

2023年5月31日(水)

会場G

OS10 連成解析・連携解析

[G-01] OS10 連成解析・連携解析 (1)

座長:山田 知典(東京大学)

09:30 ~ 10:30 会場G (3F 小会議室 304)

[G-01-01] レーザ粉末床積層造形における溶融・凝固挙動の熱流体シミュレーション

*片桐 淳¹、草野 正大¹、野本 祐春¹、渡邊 誠¹ (1. 物質・材料研究機構)

09:30 ~ 09:45

[G-01-02] 液中における粒子パッキングから焼結までの連成・連携解析

*澤田 有弘¹、松本 純一¹ (1. 産業技術総合研究所)

09:45 ~ 10:00

[G-01-03] PCB水熱酸化解成反応器におけるビフェニルの酸化分解反応解析

*倉前 宏行¹、小林 龍平¹、松本 政秀¹、渡邊 信久¹ (1. 大阪工業大学)

10:00 ~ 10:15

[G-01-04] 流体中で振動する圧電バイモルフにおける流体-構造-圧電-電気回路連成現象のハイブリッド型強連成解法

*三笠 征弘¹、野崎 隼之介¹、石原 大輔¹ (1. 九州工業大学)

10:15 ~ 10:30

OS10 連成解析・連携解析

[G-02] OS10 連成解析・連携解析 (2)

座長:石原 大輔(九州工業大学)

10:45 ~ 11:45 会場G (3F 小会議室 304)

[G-02-01] ナトリウム冷却高速炉の設計最適化フレームワークの開発 (2) 最適化解析制御機能の開発

*田田 哲広¹、中峯 由彰²、桑垣 一紀¹、浜瀬 枝里菜¹、菊地 紀宏¹、吉村 一夫¹、松下 健太郎¹、田中正暁¹ (1. 日本原子力研究開発機構、2. 株式会社エヌデー)

10:45 ~ 11:00

[G-02-02] 風荷重が作用する枠組足場の OpenFOAMと ASI-Gauss法を用いた片方向連成解析

*多湖 拓海¹、磯部 大吾郎¹ (1. 筑波大学)

11:00 ~ 11:15

[G-02-03] 抵抗スポット溶接における3次元接触変形・電流・熱伝導3連成現象の重要性

*二保 知也¹、今栖 那菜¹、三小田 裕美¹、岩切 三奈¹

(1. 九州工業大学)

11:15 ~ 11:30

[G-02-04] 流体上に作られる模様のシミュレーションとその機械学習による生成手順の推定

中田 希¹、*山田 知典¹ (1. 東京大学)

11:30 ~ 11:45

OS10 連成解析・連携解析

[G-01] OS10 連成解析・連携解析 (1)

座長:山田 知典(東京大学)

2023年5月31日(水) 09:30 ~ 10:30 会場G (3F 小会議室 304)

[G-01-01] レーザ粉末床積層造形における溶融・凝固挙動の熱流体シミュレーション

*片桐 淳¹、草野 正大¹、野本 祐春¹、渡邊 誠¹ (1. 物質・材料研究機構)

09:30 ~ 09:45

[G-01-02] 液中における粒子パッキングから焼結までの連成・連携解析

*澤田 有弘¹、松本 純一¹ (1. 産業技術総合研究所)

09:45 ~ 10:00

[G-01-03] PCB水熱酸化分解反応器におけるビフェニルの酸化分解反応解析

*倉前 宏行¹、小林 龍平¹、松本 政秀¹、渡邊 信久¹ (1. 大阪工業大学)

10:00 ~ 10:15

[G-01-04] 流体中で振動する圧電バイモルフにおける流体-構造-圧電-電気回路連成現象のハイブリッド型強連成解法

*三笥 征弘¹、野崎 隼之介¹、石原 大輔¹ (1. 九州工業大学)

10:15 ~ 10:30

09:30 ～ 09:45 (2023年5月31日(水) 09:30 ～ 10:30 会場G)

[G-01-01] レーザ粉末床積層造形における溶融・凝固挙動の熱流体シミュレーション

*片桐 淳¹、草野 正大¹、野本 祐春¹、渡邊 誠¹ (1. 物質・材料研究機構)

液中における粒子パッキングから焼結までの 連成・連携解析

Couple and co-simulation from particle-packing to sintering

澤田 有弘¹⁾, 松本 純一²⁾

Tomohiro Sawada and Junichi Matsumoto

- 1) 博(科) 産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2, E-mail: tomohiro-sawada@aist.go.jp)
2) 博(工) 産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2, E-mail: matsumoto-junichi@aist.go.jp)

This paper presents our approach to development of a co-simulation technique of fluid-particle interaction and multi-phase-field computations for directly simulating manufacturing process of fine ceramics. We compute the slurry process such as mixing and dispersion of ceramic particles in solvent by a fully finite element method-based method. After that, we compute the sintering process with the FEM-based multi-phase-field method using the computation result of the slurry process as input data. The input data generates an initial phase-field of the sintering.

Key Words : Co-simulation, Fine ceramics process, Fluid-particle interaction, Multi-phase-field method, Finite element method

1. 緒 言

2000年初頭頃から脱実験や脱経験を一つの目的に、材料開発に機械学習等の情報技術を取り入れるマテリアル・インフォマティクス (MI) に関する研究開発が盛んになった。近年ではこれを更に発展させる取り組みとして、MIなどで見出された新材料を実際に製造可能なプロセスを見出すことや、材料の機能や性能が製造プロセスに密接に結びついている対象に対するプロセス・インフォマティクス (PI) 技術に関する研究開発も盛んになっている。

本研究では、粉体プロセスの一つであるファインセラミックス製品の製造プロセスを対象に、泥漿中におけるセラミックス粉体の動きを直接的に追うことで緻密な粒子配置を得る流体・粒子連成計算と、連成計算の結果から得られた粒子配置に対して焼結計算を適用することで焼成体に対応する微子構造・結晶構造を得る一連の連成・連携解析技術の提案とその研究開発への取り組みを紹介する。紹介する内容は二次元の計算例とする。

2. 連成・連携計算

本取り組みでは、Fig.1の模式図に示されるように、泥漿中 (溶媒中) における微小なセラミックス粒子の一つ一つを追跡する計算を行う。そして、連成計算によって緻密な粒子配置を取得した後に、得られた粒子配置を焼結計算の入力データとした連携計算を行う。これらの計算には、流体計算、固体計算、接触計算、焼結に関するフェーズフィールド計算、さらにそれらの連成・連携計算など、多く

の技術が必要とされる。

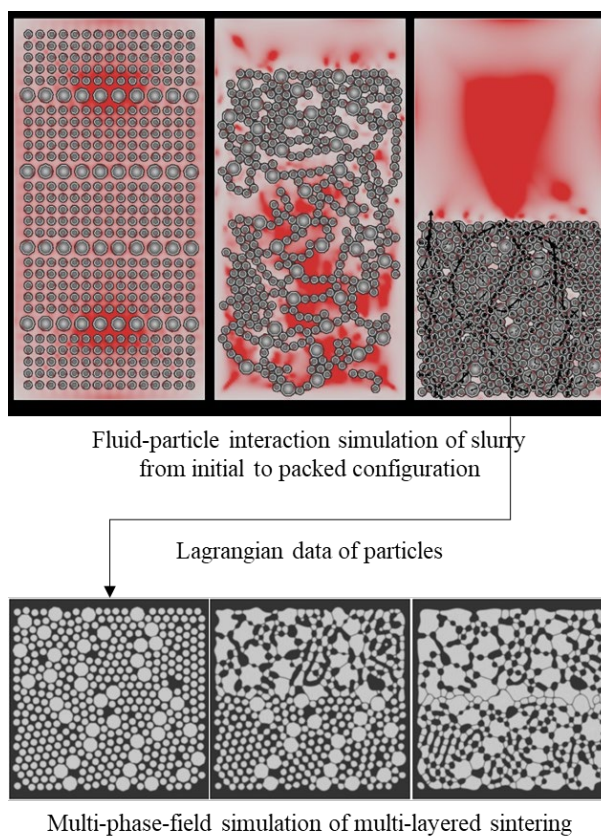


Fig.1 Illustration of co-simulation of fluid-particle interaction and multi-phase-field computations for manufacturing process of fine ceramics.

泥漿フェーズの計算に対しては、計算上の粒子の取り扱い易さから、離散要素法（DEM）が適用されることが多い。本研究では離散要素法は導入せず、流体と固体の境界にXFEMを適用するInterface-Reproducing Capturing (IRC)法に基づく流体・構造連成（FSI）計算手法[1,2]を多体系や多粒子系も取り扱えるように拡張した手法[3,4,5]を適用する。特徴は全ての計算を有限要素法（FEM）によって行う点にある。利点としては粒子一つ一つをFEMで離散化することで任意形状が直接的に取り扱えるようになること、異形状が混在する状態の取り扱いも容易になること、流体、特に固体に対して様々な構成式を適用することが可能となること、形状依存性の高い接触の厳密な取り扱いも可能になること等がある。その反面、計算量は増加する。

続く焼結フェーズの計算では、混相流計算用に開発が進められてきた直交基底気泡関数要素安定化法[6]を採用したフェーズフィールド法を、多粒子の界面や粒界を取り扱えるマルチフェーズフィールド法に拡張し、文献[7]の手法に基づく焼結計算によって行う。

流体計算 流体部すなわち泥漿の溶媒部には、非圧縮性Navier-Stokes方程式の適用を行う。構成式には泥漿の溶媒の物性値等の実測値を適用するために、指数関数型の非ニュートン流体構成式を適用する。解法としては安定化有限要素法に基づくNavier-Stokes方程式と連続の式の連立解法を適用する。

固体計算 固体部すなわち泥漿のセラミック粒子部には、線形弾性構成式によるtotal Lagrange型のCauchyの運動法則を適用する。弾塑性や脆性構成式の適用が将来展望となる。今回の計算例では、全てのセラミック粒子を正八角形で近似してメッシュを生成する。

接触計算 セラミック粒子同士の接触計算には、その他の粒子間力への拡張性の観点から、ペナルティ法を適用する。このとき線形ペナルティ法の場合には接触反力が不足する場合があるため、接触反力に非線形構成式を導入する非線形ペナルティ法を適用する。

粒子間相互作用力の計算 泥漿中におけるセラミックス粒子には、接触力以外にも様々な粒子間力が存在するものと考えられる。溶媒には、粒子の良分散状態を得るための分散剤や、粒子を糊付けしたり泥漿全体としての粘度を調整したりすることを目的としたバインダーなどの各種の添加剤が付与される。これらの付与に関しては未知の部分が多いが、接触計算手法を応用することで、粒子の粘着に関する粒子間相互作用力を付与する。本稿の計算例では、一度、接近若しくは接触した粒子同士には接着力が生じるような計算を行う。粒子が離れると、ある閾値に基づいて接着力が無くなる計算を行う。

連成・連立解法 上記に関する連立支配方程式は、非線形性となる。そのため、Newton-Raphson法に基づく反復型

解法を適用する。時間積分法にはNewmark法に基づく陰解法を適用する。各支配方程式は分離せずに、一体型の連立解法の適用を行う。強連成解法とも呼ばれる。

焼結計算への連携解析 流体・粒子連成計算の結果から、粒子一つ一つの位置情報や形状情報が得られる。広くはLagrangianデータである。これらのデータを焼結計算のための初期のフェーズフィールド場の作成のための微構造データとして、焼結計算のプログラムに受け渡す。具体的に受け渡されるデータは、粒子一つ一つに対するLagrangeデータやメッシュとなる。焼結計算は、空間に固定されたメッシュで行われる。

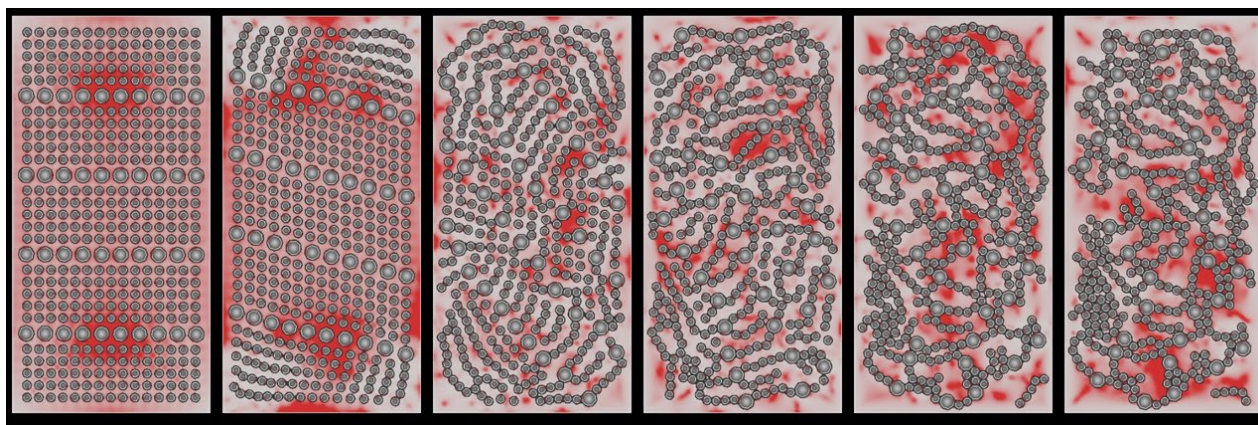
焼結計算 焼結計算は、FEM解法として混相流計算において多くの実績を有する直交基底気泡関数要素安定化法[6]を採用した上で、文献[7]のマルチフェーズフィールド法に基づいて粒界を考慮した焼結計算を行う。焼結計算はこのマルチフェーズフィールド計算を必要とするため、流体・粒子連成計算よりも計算負荷が大きい。そのため、マルチフェーズフィールド法に対応した大規模並列計算技術を開発し、導入している。

3. 連成・連携計算例

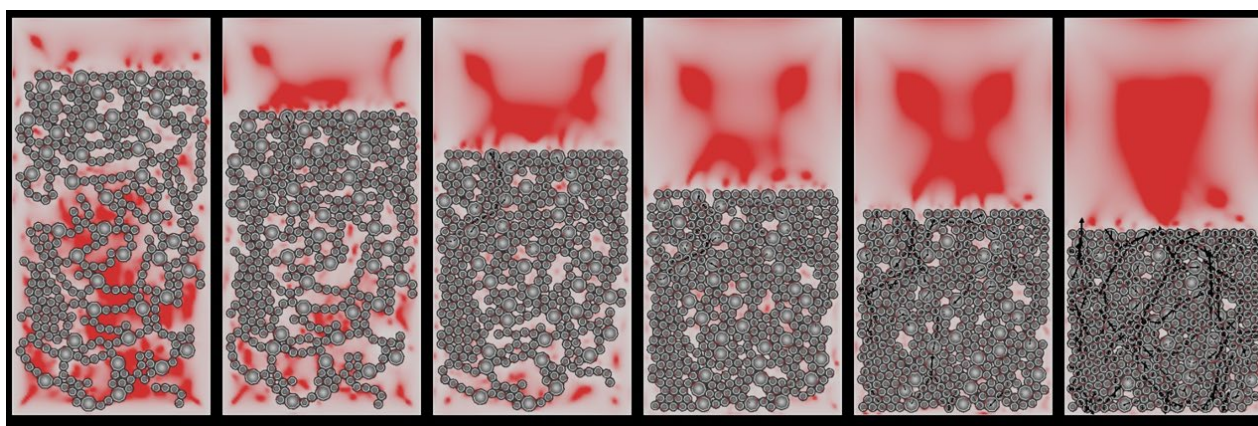
連成・連携計算の模式図として示したFig.1の計算例を更に細かいタイムステップ間隔で可視化したものをFig.2に示す。現在のところファインセラミックスの製造プロセスにおける全てのプロセスを詳細かつ厳密に計算することは行っていないが、プロセスシミュレーション技術を開発する上で重要となる幾つかのプロセスを凝縮した連成・連携計算例となっている。

最初のFig.2(a)は、セラミックスの粉体を溶媒に混ぜる混合や混練もしくは分散等のプロセス、Fig.2(b)はその後の圧密、乾燥等の工程でセラミックス粒子の配置を更に緻密化するプロセスである。(a)では計算に考慮した粒子接着力によって、弱い架橋構造や局所的な凝集構造が出現していることが分かる。(b)では粒子が整列しつつも、空隙が残る部分が発生することが分かる。これは粒子間接着力以外にも、粒子を多角形近似していることや、多角形が適切に反映された接触計算を行っていることも大きく寄与していることが明らかとなっている。今回は二つの粒径としたが、異なる粒径が混在する場合の連成計算も取り扱えていることが分かる。

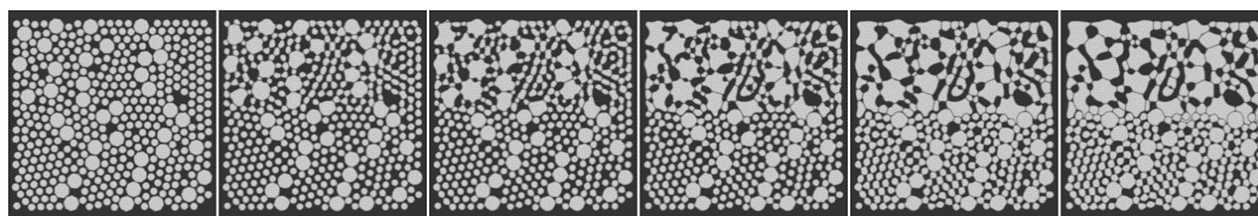
そしてFig.2(c)とFig.2(d)は焼結計算への連携計算例である。この例では、物性による焼結温度や焼結特性の異なりを考慮可能であることを確認することも目的に、上半分の粒子群の物性としての焼結基準温度を1,000度、下半分の粒子群の焼結基準温度を1,600度として、(c)と(d)で異なる焼成温度を与えた場合の計算となっている。(c)は上の粒子群の焼結基準温度に等しい1,000度で焼成した場合、(d)は上と下の焼結基準温度の中間程度の1,400度で焼成した場合である。これらの計算例により、(c)の1,000度の



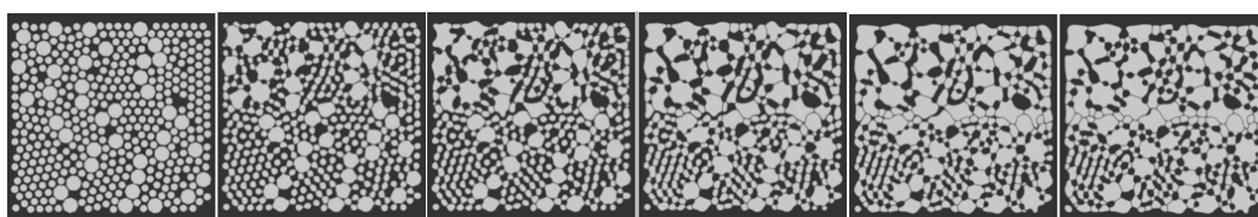
(a) Mixing process of slurry.



(b) Packing or drying process of slurry.



(c) Sintering process of particles at 1,000 °C.



(d) Sintering process of particles at 1,400 °C.

Fig.2 Snapshots of fluid-particle interaction and multi-phase-field simulations of ceramic particles.

焼成温度では下部の粒子群の焼結が十分に進まない等の知見が得られる。焼成温度を1,400度とした(d)では、下部の粒子群も焼結が進んでいることが分かる。さらに、上部と下部の粒子群の境界領域の焼結状況とその焼成温度による異なりなどの分析も行える。

4. 結 言

本稿ではファインセラミックス製品の製造プロセスシミュレーション技術開発を目的に、泥漿中におけるセラミックス粉体の動きを直接的に追って緻密な粒子配置を得る流体・粒子連成計算と、連成計算の結果から得られた粒子配置に対して、マルチフェーズフィールド法に基づ

いて粒界考慮の焼結計算を行う一連の連成・連携解析技術を提案し、その研究開発への取り組みを示した。

今後、更に精緻な計算、そして本稿の計算例には含まれないようなプロセスの計算も可能とする技術開発を進めていく予定である。

謝辞: この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP22005：次世代ファインセラミックス製造プロセスの基盤構築・応用開発）の結果得られたものです。

参考文献

- [1] Sawada T (2018), Interface-Reproducing Capturing (IRC) Technique for Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications, In: Tezduyar T (eds), Frontiers in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation, Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology, Birkhauser, Cham.
- [2] 澤田有弘, 近藤雅裕, 松本純一 (2020), XFEM を適用する流体・構造連成計算手法における流体の慣性項の計算, 日本計算工学会論文集, Paper No. 20200004.
- [3] 澤田有弘 (2020), 流体・構造連成問題に対する直接数値シミュレーション技術, トライボロジスト, 65 (11), 672-677.
- [4] 澤田有弘, 松本純一 (2021), 弾性粒子群の液中挙動に対する流体構造連成・接触計算, 計算工学講演会論文集, 26, A-11-04.
- [5] 澤田有弘, 松本純一 (2022), 離散有限要素法による流体・固体・接触の連成計算, 第 66 回理論応用力学講演会 講演論文集, OS1-4-05.
- [6] J. Matsumoto (2005), A relationship between stabilized FEM and bubble function element stabilization method with orthogonal basis for incompressible flows, J. Appl. Mech. JSCE, 8, 233-242.
- [7] Y.U. Wang (2006), Computer modeling and simulation of solid-state sintering: A phase field approach, Acta Materialia, 54 (4), 953-961.

PCB 水熱酸化分解反応器における ビフェニルの酸化分解反応解析

Analysis of Oxidative Decomposition Reaction of Biphenyl in PCB Hydrothermal Oxidative Decomposition Reactor

倉前宏行¹⁾ 小林龍平²⁾ 松本政秀³⁾ 渡邊信久⁴⁾

Hiroyuki Kuramae, Ryohei Kobayashi, Masahide Matsumoto and Nobuhisa Watanabe

¹⁾博 (情工) 大阪工業大学 ロボティクス&デザイン工学部 教授 (〒 530-8568 大阪市北区茶屋町 1-45,

E-mail: hiroyuki.kuramae@oit.ac.jp)

²⁾大阪工業大学 ロボティクス&デザイン工学部 4 年 (〒 530-8568 大阪市北区茶屋町 1-45, E-mail: e1x19032@st.oit.ac.jp)

³⁾博 (工) 大阪工業大学 工学部 教授 (〒 535-8585 大阪市旭区大宮 5-1-16, E-mail: masahide.matsumoto@oit.ac.jp)

⁴⁾博 (工) 大阪工業大学 工学部 教授 (〒 535-8585 大阪市旭区大宮 5-1-16, E-mail: nobuhisa.watanabe@oit.ac.jp)

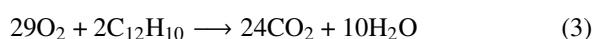
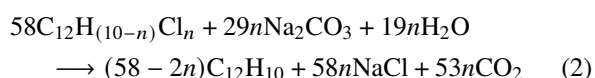
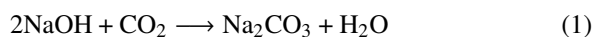
Thermal fluid analysis of a PCB hydrothermal oxidative decomposition reactor was performed considering the oxidative decomposition of biphenyl using the standard OpenFOAM solver bouyantReactingFoam. The internal fluid is assumed to be a perfect gas, and the temperature dependence of mass density, viscosity, specific heat, and thermal conductivity are considered. It was confirmed that the thermal fluid conditions in the reactor changed significantly due to the input volume fraction of biphenyl, and that the temperature in the reactor increased due to the oxidative decomposition reaction.

Key Words : Polychlorinated Biphenyl, Hydrothermal Destruction Reactor, Chemical Reaction Analysis, OpenFOAM

1. 緒言

有害なポリ塩化ビフェニル ($C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$, $1 \leq n \leq 10$, polychlorinated biphenyl, 以下 PCB という) を分解する水熱酸化分解反応器において, 底部内壁に腐食によるものと推察される減肉が確認された。現在, 底部隔壁の設置による化学物質の沈下防止や, 反応器底部への熱水供給による器内温度管理といった防食措置により, 反応器は安全に維持運用されているものの, 腐食発生メカニズムの解明が求められている。

この反応器は 370 °C, 26.5 MPa の高温・高圧のもとで,



のとおり, 投入した水酸化ナトリウム NaOH から炭酸ナトリウム Na_2CO_3 を析出し, これと水 H_2O により PCB をビフェニル $C_{12}H_{10}$ に脱塩素する。さらに液体酸素 O_2 との酸化分解反応により, 水, 二酸化炭素 CO_2 , 塩化ナトリウム NaCl に分解する [1]。したがって, 器内は PCB 混合液, 水酸化ナトリウム, 水, 液体酸素, および反応生成物の多種物質の流れが生じ, 腐食発生のメカニズムの解明のためには, これらの多成分流体の挙動, および反応器への物理的・化学的影響を明らかにする必要がある。

これまで著者らは, 反応器の内部流体として PCB と水からなる二流体を想定し, 密度差流を考慮した熱流動解析 [2] を行い, さらに反応器本体の熱伝導解析と連

成することにより, 固液界面における腐食リスク評価を行ってきた [3]。本稿においては, 化学反応をともなう多流体の熱流動解析と反応器本体の非定常熱伝導解析を行う。

2. 解析方法

本研究においては, 複数の流体が混在する流れ場を考え, VOF (Volume of field) 法 [4] にもとづく Euler 型の多流体の混合流と化学反応を考慮した非定常熱流動解析を行う。多流体の混合挙動は, 物質 i の体積分率 α_i を考え流速ベクトルを $\mathbf{u}_i$ とする移流方程式

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (4)$$

を解いて求める。なお $\sum_i \alpha_i = 1$ である。

非定常圧縮性の多流体に対する連続の式, 運動方程式, 単位質量あたりのエネルギー方程式は, それぞれ以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_i \boldsymbol{\tau}_i) + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \sum_j M_{ij} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \alpha_i \rho_i (h_i + K_i) \} + \nabla \cdot \{ \alpha_i \rho_i (h_i + K_i) \mathbf{u}_i \} = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{\kappa_i}{c_{p_i}} \nabla T_i \right) + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial t} + E_i \quad (7)$$

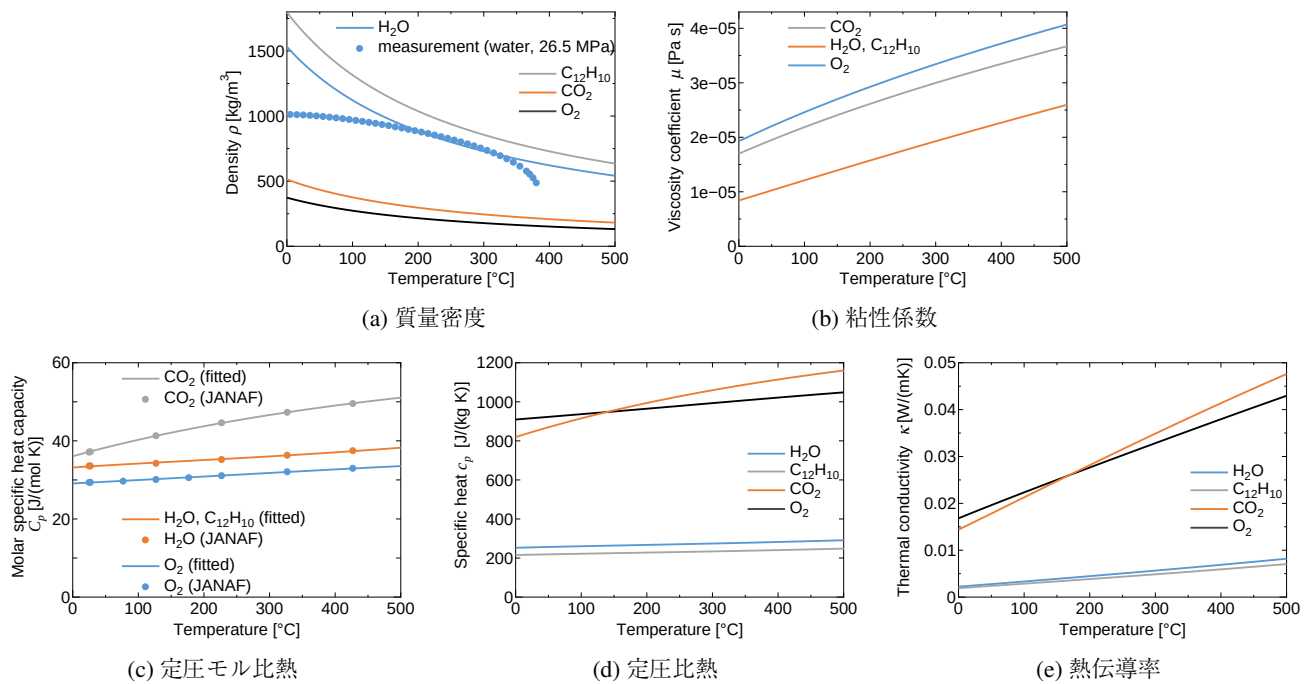


図-1 熱物性値の温度依存性

ここで、添字 i は第 i 流体を表し、 ρ_i は質量密度、 p は全流体共通の圧力、 τ_i は応力テンソル、 g は重力加速度ベクトル、 M_{ij} は抗力や揚力など流体 i, j 間の相互運動量輸送、 h_i, K_i はそれぞれ単位質量あたりのエンタルピーと運動エネルギー、 T_i は温度、 κ_i は熱伝導率、 c_{p_i} は単位質量あたりの定圧比熱であり、 E_i は流体 i とその他の流体間での相互熱伝達を表す。

本稿において、化学反応は反応式 (3) のビフェニルの酸化分解反応のみを考え、離散点において反応に必要な物質量がすべて満たされたとき、反応生成物が生成されるものとする。このとき生成物質と原料物質のエンタルピー差を化学反応熱とする。解析には汎用有限体積法コード OpenFOAM 10[5] を採用し、標準ソルバーの buoyantReactingFoam により多流体の化学反応にとまう熱流動解析を行う。

3. 物性値および解析条件

(1) 熱物性値の設定

質量密度 ρ は理想気体の状態方程式

$$\rho(T, p) = \frac{pW}{RT} \quad (8)$$

より計算する。ここで、 T は絶対温度、 W は分子量、 $R = 8.314 \text{ m}^2 \text{ kg}/(\text{s}^2 \text{ mol K})$ は気体定数である。反応器内圧力として $p = 26.5 \text{ MPa}$ とした。水の分子量は $W = 18.01528 \text{ g/mol}$ であるが、質量密度が図 1 (a) の青丸で示す実験結果に対して、高温域で良好な近似となるよう、表 1 のように分子量を設定した。

粘性係数は、Sutherland の式

$$\mu(T) = \frac{A_s \sqrt{T}}{1 + T_s/T} \quad (9)$$

を用いて設定し、図 1 (b) に示す温度依存性を導入する。ここで A_s, T_s は物質により異なるパラメータであり、本

表-1 各物質の熱物性パラメータ

物質	W [g/mol]	A_s	T_s
O ₂	31.9988	1.70×10^{-6}	125
H ₂ O	131.3224	1.72×10^{-6}	650
CO ₂	44.01	1.56×10^{-6}	142
C ₁₂ H ₁₀	154	1.72×10^{-6}	650

研究では理科年表 [6] より表 1 とした、なおビフェニルのパラメータは不明であるため、水と等価とした。

JANAF データベース [7] の定圧モル比熱をもとに、同図 (c) に示すように 4 次多項式

$$C_p(T) = R \sum_{i=0}^4 a_i T^i \quad (10)$$

により近似して温度依存性を導入する。ビフェニルの定圧モル比熱は同データベースに存在しないため、水と等価とした。これを分子量を用いて単位質量あたりの定圧比熱 c_p に変換し、同図 (d) の温度依存性を解析に導入する。水とビフェニルの分子量の違いにより、定圧比熱に差が生じる。

熱伝導率は、粘性係数と単位質量あたりの定積比熱 $c_v = c_p - R/W$ より修正 Eucken 相関式

$$\lambda(T) = \mu c_v \left(1.32 + \frac{1.77R}{c_v} \right) \quad (11)$$

を用いて計算し、同図 (e) に示す温度依存性とする。

(2) 解析モデルおよび境界条件

水熱酸化分解反応器の実機設計図をもとに図 2 に示す 3D ソリッドモデルを構築した。反応器は腐食対策後

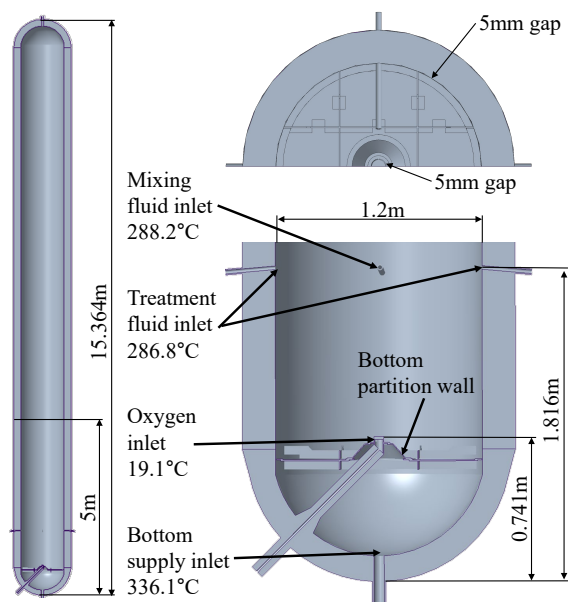
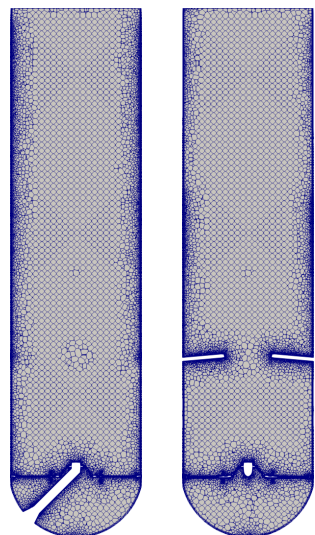


図-2 水熱酸化分解反応器



(a) 対称面 (b) 混合管断面

図-3 解析メッシュ

の底部隔壁を設置したものを解析対象とし、隔壁と酸素ノズル先端の周囲、および隔壁と反応器側壁との間にはそれぞれ5mmのすき間がある。反応器底部には斜め上に向かって酸素供給管がとおり先端ノズルから液体酸素が流入する。反応器底部の温度を高温に保つため、反応器底部中央から熱水を供給する。

この3D CADモデルから多面体セルにもとづく非構造格子の自動メッシュ分割 [8] を行い、図3に示す解析メッシュを生成した。反応器は、図2に示した断面を対称面とする1/2対称構造であるが、LES (Large Eddy Simulation) による乱流解析を行うため解析メッシュは対称性を考慮せずに構築した。本研究においては反応器底部の熱流動現象に着目するため、反応器底面から高さ5mまでを解析領域とする。壁面には境界層レイヤーメッシュを挿入した。

表-2 境界条件

	温度	速度	圧力	体積分率 [%]		
	[°C]	[m/s]	[MPa]	C ₁₂ H ₁₀	H ₂ O	O ₂
混合管流入口	288.2	0.6950		2.83, 100	97.17, 0	0
混合管側面	288.2	壁面		勾配なし		
処理液流入口	286.8	0.6040		0	100	0
処理液管側面	286.8	壁面		勾配なし		
酸素流入口	19.1	0.0467		0	0	100
酸素ノズル側面	19.1	壁面		勾配なし		
底部給水流入口	336.1	0.0074		0	100	0
流出口 (最上面)	断熱	一樣流出	26.5	勾配なし		
反応器内壁	断熱	壁面		勾配なし		
底部隔壁	断熱	壁面		勾配なし		

境界条件を表2に示す。混合管からビフェニル、処理液管と底部給水口から水、酸素ノズルから酸素がそれぞれ流入することとする。混合管からのビフェニルの投入量は、実機運転時におけるPCBの投入体積分率2.83%と100%の2ケース設定して結果を比較する。流入流量と流入温度は実機運転中の計測値とする。酸素ノズルは二重円管構造で冷却水によりつねに冷却されているため、流入温度とノズル側面ともに19.1°Cに設定する。解析モデルの最上面は流出口に相当することから、器内圧力26.5MPaを設定し、出口流速は圧力にもとづく一樣流出条件とした。反応器内壁の固液界面を断熱条件とした。

初期条件は、静止した一定温度288.2°Cの水のみの単一流体が反応器内を充滿している状態とした。

4. 解析結果

反応器の混合管断面における解析結果を比較して図4に示す。同図(a)～(d)に反応器への投入物質であるビフェニル、水、酸素、および反応生成物の二酸化炭素の体積分率を示す。同図(a-1)に示すビフェニル濃度を100%とすると、それに応じて充滿されていた水の体積分率は(b-1)のように低下し、(c-1)のとおり投入した酸素のほぼすべてが購入後即座に分解反応に消費される。これにより、反応生成物の二酸化炭素は(d-1)のように酸素ノズル先端から発生し上昇流となることがわかる。

同図(a-2)に示すビフェニル濃度を2.83%とすると、(c-2)のように酸素は混合管先端部まで上昇し、(d-3)のように混合管対向部により上側で分解反応が生じる。この場合でも十分に時間が経過すると、(c-3)と(d-3)のように酸素ノズル先端部において分解反応が行われることがわかる。

同図(e)に示すように、ビフェニルの酸化分解反応によって反応器内の温度は上昇していく。鉛直方向流速は、同図(f)に示すように乱流の影響、および上昇流が確認できる。

5. 結言

PCB水熱酸化分解反応器におけるビフェニルの酸化分解反応による非定常熱流動解析を行った。反応器に投入するビフェニルの体積分率により、反応状態と

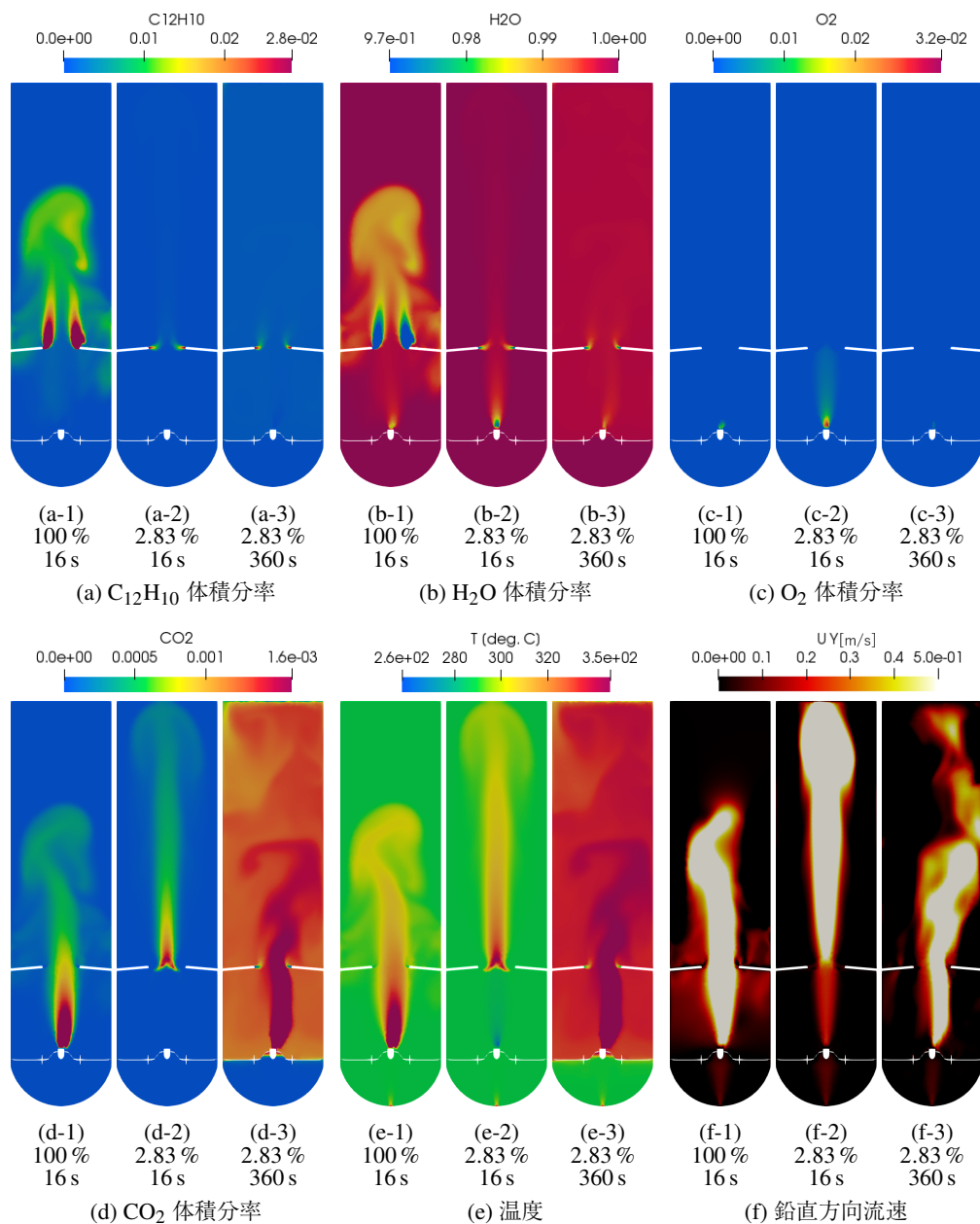


図-4 解析結果

もに熱流動状態が大きく変化した。今後はPCBの水熱酸化分解反応へ拡張するとともに、反応器本体の熱伝導解析との連成解析を行うことで、固液界面の熱伝達を考慮して反応器内壁における腐食メカニズムの解明を目指す。

謝辞: 本研究を挙行するにあたり、中間貯蔵・安全事業株式会社東京PCB処理事業所より研究資金、ならびに解析に必要な水熱酸化分解反応器の実機データを提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 前田隆之, 植田勝征, 福住忠継, 篠田克彦, 立石正和: 水熱分解によるPCBの無害化処理, 三菱重工技報, Vol. 38, No. 1, pp. 32-35, 2001.
- [2] 杉本暁大, 倉前宏行, 松本政秀, 渡邊信久: 二流体を

考慮したPCB水熱酸化分解反応器の熱流動解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 26, 2021.

- [3] 倉前宏行, 杉本暁大, 松本政秀, 渡邊信久: 多成分流体・固体複合領域解析に基づくPCB水熱酸化分解反応器の腐食リスク評価, 計算工学講演会論文集, Vol. 27, 2022.
- [4] 片岡勲: 気液二相流のモデリングと基礎方程式, 混相流, Vol. 5, pp. 3-21, 1991.
- [5] The OpenFOAM Foundation, <https://www.openfoam.org/>.
- [6] 国立天文台(編), 理科年表2020, 丸善, p. 378, 2019.
- [7] NIST-JANAF Thermochemical Tables. <https://janaf.nist.gov/>.
- [8] IDAJ: ennovaCFD for OpenFOAM. https://www.idaj.co.jp/product/ennovacfd/openfoam_gui/.

10:15 ~ 10:30 (2023年5月31日(水) 09:30 ~ 10:30 会場G)

[G-01-04] 流体中で振動する圧電バイモルフにおける流体-構造-圧電-電気回路連成現象のハイブリッド型強連成解法

*三笥 征弘¹、野崎 隼之介¹、石原 大輔¹ (1. 九州工業大学)

OS10 連成解析・連携解析

[G-02] OS10 連成解析・連携解析 (2)

座長:石原 大輔(九州工業大学)

2023年5月31日(水) 10:45 ~ 11:45 会場G (3F 小会議室 304)

[G-02-01] ナトリウム冷却高速炉の設計最適化フレームワークの開発 (2) 最適化解析制御機能の開発

*堂田 哲広¹、中峯 由彰²、桑垣 一紀¹、浜瀬 枝里菜¹、菊地 紀宏¹、吉村 一夫¹、松下 健太郎¹、田中正暁¹ (1. 日本原子力研究開発機構、2. 株式会社エヌデーデー)

10:45 ~ 11:00

[G-02-02] 風荷重が作用する枠組足場の OpenFOAMと ASI-Gauss法を用いた片方向連成解析

*多湖 拓海¹、磯部 大吾郎¹ (1. 筑波大学)

11:00 ~ 11:15

[G-02-03] 抵抗スポット溶接における3次元接触変形・電流・熱伝導3連成現象の重要性

*二保 知也¹、今栖 那菜¹、三小田 裕美¹、岩切 三奈¹ (1. 九州工業大学)

11:15 ~ 11:30

[G-02-04] 流体上に作られる模様のシミュレーションとその機械学習による生成手順の推定

中田 希¹、*山田 知典¹ (1. 東京大学)

11:30 ~ 11:45

ナトリウム冷却高速炉の設計最適化フレームワークの開発

(2) 最適化解析制御機能の開発

Development of a Design Optimization Framework for Sodium-cooled Fast Reactors

(2) Development of optimization analysis control function

堂田哲広¹⁾, 中峯由彰²⁾, 桑垣一紀³⁾, 浜瀬枝里菜⁴⁾,
菊地紀宏⁵⁾, 吉村一夫⁶⁾, 松下健太郎⁷⁾, 田中正暁⁸⁾

Norihiro Doda, Yoshiaki Nakamine, Kazuki Kuwagaki, Erina Hamase,

Norihiro Kikuchi, Kazuo Yoshimura, Kentaro Matsushita, and Masaaki Tanaka

- 1) 博(工) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: doda.norihiro@jaea.go.jp)
2) 株式会社エスデーデー (〒310-0803茨城県水戸市城南1-1-6, E-mail: y.nakamine@nddhq.co.jp)
3) 博(工) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: kuwagaki.kazuki@jaea.go.jp)
4) 博(工) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: hamase.erina@jaea.go.jp)
5) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: kikuchi.norihiro@jaea.go.jp)
6) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: yoshimura.kazuo@jaea.go.jp)
7) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393茨城県東茨城郡大洗町成田町4002, E-mail: matsushita.kentaro@jaea.go.jp)
8) 博(工) 日本原子力研究開発機構 (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002, E-mail: tanaka.masaaki@jaea.go.jp)

Japan Atomic Energy Agency is developing an innovative design system named ARKADIA for automated life cycle optimization of innovative reactors, including fast reactors, to dramatically improve development efficiency. Focusing on the conceptual design phase, ARKADIA-Design is being developed to support the design optimization process. ARKADIA-Design consists of three systems (Virtual Plant Life System (VLS), Evaluation Assistance and Application System (EAS), and Knowledge Management System (KMS)). A design optimization framework controls the linkage between the three systems through the interfaces in each system. This paper reports on the development of an optimization analysis control function that performs design optimization analysis combining plant behavior analysis by VLS and optimization study by EAS.

Key Words : Coupling codes, Framework, Reactor design optimization

1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、高速炉を含む革新炉のライフサイクル最適化を自動で行い、開発効率の飛躍的向上を実現する統合評価手法(ARKADIA) [1]を開発している。ARKADIAは、最適化検討を進める評価支援・応用システム(EAS: Enhanced and AI-aided optimization System)、最新技術によりプラント挙動を解析する仮想プラントライフシステム(VLS: Virtual plant Life System)、ナトリウム冷却高速炉をはじめとする原子炉開発の知見を集約したナレッジマネジメントシステム(KMS: Knowledge Management System)で構成し、これらを連携させることで革新炉の統合的な評価を行うものである。ARKADIA開発の一環として、ナトリウム冷却高速炉の概念設計段階の最適化プロセスを支援するARKADIA-Design[2]の開発を行い、設計最適化機能の整備を進めている。図-1にARKADIA-Designのシステム構成と、設計最適化フレームワークを示す。設計最適化フレームワークは、EAS、VLS、KMSの3つのシステムを連携させるため、各システムに配置したインターフェース(EASインターフェース、VLSインターフェース、KMSインターフェース)を通じて各シ

ステムを連結するとともに、共通インターフェースにより任意の評価フローに沿って各システム内の解析コードや評価モジュール、関連する知見(ナレッジ)を制御する。前報[3]では、設計最適化フレームワークに実装する、プラント挙動解析を実施するためのVLSの機能として、ユーザが必要とする解析評価の目的に応じて、必要な詳

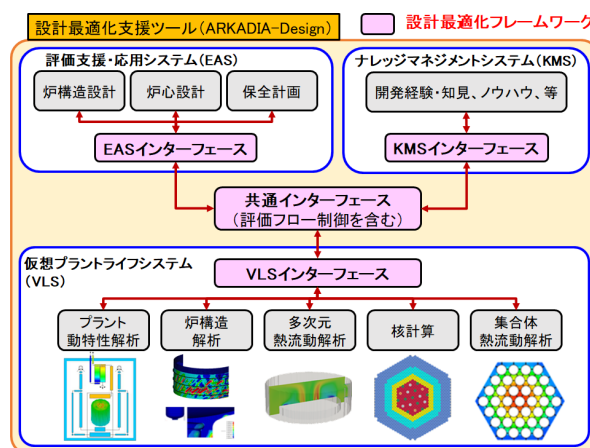


図-1 ARKADIA-Design のシステム構成と設計最適化フレームワーク

細度のモデルを有する解析コードを組合せ、連成解析を実現する連成解析制御機能の開発について報告した。本報では、VLSによるプラント挙動解析とEASによる最適化検討を組合わせた設計最適化に必要な解析を行うための、最適化解析制御機能の開発及び設計最適化問題への適用例について報告する。

2. 最適化解析制御機能の開発

2.1 ARKADIAの評価フロー

図-2にARKADIAの評価フロー[1]を示す。この評価フローに沿って設計最適化は行われ、評価フローは、①目的設定、②関連情報の入手・整理、評価条件の選定、③評価実施、④目的達成確認の4つのステップから構成される。

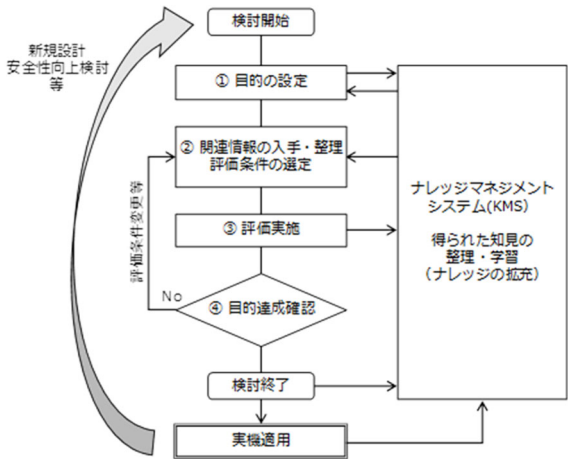


図-2 ARKADIA の評価フロー[1]

ステップ①では、目的達成に関わる要素と、その要素が依存するパラメータを設定する。図-3に目的、要素、パラメータの関係を示す。目的関数は複数の要素 e_i から構成され、要素 e_i は複数のパラメータ $p_{i,j}$ から構成される。要素 e とパラメータ p の関係は以下の要素関数で表される。

$$e_i = func(p_{i,j} | j \in n_i) \tag{1}$$

ここで、 n_i は各要素におけるパラメータ数であり、下添字の i は要素の番号、 j はパラメータの番号を表す。目的関数は、要素関数を含む形

$$object = func(e_i | i \in N) \tag{2}$$

あるいはパラメータを含む形

$$object = func(p_{i,j} | i \in N, j \in n_i) \tag{3}$$

のいずれかで表される。ここで N は要素数である。

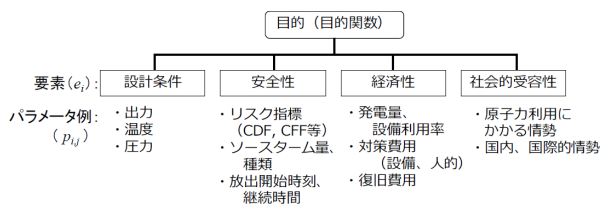


図-3 目的、要素、パラメータの関係例

ステップ②では、評価に必要な関連情報をデータベースから入手するとともに、それに基づき評価条件を選定する。なお、ステップ③で行う解析の入力データの作成もこのステップで行う。

ステップ③では、ステップ②での検討結果をもとにプラント挙動解析を実行してプラント状態を予測し、要素関数を評価する。

ステップ④では、ステップ③の結果をもとに目的達成度（ステップ①で作成した目的関数）を確認する。未達成の場合はステップ②へ戻り、評価条件の変更等を行う。

表-1に3つのシステムの評価フローにおける役割を示す。ステップ①、②、④をEASが、ステップ③をVLSが実行する。ステップ②ではKMSがEASと連携する。

表-1 各システムの評価フローにおける役割

EAS（評価支援・応用システム）	
(a)	ステップ①で評価フロー開始時にユーザによって与えられた入力から評価対象とする機器とパラメータを識別し、目的関数を設定する。
(b)	ステップ②でKMSから関連情報を取得し、プラント挙動解析の評価条件選択及び入力データを作成する。
(c)	ステップ③のVLSによる解析の結果から目的関数の値を計算し、ステップ④で目的の達成を判断する。必要に応じて、評価条件（設計パラメータ等）を変更し、ステップ②以降のステップを繰り返す。評価条件の変更は、適切なアルゴリズムによって最適解探索を効率化する。
VLS（仮想プラントライフシステム）	
(d)	ステップ③でプラント挙動を解析する（ステップ②でEASが作成した入力データを用いる）。
KMS（ナレッジマネジメントシステム）	
(e)	ステップ②で評価に必要な関連情報をデータベースから抽出し、EASに与える。

2.2 最適化解析制御機能の開発

図-4に、図-2の評価フローに従って3つのシステムを連携させるために必要な、設計最適化フレームワークの最適化解析制御機能を示す。評価フローは、共通インターフェースの評価フロー制御プログラムをユーザが起動すること（別途開発中のARKADIAプラットフォームを通じて起動する）で開始される。評価フロー制御プログラムは、EASに表-1の(a)目的関数の構築、(b)入力ファイルの作成、(c)目的関数の計算、目的達成の判断、評価条件の変更を実行させ、VLSに(d)解析実行を実行させる。ただし、(a)(b)(c)はユーザからの指示が必要であるため、ここではユーザからの指示は与えられたものとし、(c)(d)のプラント挙動解析を用いた設計最適化における繰り返しプロセス（図-4の水色部分）をメインに開発を行った。以下では、EAS及びVLSインターフェースの開発内容を説明する。

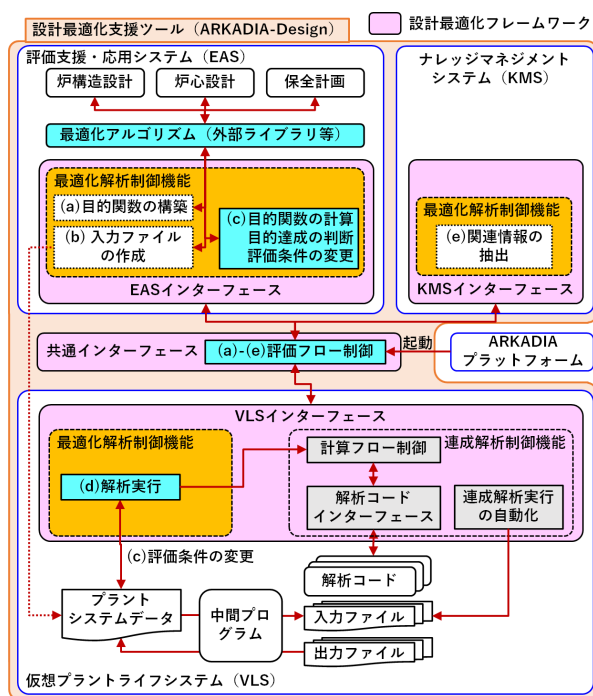


図-4 設計最適化フレームワークの最適化解析制御機能

2.2.1 EASで実行する最適化解析制御機能

EASでは図-4の(a)から(c)を実行するが、ここでは前述のとおり、(a)及び(b)はユーザからの指示は与えられたものとし、(c)について述べる。(c)ではVLSと連携し、EASで設定した評価条件（設計パラメータ値、等）でのプラント挙動解析の結果を取得し、それから目的関数を計算する。算出された目的関数値から目的達成を判断し、未達の場合は最適化アルゴリズムに従って評価条件を変更する。ここで、最適化アルゴリズムは、対象とする最適化問題の特性に合わせて選択する必要がある。具体的には、目的関数の形状が一つの最適値を持つ単峰性か、複数の局所解を有する多峰性であるか、また、不連続（微分不可）となるか等により、ユーザが最適化アルゴリズムを選択する必要がある。ユーザがライブラリとして提供されている一般的な最適化アルゴリズムを使用することを想定して、(c)の構築にあたっては、EASインターフェースから外部ライブラリを呼び出し、必要な情報を受渡す構造とした。

2.2.2 VLSで実行する最適化解析制御機能

VLSでは図-4の(d)を実行する。プラント挙動解析をEASの(c)で設定された評価条件で実行し、その解析結果をEASへ返す。評価条件の変更はプラント挙動解析の入力ファイルに反映する。前報のとおり、プラント挙動解析は解析評価の目的に応じて必要なモデルの詳細度を有する解析コードを組合せた連成解析もあることから、入力ファイルへの反映は複数の解析コードを対象とする必要がある。また、評価条件に含まれる設計変数は、各解析コードの入力ファイルの変数と1対1で対応するとは限らず、変換等を含む何らかの加工が必要である。例として、プラ

ント動特性解析コードでは様々なパラメータ解析に対応するため、流路形状から算出される流路断面積、水力等価直径等は個別の入力変数とすることが多い。さらに、設計変数はプラントシステムの階層間でも関係があり、例えば出力については解析コードにおけるモデル化の詳細度によって、炉心全体、燃料集合体単位、燃料ピン単位で扱われ、各解析コードの入力変数への変換が必要である。そこで、設計最適化フレームワークではプラント設計者が扱うプラントシステムのデータ項目を基本データとし、それらを中間プログラムによって各解析コードの入力変数に自動変換する仕組みを採用した。図-5にプラントシステムのデータ項目例を示す。このプラントシステムデータはEASが(b)において、入力ファイルを作成する際にも利用するとともに、プラント挙動解析の結果をEASへ受渡す際にも利用する。

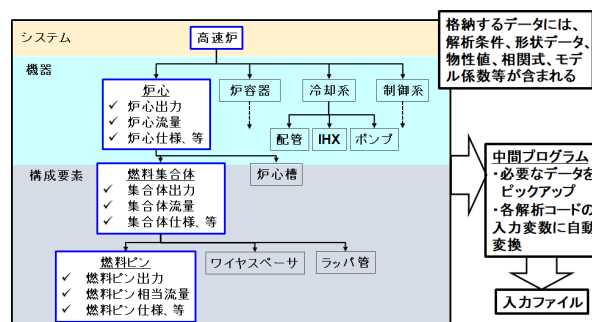


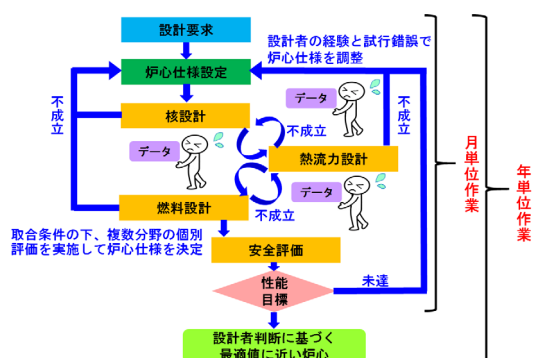
図-5 プラントシステムのデータ項目例

3. 設計最適化問題への適用

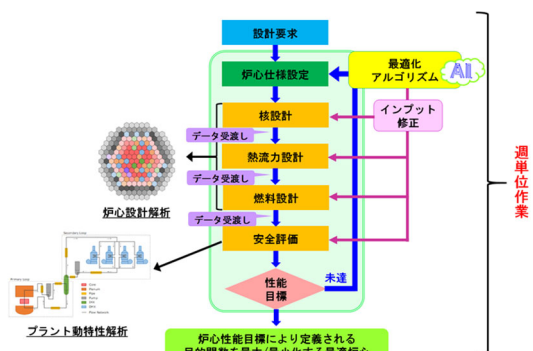
ARKADIA-Designで取り扱う、設計最適化問題は炉心設計、炉構造設計、点検工程の3分野がある[2]。ここでは、このうちの炉心設計最適化[4]に最適化解析制御機能を用いた例について説明する。

図-6に最適化プロセスを示す。図-6(a)に示すように、従来の炉心設計手法では、核設計、熱流体力設計、燃料設計の解析を繰り返して炉心仕様を設定し、その炉心仕様の安全評価の解析を行い、炉心仕様の成立性を確認する。この手法では分野間で取り合い条件を設定し、設計が成立する結果を得るために解析を繰り返すという試行錯誤が必要であるため、設計期間が数年単位に及んでいたことに加えて、取り合い条件によって限定された設計範囲における検討に留まるため、設計値に対して改善の余地が残ることが課題であった。図-6(b)に示すように、この課題に対し、ARKADIA-Designでは分野間の取り合い条件を予め設けるのではなく、各分野の解析結果を他の解析に受渡し、全分野の解析を一括で行い、設計成立性を評価する。

図-7に今回整備した最適化解析制御機能を適用する炉心設計の最適化問題を示す。簡単化のため、設計解析は熱流体力設計及び燃料設計を省略し、核設計と安全評価のみとした。炉心体系は炉心中央の燃料領域とその外周の反射体領域の2領域で構成され、炉心を冷却する冷却系統は



(a) 従来の設計手法



(b) ARKADIA-Designの設計手法

図-6 炉心設計の最適化プロセス[4]

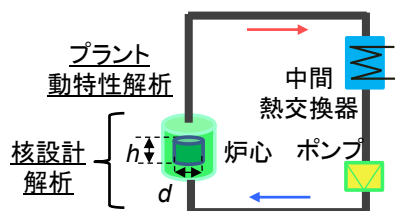


図-7 炉心設計の最適化問題[4]

除熱源となる中間熱交換器（1基）と冷却材を駆動するポンプ（1台）を配置する1ループとした。炉心及び冷却システムの仕様の詳細は既存高速炉プラントを参考に設定した。設計要求として炉心出力及び取出燃焼度を設定した上で、目的関数を経済性指標の一つとして炉心へのプルトニウム燃料の初期装荷量を最小化することとし、核的及び熱的な制約条件としてそれぞれナトリウムボイド反応度及び燃料ピン被覆管最高温度の制限値を設定した。設計変数は炉心の直径及び高さとした。これは単目的2変数2制約条件付の最適化問題である。

目的関数:

プルトニウム（Pu）初期装荷量を最小化

制約条件:

ナトリウムボイド反応度 (C_{void}) < 制限値

燃料ピン被覆管最高温度 (T_{max}) < 制限温度

設計変数:

炉心直径 (d) (探索範囲を設定)

炉心高さ (h) (探索範囲を設定)

図-8に炉心設計最適化の評価フローを示す。プラント挙動解析は、核設計解析を核計算コードMARBLEで、安全評価解析をプラント動特性解析コードSuper-COPDで行い、これらの解析は連成解析制御機能[3]を用いて連携させ、核設計解析で得られた動特性パラメータ及び反応度係数を安全評価解析に受渡し、解析に反映させた。以上により、設計変数に対する目的関数（Pu初期装荷量）及び制約条件（ナトリウムボイド反応度、燃料ピン被覆管最高温度）の値を得るようにした。

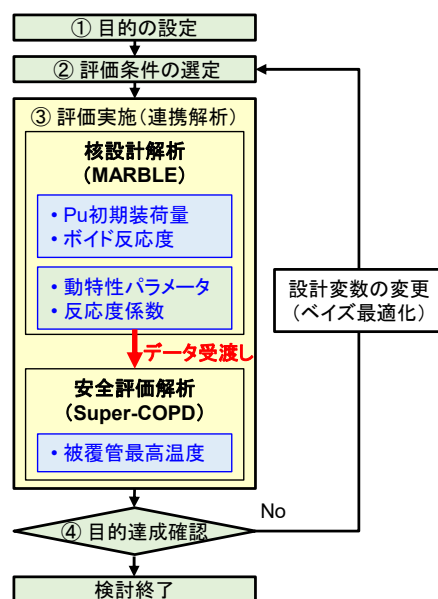


図-8 炉心設計最適化の評価フロー

最適化アルゴリズムは、大域的な最適解を比較的少ない試行回数で推定するベイズ最適化を選択し、外部ライブラリとしてTrieste [5] (TensorFlow[6]を使用したベイズ最適化のライブラリ)を利用した。設計最適化フレームワークはスクリプト言語（Python）で構築されているため、同じPythonで記述されているTriesteは、モジュールとして直接読み込むことができる。図-9に炉心設計最適化のベイズ最適化部分を表したPythonスクリプトを示す。スクリプトの概要を以下に示す。

1～3行目: 利用する各種ライブラリ等を読み込む。

5～10行目: 最適化問題の目的関数及び制約条件を定義する。設計変数の値を考慮したプラント挙動解析を実行し、その結果から目的関数及び制約条件を算出するように定義する。

11～12行目: Triesteライブラリのベイズ最適化ソルバへ問題設定を受渡し、最適化解析を実行する。

なお、他の最適化アルゴリズムのPythonライブラリを利用する場合も、最適化アルゴリズムとプラント挙動解析のプログラム構造は基本的に同じである。

1: import pssp	# 設計最適化フレームワークを読み込み
2: import tensorflow	# Tensorflow ライブラリを読み込み
3: import trieste	# Trieste ライブラリを読み込み
4:	
5: class Sim():	# 最適化問題の定義
6: def objective(param):	# 目的関数の記述 (引数: 設計変数)
7: z = pssp.vls(param)	# プラント挙動解析 (VLS) 結果を目的関数に受渡す
8: return z	# 目的関数
9: def constraint():	# 制約条件の記述
10: . . . (省略) . . .	
11: bo = trieste.bayesian_optimizer.BayesianOptimizer(Sim)	# ベイズ最適化ソルバへの問題設定
12: results = bo.optimize()	# ベイズ最適化計算の実行

図-9 炉心設計最適化の Python スクリプト (Trieste を用いたベイズ最適化部分)

図-10に本最適化問題の解析結果を示す。制約条件から2本の赤破線に挟まれた設計成立範囲内でPu初期装荷量が最小となる設計変数 (炉心直径 d 及び炉心高さ h) の組合せが探索された。初期探索点としてランダムに30点を探索し、それから10点の探索を行って星マークの最適解が、別途実施した総当たり計算によって得られた参照解に近い値が得られた。これにより、本最適化解析制御機能による最適化解析が正常に動作すること及び炉心設計最適化問題への適用性を確認した。

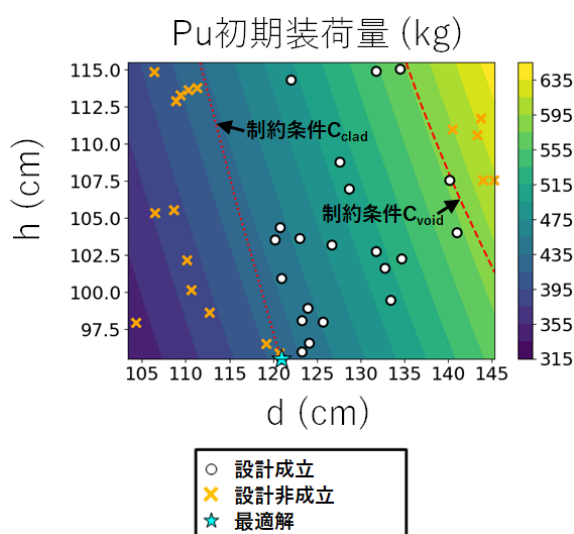


図-10 炉心設計最適化問題[4]

4. 結言

ナトリウム冷却高速炉の概念設計段階に主眼をおいた設計最適化プロセスを支援するARKADIA-Designの開発の一環として、EAS, VLS, KMSを連携する設計最適化フレームワークに最適化解析制御機能を追加した。本機能の開発にあたって、以下の工夫を行った。

- 対象とする最適化問題の特性に合わせて最適化アルゴリズムを選択する必要がある。そのため、複数の最適化アルゴリズムを容易に利用できるよう、外部ライブラリの利用を想定して設計した。

- 解析コードのインプット変数は解析コード毎に異なり、煩雑であるため、ユーザが取り扱う設計変数をプラントシステムデータとして統一し、解析コードインプットとの対応は中間プログラムによって自動変換する仕組みとした。

整備した「最適化解析制御機能」を炉心設計最適化の問題に適用し、最適化解析が正常に動作すること及び炉心設計最適化問題への適用性を確認した。

今後は、ARKADIA-Designを用いる際に必要なユーザからの情報入力やユーザへの情報表示を行うためのユーザインターフェースの整備を行う予定である。

参考文献

- [1] 大島 宏之, 浅山 泰, 古川 智弘, 田中 正暁, 高田 孝, 江沼 康弘: AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法ARKADIAの開発 (1) 全体計画, 2021年日本原子力学会春の年会, 1C01, 2021.
- [2] 田中 正暁, 大木 繁夫, 宮崎 真之, 高屋 茂, 横山 賢治, 安藤 勝訓: AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法ARKADIAの開発 (2) 設計最適化支援ツールARKADIA-Designの開発計画, 2021年日本原子力学会春の年会, 1C02, 2021.
- [3] 堂田 哲広, 中峯 由彰, 井川 健一, 岩崎 隆, 村上 諭, 田中 正暁, ナトリウム冷却高速炉の設計最適化フレームワークの開発 (1) 連成解析制御機能の開発, 計算工学講演会論文集, Vol.27, A-10-02, 2022.
- [4] 浜瀬 枝里菜, 桑垣 一紀, 堂田 哲広, 横山 賢治, 田中 正暁: 設計効率化及び過度な保守性低減に向けた炉心設計最適化プロセスの整備—代表例題の設定と炉心設計最適化プロセスの具体化検討—, 日本原子力学会 2022年秋の大会, 2F02, 2022.
- [5] Picheny, Victor, et al.: Trieste: Efficiently Exploring the Depths of Black-box Functions with TensorFlow, arXiv preprint arXiv:2302.08436, 2023.
- [6] Abadi, Martín, et al.: Tensorflow: a system for large-scale machine learning, Osdi. Vol. 16, No. 2016, pp. 265-283, 2016.

風荷重が作用する枠組足場の OpenFOAMとASI-Gauss法を用いた片方向連成解析

One-way Coupled Analysis of Prefabricated Scaffolds under Wind Loads
using OpenFOAM and ASI-Gauss Code

多湖拓海¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Takumi Tago and Daigoro Isobe

1) 筑波大学 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: tago.takumi.tp@alumni.tsukuba.ac.jp)

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

In this paper, numerical evaluation on displacement of prefabricated scaffolds and axial force of wall ties are conducted under wind loads calculated from fluid analysis and the safety technical guidelines of prefabricated scaffolds. OpenFOAM, which is an open-source numerical solver, is used for fluid analysis. The Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss code, which can stably calculate nonlinear phenomena such as member fracture, is used as a structural analysis code in this research. As a result, the fluid analysis revealed that even if prefabricated scaffolds were safe under the safety technical guidelines, the wind loads caused by the complex flow effects might lead to the collapse.

Key Words : Prefabricated Scaffolds, Wind Loads, ASI-Gauss Code, OpenFOAM

1. 序論

建設・解体現場には、建物に近接して作業が行えるように足場が設置されている。足場には多くの場合、養生シートや防音パネルが取り付けられている。しかし、これらのシート類によって風の受圧面積が増加することで足場に掛かる風荷重が増大し、足場を建物外壁面に固定する壁つなぎが引き抜かれ、倒壊に至る事例が起きている[1]。

足場を組み立てる際、その設計指針として風荷重に対する足場の安全技術指針[2]は示されているが、構造物周囲に発生する渦や剥離流といった、複雑な流れによって作用する風荷重に対する足場の安全性については不明瞭な点が多く、そのような場合の足場の挙動を評価することは、その安全性向上に際して極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、まず建物に併設された5層4スパンの枠組足場に対し流体解析を行い、枠組足場に作用する風荷重を算出する。流体解析結果から得られた風荷重と、風荷重に対する足場の安全技術指針をもとに得られた風荷重をそれぞれ外力とし構造解析を行い、枠組足場の変位および壁つなぎの軸力を比較する。流体解析には、オープンソースの流体解析ソルバーであるOpenFOAM[3]を用いる。構造解析には、最小限の要素分割で大規模構造物を解析することが可能であるASI-Gauss法[4]を用いる。

2. 安全技術指針による風荷重の算定方法

安全技術指針[2]において、足場に作用する風荷重 P は次式で計算される。

$$P = C_i q_z A \quad (1)$$

ここで、 C_i 、 q_z 、 A はそれぞれ風力係数、速度圧 [N/m²]、

作用面積 [m²]である。速度圧は空気密度 ρ [kg/m³]と高さ z [mm]における風速 V_z [m/s]から次式で与えられる。

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_z^2 \quad (2)$$

$$V_z = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

ここで、 z_0 、 V_0 、 α はそれぞれ基準高さ [m]、基準高さにおける風速 [m/s]、風速の鉛直分布を表すべき指数である。

風力係数は、風洞実験結果による平均風力係数 $\bar{C}$ と建築物に併設された足場の設置位置による補正倍率を用いて決定する。建築物に併設された足場の設置位置による補正は、風荷重の方向、足場に取り付けられたシート等の位置によって値が決まる。本研究で対象とする5層4スパンの枠組足場の風力係数を例にすると、風が側面側から流入した場合の風力係数は図-1のようになる。

以上のように、安全技術指針では速度圧、風力係数、作用面積から風荷重を算出している。しかしながら、安全技術指針は、構造物周辺に生じる渦や剥離流のような複雑な流れは考慮されていない。特に、風が構造物の側面側から流入するような場合には、建物に設置された足場は剥

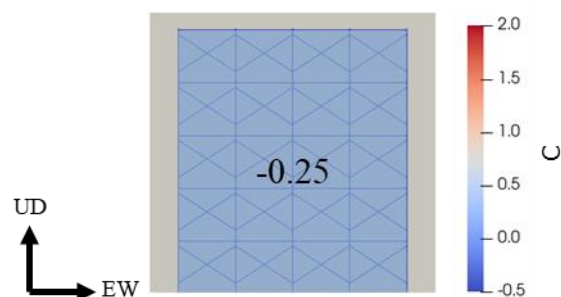


図-1 風が側面側から流入した場合の風力係数

離流の影響を受けやすく、想定されるべき風荷重を算出できないという問題点が考えられる。

3. 風荷重が作用する枠組足場の数値解析

(1) 解析モデル

a) 流体解析モデル

流体解析モデルの概観を図-2に示す。解析領域は一辺20,000 [mm]の立方体である。一辺9,000 [mm]の立方体を建物に模擬し、建物一足場間のクリアランスを250 [mm]とし、5層4スパンの枠組足場を設置している。枠組足場の寸法は、高さ8,500 [mm]、幅7,200 [mm]、奥行き900 [mm]である。枠組足場の脚柱および横架材の断面は、メッシュ化のしやすさを考慮し、一辺48.6 [mm]の正方形断面としている。枠組足場の前面に取り付けられたシートは空隙のないものとし、シートの厚さは2 [mm]としている。総セル数は37,648,304である。

b) 構造解析モデル

構造解析モデルの概観を図-3に示す。枠組足場の寸法は、流体解析モデルと同様、高さ8,500 [mm]、幅7,200 [mm]、奥行き900 [mm]である。建柱と床付き布柱、建柱と交差筋かい、建柱と壁つなぎの結合部はピン接合としている。床付き布柱の質量を25 [kg]とし、部材の密度を調整することで表現している。次に、風荷重を作用させる構造節点の位置を図-4に示す。便宜上、風荷重を作用させる構造節点を左下から右上にかけて「0-0, 0-1, …, 5-4」と定義

する。壁つなぎの本数は全部で10本とし、図-5のように枠組足場の両端の各層に取り付ける。なお、壁つなぎの番号は、風荷重を作用させる構造節点の番号と統一している。この取り付け間隔は、労働安全衛生規則[5]で定められた層方向5層以内、スパン方向4スパン以内という条件を満たしている。壁つなぎが外壁面から引き抜かれることを表現するために、壁つなぎに2,000 [N]の引張軸力が作用したら破断させる[6]。また、建柱間についても引き抜きを考慮して、微小要素に9,807 [N]の引張軸力が作用したら破断させる[7]。構造解析では、シートのモデル化はしていないが、シートの単位面積当たりの質量を1.2 [kg/m²]とし、枠組足場のシートを取り付ける側に密度として加えることで重量のみ考慮している。最下層の脚柱下端の拘束条件は、最も危険と考えられるピン接合、壁つなぎは完全拘

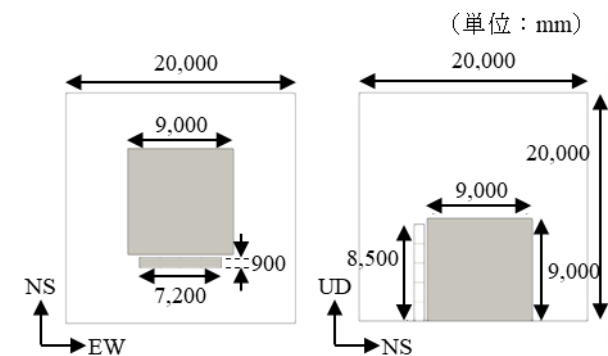


図-2 流体解析モデル

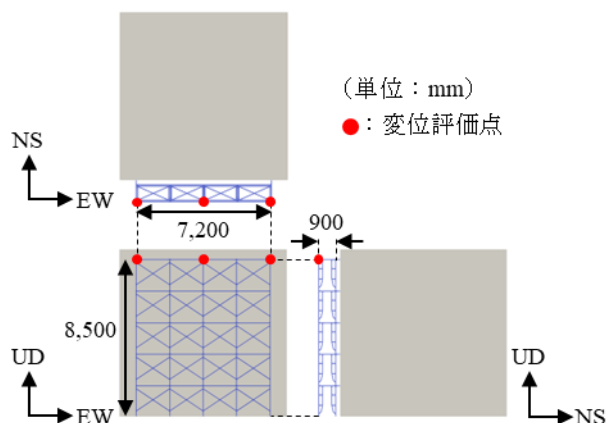


図-3 構造解析モデル

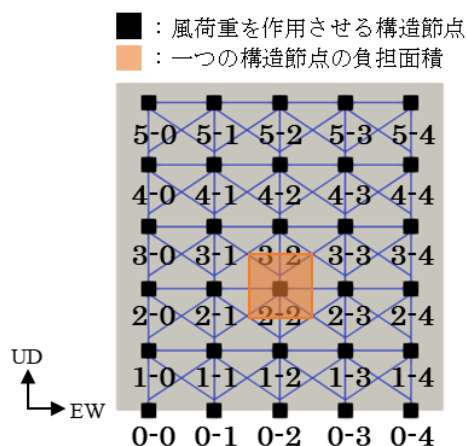


図-4 風荷重を作用させる構造節点

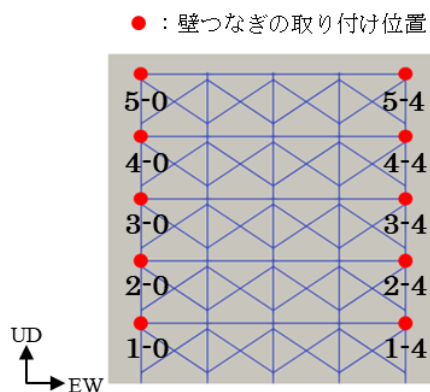


図-5 壁つなぎの取り付け位置

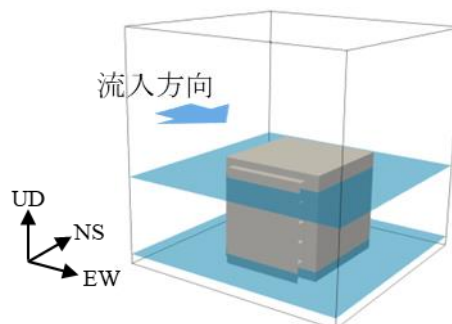


図-6 流入方向および切断面

束としている。

(2) 解析条件

a) 流体解析条件

流体解析の条件について記す。境界条件は、地表面および構造物表面には滑りなし条件、解析領域側面および上面には対称条件を適用している。

流入条件には、風速の高さ方向分布を導入し、高さ z における風速 U_z は次式で表されるものを与える。

$$U_z = U_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

ここで、 z_0 、 U_0 、 α はそれぞれ基準高さ、基準高さにおける風速、べき指数である。本解析では、 $z_0 = 10$ [m]、 $U_0 = 30$ [m/s]とする。べき指数は、4~9 階の中層建築物が主となる地域を仮定して、 $\alpha = 0.27$ とする。

図-6に示すように構造物の側面から風を流入させる。乱流モデルにはRNG k - ε モデルを用い、時間増分を0.001 [s]とし、8 [s]の解析を実施する。

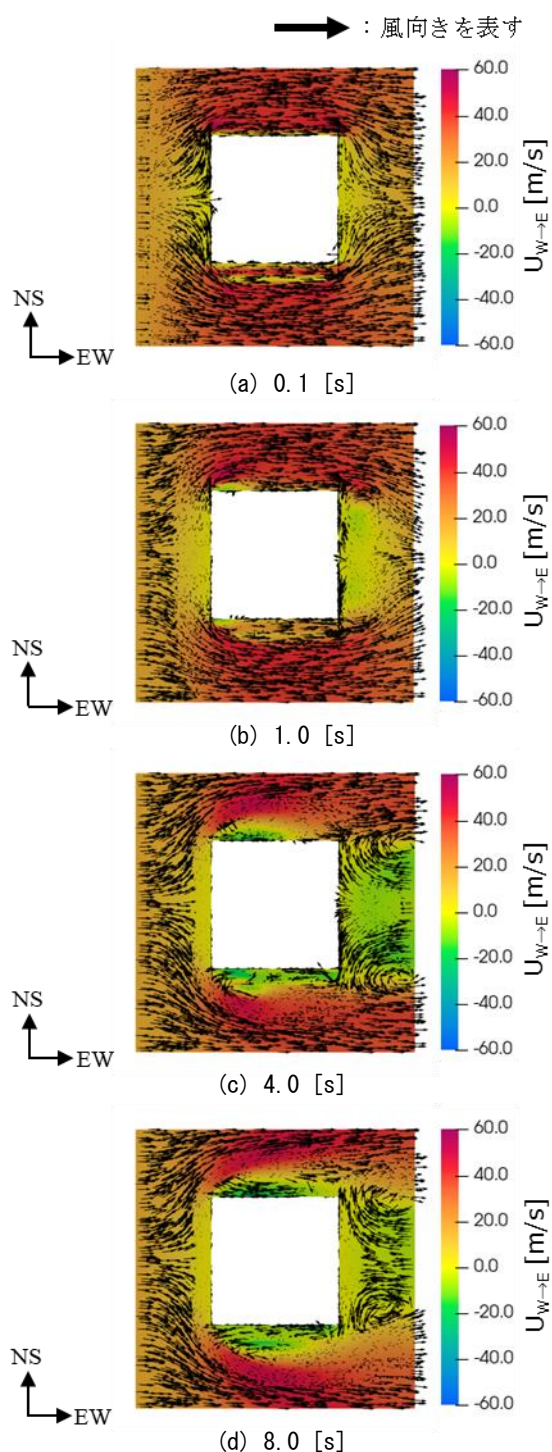


図-7 各時刻における風速分布
(EW 方向, 高さ 850 [mm])

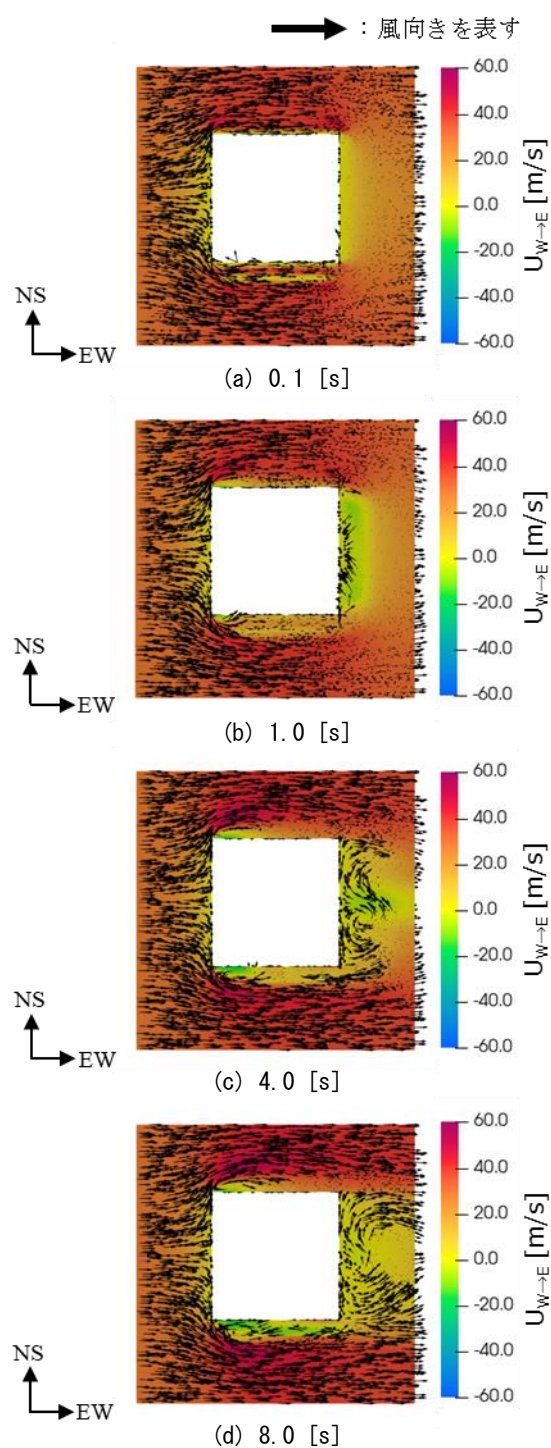


図-8 各時刻における風速分布
(EW 方向, 高さ 7,650 [mm])

b) 構造解析条件

流体解析から得られた流体節点*i*における圧力 p_i を基に、構造節点*j*に作用する風荷重 F_j を算出し、風荷重の時刻歴波形を作成する。構造節点*j*に作用する風荷重 F_j は、次式を用いて算出する。

$$F_j = \int_{A_i} p \, dA \approx p_1 A_1 + \dots + p_{n_i} A_{n_i} = \frac{A_j}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} p_i \quad (5)$$

ここで、 A_j 、 n_j はそれぞれ構造節点*j*の作用面積、 A_j 内に存在する流体節点*i*の総数である。時間増分を 0.001 [s]とし、8 [s]の解析を実施する。

(3) 解析結果

a) 流体解析結果

図-6の切断面における風速分布を図-7および図-8に示す。図-7および図-8から、解析開始直後、剥離流が形成される前に枠組足場と建物の間に風が流入しているのが確認できる。その後、建物および足場の風上側から剥離流が形成され、時間とともに風下側へ広がる。上層よりも中層以下の方が剥離流は顕著であり、剥離領域が広がっている。シートの表面側および裏面側の気圧分布を図-9および図-10に示す。図-9から、シート表面側の気圧は、時間

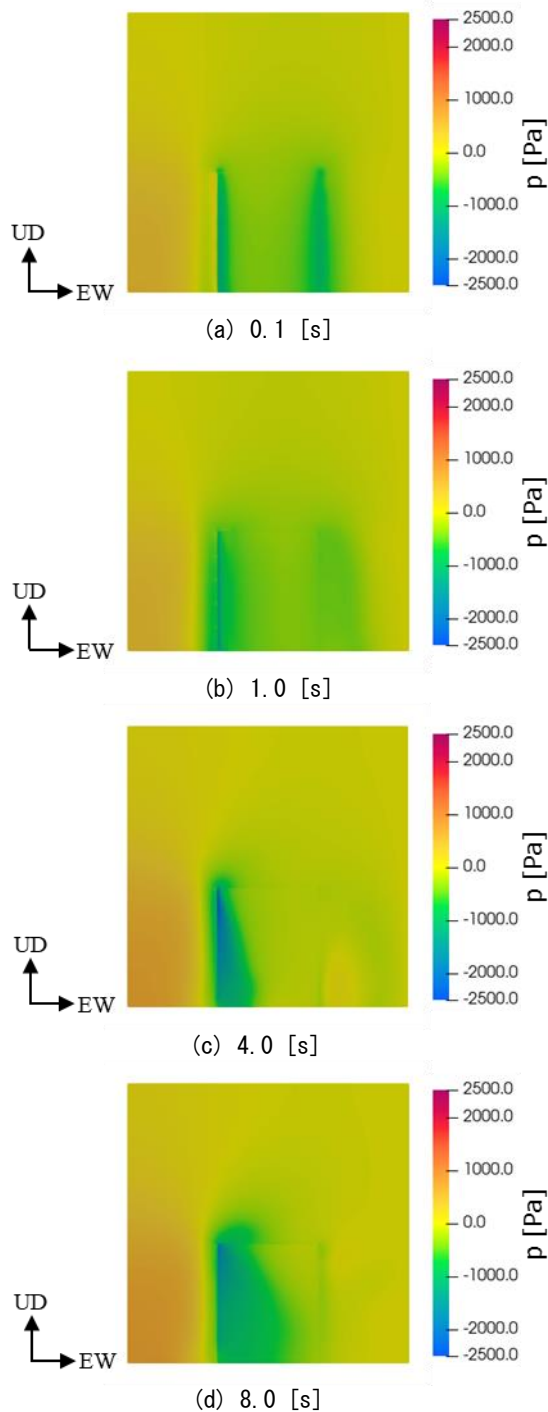


図-9 各時刻における圧力分布（シート表面側）

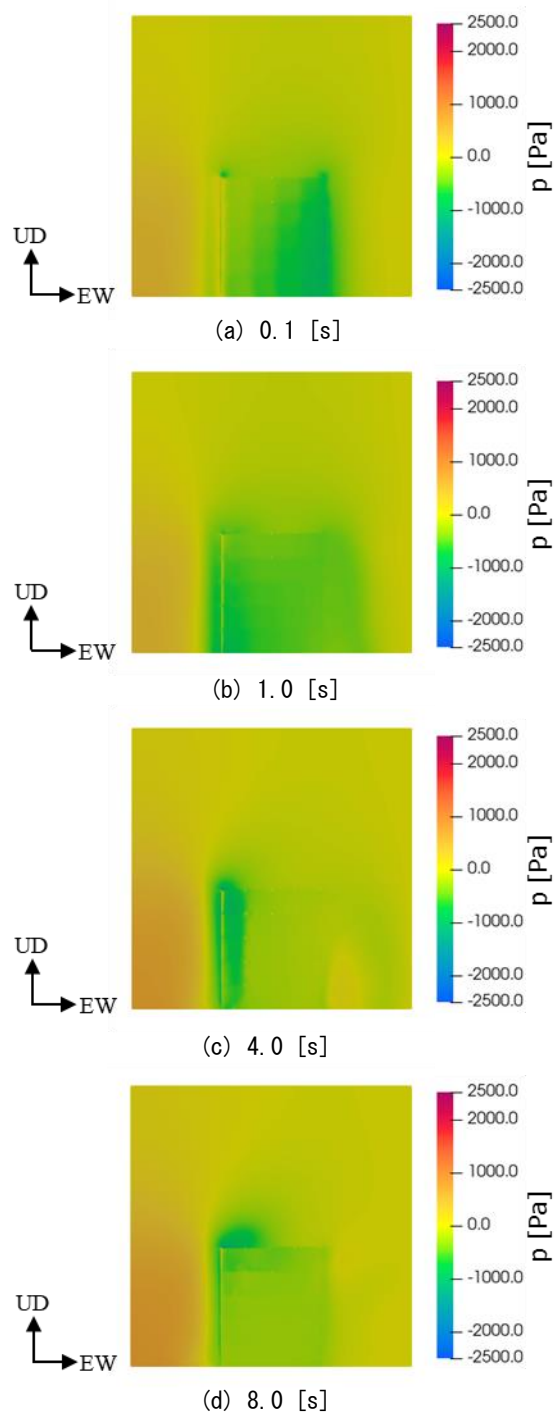


図-10 各時刻における圧力分布（シート裏面側）

とともに風上から風下へ負圧となっていくことが分かる。上層よりも中層以下の方が負圧の広がる範囲が大きい、これは中層以下の方は剥離領域が広いからだと考えられる。一方、図-10から、シート裏面側の気圧は解析開始直後に風上側で渦が発生することで負圧となるが、時間とともに渦が消滅し、次第に落ち着いていくことが分かる。

b) 構造解析結果

風荷重の時刻歴波形を図-11に示す。構造解析の可視化結果、壁つなぎに作用する軸力の時刻歴波形、枠組足場最上部におけるNS方向変位をそれぞれ図-12～図-14に示す。2.0 [s]以降から風上側の1～3層に取り付けてある壁つなぎの軸力が特に大きくなり、3.5 [s]付近で1→2→3→4→5

層の順で連鎖的に壁つなぎが引き抜かれた。これは、枠組足場の中層以下の方が剥離領域が広く、枠組足場が建物から引き剥がされる方向に風荷重が大きくなったからである。その後、5.0 [s]付近で風下側の壁つなぎも引き抜かれ、枠組足場が倒壊に至り、非常に危険な状態となった。このように剥離流の影響を大きく受けると想定される場合、足場の中層以下から壁つなぎが引き抜かれる可能性が考えられる。本研究で解析対象とした5層4スパンの枠組足場においては、3層以下の中低層部を補強するのが効果的である。

(4) 安全技術指針との比較

安全技術指針から算出される風荷重の時刻歴波形、壁

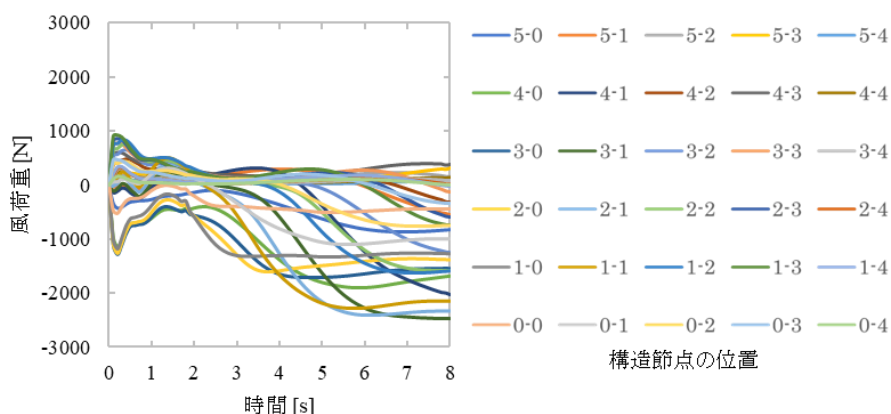


図-11 風荷重の時刻歴波形（流体解析結果）

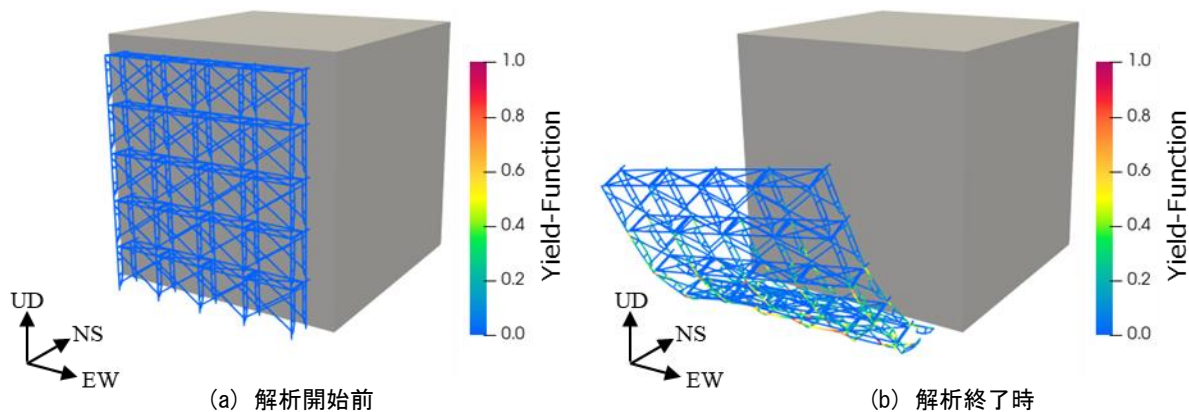


図-12 可視化結果

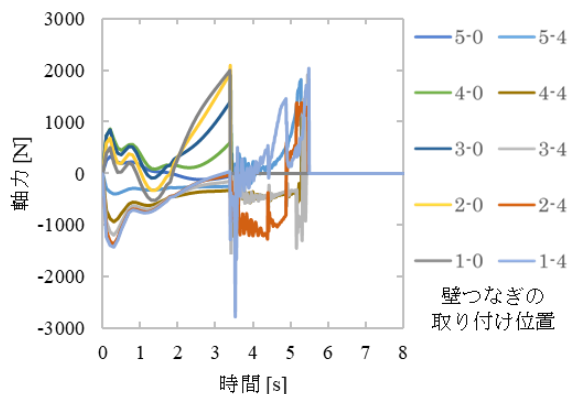


図-13 壁つなぎに作用する軸力（流体解析結果）

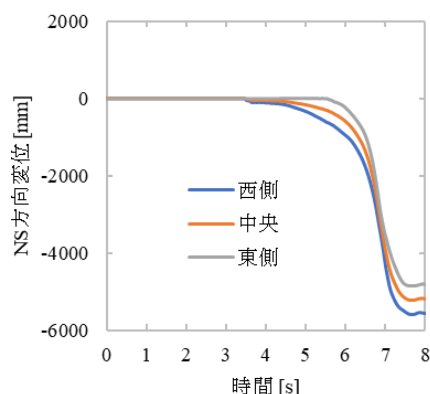


図-14 枠組足場最上部のNS方向変位（流体解析結果）

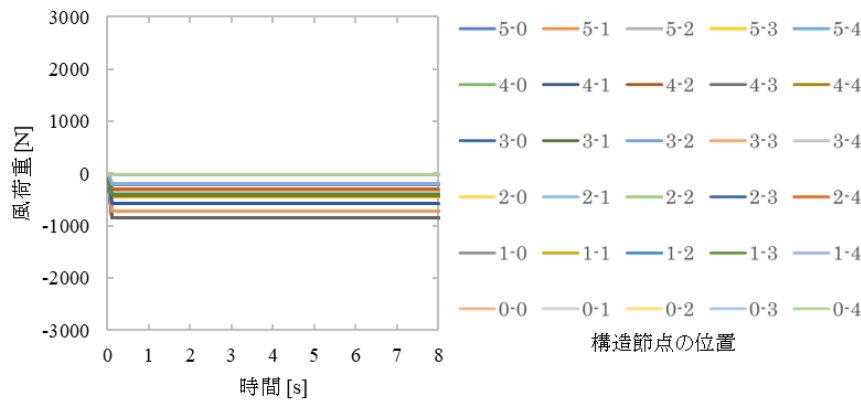


図-15 風荷重の時刻歴波形（安全技術指針）

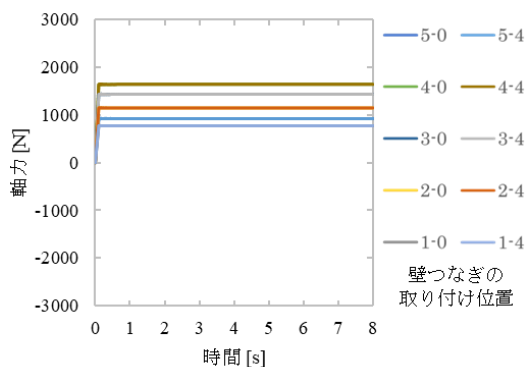


図-16 壁つなぎに作用する軸力（安全技術指針）

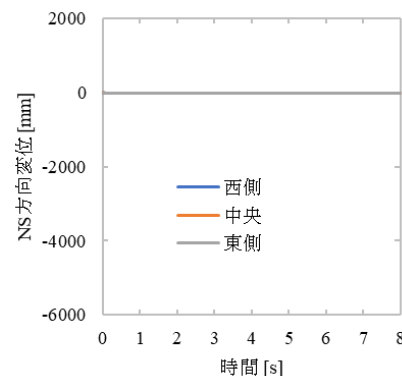


図-17 枠組足場最上部の NS 方向変位（安全技術指針）

つなぎに作用する軸力および枠組足場最上部の NS 方向変位をそれぞれ図-15～図-17 に示す。流体解析結果と安全技術指針で風荷重が大きく異なっていた。流体解析結果では、剥離流の形成や枠組足場と建物間で生じる瞬間的な流れによって非常に複雑な風荷重となる。一方、安全技術指針では、そのような複雑な流れに対しては全く考慮されておらず、壁つなぎが引き抜かれるほどの風荷重は生じなかった。このように、安全技術指針は、風の吹き始めのような流れが急激に変化する場合や剥離流が形成されることによって気圧分布が時々刻々と変化する現象には対応できない。

4. 結論

本研究では、建物の一面に5層4スパンの枠組足場が設置されている場合を想定し、枠組足場および建物の側面側から流入した場合において、流体解析ソフトである OpenFoam を用いて流体解析を実施し、枠組足場のシート部分に作用する風荷重を算出した。また、得られた風荷重を外力とし、ASI-Gauss法を用いて構造解析を実施し、強風が吹いた際の枠組足場の挙動を調査した。

流体解析結果から、枠組足場の風上側から剥離流が形成され、時間とともに風下側へ拡大し、枠組足場が建物から引き剥がされる方向に風荷重が作用することが確認できた。

流体解析結果から得られた風荷重を外力とし、構造解析を実施したところ、風上側の壁つなぎから引き抜かれ、

枠組足場が倒壊した。1～3層に取り付けている壁つなぎが特に大きくなっており、剥離流の影響を受けると考えられる足場に対しては、中低層部を重点的に補強するのが効果的であることが示唆された。

流体解析結果と安全技術指針、それぞれから風荷重を算出した際の解析結果を比較すると、両者の傾向は大きく異なっていた。流体解析結果から算出される風荷重は、剥離流や循環流で複雑な風荷重となっているが、安全技術指針ではそれらが考慮されていない。安全技術指針では安全であっても、複雑な流れの影響で生じる風荷重によって足場の倒壊につながる可能性があることが、流体解析を行うことで明らかとなった。

参考文献

- [1] 東京新聞：線路脇足場崩落の東横線、電車そろりと運転再開 17 万人に影響、2021 年 3 月 3 日、<https://www.tokyo-np.co.jp/article/89171>
- [2] 仮設工業会：改訂風荷重に対する足場の安全技術指針、2019。
- [3] OpenFOAM：<https://openfoam.org/>
- [4] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで、丸善出版、2020。
- [5] 労働安全衛生規則、第 2 編、第 10 章、第 570 条、鋼管足場。
- [6] 高梨成次、大嶋勝利、高橋弘樹：ALC パネルにおける足場用壁つなぎ材アンカーの強度に関する研究、労働安全衛生研究、第 2 巻、第 2 号、pp85-90、2009。
- [7] JISA8951：鋼管足場、2016。

11:15 ~ 11:30 (2023年5月31日(水) 10:45 ~ 11:45 会場G)

[G-02-03] 抵抗スポット溶接における3次元接触変形・電流・熱伝導3連成現象の重要性

*二保 知也¹、今栖 那菜¹、三小田 裕美¹、岩切 三奈¹ (1. 九州工業大学)

流体上に作られる模様のシミュレーションと その機械学習による生成手順の推定

Simulation of Graphical Patterns Created on Fluids and Estimation of Their Generation Procedure by
Using Machine Learning

中田希¹⁾, 山田知典²⁾

Nozomi Nakata and Tomonori Yamada

1) 学 (工学) 東京大学工学部システム創成学科 学生

(〒113-0086 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: nakata-nozomi390@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

2) 博 (工学) 東京大学大学院工学系研究科 准教授

(〒113-0086 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: tyamada@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Beautiful patterns created on fluids, such as marbling patterns and latte art, have attracted people's attention. In recent years, attempts have been made to reproduce such fluid patterns in the field of computer graphics. In this study, we not only reproduce fluid patterns but also estimate their generation procedure by using machine learning. Specifically, we perform a large number of simulations of two linear free-pores latte art and estimate the start and end positions of the free-pores by machine learning based on the results of the simulations.

Key Words : Machine Learning, Inverse Analysis, Simulation of Fluids, Transfer Learning, Computer Graphics

1. はじめに

流体シミュレーションは工業製品の流体抵抗などを解析・評価するために長らく利用されており、現代においてはさらに飛沫シミュレーションやコンピューターグラフィックスなどの多種多様な分野で応用されている。さらに、機械学習といった最新の計算技術の発展によって、サロゲートモデルの生成だけでなく、逆問題解析も現実的なものとなり、多様なモデルに対して研究が進められている。

一方、主に画像処理分野で成果を上げている畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network, CNN)は近年盛んに流体シミュレーションにも適用されている。本研究では、流体シミュレーションの逆問題解析において学習済 CNN による転移学習の適用可能性を検討する。具体的にはマーブル模様やラテアートなどの流体模様を対象として、様々な入力に対して生成される模様を学習し、生成手順を推定することを目指す。

2. 利用した既存技術

(1) Stamによる流体シミュレーション法

本研究では学習データの生成のため、Stam(2003)^[1]によって提案された演算子分割法を用いたシミュレーション手法を用いた。リアルタイムに操作可能な GUI 付の実装が Stam によって公開されており、これを Python3 で再実装し、さらに CUI ベースの並列計算によって高速にデータ生成が可能のように改変を行った。

(2) CNN

人間の視覚野の機能に着想を得た CNN^[2]は、プーリング層と畳み込み層の 2 種類のレイヤーから構成される。CNN は画像処理タスクに顕著な実績を残す機械学習モデ

ルであり、画像全体に一定の処理をほどこす畳み込み層と、画像の解像度を落とすプーリング層の 2 種類のレイヤーからなる。

(3) 転移学習

転移学習とは、あるタスクに対して学習されたネットワークの構成や重みを他のネットワークに転用する技術である^[3]。CNN については 1400 万枚以上の画像から成る巨大なデータセット ImageNet^[4] で学習・評価されたものが多数存在しており、転移学習への適用が行いやすい状態にある。

ニューラルネットワーク内部の重みは特徴抽出ベクトルとして機能していることが指摘されており、本研究ではこうした Network-based 転移学習の逆問題解析における効力を検証する。

3. 機械学習モデル

(1) 入出力次元

順解析では2本の直線的なフリーボアを模擬するため、2次元で2本の直線の始点と終点の位置を決め、シミュレーションを実行することにより、32×32ピクセルの2次元空間画像が得られる。これの逆問題解析を行う手順は以下となる。

- 32×32 ピクセルの 2 次元空間上で、ランダムな 4 点を選択する。これを p_1, p_2, p_3, p_4 とする。
- p_1 と p_2 , p_3 と p_4 を結ぶ 2 本の直線(ストローク)上において、1 秒毎に長さ 1 だけ密度源を移動させながらその方向に外力を付加する。
- 移動が終了した時点での密度分布を図 1 のように

出力し、これを機械学習モデルの入力データとする。

逆問題解析では多数のシミュレーション結果画像 ($32 \times 32 = 1024$ 次元ベクトル) から4点の座標 (8次元ベクトル) を推定する回帰問題となる。図1にデータ生成の概念図を示す。

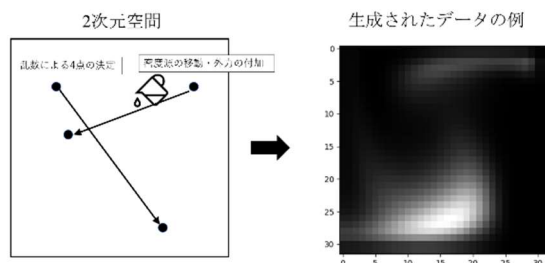


図1 データ生成手法

(2) 転移学習

本研究では、Google が 2019 年に発表した CNN モデルである EfficientNet^[5]による転移学習を行った。EfficientNet は想定される入力画像の解像度に応じて EfficientNet-B0 から EfficientNet-B7 までの 8 種類のネットワークが公開されているが、ここでは B0, B1, B2 の 3 種類のネットワークを使用した。また、ImageNet による学習済み重みの更新の有無についても検証を行った。

4. 数値実験と考察

転移学習では一般的に事前学習済みの重みを固定するが、それでは十分な精度が得られなかったため、本研究では重みを更新しながら学習を進めることとした。図2に転移学習を行わない EfficientNet-B0 の結果を、図3に転移学習を行った同じく EfficientNet-B0 の結果を示す。両社とも未学習データに対する損失は同程度によく落ちており、CNN が逆問題解析へ適用可能であることが確認できた。一方、転移学習あり／なしでは得られた精度に違いはないものの収束過程に大きな差がみられた。最適化手法として SGD を使用したため、収束曲線のぶれが大きい。転移学習ありの方が比較的少ないエポック数で収束していることが観察できた。

なお、CNN の規模(EfficientNet-B0, B1, B2)による比較は大きな差を生まなかった。これは小さなシミュレーション結果画像であったため、B0 で十分であったことを示唆している。

5. 結論と今後の展望

CNN は、画像を入力とした逆解析において、通常のディープニューラルネットワークでは過学習に陥ってしまうようなタスクであってもある程度の精度で学習を行うことができることが分かった。

今後の課題として、PINNs(Physics Informed Neural Network)^[6]との融合や、パラメータ推定などの既存研究が多数なされている分野での学習済み CNN モデルの転移学習による評価があげられる。

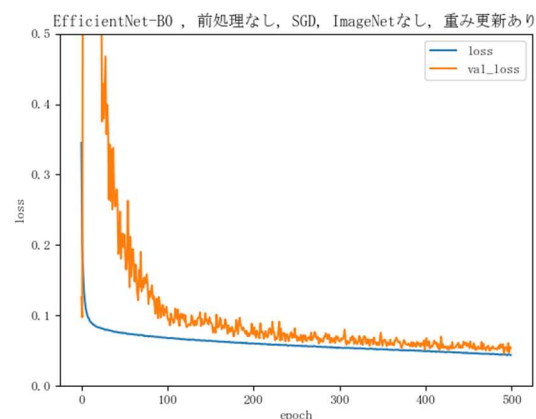


図2 転移学習なし

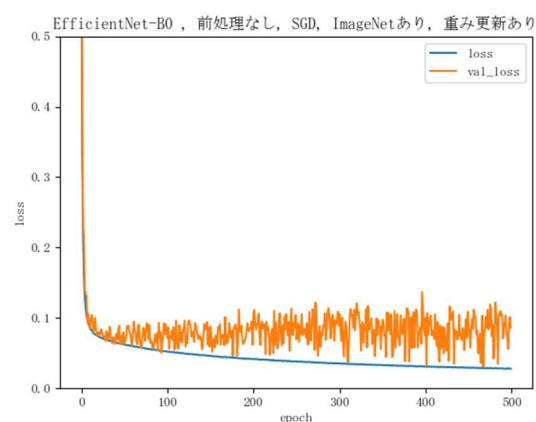


図3 転移学習あり

参考文献

- [1] Stam, J. (2003). Real-time fluid dynamics for games. In Proceedings of the game developer conference, 18, p. 25.
- [2] LeCun, Y., Boser, B., Denker, J., Henderson, D., Howard, R., Hubbard, W., & Jackel, L. (1989). Handwritten digit recognition with a back-propagation network. Advances in neural information processing systems, 2.
- [3] Tan, C., Sun, F., Kong, T., Zhang, W., Yang, C., & Liu, C. (2018). A Survey on Deep Transfer Learning. arXiv preprint arXiv:1808.01974.
- [4] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In 2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 248-255. IEEE.
- [5] Tan, M., & Le, Q. (2019). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In International conference on machine learning, pp. 6105-6114, PMLR.
- [6] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, 378, pp. 686–707.