# 東洋大学計算力学研究センター

# 2021 年度 年報



Center for Computational Mechanics Research Toyo University

# 2022年3月

## 2021 Annual Report of

## **Center for Computational Mechanics Research**

**Toyo University** 



March 2022

## 目次

1. まえがき	1
2. センターの概要	2
<ol> <li>センター設置について</li> </ol>	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. 変形性関節症のための両脚同時深部筋組織加温システムの開発	5
3.1.2. オープンソース CAE を用いた疲労き裂進展の簡易評価	8
3.1.3. 静磁場の大規模領域分割計算の高速化手法の構築	. 15
3.1.4. 癌の温熱療法高度化のための高周波電磁界·熱伝導連成解析システムの研究	. 17
3.1.5. オールドヴァイオリンの振動モードと音場の連成解析	. 24
3.2. AI グループ	. 26
3.2.1. 自己組織化マップを用いた新しい可視化手法	. 26
3.2.2. 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	. 31
3.2.3. LSTM-based variational autoencoders を用いた人物動作生成モデルの構築	. 34
3.2.4. OpenPose を用いた伝統舞踊の動作解析	. 41
3.3. 解析手法開発	. 44
3.3.1. 疫病伝搬の歴史シミュレーション	. 44
4. 共同研究	48
4.1. 埼玉 AI プロジェクト	. 48
5. 学術活動	49
5.1. 論文投稿	. 49
5.2. 学会発表	. 51
5.3. 招待講演	. 56
5.4. 総説・解説	. 56
5.5. 出版	. 56
5.6. 受賞	. 56
6. 終わりに	57

### 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2017年に終了となり、ここ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ている.本報告は2021年度の活動を中心にとりまとめたものである.

研究内容は、2017年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、より横断的・学際的な研究を目指し、研究員を増やして研究を進めてきた.

2021 年度も前年度に引き続き新型コロナウイルス感染症の影響が大きく、予定していた海外との 共同研究や、国際会議への参加など、叶わなかったものも多いが、その中でもオンラインを活用し ていくつかの産官学連携などを行った.これらについても報告している.

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。

2022年2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,国際観光学部, 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

なお,評価委員会については,大型予算を獲得していないこと,新型コロナウイルス拡大 防止等の観点から開催はしない予定である.

### 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.

### センター長

田村 善昭 (東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

### <u>研究員</u>

芦野 俊宏(東洋大学国際学部国際地域学科教授)
藤本 典嗣(東洋大学国際観光学部国際観光学科教授)
吉岡 勉(東洋大学国際観光学部国際観光学科教授)
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)
中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
加藤 千恵子(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
村上 真(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)
鄭 宏杰(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)
鄭 宏杰(東洋大学理工学部機械工学科准教授)
藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)
新藤 康弘(東洋大学理工学部機械工学科准教授)
横田 祥(東洋大学 理工学部機械工学科准教授)

### 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(日本女子大学客員研究員,九州大学名誉教授)
- 杉本 振一郎 (八戸工業大学工学部准教授)
- 富山 潤(琉球大学工学部教授)
- 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 (琉球大学工学部准教授)
- 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(明星大学情報学部教授)

### 3. 研究成果

### 3.1. 連成解析グループ

### 3.1.1. 変形性関節症のための両脚同時深部筋組織加温システムの開発

### (1) 目標·計画

変形性膝関節症の治療法として, 消炎鎮痛剤の湿布や飲み薬, 骨粗しょう症の治療薬などの薬 物療法, 運動療法, 温熱療法, 装具療法(コルセットなど)などが行われる. 近年は物理療法の 1 つである温熱療法が注目されている. 温熱治療法とは, 関節腔内を 36~39℃に加温することで, 関 節症による痛みの軽減や, 進行の抑制に効果的な治療法である. しかしながら, 既存の整形外科 分野で用いられている RF 誘電加温方式加温システムでは表面組織の加温には大変優れている ものの, 深部組織までを加温することは困難であり, 関節腔内や腰椎と大腿骨を結ぶ腸腰筋等の 筋組織の加温は特に困難である.

温熱治療法を安全かつ効果的に行うために、これまで、変形性膝関節症に対する温熱治療を 目的としてリエントラント型空胴共振器加温方式を提案し、有限要素法を用いたシミュレーションと、 試作加温装置を用いた加温実験の両面から、本加温方式の深部集中加温の可能性について検 討をおこなってきた.しかし、従来の空胴共振器アプリケータでは共振性能を高めるため、共振器 内に挿入できる誘電体は一つのみと限られていたが、臨床応用を考えた際にロコモ患者の多くが 両下肢に対して筋肉低下が診られるため、本研究は両下肢を同時に加温できるような新たなシス テムの開発を行っている.

### (2) 意義・国際社会との比較

高齢化社会が進んでいる日本では、平均寿命は約80歳に達し、運動器疾患が50歳以降急増 していることから、変形性関節症およびそれに伴うロコモティブシンドローム患者は予備軍を含めて 約4700万人いるとされている、平成25年の介護が必要となった主な原因の「高齢による衰弱」、 「骨折・転倒」、「関節疾患」を運動器の障害としてまとめると全体の36.1%で、一番多い原因である、 このことからも、整形外科分野において変形性関節症の有効な治療方法の確立は社会的に急務 であり、本研究の役割は極めて大きいと考えられる.

#### (3) 研究内容

Fig. 1 に本研究で提案する矩形型空胴共振器の概念図を示している. 空胴共振器は, 共振器内上底面にあるループアンテナから高周波電力が供給される. そして, 特定の共振周波数の電磁波を励振することによって二箇所の内部電極間に電磁界エネルギを集中させ深部集中加温できる(1)(2). Fig. 2 に矩形型空胴共振器の寸法を示す. 空胴共振器の寸法は, 高さ 300 mm, 横

400mm, 幅 120mm とし, リエントラント部 (合計で四本)は, 直径 60 mm, 高さ 105 mm (可変)である. 人体を挿入するウィンドウは, 直径 130mm とした.



Fig. 1 Thermal rehabilitation system of resonant cavity applicator.

本研究では有限要素法解析ソフト FEKO を用いて人体脚部の電磁界分布を計算し求めた. 解 剖学的人体脚部モデルは,筋肉,大腿骨,脛骨で構成されている. なお,人体脚部モデルを用い た際のリエントラントの長さを 85mm に変更した. 図 4.3 に人体脚部寒天ファントム解析モデルの要 素分割例を示す. 総要素数は 76,406 である.

300MHzから 600MHz における周波数応答解析を実施し,共振周波数は 540MHzであることが 分かった.解析した電磁波消費密度(SAR)分布を Fig. 2 に示す.



Fig. 2 Estimated SAR distribution inside of human knee.

SAR 分布解析結果より,本研究で目的とする膝関節間隙部に電磁波エネルギが集中し,両脚の同時加温を実現できることを数値的に示した.現在,試作加温装置を使った寒天ファントムの加温実験を実施している段階である.

#### (4) 2021 年度進捗状況

これまでハイパーサーミア用深部加温装置として開発を進めてきた空胴共振器加温方式において、共振現象を安定的に発生させるためには空胴共振器内部に挿入する誘電体は一つが望ましかったが、本研究において小型化し発展させた矩形型空胴共振器では両脚の同時加温を実現できる可能性を数値的に求めることができた.現在までに試作加温装置を用いた加温実験においてその有用性を実験的に確認している段階であるが、すでに良好な結果を数多く得られている.

研究成果に関しては, ICEAA-IEEE APWC-USNC URSI RSM 2021 および日本生体医工学会 関東支部若手研究者発表会において研究発表を行った.

### (5) まとめ

本研究では変形性関節症のための深部温熱リハビリテーションシステムの開発を目的として,新た に両脚同時加温可能なアプリケータの設計を行った.設計したアプリケータを用いることで人体脚 部の両脚同時加温を実現できる可能性を有限要素法による電磁界分布解析結果から示した.

### 3.1.2. オープンソース CAE を用いた疲労き裂進展の簡易評価

### (1) 目標·計画

機器・構造物の安全な使用にあたって,使用中に検出されたき裂状欠陥の有害性評価が求めら れることがある.特に繰り返し荷重を受ける機器の場合,疲労によるき裂進展の予想に基づく部品 の修理・交換計画を作成することが合理的とされる.小規模降伏条件下での疲労き裂進展挙動は 弾性解である応力拡大係数の変動範囲(応力拡大係数範囲)を用いて評価可能と考えられており, 無次元化が可能な線形解のデータベース化と近似式の作成によって,ある程度の実用化がなされ つつある.しかし,降伏域が広がると線形解の有効性が失われ,代わってJ積分型の非線形破壊 力学パラメータ,疲労J積分範囲の使用が望まれる[1-2].非線形解であるから,解析の労力は膨 大となり,解析パラメータが増えることと併せて,実用の上で必要とされる形状に対する解の蓄積の 難易度を高くしている.本研究では,微小変形・弾塑性条件下で次元的に厳密な非線形解を与え る改良参照応力法に着目し,特別な FEM ソルバを使用しなくとも,解析者が自力で解を追加でき る仕組みを開発する.FEM には,オープンソースである Salome-Meca/Code-Aster[3]を使用した.

### (2) 意義・国際社会との比較

基本的に無償で環境が整備できるオープンソースの利用価値を高めることで,新興国等での活用が促進され, CAE 技術へのアクセス性における地域格差を軽減できる.

### (3) 研究内容

### 1) 改良参照応力法の概要

低サイクル疲労のような弾塑性状態でき裂進展速度との実験的な対応関係[1]を有するとされる弾塑性J積分型破壊力学パラメータ[4]の理論は、微小変形と次式のRamberg-Osgood則型の弾塑性構成式の条件下で物理的に厳密な意味(HRRの特異性[5-6])を持つとされる.

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{E}\right) + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\rm Y}}\right)^n \tag{1}$$

ここに  $\varepsilon$  はひずみ,  $\sigma$  は応力, E はヤング率,  $\sigma_Y$ と  $\alpha$ , n は材料定数である. この場合, 次元 解析を根拠として, 弾塑性 J 積分は次式で表現できる.

$$J_{ref} = \frac{\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref/E}} \times J_e(M) \tag{2}$$

ここに  $J_{ref}$  は弾塑性 J 積分,  $J_e$  は弾性体の J 積分,  $\varepsilon_{ref}$  は参照ひずみ,  $\sigma_{ref}$  は参照応力で あり,以下で定義される.また,参照ひずみ $\varepsilon_{ref}$ は,  $\sigma_{ref}$  と式(1)上で対応するよう定める. M は作 用荷重であるが,後述する参照実験では繰り返し曲げが与えられるため,作用モーメントとする.

$$\sigma_{ref} = \left(\frac{M}{M_L}\right)\sigma_Y \tag{3}$$

$$J_{ref} = \frac{\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}/(E \times C_L \times \gamma)} \times J_e \tag{4}$$

$$C_L \to \frac{M_L(FEA)}{M_L} \tag{5}$$

$$\gamma \to (J_{ref}/J_{FEM})^{1/(n-1)} \tag{6}$$

ここに、 $M_L$  は弾完全塑性体の同一形状物体に対する極限曲げモーメントである. オリ ジナルの参照応力法[7]では、補正係数は導入されておらず、式(3)は厳密解と次元的には 一致するものの数値自体は必ずしも高精度ではなかったが、Kim ら[8]によって式(4)で示 した補正係数  $\gamma$  が導入され精度が改善されている. さらに、著者[9]によって非弾性ひず み式をべき乗型に限定すれば全面塑性状態で厳密解に漸近することが示されている.  $M_L$ についても、弾完全塑性解析を行うことで、物体の寸法や降伏応力の大きさによらない 無次元解  $C_L$  を算出できる[9].

つまり、弾完全塑性解析によって  $M_L$  の無次元解を、Ramberg-Osgood 則を仮定した弾 塑性解析の結果から  $\gamma$  の収束解を求めておけば、荷重の大きさや物体の形状、n 以外の 材料特性にはよらない、再利用可能な非線形解が取得できる.

本解析の参照実験で使用された SUS304 については、高速増殖炉設計の目的で膨大な試 験データが取得されており、繰り返し応力ひずみ関係の平均傾向が次式で近似されてい る[10].本解析では、式(7)を式(1)で近似するよう式(1)の材料定数を定めた.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + \left(\frac{\Delta \sigma - 2\sigma_p}{10^{A_0}}\right)^{\frac{1}{A_1}} \tag{7}$$

2) 解析例

材料 SUS304 における改良参照応力法のデータベースを作成するため、表1で示したようなき裂の深さと平板の奥行、き裂の深さと幅のアスペクト比が異なる四つのモデルを 使用した.解析モデルは上下左右対称なので、図1で示した右上の四分一を用いて弾塑 性解析を行った.ただし、平板の寸法が同じなので、重複のメッシュ作成手順を省くた めに Python スクリプトを導入した.

福田らにより実施された試験[11]はひずみ範囲, Δε = 0.004 のひずみ制御で楕円形表面 き裂をもつ平板の繰り返し曲げしたが,本研究では図2で示したように四分一解析モデ ルの上面に線形分布の強制変位で平板を曲げさせた.求めたデータベースを利用して楕 円形状き裂の表面点と最深点のき裂進展量を推測し,参照実験の計測結果と比較するこ とで改良参照応力法の精度検証を行う.

Case.No.	Common (mm)	Loading	Dimensionless	Dimensionless
	()	8	crack length <i>a/t</i>	crack length <i>a/c</i>
1			0.2	1
2	t = 50 $b = 250$ $L = 800$	Bending	0.2	0.2
3			0.6	1
4	L = 800			0.2

Table 1 Cases of elastic-plastic analysis of the plate with semi-elliptical surface crack



Fig. 1 Analysis model



Fig. 2 Boundary condition of the plate with semi-elliptical surface crack

3) 解析結果

弾完全塑性と弾塑性の解析結果より実断面補正係数,限界荷重補正係数を求め,表2 にまとめた.二つの補正係数を多項式近似し係数を式(8)で求めることで,純粋弾性J積 分より弾塑性解析せずに弾塑性J積分を求めることができる.多項式近似に使用する係数 A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>,A<sub>3</sub>,A<sub>4</sub> は表3にまとめた.

$$\gamma(C_L) = A_1\xi + A_2\eta + A_3\xi\eta + A_4 \qquad (\xi = a/t, \eta = a/c)$$
(8)

<i>n</i> = 3.2		Surface Point	Inner Point
	γ	1.169	0.995
Case 1 $(a/t = 0.2, a/c = 1)$	$C_L$	1.013	
Case 2 ( $a/t = 0.2$ , $a/c = 0.2$ )	γ	1.101	0.924
	$C_L$	1.07	
Case 3 ( $a/t = 0.6$ , $a/c = 1$ )	γ	1.069	0.839
	$C_L$	1.26	
Case 4 ( $a/t = 0.6$ , $a/c = 0.2$ )	γ	1.093	1.203
	$C_L$	1.69	

Table 2 Correction factors of the enhanced reference stress method

	<i>A</i> <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	$A_4$
γ (Surface)	0.0375	0.1425	-0.2875	1.0765
γ (Inner)	0.9694	0.3606	-1.3592	0.7124
$C_L$	1.783	0.1619	-1.1656	0.7276

Table 3 Coefficients of approximating equations for correction factors of

the enhanced reference stress method

低サイクル疲労荷重によるき裂進展の速度 da/dN は,式(9)のパリス則[9]を用いて評価 することができる.  $\Delta J$ は疲労 J 積分範囲,  $C \ge m$  は材料特性で,本研究では図 3 で示 した試験データより求めた  $C = 5.25 \times 10-5$  で,  $m = 1.44 \ge 1ct[12-13]$ . ただし,圧縮を伴 う条件下でのき裂進展に寄与する有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}$  は Walker の式[14]に従 い,は式(10)で定めた.式(10) で  $K_{max} \ge K_{min}$ はそれぞれ最大応力拡大係数と最小応力拡 大係数, R は応力比 (本研究では R = 1) である.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta J^m \tag{9}$$

$$\Delta K_{eff} = \frac{K_{max} - K_{min}}{\sqrt{1-R}} \tag{10}$$



Fig. 3 Crack propagation test data and crack propagation law [12-13]

き裂進展の予測結果を過去に福田らにより実施された楕円形表面き裂をもつ平板の繰り 返し曲げ試験と比較し、その結果は図4に示した.改良参照応力法はオリジナル参照応力 法の予測した結果を改善することをグラフから確認できる.その他、矢川らの全面塑性ア プローチ[15]による予測とも一致した.実際には曲げモーメントはき裂の進展とともに変 わるはずであるが、本研究では予き裂の曲げモーメントを一定として使用した原因で、き 裂進展の後半では簡易法によるき裂進展速度が高めに評価される傾向が認められた.

図4中に示した純粋弾性法(pure elastic solution approach)とは、弾性体を仮定して同一 ひずみ範囲で繰り返し曲げを与えた場合の予測であり、もっとも簡便であるとともに二次 応力下で安全側であるとして文献[2]において推奨されている.本解析でももっとも安全側 の結果を与えることを確認した.



Reference experimental data	0
Pure elastic solution approach	
Reference stress method	
Enhanced reference stress method	
Fully plastic solution approach	

Fig. 4 Comparison between the experimental results and crack propagation behavior estimated by the simplified methods

### (4) 2021 年度進捗状況

部材の形状は無数にあり、すべてをカバーする破壊力学パラメータを蓄積することは無 理があるものの、解析方法や表示方法を標準化し、データベース化を図るとともに、知識工 学的手法などによる補間を可能とすることで破壊力学の実用性を高める可能性がある.こ のための共通プラットフォームとしてオープンソース FEA が有望と考えられる.今年度は、 実用性が高い表面 3 次元き裂の解析事例の蓄積を進めた.

### (5) まとめ

本研究では、Salome-Meca を用いてき裂に関する弾性解析の有効性を示したうえで、弾塑性解 析結果を内挿して用いる改良参照応力法により、オリジナル参照応力法の精度を改善できることを 確認した.本研究の一部は、科学研究費補助金(18K02963、代表:藤岡照高)の助成を受けて実 施した.

### 参考文献

- S. Taira, Taira, R. Ohtani and T. Komatsu, 1976, Application of J Integral to High Temperature Crack Propagation, Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials Technology, Series H, Vol. 101, pp. 162-167.
- [2] R. A. Ainsworth, M. B. Ruggles, Y. Takahashi, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME, Vol. 114, No. 2, 1992, pp. 166-170.
- [3] https://www.code-aster.org/. (Accessed Jul. 13, 2021)
- [4] J. R. Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [5] J. W. Hutchinson, Singular Behavior at the End of a Tensile Crack Tip in a Hardening Material, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 16, 1968, pp. 13-31.
- [6] J. Rice and G. F. Rosengren, Plane Strain Deformation Near a Crack Tip, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 16, 1968, pp. 1-12.
- [7] R. A. Ainsworth, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 4, 1984, pp. 633-642.
- [8] Y. J. Kim, N. S. Huh, and Y. J. Kim, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, Vol. 24, No. 4, 2001, pp. 243-254.
- [9] T. Fujioka, International Journal of Pressure Vessels & Piping, 108-109, 2013, pp. 28-39.
- [10] Japan Nuclear Cycle Development Institute, Background Document of Material Strength Standards, PNC TN-241 84-10, 1984. (In Japanese)
- [11] Y. Fukuda, Y. Satoh, K. Kashima, 1991, Surface crack propagation in SUS304 stainless steel wide plates under creep-fatigue bending load, SMiRT 11 Transactions, Vol. L, pp. 187-192.
- [12] Y. Takahashi, T. Ogata, Y. Fukuda, and Y. Sato, 1989, Interim Report of Study on High-Temperature Flaw Assessment Procedure, CRIEPI Report, T89010.
- [13] Y. Asada, 1987, Creep-fatigue crack propagation behavior of structural materials for LMFBR (General report), PNC SJ 2534 87-002 (2), JWES-AE-8706.
- [14] K. Walker, 1970, The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum, American society for testing and materials, STP 462, pp. 1-14.
- [15] H. Ueda, G. Yagawa, 1988, Fully plastic solutions for surface-cracked plates subjected to bending loads, Transactions of the JSME, Series A, Vol. 54, No. 499, No. 87-0662 B, pp. 552-556. (In Japanese).

### 3.1.3. 静磁場の大規模領域分割計算の高速化手法の構築

### (1) 目標·計画

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.従来までの大規模解析を可能にした魅力を今後も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.

### (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

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.

### (4) 2021 年度進捗状況

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 年度以降も現在に至るまで、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に向けて、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か、 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.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 2019 年度以降はこの既存技術を使い続けており、この過程で BDD-DIAG の diag への漸近的収束性や摂動問題に対するコース行列の正定値性のための十分条件等が明らか にされた.

### (5) まとめ

今後とも、2021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.

### 3.1.4. 癌の温熱療法高度化のための高周波電磁界-熱伝導連成解析システムの研究

#### (1) 目標·計画

高周波誘電加温による癌の温熱療法の効果を定量的に評価するために情報通信研究機構が 公開している数値人体モデル[1]の高周波電磁界-熱伝導連成解析に取り組んでいる.この数値人 体モデルは1辺2mmのボクセルから成るため,有限要素法ではボクセル由来の階段形状が電界 の反射や回折を起こして精度が低下してしまう.また温熱療法の対象となる癌の直径は数mm程 度であるため,2mm幅のボクセルでは解像度が十分ではない.これらの問題の解決にはボクセル を分割した四面体をベースにスムージングする技術[2]の導入や要素の細分割[3]が有効であるが, これらは解析対象の自由度を飛躍的に増やしてしまう.例えば1辺0.25mmのボクセルで人体を 分割し,さらにボクセルを四面体に分割した高周波電磁界解析モデルの自由度は約1,300億にな り,電界の反射や回折を低減させるためのスムージングを施すと自由度はさらに何割か増えてしま う.本研究では,最終的に1辺0.1mm,高周波電磁界解析で1兆自由度,熱伝導解析で1千 億自由度の詳細な大規模連成解析を目指す.

本研究ではまず電磁界と熱伝導それぞれの並列ソルバを用いて高周波電磁界-熱伝導連成 解析システムを構築する.次に人体を構成する組織・臓器の物性値を調査するとともに,簡易人体 モデルから始めて人体モデルを順次詳細にしながら連成解析を行っていく.さらに血流による熱 移動モデル,スムージング,要素細分割を解析システムに順次導入していき,最終的に医療現場 で使用できるシステムの完成を目指す.

### (2) 意義・国際社会との比較

癌(悪性新生物)による死亡率は 1980 年代に日本人の死因第1位になり, 現在は約3割の方が 癌で亡くなっている. こうした状況を改善するため, 癌のより良い治療法の研究はたいへん重要で ある. 癌の治療法の一つに数 MHz~数百 MHz の高周波電磁波を用いた温熱療法がある. 癌組 織は 42.5 ℃以上になると死滅すること, 正常な組織に比べて加熱に弱いことを利用して電磁波で 癌組織を選択的に加熱する治療法である. 手術により癌組織を切除する外科治療や, 抗癌剤など を用いる化学療法, 放射線で癌組織を殺す放射線治療などに比べて患者の負担が軽く, 副作用 もほぼないため, 癌患者の QOL (Quality of Life: 生活の質)の向上にも貢献できる.

電磁界解析では電場,磁場に空間的な広がりがあるため,解析したい機器だけでなくその周辺 の空間も解析対象としなければならず解析領域が大きくなりやすい.また電磁波を対象とする場合 には要素の辺長を電磁波の波長の10分の1以下にする必要があり,大きく広がる空間を大きな要 素で埋めることができない.さらに電磁場の様子を詳細に知りたい箇所は機器の中でも特に薄い 構造をしているうえ、電磁界解析で用いる反復法の収束性はアスペクト比に非常に敏感であるた め扁平な要素でそれらをモデル化することができない.そのため電磁界解析のためのメッシュは大 自由度になりやすく、機器の丸ごと解析では簡単に数千万~数億自由度のモデルとなってしまう. また、電磁界解析では本来非定常である問題を、商用電源および電磁波が正弦波的に規則正し く変化することを利用して時間微分項∂/∂tを-iω (i は虚数単位、ωは角周波数)とおくことで複素 数での求解を一度だけ行う準定常問題としている.そのため演算カーネルは他の物理現象ではあ まり現れない複素数の疎行列ベクトル積となる.さらに、節点に自由度がある通常の節点要素では なく辺に自由度を持つ辺要素を用いる、行列に不定性があったり悪条件であったりする、など、他 の物理現象に比べて大規模問題において収束解を得ることが難しく、計算時間も長くなりやすい. このようなことから電磁界解析での並列化研究はなかなか浸透してこなかった.しかし階層型領域 分割法[4]を電磁界解析へ導入[5][6]することにより、数値人体モデルの高周波電磁界解析につい て 2016 年に 300 億自由度[7]、2019 年に 1,300 億自由度[8]の解析に成功した.これらは非構造 格子を用いた電磁界解析において世界最大規模であり、その成果は並列電磁界解析モジュール ADVENTURE\_Magnetic (AdvMag)にまとめ、ADVENTURE プロジェクトのホームページ[9]にて 公開している.

### (3) 研究内容

温熱療法は通常の体温 36~37℃から, 癌が死滅する 42~43℃程度に加温するものであり, 温度変化はわずか 5℃程度である. そのため電磁界解析に関する物性値の温度による変化は無視できる程度である. そこで本研究では電磁界解析の結果を熱伝導解析に用いる片方向連成解析(Fig. 1)を行う.



### ADVENTURE\_Magnetic

ADVENTURE\_Thermal

Fig. 1. High frequency electromagnetic field -Heat conduction coupled analysis system.

また数値人体モデルは CT や MRI から得られた断層画像から生成されるボクセルメッシュが基本となる.しかしこのようなメッシュでは、メッシュ形状に起因する電界の反射や回折による精度低下が生じる.このような精度低下を押さえるために、将来的には四面体ベースのスムージング技術を用いる必要がある.そこで本研究では数値解法には有限要素法をベースにした階層型領域分割法を用いることとする.片方向連成であるため電磁界解析と熱伝導解析のソルバはそれぞれ独

立したものでよく、電磁界解析には AdvMag, 熱伝導解析には同じ ADVENTURE プロジェクトの 並列熱伝導解析モジュール ADVENTURE\_Thermal (AdvThermal)を用いる.

まず AdvMag を用いた高周波電磁界解析により, Nedelec の四面体一次要素(辺要素)で近似された電場*E<sub>h</sub>* [V/m]を得る. 次に次式より要素ごとの渦電流密度*Je<sub>h</sub>* [A/m<sup>2</sup>]を求める.

$$Je_h = \sigma E_h. \tag{1}$$

ここで、 $\sigma$ は導電率[S/m]である. また $Je_h$ は複素数であり、実部 $Je_r$ 、虚部 $Je_i$ を用いて、その振幅  $Je_m$ 、および実効値 $Je_E$ は次のように求められる.

$$Je_m = \sqrt{Je_r^2 + Je_i^2}.$$
 (2)

$$Je_E = \frac{1}{\sqrt{2}} Je_m. \tag{3}$$

よって,加温による要素ごとの発熱密度f [W/m<sup>2</sup>]は次のように与えられる.

$$\tilde{f} = \frac{Je_E^2}{\sigma} = \frac{Je_m^2}{2\sigma} = \frac{Je_r^2 + Je_i^2}{2\sigma}.$$
(4)

AdvThermal では、 fを内部発熱の一部として熱伝導解析を行って温度分布を求める. ヒトは恒 温動物であるため筋肉などでの産熱と皮膚表面からの放熱などとのバランスをとることにより体温を 一定に保っている. しかしボクセルからなる数値人体モデルの表面積は実際の人体の表面積と大 きく異なるため、熱伝達係数を別途定める必要がある. そこでまずは電磁波による加温を考慮しな い熱伝導解析を行い、深部温度が 37℃程度になるよう人体表面の熱伝達係数を同定する. 次に 同定した熱伝達係数を用いるとともに、内部発熱を産熱と加温による発熱を合わせたものとして熱 伝導解析を行えば、高周波電磁界-熱伝導連成解析を行ったことになる.

### (4) 2021 年度進捗状況

まず人体の組織・臓器の物性値を調査した.これらは多くの研究者により測定されている.また 研究者が組織や臓器ごとに計測して発表した物性値を,データベースにまとめている機関も存在 する.例えば,電磁界解析で用いる磁気抵抗率(透磁率の逆数)や誘電率,導電率などは理化学 研究所が身体組織物性値データベース[10]としてまとめ、公開している. Table 1 は代表的な臓器 と筋肉の電磁界解析で用いる物性値である. また熱伝導解析で用いる熱伝導率や密度, 比熱など についてはスイスの研究財団 IT'IS FOUNDATION が世界中の論文から集めたデータをまとめた Tissue Properties Database [11]を公開している. Table 2 は代表的な臓器と筋肉の熱伝導解析で用 いる物性値である.

続いてこれらの物性値を用いて 1 辺 4 mm, 電磁界解析で約 3,000 万自由度の数値人体モデル(Fig. 2)の連成解析を行った.

産熱(内部発熱) [W/m<sup>3</sup>]は1時間・体表面積あたり36.0 [kcal/m<sup>2</sup>・hr] [12]から算出した. 人体の 体表面積A [m<sup>2</sup>]は体重W [kg],身長H [cm]を用いて 6 歳以上に適用される次の簡易式から求 める.

$$A = W^{0.444} \times H^{0.663} \times 0.008883. \tag{5}$$

体重は数値人体モデルの体積 6.687e-02 [m<sup>3</sup>]と人体の平均密度 985 [kg/m<sup>3</sup>]から求める. また身 長は数値人体モデルの身長 173.2 [cm]を用いる. 以上より, 産熱は 1.087e+03 [W/m<sup>3</sup>]となり, これ を人体の全要素に与えた.

また皮膚表面の熱伝達係数は,熱伝達係数を変えながら産熱のみを与えた熱伝導解析を行う ことで同定した.室温 25℃で深部温度が 37℃となる条件で,44.37 [W/m<sup>2</sup>・℃]とした.

Fig. 3 は背中から 0.148 m の断面での, 電磁界解析により求められた電場である. アンテナが胸部正面に設置されており, その周辺で電場が強くなっている. また Fig. 4 は電場より求めた渦電流密度である. 電場が強く, 導電率が大きい心臓の渦電流密度が強くなっていることが見てとれる. Fig. 5 は温度分布である. アンテナ直下を中心に温度が上昇していることが確認できる.

Table 1. Physical quantities for electromagnetic field analysis.			
	磁気抵抗率[m/H]	誘電率[F/m]	導電率[S/m]
心臓	7.958e+05	5.627e-10	1.019e+00
肺	7.958e+05	3.387e-10	4.520e-01
肝臓	7.958e+05	4.441e-10	5.200e-01
筋肉	7.958e+05	5.041e-10	7.470e-01

Table 2. Physical quantities for heat conduction analysis.				
	熱伝導率[W/m℃]	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	比熱[J/kg°C]	
心臓	5.576e-01	1.081e+03	3.686e+03	
肺	3.874e-01	3.940e+02	3.886e+03	
肝臓	5.191e-01	1.079e+03	3.540e+03	
筋肉	4.950e-01	1.090e+03	3.421e+03	



Fig. 2. Numerical human body model (30 million DOFs).



Fig. 3. Electric Field (real part) [V/m].



Fig. 4. Eddy current density (real part) [A/m<sup>2</sup>].



Fig. 5. Temperature distribution [ $^{\circ}$ C].

Upper: Only heat production by muscles, Lower: With heating by electromagnetic waves

#### (5) まとめ

2021 年度は人体の組織・臓器の物性値を調査するとともに、1 辺 4 mm, 電磁界解析で約 3,000 万自由度の数値人体モデルの連成解析を行った. 深部温度の上昇は確認できたが, 血流による 熱移動を考慮していないため末端部の温度はほとんど変わらなかった. 今後はさらに自由度の大 きい詳細な数値人体モデルの連成解析を行うとともに, 血流による熱移動モデル, スムージング, 要素細分割を解析システムに順次導入していく.

### 参考文献

[1] 情報通信研究機構 電磁環境研究室 HP: http://emc.nict.go.jp/index.html

[2] A. Takei, K. Murotani, S. Sugimoto, M. Ogino and H. Kawai, "High-Accuracy Electromagnetic Field Simulation using Numerical Human Body Models", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.52, Issue 3, 7402704, 4p, 2016.

[3] K. Murotani, S. Sugimoto, H. Kawai and S. Yoshimura, "Hierarchical Domain Decomposition with Parallel Mesh Refinement for Billions-of-DOF Scale Finite Element Analyses", International Journal of Computational Methods, Vol.11, Issue 4, p.1350061-1 - 1350061-30, 2014.

[4] R. Shioya and G. Yagawa, "Iterative domain decomposition FEM with preconditioning technique for large scale problem", ECM'99 Progress in Experimental and Computational Mechanics in Engineering and Material Behaviour, pp.255-260, 1999.

[5] H. Kanayama and S. Sugimoto, "Effectiveness of A-□ method in a parallel computing with an iterative domain decomposition method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.42, Issue 4, pp.539-542, 2006.

[6] A. Takei, S. Yoshimura and H. Kanayama, "Large-scale parallel finite element analyses of high frequency electromagnetic field in commuter trains", Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol.31, No.1, pp.13-24, 2008.

[7] S. Sugimoto, A. Takei and M. Ogino, "Finite element analysis with tens of billions of degrees of freedom in a high-frequency electromagnetic field", Mechanical Engineering Letters, Vol.3, 2017.

[8] S. Sugimoto, A. Takei and M. Ogino, "High-Frequency Electromagnetic Field Analysis with 130 Billion of Degrees of Freedom", The 38th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology, pp.290-295, 2019.

[9] ADVENTURE プロジェクト HP: http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/

[10] 理化学研究所 身体組織物性値データベース:http://cfd-duo.riken.jp/cbms-mp/j/

### [11] Tissue Properties Database V4.0:

https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/downloads/database-v4-0/

[12] 後藤昌義, 橋村三郎, 桝村純生, 安部良治, 前野巍, 有田真, "生理学", 理工学社, 1980.

#### 3.1.5. オールドヴァイオリンの振動モードと音場の連成解析

(1) 目標·計画

本研究ではストラディヴァリに代表されるようなオールドヴァイオリンの振動と周辺 音場を数値シミュレーションで解析している.

### (2) 意義・国際社会との比較

ヴァイオリンのモード振動や周辺音場の解析は 1970 年代頃から行われ, 近年では数値シ ミュレーションによる解析も進んでいる.本研究では,世界的にも類のない高精度な 3D ス キャナを用いて,特に名器といわれるいくつかのオールドイタリアンのヴァイオリンの本 体をスキャンし,有限要素法による数値シミュレーションを行っている.

### (3) 研究内容

マイクロ CT スキャナを用いてイタリアのヴァイオリンの名匠 A.Stradivari 作のヴァ イオリンを 0.1mm の精度でスキャンした.3次元のジオメトリは STEP 形式で CAD デ ータを作成し COMSOL Multiphysics<sup>™</sup>にインポートし,同 COMSOL の自動メッシュ機 能により四面体メッシュが生成され有限要素法で計算される.ヴァイオリンの解析にお いては,木材(スプルースおよびメープル)を模擬する必要があるため,木目方向とそれに 直交する年輪方向,そして年輪の周方向の3方向の直交異方性でモデル化している.物 性値は,比重,ヤング率(縦弾性係数),剛性率,ポアソン比を設定した.現段階では, ヴァイオリンの振動解析においては1000Hz 以下の低次モードに着目して解析が行われ ることが多い.特に A0モードは breath mode や air cavity mode とも呼び,表板全体が 上下に振動する吸込み湧き出しの単極子のような振動モードで,音量に関連すると言わ れる.さらに,CBR や B0 と言われる,ねじれモードについても計算に成功した.ただ し,今回は実際のストラディヴァリの材質は測定困難であるので代表値を用いている.

#### (4) 2021 年度進捗状況

図1は断面における楽器本体の変動と音場の分布を示している(A0 モード). A0 モードでは f 字孔のウィング部や魂柱を支点にバスバー側が大きく振動し,また,ホルムヘルツ共鳴 としての f 字孔からの音の放出が大きいことも確認された.

次に,図2にG線が乗る駒の位置で,196Hz(G3)の正弦波振動を水平方向(y軸)に与えた 場合の本体上部の圧力分布を示す.駒の正弦振動により表板が振動し,図のようにf字孔や C-boutsを中心として概ね同心円状に分布している様子が見える.これまでも実験により低 音域では楽器の周囲をまんべんなく音が放射されることが報告されている.こういった 楽 器周辺の音場解析は,実験環境では無響室でアレイマイクを使って実測できるが,その設備 は限られておりまた計測のコストも非常に高い.よって,数値シミュレーションにより実験 の代替が可能となれば大変有用な手法である.今後,他の周波数や加振位置でも解析を進め たい.



図 1: 振動モード(A0, 294Hz)における楽器・ 魂柱・バスバー・駒の振動による変位と音圧.



図 2: 駒の G 線が乗る箇所に 196Hz の正弦 波振動を与えた場合の周辺音場. f 字孔を中 心に同心円状に広がりを見せている.

(5) まとめ

上記のシミュレーション結果の他に、3本のストラディヴァリの CT スキャンをスキャン し CAD データ化まで行った.今後は、取得したデータを用いてそれぞれの楽器の特性の解 析や、大規模計算による広域の音場解析を行う予定である.

### 3.2. AI グループ

### 3.2.1. 自己組織化マップを用いた新しい可視化手法

(1) 目標·計画

流体解析結果の可視化については,長い歴史と多くの研究がある.しかし,それらで用いられる 可視化手法は,解析から直接得られる物理量,例えば圧力や速度,渦度など,を可視化するもの と,渦(中心),剝離域や逆流域,衝撃波などの流れを特徴つづける領域を可視化するものの 2 つ に大きく分けられる.前者は古くから用いられてきた方法であり,等高線やカラーの面塗りなどによ って,スカラーの物理量の分布を表したり,矢印などによって流れの速度を表したりする.一方,後 者は,特徴を抽出する方法はそれぞれあるが,その結果は位置をマーカや面で表したり,その位 置でのなんらかの関数の値によって色を付けたりしている.

そのいずれも、可視化する者が意図を持って適当(適切)な物理量(関数)を選ぶことから始まっているが、実際の解析ではどの物理量を見るのが流れ場を理解するのに適当であるか、分からないことも多い.

そこでここでは、機械学習を利用して流れ場の各点を分類することで、その流れ場の特徴的な 点 (のみ)を自動的に集めることを考える. 具体的には、自己組織化マップ(SOM)に解析結果の各 点の物理量、例えば圧力や速度、それらの空間微分値などを入力ベクトルとして与えて分類させる. SOM では似たベクトルは近くに配置されるので、流れの状況が似ている点はマップ上で近くに配 置されることが期待される. そこで、マップの位置に応じた色を与えれば、描かれる絵は、流れの特 徴が似ている点は近い色で塗られるはずである. その絵は、入力した個別の物理量ではなく、流 れの様々な値を考慮して決められているから、何かは分からないが、流れの特徴を可視化している と期待される.

本研究では、従来とは異なる解析手法を提案すると共に、機械学習をより幅広い分野に応用していくことを目指す.

### (2) 意義・国際社会との比較

上記のように、これまでにない可視化方法なので、今まで困難であった流れ場の解釈や、より大 規模になる今日の解析において、容易に流れ場の特徴を見出せる可能性がある.

流体解析に人工知能や機械学習を利用する試みも見られるようになってきているが,乱流のモ デリング,流れの制御,可視化画像から流れの予測などであり,解析結果の可視化に機械学習を 応用する試みは見られない.

### (3) 研究内容

SOM は入力層と競合層(マップ)からなる 2 階層ニューラルネットワークである. 複数ある入力ベクトルを競合層上に配置し, 各入力ベクトルの相対的な関係を図示し, 高次元ベクトルをクラスタリングし直感的に理解することが可能となる. また, 競合学習により, 似たベクトル同士を近くに配置するようなマッピングとクラスタ間の補間効果で, 未知の入力ベクトルに対しても分類判別ができる.

ここでは、2 次元非圧縮の流れ場を用いて研究を行った. 各点での物理量は直接的には圧力と x,y方向の速度成分(*u*, *v*)であるが,これに速度の大きさ,圧力の*x*,*y*方向微分(空間勾配),*u* お よび*v*の*x*,*y*方向微分(空間勾配)を合わせた 10 の次元のベクトルを SOM の入力とする. 空間勾 配を入れることで,渦度等も暗に含まれると考える. 粘性支配であれば、空間2階微分も入れた方 がよいのかも知れないが、ここでは考慮しなかった. 比較のため、*u*,*v*,*p*のみ、空間勾配のみの2種 類の入力ベクトルについても試したが、ここでの限られた流れ場では 10 次元の要素すべてを用い た方がよい結果が得られたため、結果は省略する.

SOM の構成はマップサイズを 20×20~128×128 とし, 近傍半径を 10→1, 学習係数を 0.3→0.01 と学習の反復回数の増加に伴い単調減少するように設定した. 学習の反復回数は 1000~4000 回 とした.

次に、学習済みのマップに各点の物理量ベクトルを再び入力すると、マップ上のどこかが発火する. そのマップ上の座標がいわばこの点の特徴を表す値になっている. 2 次元のマップなので、2 つ値が存在する. そこで、この2つの値を色に対応させることで、この点の色が決まる. すべての点を順次マップに入力し、色を決めれば結果としてカラーの面塗り画像が得られる.

2 つの値と色の対応は任意であるが, 色は一般に 3 つのパラメータで決まるので, このうち 2 つをとる. 例えば, RGB カラーモデルでは, R,G,B の 2 つを対応させ, 残りの 1 つは固定する. HSV カラーモデルでは, H(色相)と V(輝度)をとり, S(彩度)は固定する, などである.

このように考えると、マップが 2 次元で値が 2 つなのに対して、色のパラメータが 3 つあることで 対応関係が難しくなっていることに気がつく. そこで、SOM の本来の使い方ではないが、3 次元の マップを作ることも考えた. マップサイズは 25×25×25~35×35×35、その他のパラメータは 2 次元と 同様とした.

流れ場は、2 つ試みた. 1つ目は 2 次元円柱まわりの非圧縮流体で、円柱直径を 40 格子とする 直交等間隔格子を用いて 3 次風上の擬似圧縮性法で解いている. 計算領域は 1280×800 であり、 円柱直径に対して 32 および 20 倍である. さらに、計算上レイノルズ数を 10,000 としているが、格 子幅が円柱直径の 1/40 なので、少し不足しているが、可視化結果を議論するには問題ないと考え ている. 2 つ目は、キャビティ流れで、正方キャビディの上部に剪断流れを与えてキャビティ内に流 れを誘起する. 計算領域は 1000x100 でレイノルズ数は 2 次流れが起こるように 5000 とした. こちら については十分な計算格子をとっており,他者の結果とも良い一致をしている.なお,前者は非定常,後者は定常流れである.

### (4) 2021 年度進捗状況

2021 年度はこれまでの結果をまとめて機械学会に投稿した[1]. ここではその中から代表的な結果のみ示す.

Fig.1 は円柱周りの流れの結果で,まずは一般的な渦度と圧力の可視化を示している. これに対して,128x128 のマップを使い,HとVで可視化したのが Fig. 2 である. 渦度のみ, 圧力のみでは現れない,後流域とその外側との違いや放出渦等が綺麗に可視化されているのが分かる.一方, Fig. 3 は 35x35x35 の 3 次元マップをそのまま RGB に対応させた結果である. 色そのものは異なるが,こちらも流れの特徴をよく捉えていることが分かる. 円柱周りは非定常であるため,時系列(無次元時間で 0.625 間隔)の結果になっている. ここでは,マップは最初の時刻のデータのみを用いて作成しており,それ以降の時刻についてはそのままマップに入力し,発火位置を得て色を付けている.

Fig. 4 はキャビティ流れの結果の一般的な可視化結果で、左から、圧力、u, v, 渦度、流線である. これに対して、128x128 マップでHとVで可視化したもの、及び35x35x35 マップで可視化したものを Fig. 5 に示している. この場合は、3 次元の方がより多くの情報を可視化できているように見える.



Fig. 1 Computed result of flow around a circular cylinder at a certain time step. left: vorticity, right: pressure. Black line boxes show the area for SOM training.



Fig. 2 2D map result of flow around a cylinder.



Fig. 3 Time sequence of 3D map result. The time interval is 0.625 non-dimensional time.



Fig. 4 Pressure, u, v, vorticity and streamlines of the driven cavity.



Fig. 5 Driven cavity result visualized with SOM maps. Left; 2-D map. Right; 3-D map.

### (5) まとめ

2021 年度で一通りのことはできた. 次年度からは, 圧縮性流体などよりパラメータの多い流れ場 で試すこと, 3 次元の流れ場の分類と可視化の方法について考えたいと思っている.

### 参考文献

[1] Masato Masuda and Yoshiaki Tamura, "Automatic flow visualization method using self-organizing map," Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME, Vol. 7, Paper No. 21-00336 (2021).

### 3.2.2. 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,革新的構造材料がテーマとして採択された. 芦野は同プロジェク トにおけるマテリアルズ・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行った.

2018 年から始まった SIP 第二期では物質・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」が採択された. 芦野は第一期の MI に続いて第二期にも参画し, 2022 年度のプロジェクト終了まで A 領域「先端的構造材料・プロセスに対応した逆問題 MI 基盤 の構築」にある五つのサブグループの一つ, A5 において Co-Leader として構造材料データベース のデータ構造開発を行なっている. また, 分担者としては材料のオントロジー開発を担当しミクロ組 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っている.

#### (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、芦野がこのサブグループの Co-Leader となっている.

第二期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.

また,近年ではアメリカ、ドイツなどでは国家としての研究のためのデジタルインフラストラクチャーの構築が進んでいる.このようなものを活用するには各研究ドメインでのコミュニティ作りが重要であり、アメリカでは NSF の主導で組織された MaRDA (Materials Research Data Alliance)が活動して MGI2.0 (仮称)と連携する動きを見せており、2021 年 2 月には第 2 回の Annual Meeting が開催された.ドイツでは国立研究機関・大学などの参加する NFDI-MatWerk (National Research

Data Infrastructure for Materials Science & Engineering)が活動をはじめ. プロジェクト・ユースケー ス開発を実施しているが、その中では格子欠陥に関わるオントロジーなどオントロジーに関わるテ ーマが複数取り上げられている.

### (3) 研究内容

SIP 第二期、構造材料データベースのデータ構造開発では、XML-Schema を用いて試験デー タについて拡張性の高いデータ構造を開発するボトムアップに加え、材料専門家の持つ知見をオ ントロジーとして記述するトップダウンを同時に行っている.これらを連携して専門家の持つ概念構 造をベースとしたデータの活用を可能とするアプローチを採り、芦野はこのうちトップダウンのオント ロジー開発を分担している.

物質・材料研究機構との共同で構造材料データベースのデータ構造を開発するとともに、分担 者としてはミクロ組織の材料パフォーマンスへの影響など材料学の専門家の知見のオントロジー記 述を進めている. 逆問題を考える上では、現在は大量のデータから機械学習を用いて分類を行う 手法が注目されているが、専門家が材料の性能向上を目指す際にどのような特徴量を用いて判断 しているかを考えることも重要である. 現在このような知見はワークフローのアルゴリズムの中に埋 め込まれているが、機械可読な形式で書き下して可視化することで逆問題へのアプローチを行っ ている. また、システムの社会実装へ向けてデータ構造の企業等での利活用を進める.

#### (4) 2021 年度進捗状況

2021 年度にはデータ構造の社会実装へ向けてプロジェクト参画企業との協議,各企業内 で用いられているデータとの関係等について議論を進めた.これに伴ってオントロジーに ついても新しい概念記述を追加している.

ミクロ組織の表現に関しては構造材料中のミクロ組織に関するオントロジー開発を行っ てきたが、材料の性能に関してはミクロ組織を構成する粒界・介在物などの位置関係も重要 な要素である.このため、3次元の構成要素の位置関係を表すオントロジーの述語を開発す るために空間情報の記述におけるオントロジー開発[1]についてのサーベイを行い、下記の 3種類のオントロジーに分類して開発することとした(Fig.1).

1. Topology relation: 対象物相互の位置関係. equal, intersect, contain, within, touch, separate, overlap, overlapedby 等

2. Direction and Scale relation: データ内での座標軸・スケールの記述. orientation-X,Y,Z, scale-X,Y,Z 等

3. Measure relation: 対象物の距離などを表す. distance far/near, length long/short 等



Fig.1 Ontology design for describing the positional relationships of material microstructures

材料の試験については一つの母材から複数の試験片を作成する,複数の測定を行うなど といったデータの扱いがあるため,互いの座標軸・スケールなどの関係が記述できる仕組み も必要であり,2022 年度には理研・東大・JFE・神戸製鋼所など参画機関よりサンプルデー タの提供を得てミクロ組織を記述するオントロジー述語セットを完成させる予定である.

(5) まとめ

SIP 第2期は 2020 年度に中間審査が行われ、2021、2022 年度の継続が認められた. 最終年度で ある 2022 年度には社会実装への対応を継続するとともに、材料の性能に大きくかかわるミクロ組 織のオントロジー開発を実施する予定である.

### 参考文献

[1] Sun, Kai, et al. "Geospatial data ontology: the semantic foundation of geospatial data integration and sharing." Big Earth Data 3.3 (2019): 269-296.

### 3.2.3. LSTM-based variational autoencoders 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  $p(x_{sT}, z_{sT})$ 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.

$$p(\boldsymbol{x}_{\leq T}, \boldsymbol{z}_{\leq T}) = \prod_{t=1}^{T} p(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{z}_t | \boldsymbol{x}_{< t}, \boldsymbol{z}_{< t})$$

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 $p(x_t | x_{< t}, z_{\le t})$ の積に分解することができる.

$$p(\boldsymbol{x}_{\leq T}, \boldsymbol{z}_{\leq T}) = \prod_{t=1}^{T} p(\boldsymbol{x}_t | \boldsymbol{x}_{< t}, \boldsymbol{z}_{\leq t}) p(\boldsymbol{z}_t | \boldsymbol{x}_{< t}, \boldsymbol{z}_{< t})$$

本研究では、時刻tにおける事前確率 $p(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{<t}, \mathbf{z}_{<t})$ と尤度 $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{<t}, \mathbf{z}_{\le t})$ 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 $p(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{\le t}, \mathbf{z}_{< t})$ は intractable であるため、事後確率 の近似 $q(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{\le t}, \mathbf{z}_{< t})$ 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 $p(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{<t}, \mathbf{z}_{<t})$ , 尤度 $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{<t}, \mathbf{z}_{\le t})$ , 事後確率の近似 $q(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{\le t}, \mathbf{z}_{<t})$ は 全て過去の時刻の動作データ $\mathbf{x}_{<t}$ と潜在変数 $\mathbf{z}_{<t}$ 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 を $\rho$ , RNN の時刻tにおける隠れ状態ベクトルを $\mathbf{h}_t$ とすると

$$\boldsymbol{h}_t = \rho(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{z}_t, \boldsymbol{h}_{t-1})$$

となる. 事前確率 $p(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{< t}, \mathbf{z}_{< t})$ を正規分布 $\mathcal{N}\left(\mathbf{z}_t; \boldsymbol{\mu}_{p_t}, \operatorname{diag}(\boldsymbol{\sigma}_{p_t} \odot \boldsymbol{\sigma}_{p_t})\right)$ とすると, 平均 $\boldsymbol{\mu}_{p_t}$ と標準偏 差 $\boldsymbol{\sigma}_{p_t}$ をニューラルネットワーク $\boldsymbol{\phi}_{\mu}, \boldsymbol{\phi}_{\sigma}$ によりそれぞれ

$$\boldsymbol{\mu}_{p_t} = \phi_{\boldsymbol{\mu}}(\boldsymbol{h}_{t-1}), \ \boldsymbol{\sigma}_{p_t} = \phi_{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{h}_{t-1})$$

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,事後確率の近似  $q(\mathbf{z}_t | \mathbf{x}_{\leq t}, \mathbf{z}_{< t})$ は正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{z}_t; \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{z}_t}, \operatorname{diag}(\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}_t} \odot \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}_t}))$ と仮定し,平均 $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{z}_t}$ と標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}_t}$ をエンコ ーダニューラルネットワーク $\boldsymbol{\varphi}_{\boldsymbol{\mu}}, \boldsymbol{\varphi}_{\boldsymbol{\sigma}}$ によりそれぞれ

$$\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{z}_t} = \varphi_{\boldsymbol{\mu}}(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{h}_{t-1}), \ \boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{z}_t} = \varphi_{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{x}_t, \boldsymbol{h}_{t-1})$$

と表す.また,尤度 $p(x_t|x_{<t}, z_{<t})$ は事前確率あるいは事後確率の近似からサンプリングされた潜 在変数 $z_t$ とデコーダニューラルネットワーク $\psi$ を組み合わせて表現する.デコーダニューラルネット ワーク $\psi$ では潜在変数 $z_t$ と隠れ状態ベクトル $h_{t-1}$ を入力し,動作データ $x_t$ を出力する.

$$\boldsymbol{x}_t = \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{z}_t, \boldsymbol{h}_{t-1})$$

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動作 $\hat{x}_t$ と元の動作データ $x_t$ との平均2 乗誤差によって求める.

 $\mathbb{E}_{z_t \sim q(z_t | x_{\leq t}, z_{< t})} | \psi(z_t, h_{t-1}) - x_t |^2 = \mathbb{E}_{z_t \sim \mathcal{N}\left(z_t; \varphi_\mu(x_t, h_{t-1}), \varphi_\sigma(x_t, h_{t-1})\right)} | \psi(z_t, h_{t-1}) - x_t |^2$ 

また,時刻tにおける正則化項は,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.

$$D_{KL}(q(\mathbf{z}_{t}|\mathbf{x}_{\leq t}, \mathbf{z}_{< t})||p(\mathbf{z}_{t}|\mathbf{x}_{< t}, \mathbf{z}_{< t})) = D_{KL}\left(\mathcal{N}\left(\mathbf{z}_{t}; \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{z}_{t}}, \operatorname{diag}(\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}_{t}} \odot \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}_{t}})\right)||\mathcal{N}\left(\mathbf{z}_{t}; \boldsymbol{\mu}_{p_{t}}, \operatorname{diag}(\boldsymbol{\sigma}_{p_{t}} \odot \boldsymbol{\sigma}_{p_{t}})\right)\right)$$
$$= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{J} \left(\frac{\sigma_{z_{t}, j}^{2}}{\sigma_{p_{t}, j}^{2}} + \frac{\left(\mu_{p_{t}, j} - \mu_{z_{t}, j}\right)^{2}}{\mu_{p_{t}, j}^{2}} - 1 + \log \sigma_{p_{t}, j}^{2} - \log \sigma_{z_{t}, j}^{2}\right)$$

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.



Fig.1 Joint structure in motion data.

### (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. 特徴抽出器 $f_1$ の構造を Fig.3 に示す. Fig.3 に 示すように、動作データは左足・右足・胴体・頭・左腕・右腕の 7 つの部分に分解され、それぞれの 部分が全結合層(FC)に入力され、活性化関数 Rectified Linear Unit(ReLU)を通り、8 次元の特徴 ベクトルとして出力される. その後、1 つの特徴ベクトルとして統合され、56 次元の特徴ベクトルが

得られる. 特徴抽出器 $f_2$ は全結合層(FC)と活性化関数 ReLU により構成されており,  $f_2$ によって抽 出される特徴量の次元数は 32 とした. また, Fig.4 に示すように RNN  $\rho$ 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 $\varphi_\mu, \varphi_\sigma$ 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 $\varphi_\sigma$ には sigmoid 関数をかけている. デコーダネットワークは Fig.5 に示すように 3 層 の全結合層 $\psi, f'_2, f'_1$ により構成されている. 1 層目の $\psi$ が潜在変数 $z_t$ から動作特徴量 $x''_t$ への変換 であり, 残りの 2 層 $f'_2, f'_1$ 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.  $\psi, f'_2$ には ReLU 活性化関数をかけている.  $f'_1$ の構造を Fig.6 に示す. Fig.6 に示すように, 動作特徴量は 7 つの部 分に分解され, それぞれの部分が全結合層に入力され, その後 7 つの部分が統合されて動作デ ータが出力される. 事前確率ネットワークは Fig.7 に示すように 1 層の全結合層 $\phi_\mu, \phi_\sigma$ により構成さ れている. 標準偏差を出力する層 $\phi_\sigma$ には sigmoid 関数をかけている.

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.



Fig.2 Encoder network.



Fig.4 Recurrent network.



Fig.3  $f_1$  in the encoder and recurrent networks.



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,それをデューダネッワークによ りデュードすることで,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 36 個の z\_0 から生 成した動作データを Fig.8 に示す. Fig.8 に示すように多様な動作を生成することができた.生成さ れた動作の各フレームの姿勢は自然な姿勢であることが多かったが,時間方向の姿勢の変化が滑 らかでなく,高周波成分の多い動作となった.

### (4) 2021 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な動作が生成でき ることを示した.

### 参考文献



Fig.8 Randomly generated motions.

 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.

### 3.2.4. OpenPose を用いた伝統舞踊の動作解析

(1) 目標·計画

本研究では,韓国舞踊の専門家と初心者の動作解析を通じて,韓国の伝統舞踊における動作 の特徴を明らかにする.実験計画としては,まず専門家および初心者には,韓国舞踊の基本動作 を実践してもらい,その様子をビデオカメラで撮影する.そのあとに,姿勢推定ライブラリ「OpenPose」 [1]を用いた解析を行い,各関節点が示す動きの違いについて分析する.さらに,動作解析の結果 をもとに,韓国舞踊の身体表現に求められる動作や,鑑賞者に与える印象,身体への影響なども 含めて考察を行う.

### (2) 意義・国際社会との比較

近年では、心身の健康を保持・増進の重要性が叫ばれており、身体面・心理面に対する様々な 介入方法やプログラムが提唱されている.日本でも、特に医療分野において、主に高齢者を対象 として、病院内外で数多くのプログラムが実施されている.その内容としては、作業療法、運動療法、 絵画や音楽などを取り入れた芸術療法など多岐にわたる.

その中の一つとして,踊ることや身体の動きを通して,心体の調和を図るダンスセラピーが挙げ られる.ダンスセラピーは疾病や障害のある高齢者も安全に実施でき,心理・生理的効果や認知 機能・自律神経機能の向上などが報告されている.特に,日本の伝統舞踊である能や中国舞踊, 韓国舞踊は,健康増進や身体機能の向上などの効果が認められている.

特に,韓国舞踊については,高齢者に対する導入の試みに関する研究が数多く報告されている.身体動作を介したアセスメントや介入の効果を高めるためには,韓国舞踊が持つ動作特徴,および心身の健康維持・向上に及ぼす要因について明らかにするために,定量的な動作解析研究が必要であると考えられる.

(3) 研究内容

### (a) 舞踊動作を取得する方法

本研究では、姿勢推定ライブラリ OpenPose を用いて人間の骨格を検出する. OpenPose は畳み込みニューラルネットワーク (Convolution Neural Network, CNN) を利用し、画像内の人間の骨格情報を検出する手法である. 取得した骨格情報は、Fig.1 に示す 25 特徴点である.

No.	Body Part	No.	Body Part
0	Nose	1	Neck
2	RShoulder	3	RElbow
4	RWrist	5	LShoulder
6	LElbow	7	LWrist
8	MidHip	9	RHip
10	RKnee	11	RAnkle
12	LHip	13	LKnee
14	LAnkle	15	REye
16	LEye	17	REar
18	LEar	19	LBigToe
20	LSmallToe	21	LHeel
22	RBigToe	23	LSmallToe
24	RHeel		



Fig. 1 Key points detected using OpenPose.

### (b) 体の左右対称性の評価方法

Dynamic Time Warping (DTW)を用いて, 左右の肘, 手首の対称性を比較した. DTW は時系 列同士の類似度を測る際に用いる手法であり, 2 つの時系列データの長さが異なっても対応が可 能である. Fig.2 に示すように, ユークリッド距離は強制的に時間軸をそって 2 つの時系列データの 距離を計算する. DTW は2つの時系列データの距離が最小となる経路を見つける. これによって, 時間軸上でサンプル数が異なるデータや, ずれがあっても類似度を計算できる.



Fig. 2 Comparison of Euclidean and DTW alignment between two time series.

### (4) 2021 年度進捗状況

2021 年度はこれまでの結果を可視化情報学会に投稿した[2]. 初心者と専門家それぞれが韓国 舞踊を踊っている様子を記録した.また,記録した映像から,姿勢推定ライブラリ OpenPose を用い て対象者の骨格を検出し,各関節座標を示す動作データを取得した.DTW 手法を用いて韓国舞 踊の専門家と初心者の動作の左右対称性を定量的に比較し,計算された左右動きの類似度の値 を比較すると,専門家は初心者より1.4 倍~3.3 倍高い結果を得られた.

### (5) まとめ

本研究では、舞踊の動作データを取得し、定量的に分析することが目的とする. 姿勢推定 ライブラリ OpenPose を用いることによって、簡単に動作データを収集することができる ことを示した. 今後はほかの伝統舞踊の動作特徴、ダンスセラピー効果を解明する予定であ る.

### 参考文献

[1] Zhe Cao, Gines Hidalgo, Tomas Simon, Shih-En Wei, Yaser Sheikh: OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields, arXiv preprint arXiv:1812.08008(2018).
[2] 鄭宏杰,加藤千恵子,小松昭吾,青木滉一郎, Openpose と DTW 距離を用いた韓国伝統 舞踊の動作分析: 熟練者と初心者による動作差異の可視化 (特集 こころの可視化). 可視

化情報学会誌= Journal of the Visualization Society of Japan, 2021, 41. 161: 巻頭 1p, 52-55.

### 3.3. 解析手法開発

### 3.3.1. 疫病伝搬の歴史シミュレーション

目標·計画

現在,新型コロナウィルス (COVID-19) が全世界に蔓延している状況のなかで,そもそ もこういった感染症あるいは伝染病・疫病が,なぜ,どのように発生し,またこれがパンデ ミックとして広範囲に伝搬していくのか,に興味が集まっている.これに対する仮説として よく挙げられているものの一つとして,「グローバリゼーション」の影響がある.このよう な世界規模での感染症の蔓延という現象は,1990 年代初頭の冷戦終結から始まるグローバ リゼーションの時代と同期しているとも考えられる.確かにここ 2~30 年程で,今回の新型 コロナほどではないにせよ, SARS, MARS,新型インフルエンザなど各種の感染症がひっ きりなしに世界各地を襲っている.

グローバリゼーションにより東欧やアジアの市場が開放され、従来は一国の内部で閉じ ることが多かった産業活動が適材適所・水平分業ということで世界全土に分散するように なった.これに伴い、中国をはじめとする BRICS、あるいは東南アジア諸国などが新興国 として世界経済の一角を占めるようになってきている.一方でこのような動きは、世界中で これまで人がめったに踏み込むことがなかったような自然環境への侵入、あらたな土地の 開拓や都市化を促進させ、これにより野生動物とのより頻繁な接触、およびそれに伴う未知 の病原菌・感染症との遭遇が生じることになる.

より広い意味で人類社会は歴史的に,感染症,あるいは伝染病・疫病との相互のインタラ クションを繰り返してきている.以下では,疫病の歴史,特に世界史に残る規模のパンデミ ックの発生および伝搬について,調査・分析を行う.ここでは文明の進展,そしてそこに交 易の果たした役割がキーとなってくる.これらの予備調査を踏まえ,次のステップとしての 歴史シミュレーションに繋げていくための導入とする.

#### (2) 疫病の歴史

世界史におけるパンデミックの有名な事例として、14 世紀の黒死病、あるいは、第一次 世界大戦におけるスペイン風邪などがあるだろう.これら以外にも、天然痘、コレラ、結核、 梅毒など、歴史になんらかの影響を及ぼしたといわれている疫病やそのパンデミックがあ る.歴史家ウィリアム・H・マクニールの「疫病と世界史」によれば、疫病あるいは感染症 はもともと動物由来のものが多く、人類が1万年ほどまえに農耕と牧畜を始め、家畜との接 触のなかで生まれてきた病原菌がその多くを占める.こういった病は、もともとある地方の 風土病であったものが、数千年にわたる人類の長い歴史の中で世界中に伝搬していったも のと考えられている.その際に注目されているのが,人と人,民族あるいは国家間の交流, 特に,交易や文化交流などを通して距離的に離れた文明同士が相互に接触しあうことによ り生じる,病原菌の拡散,すなわちパンデミックである.これは,過去,数百年から数千年 にもおよぶ,広い意味での「グローバリゼーション」の進展であるともいえる.

例えば、世界史において最も有名な疫病の一つ、黒死病(ペスト)について考える.黒死病は14世紀中盤から後半にかけてヨーロッパ全土を襲い、その人口の三分の一が失われた と言われている.実はこのときヨーロッパだけでなく、中東や中央アジア、および中国もほ ぼ同時期に襲われており、すなわちこれはユーラシア大陸の東西にまたがる広範囲なパン デミックであった.これにより、イスラム圏ではエジプトのカイロを始め、北アフリカ、ア ラビア、中央アジアおける主要な交易都市が壊滅し、また中国では、飢饉・疫病の影響によ る大規模な民衆反乱により、元から明への王朝交代が起こっている.一方、ペストの原因と してよく挙げられるのが、元・モンゴル帝国による東西交流、すなわち「モンゴルの平和」 である.モンゴルが中央アジアを押さえ、これを政治的に安定させることでシルクロードが 復活し、マルコ・ポーロの「東方見聞録」に示されるように、ユーラシア大陸をまたにかけ る大規模な交易圏が成立するようになった。逆にこれが仇となり、ペストが大陸全土に蔓延 することとなる.なお、ペストはネズミやリスなどのげっ歯類を宿主にするが、これらの種 は中央アジアやチベットなどの草原地帯に生息していることが多く、そういった未開領域 に今回モンゴル軍が侵入したことによるものだという説がある.

二つ目の例として、古代ローマの衰亡に関わる複数回のパンデミック、特に、2世紀のア ントニヌスの疫病と6世紀のユスティニアヌスの疫病があげられる.前者では、いわゆる五 賢帝時代の最後の皇帝、マルクス・アウレリウス・アントニヌス帝の時代において、隣国パ ルティアとの戦争に参加した兵士を通じて天然痘がローマ全土に伝搬している.これは大 規模な人口減少を引き起こしており、これによる国力の減退が、のちのゲルマン民族侵入や 西ローマ帝国滅亡の遠因の一つと目されている.一方、後者のユスティニアヌスの疫病につ いては、これはローマ帝国東西分裂後の東側の皇帝ユスティニアヌス 1 世の時代のもので あり、こちらは14世紀と同様ペストのようである.これによりビザンツ(東ローマ)帝国 は衰退し、そのスキを突かれて当時勃興したイスラムにシリアやエジプトを奪われたとも 言われている.なお、交易という観点からは、これらのパンデミックが生じたタイミングに ついても、当時勃興しつつあったユーラシア東西間の交流、すなわちシルクロードの登場が その背景にある.また、海路についても、インド洋における季節風の利用が開始され、地中 海から紅海やペルシャ湾経由でインドとの海上交易も盛んになった.陸路のシルクロード と並び、インド諸国や中国の漢との交流により、香辛料や絹などが取引されている.

あるいは、15 世紀末からのスペイン・ポルトガルが先導した大航海時代において、コロ

ンブスによる新大陸発見に続く、アステカ・インカ帝国の滅亡を考えてもよい.このとき、 アステカはコルテス、インカはピサロといったコンキスタドールに滅ぼされている.当時数 百人程度の兵員しか用いることができなかったスペインがなぜこれらの巨大帝国を滅ぼし えたのかについてはさまざまな議論があるが、その一つに、天然痘や麻疹など、感染症・疫 病の旧大陸から新大陸への伝播が考えられる.1万3千年ほど前に人類がシベリアからベー リング海峡を通って新大陸へ渡ったのち、両大陸は切り離されて久しく、そのため新大陸の 人類は旧大陸由来の病気に対する免疫がなかった.また新大陸では羊や牛、馬など家畜の利 用が旧大陸に比べ圧倒的に少なく、これにより家畜由来の疫病の発生・伝播パターンも旧大 陸とは異なっていたと思われる.すなわちこれも、文明間の交流を介したパンデミックの例 の一つである.

なお、日本においても交易・交流と疫病伝搬に関する事例がある.日本列島の歴史的な人 口動向を見てみると、ここ2千年ほどの間に人口増加および停滞・減少のサイクルを繰り返 しており、平安・鎌倉時代、江戸時代の中盤、および近年の平成・令和の三か所において人 ロのピークが見受けられる.このうち最初のピークに関しては、古墳・奈良時代に増加した 人口が平安・鎌倉時代において停滞あるいは減少しており、これについて天然痘が原因であ るというウィリアム・ウェイン・フェリスの説がある.実際に、8世紀の天平の疫病大流行 では朝廷を牛耳っていた藤原4兄弟がこの疫病により相次いで亡くなり、一方、聖武天皇は この全国規模の厄災を鎮めるため仏教にすがり、東大寺大仏建立を行っている.そしてこの 天然痘を日本にもたらしたものは、遣隋使・遣唐使をはじめとする大陸との交流および交易 である可能性がある.

#### (3) 疫病と文明・交易

ひとつの仮説として, 文明, 交易および疫病に関する仕組みについて考えてみたい.

文明の発展においては、交易が不可欠のものとなる.メソポタミア、エジプト、インダ ス文明などは皆、灌漑が容易な大河川流域に誕生した.気候条件的にこのような地域は森林 地帯と草原・砂漠のちょうどはざまに存在し、比較的乾燥した気候となっている.すなわち、 川べりの「泥と砂以外に何もない」ような風土において、初期文明の多くが発生している. そのため、灌漑により得られる余剰穀物や手工業品を見返りに、金属や木材、石材など文明 構築に足りない各種資源を、交易を通じて周囲の地域から運んでくることになる.特に、初 期文明の特徴の一つである青銅器については、青銅が銅と錫の合金であり、その両者、特に 錫について埋蔵地が地域的に偏在しており、そのため遠隔交易は青銅器文明にとって死活 問題となりうる.

例えば,現在のイラクにあたるチグリス・ユーフラテス川沿いの古代メソポタミア文明

において,青銅のための錫はイランを超えてアフガニスタンの鉱山からはるばる取り寄せ ていたようである.また,ペルシャ湾・アラビア海を介して遠方のインダス文明と頻繁に交 易を行っていたことも近年明らかにされている.もう一つの例として,紀元前千年紀におけ るフェニキアは地中海全域にわたって海上交易路を開拓し,植民都市カルタゴやイスパニ アの鉱山などが開発されている.さらに,ジブラルタル海峡を大西洋側に抜け,イギリスの コーンウォールの錫を扱っていたという話もある.

このような国際交易において、パンデミックの素地が生まれる.もともとある土地での 風土病であったものが、遠隔交易・交流において商人あるいは軍隊、伝道師などを介し遠隔 地に運ばれるものとする.伝達された地域では人々が病原菌に対する免疫を持っていない ため、歴史上における黒死病やコレラなどのように、深刻なパンデミックとなりうるわけで ある.

### 4. 共同研究

### 4.1. 埼玉 AI プロジェクト

2019 年度に「埼玉県AIを活用した機器等開発・実証補助金」について、「光学ガラス部 品及び金属加工部品に関する外観検査サービス提供基盤の開発」の題目で交付を受け、研 究・開発を行った.本補助金は2019 年度単年度のものであったが、その後の製品開発に向 けて2020 年度からは共同開発体を構成した株式会社タナカ技研と共同研究を行っている.

まず、上記事業の概要は以下の通りである.

「本事業は、スマートフォンや車載カメラに必須の光学ガラス部品である IR (Infrared rays: 赤外線)カットフィルタや車載カメラの鏡筒部分を構成する金属加工部品等の外観検査を 最新の AI 技術により自動化し、クラウドベースの外観検査サービス実現のための基盤構築 を目的とするものである.実現のために、同種複数種、異種複数種に対応する高効率の学習 方式の開発とクラウドベースのサービスビジネスアーキテクチャ開発を行い、実装検証す る.」

これに対し、2021 年度は主に GAN(Generative Adversarial Network)ベースの機械学習を用 いた不良品判定について、画像のどの箇所に不良箇所があるかのセグメンテーション判別 を行うネットワークを構成し学習を行った.共同研究との関係で、画像等を載せることはで きないが、結論としては、元画像から不良箇所の推定が可能であることが示唆されたが、画 像の出力に失敗し、目視での明確な確認ができていない.今後、出力画像の調整と学習結果 の検討を行う.

なお、この補助金自体は単年度であるが、今後、これを事業化するために3年ほどは継続 的に県に経過報告を行うことになっているため、何らかの形で研究は継続する予定である.

### 5. 学術活動

2021年1月から2022年1月までの業績を掲載する.

### 5.1. 論文投稿

- Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto and Kaworu Yodo, "A Relation of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis", J. ADV.SIMULAT.SCI. ENG., Vol.8, No.1, pp.27-39, 2021.1.
- Liyang Zhang, Koichiro Aoki, Chieko Kato, "Clarification of Psychological Change and Development in Stressful Situations", Open Journal of Social Sciences, 9, 364-377. doi: 10.4236/jss.2021.91027, 2021.1.
- Shogo Matsumoto, Koichiro Aoki, Shogo Komatsu, Chieko Kato, "Clarification of Characteristics of Character Strengths Utilized in Stressful Situation", Open Journal of Social Sciences, 9, 157-166. doi: 10.4236/jss.2021.92011, 2021.2.
- Oscar Lucia, Jinhua She, Allen C. Chen, Zheyuan Cheng, Mo Yuen Chow, Larisa Dunai, Mickael Hilairet, Victor Huang, Eric Monmasson, Kazuhiro Umetani, Sho Yokota, "Emerging Trends in Industrial Electronics: A Cross-Disciplinary View", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 15, No. 1, pp. 127-139, 2021.3.
- 5. Koki Tazoe, Genki Yagawa, "Fatigue crack separation and merging simulation using the smoothed particle hydrodynamics", International Journal of Fracture, 229(1), 1-13, 2021.4.
- Shogo Komatsu, Satoshi Yoshinuma, Chieko Kato, Koichiro Aoki, "Consideration on Factors Related to Athletes' Mental Toughness", Psychology, 12, 595-606. doi: 10.4236/psych.2021.124037, 2021.4.
- Masao Yokoyama, "Coupled numerical simulations of the structure and acoustics of a violin body", The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 150(3), 2058-2064, 2021.4.
- 8. 鄭宏杰, 加藤千恵子, 小松昭吾, 青木滉一郎, "Openpose と DTW 距離を用いた韓国伝 統舞踊の動作分析—熟練者と初心者による動作差異の可視化—", 可視化情報特集記事, Vol.41 No.161, pp.12-15, 2012.6.
- Atsuya Oishi, Genki Yagawa, "Finite Elements Using Neural Networks and a Posteriori Error", Archives of Computational Methods in Engineering, volume 28, pages3433–3456, 2021.8.
- Amane Takei, Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, "High-frequency electromagnetic field analysis using pseudo-quadruple precisionin subdomain local solver", J. Advanced Simulation Science Engineering, Vol. 8, No. 2, pp 194-210, 2021.8.

- Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, Hongjie Zheng and Kaworu Yodo, "A Relation of Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems", International Journal of Computational Methods, Vol.18, No.7, 2150015 (14 pages), 2021.2.
- 12. 小松昭吾, 加藤千恵子, 青木滉一郎, "メンタルタフネス評価尺度の開発", スポーツ精神医学, Vol.18, pp.54-63, 2021.9.
- 13. Toshihiro Ashino, Nobutaka Nishikawa, Takuya Kadohira, Masahiko Demura, "Implementation of Materials Data Integration using Ontology", Supplementary Proceedings of the XXIII International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2021), Moscow, CEUR Workshop Proceedings 3036, 235-239, 2021.10.
- Koki Tazoe, Genki Yagawa, "Analyses of 3D non-planar fatigue crack propagation with smoothed particle hydrodynamics", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, https://doi.org/10.1111/ffe.13627, 2021.12.
- Masato Masuda and Yoshiaki Tamura, "Automatic flow visualization method using selforganizing map," Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME, Vol. 7, Paper No. 21-00336, 2021.12.
- 大塚佳臣、"レジ袋有料化に対する賛否に影響を与える因子とその影響度の評価"、土木 学会論文集 G(環境)、Vol.77、No.6、II\_1-II\_12、2021.
- 17. 大塚佳臣, 見島伊織, 鈴木健太, "地域水環境改善に対する支払い意志ならびに合併浄化 槽転換意思と住民の特性の関連評価", 月刊浄化槽, No.548, pp.16-19, 2021.12.

### 5.2. 学会発表

- Hibiki Kawano, Sho Yokota, Akihiro Matsumoto, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, "Design and Basic Experiment of Online Feedback Training System for Golf Putting", 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), DOI: 10.1109/SII52469.2022.9708876, 11-14 Jan. 2021.
- H. Kawai, R. Shioya, "High Performance Implementation for Small-sized Abstract Data Type in Numerical Simulation", WCCM/ECCOMAS 2020, Paris, France, Jan. 11-15, 2021.
- 村上 真, 生澤 隆広, "Variational Recurrent Neural Network を用いた人物動作生成モデ ルの構築", 情報処理学会 CGVI 研究会, オンライン, 2021.2.
- 5. 大塚佳臣, "海洋プラスチック問題の情報提供とレジ袋有料化賛否意識の関連評価", 第 55回日本環境学会年会講演集, p.79, オンライン, 2021.3.
- Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto and Kaworu Yodo, "A Revised Relation of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis",電気学会静止器/回転 機合同研究会,電磁界数値計算技術とその応用, 2021.3.
- 第宏杰,塩谷隆二,"油入変圧器内部異常の自動診断と評価",第26回計算工学講演会 2021.5.
- 金山寛,荻野正雄,杉本振一郎,淀薫,"BDD-DIAGのdiagへの漸近的収束性 第2報", 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD33)講演論文集, pp.335-338,2021.5.
- 杉本振一郎,武居周,荻野正雄,"数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析の検討", 第 26 回計算工学講演会論文集,オンライン,2021.5.
- 10. 河合浩志, "大規模構造解析システム ADVENTURE のベクトルプロセッサへの移植と 性能評価", 第 26 回計算工学講演会論文集, JSCES (オンライン), 2021.5.
- 11. 河合浩志, "メニーコア環境のためのスカイラインソルバーの効率化について", 第 26 回計算工学講演会論文集, JSCES (オンライン), 2021.5.
- Chieko Kato, Koichiro Aoki, "Self-expression and Interaction Through Mediation of Body Movement: Analysis on Psychological Change of Participants in Dance Movement Therapy", The first International Digital Round Table of SIPE, June 25, 2021.
- 13. 石垣優弥, 横山真男, 弦楽四重奏におけるアンサンブルの精度の解析, 第131 回音楽情報科学研究会(音学シンポジウム), 2021.6.

- 鈴木大河,横山真男,汎用敵対的生成ネットワークにより生成された旋律画像の補正, 第131回音楽情報科学研究会(音学シンポジウム),2021.6.
- 15. Tomoya Oguri, Sho Yokota, Akihiro Matsumoto, Daisuke Chugo, Satoshi Muramatsu, Hiroshi Hashimoto, "Development of Robotic IV Pole moving side by side with Human: First report: Design of the first prototype and forward moving experiment -", 2021 14th International Conference on Human System Interaction (HSI), DOI: 10.1109/HSI52170.2021.9538675, 8-10 July 2021.
- 16. Daisuke Chugo, Shunsuke Yamada, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin Hua She, Hiroshi Hashimoto, "Mobile Robot Navigation Considering How to Move with a Group of Pedestrians in a Crosswalk", 2021 14th International Conference on Human System Interaction (IEEE HSI), DOI: 10.1109/HSI52170.2021.9538660, 8-10 July 2021.
- 17. Yiqing Zhao, Yasuhiro Shindo, "Development of deep thermal system for locomotive syndrome", ICEAA-IEEE APWC-USNC URSI RSM 2021, Honolulu, Hawaii, USA, August 9-13, 2021.
- Shosuke Miyahira, and Terutaka Fujioka, "Assessment of a Thermal Fatigue Test Using Open Source CAE and Elastic FEA-based Simplified Method", FFW 2021 (online), 2021.8.
- Buhua Li and Terutaka Fujioka, "Simple Fatigue Crack Propagation Evaluation by Enhanced Reference Stress Method Using Open Source CAE", FFW2021 (online), 2021.8.
- Shin-ichiro Sugimoto, Amane Takei and Masao Ogino, "Study on Parallel Coupled Analysis of High-Frequency Electromagnetic Field and Heat Conduction Problems of Numerical Human Body Model", The 40th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology (JSST2021), pp.360-365, Online, 2021.9.
- Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto and Kaworu Yodo, "Positivedefiniteness of the Coarse Matrix in BDD-DIAG of a Perturbed Magnetostatic Problem", 日本 機械学会 第 34 回計算力学講演会(cmd 2021), 2021.9.
- 22. 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄, "数値人体モデルの高周波電磁界-熱伝導連成解析に関する検討", 日本機械学会 第34回計算力学講演会(CMD2021),4p, オンライン,2021.9.
- 杉本振一郎, "交流電流による誘導加熱の渦電流-熱伝導連成解析に関する検討",日本機械学会第34回計算力学講演会(CMD2021),4p,オンライン,2021.9.
- 24. 河合浩志,"領域分割法のベクトルプロセッサ型アクセラレータへの移植",日本機械学会第34回計算力学講演会(CMD2021),4p,オンライン,2021.9.
- 25. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto and Kaworu Yodo, "A Sufficient Condition for Positive-definiteness of the Coarse Matrix in BDD-DIAG of a Perturbed Magnetostatic Problem", 電磁界数値計算技術とその応用, 電気学会静止器/回転機合同

研究会,2021.9.

- 横山真男, "CT スキャンを用いたヴァイオリン内部形状の計測", 可視化情報シンポジ ウム, 2021.9.
- WANG Xuantong, 西川可穂子, 大塚佳臣, "COVID-19 パンデミック下における消費者意 識の変化と中食利用行動の変容", 第 49 回環境システム研究論文発表会講演集, p.199, オンライン, 2021.10.
- Kazuki Yamada, Sho Yokota, Akihiro Matsumoto, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, "Development of a Walking Promotion Device using Arm Swing Induced by Parametric Excitation: Third report: Evaluation on experimental results in actual walking", IECON 2021 -47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589166, 13-16 Oct. 2021.
- Jinhua She, Hipolito Guzman-Miranda, Victor Huang, Allen C. Chen, Stamatis Karnouskos, Larisa Dunai, Alin Tisan, Sho Yokota, "A Cross-Disciplinary View of Industrial Electronics: Change, Chance, and Challenge", IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589742, 13-16 Oct. 2021.
- Allen C. Chen, Sho Yokota, Victor Huang, Jinhua She, "An Overview of Standards in Modern Human Factors", IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589451, 13-16 Oct. 2021.
- 31. Mitsuhiro Suzuki, Sho Yokota, Akihiro Matsumoto, Daisuke Chugo, Hiroshi Hashimoto, "A Control Model for following Target Inclination Angle in Lateral Direction for Omni-Directional Low-Floor Mobility", IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589749, 13-16 Oct. 2021.
- 32. oshiomi Otsuka, "Evaluation of the effect of ICT in education on the academic literacy of high school students", 9th International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW 2021), pp.305-308, Online, 2021.11.
- Toshihiro. Ashino, N. Nishikawa, T. Kadohira, M. Demura, "Implementation of Ontology-Based Data Integration for Materials Data", MRM 2021, Materials Research Meeting 2021, Yokohama, 2021.12.
- 34. 杉本振一郎, "交流電流による誘導加熱の渦電流-熱伝導連成解析に関する初期検討",
   第 30 回 MAGDA コンファレンス in 広島(MAGDA2021) ~電磁現象及び電磁力に関 するコンファレンス~講演論文集, pp.111-112, オンライン, 2021.12.
- 35. 井上拓海,藤岡照高, "スモールパンチ試験の再現解析",オープン CAE シンポジウム
   2021,オープン CAE 学会,オンライン,2021.12.

- 李博華,藤岡照高, "オープンソース CAE を用いたき裂進展の簡易評価",オープン CAE シンポジウム 2021,オープン CAE 学会,オンライン, 2021.12.
- 37. 河野悟生,中後大輔,村松聡,横田祥,橋本洋志,"LRFの受光強度情報を用いた歩道に おける路面凹凸の検出法",第22回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテ グレーション部門講演会,オンライン, pp. 2619-2621, 2021 年 12 月 15-17 日.
- 38. 青木舜哉,横田祥,松元明弘,中後大輔,橋本洋志,"積載物の重量・搭載位置によらず 一定の操作性を提供する台車の開発",第22回 公益社団法人 計測自動制御学会 シス テムインテグレーション部門講演会,オンライン,pp. 2614-2618, 2021 年 12 月 15-17 日.
- 39. 細淵雅紀, 横田祥, 松元明弘, 中後大輔, 橋本洋志, "視覚障がい者の食事支援における クロックポジション提示システムの開発", 第 22 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, オンライン, pp. 2603-2605, 2021 年 12 月 15-17 日.
- 40. 鈴木唯羽,中後大輔,村松聡,横田祥,橋本洋志,"身体負荷に基づいた動作状態のフィ ードバック提示による起立支援システムの開発",第 22 回 公益社団法人 計測自動制 御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン,pp. 2593-2596, 2021 年 12月 15-17 日.
- 41. 宮崎裕也,中後大輔,村松聡,横田祥,余錦華,橋本洋志,"下肢リハビリ機器の負荷設 定における歩行筋との関係",第22回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムイン テグレーション部門講演会,オンライン,pp. 2589-2592, 2021 年 12 月 15-17 日.
- 42. 鮎田裕貴,奥田耕平,川本瑛祐,村松聡,稲垣克彦,中後大輔,横田祥,橋本洋志,"林業 従事者の安全性向上のための林業管理システムの研究",第 22 回 公益社団法人 計測 自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン, pp. 2583-2588, 2021 年 12 月 15-17 日.
- 43. 倉澤一詩,村松聡,稲垣克彦,中後大輔,横田祥,橋本洋志,"風景画像を用いたトポロジカルマップによる自律移動ロボットの研究",第 22 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン, pp.2579-2582,2021年12月15-17日.
- 44. 矢部真也,松元明弘,横田祥,"案内ロボットのシステム設計",第 22 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン, pp. 2559-2561,2021 年 12 月 15-17 日.
- 45. 高宇翔, 中後大輔, 村松聡, 横田祥, 橋本洋志, "人の密度を考慮する複数サービスロボ ットの協調ナビゲーション", 第 22 回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムイン

テグレーション部門講演会,オンライン, pp. 279-283, 2021 年 12 月 15-17 日.

- 46. 劉斌,中後大輔,村松聡,横田祥,橋本洋志,"スクランブル交差点における歩行者流動のモデル化",第22回公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン,pp.273-278,2021年12月15-17日.
- 47. 山根佳恭,村松聡,稲垣克彦,中後大輔,横田祥,橋本洋志,"オノマトペを用いた協働 ロボットのための動作インタフェースの研究",第 22 回 公益社団法人 計測自動制御 学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン,pp.259-261,2021 年 12 月 15-17 日.
- 48. 天野岳昂,松元明弘,横田祥,"英単語発話時の口腔周りの筋電計測",第 22 回 公益社
  団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,オンライン, pp. 252-255,2021 年 12 月 15-17 日.
- 49. 趙一清, 新藤康弘, 加藤和夫, "両脚の深部集中加温を目的とした矩形型空胴共振器の 開発", 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会, 2021.12.

### 5.3. 招待講演

- 横山真男、ヴァイオリンのモード振動における実験と数値シミュレーションの比較検 証(招待講演)、日本音響学会 2021 年春季研究発表会、2021.3.
- 2. 杉本振一郎, "階層型領域分割法および並列電磁界解析への適用", 第1回 JACM 賞受 賞者セミナー, オンライン, 2021.
- Toshihiro Ashino, "Materials Ontology: An Infrastructure for Exchanging Materials Information and Knowledge", Workshop on Ontologies for Materials-Databases Interoperability (OMDI2021), Linköping, 2021.10.
- 鄭宏杰, "舞踊の動作解析に関する解説",能と中国舞踊から学ぶダイバーシティ,東洋 大学総合情報学部グローバル化,ダイバーシティ&インクルージョン推進事業,2021.11.
- 5. 矢川元基、計算力学は SDGS へ貢献してきたか? 日本学術会議第11回計算力学シ ンポジウムパネル討論, 2021.12.6 (東京).
- 6. 杉本振一郎, "コンピュータシミュレーションの活用", 2021 年度第1回電気学会東北支 部青森支所学術講演会, 八戸, 2022.

### 5.4. 総説・解説

なし

### 5.5. 出版

- Genki Yagawa and Atsuya Oishi, "Computational Mechanics with Neural Networks", Springer, 2021.3.
- 2. 藤岡照高, "つり合いから読み解く材料力学", コロナ社, 2021.10.

### 5.6. 受賞

1. 李博華,オープン CAE 学会学生表彰, 2021.12.

### 6. 終わりに

本報は、2021 年度の活動を取りまとめたものである. なお、2021 年度中に予定されて いるシンポジウムに間に合わせるために原稿締め切りを 2022 年 2 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.さらに,計算力学とAIを関連づけた研究も盛んになってきてい る.社会不安が増す中で,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 2021 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

2022年3月発行

禁無断転載