東洋大学計算力学研究センター

2018年度 年報



Toyo University

2019年3月

2018 Annual Report of

Center for Computational Mechanics Research

Toyo University



March 2019

目次

	· · · · · 1
2. センターの概要	2
2.1. センター設置について	2
2.2. 組織	3
2.3. 構成メンバー	4
3. 研究成果	5
3.1. 連成解析グループ	5
3.1.1. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	5
3.1.2. 構造・音響・流体のマルチフィジクス解析	9
3.1.3. 微生物に誘発された地盤固化作用の数理モデル化・シミュレーション	10
3.1.4. 大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当	自性検証
	17
3.1.5. バーチャルリアリティ技術を用いた複雑現象の可視化	
3.1.6. コンクリート構造物の 3 次元塩害劣化予測シミュレーターの開発	
3.1.7. 粘弾性被膜を有する物体に作用する空気力特性	31
3.1.8. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認	認実験
	35
3.1.9. 実験との融合による精度向上に関する研究	40
3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47
3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量	47 最適化
3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量	47 最適化 52
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量 3.2. AI グループ 	47 最適化 52 56
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量 3.2. AI グループ 3.2.1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構 	47 最適化 52 56 購築 56
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量 3.2. AI グループ 3.2.1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構 3.2.2. 深層学習による計算力学の高度化: 深層学習を用いた高精度有限要素解析 	47 最適化 52 56 毒築56 斤61
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47 最適化 52 56 毒築56 斤61 67
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47 最適化 52 56 奪築… 56 斤 61 67 72
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量 3.2. AI グループ 3.2.1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構 3.2.2. 深層学習による計算力学の高度化:深層学習を用いた高精度有限要素解析 3.2.3. Convolutional LSTM を用いた流体解析結果予測	47 最適化 52 56 奪築…56 斤61 67 72 77
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47 最適化 52 56 奪築…56 斤61 67 72 77 72
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析 3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能量 3.2. AI グループ 3.2.1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構 3.2.2. 深層学習による計算力学の高度化:深層学習を用いた高精度有限要素解析 3.2.3. Convolutional LSTM を用いた流体解析結果予測	47 最適化 52 56 奪築…56 斤61 67 72 77 82 82
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47 最適化 52 56 奪築…56 斤61 72 77 82 86 86
 3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析	47 最適化 52 56 等築…56 斤61 72 77 82 86 86 86

4.2.	. 「知」の集積と活用の場プロジェクト	
4.	2.1. 研究実施内容	
4.	2.2. 研究実施体制	
4.3.	. 東京電力との共同研究	
5.	成果の広報および普及活動	
5.1.	. 韓国・成均館大学にて日韓合同学生ワークショップ開催	
6.	学術活動	92
6.1.	論文投稿	
6.2.	学会発表	
6.3.	招待講演	
6.4.	. 受賞	
7.	終わりに	100

1. まえがき

2012 年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されたプロジェクト「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」が一昨年度に終了となり、昨年度から東洋大学計算力学研究センターはまた新たなスタートとなった.本報告はその2年目の活動を中心にとりまとめたものである.

研究内容は、これまでのように中心となるプロジェクトは持たないが、大きく2つの分野(グループ) を作っている.1 つは、これまでのプロジェクトの延長線上の位置づけで、流体-構造連成を中心と した連成解析分野、もう1つはさらに1つ前のプロジェクトでテーマとしていた逆問題・最適化からの 流れを発展させた人工知能分野の研究である.前者についてはこれまでの研究成果の上に、より 幅広い応用を考え、後者は計算力学における逆問題や最適化を踏まえつつ最新の人工知能技 術をどのように適用していくかといった新しい分野の開拓を目指している.

また,本センターの今後の方向性として,産官との連携や,大学院を中心とした学生・若手研究 者の育成を目指した活動についても,まとめて記している.

本センターの活動にあたっては、学内外の研究者・技術者の方々、また、本学担当事務部にも 多大なご支援・ご協力を賜っている。各々名前を挙げることはしないが、ここにあらためて謝意を表 するとともに、関係各位にはさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2019年3月

東洋大学計算力学研究センター長 田村 善昭

2. センターの概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から 設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した.その後、平成 23 年度に科学技術振興機 構の戦略的研究推進事業 CREST の選定,続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略 的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている.

本センターに参加する研究員は,東洋大学の複数学部の教員(国際学部,総合情報学部, 理工学部),研究助手,大学院生などを中核とし,また客員研究員として関連分野の研究者 から構成されている.

各自の専門分野は,構造解析,流体解析,破壊解析,逆問題・最適化,大規模並列計算, 可視化など,計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており,この分野におけ る専門家集団である.平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用の ための超大規模解析技術に関して,また平成 24 年度からは,私立大学戦略的研究基盤形成 支援事業の選定を受け,連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組 んでいる.

さらに,東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的 に交流を進め,若手の人材育成にも寄与したいと考えている.

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである.

- 平成17年6月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され、計算力学研究センター発足
- 平成17年12月センター開所式開催のあと、白山第2キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成22年3月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成23年8月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成24年4月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高 精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される
- 平成 29 年 3 月「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」終了
- 平成 30 年 3 月「科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST」終了

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである.



Fig.2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている.

<u>センター長</u>

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

研究員

- 芦野 俊宏 (東洋大学国際学部国際地域学科教授)
- 河合 浩志 (東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
- 塩谷 隆二 (東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
- 新藤 康弘 (東洋大学理工学部機械工学科助教)
- 田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
- 中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
- 藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科教授)
- 藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)
- 村上 真(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)

研究助手

鄭 宏杰(東洋大学計算力学研究センター)

客員研究員

- 江澤 良孝(工学院大学非常勤講師,元東洋大学総合情報学部教授)
- 大石 篤哉 (徳島大学大学院理工学研究部准教授)
- 金山 寛(日本女子大学特任教授,九州大学名誉教授)
- 杉本 振一郎 (八戸工業大学工学部機械工学科)
- 富山 潤(琉球大学工学部准教授)
- 增田 正人 (東京大学大学院農学生命科学研究科応用動物科学専攻特任研究員)
- 松原 仁 (琉球大学工学部助教)
- 矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長,東京大学名誉教授,東洋大学名誉教授)
- 横山 真男(明星大学情報学部准教授)

3. 研究成果

3.1. 連成解析グループ

3.1.1. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標·計画

A)静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く,東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し,ADVENTURE_Magneticを公開してきた.最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど,実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる).本研究では,この高速化に対応する研究を行い,もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく.ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない.また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている.実際,大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが,本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより,追随者の上を行くPerfect Only Oneを目指す.

B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算 サービスを行っているベンチャー企業も現われている. ADVENTURE_sFlowでは磁場解析 や構造解析と同様な手法で計算しているので,高速化の検討を共通の課題として行え,入 カデータの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある. 低炭素社会向けシ ミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも,この特長を早く引き出 したいと考えている.

(2) 意義・国際社会との比較

3次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており,信頼のおける数 値解法が未だ十分確立されていない状況にある.このようななかで,我々は菊地理論をベ ースに,工学的応用を展開するという形を採っており,国際的に見ても極めてユニークな 注目すべき研究を展開している.これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある.今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが,電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している.非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので,それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている.

(3)研究内容

A)静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析,特に3次元渦電流解析(複素自由度4,355万の問題が 32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている)並びに1億自由度を最近可能にした3次元 非線形静磁場解析に対しては,領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更な る高速化に関する課題に焦点を絞って研究する.

「離散化に伴い生じる超大規模(1億自由度以上)の疎な対称連立1次方程式と連立非線 形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し,特にもう1桁の高速化 を可能にする前処理方法を確立する.」

B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る.2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向け シミュレーション技術でも応用があったので,熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も 含めて追加され,前処理機能の強化による高速化が実現されたため,実用レベルの有効性 をチェックする段階になっている.非定常解析機能ではStokes問題のみならず, Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活 用できることがポイントになっている.

(4) 平成 30 年度進捗状況

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

2014年度からBDD前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した. 一つはシュアコンプリメント行列Sとベクトルpの積qを計算する部分を独立して利用可能にすること,二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること,三つ目はコース行列を作成し,それを既存のパラレルソルバーで解くことである. この三つが実現できれば,BDDの実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な3項目になる.ノイマン

ノイマン前処理は 2005 年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており,新たな 開発を行うことになった、現時点ではコードの骨格はできたが、残念ながら効果が全く出 ていない. 部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか,何かミス を犯しているのかを見極める必要がある.予想外に時間がかかったのは最初の q=Sp の計算 であり、いくつか試みた結果、2015 年度から 2016 年度にかけて LexADV の TryDDM を適 用することにより、ようやく1コアの BDD 前処理に見通しをつけることができた.ただし 本来の BDD 前処理は内蔵しているノイマンノイマン前処理ともども依然として効果がでて おらず,唯一 BDD 前処理を簡易化した BDD-DIAG 前処理のみが収束する. 前述のとおり LexADVの TryDDM を適用したので、自由度規模が 100 万以内に抑えられている.この程 度の規模では BDD-DIAG 前処理の効果は芳しくなく, ADVENTURE_Magnetic のデフォー ルト前処理になっている簡易対角スケーリング前処理(diag)の反復回数を減らすことができ ない状態である. 2017-2018 年度も現在に至るまで、いくつかのベンチマーク問題で BDD-DIAG 前処理の効果をいろいろな視点からテストしているが、いずれの場合もほぼ同 様な事情になっている. 2018 年度は特にマルチコアでの処理を可能とし、シュアコンプリ メント行列 S を陽に作成しないアプローチを可能にした. 3 番目のコース行列作成部分は 当初,既存技術の適用で問題がないと思っていたが,出発点になっている静磁場問題の不 定性を反映して、コース問題にも特異性があることが判明し、 2016 年度はこのコース問題 を反復法で解くことを試みた.ここでも前処理なしの CG 法を利用しているが,相対残差が 落ちるまで収束させるより, 初めの 10 回で強制的に終了させる CG(10)が ADVENTURE Solid 等で用いられている不完全分解に対応して有効であることが数値的に 確認できた. 今後,問題を変更しても 10 回で良いのか等の確認が必要である. また, 2017 年度はこのコース問題を直接法の系統で解けないかということも検討した. 2018 年度はテ ストした例題では問題がなかったので既存技術を適用することに戻った.また 2018 年度に は、これまでの BDD-DIAG 前処理を一般化した Damped BDD-DIAG 前処理を提案した.

B)熱対流解析コードの機能強化

このテーマは 2014 年度からの課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した. すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

- ・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
- ・熱流束境界条件入力機能の追加
- ・熱伝達境界条件入力機能の追加
- ・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである. 最初の DDM フレームワークの適用は開発ライブラリのプロトタイプ

(LexADV の TryDDM)のテストを兼ねたものであり、一応利用可能になった.2番目、3 番目のテーマは1番目のテーマが可能になった時点で、DDM フレームワークでの実現が可 能になった.4番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果、これも可能になった. 以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0を公開した.2015年度は自動販売機 内の熱対流計算での実践を通して、Ver.1.0の信頼性をチェックすると同時に、燃料電池自動 車の市場投入に同期させて水素漏洩時の拡散現象を熱対流のアナロジーで解く試みを本格 化させる準備を行った.2016年度は水素漏洩時の拡散現象を中国の中山大学の Yao 准教授 の協力で実際に計算することができた.今後の課題は静磁場解析同様、熱解析の部分が LexADV の TryDDM を使っているための 100万自由度の壁を突破することと ADVENTURE_Thermalを参考にしながらの BDD 前処理を導入することである.これらの課 題をクリアしていくことにより、自動販売機の熱対流解析、燃料電池自動車からの水素漏 洩時の拡散解析を核にして ADVENTURE_sFlowの産業界での応用を促進していく. 2017-2018年度は全精力をサブテーマAに注いだため、サブテーマBの課題は2019年度以 降に持ち越された.



Velocity and Concentration

Fig.1. Time Histories of Velocity and Concentration in Hydrogen Dispersion.

(5) まとめ

両テーマとも, 2018(平成 30)年度までの成果をブラッシュアップし, 更なる展開を図る予 定である.

3.1.2. 構造・音響・流体のマルチフィジクス解析

(1) 目標·計画

我々の生活に支障を与える様々な騒音の一つに、雨粒や水滴の落下による音がある.これは大変悩ましい問題であるが、この音の発生原因は、水滴が衝突した際に気泡が発生しそれが振動する場合、もしくは水滴の衝突で物体が振動する場合が考えられる.また一方、楽器音の放射のシミュレーションは楽器本体の構造の振動がその周囲の空気の圧力振動として我々の耳に届く現象であって、数値シミュレーションで楽器の音色の解析をするには構造と音場の両方の物理を同時に解く必要がある.これらのように、われわれ身の回りの現実問題を数値シミュレーションで解く場合の多くは、複合的な物理現象を扱う必要があり、上記の例でいうと構造と流体と音場を同時に解かなければ分からない.本研究では、上記のような構造物の振動に加え流体と音といった3 つの物理現象を解く数値シミュレーションを扱う.特に、我々は液滴の衝突による音の放射と、楽器の振動による音の放射について着目した数値シミュレーションと実験を組み合わせた解析を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

液滴の衝突の解析においては,流体工学の立場から衝突した液滴の形状や挙動の解析は数 多くなされている.しかし,それらは燃料の噴霧,プリンタのインクジェットなどが主で,液滴の音の 原因解明や騒音の改善そのものにスポットをあてた先行研究は少ない.また,本研究で行おうとし ている,液滴の衝突と物体の振動(音)を直接数値シミュレーションで解くという複合的な物理現象 を扱われることはほとんどない.また,楽器の振動と音の放射についても,振動モードや放射音の 個々の研究は行われているが,例えばヴァイオリンのプレートの振動が空間にどのように放射され るかのマルチフィジクスによる数値シミュレーションの先行研究例は極めて少ない.

(3)研究内容

(1) 水滴が落下し物体に衝突した際に発生する音の発生メカニズム

生活騒音としての水滴の落下による衝突音を実験及び数値シミュレーションで明らかにする.この騒音低減の手法の検討のための基礎的な知見として,

- ・水滴が衝突する時の気泡が発生する条件
- ・水滴が衝突した時の物体の振動特性
- ・気泡や振動によって放射される音の強度と周波数特性
- を理解する必要があり、本研究ではこれらを目標とする.
- (2) 楽器の振動と放射音のマルチフィジクスによる数値シミュレーション

ヴァイオリンのプレートの固有振動とその放射音場の特性を数値シミュレーションで解析する.こ

の研究はいわゆるヴァイオリンの名器であるストラディヴァリといったような歴史的にも価値のある楽 器の音質の秘密を解くことにもなり、また楽器製作における音質向上に役立つものである.

・実際の楽器の 3D スキャナによるジオメトリ作成

・楽器のアーチ形状と物理特性と固有振動モード解析

・固有振動モードと音響放射

特に、ヴァイオリンにおける振動モードはフリープレートのリングモード(Mode 5)および、共鳴体としての Breath モード(A0,B1)といった主要な解析モードが知られている.

(4) 平成 30 年度進捗状況

本年度, (1)においては研究計画, 先行研究の調査, 科研費申請まで行った. また, (2)について はイタリアのミラノ工科大およびクレモナヴァイオリン博物館との共同研究として着手始めた状態で ある. 3D スキャナを用いた実際のヴァイオリン形状の取得とメッシュの生成, 商用ソフトウェア COMSOL マルチフィジクスを用いた解析手法の基礎技術の習得を行っている.

(5) まとめ

本年度においては新規立ち上げのため現状では研究計画とその予備的な研究準備にとどまって いる.来年度より数値シミュレーション環境の構築および実験を始める予定である.

3.1.3. 微生物に誘発された地盤固化作用の数理モデル化・シミュレーション

(1) 目標·計画

本研究は,岩石の風化や鉱化現象が斜面崩壊や落石などの地盤災害に多分な影響を与えて いることに着目し,岩石における化学的・微生物学的な風化作用や鉱物変成作用の数理モデルと 力学シミュレーション技術の開発を目的としている.

岩石の内部に潜む微生物は、代謝の過程で排出する有機酸等によって岩石全体を蝕み多孔 質化させている^[1]. 一方、尿素分解菌や光合成微生物は、砂粒子や若齢の石灰岩表層で炭酸塩 鉱物の化学的な生成を促していることも知られており、様々な岩種の露頭にてその痕跡を見ること ができる^{[2][3]}. 特に、微生物の代謝反応に誘発された炭酸塩鉱物の析出現象に関しては、実地盤 において効率的かつ自己組織的に作用する環境を人工的に創り出す研究も進められており^[4]、次 世代型の地盤改良工法として期待されている. しかしながら、これらの研究は実験やフィールド調 査に基づいたアプローチが主流となっており、理論シミュレーションに基づいた演繹的な検討が十 分でない現状もある. 岩石の微生物の代謝反応に誘発された風化・鉱化現象を予測するには、地球化学的な反応や 微生物の代謝反応、材料・力学学的な損傷・回復現象をベースとしたシ理論シミュレーション技術 を構築し、分野横断的に検証していく必要がある.本研究では、反応拡散理論をベースとして、湧 水や地下水の移流や微生物学的な自己触媒反応等を加味した数理モデルを構築し、最終的に は、ミクロ領域における移流・反応・拡散・増殖を加味したマクロ領域における力学挙動を解析しう るマルチスケール・マルチフィジックスモデルの構築に挑む.今年度は、尿素分解菌の代謝反応を 数理モデル化し、3次元領域でシミュレーションする技術を開発した.

(2) 意義・国際社会との比較

微生物に誘発された岩石の風化現象や鉱化現象は、例えば、硬い岩盤の生物学的風化現象 に関しては、岩盤内部に棲む微生物が岩盤を直接的かつ確実に破壊し、岩盤を多孔質化させて ゆくことが、最近になって解されたに過ぎない.特に、岩種と微生物種との関連性やその役割に関 しては未だ解明されていない点が多い.地形学分野にあっては、その存在さえが無視された形で 研究が進められてきたことも事実としてある^[5].況してや、これを理論的にシミュレーションし、現象 予測を試みるような研究は国際的にも見当たらず、本研究が国際社会に及ぼすインパクトは大きく、 地盤災害の脅威にさらされている現代社会に対する意義もあると考えられる.

(3) 研究内容

(a) 数理モデルと離散化

尿素分解菌は地盤中に存在する尿素 (NH_2 -COO- NH_2)を加水分解することが知られており、その結果生じた炭酸イオン (CO_3^{2-})が周辺にあるカルシウムイオン (Ca^{2+})とイオン結合し、炭酸カルシウム ($CaCO_3$)が析出する^[6]. 具体的には以下の反応が進行する.

$$\mathrm{NH}_2 - \mathrm{COO} - \mathrm{NH}_2 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} \xrightarrow[k_1]{} \mathrm{CO}_3^{2-} + 2\mathrm{NH}_3 \tag{1}$$

$$\operatorname{Ca}^{2+} + \operatorname{CO}_{3}^{2-} \xrightarrow[k_{4}]{} \operatorname{CaCO}_{3} \downarrow$$
 (2)

ここで, k₁, k₂, k₃ は反応速度定数である.本研究では,これらの式を反応拡散理論^[7]にてモデル 化することを考える.反応拡散理論は,化学的な反応プロセスやバクテリアの動態挙動に関する特 徴的な空間パターンを表現できることが知られており^{[8][9]},岩内微生物の挙動を考える場合にも適 していると考えられる.

式(1)および式(2)における各イオンの外部流入を考慮すると、反応拡散理論をベースとした反応 拡散方程式は以下のように想定することができる.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}_{\mathbf{A}} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{x}} - k_1 \mathbf{A} \mathbf{B} + k_2 \mathbf{C}_i \mathbf{E}^2 + \mathbf{A}_{\text{in}}$$
(3)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}_{\mathrm{B}} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{x}} - k_{1} \mathbf{A} \mathbf{B} + k_{2} \mathbf{C}_{i} \mathbf{E}^{2} + \mathbf{B}_{\mathrm{in}}$$
(4)

$$\frac{\partial \mathbf{C}_{i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}_{\mathbf{C}_{i}} \frac{\partial \mathbf{C}_{i}}{\partial \mathbf{x}} + k_{1} \mathbf{A} \mathbf{B} - k_{2} \mathbf{C}_{i} \mathbf{E}^{2} - k_{3} \mathbf{C}_{i} \mathbf{F}_{i} + k_{4} \mathbf{P}$$
(5)

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}_{\mathrm{E}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}} + k_{1} \mathbf{A} \mathbf{B} - k_{2} \mathbf{C}_{i} \mathbf{E}^{2}$$
(6)

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}_{\mathbf{F}_{i}} \frac{\partial \mathbf{F}_{i}}{\partial \mathbf{x}} - k_{3} \mathbf{C}_{i} \mathbf{F}_{i} + k_{4} \mathbf{P} + \gamma \mathbf{F}_{i}$$
(7)

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = k_3 \mathbf{C}_i \mathbf{F}_i - k_2 \mathbf{P} \tag{8}$$

ここで、A、B、C_i、E、F_iおよび P は、それぞれ、NH₂-COO-NH₂、H₂O、CO₃²⁻、NH₃、Ca²⁺および CaCO₃の濃度であり、D_•は●の拡散係数を意味し、領域内部においてランダムに設定される.また、A_{in}とB_{in}は、それぞれ、NH₂-COO-NH₂とH₂Oの流入を表し、定数値にて仮定している.式(7)の第 4 項にある γ F_iは Ca²⁺の流入を意味し、 γ は定数係数であり、岩内微生物の Ca²⁺ポンプ^[10]をモデル 化したものである.なお、固体である CaCO₃の拡散は考慮していない.

モデルの離散化に関しては、本研究では差分法(中央差分)を用いているが、式(3)~式(7)の拡 散項に関しては、前進差分と後進差分を組み合わせた方法を適用した. すなわち、例えば、変数 Gと拡散係数 Dを仮定した場合、以下の式にて離散化した.

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \nabla \left(D\nabla G \right) = \nabla D\nabla G + D\nabla G = \frac{1}{2} \nabla D\nabla G + \frac{1}{2} \nabla D\nabla G + D\nabla G \tag{9}$$

$$\frac{\mathbf{G}_{i}^{n+1} - \mathbf{G}_{i}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\left(\mathbf{D}_{i+1} + \mathbf{D}_{i}\right) \mathbf{G}_{i+1}^{n} - \left(\mathbf{D}_{i+1} + 2\mathbf{D}_{i} + \mathbf{D}_{i-1}\right) \mathbf{G}_{i}^{n} + \left(\mathbf{D}_{i} + \mathbf{D}_{i-1}\right) \mathbf{G}_{i-1}^{n}}{\Delta \mathbf{x}^{2}}$$
(10)

ここで, n はステップ数, i は格子点番号, Δt は時間増分, Δx は格子サイズである.

(b) 数値解析例および考察

実環境における尿素分解菌に誘発された炭酸カルシウムの析出現象は、気温や地下水の成分、 土粒子密度、圧密度等、様々な環境条件に依存する.したがって、式(3)~式(8)の各係数は、数 多くの実験やフィールド調査に基づいて決定しなければならない.しかしながら、現段階では十分 な実験および調査データが得られていないため、ここでは、各係数は無次元量を仮定し、各成分 の濃度変化のパターンのみに着目することにする.

本数値解析例では、Fig.1に示すような直方体領域(2×1×1)に半径が0.7および0.45の2つの

球形砂粒子が配置された問題を仮定し, 直方体領域のすべての境界には Neumann 条件を課した. また, Fig. 1 に示すように, 間隙の 3 つの点を NH₂-COO-NH₂と H₂O の流入点に仮定した. なお, 砂粒子の内部では炭酸カルシウムの生成反応は起こらない設定をしている.

格子点の総数は 545025, 格子サイズ(Δ**x**)は 0.0156, 時間増分(Δ*t*)は 0.1 に設定した. 各物質の拡散係数はランダムに設定し, D_A=5e-7~5e-5, D_B= D_{Ci}= D_E= D_{Fi}=7e-7~7e-5 を仮定し, A_{in} と B_{in}は 0.5~1.0 の範囲でランダムに連続して与えた. また, 式(7)のγは 0.005 に設定し, A, B, C_i, E, F_iの初期値として, 0.0~0.5 のランダム値を領域内部に設定した.



Fig. 1. The numerical simulation model. Two spherical soil particles (radius: 0.7 and 0.45) and three urea and water inflow points are located in the domain.

Fig. 2 に k_1 =25, k_2 =0.005, k_3 =10, k_4 =0.005 の場合の CaCO₃ 濃度の等値面の時間変化を示す. 同図より、初期段階では、CaCO₃の濃度はNH₂-COO-NH₂とH₂Oの流入点付近で高まり、その後、 砂粒子の表面で高まっている様子が分かる. そして、CaCO₃の濃度は間隙を埋め尽くすような形で 進展していった. このような CaCO₃ の析出による粒子径の増大化現象は、既往の実験研究でも確 認されており^[4]、本モデルによる結果は定性的には良好であると考えられる.



Fig. 2. The evolution of calcite precipitations by the proposed mathematical model (k_1 =25, k_2 =0.005, k_3 =10, and k_4 =0.005). The time t at which the figures were taken are as follows: (A) t =1×10²; (B) t =2×10³; (C) t =5×10³; and (D) t =1×10⁴. The color bar indicates the calcite concentration.



Fig. 3. The evolution of calcite precipitations by the non-diffusion model (k_1 =25, k_2 =0.005, k_3 =10, and k_4 =0.005). The times t at which the figures were taken are as follows: (A) t =1×10²; (B) t =2×10³; (C) t =5×10³; and (D) t =1×10⁴. The color bar indicates the calcite concentration.



Fig. 4. The variation of calcite concentration with time using the proposed mathematical model. (A) the case of $k_1 = 25$, $k_2 = 0.005$ and $k_3 = 10$; (B) the case of $k_1 = 10$, $k_2 = 0.005$ and $k_3 = 25$. In the both cases, the values of k_4 are set to 1.0×10^{-2} , 0.5×10^{-2} , 0.4×10^{-2} , 0.3×10^{-2} , 0.2×10^{-2} , 0.1×10^{-2} , and 0.0.

Fig. 3 は,式(3)~式(7)の拡散項を削除した場合の CaCO₃ 濃度の等値面の時間変化の様子である. CaCO₃の濃度変化は,拡散項を考慮した場合(Fig. 2)とは異なり, NH₂-COO-NH₂と H₂O の流入点付近でのみ高まっていることが分かる. このことから,実験で見られる砂粒子表面での CaCO₃ 析出現象は各物質の拡散に依存していると認識される.

Fig. 4 は, 拡散項を考慮した場合 (Fig. 4(A);以後, "ケース A"と称す)と拡散項を考慮しない場合 (Fig. 4(B); "ケース B"と称す) について, 反応速度定数 k_4 の値を変化させた場合の領域全体における CaCO₃ 濃度の時間変化を示している. これは, CaCO₃溶解の度合いが CaCO₃ 析出量へ及ぼす影響を確認するためのものである. 同図より, ケース A では, k_4 の値が大きくなる程に領域全体の CaCO₃ 析出量が増加している. 一方, ケース B では, k_4 の値が小さくなる程に CaCO₃ 析出量が増加している. 式(2)に示すように, k_4 を大きくすることで CaCO₃の濃度は部分的に減少する一方, CO²⁻ は拡散しながら増加することになる. したがって, ケース A では, これらの増加した CO²⁻ が砂粒子表面付近で Ca²⁺と結合し新たな CaCO₃を析出させ, 結果として領域全体の CaCO₃ 濃度が増加したものだと考えられた. なお, ケース B では CO²⁻ の拡散が考慮されていないために, 砂粒子表面での CaCO₃ 析出は起こらず, k_4 の増加に伴って CaCO₃の溶解が進んだと考えられた.

また、ケース A では k₄=0(溶解なし)の場合は単調増加しているのに対し、それ以外の場合には ロジスティック関数に似た増加挙動を示している. 一方、ケース B ではこのようなロジスティック挙動 は見られない. 興味深いことに、尿素分解菌の代謝反応に起因する CaCO₃ の析出はロジスティッ ク関数に似た増加パターンを示すことが知られており^[4]、ケース A の結果はこの知見に一致する. このような増加パターン発現の物理的なメカニズムについては未だ解明されていないが、本シミュ レーション結果によれば、明らかに物質の拡散現象が大きく関わっていることが分かる. Fig. 5 は、本シミュレーションによって得られた結果をもとに、尿素分解菌の代謝反応に誘発された CaCO3 の析出現象のメカニズムを図示したものである.物質拡散と析出パターンとの関連性に関する定量的な検証については今後研究していく必要があるものの、CaCO3 析出で見られる空間パターンが各物質の拡散現象に起因していることは興味深い.



Fig. 5. Drawing of calcite precipitation after microbial urea hydrolysis. The calcite precipitations occur at void fractions and on the surfaces of grains, and some calcite precipitations are connected to each other. The surface precipitations depend on the diffusion of substances.

(4) 平成 30 年度進捗状況

今年度は、尿素分解菌の代謝反応を反応拡散理論に基づいて数理モデル化し、3 次元領域で シミュレーションする技術を開発した.解析の結果、定性的ではあるが、CaCO3の空間パターンが 各物質の拡散現象に起因していることを発見した.本シミュレーションで用いたすべての係数は無 次元量で仮定されているため、今後は、実験やフィールド調査に基づいたパラメータ設定を行って いく必要がある.なお、パラメータ取得のためには、純粋培養した尿素分解菌株を用いたバッチ試 験やカラム試験が有効であると考えている.

(5) まとめ

岩石における化学的・微生物学的な風化作用や鉱物変成作用の数理モデルと力学シミュレーション技術の開発を指向し研究を進めている.最終的には,湧水や地下水の移流や微生物学的な自己触媒反応等を加味した数理モデルを構築するとともに,ミクロ領域における移流・反応・拡散・ 増殖を加味したマクロ領域における力学挙動を解析しうるマルチスケール・マルチフィジックスモデ ルの構築にチャレンジしていく予定であり、今年度に開発・シミュレーションした技術は、これらの要素技術として活用することができる。また、反応速度係数の決定にあっては、数理生物学的なモデル(微生物増殖モデル)を導入していくことを考えており、最優先事項として取り組んでいきたいと考えている。さらに、本研究で対象としている現象を実環境問題として捉えた場合、大規模な計算が必要になると考えられることから、本シミュレーションの大規模問題への適用も併せて検討していきたいと考えている。

参考文献

[1] Konhauser, K. O. (2007). Introduction to geomicrobiology. Wiley- Blackwell.

[2] Hirotaka Sakiyama, and Hitoshi Matsubara (2018). Physical, chemical, and biological investigation of an unconformity between limestone and sandstone in a coastal area: Iriomote Island case study. CATENA, 171, 136-144.

[3] Hayato Oshiro, and Hitoshi Matsubara (2018). Carbonate precipitation through photoautotrophic microorganisms at the Giza cliff, Japan. Environmental Earth Sciences, 77(16), 591 (1-11).

[4] DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. Ecological Engineering, 36(2), 197-210.

[5] Viles, H. A. (2012). Microbial geomorphology: a neglected link between life and landscape. Geomorphology, 157, 6-16.

[6] De Muynck, W., De Belie, N., and Verstraete, W. 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. Ecological Engineering, 36 (2), 118-136.

[7] Turing, A. M. 1952. The chemical basis of morphogenesis. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 237 (641), 37-72.

[8] Kondo, S., and Miura, T. 2010. Reaction-diffusion model as a framework for understanding biological pattern formation. Science, 329 (5999), 1616-1620.

[9] Pearson, J. E. 1993. Complex patterns in a simple system. Science, 261 (5118), 189-192.

[10] Rosen, B. P. 1987. Bacterial calcium transport. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Reviews on Biomembranes, 906(1), 101-110.

3.1.4. 大規模高精度流体 – 構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証 オープン CAE による弾塑性熱応力解析と熱疲労評価の精度・妥当性検証

(1) 目標·計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品

質確保」(精度・妥当性検証(V&V))の重要性は広く認識されている通りである.企業でよく使用さ れている商用ソルバでは、ソルバ開発元によるソフトウエア品質管理とユーザ支援によってある程 度の品質確保が図られており、ソースコードの秘匿化により、ユーザ自身がアルゴリズムを確認す ることはあまりない.近年、利用が広がりつつあるオープン CAE^{注)}の場合は、ソースコードが公開 されているためユーザ自身が確認、改変ができる一方で、ソフトウエア品質とユーザ技量の両方の 検証がユーザに委ねられるため、V&V における新たな課題が提起されている.ただし、ソースコー ドが公開され、無償であることからアクセス性が高く、オープン CAE が商用ソルバよりも社会的受容 性に優れることも期待し得る.

本研究では、固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し、公開する上で、商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで、より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示する.

注) Open Source CAE と呼ぶのが一般的であるが, ソースコード以外の知識情報やユーザコミュニ ティを含めた広義な概念として「オープン CAE」と呼んでいる[1].

(2) 意義・国際社会との比較

無償で利用できるオープンCAEを取り上げることで、市民目線での検証が可能になり、精度検証 の客観性、計算力学に対する社会的受容性が高まる.安価な検証手段を提示することで新興国 や小規模企業での普及にも貢献し得る.また、形状モデルデータや可視化ツールを製品開発・製 造のための共通プラットフォームとしての利用が可能であることから、ものつくりのグローバル化にも 寄与する.ユーザ自身に対して高い技術力を要求することから、意欲のあるユーザの自己研さん (その結果、解析の品質確保につながる)のための利用でも有利になる.

(3) 研究内容

オープン CAE の一例としてフランス電力 (EdF)が開発した Salome-Meca [2] を取り上げ,精度・ 妥当性検証を行う. 2015 年度は引張試験を例題として材料非線形問題を取り上げ[3], 2016 年度 は文献情報をもとに非定常熱応力による熱疲労問題の弾性解析を取り上げた[4]. 2017 年度は, 実用上重要な接触解析に関連して,ボルトで締結した平板試験片を用いた引張試験を行い, Salome-Meca による解析との比較を行った. 2018 年度は, 2016 年度の解析を発展させ,弾塑性解 析による熱疲労問題を取り上げた[5]. また, オープンソースの後処理ソフト, ParaView を用いた熱 疲労評価を取り入れた. 商用 CAE ソルバ MSC.Marc [6] とも比較した.

(4) 平成 30 年度進捗状況

(a) 試験片および試験方法

1989年に日本原子力研究開発機構によって行われた熱疲労試験[7]を解析的に再現した. 試験 片は厚肉部を有する円筒であり, 図1にその形状と寸法を示す. 最大肉厚 30 mm, 最小肉厚 3.5 mm, 内径 53.5 mm を有する SUS304 製の厚肉円筒試験体が使用された.

試験方法として, 試験体内部に, 流速を一定に保った二種類の液体金属ナトリウムが交互に流 し込まれ, 急熱と急冷の繰返しによって熱疲労損傷をもたらした. はじめに温度 600 ℃の液体金属 ナトリウムによって 50 分間の急熱, 続けて温度 300 ℃ の液体金属ナトリウムによって 10 分間の急 冷が行われた. この急熱・急冷が 2,000 回繰返された. 試験中には, 試験体の内表面付近, 外表 面のいくつかの点における温度が計測され, 試験終了後には, 試験体を断面で切断し, 内面から 発生したき裂が観察された.

(b) 解析方法

解析には Salome-Meca 2015.1 に内包されたソルバ Code_Aster Ver. 11.7 を使用した.解析モ デルと要素分割,境界条件を図2に示す.使用要素は四面体2次要素とし,264 要素,875 節点と した.境界条件として,左端(ナトリウム入りロ側)は Z 軸方向の変位を同一化し,右端は Z 軸方向 の変位をゼロとした.解析モデルの内面には液体金属ナトリウムによる熱伝達を与えた.熱伝達の 温度時刻歴を図3に示す.急熱と急冷の1サイクル(3,000 s)の温度変化として,実験で計測され た温度変化データを使用した.解析のタイムステップ分割数は3,200とした.SUS304の物性値を表 1と表2に示す.これらはすべて温度依存のデータであり,試験の報告書[7]より引用した.

熱疲労損傷の評価として,得られた弾性解析結果と弾塑性解析結果から, Paraview を用いてミ ーゼスの相当ひずみ範囲を計算した.

弾性解析ルートの疲労損傷評価として,弾性解析結果からひずみ範囲を計算するために,ミー ゼスの相当応力範囲 S_p を求めた. 今回は, ASME 規格 (ASME Section III Subsection NH)[8]にお けるひずみ範囲定義法を簡易化した定義を用いて S_p を求めた. さらに,弾性解析ルートの簡易的 な弾塑性ひずみ評価手法である, SRL(応力再配分軌跡, Stress Redistribution Local)法[10]を簡 易化した手法を用いて相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ を算出した. 応力範囲 S_p が設計応力強さ S_m の3 倍を 超える場合に対しては SRL 法を用いた.

弾塑性解析ルートの疲労損傷評価として, ASME 規格の手法をベースに弾塑性解析結果から 相当ひずみ範囲Δε を求めた. ひずみ範囲を決定づける2時刻点の決定法は弾性解析ルートから 応力範囲を求めるために使用した簡易法[9]を修正し, 使用した.

(c) 解析結果

熱伝導解析結果と試験での温度計測結果との比較を図4に示す.試験で計測された評価点で

19

の温度変化は,解析結果とほぼ一致していることが確認できた.最大の引張り,圧縮応力が発生した厚肉部内面での弾性解析の結果と弾塑性解析の結果を図5に示す.また,商用 CAE ソフトである MSC.Marc[6]での解析結果と比較すると,わずかの差違が認められた.本解析では,軸方向と周方向の応力が支配的であった.

解析モデル内面におけるひずみ範囲の評価結果と,試験でのき裂の発生状況との比較を図6に 示す.弾性解析結果から SRL 法を用いて疲労評価を行った結果は,過度に安全側の評価となっ た.これは,今回参照した試験では現実の機械部品では発生しない大きな熱応力が厚肉部に発 生したためであると考えられる.弾性解析結果から純粋弾性法を用いて疲労評価を行った結果は, 弾塑性解析結果と比べて危険側の評価となった.また,Salome-Meca での解析結果と,MSC.Marc での解析結果とを比較すると,微小な誤差があることが確認できた.



Fig. 1. Specimen dimensions and configuration



Fig. 2. FEA model and boundary conditions

Т	λ	C_p	ρ	h
(°C)	(W/m K)	(kJ/kg K)	(kg/m ³)	(kW/m ² K)
300	18.30	0.5399	7900	13.10
350	18.97	0.5482	7880	12.71
400	19.68	0.5524	7860	12.33
450	20.35	0.5566	7830	11.98
500	21.02	0.5608	7810	11.63
550	21.69	0.5692	7790	11.30
600	22.36	0.5775	7760	10.99

Table 1. Material properties of the Type 304 stainless steel (304SS) for the heat transfer analysis

Table 2. Material properties of the 304SS for the elastic and elastic-plastic FEA

Т	Ε	v	α	S_m	σ_{y}
(°C)	(GPa)		(10 ⁻⁶ m/m K)	(MPa)	(MPa)
300	176.4	0.287	18.79	114.7	172.0
350	172.5	0.291	19.19	110.7	166.1
400	168.6	0.295	19.57	106.8	160.2
450	163.7	0.298	19.93	101.9	152.9
500	158.8	0.302	20.28	98.00	147.0
550	153.9	0.306	20.60	95.06	142.6
600	149.0	0.310	20.87	92.12	138.2



Fig. 3. Temperature changes of sodium in one cycle



Fig. 4. Results of the heat transfer analysis



Fig. 5. Results of the elastic FEA: (a), (b) and elastic-plastic FEA: (c), (d)



Distance from the inlet of the FEA model (mm)

Fig. 6. Comparison of equivalent strain range between elastic and elastic-plastic FEA, and experimental observation [7]

(5) まとめ

Salome-Mecaを用いて熱疲労解析を行った.疲労損傷を定めるための2時刻点決定法はASME 規格におけるひずみ範囲定義法を簡易化したものを使用し,弾性解析からの疲労損傷評価では SRL 法を用いて相当ひずみ範囲を算出した.

非定常熱伝導解析結果は,試験で計測された温度変化とよく一致した. Salome-Meca での解析 結果と, MSC.Marc での解析結果とを比較すると,弾性解析,弾塑性解析の両方で微小な誤差が 見られた.弾塑性解析では,厚みが急激に変化する部分において,解析精度のわずかの低下が 確認された.

SRL 法を用いて求めた相当ひずみ範囲は,過度に安全側の評価となり,純粋弾性法を用いて 求めた相当ひずみ範囲は,弾塑性解析結果と比べて危険側の評価となった.

参考文献

[1] (社)オープン CAE 学会, http://www.opencae.or.jp/, (2018 年 1 月 13 日閲覧).

[2] EdF, Code-Aster.org, http://www.code-aster.org/, (2018年1月13日閲覧).

[3] 藤岡, 構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現),

オープン CAE シンポジウム 2015@富山, オープン CAE 学会, 富山, 2015.11.

[4] 三浦, 藤岡, Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, オープン CAE 学会, 2016.11, 東京.

[5] 三浦, 藤岡, 新藤, Salome-Meca を用いた熱疲労解析, オープン CAE シンポジウム 2018@川 崎, 川崎, 2018.12.

[6] MSC Software, http://www.mscsoftware.com/, (2018年1月13日閲覧).

[7] 石崎公人,他三名,SUS304 鋼の熱疲労試験,JAEA, PNC-TN9410 89-101, (1989) pp. 1-112.

[8] ASME, Boiler and Pressure Vessels Code, Section III, Subsection NH, (2014).

[9] Junya MIURA, Terutaka FUJIOKA, and Yasuhiro SHINDO, Visualization of Thermal Fatigue Damage Distribution With Simplified Stress Range Calculations, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 140(6), Paper No: PVT-17-1225, (2018). DOI: 10.1115/1.4041057

[10] Terutaka FUJIOKA, Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), Paper No: PVT-14-1008, (2014). DOI: 10.1115/1.4027418

3.1.5. バーチャルリアリティ技術を用いた複雑現象の可視化

(1) 目標·計画

これまで、バーチャルリアリティ(VR)や立体視を利用した可視化の研究は、それらの機器が注目 されるたびに行われてきたが、必ずしも定着したとはいえない.その理由は、大きく2つあると考えら れる.1つは機器が高価であること、例えば、IPT (Immersive Projection Technology)と呼ばれる没 入型ディスプレイは数百~数千万円が普通であるし、より簡便な HMD (Head Mounted Display)で も数十万円するものが一般的であった。2つめは、そうやって工夫して可視化をしても、PC のモニ ターで見るのと結局は大差ない、ということである.ところが、前者については、主にゲームを中心と して安価な HMD が開発されるようになってきたことで、障害とは言えなくなってきた。そこで、ここで は2つめの、PC のモニターとは本質的に異なる、VR だからこそできる可視化を考えることで、VR を 用いることの意義を証明するのが研究の目的である.

(2) 意義・国際社会との比較

先に述べたように, 歴史的にみても, VR を可視化に利用して成功した例は多くない. 2018 年 6 月に英国グラスゴーで開催された欧州数値流体力学会議においても, VR を利用した可視化の発表はわずかに数件で, それも試しに用いてみた, という程度のものがほとんどであった. 現在, 何度目かの VR 元年と呼ばれ, 安価で高性能な HMD 等が開発されつつあるタイミングで VR による可視化を研究することは多いに意義があると考える.

(3) 研究内容

本センターでは、HolostageMINIという IPT 型の VR 装置とHMD を所有している. これらで、同じ 内容の可視化ができるよう、システムを構築している. その概略を図1に示す.



Fig. 1. System overview

緑のボックスはこの研究で開発したソフトウェア,水色のボックスは市販(もしくはフリー)のソフトウェ アである.これらによって,計算あるいは実験の結果をいずれの装置にも表示することができる.先 の「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」ではHolostageMINIでの可視化システムを構築した が,その後,HMD でのシステムを追加したので,まずここではこれについて説明する. ここでは HMD として Oculus 社のものを想定している. Oculus に表示する方法の 1 つは Unity と 呼ばれるゲームエンジン (ソフトウェア)を利用することであるが, Unity は様々な CG (Computer Graphics)のファイル形式に対応しており, その 1 つが 3dsmax の max 形式である. そこで, ここでは シミュレーション結果を可視化する際に作られる CG データを 3dsmax の入力とし, 適当な処理を施 した後に max 形式で出力するようにしている. 3dsmax への入力は汎用性を考慮し, VRML ファイ ルを用いている. 図に示したように, 3dsmax からは HolostageMINI で表示するための vmx ファイル も出力できる.

本研究は、このシステムをベースとし、どのような可視化をすれば、VR ならではの有用な可視化が可能かを考えることである。今年度はその1つとして、半透明表示を利用した可視化を提案した。 その詳細を以下に記す。

(4) 平成 30 年度進捗状況

VR や立体視を用いることの利点は、一目で奥行きが分かることである. 重なっていない 2 つの面 があったときに、どちらが手前でどちらが奥かはモニターの2次元的な表示では分からないが、VR でなら分かる. これと同じ理屈で、前後に半透明の面が2つあったとき、どちらが手前でどちらが奥 か、モニターでは判別が難しいが、VR では容易である. この性質を利用すれば、複数の半透明の 面が重なるような可視化でもそれぞれの面の位置関係を自然に把握できることが期待される.

半透明は、等値面などでしばしば利用されるが、一般には相対関係が分からなくなるため、数を 限ることが多い.これに対し、VR 空間ではある程度数が多くても前後に離れていれば区別がつくと 考えられる.そこで、VR 空間ならではの可視化の1つとして、(等値)面を半透明にして重ねて表示 することを提案した.その効果については、実際に体験するしかないが、あとで示すように、2次元 表示ではどうなっているのか分からないものも、区別がしやすい.

普通,物体は不透明な面として表示するか,あるいは可視化の邪魔になるなら表示しないかのいずれかであるが,VR空間では,等値面と同じく半透明にして表示することが可能である.半透明にしても,物体があることは把握でき,さらに物体の向こう側(奥側)にあるものも透けて見えるため,より情報量が増すことにもなる.

そのようにして可視化した例を以下に示す.



Fig. 2. Flow over delta wing (iso-surfaces of total pressure)

図 2 はデルタ翼の周りの流れを可視化したもので, 渦崩壊の中心が可視化されている. ポリゴン (CG)が粗く見えるのは, HolostageMINIで表示するためにデータを変換する途中での負荷を軽減 するためにデータを減らしているためで, また, 画像が二重に見えるのは, 右目と左目の画像を重 ねて表示しているからである.



Fig. 3. Flow around a sphere (iso-surfaces of vorticity)

図 3 は球周りの非圧縮流れの渦度の等値面を描いている.2 次元的な図では全く分からないが、 左奥に白い球があり、その周りと後流に渦度が発生しているのが分かる.

(5) まとめ

VR でのみ可能な,あるいは VR ならではの可視化について研究を行っている.1 つの手法として 半透明を積極的に利用することを提案した.今後の課題としては,半透明であってもより多くの面を 表示できるようにすること,データ変換の手間を削減して表示までの時間を短縮することなどが挙 げられる.

3.1.6. コンクリート構造物の3次元塩害劣化予測シミュレーターの開発

(1) 目標·計画

コンクリート構造物は,社会基盤を支え,人々の安全・安心な生活を守る重要な役割を担う.例え ば,物,人を陸路で移動するための道路,橋梁,トンネル,空路,航路で移動するための空港,港 湾,利水・治水のためのダム,地すべりなどを防ぐ擁壁,津波,高潮を防ぐ防波堤など,その他多く の社会基盤設備としてコンクリート構造物が使用されている.これらコンクリート構造物を健全で長 期に供用するためには,コンクリート構造物の経年劣化を予測し,最適かつ効果的な対策を講じる 必要がある.本研究開発では,コンクリート構造物の経年劣化のなかで特に問題となっている塩害 に着目し,環境作用(ここでは飛来塩分のみ)を考慮した 3 次元塩害劣化予測シミュレーターの開 発を目標とする.なお,本研究では,コンクリート橋を対象に検討している.

飛来塩分の3次元シミュレーションとしては、すでに Adventure_Fluid とランダムウォーク法(以下, RW法)による3次元飛来塩分シミュレーターの開発が進んでおり、飛来塩分の構造物への付着分 布まで解析が可能である.今回の開発では、その付着分布を入力データとした塩分のコンクリート 内部への拡散解析まで行うことを計画している.

(2) 意義・国際社会との比較

コンクリート構造物の劣化予測を数値解析的に行っている研究は多くあるが、3 次元かつ飛来塩 分を粒子で扱い、それらを風による輸送および構造物への付着分布まで検討した例は少なく、さら に回の開発では、その付着分布を入力データとした塩分のコンクリート内部への拡散解析まで行う ことから、高精度な劣化予測が可能となると考える.また、塩害劣化が問題となっている国は多くあ ることから、本研究は国際的にも意義のあるものである.

(3) 研究内容

飛来塩分の3次元シミュレーションとしては、上記で示したようにすでに開発が進んでおり、Fig.1 に示すようにメゾ塩害環境(飛来塩分の構造物の部材・部位への付着分布)のシミュレーションまで 可能となっている.風速場の計算は、Adveture_Fluidを採用し、粒子の拡散・付着にはランダムウ オーク法(RW 法)を採用している. Fig.1 にあるように本解析結果は、ガーゼ拭き取り法による実橋 梁の付着塩分分布を精度良く再現していることがわかる.

ランダムウォーク法による解析結果は, Fig.2 に示すように構造物表面に付着した粒子分布である. コンクリート表面に付着した塩分のコンクリート内部への拡散解析を実施するためには, その粒子 の分布を 3 次元塩分濃度拡散解析の境界条件として, 等価節点塩分濃度に変換する必要がる (Fig.3). 本研究開発では, いくつかの手法を検討する予定である(Fig.4).



構造物の局所的な塩害環境を評価することを目的とする(調査,数値解析)

Fig.1. Airborne Chloride simulation for mezzo chloride attack condition



Fig.2. Adhesion chloride particles on surface of structures obtained by RW method







Fig.4. Ideas for conversion method for equivalent nodal chloride concentration

(4) 平成 30 年度進捗状況

Fig.4に示した等価節点塩化物濃度の変換については,現在開発中である.平成30年度の進捗 としては, Fig.5 に示すように面ごとに異なる塩分濃度を与えた3次元塩分拡散解析の実施が行え る.なお,3次元塩分拡散解析は, Meshman_FEM をベースに検討を進めている.



Fig.5. An examples of analytical results

(5) まとめ

本研究開発では, 飛来塩分の3次元シミュレーションとしては, すでに Adventure_Fluid とランダ ムウォーク法(以下, RW 法)による3次元飛来塩分シミュレーターの開発が進んでおり, 飛来塩分 の構造物への付着分布まで解析が可能である. 今回の開発では, その付着分布を入力データとし た塩分のコンクリート内部への拡散解析まで行うことを計画し, 現状では, 3次元拡散解析まで可 能である. 将来的にはコンクリート内部の鉄筋腐食状況・速度まで予測可能な塩害劣化予測シミュ レーターの開発を行う予定である.

なお,本研究は,新潟大学佐伯研究室および株式会社インサイトとの共同研究として実施している.

3.1.7. 粘弾性被膜を有する物体に作用する空気力特性

(1) 目標·計画

粘弾性被膜による抵抗低減メカニズムの解明することが目的である. 今年度は粘弾性被膜を有 する物体に作用する空気力計測を行い, 金属模型に作用する空気力と差が生じるか確認する. 次 年度以降, 乱流計測用の風路を製作して, 抵抗低減メカニズムの解明を目的とした研究を計画し ている.

(2) 意義・国際社会との比較

31
流体抵抗の低減は主要な研究課題の一つである. 航空機は抵抗を低減することで燃費が改善され,配管の抵抗低減は損失ヘッドの改善に繋がる.様々な抵抗低減法の一つに,水棲生物に着目した研究がある.例えばイルカは,体を覆う柔らかい表皮を利用して抵抗を低減していると考えられている⁽¹⁾. Kramer の研究を契機として,ゴムやゲルのような軟質のコーティング材による摩擦抵抗低減効果に関する研究が半世紀以上に亘り行われてきた⁽¹⁻⁹⁾.これまでの研究は材料特性の違いによる摩擦抵抗低減効果に着目した研究事例が殆どである.その効果を,航空機の翼表面に応用するには,材料特性と抵抗低減効果の仕組みを明らかにすることが不可欠である.そこで本研究では,イルカの表皮を軟質のコーティング材でモデル化した風洞実験を行い,摩擦抵抗低減のメカニズムを解明したいと考えている.

(3) 研究内容

Fig.1は粘弾性被膜を有する翼模型の空気力計測の概要図である. 翼形状はNACA4412 翼型 である. 風洞の出口面積は A=0.3×0.3 m² であり, 最大 45m/s まで風速を上げることができる. 風洞 出口の直下にはシリコーンゴム製の翼模型が設置されており, 2 本のサポート材で翼が固定されて いる. サポート材の正面には風防が取り付けられており, 空気力計測の妨げとならないようになって いる. 風路から放出される気流により, 模型に作用する空気力を(株) 共和電業 社製の3分力計を 用いて, ユニバーサルレコーダ (EDX-20A-4H,) で測定した.

Fig. 2 は実験で使用したシリコーン製翼模型である. Table 1 は空気力計測に使用した翼模型の 大きさを示している. 翼型模型は, すべてゴム製の翼模型と 4mm 厚のゴム被膜の翼模型を製作し た. 模型は信越シリコーン社製の KE-14 を使用した. 粘弾性皮膜の翼模型と比較するため, アルミ ニウム製の翼模型を製作して空気力計測を行った. ヤング率の右側に括弧書きした数値はゴムの 硬さ試験法の一つであるデュロメータ硬さを意味している. 下二桁の数字が大きいほど硬度が高い. デュロメータ硬さは tecklock 社製の自動ゴム硬さ計測システム GX01 を用いた.

翼弦長を代表長さとしたレイノルズ数 Re で $4.3 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^5$ の範囲で変化させて実験を行った. 風速 U で 5~30m/s に対応する. また迎角 α =-10~10° で 2° ごとに変化させた. 角度を変化させた実験は Re= 2.0×10^5 で行った. 実験条件は, 小型の有翼飛翔体の飛行速度を想定して決定した.

32





Fig.1. Schematic picture of experimental setup. Fig.2. Wing model covered with silicone rubber.

Table 1. Specifications of wing model.

Span w [mm]	130
Length L_c [mm]	130
	2.1 (A27)
Young modulus <i>E</i> [MPa]	2.7 (A33)

Fig.3 はレイノルズ数 Re に対する翼型模型の抗力特性 Cdを示している. 図の凡例は, "P+S"が 「被膜付き翼型」, "S"のみは「シリコーンゴム製の翼型」, 括弧内の S は Soft(A27), H は Hard (A33)を意味する. Fig.3からレイノルズ数に依らず,ゴム製の翼型はアルミ製の翼型に比べて抵抗 低減効果を確認できる. レイノルズ数が最も低いとき, データにばらつきが見られる理由は, 測定 する空気力が小さくなり S/N 比が低下するためである.4種類のゴム製翼型の抵抗低減率は、平均 で20%以上となった.

Fig.4 は Re=2.6×10⁵ での迎角と抗力係数 C_d の関係を示している. 迎角を変更した場合でも、ア ルミ製の翼型に比べて、ゴム製の翼型は抵抗低減効果があることを確認できる. 迎角が増すにつ れて、ゴムで被膜された翼型とシリコーンゴムのみの翼型の抵抗低減効果に差が少し見られるが、 最大迎角α=10°のときでもゴムで被膜された翼型は、約30%の抵抗低減効果がある.以上の結果 から、ゴムのような弾性被膜は抵抗低減法として利用可能であるといえる.



Fig. 3. Characteristics of drag coefficient with Reynolds number.



Fig. 4. Characteristics of drag coefficient with the angle of attack (Re= 2.0×10^5).

(4) 平成 30 年度進捗状況

粘弾性被膜の翼模型を製作して空気力計測を行い,アルミニウム製の翼模型の空気力と 比較した.その結果,粘弾性被膜を用いることで最大 30%の抵抗低減効果が得られること を確認した.

(5) まとめ

粘弾性被膜を有する物体の空気力特性を調べた.金属模型との比較により抵抗低減効果 を確認することができた.現在,風路の製作に取り組んでおり,抵抗低減メカニズムに着 目した実験を開始したいと考えている.

参 考 文 献

[1] Gray J.: Studies in animal locomotion VI, The propulsive powers of the dolphin, *J. Exp. Biol.*, **50** (1936), 233-55.

[2] Kramer, M. O.: Boundary layer stabilization by distributed damping, J. Aero. Sci., 24 (1957), 459-460.

[3] Carpenter, P. W.: Status of transition delay using compliant walls, in Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, **123** (D. M. Bushell and J. N. Hefner, Eds.), *Progress in Astro. & Aero.*, AIAA (1990), 79-113.

[4] Davies, C. and Carpenter, P. W.: The effect of anisotropic wall compliance on boundary-layer stability and transition, *J. Fluid Mech.*, **218** (1990), 171-223.

[5] Carpenter, P.W, Garrad, A.D.: The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part 1. Tollmien-Schlichtinga instabilities, *J. Fluid. Mech.*, **155** (1985), 465-510.

[6] Carpenter, P.W, Garrad, A.D.: The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part 2. Flow-induced surface instabilities, *J. Fluid. Mech.*, **170** (1986), 199-232.

[7] Gad-el-Hak, M.: The response of elastic and viscoelastic surfaces to a turbulent boundary layer. J. *Appl. Mech.*, **53** (1986), 206-212.

[8] Hess D. E., Peattie R. A. and Schwarz W. H.: A noninvasive method for the measurement of flow-induced surface displacement of a compliant surface, *Experi. in Fluids*, **14**-1 (1993), 78-84.

[9] Lee, T., Fisher, M. and Schwarz, W. H.: Investigation of the stable interaction of a passive compliant surface with a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **257** (1993), 373-401.

3.1.8. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標·計画

フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は、これまで多く行われてきた^(1,2).しかし、系統的に データを整理した成果は数少ない^(3,4).本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて、材料と 流体力学の物理量を関連付けることで、フラッタ特性を整理できる無次元パラメータの提案を試み

(2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体-構造連成問題の主要課題の一つである.計算機性能の 向上により,予測精度の信頼性は向上している一方で,数値計算結果の妥当性を確認するために 参照できる実験データは数少ない.本研究ではフラッタ現象に関する基礎的な実験を通じて,無 次元数を提案する.

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞装置の全体図である. 風洞装置は出口断面積が 0.3×0.3m²であり, 気流速度は 最大 40m/s である. 風洞装置の出口部分には Fig. 1 (b)に示したようなフラッタ装置を設置している. 試験片であるシート材は金属フレームで支持されており, 片端固定, 他端自由の状態である. 固定 端は二枚の金属板で挟まれており, 実験中に外れない様にボルト固定されている. 鉛直と水平に 設置したシート材の変位を測定するために, レーザ変位計(LK-G500, KEYENCE Corp.)を用いた. 風速を変化させて実験を行い, フラッタ開始時の風速を調べた. フラッタ時のシート材の変位をサ ンプリング周波数 5kHz で約 13 秒間測定し, 65000 点のデータを収録して周波数解析を行った.



(a) Wind-tunnel (vertical support).

(b) Horizontal support.

Fig.1. Experimental setup of wind-tunnel.

昨年度までに、金属製とゴム製、樹脂製のシート材を用いて実験を行ってきた.フラッタ特性を 系統的に整理する無次元数の有効性を確認するために、今年度はすべての実験データを整理し てみた.また必要に応じて、再実験を行った.Table 2, 4, 6 は実験に使用したシート材の種類とヤ ング率を示している.Table 3, 5, 7 は各シート材のサイズである.それぞれのシート材を3 枚から5 枚用意して、実験の再現性を確認した上で実験データとして採用している.金属製、樹脂製のシ ート材は、シート材を片持ち梁の状態にしてたわみを計測し、変位の対称性があることを確認でき たものを用いて実験した.

る.

Name	Young's modulus [MPa]	
Polyvinyl chloride (PVC)	2.95	
Polyethylene terephthalate (PET)	1.94	
Acrylic (AC)	3.01	
Polycarbonate (PC)	2.24	
Duracon (POM)	2.74	
ABS	1.94	
Polystyrene (PS)	1.98	
Propylene	1.58	
Polyetylene	1.06	

Table 1 Young's modulus of resin sheet.

Table 2 Dimensions of resin sheet.

<i>L</i> [mm]	160, 180, 200, 220, 240	
<i>w</i> [mm]	30, 35, 40, 45	
<i>t</i> [mm]	0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0	

Table 3 Young's modulus of rubber sheet.

Name	Young's modulus	
Urethane rubber (UT)	46.20	
Flexible polyvinyl chloride (EV)	31.60	
Black natural rubber (BN)	9.90	
Fluorine-containing rubber (FS)	8.30	
Nitrile rubber (NBR)	7.60	
Ethylene-propylene rubber (EPT)	7.10	
Chloroprene rubber (CR)	5.60	

Table 4 Dimensions of rubber sheet.

<i>L</i> [mm]	100, 110, 120, 130, 150
<i>w</i> [mm]	40, 50, 60, 70, 80, 90
<i>t</i> [mm]	0.5, 1.0

Name	Young's modulus [GPa]	
Aluminum	70.6	
Brass	105	
Stainless	205	

Table 5 Young's modulus of steel sheet.

Table 6 Dimensions of steel sheet.

<i>L</i> [mm]	200, 250, 300	
<i>w</i> [mm]	40	
<i>t</i> [mm]	0.3, 0.4, 0.5	

Fig. 3 は各シート材のフラッタ開始速度を系統的に整理した結果である. 縦軸は本研究で提案 する無次元数であり, 横軸はレイノルズ数である. 縦軸は, 流体力のモーメント *pu²/2wL²*に対 する曲げモーメント *EI /t* の比を意味する. *t* はシート材の厚さであるが, 曲率半径 *r* は *t* に比例すると考えることができる. 無次元数を整理するとシート材の幅 *w* の影響が打ち消 される形をしており,実験結果は無次元数の形を支持していることを確認している. 大きさ と材質を変更しても, 各シート材が両対数で比例関係にあることが分かる. この結果は, 無次元数 とフラッタ開始速度に関係があることを意味している. また樹脂製シート材の設置方法によらず, 無 次元数とフラッタ開始風速が概ね比例関係にあることが確認できる. 水平支持の場合, 高い風速 でフラッタ開始していることを読み取ることができる.



Fig. 3. Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

Fig. 3 の実験結果から, フラッタ開始風速を予測する式に換算した結果が Fig. 4 である. 横軸は 複雑な式となるため図中に示していない. ゴムシートと樹脂シートは概ね 1 本の線に乗ることが判る. 原点を通過するように直線近似していないため, 横軸 N=0 のとき U=0 とならない. ゴムシートと樹脂 シートは計測上のばらつきによるものである. 一方, 金属シートは U~3.24m/s と大きい. その理由 は, 金属シートの試験を水平支持で実験したためであると考えている. 水平支持の場合, 実験開 始の時点でたわみが存在しており, フラッタ開始速度に影響したものと予想している. 現在, 鉛直 支持と水平支持の実験に取り組んでおり, 今後, 再検討したいと考えている.



Fig. 4 Flutter velocity to non-dimensional number.

(4) 平成 30 年度進捗状況

樹脂製のシート材を用いてフラッタ実験を行った.シート材の大きさ,材質によらず,無次元数を 用いてフラッタ周波数特性を系統的に整理できることが確認できた.シート材を水平支持,垂直支 持の2種類で実験した結果,シート材の支持方法によらずフラッタ開始速度を予測できることが確 認できた.

(5) まとめ

流体構造連成解析の検証に使用できる実験データを取得するために、フラッタ試験を行ってきた.金属製、ゴム製、樹脂製のシート材についてフラッタ開始速度を調べた結果、フラッタ特性を系統的な傾向が確認できた.実験結果に基づいて導出した無次元数は、シート材料の材質、大きさによらず、フラッタ特性を整理できる形をしている.またシート材の支持方法によらず、フラッタ開始

速度を整理できることが確認できた.

参考文献

[1] Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).

[2] 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計 測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).

[3] 黒川雄太、フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定:その2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I)、日本建築学会学術講演梗概集、B-1、(2007).
[4] 山口信行、伊藤恵介、緒方正幸、柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究(第1報、フラッタ限界の予測と風洞試験結果)、日本機械学会論文集(B編)、67巻、663号(2001-11)、pp. 2738-2745.

[5] 五十嵐保, 杉山均, 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, 共立出版, (2013).

3.1.9. 実験との融合による精度向上に関する研究

(1) 目標·計画

段ボールは主に物流の基盤を成す材料として用いられ,流通過程の外乱から被包装物が 損傷しないよう設計なければならない.従来から段ボールにおける設計方法では,輸送条 件などに応じた試験を繰り行うことによる試行錯誤に依存している.しかし,このような 方法では,被包装物に応じたその場限りの設計となるため効率的ではない.そのため,設 計段階において数値解析を用いることが望まれるが,数値解析を有効に活用するには解析 結果の妥当性を保障する必要がある.妥当性を保障する要因のひとつに適正な弾性係数を 用いることが求められる.段ボールの弾性係数に関しては,算出式や同定により求めた値 を用いている.特に同定により求められた弾性係数は,実験値のばらつきや数値解析の誤 差といった因子が存在するため不確定性をもつ.そのため,不確定性を低減することが可 能となれば数値解析の信頼性向上に貢献できると考えられる.

このような不確定性の低減についてはベイズ推定^{III}が有効な手法であると示されている. ベイズ推定では、弾性係数に関する類似データおよび観測データから得られた情報を解析 者の主観として事前分布に定義することが可能である.そのため、有効な事前分布を定義 することが可能であれば、少ない観測データのもとでも比較的確信度の高い推定結果が得 られる.そこで本研究では、事前分布の最適化による弾性係数の不確定性の低減を目標と する.そのための手法として広く使える情報量基準(Widely applicable information criterion, WAIC)^[2]の理論に基づき事前分布の最適化を行う.情報量基準 WAIC を用いるた めの制約として,階層ベイズモデルが必要であるため,実験値のばらつきを取り上げた階 層ベイズモデルを構築した.また,最適化された事前分布と無情報事前分布との推定結果 を比較することで不確定性の低減が可能であるか検討を行った.さらに,最適化された事 前分布によって推定された弾性係数の値を用いた解析結果と実験値とを比較することで, 弾性係数の妥当性について評価を行った.

(2) 意義・国際社会との比較

数値解析を有効に活用するには,解析結果の妥当性を保障しなければならない.このような妥当 性を評価するための方法論としてベイズ推定によるアプローチが行なわれている.しかし,妥当性 評価に用いられているベイズ推定の多くは,解析者の経験にもとづいた事前分布を定義している. しかし,本研究における事前分布の定義は情報量基準を用いることで観測データから最適な事前 分布を定義することが可能であるため解析者の経験による事前分布と比較すると推定に有益とな ると考えられる.

一方で研究対象となる段ボールにおいては複雑な形状を有することから有効な数値解析手法 が確立されておらず,利用用途に合わせた試験を繰り返し行うといった試行錯誤に依存した設計 を行っている.従って,本研究の提案手法により段ボールの解析結果の妥当性を示すことで,数 値解析を活用した効率的な設計を行うことが可能であるという観点から,非常に意義のある研究と いえる.

(3)研究内容

本研究の内容は、段ボールの弾性係数を対象に下記の2つに大別される.

- (a). 弾性係数の簡易推定
- (b). 弾性係数の妥当性検証

(a)では,曲げ試験と数値解析から作成された応答曲面を利用し簡易的に弾性係数を求める方法を示す.

(b)では、(a)により推定された弾性係数の不確定性に関してベイズ推定を利用することで評価する.

(a)弾性係数の簡易推定

(a-1) 曲げ試験

ー層段ボールの荷重-変位特性を測定するため図1(a)に示す万能試験機を用いた.また, 図1(b)に示すように測定は試験片の両端を治具で完全固定し圧子により圧縮速度 10mm/min で荷重を与え、負荷をセンサーにより段が完全に潰れるまで行った.

本研究では中芯の2方向に対して試験毎に新しい試験片を用いて同手順による測定をCD, MD それぞれ 10 回行う.また、本研究では図2に示すように測定された測定値に対し回帰 直線を求め解析領域を($0.5 \le x \le 2.0$)に限定して議論を行う.



Fig.1. Bending test of corrugated cardboard



Fig.2. Load – distribution characteristic $(0.5 \le x \le 2.0)$

(a-2) 均質化法

段ボールの有限要素解析では、ライナと中芯から構成される段が段ボール全体に分布し ているため、全ての段に対して要素分割を行う必要がある.そのため、要素数が膨大とな り解析結果を得るには計算負荷が極めて高くなる.しかし、段ボールのような中芯が周期 性をもつ構造体においては、均質化法を適用することで効率的に解析を行なうことが示さ れている.そこで本研究では下記の点に留意し数値シミュレーション解析に均質化法を適 用する.一般的に均質化法を薄板の曲げ問題に適用した場合には誤差が生じることが知ら れており、このような問題に対する均質化法の適用に関しては、高次項を考慮した均質化 法や曲げ問題に特化した均質化法が別途提案されている.そのため、このような曲げ問題 に均質化法を適用するには一般に均質化法の理論の拡張が必要になると認識されている. ただし、本研究では、階層ベイズモデルのハイパーパラメータの最適化による不確定性の 低減に主眼を置いていることから、簡単のため、便宣的に一般的に用いられる均質化法を 使用するものとする.従って、ここで取り扱うライナと中芯の弾性係数は有限要素モデル から得られたモデルパラメータであり、実際のライナおよび中芯の材料単体における弾性 係数とは一致しない.

(a-2.1) ミクロモデル

マクロモデルに適用するための等価物性値をミクロモデルにより算出する.均質化法で は、周期構造の一周期をユニットセルと定義している.そのため、図3(a)に示す段ボールの 一つの段をミクロモデルとしてモデル化した.中芯をモデル化する際、段ボールの中芯は 製造過程に依存し、各段で波形状が異なる.本研究では中芯を正弦波形状としてモデル化 を行った.要素分割においては、四面体二次要素を用いて、総要素数は解析時間を考慮し 2973 要素とした.また、ライナと中芯の性質は異なるため、それぞれ独立した材料である とし、弾性係数を定義する.

(a-2.2) マクロモデル

等価物性値をミクロモデルに適用することで、全体構造解析を行なう.マクロモデルで は曲げ試験と同様の試験片の寸法および境界条件を与える.測定時の試験片は、治具で挟 むことで完全に固定されており、圧子により試験片中央線上に鉛直下向きに任意の荷重が 加えられたとする.また、段ボールの抄紙方向および垂直方向に関してはマクロモデルに ミクロモデルの座標系を考慮することで表す.

図 3(b)に示すマクロモデルより, 抄紙方向に対して解析を行う場合の境界条件は*C*₁, *C*₂面上の*xyz*方向を完全拘束し, *L*₁線上の鉛直方向に任意の荷重を与える.一方, 垂直方向に対して解析を行う場合の境界条件は, *C*₃, *C*₄面上の*xyz*方向を完全拘束し, *L*₂線上の鉛直方向に任意の荷重を加える.要素分割は四面体二次要素を用いて,総要素数は変形挙動が変わらない程度の規模を選択し, 1492要素とした.この抄紙方向および垂直方向の境界条件を用いて各方向の全体構造解析を行った.





(a)Micro model

(b) Macro model

Fig.3. Finite element model

(a-3) 弾性係数の算出

ミクロ解析より中芯とライナの弾性係数を設計変数とし,図4に示す2次元格子点上に おける弾性係数を解析点とする.中芯およびライナは,段ボール原紙が同様であっても形 状や製造工程によりそれぞれ異なった弾性係数を有する.一般的に段ボールは中芯よりラ イナの剛性が大きい素材である.このようなことから弾性係数の範囲を中芯の弾性係数が ライナの弾性係数を上回らないという制約のもと,解析に用いる弾性係数の範囲をライナ で 3000MPa から 6000MPa,中芯で 1000MPa から 5000MPa までとし,それぞれ 500MPa 間 隔毎に総計 63 解析点を設定した.これらの解析点における解析結果の変位から CD,MD それぞれ応答曲面を作成し,図5 に示す応答曲面の解空間より交点の座標を弾性係数とす る.



Fig.4. Grid search of material properties



Fig.5. Inference of elastic modulus by intersection of coordinate

(b) 妥当性検証

(b-1) 弾性係数推定モデル

本論文の特長として弾性係数の同定に高次の内挿式を用いるのではなく、ライナと中芯 の弾性係数の影響を確率的論的に評価する点にある.従って、次式に示す階層ベイズモデ ルを用いて弾性係数の評価を行う.

$$p(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\lambda} | \boldsymbol{d}) = \frac{p(\boldsymbol{d} | \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta} | \boldsymbol{\lambda}) p(\boldsymbol{\lambda})}{\int p(\boldsymbol{d} | \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta} | \boldsymbol{\lambda}) p(\boldsymbol{\lambda}) d\boldsymbol{\theta}}$$
(1)

dは観測データ,**θ**はライナと中芯の弾性係数である.弾性係数**θ**は抄紙方向と垂直方向の応 答曲面から得られるパラメータであるため,2方向の応答曲面が次式の正規分布に従い確率 的に分布すると仮定する.

$$f(d|\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{lik}}} exp\left\{-\frac{(d-\mu_{lik})^2}{2\sigma_{lik}^2}\right\}$$
(2)

また、 $p(\theta|\lambda)$ はパラメータ λ が与えられたときの弾性係数 θ に関する事前分布であり、下記に示す正規分布に従う.

$$p(\boldsymbol{\theta}|\boldsymbol{\lambda}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{pri}} exp\left\{-\frac{\left(\theta - \mu_{pri}\right)^2}{2\sigma_{pri}^2}\right\}$$
(3)

ここで、事前分布の平均は抄紙方向と垂直方向の応答曲面の重ね合わせから得られたライ ナと中芯の弾性係数、分散はハイパーパラメータ $p(\lambda)$ により決定される.本研究におけるハ イパーパラメータ $p(\lambda)$ とは、事前分布の分散 σ^2 を決定するための事前分布に対する事前分 布を意味するパラメータであり、ハイパーパラメータ λ は弾性係数 θ の事前分布の確信度に 影響を与える.このハイパーパラメータ λ に関して、応答曲面は作成する過程で生じる不確 定因子を含むため、本研究では不確定因子の一つである試験機の精度をハイパーパラメー タ λ として定義する.そのため、ハイパーパラメータ λ を次式のガンマ分布で定義する.

$$\lambda \sim \operatorname{Ga}(\alpha, \beta) \tag{4}$$

ベイズ推定では事前分布に正確な情報を取り込むことで,推定精度が向上する利点をもつ. そのため,ハイパーパラメータAに関して情報量基準 WAIC を用いて最適化を行った.

(b-2) 事後分布推定

WAIC による最適化を行ったハイパーパラメータによる推定結果の有効性を確認するた

め、次に示すハイパーパラメータの選択手法により比較を行う. Case A は最適化したハイ パーパラメータを選択した場合. Case B はモデルパラメータに対して特に検討を行わない, モデルパラメータへの影響が限りなく小さい無情報事前分布を選択した場合である.本研 究ではこれらのハイパーパラメータの設定から事後分布を求め検証を行う. 図7に Case A, B の設定により MCMC から推定されたライナと中芯の弾性係数の事後分布を示す. 図7よ り Case A, B を比べるとの全体分布形状は類似しているが, Case A は Case B よりも分布形 状の幅が狭くなっており,確信度の高い区間も Case A では的確に捉えられている. 一方, Case B では確信度の高い区間の幅も広領域に広がっている. さらに定量的に事後分布の標 準偏差を比較すると Case A のライナが 880,中芯が 448, Case B のライナが 1053,中芯が 552 となり標準偏差の変化率は最適化パラメータを用いた場合,ライナで 16%,中芯で 18% の改善が図られた. 以上よりハイパーパラメータを用いることで事後分布の推定精度を向上さ せることからも,的確にハイパーパラメータを設定できたといえる. また,図8 に各パラ メータの事後分布を示す.



Fig.6. posterior distribution of elastic modulus

(b-3) 推定値の妥当性

推定したライナと中芯の弾性係数の妥当性を検証するため、最適化パラメータを用いて 推定された事後分布の平均値と95パーセント確信区間の下限の値を用いて数値シミュレー ション解析を行った結果と観測値および観測値から得られた各回帰直線の比較を行った. 図7に観測結果の一部である荷重が5Nから25NまでのCDおよびMDの比較結果を示す. 事後分布の平均値を弾性係数として用いた解析は回帰直線と概ね一致している.一方95パ ーセント確信区間の下限の値を弾性係数として用いた場合であっても、解析結果が回帰直 線から大きく異なることはなく、回帰直線の近傍を示している.このことから、推定され た弾性係数の値は回帰直線を捉えており、確信区間の値も正しく機能している.



Fig.7. Validation of elastic modulus

(4) 進捗状況

段ボールを構成するライナと中芯の弾性係数を対象に簡易的に弾性係数を求め,ベイズ 推定を用いた妥当性検証を実施した.その結果,ベイズ推定によって不確定性が低減され た弾性係数を用いて有限要素法解析結果と試験結果との整合性を確認することができ,情 報量基準を利用した事前分布の最適化の有用性を示した.

(5) まとめ

情報量基準を用いて事前分布を最適化する方法を提案し,段ボールの弾性係数を対象に 不確定性の低減が可能であるか確認した.その結果,事前分布に無情報事前分布を定義し たのと比較して不確定性の低減が可能である事後分布が得られ,本手法の有効性を示した. また,不確定性の低減された弾性係数を用いた数値解析の結果と試験値は概ね一致してお り,推定された弾性係数の妥当性を示した.

参考文献

- [1] ベイズ統計学概説, 松原望, 培風館, 2010.
- [2] Watanabe, S., Asymptotic equivalence of Bayes cross validation and widely applicable information criterion in singular learning theory, Journal of Machine Learning Research, Vol.14, 2010, pp.3571-3591.

3.1.10. 超音波治療用プローブの形状による音圧分布特性解析

(1) 目標·計画

近年,悪性腫瘍による死亡者は男女ともに年々増えており,2016年における癌死亡者数は,約 37万3千人であった.悪性腫瘍による死亡者数の増加の主な原因は人口の高齢化であるため,こ れからもますます増加していくことが予測されている¹⁾.

悪性腫瘍の治療法として,患者に手術を施す外科療法,高エネルギーの放射線を照射して癌細胞を死滅させる事によって癌の増殖を阻止する放射線療法,患者に抗癌剤を投与する事によって 癌治療を行う化学療法等があるが,近年,HIFU(High Intensity Focused Ultrasound)療法が注目さ れている.この治療法は、体外より照射した超音波を目的部位に集束させ癌組織を壊死させる方 法である.この治療法を脳腫瘍に用いる際の問題として、骨などの人体組織における超音波の反 射、屈折により、焦点位置が移動し、正常組織を傷付ける恐れがある.

このような状況に対し、より安全で効果的な HIFU 治療を行うためには、術前に超音波が生体内 を伝搬する様子をシミュレーションする必要がある.本研究では、ハンドヘルド形式のプローブを有 する小型の超音波治療装置を用いた際の音圧分布に関して FDTD (Finite-difference time-domain) 法を用いた解析を実施し、プローブ形状が超音波商社領域へ及ぼす影響につい て数値的検討を実施した.

(2) 意義・国際社会との比較

ハンドヘルド形式の簡便な超音波治療装置において、プローブ形状によって加温領域制御可能 となることで、患者個々の腫瘍形状に合わせた低侵襲治療を行うことができるようになり、癌の低侵 襲治療分野へ及ぼす影響は大きいと考えられる.

(3) 研究内容

本研究では, Fig. 1 に示すような超音波プローブを直接幹部へ接触させ治療する小型の HIFU 治療システムを対象として, プローブの先端形状を変更した際の音圧分布制御の数値的検討を実施した. 解析内で形状変更を行ったプローブの形状写真を Fig. 2 に示す. 本プローブは取り外し 可能のアクリル製のプローブキャップと超音波トランスデューサを含む本体とで構成されている. 本 研究では, この取り外し可能なプローブ先端パーツのテーパ角度を 60, 70, 80 [deg]とした解析モ デルを作成し検討を行った.

(i) 解析モデル

本研究で作成した解析モデルであるプローブ形状を Fig. 3 に示す.本研究では先端形状の高さ を一定として,テーパ部の傾きを3種類変更したモデルを作成した.また,今後の研究において実 験結果との比較検討を行うために,アクリルキューブに超音波を照射した際を想定し,解析モデル の作成を行った.プローブ内部は Fig. 1 の実機より採寸したパーツを配置しモデル作成を行った. トランスデューサを含む本体部分に関しては, 共通モデルである. プローブ内部は水で満たされた 状態であり, プローブ周辺領域は空気層とした.



Fig. 1. HIFU device



Fig. 2. Ultrasound probe



Fig. 3. Analysis model

(ii) 解析条件

本研究では FDTD 法を用いた音圧分布解析を実施した.使用した解析ソフトは ZMT(Zurich Med Tech) 社製の Sim4Life® 内の Acoustic Solver を用いた¹⁾.本解析モデルを構成する各材料 の音響特性を Table 1 に示す^{2,3)}. また,トランスデューサから発生する超音波の周波数は実機と同様に 800 [kHz]とした.解析モデル要素の一片の大きさは 0.1mmであり,総要素数は 348,397,000 であった.解析 PC は, CPU: Intel Core-i7 4770, memory: 32GB であった.

Matrerial name	Mass Density	Speed of Sound	Acoustic Impedance
	[kg/m^3]	[m/s]	[Mrayl]
Aluminum	2700	5303	14.3235
Air	1.165	343	0.000399
Acrylic resin	1190	2730	3.2487
Water	994	1482.3	1.47346

Table 1. Material properties

(iii) 解析結果

Fig.4 にテーパ角 60 度における超音波音圧分布解析結果と温度分布連成解析結果例を示す. 被加温体内部で超音波エネルギによる発熱の様子が再現されていることが確認できる.また,超 音波エネルギは深さ約 1.5cmの部分で集束していることを確認した.各解析時間は約6時間程度 であった.



Fig. 4. Estimated results by FDTD (θ =60deg)



Fig. 5. Focal depth profile evaluating the experimental results and FDTD calculations

Fig. 5 は各テーパ角における焦点深さについて実験結果と解析結果とをまとめたグラフを示している.加温実験は各テーパ角ごとに 5 回の加温実験を行った.その結果,実験結果の平均値とFDTD 法による解析結果との傾向が一致し,角度が増大するにつれて,焦点距離が浅くなることが確認できた.このことから腫瘍の位置に応じた適切なプローブ形状を選択することで,効果的な加温治療が行うことができる可能性を示した.

(4) 平成 30 年度進捗状況

本年度は新たに超音波治療装置のプローブ形状と照射領域との関係性について数値的に解明 するべく, FDTD 法を用いた音圧分布解析と温度分布解析の連成解析を実施した. FDTD 法解析 では立方体要素のため,要素数が膨大になることが予想されたが,現有の PC で解析を行うことに 成功した. さらに先行研究⁴で行った,筋肉等価寒天ファントムへの照射実験との比較検討を行い プローブ形状のパラメータと照射領域の関係性について明らかにした.

(5) まとめ

本研究では,癌治療法の一種である集束超音波治療方法(HIFU)における,超音波照射領域制 御の新たな手法の一つとして,プローブ先端形状を変更する方法を提案し,その基礎的な部分に ついて FDTD 方を用いた数値解析を実施した.本解析により,プローブ内部および照射体内での 超音波音圧分布を推定できる事を示した.また,プローブ形状を変更することで,照射深さ,領域 の大きさを変更できる可能性を示した.今後さらに研究を進め,実験との比較件を行う予定である.

参考文献

- [1] 国 立 が ん 研 究 センター が ん 情 報 サービス 最 新 が ん 統 計: https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html (2018/01/11 時点アクセス可能)
- [2] 大平克己, 非接触・空中伝搬超音波検査装置「NAUT21」に必要性とその応用, Eizo joho industrial 2013, p.69, (2013)
- [3] Cornelius T. Leondes: Biomechanical Systems, CRC Press, pp.(4-19)-(4-27), (2000).
- [4] Yasuhito Ichishima, Yasuhiro Shindo, Kazuo Kato, Akira Takeuchi: A Study of Controlling Ultrasound Irradiation Area and Focal Length by Changing HIFU Transducer, Proceedings of Life Science Conference 2017, pp.1-2, (2017).

3.1.11. 大規模構造解析のための領域分割法に基づく並列 FEM ソルバーの性能最適化

(1) 目標·計画

近年マイクロプロセッサアーキテクチャのマルチコア化,あるいは今後のさらなるメニーコア化に 伴い、スパコンをはじめとするHPC環境において新たな性能上の問題が生じている.これはスパコ ンにおける並列ソルバーの利用コア数に関して、数千・数万はもとより場合により百万単位のコアを 用いた超高並列環境の登場を意味する.特に、スパコンを構成する各計算ノード内におけるマル チスレッド環境での並列性能が問題となってきている.本研究では領域分割法にもとづく大規模並 列有限要素解析について検討する.

領域分割法(Domain Decomposition Method: DDM)は有限要素解析の並列化,大規模化の ための主要な方法の一つであるが,これに基づくFEMソルバーの設計において,部分領域ローカ ルFEソルバーの実装はDDMコード全体の性能を決定する重要部分であり,従来から計算上にお けるホットスポットとなってきた.また,BDD前処理のために必要とされるコースグリッド修正のため のコース問題向けソルバーの実装もまた,近年の超高並列環境において性能上問題となってい る.

そこで本研究では、ここ数年における計算機アーキテクチャの劇的な変化を踏まえ、領域分割 法における部分領域ローカルFEソルバーおよびBDD前処理のためのコースソルバーの実装につ いてそれぞれ再検討を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

計算機技術の発展に伴い,複雑形状を有する人工物の挙動を精緻に予測するために大自由 度規模の三次元有限要素解析が用いられるようになってきた.このような大自由度規模の問題をス ーパーコンピュータ等の先端計算機資源で効率よく解くためには並列計算が不可欠であり、領域 分割法は有限要素法の並列計算手法のうち、最も有効なものの一つとして認知され、研究開発が 進められてきた.

一方, プロセッサのマルチコア化に伴い浮動小数点演算性能が強化される一方で, メモリバンド 幅向上がこれに追いついていけないこと, すなわちByte/FLOPS値(B/F値)の低下が懸念されてい る. その結果として, メインメモリをただ読み書きしているだけのアプリケーションはマルチコア環境 においてスケールしなくなり, キャッシュメモリを有効に利用する工夫が必要となる.

こういった状況から、領域分割法ソルバーにおける部分領域ローカルソルバーおよびBDD前処 理のためのコースソルバーの実装を再検討する必要が生じているように思われる.より具体的には、 部分領域サイズとして数千から数万自由度規模を想定し、これに対しキャッシュを有効利用し、か つスレッド並列化が容易なローカルソルバーおよびコースソルバー設計が望まれている.プロセッ サのマルチコア化に伴い浮動小数点演算性能が強化される一方で、メモリバンド幅向上がこれに 追いついていけないこと、すなわちByte/FLOPS値(B/F値)の低下が懸念されている.その結果とし て、メインメモリをただ読み書きしているだけのアプリケーションはマルチコア環境においてスケー ルしなくなり、キャッシュメモリを有効に利用する工夫が必要となる.

(3) 研究内容

DDMではまず,解析領域全体を複数の重なりのない部分領域に分割する.続いて,部分領域 についてそれぞれ適当な境界条件を設定したうえで独立に解析を行う.領域間境界におけるつり 合いが取れるように境界条件を修正しながらこれを繰り返す.



Fig.1. 領域分割法のフロー

領域分割法ソルバーにおけるこれまでの実装では、その部分領域ローカルFEソルバーに

おける有限要素解析に関して、線形代数ソルバーとしては直接法ソルバーが用いられていた(DS-Sky).まずDDMループの最初に、部分領域ごとの剛性行列を組み立て、行列分解しておく.以後DDM反復ごとに、すでに分解済みの行列データに対し前進後退代入(Forward and Back-Substitution: FBS)により解を求める.部分領域サイズの増大に伴い、このアプローチでは大量のメモリが必要となる.また、そのFBS部分がメモリバンド幅依存となり、マルチコア環境でのスケール性に劣る.

これに対し、DDMの部分領域ローカルソルバーについて、その線形代数ソルバーを直接 法から反復法に切り替えることもできる.反復法ソルバーでは、本来疎行列である剛性行 列の非ゼロ成分のみをコンパクトに利用することができるため省メモリである.さらに部 分領域サイズによってはプロセッサのキャッシュ容量に収めることも可能であり、マルチ コア環境においてスケールしやすい.よって反復法の前処理によっては、直接法ソルバー に拮抗する性能が得られる可能性がある.

一方で、部分領域ローカルソルバーの実装に、部分領域単位のShur補元行列を用いる方法、 ローカルShur補元アプローチも可能である.この場合、最初に一度部分領域ごとにローカル なShur補元行列を求めておき、以後DDMの反復ごとにこれらローカルShur補元行列とベク トルとの行列ベクトル積を評価することにより、部分領域単位でのFEM計算を代替するこ とができる.



Fig.2. 部分領域ローカルソルバーにおける領域自由度と計算時間との関係

(4) 平成 30 年度進捗状況

ここでは、部分領域ローカルソルバーの性能最適化のために、ローカルSchur補元アプロ ーチの適用を考える.

DDM は領域間インターフェイス自由度に関する反復解法であり、その際の係数行列は (グローバル) Schur 補元と呼ばれるが、大規模解析の場合、通常 その係数行列を陽に求 めることはない. グローバルSchur補元行列は部分領域ごとのローカルなSchur 補元行列の 合成となる.あるいは、部分領域をスーパー要素とみなせば、ローカルSchur補元 (LSC)は その要素剛性行列に対応する. DS-LSCではLSC行列を陽に 求める. まず LSC 行列を予 め陽に求めておき、メモリ上に保存しておく.毎回の反力評価では連立一次方 程式を求解 するかわりに、LSC行列とインターフェイス変位ベクトルとの積によりこれを評価する.こ れ は直接法ソルバーベースの実装 (Direct solver-based, Storage type: DS) に分類され,対称 なLSC行列の上 三角部分が保存される. DS-LSCの求解処理は、対称行列とベクトルとの積 である. さらに, 最初に一度 だけ行うLSC行列自身の作成処理において, 複数右辺項問題 および行列行列積が現れる.これらについてスレッド並列化されたBLASを用いることによ り、高速化が見込まれる. DDMでは領域間境界でのつり合いを求めるために繰り返し計算 を行う.これはより具体的には、インターフェイス問題をCG法によって解くことを意味す る. その結果, DDMにおけるCGループの各ステップにおいて, 部分領域ごとにローカルソ ルバーが起動される. 今回はこのローカルソルバーの中でさらに反復法ソルバーが用いら れるため、DDM全体ではCGループがグローバルおよびローカルで二重にまわることになる.

(5) まとめ

領域分割法に基づく並列有限要素解析において、その部分領域ローカルFEソルバーの実装 にローカルSchur補元アプローチの導入を検討し、高速化及びメモリ量の削減を試みた.

3.2. AI グループ

計算力学研究センターに本年度より設置された AI グループは,近年流行している深層学 習や機械学習を始めとした種々の人工知能関連技術を計算力学分野に応用することを目的 としている.

よく知られているように,近年流行している AI 技術は Convolutional Neural Network (CNN) を用いて画像認識を行ったり, Recurrent Neural Network (RNN)または Long-Short Term Memory (LSTM)を用いて音声認識を行ったりと,所謂メディア情報分野に特化して研究開 発が先行されている.このような状況に対して,本グループでは従来行われてきた計算力 学分野の様々な研究分野に対して AI 技術を融合してより高度なシステムを構築することを 目指している.本年度は主に以下の6テーマについて研究活動を行った.

- 1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構築
- 2. 深層学習による計算力学の高度化
- 3. Convolutional LSTM を用いた流体解析結果予測
- 4. 血中アミノ酸によるメタボロームの予測
- 5. 人工知能による電力用変圧器の内部異常診断
- 6. マテリアルズ・インテグレーションのための材料オントロジーの開発

3.2.1. Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデルの構築

(1) 目標·計画

映画やゲームといった 3 次元コンピュータグラフィックスのコンテンツには人型のキャラクタが登場することが多く、キャラクタの動作を生成・制御・編集することは重要なタスクである.本研究の目的は、ニューラルネットワークを使用し、多様で自然な動作を生成することができるモデルを構築することである.

(2) 意義・国際社会との比較

3次元コンピュータグラフィックスのキャラクタの動作を生成・制御・編集する手法は多数提案され ており[1],その中でも、モーションキャプチャシステムで収録した動作データを使用する方法は自 然な動作を生成することができるため、よく使用されている.近年、深層ニューラルネットワークを使 用し、モーションキャプチャデータから学習することで動作を制御する手法が提案された[2],[3].一 方、深層ニューラルネットワークを用いた生成モデルである variational autoencoder[4],[5]や Generative Adversarial Networks (GAN)[6]が提案され, 主に画像を生成する問題に適用されている. 本研究では, Recurrent Neural Network (RNN) と variational autoencoder を使用し, モーション キャプチャデータから学習することで, 多様で自然な動作を生成することができるモデルを構築する.

(3) 研究内容

(a) 動作データセットと前処理

本研究で使用したモーションキャプチャデータは CMU Graphics Lab MotionCapture Database[7]である. 元データのフレームレートは 120fps であるが,本研究では 30fps にダウンサン プリングしたものを使用した. 元データは, Fig.1 に示す 19 関節のローカル座標系における 3 軸方 向の回転角度と,ルート関節(Hip)の3 軸方向の平行移動量として表現されている. 本研究では,こ れらを,ルート関節(Hip)を地面に垂直に投影した点を原点とし,右方向をx軸,上方向をy軸,正 面方向をz軸としたローカル座標に変換し,ルート関節(Hip)のy座標とその他の 18 関節のxyz座 標とxz平面における速度とy軸中心の角速度の58 次元ベクトルを動作データとして使用した. 次に, 各データを 64 フレーム(約 2 秒)ずつシフトし, 128 フレーム(約 4 秒)の固定長データに変換し, 13,032 個の動作データを得た. 最後に, 平均ベクトルを引き, 標準偏差で割ることで, データの標 準化を行った.

(b) Variational Recurrent Neural Network (VRNN)

時刻tの動作データを x_t , 潜在変数を z_t とすると, 時間長Tの動作データと潜在変数の同時確率 $p(x_{\leq T}, z_{\leq T})$ は, 連鎖率を使用して各時刻tの確率の積に分解することができる.

$$p(x_{\leq T}, z_{\leq T}) = \prod_{t=1}^{T} p(x_t, z_t \mid x_{< t}, z_{< t})$$

ただし, $p(x_0, z_0) = 1$ とする. また, 各時刻の確率に対して条件付き確率の関係を使用すると, 時刻tにおける事前確率 $p(z_t | x_{< t}, z_{< t})$ と時刻tにおける尤度 $p(x_t | x_{< t}, z_{< t})$ の積に分解することができる.

$$p(x_{\leq T}, z_{\leq T}) = \prod_{t=1}^{T} p(x_t \mid x_{< t}, z_{\leq t}) p(z_t \mid x_{< t}, z_{< t})$$

本研究では、時刻tにおける事前確率 $p(z_t | x_{<t}, z_{<t})$ と尤度 $p(x_t | x_{<t}, z_{\le t})$ をニューラルネットワークにより表現する.また、時刻tにおける事後確率 $p(z_t | x_{\le t}, z_{<t})$ は intractable であるため、事後確

率の近似q(z_t | x_{<t}, z_{<t})を別のニューラルネットワークを用いて表現する.

時刻tにおける事前確率 $p(z_t | x_{<t}, z_{<t})$, 尤度 $p(x_t | x_{<t}, z_{\le t})$, 事後確率の近似 $q(z_t | x_{\le t}, z_{<t})$ は全て過去の時刻の動作データ $x_{<t}$ と潜在変数 $z_{<t}$ に依存することから, RNN によりこの依存関係 を表現する. RNN $\epsilon \rho$, RNN の時刻tにおける隠れ状態ベクトルを h_t とすると

$$h_t = \rho(x_t, z_t, h_{t-1})$$

となる. 事前確率 $p(z_t | x_{<t}, z_{<t})$ を正規分布 $\mathcal{N}(z_t; \mu_{p_t}, \sigma_{p_t})$ とすると、平均 μ_{p_t} と標準偏差 σ_{p_t} をニュ ーラルネットワーク $\phi_{\mu}, \phi_{\sigma}$ によりそれぞれ

$$\mu_{p_t} = \phi_{\mu}(h_{t-1}), \ \sigma_{p_t} = \phi_{\sigma}(h_{t-1})$$

と表す. ただし, t = 0のときの事前確率は標準正規分布とする. また, 尤度 $p(x_t | x_{<t}, z_{\le t})$ も正規 分布 $\mathcal{N}(x_t; \mu_{x_t}, \sigma_{x_t})$ であると仮定すると, 平均 μ_{x_t} と標準偏差 σ_{x_t} をデコーダニューラルネットワーク $\psi_{\mu}, \psi_{\sigma}$ によりそれぞれ

$$\mu_{x_t} = \psi_{\mu}(z_t, h_{t-1}), \ \sigma_{x_t} = \psi_{\sigma}(z_t, h_{t-1})$$

と表す. 同様に事後確率の近似 $q(z_t | x_{\leq t}, z_{< t})$ も正規分布 $\mathcal{N}(z_t; \mu_{z_t}, \sigma_{z_t})$ と仮定し, 平均 μ_{z_t} と標準 偏差 σ_{z_t} をエンコーダニューラルネットワーク $\varphi_{\mu}, \varphi_{\sigma}$ によりそれぞれ

$$\mu_{z_t} = \varphi_{\mu}(x_t, h_{t-1}), \ \sigma_{z_t} = \varphi_{\sigma}(x_t, h_{t-1})$$

と表す.

時刻tにおける動作データ x_t の再現誤差は、 x_t からエンコーダネットワークにより事後確率の近似を求め、サンプリングされた潜在変数 z_t からデコーダネットワークによって求められた尤度の対数によって求める.

$$-\mathbb{E}_{z_{t} \sim q(z_{t} \mid x_{\leq t}, z_{< t})} \log p(x_{t} \mid x_{< t}, z_{\leq t})$$

=
$$-\mathbb{E}_{z_{t} \sim \mathcal{N}\left(z_{t}; \varphi_{\mu}(x_{t}, h_{t-1}), \varphi_{\sigma}(x_{t}, h_{t-1})\right)} \log \mathcal{N}\left(x_{t}; \psi_{\mu}(z_{t}, h_{t-1}), \psi_{\sigma}(z_{t}, h_{t-1})\right)$$

また,時刻tにおける事前確率と事後確率の近似の誤差は,事前確率に対する事後確率の近似の KL Divergence によって求める.

$$D_{KL}(q(z_t \mid x_{\le t}, z_{< t}) \mid \mid p(z_t \mid x_{< t}, z_{< t})) = D_{KL}\left(\mathcal{N}(z_t; \mu_{z_t}, \sigma_{z_t}) \mid \mid \mathcal{N}(z_t; \mu_{p_t}, \sigma_{p_t})\right)$$
$$= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{J} \left(\frac{\sigma_{z_t, j}^2}{\sigma_{p_{t, j}}^2} - 1 + \log \sigma_{p_t, j}^2 - \log \sigma_{z_t, j}^2\right)$$

ここで, Jは潜在変数の次元数である. 時刻tにおける誤差関数は再現誤差と KL Divergence の和 とし, 全時刻における誤差関数はこれを時間方向に加算したものとする.



(c) 実験

本研究で構築したモデルでは、58次元の動作データ x_t を8次元の潜在変数 z_t で表現する. x_t を z_t に変換するエンコーダネットワークの構造を Fig.2 に示す.提案モデルでは 2 層の特徴抽出器 f_1, f_2 により動作データから特徴抽出を行っている. f_1, f_2 は全結合層(FC)と活性化関数 Rectified Linear Unit(ReLU)により構成されており、 f_1, f_2 によって抽出される特徴量の数はそれぞれ 48、32 とした.また、Fig.3 に示すように RNN ρ には Long Short-Term Memory(LSTM)を使用し、動作特徴 量 x_t'' と潜在変数 z_t から隠れ状態ベクトル h_t を更新する.隠れ状態ベクトル h_t の次元数は 32 とした. エンコーダネットワークでは、Fig.2 に示すように動作特徴量 x_t'' と隠れ状態ベクトル h_{t-1} から 1 層の 全結合層 $\varphi_u, \varphi_\sigma$ により平均と標準偏差を出力する.標準偏差を出力する層 φ_σ には sigmoid 関数を

かけている. デコーダネットワークは Fig.4 に示すように3層の全結合層 ψ , f'_1 , f'_2 により構成されている. 1層目の ψ が潜在変数 z_t から動作特徴量 x''_1 への変換であり,残りの2層 f'_1 , f'_2 が動作特徴量 x''_t から動作データ x_t への変換となっている. ψ , f'_1 には ReLU活性化関数をかけている. 事前確率ネットワークは Fig.5 に示すように1層の全結合層 ϕ_μ , ϕ_σ により構成されている. 標準偏差を出力する層 ϕ_σ には sigmoid 関数をかけている. Fig.4 に示すように,本研究のデコーダネットワークでは動作データが確率的に出現するように表現していない. そのため,動作データと動作データをエンコード・デコードして得られたデータとの平均2乗誤差を再現誤差としている.

学習データ数を 10,426, 評価用データ数とテスト用データ数をそれぞれ 1,303, バッチサイズを 1,600 として学習を行った. 学習のエポック数は 2,000 とした. また, 最適化には adam を使用した.

構築した動作生成モデルを評価するための実験を行った.具体的には,事前確率ネットワーク により推定された事前確率分布から潜在変数z_tをサンプリングし,それをデコーダネッワークにより デコードすることで,動作データx_tを生成する.ランダムにサンプリングした 32 個のz₀から生成した 動作データを Fig.6 に示す.自然で多様な動作が生成できることが確認できた.



Fig.6. 32 randomly generated motions.

(4) 平成 30 年度進捗状況

VRNN を使用してモーションキャプチャデータセットから学習を行い,8次元の潜在変数空間か

らサンプリングを行うことで動作を生成可能なシステムを構築した.実験の結果,多様で自然な動 作が生成できることが確認できた.

(5) まとめ

本研究では、3 次元コンピュータグラフィックスのキャラクタの動作生成を目的とし、RNN により過 去の動作との依存関係を表現すると同時に、多階層のニューラルネットワークにより動作特徴量を 抽出し、低次元の潜在変数空間に確率密度関数として動作特徴を表現することができるモデルを 構築した.実験の結果、8 次元の潜在変数空間からサンプリングすることで多様で自然な動作が生 成できることを示した.

参考文献

[1] X. Wang, Q. Chen, and W. Wang, "3D Human Motion Editing and Synthesis: A Survey," Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2014.

[2] D. Holden, J. Saito, T. Komura, and T. Joyce, "Learning Motion Manifolds with Convolutional Autoencoders," SIGGRAPH Asia 2015 Technical Briefs, SA'15, 18:1-18:4, 2015.

[3] D. Holden, J. Saito, and T. Komura, "A Deep Learning Framework for Character Motion Synthesis and Editing," ACM Trans. Graph., vol.35, no.4, 138:1-138:11, 2016.

[4] D. P. Kingma and M. Welling, "Auto-Encoding Variational Bayes," International Conference on Learning Representations 2013, 2013.

[5] D. P. Kingma, D. J. Rezende, S. Mohamed, and M. Welling, "Semi-Supervised Learning with Deep Generative Models," Proceedings of Neural Information Processing Systems 2014, 2014.

[6] A. Radford, L. Metz, and S. Chintala, "Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks," International Conference on Learning Representations 2016, 2016.

[7] CMU. Carnegie Mellon University - CMU Graphics Lab - motion capture library. http://mocap.cs.cmu.edu.

3.2.2. 深層学習による計算力学の高度化: 深層学習を用いた高精度有限要素解析

(1) 目標·計画

本研究は、計算力学のコア部分へ機械学習、特に深層学習(Deep Learning)を導入し、従来の 技術を凌駕する高速化・高精度化を達成する新しい手法の開発を目的としている.

有限要素法(FEM)など計算力学の基盤を成す解法は,現象を数学的に表現する微分方程式

に対して,解析対象を空間的に細分割する格子あるいは要素に基づいて離散化してできる連立 一次方程式を解くという数値解法である.これらの解法は,格子あるいは要素の細かさが解の精度, すなわち解の正しさに直結するため,これまでの計算力学では,多くの研究リソースが,より大規模 な連立方程式をより速く解くことに費やされてきた.

本研究は、従来の手法を根源から見直し深層学習の観点から再構築することにより、全く新しい 数値解析手法を開発することを目指す.

今年度は, 誤差情報の深層学習により, 従来の有限要素解析の限界を突破する新しい高精度 解析手法の基礎的評価について報告する.

(2) 意義・国際社会との比較

深層学習の基幹技術である階層型ニューラルネットワークは、これまで計算力学の様々な分野 に適用されてきた. 関数近似能力を利用して、材料構成則の推定、非破壊評価、構造最適化など 多様な用途に適用されているが、用いられている階層型ニューラルネットワークの規模、ニューラ ルネットワークの学習に使用するデータ数、学習回数はいずれも小規模である. 計算機の性能は 着実に向上し、深層学習に関する研究の活発化により階層型ニューラルネットワークの学習に関 するアルゴリズム、学習に用いるハードウエアの性能は急速に向上している. これにより、これまで は適用が不可能であったような対象についても適用が可能になりつつある.

本研究は、計算力学のコアとなる有限要素法の解析精度向上のために深層学習を適用するも のである. 個別問題に対して surrogate モデルを構築するのではなく、汎用的な高精度有限要素解 析法を目指すものである. こうした階層型ニューラルネットワークの適用例は非常に少なく、本研究 はユニークなものである. 今年度は、誤差評価に基づく高精度有限要素解析への深層学習の適 用例を示す. 汎用的な高精度有限要素解析法は、実用的な価値が大きいものである.

(3) 研究内容

有限要素法の解析精度は節点数に依存し,高精度な解を得るためには多数の節点を用いる必要がある.しかしながら,例えば3次元解析において要素の1辺の節点数を2倍にすると全体の節点数は8倍に増加し,求解に要する計算量は512倍に激増する.計算機の性能向上や並列処理により演算性能が飛躍的に伸びているとはいえ,こうした計算負荷は有限要素解析の適用範囲を制限することになる.

高精度な解を得るために多数の節点を必要とするという有限要素解析の本質的な制約のもとで, 全体節点数の激増を抑制しながら高精度な解を得る手法としてアダプティブ法がある.アダプティ ブ法では比較的粗い要素分割(要素サイズ大)で解析し,精度が悪い部分だけ要素分割を精細化 (要素サイズ小)する手法である. 部分的な要素分割を繰り返し行い, 所要の精度まで到達しようと するものであり, 全体を小さな要素で分割する場合に比べて全体節点数は少なく済み, 所望の領 域において高精度な解が得られるという利点がある. しかしながら, 最終的な要素数は初期の要素 数に比べて増大するため解析時間は増加すること, また, 要素細分割と有限要素解析を繰り返す ため, かならずしも簡便ではないという欠点もある.

本研究は、高精度な解には多数の節点を必要とする有限要素法の本質的な制約に対して、深 層学習によりブレークスルーを起こそうとするものであり、少ない節点数の粗い解析結果と誤差に 関する情報から深層学習により高精度な解析を導こうとするものである.

(3.1) 事後誤差評価と深層学習を用いた高精度有限要素解析

通常の変位法有限要素解析では要素間境界において応力は不連続となる.この不連続な応力 をスムージングして得られた応力は,元の不連続な解よりも真の解に近いことが知られており, Zienkiewicz and Zhu はこれを用いた事後誤差解析法(ZZ法)を提唱した[1]. Fig.1 に1次元1次要 素における ZZ 法の概要を示す.解析で得られた応力を平滑化して得られた応力は真の応力に近 いため,解析で得られた応力と平滑化応力との値との差は真の誤差(真値との差)の精度良い近 似とみなすことができる.ZZ 法は非常に簡便で性能もよいため,事後誤差評価法として広く採用さ れている.



 σ obtained by FEA (discontinuous)

Fig.1. Zienkiewicz-Zhu Error Estimator

アダプティブ法はこの事後誤差評価を利用して要素分割の最適化を図る手法である. 初期のメ ッシュで解析を行った後, ZZ 法で事後誤差評価を行い誤差が大きい領域だけ要素分割を精細化 する. 再度解析と事後誤差評価を行い, 誤差が基準を上回る領域についてはさらに要素分割を精 細化する. 誤差が十分小さくなるまでこの解析, 誤差評価, 要素細分割を繰り返すのがアダプティ ブ法である. 細分割は局所的であるため, 解析時間に直結する全体節点数の増加は抑制される. しかしながら, 部分的ではあれ要素分割を繰りかえすことで節点数は増加し, 増加した節点数の下 での解析を繰り返すため, 負荷は必ずしも低くないという難点がある.

本研究は,要素細分割と再解析を行うことなく,深層学習により高精度な解を得ようとするもので ある.本研究の深層学習を用いた高精度有限要素解析法は次の3つの過程で構成される.

- Phase 1 様々な設定(領域形状,荷重,固定条件など)の解析対象を用意する. 個々の解析対象 について,比較的粗いメッシュによる有限要素解析および事後誤差評価,さらには非常 に詳細なメッシュを用いた有限要素解析を行う.これにより多数の(粗いメッシュによる着 目点の応力値,粗いメッシュにおける着目点および周辺の誤差評価結果,精細メッシュ における着目点の応力値)というデータセットを収集する.
- Phase 2 Phase 1 で蓄積したデータセットを用いて, 階層型ニューラルネットワークの学習を行う. ただし,

入力データ: 粗いメッシュによる着目点の応力値と着目点および周辺の誤差情報

教師データ: 精細メッシュによる着目点の応力値

とする.これにより,粗いメッシュの解析結果と誤差情報を入力すると精細メッシュの解析 結果を出力する階層型ニューラルネットワークが構築される.

Phase 3 Phase 2 で構築した階層型ニューラルネットワークを新しい解析対象へ適用する. 解析結果と事後誤差情報を学習済み階層型ニューラルネットワークに入力すれば, 精細メッシュによって解析した場合の推定値が迅速に出力される.

本手法の特徴は Phase 3 における汎用性と迅速性である. ただし, Phase 1 および Phase 2 では 非常に大量の計算が必要であることにも注意が必要である.

(3.2) 漸近誤差評価と深層学習を用いた高精度有限要素解析

節点密度と誤差の関係式を基にき裂先端における応力拡大係数を高精度に予測する手法が ある[2]. 有限要素解析で得られる応力と節点密度との間の次のような式を用いて真値を予測する ものである.

$$\sigma_{FEM} = \sigma_{EXACT} + aN^{-\delta} \tag{1}$$

ここで σ_{FEM} は有限要素解析で得られた応力値, σ_{EXACT} は真値, a, δ は係数, Nは節点密度である.

節点密度の異なる複数の解析から係数を推定することにより、 *σEXACT* の推定が可能となる. この手法は 2 次元き裂や 3 次元貫通き裂に適用し良い結果が得られているが、係数は対象ごとに異なるなど汎用性に難点がある.

本研究では、節点密度の異なる2つのメッシュを用いた解析結果から、深層学習により精細メッシュによる解析結果を予測する.この手法も次の3つの過程で構成される.

- Phase 1 様々な設定(領域形状,荷重,固定条件など)の解析対象を用意する. 個々の解析対象 について,粗いメッシュ(粗メッシュ),全体を細分割したメッシュ(分割メッシュ),さらには 非常に詳細なメッシュ(精細メッシュ)を作成し有限要素解析を行う. これにより多数の(粗 メッシュによる着目点の応力値,粗メッシュと分割メッシュによる着目点および周辺の変 化量,精細メッシュにおける着目点の応力値)というデータセットを収集する.
- Phase 2 Phase 1 で蓄積したデータセットを用いて, 階層型ニューラルネットワークの学習を行う. ただし,
 - 入力データ: 粗メッシュによる着目点の応力値と着目点および周辺の粗メッシュ,分割メ ッシュ間の変化情報

教師データ: 精細メッシュによる着目点の応力値

とする.これにより,粗メッシュおよび分割メッシュの解析結果を入力すると精細メッシュの 解析結果を出力する階層型ニューラルネットワークが構築される.

Phase 3 Phase 2 で構築した階層型ニューラルネットワークを新しい解析対象へ適用する. 用意し たメッシュとその分割メッシュを用意し, 両解析結果を学習済み階層型ニューラルネットワ ークに入力すれば, 精細メッシュによって解析した場合の推定値が迅速に出力される.

本手法では, 追加情報として粗メッシュ, 分割メッシュの解析における事後誤差評価情報も使用 可能である.

(3.3) 実施例

本研究の事後誤差評価と深層学習を用いた高精度有限要素解析法について,簡単な例題を 通して基本性能の評価を行った. Fig.2 に 2 次元応力解析の解析対象を示す. 底面を固定し上面 の片側に荷重を加えた. 領域内に均等に配置した 1600 箇所において応力値を求めた. 全体を 4 角形 1 次要素で要素分割した. 要素数は 16(4x4)とし,収束値(真値)を求める際には 65536 (256x256)の要素分割を用いた. すなわち,粗いメッシュ(16 要素)の解析結果から精細メッシュ (65536要素)の解を推定する問題である.入力データとしては,着目点と周囲4点における応力の 解析結果と平滑化応力との差(15個(応力3成分x5点))および周囲の4点と着目点との応力値 の差(12個(3成分x4点))の計27個,出力データ(教師データ)としては精細メッシュによる着目点 の応力値3成分で計3個とした.1600箇所から1444点を着目点として選択し,上記の入出力デ ータセットを1444パターン作成した.ここから860個を学習パターン,残り584個を検証パターンと して階層型ニューラルネットワークの学習を行った.階層型ニューラルネットワークは入力層ユニッ ト数27,出力層ユニット数3とし,中間層の層数およびユニット数については数種類の中から予備 実験により決定した.



Fig.2. 2D stress analysis

Fig.3にせん断応力σ_{xy}の推定結果を示す. 横軸は着目点の番号であり1520は上面近傍左側, 1560は上面近傍右側を示す. 縦軸は応力値である. 図中の緑線は16要素分割による解析結果, 青線は平滑化応力, 赤線は65536要素分割による真値(教師データ), 黒線は学習済みニューラ ルネットワークによる推定値である. 黒線(推定値)は赤線(教師データ)によく追従していることが わかる.



Fig.3. Performance of the proposed method

(4) 平成 30 年度進捗状況

深層学習による高精度有限要素解析法を提案し、2次元の簡単な応力解析を例題として本手 法を適用して基礎的評価を行い、良好な結果を得た.本手法は、有限要素解析の誤差情報を活 用し、比較的粗いメッシュでも高精度な解を得ることができる手法である.

(5) まとめ

本研究は粗いメッシュによる解析結果と誤差情報から深層学習を用いて精細メッシュによる解 析結果を得ようとするものである. 深層学習により構築した階層型ニューラルネットワークを用いるこ とにより,任意の新たな解析結果を改良することが可能になる. これは,高精度な解を得るために は精細メッシュによる大量の計算を必要とする従来の有限要素解析に対するブレークスルーとなる ものである.

参考文献

[1] Zienkiewicz, O.C., Zhu, J.Z., "A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24 (1987), pp. 337-357.

[2] 矢川元基, 一宮正和, 安藤良夫, "有限要素法の離散化誤差に基づく応力拡大係数の解析法", 機論, 44 巻, 379 号, (1978), pp. 743-755.

3.2.3. Convolutional LSTM を用いた流体解析結果予測

(1) 目標·計画

本研究では、人工知能分野で注目されている Deep Learning の技術を用いて、数値解析結果を 解析なしに予測する技術の開発を目指す. Deep Learning は画像認識や音声認識では既存の認 識アーキテクチャの性能を超え、現在では将棋や碁などのゲームでも人間に勝る予測や推論が可 能となっている^{[1],[2],[3]}. この技術は主に画像認識で用いられる CNN(Convolutional Neural Network)のブレークスルーがあったからこそ、非常に強力な推論が可能となっている. また、 LSTM(Long Short-Term Memory)^[4]と呼ばれる RNN(Recurrent Neural Network)時系列データを逐 次入力し、ネットワーク内部の記憶とともに未来を学習することで、音声認識の精度を飛躍的に向 上させた. 数値解析では計算領域を離散的な格子に分割して、静解析でない場合 1 時刻先の解 を得る. そのため、数値解析モデルの学習は CNN との相性が非常に良く離散空間を畳み込みより
特徴を抽出し、LSTM を用いれば時系列データを加味した解析結果を予測することが可能である と考えられる.

本年度は数値解析の物理量を入力とした Convolutional LSTM^[5]を構築し,数値解析結果を学 習させ,定性的,定量的評価を行った.

(2) 意義・国際社会との比較

人工知能は情報処理分野で自動車の自動運転や, 顔認証, 音声認証/認識, チャットボットなど に組み込まれることが多い. しかし, 計算工学, 計算力学の分野ではまだまだ解析等の中に組み 込まれていない. これは, 計算モデルが確率していて, 計算さえできれば解が得られるからである. しかし近年, 複雑化した計算モデルでは, 1 ケース解くのに数日かかることもしばしばである. そこ で, 人工知能に初期値を入力して少し待つと解きたかった問題の解が得られれば, 解析時間の短 縮になったり, 想定外の解析も試みたりすることができ, 新たな発見や見たい減少をピンポイントで 細かく解析するための足がかりにもあると考えられる.

本研究では Convolution LSTM を用いて画像認識技術を用いて数値解析結果の予測を行うという試みは、全く新しいものであり、学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考える.

(3) 研究内容

本研究では、Deep Learning を用いた解析結果予測を最終目標として、ある解析時刻の状態 から次の時刻の状態を予測するネットワークを構築する.数値解析では、解析結果は物理 量を節点上に持つため、空間的な意味合いが非常に重要である.そのため、従来の LSTM では取り扱えていなかった空間情報を考慮した学習モデルである Convolutional LSTM(ConvLSTM)を用いる.ConvLSTM は動画像から未来の画像を予測するために開発さ れたネットワークであるが、ここでは空間情報を節点情報とし、物理量は Convolutional 層 の入力チャネルとして対応させることで解析結果の予測を行うことが可能であると考えら れる.本研究では、数値解析結果予測のために ConvLSTM を用いることを提案する.

時間的な状態情報をもとに未来の状態を推定する方法の一種にLSTM がある. LSTM は 従来 1 次元の特徴量情報を再帰的に呼び出し,予測時の入力情報として入力データとマー ジして扱う. ConvLSTM では 1 次元の特徴量情報を 2 次元の Convolutional 層に拡張し, 空間情報として過去の入力情報を記憶することができる. つまり,シーケンシャルに空間 情報を追跡することが可能となる. ConvLSTM の各ゲート及び活性化関数を式(1)に示す.

$$i_{t} = \sigma \left(W_{xi} * X_{t} + W_{hi} * \mathcal{H}_{t-1} + W_{ci} \circ C_{t-1} + b_{i} \right)$$

$$f_{t} = \sigma \left(W_{xf} * X_{t} + W_{hf} * \mathcal{H}_{t-1} + W_{cf} \circ C_{t-1} + b_{f} \right)$$

$$C_{t} = f_{t} \circ C_{t-1} + i_{t} \circ \tanh \left(W_{xc} * X_{t} + W_{hc} * \mathcal{H}_{t-1} + b_{c} \right)$$

$$(1)$$

$$o_{t} = \sigma \left(W_{xo} * X_{t} + W_{ho} * \mathcal{H}_{t-1} + W_{co} \circ C_{t} + b_{o} \right)$$

$$\mathcal{H}_{t} = o_{t} \circ \tanh \left(C_{t} \right)$$

ここで, Xは入力群, Hは隠れ層状態, Cは cell の出力を表し, *i*, *f*, *o* はそれぞれ input, forget, output のゲートを表す. これらの変数は 3 次元のテンソルであり,時刻 t と 2 次元の空間情報(row, column)を有する.計算記号である "*"は畳込み積, "。"はアダマール積を表す. この手法を用いることで,シーケンシャルに解析結果を追跡することができ,数ステップの解析を行うことで,次ステップ以降の解析結果を予測することが可能となる.

一般的に ConvLSTM は画像データを入力し、画像データを出力する.本研究で用いる入力 データは2次元の座標値(x, y)に物理量(u, v, p)の3つの成分からなるベクトルで表される. これはカラー画像を入力とした ConvLSTM と同様である.

数値解析の解析モデルは2次元円柱周りの流体解析であり,計算領域を1250×800の直交 等間隔格子を用いて解析を行った.解析手法は疑似圧縮性法を用い,離散化に3次精度風 上差分を用いた.解析条件は表1に示す.

Cylinder Diameter	40
Reynolds number	1,000
Courant number	0.25

Table 1 Analysis conditions

入力ベクトルとなる各格子点の物理量は 100 ステップ毎に獲得し,300 セットのベクトル を収集した.計算領域が 1250×800 と深層学習を行う上では大きいので,円柱周りの 300×200 のサイズでトリミングを行った.4フレーム分の過去の物理量を入力し,1フレーム後の物理量 を予測するように学習データを生成した.学習データの正規化はそれぞれの物理量が 0~1 にな るように行なった.入力ベクトルは空間情報(300,200)と物理量(3)が4フレーム分の構成となっ ている.すなわち,(4,300,200,3)のベクトルが一つの入力ベクトルとなる.ネットワークは入 力層から ConvLSTM を4層積層させ,最上層では3次元の Convolutional 層を配置した6層のネ ットワークを構築した.Fig.1 に1チャネル分のネットワーク構造を示す.ConvLSTM のカーネ ルサイズは全ての層で(3×3)として,3次元 Convolutional 層の入力は(20,4,300,200)とし,カーネ ルサイズを(3×3×3)とした.ストライドは全ての層で(1,1)と(1,1,1)とした.損失関数はクロスエ ントロピー,最適化には Adadelta を用い,誤差逆伝播法に従って学習を行なった.



Fig.1. Convolutional LSTM network structure

学習の入力にはフレーム数 t=4 から t=149 までの 145 個のデータを用いて 10,000 回学習を 行った.学習済みモデルを用いて、学習データの予測精度を検証した.精度検証には数値 解析で求められた物理量と ConvLSTM が予測した物理量の平均二乗誤差(MSE)を求めた. 各時間におけるそれぞれの物理量の表 2 に示す.また、予測結果を可視化したものを Fig.2 に示す.これらの結果より、圧力場に関しては円柱後流の渦の放出周期が一致し非常に良 い予測を行えているが、速度場においては期待した成果が得られなかった.これらは圧力 場に合わせて、速度場を正規化してしまったことに原因があると考えられるため、それぞ れの成分で正規化のパラメータを決定する必要がある.しかし、本年度の成果として、物 理量を用いての予測が可能であることが示唆され、今後の学習・予測・精度に期大いに待 が持てる.

	t=30	t=31	t=32	t=33
р	0.0680	0.0683	0.0684	0.0683
u	0.9654	0.9901	1.0204	1.0509
v	0.1154	0.1235	0.1274	0.1304

Table 2 MSE by time interval

_	t=30	t=31	t=32	t=33	
CFD p	0	•	•	0	
Predicted p	ORA	6	0	0	
CFD u	5	4	4	5	
Predicted u		6	CON MA	No.	
CFD v	a	art	sol !		
Predicted v					

Fig.2. Visualized each component (CFD is actual solution, Predicted is ConvLSTM solution)

(4) 平成 30 年度進捗状況

Convolutional LSTM を用いて数値流体解析結果を予測すること提案し、それに成功した. 昨年度では、可視化画像を用いた予測であったが、今年度は解析結果の物理量を扱い、学習および予測を行った. 正規化の不備はあったが、チューニングを行うことで十分な予測精度を獲得できると考えられ、今後に大いに期待が持てる. また、昨年の課題であった定量的評価を MSE と本稿では割愛したが SSIM(Structural Similarity Index Measure)の2つの手法で評価した.

(5) まとめ

本研究では、数値解析結果の予測を目標として、Convolutional LSTM を用いて予測器を構築し、 その検証実験を行った.解析は2次元円柱周りの流れ解析であり、流れ場はカルマン渦列を放出 する定常流れである. Convolutional LSTM の学習に解析結果の物理量を用いた.数値流体解析 (CFD)の結果と予測結果を可視化して比較したところ, 圧力の放出周期が概ね一致したが, 速度 場がうまく予測できていないことがわかった. 定量的評価として MSE で評価しても同様の結果が得 られた. これは正規化のパラメータに問題があると考えられ, 今後改善する. 以上より, Convolutional LSTM で物理量を扱い数値解析結果を予測することに成功した. 今後はネットワー クのパラメータチューニングによる予測の高精度化, 計算領域全体の学習方法の提案, 検証を行 う.

参考文献

- Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks", NIPS2012, 2012.
- [2] Alex Graves, Abdel-rahman Mohamed, Geoffrey Hinton, "Speech recognition with deep recurrent neural networks", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.6645-6649, 2013.
- [3] Silver, David and Schrittwieser, Julian and Simonyan, Karen and Antonoglou, Ioannis and Huang, Aja and Guez, Arthur and Hubert, Thomas and Baker, Lucas and Lai, Matthew and Bolton, Adrian and Chen, Yutian and Lillicrap, Timothy and Hui, Fan and Sifre, Laurent and van den Driessche, George and Graepel, Thore and Hassabis, Demis, "Mastering the game of Go without human knowledge", Nature, Vol.550, pp. 354–359, 2017.
- [4] Klaus Greff, Rupesh Kumar Srivastava, Jan Koutník, Bas R. Steunebrink, Jürgen Schmidhuber, "LSTM: A Space Odyssey", arXiv:1503.04069, 2015.
- [5] Xingjian Shi, Zhourong Chen, Hao Wang, Dit-Yan Yeung, Wai-kin Wong, Wang-chun Woo, "Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting", arXiv:1506.04214v2, 2015.

3.2.4. 血中アミノ酸によるメタボロームの予測

(1) 目標·計画

一般に食肉の品質や価格の評価には、いわゆる「サシ」や「霜降り」の度合いが大きく影響する. 「サシ」や「霜降り」とは骨格筋への脂肪交雑のことであるが、食肉中の脂質含量はうまみや香りだ けでなく食感や柔らかさ、舌触りなどにも深く関係する重要な因子の一つである. 骨格筋だけでな く、ガチョウやニワトリなどの脂肪肝として知られるフォアグラや白レバーなども高級品として流通し ており、このように食肉中の脂質含量は畜産物一般の付加価値を規定する重要な指標である.一 方で、それらの製品は依然として高付加価値食品として嗜好されているものの、近年では逆に脂 質含量の低い食肉も「赤身肉ブーム」などと呼ばれて一定の人気を博している.したがって、近年 では食嗜好の多様性や食の選択肢の多様性が重要視される傾向が強まっており、それに合わせ て多様な食資源を提供できるようにするための畜産技術開発には高い社会的ニーズがある.生産 現場では特定のアミノ酸欠乏食を給餌すると「霜降り」になるなどの報告もなされていて、高品質・ 付加価値の高い食材を生産することが畜産技術の課題の一つである.しかし、栄養の足りない食 餌(アミノ酸欠乏食)を与えると成長遅滞が生じ、出荷までの飼育日数が伸びてしまうことにより、飼 育コストがかかってしまう場合がる.そこで、家畜の血液検査などでモニタリングし、給餌食を制御 することで、成長遅滞を緩和し高品質食肉を生産、飼育コストの削減を目指す.血液中のアミノ酸 組成から脂肪量や体重量などを予測する人工知能を構築し、その予測精度を検証する.

(2) 意義・国際社会との比較

畜産分野ではこれまで様々なニーズに答えるために様々な家畜品種を育種改良してきた.それ らは目的の品質の畜産資源を安定的に供給できる反面,品質の改変には多大な時間と労力を要 する.一方で飼料組成やその給餌方法の工夫による品質への介入もよく行われており,ドングリを 給餌するイベリコ豚などはその代表例である.これらの技術は育種改良に比べれば開発・改良に かかるコストと時間は少なくて済むが,現状では経験則に基づいて行っている場合がほとんどであ る.したがって,代謝栄養学的な根拠に基づいて畜産物の品質を目的に合わせて効率的に改良 できるような家畜飼料を設計する技術の開発は,これからの畜産業にとって非常に意義のあること だと考えている.特に飼料によって栄養学的に畜産物中の脂質含量を自在に調節することができ れば,同じ品種の動物から複数種の肉質の畜産物をニーズに応じて作り分けたり,産卵を終えた 廃鶏や泌乳を終えた廃用牛などの肉を高付加価値化して出荷したりすることができるようになる可 能性がある.またそのような技術は強制給餌やホルモン・薬剤等の投与を前提としないため,動物 倫理や食の安全に関わる問題をほとんど含まない点も非常に大きな意義をもつ.

(3) 研究内容

本研究では,血中アミノ酸組成から各メタボロームを予測するシステムの開発を目指す.主に対象とする代謝系は肝臓脂肪蓄積量・骨格筋脂肪蓄積・全体重量である.肝臓脂肪蓄積では「フォ アグラ」や「白肝」などの高級食品の安定生産,骨格筋脂肪蓄積では「霜降り」豚などの付加価値 食品の安定生産を助長する.体重は成長遅滞の予測に役立てる.

はじめに、ラットの動物実験により、通常食に含まれるアミノ酸量からなる餌(CN)と各アミノ酸が欠乏した餌(Δアミノ酸)と給餌し、アルギニンが欠乏した餌(ΔArg)で肝臓への脂肪蓄積量が増加し

たことが示された.全体のアミノ酸量が減少した餌(5AA)においても肝臓への脂肪筑西量が優位に 増加し脂肪蓄積量が CN より高い傾向にあることが示された.一方,血液中のアミノ酸組成は給餌 した餌とは線形の関係はないため,何らかの機構が働いて,血中アミノ酸成分をコントロールして いると考えられる.



Fig.1. Liver TG level of rat by each diet



また、ラットの肝臓細胞培養実験において、アミノ酸飢餓培地(Zero 培地)、対照培地(Full 培地)で 培養し、細胞のトリグリセリド(TG)量(脂肪量)を測定した結果、Zero 培地において優位に脂肪取り 込みが起きていたことが示された。

そこで、血中アミノ酸組成より、脂肪量を予測するシステムを構築した.これにより、血液検査のみ

で,脂肪蓄積を判別でき,屠殺の選定に大いに役立つ.

血液による脂肪蓄積量分類に SOM(Self-Organizing Map), 脂肪量予測システムとして MLP(Multi-Layer Perceptron)を用いた. 分類結果マップと予測精度は Fig.3 と Table 1 にまとめる.



(A) Classification of Amino Acid, label means diet.



(B) Heatmap of TG level by SOM result

Fig.3. Result of SOM

Table 1 MLP Predict (TG range : 4.820781609~71.93345679 [µg/mg liver])

3-layers has 1-hidden layer, 4-layers has 2-hidden layers, 5-layers has 3-hidden layers.

Each hidden layer has 100 neurons.

	Mean Error [µg/mg liver]		
3-layers	8.396940757		
4-layers	7.697757924		
5-layers	7.49895795		

以上の結果から,高い精度で分類,予測が行えていることがわかる.この結果を踏まえて,豚の骨格筋脂肪蓄積,枝肉重量の予測も行った.脂肪蓄積に関しては霜降り割合をスコアで表すため,スコアを予測値として検証を行った.スコアは 2.3~3.5 の範囲のデータを用いている.予測結果の平均値を Table 2 に示す.

Table 2 MLP Predict (Pork "Shimofuri" score)

	Error [score]		
3-layers	0.025356878		
4-layers	0.030470329		
5-layers	0.0229893		

霜降りスコアを予測する結果は非常に良い精度で行えるが、学習データが 2.3~3.5 と偏っている 点と、そのデータ内でも 2.5 と 2.8 のスコアが大半であったことから、過学習が生じている可能性が 高い、今後はデータを満遍なく集める必要があると考えられる.

枝肉重量を予測した場合の結果を Table 3 に示す.

Table 3 MLP Predict (Pork Weight)

Verification No.	Correct [kg]	Prediction [kg]	Absolute Error [kg]
1	74.2	76.18718	1.98718
2	75.6	72.25203	3.34797
3	76.2	75.85350	0.3465
4	81.4	77.58651	3.81349
5	81.4	79.04945	2.35055
6	77.7	80.72501	3.02501
		Average Error	2.47845

枝肉重量は非常に良い精度で予測が行えている.また,入力ベクトルの特徴選択技術を用いる ことで,次元の削減と高精度化が期待できる.特徴選択を行った結果は割愛するが,全データを 使用するよりも,計算コストの削減と,精度の向上が見込めた.これは体重増量に関係しないアミノ 酸を排除できたと考えらるが,生理学的意味を考え結論を出す必要がある.

(4) 平成 30 年度進捗状況

本年度は, 豚の血中アミノ酸組成から「霜降りスコア」および枝肉重量の予測を行なった. 霜降り スコアの学習は過学習している可能性が高く, 偏りのないデータを収集する必要があると考えられ る. 枝肉重量では, 十分な予測精度が得られ, 血中アミノ酸から体重の増減を予測し, 個体管理の 補助に役立てられると考えられる.

(5) まとめ

血中アミノ酸組成から脂肪蓄積量の予測に焦点を当て、人工知能技術の一つである機械学習を 用いて分類、学習を行なった.ラットの実験をはじめ、SOM、MLPにおいて十分な精度で分類、予 測が行えていることが示唆され、豚の筋肉への脂肪蓄積を対象とした予測を行なった.収集された データの霜降りスコアに偏りがあり、十分な学習は行えていないと考えられるが、データが満遍なく 揃うことで、予測精度の向上が期待できる.また、枝肉重量は成長遅滞を測る上で重要な因子であ り、それの予測を高精度で行えたことは大きな意味を持つ.今後は生育過程での血中アミノ酸デー タから出荷時の枝肉重量を予測することが望まれる.さらに、成長遅滞を起こさずに目的の食肉を 生産するための食餌開発を行う必要がある.食事開発は血中アミノ酸組成をある数値にするため の餌を求める逆問題をとくことになり、畜産に限らず医学的にも重要な課題である.

3.2.5. 人工知能による電力用変圧器の内部異常診断

(1) 目標·計画

油入変圧器は、電力流通システムの中に重要な役割を果たしている.停電を避けるために は、変圧器の内部異常を早期に発見する必要がある.本研究の目的は、人工知能(AI)の 技術を使用し、電力用油入変圧器の内部異常を診断することである.

(2) 意義・国際社会との比較

運転中の変圧器は、常に電気的・熱的・機械的といった様々のストレスを受けている. 変圧器の内部で絶縁破壊現象や局部加熱現象など異常現象が発生する際に必ず発熱を伴っ て発生する.その熱の影響で絶縁油や絶縁物は熱分解反応し,分解ガスを発生する.油入 変圧器の異常診断技術として,油中ガス分析などが広く用いられている[1][2].しかし従来 の油中ガス分析には,専門家の長年経験と高い技術が必要となる.自動的な異常診断の技 術は求められているが,故障兆候と故障原因の関係は複雑であり,精密な数学モデルによ る解析は困難である.近年 AI の技術は急速な発展に伴い各分野に応用され,AI 技術を受変 電設備診断システムにも活用されている[3][4].本研究では多層パーセプトロン(Multi-Layer Perceptron (MLP))と自己組織化マップ(Self-Organizing Map (SOM))二つの手法を 用いて実機の変圧器のガスデータから学習することで,電力用変圧器の内部異常を診断す る.

(3) 研究内容

(a) 学習用データ

分析用実機データとしては、文献[2]の調査により公開されている電力用変圧器のガス分 析結果を用いる.データの中に正常運転変圧器 1,033 台及び不具合変圧器 117 台があるが、 不具合の現象不明のものと絶縁油混入のものを除いた.合計 1,099 件のデータ(「正常」:1,033 件,「過熱」:23 件,「放電」:40 件,「過熱+微小放電」:3 件)を用い、ランダムで学習用 データ(997 件)と予測用データ(102 件)を分ける.

文献[5]では各種分解ガスの値を入力データとし、その結果を IEC ガス組成比など従来の 診断法と比較されたが、文献[2]より異常診断図 A, B は IEC 法より良好な診断結果を得られ たため、本研究では C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 の 3 種のガスの組成比を入力データとする. すなわ ち異常診断図 B の C_2H_2/C_2H_6 , C_2H_4/C_2H_6 の成分比に異常診断図 A で用いた C_2H_2/C_2H_4 の成 分比も加えた. また異常診断値は「正常」、「過熱」、「放電」及び「過熱+微小放電」の4 つ とした. また入力データの各ガス成分比の値は 0~1 の範囲で正規化を行った.

(b) MLP よる異常診断

階層型の教師ありニューラルネットワークである MLP による学習は複数ニューロン層 (入力層,中間層,出力層)によって構成されている. MLP による異常診断の概念図を Fig.1 に示す.

78



Fig.1. Neural network architecture used for diagnostics

(c) SOM よる異常診断

自己組織化マップ(SOM)は T.Kohonen により提案された 2 階層型の教師なしニューラ ルネットワークの一種である. Fig.2 に示すように SOM は入力層と出力層の 2 層の構造を 持っている.入力層の多次元ベクトルデータ x_jを,低次元(例が 2 次元)の出力層に写像する ことができる.多次元データを分類する際に似ているベクトルは出力層の 2 次元マップ上 に近く配置され,そうでないベクトルは離れた位置に配置される. 結果の 2 次元マップを 可視化によって元データの関係が直観的に認識しやすくなる.



Fig.2. SOM の構造

(4) 平成 30 年度進捗状況

(a) MLP よる異常診断結果

まず学習用データ(997件)を訓練データ(800件)と検証データ(197件)を分けて隠れ 層のニューロン数は10とし、3層の MLPで1,000回の繰り返し学習を行った.次に上記で 訓練されたモデルを用いて予測用データの異常診断値を検証した.その結果をTable1に示 す. 102 件の予測用データに対し「過熱+微小放電」の1 件が「過熱」に診断された以外に、す べての予測した異常診断値が実際の結果と一致した. Table 1 より未知データに対する全体 の予測正解率は約 99%である. 従来の異常診断図 B より高い正解率が得られた. 「過熱+微 小放電」を「過熱」に診断され、正解率が低くなっているが、これは「過熱+微小放電」の 事例が3件(学習用データ2件、予測用データ1件)しかないためであり、今後のデータ 蓄積によって改善が期待される.

			Predicted results using MLP			
		Number of unit	Normal operating	Overheating	Discharge	Overheating with Discharge
	Normal operating	94	94			
Actual	Overheating	2		3		
condition of	Discharge	5			5	
transformers	Overheating with Discharge	1				0

Table 1 Predicted results using MLP

(b) SOM よる異常診断結果

まず学習データ(997件)を用いて SOM 異常診断マップを作成する.次に予測用データ を入力し,異常現象を推定する.学習条件としては,学習率係数の初期値は 0.3,近傍領域 の初期値は 25.学習回数は 1,000 回でマップサイズは 100×100=10,000 とした.

Fig. 3 は SOM による診断結果であり, 似ている異常現象が近くに配置されていることがわ かる.また予測用データをマップ上の分布が表示され,学習用データ及び他の変圧器との 関係が直観的に認識することができる(Fig. 4 に予測用データの分布を示す記号: E: 放電 (5 件), T:過熱(2 件), M: 過熱+微小放電(1 件), N: 正常(94 件,代表の1 件のみ示 す)).予測用データの分布により「過熱+微小放電」の1 件のみは「過熱」の領域に診断 されたが,他のデータは実際の結果とすべて一致した.事例が少ない「過熱+微小放電」 の1 件のデータについて MLP を用いて診断する際も同じく「過熱」と診断されたため,今 後多くの変圧器データを収集する必要がある.



Fig. 3 Predicted results using SOM

(5) まとめ

実機の油中ガス分析データに基づく,教師あり(MLP)と教師なし(SOM)の機械学習 手法を用いて電力用変圧器の内部異常診断を行った.異常診断の結果より両手法とも高い 正解率が得られた.事例が少ないデータに対しては今後多くの変圧器データを収集し,さ らなる検証が必要である.

参考文献

- IEEE- Institute of Electrical and Electronics Engineer-"IEEEguide for the interpretation of gases generated in oilimmersed transformer"IEEE Std C57.104-2008.
- [2] 電気協同研究, "電力変圧器改修ガイドライン", 電気協同研究会, 第65巻1号(2010).
- [3] J. J. Dukarm, "Transformer oil diagnosis using fuzzy logic and neural networks," in CCECE/CCGEI, 1993, pp. 329–332.
- [4] V. Miranda and A. R. G. Castro, "Improving the IEC table for transformer failure diagnosis with knowledge extraction from neural networks," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, pp. 2509–2516, 2005.
- [5] Thang KF, Aggarwal RK, McGrail AJ, Esp DG, "Analysis of power transformer dissolved gas data using the self-organizing map", IEEE Transactions on Power Delivery 2003, 18:1241-1248.

3.2.6. マテリアルズ・インテグレーションのための材料オントロジーの開発

(1) 目標·計画

近年各国において、物質・材料設計、また開発された材料の実用化に必要とされるリー ドタイムを短縮するためにデータ、異なったスケールのシミュレーション、過去の経験式 などを総合的に活用しようという研究開発が活発化している.我が国では2014年度から内 閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)において、革新的構造材料プロジェクトが 採択された. 芦野はマテリアルズ・インテグレーション(MI)の分担者として複数の情報資 源を連携させるためのデータ表現の開発、これに基づいたプロトタイプシステムの開発を 進めている.

MI プロジェクトは 2018 年度で終了し、この間に Python を用いたデータ統合システム のプロトタイプとサンプルとなるデータベース、知識ベースを開発してきた. 2018 年から 始まる SIP 第二期においては、物質・材料研究所を中心とした課題「統合型材料開発シス テムによるマテリアル革命」が採択され、5 つあるサブグループのうち、構造材料データベ ースのコ・リーダーとして 3 年後の見直しを含み最大 5 年間、2022 年までミクロ組織とそ の相互関係について表現することのできる構造材料データベースの開発を行う.

(2) 意義・国際社会との比較

米国では 2011 年に材料開発に計算機シミュレーション, データを活用しようという研究を統合す る形でマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブ(MGI)が国策として推進されるようになった. これにより 我が国でも材料のデータ・シミュレーションが注目され, 2014 年に始まった内閣府戦略イノベーショ ン創造プログラム(SIP)では, テーマの一つとして革新的構造材料分野が取り上げられた. 引き続き SIP 第二期においても材料開発基盤, 統合型材料開発システムが課題となり, その中で材料の性 能に関わるミクロ構造を表現することのできるデータ構造がサブテーマとして取り上げられた.

この中ではデータ統合のための共通の辞書・概念構造として材料に関するオントロジーを開発す ることとしている. オントロジーを用いてデータの意味的関係を表記することは, オープンデータの 世界において異なった情報リソースから得られるデータを統合する上での基盤としてその重要性が 認識されており, 多くの分野で研究・開発が行われている. 材料についても, 海外にあっても欧州 の EMMC (European Materials Modeling Council), AFRL (Air Force Research Lab.)などにおいて 材料のオントロジー開発や既に部分的に開発されたオントロジーの収集などが進められている.

(3) 研究内容

材料の性能を評価するには実験データ,金属組織学などに基づいた理論式・経験式,数値シミ

ュレーションなどの多様な情報を総合的に扱う必要がある. 2014年から2018年まで, SIPの分担者 としてこれらの異種データリソースを統合利用するための作業環境のプロトタイプを開発してきた.



Fig.1. An example workflow of creep data analysis.

セマンティック・ウェブの一連の規格であるRDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language), RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMathなどを基盤技術として, 機械試験, クリープなどを例題として関連した経験式・推論規 則・データを記述してリンクしたXMLドキュメントをApache Jena/Fuseki SPARQLエンドポイントに格 納した. これらのデータをスクリプト言語のプログラミング環境であるPythonからSPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索し, XPathやSageMathの数式処理機能, Python の可視化ライブラリなどを用いて処理することのできるプラットフォームのプロトタイプを開発し, クリ ープデータの処理に関わる典型的なワークフローとして, SPARQLによるクリープ実験データの検 索, XPathによる結果の変換, 関連する構成方程式の検索, 得られたOpenMath形式の数式記述 から数式処理ステムで処理可能な形式への変換と回帰分析の適用によるパラメータフィッティング, 得られた結果の可視化による検証とデータベースへの追加, という一連の処理をPythonのスクリプトとして記述してシステムとデータベースの検証した(Fig.1).

2018年度からはSIP第二期のサブグループの一つである構造材料データベース構築の Co-Leaderとして、構造材料のミクロ組織やその相互関係、パフォーマンスへの影響などをオントロ ジーとして記述し、各種の実験から得られるデータのスキーマとの間でマッピングすることで、材料 のパフォーマンスに大きな影響を及ぼすミクロ組織に関わる知識と異なったスケールの実験データ や数値シミュレーションとの関連を表現することのできるデータベースを構築する(Fig.2).



Fig.2. Ontology and data mapping for structural materials.

(4) 平成 30 年度進捗状況

本年度は昨年度までに開発した Python 上のデータ処理環境において、材料データの処理に関 わるワークフローを Python のスクリプトとして記述した. この中ではデータ検索のための SPARQL、 検索結果のデータを変換するための XSLT, 数式処理のための OpenMath などで必要とされる語 彙を共通する材料オントロジーから選択している. オントロジーは W3C 標準である OWL (Web Ontology Language)を用いて記述しており、Python に組み込むことのできる推論エンジンを用いて 処理することができる. また、平成 30 年度から開始される SIP 第二期の立ち上げとして構造材料に 関わるオントロジーの検討を開始した.

(5) まとめ

SIP 第一期は本年度で終了であり、成果の取りまとめ、最終報告書の作成などを予定している. また一方で、SIP 第二期に向けての準備を進めている. 国際的には、2018 年 11 月に行われた選挙 にてデータに関する国際委員会である CODATA の Executive Committee のメンバーとなり、ロシア での材料データワークショッププログラム委員、EU 標準規格委員会のナノインデンテーションに関 わるデータ標準化のワークショップなど材料データに関する活動が広がっており, EMMC などと協力して材料データ交換のための標準に関する国際活動を進めていく予定である.

4. 共同研究

4.1. 原子力科学技術プロジェクト

平成28年10月より文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子 カ科学技術・人材育成推進事業」において、研究課題名「構造健全性評価の信頼性向上に 向けた計算科学基盤の構築と破壊挙動の解明」が採択され、研究代表機関である東京理科 大学より再委託を受け、平成31年3月までの予定で研究を実施した.

4.1.1. 研究実施内容

本研究では、原子炉構造材料の延性---脆性遷移に焦点を絞り、延性---脆性遷移の基本的な メカニズムを解明するためのマルチスケール材料モデリングを基礎とする計算科学的基盤 技術の構築を行った.さらに、本研究で構築した計算科学的基盤技術によって得られる延 性---脆性遷移のメカニズムに関連する情報と、これまでに蓄積されてきた実験的観察結果を 統合することにより、工学的に必要なパラメータ(破壊靭性値等)を導き出すことを目指 した.具体的には、延性---脆性遷移のメカニズム解明のための計算科学的アプローチを描き、 それを実行可能とする分子動力学、転位動力学および有限要素法のコードを整備した.構 築した計算科学的基盤技術を用いて、フェライト鋼に見られる延性---脆性遷移のメカニズム を解明し、さらに、延性---脆性遷移とき裂先端の力学場との関係を明らかにすることを目指 した.

東洋大学グループでは,超大規模破壊靭性値計算と超大規模可視化を担当した.平成 30 年度は,重ね合わせの原理を用いた有限体を取り扱うことのできる転位動力学を用いた数 値解析を実施し,破壊靱性値に対する与えた応力条件の影響を調べた.Fig.1に開発システ ムによる,有限体中の転位を含むき裂解析を,き裂モデル転移動力学・有限要素法連成解 析により実施した結果を示す.

超大規模可視化については、き裂先端における力学的状態と破壊靭性値の関係の評価に は、き裂先端における転位の遮蔽効果を視覚的に理解し分析する必要がある.そこで、昨 年度から引き続き、スーパーコンピュータ上での大規模計算に対し、必要な部分の可視化 処理をスーパーコンピュータで行い、ローカルホストへ結果を転送し、ローカルホスト上 で可視化を実現するシステムについて、ミクロからマクロまでの解析を含んだマルチスケ ールへの対応を行った.マルチスケールでは、可視化に要求されるデータ量、可視化範囲 のスケールも異なることから、解析規模、データ転送量、可視化精度の関係を見積もり、 求められる精度に対する現実的な処理時間での可視化処理を選択可能にするシステムの構 築を行った.転位動力学法の可視化に対する要求は、転位の形状を表すだけではなく、転 位が作る応力分布を可視化する必要があり,転位動力学法では計算過程にいて転位線上の 応力のみが計算されるため,空間に広がる応力分布の情報は通常計算されない.このよう な転位による応力分布の可視化について検討し,可視化する応力分布の面や空間を固定し, 面や空間を格子に分割した.転位動力学法の計算過程において,その面や空間の格子点の 応力を通常の転位動力学法における応力の計算方法で計算し,出力した.Fig.2 に Frank Read ソースの転位動力学シミュレーション結果に対する応力分布可視化の例を示す.



Fig. 1. き裂モデル転移動力学-有限要素法連成解析結果



Fig.2. 応力分布:相当応力の断面コンター表示

4.1.2. 研究実施体制

- (1)「東京理科大学」グループ
- ① 研究代表者:高橋昭如(東京理科大学理工学部,准教授)
- ② 研究項目

混合転位のモデリング、き裂の数値解析手法の開発、破壊靭性値の計算・評価

(2) 「電力中央研究所」グループ

①再委託先機関事業責任者:野本明義(電力中央研究所,上席研究員)

② 研究項目

き裂先端の転位挙動と破壊靭性値の転位動力学計算,原子間ポテンシャルの開発,混合 転位の数値計算

- (3) 「東洋大学」グループ
- ① 再委託先機関事業責任者: 塩谷隆二 (東洋大学総合情報学部, 教授)
- ② 研究項目

スパコンによる超大規模破壊靭性値計算,超大規模可視化

4.2. 「知」の集積と活用の場プロジェクト

平成28年12月より「「知」の集積と活用の場による革新的技術創造促進事業」(うち「知」 の集積と活用の場による研究開発モデル事業)において、研究課題名「アミノ酸の代謝制 御性シグナルを利用した高品質食肉の研究開発とそのグローバル展開」が採択され、研究 代表機関である東京大学より再委託を受け、平成33年3月までの予定で研究を実施してい る.

4.2.1. 研究実施内容

栄養学的根拠に基づく食餌改良により,世界の消費者の嗜好にマッチした品質の食肉(霜 降り肉や,柔らかい肉など)の安定生産を可能にし,様々な業種の企業との連携により, 肉質の科学的評価系,トレーサビリティの向上を実現してバリューチェーンを確立し,海 外産食肉と明確に差別化される高付加価値な日本産食肉のブランドカの強化を目指す.こ れまでのアミノ酸シグナルを用いた代謝調節に関する知見をもとに,飼料形態や給与法の 工夫により,高付加価値食肉を安定生産し,肉質の評価系を確立,伊藤ハム株式会社の販 路を活用してグローバルに消費者に届け事業創出することを目指している.

具体的には、筋肉内脂肪含量が高い霜降り豚肉を生産するには、低リジン飼料の給与が 現実的であることをこれまでに確認している.しかし、飼料効率の低下や肥育期間の延長 という課題が残された.また、筋肉内脂肪含量に焦点を定めて研究を進めたので、筋肉の 硬さや色調などの物性、筋肉の遊離アミノ酸含量や脂肪酸組成など、味や脂肪のロどけに 影響をおよぼす要因、さらに、官能特性については検討できなかった.本研究では、「ボ ーノポークぎふ」を生産するブタのリジン要求量を再検討し、そのうえで高温期用の低リ ジン飼料を開発することで、年間を通して安定して霜降り豚肉を生産する技術を開発する. このことにより、「ボーノポークぎふ」の認定基準である筋肉内脂肪含量 5%を 70%の LW ボーノがクリアできる技術の確立を目標とする.さらに、物性、遊離アミノ酸組成と脂肪 酸組成、官能特性の解析を通して、脂肪交雑のある豚肉をわかりやすく消費者にアピール する指標の取得を目指す.

東洋大学チームでは、モデル動物(ラット)および他の共同研究機関から供給されるブ タの血中アミノ酸濃度、血中中間代謝物濃度、血中ホルモン濃度、筋肉切片の脂肪交雑量 から、機械学習(ニューラルネットワーク)や自己組織化マップ(SOM)を行い、血中のア ミノ酸とホルモンの濃度から筋肉内脂肪含量を予測する人工知能プログラム(AI)を作成 する. さらに、血中のアミノ酸とホルモンの濃度の変化を予測する AI も作成する. この2 つの AI を使えば、飼料中のリジン濃度→血中のアミノ酸とホルモン濃度→筋肉内脂肪含量 と予測できるようになる.本年度は GPU 環境でアミノ酸濃度から豚の枝肉の重量を予測し た. また、特徴選択によって学習するパラメータを選択し、予測精度を改善した.モデル 動物(ラット)の筋肉中の脂肪前駆細胞の量を測定、脂肪細胞分化の筋肉の脂肪交雑への 寄与率を決定することを目指す.

4.2.2. 研究実施体制

(1)研究コンソーシアム

代謝制御性アミノ酸シグナルを利用した高品質食肉開発コンソーシアム

(2)研究代表者:高橋伸一郎(東京大学大学院農学生命科学研究科,教授)

(3) 構成員

伊藤ハム株式会社,株式会社ゼンショーホールディングス基盤技術研究所,日本農産工 業株式会社畜産技術センター,株式会社リバネス,株式会社塚原牧場,中濃ミート事業協 同組合,秋田県畜産試験場比内地鶏研究部,学校法人麻布獣医学園麻布大学獣医学部獣医 学科栄養学研究室,学校法人明治大学機能性食品開発基盤研究所,学校法人東洋大学計算 力学研究センター,公益財団法人 未来工学研究所,ネットスマイル株式会社

4.3. 東京電力との共同研究

地球温暖化はもはや世界的な問題となっており,京都議定書から近年のパリ協定に至る 流れのなかで,再エネやEVの大量導入を含むエネルギー変革が求められつつある 1)-6). 例えばパリ協定では今世紀後半以降 CO2 排出量を実質0にすることが求められている.こ れはエネルギー消費において電力部門でほぼ 100%の非化石燃料化,および運輸や熱部門に おける電化を意味する.本研究では,再エネおよびスマートハウス,EV,そして特に蓄電 池に注目して,それらの普及シミュレーションを考える.

そのためにまず本年度は、将来の再エネおよび蓄電池普及シミュレーションの実装を念 頭に、電力システムおよび電力業界の市場・政策および技術動向について調査を行った. その際には、エネルギー業界、特に電力業界を中心として、それに自動車、建築および電 気・機械業界がかわわる、あわせて4つの業界間の関係を把握することが必要となる.

以上の業界間における蓄電池の普及の流れについては、以下の図のようになることが予 想される. 近年ノート PC やスマホ市場において本格的に立ち上がったリチウムイオン電池 の市場については、まず建築分野において FIT 終了後の自家発電のための定置型蓄電池と してその市場が刺激される. これに続いて、もしここ 10 年 20 年で EV・PHV 市場が世界 的に立ち上がることがあれば、これによって爆発的な拡大を迎えることが予想される. そ して最終的には電力系統に繋げるための蓄電池の大量導入への道が開けることになるだろ う.



Fig.1. 蓄電池普及の流れ

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 韓国・成均館大学にて日韓合同学生ワークショップ開催

2018 年 11 月 30 日及び 12 月 1 日に韓国・水原にある成均館大学において "2018 Korea - Japan Joint Workshop for Students and Scholars" と題した合同ワークショップを開催し、当センターの研究員及び総合情報学部の学生を含む 6 名が参加した.

研究発表は、東洋大学からは総合情報学部の学部4年生4名が、また成均館大学からは 大学院生6名が交互に行った.また、本ワークショップのホストを務めて頂いた Prof. Moon Ki Kim から成均館大学の紹介、当センターの研究員である塩谷隆二教授及び中林靖教授か ら東洋大学の紹介及びセンターの研究紹介を行った.

ワークショップ終了後の懇親会でも様々な話をして,提携校である両大学の親睦を深めた.



集合写真

懇親会の様子

6. 学術活動

2018年1月から2019年1月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

- Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, Hiroshi Kanayama and Amane Takei, Hierarchical Domain Decomposition Method for Devices including Moving Bodies, J. ADV. .SIMULAT. .SCI. ENG. Vol.4, Issue 1, pp. 99-116, 2018.
- 2. Hongjie Zheng, Ryuji Shioya, Naoto Mitsume, Large-Scale Parallel Simulation of Coastal Structures Loaded by Tsunami Wave Using FEM and MPS Method, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol.5, No.1, pp.1-16, 2018. (査読有)
- 吉田匡秀,森永雅彦,藤岡照高,火力発電所のボイラ水冷壁管に対する熱疲労寿命消 費率推定手法,日本機械学会論文集,Vol. 84, No. 859, pp. 17-00397, 2018.
- Kosaburo Hirose, Hitoshi Matsubara, Mechanisms of mudcrack formation and growth in bentonite paste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol.144, No.4, 04018017, 2018.
- Ö Aydan, J. Tomiyama, H. Matsubara, N. Tokashiki, N. Iwata, Damage to rock engineering structures induced by the 2016 Kumamoto earthquakes, Rock Dynamics – Experiments, Theories and Applications, Charile C. Li, et al. (Eds), CRC, pp. 525-532, 2018.
- Hirotaka Sakiyama, Hitoshi Matsubara, Physical, chemical, and biological investigation of an unconformity between limestone and sandstone in a coastal area: Iriomote Island case study, CATENA, vol.171, No.2018, pp. 136-144, 2018.
- Hayato Oshiro, Hitoshi Matsubara, Carbonate precipitation through photoautotrophic microorganisms at the Giza cliff in Okinawa, Japan, Environmental Earth Sciences, vol.77, No.16, 591, 2018.
- 8. 富山潤,風間洋,比嘉正也,砂川恒雄,薄板モルタル供試体による沖縄県の塩害環境の定量的評価検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.40,No.1,pp.681-686 2018(査読有)
- 9. 金田一男,富山潤,宮野伸介,崎原盛吾,CFRP 仕様の高性能プレテンション PC 桁の 曲げ・せん断耐力,コンクリート工学年次論文集,Vol.40,No.2,pp.403-408, 2018(査読

有)

- 10. 須田裕哉,富山潤,斎藤豪,佐伯竜彦,湿度変化による乾燥作用を受けたセメントペーストの空隙構造と塩化物イオンの拡散性状の関係に関する基礎的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.40,No.1,pp.747-752,2018(査読有)
- 11. 比嘉正也,風間洋,富山潤,砂川勇二,長嶺明,沖縄県離島架橋の塩害劣化評価のための暴露供試体 20 年目追跡調査,第 18 回コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,Vol.18,pp.311-316,2018(査読有)
- 山路徹,富山潤,金城信之,海上大気中に 30 年間暴露されたコンクリートにおける表面被覆材の塩害防止効果、コンクリート工学年次論文集,Vol.40,No.1,699-704,pp.2018 (査読有)(報告)
- 比嘉正也,砂川勇二,風間洋,富山潤,沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの 配合及び施工指針(案)の概要,コンクリート工学年次論文集,Vol.40,No.1,pp.627-632, 2018(査読有)(報告)
- 14. 河合浩志、遊佐泰紀、岡田裕、山田知典、吉村忍,ハイパフォーマンス・デザインパタ ーンに基づく連続体力学分野向けテンソルライブラリの実装効率向上,日本計算工学 会論文集, Paper No. 20180012 (Aug. 2018), 2018.
- Masao OGINO, Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA and Hiroshi KAWAI, Two-level extension of the hierarchical domain decomposition method, JSME Mechanical Engineering Letters, Vol. 4, pp. 18-00088 (Mar. 28), 2018.
- Y. ISEKI, Y. SHINDO, K. SAITO, K. KATO, "Heating Properties of RF Capacitive Applicator with Magnetic Nanoparticles", Thermal Medicine, Vol.34, No.4, pp.53-67, 2018.
- J. MIURA, T. FUJIOKA and Y. SHINDO, "Visualization of Thermal Fatigue Damage Distribution with Simplified Stress Range Calculations", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.140, No.6 pp.061403-1-061403-7, 2018.
- Masao Yokoyama, Kouhei Murotani, Genki Yagawa, High-performance computing in simulation of milk crown, Computational Particle Mechanics, Vol.5, pp.1-8, 2018
- 19. Y.M.Guo, T.Hamada, G.Yagawa, S. Kamitani A sub-domain mashless method based on combination of weak and strong forms, International Journal of Mathematical Models and

Methods in Applied Sciences, Vo.12, pp.106-111, 2018

 Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, Y. ISEKI, K. KATO, "Heating Characteristics of Developed Rectangular Resonant Cavity Applicator for Non-Contact Hyperthermia Treatments", Thermal Medicine, Vol. 35, No.1, pp. 1-11, 2019

6.2. 学会発表

- Ryuji Shioya, Hongjie Zheng, Hiroshi Kawai, Amane Takei, Performance Comparison of GMG and BDD for Large Scale Numerical Simulation, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (SIAM-PP18), Waseda, Tokyo, Japan, Mar. 7-10, 2018.
- H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, T. Yamada, S. Yoshimura, Performance Tuning of DDM Subdomain Local FE Solvers for Many-Core Architecture, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (SIAM-PP18), Waseda, Tokyo, Japan, Mar. 7-10, 2018.
- 3. 金山寛, "静磁場領域分割解析のマルチパート化に向けて", 第1回大規模電磁界数 値解析手法に関する研究シンポジウム(LSCEM2018), 原鶴温泉, 2018.3.
- 4. 八代月光, 植木一也, 横山真男, ニューラルネットワークを用いたオールドヴァイオリンの音色の識別, 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 2018.3.
- 5. 遠野大輔, 横山真男, 植木一也, 機械学習を用いたテレビドラマ音楽の自動生成, 情報 処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 2018.3.
- 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, "静磁場領域分割解析のマルチパート化に向けて", 第 30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD30), 長野市生涯学習センター, 2018.5.
- Y. OOE, T. SAITO, Y. ISEKI, Y. SHINDO, K. KATO, "Basic Study of Measuring Temperature Distributions during Hyperthermia Treatments Using Ultrasound Images", The 7th Asian Congress of Hyperthermic Oncology(ACHO), pp.72-72, (2018 年 5 月), (Seoul, Korea).
- 8. R. TOKUTAKE, Y. SHINDO, K. KATO, A. TAKEUCHI, "3-D VR simulator for effective hyperthermia treatments", The 7th Asian Congress of Hyperthermic Oncology(ACHO), pp.67-67, (2018 年 5 月), (Seoul, Korea).
- 9. Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, K. KATO, "Heating Characteristics of Developed Rectangular

Resonant Cavity Applicator", The 7th Asian Congress of Hyperthermic Oncology(ACHO), pp.65-65, (2018 年 5 月), (Seoul, Korea).

- 10. Kosuda, M. Kubota, Y. Yokoyama, M, Mochizuki, O., Visualization of flow influenced by surface pattern, Proceedings 18th International Symposium on Flow Visualization, 2018.6.
- 11. 横山真男, 八代月光, 植木一也, 深層学習によるヴァイオリン製作者識別の試み, 情報 処理学会音学シンポジウム 2018, 2018.6.
- Yoshiaki Tamura, "Visualization Methods in Virtual Reality Environment", 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6) and 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7), Glasgow, UK, 2018.6.
- 13. 大石篤哉,山本健斗,加藤正大,"要素の分類に基づく要素積分の高速化",第23回計 算工学講演会,名古屋,2018.6.
- 14. K.Tazoe, M.Oka and G.Yagawa, Analyses of Fatigue Crack Propagation with Smoothed Particle Hydrodynamics Method, WCCM 2018, New York, USA, Jul. 22-27, 2018.
- H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, T. Yamada, S. Yoshimura, Subdomain Local FE Solver Design for DDM on Many-Core Architecture, WCCM 2018, New York, USA, Jul. 22-27, 2018.
- 16. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Prediction of Numerical Analysis Results using Machine Learning", 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII) and 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics (PANACM II), New York City, NY, USA, 2018.7.23.
- J. Miura, T. Fujioka, and Y. Shindo, Visualization of Thermal Fatigue Damage Distribution With Elastic-Plastic FEA, ASME PVP 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84095, ASME, Prague, July 2018.
- I. Yamasaki, T. Fujioka, Y. Shindo and Y. Kaneko, Application of the Enhanced Reference Stress Method to Fatigue Propagation of a Surface Crack in a Plate Subjected to Cyclic Bending, ASME PVP 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84233, ASME, Prague, July 2018.
- 19. R. TOKUTAKE, Y. SHINDO, K. KATO, "Development of VR Simulator System for Effective Hyperthermia Treatments", 40th Annual International Conference of the IEEE EMBS,

ThPoS-22.43, pp.1-2, (2018年7月), (Hawaii, USA).

- 20. Y. ICHISHIMA, Y. SHINDO, Y. ISEKI, K. KATO, "Heating Characteristics of Proposed Applicator Using Rectangular Resonant Cavity for Treating Deep Tumors without Contact", 40th Annual International Conference of the IEEE EMBS, ThPoS-22.42, pp.1-2 (2018 年 7 月), (Hawaii, USA).
- 21. Y. SHINDO, K. KATO, Y. ICHISHIMA, Y. ISEKI, R. TOKUTAKE, F. IKUTA, K. TAKAHASHI, "Evaluation of Deep Thermal Rehabilitation System Using1 Resonant Cavity Applicator During Knee Experiments",40th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp.3220-3223, (2018 年 7 月), (Hawaii, USA).
- 22. 3-D Discrete Dislocation Dynamics Simulation Considering Boundary Effect Coupling With Finite Element Method, Zheng Hongjie, Ryuji Shioya, Hiroshi Kawai, Akiyuki Takahashi, ICCM 2018, Rome, Italy, Aug. 6-10, 2018.
- H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, T. Yamada, S. Yoshimura, Element-by-element Matrix Storage-free Subdomain Local FE Solver for Domain Decomposition Method, ICCM 2018, Rome, Italy, Aug. 6-10, 2018.
- 24. 田添広喜,岡正徳,矢川元基,"分離・結合を伴う疲労き裂進展の SPH 解析および疲労 試験による検証",日本機械学会第 31 回計算力学講演会,徳島, 2018.11.
- 大石篤哉, 矢川元基, "深層学習を用いた高精度有限要素解析", 日本機械学会第 31 回計 算力学講演会, 徳島, 2018.11.
- 26. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, "静磁場の領域分割解析におけるマルチパート 処理", 日本機械学会第 31 回計算力学講演会, 徳島, 2018.11.
- 27. 増田正人、中林靖、田村善昭、塩谷隆二、"機械学習を用いた数値解析結果予測"、日本機械学会第31回計算力学講演会、徳島、2018.11.
- 28. 鄭宏杰,塩谷隆二,増田正人,中林靖,"人工知能による電力用変圧器の内部異常診断", 日本機械学会第31回計算力学講演会,徳島,2018.11.
- 29. 三浦純哉,藤岡照高,新藤康弘, Salome-Meca を用いた熱疲労解析,オープン CAE シ ンポジウム 2018@川崎,オープン CAE 学会,川崎市, 2018.12.

- 30. 広田憲亮,藤岡照高, Salome-Meca による炭素鋼の応力ーひずみ線図実験データの再現, オープン CAE シンポジウム 2018@川崎,オープン CAE 学会,川崎市, 2018.12.
- 渋谷寿幸,藤岡照高, RasberryPi を用いた片持ち梁のひずみの測定と解析結果の検証, オープン CAE シンポジウム 2018@川崎,オープン CAE 学会,川崎市, 2018.12.
- 32. 藤岡照高, ボルト締結平板試験片の引張試験と Code-Aster による再現解析, オープン CAE シンポジウム 2018@川崎, オープン CAE 学会, 川崎市, 2018.12.
- 33. 津田涼汰,廣瀨孝三郎,上原盛久,松原仁:島尻層群泥岩の物理・化学的な風化機構
 と進行過程に関する実験的検討,土木学会第73回年次学術講演概要集,pp.899-900,
 2018.
- 34. 土肥翔,松原仁,廣瀨孝三郎:琉球石灰岩の化学的風化に伴う残柱強度に関する実験的研究,土木学会第73回年次学術講演概要集,pp.901-902,2018.
- 35. 宮城圭汰,松原仁,駒津慎:古紙繊維を用いた砂地盤の液状化抑制効果に関する実験 的検討,土木学会第73回年次学術講演概要集,pp.981-982,2018.
- 36. 野原和希,丸祐介,山田和彦,藤松信義,はやぶさ型サンプルリターンカプセル後流 流れ場の PIV 計測および CFD 解析の比較,第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙 数値シミュレーション技術シンポジウム,2018.
- 37. 古田圭二,藤松信義,異なる径を有する5孔ピトー管の風速・風向特性の比較,日本 実験力学会 2018 年度年次講演会,2018.
- Keiji Furuta, Nobuyoshi Fujimatsu, Comparison of Flow Characteristics for 5-Hole Pitot Tube with Different Diameters Towards the Flight Control for UAV, ICFD2018, 2018.
- 39. 野原和希,山田和彦,藤松信義,はやぶさ型カプセルの空力特性に関する研究,第 62 回宇宙科学技術連合講演会,2018.
- 40. 須田裕哉,富山潤,斎藤豪,湿度による乾燥を受けたフライアッシュペーストの塩化 物イオンの拡散性状に関する基礎検討,第73回土木学会年次大会,2018(CD-ROM).
- 金田一男,富山潤,宮野伸介,プレテンション PC 桁に用いる CFRP より線の定着長に
 関する研究,第 73 回土木学会年次大会,2018(CD-ROM).
- 42. 佐伯竜彦,富山潤,山下将一,薄板モルタル供試体を用いた橋梁各部位の塩害環境評

価,土木学会,コンクリート技術シリーズ,塩害環境の定量評価に関する小員会(348 委員会(第2期))委員会報告書およびシンポジウム講演概要集,pp.127-134,2018.

- 43. 長嶺剛,須田裕哉,藍檀オメル,富山潤,環境作用を受けたセメント効果体の物質移 動性状に関する基礎検討,土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会,pp.10-11, 2019.1.
- 44. 豊里剛人,須田裕哉,富山潤,藍檀オメル,セメント硬化体の炭酸化収縮と相組成変 化に関する基礎検討,土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会,pp.12-13, 2019.1.
- 45. 木村文哉,富山潤,須田裕哉,藍檀オメル,沖縄県における塩害環境の定量評価に関する基礎研究,土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会,pp.14-15, 2019.1.
- 46. 神立晋弥, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉, 衝撃荷重下における岩石の動的変形・破 壊特性に関する実験的研究, 土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, pp.26-27, 2019.1.
- 47. 内田凌太,富山潤,須田裕哉,藍檀オメル,プレテンション PC 桁のプレストレス導入時の端部ひび割れ抑制に関する研究,土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, pp.32-33, 2019.1.
- 48. 古田泰祐,富山潤,須田裕哉,藍檀オメル,堀口賢一,本澤昌美,コンクリート構造物の表面ひび割れ画像を入力データとした均質化法による材料劣化予測に関する研究, 土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会,pp.34-35, 2019.1.
- 49. 有澤希,富山潤,須田裕哉,藍檀オメル,コンクリート橋梁の部位・部材毎の劣化の 違いを考慮した LCC 評価に対する基礎的検討,土木学会西部支部沖縄会技術研究発表 会,pp.36-37, 2019.1.

6.3. 招待講演

- 1. 矢川元基, 原子力とエネルギー問題, 東京理科大学特別講義, 2017.5.8 (野田).
- 2. 矢川元基,計算力学の現状と今後の発展,九州電技開発株式会社特別講演会, 2018.5.15(福岡).
- 3. 矢川元基,計算力学:その背後にあるもの,日本機械学会計算力学部門講演会特別講演, 2018.11.24(徳島).
- 4. 矢川元基, A particle method applied to fatigue crack propagation analysis (Plenary Lecture), Taiwan-Japan Workshop, 2018.11.29, Taichung, Taiwan.

- 5. 横山真男, クレモナを中心としたヴァイオリン製作と音響研究, 日本音響学会音楽音 響研究会 2018 年 11 月研究会, 2018.11.
- 6. 矢川元基,計算力学に関する課題と展望,新日鉄住金(株),特別講演,2018.12.3(東京).

6.4. 受賞

- 1. 新藤康弘,平成30年関東ハイパーサーミア研究会,優秀発表賞,2018年3月.
- 2. 新藤康弘, 平成 29 年度東洋大学優秀教育活動賞, 2018 年 8 月.
- 3. 田村善昭,日本シミュレーション学会,学会賞(ベストオーサー賞),2018年9月.
- 三浦純哉,藤岡照高,新藤康弘,オープン CAE 学会,オープン CAE シンポジウム 2018, 学生表彰(論文タイトル: Salome-Meca を用いた熱疲労解析),川崎,2018 年 12 月.

7. 終わりに

本報は、2018年度の活動を取りまとめたものである.なお、2018年度末に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを2019年1月とした.したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい.

今日,計算力学は製造業のみならず,社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大き く広がりをみせている.計算力学とAIも大きく注目を集めてきている.より広い視点で計 算力学の発展に資するようセンター研究員一同,今後とも努力していきたい.



東洋大学 計算力学研究センター 2018 年度年報

この資料の転載,引用などはご遠慮ください. 本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします. 編集・発行 東洋大学計算力学研究センター 〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100 URL: http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/ TEL・FAX: 049-239-1475