

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

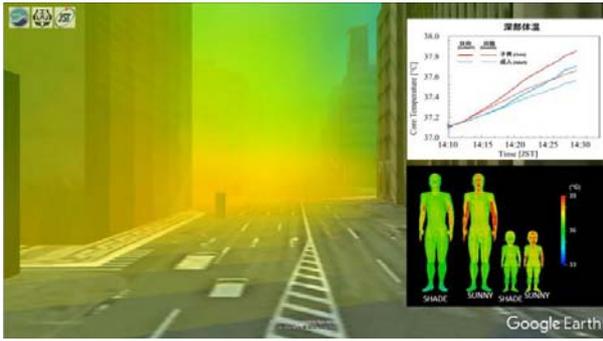
ISSN 1344-8692 Vol. 60, No. 253  
2021. 10

*Thermal Science and Engineering*

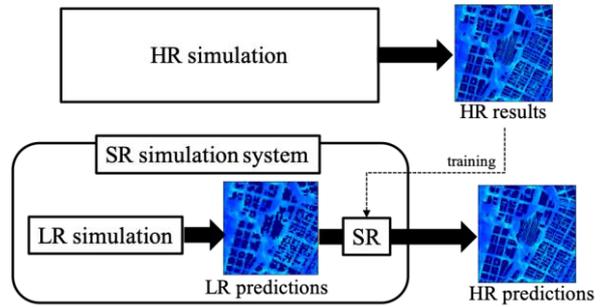
ISSN 0918-9963 Vol. 29, No. 4  
2021. 10

*HSTJ*

◆特集：データ駆動科学と熱・流体工学



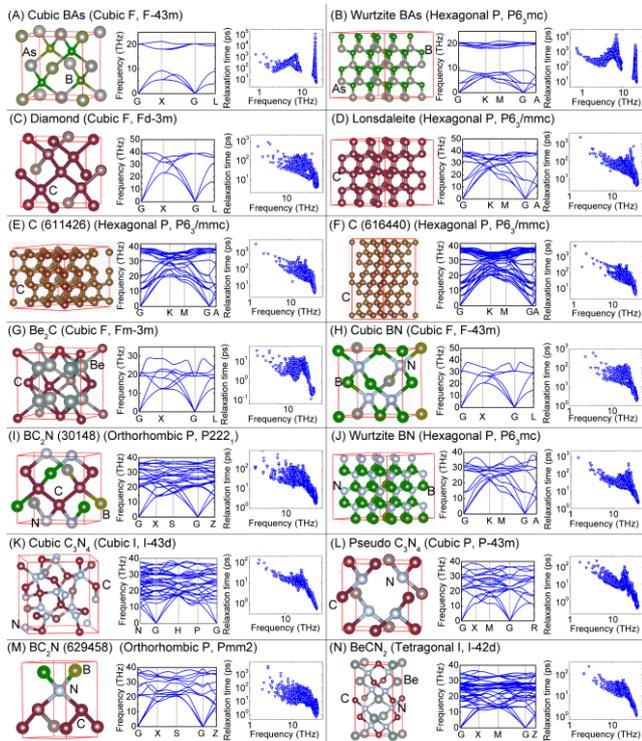
左：微気象モデルと人体温熱応答モデルの融合



右：超解像技術による街区微気象の超高速予測

数メートル解像度の微気象予測シミュレーションと人体温熱応答シミュレーション（名古屋工業大学平田晃正教授）の融合により，都市街区内の熱中症リスクを定量評価することに成功した．左図は東京銀座通りを歩く歩行者を対象として，街区内の詳細な微気象特性を考慮した上で個人単位の熱ストレスを定量評価した例であり，熱中症リスク低減サービスの端緒を開いた．右図は，深層ニューラルネットワークを用いた超解像（SR, Super-Resolution）技術により，スーパーコンピュータによる膨大な計算を必要とする高解像度（HR, High-Resolution）の微気象予測結果を PC 上で実行可能な低解像度（LR, Low-Resolution）シミュレーション結果から超高速に生成した例である．

（特集記事「深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区熱環境のリアルタイム予測（大西 領, 安田 勇輝）」より）



左：60,000 種類以上の候補からスクリーニングした熱伝導率が高い化合物結晶の構造，フォノン分散関係，緩和時間

構成元素に付随する 58 種類の特徴量を用いて 290 の結晶化合物の構造や組成に由来する基礎的な記述子を抽出した．この 290 次元の記述子ベクトルと，調和格子動力学から計算した 320 の結晶化合物の散乱位相空間についてピラミッド型ニューラルネットワークによって事前トレーニングし，得られた出力層以外のサブネットワークを転移して，熱伝導率の予測モデルをトレーニングした．

左図はこの予測モデルを用いて Material Project データベースにある 60,000 種類を超える結晶化合物の構造・組成情報をもとにスクリーニングすることで，高熱伝導率の結晶化合物を探索した結果であり，熱伝導率が高いと予測されたトップ 14 の化合物のリストである．

（特集記事「伝熱マテリアルズ・インフォマティクスの進展（塩見 淳一郎）」より）

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

大西 領, 安田 勇輝 (東京工業大学), 塩見 淳一郎 (東京大学) …………… 表紙裏

### 〈追悼〉

岐美 格先生を偲んで …………… 芹澤 昭示 (京都大学名誉教授) …………… 1  
 岐美 格先生のご逝去に寄せて …………… 小澤 守 (関西大学名誉教授) …………… 5

### 〈日本伝熱学会創立 60 周年記念〉

日本伝熱学会創立 60 周年記念事業 …………… 平井 秀一郎 (東京工業大学) …………… 8

### 〈特集：データ駆動科学と熱・流体工学〉

特集「データ駆動科学と熱・流体工学」にあたって …………… 小田 豊 (関西大学) …………… 11  
 機械学習縮約モデルを用いた革新的流れ制御に向けて  
 …………… 深淵 康二 (慶應義塾大学), 深見 開 (カリフォルニア大学ロサンゼルス校) …………… 12  
 伝熱マテリアルズ・インフォマティクスの進展 …………… 塩見 淳一郎 (東京大学) …………… 16  
 航空機エンジン用ステージング燃焼器内に形成される燃焼振動の予兆検知  
 …………… 後藤田 浩, 新地 悠平 (東京理科大学),  
 庄司 烈, 吉田 征二 (宇宙航空研究開発機構) …………… 23  
 深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区熱環境のリアルタイム予測  
 …………… 大西 領, 安田 勇輝 (東京工業大学) …………… 30  
 機械学習を用いた気液二相流の流動様式識別 …………… 三輪 修一郎 (東京大学) …………… 36  
 熱交換器の管端溶接部における AI を活用した溶接欠陥判定システム  
 …………… 和田 貴裕, 井岡 良太, 篠田 薫, 安部 正光 (日立造船株式会社),  
 服部 洋 (株式会社ニチゾウテック) …………… 44

### 〈ヒストリーQ〉

人と熱との関わりの足跡 (その 8) - 日本近代製鉄の発祥 釜石から八幡へ -  
 …………… 森 一欽 (釜石市文化スポーツ部世界遺産課), 星 朗 (東北学院大学) …………… 50

〈行事カレンダー〉 …………… 57

### 〈お知らせ〉

第 59 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 …………… 58  
 優秀プレゼンテーション賞 (第 59 回日本伝熱シンポジウム) について …………… 60  
 日本伝熱学会主催オンライン講習会「計測技術～測定の基礎と設計応用～」受講者募集のご案内 …… 61  
 ・事務局からの連絡 …………… 62

〈編集出版部会ノート〉 …………… 65

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Ryo ONISHI, Yuki YASUDA (Tokyo Institute of Technology)  
Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo) ..... Opening Page

< Eulogy >

In Memory of Professor Itaru Michiyoshi  
Akimi SERIZAWA (Kyoto University, Professor Emeritus) ..... 1  
To the Memory of Professor Itaru Michiyoshi  
Mamoru OZAWA (Kansai University, Professor Emeritus) ..... 5

< The 60<sup>th</sup> Anniversary >

HTSJ 60<sup>th</sup> Anniversary  
Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology) ..... 8

< Special Issue: Data-Driven Science for Thermal and Fluids Engineering >

Preface to the Special Issue on “Data-Driven Science for Thermal and Fluids Engineering”  
Yutaka ODA (Kansai University) ..... 11  
Towards an Innovative Flow Control with Machine Learning-Based Reduced-Order Modeling  
Koji FUKAGATA (Keio University),  
Kai FUKAMI (University of California, Los Angeles) ..... 12  
Progress in Materials Informatics for Heat Transfer  
Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo) ..... 16  
Early Detection of Combustion Oscillations in a Staged Aircraft Engine Model Combustor  
Hiroshi GOTODA, Yuhei SHINCHI (Tokyo University of Science),  
Takeshi SHOJI, Seiji YOSHIDA (Japan Aerospace Exploration Agency) ..... 23  
CNN-Based Super-Resolution Simulation for Realtime Prediction of Urban Heat Environment  
Ryo ONISHI, Yuki YASUDA (Tokyo Institute of Technology) ..... 30  
Gas-Liquid Two-Phase Flow Regime Identification using Machine Learning Techniques  
Shuichiro MIWA (The University of Tokyo) ..... 36  
Welding Defects Detection System Utilizing AI in Tube-to-Tubesheet Weld Joints of Heat Exchangers  
Takahiro WADA, Ryota IOKA, Kaoru SHINODA, Masamitsu ABE (Hitachi Zosen Corporation),  
Hiroshi HATTORI (NICHIZO TECH INC.) ..... 44

< History Q >

Footprints of the relationship between humans and heat (Part 8)  
-Origin of Japanese modern iron manufacture “From Kamaishi to Yahata”-  
Kazuyoshi MORI (World Heritage Division, Kamaishi City),  
Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University) ..... 50

< Calendar > ..... 57  
< Announcements > ..... 58  
< Note from the JHTSJ Editorial Board > ..... 65

## 岐美 格先生を偲んで

*In Memory of Professor Itaru Michiyoshi*

芹澤 昭示 (京都大学名誉教授)

*Akimi SERIZAWA (Kyoto University, Professor Emeritus)*

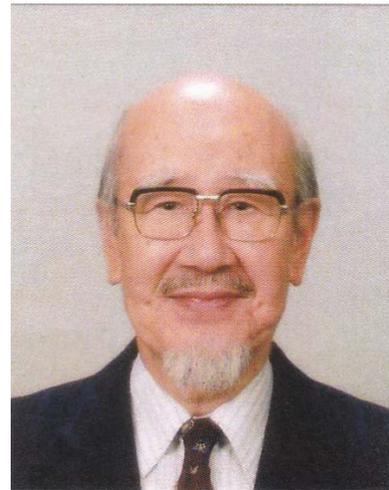
*e-mail: ser3811@nifty.com*

第24代会長の岐美 格先生が2021年6月7日に急性肺炎のため94歳で永眠されました。先生のご遺志で近親の方だけでご葬儀が行われたとのこと。岐美先生より薫陶を頂いた一人として、先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

岐美先生は今年の初めまではお元気でおられ、お一人で杖を使って散歩をされたり、奥様と一緒に外食を楽しんでおられたとお聞きしています。2月にご自宅の玄関で転倒されたのが原因で股関節や脊椎を骨折され、入院治療と自宅療養を繰返しておられたようです。私も含めて岐美研究室の卒業生の多くはご高齢の岐美先生がそれまでと変わらずお元気にお過ごしのこととだけ思っていただけに、突然の訃報に接し、驚きと深い悲しみとともに非常に大きなショックを受けています。

岐美先生は1926年6月27日のお生まれです。満95歳の誕生日を目前にしてお亡くなりになったこととなります。先生は大変温厚な方で、お会いすると何時もニコニコ笑顔をされておられました。先生はお酒をこよなく愛され、その思い出が沢山あります。

先生は昭和23年3月に京都大学工学部機械工学科をご卒業後、大学院に進学され、昭和28年に京都大学工学部講師、昭和31年に工学部助教授(後に工学研究所助教授に配置換え)を経て、昭和36年に34歳の若さで教授に昇任(工学部原子核工学科)、平成元年に松江工業高等専門学校長に配置換えになり、平成7年3月にご退職されるまでの42年間一貫して教育・研究に人生を捧げてこられました。その間、同志社大学、福井大学、大阪府立大学、神戸大学大学院等の非常勤講師を務められるとともに、日本伝熱研究会(現在の日本伝熱学会)会長、日本機械学会副会長、日本原子力学会理事、日本混相流学会会長を歴任されています。



岐美 格先生

また、一方では、文部省学術審議会委員や日本学術会議熱工学研究連絡委員会委員、国立高等専門学校協会副会長などの公職に就かれ、我が国の学術行政に尽力されるとともに、文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究熱班代表、エネルギー重点領域研究運営委員として我が国のエネルギー総合研究を先導して来られました。

岐美先生はこのように40有余年の長きにわたる学術研究や教育、そして学術行政において、常に先見的、先導的立場から、新しい学問領域の開拓と体系化、新理論の展開、実験技術の開発とデータの集積を行い、学術及び工学の発展に大きく貢献され、その学問領域の広さと奥行き、そして人間的な幅の広さは、なかなか凡人には真似のできない、ある意味では岐美先生独特の哲学があったように思われます。平成11年の春の叙勲では、このような岐美先生のご業績に対して、勲三等旭日中綬章が授与されています。

岐美先生のご専門は伝熱学、熱流体工学、エネルギー変換工学、原子炉工学、混相流科学等々の

多岐にわたりますが、恐らく先生ご自身にとって最もやり甲斐のあった仕事は、ご自身の恩師である菅原菅雄先生（伝熱研究会第6代会長、京都大学）との共著論文に代表される

### 1. 自然対流熱伝達に関する研究

### 2. 凝縮熱伝達に関する研究

および岐美先生が工学研究所時代に佐藤 俊先生（第16代会長）らと一緒に研究された

### 3. 沸騰とバーンアウトの研究

であったことと思います（いずれも日本機械学会論文集）。

自然対流熱伝達に関するご研究では、油、水、空気及び液体金属などの任意の流体が鉛直または水平な壁面に沿って層流あるいは乱流となって自然対流する場合の熱伝達について、理論的、実験的に研究されました。特に、壁面の温度が非定常に変化する場合や強制対流熱伝達が共存する場合などにも適用できる一般的な理論式を導くと共に、その妥当性を実験的に検証されておられます。

凝縮熱伝達に関するご研究では、水蒸気が鉛直壁に滴状凝縮する場合の熱伝達を理論的に解析し、真空時並びに水蒸気が強制流動する場合の実験を行い、理論式の適用性を確かめると共に、滴状凝縮を維持する方法についても研究されました。

沸騰現象とバーンアウトのご研究は、原子炉の出力逸走事故時の過渡沸騰に関し、初気泡発生に至るメカニズムを理論的に提案し、自然循環あるいは強制循環によって冷却された模擬燃料棒がバーンアウトするまでの諸現象を理論的及び実験的に研究されたもので、当時としては大変先駆的な研究でした。

研究室のコンパや飲み会の席上、岐美先生から当時の話として、手廻し計算機であるタイガー計算機を使って微分方程式を解いたこと、沸騰開始条件やバーンアウトの研究を一緒にされた佐藤先生や、竹内貴一郎先生（後に同志社大学）、そして近藤奎五氏のお名前をしばしば口にされておられたのが強く印象に残っています。

原子核工学教室に赴任された後はガス、水、有機液体、液体金属を冷却材とした原子炉、及び、流動燃料型原子炉の流動と熱伝達に関連して、内部発熱を伴う管内流の熱伝達や膜沸騰現象、高温ガスの流動と熱伝達、水銀やビスマス、カリウム、ナトリウム、NaKなどの液体金属の沸騰現象、気

液二相流の流動と熱伝達に関するご研究等々の基礎研究においても多くの業績を残されました。

私自身は岐美先生の研究室で学部、大学院（修士課程および博士課程）、そして日本学術振興会奨励研究員時代を含めて8年間を過ごさせて頂き、ご指導頂きました。私が京都大学工学部原子核工学科に入学したのは昭和37年4月ですが、当時の教室主任が岐美先生でした。新入生へのガイダンス時に教室主任として挨拶された岐美先生は原子核工学科教授に就任された翌年の35歳の若い気鋭の教授で、冒頭に掲げた岐美先生のお写真から受ける印象とはまるで違って、大変むっつりした印象でした。その後、学部3回生で初めて岐美先生の授業を受けることになりました。岐美先生の講義は朝一番の講義で原子炉工学を教えて頂きました。当時は今のようにゼロックスなどの便利な複写機はなく、アンモニヤの匂いの残る青焼きの図面コピーが授業の度に沢山配布され、岐美先生は一言一句の文章を黒板に丁寧に書きになり、我々学生は必死にそれをノートに書き写したのを記憶しています。当時、原子力は時代の花形であり、膨張する将来の日本の電力供給を背負って立つ主力エネルギー源としてバラ色の夢を人々に感じさせる魅力ある分野でした。後に福島第一原発事故のような重大な事態を引き起こす事になるなどとは当時想像すらしませんでした。

私は3回生から岐美先生の研究室配属となりましたが、4回生の卒業研究として気液二相流の蒸気ボイド率に関する実験研究に従事するようになり、そこで岐美先生の直接のご指導を頂くことになった訳です。岐美研究室には原子核工学科第1期生の中島 健（現）神戸大学名誉教授が博士課程に在籍しており、文字通り兄貴分として色々ご指導頂きました。当時原子力は時代の寵児でしたから、国からの研究費も潤沢であったようで、大学の原子力関連講座には大型の特別予算が次から次へと付いた時代でした。大学院修士課程に進学する頃には岐美研究室にも大型予算による原子動力実験装置が宇治キャンパス内に完成し、沸騰流体ループ室には内部発熱を伴う伝熱実験装置としてのスラリーループとディフェニールを作動流体とする有機液体沸騰伝熱実験ループが、そして隣の液体金属ループ室にはビスマス伝熱実験装置と最大磁場1テスラーの電磁石付きの水銀ループ、

そして高温ガスループ室にはアルゴンガスを作動流体とする MHD 発電ループとプラズマ実験装置、高温ガス伝熱・流動実験装置等の大型実験装置および可視観察用のマッハツエンダーとシュリーレン装置が設置され、学生・院生の多くは宇治の実験室に住み込むかのように寝泊まりし、交替で夕食を作り実験に励んでいました。

当時、岐美先生は時折吉田キャンパスから大学のシャトルバスを利用して宇治の実験室に顔を出され、実験をしている私の傍に立ち、気液二相流の流れを観察され、「研究に際して大事なことは、現象を自分の目でしっかり観察し、その中から物理を考察し、謙虚に自然を理解することである」と常々言われておられました。また、実験データを取るものの大切さを学生に諄々と教えてくれました。さらに、自然現象の織りなす美しさを見て「君いー、美しいものは本当に素晴らしい」と口癖のように言われていたのを今でも思い出します。この言葉こそ、岐美先生の学問をする上での哲学あるいは信念にも通ずる基本的な姿勢であったと思います。後に岐美先生が松江高専校長として転出された後に松江高専研究紀要にお書きになった論文「枕草子と徒然草における自然」（平成5年3月）の中でも、その書き出しに「枕草子と徒然草に書かれている自然について、自然を見つめる「め」や自然に対する「こころ」を浮き彫りにしつつ、考察を試みようとするものである。」とお書きになっています。科学する者の大切な心構えとして、岐美先生から頂いた貴重なお教えと思い、今も心に大切にしまっています。

岐美先生は大変らかな性格の先生でした。私が助教時代、先生が文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究の中の「熱エネルギーの高効率利用に関する研究（総括班）」（1984～1986）の代表をされておられた関係から、西川兼康先生、森康夫先生、甲藤好郎先生等々の大先生方や、その後本会の会長を歴任された先生方多数が参加された合同討論会や研究発表会、そしてその後の懇親会、さらには街中に出での飲み会等々の会場やスケジュールなどを私の思いで勝手に設定させて頂いていましたが、岐美先生から一言も注文を付けられることはありませんでした。先生には大変失礼な言い方になりますが、下にいる者としてはこの上なくやり易い先生でした。これも、まさに

岐美先生の大きなお人柄によるものと、今になってつくづく感謝している次第です。

地方で学会が開催される場合には、学会が終わると必ずや岐美先生を引っ張り込んで研究室の仲間達と一緒に温泉に浸かり、同宿し、お酒を酌み交わしながら研究話や雑談を楽しんだ思い出が沢山あります。また、研究室のコンパの後、先生の行きつけの飲み屋さん（時には京風の小料理屋さんや割烹にも）連れて行って頂いてご馳走になったりもしました。ある時、研究室のコンパに続く2次会で飲んだ後、私が車を運転し先生をご自宅にお送りする途中、深夜の鴨川堤防で検問に引っかかったことがありました。当時の京都人には学生を特別扱いする風習があったのか、検問の警察官も実に鷹揚で、「先生をご自宅までお送りするところです」と言うのと「気をつけて運転して帰ってください」と飲酒運転を咎められる事もなく無罪放免、後部座席でうとうとしておられる岐美先生の姿をミラー越しに眺めて過ごした記憶があります。また、舞鶴での船釣りにお誘いし、獲れ過ぎた大物カレイ数十枚を全部先生に持ち帰って頂いたところ（先生以外は全員独身者のため）、ご近所に配っても処理できずに大変困った、と後で先生からお聞きし、申し訳ないことをしてしまったと思いましたが後の祭りです。

このように師弟の関係を超えて岐美先生のお人柄に触れる機会は私だけでなく、多くの門下生が経験したことだと思います。そんな訳で、色々な節目に、多くの門下生が先生の周りに何時も自然と集まってきていました。古希のお祝い、叙勲のお祝い、そして米寿のお祝い等々、誰が言うでもなく自然の流れとして企画され、多くの門下生か



「米寿祝いの会」で挨拶される岐美先生



「岐美先生を囲む会」(2019.11)

ら祝福されてきました。岐美先生を囲む集まりでは何時も決まってその会合の締めくくりに、先生を囲んで出席者全員が輪になって参加し、岐美音頭なる踊りを踊るのが恒例でした。そうした先生の気取らない一面も卒業生に慕われる理由であったかも知れません。

実際に、ほぼ毎年の恒例行事として卒業生の有志(皆常連ですが)が集まり、岐美先生を囲んでの飲み会が鴨川の畔の料亭で持たれてきました。岐美先生は、年々師弟間の年の差を感じさせないような風貌になってくる教え子達と楽しそうにお酒を酌み交わし、雑談を楽しんでおられました。昨年はコロナ禍で先生を囲む会は中止となり、代わりに昔の学生時代を振り返った思い出の文集を作り岐美先生に謹呈する事になりました。岐美先生はそれを楽しそうにお読みになっていたと後日お聞きしました。この文集が岐美先生との交流の最後になってしまったことはこの上なく寂しいことです。しかし、この文集には岐美先生ご自身も一文をお書きになっており、そこには岐美先生らしい、さらりとした素朴なユーモアが含まれています。一部をご紹介します。

## 『無題』

岐美 格

「お名前、何と、お読みするのでしょうか、キミさんで宜しいのでしょうか、」

「讃岐のキ、美濃のミですから、たしかに。でも、岐はワカレミチのミチ、美はウツクシイですからヨシ。それでミチヨシと言います。」

「むつかしいですね。かんたんには読めませんね。」

「ハイ。私は名刺に、ミチヨシと仮名づけしました。そう言えば、私の曾祖父は、迷子札に仮名づけしていたそうです。」

今もその迷子札が残っているが、それには、京都府山城國愛宕郡大宮村式百七番戸 岐美 實と、もう一つには 府社今宮神社前 東側黒門邸宅と墨書、二つの袋を紐でつなぎ重ね合わせ、首からかけるようになっている。中にはお守りが複数体おさめてある。

昔から何回となく、繰返されてきた会話である。

ローマ字では Michiyoshi である。“Advances in Heat Transfer”の著者名索引には、Michiyoski となっていた。ロシア人のようである。昔 中学校の教練の教官は、ミチヨシのチを発音しないで「ミヨシ」と私をよんでいて、卒業するまで変えなかった。キットそれが正しいんだと思っていたのであろう。(原文のまま) —以下省略—

改めて、岐美先生の長年のご指導に対し深く感謝申し上げますとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。

(注) 岐美先生がお書きになった論文「枕草子と徒然草における自然」(全文)は京都大学機械系同窓会「京機会」の月刊ニューズレター京機短信特別号 No.359 でご覧頂けます。

[https://keikikai.jp/wp-content/uploads/2021/09/tanshin\\_no359.pdf](https://keikikai.jp/wp-content/uploads/2021/09/tanshin_no359.pdf)

岐美 格先生のご逝去に寄せて  
*To the Memory of Professor Itaru Michiyoshi*

小澤 守 (関西大学名誉教授)

*Mamoru OZAWA (Kansai University, Professor Emeritus)*

*e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp*

さる6月12日、岐美研OBの芹澤昭示さんから著者のスマートフォンに久しぶりにショートメールが入った。岐美格先生が6月7日に急逝されたという内容であった。機械学会関西支部の商議員会にも伝熱学会関西支部の総会、講演討論会にもここ数年お見えにならなかったように思う。そこそこのお年だから京都での開催ならいざ知らず、大阪や神戸での会合へのご出席は無理なのかもしれないと、日ごろの雑務にかまけてとくに意識もしていなかったのは事実である。岐美先生のどこかウイットに富んだコメントや絶えずニコニコされていた先生の笑顔を思い出し、もうお会いすることもコメントをお聞きすることもできない寂しさを感じざるをえない。

岐美先生のご略歴や先生のご活躍の詳細は芹澤さんの追悼文をご覧くださいとして、著者は岐美研でも京大出身でもない外部の一人として、岐美先生に関わる思い出などを書かせていただき、先生に対する追悼文としたい。

著者が岐美先生を初めて認識したのは1974年の国際伝熱で、阪大石谷研のD1の時であった。たしか麴町会館ではなかったかと思うが、同じところに宿泊していた。国際伝熱会議(IHTC)は経団連会館で開催され、著者にとっても初めての国際会議出席であった。海外から著名な研究者、大学教授など大勢の人が参加し、国内からも伝熱関係者総出のような状況であった。あれがZuber、あれがStyrikovichか、Collierかといったまさしくお上りさんであったと記憶する。著者の所属していた石谷研、出身研である赤川研からもそれぞれ論文が採択されていた。沸騰二相流やプール沸騰関連の発表であった。このIHTCでは後に伝熱シンポジウムでも採用されたインフォーマルミーティングのセッションがいくつかあり、その内の一つが気液二相流関連であったように思う。そこで神戸大学時代の師匠赤川浩爾先生も岐美格先生も発

表をされた。内容は残念ながら全く記憶にない。記憶にあるのは、発表が終わっていたのかまだだったのかは定かではないが、話の切れ目に終了合図のベルがチンとなったものだから岐美先生はすかさず“Thank you”と話を終えられたことだけである。時間が超過してもしばらく話を続ける場合が多い中、違和感なく見事に時間通りに終わられたのを目の当たりにして、さすが偉い先生は違うなど感心したものである。著者は、講演とはかくあるべしと胆に銘じたが、銘じたはずの胆がいまや行方不明である。

それ以降、機械学会関西支部の講演会、伝熱シンポジウム、伝熱関西での会合や懇親会などで岐美先生には親しくお話をさせていただいた。著者は阪大で助手をやっていた1979年頃、石谷先生のお手伝いとして、第1回目の日米セミナー Two-Phase Flow Dynamics の事務局を担当した。海外からは亡き A. E. Bergles, J. Weisman, S. G. Bankoff, さらには R. T. Lahey, Jr., O. C. Jones, G. Yadigaroglu など、Weisman, Bankoff のお二人は別として、当時まだ40歳代で活発に研究活動を行っていた方々が参加した。実際、Berglesさんは後にASMEの会長も務めた。少々不鮮明であるが写真1はその時の記念写真である。写真の下に当時作成した人の配置を示している。岐美先生はWeisman夫妻のすぐ後ろに立っておられる。

同じ日米セミナーの第3回目が琵琶湖ホテルで岐美先生とO. C. Jonesさんがオーガナイザーとなって1988年7月に開催された(写真2)。著者は第1回、第2回(米国開催)では事務局を務めたが、このときには岐美先生や事務万端を担当された芹澤さんのご配慮で講演をさせていただいた。33年も前のことである。

岐美先生には石谷・赤川両師匠の企画する事業に積極的に協力していただいた。1982年に学術会議水理学水力学研究連絡委員会のもとに混相流小

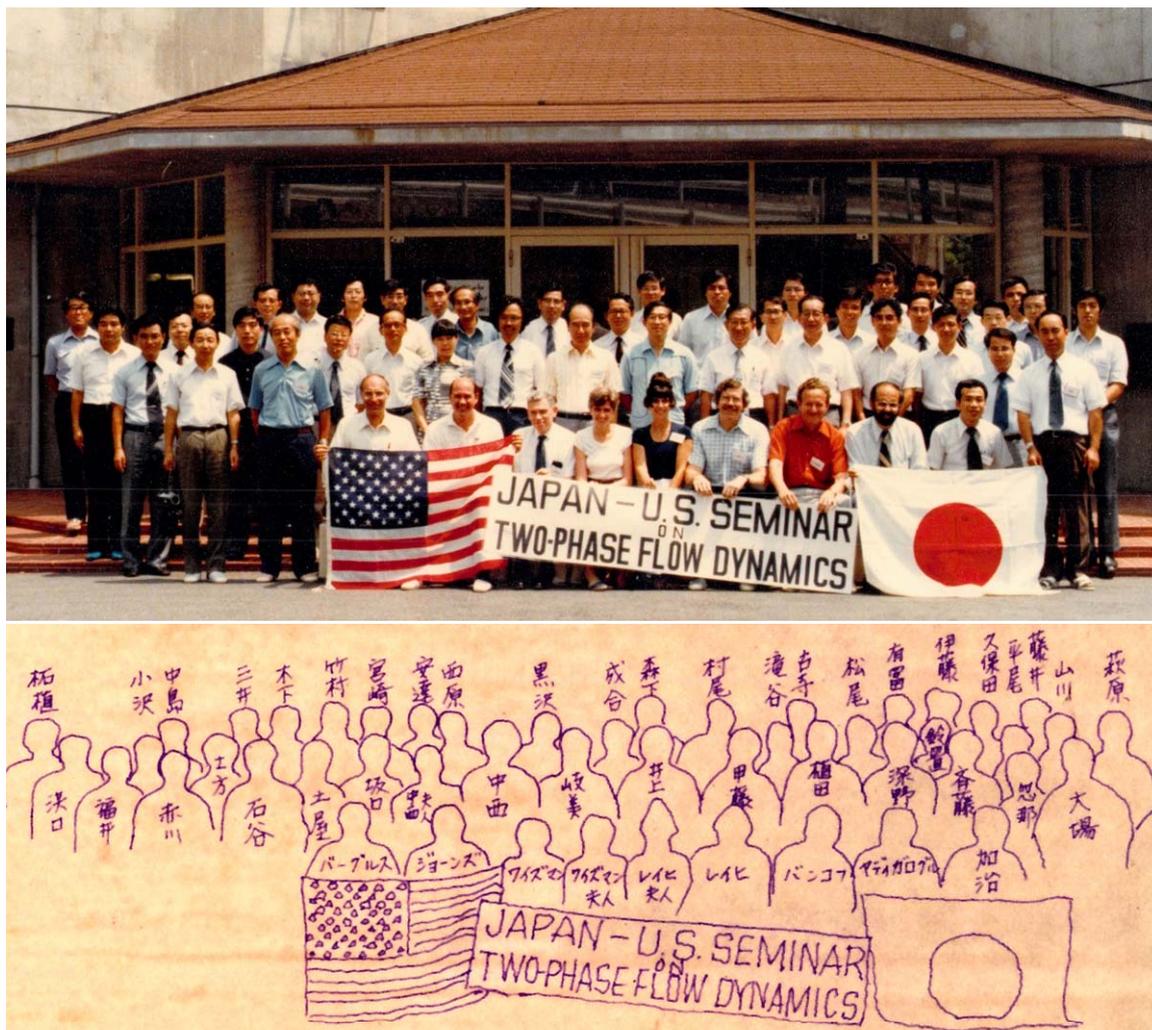


写真1 第1回二相流のダイナミクスに関する日米セミナー  
(1979年関西地区大学セミナーハウス 手書きの図は写真との対応関係で当時のもの)



写真2 第3回二相流のダイナミクスに関する日米セミナー（1987年，琵琶湖ホテルにて開催．岐美先生は佐藤泰生先生（熊大）の後ろに石谷先生と並んで立ち，二人の間に G. B. Wallis さんが見える）

委員会が組織され、以降、混相流シンポジウムを6回ほど開催したが、岐美先生は毎回の委員会に出席され、事業推進の力強い味方であった。なお委員会は、岐美先生のほかに委員長の赤川、発案者の石谷および植田辰洋、世古口言彦、加藤洋治、斎藤孝基、西川兼康、川島俊夫、岸力、中川博次、森川敬信、日野幹夫、玉井信行、豊倉富太郎、村上光清、志村博康、山本光男、中西重康の各先生方（順不同）によって構成され、混相流シンポジウム開催に多大なご協力を頂いた。いつも和やかな会合で、事務局を務めていて気持ちのいい委員会であった。毎回のシンポジウム企画において、委員の先生方には積極的に講師の選定を行っていただき、場合によっては自ら講演をいただいた。これらの委員の先生方の協力体制が混相流学会設立に大きく寄与したと思っている。

ふと気になって1977年刊行の機械学会二相流のダイナミクスに関する研究分科会編『気液二相流のダイナミクスに関する研究』の委員名簿を覗いてみたら、なんと岐美先生も委員であったし、佐藤俊先生や南山龍緒先生、既にかなりのお年であった田伏敬三先生等、多士済々であったことを改めて認識した。

法人化前の伝熱学会関西支部の総会で、著者が常任幹事を務めていた時だったと思う。2年に1度の伝熱セミナーの1年目（開催しない年）であったため、引当金を取り崩し、それを次年度のセミナーのための準備金として積み立てるという会計報告をしたときに、岐美先生が手をあげられ、「要するにセミナーに関しては引当金を取り崩し、それを引当金として組み込むという事業をやるのですね」とおっしゃった。当方、「はい」としか答えられなかった。また機械学会関西支部では著者が常務幹事を務めていたとき、商議員会、支部総

会などでちょっとした、しかしポイントをついたコメントや質問をされた。支部の運営上、大いに助けられたものである。

著者がまだ千里山の工学部にいたころ、東京で何の集まりであったか全く忘れたが、新幹線で芹澤（京都大）、三島（京都大）、片岡（大阪大）、小澤（関大）が一緒になり、持ち込んだビール片手に京都まで何かと議論した。何のことはない、岐美一門と石谷一門の集会であった。誰とはなしに、最近の学会で学生が講演をしてもしっかりした議論をしようとする、学生をいじめるみたいだし、結果的に親方が出てきて時間切れになる。これじゃいつまでたっても学生にとっては訓練にならない。そこで学生にしっかり話をさせ徹底的に議論をする、学生にとって非常に緊張する機会を作ろうということで早々に話がまとまり、大阪ー京都ー関西でOKKの会なるものをでっちあげ、3大学持ち回りで何度もやった。学生には「いじめる会」に思えたようで、通常の学会よりかなり緊張するとの評判さえ立った。このようないわば研究室間の私的な会合にも岐美先生は出席されていた。若い人たちが自由に議論をし、会が盛り上がるのを横で見ながら楽しんでおられたように思う。

佐藤、岐美などの先生方の名前をだしても若い伝熱諸氏にはほとんど実感が無いでしょうね。著者もすでに古希を過ぎたが、若い人たちが熱心に議論しているさまをニコニコとして眺めながら、時に岐美先生のように先を見通したコメントが出せるようにはなっていない。日ごろの不勉強のせいなのか、育ちが悪かったのかはともかく、情けない状況なのだ。今改めて自戒する次第である。

岐美格先生、本当に長い間お世話になり、ありがとうございました。心からご冥福をお祈りいたします。

## 日本伝熱学会 創立 60 周年記念事業

*HTSJ 60<sup>th</sup> Anniversary*

平井秀一郎 (東工大)

*Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology)*

*e-mail: hirai.s.aa@m.titech.ac.jp*

### 1. はじまり

2019 年の 2 月、伝熱学会の 57 期活動を総括する会議が東京で行われていた。2 年間の総務担当副会長の任期もあと 3 か月程度残っているだけであり、私としてはやれやれという思いで会議に参加していた。

その会議がおおかた終わりかけのころ、「2 年後に学会は 60 周年を迎える。何らかの行事をする必要がある。準備を考えると、今から担当を決めておいた方がいい」という発言があった。60 周年か、よくそんなスケジュールが頭に入っているな！と感心しつつ、企画部会長あたりがしきってするのであろう...とっていると、さきほどの発言をされた同人から「通常の理事以外に、特命理事というのを任命することができる、と定款にある」。そんな制度あったっけ？とっていると、「50 周年ほど派手にする必要はないが、特命理事は総務担当副会長経験者がいい」。あれよあれよと、平井、おまえがやれ、で決まってしまった[1]。

本稿は、60 周年記念事業を担当した顛末を時系列で記録として残すものである。私自身、担当するにあたって、40 周年、50 周年の「伝熱」の記事を読んだ。次の 70 周年を担当する方の少しでも参考になれば幸いである。

### 2. 何をするのか？

10 年前の 50 周年記念事業は、春の伝熱シンポとは別に、秋に盛大に執り行われた[2]。40 周年は、伝熱シンポ前日に、菱沼教授(北大)の燃料電池、矢部氏(産総研)のナノ・マイクロ伝熱の 2 件の特別講演会[3]と、過去 40 人の会長が、伝熱学会誌に 1 ページずつ特別寄稿する企画であった。こうしてみると、[特別講演] + [何か別の企画] という形になるのかなと思った。

特別講演の講師を、どなたにお願いするのか？ 重鎮にお願いするのか、分野はどうするのか？ 伝熱シンポのセッション構成も、若い頃に参加していたときは、随分と変わってきている。伝熱も、「熱移動の基礎現象は何なのか？」から「最新デバイスの中で熱だけでなく物質移動」とか、「マクロな式だけでは表記できない伝熱」、「脱炭素に関わる伝熱」とかが重要になってきているように思う。

さらに、「伝熱分野の将来を担う若手に何を指して頂きたいか」を考えるに、育ってきた研究室のテーマを継続して極めるだけではなく、新しく「自分の旗」をたてて欲しいと思っている。そういう意味で、新しい研究分野をご自身で、「ゼロ」から立ち上げてこられた方が特別講演の講師として望ましいと思った。

また、昨今いろんなところで使用される「多様性」を考えるに、“外”の視点から、「熱とか流体にどのようにかわり、どのような取組をされているのか」、がヒントになると思った。

そのような観点から、熱工学コンファレンスで聞いた山西陽子先生の講演が印象に残っており、2020 年 2 月に福岡に伺い、講演をお願いした。

もうひとかたは、花村教授(東工大、第 59 期会長)に相談し、「絶対におもしろい」というお墨付きをもらって、東大の内田建先生をご紹介頂いた。2020 年 1 月に東大に伺い、ご快諾いただいた。

お二人の先生にお願いしたときは、まだ、新型コロナがはやる直前であり、伝熱シンポ 2 日目の意見交換会にも出ていただいて、伝熱の方と直接お話し頂きたいと申し上げたが、その後、コロナ禍によりオンラインになり、これらのことが果たせなくなったことが大変残念である。

もう一方の「別の企画」を何にするのか。2019 年 12 月の理事会終了後の意見交換会で、高田教授(九大、第 58 期会長)と、話をしていると、



図1 日本伝熱学会の新しいロゴ, 金子敏宏氏

「学会のロゴを新しくするか」、「学会のマスコットキャラを新しくつくるか...」などの意見がでてきた。2020年2月福岡で、さらに話をしたとき、マスコットキャラは難しいからやめよう、ロゴはネットからコピーしてきたものとオリジナルなものをどう区別するのか?ということになり、「H」「T」「S」「J」の文字を必ず入れる方向でいこうと決まった。

### 3. 新しい「ロゴ」

新しいロゴを募集することについて、会員各位に案内を出したときに、応募してくれるのか?という不安があった。賞金を10万円にしたら、たくさん応募があるかとも思い企画部会と理事会に、「ロゴを新しくする企画、賞金10万円」とおそるおそる出したところ、あっさり認めてくれた。

阪大の津島教授に、60周年記念事業委員会の幹事になっていただいて、2020年10月から公募開始、12月締め切りにした。12月中旬くらいに数十件は集まるかと思いきや、まだ、1桁。そこで、全国の伝熱学会支部長に、各支部の会員に応募の勧誘を出していただくようお願いをした。しかし、締め切りの12月末に集まったのは8件のみ。締め切りを2021年1月18日まで延ばし、1月になってから会員数の多い大学の代表の方に、その大学内で応募いただくお願いをした。これにより集まったのが33件。なんとか体面をたもったが、このような企画の難しさを痛感した。

伝熱シンポのときの会員投票で最優秀賞の1件を選ぶ前に、候補を3件に絞る必要があった。審査前には公開していなかったが、実は審査員は若手の女性会員3名で、青山学院大の石井慶子氏、京大の栗山怜子氏、九大の塘陽子氏である。新型コロナの緊急事態宣言が2021年の年始めに2回目、春の連休に3回目が発出された中で、その隙間の

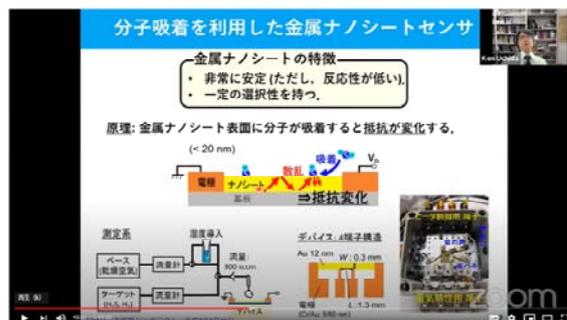


図2 特別講演1 内田建教授「社会課題解決を目指したナノ電子材料・デバイスにおける熱の課題と利用」

4月中旬に東京に集って頂き、新しい新鮮な視点での選考を見事にして頂いた。

伝熱シンポの総会のとときの会員の直接投票から、1週間の期間を設けたネット投票に切り替え、総計586票で最終的に図1に示される東大の金子敏宏氏のものが最優秀賞に選ばれた。

### 4. 特別講演会

日本伝熱学会創立60周年を記念する特別講演会が伝熱シンポ二日目、5月26日に行われた。学会が還暦を迎えることを意識し、伝統のある分野を尊重しつつも新しい分野にどのようにチャレンジするのか、特に若手の研究者に刺激になるような発想から生まれるのか、—新しい領域への挑戦—とした。学会そのものがオンラインであることから、本講演会もオンラインであり、逆にそのことを利用して、伝熱学会員には講演会において質問が可能なZoomによる配信を、また、一般の方にもYouTubeにより無料で公開した。事前に日本機械学会の7つの部門、化学工学会の2つの部会に講演会の約一週間前にメールサービスを利用して、伝熱シンポに登録していなくてもYouTubeの利用により無料で講演を視聴できる情報発信をした。公益社団法人である日本伝熱学会として、学会員のためだけでなく、社会のための学会としての活動を意識した。2020年までの熱工学コンファレンスで、ZoomとYouTubeを駆使したご経験をお持ちの植村准教授(北大)に60周年の委員会に加わってもらい、これらのすべてを差配して頂いた。

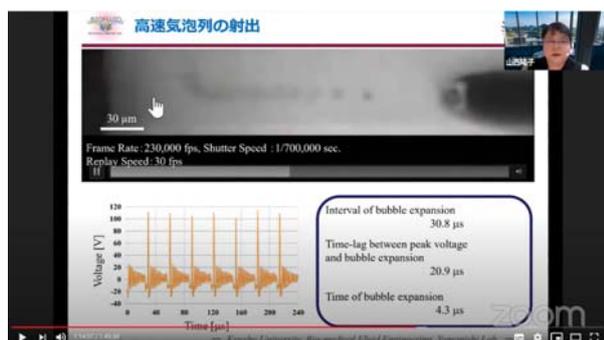


図3 特別講演2 山西陽子教授「電界誘起気泡による機能創発と異分野研究への発想」

特別講演は、花村会長に司会進行を進めていただいた。東大の内田建教授は「社会課題解決を目指したナノ電子材料・デバイスにおける熱の課題と利用」というタイトルで講演をして頂いた。トランジスタの研究から始まり、ナノスケールの電子のふるまいについて、基礎としての現象の理解のレベルを上げて来られた経緯を述べられた。その中で、研究のニーズと社会のニーズと照らし合わせ、IoT で必要とされる低消費電力の超小型センサーに、ナノスケールのジュール熱を利用する新しいセンサーの開発に成功した話をなされた。例えば、人間の呼吸中の成分が、ナノシートに付着することにより、電気抵抗が変化することを、発生する熱により高感度にセンシングできる研究へ新たな展開を図られたことの説明がなされた。

九大の塘氏、東大の志賀氏、丸山氏から、「どのようにしてこのような発想にいたったのか？」とか「ブレイクスルーとは？」について質問がなされ、「自分の技術・知識と社会のニーズのアンズをいかにとるのか、という発想が重要である」ことが述べられた。

次に、九大の山西陽子教授より、「電界誘起気泡による機能創発と異分野研究への発想」というタイトルで講演をして頂いた。イギリスのインペリアルカレッジで石炭燃焼・レーザ計測で学位をとられた後、東北大学で全く違う分野での細胞について学び、さらに、電気メスの超小型化について研究していたところ、マイクロ気泡を連続的に射出することに成功し、気泡が圧壊するとき、生物の膜を焦がさずに穴を開けられることを発見したこと、さらには、これを利用して外科手術というカテゴリーでなくて血栓をとる技術、遺伝子、

薬剤を注入する技術などに発展させたことについて発表がなされた。

名大の長野氏、東北大の小宮氏から、「違った切り口の展開とは？」「異分野融合とは？」について質問がなされ、「自分の技術、基礎の立ち位置をふりかえりつつ、異分野の人と積極的に議論すること、外部のニーズについて希求することがその切り口になる」との答えがなされた。

Zoom と YouTube で、約 400 名弱の視聴があり、その後の学会の意見交換会でも、60 周年にふさわしい実におもしろい講演であったと多くの人から言われた。好評であったように思う。

## 5. 最後に

特別講演会を企画してみて、日頃、学会で聞く、研究“そのもの”の内容ではなく、「どのようにしてその研究内容に至ったのか」という内容の講演はなかなか聞く機会がないことを改めて思った。内容よりも経緯については、論文を読んでもうかがい知ることにはできない。何十周年記念という特別な事業でなくても、もっと通常の伝熱シンポでもこのような機会を設けては...と思った。

60 周年を記念する本事業は、(1) 準備期間の 2 年間に会長を歴任頂いた高田保之氏 (九大) と花村克悟氏 (東工大) には貴重なアドバイスを頂いた。(2) 60 周年記念事業委員会の幹事の津島将司氏 (阪大) と植村豪氏 (北大) には心血を注いご協力頂いた。(3) 石井慶子氏 (青山学院大)、栗山怜子氏 (京大)、塘陽子氏 (九大) には、ロゴの選定作業を今までにない新しい感覚でして頂いた。ここに記し、深く感謝申し上げる次第です。

10 年後の 70 周年に、上記の方々はどのようなことをされているのか、学会はどのように発展しているのか、などを想いつつ、筆をおきます。

## 参考文献

- [1] 高田保之, 第 58 期会長就任にあたって, 伝熱, 58-244 (2019) 1.
- [2] 宇高義郎, 大久保英敏, 荒木拓人, 酒井清吾, 浅岡龍徳, 津島将司, 日本伝熱学会創立 50 周年記念伝熱セミナーの報告, 伝熱, 51-214(2012)16.
- [3] 小澤守, 日本伝熱学会 40 周年記念セミナーの報告, 伝熱, 41-169(2003)3.

## 特集「データ駆動科学と熱・流体工学」にあたって

*Preface to the Special Issue on "Data-Driven Science for Thermal and Fluids Engineering"*

小田 豊 (関西大学)

Yutaka ODA (Kansai University)

e-mail: oda.y@kansai-u.ac.jp

近年よく耳にするデータ駆動科学という言葉は「Data-Driven Science」の訳語であり、データによって推進される科学を意味します。通常、ここでいうデータとは計算機や計測機器の飛躍的な性能向上がもたらした高次元のデータを意味します。既存の解析手法では複雑な高次元データに潜む物理現象の理解が困難である一方、機械学習に代表される AI 技術の発展はこうした高次元データに基づくモデル化や規則の発見を可能にしつつあります。機械工学では特に熱・流体工学分野で機械学習の応用が急速に進展しつつあり、今後の発展が大きく期待されます。本特集を通じて会員諸氏の皆様に当該分野をリードする先端研究に触れて頂き、研究や教育の参考にして頂ければ幸いです。

慶應義塾大学の深淵氏、UCLA の深見氏には円柱周りの非定常層流を題材に、機械学習手法による流れ場の低次元化に始まり、スパース回帰による縮約モデルの導出を経て、制御理論と組み合わせたデータ駆動型の流れ制御へと至る道筋を豊富な文献とともに分かりやすく紹介頂きました。東京大学の塩見氏には転移学習を用いた高熱伝導結晶の探索、およびベイズ最適化を用いた熱伝導材料のナノ構造最適化について紹介頂きました。前者では材料データベースの限られた情報から物理的洞察に基づいて選定した特徴量をもとに事前学習が行われており、課題に対する適切なアプローチを考える目利きの能力と総合的な知識の必要性が指摘されています。東京理科大学の後藤田氏には航空機エンジンのステージング燃焼器で問題となる燃焼振動の予兆検知について紹介頂きました。一見すると複雑で規則性がないように見える圧力変動の時系列データに対して、複雑系科学と情報理論に基づく高度な時系列解析手法を適用することで、背後に潜む非線形ダイナミクスの特徴量が適切に評価され、サポートベクターマシンによる燃焼状態の分類と予兆検知に成功していま

す。東京工業大学の西大氏、安田氏には全球から都市街区のスケールまでシームレスに実行可能な大気海洋シミュレーションを概説して頂くとともに、深層学習による超解像技術を応用することにより街区微気象シミュレーションの超高速化（リアルタイム化）を実現した例を紹介頂きました。超解像技術の物理考慮レベルを上げることによる精度のさらなる向上が、都市部における熱中症リスクを最小化する人流制御サービスの実現につながる事が期待されています。東京大学の三輪氏には機械学習を用いた気液二相流における流動様式識別についてご紹介頂きました。計測した気泡弦長さの累積分布関数を特徴量として環状流路の流動様式を判定した例では、流動様式線図の境界線は「線」ではなく「遷移区域」であり、より細かな複数のクラスに分類された流動様式を経ながら徐々に流動状態が遷移することが見出されています。また、前半部では日米の大学 IT 教育の違いを実体験に基づいて紹介頂くとともに、急速に発展する AI 技術への対応で遅れをとる日本の大学教育に対して重要な視点を提供頂きました。日立造船株式会社の和田氏らには産業界における AI 技術の実用例として、熱交換器の管端溶接部における欠陥判定システムをご紹介頂きました。検査員による目視で行っていた探傷画像内の溶接欠陥有無の判定を、従来の画像処理、CNN による画像分類、AE (Auto Encoder) による画像復元という 3 種類の手法を用いて個別に実施し、各手法の信頼度に基づいて総合的に判定することにより、実用に耐え得る判定精度 (99%) が達成されています。この技術により検査時間と検査員の負担は大幅に低減されており、産業応用における AI 技術の威力を窺い知ることができます。

最後になりましたが執筆者の皆様には大変ご多忙のところ、本特集にご寄稿頂きましたことを心より感謝いたします。

## 機械学習縮約モデルを用いた革新的流れ制御に向けて

*Towards an Innovative Flow Control with Machine Learning-Based Reduced-Order Modeling*

深淵 康二 (慶應義塾大学), 深見 開 (カリフォルニア大学ロサンゼルス校)  
*Koji FUKAGATA (Keio University), Kai FUKAMI (University of California, Los Angeles)*  
*e-mail: fukagata@mech.keio.ac.jp*

### 1. はじめに

近年の第3次人工知能ブームに伴い、ここ数年、流体力学の諸問題に対する機械学習の応用に関する研究が世界中で精力的になされている。筆者のグループにおいても、科研費基盤A「機械学習による乱流ビッグデータの特徴抽出手法の構築」(2018~2020年度, 課題番号18H03758)および、科研費基盤S「機械学習を活用した革新的流れ制御パラダイムの創出と実践」(2021~2025年度, 課題番号21H05007)の補助を受け、円柱周り流れやチャネル乱流といったカノニカルな流れやその制御に対する機械学習の応用可能性に関する調査を行っている[1-4]。本稿ではこのうち、新たな流れの制御手法構築に向けた研究である、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional neural network, CNN) [5]を用いたオートエンコーダ(Autoencoder, AE) [6]による流れ場の低次元化およびその特徴抽出に関する研究を紹介する。なお、機械学習の乱流への各種応用に関しては別学会の特集記事[4]を参照されたい。

### 2. 畳み込みニューラルネットワークを用いたオートエンコーダ(CNN-AE)

本稿で紹介する一連の研究では、図1に示すような畳み込みニューラルネットワーク(CNN-AE)を用いて流れ場の低次元化を行っている。オートエン

コーダ(AE)はニューラルネットワークを用いたデータの低次元化手法である。低次元化をしたいターゲットとなるデータを $q$ とすると、AEモデル $F$ を用いて $q = F(q)$ と問題は定式化される。この式に示される通り、AEでは入出力に同じデータ $q$ を用意する。加えて、AEは図1に示すようにデータを圧縮するようなボトルネック構造を持っているため、出力層で入力と同様のデータを得ることが出来た場合には、モデルの最深部(図1の赤丸の部分)にある潜在ベクトル(Latent vector)は、高次元データ $q$ の低次元写像となっている。筆者のグループでは、非定常層流[8,9]および乱流場[10]に対し、CNN-AEを適用した流れ場の低次元化を試みている。以下では、流れ場データに対するCNN-AEの圧縮性能の調査および潜在ベクトルの持つ意味の理解[11]、スパース回帰を用いた潜在ベクトルのダイナミクスの記述[12]、また得られたダイナミクスの記述に基づく流れ場制御の予備的検討[13]の例を紹介する。

### 3. 非定常層流に対するCNN-AEの適用とその理解

まずCNN-AEを用いた流れ場データの低次元化の手始めとして、主流速度と円柱直径に基づくレイノルズ数 $Re_D = 100$ の円柱周り流れを考える。上述の通り本研究では最終的には流れ制御への応用を目指しているため、データの圧縮に加え、CNN-AE

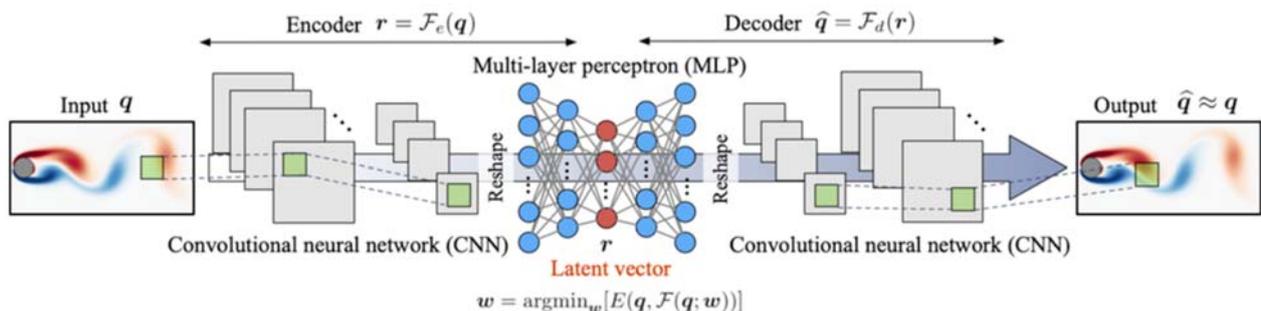


図1 CNN-AEの概略[7]. (CC BY 4.0)

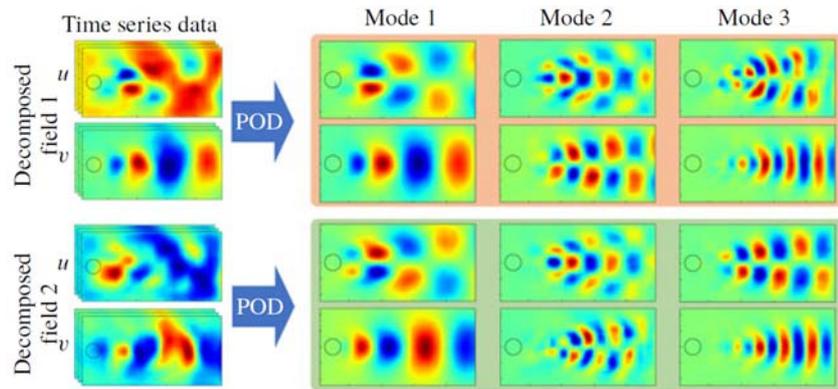


図2 レイノルズ数  $Re_D = 100$  の円柱周り流れにおける，CNN-AE を用いて抽出された2つの非線形モードに対する固有直交分解 (POD) [11]. (T. Murata, K. Fukami, and K. Fukagata, *J. Fluid Mech.* **882**, A13 (2020). Copyright © 2019 by Cambridge University Press. With permission.)

で得られた低次元表現の理解にも注目する．これらの目的を達成するため，モード分解 CNN-AE (Mode decomposing CNN-AE, MD-CNN-AE) と呼ばれる，低次元ベクトルを可視化する非線形モード分解法を提案した[11]．具体的には，まず CNN-AE の左側部分 (CNN エンコーダ) を用いて円柱周り流れを潜在空間における 2 つの非線形モードに低次元化し，これら 2 つの非線形モードそれぞれに対しデータをオリジナルの次元に再復元する CNN デコーダを準備することで，各モードに対応する流れ場を物理空間で可視化する．

まず，MD-CNN-AE に含まれる活性化関数を全て線形なものとし，従来の線形理論に基づく縮約手法である固有直交分解 (Proper orthogonal decomposition, POD) との比較を行ったところ，CNN-AE は基本的には POD と等価の操作を行っていることが示唆された．加えて，非線形活性化関数を MD-CNN-AE に使用することで，POD よりも低い再構成誤差を示し，非線形活性化関数が圧縮性能を向上させていることが観察された．本研究での MD-CNN-AE では得られた非線形モードを可視化することが可能であり，得られた2つの非線形モードから再構築された場に対し POD を行うと，図2に示す通り非線形モードには複数の線形 POD モードが内包されていることが確認できた．これらの結果より，CNN-AE を用いることで，流れ場の低次元化及び特徴抽出が可能であるのみならず，従来の線形 POD モードとの解釈可能な関係を維持することが可能であることが示された[11]．

なお，本研究では非定常層流のみを対象とした

が，乱流を含めたより複雑な流れ場にも対応可能な階層型 CNN-AE の開発も行っている[14]．

#### 4. スパース回帰を用いた低次元流れ場表現に対する支配方程式の導出

CNN-AE を用いることで高自由度の流れ場データを数個のモードで効率的に表現可能であることがわかったため，次にそれらの時間発展を，スパース回帰手法を用いることにより，常微分方程式の形で得ることを考える[12]．流れ場のダイナミクスが低次元，かつシンプルな支配方程式の形で得られることは，従来の制御理論との組み合わせを可能とするため，この常微分方程式の導出は，データ駆動型の流れ制御の実現に向けた極めて重要なステップ

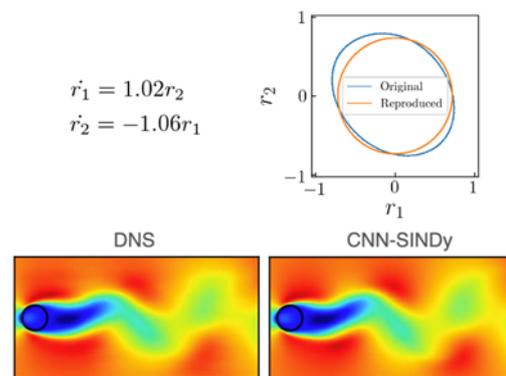


図3 CNN-AE 及び SINDy を用いた非線形モードの支配方程式の記述 [12]．支配方程式から得られるモード係数の軌跡及び CNN デコーダと組み合わせた際に再構築された流れ場も示す．(CC BY 4.0)

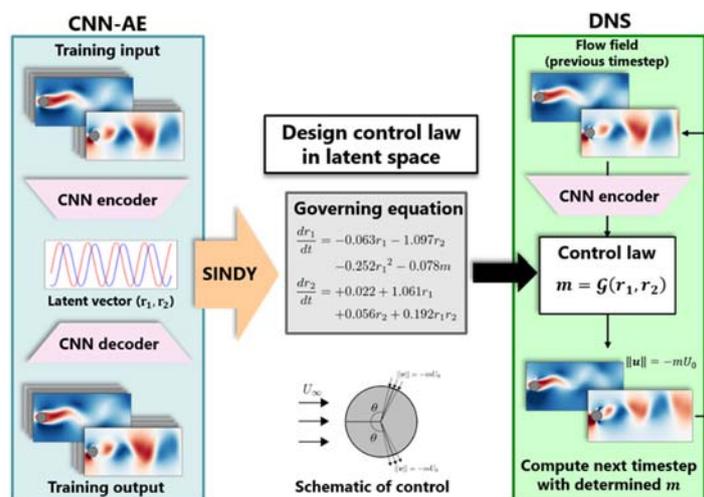


図4 CNN-AE/SINDy を用いた縮約モデルによる潜在空間での流れ制御則設計の概略[13].

であると言える。

上述の円柱周り流れから得られた 2 つのモード係数に対し、Sparse identification of nonlinear dynamics (SINDy) [15]と呼ばれるスパース回帰を施すことで、図 3 に示すようなシンプルな常微分方程式を導出することが可能である。得られた方程式を再度数値積分し、CNN デコーダを用いて物理空間における流れ場を再構築することも可能であるため、これは従来の高解像シミュレーションの代替となる縮約モデルとしても利用できる。実際に再構築された流れ場 (図中の CNN-SINDy) が直接数値シミュレーションから得られた結果 (図中の DNS) と定性的に良い一致を示していることから、非線形 CNN-AE モードから得られたわずか 2 変数の方程式が、高次元のダイナミクスを効率よく表現していることが示唆される。

なお、本稿では割愛するが、円柱周りの遷移流のような渦の成長過程を含む場合でも、本手法を用いることでスパースな記述を得られることを確認しており、また乱流であっても、既に少数の非線形モードに分解された 9 方程式せん断流モデルのようなモデル乱流場に対しては、支配方程式が再現できることを確かめている[12].

### 5. 潜在空間に基づく流れ制御の可能性

以上の結果より、CNN-AE を用いて得られた流れ場の低次元表現に関する支配方程式が得られることがわかったため、最後にその支配方程式と制御理

論を組み合わせた、データ駆動型流れ制御への応用例[13]を紹介する。

前節と同様に  $Re_D = 100$  の円柱周り流れを対象とするが、ここでは図 4 の中央部に示すように、円柱表面での吹出し/吸込み制御を用いることで渦放出を抑制することを考える。まず CNN-AE の訓練データとして、様々な吹出し/吸込み強度  $m$  により制御された DNS データを用意し、様々な制御場に適応した CNN-AE を作成する。流れ場を上述の議論と同様に、2 つの変数に写像した後、制御変数  $m$  を加えてスパース回帰を行うことで、制御変数の加わった潜在空間における支配方程式を導出することが可能である。

本研究では、ここで得られた常微分方程式に対し、座標変換を用いた線形化を施し、最適制御理論を適用した。図 5 に示す通り、潜在空間における軌跡を原点に収束させるような制御を行うことで、渦放出が抑制されることを確認している。現在、物理空間における制御手法の妥当性の検証や、より複雑な流れへの適用と流れ制御に適した CNN-AE の改良を行っている。

### 6. 結言

本稿では筆者のグループで行ってきた機械学習の流体力学への応用のうち、流れ制御に向けた CNN-AE による流れ場の低次元化およびその特徴抽出に関する研究の一部を紹介した。ここでは非定常層流に対する結果を紹介したが、状態推定や縮約

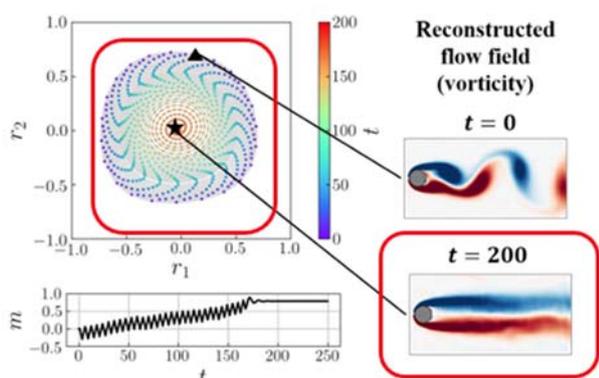


図5 潜在空間での状態フィードバック制御[13].

モデルに関しては乱流への応用に対しても研究を進めており[16-18], それらと組み合わせることで、革新的な流れ制御の構築を目指している。今後のさらなる研究の発展に期待して頂きたい。

#### 謝辞

本稿で紹介した流れ場の低次元化およびその流れ制御への応用に関する研究は、科研費基盤A「機械学習による乱流ビッグデータの特徴抽出手法の構築」(2018~2020年度, 課題番号18H03758)および、科研費基盤S「機械学習を活用した革新的流れ制御パラダイムの創出と実践」(2021~2025年度, 課題番号21H05007)の補助を受けたものである。加えて、研究分担者・研究協力者の先生方、及び研究室学生・卒業生に深く感謝します。

#### 参考文献

[1] 機械学習のページ, 慶應義塾大学理工学部・深淵研究室, <https://kflab.jp/ja/index.php?21H05007> (最終閲覧日: 2021年7月31日) .

[2] 深淵 康二 ほか, 機械学習を用いた乱流の特徴抽出手法の構築に向けて, *ながれ*, **37** (2018) 524-527.

[3] 深淵 康二, 深見 開, 機械学習を用いた乱流ビッグデータ解析に向けて, *計測と制御*, **59**, (2020) 571-576.

[4] 深淵 康二, 機械学習の乱流への応用, *日本機械学会誌*, **124**-1232 (2021) 10-13.

[5] LeCun, Y. et al., Gradient-based learning applied to document recognition, *Proc. IEEE*, **86** (1998), 2278

[6] Hinton, G. E. and Salakhutdinov, R.R., Reducing the dimensionality of data with neural networks, *Science*, **313** (2004) 504-507.

[7] Fukami, K. et al., Model order reduction with neural networks: Application to laminar and turbulent flows, *SN Comput. Sci.*, **2** (2021) 467.

[8] Hasegawa, K. et al., Machine-learning-based reduced-order modeling for unsteady flows around bluff bodies of various shapes, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, **34** (2020) 367-383.

[9] Hasegawa, K. et al., CNN-LSTM based reduced order modeling of two-dimensional unsteady flows around a circular cylinder at different Reynolds numbers, *Fluid Dyn. Res.*, **52** (2020) 065501.

[10] Nakamura, T. et al., Convolutional neural network and long short-term memory based reduced order surrogate for minimal turbulent channel flow, *Phys. Fluids*, **33** (2021) 025116.

[11] Murata, T. et al., Nonlinear mode decomposition with convolutional neural networks for fluid dynamics, *J. Fluid Mech.*, **882** (2020) A13.

[12] Fukami, K. et al., Sparse identification of nonlinear dynamics with low-dimensionalized flow representations, *J. Fluid Mech.*, **926** (2021), A10.

[13] Kanehira, S. et al., Latent space based feedback control design: Machine-learning-based reduced-order modeling of unsteady fluid flows, *Mechanistic Machine Learning and Digital Twins for Computational Science, Engineering & Technology (MMLDT-CSET2021)*, San Diego, USA (2021).

[14] Fukami, K. et al., Convolutional neural network based hierarchical autoencoder for nonlinear mode decomposition of fluid flow data, *Phys. Fluids*, **32** (2020) 095110.

[15] Brunton, S. L. et al., Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **113** (2016) 3932-3937.

[16] Fukami, K. et al., Synthetic turbulent inflow generator using machine learning, *Phys. Rev. Fluids*, **4**, (2019) 064603.

[17] Fukami, K. et al., Super-resolution reconstruction of turbulent flows with machine learning, *J. Fluid Mech.*, **870** (2019) 106-120.

[18] Fukami, K. et al., Machine-learning-based spatio-temporal super resolution reconstruction of turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, **909** (2021) A9.

## 伝熱マテリアルズ・インフォマティクスの進展

*Progress in Materials Informatics for Heat Transfer*

塩見 淳一郎 (東京大学)

Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo)

e-mail: shiomi@photon.t.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

伝熱システムの性能は材料の性能に強く依存し、また材料が革新されるとそれに合わせて最適なシステムの形態が変わり得ることから、材料からシステムまでを一貫して研究するアプローチが一般的になって久しい。材料開発は従来、経験則にもとづいて行われることが多かったが、近年、ナノテクノロジーによってナノ構造の作製、解析、物性評価技術が発展し、指導原理にもとづいた材料設計ができるようになってきており、原理から積み上げていくマインドを有する機械工学の研究者も広く貢献している。しかし、パラメータの多さからそれでも未だに試行錯誤を中心に進められているのが現状であり、多くの技術において材料開発が律速になっていることは否めない。従って、それを加速させる手法の開発は工学のさらなる発展への根幹的な課題であると言える。

そのような中で、近年、材料開発を高速化するために、材料データを情報科学的手法によって取扱うことで、効率的に材料開発を行うマテリアルズ・インフォマティクス (MI) が盛んに行われるようになった。先行しているバイオ・インフォマティクスで実践されてきた手法を材料に適用したものが多いが、MI が近年急速に発展している背景には、標準的な第一原理計算ツールや自動実験の発展などによって、材料のデータベースが量的にも質的にも向上してきたことがある。材料データベースについては MI 研究の大型プロジェクト (Materials Genome Initiative) にいち早く取り組んだ米国がリードしており Material Project, AFLOW, ICSD, OQMD などメジャーなものが多いが、国内でも物質・材料研究機構の AtomWorks-Adv をはじめデータベースが充実してきている。

これによって、誰もが自由に計算・実験データを活用する環境が整えられてきており、データベースを活用して機械学習を適用し、高速な相図の決定、

材料物性の予測、効率的なプロセス制御などの MI 研究が進められている。MI は、材料開発において要求される多様な機能の実現に対して広く活用できる可能性があり、幅広い分野で重要性を持つ。

東京大学・熱エネルギー工学研究室では、共同研究者らとともに、6 年程前から伝熱材料に MI を適用する研究を進めてきた。きっかけは、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ (*Mi<sup>2</sup>i*) という JST のプロジェクト (2015~2020) であり、電池材料、磁性材料、伝熱材料の 3 つの出口に対して MI 研究を推進する人材ハブ的なプロジェクトであったが、伝熱材料は思いの外 MI との親和性が良く、当時世界的にも他の物性と比較すると実施例が少なかったこともあり、当該プロジェクトで様々な成果が上がった。

対象としてきたのは、高/低熱伝導率の熱輸送、高性能の熱電変換、波長選択型の熱輻射などであるが、それぞれ、電子機器や光センサの熱マネージメント、IoT のセンサ・通信デバイスの自立電源、熱輻射冷却による空調の省エネなどの社会的なニーズに呼応したものである。

実施した MI 研究のアプローチを大別すると、データベースを利用して既存のバルク材料からターゲット物性に優れたものを探索するハイスループットスクリーニングと、最適化手法によりターゲット物性を最適にする未知のナノ構造を設計する最適ナノ構造設計があり、本稿ではそれら 2 つについて、事例を紹介する。

## 2. 低/高熱伝導率結晶の探索

## 2.1 低熱伝導率結晶のスクリーニング

まず最もオーソドックスな MI のアプローチとしては、ハイスループットスクリーニングがある。これはバイオ・インフォマティクスで多用されてきた手法であるが、材料のデータベースが充実してきた (特に計算科学によるもの) ことをきっかけに、触媒作用、電池技術、熱電材料、化学プローブ、ポリ

マー、磁性材料などの多くの分野で実践されてきた。伝熱材料については、熱電変換を念頭に低熱伝導結晶化合物の探索に関する研究がよく行われており、先駆的な研究としては、Carrete らがランダムフォレスト回帰によって 79,000 種類のハーフホイスラー化合物をスクリーニングし、原子半径要素が大きい材料の熱伝導率が低いことを見出している<sup>[1]</sup>。また、Seko らは、ガウス過程回帰を用いて 54,779 種類の化合物をスクリーニングし、熱伝導率が 0.5 W/mK を下回る結晶化合物を予測している<sup>[2]</sup>。

## 2.2 転移学習を用いた高熱伝導結晶の探索

熱伝導率をターゲットに結晶をスクリーニングする際の 1 つの課題は、単結晶であっても熱伝導率の計算には結晶格子振動の非調和性を考慮する必要があることから、その計算負荷が非常に大きく、利用可能なデータが少ないことである。なお、本稿の読者をご存じのように、実験による熱伝導率計測もそれ相当に大変であり、利用できる単結晶のデータは計算のそれよりもさらに少ない。機械学習は元来「ビッグデータ」に対して特に威力を発揮する手法であるため、機械学習に必要な「ビッグデータ」と現状で利用可能な「スモールデータ」との間のギャップを埋めることが重要となる。

そこで、我々は熱伝導率を計算する過程で求める中間物性に着目し、それを用いて転移学習を適用することでそのギャップを埋める試みを行った。結晶の熱伝導率の計算をフォノン気体モデルの線形化ボルツマン輸送方程式によって求めると、熱伝導率はおおよそ比熱、群速度、緩和時間の掛け算で求まる。さらに、緩和時間は「非調和性の強さ」と運動量とエネルギーの保存則を満たしながらフォノン・

フォノン散乱が生じ得る「散乱位相空間」からなる。散乱位相空間は、散乱し得るフォノンモードの組み合わせの数であり、値が小さいほど散乱が生じにくくなり、緩和時間が大きくなる。

これらの物性のうち、比熱、群速度、散乱位相空間はフォノンの状態（分散関係）だけから求められる調和物性であることから計算負荷が小さく、比較的大きなデータを利用できる。そこで散乱位相空間をビッグデータとして用いて、転移学習によってスモールデータしかない熱伝導率の学習を行った。図 1 にその模式図を示す。この際、電子デバイスの放熱基板の開発を念頭に熱伝導率が高い材料をターゲットにした<sup>[3]</sup>。

転移学習には、統計数理研究所の吉田教授らが開発した XenonPy<sup>[4]</sup>を用いた。各結晶化合物に対して、構成元素に付随する 58 種類の特徴量（原子質量、電気陰性度、ワンデルワールス半径など）を用いて 290 の結晶化合物の構造や組成に由来する基礎的な記述子を抽出した。なお、本記述子は任意の化合物について抽出可能である。この 290 次元の記述子ベクトルと、調和格子動力学から計算した 320 種類の結晶化合物の散乱位相空間についてピラミッド型ニューラルネットワークによって事前トレーニングし、得られた出力層以外のサブネットワークを転移（特徴抽出や入力記述子の伝達）して、熱伝導率の予測モデルをトレーニングした。熱伝導率のデータは 45 個しかないが、よりデータの多い散乱位相空間で事前トレーニングすることで、より精度の高い予測モデルを構築することができる。実際には 320 個のデータはビッグデータとは呼べず、本来はもっと数を大きくすべきであるが、それにはそれなりの計算時間がかかるため、今回は原理実証としてこの程度に留めた。最後に、このモデルを用いて Material Project データベースにある 60,000 種類を超える結晶化合物の構造・組成情報をもとにスクリーニングすることで、高熱伝導率の結晶化合物を探索した。最終的に得られた熱伝導率が高いと予測されたトップ 14 の化合物のリストを図 2 に示す。実際に第一原理計算で確認したところ、Be<sub>2</sub>C、C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (2 種類の構造)、BeCN<sub>2</sub> 以外の 10 種類は概ね 1,000~3,000 W/mK の非常に高い熱伝導率を示した。その多くが超硬材料であり、硬い材料は原子間の結合が強くフォノン群速度が大きいため、一見自明であるようにも思われる。しかし、群速度が大きいと

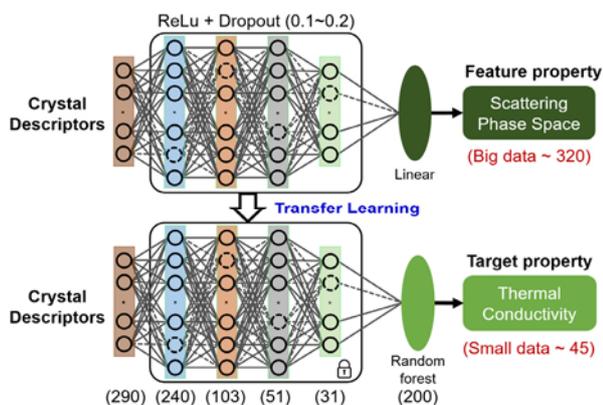


図 1 化合物結晶の転移学習の模式図<sup>[3]</sup>

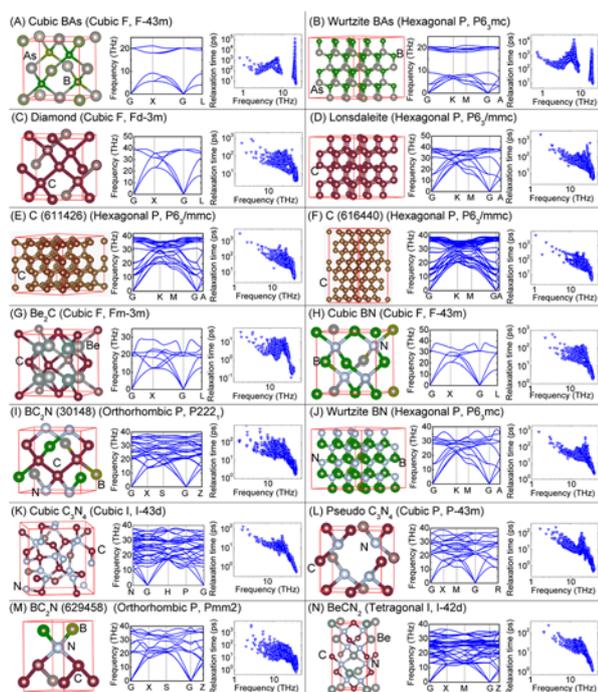


図 2 60,000 種類以上の候補からスクリーニングした熱伝導率が高い化合物結晶の構造，フォノン分散関係，緩和時間<sup>[3]</sup>。

フォノンの周波数帯が広くなり，散乱位相空間が大きくなることが多く，硬いからと言って 1,000W/mK オーダーの熱伝導率を有するとは限らず，現にそうでない材料が多数ある。また，BC<sub>2</sub>N など熱伝導率の文脈でまだ研究されていない材料も特定された。さらに，BAs のように硬くない材料もリストに入っている。BAs は近年，高熱伝導材料として経験的に見出されており<sup>[5]</sup>，今回は新しい発見とはならなかったが，このような特殊な材料も見つかったことは MI 手法の有用性を示すものである。なお，BAs はフォノンバンドにギャップを有し，それによって散乱位相空間が小さくなることで熱伝導率が高くなることが知られている。

### 3. 熱伝導材料のナノ構造最適化

#### 3.1 ベイズ最適化を用いた最適設計手法の開発

本章ではナノ構造の最適化について紹介する。材料系としては，熱キャリアの波長や位相緩和長さよりも小さい内部構造を有するものを対象とした。つまり，フォノンであれば 10 nm 以下（実際は材料や環境によるので厳密な議論ではない）のナノ構造を有する材料である。そうすることで，熱キャリア

の波動的な特性を利用することができ，熱輸送の制御性が高まる。

ベイズ最適化を用いて複数種類の材料（材料Aと材料B）から成るナノ構造の全体最適設計を可能にする手法の概要を図3に示す<sup>[6]</sup>。ここでは，ナノ構造がリードと呼ばれる半無限長の熱浴に接合された系を考え，リード間の熱輸送を原子グリーン関数法によって計算している（アプローチは汎用的であり，他の系や物性計算手法でも構わない）。原子グリーン関数法では左リードから右リードへのフォノンの透過関数（フォノンの各モードが透過する割合の合計）を与えて熱伝導度を計算する。原子グリーン関数法とベイズ最適化を組み合わせ，予測モデルにより候補構造の中から選ばれた  $N$  個（ここでは経験的に  $N=20$  とする）の構造の熱伝導度を計算し，予測モデルの改善とデータベースの構築を同時に行うことで，最適構造を同定する。なお，初期訓練データとしては，ランダムに選んだ  $N$  個の構造の計算データを用いて予測モデルを学習させる。ここで，ベイズ最適化には汎用ベイズ最適化ライブラリである COMBO<sup>[7]</sup>を用いた。COMBO では Random feature maps とベイズ線形回帰モデルを組み合わせた予測モデルを採用しており，ガウス過程の近似となる予測性能を持つと同時に，計算量は訓練データ数に対して線形であるなど，高精度かつ高速な予測を可能にしている。また，予測モデルのハイパーパラメータは自動的にチューニングされるため，非専門家でも容易に扱うことが出来る。

まず，本手法の有用性を示すべく，シリコン (Si) のリードに挟まれた極薄膜の半分を Si, もう半分をゲルマニウム (Ge) とする場合に，熱伝導度が最大あるいは最小になる構造を同定する問題に取り組

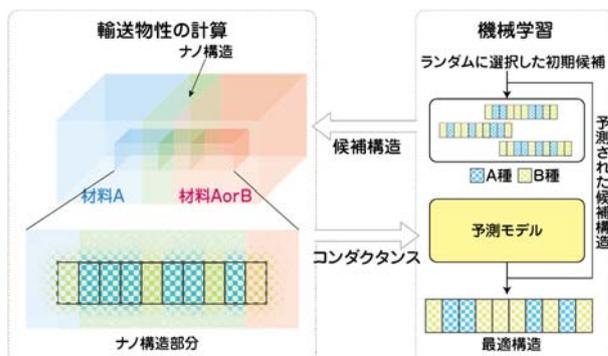


図 3 熱輸送物性計算と機械学習を組み合わせる熱伝導度を最小化あるいは最大化する手法のフローチャート<sup>[6]</sup>。

んだ。断面方向に周期境界条件を適用し、16 個の原子から構成されるミニマルな系とすることで、全候補構造数は 12,870 個となるが、系が小さく計算コストが低いことから全構造について計算を行うことができ、ベイズ最適化の性能を検証することができる。構造の記述子は各原子の種類を表すビット列 (Ge = “1”, Si = “0”) によって与えた。

図 4(a)に熱伝導度が最大になる場合、(b)に最小となる場合の構造を示す。また、図 4(c)に、計算した構造数に対して、それまでに得られた最適値の推移を示す。異なる訓練データを用いた場合で最適化効率が異なるが、いずれの最適化においても良い効率を示しており、最適構造を見つけるまでに計算が必要な構造数は最大でも 438 個 (全体の 3.4%) であった。最大の熱伝導度を持つ構造は、Si リードが薄膜領域の Si 原子を通じて連結されている。その領域を通じてフォノンは反射されることなく輸送されるため、この構造が最大熱コンダクタンスを持つことは直感的に理解し易い。一方、最小熱伝導度の構造は Si と Ge の原子層が非周期的に積層された

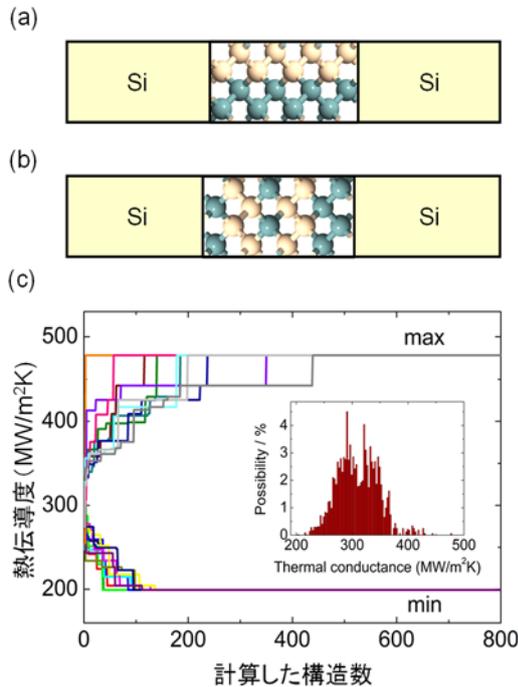


図 4 (a)熱伝導度を最大および(b)最小にする最適構造。黄色と緑の原子が Si と Ge を表す。なお、断面方向 (熱流と垂直の方向) には周期境界条件を適用している。(c)異なる初期訓練データに対する 10 回の最適化。挿図は全候補構造の熱伝導度のヒストグラム<sup>[6]</sup>。

超格子構造となった。これは材料の低熱伝導化のために広く研究されている周期的な超格子構造とは異なる非直感的な構造である。このように、全体の候補構造数の数%の構造を計算するだけで最適構造が同定でき、材料の高熱伝導化や低熱伝導化のための構造設計という逆問題に対して、ベイズ最適化が有効に機能することがわかった。

### 3.2 現実の実験系への適用

前節の手法の有用性の実証を受けて、より現実的で大きな系の構造最適化に取り組んだ。具体的には、熱伝導率を最小にするヒ化ガリウム (GaAs) とヒ化アルミニウム (AlAs) の超格子構造の最適化に取り組んだ<sup>[8]</sup>。GaAs/AlAs 超格子は量子井戸として広く研究されており、分子線エピタキシー法によって単原子レベルの粗さの綺麗な界面で堆積することができる。ただし、前節の問題のように、原子位置の最適化として問題を拡大すると、候補構造数が莫大となりベイズ最適化を用いた手法を適用することが困難となる (解決方法は後述する)。また、そも

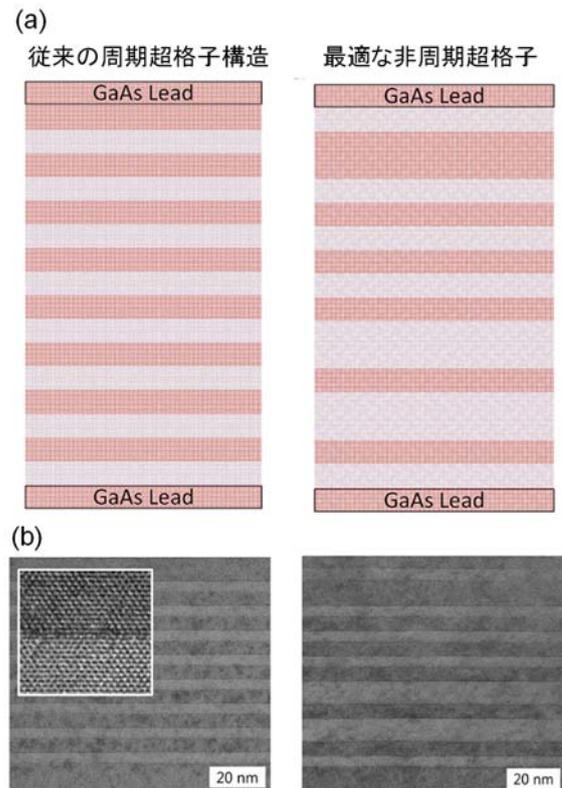


図 5 最適化された非周期超格子とリファレンスの従来の周期超格子(a)デザイン、(b)実際に作製した試料の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像<sup>[8]</sup>。

そも、原子単位での配置の制御は少なくとも現時点では実験的にできない。そこで、最小単位の層を定義し、GaAs 層を 0, AlAs 層を 1 と記述子をアサインした。また、実験との整合性が重要となるため、リードは実験に倣って GaAs 層とし、原子グリーン関数法の入力として必要な原子間力定数は第一原理計算から求め、界面の単原子粗さも考慮して計算を行った。なお、界面間の距離が短いため、フォノン・フォノン散乱の影響は無視できると仮定し、本計算においては原子間力の非調和性は取り扱っていない。

最適化を行った結果、全体の 2.7%の構造を計算するだけで、最低熱伝導率に収束した。得られた最適構造は図 5 に示すように、非周期的で非直観的なものとなった。次に、分子線エピタキシー法によって最適超格子構造、およびリファレンスとして従来の周期的超格子構造を実際に作製し(東京大学の平川教授のグループが作製)、時間領域サーモフレクタンス法によって熱伝導率を計測した。図 6 に示すように、計算結果は実験とよく一致し、最適設計によって熱伝導率を効果的に制御できることがわかった。

MI のもう 1 つの強みは、得られた「非直観的な正解」から、そのメカニズムを同定する過程で新たな科学を見出せる可能性があることである。この例の場合は、どうしてその特定の非周期構造が最小熱伝導率を達成するかを、フォノンの局在という観点

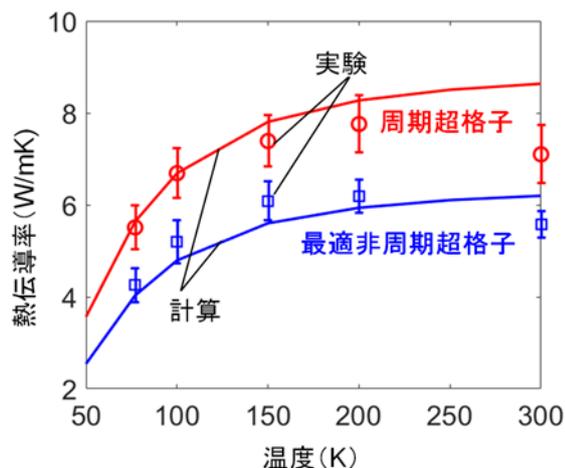


図 6 計算および実験で得られた、熱伝導率が最小になるように最適化された非周期超格子の熱伝導率の温度依存性。従来の周期超格子と比較して熱伝導率が有意に小さい<sup>[8]</sup>。

から解析した。詳細は紙面スペースの関係で割愛するが、周期構造は特定のフォノンを局在化して伝搬を阻害するには役立つが、熱輸送に寄与する様々な周波数や波数のフォノン「群」の伝搬を阻害するには、空間的に様々な長さスケールの構造を配置した方が良く、それが最適になされているのが最適構造であることが明らかになった。

#### 4. 巨大探索空間におけるブラックボックス最適化

##### 4.1 波長選択輻射膜の構造最適化

前章で、機械学習で設計した最適構造を実験で実現し、新しい物理を見出すところまでを、ナノ構造化した熱伝導材料にて示すことができた。一方で、フォノンは波長が短いため(室温では 10 nm 以下)、それにはナノメートルオーダーでの緻密な材料合成が必要となる。そこで、より簡単に実験実証ができる系を検討し、熱輻射であれば波長がマイクロメートル前後であるので適当であろうと考えた。さらに、電磁場解析はフォノン輸送解析より一般に計算負荷が小さいため、より効率的にデータを作成でき、その結果より大きな探索空間での機械学習や最適化が実施できる。この概念のもとに最初に行ったのが、狭帯域の熱輻射スペクトルを有する多層膜の設計である。ここでは紙面スペースの関係で詳細を割愛するが、転送行列法によって輻射スペクトルの計算が高速にできることから、数千万の計算ができ、80 億通り以上の候補構造の探索ができた。また、熱輻射膜の性能としても、実験で作製した際に 200 に迫る Q 値を達成することができた<sup>[9]</sup>。

##### 4.2 巨大探索空間の MI への挑戦

こうなると、さらに大きな探索空間に挑戦したくなる。そこで、共同研究者らとともに量子アニーラを活用する手法に取り組んだ<sup>[10]</sup>。量子アニーラは Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO)、つまりイジングモデルしか解けないが、それを東京大学の津田教授のグループが Factorization Machine によって QUBO の係数を学習する手法で解決した(図 7)。スカイラジエータを目的とした熱輻射メタマテリアルにこれを適用したところ、古典計算機を使った場合と比較して、探索時間が劇的に短くなった<sup>[10]</sup>。この手法によって、量子ビットの数を  $n$  とすると、原理的には、 $2^n$  個の候補構造の探索が可能となり、D-Wave(カナダの商用の量子アニーラ)

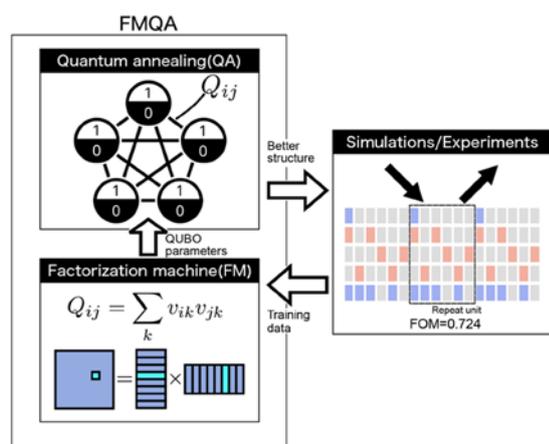


図7 回帰のための Factorization Machine, セレクションのための量子アニーリング, シミュレーション/実験を組み合わせた材料探索手法<sup>[10]</sup>.

などの量子ビット数が増大していることを考えると、巨大探索空間のブラックボックス最適化を実現する重要な技術である。

### 5. おわりに

本稿では、伝熱材料の MI について、東京大学熱エネルギー工学研究室とその共同研究者の近年の研究成果をいくつか紹介した。このように、伝熱材料と MI の相性は良く、熱物性計算と機械学習を組み合わせることによって、最適構造を設計し、実際に実験で高性能を実現する例が増えている。中規模の探索空間であればベイズ最適化は探索効率が非常に良く、実験と機械学習を交互に行うアプローチも含めて、スタンダードになりつつある。ベイズ最適化は熱電変換での熱伝導率の低減とパワーファクターの増大などの一般に相反する目的のバランスを最適化するのにも有用である<sup>[11]</sup>。一方、巨大な探索空間を取り扱うには他の手法を考える必要がある、それには量子アニーラを活用した手法が有用であると考えている。ただし、探索空間が大きくなると、必要なデータ数も多くなるため、より高速に物性データを得る手法が必要となる。物性計算の高速化や計算の並列化とともに、自動実験系の開発も進んでおり、探索空間と一貫性のあるデータ数のマッチングを取りながら大規模化できれば、材料開発が飛躍的に高効率化するのはと期待している。

このように、ブラックボックスモデルによる MI が発展する一方で、可読性のあるモデルやデータ/

特徴量の可視化方法も広く議論されている。これは、情報量を犠牲にしても人間が理解を深めるためということに加えて、複雑な材料やプロセスを開発する際に重要である。本稿では探索空間を巨大化する手法について述べたが、機械学習で追いきれない部分については学習ループに人間（所謂「匠」）が介在するようにするなど、それぞれの課題に合わせた手法が実践されている。MI においては、このように各課題に対して適切なアプローチを適宜考える目利きの能力が重要である。ここで、価値のある課題の多くは分野やスケールを横断するため、それに対する問題設定を考える際は統合的な知識が必要であり、その点においても機械工学や伝熱工学との相性が良いと感じている。是非、当該分野の若い研究者の方々に興味を持って頂ければと思う。

### 謝辞

本稿で紹介した論文の筆頭著者である Shenghong Ju 氏, Run Hu 氏, 北井孝紀氏, Jiang Guo 氏, 山脇証氏をはじめとする東京大学エネルギー工学研究室のメンバーおよび、吉田亮氏, Stephen WU 氏, 津田宏治氏, 田村亮氏, 平川一彦氏, 長井奈緒美氏, 櫻井篤氏をはじめとする共同研究者の方々に深く感謝する。

### 参考文献

- [1] Carrete, J., Li, W., Mingo, N., Wang, S. & Curtarolo, S., *Physical Review X* 4, 011019 (2014).
- [2] Seko, A., Togo, A., Hayashi, H., Tsuda, K., Chaput, L., Tanaka, I., *Physical Review Letters* 115, 205901 (2015).
- [3] Ju, S., Yoshida, R., Liu, C., Wu, S., Hongo, K., Tadano, T., Shiomi, J., *Physical Review Materials* 5, 053801 (2021).
- [4] <https://github.com/yoshida-lab/XenonPy>
- [5] Lindsay, L., Broido, D. A., Reinecke, T. L., *Physical Review Letters* 111, 025901 (2013).
- [6] Ju, S., Shiga, T., Feng, L., Hou, Z., Tsuda, K., Shiomi, J., *Physical Review X* 7, 021024 (2017).
- [7] Ueno, T., Rhone, T.D., Hou, Z., Mizoguchi, T., Tsuda, K., *Materials Discovery* 4, 18 (2016).
- [8] Hu, R., Iwamoto, S., Feng, L., Ju, S., Hu, S., Ohnishi, M., Nagai, N., Hirakawa, K., Shiomi, J., *Physical Review X* 10, 021050 (2020).

- [9] Sakurai, A., Yada, K., Simomura, T., Ju, S., Kashiwagi, M., Okada, H., Nagao, T., Tsuda, K., Shiomi, J., *ACS Central Science* 5, 319 (2019).
- [10] Kitai, K., Guo, J., Ju, S., Tanaka, S., Tsuda, K., Shiomi, J., Tamura, R., *Physical Review Research* 2 (1), 013319 (2020).
- [11] Yamawaki, M., Ohnishi, M., Ju, S., Shiomi, J., *Science Advances* 4, eaar4192 (2018).

## 航空機エンジン用ステージング燃焼器内に形成される燃焼振動の予兆検知

*Early Detection of Combustion Oscillations in a Staged Aircraft Engine Model Combustor*

後藤田 浩, 新地 悠平 (東京理科大学)

*Hiroshi GOTODA, Yuhei SHINCHI (Tokyo University of Science)*

庄司 烈, 吉田 征二 (宇宙航空研究開発機構)

*Takeshi SHOJI, Seiji YOSHIDA (Japan Aerospace Exploration Agency)*

*E-mail: gotoda@rs.tus.ac.jp*

*E-mail: shoji.takeshi@jaxa.jp*

*E-mail: yoshida.seiji@jaxa.jp*

### 1. はじめに

燃焼器の致命的な破損やライフサイクルの低下に繋がる燃焼振動は、化学反応による急激な発熱場、音響場と乱流場が相互に作用し合う非線形散逸現象である[1]。そのため、燃焼振動の非線形ダイナミクスを取り扱うための複雑系科学の基礎理論とその数理解析技術に寄せる期待が高まりつつある[2-4]。著者の一人は、記号力学、複雑ネットワーク、集団同期と力学系理論を融合させた先進的な数理解析手法を用いて、旋回乱流燃焼器で発生する燃焼振動の非線形ダイナミクスと予兆検知に関する一連の研究を進めている[5-11]。

航空機エンジン用の燃焼器開発において、rich burn quick mix lean burn (RQL) と希薄予混合燃焼は、低NOx 排出量を可能にする燃焼方式として有望視されている[12]。しかしながら、RQL では燃料と酸化剤の混合比が一時的に理論当量比に近づくと、NOx 排出量が増加する。希薄予混合燃焼は拡散燃焼と比較して安定した燃焼状態を保持できる当量比の範囲が狭く、その範囲外では燃焼振動や吹き消えなどの不安定な燃焼状態が生じる。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 航空技術部門推進技術研究ユニットでは、高い燃焼効率と低NOx の両立を図るために、一つの燃焼器内で拡散燃焼と希薄予混合燃焼の両方を用いた航空機エンジン用ステージング燃焼器の研究開発が進められている[12, 13]。しかしながら、ステージング燃焼器においても燃焼振動の発生が懸念される。そこで、同機構推進技術研究ユニットとの共同研究の一つとして、複雑系科学の視点から、シングルセクタのステージング燃焼器で発生する燃焼振動の予兆検知を行ってきた[14]。そして現在、より実機に近

い燃焼状態を模擬したマルチセクタのステージング燃焼器内で発生する燃焼振動の予兆検知を試みている。

近年、人工知能技術の目覚ましい進展に伴い、機械学習の燃焼分野への応用が望まれている。著者の一人は、推移ネットワーク[15]、Jensen-Shannon 複雑さ解析[16]とサポートベクトルマシーン[17]を組み合わせた方法論を提案し、旋回乱流燃焼器で発生する燃焼振動の予兆検知を行っている[18, 19]。本稿では、マルチセクタのステージング燃焼器を対象に、リカレンス定量化解析[20]とサポートベクトルマシーンを用いた燃焼振動の予兆検知に関する研究内容[21]を紹介する。

### 2. 実験装置と方法

本研究では、JAXA グリーンエンジンプロジェクトにおいて製作されたステージング燃焼器を用いる。燃焼試験は同機構推進技術研究ユニットが保有する高温高圧燃焼試験設備[22]で行われ、クルーズ条件や航空機の離着陸サイクル条件とは異なる実験条件下で人為的に燃焼振動を発生させる。図 1 にステージング燃焼器[21]を示す。燃焼器は軸方向ステージングを採用した2段燃焼器であり、希薄予混合燃料ノズル(lean staged fuel nozzle: LSF)とエミッション制御ノズル(emission control fuel nozzle: ECF)から構成される。LSF は主燃料ノズルとパイロット燃料ノズルから構成され、それぞれのノズルに供給される燃料流量は燃焼器の運転条件によって異なる。試験供試体は3組のLSFとECFを有し、燃焼器ライナの周方向の角度が90度のステージング燃焼器を使用する。本研究では、高圧ケーシングの外側に設

置された Kulite 製の圧力トランスデューサ(Model XTHE-10L-190-1000SG)を用いて、中央と両サイドの3箇所 (PT1-PT3) の燃焼器ライナのポート位置で圧力変動  $p'$  を計測する。ただし、 $p'$  のサンプリング周波数を 50 kHz とし、PT3 で測定された  $p'$  を解析対象とする。

本研究では、燃焼器の入口圧力を 1340 kPa、入口温度を 740 K、空気流量を 2.74 kg/s とする。燃料には灯油を用い、LSF のパイロット燃料ノズルに供給する燃料流量  $W_{fp} = 16.5$  g/s に保ち、メイン燃料ノズルに供給する燃料流量  $W_{fm}$  を 35.2 ~ 50.9 g/s の範囲で 0.4 g/s ごとに変化させる。これらの条件下で、安定燃焼から燃焼振動へ燃焼状態を遷移させる。それぞれの  $W_{fm}$  に対して取得された 30 秒間の  $p'$  をサポートベクトルマシンの教師データに用いる。そして、 $W_{fm}$  を 12 秒間で 33.6 ~ 43.3 g/s まで線形的に変化させたときの燃焼振動の予兆検知を行う。

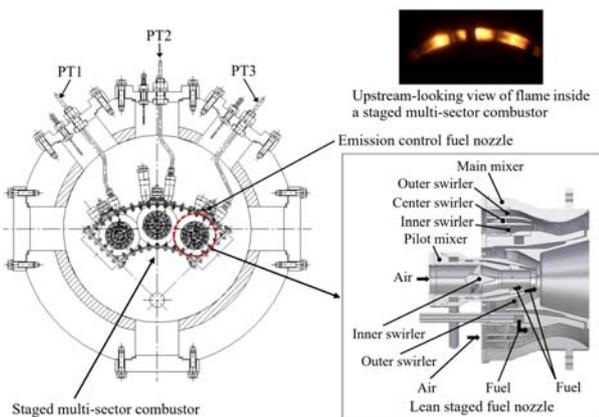


図1 マルチセクタのステージング燃焼器[21].

### 3. 複雑系科学の基礎理論に基づく解析手法と機械学習

#### 3.1 リカレンス定量化解析

力学系理論に基づく時系列解析は、Takens の埋め込み定理[23]を用いて不安定現象の時間変動を遅延座標系に変換し、構築された位相空間内の軌道不安定性を定量化することが可能である[24]. 本研究では、軌道同士の距離の秩序・非秩序構造を抽出することが可能なリカレンスプロット[20]に着目する。リカレンスプロットは  $d$  次元位相空間内の2点間距離を  $i, j$  の座標軸から構成される二次元平面上に binary plot として表示させたものであり、回帰行列の成分  $R_{ij}$  を用いて表現される。

$$R_{ij} = \Theta(r - \| \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j \|) \quad (1)$$

ただし、 $\Theta$  をヘビサイド関数、 $\mathbf{p}_i = (p'(t_i), p'(t_i + \tau), \dots, p'(t_i + (d-1)\tau))$ ,  $\tau$  を位相空間の遅れ時間、 $r$  を位相空間内の2点間距離の閾値とする。なお、 $r$  をアトラクタの最大直径の10%とする。

本研究では、 $p'$  の決定論的な構造を定量化するために、リカレンス定量化の一つとして知られるリカレンス決定度  $D_e$  を教師データから見積もる。

$$D_e = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{l_{\max}} lp_l}{\sum_{l=1}^{l_{\max}} lp_l} \quad (2)$$

ただし、 $l$  を斜線長さ、 $p_l$  を斜線長さの存在確率、 $l_{\min}$  を斜線長さの最小値、 $l_{\max}$  を斜線長さの最大値 (=  $N_{sp} - 1$ )、 $N_{sp}$  を位相空間内の点ベクトルの総数とする。本研究では、 $d = 5$ ,  $l_{\min} = 2$  とし、 $\tau$  は相互情報量が最初に極小値をとる時間とする。リカレンスプロットに短い斜線が不均一に分布する場合、 $p'$  は不規則的なダイナミクスに従う。長い斜線が形成される場合、 $p'$  は決定論的なダイナミクスに従う。 $0 \leq D_e \leq 1$  をとり、ダイナミクスの決定論性が高くなるほど  $D_e$  は増加する。

マルチフラクタル系の定式化に必要な分配関数で表現された一般化エントロピーは、ダイナミクスの乱雑さを測る重要な尺度の一つである[25]. Costa ら[26]は、二次の一般化エントロピー (相関エントロピー) から定義されるサンプルエントロピーの有用性を報告している。本研究では、サンプルエントロピーの概念をリカレンス定量化解析に取り入れた独自の手法論を提案する。本手法では、 $d$ 次元と  $d+1$ 次元の回帰行列の成分の積  $J_{ij}$  を算出する。 $J_{ij}$  は  $d$ 次元と  $d+1$ 次元の位相空間における近傍な点を表す。結合された2つの回帰行列に joint probability of recurrence [20]を適用し、 $J_d$ を算出する。本研究では、 $J_d$ を joint-dimensional vicinity と名付ける。

$$J_{ij} = R_{ij}^d R_{ij}^{d+1} \quad (3)$$

$$J_d = \frac{S - R_r^d}{1 - R_r^d} \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{(N_{sp} - 1)^2 R_r^d} \sum_{i=1}^{N_{sp}-1} \sum_{j=1}^{N_{sp}-1} J_{ij} \quad (5)$$

$$R_r^d = \frac{1}{(N_{sp} - 1)^2} \sum_{i=1}^{N_{sp}-1} \sum_{j=1}^{N_{sp}-1} R_{ij}^d \quad (6)$$

ただし、 $d = 4$ ,  $N_{sp} = 2497$  とする。  $0 \leq J_d \leq 1$  をとり、ダイナミクスの乱雑度が高くなるほど、 $J_d$  は低下する。本研究では  $J_d$  と  $D_e$  から成る二次元平面を構築し、サポートベクトルマシーンを適用する。

### 3.2 サポートベクトルマシーン

教師あり機械学習の一つであるサポートベクトルマシーンは、統計的学習理論に基づくパターン認識法であり、教師データから汎化誤差が最小となるようにクラスを分類する手法である[17, 27]. サポートベクトルマシーンを導入する際に、まず教師データ  $\{\mathbf{x}_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  をクラスタリングする。ただし、 $\mathbf{x}_i = (J_d, D_e)$  とする。本研究では、 $J_d$ - $D_e$  平面に教師無し学習である  $k$  平均法[27]を適用し、燃焼状態を(i) 安定燃焼, (ii) 安定燃焼から燃焼振動への遷移, (iii) 発達した燃焼振動に分類する。そして、分類境界の決定関数に対するラグランジュ関数の最適化問題を解く。本研究では、分類されたクラスに一对他法[28]を適用することで得られる教師データのラベルを  $y_i$  とする。ただし、 $y_i$  は+1または-1をとる。Karush-Kuhn-Tucker 条件下で、ラグランジュ関数  $\tilde{L}$  が得られる。式(7)を最大化することにより決定関数  $f(\mathbf{x})$  を得る。

$$\tilde{L}(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq a_i, \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0$$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n a_i y_i k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$  をラグランジュ乗数とし、カーネル関数  $k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$  にはガウスカーネルを用いる。また、 $n = 24600$  とする。

### 4. 結果と考察

$W_{fm}$  を増加させたときの  $p'$  の時間変化を図2に示す。 $W_{fm} = 35.2 \text{ g/s}$  のとき、 $p'$  は低振幅かつ非周期的な挙動を有しており、安定燃焼が形成される。 $W_{fm} = 40.7 \text{ g/s}$  のとき、急激な振幅の増加を伴う周期的な振動が突発的に現れる。 $W_{fm}$  をさらに増加させると周期的な振動の形成が顕著になる。そして、 $W_{fm} = 50.9 \text{ g/s}$  のとき、十分発達した燃焼振動が形成される。このとき、燃焼器の横方向の一次音響共鳴モードに対応する約 1300 Hz とその二次モード ( $\approx 2600 \text{ Hz}$ ) が支配的になることが、周波数解析によって確認されている。シングルセクタのステーjing燃焼器を用いた従来の研究[14]では、燃焼器の縦方向の1/4 波長音響共鳴モードが観察されている。しかしながら、本研究の実験条件下においては、縦方向のモードは観察されていない。

非周期振動から周期振動への遷移、もしくはその逆遷移は間欠性、周期倍分岐やトラス崩壊な

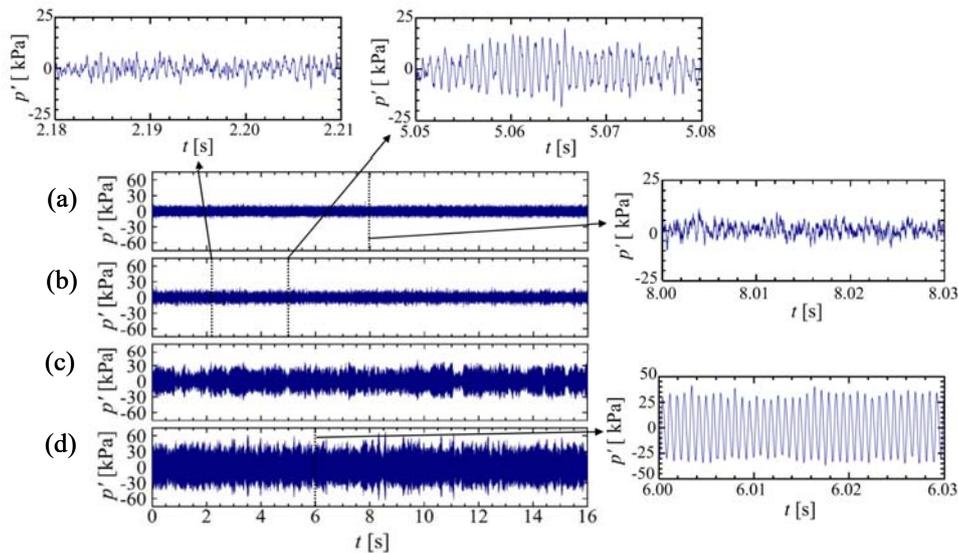


図2 主燃料流量  $W_{fm}$  を増加させたときの圧力変動  $p'$  の時間変化. (a)  $W_{fm} = 35.2 \text{ g/s}$ , (b)  $W_{fm} = 40.7 \text{ g/s}$ , (c)  $W_{fm} = 44.3 \text{ g/s}$ , (d)  $W_{fm} = 50.9 \text{ g/s}$  [21].

どのようなシナリオを経て起きることが知られている。間欠振動は、バーストとリミットサイクル振動が交互に不規則的に現れる非線形現象であり、燃焼振動の前兆現象として様々な燃焼器で観察されている[3, 29, 30]。そのため、間欠振動のダイナミクスの理解は燃焼振動の予兆検知に重要であると考える。本研究では、(i) 圧力変動のバースト領域のダイナミクスは決定論的な過程によって支配されていることを、(ii) 主燃料流量の増加に伴って、圧力変動は高次元カオスから雑音リミットサイクル振動に移行することを明らかにしている[21]。このような特徴を有する安定燃焼から燃焼振動への遷移現象を取り扱っている。最近、著者らはステージング燃焼器内の燃焼振動の前兆現象として、臨界減速の存在を報告している[31]。今後、燃焼振動の予兆検知で重要となる間欠振動と臨界減速との関連性についても明らかにしていきたい。

$J_d$  と  $D_e$  の二次元平面を図3に示す。ただし、それぞれの  $W_{f,m}$  に対して時間幅  $L$  のセグメントに分割された  $p'$  の  $J_d$  と  $D_e$  を見積もる。本研究では、 $L = 0.05$  s とし、1つのセグメントの  $p'$  は燃焼振動の約62サイクル分に相当する。また、30秒間の  $p'$  を取得しているため、それぞれの  $W_{f,m}$  に対する教師データ数は600 (= 30/0.05) である。位相空間内の軌道不安定性に基づく圧力変動の短期予測の結果[21]を踏まえて、 $J_d$  の  $\tau$  を  $2.0 \times 10^{-5}$  s とする。 $W_{f,m}$  が増加するにつれて、 $(J_d, D_e)$  の位置は左下側から右上側へ移動し、非線形的に変化する。 $J_d - D_e$  平面は  $W_{f,m}$  の増加に伴う安定燃焼から燃焼振動への状態変化を捉えている。

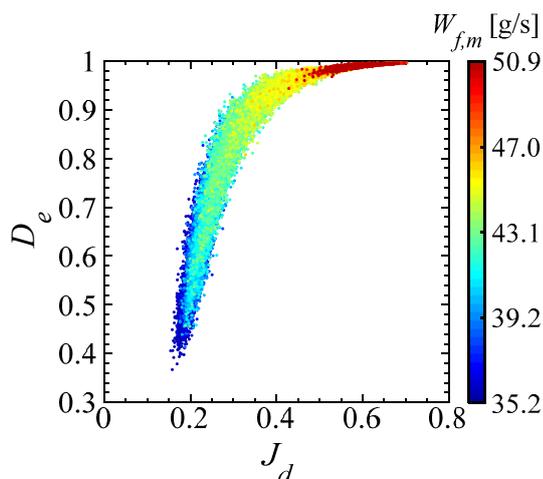


図3 主燃料流量  $W_{f,m}$  を増加させたときの joint-dimensional vicinity  $J_d$  とリカレンス決定度  $D_e$  の変化 [21].

図3の  $J_d - D_e$  平面に  $k$  平均法を適用し、サポートベクトルマシンのことによって得られた特徴空間を図4(a)に示す。サポートベクトルマシンの燃焼状態を安定燃焼(青色)、安定燃焼から燃焼振動への遷移状態(黄色)、十分発達した燃焼振動(赤色)に分類することが可能である。 $W_{f,m}$  を過渡的に増加させたときの  $p'$  を図4(b)に示す。なお、それぞれの色は図4(a)によって得られた燃焼状態と対応する。 $p'$  の変化に応じて、 $(J_d, D_e)$  の位置(黒点)は特徴空間内を移動し、 $11.0 \text{ s} \leq t \leq 17.0 \text{ s}$  で安定燃焼と遷移状態が交互に形成される。 $t \geq 17.2 \text{ s}$  のとき、突発的に燃焼振動が形成され始める。 $t \geq 20 \text{ s}$  のとき、十分発達した燃焼振動が継続して形成される。このことは特徴空間が安定燃焼から燃焼振動への遷移状態を十分捉えていることを示している。よって、本研究で提案する方法論は、燃焼振動の予兆検知に有用であると言える。最近、Kobayashi et al. [18]は、旋回乱流燃焼器を対象に、安定燃焼と遷移状態の継続時間に着目した燃焼振動の予兆検知指標  $R_t (= L_t / L_{all})$  を提案している。 $L_t$  を遷移状態と判定されたラベルデータ数、 $L_{all}$  をラベルデータの総点数とする。 $R_t = 25\%$  を超えるときに燃焼振動の予兆を捉えたと判定する。この基準に基づく、燃焼振動の前兆は  $t = 14.0 \text{ s}$  のときに起きると判定できる。

圧力変動(図4(b))、圧力変動の二乗平均平方根  $p'_{rms}$  とパワースペクトル密度 PSD の時間変化を図5に示す。燃焼振動の前兆に対応する  $t \approx 15.0 \text{ s}$  を超えると、 $p'_{rms}$  は増加し始めている。十分発達した燃焼振動が形成されると、 $p'_{rms}$  はほぼ一定となる。PSDに着目すると、 $f \approx 1300 \text{ Hz}$  で卓越したピークが現れており、横方向の一次音響共鳴モードに対応する。十分発達した燃焼振動が形成される時、二次モードが現れる。圧力変動の振幅が増加するにつれて一次モードが支配的となるが、PSDは燃焼振動の前兆時間を正確に抽出することが困難である。これらの結果から、サポートベクトルマシンのことによって得られた  $J_d - D_e$  平面の特徴空間は、圧力変動の二乗平均平方根とパワースペクトル密度よりも優れた燃焼振動の検知器であると言える。

確率分布の汎関数として定義される情報エントロピー、カルバック・ライブラー距離、相互情報量は情報理論における最も基本的な量である。特に、統計力学的エントロピーと関わりのある情報エントロピーは乱雑さを測る重要な尺度である。情報

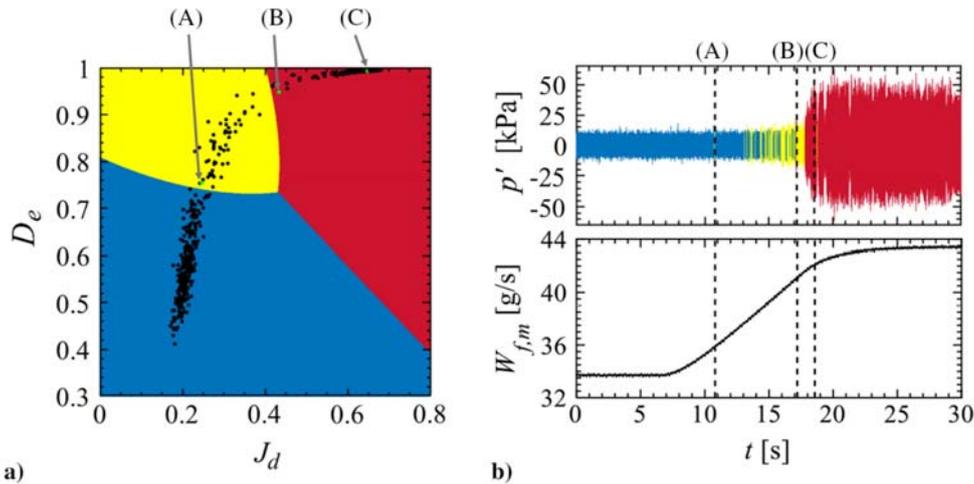


図4 (a) Joint-dimensional vicinity  $J_d$ とリカレンス決定度  $D_e$ から成る特徴空間と主燃料流量  $W_{f,m}$ を過渡的に増加させたときの燃焼状態の推移. (b)  $W_{f,m}$ を過渡的に増加させたときの圧力変動  $p'$ の変化 [21]. (A)  $t = 10.80$  s, (B)  $t = 17.20$  s, (C)  $t = 18.57$  s.

理論と記号力学の融合によって、時系列の記号列への動的変換が考慮され、順列エントロピー[32]やカルバック・ライブラー距離を用いた Jensen-Shannon 複雑さ解析が提案されている. そこで、Jensen-Shannon 複雑さ解析とサポートベクトルマシンのを組み合わせた方法論[19]を用いて、本研究で観察される燃焼振動の予兆検知を行い、図4で得られた結果と比較する. Jensen-Shannon 複雑さ解析の詳細については、文献[25]を参考にしたい.

順列エントロピー  $H_p$  と Jensen-Shannon 複雑度  $C_{JS}$  からなる二次元平面の特徴空間を図6に示す.

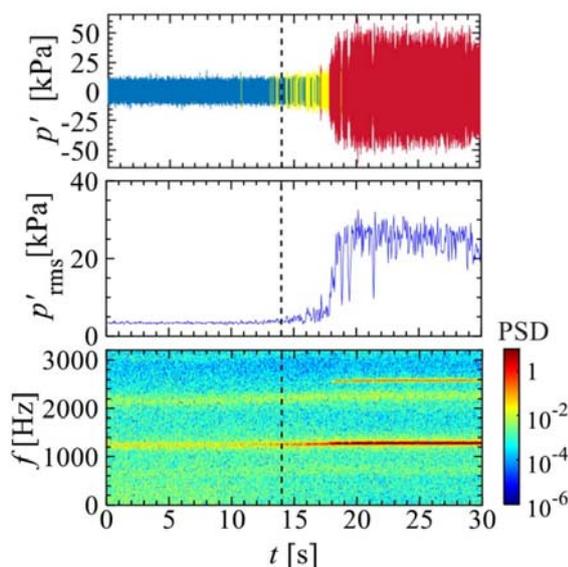


図5 圧力変動(図4(b)), 圧力変動の二乗平均平方根  $p'_{rms}$  とパワースペクトル密度 PSD の時間変化 [21].

図4と同様に、青色は安定燃焼、黄色は安定燃焼から燃焼振動への遷移状態、赤色は発達した燃焼振動に対応している. ( $H_p$ ,  $C_{JS}$ ) の位置 (黒点) は中央付近から左下側へ移動し、 $12 \text{ s} \leq t \leq 16.5 \text{ s}$  で安定燃焼と遷移状態が交互に形成される. ここで重要な点として、 $R_t$ が25%を超えるのは、 $t \geq 14.8 \text{ s}$  のときである. この時刻は本研究で提案する手法によって得られる予兆検知時刻とほぼ同一である. これらの結果から、従来の研究[19]と本研究で提案する方法論は、ステージング燃焼器内の燃焼振動の予兆検知に有効であると言える. 最近、著者の一人はJAXA 高効率軽量ファン・タービン技術実証 (aFJR) プロジェクト[33]との共同研究によって、サポートベクトルマシンの空力弾性不安定現象である翼列フラッタの予兆検知に有用であることを報告している[34]. このように、サポートベクトルマシンは、航空宇宙工学分野における様々な不安定現象の予兆検知に有用な機械学習の一つになることが期待される.

## 5. まとめ

本研究では、力学系理論に基づく時系列解析と機械学習を用いて、航空機エンジン用ステージング燃焼器内に形成される燃焼振動の予兆検知を行った. Joint-dimensional vicinity とリカレンス決定度から成る二次元平面にサポートベクトルマシンを適用することで、安定燃焼から燃焼振動への遷移を捉えることができる. 本研究で提案する

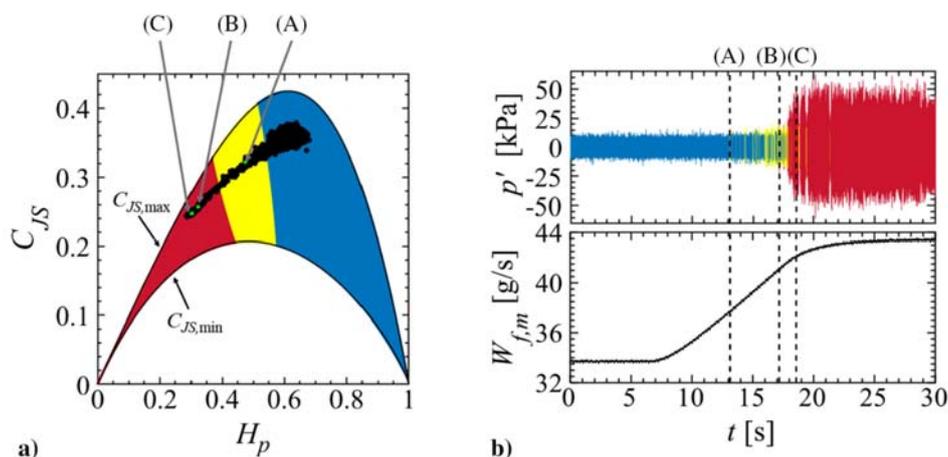


図6 (a) 順列エントロピー $H_p$ と Jensen-Shannon 複雑度  $C_{JS}$  から成る特徴空間と主燃料流量  $W_{f,m}$  を過渡的に増加させたときの燃焼状態の推移. (b)  $W_{f,m}$  を過渡的に増加させたときの圧力変動  $p'$  の変化 [21]. (A)  $t = 13.13$  s, (B)  $t = 17.17$  s, (C)  $t = 18.57$  s.

方法論は、マルチセクタのステージング燃焼器内の燃焼振動の予兆検知に有用である。

#### 参考文献

- [1] T. C. Lieuwen, *Unsteady Combustor Physics* (Cambridge University Press, 2012).
- [2] M. P. Juniper and R. I. Sujith, *Annual Review Fluid Mechanics* **50**, 661 (2018).
- [3] R. I. Sujith and V. R. Unni, *Physics of Fluids* **32**, 061401 (2020).
- [4] R. I. Sujith and V. R. Unni, *Proceedings of the Combustion Institute* **38**, 3445 (2020).
- [5] H. Gotoda, Y. Shinoda, M. Kobayashi, Y. Okuno, and S. Tachibana, *Physical Review E* **89**, 022910 (2014).
- [6] Y. Okuno, M. Small, and H. Gotoda, *Chaos* **25**, 043107 (2015).
- [7] H. Gotoda, H. Kinugawa, R. Tsujimoto, S. Domen, and Y. Okuno, *Physical Review Applied* **7**, 044027 (2017).
- [8] S. Murayama, H. Kinugawa, I. T. Tokuda, and H. Gotoda, *Physical Review E* **97**, 022223 (2018).
- [9] S. Murayama, K. Kaku, M. Funatsu, and H. Gotoda, *Proceedings of the Combustion Institute* **37**, 5271 (2019).
- [10] S. Murayama and H. Gotoda, *Physical Review E* **99**, 052222 (2019).
- [11] T. Kurosaka, S. Masuda, and H. Gotoda, *Chaos* **31**, 073121 (2021).
- [12] 宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ 研究開発本部, 航空機研究開発の現在から未来へ, 丸善出版株式会社 (2011).
- [13] T. Yamamoto, K. Shimodaira, S. Yoshida, and Y. Kurosawa, *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* **135**, 031502 (2013).
- [14] H. Kobayashi, H. Gotoda, S. Tachibana, and S. Yoshida, *Journal of Applied Physics* **122**, 224904 (2017).
- [15] J. Zhang, J. Zhou, M. Tang, H. Guo, M. Small, and Y. Zou, *Scientific Reports* **7**, 7795 (2017).
- [16] A. Rosso, H. A. Larrondo, M. T. Martin, A. Plastino, and M. A. Fuentes, *Physical Review Letters* **99**, 154102 (2007).
- [17] V. N. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory* (Springer-Verlag, 1995).
- [18] T. Kobayashi, S. Murayama, T. Hachijo, and H. Gotoda, *Physical Review Applied* **11**, 064034 (2019).
- [19] T. Hachijo, S. Masuda, T. Kurosaka, and H. Gotoda, *Chaos* **29**, 103123 (2019).
- [20] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, and J. Kurths, *Physics Reports* **438**, 237 (2007).
- [21] Y. Shinchi, N. Takeda, H. Gotoda, T. Shoji, and S. Yoshida, *AIAA Journal* (2021) 印刷中.
- [22] 下平一雄, 山田秀志, 牧野敦, 山本武, 林茂, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-05-007, (2006).

- [23] F. Takens, *Dynamical Systems of Turbulence, Lecture Notes in Mathematics* **898**, 366 (Springer-Verlag, 1981).
- [24] H. Kantz and T. Schreiber, *Nonlinear Time Series Analysis* (Cambridge University Press, 1997).
- [25] 宮野尚哉, 後藤田浩, 時系列解析入門 [第 2 版] 線形システムから非線形システムへ (サイエンス社, 2020).
- [26] M. Costa, A. L. Goldberger, and C. K. Peng, *Physical Review E* **71**, 021906 (2005).
- [27] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning* (Springer-Verlag, 2006).
- [28] C. Brunner, A. Fischer, K. Luig, and T. Thies, *Journal of Machine Learning Research* **13**, 2279 (2012).
- [29] V. Nair and R. I. Sujith, *Chaos* **23**, 033136 (2013).
- [30] V. Nair and R. I. Sujith, *Combustion Science and Technology* **187**, 1821 (2015).
- [31] 岸谷宣成, 新地悠平, 後藤田浩, 庄司烈, 吉田征二, 第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1434 (2021).
- [32] C. Bandt and B. Pompe, *Physical Review Letters* **88**, 174102 (2002).
- [33] T. Nishizawa, *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019, IGTC-2019-IL2* (2019).
- [34] T. Hachijo, H. Gotoda, T. Nishizawa, and J. Kazawa, *Journal of Applied Physics* **127**, 234901 (2020).
-

# 深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区熱環境のリアルタイム予測

*CNN-Based Super-Resolution Simulation for Realtime Prediction of Urban Heat Environment*

大西 領, 安田 勇輝 (東京工業大学)

Ryo ONISHI, Yuki YASUDA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: onishi.ryo@gsic.titech.ac.jp

## 1. はじめに

安全・安心な社会を実現するためには、熱中症リスクの低減が急務の課題である。例えば日本における熱中症による死亡者は年平均約 900 名 (2007 年～2011 年の平均値[1]) にも及ぶ。これは、台風・大雨による死者不明者年平均約 60 名 (2004 年～2009 年の平均値) に比べ桁違いに大きく、地震・津波による死者不明者年平均約 1,000 名 (1995 年～2016 年の平均値) に匹敵する。温暖化、ヒートアイランド、高齢化の進行に伴い、今後さらに深刻化していくと考えられる中で、熱中症リスクを低減するためには各人の行動変容だけでなく社会のスマート化も必要になると考えられる。

各人が熱中症を正しく理解した上で判断し行動することはもちろん重要である。しかし、判断を間違えてしまった時に熱中症リスクが急上昇する。各人が判断ミスをしないように、そもそも各人が自然と熱中症リスクが低い行動を取れるようなスマートな社会の実現が必要であろう。もし、人流だけでなく都市街区の熱環境までをサイバー空間上で再現し予測できれば、各人の年齢、性別、体型や健康状態を考慮した上で、群衆全体の熱中症リスクを低減するような人流制御サービスが可能になるだ

う。

そのような未来社会サービスの実現のためには、現在の天気予報が対象とする気象よりも、さらに人の生活に近い“微気象”に対する予測情報が必要となる。なお、微気象とは、土地利用・建物・植生および人間活動などの影響を強く受ける地表から高度 100m 程度までの気象現象のことである。この微気象を予測できるようになり、図 1 に示すような微気象予測情報を包含した気象情報基盤 (インフラ) が整備されれば、上記のような熱中症リスク低減サービスだけでなく、街区での安全なドローン物流、スマートエネルギーマネジメントやプラントのスマート運用などの様々な未来社会サービスが実現されるだろう。しかし、現状では、微気象予測シミュレーションの計算コストが大きなボトルネックの一つとなっている。例えば、2km 四方の領域を 5m 解像度で、30 分先までを予測するのに、スパコンを使っても数時間かかってしまう。予測にかかる時間を 1,000 分の 1 程度に劇的に低減しないとリアルタイムサービスを実現することはできない。

近年、著者らの研究グループでは、深層学習を援用した AI シミュレーション技術を開発し、街区微気象つまり街区熱環境に関する高解像度予測情報をリアルタイムに取得することを可能にした[2]。具体的には、超解像と呼ばれる低解像度画像から高解像度画像を作成する技術を活用した超解像シミュレーション法を開発した。本稿では、この手法に基づいた街区熱環境の高解像度予測情報創出に関する最新の取り組みを紹介する。

## 2. 街区微気象シミュレーション

### 2.1 Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)

海洋研究開発機構および東京工業大学が中心となって Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) と呼ばれるマルチスケール大気海洋結合



図 1 微気象予測情報を活用した未来社会サービス

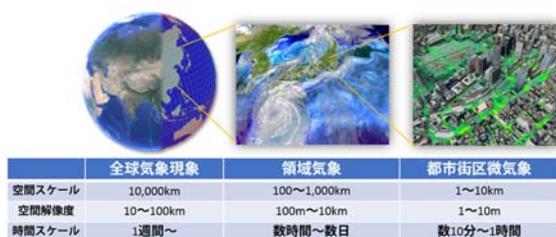


図2 Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) が対象とする気象スケール. MSSG は全地球スケールから都市街区の微気象までを扱うことができる世界唯一のマルチスケールモデルである.

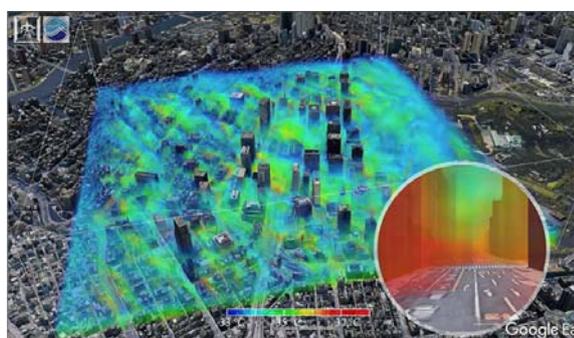


図3 2015年8月7日14:30の東京駅付近の気温分布の3次元可視化画像

モデルの開発が進められている. このMSSGは図2に示すように全球(グローバル), 領域(メソ), および都市(マイクロ)スケールの大気海洋シミュレーションをシームレスに実行できるように設計されている[3-6]. 都市街区スケールを対象としたシミュレーションの際には, 境界層モデルを用いず, いわゆるLES(Large-eddy simulation)モデルとして実行される. LESとは, 計算格子以下の乱流現象をモデル化した乱流モデルを用いることで, 乱流による混合と拡散を適切に考慮できる計算手法である. MSSGの大気コンポーネントの力学過程は非静力学方程式系に基づいており, 支配方程式は, 密度の輸送方程式, 運動量の輸送方程式(Navier-Stokes方程式), 圧力の輸送方程式, および水物質の輸送方程式である.

図3に, MSSGを用いて得られた東京駅付近の気温の3次元分布を示す. この図右下円には, 銀座通りに立った人の目線での気温分布の可視化画像が示されている. ビルの日陰側(右側)に比べ, 日向

側(左側)の気温が高い様子がわかる. 高々幅30mしかない通りであっても, その両端で熱環境が大きく異なることがわかる.

MSSGを用いた都市街区の熱環境シミュレーションにより得られた動画は日本科学未来館のyoutubeチャンネルから視聴できる[7].

## 2.2 三次元熱放射モデル

街区熱環境を定量化する際には, 建物による日射の遮りや, 日射によって暖められた表面からの熱放射などの3次元熱放射過程を計算する必要がある. MSSGは, ラジオシティ法と呼ばれる, 形態係数データを用いた3次元放射計算を行う[6]. その際, 地表面や建物表面については計算格子に沿って面積要素に分割する一方, 樹冠については体積要素に分割し, 樹冠内部での多重散乱も考慮した放射熱フラックスを算出する.

MSSGは, 対流だけでなく, 地下や建物での熱伝導, さらには3次元熱放射過程までを直接計算できる. つまり対流, 伝導および放射の3つの伝熱過程すべてを直接計算できる.

一般的な気象モデルは地形に沿った座標系を用いるため, 地面の起伏は考慮できるものの, 建物などの地面から垂直に切り立った人工構造物の周りの流れを計算することはできない. また, 考慮される熱放射過程も鉛直1次元方向のみであり, 光が斜めにあたることでできるビルの日陰などの3次元過程は考慮されない. 一般的な工学モデルは, 人工構造物周りの流れを考慮できるものの, 気温や湿度などの気象要素を考慮せず, また熱放射過程の計算機能を有しないことが多い. 近年は機能拡張が行われ, city-LES[8]やPALM[9]と呼ばれるモデルは, 気象要素や3次元熱放射過程の計算も可能となっている. しかし, それらのモデルであっても, 格子系の制約から領域気象計算や全球気象計算を実施することはできない. MSSGモデルは上記全てを実施できる上に, 海洋モデルも有するという強力なモデルである.

## 2.3 樹冠モデル

前節で熱放射過程計算における樹冠の影響に関して触れた. 一方, 樹冠は熱放射だけでなく, 風や気温にも影響を与える. 樹冠が大気の流れに及ぼす抵抗は葉面積密度に比例する. MSSGの樹木モデル[6]では, 葉による渦生成効果と散逸効果を考慮する. 樹冠から大気への顕熱フラックスおよび潜熱フ

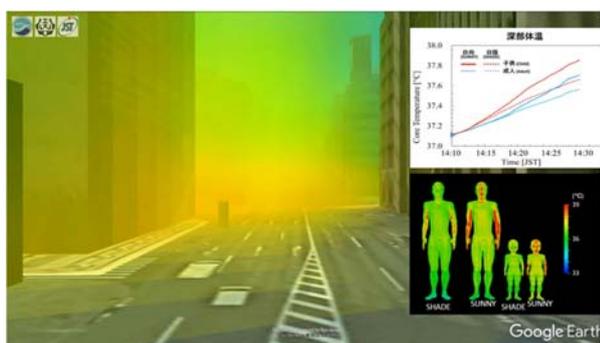


図 4 東京銀座通りを対象として、地域や場所の気象特性を建築物や道路、樹木などの影響も考慮した上で予測し、さらに詳細な人体温熱応答モデルによって個人単位の熱ストレスを定量評価することに成功した。

ラックスの計算では、気孔開度が蒸散量に及ぼす植物生理学的作用を考慮した気孔コンダクタンスモデルを用いる。その際、熱収支式から葉表面温度を計算する。

## 2.4 微気象と人体温熱応答

直近では、微気象予測シミュレーションと人体温熱応答シミュレーション(名古屋工業大学 平田晃正教授)を融合することに成功した。微気象情報を人体温熱応答モデルの入力値にすることにより、各人の深部体温の時間変化を予測した[10, 11]。ここでは、人体を一辺 2mm の立方体メッシュに区切り各メッシュの温度および血流温度の変化を算出した。その際、外部環境との伝熱と放射を通じた熱フラックスだけでなく、3.6km/h の歩行による運動強度に応じた体内発熱、着衣としては白い綿素材の半袖および長ズボンを想定した上で、体表面からの発汗も考慮した。この融合技術により、都市街区内の熱中症リスクを定量予測することに成功した。なお、深部体温は体内奥深くの体温であり、1 度程度上昇すると熱中症の症状が現れ始めると言われている。銀座通りを歩く歩行者を対象として、深部体温の変化を計算した結果、猛暑の中 20 分程度歩くだけで深部体温が 0.8 度近く上昇し、また、同じ通りであっても日向側を歩くか日陰側を歩くかで 0.2 度異なり、大人か子供かでも 0.2 度異なることがわかった。これは熱中症リスク低減サービスの端緒を開いたことになる。

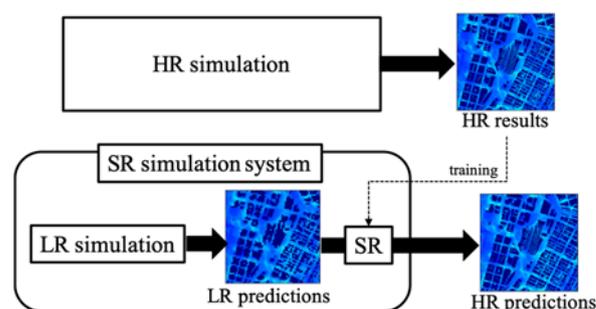


図 5 超解像シミュレーションシステム。高解像度 (high-resolution, HR) 計算結果を用いて深層学習させておいた超解像 (SR) 器に、低解像度 (low-resolution, LR) 計算結果を渡し、HR 予測結果を超高速度に生成する。

## 3. 超解像シミュレーション法による街区熱環境のリアルタイム予測

### 3.1 超解像シミュレーション法

数メートル解像度での微気象シミュレーションには、スーパーコンピュータを使った膨大な計算が必要である。実際の社会サービスへの適用を考える際には、計算量の軽減、計算時間の削減が必要となる。近年、著者らのグループでは深層学習を活用した AI 融合シミュレーションによる計算時間の劇的な削減に成功した[2]。具体的には深層ニューラルネットワークを用いた超解像 (Super Resolution, SR) 技術[12]を活用した。なお、超解像とは、低解像度 (low resolution, LR) 画像から高解像度 (high resolution, HR) 画像を生成する技術である。

本節では、我々の超解像シミュレーション法の概説と、その性能向上に向けた直近の取り組み[13]を紹介する。

図 5 に、開発した超解像シミュレーション法を分解する。予め大量の HR シミュレーション結果と LR シミュレーション結果から成る学習データセットを作成し、そのデータセットを学習させた超解像器を用意する。LR シミュレーションは HR シミュレーションに比べて計算コストが非常に小さく、例えば 30 分先までの街区微気象の予測を 1 分程度で更新できると仮定する。LR シミュレーションから得られる LR 予測結果を超解像器によって HR 予測結果に変換することで、HR 予測結果をリアルタイムに更新することが可能となる。

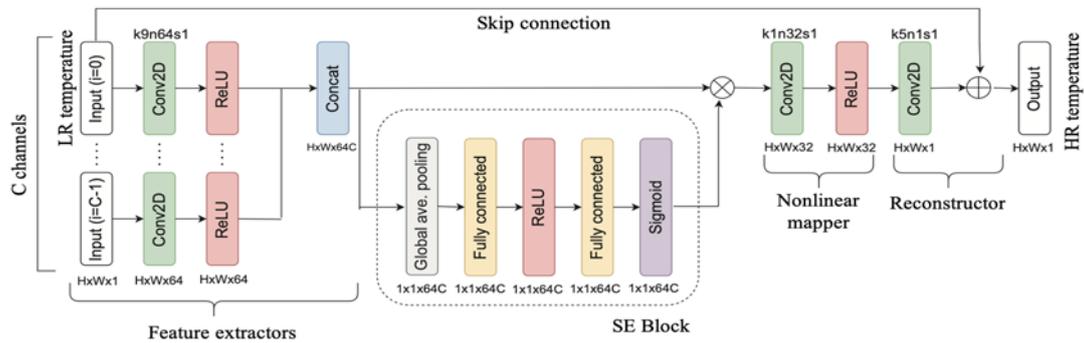


図6 SE-SRCNN (Squeeze-and-Excitation Super-Resolution Convolutional Neural Network) のネットワーク。"Conv2D"と書かれた四角形の上の文字列はカーネルサイズ，フィルタ数，ストライドサイズを示す。例えば，"k9n64s1"はカーネルサイズが9×9，64フィルタ，ストライドサイズ1×1を表す。

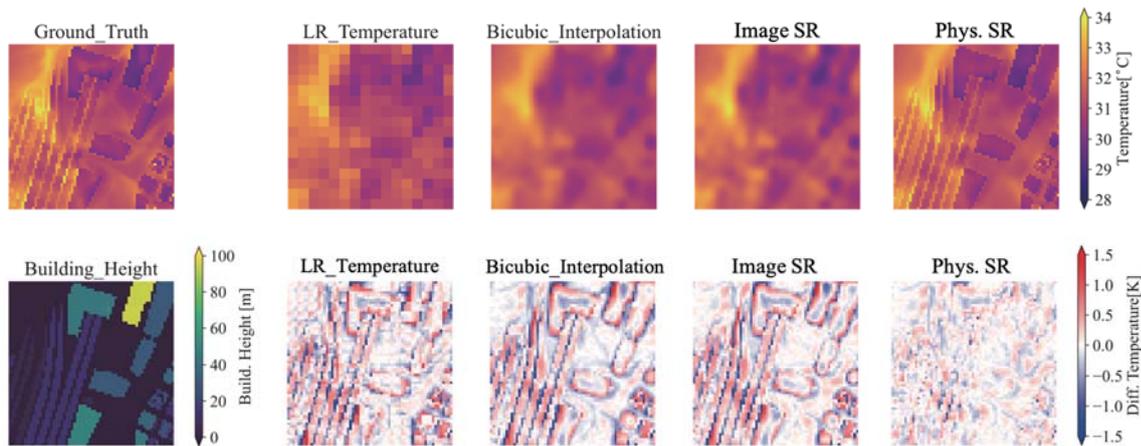


図7 2m高さにおける気温分布の超解像結果例。上段が気温分布を示し，左上が参照解としての5m解像度結果を示す。LR\_Temperatureが20m解像度結果 (Low-Resolution) であり，Bicubic補間およびイメージ超解像，物理超解像結果がその横に示されている。下段は，右下の建物高さ分布を除いて，超解像結果と参照解との誤差を示す。

超解像器を学習させるには時間がかかるが，学習済み超解像器を用いてLR結果をHR情報に補間するには時間を要しないことを利用して，リアルタイム性を確保する。実際，HRを5m解像度，LRを20m解像度とした場合，2km四方の街区に対する30分先までのHR予測結果をリアルタイムに更新できる(1分程度で更新できる)ことが確認されている [2]。

### 3.2 物理超解像

近年，深層ニューラルネットワークに物理法則を学習させる取り組みが盛んに行われている。Onishi et al. (2019)[2]は，物理を学習した超解像 (Physics-

informed SR，もしくは，単に Physics SR) を下ののようにレベル0~3まで定義した。

| 超解像器の物理考慮レベル |  |
|--------------|--|
| Level 0:     | Image SR method  |
| Level 1:     | Physics SR that utilizes supplemental HR information                             |
| Level 2:     | Physics SR that utilizes statistical theory for mapping between LR and HR images |
| Level 3:     | Physics SR that directly utilizes governing equations                            |

物理法則を学習させず，画像のみを学習させたも

のはイメージ超解像と呼ばれ、物理考慮レベル0の超解像に分類される。Onishi et al. (2019) [2]はイメージ超解像にとどまっていた。本稿では、物理考慮レベル1の超解像器の開発[13]について概説する。

都市街区内の気温分布を予測することを想定し、街区微気象シミュレーションから得られた高さ2mにおける1分平均気温の水平分布画像を想定する。図6に、開発した深層ニューラルネットワークを示す。気温分布のLR画像からHR画像を生成するのがこのニューラルネットワークの機能である。その際、気温分布だけでなく、その他の物理量の分布も考慮することで隠れている物理法則を学習させる。考慮する複数の分布画像をチャンネル毎に入力し、抽出された特徴量の重要性をアテンション機構の1つであるSE (Squeeze-and-Excitation) ブロックを通じて動的に決定する。

図7に東京駅周辺の320m四方(5m解像度, 64×64格子)における2m高さにおける気温分布の超解像結果例を示す。ここに示す物理超解像では、入力として気温分布の他に、建物高さ分布、地表面における下向き短波放射(日射)分布、東西方向および南北方向風速の分布を用いた。なお、水平方向の計算領域は2km四方であり、その領域を320m四方のタイルに分割した上で、タイル単位で学習を行った。図に示されているのはその一つのタイルであり、左側には東京駅の高架、右側には高層ビルがある。20m解像度気温分布から5m解像度気温分布を得るのが今回の超解像の目的となる。イメージ超解像を用いた場合、Bicubic補間を用いた結果に比べて、よりコントラストがはっきりした画像が得られる。しかし、線路高架による小スケールの分布構造は再現されない。一方で、物理超解像を用いた場合には、その小スケールの分布構造まで再現されている。補間の二乗平均平方根誤差RMSEで見ると、Bicubicでは0.35度であったものが、物理超解像を用いた場合には0.18度にまで低減された。詳述は省くが、この誤差半減には建物高さ情報が大きく貢献したことがわかった。図7下段に補間誤差の水平分布を示す。Bicubicやイメージ超解像では、建物壁面近傍で大きな誤差が見られる。一方、物理超解像では、そのような大きな誤差がない。これは、物理超解像器が建物周辺では特殊なことが起こることを学習した結果である。

物理を学習させることで格段の補間性能向上を

得られることが明らかになった。一方で、レベル0~3まである物理考慮レベルでいうと、まだレベル1の段階である。今後レベルを上げることで、どこまでの補間精度の向上を得られるかを明らかにする。

#### 4. おわりに

熱中症リスクを積極的に低減するために、例えば都市街区における熱中症リスクを最小化する人流制御サービスの実現が望まれる。そのような近未来社会サービスの実現には、街区熱環境のリアルタイム予測情報が必要となる。しかし、街区微気象シミュレーションの計算コストは甚大であり、シミュレーション科学の力だけに頼っていたのでは、そのリアルタイム予測の実現には数十年かかる。そこで、著者らは、深層学習を用いた超解像技術と予測シミュレーションを融合活用する、超解像シミュレーション法と呼ばれるAI融合シミュレーション技術を開発した[2]。当初は物理を考慮せずに画像情報のみを学習させるイメージ超解像器を開発したが、本稿で紹介したように、物理を考慮した超解像器を開発し、大幅な補間性能向上を達成した[13]。一方で、レベル0~3まである物理考慮レベル[2]でいうと、まだレベル1の段階である。今後レベルを上げていくことで、補間精度と汎用性の向上を図る。

#### 謝辞

大規模数値シミュレーションは海洋研究開発機構の地球シミュレータを用いて行われ、機械学習は海洋研究開発機構のDAシステムおよび東京工業大学のTSUBAME3.0を用いて行われた。科研費学術変革領域(B)「微気象制御学」領域(課題番号: 20B207)の支援を受けた。最後に、執筆の機会を与えてくださった編集委員会に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 藤部文昭, 暑熱(熱中症)による国内死者数と夏季気温の長期変動, 天気, 408 (2013), pp.371-381.
- [2] Onishi, R., Sugiyama, D. and Matsuda, K., Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology”, SOLA, 15 (2019) 178-182.
- [3] Takahashi, K., Onishi, R., Baba, Y., Kida, S., Matsuda, K., Goto, K., and Fuchigami, H.,

- Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 454 (2013) 012072.
- [4] Onishi, R., and Takahashi, K., A Warm-Bin–Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69 (2012) 1474-1497
- [5] Sasaki, W., Onishi, R., Fuchigami, H., Goto, K., Nishikawa, S., Ishikawa, Y., and Takahashi, K., MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 9352–9360.
- [6] Matsuda, K., Onishi, R. and Takahashi, K., Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.* 173 (2018) 53-66.
- [7] MiraikanChannel, 東京ヒートアイランド: [youtu.be/EMm9La3riNA](https://youtu.be/EMm9La3riNA)
- [8] Ikeda, R., Kusaka, H., Iizuka, S., Boku, T. and Akimoto, Y., Development of Parallelized Urban Meteorological Model, *Proceedings of 8th International Conference on Urban Climates* (2012), pp.587-589.
- [9] B. Maronga et al., The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives, *Geosci. Model Dev.*, 8 (2015), pp.2515-2551.
- [10] Kamiya, T., Onishi, R., Kodera, S. and Hirata, A., Estimation of Time-Course Core Temperature and Water Loss in Realistic Adult and Child Models with Urban Micrometeorology Prediction, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 5097 (2019)
- [11] 都市空間での詳細な熱中症リスク評価技術の開発に成功～より安心・安全な行動選択に向けて～（プレスリリース）, [www.jst.go.jp/pr/announce/20190723-2/index.html](http://www.jst.go.jp/pr/announce/20190723-2/index.html)
- [12] Dong, C., Loy, C.C, He, K., and Tang, X., Learning a deep convolutional network for image super-resolution, *In European Conference on Computer Vision*, (2014) 184-199.
- [13] Yasuda, Y., Onishi, R., Hirokawa, Y., Kolomenskiy, D. and Sugiyama, D., Physics-Informed Super-Resolution for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, arXiv:2108.00806.

## 機械学習を用いた気液二相流の流動様式識別

*Gas-Liquid Two-Phase Flow Regime Identification using Machine Learning Techniques*

三輪 修一郎 (東京大学)

*Shuichiro MIWA (The University of Tokyo)*

*e-mail: miwa@vis.t.u-tokyo.ac.jp*

### 1. はじめに

本稿を執筆している 2021 年夏現在, 日本における第三次 AI ブームにも少しずつ落ち着きが見られ, 様々な用途に応じて AI 技術を「実装」する段階に移行しているように筆者は感じている. 書店に並ぶ AI 関連の技術書も, コードによる応用例や実装をフォーカスしたものが目立ち, 細分化が進んでいる印象を受ける. YouTube 等に上がっている機械学習関連動画も高再生数を弾き出しているものも多く, AI (図 1: 機械学習や深層学習を含む) 応用への関心が依然高いことが伺える.

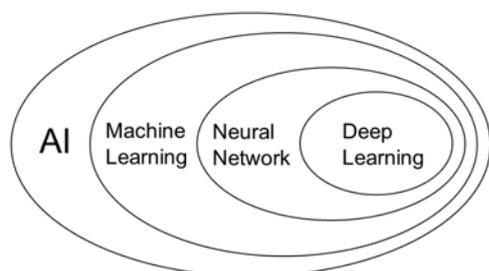


図 1 AI, 機械学習, 深層学習の概念

国内外の工学系学会においても, AI 応用を念頭にいた様々な分科会が立ち上がり, 応用として用いる機械学習の可能性と限界が少しずつ可視化されつつあるように感じる. 深層学習のような機械工学系からは比較的「遠い」技術を用いてコードを書き上げる際, 一昔前までは実装に伴う情報取得に極めて高いハードルが存在し, 学会等の場での情報収集が必要不可欠であった. 深層ニューラルネットワーク等をゼロから実装するには, その道に詳しい研究室に所属する等, 選択肢が限られていた. しかしながら, 情報やソフトウェアそのものに価値があった時代から, インターネット経由で共有されたコードをユーザー同士が更新し合い, 英知を結集してより良い物を作り上げる時代に移行しつつあるように思える. TensorFlow や

Keras 等のフレームワークを一度は耳にされた伝熱学会会員の方も多いのではないだろうか. これらのフレームワーク環境はコマンド数行で PC 上に実装可能であり, 家電量販店で販売されているゲーム用の GPU を用いれば, 一昔前ではラボレベルで開発していた静止画や動画中の画像識別や物体検出といったハイコストな高速画像処理も可能である. つまり, 深層学習等の最新アルゴリズムを用いた画像識別等のツールを個人で容易に開発・チューニングできるようになったということの意味する. これは, 計算流体力学における汎用 CFD のように, 機械学習は高次元・大規模データからの相関を見つけ出す汎用ツールとして普及していくのはほぼ確実であると考えて間違いは無く, 我々は大変 Exciting な時代の渦中に立っているのではないだろうか.

本稿においては, 筆者の自己紹介も兼ねた雑筆にお付き合い頂いた後, 気液二相流の紹介と, AI 技術応用例を紹介させて頂きたいと思う.

### 2. Purdue 大学工学部での AI

筆者は米国 Purdue 大学にて環境工学 (Civil/Environmental Engineering) 専攻として学部を卒業し, 2006 年より燃料電池における熱流体モデルの研究を行うため原子力工学科の修士課程に進んだ. この進路変更(?) が「AI」を耳にするきっかけとなる. 大学院入学当時の学科長が Computer Science (CS) の学位を持つ Lefteri Tsoukalas 教授であり, ニューラルネットワークやファジー理論といった人工知能技術を原子力システム安全へ応用する研究を専門とする先生であった. つまり, 原子力工学科の学科長が AI 研究者であったという訳である. 当時の AI は, 第二次のブームから長い年月が経過した下火ムードであり, AI 研究者は粛々と研究開発を継続していた時代である. 「ニューラルネットワーク」と言えばインチキ臭い印

象を抱かれた時代であり、Support Vector Machine等の機械学習アルゴリズムが代わりに脚光を浴びていた。筆者も、AIはSF小説等でしか耳にしたことが無く、AIそのものが具体的にどのような知識を指すのか見当が付かなかった（知識の定義が曖昧なのは現在も変わらないようではあるが…）。現在においても、AIや機械学習（Machine Learning）の定義は様々であるが、一般的にはA.L. Samuelによる「明示的にプログラミングすることなく、コンピューターに学ぶ能力を与えようとする研究分野」が一般化されたものようだ。これが原子力工学とどのようにリンクするのか当時は全く分からなかったが、「米国目線」での原子力の歴史を学ぶことでヒントを得るようになる。これまでに発生した原子力過酷事故のうち、米国はスリーマイル島（TMI）事故を1979年に経験している。詳しくは、Wikipedia等を参照されたいが、この事故の教訓は、想定外の異常に遭遇すると人はパニックに陥り、マニュアル通りの厳格な訓練を積んだはずの運転員であっても判断を誤り、誤操作を起こすという点である。この事故以降、「訓練を積んだ運転員もヒューマンエラーを起こす」認識が定着し、学習データの特性に従って信号を出力するデータ駆動型のプラント状況診断が導入されるきっかけとなり、原子力分野におけるAI応用が本格化することになる。勿論、最終的な判断を機械に委ねるか、人間の判断を優先させるかは難しいテーマであり、工学分野において絶対的な正解は存在しない。現に、最新のコックピット設計で操縦ハンドルを無くしてしまったエアバス社と、ハンドルを維持するボーイング社の違いに見られるように、設計思想における安全の考え方も国や文化によって異なる傾向にある。しかし、問題解決策を一刻も早く検討し、遂行する実行力とシステム構築の速さは米国の凄みであり、超大国に君臨し続けている理由の一つと考えられる。ここぞという時の力は、Operation Warp SpeedでCovid-19ワクチンを作り上げ有言実行してしまった現在も健在であるように思える。ネガティブな意見で恐縮ではあるが、日本であれば、「運転員の訓練マニュアル拡充」「事故調査委員会による報告書」等、既存のシステムの積み上げに動き、委員会や会議を連発しながら、もやもやとしたまま先送りされるか忘れ去られてしまうのでは無いだろうか…。

Tsoukalas 教授の授業に加え、筆者が機械学習に興味を抱ききっかけとなったもう一つの出会いについても述べたい。筆者が当時世話役をしていたPurdue大学日本人大学院生グループ主催の座談会に福永圭之介（Keinosuke Fukunaga）名誉教授を招待し、米国に来られた経緯やご自身の研究理念等をお話頂いた。福永先生のご専門は「統計的パターン認識」で、国内某電機メーカーでレーダーの研究に従事していた頃に国際会議で発表した研究成果がPurdue大の目に留まり、助教授ポストのオファーがあったとのことであった。1ドル=360円の固定為替の時代で、世界情勢は米ソ冷戦の真ただ中。当時の米国は核戦争に備え、ミサイル防衛の研究に力を入れていたが、多弾頭化された弾道ミサイルに含まれたデコイ（偽の核弾頭）をレーダーや赤外線等の信号から瞬時に判別し、本物の核弾頭を迎撃する技術をパターン認識により確立しようとしていたようだ。SF小説にでも出てきそうな話に衝撃を受けた記憶がある。（興味本位で検索してみたところ、近年ではデコイ対策としてパターン認識そのものの強化では無く、迎撃側も多弾頭化してしまう発想が主流のような（図2）。この想像力を人類が直面する気候変動や貧困・食料問題等に応用できないものか。悲しくも、科学技術のブレークスルーの多くが軍事利用を応用とした基礎研究から派生するケースが多いようである。）

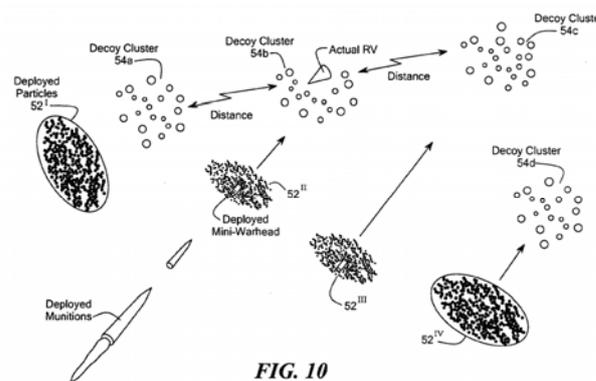


FIG. 10

図2 宇宙空間迎撃弾頭の特許案 [1]

少し話が脱線したが、以上のエピソードからのポイントは2点である。まずは、米国大学工学部では全分野において学部一年次からIT/プログラミング教育に力を入れている点である。Purdue大学の場合、1年目のFreshman Engineeringのカリキ

ュラムで MATLAB と C 言語, Fortran, (筆者在籍時は) UNIX の使い方を叩き込まれる。Python 等の新たな言語を学ぶ上で、このカリキュラムより得た経験が筆者にとっては今でも役に立っている。プログラミングを始める際、どの言語を選ぶのが良いかとの質問が頻繁にあるが、筆者の感覚としては R であれ Python であれ、どれか一つに絞り、継続して課題や研究に使い続けることが大事であると考えている。いわゆる IT やプログラミングスキルとは、debug 等のトラブルシューティングを一つでも多く経験することで得られる「迅速な対応力」が大きな割合を占めると考える。これは熱流動分野にも該当することであり、実験室や解析マシン前でのトラブルシューティング力が、研究者としての成長に直結する点は大きく、学生時代に(「論文博士」では経験できない)研究室での生きた経験を一日でも多く得ることが重要であると感ずる。

米国のカリキュラムに対し、国内大学はいかがであろうか。筆者が所属する北大ではプログラミングの経験はおろか、近年では機械系においてもパソコンを所有していない学生が増えつつあり、レポート課題を LINE 感覚でスマホ送信する者まで出現し始めており、経験値の格差が広がりつつあるように感じる。

次に、カリキュラムのフレキシビリティについてである。Purdue 大においては Prerequisite (前提科目) が徹底されており、Freshman Engineering の課程で C 言語の授業をパスしなければ、情報工学系の授業の履修は認められず、再履修が決まると同時に卒業が遅れてしまう厳しさがある。ただし、履修に必要な Prerequisite さえクリアしてしまえば、他学科の授業を履修することは可能であり、筆者も博士課程在籍時に電子工学科のパターン認識の授業を履修した。筆者が受講した授業での指定教科書を図 3 に示すが、米国の教科書に共通する点として、どれも図鑑のように分厚い。しかしながら、詳細な説明に加え、図表や例題が豊富で、一人でも読み進めることが可能である。日本の大学の教科書は、(少なくとも筆者には) 教員の説明や参考書による補足を前提に書かれているように映る。AI 分野に限らず、筆者の専門分野である流体工学、伝熱工学の分野においても、参考書や、図解雑学的な「薄い」入門書が大学生協をはじめ

とした書店に毎年山積みされているのがその根拠である。これに対し、「図鑑」「百科事典」のような米国の教科書は、カリキュラムに合わせて教員が取捨選択し、クラス外での自習や課題に加え、教員による講義をパラレルでこなすスタイルが一般であり、一クラスの情報量が濃厚となる傾向にある。また、米国の授業では宿題とテストに加え、必ず「プロジェクト」が課せられ、各自が選択したトピックについて文献調査を行い、レポートを書き上げ、クラス内での発表課題をこなす必要がある。これを学部時代に何度も経験することで、研究を行う上での基礎力が養われ、大学院に進学した学生が「即戦力」として研究課題に参画できる要因にもなっているかと考える。このような米国式カリキュラムを 80~90 年代に留学生として経験した海外組が教職として出身国へ戻り、母国の大学教育改革に着手している点も、中国や韓国等の国が世界大学ランキング等で躍進を続けている理由の一つかとも考えられる。

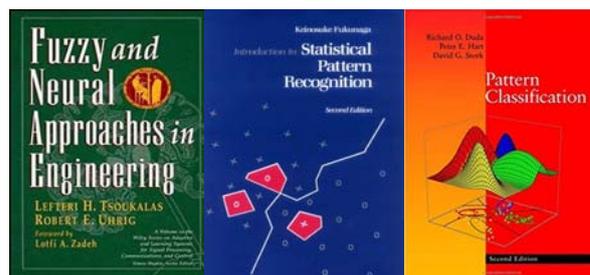


図 3 Purdue 大学大学院機械学習系のクラスで使用されるテキスト (左) 原子力工学科: Tsoukalas 著“Fuzzy and Neural Approaches in Engineering” (中) (右) 電子工学科: Fukunaga 著 “Intro. to Statistical Pattern Recognition”, Duda et al. 著 “Pattern Classification.” 全て Amazon より購入可。

### 3. 気液二相流の流動様式

本章では、熱流動現象の一つである、気液二相流の流動特性に照準を充て、機械学習を用いた流動様式識別について述べる。異なる物性を有する物体が混在しながら流れる現象を「混相流」と呼ぶが、気相と液相が混合することで形成される気液二相流は伝熱機器をはじめとした様々な工業用アプリケーションにて見られる現象である。この現象の十分な理解は、原子力発電所や、熱交換機

器，化石燃料輸送系等といったエネルギー・化学システムシステムを安全且つ効率的に設計する上で重要となる．これは，後述する気液二相流の「流動様式」の変化に伴う気液界面構造が，流体の運動量，エネルギー輸送に影響を及ぼすためである．気液二相流の研究は，ボイラーや原子力技術の進歩と共に発展してきた経緯があり，安全解析コードに適用可能な均質流モデルやスリップモデル，ドリフトフラックスモデル等の開発が米国を中心に進められてきた．最も詳細な気液二相流の基礎方程式である二流体モデルを例として見ると，瞬時・局所の基礎方程式を時間平均することにより，平均化された基礎方程式は以下の通り表される．

[質量]

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{v}_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

[運動量]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{v}_k \bar{v}_k) \\ = -\nabla \cdot \alpha_k p_k + \nabla \cdot \alpha_k (\bar{\tau}_k + \bar{\tau}_k^T) + \alpha_k \rho_k \bar{g} \\ + \bar{v}_{ki} \Gamma_k + \bar{M}_{ik} + p_{ki} \nabla \alpha_k - \nabla \alpha_k \cdot \bar{\tau}_i \end{aligned} \quad (2)$$

[エネルギー]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k h_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \bar{v}_k) \\ = -\nabla \cdot \alpha_k (\bar{q}_k + \bar{q}_k^T) + \alpha_k \frac{D_k p_k}{Dt} + h_{ki} \Gamma_k + a_i q_{ki}'' + \Phi_k \end{aligned} \quad (3)$$

単相流におけるモデルと異なる点として，相関輸送項の存在が挙げられる．気液二相間における質量，運動量，エネルギー輸送は，次式のように表すことが可能である．(相関運動量式は簡単化しているが，抗力に加え，揚力，乱流拡散，付加質量，バセット力等がこれに加わる．)

$$\Gamma_k = a_i m_k \quad (4)$$

$$\alpha_d F_D / B_d = -a_i \left[ \frac{C_D}{4} \left( \frac{r_{sm}}{r_d} \right) \frac{\rho_c v_r v_{rL}}{2} \right] \quad (5)$$

$$\Gamma_k h_{ki} + a_i q_{ki}'' = a_i (m_k h_{ki} + q_{ki}'') \quad (6)$$

以上の関係式を要約すると，界面輸送項は気液界面を表す幾何学的パラメータである界面積濃度 ( $a_i$ ) と駆動力の積として表される．

$$\text{界面輸送項} \sim a_i \times (\text{駆動力}) \quad (7)$$

$a_i$  は二相流中の気液界面積の和を全体積で除した値である． $a_i$  の値は気液界面の形状に依存するため，流動様式の正確な識別は二流体モデルの解析精度に影響を及ぼすことが分かる．

垂直上昇気液二相流において見られる代表的な流動様式を図4に示す．気相流量の増加に伴い，流動様式は(a)気泡流，(b)キャップ気泡流，(c)スラグ流，(d)チェーン流，(e)環状噴霧流／環状流へと遷移することが知られる．沸騰系の場合においては，壁面加熱に伴った蒸気生成量の増加がこれに相当する．壁面加熱の上昇に伴い，液膜が蒸発するとドライアウトが生じ，液相のみが液滴として存在する噴霧流となる．

これらの流動様式を区別するため，一般的に流動様式線図が用いられるが，異なる仮定に基づいた理論によるものや，観測方法により提案された遷移条件等が複数提案されている．

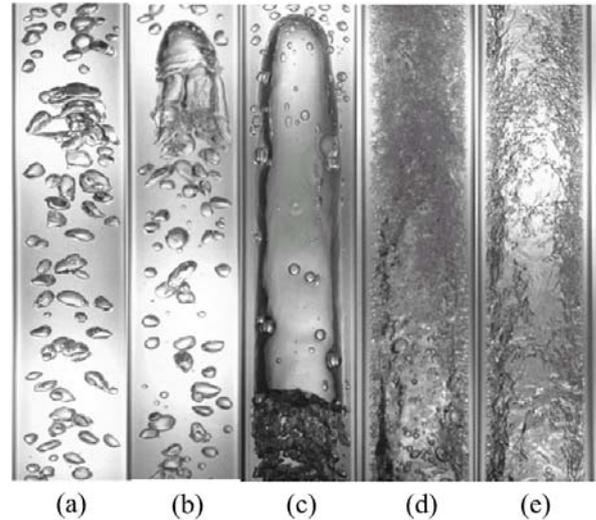


図4 気液二相流における流動様式 [2]

垂直上昇流の場合，Taitel 線図や，Mishima-Ishii 線図等が挙げられ，気泡に働く浮力の影響が著しい水平流の場合は Mandhane 線図が参照される場合が多い[3]．この他，下降流，傾斜配管等においては異なる流動様式が生じるのに加え，スラグ気泡の代わりにキャップ気泡が生成される大口径(室温大気圧条件では配管径約10cm)においても異なる流動様式線図が用いられる．これに加え，

気泡注入方法や観測部上流における配管形状，システム条件（温度，圧力），流体物性値等による気液界面への影響も無視できないであろう．このように，ユニバーサルな流動様式遷移判定は存在しないのが現実であり，既存の流動様式線図はあくまで「目安」の指標として捉えるのが望ましい．

#### 4. 機械学習を用いた流動様式識別

ここで，気液界面形状を表すパラメータの一つであるボイド率（ $\alpha$ ）について考える．図5に管内における垂直上昇気泡流の概略図を示すが，ボイド率は管内断面，又は，体積中に占める気相の割合を表し，断面平均ボイド率（ $\langle \alpha \rangle$ ）は式(8)のように定義される．

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{A_{Total}} \iint dA = \frac{A_G}{A_{Total}} \quad (8)$$

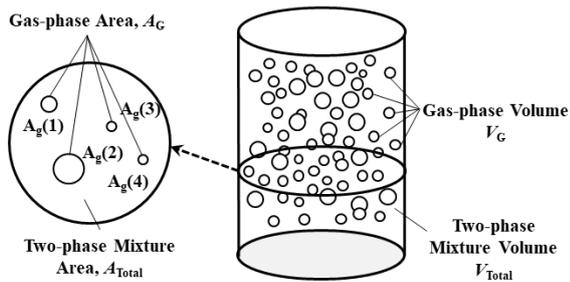


図5 断面平均ボイド率

前述した二流体モデルにも表れるパラメータであるため，二相流の状態を評価する上で最も重要な項となる．気液の割合を計測することで求められるため，局所プローブによる計測が必要となる界面積濃度（ $a_i$ ）と比較し，データ取得が容易な点も挙げられる． $\langle \alpha \rangle$ の計測方法の一つとして，気液の電気伝導率の差を利用したインピーダンスセンサーが用いられる（図6）．垂直上昇二相流の場合，配管断面にアーチ型の電極を対に埋め込み，電極間の電圧を計測する．この原理の応用として，複数の電極を使用し，多チャンネル信号をマルチプレクサーを用いて計測することで気相分布図を取得するトモグラフィへの応用も可能となる．

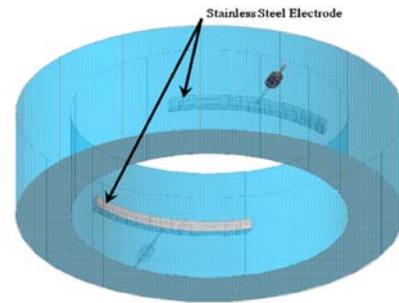


図6 インピーダンスセンサーのイメージ図 [4]

紙面の都合上，インピーダンスセンサーの作動原理や構成方法については文献 [6] を参照して頂きたい．図7にインピーダンスセンサーを用いて内径 5 cm の垂直上昇気液二相流にて計測したボイド率データを示す．流動様式の遷移とともにボイド率変動が大きく異なることが分かる．確率密度分布（PDF）からは，支配的なボイド率値が示されており，テイラー気泡と小気泡が混在するスラグ気泡においては，ダブルピークが確認でき，チェーン流への遷移とともに小気泡成分が減少する傾向となっている．この遷移傾向は，累積分布関数（CDF，又はCPDF）としてプロットすることで分かりやすく表現され，パワースペクトル密度等の周波数領域図よりも，流動様式を表す特徴量となり得ることが分かる．

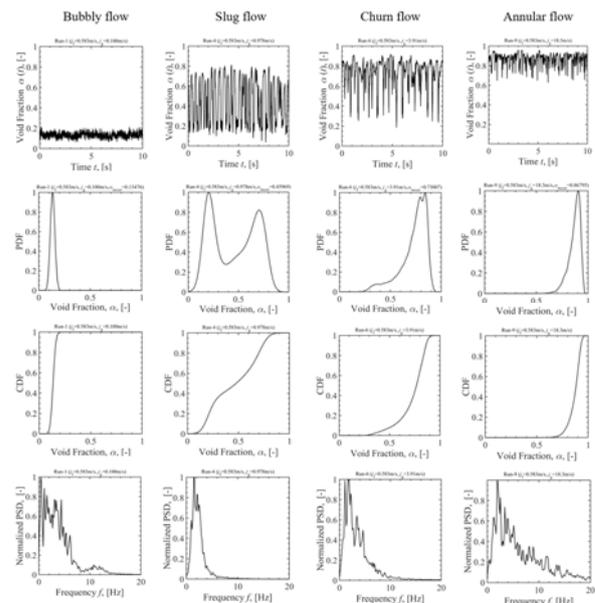


図7 流動様式毎のボイド率（上）時系データ，（中上）確率密度分布，（中下）累積分布関数，（下）パワースペクトル密度

ボイド率と同様、多点導電性プローブ（図 8）による流れ場局所点において計測した気泡弦長さのデータからも、累積分布関数を求めることで流動様式の区分けが可能であることが報告されている [5]。これは AI モデルを構築する上で重要な点であるが、物理現象の説明が可能な「特徴量」の選定がモデルの精度を大きく左右する要因となる。教師データが必要となる機械学習モデルを用いて「識別」「認識」のタスクを行う際、CDF（図 9）のように、人間の目である程度分類が可能でなければ、高精度なモデル構築は見込めない。

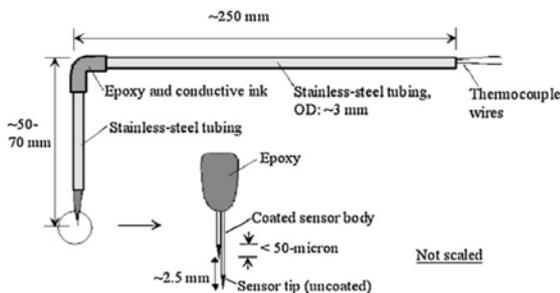


図 8 導電性ダブルセンサープローブ [5]

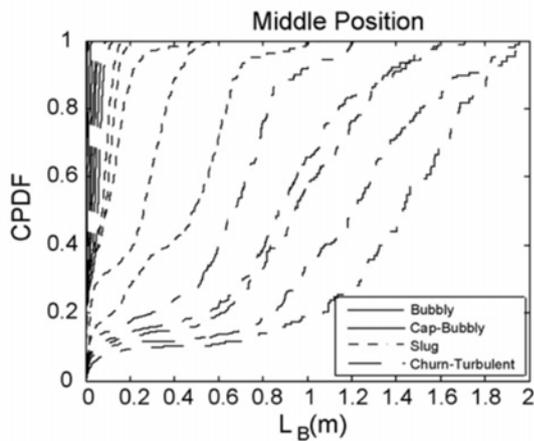


図 9 気泡弦長さの累積分布関数 [5]

機械学習モデルの構築にあたっては、「教師あり (Supervised)」「教師なし (Unsupervised)」学習に分類される。教師あり学習においては、実験により取得したデータの一部を「教師データ」として学習させることから始まる。第三次 AI ブームを席卷した深層学習 (Deep Learning) が画像認識の分野では話題となっているが、ボイド率計測値等の一次元データによる識別は GPU 無しのニューラルネットワークでも十分に可能であり、熱流動への応用は本稿で紹介する事例からも分かる通り

2000 年代初期から取り組みが行われている。ニューラルネットワークは機械学習の一種であり、人間の神経細胞 (ニューロン) を数学的モデルとして模擬したものである。

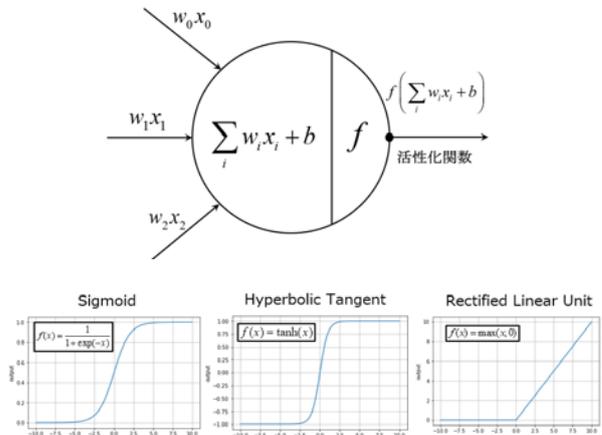


図 10 ニューラルネットの単一ノードと活性化関数

図 10 に示す通り、入力されたパラメータ ( $x$ ) を重み係数 ( $w$ ) とバイアス ( $b$ ) の関数としてセル内に格納し、活性化関数 (Activation Function) で  $0 \sim 1$ 、或いは、 $-1 \sim 1$  の値へと出力される。これらを複数組み合わせることで、より複雑な多層ニューラルネットワークの構築が可能となる (図 11)。様々な活性化関数が定義されているが、基本、入力値に対し何らかの形で出力値を変化させることができれば良い。

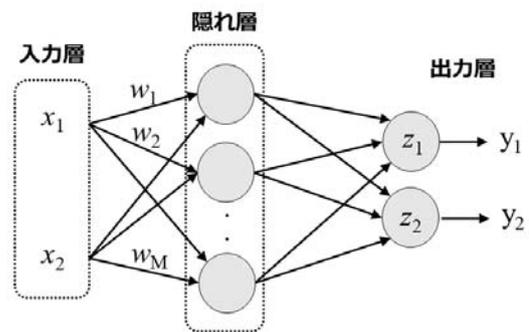


図 11 隠れ層に複数のノードを搭載したニューラルネット

脳神経を模倣したシグモイド関数、ハード tanh 関数 (hard tanh)、正規化線形関数 (ReLU) 等の様々な活性化関数が提案されているが、これらの明確

な選択基準はいまだ存在せず、対象とする問題に応じて、経験則やトライアルアンドエラーにてチューニングする形が一般である。

入力値として抽出したデータ群、或いは特徴量は、訓練用 (Training)、検証用 (Validating)、テスト (Testing) 用に分類される。正解レベル (この場合は流動様式名) と入力データがセットとなった訓練データを用い、モデルの学習 (重み係数やバイアスパラメータの調整) を行い、検証データにより訓練済みのモデルを評価する、という流れである。AI とは言うものの、マジックでも何でも無く、単純に表現すれば「高次元、高オーダーのフィッティング」と変わらない。

インピーダンスセンサーにより得られた特徴量によりニューラルネットを学習させ、テスト用データを用いて出力した値を流動様式線図に示したものが図 12 となる。前述した通り、特徴量は断面平均ボイド率の CDF である。遷移領域付近においては境界線 (Transition Boundary) と比較し若干のばらつきが見られるが、概ね良い傾向で 4 つの流動様式に分類できていることが分かる。

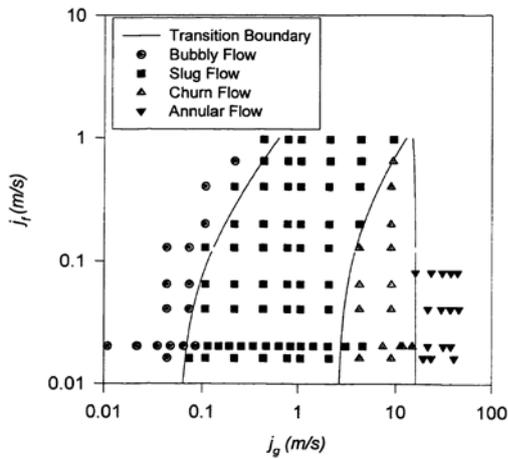


図 12 流動様式線図上に出力されたニューラルネットによる流動様式判定結果 [6]

導電性ダブルセンサープローブにより得られた気泡弦長さによる流動様式識別として、Purdue 大学にて行われた研究成果を図 13, 14 に示す。試験部の中心に伝熱ヒータを設置した環状流路を用いた沸騰気液二相流ループとなるが、気泡弦長さ分布から CDF 値を算出し、特徴量としてニューラルネットに組み込んでいる。円管と異なり、環状流路には学習データを生成する上で必要となる流動

様式線図が存在しないため、学習を不要とした「教師なし学習」によるデータのクラスタリングから流動様式を判定した (図 13)。

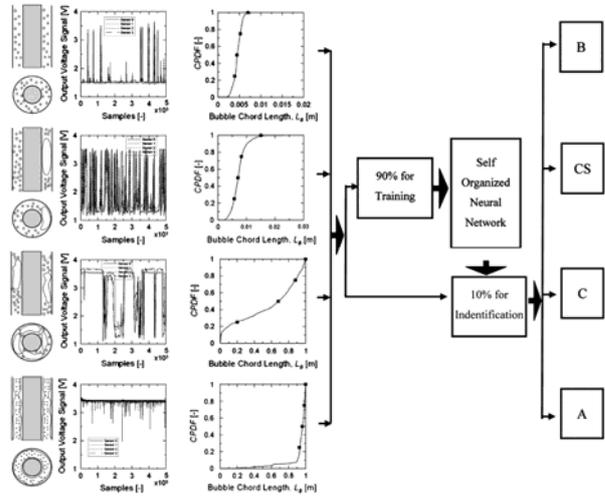


図 13 教師なし学習を用いた環状流路における沸騰二相流流動様式識別 [6]

出力した流動様式結果を比較のため、垂直上昇流の流動様式線図上に Plot してみると、遷移境界ラインにおける流動様式が複数のクラスとしてクラスタリングされていることが分かる。図 12 と同じく、流動様式線図の境界線はあくまで「目安」であり、流動様式の遷移は「遷移区域」として徐々に変化していくと言える。ニューラルネットをはじめとした機械学習を用いることで、この「遷移区域」の定量化が可能となり、遷移付近における構成方程式の使用が期待される。

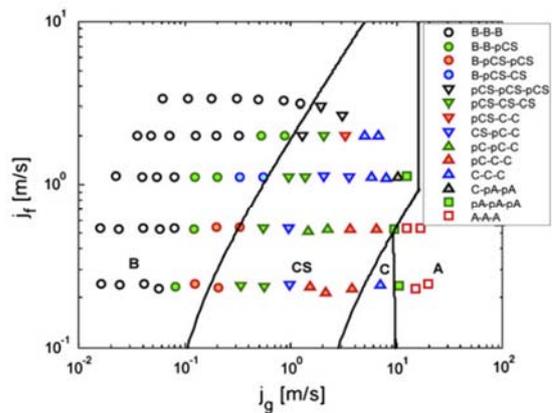


図 14 環状流路における流動様式識別結果 [7]

以上のような取り組みを基礎知識とし、近年流

力振動データからの二相流識別[8]や、高速度画像により得られた流動様式画像を深層学習により区分けする研究[9]等にも展開されており、熱流動と機械学習を融合させた研究の発展に今後ますます期待が高まると予想される。

## 5. おわりに

本稿では流動様式について取り扱ったが、機械学習の活用はより詳細な熱流動現象理解に確実に繋がっていくものと考えられる。近年、機械学習やデータ駆動研究を題材とした論文や学会発表が多く見られるようになったが、熱流動の分野においても一つの「計算ツール」として普及していくことはほぼ間違いないであろう。目視判別やコーディングに依存することが未だに多い画像処理等の分野においては、深層学習を用いた自動化が確実に進むものと思われる。ただ、ニューラルネットのモデルを見ても分かる通り、内部は可視化されないパラメータの塊であり、ブラックボックス的に使用してしまう問題が存在するのも事実であり、AIによる判定の根拠を説明可能とする研究課題も近年注目されている。

また、我が国が直面する課題の一つとして、次世代人材育成の強化が挙げられる。熱流動を取り扱う機械工学科、原子力工学科、化学工学科においても、米国のように一刻も早く受講可能な選択科目としてカリキュラムに取り入れることが望まれる。既に生じている現象であるが、国内大学に割り当てられた研究費や外部資金等の国富が、莫大なライセンス料として外資系企業へ流れ、CFDの分野では（多くの日本人研究者による構成式が使われているにも関わらず）もはや取り返しのつかない状況に陥ってしまっている。「優秀な素材や部品は造れるが、iPhoneは造れない」日本の「ガラパゴス職人」的な文化も少なからず影響しているように思うが、熱流動や物理を理解しないAI

技術者に大金を叩いて業務委託をする時代にならないよう、早い段階で実践プログラム教育の強化とAI技術の理解、研究課題への積極的な取り入れ等の検討が必要かと考える。

## 参考文献

- [1] Lloyd, R.M., Kinetic energy rod warhead deployment system, U.S. Patent, US 2006/0021538 A1, Feb.2, 2006.
- [2] Ishii, M. and Hibiki T., *Thermo-fluid dynamics theory of two-phase flow*, Springer, 2011.
- [3] 日本機械学会「気液二相流ハンドブック」コロナ社 (1995)
- [4] Schlegel, J.P. et al., Development of impedance void meter for evaluation of flow symmetry, *Annals of Nuclear Energy*, **63** (2014), 525-532.
- [5] Julia, J.E. et al., Upward vertical two-phase flow local flow regime identification using neural network techniques, *Nuclear Engineering and Design*, **238** (2008), 156-169.
- [6] Julia, J.E. et al., Flow regime development analysis in adiabatic upward two-phase flow in a vertical annulus, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **32** (2011), 164-175.
- [7] Mi, Y., Two-phase flow characterization based on advanced instrumentation, neural networks, and mathematical modeling, Ph.D. Thesis, Purdue University, May 1998
- [8] Miwa, S. et al., Two-phase flow induced vibration in piping systems, *Progress in Nuclear Energy*, **78** (2015), 270-284.
- [9] 柴田尚人 et al., 深層学習を用いた高圧気液二相流遷移領域における流動様式識別, *混相流*, **35** (2021), 93-100.

## 熱交換器の管端溶接部における AI を活用した溶接欠陥判定システム

*Welding Defects Detection System Utilizing AI  
in Tube-to-Tubesheet Weld Joints of Heat Exchangers*

和田 貴裕, 井岡 良太, 篠田 薫, 安部 正光 (日立造船株式会社)  
服部 洋 (株式会社ニチゾウテック)

Takahiro WADA, Ryota IOKA, Kaoru SHINODA, Masamitsu ABE (Hitachi Zosen Corporation)  
Hiroshi HATTORI (NICHIZO TECH INC.)  
e-mail: wada.t@hitachizosen.co.jp

### 1. はじめに

産業プラントなどで使用される多管式熱交換器は、円柱状の胴体に多数の細長い円管を配列した構造をしており、胴体側の流体と円管側の異なる二つの流体間で熱の交換を行う。この熱交換器において重要な溶接継手の一つである管と管板の接合部(以下、管端溶接部)は、使用条件に応じた高い品質が求められる。

管端溶接部の検査手段としては、一般的に目視試験や浸透探傷試験が用いられるが、溶接内部の検出性能が十分でないことが課題であった。すでに我々は、図1に示す管端溶接部用フェーズドアレイ超音波探傷試験(Phased Array Ultrasonic Testing)装置(以下、管端 PAUT 装置)を開発している[1-5]。本装置は、多数の振動子により構成されるアレイ探触子が超音波ビームを送信するタイミングを制御し、個々の振動子から出力された超音波ビームを合成した波面を形成することで管端溶接内部における溶接欠陥の場所とその範囲を高精度に検出することが可能である。この技術により、管端溶接内部における検出精度向上と検査時間の大幅な短縮を実現している。



図1 管端溶接部 PAUT 装置

本装置より取得した探傷画像における溶接欠陥の有無は、検査員が目視で1枚ずつ判定する。しかし、多管式熱交換器は数千から数万本の管を有する場合があります。多い場合で100万枚を超える膨大な探傷画像を目視確認することになる。そのため、検査の長時間化によるコスト増加や検査員の負担が課題であった。そこで、検査時間の短縮および検査員の負担軽減に向けて、AI技術を活用することで、探傷画像中の溶接欠陥の有無を自動判定するシステムを開発した。本稿では、AI技術を用いた溶接欠陥有無自動判定システムの概要と実機検査に適用した成果について述べる。

### 2. 溶接欠陥有無自動判定システム

#### 2.1 概要

開発した溶接欠陥有無自動判定システムは、YOLO (You Only Look Once) [6, 7]、畳み込みニューラルネットワーク(以下、CNN) [8]、自己符号化器(以下、AE) [9]の3つのAI技術を採用しており、主な特長は次のとおりである。

1. 物体検出手法を使用することで、従来の画像処理では困難であった探傷範囲の抽出を可能とした。
2. AI技術を含む3つの判定手法を用いて溶接欠陥の有無を判定し、誤判定を低減した。
3. 各判定手法の信頼度を使用したアンサンブルにより、判定精度の向上を実現した。

#### 2.2 処理フロー

本システムの処理フローを図2に示す。はじめに、管端 PAUT 装置より取得した探傷画像を入力する。つぎに、物体検出手法である YOLO を用いて探傷画像より探傷範囲の抽出を行う(図2の①)。続いて、探傷範囲を抽出した画像に対して、従来の

画像処理による溶接欠陥有無判定(図2の②), CNNを用いた画像分類による溶接欠陥有無判定(図2の③), AEを用いた画像復元による溶接欠陥有無判定(図2の④)を行う。これらと同時に, 各判定手法における抽出画像に対する信頼度を計算する(図2の⑤)。最後に, 各判定手法の判定結果と信頼度をもとにアンサンブルを行い, 最終的な判定結果を出力する(図2の⑥)。本システムの各処理については, 以降の章で説明する。

### 3. YOLOによる探傷範囲抽出

#### 3.1 YOLO

YOLOは, ワシントン大学の Joseph Redmon 氏が開発した物体検出用ネットワークである。従来の物体検出手法では, はじめにオブジェクトの領域を推定し, その後クラス確率の計算を行い識別していたため処理が複雑であり, 処理時間が長くなるという欠点があった。YOLOは, 単一のCNNネットワーク構造により, 画像全体から「領域推定」と「識別」を同時に行うため, 従来の手法に比べてリアルタイムな処理が可能である。

#### 3.2 探傷範囲抽出

管端 PAUT 装置より取得される探傷画像は, 管の厚さや径, 溶接条件, アレイ探触子の接触状態などにより, 溶接欠陥の位置, 溶接部の高さ, エコーの形状などが変化するため, 探傷画像ごとに構図が様々である。また, 電気ノイズなどの溶接欠陥ではないエコーが現れる場合もある。そのため, 溶接欠陥が生じる領域は探傷画像ごとに一定ではなく, 従来の画像処理では特定が困難であった。そこで, 物体検出手法である YOLO を用いて溶接欠陥が生じる領域を検出し, 探傷範囲を抽出した。

YOLOにより検出する領域を図3に示す。検出する領域は, 管端溶接部の周縁部(管端側の管表面および管奥側の管表面)から反射したエコー(以下, 底面エコー)である図3の(1)から(4)からなる黒破線で囲んだ範囲とした。学習データに対して検出したい領域のアノテーション(四角形の枠で囲む作業)を行う際, 図3に示すように検出領域の四隅に底面エコーの一部を含めることで, 探傷画像中の底面エコーの特徴に応じた検出ができるように工夫した。このアノテーションした座標情報を教師データとして学習データに付与し, 学習を行うことで

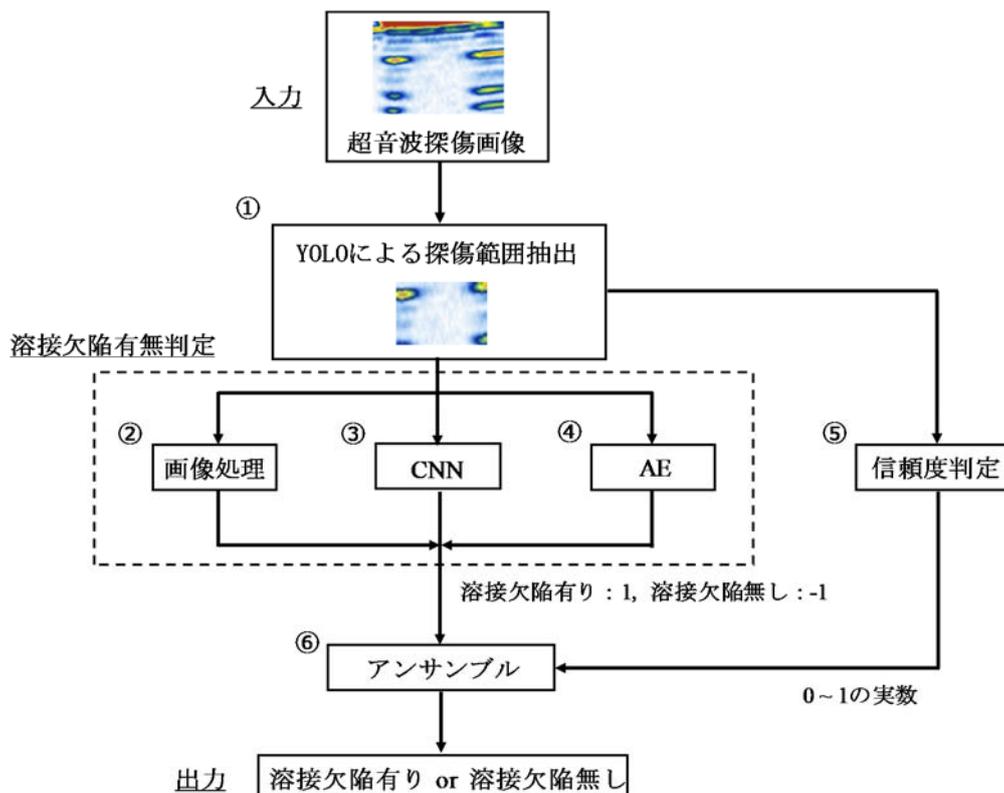


図2 溶接欠陥有無自動判定システムの処理フロー

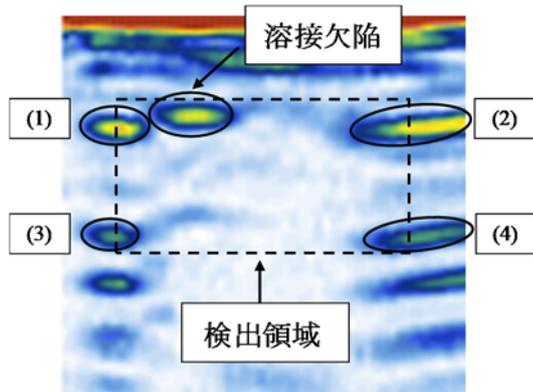


図3 YOLOにより検出する領域

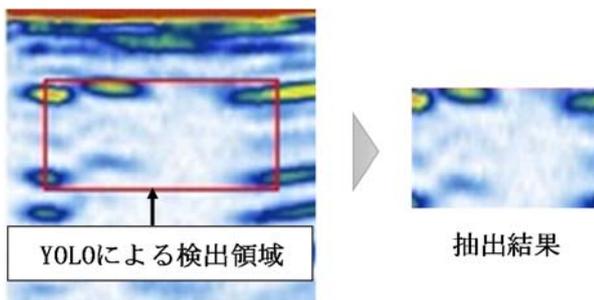


図4 YOLOによる探傷範囲の抽出結果例

領域検出モデルを作成した。

YOLOによる探傷範囲の抽出結果例を図4に示す。結果より、想定した領域を検出し、探傷範囲を抽出できることが確認できた。また、YOLOによる探傷範囲の抽出精度は約99%となった。

#### 4. 画像処理による判定

画像処理による溶接欠陥有無判定では、YOLOを用いて探傷範囲を抽出した画像に対して、底面エコー部を除いた領域内のエコー高さに対応した全ピクセルを一つずつ探索し、基準値以上のエコー高さをもつピクセルが一定以上ある場合に溶接欠陥有りと判定する。この判定手法では、基準値を超えたピクセル数をカウントするため、溶接欠陥であると判定する寸法に照らして抽出することが可能である。しかし、以下の問題点があった。

1. 機械的に全ピクセルを確認するため、ノイズなどで人が見れば溶接欠陥ではないと判別可能なものでも、閾値を超えていれば抽出されてしまう。
2. 底面エコーと溶接欠陥がつながっている場合、溶接欠陥を検出できないことがある。

そのため、画像処理による溶接欠陥有無判定では、溶接欠陥の見落としが生じる懸念があった。また、こうした画像の一部は、人による目視であれば容易に判断できるものであった。そこで、AI技術であるCNNおよびAEを用いた溶接欠陥の有無判定を試みた。

### 5. CNNを用いた画像分類による判定

#### 5.1 CNN(Convolutional Neural Network)

ディープラーニングは、機械学習の一種であり、中でもCNNは視覚野の特徴抽出の仕組みをモデル化しており、特に画像認識の分野にて用いられる。CNNは、図5に示すように畳み込み層、プーリング層、全結合層などから構成されたニューラルネットワークである。畳み込み層では、入力された画像に対して複数のフィルタ処理を行い、画像の特徴量を抽出する。そして、プーリング層では、特徴を損なわないように画像サイズの変換が行われる。この処理が何度か繰り返された後、全結合層では、抽出されたエッジやテクスチャなどの特徴量に基づいて演算を行い、入力した画像のクラス分類結果を出力する。

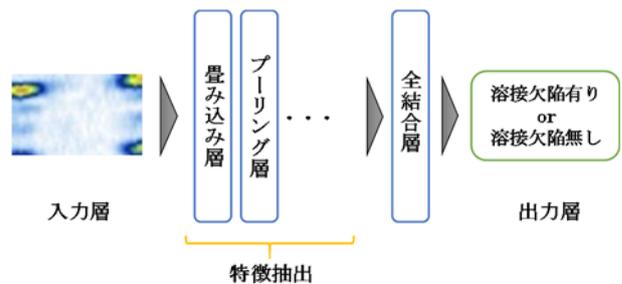


図5 CNN概要図

#### 5.2 CNNによる溶接欠陥有無判定

YOLOを用いて探傷範囲を抽出した画像のうち、溶接欠陥有りの画像および溶接欠陥無しの画像を学習データとして使用した。この学習データをもとに、CNNによる2クラス（溶接欠陥有り/無し）の分類モデルを作成した。学習済の分類モデルに画像を入力すると、溶接欠陥有り/無し別の確信度（溶接欠陥有無の確率）が出力される。確信度は0~1の実数値をとり、合計すると1になる。ここでは、溶接欠陥有りの確信度が0.5以上の場合に「溶接欠陥有り」、0.5より小さい場合に「溶接欠陥無し」と判

定することにした。

テスト用データに対する CNN を用いた画像分類による溶接欠陥の有無判定精度は約 80% となった。ただし、この判定手法では、溶接欠陥有りの画像に対する判定精度が約 94% となり、溶接欠陥の見落としが少ない結果となった。

## 6. AE を用いた画像復元による判定

### 6.1 AE (AutoEncoder)

AE は、機械学習においてニューラルネットワークを使用した次元削減のためのアルゴリズムであり、図 6 に示すように入力データを圧縮する Encoder と圧縮したデータを復元する Decoder から構築される。AE では、入力層と出力層の次元が同じになるよう学習が行われ、中間層では、入力データが圧縮されるため入力層より次元が小さくなった特徴表現を得ることができる。出力層では、圧縮された特徴的なデータをもとに入力データの復元が行われる。AE における学習では、正常データのみを学習して、正常なデータを圧縮し、復元するモデルを構築する。学習していない異常なデータを入力した場合は、異常箇所をうまく圧縮、復元できないため、復元データは入力データとは異なるものとなる。そのため、入力データと復元データを比較すると、それらの差が大きくなる。この差を異常度とすることで、正常および異常の判定を行うことができる。また、画像中の差分が大きい箇所を抽出することで、異常個所の特定が可能となる。AE では、正常なデータのみを学習に使用するため、異常なデータが少ない場合においても有効な技術である。

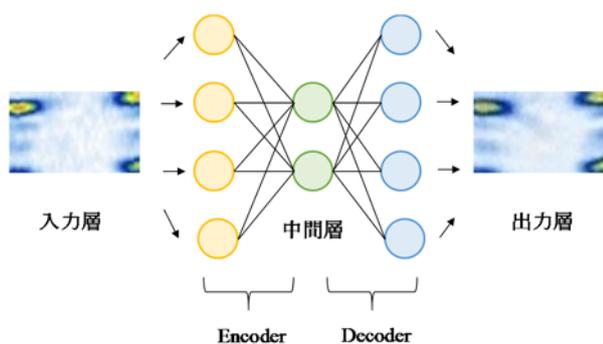


図 6 AE 概要図

### 6.2 AE による溶接欠陥有無判定

YOLO を用いて探傷範囲を抽出した画像のうち、

溶接欠陥無し of 画像のみを学習データとして使用した。この学習データをもとに、AE による画像復元モデルを作成した。学習済の復元モデルに溶接欠陥有りの画像を入力した場合、溶接欠陥部分のみがうまく復元されず、入力した溶接欠陥有りの画像とは異なる画像が復元される。そのため、入力画像と復元画像における各画素値の差を計算することで、溶接欠陥有無の判別が可能となる。しかし、入力画像および復元画像には、YOLO により抽出した底面エコーの一部が含まれており、底面エコーの形状は画像ごとに異なるため、AE による完全な復元が困難であった。そのため、入力画像と復元画像における各画素値の差は、溶接欠陥部分と同様に底面エコー部分においても大きくなった。そこで、入力画像と復元画像の溶接欠陥部分での差を顕著にするため、入力画像と復元画像の差を計算する前に、底面エコー部分を除去する処理を行った。また、溶接欠陥が有る場合、溶接欠陥部分における差がそれ以外の領域と比べて大きくなるため、各画素値の差の分散は大きくなる。一方、溶接欠陥が無い場合、ノイズなどの影響を除いて差は小さくなるため、相対的に各画素値の差の分散は小さくなる。ここでは、評価指標に各画素値の差の分散を使用し、一定値以上の場合に「溶接欠陥有り」、一定値より小さい場合に「溶接欠陥無し」と判定することにした。

テスト用データに対する AE を用いた画像復元による溶接欠陥の有無判定精度は約 92% となり、3 つの判定手法のうち最も高い判定精度となった。

## 7. アンサンブルによる判定

### 7.1 信頼度判定

各判定手法における溶接欠陥有無の判定精度には、ばらつきがあった。また、判定手法によって探傷画像ごとの正解および不正解が異なっていた。例えば、各判定手法のうち最も精度が高い AE による判定が誤っている画像に対して、CNN および画像処理では正しい判定結果となる事例が見られた。そこで、各判定手法が出した判定結果に対して、信頼度を掛け合わせた溶接欠陥の有無判定方法を導入した。

信頼度は、判定画像に対する各判定手法の確からしさを表す。事前に、判定手法別に正しく判定できた画像、判定できなかった画像を準備し、CNN によりどのような画像に対して正しい判定ができる

かを学習した。これにより、YOLO による抽出画像を入力した際に、正しい判定ができる画像であるかの確信度が判定手法ごとに出力される。つまり、過去に正解した画像に似ている場合は 1 に、過去に不正解となった画像に似ている場合は 0 に近い値が求まる。

### 7.2 アンサンブルによる溶接欠陥有無判定

最後に、式(1)に示す各手法の判定結果  $x_i$  と上記の信頼度  $r_i$  の総和  $y$  によるアンサンブルを行う。アンサンブルの結果、 $y > 0$  の場合は「溶接欠陥有り」、 $y < 0$  の場合は「溶接欠陥無し」、 $y = 0$  の場合は「判定不可」を最終的な判定結果として出力する。つまり、探傷画像に応じた信頼度により、各判定手法の判定結果を適切に考慮した溶接欠陥有無の判定結果を得ることが可能となる。アンサンブルによる溶接欠陥有無の判定結果例(溶接欠陥有りの場合)を表 1 に示す。表 1 では、3 つの判定手法のうち CNN のみが異なる判定結果となっているが、画像処理および AE の信頼度が高いため、最終的な判定結果は「溶接欠陥有り」となる。

$$y = \sum x_i r_i \quad \dots (1)$$

$y$  : 総和

$x_i$  : 各判定手法における判定結果  
(溶接欠陥有り : 1, 溶接欠陥無し : -1)

$r_i$  : 各判定手法における信頼度  
(0~1 の実数値)

表 1 アンサンブルによる判定例

| 判定手法 | 各手法の判定結果<br>$x$ | 信頼度<br>$r$     | 総和<br>$y$           |
|------|-----------------|----------------|---------------------|
| 画像処理 | 1               | × 0.91 = 0.91  | 1.22<br>( $y > 0$ ) |
| CNN  | -1              | × 0.56 = -0.56 |                     |
| AE   | 1               | × 0.87 = 0.87  |                     |

アンサンブルによる溶接欠陥の有無判定精度は、画像単位で約 96%、溶接管単位(1° 毎に取得した画像 360 枚分を 1 セットとしたもの)で約 99% の判定精度を実現した。アンサンブルを行うことで判定精度が向上し、各判定手法単独での判定結果と比較して溶接欠陥の見落としは、ほとんど無くなった。

### 8. 実機検査業務への適用

開発した自動判定システムを化学プラント向け熱交換器の管端溶接部における検査業務に適用した。本システム導入による検査の流れを図 7 に示す。従来は、検査員が取得した全ての探傷画像データに対して目視による欠陥有無の判定を行っていたが、判定システム導入後は全データのうち、判定システムが「溶接欠陥有り」と判断した画像のみ検査員による目視確認を行った。

その結果、判定システム導入前の検査業務と比較して検査および判定に係る時間を約 75% 削減することができた。具体的には、200 万を超える探傷画像データの判定に約 2 カ月を要したが、本システムを適用することによって約 2 週間で迅速かつ正確に判定可能となり、検査コストと検査員の負担を大幅に低減することができた。

### 9. さいごに

近年、熱交換器の管端溶接部における精密検査のニーズが高まっている。新規製作時の品質向上や初期状態の把握、ならびに供用中の機器における有害な亀裂の検出や補修・更新を判断するための劣化診断などを目的に、管端 PAUT 装置が適用されている。従来、装置より取得した探傷画像中の溶接欠陥有無は、検査員が目視により 1 枚ずつ判定していたが、検査コストや検査員の負担軽減といった課題を克服する必要性から本開発を行った。適用した手法および得られた成果を下記に示す。

1. YOLO を用いて探傷領域を検出および抽出した。
2. 画像処理, CNN, AE の判定手法により、溶接欠陥の有無を判定した。
3. 各判定手法の判定結果と信頼度を用いたアンサンブル手法により、最終的に画像単位で約 96%、溶接管単位で約 99% の判定精度を実現した。
4. 溶接欠陥有無自動判定システムの適用により、検査および判定に係る時間を従来と比べて約 75% 削減することができた。

今後、化学プラントの分野をはじめ、様々な分野で使用される熱交換器における管端溶接部の欠陥検出のほか、応力腐食割れや管内外面の腐食部検査などへ本システムの適用を進めていく。

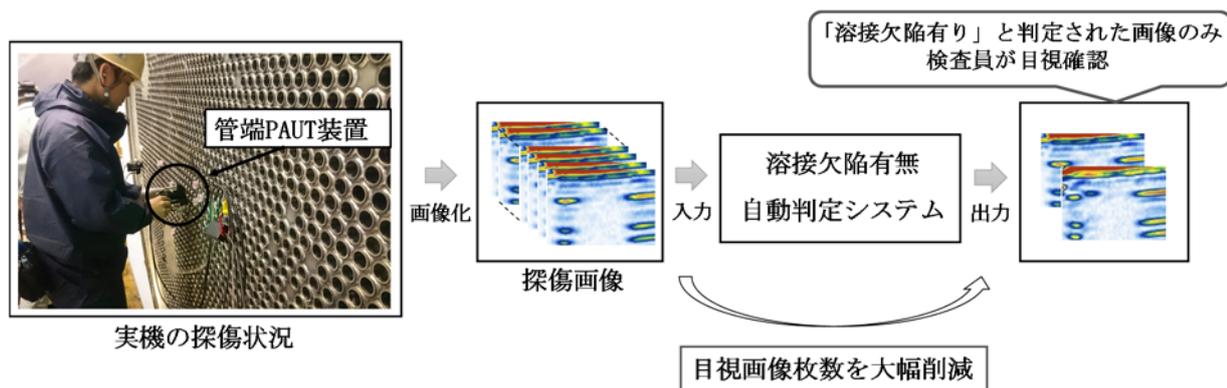


図7 溶接欠陥の有無を自動で判定するシステムの導入による検査の流れ

### 参考文献

- [1] M.Abe, J.Murakami, N.Shinmura, *Ultrasonic Testing and Photographic Imaging System for Tube to Tubesheet Weld of Heat Exchanger*, ASME, PVP2017-65569, (2017), 1-8.
- [2] 篠田薫, 安部正光, 村上丈一, 新村直人, 服部洋, 多管式熱交換器における管端溶接部の PAUT 検査技術, 溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集, (2019), 38-43.
- [3] 篠田薫, 安部正光, 村上丈一, 新村直人, 服部洋, 多管式熱交換器における管端溶接部の PAUT 検査技術, 配管技術, 62(6), (2020), 8-14.
- [4] 篠田薫, 安部正光, 村上丈一, 新村直人, 服部洋, 多管式熱交換器における管端溶接部の PAUT 検査技術, 検査技術, 25(10), (2020), 67-73.
- [5] 和田貴裕, 井岡良太, 篠田薫, 片山猛, 安部正光, 竹中俊哉, 服部洋, 管端溶接部の溶接欠陥有無自動判定システムの開発, Hitz 技報, 81(1), (2020), 2-8.
- [6] J.Redmon, S.Divvala, R.Girshick et al., *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2016), 779-788.
- [7] J.Redmon and A.Farhadi: *YOLO9000: Better, Faster, Stronger*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2017), 7263-7271.
- [8] Y.LeCun, B.Boser, J.S.Denker et al., *Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition*, Neural Computation, 1(4), (1989), 541-551.
- [9] G.E.Hinton and R.R.Salakhutdinov, *Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks*, Science, 313(5786), (2006), 504-507.

人と熱との関わりの足跡（その8）  
 ー日本近代製鉄の発祥 釜石から八幡へー

*Footprints of the relationship between humans and heat (Part 8)*  
*-Origin of Japanese modern iron manufacture "From Kamaishi to Yahata"-*

森 一欽（釜石市文化スポーツ部世界遺産課），星 朗（東北学院大学）  
*Kazuyoshi MORI (World Heritage Division, Kamaishi City)*  
*and Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University)*  
*e-mail: mori1842@city.kamaishi.iwate.jp, ahoshi@mail.tohoku-gakuin.ac.jp*

1. はじめに

2015年に世界遺産となった「明治日本の産業革命遺産ー製鉄・製鋼，造船，石炭産業」は，幕末から明治に約半世紀という短期間で近代化を果たした軌跡を物語る遺産群で，8県11市の23資産で構成されている。橋野鉄鉱山（釜石市）は，この「明治日本の産業革命遺産」を構成する資産の一つで，安政5（1858）年に大島高任（図1，注1）によって築かれた日本現存最古の洋式高炉跡として日本の近代製鉄のはじまりを物語っている。現在も残る採掘場跡，運搬炉跡，諸施設のある高炉場跡は，当時の製鉄の一連工程を理解することができる貴重な遺跡となっている[1][2]。

製鉄・製鋼部門においては，これまで日本初の近代製鉄所あるいは近代製鉄の発祥地として八幡製鐵所が取り上げられてきたが，「明治日本の産業革命遺産」では八幡製鐵所を日本の産業革命の達成点と位置づけて釜石を発祥とし，八幡において達成に至る流れを鮮明にしている。釜石市においては橋野鉄鉱山インフォメーションセンターおよび釜石市立鉄の歴史館に関連する資料や解説パネルを設置している（注2）。

本稿では世界遺産の一翼をなす製鉄・製鋼分野の流れを紹介することとする。

2. 日本近代製鉄発祥地釜石

江戸時代末，西欧列強が日本近海に接近した。鎖国をしていた日本では，その対応として海防の強化を行っていた。その中で，欧米に対応できる軍備として，佐賀藩や薩摩藩などが鉄製大砲の生産に乗り出した。鉄製大砲生産には西洋技術の導入が必要であったが，外国人技師から直接教わる

ことが出来ず，オランダのロイク国立大砲製造所長ヒュゲーニンが著した『ロイク国立大砲製造所における鑄造法』などを翻訳し，これを手本に実物を見たこともないまま反射炉建設に乗り出した。しかし，当初，反射炉で使用する銑鉄（鉄鉱石を還元して得られる鉄で炭素を2.1%以上含むものをいう。）は従来のたたら製鉄技法の砂鉄銑であったが，砂鉄銑で作った大砲は，発砲と共に亀裂が入るなど，材質上の多くの問題があったことから，岩鉄（磁鉄鉱）を原料とする銑鉄が必要となった。

攘夷派の急先鋒であった水戸藩では，前藩主徳川斉昭の主導により海防強化が推し進められ，盛岡藩出身の大島高任や薩摩藩士竹下清右衛門矩方，三春藩士熊田嘉門宗弘を招聘し，安政3（1856）年に那珂湊反射炉が完成した。なお，水戸藩はこの当時，銅の供給が困難なために鉄製大砲製造に舵を切ったのであって，鉄製大砲の有効性については認識していない点は近代化に対する為政者と技術者のギャップとして捉えることができる。



図1 大島高任（鉄の歴史館蔵）

さらに大島は、鉄製大砲の原料は砂鉄銑ではなく、岩鉄(磁鉄鉱)銑であるべきという見解から、反射炉に岩鉄銑を供給する目的で、大橋(現釜石市甲子町第1地割)に高炉建設を計画して、自らの属する盛岡藩に出資を依頼した。しかし、盛岡藩にとって高炉建設は初の試みであり、また盛岡藩は財政難であったため出資せず、大島は山田(現岩手県下閉伊郡山田町)の御給人(御用金献納等により武士階級を得た商人)貫洞瀬左衛門に出資を依頼し、安政4年12月1日(西暦1858年1月15日)、日本で初めて鉄銑を原料とした高炉での連続出銑に成功した。これが近代製鉄の発祥となり、その功績により大島高任は「近代製鉄の父」と呼ばれている。なお、日本鉄鋼連盟では昭和34(1959)年に12月1日を「鉄の記念日」と制定している。この成功を受け、盛岡藩では安政5(1858)年に橋野鉄銑山を建設した。(図2)

しかしながら、安政の大獄により斉昭が蟄居となり、供給先的那珂湊反射炉が閉鎖されたり、開国に伴って兵器等が西欧諸国から輸入されたりしたため、本来の役割を果たさないまま明治を迎えることとなる。慶応年間、盛岡藩では仙台藩に倣い鉄銭の生産を計画し、大迫(現花巻市大迫)に銭座を開設した。さらに、その分座を栗林(現釜石市栗林町)に建設し、銑鉄需要を確保した。戊辰戦争で鉄銑山の所有が盛岡藩から民営に移ると、釜石地域においては各高炉場に銭座を開設し、高炉銑から鑄銭を行い、明治初期には7カ所13基の高炉が稼働するほどの盛業となっていた(注3)。

現在、露出遺構として残っているのは橋野鉄銑山のみで、こちらも高炉に関しては3基の下部の花崗岩石組が残る程度である。県指定文化財『紙本両鉄銑山御山内並高炉之図』(鉄の歴史館蔵)には二番高炉の立面および断面図が掲載されており、この絵図と昭和30(1955)年、31(1956)年に実施された発掘調査の成果をもとに、鉄の歴史館では三番高炉の原寸模型を製作して、総合演出シアターとして活用されている(図3)。

明治に入り、政府は「富国強兵」「殖産興業」を目標として近代化を推し進め、その基幹となる製鉄業の近代化のため、釜石に官営の製鉄所を建設することとなった。明治7(1874)年、工部省釜石寮釜石支庁が設置され、大島高任とドイツ人技師ルイス・ビアンヒーが来釜した。建設用地は海

運を活かすため、銑石採掘場の隣接地ではなく沿岸部に建設する計画となった。しかしながら、鈴子(現釜石市鈴子町)に25t高炉2基、そして銑石等の輸送に鉄道を敷設するというビアンヒー案と大只越(現釜石市大只越町)に10t高炉5基、輸送用に馬車鉄道を敷設するという大島案が対立した。前者は国の威信をかけ大きな事業点をしようとするもので、後者はまさに「小さく生んで大きく育てる」という堅実路線であった。その当時の工部省としてはどちらの案が優れたものかというよりも、国家事業である点や外国人技師の意見という点で決定したと思われるが、ビアンヒー案を採用し、鈴子に製鉄所が建設された。現在も日本製鉄株式会社東日本製鉄所釜石地区として稼働している。



図2 橋野鉄銑山三番高炉(手前が湯出口)



図3 橋野鉄銑山三番高炉原寸模型(手前が湯出口)(鉄の歴史館蔵)

官営釜石製鉄所では、25 t 高炉（図 4）を 2 基とパドル炉 12 基を設置した鍊鉄場を主に、港には専用棧橋を設け、大橋の採鉱場と小川（現釜石市甲子町）の製炭場、さらに釜石の工場間に、我が国 3 番目の鉄道、工部省釜山寮釜石鉄道を建設し、鉄鉱石および木炭を運搬した。

建設年数 6 年、巨額の設備投資、20 名近い外国人技師を雇用した巨大プロジェクトは、実日数 1 年にも満たないまま、明治 15（1882）年 12 月に営業廃止が決定した（注 4）[3]。



図 4 官営 25 t 高炉  
（釜石鉱山田中製鐵所写真帖より鉄の歴史館蔵）

その後、釜石製鉄所は田中長兵衛に払い下げられ、田中は横須賀支店長の横山久太郎に一切を任せた。当初計画では、鉄鉱石や木炭を払下げ、東京で売りさばく予定であったが、物価が下落し、さらに運賃が高騰したために上手くいかなかった。横山は再度、釜石で製鉄を行うことを決断し、地元出身の高橋亦助を高炉主任に、村井源兵衛を機械主任に採用して、48 回の失敗を乗り越えて明治 19（1886）年に出鉄に成功（図 5）、翌明治 20（1887）年に釜石鉱山田中製鐵所を設立した。その後、明治 24（1891）年までに大橋や鈴子に高炉を 2 基ずつ新設し、さらに明治 27（1894）年には栗橋分工場を設置し、高炉を 1 基操業し、合計で 7 基の小高炉で操業を行った。この間、釜石で生産された銑鉄は、明治 23（1890）年の大阪砲兵工廠の実験により、これまで海岸砲弾丸製造用に輸入していたイタリアのグレゴリーニ銑に比べて遜色なしとの結果が得られ、需要拡大へと繋がった。

一方、官営釜石製鉄所時代の炉 2 基は、廃業後そのままの状態であった。そこで、田中は農商務

技師で帝国大学工科大学採鉱冶金科教授の野呂景義と、その弟子で農商務省技師試補の香村小録にその改修を依頼し、明治 27（1894）年、30 t 炉として操業に成功した。この炉は木炭に代わりコークスを用いて製鍊したことで、出銑量が飛躍的に増加した。この年、釜石銑は生産量において初めて中国地方の砂鉄銑を超えた。このコークス銑は、わが国初めての成功であり、現在もこの方法が採用されている。



図 5 49 回目にして出銑に成功した高炉  
（鉄の歴史館蔵）

明治 27 年は日清戦争の時期にあたり、鉄道などのインフラの充実が必要とされる中、日本人による大型高炉の操業、そしてコークスへの転換の成功は、官営八幡製鐵所設置の後押しとなった。

官営八幡製鐵所の建設時には釜石の技師と 8 名の熟練職工が派遣されたほか、初代技監には大島高任の長男道太郎が就き、明治 34（1901）年操業を開始する。しかし、当初は上手くいかなかったため、嘱託顧問として野呂景義が指導し、日本最大にして初の銑鋼一貫体制の製鐵所として本格始動する。なお、釜石製鐵所も銑鋼一貫体制に取り掛かり、明治 36（1903）年、民間初の銑鋼一貫体制を確立する。

### 3. 釜石製鉄技術の変遷

日本古来のたたら製鉄では、炉の温度が 1200°C 前後であったため溶銑とならず、鉄の取出しに炉の解体が必要であった。一方で高炉は 1400°C 以上となるため溶銑となり、連続出銑を可能とした。

炉の高さが温度上昇の要因になるが、高い炉の建設には耐火煉瓦の導入が必要であった。耐火煉

瓦は当時の日本には無く、佐賀の築地、多布施反射炉建設に伴い、蘭書を頼りに製作したのが始まりと考えられる。釜石においては、大島的那珂湊反射炉の経験をもとに台村（現花巻市台）などの粘土を用いて製造された耐火煉瓦を使用した。

炉の温度を上げるために必要となるのが送風であるが、古くは袋状のふいごを用いていたが、江戸時代中期に西日本では天秤鞆（てんびんふいご）が、東日本では大型の箱ふいごが発達した。送風は人力で行っており、番子と呼ばれる職人が代わる代わる送風に従事し、「替わり番子」の語源と言われている。天保年間には水車ふいご（水力）が発明されていた。それと合わせるように安政年間に高炉法が導入され、初期高炉は水車ふいごとなっている。

岩手県久慈市歴史民俗資料室では天保年間に発明されたとされる水車ふいごの模型（図 6）を所蔵している。水車軸に上下 2 カ所の歯車を取り付けられ、それを覆うように襖状（ふすまじょう）の板が設置され、水車軸が回ると襖状の板が前後し、ふいごの柄を前後させる仕組みとなっている。ふいご自体は旧来の横型である。一方、蘭書に描かれた高炉のふいごは、水車軸に 3 本の爪が付され、そこに柄が当たると上に、外れると下に落ちることで、上下のピストン運動をする仕組みとなっている（図 7）。



図 6 水車ふいごの模型  
（久慈市歴史民俗資料室蔵）

瓢山高炉図（図 8、注 5）に描かれたように、大島は当初蘭書のまま円筒型のふいごを採用したが、当時の日本の旋盤技術では円筒型の加工が上手く

いかず、古来の箱ふいごを縦型に応用して成功している。

応用するにあたり、蘭書のふいごは送風口がふいごの頂点部であったが、箱型ふいごはふいごの中央に設置してある。このことにより、前者はシマ板（ふいご内にあつて移動して送風する板）が上に行った時のみに送風できるのに対し、後者は上下移動の両方で送風できるようになっている。

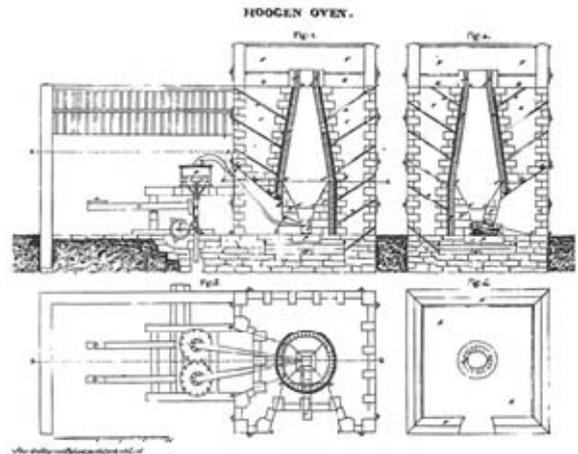


図 7 蘭書に描かれた高炉  
（『ロイク国立大砲鑄造所における鑄造法』より）

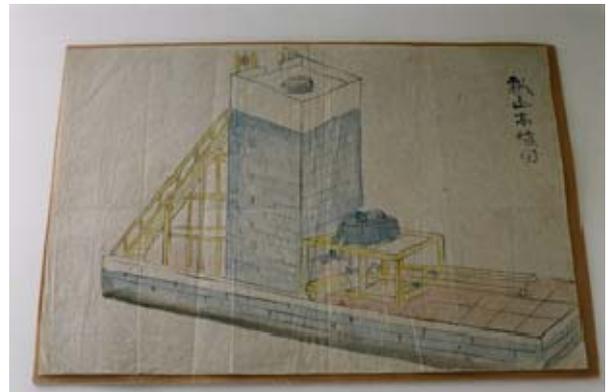


図 8 瓢山高炉図（鉄の歴史館蔵）

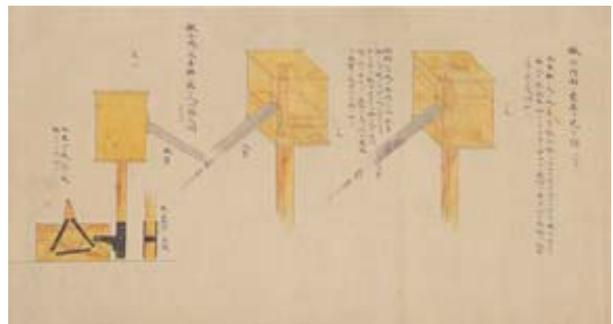


図 9 箱型水車ふいご  
（紙本両鉄鉾山御山内並高炉之図より）

明治期には、高炉熱の循環および蒸気機関による熱風炉が導入された。官営の高炉においては、当時、最新の鉄製の直立単筒の送風機と蓄熱式の熱風炉（ホイットウェル式）を採用している。一方、官営を受け継いだ田中製鐵所では当初、設備資金の関係で木製横型送風機と鉄管式（横臥鉄管熱風炉）を採用している。この技術は群馬県の中小坂鉄山の技術を導入したもので、中小坂鉄山での高炉操業経験を持つ秋元光愛を招聘しているが失敗している。49回目の成功後も基本はこの型式を採用したが、木製送風機は空気の漏れが激しく、熱風炉も十分な温度を保つことができなかった。それに対して、田中製鐵所では鉄管を伸ばし、本数を増やすことで伝熱面積を広げる改良を繰り返したが上手くいかず、最終的には送風機を鉄製に、熱風炉は直立鉄管に改造することにより問題が解消され、明治27（1894）年には蓄熱式熱風炉も導入されて、順次、各高炉も蓄熱式となった。合わせて、動力も水車から蒸気機関に替えられ、水量の確保できる大橋では明治38（1905）年まで水車のままであったが、鈴子や栗橋では明治28（1895）年までには蒸気機関となった[4]。

燃料（還元剤）については、たたら製鉄以来、木炭を使用していた。「砂鉄七里、木炭三里」と言われる運搬距離の目安を元に燃料獲得に主眼を置いた工場立地となっており、大橋鉄鉱山や橋野鉄鉱山は鉄鉱石採掘場から3kmほどのやや広い河岸段丘上に立地し、周辺には木炭供給減となる豊富な森林が広がっている。一方、近代化に伴い海運重視の臨海立地にはなるものの、官営釜石製鉄所は木炭供給地との位置関係も念頭に置いた工場立地となっており、約9km離れた小川に製炭所を設置し、運搬用に鉄道も敷設している。残念ながら、当初、コークスは念頭になく、小川製炭所の火災に伴い、急遽コークス窯（ビーハイブ式）を設置し、三池から石炭を運ぶこととなった。一方、八幡製鐵所は呉など多くの候補が上がる中、石炭供給地（筑豊炭田）に隣接していることでその立地が決定に至っている。このように立地選定の上で燃料の供給が主要な要因となっている[3][5]。

#### 4. おわりに

幕末から明治期における近代製鉄の発祥から達成までの道のりを紹介してきたが、当時の政局や

社会情勢等に左右されながらも約半世紀で産業革命を実現させた背景には、西洋技術を受容できるだけの内在的な技術力が日本にはあったということが伺える。

合わせて、一方的な受容では技術の定着はせず、日本人技師の成長および日本流へのアレンジにより日本の産業革命は成り立っている。この点で、日本の産業革命の出発時より人材育成のために学校を設立、留学の推奨を実施してきた先行投資は大きく実を結んだといえる。

新技術への羨望はいかなる時代でも強いが、それを定着させていくためには、自己のキャパシティおよび周辺の環境を知ったうえで進めていくことが大切であることを、日本の近代製鉄史は改めて示唆してくれる。この貴重な教訓を体現している遺産群を保護活用しながら後世に繋げていくことが、我々の使命と考えている。

#### 注1

大島高任は文政9（1826）年、盛岡藩の医師のもとに生まれ、幼名は文治、その後、周禎と名乗る。後に還俗し惣左衛門、明治には改名し高任となる（本稿では高任で統一する）。江戸や長崎で蘭学をはじめ西洋の兵法、砲術、採鉱、冶金を習得している。還俗し惣左衛門を名乗る。釜石での高炉建設成功後は、勘定奉行並として盛岡藩の産業育成に尽力する。明治維新後、岩倉使節団に参加し、欧米の近代化された鉱工業を視察、帰国後は小坂銀山や佐渡金山などの近代化に尽力して大きな功績を残した。また、人材育成の重要性を説いていた大島は、盛岡城下に本格的な洋学校である私学「日新堂」、函館に武田斐三郎（五稜郭の設計者として有名）と共に「坑師学校」を設立している。また、明治3（1870）年、民部大輔大木喬任に鉱山専門の学校である「坑学寮」の創設を建白し、工科大学（現東京大学工学部の前身）設置のきっかけの一つとなっている。晩年はブドウ栽培やワイン醸造、お茶の栽培も手掛け、明治34（1901）年に76歳でその生涯を閉じている[1][2]。

#### 注2

橋野鉄鉱山インフォメーションセンターは橋野町第2地割橋野鉄鉱山高炉場の300m北側に所在する。世界遺産登録直前の平成25（2013）年に開

館し、「明治日本の産業革命遺産」および橋野鉄鉱山の概要を紹介する施設となっている。釜石市立鉄の歴史館は大平町に所在し、昭和 60 (1985) 年に開館した。大島高任の顕彰および釜石製鉄所の歴史を紹介する施設で、大島家文書および釜石製鉄所資料を所蔵している。

注 3

江戸時代の銭貨は基本的には銅製で「寛永通宝」も主に銅で鑄造されていたが、銅の不足により真鍮や鉄でも鑄造されるようになった。鉄銭の最初は元文 4 (1739) 年である[6]。仙台藩の石巻鑄銭場では、明和 5 (1768) 年より鉄銭の鑄造を開始している。盛岡藩では高炉成功後すぐに銭座建設を幕府に申請している。しかし、許可が下りなかったため石巻鑄銭場に供給を求めるも、仙台藩でも文久山高炉（現一関市大東町）などが建設されたため 3 年間で供給が途絶えた。

注 4

失敗の要因については、鉄鉱石の欠乏や木炭の不足、外国の技術に職工がついて行けなかったなど多くの説がある[3] [5] が、明治 10 年代は、政府事業の拡大や西南戦争などによる巨額の戦費により、財政危機に見舞われていた。この時、大隈重信に代わり大蔵卿となった松方正義は、赤字解消策として明治 15 (1882) 年に官営工場払下概則を施行、これに基づき、釜石鉱山も払い下げられることとなった。

注 5

大橋一番高炉の図と考えられる。大橋高炉を流

れる久子沢（ひさごさわ）に因み、周辺の山を瓢山（ひさごやま）と呼称したものと考えられる。

[本稿について] 熱の科学技術史研究会では例年の日本伝熱シンポジウムにおいてオーガナイズドセッション (OS) 「人と熱との関わりの足跡」を企画しているが、2021 年の伝熱シンポジウムが郡山で開催されるにあたり、近代日本の始動に大きな役割を果たした岩手県釜石市の製鉄事業に焦点を当てることとした。そのため、釜石市を經由して同市世界遺産課の森一欽氏にご講演を依頼したところご快諾を頂き、かつ開催当日の OS においては主旨に沿ったご講演を頂いたことに心から感謝したい。本稿は、この時のご講演内容に加筆して頂いたものを、当該 OS を運営した星朗（東北学院大学）と河村洋（東京理科大学）が編集したものである。（熱の科学技術史研究会）

参考文献

- [1] 鉄都釜石 日本近代製鉄の夜明け, 2016, 釜石市発行.
- [2] 釜石市立鉄の歴史館 GUIDE BOOK, 2019, 釜石市発行.
- [3] 失敗の鐵学, 2020, 釜石市立鉄の歴史館.
- [4] 高松亨, 釜石田中製鉄所木炭高炉の鉄管熱風炉, 技術と文明 6-1, 1990, 日本産業技術史学会.
- [5] 小野寺英輝, 官営釜石製鉄所廃業の倫理的考察, 日本機械学会論文集 (C 編) 74-746, 2008, 日本機械学会.
- [6] 鈴木公雄, 銭の考古学, 2002, 吉川弘文館.

行事カレンダー

本会主催行事

| 開催日                      | 行事名                                | 申込締切   | 原稿締切 | 問合せ先  | 掲載号 |
|--------------------------|------------------------------------|--------|------|---|-----|
| 2021年                    |                                    |        |      |   |     |
| 10月<br>3(日)<br>～<br>7(木) | アジア熱科学会議<br>(2 <sup>nd</sup> ACTS) |        |      | ACTS2020 実行委員会<br>secretary@acts2020jp.org                |     |
| 11月<br>26(金)             | 講習会「計測技術 ～測定的基础と設計応用～」             | 先着 40名 |      | 公益社団法人日本伝熱学会<br>E-mail: office@htsj.or.jp<br>03-3259-7919 |     |

本会共催、協賛、後援行事

| 開催日                        | 行事名   | 申込締切 | 原稿締切 | 問合せ先  | 掲載号 |
|----------------------------|---|------|------|---|-----|
| 2021年                      |   |      |      |   |     |
| 10月<br>13(水)<br>～<br>14(木) | 第48回日本ガスタービン学会定期講演会   |      |      | (公社) 日本ガスタービン学会<br>E-mail: gtsj-office@gtsj.org   |     |
| 25(月)<br>～<br>27(水)        | 第42回日本熱物性シンポジウム   |      |      | 日本熱物性学会 事務局<br>jstp@okayama-u.ac.jp<br>堀部明彦(代理) 山田寛   |     |
| 27(水)<br>～<br>28(木)        | 日本機械学会関西支部第375回講習会<br>応力計測の基礎とその応用  |      |      | (一社) 日本機械学会関西支部<br>Tel:06-6443-2073<br>E-mail: info@kansai.jsme.or.jp   |     |
| 11月<br>3(水)<br>～<br>6(土)   | The 16th International Symposium on<br>Advanced Science and Technology<br>in Experimental Mechanics |      |      | 新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事務局 担当: 小林 TEL: 025-368-9310/FAX: 025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp                  |     |
| 6(土)                       | No.21-89 特別講習会「部門30周年記念講演会「Energy systems for the next decade」」                                     |      |      | (一社) 日本機械学会総合企画 G<br>森本あかね morimoto@jsme.or.jp  |     |
| 9(火)<br>～<br>11(木)         | 第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム   |      |      | (一社) 日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門<br>担当 大通千晴<br>daitsu@jsme.or.jp  |     |
| 13(土)                      | 日本機械学会関東支部山梨講演会   |      |      | (一社) 日本機械学会関東支部<br>Tel:03-5360-3508<br>E-mail: kt-staff@jsme.or.jp  |     |
| 17(水)<br>～<br>18(木)        | 日本機械学会関西支部第376回講習会<br>実務者のための流体解析技術の基礎と応用   |      |      | (一社) 日本機械学会関西支部<br>Tel:06-6443-2073<br>E-mail: info@kansai.jsme.or.jp   |     |
| 19(金)                      | 脱炭素社会実現に向けた再エネ利用システムの研究開発に関する講演会  |      |      | 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻<br>西村 顕 E-mail: nisimura@mach.mie-u.ac.jp  |     |
| 22(月)<br>～<br>24(水)        | 第59回燃焼シンポジウム  |      |      | (一社) 日本燃焼学会<br>office@combustionsociety.jp  |     |
| 12月<br>4(土)                | 21-52 第23回スターリングサイクルシンポジウム  |      |      | (一社) 日本機械学会エンジンシステム部門事務担当 大竹英雄<br>otake@jsme.or.jp  |     |
| 9(木)                       | 2021年度計算力学技術者(CAE技術者)資格認定事業   |      |      | (一社) 日本機械学会事業企画グループ 金子<br>caenintei@jsme.or.jp  |     |
| 14(火)<br>～<br>16(木)        | 第33回数値流体力学シンポジウム  |      |      | (一社) 日本流体力学会<br>03-3714-0427/FAX: 03-3714-0434<br>E-mail: info@nagare.or.jp   |     |
| 16(木)<br>～<br>17(金)        | 第30回微粒化シンポジウム   |      |      | 日本液体微粒化学会事務局<br>(株) 学術出版印刷 担当: 近藤 朋子<br>Tel. 06-6466-1588/Fax. 06-6463-2522<br>E-mail: information_atmz@ilass-japan.gr.jp   |     |
| 2022年                      |   |      |      |   |     |
| 3月<br>15(火)<br>～<br>17(木)  | The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2022)                   |      |      | ICJWSF-2022 組織委員会 議長: 木村元昭<br>日本大学理工学部機械工学科教授<br>電話: 03-3259-0750/FAX: 03-3293-8254<br>E-mail: kimura.motoaki@nihon-u.ac.jp |     |
| 19(土)<br>～<br>21(月)        | 32st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP32)  |      |      | ISTP32 実行委員会委員長<br>宇高義郎<br>utaka@ynu.ac.jp  |     |

## 第59回 日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第59回 日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 板谷 義紀

幹事 服部 博文

開催日：令和4年 5月 18日（水）～ 5月 20日（金）

会場：長良川国際会議場 (<http://www.g-ncc.jp>) ※状況によってはWeb開催の可能性あります。

所在地 〒502-0817 岐阜県岐阜市ながら福光2695-2 電話番号 058-296-1200

アクセス 自動車：名神高速岐阜羽島ICから岐阜環状線経由で約40分

東海北陸自動車道岐阜各務原ICから国道21号、岐阜市街経由で約40分

（駐車場は有料です）

バス：岐阜駅バスターミナルより約 20 分＋徒歩 約 2 分

岐阜バス「市内ループ線」で長良川国際会議場北口下車

「三田洞線 K50・K55」で長良川国際会議場前下車

飛行機：中部国際空港（セントレア）から名鉄岐阜駅（特急66分）＋上記バスと徒歩で約22分

講演申込締切：令和4年 1月 14日（金）

講演論文原稿提出締切：令和4年 3月 4日（金）

早期参加申込締切：令和4年 4月 1日（金）

ホームページURL：<https://htsj-conf.org/symp2022/>（準備中）

【シンポジウムの形式】 ※状況によってはWeb開催の可能性あります。

- 講演発表形式として
  - a) 通常的一般セッション（口頭発表）
  - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは15分（発表10分、個別討論5分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5分 × セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第59回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

### 【講演申込方法】

- 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者（登壇者）は、日本伝熱学会会員（学生会員、賛助会員、特別賛助会員を含む）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は、会員申込と会費納付を行って下さい。（オーガナイズドセッションについては、各セッション募集に従って下さい。）
- 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第59回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- 発表申込み時に、論文要旨（日本語で200～250字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- 講演発表申込みは、講演者1名につき1題目とさせていただきます。

- 講演の採否およびセッションへの振分けは、実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集電子版】

- 講演論文集として電子版のみを発行し、冊子版は発行しません。
- 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお、参加できなかった日本伝熱学会員には、講演論文集電子版をネットからのダウンロードを基本として配布します（ネットダウンロードが困難な会員は事務局へお申し込みください）。
- 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を提出して頂きます。講演論文はA4サイズで2～6ページ、講演アブストラクトは、A4サイズで1ページとします。
- 講演論文原稿の執筆要綱は会誌1月号の「お知らせ」と本シンポジウムのホームページに掲載します
- 講演論文原稿は、原則としてPDFファイルで提出して頂きます。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。

【参加費等】※状況によってはWeb開催の可能性あります。

- シンポジウム参加費  
会員一般（事前申込：12,000 円、当日申込：15,000 円）  
非会員一般（事前申込：15,000 円、当日申込：18,000 円）  
会員学生（事前申込：6,000 円、当日申込：7,000 円）  
非会員学生（事前申込：7,000 円、当日申込：8,000 円）  
※特別賛助会員は1口につき3名、賛助会員は1口につき1名、参加費が無料になります。  
※会員とは、日本伝熱学会会員のほか、共催・協賛学協会の会員を含みます。  
※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。
- 講演論文集電子版  
講演論文集電子版のみの販売：5,000 円（シンポジウム後の販売になります。）

【意見交換会】※状況によってはWeb開催の可能性あります。

- 開催日：令和4年 5月 19日（木）
- 会場：都ホテル岐阜長良川（〒502-0817 岐阜県岐阜市長良福光2695-2）  
参加費：未定

【ご注意】

- 講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- 講演申込みは共著者の許可を得てから行って下さい。
- 論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- 参加費、意見交換会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第59回 日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局  
東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 機械工学科 内 板谷宛  
E-mail : yitaya@gifu-u.ac.jp, Tel : 058-293-2532, Fax : 058-293-2532 or 2491

## 優秀プレゼンテーション賞（第 59 回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会  
委員長 小宮 敦樹

第 59 回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

開催日：令和 4 年 5 月 18 日（水）シンポジウム第 1 日

発表形式：発表者 1 名あたり、発表内容をまとめた 1 枚のアピールスライド提出とポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。アピールスライドは冊子体として配布されるとともにスライドショーとして会場にて案内される予定です。

なお、伝熱シンポジウムの開催状況により、優秀プレゼンテーション賞セッションをオンラインにて開催する場合があります。発表形式の詳細については決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。

対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和 4 年 3 月 31 日現在で 28 歳以下の方、または、申込当日に学生である方。

応募資格：発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、講演論文原稿提出までに、会員申し込みを行ってください。なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。

応募件数：大学に所属する学生の場合：指導教員あたり 1 名（1 件）  
大学以外の研究機関，企業に所属する場合：研究グループあたり 1 名（1 件）  
とします。

応募方法：第 59 回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の講演申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。

審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。

表彰：受賞者はシンポジウム第 2 日の学会総会で表彰されます。

日本伝熱学会主催 オンライン講習会  
「計測技術～測定の基礎と設計応用～」受講者募集のご案内

産学交流委員会  
委員長 近藤 義広

開催日 2021年11月26日 金曜日 12:50～17:00  
開催方法 オンライン (Webex を予定)

要旨 『計測技術』を基礎から学ぶ必要がある方や、実設計における計測技術の最新技術を学びたい方を対象に、計測分野で著名な方々とディスカッションをすることでより広い知見を得られるオンライン講習会を開催する運びとなりました。昨年開催しご好評頂いた『計測技術』について、本年は計測技術の基礎となる各種センサーおよび、多くの場面で需要が高まっている非接触計測技術、さらに実設計への応用のための計測技術に関する専門家を講師陣にお招きし、計測の基礎から応用まで幅広くご講演頂きます。本講習会では、講演者と聴講者が一体となった参加型イベントにするため、設計業務や研究で悩んでいることを共有する総合討論の時間を設けております。また本年はオンライン講習会ですので、これまで会場に足を運ぶことが難しかった方でもご参加いただきやすくなっております。

題目・講師 (敬称略)

- |                                |           |       |
|--------------------------------|-----------|-------|
| (1) 開会のあいさつ (12:50 - 13:00)    | 日立アカデミー   | 近藤 義広 |
| (2) 講演 (13:00 - 16:30)         |           |       |
| ・放射温度計の正しい使い方                  | 防衛大学校     | 中村 元  |
| ・熱電対の正しい使い方 (熱電回路の図式表現と測定誤差要因) | 名古屋工業大学   | 田川 正人 |
| ・定常法による熱伝導率測定の原理と応用            | 名古屋市工業研究所 | 梶田 欣  |
| ・熱流センサによる電子部品の発熱量測定            | パナソニック    | 沼本 竜彦 |
| ・冷却用ファンの性能測定および評価手法            | 金沢工業大学    | 福江 高志 |
| (3) 総合討論 (16:30 - 17:00)       | 講演講師, 司会: | 近藤 義広 |

定員 先着 40 名

資料集 本セミナーに参加された方に、資料集をメール配信いたします。資料集のみの販売はいたしません。

申込方法 伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください。

<http://www.htsj.or.jp/committee/lecture/20211126keisokugijutsu/>

問合せ先 (公社) 日本伝熱学会 (担当 大澤) / 電話 (03) 3259-7919 / FAX (03) 5577-7939

/ E-mail : office@htsj.or.jp



## 編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

| 対象  | 対応   | 具体的な手続き<br>(電子メールでの連絡を前提としています)  |
|---|--|--|
| 本会（支部）主催による行事                             | 無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信  | 申込者は、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML担当）、広報委員会委員長（HP担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。   |
| 関係学会や本会会員が関係する組織による<br>国内外の会議・シンポジウム・セミナー | 条件付き掲載<br>会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料）<br>HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料）<br>ML：条件付き配信（無料） | 申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。   |
| 大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）             | 会誌：掲載せず<br>HP：条件付き掲載（無料）<br>ML：条件付き配信（無料）                                      | 申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。   |
| 一般広告<br>求人広告                              | 会誌：条件付き掲載（有料）<br>HP：条件付き掲載<br>(バナー広告のみ、有料)                                     | 申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては <a href="http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf</a> をご参照下さい。 |

### 【連絡先】

- ・総務部会長：稲田孝明（東京電機大学）：t-inada@mail.dendai.ac.jp
- ・編集出版部会長：永井二郎（福井大学）：nagai@u-fukui.ac.jp
- ・広報委員会委員長：一柳満久（上智大学）：ichiyanagi@sophia.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：長谷川洋介（東京大学）：ysk@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：office@htsj.or.jp

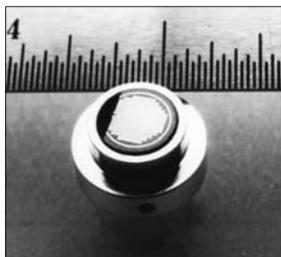
### 【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはTextファイルでお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります。pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

# 熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 ( $W/cm^2$ ) に比例した直流電圧を出力します。  
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。  
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、  
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

## 熱流束 マイクロセンサー



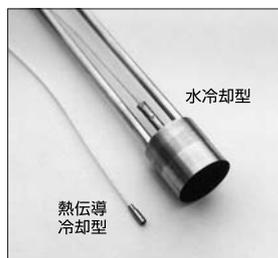
### 特徴

- 最高速の応答 (約 6 $\mu$ 秒)
- 850 $^{\circ}$ Cまで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

### 使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

## サーモゲージ

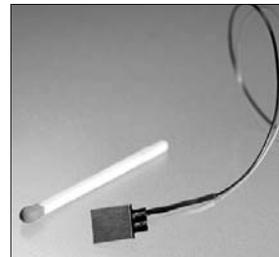


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

## gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72 $m^2$ の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

### 使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

## 熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL

[www.senstech.jp](http://www.senstech.jp)

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F  
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

E-mail

[info@senstech.jp](mailto:info@senstech.jp)



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

### CAPTEC 社(フランス)

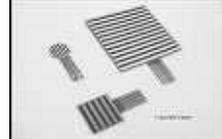
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。  
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

#### 熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm  
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)  
温度範囲: -200～200°C  
応答速度: 約 200ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

#### 輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm  
厚み: 0.25mm  
温度範囲: -200～250°C  
応答速度: 約 50ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
波長領域: 赤外/可視+赤外

### MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

#### 熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft<sup>2</sup>sec(フルスケール)  
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)  
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)  
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)  
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下\*  
再現性: ±0.5%  
較正精度: ±2%  
オプション: 輻射窓・視野角指定等

\*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

#### 超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】  
表面温度及び表面熱流束計測  
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等  
【最小プローブ径】  
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】  
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C  
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C  
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C  
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C  
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

### ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

#### 高温用熱流板



最高温度: 980°C  
応答速度: 0.1s  
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

#### 水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C  
応答速度: 0.1s  
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm<sup>2</sup>

#### 当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

#### 有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B  
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522  
URL: <http://www.techno-office.com>

## 編集出版部会ノート

### *Note from the JHTSJ Editorial Board*

2021年5月の伝熱シンポジウムは、コロナ禍のため初のオンライン開催となりましたが、実に見事に運営されました。前号に実施報告記事が掲載されています。そこでも触れられましたが、本学会は創立60周年を迎え、その記念事業が行われました。詳細は、本号に平井秀一郎先生（東京工業大学）が書かれた報告記事をぜひご一読ください。また、本学会第24代会長の岐美格先生が6月に逝去されたとの連絡を直後に受けました。追悼記事の準備は7月号には間に合わず、本号に2編掲載致します。心よりご冥福をお祈り致します。

さて、本号では「データ駆動科学と熱・流体工学」の特集を小田豊先生（関西大学）に組んでいただきました。データサイエンス・AIを駆使した熱流体工学に関して、科学の側面からエンジニアリングに至る幅広い内容について、トップリーダーの皆様から6件のご寄稿をいただきました。ご多用にも関わらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

永井 二郎（福井大学）

*Niro NAGAI (University of Fukui)*

*e-mail: nagai@u-fukui.ac.jp*

企画・編集出版担当副会長 高松 洋（九州大学）

編集出版部会長 永井 二郎（福井大学）

#### 委員

（理事） 中原 真也（愛媛大学）、丸山 直樹（三重大学）、坂村 芳孝（富山県立大学）

（協議員） 浅岡 龍徳（信州大学）、小田 豊（関西大学）、小針 達也（日立製作所）、小宮 敦樹（東北大学）

武田 哲明（山梨大学）、塚原 隆裕（東京理科大学）、中川 慎二（富山県立大学）

矢吹 智英（九州工業大学）

TSE チーフエディター 鈴木 雄二（東京大学）

TSE 編集幹事 福島 直哉（東海大学）

編集出版部会 連絡先： 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

福井大学 学術研究院工学系部門

永井 二郎

Phone: 0776-27-8537

E-mail: nagai@u-fukui.ac.jp