

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 64, No. 268
2025. 7

Thermal Science and Engineering

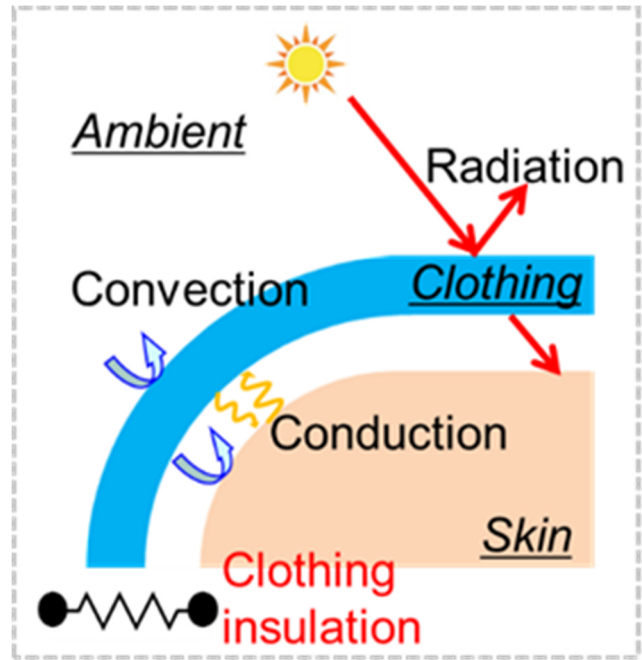
ISSN 0918-9963 Vol. 33, No. 2-3
2025. 7



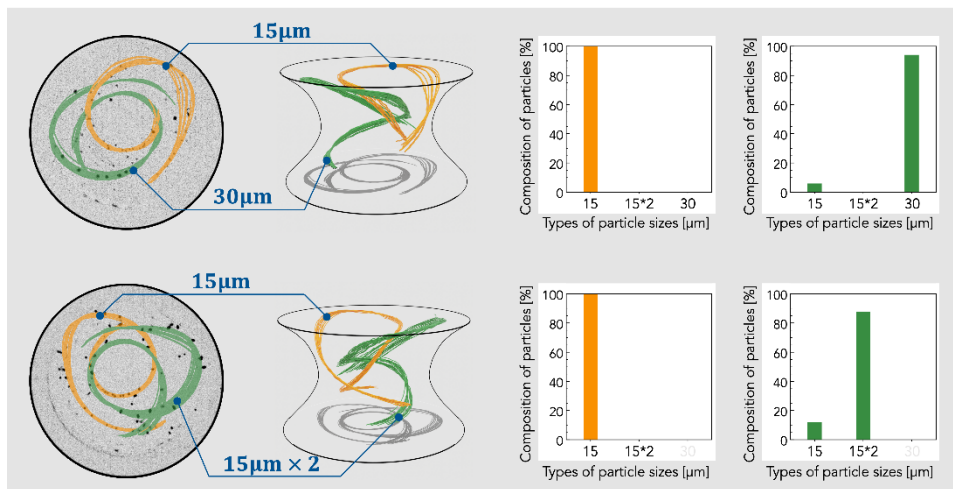
◆特集：マルチスケールの対流現象



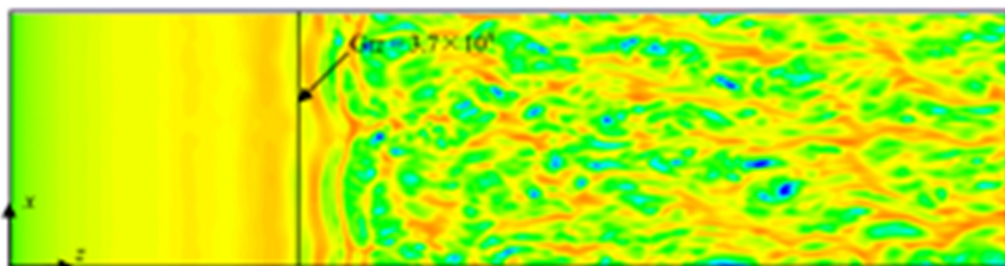
模型実験により再現された火災旋風の例（特集記事「火災現象のスケール効果（桑名 一徳）」より



衣服を介した伝熱（特集記事「生体周りの伝熱と快適性の定量化（島崎 康弘）」より



コヒーレント構造における粒子組成と粒径分布（特集記事「O(2)対称性を有する熱対流中を運動する微小粒子群の秩序構造形成（野口 信，上野 一郎）」より



LES で得られた壁面近傍断面内瞬時温度分布（特集記事「垂直平板自然対流乱流境界層の相似則（服部 康男）」より

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

桑名 一徳（東京理科大学），野口 信，上野 一郎（東京理科大学），
島崎 康弘（豊橋技術科学大学），服部 康男（電力中央研究所）……………表紙裏

〈新旧会長挨拶〉

第 64 期会長挨拶……………須賀 一彦（追手門学院大学）…………… 1

〈第 37 回日本伝熱学会賞〉

第 63 期（2024 年度）表彰選考委員会 報告

……………表彰選考委員会 委員長 永井 二郎（福井大学）…………… 2
日本伝熱学会学術賞を受賞して……………陳 志豪（天津大学），
Mayowa I. Omisanya（LAUTECH），宇高 義郎（天津大学）…………… 4
日本伝熱学会学術賞を受賞して……………PAUL Soumyadeep（スタンフォード大学），
程 馨毅，伊藤 佑介，徐 偉倫，大宮司 啓文（東京大学）…………… 5
日本伝熱学会技術賞を受賞して……………矢嶌 健史（TEPCO HD）…………… 7
日本伝熱学会登鯉賞を受賞して……………許 斌（東京大学）…………… 8
日本伝熱学会登鯉賞を受賞して……………庄司 衛太（東北大学）…………… 9
日本伝熱学会登鯉賞を受賞して……………江目 宏樹（山形大学）…………… 10
日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………小野 泉帆（東北大学）…………… 11
日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………吉田 雅輝（海上自衛隊）…………… 12

〈第 62 回日本伝熱シンポジウム〉

第 62 回日本伝熱シンポジウムの報告

……………店橋 護，伏信一慶，加藤 之貴，齊藤 卓志，村上 陽一，長澤 剛，
兒玉 学（東京科学大学），西 剛伺（足利大学），津島 将司（大阪大学），
春木 直人（岡山県立大学），磯部 和真，中曾 浩一，山田 寛（岡山大学），
小田 豊（関西大学），須網 暁（岐阜大学），矢吹 智英（九州工業大学），伊藤 衡平，
藏田 耕作，手嶋 秀彰，宮崎 康次（九州大学），西田 耕介（京都工芸繊維大学），
岩井 裕（京都大学），服部 康男（電力中央研究所），イ エリム，岡部 弘基，
杵淵 郁也，塩見 淳一郎，鹿園 直毅，白樫 了，鈴木 雄二，松浦 弘明，
ムテルデュ ティモテ（東京大学），岩本 薫，田川 義之（東京農工大学），塚原 隆裕，
元祐 昌廣（東京理科大学），清水 信，徳増 崇，中村 寿，埜上 洋（東北大学），
勝身 俊之，佐藤 大輔（長岡技術科学大学），齋木 悠，服部 博文（名古屋工業大学），
櫻井 篤（新潟大学），坂本 明洋（日本製鉄（株）），近藤 義広（（株）日立アカデミー），
永井 二郎（福井大学），中村 元（防衛大学），田部 豊，能村 貴宏（北海道大学），
江目 宏樹（山形大学），荒木 拓人（横浜国立大学），瀬名波 出（琉球大学）…………… 13
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 — 第 62 回日本伝熱シンポジウム —
……………学生会委員会幹事 西田 耕介（京都工芸繊維大学）…………… 30

〈特集：マルチスケールの対流現象〉

火災現象のスケール効果	桑名 一徳（東京理科大学）	31
O(2)対称性を有する熱対流場中を運動する微小粒子群の秩序構造形成	野口 信，上野 一郎（東京理科大学）	37
生体周りの伝熱と快適性の定量化	島崎 康弘（豊橋技術科学大学）	43
垂直平板自然対流乱流境界層の相似則	服部 康男（電力中央研究所）	49

〈行事カレンダー〉	59
-----------	----

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 63 期（2024 年度）総会議事録	60
2025 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・登鯉賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ	64
学会事務局からのお知らせ	65
編集出版部会からのお知らせ	66

〈編集出版部会ノート〉	70
-------------	----

Vol.64, No.268, July 2025

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Kazunori KUWANA (Tokyo University of Science), Shin NOGUCHI and Ichiro UENO (Tokyo University of Science) Yasuhiro SHIMAZAKI (Toyohashi University of Technology) Yasuo HATTORI (Central Research Institute of Electric Power Industry)	Opening Page
--	--------------

< New and Former Presidents' Addresses >

Inauguration Address as the 64th President Kazuhiko Suga (Otemon Gakuin University)	1
--	---

< The 37th Heat Transfer Society Awards >

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2024 Niro NAGAI (University of Fukui)	2
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Zhihao CHEN (Tianjin University), Mayowa I. Omisanya (LAUTECH), Yoshio UTAHA (Tianjin University)	4
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan S. PAUL (Stanford Univ.), X. CHENG, Y. ITO, W.-L. HSU, H. DAIGUJI (Univ. of Tokyo)	5
On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan Takeshi YAJIMA (TEPCO HD)	7
On Receiving Touri Award of the Heat Transfer Society of Japan Bin XU (The University of Tokyo)	8
On Receiving Touri Award of the Heat Transfer Society of Japan Eita SHOJI (Tohoku University)	9
On Receiving Touri Award of the Heat Transfer Society of Japan Hiroki GONOME (Yamagata University)	10
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Mizuho ONO (Tohoku University)	11
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Masaki Yoshida (Japan Maritime Self-Defense Force)	12

<The 62th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 62th National Heat Transfer Symposium of Japan

Mamoru TANAHASHI, Kazuyoshi FUSHINOBU, Yukitaka KATO, Takushi SAITO, Yoichi MURAKAMI, Tsuyoshi NAGASAWA, Manabu KODAMA (Institute of Science Tokyo), Koji NISHI (Ashikaga University), Shohji TSUSHIMA (Osaka University), Naoto HARUKI (Okayama Prefectural University), Kazuma ISOBE, Koichi NAKASO, Yutaka YAMADA (Okayama University), Yutaka ODA (Kansai University), Akira SUAMI (Gifu University), Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology), Kohei ITO, Kosaku KURATA, Hideaki TESHIMA, Koji MIYAZAKI (Kyushu University), Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology), Hiroshi IWAI (Kyoto University), Yasuo HATTORI (Central Research Institute of Electric Power Industry), Yaerim LEE, Kohki OKABE, Ikuya KINEFUCHI, Junichiro SHIOMI, Naoki SHIKAZONO, Ryo SHIRAKASHI, Yuji SUZUKI, Hiroaki MATSUURA, Timothée MOUTERDE (The University of Tokyo), Kaoru IWAMOTO, Yoshiyuki TAGAWA (Tokyo University of Agriculture and Technology), Takahiro TSUKAHARA, Masahiro MOTOSUKE, (Tokyo University of Science), Makoto SHIMIZU, Takashi TOKUMASU, Hisashi NAKAMURA, Hiroshi NOGAMI (Tohoku University), Toshiyuki KATSUMI, Daisuke SATO (Nagaoka University of Technology), Yu SAIKI, Hirofumi HATTORI (Nagoya Institute of Technology), Atsushi SAKURAI (Niigata University), Akihiro SAKAMOTO (Nippon Steel Corporation), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy Co., Ltd.), Niro NAGAI (University of Fukui), Hajime NAKAMURA (National Defense Academy of Japan), Yutaka TABE, Takahiro NOMURA (Hokkaido University), Hiroki GONOME (Yamagata University), Takuto ARAKI (Yokohama National University), Izuru SENAHA (University of the Ryukyus) 13

Best Presentation Award - 62th National Heat Transfer Symposium of Japan -

Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology) 30

<Special Issue: Convection in Multiscale>

Scaling Fire and Explosion Phenomena

Kazunori KUWANA (Tokyo University of Science) 31

Formation of Ordered Structures by Microparticles in Thermoconvective Flows with O(2) Symmetry

Shin NOGUCHI and Ichiro UENO (Tokyo University of Science) 37

Heat transfer in vicinity of humans and their comfort

Yasuhiro SHIMAZAKI (Toyohashi University of Technology) 43

On the similarity of turbulence natural-convection boundary layer along a vertical plate

Yasuo HATTORI (Central Research Institute of Electric Power Industry) 49

<Calendar> 59

<Announcements> 60

<Note from the JHTSJ Editorial Board> 70

第 64 期会長挨拶

Inauguration Address as the 64th President



須賀 一彦 (追手門学院大学)

Kazuhiko SUGA (Otemon Gakuin University)

e-mail: k-suga@otemon.ac.jp

過日、沖縄にて行われました第 62 回日本伝熱シンポジウムでの総会で、第 63 期に続き第 64 期も会長に重任することを承認いただきました追手門学院大学の須賀一彦です。会員の皆様、どうぞよろしくお願い申し上げます。

昨年の第 63 期会長就任あいさつで、理工系学会の会員減少傾向が続く我が国にあって、伝熱学会の持続可能性を高めるべく、DX 化を含め、学会運営のレジリエンス強化を目指した、新しい形での運営を模索する旨申し上げました。そこで、第 63 期は、学会事務局運営の外部委託を検討し、内容を煮詰めることからスタートしましたが、ご存知のように昨夏、年度途中において前事務局長が自己都合により急遽退職する事態となりました。したがって、業務引継ぎ期間が十分確保できないという問題を抱えながら、前進するしかないということになり、鈴木雄二総務担当副会長を中心に、服部博文理事・財務部会長等、関係各位のご尽力を頂いて、一般社団法人・学会支援機構への業務委託契約に向けて進めました。そして、この 4 月から業務委託を開始したという次第です。しかし、事務局の整理を含め、残務整理が山積しており、完全な運用にはまだしばらく時間を要するという現状です。このように会員の皆様にご迷惑をおかけしていること、この場を借りてお詫び申し上げます。

また、会員問題に関しては、このような事務局の問題もあって、第 63 期では有効な議論ができないまま、第 64 期に引き継ぐことになりました。第 64 期では新たな会員獲得と同時に、退会者数を減らす仕組みの構築が必要と考えております。前者は、他学会で施行されているような入会のハードルを下げる工夫が有効かもしれませんし、後者はシニア人材活躍の仕組みを作る工夫も必要ではないかと考えております。いずれにしても、理事会で熟議して、方針を打ち出せたらと考えております。

一方、今回の第 62 回伝熱シンポジウムでは、HTSJ

国際伝熱シンポジウムを同時開催しました。詳細な報告や分析は別途にありますが、大変盛況でした。ひとえに実行委員会の皆様のご尽力の賜物であり、この場をお借りして感謝いたします。実際、海外からの参加者も含めて、例年以上の講演数と参加者数で、このような形での国内開催の国際会議への潜在的なニーズがあるということの表れではないかと思われまふ。学会の予算編成について熟議が要りますが、今後のシンポジウム運営や学会の国際化促進を考える上で参考にしたいと思ひます。

さて、私と同年配の会員の皆様との意見交換の場で、昔の伝熱シンポでは、重鎮の偉い先生から、学生であっても大変厳しい質問や指摘を受け、それが研究者としての成長に大きな影響を受けたという話をよく聞きます。本会の抜山記念国際賞でも有名な、沸騰曲線を発見されるなど幾多の先駆的な研究をなさった、第 2 期会長の抜山四郎先生の言葉に、“学会の討論はあたたかい厳しさをもって”があります。しかし、最近は何でもハラスメントだと騒がれる風潮にあるので、厳しさが無くなって久しいのではないのでしょうか。実際多くの質疑で、まず感謝や褒め言葉から入り、なんだかふんわりとした議論になっているように感じています。しかし、学術の世界では建設的だが鋭い意見が研究の進歩には必須であり、ハラスメントにならないような時流に合った形で、伝熱学会伝統の“あたたかい厳しさ”をもう一度蘇らせては如何かと思ひます。難しい課題ですが、これは、経験豊富な比較的シニアの会員の皆様には是非お願いしたいと思ひます。

以上のように、第 64 期も継続して新たな取り組みを加えながら日本伝熱学会は進化していかなければならないと思ひます。もちろん、会員の皆様の協力なしでは立ち行かないのは明らかでありまして、皆様のご協力を切にお願いしまして、第 64 期会長のあいさつと代えさせていただきます。何卒よろしくお願いいたします。

第 63 期（2024 年度）表彰選考委員会 報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2024

表彰選考委員会 委員長

永井 二郎（福井大学）

Niro NAGAI (University of Fukui)

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

1. 日本伝熱学会賞

2024 年度（令和 6 年度）日本伝熱学会賞 学術賞，技術賞，登鯉賞，奨励賞および貢献賞の選考結果についてご報告いたします。第 63 期は 2024 年 12 月 13 日を応募締切として募集を行い，最終的に学術賞 5 件，技術賞 1 件，登鯉賞 6 件，奨励賞 2 件，貢献賞 2 件の自薦・他薦の中から候補を決定しました。表彰選考委員会において厳正なる審査を行った結果，学術賞 2 件，技術賞 1 件，登鯉賞 3 件，奨励賞 2 件，貢献賞 1 件を受賞候補者として 4 月の理事會に推薦し，承認されました。各賞の受賞者は以下のとおりです。順不同・敬称略で記載しています。

授賞式は，沖縄で開催された日本伝熱学会第 63 期総会の付帯行事として執り行いました。

1.1 学術賞 (Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

1) 代表研究者：陳 志豪（天津大学）

共同研究者：Mayowa I. Omisanya (Ladoke Akintola University of Technology)
宇高 義郎（天津大学）

「異形態相関沸騰による限界熱流束促進」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E131, 2024.

2) 代表研究者：Paul Soumyadeep (Stanford University)

共同研究者：程 馨毅（東京大学）
伊藤 佑介（東京大学）
徐 偉倫（東京大学）
大宮司 啓文（東京大学）

「ナノ細孔内部の沸騰現象に関する研究」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E222, 2024.

1.2 技術賞 (Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan)

1) 代表研究者：矢野 健史（東京電力ホールディングス株式会社）

「空間サーモグラフィを用いた乾燥工程のデジタルトランスフォーメーション」

1.3 登鯉賞 (Touri Award (Outstanding Young Researcher Award) of the Heat Transfer Society of Japan)

1) 受賞者：許 斌（東京大学）

「歪みエンジニアリングを活かした高性能熱電材料の創製」
第 60 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D134, 2023.

2) 受賞者：庄司 衛太（東北大学）

「多様な熱・物質輸送の時空間分布観測を可能とする光学計測技術に関する研究」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I224, 2024.

3) 受賞者：江目 宏樹（山形大学）

「散乱性媒体によるスペクトル熱制御機構に関する研究」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, G222, 2024.

1.4 奨励賞 (Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan)

1) 受賞者：小野 泉帆（東北大学）

「第一原理計算によるフェムト秒レーザー場の物質における光と熱の変換現象の解明」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D232, 2024.

- 2) 受賞者：吉田 雅輝（海上自衛隊）
「赤外線カメラによる矩形ミニチャネル内流動
沸騰熱伝達の高時空間分解測定」
第 60 日本伝熱シンポジウム講演論文集, H1411,
2023.

1. 5 貢献賞 (Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

- 1) 受賞者：近藤 義広（株式会社日立アカデミー）
「日本伝熱学会産学交流委員会が主催するイベ
ントの提案・企画・運営」

2. 名誉会員の顕彰

第 63 期では名誉会員として以下の 1 名の方（敬
称略）を上記附帯行事において顕彰しました。本会
の発展に多大なるご貢献ありがとうございました。

- 1) 平井 秀一郎（東京科学大学）
第 56-57 期副会長，第 58-59 期理事（特命），第
62 期会長

3. 文部科学大臣表彰の推薦

令和 7 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰に
ついて、本会からは、科学技術賞（研究部門）1 件，
科学技術賞（開発部門）1 件，若手科学者賞 2 件を

文部科学省に推薦いたしましたところ、以下 1 件が
受賞となりました。

1) 科学技術賞（開発部門）

KOA 株式会社 平沢浩一，有賀善紀

「基板放熱型熱設計手法ならびに対応する表面
実装抵抗器の開発」

4. 謝辞

日本伝熱学会賞ならびに名誉会員の選考には、本
会第 63 期表彰選考委員会委員の皆様の多大なご尽
力をいただきました。ご協力をいただきました関係
各位に深く御礼申し上げます。



名誉会員証 授与式



学会賞 授賞式

日本伝熱学会賞を受賞して

*On Receiving Scientific Contribution Award of the
Heat Transfer Society of Japan*



陳 志豪 (天津大学), Mayowa I. OMISANYA (LAUTECH), 宇高 義郎 (天津大学)
Zhihao CHEN (Tianjin University), Mayowa I. Omisanya (LAUTECH), Yoshio UTAKA (Tianjin University)
e-mail: zhchen2015@tju.edu.cn

第 62 回日本伝熱シンポジウムにおいて、日本伝熱学会学術賞を賜り、選考委員会及び推薦していただいた皆様に厚く御礼を申し上げます。受賞者を代表して以下に、陳よりご挨拶申し上げます。

私は博士課程の学生時代より日本伝熱シンポジウムに参加し、研究のモチベーションをいただくとともに、また日本伝熱学会に加わることで、自身の成長を促すことができました。そのような関係の深い学会にて、尊敬する諸先生方に本研究を評価いただけたことを、大変嬉しく思っています。

今回の受賞研究は、受賞者の二人（陳・宇高）が 2015 年に横浜国立大学から中国・天津大学に異動した後、しばらくしてから開始したもので、既に取り組み始めて 10 年近くが経過しています。以下に、本研究の背景と特徴について述べます。

沸騰伝熱分野における伝熱促進の手法としては、伝熱面へのマイクロ・ナノスケールの微小構造を付与する方法が一般的に用いられています。しかし、こうした構造体は、沸騰時に発生する気液の運動などによって損傷しやすく、耐久性に課題がある場合が多く見受けられます。

受賞者らは、沸騰限界熱流束 (CHF) の向上を目的とし、一般的な伝熱面への表面構造付与による方法ではなく、伝熱表面はそのままに、伝熱板の内部構造を工夫するという新たな方法を提案しました。具体的には、熱伝導性の高い材料を伝熱板に用い、その内部に熱伝導性の低い材質を離散的に配置することで、沸騰過程において表面温度分布を意図的に形成する手法です。沸騰の限界熱流束点近傍では、伝熱面に生じた温度分布により、核沸騰と膜沸騰が共存し、さらに核沸騰のぬれ部と膜沸騰の乾き部が隣接する状態になります。これにより、ぬれ部と乾き部の境界付近では強い気液移動現象が発生し、両者の相互干渉が起こると考えられます。この現象が CHF の向上に寄与すると考えられることから、本 CHF の促進法の特徴で

ある核沸騰と膜沸騰共存による相互干渉に着目し、本方法を「異形態相関沸騰 (Different-mode-interacting boiling, DMIB)」と名付けました。

本方法は、代表的な沸騰系、すなわちこれまでにプール水中、プール水中の狭隘間隙、および狭隘間隙流動沸騰系に対して実験的に検討し、それぞれにおいて有意な成果[1-3]が得られています。今回の受賞対象となった研究では、DMIB を狭隘間隙内の流動沸騰に適用することで、CHF と熱伝達率の向上を図り、狭隘空間での高性能冷却の実現を目指しました。実験では、10mm 角の銅伝熱面を用い、流路高さ・幅、水の流速・サブクール度、低熱伝導性材料幅をパラメータとして設定し、検討を行いました。その結果、CHF は、通常面に対して最大 89% の向上が確認され、熱伝達率においては最大で 12 倍の向上が達成されました。このように、本手法は CHF の向上に加え、核沸騰域内において異なる熱流束領域が隣接することによる熱伝達の促進も実現されており、優れた特性が明らかとなりました。なお、受賞者らは現在も継続的に研究を進めており、プール沸騰においても CHF を約 2 倍に向上させる成果を得ています。

今後とも、日本伝熱学会の諸先生から変わらぬご指導・ご鞭撻を賜りましたら、誠に幸甚に存じます。また、本研究に関して、これまで実験や計算に真摯に取り組んでくれた学生諸君に深く感謝いたします。あわせて、日頃よりご支援をいただいている天津大学の先生方にもお礼申し上げます。

- [1] Utaka, Y. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **133** (2019).
- [2] Chen, Z. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **201** (2023).
- [3] Omisanya, M. I. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **226** (2024).

日本伝熱学会学術賞を受賞して
*On Receiving Scientific Contribution Award
 of the Heat Transfer Society of Japan*



PAUL Soumyadeep (スタンフォード大学), 程 馨毅, 伊藤 佑介, 徐 偉倫, 大宮司 啓文(東京大学)
S. PAUL (Stanford Univ.), X. CHENG, Y. ITO, W.-L. HSU, H. DAIGUJI (Univ. of Tokyo)
e-mail: sdipaul@stanford.edu

We are very honored to receive the Scientific Contribution Award from the Heat Transfer Society of Japan for “ナノ細孔内部の沸騰現象に関する研究”.

Boiling heat transfer forms the basis of many widely used thermal management systems, ranging from nano/microscale cooling devices in electronics to macroscale heat exchangers in power generation. Boiling is a non-equilibrium, multiscale process that begins with the nucleation of nanoscale bubbles, followed by their growth and coalescence into micro- and macroscale bubbles. To date, there exists no holistic and consistent understanding of boiling that encompasses the full range of scales. Even less is known about boiling at nanometric scales, which span the regimes of nucleation and inertial bubble dynamics. This gap in understanding stems from the lack of experimental techniques capable of capturing the spatiotemporal dynamics of nanobubbles with nanosecond time resolution.

To address this, we developed a nanopore-based microfluidic platform to fundamentally investigate the physics of nanoscale boiling, including bubble nucleation, growth dynamics, boiling transitions, and bifurcations. Figure 1A shows our experimental setup [1] for generating vapor nanobubbles within a nanopore through localized ionic Joule heating. The nucleation and explosive growth of bubbles result in ionic current blockages and stress waves in the liquid, which are detected using a hydrophone and recorded on a high-bandwidth oscilloscope. For large pore diameters (500 to 2000 nm), nanopore boiling involves the sequential nucleation of vapor bubbles, analogous to nucleate boiling. Each bubble nucleation event generates a current blockage signal, while the

corresponding pressure signal (cf. Figure 1B) exhibits a characteristic three-peak profile, indicating bubble growth and collapse.

In the smaller pore diameter range (200 to 500 nm), we observed a transition from nucleate to film boiling (cf. Figure 1C). Under a fixed bias voltage, the boiling structure spontaneously transitioned from discrete nucleate boiling (characterized by isolated current blockages and three-peak pressure signals) to film boiling, in which a torus-shaped, pinned vapor bubble undergoes continuous volumetric harmonic oscillations. In the film boiling regime, both the drop in ionic current and the frequency of fluctuations scale with pore diameter, supporting our hypothesis of a vapor film blanketing the cylindrical pore surface.

In a separate study [2], we investigated the transient evolution of boiling structures under gradually increasing bias voltage which modulates Joule heat intensity (cf. Figure 1D). We measured the current response and calculated Joule heat dissipation (current $\times$ voltage) as a function of bias voltage. The dissipation curve exhibits an ‘M’-shaped profile with two sharp bifurcation points corresponding to the onset of nucleate boiling (ONB) and the onset of film boiling (OFB). Although increasing bias voltages generally raise the Joule heat dissipation, phase change and bubble nucleation reduce dissipation by consuming sensible heat and limiting Joule heating through partial occlusion of the pore volume. As a result, dissipation decreases with increasing bias voltage beyond each bifurcation point.

These findings indicate that nanopore boiling adheres to the principle of minimum entropy production. Irreversible processes such as bubble nucleation from metastable liquid and coalescence of

bubble clusters into a film bubble result in nucleate and film boiling respectively. Transition into these boiling structures reduce entropy production, and so they are thermodynamically more favorable. In summary, we demonstrate that nanopore boiling exhibits self-organized boiling structures consistent with Prigogine's theory of self-organization [3]. It is interesting to note that as the system size shrinks to nanometric scales, local heat and mass transfer transitions from diffusive to ballistic regimes. Nevertheless, the system as a whole undergoes self-organization and thermodynamic bifurcations that

are analogous to those observed in macroscopic systems.

References

- [1] Paul, S. et al., Phys. Rev. Research, **4-4** (2022) 043110.
- [2] Paul, S. et al., Phys. Rev. Research, **6-1** (2024) 013110.
- [3] Nicolis, G. and Prigogine, I., *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, Wiley (1977).

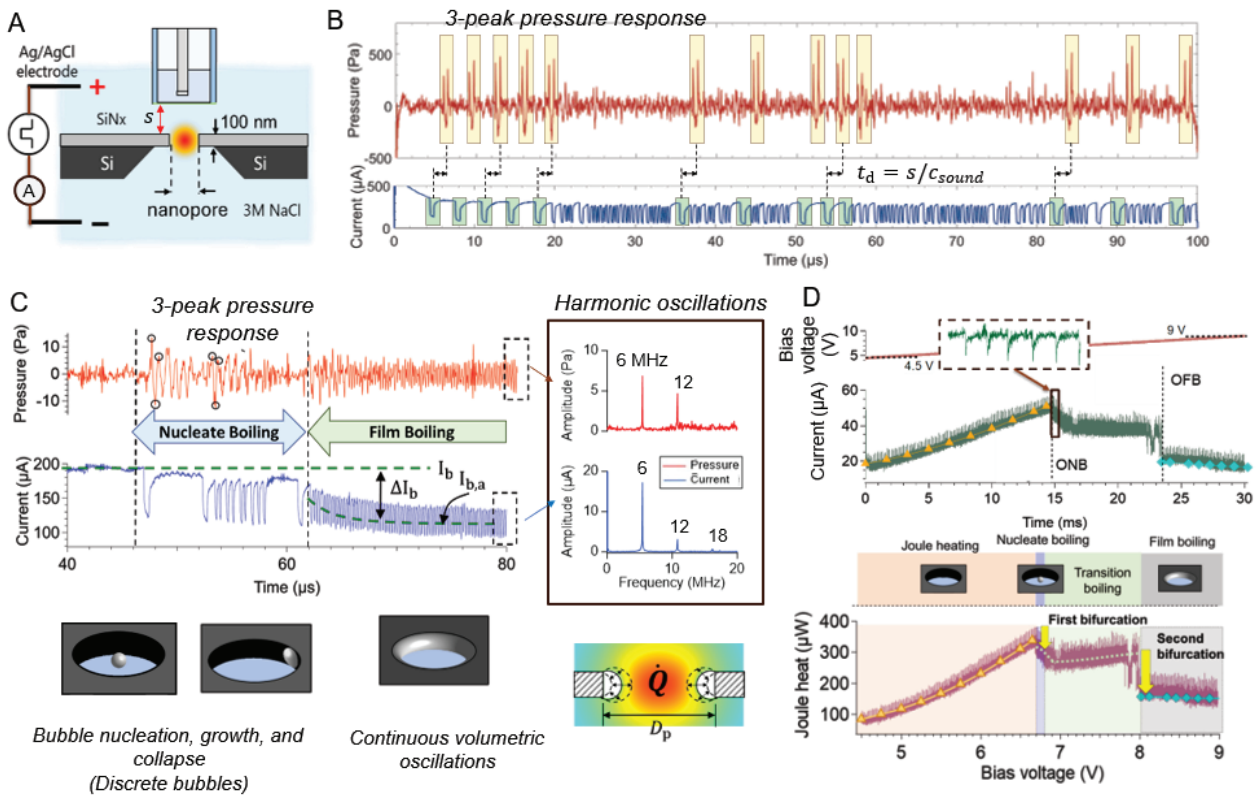


Figure 1 (A) Experimental setup for simultaneous acoustic and electrochemical sensing of boiling within a solid state nanopore. (B) shows time correlated acoustic and current signals for a 710 nm diameter pore under 8 V bias voltage. (C) shows acoustic and current signals for a 460 nm diameter pore. At 60 μ s, discrete current spikes transition to harmonic oscillations, which indicate the transition to film boiling regime. We hypothesize that a torus-shaped vapor film forms on the cylindrical pore surface which undergoes volumetric oscillations in thermal resonance with the Joule heat dissipation in the nanopore. (D) Current response for a 199 nm pore under a ramp bias voltage pulse (top) and a 'M'-shaped boiling curve which shows the two bifurcation points corresponding to the onset of nucleate boiling (ONB) and the onset of film boiling (OFB).

日本伝熱学会技術賞を受賞して
On Receiving Technical Achievement Award of the
Heat Transfer Society of Japan



矢島 健史 (TEPCO HD)
Takeshi YAJIMA (TEPCO HD)
e-mail: yajima.takeshi@tepcoco.jp

この度は、技術賞を受賞する栄誉をいただき、大変光栄に存じます。このような名誉ある賞をいただけましたのは、関係各位のご指導ご鞭撻のおかげと深く感謝申し上げます。

今回受賞対象となった技術は「空間サーモグラフィを用いた乾燥工程のデジタルトランスフォーメーション」となります。産業界の中で特に CO₂ 排出量の大きい塗装乾燥工程について、既存炉のデジタルライゼーション（画像データ化）とデータを元にしたトランスフォーメーション（電化仕様決定）までを一気通貫で行う、工業炉の電化設計支援技術です。実証炉等を使って調整を重ねる現行手法であれば仕様決定まで 1 年以上かかるところを、本技術では 2 日間に短縮します。工業炉の CO₂ 削減を検討する企業にとっては、提供される画像データと電化仕様書を設備会社に渡すだけで済むうえ、事前に機器や電炉本体、受電設備容量を大まかに算出でき、また過大な設備設計を防ぐことにもつながります。本受賞にあたっては、このデジタルトランスフォーメーションが産業界の CO₂ 削減に大きく寄与する点を評価いただきました。

デジタルライゼーションには、保浦ら[1]の技術を応用した炉内の空間温度分布を画像化する「空間サーモグラフィ」と、塗料を塗布したテストピースの温度推移を画像化する「塗料サーモグラフィ」、塗料の単位面積あたり受熱量を画像化する「受熱量グラフィ」の三つから構成される「乾燥炉サーモグラフィ」を用います。炉内のライン（ハンガーやコンベア）に取り付け測定し、ラインに沿った炉全体の特性を描写する画像データを作成します（図 1）。測定は生産ラインが稼働中であっても可能です。

トランスフォーメーションについて、ここでは赤外線両面照射の電化仕様算出例を示します。単位面積あたり受熱量に炉内のライン上での照射相当面積を乗じ、赤外線吸収率と赤外線変換効率で

除すことで赤外線ヒーター消費電力を逆算します。この技術は、業界紙[2]や日経 GX（2024.11.21）にも取り上げられました。

今後も伝熱技術を活かしたデジタルトランスフォーメーションを推進し、産業界の発展に貢献して参ります。最後に本技術にご協力いただいた皆様に深く感謝申し上げます。

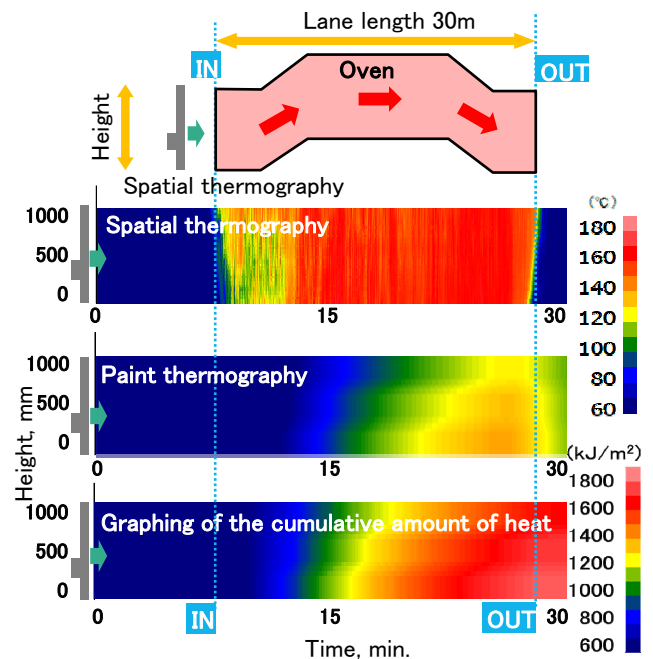


図 1 山形炉特性のデジタルライゼーション

参考文献

- [1] T. Houra, H. Tomita and M. Tagawa, *Improvement of the Fluid Temperature Scanner for Practical Use*, Proceedings of the 4th International Forum on Heat Transfer, IFHT2016-1891(2016).
- [2] 矢島健史, 乾燥炉サーモグラフィを用いたデジタル技術伝承, 月刊塗装技術 11 月号, 55-60 (2023).

日本伝熱学会登鯉賞を受賞して

*On Receiving Touri Award
of the Heat Transfer Society of Japan*



許 斌 (東京大学)

Bin XU (The University of Tokyo)

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

このたび、第 62 回日本伝熱シンポジウムにおいて、日本伝熱学会登鯉賞を賜るという大変光栄な機会をいただきました。ご推薦くださった先生方、また選考委員の皆様にご心より御礼申し上げます。これまでご指導・ご協力を賜りました多くの関係者の皆様のおかげと深く感謝しております。本賞を励みに、今後も伝熱分野の発展に貢献できるよう一層精進してまいります。

受賞の対象となった研究は、「歪みエンジニアリングを活かした高性能シリコン熱電材料の創製」に関するものです。IoT 社会の実現に向けては、センサーなどの小型デバイスに対して自立的な電源供給が求められます。その中で、熱電モジュールは有力な選択肢の一つです。熱電材料の高性能化には、格子熱伝導率の制御が極めて重要であり、従来はナノ構造化によるフォノン散乱の強化、いわゆる「サイズ効果」によって熱伝導率を低減し、熱電性能の向上を図ってきました。しかし、この手法では熱伝導率とともに電気伝導率も低下するため、熱電性能 (ZT 値) のさらなる向上には限界がありました。

この課題に対して、環境負荷が小さく、豊富かつ低コストであるシリコン材料に着目し、サイズ効果に加えて「歪みエンジニアリング」によるフォノン制御手法を導入しました。具体的には、バルクシリコンのナノ結晶に対して構造相転移を起こさない程度のひずみを導入し、その結果、格子の軟化とナノ粒界における界面ソフトニングを誘起し、フォノンの境界散乱を著しく増強することに成功しました。これによりフォノン群速度も低下し、最終的に熱伝導率はアモルファスシリコンに匹敵する約 1.5 W/m·K まで低減されました^[1]。

さらに、得られた知見を応用し、熱伝導率の低減と電気伝導率の維持を両立する三次元ネットワ

ーク構造を有する新しいシリコン熱電材料を独自に設計・作製しました。この構造は、シリコンのナノ粒子を低圧かつ高速な焼結プロセスで形成し、ナノ粒子間は高結晶性の狭いチャンネル部分で接続されています。ここでは、歪みに起因するフォノン群速度の減速とチャンネル部におけるフォノン透過の抑制が相乗的に作用する一方で、高い電子伝導性が確認されました。その結果、従来の 5~10 倍の熱電性能を有する p 型および n 型のバルクスケール・シリコン熱電材料の開発に成功し、実際に IoT センサーの駆動や無線データ送信への応用にも成功しました。

本研究の成果により、応用物理学会「講演奨励賞」を受賞し、筆頭・責任著者として論文の採択・投稿（現在査読中）も行っております。また、本研究で示した歪み導入によるフォノン制御技術は、シリコンに限らず、他の多くの熱電材料への応用も期待されており、今後の低環境負荷型エネルギー変換技術の実用化に貢献するものと考えております。

最後に、本研究は、塩見淳一郎先生が研究代表を務められた JST CREST「メカノ・サーマル機能化による多機能汎用熱電デバイスの開発」において実施されたものであり、塩見先生のご指導、ならびに JST の研究支援に心より感謝申し上げます。また、共同研究者である河野正道先生、生駒嘉史先生、岩瀬英治先生、加藤慎也先生、さらに当時研究を共に進めてくれた寺嶋真伍氏、永廣怜平氏にも深く感謝いたします。そして、常に励ましをいただいた所属研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。今後とも、基礎と応用をつなぐ視点から、伝熱工学の発展に寄与してまいりたいと考えております。

[1] B. Xu, et al., *J. Mater. Chem. A*, **2023**, *11*, 19017.

日本伝熱学会登鯉賞を受賞して

*On Receiving Touri Award
of the Heat Transfer Society of Japan*

庄司 衛太 (東北大学)

*Eita SHOJI (Tohoku University)**e-mail: eita.shoji@tohoku.ac.jp*

このたびは、日本伝熱学会登鯉賞という荣誉ある賞を賜りましたこと、心より光栄に存じます。ご指導くださいました先生方、ご推薦・ご選考くださった諸先生方、そして日々の議論や助言を通じて研究を支えてくださった皆様に、厚く御礼申し上げます。

受賞対象となった研究テーマ「多様な熱・物質輸送の時空間分布観測を可能とする光学計測技術に関する研究」は、不可視であった輸送現象を光学的手法で観測し、その理解を深めることを目的としています。私は学生時代から、輸送現象を高精度に捉える光学計測技術の開発に取り組んできました。対象物質や現象は多岐にわたり、ナノフルイドや高分子ナノコンポジット材料、溶融合金、超重質油、超臨界流体などの多様なスケール・状態に対応する計測技術の研究を進めてきました。今回は、受賞対象に関連する研究について、簡単にご紹介いたします。

一つ目の研究は、ナノフルイドや高分子ナノコンポジット材料の動的濡れの研究です。これらナノ材料の印刷や塗布、乾燥といった成膜プロセスにおいて、動的濡れは機能性材料の品質を左右する重要な現象です。特に、固体・液体・気体の三相接触線近傍に存在する厚さナノスケールの液膜は観測が難しく、ダイナミクスの理解が遅れていました。そこで、厚さ方向にサブナノメートルの空間分解能を持ち、リアルタイムで二次元的に膜厚を計測可能な位相シフトエリプソメータを開発し、ナノ液膜の詳細な観察を可能としました。その結果、新たな現象としてナノフルイドの超拡張濡れを発見できました。

次は合金材料の研究です。金属材料の創成において、溶融合金の凝固過程で形成される相分離構造の制御は重要な課題です。凝固中に生じる融体内対流は、相分離構造の形成過程に影響を及ぼすことが知られており、その関係を明らかにする実

験的手法が求められていました。そこで、静磁場重畳電磁浮遊法により融体内の対流強度を制御しながら合金を凝固させ、得られた試料を中性子 Computed Tomography (CT) により非接触・非破壊で三次元的に観察する手法を確立しました。このアプローチにより、対流の強さと相分離構造との相関を初めて三次元的に示すことができました。中性子は、隣接する原子番号の元素間でも質量減衰係数に差があるという特性を持つため、X 線では識別が困難な構造可視化が可能となりました。

また、近年注目されている非在来型資源である超重質油についても研究を行いました。特に、超臨界水を用いた改質反応は、触媒を用いずに超重質油を処理できる有望な手法です。しかし、従来の光学手法では、金属製の高压容器内における超重質油と超臨界水の混合・流動状態の観測が困難でした。そこで、中性子ラジオグラフィに着目しました。超重質油と超臨界水ともに中性子に対して高い質量減衰係数を有する水素を含有しますが、両流体の大きな密度差を活かし、超臨界水中の超重質油の流動状態観測に初めて成功しました。

さらに、博士課程に開発していた位相シフト光干渉計も、最近新しい試みを進めています。当時は対流熱伝達の観測を目的としていましたが、現在は熱工学・化学工学・音響工学を連携し、熱・物質・音が相互に作用する輸送現象の計測へと応用を広げています。最近、音波中の密度変動計測に成功し、新たな応用可能性が開けてきました。

現象の観測は、現象の本質に迫るうえで不可欠なアプローチと考えています。今後も光学計測の可能性を広げながら、多分野に貢献可能な技術創出に努めてまいります。最後になりますが、これまで支えてくださったすべての方々に、改めて深く感謝申し上げます。今後とも変わらぬご指導ご鞭撻を賜りますよう、何卒よろしくお願い申し上げます。

日本伝熱学会登鯉賞を受賞して

*On Receiving Touri Award (Outstanding Young Researcher Award)
of the Heat Transfer Society of Japan*



江目 宏樹 (山形大学)

Hiroki GONOME (Yamagata University)

e-mail: gonome@yz.yamagata-u.ac.jp

このたび、沖縄コンベンションセンターにて開催された日本伝熱学会第 63 期総会にて名誉ある日本伝熱学会登鯉賞を賜りましたこと、誠に光栄に存じます。この場をお借りしまして、これまでご指導いただきました諸先生、諸先輩方、ご推薦頂きました先生、ご選考くださいました先生方、ならびに関係者の方々、これまで伝熱シンポジウム等の学会の場を通じて議論させていただいた皆様に深く感謝の意を表します。

受賞対象となりました、「散乱性媒体によるスペクトル熱制御機構に関する研究」は私が学生時代から取り組んでいる研究であり、Mie 散乱理論で知られるナノマイクロ粒子のふく射特性を制御することで、遮熱塗料等に応用可能なコーティングのふく射特性を制御するものです。

当時は、本技術を可視・近赤外領域に応用し、熱くなりにくい黒色塗料を実現しました。自動車や住宅などの建築物外壁は普段、太陽光に曝されています。これらには美的観点から、黒などの暗い色調が多用されておりますが、これらの色を有する表面は太陽光に対する可視・近赤外領域の吸収率が大きいので、夏期の室内温度が上昇しやすく、冷房負荷を増大させる原因となっています。このため、可視光の反射を小さくし、太陽光エネルギーの約 52% を持つ近赤外光の反射を大きくするという波長選択性を有するコーティングの実現が望まれていました。そこでコーティング内のふく射伝播を光線放射モデルによるふく射要素法 (REM²) を用いて計算し、コーティングの分光半球反射率を導出しました。この解析により、粒子材料、粒子径、体積分率や膜厚を最適化し、使用する粒子を選定しました。その粒子を使用してコーティングを作製し、分光半球反射率を測定しました。解析結果が示唆したとおり、低い可視光反

射率を維持しながら、高い近赤外反射率を持つコーティングが実現できました。実際に太陽光下で温度測定実験を行うと、一般的な黒色塗料と比べて 10℃ 以上も表面温度が下がっていることが確認されました。

最近では、この研究のさらなる発展を狙い、暑いときは近赤外光を反射し、寒いときは近赤外光を吸収するといったような自律的スペクトルスイッチング熱制御機構の開発に取り組んでいます。多くの先行研究ではこのようなスペクトルスイッチングにおいて、可視光もスイッチングしてしまい、色が変わってしまいます。すなわち、外観デザインが大きく変化してしまうことから、商用利用に不向きで、社会実装まで乖離があるのが現状です。本研究では、色変化なく、熱スイッチングできる機構を開発し、社会実装に大きく近づけたと期待しています。

今後は、この技術をさらに応用範囲を広げ、建築物の外装のみならず、車両や電子機器など、様々な分野に適用できるよう、より実用的な性能向上を目指して研究を進めていきたいと考えています。また、商業化に向けた技術的なハードルをクリアするため、企業との連携や産学共同研究をさらに強化し、社会全体での熱管理技術の向上に貢献できるよう努めていきます。

最後に、このような素晴らしい賞を賜り、大変光栄に感じておりますが、私一人の力ではここまで来ることはできませんでした。常に支えてくださった研究室の仲間、家族、そして多くの研究者の皆様に感謝の気持ちを忘れず、今後も微力ながら伝熱工学の発展に貢献できるよう精進してまいります。2017 年に山形大学に着任し、今年度より教授職を拝命いたしました。今後ともご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

*On Receiving Young Researcher Award
of the Heat Transfer Society of Japan*

小野 泉帆 (東北大学)

*Mizuho ONO (Tohoku University)**e-mail: ono.mizuho.q3@dc.tohoku.ac.jp*

この度は、日本伝熱学会第 63 期総会におきまして、栄誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。ご指導を賜りました先生方、ご選考をいただきました先生方、ならびに学会事務局の皆様にご心より御礼申し上げます。

今回、受賞対象となりました「第一原理計算によるフェムト秒レーザー場の物質における光と熱の変換現象の解明」は、私が在籍する東北大学流体科学研究所の小宮敦樹教授のご指導のもとで行った研究です。

フェムト秒レーザーに関する研究は、1980 年代後半に開発された Ti:Sapphire レーザーに加え、Kerr 効果を用いたモード同期法の開発以降、急速な進展を遂げています。このレーザーの特筆すべき点は、パルス圧縮により得られるその超高速度にあり、時間分解能は原子の運動をも捉えるほどです。一方で、実験的に得られるデータの解釈は往々にして困難を伴います。光と物質の相互作用において電子が担う役割は極めて重要であり、その詳細を解明する上で第一原理計算の重要性がここに際立ちます。本計算で用いられる手法は、リアルタイム時間依存密度汎関数法 (RT-TDDFT) であり、これは典型的な密度汎関数法 (DFT) を時間発展の問題へと拡張したものです。本手法は、もともと原子核物理の分野で発展し、同学の専門家であった現 Bertsch 教授と矢花教授によって 1996 年に初めて動的な分子応答特性の記述に実時間・実空間解法として適用され、その後、周期系へと拡張されました。この手法の特長は、強電場下における複雑な電子応答を記述できる点にあります。すなわち、RT-TDDFT を用いることで、フェムト秒レーザーに対する物質の応答を非常に高い精度で解析することが可能になります。

本研究では、フェムト秒レーザー照射に対する物質の応答として、光エネルギーが熱エネルギーへと変換される過程に着目いたしました。これは

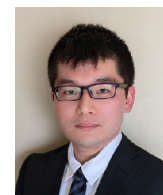
統計熱力学的に見れば、光の振動でのコヒーレンスの高い運動が、粒子間相互作用を介したエントロピー増大則に従い、そのコヒーレンスを失う過程と捉えることができます。粒子系の温度は、粒子間で十分なエネルギー交換が行われ、統計的な平衡分布が実現された時点で初めて定義可能となります。

上記は定義をなぞって光熱変換の説明をしたに過ぎませんが、本研究ではこの過程を RT-TDDFT に基づいて理論的に導出することに取り組みました。ここでは、特に電子系の熱化について扱います。その手がかりは、電子間相互作用の速さ、すなわち電子の熱化時間を評価することで得られると期待されます。具体的には、電子緩和時間をパラメータとして含む誘電関数モデルを基に、RT-TDDFT 計算の結果と比較することで、この緩和時間を抽出することを試みました。誘電関数モデルには、電子緩和時間の他にも自由電子数や背景誘電率といったパラメータが必要となりますが、これらも全て RT-TDDFT 計算から決定します。そして、数値計算により得られた誘電関数をモデルにフィッティングすることにより、電子緩和時間を導出します。これらの手順を異なるレーザー強度で実施し、励起の度合いによって電子緩和時間にどのような差異が生じるかを評価しました。

その結果、レーザー強度が増大するにつれて電子緩和時間が長くなり、すなわち電子系の熱化が遅延する傾向が明らかになりました。同時に観測された有効電子質量の増加は、この熱化遅延が粒子間相互作用の相対的な低下に起因することを示唆しています。本研究で得られた知見は、例えばレーザー照射後の電子の反応性がどの程度持続するのかといった問いに答えるものであり、高効率な光触媒材料の開発など、将来的な応用にも貢献し得るものと考えております。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

*On Receiving Young Researcher Award
of the Heat Transfer Society of Japan*



吉田 雅輝 (海上自衛隊)

Masaki Yoshida (Japan Maritime Self-Defense Force)

e-mail: yoshida.masaki.wq@ext.cs.atla.mod.go.jp

日本伝熱学会第 63 期総会におきまして、日本伝熱学会賞（奨励賞）を賜りましたことは、誠に身に余る光栄に存じます。本賞を賜るにあたり、ご審査くださいました選考委員の諸先生方ならびに学会事務局の皆様に、心より御礼申し上げます。

このたびの受賞対象は、防衛大学校理工学研究科後期課程在学中に取り組んだ「矩形微細流路沸騰熱伝達の高時空間分解測定と動的伝熱特性」に関する研究です。

冷凍空調機器などに用いられる熱交換器では、沸騰や凝縮を伴う気液二相流による熱交換が一般的であり、その伝熱性能の向上は省エネルギー化や地球環境負荷の低減に大きく貢献します。近年では流路の微細化が進み、熱交換器の小型・高性能化が実現されつつあります。とりわけ業務用空調機においては、矩形微細流路を備えた扁平多孔管熱交換器が開発され、これらの熱伝達特性の予測に関する研究が活発に行われています。しかし、流動沸騰に起因する高速かつ複雑な動的伝熱現象については、未解明な点が多く残されています。

本研究では、辺長 2 mm の矩形微細流路内における水の流動沸騰現象を高速度カメラにより可視化するとともに、赤外線カメラを用いて高い時空間分解能で熱伝達の変動を明瞭かつ定量的に測定しました。さらに、得られた瞬時熱流束分布を解析するための独自の画像処理プログラムを作成し、沸騰の素過程ごとの伝熱への寄与を定量的に評価しました。

その結果、強制対流が伝熱において支配的な役割を果たしていることや、気体プラグが周期的に通過する流れ場においては薄液膜蒸発の寄与が増加し、熱伝達率が顕著に向上することを確認し、これを第 60 回日本伝熱シンポジウム（2023 年）にて報告しました。

さらに、質量流量・蒸気クオリティ・加熱熱流

束を系統的に変化させた熱伝達変動測定（4000 Hz, 25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ）を実施し、スラグ流から環状流に至る過程において各素過程の伝熱寄与を詳細に調査しました。その結果、強制対流が総伝熱量の 85~95%を占めること、核沸騰（マイクロレイヤ）の寄与は高熱流束時（壁面熱流束 220 kW/m^2 ）において 5~8%程度であるものの、熱流束の低下とともに大きく減少することが明らかとなりました。また、低クオリティ条件下においても部分的にドライパッチが形成され、特にその範囲が小さい場合には、周囲に形成される三相界線の寄与により熱伝達率の低下が抑制されることが示されました。これらの成果は、第 61 回日本伝熱シンポジウムおよび原著論文[1,2]にて報告しました。

本研究にて多大なるご指導を賜りました防衛大学校教授 中村元先生、さらに共同研究者として多くのご助言とご協力をいただきました同校准教授 山田俊輔先生、准教授 船見祐揮先生に、深く感謝申し上げます。

また、一から設計した実験装置の製作にあたり、防衛大学校教務課実習工場の皆様より多大なるご支援を賜りました。測定面の作成に関する微細加工技術につきましては、摂南大学准教授 洞出光洋先生より多大なるご指導を賜りました。

なお、本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号 JPMXP1223NM0002）の支援および科学研究費補助金（No.21K03908, 研究代表者 中村元）の助成を受けました。ここに記して、関係各位に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 吉田雅輝, 山田俊輔, 船見祐揮, 中村元, 日本冷凍空調学会論文集, **41(2)** (2024) 159-170.
- [2] M. Yoshida, S. Yamada, Y. Funami, H. Nakamura, *Int. J. Heat Mass Transf.* **238** (2025) 126457.

第 62 回日本伝熱シンポジウム

・ HTSJ 国際伝熱シンポジウムの報告

*Reports on the 62nd National Heat Transfer Symposium of Japan
and on the HTSJ International Heat Transfer Symposium*

店橋 護, 伏信一慶, 加藤 之貴, 齊藤 卓志, 村上 陽一, 長澤 剛, 兒玉 学 (東京科学大学),
西 剛伺 (足利大学), 津島 将司 (大阪大学), 春木 直人 (岡山県立大学),
磯部 和真, 中曾 浩一, 山田 寛 (岡山大学).
小田 豊 (関西大学), 須網 暁 (岐阜大学), 矢吹 智英 (九州工業大学),
伊藤 衡平, 藏田 耕作, 手嶋 秀彰, 宮崎 康次 (九州大学),
西田 耕介 (京都工芸繊維大学), 岩井 裕 (京都大学), 服部 康男 (電力中央研究所),
イ エリム, 岡部 弘基, 杵淵 郁也, 塩見 淳一郎, 鹿園 直毅, 白樫 了, 鈴木 雄二, 松浦 弘明,
ムテルデウ ティモテ (東京大学), 岩本 薫, 田川 義之 (東京農工大学),
塚原 隆裕, 元祐 昌廣 (東京理科大学), 清水 信, 徳増 崇, 中村 寿, 埜上 洋 (東北大学),
勝身 俊之, 佐藤 大輔 (長岡技術科学大学), 齋木 悠, 服部 博文 (名古屋工業大学),
櫻井 篤 (新潟大学), 坂本 明洋 (日本製鉄 (株)), 近藤 義広 ((株) 日立アカデミー),
永井 二郎 (福井大学), 中村 元 (防衛大学), 田部 豊, 能村 貴宏 (北海道大学),
江目 宏樹 (山形大学), 荒木 拓人 (横浜国立大学), 瀬名波 出 (琉球大学)
*Mamoru TANAHASHI, Kazuyoshi FUSHINOBU, Yukitaka KATO, Takushi SAITO, Yoichi MURAKAMI,
Tsuyoshi NAGASAWA, Manabu KODAMA (Institute of Science Tokyo),
Koji NISHI (Ashikaga University), Shohji TSUSHIMA (Osaka University),
Naoto HARUKI (Okayama Prefectural University),
Kazuma ISOBE, Koichi NAKASO, Yutaka YAMADA (Okayama University), Yutaka ODA (Kansai University),
Akira SUAMI (Gifu University), Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology),
Kohei ITO, Kosaku KURATA, Hideaki TESHIMA, Koji MIYAZAKI (Kyushu University),
Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology), Hiroshi IWAI (Kyoto University),
Yasuo HATTORI (Central Research Institute of Electric Power Industry),
Yaerim LEE, Kohki OKABE, Ikuya KINEFUCHI, Junichiro SHIOMI, Naoki SHIKAZONO, Ryo SHIRAKASHI,
Yuji SUZUKI, Hiroaki MATSUURA, Timothée MOUTERDE (The University of Tokyo),
Kaoru IWAMOTO, Yoshiyuki TAGAWA (Tokyo University of Agriculture and Technology),
Takahiro TSUKAHARA, Masahiro MOTOSUKE, (Tokyo University of Science),
Makoto SHIMIZU, Takashi TOKUMASU, Hisashi NAKAMURA, Hiroshi NOGAMI (Tohoku University),
Toshiyuki KATSUMI, Daisuke SATO (Nagaoka University of Technology),
Yu SAIKI, Hirofumi HATTORI (Nagoya Institute of Technology), Atsushi SAKURAI (Niigata University),
Akihiro SAKAMOTO (Nippon Steel Corporation), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy Co., Ltd.),
Niro NAGAI (University of Fukui), Hajime NAKAMURA (National Defense Academy of Japan),
Yutaka TABE, Takahiro NOMURA (Hokkaido University), Hiroki GONOME (Yamagata University),
Takuto ARAKI (Yokohama National University), Izuru SENAHA (University of the Ryukyus)*

1. はじめに

第 62 回日本伝熱シンポジウム (実行委員長: 店橋護, 以下, 伝熱シンポ) は, 日本伝熱学会のさらなる国際化を促すことを目的とした HTSJ 国際伝熱シンポジウム (実行委員長: 伏信一慶, 以下, 国際シンポ) とともに, 5 月 14 日 (水) から 17 日 (土) の四日間の日程で, 沖縄県宜野湾市にある沖縄コンベンションセンターで開催されました. ここで, 国際シンポの併催は日本伝熱学会の国際会議関連基

金からの支援があったため, 実現できたものです. 今回の伝熱シンポは, 関東支部担当でしたが, アフターコロナにおける物価上昇, 為替変動, インバウンド需要拡大等の社会情勢から, 関東圏での開催は会場費, 宿泊費等の観点から実施側・参加側の双方に大きな負担となることが予想されました. このため, 実行委員長の所在地域と開催地の地域が異なる遠隔地開催として, 沖縄県での開催となりました. 遠隔地開催は伝熱シンポとしては初の試みであり,

これが実現できたことは今後の伝熱シンポの開催形態を検討する上で、日本伝熱学会としてはたいへん貴重な経験となったものと信じています。なお、伝熱シンポが沖縄県で開催されるのも初めてのことでした。

伝熱シンポの遠隔地開催にあたって、準備・運営は東京科学大学に所属する会員と、主として関東地区の会員から構成される実行委員会を組織して行われました。開催地にはご迷惑をお掛けしないことを前提に準備をすすめてきましたが、最終的には、瀬名波出教授をはじめとして琉球大学の教員・学生の皆様に一部をお手伝い頂くこととなりました。ここに記して御礼申し上げます。また、沖縄県での開催にあたっては、沖縄観光コンベンションビューローの皆様、特に東京事務所の皆様には多大なご支援を頂きました。これにより、沖縄県から大規模な補助金を支出して頂いたことから、通常の伝熱シンポとは少々異なる大胆な企画を準備することができました。ここに記して御礼申し上げます。

第 62 回伝熱シンポには日本伝熱学会の国際会議関連基金からの支援が決定されていたことから、国際シンポの企画とは別に、他の国際会議の誘致も同時に行われました。今回は、IUTAM（国際理論応用力学連合）主催の国際会議「IUTAM Symposium on Machine Learning in Diverse Fluid Mechanics」（組織委員長：深淵康二教授（慶應義塾大学）、実行委員長：岩本薫教授（東京農工大学））をコロケーション頂くことになり、日本伝熱学会も共催団体となりました。IUTAM Symposium には会場の一室を提供し、5 月 15 日（木）から 17 日（土）の日程で開催されました。この会議では、機械学習関連で世界的に著名な研究者が招待され、伝熱を含む多様な流体力学分野における機械学習に関する最新の研究成果が発表されました。IUTAM Symposium の主催者側のご厚意ですべての講演は伝熱シンポの学生参加者には無料で、一般参加者には減額された参加登録費で公開して頂きました。また、IUTAM Symposium の招待講演者のうち、3 名の方は国際シンポにおいても招待講演を頂き、日本伝熱学会の国際化の促進に大いに貢献頂いたものと信じています。

今回の伝熱シンポ／国際シンポの開催規模を以下にまとめます。参加者数は 726 名（特別講演および招待講演の講師 11 名を含む）、講演数は伝熱シンポ 264 件（特別講演 1 件、企業特別セッション 2 件、

ものづくりセッション 12 件、優秀プレゼンテーション賞セッション 53 件を含む）、国際シンポ 155 件（招待講演 10 件を含む）の合計 419 件となりました。この発表件数は、第 43 回（名古屋）における 427 件以降では最高です。特筆すべきは、国際シンポにおける講演件数が全体の 1/3 を超えていたことに加え、発表者の国籍も米国、英国、韓国、中国、ドイツ、フランス、ポルトガル、インドネシアと多岐にわたった点であり、今回の国際シンポ開催が、今後、日本伝熱学会の国際化をさらに推進する方策を考える上で良いきっかけとなると信じています。

本シンポジウムの企画段階では、従来の伝熱シンポの講演の約 1/3 が国際シンポで発表されることを想定しました。これを実現するため、従来伝熱シンポでオーガナイズドセッション（OS）を企画頂いたオーガナイザーの皆様には国際シンポでの OS を企画頂くこと、さらにはその分野で著名な招待講演をご推薦頂くことをお願いしました。また、従来 OS として設定されていなかった分野についても国際シンポでの OS 企画を募集・依頼することになりました。この結果、前回第 61 回伝熱シンポにおける 8 つのオーガナイズドセッションに加え「相変化現象とその伝熱に関する最近の進展」が設けられ、各セッションの特色に合わせて伝熱シンポおよび国際シンポでの発表機会が用意されました（表 1-1）。一方、表 1-2 に示す一般セッションに加えて、優秀プレゼンテーション賞セッション、ものづくりセッション、企業特別セッション（公開セッション）が

表 1-1 オーガナイズドセッションの一覧と講演件数（カッコ内の数字は招待講演数）

セッション名	伝熱シンポ	国際シンポ
乱流を伴う伝熱研究の進展	13	(1)+3
熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進	未設定	(1)+12
ふく射輸送とふく射性質	5	(1)+10
化学プロセスにおける熱工学	未設定	(1)+12
水素・燃料電池・二次電池	21	6
濡れ現象の制御と理解	8	(2)+18
燃焼研究の最前線	18	(2)+13
バイオ伝熱・熱力学	未設定	(1)+8
相変化現象とその伝熱に関する最近の進展	未設定	(1)+10
合 計	65	(10)+92

表 1-2 一般セッションの一覧と講演件数

セッション名	伝熱 シンポ	国際 シンポ
沸騰・凝縮	16	3
電子機器の冷却	22	4
強制対流	6	2
ヒートパイプ	10	2
多孔体内の伝熱	6	1
物質移動	0	2
計測技術	15	0
融解・凝固	7	3
分子動力学	10	12
混相流	5	0
自然対流	5	0
自然エネルギー	3	1
空調・熱機器	6	9
熱物性	3	2
ナノ・マイクロ伝熱	16	12
熱音響	1	0
合 計	131	53

開催され、学生や若手研究者をエンカレッジする場として、伝熱に関わる企業の研究者・技術者の情報交換・交流の場として極めて有効であったと考えています。

今回のシンポジウムでは、伝熱シンポ開催に関して実行委員会、学会事務局の負担軽減を目指したいいくつかの方策が取り入れられました。最も大きな変革は講演申込、プログラム編成および公開、講演論文投稿および公開、参加登録等が統合された外部システム（株式会社アトラスの Confit）を導入したことです（詳細は別ページを参照ください）。今回のシンポジウムに参加された皆様は、自身で印刷した参加証により、スムーズな参加受付を体験いただけたのではないのでしょうか。この取り組みは、シンポジウム HP の形態、プログラム冊子の形態、学会誌「伝熱」に掲載されたプログラムの様式等、多くの変更につながっており、伝熱シンポの準備・運営に係る実行委員、学会事務局等の負担軽減につながったものと考えています。

会期 3 日目（5/16（金））には、特別講演・総会の後に、ラグナガーデンホテルにて意見交換会が開催され、295 名の有料参加者（招待者を含めると 300 名超）を迎えて大いに盛り上がりました。第 59 回は 213 名、第 60 回は 253 名、第 61 回は 281 名と、最近は何を追うごとに参加者数が増えており、シン



図 1-1 沖縄コンベンションセンターと立看板



図 1-2 参加受付の様子

ポジウム会場とは違った雰囲気で見聞や情報の交換を行うことで、有意義な時間が共有できたものと考えています。

以上、伝熱シンポならびに国際シンポの概要をまとめさせていただきました。各セッション、イベントについては、個別に報告をいただいているので、ご覧いただければ幸いです。

（店橋 護，伏信 一慶，齊藤 卓志，村上 陽一）

2. 特別講演

第 62 回日本伝熱シンポジウムの特別講演の講師には、東京科学大学特命教授の佐藤勲先生をお招きしました。日本伝熱学会の会員の皆様は佐藤勲先生のことをよくご存じで、ここで紹介するまでもないかも知れませんが、先生のご専門は、熱流体工学・エネルギー工学、熱流動現象の光学計測であり、熱

伝導・対流伝熱・ふく射伝熱が複合した伝熱現象の解明等に取り組んでこられています。また、東京工業大学（当時）において、総括理事・副学長の重責を担われるとともに、日本伝熱学会においても、第 52 期および第 53 期の総務担当理事・副会長等を務められ、学会運営にも大きく貢献されています。

今回の特別講演では「自然の摂理を活かして複雑なシステムを制御する—伝熱現象から大学運営まで—」という題目でご講演を頂戴しました。様々な伝熱機構が存在する実際のものづくりの現場における可視化計測の取り組みや、冷熱利用・輸送技術の開発ストーリーなど多彩なトピックスを取り上げた前半から、それらの研究経験を踏まえた上での大学執行部メンバーとしての気づきをご紹介頂きました。中でも東京工業大学と東京医科歯科大学の統合経緯に関わる話題は、まさに聴衆の耳目を奪うという状況であったかと思います。

佐藤勲先生は、懇親会にも参加され、多くの参加者の皆様と交流を深めておられたと存じます。本会の総務担当理事・副会長等として学会運営に多大なご貢献を頂いた佐藤勲先生でございますが、東京工業大学（当時）の総括理事・副学長に就任されて以

降、なかなか伝熱シンポにご参加頂けていなかったものと思います。今回佐藤勲先生を特別講演の講師としてお迎えすることができたことは、非常に感慨深いものでございました。

（店橋 護，齊藤 卓志）

3. オーガナイズドセッション

3-1 乱流を伴う伝熱研究の進展

今回の伝熱シンポでは、従来の OS に加え、国際シンポが平行開催されたため、本 OS も国際シンポに 1 セッション設けました。国際シンポでは 1 件の招待講演と 3 件の一般講演、伝熱シンポでは 13 件の一般講演で、合計 17 件でしたが、希望としては国際シンポ：伝熱シンポが 1：1 であつても良かったと思います。さて、国際シンポでは、Pusan National University の Hee Chang Lim 教授による“AI-Driven Innovations in Applied Fluid Mechanics: From Turbulent Flow Reconstruction to Real-World Applications”と題した招待講演を頂きました。Lim 教授は、伝熱シンポと同じ会場で同時開催されている IUTAM Symposium on Machine Learning in Diverse Fluid Mechanics での講演者でもあったため、こちらの OS でも渡りに船としてご講演いただきました。



図 2-1 特別講演の様子



図 3-1 招待講演者の Prof. Lim（左）



図 2-2 熱弁をふるわれる佐藤勲先生

乱流制御に関しては、すでに 20 世紀末頃から研究が始められています。近年では、AI や機械学習 (ML: Machine Learning) の技術や研究の進展により、まず乱流場の予測および再現を通じて、摩擦抵抗をいかに低減できるかが注目されています。また、乱流伝熱については、流体抵抗と熱伝達との相似的な関係をどのように崩して熱伝達効率を高めるかが、現在もおお重要な課題となっています。国際シンポでは、招待講演を含めてほとんどが AI 関連の研究

で占められていました。一方、伝熱シンポでは、実験や DNS による乱流伝熱現象の物理的機構の解明を目指す研究が依然として主流であり、基礎研究にはなお大きな余地があると考えられます。AI の発展によって、これら乱流伝熱に関する基礎研究が駆逐されるのか、あるいは熱移動を含む膨大な乱流伝熱データの解析において、AI はあくまで補助的な技術にとどまるのか、今後の研究動向が非常に注目されます。

(服部 博文, 店橋 護, 中村 元, 岩本 薫,
服部 康男, 塚原 隆裕, 小田 豊)

3-2 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進

本国際 OS は英題“Thermal and mass transport enhancement for thermal energy materials and systems”として熱エネルギー材料や熱システムにおける伝熱促進や物質移動促進に関して議論を深めることを目的とし、趣旨説明、招待講演 1 件、一般講演 13 件が行われました。まず、セッションの冒頭でオーガナイザーの加藤之貴（東京科学大学）から本 OS の企画趣旨説明として第 7 次エネルギー基本計画（2025/2 決定）において“蓄熱”が言及され、熱システムのカーボンニュートラルへの貢献が期待されていること、熱エネルギー材料とシステムでの伝熱、物質移動促進の重要性と最近の技術トレンドなどが概説されました。招待講演として、Prof. Annelies Vandersickel, Institute of Engineering Thermodynamics, Department of Thermal Process Technology, ドイツ航空宇宙センター（DLR）から“Heat transfer enhancements strategies for thermal energy storage approaches being pursued at DLR”（蓄熱のための伝熱促進に関する DLR の取組み）と題する講演を頂きました。ドイツのカーボンニュートラル社会実現に向けた DLR のミッションと熱利用技術・プロセスに関する最新の研究開発事例と展望について解説頂き、日本の蓄熱、伝熱研究に重要な研究視点が示されました。一般講演では酸化カルシウム／水系化学蓄熱のシステムの実証報告および化学蓄熱材料の伝熱促進と伝熱解析検討の報告がありました。ついで、リットリウム硫酸塩水和物などの新たな蓄熱材検討、二酸化炭素回収に関する酸化カルシウム複合材料の開発、酸化セリウム材料による二酸化炭素資源化について報告されました。さらに、乱流場にお

ける随伴解析に基づく複雑伝熱面の形状最適化、セミクラスレートハイドレートを用いた新規の蓄電システムの検討が示されました。

マイクロカプセル型相変化材料（MEPCM）の応用展開について連続して報告がありました。MEPCM 蓄熱実証検討とともに、MEPCM と触媒を複合した温度調節型反応システムの提案、MEPCM のケミカルループ、および圧力スイングを伴う酸素回収システムへの応用展開の進展が示されました。また、アルミ-ケイ素潜熱蓄熱材を活用した蓄熱発電に関する LCA 検討が報告されました。

社会実装を見据えての蓄熱技術の新たな可能性が報告され大変有意義なものとなりました。招待講演者の Prof. Vandelshikel も日本の先進的な蓄熱、熱利用技術が高く評価され、良い国際 OS となったと判断されます。発表者の皆様、ご参加いただいた皆様に深く感謝申し上げます。

(加藤 之貴, 鹿園 直毅, 中曾 浩一, 能村 貴宏)



図 3-2 招待講演者の Prof. Vandersickel (左)

3-3 ふく射輸送とふく射性質

ふく射伝熱のセッションとして、国際シンポと一般講演を 2 日間にわたって企画しました。初日に開催された国際シンポでは、韓国 KAIST の Bong Jae Lee 教授をお招きし、近接場熱放射とそのエネルギー変換技術について講演頂きました。近接場熱放射は物体間のギャップが小さい場合、エヴァネッセント波による効果で黒体放射限界を超える熱輸送現象として注目を集めています。様々な測定結果と併せて、近接場熱光電変換技術の最新研究とシステム設計の理論解析が紹介されました。特に近接場として捉えるべきギャップ間距離をナノテク技術で長くして、応用に近づけようとするアイデアは興味深いアプローチであり、韓国で技術の社会実装を目指

して大型プロジェクトが推進されているとのことでした。

国際シンポのセッション 1 では、ナノ・マイクロ構造体を用いたふく射制御に関する応用研究が発表されました。放射冷却塗料の開発やメタマテリアルを用いた放射率制御、レクテナに関する研究などについて盛んに議論がなされ、微細構造の寸法設計や使用する材料の選定が放射率スペクトルの制御へ向けて重要であることが改めて確認されました。セッション 2 では、ふく射現象の物理解と材料設計に関する発表が行われました。Foldy-Lax 方程式を用いた超高密度コロイド懸濁液中の近赤外光散乱を数値解析、Ni 超合金の自己組織化により構築された高温対応の太陽選択吸収体の提案、ミクロンサイズの VO_2 微粒子を用いた温度応答型の受動的ふく射制御技術の講演があり、材料の応用可能性が議論されました。ふく射輸送の精緻な理解に基づき、エネルギー変換や熱制御技術への応用が期待されます。セッション 3 では、ふく射伝熱に関する基礎的理解と応用展開に関する多角的な研究が発表されました。ペロブスカイト材料を活用した熱光電変換技術による低・中温度廃熱回収や金属-絶縁体-金属トンネルダイオードによる近接場熱放射のエネルギー変換、熱光起電力に対する冷却技術の重要性、 BaSO_4 による受動的冷却技術について発表がありました。



図 3-3 Prof. Lee (左から三番目) とセッションオーガナイザー

翌日の一般講演では材料設計の観点から、誘電体多層膜と相変化材料を用いた放射率可変素子に関する報告があり、宇宙機の熱制御や受動的冷却への応用が議論されました。応用の側面からカーボンナノチューブを用いた熱流センサーや糸状デバイスへの展開に関する研究、黒体放射を利用した非接触

加熱法など新素材・新手法に基づく研究報告もなされました。解析の側面から、多孔体や散乱性媒体におけるふく射伝熱をモンテカルロ法で解析し、複雑構造における放射伝熱の定量化に取り組む発表がありました。従来のエネルギー伝搬制御や利用技術にとどまらず、センシングや再生医療などの異分野応用につながる成果であり、ふく射伝熱の工学的可能性を大きく広げるものでした。今後の社会実装も視野に入れた基礎と応用の融合が進んでいる点で、ふく射伝熱分野の活力を強く感じさせるセッションとなりました。

学会の支援により、海外研究者をお招きすることができ、セッション聴講者数は例年より多かったと実感しました。記して謝意を表します。

(江目 宏樹, 清水 信, 磯部 和真,
櫻井 篤, 宮崎 康次)

3-4 化学プロセスにおける熱工学

本 OS は、化学プロセス内で生じる伝熱現象、および熱移動制御によるプロセスの効率化や新しいプロセスの提案、エネルギー有効活用、カーボンニュートラル実現に向けた研究開発など、幅広く議論する場として、毎年開催していますが、今回は国際シンポにおいて“IOS4 Thermal engineering on chemical process”と銘打って開催されました。講演件数は招待講演 1 件、一般講演 12 件でした。まずセッション冒頭で、オーガナイザーを代表して埜上洋先生（東北大学）より開会挨拶が行われ、引き続き行われた午前中前半のセッションでは、多孔質体や粒子充填層、相変化現象などを取り扱った研究報告がなされました。続く午前中後半のセッションでは、招待講演として、Pranowo 先生 (Yogyakarta Atma Jaya Univ.) から“Numerical Simulation of Vapor Absorption in Heat Pump Absorber Using the Radial Basis Function Meshless Method”（動径基底関数を用いたメッシュレス法による吸収式ヒートポンプにおける蒸気吸収の数値解析）をご講演いただき、メッシュレス法の基礎から自由界面の解析への応用などについて丁寧にご説明いただきました。ご講演後、実行委員会から、かりゆしなどの贈呈があり、終始和やかな雰囲気でした。また、同セッションでは、吸収式ヒートポンプによる温熱・冷熱生成、コークス炉の熱解析、プラスチック包装の熱シールなどに関する数値解析といった化学プロセスに関連

する熱工学の研究報告がなされました。

午後からは少し広めの会場に移動して、5 件の一般講演があり、カーボンニュートラルに関連して、CO₂ 固定化、鉄系触媒による炭素と水素の生成、プラスチック含有バイオマスの熱分解挙動、メタンからの水素生成などに関する研究報告がなされました。参加者も多く活発な議論が交わされ、幅広い分野の研究者が集まる大変有意義な機会となりました。招待講演を行っていただいた Prof. Pranowo 先生をはじめ、発表者の皆様、ご参加いただいた皆様に深く感謝申し上げます。

(中曾 浩一, 須網 暁, 桒上 洋)



図 3-4 プレゼントされたかりゆしを羽織り、記念品を贈呈される Prof. Pranowo (写真左)

3-5 水素・燃料電池・二次電池

本オーガナイズドセッションは、水素関連技術から燃料電池、電解、二次電池などエネルギー変換デバイス・システムに関する様々なトピックまで広くカバーしており、第 43 回 (2006 年) から長年継続して企画・開催されています。過去 16 年間の講演件数の推移を図 3-5 に示します。近年では、燃料電池 (PEFC, SOFC) の話題に加え、二次電池 (リチウムイオン電池、金属空気電池、全固体電池) や電解 (PEM 型、アルカリ型、SOEC 等) に関する講演が増加傾向にあり、およそ 30 件の研究発表ならびに議論が例年活発に行われています。

今回の伝熱シンポは国際シンポと併催で行われ、本 OS は伝熱シンポでは 5 セッション、国際シンポでは 1 セッションが設置され、計 27 件のご講演を頂きました。講演会場の様子を図 3-6 に示します。講演内容は、水素生成、燃料電池、二次電池、電解セルにおける反応輸送現象の計測・シミュレーションなど多岐にわたっており、触媒層内のミクロ挙動

の解明から単セルの解析評価に至るまでマルチスケールの観点で様々な取組が紹介されました。水電解関係では気泡挙動に関する 4 件の講演があり、総合討論では気泡の検出技術や挙動メカニズムなど伝熱シンポジウムに相応しい白熱した議論が繰り広げられました。セッションにご参加いただいた講演者、関係者の皆様には厚く御礼申し上げます。次回も多数のご発表をお待ちしております。

(西田 耕介, 荒木 拓人, 伊藤 衡平, 岩井 裕, 田部 豊, 津島 将司, 徳増 崇)

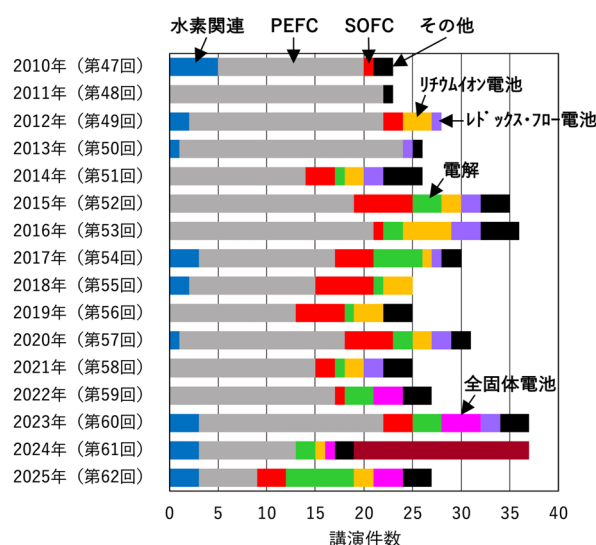


図 3-5 水素・燃料電池・二次電池 OS における講演件数の推移



図 3-6 講演会場の様子

3-6 濡れ現象の制御と理解

今年で 4 年目となる本 OS は、元祐先生 (東京理科大学)、手嶋先生 (九州大学)、杵淵先生 (東京大学) に新たなオーガナイザーとして参画いただき、

伝熱シンポとして2セッション、国際シンポとして5セッションを4日間にわたって行いました。2件の招待講演および26件の一般講演がセッションを問わず英語で発表され、立ち見が出るほどの聴衆を集めるとともに白熱した議論が交わされました。

本年は沖縄科学技術大学院大学（OIST）の Amy Shen 先生（図 3-7）および北京大学の Hao Wang 先生（図 3-8）に招待講演をお願いしました。Shen 先生からは蒸発によって誘起される物質堆積のバイオや工学分野への応用についてお話頂きました。特に、複雑なコロイド液体である血液での液滴蒸発に関して、蒸発完了後の堆積物におけるクラックの生成について解説頂きました。Wang 先生からは、三相界線近傍の気液界面形状について、実験による可視化および数値計算による検討を詳細に解説頂くとともに、気体からの CO_2 回収などへの応用について紹介頂きました。

一般講演では、三相界線のダイナミクスや液滴および液体の濡れ挙動、固液界面における気泡の生成および成長、気液および固液界面の分析手法など、

いずれも興味深い研究が報告されました。質疑応答も活発に行われ、セッション終了後も今後のコラボレーションに向けた情報交換が行われました。また、総合討論では、「三相界線を観察するにはどのような手法が優れているのか？」について議論が交わされました。

様々な工業的応用や物理現象にかかわる液滴の挙動と濡れ現象の理解を目的に、熱流体にかかわる研究者だけでなく、界面分析手法の専門家も参加する分野横断的な議論の場として、本 OS は盛況のうちに終了しました。講演者の皆様、ご参加いただいた皆様に感謝申し上げます。

（イ エリム、塩見 淳一郎、杵淵 郁也、
田川 義之、元祐 昌廣、手嶋 秀彰、
山田 寛、ムテルデウ ティモテ）

3-7 燃焼研究の最前線

伝熱に関する研究分野の一つである燃焼工学分野の学術的交流を促進することを目的とし、伝熱シンポにて例年開催している燃焼工学に関する OS「燃焼伝熱研究の最前線」、今回同時開催となった国際シンポにおいて OS「The Frontier of Combustion Research」を開催しました。国際シンポでは、招待講演として、著名な Jacqueline Chen 先生（Sandia National Laboratories）、Heinz Pitsch 先生（RWTH Aachen University）の両名を招き、燃焼伝熱に関する研究についてご講演頂きました。

また、一般講演として、アンモニア燃焼、燃焼計測技術、数値解析手法、次世代燃焼技術など、幅広いトピックスに関する計33件（国際シンポ：15件、伝熱シンポ：18件）の講演がありました。機械学習



図 3-7 Prof. Shen（写真左）との記念撮影



図 3-8 Prof. Wang（写真左）との記念撮影



図 3-9 参加者の質問に答える Dr. Chen（写真右）



図 3-10 講演中の Prof. Pitsch

などの新しい技術を活用した研究が増えてきていることが印象的でした。これらを計 9 つのセッション（国際シンポ：4 セッション，伝熱シンポ：5 セッション）に分けて 4 日間（5 月 14～17 日）に渡って実施しました。当日は多くの方にご参加いただき，質疑応答や自由討論なども活発に繰り広げられ，盛況のうちに終えることができました。本 OS にご参加・ご協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。次回も多数のご発表とご参加を心よりお待ちしております。

（勝身 俊之，佐藤 大輔，齋木 悠，
中村 寿，鈴木 雄二，店橋 護）

3-8 バイオ伝熱・熱力学

本 OS（Biotransport and Biothermodynamics）は伝熱学会の研究会「細胞内熱ダイナミクス研究会」の活動の一環として，二つのセッションで開催されました。最初のセッションは 5 件，後半のセッションは招待講演 1 件を含む 4 件の発表がありました。招待講演では，Prof. Luis Carlos（Physics Department, Universidade de Aveiro）をお招きして，“Tracking Protein Dynamics with Luminescence Thermometry”と題して，蛍光タンパク質を使った分子のブラウン運動速度の温度依存性の測定を中心とした最近の研究についてご講演頂きました。招待講演に対して多くの質問があり，質疑応答の時間がやや不足しているように感じました。

OS では，Biothermodynamics に関連する発表として，生体とセンサーの接触熱抵抗の測定，近赤外光を用いた焼灼治療，単一細胞の代謝熱測定，細胞内局所過熱による神経分化促進，短波赤外分光による

生体の水分活性測定，Biotransport に関する発表として，細胞の電気穿孔分布の時間発展，発汗量の高速度モニター装置の開発，リポソーム薬剤の乾燥保存法がありました。昨年度に比べると，発表者の顔ぶれはほぼ変わらなかったものの，参加者は倍以上の 40 名強となり，学生を含む若い研究者のなかには，細胞内の熱に関わる問題や計測技術等について興味を持つ人が予想以上に存在していることが分かり，研究会の潜在的な会員の増強に資する OS となりました。

（白樫 了，藏田 耕作，岡部 弘基，松浦 弘明）



図 3-11 Prof. Carlos（右から三番目）とセッションオーガナイザー

3-9 相変化現象とその伝熱に関する最近の進展

本 OS は，気液相変化の基礎過程，沸騰・凝縮伝熱，相変化伝熱促進手法など，幅広い相変化現象の研究に関する最新の研究成果について議論する場として開催されました。1 件の招待講演と，10 件の一般講演が行われ，5 月 16 日および 17 日の 2 日間にわたり，2 つのセッションに分けて活発な議論が交わされました。招待講演では，マンチェスター大学の Giovanni Giustini 先生に“On the modelling of liquid "microlayer" formation and depletion in nucleate boiling: novel insights from interface capturing simulations of bubble growth at a surface”と題してご講演を頂きました。

気泡底部に形成されるマイクロ液膜も解像する沸騰の直接数値計算の手法と最新の研究結果が紹介されました。特に，液膜厚さの観点から，実験をよく再現する計算結果が得られていることが示されました。また，激しい蒸発が生じているマイクロ液膜

上の気液界面条件として設定される界面熱抵抗については、信頼性のある実験データが不足しており、今後の重要な研究課題であることが指摘されました。会期が重複したフランス開催の ICMF2025 を途中で切り上げる必要がありながら、本講演をお引き受けいただいた Giustini 先生に、心より感謝申し上げます。

一般講演では、格子ボルツマン法を用いた沸騰の数値計算、気泡微細化沸騰のメカニズム、高温面の濡れ条件、気液界面熱抵抗、濡れ制御や界面活性剤添加による沸騰熱伝達促進、複合濡れ面や冷却管表面の凝縮の数値計算についての大変興味深い研究発表が行われ、いずれも活発な議論が展開されました。本 OS を通じて、気液相変化現象に関する未解明の課題が改めて浮き彫りとなり、今後の研究展開に向けて非常に意義深い機会となりました。ご講演いただいた皆様、ご参加いただいた方々に心より御礼申し上げます。

(矢吹 智英, 永井 二郎)



図 3-12 Dr. Giustini (写真左) との記念撮影

4. 特別企画セッション

4-1 企業特別セッション「沖縄地区企業による部品開発・技術開発の紹介」

産学交流委員会では、毎年、伝熱シンポにおいて、シンポジウム開催地区の地元企業をお招きしたセッションを企画しています。シンポジウム登録参加者に限らず一般の方も参加可能な公開セッションとし、シンポジウム開催地域の産業や技術、企業活動への理解を深めるとともに、総合討論を通じて、伝熱に関する新たな気づきや連携の機会を創出することを目的としています。

今年のシンポジウム主催は関東地区でしたが、例年に倣い開催地である沖縄県内の企業 2 社（うち 1 社は関連会社との共同発表）にご講演をいただきました。発表の様子を図 4-1 に示します。



図 4-1 企業特別セッション講演の様子



図 4-2 講演者との集合写真（左から、琉球大学 瀬名波、JFE エンジニアリング株式会社 山本様、内海様、中城バイオマス発電所 森脇様、拓南製鉄株式会社 山内様、本セッション主担当 西）

ご講演題目等は、以下の通りです。また講演者およびオーガナイザー等との集合写真を図 4-2 に示します。ご講演者の皆様には、快くご講演をお引き受け頂き、深く感謝申し上げます。

- (1) 中城バイオマス発電所における高効率設計、沖縄ニューエナジー株式会社 中城バイオマス発電所所長 森脇 新二 氏、JFE エンジニアリング株式会社 エネルギー本部エネルギーソリューション事業部技術部 内海 高博 氏

- (2) 「鐵（テツ）を拓（ひら）いて琉球を起こす。」
 拓南製鐵株式会社 専務取締役 山内 昌博 氏
 （瀬名波 出）

4-2 モノづくりセッション

産学交流委員会では、シンポジウム 2 日目夕刻に、モノづくりセッションを企画し、運営しました。産学交流委員会の活動目的である、産学交流の活性化を目的として設けたセッションで、今回のシンポジウムで 2 回目の開催となります。

最初に、座長の近藤委員から、本学会の企業所属の会員の現況とセッションの趣旨について説明がありました（図 4-3）。企業所属の正会員数は、正会員全体の 41%を占めますが、企業所属の正会員によるシンポジウムでの講演数は 20%未満です。ここ数年は上昇傾向（2023 年の福岡開催では 7%、2024 年の神戸開催では 13%、今回の沖縄開催では 17%）にあるものの、会員割合とは大きく乖離しています。そこで、企業所属の研究者、技術者にとって発表しなくなるセッション、聴講者の皆様にとって有用な

情報交換の場となることを目指し、各社の社業と熱に関わる取り組みについて紹介頂く本セッションを設定した旨、説明がなされました。

趣旨説明に続き、12 社の企業による発表、総合討論が行われました（表 4-1）。優秀プレゼンテーション賞セッションと同時刻に併催され、ピーク時は 100 名近い参加をいただくことができました（図 4-4）。発表内容は多種多様で、さまざまな熱関連技術が、さまざまなアプリケーションで生かされていることを知る良い機会となりました。聴講者の皆様にとって、社会実装、技術の出口の観点から新たな気づき、繋がりが得られたのではないかと思います。なお、セッション終了後は、那覇市内にて、発表者と産学交流委員で意見交換会を開催し、交流を深めました。

来年のシンポジウムでも、本セッションを企画予定ですので、ご興味をお持ちの企業の方は発表をご検討頂ければ幸いです。

（西 剛伺，近藤 義広）

表 4-1 モノづくりセッション発表企業一覧
 （発表順）

企業名	題目
シーメンス	電気・熱連成解析によるジュール熱を考慮した基板部品の高精度温度予測
デンソー	アクチュエータのモデリングによる発熱量損失算出手法
ナブテスコ	電動化が進む油空圧機器のパワーエレクトロニクス技術
日置電機	熱電対による表面温度測定の測定誤差とその要因
ベテル	複数の空間分解能による熱伝導率の測定
WELCON	コルゲートマイクロチャネル構造を適用した高性能熱交換器のアルミニウム化
日本製鉄	鋼管製造プロセスにおける水冷技術
Wave Technology	(株)Wave Technology における電子機器の熱設計への取り組み
東京電力ホールディングス	データセンター高負荷サーバーの熱処理に関する研究
東亜電気工業	熱対策ソリューション（RDHx/CDU）の今後の展望
IHI	高温熔融金属内の不純物除去に関する技術紹介
日本ガイシ	波長選択赤外線による新規プロセスの開発



図 4-3 セッション趣旨説明の様子



図 4-4 モノづくりセッション会場の様子

5. 優秀プレゼンテーション賞セッション

優秀プレゼンテーション賞 (Best Presentation Award: BPA) セッションは、伝熱シンポの付帯イベントとして、平成 15 年 (2003 年) 5 月の第 40 回日本伝熱シンポジウム (広島) にて「学生プレゼンテーション賞セッション」(第 41 回より現在の「優秀プレゼンテーション賞セッション」に改称) として開始され、その後、例年の伝熱シンポにて開催しています。本セッションは、28 歳以下の若手研究者や学生会員が伝熱シンポ参加者に自身の研究を紹介し、時間をかけた議論と発表技術に磨きをかける場を提供するものとして位置づけており、学生会委員会と実行委員会により企画・運営されています。本年度は 23 回目の開催となりました。

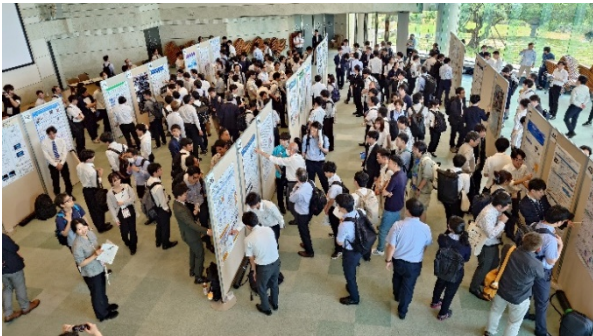


図 5-1 BPA セッション実施会場の様子

本年度の優秀プレゼンテーション賞セッションは、昨年の第 61 回伝熱シンポジウム (神戸) 同様、対面でのポスター発表での開催となりました。特に、近年の BPA 実施にて大きな懸念となっていた会場の大きさや各ポスターの見やすさの点については、実行委員会、および会場となった沖縄コンベンションセンターの多大なご協力をいただいて、図 5-1 に示すように、会場で最も広い A1 室で開催し、さらにポスターパネルを 3 枚ずつの連結とすることでパネル間のスペースを確保し、十分な広さと見やすさを得ての盛会なセッションとなりました。

会場では、前半の 1 時間を奇数番号、後半の 1 時間を偶数番号の発表時間として、工夫を凝らしたポスターの数々が発表されました。なかには、タブレット等を利用した動画等を示しながらの発表も見られました。会場では、大学の先生や企業の研究者からの質問だけではなく、発表の学生同士での質問や討議が活発に行われていました。今回の講演申込

数は 54 件で、そのうち 1 件は体調不調によるキャンセルの申し出があったことから、53 件が審査対象となりました。この件数は、昨年と同様に近年では最高の発表件数です。今回も 1 発表につき 5 名の審査員による厳正な審査等の結果、BPA-05 林田侑也 (九州大)、BPA-18 上村和輝 (大阪大)、BPA-24 成翰承 (九州大)、BPA-25 多ヶ谷優治 (東京科学大)、BPA-31 谷知輝 (東北大)、BPA-45 北野智己 (東京科学大)、BPA-48 瀧口恭祐 (九州大) (敬称略、発表番号順) の 7 名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました (本誌の「優秀プレゼンテーション賞受賞者」の記事もご覧ください)。

受賞者 7 名は、シンポジウム 3 日目の総会時に受賞の紹介と賞状の授与がシンポジウム実行委員長の東京科学大学、店橋護先生から行われ、最後に店橋実行委員長、須賀会長との記念撮影が行われました (図 5-2)。

最後に、本セッションを開催するにあたり、優秀プレゼンテーション賞の審査員の先生方、学生会委員会幹事の西田耕介先生 (京都工芸繊維大)、学生会委員会委員の先生方、伝熱シンポ実行委員会の先生方に大変お世話になりました。この場をお借りして篤く御礼を申し上げます。

(春木 直人)



図 5-2 店橋実行委員長、須賀会長との記念撮影

6. 機器展示・広告

機器展示・カタログ展示・プログラム冊子への広告掲載を募集し、多くの企業から申し込みを頂きました。沖縄での開催ということで、多くの展示物が航空便による事前送付となりましたが、出展企業の皆様のご協力のもと、各展示を円滑に実施することができました。以下にご協力頂いた企業をご紹介します (五十音順、敬称略)。

【機器展示】

英和株式会社, 株式会社構造計画研究所, 株式会社コスモ, サイエンスエッジ株式会社, 西華デジタルイメージ株式会社, SOLIZE 株式会社, ダンテック・ダイナミクス株式会社, トヨタ自動車株式会社, ニイガタ株式会社, 日本カノマックス株式会社, 株式会社フォトロン

【カタログ展示】

株式会社ファンクショナル・フルイッド, 株式会社ベテル

【広告】

株式会社東京インスツルメンツ, 株式会社ファンクショナル・フルイッド

(長澤 剛)

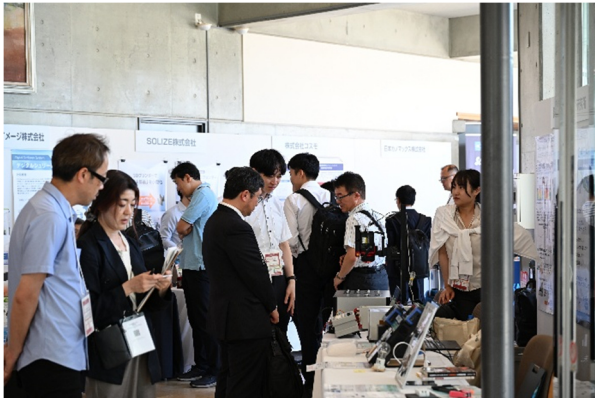


図 6-1 参加者で賑わう機器展示スペース

7. 弁当・菓子・飲料の提供

シンポ会場の周辺には、飲食店がほとんど無いため、事前予約制で弁当を会期中に販売しました。今回は、国際シンポを併催したため、弁当についても国際会議の標準対応を取り入れ、多様性に配慮した弁当を手配しました。すなわち、一般向け弁当に加えて、ベジタリアン、ビーガン、ハラール弁当を選択可能とし、4 日間で約 1000 個の弁当を提供しました。また、沖縄県からの依頼・要請（地元食材の提供・宣伝）に応じて、一般弁当は沖縄料理を中心としたメニューとしました。さらに、同時に提供した飲料についても沖縄で一般的な「さんぴん茶」（沖縄県にて製造）を提供しました。

今回は、やはり沖縄県からの依頼・要請（沖縄県産スイーツの宣伝）に応じて、ちんすこう、紅芋タルト等の沖縄スイーツを沖縄県物産公社より取り寄せ、機器展示スペース近くで無料提供しました。

約 1000 個の菓子を準備しましたが、準備した菓子の中に現在人気 No.1 の雪塩サンド等が含まれていたことから、最初の 2 日間でほぼすべて無くなるほど参加者には好評でした。このため、急遽菓子類を追加購入して、3 日目と 4 日目に対応しました。3 日目と 4 日目は通常の菓子に加えて、揚げたてサターアンダギーが提供されました。揚げたてサターアンダギーを提供する極めて高評価の手作り店（山家）が、会場近く（といっても会場のある宜野湾市の隣の浦添市ですが）に存在することを実行委員長が発見し、急遽発注することになりました。購入にあたっては、伝熱シンポ実行委員長と IUTAM シンポ実行委員長（岩本薫（東京農工大学、伝熱シンポ／国際シンポ実行委員兼任））が、自ら店に出向き発注・商品受け取りを行いました。揚げたてサターアンダギーは 3 日目と 4 日目にそれぞれ 100 個程度が提供されましたが、大好評で瞬く間に消費されていました。今回の沖縄スイーツの提供を通じて、沖縄を離れる際にお土産として沖縄スイーツを購入された参加者の皆様も多くいらっしゃったと思います。これにより、沖縄県からの支援に改めて、沖縄の物産普及、地域振興に少しでも貢献できたのではと考えています。



図 7-1 沖縄料理のお弁当



図 7-2 揚げたてサターアンダギー（山家）

本シンポは、「環境に配慮した運営を行う」と宣言して準備が行われました。このため、会場での飲料提供についても環境に配慮するという事で、無料ウォーターサーバを会場内に設置しました。これは、ペットボトル等のプラスチックゴミの排出を極力抑えるためです。なお、ごみ排出量を極力抑えるために会場内にはごみ箱の設置も敢えて行いませんでした。

従来、伝熱シンポでは休憩時間中の飲料や菓子類の提供は必ずしも実施されていません。これらの今回の提供は特殊ケースとして理解して頂ければ幸いですし、次回以降の伝熱シンポでデフォルトとなるものではないことを付記しておきます。

(長澤 剛, 店橋 護, 岩本 薫)

8. 意見交換会

意見交換会は、会期三日目となる 5 月 16 (金) の 18 時 30 分より、講演会場の沖縄コンベンションセンターから徒歩で移動できるラグナガーデンホテルの大宴会場「羽衣の間」にて開催されました。実行委員会としても意見交換会への参加者にどれだけ満足いただけるか、を重視し、料理や飲料の内容、テーブル配置や進行内容についてホテル側と打ち合わせを重ねました。特に、伝熱シンポの意見交換会のあり方については、実行委員長の強い思い入れと、沖縄県からの依頼・要請（地元食材の提供・歴史文化の体験）を鑑み、提供食材等が最終決定されました。その結果、沖縄料理を中心としたメニューとし、意見交換会前半で料理が無くなることのないよう十分な量の料理を提供しました。特に、沖縄を代表する料理として、沖縄そば、ジュシー、沖縄焼きそば、そうめんチャンプルー等を別発注したことで、参加者の皆様には沖縄料理を堪能いただけたものと考えています。飲料についても、実行委員長の強い思い入れがあり、飲料プランとは別に泡盛の古酒（3 年以上熟成させたもの）を提供することとしました。泡盛古酒の選定にあたっては、琉球大学の先生方に相談させていただき、海乃邦（うみのくに）10 年、國華（こっか）15 年、春雨（はるさめ）24 年を提供することとなりました。古酒とは別に少しグレードの高いワインも別発注で準備しましたが、どちらも大人気で 300 名を超える参加者、すべての皆様にご賞味頂けなかったことが唯一悔やまれる点です。

意見交換会は、伝熱シンポの店橋護実行委員長と国際シンポの伏信一慶実行委員長の二人による掛け合いトークで幕が切られました。次に、第 63 期日本伝熱学会会長の須賀一彦先生よりご挨拶を頂戴し、乾杯のご発声は第 36 期会長を務められた慶応義塾大学名誉教授の長島昭先生より行っていただきました。会の中ほどで、沖縄の伝統芸能であるエイサーを創作アレンジしたパフォーマンスを創作衆桜輝（そうさくしゅうおうか）の皆さんが行い、参加者の耳目を集めました。このエイサーの演舞は、沖縄県から支援の一環として行われたものであり、エイサーの選択はやはり実行委員長の思い入れでした。パフォーマンス後には参加者の皆さんとの集合写真に入っただき、よい記念になったと思われます（図 8-1）。



図 8-1 意見交換会参加者とエイサーチームの記念撮影



図 8-2 様々な料理を楽しむ参加者

その後、あらためて歓談の時間を過ごした後、次の伝熱シンポの案内が実行委員長を務められる北海道大学の戸谷剛先生より行われました。続いて、那覇市内へ戻るためのチャーターバスの案内が行われ、予定通り 20:30 には参加者もほぼ退場し、閉

会となりました。

最後になりましたが、意見交換会にご参加いただいた皆様にあらためて御礼申し上げますとともに、実施に向けてご協力いただいた方々に心からの感謝を述べさせていただきます。

(齊藤 卓志, 店橋 護)

9. シンポジウム HP および DX 化の取組み

本シンポジウムでは、運営の高効率化を目的として、デジタルトランスフォーメーション (DX) を大幅に推進しました。昨年度までのシンポジウムでは、長年使用されてきたホームページを部分的に修正しながら継続運用していました。毎年同様の操作体系であったため、継続参加者には使いやすい一方、運営面では課題がありました。

具体的には、ホームページにバグが多く、ソースコードを直接修正する必要があったほか、参加費の徴収には別システム (Peatix) を用い、ホームページとの情報連携はアルバイト学生による手作業に依存していました。サーバーの保守も自前で行う必要があり、受付や弁当配布では名簿照合、目視確認、チケット配布など人手が多く必要でした。

こうした課題を解消するため、本年度は、ホームページの構築、講演申込、原稿投稿、参加登録を含む全体的なシステムに、株式会社アトラスが提供する「Confit」を採用しました。その結果、ホームページはソースコードに触れず作成可能となり、図 9-1 に示すようなページを迅速に構築できました。講演申込や原稿投稿も、Confit の標準テンプレートを一部カスタマイズすることで対応可能でした。

参加登録についても Confit 上で完結し、決済には GMO ペイメントゲートウェイ社のサービスを利用することで、主要なクレジットカード決済と銀行振込の両方に対応できました。さらに、入金情報が自動的に Confit 側のデータベースへ反映されるため、個別問い合わせがない限り、入金確認作業は不要となりました。また、QR コード付き参加証の自動生成機能により、参加者には事前に印刷して持参してもらい、会場ではスキャンのみで受付とパンフレット配布を完了できました。

加えて、プログラムの編成や座長の選任、参加者への一斉配信メールについても、Confit に搭載されているプログラム編成機能およびメール送信機能を活用することで、運営側の作業負担を大きく軽減

することができました。プログラムの PDF やオンラインプログラムについても自動作成が可能であり、事務作業の効率化が一層進みました。

一方で、Confit で対応できない場面もありました。1 つは弁当配布です。本シンポジウムでは、4 日間にわたり、一般・ビーガン・ハラール・ベジタリアンの 4 種から日ごとに選択できる方式を採用しており、未申込を含めると 1 人あたり 625 通りの組み合わせとなりました。700 名を超える参加者の弁当配布を名簿で照合しながら行うことは現実的でなく、Confit でも対応できなかったため、最終的には参加証の QR コードを読み取り、該当する弁当内容を音声で指示する独自システムを開発して対応しました。



図 9-1 Confit を使用したシンポジウム HP



図 9-2 弁当受渡しシステム

もう 1 つはプログラム冊子用 PDF の作成です。Confit が出力する PDF は冊子体に適さない形式であったため、手作業でレイアウトを整えた上で冊子用 PDF を作成しました。

このように一部に手動対応を要したものの、運営業務全体としては大幅な省力化を実現できました。

特に、ホームページ作成から講演管理、参加登録、受付処理、入金確認、プログラム整備までの主要業務を、担当者 1 名とサポートスタッフ 1 名の計 2 名で遂行できたことは、DX 推進の大きな成果だと思います。

ただし、省力化が可能になったとはいえ、システムの運用には一定の IT 知識が必要であり、次年度以降も同様の仕組みを採用する場合は、担当者に相応の IT リテラシーが求められる点に留意する必要があります。

(兒玉 学)

10. 実行委員会

実行委員会は、東京科学大学を中心とした関東圏の会員、ならびに開催地となる琉球大学の会員などにより組織されました。

2024 年 5 月 23 日に開催したプレ実行委員会を起点として、前回シンポジウムからの引継ぎ会議一回、現地下見一回、実行委員会三回、実行委員長/副委員長ならびに幹事団による幹事会六回を経て、今回のシンポジウム開催に漕ぎつけることができました。また、会期中、献身的に働いていただいた実行委員会メンバー、ならびに若い学生アルバイトの皆さんの協力により、スムーズなシンポジア運営が実現できました。

第 62 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

実行委員長

店橋 護 (東京科学大学)

副委員長

伏信 一慶 (東京科学大学)

加藤 之貴 (東京科学大学)

瀬名波 出 (琉球大学)

末包 哲也 (東京科学大学)

主幹事

齊藤 卓志 (東京科学大学)

幹事

長澤 剛 (東京科学大学)

志村 祐康 (産業技術総合研究所)

笹部 崇 (東京科学大学)

委員

伊井 仁志 (東京科学大学)

岩本 薫 (東京農工大学)

榎本 陸 (東京科学大学)

大西 領 (東京科学大学)

川口 達也 (東京科学大学)

Kim Dae-Yeong (東京科学大学)

Kim Byunggi (東京科学大学)

熊野 寛之 (青山学院大学)

白樫 了 (東京大学)

鈴木 佐夜香 (東京科学大学)

高木 洋平 (横浜国立大学)

田川 義之 (東京農工大学)

永島 浩樹 (琉球大学)

中別府 修 (明治大学)

野崎 智洋 (東京科学大学)

服部 博文 (名古屋工業大学)

福島 直哉 (東海大学)

堀 琢磨 (東京農工大学)

松下 真太郎 (東京科学大学)

三浦 正義 (千葉工業大学)

安田 啓太 (琉球大学)

Wang Ye (東京科学大学)

顧問

佐藤 勲 (東京科学大学)

花村 克悟 (東京科学大学)

井上 剛良 (東京科学大学)

平井 秀一郎 (東京科学大学)

岡村 哲至 (東京科学大学)

HTSJ 国際伝熱シンポジウム実行委員会

実行委員長

伏信 一慶 (東京科学大学)

副委員長

店橋 護 (東京科学大学)

瀬名波 出 (琉球大学)

津島 将司 (大阪大学)

野崎 智洋 (東京科学大学)

主幹事

村上 陽一 (東京科学大学)

幹事

兒玉 学（東京科学大学）

志村 祐康（産業技術総合研究所）

笹部 崇（東京科学大学）

委員

第 62 回日本伝熱シンポジウム実行委員会の委員
に同じ

（村上 陽一）

1.1. あとがき

第 62 回日本伝熱シンポジウムと HTSJ 国際伝熱シンポジウムを無事に終えることができ、正直安堵しています。2022 年秋ごろに、理事会より日本伝熱シンポジウムを東京工業大学（旧）が担当できないか、と打診を受けたわけですが、お引き受けする条件は「関東地区から少しだけ離れた場所での開催でも宜しければ」でした。実は、お引き受けした時点で実行委員長は沖縄開催を想定していました。しかし、その後、日本伝熱学会の国際会議関連基金の有効利用の依頼があり、国際会議を併催する運びとなりました。学会基金からの十分な支援があるのであれば、東京で華々しく開催するとの案も一時的に浮上しましたが、前述のように物価上昇、為替変動、インバウンド需要拡大等の社会情勢から、東京での開催は断念しました。当時の高松会長からは、「ハワイはさすがにやめて」とのお話を頂いた記憶がありますが、その当時から沖縄開催と決めていました。そのような状況の中、2023 年 5 月には沖縄県の会場を予約していましたが、沖縄県は本会の九州支部に含まれるため、事前に（ほぼ同時に）九州支部に沖縄開催をご了承頂きました。実行委員長自身は、別学会等で国際会議を海外の遠隔地で開催してきた経験を有していたため、伝熱シンポの遠隔地開催にも大きな抵抗はありませんでした。ただ、実際に準備・運営を始めると、歴史ある日本伝熱シンポジウムの重みを感じる事となりました。そのうち最も大きなものはその開催規模でした。総参加者 700 名前後となる大規模集会の準備は極めて大変であ

り、実行委員会に入って頂いた幹事、委員の皆様には大きな負担をお掛けすることになりました。実行委員会に入って頂いた比較的若い世代の会員には、この種の大イベントに関わった経験は、いつか役に立つとの思いでした。そして、この種のイベント開催で一番重要なのは参加者への配慮、ホスピタリティであることを言い続けました。今回参加された皆様にはこのホスピタリティを少しでも感じて頂いたのではないと思います。

今回、伝熱シンポに国際シンポを併設するにおいては、従来の伝熱シンポの OS のオーガナイザーの皆様から他大なご協力を頂きました。特に、各分野で戦略的に重要となる海外研究者を招待講演者としてご推薦頂いた訳ですが、非常に素晴らしい方々をご推薦頂き、この効果もあって総講演数の 1/3 以上が国際シンポで発表されることにつながったと感じています。この講演数となると国際会議単独で会計的に成立する規模となります。今回の国際シンポは、第 62 回伝熱シンポ限定で企画されたものですが、今回の成功を考えると、日本伝熱学会の更なる国際化を促進するために、数年に 1 回程度の周期で継続開催しても良いように感じられました。ただし、準備側の負担を最小限に抑えられるのであれば、との条件付きであり、無理をして開催するものではないとも考えています。

今回の伝熱シンポ／国際シンポにおいて、特別講演、招待講演、一般講演、特別企画セッション、優秀プレゼンテーション賞セッションを合わせて 419 件という多数の講演を頂いたことは、大変ありがたく存じます。ご講演、ご参加いただいた皆様に心より御礼を申し上げます。また、それぞれに多忙な中、シンポジウムの成功に向けてご尽力・ご協力頂いた各 OS のオーガナイザーの皆様、産学交流委員会や学生会委員会の皆様、実行委員会の幹事・委員の皆様、会場運営を補助頂いたアルバイト学生の皆様、そして当日運営を補助頂いた新学会事務局の皆様には心から御礼を申し上げます。

（店橋 護、伏信一慶）

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
ー 第 62 回日本伝熱シンポジウム ー
Best Presentation Award
- 62nd National Heat Transfer Symposium of Japan -

学生会委員会幹事

西田 耕介 (京都工芸繊維大学)

Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology)

e-mail: knishida@kit.ac.jp

令和 7 年 5 月 16 日に沖縄コンベンションセンターで開催された日本伝熱学会総会において、第 62 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞 (Best Presentation Award: BPA) セッションで発表を行い、優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

2025 年度 受賞者

- ◆ 林田 侑也【九州大学】
電解析出多孔質体による液供給ダイナミクスと
プール沸騰限界熱流束の向上
- ◆ 上村 和輝【大阪大学】
伝熱促進を目的とした熱対流乱流への水平方向
減衰力の導入
- ◆ 成 翰承【九州大学】
環境制御型走査電子顕微鏡を用いた懸架グラフ
ェンにおける動的濡れ性の解明
- ◆ 多ヶ谷 優治【東京科学大学】
火花点火機関における壁面近傍ガス組成解析手
法の開発
- ◆ 谷 知輝【東北大学】
生体組織内での熱浸透深さに関する周期加熱条
件の影響評価
- ◆ 北野 智己【東京科学大学】
2.5 次元共有結合性有機骨格の創出とその卓越
した CO₂ 分離回収性能の発見
- ◆ 瀧口 恭祐【九州大学】
原子間力顕微鏡を用いた加熱水中における界面
ナノバブル計測

(順不同)



図 1 BPA ポスター会場風景



図 2 店橋実行委員長、須賀会長との記念撮影

今回の BPA セッションでは過去最多タイとなる 53 件のポスター発表がありました。審査はポスターの内容および発表態度 (質疑応答含む) を評価対象とし、各ポスターに対して 5 名の審査員により評価が行われました。

ポスター発表の会場は終始盛況であり、発表者は日頃の研究成果に対する参加者からの多岐にわたる質問に対し、様々な趣向を凝らしながら積極的な議論がなされていました。最後になりましたが、発表者の皆様、審査員の先生方、ご参加いただいた全ての皆様に厚く御礼申し上げます。

火災現象のスケール効果

Scaling Fire and Explosion Phenomena

桑名 一徳 (東京理科大学)

Kazunori KUWANA (Tokyo University of Science)

e-mail: kuwana@rs.tus.ac.jp

1. はじめに

火災は規模が大きい現象である。何かが燃えたとしても、数センチメートルの話であれば火災とは呼ばない。その状態で消せれば、火事にならなくてよかったと、むしろほっとするだろう。

スケールが違くと、ものの燃え方もだいぶ異なる。例えば、ろうソクに火をつけると図 1(a)のように燃える。ろうソクの芯でろうが気化し、それが空気中の酸素と反応して火炎が形成される。芯の太さは 1 mm ぐらいであり、火炎高さは数センチメートルである。つまり、火炎高さは燃えているものの大きさの数十倍程度である。マッチ棒などもそのように燃焼する。

一方、家一軒が燃えると図 1(b)のようになるだろう。燃えているものの大きさが 10 m 程度だとすると、火炎高さも同程度になることが多く、100 m にまで達することはない。つまり、図 1(a)と(b)では無次元火炎高さがまるで異なる。この違いはなぜ生じるのだろうか？

火炎を吹き消す(空気流により消炎させる)ときのスケール依存性についても、かねがね不思議に思っていることがある。まず、大きな火炎を吹き消すのはとても困難である。大規模な山火事や市街地火災は、風が強いときに起きやすい。風により消炎するどころか、むしろ燃焼が激しくなる。逆に、ろうソクの炎のように小さい火炎は容易に吹き消せる。ここまでは特に不思議なことはなく、誰もが納得できるだろう。

不思議に思っているのは、タバコや線香のように燐焼しているものを吹き消すときのことである。燐焼は、炎を伴わない表面燃焼である。タバコや線香の燐焼では、熱分解により生じた可燃性ガスは燃焼せず(高沸点成分が凝縮して白い煙として見える)、残ったチャー(固定炭素)が表面燃焼する。燐焼時の温度は一般に 1000℃以下であり、有炎燃焼時の火炎温度が 1000℃以上に達することを考えると、

燐焼は低温で緩慢な燃焼形態だといえる。

大きいものが燐焼しているのを吹き消すのが難しいのは当然である。しかし、タバコはおろか線香のように小さな燐焼領域も吹き消すのは容易ではない。Lin らの研究[1,2]によると、10 m/s 以上の風速が必要なようである。空気流の向きと燃え広がり方向が同じ場合は特に吹き消しにくく、直径 1.5 mm の線香では 46 m/s もの空気流が必要である。1.5 mm の線香のように小さいものを吹き消すのがこんなに大変なのはなぜだろうか？

以上のような火災現象のスケール効果について考えようというのが、本稿のテーマである。

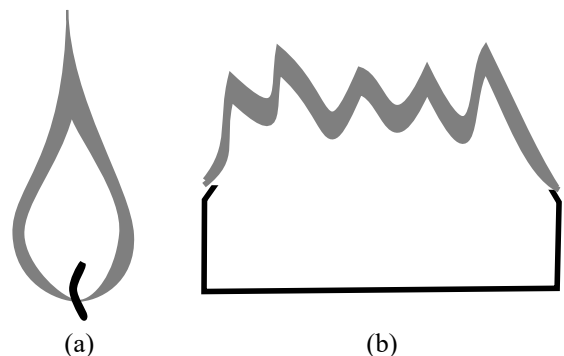


図 1 火炎高さのスケール効果

2. 火炎高さ

火災時にみられる火炎は主に拡散火炎である。つまり、ろうソクの炎のように、燃料と酸素が異なる方向から火炎に供給される。

ブンゼンバーナで燃料だけを供給し、拡散火炎を形成させる実験を想像してみよう。燃料ガスの供給速度を増やすほど、火炎が高くなりそうである。燃焼研究の分野では、火炎高さと燃料流速が図 2 のような関係にあることがよく知られている[3]。燃料流速が小さいうちは、燃料流速に比例して火炎高さが増加する。しかし、燃料流速が速くなり乱流火炎

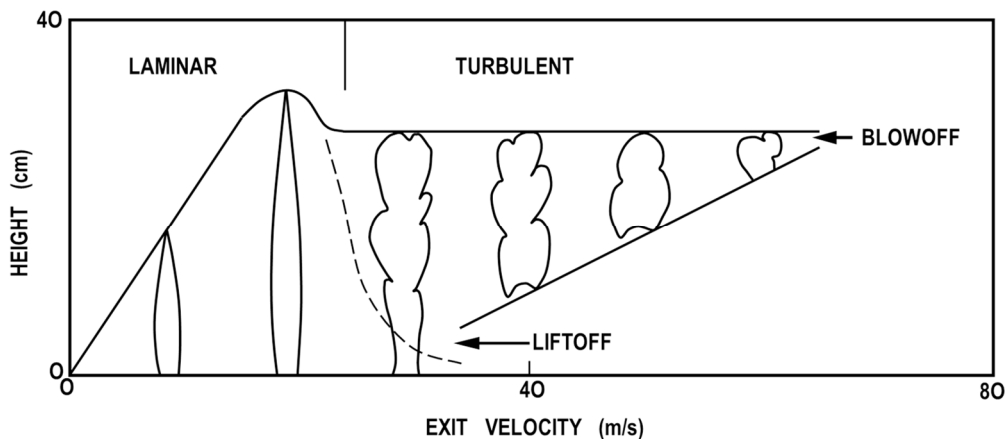


図2 拡散火炎の火炎高さ[3]

に遷移すると、燃料流速を増やしても火炎高さが変わらなくなる。燃料流速が速すぎると火炎が吹き飛んだり、燃料によっては浮き上がったりが、今回はこれらの現象には触れず、火炎高さのみを考える。

火炎上で燃料と酸素が反応するので、火炎に到達する燃料と酸素の量は比例し、その比は燃焼反応の量論関係で決まる。バーナ径を d 、燃料流速を u とすると、燃料供給速度は ud^2 に比例する（ここでの議論では比例係数を考える必要がない）。一方、酸素は拡散により火炎に到達する。拡散係数を D とすると、拡散の代表速度は D/d である。火炎高さを h とし、火炎面積が dh に比例すると考えると、火炎への酸素供給速度は速度と面積の積であるから、 Dh に比例する。そして、酸素と燃料の供給速度が比例することから、 $ud^2 \sim Dh$ つまり $h \sim ud^2/D$ が得られ、火炎高さ h が燃料流速 u に比例するという図2の関係を理解できる。なお本稿では、 y が x に比例することを $y \sim x$ と書く。

先ほど得た関係式は、 $h/d \sim ud/D$ と書きなおせる。 h/d はバーナ径基準の無次元火炎高さ、 ud/D はペクレ数であるから、無次元高さがペクレ数に比例するともいえる。ペクレ数はレイノルズ数と似たようなものなので、無次元火炎高さがレイノルズ数に比例すると言ってもよい。

なお、バーナ径 d が小さい場合は、火炎への酸素供給速度を評価するにあたって、 d よりも h を代表スケールと考えるほうが良いかもしれない。だとすると、拡散の代表速度は D/h 、火炎面積は h^2 にそれ

ぞれ比例することになる。この場合も、結局 $ud^2 \sim Dh$ つまり $h \sim ud^2/D$ となり、先ほどと同じ結論が得られる。

無次元火炎高さがレイノルズ数に比例するのは、あくまで層流火炎の場合である。レイノルズ数が一定以上大きくなり乱流火炎に遷移すると、分子拡散よりも乱流拡散が重要になる。乱流拡散係数 D_t は、その次元から $D_t \sim ud$ と表せる。先ほど得た関係式の拡散係数 D を乱流拡散係数 D_t に置き換えると、 $h/d = \text{constant}$ という関係が得られ、乱流火炎では火炎高さが一定になるという図2の傾向を説明できる。

ここまでの検討では浮力のことを考えていなかった。バーナ火炎の場合は、レイノルズ数が大きくなることにより乱流化する。一方、火炎の場合は木材等の熱分解で可燃性ガスが発生するので、その発生流速がそれほど大きくなることはない。浮力により誘起される流れの速度のほうがよほど大きいのである。

このとき、酸素は浮力流により火炎に供給される。浮力流の代表速度は $(gh)^{1/2}$ と表せる（ g は重力加速度）。火炎面積の代表値は、 d が小さければ h^2 、大きければ dh とそれぞれ表せるだろう。火炎への酸素供給量は浮力流速と火炎面積の積で表せ、それが燃料の供給速度 ud^2 に比例する。このことから、以下の関係式が得られる。

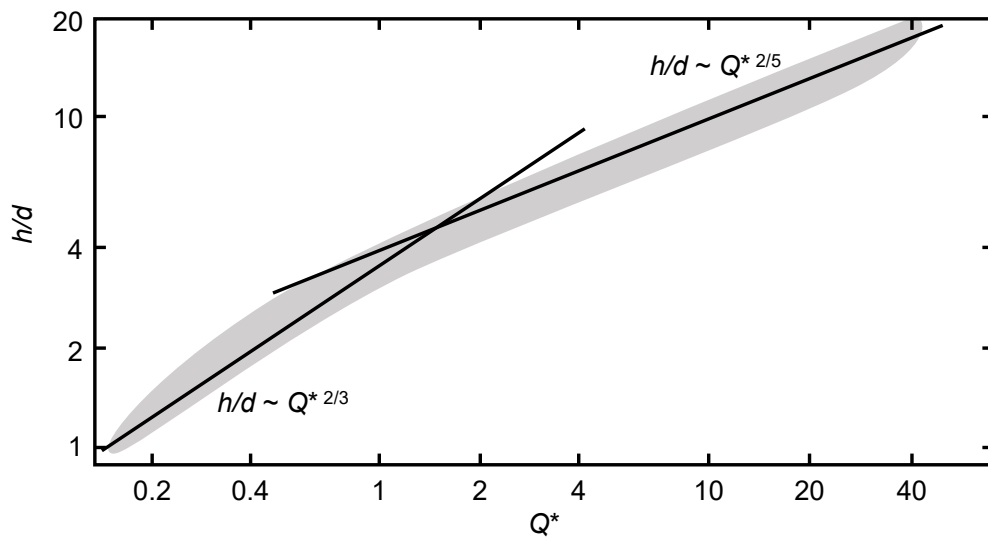


図3 火炎高さと発熱速度の関係（Zukoski ら[5]がまとめたデータをもとに作成）

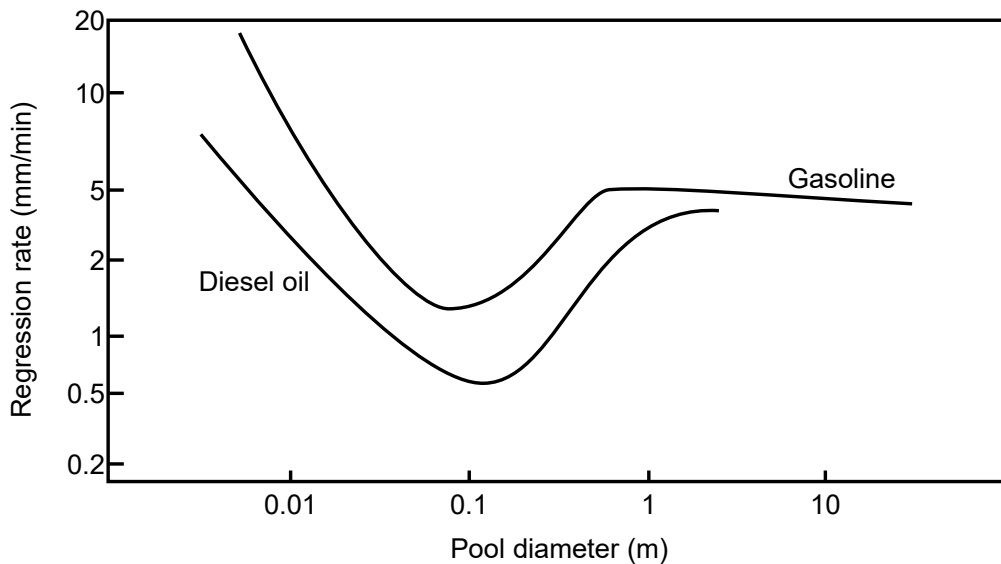


図4 液面降下速度と液体プール形（Drysdale[6]がまとめたデータの一部）

$$\frac{h}{d} \sim \begin{cases} \left[\frac{u}{(gd)^{1/2}} \right]^{2/5} & d \text{ が小さいとき} \\ \left[\frac{u}{(gd)^{1/2}} \right]^{2/3} & d \text{ が大きいとき} \end{cases} \quad (1)$$

ここで $u/(gd)^{1/2}$ はフルード数であり、浮力支配の拡散火炎の高さがフルード数に依存することがわかる。

さて、火災実験において可燃性ガスの発生流速 u を計測するのは容易ではない。一方、燃焼による発熱速度を比較的簡単に推定する方法がある。酸素消

費法と呼ばれるもので、多くの可燃物の燃焼熱が酸素消費量あたりに換算するとほぼ等しくなる（約 13 MJ/kg）こと[4]に基づいた方法である。燃料面積当たりの発熱量は u に比例するとみなせるので、以下の無次元量はフルード数とほぼ同じ意味を持つ。

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_0 T_0 (gd)^{1/2} d^2} \quad (2)$$

ただし、 Q は発熱速度、 ρ_0 、 c_0 、 T_0 はそれぞれ、周囲空気の密度、比熱、温度である。式(2)で定義される無次元発熱速度 Q^* は、火災強度を表す無次元量で、

火災研究では非常に重要である．式(1)は、 $h/d \sim Q^{*2/5}$ (Q^* が大きい場合) または $h/d \sim Q^{*2/3}$ (Q^* が小さい場合) と書き直すことができる．

図3は、火災高さと発熱速度の関係を示すグラフで、Zukoskiら[5]がまとめた多くのデータをもとに作成した．これまでに検討したように、 Q^* が大きい ($Q^* \geq 1$) と無次元火災高さが $Q^{*2/5}$ に比例し、 Q^* が小さい ($Q^* \leq 1$) と無次元火災高さが $Q^{*2/3}$ に比例することがわかる．

火災の場合の Q^* は、制御されているわけではなく、火災から熱を受けた可燃物が熱分解なり蒸発なりして可燃ガスを発生する速度に依存する．可燃性液体をサイズの異なる容器に入れて燃焼させたときの蒸発速度（液面降下速度）を図4に示す[6]．

容器径がおおよそ1mを超えると、液面降下速度がほぼ一定になる．このような条件では火災から液面への放射伝熱が蒸発速度を決める支配メカニズムであり、ある程度火災サイズが大きくなると液面に至る放射熱流束が一定になるためである．この場合、燃料面積当たりの発熱速度が容器径によらず一定になるので、 $Q/d^2 = \text{constant}$ である．式(2)より、無次元発熱速度 Q^* は $Q/d^{2.5}$ に比例する．したがって、サイズが大きくなると Q^* が小さくなり、つまりは無次元火災高さ h/d も小さくなる．

容器径が10cm程度以下では、容器径が小さくなるほど液面降下速度が大きくなる．このような条件では火災基部から液面への熱移動が重要で、サイズが小さくなるほど基部の影響が相対的に増すためだと理解できる．つまり、サイズが小さくなるほど面積当たりの発熱速度 Q/d^2 が大きくなるので Q^* も大きくなり、さらには無次元火災高さも大きくなる．

以上に述べたことから、図1に示した火災高さのスケール効果を説明できる．

3. 火災旋風の発生条件

都市火災や林野火災で、火災による上昇気流が竜巻状の流れを引き起こすことがある．火災旋風と呼ばれる現象である．図5のように、この竜巻状の流れが炎を伴うと、周囲の燃焼領域に比べて火災高さが著しく上昇する．日本では、1923年の関東大震災後に被服廠跡で火災旋風が発生し、約4万人の死者が出た事例[7]がよく知られている．林野火災でも火災旋風が発生し、人的被害が出た例が複数報告されている[8]．

ある程度の風が吹いているときに火災旋風が発生しやすいとされている．そして、風が弱すぎても強すぎても火災旋風が発生しにくくなる．つまり、火災旋風を発生させやすい風速が存在する．

火災旋風を発生させやすい風速は、火災規模に依存すると考えるのが自然である．大規模な火災ではそれなりの風速が必要だろうし、小規模であれば弱い風でも火災旋風が発生しそうである．



図5 模型実験により再現された火災旋風の例[8]

火災旋風を発生させやすい風速は、その火災が誘起する浮力流速と同程度であるとされている[9, 10]．風と浮力の相互作用により火災旋風が発生することを考えると、受け入れやすい仮説である．

先に述べたように、浮力流の代表速度は $(gh)^{1/2}$ である．したがって、火災旋風を発生させやすい風速を u_c とすると、 $u_c \sim (gh)^{1/2}$ と書ける．また、大規模火災における無次元火災高さと無次元発熱速度との関係は、 $h/l \sim Q^{*2/3}$ と表せる．なお、火災域が円形とは限らないので、火災の代表スケールを（直径 d ではなく） l と表すことにする．これら2つの式を組み合わせると、 u_c の火災規模依存性として次の式を導ける．

$$\frac{u_c}{(gl)^{1/2}} \sim Q^{*1/3} \quad (3)$$

図6は、過去に発生した火災旋風事例や、さまざまな実験結果[10]をまとめたものである．幅広い条件

に対して式(3)が成立していることを確認できる。無次元発熱速度 Q^* が火災現象においていかに重要なパラメータであるか、おわかりいただけると思う。

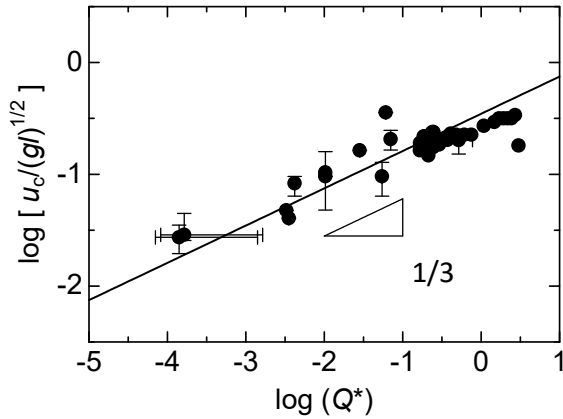


図6 火災旋風を発生させやすい風速[10]

4. 燐焼を吹き消す

1節で述べた、たとえ小さい燐焼領域でも吹き消すのがとても難しいことについて考えてみたい。はじめに正直に書いておくと、私には実験結果をうまく説明できない。何がうまくいかないかを書くので、解決方法をおわかりの方は是非ご教授ください。これは火災というより伝熱の問題だと思うので、『伝熱』で執筆させていただく機会に教えを請おうと考えた次第である。

Lin ら[1]が空気流中で線香を燃焼させた結果によると、線香が細いほど吹き消すのに必要な最小の空気流速が大きくなる。つまり、細いほど吹き消しにくくなる。これは直感的には意外な結果である。なんとなく、燃焼領域が小さいほど簡単に消せそうな気がするためである。

ここでは、直径 d の球形可燃物が温度 T_0 、速度 u の空気流中で燐焼している状況を考える。タバコや線香の燐焼では、熱分解反応によるチャーの生成と、チャーの表面燃焼が同時に起こる。ここでの検討では、簡略化のためチャーの表面燃焼のみを考える。つまり、球形可燃物としてチャーを考える。

さらなる簡略化のために擬定常状態を考え、時間変化を考えないことにする。そして、表面燃焼速度はチャー密度（物性値）と酸素濃度にそれぞれ1次に依存するとし、反応速度の表面温度 T_s への依存性をアレニウスの式で表す。このとき、次の2式で現

象を記述できる。

$$Q_0 B \rho_c \rho_g Y_{0,s} e^{-T_a/T_s} = h(T_s - T_0) \quad (4)$$

$$B \rho_c \rho_g Y_{0,s} e^{-T_a/T_s} = k_0 \rho_g (Y_{0,0} - Y_{0,s}) \quad (5)$$

Q_0 は単位質量の酸素あたりの燃焼熱、 B は反応速度定数の前指数因子、 ρ_c はチャー密度、 ρ_g は気相密度、 $Y_{0,s}$ は固体表面における酸素質量分率、 T_a は活性化温度、 h と k_0 は空気流と固体間の熱伝達係数および酸素物質移動係数、 $Y_{0,0}$ は空気流中の酸素質量分率である。以下では、気相密度の温度依存性を無視し、 ρ_g を定数（物性値）として扱う。

式(4)は、表面燃焼で発生した熱がすべて気相に移動することを表している（そうでなければ定常状態を維持できない）。式(5)は、反応による酸素消費速度が気相から固体表面への酸素移動速度と釣り合っていることを表している。

式(4)、(5)より、 $Y_{0,s} = Y_{0,0} - (h/k_0 \rho_g Q_0)(T_s - T_0)$ である。つまり、 $Y_{0,s}$ は T_s を用いて表せる。熱伝達係数と物質移動係数に係る無次元数ヌセルト数 $Nu = hd/\lambda$ およびシャープウッド数 $Sh = k_0 d/D_0$ は同程度の値になることが多い。そこで $Nu = Sh$ を仮定し、ついでにレイス数 $Le = \lambda/\rho_g c D_0 = 1$ も仮定すると、 $Y_{0,s}$ と T_s の関係式は次のようになる。

$$Y_{0,s} = Y_{0,0} - (c/Q_0)(T_s - T_0) \quad (6)$$

ただし、 λ は熱伝導率、 D_0 は空気中の酸素の拡散係数、 c は空気の比熱である。

式(6)を式(4)に代入して T_s について解けばよい。結果の一例を図7に示す。横軸 $h/cB\rho_c\rho_g$ は反応による発熱に対する熱損失の程度を表す無次元量である。この無次元量が一定の範囲にあれば解が3つ存在する。高温の解は燃焼状態を、低温の解は消炎状態をそれぞれ表している。真ん中の解は不安定で実現しないので物理的な意味がない。

無次元熱損失が限界値を超えると燃焼解がなくなる。つまり消炎する。空気流速 u が大きくなると h も大きくなるので、一定以上の空気流速で線香を吹き消せることを理解できる。

問題は、吹き消しの限界空気流速（ u_c と書く）が粒径 d にどのように依存するかである。無次元熱損失の定義に表れる量のうち、 u と d に依存するのは h だけである。したがって、図7の結果は、吹き消しの限界熱伝達係数が存在することを意味している。

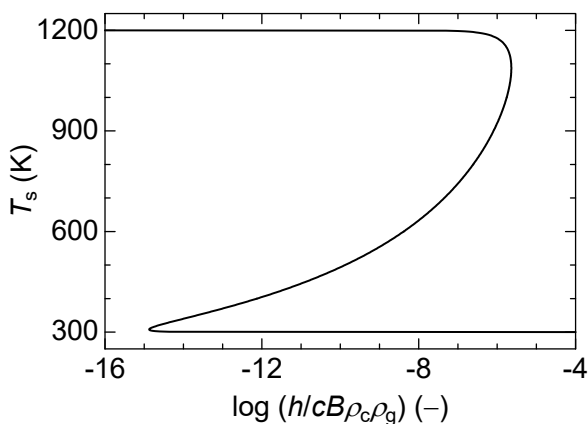


図7 固体表面温度と熱損失量の関係

球の熱伝達に係るヌセルト数としてしばしば用いられる Ranz-Marshall の式 $Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$ によれば, $Re \gg 1$ のとき $h \sim (u/d)^{1/2}$ である。したがって, $u_c \sim d$, つまり, 限界空気流速が粒径に比例することになる。これは, 線香が細いほど限界空気流速が大きくなるという Lin らの実験[1]とはまるで逆の結果である。表面燃焼の場合は燃焼も熱損失も表面で起こるので, 式(4)や(5)は d に直接依存しない。現象のスケール依存性は熱伝達係数と物質移動係数を通してのみ現れる。Viriya-amornkij ら[2]がもう少し複雑なモデルを用いて解析しているが, ここでの検討と本質的には同じ結果が得られている。

ここで検討したモデルでは, 限界空気流速のスケール効果を再現できていない。簡略化しすぎているからだと思われるかもしれないが, シンプルなモデルでもパラメータ依存性ぐらいいは再現できるものである。何か本質的なメカニズムを見落としているのだと思う。

ところで, 図7で, 横軸つまり無次元熱損失がごく小さくなると消炎解が存在しなくなる。つまり, 自然発火する。通常, 何らかのメカニズムでそれなりの熱損失が存在するので, 線香やタバコが自然に発火することはない。

5. まとめ

火災現象のスケール効果について考えた。2節で火炎高さのスケール効果を考えるうえで無次元発

熱速度 Q^* が重要であることを紹介し, 火災旋風の発生条件も Q^* により決まることを3節で確認した。4節では, 燐焼の消炎条件に関するスケール効果をうまく説明できないことを白状した。

謝辞

4節の内容は, JSPS 科研費 JP21H04593 の助成を受けた研究で得た成果である。

参考文献

- [1] Lin, S., Chow, T. H., and Huang, X., Smoldering propagation and blow-off on consolidated fuel under external airflow, *Combust. Flame*, **234** (2021) 111685.
- [2] Viriya-amornkij, P., Kuwana, K., and Huang, X., Predicting extinction limits of concurrent smoldering spread by a reduced analytical model, *Combust. Flame*, **269** (2024) 113668.
- [3] Liñán, A. and Williams, F.A., *Fundamental Aspects of Combustion*, Oxford University Press (1993).
- [4] Huggett, C., Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *Fire Mater.*, **4** (1980) 61.
- [5] Zukoski, E. E., Kubota, T., and Cetegen, B., Entrainment in fire plumes, *Fire Saf. J.*, **3** (1980/81) 107.
- [6] Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd Ed., Wiley (2011) p. 183.
- [7] Soma, S. and Saito, K., Reconstruction of fire whirls using scale models, *Combust. Flame*, **86** (1991) 269.
- [8] Ahmad, A. D. et al., Large-scale fire whirl and forest fire disasters: awareness, implications, and the need for developing preventative methods, *Front. Mech. Eng.*, **19** (2023) 1045542.
- [9] Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., and Williams, F. A., Scaling fire whirls, *Fire Saf. J.*, **43** (2008) 252.
- [10] Kuwana, K., Sekimoto, K., Minami, T., Tashiro, T., Saito, K., Scale-model experiments of moving fire whirl over a line fire, *Proc. Combust. Inst.*, **34** (2013) 2625.

O(2)対称性を有する熱対流場中を運動する微小粒子群の秩序構造形成

Formation of Ordered Structures by Microparticles in Thermoconvective Flows with O(2) Symmetry

野口 信[†], 上野一郎 (東京理科大学)Shin NOGUCHI[†] and Ichiro UENO (Tokyo University of Science)[†]e-mail: shin@rs.tus.ac.jp

1. はじめに

閉空間における流れは、単なる乱流ではなく、より多層的な構造を持つ。Cavity [1, 2] (図 1 a 参照) や Rotating drum [3] (図 1 b 参照) といった系においては、カオティックな振る舞いに加えて、KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) 構造と呼ばれる秩序だった流れの領域が共存することが知られている。そ

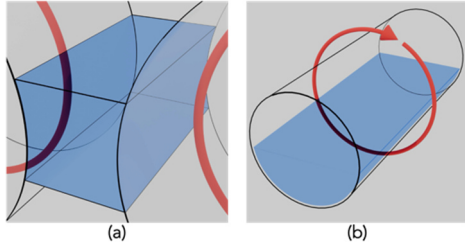


図 1. 典型的な 2 種類の流れ構成の模式図: (a) キャビティ流れ, (b) 液体が部分的に充填された回転容器。

して、この KAM 構造に含有粒子が集合するという非常に面白い現象が確認されている。こうした現象は、非線形力学における古典的なテーマであると同時に、現代の産業プロセスとも密接に結びついている。例えば、スプレー缶内部でのコーティング剤の分布や、ワクチン製剤中における抗体凝集体の除去といった課題は、いずれも閉空間内の微視的な流れの構造に依存している。Cavity や Rotating drum のように、一方向に主要な流れをもつ系における KAM 構造や粒子の集合現象については、これまでに多くの研究が蓄積されてきた。しかし、我々が注目しているのは二方向に主流が存在し、より構造的に自由度の高い流れ場である。それらが直交することで、内部により多様な運動と秩序が生まれる。このような流れを安定して実現するには、対象とする系が O(2)対称性 (回転対称性と鏡面对称性) を有していることが望ましい。その条件を満たす対象系として、円筒形状の対流場「液柱」(図 2 参照) を選定した。表面張力差駆動対流を実現する液柱内部では、周方向 (トロイダル方向) の流れに起因する位

相モードが生じる。これは液柱内に形成される KAM 構造をより複雑にする。結果として、内部の構造は時空間的に多層的な性質を示すようになるため、知見の蓄積が乏しいのが現状である。本稿では、液柱系における KAM 構造の形成について、実験的に明らかになった知見に基づいて紹介する。さらに、現象の魅力と今後の課題について紹介する。

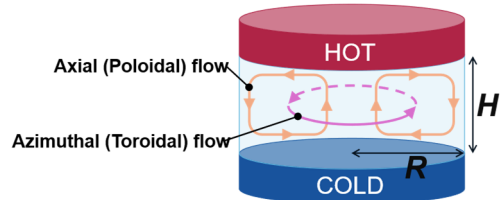


図 2. ハーフゾーン液柱の模式図

2. 流れの実現

2.1 軸方向 (ポロイダル方向) 流れ

液柱における軸方向の流れは、自然対流の一種であるマランゴニ対流を利用して実現する。この対流は、液体表面に生じる表面張力 σ の差によって駆動されるものであり、表面張力差の要因としては主に温度差および濃度差が挙げられる。本系では、液柱端面間に付与した温度差が主要な制御パラメータとなる。一般に、液体は温度が高くなるほど表面張力が低下する性質を持つ。この特性を利用し、液柱を支持する上下ロッド間に温度差を印加することで、自由表面上軸方向に有意な温度勾配を実現する。その結果、表面張力差が生じ、液体の駆動が自由表面上に限定的に発生する。この表面での駆動が粘性剪断により液柱内部へと伝播し、結果として軸方向に対して対称な流れが実現される。なお、この系において上部ロッドの温度を T_H 、下部ロッドの温度を T_C として温度差を設定した。液柱において、対流による熱輸送と熱伝導による熱輸送の比を表す無次元数として、マランゴニ数: Ma があり、式 (1) で表される。

$$Ma = \frac{|\sigma_T| \Delta T L}{\rho_f \nu \kappa} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_T (\equiv \partial \sigma / \partial T)$ は表面張力温度係数、 $\Delta T (= T_H - T_C)$ は上下ロッドの温度差、 L は代表長さであり、本実験では上下ロッド間の距離(H)を採用している。また、 ρ_f, ν, κ はそれぞれ液柱を形成する試験流体の密度、動粘度、温度拡散係数を表している。マランゴニ数は、液柱における熱駆動対流の強さを特徴づける無次元数である。さらに、マランゴニ数はレイノルズ数： Re とプラントル数： Pr の積で表すことが出来る。 Re と Pr はそれぞれ式(2)および(3)で表される。

$$Re = \frac{|\sigma_T| \Delta T L}{\rho_f \nu^2} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \quad (3)$$

2.2 周方向（トロイダル方向）流れ

本実験では、高プラントル数流体を試験流体として採用している。ロッド間に印加した温度差 ΔT を増加すると、軸方向流れの対称性が破れ、Hopf 分岐が生じる。特に、この時のマランゴニ数を臨界マランゴニ数 Ma_c という。これは、いわゆる Hydrothermal wave (HTW) 不安定性[4]と呼ばれており、結果として「定在波」と「回転波」という2種類の振動流が出現する。我々は、このうちの回転波（回転振動流）を活用することで、軸方向の流れと共存する周方向の流れを液柱内に実現している。

2.3 周方向流れにおける“位相モード”

振動流条件下において、液柱のアスペクト比 ($\Gamma = H/R$) の変化に応じて、半径方向に熱対流場の周期的な歪みが発生することが知られている。Preisser et al. [5]は、この歪みを位相モードとして定義し、そのモード数を m で表した。また、アスペクト比とモード数の関係は、 $m > 2$ の熱対流場を対象として、経験的に $\Gamma * m \sim 2.2$ とされている。この位相モードの出現により、液柱内に形成されうる KAM 構造は、単純な一方向流れに比べて遥かに複雑かつ多様な振る舞いを見せる。我々が対象とするのは、高 Γ 液柱で発現する $m = 1$ の位相モードである。

3. 粒子集合現象

3.1 粒子の不均一分布

通常、系内の対流状態を観測する際には、トレーサと呼ばれる粒子を用いる。これらは流体の運動

に対して十分な追従性をもつよう設計されており、圧力や速度、剪断といった“場”の情報を可視化するための手段として広く利用されている。しかし本現象では、回転振動流の条件下において、トレーサ粒子が期待される追従挙動から逸脱し、特異なパターンを示す。時間の経過とともに、これらの粒子は一定の軌道に沿って自己組織化し、最終的には紐状のコヒーレントな構造を形成する[6]。Schwabe et al. [7]は、この現象を粒子集合現象 (Particle Accumulation Structure, PAS) と名付けた。この現象は、結果的に粒子が空間的に不均一な分布を示す事で、可視化ツールとしては適さない状況をもたらす。一方で我々は、この“望ましくない現象”自体が、逆説的に学術的な興味と工学的な意義を備えた現象であると捉え直し、研究対象としている。

3.2 粒子の輸送機構

これまで液柱における PAS 発現機構に関しては、大きく分けて2つの物理モデルが提案されてきた。

3.2.1 Phase locking model

このモデルは Pushkin et al. [8]によって提唱されたものである。液柱内において粒子が軸方向にターンオーバー運動を行う。これに対して周方向に伝播する横断的な波が存在し、かつ粒子のターンオーバー運動の周波数と周方向波の周波数が可約な関係にあるとき、粒子群は空間的にコヒーレントな構造を形成する、というものである。このモデルで注目すべき点は、粒子が秩序ある構造を形成する主要因として、粒子に作用する“慣性”と“粘性抵抗”の相互作用に着目している点にある。一方で、KAM 構造との関連性については踏み込んでいない。

3.2.2 Particle-free-surface interaction model

このモデルは、Hoffmann and Kuhlmann [9]によって提唱されたものである。彼らは、軸方向および周方向という二つの主要な流れをもつ液柱内の対流場においても、KAM 構造が形成されうることを数値解析により示している。さらにこのモデルでは、粒子群のコヒーレント構造は、KAM 構造あるいはその周辺への粒子の集合によって形成されると考えられている。注目すべきは、PAS の発生要因として粒子の“慣性”には依存せず、粒子が持つ有限な大きさ、すなわち幾何的拘束に基づく相互作用が主要因であるとする点である。具体的には、粒子が自身の半径以上に自由表面へ近づくことはできないという仮定のもとで、粒子は特定の KAM 構造へ集

合しうるとされている。粒子は、自由表面との複数回の接触と反発を経て、機械的に KAM 構造もしくはその周辺へと輸送されると説明されている。

このように、異なる視点に立脚した 2 つのモデルはいずれも PAS 形成に関する重要な洞察を提供しているが、ここで本研究における最も本質的な課題が浮かび上がる。すなわち、KAM 構造の形成と、その際に系内に形成される速度場や温度場などの“場”の情報との間に、どのような相関関係あるいは因果関係が存在しているのかが、依然として明らかになっていないという点である。この未解明の関係性の解明こそが、我々の中心的な問いであり、KAM 構造という“秩序”とそれに対する粒子集合という“応答”とを結びつける鍵となる。

4. 実験

4.1 装置概要

図 3 に、実験装置の概略図を示す。本研究の対象系である液柱は、同径かつ同軸上に配置された上下ロッド間に、シリンジポンプを用いて試験流体を注入することによって形成される。上部ロッドは、液柱内の観察の必要性および加熱の条件を考慮し、人工サファイア製である。下部ロッドはアルミニウム製とし、その表面には黒アルマイト加工を施している。これは、腐食耐性や耐摩耗性の向上に加え、照明による不要な反射を抑制するためである。上部ロッドは温度コントローラーによってフィードバック制御されており、下部ロッドは恒温槽によって温度が一定に保たれている。このようにして上下ロッド間に温度差を印加することで、液柱内に温度差マランゴニ対流を誘起する。液柱内粒子の観察にあたっては、上部方向および側部方向に高速度カメラを

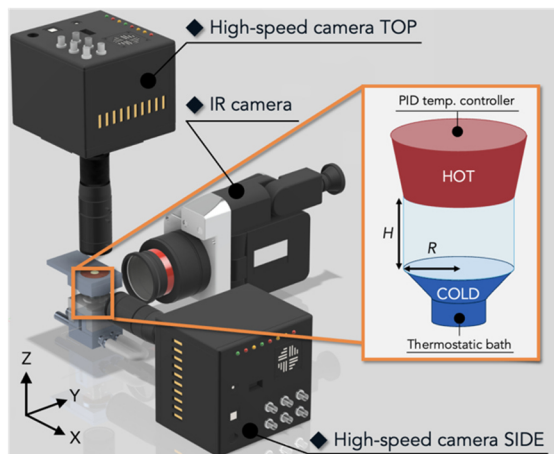


図 3. 実験装置

設置し同期撮影を行う。さらに側部方向には赤外線 (IR) カメラを設置した。液柱の周囲には外乱の影響を抑えるためのアクリル製シールドを設けている。このシールドにはフッ化カルシウム (CaF_2) 製の小窓を取り付け、IR カメラによる液柱表面温度の計測により、HTW 不安定性によって発現する自由界面の温度変動を捉えることを可能としている。系全体の観察は、光源として LED ライトを用いた。

4.2 実験条件

本実験では、高プラントル数流体である 2-cSt のシリコンオイルを使用した。試験粒子には、金コーティングアクリル粒子 (粒径: 10, 15, 30 μm) を用いた。光学的な視認性と流れへの追従性の両立を意識した選定である。液柱を保持する上下のロッドはいずれも直径 0.75 mm であり、ロッド間距離を変換することで、液柱のアスペクト比を任意に設定可能にしている。さらに、液柱内の対流に大きな影響を与えるパラメータとして、液柱の体積比 V/V_0 が挙げられる。ここで、 V は実際に形成された液柱の体積、 V_0 はロッド間距離とロッド径に基づく直円筒形状の体積を表す。体積比は、液柱形状が理想形からどの程度乖離しているかを示す指標であり、自由表面の湾曲や変形と密接に関連する。

4.3 粒子運動再構築法

液柱内を運動する粒子の三次元的な軌道を再構築するために、Particle Tracking Velocimetry (PTV) 法を用いた。ここで注意すべき点として、本実験では液柱内速度場を得ることを目的とせず、粒子運動の軌道そのものの構造的特徴を明らかにするために PTV 法を活用している。各実験において、追跡対象とした粒子はコヒーレント構造を形成する大多数から任意に選択する。上方視点画像および側方視点画像から各粒子の位置座標を特定することで、追跡および三次元再構築を可能としている。また、自由表面の変形が大きい条件下では、光学的屈折による観測誤差が無視できなくなる。このため、スネルの法則に基づく補正処理を導入し、粒子位置の再構築精度を確保した。等温条件を仮定した場合、補正による最大誤差は約 10 μm 程度である。

5. 回転振動流条件下における PAS 発生領域探索

Schwabe et al. [16] の先行研究により、体積比 $V/V_0 \sim 1$ の条件において、 $m > 1$ の位相モードに比べて、本実験の対象である $m = 1$ の対流場における PAS

の発現パラメータ領域は非常に限定されていることが示されている。一方、この体積比の制約を排除することで、先行研究によって示されたパラメータ空間より広い領域において PAS 形成を実現しうる。以下に示すマランゴニ数および体積比条件において、大別して2つのグループに分類できる PAS が発現する。この構造を外観的な特徴から、“螺旋構造を伴う構造 (PAS with a spiral)” および“螺旋構造を伴わない構造 (PAS without a spiral)” と呼称しそれぞれの特徴を紹介する。

5.1 螺旋構造を伴う構造 (PAS with a spiral)

表 1 に示した実験条件において、液柱内を運動する粒子が螺旋構造を伴うコヒーレント構造を形成する様子が確認される。この構造は、Sakata et al. [10]による宇宙実験、および Terasaki et al. [11]が実施した地上実験において報告されたものと同様のものである。

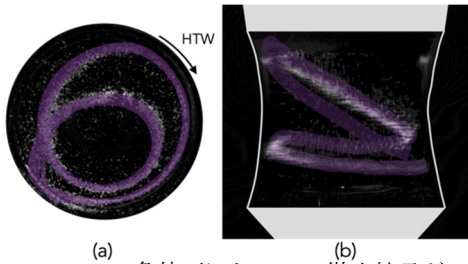


図 4. $\Gamma = 1.8$ の条件下において、微小粒子が PAS を形成する際のスタック画像。(a) 上部ロッド越しに観察した上面図、(b) 液柱のシールド越しに観察した側面図。“HTW”の矢印は、PAS の回転方向を示す。

表 1 螺旋構造を伴う構造が発現した条件

$\Gamma[-]$	$V/V_0[-]$	$\Delta T[K]$	$Ma[-]$	$d_p[\mu m]$
2.0	0.81	22	2.06×10^4	15
1.8	0.87	22	1.86×10^4	15
1.6	0.76	22	1.65×10^4	15
1.4	0.66	22	1.44×10^4	15
1.2	0.50	22	1.24×10^4	15

$\Gamma = 2.0 - 1.4$ の範囲において、一貫して類似した構造の形成が確認されている。代表例として、 $\Gamma = 1.8$ の条件下で確認された構造を図 4 に示す。加えてこの構造は、Capobianchi and Lappa [12]による数値解析において予測された液柱内の閉じた流線構造と形状的に極めて類似している。この一致は、実験においても液柱内に同様の流線が実在し、かつそれが粒子のアトラクタとして機能する可能性を示唆する。一方、表 1 に示す $\Gamma = 1.2$ の液柱においては、粒子群が液柱内を運動する中で異なる空間的位相を有する 2 つ螺旋構造としてコヒーレントな構造を形成する。この現象の詳細については、第 6.

2 節にてあらためて述べる。

5.2 螺旋構造を伴わない構造 (PAS without a spiral)

表 2 に示した実験条件において、液柱内を運動する粒子が螺旋構造を伴わない新規のコヒーレントな構造を形成する様子が確認された。

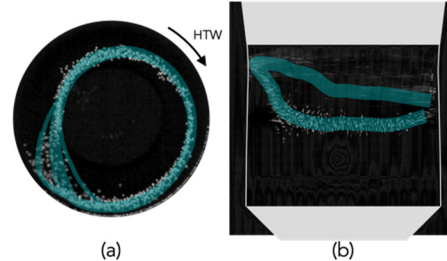


図 5. $\Gamma = 1.6$ の条件下において、微小粒子が PAS を形成する際のスタック画像。(a) 上部ロッド越しに観察した上面図、(b) 液柱のシールド越しに観察した側面図。“HTW”の矢印は、PAS の回転方向を示す。

表 2 螺旋構造を伴わない構造が発現した条件

$\Gamma[-]$	$V/V_0[-]$	$\Delta T[K]$	$Ma[-]$	$d_p[\mu m]$
1.6	0.98	41	3.45×10^4	30
1.5	0.99	41	3.23×10^4	30
1.4	0.90	41	3.01×10^4	30
1.3	0.92	41	2.80×10^4	30
1.2	0.89	41	2.58×10^4	30

$\Gamma = 1.6 - 1.2$ の範囲において、類似した構造の形成が確認された。その代表例として、 $\Gamma = 1.6$ の条件下で確認されたコヒーレント構造を図 5 に示す。この構造は、Barmak et al. [13, 14]による数値解析において予測された、液柱内の閉じた流線構造と形状的に極めて類似している。この一致は、実験系においても同様の流線が実在し、それが粒子アトラクタとしての機能を有する可能性を示唆する[15]。

今回紹介した PAS の発現領域に関するパラメトリック調査では、Schwabe et al.[16]において稀であるとされてきた、 $m = 1$ の位相モードを有する対流における PAS の発現条件を再検証し、それに対する新たな結果を提示した。液柱の体積比を任意に設定可能とした点が、PAS の形成に大きく寄与したと考えられる。図 6 に、PAS が発現したパラメータ領域を示す。この結果は、比較的狭い Ma 数領域において、KAM 構造が非常に繊細かつ非線形的にその形態を変化させる可能性を示唆している。

6. 異種粒子混合系における PAS の発現

PAS に関するこれまでの研究では、主に液柱内に単一条件の粒子を投入した系を対象としていた。しかし、化学や医学といった応用分野、あるいは将来的に想定される宇宙空間での長期探査活動におけ

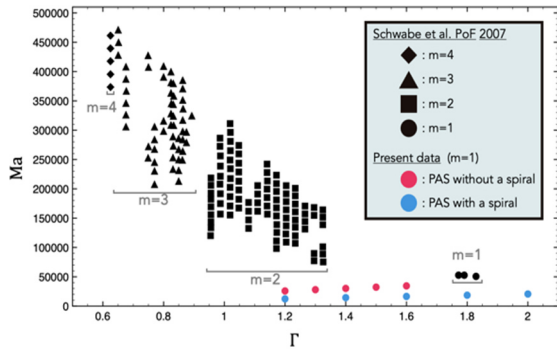


図6. Schwabe et al. [16]に基づき、 $Ma - \Gamma$ 平面上における PAS が十分に発達する領域を示す (黒いシンボル)。青および赤のシンボルは、本実験で PAS が確認された条件を示す。

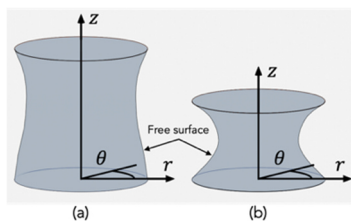


図7. 本研究で採用した2種類の液柱の模式図。(a) 参考文献[10, 11]で採用された従来形状、(b) 側面から見ると三日月上の輪郭を持つ凹型液柱。

る生命維持の相分離システムでは、異なる特性をもつ複数種の粒子が混在する状況のほうがむしろ一般的である。現実的な環境を想定するならば、多成分系における PAS の形成に焦点を当てることが不可欠であり、対流場が粒子に与える選択性や構造化の力を、多様な視点から捉える必要がある。

6.1 対象ジオメトリ

図7に従来形状の液柱および本章の実験で注目した液柱を示す。(a)は、Terasaki et al. [11]や Sakata et al. [10]によって採用された従来型の液柱形状であり、ここでは“straight liquid bridge”と呼ぶ。一方、(b)は $V/V_0 < 1$ の条件下にもかかわらず、側面から見ると大きくくびれた三日月形の輪郭を呈しており、これを“concave liquid bridge”と定義する。本実験で使用された液柱の詳細な情報について、表3にまとめる。ここでの検証の主眼は、異種条件粒子の混合系における PAS の発現にある。そのため、本章では $15 \mu\text{m}$ の粒子のみを用いた実験1と、 $15 \mu\text{m}$ および $30 \mu\text{m}$ の粒子を混合した実験2を実施した。

表3 対象系の詳細な条件

Name	$\Gamma[-]$	$V/V_0[-]$	$\Delta T[\text{K}]$	$Ma[-]$
Straight	2.0	0.81	22	2.06×10^4
Concave	1.2	0.50	22	1.24×10^4

6.2 粒子群運動

図8には、(a) 実験1および (b) 実験2で得られた粒子群の画像に、それぞれの構造から4つずつ選定した粒子を追跡し、その軌道を重ね合わせた可視化結果を示している。実験1および実験2においては、条件の異なる粒子ごとに軌道の色を2種類(緑、オレンジ)に分けて可視化している。実験1では本来 $15 \mu\text{m}$ の粒子のみを用いていたが、粒子が液柱内を運動する過程で、2つの粒子が二量体を形成し、単体とは異なるコヒーレント構造を構成する挙動を示す点は注目値する。そのため、二量体粒子を個別に追跡対象とし、色を区別して可視化している。実験1・2共通して、オレンジ色の構造は $15 \mu\text{m}$ の粒子によって、緑の構造は $30 \mu\text{m}$ および $15 \mu\text{m}$ が形成する二量体によって構成される (図9参照)。

Gotoda et al. [17]は、 $m=2$ のPASにおいて異なる粒径の粒子を混合すると対流場が乱され、粒子間の相互作用によって PAS が消滅することを実験的に示している。それに対し、本実験で観測された構造は、粒子の形状に関わらず粒径に応じて粒子が異なる位置に引き寄せられることを示している。図10

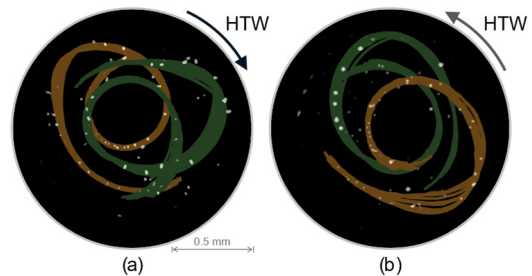


図8. 粒子軌道のスタック画像。(a) 実験1、(b) 実験2。各粒子条件で任意に抽出した4粒子の流跡線。

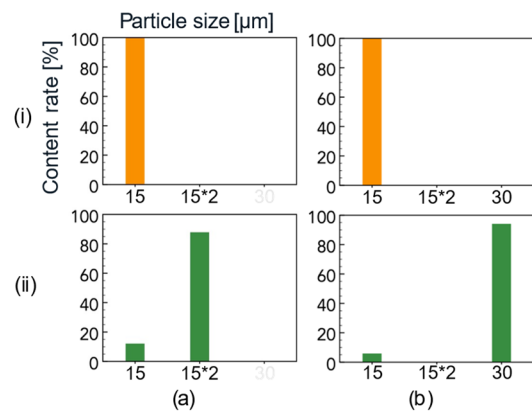


図9. (a) 実験1および (b) 実験2においてコヒーレント構造を形成した粒子の構成比率。色分けは図8および図11に示した構造に対応している。

に各実験における粒子軌道の鳥瞰図を示した．このとき形成される二つの構造は，空間的に位相がずれており，DNA が有する二重螺旋構造のように互いに干渉することなく共存する．

7. PAS が持つ振れと振れの構造

前章で言及した，実験 2 の $30\text{ }\mu\text{m}$ 粒子の軌道構造について，さらに詳細に検討する．図 11 には実験 2 で得られた緑の粒子軌道の包絡面を示している．視認性を高めるため，粒子軌道の包絡面は 2 色で描かれ，振れ構造が強調されている．包絡面はアルファベット順に A と B の 2 領域に分けられ，構造を形成する粒子は白抜きから赤塗りの記号へと移動する．領域 A では，構造が液柱内部の下部ロッド付近から自由表面近くの上部ロッドに向かって，外向きに約 1.5 回振れながら上昇する．その後，領域 B では内向きに半回ねじれつつ下降する．ただし，領域 A の終点と B の始点との間には観察できない領域があり，包絡面の連続性は確認できない．さらに，上部ロッド近傍の自由表面付近では，構造が方位角方向に伸びる様子が確認され，この特徴は粒子軌道のポアンカレ断面[15]にも対応している．数値解析によって KAM が呈する振れた構造は，位相モード $m=3$ で示されている [18]が，その空間的特性について深い議論はなされていない．本結果は，実験による粒子の高精度追跡により，熱対流場中に形成される KAM 構造の特徴を抽出する可能性を示唆している[19]．

8. まとめ

本稿では，液柱系における KAM 構造の形成について，実験的に得られた知見に基づいて紹介するとともに，著者らが初めて明らかにした粒子軌道の「振れ」構造と，それに対応する KAM 構造の持つ複雑性について述べた．また，著者らが注目する $m=1$ の対流構造を有する液柱において，PAS の形成領域をパラメトリックに検証した結果，これまで極めて限定的とされてきた形成領域が，実際には広範な条件下で発現することを示した．

PAS は，単に粒子が秩序を持って集まるという静的な現象にとどまらない．むしろ，対流場に内在する構造的な要因によって粒子が配置され，その軌道を通じて空間構造を“描写する”という過程に本質的な意義があると捉えられる．PAS とは，構造と粒子の対話の痕跡のように感じられる．ここに現象の

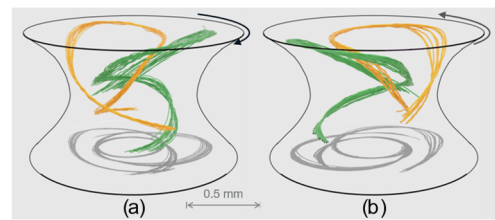


図 10. 三次元再構築された各粒子が呈する軌道構造の俯瞰図．(a) 実験 1，(b) 実験 2．

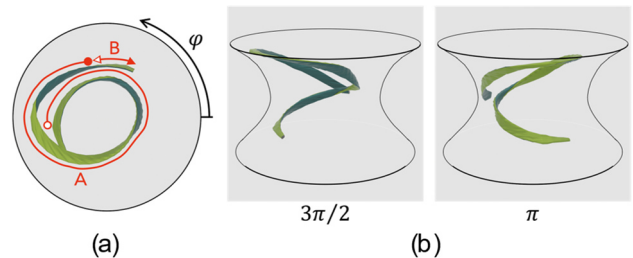


図 11. 粒子軌道の包絡面．(a) 上面図，(b) 俯瞰図．粒子は点 A から点 B に向かって移動し，白抜き記号から赤塗り記号へ遷移する．

魅力と造形美が見出される．

今後の課題としては，この“構造の選択性”がどのような場の変化に応答して現れるのか，また KAM 構造が有する粒子運動への影響をより詳細に解明することで，流れと粒子の関係性が持つ普遍性と多様性の両面を浮かび上がらせる必要がある．

参考文献

- [1] H. Wu, F. Romanò, H. C. Kuhlmann, *PAMM* **17** (2017), 669–670.
- [2] H. Wu, F. Romanò, H. C. Kuhlmann, *J. Fluid Mech.* **955** (2023), A16.
- [3] F. Romanò, A. Hajisharifi, H. C. Kuhlmann, *J. Fluid Mech.* **825** (2017), 631–650.
- [4] M. K. Smith, S. H. Davis, *J. Fluid Mech.* **132** (1983), 119–144.
- [5] F. Preisser, D. Schwabe, A. Scharmann, *J. Fluid Mech.* **126** (1983), 545–567.
- [6] S. Tanaka, H. Kawamura, I. Ueno, D. Schwabe, *Phys. Fluids* **18** (2006), 067103.
- [7] D. Schwabe, P. Hintz, S. Frank, *Microgravity Sci. Technol.* **9** (1996), 163–168.
- [8] D. O. Pushkin, D. E. Melnikov, V. M. Shevtsova, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011), 234501.
- [9] E. Hofmann, H. C. Kuhlmann, *Phys. Fluids* **23** (2011), 072106.
- [10] T. Sakata, S. Terasaki, H. Saito, S. Fujimoto, I. Ueno, T. Yano, K. Nishino, Y. Kamotani, S. Matsumoto, *Phys. Rev. Fluids* **7** (2022), 014005.
- [11] S. Terasaki, S. Sensui, I. Ueno, *Int. J. Heat Mass Transf.* **203** (2023), 123772.
- [12] P. Capobianchi, M. Lappa, *J. Fluid Mech.* **908** (2021), A12.
- [13] I. Barmak, F. Romanò, H. C. Kuhlmann, *PAMM* **19** (2019), e201900058.
- [14] I. Barmak, F. Romanò, H. C. Kuhlmann, *Phys. Rev. Fluids* **6** (2021), 084301.
- [15] S. Noguchi, I. Ueno, *Phys. Rev. Fluids* **8** (2023), 114002.
- [16] D. Schwabe, A. I. Mizev, M. Udhayasankar, S. Tanaka, *Phys. Fluids* **19** (2007), 072102.
- [17] M. Gotoda, D. E. Melnikov, I. Ueno, V. Shevtsova, *Chaos* **26** (2016), 073106.
- [18] F. H. Muldoon, H. C. Kuhlmann, *Physica D: Nonlinear Phenom.* **253** (2013), 40–65.
- [19] S. Noguchi, I. Ueno, *J. Colloid Interface Sci.* **684** (2025), 29–42.

生体周りの伝熱と快適性の定量化

Heat transfer in vicinity of humans and their comfort

島崎 康弘 (豊橋技術科学大学)

Yasuhiro SHIMAZAKI (Toyohashi University of Technology)

e-mail: shimazaki@ace.tut.ac.jp

1. はじめに

これから本格的な夏を迎えるが、観測史上で最も暑くなった近年の猛暑の夏は記憶に新しい。日本の暑熱環境は、地球の温暖化に加えて都市化による温暖化（ヒートアイランド）により、年々厳しさを増しているといわれる。災害級ともいわれる暑熱環境においては、スポーツなど屋外の激しい活動ならずとも、労働現場や日常生活の場においても暑熱リスクが増大している。我が国では暑熱ストレスについての注意喚起が盛んにおこなわれている一方、熱中症と同等以上に低体温症など寒冷ストレスによる死者数も報告されていることも忘れてはならない。

筆者らは、厳しい夏冬や変わりゆく気候においても工夫により我々の体感する環境は変えることはできるとの思いから、より人の適応にフォーカスした取り組みを行っている。本報では、環境中における安全性まで広い意味でとらえた快適性の観点から、人体そのものやその周囲の伝熱現象をみてみたい。

2. 快適性と伝熱

2.1 快適性とは

快適性とは人間がどれほど快適と感じるかを示すもので、様々な場面・対象に対して使われている。伝熱誌ということで、ここでは主に温熱的快適性の物理的観点に限定すると、ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers アメリカ暖房冷凍空調学会) では温熱快適性を熱的環境に満足を表す知覚の程度、また暑くも寒くもない熱的中立に近い状態と定義している[1]。筆者らも被験者実験を行い図1のような関係性を得ている[2]。ここで、横軸は温冷感（-3：寒い～+3：暑い）、縦軸は快適感（-2：不快～+2：快適）である。熱的中立を示す横軸0付近では個人差の影響もあり申告にばらつきがあるものの快適の申告となり、そこを基準に寒くても暑くてもほ

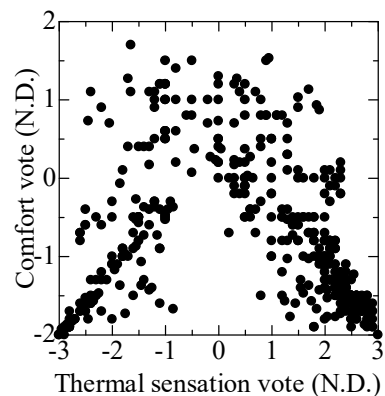


図1 温冷感と快適性の関係

ぼ線形的に快適感が悪化する。

ヒトは恒温動物であり、深部温を37℃程度に保つ体温調節機能が備わっている。下図2は、環境温度に応じた生理・物理的反応の概念を示したものである[3]。一般に物体は、加熱または冷却されると、そのエネルギー量と熱容量に応じて温度上昇または温度低下する。一方でヒト（だけではないが）は、例えば、周囲温が上昇すると皮膚温が上昇することで温度差を確保し対流熱移動しようとするが、この

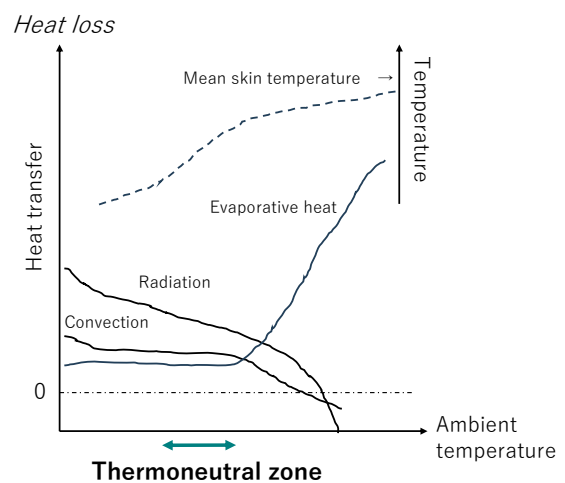


図2 人体周囲の伝熱と環境条件

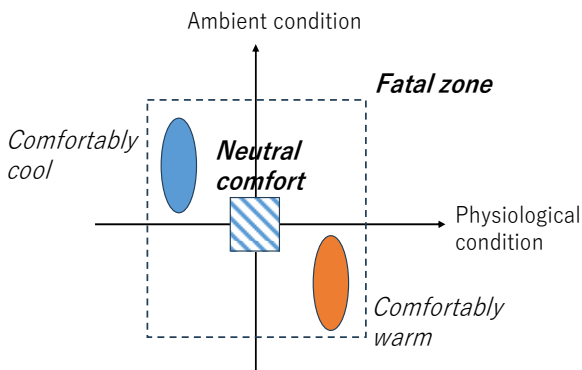


図3 環境条件と快適性の関係

ような乾式放熱が限界に達すると我が身の水分を削って発汗放熱（物質移動）も始まる。逆に、周囲温度が下がると皮膚温も低下し、さらにふるえ運動することで熱産生を行い身体の温熱状態を維持しようとする。対流・ふく射による放熱は体温と環境温が同じときは0となる。発汗やふるえ熱産生などの労力をともなう体温調節反応を必要としない環境温度の範囲である熱的中性域で快適と感じやすい。

図3は、 x 軸に人体生理状態、 y 軸に周囲環境をとった久野らの2次元温冷感モデルを参考にした概念図である[4]。わかりやすく単純化すれば、 x 軸は身体の熱い（+側）/冷たい（-側）、 y 軸は気温が高い（+側）/低い（-側）といったイメージである。快適性には、熱的中立な狭義の快適範囲と致死域とを隔てる安全基準など広義の快適範囲がある。

乾は、このような不快を取り除いた状態を消極的快適性、不快でない状態をより心地よくする積極的快適性と区別した[5]。快適という言葉において、前者は「適」であり、後者は「快」と説明した。また、消極的快適から積極的快適への過渡には暑くても快適、寒くても快適ということも生じうる。

なお、快適性の感じ方には個人差もあることから、ISO7730においては、環境への不満足者率が10%以下であることを快適推奨域としている[6]。

2.2 快適方程式と人体熱収支

先によれば、熱的快適のためにはヒトは代謝として体内で産生した熱を適度に周囲環境へと逃がし熱平衡（バランス）を保つことが求められる。この基本的な概念はFangerの快適方程式（Fanger's comfort equation）と呼ばれ、ASHRAEやISOの規格として広く活用されている(式(1))[7]。

$$f(Met, clo, T_{amb}, T_r, \phi, v) = 0 \quad (1)$$

ここで、 Met は代謝量、 clo は着衣量、 T_{amb} は空気温度、 T_r は放射温度、 ϕ は湿度、 v は気流をそれぞれ示し、これらの要素は人体の快適性に影響の大きな温熱環境六大要素と呼ばれる。

具体的にはその熱バランスである人体熱平衡式は以下の式(2)の形で表現される。

$$M - W = E \pm R \pm C \pm S \quad (2)$$

ここで、 M は代謝による熱産生量、 W は機械的な外部仕事、 E は潜熱放散量、 R は放射による顕熱放散量、 C は対流による顕熱放散量、 S は体内蓄熱量であり、ここでの右辺の符号+は放熱を意味する。 S における±は体温の上昇/下降により調整され、定常状態においては通常0となる。

人体は活動強度に応じて、体内の栄養分を消費して熱エネルギーと仕事を得る（左辺）。ここでは体温調節や生体内の伝熱には触れないことにするが、安静状態で白熱球一つ分の100W程度となる。 E, C による人体から環境への熱放散は、基本原理は熱・物質移動により表現できる。例えば、

$$C = h_c(T_{skin} - T_{amb}) \quad (3)$$

ここで、 h_c は対流熱伝達率、 T_{skin} は皮膚温を示す。一般には、人体と周囲環境の間の伝熱は質点的に考えられる。とりわけ、人体側温度は代表温度体表面積における比率を用いて平均皮膚温が定義され、Hardy-DuBoisによる解剖学的主要部位7点（頭（顔）、腕、手、腹、大腿、下腿、足）を用いたものが常用される[8]。

$$T_{skin} = 0.07T_{forehead} + 0.14T_{arm} + 0.05T_{hand} + 0.35T_{abdomen} + 0.19T_{thigh} + 0.13T_{leg} + 0.07T_{foot} \quad (4)$$

実際には C の成分には皮膚表面から伝熱のほか呼吸にともなう熱放散も含まれるが、簡単のためここでは割愛する。 E に関して、皮膚からの潜熱放散は顕熱と潜熱移動のアナロジーを用いる。

対流熱伝達率に関して、気流および人体の動きによる相対的な強制対流が支配的である。実験的に、風速の1次関数や累乗として表現されるが[9]、生活環境を考慮すると比較的その風速範囲が限られることから同程度の値となっている。なお建築分野ではJürgesの式が比較的よく用いられる。また、被験者実験によれば、風向による体感への影響は見られないようである[10]。

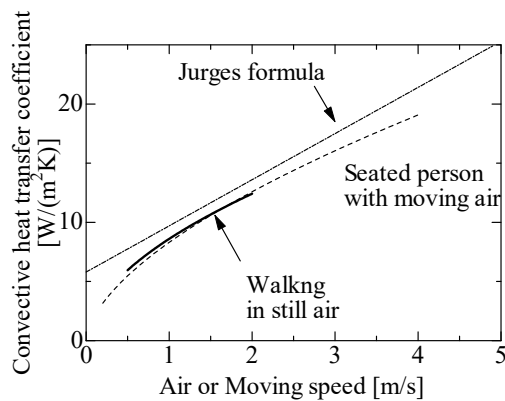


図4 人体の対流熱伝達率

R に関して、太陽放射による短波成分 R_{sh} とその他の長波成分 R_{ln} に分けて以下となる。

$$R = (1 - \alpha_{skin})R_{sh} + \varepsilon_{skin}(R_{ln} - \sigma T_{skin}^4) \quad (5)$$

ここで、 α は日射吸収率 (~ 0.3)、 ε は赤外放射率 (~ 0.98) である。

以上を踏まえて数的な理解のため、一例として筆者の行った実験より熱バランスをあげると図5のようになる。

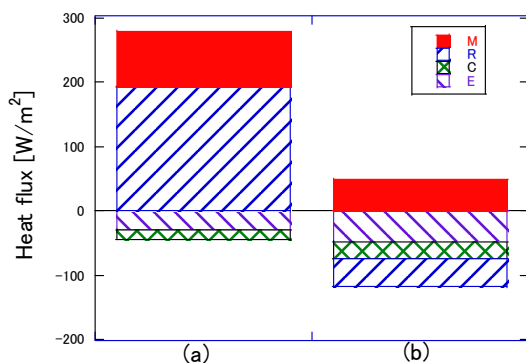


図5 人体熱収支の内訳例

(a)は夏季の屋外(立位, 気温 33 °C, 湿度 53%R.H., 風速 0.8 m/s, R_{sh} 585 W/m², R_{ln} 520 W/m²), (b)は空調空間のいわゆる快適域(座位, 気温 25 °C, 湿度 45%R.H., 気流 0.1 m/s)の被験者実験に基づく値である[11].

実際には、人体各部の対流熱伝達率を求めた例や数値人体熱モデルにおいて人体各部の体温予測をするマルチノードモデルの例、部位の局所的な温熱状況が全身の快適性与える影響を調査した例などもある。

2.3 着衣の効果

温熱環境六大要素の着衣は、他の要素と関連して少し複雑に作用する(図6)。人体は着衣をまとうことで人体近傍には断熱性の高い静止空気を有する微気候が形成され、周囲環境と人体との間で熱的な緩衝材となる。この微気候における熱移動は伝導、対流、ふく射を介して行われるが、便利のためこれらをひとまとめにし、着衣性能を表す着衣量(Clo value)として一定環境(着座人体・皮膚温 33 °C, 気温 21 °C, 湿度 50%R.H., 気流 0.1 m/s)における断熱性能として実験的に決定されている[12].

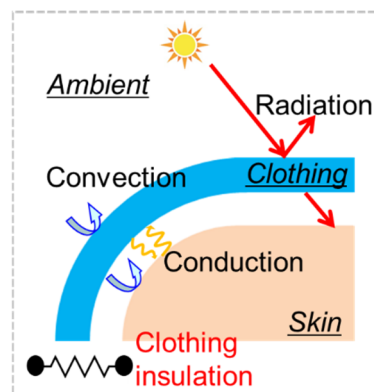


図6 衣服を介した伝熱

この着衣量を用いることで人体と環境との間に置き換えることができる。例えば、この総合的な着衣の熱抵抗値 R_{cl} を用いると、顕熱輸送に関して以下とできる。

$$C + R = \frac{T_{skin} - T_o}{R_{cl} + 1/h_{fcl}} \quad (6)$$

$$T_o = \frac{h_r T_r + h_c T_{amb}}{h_r + h_c} \quad (7)$$

$$h = h_r + h_c \quad (8)$$

ここで、 f_{cl} は人体と着衣人体との表面積比率(増分)を表す係数(clothing area factor)であり、環境は作用温度 T_o を用いる。なお、 h_r はふく射熱伝達率であり、 T_r は周囲環境の(仮想的な)表面温度である。

微気候の大きさが小さいときには熱移動形態は伝導が支配的であり、一定程度の大きさを越えると対流により放熱が活発なことが示されている[13].

3. 着衣人体モデルにおける伝熱

従前の着衣の取り扱いにおいて、伝熱は人体ー環

境の間の質点的なものであり、着衣内の詳細な現象は考慮されていない。一方で、着衣と人体との間には外部環境に直接的に影響を受けない微気候（空気温度・湿度、気流）が生まれ、これを衣服内気候（Clothing microclimate）と呼んでいる。以下では、より現実的な着衣人体における事象を見てみたい。

人体形状は伝熱的によく円柱状に近似され、筆者らはこの垂直円柱モデルを用いて着衣人体周囲の現象論の理解を試みている[14]。一例として、厚さ 0.002 m、高さ 0.2 m、幅 0.3 m の寸法を持つ発熱体を人体に見立て、同心円状に衣服形状を模擬した外管は厚さ 0.0005 m の軟質 PVC（ポリ塩化ビニル）シートを用いて作成し、円筒形ヒーターを囲うことで着衣人体形状を模擬した。着衣の違い、つまり空気層厚さの違いによる熱伝達特性への影響を調査するため、空気層厚さは 10, 20, 30 mm と変化させた。モデルの概要は図 7 となる。なお、着衣下の空気層厚さなど形状に関しては、3D ボディスキャンを通して決定している。

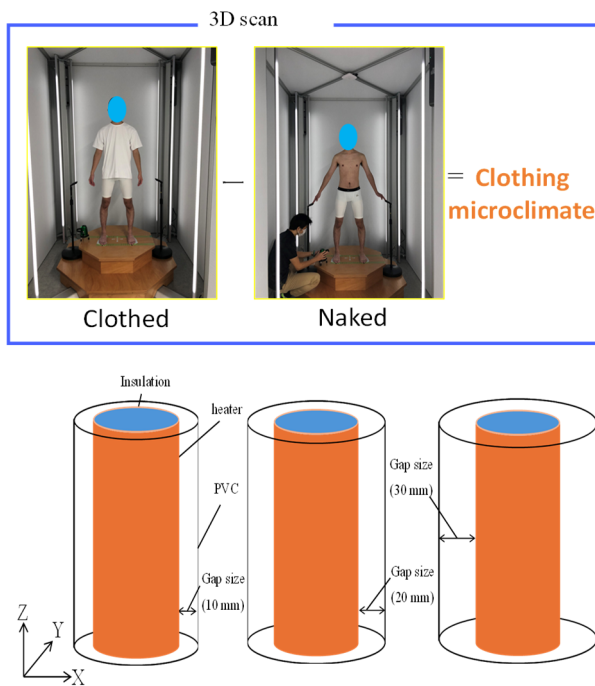


図 7 垂直円柱による着衣人体モデル

衣服内ということで人体生理発熱を駆動力とする気流を考え、着衣量測定と同条件にて、衣服内微気候を含んだ自然対流現象を定式化する。ここで、水力直径 D_H を代表長さとした平均ヌセルト数 Nu と修正レイリー数 Ra^* によって熱伝達特性を整理

すると、図 8 および近似的に式 (9) ($|r| = 0.93$) を得た。

$$Nu = \frac{q_{conv} D_H}{\lambda(T_{skin} - T_{amb})} = 0.68 Ra^{*0.25} \quad (9)$$

$$Ra^* = Gr^* Pr \quad (10)$$

$$Gr^* = \frac{g \beta q_{conv} D_H^3}{\nu^2 \lambda} \frac{D_H}{L} \quad (11)$$

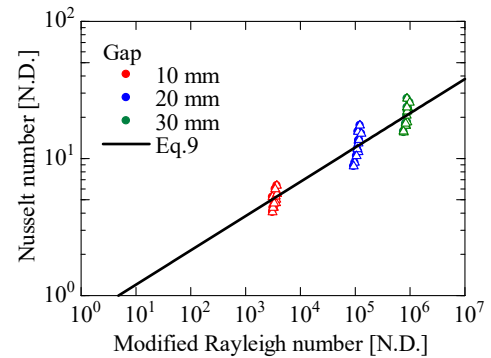


図 8 着衣人体の対流熱伝達特性

ここで、 g は重力加速度、 β は流体の体膨張係数、 q_{conv} は人体からの対流による熱流束、 ν は流体の動粘性係数、 λ は流体の熱伝導率、 L はモデル高さである。 q_{conv} は表面に張り付けた熱流束計で測定した熱流束から、ふく射による熱流束を減ずることで算出した。 Pr はプラントル数であり 0.71 程度である。

また同時に PIV を用いて衣服内気候の流速分布測定を得ることができる。なお本モデルでは、着衣素材の気孔を介した熱および流体移動は考慮していない。例えば上端部での流速分布は図 9 となる。

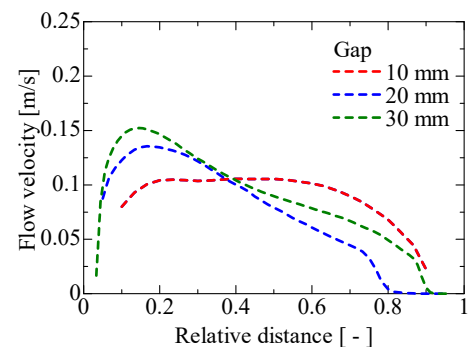


図 9 異なる着衣空隙における流速分布

さらに、開口からの流速をもとに、円周方向に流速を積分することで衣服内外の換気量 Q を求めることができる。空気層厚さを大きくすることで衣服

内の換気流量 Q は増加する傾向が見られ、例えば、空気層厚さが 10 mm から 30 mm へと増加することで、換気量は 3 倍程度増加した。

衣服内の換気に伴う衣服内気候内外の直接的な顕熱損失量 V を考慮し、定常状態を仮定することで、人体熱平衡式(2)は以下の式(12)のようにできる。

$$M - W = E \pm R \pm C \pm V \pm S \quad (12)$$

衣服内の気流に伴う顕熱損失量 V は換気量 Q を用いて式(13)となる。

$$V = \frac{\rho C_p (T_{gap} - T_{amb})}{A} \quad (13)$$

ここで、 Q は衣服内の換気量、 C_p は流体の比熱、 T_{gap} は衣服内の空気温度、 A は体表面積、 ρ は流体の密度である。

ここで、着衣性能評価と同環境にて人体熱平衡式(12)における構成因子ごとの熱損失量を図 10 に試算してみる。

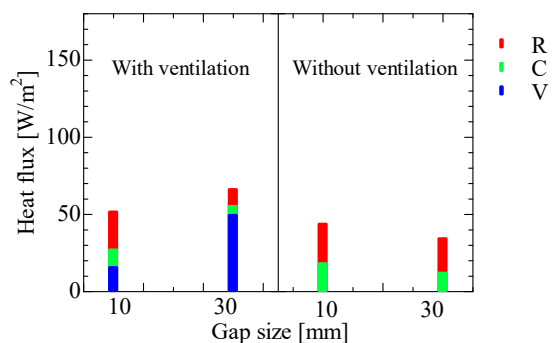


図 10 着衣内換気の有無による熱収支内訳

空気層厚さを 10 mm から 30 mm に増加させることにより、空気層厚さの増加に伴う衣服内換気量が増加し、 V も同様に増加した。衣服内の換気に伴う顕熱損失量は 3 倍程度に増加し、発熱量のおよそ 55% を人体表面から周囲環境へ直接排出させることが可能となる。一方で衣服内気流を考慮しないと、空気層により断熱され放熱量は減る結果となる。実際、衣服内の対流熱放散の増大が期待できるといえる。暑熱期に開襟やルーズフィットの着想にすることで涼を得ることの合理性を示すものである。

我々は置かれた環境自体を変えることは難しいが、このように着衣・着想を工夫することで自身の身近な快適性を即効性をもって調整することができる。この考えがクールビズやウォームビズのコンセプトとなっている。実際、繊維やアパレル業界で

はこの微気候の快適性向上を目指して素材や製品開発が行われている。筆者らもプロトタイプ of 被服や帽子などを用いて被験者実験や数値計算を行うことで、物理的かつ感覚的にも快適が実現できる設計を行っている[15]。

なお、今回深く触れなかったが、着衣量は室内環境にて実験的に求められるため、日射などふく射の影響を十分に考慮しきれていない。着衣素材の日射特性の把握に基づく試みも数々行われていることには触れておきたい。

4. おわりに

人体という一発熱体のおかれた環境の熱的状態を定量的に評価し、また安全や快適な環境を創造するために必要な物理的な理解を進めたつもりである。屋外においては着衣の工夫は重要な快適性向上の戦力となる。また、建物内に目を移すと、滞在者・利用者が感じるさまざまな快適さを提供するために、空調をはじめ実に様々なサービス（設備）によりエネルギーが消費されている。温室効果ガス排出削減目標達成や 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて様々な取り組みが行われるなか、我が国のエネルギー消費量の約 3 割を占める建築物分野において、どう快適を創るかは重要な課題といえる。より良い環境を最小限のエネルギー使用により達成することを使命としてエビデンスを伴った取り組みを進めていきたい。

参考文献

- [1] ASHRAE, ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE (2023)
- [2] Shimazaki, Y. et al., Application of human thermal load into unsteady condition for improvement of outdoor thermal comfort, Build. Environ, 46 (2011) 1716-1724.
- [3] 山蔭道明, 体温のバイオロジ, メディカルサイエンスインターナショナル (2005).
- [4] 久野寛, 温熱環境における快適性— Comfort と pleasantness, 基礎心理学研究, 18-1 (1999) 102-106.
- [5] 乾正雄. やわらかい環境論, 海鳴社 (1988).
- [6] ISO, ISO7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and

- interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO (2005).
- [7] Fanger, P.O., Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press (1970).
- [8] Hardy, J.D., DuBois, E.F., Soderstrom, G.F., The Technic of Measuring Radiation and Convection: One Figure, J. Nutr. 15-5 (1938) 461-475.
- [9] ASHRAE, ASHRAE Handbook: Fundamentals, ASHRAE (2021).
- [10] Shimazaki, Y. et al., Thermal responses and perceptions under distinct ambient temperature and wind conditions, J. Therm. Biol., 49-50 (2014) 1-8.
- [11] Shimazaki, Y. et al., Experimental determination of pedestrian thermal comfort on water-retaining pavement for UHI adaptation strategy, Atmosphere 12-2 (2021) 127.
- [12] ISO, ISO9920 Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, ISO (2007).
- [13] Xu, J., et al., Numerical investigation of the effect of clothing air gap distribution and environmental air speed on dry heat transfer underneath clothing, Int. J. Heat Mass Transf., 198 (2022) 123400.
- [14] 井原ら, 衣服内気流が人体熱収支に及ぼす影響, (空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会 (2025)).
- [15] Shimazaki, Y., et al., Clothing strategies on thermal adaptation for outdoor summer heat, 6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (2023).
-

垂直平板自然対流乱流境界層の相似則

*On the similarity of turbulence natural-convection
boundary layer along a vertical plate*

服部 康男（電力中央研究所）

Yasuo HATTORI (Central Research Institute of Electric Power Industry)

e-mail: yhattori@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

本稿は、マルチスケールの対流を取り扱う特集の中で、機械工学分野での自然対流伝熱の歴史と発展に関する網羅的なレビューをいただけないか？とのお話を踏まえて執筆したものとなる。自然対流伝熱に関する既往研究への体系的理解は、自分にとって、いつか挑戦したい課題であり即時快諾した。だが、実際に書き始めてみると、先人たちによる数多くの偉大な成果を前にして、快諾への若干の後悔とともに、そのような成果の俯瞰への力不足を痛感した。そのため、大変心苦しい話だが、以下では、レビューの対象を自身による実験経験もある垂直加熱平板周りに発達する自然対流乱流境界層に絞ることとした。特に、特集のキーワードである、マルチスケールに親和する「相似則」に主眼を置き、関連研究を紹介したい。

なお、本稿では、レビュー対象外とした種々の体系の自然対流伝熱についても、学術的・工学的な重要性から多くの研究が行われている。機械工学分野で進められている電子機器の冷却性能向上に関する層流伝熱の制御のほか、建築分野においては、居住室内（閉空間内）での自然対流伝熱も研究対象となる。水平平板間で形成される Rayleigh-Bénard 対流や火山噴火による上昇ブルームは、気象・地球流体力学に関連する研究者も現象解明を進めている。このような種々の自然対流伝熱について、自然対流の伝熱現象が、体積力（浮力など）を駆動力とすることから、加熱・冷却面など温度場・密度場の発生源の姿勢や幾何形状に強く依存する特性を踏まえて、それぞれがレビューの主題となりうる。より広範な視点からの議論については、既存のレビュー論文（例：文献[1]）や、本誌『伝熱研究』および『伝熱』における過去の関連特集号（例：文献[2]-[9]）などを参照されたい。



写真1 本学会の40周年、50周年時に配布された「伝熱研究」、「伝熱」および「伝熱シンポジウム講演文集総覧」のCD

2. 垂直平板自然対流乱流境界層の流動・伝熱様式

まず、本稿で対象とする垂直加熱平板に沿って発達する自然対流乱流境界層の伝熱および流動様式を概説したい。乱流自然対流の代表的な解析手法であるラージ・エディ・シミュレーション (LES) の結果を活用する。LES では、OpenFOAM ベースの FireFOAM ソルバーを用い、温度依存の物性値（密度、粘性係数、熱伝導率など）を直接的に考慮した。離散化手法には有限体積法を適用した。303 K の空気中に、高さ 4 m、幅 1 m の鉛直平板を配置し、その表面温度を 348.45 K に加熱した後に、時間と空間の両方向に発達する自然対流境界層の発達過程を対象とした。

図1に、加熱面に正対する加熱面ごく近傍の高さ 4 m × 幅 1 m 領域における流体温度の瞬時値分布を示す。暖色系が高温域、寒色系が低温域を表している。なお、図の視認性を高めるため、重力方向は右から左となるように配置している点に留意されたい。加熱開始から 10 秒後の結果を例示した。加熱面下端（図中左端）から、加熱面幅方向（ x 軸方向）への一様性を有する規則的な高温・

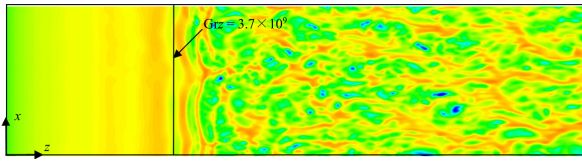


図1 LES で得られた壁面近傍断面内瞬時温度分布

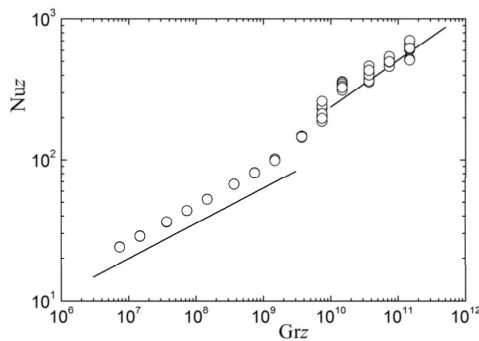


図2 局所 Nusselt 数と局所 Grashof 数との関係

低温域による波状構造が形成される．この準層流に相当する状態から，弓形への変調とともに波状構造が崩壊し，乱流状態に移移する．

乱流への遷移条件も含めて，自然対流境界層の状態を推定する無次元数として，Grashof (Gr) 数もしくは Rayleigh (Ra) 数が用いられる．Gr 数は浮力と粘性力との比であり，それに動粘性係数と温度拡散係数との比である Prandtl 数を乗じたものが Ra 数である．乱流遷移を与える Ra 数は 10^9 程度となる．層流から乱流への遷移に伴う熱伝達率の急増など，境界層の状態は伝熱様式に影響する．LES で得られた局所熱伝達率 h に関する無次元数である局所 Nusselt 数 Nuz と局所 Grashof 数 Grz との関係を図2に示す．実線にて，Tsuji and Nagano [10]による平衡・定常状態に対する実験式（層流・乱流条件）を併記した．実験式と比較して，LES で得られた Nuz は，全般に大きい値となるが，層流から乱流への遷移による急増およびこの急増を導く Grz の値に整合を与える．

ここで，Tsuji and Nagano [10]による実験式において，局所 Nusselt 数 Nuz が局所 Grashof 数 Grz の $1/3$ 乗に比例することを強調したい．熱伝達率に関する評価式は，数多く提案されているが，その多くが， $1/3$ 乗則“ $Nuz \propto Grz^{1/3}$ ”を支持する（例：文献[11]）．この $1/3$ 乗則は， Nuz と Grz の定義(Nuz

$= hz/\lambda$; λ : 熱伝導率, $Grz = g\beta\Delta Tz^3/\nu^2$; g : 重力加速度, β : 体膨張係数, ΔT : 加熱面と周囲空気との温度差, ν : 動粘性係数) から明らかのように，自然対流乱流境界層の熱伝達率 h が，スケール (z) に依存しないこと，すなわち， $h \propto z^0$ ，を意味する．伝熱機構のスケールに依存しない普遍性を示唆するものともいえる．この関係式の一般性・堅固性の把握や伝熱機構の普遍性への理解深化において，高 Ra 数 (Gr 数) 条件下への知見の蓄積が肝要となる．次に，高 Ra 数条件下への知見の蓄積を目指した研究を，アプローチに基づき，理論，数値実験，物理実験に大別して述べる．

3. 高 Ra 数条件での相似則に関する検討

3.1 理論的アプローチ

このような研究では， $Ra \sim 10^{10}$ 程度の乱流状態にある垂直平板自然対流境界層を対象とした物理実験や計算コストの抑制が可能なチャンネル体系の数値実験 (Direct Numerical Simulation, DNS) に基づき，伝熱素過程を照査するための物理モデルを構築している．既存の実験で得られた乱流統計量の境界層内分布への整合を確認しつつ，高 Ra 数条件下での Nu 数や乱流統計量の変調を推定する．文献[12]では，主流方向の流速の時間平均値の自然対流境界層内での分布に着目し，時間平均値が最大となる点を境界に，それより加熱面側 (内層) と境界層縁側 (外層) とをそれぞれ異なる数理で記述する2層モデルを提唱している．高 Ra 数での相似則を調査し，乱流モデリングでも重要な知見となる壁関数の普遍性を言及している．文献[13]では，2層モデルの概念を活用し， Nu 数と Ra 数との間に $1/3$ 乗則が成立する要件として，境界層の駆動が浮力支配であることを同定した．さらなる Ra 数の増加が，せん断支配への移行とともに $1/2$ 乗則への変化を導くことを予見している．相似則の議論で重要となる特性量の選定について，物理実験に基づき精査した研究も報告されている[14]．

チャンネル体系を対象としているが，水平加熱平板周りの自然対流である Rayleigh-Benard 対流に対して構築されている Grossmann-Lohse (GL) 理論を，垂直自然対流乱流境界層に展開する試みも報告された[15]-[17]．境界層とバルク領域とを大別する数理モデルの整備，DNS との比較によるモ

デル検証の後、局所 Nusselt 数と局所 Rayleigh 数との間に成立すべき乗則を推察した。局所 Rayleigh 数が 10^{11} を超えたときに、いわゆる *ultimate regime* (極限領域) に至るとした。また、境界層の状態を表す指標として、流束ベースの Richardson 数を提案し、この指標に基づく乱流組織構造の代表スケールの整理も試みている。高 Ra 数条件下での局所 Nusselt 数は、局所 Rayleigh 数の約 $1/3$ 乗 (0.32 乗) で整理されるものとした。一方、近年の論文[18]では、垂直平板自然対流乱流境界層においても *ultimate regime* の存在が示唆されている。局所 Nusselt 数と局所 Rayleigh 数との間に、 0.381 乗則が成立することを示唆している。

これらの研究において、Rayleigh 数の増加とともに、境界層が浮力支配からせん断支配へ移行することで、内層での乱流構造や伝熱機構に関連する素過程に変調が現れるとする点には共通認識が得られている。しかしながら、伝熱に関する基本パラメータである Nusselt 数について、Rayleigh 数との関係には合意が得られていない。内層での乱流構造への精査に必要な実験データの蓄積とともにさらなる調査・研究が望まれる状況といえる。

3.2 エルゴート性を活用した数値実験

前節でもふれたとおり、垂直加熱平板自然対流の DNS は、内部流であるチャンネル体系のものが先行していた。これは、外部流を取り扱う際に必要となる計算負荷や境界条件の取り扱いなど、数値解析上の技術課題のためと考えられる。この課題を克服する手法の一つとして、現象のエルゴート性を活用した DNS 手法が提唱された[19, 20]。時間と空間との互換性を担保するパラメータを導入し、時間発展を対象に実施した DNS を用いて空間発展の結果を得るものである。これにより、計算に関わる要件をメモリー容量から計算時間に置き換えることができるため、高 Ra 数条件の DNS を容易とした。このアイデアに基づき構築された DNS 手法は、文献[21], [22]などの後続研究にも採用されており、乱流遷移機構の解明や新たな壁関数の提唱にもつながっている。

なお、この DNS 手法は、線形安定性理論より得られる中立曲線と実験で得られる乱流遷移条件との差異に関する検討において、副次的に産まれたものであった。線形安定性理論では、付与した微

小擾乱の時間発展から境界層の安定性を同定する。ここで得られる擾乱の発達を与える最も小さな Rayleigh 数 (critical Rayleigh 数) が、実験で報告されている乱流遷移時の Rayleigh 数とは異なる原因を議論する中で、時間 (線形安定性理論) と空間 (実験) と異なる発達過程を対象とする両者を等価に扱う相関パラメータを検討する中で、この DNS 手法の発案を得た。

近年では、周囲流体のエントレインメントを考慮した境界条件を付与し、空間発達を直接取り扱ったラージ・エディ・シミュレーション (LES) も実行されている[23]-[26]。実験データとの比較において、局所熱伝達率や乱流統計量の境界層内分布の一致を確認しながら、乱流への遷移機構や乱流状態にみられる組織構造への詳細な分析も提示されている。ただし、乱流統計量の壁面ごく近傍の挙動には、実験との差異が確認されている。遷移過程への初期値依存性も認められており、それらの原因同定や分析は今後の課題であろう。

3.3 作動流体の選定を工夫した物理実験

高 Ra 数を対象とした物理実験では、通常、十分に大きい発熱体が必要となる。発熱体の周囲に静穏な環境を維持するための空間とともに大規模な設備が必須となることから、実験データの取得は進んでいなかった。そのような状況を踏まえて、Nakao ら[27]は、作動流体の選定を工夫することで、高 Ra 数条件の付与を試みた。作動流体を空気ではなく水とすることで、Ra 数を増加させた。電中研我孫子地区に既設の縦型水風洞を活用し、 10^{13} 程度にも及ぶ高 Ra 数条件を実現した。写真 2 に、縦型水風洞の外観を示す。本設備は、高 Reynolds 条件下での構造物周りにおける流動現象の解明を目的に建設された。その名の通り、作動流体には水を用いている。大型ヘッドタンク、縮流部、計測部水路、地下水路およびくみ上げポンプより構成される。大型ヘッドタンクに貯められた水を、水路下部に設置された電磁弁を解放することで、計測部に水を流し込む機構を有する。水の動粘性係数が空気と比較して $1/15$ 程度 (室温において) であること、作動流体の駆動に送風機などの回転機械を用いないこと、から高 Re 数条件下の擾乱を抑えた水流を生成することを特長とする。上部に備え付けた大型ヘッドタンクの容量

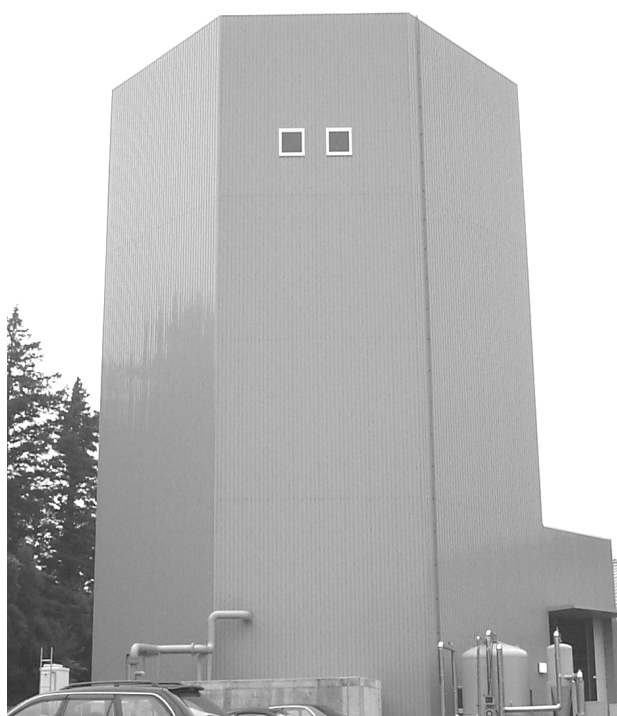


写真2 縦型水風洞の外観

は、25 m プール相当に相当し、長時間実験を可能とした。このような装置の構造・機構は、高 Ra 数条件下での垂直平板自然対流の実験にも効用を有した。作動流体となる水は、動粘性係数が小さく、 Ra 数の増加を容易とした。周囲擾乱の抑制もしやすかった。縦型の大規模水路は、垂直加熱平板の設置を許容した。上部の大型ヘッドタンクは、加熱により形成される温度成層の計測部への侵入時間を大幅に緩和した。（もちろん、 Pr 数効果や $4^{\circ}C$ 近傍での特異な密度変化などには留意を要するが。）この設備で得られた実験データに基づき、 Nu 数の $1/3$ 乗則や、境界層内の統計量分布における外層バルク量に基づく相似則の存在が確認された。これらの知見は、既往研究 [13], [28]における予見を支持した。

また、都市域での建物外面での伝熱評価[29], [30]に関連して、日中に加熱された実建物の外表面に形成される自然対流境界層を対象とした観測も行われている[31]。環境制御が困難なことから、周囲擾乱の影響には配慮が求められる。発熱体表面を高温に加熱することで、周囲流体との温度差の増加により高 Ra 数条件を付与する実験も報告

されている[32]。ただし、温度差を増加させた実験では、作動流体の物性値における温度依存性を考慮しなければいけない。特に、密度変動と温度変動との関係に対して広く使われている Boussinesq 近似の破綻による現象の変調は、その機構解明が研究対象となっており ([33]-[36])、新たな現象の解明にもつながる有益な知見をもたらす可能性がある一方で、相似則に関する議論への展開には留意を求める。高温条件下ではふく射の寄与も顕在化するため、その重畳の影響[37]も論点となる。

4. おわりに

本稿では、垂直加熱平板周りに発達する自然対流乱流境界層における相似則に関する研究を中心に紹介した。多くの研究を通じて、伝熱素過程や乱流組織構造に関する学術的にも重要な知見が蓄積されている。未解の現象も多く残されており、さらなる探求は、研究者に魅力的なものであろう。実際、今年5月に沖縄で開催された伝熱シンポジウムの関連セッションにおいても、興味深い研究成果が報告され、活発な質疑も行われていた。

このような研究の推進において、学術的な興味もちろんだが工学面での種々な応用先を有していることが重要と思われる。自然対流伝熱は、機械のほか、建築や化学に関する工学分野、地球物理や気象といった理学の分野においても研究課題として位置づけられている（例：文献[38]-[54]）。私自身も、自然対流伝熱機構の把握を目的とした種々のプロジェクトに関与しながら研究を進めてきた[55]-[59]。

成果の実用的な応用を見据えると、強制対流の分野では精力的に検討されている伝熱促進や制御に関する知見も求められるようになるだろう。伝熱促進の試みも行われており[60]-[65]、マイクロバブルの付与や共鳴による遷移促進といった自然対流固有の伝熱機構を踏まえた独創的な切り口が提示されている。強制対流と異なる組織構造の存在や外層の流体運動による伝熱機構の支配も示唆されていることから[10], [66], [67]、乱流構造への理解の深化も肝要と考えられる。外層構造の同定においては、境界層外縁部への微弱主流の付与による境界層の安定化と熱伝達率の急減との関連性に関するさらなる精査も興味深い [68]-[71]。

研究ツールとしての数値シミュレーションの存在感の増加にも疑いはないだろう。1990年代の閉空間内自然対流のDNS[72]を目にして感銘した自分も驚くほど、近年では、LESが活用されている。一方で、機器の実設計への応用などを考えると、乱流構造の同定とともに、RANSモデル[73]-[75]の改良にもニーズはあるだろう。ただし、シミュレーションの検証という点からも物理実験の重要性は変わらないと思われる。精緻な乱流計測の結果（例：文献[10]）は長く引用されている。自然対流の特徴を踏まえると、駆動力を付与する密度・温度場と速度場の同時計測[76], [77]や外層の三次元構造を把握するための3次元3成分流速計測[78], [79]の導入は、私たちに新たな視界を与えることを期待させる。

最後に、故 辻俊博先生への想いを述べることをお許し願いたい。本稿の執筆に際して、過去の学会誌（写真 1）や学生時代に精読した教科書や論文（例：文献[80]-[82]）にも目を通した。その中で、辻先生と交わした数多くの議論が頭を占めた。辻先生存在の大きさをかみしめつつ執筆した本稿は、私にとっては、辻先生との共著である。本稿の執筆について、お声掛けをいただいた古川琢磨先生（芝浦工大）に深謝いたします。

参考文献

- 1 Fan, Y. Zhao, Y. Torres, J. F. Xu, F. Lei, C. Li, Y. and Carmeliet, J., *Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications*, *Phys Fluids*, **33** (2021) 101301.
- 2 辻俊博, 自然対流における乱流計測, 伝熱研究, **30-117** (1991) 56.
- 3 長野靖尚, 辻俊博, 自然対流乱流境界層の乱れの生成と熱輸送のメカニズム, 伝熱研究, **32-124** (1993) 75.
- 4 尾添紘之, 自然対流伝熱研究の将来, 伝熱研究, **35-137** (1996) 12.
- 5 北村健三, 自然対流ののどの小骨, 伝熱研究, **42-176** (2003) 32.
- 6 稲垣照美, 自然対流の赤外線計測, 伝熱研究, **43-178** (2004) 2.
- 7 尾添紘之, 岩本光生, 平野博之, 田川俊夫, 桑木賢也, 金田昌之, 自然対流伝熱研究 50 年の回顧, 伝熱研究, **50-213** (2011) 15.
- 8 北川石英, 自然対流気液二相流の熱伝達, 伝熱研究, **58-242** (2019) 30.
- 9 中尾圭佑, 居住空間の壁面熱伝達, 伝熱研究, **58-243** (2019) 30.
- 10 Tsuji, T. and Nagano, Y., *Velocity and temperature measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate*, *Thermal and Fluid Sci.*, **2** (1989) 208.
- 11 Khalifa, A-J. N., *Natural convection heat transfer coefficient – a review 1. Isolated vertical and horizontal surfaces*, *Energy Conversion and Management*, **42** (2001) 491.
- 12 Holling, M. and Herwig, H., *Asymptotic analysis of the near-wall region of turbulent natural convection flows*, *J. Fluid Mech.*, **541** (2005) 383.
- 13 Wells, A. J. and Worster, M. G., *A geophysical-scale model of vertical natural convection boundary layers*, *J. Fluid Mech.*, **609** (2008) 111.
- 14 Ng, C. S. Ooi, A. Lohse, D. and Chung, D., *Vertical natural convection: application of the unifying theory of thermal convection*, *J. Fluid Mech.*, **764** (2015) 349.
- 15 Ng, C. S. Ooi, A. Lohse, D. and Chung, D., *Changes in the boundary-layer structure at the edge of the ultimate regime in vertical natural convection*, *J. Fluid Mech.*, **825** (2017) 550.
- 16 Ng, C. S. Ooi, A. Lohse, D. and Chung, D., *Bulk scaling in wall-bounded and homogeneous vertical natural convection*, *J. Fluid Mech.*, **841** (2018) 825.
- 17 Wei, T. Wang, Y. and Abraham, J., *Integral properties of turbulent natural convection over a vertical flat plate*, *Int. Communications in Heat and Mass Transf.*, **125** (2021) 105286.
- 18 Wells, A. J., *From classical to ultimate heat fluxes for convection at a vertical wall*, *J. Fluid Mech.*, **970** (2023) 665.
- 19 Abedin, M. Z. Tsuji T. and Hattori, Y., *Direct numerical simulation for a time-developing natural-convection boundary layer along a*

- vertical flat plate, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **52** (2009) 4525.
- 20 Abedin, M. Z. Tsuji T. and Hattori, Y., *Direct numerical simulation for a time-developing combined-convection boundary layer along a vertical flat plate*, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **53** (2010) 2113.
- 21 Ke, J. Williamson, N. Armfield S. W. and McBain, G. D., *Stability of a temporally evolving natural convection boundary layer on an isothermal wall*, *J. Fluid Mech.*, **877** (2019) 1163.
- 22 Ke, J. Williamson, N. Armfield S. W. Norris, S. E. and Komiya A., *Law of the wall for a temporally evolving vertical natural convection boundary layer*, *J. Fluid Mech.*, **902** (2020) A31.
- 23 Nakao, K. Hattori, Y. and Suto, H., *Numerical investigation of a spatially developing turbulent natural convection boundary layer along a vertical heated plate*, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **63** (2017) 63.
- 24 Ortiz, A. V. Koloszar, L. and Planquart, P., *Large eddy simulations on a natural convection boundary layer at $Pr = 0.71$ and 0.025* , *Nuclear Eng. Design*, **353** (2019) 110231.
- 25 Yang, S. and Bieder, U., *Using of large eddy simulation model for a spatially developing turbulent natural convection boundary layer in water along a side-heated vertical wall with high Rayleigh number ($Ra^* = 8 \times 10^{14}$)*, *Int. J. Thermal Sci.*, **187** (2023) 108167.
- 26 Ke, J. Williamson, N. Armfield S. W. and Komiya, A., *The turbulence development of a vertical natural convection boundary layer*, *J. Fluid Mech.*, **964** (2023) A24.
- 27 Nakao, K. Hattori, Y., Suto, H. Takimoto, H. and Niida Y., *Scaling high Rayleigh number natural convection boundary layer statistics: A vertical water tunnel experiment*, *Phys. Fluids*, **35** (2023).
- 28 Kis, P. and Herwig, H., *The near wall physics and wall functions for turbulent natural convection*, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55** (2012) 2625.
- 29 Nottrott, A. Onomura, S., Inagaki, A. Kanda, M. and Kleissl J., *Convective heat transfer on leeward building walls in an urban environment: Measurements in an outdoor scale model*, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **54** (2011) 3128.
- 30 Inagaki, A. Kanda, G., Onomura, S. and Kumemura, H., *Thermal Image velocimetry*, *Boundary-Layer Meteorol.*, **149** (2013) 1.
- 31 小野村史穂, 服部康男, 稲垣厚至, 神田学, 建物の鉛直壁面に発達する熱境界層の実測, 土木学会論文集 B1, **67** (2011) 337.
- 32 Hattori, Y. Tsuji, T. Nagano, Y. and Tanaka, N., *Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures*, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **27** (2006) 445.
- 33 Mlaouah, H. Tsuji, T. and Nagano, Y., *A study of non-Boussinesq effect on transition of thermally induced flow in a square cavity*, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **18** (1997) 100.
- 34 Satake, H. and Tagawa, T., *Mathematical modeling for low-Mach-number compressible thermal convection analysis in a square enclosure*, *Phys. Fluids*, **36** (2024) 127168.
- 35 Ke, J. Armfield S. W. and Williamson, N., *Non-Oberbeck–Boussinesq effects on the linear stability of a vertical natural convection boundary layer*, *J. Fluid Mech.*, **988** (2024) A44.
- 36 Ke, J. Armfield S. W. and Williamson, N., *Non-Oberbeck–Boussinesq effects on the convective stability in a transient natural convection boundary layer flow water*, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **241** (2025) 126670.
- 37 Kogawa, T. Okajima, J. Komiya, A. and Maruyama, S., *Effect of gas radiation-depended natural convection on the transition of spatially developing boundary layers*, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **177** (2021) 12580.
- 38 Clark, R. P. and Toy, N., *Natural convection around the human head*, *J. Physiol.*, **244** (1975) 283.
- 39 Murakami, S. Kato, S. and Zeng, J., *Combined simulation of air flow, radiation and moisture transport for heat release from a human body*, *Building and Environment*, **35** (2000) 489.
- 40 Rodrigues, A. M. Piedade, A. C. Lahellec, A. and Grandpeix, J. Y., *Modelling natural convection in*

- a heated vertical channel for room ventilation, Building and Environment, 35 (2000) 455.*
- 41 Al-Waked, R. and Behnia, M., *CFD simulation of wet cooling towers*, Applied Thermal Eng., **26** (2006) 382.
 - 42 Fitzgerald, S. D. and Woods, A. W., *Transient natural ventilation of a room with a distributed heat source*, J. Fluid Mech., **591** (2007) 21.
 - 43 Al-Waked, R. and Behnia, M., *Enhancing performance of wet cooling towers*, Energy Conversion and Management, **48** (2007) 382.
 - 44 Zhang, T. and Chen, Q., *Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins*, Building Environment, **42** (2007) 1675.
 - 45 Fossa, M. Menezo, C. and Leonardi, E., *Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications*, Experimental Thermal and Fluid Sci., **32** (2008) 980.
 - 46 Defraeye, T. Blocken, B. and Carmeliet, J., *Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling*, Energy Conversion and Management, **52** (2011) 512.
 - 47 Chen, Y. Sun, F. Wang, H. Mu, N. and Gao M., *Experimental research of the cross walls effect on the thermal performance of wet cooling towers under crosswind conditions*, Applied Thermal Eng., **31** (2011) 4007.
 - 48 Dittko, K. A. Kirkpatrick, M. P. and Armfield S. W., *Large eddy simulation of complex sidearms subject to solar radiation and surface cooling*, Water Res., **47** (2013) 4918.
 - 49 Lu, Y. Gurgenci, H. Cuan, Z. and He, S., *The influence of windbreak wall orientation on the cooling performance of small natural draft dry cooling towers*, Int. J. Heat and Mass Transf., **79** (2014) 1059.
 - 50 Kim, D. Yook, S.-J. and Lee, K.-S., *Investigation of radiative and convective heat transfer in storage vaults for improving space efficiency*, Int. J. Heat and Mass Transf., **80** (2015) 301.
 - 51 Fan, Y. Li, Y. Hang, J. and Wang, K., *Diurnal variation of natural convective wall flows and the resulting air change rate in a homogeneous urban canopy layer*, Energy and Buildings, **153** (2017) 201.
 - 52 Yang, S. Bieder, U. and Studer, E., *LES of natural convection along a side-heated vertical wall in a water cavity applied for the scale of Small Modular Reactor ($Ra = 10^{15}$)*, Nuclear Eng. Design, **414** (2023) 112543.
 - 53 Rymys, M. Tesch, K. and Lewandowski, W. M., *Optimization of the distance between the vertical plates in the convective air heat exchanger*, Int. J. Thermal Sci., **185** (2023) 108064.
 - 54 Yang, S. Nop, R. Girard, A. Duri, D. and Studer, E., *#D LES of natural convection in the side-heated vertical wall with cryogenic helium up to $Ra = 10^{15}$* , Prog. Nuclear Energy, **170** (2024) 105115.
 - 55 Sakamoto, K. Koga, T. Wataru, M. and Hattori, Y., *Heat removal characteristics of vault storage system with cross flow for spent fuel*, Nuclear Eng. and Design, **195** (2000) 57.
 - 56 Hattori, Y. and Suto, H., *PIV measurement of thermal convective flow above a cooking oven (insight into turbulence structure near a heat source)*, Visualization of Mechanical Processes, **2** (2012) 111.
 - 57 佐野理志, 白井孝治, 服部康男, 須藤仁, 土野進, *換気制限下における密閉空間内の火災挙動把握と火災予測手法の検討*, 日本原子力学会和文論文誌, **12-1** (2013) 32.
 - 58 Matsuyama, K. Okinaga, S. Hattori, Y. and Suto, H., *Experimental study on fire behavior in a compartment under mechanical ventilated conditions: the effects of air inlet position*, Fire Sci. and Tech., (2017) 111.
 - 59 Hitoshi, S. Matsuyama, K. and Hattori, Y., *Similarity of energy balance in mechanically ventilated compartment fires: An insight into the conditions for reduced-scale fire experiments*, Nuclear Eng. Tech., **54** (2022) 2898.
 - 60 Tsuji, T. Kajitani, T. and Nishino, T., *Heat transfer enhancement in a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate*, Int. J. Heat and Fluid Flow, **28** (2007) 1472.

- 61 Ogasawara, N. Torres, J. F. Kanda, Y. Kogawa, T. and Komiya, A., *Resonance-driven heat transfer enhancement in a natural convection boundary layer perturbed by a moderate impinging jet*, Phys. Review Fluids, **6** (2021) L061501.
- 62 Koizumi, T. Kogawa, T. Torres, J. F. Kanda, Y. and Komiya, A., *Controlling instability waves on vertical natural convection using a buoyant impinging jet*, Phys. Review Fluids, **148** (2023) 107033.
- 63 Kitagawa, A. Kitada, K. and Hagiwara, Y. *Experimental study on turbulent natural convection heat transfer in water with sub-millimeter-bubble injection*, Experiments in Fluids, **49** (2010) 613.
- 64 Kitagawa, A. Endo, H. and Hagiwara, Y. *Effects of sub-millimeter-bubble injection on transition to turbulence in natural convection boundary layer along a vertical plate in water*, Experiments in Fluids, **51** (2011) 701.
- 65 Kitagawa, A. and Murai, Y. *Natural convection heat transfer from a vertical heated plate in water with microbubble injection*, Chemical Eng. Sci., **99** (2013) 215.
- 66 Kitamura, K. Koike, M. Fukuoka, I. and Saito, T., *Large eddy structure and heat transfer of turbulent natural convection along a vertical flat plate*, Int. J. Heat Mass Transf., **28** (1985) 837.
- 67 Wei, T. Wang, Y. and Abraham, J., *Layered structure of turbulent natural convection over a vertical flat plate*, Int. J. Heat and Mass Transf., **181** (2021) 121866.
- 68 Kitamura, K. and Inagaki, T. *Turbulent heat and momentum transfer of combined forced and natural convection along a vertical flat plate-aiding flow*, Int. J. Heat Mass Transf., **30** (1987) 23.
- 69 Hattori, Y. Tsuji, T. Nagano, Y. and Tanaka, N., *Characteristics of turbulent combined-convection boundary layer along a vertical heated plate*, Int. J. Heat and Fluid Flow, **21** (2000) 520.
- 70 Hattori, Y. Tsuji, T. Nagano, Y. and Tanaka, N., *Effects of freestream on turbulent combined-convection boundary layer along a vertical heated plate*, Int. J. Heat and Fluid Flow, **22** (2001) 315.
- 71 Ojofetimi, A. and Hattori, Y., *Wall-resolved large eddy simulation of turbulent mixed-convection heat transfer along a heated vertical flat plate*, Int. J. Heat and Mass Transf., **109** (2017) 428.
- 72 Paolucci, S., *Direct numerical simulation of two-dimensional turbulent natural convection in an enclosed cavity*, J. Fluid Mech., **215** (1990) 229.
- 73 To, W. M. and Humphrey, J. A. C. *Numerical simulation of buoyant, turbulent flow -1. Free convection along a heated, vertical, flat plate*, Int. J. Heat Mass Transf., **29** (1986) 573.
- 74 Xu, W. Chen, Q. and Nieuwstadt, F. T. M. *A new turbulence model for near-wall natural convection*, Int. J. Heat Mass Transf., **41** (1998) 3161.
- 75 Ortiz, A. V. and Koloszar, L. *RANS thermal modelling of a natural convection boundary layer at low Prandtl number*, Computers and Fluids, **254** (2023) 105809.
- 76 Shoji, E. Komiya, A. Okajima, J. and Maruyama, S., *Development of quasi common path phase-shifting interferometer for measurement of natural convection fields*, Int. J. Heat and Mass Transf., **55** (2012) 7460.
- 77 Kogawa, T. Shoji, E. Okajima, J. Komiya, A. and Maruyama, S., *Experimental evaluation of thermal radiation effects on natural convection with a Rayleigh number of 10^8 – 10^9 by using an interferometer*, Int. J. Heat and Mass Transf., **132** (2019) 1239.
- 78 Takeyama, M. Suto, H. and Hattori, Y., *3D3C rainbow particle tracking velocimetry: improving depth resolution and velocity vector acquisition rate by using color space for a multi-cycle rainbow pattern*, Int. J. Visualization, **27** (2024) 1089.
- 79 Takeyama, M. Fujiwara, K. and Hattori, Y., *Improvement in the Number of Velocity Vector Acquisitions Using an In-Picture Tracking Method for 3D3C Rainbow Particle Tracking Velocimetry*, Fluids, **9** (2024) 226.

- 80 Dring, R. P. and Gebhart, B., *A theoretical investigation of disturbance amplification in external laminar natural convection*, J. Fluid Mech., **34** (1968) 551.
- 81 Cheesewright, R., *Turbulent natural convection from a vertical plane surface*, J. Heat Transf., **90** (1968) 1.
- 82 Jaluria, Y. and Gebhart, B., *An experimental study of nonlinear disturbance behaviour in natural convection*, J. Fluid Mech., **61** (1973) 337.
-

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／ウェブサイト
7 月				
21(月)～25(金)	Turbulence, Heat and Mass Transfer 2025 (THMT'25)	2025 年 1 月 15 日 (水)	2025 年 4 月 30 日 (水)	Chair : K. Suga, Osaka Metropolitan Univ. Co-Chair : M. Tanahashi, Institute of Science Tokyo OC-Secretary : K. Iwamoto, Tokyo Univ. of Agriculture and Technology Email : contact@thmt-25.org https://www.thmt-25.org/

本会共催、協賛行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ
2025 年				
7 月				
28 日(月)～8 月 1 日(金)	2025 年度 熱処理大学	2025 年 7 月 18 日(金)		(一社) 日本熱処理技術協会 事務局 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3 丁目 2 番 10 号 (鉄鋼会館 6 階) TEL : 03-6661-7167 Email : jsht-honbu@jsht.or.jp
8 月				
28 日(木)	No.25-85 講習会「実験流体力学 流体計測の基礎」	申込み先着順により定員になり次第締め切り		一般社団法人 日本機械学会 流体工学部門担当 金子 〒162-0814 東京都新宿区新小川町 4-1 KDX 飯田橋スクエア 2 階 TEL : 03-4335-7611 Email : kaneko@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/event/23-60/
9 月				
16 日(火)～18 日(木)	日本実験力学学会 2025 年度年次講演会	事前登録締切 2025 年 7 月 31 日(木)	2025 年 6 月 16 日(月)	〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 熊本大学 工学部 機械事務室気付 日本実験力学学会 事務局 TEL : 096-342-2702 Email : office@jsem.jp https://jsem.jp/wordpress/annual25/
24 日(水)～26 日(金)	第 22 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2025)	事前オンライン決済 2025 年 9 月 8 日	2025 年 6 月 14 日(土)	学術講演会事務局 九州大学 末國晃一郎 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1 TEL : 092-583-7948 Email : suekuni.koichiro.063@m.kyushu-u.ac.jp https://www.thermoelectrics.jp/conference.html
10 月				
4 日(土), 5 日(日)	No. 25-12 熱工学コンファレンス 2025	早期参加登録 2025 年 9 月 12 日(金)まで, 9 月 13 日(土)～後期参加登録	2025 年 6 月 13 日(金)	熱工学コンファレンス 2025 実行委員会事務局 幹事 江目宏樹(山形大学) Email : tedconf25@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/conference/tedconf25/
8 日(水), 9 日(木)	第 53 回日本ガスタービン学会定期講演会		2025 年 6 月 20 日(金)	公益社団法人日本ガスタービン学会 事務局 TEL : 03-3365-0095, FAX : 03-3365-0387 Email : gtsj-office@gtsj.or.jp https://www.gtsj.or.jp/html_calender/teiki53-niigata_boshuu.html
22 日(水), 23 日(木)	2025 年度 第 2 回熱処理技術セミナー 熱処理応用講座「熱処理品質の評価・解析技術」	2025 年 10 月 10 日(金)までもしくは定員に達した場合		(一社) 日本熱処理技術協会 事務局 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3 丁目 2 番 10 号 (鉄鋼会館 6 階) TEL : 03-6661-7167 Email : jsht-honbu@jsht.or.jp
22 日(水)～25 日(土)	第 11 回日韓機械学会合同・熱流体国際会議			一般社団法人日本機械学会 総合企画グループ 電話:03-4335-7615 Email : izawa@jsme.or.jp , otani@jsme.or.jp https://www.jsme.or.jp/event/25-207/

公益社団法人 日本伝熱学会 第 63 期（2024 年度）総会議事録

1. 開催日時：2025 年 5 月 16 日（金） 16 時 35 分～17 時 00 分
2. 会場：沖縄コンベンションセンター（A1 会議室）
沖縄県宜野湾市真志喜 4 丁目 3-1
3. 正会員数： 1027 名

議事経過

【開会】

- ・議長挨拶と定足数確認

総会議長である須賀会長より、冒頭挨拶があり、第 63 期は事務局長と職員の期途中での退職のため、事務局機能を外部委託することとなり、その準備に迫われたこともあり、第 3 号議案である第 63 期決算がこの総会までに間に合わなかったことが話された。

その後、議事進行役の鈴木副会長より、2025 年 5 月 16 日現在の日本伝熱学会の正会員数 1027 名中、出席者 774 名（内訳：現地出席者 128 名、委任状提出者 618 名、議決権行使で賛成票 28 名）であり、定款第 30 条 2 項の定めるところにより、本総会が成立することが述べられた。また、本総会の第 5 号議案の定款の改正に伴う議決権数についても、定款第 44 条の定める、正会員の 2/3 以上、すなわち 685 名の定足数を満たしており、定款の変更についても審議が可能であることが併せて述べられた。

【議事】

（1）第 1 号議案 第 63 期事業報告

鈴木総務担当副会長より、第 63 期事業について資料に示され、I-1 研究会、学術講演会の開催、神戸にて 2024 年 5 月 29 日～5 月 31 日に開催された第 61 回日本伝熱シンポジウムの実施について報告された。また、各支部による事業として、伝熱セミナー、産学交流委員会による「計測技術 ～温度計測の基礎と様々な温度センサー～」講習会の実施、「つくば・日立エリアの産学官伝熱・熱物性研究開発最前線」のセミナー、第 10 回「伝熱工学の基礎」の講習会などの開催について報告された。

学会誌「伝熱」、「TSE」および伝熱シンポジウムの講演論文集（CD-ROM 版）の発行について、また、I-3 研究及び調査の実施として、特定推進研究企画委員会、カーボンニュートラル技術研究会、研究会「熱事象の科学知・技術知」による事業について報告された。その他、新たに細胞内熱ダイナミクス研究会の設置について、また、登鯉賞を含む学会賞、抜山記念国際賞、名誉会員の顕彰、優秀プレゼンテーション賞など各表彰事業および共催・協賛の実績について報告した。

また、I-6 国際的な研究協力の推進については、AUTSE、NanoRad2024 の実施について報告された。

以上について、須賀会長より議場にその承認が求められたところ、拍手による賛成多数で承認された。

（2）第 2 号議案 第 63 期会務報告

鈴木総務担当副会長により、第 63 期会務報告について資料に示され、2024 年 5 月 26 日に開催された第 62 期の定時総会後に、2024 年 6 月 27 日のオンラインによる第 62 期臨時総会をはさみ、対面・オンラインのハイブリッドによる 4 回の理事会の開催、63 期の事業計画および予算案のメール審議、会長・副会長の選任のための臨時理事会の開催と、合わせて 6 回の理事会を開催したことが報告された。また、部会活動について、総務部会、財務部会、企画部会、編集出版部会と、各種委員会および特別委員会の会務についてそれぞれ報告された。

また、国際伝熱会議アセンブリ委員については加藤之貴先生の退任に伴い、東北大学教授の小宮敦樹教授が選出されたことが報告された。

この他、8 支部のそれぞれの会務の他、契約に関する事項、行政庁との関わる会務について報告された。

会員の状況については 2025 年 3 月 31 日現在、正会員は前年比 15 名の減、永年正会員は 5 名増、名誉会員は 1 名減、学生会員は 19 名増、賛助会員は 1 社減、特別賛助会員は変更なしであることが報告された。

以上について須賀会長より議場にその承認が求められたところ、拍手による賛成多数で承認された。

(3) 第3号議案 第63期(2024年度)収支決算と監査報告

近藤財務担当副会長より、第63期(2024年度)収支決算と監査報告について、公益社団法人としての伝熱学会の財務は、公益事業に関わる単年の収支相償を厳守するため、公益事業で赤字とすることが必要になることが説明された。第63期(2024年度)の決算(2024年4月1日～2025年3月31日)については、第63期途中に事務局長、事務スタッフが退職したため、急遽財務部会中心に決算処理を行ったが、確定数値をまとめることができておらず、暫定決算値が提示された。なお、第63期決算については、6月24日に臨時総会を招集し、改めて議場に審議を図ることが説明され、拍手による賛成多数で承認された。

(4) 第4号議案 第64期役員・協議員選出

須賀会長より、第64期(2025年度)役員選出について、第63期第4回理事会において審議した役員・協議員候補者が示された。

以下の第64期理事、監事が選任され、須賀会長より以下の候補者について議場に個別にその承認が求められたところ、全員、拍手による賛成多数で承認された。なお、被選任者はいずれも承認を承諾した。

定款第17条第1項により退任する役員

理事	岩井 裕	理事	佐々木 直栄
理事	服部 博文	理事	店橋 護
理事	河野 正道	理事	長野 方星
理事	山田 昇	理事	有賀 善紀
監事	佐藤 英明		

定款第17条第2項により退任する役員

理事(副会長)	鈴木 雄二	理事(副会長)	永井 二郎
---------	-------	---------	-------

定款第17条第1項により選任される役員

理事	巽 和也	理事	長野 方星
理事	大西 元	理事	瀬名波 出
理事	服部 博文	理事	保浦 知也
理事	伏信 一慶	理事	中山 浩
監事	近藤 義広	監事	萩原 剛

定款第17条第2項ただし書きにより重任する役員

代表理事(会長) 須賀 一彦

定款第17条第2項より選任される役員

理事(副会長)	店橋 護	理事(副会長)	宮良 明男
---------	------	---------	-------

続いて、新協議員について資料に示され、須賀会長より議場にその承認が求められたところ、拍手による賛成多数で承認された。

(5) 第5号議案 定款の改正について

須賀会長より、定款の改正について資料に示され、議場にその承認が求められたところ、拍手による賛成多数で承認された。

(6) 第6号議案 議事録署名人の選任について

須賀会長より、本定時総会の議事録署名人について、永井二郎氏、鈴木雄二氏が指名され、議場にその承認が求められたところ、拍手による賛成多数で承認された。

(7) 第7号議案 第64期(2025年度)事業計画

鈴木総務担当副会長より、第64期(2025年度)事業計画について、国際会議と併設にて開催される神戸での日本伝熱シンポジウム、各支部主催による講演会・伝熱セミナー、会誌「伝熱」、論文集「TSE」、日本機械学会熱工学部門との合同編集雑誌JTST(Journal of Thermal Science and Technology)の刊行、研究会、表彰関連、他学協会との講演会等の共催・協賛、国際的な研究協力の推進などについて資料に示され、報告された。

(8) 第8号議案 第64期(2025年度)収支予算

近藤財務担当副会長より、第64期(2025年度)収支予算について資料に示された。また「公益社団法人」としての持続的な学会活動を行うための財務方針についての財務サイクル構造が示され、63期からは「学会運営安定化基金」を特定費用準備資金として積み上げ、弾力的に運用することが併せて報告された。

以上、新たに選任された理事・監事で、新副会長の選定を行うための臨時理事会の開催と定時総会の終結が確認された。なお、会長については、定款第17条2、細則4-1により、2025年1月6日(月)から1月14日に開催されたメール審議による臨時理事会で重任が承認されている。

2025年5月16日

公益社団法人日本伝熱学会第63期(2024年度)総会

議長 須賀 一彦 印

議事録署名人 鈴木 雄二 印

議事録署名人 永井 二郎 印

公益社団法人 日本伝熱学会 第63期(2024年度)臨時総会議事録

1. 開催日時: 2025年6月24日(火) 17時30分~18時00分

2. 会場: 東京大学工学部2号館3階31A会議室

東京都文京区本郷7丁目3-1

(Zoom併用によるハイブリッド開催)

3. 正会員数: 1031名

議事経過

【開会】

- ・議長挨拶と定足数確認

総会議長である須賀会長より、冒頭挨拶と開会宣言がされ、臨時総会が開催された。

その後、議事進行役の鈴木副会長より、2025年6月10日現在の日本伝熱学会の正会員数1031名中、出席者653名(内訳: オンライン出席者40名、委任状提出者584名、議決権行使による賛成票29名)であり、定款第30条2項の定めるところにより、本総会が成立することが述べられた。

【議事】

(1) 第1号議案 第63期(2024年度)収支決算報告

近藤財務担当副会長より、第63期収支決算について配布資料に基づいて説明がなされた。まず、正味財産増減計算書内訳表に記載の、公益社団法人認定に掛かる収支相償について説明があった。公益事業については、学術推進普及事業が12,675,780円の赤字、奨励表彰事業が12,675,780円の赤字であり、これらに特定費用準備金を算入して計算される収支相償の第1段階は満足していることが説明された。ただし、公益事業共通収入を算入すると、2,680,262円の黒字となったため、第63期は収支相償の第2段階が満足できず、第64期で解消する必要があることが説明された。次に、第63期末の正味財産合計が48,450,887円となり、第62期と比較して7,850,847円の減少となっているが、これは特定費用準備金の国際シンポジウム基金と会議登録システム改修基金の取り崩しによって特定資産が減少したことによるものであるとの説明があった。以上により、第63期の決算報告が終了した。

次に、佐藤監事より2025年6月8日に行われた会計監査の結果が報告され、適法に処理、記載されているとの報告があった。また、須賀会長から、顧問公認会計士からの調査報告書について説明があり、財務諸表が第63期末における財務状態および正味財産増減を正しく表示しているとの報告であることが示された。

以上について、須賀会長より議場にその承認が求められたところ、満場一致で承認された。

(2) 第2号議案 議事録署名人の選任

須賀会長より、本臨時総会の議事録署名人について、永井二郎氏、鈴木雄二氏が指名され、議場にその承認が求められたところ、満場一致で承認された。

以上、臨時理事会の終結が確認された。

2025年6月24日

公益社団法人日本伝熱学会第63期(2024年度)臨時総会

議長 須賀 一彦 印

議事録署名人 鈴木 雄二 印

議事録署名人 永井 二郎 印

2025 年度日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・登鯉賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では以下の各賞の表彰を実施します。つきましては、下記の要領に従って学術賞、技術賞、貢献賞、登鯉賞および奨励賞の候補者推薦を募集します。自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。なお、2023 年度から新たな分野を開拓し、顕著な業績を挙げた若手研究者を対象として**登鯉賞**を設けました。是非ご応募ください。

1. 対象となる業績

- (1) **学術賞**の対象は、原則として、最近3年間の Thermal Science and Engineering 誌または Journal of Thermal Science and Technology 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表され、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行った研究者とその共同研究者とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と厳密に一致する必要はありません。
- (2) **技術賞**の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします。
- (3) **貢献賞**の対象は、本学会が主催する事業の実施において、顕著な貢献を行った会員とします。
- (4) **登鯉賞**の対象は、2026 年 4 月 1 日において、39 歳未満の若手研究者であり、独自に新たな分野を開拓し、最近3年間の Thermal Science and Engineering 誌または Journal of Thermal Science and Technology 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した個人とします。
- (5) **奨励賞**の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準じる者（大学卒業後5年以内の者）とします。
- (6) 学術賞の対象者のうち少なくとも1名は本学会会員であることが必要です。また登鯉賞および奨励賞の対象資格は本学会会員に限ります。
- (7) 贈賞数は、学術賞2件、技術賞1件、貢献賞2名、登鯉賞2名、奨励賞4名を目安とします。

2. 選考方法

- (1) 「学会賞に関する内規」に定める賞の内、上項に記載の各賞は、「表彰選考委員会」が「学会賞の審査・選考方法内規」に基づいて選考します。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

3. 提出書類

- (1) 申請書・推薦書
 - ・ 申請書・推薦書の書式は、本学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
 - ・ 学術賞、技術賞、貢献賞、登鯉賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意下さい。
- (2) 関連する日本伝熱シンポジウム講演論文または TSE/JTST 論文（学術賞、登鯉賞、奨励賞のみ）
- (3) 推薦／申請に係わる学術論文1編または技術内容参考資料（学術賞、登鯉賞、技術賞のみ）

4. 提出期限

2025 年 12 月 12 日（金）

5. 提出先および問い合わせ先

いずれの書類も PDF 化し、下記電子メールアドレス宛にお送り下さい。

佐賀大学 理工学部 宮良 明男

E-mail: miyara@me.saga-u.ac.jp

TEL 0952-28-8623

(〒840-8502 佐賀市本庄町 1)

学会事務局からのお知らせ

会員の皆様へ

2025 年 5 月 16 日に開催された通常総会において、定款第 2 条（事務所）が変更されました。

これは、事務局機能の外部委託に伴う、事務所所在地の変更に関するものです。これまでの所在地「東京都千代田区内神田 1-18-11 東京ロイヤルプラザ 1101 号」から、以下の業務委託先法人の所在地に連絡先も含めて変更となりますので、ご確認のほどよろしくお願い申し上げます。

新しい事務局所在地及び連絡先：
〒112-0012
東京都文京区大塚 5-3-13 3F 学会支援機構内
公益社団法人 日本伝熱学会 事務局
E-mail : htsj-office@asas-mail.jp
Tel : 03-5981-6011 Fax : 03-5981-6012
受付時間 : 10:00～17:00（平日）

なお、各種お問い合わせにつきましては、当分の間、従来の連絡先（office@htsj.or.jp）でも対応いたしますが、できる限り上記の新しい連絡先へご連絡くださいますようお願い申し上げます。

今期（第 64 期）の会費請求について

事務業務の学会支援機構への委託に伴い、2025 年度年会費について、以下のとおりご案内いたします。

自動引落としをご利用の会員と今年度新入会の会員以外には、年会費の請求書を郵送にてお送りいたします。

請求書の様式は従来と異なり、三井住友カード宛の払込取扱票（収納代行方式）となっております。

また、会員データベースも学会支援機構のシステムへと移行し、会員専用ページが設けられております。ログイン後、クレジットカードによる年会費の決済も可能ですので、ご利用ください（ログイン情報は別途お知らせします）。

なお、現在自動引き落としをご利用の会員には、再度お手続きが必要となりますので、別途ご案内をお送りする予定です。

ご不明な点がございましたら、上記事務局までお問い合わせください。
今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

ご所属、ご住所、メールアドレス等、個人、法人情報が変更になった場合には、速やかに事務局へご連絡ください。変更内容を適当な書式でメールで送付いただければ幸いです（ウェブサイトにある書式は不要です）。



編集出版部会からのお知らせ ー各種行事・広告などの掲載についてー



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 (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 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載 しリンク形成（無料） 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 HP：条件付き掲載（無料） 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。MLでHPに公募情報が掲載された情報のみを配信します。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （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 http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：大宮司 啓文（東京大学）：daiguji@thml.t.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：長野方星（名古屋大学）：mailto:nagano@mech.nagoya-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：渡部 弘達（立命館大学）：hirowtnb@fc.ritsumei.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：長澤剛（東京科学大学）：nagasawa.t.1752@m.isct.ac.jp
- ・事務局 横川和代（学会支援機構）：htsj-office@asas-mail.jp

【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルをお願いします。
- ・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。

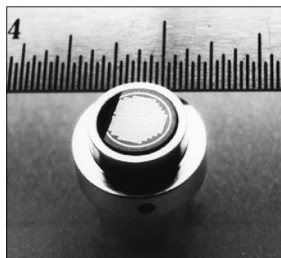
熱流束センサー

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



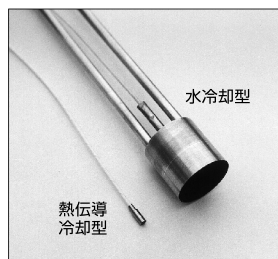
特徴

- 最高速の応答 (約 $6\mu s$)
- $850^\circ C$ 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
- タービンブレード熱風洞試験
- 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

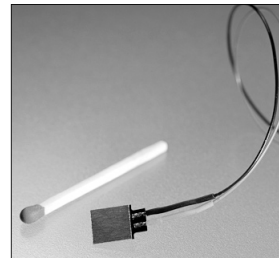


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

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、 $72m^2$ 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

〒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



■ 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。

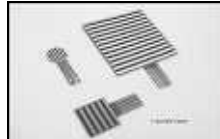
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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℃
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℃
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/ft²sec(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℃(水冷なし)／1500℃(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%
校正精度: ±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℃〜+400℃
J型(鉄／コンスタンタン) −210℃〜+1200℃
E型(クロメル／コンスタンタン) −270℃〜+1000℃
K型(クロメル／アルメル) −270℃〜+1372℃
S型(白金10%ロジウム／白金) +200℃〜+1700℃

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℃
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℃
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0〜3000W/cm²

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>

「水と空気」の機能性

射出成形とダイキャスト成形の生産環境を最適化

ファンクショナル・フルイッドは、水に起因する様々な障害を防止し、
高効率で安定した冷却工程、製品精度の向上、
省エネルギー推進を目的とした製品を提供しています。
「水と空気」の機能性を追求し、生産環境の改革を通じて、
お客様の生産技術の向上と、社会課題の解決に貢献します。

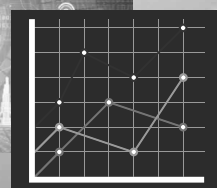
■ 射出成形用二次冷却システムUWT-1000WHX



NEW

■ 遠隔監視システム

冷却水を遠隔監視し、安定生産と省人化を実現。



編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

本号では、特集「マルチスケールの対流現象」を組ませていただきました。マルチスケールというタイトル通り、多種多様なスケールでの対流現象に関してご研究されている先生方からご寄稿していただきました。桑名一徳先生（東京理科大学）からは火災現象におけるスケール効果に関してご解説していただきました。野口信先生、上野一郎先生（東京理科大学）からはマロンゴニ対流に関する最新研究についてご解説して頂きました。島崎康弘先生（豊橋技科大）には人体周囲の伝熱現象、特に衣服着用下の自然対流のモデリングについてご解説していただきました。服部康男先生（電力中央研究所）には機械工学に関わる垂直加熱平板の自然対流のレビューをして頂きました。ご多用中にもかかわらず、ご寄稿下さりました皆様に厚く御礼申し上げます。また第 64 期から長野方星先生が編集出版部会長にご就任され、編集委員の先生方も一部、交代致しました。引き続き、伝熱学会の皆様のご興味を引く学会誌となりますよう、編集部会一丸となって取り組んで行く所存です。

古川 琢磨（芝浦工業大学）

Takuma KOGAWA (Shibaura Institute Technology)

e-mail: kogawa@sic.shibaura-it.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 宮良 明男（佐賀大学）

編集出版部会長 長野 方星（名古屋大学）

委員

（理事） 齊藤 泰司（京都大学）

（協議員） 石崎 拓也（宇宙航空研究開発機構）、上野 藍（名古屋大学）、鎌田 慎（名古屋大学）、仮屋 圭史（佐賀大学）、古川 琢磨（芝浦工業大学）、地下 大輔（東京海洋大学）、西川原 理仁（名古屋大学）、山崎 匠（東北大学）

TSE チーフエディター 鈴木 雄二（東京大学）

TSE 編集幹事 李 敏赫（東京大学）

編集出版部会 連絡先： 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学 大学院工学研究科機械システム工学専攻
長野 方星

Phone: 052-789-4470

E-mail: nagano@mech.nagoya-u.ac.jp