検討」の一環として実施しました.

参考文献

[1] 角 有司, 上松 千陽, 瀧野 敦夫, 難波 宗功, 中川 貴文: 品質工学を利用したデータ同化手法の検討と木造住宅倒壊シミュレーションへの適用, 日本計算工学講演会論文集 Vol.26 (2021.5)

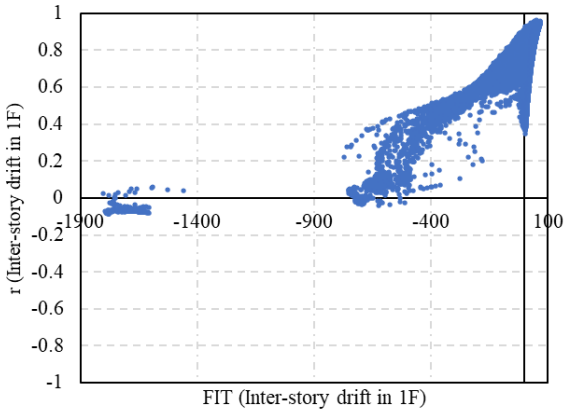
[2] Tokikatsu Namba, Takafumi Nakagawa, Hiroshi Isoda, Yuji Kado, Ryuki Odani, and Atsuo Takino. Forthcoming "Seismic Response Comparison of Full-Scale Moment Resisting Timber Frame and Joint Test Result" Journal of Structural Engineering. DOI: 10.1061/JSENDH/STENG-12165.

[3] 河合直人, 槌本敬大他：木造3階建て軸組構法住宅の設計法と震動台実験 その1～14, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.229-254, 2010.9

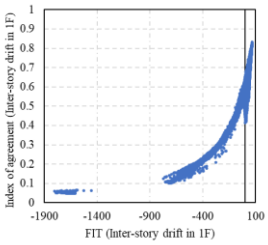
[4] 人見 祐策、五十田 博、河合 直人：大変形と繰り返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデル-木造建物の地震時挙動に関する研究(その2)、建築学会構造系論文集、Vol.74 No.646、pp.2299-2306. 2009

[5] JAXA: "JIANT", (https://www.jss.jaxa.jp/), (accessed 2021.01.04)

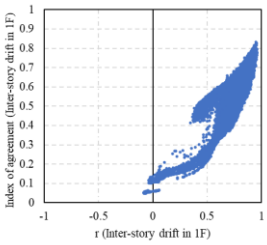
[6] 森下光之助：機械学習を解釈する技術 予測力と説明力を両立するテクニック、技術評論社、2021



(a) FIT vs r

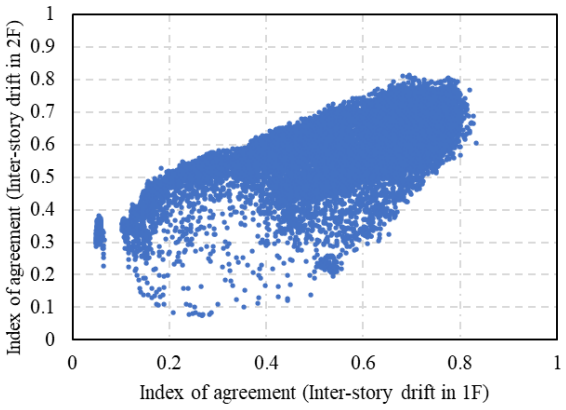


(b) FIT vs Index of agreement

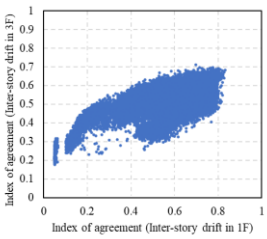


(c) r vs Index of agreement

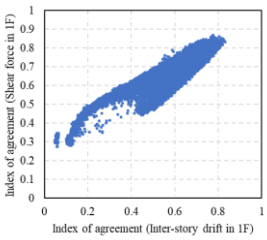
図-6 各評価指標相関性(BSL90%加振時 1 層層間変形)



(a) 1F vs 2F (Inter-story drift)

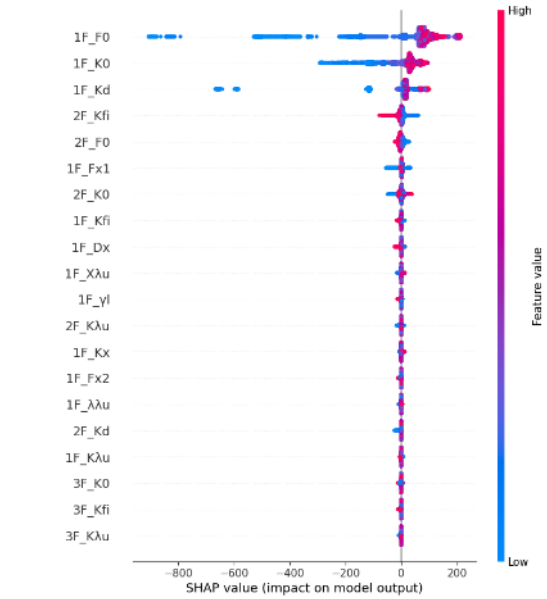


(b) 1F vs 3F (Inter-story drift)

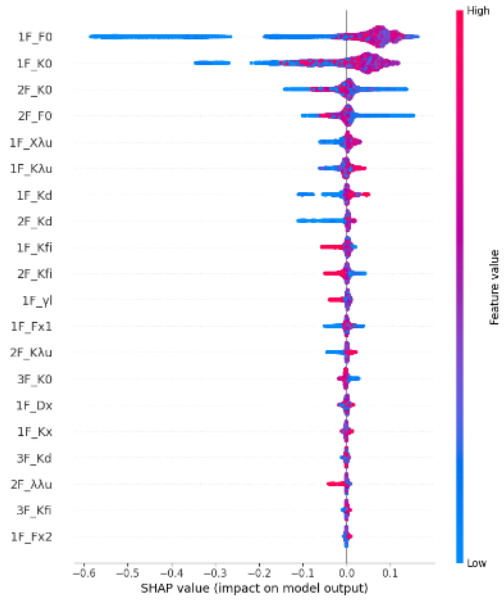


(c) Inter-story drift vs Shear force

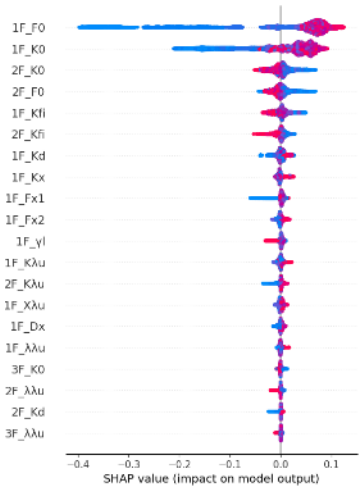
図-7 各層間変形及び層せん断力相関性(BSL90%)



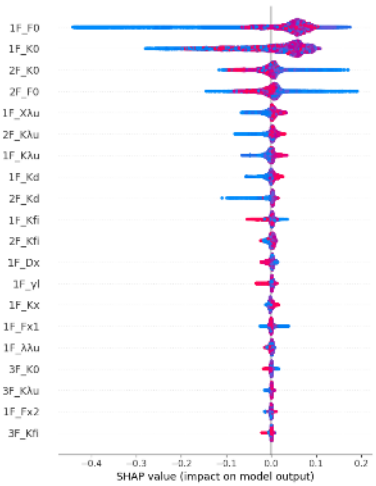
(a) FIT (Inter-story drift in 1F, BSL90%)



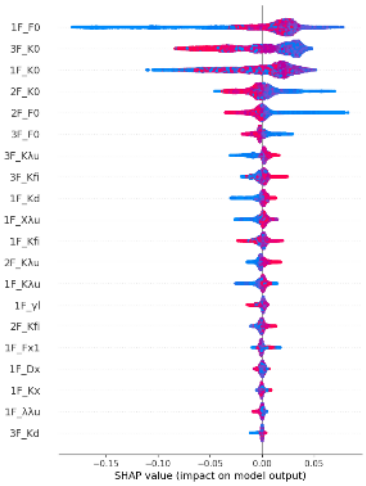
(b) r (Inter-story drift in 1F, BSL90%)



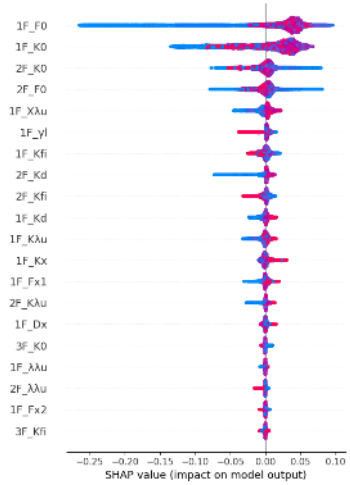
(c) Index of agreement (Inter-story drift in 1F, BSL90%)



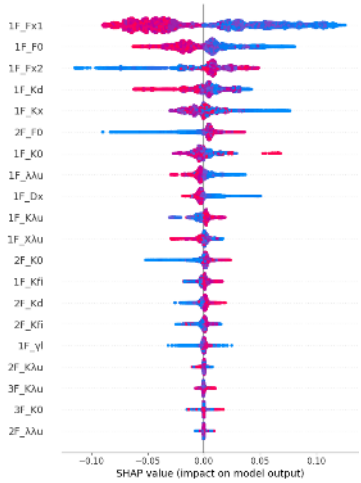
(d) Index of agreement (Inter-story drift in 2F, BSL90%)



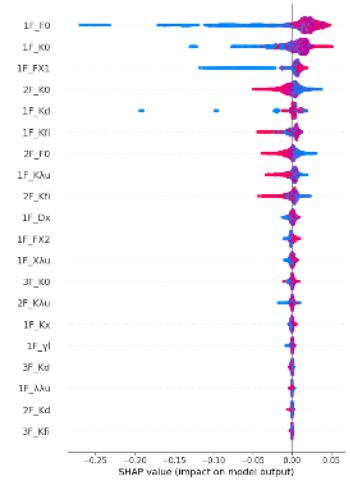
(e) Index of agreement (Inter-story drift in 3F, BSL90%)



(f) Index of agreement (Shear force in 1F, BSL90%)



(g) Index of agreement (Inter-story drift in 1F, BSL160%)



(h) Index of agreement (Inter-story drift in 1F, BSL90%, After 4cycle)

図-8 SHAP Summary plot

11:00 AM - 11:15 AM (Wed. May 31, 2023 10:45 AM - 11:45 AM Room A)

[A-02-02] 鉄筋コンクリート構造建屋の地震時損傷挙動再現解析

*田中 栄次[1] （1. 清水建設株式会社）

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

パレットラックシステムの進行性崩壊防止に関する数値解析的研究

Numerical Study on the Progressive Collapse Prevention of Pallet Rack Systems

謝　氷清[1)]，磯部大吾郎[2)]
Bingqing Xie and Daigoro Isobe

1)筑波大学大学院（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1丁目, E-mail: s2220893@u.tsukuba.ac.jp)
2) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1丁目, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp）

Pallet racking systems are most commonly used in logistics warehouses to store goods on pallets. This racking system is often likely to collapse when hit by a forklift. Reinforcing the rack system with plan braces has been considered as a mean to resist the collapse of the racking system. However, previous studies have not investigated the number of levels of plan braces needed, and most analyses have focused on single-level racks or two-row racks. As the existing rack system in the warehouse is assembled across aisles and connected to adjacent racks by components, it is essential to develop collapse control methods for multiple rows of shelves installed across aisles. This study uses numerical analysis to verify the resistance to collapse of the rack system with plan braces when the forklift impacts at 0° and 45° angles. The simulation code employed is the ASI-Gauss code.

Key Words : *Pallet rack system, Plan brace, Progressive collapse, Forklift, ASI-Gauss code*

1.　緒言

パレットラックシステムは，倉庫で商品を保管するために最もよく使われる収納棚の一種である．このラックシステムは，軽量で薄く，熱間圧延された鋼材で作られているため，軽くて簡単に設置することができ，柔軟なデザインが可能である．また，軽量でありながら，自重を大幅に上回る荷重に耐えることができる．

一方，荷物の入出庫の際に，フォークリフトがラックに衝突する（図-1）ことでラックが崩壊し，倉庫内の他のラックにも連鎖的に崩壊が広がる現象，つまりラックシステムの進行的崩壊現象が問題となっている[1]．崩壊が起こると，図-2に示すようにラックシステムに保管されている荷物が落下して破損し，ラックシステム本体の価格以上に大きな経済的損失となる．さらには，人命が危険にさらされる可能性もある．そこで，ラックシステムの崩壊を抑制する方法として，ラックを平面ブレースで補強することが検討されている．先行研究[2]によれば，ラックに平面ブレースを設置すると，ラックの変形を効果的に抑制することができる．ただし，平面ブレースがラックの崩壊を抑制する効果については検討されていない．

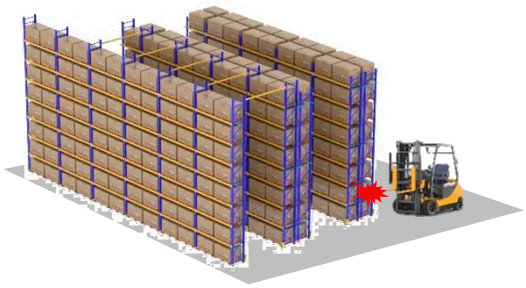


図-1　ラックに衝突するフォークリフト

図-2 ラック崩壊事故後の被害の様子[1]

本研究では，3列のラックおよびフォークリフトをモデル化し，平面ブレースの有無および設置する段を変化させて数値解析を実施する．そして，平面ブレースの崩壊抑制効果の検証を行う．

2.　解析手法

本研究で用いた有限要素解析手法は ASI-Gauss 法[3]である．進行性崩壊現象を再現するために部材の破断アルゴリズムを導入したコードを用いた．本節では，破断アルゴリズムについて説明する．

塑性ヒンジが生じている要素について，次の条件を満たした場合に破断が発生すると判定する．

$$\left|\frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}}\right| \geq 1 \quad or \quad \left|\frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}}\right| \geq 1 \quad or \qquad (1)$$

$$\left|\frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}}\right| \geq 1 \quad or \quad \left|\frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}}\right| \geq 1 \quad or \quad \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1$$

ここで，κ_x，κ_y，γ_{xz}，γ_{yz}，ε_zはそれぞれx軸，y軸回りの曲率，x軸，y軸方向のせん断ひずみ，引張軸ひずみであり，添字 0 は破断臨界値を示す．本研究では，上記 5 種類の破断臨界値を各種実験や材料定数から与える．部材破断が判定された場合，その要素に生じている断面力が瞬時に解放される．すなわち，当該要素に生じている断面力の全成分を 0 にする．

3. サイクル試験結果の再現

解析モデルの精緻化を図るため，Godrej社[4]が 1 列のラックシステムに対し実施した応力サイクル試験の再現を試みた．応力サイクル試験とは，材料や部品，製品の信頼性や耐久性を評価するための試験方法である．試験中に一定の振幅と周波数を持つ応力が周期的に加えられ，構造体の変形状態を評価する．

3.1 接合部のモデル化

ラックシステムの支柱とビームは，図-3に示すようにビーム両端のフックにビームピンと呼ばれるZ型のピンを挿入することで固定されている．ビームと支柱の接合部の剛性は，ビームピンおよびビームピンで接続されたビームと支柱の一部を含んだ箇所の剛性とし，10 mmの微小要素にビームピンの1.5倍の剛性を与えることで模擬した．

3.2 サイクル試験用のモデルと荷重条件

試験対象としたパレットラックは，欧州規格EN15512を満たすものである．また，各部材の材質はインド規格IS5986とIS2062に従うGodrej社のものとした．なお，対象とするラックの一棚当たりの積載荷重は，最大積載荷重の2000 kgである．パレットラック1列の寸法は，図-4に示すように高さ6300 mm，奥行き1000 mm，ビーム長さは2800 mmであり，高さ1500 mm毎にビームが設置されている．ラックの奥行方向をCA (Cross Aisle) 方向とし，ビーム方向をDA (Down Aisle) 方向とする．図-5に示すようにCase 1ではDA方向に1.5 kNの往復サイクル力を加え，Case 2ではCA方向に1.5 kNの往復サイクル力を加えた．

3.3 サイクル試験結果と解析結果の比較

試験結果および解析結果の荷重変位曲線を図-6（Case 1）および図-7（Case 2）に示す．Case 1 の試験結果と解析結果はループの大きさも含め良好に一致している．解析結果によると，支柱とビームの接合部に塑性化が生じていた．また，Case 2 の場合はループの大きさに多少の差異があるが，両者は定性的にほぼ一致している．解析結果によると，支柱と鉛直ブレースの接合部に塑性化が生じていた．

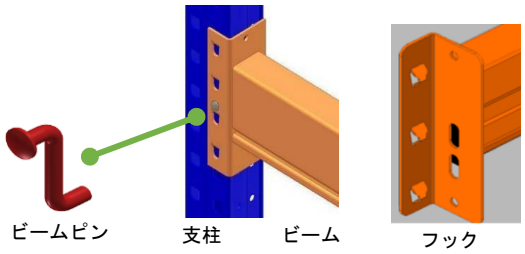


図-3 支柱とビームの接合部

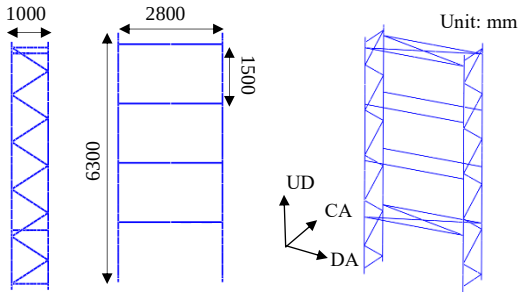


図-4 試験用ラックの寸法と全体モデル

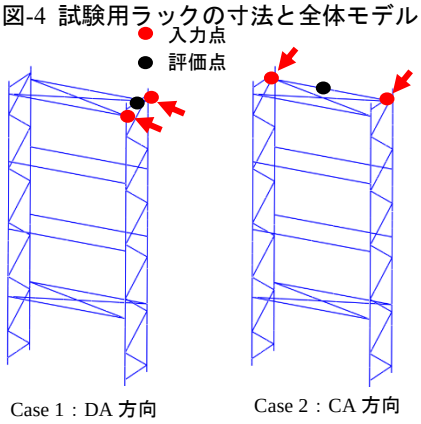


図-5 解析条件

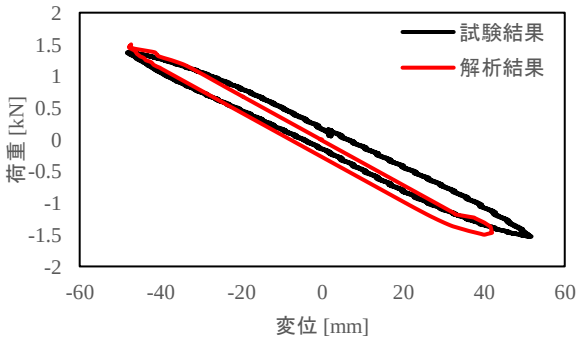


図-6 荷重変位関係（Case 1）

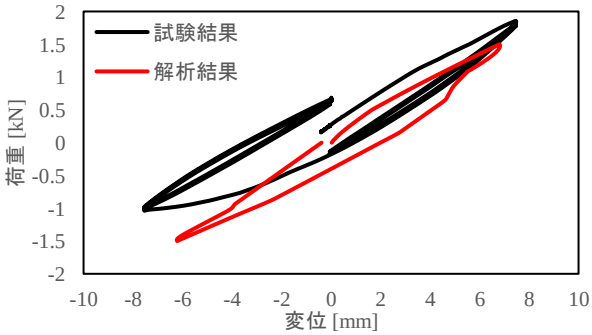


図-7 荷重変位関係（Case 2）

4. フォークリフトとパレットラックの解析モデ

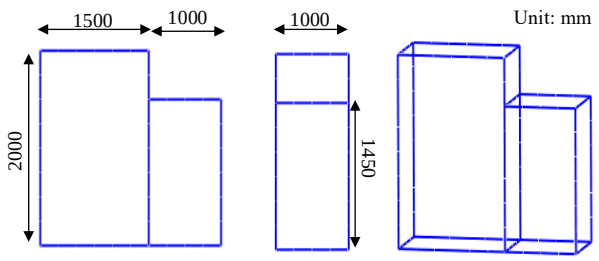


図-8 フォークリフトの解析モデル

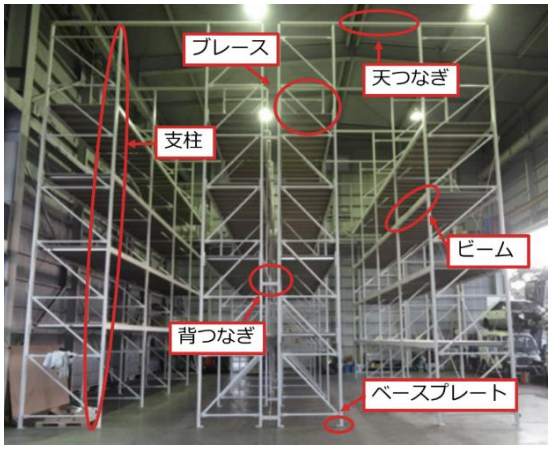


図-9 パレットラックシステム[5]

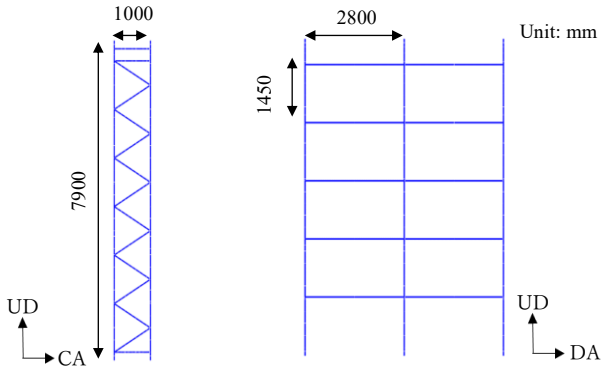
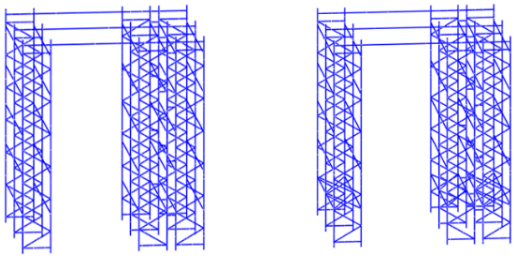


図-10 ラックの寸法



(a) 平面ブレースなしモデル　(b) 平面ブレースを 1 段目に設置した

図-11 ラックシステムの全体モデル

ル

4.1 フォークリフトの解析モデル

本研究でモデル化したフォークリフトは, 図-8に示すように長さ1500 mm, 幅1000 mm, 高さ2000 mmである. フォークリフトの前に置かれた荷物の寸法は, 長さ1000 mm, 幅1000 mm, 高さ1450 mmある. フォークリフトと荷物の合計重量は3600 kgである.

4.2 パレットラックの解析モデル

本節で解析対象とするパレットラックは, 前節と同様に欧州規格EN15512に従い, また, 部材の材質はインド規格IS5986とIS2062に従うGodrej社のものとした. なお, 対象とするラックの一棚当たりの最大積載荷重は2000 kgとした. パレットラックの写真を図-9[5]に示す. 支柱, ビーム, 鉛直ブレース, 天つなぎ, 背つなぎ, ベースプレート, 平面ブレースを全て線形Timoshenkoはり要素でモデル化した. 弾性係数, 降伏応力, ポアソン比, 密度はそれぞれ, 205 GPa, 235 MPa, 0.3, 7.85×10^{-6} kg/mm^{3}である. パレットラック1列の寸法は, 図-10に示すように高さ7900 mm, 奥行き1000 mm, ビーム長さは2800 mmであり, 高さ1450 mm毎にビームが設置してある. 前節と同様に, ラックの奥行方向をCA (Cross Aisle)方向とし, ビーム方向をDA(Down Aisle)方向とする.

本研究では, ビーム段数が 5 段で 2 つの間口を持つラックを 1 列とし, 3 列のラックを組み合わせたモデルを作成した. 図-11 にパレットラックモデルの概要を示す. 2 列のラックが背つなぎによって接続され, もう一方の 1 列のラックと天つなぎによって接続されている. 平面ブレースを設置しないモデル, 1〜5 段にそれぞれ平面ブレースを設置したモデル, 1 段と 5 段の両方に平面ブレースを設置したモデルの計 7 つを作成した. 本研究では, 荷物とパレットの重量をビーム要素に密度として加えることで考慮した.

4.3 破断条件

ラックの構成部材を接続している六角ボルトおよび支

表-1 破断条件

項目	接続される部材	破断条件
六角ボルト（M10）	支柱-鉛直ブレース（1 本） 支柱-ベースプレート（2 本） 支柱-背つなぎ（2 本） 支柱-天つなぎ（4 本）	引張軸力 ≥ 23.2 kN（/ボルト1本） or せん断力 ≥ 13.9 kN（/ボルト1本）
六角ボルト（M12）	ベースプレート-地面（2本）	引張軸力 ≥ 33.7 kN（/ボルト1本） or せん断力 ≥ 20.2 kN（/ボルト1本）
ビームピン	支柱-ビーム	せん断力 ≥ 6.04 kN
フック	支柱-ビーム	せん断力 ≥ 26.5 kN or 曲げモーメント ≥ 1.5 kNm

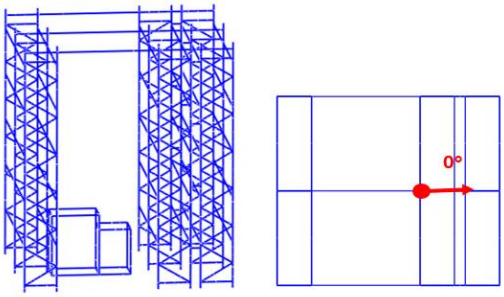


図-12 0 度方向の衝突

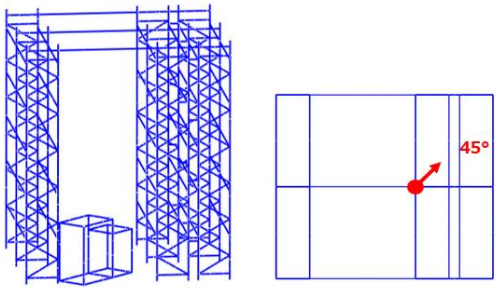


図-13 45 度方向の衝突

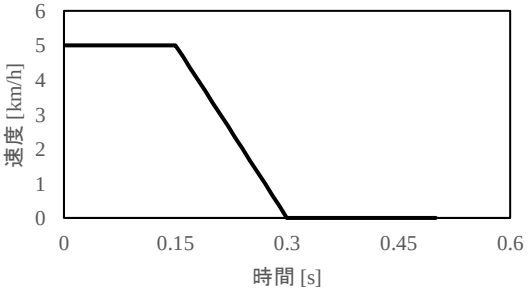


図-14 フォークリフトの衝突時間

柱とビームの接続部の破断条件を表-1 に示す．基本的には 2 節で述べた部材の破断アルゴリズムと同様の処理を行うが，六角ボルトおよび支柱とビームの接続部に対しては，表に示すように荷重条件も設定した．六角ボルトについては，材質は SS400 とした．SS400 の引張強さ 400 N/mm^2 とボルトの有効断面積から六角ボルトの破断条件を設定した．支柱とビームは 3.1 節で述べたように，ビームが両端についたフックで支柱に接続された上で，ビームピンと呼ばれる Z 型のピンで固定されている．この接続部の破断条件については，Godrej 社[4]の情報提供に基づいて決定した．

5. フォークリフトの衝突解析結果

荷物を積んだフォークリフトが，0度（図-12）と45度の方向（図-13）から図に示す点に5 km/hで衝突することを仮定した．フォークリフトがラックに衝突した後，0.15 s は等速で走行し，その後の0.15 sで線形的に減速して完全に停止（0 km/h）することとした（図-14）．

図-15および図-16に示すように，フォークリフトが0度方向および45度方向から衝突した場合のいずれも，平面

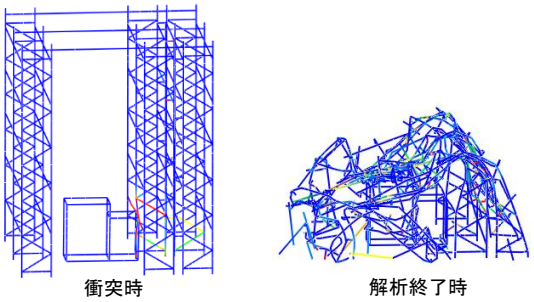


図-15 ラックシステムの挙動（平面ブレースなし，0 度方向衝突）

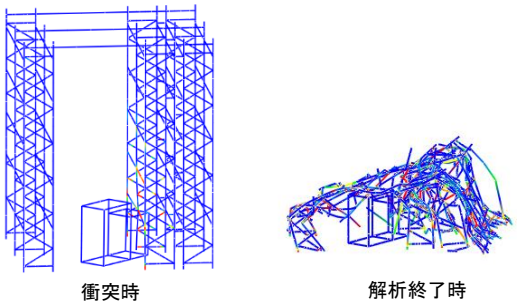


図-16 ラックシステムの挙動（平面ブレースなし，45 度方向衝突）

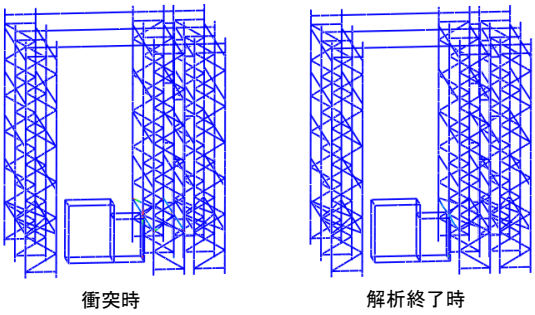


図-17 ラックシステムの挙動（平面ブレースを 1 段目に設置，0 度方向衝突）

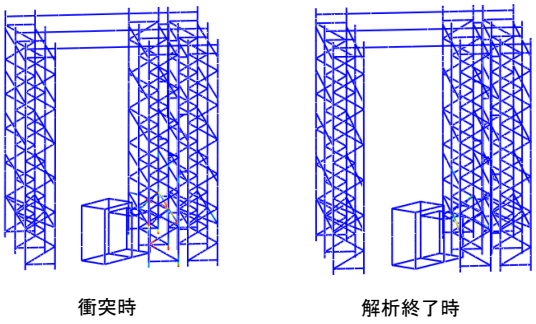
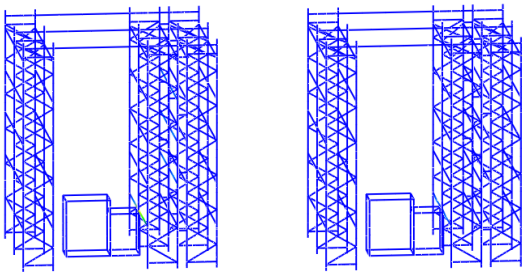


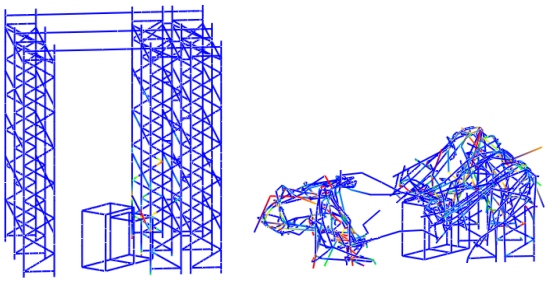
図-18 ラックシステムの挙動（平面ブレースを 1 段目に設置，45 度方向衝突）

ブレースがないラックシステムは全体的に崩壊した．しかし，1段目に平面ブレースを設置した場合には，崩壊は発生しなかった（図-17，図-18）．また，5段目に平面ブレースを設置した場合には，0度方向で崩壊は発生しなかったが（図-19），45度方向では崩壊が発生した（図-20）．表2と表3より，平面ブレースを2段目，3段目と4段目に設置した場合は，どの方向でも崩壊が発生した．1段目と5段



衝突時　　解析終了時

図-19 ラックシステムの挙動（平面ブレースを 5 段目に設置，0 度方向衝突）



衝突時　　解析終了時

図-20 ラックシステムの挙動（平面ブレースを 5 段目に設置，45 度方向衝突）

目両方に平面ブレースを設置した場合には，崩壊は発生しなかった．1段目のみに平面ブレースを設置した場合には，衝突点付近の平面ブレースが座屈して衝突エネルギーを吸収し，それ以外の部材の変形が抑制されたと考えられる．また，5段目のみに平面ブレースを設置した場合には，最上段が補強されたためにその懸垂効果によりラックの崩壊が抑制されたと考えられるが，衝突方向によっては崩壊を防げないことが分かった．

6. 結言

本研究では，骨組構造の崩壊挙動を高精度に解析できるASI-Gauss法を用い，ビームと支柱の接合部に微小要素を追加することでGodrej社のサイクル試験結果を再現した．また，通路を挟んで連結される3列のラックシステムをモデル化し，フォークリフトの衝突解析を実施し，平面ブレースがラックシステムの崩壊を抑制する効果について検証した．その結果，平板ブレースを1段目に設置すると，衝突時の水平方向への変形が抑制され，全体崩壊を防ぐことができた．また，平板ブレースを最上段に設置すると，その懸垂効果により，ある程度進行性崩壊を抑制する効果が見られた．

今後は，ラックシステムに積載する荷物をモデル化し，システム全体の進行性崩壊現象の再現および防止策の検討を行う予定である．

謝辞

本研究の遂行にあたり，Godrej社のNagendiran氏，Unnikrishnan氏，Pradeep氏には，ラックシステムの試験データの提供など多大なる貢献を受けた．ここに謝意を表する．

表-2　0 度方向衝突

Case	平面ブレースの設置段	ラックシステムの挙動
1	無し	崩壊
2	1	崩壊せず
3	2	崩壊
4	3	崩壊
5	4	崩壊
6	5	崩壊せず
7	1と5	崩壊せず

表-3　45 度方向衝突

Case	平面ブレースの設置段	ラックシステムの挙動
1	無し	崩壊
2	1	崩壊せず
3	2	崩壊
4	3	崩壊
5	4	崩壊
6	5	崩壊
7	1と5	崩壊せず

参考文献

[1] Dubina D, Marginean I, Dinu F. Impact modelling for progressive collapse assessment of selective rack systems, *Thin Wall Struct* 2019; *143*: 106201.
[2] Ng AY, Beale RG, Godley MH. Methods of restraining progressive collapse in rack structures, *Eng Struct* 2009; *31*: 1460-1468.
[3] Isobe D. *Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications*, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
[4] Godrej (https://www.godrej.com/).
[5] 株式会社 STEEL LABO (https://www.steel-labo-shopping.com/jirei/p-004.html).

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

地震時の建物一棟解析とVRシミュレータの開発

Analysis of an Entire Building during an Earthquake and Development of a VR Simulator

楊全宜[1)]，Yan Meng[2)]，磯部 大吾郎[3)]
Quanyi Yang, Meng Yan and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s2220898@u.tsukuba.ac.jp）
2) 修(工) 筑波大学大学院（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: yan.meng.xm@alumni.tsukuba.ac.jp）
3) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp）

As a part of disaster prevention education, a Virtual-Reality (VR) simulator that could directly experience indoor conditions during an earthquake was developed. The Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code, which can stably perform non-linear phenomenon, was used as a numerical code to simulate and investigate seismic motions. By this numerical code, it is possible to simulate the motion of the interior of a 10-story building during an earthquake. Based on the numerical results, a VR simulator capable of reproducing the results in a 3D environment was developed.

Key Words : *ASI–Gauss code, Seismic motion analysis, VR simulator*

1.　はじめに

1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災では，甚大な被害があった．建物が無事であっても家具が転倒してその下敷きとなったり，室内が散乱することで避難が遅れてしまうなど，居住者に対する被害が大きくなった．阪神淡路大震災住宅内部被害調査報告書[1]によると，図1に示すように家具の種類や寸法，重量によって被害状況が異なったことが確認できる．また，先行研究[2]では，同じ種類の単一家具でも，階数によってその挙動が異なることも確認された．この状況を踏まえ，防災教育のコンテンツとして，地震発生時の建物各階層の室内挙動を体験できるVRシミュレータの開発は重要である．

本研究では，建物モデル内に家具モデルを設置した統合モデルを用いて地震応答解析を実施し，解析によって得られた結果を投影し，室内の様子を体験できるVRシミュレータを開発することを目的とする．Eディフェンスで行われた10階建て鉄筋コンクリート建造物の3次元震動台実験[3]の情報に基づき，建物モデルと家具モデルを作成し，ペナルティ接触理論に基づいた接触アルゴリズムとRC構成則を導入した有限要素解析プログラム[4]を用いて地震応答解析を実施する．そして，VR用の3Dモデルを作成し，3D環境の中に解析結果を再現することで地震発生時の室内を仮想的に体験できるVRシミュレータを開発する．有限要素解析手法には，はり要素による有限要素法の一種で，最小限の要素分割で骨組構造物の挙動を解くことができるASI-Gauss法[4]を用いる．

2.　解析モデル

2.1 建物モデル

実験[3]で用いられた10層RC造建物の設計図に基づき，図2に示す解析モデルを作成した．全高25.75 m，幅12 m，奥行8 mであり，1階から7階まで耐震壁が設置されている．モデルの節点数は718，要素数は1320である．解析モデルの材料・断面情報については，設計図に記載された情報を元に必要なデータを算出し使用した．

2.2 家具モデル

図3に示すような，実験で用いられた3種類の家具の解

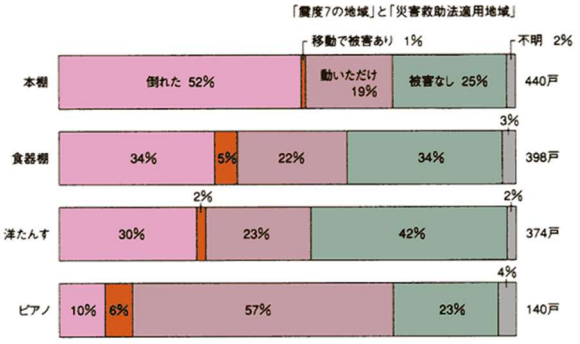


図-1 家具の被害状況[1]

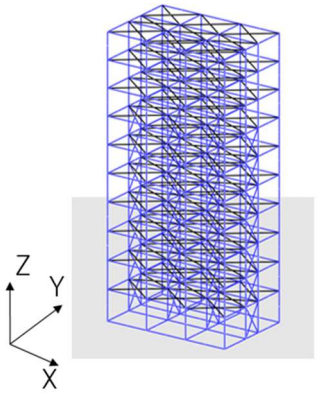


図-2 建物モデル

図-3 実際の家具と家具モデル

表-1 家具モデルの情報

対象物	節点数	要素数	幅 (mm)	奥行 (mm)	高さ (mm)
①棚	1353	1796	600	417	1800
②冷蔵庫	1467	1942	590	645	1790
③多目的棚	2267	3028	900	440	1800

析モデルを作成した．それぞれの節点数，要素数，寸法を表1に示す．全ての家具を線形Timoshenkoはり要素でモデル化した．また，本研究で用いるペナルティ接触アルゴリズムでは，家具の要素を粗く分割すると家具間で接触判定されず，通り抜けてしまう可能性があるため，家具の接触面は細かく分割した．家具の重心と内容物の重量については，部材密度を調整することにより表現した．

3. 解析条件

入力地震波には実験[3]と同じ，1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸波100%を用いた．解析における時間増分は0.001 s，実時間は41.94sである．

家具の接触は，前節に記したようにペナルティ接触理論に基づきペナルティ力と動摩擦力を接触要素の各節点に与えることで表現している．図4に要素に接触力が作用する際の概念図を示す．部材幅L_1を持つ接触要素は部材幅L_2を持つ被接触要素に対し，相対速度ベクトル$\boldsymbol{v}$で移動しているものとする．この場合，要素に対して2種類の接触力が作用する．

$$\boldsymbol{F_P} = \alpha(1-\frac{l}{L})^q \frac{\boldsymbol{n}}{\|\boldsymbol{n}\|} \tag{1}$$

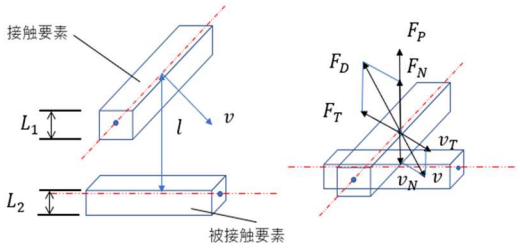


図-4 ペナルティ接触理論の概念図

表-2 接触パラメータ

対象物	α[kgf]	q	D_C	μ 短辺方向	μ 長辺方向
①棚	157.0	1	188.4	0.39	0.39
②冷蔵庫	70.0		84	0.18	0.40
③多目的棚	107.0		128.4	0.34	0.42

$$\boldsymbol{F_D} = \boldsymbol{F_T} + \boldsymbol{F_N} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{F_T} = -\mu\alpha(1-\frac{l}{L})^q \frac{\boldsymbol{v_T}}{\|\boldsymbol{v}\|} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F_N} = -D_C(1-\frac{l}{L})^q \frac{\boldsymbol{v_N}}{\|\boldsymbol{v}\|} \tag{4}$$

1つ目の接触力は式(1)に示すペナルティ力$\boldsymbol{F_P}$であり，接触面の法線方向のみに作用する．2つ目の接触力は式(2)に示す動摩擦力$\boldsymbol{F_D}$であり，接触面の接線方向と法線方向に作用する．ここで$\boldsymbol{F_T}$，$\boldsymbol{F_N}$はそれぞれ$\boldsymbol{F_D}$の接線方向成分および法線方向成分であり，式(3)，式(4)で表現される．

接触パラメータは，先行研究[5]で示された有効な値を使用している．ペナルティ係数αは対象物の重量[kgf]，ペナルティ指数qは1.0，動摩擦係数μは最大静止摩擦係数の0.8倍，減衰に関する定数D_Cはペナルティ係数αの1.2倍とした．それぞれの家具モデルにおける接触パラメータを表2に示す．

地震発生時には，特に建物の高層階では床面が大きく傾くことが予想される．そして，家具の転倒挙動に対しては床面の傾きが大きく影響を及ぼすことが考えられる．そこで本研究では，家具の動きに対する床面の傾きの影響を考慮するため，床面の法線ベクトルと，床を構成する特定の1点と接触要素の節点を結ぶベクトルを用いて接触判定を行っている．図5に示すように，家具が設置された階層の要素から3つの節点を選択し，それらの節点座標からベクトル$\boldsymbol{a}$とベクトル$\boldsymbol{b}$を計算し，両ベクトルにより床平面を定義する．そして，両ベクトルの外積によって床平面の単位法線ベクトルを算出する．次に，家具節点座標と建物節点座標からベクトル$\boldsymbol{c}$を算出し，家具要素と床平面との間の距離をベクトル$\boldsymbol{c}$と単位法線ベクトルの内積

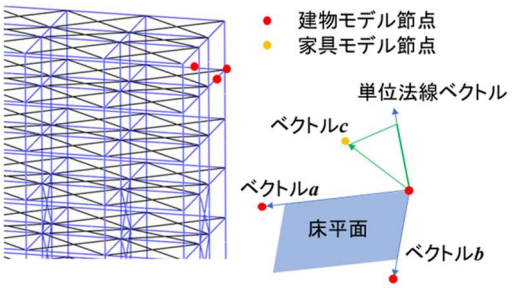
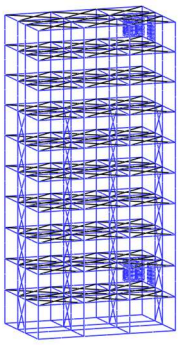
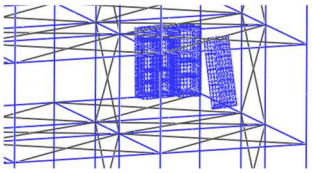


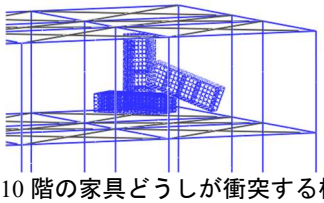
図-5 床平面の計算



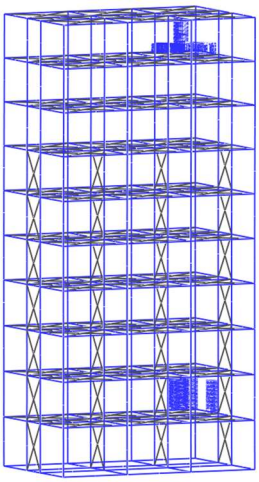
a) 解析開始時の様子



b) 2 階の家具が揺れる様子



c) 10 階の家具どうしが衝突する様子



d) 解析終了時の様子

図-6 解析結果

によって算出する．この接触判定方法を用いることにより，床面が傾く際の接触力をより正確に計算することが可能となった．

4. 解析結果

家具モデルを2階，10階に設置し，地震応答解析を実施した．図6に示す解析結果から，2階の家具は移動する様子が確認できたが，転倒には至らなかった．一方で，10階に配置された家具は大きく移動し，棚と多目的棚が衝突し，転倒に至った．

5. VR環境の構築

本研究では，BlenderとUnityソフトウェアを使用してVR環境を構築した．Blenderは，一般的に3Dモデリングによく用いられるソフトウェアである．Blenderを使用することで，複雑な形状やデザインを簡単かつ迅速に作成することができる．Unityは，高品質のグラフィックスをサポートしており，VR環境においてもリアルな映像表現が可能である．

実験[3]の情報に基づき，図7に示すようにBlenderを使用して実物と同じサイズの3Dモデルを作成し，モデルにテクスチャを貼り付けることで，実物に近い視覚効果を得ることを試みた．全ての3DモデルをUnityにインポートし，対応するVR環境を構築した．

室内家具の動きを体験できるVRシミュレータを開発するために，VR環境下で3Dモデルのアニメーションを制作する必要がある．アニメーションとは，1秒間に連続する24以上のフレームの中で，各フレームで異なる位置にあるモデルを連続して表示し，人の視覚でモデルが動いているように認識されるものである．つまり，VR環境中に解析結果を再現するため，各フレームにおける各3Dモデルの位置を，解析結果の同時刻における各モデルの位置と一致させる必要がある．

UnityのVR環境では，3Dモデルの位置は，3Dモデル自体が持つ座標系の原点の空間座標X，Y，Zの座標値と3軸回りの回転角度の計6つの自由度で決定される．3Dモデルと解析モデルの位置を一致させるために，UnityのC#スクリプトで，図7の概念図に示された計算を行った．40ミリ秒（25フレーム/秒）ごとに，解析結果から出力した同時刻の解析モデルの3つの節点の座標値を読み取り，それらの座標値から3Dモデルの位置を決める6つの自由度を計算する．これを連続的に行うことで，VR環境の中に解析結果を再現することができる．図8および図9は，解析結果を再現したVR環境における，2階と10階の室内視点からの様子である．

6. おわりに

本研究では，ASI-Gauss法に基づいた有限要素解析プログラムに建物内床面の傾きを考慮した接触アルゴリズムを導入することで，地震時における建物内の2階と10階の

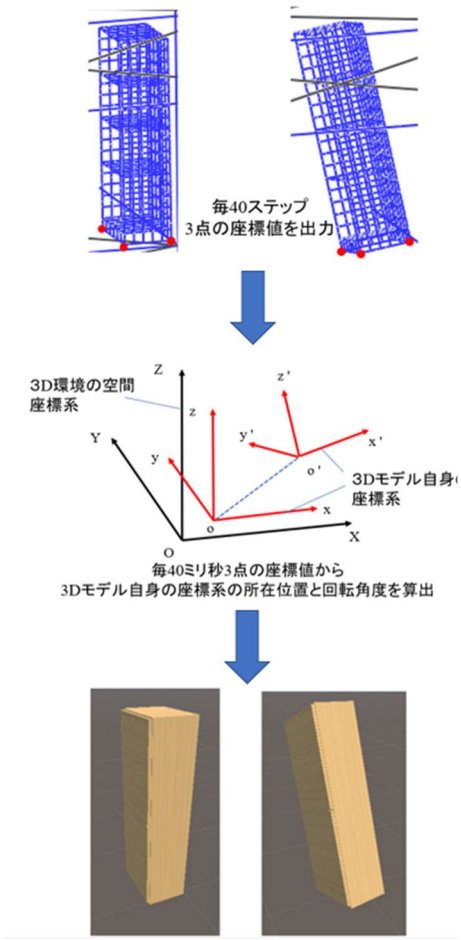


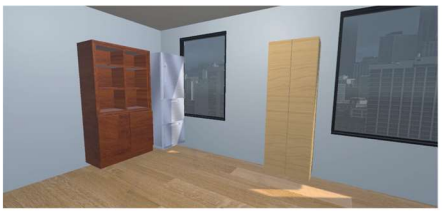
図-7 解析結果の VR 空間での可視化

a) 開始時の様子

b) 家具が揺れる様子

c) 終了時の様子

図-8 2 階室内視点からの様子



a) 開始時の様子

b) 家具が転倒する様子

c) 終了時の様子

図-9 10 階室内視点からの様子

室内挙動を解析した．また，室内挙動の解析結果をVR空間に可視化するシステムの構築も行った．

参考文献

[1] 日本建築学会,「阪神淡路大震災　住宅内部被害調査報告書」, 1996.

[2] 三浦 他， RC造建物内に配置した耐震家具の地震時挙動解析, 日本計算工学会論文集，2018巻，2号，p. 20182005, 2018.

[3] 福山 他, E-ディフェンスを用いた10階建て鉄筋コンクリート造建物（2015）の三次元振動台実験，日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, p.865, 2016.

[4] 磯部大吾郎，はり要素で解く構造動力学：建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで　Fortran90・C++ソースコード付，丸善出版，ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.

[5] 磯部 他,有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第718 号, pp. 1891-1900, 2015.

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-03] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (3)

座長:市村 強(東京大学)

Wed. May 31, 2023 1:15 PM - 2:45 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-03-01] (キーノート講演)粒子法と ASI-Gauss法のカップリングに基づく波浪-骨組構造連成解析

*大村 浩之[1]、三目 直登[1]、浅井 光輝[2]、磯部 大吾郎[1] （1. 筑波大学、2. 九州大学）

1:15 PM - 1:45 PM

[A-03-02] µ(l)レオロジーモデルを用いた粒状流の完全陰解法型 SPH解析

*岡野 翔大[1]、森川 ダニエル[2]、大﨑 春輝[1]、浅井 光輝[1] （1. 九州大学、2. 海洋研究開発機構）

1:45 PM - 2:00 PM

[A-03-03] 弾性変形を考慮した浮体の運動方程式における遅延関数の効果について

*眞鍋 尚[1]、坂本 大樹[1]、室井 謙吾[1] （1. みずほリサーチ &テクノロジーズ）

2:00 PM - 2:15 PM

[A-03-04] 複数浮体の動揺解析における遅延関数の効果について

*坂本 大樹[1]、眞鍋 尚[1]、室井 謙吾[1] （1. みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社）

2:15 PM - 2:30 PM

[A-03-05] Wide-area river simulation using 1-m mesh resolution for sediment and flood damage prediction

*Arce-Acuna Marlon[1]、青木 尊之[1]、Shima Hirona[2]、Maya Yoshida[2] （1. Tokyo Institute of Technology、2. Sabo &Landslide Technical Center）

2:30 PM - 2:45 PM

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

粒子法と ASI-Gauss 法のカップリングに基づく 波浪–骨組構造連成解析

Wave–Framed Structure Interaction Analysis Based on Coupled Particle Method and ASI-Gauss Method

大村浩之,[1] 三目直登,[2] 浅井光輝,[3] 磯部大吾郎 [4]
Hiroyuki Ohmura, Naoto Mitsume, Mitsuteru Asai and Daigoro Isobe

[1]博 (工) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: homura@bosai.go.jp)
[2]博 (工) 筑波大学 システム情報系 助教 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: mitsume@kz.tsukuba.ac.jp)
[3]博 (工) 九州大学 工学研究員 准教授 (〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744, E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp)
[4]博 (工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this reseach, we developed a partitioned FSI analysis method by coupling both stabilized ISPH method and ASI-Gauss method aimed for tidal wave and framed structures interaction problems. For transmission of physical quantities between fluid and structure domains, we adopted a particle-beam element interaction model based on Improved ERP wall boundary model. Some test calculations were conducted as verification and validation for the proposed method. Furthermore, we showed results of simulation that simple framed structures were broken and swept away by a flow mimicking tsunami.

Key Words : *ISPH method, FEM, ASI-Gauss method, Fluid–structure interaction, Tsunami*

1. 緒言

津波による構造物の被害を予測するためには，津波によって構造物が変形，破壊する現象を把握することが肝要である．そのためには数値解析の利用が不可欠だが，既存の研究例としては，津波遡上解析 [1] や，構造物に衝突する波浪の解析 [2] など，流体のみの挙動を再現する解析への適用に留まっているのが現状である．すなわち，津波によって構造物が流失するようなダイナミックな連成問題を一貫して再現する手法は確立されていない．そのような手法が実現すれば，津波が家屋等を巻き込みながら遡上する過程など，より複雑で現実に近い状況を再現でき，津波対策のさらなる高度化が期待できる．

上記の背景を踏まえ，本研究では粒子法とはり要素の有限要素法（FEM）をカップリングさせた分離型解法の Fluid-Structure Interaction (FSI) 解析手法を構築し，波浪によって骨組構造物が変形，破壊，流失する現象を一気通貫でシミュレーションする．

粒子法には非圧縮性流れに対して定式化された Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) 法 [3] を採用する．粒子法では点群で連続体を離散化するため，境界における幾何学的な情報が失われる．そのため，一般に境界条件を付与するために何らかのモデリングが必要となる．壁面上の境界条件処理に関しては，連成面上での物理量計算に直結するため，壁境界モデルの精度は連成解析に適用する上で特に重要である．そこで本研究では，高精度に壁面境界条件を処理でき，かつ連成計算の精度が優れる Improved Explicit Represented Polygon (IERP) モデルを開発し，これを ISPH 法に適用した．

構造解析に適用するはり要素の FEM としては，Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss 法 [4] に基づく解析スキームを用いる．ASI-Gauss 法は線形 Timoshenko はり要素における数値積分点と応力評価点の位置関係 [5] を利用し，弾塑性変形の計算を高精度化した手法である．さらに，本研究では構造物が流失し壁面および他の構造物に衝突する様子を再現するために，梁部材の部材形状を厳密に考慮した接触モデル，ならびに破断面を陽に表現する破断モデルを提案する．

粒子法とはり要素のカップリングとしては，まず梁部材の形状を補間するポリゴンを定義し，それを粒子法における壁境界として扱う．その上で，節点とポリゴン頂点，ならびに要素とポリゴン面それぞれで評価される物理量を関連づけることで，粒子–はり要素間の連成モデルを構築する．

2. ISPH 法に基づく自由表面流れ解析

(1) 離散化スキーム

本研究では次式で記述される非圧縮性流れを対象とする．

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\boldsymbol{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{v} + \boldsymbol{g} \tag{2}$$

ただし，$\boldsymbol{v}$ は流速，t は時間，ρ は密度，p は圧力，ν は動粘性係数，$\boldsymbol{g}$ は重力加速度である．流体解析スキームには ISPH 法 [3] を用いる．ISPH 法をはじめとする SPH 系列の手法では，次式のカーネル近似に基づく粒子離散表現を基本とする．

$$\phi(\boldsymbol{x}_i) \approx \langle \phi \rangle_i = \sum_{j \in \mathbb{P}_i} \frac{m_j}{\rho_j} \phi_j W_{ij} \tag{3}$$

ここで，ϕ は任意の物理量，i, j は粒子のインデックス，$\boldsymbol{x}$ は位置ベクトル，m_i, ρ_i は粒子 i 上で定義される質量と密度，W_{ij} は粒子 i, j 間の距離に依存するカーネル関数である．また，$\mathbb{P}_i$ は粒子 i の影響半径 h 内に存在する粒子の集合である．カーネル関数には 3 次スプライン関数を用いる．

導出過程は割愛するが，式 (3) を用いて次式の 1 階，2 階の空間微分モデルが導かれる．

$$\nabla\phi(\boldsymbol{x}_i) \approx \langle\nabla\phi\rangle_i = \sum_{j\in\mathbb{P}_i} \frac{m_j}{\rho_j}\left(\phi_j - \phi_i\right)\nabla W_{ij} \tag{4}$$

$$\nabla^2\phi(\boldsymbol{x}_i) \approx \left\langle\nabla^2\phi\right\rangle_i = 2\sum_{j\in\mathbb{P}_i} \frac{m_j}{\rho_j}\left(\phi_j - \phi_i\right)\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{|\boldsymbol{r}_{ij}|^2}\cdot\nabla W_{ij} \tag{5}$$

ここで，$\boldsymbol{r}_{ij} = \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i$ である．

非圧縮性流れを対象とする粒子法では，一般に射影法 [6] に基づいて時間方向の離散化を行う．すなわち，速度と圧力を変数分離し，速度は陽的に，圧力は陰的に計算する．$n+1$ ステップ目の圧力 p は次式のポアソン方程式を解くことで得る [7]．

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t}\nabla\cdot\boldsymbol{v}^* + \frac{\alpha\left(\rho - \langle\rho\rangle^n\right)}{\Delta t^2} \tag{6}$$

ここで，$\boldsymbol{v}^*$ は中間状態における流速，Δt は時間増分，$\hat{\rho}$ は離散化された状態での数値的な流体密度である．また，α は安定化係数で，時間増分の値に応じて設定される．

(2) IERP 壁境界モデル

IERP モデルおよびその前身である ERP モデル [8] では，図–1 に示すように，壁面をポリゴンで近似的に表現し，粒子 i をポリゴン k に関して鏡映したゴースト粒子 i^k が流体粒子から受ける寄与を計算し，それをもう一度鏡映することでポリゴン k が粒子 i に与える壁寄与を計算する．例えば 1 階微分量の壁寄与 $\langle\nabla\phi\rangle^{\mathcal{S}}_{i,k}$ は次式のように求められる．

$$\langle\nabla\phi\rangle^{\mathcal{S}}_{i,k} = \boldsymbol{R}_{i,k}\langle\nabla\phi\rangle^{\mathcal{F}}_{i^k} = \boldsymbol{R}_{i,k}\sum_{j\in\mathbb{P}_{i^k}} \frac{m_j}{\rho_j}\left(\phi_{j^k} - \phi_i\right)\nabla W_{i^k j} \tag{7}$$

ここで，i^k は粒子 i をポリゴン k に関して鏡映した粒子である．$\boldsymbol{R}_{i,k}$ はその鏡映を表す表現行列である．詳細は割愛するが，0, 2 階微分項の寄与についても同様に計算される．このように壁寄与を計算することにより，ポリゴンで表現された特定の壁領域が粒子に与える力を陽に記述できる．すなわち，その反作用を壁面に与えれば境界面上の運動量保存が保証されるため，既存の壁境界モデルと比べて連成解析の精度および安定性が向上する．

さらに，ポリゴン同士が接する角に対しても同様に寄与を考慮することで，より精緻に壁領域を表現する．角 k が粒子 i に与える寄与もポリゴンの場合とまったく同様に計算されるが，カーネル関数 $W_{i^k j}$ は壁領域の体積を整合させるために次式に従って修正される．角が凹形状（$0 \le \theta_k < \pi$）の場合，

$$\hat{W}_{i^k j} = \frac{2\pi - 3\theta_k}{\theta_k} W_{i^k j} \tag{8}$$

角が凸形状（$\pi \le \theta_k \le 2\pi$）の場合，

$$\hat{W}_{i^k j} = \begin{cases} W_{i^k j} & \left(\forall l \in \mathbb{W}^{\mathrm{near}}_k; \boldsymbol{r}_{lj}\cdot\boldsymbol{n}_l < 0\right) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{9}$$

となる．ここで，θ_k は角の角度，$\mathbb{W}^{\mathrm{near}}_k$ は角 k に隣接するポリゴンの集合，$\boldsymbol{r}_{lj}$ はポリゴン l から粒子 j に向かう最短経路方向ベクトル，$\boldsymbol{n}_l$ はポリゴン l 上の外向き法線ベクトルである．また，凸形状の角に隣接するポリゴンに関しても同様の考えに基づいてカーネル関数が修正される．

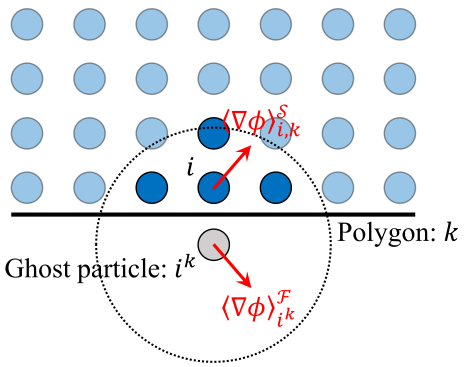
以上に記した方法によって，物理量の壁寄与項が表現される．例えば圧力勾配項は次式のように与えられる．

$$\left\langle\frac{\nabla p}{\rho}\right\rangle^{\mathcal{S}}_i = \sum_{k\in\mathbb{W}_i}\left\{\sum_{j\in\mathbb{P}_{i^k}} \frac{m_j}{\rho_j}\left(\frac{p_{j^k}}{\rho_j} + \frac{p_i}{\rho_i}\right)\boldsymbol{R}_{i,k}\nabla\hat{W}_{i^k j}\right\} \tag{10}$$

ここで，$\mathbb{W}_i$ は粒子 i の影響半径内に存在するポリゴンと角の集合である．同様に，粘性項は

$$\left\langle\frac{\nabla p}{\rho}\right\rangle^{\mathcal{S}}_i = \sum_{k\in\mathbb{W}_i}\left\{\sum_{j\in\mathbb{P}_{i^k}} \frac{m_j}{\rho_j}\left(\frac{p_{j^k}}{\rho_j} + \frac{p_i}{\rho_i}\right)\boldsymbol{R}_{i,k}\nabla\hat{W}_{i^k j}\right\} \tag{11}$$

となる．3 次元空間への拡張など，IERP モデルのより詳細な説明は文献 [9] を参照されたい．



図–1 ポリゴン面に関する鏡映に基づく間接的な壁寄与表現

3. ASI-Gauss 法に基づく骨組構造解析

(1) 離散化スキーム

空間方向の離散化として，全ての変位成分を同一の 1 次 Lagrange 関数で補間する線形 Timoshenko はり要素 [10] を用いる．また，時間積分には Newmark の β 法を用いる．これらを用いて時空間的に仮想仕事の原理式を離散化すれば，次式の変位 $\boldsymbol{d}^{t+\Delta t}$ を未知数とした連立方程式が得られる．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{d}}^{t+\Delta t} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{d}}^{t+\Delta t} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{d}^{t+\Delta t} = \boldsymbol{f}^{t+\Delta t} - \boldsymbol{g}^t \tag{12}$$

$$\ddot{\boldsymbol{d}}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta\Delta^2}\left(\boldsymbol{d}^{t+\Delta t - \boldsymbol{d}^t}\right) - \frac{1}{\beta\Delta t}\hat{\dot{\boldsymbol{d}}}^t + \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right)\ddot{\boldsymbol{d}}^t \tag{13}$$

$$\dot{\boldsymbol{d}}^{t+\Delta t} = \frac{\gamma}{\beta\Delta^2}\left(\boldsymbol{d}^{t+\Delta t - \boldsymbol{d}^t}\right) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\hat{\dot{\boldsymbol{d}}}^t + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\Delta t\ddot{\boldsymbol{d}}^t \tag{14}$$

ここで，$\boldsymbol{M}, \boldsymbol{C}, \boldsymbol{K}$ はそれぞれ系全体の質量マトリックス，減衰マトリックス，剛性マトリックスである．ま

た，$\boldsymbol{f}, \boldsymbol{g}$ はそれぞれ節点外力ベクトル，節点内力ベクトルで，γ, β は Newmark の β 法の重みパラメータである．本研究では，$\gamma = 5/6, \beta = 4/9$ とする．

ASI-Gauss 法では，梁部材を 2 つの線形 Timoshenko はり要素で表現したうえで，弾性領域ではそれぞれの応力評価点を 3 次はり要素のものと一致するように配置し，塑性ヒンジが生じた後はその位置に応力評価点を配置するように積分点をシフトする．これにより，通常の FEM に比べて弾塑性変位解の精度が著しく向上する．

(2)　梁部材接触モデル

梁部材同士および梁部材と壁面との接触現象を表現するために，本研究では粒子ベース接触モデル（図–2）を提案する．以下では，当該モデルにおける接触力計算の流れを記す．

まず，実際の部材の断面形状を考慮して，はり要素 i の部材表面を Γ_i^S と定義する．いま，はり要素 i に接触する要素を j とすると，幾何学的には線分として表されるはり要素 i, j 間での最近傍点は 1 点に定まる．その最近傍点を中心とし，部材の幾何形状に応じて規定される接触が起きうる領域を接触領域 Γ_i^c とする．

部材形状を厳密に考慮して接触力を計算するために，接触領域 Γ_i^c 上に等間隔に接触粒子群 $\mathbb{C}_i$ を配置し，粒子同士の接触力計算を介して節点上での接触力を与える．接触粒子 $a \in \mathbb{C}_i$ が $b \in \mathbb{C}_j$ から受ける衝突力 $\boldsymbol{f}_{ab}^n$ は，力積法 [11] に基づいて次式のように計算される．

$$\boldsymbol{f}_{ab}^n = \begin{cases} -\frac{(1+e)\boldsymbol{v}_{ab}\cdot\boldsymbol{n}_{ab}m_{ab}}{\Delta t}\boldsymbol{n}_{ab} + \boldsymbol{f}_{ab}^s & (\boldsymbol{v}_{ab}\cdot\boldsymbol{n}_{ab} < 0) \\ \boldsymbol{f}_{ab}^s & \text{else} \end{cases} \tag{15}$$

ただし，e は反発係数，$\boldsymbol{v}_{ab}, m_{ab}$ は粒子 a, b 間で計算される相対速度および相対質量，$\boldsymbol{f}_{ab}^s$ は数値誤差等に起因する粒子貫入を防ぐための安定化力である．また，接触面の単位法線ベクトル $\boldsymbol{n}_{ab}$ は，

$$\boldsymbol{n}_{ab} \equiv \frac{\boldsymbol{n}_a - \boldsymbol{n}_b}{|\boldsymbol{n}_a - \boldsymbol{n}_b|} \tag{16}$$

$\boldsymbol{n}_a$ は粒子 $a \in \mathbb{C}_i$ 上での Γ_i^S の外向き単位法線ベクトルである．

同様に，摩擦力 $\boldsymbol{f}_{ab}^t$ は，

$$\boldsymbol{f}_{ab}^t = \min\left(\mu\left|\boldsymbol{f}_{ab}^n\right|, \left|-\frac{(1+e)\boldsymbol{v}_{ab}\cdot\boldsymbol{t}_{ab}m_{ab}}{\Delta t}\right|\right)\boldsymbol{t}_{ab} \tag{17}$$

ただし，μ は摩擦係数である．また，摩擦方向に対する接触面の単位接線ベクトル $\boldsymbol{t}_{ab}$ は，

$$\boldsymbol{t}_{ab} \equiv -\frac{\boldsymbol{v}_{ab} - (\boldsymbol{v}_{ab}\cdot\boldsymbol{n}_{ab})\boldsymbol{n}_{ab}}{|\boldsymbol{v}_{ab} - (\boldsymbol{v}_{ab}\cdot\boldsymbol{n}_{ab})\boldsymbol{n}_{ab}|} \tag{18}$$

である．

接触力 $\boldsymbol{f}_{ab}^c = \boldsymbol{f}_{ab}^n + \boldsymbol{f}_{ab}^t$ によって生じる要素軸回りのトルク $\boldsymbol{m}_{ab}^c$ は次式のように求められる．

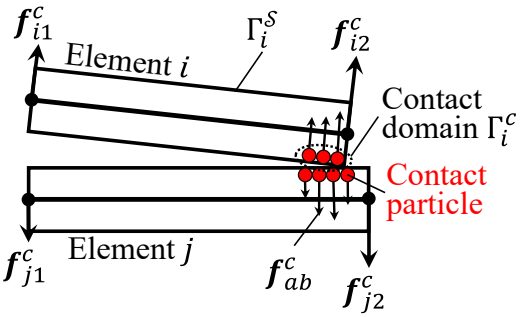
$$\boldsymbol{m}_{ab}^c = (\boldsymbol{x}_a - \boldsymbol{x}_{i,a}) \times \left\{\boldsymbol{f}_{ab}^c - (\boldsymbol{f}_{ab}^c\cdot\boldsymbol{e}_i)\boldsymbol{e}_i\right\} \tag{19}$$

ここで，$\boldsymbol{x}_a, \boldsymbol{x}_{i,a}$ はそれぞれ粒子 a の絶対位置および要素にマッピングした位置，$\boldsymbol{e}_i$ は要素軸方向の単位ベクトルである．

以上のように計算した接触力および接触トルクは次式に従って要素 i の節点力ベクトル $\boldsymbol{f}_i^c$ に変換される．

$$\boldsymbol{f}_i^c = \frac{1}{N_{ab}}\sum_{a\in\mathbb{C}_i}\sum_{b\in\mathbb{C}_j}\boldsymbol{N}^\top(\xi_{i,a})\begin{pmatrix}\boldsymbol{f}_{ab}^c \\ \boldsymbol{m}_{ab}^c\end{pmatrix} \tag{20}$$

ただし，N_{ab} は総接触点数，$\boldsymbol{N}$ は形状関数マトリックス，$\xi_{i,a}$ は $\boldsymbol{x}_{i,a}$ を無次元化した量である．総接触点数で除しているのは，多点接触の簡易的なモデリングで，全ての接触点の寄与が同一であることを仮定している．



図–2 粒子ベース接触モデル

(3)　梁部材破断モデル

本研究では，構造物が津波によって流失する挙動を追跡するために，梁部材の破断面を陽に表現する陽的破断モデルを開発し導入する．

はじめに，梁部材の破断を扱った既存研究 [12] を参考に，次式のひずみ量を参照した判定式を用いて破断の発生判定を行う．

$$\left(\frac{\chi_x}{\chi_x^c}\right)^2 + \left(\frac{\chi_y}{\chi_y^c}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{zz}^c}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{xz}}{\varepsilon_{xz}^c}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{yz}^c}\right)^2 \geq 1 \tag{21}$$

ここで，$\chi_x, \chi_y, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ はそれぞれ要素座標系 x, y 軸方向の曲率，軸ひずみ，x, y 軸方向のせん断ひずみである．また，上添え字の c はひずみの破断臨界値を表す．

はり要素 i が破断した時刻を t_f，その時の応力評価点および数値積分点の無次元位置をそれぞれ r_f, s_f とする．破断面では，破断が発生した瞬間に要素が保持している断面力 $\boldsymbol{\sigma}_{t_f}(r_f)$ が解放力 $\boldsymbol{g}_f$ として作用する．両者の関係は，

$$\boldsymbol{g}_f = \boldsymbol{B}^\top(s_f)\boldsymbol{\sigma}^{t_f}(r_f) \tag{22}$$

となる．ただし，$\boldsymbol{B}$ は節点量を要素量に変換するマトリックスである．

破断面を陽に表現するために，破断した瞬間に r_f で要素を分離させ，節点を生成する．同時に，破断面に接する節点に式 (22) の解放力を作用させる．その際，破断過程におけるエネルギー減衰を模擬して解放力を平滑化する．平滑化には，次式で表される破断時刻 t_f からの経過時間 Δt_f に依存する近似 Heaviside 関数 $H(\Delta t_f)$ を用いる．

$$H(\Delta t_f) = \frac{1}{2}\left\{1 + \cos\left(\pi\frac{\Delta t_f}{\tau_f}\right)\right\} \tag{23}$$

ここで，τ_f は平滑化パラメータで，本研究では経験的に $\tau_f = \Delta t_f/100$ とする．

4. ISPH 法と ASI-Gauss 法のカップリングに基づく波浪–骨組構造連成解析

波浪–骨組構造連成解析を実現するために，上述した ISPH 法と ASI-Gauss 法をカップリングした分離型解法の FSI 解析手法を構築する．時間発展アルゴリズムには Conventional Serial Staggered (CSS) アルゴリズム [13] を採用する．以下では粒子とはり要素の間における運動量伝達の計算方法，すなわち連成モデルについて記述する．

(1) 構造から流体に対する連成モデル

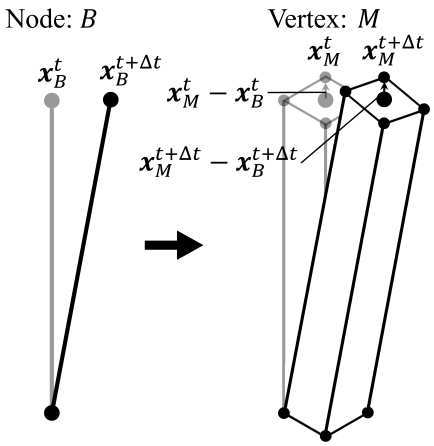
はり要素の節点上で評価される物理量から，連成境界面，すなわち部材表面上の量を計算する．IERP モデルでは部材表面を含めた壁面をポリゴンで表現するため，ポリゴンの頂点での量を求めればよい．

構造から流体に対する連成モデルの模式図を図–**3** に示す．部材表面を表すポリゴンの頂点 M の位置 $\boldsymbol{x}_M$ と，頂点 M に対応する節点 B の位置 $\boldsymbol{x}_B$ の間には次の関係式が成り立つ．

$$\boldsymbol{x}_M^{t+\Delta t} - \boldsymbol{x}_B^{t+\Delta t} = \boldsymbol{P}_B^{t+\Delta t}\left(\boldsymbol{x}_M^{t} - \boldsymbol{x}_B^{t}\right) \tag{24}$$

$\boldsymbol{P}_B$ は節点 B における断面の回転に対する表現行列で，節点の回転方向の変位に基づいて決定される．

頂点 M の速度および加速度については，変位 $\boldsymbol{u}_M^{t+\Delta t} = \boldsymbol{x}_M^{t+\Delta t} - \boldsymbol{x}_M^{t}$ に Newmark の β 法を適用することで計算できる．ただし，その際の重みパラメータには構造解析と同じ値を用いる．



図–**3** 構造から流体に対する連成モデル

(2) 流体から構造に対する連成モデル

流体から構造に対する連成モデルの模式図を図–**4** に示す．IERP モデルを用いて壁領域を表現すると，粒子 i がポリゴン k に及ぼす力は次式のように計算できる．

$$\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}} = -m_i\left(-\left\langle\frac{\nabla p}{\rho}\right\rangle_{i,k}^{\mathcal{S}} + \nu\left\langle\nabla^2\boldsymbol{v}\right\rangle_{i,k}^{\mathcal{S}}\right) \tag{25}$$

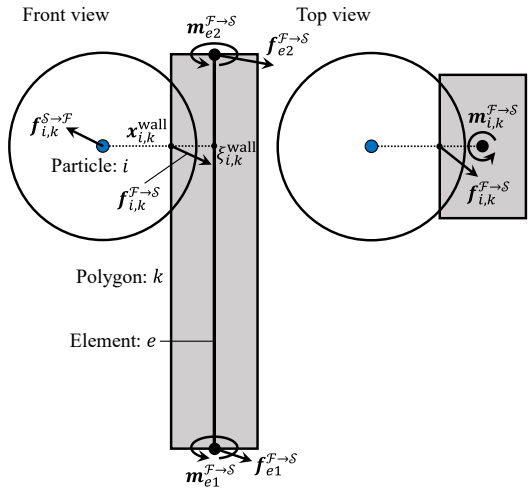
流体力 $\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}$ の作用点は粒子 i から見たポリゴン k 上の最近傍点 $\boldsymbol{x}_{i,k}^{\mathrm{wall}}$ とする．また，$\boldsymbol{x}_{i,k}^{\mathrm{wall}}$ をはり要素 e 上に投影した座標を $\boldsymbol{x}_{i,k,e}^{\mathrm{beam}}$ とする．$\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}$ によって生じる要素軸回りのトルク $\boldsymbol{m}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}$ は，

$$\boldsymbol{m}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}} = \left(\boldsymbol{x}_{i,k}^{\mathrm{wall}} - \boldsymbol{x}_{i,k,e}^{\mathrm{beam}}\right)\times\left\{\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}} - \left(\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}\cdot\boldsymbol{e}_e\right)\boldsymbol{e}_e\right\} \tag{26}$$

ポリゴン k に対応するはり要素 e に作用する節点力 $\boldsymbol{f}_e^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}$ は次式のように書ける．

$$\boldsymbol{f}_e^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}} = \sum_i\sum_{k\in\mathbb{W}_i}\boldsymbol{N}^{\top}(\xi_{i,k}^{\mathrm{wall}})\begin{pmatrix}\boldsymbol{f}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}\\ \boldsymbol{m}_{i,k}^{\mathcal{F}\to\mathcal{S}}\end{pmatrix} \tag{27}$$

ただし，$\xi_{i,k}^{\mathrm{wall}}$ は $\boldsymbol{x}_{i,k,e}^{\mathrm{beam}}$ を無次元化した要素座標である．上述した流体から構造に対する連成モデルにおける計算は，ポリゴン k が 2 次元角もしくは 3 次元角に置き換わっても同様に成り立つ．



図–**4** 流体から構造に対する連成モデル

(3) 妥当性検証

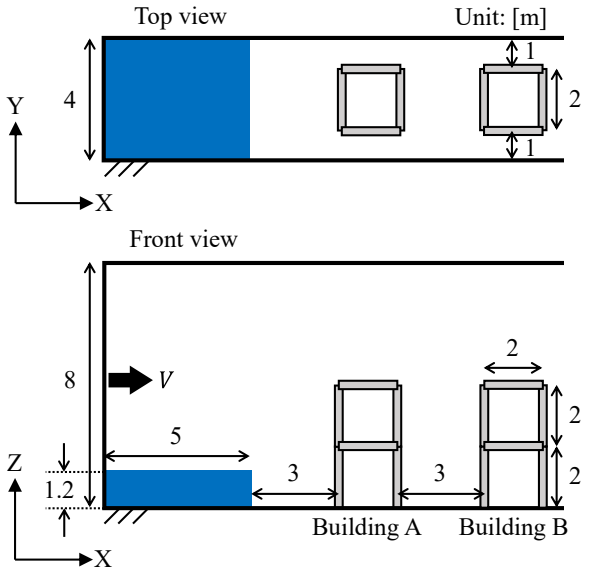
以上で提案した連成解析手法の精度・妥当性検証として，梁部材の水中落下問題やゴム板付きダムブレイク問題を解く．紙面の都合上，計算結果の詳細は発表にて述べるが，良好な精度で流体構造連成現象を再現できることが確認された．

5. 波浪および漂流物の衝突を受ける建物の流失解析

本章では，波浪–骨組構造連成問題に対する提案手法の有用性を示すために，津波を模した段波およびそれに伴う漂流物の衝突を受ける建物が変形・破壊し，流失する過程をシミュレートした結果を示す．

(1) 計算条件

図–**5** に解析対象とする系の概観を示す．実際の津波と建物のスケールを想定し，十分な幅方向長さ，奥行 4 [m]，高さ 8 [m] の閉空間の中に，幅 5 [m]，奥行 4 [m]，高さ 1.2 [m] の水を配置する．また，水の端から 3 [m] 離れた位置に 2 層 1 × 1 スパンの単純骨組構造物（以下，建物 A と呼称する）を配置する．さらに，建物 A から 3 [m] に建物 A と同一の構造物（以下，建物 B と呼称する）を配置する．建物 A, B のスパン長および階高はそれぞれ 2 [m] とし，建物を構成する全ての部材の断面形状は 0.24 [m] 角の正方形とする．



図–5 系の概観

表–1 流体解析条件

Time increment	5.0×10^{-4} [s]
Number of time steps	10000
Particle spacing	5.0×10^{-2} [m]
Number of particles	192000
Effective radius	1.2×10^{-1} [m]
Relaxation coefficient	5.0×10^{-3}
Density	1.0×10^{3} [kg/m^3]
Kinetic viscosity	1.0×10^{-6} [m^2/s]

表–2 構造解析条件

Time increment	5.0×10^{-4} [s]
Number of time steps	10000
Young's modulus	7.93×10^{7} [N/m^2]
Poisson's ratio	0.4
Yield stress	5.98×10^{5} [N/m^2]
Density	4.91×10^{2} [kg/m^3]
Diameter of contact particle	2.0×10^{-2} [m]
Coefficient of restitution	0.15
Coefficient of friction	0.3
Smoothing parameter	1.0×10^{-2} [s]

段波は予め入力した速度時刻歴に従って左端の壁面を動かすことで発生させる．$0.0 \le t < 0.1$ [s] では線形的に速度を増加させ，$0.1 \le t < 0.9$ [s] の区間では一定，$0.9 \le t < 1.0$ [s] では線形的に減少させ，1.0 [s] 以降は常に速度を零とする．また，最大速度は 3 [m/s] とする．

流体解析条件および構造解析条件をそれぞれ表**–1** と表**–2** に示す．構造物の全ての部材は 2 要素で分割している．構造物の材料はスギ材を想定して物性値を決定している．また，ここでは木材の脆性的な破壊特性を考慮し，部材が塑性化した瞬間に破断も生じるものとして，式 (21) の破断臨界値は降伏ひずみと同値とする．

(2) 計算結果

図**–6** に建物 B のみを配置した場合（以下，ケース 1 と呼称する）および建物 A, B 両方を配置した場合（以下，ケース 2 と呼称する）それぞれの可視化結果を示す．流体粒子のコンターは圧力 [Pa]，はり要素のコンターは降伏関数を表している．

ケース 1 では，建物 B の 1 階部分の柱が段波の衝突を受けて変形を起こすものの，塑性化・破壊には至らなかった．一方，ケース 2 では，最初に段波の衝突を受ける建物 A の 1 階における上流側の柱に大きな流体力が作用し，底面および 2 階との接合部分で破断が生じた．その後，波は後流側の 1 階柱にも衝突し，底面との接合部で破断を引き起こした．1 階の柱を全て失った建物 A は転倒し，その衝撃によってほとんどの接合部で破断が生じた．漂流物と化した建物 A は流れに乗って移流し，崩壊直後に建物 B に衝突した．衝突を受けた建物 B の 1 階における上流側の柱は底面との接合部で破断を起こし，建物 B も建物 A と同様のプロセスで崩壊を起こした．

以上の計算結果から，津波および建物のスケールにおいて，波浪の衝突を受けた骨組構造物が変形・破壊を起こし，流失することで他の構造物に衝突する過程を提案手法によって再現できることが示された．また，建物単体では被害が生じない場合においても，上流側で流失した構造物が漂流物として衝突を起こすことによって，被害を伝播させる可能性があることが示唆された．

6. 結言

本研究では，粒子法における壁境界モデルとして連成解析に適した IERP モデル，ならびに梁部材の流失と衝突を再現できる粒子ベース接触モデルと陽的破断モデルをそれぞれ開発した．その上で，それらを導入した ISPH 法と ASI-Gauss 法をカップリングした波浪–骨組構造連成解析手法を構築した．計算例として，波浪および漂流物の衝突を受ける建物の流失解析を実施した．計算結果から，漂流物の衝突を介した被害伝播過程を含む波浪による骨組構造物の被害シミュレータとして提案手法が有用であることが示された．

参考文献

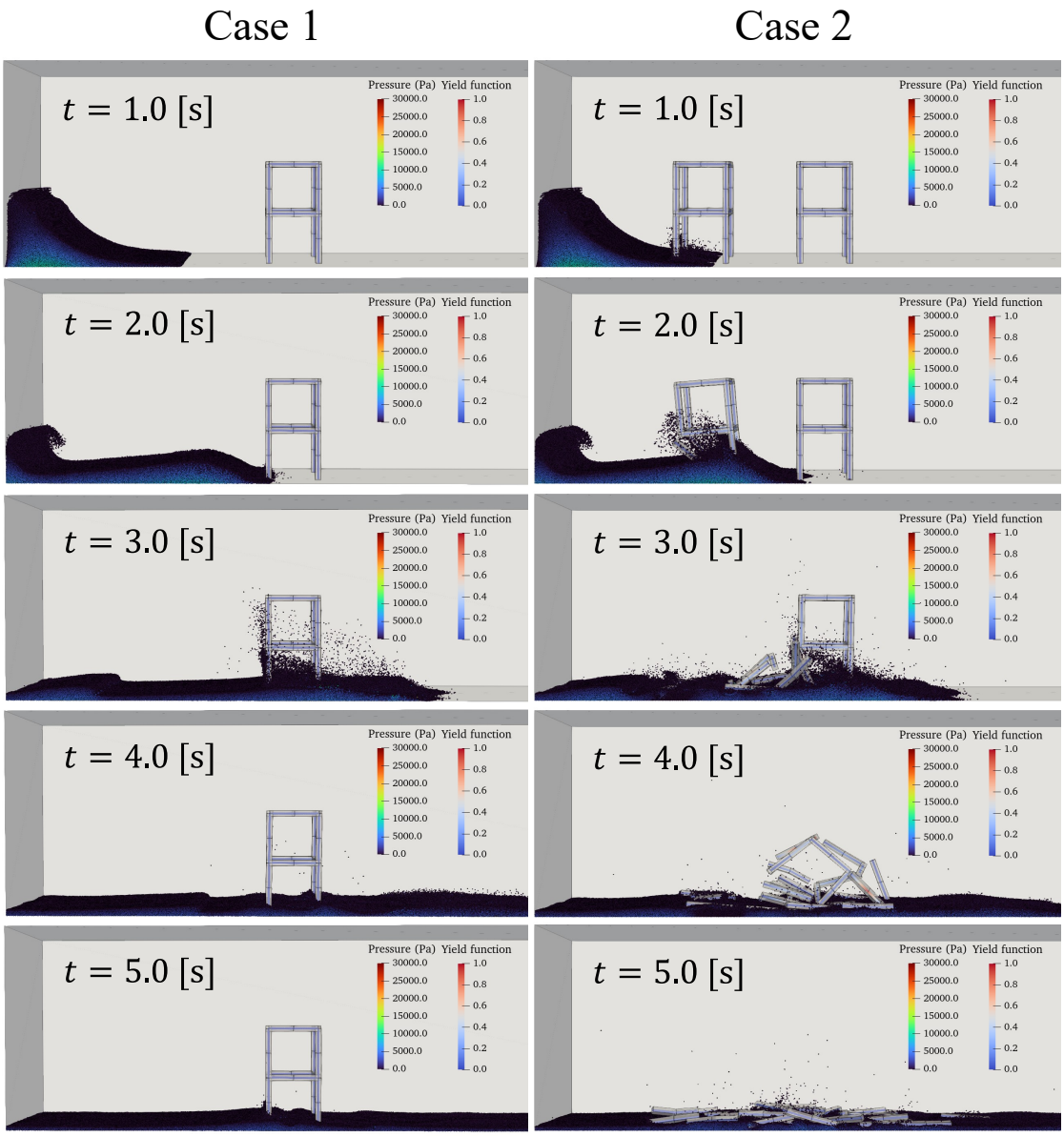
[1] Kowalik, Z. and Murty, T.S.: Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup, *Marine Geodesy*, Vol.16, No.2, pp.87–100, 1993.

[2] Kleefsman, K.M.T. et al.: A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems, *J. of Comp. Phys.*, Vol.206, No.1, pp.363–393, 2005.

[3] Cummins, S.J. and Rudman, M.: An SPH projection method, *J. of Comp. Phys.*, Vol.152, No.2, pp.584–607, 1999.

[4] Lynn, K.M. and Isobe, D.: Finite element code for impact collapse problems of framed structures, *Int. J. for Num. Methods in Eng.*, Vol.69, No.12, pp.2538–2563, 2007.

[5] Toi, Y.: Shifted integration technique in one-dimensional plastic collapse analysis using linear and



図–6 可視化結果（左：ケース 1，右：ケース 2）

cubic finite elements, *Int. J. for Num. Methods in Eng.*, Vol.31, No.8, pp.1537–1552, 1991.

[6] Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuc. Sci. and Eng.*, Vol.123, No.3, pp.421–434, 1996.

[7] Asai, M. et al.: A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *J. of Applied Maths.*, Vol.2012, pp.1–24, 2012.

[8] Mitsume, N.: Explicitly represented polygon wall boundary model for the explicit MPS method, *Comp. Particle Mechs.*, Vol.2, No.1, pp.73–89, 2015.

[9] 大村浩之: 粒子法と ASI-Gauss 法のカップリングに基づく流体–骨組構造連成解析, 博士論文, 筑波大学, 2023.

[10] Hughes, J.R.T. et al.: A simple and efficient finite element for plate bending, *Num. Methods in Eng.*, Vol.11, No.10, pp.1529–1543, 1977.

[11] Baraff, D.: Interactive simulation of solid rigid bodies, *IEEE Comp. Graphs. and Apps.*, Vol.15, No.3, pp.63–75, 1995.

[12] Isobe, D. and Tanaka, S.: Sequential simulations of steel frame buildings under multi-phase hazardous loads during earthquake and tsunami, *Frontiers in Built Env.*, Vol.7, pp.669601, 2021.

[13] Farhat, C. and Lesoinne, M.: Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems, *Comp. Methods in Applied Mechs. and Eng.*, Vol.182, No.3-4, pp.499–515, 2000.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

$\mu(I)$レオロジーモデルを用いた粒状流の完全陰解法型SPH解析

Fully Implicit SPH Analysis of Granular Flow using $\mu(I)$ Rheology Model

岡野翔大[1)]，森川ダニエル[2)]，大﨑春輝[3)]，浅井光輝[4)]
Shodai Okano, Daniel Morikawa, Haruki Osaki and Mitsuteru Asai

1) 九州大学大学院 工学府土木工学専攻（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744, E-mail: s-okano@doc.kyushu-u.ac.jp）
2) 海洋研究開発機構（〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25, E-mail:morikawad@jamstec.go.jp）
3) 九州大学大学院 工学府土木工学専攻（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744, E-mail: h-osaki@doc.kyushu-u.ac.jp）
4) 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744, E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp）

In this study, we aimed to model fluidized ground as a fundamental study for developing a numerical analysis technique that can not only predict the scale of occurrence but also estimate the scale of damage. We model granular soil as a continuum with equivalent flow characteristics (rheology) at a macroscopic viewpoint, and employed a $\mu(I)$ rheology model suitable for granular flow. The implementation in the SPH with explicit time integration causes an instability issue because of the high viscosity in the rheology model, and a fully implicit ISPH method is utilized to overcome the drawback. This significantly relaxed the constraints on time increments. The comparison of numerical and experimental results for sand flow supports the usefulness of the $\mu(I)$ rheology model and fully implicit ISPH method for granular flow.

Key Words : *Non-Newtonian fluid, Granular flow, μ(I) rheology, Fully implicit ISPH*

1.　はじめに

我が国は急峻な地形が多く，各地で大規模な斜面崩壊が発生している．その発生要因は様々であり，土質の地域性も相まって予測は困難を極まる．特に，大雨や短時間強雨の発生頻度は全国的に増加しており，斜面崩壊の被害予測技術の高度化へのニーズが高まっている．そこで本研究では，発生規模の予測のみならず被害規模の想定まで可能な数値解析技術の構築を目指し，その基礎検討として崩壊後の地盤流動現象のモデル化を行った．

本研究では，物体の大変形・分裂・結合を伴う形状変化の激しい問題を効率よく計算できる粒子法の一種であるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を採用し，地盤災害に特化した材料モデルの改良を試みた．直径 0.001～10mm 程度の土粒子を直接モデル化した DEM などによる離散体モデルで地盤全体の解析を行うことは，計算コストが膨大になることから非現実的である．そこで，巨視的な視点から，地盤を等価な流動特性（レオロジー）を持つ連続体とみなした SPH モデルによる解析ツールの開発を行った．特に本研究では，流動化後のレオロジー特性のモデル化に焦点を当て，数値解析結果と実験の比較検証を通してモデル化の妥当性確認を行った．

2.　数値解析手法

(1)　支配方程式と材料モデル

非ニュートン流体はせん断速度によって粘性が変化する流体であり，中でも粘塑性流体は粒状体の流れと類似性があることで知られている．そこで，本研究では流動化した地盤を粘塑性流体としてモデル化した．モデル化した流動状態の地盤の非圧縮性流体としての運動方程式は，次式で表される．

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{g} \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{v}$は速度，ρは密度，pは圧力，νは動粘度，$\mathbf{g}$は外力である．

粘塑性流体については様々な粘性モデルが提案されているが，本研究では$\mu(I)$モデル[1,2]を用いて，粒状体流れの局所的な動粘度νを次のようにモデル化した．

$$\nu = \frac{1}{\rho\dot{\gamma}}\left\{c + \left(\mu_s + \frac{\mu_d - \mu_s}{I_0/I + 1}\right)p\right\} \tag{2}$$

ここで，$\dot{\gamma}, c, \mu_s, \mu_d, I_0, I$はそれぞれせん断速度，粘着力，静摩擦係数，動摩擦係数，材料定数，慣性数（Inertial number）である．慣性数Iは次式で定義される無次元量である．

$$I = \frac{\dot{\gamma} d_s}{\sqrt{p/\rho_s}} \tag{3}$$

ここで，d_sは材料の粒径，ρ_sは材料の密度である．

既往研究で多く用いられているBingham モデルと異なり，$\mu(I)$モデルは静的摩擦だけでなく，動的な状態の摩擦までが表現できる．

(2)　離散化手法

SPH法は，連続体の解析領域を有限個の粒子に離散化し，対象粒子の物理量を近傍粒子の物理量の重み付き平均として近似する手法である．非圧縮性流体解析では，速度場を陽的に，圧力場を陰的に解く半陰解法型のソルバーであるISPH (Incompressible SPH) 法が多く用いられている．

しかし，非ニュートン流体を半陰解法によって計算する場合，安定して解析を行うためには，粘性が高い状態での時間増分Δtを非常に小さく設定しなければならない．

そこで，本研究では完全陰解法型ISPH法[3]を導入して運動方程式を解く方針とした．本手法では，粘性項と重力項によって陰的に仮速度$\mathbf{v}^*$を求める予測ステップと，圧力Poisson方程式を陰的に解くことにより得られた圧力により次の時間ステップの速度$\mathbf{v}^{\mathrm{N+1}}$を求める修正ステップに分離して運動方程式を解く．その2つのステップの計算は次式によって与えられる．

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{v}^{\mathrm{N}} + \Delta t(\nu\nabla^2\mathbf{v}^* + \mathbf{g}) \tag{4}$$

$$\mathbf{v}^{\mathrm{N+1}} = \mathbf{v}^* - \frac{\Delta t}{\rho}\nabla p^{\mathrm{N+1}} \tag{5}$$

粒子iについて式(4)の予測ステップを計算するために，粘性項についてSPH近似を行うと次のようになる．

$$\nu\nabla^2\mathbf{v}_i^* \cong \sum_j B_{ij}(\mathbf{v}_j^* - \mathbf{v}_i^*) \tag{6}$$

$$B_{ij} = \frac{2\nu_i m_j}{\rho_j}\frac{\mathbf{r}_{ij}\cdot\nabla W_{ij}}{\mathbf{r}_{ij}^2} \tag{7}$$

ここで，jは粒子iの近傍粒子，$m_j, \rho_j, \mathbf{r}_{ij}, W_{ij}$はそれぞれ粒子$j$の質量，密度，粒子$i, j$間の相対位置ベクトル，$\mathbf{r}_{ij}$によって値が定まるカーネル関数（重み関数）である．式(6)を式(4)に代入して整理すると，陰的に仮速度$\mathbf{v}^*$を求める次のような連立一次方程式ができる．

$$\left(1 + \Delta t\sum_j B_{ij}\right)\mathbf{v}_i^* - \left(\Delta t\sum_j B_{ij}\,\mathbf{v}_j^*\right) = \mathbf{v}_i^{\mathrm{N}} + \Delta t\mathbf{g} \tag{8}$$

以上の完全陰解法型ISPH法により，高粘性状態の非ニュートン流体でも無条件で安定した解析を行うことができる．

3. 理論解との比較検証

(1) 概要

本手法の精度を検証するために，流速分布の理論値が存在する**図-1**に示す管路流れ（Poiseuille flow）の解析を行った．管路の直径R，圧力差Δp，検査領域の長さLはそれぞれ0.13m, 1000Pa, 0.6mとし，数値解析の際の時間増分Δtは10^{-5}s，初期粒子間隔dは5×10^{-3}mに設定した．

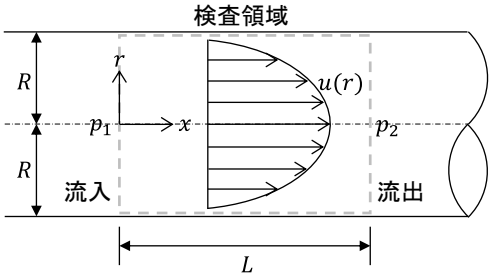


図-1 管路流れ解析の模式図

(2) ニュートン流体

ニュートン流体の管路流れにおいて，x方向の流速uの理論値は，管路中央からの距離rを変数として次のように表される．

$$u = \frac{\Delta pR}{16\rho\nu L}\left\{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right\} \tag{9}$$

ここでは，ρ= 1000kg/m^3，ν= 0.1m^2/sとした．

図-2に示すように，計算値は理論値と非常に一致しており，管路中央部での誤差は2.59%であった．

(3) 非ニュートン流体

非ニュートン流体の粘性モデルの一つであるBinghamモデルでは，動粘度νは次のようにモデル化される．

$$\nu = \nu_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \tag{10}$$

ここで，ν_0は降伏後の動粘度，τ_yは降伏応力であり，ν_0= 0.1m^2/s，τ_y= 50Paとした．Binghamモデルでは，管路流れの流速uの理論値は次のように表される．

$$u = \frac{\Delta pR^2}{4\rho\nu L}\left\{\left(1 - \frac{r_0}{R}\right)^2 - \left(\frac{r}{R} - \frac{r_0}{R}\right)^2\right\}, \qquad if\ r > r_0 \tag{11}$$

$$u = \frac{\Delta pR^2}{4\rho\nu L}\left\{\left(1 - \frac{r_0}{R}\right)^2\right\}, \qquad if\ r < r_0 \tag{12}$$

$$r_0 = \frac{2L\tau_y}{\Delta p} \tag{13}$$

図-3に示すように，非ニュートン流体についても計算値は理論値と非常に一致しており，管路中央部での誤差は2.16%であった．以上の比較検証から，本手法がニュートン流体・非ニュートン流体の両方に対して十分な精度で解けることを確認した．

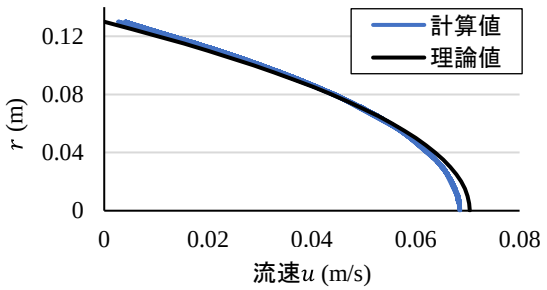


図-2 ニュートン流体の管路流れの流速分布

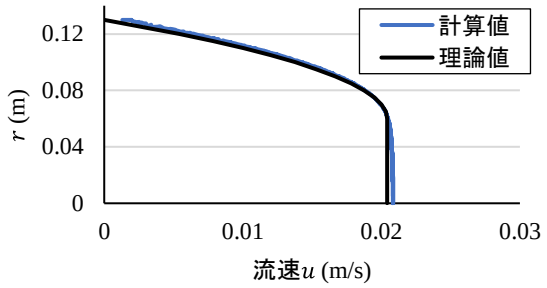


図-3 非ニュートン流体の管路流れの流速分布

4. 実験との比較検証

(1) 概要

次に，粒状体流れに対して本手法の妥当性を確認するために，森口ら[4]の実験の数値解析を行い，結果を比較した．この実験では，**図-4**，**図-5**に示すように水平面から傾斜角θだけ傾いた水槽の上部から乾燥砂を自由落下させ，その際の衝撃力を記録している．実験に用いた砂の諸量は，**表-1**に示す通りである．

数値解析での時間増分Δtは10^{-3}s，初期粒子間隔d（粒径）は5×10^{-3}mに設定した．実験で用いられた砂の平均粒径D_{50}は0.273mmであり，単純に平均粒径を用いたDEM解析では2億～3億の粒子（計算点）を要する．その一方，連続体モデルを用いた解析では粒子数を36万に抑え，計算コストを低減させることができた．

表-1 砂の諸量

平均粒径	D_{50}	0.273	mm
均等係数	U_c	1.37	-
曲率係数	U_c'	1.01	-
乾燥密度	ρ_d	1379	kg/m^3
土粒子密度	ρ_s	2650	kg/m^3

図-4 実験装置の写真

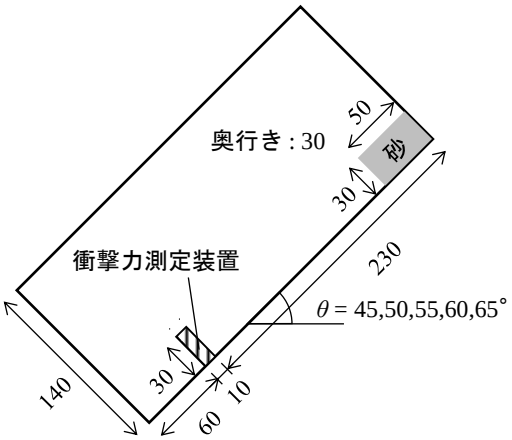


図-5 計算モデルの模式図（単位 : cm）

(2) 形状の比較

図-6は実験での砂の形状，**図-7**は$\mu(I)$モデルを用いて連続体として計算した砂の形状である．数値解析で得られた流動状態の形状は，実験時の写真と整合した結果が得られた．

その一方で，**図-8**に示すように，数値解析では時間が経つにつれ堆積した砂の表面が安息角を形成することなく水平に近づくような挙動をしていた．

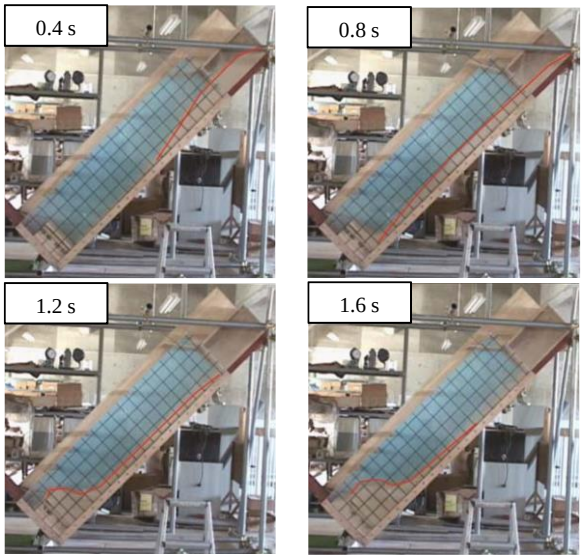


図-6 実験での砂の形状（θ= 45°）

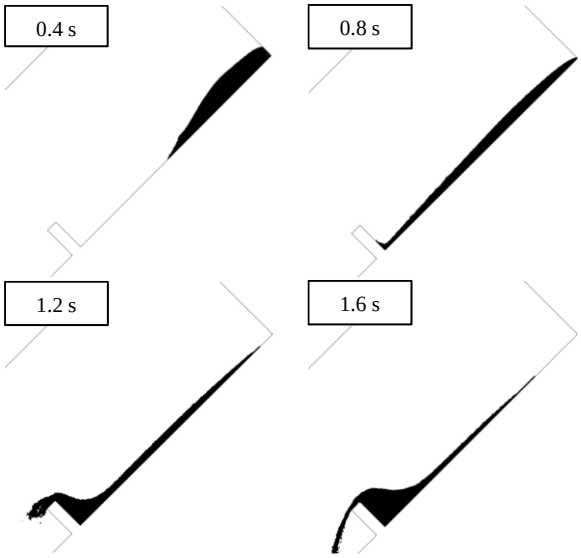


図-7 数値解析での砂の形状（θ= 45°）

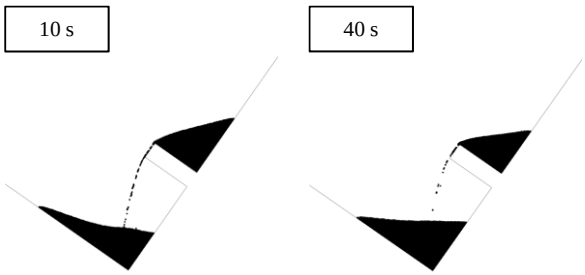


図-8 堆積後の砂の形状（θ= 55°）

(3) 衝撃力の比較

次に，衝撃力を用いて，定量的な評価を行った．**図-9**は実験で計測された衝撃力の時系列推移である．傾斜角が大きくなるにつれ，ピーク衝撃力が大きくなる関係があることがわかる．また，θ= 55°, 60°, 65°の場合は明確なピーク衝撃力があるのに対して，θ= 45°, 50°の場合は明確なピーク衝撃力がなく，約200Nに達した後横ばいに推移している．このように傾斜角θによって衝撃力の推移の特徴が異なる原因は，砂が流下する速度の違いと，衝撃力測定装置の上に砂が堆積する空間の大きさの違いによるものと思われる．

数値解析では，衝撃力測定装置の内部にダミー粒子を配置し，近傍の流体粒子の圧力を正規化してSPH近似したものをダミー粒子にマッピングした．数値解析における衝撃力は，その総和をとることで算出した．

図-10は各傾斜角における計算値と実験値を比較したものである．形状のみでなく，衝撃力の推移についても，$\mu(I)$モデルを用いた計算値は実験値に近い値が得られた．非ニュートンモデルとしてしばしば用いられているBinghamモデルと比較しても，より高い精度でピーク衝撃力を再現できた．なお，ここではBinghamモデルの降伏応力τ_yは，粘着力c，圧力p，内部摩擦角ϕ'を用いてMohr-Coulombの破壊基準から次式のように定義した．

$$\tau_y = c + p\tan\phi' \qquad (14)$$

$\mu(I)$モデルは流体が静的状態から動的状態に遷移していく中で，せん断応力と垂直応力の比が変化する．一方，Binghamモデルはせん断応力と垂直応力の比が一定であるので，動摩擦が支配的な問題では精度が期待できない．そのため，Binghamモデルでは流下速度が大きい（傾斜角θが大きい）ケースほど精度が低くなるものと考えられる．

さらに，**図-11**，**表-2**に示す通り，Binghamモデルはピーク衝撃力の誤差が20～40%であったのに対し，$\mu(I)$モデルは全て10%以内に抑えることができた．

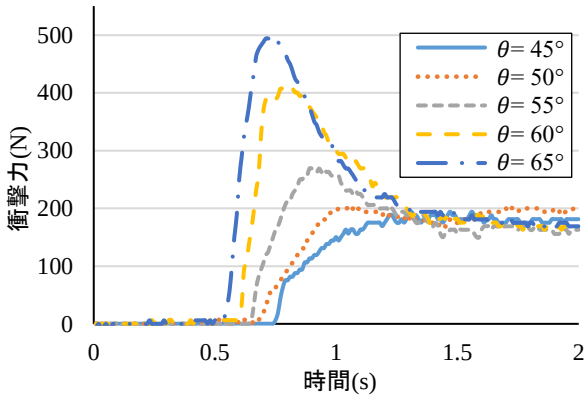


図-9 実験での衝撃力の時系列推移

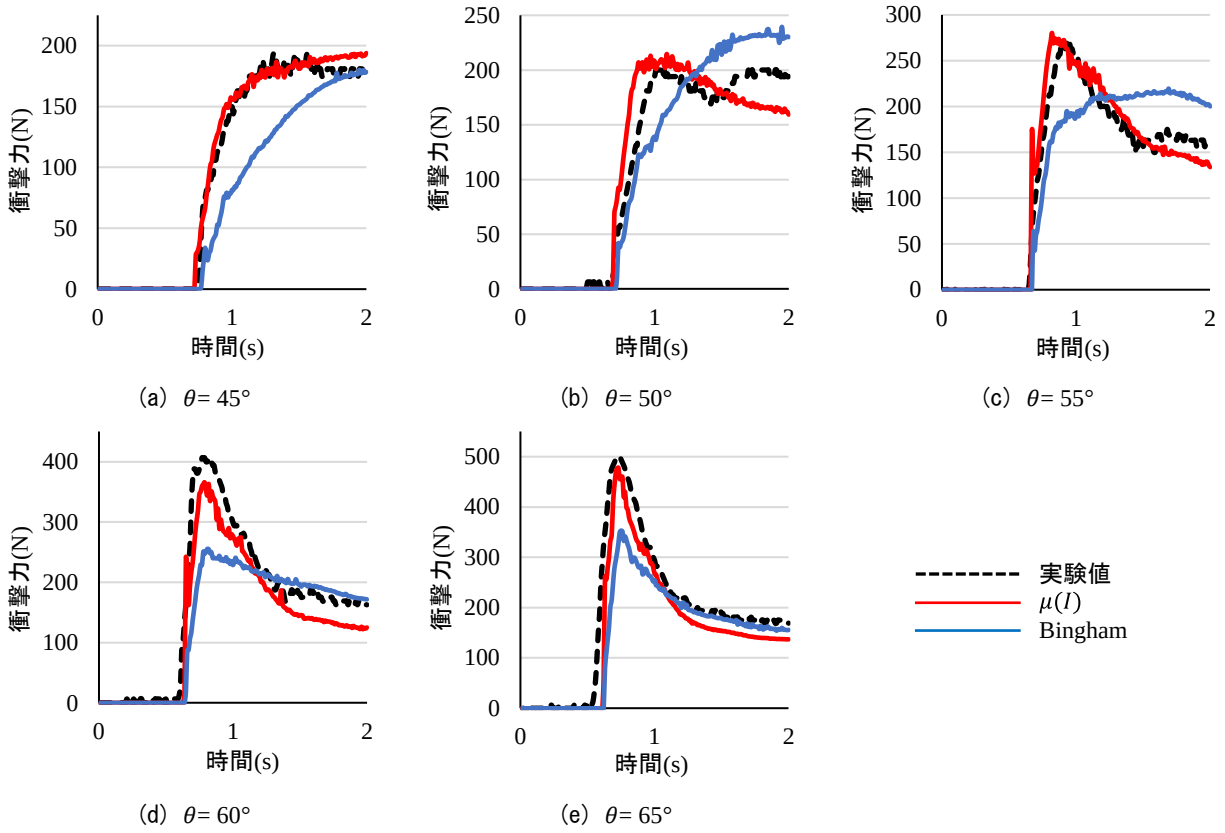


図-10 各ケースにおける衝撃力の時系列推移

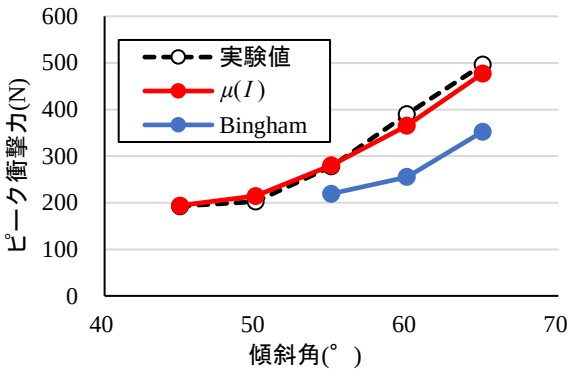


図-11 ピーク衝撃力の比較

表-2 実験のピーク衝撃力との誤差（単位：%）

θ	$\mu(I)$モデル	Binghamモデル
45°	+0.6	-
50°	+5.9	-
55°	+0.8	-21.1
60°	-6.3	-34.5
65°	-3.8	-29.0

5. おわりに

本研究では，斜面崩壊の被害予測のための数値解析手法の構築を目的として，流動化した地盤に着目した基礎検討を行った．非ニュートン流体のひとつである$\mu(I)$モデルにより地盤をモデル化し，完全陰解法型ISPH法により安定かつ効率的な解析が実施できるように改良した．これにより，非ニュートン流体としてモデル化する際の課題であった時間増分の条件を大幅に緩和させることができた．さらに，数値解析と理論解・実験の比較から，本手法の精度・妥当性を確認した．

今後，安定した地盤が静止状態から流動へと遷移する過程の解析を行う予定である．加えて，本研究で明らかになった，流動から静止状態へと遷移する過程を再現できていないという課題についても，適切なモデル化を検討する．そして，静止→流動→静止という過程の解析をシームレスに行うことで，斜面崩壊の発生から流動化後までを統一的に解くことができる数値解析法へと発展させていく計画である．

謝辞：この成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP22005）の結果得られたものです．また一部は，JSPS科研費JP 20H02418の助成を受けたものです．

参考文献

[1] P. Jop, Y. Forterre, and O. Pouliquen. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, Vol. 441, No. 7094, pp. 727-730, 2006.

[2] G. Wang, A. Riaz, and B. Balachandran. Smooth particle hydrodynamics studies of wet granular column collapses. *Acta Geotechnica*, Vol. 15, No. 5, pp. 1205–1217, 2020.

[3] D. Morikawa, M. Asai, N. Idris, Y. Imoto, and M. Isshiki. Improvements in highly viscous fluid simulation using a fully implicit SPH method. *Computational Particle Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 529-544, 2019.

[4] S. Moriguchi, R. I. Borja, A. Yashima, and K. Sawada. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction. *Acta Geotechnica*, Vol. 4, No. 1, pp. 57-71, 2009.

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

弾性変形を考慮した浮体の運動方程式における遅延関数の効果について

The effects of memory effect function of equation of motion in floating body with elastic deformation

眞鍋尚 [1)] 坂本大樹 [2)] 室井謙吾 [3)]
Takashi MANABE, Daiki SAKAMOTO and Kengo MUROI

[1)]博 (工) みずほリサーチ & テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部 次長
（〒 101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3, E-mail: takashi.manabe@mizuho-rt.co.jp)
[2)]修 (工) みずほリサーチ & テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部 主任コンサルタント
（〒 101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3, E-mail: daiki.sakamoto@mizuho-rt.co.jp)
[3)]修 (工) みずほリサーチ & テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部 コンサルタント
（〒 101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3, E-mail: kengo.muroi@mizuho-rt.co.jp)

Hydrodynamic forces in floating bodoy motion problems are described with the linear potential theory. Recently, nonlinear direct simulations in the timedomain using memory effect function are becoming common. In this paper, emphasis is placed on the relation memory effect function of motion of equations and the add mass damping coeffecient in the direct simulation of semi-submersible type floating offshore with elastic deformation.Moreover the calculation process of memory effect function are discussed from our numerical results are shown.

Key Words : *Floating body, Equation of motion, Elastic deformation, Memory effect function, Time simulation*

1. はじめに

本論では近年, 再生エネルギーの一環として注目を浴びている浮体式洋上風力発電の動揺解析に関する検討を行う。浮体の動揺解析を行う場合浮体が水中で振動するため，固有周期が長くなること (付加質量力)，また浮体が運動することで周りの水面に散乱波を発生させる力 (造波減衰力) が生じていることを考慮する必要がある．付加質量力，造波減衰力はラディエーション流体力と呼ばれ，付加質量力は浮体加速度，造波減衰力は速度にそれぞれ比例する力であるため付加質量係数および造波減衰係数を用いて運動方程式は構成される．付加質量力係数および造波減衰力係数を求める際, 流場を非粘性，非回転の仮定より完全流体とし３次元 Laplace 方程式と浮体表面の条件，水面の自由表面条件, 水底条件また波の放射条件のもと，浮体まわりのポテンシャルを求める．得られたポテンシャルより付加質量力，造波減衰力および波力を計算する．浮体の運動は 1 質点系運動方程式で表現され、遅延関数型運動方程式は時間領域における運動方程式であり，浮体が動揺することによる流場の周波数無限大に対応する不変付加質量を用い，過去の影響を遅延関数を用いて取り入れていることに特徴がある [1,2]．一方, 浮体式洋上風力発電で用いられるセミサブ形状のような浮体では弾性変形を考慮する必要があり [3~5], これを運動方程式に組み込む必要がある。本論では弾性変形を考慮した運動方程式において弾性変形部材の流体力の効果について検討する。

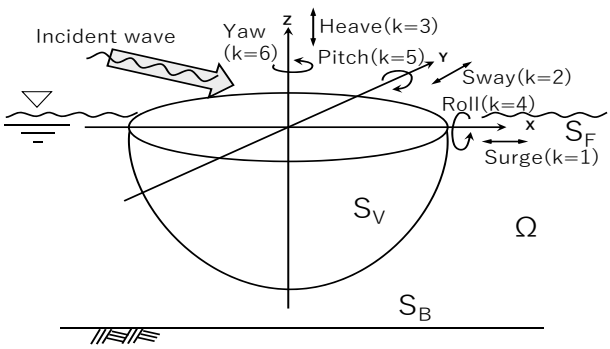
2. 浮体の支配方程式

本論では図 1 に示すような３次元任意形状浮体が不規則な波が作用することによってどのような運動が生じるか考える．いま，波高 ξ_0，周波数 ω の規則波が作用する場合， 水深 h は一定，また流体は非回転，非粘性の完全流体とすると，動揺する浮体周辺の速度ポテンシャル Φ は以下のように表わされる．

$$\begin{aligned}\Phi(x,y,z;t) &= \left[\frac{g\xi_0}{\omega}\left\{\phi_0(x,y,z)+\phi_d(x,y,z)\right\}\right.\\ &+ \left.\sum_{k=1}^{6}\frac{gX}{\omega}\phi_i^r(x,y,z)\right]\exp^{-i\omega t}\end{aligned} \tag{1}$$

なお、下添字 k は方向を表わすこととし、その方向は図 1 に示す通りである。ただし、回転は軸方向右回りを正とする。ここに，g は重力加速度，t は時間，i は虚数単位 $(=\sqrt{-1})$ である． また，ϕ_d は浮体が存在することによって生じる散乱波（Diffraction wave）を示す無次元化されたディフラクションポテンシャル (Diffraction potential) 関数，$\phi_i^r(i=1,2,\cdots,6)$ は浮体の i モードの動揺によって生じる発散波（Radiation wave）を示す無次元化されたラディエーションポテンシャル (Radiation potential) 関数である。さらに，ϕ_0 は浮体に作用する入射波を表わす無次元化されたポテンシャル関数であり，入射ポテンシャルは次式のように表わされる．

$$\phi_0(x,y,z) = -i\frac{g\eta}{\omega}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}\left\{e^{-ik(x\cos\beta+y\sin\beta)}\right\} \tag{2}$$



図–1 浮体の動揺

ここで,β は波の入射角，k_0 は波数で次の分散関係式の固有値である．

$$\omega^2 = gk_0 \tanh k_0 h \tag{3}$$

ポテンシャルの線形性を考慮すると， 速度ポテンシャルに関する基礎方程式と境界条件はディフラクションポテンシャル関数 ϕ_d と， 浮体の動揺を1モードとおいたときの浮体の動揺によるラディエーションポテンシャル関数 ϕ_i^r それぞれについて成り立つ． したがって，ディフラクションポテンシャル， ラディエーションポテンシャルについてそれぞれ流体領域 Ω における基礎方程式と，自由表面 S_F，水底 S_B，浮体表面 S_V，原点からの水平距離を R としたときの無限遠方 $(R \to \infty)$，での各境界条件が以下のように得られる．

ディフラクション probelm

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial^2\phi_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi_d}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi_d}{\partial z^2} &= 0\ (in\ \Omega)\\
\frac{\partial\phi_d}{\partial z} - \frac{\phi_d\omega^2}{g} &= 0\ (on\ S_F)\\
\frac{\partial^2\phi_d}{\partial z} &= 0\ (on\ S_B)\\
\frac{\partial\phi_d}{\partial n} &= v_7\ (on\ S_v)\\
\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\{\frac{\partial\phi_d}{\partial R} - ik_0\phi_d\} &= 0\ (whenR \to \infty)
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

ラディエーション probelm

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial^2\phi_l^r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi_l^r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi_l^r}{\partial z^2} &= 0\ (in\ \Omega)\\
\frac{\partial\phi_l^r}{\partial z} - \frac{\phi_l^r\omega^2}{g} &= 0\ (on\ S_F)\\
\frac{\partial\phi_l^r}{\partial z} &= 0\ (on\ S_B)\\
\frac{\partial\phi_d}{\partial n_j} &= v_j\ (on\ S_v)(j = 1 \sim 6)\\
\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\{\frac{\partial\phi^r}{\partial R} - ik_0\phi^r\} &= 0\ (whenR \to \infty)
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

ここに，n_j は浮体の j 方向に対する単位法線ベクトルである．さらに浮体表面の条件として与えられる複素流速 $v_j(j = 1, 2, \cdots, 6)$ 次式より計算される．

$$\left.\begin{aligned}
v_1 &= -i\omega X_1 n_x\\
v_2 &= -i\omega X_2 n_y\\
v_3 &= -i\omega X_3 n_z\\
v_4 &= -i\omega X_4[(y - y_G)n_z - (z - z_G)n_y]\\
v_5 &= -i\omega X_5[(z - z_G)n_x - (x - x_G)n_z]\\
v_6 &= -i\omega X_6[(x - x_G)n_y - (y - y_G)n_x]
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

また， ディフラクション problem における v_7 は入射ポテンシャルの法線方向微分として以下のように与えられる．

$$v_7 = \frac{\partial\phi_0}{\partial n} \tag{7}$$

式 (5),(4) をそれぞれ特異点分布法を用いて数値的に解く。その際、用いる Green 関数は Laplce 方程式，自由表面の条件, 水底の条件, 放射条件を満足するように決定される.Q 点 $(\eta.\xi)$ に単位強さのわき出しがあるとき P 点 (x,y,z) に誘起されるポテンシャルは Green 関数 G(P,Q) を用いて表わされる．G(P,Q) は P,Q の座標の他に水深 h, 波数 k, 波周波数 ω に依存する関数となる． この場合の Green 関数は，P,Q の距離によって 2 種類の Green 関数を使い分ける． すなわち, 積分形の Green 関数と級数形の Green 関数を用いる．級数形の Green 関数は収束が速いが， P が Q に一致する場合には発散する可能性があるため積分形の Green 関数を用いる．それぞれ次のように与えられる。

・級数形 *Green* 関数

$$\begin{aligned}
G(P,Q) &= \frac{2\pi(v^2 - h^2)}{k^2h - v^2h + v}\cosh[k(\zeta + h)]\cosh[k(z + h)]\cdot\\
&[Y_0(kR) - iJ_0(kR)]\\
&+4\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(k_n^2 + v^2)}{k_n^2h + v^2h - v}\cos[k_n(z + h)]\cos[k_n(\zeta + h)]\cdot K_0(k_nR)
\end{aligned} \tag{8}$$

・積分形 *Green* 関数

$$\begin{aligned}
G(P,Q) &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\\
&+2P.V.\int_0^{\infty}\frac{(\mu + v)e^{-\mu k}\cosh[\mu(\zeta + h)]\cosh[\mu(z + h)]}{(\mu\sinh\mu k - v\cosh\mu k)}\\
&\times J_0(\mu R)d\mu\\
&+2\pi\frac{(k^2 - v^2)\cosh[k(\zeta + k)]\cosh[k(z + h)]}{(k^2h - v^2h + v)}J_0(kR)d\mu
\end{aligned} \tag{9}$$

次に流体中に存在する構造物には， 波の作用による波圧，波力と構造物が動揺した時に流体から受ける動水圧が働く． 波力は波圧を構造物表面で積分することにより求めることができる． 波圧は構造物が動かない仮定のもとで入射波の散乱波すなわちディフラクションポテンシャルと既知である入射波のポテンシャルの和から求められる． 動水圧は運動方程式を解く都合上， 付加質量と減衰係数として用いることが多い．付加質量力は構造物が水中で運動する場合， 周りの流体も伴って運動することになり， あたかも質量が付加された現象を表現している．また， 構造物は水面近傍で運動し，

水面に擾乱を与え，外面に発散していく波を発生させる． このような力を造波減衰力という． この流体力は付加質量力と造波減衰力はラディエーション流体力と呼ばれ， 波周波数に依存しており， 付加質量力は加速度, 造波減衰力は速度にそれぞれ比例する．ラディエーション流体力 F^R はラディエーションポテンシャルを用いて次式のように物体表面で積分とすると求められる．

$$\left.\begin{aligned} F_{ij}^R =& Re\left[\omega^2\rho\int_S X_j^0\phi_j^r n_i ds\exp^{-i\omega t}\right] \\ =& -\rho\int\left\{Re(\phi_j^r)\ddot{X}_0 + \omega Im(\phi_j^r)X_0\right\}n_i ds \\ =& -\rho\int\left[\left\{Re(\phi_j^r)n_i\right\}\ddot{X}_0 + \omega\left\{Im(\phi_j^r)n_i\dot{X}_0\right\}\right]ds \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

ここで， X_j^0：構造物の j モードの動揺振幅 (実数) である． 上式を付加質量係数 M_{ij} および造波減衰係数 N_{ij} を用いて表すと次のようになる．

$$F_{ij}^R = -M_{ij}\ddot{X} - N_{ij}\dot{X} \tag{11}$$

したがって， 付加質量係数 M_{ij}， 造波減衰係数 N_{ij} は次式で与えられる．

$$\left.\begin{aligned} M_{ij} =& \rho\int Re(\phi_j^r)n_i ds \\ =& \rho\sum_{k=1}^{m}\int_{s_k} Re(\phi_j^r)n_i ds \\ N_{ij} =& \rho\omega\int Im(\phi_j^r)n_i ds \\ =& \rho\sum_{k=1}^{m}\int_{s_k} Im(\phi_j^r)n_i ds \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

3. 1 質点系の運動方程式の解法

これまでに示してきた浮体に作用する付加質量係数, 造波減衰力係数および不規則波力を用いて運動方程式を構築する． 付加質量， 造波減衰力および波力は浮体の重心点において求めているため重心点における運動方程式を構成する．浮体を 1 質点系の 3 次元運動とした場合の時間領域における運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} &(\boldsymbol{m} + \boldsymbol{M}(\infty))\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{x}} + (\boldsymbol{C} + \boldsymbol{G})\boldsymbol{x} \\ &+ \int_{-\infty}^{t}\boldsymbol{L}(t-\tau)\dot{\boldsymbol{x}}(\tau)d\tau = \boldsymbol{F}(t) \end{aligned} \tag{13}$$

ここで $\boldsymbol{x}$ は浮体の変位,$\boldsymbol{m}$,$\boldsymbol{C}$,$\boldsymbol{D}$ は浮体の一般化質量, 復原力, 粘性減衰 Matrix,$\boldsymbol{G}$ は係留系の剛性 Matrix をそれぞれ表す。また,$\boldsymbol{M}(\infty)$,$\boldsymbol{L}(t)$ は浮体の不変付加質量および遅延関数であり, それぞれ次式で与えられる。

$$\boldsymbol{L}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\boldsymbol{N}(\sigma)\cos\sigma t d\sigma \tag{14}$$

$$\boldsymbol{M}(\infty) = \boldsymbol{M}(\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_0}\int_0^{\infty}\boldsymbol{L}(t)\sin\sigma_0 t dt \tag{15}$$

ここで,$\boldsymbol{M}(\sigma)$,$\boldsymbol{N}(\sigma)$ はそれぞれ波周波数 σ における付加質量と造波減衰係数である。式 (13) では浮体の運動が不規則であるため波周波数に依存しない不変付加質量 $\boldsymbol{M}(\infty)$ と遅延関数 $\boldsymbol{L}(t)$ による減衰を評価している時間領域における運動方程式である。遅延関数 $\boldsymbol{L}(t)$ は久保ら [6] に従い, 高周波数領域において造波減衰係数を周波数の近似を導入し, 低周波数側は数値積分, 高周波数側は解析的積分を用いて求める。不変付加質量は遅延関数が周期的に収束する関数である性質を考慮し, 式 (15) の積分範囲は 0 から遅延関数有効時間 t_e 範囲までの時間積分として求める。さらに, 式 (13) における右辺第 3 項に関しても遅延関数の周期性を考慮して次式のように時間積分範囲を 0 ~ t_e とした。

$$\int_{-\infty}^{t}\boldsymbol{L}(t-\tau)\dot{\boldsymbol{x}}(\tau)d\tau = \int_0^{t_e}\boldsymbol{L}(t-\tau)\dot{\boldsymbol{x}}(\tau)d\tau \tag{16}$$

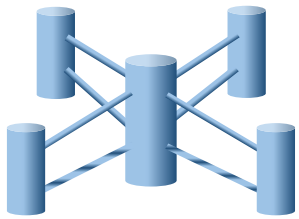
式 (16) における t は現在求めようとしている時刻 t を表し, この畳み込み積分は現在より過去に時刻 t_e 遡って積分し, 減衰項として表している。したがって,Newmark-β 法を用いた時間積分スキームでの各時間 step において上式の畳み込み積分を行う。ただし, 本論では台形公式を用いた。

4. 弾性変形を考慮した運動方程式

次に図 2 に示すセミサブ形状の浮体について考える。弾性変形を考慮する部材について図 3 に示すように流体力を求めるモデルと動的解析を行うモデルに分けて考える。したがって, 動的解析を行う場合は, 各要素の流体力を用いて, 要素毎の運動方程式を構築する必要がある。

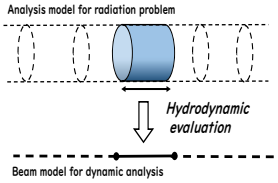
$$\begin{aligned} &\left(\boldsymbol{m}_i^e + \boldsymbol{M}_i^e(\infty)\right)\ddot{\boldsymbol{x}}_i^e + \boldsymbol{D}_i\dot{\boldsymbol{x}}_i^e + \boldsymbol{k}_i^e\boldsymbol{x}_i^e \\ &+ \int_0^{t_e}\boldsymbol{L}_i^e(t-\tau)\dot{\boldsymbol{x}}_i^e(\tau)d\tau = \boldsymbol{F}_i^e(t) \end{aligned} \tag{17}$$

ここで,$\boldsymbol{x}_i^e$,$\boldsymbol{m}_i^e$,$\boldsymbol{k}_i^e$ は i 番目梁要素の要素変位, 要素質量および要素剛性 Matrix である。さらに $\boldsymbol{M}_i^e(\infty)$,$\boldsymbol{L}_i^e(t)$ は i 番目要素の要素不変付加質量および造波減衰係数を用いて導出した要素遅延関数である。なお,$\boldsymbol{F}_i^e(t)$ はその要素に作用する動的要素波力である。式 (17) より右辺第 3 項の要素遅延関数に関して時間 t_e 遡る時間積分を行う必要がある。浮体を 1 質点系で考えた場合では各時間 Step で 1 回のみの計算で十分であったが, 弾性変形を考慮した場合では, 各要素において, 要素造波減衰係数および要素速度 $\dot{\boldsymbol{x}}^e$ が異なるため全要素で要素遅延関数に関する積分を行う必要があり, 膨大な計算量が生じる。



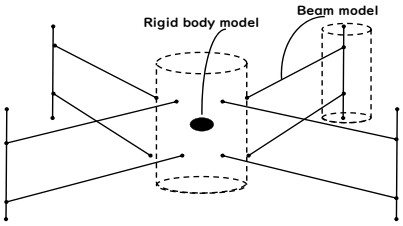
図–2 セミサブ形状の浮体

そこで本論では動的解析においてはすべての構造を弾性変形部材とみなさず, 従来通りの浮体の運動を剛体



図–3 弾性変形部材のモデル化

運動とみなせる 1 質点系部材と分けて考えるモデルを考えた。図 4 はその一例。



図–4 剛体モデルと弾性変形モデルのハイブリッドモデル

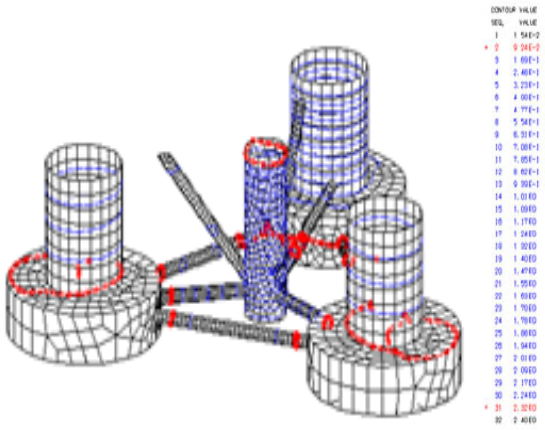
その際の 1 質点系の運動方程式は (13) に示した通りである。ここにおいても遅延関数による時間積分は行われるが 1 質点系であるため, 大幅に計算量が減少される。

次に弾性部材の質量および剛性より構成される式 (17) において要素不変付加質量と要素遅延関数が及ぼす数値的効果を検討する必要がある。これらを検証するため, 図 5[7] に示すセミサブの浮体に対し, 弾性変形部材の径のみを変化させて得られる要素付加質量と要素造波減衰係数を求め, その影響を調べた。これらを検証す

図–5 流体力検証の浮体形状

るため, 図 5[7] に示すセミサブの浮体に対し, 弾性変形部材の径のみを変化させて得られる要素付加質量と要素造波減衰係数を求め, その影響を調べた。

図 6 では波向き 270 度入射の場合のポテンシャルコンター図を示す。



図–6 ポテンシャルコンター図 (波向き 270 度入射)

5. おわりに

本論では弾性変形を考慮した浮体の運動方程式について検討を行った。動的解析モデルでは従来の 1 質点系モデルと弾性変形モデルを組み合わせた解析モデルを示した。また, 弾性変形モデルにおける運動方程式に対する要素不変付加質量と要素遅延関数の影響を検討するため, セミサブ形状の浮体に対し, 弾性変形部材の大きさを変化させて, その効果を調べた。

参考文献

[1] 眞鍋尚, 遅延関数を用いた浮体の動揺シミュレーション, 富士総研技報, **8**, 116(2003)

[2] 坂本大樹, 吉村英人, 眞鍋尚, 浮体式洋上風力発電に関わる数値シミュレーションの利用状況と MHRT の取り組み, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, **2** No. 1(2022).

[3] ファム バン フック, 石原孟, セミサブ浮体式洋上風力発電システムの動的応答予測モデルの開発と実験による検証, 土木学会論文集 A, **65**(2009),601.

[4] 福王翔, 流体力モデルによセミサブ型浮体式洋上風車の動的応答への影響, 土木学会論文集 A, **75**(2019),I-539.

[5] 福王翔, 飯島一博, 鈴木英之, ポテンシャル論を使用した浮体式風車支持物の三次元弾性モデルの時刻歴解析, 風力エネルギー利用シンポジウム論文集,**41**(2019),18.

[6] 久保雅義, 岡本俊策, 岸壁直前係留浮体の遅延関数を用いた時系列解析の精度向上に関する研究, 海岸工学論文集, **34** (1987),611.

[7] A.Robertson, J.Jonkman, M.Masciola, *et.al.*, Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4, NREL(2014).

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

複数浮体の動揺解析における遅延関数の効果について

The effect of memory function in Numerical simulation for multiple floating bodies

坂本大樹[1)]，眞鍋尚[2)]，室井謙吾
Daiki Sakamoto, Takashi Manabe and Kengo Muroi

1) 修士(工) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3 , E-mail: daiki.sakamoto@mizuho-rt.co.jp)
2) 博士(工学) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3 , E-mail: takashi.manabe@mizuho-rt.co.jp)
3) 修士(工) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3 , E-mail: kengo.muroi@mizuho-rt.co.jp)

In recent years, offshore wind turbines have been attracting attention as part of renewable energy, but considering the construction and inspection, it is necessary to analyze the fluctuation of multiple floating bodies considering both the floating bodies and ships at the same time. In this paper, we introduce an example of motion analysis using the memory function for multiple floating bodies, and examine the effect of introducing the delay function type motion equation.

Key Words : *multiple floating bodies, retardation function method, offshore wind turbines*

1.　はじめに

近年，再生エネルギーの一環として注目を浴びている分野の一つとして洋上風力発電が挙げられ，例えば経済産業省が中心となり，関係省庁と連携して策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では，電力部門の脱炭素化の柱の一つとして，洋上風力発電を取り上げ，2030年10GW，2040年30～45GWの案件形成を導入目標としている．2023年4月現在では， 4海域に対して事業者選定のための公募がなされている段階であり，今後も導入が進んでいくと考えられる．

そのような洋上風力発電であるが，今後発電施設の建設，運用を考えた際には，施工時や点検時に洋上風車などの浮体本体と作業船それぞれが波力等を受けて動揺することが想定される．安全性の確保のためにはそれらの挙動を同時に考慮した複数浮体の動揺特性を把握する必要であるといえ，その際にはシミュレーション技術による浮体動揺解析が果たす役割は大きい．

一般に浮体の動揺解析に用いられる運動方程式は周波数一定型運動方程式と遅延関数型運動方程式[1]があるが，前者が周波数領域における運動方程式である一方で，後者は時間領域における運動方程式であり，浮体が動揺することによる流場の周波数無限大に対応する不変付加質量を用い，遅延関数を用いて過去の影響を取り入れていることに特徴がある．

遅延関数型運動方程式では浮体の長周期動揺含めた計算が可能であるため，単一の浮体に対する浮体動揺の計算では主流となっており，過去の検討事例としては，久保ら[2,3]が遅延関数および不変付加質量の精度向上の計算方法を提案し，岸壁前面の係留浮体を示した例や，井上[4]らが遅延関数型運動方程式を用いて反射波による動揺量に及ぼす影響を調べた例，笹ら[5]が観測値との比較を示し，遅延関数型運動方程式による動揺量が周波数一定型より精度よく長周期動揺を再現していることを明らかにした例などが挙げられるが基本的には単一の浮体を対象としている．一方で複数浮体の動揺解析については，斎藤[6]などの周波数一定型運動方程式に基づく事例があるが，遅延関数型運動方程式を用いた事例は少ないのが現状である．そこで本論では複数浮体における遅延関数型運動方程式を用いた動揺解析事例について紹介し，遅延関数型運動方程式を導入する効果について検討する．

2.　複数浮体における流体力・波力の算出

一般的な浮体動揺計算では，設定した浮体形状に対して，時系列シミュレーションを行う前に，流体力・波力を算出する必要がある．ここでは図-1に示すような複数浮体における流体力・波力の算出方法について説明する．

一般に，複数浮体における速度ポテンシャルは以下のようにおくことができる．

$$\phi(\mathrm{x,y,z,t}) = \left[\frac{g\xi_0}{\omega}\{\phi_0(x,y,z) + \phi_d(x,y,z)\} + \sum_{j=1}^{6}\frac{gX}{\omega}\phi_{Aj}{}^{r}(x,y,z) + \sum_{j=1}^{6}\frac{gX}{\omega}\phi_{Bj}{}^{r}(x,y,z)\right]e^{-i\omega t} \quad (1)$$

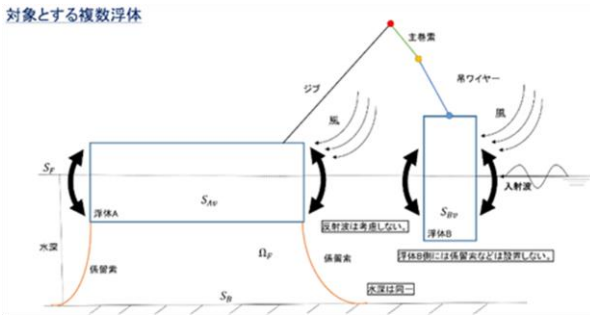


図-1 複数浮体イメージ図

ここで，ϕ_0：入射波ポテンシャル，ϕ_d:浮体A,Bのdiffraction potential，${\phi_{Aj}}^r$:浮体Aにおけるjモード運動のradiation potential，${\phi_{Bj}}^r$:浮体Bにおけるjモード運動のradiation potentialであり，ϕ_0は以下のように表される．

$$\phi_0(x,y,z)=-i\frac{g\eta}{\omega}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}e^{-ik(x\cos\beta+y\sin\beta)} \tag{2}$$

なおi,jは1~6の値をとり，6自由度の運動を示す．各値が示す方向は以下のように定義した．

$$\begin{aligned} i=1&:\text{Surge}\ (\text{x 方向並進運動})\\ i=2&:\text{Sway}\ (\text{y 方向並進運動})\\ i=3&:\text{Heave}\ (\text{z 方向並進運動})\\ i=4&:\text{Roll}\ (\text{x 軸回り回転運動})\\ i=5&:\text{Pitch}\ (\text{y 軸回り回転運動})\\ i=6&:\text{Yaw}\ (\text{z 軸回り回転運動}) \end{aligned} \tag{3}$$

ただし，回転は軸方向右回りを正とする．

ϕ_d，${\phi_{Aj}}^r$，${\phi_{Bj}}^r$ それぞれについて，それぞれ流体領域Ωにおける基礎方程式と，自由表面S_F，水底S_B，浮体表面S_{AV}・S_{BV}，SV，原点からの水平距離をRとしたときの無限遠方(R→∞)での各境界条件が以下のように得られる．

○ディフラクションϕ_d

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2\phi_d}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi_d}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi_d}{\partial z^2}=0\ (in\ \Omega)\\ &\frac{\partial\phi_d}{\partial z}-\frac{\phi_d\omega^2}{g}=0 \qquad (on\ S_F)\\ &\frac{\partial\phi_d}{\partial z}=0 \qquad (on\ S_B)\\ &\frac{\partial\phi_d}{\partial n}=v_7 \qquad (on\ S_{Av},S_{Bv}\ )\\ &\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial\phi_d}{\partial R}-ik_0\phi_d\right)=0 \quad (when\ R\to\infty) \end{aligned} \tag{4}$$

○ラディエーション${\phi_{Aj}}^r$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2{\phi_{Aj}}^r}{\partial x^2}+\frac{\partial^2{\phi_{Aj}}^r}{\partial y^2}+\frac{\partial^2{\phi_{Aj}}^r}{\partial z^2}=0\ (in\ \Omega)\\ &\frac{\partial{\phi_{Aj}}^r}{\partial z}-\frac{{\phi_{Aj}}^r\omega^2}{g}=0 \qquad (on\ S_F)\\ &\frac{\partial{\phi_{Aj}}^r}{\partial z}=0 \qquad (on\ S_B)\\ &\frac{\partial{\phi_{Aj}}^r}{\partial n}=v_{A,j} \qquad (on\ S_{Av})\\ &\frac{\partial{\phi_{Bj}}^r}{\partial n}=0 \qquad (on\ S_{Bv})\\ &\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial{\phi_{Aj}}^r}{\partial R}-ik_0{\phi_{Aj}}^r\right)=0\ (when\ R\to\infty) \end{aligned} \tag{5}$$

○ラディエーション${\phi_{Bj}}^r$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2{\phi_{Bj}}^r}{\partial x^2}+\frac{\partial^2{\phi_{Bj}}^r}{\partial y^2}+\frac{\partial^2{\phi_{Bj}}^r}{\partial z^2}=0\ (in\ \Omega)\\ &\frac{\partial{\phi_{Bj}}^r}{\partial z}-\frac{{\phi_{Bj}}^r\omega^2}{g}=0 \qquad (on\ S_F)\\ &\frac{\partial{\phi_{Bj}}^r}{\partial z}=0 \qquad (on\ S_B)\\ &\frac{\partial{\phi_{Aj}}^r}{\partial n}=0 \qquad (on\ S_{Av})\\ &\frac{\partial{\phi_{Bj}}^r}{\partial n}=v_{B,j} \qquad (on\ S_{Bv})\\ &\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\frac{\partial{\phi_{Bj}}^r}{\partial R}-ik_0{\phi_{Bj}}^r\right)=0\ (when\ R\to\infty) \end{aligned} \tag{6}$$

なお，$n_{k,j}$は浮体kのj方向に対する単位法線ベクトルであり，浮体表面の条件として与えられる複素流速$v_{k,j}$（j＝1，2，・・6)は浮体kの重心位置の変動量$X_{k,1}$~$X_{k,3}$および重心まわりの回転角$X_{k,4}$~$X_{k,6}$を用いて次式により計算される．

$$\begin{aligned} v_{k,1}&=-i\omega X_{k,1}n_{k,x}\\ v_{k,2}&=-i\omega X_{k,2}n_{k,y}\\ v_{k,3}&=-i\omega X_{k,3}n_{k,z}\\ v_{k,4}&=-i\omega X_{k,4}[(y-y_G)n_{k,z}-(z-z_G)n_{k,y}]\\ v_{k,4}&=-i\omega X_{k,5}[(z-z_G)n_{k,x}-(x-x_G)n_{k,z}]\\ v_{k,4}&=-i\omega X_{k,6}[(x-x_G)n_{k,y}-(y-y_G)n_{k,x}] \end{aligned} \tag{7}$$

また，ディフラクションϕ_dにおけるv_7は入射ポテンシャルの法線方向微分として以下のように与えられる．

$$v_7=\frac{\partial\phi_0}{\partial n} \tag{8}$$

上記の条件に基づきLaplace方程式を解いたうえで，各浮体に働く流体力波力をそれぞれ求めることになる．浮体A，浮体Bそれぞれに働く波力は式(9)のように表される．

$$F_j^{A^d} = -\rho(i\omega)\int_{SA}(\phi_0+\phi_d)n_{Aj}ds$$
$$F_j^{B^d} = -\rho(i\omega)\int_{SB}(\phi_0+\phi_d)n_{Bj}ds \tag{9}$$

また流体力として, 浮体A, 浮体Bそれぞれの付加質量M, 減衰係数Nは式(10), (11)のように表される．なお，添え字のAiBjはBのjモードの揺れがAのiモードの揺れに作用する力を示す.

$$M_{AjAi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SA}Im(\phi_{Aj}^r)n_{Ai}ds$$
$$M_{AjBi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SA}Im(\phi_{Bj}^r)n_{Ai}ds$$
$$M_{BjAi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SB}Im(\phi_{Aj}^r)n_{Bi}ds \tag{10}$$
$$M_{BjBi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SB}Im(\phi_{Bj}^r)n_{Bi}ds$$

$$N_{AjAi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SA}Re(\phi_{Aj}^r)n_{Ai}ds$$
$$N_{AjBi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SA}Re(\phi_{Bj}^r)n_{Ai}ds$$
$$N_{BjAi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SB}Re(\phi_{Aj}^r)n_{Bi}ds \tag{11}$$
$$N_{BjBi}=\frac{\rho}{\omega}\int_{SB}Re(\phi_{Bj}^r)n_{Bi}ds$$

3. 運動方程式

２で求めた流体力・波力を用いて時系列シミュレーションを行う．その際用いられる運動方程式は上述のとおり，周波数一定型運動方程式と遅延関数型運動方程式がある. 単一浮体の場合, 周波数一定型運動方程式は, 式(12)に示すとおりである.

$$\sum_{i=1}^{6}\{M_{ij}(\sigma_0)+m_{ii}\}\ddot{x}_i+\sum_{i=1}^{6}\{N_{ij}(\sigma_0)+D_{ij}\}\dot{x}_i + \sum_{i=1}^{6}(C_{ii}+G_{ii})x_i = F_j(t) \tag{12}$$

ここで，m_{ii} : 質量マトリクス，N_{ij} : 減衰マトリクス，C_{ij} : 復元力, G_{ij} : 剛性マトリクス, F_j : 浮体に働く外力を示す.
また，遅延関数型運動方程式は式(13)に示すとおりである.

$$\sum_{i=1}^{6}\{M_{ij}(\infty)+m_{ii}\}\ddot{x}_i+\sum_{i=1}^{6}\left\{\int_{-\infty}^{t}L_{ij}(t-\tau)\dot{x}_i d\tau+D_{ij}\dot{x}_i\right\} + \sum_{i=1}^{6}(C_{ij}+G_{ij})x_i = F_j(t) \tag{13}$$

$$M_{ij}(\infty) = M_{ij}(\sigma_0)+\frac{1}{\sigma_0}\int_0^{\infty}L_{ij}(t)sin\sigma_0 t dt \tag{14}$$

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}N_{ij}(\sigma)cos\sigma t d\sigma \tag{15}$$

周波数一定型運動方程式が特定の周波数σ_0についての運動方程式となっているのに対して，遅延関数型運動方程式は不変付加質量$M_{ij}(\infty)$や遅延関数$L_{ij}(t)$を用いることで，全周波数に対する運動方程式となっている.

一方，これらの運動方程式を複数浮体に適用する場合を考えると，まず周波数一定型運動方程式の場合は，式(16)のようになる．なお添え字のi'，j'は1～6が船舶の6自由度の動揺を，7～12が吊荷の6自由度の動揺を示している.

$$\sum_{i'=1}^{12}(M'_{i'j'}(\sigma_0)+m_{i'i'})\ddot{x}_{i'}(t)+\sum_{i'=1}^{12}(N'_{i'j'}(\sigma_0) + D_{i'j'})\dot{x}_{i'}(t)+\sum_{i'=1}^{12}(C_{i'j'}+G_{i'j'})x_{i'}(t) = F_{j'}(t) \tag{16}$$

また，M'_{ij} ，N'_{ij} ，$m_{i'j'}$，$C_{i',j'}$はそれぞれ以下のように表される．ここで，I_x ，I_y ，I_z は慣性モーメントを，$K_{i,j}$は復元力係数をそれぞれ表す.

$$M'_{ij}(\sigma_0) = \begin{pmatrix} M_{AjAi} & M_{AjBi} \\ M_{BjAi} & M_{BjBi} \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$N'_{ij}(\sigma_0) = \begin{pmatrix} N_{AjAi} & N_{AjBi} \\ N_{BjAi} & N_{BjBi} \end{pmatrix} \tag{18}$$

$$m_{i'j'} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} m^A & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & m^A & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & m^A & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & I_x^A & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & I_y^A & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & I_z^A \end{matrix} & 0 \\ 0 & \begin{matrix} m^B & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & m^B & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & m^B & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & I_x^B & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & I_y^B & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & I_z^B \end{matrix} \end{pmatrix} \tag{19}$$

$$C_{i',j'} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} 0 & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & 0 & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & K_{33}^A & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & K_{44}^A & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & K_{55}^A & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & 0 \end{matrix} & 0 \\ 0 & \begin{matrix} 0 & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & 0 & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & K_{33}^B & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & K_{44}^B & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & K_{55}^B & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & 0 \end{matrix} \end{pmatrix} \tag{20}$$

遅延関数型運動方程式の場合は，単一浮体の場合と同様に式(14)，式(15)によりそれぞれの項で不変付加質量$M_{ij}(\infty)$と遅延関数$L_{ij}(t)$を求めればよく，最終的に解く運動方程式は式(21)のようになる.

$$\sum_{i'=1}^{12}(M'_{i'j'}(\infty)+m_{i'i'})\ddot{x}_{i'}(t)+\sum_{i'=1}^{12}\left\{\int_{-\infty}^{t}L_{i'j'}(t-\tau)\dot{x}_{i'}d\tau + D_{i'j'}\dot{x}_{i'}\right\}+\sum_{i'=1}^{12}(C_{i'j'}+G_{i'j'})x_{i'}(t) = F_{j'}(t) \tag{21}$$

4. 動揺解析事例

本章では複数浮体に対して，遅延関数型運動方程式を用いて動揺計算を行った例を示す．

解析対象は，大型船舶と船舶から吊られる吊荷とし，図-2に示すとおり形状を設定した．なおここでは船舶および吊荷は矩形として表現し，喫水面以下に計算用のメッシュを作成した図を示している．設定した浮体形状に対して，流体力・波力を算出したうえで，表-1に示す設定条件にて遅延関数型運動方程式を用いて動揺シミュレーションを行った結果を図-3に示す．なお流体力・波力の算出は3次元特異点分布法によって行っており，波浪は不規則波とした．また波浪以外の外力は検討しなかった．本ケースでは吊荷から船舶方向の向きに平行に波向を設定しているため，Surge，Heave，Pitch方向の動揺が確認できることが分かる．

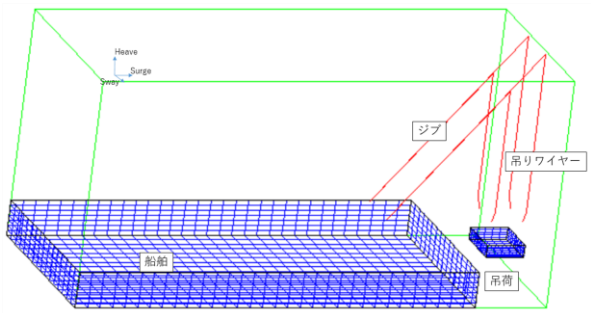


図-2 複数浮体形状設定例

表-1 その他計算条件

項目	設定内容
波浪スペクトル	ブレッドシュナイダー・光易型
有義波高	1.2 m
有義波周期	10秒
波向	0° （吊荷→船舶方向）
係留索	鋼製ワイヤー×4本
計算時間	600秒
計算時間刻み	0.01秒

5. おわりに

本論文では，洋上風力発電の施工時や点検時などに想定される，洋上風車などの浮体本体と作業船といった複数浮体において，遅延関数型運動方程式を用いた場合の動揺計算の流れを整理した．また，そのうえで遅延関数型運動方程式を用いた複数浮体の動揺計算事例を紹介した．

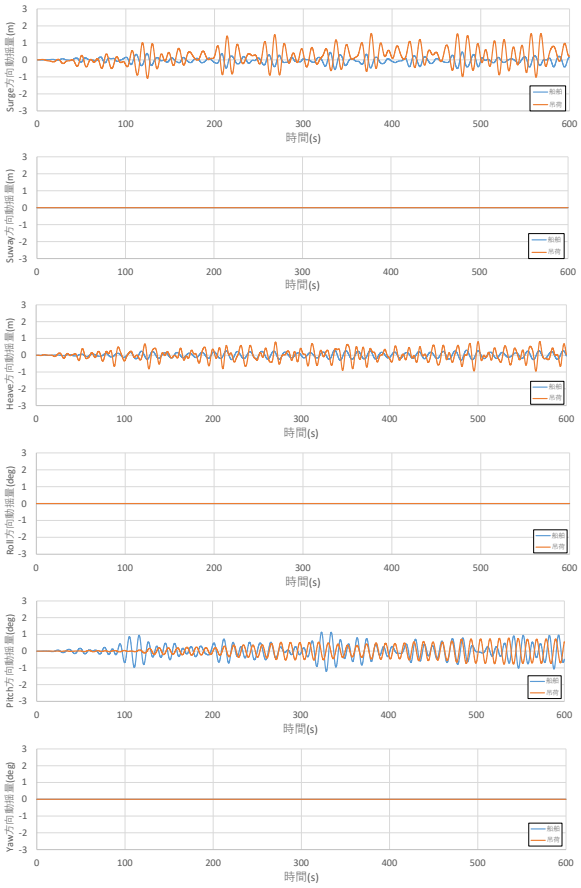


図-3 動揺量計算結果

参考文献

[1] 土木学会: 海岸波動，1996.
[2] 久保雅義, 岡本俊策: 岸壁直前における三次元浮体の流体力係数の周波数特性について，日本航海学会論文集，77，33，1987.
[3] 久保雅義，斎藤勝彦，下田直克，岡本俊策: 岸壁直前係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について，海岸工学論文集，35，687，1988.
[4] 井上義行, 杉山裕樹 : 任意反射率岸壁付近に係留された浮体の運動と係留力の３次元解析，海岸工学論文集，36，739，1989.
[5] 笹健児，白石悟，榊原繁樹 : 係留船舶の長周期動揺の各種数値計算法による再現性に関する比較検討，港湾技術資料，931，1999.
[6] 斎藤勝彦，2浮体動揺よりみた港内静穏に関する基礎的研究，大阪大学博士論文，1991
[7] 眞鍋尚 : 遅延関数を用いた浮体の動揺シミュレーション，富士総研技報，第８巻第１号，116-131，2003.
[8] 坂本大樹，吉村英人，眞鍋尚 : 浮体式洋上風力発電に関わる数値シミュレーションの利用状況とMHRTの取り組み, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, Vol. 2 No. 1，2022.

Proceedings of Computational Engineering Conference JSCES
Vol. 28, 2023 May

Wide-area River simulation using 1-m mesh resolution for sediment and flood damage prediction

Arce-Acuna Marlon[1)] 青木 尊之[2)] Shima Hirona[3)] Maya Yoshida[4)]

1) Researcher, Tokyo Institute of Technology (2-12-1 i7-3 Ookayama Meguro, Tokyo, E-mail: marlon.arce@sim.gsic.titech.ac.jp)
2) Professor, Tokyo Institute of Technology (2-12-1 i7-3 Ookayama, Meguro Tokyo, E-mail: taoki@gsic.titech.ac.jp)
3) Researcher, Sabo & Landslide Technical Center
4) Researcher, Sabo & Landslide Technical Center

For a fast, high-resolution river flow, we solve the full shallow water equations using a novel third-order MUSCL numerical scheme accelerated on GPU. Sediment and gravel transportation effects are considered for flood and damage prediction using a benchmark river bed. These simulations were performed completely on GPU and achieved on real time.

Key Words : *Shallow water equations, GPU, River flow, Bed deformation*

1. INTRODUCTION

Flooding are disasters that represent a great risk and damage to cities and their citizens. In recent years, Japan has experienced an increase in river flooding [1], these events make it very important to find ways to forecast flooding.

There are several models that have tried to take on this research. Some one-dimensional models are MIKE11 [2] and HEC-RAS [3], some two-dimensional models include JFLOW [4] and LIS-FLOOD [5]. These represent all good research and efforts to model flooding, it is important to note that in most cases these models use simplifications in the equations or neglect terms in order to obtain fast results.

Since river beds naturally change their shape due to erosion, this effect is important to be studied and included in a model in order to get more accurate results. Some experiments and models [6], [7], have tried this by considering the bed deformation due to sediment particles.

We introduce a model that uses the full shallow water equations to simulate the river flow, with run-up treatment for accurate flooding simulation, as well as presenting the formulation for the river bed deformation.

2. NUMERICAL METHODS

In order to simulate the river flow, we utilize the full shallow water equations (SWE)

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y}=S_z+S_\tau+\boldsymbol{R} \tag{1}$$

$$Q=\begin{bmatrix} h \\ M \\ N \end{bmatrix}, F=\begin{bmatrix} M \\ M^2/h+gh^2/2 \\ NM/h \end{bmatrix}, G=\begin{bmatrix} N \\ MN/h \\ N^2/h+gh^2/2 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

where h stands for the water height, M and N are the momentum in the x and y direction respectively ($M=hu, N=hv$), z is the river bed, **S** is the source terms (bottom gradient and Manning friction force), **R** is the rainfall source term, g is gravity, and n is the Manning coefficient. The source terms are defined are

$$S_z=\begin{bmatrix} 0 \\ -gh\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right) \\ -gh\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right) \end{bmatrix},$$

$$S_\tau=\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}}\cdot M\sqrt{M^2+N^2} \\ \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}}\cdot N\sqrt{M^2+N^2} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

where R defines the prescribed rainfall rate [L/s].

These equations are solved using the third-order MUSCL scheme [8] and Local Lax-Friedrichs [9] for element reconstruction. The time integration is based on third-order TVD Runge-Kutta scheme. For the run-up inundation a thin layer technique is used. This method has proved stable, monotone and robust while providing accuracy and speed. For

a detail description of this method with benchmark results and practical applications see [10].

The rainfall term is computed using a Euler time integration, since rainfall data is usually reported in a coarse time and space resolutions, using a first-order integration deemed sufficient.

In order to simulate the river bed deformation due to the sediment, the governing equations [11] are

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda}\sum_i \left(\frac{\partial q_{bx,i}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by,i}}{\partial y}\right) = 0, \tag{4}$$

$$q_{b,i} = \sqrt{sgd_i^3}\left\{17\tau_{*,i}^{3/2}\left(1-\frac{\tau_{*c,i}}{\tau_{*,i}}\right)\left(1-\sqrt{\frac{\tau_{*c,i}}{\tau_{*,i}}}\right)\right\}P_i. \tag{5}$$

Where λ is the porosity of material of bed layer ($\lambda = 0.4$), s is the submerged weight of sediment (chosen as 1.65), $q_{b,i}$ is the sediment transport rate for each size particle i, d_i is the diameter of sediment class for rate for each size particle i. P_i is the fraction in percentage of particle size i in the bed, $\tau_{*,i}$ and $\tau_{*c,i}$ are non-dimensional shear stress of sediment and critical shear stress of sediment respectively. These last two values are computed using the expressions as follows [12],

$$\tau_{*,i} = \frac{u_*^2}{sgd_i}, \tag{6}$$

$$u_* = \sqrt{ghI_e}, \tag{7}$$

$$I_e = \frac{(u^2+v^2)\cdot n^2}{h^{4/3}}. \tag{8}$$

Additionally, it might be necessary to consider the local bed slope (θ) in order to get a more accurate simulation. For this purpose, the following expressions include the slope term (the equations are symmetrical for the y direction)

$$\tau_{*i} = \sqrt{\tau_{*xi}^2 + \tau_{*yi}^2} \tag{9}$$

$$\tau_{*xi} = \frac{u_{*x}\sqrt{u_{*x}^2 + u_{*y}^2}}{sgd_i} + \tau_{*gxi} \tag{10}$$

$$\tau_{*gxi} = \frac{\tau_{*coi}}{\mu_s} sin\theta_x \tag{11}$$

$$sin\theta_x = \frac{z[i-1] - z[i+1]}{\sqrt{(2\Delta x)^2 + \left[z[i-1] - z[i+1]\right]^2}} \tag{12}$$

These equations are solved using an upwind scheme, using the same stability condition for the SWE. Couple and decouple computations between the SWE and bed deformation were tried. Since the numerical results showed no significant difference, we chose to compute the equations separately for computational speed gain.

3. IMPLEMENTATION

1) Domain

In this study, we used two databases to study the river flow with rainfall and the sediment bed deformation.

The first database represents an area of $10{,}500 \times 6{,}000$ meters with a 1-m resolution. This was obtained from a region around the Sumiyoshi river using Lidar technology. The full domain can be seen in Fig. 3. Several of the river routes contain dikes, that have been installed to control the water flow. A second database is provided with the river routes in this area.

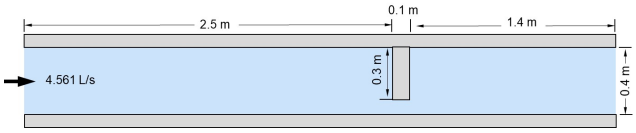


Fig. 1 Bed deformation benchmark description

The second domain describes the bed used to compute the sediment bed deformation [13]. This consist of a bed slope 1:30 of 2 m long and 40 cm wide. There is a block obstacle at 50 cm which is 10 cm wide and 30 cm long. The inflow at the left of the domain is 4.561 L/s, the outflow at the right of the domain is an open boundary.

2) Adaptive block-based computation

Since computing large domains can very computationally demanding, we took the approach to split the domain into blocks and to move to GPU only the blocks that required for active computation. Each block is of size16×16.

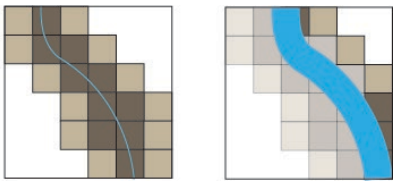


Fig. 2 GPU adaptive block-based computation schematic

All blocks remain on CPU memory. Initially only blocks that contain a river route are uploaded to GPU memory. As the simulation progresses, if the river flow grows or expand and it crosses the boundary of the existing block, then a new neighbor block is upload to GPU memory, this procedure can be seen in Fig. 2. For a more detailed description of this process see [14].

For the Sumiyoshi domain, the total number of blocks is 109,125. However, by using the technique previous described,

only 12,619 blocks are used on GPU memory, and from those 80933 are active blocks. These active blocks represent areas where the simulation is taking place, while the remaining 'inactive' blocks are used for boundary purposes.

3) GPU computation

As previously mentioned, all the computation is performed on GPU. To achieve these, the domain blocks uploaded to GPU memory are computed with a matching CUDA block. Additionally, several optimizations are introduced to compute the different equations and high performance, near peak is obtained.

When needed, in order to speed up the computation of large domains, multi-GPU is used. METIS library [15] is used in these cases to split the domain and obtain load balance for the GPU computation.

4. RESULTS

The first result presented is the river flow with rainfall simulation over the large 1-m resolution Sumiyoshi domain. For this simulation the value R = 0.001 is used.

Since the number of river routes for this area is in the hundreds, a manual initial condition for each route is not feasible. Instead, the domain starts with a dry river bed and the rainfall is used to fill out all the river routes until a steady flow is achieved. Once the steady flow is achieved, this state is stored and used as an initial condition for subsequent simulations.

Fig. 3 shows the Sumiyoshi simulation with the steady flow after running it with rainfall. The zoomed insert in the figure shows the outline of the active blocks as well as it shown the water flow behind a dike located in the river route.

All these computations were performed on GPU, using the University of Tokyo Supercomputer Wisteria-Aquarius, each node with eight A100 Nvidia cards and NVLINK network connection and InfiniBand HDR. Our results were achieved real-time using 2 and 4 GPUs, which makes it possible to use this model for forecasting if necessary.

The second result represents a benchmark to study the bed deformation by sediment. This is very important to incorporate the effect of real bed movement in rivers, particularly with the effect of dikes present in the routes

The initial benchmark has an inflow of 4.651 L/s that moves down a bed with slope 1:30 which contains a block at 50 cm (see Fig. 1). The simulation uses a uniform particle with diameter 0.746 cm. The simulation runs on single GPU real-time due to the size of this domain.

This benchmark is compared to the experimental version described in [13]. Some of the main observations from the experiment are that the water flow creates a "road" behind the mid-block, and that the deepest observed deformation was around 12 cm. Additionally, measurements were performed to present contours of the bed deformation and flow streamlines for the experiment.

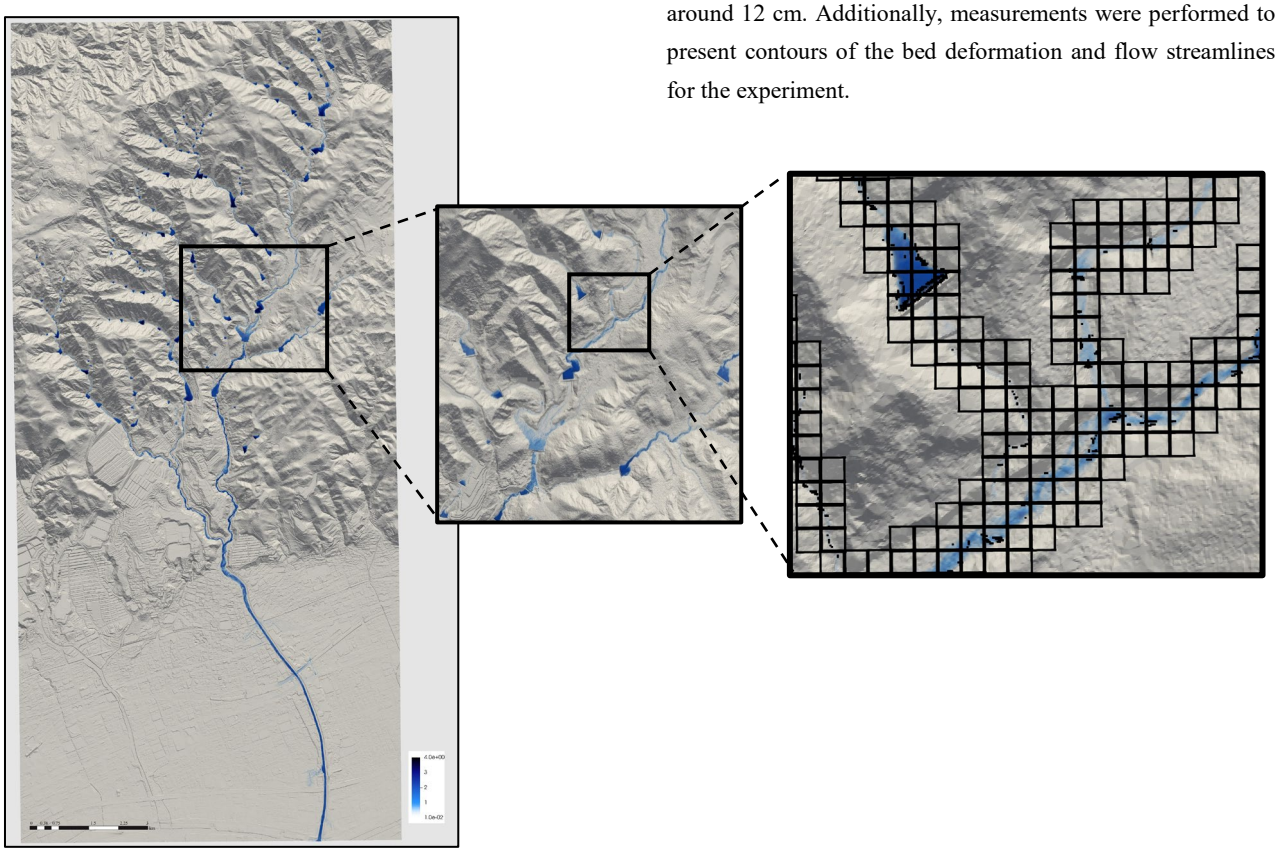


Fig. 3 Sumiyoshi water height of the simulated river flow with steady flow. Insert: sample domain progressive zoom

In our results, we observed a flow 'road' that created behind the mid-block, which is located in good agreement with the location of that reported in the experiment. In the case of the deepest deformation, our simulation obtained around 15.5 cm.

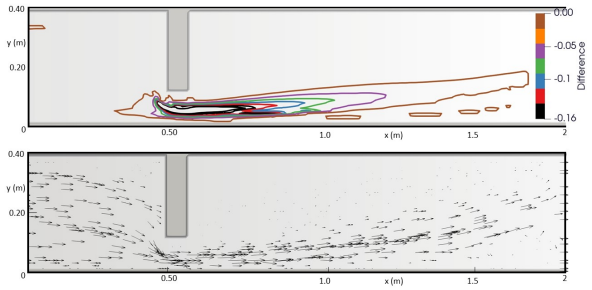


Fig. 4 Bed deformation (Top) and streamlines (Bottom) for sediment benchmark

These differences can be accounted by several factors, such as the numerical method and the boundary conditions used around the bed domain. Results of the flow streamlines and bed deformation contours are shown in Fig. 4 Top and Bottom respectively.

Even though not part of the experiment, in order to further study the effect of sediment on bed deformation, we simulated the same benchmark but using more than a single particle. In total, eight different sizes with their own fraction probabilities were used (see Table 1).

Size (mm)	Percentage (%)
300 >	0
75-300	5.2
19-75	65.8
4.75-19	13.2
2-4.75	5.5
0.85-2	3.1
0.25-0.85	4.5
0.075-0.25	1.9

Table 1 Sediment particle sizes and percentages

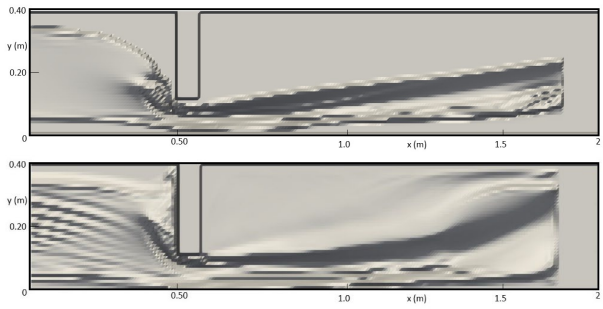


Fig. 5 Bed deformation on benchmark bed using single particle (Top) and multiple particles (Bottom)

The result of this simulation at a steady flow is shown in Fig. 5 bottom, and are compared with the case of a single particle Fig.5 top. As it can be seen, the movement of material of different sizes creates more deformation on the bed than when a single particle is used. Additionally, the deformation with several particles' sizes occurred over a much longer time compared to that of a single particle.

5. CONCLUSIONS

We were able to reproduce the river flow on a real domain using the full SWE. Introducing the rainfall term allowed not only a way to fill out a domain with hundreds of river routes but also to incorporate this value as part of a simulation where rain occurred. The results were obtained fully on GPU in real-time by using four GPUs. The adaptive block-based computation introduced allowed for a fast simulation while preserving the accuracy. The bed deformation simulation was achieved with single and multiple sediment particles and proved that this formulation can be used to simulate the evolution of the deformation on a more realistic and larger domain in the future.

REFERENCES

[1] "The Mainichi Newspaper," 11 August 2022. [Online]. Available: https://mainichi.jp/english/articles/20220811/p2a/00m/0na/005000c. [Accessed 30 September 2022].

[2] H. Danish Hydraulic Institute, MIKE 11 – A Modeling System for Rivers and Channels, 2009.

[3] B. G. W., HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Davis, CA.: Hydrologic Engineering Center, 2010.

[4] K. Bradbrook, "JFLOW: a multiscale two-dimensional dynamic flood model," *Water and environment journal,* Vols. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.00011.x, 2006.

[5] J. Shaw, G. Kesserwani, J. Neal, P. Bates and M. K. Sharifian, "LISFLOOD-FP 8.0: the new discontinuous Galerkin shallow-water solver for multi-core CPUs and GPUs," *Geosci. Model Dev,* vol. 14, no. https://doi.org/10.5194/gmd-14-3577-2021, p. 3577–3602, 2021.

[6] S. E. H. T. Xuan Loc Luu, "A new treatment of the exchange layer thickness to evaluate sediment sorting and armoring," *Journal of Applied Mechanics,* vol. 9, pp. 1025-1030, 2006.

[7] H. Z. H. T. C. Z. Luohao Zhang, "Particle size distribution of bed materials in the sandy river bed," *International Journal of Sediment Research,* vol. 32, pp. 331-339, 2017.

[8] S. Yamamoto and H. Daiguji, "Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier-Stokes equations," *Comput. Fluids,* vol. 22, pp. 259-270, 1993.

[9] R. J. LeVeque, Finite volume methods for hyperbolic problems, Cambridge, United Kingdom,: Cambridge University Press, 2002.

[10] M. Arce Acuña and T. Aoki, "Tree-based mesh-refinement GPU-accelerated tsunami simulator for real-

time operation," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci,* vol. 18, no. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2561-2018, pp. 2561-2602, 2018.

[11] M. Hirano, "River-bed degradation with armoring," in *Procs of JSCE*, 1971.

[12] M. Ashida and M. Michiue, "study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams," in *Procs of JSCE*, 1972.

[13] N. Kyoichi, M. Masanori and H. Osamu, "Simulation of bed evolution around contration in mountainous river," in *水工学論文集 40th*, 1996.

[14] A.-A. Marlon, A. Takayuki and H. Shima, "A real-time flood simulation with 1m-mesh simulation," in *CMD 35th Computational Mechanics Division Conference*, 2022.

[15] G. Karypis and V. Kumar, "“A Fast and Highly Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs”," *SIAM Journal on Scientific Computing,* vol. 20, no. 1, pp. 359-392, 1999.

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-04] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (4)

座長:樫山 和男(中央大学)

Wed. May 31, 2023 3:00 PM - 4:30 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-04-01] (キーノート講演)斜面安定解析結果を用いた豪雨による広域斜面崩壊の即時予測

*外里 健太[1]、野村 怜佳[2]、森口 周二[2]、寺田 賢二郎[2] （1. 八戸工業大学、2. 東北大学）

3:00 PM - 3:30 PM

[A-04-02] 有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析

*宮内 暖季[1]、深澤 一志[1]、樫山 和男[1] （1. 中央大学）

3:30 PM - 3:45 PM

[A-04-03] 下水道の簡易的なモデル化による内水氾濫解析手法の開発

*紺野 矩彦[1]、小笠原 敏記[1] （1. 岩手大学）

3:45 PM - 4:00 PM

[A-04-04] Implementing 2D shallow water equations to simulate debris flows using SPH

*Dolojan Nilo[1]、野村 怜佳[1]、森口 周二[1]、寺田 賢二郎[1] （1. 東北大学）

4:00 PM - 4:15 PM

[A-04-05] ロバスト主成分分析に基づく沖合津波観測点配置の最適化

*藤田 真粋[1]、野村 怜佳[1]、大竹 雄[1]、越村 俊一[1]、森口 周二[1]、寺田 賢二郎[1] （1. 東北大学）

4:15 PM - 4:30 PM

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

斜面安定解析結果を用いた 豪雨による広域斜面崩壊の即時予測

Rapid prediction of rainfall-induced landslides for a wide area using slope stability analysis results

外里健太 [1] 野村怜佳 [2] 森口周二 [3] 寺田賢二郎 [4]
Kenta Tozato, Reika Nomura, Shuji Moriguchi and Kenjiro Terada

[1] 八戸工業大学 工学部工学科（〒 031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1, E-mail: k-tozato@hi-tech.ac.jp）
[2] 東北大学 災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: nomura@irides.tohoku.ac.jp）
[3] 東北大学 災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: s_mori@irides.tohoku.ac.jp）
[4] 東北大学 災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp）

This study presents a framework that can rapidly predict rainfall-induced landslides for a wide area by creating a surrogate model for slope stability analysis. By combining infiltration analysis and three-dimensional slope stability analysis, the landslide risk is evaluated as a factor of safety. Using the numerical analysis results considering various rainfall scenarios and combining the mode decomposition technique as well as Gaussian process regression, a surrogate model for predicting the rainfall-induced landslides is constructed. In this study, applicability to the analysis of actual terrain is discussed.

Key Words : *Slope stability analysis, Surrogate model, Rapid prediction, Landslide*

1. 緒言

わが国では，毎年のように豪雨に起因する斜面崩壊が各地で発生している．近年の例でみても，2018 年の西日本豪雨で 2081 件，2019 年東日本台風で 952 件が報告されるなど，広域において多数の斜面崩壊が発生している．このような広域で発生する斜面崩壊による被害を軽減するためには，斜面の危険度を降雨の状況に合わせて即時的に予測可能な技術が必要である．

豪雨に起因する広域での斜面崩壊の既往研究例としては，過去の斜面崩壊の事例に基づいて，降雨強度と継続時間の閾値関数を設定する例 [1] や，過去の斜面崩壊データと地形地質特性，水文的特性，降水量などのデータを組み合わせて，統計的に斜面崩壊危険箇所を予測する例 [2]，無限長斜面安定解析などを用いて力学的な評価を実施する例 [3] などが挙げられる．

このように，豪雨による広域斜面崩壊の予測について様々なアプローチが存在しているものの，３次元極限平衡法のような，力学的に高度な数値解析結果を用いて即時予測を実施する研究例はほとんど存在しない．そこで本研究では，３次元極限平衡法による斜面安定解析の結果を広域斜面崩壊危険度評価に活用するための枠組みを提案することを目的とする．具体的には，降水量の不確実性を考慮して様々な降雨シナリオで数値解析を実施し，斜面安定解析結果のデータベースを生成する．そのデータを用いて代理モデルを構築することで，降雨データから即時的に斜面崩壊危険度マップを出力可能とする枠組みの提案を行う．

2. 数値解析手法

本研究では，降雨に起因する斜面崩壊の危険度評価を，浸透解析と斜面安定解析の 2 つを組み合わせることによって行う．

(1) 浸透解析

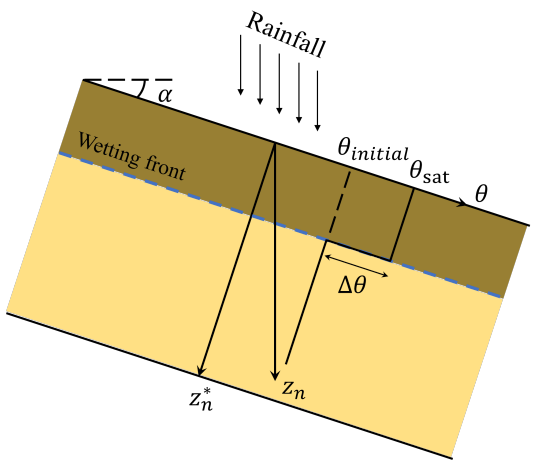
浸透解析には，Green-Ampt モデル [4] を使用する．Green-Ampt モデルでは，浸潤面より下側で初期の体積含水率が保たれるとして浸潤面より上から地表面までの領域を飽和条件と仮定し，1 次元的に浸透挙動を表現する簡易的なモデルである．本研究では，広域を対象とした評価を実施することから，比較的計算コストの小さい本モデルを採用した．また，広域を対象とする場合には，基盤面（不透水面）の空間的な分布の情報が得られないことが多いため，その情報を必要としないという意味でも本モデルにメリットがあると考えて採用した．

Green-Ampt モデルはダルシー則に由来してモデル化がなされており，時間変化を伴う降雨に対する傾斜角 α の斜面について，ある時刻 t_n での累積の浸透量 I_n と浸透率 f_n は以下の式で与えられる [5].

$$I_n = I_o + K_s \cos\alpha \Delta t + \frac{\psi\Delta\theta}{\cos\alpha}\left(\ln\left(\frac{I_n\cos\alpha + \psi\Delta\theta}{I_o\cos\alpha + \psi\Delta\theta}\right)\right) \quad (1)$$

$$f_n = K_s(\cos\alpha + \frac{\psi\Delta\theta}{I_n}) \quad (2)$$

ここで，I_o が時間ステップ t_o での累積浸透量，$\Delta t = t_n - t_o$ であり，K_s が飽和透水係数，ψ が浸潤面におけるサクション，$\Delta\theta$ が初期体積含水率と飽和体積含水率の差で



図–1 Green-Ampt モデルによる浸透解析のイメージ

ある．降雨強度がその時刻における浸透率 f_n を下回る場合には，すべての降雨が地中に浸透していくことになるため，累積浸透量は降水量の分だけ加算される形になる．一方で，降雨強度が浸透率 f_n を上回る場合には，すべての水が地中に浸透しきらないため，式 (1) によって累積浸透量が求められ，浸透しきらない分が地表水として残ることになる．

次に，浸透深さについて，時間ステップ t_n での斜面垂直方向の浸透深さを z_n^* とするとき，

$$z_n^* = \frac{I_n}{\Delta\theta} \tag{3}$$

となり，鉛直方向の浸透深さ z_n は，以下の式で算出される．

$$z_n = \frac{I_n}{\Delta\theta\cos\alpha} \tag{4}$$

以上の Green-Ampt モデルによる浸透解析のイメージを図–1 に示す．

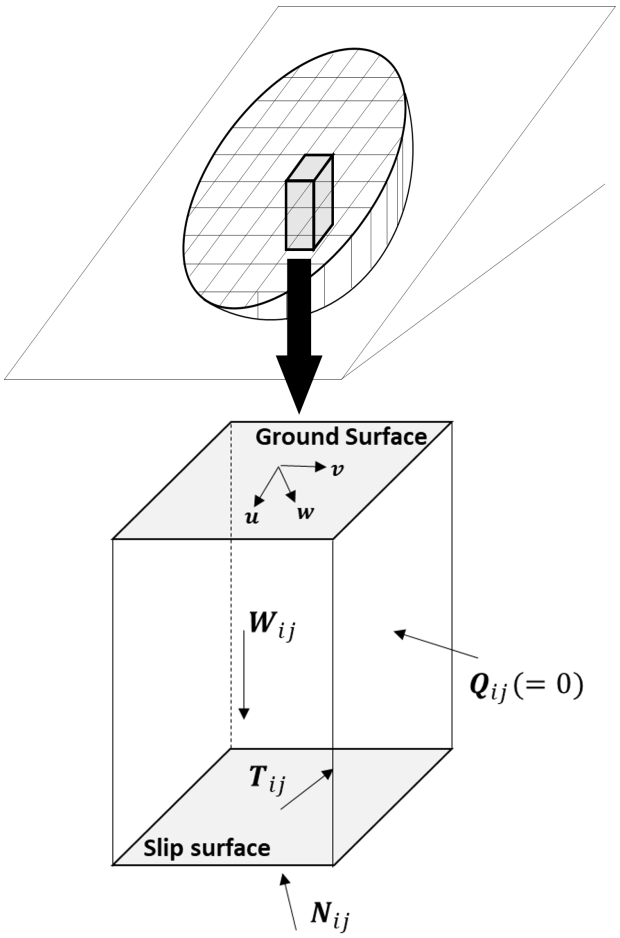
(2) 斜面安定解析

本研究では 3 次元極限平衡法に基づく斜面安定解析手法の 1 つである Hovland 法 [6] を採用して斜面崩壊危険度の評価を行う．Hovland 法では，すべり面によって切り取られる崩壊土塊を土柱に分解し，それらの抵抗力と滑動力の合計の値の比から安全率 F を算出する．そのイメージを図-2 に示す．具体的に数式で表すと以下のようになる．

$$F = \frac{\sum_i \sum_j \{cA + (N_{ij} - u_{ij}A)\tan\phi\}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \tag{5}$$

ここで i と j がそれぞれ土柱の x, y 方向の番号，T_{ij} が土柱のせん断力，N_{ij} がすべり面上の垂直力，W_{ij} が土柱重量, u_{ij} が間隙水圧，c が粘着力，A が土柱のすべり面の面積，ϕ が内部摩擦角を表している．本研究では，すべり面形状を楕円体と仮定して安全率の算出を行う．

Hovland 法では，土柱側面に働く力をゼロとして仮定して安全率を算出する．垂直力方向の力のつり合いと



図–2 3 次元斜面安定解析のイメージ

すべり体全体でのすべり方向に垂直な方向 $\boldsymbol{v}$ のモーメントのつり合いを考えれば以下のようになる．

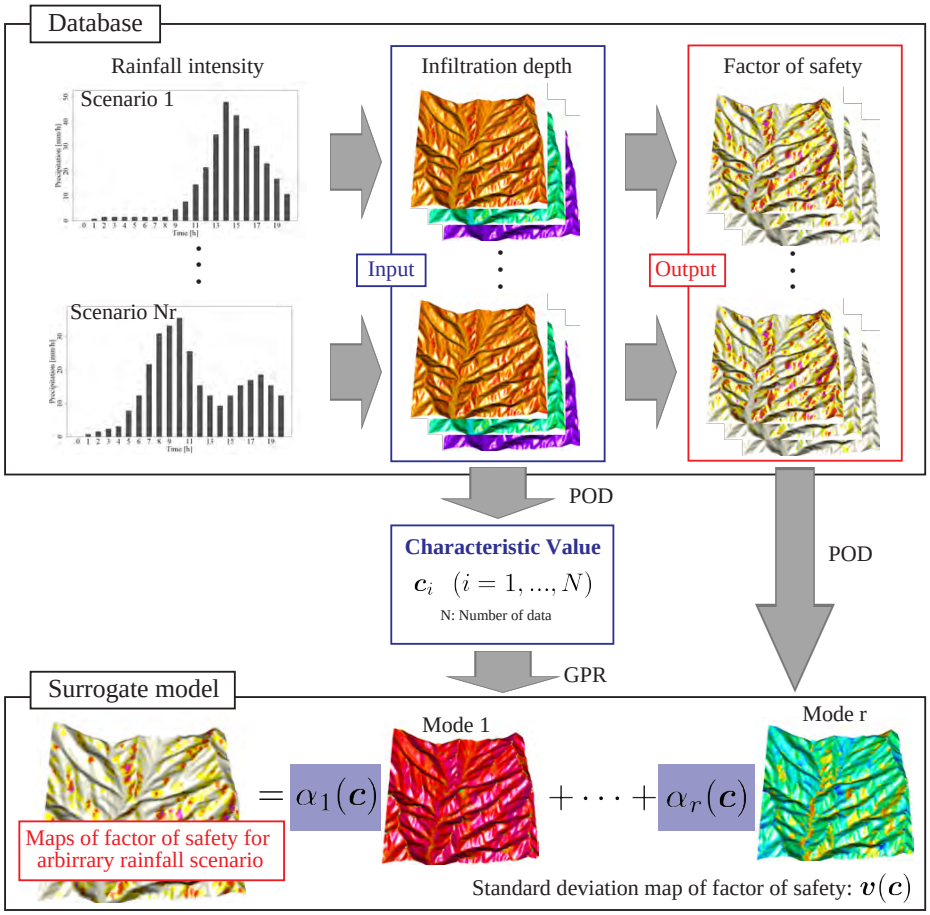
$$(\boldsymbol{T}_{ij} + \boldsymbol{N}_{ij} + \boldsymbol{W}_{ij}) \cdot \boldsymbol{n}_{ij} = 0 \tag{6}$$

$$\sum_i \sum_j (\boldsymbol{r}_b \times \boldsymbol{T}_{ij} + \boldsymbol{r}_b \times \boldsymbol{N}_{ij} + \boldsymbol{r}_g \times \boldsymbol{W}_{ij}) \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{7}$$

ここで，方向 $\boldsymbol{v}$ は，$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{u} \times \boldsymbol{w}$ で求められる方向であり，$\boldsymbol{u}$ はすべり方向を表現する単位ベクトル，$\boldsymbol{w}$ がその方向と地表面に垂直で地中方向を向く単位ベクトルである．また，$\boldsymbol{T}_{ij} = T_{ij}\boldsymbol{t}_{ij}, \boldsymbol{N}_{ij} = N_{ij}\boldsymbol{n}_{ij}, \boldsymbol{W}_{ij} = W_{ij}\boldsymbol{g}$ がそれぞれせん断力，垂直力，重力をベクトル表現で表したものであり，$\boldsymbol{t}_{ij}, \boldsymbol{n}_{ij}, \boldsymbol{g}$ がそれぞれ方向を表す単位ベクトルである．また，本研究では，すべり面として楕円体を仮定することから，$\boldsymbol{r}_b$ と $\boldsymbol{r}_g$ をそれぞれ楕円体の回転中心から土柱底面中心，土柱重心までの位置ベクトルとして表している．式 (5),(6),(7) から，安全率は以下の式のように書き換えられる．

$$F = \frac{\sum_i \sum_j (\boldsymbol{t}_{ij} \times \boldsymbol{r}_b) \cdot \boldsymbol{v}[cA - \{W_{ij}(\boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{n}_{ij}) + u_{ij}A)\}\tan\phi]}{\sum_i \sum_j W_{ij}\{-(\boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{n}_{ij})(\boldsymbol{r}_b \times \boldsymbol{n}_{ij}) \cdot \boldsymbol{v} + (\boldsymbol{r}_g \times \boldsymbol{g}) \cdot \boldsymbol{v}\}} \tag{8}$$

最後に，すべり面上での間隙水圧の与え方について，既往の研究 [7] で用いられている手法を採用した．間隙



図–3 斜面崩壊危険度評価の代理モデル構築の流れ

水圧は浸潤面の位置とすべり面の位置の関係から 2 つのケースに場合分けされる．浸潤面がすべり面よりも上側にある場合については間隙水圧はゼロとし．一方すべり面の方が浸潤面よりも上側にある場合では，間隙水圧をすべり深さに応じて与えるものとする．

3. 代理モデルの構築

ここでは，数値解析結果を用いて斜面安定解析を代替する代理モデルを構築する手法について説明する．広域の斜面安定解析には，一般に高い計算コストが必要となることから，時々刻々と変化する降雨の状況に合わせて斜面崩壊危険度評価をリアルタイムに可能とする代理モデルを構築する．代理モデルの構築の流れを図-3 に示す．なお，空間モードを用いた代理モデルの具体的な構築の流れについては，津波の代理モデルを構築している研究例 [8] を参考にしている．

まず，様々な降雨シナリオを考慮して数値解析を実施することで，数値解析結果のデータベースを浸潤面分布と安全率分布の入出力関係として作成する．得られたそれぞれの空間分布データに対して固有直交分解 (POD: Proper Orthogonal Decomposition)[9] を適用することで，浸潤面の空間分布の特徴を定量的に評価するとともに，空間モードを用いた代理モデルを構築する．数値解析から得られる，ある降雨シナリオ，ある時間での空間分布データをデータベクトルとして $\boldsymbol{x}_i$ とすると，データ行列 $\boldsymbol{X}$ を以下のように定義する．

$$\boldsymbol{X} = \begin{pmatrix} | & & | \\ \boldsymbol{x}_1 & \cdots & \boldsymbol{x}_N \\ | & & | \end{pmatrix} \tag{9}$$

ここで，N が POD の対象となるデータ数，$\boldsymbol{x}_i (i = 1, ..., N)$ は n 個の要素を持つベクトルであり，n は評価地点数である．この行列の共分散行列 $C = \boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^T$ に対して固有値解析を適用することで，データベクトル $\boldsymbol{x}_i$ は以下のように，算出されたモード $\boldsymbol{u}_k (k = 1, ..., N)$ の線形結合として以下のように表現される．

$$\boldsymbol{x}_i = \sum_{k=1}^{N} \alpha_{ik} \boldsymbol{u}_k = \alpha_{i1}\boldsymbol{u}_1 + \cdots + \alpha_{iN}\boldsymbol{u}_N \tag{10}$$

ここで，α_{ik} が i 番目のデータ，第 k モードに対する POD 係数であり，データ行列の特異値分解の結果から算出される．この係数が空間モードの特徴量の大きさを表現しており，空間分布の特徴を表現する指標となる．ここでは，浸潤面分布データ，安全率分布データのそれぞれについて POD を適用することで，以下の式のように代理モデルを表現する．

$$\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{c}) = \sum_{k=1}^{r} \alpha_k(\boldsymbol{c}) \boldsymbol{u}_k \tag{11}$$

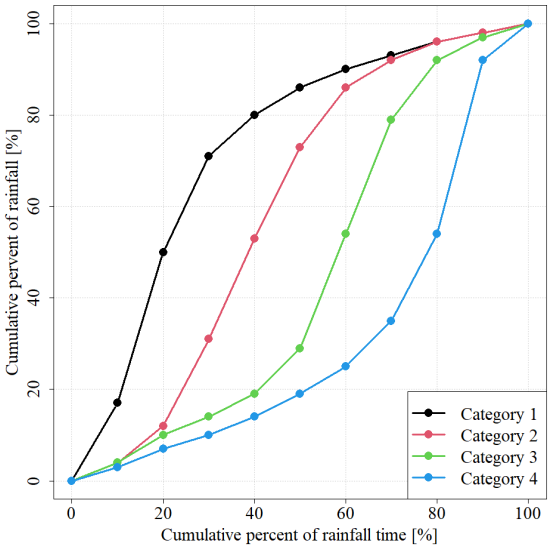
ここで，$\boldsymbol{c}$ が浸潤面分布の特徴量 (POD 係数) が並ぶベクトル，r が代理モデルに用いる空間モード数，$\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{c})$ が任意の浸潤面分布条件での安全率の空間分布，$\alpha_k(\boldsymbol{c})$ が安全率の POD 係数についてモードごとに補間を行い，浸潤面分布の特徴量の関数として表現したものである．その POD 係数の補間の部分については，ガウス過程回帰 (GPR: Gaussian Process Regression) を用いている．ガウス過程回帰を用いることで，回帰の結果だけでなくそのばらつきについても定量的に評価が可能であることから，予測の信頼度を表現可能である．実際の降雨が観測された場合には，浸透解析を行うことで浸潤面分布を算出し，以下の式によって特徴量を算出した後に式 (11) に代入することによって広域の斜面崩壊危険度を評価する．

$$\hat{\boldsymbol{c}} = \boldsymbol{U}_{wf}^T \boldsymbol{x}_{wf} \tag{12}$$

ここで，$\boldsymbol{U}_{wf}$ が浸潤面分布データの空間モードが列方向に並ぶ行列，$\boldsymbol{x}_{wf}$ が浸潤面分布データである．

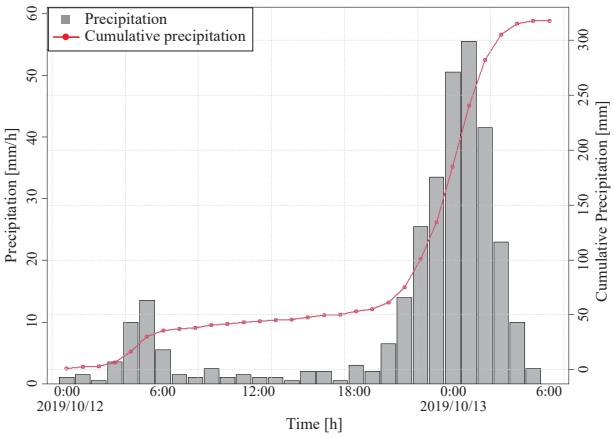
4. 対象地域と解析条件

本研究では，2019 年の東日本台風で斜面崩壊が確認された岩手県釜石市の一部の領域を対象領域として選定し，一連の解析を行う．対象領域は 1 km × 1 km の広さであり，地形データの空間解像度は 5 m として設定した．また，浸透解析，斜面安定解析に必要な地質パラメータについては，同じ地域を対象に解析を実施した研究 [10] で用いられているものを使用している．



図–4 学習用の降雨シナリオ構築のための降水量の時間変化

代理モデル構築に用いる降雨条件については，図-4 に示す降雨の継続時間と降水量の関係 [11] を用いて降雨シナリオを作成した．図-4 の各軸が 1 降雨イベントの降雨継続時間と総降水量の割合を示していることから，継続時間と累積降水量を与えることで具体的な降雨シナリオを作成することができる．本研究では，対象地域の確率降水量から表-1 に示す 7 つのシナリオを想定し，学習用シナリオとして設定した．これらを入力条件として一連の解析を実施し，1 時間おきにデータを保持する形とした．なお，降水量データ，地質パラメータ等については，空間的に一様なものとして設定している．また，検証用データには，図-5 に示す 2019 年の東日本台風時の釜石観測所のアメダス観測データを用い，そのときの数値解析結果と代理モデルの結果を比較することで構築した代理モデルの妥当性の検証を行う．



図–5 代理モデルの精度検証のための降雨シナリオ

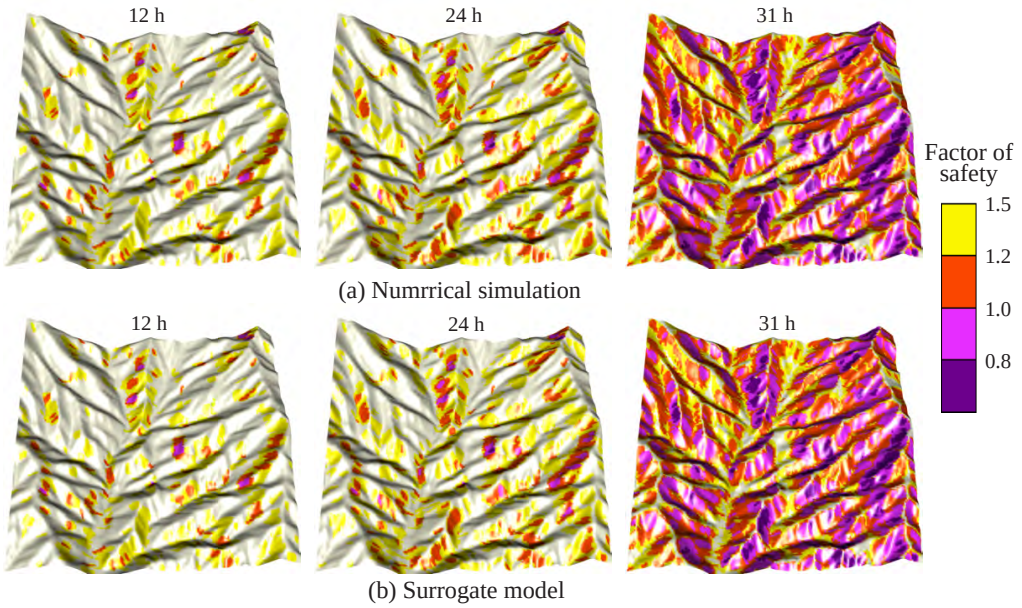
表–1 降雨の学習シナリオ

Case	Cumulative rainfall	Duration	Category
1	310 mm	10 h	1
2	310 mm	10 h	2
3	310 mm	20 h	2
4	310 mm	20 h	3
5	420 mm	30 h	3
6	420 mm	30 h	4
7	420 mm	50 h	4

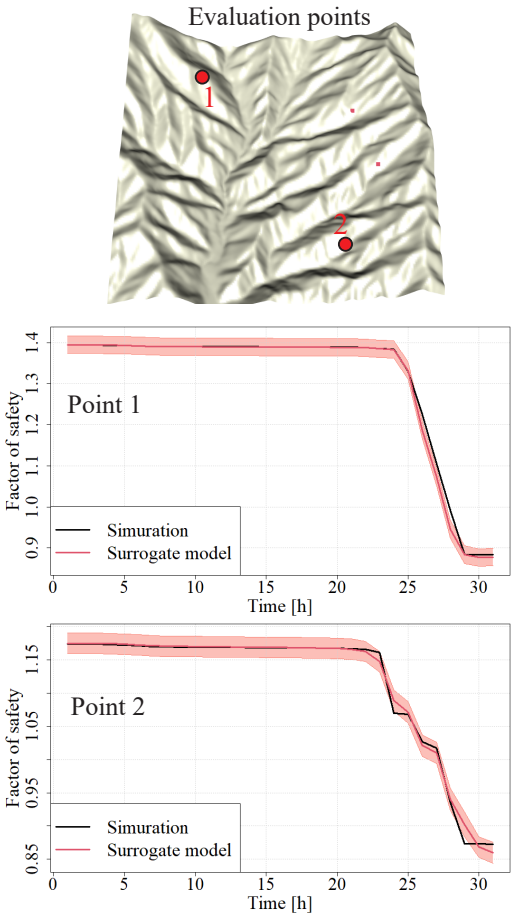
5. 結果

図-5 を入力としたときの数値解析と代理モデルから得られる安全率について比較した結果を図-6 と図-7 に示す．図-6 は，異なる時間での安全率の空間分布を比較したものである．図-7 については，ある地点での安全率の時間変化の比較を示しており，予測のばらつきについても合わせて示している．予測のばらつきについては，POD 係数のガウス過程回帰から算出される分散をモードの線形和として足し合わせた値に，代理モデル構築の際に省略したモードに含まれる値の分のばらつきを加えたものとして表現している．これらを比較すると，数値解析の結果と代理モデルの結果が概ね一致していることから，代理モデルによって評価したい降水量シナリオでの安全率の時間変化を概ね表現可能であることが確認できる．

また，安全率分布の比較について，平均平方二乗誤差率 (RMSPE: Root Mean Squared Percentage Error) の時間変化を図-8 に示す．降雨イベント前半に比べて後

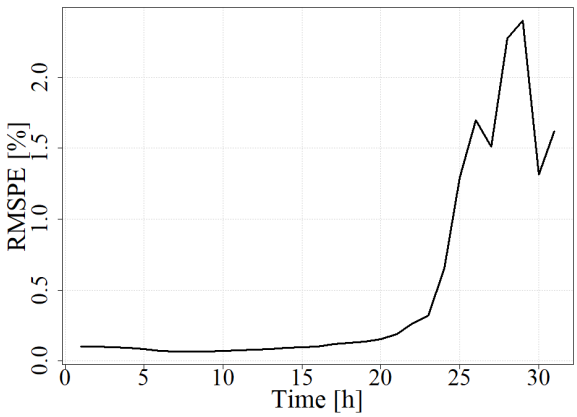


図–6 数値解析から得られる安全率分布と代理モデルによる安全率分布の比較



図–7 2 つの評価地点での安全率の時間変化の比較

半の時間に大きな誤差が発生しているものの，最大でも 2.5%程度であることから，代理モデルによって数値解析結果が再現できることが確認できる．後半部分の



図–8 数値解析結果と代理モデルの誤差の時間変化

誤差が大きくなる要因としては，後半部分は降雨強度が大きくなる時間であり，強い降雨強度のデータが学習データに少ないためであると考えられる．この部分については，データ数を増やすことによって解決可能である．代理モデルに必要なデータ数については，ガウス過程回帰によって得られるばらつきの情報を活用することで効率的に選択できる可能性があることから，この点については今後の検討課題である．

最後に計算コストについて比較すると，数値解析では Intel(R) Xeon(R) Processor E5-2690 v3 (2.60GHz)，8 並列で 7 分 15 秒の時間を要したのに対し，代理モデルでは事前にモデルを構築しておくことで，数秒で算出可能であることから，代理モデルによる大幅な効率化が確認できる．この例では比較的小さい領域を対象としていることから，数値計算の例での計算コストも小さいものの，今後広域に拡張することを考慮すると，計算コストのより効果的な削減が期待できる．

6. 結言

３次元極限平衡法から得られる結果を用いて，降雨に起因する斜面崩壊の危険度の即時的な予測を可能とする枠組みについて提案した．降水量の不確実性を考慮して浸透解析と斜面安定解析を実施し，その解析結果に対して固有直交分解とガウス過程回帰を適用して代理モデルを構築した．この代理モデルによって概ね数値解析結果を表現可能であることを確認し，その妥当性を検証した．

本研究では，比較的小さい領域を対象に有用性の検討を実施したが，今後はさらに広域（市町村レベル）での斜面崩壊ハザード評価について検討を実施する．その場合，本研究では考慮しなかった降水量の空間分布についても不確実性として考慮する学習シナリオを検討する必要があるため，対象地域の過去の降水量データから降水量の空間的不確実性の評価を行い，仮想の降雨シナリオを構築している研究例 [12] などを参考にしながら効率的な学習シナリオの検討が必要である．また，本研究では，1 つの降雨イベントを対象とした解析であり，先行降雨などの影響を評価できないモデルとなっていることから，その影響も考慮可能とするような数値解析手法の改良も今後の課題である．

参考文献

[1] F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi, and C. P. Stark. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, Vol. 5, pp. 3–17, 2008.

[2] C. W.W. Ng, B. Yang, Z. Q. Liu, J. S.H. Kwan, and L. Chen. Spatiotemporal modelling of rainfall-induced landslides using machine learning. *Landslides*, Vol. 18, pp. 2499–2514, 2021.

[3] J. Y. Park, S. R. Lee, D. H. Lee, Y. T. Kim, and J. S. Lee. A regional-scale landslide early warning methodology applying statistical and physically based approaches in sequence. *Engineering Geology*, Vol. 260, p. 105193, 2019.

[4] W.H. Green and G Ampt. Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 1–24, 1911.

[5] Li Chen and Michael H. Young. Green-ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resources Research*, Vol. 42, , 2006.

[6] H. J. Hovland. Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, pp. 971–986, 1977.

[7] N. Jia, Z. Yang, M. Xie, Y. Mitani, and J. Tong. Gis-based three-dimensional slope stability analysis considering rainfall infiltration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 2014 74:3*, Vol. 74, pp. 919–931, 2014.

[8] K. Tozato, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, Y. Otake, Y. Fukutani, K. Nojima, M. Sakuraba, and H. Yokosu. Rapid tsunami force prediction by mode-decomposition-based surrogate modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 1267–1285, 2022.

[9] Y. C. Liang, H. P. Lee, S. P. Lim, W. Z. Lin, K. H. Lee, and C. G. Wu. Proper orthogonal decomposition and its applications—part i: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, pp. 527–544, 2002.

[10] K. Tozato, N. L. J. Dolojan, Y. Touge, S. Kure, S. Moriguchi, S. Kawagoe, S. Kazama, and K. Terada. Limit equilibrium method-based 3d slope stability analysis for wide area considering influence of rainfall. *Engineering Geology*, Vol. 308, p. 106808, 2022.

[11] F. A. Huff. Time distributions of heavy rainstorms in illinois. *ILLINOIS STATE WATER SURVEY CHAMPAIGN*, 1990.

[12] 外里健太, 佐々木駿, Nilo Lemuel J. Dolojan, 森口周二, 寺田賢二郎. 降雨の空間的不確実性を考慮した斜面安定解析による斜面崩壊ハザードマップの構築. 日本計算工学会論文集, Vol. 2022, pp. 20220018–20220018, 2022.

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析

Sound Field Analysis considering the Effect of Wind Velocity using Finite Element Method

宮内暖季 [1] 深澤一志 [2] 樫山和男 [3]
Haruki MIYAUCHI, Kazushi FUKAZAWA and Kazuo KASHIYAMA

[1]修士 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻（〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail: a19.65sn@g.chuo-u.ac.jp)
[2]修士 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻（〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail: a17.kfgc@g.chuo-u.ac.jp)
[3]工博 中央大学 理工学部 教授（〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp）

This paper presents a finite element method for sound field analysis considering the effect of wind velocity. In order to examine the validity of the method, a spherical wave model is performed as a benchmark analysis. As an application example, the present method is applied to the constraction noise ploblem.

Key Words : *Finite Element Method, Wind Velocity, Wave Equation*

1. はじめに

著者らの既往の研究では，任意形状への適合性に優れる有限要素法を用いた大規模音場解析 [1] を行ってきた．しかし，風の影響の考慮はなされていなかった．

そこで本研究では，有限要素法を用いた風の影響を考慮した音場解析を行い，その妥当性の検証と応用例への適用を行った．

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式と条件式

風速の影響を考慮した波動方程式 [2] を以下に示す．

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + 2u_i\frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial t} + u_i u_j \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_j} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \tag{1}$$

ここで，p は音圧，c は音速，u_i は各成分における風速，Ω は解析領域を示す．

次に，初期条件は無音状態とし，以下の式で与える．

$$p = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad \text{in} \quad \Omega \tag{2}$$

また，本研究で用いる Nenmann 境界条件は以下のように表せる．

$$q_n = -\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \qquad \text{on} \quad \Gamma_q \tag{3}$$

$$q_n = -\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{c \pm u_i}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad \text{on} \quad \Gamma_q \tag{4}$$

ここで，n は解析境界からの外向き法線ベクトル，Γ_q は Neumann 境界条件が考慮される境界である．式 (3) は完全反射の反射境界条件である．式 (4) は Mur の吸収境界条件であり，右辺項において風速成分が境界から外向きの場合は正号を，内向きの場合は負号を用い，開空間処理として扱う [3]．

(2) 有限要素法に基づく数値解析

式 (1) に対して Galerkin 法に基づく重み付き残差法を適用し，Green-Gauss の定理を用いると，以下の弱形式が得られる．

$$\int_{\Omega_e} p^* \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} d\Omega + 2u_i \int_{\Omega_e} \frac{\partial p}{\partial x_i}\frac{\partial p}{\partial t} d\Omega - u_i u_j \int_{\Omega_e} \frac{\partial p^*}{\partial x_j}\frac{\partial p}{\partial x_i} d\Omega + c^2 \int_{\Omega_e} \frac{\partial p^*}{\partial x_i}\frac{\partial p}{\partial x_i} d\Omega = (u_i u_j - c^2)\int_{\Gamma_q} p^* q_n d\Gamma \tag{5}$$

ここで，p^* は音圧 p の重み関数である．Ω_e は要素の領域である．

有限要素として四面体 1 次要素を用いると，各要素における時間に関する常微分方程式は以下のようになる．

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \mathbf{D}_e \frac{\partial p}{\partial t} - \mathbf{K}_{\mathbf{v}e} p + \mathbf{K}_e p = \mathbf{F}_e \tag{6}$$

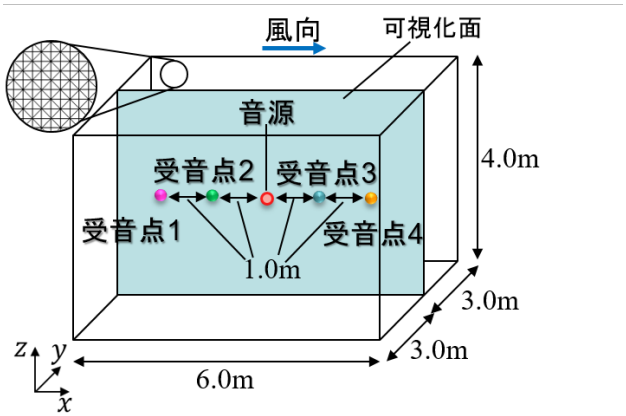
ここで，$\mathbf{M}_e$，$\mathbf{D}_e$，$\mathbf{K}_{\mathbf{v}e}$，$\mathbf{K}_e$，$\mathbf{F}_e$ はそれぞれ各要素の質量行列，式 (5) における左辺第 2 項によって生じる行列，左辺第 3 項によって生じる行列，拡散行列，境界積分項を表す．

時間方向の離散化には差分法を用い，各時間の微分項に対して中心差分を施し，反復法の一種である BiCGStab 法により未知数である音圧を求める．

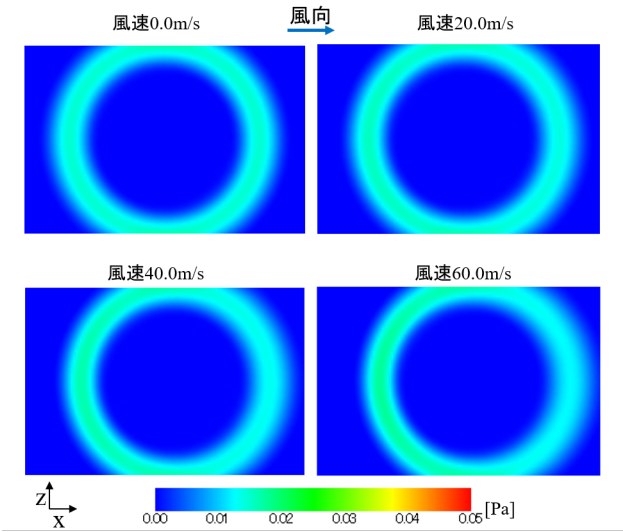
3. 数値解析例

(1) 解析条件

ベンチマーク問題として，風速が音の伝播に与える影響と解析精度に与える影響についての比較を行う．解析モデルを**図-1** に示す．解析モデルの中心を音源位置とし，音源位置から 250Hz の cos 波 1 波長を入力させる．



図–1 解析モデル



図–2 各風速での可視化結果 (t = 0.0080[s])

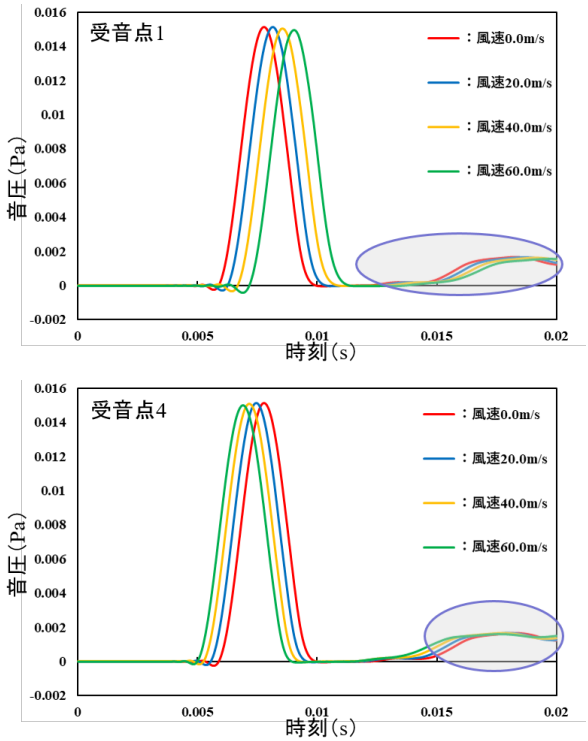
表–1 解析結果から算出した見かけの音速

風速	0.0m/s	20.0m/s	40.0m/s	60.0m/s
風下側 見かけの音速[m/s]	340.1	359.7	381.7	401.6
風上側 見かけの音速[m/s]	340.1	320.5	301.2	279.3

風速は一定とし，解析モデルに示す向きに 0.0，20.0，40.0，60.0m/s として，4 通りの解析を行う．また，音速は 340.0m/s，時間増分量は 0.01ms，要素分割幅は 1 波長を約 27 分割した 0.05m としている．境界条件は，すべての境界で Mur の吸収境界条件としている．なお，自由度は 1, 185, 921 である．

(2) 解析結果

図-2 に各風速での可視化結果，**図-3** に受音点 1，4 における音圧値の比較図を示す．風速の影響により伝播波の到達に差が生じることを確認した．**表-1** に解析結果から算出した見かけの音速を示す．見かけの音速 c'



図–3 各風速での受音点 1，4 における時刻歴波形

の算出方法は以下に示す通りである．

$$c' = \frac{|\text{音源から受音点 } 1, 2(3,4) \text{ までの距離の差}|}{|\text{受音点 } 1, 2(3,4) \text{ での最大音圧値の到達時刻の差}|}$$

風下側では音速に風速を足した値，風上側では音速から風速を引いた値が見かけの音速の厳密解であり，各風速で良い一致を示していることを確認した．ただし，**図-3** 中の円部分に示すように開境界で音が吸収しきれず，反射が発生している．開境界処理ついては今後の課題としたい．応用例への適用については講演時に示す．

4. おわりに

本研究では，有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析を行った．結論を以下に示す．

- 風速の影響により，伝播波の到達速度に差が生じることを確認した．
- 解析結果による見かけの音速が厳密解と良い一致を示し，定量的な妥当性を確認した．

今後は，開空間処理方法の検討，遮音壁の内部構造を考慮した解析を予定している．

参考文献

[1] 深澤一志，樫山和男，吉川仁：インパルス応答解析に基づく有限要素法を用いた音場解析手法の構築，計算工学講演会論文集，計算工学会，Vol.27，E-10-03，2022.

[2] Pierce. A. D.: *Acoustics*, the Acoustical Society of America, 1991.

[3] 野村卓史，高木耕平：気象要因の影響を考慮した音の伝播に関する有限要素解析法，応用力学論文集，土木学会，Vol.9，pp.221-230，2006.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

下水道の簡易的なモデル化による内水氾濫解析手法の開発

Development of Numerical Simulation Method on Inland Water Flooding by Simple Modeling of Sewage System

紺野矩彦[1)]，小笠原敏記[2)]
Norihiko Konno and Toshinori Ogasawara

1) 岩手大学大学院 総合科学研究科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5, E-mail: g0122030@iwate-u.ac.jp)
2) 工博 岩手大学 理工学部 教授（〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5, E-mail: togasa@iwate-u.ac.jp）

In recent years, flood damage due to climate change has occurred frequently, and simulation of disaster damage has become necessary. Sewage analysis is essential to calculate the impact, but some local governments say it is difficult to analyze the sewage system as pipeline flow. We hypothesized that the runoff into the sewage system could be easily calculated using Torricelli's theorem. This hypothesis was applied to Morioka City, Iwate Prefecture, focusing on land use, and the characteristics of the flood were clarified.

Key Words : *Inland water flooding, Numerical simulation, Modeling sewage system*

1.　はじめに

近年の気候変動による短時間雨量が，内水氾濫の増加を引き起こしている．例えば，令和4年8月3日からの大雨では，14水系40河川流域で内水氾濫が発生した[1]．外水氾濫のハザードマップは整備が進められているが，内水氾濫のハザードマップの整備は不十分である[2]．内水氾濫の浸水想定手法に用いる数値解析には，地表面の流れと下水管路の流れを解析する手法(以下，「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」と呼称)や，あらかじめ降雨強度から下水道の排水能力分を差し引き，地表面の流れのみを解析する手法（以下,「平面２次元モデル」と呼称）などがある[3]．「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」は氾濫の再現性が高いが，下水道網の情報を必要とする．下水道網は，標高データのように全国で一括したデータが一般公開されていないため，解析対象ごとにデータを作成する必要がある．下水道網のデータ作成やその計算は煩わしく時間を要するため[4]，「下水道ネットワーク＋平面2次元モデル」は汎用性に欠ける．一方で，「平面２次元モデル」は管路網の入力が不要なため，計算に手間を要さないが，湛水面積を過大評価する傾向であることから，ハザードマップに用いるためには結果の再現性や妥当性について留意する必要がある[3]．したがって，簡便で精度が保証される内水氾濫のハザードマップ作成には，「平面２次元モデル」のように管路網の入力が不要で，かつ「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」に準ずる再現性を有する解析手法の開発が必要であると考える．

内水氾濫の解析手法に関する既往研究として，関根[5]や川池ら[6]，三好ら[7]などが挙げられる．関根[5]や川池ら[6]は，下水道ネットワークを考慮した解析手法である．関根は，特に雨水が地表面や屋根から下水道に流れる過程などを考慮した街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデルを構築し，内水氾濫解析の高精度化を図っている[5]．川池らは，「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」の解析結果と実験結果との比較を行い，計算モデルの検証を行なっている[6]．また，三好らは「平面2次元モデル」について，下水道による内水排除に準線形貯留関数モデルを適用させて，下水道網のデータを必要としない解析手法を開発し，オープンデータのみで広域の内水氾濫解析を行なっている[7]．しかしながら，三好らのモデルは，過去の浸水記録に基づくパラメータ同定を必要とするため，浸水記録がない地域への適用は難しいと考える．

これらの問題を解決するため，本研究は雨水排除の簡易的なモデル化による汎用的な内水氾濫解析手法の開発を目的とする．雨水は，森や畑といった浸透域では地面への浸透により，都市部の不浸透域では道路に設置されている雨水ますを介して下水道により排除される．そこで土地利用に応じて，浸透量をHorton式で，雨水ますから下水道への流量をトリチェリの定理を用いて簡易的に解析するモデルを作成し，盛岡市市街地に対象として解析を行った．この解析結果を盛岡市が「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」を用いて作成したハザードマップと比較して，本モデルの内水氾濫の再現性について，浸水分布と浸水深の点から検討する．

2.　手法

(1)　平面二次元場の基礎方程式

平面二次元場の流れの基礎方程式として，局所慣性方程式と連続式を用いる．

$$\frac{\partial M}{\partial t}+gh\frac{\partial(h+z)}{\partial x}+gn^2\frac{|M|M}{h^{7/3}}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+gh\frac{\partial(h+z)}{\partial y}+gn^2\frac{|N|N}{h^{7/3}}=0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=r-f \qquad (3)$$

ここで，M，Nはそれぞれx，y方向の流量フラックス，hは水深(m)，gは重力加速度(m/s^2)，zは地盤高(m)，nはマニングの粗度係数(=0.03)，rは降雨強度(m/s)，fは後述する雨水排除速度(m/s)である．差分は，Gustavo et. al. [8]を参考に行った．

(2) 雨水排除速度の定式化

地表の雨水は，浸透と下水道によって排除される．式(3)の雨水排除速度fについて，森や畑などの浸透域では式(4)より，道路では式(6)より求める．式(4)は，森や畑などにおける浸透速度を表し， Horton式を用いて計算される[9].

$$f_{inf}=\frac{1}{3600}\times\{f_c+(f_0-f_c)e^{-\alpha t}\} \qquad (4)$$

ここで，f_{inf}は浸透速度(m/s)， f_0は初期浸透能(m/h)，f_cは終期浸透能(m/h)，αは減衰係数(=4.14)，tは降雨経過時間(h)である．パラメータは天口ら[10，11]を参考にして定めた(表-1).

下水道による雨水排除は，雨水ますを介して行われる．道路における雨水ますを介した下水道への流量は，トリチェリの定理を用いて簡易的にモデル化される(図-1，式(5))．トリチェリの定理における水深を用いた流量計算とは厳密には異なるが，下水道への流量は地表面の水深の1/2乗に比例すると仮定した．なお，本モデルでは下水道から地表への逆流は考慮していない．雨水ますは最低20m間隔で道路に設置されることから [12]，計算格子1つあたりの下水道による水位減少速度f_{sew}は，雨水ますに近接する格子間で前述の流量を按分し，式(6)で求める．

$$Q_{sewer}=\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2gh} \qquad (5)$$

$$f_{sew}=\frac{Q_{sewer}}{A}\times\frac{dx}{20} \qquad (6)$$

ここで，Q_{sewer}は雨水ますを介した下水道への流量(m^3/s)，dは取付管の内径(m)，hは水深(m)，f_{sew}は下水道による水位減少速度(m/s)， Aは計算格子の面積(m^2)，dxは格子刻み(m)である．取付管の内径は設計指針の下限である0.125mを用いた[12]．前述の通り，道路では式(6)により雨水排除速度を求めるが，雨水ますは道路の両端に設置されることから，道路格子で格子内の建物面積が5~95%の格子にのみ式(6)を適応させた．

表-1 浸透域の浸透能

	初期浸透能	終期浸透能
森	0.100	0.050
畑	0.050	0.020
荒れ地	0.010	0.005

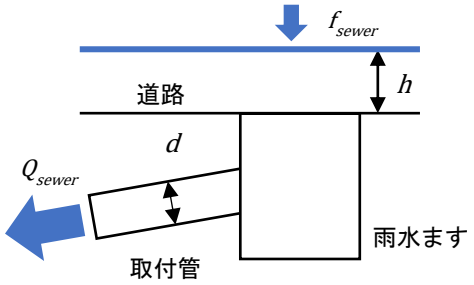


図-1 下水道による雨水排除の概念図

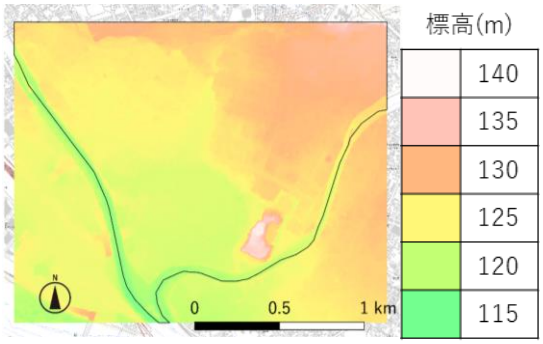


図-2 盛岡市市街地の標高

図-3 盛岡市市街地の土地利用

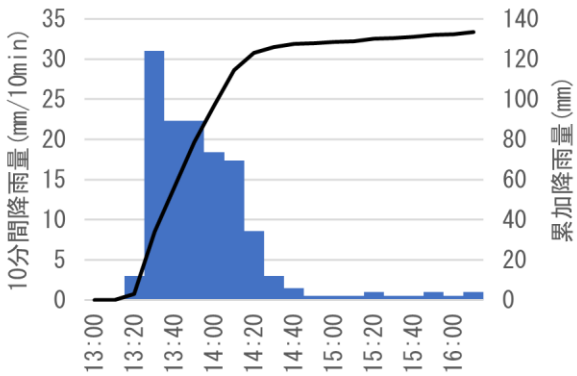


図-4 想定降雨

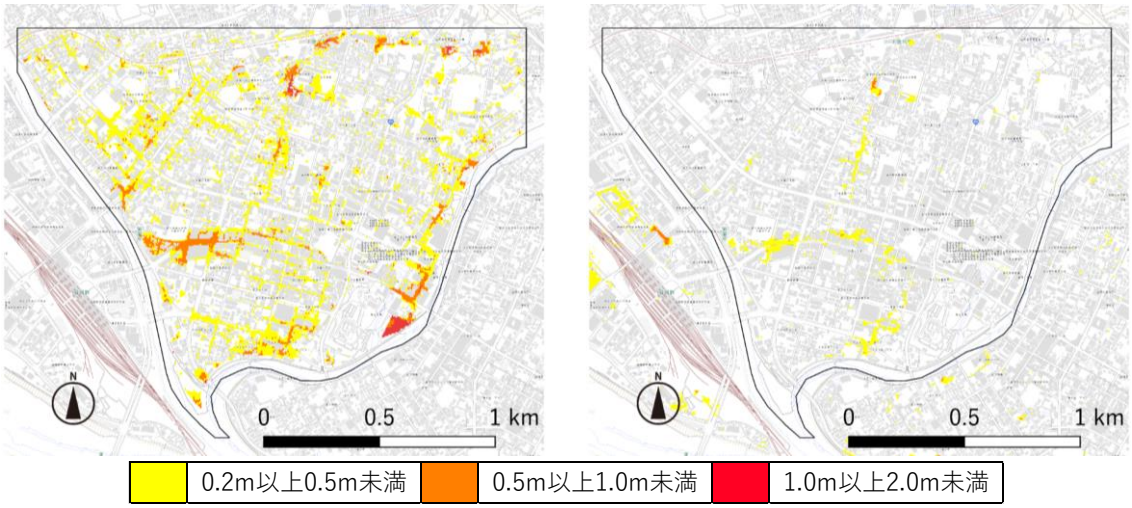


図-5　(左)本モデルによる最大水深，(右)盛岡市内水ハザードマップ
図の背景として国土地理院の淡色地図を引用した．内水ハザードマップは盛岡市のデータに一部加筆した．

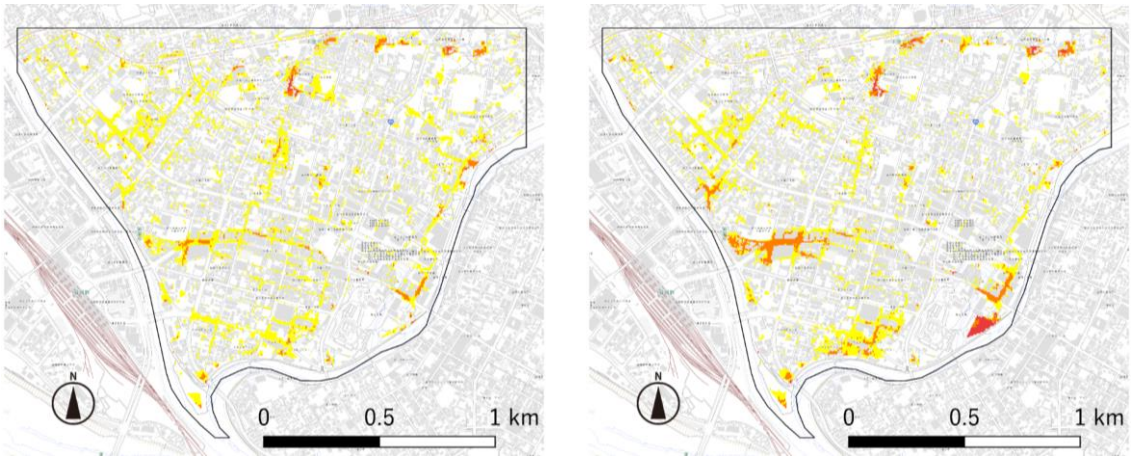


図-6　(左)想定降雨終了直後(14:20)の浸水深，(右)想定降雨終了 2 時間後(16:20)の浸水深
図の背景として国土地理院の淡色地図を引用した．

3.　解析条件

解析対象は岩手県盛岡市とする．盛岡市の市街地は，北上川の旧河道や盛岡城の堀などにより局所的に標高が低く，水が集まりやすい地形となっている(図-2)．標高値は，国土地理院基盤地図情報のDEM5A[13]を用いた．浸透を解析する際の土地利用は，JAXAの高解像度土地利用土地被覆図[14]を用いて，最近傍近似によりDEM5Aのメッシュに合わせた(図-3)．雨水ますを介した下水道を再現する道路境界は，基盤地図情報の建物と道路から判断した[13]．解析領域の境界と建物には不透過条件を課している．

降雨条件は，盛岡市が行った解析結果と比較するため，2016年8月2日に観測された時間雨量62.3mmの降雨[15]を，時間雨量120mmになるように引き延ばして課した(図-4)．時間刻みを0.1秒とし，3時間を想定して解析を行った．格子刻みはDEMのメッシュサイズである5.236mとし，東西2200m，南北1770mの領域で解析した．また，計算の発散を防ぐため，勾配が急な盛岡城跡とその周辺に不透過条件を課した．

4.　モデルの検証

(1)　「下水道ネットワーク＋平面二次元モデル」との比較

解析によって得られた最大水深(図-5左図)を，盛岡市が「下水道ネットワーク＋平面二次元モデル」を用いて行った解析結果（図-5右図）と比較する．浸水域の分布傾向は概ね一致しているが，本モデルで浸水深が大きくなることが確認できる．この要因として，下水道への流量の過小評価が考えられる．本モデルではトリチェリの定理における水深を浸水深で計算しているが，厳密にはトリチェリの定理における深さとは異なる．したがって，深さを適切にモデル化することができれば，浸水深もより高精度で再現できると推察される．また，解析領域の東端の中津川右岸や西部中央の材木町周辺で，解析結果に顕著な違いが見られる．境界に不透過条件を課したため，河川への排水を再現できず，浸水深が深くなったと考えられる．

(2) 時間経過に伴う考察

想定降雨終了時の浸水深(図-6左図)と降雨終了から2時間後の浸水深(図-6右図)を比較する．降雨終了直後では，浸水域が解析領域全体に広がることがわかる．2時間後では，浸水域が減少する一方で，旧河道や堀の跡のような低地では，さらに浸水深が大きくなることがわかる．したがって，降雨終了後の浸水状況は，地形の影響を大きく受けながら変化するものと考えられる．

(3) 解析時間

対象領域の計算時間は，「IntelXeon W-2265 3.5Ghz」のPCで，実現象の3時間分の計算に49分を要した．この結果より，本計算モデルは，計算処理速度が十分に速く，リアルタイム氾濫解析への適応が期待できると言える．

5. まとめ

本研究では，雨水の排除過程の簡易的なモデル化による内水氾濫解析を行い，以下の成果を得た．

1) トリチェリの定理を用いた下水道の簡易的な再現により，内水氾濫の浸水分布を概ね解析できることを示した．
2) 盛岡市市街地では，従来危険と考えられてきた旧河道に加えて掘の跡でも浸水深が大きくなることを示した．
3) 本モデルは，計算の処理速度が速いことから，洪水の予報業務や動的なハザードマップへの応用が期待できる．

今後の課題として，実験による本モデルの検証や，下水道の逆流の考慮，他地域での検証が挙げられる．

謝辞:「下水道ネットワーク＋平面２次元モデル」による内水氾濫解析データは，盛岡市上下水道局より提供を受けました．ここに記して，感謝申し上げます．

参考文献

[1] 日本河川協会：https://www.japanriver.or.jp/information/info_pdf/2022_web_resume.pdf (2023年3月20日　閲覧)
[2] 内水氾濫　想定済み１割，岩手日報，2022年10月7日，p.4
[3] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，内水浸水想定区域図マニュアル(案)，令和3年7月
[4] 労力に二の足　遅れる備え，岩手日報，2022年10月7日，p.4
[5] 関根正人：住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値計算，学会論文集B1(水工学)，Vol.67，No.2，70-85，2011.
[6] 川池健司，清水篤，馬場康之，中川一，武田誠：下水道を含めた氾濫模型実験による内水氾濫解析モデルの検証，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67，No.4，I_985-I_990，2011.
[7] 三好学，田村隆雄，武藤裕則，安藝浩資：全国規模で整備されているオープンデータを用いて広域かつ詳細な浸水深分布を作成する内水解析モデル，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.4，I_1321-I_1326，2018.
[8] Almeida, G.A.M，Paul Bates，Jim E.F.，and Maxime. S.：Improving the stability of simple formulation of the shallow water equations for 2-Dflood modeling，Water Resources Research，Vol.48，W05528
[9] 土木学会　水理委員会：水理公式集[平成11年版]，pp.23-24
[10] 天口英雄，河村明，高崎忠勝，中川直子：個別の地物情報を考慮した密集市街地におけるTokyo Storm Runoff Modelの提案，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67，No.4，I_517-I_522，2011
[11] 天口英雄，青木宥都，河村明：地物GISを用いた農村流域における洪水流出解析モデルの開発，河川技術論文集，第27巻，2021年6月
[12] 日本下水道協会：下水道施設整備計画・設計指針と解説 2009年版
[13] 国土地理院：基盤地図情報 https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php (2023年3月14日　閲覧)
[14] JAXA：高解像度土地利用土地被覆図(バージョン21.11)，https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc_j.htm (2022年12月5日　閲覧)
[15] 気象庁：過去の気象データ検索，https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php (2023年2月21日　閲覧)

Proceedings of Computational Engineering Conference JSCES
Vol. 28, 2023 May

Implementing 2D shallow water equations to simulate debris flows using SPH

Nilo Dolojan [1], Reika Nomura [2], Shuji Moriguchi [3], Kenjiro Terada [4]

[1] Graduate School of Civil and Environmental Engineering, Tohoku University (Email: dolojan.nilo@dc.tohoku.ac.jp)
[2] Dr. Eng. Assistant Professor, IRIDeS, Tohoku University (Email: nomura@irides.tohoku.ac.jp)
[3] Dr. Eng. Associate Professor, IRIDeS, Tohoku University (Email: s_mori@irides.tohoku.ac.jp)
[4] Ph.D. Professor, IRIDeS, Tohoku University (Email: tei@irides.tohoku.ac.jp)

This study uses the two-dimensional shallow water equation to govern debris flow behavior after slope failure. In particular, the debris flow is assumed as a homogenous viscous fluid and discretized into depth-integrated particles using the smoothed particle hydrodynamics. This method allows for the tracking of particles in a Lagrangian manner without much consideration of the background mesh. This computational advantage is ideal for wide areas debris flow studies characterized by large computational domains relative to the small percentage of failure areas. Debris flow experiments and actual debris flow disasters are simulated to demonstrate the capability and applicability of the model.

Key Words : *shallow water equations, debris flow, SPH*

1. INTRODUCTION

Debris flow is a common natural geohazard that causes significant damage in mountainous regions. Commonly triggered by earthquakes or rainfall, debris flows often travel over long distances in a fluid-like manner causing destruction along their path. Due to the serious threat it poses to human life, economy, and property, there is a need to better understand the behavior and consequences of this hazard. While the prevention of debris flows remains to be challenging, numerical simulation and modelling are useful tools in minimizing the damages and casualties inflicted on the affected communities.

Therefore, this study employs a smoothed particle hydrodynamics (SPH) approach in discretizing the depth-integrated two-dimensional shallow water equations (2D SWE) to better understand the post-failure behavior, propagation, and extent of multiple debris flows over a wide areas. Particularly, the debris flow is assumed to be a single-phase homogeneous viscous fluid governed by the 2D SWE. The fluid body is discretized using the mesh-free Lagrangian SPH method, whose calculation cost is defined by the number of particles regardless of the extent of the computational domain. Calibration and parameter fitting of the model is conducted to reproduce the debris flow experiments of Iverson et al.[1] and confirm the model's applicability. The calibrated model is then applied on a wide-area scenario to simulate the actual debris flow disasters that occured in Marumori, Miyagi, Japan.

2. NUMERICAL SCHEME

(1) Governing Equations

Neglecting the viscosity terms, the depth-integrated 2D SWE can be written in the Lagrangian form as:

$$\frac{Dh}{Dt} + h\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$h\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\nabla P - gh\nabla z - \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho} \tag{2}$$

where D/Dt is the total material deriative, h is the flow depth, $\boldsymbol{u}$ is the velocity vector, $P = \frac{1}{2}gh^2$ is the pressure, g is the acceleration due to gravity, z is the bed elevation, ρ is the density and $\boldsymbol{\tau}_b$ is the bed shear stress vector.

(2) SPH Discretization

The above equations are solved using the mesh-free Lagrangian SPH approach. Under the SPH algorithm, the fluid body is discretized into particles each carrying material properties such as density, pressure, velocity, etc. The approximation of a function is defined using a smoothing kernel function in the integral representation of the function as:

$$< f(\boldsymbol{x}) >= \int_{\Omega} f(\boldsymbol{x'})W(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x'}, h_s)d\boldsymbol{x'} \tag{3}$$

where $W(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x'}, h_s)$ is the smoothing kernel function, h_s is the smoothing length such that $W = 0$ when $|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x'}| > \kappa h_s$. Here κ is a constant related to h_s that defines the radius of the support domain of the kernel function at point $\boldsymbol{x}$. For brevity, $W(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x'}, h_s)$ is shortened into W_{ij} representing the value of the kernel function between two

particles, i and j. This paper employs a cubic B-spline kernel function given by:

$$W_{ij} = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{1}{2}q^3, & 0 \le q < 1 \\ \frac{1}{6}(2-q)^3, & 1 \le q < 2 \\ 0, & q \ge 2 \end{cases} \tag{4}$$

where $\alpha_d = 15/7\pi h_s^2$ is the normalization constant in 2D space, and $q = \frac{|\boldsymbol{x_i} - \boldsymbol{x_j}|}{h_s}$ is defined as the relative distance between particles. Discretizing the integral representation as the summation of N neigboring particles within the support domain of particle i, a function and its gradient can be expressed as:

$$< f(\boldsymbol{x}_i) >= \sum_{j=1}^{N} f(\boldsymbol{x}_j) W_{ij} \Delta \boldsymbol{x}_j \tag{5}$$

$$< \nabla f(\boldsymbol{x}_i) >= \sum_{j=1}^{N} f(\boldsymbol{x}_j) \nabla W_{ij} \Delta \boldsymbol{x}_j \tag{6}$$

where $\Delta \boldsymbol{x}_j$ is the particle's volume in 3D space and the particle's area in 2D space.

Applying the SPH approximation, the continuity and momentum equations can be written as :

$$h_i = \sum_{j=1}^{N} V_j W_{ij} \tag{7}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^{N} V_j \left(\frac{P_i}{h_i^2} + \frac{P_j}{h_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla W_{ij} - \boldsymbol{g}_i - \frac{\boldsymbol{\tau}_{bi}}{\rho h_i} \tag{8}$$

where V_j is the constant volume of a particle, W_{ij} is the kernel function, and Π_{ij} is the stabilizing artificial viscosity term. The vector $\boldsymbol{g}_i$ is defined as $g\nabla z$, where ∇z is calculated from the terrain using finite differences only once and interpolated into the particle positions for simplicity. Note that the 2D SPH area with constant volume $A_j = h_j/V_j$ is analogous with the traditional 3D SPH volume with constant mass $V_j = \rho_j/m_j$.

The artificial viscosity term is used to stabilize and reduce the oscillation in the numerical solution. This paper adopts the artificial viscosity used in the works of Monaghan [2] and Xia [3] as:

$$\Pi_{ij} = -\frac{0.5\nu_{sig} \boldsymbol{u}_{ij} \cdot \boldsymbol{r}_{ij}}{\bar{h}_{ij} |\boldsymbol{r}_{ij}|} \tag{9}$$

$$\nu_{sig} = c_i + c_j - 2\frac{\boldsymbol{u}_{ij} \cdot \boldsymbol{r}_{ij}}{|\boldsymbol{r}_{ij}|} \tag{10}$$

where $\boldsymbol{r}_{ij}$ is the distance vector, $\bar{h}_{ij} = (h_i + h_j)/2$ is the mean flow depth and $c = \sqrt{gh}$ is the wave celerity.

(3) Rheological Model

To simulate debris flow behavior, the flow resistance or bed shear stress term τ_b must to be specified. Particularly, this study employs both the Manning's turbulent model and Coulomb's frictional model defined, respectively, as:

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2}}{h^{1/3}} \tag{11}$$

$$\tau_b = \rho g h \cos\alpha \tan\phi \tag{12}$$

where n is the Manning's friction coefficient, α is the slope gradient, and ϕ is the internal friction angle of the material. By modifying only two parameters, n and ϕ, the flow characteristics could be modified and calibrated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

(1) Debris Flow Flume Experiment

The model is used to simulate the debris flow experiments of Iverson et al. [1]. The experiment involves the release of a debris flow-like mixture of soil and water with a total volume of 11.78 m^3 and wet bulk density of 2,010 kg/m^3 over a rectangular concrete channel 95 m long, 2 m wide, and 1.2 m deep (**Fig. 1**). Upon release of the material, the propagation of the flow front is measured and plotted with time.

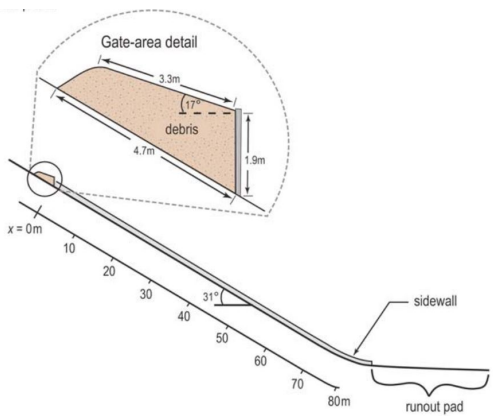


Fig. 1 Flume experimental setup, taken from Iverson et al.

To simulate the experiment, the debris flow was discretized into 2,353 particles with initial spacing of $\Delta x = 0.1$ m. The radius of the support domain is further defined as $\kappa h_s = 2.4\Delta x$. To maintain a reasonable amount of neighboring particles during the flow expansion or contraction, the smoothing length is modified and updated with respect to the initial depth and smoothing length of each particle. Wall boundary conditions are implemented using fixed virtual fluid particles whose positions and velocities are not evolved through time.

Parameter fitting and calibration of the flow resistance parameters, n and ϕ, are conducted to reproduce the results of the experiment. **Fig. 2** shows the effect of varying the flow resistance parameters in modifying the flow behavior. In both instances, reducing the values leads to less flow resistance and therefore higher flow velocities. The parameters that best replicated the experimental results are Manning's friction coefficient $n = 0.03$ for the flume floor

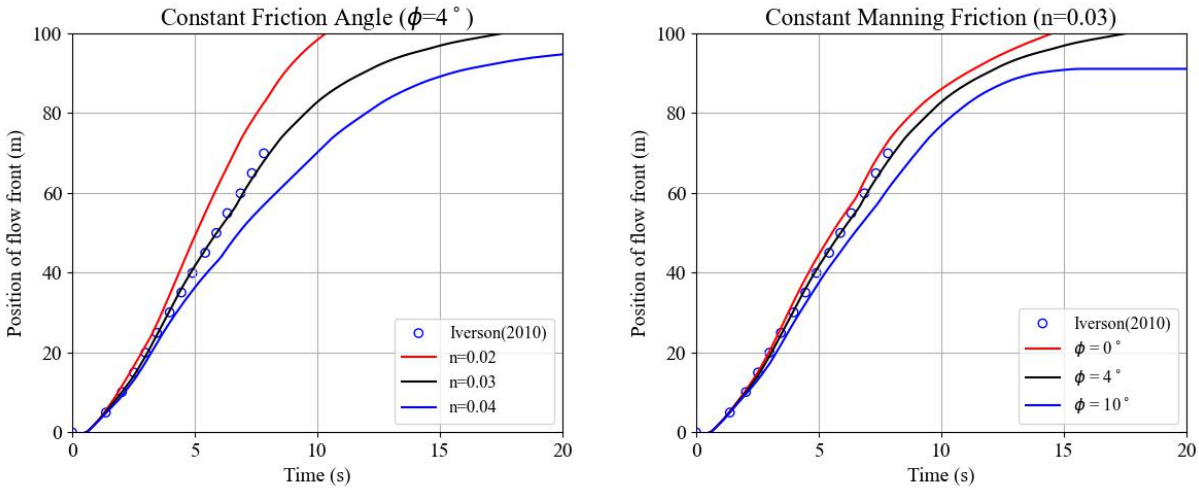


Fig. 2 Graphs showing the propagaton of the experimental and simulated flow front in time. The left figure shows the effect of varying the friction coefficient, while the right shows the effect of varying the internal friction angle.

and an internal friction angle $\phi = 4°$. This friction coefficient value corresponds to rough concrete or gravel bottom ($n = 0.03$) [4] consistent with the conditions of the experimental setup, while this friction angle suggests the residual strength of a post-failure mixture of fluidized soil and water. Sufficient selection of the parameters shows that the model can result in a reasonable agreement with the experiment demonstrating the applicability of both the numerical and rheologic model.

(2) Marumori Debris Flow Disasters

The model is then applied to simulate the debris flow disasters that occurred during the 2019 Typhoon Hagibis in Marumori, Miyagi, Japan. The terrain is characterized using a high-resolution digital elevation model (1 meter) of the study area taken after the 2019 event. The distribution of the source of slope failure is inferred from the analysis of post-event terrain morphology and the delineation of the actual observable debris flows. The geometric features of the slope failure is extracted from the post-failure condition of the terrain. The elevations (ridges) and depressions (valleys) are highlighted using a neighborhood focal statistics algorithm, where the mean elevation of the neighboring cells is subtracted from the elevation of the focal cell. A negative difference value specifies that the focal cell is lower than its neighbors and can then be considered a depression, and vice versa.

A threshold difference value is then determined using the delineated actual failure geometry. Moreover, assuming that the terrain is the equilibrated condition after slope failure, a threshold slope angle could be employed to highlight areas whose gradients have been lowered after failure. The intersection of the above conditions is then manually post-processed to remove unwanted artifacts outside the delineated failure geometry. Finally, the depths (volumes) are assumed to be the difference values obtained in the earlier neighborhood focal statistics algorithm.

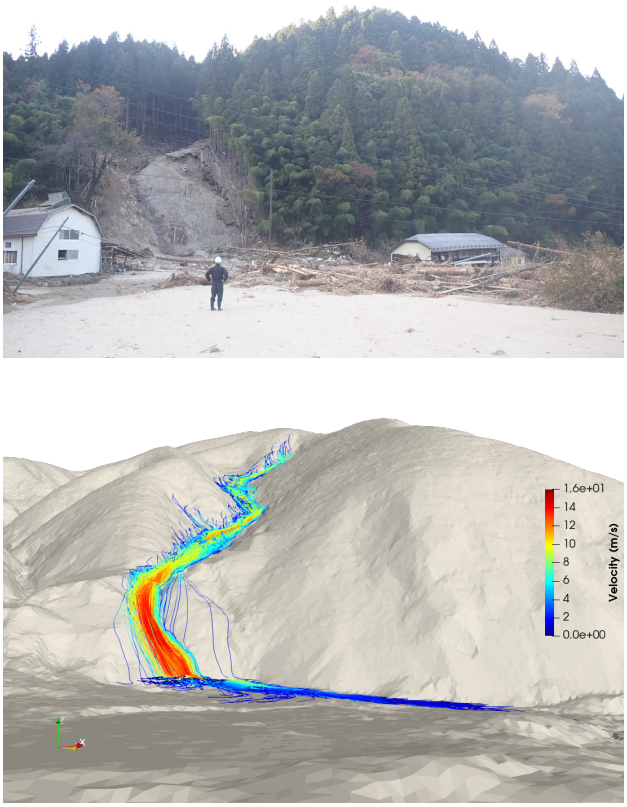


Fig. 3 Actual and simulated debris flow within Usudaira community.

Taking the experimental results earlier to be a quantitative benchmark of debris flow behavior, the Marumori debris flows are simulated using the same material properties and calibrated parameters in section 3.1, The Manning's friction coefficient, however, was modified to n=0.07 to

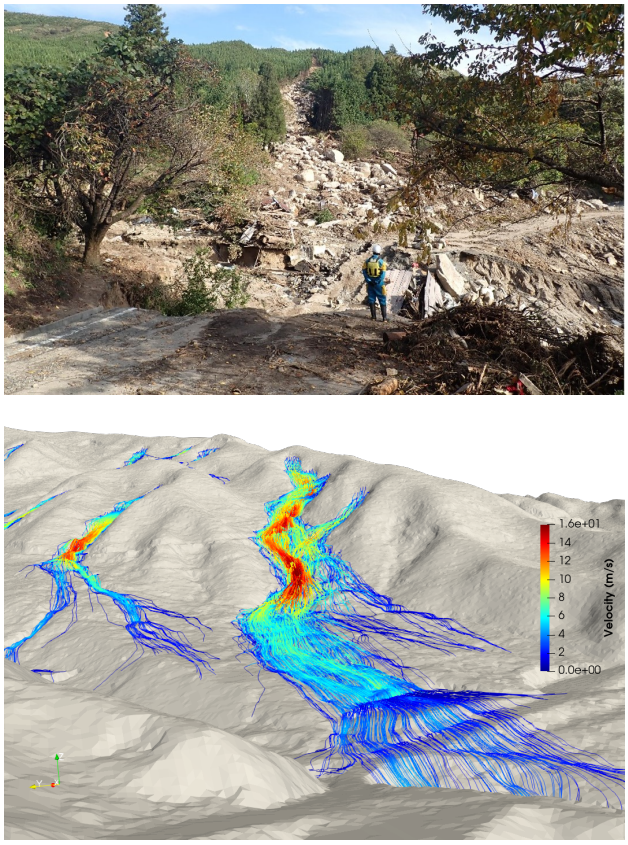


Fig. 4 Actual and simulated debris flow within Koyasu community.

correspond to mountain streams lined with cobbles and boulders [4] resembling actual field conditions.

Two areas in Marumori that sustained significant damage during the typhoon are analyzed in detail. The first area is the Usudaira community adjacent to the Gofukuya River that suffered multiple flooding and slope disasters. The computational domain covers a total area of 312,477 m^2, with debris positioned at the source areas and discretized into 17,608 particles with initial spacing of $\Delta x = 0.5$ m. The next area is within the Koyasu community covering a compuational domain area of 740,911 m^2. The debris flow along the source areas is dicretized into 32,292 particles with initial spacing of $\Delta x = 0.5$ m.

Fig. 3 and **Fig. 4** show some of the results within the computational domain of Usudaira and Koyasu communities, respectively, each depicting a simulation of a single debris flow event after 60s. It illustrates the pathlines of individual debris flow particles visualized (masked) at 20 particle intervals for better clarity. The pathlines depict the evolution of particle positions and velocities through space and time.

The results show peak velocities of 16.2 m/s and 17.4 m/s for Usudaira and Koyasu, respectively, conforming with local and global debris flow velocity estimates. Moreover, particle tracking also provides information regarding total distance travelled reaching distances of up to 600 m for both areas. An aerial view of the distribution of pathlines suggest that the model generally captures the physical behavior and response of the debris flows as confirmed by the close agreement of the simulated debris flow distributions with the delineated damaged areas (**Fig. 5**).

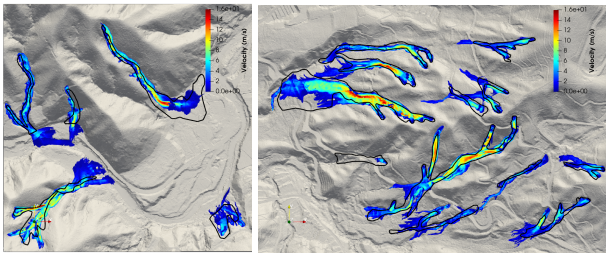


Fig. 5 Simulated results overlain by actual damage.

The above simulations demonstrate the applicability of the model in characterizing multiple debris flow occurrences over wide areas with intuitive and reasonable results. The model could provide necessary information such as debris flow velocities, propagation direction, and runout distributions that are expected to aid in the consideration, placement, and design of both soft and hard disaster prevention measures.

4. CONCLUSIONS

Using an SPH-based approach in solving the depth-integrated shallow water equations, the propagation velocity, behavior, and extent of an idealized single-phase debris flow have been modeled. Calibration of two material parameters related to the flow resistance terms allowed the model to conform with past or experimental data. Despite the numerical and theoretical simplifications, proposed method successfully reproduced the flow velocities of the full-scale experiment of Iverson et al.[1] and the runout extent of the debris flow disasters that occurred in Japan. Therefore, given proper calibration, the model can be used in the evaluation, assessment, or mitigation of would-be future debris flow hazards in the area. Moreover, the simplified 2D SWE framework provides a practical alternative for wide-area debris flow hazard studies.

ACKNOWLEDGMENT We would like to thank the Geospatial Information Authority of Japan for providing the high-resolution digital elevation model of Marumori Town.

REFERENCES

[1] Iverson, R. M. et al: The perfect debris flow? aggregated results from 28 largescale experiments. J Geophys Res, 2010.
[2] Monaghan, J. J.: SPH and Riemann Solvrs. J. Comp. Phys., 1997
[3] Xia, X. et al.: Balancing the source terms in a SPH model for solving shallow water equations. Adv. Water Res., 2013
[4] Chow, V.T.: Open channel hydraulics, 1959

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

ロバスト主成分分析に基づく沖合津波観測点配置の最適化

Optimization of Offshore Gauge Configuration with Robust Principal Component Analysis

藤田真粹 [1] 野村怜佳 [2] 大竹雄 [3] 越村俊一 [2] 森口周二 [2] 寺田賢二郎 [2]
Saneiki Fujita, Reika Nomura, Yu Otake, Shunichi Koshimura, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada

[1]東北大学大学院 工学研究科（〒 980-8572 宮城県仙台青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: saneiki.fujita.s8@dc.tohoku.ac.jp)
[2]東北大学 災害科学国際研究所（〒 980-8572 宮城県仙台青葉区荒巻字青葉 468-1）
[3]東北大学大学院 工学研究科（〒 980-8579 宮城県仙台青葉区荒巻字青葉 6-6-06）

In this study we present an optimization scheme to configure offshore wave gauges using machine learning and sparse sensing techniques. Specifically, the robust principal component analysis is employed for extracting low-dimensional spatial mode from a pre-computed tsunami scenario dataset. According to the low-rank spatial mode that is dominant for the whole tsunami propagation, the optimal sparse gauges' configuration is determined. As a demonstration, the optimal observation gauges off the coast of Shikoku is detected for 1564 possible Nankai Trough earthquakes. The forecast capability of the detected gauges' configuration is examined within the framework of the previous tsunami scenario detection.

Key Words : *Gauge Configuration Optimization, Robust Principal Component Analysis, Tsunami Forecasting*

1. 緒言

巨大地震とそれに伴う津波は沿岸地域に甚大な被害を及ぼす．近年，津波被害低減を目的に，沖合での津波観測データを利用したリアルタイムリスク評価手法が提案されている [1]．こうした手法は津波の観測情報を直接的に使用することから，観測地震動データを使用する従来手法に対して，予測不確実性がより小さいという利点がある．一方，国土全体を対象としたリアルタイムリスク評価の実現のためには，広範囲かつ密な津波観測網の導入が望ましいが，計測器の設置や運用に要する費用が問題となる．そのため，スパースな配置でありながら，襲来する津波の情報を効率的に観測できる観測網の設計が必要となる．すなわち，リアルタイム予測に求められる「即時性」を満足するような，津波発生直後の沖合での微小な海面変動に敏感な観測網を設計することが求められる．

本研究ではロバスト主成分分析（RPCA: Robust Principal Component Analysis）[2] による低ランク構造の特徴量抽出と，スパースセンサーの最適配置手法 [3] を用いた津波観測点配置の最適化を提案する．RPCA は主成分分析（PCA: Principal Component Analysis）を拡張した手法であり，局所的もしくは偶発的に生じる外れ値を除去した低ランク構造を同定し，データに対して支配的な特徴量の抽出を可能にする．これにより，沿岸部において局所的に増幅した波高成分を外れ値として除去し，沖合での津波伝播を低ランク構造として扱うことが可能となる．検証として，南海トラフ地震・津波を想定し，RPCA と PCA それぞれを用いた最適化によって四国沖合での観測点配置を決定し，比較を行った．具体的には最適化により特定された少数の観測点における観測情報を入力とし，津波シナリオ同定に基づくリスク予測 [1] の精度を比較することで，本手法の優位性を確認する．

2. ロバスト主成分分析による沖合観測点配置の最適化手法

(1) スパース観測点配置の最適化

本研究では，スパースセンシングのためのセンサー位置最適化手法 [3] に従い，n 点の候補位置での波高情報の復元を可能とする $p\ (< n)$ 点の組み合わせを特定することを観測点配置の最適化と位置付ける．n 点の候補観測点位置での時刻 t における波高 $\boldsymbol{x}_t \in \mathbb{R}^n$ は，空間モード行列 $\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ を用いて，次式のように表すことができる．

$$\boldsymbol{x}_t = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{a}_t \approx \boldsymbol{\Phi}_r \boldsymbol{a}_t \tag{1}$$

ここで，$\boldsymbol{\Phi}_r \in \mathbb{R}^{n \times r}$，$\boldsymbol{a}_t \in \mathbb{R}^r$ はそれぞれ，r 次元まで次元縮約された空間モード行列と係数ベクトルである．式 (1) から n 次元の波高情報は，次元縮約空間モード行列 $\boldsymbol{\Phi}_r$ を介することで r 次元の状態ベクトル $\boldsymbol{a}_t$ で表現できる．

いま，n 個の候補観測点での波高 $\boldsymbol{x}_t$ と $p(< n)$ 個の少数観測点における波高 $\boldsymbol{y}_t \in \mathbb{R}^p$ をダウンサンプリング行列 $\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ により次のように関連付けることを考える．

$$\boldsymbol{y}_t = \boldsymbol{C} \boldsymbol{x}_t + \boldsymbol{w} \approx \boldsymbol{C} \boldsymbol{\Phi}_r \boldsymbol{a}_t + \boldsymbol{w} \tag{2}$$

この式において，$\boldsymbol{w} \in \mathbb{R}^p$ は観測情報に含まれる誤差などのノイズベクトルであり，少数の観測点位置を決定するダウンサンプリング行列 $\boldsymbol{C}$ は次式のように書き表さ

れる．

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{\gamma_1} & \boldsymbol{e}_{\gamma_2} & \cdots & \boldsymbol{e}_{\gamma_p} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

ここで，$\gamma_i \in \{1, ..., n\}$ は選定される観測点番号であり，$\boldsymbol{e}_{\gamma_i} \in \mathbb{R}^n$ は γ_i 番目の要素を 1，その他の要素を 0 とした n 次元ユークリッド空間の標準基底である．そして，式 (2) の逆問題を考えると，r 次元の状態量ベクトル $\boldsymbol{a}_t$ を，p 次元のスパース観測情報 $\boldsymbol{y}_t$ から推定することができる．

$$\hat{\boldsymbol{a}}_t = (\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}_r)^{\dagger}\, \boldsymbol{y}_t \tag{4}$$

ここで，$(\bullet)^{\dagger}$ は $\bullet$ の一般化逆行列である．推定された状態ベクトル $\hat{\boldsymbol{a}}_t$ を式 (1) に代入することで，p 次元観測量に基づく n 次元の全候補位置での波高推定が可能となる．

すなわち，推定結果 $\hat{\boldsymbol{a}}_t$ と真値との誤差 $\epsilon = \boldsymbol{a}_t - \hat{\boldsymbol{a}}_t$ が最小化されるような配置である場合，p 点から n 候補点の情報を高精度に復元することができているといえる．よって本研究では，次式のように推定誤差の共分散行列の行列式を最小化するという目的関数を設定する．なお，観測ノイズ $\boldsymbol{w}$ についてはガウス分布に従うもの（$\boldsymbol{w} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{I})$）と仮定した．

$$\min_{\forall \boldsymbol{C}} \det\left[\mathrm{Var}(\boldsymbol{a}_t - \hat{\boldsymbol{a}}_t)\right] = \min_{\forall \boldsymbol{C}} \det\left[(\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}_r)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}_r\right]^{-1} \tag{5}$$

このような組み合わせ最適化問題を効率的に解く手法として，列ピボット付き QR 分解に基づく貪欲法 [3] が提案されている．これに倣い，本研究でも次式のような行列展開を適用する．

$$\left(\boldsymbol{\Phi}_r\boldsymbol{\Phi}_r^{\mathrm{T}}\right)\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{Q}\boldsymbol{R} \tag{6}$$

ここで，$\boldsymbol{Q} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ は直交行列であり，$\boldsymbol{R} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ は上三角行列である．また，$\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ は $\boldsymbol{R}$ の対角成分を降順に並び替えるための置換行列である．逐次的に $\boldsymbol{R}$ の対角成分を最大化する行列 $\boldsymbol{C}$ を特定することにより，最適化目的関数における貪欲的な行列式の最小化が達成される．

(2) ロバスト主成分分析による低ランクな沖合観測情報の抽出

主成分分析（PCA）は教師無し機械学習の一種であり，次式のようにデータ行列 $\boldsymbol{X}$ に特異値分解を適用することにより，特徴量抽出と次元縮約を可能とする手法である．

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \approx \boldsymbol{\Phi}_r\boldsymbol{\Sigma}_r\boldsymbol{V}_r^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

ここで，データ行列 $\boldsymbol{X}$ は，式 (1) における波高ベクトル $\boldsymbol{x}_t$ を列方向に並べた次式のものとして定義される．

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} | & & | \\ \boldsymbol{x}_{t=1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{t=m} \\ | & & | \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n\times m} \tag{8}$$

式 (7) における $\boldsymbol{\Phi}$ と $\boldsymbol{V}$ は，それぞれ左特異ベクトルと右特異ベクトルを列方向に並べた行列であり，$\boldsymbol{\Sigma}$ は特異値を対角成分に降順に並べた行列で，$\boldsymbol{\Sigma}_r$，$\boldsymbol{\Phi}_r$，$\boldsymbol{V}_r$ はそれぞれ次元縮約した行列で，大きい順に r 番目までの特異値とそれに対応する r 個の特異ベクトルのみが格納されている．先述のように，本研究における最適化は，PCA により抽出・次元縮約された空間モード行列 $\boldsymbol{\Phi}_r$ に応じて観測点位置の選定を行う．しかし，データの分散を参照する PCA は外れ値の存在に敏感である．そのため，津波波高データに対して PCA を適用した場合，抽出される特徴量は波高の振幅が大きい沿岸部での観測点情報に強く依存してしまい，即時予測性に優れた沖合観測点の情報が反映されにくいという課題が生じてしまう．

このような課題を克服するため，本研究ではロバスト主成分分析（RPCA）[2] を適用することで沿岸部での情報を効果的に除去し，沖合で伝播する波に対して支配的な特徴量の抽出を目指す．RPCA では，対象とするデータ行列 $\boldsymbol{X} \in \mathbb{R}^{n\times m}$ が，秩序構造を格納した低ランク行列 $\boldsymbol{L} \in \mathbb{R}^{n\times m}$ と外れ値を格納したスパース行列 $\boldsymbol{S} \in \mathbb{R}^{n\times m}$ の和で構成されているものとし，データ行列 $\boldsymbol{X}$ から各行列 $\boldsymbol{L}$，$\boldsymbol{S}$ の同定を目的とする．すなわち，沿岸の高振幅な観測情報を $\boldsymbol{S}$，沖合の観測情報成分を $\boldsymbol{L}$ として可算分解することを可能にする．

この同定は，次式のように低ランク行列 $\boldsymbol{L}$ のランクとスパース行列 $\boldsymbol{S}$ の L0 ノルムの最小化問題解くことで達成される．

$$\min_{\boldsymbol{L}\,\boldsymbol{S}} \mathrm{rank}(\boldsymbol{L}) + \|\boldsymbol{S}\|_0 \quad \text{subject to } \boldsymbol{L} + \boldsymbol{S} = \boldsymbol{X} \tag{9}$$

ただし，行列のランク最小化問題と L0 ノルム最小化問題はともに非凸最適問題に属する．そのため，実際にはそれぞれを凸最適化問題へと緩和した核ノルムと L1 ノルムの最小化問題を解くことにより，近似的に行列の低ランク性とスパース性を満たす行列を同定する．

$$\min_{\boldsymbol{L}\,\boldsymbol{S}} \|\boldsymbol{L}\|_* + \lambda\|\boldsymbol{S}\|_1 \quad \text{subject to } \boldsymbol{L} + \boldsymbol{S} = \boldsymbol{X} \tag{10}$$

ここで，λ は重みパラメータであり，対象行列 $\boldsymbol{X} \in \mathbb{R}^{n\times m}$ の次元から $\lambda = 1/\sqrt{\max(n, m)}$ により設定される．また，$\|\bullet\|_*$ は核ノルムであり，$\bullet$ の特異値の総和により算出される．このような等式制約のある凸最適化問題は拡張ラグランジュ法 [4] により容易に解くことができる．

データ行列 $\boldsymbol{X}$ の代わりに，低ランク行列 $\boldsymbol{L}$ に対して特異値分解を適用し，次式のように特徴量の抽出と次元縮約を行う．

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{\Phi}^L\boldsymbol{\Sigma}^L\boldsymbol{V}_r^{L^{\mathrm{T}}} \approx \boldsymbol{\Phi}_r^L\boldsymbol{\Sigma}_r^L\boldsymbol{V}_r^{L^{\mathrm{T}}} \tag{11}$$

外れ値に依存しない低ランク行列 $\boldsymbol{L}$ に対応する特徴量 $\boldsymbol{\Phi}^L$ は，式 (7) における PCA での特徴量 $\boldsymbol{\Phi}$ に対して，より支配的な低次の空間モードを抽出することが可能となる．すなわち，沿岸の高振幅な観測情報 $\boldsymbol{S}$ を除去した，沖合の観測情報成分 $\boldsymbol{L}$ によってのみ，観測点位置最適化（式 (5)）を考えることができる．

3. 検証例題

RPCA による低ランク成分の特徴量抽出及び観測点配置最適化の有効性を四国沖を対象として例証する．まず，南海トラフ地震・津波を想定し，地震規模と発生位

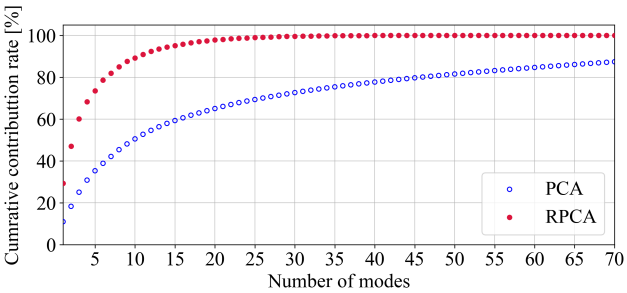
置の組み合わせから作成した 1564 件の仮想的な地震・津波シナリオ [5] のうち，ランダムに選定した 1414 件を学習シナリオとして用い，PCA と RPCA により抽出された特徴量から観測点の最適配置を同定する．残る 150 件をテストシナリオとし，それぞれの最適観測点で得られる情報を入力としたリアルタイム津波予測 [1] を実施する．データ行列 $\boldsymbol{X}$ は TUNAMI-N2[6] による津波シミュレーションから得られる 1414 件のシナリオにおける n=134 の観測点（**図–2**）での波高の時刻歴データを集約したものとする．すなわち，各学習シナリオについて式 (8) により構成される行列 $\boldsymbol{X}^i$ を列方向に並べることにより，1414 件の学習シナリオを集約したデータ行列 $\boldsymbol{X}$ を次式のように定義する．

$$\boldsymbol{X} = \left[\begin{array}{ccc} \boldsymbol{X}^{i=1} & \cdots & \boldsymbol{X}^{i=1414} \end{array} \right] \tag{12}$$

データ行列 $\boldsymbol{X}$ に対して，PCA と RPCA をそれぞれ適用し，求められた特異値 σ_i を次式に代入することから算定した，i 番目の空間モードの寄与率を累積して**図–1** に示す．

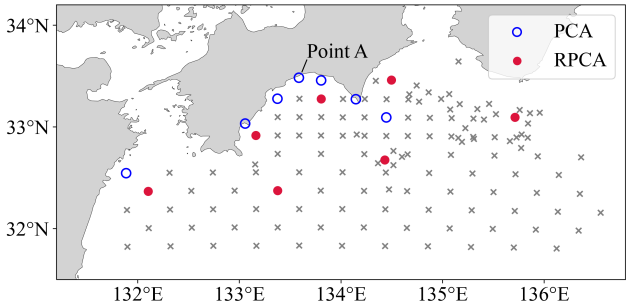
$$c(i) = \frac{\sigma_i}{\sum_{j=1}^{n} \sigma_j} \tag{13}$$

図–1 より，RPCA により抽出した空間モード（赤点）は PCA（青点）と比較して，低次の成分がより高い寄与を有していることが確認できる．実際，RPCA による抽出の場合，r=7 までの空間モードの累積寄与率は約 82 %であるが，PCA の場合，データ行列の 80 %を説明するためには r=46 までの空間モードを使用する必要がある．このことから，データ行列から外れ値を除去したことで，支配的な低次の特徴量抽出が達成できているといえる．



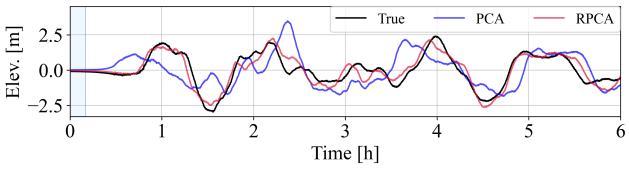
図–1 空間モードの累積寄与率

四国沖に設置した 134 点の候補観測点から，次元縮約後の空間モード $\boldsymbol{\Phi}_{r=7}$，$\boldsymbol{\Phi}^L_{r=7}$ をそれぞれ用いて最適化された p=7 の観測点配置を**図–2** に示す．PCA 空間モード $\boldsymbol{\Phi}_{r=7}$ を用いた最適化（青点）では，選定された観測点が沿岸部に集中していることが確認できる．一方で，RPCA 空間モード $\boldsymbol{\Phi}^L_{r=7}$ に基づく最適配置（赤点）では沿岸部への集中傾向が緩和され，沖合から沿岸まで網羅的に観測点が選定されていることがわかる．この結果から，RPCA を用いることにより，沿岸部での高振幅成分を外れ値とみなし，沖合での低振幅な低ランク成分の特徴量を抽出することで，より合理的な最適化が実現できるといえる．

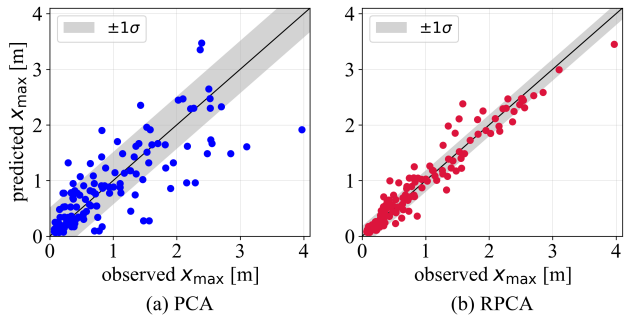


図–2 7 点の観測点配置の最適化結果

図–2 に示す二つの最適配置について，津波予測に対する有用性の検証を実施する．150 件の検証用シナリオにおける，p=7 の観測点での波高情報 10 分間分を入力とし，ベイズ更新に基づく最尤シナリオ同定から津波波高予測を行う．150 件のうち 1 件のテストシナリオについて，高知市沿岸部（**図–2** Point A）での津波波形とその予測結果を**図–3** に示す．PCA による最適観測点を用いた予測結果（青線）に対して，RPCA を使用した場合の予測（赤線）は時系列データのトレンドや振幅などがテストシナリオの波形（黒線）に類似していることがわかる．加えて，Point A（**図–2**）における各テストシナリオの観測波高と予測波高の最大値を，全 150 件についてプロットしたものを**図–4** に示す．どちらの予測結果においても正の相関傾向が見られるものの，RPCA により最適化した観測網（**図–4** (b)）の方が全てのテストシナリオに対してより精度の高い予測をしていることが確認できる．以上の結果から，RPCA により抽出された支配的な低次の空間モードと，それを参照した少数の最適観測点は，津波予測において有用であるといえる．



図–3 高知市沿岸観測点（図–2 Point A）における津波波形の予測結果



図–4 150 件のテストシナリオに対する観測波高と予測波高の最大値の比較

4. 結言

本研究では，ロバスト主成分分析 (RPCA) とスパースセンシング技術を適用して，津波リスク予測のための観測点位置最適化手法を提案した．具体的には，津波波高データから沖合の観測波高情報が強く反映される低ランク構造の抽出を行い，得られた特徴量に基づいた観測点配置の最適化を行った．四国沖を対象とした検証例題からは，RPCA に基づく最適化により，従来の PCA による最適化では沿岸部に集中してしまっていた観測点を，沖合から沿岸まで網羅的に配置させることが可能であることを確認した．また，南海トラフ地震・津波を想定した即時津波予測を実施したところ，RPCA により算定される 7 点の最適観測点は，PCA による最適観測点配置より高精度な津波波高予測が可能であることを示した．以上の結果から，提案する手法が即時的な津波予測において有用であると確認できた．

参考文献

[1] Reika Nomura, Saneiki Fujita, Joseph M Galbreath, Yu Otake, Shuji Moriguchi, Shunichi Koshimura, Randall J LeVeque, and Kenjiro Terada. Sequential bayesian update to detect the most likely tsunami scenario using observational wave sequences. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 127, No. 10, p. e2021JC018324, 2022.

[2] Emmanuel J Candès, Xiaodong Li, Yi Ma, and John Wright. Robust principal component analysis? *Journal of the ACM (JACM)*, Vol. 58, No. 3, pp. 1–37, 2011.

[3] Krithika Manohar, Bingni W Brunton, J Nathan Kutz, and Steven L Brunton. Data-driven sparse sensor placement for reconstruction: Demonstrating the benefits of exploiting known patterns. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 38, No. 3, pp. 63–86, 2018.

[4] Zhouchen Lin, Minming Chen, and Yi Ma. The augmented lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted low-rank matrices. *arXiv preprint arXiv:1009.5055*, 2010.

[5] 野村怜佳, 藤田真粹, 大竹雄, 森口周二, 越村俊一, 寺田賢二郎, 橋詰正広. 模擬津波動態とベイズ更新によるリアルタイム津波リスク評価手法. 日本計算工学会論文集, Vol. 2022, pp. 20220003–20220003, 2022.

[6] Fumihiko Imamura, Ahmet Cevdet Yalciner, and Gulizar Ozyurt. Tsunami modelling manual. *UNESCO IOC international training course on Tsunami Numerical Modelling*, 2006.

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-05] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (5)

座長:吉村 忍(東京大学)

Wed. May 31, 2023 4:45 PM - 6:00 PM Room A (1F Conference Room 101)

[A-05-01] (キーノート講演)多様なシナリオデータベースの融合による津波リスク同定

*野村 怜佳[1]、大竹 雄[1]、森口 周二[1]、越村 俊一[1]、LeVeque Randall[2,1]、寺田 賢二郎[1] （1. 東北大学、2. ワシントン大学）

4:45 PM - 5:15 PM

[A-05-02] 風力発電風車の配置最適化問題への量子コンピューティング適用

*川原 仁志[1]、佐藤 富一[1]、門脇 高広[1]、里見 英俊[1] （1. 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）

5:15 PM - 5:30 PM

[A-05-03] 都市型水害解析ソフトウェアの開発とその基礎的検証

*高椋 恵[1]、眞鍋 尚[1]、溝内 秀男[1] （1. みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社）

5:30 PM - 5:45 PM

[A-05-04] デイサービス施設における排泄介助マルチエージェントシミュレーション

*高木 碧[1]、藤井 秀樹[1]、内田 英明[2]、吉村 忍[1] （1. 東京大学、2. 大阪大学）

5:45 PM - 6:00 PM

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

多様なシナリオデータベースの融合による津波リスク同定

Tsunami risk evaluation by the combined use of heterogenous datasets

野村怜佳 [1)]，大竹雄 [2)]，森口周二 [3)]越村俊一 [4)]Randall J. LeVeque[5)]，寺田賢二郎 [6)]
Reika Nomura, Yu Otake, Shuji Moriguchi, Shunichi Koshimura, Randall J. LeVeque, Kenjiro Terada

[1)]博（工） 東北大学災害科学国際研究所 （〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1），
e-mail:nomura@irides.tohoku.ac.jp
[2)]博（工） 東北大学大学院工学研究科（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）
[3)]博（工） 東北大学災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）
[4)]博（工） 東北大学災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）
[5)]Ph.D. Department of Applied Mathematics, University of Washington (Seattle, WA, USA)
[6)]Ph.D. 東北大学災害科学国際研究所（〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）

In this study, we investigate the applicability of the transfer learning methods to combine the heterogeneous datasets for previous tsunami risk evaluation method. We first set up two different databases, which are created by two different tsunami propagation/inundation simulation tools with the corresponding techniques for generating fault rupture. With these two databases both consisting of over 1000 tsunami scenarios triggered by Nankai Trough, we proceed to the unsupervised learning by proper orthogonal decomposition (POD) where the so-called “frustratingly easy domain adaption” is implemented. Comparing the prediction results based on the learning with (1) simple database summation and with (2) a domain adaption, we then argue the applicability and the possibility of the combining the heterogeneous datasets for the early tsunami forecast.
Key Words : *Proper orthogonal decomposition, Tsunami scenario database, Domain Adaption*

1. 序論

リアルタイム津波リスク予測において機械学習は非常に有望なツールである．こうした取り組みにおいて，津波災害が低頻度で観測データが極端に少ないことから，予測に用いられる機械の学習には，初期・境界条件を変化させた大量のシミュレーション結果を用いることが一般的である．このことから，学習に用いられるアルゴリズム，データに対する処理だけでなく，データベースを構成するシミュレーション結果自体に対してもその精度や妥当性といった観点から十分な配慮がなされるべきである．しかしながら，数値解析手法や離散化における近似，または断層破断モデリングなどに由来し，データベース内のシミュレーション結果がなんらかの固有性を有し，学習に偏重を生じさせる可能性がある．こうした懸念を払しょくするには，単一のシミュレーションツールに頼らず，さまざまなツールを併用することで生成可能な多様な津波シナリオデータベースを融合して学習を行うことが効果的であると考えらえる．

本研究では，異なる津波シナリオデータベースを効果的に融合・学習することにより，教師なし学習に基づく津波シナリオ同定手法の精度向上の可能性について検討する．具体的には,「ソースドメイン」と呼ばれる別のデータベースの重要な情報を転送することで、目的のデータベース（ターゲットドメイン）の学習プロセスを改善する転移学習手法 [1] のアプローチに着目し，離散化手法や解析条件などが異なる２つの津波シナリオデータベースを，ソースとターゲットの２つに区分して取り扱うことで，シナリオ同定に基づく津波リスク評価の性能が向上するか，試行を通じて明らかにする．

2. シナリオ同定手法 [2]

(1) 教師なし学習としての固有直交分解

本研究では，Nomura et al.[2] の提案した逐次更新型津波リスクシナリオ同定手法の枠組みにおいて，異なるデータベースを融合した場合の学習の効果を試行する．本手法では，津波シナリオデータベースに対し固有直行分解を行い，それらの結果を事前学習の結果として利用することで，実災害発生時，逆行列計算およびベイズ更新によってデータベース内から最尤シナリオを同定する手続きをとる．

いま，シナリオ数を N_s，各シナリオにおいて N_g 個の模擬観測点毎に得られる時間離散的な波高データ（以降, 模擬観測点データ）の数を m とし一連のシナリオシミュレーション結果すべてを格納した次の行列 $\boldsymbol{X}$ を “データ行列” と呼ぶこととする。

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_1 & \boldsymbol{x}_2 & \dots & \boldsymbol{x}_j & \dots & \boldsymbol{x}_{N_s} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_g \times M}, \tag{1}$$

上式おいて M は離散的な時刻歴データの数 m とシナリオ数 N_s を乗じた値となっている．各マトリクス $\boldsymbol{x}_j$ はシナリオ j の解析において得られる模擬観測点データ

が次のように格納されている．

$$\boldsymbol{x}_j = \begin{bmatrix} | & | & & | \\ \boldsymbol{\eta}_j^{(t_1)} & \boldsymbol{\eta}_j^{(t_2)} & \dots & \boldsymbol{\eta}_j^{(t_m)} \\ | & | & & | \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_g \times m} \tag{2}$$

$$\text{with} \quad \boldsymbol{\eta}_j^{(t)} = \left[\eta_{1,j}^{(t)} \quad \eta_{2,j}^{(t)} \quad \dots \eta_{N_g,j}^{(t)}\right], \tag{3}$$

データ行列 $\boldsymbol{X}$ に対して，次のように特異値分解 (Singular Value Decomposition) を行うことで，全シナリオに共通する波高の空間分布特性を表すモード行列と，シナリオに依存して時間変化する係数行列とに分解することができる．

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \approx \boldsymbol{\Phi}_r \boldsymbol{A}_r, \left(\boldsymbol{A}_r = \boldsymbol{\Sigma}_r \boldsymbol{V}_r^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{r \times M}\right). \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{\Phi}_r \in \mathbb{R}^{n \times r}$ は固有値の大きさ順に並べ変えたときの r 番目までの固有ベクトル（固有モード）を格納した次元削減後のモード行列である．一方 $\boldsymbol{A}_r$ は，各モードに対応する全シナリオの係数をブロック行列化し次のように格納した行列である．

$$\boldsymbol{A}_r = \left[\boldsymbol{\alpha}_1 \quad \boldsymbol{\alpha}_2 \quad \dots \quad \boldsymbol{\alpha}_j \quad \dots \quad \boldsymbol{\alpha}_{N_s}\right], \tag{5}$$

ここで，各ブロック行列 $\boldsymbol{\alpha}_j \in \mathbb{R}^{r \times m}$ には j 番目のシナリオに依存した係数が格納されている．すなわち，モード $\boldsymbol{\Phi}_r$ がシナリオや時刻推移に対して不変な情報であるのに対して，係数 $\boldsymbol{\alpha}_j$ はシナリオや時間を特徴づける係数が格納された行列である．

いま，津波イベント χ が発生した場合を考える．ある時刻 t において全観測点が取得する波高データを格納したベクトル $\boldsymbol{\eta}_\chi^{(t)} \in \mathbb{R}^{N_g \times 1}$ を用いることで，時刻 t における実際の津波イベント χ の係数 $\boldsymbol{\alpha}_\chi^{(t)}$ は次のように逆算することができる．

$$\boldsymbol{\alpha}_\chi^{(t)} = \boldsymbol{\Phi}^\dagger \boldsymbol{\eta}_\chi^{(t)} \tag{6}$$

このようにして算定される係数 $\boldsymbol{\alpha}_\chi$ とあらかじめデータベース化されたシナリオ $j = 1, \dots N_s$ それぞれの係数 $\boldsymbol{\alpha}_j$ を用いてベイズ更新を行うことで，最尤シナリオを同定する．詳細については [2] を参照されたい．

(2) 多様なデータベースの融合による学習

前節 (1) で述べた，データマトリクスに対する固有直交分解（式 (1)〜(5)）は実災害の事前に行う「学習」に相当する．いま，シミュレーションツールや解析条件シナリオの総数などに差異があるものの，(i) 対象地域，(ii)N_g 点の模擬観測点位置が整合している 2 つの津波シナリオデータベースがある状況を考える．これら 2 つのシナリオデータベースそれぞれを式 (1) の規則にならって，マトリクス形式にまとめた際，一方をソース $\boldsymbol{X}_{src} \in \mathbb{R}^{N_g \times M_{src}}$，他方をターゲット $\boldsymbol{X}_{tgt} \in \mathbb{R}^{N_g \times M_{tgt}}$ と呼ぶこととし，式 (4) で特異値分解の対象となるデータマトリクスの生成方法として，次項 a)，b) で述べるの 2 つの方法を考えることとする．なお，本稿においてソースとターゲットという 2 つの呼称は，データベースに含まれるシナリオ数の多寡，シナリオの多様性に関する優劣関係に紐づいたものではなく，単に 2 つのデータベースを区別するための便宜的なものであることに注意されたい．

a) 単純な加算によるデータベース融合

２つのデータベース，$\boldsymbol{X}_{src}$ 及び $\boldsymbol{X}_{tgt}$ の２つを列方向に結合したマトリクスとしてデータマトリクス $\boldsymbol{X}$ を定義し，モード $\boldsymbol{\Phi}_r$ 及び係数 $\boldsymbol{A}_r$ を抽出するものである．

$$\boldsymbol{X} = \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{X}_{src} & \boldsymbol{X}_{tgt} \end{array}\right] \in \mathbb{R}^{N_g} \tag{7}$$

$$\approx \left[\boldsymbol{\Phi}_r\right] \cdot \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{A}_{src} & \boldsymbol{A}_{tgt} \end{array}\right] \tag{8}$$

b) ドメイン適合法 [1] によるデータベース融合

Daumé III[1] の提案した “Easy adaption” に基づき，２つのデータベース $\boldsymbol{X}_{src}$ 及び $\boldsymbol{X}_{tgt}$ を次の規則によって列方向・行方向の両方に結合する．

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{src} & \boldsymbol{X}_{tgt} \\ \boldsymbol{X}_{src} & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{X}_{tgt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{—— Common ——} \\ \text{—— Source ——} \\ \text{—— Target ——} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3N_g \times n} \tag{9}$$

$$\approx \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{r,c} \\ \boldsymbol{\Phi}_{r,s} \\ \boldsymbol{\Phi}_{r,t} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{A}_{src} & \boldsymbol{A}_{tgt} \end{array}\right], \tag{10}$$

式 (9) に示すように，この結合の方法では，1 から N_g 段目までの上三分の一が２つのデータベース双方を含む共通パート（Common），$N_g + 1$ 段から $2N_g$ 段までの中段パートがソースデータ（Source）のみを，$2N_g + 1$ から $3N_g$ 段までの下三分の部分がターゲットデータの情報のみを含むように構成されており，このようなデータマトリクスの構成をとることで，２つのデータベースに共通するモード成分 $\boldsymbol{\Phi}_{r,c}$，各データベース毎に抽出されるモード成分 $\boldsymbol{\Phi}_{r,s}$，$\boldsymbol{\Phi}_{r,t}$ との３つのパートで考えることができる．

3. 異なるシナリオデータベースの融合による津波リスク評価

(1) 津波シナリオデータベース

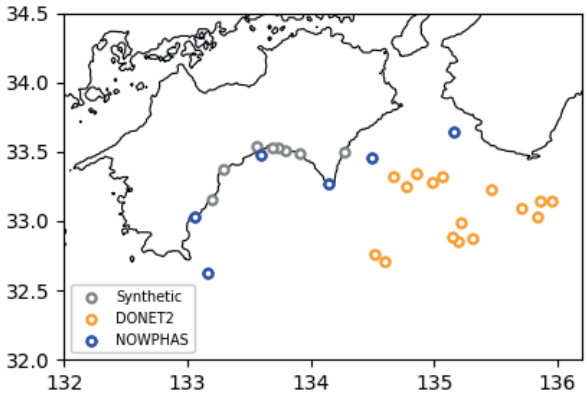
前節で説明した 2 つのでデータベースの結合方法 a) と b) それぞれの有効性について検証するため，シミュレーションツールや初期条件の生成方法が異なる 2 つの津波シナリオデータベースを用いた検証を行った．各シナリオデータベースの詳細は**表–1** にまとめる．両者とも，マグニチュードの比較的大きい南海トラフ沖地震に誘発される津波シナリオを格納しているが，空間離散化や，津波波源となる断層破壊のモデル化方法に差異がある．２つのシナリオデータベース間で共通する模擬観測点の位置は**図–1** に示すとおりである．全 30 観測点のうち，16 点が DONET2，6 点が NOWPHAS 観測点と同様の位置となっている．

(2) ２種データベースの融合による津波リスク評価結果

表–1 に示す２つの津波シナリオデータベースを，2.(2) で詳述した a) 単純な加算と b) ドメイン適合の２つの方

表–1 Tsunami scenario dataset used in both target/source domain

	Target	Source
Number of gauges N_g	30	
Number of scenarios N_s	1255	1874
Magnitude classes	7.6, 7.9, 8.2, 8.5, 8.8	8.1, 8.3, 8.5, 8.7, 8.9
Fault rupture modeling	Okada model[4]	`fakequake` software[6]
Tsunami simulation tool	TUNAMI-N2[5] (Finite difference method)	`GeoClaw`[7] (Finite volume method)



図–1 模擬観測点の位置（N_g=30）：計算上仮想的に配置した 8 点（灰）に加え DONET2 と同位置の 16 点（橙）NOWPHAS と同位置（青）の 6 点によって構成される

法で融合し，固有直交分解及びベイズ更新を行うことで津波リスク評価を行った．ここでは，1874 シナリオのデータベースをソースデータ $\boldsymbol{X}_{src}$ を，1255 シナリオデータベースを 7:3 の割合でランダムに分割したうちの 878 シナリオ（7 割）を用いてターゲットデータ $\boldsymbol{X}_{tgt}$ を作成した．**図–2** に，b) ドメイン適合法 (式 (9)) によるデータマトリクスから抽出されたモード，共通部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,c}$，ソース部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,s}$，ターゲット部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,t}$ それぞれの空間分布を，対応する模擬観測点上にプロットしたものを示す．**図–2** 上段に示す第 1 モードの空間分布については，三つのパート（共通部，ソース部，ターゲット部）によらず，沿岸部ほど大きく，沖合部ほど小さい値になっていることがわかる．一方，より高次のモードである第 8 モードの空間分布を可視化してみたところ，共通部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,c}$ とソース部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,s}$ とではやや異なる分布傾向が観察された．一方，パネル右側に位置するターゲット部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,t}$ の空間分布傾向が共通部 $\boldsymbol{\Phi}_{r,c}$ との空間分布傾向により類似していることから，共通部モードがターゲットデータの影響をより強く受けていると考えられる．これらの観察から，2 つのシナリオデータベースをドメイン適合法によって結合することで，各データベースが共通部の空間分布特性にどのように影響を与えているかを観察できるといえる．

ターゲットデータベースの残りの 3 割（377 シナリオ）を，テストシナリオすなわち検証データとして用い，データベースの結合方法の違いによる津波リスク評価結果の精度を確認した．377 件のうち，代表的な 1 シナリオの結果を可視化した**図–3**(a)，(b) の比較から，a) 単純な加算によってモード・係数の抽出やシナリオ同定を行った場合（左図，(a)），最大波高や全体的なトレンドが大きく異なる波高データが予測結果として得られる一方，b) ドメイン適合法を用いてデータベースを結合した場合の予測では，それらが類似したデータを予測として提示できていることが確認できる（右図，(b)）．しかし，377 件の検証すべての結果を最大波高を指標としてまとめた**図–4** からは，2 つのデータベース結合方法（中央及び右図）の間に顕著な差が観察できない．誤差の指標として分散 $\sigma^2 = \mathrm{Var}[\eta_{\mathrm{true}}^{\max} - \eta_{\mathrm{pred}}^{\max}]$ の値を求めたところ，単純な加算による場合 $\sigma^2 = 1.13$ であったのに対して，ドメイン適合法では $\sigma^2 = 1.097$ と，やや精度が高くなっていることが確認できるが，ターゲットデータ $\boldsymbol{X}_{tgt}$ のみを利用してモード抽出，ベイズ更新を行った場合の（**図–4** 左）分散値 ($\sigma^2 = 1.10$) と比較しても，明らかな差とはいいがたい．このことから，データベースの結合や結合方法の違いによるリスク予測性能の違いについては更なる議論が必要であるといえる．

4. 結論

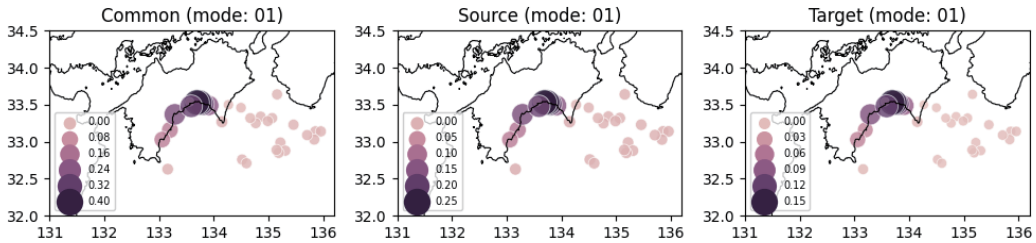
本研究では，教師なし学習に基づく津波シナリオ同定手法において，精度向上のための異なる津波シナリオデータベースの効果的な融合について検討を行った．具体的には，離散化手法や解析条件などが異なるものの，波高観測点位置や対象とする断層が同様である 2 つの津波シナリオデータベースを用意し，2 つのシナリオデータベースを単純に結合した場合と，ドメイン適合法によって結合した場合との学習とそれに伴う予測結果の違いを確認した．データベースを結合させることで，津波波高データの予測精度が多少向上することが確認できたが，ドメイン適合法の有効性などについては今後更なる検討が必要である．

参考文献

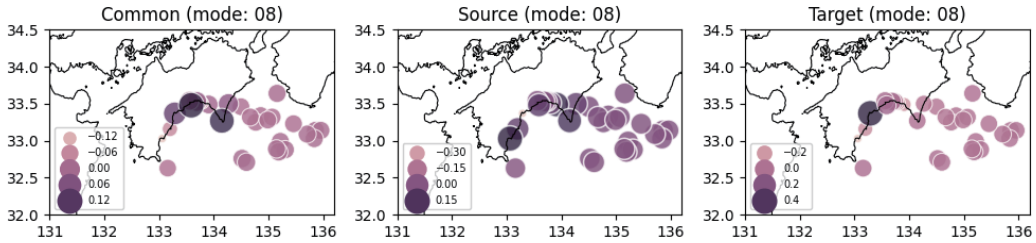
[1] Daumé III, Hal. “Frustratingly easy domain adaptation.” arXiv preprint arXiv:0907.1815, 2009.

[2] Nomura, R. et al., Sequential Bayesian Update to Detect the Most Likely Tsunami Scenario Using Observational Wave Sequences. JGR : Oceans, 127(10), 2022.

[3] LeVeque, R. J. et al., Nankai Trough FakeQuakes geodetic and waveform data [Data set]. Zenodo.

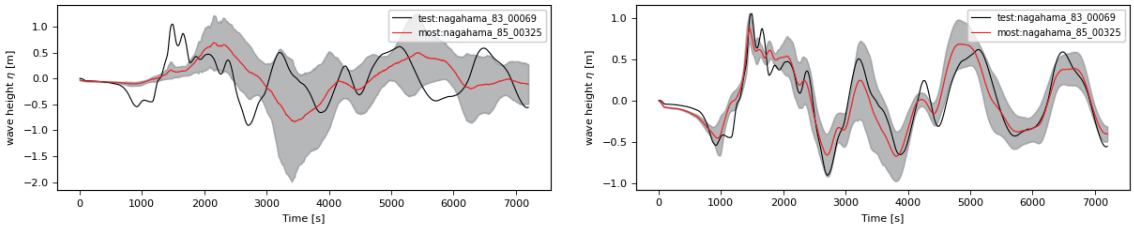


(a) 第 1 モードの空間分布



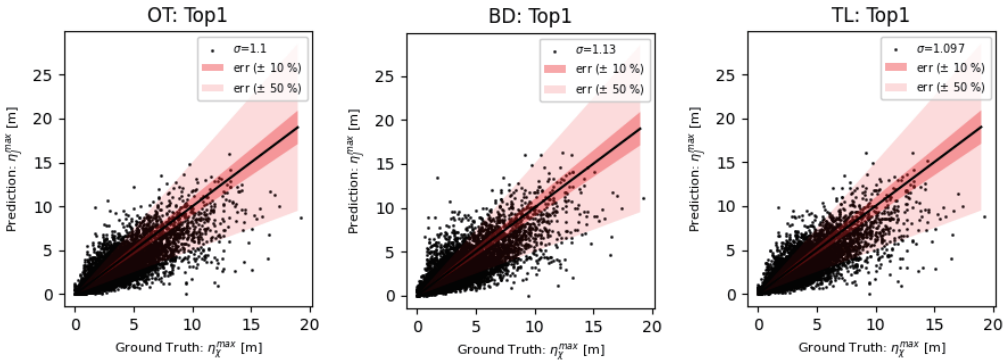
(b) 第 8 モードの空間分布

図–2 ドメイン適合法により抽出された第 1 モード（上段）及び第 8 モード（下段）の空間分布．左：共通部 $\mathbf{\Phi}_{r,c}$(Common)，中央：ソース部 $\mathbf{\Phi}_{r,s}$，右：ターゲット部 $\mathbf{\Phi}_{r,t}$



(a) 単純な加算によるデータベース結合　(b) ドメイン適合法によるデータベース結合

図–3 異なるシナリオデータベースの結合による津波波高予測結果（図–1 における Point A 位置）．(a) 単純結合によるデータベース融合による予測，(b) ドメイン適合によるデータベース融合による予測



図–4 Point A 位置（図–1 参照）における最大波高の予測値 $\eta_{\mathbf{pred}}^{\mathbf{max}}$（縦軸）- 観測値 $\eta_{\mathbf{true}}^{\mathbf{max}}$（横軸）の比較．左：ターゲットデータ $X_{\mathbf{src}}$ のみを用いて学習・予測を行った場合，中央：ターゲット X_{tgt}・ソース X_{src} 双方を単純に加算した学習・予測を行った場合，右：ターゲット X_{tgt}・ソース X_{src} 双方をドメイン適合法によって結合し学習・予測を行った場合

https://doi.org/10.5281/zenodo.7680206, 2023.

[4] OKADA, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the seismological society of America, 75.4: 1135-1154, 1985.

[5] Imamura, F. et al., Tsunami modelling manual, *UNESCO IOC international training course on Tsunami Numerical Modelling*, 2006.

[6] LeVeque, R. J. et al., Generating random earthquake events for probabilistic tsunami hazard assessment. Global Tsunami Science: Past and Future, Volume I, 3671-3692, 2017.

[7] Clawpack Development Team, Clawpack Version 5.7.1, http://www.clawpack.org, 2020.

[8] Koshimura, S. and Nomura, R., Data from 666 earthquake/tsunami scenario simulations targeting Nankai subduction (0.9.1 pre-release) [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.6785643, 2022.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

風力発電風車の配置最適化問題への量子コンピューティング適用

Application of Quantum Computing to Wind Turbine Placement Optimization Problem

川原仁志[1)]，佐藤富一[2)]，門脇高広[2)]，里見英俊[2)]
Hitoshi Kawahara, Tomikazu Sato, Takahiro Kadowaki and Hidetoshi Satomi

1) 博(工) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社（〒105-6950 東京都港区虎ノ門4-1-1)
2) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社（〒105-6950 東京都港区虎ノ門4-1-1)

To effectively generate power in wind power generation, it is necessary to pay attention to the layout of the wind turbines together with the terrain and weather conditions. In this paper, we report on the modeling for the application of quantum computing, the application of quantum-inspired algorithms, and the application of quantum computers to the optimization problem of wind turbine layout.

Key Words : *Optimization, Wind-power generation, Quantum computing, QUBO, Ising*

1.　はじめに

2020年10月，政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言し，2021年には第6次エネルギー基本計画が策定された[1]．その中の様々な施策のうちの一つに実用段階にある脱炭素電源の活用が挙げられている．特に再生可能エネルギーについては主力電源化が期待されており、風力発電はその切り札と位置付けられている．計画では，陸上，洋上合わせた風力発電量を2030年度には2019年度の5倍以上を目指している[2]．風力発電に関しては，日本では陸上風力の設置が進んでいるが，導入可能な適地は限定的であることから大量導入、コスト低減、経済波及効果が期待される洋上風力発電の導入拡大が予想されている[3]．

一方，複数の風車を設置するウインドファームでは，特に風車風下に風車ウエイクと呼ばれる風速の欠損や風の乱れが生じ（図１），発電量が減少する等の課題があることが知られている．風車ウエイクに関しては計算機シミュレーション等を用いて様々な研究がなされている[4]．

図1　風車ウエイク [5]

限られた適地や条件において，効率的な発電量を得るためには，発電量の減少を抑えるための設計が必要であり，風車ウエイクの影響や気象・海象による風況，地形や制約条件を考慮して風車配置最適化手法の確立等で発電量予測を高度化する必要がある[6]．しかし，与えられた複数の風車配置の候補地に対して，風況や風車ウエイク等を考慮した配置場所の最適化は，施設配置問題（Facility Location Problem）の一つに位置づけられNP困難な問題に属する．

風車配置の最適化に関しては風況や風車ウエイクの他に地形や様々な制約条件を考慮する必要があるが，本報では年間平均の風速，風向，変動頻度，風車ウエイクを考慮した組合せ最適化問題として定式化を行い，その解法として Simulated annealingと量子アニーリングマシンを用いて試算したのでその結果について報告する．

2.　風車ウエイクモデルと数理モデル

(1)　ウエイクモデル

風車ウエイクモデルはデンマーク工科大学による WAsPソフトウェアのWake Effect Model[7][8]を用いた。

当該モデルでは風車の配置（図2）の風上風車による風速の減速分は式(1)で計算される．

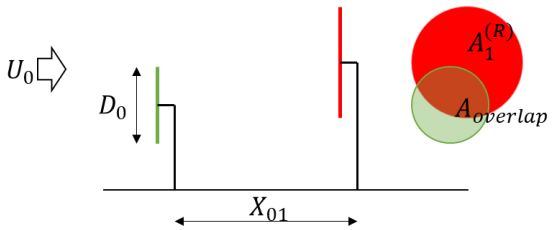


図2　風車配置と影響範囲の概略

$$\delta V_{01} = U_0\left(1-\sqrt{1-C_t}\right)\left(\frac{D_0}{D_0+2kX_{01}}\right)^2 \frac{A_{overlap}}{A_1^{(R)}} \qquad (1)$$

ここで各々の変数は以下の意味を持つ．

δV_{01}：風上風車(0)による風下風車(1)の風速減速
D_0：風上風車ローター径
X_{01}：風上風車と風下風車間の距離
ρ：空気の密度
U_0：流入速度
C_t：スラスト係数

$$C_t = \frac{2F_T}{\rho \frac{\pi}{4} D_0^2 U_0^2} \tag{2}$$

F_T：スラスト力
k：減衰係数（陸上の場合：0.075、洋上の場合：0.04）

(2) 数理モデル

量子イジングマシンやSimulated Annealingを利用することを念頭においてQUBO（Quadratic Unconstrained Binary Optimization）でモデル化する．

s_i，s_jを$i,j \in \{1,2,\dots,n\}$で0あるいは1の値を持つベクトルとし，w_{ij}を風車iが風車jから受けるウエイクの影響，p_iを風車iの発電量とすると各風車の発電量p_iは以下の式(3)で表される．ここで，最小値を求める問題とするために発電量は負，風車ウエイクは正とする．

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_{n-1} \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_0 & w_{01} & \cdots & w_{0n-1} & w_{0n} \\ w_{01} & j_1 & \cdots & w_{1n-1} & w_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_{0n-1} & w_{1n-1} & \cdots & j_{n-1} & w_{n-1n} \\ w_{0n} & w_{1n} & \cdots & w_{nn-1} & j_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_{n-1} \\ s_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

ここで行列とベクトルを式(4)(5)で表すと，

$$[Q_1] = \begin{bmatrix} j_0 & w_{01} & \cdots & w_{0n-1} & w_{0n} \\ w_{01} & j_1 & \cdots & w_{1n-1} & w_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_{0n-1} & w_{1n-1} & \cdots & j_{n-1} & w_{n-1n} \\ w_{0n} & w_{1n} & \cdots & w_{nn-1} & j_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$[s] = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_{n-1} \\ s_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

全体での発電量は式(6)となる．

$$H = [s]^T [Q_1][s] = \sum_i \sum_j q_{i,j} s_i s_j \tag{6}$$

ここで$q_{i,j}$は行列$[Q_1]$の要素を表す．

領域内に配置する風車の本数Mを制約条件とするには以下の項を追加する．式(7)は所定の本数M以外で非ゼロとなり最適解から離れていく効果を持つ．αは任意の正の定数である。

$$\alpha \left(M - \sum_j s_j \right)^2 \tag{7}$$

この式を展開して整理すると式(8)を得る．

$$\alpha \left(M - \sum_j s_j \right)^2 = aM^2 + [s]^T [Q_2][s] \tag{8}$$

ここで

$$[Q_2] = a \begin{bmatrix} -2M+1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & -2M+1 & \cdots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & -2M+1 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & -2M+1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

である．またバイナリ変数の$s_i = s_i^2$を用いた．
整理すると，風車本数を制約条件とした発電量のモデル式として式(10)を得る．

$$H = [s]^T [Q_1 + Q_2][s] + aM^2 = [s]^T [Q][s] + aM^2 \tag{10}$$

上三角行列にする場合には式(11)を用いる．

$$Q'_{ij} = \begin{cases} Q_{ij} + Q_{ji} & i < j \\ Q_{ii} & i = j \\ 0 & i > j \end{cases} \tag{11}$$

3. 計算例

(1) 問題設定

12km四方の矩形領域内の半径2kmの円の中に風車を配置する問題を考える（図2左図）．図2左図において赤い領域は風速が強く，青は風速が弱い領域を表す．図2右図は領域内の平均的な風向を示す．概ね北西と南東の風が強いと仮定した（上方が北）．発電量は10MWクラス風車のパワーカーブを仮定した[9].

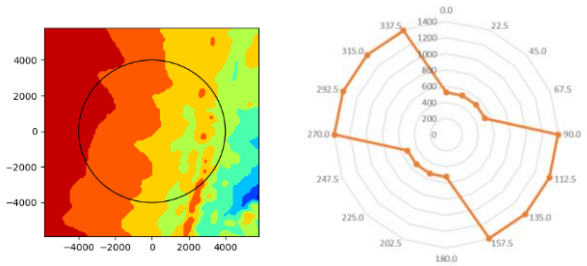


図2　対象領域と風速強度，平均的風向

図3には図2の条件下での風車ウエイクの影響分布を示す．図中の赤い箇所に風車が設置された場合の風車ウエイクの影響範囲を色で示している．青色から深い緑色の領域が風車ウエイクの影響が強い領域を示している．

モデルでは風車を配置可能な位置すべてでウエイクの影響を予め計算しておき式(3)のw_{ij}とした．本モデルでは風車単体のウエイクを重ね合わせるモデルのため複数の風車が並んだ場合には過剰に評価する可能性がある．この点については今後の課題である．

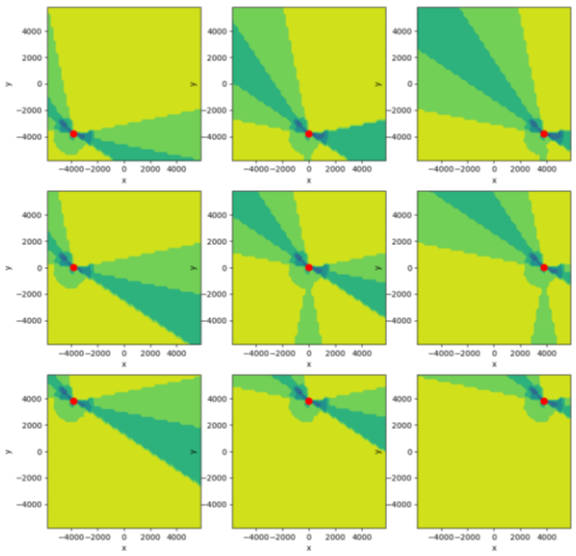


図3　風車ウエイク分布

図4には円の中の風速強度の詳細を示す．円の中で青い部分の風速強度は同じ値で最も強く，緑色部分が同じ値で2番目に強い領域を示す．

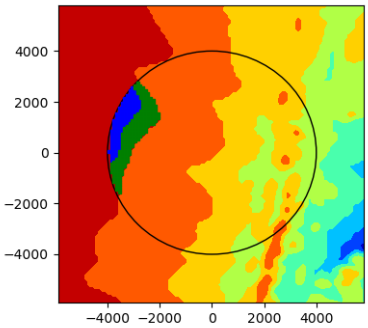


図4　風速強度の詳細分布

(2)　計算結果

①　Simulated Annealing法による計算[10]

1辺を118分割し全体を13,924カ所に区分けし，その中から発電量を最大化する100カ所を選択した．計算は商用のサービスと自社開発のコードで行った．自社開発コードは反復計算中の次ステップの発電量を求めるための計算量を削減する工夫を施している[11].

図5にウエイクを考慮しない場合の計算結果を示す．青い点が風車を配置する候補位置である．初期状態として1000カ所の候補地を設定（図5左図）し徐々に温度を下げていき図5右図が最終状態である．図5中図は候補地が約500まで絞り込まれた状態である．図4の最も風速強度が強い領域と図5右図の風車配置候補地は一致しており正しい配置が選択されている．計算はすべて数分以内に終了している．

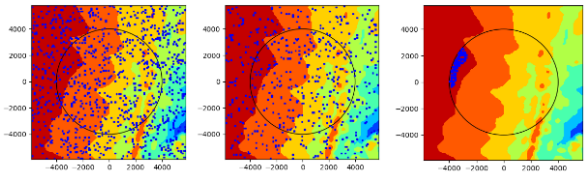


図5　風車ウエイクを考慮しない場合の風車配置

図6に風車ウエイクを考慮した風車配置を示す．風向の頻度が高い北西・南東方向の配置を避ける候補地が選択されており（風車ウエイクの影響を軽減する方向），最大発電量に対して0.089%減の発電量となった．本モデルでは計算時間は風車ウエイクの考慮あり／なしでほとんど変わらない．

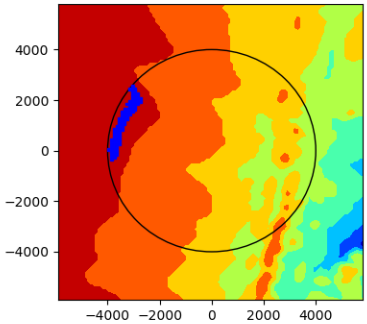
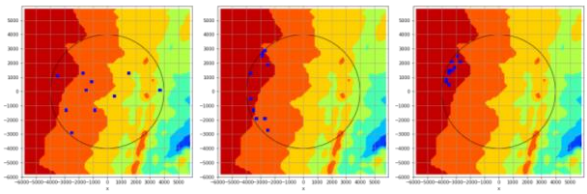


図6　風車ウエイクを考慮した風車配置

②　量子アニーリングマシンによる計算

量子アニーリングマシンを用いて風車ウエイクを考慮しない場合の計算を実施した．計算はD-Wave leapを利用した．計算条件としては1辺を59分割，領域全体を3,481領域に区分けし，その中から10地点を選択するものとした．計算はSimulated Annealingと古典＋QPU（Hybrid），Kerberosの3種類[12][13]で行った．パラメータはすべてデフォルトを用いた．図7に計算結果を示す．



Simulated annealing（古典）　Dwave-system hybrid（古典+量子）　Kerberos

図7　量子アニーリングマシンによる計算結果

表1にD-WaveによるSimulated Annealingによる計算時間で正規化した計算時間と理論値との差を示す．最大風速強度と最小風速強度の差が小さいため理論値との差が小さいように見えるが，風車配置位置は大きく異なる．Tabu search[14]とSimulated Annealing，量子を併用するKerberos samplerが最も理論値に近い値となった．今回の計算では

計算時間の制約上，パラメータのチューニングは実施できなかったが，得たい精度と計算時間に応じたパラメータの調整が重要であることを示唆する結果と考えられる．

表 1

Sampler	Time	Error
Neal	1.00	-1.80%
Hybrid	0.61	-0.41%
Kerberos	10.06	0.00%

4. まとめ

風車を配置する候補地の数と配置する風車本数の数が増えると組合せの数が爆発的に増加する施設配置問題に対して，風車ウエイクを考慮できる数理モデルを構成し，量子コンピューティングの適用を行った．結果として量子コンピューティング適用の有効性は示唆できるものの，今後さらに数理モデルに関しては，風車ウエイクの影響を加え合わせるモデルから，多段階に並んだ場合の影響を合理的に考慮するモデルへの改良を行っていく必要がある．また，heuristicな解法である一面から精度や計算時間とパラメータの調整に関する知見を蓄積していく必要がある．

参考文献

[1] 経済産業省，エネルギー基本計画，https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf

[2] 経済産業省，2050年カーボンニュートラルに向けた洋上風力発電政策の現状について，2021年

[3] 経済産業省，洋上風力産業ビジョン（第1次），https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/pdf/002_02_02_01.pdf

[4] 内田孝紀，他，スパコン版リアムコンパクトによる風車ウエイクの相互干渉に関する大規模数値シミュレーション ーウエイク領域内の平均風速欠損量の予測精度検証ー，日本風力エネルギー学会論文集，Vol.45, No.4, pp.71-82, 2022.03

[5] Charlotte Bay Hasager, et al, Wind Farm Wake: The Horns Rev Photo Case, Energies 2013, 6, 696-716

[6] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ，2021.4

[7] https://www.wasp.dk/wasp#details__wakeeffectmodel

[8] Katic, J. Højstrup and N.O. Jensen: "A Simple Model for Cluster Effeciency", European Wind Energy Association Conference and Exhibition, 7-9 October 1986, Rome, Italy.

[9] https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/028_03_00.pdf

[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_annealing

[11] 片山謙吾、成久洋之，大規模な最大多様性問題に対する遺伝的局所探索，情報処理学会論文誌，Vol. 45 No. SIG 2(TOM 10), Feb. 2004

[12] https://www.dwavesys.com/

[13] D-Wave Ocean Software Documentation

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Tabu_search

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

都市型水害解析ソフトウェアの開発とその基礎的検証

Development and Basic Verification of Urban Flood Analysis Software

高椋恵[1)]，眞鍋尚[2)]，溝内秀男[3)]
Kei Takamuku, Takashi Manabe and Hideo Mizouchi

1) 修士(工) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: kei.takamuku@mizuho-rt.co.jp)
2) 博士(工学) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: takashi.manabe@mizuho-rt.co.jp)
3) 博士(理学) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社（〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: hideo.mizouchi@mizuho-rt.co.jp)

In recent years, flood damage has become more severe and frequent across the country due to the effects of climate change, and there is a continuing concern about the extent of damage. In such a situation, numerical simulation techniques are increasingly important for the physical evaluation of flood assumptions and predictions. This paper describes the urban flood damage analysis software developed by the authors and reports the results of the basic verification conducted for this software.

Key Words : *Urban Flood, Surface Flooding, Sewer Overflows, River Flooding*

1.　はじめに

近年，台風などの集中豪雨や短時間強雨（1時間降水量50mm以上の降雨）が頻発しており、短時間強雨の発生回数は年々増加傾向にある．また台風などの集中豪雨や短時間強雨の増加に伴い，都市部において都市型水害が発生すると，甚大な被害が発生し，復旧までに大幅な費用と時間が必要となる．例えば，令和元年10月に発生した台風第19号では，大雨によって多摩川流域で数ヶ所にわたって氾濫が発生し，一戸建て住宅やタワーマンションで浸水被害が発生した．浸水被害を低減するために，自治体はハード面とソフト面の両方で水害対策を行っている．ハード面の対策としては，河川の堤防の補強，雨水貯留施設の増設，排水施設の整備や避難所の整備などがある．一方，ソフト面の対策は，内水・洪水ハザードマップの整備[1][2]，リアルタイムの降雨・浸水状況や迅速な避難のための情報発信[3]などがある．このような状況の中、国土交通省では『気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～』が取りまとめられ[4]、流域治水の考え方を取り入れた水災害対策の推進に取り組んでいる．この流域治水は「気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域（雨水が河川に流入する地域）から氾濫域（河川等の氾濫により浸水が想定される地域）にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う考え方」[5]であり、流域全体で多層的に水害対策を推進するものである．一方、これまでもハード・ソフト面の対策の定量的評価において，氾濫解析に関する数値シミュレーションの活用は盛んにおこなわれており，流域治水の推進に伴い、今後もさらに重要性が増していくものと思われる．

数値シミュレーションモデルの発展に目を向けると，これまで洪水（外水）氾濫[6]，内水氾濫[7]の定量的な評価のためのモデルが提案されている．都市型水害解析を行うために解析ソルバーに必要となる機能[8]は，地表面に降った雨水やマンホールおよび河川からの氾濫水を取り扱うための地表面氾濫解析機能，マンホール内部に流入する雨水や管きょ内を流れる雨水を取り扱うための下水道解析機能，河川を流れる水を取り扱うための河川解析機能などである．著者らはこれらの機能を有するソフトウェアMC-FLOODを開発し，地表面氾濫解析機能の検証を実施[9]してきた．本論では地表面氾濫解析機能に加え，その他の機能を含めた都市型水害解析ソフトウェアの開発と基本的な検証に関して報告するものである。

2.　都市型水害解析モデル

(1) 降雨損失モデル

降雨損失モデルは降雨量に対して、有効降雨を算定するモデルである．MC-FLOODにおいて、**表−1**に示すモデルを組み込んでいる．本論では流出係数を乗じて有効降雨を求める．

$$r_e = f \cdot r \tag{1}$$

ここで，r_e：有効降雨量[mm・h^{-1}]，f：流出係数[-]，r：実

表-1 降雨損失モデルと表面流出モデルの種類

No	降雨損失モデル
1	一様浸透損失モデル
2	ホートンモデル
3	流出係数モデル
4	一様浸透モデル
5	f1-Rsaモデル
6	Green-Amptモデル
7	Hornerモデル

No	表面流出モデル
1	タイムエリア法
2	非線形貯留法
3	二重線形貯留法
4	線形貯留法
5	Kadoya法
6	ラショナル法(合理式)
7	(SCS)単位図法

績降雨量[mm・h^{-1}]である.

(2) 表面流出モデル

表面流出モデルは、人孔に流入する流量を有効降雨から算定するモデルである. MC-FLOODにおいて、表−1に示すモデルを組み込んでいる. 本論ではよく用いられる合理式を用いて, 先に算出した有効降雨量から人孔に流入する流量を求める.

$$Q = \frac{1}{3.6} r_e A \tag{2}$$

ここで, Q : 人孔流入量[m^3・s^{-1}], A : 集水域[km^2]である.

(3) 地表面氾濫解析モデル

地表面氾濫解析モデルは, 3次元の非圧縮性流体の基礎方程式に浅水流近似を施した連続の式(3)および運動方程式(4), (5)を使用する.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_{rain} + q_{manhole} + q_{river} \tag{3}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M\sqrt{(u^2+v^2)}}{h^{4/3}} \tag{4}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N\sqrt{(u^2+v^2)}}{h^{4/3}} \tag{5}$$

ここで, h : 水深[m], u : x 方向断面平均流速[m・s^{-1}], v : y 方向断面平均流速[m・s^{-1}], $M(=uh)$: x方向流量フラックス[m^2・s^{-1}], $N(=vh)$: y方向流量フラックス[m^2・s^{-1}], H : 水位[m], t : 時間[s], g : 重力加速度[m・s^{-2}], n : マニングの粗度係数[s・m$^{-1/3}$], q_{rain} : 降雨量[m・s^{-1}], $q_{manhole}$: マンホールからの溢水量[m・s^{-1}], q_{river} : 河川からの越水量[m・s^{-1}]である.

(4) 下水道解析モデル

下水道解析モデルは, 管きょについては, 次に示す連続の式(6)と運動方程式(7)を使用する.

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial (U_s Q_s)}{\partial x} = -gA_s\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g{n_s}^2 Q_s|U_s|}{{R_s}^{4/3}} \tag{7}$$

ここで, A_s : 流水断面積[m^2], Q_s : 管きょ内の流量[m^3・s^{-1}], U_s : 管きょ内の断面平均流速[m・s^{-1}], H : 水位[m], n_s : 管きょのマニングの粗度係数[s・m$^{-1/3}$], $R_s = A_s/S_s$: 管きょの径深[m], S_s : 管きょの潤辺[m], t : 時間[s], g : 重力加速度[m・s^{-1}]である.

式(7)に満管状態を開水路と同じように解析することができるプライスマンスロットモデルを適用すると, A_sは式(8)のように表される.

$$A_s = \begin{cases} A_{so} & (A_s \le A_{s0}) \\ A_{s0} + \dfrac{Ba^2}{g} & (A_s > A_{s0}) \end{cases} \tag{8}$$

ここで, A_{so} : 管きょの流水断面積[m^2], A_{s0} : 管渠の断面積[m^2], B : スロット幅[m], a : 圧力波の伝搬速度[m・s^{-1}], g : 重力加速度[m・s^{-2}]である.

また, マンホールについては, 次に示す連続の式(9)を使用する.

$$FA_m\frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum Q_{sin} + Q_{in} - Q_{out} \tag{9}$$

ここで, A_m : マンホールの断面積[m^2], h_m : マンホール内の水深[m], t : 時間[s], Q_{sin} : 管きょからの流入流量[m^3・s^{-1}], Q_{in} : 地表面からマンホールへの流入流量[m^3・s^{-1}], Q_{out} : ポンプの排水流量[m^3・s^{-1}]である.

(5) 河川解析モデル

河川解析モデルは, 次に示す連続の式(10)と運動方程式(11)を使用する.

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r + q_s \tag{10}$$

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} + \frac{\partial (U_r Q_r)}{\partial x} = -gA_r\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g{n_r}^2 Q_r|U_r|}{{R_r}^{4/3}} \tag{11}$$

ここで, A_r : 河川の流水断面積[m^2], Q_r : 河川の流量[m^3・s^{-1}], U_r : 河川の断面平均流速[m・s^{-1}], H : 水位[m], n_r : 河川のマニングの粗度係数[s・m$^{-1/3}$], $R_r = A_r/S_r$: 河川の径深[m], S_r : 河川の潤辺[m], t : 時間[s], g : 重力加速度[m・s^{-2}]である.

(6) 計算手法

a) 離散化

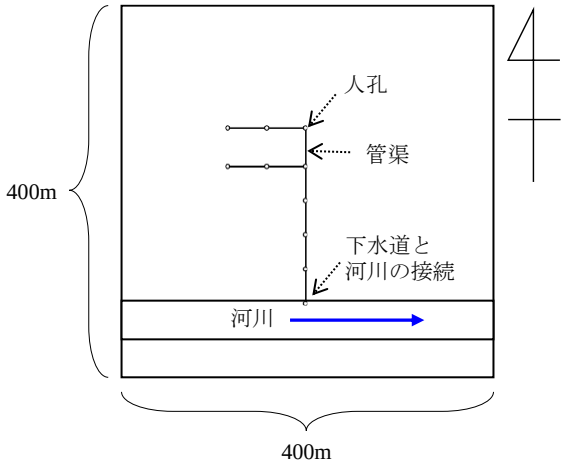


図-2 解析条件

地表面氾濫解析モデルはデカルト座標系とし，差分法により空間的に離散化する．また水深hとxy方向流量フラックスを互い違いに配置するスタッガード格子を用いる[6]．式(4)および式(5)における左辺第2項、第3項については1次精度風上差分を用い，それ以外の空間微分には中央差分を用いる．時間方向には2次精度であるLeap-Frog法を用いて時間積分する．さらに式(4)および式(5)における右辺第2項については半陰解法[6]を用いる．下水道解析および河川解析モデルは地表面氾濫と同様に離散化する．

b) ドライベッドの取り扱い

地表面氾濫解析モデルでは，河川からの越流時もしくは人孔からの溢水時において解析を始める．また，浸水した箇所（ウェットベッド）から浸水していない箇所（ドライベッド）へと水が移動する現象を解く必要がある．MC-FLOODでは計算の安定性を考慮して，ウェットベッドとドライベッドの境界部分では段落ちや越流を仮定した流量公式により流量フラックスM，Nを算定する．

c) 越流・溢水の取り扱い

地表面氾濫は河川からの越水もしくは人孔からの溢水により発生する．河川からの越水は式(10)および式(11)により時々刻々計算される水位が河川堤防高さを超えた場合に式(3)の右辺第3項により考慮する．越水量については本間の公式[10]により算定する．

人孔からの溢水も河川堤防と同様に，人孔内の水位が地表面高さを超えた場合に式(3)の右辺第2項により考慮する．なお、本来、洪水ハザードマップ等の検討では、破堤を考慮するが、本検討では都市域の河川を想定して越水のみを考慮する．

3. 解析条件

(1) 地表面、下水道、河川の条件

MC-FLOODにより，内水および外水氾濫の現象を評価できるか否かを確認することに主眼を置き数値シミュレーションを実施する．

降雨損失モデルは先ほど述べたとおり，降雨量に対して流出係数を乗じたものを有効降雨量とする．表面流出モデルでは，各人孔集水域を400m²として，有効降雨量に対して合理式を用いて人孔流入量を算定する．下水道解析モデルでは人孔径を0.6m, 管きょ径を0.3m, 管路勾配を2%として設定する．最下流端では河川と接続する設定とする．河川解析モデルでは矩形断面を想定し，河床勾配を1/3000，川幅を20mとする．地表面氾濫解析モデルではメッシュサイズを5mとし，東西方向，南北方向をそれぞれ80分割したメッシュとする．標高については河川を除いて0m，粗度係数は0.05 s・m$^{-1/3}$とする．その他の条件を含めて**表-2**に示す．また河川や下水道の平面配置を**図-2**に示す．

表-2 解析条件

解析モデル	解析条件
降雨損失モデル	選択モデル　：流出係数モデル 流出係数f　：0.8
表面流出モデル	選択モデル　：合理式 各人孔集水域　：400m^2 洪水到達時間　：10min
下水道解析モデル	人孔径　：0.6m 管きょ径　：0.3m 管路勾配　：2% 管路断面形状　：円管 下流端　：河川と接続
河川解析モデル	河床勾配　：1/3000 断面形状　：矩形 川幅　：20m
地表面氾濫解析モデル	メッシュサイズ：5m x方向　：80分割 y方向　：80分割 メッシュ数　：6,400 標高　：対象区域全体にわたって0m 粗度係数　：対象区域全体にわたって0.05m$^{-1/3}$s

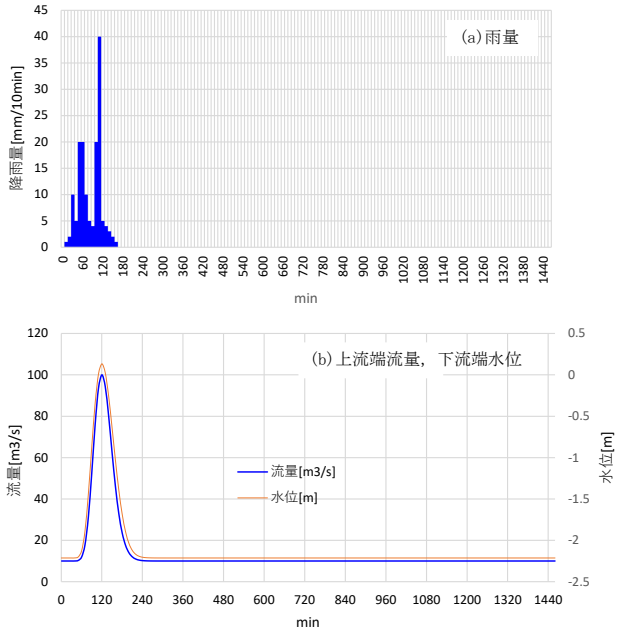


図-3 降雨量、河川の流量・水位

(2) その他境界条件

地表面、下水道、河川の配置のほかに、外力を設定する必要がある．本検討では、人孔から流入する降雨量および河川上流端からの流入量および河川下流端での水位変動を与える．外力として与えた降雨量および河川の境界条件である流量・水位を**図-3**に示す．

4. 計算結果と検証

(1) 計算結果

計算開始から100分後～120分後の浸水深分布を**図-4**に示す．100分後では人孔からの溢水により地表面が浸水し始めている．これは、降雨量に対して、下水道での流下能力が足りずに、人孔から溢水するためである．110分後には河川から越水が始まり、上流から浸水している様子が分かる．また、下水から溢水した水が広がりを見せている．120分後には河川からの氾濫が卓越し、河川左岸側の浸水域が110分後と比較して拡大している様子が見て取れる．

5. おわりに

本論では、都市型水害に焦点を当て、都市型水害解析ソフトウェアを開発するとともに、簡単な事例を作成し、その結果について検証した．

- 降雨損失モデル、表面流出モデル、下水道解析モデル河川解析モデル、地表面氾濫解析モデルをそれぞれ開発した．
- 事例計算により、人孔からの溢水、河川からの越水の状況を定量的に評価できることを確認した．

開発したソフトウェアは本論で検討したもの以外の機能も有しており，それらの機能の検証も実施予定である．併せて，実データでの検証を進めるとともに課題を抽出し，都市型水害解析ソフトウェアの改良を進める．

参考文献

[1] 国土交通省 水管理・国土保全局: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）平成２７年７月.
[2] 国土交通省水管理･国土保全局下水道部: 内水浸水想定区域図作成マニュアル（案）令和３年７月.
[3] 国土交通省：川の防災情報 (https://www.river.go.jp/index).
[4] 国土交通省: 気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～,答申,令和２年７月.
[5] 国土交通省：流域治水の推進 (https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/index.html).
[6] 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文: 氾濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-2, pp.305時 317, 1980.
[7] 関根正人: 住宅密集地を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.2, 70-85, 2011
[8] 公益財団法人 日本下水道新技術機構: 流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き），2017年3月.
[9] 公益財団法人 日本下水道新技術機構: 下水道施設の耐水化計画および対策立案に関する手引き，2017年3月.
[10] 国土交通省 水管理・国土保全局: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版），平成27年7月.

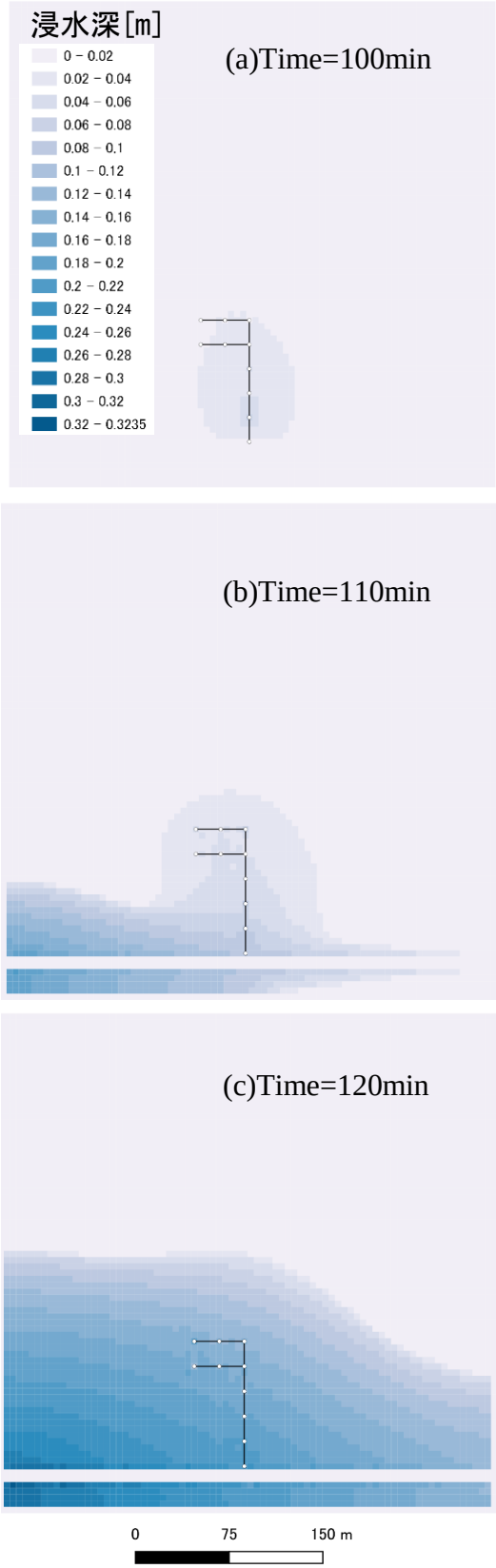


図-4 浸水深分布

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

デイサービス施設における排泄介助マルチエージェントシミュレーション

Multi-Agent Simulation of Excretion Care in Day Care Facilities

高木碧[1)]，藤井秀樹[2)]，内田英明[3)]，吉村忍[4)]
Aoi Takagi, Hideki Fujii, Hideaki Uchida and Shinobu Yoshimura

1) 東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: a_takagi@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail:fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
3) 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教(〒565-0871 吹田市山田丘2-1, E-mail:uchida@see.eng.osaka-u.ac.jp)
4) 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

With the declining birthrate and aging population, the shortage of care workers is becoming a serious problem in Japan. In this study, with a view of improving the efficiency of care work by caregivers, we verify the effectiveness of the developed method by modeling and simulating care work in day care facilities, and by comparing the results with actual observation results in actual care facilities. Here we focus on "excretion care," which is considered to be a particularly high burden on caregivers.

Key Words : *Multi-agent simulation. excretion care. day-service facilities*

1.　はじめに

超高齢化社会を迎えて10年以上が経った現在も，日本における少子高齢化は止まるところを知らない[1]．少子高齢化の進行に伴う介護サービス需要の拡大や，介護職の不人気により，介護人材不足は日本の社会福祉における課題として深刻さを増しており，介護人材の需要と供給は今後もますます乖離していくと推測されている[2]．この状況に対し，政府は厚生労働省を中心とし，介護人材の確保に向けて，介護士による作業の効率化や労働環境の改善，介護テクノロジーの導入，効果的な新人教育などの様々な対策を掲げている[3]．しかし，これらの対策の実施に際して，介護施設においては個人情報に関わる状況が多いために公的な調査が難しいことや，介護者や被介護者に関する情報の定量化が困難であるために介護問題を科学分野で扱いにくいこと等の障壁も存在する．

本研究では，介護施設において介護士により高齢者に対して行われる介助作業のモデル化及びシミュレーションを行うことで，介護環境における様々な状況を再現する．そして，今後モデル化やシミュレーションの対象範囲を拡大させることにより，シミュレーションに基づき介護に関する問題を議論する手法の確立を目指す．具体的には，マルチエージェントモデルに基づき，現実のデイサービス施設を模した介護空間をコンピュータ上に構築し，実観測結果とシミュレーション結果の比較を行うことにより，本手法の有効性を検証する．なお，今回は介護活動の中で介護者の負担が特に高いと考えられる「排泄介助」に着目する．

2.　現実の介護施設における介助システム

本研究を行うにあたり，介護現場において介護士がどのような動きや導線，思考プロセスをとっているのかを把握するため，現実のデイサービス施設（以下，施設 X）の訪問見学を行った．得られた主な知見には，①高齢者の運動機能や認知機能に個人差が大きいこと，②各高齢者に対する排泄介助のタイミングは介護士が高齢者の排泄時刻を記録したチェック表に基づいて決められること、が挙げられる．また，③高齢者の周囲にある机や椅子の配置がレクリエーションや食事等のイベントの切り替えと共に大きく変わることも知見として得られた．施設 X における机や椅子の配置のうち10時-12時における配置をパターンA，13-14時における配置をパターンBとした．

施設Xでは，排泄介助作業時の介護士や高齢者の経路及び介助に要した時間の手動計測も行った．計測結果を表1及び図1，図2に示す．表1において，開始・終了時刻や作業時間のうち括弧()が付いているものは，介助作業の開始や終了のタイミングを正確に記録できなかったために，その高齢者の歩行速度等から推測した時刻や時間である．

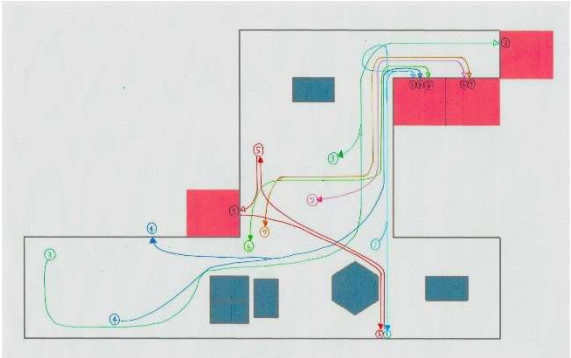


図 1　パターン A における，施設 X で観測された介護士・高齢者の移動経路

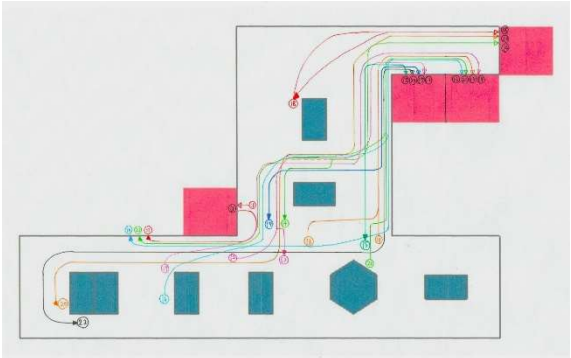


図 2　パターン B における，施設 X で観測された介護士・高齢者の移動経路

表 1　施設 X で観測された各介助の時刻及び作業時間

		開始時刻	終了時刻	作業時間
A	1	11:(01:40)	11:12:55	(11 分 15 秒)
	2	11:02:30	11:08:15	5 分 45 秒
	3	11:09:40	11:15:25	5 分 45 秒
	4	11:15:20	11:17:20	2 分 45 秒
	5	11:22:00	11:24:50	2 分 50 秒
	6	11:46:20	11:51:05	4 分 45 秒
	7	11:(46:20)	11:51:10	(3 分 50 秒)
―	8	12:22:25	12:25:10	2 分 45 秒
	9	12:32:20	12:37:15	4 分 55 秒
	10	12:47:25	12:49:15	1 分 50 秒
B	11	13:02:50	13:05:20	2 分 30 秒
	12	13:04:30	13:11:05	6 分 35 秒
	13	13:06:55	13:09:(35)	(2 分 40 秒)
	14	13:(09:45)	13:15:(35)	(5 分 50 秒)
	15	13:13:(35)	13:15:(50)	(2 分 15 秒)
	16	13:15:30	13:20:50	5 分 20 秒
	17	13:(19:30)	13:23:(35)	(4 分 5 秒)
	18	13:24:25	13:30:50	6 分 25 秒
	19	13:25:(45)	13:32:25	(6 分 40 秒)
	20	13:32:10	13:40:20	8 分 10 秒
	21	13:35:50	13:39:20	2 分 30 秒
	22	13:41:(55)	13:44:50	(2 分 55 秒)

3.　介護空間モデルの仕様と実装

(1) 概要

本研究では，シミュレーションによる介護状況の再現及び介助作業効率化に向けた検討を行うことを目的として，まず介護施設における排泄介助の状況を再現する介護空間モデルを構築し，その有効性を検証する．具体的には，現実に存在するデイサービス施設Xを模した介護空間をコンピュータ上に構築し，マルチエージェントシミュレーションを行う．そのシミュレーション結果と施設Xにおける実観測結果の比較を行うことにより，本手法の有効性を検証する．本研究では，パターンAの環境でモデルチューニングを行い，本シミュレーションの出力を実際の介護施設におけるパターンA環境下での計測結果に適合させた後に，そのモデルを用いてパターンBの環境下で行ったシミュレーションを行い，解析結果を計測結果と比較し，モデルの再現性の検証を行った．

(2) 仕様

介護空間モデルは，デイサービス施設Xにおける共有スペースの環境を模して構築した．紙面の都合上，仕様についての詳細な説明は割愛するが，基本的には共有スペース内に座っている高齢者を介護士が周辺のトイレに誘導して排泄介助を行うという状況を想定している．

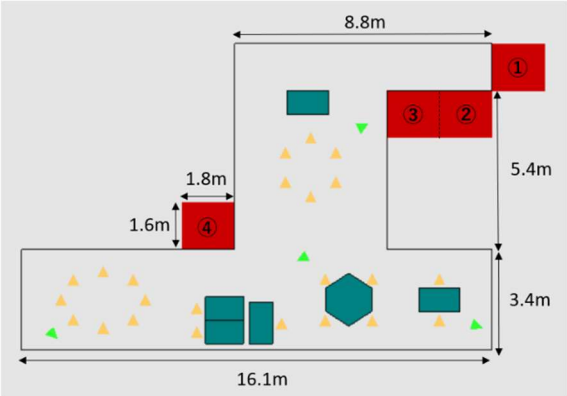


図3　環境設定

前章で述べた通り，施設Xでは時間帯によって机や椅子の配置が異なっていたため，それをパターンA，Bとして設定した．

(3) エージェントの行動に関するルール設定

各エージェントの状態遷移図を図4，5に示す．介護士にはタスク順位と名付けた介助をすべき優先順位が割り振られ，タスク順位上位の者から高齢者が介助を必要としている人数分だけ随時介助を行うという状況を想定する．ただし，今回のシミュレーションでは，全介護士の順位を完全にランダムに決定するものとした．また，介護士が高齢者に排泄介助の声掛けを行うタイミングに関しては，各高齢者が直近で排泄した時刻を参照し，介助すべき時刻を迎えた高齢者の中からランダムに順番をつけることで決定する．

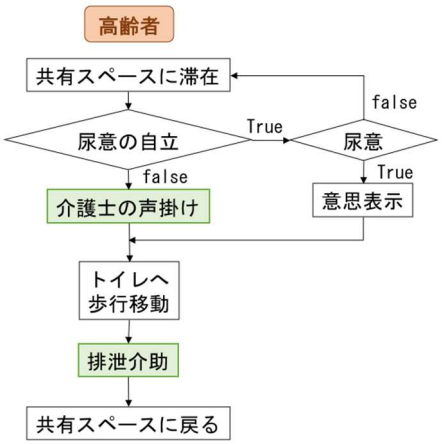


図4　高齢者エージェントの状態遷移図

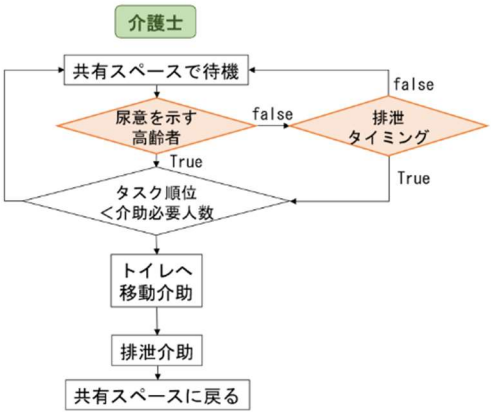


図5　介護士エージェントの状態遷移図

(4) 移動モデルに関する設定

エージェントの空間移動モデルとしては, Helbing が提唱したSocial Force Model（以下SFM）を採用した[4]. 一般にSFMにおいてはエージェント間に以下の力が作用するとする.

(1) 移動目標に近づく力
(2) 他のエージェントからの斥力
(3) 壁や机などの環境からの斥力
(4) 魅力的な環境への引力

このうち, (4) 魅力的な環境への引力は今回のシミュレーションにおいては考慮しない. また, (1)～(3)の３つの斥力・引力は, 移動しているエージェントに働くものとする.

(5) 評価項目

パターンBのシミュレーションを行うモデル検証においては, 介護士エージェントによる各介助作業の作業時間及び作業回数, エージェントの移動経路を解析し, それらの解析結果を施設Xにおける計測結果と比較した. 作業時間は, 出力された全介護士による合計作業時間を合計作業回数で割ることで, 介助1回あたりの作業時間に換算し, それらを施設Xにおける計測結果と比較した. なお, 本マルチエージェントシミュレーションにはランダム性が内包されるため, 同一条件で10回解析を行った.

4.　結果と考察

(1) モデル構築

パターン A で実時間にして 2 時間分行ったシミュレーションにおける介護士の合計作業回数の平均値は, 図 6 に示すように, 介護士の人数の大小にかかわらず 7, 8 回程度となった. 施設 X での計測結果を参照すると, パターン A のレイアウトで活動が行われていた 10～12 時における作業回数は 7 回であり, 本シミュレーション結果と概ね一致した. また, 図 7 に示すように, 介助 1 回あたりの作業時間の平均値は 3.5 分程度となった. 施設 X での計測結果を参照すると, 10～12 時に行われた 7 回の介助における作業時間は, 高齢者の運動機能等に関する個人差が大きいため一概には言えないが, 多くの場合において作業時間がおよそ 3～4 分前後となっており, 本シミュレーション結果に近い値であった. 各試行の出力値には大きなばらつきがあるため, 数回試行を繰り返し平均値やばらつき等を観察することが必要であるが, それを考慮した上で, パターン A のシミュレーションが, 施設 X での現実の介護状況を妥当なレベルで再現できているということを確認し, モデルの構築（パラメータ設定）を完了した. 図 8 にパターン A のシミュレーションから得られた介護時の移動経路を示す.

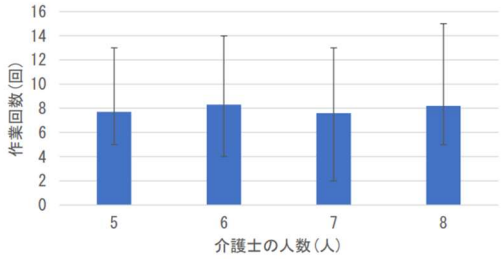


図 6 パターン A のシミュレーションから得られた合計作業回数

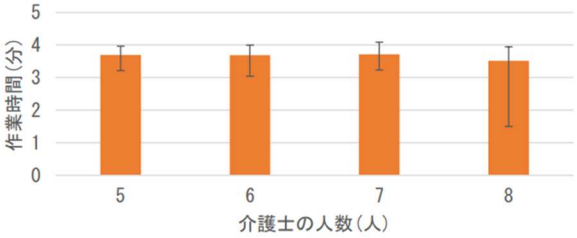


図 7　パターン A のシミュレーションから得られた介助 1 回あたりの作業時間

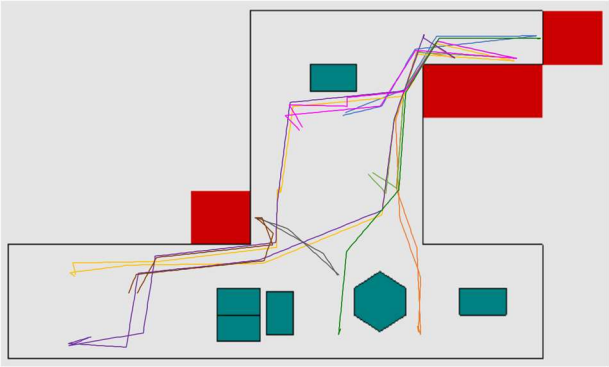


図 8　パターン A のシミュレーションから得られた移動経路

(2) モデル検証

次に，パターンBのシミュレーションを行うことで，本構築モデルの有効性を検証する．図9に示すように，介護士の人数に関わらず，パターンBにおける合計作業回数は9，10回程度であった．一方，施設Xでの計測結果は，パターンBの机・椅子の配置をとっていた13～14時の間には12回の介助が行われた．パターンBのシミュレーションから得られた合計作業回数の平均値は，施設Xでの作業回数の実測値に比べてやや少ないが，シミュレーションから得られる合計作業回数の最大値は12回であり，施設Xでの実測値に一致する．

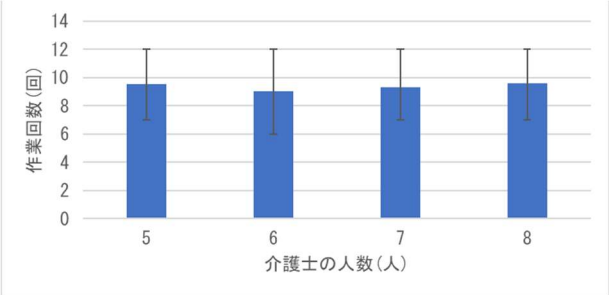


図 9　パターン B のシミュレーションから得られた合計作業回数

パターンBのシミュレーションから得られた介助1回あたりの作業時間は，図10に示すように，どの介護士の人数に対しても4分程度となり，そのばらつきはおよそ3.5分から5分弱の幅に収まる．施設Xでの計測結果を参照すると，パターンBの机・椅子の配置をとっていた13～14時の間に行われた介助の作業時間は，各介助による差は大きいものの，平均値は約4分40秒ほどであり，シミュレーション結果に概ね合致した．

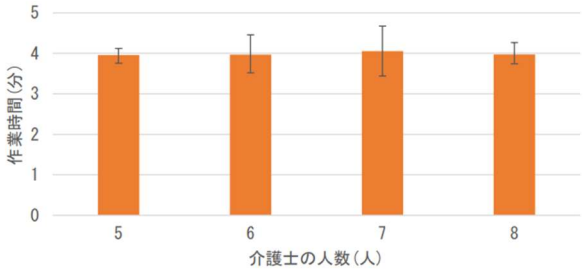


図 10　パターン B のシミュレーションから得られた介助 1 回あたりの作業時間

図 11 には，パターン B のシミュレーションから得られたエージェントの移動経路と施設 X で計測された介護士・高齢者の移動経路を比較する．この図より，経路の概形が類似している上，画面左側のトイレ付近と画面右側のトイレ 3 室に続く壁沿いにて多数の経路が混在しているという点で共通していることが分かる．また，本シミュレーションから得られたエージェントの移動経路の範囲内に施設 X で観測された移動経路がおおよそ含まれていることが分かる．したがって，本シミュレーションは，介護時の移動経路についても，現実のデイサービス施設 X での状況を再現していると判断できる．

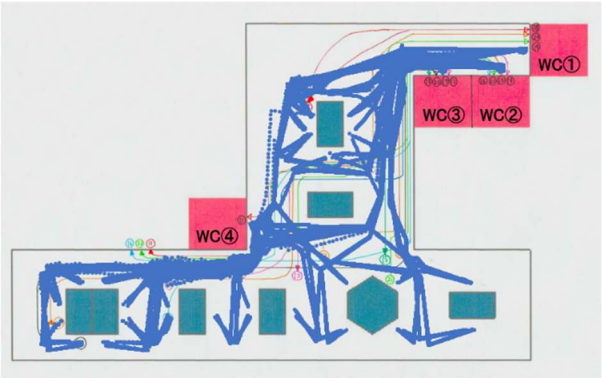


図 11 パターン B のシミュレーションと施設 X で観測された移動経路の比較

5.　結論

本研究では，排泄介助を対象として，現実の介護施設における介護空間のシミュレーションモデルを構築し，シミュレーション結果（作業回数，作業時間，移動経路）を，施設での観測結果と比較を行い，妥当な再現性を有することを確認した．

参考文献

[1] 内閣府.“令和4年版高齢社会白書（全体版）”.2020.
[2] 厚生労働省社会・援護局福祉基盤課福祉人材確保対策室.“第8期介護保険事業計画に基づく介護人材の必要数について”.2021.
[3] 厚生労働省社会・援護局福祉基盤課福祉人材確保対策室.“介護職員数の推移”.2021.
[4] DirkHelbing,PeterMolnar.“Socialforcemodelforpedestrian dynamics”.PhysicalReviewE,Vol.51,Number5,pp.4282-4286,1995.

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-06] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (6)

座長:北 栄輔(名古屋大学)

Thu. Jun 1, 2023 9:00 AM - 10:15 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-06-01] 沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

*丹司 尊[1]、内田 英明[2]、藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1] （1. 東京大学、2. 大阪大学）

9:00 AM - 9:15 AM

[A-06-02] EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

*田中 瑞基[1]、内田 英明[2]、吉村 忍[1]、藤井 秀樹[1]、丹司 尊[1] （1. 東京大学、2. 大阪大学）

9:15 AM - 9:30 AM

[A-06-03] 移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

*大島 航星[1]、長谷川 浩志[1] （1. 芝浦工業大学）

9:30 AM - 9:45 AM

[A-06-04] レベル4の MaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

*小幡 快世[1]、鈴木 隆介[1]、長谷川 浩志[1] （1. 芝浦工業大学）

9:45 AM - 10:00 AM

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman[1]、山田 修也[1]、玉城 龍洋[2]、*北 栄輔[1] （1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校）

10:00 AM - 10:15 AM

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

Construction of the Okinawa Traffic Digital Twin and Its Application to Sightseeing Issues

丹司尊[1)]，内田英明[2)]，藤井秀樹[3)]，吉村忍[4)]
Takashi Tanji, Hideaki Uchida, Hideki Fujii, and Shinobu Yoshimura

1) 学(工) 東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: t_tanji@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
2) 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教（〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-3, E-mail: uchida@see.eng.osaka-u.ac.jp）
3) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
4) 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

We have been constructing the Okinawa Traffic Digital Twin to solve multiple social problems related to traffics in Okinawa. For this purpose, we emply the microscopic multi-agent-based traffic simulator ADVENTURE_Mates, together with real data in Okinawa's traffic situation. As one of examples, we show simulations employing different route search algorithms including Eco-driving.

Key Words : *Traffic digital twin, ADVENTURE_Mates, Route search, Eco-driving*

1. はじめに

沖縄県は2018年度に国内700万人、外国人300万人の計1,000万人もの観光客が訪れ、7,340億円の観光収入を計上した[1]。さらに年々外国人観光客の人数も増加しており、さらなる盛り上がりが期待される。一方、観光に関する様々な問題が生じている。沖縄旅行の満足度に関する調査結果によると、食事や宿泊施設、環境の美しさでは「大変満足」「やや満足」が9割を超えているのに対し、渋滞状況や運転しやすさなどについては6割程度に留まっており、交通状況が大きな観光課題となっている[2]。混雑の激しい地域では、損失時間が年間100万人時間以上になっており、観光客が訪れることのできる施設数も減少し、観光客消費額の損失にも影響を与えている。

沖縄本島での慢性的な渋滞の要因は「交通容量の不足」「交通需要の超過」の２つの軸で考えられる。沖縄の道路改良済み延長は、本土復帰以降2.65倍になり交通容量は増大している一方で、近年の道路整備費は減少傾向にある。加えて、沖縄には本島の面積の15%を占めるほど広く米軍基地が存在し、東西を結ぶためには広大な敷地を有する基地を迂回する必要がある。これらの事情から沖縄の交通容量は頭打ちとなっている。

交通需要を「域内の移動人数」「自動車の分担率」「経路選択率」の観点から検討する。沖縄県の人口及び入域観光客数は返還以降増加傾向にあり、域内を移動する人数は年々増加傾向にある。沖縄の公共交通はモノレール、タクシー、バスのみであり、近年はバス専用レーンが整備され改善されたもののバスは道路混雑により定時性が失われている。また、沖縄都市モノレール線は那覇空港からてだこ浦西までの限られた地域でのみ運行している。自転車の普及率も起伏の多さ、天気の変わり易さ、気温の高さから全国基準でも極めて低いため、自動車の分担率が非常に高く、全国平均が66%程度であるのに対し沖縄では90%を占めている[1]。

最後に「経路選択率」の観点から検討する。「経路選択率」とはある地点からある地点へ移動する際に特定の経路を選択する割合を指し、特定の経路のみを全員が選択する場合にその経路の経路選択率は100%、その他の経路の経路選択率は0%となるようなものと定義する。沖縄には数多くの道路が存在しているが、南北を結ぶ三本の主要道路のうち沖縄自動車道のみ交通需要が低いなど経路選択率の偏りが起こっている。バイパスに関しても新たなバイパスができたことにより自動車が集中し、他の経路は空いているにも関わらず混雑が起こる事態が生じている。以上の理由から交通需要が増大しており、その結果沖縄では渋滞が慢性化している。

沖縄における交通の不便さは、沖縄観光の大きな障壁になっており改善が急務である。本研究では沖縄観光を促進するため交通問題の解決策を検討するための基盤を整備し、特に「慢性的な交通渋滞」の解消により域内移動を効率化することを目的とする。

具体的には、著者らの研究室で長年研究開発を進めているマルチエージェントモデルに基づくミクロ交通流シミュレータであるADVENTURE_Mates（以下MATESと呼ぶ）[2][3]を用いて沖縄の交通状況を再現し（沖縄の交通デジタルツインの構築）、渋滞軽減の糸口を探る。MATESにおいては、道路空間は信号、速度制限や一方通行も再現されており高い精度で道路環境を再現できる。個々の車両エージェントは経路探索を行い移動するため、経路探索の方法による交通状況の変化を観測する本研究での活用に適している。車両エージェントはエージェント毎に設定された出発地から発生し、目的に到着すると消滅する。その際の経路は、移動距離、移動時間、右左折回数、車線数を重み付けして足し合わせたコストが最小化するようにA*アルゴリズムを用いて探索する。

先に述べたように、沖縄本島の交通渋滞の原因には、「道路整備予算の減少」「米軍基地の存在」「沖縄の人口及び入域観光客数の増加」「自動車分担率の高さ」「経路選択率の偏り」などが複合的に影響を及ぼしているが、本研究では「経路選択率の偏り」に着目し、「低燃費経路」という経路に自動車を誘導することで経路選択率を変化させ、それが交通にどのような変化があるかを評価する。

2. 沖縄本島の交通の再現

2.1 手法の概要

まずオープンソースであるOpenStreetMapのデータを用いて沖縄本島全域の交通網を再現する。加えて、燃費を計算するためには道路勾配の情報も必要であることから、各ノードの標高を取得し入力する。信号の現示パターン

や秒数のデータについては、いずれは地元警察より提供いただけるように交渉する予定であるが、本研究では、第一ステップとして、著者らが実際に沖縄に赴き、主な交差点をピックアップし計測して、その結果を用いた。交通量については、レンタカーの交通量と乗用車の交通量を分けて設定し、レンタカーの交通量はレンタカーのプローブデータ等から推定したものを、乗用車の交通量は平成27年の交通センサスのデータを用いた。

2.2　道路ネットワークの設定

沖縄本島の交通ネットワークは、OpenStreetMap から取得したデータを ADVENTURE_Mates のデータ形式に変換して用いる。表 1 に示すように、3 種類の詳細度の道路ネットワークを用意した。図 1 にはネットワーク 1 を示す。

表 1 再現レベルを変えた道路ネットワーク

道路	ネットワーク		
道路レベル	1	2	3
自動車専用道、高速・有料道路	○	○	○
高速道路への接続路	○	○	○
国道で、主要道路のうち、高速道路でないもの	○	○	○
国道への接続路	○	○	○
地方自治体に管理されている主要道路	○	○	○
主要道への接続路	○	○	○
補助的な主要道路など	○	○	×
一般道（2 車線以上）	○	×	×
一般道（2車線未満）	×	×	×
居住区域内道路	×	×	×
ノード数	11560	6292	4462
リンク数	12850	6641	4650

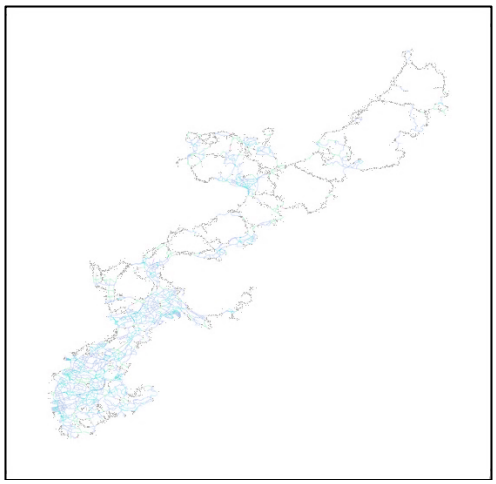


図 1 沖縄の交通ネットワーク 1

2.3　標高の設定

燃費を計算するためには道路の傾斜角が必要になる。しかし、OpenStreetMap には標高データが存在しない。そこで、国土地理院の標高 API を用いて標高データを取得した。国土地理院の標高データのデータソースは等高線から得られた 10m DEM（Digital Elevation Model）データであり、10m 四方の正方形の中心に標高データを持たせた形式である。

2.4　信号の設定

現実の信号現示データは公開されていないため、一部の交差点を除き MATES が保有するテンプレートの信号データを用いる。テンプレートは交差点の数によって異なり、2 叉路から 6 叉路までの 5 パターンを用意する。一方、観光地周辺と沖縄地方渋滞対策推進協議会の発表する主要渋滞箇所を中心に 61 箇所のデータを抽出し、現地で計測しデータを取得し実装した。

2.5　交通量の設定

沖縄本島の交通量をレンタカーとレンタカー以外に分けて設定する。レンタカー以外には乗用車類、小型貨物車、普通貨物車が含まれ、国土交通省道路局企画課道路経済調査室より提供していただいた平成 27 年の全国道路・街路交通情勢調査の自動車起終点調査の結果を利用する。OD データは本島を 199 のエリアに分割し、そのエリア間の 1 日の交通量をまとめた。各エリア内のノードを OD ノードとして設定し、すべての交通量が 199 個の点から発生・消滅するように設定した。ただし、出発ノードと到着ノードが同一の場合にはエラーになるため、同一エリア間の OD データには別のサブ OD ノードを設定し対応した。表 2 にトリップ数を示す。

表 2 自家用車のトリップ数

種別	トリップ数
乗用車類	1,569,428
小型貨物車	343,601
普通貨物車	107,384
全車種計	2,020,413

全国道路・街路交通情勢調査の自動車起終点調査ではレンタカーを調査対象としていないため、レンタカーの交通量に関しては、一般財団法人計量計画研究所が推計を行ったレンタカーOD データを用いた。

2.6　交通量の妥当性検証

設定した交通量の妥当性検証には、リンク交通量が実際の交通量と一致するかどうかを確認した。比較にあたり、図 2 に示す 11 箇所のリンク交通量を用いた。

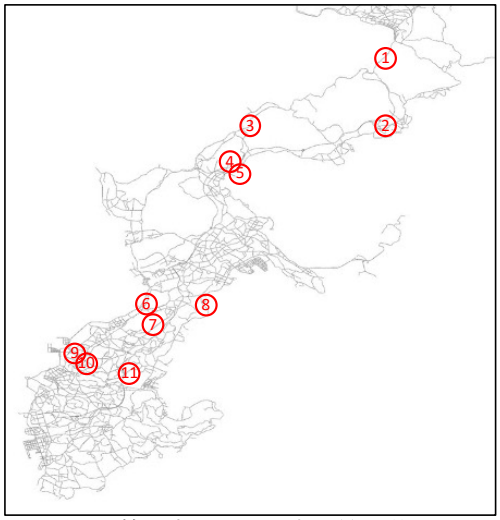


図 2 検証するリンク交通量の場所

シミュレーションを 1 日分行い、各リンクの交通量を求め、実測値のリンク交通量と比較した。その結果を表 3 に示す。ただし、このシミュレーションにおいては、自動車エージェントは最短距離経路優先で探索を行うこととした。

表 3 各リンクの交通量の比較

リンク	リンク交通量		誤差
	実測値[台/日]	シミュレーション[台/日]	
1	41,742	43,343	4%
2	11,610	10,015	-14%
3	17,959	18,758	4%
4	30,285	25,427	-16%
5	14,461	13,683	-5%
6	31,589	33,569	6%
7	25,451	12,751	-50%
8	27,461	30,629	12%
9	22,086	23,021	4%
10	13,884	12,225	-12%
11	37,135	23,352	-37%

表 3 より実測値とシミュレーションのリンク交通量は、概ね誤差 15%以内に収まっているものの、リンク 4、7、11 においては実際よりも少ない値となっている。リンク 4、7、11 はすべて沖縄自動車道（高速道路）上のノードである。この理由としては、高速道路を利用した経路が最短距離経路ではないものの最短時間経路である場合に、最短時間経路を選好するドライバを再現できていないことが考えられる。一方、その他のリンクにおいては、沖縄の交通量をほぼ良好に再現できていることが確認できた。

3. 低燃費経路による交通状況の変化

2 章で構築した沖縄交通デジタルツインを用いて、低燃費経路に自動車を誘導することにより、交通状況がどのように変化するかをシミュレーションする。ドライバが目的地まで移動する際の経路としては、「時間がかからない経路」「交通料金が安い経路」「ガソリン代がかからない経路」などが中心であるが、近年では環境への配慮も重視されておりガソリン代のかからない環境負荷の小さいルートへの需要も高まっている。

3.1 燃費・電費の算出方法

本研究では以下に述べる燃費・電費の推定モデルを用いる。燃費は消費した燃料に対して走行した距離を指し、[km/ℓ]の単位で表される。W_{all}を走行エネルギー、d[km]を走行距離、ηをエンジンの熱効率、G[MJ/ℓ]をガソリンの標準発熱量とすると、燃費FCは次式で表される[9]。

$$FC[\mathrm{km}/\ell] = \frac{\eta G d}{W_{all}} \tag{1}$$

また、走行エネルギーは転がり摩擦抵抗F_{roll}、慣性抵抗F_{ine}、空気抵抗F_{aer}、勾配抵抗F_{gra}を用いて以下のように表される。また、加速エネルギーが負の際には加速エネルギーは 0 として計算する。

$$W_{all} = (F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})v\Delta t \tag{2}$$

$$F_{roll} = \tau m g cos\theta \tag{3}$$

$$F_{ine} = (1+k)ma \tag{4}$$

$$F_{aer} = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \tag{5}$$

$$F_{gra} = mgsin\theta \tag{6}$$

ここで、τは転がり摩擦係数、mは車重、gは重力加速度、θは勾配角、kは回転部慣性質量係数、ρは空気密度、C_dは空気抵抗係数、Aは前面投影面積、vは車速である。

電費は、一定の距離を走行するために消費した電力量を指し、[Wh/km]の単位で表される。走行エネルギーに関しては電気自動車 EV に関してもガソリン車と同様の式を利用することができるが、EV には回生という機能があり、これは下り坂などで加速度が負である際にモータを逆回転させることで運動エネルギーから電気エネルギーを生み出す機能である。そのため、EV の電費ECはガソリン車と異なり走行エネルギーが非負かどうかで分かれた以下の式で表される。

$$EC = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{ev}}(F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})SOC \\ \quad (\text{走行エネルギーが非負}) \\ \eta_{ev}(F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})R(a) \\ \quad (\text{走行エネルギーが負}) \end{cases} \tag{7}$$

ここで、η_{ev}は機械損失率、SOCは充電残量、$R(a)$は回生率、aは加速度を表す。また、回生率は以下の式で表される。

$$R(a) = \left(exp\left(\frac{0.0411}{|a|}\right)\right)^{-1} \quad (\mathrm{a} < 0) \tag{8}$$

以上の式から、ガソリン車・EV ともに車重や前面投影面積などの車両の属性に加えて、経路での速度、傾斜角、加速度がわかれば燃費と電費を計算することができる。なお、電飾やエアコンによる消費エネルギーも生じるが、カタログ値に考慮されないため、本研究でも考慮しない。

3.2 計算式の妥当性検証

前節で述べた燃費と電費の計算式の妥当性検証を行う。カタログ値の燃費は WLTC モード[4]で測定されるため、本研究でも WLTC モードでの検証を行った。WLTC モードとは、「市街地（Low）モード」「郊外（Medium）モード」「高速（High）モード」「超高速（Extra-high）モード」から構成される速度プロファイルで走行させた場合の燃費を算出するものである。なお日本では超高速モードでの計測は不要とされているため、「市街地モード」「郊外モード」「高速モード」で走らせた際の計算値とカタログ値を比較した。車両パラメータには、ガソリン車はトヨタのパッソ、電気自動車は日産のリーフのデータを用いた。その結果を表 4、表 5 に示す。これらは車両カタログの諸元表及びパラメータチューニングから得た値である。

表 4 ガソリン車（トヨタ パッソ）のパラメータ[5]

空気密度[kg/m^3]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m^2]	1.79
転がり抵抗係数	0.018
重量[kg]	1101.25
回転部慣性質量係数	0.34
エンジンの熱効率	0.3
ガソリンの標準発熱量[MJ/L]	33.37

表 5 電気自動車（日産リーフ）のパラメータ[6]

空気密度[kg/m^3]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m^2]	2.47
転がり抵抗係数	0.0129
重量[kg]	1811.25
回転部慣性質量係数	0.25

機械損失率	0.83
SOC	1（固定）

このパラメータ及び WLTC モードの速度プロファイルに沿ってガソリン車と電気自動車を走らせた際の燃費と電費はそれぞれ表 6 と表 7 のようになった。

表 6 ガソリン車の燃費のカタログ値と計算値

	カタログ値	計算値
市街地（Low）モード	15.7[km/ℓ]	18.4[km/ℓ](+14%)
郊外（Medium）モード	20.4[km/ℓ]	18.3[km/ℓ](-12%)
高速（High）モード	20.5[km/ℓ]	19.6[km/ℓ]（-5%）

表 7 電気自動車の電費のカタログ値と計算値

	カタログ値	計算値
市街地（Low）モード	133[Wh/km]	138[Wh/km] (+4%)
郊外（Medium）モード	145[Wh/km]	146[Wh/km] (+1%)
高速（High）モード	171[Wh/km]	155[Wh/km] (-9%)

ガソリン車では、市街地モードではカタログ値よりも燃費がよく、郊外モードと高速モードではカタログ値より燃費が悪化した。これは低速で走行している間は効率の良いエンジンの回転域に到達しないことが原因であり、本シミュレーションでは回転数によらず熱効率が一定であるとしたことによる誤差である。

EV に関しては、実際よりも燃費がややよくなっている。この原因は「SOC を 1 で固定していること」「走行抵抗以外の消費エネルギーを考えていないこと」などが挙げられる。SOC は本来消費エネルギーとともに減少し、それに伴い消費電力も変化する。走行抵抗以外の消費電力に関しては、ライトなどの電飾やエアコンなどの消費が考えられる。とはいうものの、ガソリン車、電気自動車どちらにおいても計算式により燃費、電費を 15%以内の誤差で求めることができていることが確認された。

なお、今回は、平成 26 年時点での電気自動車普及率は 1,000 世帯あたり 52 台と全国平均の半分以下であり、あまり浸透していなかった[7]ため、すべての車両エージェントをガソリン車として実装し、数値実験を行った。

3.3 低燃費経路選択アルゴリズムの実装

次に、低燃費経路選択アルゴリズムを実装した。MATES では、リンクの端点において接続するリンクが 1 本であるノードが OD ノードに選ばれる。車両の発生や消滅はすべて OD ノードで行われる。現状の MATES の経路選択は内生的なものであり、シミュレーションの内部状態によって経路が決定する。各経路は各車両エージェントが一般化コストを最小化するように最適経路探索アルゴリズムによって経路探索し走行する。MATES では最適経路を探索するアルゴリズムとして A*アルゴリズムを採用しており、一般化コスト$C(r)$を次式に示す。

$$C(r) = \sum_{i \in L_r} \frac{w_d d_i}{16.7} + w_t t_i \qquad (9)$$

ここで、L_rは経路 r が通過予定のリンクの集合、$d_i[m]$はリンクiの道のり、$t_i[s]$はリンクiを通過するための所要時間であり、w_dとw_tは重み係数である。16.7 は 16.7m/s すなわち時速 60km に由来しており、経路選択時に各リンクを車両は時速 60km で通過するものと仮定している。リンクを通過するための所要時間$t_i[s]$は直近 100 秒にリンクiを通過した車両の平均所要時間を用いる。今回は一般化コストに式 (10) に示す燃料消費量のパラメータを追加し低燃費経路選択アルゴリズムを実装した。

$$C(r) = \sum_{i \in L_r} \frac{w_d d_i}{16.7} + w_t t_i + w_{fc} \frac{W_{all}}{\eta G} 10^6 \qquad (10)$$

ここで、w_{fc}は燃料消費量の重み係数であり、本研究では距離優先や時間優先のパラメータと同時に用いることはないため、w_tとw_dのどちらかが 1 の際には$w_{fc} = 0$、$w_{fc} = 0$の際にはw_tとw_dのどちらも 0 となる。

4．沖縄での低燃費経路の有用性分析

すべての自動車が低燃費経路選択アルゴリズムを選択した場合と距離優先アルゴリズムを選択した場合でシミュレーション結果（シミュレーション時間は 8 時間）がどのように変化するかを検証する。なお、低燃費経路選択が渋滞改善に寄与するかは全車両の平均速度及び主要渋滞箇所のうちの 51 箇所における交通量、渋滞長、平均速度を比較し評価する。結果を表 8 と、図 3~5 に示す。

表 8 低燃費経路選択の有無による結果の比較

	低燃費経路選択	最短距離経路選択
シミュレーション時間	480min	480min
のべ車両数	431,498 台	411,365 台
平均旅行距離	19.0km	22.3km
平均旅行時間	56.3min	58.0min
平均速度	20.2km/h	23.1km/h

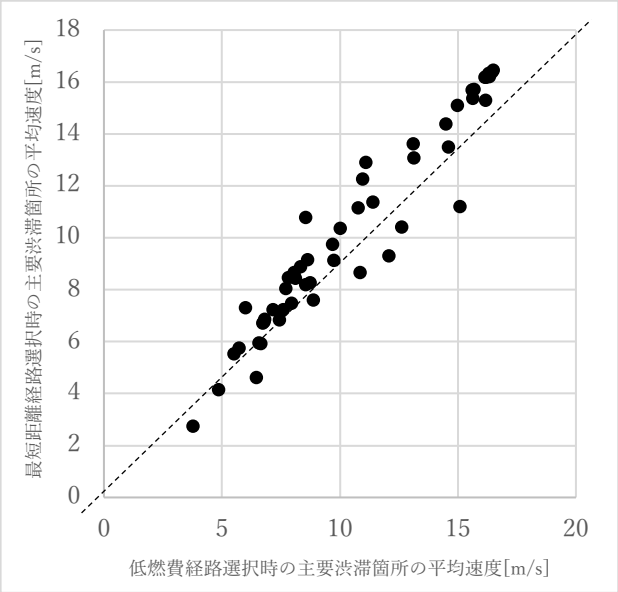


図 3 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の平均速度

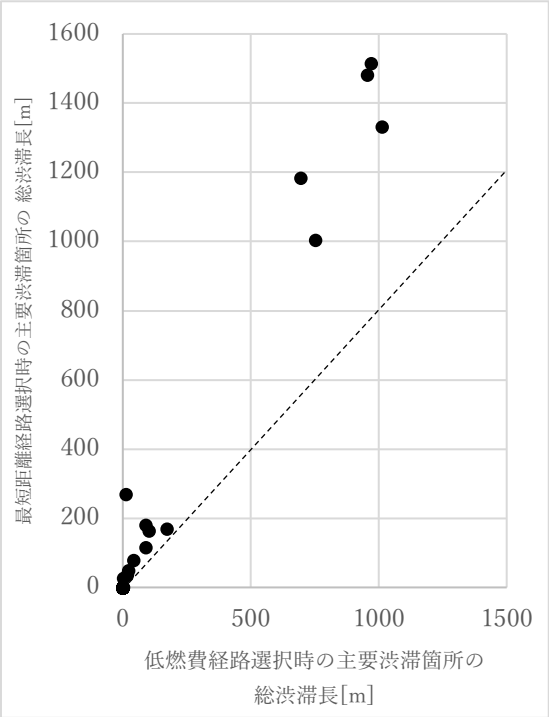


図 4 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の総渋滞長

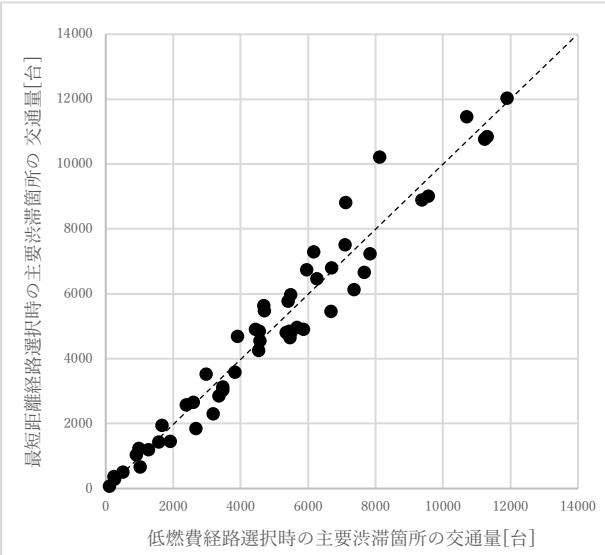


図 5 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の交通量

表8を見ると、低燃費経路選択では低燃費経路では平均速度は14%ほど増加するが、混雑を避け迂回するため平均旅行距離が17%ほど長くなる。図3~5は最短距離選択時と低燃費経路選択選択時の主要渋滞箇所の平均速度、総渋滞長、交通量を表しており、経路選択によって平均速度と交通量は大きく変化しないものの、渋滞長が43%改善していることがわかる。那覇市近辺は主要渋滞箇所が多く、それらすべてを回避して経路を選ぶことは不可能に近いため主要渋滞箇所での渋滞を完全になくすことはできず、平均速度や交通量からも渋滞が依然として発生していることがわかる。しかし、渋滞長を見比べると大幅に改善しており、低燃費経路選択によって渋滞の発生を防ぐことはできないが渋滞の程度を4割程度軽減する効果があることが示唆された。

5. おわりに

本研究では沖縄本島の交通ネットワーク、標高、信号、交通量を入力することにより、沖縄本島の交通状況を再現できる交通デジタルツインを構築した。これを用いて沖縄本島をまるごとシミュレーションできるようになり、渋滞軽減をはじめ、MaaS の検証、電気自動車の CS の配置、デマンドバスの経路探索など様々な交通問題を検証する上での基盤を整備することができた。

構築した沖縄交通デジタルツインに低燃費経路選択アルゴリズムを実装することにより、低燃費経路選択が渋滞軽減へ寄与するかを検証した。低燃費経路を選択することにって完全に渋滞を防ぐことは不可能であったが、渋滞長を 4 割程度減少させ、渋滞の程度を軽減する効果があることを示すことができた。

今後は交通が関連する幅広いジャンルに本手法を適用していく。

謝辞

本研究を推進するにあたり、琉球大学の富山潤教授、神谷大輔教授、一般財団法人 計量計画研究所の北村清州様、沖縄総合事務局の村田太紀様に、意見交換やデータ提供など様々な場面でご協力いただきました。記して謝辞を申し上げます。

参考文献

[1]沖縄県, “平成 30 年版観光要覧”, 2019
[2]S. Yoshimura, “MATES : Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator -- Theory, Implementation and Practical Application”, Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 11, No. 1, p. 17–26, 2006
[3]吉村忍, 西川紘史, 守安智, “知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発”, シミュレーション, Vol. 23, No. 3, pp. 228-237, 2014
[4]国土交通省, “乗用自動車等の国際調和排出ガス・燃費試験法（ＷＬＴＰ）の概要について”, 2015
[5]トヨタ自動車, “トヨタ パッソ 主要諸元表”, https://toyota.jp/pages/contents/passo/003_p_002/4.0/pdf/spec/passo_spec_202208.pdf
[6]日産自動車, “日産リーフ主要諸元”, https://www3.nissan.co.jp/content/dam/Nissan/jp/vehicles/leaf/2109/pdf/leaf_specsheet_01.pdf
[7]沖縄県企画部統計課, “平成 26 年全国消費実態調査 (沖縄県版) 主要耐久消費財に関する結果 結果の概要”, 2014

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

Simulation of infrastructure coordination between transportation and electricity via electric vehicles

田中瑞基[1)]，藤井秀樹[2)]，内田英明[3)]，丹司尊[4)]，吉村忍[5)]
Mizuki Tanaka, Hideki Fuji, Hideaki Uchida, Takashi Tanji　and Shinobu Yoshimura

1) 学(工) 東京大学大学院工学系研究科(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: m_tanaka@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
3) 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教（〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-3, E-mail:uchida@see.eng.osaka-u.ac.jp）
4) 修(工) 東京大学大学院工学系研究科（〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail:t_tanji@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp）
4) 工博　東京大学 工学系研究科 教授(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

With the spread of variable renewable energy sources such as wind and solar power, a low-cost leveling method has been proposed by utilizing EVs as storage batteries. To achieve this, it is necessary to coordinate transportation and electric power, and for this purpose, a coupled simulation that unifies transportation and electric power is important. In this study, a coupled simulator that links an existing traffic simulator and an electric power simulator is constructed, and the extent to which EVs actually affect both is examined.

Key Words : *EV,Transportation,Electric power,Coordination simulation*

1.　はじめに

近年，地球温暖化に伴う異常気象が全世界における課題となっており，その原因となる二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出量を減らすことが共通目標となっている. そのため, 太陽光発電をはじめとした変動型再生可能ネルギー（Variable Renewable Energy [VRE]）の導入が促進されている[1].

変動型再生可能エネルギーは発電量が時間帯や天気等に大きく依存して変動するため, その大量導入は, 需給バランスが必須となる電力系統に不安定をもたらすことが懸念されている．電気自動車(electric vehicle, EV)を蓄電池として活用して，低コストで電力需給の平準化を図り電力系統の安定性を向上させる手法が提案されている[2].

今後EVを介した道路交通網と電力系統間での相互の結びつき（インフラ協調）がより強くなると考えられている. EVが双方に与える影響を評価するには交通網のメカニズムと電力系統のメカニズムを一元的に考えることが必要となる.

本研究では，著者らの研究室で開発してきている知的マルチエージェント交通流シミュレータADVENTURE_Mates (以下MATES) [3]と米国電力研究所EPRIが開発し公開している電力シミュレータOpenDSS (Open Distribution System Simulator) [4] とを組み合わせることで道路交通網メカニズムと電力系統メカニズムに与える影響を一元的に評価する連成シミュレータを構築することを目的とする.

2.　手法

(1)　MATES

MATESは車両移動を詳細に表現することが可能なミクロ型交通流シミュレータである．MATESではマルチエ等の交通主体はエージェントとして実装され，それらは周囲の状況を知覚し自律的に行動する. そして, エージェント1つ1つの行動が周囲に存在するエージェントに影響を与えるという環境を構築している. これにより, エージェント間での相互作用を実現し，複雑な交通現象の再現が可能となっている.

本研究では, 従来のMATESに対してEVのバッテリー容量出力，充電ステーション（charging station, CS）における充電行動を追加実装したバージョンを使用した[5].

(2)　OpenDSS

OpenDSSはEPRIによって開発された配電シミュレータであり，現状及び将来の配電システムの課題に対応するために作られた柔軟でカスタマイズ可能なプラットフォームを利用し，エンジニアが複雑な分析を行うことを可能としている.

OpenDSSの内部では潮流計算が行われている．潮流計算とは，電力系統においてそれぞれの発電機から供給される電力が送電線や変圧器を通してそれぞれの負荷に流れていく状態を求める計算であり，以下の式を用いて計算される. ここで Y_{system}は各回路に固有の行列, V_nはn回目に計算された電圧，$I_{\mathrm{PC}}(V_n)$はV_nをもとに計算される電流である.

$$I_{\mathrm{PC}}(V_n) = Y_{\mathrm{system}} V_n \tag{1}$$

$$V_{n+1} = [Y_{\mathrm{system}}]^{-1} I_{\mathrm{PC}}(V_n) \tag{2}$$

V_nの値が収束するまで繰り返し計算され，それにより得られた値をVとして出力する.

(3) 連成手法

連成シミュレーションを行う際には，2つのシミュレータ間でファイルの受け渡しを行う必要がある．EVが充電を行うと充電器部分の運用条件が変化し，その結果潮流計算の計算結果が変化する．そして，その計算結果をもとに充電料金にインセンティブをかける等の行為により経路選択部分に影響が生じる．本研究ではこのフローをもとに連成シミュレータを構築しており，これをまとめたものが図1および図2である．

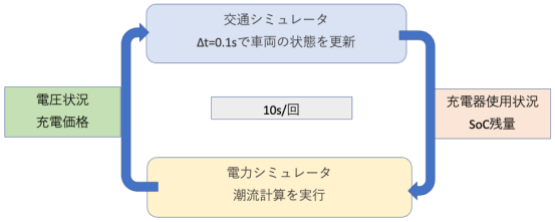


図 1　データ連携の概要

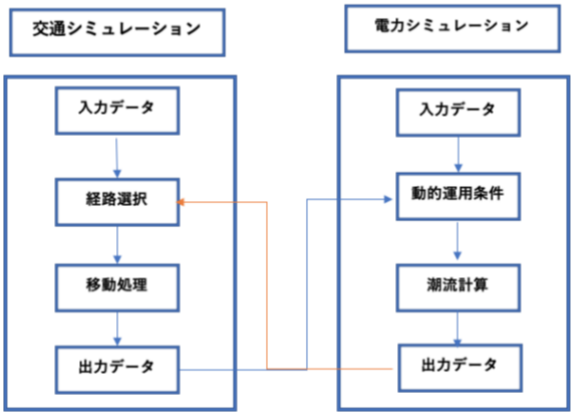


図-2　シミュレーションフロー

3. シミュレーション設定

(1) MATES

MATESを実行する際にはEVエージェントに関連する情報を設定する必要がある．実際のEV車両に基づき表1のように設定している。

表 1 EV エージェント諸元表

車両総重量	1811.25$[kg]$
転がり摩擦係数	0.00129
空気密度	1.204$[kg/m^3]$
空気抵抗係数	0.28
前面投影面積	2.47$[m^2]$
最終減速比	8.193
駆動系効率	0.87
充電容量	62$[kWh]$
一充電走行距離	458$[km]$

(2) OpenDSS

潮流計算を行うOpenDSSにおいては変圧器が導入されており，現実的でない電圧が出力されないように電圧の上限・下限が設定されている．そのため，実データに基づくデータを入力することが必要となる．今回はCREST126モデル[6]を利用し，それに基づくネットワークを図3のように作成した．

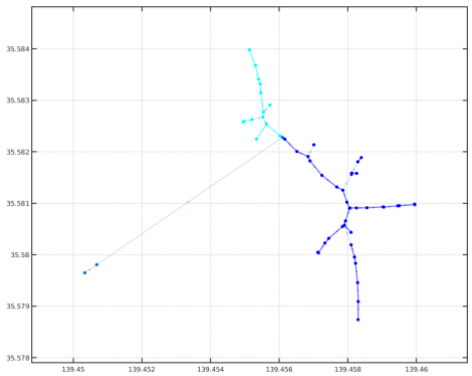


図 3　電力ネットワーク

ここで，各ノードは高圧需要家と対応しており，本研究ではこれを急速充電器として扱っている．MATESではこれに対応する道路ネットワークを構築した．

4. 結果

連成させない状態で電力シミュレーションを用いて計算した電圧の値が図4であり，連成させてシミュレーションを実行したものが図5である．ここでいずれも横軸は時間、縦軸は電圧を意味しており，各線が需要家の電圧に対応している．

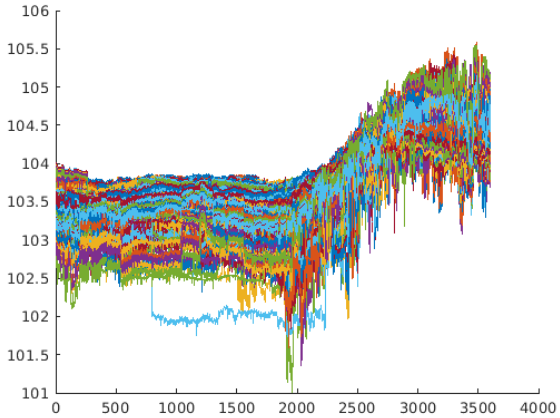


図 4 無連成状態における電圧変化

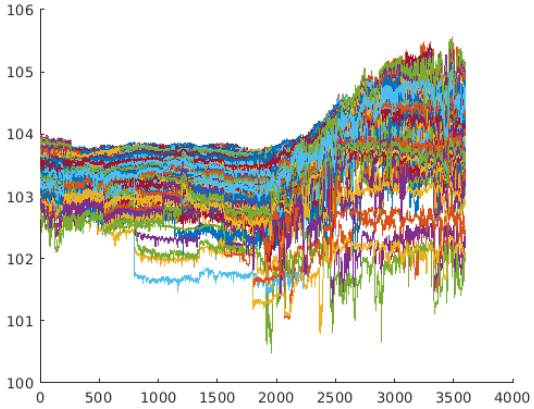


図 5 連成シミュレーションにおける電圧変化

図4と図5を比較すると，2000ステップ程度までは大きな違いはないものの，時間が経過するにつれ需要家ごとの電圧の値にズレが生じていることがわかる．これは錬成シミュレータにおいては，充電行動を開始するEVエージェントが多くなったことで利用されている充電器では電圧降下が生じているためであると考えられており，EVが電力系統に与えている影響を再現することができていると考えている．

5. まとめ・今後の展望

今回はCREST126モデルをベースとした簡単なネットワークを作成し，それに対する連成シミュレータの実装及びその動作確認を行った．

今後は相互作用の部分に関しての感度解析を行なった上で，実地域の道路ネットワークに対して適切に電力ネットワークを対応させることで，その地域全体に対して連成シミュレータを実装し， EVの影響を評価したい．

参考文献

[1] 小島康弘: 再生可能エネルギー導入を支える蓄電池制御技術．計測と制御，Vol. 55, No. 7, pp. 609-612, 2016.

[2] Zhang B., *et al.*: Optimized Operational Cost Reduction for an EV Charging Station Integrated With Battery Storage and PV Generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.10, pp.2096-2106, 2019.

[3] 内田英明ら: マルチエージェント交通流シミュレーションにおける充電を考慮したEVの経路選択，人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp.AG16-I_1-9, 2017.

[4] Q Hu., *et al.*:The Prediction of Electric Vehicles Load Profiles Considering Stochastic Charging and Discharging Behavior and Their Impact Assessment on a Real UK Distribution Network. ScienceDirect,Vol158,p.6458-6465,2019.

[5] H. Uchida, H. Fujii, S. Yoshimura. ”Multiagent Coupled simulation of a Transportation System and Power Grid.”2018 21st International Conference on Inteligent Transportation Systems (ITSC), pp.460-466, 2018.

[6] 早稲田大学スマート社会技術融合研究機構 https://www.waseda.jp/inst/across/news/501.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

Optimal Placement of On-demand Bus Stops for Persons with Mobility Constraints

大島航星[1)]，長谷川浩志[1)]
Kosei Oshima and Hiroshi Hasegawa

1)　芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307)

In rural areas, transportation is essential for daily life. However, the fixed-route bus system has become inefficient due to declining demand caused by depopulation in rural areas. Therefore, on-demand buses, which operate by aggregating the small-scale demand in rural areas, are getting attention. In this study, we create, compare, and evaluate several models of bus stop locations from the perspective of persons with mobility constraints who have difficulty getting to on-demand bus stops.

Key Words : *on-demand bus, persons with mobility constraints, facility location problem*

1.　はじめに

地方では日常生活を送るうえで車やバスなどの交通手段が必須となっている．しかしながら，過疎化による需要減少により定時定路線型のバスは非効率的になってしまっている．こうした背景の中，地方の小規模需要を集約した形で運行するオンデマンドバスが注目されている．

オンデマンドバスは運行方式の違いで図1のように分類できる[1]．地域構造ごとに適した運行方式が存在しており，本研究の対象地である栃木県那須町では自由経路ミーティングポイント型のデマンド型交通が導入されている[2]．

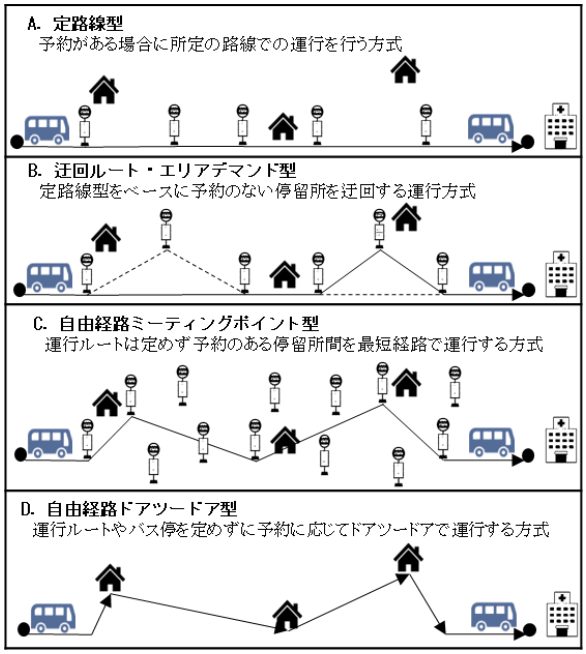


図-1. オンデマンドバスの運行方式による分類[1]

平岡らは，利用者の住所から目的地までの方向ベクトルを用いたリアルタイムでの予約と公共交通機関へのシームレスな乗り継ぎを考慮した自由経路ドアツードア型のオンデマンドバスのルート最適化手法を提案した[3]．

本研究では，平岡らの自由経路ドアツードア型の研究で得られた知見をもとに那須町で運行されている自由経路ミーティングポイント型についての研究を行う．

自由経路ミーティングポイント型は自由経路ドアツードア型と異なり，バス停までの移動が必須である．那須町のデマンド型乗合交通のバス停設置の目安は500mであるが，図2のように那須町のデマンド型乗合交通の登録者対象のアンケートによると登録者の22%は500mの移動が困難であると回答している．

そこで，より多くの移動制約者がオンデマンドバスを利用できるような複数のバス停の配置モデルを作成し，それらの比較・評価を行う．

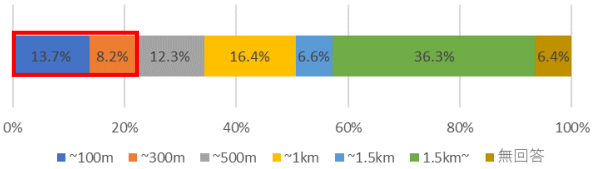


図-2. 那須町デマンド型乗合交通登録者の休まず歩ける距離[4]

2.　シミュレーション概要

本研究では国勢調査の最小単位である那須町の250mメッシュの人口分布を用いて3つのモデルを作成する．

(1)　p-メディアンモデル

p-メディアンモデルとは，需要点から施設までの距離(移動距離)と需要量の積の総和が最小になるように*p*個の施設を配置するモデル．以下の式(1)~(4)のように定式化される．

$$min \sum_i (w_i \sum_j d_{ij} x_{ij}) \quad (1)$$

$$subject\ to \sum_i x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \forall i, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (4)$$

w_i: 需要点iにおける需要量　p: バス停の数
d_{ij}: 需要点iからバス停jまでの距離　N: バス停候補地の集合
x_{ij}: 需要点iにおけるバス停候補地jへの割当てを表す二値変数
y_j:バス停候補地jにおけるバス停の有無を表す二値変数

(2)　p-センターモデル

p-センターモデルとは，移動距離の最大値が最小になるようにp個の施設を配置するモデル．式(2),(3),(4)に式(5),(6)を加え，以下のように定式化される．

$$min\ Z \quad (5)$$

$$subject\ to \sum_j d_{ij} x_{ij} \leq Z \quad (6)$$

$$(2), (3), and (4)$$

Z: 最大移動距離

(3)　最大被覆モデル

最大被覆モデルとは，施設から距離u以内に可能な限り多くの需要が収まるようにp個の施設を配置するモデル．式(2),(3),(4)に式(7)を加え，以下のように定式化される．

$$min \sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

$$subject\ to\ (2), (3), and (4)$$

a_{ij}: バス停jから距離u以内でカバーできる需要点iの需要量
($d_{ij} \leq u$ ならばw_i,さもなくば 0)

3.　シミュレーション条件

今回のシミュレーションでは前述した3つのモデルと比較用としてバス停を均等に配置したモデルを作成する．条件は表1に示す．

表-1 シミュレーション条件

対象地	栃木県那須町高久乙地区
バス停候補	250mメッシュの各グリッド
バス停数	34
需要点	250mメッシュの各グリッド
需要量	250mメッシュの各グリッドの65歳以上の人口分布[4]

4.　シミュレーション結果

シミュレーションで作成したp-メディアンモデル，p-センターモデル,最大被覆モデルと比較として均等にバス停を配置したモデルを図 3 に示す.また, それらの比較を表2に示す.

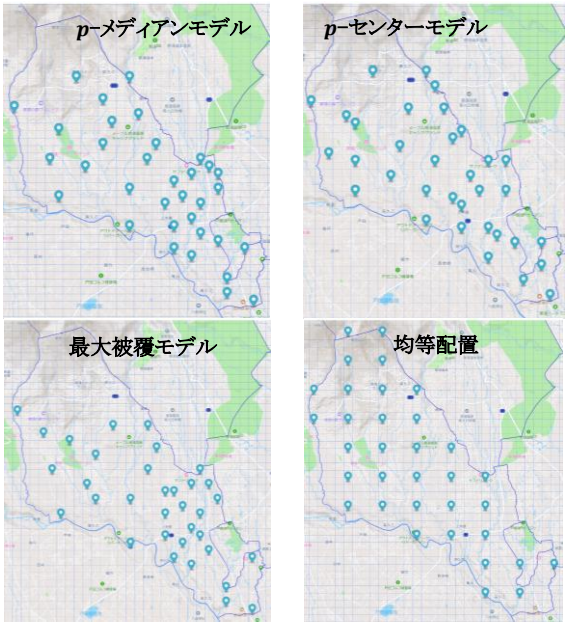


図-3. 作成したモデル

表 2. シミュレーション結果比較

	pメディアン	pセンター	最大被覆	均等配置
バス停数[カ所]	34	34	34	34
総移動距離[m]	203289.4	295337.2	264475.7	527709.4
最大移動距離[m]	840.0	538.5	1605.3	957.7
300m以内のバス停の割合[%]	80.9	61.2	89.1	30.4

作成したモデルのうち，最大被覆モデルのカバー率が最大となり，バス停を均等に配置した場合と比べカバー率は2.9倍になった．しかし，p-メディアンモデルと比較してカバー率は1.1倍であるのに対し，総移動距離が1.3倍，最大移動距離が1.9倍になってしまっている．

5.　おわりに

今回作成したモデルの中で最適なモデルは最もカバー率が大きい最大被覆モデルであると考える．しかしながら最大被覆モデルは総移動距離や最大移動距離が大きくなってしまった．これは制約条件に距離の数値を含まないことが原因であると考えられる．そのため，制約条件に移動距離を含むp-メディアンモデルと最大被覆モデルのパレート解を用いることでより移動制約者に適したバス停配置モデルの作成ができるようになると考える．

参考文献

[1]　国土交通省: デマンド型交通の手引き, 2013.
[2]　那須町: 令和3年度 那須町公共交通に関する現地調査結果,2020
[3]　平岡優希ら: MaaSを考慮したオンデマンドバスのルート最適化, 計算工学講演会論文集 Vol.26, 2021
[4]　那須町: 令和3年度 那須町公共交通に関するアンケート調査結果,2020
[5]　総務省統計局: 2020年度国勢調査結果, 2020

計算工学講演会論文集 Vol.28 (2023年6月)

レベル4のMaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

On Trial of Multidisciplinary Optimization to Actualized Level 4 MaaS Platform

小幡快世[1], 鈴木隆介[1], 長谷川浩志[1]
Kaisei OBATA, Ryusuke SUZUKI and Hiroshi HASEGAWA

[1] 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻（〒337-0003 埼玉県さいたま市見沼区深作 307）

Mobility as a Service (MaaS) is a service that aims to provide seamless mobility to users and bring economic, social, transportation, and environmental benefits to cities. In this study, we will optimize tourist routes from pre-determined tourist attractions, and pre-determined departure and arrival points, taking into account customer needs, which include qualitative data, and quantitative data, such as travel distances, and the benefits on the part of the stakeholders. This will enable System of Systems design for level4 MaaS realization.

Key Word: MaaS, level4, Mobility, Optimization, Multidisciplinary optimization

1. 緒 言

近年，Mobility as a Service(MaaS)と呼ばれる公共バスや電車といった公共交通機関を複合的に捉え，検索・予約・購入・決済までを提供する新たなサービスが提供され始めている．これを受けて，観光分野や地方都市などでの様々な実証実験が展開され， MaaSを導入するための課題が顕著化してきた(1)．この実証実験から，「移動＋α」といった移動以外の付加価値を提供し，利用ユーザーの利便性を高める必要があることが分かった．これは，新たな価値創生と掛け合わせなければ，MaaS 単独での持続可能な運営が難しいことを示したものである.また，実際に幹線バスなどの二次交通が運行しているものの，利用者の制限があり，顧客側のニーズに応えきれず，管理・運営側も十分な利益が出ないという状況も多い．そのため，双方の需要を考慮しながら改善する必要がある．

一方，鈴木らの研究では，定性的な顧客ニーズ，移動距離，運賃といった定量的データ，管理・運営側の利益を考慮した観光ルート最適化を行った．この研究によって，観光客だけでなく，運営・管理側を考慮することができ，MaaS の実現に大きく近づいた．

本研究では， 鈴木らの研究の協調的最適化のフレームワークを用いて，提案されたフレームワークの妥当性確認を行い，この結果を報告する．なお，観光ルートを構成する際に必要な観光地,発着地点を，栃木県那須町の那須高原地域から選出する．

2. 協調的最適化のフレームワーク

図1に，利用者側の2つのサブシステム(顧客ニーズと定量的データ)と，管理・運営側の最適化サブシステム，事前決定済観光群,飛び込み発着スポット群，発着スポット群を連成変数として加えた協調的最適化のフレームワークを示す．このフレームワークを用いることで，選ばれた，発着地点，および観光スポットを基に協調的最適化を行いルートと移動手段を決定できる．

2.1 協調的最適化 協調的最適化は問題が大規模，かつ分散環境下に存在する解析領域を対象とした複合領域最適化手法である．初めに，各システムにて，ウエイトを算出する．次に，観光地iの基準ウエイトの初期値A_iを設定し，各サブシステムに送る．各サブシステムにて得られたウエイト$W_{S,i}$，$W_{N,i}$ ，$W_{Q,i}$と基準ウエイトA_iの二乗和誤差が最小となる値を各サブシステムで求め，得られた各サブシステムの最適ウエイトをメインシステムに返す．メインシステムでは，3 つのサブシステムから受け取ったウエイトが制約条件を満たした上で最大化するように最適化する．制約条件は各サブシステムから算出された観光地のウエイトと基準ウエイトの二乗和誤差であり，最適化手法の都合上 0.01 以下として用いる．目的関数が制約条件を満たした場合， 3 つのサブシステムのウエイトの合計が最も高い観光地が次に進む観光地のルートとなる．制約条件を満たさない場合には基準ウエイトA_iを更新し，最適化を続行する．以上の処理を繰り返し行うことで移動ルートと用いる移動手段が決定する．

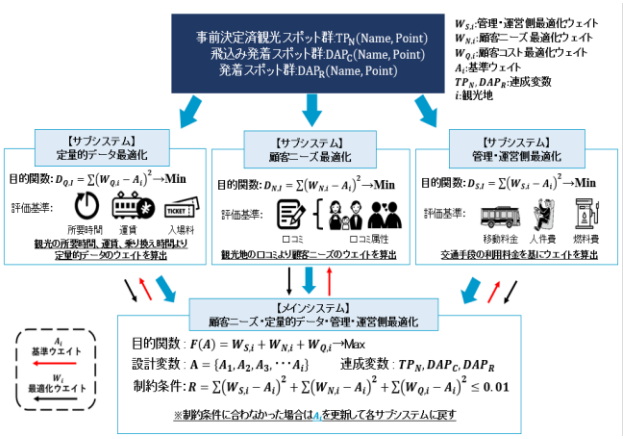


図 1 3 つのサブシステムによる協調的最適化

2.2 発着地点，観光スポットの設定

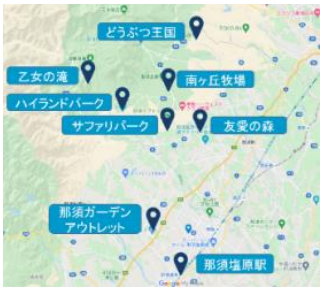


図 2 事前決定済みスポット群

本研究では，まず初めに図 2 に示すスポットのリストから，発着地点及び，任意の数の観光スポットを選択する．選ばれた発着スポットDAP_R，事前決定済観光スポットTP_Nを連成変数として各サブシステム間に受け渡す．

2.3 観光ニーズ把握システム 連成変数値の観光地ごとに口コミを抽出し，投稿者の属性を分類する．

さらに抽出されたロコミを無作為に選択し，テキストマイニングを用いることで観光地ごとの評価点を算出する．評価方法はロコミデータを形態素解析し，解析結果の単語を点数化することで評価点を算出した．なお，今回評価の対象とした単語と点数については鈴木らの研究(2)と感動語分類表を基に設定した．

2.4 定量的データ最適化システム　連成変数値から入場料，移動にかかる運賃，移動時間を用いてウエイトを算出し、AHP による評価点と掛け合わせることで各観光地の評価点を算出する。

2.5 運営・管理側最適化システム　連成変数値の発着地点，観光スポットから，各交通手段を用いた際の移動料金や利益を計算し，式(1)を用いて観光地のウエイトを算出する．

$$W_{S,i} = \frac{F_{si}}{S_F} - \left(\frac{C_{p,si}}{S_{C_p}} \cdot W_{p1} \cdot W_{p2} + \frac{C_{f,si}}{S_{C_F}} \cdot W_{f1} \cdot W_{f2} \right) \qquad (1)$$

ここで，s は交通手段，i は観光地，$W_{S,i}$は各観光地のウエイト，F_{Si}は各交通手段で各観光地まで移動する際の料金，$C_{p,Si}$は観光地まで移動する際に発生する人件費，$C_{f,Si}$は観光地まで移動する際に発生する燃料費，W_{p1}は交通会社が希望する人件費の重み，W_{p2}は交通会社が実際に充てている人件費の重み，W_{f1}は交通会社が希望する燃料費の重み，W_{f2}は交通会社が実際に充てている燃料費の重み，S_Fは各交通手段の料金の総和，S_{Cf}は各交通手段の人件費の総和，S_{Cp}は各交通手段の人件費の総和と設定している．得られたウエイトが一番大きいスポットに移動する．以上の処理を選択された到着地点に到達するまで行う．

3. 妥当性確認

本フレームワークの妥当性を確認するために，発着地点を那須塩原駅，観光地を那須どうぶつ王国，那須ハイランドパークに設定し，最適化を行った結果を以下に示す．これらの結果はそれぞれ図 3 に，管理・運営側を考慮した結果と，定量的データ，顧客ニーズ把握システムより顧客側を考慮した結果を示し，全体システムで最適化された結果を図 4 に示す．管理・運営側最適化システムでは,運営会社の利益を確保するため,一番利用料金が高いタクシーのウエイトF_{Si}が高くなったためタクシーのみが使われる結果となった．また，顧客側観光ルートでは，AHP の結果より,移動料金のウエイトが高かったため,一番移動料金が安くなるよう，無料で乗れる施設バスやレンタサイクルを使用したルートとなったと考えられる．また，図 4 の複合領域最適化の結果は移動時間と移動料金が，その双方を考慮したような，間を取った結果となった．

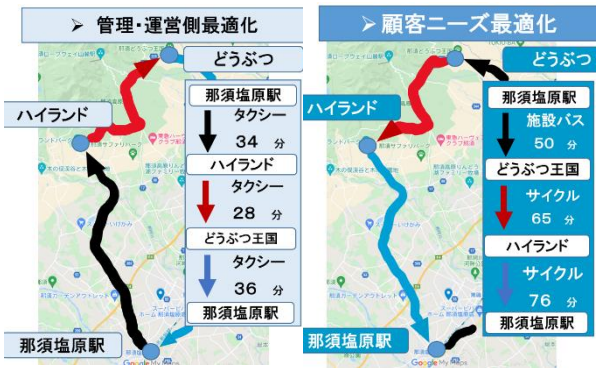


図 3 管理・運営側，顧客側観光ルート

表 1 移動時間と料金

移動時間と移動料金
管理・運営側
98 分 ￥5, 505
顧客側
191 分 ￥3, 840
複合領域最適化
120 分 ￥4, 700

図4 複合領域最適化後のルート

これらの結果が利用者のニーズに応えられているかの妥当性を確認するために，実際の利用者である若者がどの観光ルート，移動手段を使うのか 27 名の 20 代男性にアンケートを行った．以下の図 5 にその結果を示す．レンタサイクルでの長時間の移動は回避したく，タクシーだけの移動では料金が高くなってしまうという理由から，間を取った複合領域最適化のルートを選択した人が 66%であった．

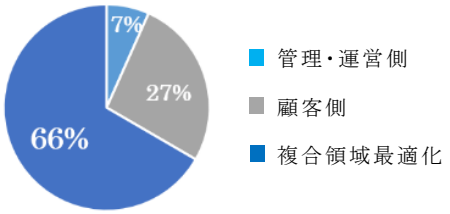


図 5 妥当性確認の結果

また，選択する発着地点・観光地を変えて同様に最適化を行い、妥当性確認を行った．そのケースにおいても，最終的に利用者と管理・運営側の折り合いをつけた複合領域最適化後のルートを選択する人が同様に 6 割程度いた．また，移動手段は問わず，移動料金をできる限り抑えたいという理由で，顧客側の観光ルートを選択した人も同様に 3 割程度いた．

4. 結言

本研究では，鈴木らの研究で考案した，協調的最適化のフレームワークの妥当性確認を行った．複数の観光ルートで，利用者と管理・運営側の折り合いをつけた複合領域最適化後の観光ルートを選択した人が 6 割程度いた．このことから，鈴木らの協調的最適化のフレームワークの妥当性を確認することができた．

参考文献

(1) 経済産業省，新しいモビリティサービスの社会実装に向けた知見集（令和 2 年度版），2021.04
(2) 鈴木隆介，長谷川浩志，MaaS に向けたロコミ情報とステークホルダーを考慮した観光ルートの最適化，計算工学講演会論文集 Vol26, 2021.
(3) 平岡優希，長谷川浩，MaaS を考慮したオンデマンドバスのルート最適化，計算工学講演会論文集 Vol26, 2021.

10:00 AM - 10:15 AM (Thu. Jun 1, 2023 9:00 AM - 10:15 AM Room A)

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman[1]、山田 修也[1]、玉城 龍洋[2]、*北 栄輔[1] （1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校）

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-07] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (7)

座長:藤井 秀樹(東京大学)

Thu. Jun 1, 2023 10:30 AM - 11:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-07-01] 被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

*今井 星太[1]、宮村 倫司[1] （1. 日本大学）

10:30 AM - 10:45 AM

[A-07-02] ミクロ交通流シミュレータへの CAV挙動の実装

*稲葉 陽樹[1]、藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1] （1. 東京大学）

10:45 AM - 11:00 AM

[A-07-03] 高速道路合流部における動的ハイブリッド交通流シミュレーション

今井 陽[1]、*藤井 秀樹[1]、吉村 忍[1] （1. 東京大学）

11:00 AM - 11:15 AM

[A-07-04] 自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

*惣野 源也[1]、長谷川 浩志[1] （1. 芝浦工業大学）

11:15 AM - 11:30 AM

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

今井星太[1)]，宮村倫司[2)]
Shota Imai and Tomoshi Miyamura

1) 日本大学大学院工学研究科 大学院生（〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 , E-mail: cesh22004@g.nihon-u.ac.jp ）
2) 工博 日本大学工学部 准教授（〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 , E-mail: miyamura.tomoshi@nihon-u.ac.jp）

During a disaster, routes to destinations may be blocked due to road damage, making repairs necessary. Emergency activities in a disaster-stricken area involve three phases: saving lives, transporting emergency supplies, and restoring traffic for general vehicles. In this study, a traffic flow simulator was used to simulate traffic flows during each phase, and vehicle arrival times were evaluated. Based on the simulations, deep reinforcement learning was used to determine where road repairs are necessary for each phase, and a repair plan was designed accordingly.

Key Words : *Traffic Flow Simulation, Deep Reinforcement Learning, Disaster Recovery*

1.　はじめに

地震などの被災地で道路が破損した際には，被災地へ出入りするルートを確保することが困難になるため，修復が必要となる．災害時の被災地での応急活動には 3 つのフェーズがあり，人命救助，緊急物資輸送，一般車両通行の順に進められる[1]．各フェーズにおいて，破損した道路をどのような順番で修復するのかについての計画を立案する必要がある．

交通流には様々な要因が複合的に関連している．交通現象そのものが異なる属性や目的をもつ多数の車両の相互作用の結果である．この問題に対して吉村ら[2]，藤井ら[3]はマルチエージェントシミュレーションによるアプローチを提案した．　また，藤井らは知的マルチエージェント交通流シミュレータ ADVENTURE_Mates[4]を開発している．

強化学習とは教師あり学習，教師なし学習と並ぶ機械学習の分類の一つである．強化学習では，タスクを実行する上で，単体の行動結果ではなくタスク全体の行動結果を評価することにより，一連の意思決定を学習する．深層強化学習は強化学習の一種であり，強化学習の行動結果の評価にニューラルネットワークを適用した学習手法である[5]．近年，深層強化学習を用いた行動計画作成の研究が行われている[6]．荻野は強化学習を粒子の充填問題に応用した[7]．また，小寺等は強化学習をトラス構造物の施工経路生成に応用した[8]．

本研究では藤井らが開発した交通流シミュレータを用いて災害時の交通流をシミュレートし，車両の到達時間を評価する．それに基づいた深層強化学習により破損した道路の修復の順番を決めることで，修復計画の作成を行う．

2.　被災地の応急活動フェーズ

災害時の被災地での応急活動には 3 つのフェーズがある．フェーズは図 1 のように遷移していく．災害後 72 時間後程度までは，人命救助フェーズと呼ばれる．傷病者が多数発生し，早期の救出救助活動が開始され，救助された多数の傷病者を医療機関に搬送される．また，ライフラインや交通機関が途絶し，被災地外からの支援の受入れが少ない状態である．72 時間~1 週間後程度までは緊急物資輸送フェーズと呼ばれる．このフェーズでは，ライフライン等が復旧し始め，人的・物的支援の受入体制が確立されている状態である．これ以降は一般車両通行フェーズと呼ばれ，地域医療やライフライン機能，交通機関等が徐々に復旧している状態である．

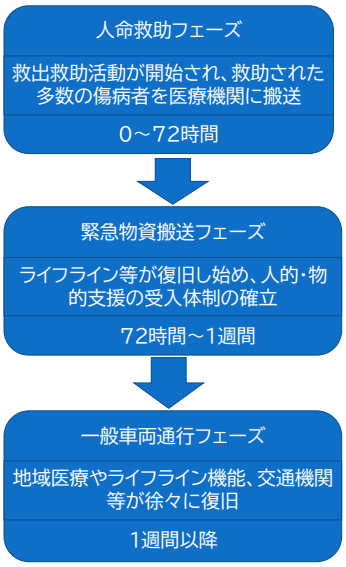


図-1 応急活動フェーズ

3. 交通流シミュレータ

(1) ADVENTURE_MATES

ADVENTURE_MatesはADVENTUREプロジェクト[9]において開発されたモジュールのひとつであり，知的マルチエージェントモデルに基づく交通流シミュレータである．知的エージェントとしてモデル化された車両は道路環境中で他の車両エージェントと相互作用しながら自律的に意思決定(経路探索，加速度決定)をする．複雑な交通現象は知的エージェント同士の相互作用の結果として創発するよう設計されている．

(2) 設定可能な情報

シミュレーションを行う際，信号や交通量を設定する必要がある．ADVENTURE_Mates では，信号ごとに信号パターンを決定できる．また，各ネットワークの端点が流入流出点となっているため，そこからの車両発生台数を設定することで交通量を制御できる．

(3) osm2mates

OSM とは，OpenstreetMap[10] の略称である．OpenStreetMapとは，自由に利用でき，なおかつ編集機能のある世界地図を作る共同作業プロジェクトである．osm2matesはADVENTURE_Matesを実行するための地図データ（mapPosition.txt，network.txt）をOpenStreetMapから自動的に作成するプログラムである．

4. 強化学習

強化学習は行動心理学者であるスキナーが動物の行動を説明する基本原理として唱えた強化に由来する考え方である[11]．代表的な例であるスキナー箱を用いて，基本的な考え方を説明する．図-2 のネズミは最初，無造作な行動をする．しかし，ある時偶然電源スイッチを押し，レバーを押したことで餌（報酬）を得ることができる．このような動作を繰り返すうちにネズミはスイッチの状態によって，餌（報酬）を得るために適切なレバーやスイッチを押すこと（行動）を覚える．強化学習はこれを確率的動的計画法の枠組みで定式化したものである．

強化学習では環境という行動と行動による状態の変化が定義されており，ある状態への到達に対し報酬が与えられる空間がある．この環境が開始されてから終了されるまでを 1 エピソードといい，この 1 エピソードの中で得られる報酬を最大化することが強化学習の目的である．

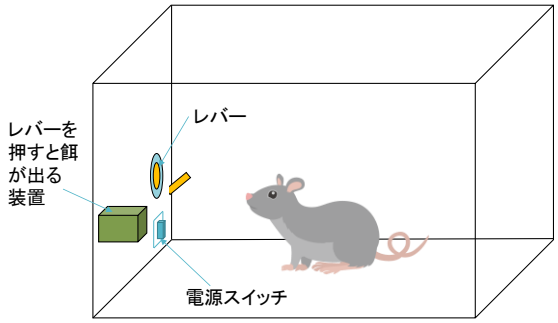


図-2 スキナー箱

(1) Q 学習

状態による行動価値（価値関数）を Q 値と呼ぶ．Q 値は Q テーブルと呼ばれる表に記録をし，行動をするたびに該当する Q 値を更新する．状態s_t，行動a，報酬r，学習率α，割引率γとしたとき，Q テーブルの更新にはベルマン方程式に基づく式(1)を用いる．

$$Q_{(s_t,a)} = (1-\alpha)Q_{(s_t,a)} + \alpha(r + \gamma Q_{(s_{t+1},a')}) \qquad (1)$$

(2) 深層強化学習（Deep Q Network（DQN））

Deep Q Network（DQN）とは，Q 学習の Q 値を Q テーブルではなく，ニューラルネットワークで計算する学習方法である．ニューラルネットワークとは，人間の脳を模した数理モデルである．ニューラルネットワークは入力層と一つ以上の中間層，出力層を含む，複数のノード層で構成されている．各ノードは別のノードに接続し，重みと閾値を持つ．深層強化学習では，ニューラルネットワークの入力を状態とし，出力を各行動の Q 値とする．Q 学習におけるベルマン方程式を教師データとするとき，損失関数を二乗誤差により定める．これを最急降下法を基にしたアルゴリズムにより最小化することで Q 値を算出する関数として使えるニューラルネットワークを生成する．

5. 深層強化学習による道路修復計画の作成

(1) 深層強化学習による災害時道路修復計画の作成手法の概要

修復途中の道路の評価はADVENTURE_Mates を用いて行う．いくつかの地点で発生させた車両が目的地に到達するのにかかる時間を基に報酬に計算する．一方，道路の修復費用を負の報酬として評価する．これらの報酬の和が大きくなるように，図-3 のような深層強化学習によって道路の修復の順番を決定することで道路修復計画を作成する．

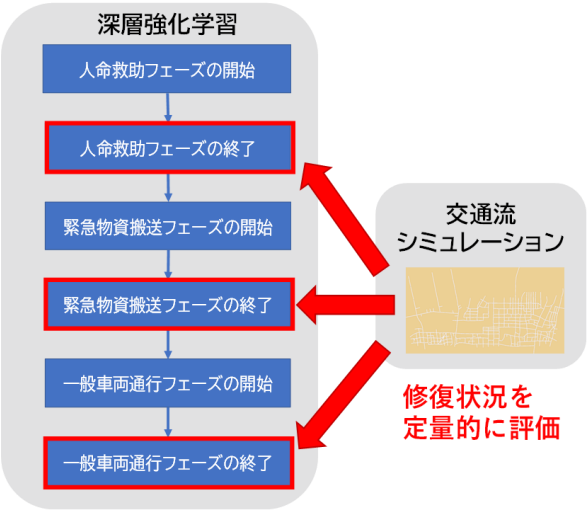
シミュレーション上ではフェーズの表現を車両の種類と流入点の数によって表現する．車両は目的地が病院の緊急車両と目的地がランダムな一般車両の 2 つを用意する．人命救助フェーズでは，傷病者を搬送する緊急車両の交通流を再現する．緊急物資搬送フェーズでは，ボランティアや物資の受け入れを再現する．一般車両通行フェーズでは，平常な交通流を再現する．フェーズが進むにつれ，流入点の数とそれぞれの流入点から発生する車両の数を増やす．また，それぞれのフェーズで修復できる道路の数に上限を設ける．

破損した道の数をn個としたときn個の各道路の状態は未修復と修復の 2 個であるため，全ての修復パターンの状態は2^n個となる．また，フェーズの状態は 3 個である．1 エピソード内での行動の上限をmとしたとき，修復を

行った回数の状態はm個となる．そのため，状態の総数は$2^n \times 3 \times m$となる．状態は$s_1 \sim s_{2^n \times 3 \times m}$となる．行動はそれぞれの道の修復をするという行動と現在のフェーズの道の修復を終了するという行動とし，$a_1 \sim a_{n+1}$とした．1 エピソードは 3 フェーズ目の道路の修復を終了したときか，行動の数がmを超えたときに終了するようにした．

報酬は以下のように与えた．修復を行ったときに工事費を表す報酬を与えた．修復したときに現在のフェーズ中に修復できる道路の上限を超過していたら一定の負の報酬を与えた．フェーズを終了するという行動をとったときは車両全体に対して，（修復後の経済的損失−初期状態の経済的損失）の報酬を与える．経済的損失Lはフェーズの日数d，総走行時間t，人口p，平均時給w，1 時間当たりのガソリン代cにより式(2)で求める．

$$L = dtp(-w - c) \tag{2}$$



図−3 深層強化学習でのシミュレーション結果の利用

(2) DQN 用ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワークでは入力層のノード数を$n+2$個，中間層のノード数を 128 個で層は 3 層，出力層のノード数を$n+1$個とする．中間層の活性化関数には ReLU を使用する．Optimizer には adam を使用する．ニューラルネットワークへの入力は，n番目の入力ノードまでは対応する道路が修復されていれば 1，修復されてなければ 0 を入力する．また，$n+1$ 番目の入力ノードには現在のフェーズが何フェーズ目かを入力し，$n+2$ 番目の入力ノードには現在のフェーズで道路を修復した回数を入力する．

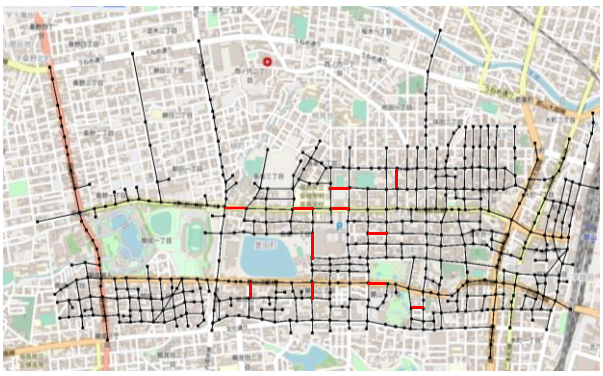
(3) 実装

本研究では，Python と Tensorflow を用いて実装を行う．深層強化学習での行動選択や報酬の計算，強化学習部分については Tensorflow の強化学習用ライブラリ TF-Agents を用いて実装する．Q 学習を行う深層学習部分については Tensorflow により実装を行う．交通流シミュレーションの入力データとなるマップの修復状況の変化に応じた書き換えや，交通流シミュレーションの実行といった深層強化学習以外の部分も Python により実装する．

6. 郡山駅周辺の道路修復計画作成への応用

(1) 問題設定と入力データの作成

郡山駅周辺が被災したと仮定し，その道路修復計画を提案手法により作成する．交通流シミュレーションの入力データとなるマップは，osm2mates により OpenStreetMap を基に作成した．郡山駅周辺から開成山公園周辺までを対象としている．ここでは，図-4 のように 11 本の道路が破損したと仮定して，それらの道路を削除した初期状態のマップを作成した．図-4 の中の赤の線が引かれている道が破損している道である．本研究ではすべての車線は片側 1 車線であると仮定している．また，信号に隣接している交差点の数ごとに，デフォルトの信号パターンを設定した．報酬の計算には郡山市のデータを基に作成した表-1 の値を使用する．修復箇所数の上限は人命救助フェーズでは 2，緊急物資搬送フェーズでは 4，一般車両通行フェーズでは 10 とし，1 エピソード内での行動の上限mを 50 とする．また，人命救助フェーズでは図-5，緊急物資搬送フェーズでは図-6，一般車両通行フェーズでは図-7 のマップを使用する．車両の流入点を大きな青の点とし，救急車の目的地である病院は大きな緑の点で表している．



図−4 郡山駅前のマップ

表−1 報酬の計算に使用した値

項目	数値
道路の修復費用	60 万円
範囲内の人口	3 万人
平均時給	2440 円
1 時間当たりのガソリン代	495 円
人命救助フェーズの日数	3 日
緊急物資搬送フェーズの日数	4 日
一般車両通行フェーズの日数	20 日

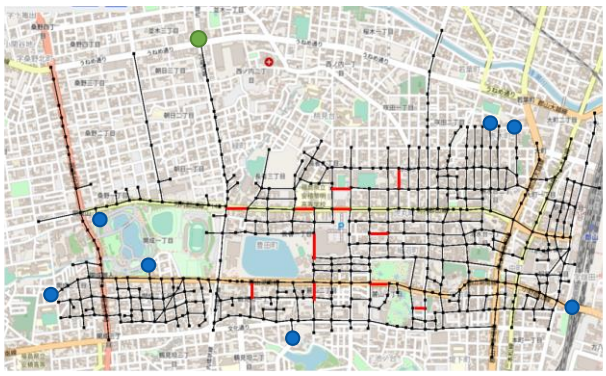


図-5 人命救助フェーズのマップ

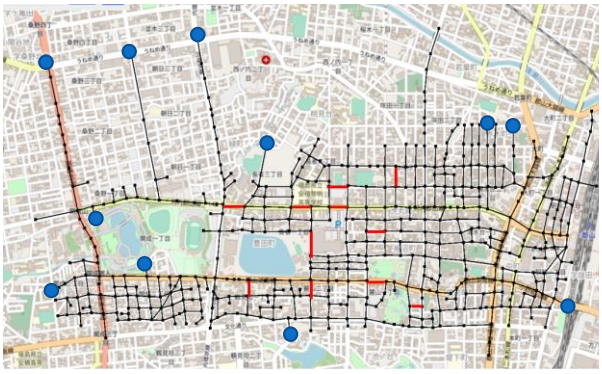


図-6 緊急物資搬送フェーズのマップ

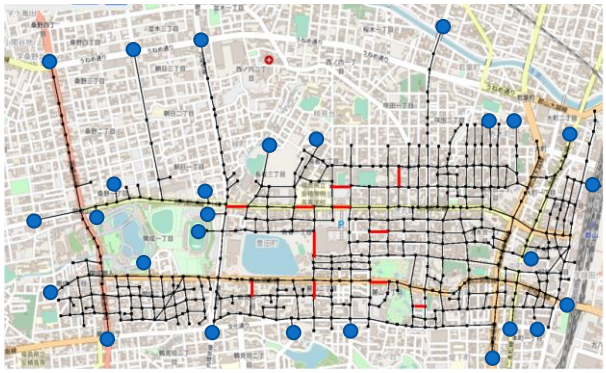


図-7 一般車両通行フェーズのマップ

(2) 深層強化学習による道路修復計画作成の結果

ここでは，予め修復過程の道路の全パターンのマップによるシミュレーションをシミュレーション内時間で1200s 分行って結果データを保存し，学習においてはそのデータを用いる．シミュレーションは 3 フェーズごとに 2^{11} パターンあるため，全 6144 パターンとなる．シミュレーションの実行時間は人命救助フェーズでは約 35s，緊急物資搬送フェーズでは約 40s，一般車両通行フェーズでは，170[s]となった．エピソード数 2000，エポック数 50 で実行をしたところ，計算時間は 5508.9s，2000 エピソード目の報酬が 122.65，使用されたシミュレーションは 2093 パターンとなった．各エピソードの報酬は，図-8 のようになった．人命救助フェーズのシミュレーションが 514 パターン，緊急物資搬送フェーズのシミュレーションが 861 パターン，一般車両通行フェーズのシミュレーションが 718 パターン行われた．また，人命救助フェーズの修復箇所を図-9，緊急物資搬送フェーズの修復箇所を図-10，一般車両通行フェーズの修復箇所を図-11 に示す．修復箇所を青い線，破損箇所が赤い線で表す．

学習により作成した修復計画では，修復されない道路があった．この原因は本研究で使用したマップには迂回路が多く存在するためだと考えられる．また，シミュレーションは，シミュレーション内時間で 1200s を 1 回のみしか行っていないため，目的地がランダムな車両の走行時間を十分に評価できていないと考える．

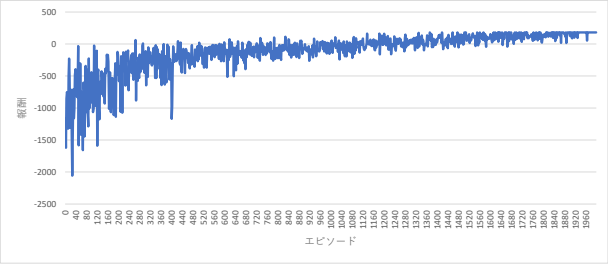


図-8 1 エピソード毎の報酬

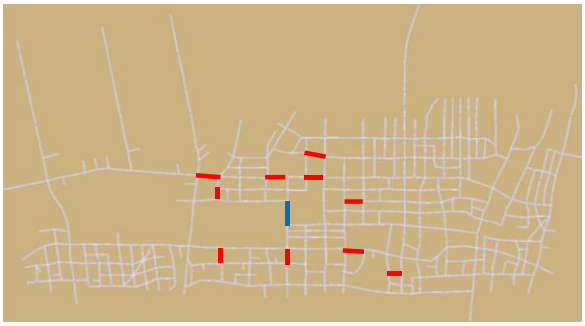


図-9 人命救助フェーズの修復箇所

図-10 緊急物資搬送通行フェーズのマップ

図-11 一般車両通行フェーズのマップ

7. おわりに

本研究では車両の到達時間の評価に基づいたDQNとQ学習により破損した道路のフェーズごとの修復箇所を決めることで修復計画の作成をした．報酬が高くなり易い道路は早いフェーズで修復されることが確認できた．修復計画の作成時間の大半をシミュレーションの計算が占めているため，その高速化が必要である．

また，フェーズごとの交通量や車両のパラメータに実際に計測したデータを使う必要があると考える．

謝辞: 本論文の作成にあたり，ご協力ご助言頂いた学部生には感謝いたします．

参考文献

[1] 国土交通省: 災害時の通行可能な道路の確保と情報の取扱．

[2] 吉村忍，西川紘史，守安智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータMATESの開発，シミュレーション.23(3), 2004, pp.58-67.

[3] 藤井 秀樹，仲間 豊，吉村 忍: 知的マルチエージェント交通流シミュレータMATESの開発 第二報：歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較，シミュレーション，vol. 25, no. 4, pp. 274-280, 2006.

[4]https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/download/Mates.html

[5] 牧野浩二，西崎博光: TensorFlowによる深層強化学習入門 —OpenAI Gym+PyBullet によるシミュレーション—，2021年，オーム社.

[6] 松原崇充: 強化学習による行動学習—未知問題を閉じる道具—，日本ロボット学会誌Vol.36，2018.

[7] 荻野正雄: 深層強化学習を用いた粒子ランダム稠密充填の検討，計算工学講演会論文集，Vol.26（online），2021.

[8] 小寺 正也，大崎 純，林 和希: 強化学習とグラフ埋め込みによるトラスの安定な施工経路生成，日本建築学会大会[東海]，2021年09月09日.

[9] https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/

[10] https://openstreetmap.jp/

[11] 吉本 潤一郎，銅谷 賢治，石井 信: 強化学習の基礎理論と応用，計測と制御，第44巻，第5号　2005年5月号.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年5月)　計算工学会

ミクロ交通流シミュレータへのCAV挙動の実装

Implementing CAV Behavior on the Micro-Traffic Simulator

稲葉陽樹[1)]，藤井秀樹[2)]，吉村忍[3)]
Haruki Inaba, Hideki Fujii and Shinobu Yoshimura

1) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: hinaba@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
3) 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Autonomous Vehicles (AV) and connectivity technologies have been on the rise these days. On April 1st, 2023, LEVEL4 AV has been legalized to drive on public road in Japan. AV has a lot of features to contribute to social problems such as social welfare for vulnerable road users, lack of labor force, and alleviation of traffic jams etc. In this study, the mixed-Autonomy condition: an environment that both AV and Human-Driven Vehicles run around the network, is in focus. To evaluate the influence of CAV on the traffic network, altruism in the route choice process is implemented on the microscopic traffic simulator.

Key Words : *Connected-Autonomous Vehicle, Micro-Traffic Simulator, Mixed-Autonomy*

1.　はじめに

日本では2023年4月1日に改正道路交通法が施行され，自動運転レベル4の公道走行が解禁された．近年は自動車業界の100年に一度の大変革期と言われ，CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electronic) の4つの要素が注目を浴びている．本論文ではコネクテッド技術を活用する自動運転車両 (Connected Autonomous Vehicle, CAV)を対象とする．

自動運転車の普及により期待される効果には，自家用車に代わる交通弱者の移動手段になるという社会福祉の側面，路面状況を踏まえた運転や運転行動の標準化といった制御・安全の側面，人件費削減・人手不足解消といった経済的側面・交通容量増加による渋滞削減などの交通インフラの効率化の4つが考えられる．このうち交通インフラの効率化に関しては，車間距離を極めて小さくして一つの隊列として振る舞うプラトゥーン走行の実現によって交差点容量が増加し，都市部の交通量を倍増させられるとする先行研究[1]があり，この他にも自動運転車の優れた特性によって交通のパフォーマンスが向上するとする研究は数多く存在する．

一方で，Wu et al. [2] や Di et al. [3] は自動運転車の普及率が低く人が運転する手動運転車が混在している環境Mixed-Autonomy [2] についても研究しており，Ye et al. [4] では，セルオートマトンの一種であるTSM (Two-state Safe-speed Model) に対しACC (Adaptive Cruise Control) による車間距離の短縮効果と狭域通信 (Detected Short-Range Communication, DSRC) による認知可能距離の拡大のメカニズムを反映させ，CAVの普及率が30%を超えるとネットワークのパフォーマンスが普及率向上にほぼ比例して向上することが示された（図1）．

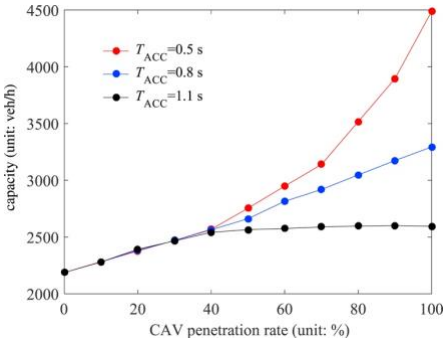


図-1 CAV 普及率と交通容量の関係[4]

以上はミクロな観点での効果の整理であるが，経路選択行動というマクロな観点においてもCAVは交通ネットワークの効率向上に貢献する可能性があることがわかっている．例えば，自動運転車に乗る人の時間価値が低いという特徴を考慮したときにUser Equilibrium と System Optimum の関係性がどう変化するかについてまとめた先行研究[5]や，マクロな経路選択結果を運転手間のナッシュ均衡として考えてCAVに利他性を持たせて手動運転車よりもコストの大きい経路に分配することで安定しロバストで社会的コストも小さい状態を実現することができるとする研究[6]もある．

本研究では，高速道路等の簡単な環境で行われていたCAV挙動の交通ネットワークへの影響評価を，市街地を含む複雑かつ現実的な環境にまで拡張し，次世代交通の可能性について示すことを目的とする．そのための最初の一歩として本論文では，CAVにより実現されると考えられる利他性を表現する経路選択行動の実装に取り組んだ．

2.　ミクロ交通流シミュレーションの概要

(1)　ADVENTURE Mates

本研究ではミクロ交通流シミュレータとして

ADVENTURE_Mates[7][8] を使用する．ADVENTURE_Mates はマルチエージェントシステムとして交通流を模擬するもので，各車両エージェントが自律的に認知・判断・行動を行い，創発現象を表現することができる．実際に，現実の大規模かつ複雑な交通流の分析や再現に利用された例もあり，信頼性の高いシミュレータである．

(2) CAVの利他性の表現

Bıyık et al. [6] ではCAVの利他性を表現するパラメータκを定義している．これは利用可能な最短経路でかかる所要時間のκ倍の遅延まで許容するという特性を表している．またこの研究ではゲーム理論のナッシュ均衡の考え方を用いて実現しうる均衡状態を整理しており，自由流時の所要時間の異なる複数の経路が存在するような出発地と目的地の組み合わせに対し，CAVをどの経路に割り当てればロバスト性の向上・社会的コストの低減につながるかについて考察している（図2）．

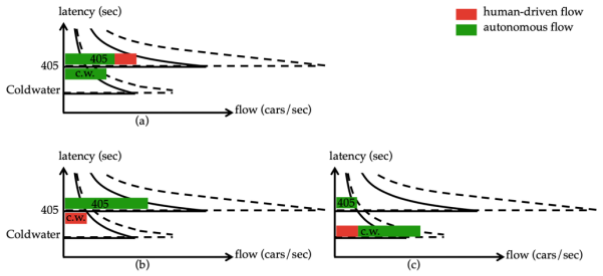


Fig. 5: (a) and (b) represent two selfish equilibria with the same social cost. The equilibrium with all autonomous flow on the 405 freeway (b) is more robust to additional unforeseen flow demand. Solid (resp. dashed) lines characterize the road with only human drivers (resp. autonomous vehicles). The 405 has maximum flow that benefits more from autonomy than the canyons – by routing all autonomous traffic onto the 405, a social planner can make the routing more robust to unforeseen demand. If some autonomous users are altruistic, a social planner can send them on the 405 while Coldwater is uncongested (c), leading to a lower overall travel time.

図-2 交通量と遅延の関係と CAV の分配について[6]

本研究では利他性を表すパラメータとしてκを採用しつつ，遅延以外のコストに拡張し，複数の起終点 (origin-destination, OD) が存在する環境においても機能する手法を検討する．

(3) K-shortest path problem

ADVENTURE_Matesでは選好プロファイルに応じて最も好ましい最短経路を採用する．しかし今回は利他性の表現のため，許容できる範囲内の迂回路を選択するために最短経路以外の経路候補を取得する必要がある．つまり，ある文脈でK番目に短いパスを見つける K-shortest path problem を解くアルゴリズムを実装する必要がある．このアルゴリズムとしてYenのアルゴリズム[9] を採用した．これは探索済みのリンクを適切に削除しつつ経路探索を繰り返すもので，計算量は $O(KN^3)$ 程度である．

3. 利他的経路選択の実装と検証

(1) シミュレーション環境

迂回路を選択する行動が実装できているかどうかを検証するため，図3の通りに一車線の直線とコの字型の迂回

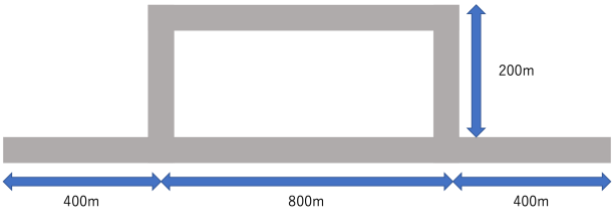


図-3 シミュレーション環境の模式図

路からなる簡単なネットワーク環境を設定した．交通需要のほとんどは左端から右端へと向かうものとした。

(2) 検証

各車両エージェントに異なるκ値を与えてシミュレーションを実施した．CAVエージェントは二番目の経路まで探索し十分大きなκ値を設定した時には渋滞がなくても迂回路を選択することを確認し，正しく機能していることがわかった．一方でCAVエージェントがいない場合，十分に車両密度が高くならない限り最短経路である直進以外を選ぶエージェントは存在しなかった

4. おわりに

CAVと手動運転車両の混合環境において，CAVが社会全体の効率・パフォーマンスを向上させるためにどのようなマクロ挙動を実現できるかについて考察するために利他的な経路選択行動を実装することができた．

今後の課題としては，複雑なネットワークや複数のODが存在する環境でのシミュレーションの実施，複数存在する迂回路のうちどれを選ぶようにするべきかという分配問題などが考えられる．エージェントごとの判断に依拠する分散型が良いか，ある一定の規模のネットワークごとに中央集権的に需要を分配する方が良いかについても検討をしていきたい．

参考文献

[1] Lioris J. *et al.*:: Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads, *Transportation Research Part C*, Vol. 77, pp. 292-305, 2017.

[2] Wu C. *et al.*: Emergent behaviors in mixed-autonomy traffic; *Conference on Robot Learning*, pp. 398-407, 2017.

[3] Di X. *et al.*: A survey on autonomous vehicle control in the era of mixed-autonomy: from physics-based to AI-guided driving policy learning; *Transportation Research Part C*, Vol. 125, p. 103008, 2021.

[4] Ye *et al.*: Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow; *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 490, pp. 269-277, 2018.

[5] Wu W. *et al*: Modelling the traffic in a mixed network with

autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets, *Transportation Research Part E*. Vol. 134, p. 101855, 2020.

[6] Bıyık, E. et al.: Altruistic Autonomy: Beating Congestion on Shared Roads. *Algorithmic Foundations of Robotics XIII*, pp. 887-904, 2018.

[7] Yoshimura S.: MATES : Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator - Theory, Implementation and Practical Application, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–26, 2006.

[8] Fujii H., *et al*.: Agent-based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams, *Transportation Research Part C*, Vol. 85, pp. 234-248, 2017.

[9] Yen, J.-Y.: Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science* Vol. 17, No. 11, pp. 712-716, 1971.

計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

高速道路合流部における 動的ハイブリッド交通流シミュレーション

Dynamic Hybrid Traffic Simulation at Highway Merging Section

今井陽 [1] 藤井秀樹 [2] 吉村忍 [3]
Yo IMAI, Hideki FUJII and Shinobu YOSHIMURA

[1] 修 (工) 東京大学大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: y_imai@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
[2] 博 (環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (同上, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
[3] 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (同上, E-mail: yoshi@sys.t.u-toyo.ac.jp)

Traffic simulations are useful tools for quantitatively assessing various traffic measures, including planning expressway maintenance. The authors previously proposed a dynamic hybrid traffic simulation model to achieve local high-resolution and calculation speed. This study extends this model to be applicable to expressway merging sections. Algorithms to reproduce the car merging behavior have been newly implemented to both the macroscopic and microscopic models composing the hybrid model. The result of the simulation targeting an actual merging section showed that the model could accurately reproduce the observed traffic jams' length, start time, and end time.

Key Words : *Traffic Simulation, Multi-agent Model, Cell Transmission Model, Hybrid Model*

1. 序論

日本を含む先進国では高速道路の老朽化が進んでおり，メンテナンスが欠かせない．渋滞を発生させないような工事計画が必要であり，このような交通施策の事前評価手法として交通流シミュレーションが用いられる．

交通流シミュレーションで使用されるモデルは，車両表現の粒度によって微視的（ミクロスコピック）モデル，巨視的（マクロスコピック）モデルの 2 種に大別される．以下，それぞれをミクロモデル，マクロモデルと呼ぶ．ミクロモデルは個々の車両挙動を扱い，これに起因する複雑な交通現象の再現に向くが計算コストが高い．一方でマクロモデルは交通流を流体近似するモデルであり，計算コストが低いため大規模ネットワークのシミュレーションに向くが車両間相互作用から創発される交通現象を再現できない．

そこで，ミクロモデルとマクロモデルを統合したハイブリッドモデルにより両モデルの欠点を補う手法が提案されている．なかでも，高橋ら [1] は渋滞の発生や解消の状況に応じ，シミュレーション中に動的にマクロモデルとミクロモデルの適用領域を決定する動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを提案した．高負荷のミクロモデルを必要最小限の領域に適用することで，着目領域の解像度を高く保ちつつ全体の計算コストを抑制できることを確認した．

本研究では高速道路の分合流部，とく合流部にも高橋らのモデルを適用できるよう拡張することで，インターチェンジやパーキングエリアで発生する渋滞を評価できるようにすることを目的とした．また，実際に高速道路の合流部で発生した渋滞をシミュレーションで再現し，観測値と比較することで提案モデルの検証や性能評価を行った．

2. 研究手法

(1) マクロモデルの合流部への拡張

a) Cell Trasmission Model

本研究でマクロモデルとして採用する Cell Transmission Model (CTM) [2] はシミュレーション対象の道路をセルに分割し，タイムステップごとに隣のセルへの流量を決定する．時刻 t においてセル i へ流入する交通量 $y_i(t)$ は，その上流のセル $i-1$ から送り出せる流量 $S_{i-1}(t)$，および，セル i が受け取れる流量 $R_i(t)$ をもとに以下の式で決定される．

$$y_i(t) = \min\{S_{i-1}(t), R_i(t)\} \tag{1}$$

ここで，$S_{i-1}(t)$ および $R_i(t)$ はそれぞれ，

$$S_{i-1}(t) = \min\{uk_{i-1}(t), Q_{i-1}(t)\} \tag{2}$$

$$R_i(t) = \min\{w(K_i(t) - k_i(t)), Q_{i-1}(t)\} \tag{3}$$

で求められる．$k_i(t)$ はセル i の密度，$K_i(t)$ は渋滞時の最大密度，Q_i は交通容量，u は forward wave 速度，w は backward wave 速度である．

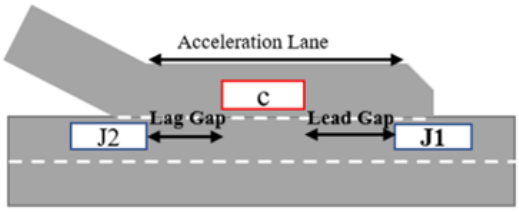
b) 合流モデル

合流部においては，合流前の 2 つのセルから送り出せる流量を S_1，S_2，合流後のセルへ流入する交通量を y_1，y_2 として，次のルールを適用する．

$\mathbf{S_1 + S_2 < R}$（空いているとき）

道路が空いている場合は本線を走行する車両と加速車線を走行する車両との干渉は顕著でなく，合流前のそれぞれのセルから流出可能な車両がそのまま合流後のセルに流入するため，以下の式が成り立つ．

$$y_1 = S_1, \quad y_2 = S_2 \tag{4}$$



図–1 合流車・先行車・後続車

$\mathbf{S_1 + S_2 > R}$（渋滞しているとき）

S_1 および S_2 がともに十分大きいとき，優先度を表す定数 p_1，p_2（$p_1 + p_2 = 1$）を用い，次の式で流入量を求める．p_1，p_2 は合流比とも呼ばれ，道路形状などによって決定される．

$$y_1 = p_1 R, \quad y_2 = p_2 R \tag{5}$$

一方，$S_1 < p_1 R$ または $S_2 < p_2 R$ が成立するとき，式 (5) のままでは $y_1 + y_2 < R$ となってしまう．この場合には，以下のように流入量を決定する．

$$\begin{cases} y_1 = S_1 \\ y_2 = R - S_1 \end{cases} \quad \text{あるいは} \quad \begin{cases} y_1 = R - S_2 \\ y_2 = S_2 \end{cases} \tag{6}$$

(2) ミクロモデルの合流部への拡張

a) Intelligent Driver Model

ミクロモデルにおいては，追従モデルとして Intelligent Driver Model (IDM) [3] を採用する．以下の式を用い，自車と先行車との距離や速度差に応じて加速度を決定する．

$$\frac{\mathrm{d}v_n}{\mathrm{d}t} = a\left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0}\right)^{\delta} - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n}\right)^2\right] \tag{7}$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}} \tag{8}$$

ここで，v_n は車両 n の速度，v_0 は希望速度，a は最大加速度，b は快適減速度，s_n は先行車との車間距離，s^* は車両速度 v_n および先行車と速度差 Δv_n に応じた最適車間距離，s_0 は停車時の最小車間距離，T は安全車頭時間である．

b) 合流モデル

合流モデルは Al-Obaedi&Yousif の合流モデル [4] を改変して用いた．この合流モデルでは，次に示す gap acceptance モデルによる先行車とのギャップ (lead gap) および後続車とのギャップ (lag gap) の判断と，合流開始の判断および加減速を各タイムステップで実行する．

gap acceptance モデル

gap acceptance モデルでは先行車，後続車とのギャップ G_{J1} および G_{J2} を求め，これらが次の式で表される最小値 $\bar{G}_{\mathrm{J1}}$，$\bar{G}_{\mathrm{J2}}$ を上回っているかどうかを判断する．C，J1，J2 はそれぞれ図 1 における合流車，本線の先行車，後続車に対応する．

$$\bar{G}_{\mathrm{J1}} = \alpha\tau v_{\mathrm{C}} + \max\left[0, \left(\frac{v_{\mathrm{C}}^2}{2b'_{\mathrm{C}}} - \frac{v_{\mathrm{J1}}^2}{2b'_{\mathrm{J1}}}\right)\right] \tag{9}$$

$$\bar{G}_{\mathrm{J2}} = \alpha\tau v_{\mathrm{J2}} + \max\left[0, \left(\frac{v_{\mathrm{J2}}^2}{2b'_{\mathrm{J2}}} - \frac{v_{\mathrm{C}}^2}{2b'_{\mathrm{C}}}\right)\right] \tag{10}$$

ここで，τ はドライバの反応時間，b'_n は車両 n の最大減速度である．α は合流の積極性あるいは緊急性を表す係数であり，値が小さいほど積極的に合流しようとする．

合流開始の判断と加減速

ギャップの大きさに応じ，以下の 4 パターンの行動を選択する．

- G_{J1} および G_{J2} を両方とも許容できる場合は，その場で合流する．
- G_{J2} のみ許容できない場合は，J2 から離れるために加速する．さらに J2 に協調行動を取ってもらう．
- G_{J1} のみ許容できない場合は，そのままでは合流できないので減速する．
- G_{J1} および G_{J2} を両方とも許容できない場合は，合流車はどうにもできないので J2 に協調行動を取ってもらう．

単純化のため，本ルールにおける加速度は $1.4\mathrm{m/s^2}$，減速度は $-3\mathrm{m/s^2}$ で固定した．協調行動を行う本線車両は，その場で追い越し車線への車線変更を試みる．十分なスペースがなく，車線変更ができなければ減速する．

ジッパー合流

Al-Obaedi&Yousif の合流モデルに加え，加速レーンにおいて加速できず時速 40 km/h 以下となった車両はジッパー合流を行うよう下記のルールを定めた．

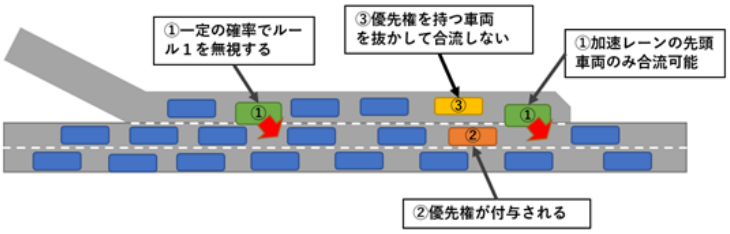
1. 加速レーンの先頭車両しか合流できない．ただし，一定の確率 P_{z} でこのルールを無視した合流を行う．
2. 合流しようとする車両は本線の後続車に対し，自車の次に進行できる “優先権” を付与する．
3. 本線後続車にすでに優先権が付与されていた場合，合流を行わない．

ジッパー合流の概要を図 2 に示す．第 2，第 3 のルールによって合流車と本線車両が交互に進むようになる．第 1 のルールにより基本的には車両は加速レーンの先頭で合流を行うが，先頭まで待てずに途中で合流する車両も確率的に発生する．実データをもとにした予備実験により $P_{\mathrm{z}} = 0.05$ と定めた．合流部の可視化の様子を図 3 に示す．

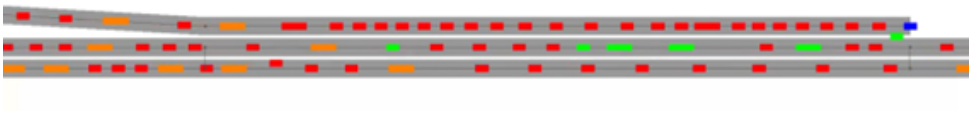
(3) モデル切り替えの基準の合流部への拡張

高橋らのモデル [1] では 1 本の道路を連続したセルで表現し，セルの密度情報およびその変動係数をもとに各セルに適用するモデルを決定した．合流部では 2 本の道路が関わるため，密度の扱い方を工夫する必要がある．本研究では本線側のセルの密度を考慮する際に，合流車線に相当するセルの密度と足し合わせて扱うものとした．

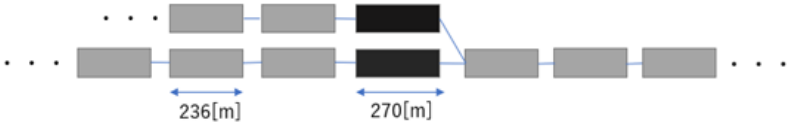
また，加速レーンと本線の一方がマクロモデル，もう一方がミクロモデルという状況であると，ミクロモデル側の車両が合流に伴う速度調整を実行できず，それに起因する渋滞の形成や延伸を再現できない．そのため，加速レーンのセルと本線のセルは同じモデルを適用するルールを定めた．どちらか一方にミクロモデルが適用されたら，他方にもミクロモデルが適用される．



図–2 ジッパー合流の概要



図–3 合流部の可視化



図–4 道路ネットワークのセルによる表現

3. 高速道路合流部を想定したシミュレーション

(1) シミュレーション条件

提案モデルを用いて実在する高速道路の合流部を含む区間のシミュレーションを実施した．全長は約 26 km であり，本線は 3 車線、合流車線は 2 車線である．合流車線では加速レーンより上流に約 1 km の道路を設置した．図 4 は対象区間をセルで表現したものであり，マクロモデルでシミュレーションする際に使用する．セルの長さは $u\Delta t_{\mathrm{macro}} \approx 236.1$ m に設定する．ただし，自由流速度 u を 85 km/h，マクロモデルのタイムステップ幅 $\Delta t_{\mathrm{macro}}$ を 10 s とする．例外として合流部のセルの長さのみ現実の合流車線の長さに合わせて 270 m に設定した．上流端点から流入する交通量には観測値から推定した値を使用した．

CTM で使用するパラメータを表 1 に，IDM で使用するパラメータを表 2，表 3 に示す．モデル切り替えに関する閾値は $K_{\mathrm{th}} = 18.0$，$CV_{\mathrm{th}} = 0.05$ とした．モデル切り替えのアルゴリズムについては高橋らの研究 [1] を参照されたい．

表–1 CTM のパラメータ

臨界密度 k_c [veh./km]	20.0
最大密度 K [veh./km]	124.0
交通容量 Q [veh./h]	1700
forward wave 速度 u [km/h]	85.0
backward wave 速度 w [km/h]	16.3

表–2 IDM のパラメータ（普通車）

希望速度 v_0 [km/h]	100
加速度指数 δ	4
最小車間距離 s_0 [m]	2.0
安全車頭時間 T [s]	1.6
最大加速度 a [m/s^2]	1.4
快適減速度 b [m/s^2]	2.0
車両の長さ l [m]	4.4

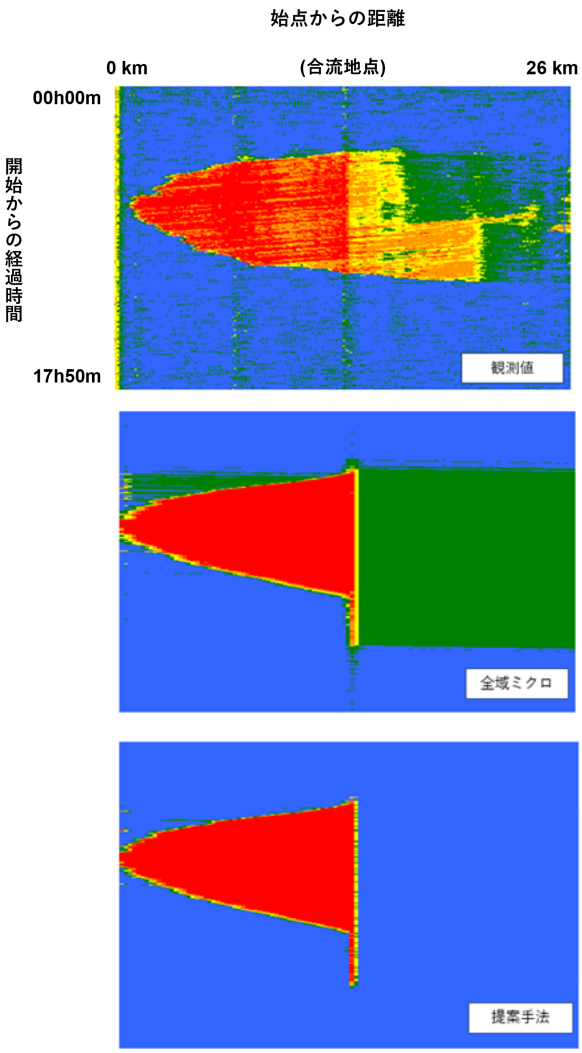
表–3 IDM のパラメータ（大型車）

希望速度 v_0 [km/h]	80
加速度指数 δ	4
最小車間距離 s_0 [m]	4.0
安全車頭時間 T [s]	2.1
最大加速度 a [m/s^2]	0.7
快適減速度 b [m/s^2]	2.0
車両の長さ l [m]	8.5

(2) シミュレーション結果

シミュレーションによって得られたセルごとの空間平均速度と観測値を図 5 に示す．比較のため，全域にミクロモデルを適用した場合の結果も示した．速度と色の対応は表 4 のとおりである．なお，全域にミクロモデルを適用した場合と比べて提案モデルによるハイブリッドシミュレーションでは計算時間が 1/15 ∼ 1/13 程度まで短縮されたことを確認している．

図 5 を見ると，渋滞長，渋滞開始時刻，渋滞解消時刻は観測値と近い結果になっている．観測値では合流部より下流でも 40 km/h 以下の低速領域がしばらく続いている．実際の高速道路では合流部より下流にも他



図–5 空間平均速度の比較

表–4 空間平均速度と色の対応

空間平均速度 [km/h]	色
0 ～ 20	
20 ～ 40	
40 ～ 60	
60 ～ 80	
80 ～	

のボトルネックが存在するが，本シミュレーションでは合流部以外のボトルネックは考慮していないため再現できていない．

4. 結論

本研究では，高橋らの提案した動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを高速道路の合流部に適用できるよう拡張した．とくに，ミクロモデルについて Al-Obaedi&Yousif の合流モデルやジッパー合流モデルを実装した．これに加えて合流部におけるモデルの動的な切り替えで発生するいくつかの問題点に対応することで，動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを合流部に適用可能にした．実際の高速道路合流部における渋滞を再現するシミュレーションによって提案モデルの検証では，渋滞長や渋滞開始・終了時刻が観測値とよく一致しており，提案モデルが想定どおり機能することが確認できた．

Al-Obaedi&Yousif の合流モデルは比較的シンプルな合流モデルであったが，合流挙動を表現するミクロモデルは数多く提案されており，用途によってはより複雑なモデルが必要になるかもしれない．たとえば，実際の分合流部付近では車線利用率が均等ではなく，車線利用率を正確に再現するにはより詳細な合流モデルやモデル切り替え時の車両変換処理の改善が必要になる．また，高速道路の工事計画の検討の際には車線規制のシミュレーションが不可欠であるが，本研究の合流モデルを車線規制部分に適用できるかどうか確認が必要である．

なお，本研究では各交通流モデルで使用するパラメータやモデル切り替え基準のパラメータの多くを固定していたが，より適切なパラメータを使用することでさらなる性能向上が期待できる．

上記と並行し，動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルの活用方法も検討する必要がある．たとえばシミュレーションの計算速度を活かしたパラメータ探索や，大規模ネットワークにおけるシミュレーションが想定され，これによりシミュレータやモデルがクリアすべき新たな課題が見つかる可能性がある．

参考文献

[1] 高橋徹, 阿部和規, 藤井秀樹, 伊加田恵志, 松平正樹: 動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルの開発と速道路の実データを用いた検証, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 13, No.1, pp. 37–47, 2021.

[2] Daganzo C.F.: The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, pp. 269–287, 1994.

[3] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805–1824, 2000.

[4] Al-Obaedi, J. and Yousif, S.: Microsimulation Model for Motorway Merges With Ramp-Metering Controls, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 296–306, 2012.

計算工学講演会論文集　Vol.28 (2023年6月)　計算工学会

自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

Optimal Placement of One-way Carsharing Based on Autonomous Car and Visualization Simulation

惣野源也[1)]，長谷川浩志[1)]
Genya Sono and Hiroshi Hasegawa

1) 芝浦工業大学　大学院理工学研究科　システム理工学専攻　(埼玉県さいたま市見沼区深作307)

Car sharing services have become a sharing service that is attracting attention all over the world. However, one-way car sharing requires relocation due to uneven distribution of vehicles, and it is necessary to guide the optimum station layout at the introduction stage. In addition, it is expected that Autonomous cars will be introduced for car sharing in the future. Therefore, the purpose of this paper is to reduce costs and improve the utilization rate in consideration of relocation by Autonomous operation and station placement based on users. In addition, visualization simulations are performed.

Key Word: MaaS，Autonomous Car，Car Sharing，Optimization，Visualization

1.　はじめに

近年，カーシェアリングは世界的に注目されつつある．2020年3月には日本でのステーション数は約2万カ所，会員数は200万人を超えた[1]．さらに，自動車に関しては，自動運転レベル3の販売が開始し，自動運転の普及が本格化しようとしている．

中でも海外で，普及が進んでいるのがワンウェイ型カーシェアリングである．ワンウェイ型カーシェアリングは，車両の貸出場所と返却場所が異なるものである．しかし，利用したいがステーションが近辺になく借りることができない，返却できない問題が生じてしまう．この問題を解消するためには，ステーションの再配置，自動運転を考慮した，車両の再配置が必要となる．

川上らは，貪欲法を用いた再配置の最適化，ダイナミックプライシングによって利用者自身による再配置を行った[2]．ステーションは，互いに等間隔の距離間で既存する施設を仮想のステーションとして設定した．

本研究では，自動運転による再配置や利用者に基づくステーション配置を考慮したコストの削減，利用率の向上を目的とする．また，自動運転への適用も考慮するため，EV車におけるバッテリーの要素と自動運転車による流しの活用も加味して各車ごとの再配置を行う．さらに，時間帯ごとの利用率からステーション配置を定式化して求める．

2.　システム構成

本研究のシステム構成を図 1 に示す．本研究では，栃木県那須町にてワンウェイ型カーシェアリングサービスの導入を想定する．ステーションは，川上らの研究と同様に那須町のある地域を一定範囲とした中で，既存する施設を仮想のものとして設定した．

図 1　システム構成

3.　再配置のながれ

図2では利用者はステーションAから車両を利用し，ステーションBで車両を返却したい．また，ステーションAは空車，ステーションDは満車の状態である．そのため，ステーションDもしくは利用可能な車両が存在するステーションCから車両をステーションAへ再配置を行う．このとき，どちらのステーションから車両を移動させるかを価値関数$V_{i,j}$にて判断する．式(1)に価値関数$V_{i,j}$について示す[2]．

$$Vij = \frac{1}{E - G + 1} + \Delta + w_t t_{ij} \qquad (1)$$

ここで，Eは再配置によって取り除かれる要求拒否の数，Gは新たに生成される要求拒否の数である．また，ΔはE，Gが発生する間にかかる時間，w_t，t_{ij}は移動時間の重み，ステーションi，j間を表す．

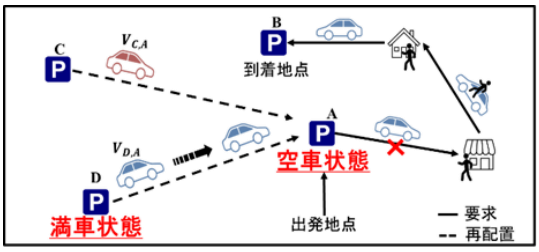


図2　再配置の流れ

4. *p*-メディアンモデルによるステーション配置

p-メディアンモデルを導入することにより，自動運転によるステーションから需要地までの移動コスト最適化を行う．*p*-メディアンモデルとは，需要の分布が所与の場合，需要地から施設までの総距離が最小になるように，*p*個の施設を新たに配置するモデルである．*p*-メディアンモデルは，以下のように定式化される．

$$\min \sum_i \left(w_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \right) \tag{2}$$

$$\text{subject to} \sum_j x_{ij} = 1,\ \forall i \in N \tag{3}$$

$$x_{ij} \le y_i,\ \forall i, j \in N \tag{4}$$

$$\sum_j y_j = p \tag{5}$$

w_iは需要iにおける需要量，d_{ij}は需要iから施設jまでの距離，x_{ij}は需要iにおける施設jへの割当を表す決定変数，y_iは施設jにおける施設の有無を表す決定変数，pは施設数，Nは施設の集合を表す．

5. *p*-メディアンモデルによるステーション選択

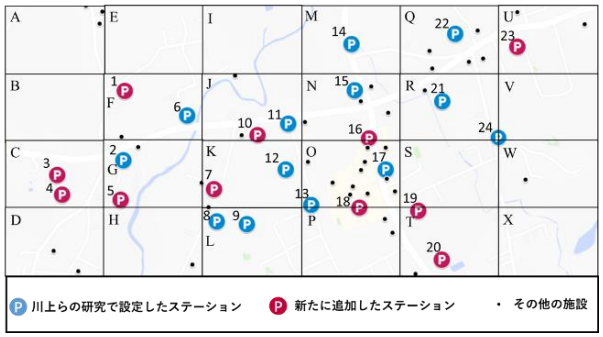


図3　仮想ステーション

図 3 では，川上らの研究で設定したステーション，新たに設定したステーション，その他の施設を示している．川上らの研究では，ステーションをランダムに選択している．新たにステーションを設定した理由としては，川上らの研究で設定した 13 個のステーションが最適な配置とは限らないので，*p*-メディアンモデルで最適な配置を導くためである．*p*-メディアンモデルを行う際，ステーション数と需要地の数を同じにしなければならないため，使用する需要地は，全体のエリアを 24 分割し，各エリアの施設間の中心点とした．また，需要地の時間帯混雑率は Google map から取得し，時間帯ごとのステーション利用率とする．これらのデータを基に，ステーション配置の最適化を行う．

6. ステーション配置の検討及び考察

ステーション利用率，需要地とステーション間との距離を基に，図 3 で設定したステーションから，*p*-メディアンモデルで選択されたステーションと先行研究で設定したステーションとで，各時間帯における 1 台当りの移動距離と再配置回数の比較を行う．各時間帯における 1 台当りの移動距離と再配置回数の結果を図 4，表 2 に，初期条件を表 1 に示す．

表 1　初期条件

ステーション数	13 個
車両台数	312 台
時間帯	6:00～24:00
利用人数	1000 人/日
初期台数割合	全体の 2/3

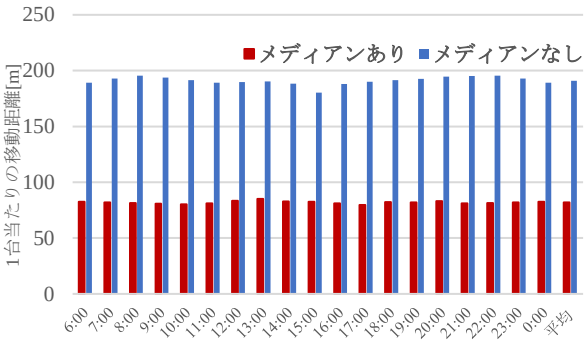


図 4　移動距離比較

表 2　再配置回数比較

メディアンなし	メディアンあり	改善後
253回	163回	106回

図 4，図 5 から，*p*-メディアンモデルにより選択されたステーションの方が先行研究のステーションより，1 台当たりの移動距離が約 120m 短縮された．また，再配置回数に関しても *p*-メディアンモデルを導入することにより，削減を行えたが再配置回数の偏りが出てしまった．これらを踏まえて，空車要求拒否が出たステーションを満車要求拒否が出たステーションに近づけ再度，再配置回数比較を行った．結果を表 3 に示す．

表 3　再配置回数

改善後	メディアン
106 回	163 回

改善後のステーションでは，さらなる再配置回数の削減を達成した．

7. 自動運転車への適応

(1) バッテリー残量

利用者が自動運転車両を使用するときに，バッテリー残量が一様に充電されている必要がある．再配置によりバッテリー残量に偏りが起きると，充電時間が足りず，顧客が自由に利用できない要求拒否が起きる場合がある．よって，充電残量が最も多い車を自動運転させるシステムをさらに組み込んだ．バッテリー残量が最も多い車と，ランダムな車でのバッテリー残量比較を図 5 に示す．

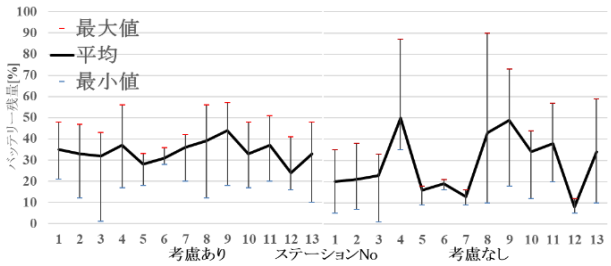


図 5　バッテリー残量比較

バッテリー残量を考慮しない場合では，バッテリー残量差が大きく出てしまい要求拒否が出やすくなってしまうことが分かる．

(2) 流しへの応用

「流し」とは，タクシーの営業で用いられるもので，タクシーを走らせながら利用者を探す方法である．普通車のカーシェアリングでは，運転手が利用者のため「流し」を行えないが，自動運転車の場合は運転手を必要としないため，「流し」へ応用が可能となる．そこで本節では，自動運転車でシステムの運用する際の，流しへの応用を考慮するためバッファーの追加を行った．バッファーとは，自動運転車両が仮想的に存在する位置である．*p*-メディアンモデルによって選択された仮想ステーションに5通りのバッファーを追加した．それぞれのバッファーを追加した場合で時間ごとの需要点から仮想ステーションまたはバッファーまでの移動距離比較を行う．結果を図6に示す．

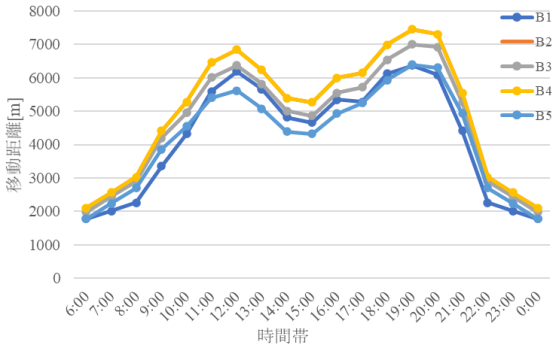


図6　時間帯ごとの移動距離比較

図7より6:00~10:00，19:00~0:00の間ではバッファーB1，11:00~18:00の間ではバッファーB5が最適だと分かった．それぞれの時間帯で最適なバッファーを取り入れた場合の総距離比較を表4に示す．

表 4　総距離比較

	バッファーあり	バッファーなし
総距離[m]	77578.87	81994.22

バッファーを追加したことによって，総距離が短くなったのが示せた．

8.　可視化シミュレーション

7章までの結果やシミュレーションの動きを可視化させる環境構築に取り組んだ．

本論文では，本研究のシステムをアプリケーション化し，実証実験を行うことを目標に，プロトタイプの作成を行った．これにより，カーシェアリング導入を検討する際のシミュレーションとしてこのシステムを操作する場合に開発者以外でも仕様検討を行うことができると考えた．

9.　GoogleAPI×MapBoxによる可視化

位置情報をGoogleMap，可視化ツールにはMapBoxを使用し，車両の移動と各ステーションへの再配置の様子を可視化させた．GoogleAPIは，地図上の位置情報をデータとして読み込むのに利便性が良く，移動するステーション間の道順を緯度経度で取得できるため利用した．MapBoxはMapBox社が提供するリアルタイムで更新されるライブロケーションマップの開発プラットフォームである．時間帯ごとに様々な数値が変動するシステムには最適なため，これを利用した．

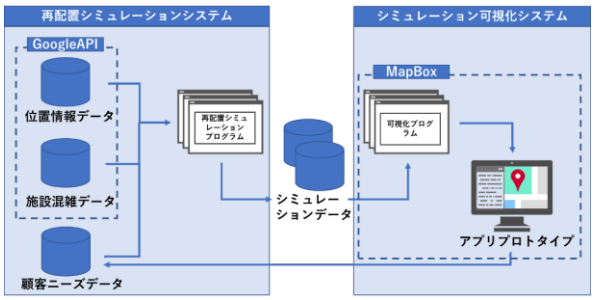


図7　可視化システム構成

図 7 は，2 章から 6 章の再配置システムを，MapBox を使用した可視化システムに組み込んだ構成図である。可視化システムのアプリケーションで顧客データを入力し、再度再配置シミュレーションを行いことで，フロントシステムからシミュレーションの値を変化させて結果を可視化させられる構成とした。

10.　今後の展望

ワンウェイ型カーシェアリングのシミュレーションにステーション最適化を含めることで，移動距離におけるコスト，再配置回数を削減できることが示せた．さらに，自動運転要素を考慮することでシステム運用を現実的なものにすることができる．またシミュレーションを可視化することで，車両の動き，混雑率など妥当性を確認できた．

参考文献

[1] 公益財団法人エコロジー・モビリティ財団，http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_top.html，最終閲覧日：2021 年 6 月 5 日．
[2] 川上悟・長谷川浩志，”ダイナミックプライシングを考慮したワンウェイ型カーシェアリングの再配置最適化”，2021，第 26 回日本計算工学講演会論文．