

Sat. Oct 28, 2023

Room F

Oral Presentation in GISA

教育

Chair: Masaya Uesugi (Fukuoka Institute of Technology)

9:20 AM - 10:20 AM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F1-02] キッズデザイン賞受賞事例にみる木質の保育・幼児教育の地理的傾向

*Suzu Shimada¹, Naoko Fujita¹, Max Hanssen¹, Linda Gadhoum¹, Miyano Imoto¹, YUXIN ZHOU¹ (1. University of Tsukuba, Art and Design)

9:20 AM - 9:40 AM

[F1-03] デジタル化と立地がコロナ禍における私立中学校選択に与える影響

Yuki Baba, *Iyanagi Hiroyasu¹, Kazushi Matsuo¹, Morito Tsutsumi² (1. Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 2. Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba)

9:40 AM - 10:00 AM

[F1-04] 東京都認証保育所における教育サービスの提供率の地域較差に関する分析

*Tohru OHBA¹ (1. PASCO Corporation)

10:00 AM - 10:20 AM

Oral Presentation in GISA

空間解析手法 1

Chair: Daisuke Murakami (Institute of Statistical Mathematics)

10:40 AM - 12:00 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F2-01] 1kmメッシュ別滞在人口データを用いた時系列パターン分類手法の開発

*Chenan Huang¹, Narumasa Tsutsumida¹ (1. Saitama University)

10:40 AM - 11:00 AM

[F2-02] 地域メッシュ統計データから千葉県市町村の人口密度の度数分布を作成する際に最適なメッシュ次数

*Koko Yoshida¹, Akihiro Teraki¹, Hiroyuki Usui² (1. Chiba Institute of Technology, 2. The University of Tokyo)

11:00 AM - 11:20 AM

[F2-03] 分位点毎の全体傾向から乖離した局所的地域抽出手法の提案

*Kenya Aoki¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku University)

11:20 AM - 11:40 AM

[F2-04] Group Fused MCPに基づく組成データの異質地域

検出手法の提案

*Masato Ishikawa¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku Univ.)

11:40 AM - 12:00 PM

Oral Presentation in GISA

自治体

Chair: Toshikazu Seto (Komazawa University)

3:20 PM - 4:40 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F4-02] 2次元地図と3次元データを用いた道路損傷データ共有システムの提案

*Atsushi Murakami¹, Yoshihiro Yasumuro², Satoshi Kubota² (1. Kansai University Graduate School, 2. Kansai University)

3:20 PM - 3:40 PM

[F4-03] 公共賃貸住宅の維持管理・運営段階用の BIM と GIS の連携に関する研究～空間オブジェクトと公共賃貸住宅用の 3 次元位置情報を活用したタブレット端末用点検記録アプリケーションの開発を通じて～

*Koji katayama Katayama¹ (1. National Graduate Institute for Policy Studies)

3:40 PM - 4:00 PM

[F4-04] 登記所備付地図オープンデータを用いた土地区画形状分析

*Kazuto AOKI¹ (1. Suzuka University Junior College)

4:00 PM - 4:20 PM

[F4-05] 大規模災害時を想定した広域な土木施設の被害情報の収集・共有システム構築の試み

*Daiki Hayashi¹, Toru Shimada¹, Tomokazu Ito¹, Daiichiro Hori¹, Yoshinori Abe¹, Shoichi Yokoyama¹, Sayuri Yoshioka¹, Daisuke Kudo¹, Akiko Takeshima¹, Mina Kobayashi¹, Kento Tamagawa¹, So Tsuchiya¹, Katsumi Takizawa¹, Yuji Hayashi¹, Hirokazu Kyoso¹, Nobuhiro Yokoyama¹, Kouki Kawase², Nobuyuki Mannen², Toyokazu Banba², Yoshitomo Sugiyama² (1. Kokusai Kogyo Co., Ltd., 2. Aichi Prefectural Government, Bureau of Construction, Public Works Department, Planning Division)

4:20 PM - 4:40 PM

Oral Presentation in GISA

防災 1

Chair: Hiroyuki Usui (Department of Urban Engineering, The University of Tokyo)

5:00 PM - 6:40 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F5-01] 移動経路の水害リスクを考慮した一時避難所としての避難所配置分析

*Chisa Baba¹, Michinori Hatayama² (1. Shiga University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:00 PM - 5:20 PM

[F5-02] 携帯電話データを用いた災害発生直後の都市における人口分布に関する地理学的研究

*Masami Onozuka¹, Yuichi Hasimoto¹ (1. Hokkaido University)

5:20 PM - 5:40 PM

[F5-03] 大規模駅周辺地域における道路閉塞を考慮した帰宅困難者による道路混雑度の評価

*Shunichi Kusano¹, Toshihiro Osaragi¹, Maki Kishimoto¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

5:40 PM - 6:00 PM

[F5-04] 大地震発生時の二段階避難における避難施設割り当てモデル

*Kai Tang¹, Toshihiro Osaragi¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

6:00 PM - 6:20 PM

[F5-05] 滞在人口との比較による夜間光光度に基づく水害復興過程分析の妥当性検証

*Akina Machida¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku University)

6:20 PM - 6:40 PM

Oral Presentation in GISA

教育

Chair: Masaya Uesugi (Fukuoka Institute of Technology)

Sat. Oct 28, 2023 9:20 AM - 10:20 AM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F1-02] キッズデザイン賞受賞事例にみる木質の保育・幼児教育の地理的傾向

*Suzu Shimada¹, Naoko Fujita¹, Max Hanssen¹, Linda Gadhoum¹, Miyano Imoto¹, YUXIN ZHOU¹

(1. University of Tsukuba, Art and Design)

9:20 AM - 9:40 AM

[F1-03] デジタル化と立地がコロナ禍における私立中学校選択に与える影響

Yuki Baba, *Iyanagi Hiroyasu¹, Kazushi Matsuo¹, Morito Tsutsumi² (1. Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 2. Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba)

9:40 AM - 10:00 AM

[F1-04] 東京都認証保育所における教育サービスの提供率の地域較差に関する分析

*Tohru OHBA¹ (1. PASCO Corporation)

10:00 AM - 10:20 AM

キッズデザイン賞受賞事例にみる木質の保育・幼児教育の地理的傾向

嶋田珠々*・藤田直子**・ハンセンマックス***・リンダガドム***・井本雅乃***・シュウウキン***

Geographical trends of children's activities and early childhood education in wooden spaces based on Kids Design Award Winning Cases

Suzu Shimada*, Naoko Fujita**, Max Hanssen***, Linda Gadhoom***, Miyano Imoto***, Yuxin Zhou***

Abstract "Woodification" is a recent trend of using wood in various contexts. This study investigates the geographical patterns of wooden spaces in Japan, their distribution, geographical factors influencing them, and their relationship with the environment. It focuses on case studies of award-winning wooden nurseries, kindergartens, and childcare centers from the Kids Design Award. This study looks at woodification's unique features, such as architecture, teaching methods, and location. ArcGIS Pro was used to compare population and land use data. 171 woodification cases were found, mainly in densely populated areas. The Kanto region has a strong prevalence of steel or concrete parks in urban areas, while parks outside cities use wood as the main material.

Keywords: 内装木質化 (woodification), 保育園 (nursery school), 幼稚園 (kindergarten), 認定こども園 (certified child care institution), 教育方法 (educational methods)

1. はじめに

1.1. 研究背景

平成22年に林野庁で、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」を施行し、公共の建築物に木材の利用を進める取り組みが行われるようになった。文部科学省でも平成27年度に「木の学校づくり先導事業」を開始し、「木質化」の効果に期待する潮流がある。

一方で、近年、共働き世帯数の増加により、保育園等利用率が急増し、認定こども園等の新しい形態の保育・幼児教育施設が急増している。平成29年3月告示の幼稚園教育要領及び保育所保育指針では、「環境」という領域での記述があり、保育士等の人的環境、施設や遊具の物的環境、自然や社会等事象があるとしている。さらに、指導上の留意点では、「幼稚園等での生活が家庭や地域社会と連続性を保

ちつつ展開すること」「地域資源の活用を積極的に行うこと」を言及している。したがって、子どもの人格形成や創造的思考力の土台となる保育・幼児教育の重要性が問われており、地域のつながりを通じた教育環境の質向上が求められる。

1.2. 既往研究と本研究の位置付け

木質化の効果に関しては、内装に木材を使用することで、第一印象は全体的に好意的になることを明らかにした研究 (Ridout et al., 2002) 白いスチールの壁パネルとの比較で視覚効果として人間に感情的で自然な印象を与え、木材仕上げを好む被験者で血圧が有意に低下し、それを嫌う被験者の血圧の有意な上昇がないことを示した研究 (Sakuragawa et al., 2005) がある。また、杉の木材には人間に前向きな活力の変化を与え、杉の木材からの揮発性成分の排出の吸入は、人間に良い影響を与える可能性がある

GISA Members

* 学生会員 筑波大学人間総合科学学術院 (Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba) , 〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1 s2330514@u.tsukuba.ac.jp

** 正会員 筑波大学芸術系 (Institute of Art and Design, University of Tsukuba) fujita.naoko.gf@u.tsukuba.ac.jp

*** 学生会員 筑波大学人間総合科学学術院 (Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba)

ことを明らかにした研究 (Azuma et al., 2016), 木材の香りの成分である α -ピネンによる嗅覚刺激は、副交感神経活動に関連する HRV の HF 成分を大幅に増加、心拍数を大幅に低下させ生理的弛緩を誘発することを示した研究 (Ikei et al., 2016) がある。

さらに、無垢材の表面と接触するとストレスパラメータが低下することを明らかにした研究 (Grote et al., 2021) がある。

木質化の教育環境に関しては、自然との関係を強化することに加えて、自然が豊かな学校環境は病気を減らし、生徒の成績と学習を向上させる可能性があることを示唆した。また、同研究で木材は持続可能な設計に適した建築材料であり、自然素材であることがよく認識されているため、生物親和的デザイン、ひいては RED (the restorative environmental design) に最適な素材であると示した (Burnard and Kutnar, 2015)。保護者・保育士へのアンケートで無垢材の香りの効果が示唆され、床材は印象に与える効果が大きいことを明らかにした (Bamba et al., 2013)。教育者 (保育者) は、物理的環境における木材が就学前の子ども「心理的幸福に影響する」、「教育活動への集中力を高める」と感じていることが明らかにした (Hanták and Končerková, 2022)。

以上より、木質化が人々へ良い影響を与えるという研究成果はあるが、日本国内の木質の保育・幼児教育に関しては実態の解明や効果の検証が不十分である。したがって本研究では、木質の保育・幼児教育施設に着目し、その周辺環境や地理的特性と比較して分析する。

1.3. 研究目的

本研究の目的は、我が国で優良とされる木質の保育・幼児教育の分布と地理的要素を比較することで、木質の保育・幼児教育の地理的傾向、周辺環境との関係の一端を明らかにすることとした。そのための具体的な研究項目として、二つの調査目的を設定した。一つ目は、キッズデザイン賞受賞事例から木質の保育・幼児教育の立地とその特性を明らかにすることとした。二つ目は、木質の保育幼児教育での分布と地理的要素との関係を明らかにすることとした。

本研究の長期的な狙いは、木質化の進展状況や地理的要素との関係を示すことで、我が国の保育・幼児教育における木質化整備や効果検証の際の指針にすることを目的とする。また、木材利用の促進、教育環境の質向上に貢献することを目指す。

2. 方法

2.1. 研究方法

本研究は研究目的を達成するため、2 種類の調査を行った。キッズデザイン受賞事例を対象として、前者は保育・幼児教育の木質の実態調査 (研究 1)、後者は木質の保育・幼児教育施設の分布と地理的傾向の比較分析 (研究 2) である。研究 1 では、キッズデザイン賞受賞作品から、保育・幼児教育に関わる木質化の事例を対象にその実態と立地の調査を行った。研究 2 では、GIS を用いて木質の保育・幼児教育 (保育園・幼稚園・認定こども園) の分布と地理的傾向 (構造・木質化種類、教育方法、人口、土地利用) で比較分析を行なった。

2.2. 分析方法

本研究の対象物は、キッズデザイン賞受賞事例である。キッズデザイン賞とはキッズデザイン協議会が 2007 年から実施している顕彰制度である。さまざまな企業・団体の業界横断的なネットワークを持ち、多角的な視点で子どものための環境改善を目指していることから本研究対象物として選択した。

データ分析には ArcGIS Pro を使用した。分析対象データの座標系は JGD2011 である。研究 1 での分析結果から、キッズデザイン受賞事例の X 座標 Y 座標データをマッピングした後、国土数値情報データと比較分析した。比較データは、日本全国の平成 27 年度の DID 人口地区データの当該 DID の人口、森林地域データ、平成 30 年度の都市地域データ、関東地方の 1km メッシュ別将来推計人口データ (H30 国政局推計) 2020 年 0-4 歳男女人口を用いた。

3. 結果

3.1. 木質の保育・幼児教育の立地と特性

(1) 木質の保育・幼児教育 (以下、園) に該当するものは 171 件あった (図 1)。

- (2) 構造は木造（Wooden）が最も多い（図2）．次いで多かった鉄骨造内装木質化（Steel frame interior wood conversion）と RC 造内装木質化（RC interior wood conversion）の建設理由を調査すると，新設（newly organized）の次に改修（renovation）が多かった（図3）．
- (3) 各園で実施している教育方法は自然教育（Natural education）・環境教育（Environmental education）・食育（Dietary education）・地域連携（Regional collaboration）に分けられた（図4）．
- (4) 47都道府県中45都道府県で確認でき，関東地方に多く分布が見られた（図5）．また，東京都は鉄骨造及び RC 造内装木質化の割合が高い．

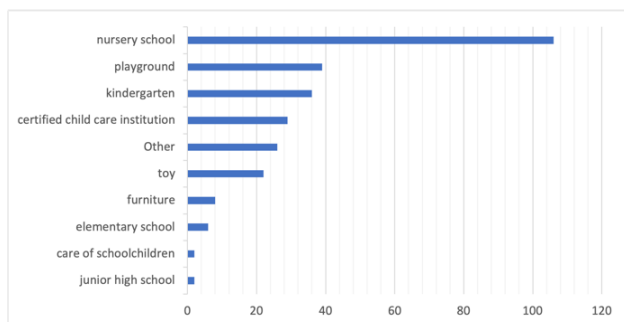


図 1 木質の事例の内訳

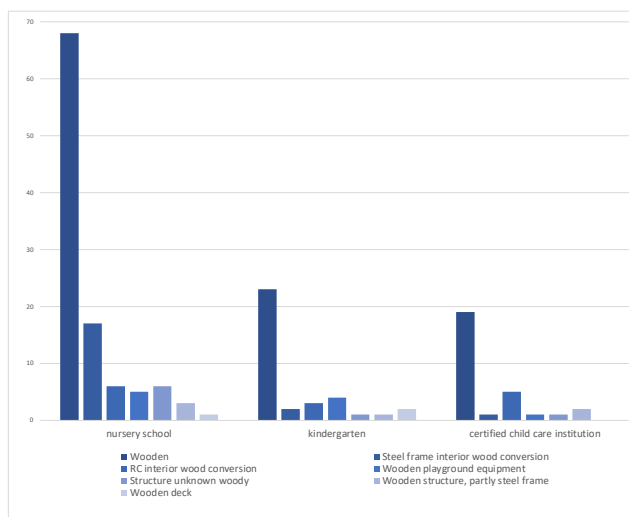


図 2 木質の園の構造種類

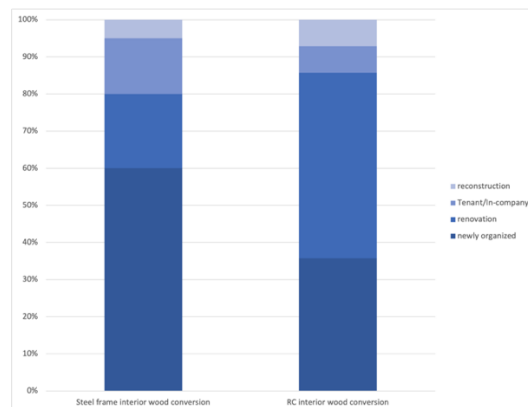


図 3 木質の園の建設理由

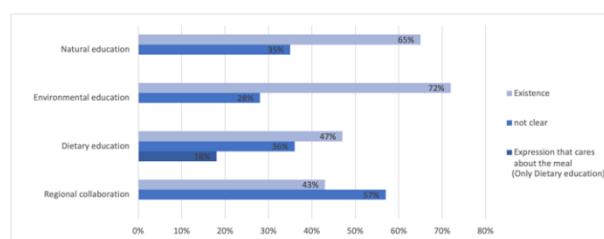


図 4 各教育方法の実施割合

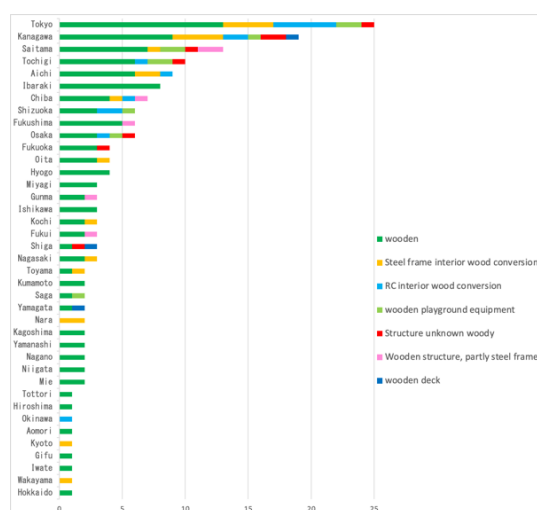


図 5 立地する都道府県の内訳

3.2. 木質の保育・幼児教育の分布と地理的傾向

- (1) 木質の園は，全国的に DID 人口が多い地域に分布していた．また，その傾向は関東地方で著しい（図6）．関東地方の人口集中地区に位置する園は鉄骨造及び RC 造内装木質化が多かった．一方で，人口集中地区外に位置する園のほとんどは木造だった．

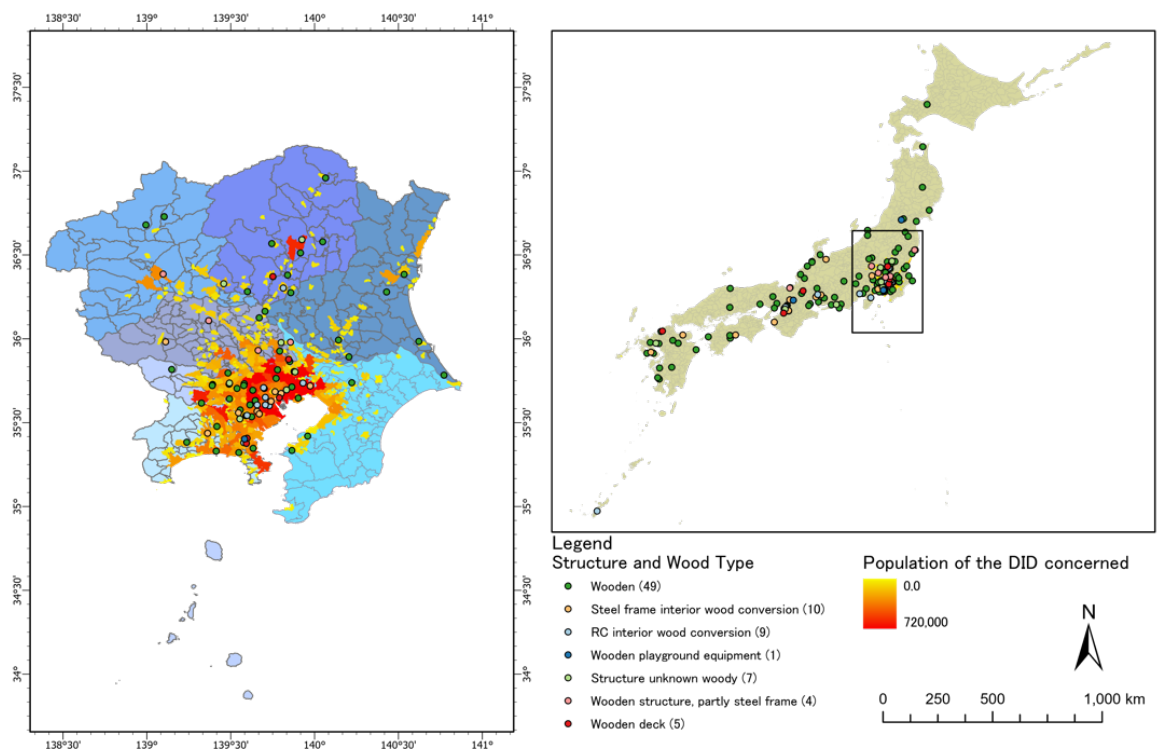


図 6 木質の園の分布と DID 人口との比較

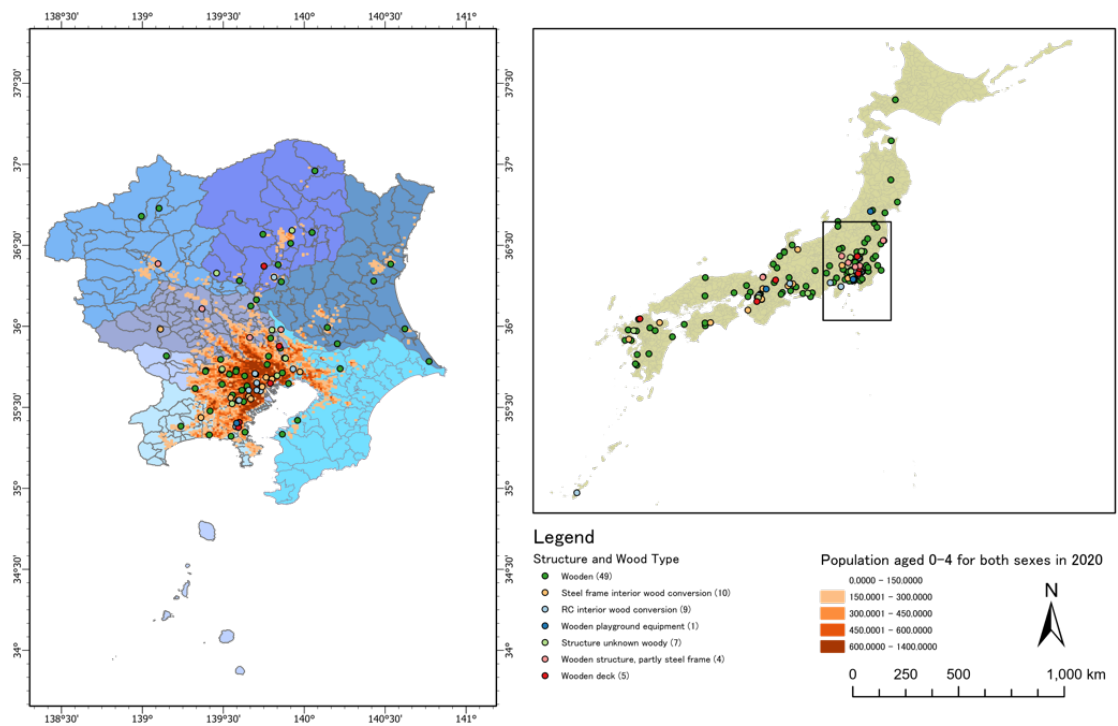


図 7 木質の園の分布と関東地方の 0-4 歳男女人口の比較

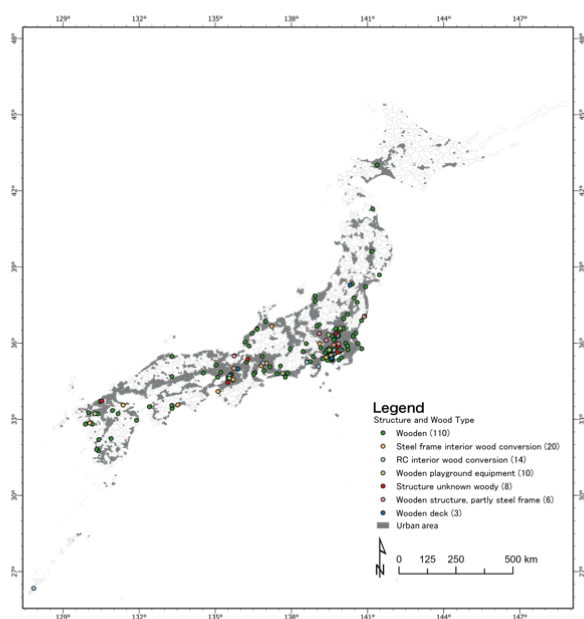


図 8 木質の園の分布と都市地域の比較

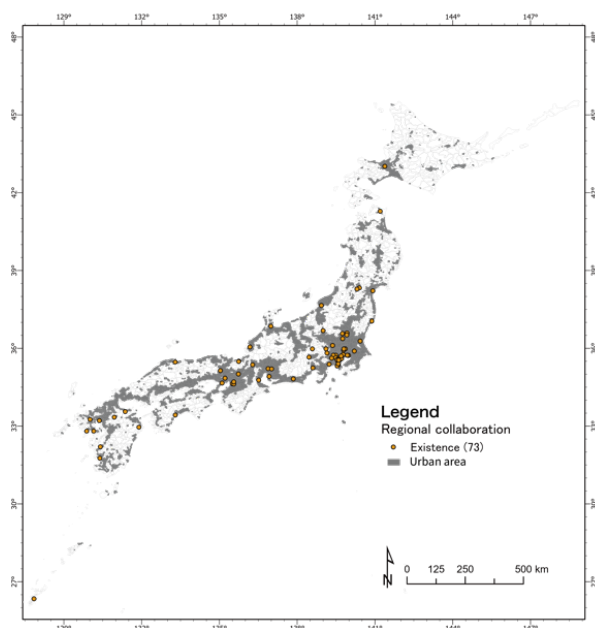


図 9 地域連携を行う園と都市地域の比較

- (2) 関東地方の 1km メッシュ別将来推計人口データから平成 30 年に国政局が推計した 2020 年における 0-4 歳（乳幼児）男女の将来推計人口データを用いて示した（図 7）。関東地方の木質化の園は人口が多い地域に分布していた。一方で、0-4 歳男女の人口が少ない地域に位置する園のほとんどは木造だった。

- (3) 木質の園は、都市地域に多く位置していた（図 8）。周辺地域の人々と協力して教育活動を行う「地域連携」を実施している園も、都市地域に位置している場合が多い（図 9）。木を含む植物等の自然を活用して行う「自然教育」を実施する園は、森林地域以外に位置することが多い（図 10）。

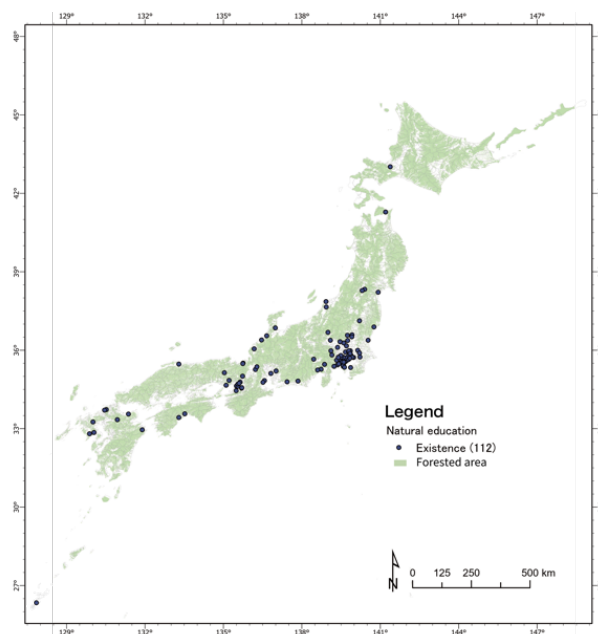


図 10 自然教育を行う園と森林地域の比較

4. 考察

本研究結果は、木質の保育・幼児教育の分布と地理的要素を比較することで、木質の園の構造や教育方法と周辺環境との関係の一端が明らかになった。

第一に、構造との比較では、木質の園は、関東地方に集中していた。人口が多い都市地域には、鉄骨造及び RC 造内装木質化の園が多い。東京都を中心とした人口集中地区では、新規の保育・幼児教育施設が急増していること、限られたスペース内で多くの人々が暮らすため、頑丈な構造と内装木質化によって快適な環境を提供することが重要と示唆された。

第二に、教育方法との比較では、「地域連携」を実施している園は、都市地域に位置している場合が多く、「自然教育」を実施する園は、森林地域以外に位置することが多いことが明らかになった。「自然教育」

は、木を含む植物等の自然を活用して行う教育方法である。近年では、木育といった森林でのあそびや植物を育てることを教育に取り入れる園が増えている。Coatesら(2019)は、森林での自然教育で、創造力や問題解決能力、自律的・協調的な学習能力の向上、運動量の増加、環境との交渉、身体的リテラシーの発達、社会的支援ネットワークの構築、個人的・社会的・環境的責任の認識、レジリエンスの構築、紛争管理、交渉、外交などの中核的な社会的スキルの発達が叶うことを示している。これらのスキルは、従来の学校環境にも転用可能であり、教育者は、このような利点を実現するために、教室の外で子どもたちが仲間とともに学ぶ機会を設けることを検討すべきであると述べている。しかしながら、本研究では都市地域以外に位置する園の「地域連携」及び森林地域以外に位置する園での「自然教育」の実態は、明らかにできなかった。都市地域以外に位置する園での「地域連携」の有無や特性、森林地域以外に位置する園での「自然教育」の利用場所や活動の特性を継続する論文で示したいと考える。

謝辞

キッズデザイン賞に纏わる数多くの貴重な資料をご提供いただきました、特定非営利活動法人キッズデザイン協議会の橘周子氏に感謝の意を表します。

参考文献

- Azuma Kenichi・Kouda Katsuyasu・Nakamura Masashi・Fujita Saeko・Tsujino Yoshio・Uebori Michiko・Inoue Shigeto・Kawai Shuichi (2016) Effects of Inhalation of Emissions from Cedar Timber on Psychological and Physiological Factors in an Indoor Environment. 「Environments」, 3 37.
- Bamba, I., Azuma K., Fujita S., Tsujino Y., Uebori M., Kimura A., Nakamura M., Kouda K. and Kawai S. (2013) Effect of japanese cedar on psychological and physiological factors influencing fatigue recovery in an indoor environment. *Environmental Health Perspectives. Supplements*, 2013 (1), 3900.
- Burnard Michael D.・Kutnar Andreja (2015) Wood and human stress in the built indoor environment: a review. 「Wood Sci. Technol.」, 49 (5), 969-986.
- Coates Janine K.・Pimlott-Wilson Helena (2019) Learning while playing: Children's Forest School experiences in the UK. 「Br Educ Res J」, 45 (1), 21-40.
- Grote Vincent・Frühwirth Matthias・Lackner Helmut K.・Goswami Nandu・Köstenberger Markus・Likar Rudolf・Moser Maximilian (2021) Cardiorespiratory Interaction and Autonomic Sleep Quality Improve during Sleep in Beds Made from Pinus cembra (Stone Pine) Solid Wood. 「International Journal of Environmental Research and Public Health」, 18 (18), 1-17.
- Hanták, J. and Končerková D. (2022) The positive impact of wooden material on educational processes in the environment of slovenian wooden kindergartens. *Architecture Papers of the Faculty of Architecture and Design STU*, 27 (3), 29-35.
- Ikei Harumi・Song Chorong・Miyazaki Yoshifumi (2016) Effects of olfactory stimulation by α -pinene on autonomic nervous activity. 「Journal of Wood Science」, 62 (6), 568-572.
- Ridoutt Bradley G.・Ball Roderick D. Killerby Shaun K. (2002) Wood in the interior office environment: Effects on interpersonal perception. 「For. Prod. J.」, 52 (9), 23-30.
- Sakuragawa Satoshi・Miyazaki Yoshifumi・Kaneko Tomoyuki・Makita Teruo (2005) Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses. 「Journal of Wood Science」, 51 (2), 136-140.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2007) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2007.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2008) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2008.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2009) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2009.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2010) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2010.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2011) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2011.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2012) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2012.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2013) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2013.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2014) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2014.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2015) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2015.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2016) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2016.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2017) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2017.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2018) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2018.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2019) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2019.
- 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2020) KIDS DESIGN CONCEPT BOOK 2020.

リッケ・ローセングレン・Jo Gregersen [ほか] 写真・
ヴィンスルー美智子村上進 訳, Anonymous 訳
(2020)『北欧の森のようちえん：自然が子どもを
育む：デンマーク・シュタイナー幼稚園の実践』,
イザラ書房.

全国保育士会 編, Anonymous 訳 (2017)『保育所保
育指針幼保連携型認定こども園教育・保育要領幼
稚園教育要領：平成 29 年 3 月 31 日告示：平成
30 年度改正施行』, 全国社会福祉協議会.

国土緑化推進機構 編著, Anonymous 訳 (2018)『森
と自然を活用した保育・幼児教育ガイドブック』,
風鳴舎.

文部科学省 [編], Anonymous 訳 (2018)『幼稚園教
育要領（平成 29 年告示）：平成 29 年 3 月告示』,
東山書房.

社会福祉法人 社会福祉協議会 全国保育協議会
(2022) 全国保育協議会 会員の実態調査 2021 報
告書.

デジタル化と立地がコロナ禍における私立中学校選択に与える影響

馬場優樹*・伊柳佑康**・松尾和史***・堤盛人****

The Impact of Digitalization and Location on the Private Secondary School Choice Behavior During the Covid-19 Pandemic

Yuki BABA*, Hiroyasu IYANAGI**, Kazushi MATSUO*** and Morito TSUTSUMI****

Abstract The COVID-19 pandemic has also had a profound impact on school choice. However, quantitative findings on school choice behavior in a pandemic are limited. This study focuses on the rapid digitization of schools during the pandemic and their location, which relates to the risk of infection during commuting to school, and aims to clarify the impact of these factors on the choice of private junior high schools before and after the pandemic. The analysis using data on the choice of schools and the location of current students revealed that the implementation of online information sessions and the introduction of ICT devices significantly impacted the number of students who took the entrance exam after the pandemic. In addition, the results showed that the commuting distance of current students tended to decrease after the pandemic. These results indicate that the factors affecting school choice have changed since the pandemic.

Keywords: 学校選択 (School Choice)、中学受験 (Junior High School Entrance Examinations)、COVID-19、デジタル化 (Digitalization)

1. はじめに

首都圏では『第3次中学受験ブーム』が到来していると言われているように、小学6年生の生徒数が減少している中においても中学受験者数が年々増加しており、中学受験者数が小学校6年生の生徒数に占める割合はリーマンショック前の時期を超え、約17.9%まで達している。この背景には、公立中学校よりも私立や国立の中学校の方がオンライン授業などのコロナ禍への対応が早かったことがあり、今後もこの傾向が続くことが指摘されている(週刊ダイヤモンド, 2023)。

中学受験生は小学生であるため、保護者の意向も志望校の決定に大きな影響を及ぼす。保護者にとっては、子供に長い時間をかけて通学をさせることは、心配な要素の一つである。実際、保護者が志望校を選ぶ際に重視することについてのアンケートでは、約7割の保護者が通学の交通の便、立地を重要視し

ていることが示されている(ベネッセ教育情報, 2008)。特に、コロナ禍においては、感染リスクの面から、通学時間が短い近くの学校や、オンラインでの説明会や授業などのデジタル化を含めた感染症対策の充実した学校を選ぶ可能性がある。実際に、行動免疫システム理論では、感染症の流行時には、伝染への恐怖が個人の意思決定を促すことが知られており(Schaller and Park, 2011), Hailey et al. (2023)はコロナ禍において、保護者の学校に対する選好が、各学校の人種構成と公衆衛生対策に依存することを示している。しかしながら、コロナ禍前後における学校選択行動の差異に関する定量的な知見はほとんど得られていない。

そこで本研究では、コロナ禍前後における首都圏私立中学校の選択行動の変化を、デジタル化と立地の二つの側面から明らかにすることを目的とする。

* 非会員 元筑波大学大学院システム情報工学研究群 (University of Tsukuba)
 ** 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究群 (University of Tsukuba)
 〒305-8573 茨城県つくば市天王台一丁目1-1 E-mail:s2320412@s.tsukuba.ac.jp
 *** 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究群 (University of Tsukuba)
 **** 正会員 筑波大学システム情報系 (University of Tsukuba)

2. 既存研究

学校選択の要因に関する研究の多くは、交通の利便性との関連に着目している。Gallego & Hernando (2010) はチリのサンティアゴの事例を用いた研究で、学生は地下鉄の駅に近い学校を選ぶ傾向があることを示している。Lavy (2006) は、イスラエルのテルアビブ市において、学生が学校を自由に選択できる制度への変更に当たって、個々の学生の学校選択への影響を分析し、学校と同じバス路線沿いに住む学生は、そうでない学生に比べて、その学校を選ぶ傾向があることを示している。また、Andrew et al. (2018) は、メキシコシティにおいて、今まで鉄道路線が敷かれていなかった郊外部に鉄道が開通した際の学校選択の変化に着目し、DID (Difference-in-differences) を用いて定量的に分析した結果、成績の高い学生に限り、鉄道が開通する前と比較して、より遠くより学力の高い学校を選択する傾向があること、逆に成績が低い学生については鉄道が開通した際も学校選択には特に影響を与えないことを明らかにした。

学校選択に関する文献ではほかにも様々な要因について研究が行われている。Martin and Carlson (2005) は、親が子供の通学の際に気に掛けることとして、「学校までの距離」に次いで「交通上のリスク」が挙げられていることを示している。Valentine (1997) は、小学校への通学の際に親が心配している事象は「拉致」に次いで「交通事故」が挙げられていることを示している。これらの結果から親が子供を通学させる際に、予測不可能なリスクを重要視していることがわかる。

日本国内を対象とした研究では、家庭的な要因に着目したものが多く、貞広 (1999) は質問紙調査により、学校選択には母親の学歴や父親の年齢、世帯収入などが影響していることを示している。片岡 (2009) は、インターネット調査により、学校選択には社会経済的地位や親の教育期待の高さが影響していることを示している。いずれも定性的な調査に基づいた研究であり、日本では教育に関するオープンデータが少ないことを課題として挙げている。

これらの研究では、学校選択行動について交通利便性をはじめとする様々な要因との関係が示されて

いるが、コロナ禍のような特異な状況下における学校選択行動の変化に着目した研究は筆者らの知る限り存在しない。

3. データと分析手法

3.1. 中学受験データの概要

本研究の分析の対象は、①学校数が多いため受験競争が激しく、②過去のデータが比較的容易に入手可能であるという二つの理由から、首都圏（東京都・千葉県・埼玉県・神奈川県）に位置する受験による入学者選抜が実施されている中学校とする。ただし、国公立中学校の場合には通学範囲の制限があるため、本研究の対象からは除外する。

本研究では、学校ごとに各年の受験者数や偏差値などを収集・整理したパネルデータを用いる。作成にあたっては晶文社学校案内編集部にて毎年発行されている首都圏中学受験案内を用いて、2019年から2022年の各学校の受験者数（実際に試験を受験した人数）、授業料（入学金、初年度の施設費、授業料、その他費用の合計）、各試験の日程、偏差値、男子校や女子校、共学などの種別、ICT 端末の導入状況などといった学校の属性データを収集した。本研究では、これらのデータに加え、各学校の SNS の開設状況や、オンライン説明会の実施有無の情報をホームページ等から収集した。データ整理の結果、2019年から2022年までのデータに欠損のない私立中学校は262校が抽出された（図1）。これらのデータの概要と基本統計量は表1に示す

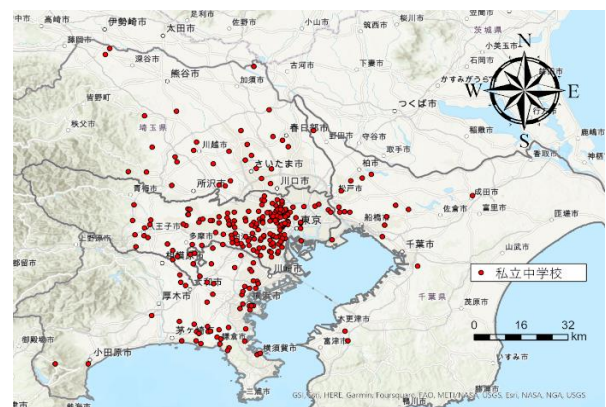


図1 分析に用いる学校の分布

表 1 変数の概要と基本統計量

		2019		2020		2021		2022	
		平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
Online_Info	オンライン説明会の開催有無 学校が情報発信用の SNS	0.00		0.00		0.44		0.45	
SNS	(Facebook, Twitter, Instagram) を開設 していれば 1 をとるダミー変数	0.16		0.21		0.42		0.41	
Online_Class	学校がオンライン授業を 行っていれば 1 をとるダミー変数	0.00		0.00		0.91		0.95	
ICT	ICT デバイスの導入状況。 導入していれば 1 をとるダミー変数	0.57		0.53		0.67		0.87	
Deviation	偏差値	52.35	11.95	52.59	12.18	53.16	12.44	53.46	12.42
Fee	授業料（入学料，初年度の施設費， 授業料，その他費用の合計）	119.35	17.24	121.66	16.78	121.39	15.68	124.22	15.16
Test-taker	受験者数	718.86	863.07	783.06	913.06	765.26	814.93	806.48	900.58
Comp_rate	受験倍率（受験者数/合格者数）	2.12	1.01	2.27	1.10	2.26	1.09	2.29	1.05
n		262		262		262		262	

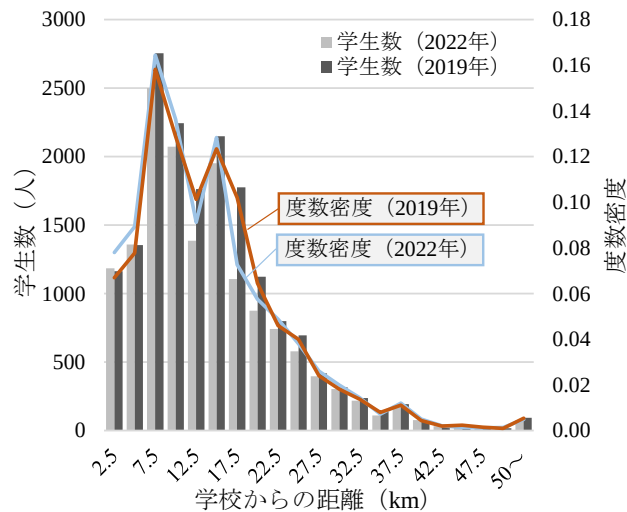


図 1 居住地域から学校までの距離のヒストグラム

3.2. 通学データの概要

本研究では、前述の中学受験データに加え、通学距離に関するデータも利用する。これは、前述の分析対象の 262 校に対して、在校生の居住市区町村についてアンケート調査を行ったものである。本研究では、コロナ禍前後の通学データを提供いただいた 21 校のデータを利用する。本研究では、各学校の平均通学距離を在校生の居住市区町村の役所からの距離の平均として算出する。

図 1 は 2019 年と 2022 年における各学校の在校生の居住地区町村と学校の距離をヒストグラムにまとめたものである。約 8 割の学生は 20km 圏内の市区

町村に居住していることがわかる。さらに、2019 年と 2022 年の度数密度を比較すると、15km～20km 圏内からの通学者の割合が減少し、5km 圏内からの通学者の割合が増加していることが読み取れる。但し、22.5km より遠い地域からの通学者数の割合にはほとんど差がない。これは、中距離圏の学生の学校選択行動が変化した可能性を示している。

3.3. 分析手法

前述のデータを用いて、コロナ禍前後の学校選択行動の変化を定量的に示す。一つ目の分析では、受験校選択の要因について年ごとのクロスセクションの回帰分析を行い、係数の経年的な変化を明らかにする（式 1）。

$$\begin{aligned} \text{Comp_Rate}_i &= \beta_0 + \beta_1 \text{ICT}_i + \\ &\beta_2 \text{Online_Class}_i + \beta_3 \text{Online_Info}_i + \\ &\beta_4 \text{SNS}_i + \sum_{k=5}^K \beta_k X_{i,k} + \varepsilon_i \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 i は学校を表し、 $X_{i,k}$ は授業料や偏差値、学校の種別（共学、男子校、女子校）、試験日などの式の中に個別に記述されていない他の説明変数を表す。 ε_i は誤差項であり、 β_0 は定数項、 β_k は各変数の係数を表す。デジタル化が受験校選択に影響を及ぼすのであれば、ICT デバイスの導入可否やオンライン授業、オンライン説明会、SNS の開設状況などの係数が正に有意になると考えられる。

二つ目の分析では、私立中学に通う学生の通学距離の変化について、固定効果モデルを用いて明らかにする（式2）。

$$\ln(Com_{Dist_{it}}) = School_i + Year_t + \sum_{k=5}^K \gamma_k X_{it,k} + \epsilon_{it} \quad (2)$$

ここで、 $\ln(Com_{Dist_{it}})$ は t 年における学校 i の平均通学距離の対数値であり、 $School_i$ は学校固定効果、 $Year_t$ は時点固定効果を表す。学校固定効果は、各学校固有の時間的に変化しない未観測の交絡因子（例えば、校風や、知名度など）の影響を制御し、時点固定効果は各学校に共通する、時点ごとに異なる交絡因子の影響を制御する。コロナ禍の影響によって、受験生及びその保護者がより自宅に近い学校を好むようになった場合、2021年以降の時間固定効果の係数が有意に負になることが考えられる。式1と異なる点として、式2ではコロナ禍において、急激に増えたオンライン説明会やオンライン授業、SNS、ICTデバイスの導入などの変数は用いていない。これは、これらの変数が通学距離の経年変化を捉える時間固定効果の係数にバイアスをもたらす可能性があるためである。

4. 分析結果

4.1. デジタル化が受験校選択に及ぼす影響の経年変化

表2は年ごとに、受験倍率を被説明変数とした受験校選択の要因に関する回帰分析の結果を表したものである。偏差値の係数は2019年から2022年まで

のすべての年において1%水準で正に有意であり、偏差値が1高いと、受験倍率が0.04-0.05ポイント増加することを示している。オンライン授業は2021年、2022年のいずれにおいても有意な係数は得られなかった。オンライン授業は9割以上の学校で導入されており、学校選択における差別化要因として機能しなかったことが考えられる。オンライン説明会を開催した学校は、コロナ禍後、最初の受験において、受験生を惹きつけ、オンライン説明会を開催していない学校に比べ、受験倍率が0.25ポイント高くなった。しかし、2022年には、オンライン説明会の開催有無に有意な係数は得られなかった。コロナとの共存が進む中で対面での説明会が再開されたことから、オンライン説明会の開催による受験生を惹きつける効果は減少したことが考えられる。SNSの有無の影響は、2019年から2021年まで非有意であり、2022年には5%水準で負に有意な結果が得られた。この背景には逆の因果の可能性がある。SNSの開設には、保護者向けと受験者向けへの情報公開の要素があり、特に後者の場合、学校の認知度の向上や、受験生を増やすことを目的としていることが考えられる。この場合、既に認知度の高い学校はSNSを開設する必要はなく、認知度の低い学校でSNSを開設することが考えられる。この場合、SNSの開設が受験倍率を下げるのではなく、倍率が低い学校でSNSが開設されているという逆の因果の可能性が高い。ICTデバイスの導入状況の影響は2019年から2021年まで、有意ではなかったものの、2022年に5%水準で正に有意な係数が得られた。これは、デジタル化の普及が、デジタル教育に対するニーズを牽引し、

表2 受験校選択の要因に関する回帰分析の結果

year	(1) 2019		(2) 2020			(3) 2021		(4) 2022		
	coeff	t-value	coeff	t-value		coeff	t-value	coeff	t-value	
(Intercept)	-0.87	-0.49	-5.11	-2.37	**	-2.43	-1.10	-4.54	-1.97	*
ICT	-0.01	-0.12	-0.17	-1.38		0.11	0.79	0.39	2.13	**
Online_Class						0.19	0.86	-0.20	-0.74	
Online_Info						0.25	1.96	0.13	1.03	*
SNS	0.02	0.18	0.06	0.41		-0.15	-1.18	-0.28	-2.28	**
Deviation	0.05	9.26	0.05	8.26	***	0.05	7.08	0.04	6.61	***
Fee	-0.05	-0.13	0.82	1.77	*	0.31	0.64	0.82	1.65	
adj-Rsq		0.463		0.426			0.384		0.387	
n		262		262			262		262	

***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1. 試験日ダミー、学校種別ダミーの係数は省略。

表 3 通学距離の分析結果

		(1)		(2)	
		coeff	t-value	coeff	t-value
(Intercept)		9.544	9.98 ***	8.876	23.67 ***
Deviation		0.012	1.91 *	0.010	1.85 *
Fee		-0.155	-0.84		
時間	2020	-0.006	-0.41	-0.007	-0.56
固定	2021	-0.023	-1.54	-0.024	-1.83 *
効果	2022	-0.029	-1.71 *	-0.033	-2.50 **
学校種別		Yes		No	
試験日ダミー		Yes		Yes	
学校固定効果		Yes		Yes	
adj-Rsq		0.99		0.99	
AIC		-277.9		-286.5	
n		84		84	

***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1

ICT デバイス導入校に対する人気を高めたことが考えられる。

4.2. コロナ禍における通学距離の変化

表 3 は式 2 に基づいた通学距離に関する固定効果モデルの推定結果を表している。(1)列は全変数を用いた推定結果であり、(2)列は AIC 最小化を基準としたステップワイズ法による変数選択を行った場合の結果である。変数選択の結果、授業料や、いくつかの試験日ダミー、学校種別ダミーが除外された。推定結果は、偏差値が向上すると、1 単位あたり平均通学距離が 1~1.2%遠くなり、コロナ禍以降の 2021 年と 2022 年には、2019 年に比べ、平均通学距離がおおよそ 2.3~3.3%短くなったことを示している。この結果は、成績が良い学生がより遠くの学校へ行こうとする傾向があることを示した Andrew et al. (2018) の結果と整合する。さらに、時間固定効果の係数は、受験生およびその保護者が、コロナ禍において、通学距離の近い学校を好むようになったことを示唆しており、我々の仮説を支持するものである。

5. 結論

本研究では、昨今の学校教育のデジタル化と、立地に関する私立中学受験者の選好が、コロナ禍を契機にどのように変化したのかを明らかにするために、

受験倍率と通学距離に関するミクロなデータを用いて定量的な分析を行った。分析の結果は、受験倍率には、全期間を通じて、偏差値が大きな影響を及ぼすことが示唆された。また、2021 年にはオンライン説明会の開催有無が、2022 年には ICT デバイスの導入状況が受験倍率に有意に正の影響を及ぼすことが示唆された。これらの結果は、受験者の選好が、経年的に変化していることを示している。特に近年は、2022 年における学校教育のデジタル化が受験者の動向に大きな影響を及ぼす可能性を示している。また、私立中学校の在校生の平均通学距離を被説明変数とした分析の結果は、コロナ禍を契機に通学距離が 2.3~3.3%短くなったことを示しており、私立中学受験者がより近くの学校を選択するようになったことを示唆している。

本研究の結果は、私立中学校のマネジメントだけでなく、私立中学校への進学を志す児童およびその保護者や、首都圏の政策意思決定者にも有益な情報を提供する。特に、私立中学校に対する選好は、行政が提供すべき教育サービスの方向性を判断する際の判断材料となることが考えられる。

但し、通学距離に関するデータは、アンケート調査の回答が得られ、欠損のない、21 校に限定されるため、サンプルの代表性の点に懸念がある。また、私立中学受験者の選好の変化は、偏差値帯によっても異なる可能性がある。しかしながら、本研究では、サンプルサイズの点から、これらを考慮した精緻な分析はできていない点に課題が残されている。

謝辞

本稿の執筆にあたり、在校生の居住地データを提供いただいた学校に深く謝意を表する。

参考文献

片岡栄美 (2009) , 格差社会と小・中学校受験, 家族社会学研究, **21** (1) , 30-44.
貞広斎子 (1999) , 定量的選好モデルを用いた親の学校選択行動分析 (II 研究報告). 日本教育行政学会

年報, **25**, 103-116.

週刊ダイヤモンド (2023) 中学受験が過去最高の受験者数、受験率、過熱の「負の象徴」とされる入試トラブルも。週刊ダイヤモンド 2023 年 4 月 15 日・22 日合併特大号。<<https://dw.diamond.ne.jp/articles/-/29895>>.

ベネッセ教育情報 (2008) 通学時間を考える その 1.

<<https://benesse.jp/juken/200806/20080624-1.html>>.

Dustan, A., & Ngo, D. K. (2018). Commuting to educational opportunity? School choice effects of mass transit expansion in Mexico City. *Economics of Education Review*, **63**, 116-133.

Gallego, F. A., & Hernando, A. (2010). School choice in Chile: Looking at the demand side. *Pontificia Universidad Catolica de Chile Documento de Trabajo*, (356).

Hailey, C. A., Murray, B., Boggs, R., Broussard, J., & Flores, M. (2023). Unmasking racial avoidance: Experimental evidence on parental school choice and public health policies during the Covid-19 pandemic. *Social Science & Medicine*, 327, 115915.

Lavy, V. (2006). From forced busing to free choice in public schools: quasi-experimental evidence of individual and general effects. NBER working paper 11969.

Martin, S., & Carlson, S. (2005), Barriers to children walking to or from school – United States, *Morbidity & Mortality Weekly Report*, 54, 949–952.

Schaller, M., & Park, J. H. (2011). The behavioral immune system (and why it matters). *Current directions in psychological science*, **20** (2), 99-103.

Valentine, G. (1997). “Oh Yes I Can.” “Oh no you can't”: Children and parents' understandings of kids' competence to negotiate public space safely. *Antipode*, **29** (1), 65-89.

東京都認証保育所における教育サービスの提供率の地域較差に関する分析

大場 亨 *

Analysis on the regional difference of the rate of educational service by the nursery schools certified by Tokyo metropolitan government

Tohru OHBA *

Many unauthorized nursery schools have begun to provide education services such as English teaching or eurhythmics. This paper aims to analyze the regional quantitative difference of the services in Tokyo. Dividing the number of nursery schools providing each education service by their total number, we calculate education service rates in every ward and city. Local Moran's *I* shows high concentration of the rates of English teaching, eurhythmics and the study for elementary school examination in the center of Tokyo, as well as that of art and Montessori education in the western suburb of Tokyo. It is required to examine not only increase in the number of nursery schools but also equality of opportunity of the education.

Keywords: 認可外保育所 (unauthorized nursery school), 英語教育 (English teaching), リトミック (eurhythmics), モンテッソーリ教育 (Montessori education), 空間自己相関 (spatial autocorrelation)

1. はじめに

近年、保育所の数が増加した結果、児童の入所数が定員数に満たない保育所が少なからず現れている。この状況の中、入所数を確保するために、英語教育等の教育サービスを多くの認可外保育所が提供し始めている。

保育所であっても、幼稚園のように教育サービスの提供を望む保護者がいる。たとえば、都区内の認可外保育所を取材した週刊東洋経済(2010)は、「幼稚園のように教育もしっかりしてほしい」との保護者の声や、ヨコミネ式教育法を導入した保育園に「入園するため、他県から越してきた家族もいる」との保育所を紹介している。

認可外保育所とは、認可保育所以外の保育施設である。認可外保育所への入所には、保育の必要性を要しない。認可外保育所と利用者は、市区町村を介さずに直接に利用契約をする。認可外保育所の利用者負担額は、事業者によって決められ、保育時間に応じた定額制であることが多い。

かつて待機児童が多かった頃より、認可外保育所の利用者負担額（保育料）と認可保育所の利用者負担額との差額に対して、国や地方公共団体は補助金を支給している。近年多くなっている認可外保育所の教育サービスは、オプション料金をとらずに、利用者負担額の基本料金の中で提供されている。したがって、認可保育所の利用者負担額とほぼ同等の負担で、教育サービスを含む保育サービスを利用者は享受することができる。

認可外保育所の一つである東京都認証保育所において、教育サービスの開始が特に多い。東京都認証保育所の多くは、所在地の市区町村民のみでなく、東京都民の利用者を受け入れているので、東京都民はほぼ自由に東京都認証保育所を選択することができる。とはいえ、自宅、勤務先または通勤の経由地の近くでなければ、たとえ魅力的な教育サービスが基本料金の中で提供されているとしても、その保育所を多くの都民は利用しづらいであろう。

そこで、基本料金で教育サービスを提供する東京

* 正会員 株式会社パスコ (G-Space DX Promotion Department, Pasco Corporation)

〒153-0064 東京都目黒区下目黒 1-7-1 E-mail: taobro6361@pasco.co.jp

都認証保育所の地域的な偏りを本稿は分析する。この結果は、教育機会の均等や利用者負担額の公平性を検討するための資料になると考える。なお、管見の限り、教育サービスを提供する保育所の偏在について既往の研究はない。

2. 分析の方法

多くの東京都認証保育所が基本料金の中で提供している教育サービス、すなわち、月2回以上の英語、リトミック、絵画・造形、小学校受験のための教育、モンテッソーリの各教育サービスについて分析する。リトミックとは、音楽の能力のみでなく、音楽を通じて自発性や集中力等も培う教育である。また、モンテッソーリ教育とは、与えられた学習環境の中で、児童が自発的に自己の構築に取り組むようにする教育である。

それぞれの東京都認証保育所の Web サイトや入園案内、保育所の検索サイトから、各保育所による各教育サービスの提供の有無に関する情報を取得した。また、2021年4月現在の（公財）東京都福祉保健財団の Web サイト「とうきょう福祉ナビゲーション」<<https://www.fukunavi.or.jp/fukunavi/>>から、各保育所の立地点の日本測地系の緯度・経度の情報を取得した。これを世界測地系の平面直角座標第9系のXY座標に投影変換した。

教育サービスを提供する東京都認証保育所の数は、その総数に影響される。そこで、ある市区町村内で各教育サービスを提供している東京都認証保育所の数を、同じ市区町村内の東京都認証保育所の総数

で除して、その市区町村内の各教育サービスの提供率とする。この提供率を分析する。

島嶼部を除く各市区町村内の東京都認証保育所の度数の分布を表1に示す。この度数が多いほど、算出する各教育サービスの市区町村別の提供率は安定する。しかし、度数の多い市区町村のみを提供率の分析対象とすると、分析対象とする市町村のみでなく、区も少なくなる。そこで、東京都認証保育所の度数が7以上である市区町村を分析対象とする。これにより、分析対象とするのは、文京区と北区を除く21の区、武蔵野、三鷹、府中、調布、小平、日野、多摩、西東京の各市である。

各教育サービスの局所的な集積性を確認するため、空間的自己相関の代表的な指標である local Moran's *I* 統計量を、教育サービス毎に次式により算出する。

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \tag{1}$$

ここで、*n* は市区町村数、*x_i* と *x_j* は市区町村 *i* と市区町村 *j* の教育サービスの提供率、 $\bar{x}$ はその平均値、*w_{ij}* は市区町村 *i* と市区町村 *j* との空間的近接性を示す空間重み行列の要素である。空間重み行列の要素は、市区町村間 *i* と境界線を共有する一次連結の市区町村 *j* に 1、それ以外の市区町村に 0 を与える重み係数とした。

空間分析ソフトウェア GeoDa (Anselin et al, 2006) を分析に用いる。試行回数を 99999 回とするモンテカルロ・シミュレーションで求めた疑似 *p* 値によって、仮説を検定する。

local Moran's *I* 統計量の値が正であるときは、ある市区町村の教育サービスの提供率が周辺の市区町村のそれと類似していることを、local Moran's *I* 統計量の値が負であるときは、類似していないことを示す。さらに、教育サービスの提供率が平均よりも大きく、周辺と類似している High-High (HH)、平均よりも小さく、周辺と類似している Low-Low (LL)、平均よりも小さく、周辺と相違している Low-High (LH)、平均よりも大きく、周辺と相違している High-Low (HL) に市区町村を分けることができる。

表1 島嶼部を除く市区町村内の認証保育所数		
市区町村内の 認証保育所数	都内の区 の度数	都内の市町村 の度数
0	0	5
1～3	2	11
4～6	0	6
7～9	5	1
10～19	11	7
20～29	1	0
30～39	2	0
40 超	2	0
計	23	30

3. 分析結果

教育サービスの別に、HH, LL, LH, HL の市区町村を図 1 に示す。local Moran's I 統計量が有意水準 5% で有意である市区町村のみ図 1 に示した。英語教育の提供率について千代田区と江東区は LH である。これは、英語教育の千代田区の提供率(0.20)や江東区の提供率(0.34)が比較的低いものの、両区に隣接する中央区の提供率(0.75)や港区の提供率(0.74)が高いことによる。多くの東京都認証保育所は利用者を所在地の市区町村民に限っていないから、千代田

区を含む中央区、港区周辺の都心地域で、英語教育の提供を受けやすいと考えられる。

リトミック教育の提供率について、千代田区、中央区、江東区は HH である。これらの区のリトミック教育の提供率は、隣接区とともに高い。また、小学校受験教育の提供率についても、千代田区は HL である。つまり、都心の千代田区では、リトミック教育と小学校受験教育の提供率がともに高い。

一方、絵画・造形教育の提供率について三鷹市が HH、モンテッソーリ教育の提供率について小平市が

英語教育



リトミック教育



絵画・造形



小学校受験



モンテッソーリ教育

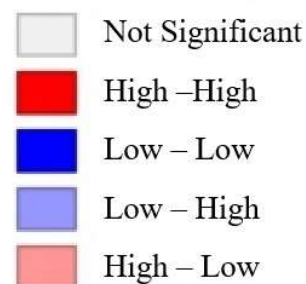
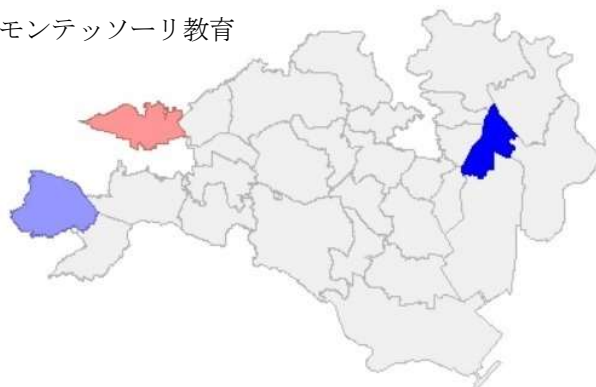


図 1 教育サービスの提供率に関する local Moran's I 統計量による市区町村の地区類型

HL である。このように、東京都の市部において、絵画・造形教育とモンテッソーリ教育の提供率の高い地域がある。

4. 考察

local Moran's I 統計量による分析の結果、東京都認証保育所が提供する教育サービスに地域的な偏りが確認された。英語、リトミック、小学校受験教育の提供する保育所は都心に集積し、絵画・造形教育とモンテッソーリ教育を提供する保育所は郊外の一部に集積している。

英語、リトミック、小学校受験の教育サービスの提供を基本保育の中で受けることが容易であるのは、都心に暮らしているか、都心を勤務先または通勤の経由地とする保護者の児童であろう。それ以外の児童が保育所以外場でこれらの教育サービスを受けることは可能ではあっても、親子でともに過ごす時間が減少する恐れがある。

保育所の数の充足が進んだこと、新型コロナウイルスの感染拡大で出生数が減少していることを考えると、教育サービスの提供による保育所の入所児の獲得競争は今後も続くであろう。保育の量の充足ばかりでなく、教育機会の均等にも関心を向けるべきときが来たと考える。

市区町村別の保育所の教育サービスの提供率に空間自己相関があることを本稿は明らかにしたが、その偏りの原因までは明らかにしていない。原因の追究は今後の課題として残されている。

東京都認証保育所の数が少ない市区町村があった。数施設の保育所が教育サービスの提供を開始するだけで、local Moran's I 統計量が大きく変動する少数問題が、このような市区町村にある。分析結果の安定性に留意が必要である。

また、本稿の市区町村毎の集計値の分析には、可変地区単位問題がある。すなわち、集計に用いる空間単位の形状や大きさの違いによって、分析結果が異なる。この点に配慮した上での、保育所の教育サービスの偏りに関する研究が課題として残されている。

参考文献

- Anselin, L., Syabri, I. and Kho, Y. (2006) GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, **38**(1), 5-22.
- 週刊東洋経済(2010) 施設で保育料に大きな差, 教育が売りの認可外も登場. 「週刊東洋経済」, **6296** (2010-11-27), 54-55.

Oral Presentation in GISA

空間解析手法 1

Chair: Daisuke Murakami (Institute of Statistical Mathematics)

Sat. Oct 28, 2023 10:40 AM - 12:00 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F2-01] 1kmメッシュ別滞在人口データを用いた時系列パターン分類手法の開発

*Chenan Huang¹, Narumasa Tsutsumida¹ (1. Saitama University)

10:40 AM - 11:00 AM

[F2-02] 地域メッシュ統計データから千葉県市町村の人口密度の度数分布を作成する際に最適なメッシュ次数

*Koko Yoshida¹, Akihiro Teraki¹, Hiroyuki Usui² (1. Chiba Institute of Technology , 2. The University of Tokyo)

11:00 AM - 11:20 AM

[F2-03] 分位点毎の全体傾向から乖離した局所的地域抽出手法の提案

*Kenya Aoki¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku University)

11:20 AM - 11:40 AM

[F2-04] Group Fused MCPに基づく組成データの異質地域検出手法の提案

*Masato Ishikawa¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku Univ.)

11:40 AM - 12:00 PM

1 km メッシュ別滞在人口データを用いた時系列パターン分類手法の開発

黄晨安*・堤田成政**

Development of Time-Series Pattern Clustering Method Using 1 km Grid Population Data

Huang Chenan*, Narumasa Tsutsumida**

Abstract The COVID-19 pandemic has constrained urban activities. Clustering approaches offer insights into shifts in population distribution patterns during the pandemic. However, using existing clustering algorithms, such as Dynamic Time Warping (DTW) or simple k -medoids, on time-series data can lead to local optimal solutions, highlighting the need for enhanced accuracy. In this study, we introduce a k -medoids method that integrates DTW, which measures the similarity of time-series data, with the Whale Optimization Algorithm (WOA) to search for the global optimal solution. As a case study, we employed the WOA-DTW- k Medoids algorithm on monthly 1 km grid population data from the Greater Tokyo Area (encompassing Tokyo, Kanagawa, Saitama, and Chiba Prefectures) spanning 2019 to 2021. The results demonstrated superior accuracy compared to other methods, particularly in terms of distinct cluster aggregation. Our approach effectively addresses the local optimization challenge inherent in DTW- k Medoids.

Keywords: COVID-19, Dynamic Time Warping, Whale Optimization Algorithm, k -medoids

1. はじめに

2019年にCOVID-19が確認されて以降、コロナに伴う行動制限が人々の日常に大きく影響を及ぼした。特に、日本では2020年4月から緊急事態宣言が発令され、行動自粛が誘導されたため、人々の移動が抑制されたパターンに変化した。現在、ワクチン接種者の増加につれて、人々はCOVID-19と共存するポストコロナ社会に適応するように見えるが、長期的に人々にソーシャルディスタンスを維持させ、人口集中を避ける都市利用が進むと考えられる。そこで、ポストコロナ社会の都市利用のあり方を考えるためには、コロナ禍における移動パターンの変化を広域的かつ長期的に把握する必要がある。

移動パターンの変化のような時系列データを定量化する場合、特徴を類似化できるクラスタリング

手法を用いることが考えられる。この中で、Dynamic Time Warping (DTW) を用いた k -medoids (DTW- k Medoids) は異なる時系列データ間の類似度を算出できるため、広く用いられてきた。例えば、Chen et al. (2017) は、DTW- k Medoids により一週間の建物別の密度データをクラスタリングすることで、都市機能エリアを分類した。Nakagawa et al. (2019) は、DTW- k Medoids を用いて一ヶ月間の株価の日変動パターンを分析し、株価の変動を予測した。

DTW- k Medoids は、時系列データの変動や特性をより詳細に捉えることができるため、時間平均データに適用した k -medoids より優れていると考えられている。しかしながら、DTW- k Medoids は k -means のような中心点ベースのクラスタリングアルゴリズム

* 学生会員 黄晨安 埼玉大学大学院理工学研究科 (Saitama University)

〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 E-Mail : huang.c.462@ms.saitama-u.ac.jp

** 正会員 堤田成政 埼玉大学大学院理工学研究科 (Saitama University)

ムであり、初期中心点の選択に依存するため、局所最適解に陥りやすいという課題がある(Sinaga and Yang, 2020). この解決策の一つとして、生物の群れの行動を模倣した最適化アルゴリズムの導入が考えられる(Yang et al., 2018). このような最適化アルゴリズムは、優れた探索性能により、初期値依存を克服し、広範な探索空間での大域的最適解を探索することができる. 例えば、Yang et al. (2018) は Artificial Bee Colony (ABC) アルゴリズムを DTW-kMedoids に導入し、大域的に最適な初期中心点を探索できると報告している. しかし、ABC アルゴリズムは多数のパラメータの設定が必要であり、これが問題の複雑化を招く可能性がある.

そこで、本研究では、これまでに検討されていない新たな手法として、鯨の最適化行動を模倣した Whale Optimization Algorithm (WOA) を DTW-kMedoids に導入した WOA-DTW-kMedoids を提案する. WOA は他の最適化アルゴリズムに比べて、パラメータが少なく、調整が容易であるという利点がある. 本稿では、 k -medoids, DTW-kMedoids との性能比較を踏まえ、ケーススタディとして、月別に整備された 1 km メッシュ別滞在人口データに WOA-DTW-kMedoids を適用することで、2019 年から 2021 年におけるコロナ禍時期の人々の移動パターンを可視化する.

2. 研究手法

DTW-kMedoids が局所最適解に陥りやすいという課題を克服するため、本研究では、WOA アルゴリズムと DTW-kMedoids を組み合わせた WOA-DTW-kMedoids を提案する. 以降、それぞれの手法を説明する.

2.1. Dynamic Time Warping (DTW)

DTW は Sakoe and Chiba (1978) によって提案された時系列データ間の類似度算出手法である. DTW ではデータの各サンプル点が対多で対応させることができるため、異なる長さの時系列データの類似度を算出することができる (図 1).

例として、図 1 に示すような時系列 $X =$

$(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ と $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)$ の DTW 距離を算出する方法を示す. ここで時系列 X , Y の要素数を表す n, m は異なる整数であってもよい.

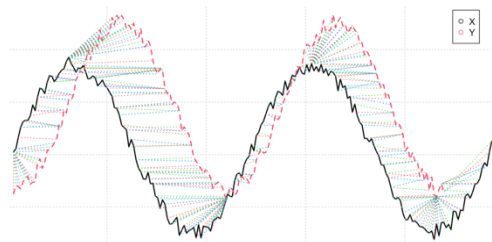


図 1. 異なるサンプル数を有する時系列データ X, Y に対する Dynamic Time Warping(DTW)適用の概念図

まず、式(1)より、 x_i, y_j 間の距離 $d(x_i, y_j)$ を $n \times m$ の距離行列の要素 $Mat(i, j)$ とする:

$$\begin{cases} Mat(i, j) = d(x_i, y_j) \\ d(x_i, y_j) = (x_i - y_j)^2 \end{cases} \quad (1)$$

次に、式(2)により、距離行列から動的計画法によりて最小経路を算出し、DTW 距離とする.

$$D_{DTW} = Mat(i, j) + \min \begin{cases} Mat_{DTW}(i-1, j) \\ Mat_{DTW}(i, j-1) \\ Mat_{DTW}(i-1, j-1) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 D_{DTW} は X の先頭から i 番目までの要素と、 Y の先頭から j 番目までの要素の DTW 距離を示す.

なお、DTW の精度と実行時間を向上させるために、ウィンドウサイズを追加する事が可能である. ウィンドウサイズとは、 x_i が Y の要素或いは y_j が X の要素に対応可能な最大数である. 例えば、ウィンドウサイズを w とした場合、 x_i は $[y_{i-w}, y_{i+w}]$ 範囲のデータのみと対応できる.

2.2. DTW-kMedoids

k -medoids はクラスタ内のデータ点の中から最も代表的な点 (medoid) をクラスタの中心として選択する. DTW と共に、データの実際の構造に基づくという性質を有しているため、両者はよく組み合わせて利用される. 具体的な手順は次の通りである:

ステップ1：データセットから k 個のデータを選び、初期のクラスタ中心と定義する。

ステップ2：各データと k 個のクラスタ中心とのDTW 距離を計算し、各データを最も近いクラスタ中心が所属するクラスタに割り当てる。

ステップ3：各クラスタ内で DTW 距離の合計が最小となるデータを新たなクラスタ中心として更新する。

ステップ4：クラスタ中心が更新されなくなるまで、或いは設定されたイテレーション数に達するまで、ステップ2と3を反復的に実行する。

2.3. Whale Optimization Algorithm (WOA)

WOA は Mirjalili and Lewis (2016) によって提案された数値最適化手法である。「バブルネット・フィーディング」という鯨の群れが獲物を狩る行動パターンを模倣しており、鯨群が海底から水面へと螺旋状に上昇しながら泡を吹いて獲物を中心に集め、捕食する行動パターンである。WOA では二つの行動により、バブルネット・フィーディングを表現する。

2.3.1. 獲物を囲む行動

事前定義される反復数を t_{max} とし、 L 頭の鯨のうち、現時点 t で獲物の位置にいる鯨を $\vec{X}^*(t)$ とする。別のある鯨は獲物に向けて位置を更新する。

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (3-1)$$

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (3-2)$$

ここで、 $\vec{X}(t)$ は現時点 t でのある鯨の位置であり、 $\vec{D}$ はその鯨と獲物の位置にいる鯨との距離である。 $\vec{A}$ および $\vec{C}$ は係数ベクトルであり、次のように定義される：

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (4-1)$$

$$\vec{a} = 2 - 2\left(\frac{t}{t_{max}}\right) \quad (4-2)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4-3)$$

ここで、 $\vec{r}$ は $[0,1]$ 範囲のランダムベクトルである。式(4-1)で $\vec{A}$ の範囲は $\vec{a}$ によって決定される。 $\vec{a}$ は 2 から 0 まで線形に減少するため、 $\vec{A}$ の範囲は $[-2,2]$ となる。WOA では、 $\vec{A}$ の範囲が $[-1,1]$ の場合のみ、獲物を包囲する行動を行う。これは、鯨が獲物に十分に近づいた時にのみ捕食行動を行うという生態学的観察に対応している。さらに、ランダム

ベクトル $\vec{r}$ を用いることにより、探索空間内で鯨と獲物の間の任意位置に到達することが可能になる。

2.3.2. 螺旋状に移動する行動

鯨が獲物を捕らえるために螺旋状に上昇する行動を模擬するため、式を以下に示す：

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}^T \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (5-1)$$

$$\vec{D}^T = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (5-2)$$

$\vec{D}^T$ は鯨と獲物との距離である。 b は定数であり、対数螺旋形状を定義する。 l は $[-1,1]$ の範囲でランダムに選択される。

なお、鯨は獲物を狩る場合、螺旋状に移動しながら獲物を囲むため、上記の二つの行動が行われる。そのため、ランダムな確率 p を用いて式(6)のように実行される。

$$\begin{cases} \vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{X}(t+1) = \vec{D}^T \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

2.3.3. 獲物を探す行動

鯨の行動は常に獲物に向かうだけではなく、探索活動も含んでいる。WOA で $1 < |\vec{A}| < 2$ の場合、鯨が獲物をランダムに探索する行動を模擬する。この時、鯨 $\vec{X}(t)$ は最適な位置にいる鯨 $\vec{X}^*(t)$ から離れ、より広範な探索を行う。

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (7-1)$$

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}(t)| \quad (7-2)$$

ここで、 $\vec{X}_{rand}(t)$ は鯨群からランダムに選択された現時点 t の鯨の位置を表す。

WOA はバブルネット・フィーディングを通じて対象範囲を詳細に調査し、かつ獲物を探す行動を通じて探索空間全体を探索する。そのため、最適化問題において大域的な最適解を探索でき、優れたパフォーマンスを発揮すると報告されている (Nasiri and Khiyabani, 2018)。

2.4. WOA-DTW-kMedoids (提案手法)

既存研究では、WOA は Nasiri and Khiyabani (2018) によって k -means に適用され、初期中心点の最適化を通じてクラスタリングの精度を向上させた。本研究で提案する手法は、WOA の探索能力を活用し、DTW-kMedoids が局所最適解に陥りやすい課題

に対処することで、時系列データに対するクラスタリングの精度向上を目指す。具体的な手順は図2の通りである。

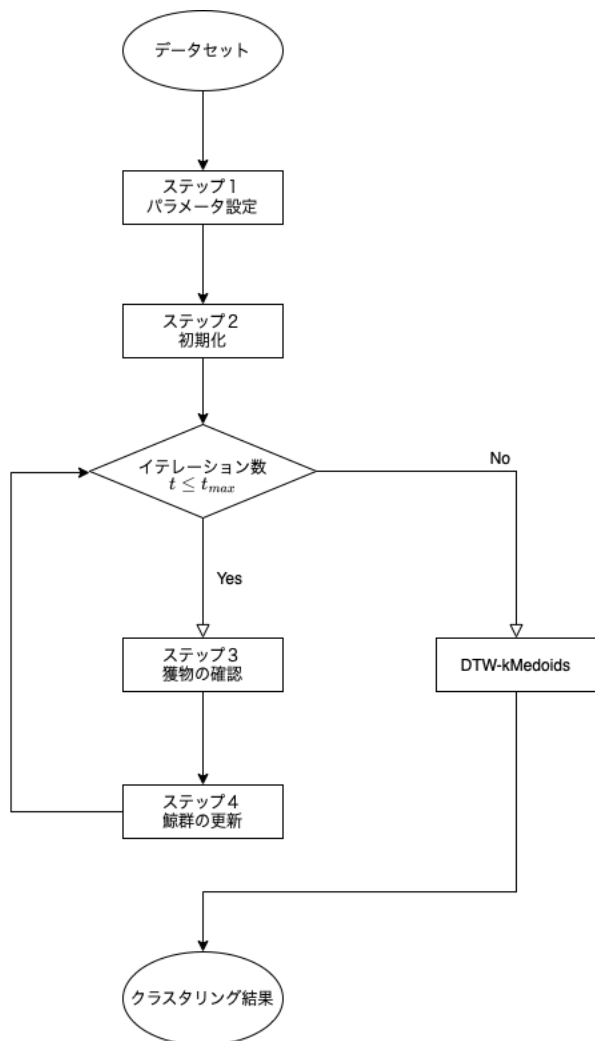


図2. WOA-DTW-kMedoids のフローチャート

ステップ1：パラメータ設定

事前パラメータとなる鯨の総数 L ，クラスタ数 k ，各クラスタの中心間の最小 DTW 距離，各クラスタ内の最小データ数を設定する。

ステップ2：初期化

初期状態 ($t = 0$) では，ある鯨 $\vec{X}(0)$ が k 個のランダムなクラスタ中心 $(c_1, c_2, \dots, c_k)$ に位置している (式8)。

$$\vec{X}(0) = (c_1, c_2, \dots, c_k) \quad (8)$$

鯨の総数が L のため， L 組の異なる初期中心点の組み合わせを持つことになる。

ステップ3：獲物の確認

それぞれの鯨に対して DTW-kMedoids を一度実行し，最も大きなシルエット係数 (Silhouette Index) の値を示した鯨の位置 (初期中心点の組み合わせ， $\vec{X}^*$) を獲物の位置とする。シルエット係数 $s(i)$ は，各データが自身の所属するクラスタと他のクラスタとの類似性を数値化する手法 (式9) であり，クラスタリング結果の精度評価でよく使用されている。

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (9)$$

ここで， $a(i)$ はデータ i と同じクラスタ内の他のデータまでの平均距離であり， $b(i)$ はデータ i と最も近い別のクラスタのすべてのデータとの平均距離である。 $s(i)$ の範囲は $[-1, 1]$ であり，値が1に近づくほどクラスタ内のデータ間の距離が短く，クラスタリングの精度が高まると解釈される。

ステップ4：鯨群の更新

WOA を実行し，バブルネット・フィーディングと獲物を探す行動を通じて，それぞれの鯨の位置を更新する。

ステップ5：DTW-kMedoids の実行

ステップ3とステップ4を t_{max} 回繰り返し，最も大きなシルエット係数の値を示した鯨の位置を最適な初期中心点の組み合わせとする。これを用いて再度 DTW-kMedoids を実行し，クラスタリングの結果を得る。

WOA-DTW-kMedoids は，大域的に最適な初期中心点を探索するため，DTW-kMedoids での局所最適解に陥る課題に対処できると考えられる。

3. 滞在人口データへの適用

国土交通省が提供する一都三県（東京都，神奈川県，埼玉県，千葉県）の 1 km メッシュ別の滞在人口データに対して k -medoids，DTW-kMedoids，WOA-DTW-kMedoids を適用し，シルエット係数により精度を検証した。なお，パラメータはクラスタ数 k を 3，WOA-DTW-kMedoids の最小クラスタ中心 DTW 距離を 100，各クラスタのデータ数を 1000，DTW-kMedoids のパラメータであるウィンドウサイズを 1，WOA-DTW-kMedoids の鯨の総数 L を 30 とした。

3.1. データ

1 km メッシュ別滞在人口データには、4 つの時間帯（平日昼間・平日深夜・休日昼間・休日深夜）の月平均値が 1 km メッシュごとに格納されている。昼間は 11:00~14:00、深夜は 1:00~4:00 と定義されている。本稿では深夜及び休日の流動人口は特定の場所（歓楽街、繁華街）を除いて変化が限られると想定し、平日昼間のみを検討した。対象期間は、2019 年 1 月から 2021 年 12 月までとし、三つの期間を設定する：

- 1) プレコロナ期（2019 年 1 月~2019 年 12 月）
- 2) コロナ禍前期（2020 年 1 月~2020 年 12 月）
- 3) コロナ禍後期（2021 年 1 月~2021 年 12 月）

なお、コロナ禍に伴う人々の移動パターンの変化を調査するために、各メッシュにおけるプレコロナ期の 12 ヶ月平均に対し、コロナ禍前後期における月々の滞在人口変化値を（式 10）にて算出する。

$$\begin{aligned} \text{滞在人口変化値} &= \text{コロナ前・後期滞在人口データ} \\ &\quad - \text{プレコロナ期滞在人口データの 12 ヶ月平均} \quad (10) \end{aligned}$$

即ち、各メッシュに対し、コロナ禍前期とコロナ禍後期の人々の移動パターンの変化は、それぞれ 12 個のデータ数を持つ時系列データとして表され、各メッシュは一ヶ月の滞在人口変化値を示している。

なお、本分析では、2 つの時期のデータを 1 つのデータセットとし、同時にクラスタリングした。これにより、別の時期のデータであっても統一的なクラスタリング基準が設定され、全体的な傾向やパターンをより容易に観察できるようになり、クラスタリングの一貫性が保たれると期待した。

3.2. 結果

一都三県における人々の移動パターンの変化を、*k-medoids*, *DTW-kMedoids*, *WOA-DTW-kMedoids* により、クラスタリングを行った。表 1 に示すように、*WOA-DTW-kMedoids* のシルエット係数の値は最も高かった。これにより *WOA-DTW-kMedoids* のクラスタリング精度が他に比べ優れていることが示唆される。

図 3 に *WOA-DTW-kMedoids* によるクラスタリング結果と空間的な分布を示す。プレコロナ期と比較

表 1 異なるクラスタリングアルゴリズム
シルエット係数の比較(k = 3)

Algorithm	<i>k-medoids</i>	<i>DTW-kMedoids</i>	<i>WOA-DTW-kMedoids</i>
Silhouette Index	0.53	0.54	0.69

したコロナ禍前期の傾向を図 3(a) に示す。Cluster 1 は主に東京都心部近郊に分布している。2020 年 3 月から 5 月にかけて滞在人口は増加し、その後は減少して 2020 年 7 月からは徐々に安定したパターンを示した。全体的には、2019 年と比較して滞在人口は増加している。一方、Cluster 2 は東京都心部に位置しており、2020 年 3 月から 5 月にかけて滞在人口が大幅に減少し、その後は少しずつ回復したものの、2019 年と比べると滞在人口は減少している。都心部近郊が主に住宅地であることを考慮すると、コロナ禍の影響で、特に緊急事態宣言時期（2020 年 3 月 ~ 5 月）に、人々が人口が密集する東京都心部（Cluster 2）を避け、住宅地周辺（Cluster 1）での活動を選択したことが示唆される。さらに、Cluster 3 は東京の遠郊に分布しており、2019 年と比較して滞在人口に大きな変化は見られない。

プレコロナ期と比較したコロナ禍後期の傾向を図 3(b) に示す。Cluster 1 と Cluster 2 のデータ数が増加し、東京都心部や近郊から段階的に拡散している傾向がみられる。これは、コロナ禍が日常に浸透し、長期的に人々の移動へと変化をもたらしていると考えられる。

4. おわりに

本研究では、時系列データ向けの新たなクラスタリング手法、*WOA-DTW-kMedoids* を提案した。既存の *DTW-kMedoids* に比べて初期値の大域的最適解を探索することで精度が向上した。また、*WOA-DTW-kMedoids* を滞在人口データに適用し、コロナ禍期の平日昼間の一都三県における人々の移動パターンの変化を示した。コロナ禍の影響は時間とともに減少しているものの、我々の日常生活に徐々に浸透し、都市の移動パターンを緩やかに変えていると考えられる。これは、コロナ禍と共存するポストコロナ時代への移行を示唆していると考ええる。

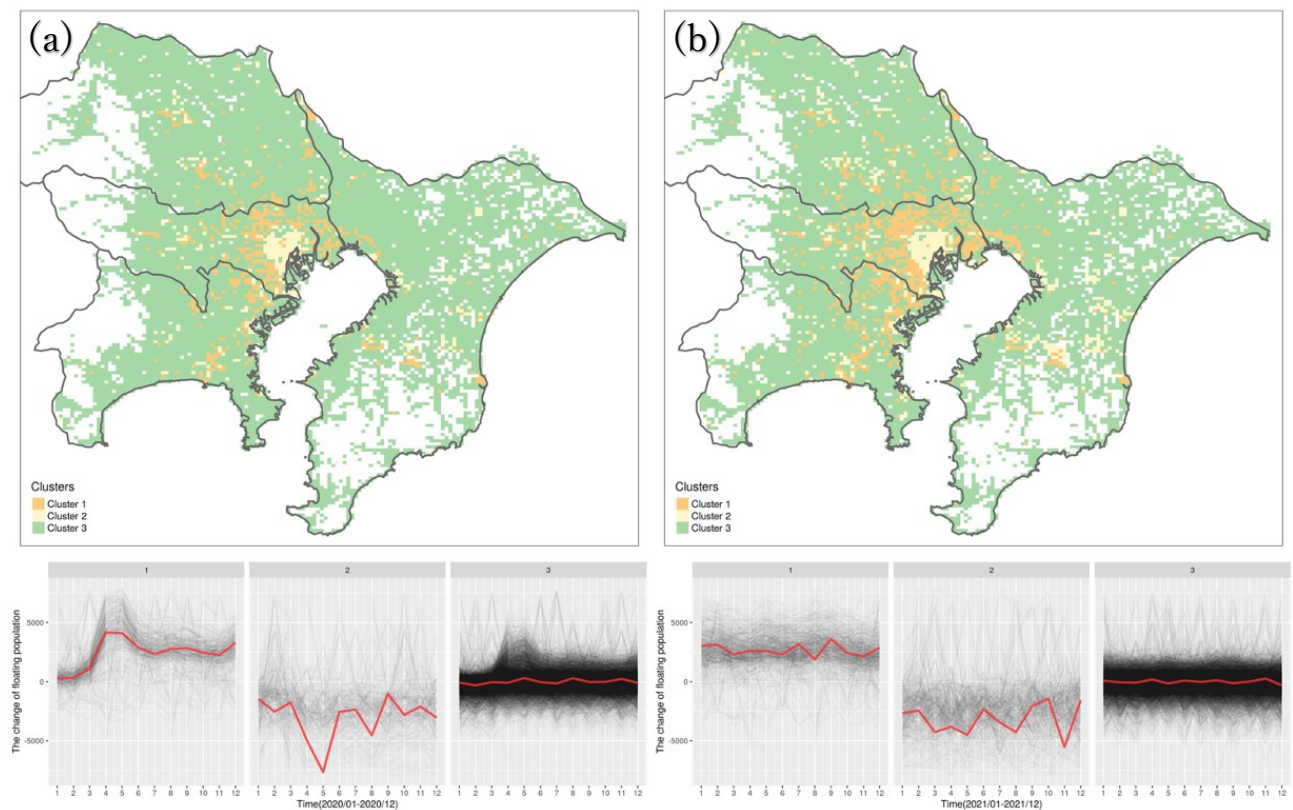


図4. 一都三県における人々の移動パターンの変化

(a): コロナ禍前期 (2020 年) の変化 ; (b): コロナ禍後期 (2021 年) の変化
 黒線 : 各メッシュの毎月の滞在人口変化値 ; 赤線 : 各クラスタの中心値

参考文献

- Chen Y, Liu X, Li X, et al. Delineating urban functional areas with building-level social media data: A dynamic time warping (DTW) distance based k-medoids method. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 160: 48-60.
- Nakagawa K, Imamura M, Yoshida K. Stock price prediction using k-medoids clustering with indexing dynamic time warping. *Electronics and Communications in Japan*, 2019, 102(2): 3-8.
- Yang A, Zhang H, Stewart R A, et al. Water end use clustering using hybrid pattern recognition techniques—Artificial Bee Colony, Dynamic Time Warping and K-Medoids clustering. *Int. J. Mach. Learn. Comput*, 2018, 8: 483-487.
- Sakoe H, Chiba S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 1978, 26(1): 43-49.

- Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 2016, 95: 51-67.
- Nasiri J, Khiyabani F M. A whale optimization algorithm (WOA) approach for clustering. *Cogent Mathematics & Statistics*, 2018, 5(1): 1483565.
- Sinaga K P, Yang M S. Unsupervised K-means clustering algorithm. *IEEE access*, 2020, 8: 80716-80727.
- 国土交通省, “全国の人流オープンデータ”, <https://www.geospa.al.jp/ckan/dataset/mlit-1km-fromto> を加工して作成.

基礎自治体の人口密度分布を概観する際に最適なメッシュ次数 — 千葉県における 250m, 500m, 1km メッシュ人口データを対象に —

吉田光杏*・寺木彰浩**・薄井宏行***

Appropriate Grid Square for aggregating population density to make its histogram

- Case study on 250 meters, 500 meters and 1 km Grid Square population data for Chiba prefecture -

Koko Yoshida*, Akihiro Teraki**, Hiroyuki Usui***

Population density distribution is essential for understanding its mode and range and their comparison among different administrative districts (e.g. cities). Making a series of histograms is the first step for doing so, however, urban planners and practitioners face the same following question: what is the appropriate spatial unit (e.g., 250 meters, 500 meters and 1km Grid Square) for aggregating population density? To this end, we develop a method for determining the appropriate Grid Square size for making histograms of population density based on computing the Akaike Information Criterion (AIC). Results of empirical case study in Chiba prefecture show that histograms based on 1km Grid Square is the best model of population density distribution.

Keywords: メッシュデータ (Grid Square Statistics), 人口密度 (population density), AIC (Akaike Information Criterion), 千葉県 (chiba prefecture),

1. はじめに

1.1. 背景

国勢調査の GIS データは充実しており 4 種類 (小地域と次数が異なる 3 種の地域メッシュ統計データ, 以下「次数」を地域メッシュ統計データの次数に用いる。) が公開されている。しかし, どれを選べばよいか判断に窮する。教科書や手引き, 学術論文などにも参考になるものはない。GIS を道具として使わなければいけない専門家や GIS の初学者が最初に国勢調査の GIS データに触れるときの拠り所は管見では残念ながら見あたらない。

1.2. 研究の目的

本研究では, 地域全体を概観する方法として, 人口密度の度数分布に基づきメッシュを類型化して主題図を作成することを想定し, 最適なメッシュ次数選択方法を開発し, 千葉県を対象に実証分析を行う。本稿は, GIS に十分に精通しているわけではない者が直面するであろう「国勢調査の GIS データ選択の問題」に対して, 最適なメシ

ュ次数の選択方法を提供する。具体例として都市計画の実務者が所管する地域全体の人口分布を概観する場合について検討する。

まず次章では既存の関連研究などについてまとめる。第 3 章では理論的検討として本稿で取りあげる統計学的指標とその計算方法について検討する。次数の異なる複数の地域メッシュ統計データから使用するものを選択するための指標として AIC (Akaike Information Criterion : 赤池情報量基準) を用いる。第 4 章ではケーススタディとして千葉県の市町村を取りあげる。その結果, AIC による精緻な議論のかわりに DID 面積率が簡便な指標となり得る可能性が示された。最後に第 5 章において, 本稿で得られた知見を簡単にまとめ, 今後の課題について述べる。

2. 既存の関連研究と本稿の独自性

2.1. 地域メッシュ統計について

本稿は人口に関する地域メッシュ統計を取りあげる。日本を緯度・経度に基づいてほぼ同じ形状

*学生会員 千葉工業大学創造工学部 (Chiba Institute of Technology)

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1 E-mail : s20b2119vg@s.chibakoudai.jp

**正会員 千葉工業大学創造工学部 (Chiba Institute of Technology)

*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (the University of Tokyo)

に分け、それぞれについて国勢調査の人口を編成したものである³⁾。基準地域メッシュ（第3次地域区画、以降「3次メッシュ」または「3次」他の次数についても同じ）は東西方向・南北方向とも概ね1kmのほぼ正方形で、4次はそれを東西方向・南北方向にそれぞれ2分割、5次は更に2分割ずつした区画である。1960年代から区画が固定されている、市町村程度の広さを扱う際は同じ次数であれば実用上同じ形状とみなすことができるなどの特徴があり、広く活用されている²³⁾。

2.2. 可変単位地区問題

地域全体の人口分布を概観する際のメッシュ次数選択の問題は「可変地区単位問題」（伝統的には「集計単位問題」⁴⁾）の一例である。小地域や本稿で取りあげる3種のメッシュのように、対象とする地域が同じでも集計する単位が異なると、データの視覚的な印象や分析結果が異なってしまう現象である^{5),6),7),8)}。既往研究として、1kmメッシュと500mメッシュのサイズの違いと任意の不定形領域における人口推定誤差及び施設への平均距離の関係を明らかにしたもの⁹⁾、空間相関分析により空間変動の周期とメッシュサイズの関係を検討したもの¹⁰⁾、土地利用の同質性や都市認識に関するアンケート調査から算出した因子スコアを例に、連続量で表される変数の最適メッシュサイズをAICに基づいて明らかにしたもの^{11),12)}、そして行政区域による集計単位の違いと道路距離計測の誤差の関係を明らかにしたもの¹³⁾がある。

ところが、本稿のように地域全体の人口密度分布を概観する際に次数の異なる複数の地域メッシュ統計データからAICを用いて最も良いメッシュ次数を選択することを試みた既往研究は存在しない。

3. 理論的検討

3.1. 次数に用いる指標

本稿ではデータ数や母数が著しく異なる複数の確率モデル（以下「モデル」）から人口密度分布に最も良く当てはまるものを選択する。坂元ら¹⁴⁾を踏襲し、最尤法に基づきモデルを評価する指標

であるAICを用いる。AICは期待平均対数尤度の不偏推定量の近似値に基づく規準である。その値は最大対数尤度および自由パラメータ数で与えられる。通常、同一の確率分布に従うモデルの選択を行う場合は共通項を無視した簡便な式を用いて値を計算する。最も小さいAICを与えるモデルをMAICE（Minimum AIC Estimation：最小AIC推定値）と呼び、最適であると考えられる。

3.2. モデルの定式化

本稿の検討対象は、対象となる市町村を過不足なく被覆する3次メッシュとそれらを分割して得られる4次～5次メッシュの人口分布である（図-1）。

議論が不必要に煩雑になることを避けて見通しを良くするために以下の仮定を置く。

[仮定1]データがないメッシュの人口を0人とする。

[仮定2]同じ次数のメッシュの面積の違いは、対象地域内では実用上無視しうるほど小さい。

[仮定3]水面などの非可住地が含まれていても、人口密度の計算には当該メッシュ全体の面積を用いる。

また定式化に用いる記号を以下のように定義する。対象地域の m 次のメッシュ総数を N_m とし、それぞれの次数のメッシュの面積を A_m とする。メッシュ・コードの昇順に並べたときに k 番目のメッシュについて人口を $P_{m,k}$ 、人口密度： $\rho_{m,k}$ とする。

3.3. AICの導出

対象地域の m 次メッシュの人口密度を度数分布表に整理する。

この度数分布を多項分布とみなし、階級数を C_m 、下から c 番目の階級の観測度数（すなわち、その

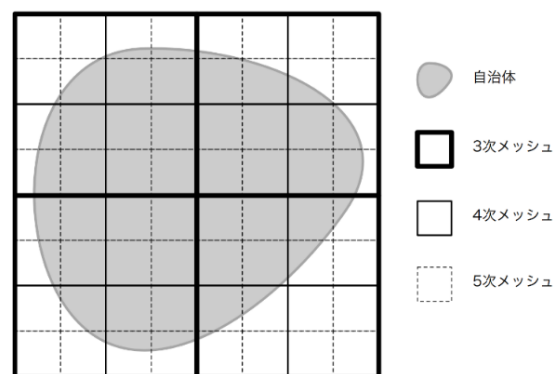


図-1 モデルのイメージ

階級に入るメッシュの数) を $n_m(c)$, その確率を $p_m(c)$ とする. それぞれの観測度数からなる集合が得られる確率は

$$r(\{n_m(c)\}|\{p_m(c)\}) = \frac{N_m!}{\prod_{c=1}^{C_m} n_m(c)!} \prod_{c=1}^{C_m} p_m(c)^{n_m(c)}$$

で与えられるので対数尤度は次式で表される.

$$l(\{p_m(c)\}) = \sum_{k=1}^{N_m} \log(k)$$

$$- \sum_{c=1}^{C_m} \log \Gamma(c_m(c) + 1) + \sum_{c=1}^{C_m} n_m(c) \log(p_m(c))$$

このとき使用する次数を選ぶのは階級 c の確率の集合 $\{p_m(c)\}$ をパラメータとする複数のモデル MODEL(m) から一つを選ぶモデル選択問題である.

$$\text{MODEL}(m) : p_m(c) = \theta_m(c) \quad (1 \leq c \leq C_m)$$

これらは

$$\sum_{c=1}^{C_m} \theta_m(c) = 1$$

の制約を持つので, m 次メッシュの度数分布を表すモデルに対応する AIC は次式で表される.

$$\begin{aligned} \text{AIC}(m) = & -2 \left[\sum_{k=1}^{N_m} \log k - \sum_{c=1}^{C_m} \log c_m(c)! \right. \\ & \left. + \sum_{c=1}^{C_m} n_m(c) \log \frac{n_m(c)}{N_m} \right] + 2(C_m - 1) \end{aligned}$$

この式から近似計算により, C_m が増加する場合は上限値も下限値もともに増加するので AIC(m) も増加することが予想される.

4. ケーススタディ

4.1. 対象地域

ここではケーススタディとして千葉県の市町村を取りあげる. 「千葉県は日本の縮図」¹⁵⁾といわれるように, わが国第1の都市圏である首都圏の一部を構成する人口密度が極めて高い地域とそれに準ずる都市部から郊外部までのすべてを含んでいる. 地理的に見ても関東平野の起伏が比較的緩やかな市街地のみならず, 沿岸部の漁村から中山間地域の山村までバラエティに富んでいる. わが国の状況を的確に捉えることができるサンプルと言える.

4.2. 人口分布のカテゴリー分け

都市計画の実務で用いられる人口密度の具体的な基準として以下のようなものがある.

- ・国勢調査

人口集中地区 (DID : Densely Inhabited District) : 40 人 / ha 以上¹⁶⁾

- ・都市計画運用指針¹⁷⁾

中心の市街地を形成している区域 : 40 人 / ha 以上

市街化区域の住宅用地目標 :

土地の高度利用を図るべき区域 : 100 人 / ha 以上

その他の区域 : 80 人 / ha 以上

土地利用密度の低い地域 : 60 人 / ha 以上

既成市街地 : 40 人 / ha 以上

集落地区計画における「現に家屋が連たんする地区でまとまりのある一団の土地の区域」 : 20 人 / ha 以上

- ・東京都が示す「集約型の地域構造への再編に向けた指針」の地区の類型化 : 20 人 / ha が階級幅の最小値¹⁸⁾

以上より, 本稿では階級幅が 20 人 / ha で 0 人 / ha から始まる人口密度の度数分布表の評価について検討する.

4.3. AIC によるモデル選択

3 次から 5 次を対象としているので地域メッシュ統計の定義から

$$16N_3 = 4N_m = N_5, A_3 = 4A_4 = 16A_5$$

$$P_{3,k} = \sum_{i=4k-3}^{4k} P_{4,k} = \sum_{i=16k-15}^{16k} P_{5,k}$$

$$P_{4,k} = \sum_{i=4k-3}^{4k} P_{5,k}$$

ただし,

$$P_{m,k} = \sum_{i=4k-3}^{4k} P_{m+1,k} \quad (3 \leq m \leq 4, 1 \leq k \leq N_m)$$

$$\rho_{m,k} = \frac{P_{m,k}}{A_{m,k}} \quad (3 \leq m \leq 5, 1 \leq k \leq N_m)$$

である. したがって, 次式を得る.

$$AIC(3) = 2N_3 \log N_3 - 2 \sum_{i=1}^{N_3} \log i + 2 \sum_{c=1}^{C_3} \sum_{i=1}^{n_3(c)} \log i \\ - 2 \sum_{c=1}^{C_3} n_3(c) \log n_3(c) + 2(c_3 - 1)$$

$$AIC(4) = 8N_3 \log 4N_3 - 2 \sum_{i=1}^{4N_3} \log i + 2 \sum_{c=1}^{C_4} \sum_{i=1}^{n_4(c)} \log i \\ - 2 \sum_{c=1}^{C_4} n_4(c) \log n_4(c) + 2(c_4 - 1)$$

$$AIC(5) = 32N_3 \log 16N_3 - 2 \sum_{i=1}^{16N_3} \log i \\ + 2 \sum_{c=1}^{C_5} \sum_{i=1}^{n_5(c)} \log i \\ - 2 \sum_{c=1}^{C_5} n_5(c) \log n_5(c) + 2(c_5 - 1)$$

4.4. 度数分布表を用いた市街地の評価

千葉県全ての市町村について AIC(3) から AIC(5) を計算し、市町村の人口及び面積とともにまとめた（紙面の制約により表-1 に市だけを抜粋したもの示す）。千葉県では全ての市町村で 3 次メッシュが選択された。例として柏市を過不足なく被覆する地域の 3 次から 5 次メッシュによる人口密度分布図（図-2）を示す。人口密度の極大値を示す場所は他の次数と概ね一致するなど、全体を概観するという目的は 3 次メッシュにより十分に果たされていると考える。

また表-1 から同じ市町村であれば C_m が大きいと AIC(m) も大きいことも読み取れる。前章の予想は裏付けられたと言える。

一方で 20 人 / ha 未満の階級の度数が卓越する市町村が 3 次から 5 次の全てで多いなど、次数が異なっても同じような傾向を持つことが明らかとなった（図-3）。以後、この階級の度数が当該市町村の度数全体に占める割合を 20 人 / ha 率と呼ぶことにし、見通しを良くするため 3 次メッシュに絞って議論を続ける。

C_3 と 20 人 / ha 率を比較すると強い負の相関が見て取れる（図-4）。20 人 / ha 率が高いのは他の階

級のメッシュが少ないことの裏返しである。当然の結果であろう。

次に 20 人 / ha 率と DID 面積率を見てみよう（図-5）。DID の定義における人口密度の基準は上述通り 40 人 / ha であるが、それだけでなく連たん性や都市的施設を面積から除外するなどの条件が加えられている。人口密度の高い地区を直接代表する指標ではなく、都市的地域を示す指標として作成されているからである¹⁹⁾。したがって 20 人 / ha 率と DID 面積率は必ずしも相補的な関係にあるわけではない。しかし実態としてここでも強い負の相関が示された。

したがって C_3 と DID 面積率も相関を持つことが示唆される。実際に見てみると（図-6）、正の強い相関を持つことが示されている。

4 次および 5 次メッシュの場合も同様の傾向を持つことを考え合わせると、市町村全体を概観する場合にはほかの指標の値に関わらず、DID 面積率の大小により次数を選択することが、度数分布表を作成し AIC を計算して値の大小を比較するという精緻ではあるが煩瑣な作業の代わりとなり得ることが示唆される。

5. まとめと今後の課題

本稿は都市計画の実務者が予見に捕らわれることなく、所管する地域全体の人口分布を概観する際のデータ選択についてあげ、指標として AIC を適用する場合の計算方法と性質について検討した。またケーススタディとして千葉県の市町村を取りあげた。その結果、すべての自治体で 3 次メッシュが選択されるとともに AIC による精緻な議論の

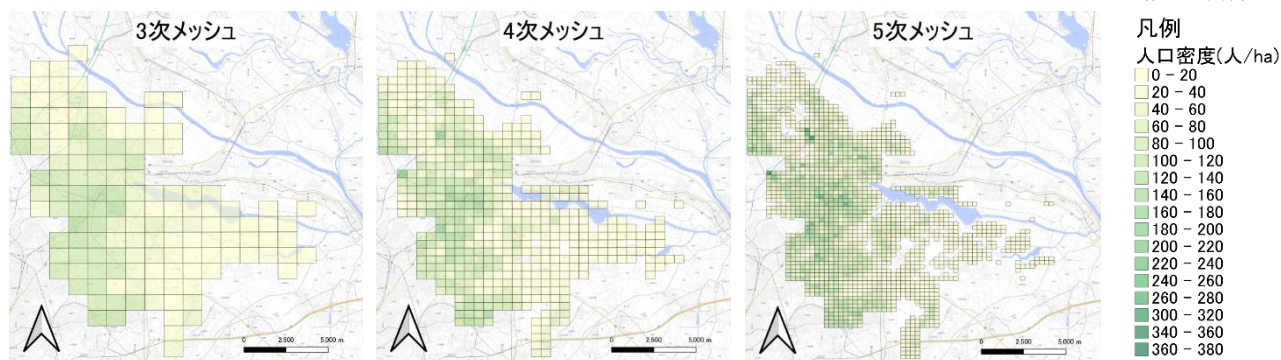


図-2 柏市を過不足なく被覆する 3 次メッシュの地域の人口密度分布

表-1 千葉県の市の人口及び面積と AIC⁽¹⁾

自治体名	概況		N ₃	3次		4次		5次	
	人口(人) ²⁰⁾	面積 (km2) ²¹⁾		C ₃	AIC(3)	C ₄	AIC(4)	C ₅	AIC(5)
千葉市	974,951	271.76	334	9	51.84	14	86.50	22	143.86
銚子市	58,431	84.20	124	2	5.98	4	16.45	4	21.86
市川市	496,676	57.45	88	12	58.64	14	85.09	20	132.84
船橋市	642,907	85.62	126	11	55.58	14	82.99	24	146.16
館山市	45,153	110.05	153	2	5.24	3	11.13	4	19.44
木更津市	136,166	138.90	194	3	12.78	4	21.68	5	31.91
松戸市	498,232	61.38	87	8	40.02	11	64.08	15	96.83
野田市	152,638	103.55	136	4	18.05	5	27.52	7	44.48
茂原市	86,782	99.92	132	3	10.30	3	13.90	5	26.90
成田市	132,906	213.84	264	5	20.93	7	34.79	11	61.48
佐倉市	168,743	103.69	144	6	27.04	7	38.69	11	64.47
東金市	58,219	89.12	125	3	9.22	4	16.76	5	26.46
旭市	63,745	130.45	168	2	5.45	3	10.98	5	22.88
習志野市	176,197	20.97	39	8	33.35	12	61.36	22	119.00
柏市	426,468	114.74	155	7	36.95	11	63.57	17	104.99
勝浦市	16,927	93.96	130	2	4.60	3	8.98	4	18.22
市原市	269,524	368.16	434	4	19.39	6	33.60	7	47.32
流山市	199,849	35.32	58	7	33.10	10	54.94	15	90.74
八千代市	199,498	51.39	74	6	27.68	9	49.06	14	82.40
我孫子市	130,510	43.15	65	6	25.63	9	44.62	14	75.83
鴨川市	32,116	191.14	234	2	4.00	2	6.32	4	19.41
鎌ヶ谷市	109,932	21.08	40	6	26.62	7	38.64	11	65.98
君津市	82,206	318.78	369	4	15.38	4	19.50	6	34.26
富津市	42,465	205.40	254	3	9.46	3	12.67	5	25.20
浦安市	171,362	17.30	36	11	44.29	14	70.24	20	114.82
四街道市	93,576	34.52	53	5	20.72	5	26.86	8	46.49
袖ヶ浦市	63,883	94.92	132	3	10.84	5	22.68	7	37.60
八街市	67,455	74.94	107	2	5.86	3	12.98	5	25.89
印西市	102,609	123.79	155	4	15.96	8	38.19	13	70.26
白井市	62,441	35.48	55	5	20.17	6	30.80	10	55.65
富里市	49,735	53.88	78	3	11.12	4	19.49	7	37.97
南房総市	35,831	229.55	293	1	0.00	2	5.26	3	12.32
匝瑳市	35,040	101.52	131	2	3.99	2	5.26	4	16.34
香取市	72,356	262.35	305	2	5.64	3	11.08	4	19.58
山武市	48,444	146.77	183	2	4.60	2	6.47	3	14.30
いすみ市	35,544	157.50	187	1	0.00	2	5.65	2	8.22

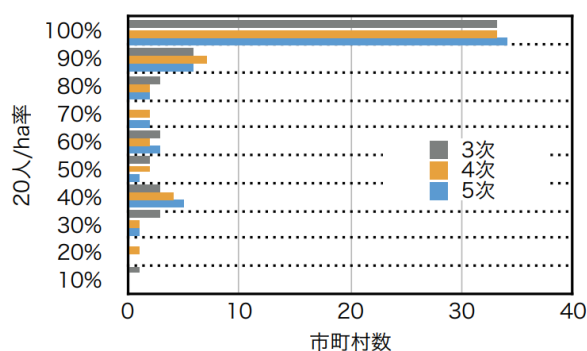


図-3 自治体・メッシュ次数毎の 20 人 / ha

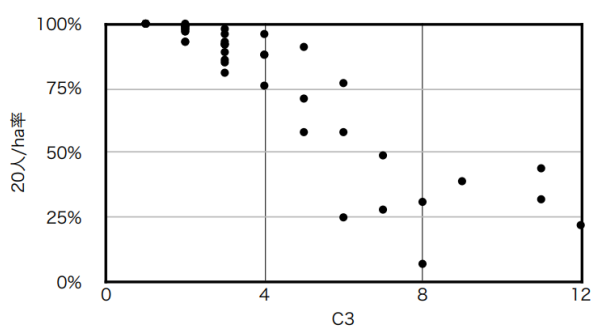


図-4 3次メッシュの C3 と 20 人 / ha

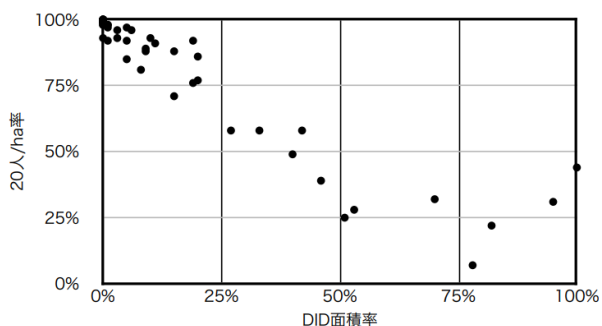


図-5 3次メッシュの 20 人 / ha 率と DID 面

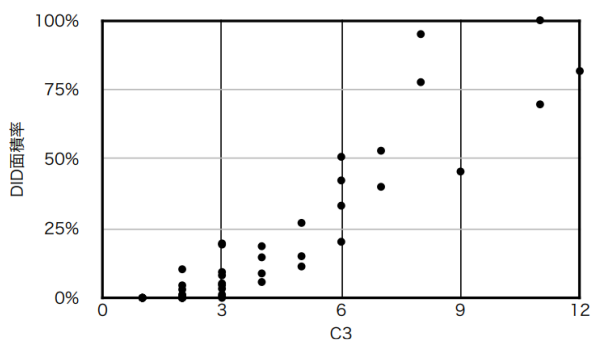


図-6 3次メッシュの DID 面積率と C₃

かわりに DID 面積率が簡便な指標となり得る可能性が示された。これには自治体が所管する地域全体を概観するという目的と、都市計画業務を想定して度数分布表の下限と階級を固定していることが強く影響していると考えられる。たとえば階級数が増加するのは結果として人口密度の最大値が大きくなる場合である。逆に 20 人 / ha 未満の階級の度数が圧倒的な市町村が多いなど、人口密度が低いメッシュの影響も極めて大きいことも示された。したがって、階級の下限と幅を次数に応じて柔軟に変える場合、都市計画区域外などの 20 人 / ha のメッシュが圧倒的に多いと想定される場所を除いて都市計画区域のみや市街化区域のみに対象を限定する場合などの検討が必要であろう。

また本稿では人口密度しか考慮していない。他の属性、あるいは、連担性や集塊性などの位置・形状を考慮する場合の検討なども望まれる。

註

- (1) MAICE を与える AIC を赤太字で示した。

参考文献

- 1) 総務省統計局, 「地域メッシュ統計について」, 日本語, <https://www.stat.go.jp/data/mesh/mtuite.html>
- 2) 総務省統計局, 「地域メッシュ統計の特質・沿革」, 日本語, <https://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf>
- 3) 佐藤彰洋 (2019) 「メッシュ統計」, 共立出版
- 4) 青木義次 (1998) 「集計単位問題についてのノート」, 総合都市研究, 65, 17-24, 東京都立大学都市研究所
- 5) Openshaw, S. (1984) "The modifiable areal unit problem", Concepts and techniques in modern geography, 38, Geo Books
- 6) 貞広幸雄 (2003) 「可変単位地区問題」, 地理空間分析, 朝倉書店
- 7) 中谷友樹 (2015) 「空間分析におけるスケール」, 地理情報科学— GIS スタンダード—,

古今書院

- 8) 石井儀光（2018）「集計単位変換」，空間解析入門都市を測る・都市がわかる，朝倉書店
- 9) 腰塚武志・栗田治（1984）「メッシュデータを用いた人口推定と平均距離算出」，都市計画論文集，19，319-324，日本都市計画学会
- 10) 青木義次・大佛俊泰・尚炯鐘（1986）「都市メッシュデータ解析におけるメッシュサイズの効果」，都市計画論文集，21，247-252，日本都市計画学会
- 11) 玉川英則（1987）「土地利用比率の同質性からみた最適メッシュ規模に関する考察」，都市計画論文集，22，229-234，日本都市計画学会
- 12) 樋口忠彦・玉川英則（1988）「連続変量の最適メッシュ区分についてメンタルマップを用いてのケーススタディ」，都市計画論文集，23，37-42，日本都市計画学会
- 13) 讃岐亮・吉川徹・佐藤栄治（2010）「地域施設までの道路距離の精度に対して人口の集計単位がもたらす影響 神奈川県の小地域を対象にして」，日本建築学会計画系論文集，75（658），3011-3019，日本建築学会
- 14) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎（1983）「情報量統計学」，共立出版
- 15) 千葉県環境生活部県民生活・文化課，「千葉県県民活動推進計画（平成30～32年度）の策定について」，日本語，
<https://www.pref.chiba.lg.jp/kkbunka/np/keikaku/h30keikaku.html>，発行日2018年3月30日
- 16) 総務省統計局，「人口集中地区とは」，日本語，
<https://www.stat.go.jp/data/chiri/1-1.html>
- 17) 国土交通省都市局都市計画課，「都市計画運用指針 第12版（令和4年4月1日一部改正）」，日本語，
https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/crd_city_plan_fr_000008.html
- 18) 東京都都市整備局，「集約型の地域構造への再編に向けた指針」，日本語，
https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/keikaku_chousa_singikai/shishin02.html
- 19) 総務省統計局，「人口集中地区に関する Q&A（回答）」，日本語，
<https://www.stat.go.jp/data/chiri/qa/qa-1.html>
- 20) 総務省統計局，「国勢調査 / 都道府県・市区町村別の主な結果 / 都道府県・市区町村別の主な結果」，日本語，
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?statinfid=000032143614>
- 21) 国土交通省国土地理院，「全国都道府県市区町村別面積調」，
<https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO-title.htm>，発行日2023年3月23日

分位点毎の全体傾向から乖離した局所的地域抽出手法の提案

青木健哉*・井上亮**

Extraction of local areas of deviation from the overall trend for each quartile

Kenya Aoki*, Ryo Inoue**

In order to extract localized areas that deviate from the overall trend, a regression model with dummy variables for each subregion has been studied. We have examined a method that introduces generalized lasso to the model, which sets a regularization term for the difference between the parameters of adjacent subregions. However, the generalized regression model estimates the parameters of the explanatory variables that represent the conditional mean of the explained variable, and often fails to explain the effects of the explanatory variables on the explained variable away from the conditional mean. This study proposes a new method that combines quantile regression and generalized lasso in order to extract regions with characteristics that differ from the overall trend for each quantile. To validate its effectiveness, we applied this approach to rental housing data in the five central wards of Tokyo. The results showed that the neighborhoods where rent levels deviated from the overall trend in the analyzed area were different by quantiles.

Keywords: 地域分析 (regional analysis), 分位点回帰 (conditional quantile regression), generalized lasso

1. はじめに

地理的な位置に紐付けられた地理空間データは、データが観測された各地点・各地域の、社会経済現象や自然環境など、様々な空間現象の実態を記録している。

近年、観測・蓄積・公開されてきた豊富な空間データを活用し、空間現象が有する地点毎・地域毎の特徴把握を目指した分析が行われている。それらの分析の前提は、空間現象が空間的異質性を有しており、その生成要因・過程が場所によって異なるとする仮定である。この空間的異質性に注目した分析アプローチは、さらに異なる仮定により大きく2種類に分類できる。1つは、分析対象領域内で空間現象の生成過程が連続的な変化を仮定した分析で、その代表は地理的加重回帰 (Geographically Weighted Regression, GWR) (Brunsdon et al., 1998; Fotheringham et al., 1998, 2002)

である。他方は、ある特定の空間境界における空間現象生成過程の離散的変化を仮定した分析である。その境界を探索するため事前に地域区分を設定し、各小地域にダミー変数を設定した回帰モデルを用いた分析が行われる。また、スパースモデリング手法の generalized lasso (GL) (Tibshirani & Taylor, 2011) の活用も検討されている (例えば、井上ほか, 2020)。

さて、いずれの仮定に基づく空間的異質性の分析手法も、基本的には通常最小二乗法 (Ordinary Least Squares, OLS) に基づく推定を行っている。OLS は、説明変数を与えたときの条件付平均値を表すパラメータを推定し、説明変数が被説明変数に与える平均的な影響を評価している。そのため、条件付平均値から大きく離れた説明変数の被説明変数に与える影響は説明できない (Koenker & Bassett, 1978)。すなわち、OLS に基づく分析手法

* 学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06 E-mail: kenya.aoki.r6@dc.tohoku.ac.jp

** 正会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

では、条件付平均値とは異なる状況下における空間的異質性の構造を分析することはできない。

そこで、被説明変数に与える説明変数の影響を分位点毎に評価できる条件付き分位点回帰 (Conditional Quantile Regression, CQR) (Koenker et al., 2001) を活用した空間的異質性の分析手法が提案されている。例えば、Chen et al. (2012) は、連続的な空間的異質性を仮定した上で、GWR と CQR を融合した地理的加重分位点回帰 (Geographically Weighted Quantile Regression, GWQR) を提案した。しかし、特定の空間境界で離散的に空間現象の生成過程が変化することを仮定した、分位点を考慮した空間的異質性分析手法は議論されていない。

そこで本研究は、CQR と GL を融合し、分位点毎に分析対象領域全体の傾向から乖離した局所的な地域を抽出できる手法を提案する。

以下に本論文の構成を示す。第 2 章では、CQR と GL を紹介する。第 3 章では、CQR と GL を融合した新たな手法を提案し、そのパラメータ推定問題を提示する。第 4 章では、東京都都心 5 区の集合住宅の募集賃料データを用いて、提案手法の有効性を確認する。第 5 章では、本研究の成果を整理し、今後の課題を述べる。

2. 分析手法

2.1. 分位点回帰 (CQR)

通常の回帰分析は、説明変数を与えた上で、被説明変数の条件付平均値を表すパラメータを推定する。これに対して CQR は、被説明変数の条件付分位点を表すパラメータを推定する。CQR は、様々な分位点に対応したパラメータ推定が可能になるだけでなく、被説明変数の外れ値に対しても頑健な推定値を得ることができる。

CQR の説明の前に、分位数を説明する。Y を累積分布関数 $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ に従う確率変数とすると、Y の τ 分位数 ($\tau \in (0,1)$) は

$$q_Y(\tau) = F_Y^{-1}(\tau) = \inf\{y: F_Y(y) \geq \tau\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、損失関数 $\rho_\tau()$ を以下の式

で定義し (図 1),

$$\rho_\tau(u) = \begin{cases} \tau u & \text{if } u \geq 0 \\ (\tau - 1)u & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$\rho_\tau(Y - m)$ の期待値を最小化する最適化問題

$$\begin{aligned} & \min_m E(\rho_\tau(Y - m)) \\ & = \min_m \left[(\tau - 1) \int_{-\infty}^m (y - m) dF_Y(y) \right. \\ & \quad \left. + \tau \int_m^{\infty} (y - m) dF_Y(y) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

を解くと、Y の τ 分位数 $q_Y(\tau)$ が得られる。

式(3)の解 $\hat{m}$ は、式(3)の右辺を m で微分したものが 0 となる値として得られる。

$$0 = (1 - \tau) \int_{-\infty}^{\hat{m}} dF_Y(y) - \tau \int_{\hat{m}}^{\infty} dF_Y(y) \quad (4)$$

これを整理すると、

$$F_Y(\hat{m}) = \tau \quad (5)$$

となり、 $\hat{m}$ は Y の τ 分位数であることが確認できる。

CQR では、説明変数 $\mathbf{X}$ が与えられた時の Y を線形関数 $Q_{Y|\mathbf{X}}(\tau) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ で表現し、パラメータ $\boldsymbol{\beta}$ を推定する。この推定値は最小化問題

$$\min_{\boldsymbol{\beta}} \sum_{i \in N} \rho_\tau(Y_i - \mathbf{X}_i \boldsymbol{\beta}) \quad (6)$$

を解くことで得られる。

ここで、被説明変数ベクトルを $\mathbf{y}$, 説明変数行列を $\mathbf{X}$, 要素が 1 または 0 の長さ n の列ベクトルをそれぞれ $\mathbf{1}_n, \mathbf{0}_n$ とする。また、要素が非負のベクトル $\boldsymbol{\beta}^+, \boldsymbol{\beta}^-, \mathbf{u}, \mathbf{v}$ を用いて、正のパラメータを $\boldsymbol{\beta}^+$, 負のパラメータを $-\boldsymbol{\beta}^-$, パラメータを $\boldsymbol{\beta}^+ - \boldsymbol{\beta}^-$ で表し、

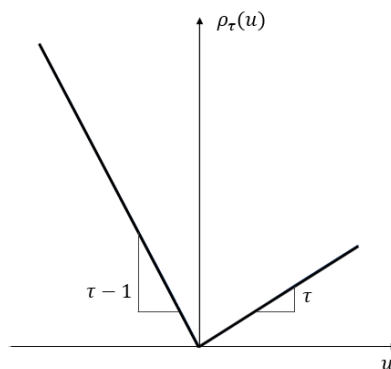


図 1 損失関数 $\rho_\tau(u)$ の関数

同様に、正の誤差を $\mathbf{u}$ 、負の誤差を $\mathbf{v}$ とし、誤差を $\mathbf{u} - \mathbf{v}$ で表すと、式(6)は式(7)に書き換えられる。

$$\begin{aligned} \min_{\beta^+, \beta^-, \mathbf{u}, \mathbf{v}} \quad & \tau \mathbf{1}'_N \mathbf{u} + (1 - \tau) \mathbf{1}'_N \mathbf{v} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{y} - \mathbf{X}(\beta^+ - \beta^-) = \mathbf{u} - \mathbf{v} \\ & \beta^+, \beta^- \geq \mathbf{0}_J, \mathbf{u}, \mathbf{v} \geq \mathbf{0}_N \end{aligned} \quad (7)$$

任意の τ 分位点に対するパラメータ推定は、正の誤差 $\mathbf{u}$ に対して τ 、負の誤差 $-\mathbf{v}$ に対して $(\tau - 1)$ の重み付けを行った、その合計の最小化問題と表せる。線形計画問題である式(7)は、シンプレックス法や内点法で解ける。

2.2. スパースモデリング

2.2.1. Lasso

パラメータが多いモデルを用いると、データへの適応度は増すが、未知のデータに対する汎化性能が低下する。この現象は過学習と呼ばれており、過学習を防ぐために様々な方法が議論されてきた。その一つである lasso (Tibshirani, 1996) は、線形回帰の損失関数に L_1 正則化項を加えた推定を通して変数を選択し、線形回帰モデルの予測精度と解釈可能性を向上させる分析手法である。

Lasso では、被説明変数ベクトル $\mathbf{y}$ 、説明変数行列 $\mathbf{X}$ 、パラメータベクトル β 、誤差ベクトル ϵ を用いて表される線形回帰モデル

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\beta + \epsilon \quad (9)$$

に対して、以下の最適化問題を解き、パラメータを推定する。

$$\min_{\beta} \left[\frac{1}{2} \sum_{i \in N} \left(y_i - \sum_{j \in J} \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j \in J} |\beta_j| \right] \quad (10)$$

ここで、 N はサンプル数の集合、 J は説明変数の集合を表す。また、式(10)の λ はハイパーパラメータと呼ばれ、この値が大きいほど制約が強く働き、ゼロに推定されるパラメータが多くなる。このような最適化問題を解くことでパラメータがゼロ推定されやすくなり、効率良く変数選択を行うことが可能になる。

2.2.2. Generalized lasso (GL)

GL (Tibshirani & Taylor, 2011) は、パラメータに

隣接関係を設定した上で、隣接パラメータの差に対する L_1 正則化を導入した、lasso の拡張手法である。2種類の正則化項に対する重みを表すハイパーパラメータを λ_1, λ_2 、隣接するパラメータの組み合わせの集合を E とすると、GLによる推定は以下の最適化問題で表せる。

$$\begin{aligned} \min_{\beta} \quad & \left[\frac{1}{2} \sum_{i \in N} \left(y_i - \sum_{j \in J} \beta_j x_{ij} \right)^2 \right. \\ & \left. + \lambda_1 \sum_{j \in J} |\beta_j^T| + \lambda_2 \sum_{(a,b) \in E} |\beta_a - \beta_b| \right] \end{aligned} \quad (11)$$

第3項の正則化により、隣接するパラメータの差がゼロに、すなわち隣接するパラメータが共通の値で推定されやすくなる。

GL はパラメータの隣接関係を柔軟に設定できるため、地域分析にも応用されている。地域単位に異なるパラメータを設定した回帰モデルに対して、地域の隣接関係に基づいてパラメータの隣接関係を設定した分析が行われている (井上ほか, 2020)。

2.3. CQR とスパースモデリングの融合

CQR に対しても、正則化項を付与して変数選択を行う手法に関する研究が行われている (例えば, Wu & Liu, 2009)。CQR と lasso を融合したモデルは

$$\min_{\beta^T} \left[\sum_{i \in N} \rho_{\tau} \left(y_i - \sum_{j \in J} \beta_j^T x_{ij} \right) + \lambda \sum_{j \in J} |\beta_j^T| \right] \quad (12)$$

で表せ、更に式(13)に書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \min_{\beta^+, \beta^-, \mathbf{u}, \mathbf{v}} \quad & \tau \mathbf{1}'_N \mathbf{u} + (1 - \tau) \mathbf{1}'_N \mathbf{v} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{y} - \mathbf{X}(\beta^+ - \beta^-) = \mathbf{u} - \mathbf{v} \\ & \mathbf{1}'_J (\beta^+ + \beta^-) \leq s \\ & \beta^+, \beta^- \geq \mathbf{0}_J, \mathbf{u}, \mathbf{v} \geq \mathbf{0}_N \end{aligned} \quad (13)$$

なお、Wu & Liu (2009) は、CQR に SCAD (Fan et al., 2001) や adaptive-lasso (Zou, 2006) の正則化項を付与した変数選択手法も示している。

3. 提案手法

本章では、分位点毎に分析対象の他の地域とは異なる傾向を持つ地域を抽出する手法として、

CQR と GL を融合したモデルを提案する．CQR の損失関数に GL に基づく L_1 正則化項を導入することで、一部のパラメータが 0 となり、一部の隣接パラメータが共通値となる推定を、分位点毎に実施できる．

提案手法は以下の最適化問題で表され、 τ 分位点でのパラメータベクトル β^τ を推定する．

$$\min_{\beta^\tau} \left[\sum_{i \in N} \rho_\tau \left(y_i - \sum_{j \in J} \beta_j^\tau x_{ij} \right) + \lambda_1 \sum_{j \in J} |\beta_j^\tau| + \lambda_2 \sum_{(a,b) \in E} |\beta_a^\tau - \beta_b^\tau| \right] \quad (14)$$

第 1 項は CQR の損失関数である．第 2 項はパラメータに関する L_1 正則化項で、パラメータがゼロに推定されやすくなる．第 3 項は隣接関係にあるパラメータの差に関する L_1 正則化項で、隣接するパラメータが同じ値として推定されやすくなる． λ_1, λ_2 は 2 種類の正則化項の重みを表すハイパーパラメータである．

式(14)の正則化項を制約条件で表すと、式(15)に書き換えられる．

$$\begin{aligned} \min_{\beta^+, \beta^-, \theta^+, \theta^-, u, v} \quad & \tau \mathbf{1}'_N \mathbf{u} + (1 - \tau) \mathbf{1}'_N \mathbf{v} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{y} - \mathbf{X}(\beta^+ - \beta^-) = \mathbf{u} - \mathbf{v} \\ & \mathbf{1}'_J(\beta^+ + \beta^-) \leq s \\ & \mathbf{D}(\beta^+ - \beta^-) = \theta^+ - \theta^- \\ & \mathbf{1}'_K(\theta^+ + \theta^-) \leq t \\ & \beta^+, \beta^- \geq \mathbf{0}_J, \theta^+, \theta^- \geq \mathbf{0}_K, \mathbf{u}, \mathbf{v} \geq \mathbf{0}_N \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 s, t はそれぞれ λ_1, λ_2 と対応するハイパーパラメータで、値を小さくすると制約が強く働き、パラメータがゼロに推定されやすくなる． $\mathbf{D}$ はパラメータの隣接関係を表現する $J \times K$ 行列、 θ^+, θ^- は要素が非負のベクトルで、 θ^+ は正值、 $-\theta^-$ は負

値の隣接パラメータの差を表す．

なお、式(14)の λ_1, λ_2 や式(15)の s, t は事前に決める必要がある．ハイパーパラメータの設定によってモデルの推定精度が変化するため、本研究ではモデルの予測性能評価指標である情報量規準の BIC を用いて適切なモデルを選択する、CQR における BIC は以下で表される (Lee et al., 2014)．

$$BIC(\tau) = \log \left(\sum_{i \in N} \rho_\tau \left(y_i - \sum_{j \in J} \beta_j^\tau x_{ij} \right) \right) + k \frac{\log(N)}{2N} \quad (16)$$

ここで、 k は非ゼロのパラメータの数を表す．この BIC の値をもとにハイパーパラメータを分位点毎で設定し、BIC が最小になったモデルを選択する．

4. 提案手法の賃料データへの応用

4.1. データと分析モデル

本章は、提案モデルを集合住宅の募集賃料データへ適用し、その有効性を確認する．賃料水準が周辺地域と異なる小地域が存在するかを分析するため、築年数や所在階数などの物件属性に加えて、町丁目毎にダミー変数を設定した賃料モデルを推定する．分位点毎の賃料形成要因評価の違いや、町丁目毎の賃料水準の違いを分析する．

分析には、東京都都心 5 区（千代田区、中央区、港区、新宿区、渋谷区）の集合住宅の募集賃料データ 35,801 件（アットホーム株式会社, 2023）を使用する．使用データの概要を表 1 に示す．1 m² 当たり賃料（以後、賃料単価と記す）の対数を被説明変数とし、最寄り駅までの徒歩時間や、所在階数、専有面積、築年数の 4 種類の物件属性の対数を説明変数とする．なお、築年数には値が 0 のデ

表 1. 被説明変数と物件属性の説明変数

変数	最小値	最大値	平均値	標準偏差
賃料単価 (円/m ²)	320.36	76097.56	4249.64	1079.95
最寄り駅までの徒歩時間 (分)	1	34	5.33	2.98
築年数 (年)	0	35	16.48	8.73
所在階 (階)	1	58	6.13	6.04
専有面積 (m ²)	10	343.54	37.68	23.01

ータがあるため、すべてに 1 を足して対数化した。また、各パラメータに対する正則化項の影響を同一にするため、対数変換後の物件属性を平均 0、分散 1 に標準化した。

町丁目ダミーは、町丁目ダミーを使わないモデルによる 50%分位点の推定で、残差の町丁目毎の平均値が最小の町丁目を基準に設定した。

物件 i の賃料単価の対数 y_i を表すモデルを式(17)で表す。

$$y_i = \alpha^\tau + \sum_{j \in J} \beta_j^\tau x_{ij} + \sum_{k \in K} \gamma_k^\tau d_{ik} + \varepsilon_i \quad (17)$$

ただし、 J は 4 つの物件属性のパラメータの集合、 K は 505 町丁目の集合を表す。また、 α^τ は τ 分位点における定数項、 β_j^τ は τ 分位点における物件属性 j のパラメータ、 γ_k^τ は τ 分位点における町丁目 k のダミー変数 d_{ik} のパラメータ、 ε_i は誤差項である。

N を物件 35,801 個の集合、 L を隣接する町丁目対 1,302 組の集合、ハイパーパラメータを λ_1, λ_2 とすると、提案手法による推定は式(18)で表せる。

$$\min_{\alpha^\tau, \beta^\tau, \gamma^\tau} \left[\sum_{i \in N} \rho_\tau \left(y_i - \alpha^\tau - \sum_{j \in J} \beta_j^\tau x_{ij} - \sum_{k \in K} \gamma_k^\tau d_{ik} \right) + \lambda_1 \sum_{k \in K} |\gamma_k^\tau| + \lambda_2 \sum_{(a,b) \in L} |\gamma_a^\tau - \gamma_b^\tau| \right] \quad (18)$$

分位点による説明変数の影響の差異を確認するため、 $\tau = [0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9]$ の 5 つの分位点で分析を行った。また、CQR に基づく分析の有用性を確認するため、条件付き平均値に対する説明変数の影響を GL で推定し、提案手法と比較する。

なお、 L_1 正則化項はパラメータの絶対値の大きさに関わらず罰則が等しいという性質を持つため、lasso による推定値はゼロに近づく方向にバイアスを有し、変数選択の一致性がないことが知られている (Fan et al., 2001)。この性質は GL による推定でも、隣接パラメータ間の差が小さくなる方向に作用するため、推定値に基づいた解釈は適切でないことが指摘されている (Jing et al., 2018)。そこで本研究は、まず、様々なハイパーパラメータ設定

の下で、提案手法で推定し、賃料モデルの説明変数の組合せの候補を得る。次に、得られた説明変数の組合せを用いたモデルを立てて CQR を行い、BIC 最小のモデルを各分位点で選択する。

4.2. 分析結果と考察

ハイパーパラメータ s, t の値を 10 から 150 まで 5 ずつそれぞれ変化させた結果、10%分位点は $s = 30, t = 70$ 、25%分位点は $s = 30, t = 65$ 、50%分位点は $s = 40, t = 80$ 、75%分位点は $s = 40, t = 95$ 、90%分位点は $s = 45, t = 115$ のときに BIC がそれぞれ最小になった。以下に物件属性のパラメータ推定結果と、町丁目ダミー変数のパラメータ推定結果を示す。

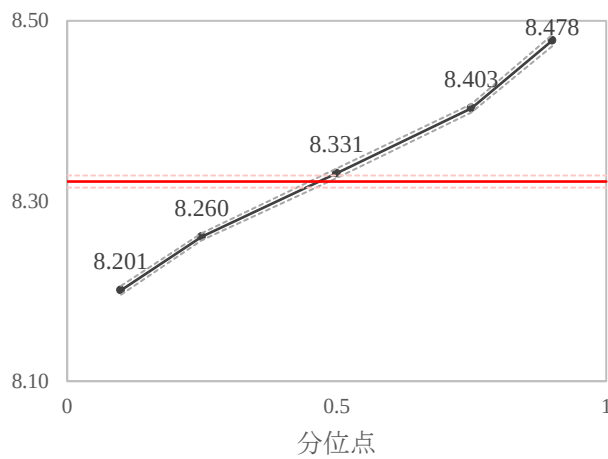
4.2.1. 物件属性に対するパラメータ推定結果

物件属性に対するパラメータ推定結果を図 2 に示す。横軸が分位点、縦軸が推定値である。黒線は CQR の推定値、上下の黒点線がその 95%信頼区間を表す。また、赤線が OLS 推定値、その上下の赤点線がその 95%信頼区間を表す。

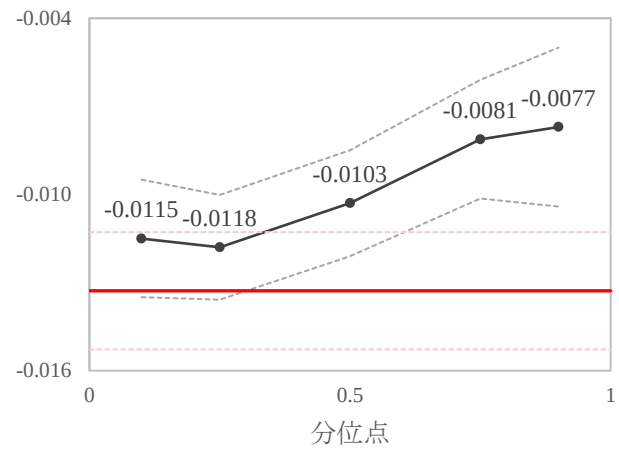
最寄り駅までの徒歩時間の影響 (図 2-(b)) は、すべての分位点で負に推定された。最寄り駅までの徒歩時間が賃料単価に与える影響は、割安な物件ほど大きいことを示す。しかし、他の物件属性よりも推定値が 0 に近く、賃料単価に与える影響は小さい。

築年数の影響 (図 2-(c)) は、すべての分位点で負だが、分位点による違いは小さく、割安・割高な物件で大きな差がないことを表す。

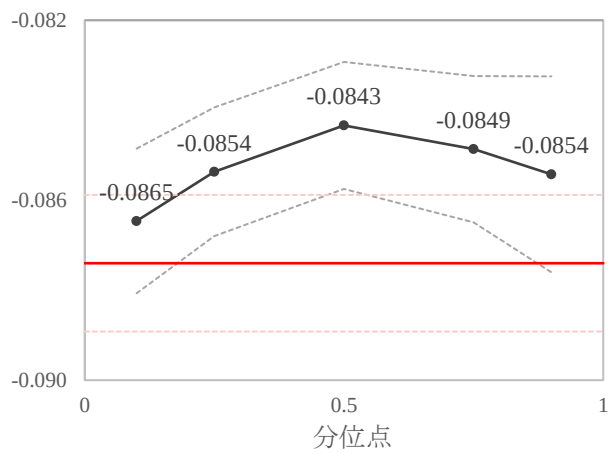
所在階の影響 (図 2-(d)) は、すべての分位点で正に推定された。低分位点では影響が大きく、高分位点では小さい。都心 5 区には、所在階による賃料の違いが小さい高級な低層マンションが多数存在している (井上ほか, 2020)。このことが反映され、高分位点では所在階の賃料単価に与える影響が小さくなっている可能性がある。また、高分位点の分析では、高層階の物件に合わせた推定が、低分位点の分析では、低層階の物件に合わせた推定がされている可能性がある。



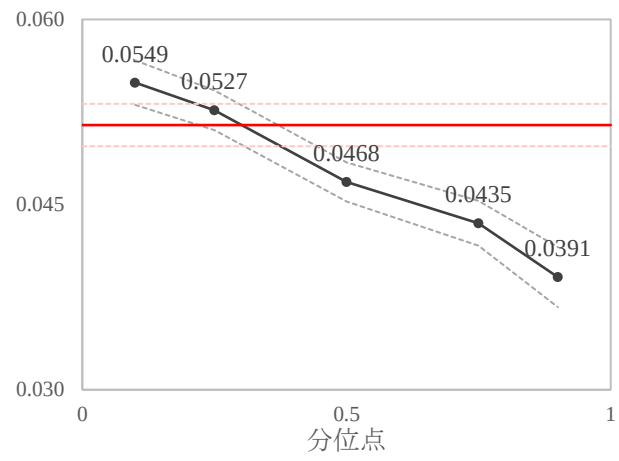
(a) 定数項



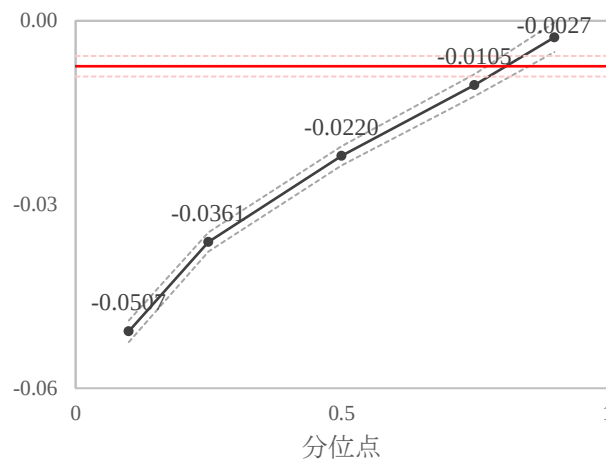
(b) 最寄り駅までの徒歩時間



(c) 築年数



(d) 所在階



(e) 専有面積

図2 物件属性のパラメータ推定結果

専有面積の影響（図 2-(e)）は、すべての分位点で負に推定された。低分位点では影響が大きく、高分位点では小さい。割安物件と異なり、割高物

件では面積が増加しても賃料単価が逡減しない傾向があることを示す。

以上のように、賃料単価に与える影響が低分位

点と高分位点で異なる物件属性が存在することが分かった。ほとんどの物件属性では、高分位点に比べ低分位点の方がパラメータ推定値の絶対値が大きく、賃料単価に与える影響が大きいことが確認できた。

4.2.2. 町丁目ダミー変数のパラメータ推定結果

都心 5 区の中で、賃料水準が全体傾向から乖離した特徴を持つ地域を分位点毎に抽出することを目指して設定した、町丁目ダミー変数のパラメータの推定結果を図 3 に示す。図中の網掛け地域は共通値として推定された地域を表す。すべての分位点で、千代田区の神田西福田町を基準に、千代田区の西部、港区・渋谷区の多くの町丁目は正、新宿区・中央区は負に推定された。しかし、低分位点で負に推定され、高分位点では正に推定された地域があるように、分位点毎で地域の評価が異なることも確認できた。また、共通のパラメータで推定された地域も、各分位点で数か所確認でき、同一の価格形成が行われている地域が価格帯毎で異なることも確認された。

千代田区の西部や港区・渋谷区の大半の地域は、中心業務地区で、全分位点を通して賃料水準が高いと予想される。特に港区は、「六本木ヒルズ」をはじめとした大型複合商業施設も多く、六本木・麻布などのような高級住宅街がある。また、皇居のある千代田区もオフィス街が立ち並び、所得の高い人が集まるエリアでもある。一方、中央区・新宿区は、都心 5 区の中では住宅地としての人気は比較的低いことが反映され、賃料水準が低くなったと考えられる。

分位点毎に推定結果を見ると、新宿区の大久保・百人町周辺は低分位点では負だが、高分位点になるにつれ正に推定された。このエリアは新大久保駅があり、韓国やベトナム、ネパールなど多くの国から出稼ぎに来ているものが多く、人気が高くなっているといえる（箕輪・鈴木, 2018）。このことが高分位点での賃料水準に反映され、正に推定されたと考えられる。

5. おわりに

本研究は、分位点毎に全体の傾向から乖離した特徴を持つ小地域を抽出する手法として、CQR と GL を融合したモデルを提案した。小地域毎にダミー変数を設定し、CQR の損失関数に GL に対応した L_1 正則化項を付加することで、分位点毎に異なるパラメータ推定に加えて、周辺地域と異なる特徴を持つ小地域を分位点毎に特定できる。

提案手法の有効性を確認するため、提案手法を用いて東京都都心 5 区の集合住宅の募集賃料データに適用した。分析結果から、物件属性の賃料への影響が分位点毎で異なることが明らかになった。また、町丁目単位に設定したパラメータや隣接する町丁目のパラメータの差を 0 に推定することで、各分位点で町丁目単位に賃料水準が異なる実態を抽出した。都心 5 区の賃料分布は、中心業務地区とその他の地域で大きく異なるだけでなく、低分位点と高分位点では、賃料の空間分布が異なることが分かった。

最後に提案手法の課題を記す。まず、提案手法は、CQR によって各地点で割高・割安な物件に対する説明変数の影響を分析しており、高級・低級物件を区別している訳ではない点が挙げられる。例えば高分位点の分析では、高級住宅街で割高な物件と低級住宅街で割高な物件に対して価格形成要因に対する共通の評価と、異なる地域的影響を推定している。しかし、高級住宅街と低級住宅街では、同じ分位数でも物件属性・品質が異なっており、場所毎に属性に対する評価も異なると考えるのが自然である。そこで、今後、物件属性に基づく分類と提案手法を組み合わせた分析が不可欠であると考えられる。

また、GL の限界により、共通のパラメータが推定される小地域が少ない点が挙げられる。GL は隣接パラメータの差の絶対値の大小に関わらず罰則の効果等しい。この特徴は、罰則なしの分析で推定値に近いパラメータを共通の値に推定できな

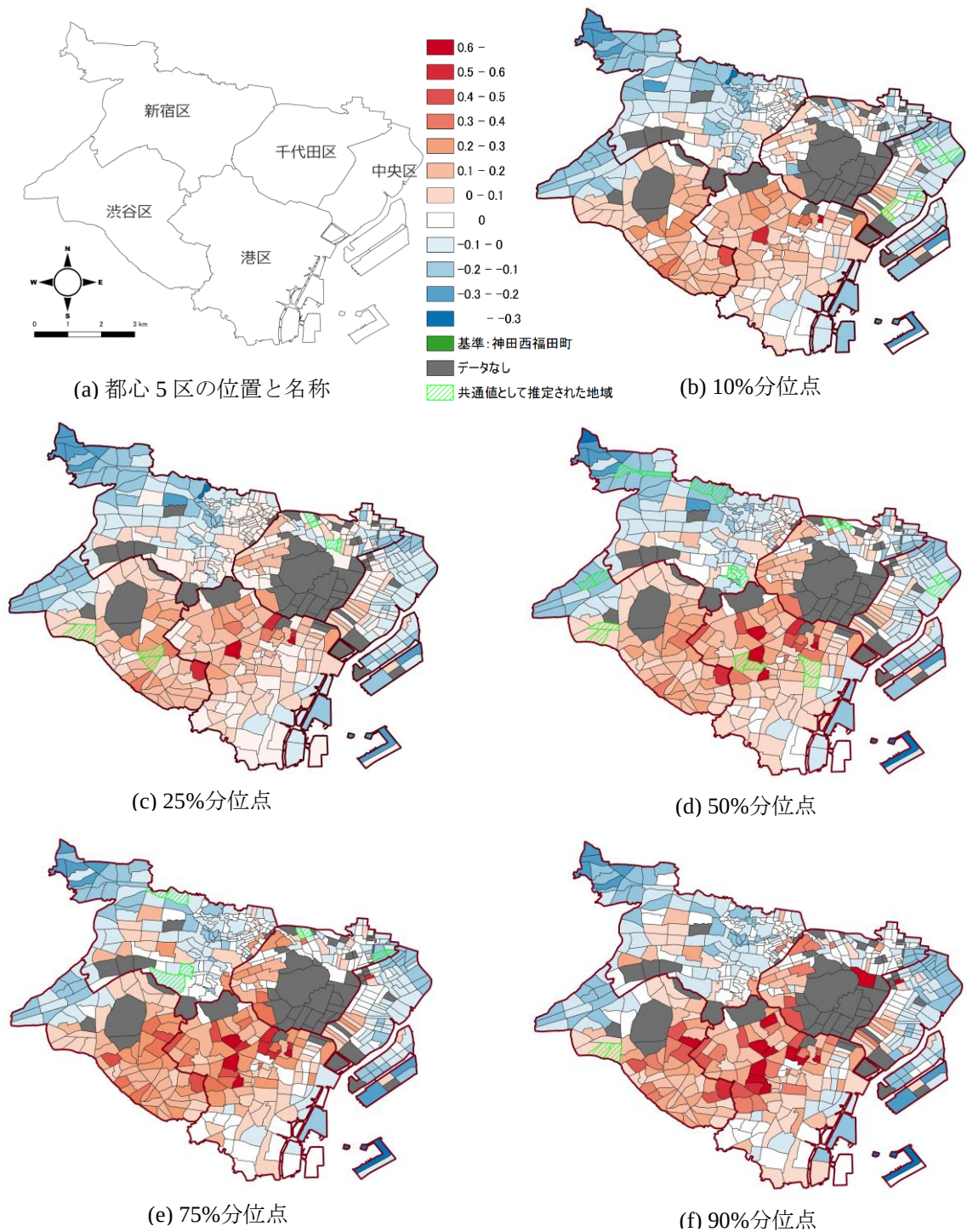


図 3 町丁目ダミー変数に関するパラメータ推定

い場合が生じる。この課題は、罰則を科す値が大きいとその効果が小さくなる、MCP (Zhang, 2010) などの正則化関数を用いると軽減できる可能性がある。今後、隣接パラメータの差に対して MCP 関数を用いた正則化を行う fused-MCP (Jing et al., 2018) の活用を検討する。

謝辞

本研究は、国立情報学研究所の IDR データセット提供サービスによりアットホーム株式会社から提供を受けた「アットホームデータセット」を利用した。また本研究は、JSPS 科研費 JP21H01447 の助成を受けた。

参考文献

- アットホーム株式会社 (2023) アットホームデータセット. 国立情報学研究所情報学研究データリポジトリ. (データセット). <https://doi.org/10.32130/idr.13.1>
- 井上亮・石山里穂子・杉浦綾子 (2020) 東京都区部の賃貸マンション市場の地理的分割の実態把握—スパースモデリングによるアプローチ—. 「土木学会論文集 D3」, **76** (3), 251-263.
- 箕輪在弘・鈴木琢磨 (2018) 新大久保地区における在留外国住民の多国籍化—都市部の多文化共生を考える前に—. 「東洋大学社会学部紀要」, **55** (2), 49-65.
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, **28**(4), 281-298.
- Chen, J. V., Deng, W. S., Yang, T. C. & Stephan A. M. (2012) Geographically weighted quantile regression (GWQR): An application to U.S. mortality data. *Geographical Analysis*, **44**, 134-150.
- Fan, J. & Li, R. (2001) Variable selection via nonconcave penalized likelihood and its oracle properties. *Journal of the American Statistical Association*, **96** (456), 1348-1360
- Fotheringham, A. S., Charlton, M. E., & Brunsdon, C. (1998). Geographically weighted regression: A natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, **30**(11), 1905–1927.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationship (1st edition). Wiley.
- Jing, B., Yang, G., Yu, X. & Zhang, C (2018) Fused-MCP with application to signal processing. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, **27** (4), 871-886
- Koenker, R. & Bassett, G. Jr. (1978) Regression quantile. *Econometrica*, **46** (1), 33-50.
- Koenker, R. & Hallock, K.F. (2001) Quantile regression. *Journal of Economic Perspectives*, **15** (4), 143-156.
- Lee, R. E., Noh, H., & Park, U. B. (2014) Model selection via Bayesian information criterion for quantile regression models. *Journal of the American Statistical Association*, **109** (505), 216-229.
- Tibshirani, R. (1996) Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, **58** (1), 267-288.
- Tibshirani, R., & Taylor, J. (2011) The solution path of the generalized lasso. *The Annals of Statistics*, **39** (3), 1335-1371.
- Wu, Y. & Liu, Y. (2009) Variable selection in quantile regression. *Statistica Sinica*, **19** (2), 801-817.
- Zhang, C. H. (2010) Nearly unbiased variable selection under minimax concave penalty. *The Annals of Statistics*, **38** (2), 894-942.
- Zou, H. (2006) The adaptive lasso and its oracle properties. *Journal of the American Statistical Association*, **101** (476), 1418-1429.

Group Fused MCP に基づく組成データの異質地域検出手法の提案

石川 理人*・井上 亮**

Detecting Heterogeneous Regions in Compositional Data Based on Group Fused MCP

Masato Ishikawa*, Ryo Inoue**

Abstract: Compositional data refers to data representing the proportions of components in a given subject. The composition obtained for each zone, such as municipality, constitutes a type of spatial data that experiences varying influences depending on its location. To understand the regional characteristics, it is significant to capture such regional variations in compositional data. This study proposes a new method to identify regional clusters that have common factors influencing composition. Our method sets up an individual parameter vector for each zone as the first step. Next, we utilize regularization employing the MCP function to estimate shared parameter vectors for regions that share factors. To illustrate the effectiveness of our approach, we analyze vote shares by political party.

Keywords: 組成データ (compositional data), スパースモデリング (sparse modeling), 空間的異質性 (spatial heterogeneity), MCP 正則化 (MCP regularization)

1. 序論

組成データとは、ある対象を構成する要素の割合を表すデータである。空間データには組成データの形式をとるものも多く、一例として市区町村ごとに集計した年齢階層別人口割合や政党別得票率などが挙げられる。空間データは地域ごとの特徴を反映するため、場所によってデータの生成過程は異なることが多い。このような空間的異質性を捉える分析を組成データを対象として行えば、各地域の特徴の把握につながると期待される。

データの空間的異質性には、空間上で滑らかにデータの性質が変化する連続的な空間的異質性と、ある境界でデータの性質が不連続に変化する離散的な空間的異質性が存在する。このうち、離散的な空間的異質性が生じる要因としては、例えば市区町村などの区域ごとに政策や環

境が異なることが挙げられる。離散的な空間的異質性を捉える分析アプローチの1つとして、スパースモデリング手法の1つである Generalized Fused Lasso (GFL: Tibshirani & Taylor, 2011) がある。この手法は、観測点どうしが所与の隣接関係を有するデータを対象として、各観測点で固有のパラメータを設定し、隣接するパラメータの差の絶対値に比例する正則化を行うことによって、値の差が小さいパラメータを共通の値として推定する。これにより、データの生成過程が大きく異なる境界においてパラメータの値が不連続に変化する結果が得られるため、地域ごとの特徴把握を目的とした手法に応用できる。ただし、GFL を用いた分析には課題も存在する。第一に、GFL は各観測点に対応するパラメータがスカラーであることを前提とした手法であるため、組成データを対象とした分

* 学生会員 東北大学大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 E-mail: masato.ishikawa.r4@dc.tohoku.ac.jp

** 正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

析のように各観測点に対応するパラメータがベクトルとなる場合には、GFL をそのまま適用することはできない。第二に、GFL はパラメータの値の差の大小に依らず正則化の強さが等しいため、必ずしも値が近いパラメータから優先的に共通の値として推定されるとは限らず、その結果として得られたパラメータの値が実態を正しく反映しない可能性がある。

前者への対処法としては、GFL におけるスカラーのパラメータの差の絶対値に対する正則化を、ベクトルのパラメータの距離に対する正則化に拡張することが考えられる。あるグループに属するパラメータに対してまとめて正則化を行う Group Lasso (Yuan & Lin, 2006) が提案されており、これを隣接するパラメータの差分ベクトルを構成する各要素に対して適用することにより、正則化を強めると隣接するパラメータが共通のベクトルとして推定される問題として定式化することができる。一方、後者への対処法としては、正則化を行う対象の絶対値の大小に依らず勾配が一定である Lasso の正則化関数の代わりに、正則化を行う対象の絶対値が大きくなるほど勾配が緩やかになる MCP (Zhang, 2010) の正則化関数を用いることにより、値が近いパラメータから、より優先して共通の値に推定される効果が期待できる。

以上の点を踏まえ、本研究では、MCP の正則化関数を用いて、組成データの離散的な空間的異質性を捉える手法を提案する。隣接するパラメータの差分ベクトルおよび各パラメータベクトル自体に対し、Group MCP (Breheny & Huang, 2009) に基づく正則化を行うことによって、対象地域全体の傾向と類似した地域のパラメータが 0 に推定され、組成の形成過程が特徴的な地域が共通の非 0 のパラメータベクトルとして推定される結果を得る。組成データは、要素の総和が定数となることに起因して、実空間で定義された統計処理をそのまま適用できないことが知られている。組成データが属する単体空間から実空間への写像方法として対数比変換

(Aitchison, 1986; Egozcue et al., 2003) が提案されており、本研究では対数比変換した各区域の組成を目的変数としたモデルによって分析を行う。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、組成データ分析に関する既往研究について整理する。第 3 章では、既存のスパースモデリング手法である Lasso, GFL, Group Lasso, MCP について整理する。第 4 章では、提案手法の定式化とアルゴリズム、およびハイパーパラメータの決定基準について述べる。第 5 章では、実データを対象とした提案手法による分析例を紹介し、結果から得られる知見をまとめる。第 6 章では、本研究の成果と今後の課題を述べる。

2. 組成データ分析に関する既往研究

組成データは、複数の正の要素によって構成され、それらの総和が定数 (1 あるいは 100%) となるベクトルとして定義される。

$$\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_D), \\ y_1, \dots, y_D > 0, \quad y_1 + \dots + y_D = 1 \quad (1)$$

組成データを構成する D 個の要素のうち、 $D - 1$ 個が与えられると、要素の総和が定数であるために、残りの 1 つの要素の値は自動的に定まる。よって、組成データの属する空間の次元数は、要素数 D よりも 1 少なく、各要素の独立性は保たれない。また、各要素が正の値をとることにより、組成データの分布は、 $D - 1$ 次元空間内において有限となる。このような複数の制約が存在する組成データの属する空間は単体空間と呼ばれ、実空間で定義された統計処理をそのまま組成データに対して適用すると、さまざまな不都合を生じる (Aitchison, 1986)。このことから、各種統計処理を行う前に、組成データを単体空間から実空間に写像する操作が必要になる。

Aitchison (1986) は、組成データにおいては各要素の値そのものは意味を持たず、要素間の比率のみが重要であることを指摘し、相加対数比

変換（ALR 変換）と有心対数比変換（CLR 変換）を提案した．ALR 変換では，基準とする要素 y_{d^*} を決めた上で，それ以外の要素と y_{d^*} の比の対数をとる．

$$\begin{aligned} alr(\mathbf{y}) &= \ln\left(\frac{\mathbf{y}_{-d^*}}{y_{d^*}}\right), \\ \mathbf{y}_{-d^*} &= (y_1, \dots, y_{d^*-1}, y_{d^*+1}, \dots, y_D) \end{aligned} \quad (2)$$

また，CLR 変換では，変換の際の基準を，全要素の幾何平均 $g(\mathbf{y})$ とし，各要素と $g(\mathbf{y})$ の比の対数をとる．

$$clr(\mathbf{y}) = \ln\left\{\frac{\mathbf{y}}{g(\mathbf{y})}\right\}, \quad g(\mathbf{y}) = \sqrt[D]{y_1 \dots y_D} \quad (3)$$

これらの変換を行うことにより，組成データはその特有の制約に起因する不都合な性質の多くを解消でき，実空間で定義された統計処理を行うことが可能になる．

ただし，ALR 変換や CLR 変換には欠点も存在する．ALR 変換は組成 $\mathbf{y}$ を $D-1$ 次元のベクトルに変換し，定数和制約による要素間の相関を除去できる一方で，基準とする要素 y_{d^*} の選択によって，変換後のベクトルの分布やベクトル間の距離が変化する．また，CLR 変換は，変換後のベクトルが一意に定まる一方で，その各要素の総和は 0 となり，依然として定数和制約による要素間の相関が残る．これらの欠点を克服すべく，Egozcue et al. (2003) は新たに等長対数比変換（ILR 変換）を提案した．

$$ilr(\mathbf{y}) = \ln(\mathbf{y}) \mathbf{U} = clr(\mathbf{y}) \mathbf{U} \quad (4)$$

ここで， $\mathbf{U}$ は $D \times (D-1)$ 行列であり，その各列 $\mathbf{u}_{j,j}$ は以下の条件を満たす正規直交基底である．

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}_{j,j}\|_2 &= 1, \quad \sum_{i=1}^D u_{ij} = 0, \quad j \in \{1, \dots, D-1\} \\ \mathbf{u}_{j,j} \cdot \mathbf{u}_{j',j'} &= 0, \quad j, j' \in \{1, \dots, D-1\}, \quad j \neq j' \end{aligned} \quad (5)$$

ILR 変換は組成 $\mathbf{y}$ を $D-1$ 次元のベクトルに変換する上，変換後のベクトルの分布やベクトル間の距離が一意に定まる，CLR 変換の等長写像

である．このことから，ILR 変換は ALR 変換や CLR 変換の欠点を克服した変換方法といえる．

3. スパースモデリング手法に関する既往研究

3.1 Lasso

Lasso (Tibshirani, 1996) は，線形回帰モデルの目的関数に L1 正則化項を加えることによって，一部のパラメータを 0 に推定してモデルの汎化性能を高める，代表的なスパースモデリングの手法である．Lasso の推定式は， N をサンプル数， K を説明変数の数， y_i を目的変数， $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{iK})$ を説明変数， $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_K)^T$ を推定するパラメータとして，以下の式で表される．

$$\min_{\boldsymbol{\beta}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta})^2 + \lambda \sum_{k=1}^K |\beta_k| \quad (6)$$

λ は正則化の強さを調整するハイパーパラメータであり， λ が大きいほど，0 に推定されるパラメータの数は増加する．Lasso による推定結果は λ の値に依存するため，情報量規準や交差検証に基づき値を決定することが多い．

3.2 Generalized Fused Lasso (GFL)

観測点の間に所与の隣接関係が存在するデータについて，特徴的な変化点を検出することを目的とした Lasso の拡張手法が，GFL (Tibshirani & Taylor, 2011) である．GFL の式を以下に示す．

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\beta}} \quad & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta})^2 \\ & + \lambda \sum_{(i,j) \in F} |\beta_i - \beta_j| + \delta \lambda \sum_{k=1}^K |\beta_k| \end{aligned} \quad (7)$$

ここで， F は隣接するパラメータの組の集合を表す．Lasso では各パラメータの絶対値の大きさに対して正則化を行うのに対し，GFL では，隣接するパラメータの差の絶対値の大きさに対しても正則化を行うことにより，データの変化が小さい部分が共通のパラメータによって表現さ

れた結果を得る。

3.3 Group Lasso

Lasso は、各パラメータに対して個別の正則化を行うが、複数のパラメータがグループを構成する場合に、グループごとの正則化を行う Lasso の拡張手法が、Group Lasso (Yuan & Lin, 2006) である。Group Lasso は、 β_k をグループ k に含まれるパラメータを要素としたベクトル、 w_k をグループ k に含まれるパラメータの数として、以下の式で表される。

$$\min_{\beta} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i \beta)^2 + \lambda \sum_{k=1}^K \sqrt{w_k} \|\beta_k\|_2 \quad (8)$$

この定式化によって、各グループに含まれるパラメータの推定値は、あるハイパーパラメータ λ の値において同時に 0 となり、グループごとの変数選択を行うことができる。

3.4 MCP

Lasso は一部のパラメータを 0 に推定することによって効率的に変数選択を行うことができる手法であるが、非 0 に推定されたパラメータであっても、その値が 0 に近づくバイアスを生じる。このバイアスを軽減することを目的として、Zhang (2010) は Lasso の改良手法である MCP を提案した。MCP の推定式は以下の式で表される。

$$\min_{\beta} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i \beta)^2 + \sum_{k=1}^K \rho(\beta_k | \lambda, \mu) \quad (9)$$

$$\rho(\beta_k | \lambda, \mu) = \begin{cases} \lambda |\beta_k| - \frac{\beta_k^2}{2\mu} & (|\beta_k| < \mu\lambda) \\ \frac{\mu\lambda^2}{2} & (|\beta_k| \geq \mu\lambda) \end{cases}$$

Lasso と異なる点は、正則化項の形状にある。Lasso の正則化項は、パラメータの値が 0 から離れるにつれて線形に増加するのに対し、MCP の正則化項は 2 次関数と定数をつなぎ合わせた形状をしており、パラメータの値が 0 から離れるにつれて勾配が緩やかになり、ある点で完全に

勾配は 0 となる。これにより、十分に絶対値が大きいパラメータは正則化の影響を受けず、値が 0 に近づくバイアスを生じない。正則化項の 2 次関数部分の曲率はハイパーパラメータ μ に依存し、 $\mu \rightarrow \infty$ とすれば、Lasso の正則化項と一致する。

MCP についても Lasso 同様、パラメータの差に対して正則化を行う Fused MCP (Jing et al., 2018) や、複数のパラメータで構成されるグループごとに正則化を行う Group MCP (Breheny & Huang, 2009) といった拡張手法が提案されている。いずれの手法も Fused Lasso や Group Lasso の正則化によるバイアスを軽減するが、Fused MCP を用いることには、推定値のバイアスを軽減すること以外に、より妥当な変化点を検出する効果も期待できる。Fused Lasso においては、隣接するパラメータの値の差の大小に依らず、正則化の強さが等しいため、元データの値の差が小さい部分が必ずしも優先して共通の値となるとは限らない。一方、Fused MCP においては、値の差が小さいほど強い正則化がかかるため、元データの値の差が小さい部分がより優先して共通の値となりやすい。まとめると、Fused Lasso と比較した Fused MCP の利点は、正則化によるバイアスが軽減できる点と、類似する隣接パラメータほど強い正則化がかかり、優先して共通のパラメータとして推定されやすくなる点の 2 点であると言える。

4. 提案手法

4.1 定式化

本論文で提案する手法は、ILR 変換した組成データを目的変数とし、説明変数と目的変数の関係を表す、対象地域全体で共通のパラメータ行列 $\mathbf{B}$ と、説明変数と目的変数の全域共通の関係だけでは表現できない空間的異質性を表す、各区域 i で固有のパラメータベクトル γ_i を推定することによって、組成の生成過程の不連続な地域差を把握することを目指す。提案手法のモデルは以下の式で表される。

$$\mathbf{y}_i^* = \mathbf{x}_i \mathbf{B} + \boldsymbol{\gamma}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{y}_i^*$ は各区域 i の D 次元の組成 $\mathbf{y}_i$ を ILR 変換した $D-1$ 次元のベクトル、 $\mathbf{x}_i$ は各区域 i の説明変数をまとめた K 次元のベクトル、 $\mathbf{B}$ は説明変数と目的変数の全域共通の関係を表す $K \times (D-1)$ の行列、 $\boldsymbol{\gamma}_i$ は各区域 i の空間的異質性を表す $D-1$ 次元のベクトルである。ただし、 $\mathbf{x}_i$ の 1 番目の要素は、定数項に対応する 1 とする。本論文では、上記のモデルを全区域についてまとめた以下の行列形式の表記も用いる。

$$\mathbf{Y}^* = \mathbf{X}\mathbf{B} + \mathbf{\Gamma} + \mathbf{E} \quad (11)$$

式中の行列の各行は各区域 i のモデルが対応する。

上記のモデルに対し、提案手法では以下の最適化問題を解くことによりパラメータを推定する。

$$\min_{\mathbf{B}, \mathbf{\Gamma}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{y}_i^* - \mathbf{x}_i \mathbf{B} - \boldsymbol{\gamma}_i\|_2^2 + \sum_{(i,j) \in F} \rho(\boldsymbol{\gamma}_i - \boldsymbol{\gamma}_j | \lambda, \mu) + \delta \sum_{i=1}^N \rho(\boldsymbol{\gamma}_i | \lambda, \mu) \quad (12)$$

ここで、 N は区域数、 F は隣接する区域の組の集合を表す。また、 $\rho(\boldsymbol{\xi} | \lambda, \mu)$ は、 $\boldsymbol{\xi}$ に対する正則化項であり、以下の式で表される。

$$\rho(\boldsymbol{\xi} | \lambda, \mu) = \begin{cases} \lambda \|\boldsymbol{\xi}\|_2 - \frac{\|\boldsymbol{\xi}\|_2^2}{2\mu} & (\|\boldsymbol{\xi}\|_2 < \mu\lambda) \\ \frac{\mu\lambda^2}{2} & (\|\boldsymbol{\xi}\|_2 \geq \mu\lambda) \end{cases} \quad (13)$$

この正則化項は、 $\boldsymbol{\xi}$ に対する正則化を徐々に強めた際に、ある段階で $\boldsymbol{\xi}$ を構成する各要素が同時に 0 となる、Group MCP の正則化項である。目的関数の第 2 項は隣接する $\boldsymbol{\gamma}_i$ の差分ベクトルに対し Group MCP に基づく正則化を行っており、本研究ではこの正則化を Group Fused MCP 正則化と呼称する。また、目的関数の第 3 項は $\boldsymbol{\gamma}_i$ 自体に対する Group MCP 正則化を行っている。これらの正則化により、全域共通の傾向だけでは説明できない異質性が存在する地域が、共通の

非 0 の $\boldsymbol{\gamma}_i$ によって表現され、それ以外の地域では、 $\boldsymbol{\gamma}_i = \mathbf{0}$ となる結果を得ることができる。具体的な推定方法については、次項で説明する。

MCP の正則化項を用いても、依然として正則化による推定値のバイアスが残る。そこで提案手法では、最適化問題により $\boldsymbol{\gamma}_i$ が共通の非 0 の値をとる区域の集合を得たのち、その情報を所与の説明変数として OLS 推定をし直す 2 段階の処理を行う。具体的には、最適化問題に基づく推定によって、非 0 かつ共通の $\boldsymbol{\gamma}_i$ の値をとる区域の集合が G 個形成されたとき、各集合への各区域の所属を表す $N \times G$ の行列 $\mathbf{H}$ が作成できる。例えば、領域 i が 1 番目の集合に属する場合には、 $\mathbf{H}_{i,1} = (1, 0, \dots, 0)$ とし、領域 i がいずれの集合にも属さない場合、すなわち $\boldsymbol{\gamma}_i = \mathbf{0}$ となる場合には、 $\mathbf{H}_{i,1} = \mathbf{0}$ とする。この行列 $\mathbf{H}$ を所与の説明変数行列とした OLS 推定を、目的変数の各要素 d について以下のように行えば、集合ごとのパラメータ推定値 $\hat{\mathbf{\Gamma}}^G$ が得られる。

$$(\hat{\mathbf{B}}_{,d}, \hat{\mathbf{\Gamma}}_{,d}^G) = \underset{\substack{\mathbf{B}_{,d}, \mathbf{\Gamma}_{,d}^G \\ d \in \{1, \dots, D-1\}}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{Y}_{,d} - \mathbf{X}\mathbf{B}_{,d} - \mathbf{H}\mathbf{\Gamma}_{,d}^G\|_2^2, \quad (14)$$

提案手法における最終的な $\mathbf{\Gamma}$ の推定値は、 $\hat{\mathbf{\Gamma}} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{\Gamma}}^G$ とする。

4.2 アルゴリズム

提案手法の目的関数は、MCP 正則化項を重ね合わせた複雑な形状をしており、明示的に最適解を得ることが難しい。そこで、本研究では MM アルゴリズム (Hunter & Li, 2005) を応用したアルゴリズムを提案する。MM アルゴリズムは最適化問題の逐次的な解法である。例えば、 $\hat{\boldsymbol{\beta}} = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\beta}} f(\boldsymbol{\beta})$ を推定する問題を考える。 t 回目のステップにおけるパラメータの値を $\boldsymbol{\beta}^{(t)}$ とし、 $\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\beta}^{(t)}$ において目的関数 $f(\boldsymbol{\beta})$ に接する凸関数 $f_a^{(t)}(\boldsymbol{\beta})$ によって、目的関数を近似する。そして、近似した目的関数について最適解を求め、これを $\boldsymbol{\beta}^{(t+1)}$ とする。この操作を繰り返すことによって、最適解へと収束させる。

提案手法の場合、目的関数内のすべての正則化項を個別に2次関数に近似して足し合わせるにより、近似した目的関数と各ステップの解を得ることができる。正則化を行う対象を ξ とすると、正則化項は(13)式のように表される。 $\xi = \xi^{(t)}$ において正則化項に接する2次関数は、

$$\rho_a^{(t)}(\xi | \lambda, \mu) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\|\xi^{(t)}\|_2} - \frac{1}{\mu} \right) \|\xi\|_2^2 + \text{const.} & (\|\xi^{(t)}\|_2 < \mu\lambda) \\ \text{const.} & (\|\xi^{(t)}\|_2 \geq \mu\lambda) \end{cases} \quad (15)$$

であり、目的関数内の各正則化項をこの式で近似し、 $\mathbf{F}$ によって微分して0とおけば、 $\mathbf{B}$ の値を所与とした $\mathbf{F}$ の解を求めることができる。なお、 $\mathbf{B}$ の値も、各ステップにおける $\mathbf{F}$ の値を所与として並行して更新する。

4.3 ハイパーパラメータの決定

提案手法によって得られる結果は、ハイパーパラメータ λ, δ, μ の設定によって変化するため、適切な基準によってこれらの値を定める必要がある。変数選択におけるハイパーパラメータの決定基準としては、情報量規準であるAICやBICが用いられることが多い。ただし、これらの基準を用いるのが適切なのは、パラメータ数がサンプル数に依存しない場合であり、サンプル数（区域数）が増加するとパラメータ数も増加する提案手法においては適さない。Wang et al. (2009)は、パラメータ数がサンプル数に依存する設定の変数選択問題において、整合的なハイパーパラメータの決定を行うModified BICを提案した。Modified BICの式は、 N をサンプル数、 σ^2 を残差二乗和、 p^* を選択されたパラメータ数、 p_N を事前に用意するパラメータ数として、以下の式で表される。

$$MBIC = \ln(\sigma^2) + \frac{p^* \times \ln(N)}{N} \times C_N, \quad C_N = \ln \ln(p_N) \quad (16)$$

この指標の第1項はモデルの適合度に、第2項はモデルの単純さの度合いに対応し、値が小さいほど、単純かつデータに適合した適切なモデルであるとみなされる。 $C_N = 1$ のとき、Modified BICは従来のBICと一致する。本研究では、以下に示すModified BICを各ハイパーパラメータ設定について計算し、その値が最小となる設定により得られた結果を最終的に選択する。

$$MBIC = \ln \left(\sum_{i=1}^N \|\mathbf{y}_i^* - \mathbf{x}_i \hat{\mathbf{B}} - \hat{\mathbf{r}}_i\|_2^2 \right) + \frac{G \times \ln(N)}{N} \times \ln \ln(N) \quad (17)$$

ここで、 G は非0かつ共通の $\hat{\mathbf{y}}_i$ の値をとる区域の集合の数である。各ハイパーパラメータのうち、正則化項の曲率に対応する μ の設定によっては目的関数が凸性を満たさず、局所解で結果が収束する可能性がある。そこで、 a_i を区域 i の隣接区域数として、目的関数が凸関数となる以下の十分条件を満たす範囲で μ を設定する。

$$\mu > a_{\max} + \delta, \quad a_{\max} = \operatorname{argmax}_i a_i \quad (18)$$

5. 実データを対象とした分析

5.1 データ

日本の衆議院選挙（2021）における政党別得票率を対象として、提案手法による分析を行う。対象地域は、関東地方の1都6県346市区町村とする。今回は簡単のため、政党別得票率は与党 y_{i1} と野党 y_{i2} の2区分に分類し、各区域の目的変数 y_i^* は政党別得票率をILR変換したスカラー値とする。説明変数は、産業別就業者数割合（3区分）と大学卒業者数割合を用いる。提案手法の説明変数は本来、組成データでもスカラーでも構わないが、上記の説明変数はいずれも組成データであるので、それぞれILR変換して x_{i2}, x_{i3}, x_{i4} とする。以上の3変数に定数 $x_{i1} = 1$ を加えた4変数をまとめて $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4})$ とする。ハイパーパラメータは、 μ は15に固定

し、 δ は選択肢 {0.5, 1.0, 2.0} を用意した上で、 λ を各設定に対し連続的に変化させて Modified BIC が最適となる値を探索する。

5.2 分析結果

事前に空間的異質性を考慮しないモデル $y_i^* = x_i\beta + \varepsilon_i$ により OLS 推定を行ったところ、パラメータの推定値はすべての説明変数に関して、有意水準 0.1% で有意であった。提案手法はパラメータ $\mathbf{B}, \mathbf{\Gamma}$ のうち $\mathbf{B}$ に対しては正則化を行わないが、この確認によって説明変数 x_2, x_3, x_4 をすべて分析に用いることの妥当性が示された。

本分析では目的変数がスカラーであるため、以下では提案手法における $\mathbf{B}, \mathbf{\gamma}_i$ はそれぞれ β, γ_i と表記する。Modified BIC の値は、 $(\lambda, \delta) = (0.0257, 1.0)$ において最適となった。このときの $\hat{\gamma}_i$ の空間分布を図 1 に示す。 $\hat{\gamma}_i$ の値は、政党別得票率に対する地域特性の影響の度合いを示しており、 $\hat{\gamma}_i$ が正の地域では与党の得票率を増大させる地域特有の要因が、 $\hat{\gamma}_i$ が負の地域では野党の得票率を増大させる地域特有の要因が存在すると推測される。また、 $\hat{\beta}$ の値を表 1 に示す。 γ_i を含めないモデルでは、すべてのパラメータが有意であったが、提案手法では、産業別就業者数割合の政党別得票率への影響は有意ではなくなっている。

5.3 考察

分析結果は、群馬県の広い範囲や、茨城県・千葉県の一部の地域などで、与党寄りの空間的異質性が、埼玉県・栃木県の広い範囲などで、野党寄りの空間的異質性が存在することを示唆している。 γ_i の正負が県境を挟んで逆転している場所も存在し、各市区町村の属する県が投票先の決定要因の 1 つとなっていることが推測できる。 $\hat{\gamma}_i \neq 0$ であっても、広い範囲で共通の値をとっている地域は多く、これらの地域では政党別得票率の生成過程が共通となっていると考えられる。一方、東京都心部や三浦半島などでは $\hat{\gamma}_i$ が局所的に正に、栃木県塩谷町などでは $\hat{\gamma}_i$

が局所的に負になっており、これらの地域では、 x_i では説明できないその地域特有の政党別得票率の生成過程が存在すると考えられる。 $\hat{\gamma}_i = 0$ となる市区町村は対象地域全体の市区町村数の半分以上を占め、これらの地域では顕著な政党別得票率の生成過程の偏りが存在しないと考えられる。このように、提案手法による分析結果は、全域共通のパラメータの推定では把握できない、組成の生成過程の地域差を捉えており、地域ごとの特徴を把握する上での提案手法の有効性が示唆される。

表 1 からは、産業別就業者数割合の政党別得票率への影響が、提案手法による分析においては有意でなくなっていることが読み取れる。この要因として、産業別就業者数割合と $\hat{\gamma}_i$ の相関、および両者の空間分布の特徴の違いが影響していることが予想される。産業別就業者数割合は、空間的に連続的に変化する傾向のあるデータである一方、分析結果における $\hat{\gamma}_i$ は、値がある境界で大きく変化する、空間的に不連続な分布となっている。産業別就業者数割合よりも、地域特性の影響と捉えた方が、県境などで大きく変化する政党別得票率の生成過程が説明しやすく、かつ産業別就業者数割合と $\hat{\gamma}_i$ の間には共線性が

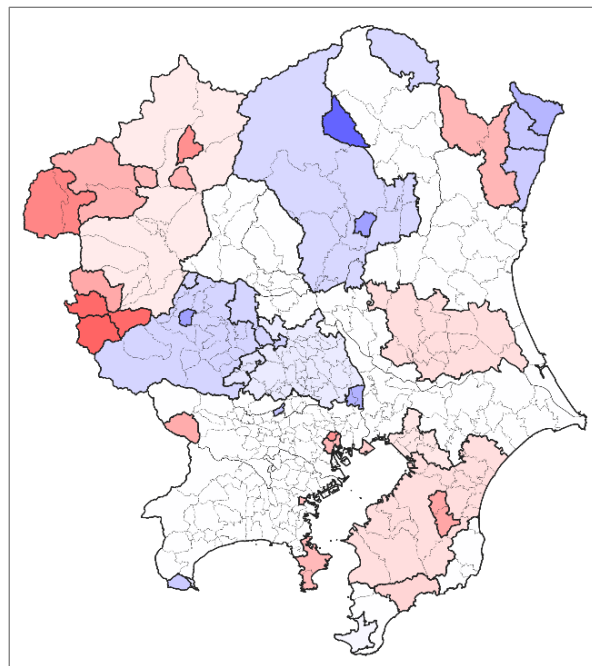


図 1 $\hat{\gamma}_i$ の分布

表1 $\hat{\beta}$ の値および有意性

変数	変数の意味	OLS 推定	提案手法
x_1	1	-0.489***	-0.338***
x_2	$\frac{1}{\sqrt{6}} \ln \frac{ind_3^2}{ind_1 ind_2}$	0.122***	0.000
x_3	$\frac{1}{\sqrt{2}} \ln \frac{ind_2}{ind_1}$	-0.087***	-0.007
x_4	$\frac{1}{\sqrt{2}} \ln \frac{dip}{1-dip}$	-0.385***	-0.321***

‘***’ $\dots p < 0.001$ ‘ ’ $\dots p \geq 0.1$

ind_1, ind_2, ind_3 は第1次～第3次の各産業就業者数割合を、 dip は大学卒業者数割合を表す。

存在することから、産業別就業者数割合が提案手法による分析では有意でなくなったと解釈できる。

6. 結論

本研究では、組成データの生成過程が異なる地域を検出することを目的とした手法を提案した。各区域の組成に対して対数比変換の一種である ILR 変換を行い目的変数とし、各区域固有のパラメータに対して Group Fused MCP および Group MCP に基づく正則化を行うことによって、組成の生成過程が特徴的な地域を共通の非0のパラメータに推定する。政党別得票率を対象とした分析によって、地域ごとの特徴を把握する上での提案手法の有効性が示唆された。

本研究には課題も存在する。第一に、分析結果に影響するハイパーパラメータ λ, δ, μ の決定手順である。提案手法では情報量規準である Modified BIC に基づきハイパーパラメータを決定するが、Modified BIC の式における $C_N = \ln \ln(N)$ は、既往研究においては重みづけの一例として示されているにすぎず、本研究においてもこの設定がハイパーパラメータの決定において妥当であるかは明らかになっていない。よって、シミュレーションデータを用いた実験によって、現状の Modified BIC が妥当な結果を選択するかを検証する必要がある。また、実デー

タ分析においては μ の値を1つに固定したが、 μ の値の選択も最終的な結果に影響を与える可能性があるため、 μ の値の違いによって分析結果が受ける影響の程度も確認する必要がある。第二に、提案手法は Γ に対してのみ正則化を行い、 B に対しては正則化による変数選択を行わない。しかし、実データ分析において確認されたように、最終的な分析結果において、 B を構成する一部のパラメータの有意性が失われることもあり、このようなパラメータは0に推定されることが望ましい。よって、 B に対する正則化項を提案手法の目的関数に追加することを検討する必要がある。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21H01447 の助成を受けた。

参考文献

Aitchison, J. (1986) *The Statistical Analysis of Compositional Data*. London: Chapman & Hall.

Breheny, P. and Huang, J. (2009) Penalized methods for bi-level variable selection. *Statistics and Its Interface*, 2(3), 369-380.

Egozcue, J.J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G. and Barceló-Vidal, C. (2003) Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 35, 279-300.

Hunter, D.R. and Li, R. (2005) Variable selection using MM algorithms. *Annals of statistics*, 33(4), 1617-1642.

Jing, B., Yang, G., Yu, X. and Zhang, C. (2018) Fused-MCP with application to signal processing, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 27(4), 872-886.

Tibshirani, R. (1996) Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, 58(1), 267-288.

Tibshirani, R.J. and Taylor, J. (2011) The solution path of the generalized lasso. *The Annals of*

Statistics, **39**(3), 1335-1371.

Wang, H., Li, B. and Leng, C. (2009) Shrinkage tuning parameter selection with a diverging number of parameters. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, **71**(3), 671-683.

Yuan, M. and Lin, Y. (2006) Model selection and

estimation in regression with grouped variables.

Journal of the Royal Statistical Society, B, **68**(1), 49-67.

Zhang, C. (2010) Nearly unbiased variable selection under minimax concave penalty. *Annals of statistics*, **38**(2), 894-942.

Oral Presentation in GISA

自治体

Chair: Toshikazu Seto (Komazawa University)

Sat. Oct 28, 2023 3:20 PM - 4:40 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F4-02] 2次元地図と3次元データを用いた道路損傷データ共有システムの提案

*Atsushi Murakami¹, Yoshihiro Yasumuro², Satoshi Kubota² (1. Kansai University Graduate School, 2. Kansai University)

3:20 PM - 3:40 PM

[F4-03] 公共賃貸住宅の維持管理・運営段階用の BIMと GISの連携に関する研究～空間オブジェクトと公共賃貸住宅用の3次元位置情報を活用したタブレット端末用点検記録アプリケーションの開発を通じて～

*Koji katayama Katayama¹ (1. National Graduate Institute for Policy Studies)

3:40 PM - 4:00 PM

[F4-04] 登記所備付地図オープンデータを用いた土地区画形状分析

*Kazuto AOKI¹ (1. Suzuka University Junior College)

4:00 PM - 4:20 PM

[F4-05] 大規模災害時を想定した広域な土木施設の被害情報の収集・共有システム構築の試み

*Daiki Hayashi¹, Toru Shimada¹, Tomokazu Ito¹, Daiichiro Hori¹, Yoshinori Abe¹, Shoichi Yokoyama¹, Sayuri Yoshioka¹, Daisuke Kudo¹, Akiko Takeshima¹, Mina Kobayashi¹, Kento Tamagawa¹, So Tsuchiya¹, Katsumi Takizawa¹, Yuji Hayashi¹, Hirokazu Kyoso¹, Nobuhiro Yokoyama¹, Kouki Kawase², Nobuyuki Mannen², Toyokazu Banba², Yoshitomo Sugiyama² (1. Kokusai Kogyo Co., Ltd., 2. Aichi Prefectural Government, Bureau of Construction, Public Works Department, Planning Division)

4:20 PM - 4:40 PM

2次元地図と3次元データを用いた道路損傷データ共有システムの提案

村上 篤志*・安室 喜弘**・窪田 諭***

Proposal of road damage data sharing system using two-dimensional maps and three-dimensional data

Atsushi MURAKAMI*, Yoshihiro YASUMURO**, and Satoshi KUBOTA***

Social infrastructure facilities were intensively developed during the period of rapid economic growth, and there are approximately 720,000 road bridges in Japan. However, the proportion of these facilities that are more than 50 years old is expected to increase by 52% by 2029. Local governments are faced with problems such as manpower and budget shortages, but they still need to maintain and manage many of these facilities. Therefore, more efficient maintenance management is required by establishing a maintenance cycle in which records of inspections, diagnoses, and actions taken on road structures are linked to the next inspection, and preventive maintenance management is implemented. This study supports the maintenance cycle by centralizing inspection and repair records. We propose a system that measures damage to road pavement surfaces and structures as 3D point cloud data with excellent moving images and visual representations, combines this with 3D data such as 2D maps and PLATEAU along with an overview of the damage, and visualizes it on an infrastructure to manage it on a time axis.

Keywords: 道路維持管理 (road maintenance), 3次元データ (three-dimensional data), 点検 (inspection), 点群データ (point cloud data), 情報システム (information system)

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降に集中的に建設された道路構造物が多く存在する。建設から50年以上経過する施設の割合が、今後ますます増加していく見込みである。これにより、構造物の損傷などの不具合が多く発生することが予想され、維持管理費用の増加が見込まれる。地方公共団体では、人手不足や予算不足などの問題が深刻であるが、多くの施設を維持管理しなければならない。そのため、道路構造物を点検、診断、措置した記録を次の点検へつなげるメンテナンスサイクルを確立し、予防保全型の管理を行い、より効率的に維持管理することが求められている（国土交通省、2016）。

筆者らは、道路維持管理の効率化と点検・補修記録などのデータ蓄積を目的として、2次元地図上に道路損傷位置を3次元点群データとして可視化し、その損傷の概要を閲覧する道路損傷データ共有システムを開発（村上、2022、2023）した。道路維持管

理の専門家による評価実験を行い、道路損傷を3次元点群データとして蓄積する有用性が示唆された。一方、過去の補修記録や点検記録とともに管理する4次元的管理が要求されているという新たなニーズが明らかになった。

道路維持管理を支援するための情報システムを開発した研究として、窪田ら（2018）は紙の2次元地図と3次元プリンタを活用し、RFID（Radio Frequency Identifier）によって現場と事務所とで情報を共有する。ただし、3次元プリンタで出力するための手順に時間とコストを要する課題がある。江本ら（2019）は、AR（Augmented Reality）によって点検時に必要な情報である橋梁の基本諸元データや点検・補修履歴、橋梁の3次元モデルを閲覧するシステムを提案した。しかし、橋梁を簡易な3次元モデルに可視化したのみで、損傷の詳細が可視化されていない点と3次元データの蓄積を含むシステムの運用方法について課題がある。Dongら（2021）は、MMS

* 学生会員 関西大学大学院理工学研究科 (Kansai University Graduate School)

** 非会員 関西大学教授 環境都市工学部 (Kansai University)

*** 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (Kansai University)

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 E-mail : skubota@kansai-u.ac.jp

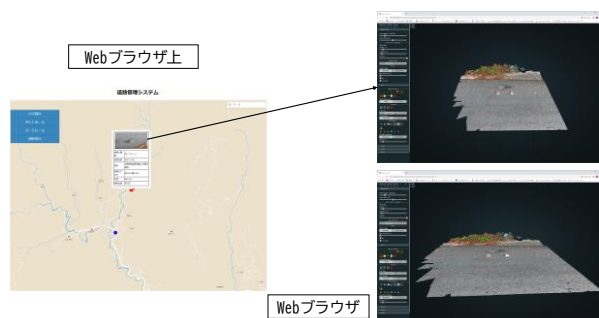


図-1 先行システムの画面

(Mobile Mapping System)や高解像度カメラなどで取得されたビックデータから必要な情報を抽出して、意思決定を支援するための PMS (Pavement Management System) のフレームワークを提案した。田中ら (2012) は、MMS から取得した橋梁の 3 次元点群データを用いて、維持管理に活用できる 3 次元現況図を自動で生成する手法を提案した。また、中村ら (2022) は、道路土工構造物の管理のため、MMS や LP (Laser Profiler) による 3 次元点群データと道路の線形を用いて、法面の点群データを自動抽出する手法を提案した。しかし、MMS は数年に一度計測されるため、日常に発生する損傷を網羅的に把握することは困難である。

以上を踏まえ、本研究では、道路の点検・補修記録の一元管理によるメンテナンスサイクルの支援を目的に、道路の舗装面と構造物の損傷を 3 次元点群データとして計測し、これを損傷の概要とともに 2 次元地図と 3 次元データの基盤データ上に可視化して、時間軸によって管理するシステムを検討する。システムでは、2 次元地図と 3 次元の基盤データ上に損傷位置を示し、損傷を 3 次元点群データで表す。3 次元の基盤データには、国土交通省の 3 次元モデル PLATEAU や 3 次元点群データによる地形データを用いる。ただし、全域の 3 次元データの整備が進んでいないことを考慮し、2 次元地図も基盤として用いる。そこでは、損傷の時間軸による管理方法、2 次元地図と 3 次元データの共存方法を考案する。本研究の対象構造物は、道路構造物、舗装面、法面、橋梁とする。

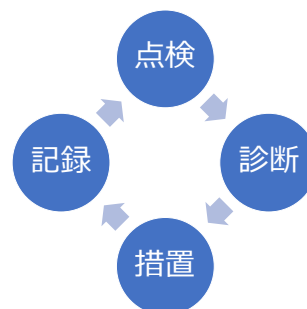


図-2 道路メンテナンスサイクル

2. 先行システムの概要

先行システムである道路損傷データ共有システム (村上, 2023) の画面を図-1 に示す。本システムは、道路舗装面や構造物の全体を 3 次元点群データによって表現するのではなく、損傷箇所のみを 3 次元点群データによって可視化し、計測にかかる時間短縮を図り、早期にシステムを利用できる環境を構築する特長がある。システムでは、2 次元地図上に損傷位置を可視化したマーカをクリックすると、損傷の 3 次元点群データと概要を閲覧できる。

システムの有用性を道路維持管理の専門家により評価した結果、3 次元点群データによる損傷の可視化については、損傷の詳細な凹凸を任意の角度から確認できる点の有用性が示唆された。また、住民が損傷を発見した際に通報するシステムは整備されているが、通報された写真や内容が蓄積されていないので、データを蓄積する要求が示された。道路を 3 次元でなく、過去の補修記録や点検記録とともに管理する 4 次元管理については課題が挙げられた。また、システムにデータを登録する際にかかる手間やコストについても課題が残った。

3. メンテナンスサイクルに基づくシステムの考察

道路のメンテナンスサイクル (図-2) は、道路構造物の健全性を把握するための点検・診断を行い、修繕の実施や通行規制などのその他に必要な措置を講じる。そして、これらの結果を次回点検へ反映するために記録・保存する。このサイクルを通して、構造物に求められる適切な性能をより長期間保存するための長寿命化計画などを作

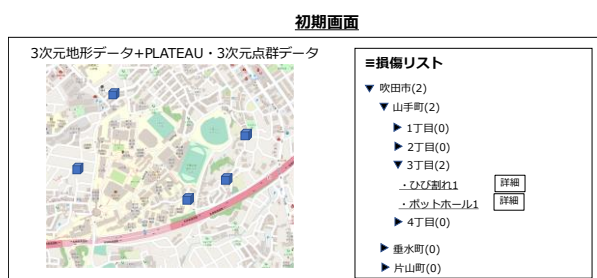


図-3 システムの画面イメージ

成・充実し、維持管理を効率的に行う。木下ほか（2022）は、玉名市を対象に市道における舗装メンテナンスサイクルの現状と課題を示し、現状の体制を変えることなく「巡視の機会を通じた路面管理」を速やかに構築する実践方法を示した。しかし、管理ICTは、現地での登録を想定しており、2次元の写真データとして損傷の状況を記録・蓄積されるため、経験の少ない若手職員が正しく状況理解できない可能性がある。

これらを踏まえ、本研究では、先行システムを改良して点検、診断、措置結果を3次元で記録し、メンテナンスを支援するシステムを提案する。点検者は、記録した過去の3次元点群データと点検時の3次元点群データとを比較し、損傷の進行状況を視覚的に把握できる。ただし、先行システムでは、1つの損傷位置に対して1つの3次元点群データと概要の登録に留まっており、複数時期のデータを登録できない。この課題と前章のニーズを踏まえて、2次元地図と3次元データを基盤とする道路損傷データ共有システムを検討する。

4. 道路損傷データ共有システムの設計

4.1. システム設計方針

先行システムと同様に、損傷の深さや微小な変形を定量評価するため、2次元の写真としてでなく、動画データから SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo) 処理により計測された3次元点群データや LiDAR (Light Detection and Ranging) 搭載のモバイル端末により計測した3次元点群データとして記録する。記録した3次元点群データは、ただ蓄積するのではなく、時系列毎に蓄積する。SfM/

MVS 処理に要する時間を考慮し、処理前の動画データとしても記録可能とする。記録された動画データは、のちにシステム機能により3次元点群データへと変換する。記録、蓄積された複数時期の損傷データの中から、ユーザが任意の時点で閲覧し、変化の経過や劣化の進行状況を容易に把握できる。国土交通データプラットフォームや My City Construction では、主に設計・施工成果が蓄積され、国土交通データプラットフォームでは、2023年8月時点では一県の施設諸元と点検データが登録されているのみである。国土交通省は、2022年7月から道路データプラットフォーム (xROAD) において道路施設の点検データを公開したが、定期点検の調書に基づくデータが対象であり、日常のパトロールにおける損傷データはなく、3次元データは公開されていない。舗装では、国土交通省が管理する約4.6kmのデータのみが公開される。本システムは、地域の幹線道路から生活道路までを対象に、即座に3次元データを構築、登録し、共有、参照する仕組みである。

損傷を3次元点群データで計測すると、周辺状況を把握することが困難である。周辺状況を含めての計測は、MMS などにより一部地域では進んでいるが、地方道路では十分に計測されていない。そこで、基盤として既存の2次元地図に加えて、国土交通省の PLATEAU プロジェクトで公開されている3次元都市モデル、地上型レーザスキャナなどにより計測された3次元点群データを用いる。PLATEAU プロジェクトは、国土交通省が推進する都市環境情報の収集・活用に関するプロジェクトであり、都市全体の詳細な地形や建物情報を含む3次元モデルを様々なファイル形式で提供しており、2023年現在で全国56都市のモデルがオープンデータとして公開されており、今後もオープンデータ化される都市が増加していく見込みである。

道路損傷の位置については、モバイル端末の GPS 情報や GPS 機能をオンにして撮影した写真を解析し、基盤データ上に可視化する。

4.2. 利用シーン

本システムは、道路管理担当職員が不足する地方公共団体や中小規模の地方公共団体において、定期

表-1 二時期のデータ形式の想定されるケース

	以前	最新
1	動画データ	3次元点群データ
2	動画データ	動画データ
3	3次元点群データ	3次元点群データ
4	3次元点群データ	動画データ

的な巡回時に、点検、診断、措置の結果を記録する際に利用される。

4.3. システムイメージ

開発する道路損傷データ共有システムのイメージを図-3に示す。設計方針に基づき、既存の2次元地図、PLATEAUの3次元都市モデルと地上型レーザスキャナなどにより計測された3次元点群データを用いた基盤上に、損傷位置を可視化する。ただし、可視化する損傷位置が増えると、注目すべき損傷位置の特定が困難になる。位置の特定を容易にするため、損傷位置を市町村毎に分類したリストを作成し、そこから注目すべき損傷をクリックすると、その位置を中心とした画面に遷移する機能を開発する。登録された点検・補修記録、損傷の状況を記録した動画・3次元点群データは、リストの詳細をクリックすると別画面に遷移し、閲覧可能になる。

システム設計方針として、損傷の状況を動画と3次元点群データとして記録・蓄積し、蓄積された複数時期のデータの中から、最新のデータとそれ以前のデータを同一画面上に表示し、損傷の進行状況の把握を容易にする。システムでは、動画データとして登録されたものは、のちに3次元点群データへの変換を想定しており、二時期のデータは3次元点群データであることが主である。ただし、変換には手間やコストを要するため動画データのまま蓄積されることも考えられる。そのため、同一画面上に表示する際に、最新のデータと以前のデータ形式が異なる可能性がある。二時期のデータとして想定されるケースを表-1に示す。データ形式が異なる場合と2つとも動画データの場合は同一画面上で、それぞれのデータを再生・閲覧する。データ形式が2つとも3次元点群データの場合は、二時期の損傷状況を比較するため、2つのデータの視点を連動し、常に同

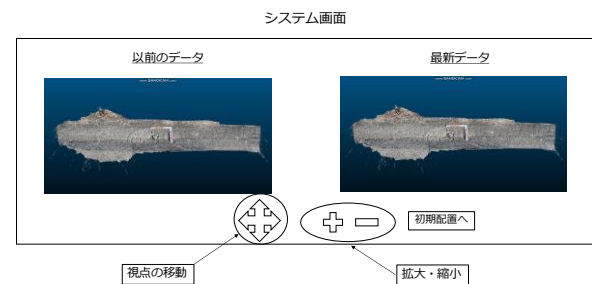


図-4 同一視点閲覧機能

一視点から閲覧できる機能の実装により、進行状況の把握を支援する（図-4）。

5. システム開発

5.1. 開発環境

本システムは、システム設計方針・システムイメージ実現のため、Unityを用いて開発する。Unityは、3Dグラフィック表現に優れたゲームエンジンで、C#を利用したスクリプティングが可能である。Unityで利用できる地図として、Google社のMaps SDK for Unity、Mapbox社のMapbox for Unityなどがある。これらは、2次元地図の表示に特化しており、3次元点群データやPLATEAUの3次元都市モデルとの併用には不向きである。そこで本研究では、2次元地図のみならず3次元地形データの表示が可能なCesium社のCesium for Unityを用いる。また、Cesium for Unityは3D Tiles形式のファイルをサポートしており、3D tiles形式で公開されているPLATEAUの3次元都市モデルとの重畳も容易である。

5.2. システム構成

本システムの構成を図-5に示す。道路管理者がシステムのデータベースに点検・補修記録、損傷の状況を記録した動画・3次元点群データを登録し、Cesium for Unity、PLATEAUを基盤としたシステムに反映する。

5.3. 損傷位置の可視化

Cesium for Unityの基盤データ上に、損傷位置を可視化するため、UnityのGame Objectを用いる。道路損傷位置は、緯度・経度のグローバル座標系を用いて特定される。しかし、UnityでのGame Objectの配置は、グローバル座標系でなく、Unity内のワー

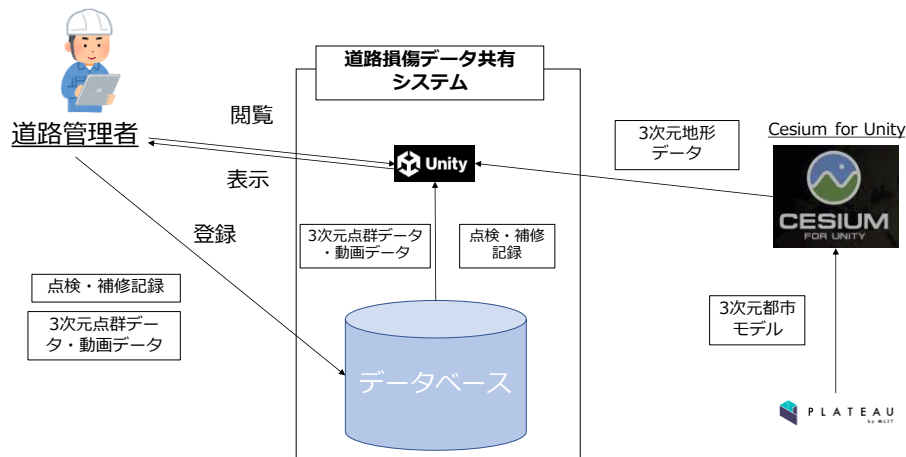


図-5 システム構成

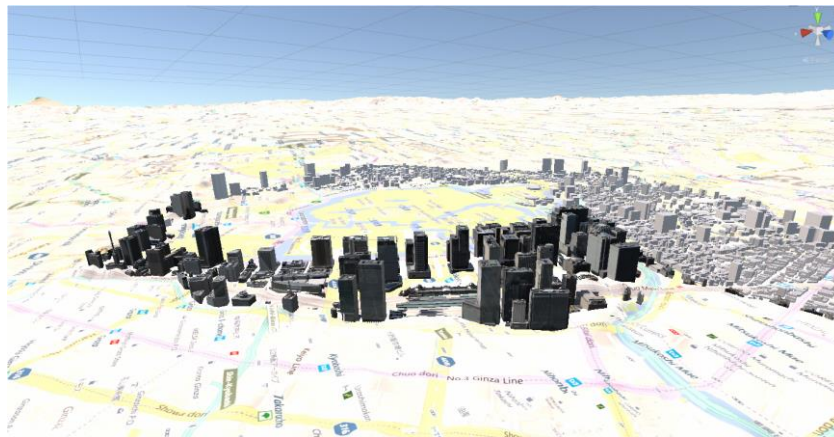


図-6 3次元都市モデルと2次元地図の重畳（東京都千代田区）

ルド座標系によって行われるため、グローバル座標系からワールド座標系への変換が必要となる。Cesium for Unityでは、Cesium Globe Anchor コンポーネントが標準で用意されている。Cesium Globe Anchorは、Game Objectを地球上の特定の位置に配置する際に用いられるもので、特定の緯度・経度・高度を指定すると、ワールド座標系へと自動で変換される。しかし、変換された座標系は単精度浮動小数点の座標で、地球上にオブジェクトを配置するためには精度が不十分である。そこで精度向上のため、倍精度浮動小数点の座標に変換するCesium Origin Shiftを用いる。これら2つのコンポーネントを用いて、Game Objectを正確に配置可能となる。

5.4. 3次元都市モデルとの重畳

本システムは道路損傷位置の可視化だけでなく、周辺の環境や地形情報も把握できるように、基盤

データと3次元都市モデルとの重畳を実現する。Cesium for Unityは、3D Tiles形式のファイルをサポートしている。システムでは、PLATEAU 公式の3D Tiles 配信サービス（国土交通省、2023）から特定地域のデータセットを指定し、「Cesium 3D Tileset」を用いて基盤データと2次元地図とを重畳した（図-6）。

6. おわりに

本研究では、道路メンテナンスサイクルの支援を目的に、2次元地図と3次元データを用いた道路損傷データ共有システムを提案し、ゲームエンジンUnityを用いて一部機能を開発した。今後の展望としては、設計方針・システムイメージに基づき、システムの開発、新たに計測、公開された3次元データの追加を行う。また、開発したシステムの評価実験を通じて有用性の評価を行う予定である。

参考文献

- 江本久雄・小野智生・中村秀明・河村圭（2019）橋梁カードによる AR を用いた点検情報へのアクセスの効率化.「土木学会論文集 F3(土木情報学)」, **75** (2), II_25-II_33.
- 木下義昭・佐川康貴・玉井宏樹・松永昭吾（2022）地方公共団体の生活道路における手作りの舗装メンテナンスサイクルの仕組み作り.「インフラメンテナンス実践研究論文集」, **1** (1), 494-503.
- 窪田諭・廣田嘉一・星加匡敦・南賢樹・鈴木泉・渡邊大介・丸山明（2018）2 次元地図と 3 次元プリンタモデルを用いた道路維持管理システムの提案.「土木学会論文集 F5(土木技術者実践)」, **74** (1), 1-10.
- 国土交通省（2023）Project PLATEAU. <<https://github.com/Project-PLATEAU>>.
- 国土交通省道路局国道・防災課道路保全企画室（2016）舗装点検要領策定について. <https://www.hid.or.jp/14gyousei_backnumber/2016data/1702/1702hosou_tenken_youryou.pdf>.
- 田中成典・北川悦司・姜文淵・安彦智史・川野浩平（2012）道路橋上部工の維持管理のための 3 次元現況図の自動生成に関する研究.「土木学会論文集 F3(土木情報学)」, **68**(2), I_181-I_189.
- 中村健二・塚田義典・梅原喜政・今井龍一・田中成典・中原匡哉・大月庄治（2022）MMS と LP の点群データを用いた道路土工構造物の抽出に関する研究.「土木学会論文集 F3(土木情報学)」, **78** (2), I_141-I_149.
- 村上篤志・安室喜弘・窪田諭（2022）3 次元点群による損傷データを用いる Web 型道路維持管理システムの提案.「地理情報システム学会学術研究発表発表大会講演集」, **31**.
- 村上篤志・安室喜弘・窪田諭（2023）3 次元点群による道路損傷データ共有システム.「土木学会論文集」, **79** (22), 22-22043, 1-9.
- Dong, J., Meng, W., Liu, Y. and Ti, J. (2021) A framework of pavement management system based on IoT and big data, *Advanced Engineering Informatics*, **47**, 1-7.

公共賃貸住宅の維持管理・運営段階用の BIM と GIS の連携に関する研究 - 空間オブジェクトと公共賃貸住宅用の 3 次元位置情報を活用した タブレット端末用点検記録アプリケーションの開発を通じて -

片山 耕治*

Research on collaboration between BIM and GIS for maintenance management and operation stages of public rental housing

- Utilizing Spatial Objects and 3D Location Data. This study also includes the development of an inspection record application designed for tablet terminals. -

Koji Katayama*

Abstract " In many local governments, there's a discernible decline in the number of engineers. This trend is increasingly coupled with the need to digitize traditional paper and visual records during the maintenance phase. With these challenges in view, the potential benefits of integrating BIM during the maintenance, management, and operational phases of public rental housing are receiving considerable attention. Notably, the majority of these public rental housing units are grouped into larger complexes, and it's common for municipalities to oversee multiple such establishments. This study explores an original approach in which each building's maintenance record is seamlessly integrated with a maintenance-focused BIM system. By leveraging tablets and specialized applications, the process introduces the simplification of maintenance data management in conjunction with 3D models, primarily through the updating of records and the assignment of absolute coordinates. This paper introduces pivotal aspect of our research was the investigation of the potential synergy between BIM, tailored specifically for the maintenance phase of public rental housing, and GIS, facilitated by the utilization of absolute coordinates.

Keywords : 公営住宅 (Public rental housing) ,BIM, GIS, 維持保全(maintenance)

1. はじめに

公営住宅は現在、全国に約 200 万戸あり、この維持管理については、今後の人手不足や維持保全業務の効率化のためにはデジタル化、更に、BIM 等の情報技術を取り入れることが有効であると考えられる。

特に、維持保全業務においては、維持保全情報として取り扱う点検箇所や修繕箇所を適切に管理することが重要だが、現状では単に点検箇所名等とそれに対応する図面により管理されている。このため、点検情報とその点検箇所を確認するためには、点検箇所対象名を手掛かりに図面を確認することが必要であり、維持保全情報の位置情報へのアクセスが容易であるとは言い難い。

そこで、BIM を導入し各種維持保全情報を部屋単位などの大枠で捉える空間オブジェクトを活用して情報管理をする取り組みが実施され始めている。

本稿では、筆者がこれまで取り組んできた、公営住宅を対象とした維持管理 BIM モデルの開発とこれと併せて維持保全情報である日常点検の結果を現場で記録するタブレット端末用の点検用アプリケーション（以降「点検アプリ」という。）の開発を通じて公営住宅の維持保全業務に位置情報を活用する取り

組みを紹介し、今後の BIM と GIS の連携の方向性について述べる。

1.1. 公営住宅の管理の現状と BIM 導入の取り組み状況

現在、行政分野での DX 化は大きな課題となっており、公営住宅についても例外ではない。また、国土交通省は 2018 年から建築 BIM 推進会議¹⁾を設け、建築物に対して企画から維持管理・運用段階の各段階での BIM 導入を促進しているところである。しかし、公共賃貸住宅分野、特に公営住宅については、ある地方公共団体において設計段階で BIM 導入の取り組みは見られるものの BIM 導入の取り組みはまだ始まったばかりである。

また、公営住宅の維持保全業務を取り巻く状況は、表 1 に示す地方公共団体へのアンケート（平成 27 年公営住宅の維持管理・点検状況調査報告書、国土交通省住宅局）の調査の自由回答から伺える通り、マンパワー（特に技術者）不足、財源不足、住宅台帳や点検・修繕履歴の記録・管理とされている。

現状、公営住宅の維持保全業務は、日常点検を例にとれば、現場は担当者の巡回による目視点検、デジ

片山 耕治*正会員 政策研究大学院大学 (National Graduate Institute for Policy Studies)

〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1 E-mail: k-katayama@grips.ac.jp

タルカメラ、紙により記録を行い、現場から事務所等に戻って表計算ソフト等に手入力を行い報告書の作成等をしているところがほとんどである。

点検・修繕を円滑に進める上で必要な事項	件数
人員（職員・技術職員）の確保	106
財源の確保	101
住宅台帳や点検・修繕履歴の記録・管理	66
入居者との情報共有および良好な関係構築	61
マニュアル・仕様書の整備	38
適正な修繕周期の計画	31
専門業者や技術者との協力・連携	26
技術・ノウハウの向上	25
周期的な点検	23

表 1 公営住宅の点検・修繕の課題

また、維持保全情報は表計算ソフトのリストとして管理されているのが大半である。一部の地方公共団体等でデータベースで管理されている場合もあるが、業務発注の契約管理台帳のデータベースであるなど、維持保全情報を位置情報を用いて管理し、点検箇所に対応する図面が容易に取り出せるような管理はされていない。

こうした状況を解決する一つの手段として、現場での点検業務にタブレット端末等を導入し点検記録のデジタル化、また、データの管理のために BIM を活用することは有効であると考えられる。

一般に、BIM 導入の効果は、計画、設計、施工段階、維持管理・運用段階の各段階で効率化が期待されるが、公営住宅は、新規の建設戸数は少なく、大量、かつ、高経年のストックの維持管理が課題となっていることから、維持管理・運営段階から BIM 導入を検討する必要性が高いと考えられる。

1.2. 公営住宅における GIS 活用の現状

公営住宅はほとんどの場合、複数棟からなる団地を形成しており、各地方公共団体は複数団地を管理しているケースがほとんどである。地方公共団体においては各種公共施設について統合型 GIS で位置情報を使って管理をしているところが多く、公営住宅も公共施設の一つとして管理されているケースがある。また、団地内の複数の住棟や各種外構施設を管理するために位置情報を活用することが有効である。

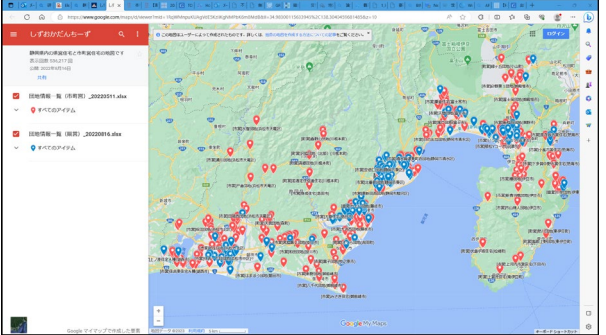


図 1 GIS の活用例：しずおかだんちーず

その他、公営住宅での GIS 活用の取り組み事例としては、「しずおかだんちーず²⁾」のように団地の位

置を GIS を活用して地図上から団地を選択することで、団地概要や入居の申し込み先等の情報へのアクセスを容易にする取り組みが見られる（図 1）。

このように公営住宅団地については、住棟毎に BIM による維持保全業務のため建築物の特定の箇所を参照したり、団地内の複数の住棟や外構の管理、さらに県市域等での団地の管理など様々な場面で位置情報の活用が求められることから、BIM や GIS の活用が期待できる。

2. 公営住宅への BIM 導入の現状

公営住宅における BIM 導入の検討状況について紹介する。

2.1. 公共賃貸住宅への BIM 導入の検討状況

筆者は国土技術政策総合研究所及び建築研究所に在籍した際に公共賃貸住宅への BIM 導入について検討を実施してきた。公営住宅の検討においては、大量に存在し老朽化のための適正な管理が求められていることから、維持管理・運用段階での維持保全業務、その内の日常点検を対象にした BIM 導入を中心に研究を実施した。

一般的に BIM は設計・施工段階では数量拾い、施工手順の確認等の目的のため、個別の部材等の各オブジェクトに情報を関連付けることが行われている。

しかし、維持保全業務のうち日常点検の主な管理対象物は図 2 に示す、住棟の外壁、階段、メーターボックス、公園や遊具等である。日常点検は外観目視が基本で、例えば東の壁面といった単位で点検、記録がされている。



図 2 公営住宅の日常点検における管理対象物

そこで、公営住宅の日常点検を対象に図 3 に示すような維持管理 BIM モデルを作成した。

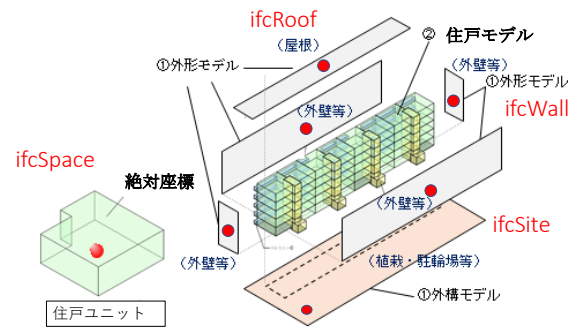


図 3 維持管理 BIM モデルのイメージ

維持管理 BIM モデルを作成するに際しては、壁等の点検対象物の空間オブジェクトを作成することで、点検対象物の具体の場所を示すこととし、空間オブジェクトに絶対座標を付すことで位置情報を与え維持保全情報を位置情報で管理できることとした。

空間オブジェクトと絶対座標の関係を関連づける際の基本的な考え方は、住戸ユニットを例に挙げると、図 4 に示すとおりである。住戸ユニットの空間オブジェクトの平面の重心と、高さ方向は一律に高さを定め、1つの空間オブジェクトに1点の絶対座標を付与することとした。この絶対座標は BIM の各オブジェクトの名前である UID と一致させることで、BIM データと絶対座標との関連付けを簡便に行う。

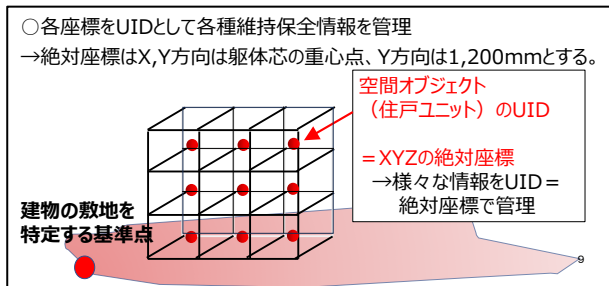


図 4 空間オブジェクトと絶対座標の関係

空間オブジェクトは図 5 に示すように、住戸、壁、屋根、敷地等の点検対象物単位で作成し、それぞれの空間オブジェクトで維持保全情報を格納するフォルダを参照するイメージである。それぞれの空間オブジェクトに対応する維持保全情報のフォルダに写真やチェックリスト等の日常点検の点検記録を格納し管理するのが維持管理 BIM モデルの活用による維持保全情報の管理イメージである。

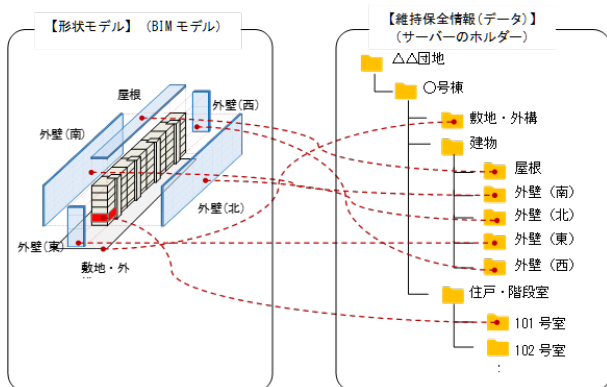


図 5 維持管理 BIM モデルの構成とデータの関係

なお、維持保全情報は維持管理 BIM モデルと別にデータベースを用意し、維持管理 BIM モデル自体に、維持保全情報を直接関連付けずに、空間オブジェクトの絶対座標を介して、維持保全情報を関連付けることとしている。

維持管理 BIM モデルを維持保全業務に適用することで、日常点検等の維持保全情報を点検対象の場

所が空間オブジェクトにより得られることになる。

このように、維持管理 BIM モデルは維持保全情報へアクセスするための UI (ユーザーインターフェース) としての役割を果たす。

2.2. 維持保全業務における位置情報の活用

維持保全業務の内、日常点検は現場で技術者等により実施されるものであり、公営住宅団地内の各住棟や外構施設や公園などを巡回して実施する。

それぞれの点検場所の点検結果の記録・管理は現状では個々の記録の台帳と図面によって管理をされているが、BIM や GIS を使って位置情報を活用することは有効で、実際、外構等の管理への GIS の導入例はある。

3 現場の業務の効率化のための維持管理 BIM モデルとタブレット端末を用いた維持保全業務の効率化に関する検討

維持管理 BIM モデルを活用して維持保全業務における日常点検作業において効率化が最も容易に実現可能と考えられるのは、現場での点検記録及び事務所に戻ってデジタルカメラの写真や紙の記録を整理する作業時間をデジタル化で削減することである。

そのため、都市再生機構の空き住棟を対象に予め維持管理 BIM モデルを作成し、併せてタブレット端末と既存の写真管理アプリケーションを活用して公営住宅の日常点検を想定し、日常点検に維持管理 BIM 及びタブレット端末を導入が維持保全業務の効率化につながるか検証を実施した³⁾。

3.1. タブレット端末と維持管理 BIM による日常点検の効率化の実証実験

実証実験では、図 6 に示すような日常点検を想定し、現場での点検記録作業から報告書作成までの作業について、タブレット端末及び写真管理用の専用のアプリケーションおよび報告書の作成アプリケーションをセットで行うケースと実施内容は同様に現場での点検記録はデジタルカメラや紙の記録用紙を用い、点検後に手作業でデータ入力するケースを計画し、それぞれの 2 名の点検実施者が交互に点検を実施した。

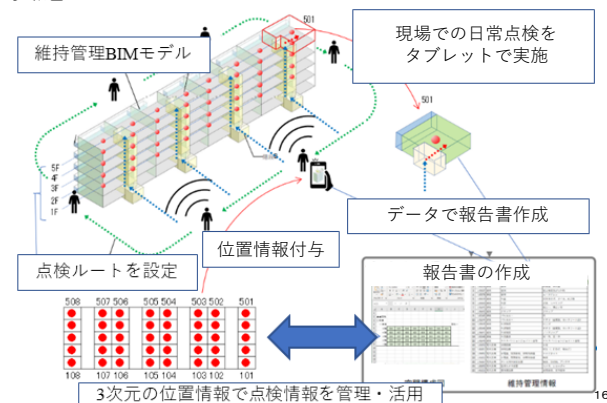


図 6 実証実験のイメージ (タブレット端末使用時)

実証実験の結果、点検記録に要する時間は、タブレット端末を用いた場合と手作業との差はほとんどなく、タブレット端末の導入で点検に要する時間が増加しないことが確認できた。タブレット端末の導入の場合では、現場での点検記録のデジタル化及び既存の写真管理アプリケーションと連携する報告書作成が可能な専用アプリケーションを活用したことで、大幅な時間短縮が可能となった。これは、維持管理 BIM モデル及びタブレット端末を導入の効果と言えるが、現場の点検記録のデジタル化による効率化であり、収集したデータを蓄積・活用した効率化を図ることについては、データの蓄積がないことから今後の課題である。

3.2. タブレット端末用の点検アプリによる点検結果への位置情報の関連付け

実証実験においてはタブレット端末用の既存の写真管理アプリケーションを用いて、点検結果を保存するためのフォルダとして点検対象物に対応する壁のフォルダを作る等の工夫により実施したことから機能に制約があり、使い勝手は悪かったことから、今後、タブレット端末による点検記録の普及を図るためにタブレット端末による日常点検の記録を容易にする点検アプリを開発した。

開発した点検アプリの UI の画面のイメージは図 7 の通りで UI の構成は、各アイコンは図 2 の維持管理 BIM モデルの空間オブジェクトに対応しており、維持管理 BIM モデルの空間オブジェクトを立面図のように平面に展開したものである。

維持保全情報を入力する際の UI ではまず屋根・外壁・住戸ユニット等に区分されており、さらにその下に詳細な項目をアイコンとし配置し、建築物の立面図に近い形とし、使用者が直感的な操作が可能なものとした。



図 7 点検アプリの入力項目選択の UI イメージ



2階の階段室の
点検記録を閲覧

現場で2階の階段室に
点検結果を現場で入力



図 8 タブレット端末での入力・閲覧画面の UI

日常点検を記録して位置情報を関連付けるためには、屋外においては衛星測位システム (GNSS) を活用することや、屋内では QR コードを張る等の方法や屋内でも位置が取得できるデバイスを使う方法も試みられているが、ここではタブレット端末の UI を工夫することで、点検者が点検対象物を間違えることがなく容易に入力できるように工夫することで対応した。

図 8 にタブレット端末での維持保全情報の入力、閲覧の UI を示す。

点検アプリの点検記録の入力時と閲覧時のページの UI は同じであり、例えば南の壁を選択すると以下の図 2 の左の画面のように撮影した写真とコメント、また、クリック 1 つで対応するチェックリストを閲覧することができる。従来は、報告書をまとめる段階で初めて確認できた写真と日常点検の結果の対応状況が現場で入力した時点で、直観的な UI でアクセス、表示することが可能となる。また、過去の履歴も参照することができることにしており、現場で現在と過去の点検記録との比較が可能となり、点検作業の質の向上を図られることも期待できる。

4. まとめ

本稿では維持管理 BIM モデルにおいて空間オブジェクトを特定するために、絶対座標を用いて位置情報を付与した維持保全情報が維持保全業務で活用可能であることを示した。また、維持管理 BIM モデルの空間オブジェクトに絶対座標を関連付け、維持保全情報を記録するタブレット端末用の点検アプリを開発し、点検記録にかかる業務の効率化についての検証の取り組みを紹介した。

維持保全情報に絶対座標で位置情報を付与するこ

とで BIM 用のアプリケーション以外に GIS 用のアプリケーションによって情報の閲覧等取扱が可能になる。公営住宅については、団地内に複数の棟や施設があることや、今後の団地の維持継続等を判断するための立地特性の検討や周辺との調整等を行う必要があり。公営住宅に関わる各種情報に絶対座標として位置情報を付与することで、団地の各種データの一元管理が容易になる可能性がある。

現在、BIM データを維持保全業務で活用するための汎用のアプリケーションは限られており、公営住宅の維持保全業務への GIS の導入の可能性がある。今後は、点検アプリをベースに、実際にクラウド GIS を用いたアプリケーションを試作し、フィージビリティ調査を実施する予定である。

公営住宅に限らずタブレット端末と何らかの点検アプリ等を用いることで、BIM の各空間オブジェクトに固有の絶対座標を与え UID として活用することで、建築物に関わる各種データの記録、閲覧、活用が容易になるよう、BIM、GIS を連携させた様々なユースケースがさらに広がることを期待したい。

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土技術政策総合研究所、建築研究所、BIM モデル開発等へのアドバイスを頂いた関係各位、事例等検討の場の提供等を頂いた地方公共団体、都市再生機構の関係者の皆様から多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 国土交通省，建築 BIM 推進会議，
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/kenchikuBIMsuishinkaigi.html>
(2023 年 8 月 30 日収録)
- 2) 静岡県，しずおかだんち一ず，
<https://www.pref.shizuoka.jp/kurashikankyo/kenchiku/kenei.jutaku/1016046.html>
(2023 年年 8 月 30 日収録)
- 3) 片山耕治, 武藤正樹, 藤本秀一, 長谷川洋, 高橋暁,
三島直生「公共賃貸住宅に係る維持管理 BIM
(Building Information Modeling) の日常点検等を
想定した実証実験の実施と検証」, 日本建築学会
大会学術講演梗概集 (建築社会システム)・p45-46
(2021 年 9 月)

登記所備付地図オープンデータを用いた土地区画形状分析

青木和人

Land parcel shape analysis using the registry office map at opendata

Kazuto AOKI

Abstract This study analyzes land parcel shapes and land use patterns in Kyoto Kyotanabe City using open data from the Ministry of Justice's nationwide cadastral map (released in January 2023). It assesses average land areas by usage, such as estimating farmland and forests at 500-750 square meters, while high-rises and factories have about 1000 square meters. The research employs the s-index to understand parcel shapes. It reveals square shapes in low-rise and densely populated areas, rectangular shapes for farmland and tall structures, complex configurations for forests and wastelands, and square roads. Triangular land shapes near railways stem from privatization-driven boundary changes. Color-coded s-index maps highlight insights, showing rectangular shapes around Kizugawa, residential zones along railway lines, and forested areas. These maps aid urban planning and decisions. Comparisons between the s-index and land-use data suggest potential for estimating land use by s-index.

Keywords: 登記所備付地図(Registry office map),オープンデータ(Opendata),区画形状(Parcel shapes),京都府(Kyoto prefecture)

1. はじめに

2023年1月23日より、法務省は全国の登記所備付地図の電子データを、G空間情報センターを通じて、無償で一般公開を開始した(法務省 2023)。登記所備付地図とは、不動産登記法第14条第1項の規定に基づき、土地の位置及び区画(境界)を明確に示した登記所に備え付けられる地図である。不動産登記できるものには土地と建物があるが、土地の登記には土地の位置がわかるように地図・図面が備え付けられている。この地図は、土地の区画を示す線と、線により構成される区画(面)に「地番」が表示されている(図1)。この登記所備付地図は地籍調査などにより測量された成果で、実世界における正確な位置座標の情報をもち、他の地図に重ねられるもの(公共座標系)で、「14条1項地図」とも呼ばれている。

これらの登記所備付地図は、法務省によりデジタルデータとして整備されている。今回、この登記所備付地図データがG空間情報センター上で公開された。これにより、生活関連・公共サービス関連情報との連携により都市計画・まちづくり、災害対応などの様々な分野で広く利用され、新たな経済効果や社会生活への好影響をもたらすことが期待されている(三枝・清水 2023)。直接的には楠野(2023)は所有者不明土地対策への活用を示している。そのために青木(2023)は本データをGISで活用する具体的方法を紹介している。この登記所備付地図データは、行

政・民間分野だけでなく、アカデミック分野での研究にも大いに活用されることが期待される。しかし、本データを活用した既往研究は法務省のデータ公開から日が浅いため、未だない。

そこで、本研究では市区町村内での地籍調査が100%完了している京都府京田辺市を対象とした登記所備付地図オープンデータの土地区画形状を検証したい。以下、2章では登記所備付地図オープンデータの詳細について説明し、3章では研究対象地域である京都府京田辺市について説明し、土地利用から地域を概観する。第4章では登記所備付地図オープンデータから算出した土地利用別の平均面積と平均s-indexから土地区画について考察する。最後に研究の成果と今後の課題について述べる。

2. 登記所備付地図オープンデータ

登記所備付地図には、たとえ災害が起きたとしても、地図から境界を復元できるような高い正確性が求められる。しかし、実際の登記所備付地図は一部の地域にしか備わっていないのが現状である。これは、登記所備付地図の作成に地籍調査が必要となるためである。地籍調査は国土調査の一種として、市町村が主体となり、一筆ごとの土地の所有者、地番、地目を調査し、境界の位置や面積を測定する調査である。地籍調査の結果は登記所にも送られ、登記簿の情報を修正し、地図も更新される。また、固定資産税算出などの行政事務の基礎資料としても使用さ

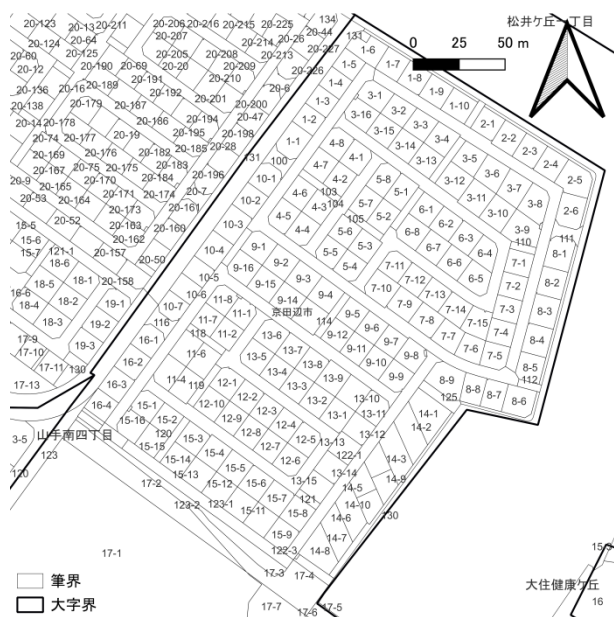


図 1. 京田辺市の登記所備付地図



図 2. 京田辺市の位置

れる。地籍調査は、1951 年から行われており、その開始から半世紀以上が過ぎている。しかし、2021 年度末時点における地籍調査の進捗率は 52% となっており、約半分の地域で調査が残っている。地帯別にみると、都市部の人口集中地区で 26%、山村部の林地で 46% と地籍調査の進捗が遅れており、これらの地帯で早急な調査の実施が必要とされている（国土交通省、2023a）。

地籍調査の日本の各地域別での進捗状況の違いを見てみると、地域間の進捗の差が大きくなっている。北海道、東北、九州の各地方では調査が比較的進んでいるが、関東、中部、北陸、近畿の各地方では大幅に遅れている府県がある。都道府県別に見てみると上位 3 位は佐賀県 99%、沖縄県 98%、青森県 73% などがとなっている。反対に最も低いのは京都府 8%、大阪府 10%、三重県 10% がワースト 3 位となっている。

そのため、地籍調査が実施され、登記所備付地図が備え付けられるまでの間、これに代えて、14 条 1 項地図に準ずる図面（公図）として、旧土地台帳施行細則第 2 条の規定に基づく地図が備え付けられている（同条第 4 項）。旧土地台帳とは、1889 年頃から 1945 年代頃までに利用された、土地の所有者等の諸情報を記録した台帳である。ただし、公図は、明治期の地租改正の際に作成されたものが多く、現地を復元するほどの精度と正確性は有していない。この地図に準ずる図面は、区画の形状情報を持つが、相対的な座標であり、実世界における正確な位置座標の情報を持たないもの（任意座標系）で、「公図」や「14 条 4 項地図」と呼ばれている。

この登記所備付地図データを公開するプラットフ

ームである G 空間情報センターは、地理空間情報の有効活用と流通促進を図るためのデータ流通支援プラットフォームである。今回、G 空間センター上で当初、公開されたデータは、登記所の地図情報システムに入っている法務省独自の地図 XML フォーマットであった。ただし、この地図 XML フォーマットは一般的な GIS 上でそのまま表示させることができない。GIS 上で表示するためには、フォーマット変換作業が必要である。そのため、公開当初、デジタル庁は地図 XML 形式のデータをプログラミング言語 python にて GeoJSON 形式のデータに変換するコンバータを作成し公開していた。しかし、本ツールはプログラミングの専門知識が必要となるため、一般的な GIS 利用者には使いづらいものであった。そこで G 空間情報センターでは、2023 年 4 月 13 日より、法務省の登記所備付地図データを一般的な GIS で利用できるファイル形式であるシェープファイル形式と GeoJSON ファイル形式に変換したデータを公開した（G 空間情報センター、2023）。

G 空間情報センターを通じて法務省が提供する登記所備付地図データは、「登記所備付地図データ利用規約」に則って、誰でも複製、公衆送信、翻訳、変形、翻案など、自由に利用することができる。商用利用も可能である。ただし、この利用規約は、提供されているデータの一部を除いて、クリエイティブ・コモンズ・ライセンスの CC-BY 4.0 と互換性がある政府標準利用規約（第 2.0 版）に準拠しているため、データを利用する際には出典を記載する必要がある。また、このデータには独自の利用規約もあるため、データを編集・加工などをして利用する場合には、上記の出典とは別に、編集や加工を行っ

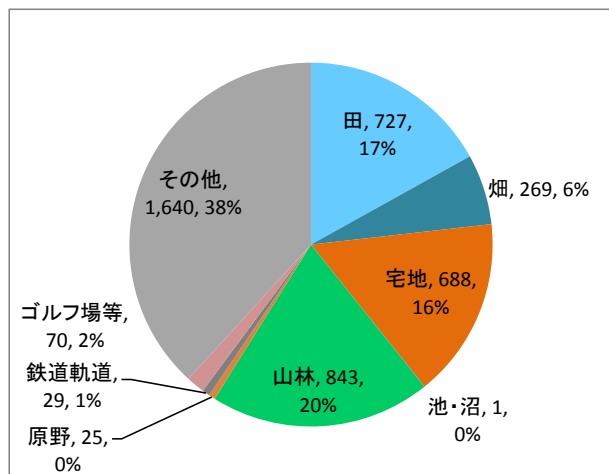


図 3. 京田辺市の土地利用

たことを記載する必要もある。このほか、編集・加工した情報を、あたかも国（または府省など）が作成したかのような態様で公表・利用してはいけないことや、他の情報と照合して特定の個人を識別する行為をしてはいけないことなどの禁止事項もある。

このような土地の形状を示す GIS データは、この他に市区町村が固定資産税課税のために整備している地番図データが存在するが、これらの情報は基本的には市区町村の固定資産税課税のための税務情報であるため、一般的には公開されていない。ただし、自治体のオープンデータ公開の流れに従って、北海道室蘭市(2022)などが先進的にオープンデータとして公開している事例があるが、その数はごくわずかである。そのため、日本全国の登記所備付地図データが誰でも自由に利用することができるようになったことの意義は大きい。

3. 研究対象地域

研究対象は、地籍調査が 100%完了している京都府京田辺市の令和 5 年 1 月 23 日に公開された登記所備付地図データ 72,431 筆である(図 1)。データの時点は法務省が地図データを抽出した令和 4 年 1 月から 2 月までの時点となる。

研究対象地域となる京田辺市は、京都府の南部に位置し、2023 年 7 月 1 日時点の推計人口で人口 74,903 人、面積 42.92k m² を有する市である。東は木津川をはさんで京都府城陽市、綴喜郡井手町と接し、西は生駒山系により大阪府枚方市、奈良県生駒市との府県境に接している(図 2)。市の中心部から直線距離にして、京都市へ約 22 km、大阪市へ約 28 km、奈良市へ約 15 km と、近畿大都市を結ぶ三角形のほぼ中心に位置している。また、京都府、大阪府、奈良県にまたがる京阪奈丘陵にある関西文化学術研究都市の北東部分となっている。市の中心部を JR 西日本学研都市線と近畿日本鉄道京都線が通り、京阪神大都市

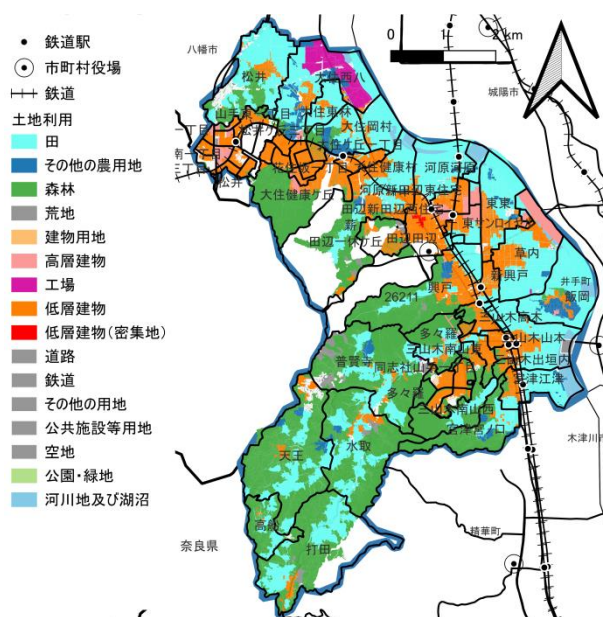


図 4. 土地利用詳細メッシュによる土地利用

への通勤者のベッドタウンとしての性格が強い。人口密度は 1,745 人/k m² であり、京阪神大都市圏へのベッドタウンとして、標準的な都市であると言える。

京田辺市(2023)の令和 4 年版統計書によると、京田辺市の 2022 年の地目別土地利用は、田 727ha(17%)、畑 269ha(6%)、宅地 688ha(16%)、山林 843ha(20%)、その他 1,640ha(38%)等となっている(図 3)。また、京田辺市の土地利用を令和 3 年度版の土地利用詳細メッシュデータを登記所備付地図にオーバーレイして表示したものが図 4 である。土地利用詳細メッシュとは、三大都市圏の土地利用の状況について、3 次メッシュ 1/20 細分区画 (50m メッシュ) 毎に、各利用区分 (田, その他の農用地, 森林, 荒地, 建物用地, 幹線交通用地, 湖沼, 河川等) を整備したものである。国土交通省(2023b)の国土数値情報ダウンロードサイトからダウンロード可能である。但し、50m メッシュの高解像度の土地利用詳細メッシュは三大都市圏のみの整備範囲であり、それ以外の地域は低解像度の 3 次メッシュ 1/10 細分区画 (100m メッシュ) 単位の都市地域土地利用細分メッシュデータとなる。

土地利用詳細メッシュでの土地利用を概観すると、市の東側の境界部である木津川周辺は田が広がっている。それより西側の市の中心部を南北に通る鉄道 2 路線の周辺地域に宅地が多いことがわかる。市の西部には JR 学研都市線の松井山手駅周辺に大阪中心部への交通アクセスの良い大規模な宅地開発地である松井山手周辺に宅地が広がっている。また、南部はおおむね山林であり、その中に農地や宅地が点在している。

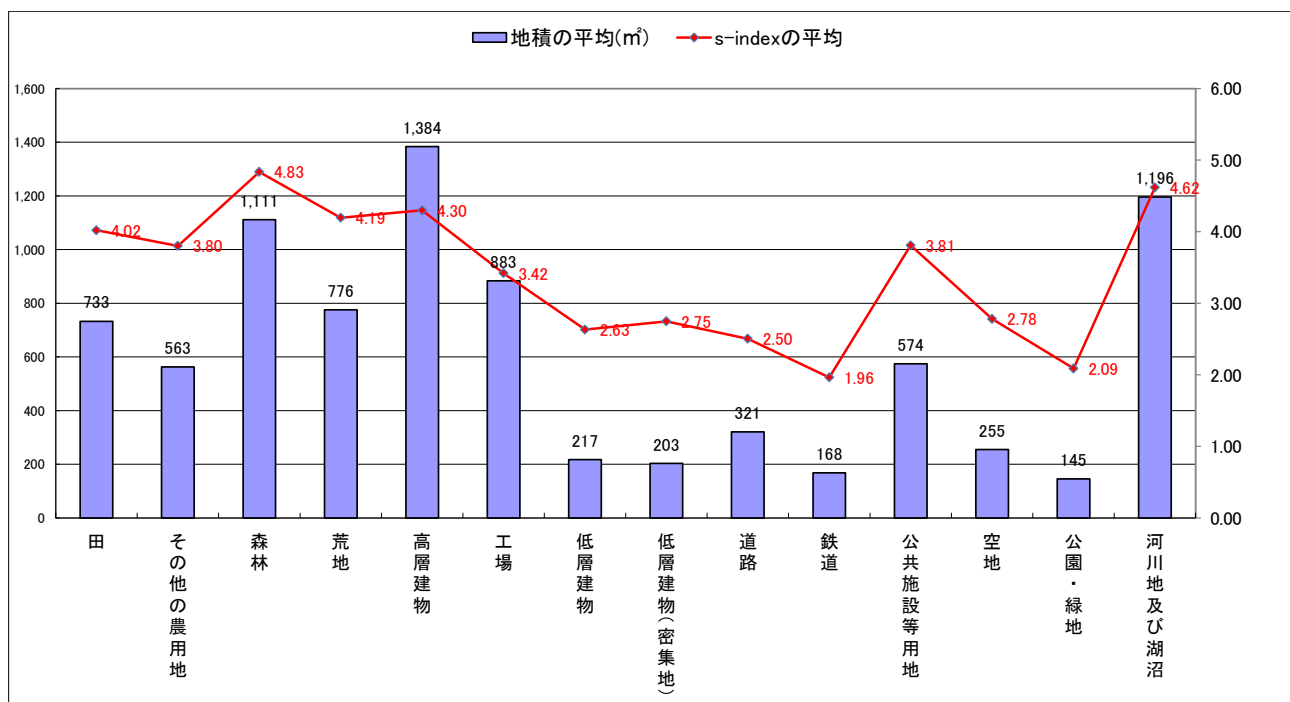


図5. 土地利用別の地積と s-index の平均値

4. 土地利用別形状分析

4-1. 平均面積

土地区画形状の分析には、GIS を用いて各土地の面積(m²)、周囲長(m)を計測し、面積を周囲長で割った値を示す s-index を算出した。それにより、土地利用別の平均面積と平均 s-index から分析した(図5)。まず、土地利用別の平均面積は、田 733 m²、その他の農用地 563 m²、森林 1,111 m²、荒地 776 m²、高層建物 1,384 m²、工場 883 m²、低層建物 217 m²、低層建物(密集地) 203 m²、道路 321 m²、鉄道 168 m²、公共施設等用地 574 m²となっている。

筆ごとの平均面積が田 733 m²、その他の農用地 563 m²であることは、田畑は一反、概ね 1000 m²を基本として区画されているため、その 3/4 の 750 m²や 1/2 である 500 m²近辺が平均面積となっていることが想像される。森林が 1,111 m²となっているところも、一反が基本となっていることからうなずける。荒地 776 m²も田畑が利用されなくなったことで、荒れ地になることを考えると同様の理由からではないかと推察される。

高層建物 1,384 m²は、京田辺市の場合、駅近辺の分譲マンションがその対象となっているため、土地区画を整理した上でマンション敷地としているため、1000 m²を超える面積となっている。工場 883 m²も 1000 m²を基本とするため、その前後の地積が多いため、この面積となっているのであろう。低層建物 217 m²、低層建物(密集地) 203 m²は、住宅や店舗の敷地、いわゆる宅地面積は一般的に 200 m²前後である

ことから頷けるものである。

その中で道路 321 m²は、今回、新たな発見であった。通常、行政の道路建設は、新たな道路建設や既存道路の拡幅、新たな宅地開発などの際に、既存の土地区画から道路建設予定の部分だけを分筆して行う。そして、行政は細かく分筆された道路用地の土地区画の各筆をわざわざ合筆整理するようなことはしない。そのため当初、予想として、もっと細かな土地面積となるように思われた。しかし、321 m²もあるということは、京田辺市の道路の多くは、既存の市街地の低層建物の宅地部分から、一部を道路用地として分筆して道路建設したのではなく、既存市街地でない地域の区画の大きい田畑山林から一部を分筆して、市街地間を繋ぐ道路建設が行われたことを示していると思われる。

鉄道は 168 m²と反対に面積が小さかった。道路とは逆で鉄道、特に JR の場合は民営化されるまでは鉄道敷地は土地登記簿上、表示登記されていなかった。民営化後に表示登記を行い、土地の地番の不安や面積の確定を行っている。そのため予想では鉄道線路上の大きな土地区画を 1 つの筆として表示登記をしたように予想されたが、低層建物よりも小さな平均面積となった。これは JR 民営化時の土地区画整理の状況、すなわち隣接する民有地との境界確定の上、細かく土地区画を分筆したことを示していると思われる。また、京田辺市には、並行して近畿日本鉄道京都線も走っている。京田辺市内は一部、線路の高架事業が行われたため、その際に隣接する低層建物敷地の一部買収等の事業が行われたことによ

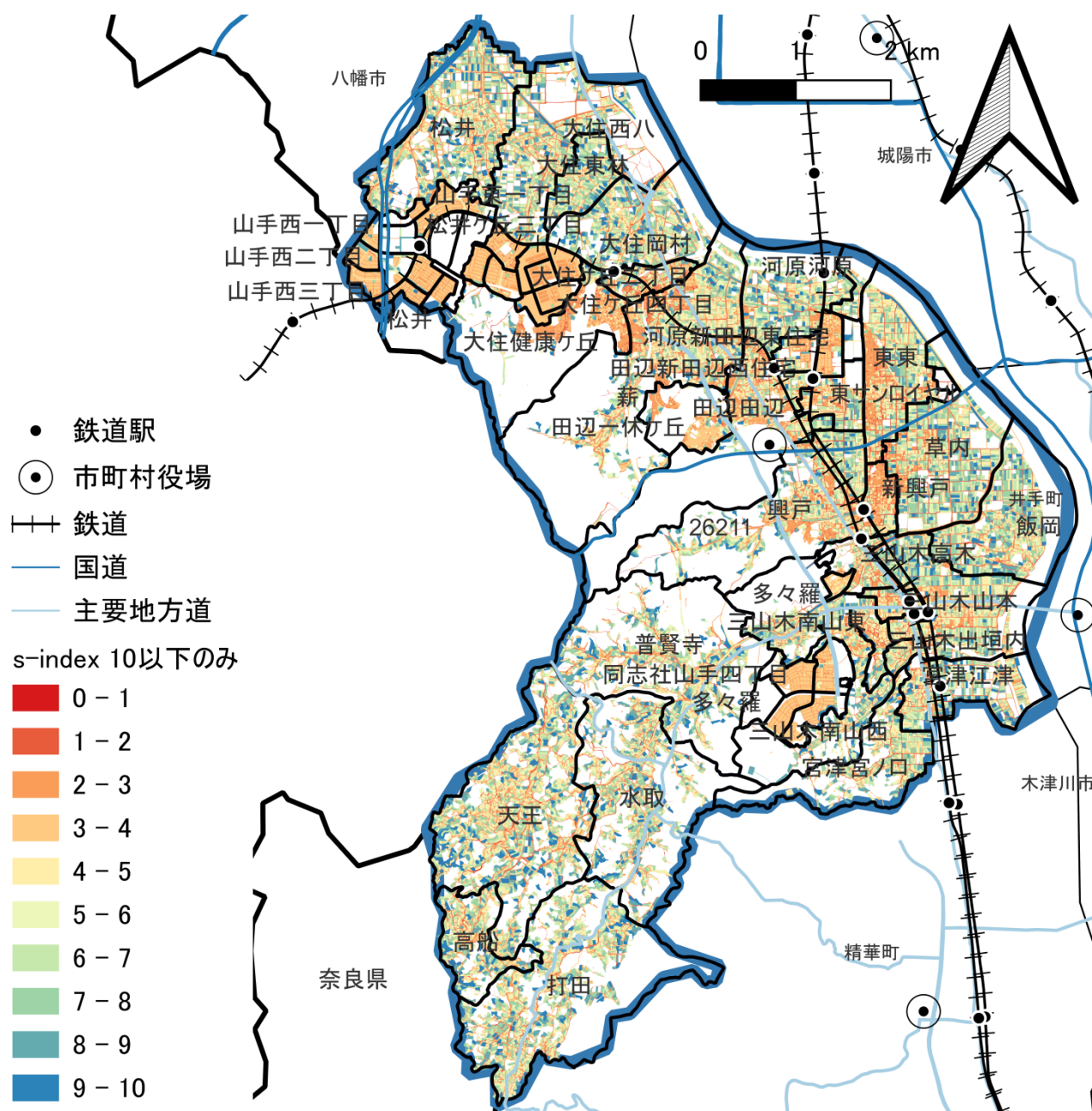


図6. 全市域のs-index

り、細かく区画が分筆されたことも予想される。

公共施設等用地 574 m²は、公共施設用地も 1000 m²を単位として考えられるため、その 1/2 あたりの面積が平均面積となっていると考えられる。空地 255 m²は低層建物の平均敷地が 200 m²付近であることから、低層建物の土地区画形状土地が空地になっているのであろう。公園・緑地 145 m²は、都市部の市街地の公園は主に宅地開発の際に行政の開発指導により、その一部を公園として行政に帰属する形で作られることが多い。そのため宅地開発の基本的な平均面積である 200 m²よりも少ない面積である 150 m²付近の面積のいわゆるミニ公園が多いためである

と考えられる。河川地及び湖沼 1,196 m²は、田畑山林と同じく一反が基本となっているため、1000 m²に近い平均面積をとなっているのであろう。

4-2. 平均 s-index

次に土地利用別の s-index (S 指数) を考察したい。s-index (S 指数) は、土地の形状の複雑さを示すのに使われる指標で s-index が小さいほど土地の形状はコンパクトで、大きいほど複雑な形状をしていることを意味する。s-index は円形であれば 0.5、三角形であれば 1.46、正方形であれば 2.5、長辺が短辺の 2 倍である長方形であれば 3.3 となる。全 72,431 筆の s-index の基本統計量は、平均 3.46、標準偏差 3.26、

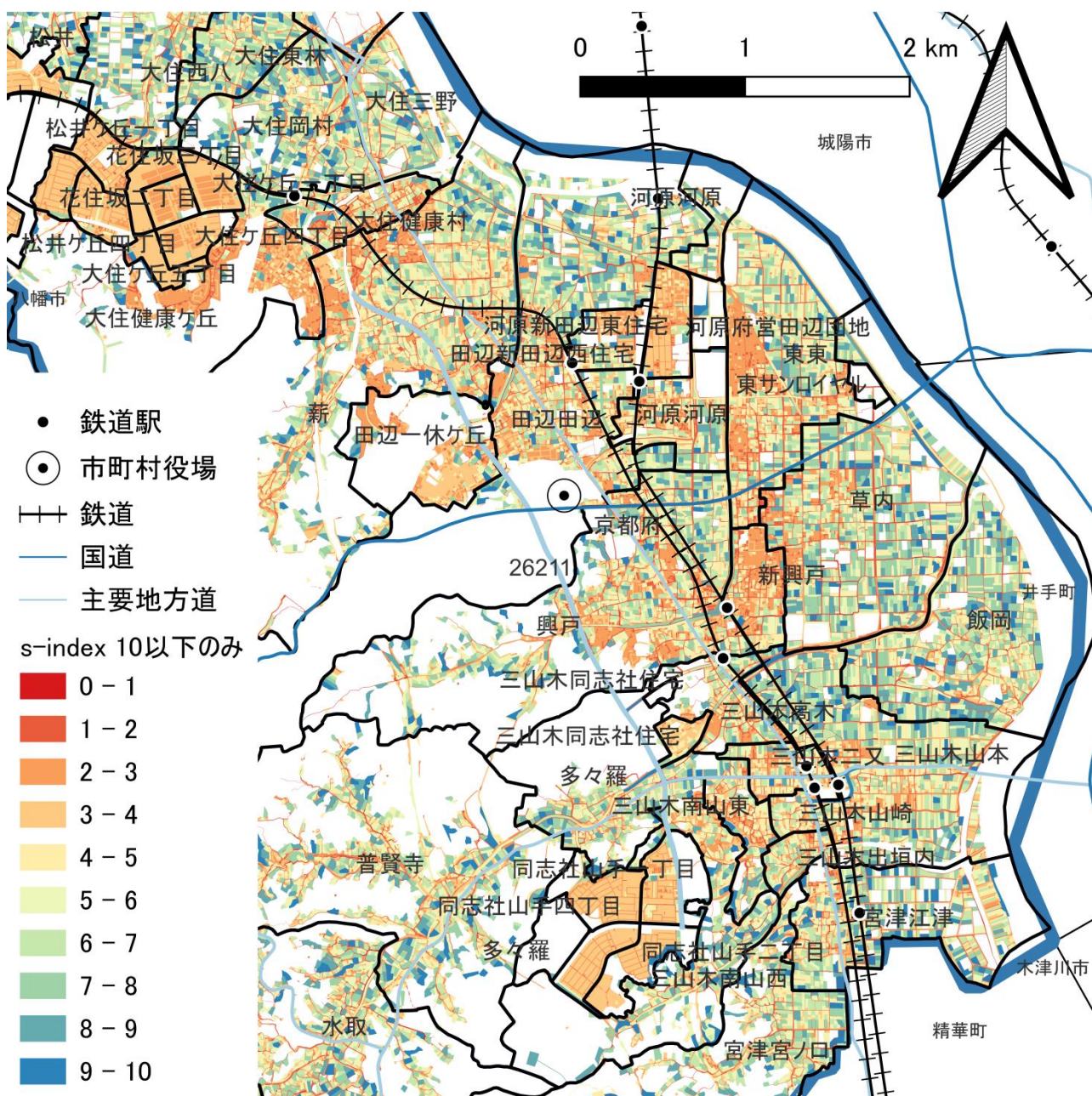


図 7. 市街化区域の s-index

最小 0, 最大 101.26 となっている. 土地利用別の s-index は田 4.02, その他の農用地 3.80, 森林 4.83, 荒地 4.19, 高層建物 4.30, 工場 3.42, 低層建物 2.63, 低層建物(密集地) 2.75, 道路 2.50, 鉄道 1.96, 公共施設等用地 3.81, 空地 2.78, 公園・緑地 2.09, 河川地及び湖沼 4.62 となっている(図 5).

s-index が田 4.02 , その他の農用地 3.80 となっていることは, 農用地が概ね長方形の一反を基本としていることを考えると概ね予想される値である. 森林 4.83 となっているのは森林の境界は田畑のように長方形形状ではなく, 土地区画形状が複雑であることを示している. 荒地 4.19 も田畑から地目変換する

ことが予想されるため、長方形に近い。高層建物 4.30，工場 3.42 も宅地における長方形に近い。

一方、低層建物 2.63，低層建物（密集地）2.75 は正方形に近い土地区画形状であることが示されている。また、道路は 2.50 と平均 s-index が正方形の s-index と同じ値であることは新たな発見である。鉄道は 1.96 と正方形の 2.5 よりも三角形の 1.46 に近い s-index となっている。これは前述の平均面積 168 m² とは反対に値が小さかった。これは JR 民営化や近鉄高架線工事に伴い、隣接する民有地との境界確定により、分筆を行った際に民有地からの一部分筆や鉄道用地からの一部分筆による等価交換を行った結

果、三角形の分筆土地が多いことを示していると推察される。

公共施設等用地 3.81 も 1,000 m² を基本とした長方形形状の公共施設用地が多いことから、このような値を示しているのであろう。空地 2.78 も低層建物の敷地が空地となっていることから正方形に近い s-index となっている。公園・緑地 2.09 も宅地開発に伴ういわゆる残地が附属公園に充てられることが多いことから、正方形よりもより三角形に近い 2.09 となっているのであろう。河川地及び湖沼 4.62 も 1 反を基礎とする、古来からの面積により広大な長方形を示す 4.62 という値となっている。

全市域の s-index のうち、10 以下の土地を色分け表示したものが図 6 である。市の東側の境界部である木津川周辺の田が広がっている地域の s-index は一反が長方形形状である s-index4 から 8 程度を示している黄色から緑色で示されていることがわかる。市の南部はおおむね山林であり、その中に農地や宅地が点在していることから、大半は長方形形状を示す 4 から 8 程度の s-index を示す黄色から緑色で示されている。そして、山間部のなかに点在する村落部分に低層建物を示す s-index2.5 に近いオレンジ色が散見される。

市街化区域を拡大して s-index10 以下の土地を色分け表示したものが図 7 である。市域中心部を南北に通る鉄道 2 路線の周辺地域は宅地が多いことから、この周辺は s-index が正方形に近い 2 から 3 の値を示すオレンジ色で示されている。また、市の西側の松井山手周辺の宅地は正方形を示す s-index2.5 に近いオレンジ色の地域が広がっていることが確認できる。

5. おわりに

本研究では 2023 年 1 月 23 日付での法務省の全国登記所備付地図のオープンデータ公開を受けて、市区町村内での地籍調査が 100%完了している京都府京田辺市を対象とした登記所備付地図データの土地区画形状を土地利用別の平均面積と平均 s-index から分析した。

(1)土地利用別の平均面積から、田畑の平均面積は約 500～750 m²前後であると推測され、同様に森林や荒地も一反を基準とした面積を持っていることが推察された。高層建物や工場の面積も、概ね 1000 m² を基準としていることが伺える。

都市部の宅地は一般的に 200 m²前後で分筆されることが経験則として語られることが多いが、本研究での低層建物 217 m²、低層建物（密集地）203 m²の平均面積の算出はこのことを定量的に示したといえる。また、道路の平均面積が 321 m²であることは、市街地をつなぐ道路が田畑や山林の区画から分筆されて建設されたことを示唆している。鉄道の平均面積が 168 m²と小さいことは、JR 民営化後に行われ鉄道敷地の表示登記や近畿日本鉄道の高架事業により

民有地との細かな面積の境界確定や等価交換に起因する可能性が示唆される。公共施設用地や空地、公園・緑地、河川地及び湖沼の面積についても、それぞれの用途に基づいた標準的な平均面積が存在することが確認できる。

(2)値が小さいほど土地の形状がコンパクトであることを示す s-index に基づく分析では、低層建物や密集地は正方形に近い形状で、田畑や高層建物や工場は長方形に近い形状、森林や荒地は複雑な形状を持つことが定量的に示された。また、道路が正方形を示す s-index 値であったことは特徴的である。一方、鉄道は三角形に近い形状を持ち、その理由として面積での考察と同様、民有地との境界確定による細かな三角形状での分筆が影響していると推察される。

(3)s-index の色分け地図の作成から、東側境界部の木津川周辺の田地が広がる地域では、一反を基準とする長方形の形状を示す s-index4～8 を示す黄色から緑色の地域が確認できた。また、市の中心部を南北に走る 2 つの鉄道路線沿いの地域は宅地が多く、s-index2～3 の正方形の土地区画がオレンジ色で示された。市の西側、松井山手周辺の宅地開発地域も同じくオレンジ色の地域が広がっていた。一方、市の南部は山林が主で長方形の形状を示す s-index4～8 を示す黄色から緑色の地域が表示され、その中に村落地域での低層建物を示すオレンジ色の地域が散見された。このような市区町村内の全筆を対象とした s-index 地図は、都市内の地域ごとの土地形状を視覚的に理解できるため、市内の地域計画や開発に役立つ地図となるであろう。

本研究では各筆の面積、s-index と土地利用詳細メッシュデータとの比較から、日本の三大都市圏周辺のベッドタウンにおける地目別の土地面積、土地区画形状を分析した。その結果から、s-index から概ね土地利用が推定できることが示唆される。今後は 50m メッシュの詳細な土地利用データが整備されていない三大都市圏周辺都市以外の地域での登記簿備付地図データの s-index 分析により、土地利用推定への足がかりとなる研究が必要であろう。このようにオープンデータを利用したアカデミックな研究成果を上げることは、行政のオープンデータ公開をより一層推進させることに繋がるであろう。

参考文献

- 青木和人(2023)「GISNow!:GIS 最新トピック(第 85 回)登記所備付地図データ(1)」, pp. 40-43, Estrela 編集委員会編『Estrela』351.
- 京田辺市(2023)「令和 4 年版統計書」.
- 楠野智之(2023)「法律実務家のための所有者不明土地対策:全体像と動きをつかむ(第6回)民間で活かせる登記所備付地図データのオープンデータ化」, pp. 68-69, 『商事法務』1242.
- 国土交通省(2023a)「全国の地籍調査の実施状況」

<http://www.chiseki.go.jp/situation/status/index.html> (2023 年 8 月閲覧).

国土交通省(2023b)「国土数値情報ダウンロードサイトー土地利用詳細メッシュデータ」
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b-c-v3_1.html (2023 年 8 月閲覧).

三枝稔宗, 清水玖美(2023)「登記所備付地図データの G 空間情報センターを介した一般公開について」, pp. 64-67, 登記情報編集室編『登記情報』63.

G 空間情報センター(2023)「法務省登記所備付地図データに関するご案内」
<https://front.geospatial.jp/moj-chizu-xml-readme/> (2023 年 8 月閲覧).

法務省(2023)「地図データの G 空間情報センターを介した一般公開について」
https://www.moj.go.jp/MINJI/minji05_00494.html (2023 年 8 月閲覧).

北海道室蘭市(2022)「地番図 2022」
<https://murorancity-opendata-muroran.hub.arcgis.com/maps/96ccd830a337432e933aa7b1a4cc6206/about> (2023 年 8 月閲覧).

大規模災害時を想定した広域な土木施設の被害情報の 収集・共有システム構築の試み

林 大貴*・島田 徹**・伊藤 友和**・堀 大一郎**・阿部 義典**・横山 省一**・吉岡 小百合**・
工藤 大典**・竹島 彰子**・小林 実和**・玉川 絢登**・土屋 奏**・滝澤 克巳**・林 勇次**・
京増 洋一**・横山 暢広**・川瀬 功記***・万年 信幸***・番場 豊和***・杉山 良智***

An attempt to build a system for collecting and sharing damage information on wide-area infrastructures assuming large-scale disasters

Daiki Hayashi*, Toru Shimada**, Tomokazu Ito**, Daiichiro Hori**, Yoshinori Abe**,
Shoichi Yokoyama**, Sayuri Yoshioka**, Daisuke Kudo**, Akiko Takeshima**, Mina Kobayashi**,
Kento Tamagawa**, So Tsuchiya**, Katsumi Takizawa**, Yuji Hayashi**, Hirokazu Kyoso**,
Nobuhiro Yokoyama**, Kouki Kawase***, Nobuyuki Mannen***, Toyokazu Banba***,
Yoshitomo Sugiyama***

Aichi Prefecture Government is building a system in order to improve their disaster response capabilities with ICT equipment, to speed up grasping the damage caused by disasters to infrastructures. It's for preparation for some disasters like the Nankai Trough Earthquake. In this report, we introduce the results of the survey of their current situation and the consideration for this system building. In the survey of the current situation, we inspected the prefecture's emergency drills, then checked the actual situations of the current systems and summarizing of information besides the questionnaires and interviews with the prefecture and related organizations. Furthermore, we conducted a trial demonstration of ICT equipment (UAV, etc.) which is considered to be effective in disaster response, and extracted issues in introducing ICT equipment. In the system consideration, we worked to achieve our policies as the below.

- (1) Utilization and analysis of data by using ICT equipment.
- (2) Speeding up of sharing the information among the parties involved by using a WEB system.
- (3) Cooperation with the systems of related organizations.

In the future, Aichi Prefecture is planning a gradual start of service in order to build a system, which can be used even in a normal situation, in a short period without rework.

Keywords: ICT (Information and Communication Technology), 無人航空機 (UAV, ドローン等) (unmanned aerial vehicle (UAV, drone, etc.)), 三次元モデル (3D model), システム検討 (system study) DX (デジタルトランスフォーメーション) (DX (digital transformation))

1. はじめに（検討の背景と目的・概要）

愛知県では、南海トラフ巨大地震や頻発・激甚化する風水害などの発生に備えて、発災時に土木施設の被害状況の把握などの対応を迅速に行えるようにすること（以下、初動対応の迅速化）が必要である。一方で、「災害時の対応を行う自治体職員や建設業従事者の減少」や「電話を中心とした情報伝達や手作業による情報集約」が課題となっている。このため、最新技術の導入やあいち DX 推進プラン 2025 の主要取組事項である『先進的な ICT 技術を取り入れた業務変革』の取組として災害対応においても DX を推進し、機動性や確実性の強化が求められている。

上記課題の解決に向けて、施設の被害状況を確認するための UAV 等の ICT 機器、被災の位置を確認するための WebGIS 等のソフトウェアを活用した災害対応時および平常時の飛躍的な生産性向上を行うこと（以下、『達成目標』）を目的としたシステム構築を進めている。

本報告は、その第一歩として、庁内アンケート等による意識調査、庁内外関係機関への災害対応に関わるシステム・ICT 機器等についてのヒアリング等による調査および ICT 機器等の試行実証を行い、システムに必要とされる要件の抽出・整理等を検討した結果を紹介するものである。

* 正会員 国際航業株式会社 (Kokusai Kogyo Co., Ltd.)

〒169-0074 東京都新宿区北新宿 2 丁目 21 番 1 号 E-mail : daiki_hayashi@kk-grp.jp

** 非会員 国際航業株式会社 (Kokusai Kogyo Co., Ltd.)

*** 非会員 愛知県建設局土木部建設企画課 (Aichi Prefectural Government, Bureau of Construction, Public Works Department, Planning Division)

2. 現状調査および課題

2.1. 現状調査

災害時には多くの関係機関（国，市町村，建設業団体など）から被災状況を始めとした必要な情報を集約する体制を整えておくことが重要である。その体制整備に向けて，様々なシステムと連携する際の課題やICT機器等の活用状況をアンケートやヒアリングにて調査した（表-1）。また，情報システムの導入により改善される対象業務を明確にするため，県の防災訓練の視察や既往の災害対応のマニュアル内容の調査も行い，現況把握に努めた（表-2）。

調査の結果，災害時の業務フローは部門間で統一されていないことや，機器の活用が必要だと感じている職員が多いにも関わらず，導入されていない実態があることを確認した。また，防災訓練では，PCやタブレットなどの活用も不十分であり，手作業中心の情報収集であることが分かった（図-1）。

表-1 アンケート・ヒアリング調査対象

区分	組織
アンケート	公共 県内部局（建設部門全職員），県内市町村，長野県
ヒアリング	公共 県内部局（システム保有課）， 国交省中部地方整備局道路部， 国交省中部地方整備局災害マネジメント室， （一社）愛知県建設業協会，（一社）土木研究会， （一社）愛知県測量設計業協会， 中部電力（株），NTT西日本
	民間
	有識者 大学教授（地盤，土木・防災，情報）

表-2 その他現況の調査対象

区分	調査対象
文献調査	県の災害時関係要領（マニュアル等）の調査， 関係システム・データベースの仕様調査， 県内で想定されている災害の整理
資料調査	先進事例・ICT機器のシーズ調査， 隣接県の現況机上調査
その他	隣接県の現況調査（Webを活用）

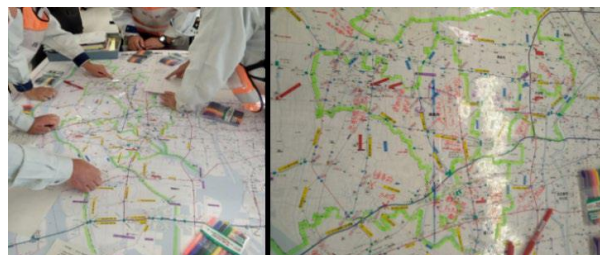


図-1 防災訓練時の情報集約の様子

2.2. 現状の課題と検討の方向性

現状調査から以下に示す災害対応における課題が明確となった。

- ①情報収集が困難な場合に対応するICT機器等を活用できていない
- ②情報伝達は手作業が中心で不確実
- ③関係機関の防災システムが連携できていない

上記の課題および検討の方向性を図-2の通りに整理した。

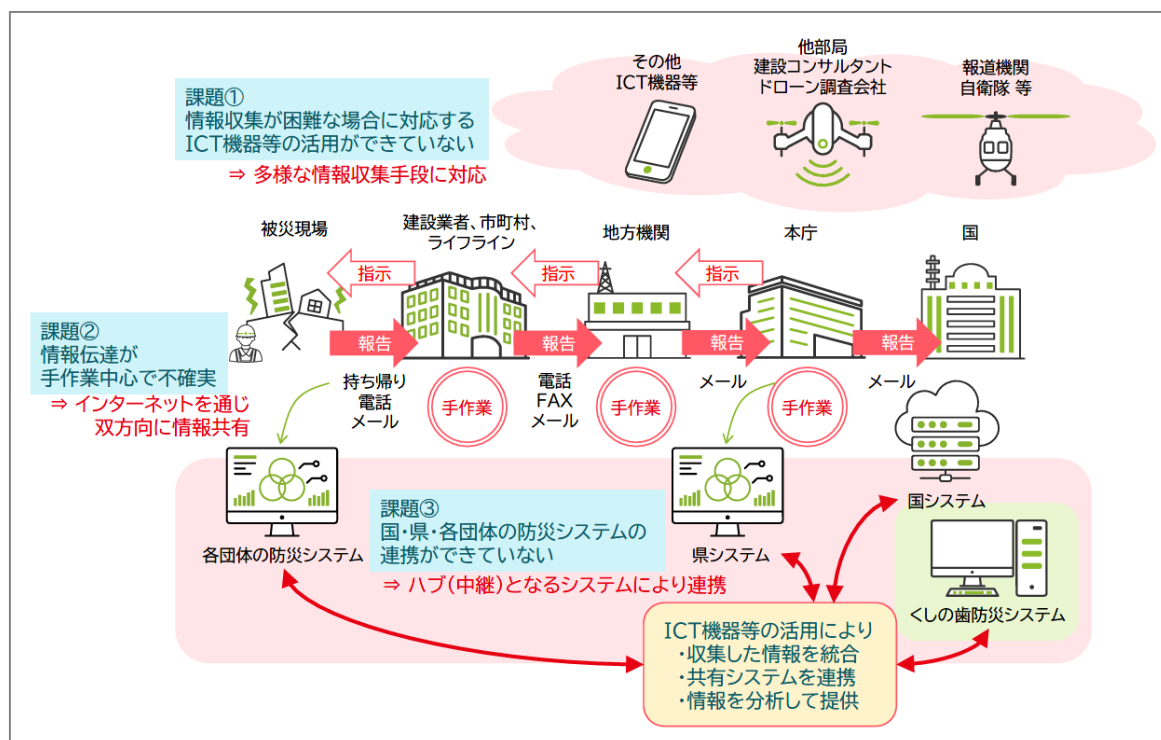


図-2 現状の課題と検討の方向性

3. 試行実証

初動対応の迅速化に向けて効果的であると思われる ICT 機器等を用いた試行実証を行い、その導入による効果の検証を実施した(表-3)。試行 A では防災訓練において UAV 等を活用した災害状況の共有、試行 B では SfM 解析を用いた 3 次元作成ソフトや 3 次元点群データの閲覧・計測が可能な 3 次元解析ソフトによる 3D データを活用した災害情報分析、試行 C では WebGIS とスマートフォンアプリを活用した情報集約・共有をそれぞれ試行し、検証した。

表-3 試行実証内容一覧

項目	試行実証内容
試行A	UAVを活用した災害状況把握
試行B	3Dデータを活用した災害情報分析
試行C	WebGISとスマートフォンアプリを活用した災害状況や維持管理履歴等の情報共有

3.1. UAV を活用した災害状況把握

試行 A (図-3、図-4) で活用した UAV は災害時の情報共有には効果的であり、現場と本部が相互に連絡を取りながら状況を確認することができた。一方、より円滑な情報共有のためには、現場と本部の意思疎通のルール化など、リモートでの指示系統を確立させることの必要性が確認できた。

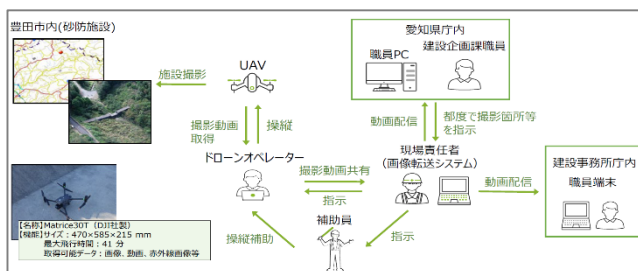


図-3 試行A (UAVを活用した災害状況把握) の全体像



図-4 フライトチェックと取得データの様子

3.2. 3D データを活用した災害情報分析

試行 B (図-5、図-6) では 3D データの「現状地形を直感的に理解できること、高さ・体積情報を含めた分析できること」の有効性を確認できた。一方で

3D データを取り扱うためシステム操作にハードルを感じるユーザが多く、操作習熟度の向上が課題となった。

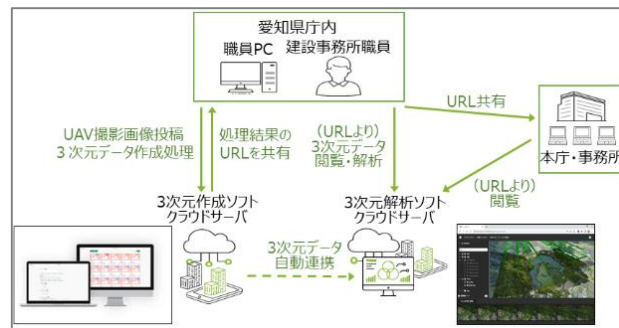


図-5 試行B (3Dデータを活用した災害状況把握) の全体像

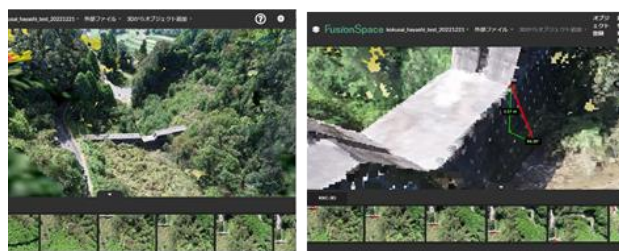


図-6 試行Bで用いた3Dデータ

3.3. WebGIS とスマートフォンアプリを用いた災害情報や維持管理履歴等の情報共有

試行 C (図-7) では、WebGIS の大量データを空間的に整理することが可能であることおよびスマートフォンアプリを用いることで現地から直接情報登録することにより迅速かつ効率的に情報登録が可能であることを確認した。一方で情報登録機能は災害協定事業者等の多くの関係者が利用することから機能をシンプルとした直感的に利用しやすいツール活用の検討が必要であることが課題となった。

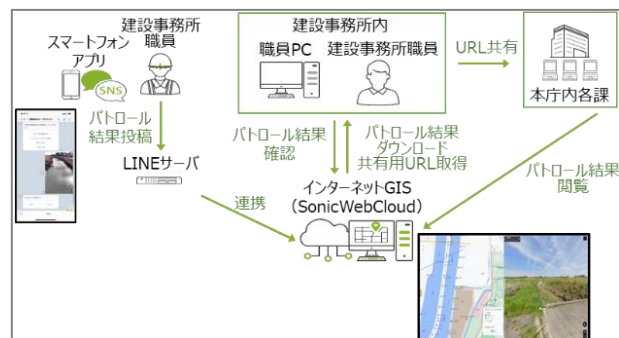


図-7 試行C (WebGISとスマートフォンアプリを用いた災害情報や維持管理履歴等の情報共有)

4. システム化計画の検討

現状の課題に対し、庁内の関係部署、関係機関（国土交通省、県内市町村、愛知県建設業協会、愛知県土木研究会）と連携するシステムを検討するため、システムの全体像やシステムの基本方針を示すシステム化計画を検討した。システム化計画の検討にあっては、従来の仕組みにとらわれることなく、「災害対応力」の向上のため、『システムのあるべき姿』を念頭に検討した。一方で、システム利用者の視点から操作性や情報の一元化、迅速かつ正確な災害時の初動対応を支援できる仕組みを備えながらも、冗長性・持続性・経済性に配慮したシステムとすることを基本として検討を行った。そのため、基本方針に加えて、システム構成、平常時での活用、段階的構築について項目について検討を行った。

4.1. システム化の基本方針の検討

2.2. 現状の課題と検討の方向性で述べた課題①対から③に対応させた、災害対応力向上システムの構築・利用により目指すシステムの基本方針とその検討内容を表-4の通りに設定した。それらのシステム基本方針を踏まえた、システムの達成目標は図-8の

通り（災害時を例として記載）。本システムを利用することで、被災状況や通行可能箇所等が一元的かつ俯瞰的に把握できるようになり、交通規制の指示や道路啓開すべき箇所を迅速に決定することが可能となる。

表-4 基本方針及び検討内容

課題	方針	検討内容
①情報収集が困難な場合に対応するICT機器等を活用できていない	ICT機器で取得した「情報/データ集約・活用基盤」構築	・ICT機器の活用を推進していくためには、情報やデータを集約し、その情報/データを共有・活用できる基盤が必要であることに着目して検討。 ・特にUAVを用いて取得する写真・動画・点群データ等を活用しやすい基盤とすること、またUAV利用の推進になるような機能を保有することを検討。
②情報伝達は手作業が中心で不確実	WEBシステムを用いた関係者間の情報共有の迅速化	・従来、手書き等的人資源に頼った業務を行っていた情報集約やその共有、巡視報告書の作成などをシステム化することで、業務効率化につながる仕組みについて、DX化を前提に検討。
③関係機関の防災システムが連携できていない	庁内外のシステム連携	・土木施設の施設情報を管理するシステムや道路の通行可否を管理するシステム、災害情報を共有するためのシステム、各課の既往システムなどが連携しない状態で構築されているため、それら庁内外のシステムとの連携を検討。

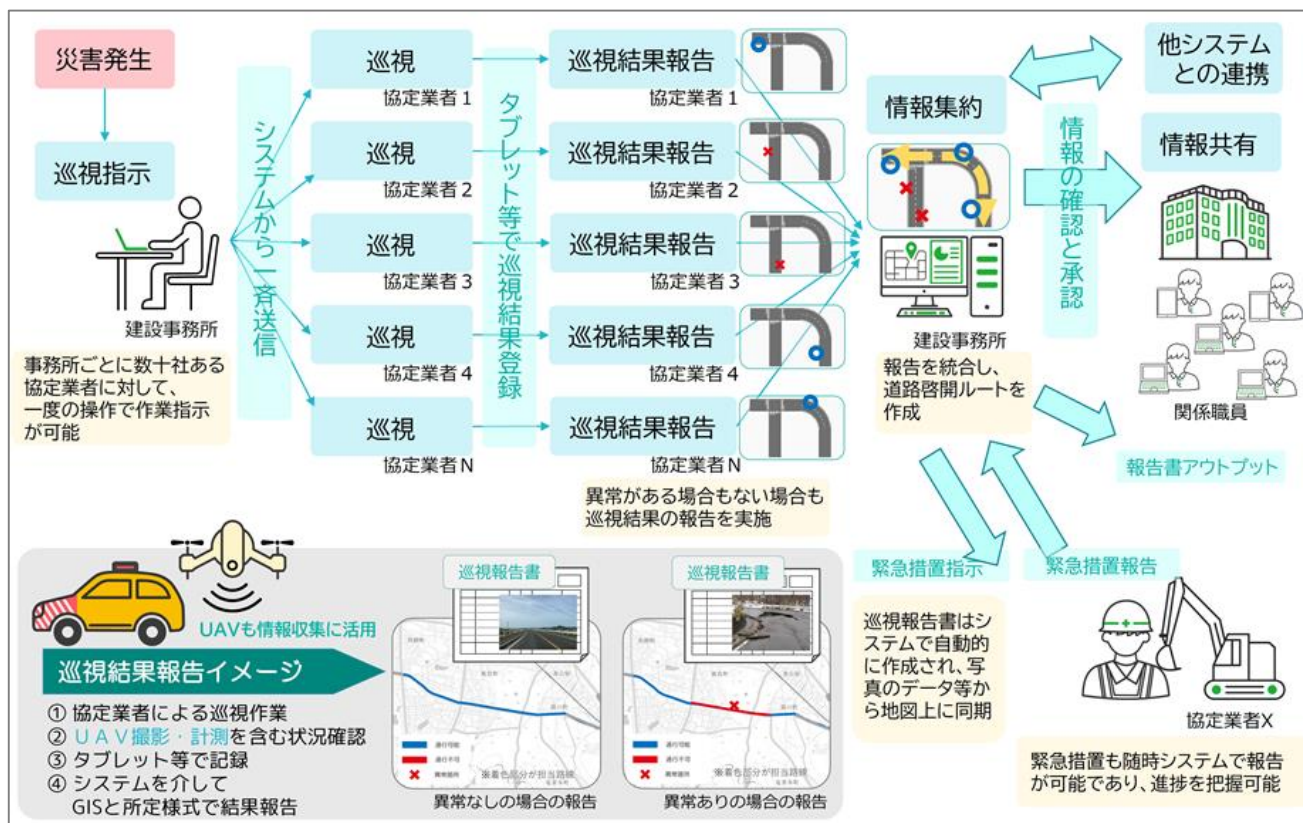


図-8 システムの達成目標（災害時）

4.2. システム構成検討（3 案比較）

基本方針を達成するための基盤となる情報/データ共有・活用ツールについて、（案1）情報共有システムの活用、（案2）WebGIS の活用、（案3）都市 OS の活用を検討した。それぞれの特徴と懸念事項を整理し、比較・検討を行った。（表-5）。

表-5 システム構成検討

項目	案1	案2	案3
ツール名	情報共有システム	WebGIS	都市OS
概要	既に災害情報の登録と共有で利用している情報共有システムを利用する案	地理情報（ハザード情報や公共施設情報等）の登録と共有が可能なWebGISを新たに構築する案	スマートシティリファレンスアーキテクチャ（内閣府）で検討されているサービス基盤（都市OS）を活用する案
特徴	・災害情報の登録・共有が可能な既存システムのリソースの活用が見込める ・既に利用実績があり、運用開始が容易	・地理情報の共有において類似のシステムがあり、職員の操作や運用に慣れている ・平常時からの利活用が見込める。	・複数のシステムやアプリケーションの連携が容易 ・機能拡張が容易
懸念事項	・大量情報の整理のためのレイヤ管理や分析・計画アプリ等の改修が可能か開発会社と検討する必要がある ・手動連携が必要な場合もある ・平常時の活用の検討が必要	・分析・計画アプリについては別途開発が必要 ・手動連携が必要な場合もある	・都市OSと連携可能な複数のシステムやアプリケーションの開発が必要 ・構築期間や費用等が増大する可能性がある

結果として、外部サービスとの連携、平常時における GIS の運用可能性、コストパフォーマンス等の検討事項から、「（案2）WebGIS の活用」を採用し、後続の検討を進めることとした。特に大量データを空間的に整理できることが可能な WebGIS は本システムの基本方針や試行実証の結果を踏まえるとその活用が期待される。

また、基本方針を踏まえて、災害対応を支援するシステムに求める要件を定義した。機能要件は、段階的な構築のため、機能ごとに優先順位を設定し、かつ、対応する作業区分の判別ができるように「基本機能」「マスター管理」「平常時活用」「災害時初動対応」「応急復旧・復旧報告」等に区分して、整理した。システム構成のアーキテクチャの概要（システムの全体像）は図-9 の通りとした。

検討したアーキテクチャを基に、アプリケーション（機能）、データベース、サービス（非機能）、外部連携システムを構成要素とし、各構成要素の検討を行った。

4.3. 平常時での活用検討

災害時における効率的な業務運営のためには、平常時から本システムを用いた「各管理施設の状況把握」を定期的に行う必要がある。また、システムを平常時から活用することで災害時のみ活用すること

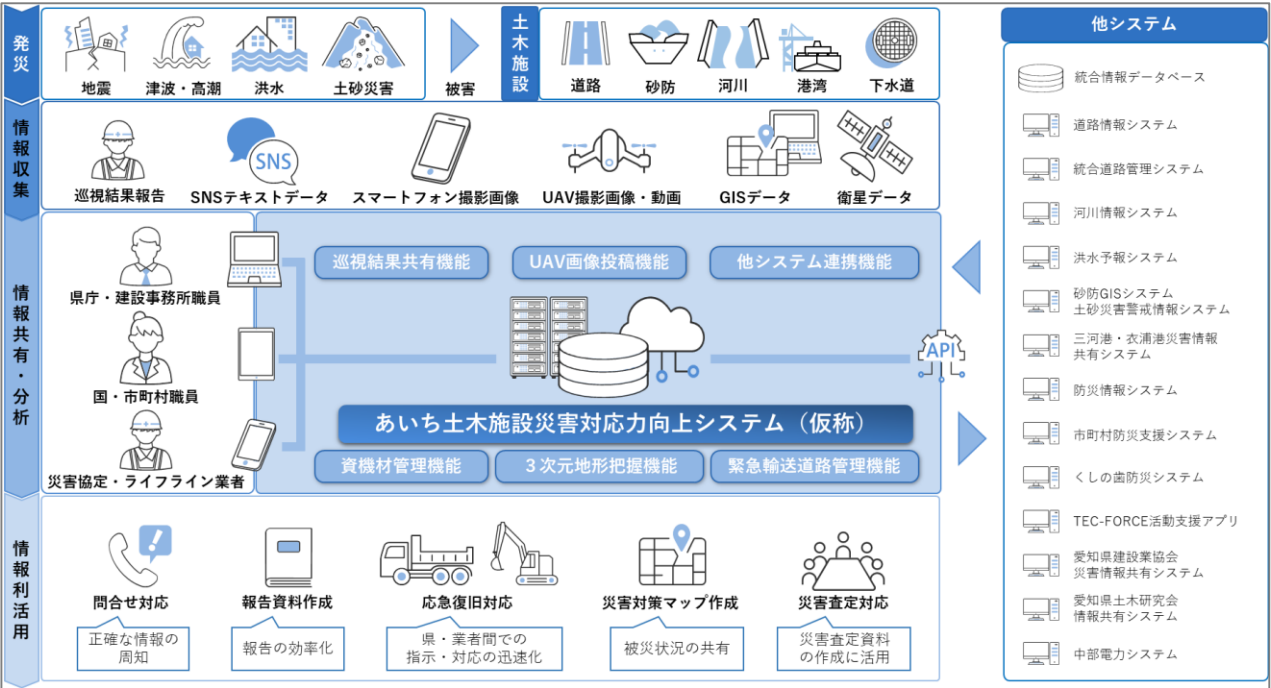


図-9 システムの全体像

と比較し、操作習熟度の向上が期待される。

本システムにおいて UAV 等により蓄積される各種データは、平常時業務の効率化はもとより、災害時における平常時との比較、将来的なオープンデータへの提供等に利用されることを前提として検討を行った。検討した結果についてシステムを活用した際の業務シナリオとしてとりまとめた（図-10）。

4.4 段階的構築に関する検討

DX の実現にあたっては、できることから始めること（スモールスタート）により、小さな成功事例を積み重ねることが重要とされる。またデータ活用については、試行錯誤を伴ってデータ基盤に求められる要件も変化するため、これからデータ活用に取り組む場合は、最初から完璧なデータ活用を目指すのではなく、必要な機能に絞って素早く構築し、拡張していくアプローチが適しているとされている。さらには、スモールスタートによりシステム開発を手戻りなく短期間で行えることができる。

本システムに搭載すべき機能についても、段階的に拡張し、幅広くデータの利活用が可能になるよう将来構想を含めて検討した。具体的には開発期、短期、中長期の3段階に分け、段階的な機能発揮を実現する計画とした（表-6）。

開発期では WebGIS を中心としたシステムの基本機能や機能要望のうち優先的なものについて導入を行うこととした。また短期・中長期にはシステム構築後、システムの機能の充実や高度利用を実施するため、ICT 機器の最新動向や技術革新等を踏まえてシステムの拡張を行うこととした。なお、開発工程の分類は調査検討段階のものであり、今後の技術革新や社会環境等により見直すことが重要である。

表-6 段階的な構築計画

開発期
● 様々な情報を収集し、統合する機能
● 関係機関の情報共有システムを連携させる機能
● 応急措置等に必要な情報を分析・提供する機能
● GIS上でデータを重ね合わせる機能
● 各種データ登録機能
短期（運用開始から2～3年で検討・構築）
● 巡視・巡回/パトロールの効率化・高度化
● 応急復旧や復旧報告の効率化
● システムの付加価値の向上
中長期（運用開始から5年後以降に検討・構築）
● 巡視等の更なる効率化
● 各種データのオープンデータ化
● 住民問い合わせ対応の高度化

5. おわりに

今後、愛知県ではシステム設計・実装が進められる。設計・実装段階だけでなく、運用が始まってからも常に利用者ニーズや最新技術等の動向などを把握し、常にシステムを最適化していくことが求められる。災害対応の実効性を確保していく必要がある。

WebGIS を中心に据えて、ICT 機器や関連システムと連携することで、GIS のもつ空間的な情報の共有・管理・分析の機能が最大限活用されることが期待される。

また災害時だけではなく、平常時から活用されること、段階的な構築に伴うシステムの最適化で、「使われるシステム」とすることで、土木施設の災害対応力の向上を図る。

参考文献

独立行政法人情報処理推進機構(2021)DX 白書 2021

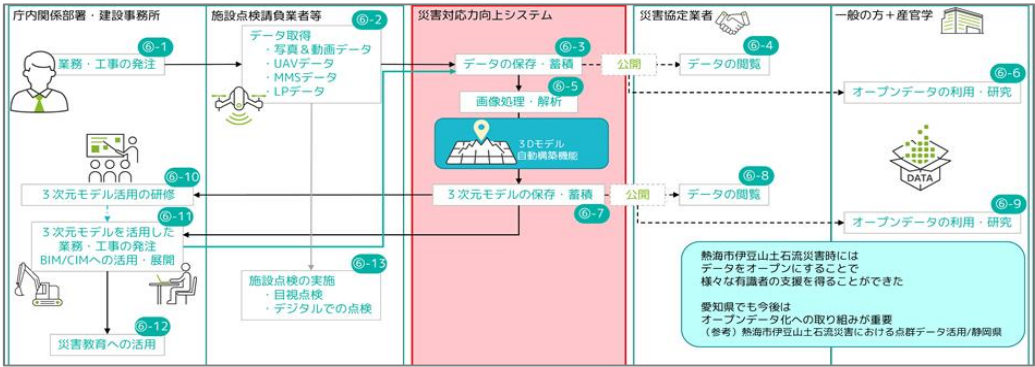


図-10 平常時のシステムシナリオ

Oral Presentation in GISA

防災 1

Chair: Hiroyuki Usui (Department of Urban Engineering, The University of Tokyo)

Sat. Oct 28, 2023 5:00 PM - 6:40 PM Room F (C-401 4th floor of Bldg. C)

[F5-01] 移動経路の水害リスクを考慮した一時避難所としての避難所配置分析

*Chisa Baba¹, Michinori Hatayama² (1. Shiga University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:00 PM - 5:20 PM

[F5-02] 携帯電話データを用いた災害発生直後の都市における人口分布に関する地理学的研究

*Masami Onozuka¹, Yuichi Hasimoto¹ (1. Hokkaido University)

5:20 PM - 5:40 PM

[F5-03] 大規模駅周辺地域における道路閉塞を考慮した帰宅困難者による道路混雑度の評価

*Shunichi Kusano¹, Toshihiro Osaragi¹, Maki Kishimoto¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

5:40 PM - 6:00 PM

[F5-04] 大地震発生時の二段階避難における避難施設割り当てモデル

*Kai Tang¹, Toshihiro Osaragi¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

6:00 PM - 6:20 PM

[F5-05] 滞在人口との比較による夜間光光度に基づく水害復興過程分析の妥当性検証

*Akina Machida¹, Ryo Inoue¹ (1. Tohoku University)

6:20 PM - 6:40 PM

移動経路の水害リスクを考慮した一時避難所としての避難所配置分析

馬場千瑛*・畑山満則**

Analysis of temporary evacuation shelter placement considering flood risk of evacuation routes

Chisa Baba*, Michinori Hatayama**

Abstract

In recent years, climate change has caused torrential rains to occur more frequently, increasing the importance of evacuation against flooding damage. It has been shown that "evacuate to a designated evacuation site" may not be the correct action to take when evacuation information is issued, but it is not uncommon for people to take the action of "evacuate to a designated evacuation site" during evacuation drills or during actual heavy rainfall events. Therefore, the purpose of this study is to examine the placement of evacuation centers when designated evacuation centers are considered as evacuation sites for eviction evacuation. The target area is Hikone City, Shiga Prefecture, Japan. Using network Voronoi partitioning, we analyzed evacuation zones considering the depth of inundation at the time of flooding and considered the placement of evacuation centers. As a result, it was found that there are several areas where evacuation behavior based on elementary school districts could be hazardous.

Keywords: 水害 (Flood disaster), 避難計画 (evacuation planning), ネットワークボロノイ分割 (network Voronoi diagrams)

1. はじめに

近年、気候変動の影響により台風の巨大化と集中豪雨に伴う水害や土砂災害が、毎年、全国各地で引き起こされている。河川整備時の計画規模を超える降雨が頻発することで、命を守る避難行動の重要性が高まっている。

昭和 36 年に策定された災害対策基本法において、避難指示に関する記述は、「市町村長は、居住者等に対し、避難のための立ち退き避難を指示することができる」という旨のみであったことから、災害対策基本法策定当初、避難指示とは立ち退き避難を促すものであると捉えられていた。しかし、平成 25 年の改定で、「立ち退き先として指定緊急避難場所、その他の避難場所を指示することができる」という旨、「立ち退き避難がかえって危険であるとき、高所への移動、近傍の堅固な建物への退避などの立ち退き避難以外の措置を指示することができる」という旨が追加されたことから、「避難行動」には、垂直避難や屋内安全確保が含まれることが示唆されている。これは、2009 年 8 月に発生した兵庫県佐用町を中心

とした豪雨災害時における避難行動時の遭難事例が一因であると考えられる。牛山(2010)によると、この豪雨災害では、死者・行方不明者 26 名のうち、13 名が立ち退き避難の移動中に遭難した。このうちの 9 名は佐用町本郷地区で遭難しており、いずれも本郷地区内の住民であった。また遭難者らは洪水流を横断して、本郷地区内の指定避難所である幕山小学校を目指したとされている。牛山は、現地でのヒアリング結果などから、「犠牲者らの避難行動は、決められた場所(自分たちで決めた場所)へ、決められた行動規範に従って行われたものである可能性が高いように思われる。」との見解を示している。

このような事例より、平成 25 年の改定以降、必ずしも「指定避難所に立ち退き避難する」という行動が安全であるわけではなく、かえって危険になる場合もあることが指摘されてきた。しかし、その一方で「立ち退き避難先としての避難所を指定する」ことが明示されたことで、「指定避難所」が明確に設定されることとなった。これを受け、状況を付与することなく「指定避難所に立ち退き避難する」避難訓

GISA Members

* 学生会員 滋賀大学データサイエンス学部 (Shiga University) s5020224@st.shiga-u.ac.jp

** 正会員 京都大学防災学研究所 (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

練が多くみられるようになった。状況に応じた行動でないにもかかわらず、この訓練行動が地域の行動規範となってしまうと、佐用町での課題が、今後再発することになる可能性もあると考えられる。そこで本研究では「想定される水害リスクを回避する避難経路・避難所の選択がある」と仮定して、立ち退き避難の際の避難所選択について考察する。

2. 道路ネットワークへの水害リスクの付与

想定される水害リスクを回避する避難経路探索のため、水害リスクを考慮したネットワークボロノイ分割を行った。QGIS を利用して必要なデータ処理を行い、道路ネットワークデータと 100 年確率での最大浸水深データを重ね合わせる。これにより、各リンクにおける最大浸水深を取得する。さらに最大浸水深の程度によって、リンクの長さに異なる重みをかけ、最大浸水深が深くなるほどリンクの長さを長くしてネットワークデータを扱う。この操作により、最大浸水深の深いリンクは避けて、より最大浸水深の浅いリンクを選択することを可能にする。最大浸水深を反映したリンク評価値(重み付き距離) WL の計算式は以下の通りである。

$WL = \text{リンクの長さ(m)} * \text{水害リスク係数}$

重みの段階は、表 1 に示す通りである。0.5m の浸水深で大人の避難が困難となることが指摘されていることから、0.5m を超える最大浸水深では重みの値を大きくする。

表 1. 最大浸水深と水害リスク係数

最大浸水深 d (m)	水害リスク係数
d=0	1
0<d<0.5	5
0.5≤d<1.0	8
d≥1.0	10
河川の横断	10000

また、ハザードマップでは堤外地にあたる河川部分には浸水深が示されないため、河川を横断するリンクに極端に大きな重みをかけることで、被災する可能性が高まる河川の横断を回避するようにした。

3. 対象地域と利用するデータ

本研究では、滋賀県彦根市を対象とした。彦根市は、滋賀県東北部に位置する自治体であり、市域の 3 分の 2 以上が低地である。犬上川や芹川、宇曾川等の一級河川が 19 河川流れており、急流で流程が短く、天井川であることから治水上不安定な河川が多い。100 年に 1 度の降雨量(概ね 1 時間に 109 ミリメートル)の際には、図 1 のように市の広範囲が浸水することが想定されている。

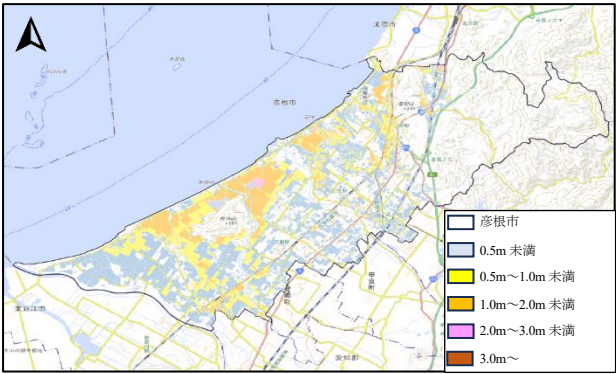


図 1. 彦根市における 100 年に一度の降雨量での最大浸水深図(滋賀県防災情報マップのデータより作成)

河川が多い彦根市では、小学校の区分けにおいて、河川をその境界としている場所もある。一方で、小学校区内を一級河川が通る小学校もあり、小学校を目指して避難をするためには、河川を渡る必要がある。この小学校区の住民からは、避難訓練の際に河川を渡っていることに対する不安の声もある。

本研究で活用する、道路ネットワークデータ、彦根市の小学校と小学校区のデータ(国土数値情報, 2016)、彦根が公開している水害ハザードマップ(2020)を使用する。彦根市の水害ハザードマップは、芹川、犬上川、宇曾川、愛知川の浸水想定区域図や、国土交通省が公開した「琵琶湖浸水想定区域図」、滋賀県が公開した「浸水想定区域図」および「地先の安全度マップ 100 年確率」を重ね合わせたものである。「地先の安全度マップ」とは、10 年確率、100 年確率、200 年確率の 3 つの想定において、川や水路が溢れることでどれくらい浸水するおそれがあるのか、溢れた場合どのような被害が出るのかを明示し

たものである。他の都道府県では、洪水予報河川及び水位周知河川の指定された河川について、水害ハザードマップが作成されている。一方「地先の安全度マップ」は、そのような河川に加え、中小河川や農業用排水路といったものによる内水氾濫も考慮した水害ハザードマップである。

4. 避難経路の水害リスクを考慮した立ち退き避難分析

分析には、ネットワークボロノイ分割を用いる。これは複数地点から、道路などのネットワーク上で最も近い母点を探し、ネットワークを分割するものである。通常のボロノイ分割では、ある地点と母点の距離をユークリッド距離で計算するのに対し、ネットワークボロノイ分割ではネットワークを辿る分割が行われるため、実際の移動距離を用いて分割を行うことができる。ネットワークの評価値に水害リスク係数を考慮した重み付き距離を用いたネットワークボロノイ分割手法を用いて、彦根市の小学校を対象に立ち退き避難経路分析を行った結果を図 2、3、4 に示す。これらは、ある小学校区について、水害リスクを考慮したネットワークボロノイ分割の結果と、実際の小学校区を重ね合わせたものである。黒いラインで小学校区を示し、桃色のポイントで小学校の位置を示す。また水色の曲線は水涯線であり、青色のポリゴンは色が薄いほど最大浸水深が浅く、色が濃いほど最大浸水深が深いことを表している。実際の小学校区内のネットワークを太く、ネットワークボロノイ分割の結果を細くし、重ね合わせた。

図 2 は小学校 A の校区周辺の分析結果である。水害リスクを考慮した場合、実際の小学校 A の校区に従うよりも、他の小学校に避難する方がよい範囲（緑色のネットワーク）があることがわかる。この小学校区内では、100 年確率での最大浸水深はあまり深くないものの、一級河川である芹川が通っている。そのため、小学校区に従って避難をするためには、芹川に近づく必要があった。分析の結果、この小学校区では、芹川の右岸にいる人々は小学校 A に避難を行うことが、想定される水害リスクを回避することになるが、芹川の左岸にいる人々は、この小学校

区に従わず、他の小学校に避難を行うことが想定される水害リスクを回避することを可能にする。

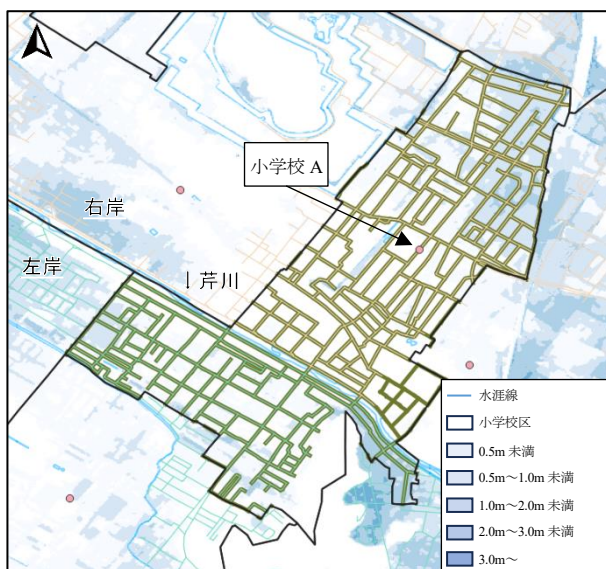


図 2. 小学校 A の小学校区と水害リスクを考慮したネットワークボロノイ分割の結果

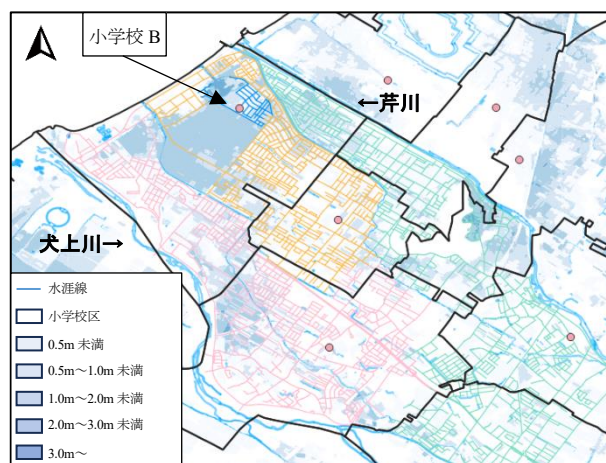


図 3. 小学校 B の校区周辺の水害リスクを考慮したネットワークボロノイ分割の結果

図 3 に示す小学校 B の校区においては、本来の小学校 B へ避難をする範囲は青色のネットワークのみであり、ほとんどの場所で他の小学校へ避難する方がより想定される水害リスクを回避できるという結果となった。これは小学校 B 付近に最大浸水深が 1.0m 以上となる範囲が広がっており、さらに小学校 B の北西には最大浸水深が 1.5m 以上となる範囲があることが要因と考えられる。また、この小学校区は芹川と犬上川の間位置する学区であるため、芹川寄りの範囲では芹川を渡らず、かつ、この小学校

Bに避難をするよりも他の小学校へ避難することが水害リスクを回避できるという結果となった。逆に犬上川寄りの範囲にいる場合には、犬上川を渡らず、より最大浸水深が浅い経路をたどる結果となった。これより、芹川と犬上川に挟まれた範囲にいる場合、図3のような避難をすることでより想定される水害リスクを回避することはできるが、避難を完了するまでにかなりの距離を移動する必要がある場所もある。氾濫による最大浸水深データを用いているため、このような結果となっているが、実際には、浸水前の早い段階の避難を行うことが求められる結果となっていると捉える必要があるだろう。

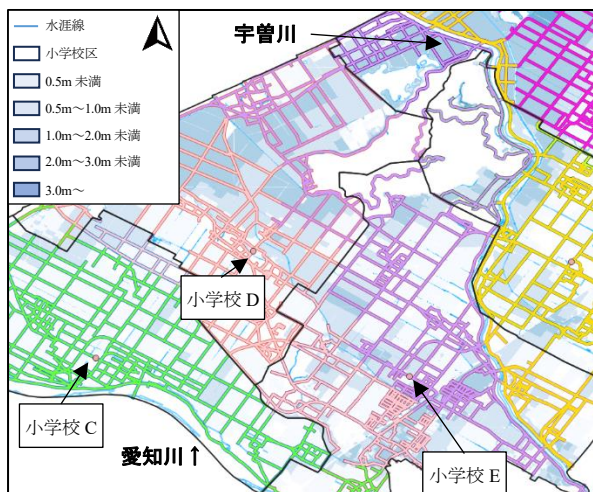


図 4. 宇曽川と愛知川に挟まれた小学校区におけるネットワークボロノイ分割の結果

図4の範囲では図3と同様に、宇曽川と愛知川に挟まれた地域も河川を横断することができないため、隣り合わない小学校にまで避難を行う部分が存在する。これは近くの小学校に避難をするという直感からかけ離れた結果となっており、徒歩で移動するには、避難にかなりの時間がかかってしまうと考えられる。これらの地域でも、立ち退き避難の際には、早い段階での行動が求められるだろう。

4. まとめ

今回の研究により、彦根市における実際の小学校区と、想定される水害リスクを回避するための圏域に違いがみられる場所がいくつもあった。実際に避難指示が出た際に、より水害リスクを回避し安全に

避難を行うためには、避難訓練の際から小学校区に捉われず、想定される水害リスクを回避するための避難所選択を考えた訓練を行っておく必要がある。そのために、今回のような想定される水害リスクを回避する避難所選択の結果を利用することが重要である。

しかし今回の分析結果では、河川の横断を一切できないように制限をかけたことで、本来の移動距離よりもかなり長い距離を移動する場所があった。今回のような長距離を移動するには徒歩移動は困難であり、現実的ではない。

実際の降雨の際には、降雨量やその継続時間によって浸水深や、浸水する範囲が変化する。これらのことを踏まえ、時間的変化を反映した分析を行うことにより、浸水が始まる前に利用できる経路を分析する。これにより、早めに避難を開始することで、今回の結果のように長距離を移動しない避難経路の選択を行うことを可能にする必要がある。また時間変化を考慮することで、どの段階でどの道路が利用できなくなるのか、どの段階で立ち退き避難を行うことが危険となるのかなどの分析も行う必要がある。

参考文献

- 牛山素行 (2010) 2009 年 8 月 9 日兵庫県佐用町を中心とした豪雨災害の特徴.「自然災害科学研究西部地区部会報」第 34 号 37-40
- 衆議院 (1961) 法律第二百二十三号 (昭和三六・一一・一五) 災害対策基本法
<https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_housei.nsf/html/houritsu/03919611115223.htm>.
- 内閣府 (2013) 災害対策基本法等の一部を改正する法律 (平成 25 年法律第 54 号) <https://www.bousai.go.jp/taisaku/minaoshi/kihonhou_01.html>
- 滋賀県彦根市〈2023〉彦根市地域防災計画 <<https://www.city.hikone.lg.jp/material/files/group/48/R5honpen01.pdf>>

携帯電話データを用いた災害発生直後の都市における人口分布に関する 地理学的研究

小野塚仁海*・橋本雄一**

CHANGES IN SPATIAL PATTERN OF POPULATION DISTRIBUTION IN A CITY AFTER AN EARTHQUAKE DISASTER

Masami ONOZUKA*, Yuichi Hashimoto**

Abstract This study aims to clarify the spatiotemporal pattern of the change in population distribution in Sapporo just after Hokkaido Eastern Iburi earthquake, and that difference by social attributes.

For the purpose, the study analyzes the Mobile Location Statistics of 26 days, contain the day the disaster occurs. To analyze the difference between usual distribution and of after disaster, we apply cosine distance to the Mobile Location Data.

As a result, it shows that the change in population distribution continues four days after the disaster, and that changes in population distribution differ by social attributes. The younger, the difference come large. The the change in distribution of females is bigger than of men. Of middle men is small especially in the day time. Those suggest that the changes in populaiton distribution after a disaster is affected by those type of employment and activeness.

Keywords: 携帯電話人口統計 (Mobile Location Statistics), 平成 30 年北海道胆振東部地震 (Hokkaido Eastern Iburi earthquake), 大規模停電 (Blackout), コサイン距離 (cosine distance)

1. はじめに

1.1. 研究の背景

スマートフォン等の普及に伴い、その位置情報を集計して利用する「携帯電話人口統計」が様々な場面で活用されるようになってきている。携帯電話人口統計は、スマートフォン等の GPS/GNSS 測位情報や基地局運用データなどを用い、時空間的な人口分布を把握するものである。これらの統計データを活用することで、様々な場面における人口分布を分析対象とすることができるようになった。

携帯電話人口統計は、リアルタイムでの収集が可能なデータであり、また災害等のイベント発生時にさかのぼってデータを取得することが可能であるため、様々な災害事例を対象とした研究が行われている (Bagrow, et al, 2011, Wang, et al, 2020)。

日本国内においては、東北地方太平洋沖地震発生後の仙台を事例に、発災後の各地域メッシュにおける人口の変化について因子分析を行い、都市機能や従業者数と関係性のあるパターンが生じていることを示した奥村 (2015) や、熊本地震における避難行

動の検出を行った Yabe et al (2016)、瀬戸ら (2016)、舩越、畑山 (2017) などがあり、被災者の行動の一部を明らかにしている。被災者の行動の変化についてより詳細に明らかにしたものとしては、庄子ほか (2021)、山口ほか (2017) などがあるが、これらの研究で用いられる手法は、「主拠点 (自宅等)」・「副拠点 (職場)」での滞在者数や滞在時間など、各ユーザーの行動を追跡したデータを使用する必要がある。災害時における速やかな状況把握のためには、取得の容易な人口分布データを用い、被災者の行動の変化を検出する手法が必要であると考えられる。

さらに、携帯電話人口統計では、利用者の契約情報等を用い、年齢や性別などの属性ごとに人口分布を得ることが可能であるが、これらの属性情報に着目した研究はわずかである (谷本、山口, 2018, 松島, 2019)。災害に対する脆弱性は被災者の社会的属性によって異なることが知られているが、これらの格差が災害発生直後の時空間にどのように現れるかについては明らかになっていない。

GISA Members

* 学生会員 北海道大学文学院人間科学専攻 (Hokkaido University) e-mail : oniten@eis.hokudai.ac.jp

** 正会員 北海道大学大学院文学研究科 (Hokkaido University)

そこで本研究では、大都市の全域が災害の影響を大きく受けた事例として平成30年北海道胆振東部地震発災後の札幌を取り上げ、その発災後の人口分布について、(1) 変化の時間的パターンの特徴を明らかにする。さらに、(2) 属性別人口分布データを用いて、社会的属性による災害の影響の差異を明らかにする。また、多次元データである携帯電話人口統計についてその平常時からの変化の大きさを計算するため、コサイン距離の携帯電話人口への適用を行う。

1.2. 研究の方法

本研究ははじめに、対象事例である平成30年北海道胆振東部地震について述べる。次いで、本研究で使用するデータであるモバイル空間統計®について説明し、このデータへのコサイン距離の適用を行う。

次いで、平常値となる人口分布を求める。期間中の各日における人口の時空間分布について総当たりでコサイン距離を算出し、日付ごとの関係をマトリックスとして示すことで、平常時とみなす期間を抽出する。さらに、平常時のデータを用い、人口分布の「平常値」を算出する。

以上をもとに、期間中の人口分布データと平常値をコサイン距離を用い比較し、本事例災害による人口分布への影響が生じた時間帯とその大きさを明らかにする。さらに、性別と年代で分類された携帯電話人口統計を用い同様の計算を行い、属性によって生じる発災後の人口分布の変化の差を明らかにする。

2. 平成30年北海道胆振東部地震について

平成30年北海道胆振東部地震は、2018年9月6日午前3時7分に発生した地震である。胆振地方中東部、深さ37kmを震源とする地震で、プレート内部の断層のずれによる内陸直下型地震に分類される(気象庁、2018)。震源付近の厚真町で震度7、安平町、むかわ町で震度6強を観測した。

震源付近の厚真町、安平町、むかわ町を中心に住宅への被害が多く発生したほか、震源から50km以

上離れた札幌市でも、市南東部の清田区を中心に液状化現象による家屋への被害が発生した(北海道、2018)。

本地震の特筆すべき事象として、北海道全域におよぶ大規模停電があげられる。停電の影響は、水道などのほかのライフラインやほとんどの公共交通、流通に波及した。

電力供給の正常化は、北海道電力札幌管内で7日22時48分、最も遅い釧路管内で8日0時13分であった。6日深夜に供給された電力は平常時の3割程度であり、北海道内の広い範囲で停電したまま夜を過ごした様子が見える(電力広域的運営推進機関、2018)。

3. 使用するデータ

3.1. モバイル空間統計®について

本研究では、携帯電話人口統計の一種であるモバイル空間統計®を使用する。モバイル空間統計®は、NTT docomo社の運用する携帯電話基地局データをもとにした人口推計である。NTT docomo社と契約のある携帯電話のうち、法人名義のものを除くものを集計対象とし、15分を1単位として集計されている。集計対象とされるのは、15歳以上80歳未満の契約者である。

本研究では、表1の内容について、札幌の中心市街地と、副都心である新札幌地区を含む、東西約20km、南北約10kmの範囲を対象に、500mメッシュ単位で人口分布データを取得した。

表1 取得したデータの内容

属性	内容
<i>M</i>	800個のメッシュ
<i>D</i>	2018年8月20日から9月4日(26日間)
<i>T</i>	0時台から23時台(24時間帯)
<i>G*</i>	男性・女性(2区分)
<i>A*</i>	20代から70代まで、10歳ごと(6年代)

*属性別人口データのみ

3.2. 総人口データ

データ取得範囲には、500mメッシュで800地区が含まれるが、一部に秘匿値が含まれた。本研究で

は、期間中欠損なく数値を得ることができた 746 メッシュについて、分析対象とした。分析対象外となった地区は、市街地南西の山地、東部の丘陵地および北東部の廃棄物埋立処理場付近の地区であった。

3.3. 属性別人口データ

20 代から 70 代までの年代別、および男性と女性の性別で区分された、12 区分の人口分布データを取得した。属性別データでは総人口データより秘匿値が現れやすい。そこで、5 章で定義する「平常時」および 9 月 6～7 日の期間の両方において、24 分の 23 以上の割合でデータを取得できた 511 の地区について分析対象とした（図 1）。

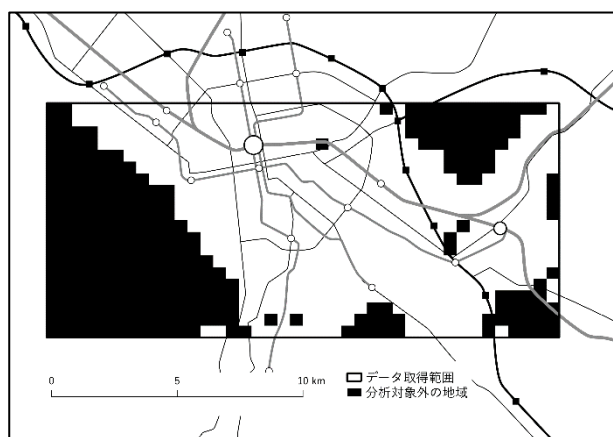


図 1 札幌市街地とデータ取得範囲

4. 携帯電話人口統計へのコサイン距離の適用

4.1. コサイン距離について

コサイン距離は、コサイン類似度と呼ばれる指標から派生したものである。

コサイン類似度 cosine similarity は、ベクトルとして表現できる各データの類似性を、2 つのベクトルの余弦を用いて表現する手法である。データ a , b の類似度は、次式であらわされる。

$$\text{cosine similarity}(a, b) = \cos(a, b) \quad \cdots \text{式 1}$$

コサイン類似度は、その値が最大値 1 に近いほど、2 つのデータ中の値の分布が類似していることを示す。コサイン類似度を応用し、類似度が高いほど 0

に近く、異なるほど大きな値になるようにしたのがコサイン距離である。コサイン距離 cosine distance は、次式のように定義される。

$$\text{cosine distance}(a, b) = 1 - \cos(a, b) \quad \cdots \text{式 2}$$

上式より、コサイン距離の最大値は 2、最小値は 0 となる。

4.2. コサイン距離の携帯電話人口統計への適用

本項では、3.1 で述べたデータについて、コサイン距離を適用する。説明のため、日付属性 D によってデータを分類し、期間中の各日における人口の時空間分布が、相互にどれだけ類似しているか求める。

日付 d , 時刻 t , 地区 m における人口を $P(d, t, m)$ とする。このとき、取得したデータの全体 P は

$$P = \{P(c) | c \in D \times T \times M\} \quad \cdots \text{式 3}$$

となる。

いま、日付属性 D によってデータを分類し、人口分布の日付間におけるコサイン距離を求める。

日付属性 $d \in D$, 時刻と地区の各集合の直積の要素 $\bar{d} \in T \times M$ を用い、次の行列を得る。

$$V(D) = \begin{bmatrix} P(d_1 \times \bar{d}_1) & P(d_2 \times \bar{d}_1) & \cdots & P(d_{|D|} \times \bar{d}_1) \\ P(d_1 \times \bar{d}_2) & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P(d_1 \times \bar{d}_{|T \times M|}) & \cdots & \cdots & P(d_{|D|} \times \bar{d}_{|T \times M|}) \end{bmatrix} \quad \cdots \text{式 4}$$

$V(D)$ の各列は、期間中の各日付に対応する。そこで、行列 $V(D)$ の各列を列ベクトル v とし、次式のように表すことで、各日付における人口分布ベクトルを得る。

$$V(D) = (v(d_1) \ v(d_2) \ \cdots \ v(d_{|D|})) \quad \cdots \text{式 5}$$

これらのベクトルを用いることで、各日における

人口の時空間分布間のコサイン距離を計算することができる。

5. 平常時とする期間の抽出

5.1. 計算方法

本研究では、発災後の人口分布について、その変化の時間的パターンの特徴を平常時の人口時空間分布と比較することで明らかにする。そのため本章では、平常時として扱う期間を、対象とする期間から抽出する。

前章で例示した方法で、期間中の各日を対象に総当たりでコサイン距離を求めた。その結果をマトリックス図として図2に示す。

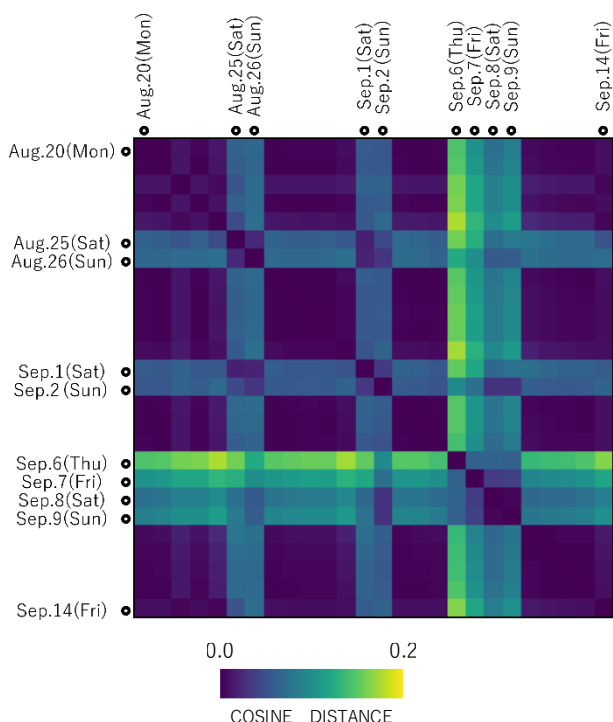


図2 各日における人口分布間のコサイン距離

5.2. 結果

9月6日、7日を除く平日どうしの組み合わせでは、いずれも小さな値となった。このことは、平日の札幌における人口の時空間分布は、毎日ほぼ一定のパターンで変動していることを示している。

休日と平日の組み合わせでは、人口分布が異なった。また、休日どうしであっても一部で値が大きくなる組み合わせが生じた。

9月6日の人口分布は、ほかのいずれの日とも異なっており、特に金曜日の人口分布と異なる様子が見られた。

8日、9日の人口分布は互いに近い一方、ほかの日との距離は遠くなった。

5.3. 「平常時」と「平常値」の定義

前節より、対象期間中の日別人口分布は、発災直後を除いた平日で、ほぼ一定のパターンを示していることが明らかになった。発災当日6日と翌7日には、ほかのいずれの日とも異なる分布が見られたが、翌週10日以降の平日は他の平日と近い人口分布となった。休日の人口分布は平日のものと異なる他、休日どうしであっても差異のやや大きい組み合わせが見られた。

そこで本研究では「平常時」として、9月6～7日を除く平日18日間を用いる。各時刻、各メッシュにおける人口の「平常値」として、平常時の中央値を用いる。

6. 発災後の人口分布の変化

6.1. 同時刻平常値との比較

時刻 t 、地区 m における人口の平常値を $\overline{P(t, m)}$ とする。これを用い、時刻 t における人口分布の平常値を列ベクトル $\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} \overline{P(t, m_1)} \\ \vdots \\ \overline{P(t, |M|)} \end{pmatrix}$ とする。このとき、日付 d 、時刻 t における人口分布の平常値からのコサイン距離は

$$\text{cosine distance}(v(d, t), \vec{v}(t))$$

…式6

として求めることができる。

上記の方法で各日時における人口分布の平常値からのコサイン距離を求めたものを、図3に示した。

平常時では、一部の日の18時以降に平常値と若干異なる分布が見られたものの、ほとんどの日時で平常値の分布とはほぼ一致した。夕方から夜間にかけての活動は日によって異なるものの、それ以外では定常的なパターンで推移していることがわかる。

発災後の6日には、発災より3時間以上経過した、

7 時以降平常時と異なる人口分布となった。平常時との差異は、6 日 12 時から 18 時の間に最大となった。

本災害の発災は明朝の時間帯であったため、多くの被災者は自宅や宿泊先に滞在していたと考えられる。発災後 7 時以降に値が増加したことは、被災者が発災後速やかに移動を開始したのではなく、朝になってから平常時の行動と差異が生じたためと考えられる。

6 日の深夜から 7 日の明朝にかけて、平常時や休日には見られない水準の値の高さとなった。この時間帯に見られる差異は、自宅や宿泊先とは異なる場所に滞在する被災者の存在を示唆している。8 日明朝にはほとんど平常時の分布に戻っており、自宅外に滞在していた被災者が停電解消後速やかに自宅等に戻ったことが想定される。

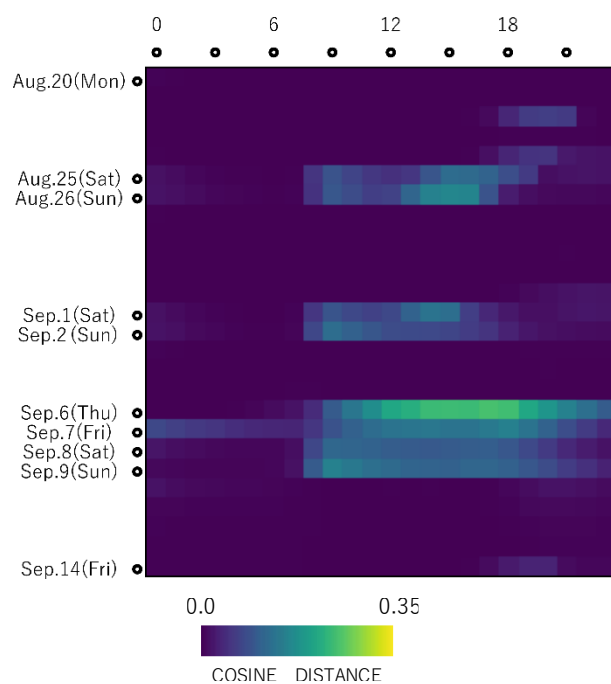


図3 各日時における人口分布と平常値のコサイン距離

6.2. 平常時午前 3 時との比較

前項では、6 日朝以降に平常時の行動と差異が生じたと考えられることが示された。この時間帯に生じる災害による行動の変化には、通勤行動の抑制により自宅にとどまったことによるものと、明るくな

るのを待って避難所やその他の施設へ移動することによるものが主に想定される。そこで、各日時における人口分布を平常時の夜間人口分布（AM3 時）と比較することで、発災後に生じた人口分布の変化が、被災者が自宅等にとどまることによって生じたのか、そうでないのか明らかにする。計算方法は次式の通りである。また、計算した結果を図 4 に示す。

$$\text{cosine distance}(v(d, t), \bar{v}(\text{AM3}))$$

…式 7

平常時には、8 時から日中にかけて値が増大し、深夜にかけて減少する様子が見られ、就業行動に伴う都市のデイリーリズムが生じている様子が見てとれる。

平日のうち、金曜日にはほかと比較しより遅い時刻まで値が高くなった。ほかの平日と比較し、より遅い時間まで外出していると考えられる。

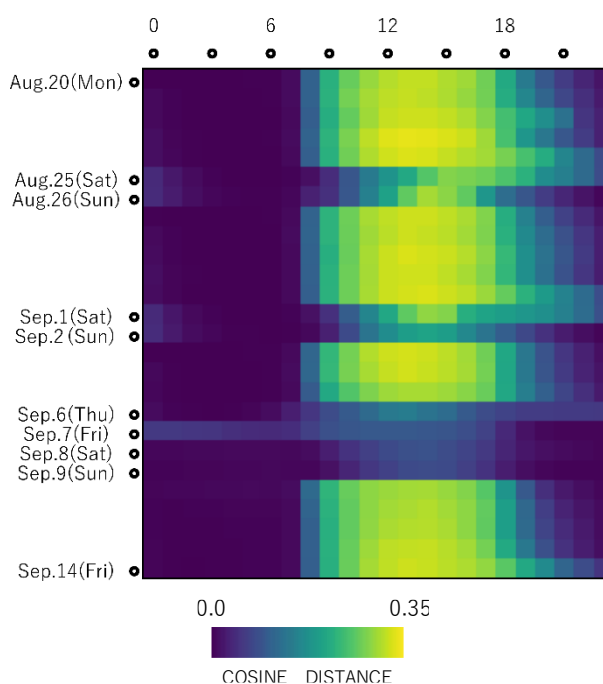


図4 各日時における人口分布と平常時午前 3 時の人口分布のコサイン距離

休日には、10 時以降値が増大するものの、そのピークの時刻や大きさは日によって異なった。

9 月 6 日には、平常時より早い 7 時台から値の増加が生じ、13 時にピークを迎えその後減少した。

このことから、自宅等を出る動きは、平常時の出勤時間帯より早く生じていること、日中に自宅以外で過ごすパターンは発災後にも生じていることがわかる。日中のピークは平常時と比較して小さく、日中出勤・外出せず自宅付近にとどまった人が多くいたと考えられる。

6日昼以降、18時頃にかけ値は減少するが、深夜から7日6時頃にかけ、他日より値が大きい状態が継続した。このことから、6日から7日にかけての夜間に自宅等以外に滞在した被災者が存在したことが想定される。

8日、9日には、12時から15時頃にかけてピークが見られるものの、期間中のいずれの日と比較してもピークが低くなった。週末で出勤者平日より少ない上、買い物やレジャーによる外出も他の週末と比較し減少したと考えられる。

7. 年代・性別と発災後の変化

7.1. 属性別人口分布データを用いた比較

6章では、総人口の時空間分布に現れる災害の影響について計算した。その結果、発災後2日間において、通勤などの外出が減少したことによる人口分布の変化と考えられるパターンが生じていたことが明らかになった。本章ではさらに、年齢と性別の社会的属性によってその影響がどのように異なるのか明らかにする。

そのため、属性ごとに人口分布の平常値を求め、9月6日、7日の各時間帯における各属性の人口分布について、平常時とのコサイン距離を求めた。その結果を、性別・年代ごとに図5に示した。

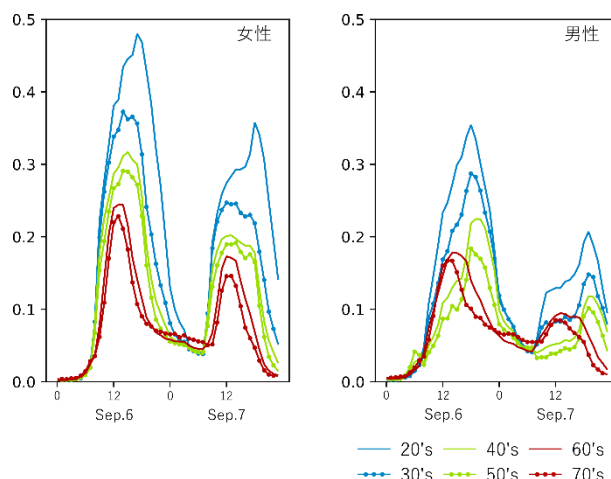


図5 9月6～7日各時刻における人口分布と平常値のコサイン距離（属性別）

7.2. 結果

いずれの年代においても、女性の方が男性より大きな値をしめした。また、若年ほど値が大きくなる傾向が見られた。また、いずれの属性においても、6日より高いピークが生じた。

30代以上の女性および60代以上の男性では、6日、7日ともに、日中にピークを生じた。

20代女性、2、30代男性では、日中に他の年代より高い値となった後、18時ごろにかけてさらに高い値となった。

40代および50代男性では、6日日中にかけての値の増加が他属性と比較し緩やかで、その後19時頃にかけて増加、ピークを生じた。翌7日には、夕方にかけてほとんど一定の値で推移し、その後20時頃にかけて増加し、ピークが見られた。

6日から7日にかけての夜間には、いずれの属性でも0.05程度の値となった。

7日日中の40代および50代の男性を除き、日中から夕方にかけて高い値となり、夜間に低い値となる傾向が見られた。これは、総人口の分布でも見られた通り、自宅付近にとどまる被災者が多く、外出行動が減少した影響によるものと考えられる。ただし、その影響の現れ方は、年齢・性別によって異なった。

夕方には、属性によって値に大きな差が見られた。災害発生後の夕方に生じる人口分布の変化について

は、奥村（2015）において、買い物や娯楽、飲食が制限されたもの「夕方活動の減少」として解釈されている。20代女性および50代以下の男性で、夕方により高い値が見られたのは、夕方活動の減少が、これらの属性でより強く生じたためと考えられる。

40代および50代の男性では、6日、7日の日中にほかの属性と比較し値が低くなった。これらの属性では、平常通り出勤した被災者が他の属性と比較し多かったと考えられる。

また、全般的に若年ほど変化が大きく、高齢ほど小さくなる傾向が見られた。60代および70代では、定年退職後の世代を含み、また高齢であることから、平常時より外出行動が他世代と比較し小さいと考えられる。そのため、外出行動の抑制に伴う人口分布の変化の幅も、他世代と比較し小さくなったと考えられる。20代および30代では、日常的に活発に外出行動を行うことが想定されるほか、就業上災害対応を求められる立場ではない被災者が多いことも考えられる。そのため、発災後の変化の幅が大きくなったと考えられる。

8. おわりに

本研究では、平成30年北海道胆振東部地震発災前後の札幌における携帯電話人口統計データを使用し、発災後に生じる人口分布の変化について、被災者の総人口に見られるものと、社会的属性によって現れる差異に着目し分析を行った。

その結果、総人口においては、発災後外出が抑制され、自宅付近にとどまる変化が見られることが明らかになった。また、停電中の夜間においては、自宅等以外の地域に滞在する被災者が存在することが示された。さらに、発災後の人口分布の変化の大きさとその経過には、年齢や性別による差異が見られることが明らかになった。

属性による災害の影響の差異は、社会生活への影響の格差や二次災害への脆弱性の格差につながることを考えられる。そのため、これらの差異をもたらした原因をより詳細に分析する必要があると考えられる。また、これらの差異が災害発生後の人口分布の変化にも表れることを明らかにしたことは、携帯

電話人口統計が社会的属性による脆弱性の格差を明らかにする上で有用であることを示している。本研究は、携帯電話人口統計の防災研究における新たな利用方法を示したものとして、価値があるものと考えられる。

本研究では、変化の発生した日時や属性について明らかにすることができたが、変化の発生した場所については、「自宅」「職場」のような分類での分析にとどまった。実際の災害対応においては、災害の発生した時間や影響を受けた人の属性についての情報に加え、災害による影響が発生した場所の地理的情報を速やかに取得する必要がある。今後は、属性別データのさらなる分析を行うと同時に、災害による人口分布変化について、その空間的特徴をより具体的に明らかにするため、手法の改良を行う。

謝辞

本研究は建議研究「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第二次）」の課題研究「地理空間情報の総合的活用による災害への社会的脆弱性克服に関する人間科学的研究」（代表者：橋本雄一、課題番号：HKD07）およびJSPS 科研費（基盤研究C）「ブラックアウト・ホワイトアウトを考慮した千島海溝地震の津波避難モデル構築」（代表者：橋本雄一、課題番号22K0104002）における成果の一部である。

参考文献

- Bagrow, J. P., Wang, D., and Barabasi, A. L. (2011). Collective response of human populations to large-scale emergencies. *PloS one*, 6(3), e17680.
- Wang, Y., Li, J., Zhao, X., Feng, G., and Luo, X. (2020). Using mobile phone data for emergency management: a systematic literature review. *Information Systems Frontiers*, 22, 1539-1559
- Yabe, T., Tsubouchi, K., Sudo, A., and Sekimoto, Y. (2016). Estimating Evacuation Hotspots using GPS data: What happened after the large earthquakes in Kumamoto, Japan. In *Proc. of the 5th International Workshop on Urban Computing* (Vol. 81, pp. 1-5).
- 奥村誠 (2015). 都市内災害復旧過程の時空間パタ

ーンの把握 携帯電話位置情報集計データの活用. 都市計画論文集, 50(3), 402-408.

庄子和之・青木俊介・米澤拓郎・河口信夫. (2021). 大規模ユーザの滞在情報に基づくエリアの特徴付けと COVID-19 による影響分析. 情報処理学会論文誌, 62(10), 1644-1657

瀬戸寿一・樫山武浩・関本義秀 (2016) 平成 28 年熊本地震における携帯電話位置情報を用いた避難所の混雑度推計, 地理情報システム学会講演論文 (<https://www.gisa-japan.org/content/files/conferences/2016/papers/C32.pdf>, last access:2023/8/29)

舩越康希・畑山満則 (2017) 熊本地震における避難所の同定手法の提案とそれを用いた支援政策に関する研究, 研究報告情報システムと社会環境 (IS) , Vol.2017-IS-139, No.3, 1-8

谷本圭志・山口博哉. (2018). 携帯電話の位置情報を活用した豪雪による市民生活への影響 平成 29 年鳥取県の豪雪を対象として. 都市計画論文集, 53(3), 927-934.

松島敏和. (2019). 携帯基地局運用データの滞留人口による大阪北部地震モニタリング. 中央復建 C. 技報= Chuo Fukken Consultants technical report, (49), 1-7.

山口裕通・奥村誠・金田穂高・土生恭祐. (2017). 携帯電話 GPS 情報から分かる熊本地震による行動パターンの被災・回復過程. 土木学会論文集 D3

気象庁 (2018) 災害時地震報告 平成 30 年北海道胆振東部地震

北海道 (2018) 平成 30 年北海道胆振東部地震災害検証報告書

札幌市 (2021) 平成 30 年北海道胆振東部地震 対応検証報告書

大規模駅周辺地域における道路閉塞を考慮した 帰宅困難者による道路混雑度の評価

草野峻一 *・大佛俊泰 **・岸本まき **

Evaluating Crowds of Stranded People Considering Street Blockages
in the Vicinity of a Large Railway Station

Shunichi KUSANO*, Toshihiro OSARAGI** and Maki KISHIMOTO**

Abstract: It is predicted that a large number of people will have difficulty in returning home in case of a large earthquake in the Tokyo Metropolitan Area and anticipated to head for railway stations for seeking the information on train restoration or alternative transportations. Furthermore, collapsed buildings may block streets and cause serious situations such as extremely crowded by stranded people. In this paper, we construct a simulation model of people returning home on foot considering the street blockages at a large earthquake. Then, we analyze the impacts of street blockages on the crowds flow and the number of people gathering at stations.

Keywords: 首都直下地震 (large earthquake in Tokyo Metropolitan Area), 帰宅困難者 (people with difficulty returning home), 路上混雑度 (degree of crowding), 道路閉塞 (street blockage), 大規模駅 (large railway station)

1. はじめに

首都圏では、東北地方太平洋沖地震（2011 年 3 月 11 日）による物的被害は軽微であったものの、鉄道の復旧情報や代替輸送手段を求める帰宅困難者が、発災直後から大規模鉄道駅に殺到した。今後発生が予想されている首都直下地震では、建物倒壊に起因する道路閉塞により帰宅困難者の徒歩帰宅が妨げられ、更なる混乱が生じる可能性がある。筆者らはこれまで、大規模駅周辺地域を対象に細街路を含む歩行者ネットワークを用いた帰宅行動シミュレーションを構築し、帰宅困難者の帰宅行動に関する分析を行ってきた（草野ほか、2023）。しかし、建物倒壊や道路閉塞の考慮については、検討すべき課題が残されていた。

本稿では、発災後における道路の閉塞状況を加味

した帰宅困難者の行動分析を行う。具体的には、まず、物的被害モデルを組み込んだ帰宅行動シミュレーションを構築する。次に、道路閉塞の発生有無が異なる 2 つの想定下においてシミュレーションを実行する。その上で、路上や鉄道駅、閉塞道路周辺における帰宅困難者の様相を精緻に分析する。

2. 帰宅行動シミュレーションの概要

2.1. 帰宅行動シミュレーションの構成

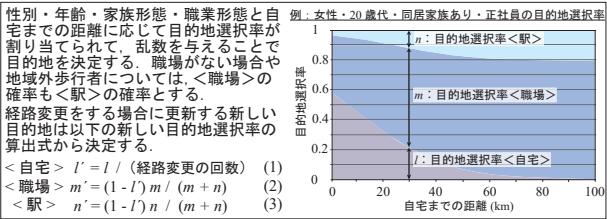
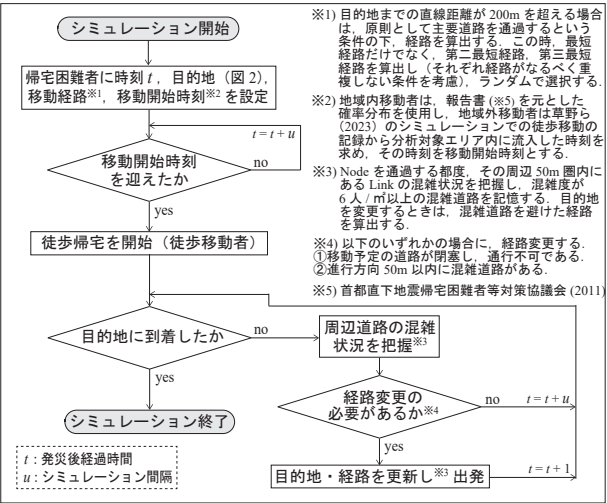
帰宅行動シミュレーションは、帰宅行動モデルと物的被害モデルの 2 つから構成される。

帰宅行動モデルの概要を図 1 に示してある。まず、帰宅困難者ごとに、目的地と移動経路、移動開始時刻を推定する。各帰宅困難者は、経路周辺の混雑状況を記憶しながら移動する。移動中に閉

* 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 E-mail:kusano.s.aa@m.titech.ac.jp

** 正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)



塞道路や混雑道路（路上混雑度が6人/m²以上）に遭遇した場合、目的地および目的地までの移動経路を新たに推定する（図2）。この時、移動時に把握した道路の混雑状況を考慮した上で、混雑度の低い経路を優先的に選択すると仮定する。

物的被害モデルの概要を図3(a)に示してある。建物倒壊は、実構造および建築年次から推定した全壊率を基に、建物単位で全壊有無を判定する（村尾・山崎，2000）。道路閉塞は、各道路リンクについて、沿道建築物の倒壊状況を基に閉塞率を推定し（国土交通省，2003）、中央分離帯の有無を考慮した上で閉塞判定を行う（図3(b)~(d)）。各道路リンクは、有効幅員が0mとなった場合、通行が不能である（完全閉塞）と想定する。

2.2. 帰宅行動シミュレーションの実行条件

帰宅行動シミュレーションの実行条件を表1に示してある。本シミュレーションでは、新宿駅南口から徒歩20分圏内を分析対象地域に設定し、発災時に対象地域内にいる地域内移動者と、徒歩帰宅の過程で対象地域に流入する地域外移動者を分析対象とする。

本稿では、発災時刻を平日14時と想定し、発

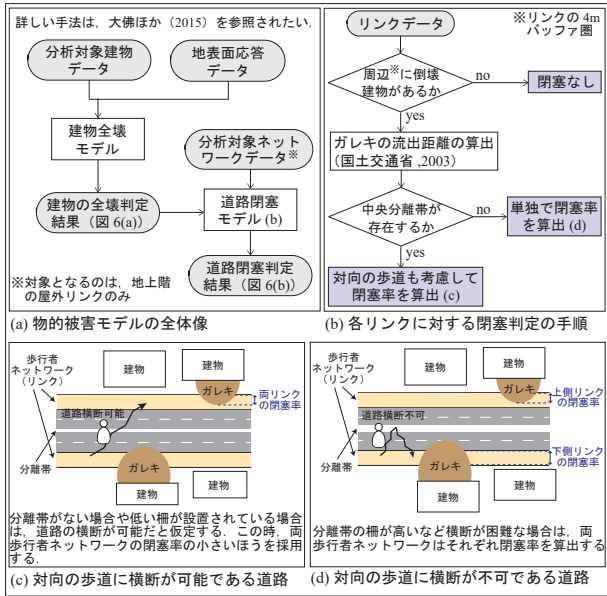


表1 シミュレーションの実行条件

シミュレーション期間		平日14時から翌2時(12時間)
想定シナリオ①		東日本大震災と同様に、目立った物的被害はなく、帰宅困難者は全ての道路を通行することが可能である状況。
想定シナリオ②		東京湾北部地震で想定される、建物倒壊や道路閉塞を考慮し、完全に閉塞していない道路のみ通行可能である状況。
分析対象地域		新宿駅南口から半径1.72km(徒歩20分)圏内(草野ら, 2023)。ただし、シミュレーションにおいて分析対象地域の周縁部分での結果の不備を避けるため、シミュレーションは新宿駅南口から半径2.5kmで行う。
分析対象建物		分析対象地域内の建物全て。平成28年土地利用現況調査から、建物の属性や階層データならびに建物外形線と位置情報を取得する。
分析対象ネットワーク		分析対象地域内の歩行者ネットワーク全て。株式会社ゼンリンが提供する歩行者詳細図(リンクデータ)から、道路延長や幅員データを取得する。屋外のみならず屋内や地下通路のネットワークも含む。
分析対象者	地域内移動者	発災時に分析対象地域にいた帰宅困難者のうち、徒歩移動を行う者。
	地域外移動者	発災時に分析対象地域にいた帰宅困難者のうち、徒歩移動を行い分析対象地域内を通過する者。
帰宅行動の制限		帰宅行動の規制はなく、各帰宅困難者は、目的地選択率(図2)に基づいて行動する。
自動車交通などの考慮		車道での自動車交通は考慮せず、シミュレーション期間中は信号機のある横断歩道なども自由に往来が可能とする。

災後12時間における帰宅困難者の行動をシミュレートする。この時、東日本大震災のように道路閉塞が発生しない場合(シナリオ①)、および、東京湾北部地震(M7.3)が発生し、分析対象地域内で物的被害が発生する場合(シナリオ②)の2つを想定し、それぞれシミュレーションを実行する。いずれにおいても、鉄道やバス等の公共交通機関は麻痺しており、徒歩移動のみ可能であると想定する。

3. シナリオ①における大規模駅周辺の混雑度評価

東日本大震災のように、発災後に顕著な物的被害は発生せず、帰宅困難者は全ての道路リンクを通行可能という想定の下、シミュレーションを実

行した。分析対象者の内訳を図4(a)に示してある。発災時に分析対象地域内に滞留していた45.8万人の内、18.3万人は移動せず職場に留まると推定された。一方、27.4万人の地域内移動者と19.3万の地域外移動者は、それぞれの目的地に向けて移動を行う。地域外移動者の流入者数をみると、発災後2時間半においてピークを示している(図4(b))。発災3時間後には、計12.0万人の地域外移動者が分析対象地域に流入し、新宿駅や新宿三丁

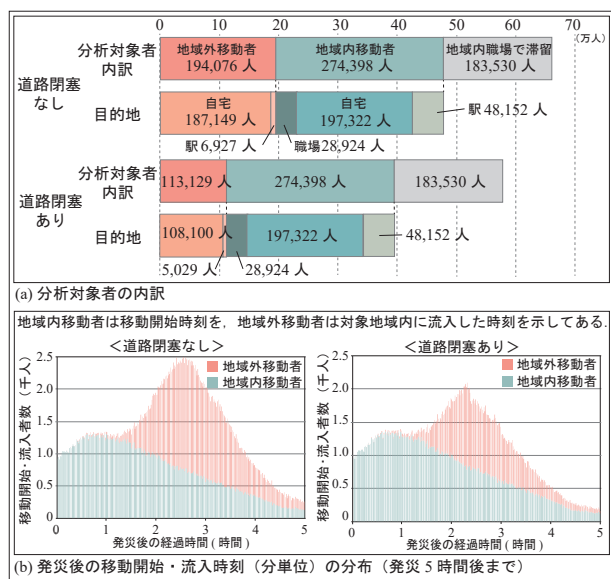


図4 分析対象者の概要

目駅、代々木駅周辺において、路上混雑が生じる様子が確認された(図5(a))。

4. シナリオ②における大規模駅周辺の混雑度評価

4.1. 建物倒壊および道路閉塞の発生状況

東京湾北部地震によって、建物倒壊や道路閉塞が発生したという想定の下、シミュレーションを実行した。建物倒壊および道路閉塞の推定結果(250mメッシュ単位の集計値)を図6に示してある。建物全壊率は、多くの地域において10%前後の値を示すものの、高層ビルが多く立ち並ぶ新宿駅西口では、比較的低い値を示している(図6(a))。道路閉塞率は、多くの地域において5%以下の値を

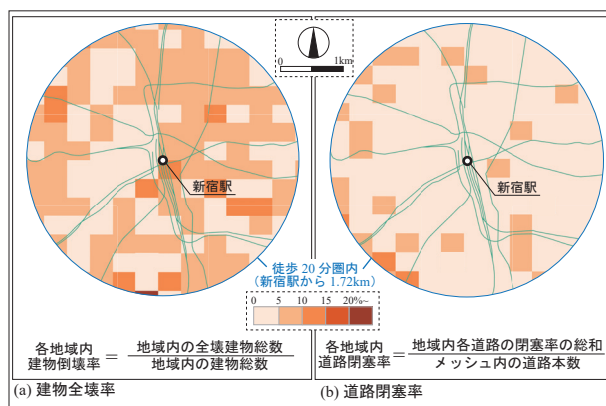


図6 建物倒壊率・道路閉塞率の推定結果(250mメッシュ)

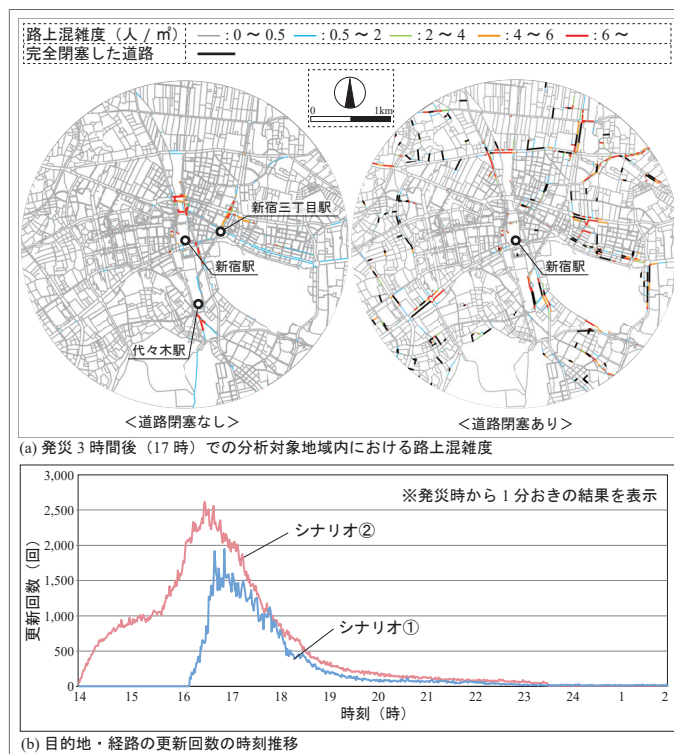
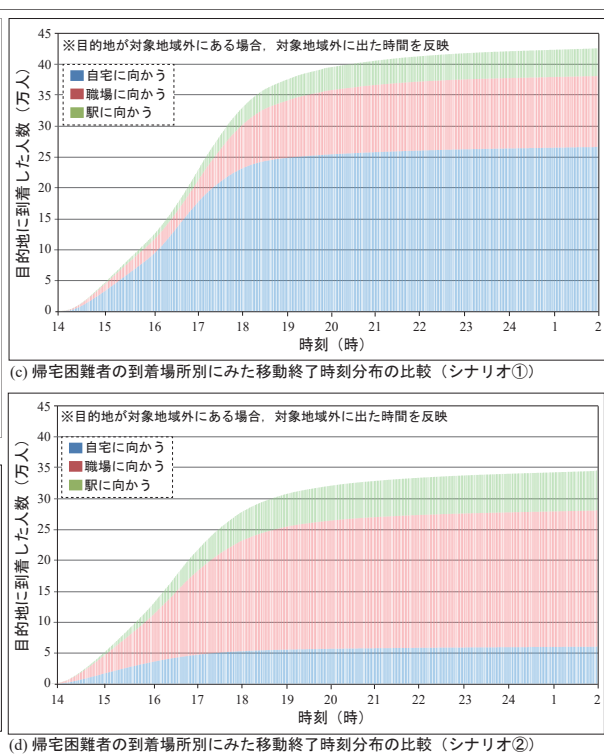


図5 道路閉塞の有無によるシミュレーション結果比較



示している（図 6(b)）。これは、分析対象地域の道路が整備されており、十分な道路幅員が確保されているためと考えられる。

4.2. 帰宅困難者の行動分析

分析対象者の内訳を図 4(a) に示してある。地域外移動者は 11.3 万人であり、シナリオ①より 8.9 万人減少した。これは、多数の帰宅困難者が対象地域外で閉塞道路に遭遇し、対象地域内への進入を断念したためである。

シナリオ②では、発災直後から多くの帰宅困難者が道路閉塞に遭遇し、目的地を変更する様子を確認できた（図 5(b)）。具体的には、目的地を駅に変更する移動者が 1.8 万人、職場に引き返す移動者が 10.3 万人増加する一方で、帰宅完了者数は 5.9 万人となり、シナリオ①の 26.5 万人から大きく減少した（図 5(c)(d)）。すなわち、道路閉塞を伴う大地震時には、円滑な移動が困難となり、結果として職場へ引き返す可能性が高くなるため、むやみに帰宅を開始しないことが肝要であると言える。

4.3. 閉塞道路周辺における移動者の時空間分布

歩道が完全閉塞した新宿三丁目駅周辺における移動者の空間分布を図 7 に示してある。多くの地域外移動者が流入する 16 時台において（図 4(b)）、最も路上混雑度が高くなる傾向が確認された。図 7 では、青梅街道を東から西へ通過し自宅を目指す移動者が、道路閉塞に遭遇している。この時、迂回して自宅を目指す移動者だけでなく、職場に引き返そうとする移動者も多く存在した。その結果、狭い歩道上で多数の帰宅困難者による異方向流が発生した。青梅街道のみならず、これと接続する細街路においても路上混雑度は 6 人 / m² を超え、非常に危険な状態となる。シミュレーションでは、20 時頃には路上混雑が解消されるものの、極度の路上混雑は群衆事故等の要因になることから、これを回避する方法について検討することが求められる。

5. まとめ

本稿では、大地震発生時の新宿駅周辺地域における、建物・道路単位での物的被害状況を考慮し

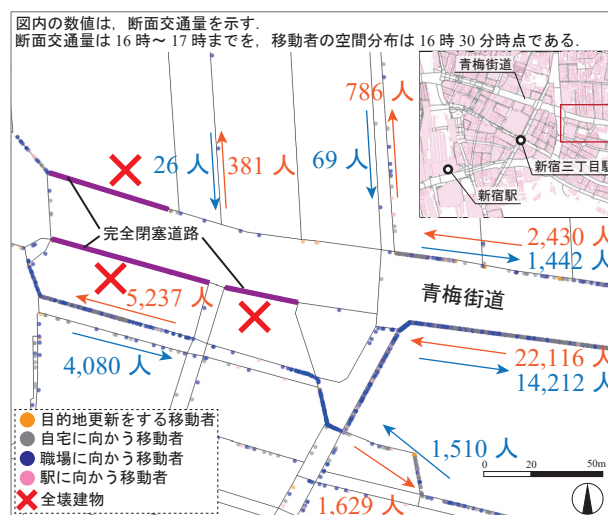


図 7 完全閉塞した道路周辺の混雑

た帰宅行動シミュレーションを実行し、道路閉塞の発生による大地震発生後の帰宅困難者の様相について分析した。閉塞箇所を迂回して帰宅を試みる帰宅困難者と、帰宅を断念し職場に引き返そうとする帰宅困難者が交錯し混乱する様子が、大通りだけでなく細街路でも確認された。発災時に職場等に滞留する人の帰宅を抑制する留め置きが重要であることを確認した。

参考文献

- 草野峻一・大佛俊泰・岸本まき（2023）道路閉塞を考慮した大規模駅周辺地域における帰宅行動シミュレーション。「日本建築学会学術講演梗概集」, (F-1), 951-952.
- 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会事務局（2011）帰宅困難者対策の実態調査結果について～3月11日の対応とその後の取組～。<<https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/kitaku/2/pdf/4.pdf>>.
- 大佛俊泰・廣川典昭・沖拓弥（2015）大地震における消防隊の到着時間からみた道路閉塞情報収集の有効性。「日本建築学会計画系論文集」, 80 (709), 465-473.
- 村尾 修・山崎 文雄（2000）自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数。「日本建築学会構造系論文集」 65 (527), 189-196.
- 国土交通省（2003）まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発, 国土交通省総合技術開発プロジェクト。<<https://www.nilim.go.jp/lab/jdg/soupuro/0.pdf>>.

大地震発生時の二段階避難における避難施設割り当てモデル

唐 凱*・大佛 俊泰**

Shelter Allocation Model for Two-Phase Evacuation for Major Earthquake

Kai Tang*, Toshihiro Osaragi**

Abstract: It is essential to account for uncertain events such as house collapses and the spread of fires when making the evacuation plan for potential major earthquakes. Two-phase evacuation refers to the process where evacuees initially gather at temporary evacuation area and then determine the subsequent relocation based on the fire situation and the extent of damage to their homes. Presently, many evacuation plans might not align with actual requirements due to the lack of consideration for varying numbers of evacuees and different evacuation routes for different disaster scenario. To address this issue, we have developed a shelter allocation model that considers distribution of evacuees and evacuation sequences for specific earthquake scenarios. Through earthquake damage simulations, we estimate the distribution of evacuees and the effects of fire spread. Furthermore, an allocation optimization model is proposed, in which distance costs for two-phase evacuation are incorporated into an objective function.

Keywords: 避難施設 (Shelter), 二段階避難 (Two-Phase Evacuation), 施設割り当て (Facility Allocation), 最適化 (Optimization)

1. Introduction

As one of the severest disasters, earthquake can cause significant damage and have devastating effects on both human lives and infrastructure. In recent years, catastrophic earthquake frequently happened, which have underscored the significance of disaster preparedness and emergency response. Well-designed and implemented evacuation plan is expected to improve the efficiency of evacuation within limited budget. In this context, operation research or optimization technology has been utilized in the design and enhancement of evacuation planning. Location-allocation model is the most common model in previous research, while decide both location of shelter and the distribution relationship. However, for highly developed cities like Tokyo, the locations of shelters are fixed and hard change since almost all available schools and parks are designated as shelters. Therefore, for these cities, the more important task is to decide how to allocate shelters to evacuees.

To get optimal allocation, it is essential to acquire accurate distribution of evacuation demand, which need to take account of actual earthquake situation. For major earthquake, house damage is one of the major factors influencing evacuation demand. Besides, timing is also important, since evacuation demand is generally thought to be significantly different between daytime and nighttime (Chen et al., 2013; Xu et al., 2017). The floating demand can be estimated using different data source, including traditional land-use data (Zhang et al., 2020), census data (Xu et al., 2017) and big data such as cell phone data (Lee et al., 2020). However, although earthquake evacuation demand strongly depends on disaster damage, it seems that few research combines demand estimation with disaster loss such as building collapse and fire spread. Especially, for areas with a large number of wooden houses, fire breakout and fire spread should be considered as an essential factor in estimation of evacuation demand. In addition to

* 学生会員 東京工業大学環境社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology) tang.k.ac@m.titech.ac.jp

** 正会員 東京工業大学環境社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology) osaragi.t.aa@m.titech.ac.jp

demand, building collapse and fires caused by the earthquake also influence the road network connection and availability of shelters. There are some studies of hurricane shelter model give thought to the open state of shelter (Li et al., 2012). Although collapse or fire can also cause shelter unfunctional, few research considers it in earthquake shelter location or allocation model.

This study proposes a shelter allocation model with consideration of damage caused by a hypothetical major earthquake. The building damage model, road blockage model and fire spread model are utilized to generate possible scenarios, in which building collapse and burndown are considered in the estimation of evacuation demand combined with population flotation, fire-spread and road blockage are considered in the estimation of shelter supply and network connectivity respectively. A two-phase evacuation flow is modeling by integrating hierarchical shelter system. We select Ogu area in Arakawa Ward, Tokyo, which show high degree of danger because of the existence of many old wooden buildings, as a real case to implement the proposed model.

2. Model formulation

2.1. Classification of shelters

According to Tokyo Metropolitan Government, the shelters are classified into 3 types with different size and function: temporary evacuation area (TEA), evacuation area (EA) and evacuation center (EC). TEAs and EAs provides the space for people to stay right after earthquake, ECs provides the space for mid-term or long-term stay, while EAs can prevent fire from spreading, while TEAs may be unreachable under fire.

Table 1 Classification of shelters

	Space type	Service radius	Time	Function
Temporary evacuation area (TEA)	Outdoor space: Parks, green lands, playgrounds	0.5km	First day	Space for stay right after earthquake

Evacuation area (EA)	Outdoor space: Fireproof open space	1~1.5km	First day	Space preventing fire from spreading
Evacuation center (EC)	Indoor space: Primary schools, middle schools	0.5~1km	Several days to several months	Provide food, water, sheet and in-door space for staying for the night

2.2. Hierarchical allocation model

Considering the fire spread process, different kinds of shelters are used, forming the two-phase evacuation route. We assume that after a large earthquake, all people need to evacuate to nearby TEAs. If fire occurs near the TEA, then this TEA will be denoted as unavailable, people need to transfer to EAs. For people without house damage, they return home after staying in TEAs or EAs for a while. For people with house damage (caused by shake or fire), they will transfer to ECs for accommodation. The details of this two-phase evacuation can be summarized as follows:

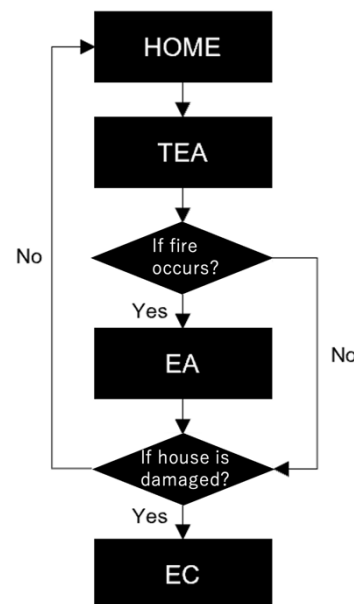


Figure 1 Flow of two-phase evacuation

The shelter allocation model aims to select appropriate distribution relationship in order to improve the evacuation efficiency, which can be measured by

distance or time. In this model we use total evacuation distance as the optimization objective, which includes total population-weighted distance from demand points (homes) to TEAs, from TEAs to EAs, from TEAs to ECs and from EAs to ECs.

The model is formulated as follows:

$$\begin{aligned} \min & \left[\sum_{d \in D} \sum_{t \in T, T^*} v_{dt} n_d l_{dt} + \sum_{d \in D} \sum_{t \in T, T^*} y_{dt} m_d l_{dt} \right. \\ & + \sum_{t \in T^*(\omega)} \sum_{e \in E} v_{te} n_t l_{te} + \sum_{t \in T(\omega)} \sum_{c \in C} y_{tc} m_t l_{tc} \\ & \left. + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} y_{ec} m_e l_{ec} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$s. t. \sum_{t \in T, T^*} v_{dt} = 1 \quad \forall d \in D \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T, T^*} y_{dt} = 1 \quad \forall d \in D \quad (3)$$

$$\sum_{e \in E} v_{te} = 1 \quad \forall t \in T^* \quad (4)$$

$$\sum_{e \in E} y_{te} = 1 \quad \forall t \in T^* \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C} y_{tc} = 1 \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{c \in C} y_{ec} = 1 \quad \forall e \in E \quad (7)$$

$$\sum_{d \in D} v_{dt} n_d = n_t \quad \forall t \in T^*, T \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} y_{dt} m_d = m_t \quad \forall t \in T^*, T \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T^*} v_{te} n_t = n_e \quad \forall e \in E \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T^*} y_{te} m_t = m_e \quad \forall e \in E \quad (11)$$

$$\sum_{e \in E} y_{ec} m_e + \sum_{t \in T} y_{tc} m_t = m_c \quad \forall c \in C \quad (12)$$

$$n_t + m_t \leq h_t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$n_e + m_e \leq h_e \quad \forall e \in E \quad (14)$$

$$m_c \leq h_c \quad \forall c \in C. \quad (15)$$

$$v_{dt}, y_{dt} \in \{0,1\} \quad \forall d \in D \quad \forall t \in T, T^* \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 0 & \leq v_{te}, y_{te}, y_{tc}, y_{ec} \leq 1 \\ \forall d \in D \quad \forall t \in T, T^* \quad \forall e \in E \quad \forall c \in C \end{aligned} \quad (17)$$

Where, the definition of decision variables and parameters are as follows:

Table 2 Definitions of decision variables

Decision variables	Details
v_{dt}	1 if evacuees without house damage are allocated from demand point d to TEA t , 0 otherwise
v_{te}	1 if evacuees without house damage are allocated from TEA t to EA e , 0 otherwise
y_{dt}	Fraction of evacuees with house damage allocated from demand point d to TEA t
y_{te}	Fraction of evacuees with house damage allocated from TEA t to EA e
y_{tc}	Fraction of evacuees with house damage are allocated from TEA t to EC c
y_{ec}	Fraction of evacuees with house damage are allocated from EA e to EC c

Table 3 Definitions of parameters

Parameter	Details
-----------	---------

n_d	Number of evacuees without house damage in demand point d
m_d	Number of evacuees with house damage in demand point d
n_t	Number of evacuees without house damage in TEA t
m_t	Number of evacuees with house damage in TEA t
m_e	Number of evacuees with house damage in EA e
T	Set of temporary evacuation areas (TEA) that are not affected by fire
T^*	Set of temporary evacuation areas (TEA) that are in danger of fire
D	Set of demand points
E	Set of evacuation areas (EA)
C	Set of evacuation centers (EC)
h_t, h_e, h_c	Capacity limit of TEA, EA, EC

Equation (1) is the objective function, which is the total population-weighted distance. Equation (2)-(3) help to ensure evacuees from one demand point will be assigned to only one TEA. Equation (4)-(6) provide that the sum of all fractions from one TEA equal to 1. Equation (7) ensures that the sum of all fractions from one EA equal to 1. Equation (8)-(9) help to acquire number of evacuees (with or without house damage) at each TEA. Equation (10)-(11) help to get number of evacuees (with or without house damage) at each EA. Equation (12) help to get number of evacuees (with house damage) at each EC. Equation (13)-(15) put constraints on TEA, EA and EC.

3. Case study

3.1. Study area

Ogu area is selected as the study area. Ogu area located in Arakawa Ward, Tokyo, including East Ogu Town and West Ogu Town. The Ogu area has a significant number of wooden buildings, making it susceptible to rapid fire spread and vulnerable to house collapse after big earthquake. It also gets a high rank in the evaluation of

earthquake danger by Bureau of Urban Development with 14 out of total 16 *Chous* get rank 4 or 5 (the highest is 5) (Tokyo Metropolitan Government, 2023). Hence it is essential to make regional evacuation plan to prepare for the possible earthquake.

3.2. Data processing

The occurrence time of earthquake is set at winter evening with north wind (wind speed is 8m/s). We use the earthquake damage simulation (Hirokawa & Osaragi, 2016) to generate data of building collapse, street blockage and fire spread. The probability of building collapsed, street blockage and building burndown are shown in Figure 2 to Figure 3. Then we combine these damage data with other basic data (building, population, etc.) to get the data needed in proposed model, which can be classified into 3 types: demand data, supply data and connectivity data. The demand data refers to the number of people who need to utilize shelters after earthquake. Demand strongly depends on the consequences caused by earthquake, including building collapse, fire spread and road blockage. Figure 3 shows the process of getting demand data. In the first step, we set the population baseline for each *Chou* based on the population report of Arakawa. Then we make 2 assumptions: (1) population is evenly distributed in buildings according to their total floor area; (2) in morning, population is distributed in residential buildings, while in afternoon and evening, population is distributed in all types of buildings. By these assumptions, we use population changing ratio (summarized by PT data) and building data (building type and building area) to get *banchi*-scale population data at morning, afternoon and evening. Supply in this model refers to those shelters available after earthquake, since some TEAs will be unreachable due to fire. We assume that if there are at least 3 fire outbreak points within 100m range of the TEA, then this TEA is denoted as unreachable. Connectivity in this model refers to the trafficability of roads after earthquake. By the simulation results of building collapse, road blockage probabilities can be got.

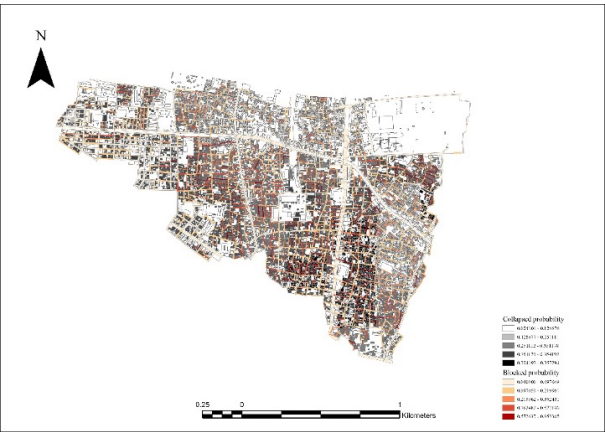


Figure 2 Distribution of building collapsed and street blockage probability

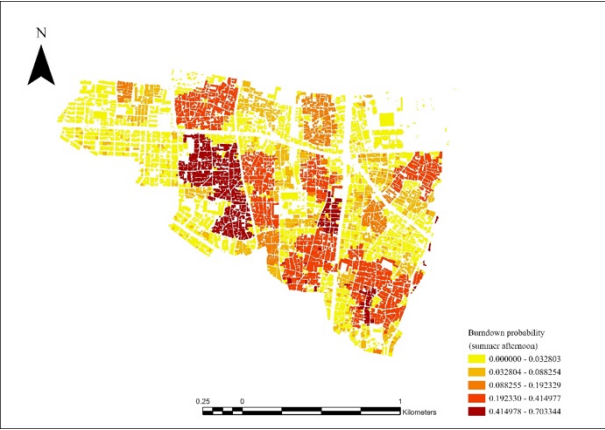


Figure 3 Distribution of building burndown probability

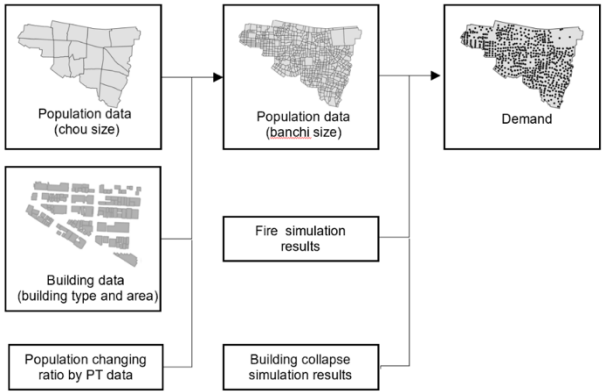


Figure 4 Flow of generating demand data

3.3. Sensitivity analysis and results

It is essential to check the stability and vulnerability of proposed allocation plan, therefore, sensitivity analysis with respect to different input parameters is needed. The capacity limit and service range are two important aspects

of shelters. For different setting of required space per person, the capacity limit can be extended or reduced to a reasonable value. We set the minimum standard at 1m²/person for TEA/EA (outdoor) and 1.65 m²/person for EC (indoor) based on the regulation of Tokyo Metropolitan Government. Also, the service range of shelters can be changed if it does not exceed the evacuees' walking range, since there is no common agreement on the appropriate value of service range. To ensure all demand points are covered, the initial service range for TEA is set at 500m, and the maximum range is set at 1.2km which can be seen as the 15min walking distance for an average adult. The results can be acquired via Gurobi Optimizer version 10.0.2 in the environment of Python 3. The Figure 5 shows the results of derived total distance for service range between 500m to 1.2km. The total distance is fluctuated between 2.6×10^8 and 2.7×10^8 , the service range shows no significant influence on the results. Since shorter distances are advantageous for management and convenient for evacuees' travel, it is better to set service range at 500m. The Figure 6 show how the total distance change with respect to the change of required TEA space for each person, it can be seen that total distance shows a sharp increase when required TEA space for each person is around 1.2. A larger space can enhance the comfort of evacuees at TEA, therefore, in our case, 1.2m²/person is a reasonable value.

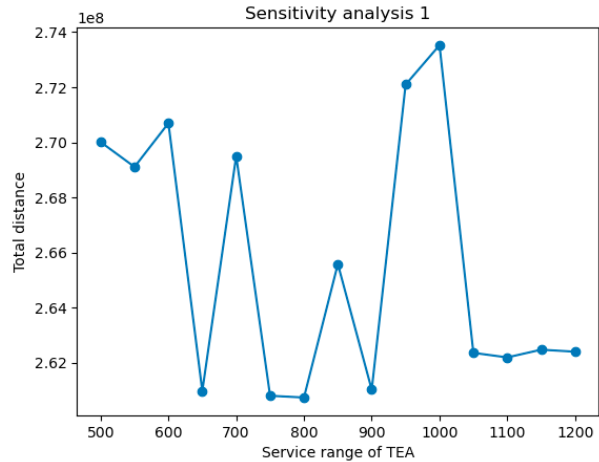


Figure 5 Sensitivity analysis of service range

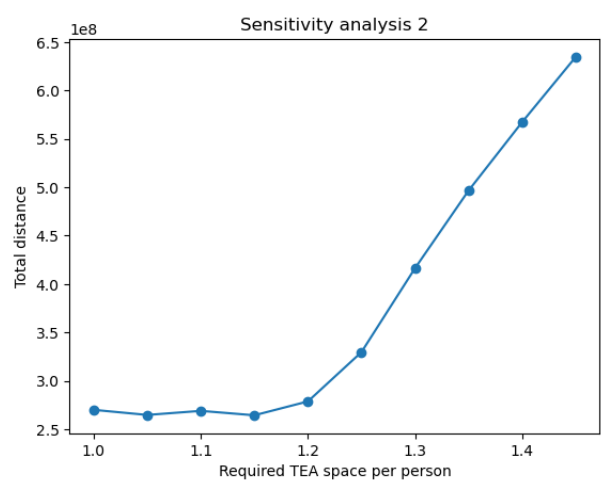


Figure 6 Sensitivity analysis of TEA capacity limit

The Figure 7 shows the allocation results of D to TEA (TEA service range: 500m, Required TEA space: 1.2m²/person), a total of 39 TEAs out of 43 are selected, 4 TEAs are not selected, and some TEAs are with low utilization rate. The Figure 8 shows the allocation results of TEA to EA, 4 TEAs in danger of fire are allocated to EAs. The Figure 9 shows the allocation results of TEA without fire to EC, remaining 35 TEAs are allocated to near EC, some evacuees in the same TEA are allocated to different ECs. The Figure 10 shows the allocation results of EA to EC.

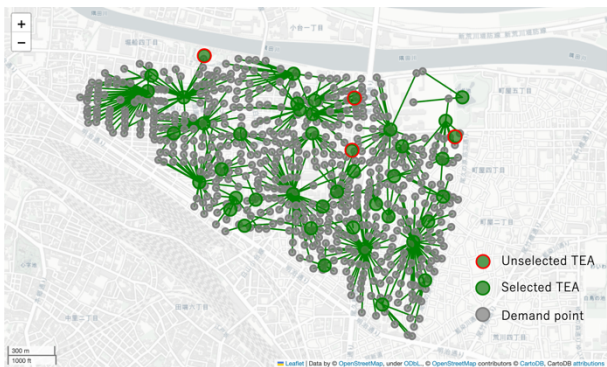


Figure 7 Allocation results of D to TEA

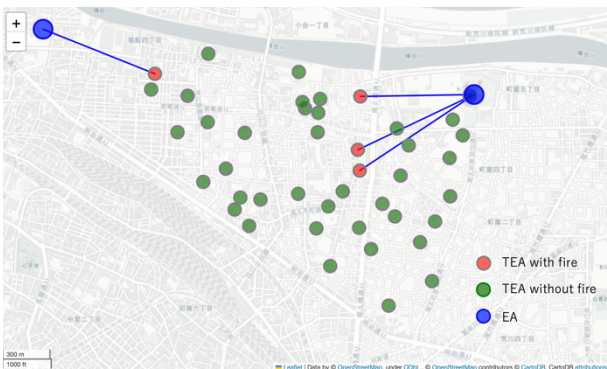


Figure 8 Allocation results of TEA with fire to EA

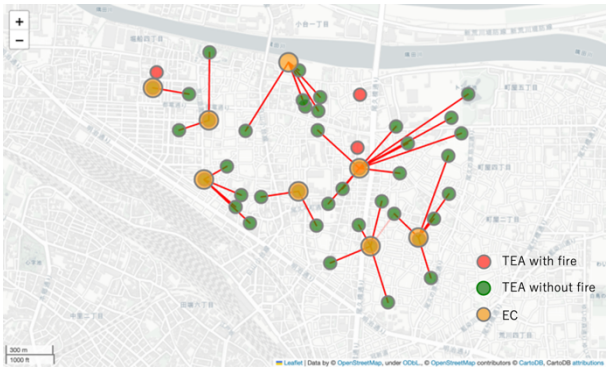


Figure 9 Allocation results of TEA without fire to EC

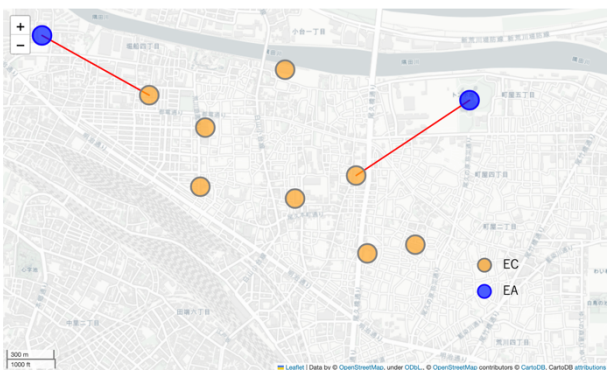


Figure 10 Allocation results of EA to EC

4. Conclusion

An earthquake is a dynamic process fraught with uncertainty. Therefore, earthquake evacuation necessitates the selection of different evacuation strategies based on different disaster scenarios. The location of earthquake shelters, as a crucial component in preparing for this unforeseeable event, has been extensively researched and applied in the past. However, these efforts often fall short in addressing specific allocation issues and rarely incorporate the dynamic nature of disasters. In high-density cities like Tokyo, earthquakes often come with

secondary disasters such as fires, making it equally important to explore how these secondary disasters impact evacuation decisions. In this context, this article proposes a hierarchical model that seeks to minimize risks during evacuations to different shelters while considering real-world events such as building collapses, road blockages, and the spread of fires. As an early attempt to use hierarchical model to optimize evacuation process under uncertain conditions, this article is of some significance.

References

- Chen, Z., Chen, X., Li, Q., & Chen, J. (2013). The temporal hierarchy of shelters: a hierarchical location model for earthquake-shelter planning. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(8), 1612-1630. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.763944>
- Hirokawa, N., & Osaragi, T. (2016). Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread. *Journal of Disaster Research*, 11(2), 175-187. <https://doi.org/10.20965/jdr.2016.p0175>
- Lee, Y. H., Lee, J. S., Baek, S. C., & Hong, W. H. (2020). Spatial Equity with Census Population Data vs. Floating Population Data: The Distribution of Earthquake Evacuation Shelters in Daegu, South Korea. *Sustainability*, 12(19), 8046. <https://doi.org/10.3390/su12198046>
- Li, A. C. Y., Nozick, L., Xu, N., & Davidson, R. (2012). Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(4), 715-729. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.12.004>
- Xu, W., Ma, Y., Zhao, X., Li, Y., Qin, L., & Du, J. (2017). A comparison of scenario-based hybrid bilevel and multi-objective location-allocation models for earthquake emergency shelters: a case study in the central area of Beijing, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(2), 236-256. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1395882>
- Zhang, X., Yu, J., Chen, Y., Wen, J., Chen, J., & Yin, Z. E. (2020). Supply-Demand Analysis of Urban Emergency Shelters Based on Spatiotemporal Population Estimation. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(4), 519-537. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00284-9>
- Bureau of Urban Development, Tokyo Metropolitan Government. (2023). Your Community's Earthquake Risk 2022 -- The Ninth Community Earthquake Risk Assessment Study. https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bosai/chousa_6/download/kikendo_english.pdf?2302

滞在人口との比較による

夜間光光度に基づく水害復興過程分析の妥当性検証

町田晶菜*・井上亮**

Abstract Night-time light have attracted attention because of their correlation with socioeconomic activities, and their usefulness has been demonstrated by their use in disaster recovery process analysis to overcome the problems of conventional data-based analysis. However, it has not been fully confirmed whether monthly night-time light can be used for analyzing the disaster recovery process in small areas. Therefore, this study focused on pre- and post-disaster changes in population data and night-time light to analyze the recovery process of flood-damaged areas in Japan from 2019 to 2021. The results showed no change in light levels in all target areas, but three of the four target areas showed changes due to the disaster, although the residential population did not change significantly. The lack of similar results to previous studies suggests that disaster recovery process analysis using night-time light images and resident population data may not be able to capture changes depending on the scale of the disaster.

Keywords: 夜間光画像, 滞在人口データ, 災害復興過程分析

1. はじめに

近年、気候変動の影響が世界各地で見られ、災害の激甚化や頻発化が懸念されている (IPCC, 2021). 防災の取り組みは行われているが、災害を避けることは困難であるため、被災を前提とした事前復興計画の策定や被災後の迅速な復興の実施が重要である。よりよい復興を行うためには、過去の災害で被災した地域の復興過程を評価し、成功した復興の要因を探る必要がある。

従来の災害復興過程の分析は、研究者によるアンケートや現地調査などの調査データ (例えば, Mitsova et al., 2019) や、国や自治体が整備した統計データ (例えば, Dewward et al., 2015) に基づいて行われてきた。しかし、調査データは状況に応じて調査回数や対象を設定して時空間解像度が高いものが入手できる特徴を持つ一方で、広範囲の調査や複数の災害との比較が困難であるという課題を持つ。また、国勢調査などの統計データは、同じ基準のデータが入手でき、様々な災害を比較可能である一方、調査間隔が長いという課題を持つ。

これらの課題を解決できるデータとして、夜間光画像が注目されている。夜間光画像とは、人工衛星

が夜間帯の地球を撮影し、その地上光度を各セルに記録した画像データである。既往研究で用いられてきた調査データや統計データよりも優れた時空間解像度を持つことや、光度が社会経済成長と相関を有すること、被災状況や地域に関わらずデータが入手可能であることから、被災に伴う夜間光光度の変化に着目した災害復興過程分析が進められている (Kocornik-Mina et al., 2020)。しかし、年単位の夜間光は国の社会経済活動と強い相関があることが示されている (Henderson et al., 2012) が、月単位の夜間光は相関が弱いとされる (Hu and Yao, 2019)。また、夜間光に基づく災害復興過程分析は、年単位の夜間光を用いた大規模で長期的な影響を評価したものが中心であるため、月単位の夜間光を用いた小規模な被災範囲を対象とした分析が有用であるか議論が十分でない。

一方、携帯電話の普及や位置情報サービスの発展により、人の行動を表す「人流データ」の精度が向上している。この人流データを用いた災害復興過程分析も進んでいる (Lu et al., 2012)。人流データは、小規模の社会経済活動を表す指標であるが、入手可能な期間や地域に制限があることから、分析できる

* 学生会員 東北大学大学院情報科学研究科 (Tohoku University) akina.machida.q2@dc.tohoku.ac.jp

** 正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

地域や期間が限定される。今後も、被災状況や地域に関わらずデータが入手可能な夜間光画像が求められる状況が存在するため、その妥当性を明らかにすることは重要である。

以上を踏まえて、本研究は、人流データのひとつである滞在人口との比較を行うことで、夜間光光度を用いた水害復興過程分析の信頼性を評価する。

2. データと分析手法

2.1. 分析対象の期間・水害地域

使用データの入手可能期間・地域の制約から、分析期間を 2019 年 1 月から 2021 年 12 月とし、その間に日本で発生した以下の水害被災地を対象とする。

- ・令和元年 10 月に発生した東日本台風より阿武隈川、千曲川の周辺
 - ・令和 2 年 7 月豪雨より筑後川、球磨川の周辺
- また、使用データの空間解像度の制約から、1 km メッシュ単位で分析を行う。

本研究では、同地域を対象に、1 ヶ月単位の夜間光データと滞在人口データを用いて水害後の人間社会活動量の変化を抽出する。さらに、両データの比較を行うことで、災害復興過程分析において各データが有用であるかどうかを考察する。

2.2. 使用データ

2.2.1. 夜間光画像

Suomi-NPP 衛星に搭載されている VIIRS で撮影された、2019 年 1 月から 2021 年 12 月までの 1 か月単位の夜間光画像を用いる。本研究は、コロラド鉱山大学の研究機関 “Earth Observations Group” が、人工衛星の取得データから雲などのノイズ処理を行ったデータを利用する。

2.2.2. 滞在人口データ

国土交通省が G 空間情報センターにて無償で提供する「全国の人流オープンデータ」の滞在人口データを用いる。このデータは、携帯電話の GPS 位置情報に基づき収集され、2019 年から 2021 年の間の各月の平均滞在人口が 1 km メッシュ単位で集計されている。集計時間（昼・深夜・終日）のうち、昼と深

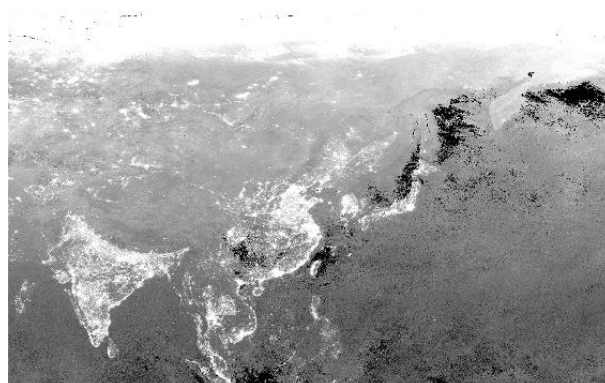


図 1 夜間光画像の一例



図 2 浸水範囲の一例（阿武隈川 角田市周辺）

夜を利用して分析し、夜間光に基づく分析結果との関連を考察する。

2.2.3. 水害データ

本研究では、各地域の被災範囲を表すデータとして、国土地理院が、収集した SNS に投稿された被災状況の画像と標高データを用いて算出した「浸水推定図の浸水範囲の輪郭線」を使用する。本研究では、浸水深に関わらず、各メッシュの浸水範囲の割合を計算し用いる。

2.2.4. メッシュの属性を表すデータ

本研究では、水害が人間活動に与える影響について調査するため、人が居住するメッシュのみに限定して分析を行う。その際に、国土数値情報にて公開されている平成 28 年度の「土地利用 3 次メッシュデータ」と、統計地理情報システムにて公開されている「令和 2 年国勢調査の 3 次メッシュ人口」を用いる。

2.3. 分析

2.3.1. STL 分解

本研究で扱う夜間光画像は、トレンドや季節性による変動が含まれており、光度の経時変化の分析を妨げる可能性がある。そこで、夜間光画像が入手可能な 2012 年 4 月から 2022 年 6 月までのデータについて、Seasonal and Trend decomposition using Loess (STL) (Cleveland et al., 1990) を用いてトレンドや季節性の除去を行う。ただし、この夜間光画像には、緯度 35 度から極までの光度が記録されない期間が存在し、日本では 5 月から 7 月までがその期間に該当する。よって、令和元年東日本台風では 5 月から 7 月を除去した計 9 か月を、令和 2 年 7 月豪雨では 6 月を除去した計 11 か月を用いて STL 分解を行う。

2.3.2. 分析対象メッシュの抽出

まず、国勢調査に基づき、人口が一定の閾値以上のメッシュを分析対象とする。閾値は、各対象地域において人口が 10 人以上であるメッシュを抽出した上で、それらのメッシュから算出した各対象地域の人口の中央値または第三四分位数とする。

次に、水害復興過程の把握には、被災地域と非被災地域を適切に分別する必要がある。そこで、国土地理院の浸水範囲データより、浸水域と重ならないものを非被災メッシュとする。また、居住地が浸水した可能性が高いものを被災メッシュとするため、水害データに基づく浸水面積割合が一定の閾値以上、かつ浸水域の面積の割合が土地利用データに基づく田の面積割合以上の基準で選び、被災メッシュに設定する。本研究では、浸水面積割合の閾値を 10% または 50% とする。

2.3.3. 分析モデル

各被災地の被災・非被災メッシュにおける、夜間光光度および滞在人口の水害前後の変化を分析する。式(1)の分析モデルを設定する。被説明変数 $y_{i,t}$ はメッシュ i の月 t における夜間光光度あるいは滞在人口の対数値である。右辺の第一項 α は定数項、第二項は、建物用地面積割合 ω_i の影響を表す。第三項は、メッシュ i が浸水域内なら 1 となるダミー変数 δ_i を用いて浸水域の影響を表し、基準とする被災月における非浸水地域に対する浸水域の違いを表す。 I_t は

月 t であることを示すダミー変数で、第四項は月 t の固定効果、第五項はその月の浸水域内の固定効果を示す。 θ , γ , β_n , μ_n はパラメータ、 $\varepsilon_{i,t}$ は誤差項である。

$$y_{i,t} = \alpha + \theta\omega_i + \gamma\delta_i + \sum_{\substack{t=2019/1 \\ t \neq \text{被災月}}}^{2021/12} (\beta_t I_t + \mu_t I_t \delta_i) + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

3. 結果

分析対象地域ごとの滞在人口（深夜・昼）と夜間光光度の変化について分析する。抽出後のメッシュ数が 10 以上となるように考慮し、対象地域で国勢調査の人口閾値と浸水面積割合の組み合わせを行った(表 1)。全ての閾値の組み合わせにおいて、深夜滞在人口及び昼滞在人口のほとんどの月で有意な値が確認できなかったが、夜間光画像では非被災メッシュのみほとんどの月で有意な値が確認できた。

各閾値の組み合わせごとの結果を表 2, 3, 4 に示す。被災前後で 0.1 以上の増減があった場合を変化があったとし、○で表し、被災前後で 0.1 以上の増減があったものの他の期間で同等以上の変化がある場合を△で表す。

変化が見られた例として、人口閾値を第三四分位数、浸水域面積の割合を 10% とした時の千曲川を挙げる。深夜滞在人口は、被災メッシュで、被災前月（2019/9）から被災 1 ヶ月後（2019/11）にかけて減少が見られ、そこから被災後 14 ヶ月（2020/12）で被災前と同水準まで回復したことがわかる。この変化は非被災メッシュでは見られないため、被災による影響だと考えられる。昼滞在人口は、被災メッシュで、被災前月（2019/9）から被災 2 ヶ月後（2019/12）にかけて減少が見られ、そこから被災後 14 ヶ月（2020/12）で被災前と同水準まで回復したことがわかる。この変化も非被災メッシュでは見られないため、被災による影響であると考えられる。一方夜間光は、被災前後で 0.1 以上の変化が見られるが、他期間での変動が大きく、また、両メッシュで同様の動きをしているため、被災による影響と断定できない。

本研究の結果は、すべての対象地域で、有意な推

表 1 人口閾値と浸水面積割合閾値の組み合わせ

人口の閾値	中央値		第三四分位数	
浸水面積割合の閾値	10%	50%	10%	50%
阿武隈川周辺	○	○	○	×
千曲川周辺	○	○	○	×
筑後川周辺	○	○	○	×
球磨川周辺	○	×	○	×

表 2 人口閾値:中央値, 浸水面積割合閾値:10%

地域	深夜滞在人口	昼滞在人口	夜間光画像
阿武隈川	○	×	×
千曲川	○	○	×
筑後川	○	×	△
球磨川	○	○	△

表 3 人口閾値:中央値, 浸水面積割合閾値:50%

地域	深夜滞在人口	昼滞在人口	夜間光画像
阿武隈川	○	×	×
千曲川	○	○	△
筑後川	○	×	×
球磨川	—	—	—

表 4 人口閾値:第三四分位数, 浸水面積割合閾値:10%

地域	深夜滞在人口	昼滞在人口	夜間光画像
阿武隈川	○	○	×
千曲川	○	○	△
筑後川	×	×	×
球磨川	○	○	×

定結果を得ることができなかった. この要因として, 本研究で対象とした災害が人間活動に大きな影響を与えなかった可能性や, 本研究で対象とした地域の被災範囲が小さく, 被災メッシュが少ないことが考えられる. また, 滞在人口では被災前後で変化がみられたが, 夜間光画像で変化が見られなかった地域が存在する. この要因として, 本研究で用いた1ヶ月単位の夜間光データが有する季節変動が大きいこ

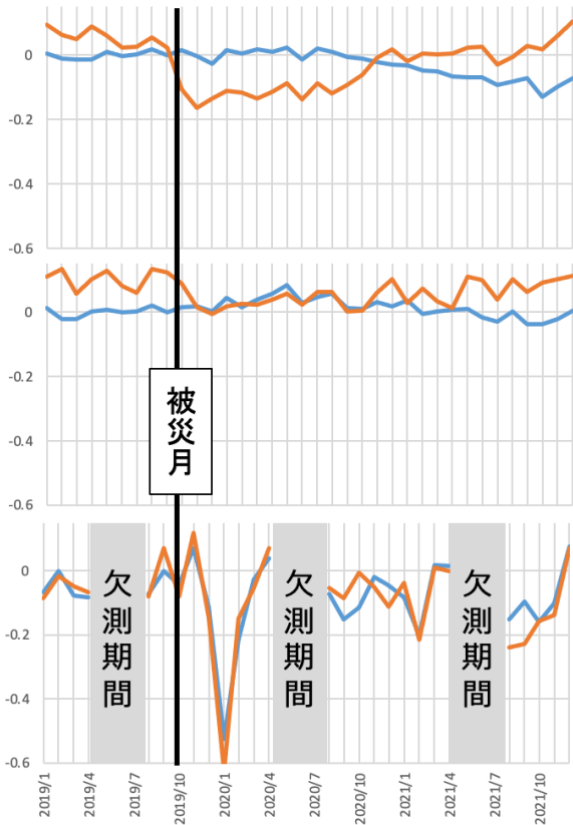


図 3 人口閾値:第三四分位数, 浸水面積割合閾値:10%における千曲川の被災前後の変化 (上から深夜滞在人口, 昼滞在人口, 夜間光)

とや, 光度が観測されない期間があることなどの精度の課題が考えられる.

4. 結論

本研究は, 社会経済活動の代理指標として注目されている「夜間光画像」と位置情報サービスの発展等により精度が向上している人流データの一つである「滞在人口データ」を用いて, 日本の水害被災地を対象に, 被災前後の光度変化および人口変化を分析した.

その結果, 有意ではないものの滞在人口でのみ減少を確認できた地域と, 夜間光画像・滞在人口のどちらも被災による変化が確認できなかった地域があった. これらの要因として, 夜間光画像と人流データの信頼性の不足や, 対象とした被災地の変化が小さく, 両データで捉えることが困難であったことが考えられる. 本研究で用いた1ヶ月単位の滞在人口

データや夜間光データがどのような災害の災害復興過程分析に有用であるかさらなる検証が必要である。

参考文献

- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. J. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3–33.
- Deward, J., Curtis, K. J., and Fussell, E.: Population recovery in New Orleans after Hurricane Katrina: Exploring the potential role of stage migration in migration systems. *Population and Environment*, Vol.37, pp.449-463, 2016.
- Henderson, V. J., Storeygard, A., and Weil, D. N.: Measuring economic growth from outer space. *American Economic Review*, Vol.102, No.2, pp.994-1028, 2012.
- Hu, Y. and Yao, J.: Illuminating economic growth. (International Monetary Fund). Working Paper no. 19/77, 2019
- IPCC: *Sixth Assessment Report (AR6)*, <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>, 2021. (最終閲覧:2023.8.20)
- Kocornik-Mina, A., McDermott, T. K., Michaels, G., and Rauch, F.: Flooded cities. *American Economic Journal: Applied Economics*, Vol.12, No.2, pp. 35-66, 2020.
- Lu, X., Bengtsson, L., and Holme, P.: Predictability of population displacement after the 2010 Haiti earthquake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States America*, Vol.109, pp.11576-11581, 2012.
- Mitsova, D., Escaleras, M., Sapat, A., Esnard, A., and Lamrdril, A. J.: The effects of infrastructure service disruptions and socio-economic vulnerability on hurricane recovery. *Sustainability*, Vol.11, No.2, pp.1-16, 2019.