発 行 所　日本機械学会 計算力学部門
お問合せ　wwwadmin@jsme.or.jp

ISSN 1340-6582

日本機械学会 計算力学部門

CMD Newsletter

COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニュースレター　No. 68　　December, 2022

目 次

■ 特集：工学分野におけるデジタルツイン（現実空間と仮想空間の架け橋）

・「特集にあたって」　工学分野におけるデジタルツイン（現実空間と仮想空間の架け橋）
…… 長岡技術科学大学 …… 倉橋 貴彦 …… 2

・逆問題工学における産学連携 …… 東京工業大学 …… 天谷 賢治 …… 3

・打撃応答データを用いた構造内の欠陥形態を予測する「非破壊検査用」逆解析シミュレーション
…… 長岡技術科学大学 …… 倉橋 貴彦 …… 8

・高解像度解析結果のデータ同化による低解像度解析の高精度化
…… モルゲンロット株式会社… 中村 昌道 …… 13
東北大学 …… 小澤 雄太
東北大学 …… 野々村 拓

・デジタルツインとデータ同化 …… 産業技術総合研究所 …… 三坂 孝志 …… 17
京都大学、DoerResearch 株式会社 …… 菊地 亮太

・流体工学におけるデジタルツイン …… 東北大学 …… 焼野 藍子 …… 19

■ 部門からのお知らせ

・2022 年度年次大会の開催報告 …… 福井大学 …… 桑水流 理…… 24

※目次の表題をクリックすると、本文が表示されます。

特集：工学分野におけるデジタルツイン(現実空間と仮想空間の架け橋)

「特集にあたって」工学分野におけるデジタルツイン（現実空間と仮想空間の架け橋）

倉橋　貴彦
長岡技術科学大学 技学研究院 機械系

近年，現実空間の情報が自由に収集できるようになり，様々な情報をもとに現実空間を仮想空間（コンピュータ上）に再現する技術として，「デジタルツイン」という言葉を最近良く耳にします．デジタルツインという言葉は，「現実世界のものを，まるで双子であるかのようにコンピュータ上において再現する技術」という意味で使用されています．IoT技術の進展により，計測・観測データなどの数値情報は従来に比べて手軽に閲覧できる時代になり，観測データをシミュレーションに利用する手法も最近では注目を集めています．その一つとして「データ同化」という手法があり，観測データを数値シミュレーションに含めて，観測データによりシミュレーション結果を補正する方法として知られています．代表的な手法としては「カルマンフィルタ(1), (2)」が知られていますが，この手法は1960年代初めに提案されたものであり，新しいものではなく歴史ある計算法でもあります．ここ最近の世の中の状況（デジタル化等の流れ）に応じて，再度注目を集めているようにも思われ，近年，データ同化や実測定値を用いた研究に関する論文(3)-(6)やデータ同化に関連した図書(7)-(9)が数多く公開されているようにも感じています．カルマンフィルタは「確率論的な計算手法」として定式化されますが，直接微分法や随伴変数法といった「確定論的な計算手法」もあります．確定論的な計算手法では，観測点における観測値（あるいは設計目標値）とシミュレーション結果の差の二乗値により構成される評価関数を定義し，制約条件である支配方程式のもと，評価関数が小さくなる（観測値とシミュレーション結果が近くなる）ように未知パラメータを同定（あるいは推定）する解析が行われます．近年の随伴変数法を用いた解析例としては，流体-構造連成問題を対象とした最適設計解析(10)，また温度場と流れ場の連成問題を対象とした最適設計解析(11)や，流れ場の時間変動部分を制御するための形状最適化解析(12)が挙げられます．コンピュータ上で物理現象を再現し設計するという観点からは，これらもデジタルツインの研究の一例と言うことができます．上記に示した確率論，また確定論的な手法を用いる問題は総じて「逆問題」と呼ばれ，カルマンフィルタの例に取りますと歴史も半世紀以上のものでもありますが，通常のシミュレーションで対象とする問題（順問題）を対象とした研究に比べますと，現状ではマイナーな研究領域とも思います．しかし，ここ数年の学会に参加をしていましても，IoT技術の進展やデジタル化の流れとともに，観測値等の測定データを使用した逆問題の研究事例も少しずつ増えてきていると個人的には感じています．

私も含め，研究領域の近い研究者の方々と，数年前より日本機械学会の計算力学講演会において「逆問題とデータ同化の最新展開」というセッションを立ち上げてます．当セッションでは，シミュレーションモデルを構築し，実物モデルへ適用する研究や，実測値をシミュレーションに取り入れた逆解析，最近では機械学習を用いた事例等，様々な内容についてご報告頂いております．興味がある方がいましたら，是非ご参加頂けたらと思います．本特集では，近年のデジタル化の流れも受けて，現実空間と仮想空間（コンピュータ上の空間）を如何に結ぶかということをテーマに，「デジタルツイン」に関して特集をさせていただきます．

最後に，今回の特集におきまして，ご執筆頂きました研究者の方，また各先生方におかれましては，ご協力頂きまして大変ありがとうございました．また，日本機械学会　計算力学部門の運営委員のご関係皆様に対しましても，ここに謝意を表します．

参考文献

(1) R. E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, Transactions of the ASME - Journal of Basic of Engineering, Vol. 82, No. 1, pp.35-45, 1960.
(2) R. E. Kalman and R.S. Bucy, New results in linear filtering and prediction theory, Transactions of the ASME - Journal of Basic of Engineering, Vol. 83, No. 83, No. 1, pp.95-108, 1961.
(3) T.Kurahashi, K.Ikarashi, T.Kenchi and T.Eto, Data assimilation of water elevation in shallow water flow based on the extended Kalman filter FEM using measurement data from image analysis, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.103-111, 2022.
(4) S.Takahashi, T.Misaka, S.Nara, N.Sugiyama, T.Nohara, Y.Kuramoto, Y.Kawamoto, A.Obara, R.Osada, A.Kikuchi, M.Ochiai, K.Osumi and N.Ishikawa, Augmentation of Cross-Sectional Spray Measurements with Discrete Droplet Model Using Ensemble Kalman Filter, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.125-137, 2022.
(5) T.Misaka, T.Nakazawa, S.Obayashi, S.Kubo, N.Asaumi and T.Ideta, Bayesian Uncertainty Reduction of Generalised k-ω Turbulence Model for Prediction of Film-Cooling Effectiveness, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.152-166, 2022.
(6) M.Nakamura, Y.Ozawa and T.Nonomura, Low-Grid-Resolution-RANS-Based Data Assimilation of Time-Averaged Separated Flow Obtained by LES, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.167-185, 2022.
(7) 樋口知之，上野玄太，中野慎也，中村和幸，吉田亮，データ同化入門，朝倉書店，2011.
(8) 片山徹，非線形カルマンフィルタ，朝倉書店，2011.
(9) 大林茂，三坂孝志，加藤博司，菊地亮太，データ同化流体科学―流動現象のデジタルツイン―，共立出版，2021.
(10) E.Katamine, R.Kawai and Y.Yoshida, Shape Optimisation of Fluid-Structure Interactive Field Considering Geometrically Nonlinear Structure, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.138-151, 2022.
(11) K.Wada and T.Kurahashi, Shape Optimisation of a Heat Source in a Thermal Convection Field Considering Perimeter Constraint Condition, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.92-102, 2022.
(12) T.Nakazawa, T.Misaka and Y.Hasegawa, Optimal Design for Suppressing Time Fluctuation Part of Two-Dimensional Jet in Crossflow, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.36, pp.112-124, 2022.

逆問題工学における産学連携

天谷　賢治
東京工業大学

逆問題, ディスクブレーキ, 圧力分布, 海洋構造物, 腐食防食モニタリング, カメラモジュール, 収差解析

1. はじめに

特集「工学分野におけるデジタルツイン（現実空間と仮想空間の架け橋）」という話題で本原稿をまとめる機会をいただき大変ありがたく感じます. デジタルツイン技術, サイバーフィジカルシステムの成功例として我々が毎日お世話になっている天気予報があげられます. 天気予報に欠かせないのはもちろん現実世界における観測です. 世界中に散らばる測候所, 気象衛星, 船舶や飛行機, ラジオゾンデからの観測情報です. 最近は個人の持つスマートフォンからの情報も活用しているそうです. 一方でスーパーコンピュータおよび数値シミュレーション技術などの近年の目覚ましい発達のもと, これらの仮想空間の技術も天気予報で活躍していることはみなさんの知るところです.

サイバーフィジカルシステムでは仮想空間と現実空間をつなげるベイズ推定やカルマンフィルタに代表される確率統計や制御工学の技術も重要な役割を担っています. さらにそれらの技術を社会実装するためには多くの技術者の協力が必要です.

私は縁あって逆問題工学の研究をさせていただいています. 逆問題工学はニーズ駆動型の学問といわれます. どのような分野においても現場において直接観測できない未知情報が存在します. その未知情報を間接的な観測量から数理モデルを利用して同定し, 可視化する技術が逆解析です. 逆問題工学の発展には多くの分野の方々の協力が不可欠です. これまでも, 自動車, 海洋設備, ソフトウエアなど様々な分野の企業のエンジニアや大学の研究者など, 多くの方々に教えていただきながら研究を進めてきてきました.

本稿では逆問題工学の産学連携の適用例として「自動車ブレーキの圧力分布の可視化技術」「海洋構造物の防食モニタリング技術」「カメラモジュールの検査システム」の3つの技術を紹介させていただきます.

2. 自動車ブレーキの圧力分布の可視化技術[1][2]

自動車用ディスクブレーキ開発において制動中のブレーキパッド － ロータ間の接触面圧分布は重要な情報となっている. 制動中のブレーキパッドとロータの接触面にはすべり摩擦が発生しているため, 接触面圧分布の測定に感圧紙や触覚センサを適用することは困難である.

本研究では制動中のブレーキパッド － ロータの接触面圧分布を精度良く測定する手法を提案する. 接触面圧により生じるロータの厚さ方向の変形量をロータ内に組み込んだセンサで測定し, 逆解析を用いて間接的にブレーキパッドの接触面圧分布を同定する.

逆解析による接触面圧分布同定手法

本手法ではまず, ロータに埋め込んだセンサを用いて, ブレーキパッドの接触面圧に伴うロータの厚さ方向の変形を測定する. 次に, 校正実験により測定された応答関数から観測方程式を構築し, Tikhonovの正則化を用いて適切化を行い未知の接触面圧分布を同定する.

ロータ微小変形の測定

想定されるロータの厚さ方向の変形は微小であるため, Fig.1に示す小型の変位拡大機構を開発しロータ変形量の測定感度の向上を図る. この機構はカニや昆虫などの外骨格生物みられる触覚器官から発想した[3]. 変位拡大機構にはコンプライアントメカニズムを利用した2段のテコを使用する. 変形の検出は2段目のテコの先に貼り付けたひずみゲージにより行う. この変位拡大機構を用いることでロータの微小変形を約10倍に拡大してひずみゲージに伝達することができ, 感度の高い測定が可能となる.

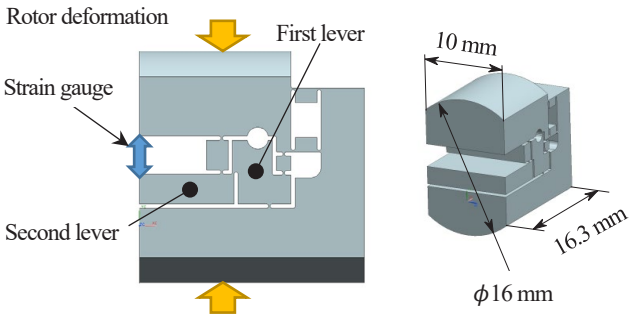


Fig. 1 変位拡大機構の概略図

測定の際にはFig.2に示すようにブレーキディスクの径方向にセンサを５個均等に配置する. なお, 各センサには最内周から最外周に向けて1番～ j番と順番に識別番号を付ける. 各センサはロータのベンチレーション穴に挿入され, ロータのz方向の微小変形を測定する. 制動中のロータはFig.2中のθ方向に回転しているため, ５個のセンサは各円周上をスキャンしながらロー

タの変形を測定することができる．従って，各センサの出力はFig.2に示すように周方向でn個に離散化して測定される．

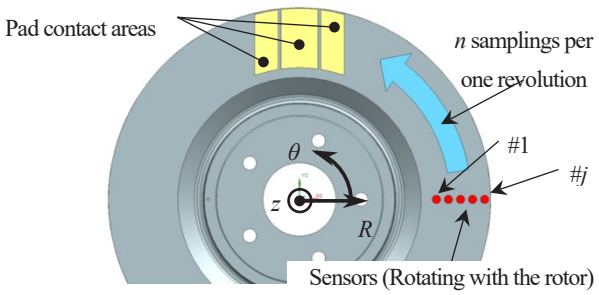


Fig. 2　ディスクブレーキの圧力分布同定領域とセンサー位置

想定されるロータの微小な変形量は弾性域内であるため，線形モデルで観測方程式を構築することができる．離散化されたロータの変形量を式（2）に示す観測量ベクトル$\boldsymbol{y}$，観測行列を$\boldsymbol{H}$とすると，観測方程式は式（3）のようになる．

$$\boldsymbol{y} = [y_1, \cdots, y_n]^T \tag{2}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

本問題では荷重位置から離れた箇所の変形を測定するため悪条件となる．そこで，Tikhonovの正則化を用いて解の安定化を図る．すなわちTikhonov汎関数は式（4）のように設定する．Tikhonov汎関数の最小解は式（5）のようになる．$\boldsymbol{\alpha}$は正則化パラメータを示し，$\boldsymbol{I}$は単位行列を示す．

$$\boldsymbol{J} = |\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}|^2 + \alpha|\boldsymbol{x}|^2 \tag{4}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \arg\min_{x} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}) = (\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{H} + \alpha\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{y} \tag{5}$$

実証実験

本手法の有効性を検証するために実証実験を実施した．実験の様子をFig.3に示す．

Fig. 3実証実験の様子

ブレーキパッドを用いて制動した際の各センサ出力の測定結果をFig. 4に示す．

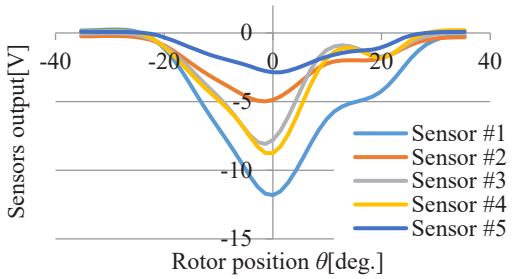


Fig. 4 変形センサの出力値

ブレーキパッドの接触面圧分布同定結をFig.5に示す．

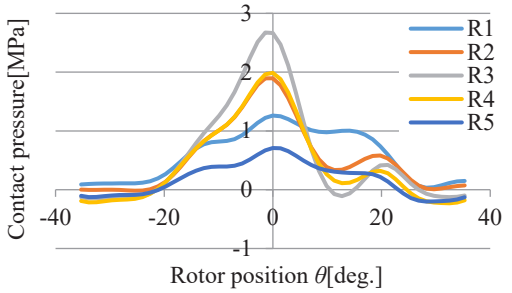


Fig. 5　同定した圧力分布

Fig.5に示す接触面圧分布を2次元カラーマップに可視化した結果をFig.6に示す．　本来は直接測定できないディスクブレーキの圧力分布を可視化できていることがわかる．

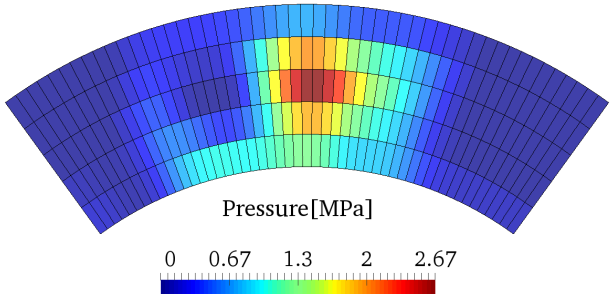


Fig. 6　同定した圧力分布

以上紹介した技術は，自動車用ブレーキの開発を効果的に行う上で非常に有用な情報を提供する手法であると期待されている．

3．ベイズ推定による海洋構造物の防食モニタリング[4][5]

海洋鋼構造物の骨組みとなる鋼材に対して腐食を防止するために犠牲陽極による電気防食が一般的に適用されている．犠牲陽極はその性質上時間とともに消耗するので発生電流量の測定による犠牲陽極の寿命評価が必要となる．現在の検査方法として，構造物近傍の電位測定による防食状態の簡易検査と，ダイバーによる犠牲陽極の詳細検査が行われている．しかし，判定結果の信頼性や定量性，さらに大型鋼構造物においては，時間や労力のコストが問題となる．

ここでは海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法として，構造物近傍の電位から，数値解析を用いて犠牲陽極の電流量を推定する逆解析手法について説明し，Fig.7の大井埠頭桟橋の犠牲陽極のモニタリングに適用した例を紹介する．

Fig.7 大井埠頭桟橋の電位測定現場

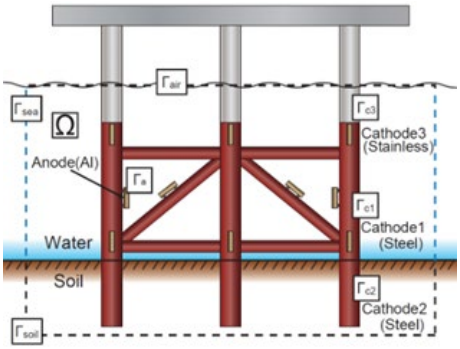


Fig.8 モニタリング対象のモデル化

数値シミュレーションモデルの概要

本手法では海洋構造物近傍において犠牲陽極から流出する電流により形成される静電場を数値シミュレーションにより定量化する. 海洋構造物のモデルをFig.8に示す. 静電場の解析領域として, 構造物周辺の海水および海底土で満たされた領域Ωを考える. 領域の境界は, 犠牲陽極表面のアノードとなる境界Γ_a, 骨組の鋼材で, カソードとなる境界Γ_{c1}, Γ_{c2}(それぞれ海中, 土中の鋼材を表す), 海面付近の耐海水性ステンレス鋼でカソードとなる境界Γ_{c3}, 海水を仮想的に分割した海中領域の鉛直面境界(以下, 海中壁) Γ_{sea}, 海中領域の上部の境界Γ_{air}, そして海底土を仮想的に分割した土中領域の境界Γ_{soil}で囲まれる.

領域内の電位をϕ, 電気伝導度をκとし, 各境界上の電位をϕ_a, ϕ_{c1}のように, ϕの下付き文字で表す. またそれぞれの境界の表面の電流密度をiとする. 海中と土中の電気伝導度が不均一であることを考慮すると, 領域内の電位ϕは支配方程式として式(6)を満足する.

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \Phi) = 0 \qquad (6)$$

ここで境界条件をそれぞれ次式で与える.

$$\begin{aligned}
i_a &= \kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = i\,(I_{\text{anode}}) && (\text{on } \Gamma_a \text{ (Sacrificial Anode)}) \\
\phi_{c1} &= -R i_{c1} + \phi_{\text{offset}} && (\text{on } \Gamma_{c1} \text{ (Steel Leg in the Sea)}) \\
i_{c2} &= i\,(I_{\text{steel-soil}}) && (\text{on } \Gamma_{c2} \text{ (Steel Leg in the Soil)}) \\
i_{c3} &= i\,(I_{\text{stainless}}) && (\text{on } \Gamma_{c3} \text{ (Stainless Lining)}) \\
i_{\text{sea}} &= i\,(I_{\text{sea}}) && (\text{on } \Gamma_{\text{sea}} \text{ (Sea Wall)}) \\
i_{\text{air}} &= 0 && (\text{on } \Gamma_{\text{air}} \text{ (Sea Surface)}) \\
i_{\text{soil}} &= 0 && (\text{on } \Gamma_{\text{soil}} \text{ (Soil Wall)})
\end{aligned}$$

ここでRは分極曲線の傾きである. ϕ_{offset}は鋼材の自然電位である. Rの事前分布は, 鋼材試験片を用いた実験により得た分極曲線を, 測定データの電位域で線形近似して取得した. また, ϕ_{offset}は領域内の電位のオフセット値を表しており, 各境界からの電流量と同じ未知パラメータとして扱う. なお, Γ_{air}, Γ_{soil}は絶縁境界として扱う.

実現象を数値シミュレーションでモデル化する場合には多くのパラメータが未知となる. ここではI_{anode}, $I_{steel\text{-}soil}$, $I_{stainless}$, I_{sea}, R, ϕ_{offset} が未知パラメータとなる.

以上の静電場の境界値問題をFEMにより解く. 有限要素法モデルをFig.9およびFig.10に示す. 解析領域としては, 電位測定点を中心に周囲のレグが6本, 犠牲陽極が59個含まれる領域のモデルを作成した.

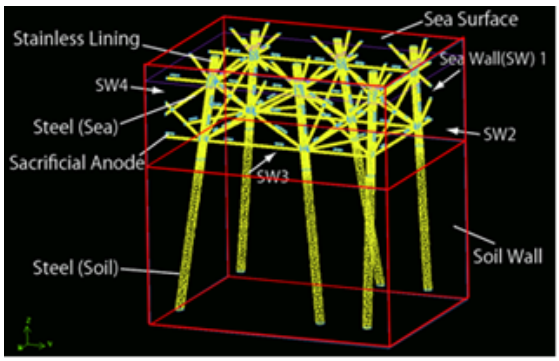


Fig.9 海洋構造物近傍の電場解析 FEM モデル

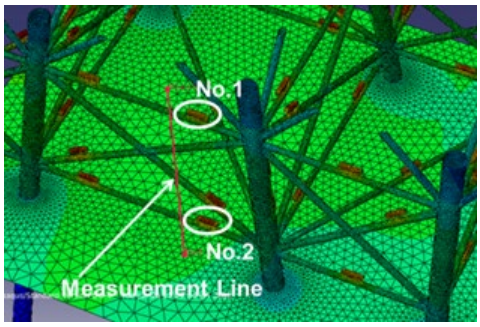


Fig.10 電位計測位置と有限要素メッシュ

実構造物の観測の概要

検証実験を行った大井埠頭は, 大型コンテナ船が接岸する港の外縁部分であり, 一部の犠牲陽極に電流計測装置が取り付けられている. 桟橋近傍の推進方向の電位分布を測定した.本構造物2002年に運用が開始され, 現在は犠牲陽極からの電流量も安定している.

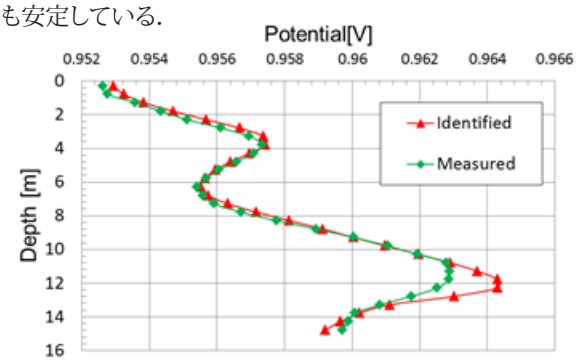


Fig.11 電位分布の測定値および計算値

電位測定では，海側のレグ近傍の水深方向の電位分布をFig.10の位置で測定した．計3箇所で同様の測定を行い，さらにステンレス鋼直近の電位も1点測定した．海中の電気伝導度は3.56[S/m]で，ほぼ一定であった．測定した深さ方向の電位分布の一例をFig.11に示す．

逆問題解析

測定点における，誤差を含んだ測定値を$\boldsymbol{\phi}'$とし，未知パラメータを犠牲陽極，土中レグ，ステンレス鋼，海中壁の境界値とし$\boldsymbol{X}$と標記する．領域内における電位は，式(6)を満足するため，測定値ϕ'と同定値$\boldsymbol{X}$の間には，式(7)で表される観測方程式が成立する．

$$\boldsymbol{\phi}' = A_{(R)}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{7}$$

$A_{(R)}$は分極抵抗Rに依存するm行$(n+1)$列の観測行列である．有限要素法計算を行い，$A_{(R)}$の各成分を求めることにより，観測方程式を構築する．

ベイズ推定による未知数の同定

電位の測定誤差や各境界の電流値，オフセット電位など事前情報を事前分布として正規分布で表現する．事前情報としては，Rの事前分布は，1000[mV]に保持したみがき鋼板の分極曲線を継続的に測定し，-910~-940[mV]の範囲で線形近似して取得した．その他のパラメータは防食設計時の値を用いた．また，測定誤差として最大50[cm]の電極の位置ずれを考慮し，平均値0[V]，標準偏差3.0[mV]の事前分布を与えた．

次に観測値，計測誤差の統計情報および観測方程式を用いて観測値による尤度を求め，事前情報をベイズ推定の枠組みにより考慮し未知パラメータの事後分布を計算する．

電流計が設置されているFig.10の犠牲陽極の電流量がNo.1が約0.9[A]，No.2が約0.7[A]であり，ともに±0.02[A]の範囲内で推移していた．同定結果と比較すると，それぞれ平均値からの標準偏差(1σ)内に収まっており，また電位分布についてもFig.11に示すように，同定値が測定値を良く再現することができた．

海洋鋼構造物の防食状態を，構造物近傍の電位測定から，ベイズ推定を用いた逆解析により推定する方法を紹介した．港湾施設で行われた検証実験により，犠牲陽極発生電流量を，同定値の標準偏差(1σ)内に正解値が収まる精度で同定できることが確認された．

４．低解像度スポット像からのカメラモジュールの収差解析[6][7][8]

近年，スマートフォン，自動運転，セキュリティーなど様々な分野で高精度なカメラモジュールが求められている．カメラモジュールの性能を評価する収差の測定は重要な技術である．著者らはこれまでに，計測が容易なスポット像から逆解析を適用して精度よく収差を同定する手法を開発してきた．

本研究ではカメラモジュールで撮影された解像度の低いスポット像から，逆解析手法を用いて波面収差を解析する手法を開発する．本手法では，波面収差を仮定して理論的に計算されるスポット像とカメラモジュールで撮影されたスポット像の残差を最小化する最小二乗問題を解く．この際に，複数のデフォーカス面におけるスポット像を用いることで空間分解能を補足する．本報告では，本手法の有効性を検証するために実施した実験の結果を示す．

収差解析手法

同定するカメラモジュールの瞳関数を$g(\xi,\eta)$とする．フーリエ光学に従えば結像点付近のスポット像の強度分布$I(x,y;d)$は次式で計算できる．

$$I(x,y;d) = |\mathfrak{F}[g(\xi,\eta)h(\xi,\eta;d)](x,y)|^2, \tag{8}$$

ここで dデフォーカス距離，$\mathfrak{F}$はフーリエ変換を表す．関数$h(\xi,\eta;d)$はデフォーカスによる光伝搬を表す関数でありヘルムホルツ方程式を満足する[2]．

イメージセンサーのピクセル素子iにおける信号強度は暗電流によるノイズ成分をcとすると次式で表される．

$$I_i(d) = (I * w)(x,y) + c, \tag{9}$$

ここで $w(x,y)$はピクセル素子が光を受ける領域の窓関数である．収差の同定問題は下記の残差最小化問題に帰着される．

$$g^\star(\xi,\eta) = \underset{g(\xi,\eta)}{\arg\min} \sum_{i,j} \left\{ I_i(d_j) - \bar{I}_i(d_j) \right\}^2, \tag{10}$$

ここで d_j はj番目のデフォーカス距離，I_i はi 番目のピクセルにおける観測値である．$g^\star$は同定した瞳関数であり，$g^\star$の位相が収差分布となる．

検証実験

実験条件実験装置の概観をFig.12に示す．光学系は顕微鏡光学系となっている．

解析対象は，NA=0.154 の顕微鏡対物レンズである．また，波長650[nm] のレーザーを使用した．まず，光学倍率200 倍，1 画素のサイズが7400[nm] の顕微鏡を用いてスポット像を撮影する．このとき，撮影したスポット像のデフォーカス距離は±20000[nm]，±19900[nm]，±19800[nm]，±19700[nm]，±19600[nm]，±19500[nm]である．撮影した高解像度スポット像を40×40画素毎に平均化して1画素に圧縮し，模擬的に低解像度スポット像を作成する．撮影した高解像度スポット像及び作成した低解像度スポット像をもとにそれぞれ収差解析を行う．瞳関数を展開するZernike係数はフォーカス面で低次の16項，デフォーカス面で低次の82項を用い，収差を展開するZernike係数は低次の16項を用いる．

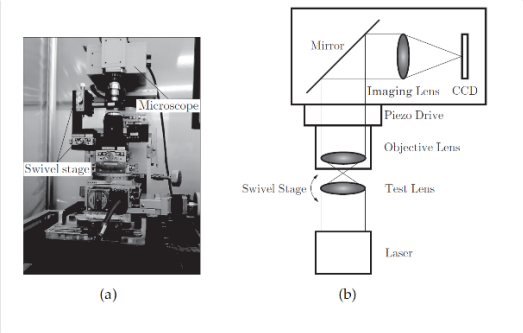
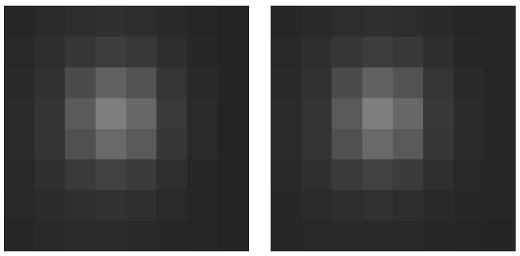


Fig.12 スポット像計測装置の概要



(a) Observed image. (b) Calculated image.

Fig.13　測定したスポット像とフィッティングした計算値

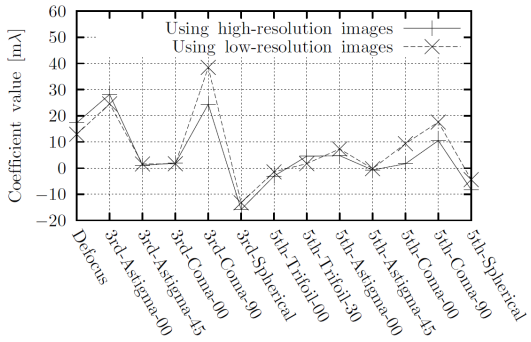


Fig.14　同定したレンズの収差係数

実験結果

本収収差解析手法により得られた収差係数をFig.14に示す．また，高解像度スポット像より求めた収差係数を正解値として合わせて記載する．さらに，高解像度のスポット像より模擬的に作成した低解像度スポット像と収束計算により得られたスポット像の一例をFig.13に示す．

解析結果より，模擬スポット像と収束計算により得られたスポット像はよく一致していることが確認できる．また，収差係数同定の誤差はコマ収差を除いて5[mλ]に収まっており，よい正確度で収差が同定できることが確認できる．

まとめ

本稿では逆問題工学の産学連携の適用例として「自動車ブレーキの圧力分布の可視化技術」「海洋構造物の防食モニタリング技術」「カメラモジュールの検査システム」の3つの技術を紹介しました．技術の社会実装においては異分野のエンジニアが協働することが必要です.その際にお互いが尊敬しあえることが重要に感じます．

最後に紹介した技術に関して協力していただいた曙ブレーキ工業，荏原製作所，日本防蝕工業，カツラオプトシステムズのみなさまに深く感謝いたします．

参考文献

[1] 逆解析を用いたブレーキパッド接触面圧分布の内外面個別同定, 井上 正則, 天谷 賢治, 大西 有希, 中川 裕喜, 羽鳥 公一, 計算数理工学論文集 / 日本計算数理工学会 編 16 109-114, 2016-12.

[2] 逆解析を用いたディスクブレーキパッド摩擦材の異方性弾性定数の非侵襲同定, 井上 正則, 天谷 賢治, 大西 有希, 鄭 珠迎, 羽鳥 公一, 日本機械学会論文集 82 (840), 16-00186-16-00186, 2016.

[3] Biomimetics of Campaniform Sensilla: Measuring Strain from the Deformation of Holes, Julian F.V. Vincent, Sally E. Clift, Carlo Menon, Journal of Bionic Engineering, Vol.4, 2,63-76, 2007.

[4] ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の犠牲陽極発生電流量同定法の開発, 米谷 直樹, 天谷 賢治, 審良 善和, 田代 賢吉, 飯田 知宏, 山路 徹, zairyo-to-kankyo 62 (9), 326-333, 2013.

[5] データ同化を用いた海洋構造物の犠牲陽極電流量予測システムの開発, 米谷 直樹, 審良 善和, 田代 賢吉, 飯田 知宏, 山路 徹, 天谷 賢治, zairyo-to-kankyo 63 (2), 43-49, 2014.

[6] 実用的なスポット像からの波面収差解析手法の開発, 上島 正史, 天谷 賢治, 片岡 康生, 日本機械学会論文集C編 75 (750), 334-342, 2009.

[7] 強度画像を用いた位相分布同定法の高精度化および効率化, 上島 正史, 天谷 賢治, 日本機械学会論文集C編 72 (717), 1486-1491, 2006.

[8] 低解像度スポット像を用いた収差解析手法の開発, 岡田 和佳, 天谷 賢治, 大西 有希, 光学41 (12), 627-634, 2012-12.

打撃応答データを用いた構造内の欠陥形態を予測する「非破壊検査用」逆解析シミュレーション

倉橋　貴彦
長岡技術科学大学 技学研究院 機械系

1. はじめに

2012年の笹子トンネルの天井板崩落事故を契機に，現在ではトンネル等のコンクリート構造物は5年に1度の点検が基本とされている．従来は打音試験による官能型の評価が主流であったが，ここ数年打撃時の応答データから定量的に評価する手法について検討や研究が進められている(1)．文献(1)の内容では，機械学習に基づき異常度をマップにする研究であるが，著者を含む研究チームでは，機械学習に基づき，打撃の応答データから構造内の欠陥形状を同定する方法について研究を実施している(2)．機械学習では，入力と出力のデータを関係付ける重みパラメータやバイアス値を同定するために，正解値を元に学習（パラメータ同定解析）を実施するため，入力と出力がペアとなったデータセットを相当数，解析前に準備する必要がある．一方，随伴変数法や直接微分法に基づく逆解析では，基本，1つの入力データに対応した出力データ（各観測点での観測値）のセット情報は必要であるが，機械学習とは異なり相当数のデータセットを準備する必要は無い．本特集記事では，随伴変数法に基づく逆解析に焦点を当て，レベルセット型トポロジー最適化による欠陥形態同定解析の解析例の紹介を行う．

2. 随伴変数法に基づく定式化

欠陥形態同定解析において，各観測点における観測値は，評価関数（目的関数）を計算する際に用いられ，シミュレーションにおいて計算された値と観測値の差の二乗値を時間積分し，各観測点で計算された値を足し合わせることにより計算する（式(1)）．

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{obs.})^T\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{obs.})dt \qquad (1)$$

ここに $\boldsymbol{u}$はシミュレーションによって算定された変位ベクトル，$\boldsymbol{u}_{obs.}$は観測変位ベクトル，$\boldsymbol{Q}$は重み対角行列，t_0は初期時間，t_fは終端時間を意味する．ここで，評価関数Jを最小とするレベルセット関数ϕの分布（空洞の形態）を求めるという問題を解く定式化を行う．評価関数の制約条件として，支配方程式および境界条件，初期条件を考慮する必要があるため，式(2)に示すラグランジュ関数を導入する．

$$J^* = J + \int_{t_0}^{t_f}\boldsymbol{\lambda}^T(\boldsymbol{M}(\phi)\ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C}(\phi)\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}(\phi)\boldsymbol{u} - \boldsymbol{f})dt \qquad (2)$$

式(2)において，$\boldsymbol{\lambda}$は随伴変数ベクトルを意味する．随伴変数が乗じられている式は，三次元の振動方程式に対する有限要素方程式（本検討では，六面体の一次のアイソパラメトリック要素を使用）を示しており，$\boldsymbol{M}$は質量行列，$\boldsymbol{C}$は減衰行列，$\boldsymbol{K}$は弾性行列，$\boldsymbol{u}$は変位ベクトル，$\boldsymbol{f}$は外力ベクトルを示す．変位ベクトルに付記しているドット記号は時間微分を示す．式(2)の停留条件を誘導するために，ラグランジュ関数の第一変分を計算することで，式(3)，式(4)が得られる．

$$\boldsymbol{M}(\phi)\ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C}(\phi)\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}(\phi)\boldsymbol{u} = \boldsymbol{f} \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{M}^T(\phi)\ddot{\boldsymbol{\lambda}} - \boldsymbol{C}^T(\phi)\dot{\boldsymbol{\lambda}} + \boldsymbol{K}^T(\phi)\boldsymbol{\lambda} = -\boldsymbol{Q}^T(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{obs.}) \qquad (4)$$

式(3)は，振動方程式であり，ラグランジュ関数の随伴変数ベクトルに対する勾配の式より得られる．また，式(4)は随伴方程式と呼ばれ，ラグランジュ関数の変位ベクトルに対する勾配の式より得られる．式(3)は，本問題設定において定義する初期条件，境界条件のもと計算される．停留条件を導出する際に，式(3)を解く上で用いられる初期条件，境界条件を考慮すると，式(4)に対する終端条件（終端時間において規定される条件），境界条件が得られる．このため，式(4)は逆時間で解く必要がある．式(3)および式(4)を解くことで得られる変位ベクトル，随伴変数ベクトルを用いることにより，ラグランジュ関数のレベルセット関数に対する勾配を計算することができる（式(5)）．

$$J^*_{e,\phi} = \int_{t_0}^{t_f}\boldsymbol{\lambda}_e^T(\boldsymbol{M}_e\ddot{\boldsymbol{u}}_e + \boldsymbol{C}_e\dot{\boldsymbol{u}}_e + \boldsymbol{K}_e\boldsymbol{u}_e)H_e(\phi)dt \qquad (5)$$

ここに，H_eはヘヴィサイドの階段関数を示す．本特集記事に示す欠陥形態同定解析では，レベルセット型トポロジー最適化に基づき解析を実施するため，式(5)を反応項とした反応拡散方程式によりレベルセット関数の進展計算を行う．反応拡散方程式中の拡散係数τは正則化パラメータと呼ばれる．

3. レベルセット型トポロジー最適化に基づく空洞形態同定解析の流れ

レベルセット型トポロジー最適化に基づく空洞形態同定解析の流れを以下に示す．

1. 計算条件（有限要素メッシュ，境界条件，初期条件，逆解析における数値パラメータ）の入力．また，反復回数をl=0とする．
2. 振動方程式の計算および評価関数Jの計算．
3. 収束判定．$|J^{(l)} - J^{(l-1)}/J^{(0)}| < \varepsilon$ の場合は，計算を終了．そうでない場合は次に進む．
4. 随伴方程式の計算および各要素に対するラグランジュ関数J^*のレベルセット関数ϕに対する勾配の計算．
5. 反応拡散方程式の計算（レベルセット関数ϕの分布の算定）
6. 欠陥の形態を更新し，ステップ2へ戻る

ステップ6に示す欠陥形態の更新においては，図1に示すように，レベルセット関数 ϕ が零の場合は欠陥の境界，正の場合は材料領域，負の場合は欠陥領域（空洞領域）とする．

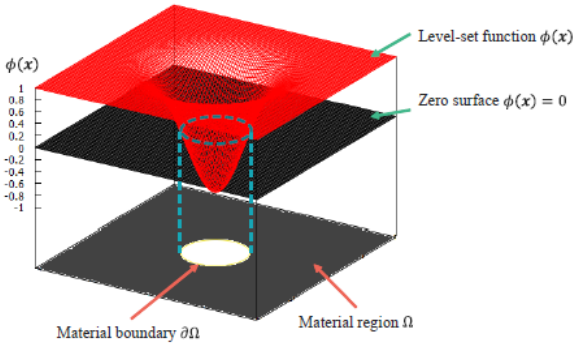


図1　レベルセット関数 ϕ による
材料領域，欠陥領域（空洞領域）の判定について

4．数値解析例の紹介および今後の展望について

図2に解析モデル図，図3に有限要素メッシュ図を示す．上面の中心点を打撃し，P1 ～ P4の点を変位の観測点とする．本特集記事では，観測変位は，図4の欠陥（空洞）の正解形態モデルに対する振動解析により得られた結果を観測変位とし，欠陥形態（空洞のトポロジー）が未知として，欠陥形態の同定解析を実施する．解析においては，コンクリートの物性値を設定することにより，図2の設計領域内において，欠陥形態を同定する．正則化パラメータ τ は0.01と設定する．

収束判定定数 ϵ は0.001とした場合の結果を図5(Case1)に示す．欠陥のサイズは異なるものが，位置，個数については適切に同定できていることを確認できる．ここで，図2の観測点（計4点）を図7に示す様に観測点(計16点)を増やした場合，図8(Case2)に示す同定結果が得られ，図4に示す欠陥形態に近づいていることが分かる．この場合も，機械学習による検討とは異なり，多数の打撃によるデータセットではなく，上面の中央の点1回の打撃に対して得られた複数点での変位応答ということ改めて説明しておく．次に，観測点数を16点にした場合に対して，$\sum_{e=1}^{mx} J_{e,\phi}^{*} / mx < \epsilon$ に変更し，収束判定定数 ϵ =100とした場合の結果を図9(Case3)に示す．ここに $J_{e,\phi}^{*}$ は評価関数を支配方程式により拡張したラグランジュ関数の設計変数に対する感度を示しており，mx は全要素を示している．また，収束判定定数 ϵ は，算定される感度の値をもとに，前の検討に比べ大きめに設定している．結果として，図8(Case2)に比べて，より図4に示す欠陥形態に近づいていることを確認でき，観測点の数や，収束判定の設定により，より適切に欠陥の形態を再現できることを表している．データセットの数という観点からは，本解析手法は機械学習に比べ利点を有していると考えられるが，一方で，振動解析により振動における応答を適切に再現できていることが前提である．この点では，物理モデルを使用しない場合も，入力データと出力データの関係のみから空洞形態を同定できる機械学習の方が優れているとも考えられる．このように，欠陥同定という同じ問題を機械学習，随伴変数法により解く場合において，利点と欠点について，一長一短あることも合わせて申し上げておく．

次に，追加考察の内容として，重み付き感度法[(4), (5)]を用いた解析の事例について説明する．本手法は，式(6)に示す様に，欠陥形態の更新において3回目以降は，感度のブレンドパラメータ κ 用いることにより，感度分布の空間振動を制御するという手法である．

$$L_{e,\phi}^{(l)} = \begin{cases} J_{e,\phi}^{*(l)} & l < 3 \\ \kappa^{(l)} J_{e,\phi}^{*(l)} + (1-\kappa^{(l)}) J_{e,\phi}^{*(l-1)} & l \geq 3 \end{cases} \quad (6)$$

Case3の結果において，反復回数 l=36 ～ 38の感度の分布を可視化すると図10 ～ 12の結果が得られる．これに対して，重み付き感度法におけるパラメータを適宜設定し，同じ反復回数における感度の分布を可視化すると図13 ～ 15の結果が得られる．各反復回数間における感度の振動を抑えられていることを確認できる．重み付き感度法を用いた場合の欠陥形態同定結果を図16(Case4)に示す．正解に対する空洞の形態一致率を判定するとCase4の結果が最も良好に得られており，感度の振動制御も欠陥形態同定の解析には有効であることがわかる．解析モデルを変更した場合等，本手法の異なるモデルへの有効性の検証は今後の課題とする．

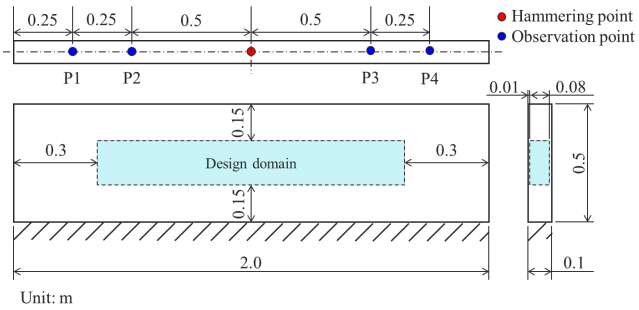


図2　解析モデル図

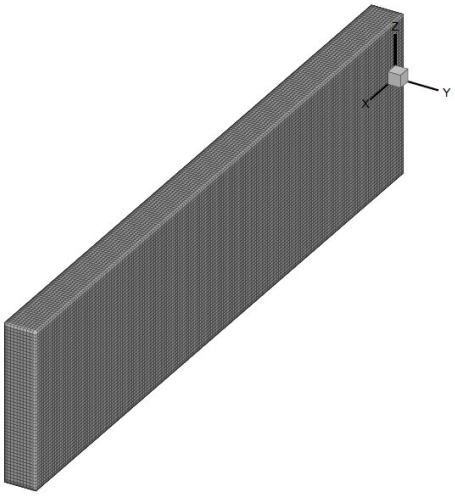


図3　有限要素メッシュ図

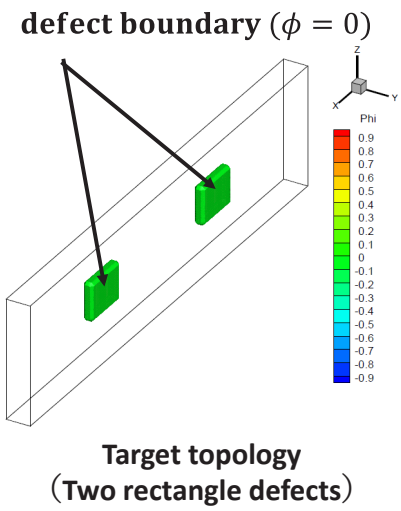


図 4　欠陥（空洞）の正解形態

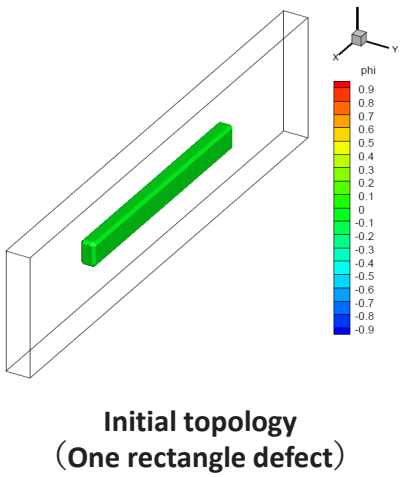


図 5　欠陥（空洞）の初期形態（反復回数 l=0）

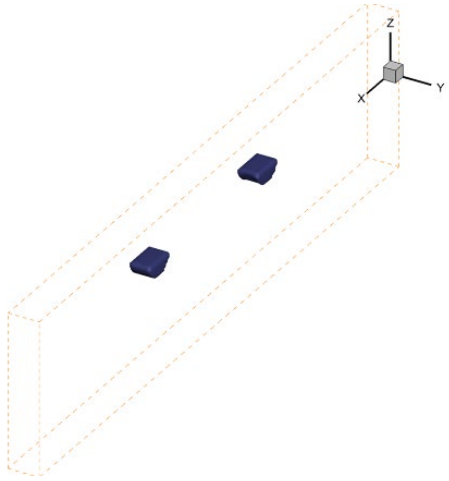


図 6　Case1：同定された欠陥（空洞）形態

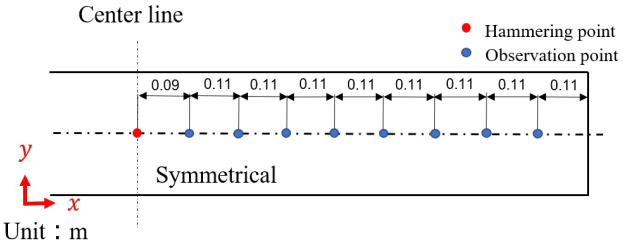


図 7　観測点の配置（中心線より右側を表示）

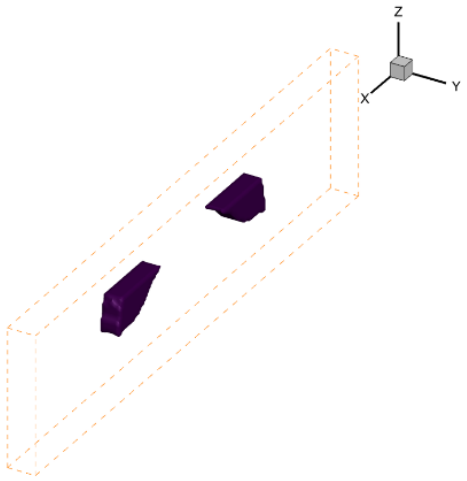


図 8　Case2：同定された欠陥（空洞）形態

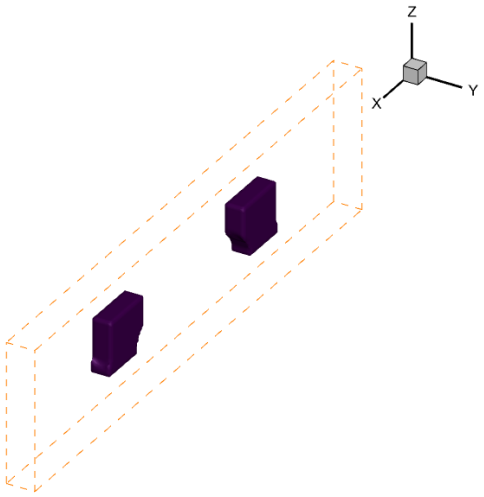


図 9　Case3：同定された欠陥（空洞）形態

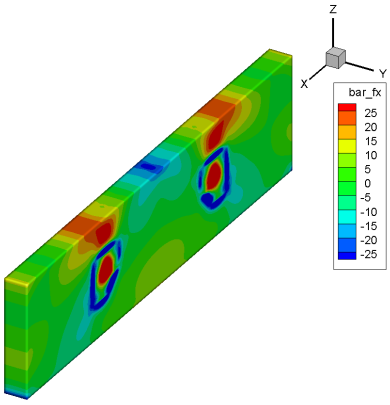


図 10　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=36）
（重み付き感度法を用いない場合）

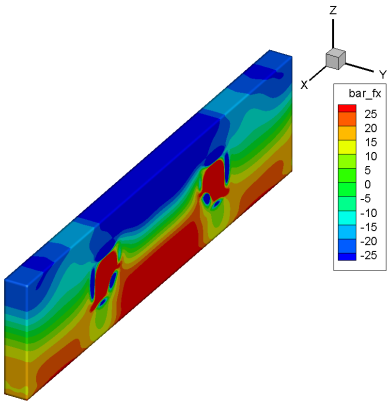


図 11　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=37）
（重み付き感度法を用いない場合）

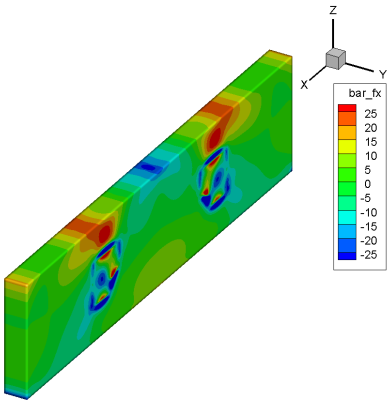


図 12　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=38）
（重み付き感度法を用いない場合）

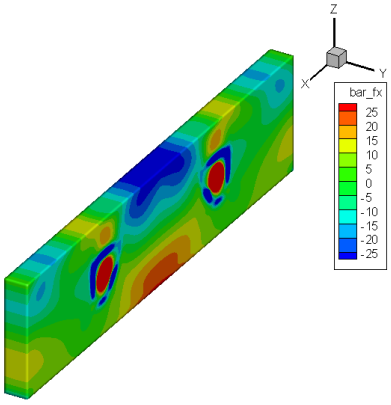


図 13　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=36）
（重み付き感度法を用いた場合）

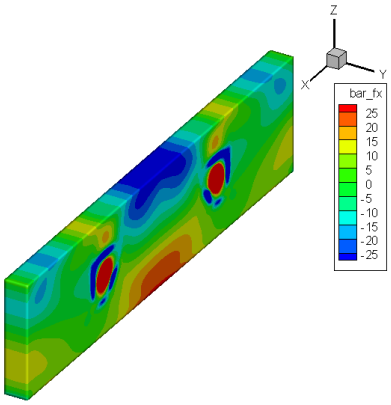


図 14　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=37）
（重み付き感度法を用いた場合）

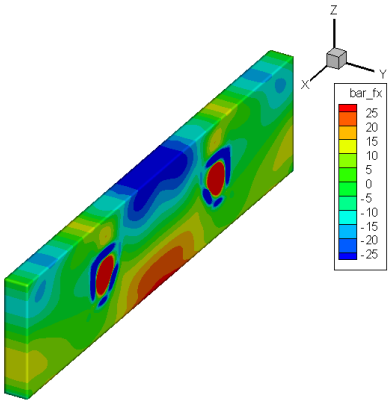


図 15　感度$J^*_{e,\phi}$の分布（反復回数 l=38）
（重み付き感度法を用いた場合）

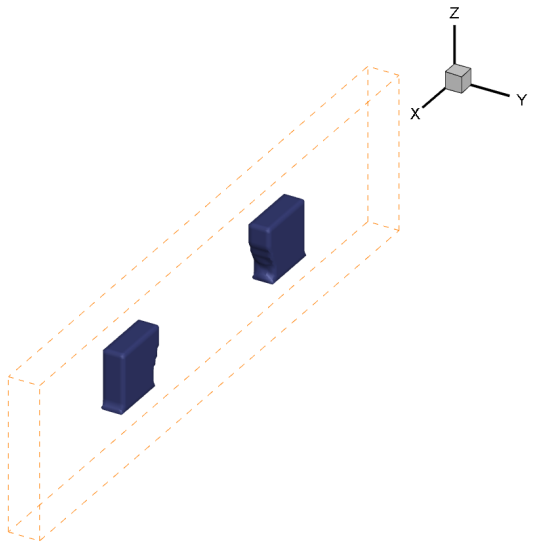


図16　Case4：同定された欠陥（空洞）形態

謝辞

本研究成果は，科学研究費補助金（基盤(C)）22K04283の援助を受けた．また，長岡技術科学大学大学院の修了生　吉原健太氏，長岡技術科学大学大学院に在籍しています竹内健悟氏，小池永遠氏，岐阜工業高等専門学校　岸田 真幸助教（長岡技術科学大学大学院　技術科学イノベーション専攻　在籍），スペインのカタルーニャ工科大学　Prof. Joan Baiges，長岡工業高等専門学校　村上祐貴教授，池田富士雄教授，外山茂浩教授，井山徹郎准教授，長岡技術科学大学，井原郁夫教授からは，研究の実施当たり，建設的なコメントを頂いた．数値実験には九州大学情報基盤研究開発センターの高性能演算サーバーシステムを利用した．記して謝意を表す．

参考文献

（1）産業技術総合研究所，人工知能を用いた打音検査で点検漏れを防止するシステムを開発 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170601/pr20170601.html　(2022/8/17)

（2）嶋田 雅也，倉橋 貴彦，村上 祐貴，池田 富士雄，井原 郁夫，打撃応答波形を用いた畳み込みニューラルネットワークによるコンクリート内の無次元密度分布の同定，日本機械学会論文集，Vol.87，No.904，pp.1-15，2021.

（3）吉原 健太，倉橋 貴彦，村上 祐貴，外山 茂浩，池田 富士雄，井山 徹郎，井原 郁夫，フェーズフィールド法の考え方に基づくレベルセット型トポロジー最適化を用いた打撃試験による空洞領域の可視化，材料，Vol.70，No.1，pp.41-48，2021.

（4）J. Baiges, J. Mart'ınez-Frutos, D. Herrero-P'erez, F. Otero and A. Ferrer, Large-scale stochastic topology optimization using adaptive mesh refinement and coarsening through a two-level parallelization scheme, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.343, pp.186–206, 2019.

（5）M.Kishida, T.Kurahashi and J.Baiges, Application of weighted sensitivity for topology optimization analysis based on the density method , JSIAM Letters, Vol.13, pp.68-71, 2021.

高解像度解析結果のデータ同化による低解像度解析の高精度化

中村　昌道　　モルゲンロット株式会社（写真左）
小澤　雄太　　東北大学（写真中）
野々村　拓　　東北大学（写真右）

データ同化　データどうか　Data Assimilation

解析値と観測値から統計的に確からしい値を推定する技術のこと。

1. はじめに

近年では観測値と解析値を組み合わせて真値を推定するデータ同化技術が注目されている。データ同化技術は、観測値と解析値を変分法やカルマンフィルタなどの手法で組み合わせ、統計的に真値を推定する手法である。流体現象はカオス性を持つ現象であり、初期値や境界条件、モデル化誤差が実験結果や解析結果に及ぼす影響が大きく、予測精度の向上においてデータ同化の重要性が知られる。

このようなデータ同化技術は観測値以外のパラメータにも応用が可能である。過去にはLarge Eddy Simulation(LES)の解析結果を Reynolds Average Navier Stokes equation (RANS)の解析に同化する研究が行われた。この研究ではLESによる解析に解像度の高い計算格子を使用し、非定常な解析結果の時間平均値を観測値と仮定して、RANSの解析に同化している。この同化によりRANSにより得られる解析結果のLESに対する再現性が向上した[1-2]。

一方で、機械学習手法の活用により、解像度が低い計算格子による解析結果と解像度の高い計算格子による解析結果を組み合わせて学習することで、低解像度な解析を高精度化できる可能性がある。この技術が実現すれば、設計開発分野において解析時間の短縮や大規模解析の実現が可能となる。

しかしこの目標は、前述した解析データ同士をデータ同化する技術の改良によっても達成できる可能性がある。RANSの解析において解像度の低い計算格子を使用し、解像度の高い計算格子を使用したLESの解析結果を同化することで、RANSの精度を向上できる。特に重要な要素として、このデータ同化においては乱流モデルパラメータも状態量と同時に改善され、最終的にはLESに対する再現性を向上するために最適なモデルパラメータが得られる。このパラメータを使用すれば、一度同化した形状に対しては高速かつ高精度な解析が可能となる。このような高速な解析が実現できれば、設計開発の分野においては既存の計算速度では計算量の多さから実用が困難であった多目的最適化や機械学習に向けた大量の教師データ作成が可能となる。

これらの技術において重要となるのは、同化や学習が行われた条件以外でも同様の効果が期待できるかどうかである。設計開発分野においては、どの程度の形状変化が適用可能範囲であるかが把握できなければ実用化は困難である。

そこで著者らの研究では、同化により最適化されたパラメータを異なる形状に適用して解析精度の向上が期待できるかを検討した[3]。

2. データ同化による低解像度RANSの高精度化

この研究では、四角柱を対象として格子解像度の高いLESによる解析を行い、その結果を格子解像度の低いRANSにデータ同化した。レイノルズ数は10^5であり、流れ場は乱流である。図1にはLESに使用した計算格子を、図2にはRANSに使用した計算格子を示す。これらの格子は、特に四角柱近傍の領域で格子解像度が異なる。LESで使用した計算格子は乱流現象を捉えられるよう、四角柱の1辺の長さが1mであるのに対して最小格子幅が0.0006mであるが、RANSで使用した計算格子は解像度が低い。

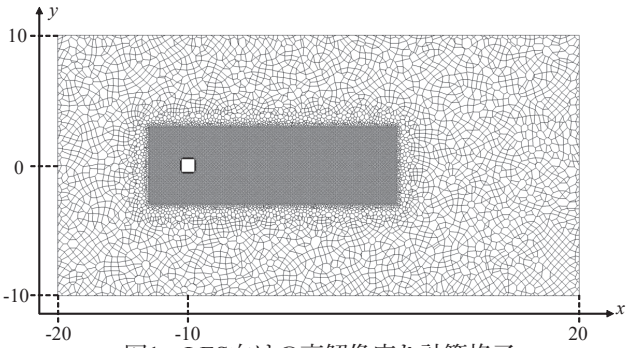


図1　LES向けの高解像度な計算格子

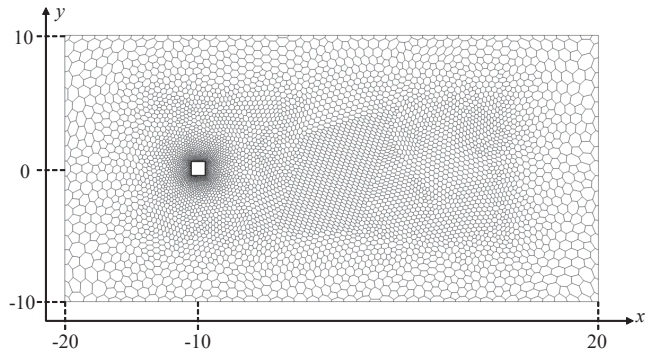


図2　RANS向けの低解像度な計算格子

RANSの解析には乱流モデルとしてk-ϵ モデルを使用しており、6つの乱流モデルパラメータを以下のように設定した。

$$C_\mu = 0.09 \quad (1)$$
$$C_{1e} = 1.44 \quad (2)$$
$$C_{2e} = 1.9 \quad (3)$$
$$C_t = 1.0 \quad (4)$$
$$\sigma_k = 1.0 \quad (5)$$
$$\sigma_e = 1.0 \quad (6)$$

これらの条件に基づく解析結果として、図3にはLESにより得られたx方向流速分布の時間平均値を、図4にはRANSにより得られたx方向流速分布を示す。図3では角柱の側面で生じる剥離および後方の逆流域が確認できる。図4では格子の形状が判明する程度に解像度が低い。加えて、LESにより得られた結果に対して角柱後方の逆流域を過大評価する。この結果は、格子解像度が低いことに加えて、RANSによる解析では非定常な乱流場を十分に再現できないことが原因で、LESに対して差異が生じる。

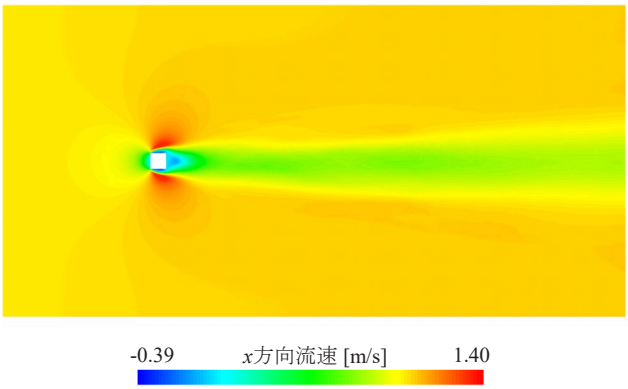


図3　LESによるx方向流速分布

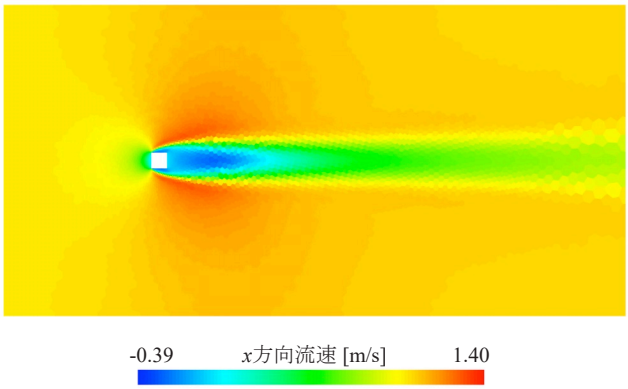


図4　RANSによるx方向流速分布

そこで、LESによる解析結果をRANSの解析にデータ同化し、流れ場の再現性を向上させる。データ同化にはアンサンブルカルマンフィルタを使用し、アンサンブルメンバは20メンバとした。観測値として、LESの解析から得られる角柱表面上の圧力$\boldsymbol{p}$の時間平均値を使用した。

同化により更新されるRANS解析の状態量$\boldsymbol{x}_t$は、圧力を$\boldsymbol{p}$、x方向流速を$\boldsymbol{u}$、y方向流速を$\boldsymbol{v}$、行列の転置をTとして以下のように表される。

$$\boldsymbol{x}_t = \left(\boldsymbol{p}^T, \boldsymbol{u}^T, \boldsymbol{v}^T, C_\mu, C_{1e}, C_{2e}, C_t, \sigma_k, \sigma_e\right)^T \tag{7}$$

前述したように、同化において更新される状態量の中に乱流モデルのパラメータを含む自己組織化モデルを使用した。このモデルでは、同化により状態量が改善されると同時に、乱流モデルパラメータも改善される。最終的に得られた乱流モデルパラメータはLESの解析結果の再現のために最適化されており、このパラメータの使用により再現性の高い結果が得られる。

一方で、今回のようにLESのような解析結果を観測値とするデータ同化では観測ノイズの決定が困難である。この場合の観測ノイズとしては、LESとRANSのモデル化誤差や格子解像度の違いなどの考慮が必要だが、定量的な決定が困難である。そこで著者らの研究では、状態量の更新とともに適応的に観測ノイズを最適化する手法を開発した。適応的な観測ノイズ決定手法は過去にも研究されており、観測ノイズを$\boldsymbol{R}_t$として以下の式が提案されている[4]。

$$\boldsymbol{E}_t = \boldsymbol{Y}_t - \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_t^f \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}_t = (1/(N-1)\ \boldsymbol{E}_t\, \boldsymbol{E}_t^T - \boldsymbol{H}_t\, \hat{\boldsymbol{V}}_t^f\, \boldsymbol{H}_t^T \tag{9}$$

この時、$\boldsymbol{Y}_t$は観測値行列であり、$\boldsymbol{H}$は観測行列、$\boldsymbol{X}_t^f$はアンサンブルメンバごとの状態量を含む状態量行列である。また、$\boldsymbol{E}_t$は単位行列、$\hat{\boldsymbol{V}}_t^f$は分散共分散行列であり、Nはアンサンブルメンバ数である。

しかし、式(9)における右辺は計算格子と状態量の数に依存する巨大な行列になるため、このままでは計算が困難である。そこで今回の手法では以下のように特異値分解を利用して$\boldsymbol{R}_t$を低次元化する。

$$\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{X}_t^f = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{W}^T \tag{10}$$

$$\boldsymbol{R}_t = \sigma^2\, \boldsymbol{I} \tag{11}$$

$$\sigma_{est}^2 = (1/N(N-1))\left[\|\boldsymbol{U}^T(\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_t^f - \boldsymbol{Y}_t)\|_F^2 - \|\Sigma\|_F^2\right] \tag{12}$$

これらの式中において、$\delta\,\boldsymbol{X}_t^f$は状態量行列の変動分を表し、式(10)の右辺が特異値行列となる。式(12)および式(11)により、式(7)で表した状態量行列とともに観測ノイズの更新が可能となる。

図5には上述した手法を用いてLESの結果をデータ同化して得られたRANSの解析によるx方向の流速分布を示す。同化前の結果との比較より、全体としてLESの流れ場に対する再現性が向上した。特に、角柱後方の逆流域の大きさの再現性が向上した。また、表1に示すように角柱の抗力係数を比較すると、データ同化によりLESの結果に対する再現性が2%向上した。加えてLESに対して1/100以下の時間で計算が可能である。

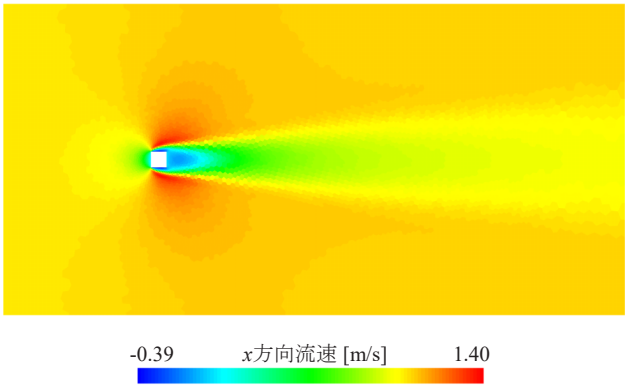


図5　データ同化されたRANSによるx方向流速分布

表1　解析手法ごとの抗力係数の比較

解析手法	抗力係数
LES	2.40
RANS	1.78
データ同化された RANS	1.89

3. 形状変化に対する同化パラメータの適用可能性の検討

前節でのデータ同化により断面形状が正方形の角柱においてLESに対する再現性が向上するとともに、この流れ場を再現可能な乱流モデルパラメータが得られた。そこで、このパラメータを異なる断面形状に適用しLESに対する再現性の向上可能性を検証した。

今回は一例として、図6には流れ方向に2mの長さを持つ長方形断面形状のx方向流速分布を、図7には流れ方向に4mの長さを持つ長方形断面形状のx方向流速分布を示す。それぞれ、LESで解析した結果、RANSで解析した結果、データ同化により得られたパラメータを使用したRANSにより得られた解析結果を示す。

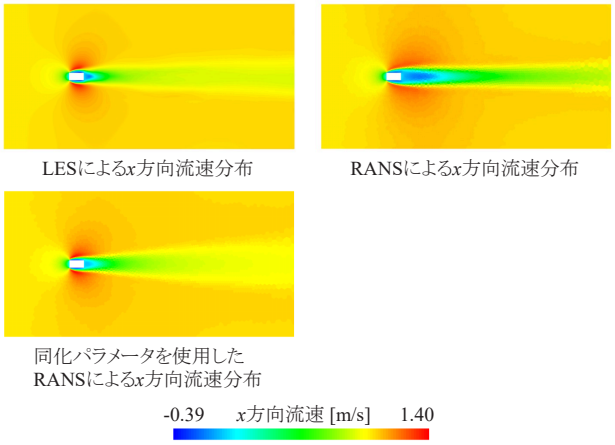


図6　2m長さの断面形状のx方向流速分布

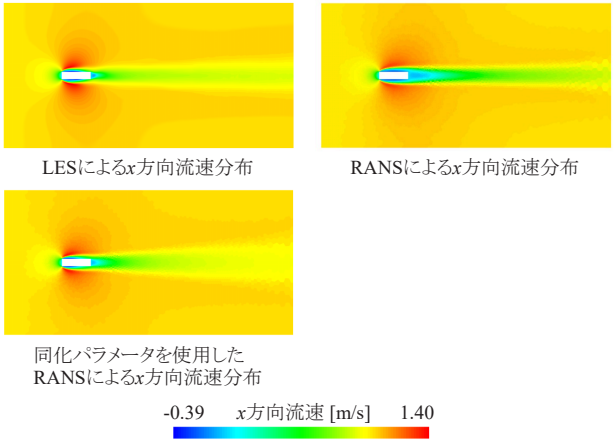


図7　4m長さの断面形状のx方向流速分布

流速場の比較では、流れ方向に断面積が増加した場合であっても、同化されたパラメータの使用により前節同様にLESに対する再現性が向上する。一方で、以下の式で表される抗力係数C_Dの再現率により、定量的な再現性を確認する。

$$\frac{|C_{D_LES} - C_{D_RANS}| - |C_{D_LES} - C_{D_DA}|}{C_{D_LES}} \times 100 \qquad (13)$$

表2に示すように、それぞれの角柱の抵抗係数の再現性を比較すると、2m長さの断面形状ではLESに対する再現性が約7%減少する。

表2　各断面形状の抗力係数の比較

断面形状	抗力係数の改善率(%)
2m 長さの断面形状	-7.04
4m 長さの断面形状	1.81

この結果が示すように、正方形断面形状においてLESを再現するように同化されたパラメータは必ずしも異なる形状においても再現性を向上しない。

図8には2m長さの断面形状の解析で得られた、流れと並行な壁面上での流速分布を示した。x方向の位置が-10.5mや-10mの位置においては、それぞれの解析における違いが少ない。しかしx方向の位置が-9.5mの位置においてLESでは流速が減速するのに対して、同化前のRANSでは減速する度合いを過少評価する。加えて、x方向の位置が-9mの位置では、同化前のRANS解析よりもLESの解析結果の方が増速する。同化により得られたパラメータを使用した場合では、これらの現象を再現する方向にプロファイルが変化するが、平均的には同化前のRANSよりも再現性が低下するため、抗力係数の再現性も低下する。一方で4m長さの断面形状においては、増速後の区間においてLESに対する再現性が向上するため、抗力係数の再現性も向上する。

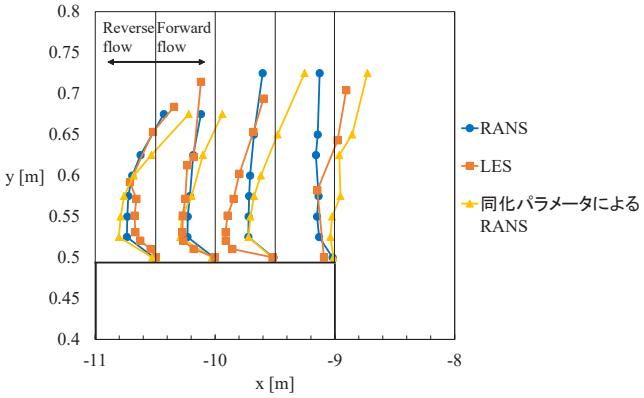


図8　2m長さの断面形状での壁面上におけるx方向流速分布

このようにk-ϵモデルを使用した場合では、データ同化によりLESに対する再現性を向上させても、流れに平行な壁面上の流速が逆流から順流に転じる区間においては、統一的なモデルパラメータによる再現性の向上が困難である。2m長さの断面形状においては、流れ場の再現性が向上する前に剥離が生ずるため、抗力係数の再現性が低下する。この場合の再現性を向上させるためには、2m長さの断面形状においてデータ同化を行い、乱流モデルパラメータを決定する必要がある。

4. おわりに

今回の研究では、同化対象となった形状や、得られたモデルパラメータによる修正が有効な形状ではLESに対する再現性が向上する一方で、断面形状に対する流れ場の変化の様相によっては再現性の向上が困難である場合が存在することを確認した。

これはデータ同化だけでなく機械学習など異なる統計的な手法で教師データから流れ場を推定する場合であっても、乱流モデルパラメータを介して流れ場の精度の向上を試みる場合には同様の現象が生じる可能性があるため、注意が必要である。

しかし同時に、同化により得られた乱流モデルパラメータが有効に適用できる形状変化の範囲は存在するため、設計対象となる形状を適切に選択することで計算時間を大幅に低減できる可能性があることを確認した。

今後は本技術を実用的な複雑形状に適用可能かどうかを検討することが必要である。また、LESの解析だけでなく実験結果の追加による精度向上の可能性も検討すべきである。

参考文献

[1] H. Kato, and S. Obayashi. 2011. “Integration of CFD and Wind Tunnel by Data Assimilation.” Journal of Fluid Science and Technology 6 (5): 717-28.

[2] H. Kato, A. Yoshizawa, G. Ueno, and S. Obayashi. 2015. “A data assimilation methodology for reconstructing turbulent flows around aircraft." Journal of Computational Physics 283: 559-581.

[3] M. Nakamura, Y. Ozawa, and T. Nonomura. 2022. “Low-Grid-Resolution-RANS-Based Data Assimilation of Time-Averaged Separated Flow Obtained by LES.” International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 36, Issue 2.

[4] T. Berry, and T. Sauer. 2013. “Adaptive ensemble Kalman filtering of non-linear systems.” Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography 65 (1): 1-16.

デジタルツインとデータ同化

三坂　孝志　　産業技術総合研究所（写真左）
菊地　亮太　　京都大学、DoerResearch 株式会社（写真右）

1. はじめに

デジタルツインはもっともらしいが実際には定義があいまいな，いわゆるバズワードに類するものと考えられる．そこでデジタルツインという言葉が使われ始めた頃の航空分野の論文[1]をあたってみると，航空機デジタルツインの実現シナリオが示されている．そこでは実航空機と共に航空機のデジタルツインが納入されて「1時間の飛行のシミュレーションを1時間で行う」（リアルタイム予測?），そして，「実航空機の状態をベイズ推定手法により定期的にそのデジタルツインに反映させる」（現実との同期）という現在のデジタルツインにつながる要素が示されている．この論文の出版から10年以上経過して情報通信技術が進歩した現在ではこれを少し拡大解釈して，デジタルツインを「現実とリアルタイムに同期されるデジタル空間上のシミュレーションモデル」と理解しても良さそうである[2]．

筆者らが利用しているデータ同化は，数値シミュレーションにおける不確かな条件・パラメータをベイズ統計により計測データに基づき推定する手法である．数値気象予測の精度向上を実現する手段として用いられており，近年は応用分野も広がっている[3]．デジタルツインとの関わりでは，上述のようにデジタル空間上のモデルを現実と同期させる手法と位置づけられる．そのような文脈でデータ同化の活用事例を2例ほど紹介したい．

2. 旋削デジタルツイン

通常，データ同化では計測データと対応する数値シミュレーション結果の差がしっかりと定義され，その差に基づき数値シミュレーションの変数やパラメータが修正される．一方，近年の深層学習による特徴認識は人間を上回る能力を示しており，本節ではそれを活かして，計測データと数値シミュレーションを特徴情報に基づき緩やかに連携した事例を紹介する．

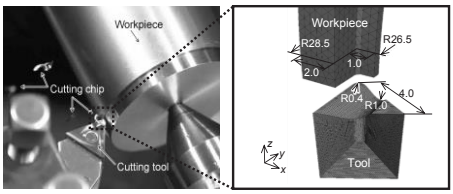


図1　切削加工映像と対応する切削FEMモデル

被加工部材を回転させ，切削工具を移動させつつ除去加工を行う旋削の有限要素法（FEM）解析は，計測が難しい加工部の物理量を調べるために用いられている．しかしながら，高圧・高温の加工状態の物理モデル（構成方程式や摩擦係数など）には不確かな要因も多く，計測データを用いた不確かさの低減が考えられる．加工部ではセンサーを設置するような接触計測は困難なため，計測データと数値シミュレーションの連携により切削デジタルツインを経由した間接的な情報取得が期待される．

ここでは図1に示す実加工画像とFEMで生成された疑似加工画像を深層ニューラルネットワーク（DNN）によって関連づける．切削加工時に発生する切りくずの形態（厚み，丸まり具合など）は加工条件や応力状態によって変化することが知られているため，加工画像内の切りくず形態の特徴に注目する．本研究では図2のようなシステムを考え，DNNを実加工画像で学習して実画像に似せたFEM結果の実画像との類似度を判断させる処理①と，実画像に似せたFEM結果でDNNを学習して実加工画像を検出させる処理②を考える．前者はFEM疑似画像の類似度に応じてFEMの不確かなパラメータを推定するデータ同化的処理であり，後者はFEM疑似画像の学習時にFEMで得られる未計測量を関連づけておくことで実画像の検出時に対応する未計測量を呼び出す，いわゆる，サロゲートモデル的処理である．

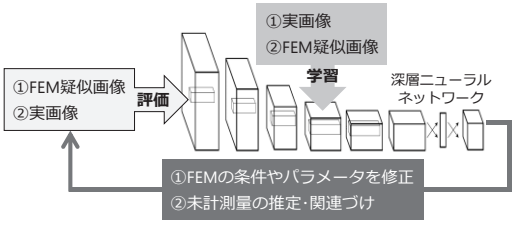


図2　DNNを経由した実画像とFEMの連携

上記①の例として，図3(a)に切削FEMに含まれる2つのパラメータ（加工硬化指数および静摩擦係数）と，DNNから得られる確信度（ここではパラメータ推定における尤度として利用）に関する応答曲面を示す[4]．また，いくつかの条件において切削FEMで生成した切りくずも示す．尤度の応答曲面となっているため，この応答曲面上で確信度が最も高い点に相当するパラメータが求めるべきパラメータである．数値シミュレーションを行う際には結果を実験結果と見比べつつ，その妥当性確認を行う場合があるが，処理①はそれをDNNに代行させるような形となっている．ちなみに，この処理①ではFEMの計算コストが大きくリアルタイムで実行することはできないため，デジタルツインとしては物足りない．

一方，処理②の例を図3(b)に示す．これは加工条件の異なるFEMの疑似加工画像と未計測の物理量を対応づけて学習した

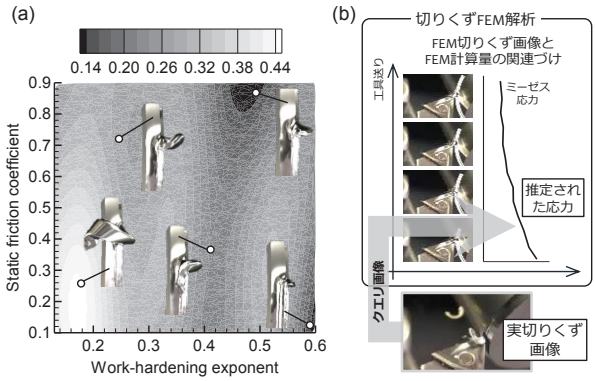


図3　(a)切りくず類似度の応答曲面と(b)DNN 画像データベース

データベースであり，実加工画像はその未計測物理量を呼び出すためのクエリとなっている[5]．DNNの高速さにより実加工画像に基づく未計測量の呼び出しは高速に実行される．ただし，ここで構築したのはあくまでもサロゲートモデルであるため，支配方程式に基づく数値シミュレーションのような外挿能力はあまり期待できない．

3. 醸造プロセスデジタルツイン

製造プロセスの監視・予測・制御の高度化に向けたデジタルツイン技術の研究開発が行われている．製造プロセスにおいて，時々刻々のデータ取得，データ同化による状態予測，リアルタイムの最適運転条件の導出，そして，それらを現場へと反映させるデジタルツインを，日本酒の醸造現場において実用化した事例を紹介する[6]．

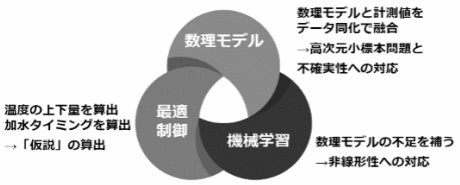


図4　醸造プロセスデジタルツインの構成要素

日本酒醸造では酒質目標を満たすために数多くの計測データが日々取得されており，それらは製造管理に活用されている[7]．更なる酒質向上，効率化に向けて，計測データを活かしたデータ駆動型研究の応用が期待されている．本事例では，デジタルツインとして，醸造プロセスモデルを定義し，現場で取得した計測データと組み合わせて，現場に支援情報をフィードバックする支援システム（図4）の実証を行った．

本支援システムでは，日本酒醸造の流れを定義した数理モデルと，醸造工程の計測データを用いた機械学習を組み合わせることで，日本酒醸造工程における最適なプロセスの支援情報を提供する．支援情報として，1週間先までのアルコール度数やボーメの予測情報，アルコール度数とボーメの関係を最適に近づけるための温度と加水管理情報を提供する．

日本酒醸造は，米を原料としてグルコースに変換する糖化プロセスと，グルコースをアルコールに変換するアルコール発酵プロセスが並行に行われる並行複発酵プロセスである．この並行複発酵を反応方程式に基づく非線形常微分方程式で表現した[6,8]．変数は液化酵素によって溶解したデンプン（オリゴ糖）を代表する変数，糖化酵素活性，グルコース量，酵母密度，アルコール度数，タンク内温度である．この数理モデルに対して，カルマンフィルタによりデータ同化を実施することで，時々刻々の予測を高精度化している．数理モデルのみで得ることができない物理量に関しては，過去データにより機械学習ベースのソフトセンサーを構築しておき，時々刻々の推定を実施している．実際に日本酒を醸造した際の例を図5に示す．取得した過去の計測値と予測値，最適制御値などを従事者に提供し，実際の培養において条件変更を実施した．典型的な醸造パターンと比較しても大きく異なるということはなく，実際に醸造する際の妥当な制御範囲に入っているという評価を頂いた．また，醸造を支援する温度管理および加水管理に関して具体的な支援情報の提供が可能であることを確認した．

科学やノウハウを背景とした数理モデル，日々の計測データ，機械学習や制御技術を組み合わせて製造プロセスの監視・予測・制御を高度化することを目的としたデータ同化によるデジタルツイン活用を紹介した．データ駆動型の製造プロセス技術は社会的な要請も高く，IoTやAI，シミュレーションを高度に駆使し，リアル・デジタルが一体となった生産運用現場の構築において，データ同化はリアルとデジタルを繋ぐ技術体系として活用できる．

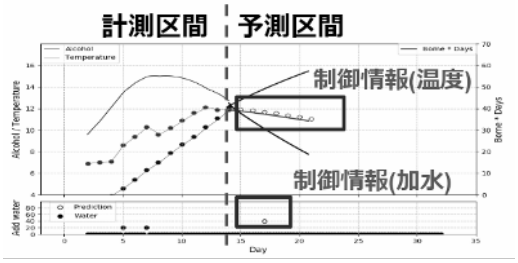


図5　支援システムによるアドバイスともろみ経過簿の例

4. おわりに

数値シミュレーションと計測データを融合するデータ同化は，数値シミュレーションの不確かさ低減に加えて，デジタルツインにおける現実とモデルの同期に活用できると期待される．

データ同化に関するオープンな情報交換の場として，「設計と運用に活かすデータ同化研究会」（主査：東北大学 大林茂教授，幹事：焼野藍子助教と筆者ら）が日本機械学会計算力学部門の研究会として開催されている．ご興味をお持ちの場合にはWebサイトをご参照頂き[9]，年1回程度の研究会にご参加頂けると幸甚である．この研究会では2020年まで行われていた「設計に活かすデータ同化研究会」に，製品のライフサイクルを通したデータ同化の活用を目指して「運用」を新たなターゲットに加えている．

参考文献

[1] Tuegel, E.J., et al., “Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin,” International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2011, p. 154798, 2011.

[2] Wikipedia, https://ja.wikipedia.org/wiki/デジタルツイン (2022年9月25日参照).

[3] 大林茂ら, データ同化流体科学―流動現象のデジタルツイン―, 共立出版, 2021.

[4] Misaka, T., et al., “Deep Neural Network-Based Cost Function for Metal Cutting Data Assimilation,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 107, pp. 385–398, 2020.

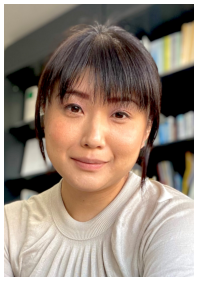
[5] Misaka, T., et al., “Turning Process Monitoring with Deep Neural Network Trained by FEM Simulation,” Procedia CIRP, Vol. 104, pp. 376–380, 2021.

[6] 菊地亮太, データ同化を用いた日本酒醸造工程の支援システムの開発, 日本醸造協会誌, Vol. 114, pp. 707–713, 2019.

[7] 小林健, 杜氏不在の純米大吟醸の製造, 化学工学, Vol. 79, pp. 530–534, 2015.

[8] Murase, Y., et al., “Mathematical Model for the Process of Brewing Japanese Sake and its Analysis,” Advances in Mathematical Science and Applications, Vol. 23, pp. 297–317, 2013.

[9] 設計と運用に活かすデータ同化研究会, http://www.ifs.tohoku.ac.jp/edge/DAE/ (2022年9月25日参照).



流体工学におけるデジタルツイン

焼野　藍子
東北大学流体科学研究所

1. はじめに

デジタルツインは主として製造業において，リアルタイムな情報連携により開発の効率化を図るプロセスモデルとして，近年改めて注目を集めている．開発段階での技術情報のデジタル化は，企画，設計，製造の各部門からのアクセス，最新情報の共有を円滑にすると考えられる．一方，デジタルツインは計算機支援工学(Computer Aided Engineering, CAE) モデルの進化型としての側面も持ち合わせている．流体工学では従来の実験流体力学に数値流体力学を併用する製品開発が主流であり，CAEを代表する分野の一つである．一般に，流体の支配方程式の非線形性，散逸性，偶然性の要素は，現象の解析，解明，モデル化や制御を困難にしている．今後さらに複雑・多様化した諸問題解決のためにも，高コストながら緻密な解析による流れの現象理解が必要である．

筆者はこれまで，流体機械の低抵抗化のため，遷移，剥離，そして乱流に作用する流体制御の研究を行い，特にエネルギー過渡増幅など流体安定性に基づく秩序渦に着目した機構解明や，制御の高性能化に関する研究に従事してきた[1-3, 5-10]．2017年秋から東北大学流体科学研究所の大林茂研究室助教に着任し，CAE技術革新のためのデータ同化にも着手した．本稿では，これまでの成果の一部をご紹介したいと思う．流体工学におけるデジタルツインのより詳細内容は，大林茂先生ほかによる「データ同化流体科学-流動現象のデジタルツイン-」(共立出版) [4] を参照されたい．

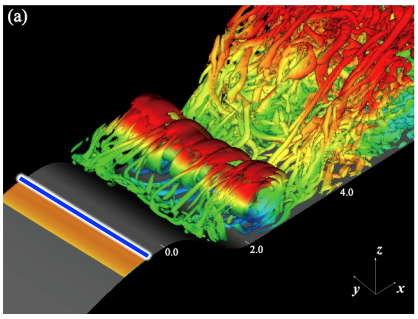
2. CFDによる流体現象の理解と制御

2－1. 流れの剥離と制御

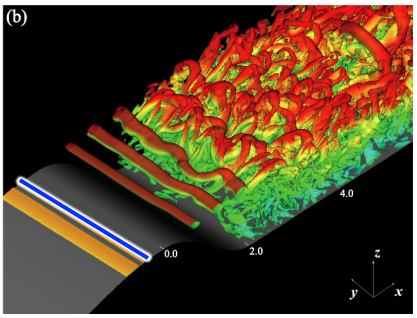
各種流体機器のエネルギー変換効率を向上するためには，流体抵抗の低減が肝要である．抵抗低減のため，機器形状の工夫だけでなく，流体へ積極的にエネルギーを付与する流体制御の研究開発が進められてきている．流体抵抗は主に流体の粘性による摩擦抵抗と流体の剥離による圧力抵抗からなるが，それぞれ異なる流体制御法が数多く提案されている．

例えば自動車の抵抗は，流れの剥離による圧力抵抗が主たる要因であり，これを低減する流体制御デバイスとして，車両背部の剥離位置付近に設置するボルテックスジェネレータが有名である．航空機では，高迎角による失速の抑制に，同様の効果を期待するデバイスを採用されている．一方，当時JAXA宇宙科学研究所において，藤井孝藏先生が代表になり「京」コンピュータの戦略プログラムとして，小型流体制御デバイスによる非線形流れ制御技術の開発に関する課題プロジェクトが推進された．そこでは，主に物体面に設置したプラズマアクチュエータの周期的駆動による，剥離抑制の制御に関する研究が行われた[5-10他]．筆者は当該プロジェクトに中核メンバーの一人として2012年10月から2016年3月まで参画しており，成果の一部を本稿で紹介したい．

圧力抵抗は，流れの剥離の抑制により達成されるが，そのためには物体表面付近への運動量投入が重要である．それにより，壁面垂直方向の圧力勾配の運動量を増加するので[7-9]，流線曲率の定理[11]から，流線を壁表面に近づけ，その結果，剥離が抑制されると考えられる．



(a)　周波数 $f_h = 0.10$



(b)　周波数 $f_h = 1.0$

図1 二次元ハンプを超える流れの様子[9]：レイノルズ数$Re_b = 4000$，等値面は変形速度テンソル第二不変量$Q = 4.0\times10^{-3}$，色は流れ方向速度 $u/u_\infty = -1.0$ (青) ~ 1.0 (赤). 青い線はアクチュエータの設置位置を示す：(a) アクチュエータ動作周波数 $f_h = 0.10$, (b) $f_h = 1.0$.

図1に，筆者が当時「京」コンピュータを用いて直接数値計算により計算した，二次元ハンプを超える流れの瞬時の可視化結果を示す．等値面は，渦運動を示す変形速度テンソルの第二不変量$Q = 4.0\times10^{-3}$，流れ方向速度 $u/u_\infty = -1.0$ (青) ~ 1.0 (赤) のように色づけてある．ハンプ後流は，ハンプ高さスケールの渦，剥離せん段層のケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定による渦の少なくとも２種類の秩序渦が発生する．剥離位置付近で，プラズマアクチュエータの周期的駆動によりそれぞれの秩序渦の発生を促進すると，流れの乱流化を早め，物体表面近傍への運動量の供給により，剥離を効率的に抑制することがわかった[7, 9]．図1(a)はハンプ高さスケールの渦を誘起する$f_h = 0.10$での駆動，(b)は剥離せん断層のKH渦を誘起する$f_h = 1.0$での駆動による流れ場の様子を示しており，いずれも効果的に剥離を抑制する．ここ

で周波数は，ハンプ高さh，主流速度u_∞を用いて，$f_h = fh/u_\infty$ のように無次元化してある．設置位置に関して，壁面剪断応力がゼロとなる剥離位置よりやや上流の圧力勾配がゼロの位置は，自由せん断流れの非粘性型二次元不安定性の起点となる変曲点に相当し[7, 9]，アクチュエータはこの付近に設置するべきであるとの知見を得ている[7]．

２－２．層流化

摩擦抵抗は乱流状態で増加することが知られており，層流から乱流への遷移を遅延する層流化によっても，低抵抗化が可能である．次世代超音速機の開発に向けて，最後の砦は低抵抗化による揚効比 (L/D) の向上であるとされる．中でも乱流による摩擦抵抗を低減する層流化は必須の技術の一つである．主翼は衝撃波による抵抗を低減するため後退角を有するが，そのために流れは三次元化し複雑な遷移過程を経て乱流化しやすい．二次元翼形状の工夫による層流翼は戦前より実用化されるが，三次元的後退翼では未だなされていない．遷音速旅客機であれば，主翼の50%を層流状態で維持できれば，航空機全抵抗のおよそ10%を低減できると考えられる．設計・製造技術の発達により各種技術の実用化への見通しがたってきたことから，現在，世界各国で開発にしのぎを削っている．日本では，東北大学流体科学研究所の大林茂先生が中心となり，NEDO先導研究プロジェクトの一部として主翼の層流化技術開発をおこなっている．筆者は2017年10月から現在まで参画し，主に後退翼前縁での遷移過程の解明，後退翼後流部のトルミーン・シュリヒティング (TS) 不安定による遷移を抑制する表面性状に関する研究を実施してきた[12-14]．

後退翼の前縁付近での流れは，後流域での遷移過程に影響が大きく，これまで半世紀以上にわたり主に実験と理論計算により解析が試みられてきたが，未解明な点が多く残されていた．例えば，漸近解を仮定する従来の安定性理論に基づき，遷移のもとになる波の存在が確認されたが，風洞試験で観察される波の波長とは一致していなかった．さらに欧米での飛行試験の結果からは，大型の航空機では，胴体で生じる境界層の乱れが主翼前縁部に侵入し，風洞実験では捉えることが難しい遷移過程が引き起こされる可能性を指摘されていた．しかし，それを証明することは困難であった．そこで筆者らは，流体科学研究所スーパーコンピュータAFFINITYを用いた超並列計算(1ケースあたり最大3000並列×約200時間)を用い，人工的に遷移を促進する擾乱の与え方を工夫することで，航空機の主翼前縁部で遷移のもとになる二つの波の発生と成長過程の詳細を捉えることに成功した[12] (図2)．これにより，従来，風洞実験でも確認されていた定在波だけでなく，後退方向に移流する進行波についても，その発生の詳細を観察することができた．このような成果は，超並列計算を可能にする計算機，各種計算手法を含めた，計算技術の発展によるところが大きい．

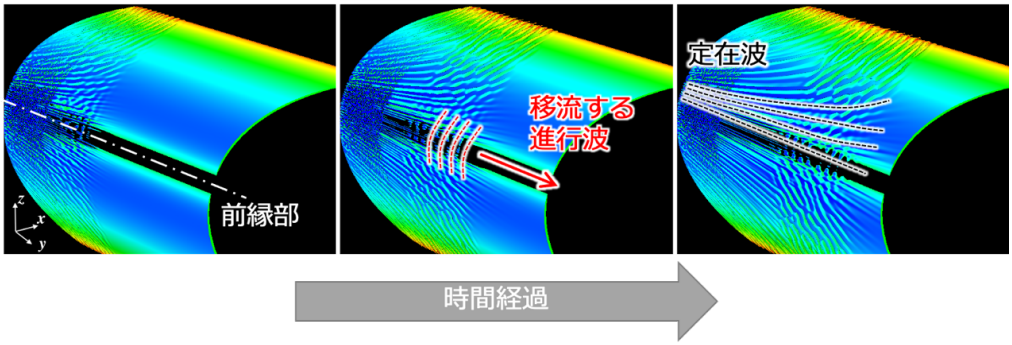


図2 後退翼前縁部周辺の流れ場の可視化の様子[12]，遷移のもとになる波が縞模様で表れている：
等値面は変形速度テンソルの第二不変量であり，スパン方向速度で色付けしてある．

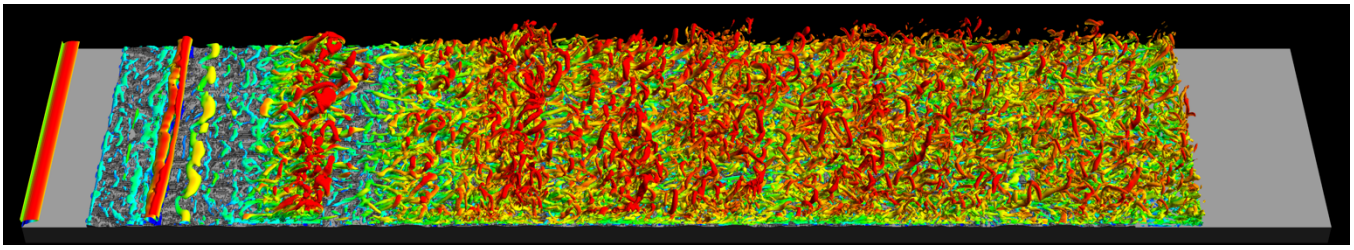


図3 砂状粗面上の流れ場の可視化の様子[14]，図中左から流れてきたTS渦の崩壊の詳細が捉えられている：
等値面は変形速度テンソルの第二不変量であり，流れ方向速度で色付けしてある．

本研究ではさらに，流れの安定性理論との比較もおこなっている．安定性解析に従来のように漸近解を仮定せず，非直交モードの重ね合わせによる有限時間でのエネルギー増幅に焦点を当て，各ターゲット時間に対するエネルギー過渡増幅を算出した．その結果，本数値計算で観察される波の波長は，短い時間で不安定化する非直交モードの最適成長波長と一致することを突き止めた[9]．それにより，後退翼前縁部の遷移のもとになる波の発生は，従来の漸近的不安定性ではなく，短い時間のエネルギー過渡増幅に支配される可能性が高いことを示した．本研究で有効性が確かめられた理論により，流れの遷移のしやすさを

はかる簡便な予測法の精度が著しく向上するため，将来的に低計算コストな技術開発を可能にすると考えられる．本研究で構築した解析技術は，航空機開発において世界に一歩先んじるために重要な成果とも言える．

筆者らは，後退翼前縁部の遷移現象の解析のほか，後流のTS遷移の遅延を期待したマイクロサイズ粗面の効果に関する直接数値計算も実施している[13, 14]．物体表面の粗さは，一般には遷移を促進し，それにより摩擦抵抗を増加すると考えられてきた．しかしながら，谷一郎先生の言及[15]，小濱泰昭先生による実験[16, 17]から，小さな粗さは，形状によって遷移遅延または乱流抵抗低減をもたらす可能性を指摘されていた．筆者らは，実験で用いたマイクロサイズで非秩序的に分布する砂状粗面をVolume Penalization (VP) 法と重合格子法により再現し，上流に与えたTS波を介する遷移過程の詳細を解析した(図3)．その結果，砂状粗面上のTS波は早く崩壊するが，それにより乱流エネルギーの増加がむしろ抑えられることがわかった．相関してレイノルズ応力の増加も抑制され，結果として摩擦抵抗の増加を弱める傾向があることを見出した[14]．実用化を踏まえた今後の展開が期待される．

3．低細長比円柱後流PIVデータ同化による乱流モデル修正

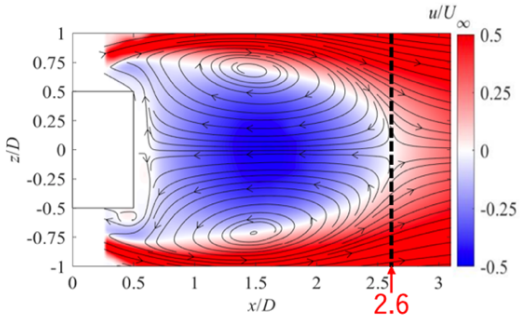
本節では大林茂先生が代表をされる令和3年度科研費基盤研究(A)プロジェクトの成果の一部として，現大林研究室博士課程1年の野本京佑くんが主として実施した研究内容を紹介する[18]．データ同化は気象分野で古くから行われてきているが，本研究室ではこれまで，その工学分野への応用について検討を行ってきている．製品開発の過程では，モデルの不正確さから，数値計算は未だ補助的な役割にとどまっている．一方，実験は制約の多い条件で限られた領域の値しか取得することができない．そのため，数値計算と実験の相互の弱点を補い，いずれの結果もの整合性を高めるデータ同化は注目度が高い[1]．東北大学では，風洞内に磁力によって模型を支持する磁力支持天秤装置により，鈍頭物体模型の空気力や流れの Particle Image Velocimetry (PIV) 計測 をおこなってきている[19, 20]．本プロジェクトではそれら実験データを用いて，数値計算のモデル化精度を高める手法を実証することで，進化型CAEとしてのデジタルツイン構築を試みる．

本研究ではまず，PIVにより取得した，低細長円柱の後流に関する二次元平面での平均流速分布データ624点を用いた．数値計算は，JAXAにより開発されたFaSTAR[21] により，レイノルズ平均ナビエ・ストークス (Reynolds-Averaged Navier Stokes, RANS) 方程式の格子数191万点の三次元数値計算について，標準的な乱流モデルであるSpallart-Allmaras (SA) モデル[22] によりおこなった．データ同化は，アンサンブルカルマンフィルターを元に開発された平方根フィルター (Square Root Filter, SRF) [23] を用いた逐次データ同化により，SAモデル係数のうち2つ (C_{b1}, C_{b2}) の修正をおこなった．

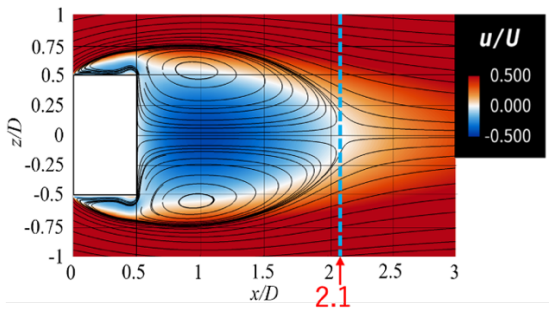
用いたPIV計測結果，修正なしと修正ありのRANS計算結果を，それぞれ図4 (a), (b), (c) に載せる．図は，平均速度分布のベクトルの接線を繋いだ流線と，流れ方向速度の大きさを色で示している．まず，流れ方向速度が負から正に反転する再循環領域の後端は，モデル係数の修正により，RANS計算はPIV結果により近づけることができた．PIVは特に物体上面と後流の表面付近のデータが欠損しているが，RANSでは上下面で対照的に再現されている．平均速度の軸対照渦の中心位置は若干ずれているものの，おおむね改善されることがわかった．表に，2つのSAモデル係数 (C_{b1}, C_{b2}) の初期値と修正後の最適値の平均と標準偏差をそれぞれ示す．いずれも収束により標準偏差が微小になり，平均値は初期値から変化していることがわかる．

表　SA モデル係数の初期値と修正後の比較

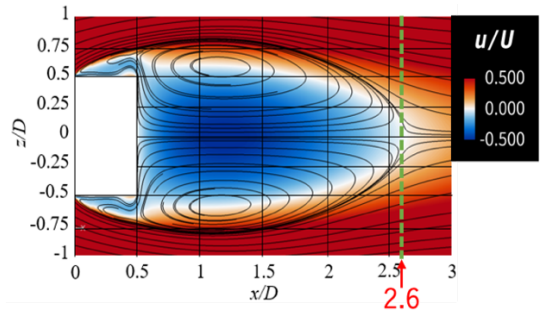
	C_{b1}		C_{b2}	
	初期値	最適値	初期値	最適値
平均	0.1355	0.1430	0.6220	-0.1060
標準偏差	3.94E-2	3.46E-6	1.10E-1	2.96E-5



(a)　PIV 計測データ[19, 20]



(b)　オリジナルの係数による RANS 計算結果[18]



(c)　修正C_{b1}, C_{b2} による RANS 計算結果[18]

図4 低細長比円柱後流の流れの様子：
流線と流れ方向速度 u/u_∞ の分布．

4. 可観測性の考え方に基づく計測データの最適選択

最後に，現大林研究室博士課程3年の吉村僚一くんが主として実施した研究内容を紹介する. 流体の支配方程式の本質的な性質や実用的に使用するモデルの不完全さのため，時間経過により誤差は大きくなっていくが，計測データの同化により，誤差を低減することができる. 何の，何処の，計測データを同化するかは，予測の精度を大いに左右する. 一般には膨大な自由度を持つ数値計算の変数を，限られた計測データで最適化する問題において，変数や計測地点の選択が必要である. このように，最適な計測地点・計測時刻・計測変数を調べる取り組みは，機動的観測 (Targeted Observation) として知られている[24]. そのための手法として，データ同化の枠組みで行う手法[25-27]や，シミュレーションの初期値鋭敏性を利用した方法[28]などが提案されている.

以上の手法の 1 つとしてKangらにより新しく提案された「可観測性」に基づく手法[29, 30]は，これまで気象分野でもあまり応用例がなく知見がほとんどなかった. そこで筆者らは本手法を気象予測における風の推定に応用し有効性を調査した[31]. Kangらの定式化では，可観測性の強さはシステムの時系列出力がシステムの初期状態の推定に必要な情報をどの程度持っているかを指す. データ同化問題においては，予測にあたり計測値がどの程度重要かと読み替えることができる. 可観測性の強さは，シミュレーションの状態遷移行列と観測行列から構築した，可観測性グラミアン (グラム行列) の最小固有値の大きさで近似される. 大規模計算ではグラミアンのサイズが巨大になるため，Kangらは複数の直交基底を摂動として与えた計算の出力から，計測点の履歴を取り出して近似した「経験的グラミアン」による手法についても紹介している.

本研究では，数値予測モデルWRF-ARW[32]を用いて，２つの異なる気象計算を行い，それぞれを「偽の計算」,「真の計算」とする双子実験と呼ばれるデータ同化実験を行った. 真の計算から取り出した疑似風速計測値を，偽の計算に３次元変分法[33]を用いてデータ同化し，偽の計算が真の計算にどの程度近づくかを評価した. 風速計測点は 1 点として地点を変えつつ複数の実験を行い，データ同化による誤差減少量が計測地点に依存する様子を可視化した(図5 (b)). 一方，各計測点でKangらの手法を用いて可観測性の強さを予測し，その空間分布を可視化した(図5 (a)). データ同化時刻直前6時間分の偽の計算から取得した風速計測値の時間履歴を用い，経験的可観測性グラミアンを構築し，その最小固有値を可観測性の強さとした. 経験的グラミアンの構築にあたり，風速場の上位4つのPODモードを使用した.

結果として，可観測性グラミアンの最小固有値の大きさは風速データ同化による予測精度向上幅と相関を持つことが分かった(図5 (a), (b)の領域A). 図5 (b), (c)では，可観測性グラミアンの最小固有値と鉛直成分渦度の時間変化の大きさとの間には相関がみられ，その相関係数の大きさは0.8程度であった. ここから，可観測性が強い地点での風速計測値が，渦度変動に起因する数値予測の不確実性を低減するという形で，予測誤差を減少することが示された.

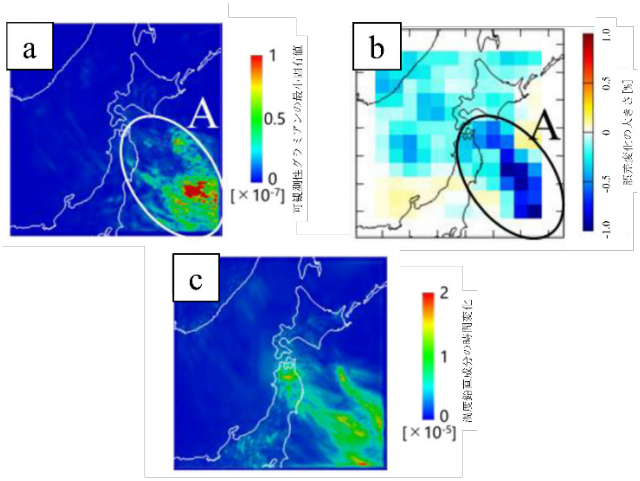


図5 結果の比較[31]: (a) 可観測性グラミアンの最小固有値の分布，(b) データ同化による誤差減少の大きさ，(c) 渦度の時間変化の大きさ.

おわりに

本稿では，流体工学のデジタルツインと題し，従来の実験流体力学に数値流体力学を併用する，計算機支援工学 (CAE) の最新の成果に関する内容についてご紹介した. デジタルツインにより製品化は効率化されることが期待される. 一方，より高速化，電動化など検討される次世代輸送機の開発では，後退翼前縁部で発生する秩序構造，微小粗さの流れ場へ与える影響など，これまでの知見では説明できず，未だモデル化なされていない現象が多くある. その解明には，やはり高コストながら緻密で原理的な解析は今後も必要不可欠と思われる.

本稿でご紹介したように，従来気象分野で用いられる統計的モデル化によるデータ同化技術は，流体工学においても有効的に利用される. ここでも，適用先によって計測地点・計測時刻・計測変数を適切に選択することが肝要であり，現象に関する基礎知識なくしては容易ではない. その選択には，制御分野の可観測性の考え方を用いることも可能である. その際は，流体の支配方程式の非線形性，散逸性，偶然性の要素は排除されることを考慮しなければならない. 今後さらに，データ同化の利用に関する知見を蓄積することがのぞまれる.

謝辞

本研究の一部は，(スーパーコンピュータ「京」／東北大学流体科学研究所が提供するスーパーコンピュータ「AFFINITY」) の計算資源の提供を受け実施しました (hp120296, hp130001, 140207, hp150219 ／ SP01APR18, SP01APR21). また，JSPS 科研費 (21H04586), IFS公募共同研究費 (J20I074, J21I031, J22I025), NEDOの委託業務 (JPNP20010) の支援を受けました. 本論文執筆にあたり，東北大学流体科学研究所大林茂教授，大学院生の吉村僚一君，野本京佑君，濵田真伍君にご協力をいただきました. ここに改めて謝意を表します.

参考文献

[1] A. Yakeno, Drag reduction and transient growth of a streak in a spanwise wall-oscillatory turbulent channel flow, Physics of Fluids, 33(6) (2021) 065122.

[2] A. Yakeno, Y. Hasegawa and N. Kasagi, Modification of quasi-streamwise vortical structure in a drag-reduced turbulent channel flow with spanwise wall oscillation, Physics of Fluids, 26(8) (2014) 085109.

[3] 焼野 藍子, 長谷川 洋介, 笠木 伸英, 時空間的周期性を有するプレデターミンド制御の壁乱流摩擦抵抗低減機構, 日本機会学会論文集B編 76(764) (2010) 555-562.

[4] 大林 茂, 三坂 孝志, 加藤 博司, 菊池 亮太, データ同化流体科学-流動現象のデジタルツイン-, 共立出版 (2021).

[5] M. Sato, K. Okada, K. Asada, H. Aono, T. Nonomura and K. Fujii, Unified mechanisms for separation control around airfoil using plasma actuator with burst actuation over Reynolds number range of 103 – 106, Physics of Fluids, 32 (2020) 025102.

[6] M. Sato, K. Asada, T. Nonomura, H. Aono, A. Yakeno and K. Fujii, Mechanisms for turbulent separation control using plasma actuator at Reynolds number of 1.6 × 106, Physics of Fluids, 31 (2019) 095107.

[7] A. Yakeno, Y. Abe, S. Kawai, T. Nonomura and K. Fujii, Unsteady shear layer flow under excited local body-force for flow-separation control in downstream of a two-dimensional hump, Int. J. Heat and Fluid Flow, 74 (2018) 15-27.

[8] A. Yakeno, Y. Abe, S. Kawai, T. Nonomura and K. Fujii, Spanwise modulation effects of local body force on downstream turbulence growth around two-dimensional hump, Int. J. Heat and Fluid Flow, 63 (2017) 108-118.

[9] A. Yakeno, S. Kawai, T. Nonomura and K. Fujii, Separation control based on turbulence transition around a two-dimensional hump at different Reynolds numbers, Int. J. Heat and Fluid Flow, 55 (2015) 52-64.

[10] M. Sato, T. Nonomura, K. Okada, K. Asada, H. Aono, A. Yakeno, Y. Abe and K. Fujii, Mechanisms for laminar separated-flow control using dielectric-barrier-discharge plasma actuator at low Reynolds number, Physics of Fluids, 27 (2015) 117101.

[11] 今井 功, 流体力学, 岩波書店 (1970).

[12] A. Yakeno and S. Obayashi, Propagation of stationary and traveling waves in a leading-edge boundary layer of a swept wing, Physics of Fluids, 33(9) (2021) 094111.

[13] H. Tameike, A. Yakeno and S. Obayashi, Influence of small wavy roughness on flat plate boundary layer natural transition, J. Fluid Science and Technology (JFST) 16(1) (20201) JFST0008.

[14] S. Hamada, A. Yakeno and S. Obayashi, Ultra-fine roughness effect on transition delay using direct numerical simulation, Proceedings of TSFP12, (2022) 343.

[15] I. Tani, Re-evaluation of Nikuradse's experimental data for rough pipes, Proceedings of the Japan Academy, 65 (B) (1989) 133-136.

[16] E. Oguri and Y. Kohama, Transactions of the JSME (in Japanese), 62, 597 (1996) 1754-1761.

[17] E. Oguri and Y. Kohama, Transactions of the JSME (in Japanese), 64, 625 (1998) 2942-2949.

[18] 大林 茂, 野本 京佑, 焼野 藍子, 野々村 拓, データ同化による風洞実験デジタルツイン構築の試み, 第60回飛行機シンポジウム講演論文集, (2022) 1A11.

[19] M. Kuwata, Y. Abe, S. Yokota, T. Nonomura, H. Sawada, A. Yakeno, K. Asai and S. Obayashi, Flow characteristics around extremely low fineness-ratio circular cylinders, Physical Review Fluids, 6(5) (2021) 054704.

[20] 桑田 政英, 磁力支持天秤装置と数値解析による低細長比円柱の空力特性に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士論文, (2020).

[21] A. Hashimoto, K. Murakami, T. Aoyama, K. Ishiko, M. Hishida, M. Sakashita and P. R. Lahur, Toward the fastest unstructured CFD code "FaSTAR", in 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, (2012) AIAA-2012-1075.

[22] P. Spalart and S. Allmaras, A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, Research Aerospatiale, 1 (1994) 5-21.

[23] M. K. Tippett, J. L. Anderson, C. H. Bishiop, T. M. Hamill and J. S. Whitaker, Ensemble square-root filters, Monthly Weather Review, 131 (2003) 1485-1490.

[24] S. D. Aberson, Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. Monthly Weather Review, 131(8) (2003) 1613–1628.

[25] N. Baker and R. Daley, Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 126.565 (2000) 1431–1454.

[26] R. H. Langland and N. L. Baker, Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography 56.3 (2004) 189–201.

[27] J. Liu, E. Kalnay, T. Miyoshi and C. Cardinali, Analysis sensitivity calculation in an ensemble Kalman filter. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 135 (2009) 1842–1851.

[28] A. Carrassi, A. and F. Uboldi, Adaptive observations and assimilation in the unstable subspace by breeding on the data-assimilation system, Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 59.1 (2007) 101–113.

[29] W. Kang and L. Xu, Computational analysis of control systems using dynamic optimization, arXiv: Optimization and Control (2009).

[30] W. Kang and L. Xu. 2012. Optimal placement of mobile sensors for data assimilations. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography 64.1 (2012) 17133.

[31] R. Yoshimura, A. Yakeno, T. Misaka and S. Obayashi, Application of observability Gramian to targeted observation in WRF data assimilation, Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 72.1 (2020) 1-11.

[32] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR, Citesser (2008).

[33] D. M. Barker, W. Huang, Y. R. Guo and A. Bourgeois, A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5. NCAR Tech Note, 68 (2003).

部門からのお知らせ

2022年度年次大会の開催報告

桑水流　理
福井大学　学術研究院工学系部門　原子力安全工学講座

2022年度年次大会が2022年9月11日（日）から14日（水）まで、富山大学五福キャンパスにて、対面形式で開催された（写真1）。会期中は好天に恵まれ、暑い中での開催となった。コロナ対策の一環として、当日会場での参加登録はできず、全員がオンラインで事前に登録を済ませた上で参加した。会場受付では参加者のQRコードを読み込むだけで受付が完了したため、初日から行列もなく、スムースに参加できた（写真2）。ただし、対面開催とは言え、マスクを常時着用しているため、顔の3分の2は見えないわけで、人の顔を覚えるのが苦手な筆者にとっては、どなたか確信が持てない方が何名かおられ、声をお掛けするのをためらってしまった。ご挨拶しそびれた先生には、この場をお借りして、お詫び申し上げます。そんな著者の冷や汗をよそに、年次大会は問題なく順調に開催された。筆者はマスクを汗で濡らしながら、計算力学部門関連のセッションを渡り歩いた。

写真1　会場の富山大学五福キャンパス正門と学会立て看板

写真2　会場受付入口の様子（右側は機械遺産展示）

全体の参加者は1,654名（うち正員904名、特別員38名、会員外98名、学生員584名、一般学生30名）となり、年次大会としては多くはないが、コロナ感染拡大が心配される中での対面開催であったので、盛会と言ってよいであろう。セッション数は68件、特別講義2件、特別行事企画は66件、一般発表件数は860件（うち口頭604件、ポスター 256件）となり、約30室に分かれて、多数の講演が行われた。そのうち、特別講義2件と特別行事企画8件は、対面とオンライン（YouTube配信）のハイブリッドで実施され、今後もオンラインの活用が学会運営の鍵となるように思われた。一方、懇親会およびほとんどの部門同好会は実施されず、Withコロナ時代の人脈づくりの難しさは、まだ解決策が見つからない状態である。

筆者が聴講したセッションでは、一部で満席に近い教室もあったが、多くのセッションでは十分なスペースがあり、換気や消毒に注意しつつ、コロナ対策ができており、快適に聴講させて頂いた。スライドの文字が小さくて見えなかったり、聴講者からの質問の声が小さくて聞こえなかったりと、昔ながらの対面ある あるを感じながら、久々の対面開催を楽しむことができた。

黒田講堂で開催された梶田先生（東京大）の特別講義「KAGRA重力波プロジェクトとそれを支える技術」では、多くの聴講者が集まっていた（写真3）。計算力学部門関連では、一般開放行事／市民フォーラムとして、「デジタルツイン構築における人とAIの役割とは～ Industry 4.0、Society 5.0を超えるパラダイムを目指して」のPart 1とPart 2が開催され、Part 2ではドイツの研究者4名とオンラインで繋ぎ、日独シンポジウムが開催された（写真4）。時差があるものの、オンラインでの活発な議論がなされていた。また、特別行事企画／先端技術フォーラム「金属AMにおけるDesign for Additive Manufacturingを理解するために」では、前計算力学部門長の高野先生（慶応大）の基調講演があり、多くの聴講者と熱心な議論がなされていた（写真5）。これらのご講演では、本大会のテーマでもあるDXに関連する技術として、デジタルツインの話が多く議論されていた。特に機械加工分野でのDXとして、デジタルツインやAMを活用した、次世代のものづくりに向けた試みが多数紹介されていた。その根底には複雑なシミュレーション技術がベースとなっており、課題は多いものの、未来に夢を感じさせてくれる内容であった。

写真3　梶田先生（東京大）による特別講演の様子

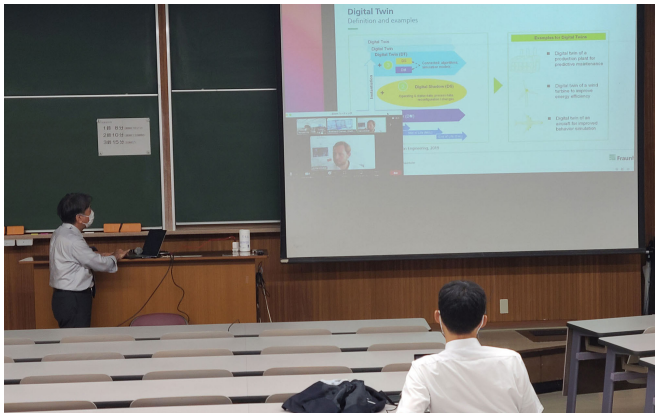


写真4　ハイブリッド開催されたセッションの様子

写真5　高野前部門長（慶応大）の基調講演の様子

その他の計算力学部門関連のセッションも盛況であり、常時20～40名程度の聴講者を集めていた。特に「1DCAE・MBDのためのモデリング」や「解析・設計の高度化・最適化」は多くの発表があり、賑やかであった。また、医工学テクノロジー推進会議企画の一般開放行事／ワークショップ「機械工学分野における少子高齢化社会の課題解決に向けた活動推進」でも、計算力学部門を代表して高野先生（慶応大）がパネリストとして参加された。医療技術に対する機械工学の役割が議論され、多くの聴講者が耳を傾けていた。

写真6　ポスターセッションの様子

一方で、学生発表の多くはポスター発表に回され、4回に分けて、各90分のポスターセッションが学生会館で実施された（写真6）。会場は十分なスペースがあり、過度な密集は避けられていた。対面ならではの濃密な議論が行われており、オンラインではこのような濃密な議論はできないことを改めて認識させられた。そして、コロナに負けず、頑張っている学生たちの姿を見ることができて、とても嬉しかった。

全体を通じて、対面開催の良さを再認識させられた大会であったが、オンラインの利便性は忘れがたく、対面とオンラインの相補的な運用が今後も強く求められることと思う。また、懇親会がない学会の寂しさは否めず、人的ネットワークづくりの場をどのように提供していくのか、学会としての課題はまだ残っている。ただし、セッション合間での旧知との雑談は僅かな時間でも嬉しかった。

末筆ながら、コロナ感染が拡大する中での開催となり、コロナ対策を万全にした上で、大会の開催にご尽力された下山大会委員長（富山県立大）、小熊実行委員長（富山大）をはじめ、実行委員会の先生方、および特別企画やOSのオーガナイザーの皆様に、改めて感謝申し上げたい。

《各行事の問い合わせ、申込先》
日本機械学会計算力学部門担当　石澤 章弘　E-mail: ishizawa@jsme.or.jp
〒162-0814 東京都新宿区新小川町4番1号 KDX飯田橋スクエア2階　TEL 03-4335-7610　FAX 03-4335-7618

計算力学部門ニュースレター No. 68 : 2022年12月8日発行
編集責任者：広報委員会委員長　倉橋 貴彦
ニュースレターへのご投稿やお問い合わせは下記の広報委員会幹事までご連絡ください。
なお、各記事の文責は著者にあります。
広報委員会幹事　篠崎 明　E-mail: akira.shinozaki@mizuho-rt.co.jp
みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部
〒101-8443　東京都千代田区神田錦町2-3
TEL 03-5281-5415　FAX 03-5281-5331