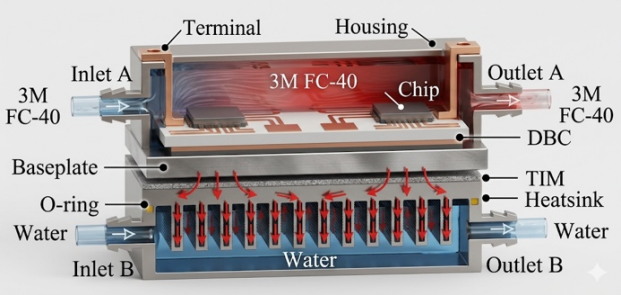
伝　熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

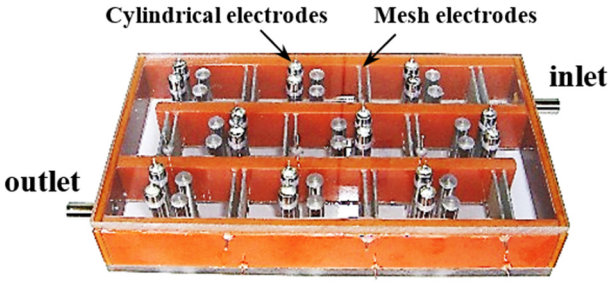
ISSN 1344-8692 Vol. 65, No. 272
2026. 7



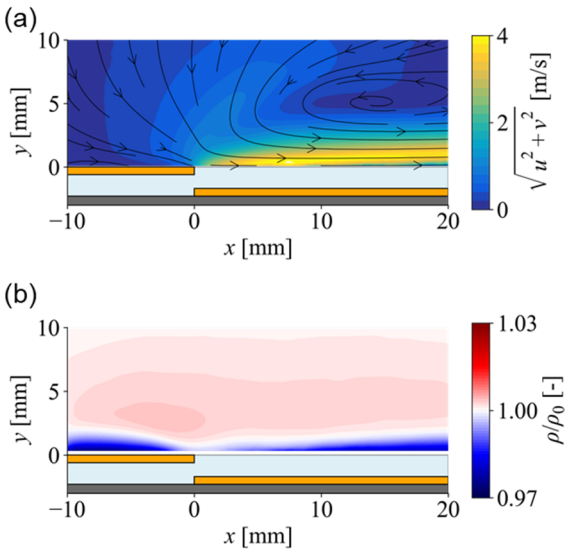
◆特集：電気流体力学と伝熱



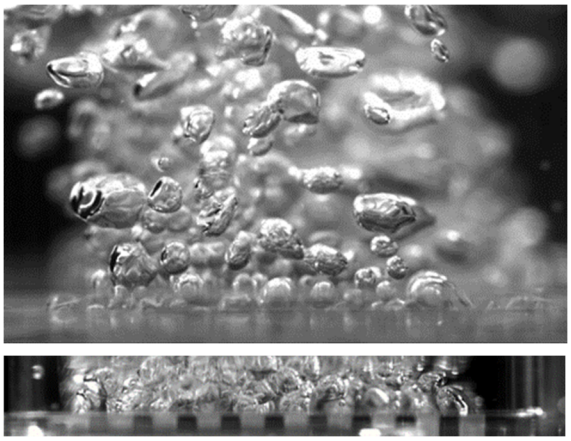
フッ素系液体両面冷却パワーモジュールのイメージ図（特集記事「電気電子機器・デバイスにおける熱流体解析と電気流体力学的伝熱応用（匹田　政幸）」より）



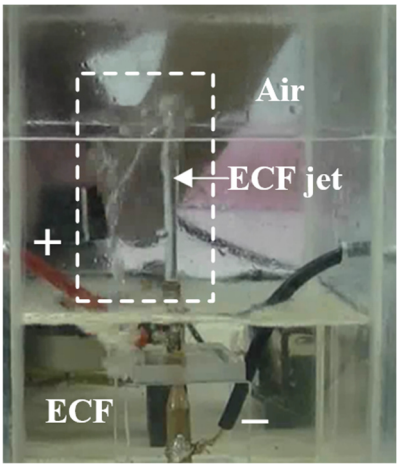
9 対多段型 EHD ポンプ（特集記事「著者が歩んだ電気流体力学研究の歴史と近年の研究動向（花岡　良一）」より）



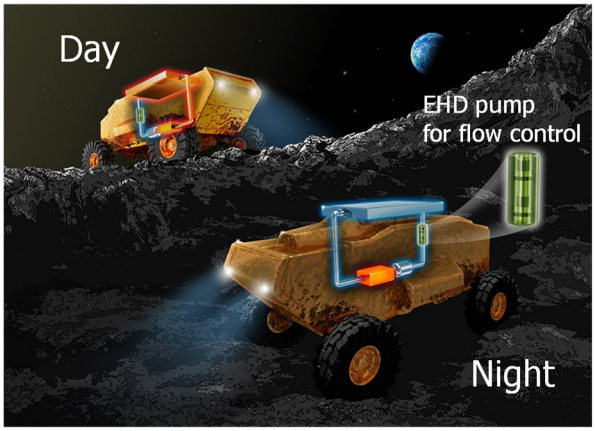
(a) PIV による速度場，(b) BOS 法による密度場の計測結果（特集記事「イオン風の対流冷却性能解明に向けた研究の進展（畑本　明彩未，金子　泰）」より）



サブクール核沸騰（SubNB）（q=10.2 W/cm^2）（特集記事「電気流体力学(EHD)効果によるサブクール流動沸騰熱伝達促進（鹿野　一郎）」より）



ECF の流動（特集記事「電界共役流体の CPU 冷却システムへの応用（桜井　康雄）」より）



EHD ポンプを用いた LHP 式ヒートスイッチの概要（特集記事「電気流体力学研究と先進熱輸送への応用（西川原　理仁）」より）

Vol. 65 2026
No. 272 July

伝　熱

目　次

〈巻頭グラビア〉

花岡　良一（金沢工業大学），匹田　政幸（九州工業大学），鹿野　一郎（山形大学），
桜井　康雄（足利大学），畑本　明彩未（青山学院大学），金子　泰（東北大学），
西川原　理仁（名古屋大学）……表紙裏

〈新旧会長挨拶〉

旧会長挨拶……須賀 一彦（追手門学院大学）…… 1
第 65 期会長就任にあたって……小原 拓（東北大学）…… 3

〈第 38 回日本伝熱学会賞〉

第 64 期（2025 年度）表彰選考委員会 報告
……表彰選考委員会委員長　宮良 明男（佐賀大学）…… 4
日本伝熱学会学術賞を受賞して
…… HUANG Xin（東京大学），谷口 尚（物質・材料研究機構），
野村 政宏（東京大学）…… 6
日本伝熱学会学術賞を受賞して
……張 華城（九州大学），梅原 裕太郎（九州大学），吉田 啓之（JAEA），
森 昌司（九州大学）…… 7
日本伝熱学会登鯉賞を受賞して……堀 琢磨（東京農工大学）…… 8
日本伝熱学会登鯉賞を受賞して……李 秦宜（九州大学）…… 9
日本伝熱学会奨励賞を受賞して……安倉 祐樹（京都大学）…… 10
日本伝熱学会奨励賞を受賞して……川合 晃生（九州大学）…… 11

〈第 63 回日本伝熱シンポジウム〉

第 63 回日本伝熱シンポジウムの報告
……戸谷 剛，植村 豪（北海道大学），青山 祐介（北海道立総合研究機構），
小林 一道，田部 豊，能登大輔，能村 貴宏，藤井 宏之（北海道大学），
櫻井 篤（中央大学），西田 耕介（京都工芸繊維大学），西 剛伺（足利大学），
近藤 義広（日立アカデミー）…… 12
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 － 第 63 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）…… 21

〈特集：電気流体力学と伝熱〉

特集「電気流体力学と伝熱」にあたって
…… 西川原 理仁（名古屋大学） …… 22
著者が歩んだ電気流体力学研究の歴史と近年の研究動向
…… 花岡 良一（金沢工業大学） …… 23
電気電子機器・デバイスにおける熱流体解析と電気流体力学的伝熱応用
…… 匹田 政幸（九州工業大学） …… 33
電気流体力学(EHD)効果によるサブクール流動沸騰熱伝達促進
…… 鹿野 一郎（山形大学） …… 39
電界共役流体の CPU 冷却システムへの応用
…… 桜井 康雄（足利大学） …… 45
イオン風の対流冷却性能解明に向けた研究の進展
…… 畑本 明彩未（青山学院大学），金子 泰（東北大学） …… 51
電気流体力学研究と先進熱輸送への応用
…… 西川原 理仁（名古屋大学） …… 62

〈行事カレンダー〉 …… 69

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 64 期（2025 年度）総会議事録 …… 70
2026 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 … 72
編集出版部会からのお知らせ …… 73
TSE 投稿規定 …… 74

〈編集出版部会ノート〉 …… 82

Vol.65, No.272, July 2026

CONTENTS

＜Opening-page Gravure: heat-page＞

Ryoichi HANAOKA (Kanazawa Institute of Technology),
Masayuki HIKITA (Kyushu Institute of Technology),
Ichiro KANO (Yamagata University),
Yasuo SAKURAI (Ashikaga University),
Asami HATAMOTO (Aoyama Gakuin University),
Yutaka KANEKO (Tohoku University),
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University) ····· Opening Page

＜New and Former Presidents' Addresses＞

Retirement Address as the 63rd and 64th President
Kazuhiko Suga (Otemon Gakuin University) ····· 1

Inaugural Address as the 65th President
Taku OHARA (Tohoku University) ····· 3

＜The 38th Heat Transfer Society Awards＞

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2025
Akio MIYARA (Saga University) ····· 4

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Xin HUANG (The University of Tokyo), Takashi TANIGUCHI (NIMS),
Masahiro NOMURA (The University of Tokyo) ····· 6

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Huacheng Zhang (Kyushu University), Yutaro Umehara (Kyushu University),
Hiroyuki Yoshida (JAEA), Shoji Mori (Kyushu University) ····· 7

On Receiving Touri Award of the Heat Transfer Society of Japan
Takuma HORI (Tokyo University of A&T) ····· 8

On Receiving Touri Award of the Heat Transfer Society of Japan
Qinyi LI (Kyushu University) ····· 9

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Yuki AKURA (Kyoto University) ····· 10

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Kosei KAWAI (Kyushu University) ····· 11

＜The 63rd National Heat Transfer Symposium of Japan＞

Report on the 63rd National Heat Transfer Symposium of Japan
Tsuyoshi TOTANI, Suguru UEMURA (Hokkaido University),
Yusuke AOYAMA (Hokkaido Research Organization),
Kazumichi KOBAYASHI (Hokkaido University),
Yutaka TABE, Daisuke NOTO, Takahiro NOMURA, Hiroyuki FUJII (Hokkaido University),
Atsushi SAKURAI (Chuo University), Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology),
Koji NISHI (Ashikaga University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy) …… 12

Best Presentation Award – 63rd National Heat Transfer Symposium of Japan –
Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology) …… 21

＜Special Issue: “Electrohydrodynamics and Heat Transfer”＞

Preface to “Electrohydrodynamics and Heat Transfer”
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University) …… 22

Author’s history of electrohydrodynamic research and recent research trends
Ryoichi HANAOKA (Kanazawa Institute of Technology) …… 23

Thermal-Fluid Analysis and Electrohydrodynamic Heat-Transfer Applications in Electrical and Electronic Equipment and Devices
Masayuki HIKITA (Kyushu Institute of Technology) …… 33

Enhancement of boiling heat transfer by electrohydrodynamic (EHD) effects
Ichiro KANO (Yamagata University) …… 39

Application of Electro-Conjugate Fluids to CPU Cooling Systems
Yasuo SAKURAI (Ashikaga University) …… 45

Progress in Research Toward Understanding Convective Cooling Performance of Ionic Wind
Asami HATAMOTO (Aoyama Gakuin University), Yutaka KANEKO (Tohoku University) … 51

Research on Electrohydrodynamics and Applications to Advanced Heat Transfer
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University) …… 62

＜Calendar＞ …… 69
＜Announcements＞ …… 70
＜Note from the JHTSJ Editorial Board＞ …… 82

第６３，第６４期を振り返って

Retirement Address as the 63rd and 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

第 63 期・第 64 期代表理事会長を務めさせていただきました，追手門学院大学の須賀一彦でございます．会員の皆様，ならびに理事・監事の皆様には，この二年間，多大なるご支援とご協力を賜り，心より御礼申し上げます．未解決の課題もなお残されておりますが，それらについては一定の方向性を示したうえで，第 65 期執行部へ引き継がせていただきました．

私が会長を拝命したこの二年間，理工系学協会全体で会員数の減少が続くなか，本学会の持続可能性を高めるため，DX 化を含めた学会運営のレジリエンス強化を目指し，新たな運営体制の構築に取り組んでまいりました．第 63 期には，学会事務局業務の外部委託を検討し，関係各位のご尽力のもと，一般社団法人学会支援機構との業務委託契約を進め，第 64 期より委託業務を開始いたしました．しかしながら，私どもの見通しの甘さもあり，旧事務室や保管資料の整理，預金口座や会計処理の一元化などの残務整理に想定以上の時間を要し，結果として約一年を費やすこととなりました．そのため，第 64 期総会までに会計監査を完了できない事態となり，会員の皆様には多大なご心配とご迷惑をおかけいたしました．この場をお借りして深くお詫び申し上げます．

一方，会員制度に関する課題については，事務局移行対応に追われたこともあり，第 63 期には十分な議論を行うことができず，第 64 期での重要課題として検討を進めました．新規会員の獲得はもちろん重要ですが，それと同時に，学会活動に貢献していただいている会員の皆様への処遇の充実や，長年ご活躍いただいた会員が退職を機に退会されることを防ぎ，活躍される場を提供する仕組みづくりも必要であると考えました．その一環として，伝熱分野において顕著な功績を挙げられた会員に対するフェロー制度の創設を提案し，さらなる活躍の場を提供できる環境整備を進めました．また，シニア会員に対する会費免除制度の導入についても検討を重ね，先日の総会においてご承認いただくことができました．これらの制度により，多様な世代の会員が継続して活躍できる環境が整うことを期待しております．

また，今回の事務局移転に際して，膨大な紙資料の保管・整理・処分が大きな負担となったことから，学会刊行物の完全デジタル化の必要性を改めて痛感いたしました．この課題については第 63 期当初から検討を開始しましたが，運用方法など多くの課題への対応検討に時間を要し，結論を得るまでには至りませんでした．今後も継続課題として次期に引き継がれることとなります．

昨年開催された第 62 回日本伝熱シンポジウムでは，HTSJ 国際伝熱シンポジウムを沖縄において同時開催し，大きな成功を収めることができました．これは関東支部を中心とする実行委員会の皆様の並々ならぬご尽力の賜物であり，心より敬意を表したいと思います．この経験を通じて，国内開催型の国際会議に対する潜在的な需要の大きさを実感するとともに，担当支部と開催地を必ずしも一致させない運営形態も，今後のシンポジウム運営の一つの方向性を示していると感じました．近年の会員数の地域的偏在や，それに伴う支部間負担の不均衡を考慮すると，従来型の運営方式は既に限界に近づいており，持続可能な運営のためには，抜本的な見直しが早急に必要であり，この点についても次期執行部において引き続き検討いただくことになるものと思います．

このように，日本伝熱学会は現在さまざまな課題を抱えております．しかし，それらの課題を一つひとつ克服しながら，時代に適応した学会へと進化していくことが重要であると考えております．そして，その実現のためには，会員の皆様のご理解とご協力が不可欠です．今後とも本学会の発展のため，変わらぬご支援を賜りますようお願い申

し上げます．

最後になりましたが，この二年間，会長として学会運営に携わる機会をいただきましたことに深く感謝申し上げます．皆様のご協力に心より御礼申し上げ，第 63 期・第 64 期会長退任のご挨拶とさせていただきます．誠にありがとうございました．

第 65 期会長就任にあたって

Inaugural Address as the 65th President



小原　拓（東北大学）
Taku OHARA (Tohoku University)
e-mail: ohara@ifs.tohoku.ac.jp

第 65 期会長を拝命しました. 私には身に余る重責で，汗顔の至りですが，幸いにも素晴らしい副会長・理事・監事の方々に恵まれましたので，協力してきちんと会務に当たりたいと思います.

最近の伝熱学会は，コロナ禍がやっと収まったところで事務局の再構築が課題となり，大変なことだったと思います．須賀前会長はじめ皆様のご尽力で立ち上がった体制を大切に引き継ぎます.

国際活動では，今年はリオデジャネイロの国際伝熱（IHTC）や各種協賛事業に加えて，今秋には AUTSE[1]の事務局が, 現在ホストしている韓国を離れます．日本としては，アジアにおける国際連携の将来を熟考して適切に対応します．抜山記念国際賞 2026[2]については, 選考結果を今回の総会で報告しましたが，毎回，卓抜した候補者が各国から推薦され，国際賞として世界で認知されていることを実感しています．今後も厳正な審査を貫き，世界的な伝熱学界の主要事業として守り育てたいと思います．なお，授賞式と受賞講演は，8 月 3 日に IHTC 中で Plenary として催行されます.

会員数の減少は深刻な問題です．しばしば考え込んでしまうのは,「熱」の問題自体は広い分野で重要視され, 世界中で研究が盛んであることです. 伝熱学会は何かを取りこぼしているのでしょうか.

社会一般に対する学会の役割は，正しい知識を提供する「権威」であり[3]，その分野で日本を代表して国際的な科学技術の世界に名誉ある地位を占めることです．そのために，清廉な志操で真理を追究します．一方，個々の会員に対して，学会はその恩恵を十分に提供できているでしょうか.

もとより学問において,「一人でない」ということは，相互検証や切磋琢磨，多様性など本質的に重要で，その環境となるのが学会です．伝熱学会も，シンポの活況を見るにつけ，この点で後れを取っているとは思えません．一方で，成熟した基盤的分野では，研究者はもはや学会に帰属意識を持ちにくいのかもしれません[4]し，因果関係の発見に優れた機械学習の隆盛をみると，結果に至るメカニズムの解明を目指す従来の要素還元主義的な研究方針にも, 変化が必要なのかもしれません.

しかし，伝熱学の全体は初学者の教育から最先端の研究開発まで幅広く，参加者それぞれに合う方法が必ずあるはずです．そうした個々の自由な努力をまとめて社会に協働するのが学会の大きな役割であり，それが個々の会員の幸せにつながると思います．会員が誇りをもって自由な研究教育に打ち込み，それが適切に評価されて社会貢献の実感が得られるよう願い, そのために努力します.

このようなことをつらつらと考えながら，この 1 年を有意義なものにしたいと思います．どうぞよろしくお願いいたします.

注

[1] Asian Union of Thermal Science and Engineering は，日中韓ほか 5 つの国と地域で構成され，事務局は 2 年毎に移動します．4 年毎に ACTS（Asian Conference on Thermal Science）を開催し，2028 年は韓国済州島を予定しています.

[2] 抜山四郎先生の卓越した沸騰研究を記念して，2 年に一度授賞します．2028 の公募は来年 6 月頃に開始される予定です.

[3] 自由な学問の中で確立される権威は，合理的で安定した社会のために重要ですが，いま一般に学界が市民の信頼を得ているかと言えば，そうではなく，それが学術会議の問題や学問の自由の雲行きにつながっていると思います.

[4] 会員を増やしている学会は，横断的で応用技術や新産業に明確なリンクをもつところが多いと思います．様々な分野で普遍的な現象や法則を見出してきた基盤的学問も，時に耕す土地を替えて未踏の荒地を開拓していかなければ，その魅力を失ってしまうのでしょうか.

第６４期（２０２５年度）表彰選考委員会　報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2025

表彰選考委員会　委員長
宮良　明男（佐賀大学）
Akio MIYARA (Saga University)
e-mail:miyara@me.saga-u.ac.jp

１．日本伝熱学会賞

2025 年度(令和 7 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 64 期は 2025 年 12 月 12 日を応募締切として募集を行い，最終的に学術賞 5 件，登鯉賞 6 件，奨励賞 4 件の自薦・他薦の中から候補を決定しました. 技術賞と貢献賞への応募はありませんでした. 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，登鯉賞 2 件，奨励賞 2 件を受賞候補者として 4 月の理事会に推薦し，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，札幌で開催された日本伝熱学会第 64 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：Zhang Huacheng（九州大学）
共同研究者：梅原 裕太郎（九州大学）
吉田 啓之（日本原子力研究開発機構）
森 昌司（九州大学）
「代替流体を用いた環状二相流における液膜構造の普遍スケーリングと界面輸送機構の解明」
第 60 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，H1414，2023.

2) 代表研究者：HUANG Xin （東京大学）
共同研究者：谷口 尚（物質・材料研究機構）
野村 政宏（東京大学）
「フォノンの流体的性質による熱テスラバルブの実現」
第 62 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，GS15-4-02，2025.

1. 2 登鯉賞（Touri Award (Outstanding Young Researcher Award) of the Heat Transfer Society of Japan）

1) 受賞者：李 秦宜（九州大学）
「走査型電子顕微鏡「その場」熱計測手法の開発」
第 59 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E312, 2022.

2) 受賞者：堀 琢磨（東京農工大学）
「ナノ多結晶体のモデリングとフォノン輸送解析の連成による熱伝導率支配要因の解明」
第 60 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D221, 2023.

1. 3 奨励賞（Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan）

1) 受賞者：安倉 祐樹（京都大学）
「ナノ・マイクロ伝熱現象の解明に向けた周波数領域サーモリフレクタンスに基づく微小スケール熱計測技術の開発」
第 62 回日本伝熱シンポジウム，HTSJ International Heat Transfer Symposium 講演論文集，IGS15-1-04，2025.

2) 受賞者：川合 晃生（九州大学）
「短波長赤外顕微分光による含水試料中の水分子回転緩和時間と水分活性の測定」
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，BPA43，2024.
第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, G112, 2024.




学術賞の受賞者




登鯉賞および奨励賞の受賞者
学会賞 授賞式

２．名誉会員の顕彰

第 64 期では名誉会員として以下の 4 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) 木戸 長生（OK-Heat コンサルタント）
第 54-55 期理事，第 56 期副会長，第 58-59 期監事

2) 安田 俊彦（日立造船株式会社）
第 50-51 期理事，第 52-53 期監事，第 55 期副会長

3) 秋吉 亮（IHI プラント建設（株））
第 49-50 期理事，第 51 期副会長，第 57-58 期監事

4) 宗像 鉄雄（産業技術総合研究所）
第 51-52 期理事，第 58-59 期副会長，第 60 期会長



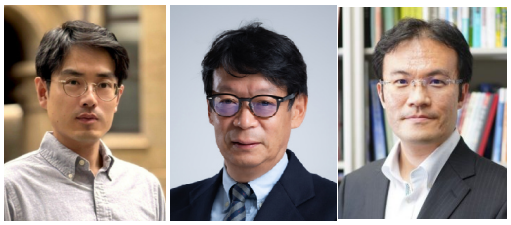
名誉会員証 授与式

３．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 64 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．

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



HUANG　Xin（東京大学），谷口　尚（物質・材料研究機構），野村 政宏（東京大学）

Xin HUANG (The University of Tokyo), Takashi TANIGUCHI (NIMS), Masahiro NOMURA (The University of Tokyo)

e-mail: huangxin@iis.u-tokyo.ac.jp

このたびは，公益社団法人日本伝熱学会学術賞を賜り，大変光栄に存じます．選考委員の先生方をはじめ，関係者の皆様に心より御礼申し上げます．

本研究は，固体中の熱輸送を担うフォノンの集団運動に着目し，従来の拡散的理解を超えた新しい熱輸送機構の解明と制御を目的として行ってきたものです．近年，フォノンの正規散乱が支配的となる条件下では，流体のような集団的振る舞い（フォノン流体力学）が発現することが注目されています．本研究は，このフォノン流体力学的描像に基づき，非線形熱輸送現象の理解と応用展開を目指したものです．

まず，本研究では，微細構造中におけるフォノン流の非線形応答に着目し，従来のフーリエ則では記述できない熱輸送特性を理論的および数値的に明らかにしました．特に，高速流条件においてフォノン流が慣性を持つことにより，流れの方向に依存した非対称な熱輸送が生じることを示しました．この結果は，熱輸送が単なる拡散現象ではなく，流体的な運動として理解できることを示唆するものです．

さらに，この非線形性を積極的に利用することで，「熱テスラバルブ」と呼ばれる新しい熱制御概念を提案しました（図 1）．テスラバルブは本来，流体に対して流れの整流作用を持つ構造として知られていますが，本研究ではこれをフォノン輸送に適用し，幾何構造のみで熱流の方向依存性（ダイオディシティ）を実現できることを示しました．特に，流速の増加に伴い整流効果が顕著になるという非線形特性を明らかにし，従来の熱ダイオードとは異なる新しい設計原理を提示しました[1]．

これらの成果は，フォノン流体力学という基礎物理に立脚しつつ，熱輸送制御という工学的課題に対して新たな指針を与えるものです．すなわち，材料固有の非対称性に依存せず，構造設計のみで熱流を制御できる可能性を示した点において重要です．また，本研究はナノスケールにおけるエネルギー輸送の理解を深化させるとともに，将来的な熱マネジメント技術や熱機能デバイスへの応用が期待されます．

本研究は，東京大学生産技術研究所野村研究室において行われたものです．野村先生には研究の着想から遂行に至るまで終始ご指導を賜りました．また，共同研究者の皆様には多大なるご協力をいただきました．また，谷口先生には高純度グラファイト試料の作製において多大なるご貢献をいただき，深く感謝申し上げます．さらに，本研究の一部は科研費および関連プロジェクトの支援を受けて実施されたものであり，ここに深く感謝申し上げます．

本受賞を励みとして，今後も熱輸送現象の本質理解とその応用展開に取り組んでまいります．

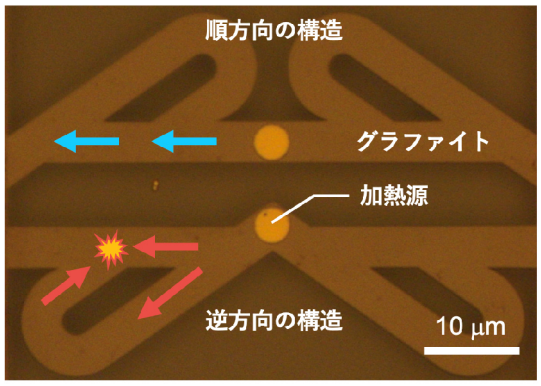


図 1．グラファイトテスラバルブ

[1] Huang, X., Anufriev, R., Jalabert, L., Watanabe, K., Taniguchi, T., Guo, Y., Ni, Y., Volz, S., and Nomura, M., A graphite thermal Tesla valve driven by hydrodynamic phonon transport, Nature **634**, 1086 (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



張 華城（九州大学），梅原 裕太郎（九州大学），吉田 啓之（JAEA），森 昌司（九州大学）
Huacheng ZHANG (Kyushu University), Yutaro UMEHARA (Kyushu University),
Hiroyuki YOSHIDA (JAEA), Shoji MORI (Kyushu University)

このたびは，日本伝熱学会学術賞という大変名誉ある賞を賜り，誠に光栄に存じます．本研究をご評価くださいました選考委員の先生方ならびに日本伝熱学会関係各位に，受賞者一同，心より御礼申し上げます．また，本研究をご推薦くださいました先生をはじめ，これまで本研究にご指導・ご支援を賜りました皆様に，深く感謝申し上げます．

受賞対象となった研究は，「代替流体を用いた環状二相流における液膜構造の普遍スケーリングと界面輸送機構の解明」です．環状二相流は，原子炉などの高熱負荷システムに広く現れる流動様式であり，その熱流動特性は管壁上に形成される薄い液膜と，界面上を伝播するじょう乱波によって大きく支配されます．特に，再濡れ，ドライアウトなどの現象は，冷却限界や伝熱性能を決定する重要な要素です．一方で，原子炉実機に相当する高温・高圧条件下では，液膜を直接観察し，膜厚や波動特性を詳細に計測することは極めて困難であり，環状流における界面輸送機構には未解明な点が多く残されていました．

本研究では，HFC134a・エタノール系を用いた代替流体実験手法を構築し，高温・高圧蒸気–水系に近い気液密度比および表面張力条件を常温・低圧環境下で模擬し，鉛直円管内環状流における液膜特性および界面せん断応力を検討しました．その結果，同じ液相見かけ速度の下で，基底，平均，最大の液膜厚さと波高は気相ウェーバ数に対して整理すると，気液密度比と表面張力に関係なく，一つの曲線になることがわかりました．じょう乱波に作用する抗力 F_D と表面張力 F_σ の平衡を考慮すると（図 1），気相ウェーバ数を含んだ波高の式が導出されました．これで，抗力と表面張力の影響を含む気相ウェーバ数に対する波高と液膜厚さの依存性を説明ことに成功しました[1].

さらに，単相流における Moody 線図との類似性に着目し（図 2），じょう乱波の波高と等価砂粒粗さとの関係を明らかにすることで，界面せん断応力および圧力損失を予測するモデルを構築しました[2]．これらの結果は，環状流における液膜構造，じょう乱波挙動，および界面せん断応力の相互関係を理解する上で有用な知見を与えるものと考えております．本研究を通じて，実機条件で直接観察が困難な界面現象であっても，代替流体を用いることで，普遍的な整理へと展開できる可能性を示すことができました．

最後になりましたが，本研究は，多くの先生方，共同研究者，学生の皆様のご協力により進めることができました．九州大学および日本原子力研究開発機構の関係各位，ならびに日本伝熱学会の皆様に，改めて深く御礼申し上げます．

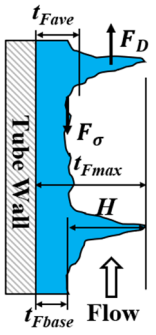


図 1　じょう乱波上における力の釣り合いモデル

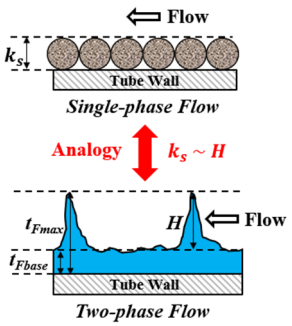


図 2　単相管内流の壁面せん断応力と環状二相流の界面せん断応力のアナロジー

参考文献

[1] Zhang, H., Mori, S., Hisano, T., Yoshida, H., Int. J. Multiphase Flow, 104342 (2023) 159.
[2] Zhang, H., Umehara, Y., Yoshida, H., Mori, S., Int. J. Heat Mass Transf., 124750 (2024) 218.

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



堀　琢磨（東京農工大学）
Takuma HORI (Tokyo University of A&T)
→　*e-mail: hori@go.tuat.ac.jp*

このたびの札幌コンベンションセンターにおいて開催された日本伝熱学会第 64 期総会にて，日本伝熱学会登鯉賞を賜りましたことを，心より光栄に存じます．これまでご指導・ご鞭撻を賜りました方々，ご推薦・ご選考くださいました方々，そして伝熱シンポジウムなどの学会の場を通してご議論させていただきました方々に，厚く御礼申し上げます．

受賞の対象の研究は，「ナノ多結晶体のモデリングとフォノン輸送解析の連成による熱伝導率支配要因の解明」です．半導体および絶縁体の結晶において，熱伝導を担うのはフォノンと呼ばれる格子振動の準粒子です．ナノ多結晶体をはじめとするナノ構造材料では，フォノンは界面に衝突することで輸送が制限されるため，熱伝導率が低下します．したがって，ナノ多結晶体の熱伝導率は構造に依存するため，実験的な測定や，シミュレーションによる評価が必要となります．しかし，これまでのフォノン輸送のシミュレーションに関する研究では，ナノ多結晶体のモデリングが十分に現実的でないほか，複雑な構造に対して効率的に適用可能ではないなど，課題がありました．

そこで，ナノ多結晶薄膜構造を対象に，幾何学的なアプローチによって結晶粒径分布の異なる構造をモデリングし，フォノン輸送のシミュレーションと組み合わせることで，どのような構造においてより熱伝導率が高いかを定量的に明らかにしました．まず，結晶成長によって合成したナノ多結晶薄膜構造に特有な異方的な熱伝導率を一括で求めるシミュレーション方法を新たに開発しました．この方法では，有限長の薄膜の厚さ方向と，無限長に近似可能な薄膜の面内方向とで，フォノンの軌跡に関して異なる情報を用いることで，熱伝導率を同時に求めることができます．この方法の妥当性は，単純な薄膜構造における既知の理論解を再現することで，確認しました．

開発したシミュレーション方法を用いて，結晶粒径分布の異なる複数のナノ多結晶薄膜構造の熱伝導率を求めました．その結果，特に面内方向において，熱伝導率は粒径分布の影響を受けやすいことを明らかにしました．このことから，より精緻な構造設計が熱伝導率向上に必要であることがわかりました．さらにこれらの熱伝導率について，結晶粒径を用いた単純な理論モデルを構築したところ，精度よく予測することを見出しました．

本研究で得た知見と開発した手法を用い，発展的な位置づけの研究も行っています．フェーズフィールド法との連携が，その一つです．フェーズフィールド法は，結晶成長を模擬することができるため，結晶核の大きさや配置などの成長条件を加味したナノ多結晶薄膜構造のモデリングが可能です．そこで，フォノン輸送のシミュレーションと組み合わせることで，成長条件と熱伝導率の関係の解明に取り組んでいます．

今後の展開として，構造モデリング，物性パラメータ，シミュレーション手法を精緻にすることで，より材料設計に資する研究を確立していきます．例えば，絶縁放熱材料のナノ多結晶体において，フォノン散乱を抑制し高い熱伝導率を示す構造の設計指針を明らかにします．さらに，現在進めております企業様との共同研究を深化・推進することで．真に社会に貢献する熱管理材料およびデバイスの実現を目指します．

2019 年より東京農工大学にて准教授として独立した研究室の運営を任されたことで，独自の研究に集中できております．このような環境を与えていただいた所属組織に感謝申し上げます．また，伝熱コミュニティの皆様と，日々研究に取り組んでくれる研究室の学生たちに，改めて感謝申し上げます．本賞を励みに，伝熱分野の発展に貢献できるよう，精進してまいります．ご指導，ご鞭撻を賜りますよう何卒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
of the Heat Transfer Society of Japan



李　秦宜（九州大学）
Qinyi LI (Kyushu University)
e-mail: qinyi.li@aero.kyushu-u.ac.jp

このたび, 第 63 回日本伝熱シンポジウムにおいて，日本伝熱学会登鯉賞という栄誉ある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，日頃からご丁寧なご指導を賜った先生方，本賞を推薦してくださった先生，選考に携わってくださった先生方，そして同僚や関係者の皆様に心より御礼申し上げます．また，伝熱シンポジウムをはじめ各学会で活発な意見交換をさせていただいた皆様にも，改めて深く感謝いたします．本賞を胸に，これまで以上に努力を続け，伝熱分野の発展に少しでも貢献できるよう努めてまいります．

受賞対象となった研究テーマは「走査型電子顕微鏡「その場」熱計測手法の開発」であり，その研究背景は以下の通りです．電子機器に用いられる材料の特徴寸法は，近年ナノスケールへと急速に微細化しており，それに伴い，電子機器の高度な熱制御を実現するには，ナノスケールの空間分解能を有する高精度な熱計測技術が不可欠です．しかしながら，そのような超高分解能熱計測技術は，現時点では十分に確立されていません．一方で，ナノ材料単体の熱物性データには数 10%といった大きな誤差を含む場合が多く，理由の一つはサンプルごとの構造の違いにある．そのため，ナノ材料における内部構造と熱物性との相関関係を解明することが極めて重要となります．

本研究では，これらのナノスケール熱計測における課題を解決することを目的として，走査型電子顕微鏡（SEM）の試料室内に，パルス電子線による局所加熱機能，ナノ白金センサーを用いた熱流計測機能，走査透過電子顕微（STEM）検出器による内部構造観察機能，さらにナノマニピュレータによる構造制御機能を統合した，その場熱計測プラットフォームを構築しました．本手法により，50 nm の空間分解能で界面を含む熱抵抗分布を計測し，ナノ構造と熱輸送特性との相関関係を解明することに成功しました．このプラットフォームの応用の一例として，単一カーボンナノチューブ（CNT）において熱伝導率が約 2 倍異なる要因を,内部構造の違いに基づいて明らかにしました[1]．また, CNT 間の熱・電気輸送特性について，接触形態の動的変化や界面欠陥といった構造因子との相関を解明しました．その結果，CNT 間界面における単位面積あたりの熱コンダクタンスが，接触構造の変化により二桁規模で変動することを実証しました[2].

使用・改造した走査型電子顕微鏡は，高田保之先生を代表者，高橋厚史先生を参加者として採択された平成 23 年度 CREST 課題「固気液相界面メタフルイディクス」の研究費により導入された FEI Versa 3D DualBeam です．研究遂行にあたり，多大なるご支援を賜りました高田先生と高橋先生に，深く感謝申し上げます．また，九州大学工学部技術部の生田竜也様と福永鷹信様には，本研究の遂行において多大なるご協力をいただき，心より感謝申し上げます．さらに，李大煒博士には，学生時代から学術研究員時代に至るまで，本研究に多大な貢献をしていただき，深く感謝申し上げます．最後になりますが，これまで本研究を支えてくださったすべての皆様に，改めて深く御礼申し上げます．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．

参考文献

[1] Li, D., Li, Q.Y., Ikuta, T., Takahashi, K. *Appl. Phys. Lett.* 120, 043104 (2022).
[2] Li, D., Takahashi, K., Li, Q.Y. *Commun. Mater.* 5(1), 86 (2024).

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



安倉　祐樹（京都大学）
Yuki AKURA (Kyoto University)
e-mail: y_akura@nms.me.kyoto-u.ac.jp

この度, 第 63 回伝熱シンポジウムにおきまして, 日本伝熱学会奨励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，学会事務局の皆様，ならびにこれまでご指導頂きました先生方，伝熱シンポジウムを始めとする学会の場でご助言を頂きました皆様に深く御礼申し上げます.

受賞対象となりました研究,「ナノ・マイクロ伝熱現象の解明に向けた周波数領域サーモリフレクタンスに基づく微小スケール熱計測技術の開発」は，ナノ・マイクロスケールの熱輸送ダイナミクスを，信頼できる計測を通じて実験的に解き明かすことを目標に取り組んでいるものです.

近年の AI の著しい発展にも表れているように，半導体デバイスはその構造の微細化・集積化を通じて飛躍的な性能向上を遂げてきました. 一方で，このような微細スケールでの熱輸送現象には未解明な点が多く残されており，その理解は最先端デバイス設計の観点からも重要です. しかし, ナノ・マイクロスケールの熱輸送現象を対象とした熱計測では，原則として拡散的に伝播する熱に対して微細スケールの高空間分解能を実現することや，微小な熱量を高 S/N 比で測定することは難しく，現在も盛んに研究が進められております．これまでに様々な測定手法が提案されてきましたが，依然として測定感度や精度，汎用性といった点で課題が多く残されており，ナノ・マイクロスケール熱輸送現象の解明に向けては，信頼できる測定技術の確立が不可欠です.

そのような信頼できる測定技術を確立すべく，私は周波数領域サーモリフレクタンス（Frequency domain thermoreflectance, FDTR）と呼ばれる手法に着目し，それをベースにした微小スケール熱輸送計測技術の開発に取り組んでおります．FDTR はレーザを用いた非接触熱物性計測手法です．試料表面をレーザで周期加熱し，それによる表面温度応答とその周波数依存性から熱物性値を得ます. 表面周期加熱の影響が及ぶ領域の深さ（熱浸透深さ）が周波数の上昇とともに減少することを利用し，深さ方向を切り分けた熱物性解析や，フォノンの平均自由行程を下回る寸法スケールでの弾道的フォノン輸送といったナノスケール熱輸送の観測にも適用できるものです.

私は FDTR 測定系を構築するところから研究を開始し，地道な測定系の調整や独自の光学系の導入等により，従来見過ごされてきたレーザースポットの歪みを抑制しながら，150 MHz という高周波数での測定（すなわち高空間分解能な測定）を実現しました[1]．また，従来は試料表面全体に必要とされていた金属トランスデューサ膜内部での熱伝導が，低熱伝導率試料や薄膜試料の測定を妨げるという課題に対し，トランスデューサ膜のパターニングによりその膜内部での熱輸送を抑制し，試料内部での熱輸送への感度を高めることで，高精度な熱物性計測を実現する方法を提案しました[2]. 本内容は 2025 年 5 月の HTSJ 国際伝熱シンポジウムにおいても発表し，多くのご議論・ご助言を頂いたものです.

現在はこれらの手法を活用し，従来手法ではその測定が困難であるようなナノスケール厚みの薄膜の熱物性や，グラフェンを始めとする低次元材料における興味深い微小スケール特有の熱輸送現象の測定に取り組んでおります．測定技術の更なる高度化を通じて，実測に基づいた議論が可能な対象を広げていきながら，開発した信頼できる測定技術を最大限活用することで，ナノスケール熱輸送現象の解明という大きな目標に向け，今後も研究に邁進してまいります.

参考文献

[1] Akura, Y. et al., Rev. Sci. Instrum., **96** (2025) 014902.
[2] Akura, Y. et al., Rev. Sci. Instrum., **96** (2025) 084906

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



川合　晃生（九州大学）
Kosei KAWAI (Kyushu University)
e-mail: kawai.kosei.757@m.kyushu-u.ac.jp

この度は, 日本伝熱学会第 64 期総会におきまして，大変栄誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜り，光栄に存じます．ご推薦ならびにご選考くださいました先生方，学会事務局の皆様に心より御礼申し上げます．

受賞対象となりました「短波長赤外顕微分光による含水試料中の水分子回転緩和時間と水分活性の測定」は，私が東京大学大学院博士課程に在籍中, 白樫了教授のご指導のもとで行った研究です．白樫研究室では，含水試料における水由来の吸収を示す短波長領域（1.8～2.2 μm）の赤外吸収スペクトルを解析し，水分子の水素結合状態，回転緩和時間を算出する短波長赤外顕微分光法が開発されてきました．本研究では，この手法を基盤として，測定温度範囲の拡張と，水分活性を評価する手法の確立を目指しました．

水は生体内の大部分を占める重要な媒質であり，特に，細胞や生体試料の凍結保存において，その状態は細胞の生存性を大きく左右します．細胞内外の水は，凍結・解凍過程において氷晶の形成や成長に関与し，細胞膜や細胞内構造に損傷を与える可能性があります．そのため，凍結保護物質の添加や冷却条件の最適化には，試料中の水の状態を定量的に評価することが重要です．

本研究では，水分子のダイナミクスを表す回転緩和時間と，化学ポテンシャルに基づく熱力学的指標である水分活性に着目しました．回転緩和時間は，水分子のダイナミクスを表す指標であり，水分活性は凍結温度の予測にも用いることができます．これらの水の特性を分光学的に測定することにより，凍結保存プロセスをより定量的に理解できると考えました．

まず，0℃以下における水分子の回転緩和時間測定に取り組みました．白樫研究室で開発された短波長赤外顕微分光法では，水分子の回転緩和時間を顕微分光的に評価できることが示されてきましたが，その適用は主に室温付近のみにとどまっていました．また，0℃以下では，水が氷になることで水素結合状態が大きく変化するため，純水を基準とした従来の解析をそのまま適用することは困難でした．そこで本研究では，氷点下でも液相を維持する水溶液を新たな基準として，短波長赤外スペクトルから得られる水素結合エネルギーに基づき，0℃以下における回転緩和時間を評価しました．その結果，誘電分光法による測定結果とよく一致し，本手法を低温環境下における水分子ダイナミクスの測定へ拡張できることを示しました．

さらに，水分活性の評価にも取り組みました．水分活性は水の化学ポテンシャルに基づく熱力学的指標であり，短波長領域の赤外吸収スペクトルから得られる水素結合エネルギーは，水分子間の相互作用を反映します．本研究では，均質な水溶液を対象として，従来法で得られた水分活性と，短波長赤外顕微分光法により得られた水素結合エネルギーを比較しました．その結果，両者の間に相関がみられ，水素結合エネルギーに基づいて水分活性を予測できることを示しました．

以上の成果により，短波長赤外顕微分光法を用いることで，含水試料中の水分子ダイナミクスおよび熱力学的状態を非接触かつ空間分解的に評価できる可能性を示すことができました. 本手法は，凍結保存における水の役割の解明だけでなく，食品，生体材料，細胞・組織など，さまざまな含水材料の評価へ展開できると考えています．

最後になりましたが, 私は 2025 年 4 月より九州大学大学院工学研究院機械工学部門の助教に着任いたしました．今後も分光計測を基盤として，生体や含水材料における水の状態と熱的現象の理解に取り組み，伝熱分野の発展に貢献できるよう努めてまいります．今後ともご指導ご鞭撻のほど，何卒よろしくお願い申し上げます．

第 63 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 63rd National Heat Transfer Symposium of Japan

戸谷 剛，植村 豪（北海道大学），青山 祐介（北海道立総合研究機構），
小林 一道，田部 豊，能登 大輔，能村 貴宏，藤井 宏之（北海道大学），
櫻井 篤（中央大学），西田 耕介（京都工芸繊維大学），
西 剛伺（足利大学），近藤 義広（日立アカデミー）

Tsuyoshi TOTANI, Suguru UEMURA (Hokkaido University), Yusuke AOYAMA (Hokkaido Research Organization), Kazumichi KOBAYASHI (Hokkaido University), Yutaka TABE, Daisuke NOTO, Takahiro NOMURA, Hiroyuki FUJII (Hokkaido University), Atsushi SAKURAI (Chuo University), Kosuke NISHIDA (Kyoto Institute of Technology), Koji NISHI (Ashikaga University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy)

1．はじめに

第 63 回日本伝熱シンポジウム（以下，伝熱シンポ）が，5 月 26 日（火）から 28 日（木）までの 3 日間の日程で，北海道札幌市の札幌コンベンションセンターにおいて開催されました．参加登録者数は 754 名（一般公開セッションのみの参加者および広告・機器展示関係者を含む），講演数は特別講演 1 件を含む 375 件でした．第 62 回，第 61 回の伝熱シンポでは国際シンポジウムが併催されていたため，単純な比較はできませんが，参加者数・講演数ともに概ね例年と同程度の規模で開催することができました．

今回の伝熱シンポの開催にあたり，最初の課題となったのは北海道支部における運営体制の確保でした．2024 年初頭の段階で北海道支部の正会員数は 19 名であり，さらに数名の会員の退職も予定されていたことから，2026 年の開催時点で実働可能な人員が極めて限られることが予想されました．このため，第 61 期会長の平井秀一郎先生（東京科学大学）をはじめ，副会長の皆様にご相談し，北海道支部外からの支援体制を整備していただくこととなりました．

その結果，プログラム編集作業については，支部外の会員によるプログラム編集支援委員会を新たに設置し，ご支援いただくこととなりました．プログラム編集作業は人員を要する作業であること，さらに後述する学会支援システムの Confit を用いることで，北海道支部外からでも対応可能であると判断しました．本委員会の設立にあたっては，巽和也先生（京都工芸繊維大学）に多大なるご尽力をいただきました．また，初代委員長には北海道にご縁のある麓耕二先生（青山学院大学）にご就任いただき，大学において最も多忙な時期である 2 月にもかかわらず，複雑なプログラム編成作業を迅速かつ円滑に進めていただきました．その結果，現地実行委員会の負担は大幅に軽減され，本シンポジウムの円滑な運営に大きく貢献していただきました．ここに，プログラム編集支援委員会の皆様ならびに本体制の構築にご尽力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます．

会場については，過去に第 47 回（2010 年）および第 55 回（2018 年）の伝熱シンポでも利用された札幌コンベンションセンターを候補として準備を進めました．しかしながら，2024 年春の時点で，2026 年 5 月は既に全ての日程が埋まっていることが分かりました．止むを得ず 6 月下旬での開催を想定して会場を仮予約することとなりました．その後，幸いにも 5 月中の予約枠に空きが生じたため，最終的には例年とほぼ同時期となる 5 月 26 日から 28 日の日程で開催することができました．



図 1-1　札幌コンベンションセンター外観と看板

今回の伝熱シンポのセッション一覧と講演件数を表 1-1 と表 1-2 に記載させていただきます．またこれらの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も開催されました．それぞれの詳細な報告については後述させていただきます．

なお，今回の伝熱シンポでは特別講演と企業特別セッションを一般公開セッションに設定し，無料で参加を受け付けました．結果的に，一般公開セッションのみの参加登録者は 17 名に達し，公益社団法人としての役割も果たすことができたと考えております．

表 1-1　一般セッションの内訳

セッション名	講演件数
沸騰・凝縮	38
電子機器の冷却	15
強制対流	10
ヒートパイプ	5
多孔質内の伝熱	6
物質移動	3
計測技術	13
融解・凝固	10
分子動力学	20
混相流	0
自然対流	8
自然エネルギー	2
空調・熱機器	11
熱物性	6
ナノ・マイクロ伝熱	23
熱音響	2

表 1-2　オーガナイズドセッションの内訳

セッション名	講演件数
乱流を伴う伝熱研究の進展	13
熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進	18
ふく射輸送とふく射性質	11
化学プロセスにおける熱工学	10
水素・燃料電池・二次電池	18
濡れ現象の制御と理解	24
燃焼研究の最前線	22
バイオ伝熱	9

また第 63 回伝熱シンポは，国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）さきがけ「複雑流動」研究領域に共催いただき，さらに 5 月 27 日には札幌コンベンションセンターの特別会議場において，「複雑流動」第 2 期生成果報告シンポジウムもハイブリッド形式で開催されました．伝熱シンポ参加者は無料聴講可能としていただいたため，伝熱シンポ会場とシームレスに移動でき，活発な質疑応答や意見交換が行われました．発表者の大半は日本伝熱学会員ではありませんでしたが，“流体”という共通の学術基盤を有する研究者同士が交流する機会となり，異分野連携の促進という観点から有意義な企画であったとお聞きしました．

以上，伝熱シンポの概要をまとめさせていただきました．今回の伝熱シンポの運営状況や各行事の様子につきましても，各担当者にまとめていただきましたので，ぜひご一読下さい．

（戸谷 剛，植村 豪）

２．特別講演

特別講演の講師には，株式会社コンベンションリンケージの桝田安志氏をお招きし，「札幌コンベンションセンターの環境配慮の取り組み ―LEED 認証「GOLD」を取得 ―」という題目でご講演いただきました（図 2-1, 図 2-2）．実は今回の伝熱シンポ開催に際して，実行委員だけで全ての準備と運営を進めることが困難であったため，作業の一部を委託したのが株式会社コンベンションリンケージ様でした．札幌コンベンションセンターでのイベント開催を支援するだけでなく，会場自体のエネルギーの高効率利用，廃棄物処理など環境配慮にも取り組まれ，伝熱工学とも密接に関連することから，今回の特別講演をお願いしました．講演内容として，札幌コンベンションセンターの紹介に始まり，MICE 業界では「サステナビリティ」，「再エネ利用」，「水の高効率利用」，「廃棄物管理」，「環境認証」，「公共交通の利便性」が求められていること，その上で上記を評価項目にしている「LEED O+M 認証「GOLD」」を国内の MICE 施設で初めて取得したこと，電灯の LED 化・遮熱フィルムの導入・再生可能エネルギーの地産地消など札幌コンベンションセンターにおけるエネルギー管理の取り組み，将来への挑戦についてお話しいただきました．本特別講演は一般公開で行い，17 名の一般参加者がありました．

（戸谷 剛，植村 豪）



図 2-1　桝田 安志 氏



図 2-2　特別講演の様子

3．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，伝熱シンポジウム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，例年の伝熱シンポジウムにて開催しております．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ジウム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，優秀プレゼンテーション賞委員会（旧 学生会委員会）と現地実行委員会により企画・運営されております．本年度は 24 回目の開催となります．

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 62 回伝熱シンポ（沖縄）と同様，ポスター発表形式での開催となりました．講演申込数は 64 件で，そのうち 1 件のキャンセルがあったため，当日は 63 件の発表がありました．この件数は，昨年から 10 件の増加で，ここ数年の中では最高の件数であります．発表件数が多かったため，会場の大きさやポスターの配置方法には特に留意しました．現地の実行委員会および会場となった札幌コンベンションセンターの多大なご協力を頂いて，会場の中でも広いホールで開催し，さらにポスターパネル間のスペースも確保し，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（図 3-1）．



図 3-1　BPA セッション実施会場の様子

当日のセッションは 2 交代制で，講演番号が奇数の発表者は前半の 1 時間で，偶数の発表者は後半の 1 時間で発表していただきました．工夫を凝らしたポスターの数々が発表され，中には，タブレット等を利用した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．審査は，各発表に対して 5 名の審査員により厳正な審査が行われ，その結果，BPA-11 三枝涼（東北大），BPA-15 光亦充時（東京大），BPA-16 田村勇輝（東京理科大），BPA-28 岡田公誠（東京科学大），BPA-39 中島博貴（滋賀県立大），BPA-43 下村友貴（弘前大），BPA-48 田村亮太（九州工業大），BPA-56 寺田隼（慶應義塾大），BPA-57 生駒凱意（九州工業大）（敬称略，発表番号順）の 9 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）

シンポジウム 2 日目の総会での表彰式では，優秀プレゼンテーション賞委員会の櫻井篤委員長が冒頭で説明をされた後，受賞者の紹介と賞状の授与がシンポジウム実行委員長の戸谷剛実行委員長から行われ，最後に記念撮影が行われました（図 3-2）．



図 3-2　戸谷剛実行委員長，櫻井篤 BPA 委員会委員長との記念撮影

最後になりましたが，本セッションを開催するにあたり，審査員の先生方，優秀プレゼンテーション賞委員会の先生方，伝熱シンポジウム実行委員会の先生方には大変お世話になりました．この場をお借りして厚く御礼申し上げます．

（櫻井 篤，西田 耕介）

4．企業特別セッション

産学交流委員会では，シンポジウム2日目午後に，企業特別セッションを企画，運営しました．シンポジウムの公開セッションとして，開催地区における熱に関わる社業，取り組みをご紹介頂くセッションです．今回は，「北海道における企業の熱に関わる取り組みの紹介」と題して，企業2社にご講演頂き，60名前後の方々に参加頂きました．

講演題目等は，以下の通りです．

(1)「通信会社が“熱”を語る理由　—産業 と地域の持 続 的 発 展 に 向 け た HOKKAIDO　IOWN CAMPUSの取り組みと挑戦—」
NTTドコモビジネス株式会社
ビジネスソリューション本部
第三ビジネスソリューション部
北海道次世代産業振興・まちづくりPT
相川 裕哉 氏

(2) 「火を制する — ハイブリッドロケット推進における極限熱設計（北海道からの挑戦）」
Letara株式会社　創設者兼共同CEO
ケンプス　ランドン（Landon KAMPS）　氏

(1)ではIOWN（アイオン）を通じた消費電力，発熱問題の解決と北海道における取り組みについて，ご講演頂きました（図4-1）．(2)ではハイブリッド推進システムによる安全なロケットの実現と熱に関する課題についてご講演頂きました（図4-2）．いずれもそれぞれの分野において持続可能社会を目指している点が印象的でした．

2名のご講演者には，快くご講演をお引き受け頂き，深く感謝申し上げます．

（西 剛伺）



図4-1　NTTドコモビジネス　相川 裕哉 氏



図4-2　Letara　ケンプス　ランドン 氏

5．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 1 日目夕刻に，モノづくりセッションを企画，運営しました．モノづくりと熱との関わりについて，企業所属の正会員の皆様にご発表頂くセッションで，今回のシンポジウムで 3 回目の開催です．優秀プレゼンテーション賞セッションと併催され，ピーク時は 110 名を超える方々にご参加頂きました．

最初に，座長の近藤委員から，本学会の企業所

属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 5-1）．その後，14 社の企業による発表，総合討論が行われました（図 5-2）．発表企業と題目を表 5-1 に示します．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，札幌市内にて，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）

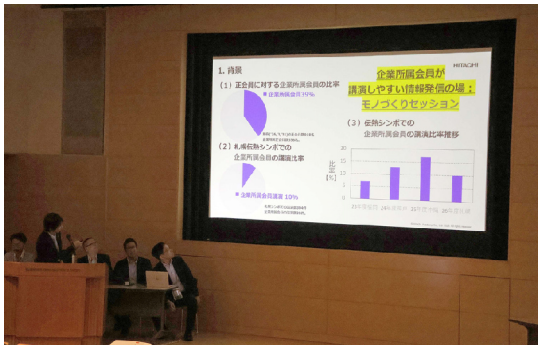


図 5-1　セッション趣旨説明の様子



図 5-2　モノづくりセッション会場の様子

表 5-1　モノづくりセッション発表企業一覧
（発表順）

企業名	題目
ベテル	パワーデバイス等に用いられる材料の熱伝導率測定技術開発　その１
NGK	赤外線を用いた新規熱処理プロセスの構築
KOA	基本部品から始まる熱設計改革
デンソー	過渡熱モデル解析と実機検証による発熱量算出技術
シーメンス	Simcenter Flotherm による半導体パッケージの低次元化モデル作成とその精度検証
コーセル	電子機器の熱設計　～電源開発"現場"の現実～
ナブテスコ	油空圧機器を電動化するパワーエレクトロニクス装置の熱設計
構造計画研究所	実験と解析の乖離検証による熱解析モデルの高精度化
トヨタ自動車	効率的な熱設計プロセスの標準化ツール　熱流センサ「Energy flow」のご紹介
日本製鉄	薄鋼板用誘導加熱の最適化手法の検討
IHI	焼き嵌め工程の冷却時間短縮における伝熱技術の貢献
WELCON	コルゲート型マイクロチャネル熱交換器の性能向上に関する取り組み
東亜電気工業	データセンター向け RDHX 導入検証と高負荷サーバー冷却に向けた取り組みの方向性
MESH-X	データセンター高負荷サーバーの蒸発冷却に関する研究

６．機器展示

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．北海道での開催ということで，多くの展示物の輸送にお手数をおかけいたしましたが，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させて頂きます（五十音順，敬称略）．

【機器展示】
- 英和株式会社
- 日本カノマックス株式会社
- 株式会社構造計画研究所
- 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 PARTNERS 株式会社
- ダンテック・ダイナミクス株式会社
- ニイガタ株式会社
- 日本フイルコン株式会社
- 株式会社フォトロン

【カタログ展示】
株式会社ベテル

【広告】
・エア・ウォーター産業・医療ガス株式会社
・株式会社サーマルサイエンス
・一般社団法人水素・燃料電池開発情報センター
・三浦工業株式会社

（植村 豪）



図 6-1　機器展示会場の様子

7．伝熱シンポ HP 開設・管理，講演プログラム・講演論文管理および参加登録管理

本年度のシンポジウムでは，昨年度と同様に，株式会社アトラスが提供する Confit を採用しました．Confit は，投稿管理システムとオンライン公開システムの 2 つから構成されています．投稿管理システムでは，講演論文申込，講演論文投稿，講演プログラム編成，座長管理，参加申込管理，受付管理等を行うことができ，オンライン公開システムでは，伝熱シンポ HP や講演論文データの制作・公開等を行うことができます．昨年度の伝熱シンポ報告記事にも記載されている通り，Confit を利用することで伝熱シンポ運営に必要な事務作業のほぼすべてを管理することができるため，伝熱シンポ運営において極めて重要なシステムとなっています．また，基本設定については昨年度に登録された情報が引き継がれていたため，比較的容易に作業を開始することができました．図 7-1 に，Confit を利用して作成した伝熱シンポ HP を示します．

講演論文投稿管理については，Confit を利用したことで大変スムーズに行うことができました．また，投稿された情報を基に講演プログラム PDF を作成していますが，昨年度の実行委員会から株式会社アトラスに対し，「講演プログラム PDF ファイルを 2 段組みで出力できるようにしてほしい」との要望が出されていたことを受け，今年度から講演プログラム PDF を 2 段組みで出力できるようになり，容易に講演プログラム PDF を作成することが可能となりました．一方で，著者所属などの投稿情報が統一された形式で入力されていないケースが多く，実行委員会側で修正を行う必要がありました．また，投稿時の入力ミスに起因して，申込期限終了後にも実行委員会へ問い合わせがあり，修正対応を行う必要がありました．実行委員会の作業負担を軽減するためにも，このような修正作業が発生しない体制づくりが必要であると感じます．例えば，入力内容は原則として投稿者の責任とし，実行委員会では修正を行わないことや，学生が投稿する場合には指導教員による事前確認を徹底してもらうことなどが考えられます．

講演プログラム管理については，今年度から新たに設置されたプログラム編集支援委員会の委員と連携して進めました．プログラム編集支援委員には，タイムテーブル作成，GS のプログラム編成，および座長選出を担当していただきました．委員の皆様の迅速な対応により，タイムテーブルや座長選出の原案を短期間で作成することができました．一方で，今年度から新設された委員会であったため，事前に実行委員会との間で業務内容や作業分担について，細部（例えば暫定プログラム案の確認作業等）まで整理することができなかった点は反省点として挙げられます．現在の日程でシンポジウムが開催される場合，講演プログラム編成は 1 月下旬から 3 月上旬にかけて行われますが，大学業務の繁忙期とも重なるため，今回のシンポジウムでは情報共有や調整，編成作業および確認作業に至るまで苦労しました．今後もプログラム編集支援委員会が継続されるのであれば，プログラム編成に必要な細かな作業内容まで共有した上で，事前に業務分担を明確にしておくことが望ましいと考えます．

参加登録管理については，Confit を利用したことにより，大きな問題なく開始することができました．参加費の支払い方法については，クレジットカード決済および銀行振込に対応していました．また，Confit は請求書払いにも対応しており，従来に比べて事務作業が大幅に軽減されたことは間違いありません．今回の伝熱シンポでは，参加費と意見交換会費を別々に支払えるよう設定したため，それぞれの領収書を個別に発行することが可能となりました．ただし，技術的な問題も少なか

らず発生したため，参加者からの問い合わせが多く寄せられました．参加登録は 3 月上旬から開始しましたが，プログラム編成の確認・公開作業と時期が重なったこともあり，対応には大変苦労しました．

Confit は非常に有用なシステムであり，前述の通り，伝熱シンポ運営に関わるほぼすべての作業と密接に関係しています．そのため，1 人で管理を行う場合には作業負担が集中してしまいます．また，参加者からの問い合わせについても，Confit の技術的な内容に関するものも多く，頻繁にメール対応を行う必要がありました．このような状況を回避するためにも，複数人で Confit を運用する体制を整備するなど，特定の個人に作業負担が集中しないよう工夫する必要があると考えます．

ここまで述べたように，非常に有用な Confit にも改善を望む点があります．例えば，現状では参加登録の種類（正会員，協賛学会会員，賛助会員など）による検索ができないことや，投稿管理システムとオンライン公開システムの情報が常に同期されていないこと，参加登録ページのラジオボタンの選択解除ができないこと，などが挙げられます．

また，これは Confit 自体の課題ではありませんが，参加登録ページの文言の確認や，シンポジウム登壇者および参加者の資格確認についても，伝熱学会事務局と十分に連携を図りながら円滑に作業を進められるよう，事前に相談・調整を行っておくことが望ましいと考えます．

（小林　一道）



図 7-1　伝熱シンポ HP

８．会場運営

今回の伝熱シンポでは，札幌コンベンションセンターをほぼ全館貸し切りとして，10 の講演室を確保し，さらに本部や附帯会議室のための部屋も設けました．

まず受付は，会場全体の配置を踏まえ，中ホール前に設置しました．会場入口から奥へ進む動線となるため，案内看板を設置するとともに，1 日目の朝には案内担当者も配置しました．受付手続きには第 62 回伝熱シンポに引き続き Confit を利用し，4 台の QR コードリーダーを併用することで，1 日目の朝の混雑時においても待機列がほとんど生じない円滑な受付運営ができました．Confit が他の学会でも利用されるようになり，参加証を事前に印刷して持参する手順についても，参加者への浸透が進んでいるように感じました．また，一般公開セッションのみ参加された方が 17 名いらっしゃいましたが，大きな混乱なく受付を進めることができました．

講演室については，設置されているプロジェクターは全て HDMI 端子による接続で，HP に掲示し，周知しました．プロジェクターは 16:9 のワイドサイズで調整していましたが，事前周知が十分ではなく，今後の引継ぎ事項にしたいと考えております．また今回の伝熱シンポでも慣例に倣い，座長席に加え，総合討論のために講演者席を最大 7 席用意しましたが，テーブル 2 台を直列につなげられない，演台の後ろになってしまうなど，レイアウトに課題がありました．

BPA のポスター会場，休憩スペース，企業展示（11 社, カタログ展示含む）を中ホールに集約し，なるべく多くの参加者に企業展示を見ていただけるよう，工夫いたしました．講演申し込みの段階で, ポスター発表は前述の通り過去最多の 64 件の見通しとなったため(ただし当日は 1 件キャンセル), 中ホールに設置予定だったクロークは本部に移動，併設することになりました．

特別講演および総会は大ホール西側半面を使用しました．なお，東側半面は過去の伝熱シンポと同様に意見交換会の会場として利用予定でした．しかし，札幌市内のホテルを利用する方が安価に開催できることが分かり，今回の伝熱シンポでは東側半面は未使用となりました．

大小 5 つの会議室を用意し，伝熱シンポの開催

中に 9 件の各種附帯会議にご利用いただきました．また，当日は北海道大学の多くの研究室の学生に講演会場等でのアルバイトにご協力いただきました．この場を借りて御礼申し上げます．

（青山 祐介，能登 大輔，藤井 宏之，田部 豊）

9．意見交換会

意見交換会は，本シンポジウム 2 日目の 19 時 00 分から 21 時 00 分まで，札幌市営地下鉄東西線大通駅/西 11 丁目駅近くの「札幌ビューホテル大通公園」の地下二階ピアリッジホールで開催されました．学会会場から離れていることもあり，やや不安もありましたが，皆様のご協力の元，滞りなく予定通り開始することができました．

会場となった 800 m^2 のホールでは，伝熱学会員の皆様の旺盛な食欲を想定し，十分な「量」の料理とフリードリンクを準備しました．また，道外からの皆様が「北海道に来て期待すること」を考慮し，スープカレー，ジンギスカン，そして寿司を屋台メニューとして設定しました．特に寿司は絶品だったと大変好評を博しております．また，近年ますます美味しくなっている北海道産のお米を味わって頂きたく，道産米三種（ゆめぴりか，ななつぼし，ふっくりんこ）食べ比べコーナーを用意しました．加えて，新たな酒蔵の創設で活気づいている北海道の日本酒を体験頂きたく，道産酒の飲み比べコーナーを設置し，老舗から新進気鋭の酒造まで地酒を 16 本（一升瓶 7 本，四号瓶 9 本）を実行委員会で厳選し，参加者の皆様にお楽しみいただきました．日本酒の前日持ち込みから適温での保管，テーブルでも楽しめるよう徳利までご配慮下さった札幌ビューホテル大通公園のご厚意に感謝する次第です．参加人数は 288 名でした．意見交換会の流れとして，まず初めに屋台メニューや地酒コーナーなど本宴会の目玉をご紹介した後，集合写真の撮影を行いました（図 9-1）．「タラバガニ」，「バフンウニ」，「ハナサキガニ」といった北海道ならでは？の掛け声に困惑しつつも，参加者の皆様が温かい笑顔をされているのが印象的です．宴は戸谷剛実行委員長（北海道大学）のご挨拶からはじまり，続いて第 64 期日本伝熱学会会長の須賀一彦先生（追手門学院大学）よりご挨拶をいただきました．そして乾杯のご発声を意見交換会に出席されている名誉会員の内年長者である第 52 期日本伝熱学会会長 宇高義郎先生（天津大学）に頂きました．伝熱シンポジウムの参加者は食欲旺盛であることをホテル側に事前に伝えていたこともあり，途中で料理が切れることもなく会の最終盤まで参加者同士の活発な交流が続きました（図 9-2）．なお，参加者同士の交流に多くの時間を費やしたいとの思いを引き継ぎ，出し物や受賞者によるスピーチは実施しませんでした．

会が終盤に差し掛かった頃に，来年度に広島で開催予定の第 64 回日本伝熱シンポジウムの実行委員長である松村幸彦先生（広島大学）から開催概要についてご案内を頂きました．最後に，閉会にあたり第 65 期日本伝熱学会会長に就任された小原拓先生（東北大学）からご挨拶と共に学会運営に対する抱負が語られ，楽しい余韻を残しつつ会は終了しました．用意した地酒はほぼ「空」となり，改めて日本伝熱学会の皆様の熱気（と酒豪ぶり）を実感する次第でした．

最後になりましたが，ご参加頂いた皆様のご協力により，意見交換会を無事に終えることができましたことを心よりお礼申し上げます．

（能村 貴宏）



図 9-1　意見交換会での集合写真



図 9-2　歓談の様子

１０．実行委員会

実行委員は，北海道大学の会員を中心として，さらに今回は前述した新しい支援体制である，プログラム編集委員会も加わった組織としました．プログラム編集委員につきましては，第 62 回伝熱シンポの懇親会において，北海道に所縁のある会員の皆様に打診して，ご快諾いただきました．

また，第 61 回伝熱シンポでは学会事務局との業務分担が始まったものの，第 62 回伝熱シンポでは事務局の体制が変わり，今回の伝熱シンポでは事務局との作業分担が不十分なまま準備を始めてしまいました．また，2018 年の札幌開催の時の実行委員会の役割を踏襲して分担を決めたのですが，Confit の導入によって作業負荷が著しく変わり，一部の実行委員に作業が集中したり，逆に作業がなくなってしまったりしたことが反省点です．

一例として，今回の伝熱シンポジウムでは，参加登録だけでなく準備に際しても現金を全く扱わず，消耗品等の購入も事務局でインターネット通販から行っていただきました．その結果，旧来の会計担当が担っていたであろう，現金や通帳の管理という作業が生じませんでした．いずれにせよ Confit を導入した場合の実行委員会内部での役割分担，そして事務局と連携体制については，今後も引き続き調整と整理が必要だと痛感しました．

第 63 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

・委員長
　戸谷 剛（北海道大学）
・幹事
　植村 豪（北海道大学）
・委員
　青山 祐介（北海道立総合研究機構）
　小林 一道（北海道大学）
　田部 豊（北海道大学）
　能登 大輔（北海道大学）
　能村 貴宏（北海道大学）
　藤井 宏之（北海道大学）
・プログラム編集支援委員会 委員長
　麓 耕二（青山学院大学）
・プログラム編集支援委員会 委員
　川南 剛（明治大学）
　兒玉 学（東京科学大学）
　畠山 友行（富山県立大学）
　平野 繁樹（近畿大学）
　矢吹 智英（九州工業大学）

（植村 豪）

１１．あとがき

冒頭にも記載した通り，第 63 回日本伝熱シンポジウムを北海道支部だけで運営することに不安を抱えた状態でスタートしました．今回の伝熱シンポを大過なく終えることができ，ほっとしています．ご参加いただいた皆様の温かいご協力，ご理解もあってのことと思います．ただ，次回，北海道支部が伝熱シンポを担当する場合，現地実行委員の体制はますます厳しい状況になっており，今回のプログラム編集支援委員会によるご支援だけでなく，さらに他の準備や運営についても，全国の伝熱学会会員の皆様にご協力をお願いすることが予想されます．その節は是非，よろしくお願いいたします．

末筆ではございますが，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，伝熱シンポ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，産学交流委員会や優秀プレゼンテーション賞委員会の皆様，実行委員会の委員の皆様，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学会事務局の皆様に心から御礼を申し上げます．

（戸谷 剛，植村 豪）

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
― 第 63 回日本伝熱シンポジウム ―
Best Presentation Award
- 63rd National Heat Transfer Symposium of Japan -

優秀プレゼンテーション賞委員会幹事
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 8 年 5 月 27 日に札幌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 63 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させていただきます．

2026 年度　受賞者

◆ 三枝 涼【東北大学】
ナノフルイドの温度・ナノ粒子濃度分布の同時計測手法の開発

◆ 光亦 充時【東京大学】
超音波浮揚により空間的に固定されたアルミニウム微粒子の燃焼特性の評価

◆ 田村 勇輝【東京理科大学】
記号力学と機械学習を用いた宇宙機用二液式スラスタにおける着火衝撃のダイナミクス解明

◆ 岡田 公誠【東京科学大学】
火炎補助式噴霧熱分解法による高性能メタネーション用触媒のワンステップ合成

◆ 中島 博貴【滋賀県立大学】
乱流伝熱面において計測された時空間熱伝達率変動に対する流動推定法の適用と検証

◆ 下村 友貴【弘前大学】
フレキシブル熱センサを用いた生体熱特性マルチセンシング

◆ 田村 亮太【九州工業大学】
水のプール沸騰における限界熱流束を支配する乾き面の濡れ限界

◆ 寺田 隼【慶應義塾大学】
フェムト秒レーザ熱蓄積による表層炭化を用いた熱駆動マイクロアクチュエータの開発

◆ 生駒 凱意【九州工業大学】
液晶紡糸カーボンナノチューブ線材の熱伝導率および電気伝導率の原材料依存性

（順不同）

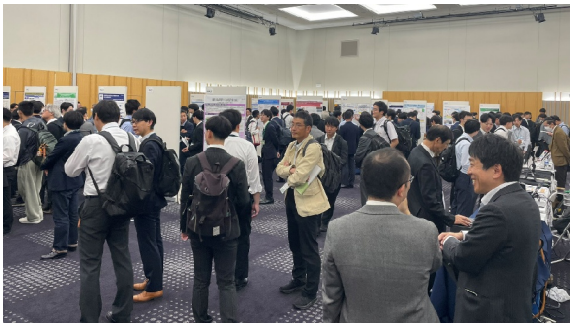


図 1　BPA ポスター会場風景



図 2　戸谷実行委員長，櫻井 BPA 委員会委員長との記念撮影

今回の BPA セッションでは過去最多となる 63 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．

特集「電気流体力学と伝熱」にあたって

Preface to "Electrohydrodynamics and Heat Transfer"

西川原　理仁（名古屋大学）
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University)
e-mail: nishikawara@nagoya-u.jp

このたび，本誌において特集号を企画する機会を頂き，筆者の専門分野の一つである電気流体力学（Electrohydrodynamics：EHD）に関する特集を企画いたしました．

EHD は，電界下において流体中の電荷に作用する電気力を利用し，電場と流動場の相互作用を扱う学術分野です．EHD によって誘起される流動は，従来の機械的可動部を用いた駆動とは異なり，電極のみで構成されるシンプルな構造により実現されます．このため，軽量，低騒音，低振動であり，機械的可動部を有しないといった特長を有しており，熱流体技術に新たな展開をもたらすことが期待されます．

電磁気学と流体力学が融合する本分野では，さまざまな流体を対象とした研究が進められていますが，本特集では特に伝熱との関連が深い絶縁性流体（冷媒，油，空気など）に焦点を当てました．例えば，近年開発が加速している次世代半導体をはじめとする電子機器においては，電気絶縁性と高い放熱性能の両立が求められており，EHD 関連技術はその有効な解決策の一つとなり得ます．

EHD に関する研究は，日本機械学会，フルードパワーシステム学会，電気学会，静電気学会などにおいて，研究会の設立や講演会でのセッション企画を通じて活発に議論されています．本特集においても，多くの伝熱学会非会員の先生方にご寄稿いただきました．本特集が EHD に対する関心を高め，関連分野のさらなる発展の一助となれば幸いです．

金沢工業大学の花岡先生には，「著者が歩んだ電気流体力学研究の歴史と近年の研究動向」と題して，長年にわたり第一線でご活躍されてきた視点から，絶縁油や冷媒の電気伝導特性ならびに EHD 流動に関する研究をご紹介いただくとともに，EHD 研究の変遷と近年の動向についてもご解説いただきました．非常に貴重な記事となっております．

九州工業大学の匹田先生には，「電気電子機器・デバイスにおける熱流体解析と電気流体力学的伝熱応用」と題して，変圧器，LED 照明，パワーモジュールにおける熱的課題と，EHD を利用した冷却技術についてご解説いただきました．

山形大学の鹿野先生には，「電気流体力学（EHD）効果によるサブクール流動沸騰熱伝達促進」と題して，GPU などの高熱流束デバイスを対象に，フッ素系冷媒における限界熱流束の向上を目的とした EHD を利用した沸騰冷却技術についてご紹介いただきました．

足利大学の桜井先生には，「電界共役流体の CPU 冷却システムへの応用」と題して，プリント基板やメッシュ電極を用いた電界共役流体（ECF）ポンプ，およびそれを用いた CPU 冷却システムについてご紹介いただきました．

青山学院大学の畑本先生，東北大学の金子先生には，「イオン風の対流冷却性能解明に向けた研究の進展」と題して，プラズマアクチュエータの伝熱応用に向けて重要となる電気流体力学効果および気体加熱効果についてご紹介いただきました．

僭越ながら，筆者も「電気流体力学研究と先進熱輸送への応用」と題し，我々の研究グループによる EHD 研究および EHD を利用した熱流体機器の研究開発事例について紹介させていただきました．

今回の特集にあたり，第一線でご活躍されている電気流体力学分野の研究者 6 名の先生方にご協力いただくことができました．末筆ながら，ご多忙の中にもかかわらず特集記事のご執筆をご快諾いただき，貴重なご寄稿を賜りました執筆者の皆様に心より御礼申し上げます．

著者が歩んだ電気流体力学研究の歴史と近年の研究動向

Author's history of electrohydrodynamic research and recent research trends

花岡　良一（金沢工業大学）
Ryoichi HANAOKA (Kanazawa Institute of Technology)
e-mail: hanaoka@neptune.kanazawa-it.ac.jp

１．はじめに

本来，私の専門は高電圧工学の分野であり，特に絶縁油のような高絶縁性液体の電気伝導や絶縁破壊を含む各種放電現象の解明を研究目的としていた．当時，1990 年頃の研究途上で絶縁性液体中の電気伝導特性や絶縁破壊現象が電気流体力学（EHD）的流動に深く関与し，電気絶縁特性を決定づける重要な要因であることを明確化したことが，新たな課題として EHD 研究を始める引き金となった．液体の EHD 研究は，主に電気磁気学と流体力学の境界領域に属するが，その中に多くの分野が介入する奥深い学問である．EHD 効果による液体の駆動現象は，伝熱制御，液体輸送，圧力応用など，様々な産業用途に適用できる可能性が高く極めて興味深い．本稿では，著者が過去約 35 年間携わってきた EHD 流動に関する研究を辿り，順次抜粋して紹介すると共に，その間の EHD 研究の変遷と近年の動向について概説する．

２．絶縁油の電気絶縁特性に及ぼす EHD 流動の重要性

高絶縁性液体中の電気伝導特性や絶縁破壊現象の本質的なメカニズムは，1980 年代にはまだ完全に解明されておらず世界的に研究が行われていた．当時，著者もこの研究に携わり，極端な不平等電界を形成する電極系を用いて，絶縁油中の直流電気伝導特性を実験的に計測していた．この実験では電極間に激しい EHD 流動が観測されるが，このような流動は既に報告されていた．しかし，電気伝導特性のメカニズムを解明する上で，1980 年以前は流体力学の導入が困難とされ，殆どの報告は流動を無視して電極近傍の空間電荷を考慮した電気・物理的説明のみに留まっていた[1]．EHD 流動が考慮され始めたのは 1985 年頃からであり[2, 3]，著者も電気伝導特性を決定づける一つの因子として流動の効果を無視することに疑問を抱き，以下の研究を行うに至った．

2.1　鉱油中の電気伝導特性と EHD 流動特性

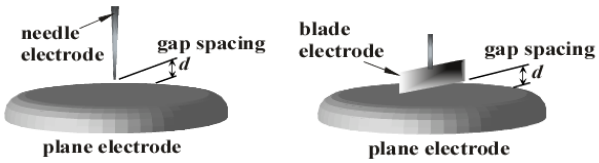


図 1　針－平板および刃－平板電極系

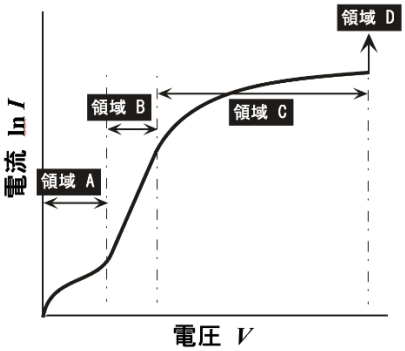
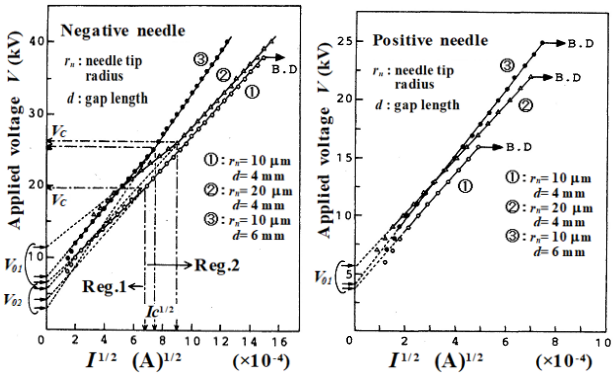
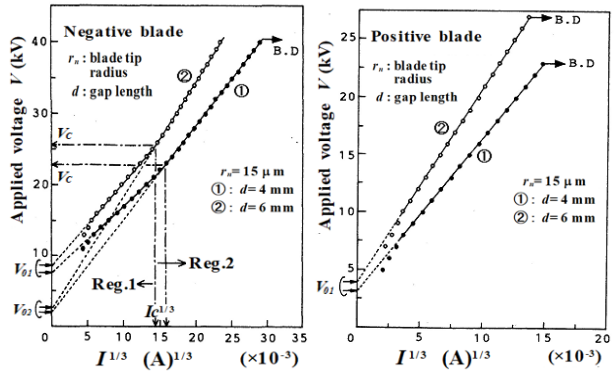


図 2　電圧 V と電流 I の関係

絶縁油中の電気伝導特性を最も特徴づける電極系は，図 1 に示す針－平板または刃－平板電極系であり，ギャップ間に強い不平等電界が形成される．一般に，常温絶縁油中の不平等電界下で得られる直流電気伝導特性（電圧 V と電流 I の関係）は，図 2 に示されるように 4 つの領域からなる．領域 A は液体中の不純物や解離現象に起因した微弱電流（暗流）領域であり，Ohm の法則（$V \propto I$）が成り立つ．領域 B は鋭利電極先端で生じる電子放出または電界電離に基づく荷電粒子の発生に起因した電流急増領域である．領域 C は V と I の関係が非線形となる領域であり，空間電荷制限電流（SCLC）領域と言われる．この領域は電極の構成によって $V \propto I^{1/n}$（普通, $n \geq 2$）の関係が成り立つ．領域 D は絶縁破壊（B. D）領域であり，一般に，



(a) 針－平板電極系における V と I の関係



(b) 刃－平板電極系における V と I の関係

図 3　電圧 V と電流 I の関係

負極性の絶縁破壊電圧 V_B は正極性の V_B より高い．

図 3 は鉱油（JISC-2320）中の針－平板または刃－平板電極系で計測した V と I の関係を示す．同図において，実線で示す直線部分は SCLC 領域に相当し，針－平板電極系では n=2（$V\text{-}V_0 \propto I^{1/2}$）および刃－平板電極系では n=3（$V\text{-}V_0 \propto I^{1/3}$）となる．ここで，$V_0$（直線の切片：$V_{01}$ と V_{02}）は，空間電荷効果に逆らって電流の発生に寄与する電圧を意味する．更に，負極性電圧を印加した場合，V と I がある値（V_c と I_c）に達すると直線の傾きが変化し，Reg.1 と Reg.2 に分けられることが注目される．なお，正極性電圧の印加時は V_B が低いため，直線の傾きに変化は見られない．このような電気伝導特性は，鉱油のみならずヘキサンやシリコーン油など別の高絶縁性液体においても共通する．

一方，図 1 の電極系に直流電圧を印加すると，特に SCLC 領域では非常に激しい EHD 流動が鋭利電極から平板電極方向に発生する．図 4 は鉱油中の刃－平板電極系に負極性電圧を印加したとき生じる EHD 流動の代表的パターン（Laser schlieren 像）を示す．このような流動現象を鑑みて，上述の針－平板および刃－平板電極系で得られる V と I の関係は，激しい流動によるキャリア分布の変化に連動した結果であると思われた．そこで，流動の特性を詳細に計測し，電気伝導特性との関連性を明確にする研究に取り組んだ．

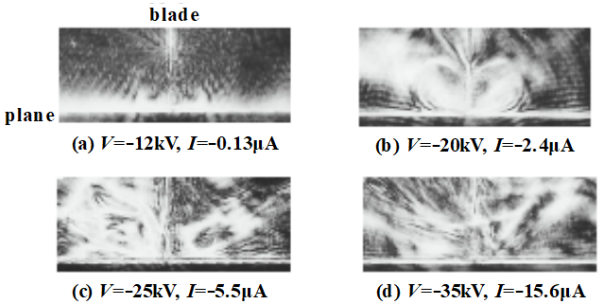
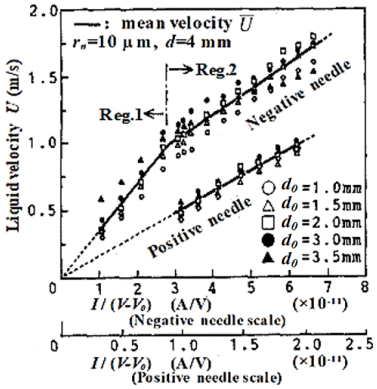
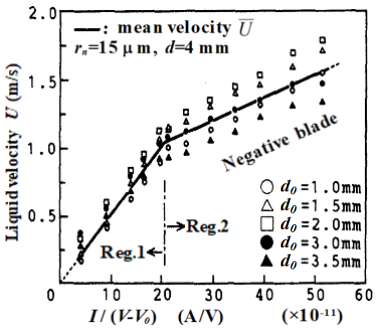


図 4 流動パターンの代表例（刃－平板電極系）



(a) 針－平板電極系における U と V，I の関係



(b) 刃－平板電極系における U と V，I の関係

図 5　流速 U と V, I の関係

EHD 流動は，自作した Laser Doppler 流速計を用い，流速 U を電圧 V の関数としてギャップ内の中心軸上 5 ケ所（平板表面からの距離 d_0）で計測し，その平均値 $\overline{U}$ として特性化した．その結果，図 5 に示すように $\overline{U}$ と $I/(V\text{-}V_0)$ の線形関係が得ら

れた. 更に, 負極性電圧を印加した場合において, $\overline{U}$が 1 m/s を超えた時，直線の傾きが変化し Reg.1 と Reg.2 に分けられ，かつ傾きの変化点における電圧 V と電流 I の値が，図 3 の直線傾斜が変化する点 V_c と I_c にほぼ一致することが分かった．これは，電気伝導特性の Reg.1 と Reg.2 が EHD 流動特性の Reg.1 と Reg.2 にそれぞれ関連していることを示唆する．なお，正極性電圧の印加時は V_B が低いので，$\overline{U}$は 1 m/s 以下であり，直線の傾きに変化は見られない.

2.2 電気伝導特性に及ぼす EHD 流動の影響に関する考察

鉱油中の電気伝導特性と流動特性は特有な線形関係を持ち，実験により次のように纏められる．

電気伝導特性 : 一般に SCLC 領域では，$(V\text{-}V_0) \propto I^{1/n}$（$n \geq 2$）の関係が成り立つ．特に，針－平板電極系では n=2（$(V\text{-}V_0) \propto I^{1/2}$）および刃－平板電極系では n=3（$(V\text{-}V_0) \propto I^{1/3}$）となる．負極性電圧の印加時は, V と I がある値で直線の傾きが変化し，2 つの領域（Reg.1 と Reg.2）に分けられる．

EHD 流動特性 : 針－平板および刃－平板電極系の対称軸上で流速 U と V, I の関係は, $U \propto I/(V\text{-}V_0)$ が成り立つ．また，負極性電圧の印加時は，平均流速$\overline{U}$が 1 m/s を超えると直線の傾きが変化し，2 つの領域（Reg.1 と Reg.2）に分けられる．

これらの結果に基づき，負極性電圧印加時の EHD 流動が電気伝導特性に及ぼす効果は，当初, Navier-Stokes の方程式と Euler の連続方程式に Coulomb 力を導入し有限差分法による数値解析から考察していたが[4, 5], 後にこれらを解析的に纏め，以下のように一般化した[6].

2.2.1「Reg. 1」の電気伝導特性に及ぼす EHD 流動効果

EHD 流動特性（図 5）の Reg.1 における電極軸上の流れは「層流」と見なされる（図 4(a), (b)に相当）．この領域では次式が成り立つ.

$$\overline{U} = k_1 \{I/(V\text{-}V_{01})\} \quad (k_1: \text{定数}, \overline{U}: \text{平均流速}) \quad (1)$$

一般に，流体力学的流れに対して物体が受ける総力 F_v は, 粘性法則によって次のように与えられる.

$$F_v = k_2 (\overline{U})^{\alpha} \quad (k_2: \text{定数}) \quad (2)$$

普通，非圧縮性流体におけるα の値は，$1 \leq \alpha \leq 2$ である．針－平板電極系で生じるような三次元的流れ（環状流）は,「Stokes の粘性法則」に支配され「α=2」であり，刃－平板電極系で生じるような二次元的流れ（側面流）は,「Newton の粘性法則」に支配され「α=1」である[7]. 一方，EHD 流動の駆動力は，Coulomb 力（qE）であるので，総駆動力 F_e は,

$$F_e = \int qE\, dv \quad (3)$$

ここで，q: 空間電荷密度，E: 空間電荷の影響を受けた電界，v: 体積を表す．今，電流 I が電極間で面積 S の仮想電荷柱内を流れるものと仮定すると, 電荷密度 q は次式のように表される.

$$q = I/\{(U + \mu E)\, S\} \quad (4)$$

ここで，U: 流速，μ: イオン移動度（鉱油では$\mu \simeq 4 \times 10^{-9}$ m^2/V・s）を表す．実験から得られる流速 U はμE より非常に大きいので, U を平均流速$\overline{U}$と見なせば平均電荷密度$\overline{q}$は，式(4)から

$$\overline{q} = k_3 (I/\overline{U}) \quad (k_3: \text{定数}) \quad (5)$$

として表せる．従って，式(3)の F_e は，印加電圧 V に関して次のように表すことができる.

$$F_e = k_4 \{I\,(V\text{-}V_{01})/\overline{U}\} \quad (k_4: \text{定数}) \quad (6)$$

流れの定常状態では，F_v と F_e は釣り合うので，式(2)と式(6)より次式を得る.

$$(\overline{U})^{\alpha+1} = k_5 I\,(V\text{-}V_{01}) \quad (k_5: \text{定数}) \quad (7)$$

式(7)は物理的に$(\overline{U})^{\alpha+1}$ が流動の生起に必要な全エネルギーに比例することを示す. 式(1)と式(7)より, 電圧 V と電流 I の関係は次式のように導かれる.

$$V\text{-}V_{01} = k_6 I^{\alpha/(\alpha+2)} \quad (k_6: \text{定数}) \quad (8)$$

式(8)は，針－平板電極系に対してα=2，および刃－平板電極系に対してα=1 を導入すれば，電気伝導特性の Reg.1 における V と I の関係と一致する.

2.2.2「Reg. 2」の電気伝導特性に及ぼす EHD 流動効果

EHD 流動特性（図 5）の Reg.2 では，電極間の流れが層流から「乱流」へと変化する（図 4(c), (d)に相当）．その時，$I/(V\text{-}V_{02})$に対する平均流速$\overline{U}$の傾き（$\overline{U}$の変化率）は減少するので，Reg.2 における流速は，式(1)にβなる指数を新たに導入して次式のように仮定される.

$$\overline{U} = k_1' \{I/(V\text{-}V_{02})\}^{\beta} \quad (k_1': \text{定数}) \quad (9)$$

β の値は, 図 5 の Reg.2 における$\overline{U}$と $I/(V\text{-}V_{02})$の関係を式(9)に適合する特性に変換すれば導出できる．図 6 はフィッティング法によって求めた $U^{1/\beta}$ と $I/(V\text{-}V_{02})$の関係を示す．同図より，βの値として，針－平板電極系ではβ= 2/3 および刃－平板電極系ではβ= 4/9 となる．Reg.2 における U の傾きの減少は，液体のコンダクタンスの増加，すなわ

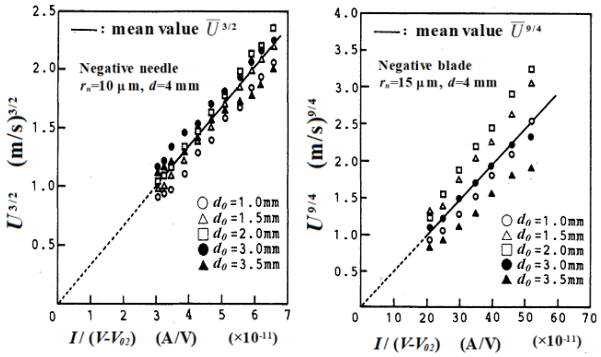


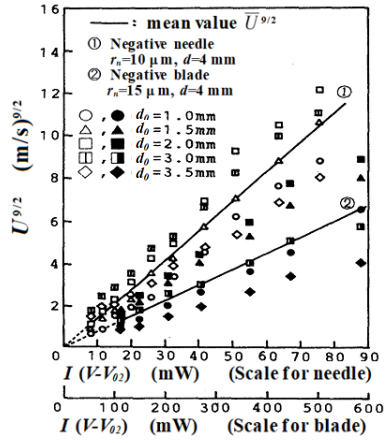
図 6　$U^{1/\beta}$と $I/(V\text{-}V_{02})$の関係

ち乱流の発生によって流体力学的抵抗が低下することを意味しβの減少（β< 1）となる．βは電極構成による流体力学的条件に依存する．

乱流問題に関する Kolmogoroff の局所平衡理論[8, 9]（高波数渦のエネルギースペクトルは，エネルギー供給を表す消散率ζ に関して$\zeta^{2/3}$ に依存する）に従えば，流速とエネルギー供給を表す式(7)は，γ なる指数を導入して次のように仮定される．

$$(\overline{U})^{\alpha+1} = k_5' \{I(V\text{-}V_{02})\}^{\gamma} \quad (k_5'：定数) \qquad (10)$$

ここで，図 3 と図 5 の Reg.2 を式(10)に適合する特性に変換すると，図 7 に示すような $(\overline{U})^{(\alpha+1)/\gamma}$と $I(V\text{-}V_{02})$の関係が得られ，$(\alpha+1)/\gamma = 9/2$となる．



7　$(\overline{U})^{(\alpha+1)/\gamma}$と $I(V\text{-}V_{02})$の関係

一般に，レイノルズ数の大きい三次元的乱流では，粘性過程は液体の流れにとって支配的ではなくαの値として 2 が選択される．従って，式(10)の指数γは，γ=2/3である．式(9)と式(10)より，Reg.2 の乱流における V と I の関係は次式で表わされる．

$$V\text{-}V_{02} = k_6' I^{\{\beta(\alpha+1)-\gamma\}/\{\beta(\alpha+1)+\gamma\}} \quad (k_6'：定数) \quad (11)$$

従って，式(11)は針－平板電極系に対してα=2，β = 2/3，γ=2/3，および刃－平板電極系に対してα=1，β= 4/9, γ=2/3を導入すれば，電気伝導特性の Reg.2 における V と I の関係と一致する．

上記の解析は電気伝導特性の SCLC 領域における $V \propto I^{1/n}$ の関係が，EHD 流動の関与によって決定され得ることを示している．また，電気伝導は破壊前駆現象であるので，EHD 流動は絶縁破壊現象にも少なからず影響を及ぼす．これに関して，破壊電圧が低い正極性破壊現象に着目し，破壊開始のメカニズム（電荷の挙動とギャップ間電界分布の流動による変化）[10]，および固体絶縁物と密着した刃電極系や円筒状固体側壁を有する針電極系の電気伝導特性と絶縁破壊現象が EHD 流動解析に基づいて考察された[11, 12]．これらの研究は EHD 流動自体の応用ではなく，液体の電気絶縁特性と流動との密接な関連性を明確化したものであり，流動の重要性が認識できる．その後，著者は上記の研究と並行し，新たな課題として EHD 流動の応用も視野に入れた研究を開始した．

3．液体の電気流体力学（EHD）研究

3.1　液体の駆動力と EHD ポンピングメカニズム

EHD の研究は，広義的に絶縁性の気体または液体が電界と流れ場の相互作用によって生じる流動現象を扱う．基本的に電気磁気学と流体力学の境界分野であるが，それらの理解には電気物性，電気化学，電気絶縁材料，高電圧工学，熱力学など多くの知識が介入する．気体中の現象はコロナ放電イオン風が代表的であり，古くから研究されそのメカニズムもかなり解明されている．一方，液体中の現象としては，流動によって発生する現象（泳動電位，流動電位，流動電流，流動帯電など）と内部電気力が誘起する現象（電気浸透，電気泳動，誘電泳動，数元効果，EHD 不安定，EHD ポンピングなど）が挙げられる．その中で，EHD ポンピングは電界の印加によって高い圧力ヘッドと液体噴流を発生できることにその特長を有し，著者が研究対象とした現象である．

3.1.1　液体の駆動力と流動との関連性

一般に，電界 $\boldsymbol{E}$ が加わった液体誘電体に働く体積力 $\boldsymbol{F}$ は，Korteweg-Helmholtz の式で表わされる．

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} - (\boldsymbol{E}^2/2)\, grad\, \varepsilon + grad\, \{(\boldsymbol{E}^2/2)\, \rho\, (\partial\varepsilon/\partial\rho)_T\} \qquad (12)$$

ここで，q:電荷密度，ε:液体の誘電率，ρ:液体の密度，T:温度を表す．式(12)の右辺第 1 項は電気泳動力，第 2 項は誘電泳動力，第 3 項は電気歪力を表わし，次のように流動と関連する．

「電気泳動力」: 主に電極から注入された荷電粒子が Coulomb 力を受け，中性分子とエネルギー変換しながら移動するため流動が発生する．電極の極性に関わらず，注入電荷はホモチャージであり対向電極へ移動するので，流動はいつも注入電極から対向電極側へ生じる．この流動は交流電界で周波数の上昇と共に減衰する．

「誘電泳動力」: 液体の誘電率が空間的に変化すると，その変化勾配と電界強度の二乗の積に比例した体積力が働き流動が生じる. 誘電率の変化は，強い不平等電界，温度勾配，異質の液体界面などの存在によって起こり得る．

「電気歪力」: 一定温度で液体が密度と誘電率の変化勾配を持つ場合，これと電界強度の二乗の積に比例した力の勾配が体積力となり流動が生じる．

誘電泳動力と電気歪力は，物理的に液体分子の分極作用に起因する．不平等電界中の分極電荷に働く力は電界が高い部分で強いので，流動は高い電界領域に向かって生じ，電界方向には無関係である．また，直流・交流いずれの電界においても発生する．通常，一定温度の均質液体中で発生するポンピング現象では，電気歪力は ε や ρ の熱的変化が殆どないので無視できるが，誘電泳動力は高電界下で ε が電界の関数となり，$grad\ \varepsilon$ は有限値を持つ可能性があり無視できない．すなわち，EHD ポンピングの発生には，真電荷に働く Coulomb 力または ε のグラディエントによる力のいずれかが必要である．

3.1.2 EHD ポンピングメカニズム

EHD ポンピング現象に関しては，幾つかのメカニズムがある．最も一般的には Stuetzer 氏[13]や Pickard 氏[14]らが研究した「イオンドラッグポンピング」であり，電気泳動力に基づく EHD 流動である．このメカニズムでは，電極に鋭利な突起部分（針や刃電極など）を設けて電極先端に約 100 kV/cm 以上の高電界を形成し，電界放出，電界電離，コロナ放電などの放電機構を介した液体中への電荷注入が不可欠である．この場合の作動液体は絶縁油などの高絶縁性液体が適する．電極に直流高電圧を印加したとき連続的に注入される荷電粒子（主にイオン）は Coulomb 力を受け，流速 1 m/s 以上の激しい液体噴流が生じる[3, 5, 6]. 2.1 節 図 4 の流れは，明らかにイオンドラッグポンピングによって発生した EHD 流動である．しかし，このメカニズムは高電界領域と電荷の注入機構を含むことから，EHD 流動の応用には長期稼働による絶縁油の劣化（スラッジの発生等）が懸念される．一方,「誘導ポンピング」と言われるメカニズムが Melcher 氏[15]によって提案され，Washabaugh 氏らは均質な弱導電性液体の誘導ポンピングを研究した[16]．このメカニズムは液体／気体または異種液体間の界面あるいは液体内の不均一温度分布の存在などに起因した誘導電荷と交流進行波電界との相互作用によって生じる EHD 流動である．しかし，交流進行波電界の発生装置が複雑で一定温度の均質液体では利用が困難なことから，EHD 流動の応用範囲は限られる．

このような状況において，一定温度の均質液体中で電極からの電荷注入機構を含まずに EHD ポンピングを発現できるメカニズムが重要視されていた．当時，著者らの EHD 研究で，鋭利な部分を全く含まないドーナッツ型のような電極を用い，特殊な弱導電性液体（ドデカンニ酸－n ブチル，ジエチレングリコールモノブチルエーテルアセテート，フッ素変成シリコーン油など）が液体噴流を発生することを実験的に確認し，そのポンピング特性について 2001 年に報告した[17]．しかし，その詳細なメカニズムはまだ未理解であったが，2003 年に「伝導ポンピング」と称される新しい EHD メカニズムが Atten 氏と Yagoobi 氏によって報告され[18]，これが上記液体噴流の発生メカニズムであることを確信した．伝導ポンピングは，電界による液体分子または不純物分子の解離イオンと電極表面付近のヘテロチャージ層（空間電荷層）に起因して発生する EHD 流動である．一般に，弱導電性の液体誘電体に電界を印加すると，電極表面と液体の界面に静電的相互作用が生じる．電界強度 E が $E < 1$ kV/cm の範囲では，電圧 V と電流 I の関係は Ohm の法則に従う．電流は主に液体中の不純物イオンの流れによって生じ，正・負イオンは平衡状態にある．この時，電極と液体の界面付近では，電気二重層とコンパクト層（厚さ：0.5 nm 程度）が形成され，更にその周囲に拡散層が形成される．E の範囲が 1 kV/cm $\leq E <$ 100

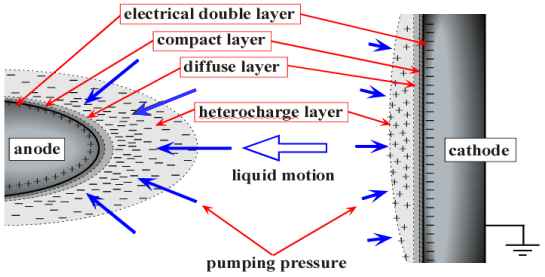


図 8　ヘテロチャージ層の形成モデル図

kV/cm では，液体分子（または不純物分子）の解離（またはイオン化）現象が生じ，解離反応が再結合反応を上回る不平衡状態となるため，正・負解離イオンが常に発生する．これらのイオンは Coulomb 力によって互いに逆極性の電極方向へ引き付けられる．その結果，陽極と陰極の表面周辺には，図 8 に模擬的に示すような厚いヘテロチャージ層が形成される．ヘテロチャージ層の厚さ a はイオンの緩和時間 τ_i，イオン移動度 μ および電界強度 E の積（$a = \tau_i \mu E$）として見積もられる．ヘテロチャージ層のイオンと電極間には引力が働くため，ほぼ ε と V^2 の積（Maxwell 応力）に比例する圧力が発生し，正・負両電極方向に生じる圧力の差が正味の圧力となる．また，解離反応の不平衡化は E の強度に依存し，イオンの流れは Sub-ohmic 特性（$I \propto V^{\kappa}$：普通 $\kappa \leq 2$）を示す定常電流となる．流動はイオンの流れによって引き起こされ，正味の流れは高電界電極に向かって生じる．伝導ポンピングの特長は，電極からの電荷注入機構を含まないので液体の劣化が防止でき，比較的単純な電極構造で一定温度の均質液体中に圧力と流動を発生できることであり実用的である．

3.2　伝導ポンピングによる EHD ポンプの開発

EHD ポンプは機械的可動部を持たず振動や音響ノイズが皆無であり，液体駆動の電気的制御が容易かつ小型・軽量化，省エネルギー化が実現可能などの利点を有するので広範囲な産業応用が期待できる．しかし，従来の電磁ポンプに比べ吐出圧力や流量が低いため，液体の循環効率が悪い．そこで，一定温度の均質液体中で大きな圧力と流量を得る EHD ポンプの開発が液体ポンピング技術の向上に繋がると考え，伝導ポンピングに適合する種々のポンプを設計・試作し特性評価した．

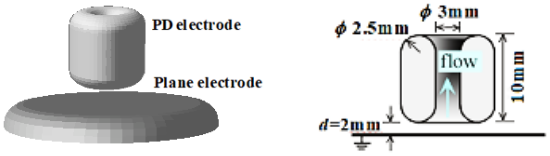
3.2.1 作動液体の選定

伝導ポンピングによる流動は，液体中で発生する解離イオンに基づくことから，作動液体の種類や電極構造の設計いかんによって圧力や流量に強弱が生じる．EHD ポンピングの実用的応用を視野に入れた場合，作動液体の選定は重要であり安全性（腐食性，毒性，引火・爆発性が無い），省エネルギー化（消費電力が少ない），地球環境保全（ODP：オゾン層破壊係数や GWP：地球温暖化係数が小さい）なども考慮する必要がある．このような観点から，種々の液体について実験を重ねた結果，ハイドロフルオロエーテル（e.g., HFE7100），ハイドロフルオロカーボン（e.g., HFC43-10），ハイドロクロロフルオロカーボン（e.g., HCFC123）などのフッ素系冷媒が EHD ポンピングに適合する作動液体となり得ることが分かった．

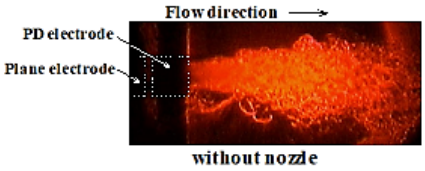
3.2.2　設計・試作した EHD ポンプ

これまでに設計・試作し研究した主な EHD ポンプを簡潔に紹介する．

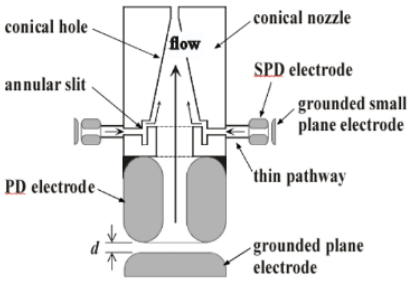
(1) 疑似ドーナッツ電極と平板電極対抗型



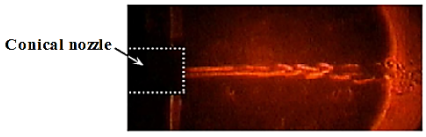
(a) PD－平板電極対抗 EHD ポンプ



(b) 液体噴流の代表的パターン



(c) 円錐ノズルを装着した電極系



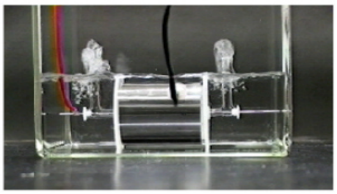
(d) スパイラル噴流の代表的パターン

図 9　EHD ポンプの概略図と流動パターン

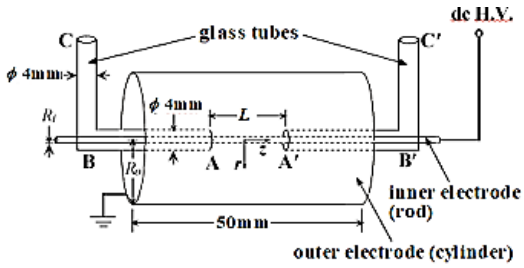
図 9(a)に示すように，疑似ドーナッツ（PD と略す）電極と平板電極が対抗した電極系である．同図(b)はこの電極構造で発生する液体噴流の代表的パターンを示し，上記の作動液体いずれにおいても同様に得られる．流動は乱流的な自由噴流となる．このような乱流的噴流は，図(c)に示すように小型の PD（SPD）と平板電極を取り付けた絶縁物円錐ノズルを PD 電極上部に装着すれば，図(d)のように直線的スパイラル噴流に変換できる．このメカニズムは Navier-Stokes の方程式と Euler の連続方程式から考察された[19].

(2) 同軸円筒電極型

図 10 のように, 円筒電極の中心軸上に棒電極を設け，棒電極の左右に 2 本の直角ガラス管を距離 L 離して装着した構造である．この EHD ポンプは 2 つのガラス管出口（同図(b)の C と C'）から同時に液体噴流が発生する．噴流パターンは図 9(b)と同様であり，HFC43-10 中の EHD ポンピング特性が報告された[20].



(a) 電極系

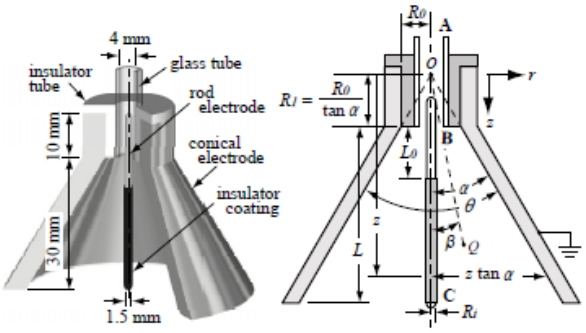


(b) 電極設計

図 10　同軸円筒電極型 EHD ポンプ

(3) 同軸円錐電極型

図 11 のように, 円錐筒電極の中心軸上に棒電極を配置した構造である．円錐電極の頂点部分は内側に絶縁チューブを設けた円筒電極と結合され，液体はその絶縁チューブから噴流する．噴流パターンは図 9(b)と同様である．また，棒電極表面は同図(b)の L_0 を除いて絶縁被覆された. この絶縁被覆は HFC43-10 中の EHD ポンピング特性に優位な効果を齎すことが報告された[21].



(a) 電極系　　(b) 電極設計

図 11　同軸円錐電極型 EHD ポンプ

(4) 円柱対抗電極と平行メッシュ電極の複合型

図 12 は，SUS304 製の円柱対抗電極と平行メッシュ電極を間隔 15 mm で直列配置した電極系を 1 対とし，9 対の電極系を蛇腹状に直列結合した多段型 EHD ポンプを示す. 円柱対抗電極は 3 mm 間隔で固定した 2 本の円柱（4 mmϕ, 長さ 20 mm）を 2 組並列に 4 mm 間隔で配置している．平行メッシュ電極は厚さ 0.1 mm，方形孔 155 μm を持つ金属メッシュ（22×18 mm^2）が 3 mm 間隔で対抗している．これらの電極系における電極間の電界分布は，円柱対抗電極で対象不平等分布，平行メッシュ板電極でほぼ平等分布となる．伝導ポンピングによる EHD 流動は，対象または平等電界が形成される電極系においても発生し，HFC43-10 中で大きな圧力と流量（V=18 kV で 25 kPa, 5.5 L/min）を得ることができる．これは電界によって生成される正・負解離イオンの移動度差によって生じることが暗示された[22]．その後，Yazdani 氏と Yagoobi 氏は，EHD 流動に及ぼすイオン移動度の効果について数値解析し報告している[23].

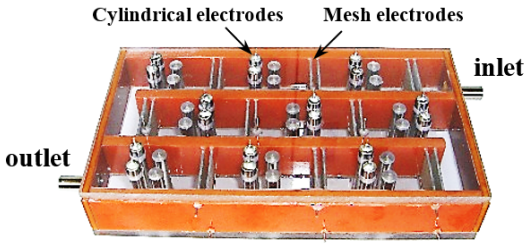
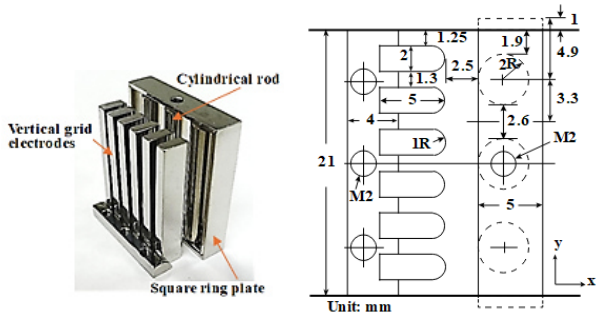


図 12　9 対多段型 EHD ポンプ

(5) 垂直格子電極と円柱電極対抗型

著者は上記(4)の研究後, 数年間は絶縁油中の固

体絶縁物（プレスボード）表面を進展する交流・直流沿面放電現象の研究に専念した．油中沿面放電は電力用油入変圧器の内部絶縁破壊に至る重要な現象であり，潜在的に主要な事故原因となる．この研究では放電様相，放電ストリーマの進展長と進展速度，プレスボード上のトラッキングと貫通破壊，放電電流と放電エネルギー，放電による油中ガス分析，沿面放電と貫通破壊の油温効果など，油中沿面放電に関わる一連の現象を把握し報告した[24-26]．その中で特に注目すべきは，絶縁油の温度が 75℃以上で電圧印加後の初期放電が非常に強まり，プレスボードの貫通破壊が容易に発生することである．これは，変圧器の絶縁不良や破壊事故リスクが油温の上昇によって高まることを意味する．このような高い温度は変圧器の稼働によって容易に発生し得るので，電気絶縁と熱の問題は変圧器寿命の短縮にも繋がる．それ故，変圧器を正常に稼働し続ける上で油温上昇の抑制が必要であり，通常，変圧器容量に応じた冷却装置が施されている．しかし，冷却装置には駆動時の電力損失やノイズなどの問題が付随する．そこで，これらの問題を低減する冷却法として EHD ポンピング技術の利用を提案し，これまで培ったノウハウを基に新たな EHD ポンプを設計・試作した．図 13 は EHD ポンプの電極構造を示す．SUS304 製の「6 個の垂直格子電極」と「角型環状板に内蔵された 3 個の円柱電極」が 2.5 mm 間隔で対抗している[27]．この電極系の 4 対を直列，並列，直並列に配置した EHD ポンプの HFC43-10 中における基本的ポンピング特性は報告された[28]．なお，現在，同図の電極系を直列 6 対ごとに 4 段蛇腹配置した 24 対多段型 EHD ポンプ（V =18 kV で 47 kPa, 5.5 L/min）を用い，油入変圧器の油温抑制効果に関する研究を続行している．



(a) 電極系　　(b) 電極設計

図 13　垂直格子－円柱電極対抗 EHD ポンプ

4．EHD 研究の移り代わりと近年の動向

上述したように，著者は大型の EHD ポンプを研究対象としてきたが, 2000 年前半頃から MEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）技術の進展により電極間距離を数μm まで縮小できる微細電極設計が可能となり，徐々にマイクロ EHD ポンプの応用性に関心が高まった．ポンプのサイズをマイクロ化すると，低い印加電圧でも高電界強度が得られ，液体駆動力を強化でき体積当たりの性能が向上する．また，液体の粘性抵抗より電界駆動力が優勢となり効率を向上できる．このような優位性もあって，従来の基礎研究的な大型 EHD ポンプから応用志向のマイクロ EHD ポンプへと研究の主軸が移り変わり，2010 年前後からマイクロポンプの新しい設計や応用に関して数多くの報告がなされた[29-34] ．近年，マイクロ EHD ポンプの研究は活発化し，その主な応用ニーズは電子機器冷却，バイオ・医療，宇宙・航空の分野に及んでいる．電子機器冷却分野では，半導体やマイクロデバイスの高性能化に伴い発熱密度が増加し，従来のファンやヒートシンクなどに代わる電子機器の熱制御技術が必要である．バイオ・医療分野では，DNA（Deoxyribo nucleic acid）解析 や PCR（Polymerase chain reaction）検査，病原体の検出，細胞の長期観察や創薬研究，水質調査や食品衛生検査などに貢献する LOC 技術（Lab-on-a-chip technology）に精密な微小流量制御が必要不可欠である．また，宇宙・航空分野では，小型・軽量・低消費電力化が可能で宇宙環境（高真空･低重力，高温・極寒）に適合する高信頼性の熱制御技術が必要である．これらの要求を満たすシステムとして，マイクロ EHD ポンプは非常に有望視されている．一方，マイクロスケールの応用が注目される中，大型 EHD ポンプも依然として必要性があり，マイクロポンプでは供給できない圧力や流量が必要な分野で有効である．大型化しても EHD ポンプは羽根車やピストンなどの可動部を持たず, 振動や騒音無しに高圧力・高流量が発揮できメンテナンスフリーという独自の機能を維持できるので, 大型アクチュエータ駆動源, 熱輸送システム, 油入電力機器冷却などへの応用が期待される．また，福祉機器や生態模倣ロボットなど人とのイン

ターフェースを持つ分野では，静音性・安全性が強みとなり基礎研究が進められている[35] ．今後，精密制御応用にはマイクロ EHD ポンプ，高出力応用には大型 EHD ポンプといった役割分担の方向性が現実的である．

5. おわりに

本稿では，著者が長年携わってきた EHD 研究の経緯，およびその間の変遷と近年の研究動向について概説した．EHD 液体流動は，様々な産業用途に応用可能であるのみならず絶縁油の電気絶縁特性にも重要な影響を齎す現象である．現在，EHD ポンプ技術は急速に発展しており，小型化と性能向上や効率化と課題解決に向けた研究が続けられている．将来的には様々な最先端技術を支える基盤技術の一つになり得る．特に期待される応用分野としては，医療・福祉機器，宇宙・航空デバイスの熱制御，ロボット駆動装置，冷却システムなどが挙げられ，若い研究者･技術者を中心に，これらの技術が益々発展することを望んでいる．

参考文献

[1] Halpern, B. and Gomer, R., Field Emission in Liquids, J. Chem. Phys., **51**, 3 (1969) 1031.

[2] Haidara, M. and Atten, P., Role of EHD Motion in the Electrical Conduction of Liquids in a Blade-Plane Geometry, IEEE Trans. Industry Applications, **IA-21**, 4 (1985) 709-714.

[3] Atten, P. and Haidara, M., Electrical Conduction and EHD Motion of Dielectric Liquids in a Knife-Plane Electrode Assembly, IEEE Trans. Elect. Ins., **EI-20**, 2 (1985) 187-198.

[4] Hanaoka, R., Takashima, T. et al., Computation of Transformer Oil Motion in the Dark Current Region, Trans. IEE of Japan, **107**, 3/4 (1987) 39-46.

[5] Takashima, T. Hanaoka, R. et al., I-V Characteristics and Liquid Motion in Needle-to-Plane and Razor Blade-to-Plane Configurations in Transformer Oil and Liquid Nitrogen, IEEE Trans. Elect. Ins., **23**, 4 (1988) 645-658.

[6] Hanaoka, R., Ishibashi, R. et al., Relationships of Current and Voltage in Transformer Oil Accompanied with EHD Motion under Negative DC Stresses, Trans. IEE of Japan, **113-A**, 2 (1993) 113-120.

[7] Streeter, V. L. and Wylie, E. B., *Fluid Mechanics*, McGraw Hill (1979).

[8] Kolmogoroff, A., Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence, *C. R. Acad. Sci. U. R. S. S*, **32** (1941) 16-18.

[9] McComb, W. D., *The Physics of Fluid Turbulence*, Clarendon Press, Oxford (1990), 70.

[10] Hanaoka, R., Ishibashi, R. et al., Positive Breakdown Mechanism in Transformer Oil Subjected to a Non-Uniform DC Field, Trans. IEE of Japan, **113-A**, 7 (1993) 518-526.

[11] 花岡良一，熊崎雅一ら，変圧器油中の不平等電界下における電気伝導特性に及ぼす固体界面の影響，電学論 A，**117**, 7 (1997) 673-678.

[12] 高島武，花岡良一ら，不平等電界下における変圧器油中の直流破壊電圧に及ぼす円筒側壁の効果，電学論 A，**119**, 1 (1999) 56-61.

[13] Stuetzer, O. M., Ion drag pumps, J. Appl. Phys., **31** (1960) 136-146.

[14] Pickard, W. F., Ion Drag Pumping I theory, J. Appl. Phys., **34**, 2 (1963) 246-250.

[15] Melcher, J. R., Traveling-wave Induced Electroconvection, Phys. Fluid, **9** (1966) 1548-1555.

[16] Washabaugh, A. P., Zhan, M. et al., Electrohydrodynamic Traveling-wave Pumping of Homogeneous Semi-Insulating Liquids, IEEE Trans. Elec. Ins., **24**, 5 (1989) 807-834.

[17] 花岡良一，高田新三ら，液体誘電体中の EHD ポンピングによる液体ジェットの特性，電学論 A，**121**, 3 (2001) 224-230.

[18] Atten, P. and Seyed-Yagoobi, J., Electrohydrodynamically Induced Dielectric Liquid Flow Through Pure Conduction in Point / Plane Geometry, IEEE Trans. Elec. Ins., **10**, 1 (2003) 27-36.

[19] 花岡良一，中道裕之ら，EHD ポンプと円錐ノズルによる液体ジェットの特徴的な流動特性，電学論 A，**124**, 5 (2004) 399-406.

[20] 花岡良一，中道裕之ら，同軸円筒型電極系による EHD 液体ジェットの流動特性，静電気学会誌，**28**, 6 (2004) 316-321.

[21] 花岡良一，細谷直輝ら，EHD 液体ジェット発生用の実用的電極系と液体ポンピング特性，

電学論 A，**127**, 12 (2007) 769-776.

[22] Hanaoka, R., Takahashi, I. et al., Properties of EHD Pump with Combination of Rod-to-Rod and Meshy Parallel Plates Electrode Assemblies, IEEE Trans. Elect. Ins., **16**, 2 (2009) 440-447.

[23] Yazdani, M. and Seyed-Yagoobi, J., Effect of Charge Mobility on Dielectric Liquid Flow Driven by EHD Conduction Phenomenon, J. of Electrostatics, **72**, 4 (2014) 285-294.

[24] Murdiya, F., Hanaoka, R. et al., Creeping Discharge Developing on Vegetable-Based Oil/ Pressboard under AC Voltage, IEEE Trans. Dielect. and Elect. Ins., **21**, 5 (2014) 2103-2110.

[25] Hanaoka, R., Oketani, K. et al., Creepage Discharge Behavior and Breakdown Process at Oil-Pressboard Interface under AC and DC Voltage, Int. J. Plasma. Environ. Sci. Technol.,**15** (2021) e02005 (13pp).

[26] Hanaoka, R., Naoe, N. et al., Effect of Temperature on Creepage Discharge and Puncture Breakdown at Oil-Pressboard Interface under AC Voltage, Int. J. Plasma. Environ. Sci. Technol.,**16** (2022) e03007 (13pp).

[27] 花岡良一，直江伸至，西川精一，久住政喜，「一組の産業用機械機器セット」，意匠登録第 1811464 号および 1811465 号 (2025).

[28] Hayashi, S., Naoe, N., Hanaoka, R. et al., Experimental Assessment on Pumping Properties of Novel EHD Pump Prototype, ISH2025, PS3-6, ID: 67 (2025) 1-6.

[29] Lee, C. K., Robinson, A. J. et al., Development of EHD Ion-Drag Micropump for Microscale Electronics Cooling, THERMINIC 2007, (2007) 1-6.

[30] Kazemi, P. Z., Selvaganapathy, P. R. et al., Electrohydrodynamic Micropumps with Asymmetric Electrode Geometries for Microscale Electronics Cooling, IEEE Trans. Dielec. and Elec. Ins., **16**, 2 (2009) 483-488.

[31] Fujiwara, Y., Kano, I. et al., Development of an Electrohydrodynamic (EHD) Micropump to Generate Oscillating Flow at Low Frequencies, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **4**, 1 (2010) 344-355.

[32] Yokota, S., A Review on Micropumps from the Viewpoint of Volumetric Power Density, The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), **1**, 2 (2014) 1-11

[33] Nishikawara, M. and Yagoobi, J., Experimental Study of Electrohydrodynamic Conduction Pumping Embedded in Micro-Scale Evaporator, 2020-EPC-1101, (2020) 1-4.

[34] Nishikawara, M., Miyakita, T. et al., Prototype of Loop Heat Pipe with Electrohydrodynamic Conduction Pump for Active Shutdown Function, 52nd Int. Conf. on Environmental Systems, (2023) 16-20.

[35] 三井和幸，EHD ポンプを用いたロボット駆動機構の開発，フルードパワーシステム，**54**, 6 (2023) 243-248.

電気電子機器・デバイスにおける熱流体解析と電気流体力学的伝熱応用

Thermal-Fluid Analysis and Electrohydrodynamic Heat-Transfer Applications in Electrical and Electronic Equipment and Devices

匹田　政幸（九州工業大学）
Masayuki HIKITA (Kyushu Institute of Technology)
e-mail: hikita@ele.kyutech.ac.jp

１．はじめに

近年の電気電子機器は，脱炭素社会の実現に向けた高電圧化・大容量化と，モバイル機器や車載デバイスに代表される小型軽量化という，相反する要求に直面している．これらに伴い，内部の発熱密度は著しく増大しており，絶縁信頼性の維持と長寿命化を両立させるための「伝熱解析」が，設計段階における最重要技術となっている．変圧器などの電力インフラ設備から，LED 照明，最新の SiC パワーモジュールに至るまで，冷却媒体としての油やフッ素系液体の流動を伴う熱移動現象の制御が鍵を握る[1-4].

電気電子機器内部では，電界・熱・流体が相互に影響し合う複雑なマルチフィジックス現象が生じる．特に，電界が誘電体液体の流動に影響を及ぼす現象は「電気流体力学（Electrohydrodynamics: EHD)」として体系化されており，電界による流動促進や電荷移動を伴う対流現象などが含まれる．一方，熱流体解析（Thermal-Fluid Analysis）は，熱伝導・自然対流・強制対流・乱流などの熱と流体の一般的な解析を扱う広い概念であり，EHD はその中の特殊な現象として位置づけられる．

変圧器油の自然対流やパワーモジュール内部の液体冷却など，電気電子機器における多くの冷却現象は，電界の影響を受ける場合と受けない場合が混在している．そのため，EHD と熱流体解析は明確に区別されつつも，実際の設計現場では両者を統合的に扱う必要がある．本稿では，この観点から，変圧器の熱流体・構造連成解析，LED の放熱設計，および循環液体を用いた最新のパワーモジュール冷却技術について，その解析手法と適用例を概説する．

２．変圧器の伝熱流体解析と EHD 冷却

2.1　解析手法と冷却制御

図 1 に，導油式変圧器の概略構造を示す．変圧器の冷却設計において，数値解析は不可欠なツールである．最初期に実用化されたのは「管路回路網解析」であり，これは巻線内の流路を管路のネットワークとして捉え，各流路への流量配分と温度を算出する手法である．油入変圧器の液体冷却媒体に対して高い計算精度が得られるため，現在も広く用いられている[1].

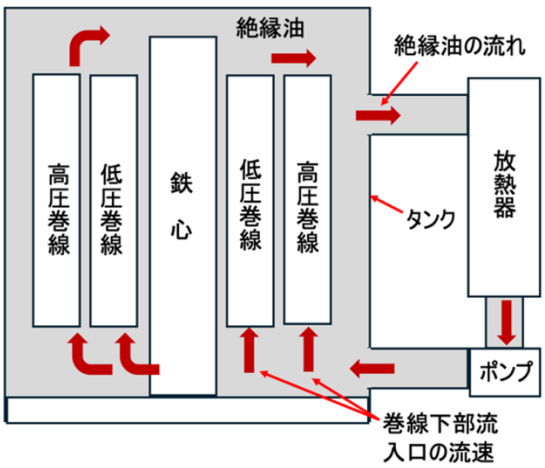


図 1 導油式変圧器の概略構造

一方，複雑な巻線ダクト内の「速度場」と「圧力損失」を計算して流動を把握するために，連続の式およびナビエ・ストークスの式を基礎方程式とする流体解析（CFD）の適用が進んでいる．気体冷却を行うガス絶縁変圧器（図１）などでは，CFD 適用の他に，k-ε モデル（k: 乱流エネルギー，ε: 散逸率）モデルを用いた乱流解析が多用される．また，自冷式変圧器ではブシネ近似（温度差による密度変化を「浮力」として定式化）を用いた自然対流計算も行われる[1].

近年では，絶縁油中に EHD ポンプ（格子型やリング型電極など）を設置し，機械的な可動部なしに強制対流を生じさせる能動的冷却制御が注目されている．図 2 に，EHD 冷却電力用変圧器の

例を示す[5]．図 2(a) は，熱媒体を循環させるためのグリッド電極を備えた EHD ポンプ 2 が設置されている．また，図 2(b) は，先端が尖った穿孔ワイヤ 4 と，非対称形状のスリーブ 5 を組み合わせることで，管状ラジエータ内に乱流化と循環流を生じさせ，変圧器油からラジエータ壁面への熱伝達を向上させる．これらにより，従来の自然対流に比べ，ラジエータの小型化や油温の低減（最大で半分程度）が期待でき，設計の最適化に大きく寄与する．

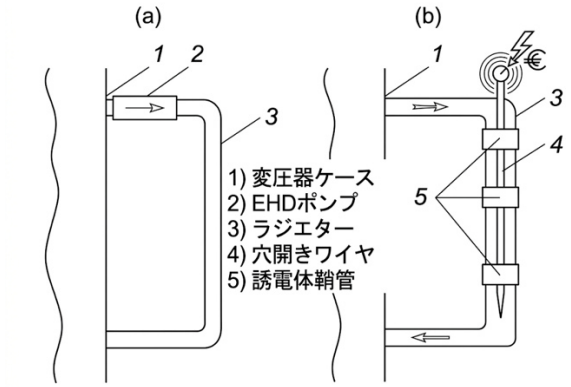


図 2 EHD 冷却電力用変圧器: (a)グリッド電極を備えた EHD ポンプ 2, (b) 管内に同軸配置された，穿孔絶縁コーティング付きワイヤ 4 と絶縁スリーブ 5 による熱伝達(文献[5] Kozhevnikova, I.，Heliyon (2023)を参考に著者作成)

2.2 流動帯電と絶縁診断

解析技術は冷却設計のみならず，経年変圧器で問題となる 流動帯電（Streaming Electrification）の解明にも適用されている．図 3 に，変圧器内部にある固体（絶縁紙）―液体（絶縁油）界面での電気二重層の形成 [6]を示す．油中微量化合物が帯電特性に及ぼす影響の評価や，UHF 帯を用いた部分放電（PD）診断など，電界・熱・流体連成解析による高精度な保守管理技術の研究が進んでいる[6,7].

2.3 測定技術による検証

解析の妥当性を検証するため，流速測定にはトレーサ微粒子を用いた PTV（粒子追跡流速測定）法や粒子像輝度パターンの相互相関を計算する PIV（粒子画像流速測定）法が用いられる [1]．温度測定では，熱電対が使われることが多い．実規模器では，高電圧下でも使用可能な光ファイバ温度センサが活用され，巻線内部の温度分布を直接計測することで解析値との整合性が確認されている [1].

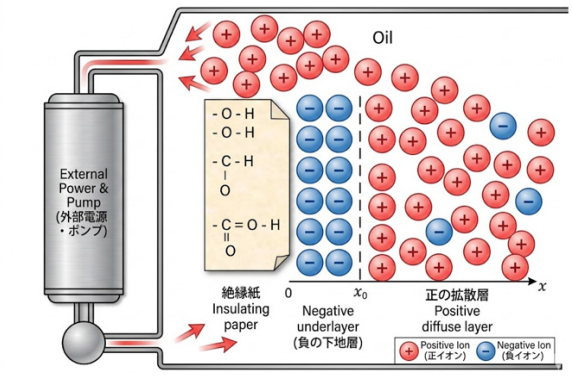


図 3 固体―液体界面での電気二重層の形成 (文献[6] Rouabeh, J., (2023)を参考に著者作成)

3．変圧器の熱流体シミュレーション（大規模解析の進展）

3.1 磁界・熱流体連成解析

損失（発熱量）を正確に把握するため，有限要素法（FEM）による磁界解析との連成が一般的である [8,9]．巻線の抵抗損に加え，漏れ磁束に起因する「渦電流損（漂遊損）」を三次元で算出し，これを熱源として分布させることで，ホットスポット温度の予測精度が飛躍的に向上した [10,11].

エステル油を絶縁油として適用した変圧器では，鉱油に比べて動粘度，比熱容量が 3〜4 倍高いため，油流速が低下しやすい．図 4 に示す巻線内温度分布からも，エステル油では鉱油よりホットスポット温度が高くなる傾向が明確に確認されている．

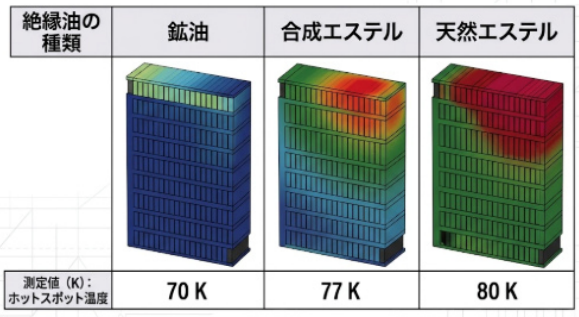


図 4 各種絶縁油の巻線内温度分布；測定値(K)は温度上昇値(文献[11] Pukel, G.J. (2012)を参考に著者作成)

このため，エステル油を使用する際には，巻線の冷却流路や油流動を改善する設計が不可欠となる．

3.2　三次元大規模解析の進展と将来動向

計算機性能の向上により，従来の二次元モデルから，タンク内部全体を含む大規模な三次元熱流体解析へと移行している [12,13]. 三次元解析の導入により，従来は理論計算や試作機データに依存していた巻線下部流入口の流速分布を精度良く求められるようになり，巻線冷却設計のさらなる最適化が可能となった [13]. 実規模の検証において，流速の実測値と解析値が1.04倍という高い精度で一致した事例も報告されている [13].

熱流体解析は，冷却構造の設計精度を高めるための基盤技術として定着し，従来は実験に依存していた評価の一部もシミュレーションへ移行しつつある．今後は，材料特性の経年変化や運転条件の変動を考慮した予測モデルの高度化が求められる．また，設計現場で迅速に検討を進めるためには，解析モデルの簡素化や計算効率の向上といった実務的な改善も重要となる．

４．変圧器の熱伝導・熱応力解析

4.1　モールド部品の信頼性評価

エポキシ樹脂を用いたモールド変圧器や絶縁スペーサにおいて，機械的特性の維持とクラック防止は極めて重要である．樹脂と埋め込み導体などの異種材料間の熱膨張係数の差に起因する応力を評価するため，「非定常熱伝導解析」と「熱応力解析」が組み合わせて実施される [1]. 具体的には，三次元空間での非定常熱伝導モデルを用い，熱の伝わり方を時間を追って解析する．次に，温度勾配が最も厳しくなる時刻を選択し，その時の最大主応力や Von-Mises 応力を算出する [14]. これにより，冷熱試験やヒートサイクル試験における健全性を事前に検討することが可能となっている．

4.2 製造プロセスへの適用

樹脂注形時の「硬化プロセス解析」も重要な手法である．大口径のモールドスペーサなどの製造において，一様に硬化させて歪みを抑えるためのヒータ制御や，内部応力分布の評価に活用されている [15].

５．LED の放熱設計・EHD 伝熱促進

5.1　小形 LED から高輝度バンクへ

LED 電球は長寿命・省電力で普及しているが，小形化を追求するほど LED チップ（ジャンクション）の温度上昇が発光効率や寿命に悪影響を及ぼす．LED の発光効率を維持するには，点灯時のジャンクション温度（T_j）を絶対最大定格以下に抑える放熱設計が不可欠である． CFD を用いた定量的な放熱設計手順として，以下の 2 段階が提唱されている．まず，最大外郭寸法内でのヒートシンク包絡体積と熱抵抗の相関を求め，T_j が目標値以下となるか検証する．次に，目標に達しない場合は，包絡体積を一定にしたまま，フィン構造による表面積増加や，アルマイト加工等による表面放射率の向上を検討する [2].

解析を効率化するため，温度解析結果から各部材間の熱抵抗を算出する「熱回路網法」が活用されている[2]．これにより，熱の主な放出経路がヒートシンク表面であることを特定し，点灯回路等のモデル化を簡略化することで計算時間を短縮しつつ, 実測値±3%以内の予測精度を実現している．

5.2　小型強制循環システムと EHD 沸騰冷却

高出力化・高集積化が進む LED 投光器・バンクなどの冷却において，発熱密度の増大に伴い，従来の空冷ファンに代わる小型かつ静音な熱マネジメント技術が不可欠となっている．これに対し，自励振動ヒートパイプ（PHP）に加え, 新たな EHD 冷却技術の導入が研究開発されている[16,17]. PHP は，液体スラグと蒸気プラグの相変化を伴う自己振動により熱を拡散する受動的伝熱デバイスである [16]. 放射状チャネルを用いた実験では，非作動時に比べてプレート内温度差が約 9%低減するなど, 高熱流束 LED の熱拡散に有効であることが示されている．

さらに, 絶縁性冷媒に電界を印加して静電圧力により液体を加熱面へ供給する EHD 沸騰熱伝達法が提案されており, 100 W/cm²を超える高熱流束の除去が実証されている.この能動的沸騰促進技術は, 次世代 LED バンクの高発熱密度冷却に有望な手段である[17].

一方, 多段式格子型 EHD ポンプを用いた小型・静音な液体循環系が提案されている[5]．これにより，高負荷時でも基板温度を適切に維持することが可能となる．

6．次世代パワーモジュールの熱・電気流体連成解析

6.1　次世代パワーモジュールの課題

次世代の MV（中電圧）SiC パワーモジュールでは，高出力密度化と絶縁確保の両立が不可欠であるが，両者はトレードオフの関係にある [3]. 従来のシリコーンゲル封止では，局所的な電界集中による部分放電（PD）が絶縁劣化（電気トリー）を招き，また絶縁セラミックスの厚膜化が熱抵抗の増大を招くという課題があった.

6.2　強制循環フッ素系液体冷却（FFLC）

この解決策として，シリコーンゲルに代わりフッ素系液体（3M 製 FC-40 等）をモジュール内部に直接流す「強制循環液体冷却（FFLC）」が提案されている [3]. FC-40 は高い絶縁耐力（46kV）と低粘度を併せ持ち，流動冷却媒体として優れた特性を示す. 図 5 に，フッ素系液体両面冷却パワーモジュールのイメージ図を示す.

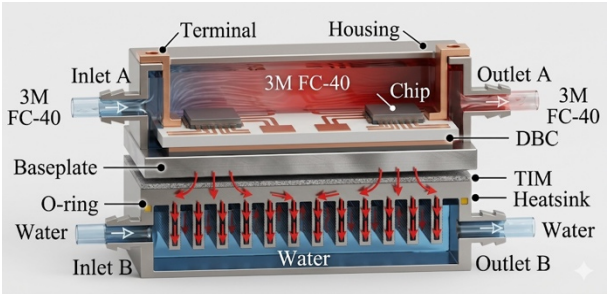


図 5 フッ素系液体両面冷却パワーモジュールのイメージ図（文献[3] Wang, L. (2024)を参考に著者作成）.

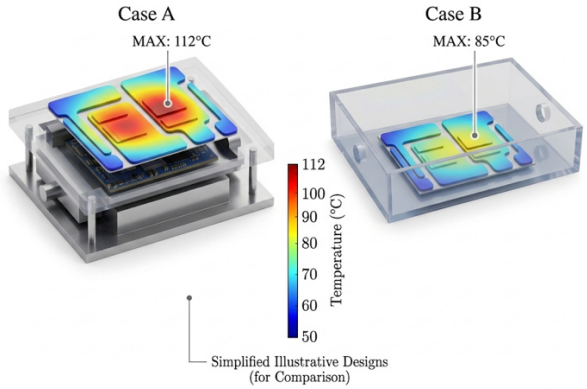


図 6 熱流体解析結果；Case A:従来の底面水冷式パワーモジュール，Case B: フッ素系冷却式パワーモジュール(文献[3] Wang, L. (2024)を参考に著者作成）.

また，図 6 に，従来の底面水冷式および片面フッ素系冷却パワーモジュールに対して，COMSOL を用いた熱流体解析によるチップ表面の温度分布を示す. シミュレーションおよび実験により，従来の底面水冷方式と比較して，フッ素系冷却モジュールではフル負荷時のジャンクション温度（T_j）を 21℃低下させ，温度上昇 ΔT_j を 35.6%低減できることが示された [3].

6.3　絶縁設計のパラダイムシフト

FFLC の最大の特徴は，チップ上面から直接熱を奪うため，チップ底面の絶縁セラミックス（DBC）をいくら積層・厚膜化しても熱性能に影響を与えない点にある. これにより，電界緩和のための DBC 多段積層が可能となり，絶縁と熱のトレードオフを完全に解消できる. 部分放電試験においても，FC-40 中に浸漬した DBC は 10 kV まで部分放電が発生せず，シリコーンゲル（6 kV）を大幅に上回る絶縁性能を実証している[3].

6.4　疑似粗さ効果と低抵抗駆動

FFLC は高電界下で誘電体液体が流動するため，本質的に EHD 的な要素を含む冷却方式であり，電界分布が液体物性や局所流動に影響を及ぼす. このため，熱流体解析に加えて電界解析を組み合わせたマルチフィジックス解析が，液体絶縁封止型パワーモジュールの設計に不可欠となる.

さらに. マイクロチャネル内に 不平等電極を配置すると，電界誘起渦が 疑似粗さ（Pseudo-roughness） として機能し，温度境界層を破壊してヌセルト数を飛躍的に向上させることが報告されている[18]. また，電極サイズを流れ方向に変化させる設計により，誘起された渦を主流方向に整列させ，熱伝達を促進しつつ流動抵抗を低減する 「等価スリップ現象」 も報告されており，省エネルギーな冷却システムとしての可能性を示している[18].

7．ナノ流体の適用による性能向上

7.1　冷却性能の飛躍的向上と伝熱メカニズム

EHD 技術とナノ流体（六方晶窒化ホウ素(Eh-BN)やカーボンナノチューブ(CNT)など）の融合は，熱輸送性能の向上と絶縁信頼性の確保という，次世代電気電子機器が抱える二大課題を同時に解決し得る革新的なアプローチである[19].

冷却性能の面では，剥離された Eh-BN や CNT

といった高アスペクト比を有するナノ粒子を分散させることで，媒体自体の熱伝導率が大幅に改善される（図 6）．これはナノ粒子の活発なブラウン運動や，粒子・液体界面に形成される高熱伝導なナノレイヤー効果に起因する．さらに電界印加下では，これらの粒子が電気的体積力の作用点となり，流体内に微細な渦や攪拌を誘起する．実験および解析の結果，ナノ粒子の添加によりヌセルト数（Nu）が単一媒体と比較して 27%～数倍程度向上することが確認されており，極限環境下での能動的熱制御における重要性が増している[19].



図 6　2D 誘電体ナノ材料(Eh-BN)とハイブリッド流体のイメージ図

7.2　電子捕捉効果による絶縁信頼性の強化

EHD 冷却において特筆すべき利点は，2D ナノシートの分散が熱伝導率を大幅に向上させるだけでなく，ナノ粒子による電子捕捉（Scavenging）効果にある．高電圧印加時に液体中に発生する自由電子をナノ粒子表面のポテンシャル井戸にトラップすることで，ストリーマ（放電路）の進展を効果的に抑制し，絶縁破壊電圧（ACBDV）を飛躍的に向上させる．これにより，より高い電界強度での冷却運用が可能となる[19].

８．むすび

本稿では，変圧器，LED，パワーモジュールなどの電気電子機器を対象とした最新の伝熱解析技術と EHD およびナノ流体の応用展開を俯瞰した．経験的なマクロ計算から，三次元マルチフィジックス解析への進展により，これまで困難であった局所現象の把握と最適設計が現実のものとなっている．今後は，さらなる計算時間の短縮と，新冷媒への適用，信頼性評価への展開や宇宙機・航空機の能動的熱制御（ヒートスイッチ技術）などへのさらなる応用が期待される．

参考文献

[1] 電気学会　変圧器の解析における高度利用技術調査専門委員会 資料 28-2-3 技術報告 5 章 冷却技術 (2015)

[2] 甲斐　誠，岡崎　享，真鍋由雄，小型 LED 電球の放熱設計，Panasonic Technical Journal, **58-2** (2012) 56.

[3] Wang, L. et al., Forced Fluorinated Liquid Cooling for Medium Voltage SiC Power Modules: Concurrently, IEEE Power Electronics, **39-12** (2024) 15622.

[4] 藤田秀樹・近藤俊成・清滝和雄・松原克夫，最近の当社の CAE 技術について，日新電機技報，　**48-1**，(2003) P2-4.

[5] Kozhevnikova, I. et al., Influence of Electrohydrodynamic Flows on Intensification of Heat- and Mass-Transfer Processes: Part 3. Electroconvection and Electrohydrodynamic Pumps in the Cooling and Thermostating Systems, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, **59-1**(2023) 59.

[6] Rouabeh, J., et.al., A study of correlation between the ect and ehd properties of different aged insulating oil mixtures that can Be an alternative to mineral oil for the insulation and cooling of power transformers, Heliyon, **9** (2023) e12693.

[7] 電気学会技術報告書, 液体誘電体の電気絶縁と EHD, ERMr 応用技術，IEEJ-GH1282 (2013).

[8] 高橋誠・水野康宏・永田徹，変圧器巻線の損失／温度上昇の分布解析，愛知電機技報，No.27，　(2006) 17.

[9] 浦井 一，松尾 尚英，橋本 裕明，加藤 達朗，電力流通機器における最近の解析技術，日立評論，12 (2013) 24-27.

[10] 櫛木一寿，脇本　聖，最近の変圧器技術，明電時報　**357-4** (2017) 11.

[11] Pukel, G.J. et al., POWER TRANSFORMERS with environmentally friendly and low

flammability ester liquids , CIGRE 2012 , **A2_201** (2012).

[12] 彦坂 知行，林田 広和，榎並 義晶，変電機器を小型化する最新の設計・解析技術，富士電機技報， **92-3** (2019) 133.

[13] 愛知電機技報, 変圧器設計への三次元流体解析の活用，No.45， (2024) 19.

[14] 広瀬英雄・南和彦・戸田充，有限要素法による非線形非定常熱伝導解析プログラム HTT の開発とその応用，高岳レビュー，**32- 3** (1985).

[15] 西澤龍男・前田孝夫・森谷廣，エポキシモールド品の応力解析，富士時報， **67-4** (1994)245.

[16] Yamagami, S. et al., Thermo-fluid dynamics of pulsating heat pipes for LED lightings, Mechanical Engineering Journal, **3-6** (2016) 1.

[17] 鹿野 一郎, 沸騰冷却デバイスの研究･開発, TED Plaza, JSME TED Newsletter, No.91, (2020) 2.

[18] Zhang, X. et al., Heat transfer enhancement and flow resistance reduction characteristics of non-uniform electrohydrodynamic conduction pumping in microchannels", Applied Thermal Engineering, Elsevier, **258-Part B** (2025) 124721.

[19] Maharana, M. et al., Electrohydrodynamics Analysis of Dielectric 2D Nanofluids, Nanomaterials, **12** (2022),1489.

電気流体力学(EHD)効果によるサブクール流動沸騰熱伝達促進

Enhancement of boiling heat transfer by electrohydrodynamic (EHD) effects

鹿野　一郎（山形大学）
Ichiro KANO (Yamagata University)
e-mail: kano@yz.yamagata-u.ac.jp

1．はじめに

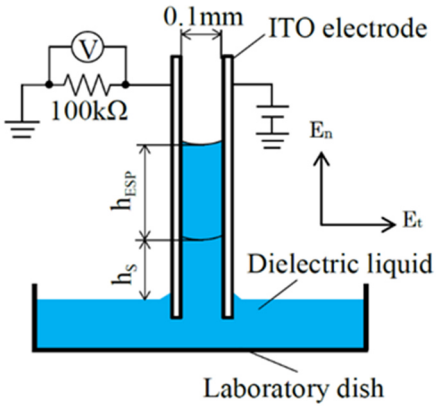
画像処理装置(GPU)や中央演算処理装置(CPU)などの高発熱電子デバイスでは，100 W/cm²を超える高熱流束を除去するための高性能冷却技術が求められている[1-3]. そのため，省スペースかつ高効率な手法として，マイクロ／ミニチャネルにおける流動沸騰冷却の研究が進められてきた[4-7]. しかし，誘電性のフッ素系冷媒を用いる場合，水などの冷媒と比較して比熱および蒸発潜熱が相対的に小さいことから，限界熱流束（CHF）が 20-30 W/cm² 程度に制限されることが多い．CHF は電子機器冷却における重要な設計指標の一つであり，その発生は冷却面温度の急上昇や装置の信頼性低下・損傷につながる．著者らは，限界熱流束（CHF）向上を目的として，電気流体力学（EHD）を利用した沸騰促進技術およびその予測モデルの開発を進めてきた[8-15]．本稿では，これらの技術および予測モデルの概要について概説する．

2．EHD による体積力

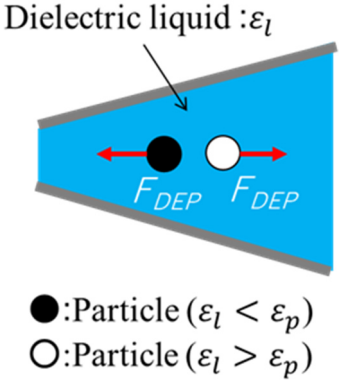
誘電液体に電圧を印加するとき，液体に流れが生じる現象を EHD と呼ぶ. この流動が生じる原因には主として三つの電気体積力があり，次式で表される[16-17].

$$\mathbf{f}_e = q\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \nabla\left[\rho\frac{E^2}{2}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T\right] \qquad (1)$$

ここで，q は電荷密度（C/m³），$\mathbf{E}$ は電界（V/m），ε は誘電率（F/m），ρ は密度（kg/m³），そして $(\partial\varepsilon/\partial\rho)_T$ はある温度 T における密度変化に対する誘電率の変化量である．式（1）の第 1 項，第 2 項および第 3 項は，それぞれ，クーロン力，誘電率の空間勾配に起因する体積力，および電歪力を示す. 絶縁破壊強度を超える高電界条件や液体中に水などの不純物がある場合には，第 1 項のクーロン力が支配的となる. クーロン力によってイオンが液体中を移動して流動を生じる現象はイオンドラッグポンプと呼ばれ，1960 年前後から広く知られている[18]．右辺第 2 項は，流体中に誘電率の不均一があるところに発生する流体力である．この流体力は，絶縁破壊を起こさない高電圧領域で発生し，式(1)の右辺第 1 項のクーロン力は無視できる[16]．この誘電率の不均一に起因する流体力には，気液界面に働く静電圧力がある．例えば，図 1(a)に示すように，シャーレ中の誘電液体中に 2 枚の電極からなる電極対の下側を浸した場合を考える. 初めは表面張



(a) 静電圧力



(b) 誘電泳動

図 1　電気流体力学的効果

力で液体が上昇（h_s）するが，電界をかけるとさらに液面が上昇（h_{ESP}）する．電界によって発生する圧力を静電圧力と呼ぶ．

$$\Delta P_{ESP} = \frac{1}{2}{E_t}^2(\varepsilon_l - \varepsilon_v) \quad (2)$$

ここで，ΔP_{ESP}は静電圧力（Pa），E_tは電界の接線方向成分（V/m），ε は誘電率（F/m），添え字l，v はそれぞれ液体と蒸気の場合を示す．次に，図1(b)に示すように電界に勾配がある場合に半径Rの球体に働く力を考える．誘電率ε_lの液体中に誘電率ε_pの半径Rの固体や蒸気泡が存在したりする場合の固液あるいは気液二相流の場合を考えると，球体に働く力は次式のようになる[19]．

$$\mathbf{f}_{\mathrm{DEP}} = 2\pi\varepsilon_l R^3\left(\frac{\varepsilon_p-\varepsilon_l}{\varepsilon_p+2\varepsilon_l}\right)\nabla E^2 \quad (3)$$

ここで，$\mathbf{f}_{\mathrm{DEP}}$は誘電泳動力（N），添え字$p$ は粒子の場合を示す．液体よりも誘電率が小さい蒸気の場合には，電界の低い方向に力が働くが，液体よりも誘電率が大きい固体の場合は，電界の高い方向に力が働く．蒸気泡に電界勾配を与えることにより，蒸気泡を加熱面近傍から除去し，熱伝達を促進できることが報告されている[20]．

3．EHD による沸騰熱伝達促進

3.1　飽和プール沸騰熱伝達

図 2 に沸騰面上で電気流体力を発生させるためのスリット電極の設置概略図を示す．電極には，幅W_S が 700 μm のスリットが設けられており，沸騰面から 600 μm の高さ H で固定されている．電極には最大で 3000 V の電圧を印加するが，このとき電極と沸騰面の間の液体には-5 kV/mm の電界が発生する．使用する冷媒は，沸点が 34 ℃の HFE-7000 であり，この液体の物性値を表 1 に示す．この液体の絶縁破壊強度は 40 kV/2.54 mm であり，電気抵抗率が高いため，絶縁破壊を起こすような高電圧を印加しなければ，流れる電流は極めて小さい．また，図 2 には沸騰が十分発達した場合の蒸気泡の挙動の概略図も示している．核沸騰が十分発達すると，スリットに沿って間隔λ_dで気泡の列が形成されると仮定でき，スリット電極上部では，周期的に蒸気泡として離脱する（図 6 参照）．スリット電極と沸騰面との間には，スリットに沿って蒸気泡が合体したトンネルが形成される．そのトンネルの気液界面の垂直方向には，図中の矢印に示すように静電圧力

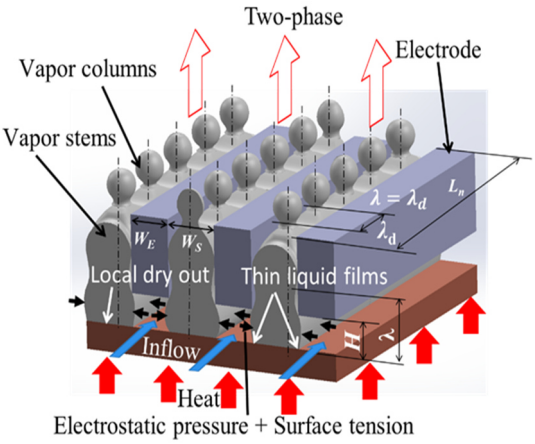


図 2　沸騰面上のスリット電極の設置[15]
(H = 600 mm, W_E = 800 mm, and Ws = 700 mm)

表 1　HFE-7000 (C3F7OCH3)の代表的な熱物性
(25 ℃)

定圧比熱 C_p ［kJ/kg/K］	1.3
潜熱 L_{lg} ［kJ/kg］	142
飽和温度 T_{sat} ［℃］ at 1 atmosphere	34
誘電率 ε_l ［-］	7.4
熱伝導率 λ ［mW/m/K］	74.9
電気抵抗率 ρ ［Ωm］	10^8
液体密度 ρ_l ［kg/m^3］	1401
蒸気密度 ρ_v ［kg/m^3］	5.78
液体動粘度 ν ［mm^2/s］	0.32
表面張力 σ ［mN/m］	12.4

と表面張力が作用する．この界面には最大で 700 Pa の静電圧力が働き，沸騰面と電極の間に液体を供給し続けることで CHF を効果的に向上させると考えられる．

プール沸騰における CHF の予測に関しては，次式の Zuber [21]による流体力学的不安定モデルが良く知られている．

$$q_{max,Z} = \frac{\pi}{24}\rho_v L_{lv}\left[\frac{\sigma(\rho_l-\rho_v)g}{\rho_v^2}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

ここで，$q_{max,Z}$はCHF（W/cm^2），L_{lv}は蒸発潜熱（kJ/kg），σ は表面張力(N/m)，g は重力加速度（m/s^2）である．

著者は，Zuber のモデルを参考に，図 2 の蒸気トンネル側面に静電圧力と表面張力が作用する気液界面に Kelvin-Helmholtz 不安定性が発生する次の CHF 予測式を提案した[10].

$$q_{max,EHD} = \frac{\pi\lambda}{48}\rho_v L_{lv}\frac{L_s}{A} \times \left[\frac{\rho_l+\rho_v}{\rho_l\rho_v}\left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda}+E_t^2(\varepsilon_l-\varepsilon_v)tanh\left(\frac{\pi W_E}{\lambda}\right)\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ここで，Aは伝熱面の面積(m²)，$L_s(=\sum_1^n L_n)$はスリットの全長(m)，W_Eは電極幅(m²) である．λは気液界面の振動波長を示すが，静電圧力と表面張力の影響により$\lambda = 2H$で振動していると仮定した．この予測式は，電極の高さ H が 200～600 μm，電界 $\boldsymbol{E}$ が-3～-7 kV/mm，スリット幅W_Eが 400～700 μm の条件で良好に実験値を予測できた[11]．さらに，蒸気トンネル下部の固気液界面は接触角の影響を強く受ける薄液膜が存在し，この薄液膜の面積比率が CHF の値を大きく変えることも明らかにした[12-13]．無酸素銅製の伝熱面上に直径が 5-15 μm の人工ダイヤモンド粒子や 4 種類の薄膜金属(Cu, Zn, Cr, NiB)を電着して，接触角を人工的に変化させることで以下の補正式を導き出し，CHF を±18 %の精度で求めることができた．

$$q^*_{max,EHD} = q_{max,EHD}\left(C_A\frac{cos\phi}{sin^2\phi}+C_B\frac{1}{sin\phi}\right) \quad (6)$$

ここで，$q^*_{max,EHD}$は修正されたCHF（W/cm²），ϕは接触角(deg)，C_A，C_Bは実験データに基づき最小二乗法により決定される定数である．本研究では，$C_A = 0.0145$，$C_B = 0.233$とした[15].

3.2 サブクール沸騰熱伝達

次に，サブクール流動沸騰の熱伝達を考える．加熱面上にサブクール液体が流れると，液体の温度は加熱された沸騰面によって上昇する．さらに壁面近傍の液体温度が飽和点より高くなると，核沸騰が開始する．そのため，サブクール沸騰においては，顕熱と潜熱の双方を考えなければならない．質量流量およびサブクール度が小さい場合，サブクール流動沸騰は，壁面近傍では局所的に飽和プール沸騰に近い状態であると仮定し，プール沸騰における CHF に液体の顕熱を加えることで評価できると仮定した．したがって，本サブクール流動沸騰モデルにおける CHF は，以下の式によって予測される[15].

$$\mathrm{CHF}_{sfb} = q_{s,max} + q^*_{max,EHD} \quad (7)$$

ここで，$q_{s,\max}$ は，流入した液体が出口で飽和温度に到達した場合の顕熱熱流束q_sの最大値である．q_sと$q_{s,\max}$を以下に示す.

$$q_s = \dot{m}C_p\Delta T_l/A \quad (8)$$

ここで，ΔT_lは入口と出口の温度差$(=T_{out}-T_{in})$である．出口温度が飽和温度に到達した場合の$q_{s,\max}$は，次式に示す.

$$q_{s,max} = \dot{m}C_p\Delta T_{l,max}/A \quad (9)$$

ここで，$\Delta T_{l,max}$は液体の飽和温度と入口温度との温度差$(=T_{sat}-T_{in})$である.

4．サブクール流動沸騰の熱流束測定

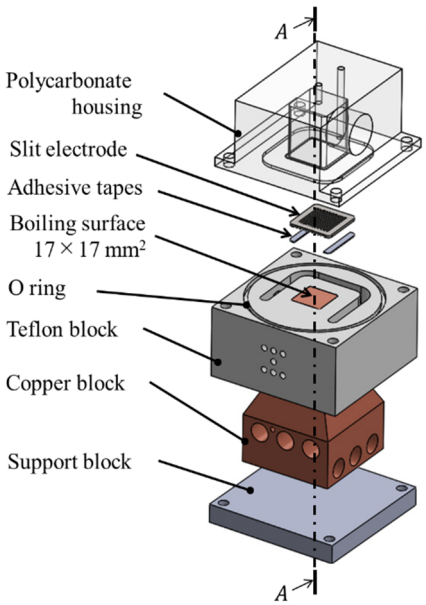
サブクール流動沸騰の熱流束測定のために著者らが開発したテストモジュールの概略図を図 3 に示す．下部には無酸素銅製の加熱ブロックがある．さらに，加熱ブロックの上部には 17 mm 角柱状銅ブロックを一体加工した．角柱状銅ブロックの上部には沸騰面があり，電極はその沸騰面から高さ H= 600 μm の位置に，電気絶縁性両面テープを用いて固定した．また，電極の上部には透明なポリカーボネート製のハウジングを設置した．なお，角柱状銅ブロックには 7 本の熱電対が取り付けられている．これらの熱電対の温度分布から温度勾配を求め，フーリエの法則に基づいて熱流束を算出した．

本研究では，核沸騰開始温度(ONB)を低下させ，CHF を向上させることを目的として，ダイヤモンド粒子電着面を採用した [12-13]．この表面は，ダイヤモンド粒子（粒径 5 μm および 1.5 μm）を，5 層の金属バインダー層（Cu，Ni，Cu，Ni，およびホウ素含有 Ni）とともに電気共析することによって形成した．電気めっきプロセスの詳細は文献 [12] に記載されている．

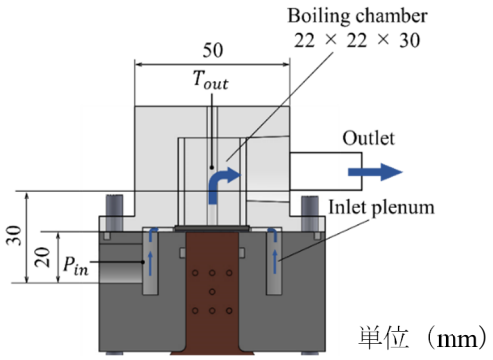
ダイヤモンド粒子電着面の平均表面粗さは，実験前で 0.580 μm であった．また，冷媒に対する電着面の接触角は実験前に 17.6 °であった．なお，5 回の沸騰実験に相当するエージング後においても，粗さおよび接触角には有意な変化は認められなかった．

冷媒は図 3(b)に示すように，スリット電極と沸騰面の間に液体を強制的に流動させ，加熱された気液二相流は，上部から流出する構造となっている．なお，沸騰が開始すると液体の流れが不安定になるため，液体は入口空間で一度貯留してから沸騰面に流れるようにした．

図 4 に著者らが開発した熱流束測定装置を示す．テストモジュールから排出された気液二相流は 10 ℃に冷却されたリザーバーで凝縮された．リザ



(a) テストモジュールの構成



(b) テストモジュール断面図(A-A 面)

図 3　テストモジュール概略図[15]

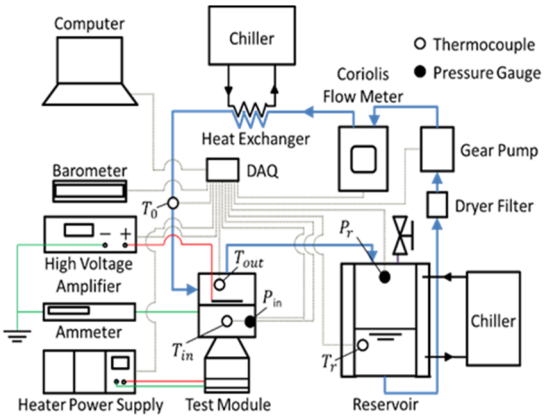


図 4　熱流束測定装置の概略図[15]

ーバーに貯留された液体は，不純物や水分を取り除くためにドライヤフィルタを通し，ギアポンプによって液体を循環させ，コリオリ流量計で質量流量を測定した．その後，熱交換器で液温を調整してからテストモジュールに供給した．なお，本研究では，圧力変化の影響がないように，リザーバーを大気開放し，大気圧下で実験を行った．

流動沸騰状態を評価するために，気液二相流の重要な状態量の一つとして蒸気の質量割合を示す乾き度χを導入した．

$$\chi = \frac{m_v}{m_l + m_v} \tag{10}$$

ここで，m_vは蒸気の質量(kg)，m_lは液体の質量(kg)である．

５．サブクール流動沸騰の熱流束測定事例

図 5 に熱流束q，顕熱による熱流束q_s，そして出口液温T_{out}を示す．本実験は，沸騰曲線の再現性を確認するために 5 回繰り返して実施された．低熱流束領域では，単相熱伝達が支配的である．単相領域においては，過熱度（$= T_w - T_s$）の増加に伴い，熱流束は線形に増加する．そして，過熱度が 8.2 K で核沸騰が始まる（ONB: Onset Nucleate Boiling）．その後，熱流束は急激に増加し，バルク液体温度が飽和点に到達する．飽和点に達する前の二相流は，サブクール核沸騰（SubNB: Subcooled Nucleate Boiling）である．バルク液体温度が飽和点に到達すると，飽和核沸騰領域（SatNB: Saturated Nucleate Boiling）に移行する．この領域では，スリット内の蒸気空洞部下部において局所ドライアウト（Local Dry-out）が発生し，伝熱面の一部が蒸気に覆われるため有効伝熱面積が減少する（図 2 参照）．その結果，沸騰曲線の傾きが小さくなる．さらに過熱度を高くすると沸騰面の温度が急激に上昇し，過熱度 40 K のとき CHF に到達する．CHF 値は 67 W/cm² である．本研

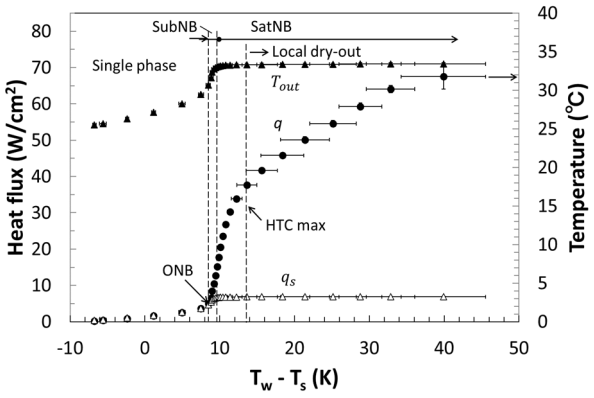


図 5　熱流束と出口液温の関係[15]
(ΔT_{sub} = 9 K, E = -5 kV/mm, $\dot{m}$ = 1.83 g/s)

究で使用した液体は不活性な電気絶縁性液体であるため，金属表面の酸化や不純物堆積の影響が小さく，安定した実験が行われたと考えられる．

図 6 は，SubNB 領域におけるスリット電極の側面および正面で観察された気泡挙動の可視化結果を示す．可視化のために，ステンレス製スリット電極と同一寸法の透明 ITO ガラス電極を新たに製作した．SubNB 領域では，伝熱面から離脱した気泡がスリット内部で合体し，スリット内部では蒸気が停留する様子が観察された．また，スリット電極上部では，スリット幅よりも小さな気泡が周期的に放出されている．その他，各領域の可視化画像は文献[15]を参照されたい．

次に，電界強度の変化に対する熱流束と乾き度の関係を図 7 に示す．電界強度の増加に伴い CHF は 15 W/cm² から 65 W/cm² へと増加した．また，電界を印加しない場合の乾き度が 10 %であるのに対して，-5 kV/mm の電界印加で乾き度が 68 %に到達した．静電圧力によるポンピングにより，蒸気の排出および液体供給が促進され，液体から蒸気への相変化量が増加していることが示唆される．

限界熱流束（CHF）の予測は，冷却システムを設計する上で重要な情報を提供する．図 8 は，実験で得られた CHF と，予測値 CHF_{fsb} との関係を示している．図中には，電界強度，質量流量，サブクール度の変化に対する CHF と式(6)による予測値 CHF_{fsb} の関係を示している．また，比較のために基本条件（$\dot{m}$ = 1.83 g/s, ΔT_{sub} = 9 K, E = -5 kV/mm）での銅平滑面のデータを示している．銅平滑面の CHF を含めて，ダイヤモンド電着面での電界強度，質量流量，そしてサブクール度の変化に対して予測値は±20%の精度で予測できる．本研究で提案している

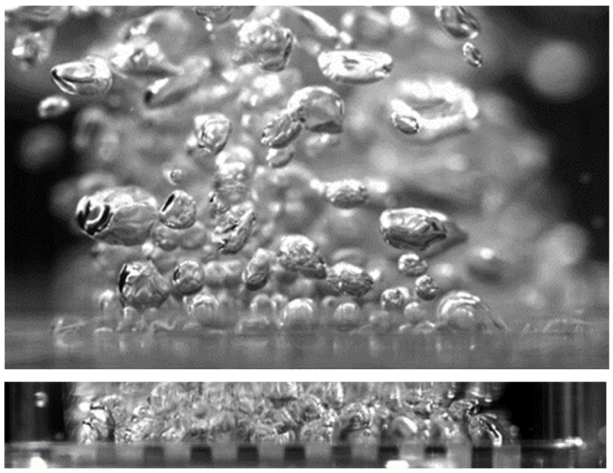


図 6　サブクール核沸騰（SubNB）[15]
（q=10.2 W/cm²）

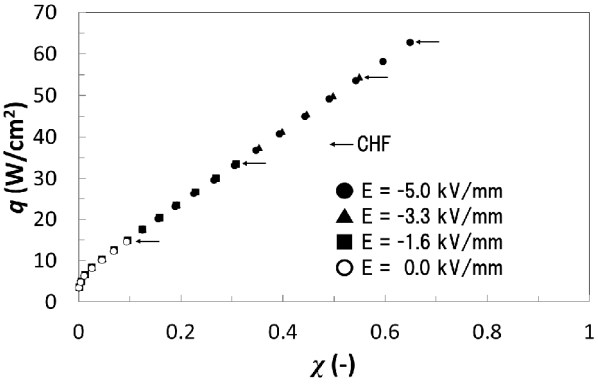


図 7　電界強度変化がおよぼす熱流束と乾き度の影響[15]（$\dot{m}$ = 1.83 g/s, ΔT_{sub} = 9 K）

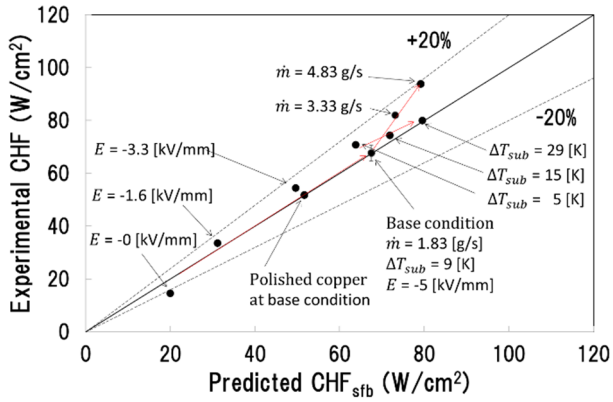


図 8　限界熱流束値の予測[15]

沸騰モデルによる予測式は良好な精度で予測できた．今後は，異なる冷媒を使用した場合や，沸騰面の大きさや粗さが及ぼす予測精度の影響について明らかにしていく予定である．

6．まとめ

本稿では，電気流体力学（EHD）を利用した沸騰促進技術およびその予測モデルについて，本研究グループのこれまでの取り組みを概説した．EHD による気泡挙動の制御は，サブクール流動沸騰における限界熱流束（CHF）の向上に有効であることが示されている．今後は，冷媒特性や流動条件の違いを考慮した予測精度のさらなる検証が重要である．

7．謝辞

本稿で述べた成果は，JSPS 科学研究費（16K06106,22K03960），並びに JST 研究成果展開事業（VP29117940851）の助成を受けて遂行されたものであり，ここに謝意を表します．

参考文献

[1] D.B. Tuckerman, R.F. Pease, High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron Device Letters EDL-2 (5) (1981) 126−129.

[2] A. Agostini, M. Fabbri, J.E. Park, L. Wojtan, J. Thome, and B. Michel, State of the art of high heat flux cooling technologies, Heat Transfer Engineering 28 (4) (2007) 258−281.

[3] A. Sridhar, D. Atienza, 3D-ICE: A compact thermal model for early-stage design of liquid-cooled ICs, IEEE Transactions on Computers 63 (10) (2014) 2576−2589.

[4] J. Lee, I. Mudawar, Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 3341-3352.

[5] L. Chen, G. Xia, Fundamental issues, mechanisms and models of flow boiling heat transfer in microscale channels, International Journal of Heat and Mass Transfer 108 (2017) 97−127.

[6] T.G. Karayiannis, M.M. Mahmoud, Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications, Applied Thermal Engineering 115 (2017) 1372−1397.

[7] A.H. Al-Zaidi, M.M. Mahmoud, T.G. Karayiannis, Flow boiling of HFE−7100 in microchannels: Experimental study and comparison with correlations, International Journals of Heat and Mass Transfer 140 (2019) 100−128.

[8] I. Kano, Y. Takahashi, Effects of electric field generated by microsized electrode on pool boiling, IEEE Transactions on Industry Applications 49 (6) (2013) 2382−2387.

[9] I. Kano, Y. Higuchi, T. Chika, Development of boiling type cooling system using electrohydrodynamics effect, ASME Journal of Heat Transfer 135 (2013) 091301(1−8).

[10] I. Kano, Effect of electric field distribution generated in a microspace on pool boiling heat transfer, ASME Journal of Heat Transfer 136 (2014). 101501(1−9).

[11] I. Kano, Pool boiling enhanced by electric field distribution in micro-sized space, 4th Micro and Nano Flows Conference, ID88 (2014).

[12] I. Kano, Pool boiling enhancement by electrohydrodynamic force and diamond coated surface, ASME Journal of Heat Transfer 137 (2015) 091006(1−9).

[13] I. Kano, Experimental verification of a prediction model for pool boiling enhanced by the electrohydrodynamic effect and surface wettability, ASME Journal of Heat Transfer 139 (2017) 084501(1−7).

[14] I. Kano, Subcooled flow boiling under an electric field on surface enhanced by diamond particles deposition, International Journal of Heat and Mass Transfer, 134 (2019) 959−969.

[15] I. Kano, H. Nagao, M. Iyoda, Effect of electric field, mass flow rate, and subcooling degree on subcooled flow boiling in a micro-slit channel, Applied Thermal Engineering, 229 (2023) 120602.

[16] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, L.P. Pitaevskii, Electrohydrodynamics of Continuous Media, second ed., 8, Butterworth-Heinemann, 1984, pp. 59−64.

[17] W.K.H. Panofsky, Classical Electricity and Magnetism, second ed., Dover Publications, 1962, pp. 111−116.

[18] Stuetzer, O. M., Ion drag pressure generation, Journal of Applied Physics, Vol. 30, No. 7 (1959), pp. 984-994.

[19] Jones, T. B., Electromechanics of particles, Cambridge University Press (1995).

[20] Patel V. K., and Seyed-Yagoobi, J., Combined dielectrophoretic and electrohydrodynamic conduction pumping for enhancement of liquid film flow boiling, Journal of Heat Transfer, Vol. 139 (2017), pp. 061502 (1-9).

[21] Zuber, N., On the stability of boiling heat transfer, Trans ASME J. Heat Transfer, 80 (1958), pp. 711-720.

電界共役流体の CPU 冷却システムへの応用

Application of Electro-Conjugate Fluids to CPU Cooling Systems

桜井　康雄（足利大学）
Yasuo SAKURAI (Ashikaga University)
e-mail: sakurai.yasuo@g.ashikaga.ac.jp

１．はじめに

電界共役流体（ECF : Electro Conjugate Fluid）[1]は機能性流体の一種である．図 1 に示すようにECFに電極を用いて直流高電圧を印加すると流動が生じる．この流動は電極を用いた他の流動現象に比べ非常に強い．この流動を利用するとポンプ（以後，ECF ポンプ）を開発することができ，その特長は摺動部が無い単純な構造で，かつ無音であることである．

筆者らは ECF の特長を利用した ECF ポンプ[2-5]を開発し，これらのポンプを利用した ECF による CPU 液冷システムを試作しその性能について実験的に明らかにしてきた[2, 3, 6].

本稿では電極を配したプリント基板あるいは金属メッシュを電極として用いた ECF ポンプとそれらを利用した ECF による CPU 冷却システムについて概説する.

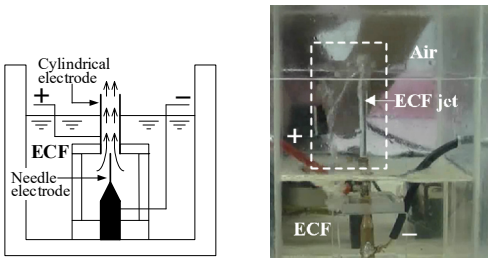


図 1　ECF の流動

２．プリント基板を用いた ECF ポンプと CPU 冷却システム

電極を配したプリント基板を用いた ECF ポンプとして, プリント基板多層型 ECF ポンプと管路形 ECF ポンプを試作した．ここでは，各種 ECF ポンプの特性評価結果と, それらを用いた CPU 冷却システムの性能を示す.

2.1　プリント基板多層型ECFポンプとCPU冷却システム[2]

プリント基板多層型ECFポンプの構造を図2に，そのポンプに使用した基板を図 3 に示す．このECFポンプの大きさはデスクトップ型パソコンの5インチベイスロットに実装可能な幅 140mm，奥行き 60mm，厚さ 35mm とした．ポンプ入口および出口における損失を防ぐため，それらの流路形状をテーパ状にした．この中に 4 枚の線状電極を配した基板を 1mm 間隔で取り付けた．この線状電極の電極間隔は基板を作成する際のエッチングを行うことができる限界値に近い 0.3mm とした．また, 電極どうしの干渉による ECF の逆流を防止し流れを一方向にするために，一対の電極間どうしの間隔は 0.7mm とした．その結果，基板上には 52 対の電極を配置することとなった.

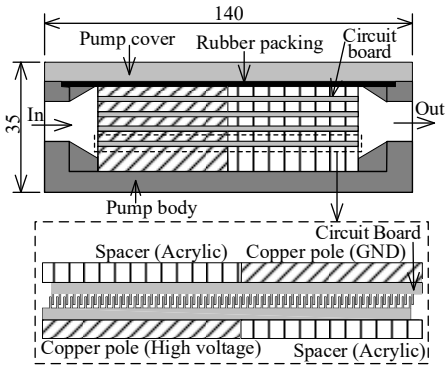


図 2　プリント基板多層型 ECF ポンプの構造

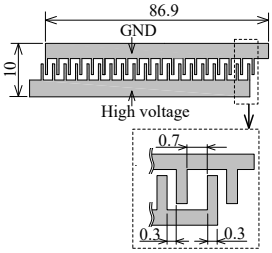


図 3　プリント基板多層型 ECF ポンプ用電極

プリント基板多層型 ECF ポンプの性能試験用実験装置を図 4 に示す．液面降下によるヘッドタンク内の圧力変化が ECF ポンプの流量特性に対

して与える影響を極力小さくし，さらに，液面降下速度を遅くし十分な計測時間を確保するため，ヘッドタンクの断面積は 400cm^2 とし，ヘッドタンク出口における管路断面積 0.29cm^2 に比べ十分大きくした．

この実験装置において，ECF ポンプに電圧を印加した場合と印加しない場合で，ヘッドタンクの液面の変位の時間的変化を変位センサにより計測した．そして，それぞれの場合で平均流量を算出し，それらの値を差し引きすることにより ECF ポンプの吐出し量 Q_P を求めた．図 4 に示したタンク底面より 13mm の位置を 0 とし，液面がその位置になった時より計測を開始し，そこから 4mm 液面が降下するまで，液面の計測を行った．ECF ポンプとストップ弁の間に可変絞りおよび圧力センサを挿入し，弁開度を変化させポンプに負荷をかけ実験を行った．なお，ECF ポンプへの入力電圧 V_{in} は 3kV から 4kV まで 0.5kV 間隔で変化させ，ECF には，最も強いジェット流が発生することが確認されている FF-3EHA2 を使用した．その物性値を表 1 に示す．

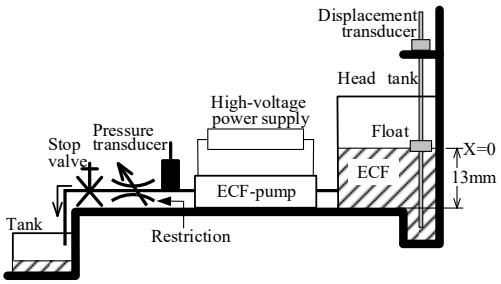


図 4　性能試験用実験装置

表 1　FF-3EHA2 物性値

Density（kg/m^3）	1430
Dynamic viscosity（m^2/s）	4.4×10^{-7}
Boiling point（℃）	76

図 5 に圧力－流量特性を示す．この図より，試作した ECF ポンプは入力電圧 V_{in} を一定とした場合，負荷圧力 P_L が大きくなると，ポンプ吐出し量 Q_P は減少するものの，V_{in}=3kV とした場合では P_L=1.84kPa で Q_P=5.92cm^3/s(355cc/min), P_L=2.45kPa で Q_P=2.71cm^3/s(162cc/min)となる．また，V_{in}=4kV とすると，P_L=3.24kPa で Q_P=8.53cm^3/s(512cc/min), P_L=3.76kPa で Q_P=4.64cm^3/s(278cc/min)の流量が供給可能であることがわかる．

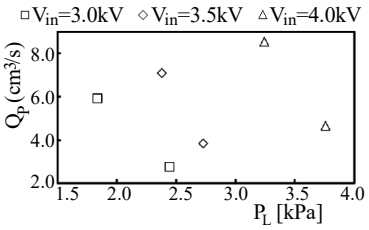


図 5　圧力－流用特性

ECF による液冷システムの実現の可能性について検討するため，プリント基板多層型 ECF ポンプを用い，図 6 に示す液冷システムを製作した．このシステムは，プリント基板多層型 ECF ポンプ，発熱源からの熱を ECF に伝えるための液冷ジャケット，リザーブタンクおよびファン一体型のラジエータにより構成されている．液冷ジャケットおよびファン一体型ラジエータには市販されている水冷キット用のものを用いた．発熱源は，アルミニウムのブロックに２本の抵抗を入れた最大で発熱量 50W のヒータ（縦 35mm，横 35mm，高さ 15mm）を用いた．ヒータから発生した熱を液冷ジャケットの周囲へ逃がさず液冷ジャケット内部を流動する ECF に全て伝えるため，液冷ジャケットの周囲を断熱材で覆った．ECF として使用した FF-3EHA2 は沸点が 76℃と低いため，液冷ジャケット内部における局所的な ECF の沸騰により，液冷ジャケットからラジエータに向けて気泡が発生した．この気泡が ECF ポンプ内に入ると，電極に高電圧を印加しているためショートが発生し，基板上の電極および ECF が劣化する原因となり，ポンプの性能が低下する．そこで，この気泡を取り除くため，液冷ジャケット出口とラジエータの間にリザーブタンクを設置し，ECF ポンプの取り付け位置はラジエータ出口と液冷ジャケット入口の間とした．管路には，内径 5mm の熱伝導率が小さいポリウレタンチューブを用いた．

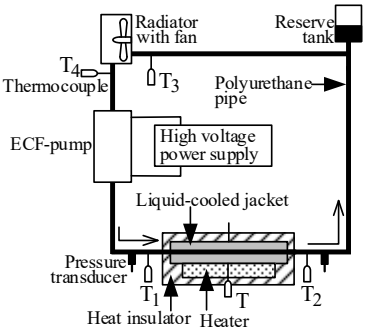


図 6　冷却性能試験用実験装置

この実験装置により，ECF を用いた液冷システムによる発熱源冷却試験を行なった．システム内を ECF で満たし，ECF に浸された ECF ポンプの電極に高電圧を印加し，システム内の ECF を循環させ，発熱源であるヒータを冷却した．このときのシステム各部の温度を熱電対で，ECF ポンプ入口および出口圧力を圧力センサで計測した．可変変圧器を用いてヒータ出力を 20W から 50W の間で変化させ，ECF ポンプへの入力電圧は 3kV，ラジエータファン回転数は 3000rpm，外部空気の温度は 23℃から 25℃の間とし，実験を行った．

ヒータ発熱量を 50W とした場合の実験結果を図 7 に示す．この図で T はヒータ温度，T_1～T_4 は図 6 に示した位置の ECF の温度である．図 7 より，ヒータ温度 T は約 15 分で約 50℃に収束し，その後，その値を保ち続けることがわかる．この実験当時，50W クラスの CPU の最高動作温度は約 70℃であり，本システムで十分冷却することが可能であることがわかる．T が一定のとき，T_1=約 31℃，T_2=約 45℃となり，液冷ジャケット内で ECF の温度は約 14℃上昇している．よって，液冷ジャケット内で ECF へ熱が伝わる状態は良く，ECF を液冷システム用の液体として用いることは妥当であると考えられる．また，圧力センサで計測した ECF ポンプにかかる負荷圧力は約 1.8kPa であり，実験時の ECF の流量は約 5.92cm^3/s(355cc/min)であったものと図 5 より推察できる．

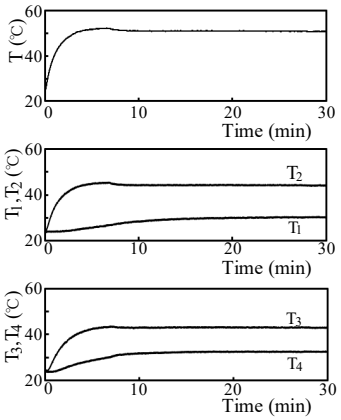


図 7　実験結果

2.2　管路形 ECF ポンプを用いた ECF ポンプと CPU 冷却システム[3]

プリント基板多層型 ECF ポンプの小型化を図りパソコンへの実装自由度を向上させるために，図 8 に示す管路形 ECF ポンプを開発した．そのポンプに用いた線状電極を配したプリント基板を図 9 に示す．このポンプはシリコンチューブ内にこのプリント基板が電極面を向かい合わせて入っている．これらの基板の間隔は 1mm とした．これは，それぞれの基板の電極による上下方向の ECF の流動を防ぐためである．ECF は電極の間隔が狭いほど強いジェット流が発生するという特長を持つため，電極間隔は基板を製作する際に行うエッチングの限界値 0.2mm とした．一対の電極どうしのジェット流の逆流を防止し流れを一方向にするため，一対の電極の間隔は 0.7mm とした．その結果，この基板には 69 対の電極を配置することとなった．また，ポンプの入口と出口における損失をできる限り防ぐため，ポンプ入口と出口流路をテーパ状にした．このポンプのサイズは，全長 185mm，横幅 9.4mm，高さ 5mm である．

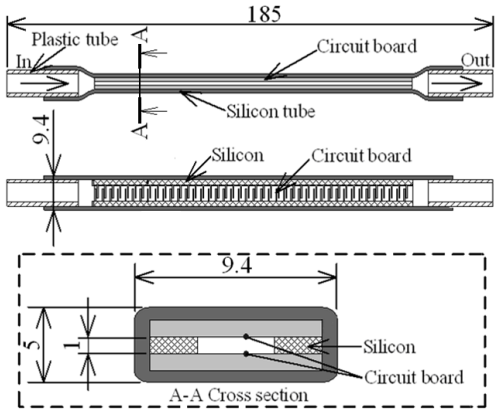


図 8　管路形 ECF ポンプの構造

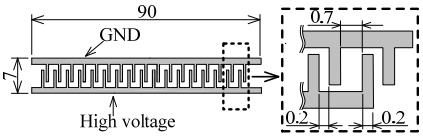


図 9　管路形 ECF ポンプ用電極

図 10 に示した実験装置を用い管路形 ECF ポンプの圧力－流量特性を調べた．可変絞りの弁開度

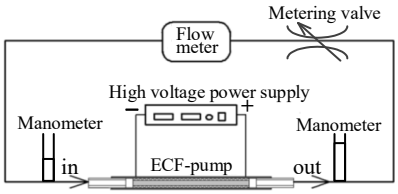


図 10　性能試験用実験装置

と ECF ポンプへの入力電圧 V_{in} を変化させて実験を行った．ポンプ吐出し量の計測にはギア式の微小流量センサ，ポンプ入口および出口の圧力の計測にはマノメータ, ECF には FF-3EHA2 を用いた．

図 11 に圧力ー流量特性の実験結果を示す. この図より，入力電圧を一定とすると，負荷圧力と吐出し量の関係はほぼ直線的で，最大吐出し圧力が約 6.0kPa，最大吐出し量が約 5.0cm^3/s(300cc/min)となっていることがわかる．また，入力電圧 V_{in} が 2.0kV のとき負荷圧力 P_L が 1.8kPa で吐出し量 Q_P は約 4.0cm^3/s(240cc/min)となっている．プリント基板多層型 ECF ポンプでは，V_{in}=3kV のとき P_L=1.84kPa で Q_P=5.92cm^3/s(355cc/min)であった．よって，電極間隔を狭くしたことにより，管路形 ECF ポンプはプリント基板の枚数が半分であっても低電圧でプリント基板多層型 ECF ポンプの流量の約 68%の流量が得られていることがわかる．

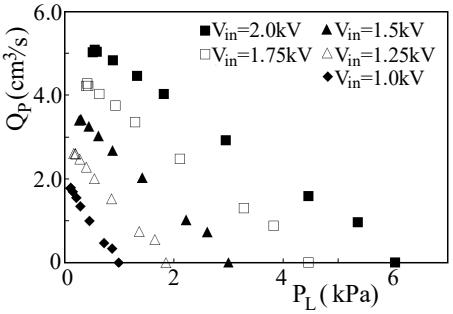


図 11　圧力ー流量特性

図 6 に示した実験装置の ECF ポンプの位置に管路形 ECF ポンプを取り付け, 発熱源冷却試験を行なった．この実験では，装置内を循環する ECF の流量を計測するため，ECF ポンプ出口に流量計を取り付けた．

ヒータ出力 50W で ECF ポンプへの入力電圧 V_{in} を 1.5kV から 2.0kV まで変化させ実験を行った．なお，他の条件は前述した実験と同じとした．

V_{in}=2.0kV とした場合の実験結果を図 12 に示す. また, 実験を開始してから 30 分後のヒータ温度 T と ECF ポンプの吐出し量 Q_P の関係を図 13 に示す. これらの図より，ヒータ温度 T は約 15 分程度で一定値に収束しその値を保ち続けること，その温度はポンプ吐出し量が大きくなるに従って低くなり，ECF ポンプへの入力電圧 V_{in} が 2.0kV のときに 55.0℃となっていることがわかる．よって，管路形 ECF ポンプを用いた ECF による液冷システムにおいても，その入力電圧を 1.5～2.0kV の間とすることにより 50Wクラスの CPU の冷却は十分可能であることが明らかとなった．

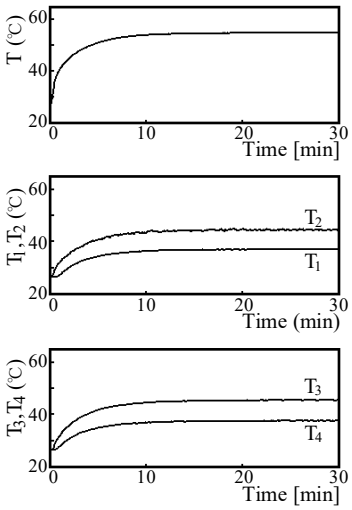


図 12　実験結果

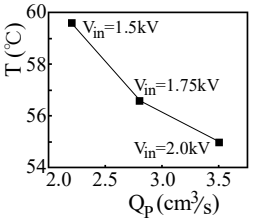
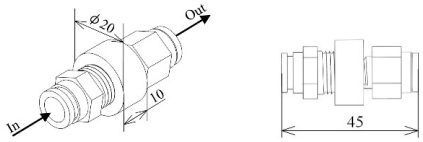


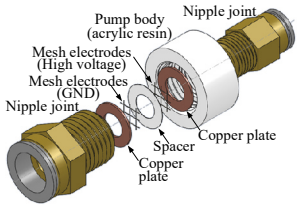
図 13　T と Q_P の関係

３．メッシュ電極を用いた ECF ポンプと CPU 液浸冷却システム

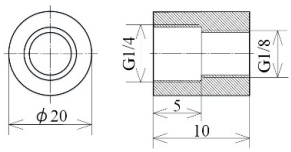
金属メッシュを電極として用いたメッシュ電極型 ECF ポンプ[4]は空間を有効に活用し ECF ポンプのさらなる小形化を図ったポンプである．そのポンプの電極部を異径管の中に組み込んだ ECF ポンプ（以後，異径管 ECF ポンプ）の構造を図 14 に示す[5]．図 14(c)に示した通り，ポンプ本体は 1/4 インチと 1/8 インチのねじにより構成されており, 3D プリンタでアクリル樹脂を用いて製作した．図 14(b)に示した通り，ポンプ本体に 2 枚の銅板，高電位電極側メッシュ，スペーサ，GND 電極側メッシュを挿入し，管継手を締め込み，管継手に通電用の端子を取り付けるだけで ECF ポンプが完成する．ポンプ本体の大きさはφ20mm×10mm, 全長は45mm, スペーサの外径はφ11.5mm, 内径はφ6mm，厚さは 0.1mm とした．金属メッシュはニッケルを，管継手は GND 電極側が G1/4, 高電位電極側は G1/8 を用いている．



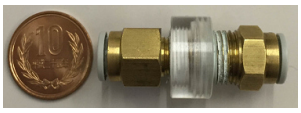
(a)組立図



(b)展開図



(c)ポンプ本体断面図



(d)写真

図 14　異径管 ECF ポンプの構造

図 15 に示した実験装置で異径管 ECF ポンプの圧力－流量特性を求めた．電極メッシュのサイズは先行研究[4]より高い性能が得られることが明らかとなっている高電位側#150（150 メッシュ／1 インチ），低電位側#120，スペーサの厚さは 0.1mm とした．ポンプへの入力電圧を一定にし，全閉弁を開けた状態で絞り弁の開度を徐々に変化させ，各開度における流量 Q および ECF ポンプ出入口の圧力差 ΔP を計測した．なお，絞り弁からの漏れを防止するため，この弁を全閉にするときのみ全閉弁を閉めた．ECF には FF-3EHA 2 を用い，ECF ポンプへの入力電圧は電極間のショートが発生しない 1.0kV までとした．

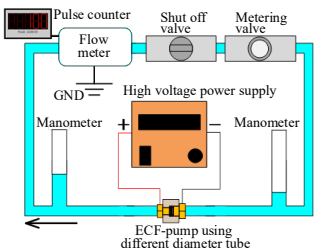


図 15　実験装置

実験結果を図 16 に示す．この図より，異径管 ECF ポンプの圧力－流量特性はほぼ直線的であること，本ポンプの最大ポンプ吐出し圧力は 0.834kPa であり図 6 に示した液冷システムの駆動源とすることは困難であることがわかる．そこで，ECF の絶縁性と沸点が低いという特長を利用し，大きなポンプ吐出し圧力を必要としない液浸冷却システムを試作した[6]．

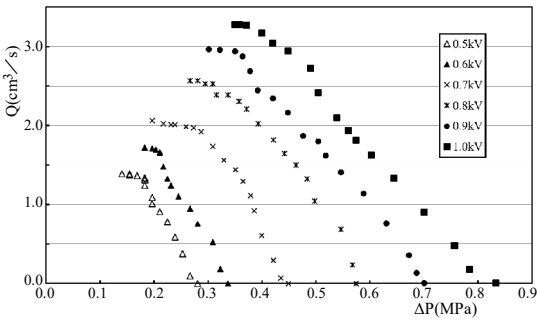


図 16　圧力－流量特性

図 17 に ECF と相変化を利用した CPU 液浸冷却システムの基本構造と CPU を冷却する原理を示す．CPU からの熱を吸熱し沸点を超えると ECF は沸騰，気化し，液相から気相に遷移する．気化した ECF はヒートシンクに熱を伝え，熱を奪ったヒートシンクは高温になり大気中に放熱する．放熱して温度が低下した ECF は液化し，気相から液相に遷移するというサイクルで冷却を行う．このシステムの利点は，液体の沸騰による気化熱を利用できることで熱伝達率が 10 倍以上になる[7]ことである．さらに，ECF ポンプを使用することにより図 17 に示すように CPU に直接噴流を当てることができ，そのときのよどみ点による熱伝達率の上昇効果[8]も期待できる．なお，このシステムはファンを用いていないため無音である．

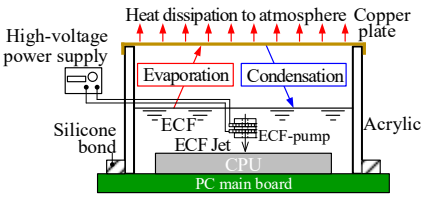


図 17　ECF を用いた液浸冷却システム

試作した液浸冷却システムの写真を図 18 に示す．CPU を覆うようにアクリルケースをマザーボードに防水性に優れたシリコンボンドで接着し，こ

のケースに ECF を入れた．その内部には ECF のジェット流を CPU に直接あて冷却効率を上げるため ECF ポンプを CPU 上部に垂直に設置した．ECF には沸点 76℃の FF-3EHA2 および沸点 61℃の FF-8EHA2 を使用し実験を行った．CPU には最大使用温度 105℃の Core i3-540 を用いた．

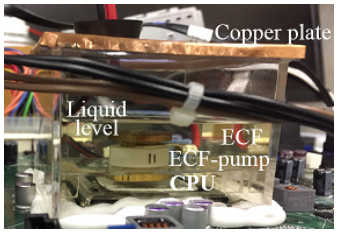


図 18　ECF を用いた液浸冷却システム

電極間隔 0.1mm とした ECF ポンプへの入力電圧を 1.0kV とし CPU の負荷率を 50%として実験を行った．その結果を図 19 に示す．この図で T はマザーボードの温度センサで計測された CPU の温度である．この図より T は時刻 30 秒までは急激に上昇すること，ECF を FF-8EHA2 とした場合はその後の CPU 温度の上昇は緩やかとなり，時刻 180 秒では CPU 温度の差は約 20℃となることがわかる．これは ECF の沸点の差により FF-3EHA2 を用いた実験では沸騰が確認できなかったものの，FF-8EHA2 を用いた実験では沸騰が確認でき相変換サイクルが機能したためである．しかしながら，FF-8EHA2 を用いた場合でも，時刻 180 秒後も CPU 温度は上昇し続けていた．よって，本研究で試作した ECF による液浸冷却システムは機能するものの，CPU から ECF への吸熱量および上部銅板から大気への放熱量が不十分でありことがわかる．これらの改善が今後の課題である．

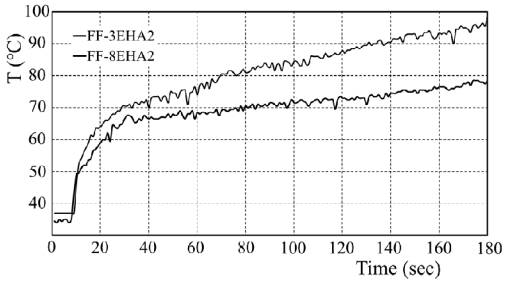


図 19　実験結果

4．おわりに

本稿では筆者らが開発した電界共役流体 ECF 用のポンプと ECF を利用した CPU 冷却システムについて概説した．本稿が ECF への関心を高める一助となれば幸いである．

参考文献

[1] 横田眞一，貞本敦史，近藤豊，大坪泰文，枝村一弥，電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ（ステータ電極（SE）形マイクロモータの提案），日本機械学会論文集 C 編，**66-642** (2000) 627.

[2] 桜井康雄，門井寛人，中田毅，枝村一弥，プリント基板多層形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用，日本機械学会論文集 C 編，**72-715** (2006) 991.

[3] 桜井康雄，中田毅，枝村一弥，管路形 ECF ポンプの開発と CPU 液冷システムへの応用，日本機械学会論文集 B 編，**75-753** (2009), 966.

[4] 桜井康雄，五十嵐友彰，中田毅，枝村一弥，メッシュ電極を用いた ECF ポンプの提案，日本機械学会論文集 B 編，**78-786** (2012) 291.

[5] 岡本拓也，桜井康雄，中田毅，枝村一弥，異なった内径を有する管を組み合わせたメッシュ電極型 ECF ポンプ，平成 27 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集，(2015) 5.

[6] 桜井康雄，石井翔太，斎藤拓也，中田毅，枝村一弥，電界共役流体と相変化を用いたパソコン CPU 用液浸冷却システムの開発，平成 30 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集，(2018) 38.

[7] 橘藤雄，沸騰の際の熱伝達，生産研究，**18-8** (1966) 201.

[8] 平田賢，森岡茂，衝突噴流の熱伝達に関する研究，日本機械学會論文集，**42-353** (1976) 236.

イオン風の対流冷却性能解明に向けた研究の進展

Progress in Research Toward Understanding Convective Cooling Performance of Ionic Wind

畑本　明彩未（青山学院大学），金子　泰（東北大学 流体科学研究所）
Asami HATAMOTO (Aoyama Gakuin University), Yutaka KANEKO (Institute of Fluid Science, Tohoku University)
e-mail: hatamoto@me.aoyama.ac.jp, y-kaneko@tohoku.ac.jp

１．はじめに

電子機器の集積化および小型化が進むにつれ，サーマルマネジメント技術の開発はますます重要な課題となっており，より効果的な冷却技術が強く求められている[1]．高熱流束条件や大幅な小型化が求められる用途では，ヒートシンクと高速ファンによる強制対流といった冷却手法が開発されてきた[2, 3]．これらはバッテリーの熱マネジメントや電子機器の冷却に広く利用されている[4, 5]．しかしながら，ヒートシンクの面積が増加すると，壁面摩擦による圧力損失が増大し，ファン駆動冷却の有効性は低下する[6]．さらに，機械式ファンの物理的サイズや騒音も問題となる．したがって，ヒートシンクのサイズを増大させることなく，また機械式ファンに依存しない，小型で非機械式の能動デバイスの開発が求められている．

電気流体力学（EHD）効果を利用した気流制御デバイスであるプラズマアクチュエータは，能動的な対流熱伝達促進手法として注目を集めている[7–10]．図 1 に大気圧バリア放電を利用したプラズマアクチュエータ（Plasma Actuator: PA）の概略図を示す．PA は 2 つの電極と誘電体で構成される単純構造で，電極間に交流高電圧を印加することでプラズマが生成され，電場で加速されたイオンと空気中の中性粒子との運動量交換衝突によって壁面に沿った気流（イオン風）が生成される．ヒートシンクを被覆電極として発熱面に PA を設置することで，誘起されるイオン風を用いた能動的な壁面冷却が期待できる．

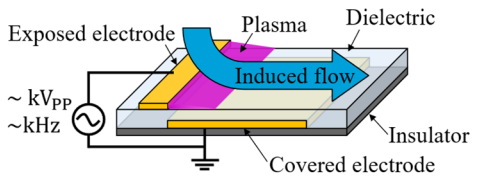


図 1　PA の概略図

PA は薄く軽量で機械的な可動部が無く，壁面に埋め込んで設置できるため，設置による圧力損失が無いといった利点を持つ．さらに，印加電圧の ON と OFF を繰り返すバースト駆動や，イオン風を対向させることで垂直方向ジェットを生成するシンセティックジェットタイプを使用することで，境界層内に渦を生成でき，効率的な冷却効果が見込まれることが数値解析によって示されている[12–14]．一方で，PA によるイオン風生成のエネルギー効率は 0.2%程度と低く[15]，プラズマに供給されたエネルギーの大部分は最終的に気体加熱として放出されることが報告されている[16]．したがって，気体加熱による冷却流の温度上昇は，PA の冷却性能に大きな影響を与える．しかし，これまでの PA による壁面冷却に関する研究では，気体加熱の影響はほとんど考慮されてこなかった．

近年では，PA の発熱が航空機翼の除氷および防氷に効果を示すことが報告されている[17–19]．これらの知見は，印加電圧，表面温度，外部流れ流速の条件によっては，PA の気体加熱効果を無視できないことを示している．強制対流冷却に PA を適用した場合，気体加熱は冷却空気の温度を上昇させ，冷却効果を低下させる，あるいは場合によってはヒートシンクを加熱する可能性もある．したがって，PA の伝熱性能を評価するためには，電気流体力学効果および気体加熱の両方の影響を考慮する必要がある．

PA の伝熱促進応用を目指すうえでは，PA の駆動において生じる電気流体力学効果と気体加熱効果について統一的な理解を得ることが重要と言える．本稿では，このような観点のもと PA の基礎的な伝熱促進性能の解明に向けて，著者らがこれまでに取り組んできた研究について紹介する．2 章では，流れ場の可視化計測に基づいた，電気流体力学効果と気体加熱効果に関する先行研究を紹介し，速度場と

密度場の計測事例をもとにその影響について述べる．3 章では，熱伝達促進効果と気流の温度上昇を切り分けて評価するためのモデルを構築し，伝熱性能に影響するパラメータを調査した結果を示す．

２．PA が誘起する流れ場の計測

PA の電気流体力学効果および気体加熱効果の基礎的な特性を評価するためには，静止気体中で駆動した際に形成される流れ場の計測が重要となる．熱線流速計やピトー管，熱電対を用いた計測例も報告されているが[19–21]，金属製のプローブを用いる計測方法では，意図しない放電が生じる危険性や，電磁干渉の影響を受ける可能性がある．そのため，プラズマ近傍の流れ場に関する情報を取得することは困難である．また，プローブ掃引による 2 次元場の取得には多くの時間を要する．このような背景から，非接触可視化計測手法が広く用いられている．

次節以降で示す様々な可視化計測から，PA における電気流体力学効果と気体加熱効果は，駆動方法によりいずれかが卓越して生成され，これにより流体制御メカニズムも異なることが明らかとなってきた．数 kHz 程度の周波数の交流電圧を印加する AC-PA においては，電気流体力学効果による流れの加速が卓越する．一方，ns オーダの時間で電圧を数 kV にまで立ち上げるパルス電圧により駆動する ns-PA は，急速な気体加熱効果が卓越し，気体の密度擾乱が形成される．

本章では，PA 駆動により形成される流れ場の非接触計測例を紹介し，当該分野における電気流体力学効果や気体加熱効果の研究動向を概説する．さらに，速度場と密度場の計測例を示し，PA が生成する電気流体力学および気体加熱効果が流れ場に与える影響について述べる．

2.1　電気流体力学効果に関する研究

静止気体中で PA を駆動すると，イオン風と呼ばれる，表面に沿ったジェットが形成される．この電気流体力学効果を利用した空力制御に関する研究が報告されたことから[19], PA は注目を集めるようになった．そのため，電気流体力学効果の解明およびその応用に関する研究は，2.2 節で述べる気体加熱効果に関する研究に比べてはるかに多い．

Particle-image-velocimetry（PIV）法により，PA が誘起する多様な流れ場に関する解析が行われてきた．一般的には，図 2 に示すように，露出電極の長手方向と直交するようにシート状レーザを照射し，トレーサ粒子の散乱光を撮影することで，2 次元断面における速度場を計測することができる．時間定常場としての壁面ジェット（図 3 (a)）[23]の計測例は多くの先行研究で見られ，印加電圧条件や PA を構成する材料がジェットの最大流速に与える影響などが明らかにされており，PA の推力特性の調査が行われている[22]．また，交流電圧の 1 周期内で 10～20 点の時間分解能で取得した速度場から，交流電圧の周期で速度が変動することが示されている[24, 25]．特に，印加電圧の負勾配期間において水平方向速度の顕著な加速が観察されている．近年では，バースト駆動により形成される流れ場に関する研究も増えている[26]．電圧条件やバースト周期，バースト比といった駆動条件に応じて，形成される流れ場の様相が変化することが分かっており，渦列が PA 表面を這うように移流する条件や，表面から離れるように移流する渦列などが観察されている（図 3 (b), (c)）[27–29]．特に，管内流れのような限られた空間における伝熱制御においては，形成される渦の移流の様相について理解することは非常に有用であると考えられる．

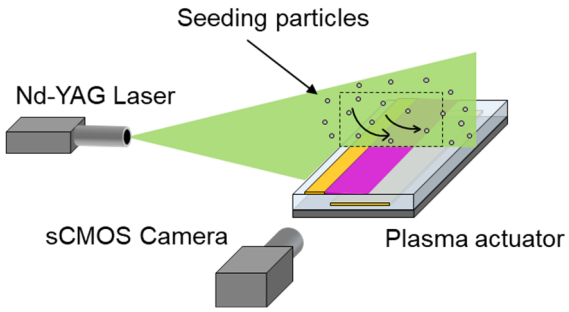


図 2　PIV の計測セッティング例

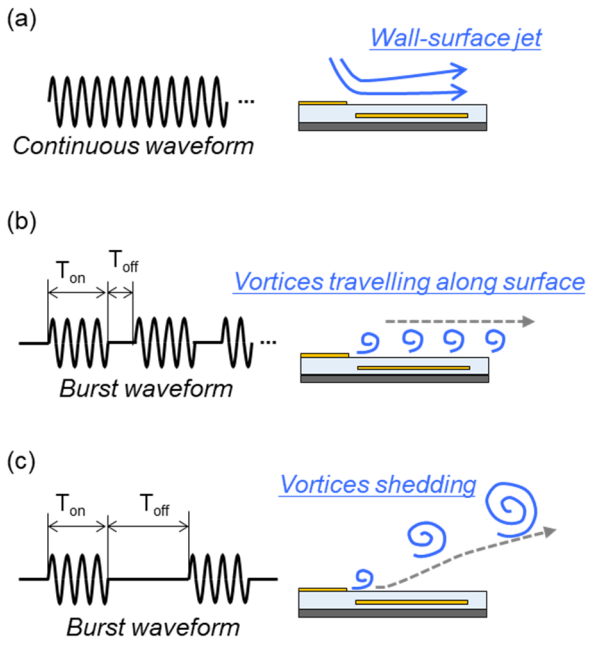


図 3　PA の電気流体力学効果により形成される流れ場．(a)交流電圧の連続印加による壁面ジェット，バースト駆動時の(b)表面を這う渦列，(c)表面から離れるように移流する渦列

速度場計測の結果を用いることで，体積力としての電気流体力の推定も行われている．非圧縮 Navier-Stokes（NS）方程式(1)に対して，2 次元速度場計測結果 $\boldsymbol{v}=(u,v)^{\mathrm{T}}$ を代入し，体積力項 $\boldsymbol{F}=(f_x,f_y)^{\mathrm{T}}$ を推定するものである[27].

$$\boldsymbol{F}=\nabla p+\rho\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t}+\rho(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}-\mu\nabla^2\boldsymbol{v} \qquad (1)$$

p は圧力，ρ は密度，μ は粘性係数である．直接計測が不可能な体積力場（電気流体力場）に関する知見を得られるため，PA の力学的な性能評価手法として多くの論文で用いられてきた．ただし，未知数（体積力 2 成分，圧力勾配 2 成分）の数に対して NS 方程式は 2 本であるため，仮定が必要となる．Benard ら[27]は，圧力勾配項が体積力に対して小さいことを仮定し，非定常計測結果から，各時刻の体積力場を算出した．図 4 は Benard ら[30]と同様の手法による体積力場の推定例を示しており，(a)時間平均的には，x 正方向（露出電極から被覆電極に向かう方向）の加速が生じている．また，(b)交流電圧 1 周期内の各時刻における検査体積（Control volume）内の体積力の空間積分値は，周期的に変動していることが分かる．これは，正勾配期間ではストリーマ放電，負勾配期間ではグロー放電といった，異なる放電形態が発生することに起因する[31]．特に，負勾配期間においてより強い加速効果が生じている．一方，正勾配期間では負の体積力を示しており，減速効果が示唆されている．しかし，負勾配期間と同様に正の体積力が生成されるとする報告もあり，正勾配期間における体積力の方向や大きさについては議論が分かれている．これには用いられる仮定（圧力勾配の影響を無視する，など）が影響していると考えられる[32]．それでもなお，印加電圧の負勾配期間における体積力生成が，PA の電気流体力学効果における支配的な役割を果たすことは，概ね共通の理解が得られている．

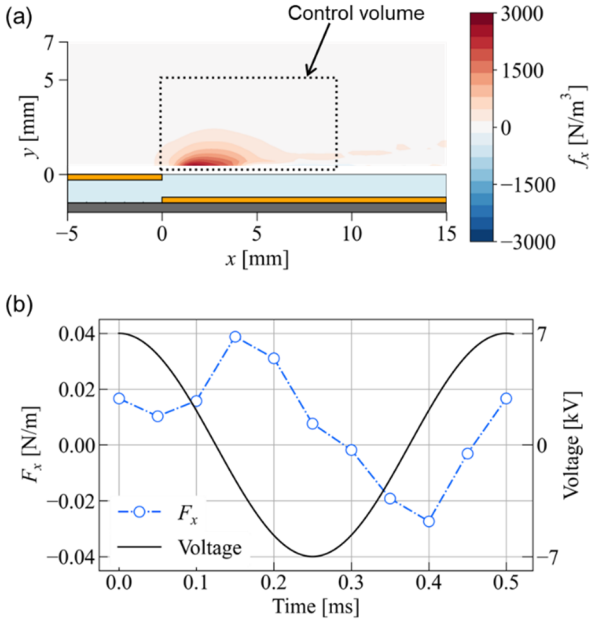


図 4　NS 方程式および速度場計測結果に基づく体積力場算出例．(a)時間平均 x 方向体積力場 f_x，(b)面積分体積力 F_x の準定常変動

2. 2　気体加熱効果に関する研究

先述のとおり，気体加熱効果は ns-PA においてより顕著に現れ，圧力波や hot plume といった密度擾乱を形成することで流体制御を実現する．そのため，気体加熱効果に関する研究は，主として ns-PA に着目したものが多い．

流体の密度 ρ と屈折率 n は，Gladstone-Dale 式（$n=1+K\rho$, K は Gladstone-Dale 定数）によって関係づけられる[33–35]．すなわち，流体中に密度擾乱が存

在すると，屈折率の空間勾配が生じ，その中を通過する光は屈折する．このような媒質の密度擾乱に伴う光の屈折現象を利用した Schlieren 法により，可視化計測が広く行われている．図 5 に示すような，放電部から発生する圧力波および hot plume の挙動について，Schlieren 法により可視化・解析されてきた[36].

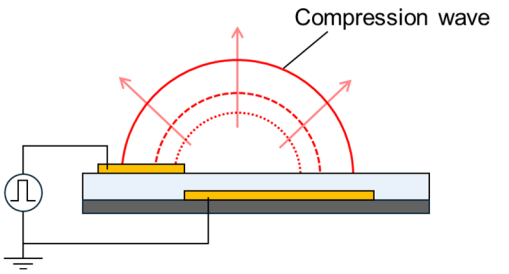


図 5　ns-PA 駆動時の気体加熱に起因する圧力波形成

Schlieren 法は，非接触計測手法であるとともに，（実験装置が整備されていれば）上述の PIV などに対して比較的容易に実施できる．そのため，AC-PA が誘起する壁面ジェットの可視化にも用いられている[26, 37, 38]．さらに近年では，伝熱制御応用への期待が高まっていることから，AC-PA における気体加熱効果に関する研究も増加している．特に，Schlieren 法を拡張した Background-oriented Schlieren（BOS）法を用いた密度場の定量計測が，2019 年頃より報告され始めている[39, 40]. 著者らは，BOS 法を PA の密度場計測へと適用し，PIV により得られた速度場と併せ，電気流体力学効果および気体加熱効果により形成される流れ場について考察してきた．次節では，BOS 法の原理および PA の流れ場計測への適用方法を概説し，最後にその結果を紹介する．

2.3　Background-oriented Schlieren 法

BOS 法では，図 6 に示すように，光源，背景画像，およびカメラのみの簡便な光学系により計測する[41, 42]. まず，密度勾配が存在しない状態で背景画像を撮影し，これを参照画像とする．次に，密度勾配が存在する状態で同様に撮影を行い，計測画像を取得する．このとき，密度（屈折率）の空間勾配に伴い光線が屈折し，カメラへと入射する．これにより，計測画像では背景パターンに見かけ上の変位が生じる．参照画像と計測画像の比較により，背景パターンの変位場 $\boldsymbol{U}'$を算出する．背景画像にランダムドットパターンを用いる場合には，PIV で用いられる画像相関法を利用することができる．光学系に基づき導出される，密度に関する Poisson 方程式（式(2)）に対して，変位場と境界条件を与えて数値的に解くことで，密度場を再構成する．C は補正係数，W は計測対象の視線方向長さ，l_0 は背景画像から計測対象までの距離である．BOS 法の原理に基づけば，式(2)により得られる密度場は視線方向に積分された情報に基づく再構成場となる．

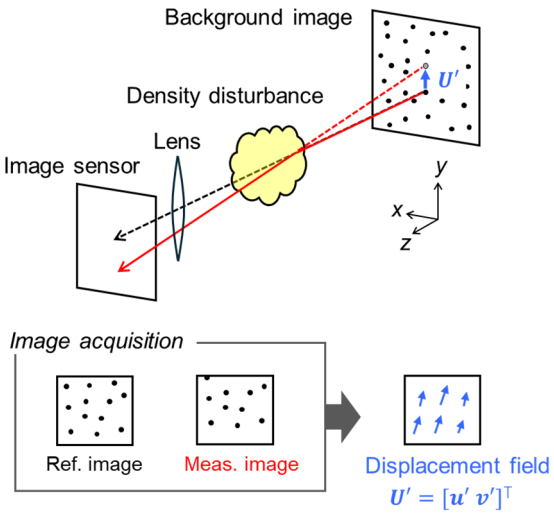


図 6　BOS 計測の概念図

$$\nabla^2\rho = \frac{C(K\rho_0 + 1)}{W(W + 2l_0)}\nabla \cdot \boldsymbol{U}' \tag{2}$$

2.4　PA の BOS 計測

PA に BOS 法を適用する際の典型的な実験計測装置は図 7 に示す通りである．プラズマが生じる露出電極の長手方向を，視線方向（z 軸方向）に一致するように配置する．PA 駆動時には，数 μm 程度の微小放電が電極に沿って生じており，すなわち生成される気体加熱場も視線方向に沿って非一様であると考えられる．実際に，IR カメラにより計測した誘電体表面の温度分布には数 mm 程度の空間変動が見られる[43]．ただし，電極の視線方向長さを十分に長くすることで，視線方向に積算（平均）した結果が得られる．高精度計測を実現するための光学系の設計および計測条件等の詳細については，文献[37]を参照されたい．また式(2)の Poisson 方程式を解く際に必要となる境界条件の設定方法につ

いては，文献[38]が参考になる．

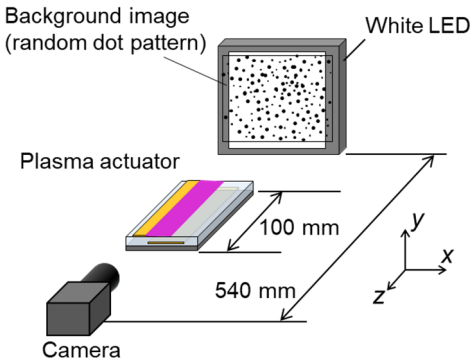


図 7　PA の BOS 計測における装置配置図

図 8 に，PA 駆動開始から 5 分後に計測を行って得られた(a)速度場および(b)密度場を示す．速度場は，線香の煙をトレーサ粒子として用いた PIV により計測した．$x=0$ mm を電極端位置，$y=0$ mm を PA 表面とする．プラズマは電極端（$x=0$ mm）から x 正方向へ進展し，この領域において電気流体力場および気体加熱場が生成されている．速度場からは，電気流体力による加速に起因する壁面ジェットが，$x>0$ mm において確認できる．また，電極端近傍には吸い込み流れが生じており，気体は電極端へ流れ込み，その後，壁面に沿って流れている．密度場を見ると，$x>0$ mm にて薄く広がる低密度領域がある．プラズマ領域へと流れ込んだ気体が，下流へ移流する過程で，加熱を受けるためである．また，(c) PA 表面近傍のプロファイルから，速度と密度ではピーク位置が異なることが分かり，電気流体力場と気体加熱場の生成分布がお互いに異なることが示唆される．また，$x<0$ mm にも見られる低密度領域は，Joule 加熱された露出電極からの熱伝導に起因する．

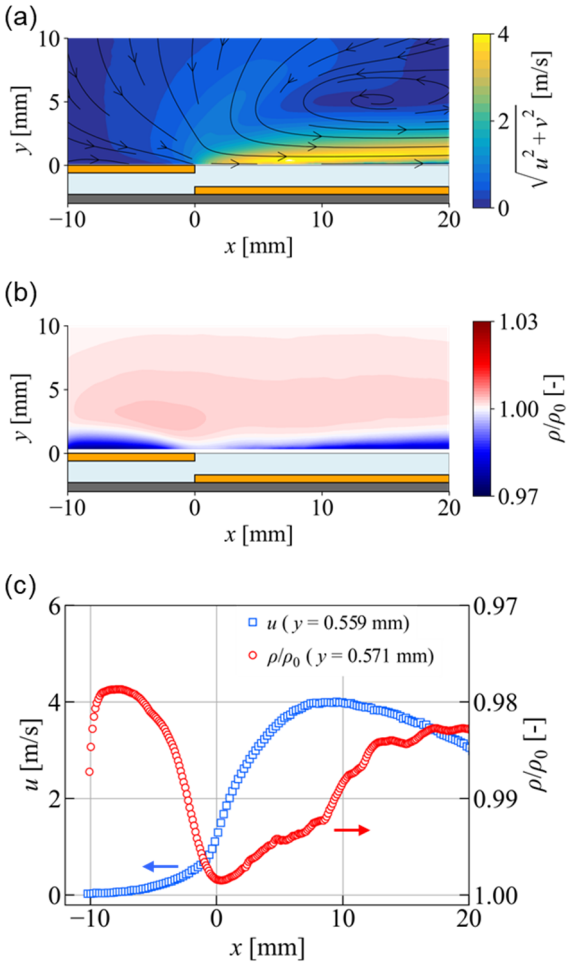


図 8　(a) PIV による速度場，(b) BOS 法による密度場の計測結果．(c) x 方向速度 u と密度のプロファイル

Kaneko ら[44]は，20 μm のワイヤ状電極を露出電極として用いた PA の速度場と密度場を同様に計測しており，上記とは異なる空間分布の速度場や密度場が形成されることを示している．露出電極形状に応じて電場分布が放射状となり，生成される電気流体力場および気体加熱場の空間分布が変化することに起因している．以上のように，速度場や密度場の空間分布計測から，PA が生成する電気流体力学効果や気体加熱効果が，流れ場に与える影響について明らかとなっている．速度場は電気流体力場の効果のみで空間分布が決定づけられる一方で，密度場は気体加熱と電気流体力場の双方の影響を受けた空間分布を形成することが明らかにされた．

2.5　課題

本章では，PA が誘起する流れ場の可視化計測について概観したうえで，電気流体力場や気体加熱場

に関連する研究動向について述べた．これらの研究に関する課題と展望について述べる．

熱流体分野における応用促進には，PA 駆動が気体の温度場に与える影響を明らかにすることが重要である．密度場の定量計測結果から，状態方程式により温度場を算出する試みも報告されている[44, 45]．しかしながら，2.1 節で述べた課題と同様に，電気流体力による加速が生じるプラズマ領域近傍において，圧力勾配の影響を無視できるか否かは明らかではない．

2.1 節にて述べたように，課題は残されているものの，電気流体力場については一定の知見が蓄積されている．そのため，PA 駆動時に形成される流れ場を再現可能な工学モデルの開発も進められており[46, 47]，Computational Fluid Dynamics (CFD)の入力としても広く用いられている．これに対し，気体加熱場の空間分布や生成強度については，いまだ十分な理解が得られているとは言い難い．そのため，熱伝達促進を目的とした CFD 研究には，PA の気体加熱効果が考慮されていないものもある．本稿で示した密度場計測に代表されるように，流体可視化計測技術の発展により，PA が生成する気体加熱効果の解明が今後さらに進展することが期待される．

3．熱伝達率と気流温度上昇の推定

PA が冷却効果をもたらすのか，あるいは加熱効果をもたらすのかを判断するためには，熱伝達促進と気体加熱の影響を切り分けて評価する必要がある．本章では，PA による熱伝達率向上および気流温度上昇を考慮したニュートンの冷却則を構築し，これら 2 つの効果を実験的に評価する．また，伝熱促進効果と気体加熱効果は，それぞれ PA による流れへの運動量入力および熱エネルギーに関連する 2 つの無次元パラメータによって特徴付けられることを示す．

3.1　モデル式の導出と実験装置

一般に，図 9 に示すような加熱平板に沿う流れに対して，主流による冷却効果は，熱伝達率hを用いたニュートンの冷却則により次式のように評価される．

$$h_{main} = \frac{\dot{q}_w}{T_{w,\mathrm{off}} - T_\infty} \tag{3}$$

ここで，$\dot{q}_w$は加熱平板から流体へ供給される熱流束であり，h_{main}は主流における局所熱伝達率，T_wは加熱平板の表面温度，T_∞は主流温度である．添字 on および off は，それぞれ PA の作動前および作動後を示す．図 9 に示すように，PA は EHD 力による加速と放電に起因する加熱の 2 つの効果を与える．これら 2 つの効果を含む定常非圧縮 NS 方程式およびエネルギー方程式は，次式のように表される．

$$(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2\boldsymbol{v} + \frac{\boldsymbol{g}}{\rho v_c^2/L_c} + \boldsymbol{J}_{PA}^* \tag{4}$$

$$\boldsymbol{v}\cdot\nabla\Theta = \frac{1}{PrRe}\nabla^2\Theta + Q_{PA}^* \tag{5}$$

式(4)は代表流速v_cおよび代表長さL_cを用いて無次元化した NS 方程式であり，$\boldsymbol{v}$は流速ベクトル，pは圧力，$\boldsymbol{g}$は重力加速度ベクトル，ρは流体の密度，$\boldsymbol{J}_{PA}^*$は流れ場に対する EHD 力ベクトル$\boldsymbol{f}_{EHD}$の影響を表す無次元パラメータである．式(5)は無次元エネルギー方程式であり，Θは$\delta T = T_{w,\mathrm{off}} - T_\infty$により定義される無次元温度，$Q_{PA}^*$は温度場に対する気体加熱$\dot{q}_{PA}$の影響を表す無次元パラメータである．レイノルズ数$Re$，$J_{PA}^*$，および$Q_{PA}^*$は次式のように定義される．

$$Re = \frac{\rho v_c L_c}{\mu} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{J}_{PA}^* = \frac{\boldsymbol{f}_{EHD}}{\rho v_c^2/L_c} \tag{7}$$

$$Q_{PA}^* = \frac{\dot{q}_{PA}}{\rho c_p v_c \delta T/L_c} \tag{8}$$

同一のレイノルズ数において，対流熱伝達に対する PA の影響は，これら 2 つのパラメータ$\boldsymbol{J}_{PA}^*$およびQ_{PA}^*によって決定される．

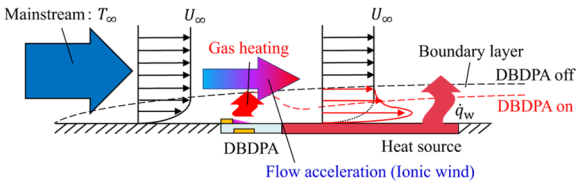


図 9　PA による熱伝達促進効果の概念図．文献[48]より CC BY 4.0 ライセンスに基づき転載．

次に，PA を駆動したときの熱伝達率および気流温度はそれぞれΔh_{PA}およびΔT_{PA}だけ変化すると仮定すると，PA 作動後のニュートンの冷却則は式(9)のように表され，式(10)のように無次元化される．

$$h_{main} + \Delta h_{PA} = \frac{\dot{q}_w}{T_{w,\mathrm{on}} - (T_\infty + \Delta T_{PA})} \tag{9}$$

$$Nu_{main} + \Delta Nu_{PA} = \frac{\dot{q}_\mathrm{w}}{\left[\Theta_{w,on} - (\Theta_\infty + \Delta\Theta_{PA})\right] \cdot \kappa_{air}\delta T/L_c} \tag{10}$$

ここで，κ_{air}は空気の熱伝導率，Nuはヌセルト数である．EHD 力の効果および気体加熱の効果をそれぞれΔNu_{PA}および$\Delta\Theta_{PA}$として評価する．加熱平板からの熱流束が一定のとき，PA 作動による表面温度変化は次式のように表される．

$$\Theta_{w,\mathrm{on}} - \Theta_{w,\mathrm{off}} = \Delta\Theta_{PA} - \left(1 - \frac{1}{1 + \Delta Nu_{PA}/Nu_{main}}\right) \tag{11}$$

式(11)より，PA による表面温度変化は，項$\Delta\Theta_{PA}$と項$\Delta Nu_{PA}/Nu_{main}$の関係によって決定される．したがって，$\Delta\Theta_{PA}$およびΔNu_{PA}を，EHD 力の効果$\boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}}$および気体加熱の効果$Q^*_{PA}$によって特徴付けることができれば，PA による表面温度変化を把握でき，PA が冷却性能を向上させる条件を明らかにすることが可能となる．強制対流において，自然対流の影響が十分に小さい場合，流れ場は一般に温度場とは独立に決定される．したがって，ヌセルト数変化ΔNu_{PA}は$\boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}}$のみに依存すると考えられる．一方で，無次元温度変化$\Delta\Theta_{PA}$は，$\boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}}$と$Q^*_{PA}$の両方に依存すると予想される．

未知数であるh_{main}，Δh_{PA}，およびΔT_{PA}は，図 10 に示す実験装置を用い，2 つの異なるヒーター加熱条件における伝熱面温度の測定結果に基づいて算出される．これらの未知数はヒーター加熱条件によらず一定であると仮定する．$\dot{q}_w$はヒーターへの印加電流を変化させることで制御する．その後，2 つの$\dot{q}_w$条件それぞれについて式(3)および式(9)を適用し，合計 4 つの方程式を得る．これら連立して解くことで未知数を求めることができる．実験は誘電体材料，厚さ，印加電圧，周波数，外部流れ流速を変化させて行った．詳細な実験条件は文献[48]を参照されたい．

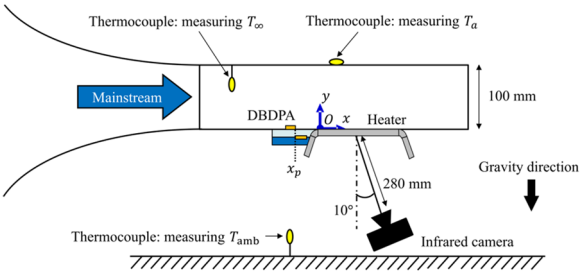


図 10　伝熱実験装置の概略図 [48]

3.2　検証のための近似

本節では，$\boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}}$とおよび$Q^*_{PA}$を実験的に推定する方法について述べる．ここで，$\boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}}$および$Q^*_{PA}$は流体中の局所値であるが，実験において局所値を評価することは困難である．したがって，代表値として空間平均された$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{PA}}$および$Q_{PA}$を推定する．

PA によって誘起される流れの運動量流量として測定される推力$\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{PA}}$[N/m]が，EHD 力の空間積分値を表すと仮定すると，$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{PA}}$は式(12)のように評価できる．

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{PA}} = \frac{1}{S}\int \boldsymbol{J}^*_{\boldsymbol{PA}} dS = \frac{1}{S}\int \frac{\boldsymbol{f}_{\boldsymbol{EHD}}}{\rho v_c^2/L_c} dS \approx \frac{\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{PA}}}{\rho v_c^2 \delta}. \tag{12}$$

ここで，積分領域Sは PA によって生成される EHD 力分布を含む領域であり，高さδ，幅L_cとする．δは電極位置における速度境界層厚さである．代表長さL_cは被覆電極の幅である 20 mm とし，代表流速v_cは主流速度U_∞とする．推力$\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{PA}}$は主流の流れ方向成分が主であることから，本研究では主流方向の推力を測定してF_{PA}とした．

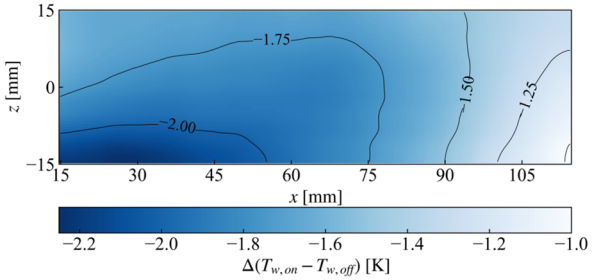
次に，Q^*_{PA}の平均値であるQ_{PA}の推定方法について述べる．Rodrigues らは，特に PA の誘電体が厚い場合，消費電力の 75–95%が直接的な気体加熱に費やされると報告している[46]．したがって，本研究では実験で測定された PA の消費電力P_{PA}を用いて，次式によりQ_{PA}を推定する．

$$Q_{PA} = \frac{1}{S}\int Q^*_{PA} dS = \frac{1}{S}\int \frac{\dot{q}_{PA}}{\rho c_p v_c \delta T/L_c} dS \approx \frac{P_{PA}}{\rho c_p v_c \delta T \delta} \tag{13}$$

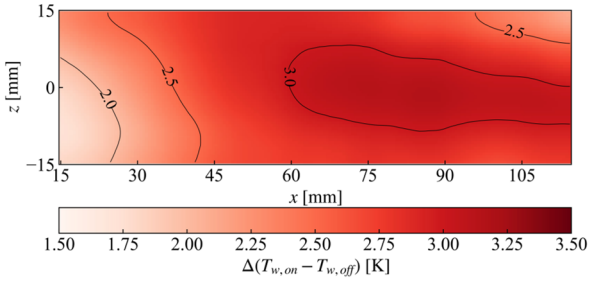
3.3　結果と考察

まず，図 11 に PA 作動による表面温度変化の代表的な$x-z$分布を 2 例示す．(a)および(b)はいずれも厚さ 3 mm の PMMA 誘電体を用いた場合である

が，主流速度およびヒーター条件が異なり，(a)はU_∞ =3 m/s，I_h =12.0 A，(b)はU_∞ =7 m/s，I_h = 16.0 A の条件である．図 11 より，主流速度が低く，ヒーターへの印加電流が大きい条件では，PA の駆動により表面温度が低下する．すなわち，PA は表面を冷却することができる．一方，主流速度が高く，ヒーターへの印加電流が小さい条件では，表面温度は上昇する．これらの結果は，PA 駆動前において表面温度が高く，かつ主流速度が低い条件ほど，PA による冷却効果が大きくなることを示している．



(a) 3 m/s, 12 A



(b) 7 m/s, 16 A

図 11　温度分布 [48]

次に，平均的な観点からΔNu_{PA}のJ_{PA}に対する特性および$\Delta\Theta_{PA}$のQ_{PA}に対する特性について議論する．ΔNu_{PA}および$\Delta\Theta_{PA}$はx = 15mm から 35 mm の範囲で平均化され，それぞれ$\overline{\Delta Nu_{PA}}$，$\overline{\Delta\Theta_{PA}}$と表記する．図 12 には$\overline{\Delta Nu_{PA}/Nu_{main}}$を$J_{PA}$の関数として示し，図 13 には$\overline{\Delta\Theta_{PA}}$を$Q_{PA}$の関数として示す．これらの図には不確かさもエラーバーとして示している．

図 12 より，$\overline{\Delta Nu_{PA}/Nu_{main}}$は$J_{PA}$と正の相関を示し，すべてのデータは単一の曲線上に分布していることが確認できる．したがって，$\overline{\Delta Nu_{PA}}$は PA の EHD 効果のみによって特徴付けられる．これは，本研究の流れが自然対流の影響を無視できる強制対流であるためである．一方，図 13 に示す$\overline{\Delta\Theta_{PA}}$についても，$Q_{PA}$と正の相関を示し，すべてのデータが単一の直線上に分布している．この結果は，$\overline{\Delta\Theta_{PA}}$が$J_{PA}$と$Q_{PA}$の両方に依存するという仮説と一致しない．これは，$J_{PA}$と$Q_{PA}$の間に強い相関が存在するためであると考えられる．先行研究において，推力と消費電力の間に線形関係があることが示されており [46]，その結果として，空間平均の観点では$\overline{\Delta\Theta_{PA}}$は最終的に$Q_{PA}$のみによって特徴付けられるといえる．

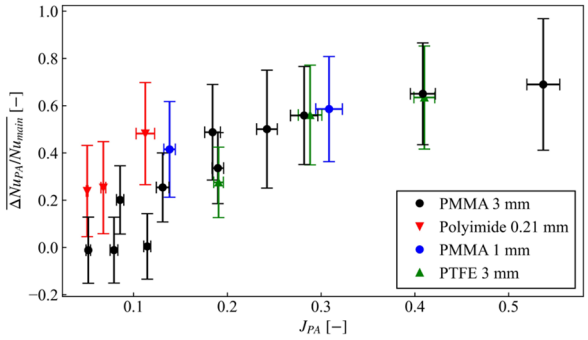


図 12　$\overline{\Delta Nu_{PA}/Nu_{main}}$と$J_{PA}$の関係 [48]

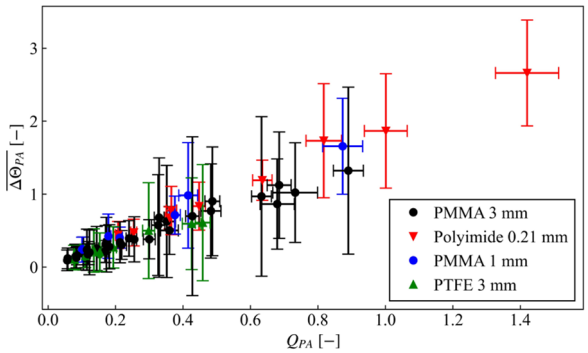


図 13　$\overline{\Delta Nu_{PA}/Nu_{main}}$と$J_{PA}$の関係 [48]

最後に，表面温度変化に対するJ_{PA}およびQ_{PA}の寄与に着目する．図 14 に，横軸にQ_{PA}，縦軸にJ_{PA}をとった無次元表面温度変化の等高線図を示す．各点は実験で測定された値を示す．図より，J_{PA}が大きくQ_{PA}が小さい領域，すなわちJ_{PA}/Q_{PA}が大きい領域では，表面温度変化が負になり，冷却効果が高くなることがわかる．式(14)に示すJ_{PA}とQ_{PA}の関係より，推力と消費電力の比F_{PA}/P_{PA}が大きいこと，主流速度が低いこと，および表面温度が高い（δTが大きい）ことが，より高い冷却効果の実現に寄与することがわかる．

$$\frac{J_{PA}}{Q_{PA}} = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{F_{PA}}{P_{PA}} \cdot \frac{\delta T}{v_c}, \tag{14}$$

本章で提案したモデルは，PA によって冷却効果

が得られる環境条件および作動条件を見出すための有力な手法であると期待される．表面温度変化の推定に必要なパラメータは，J_{PA}およびQ_{PA}に対応するPAの推力F_{PA}と消費電力P_{PA}，および環境条件（流速U_∞，気流温度T_∞，目標冷却温度T_w）である．

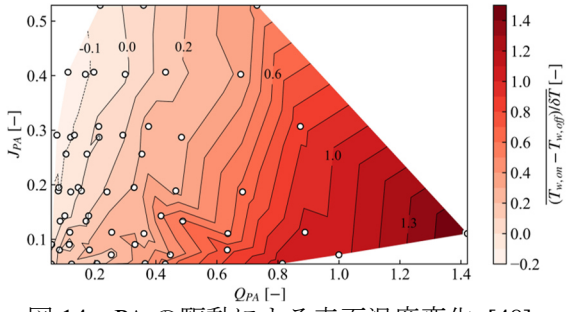


図 14　PA の駆動による表面温度変化 [48]

4．まとめ

本稿では，誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ（PA）を用いた強制対流熱伝達促進に着目し，電気流体力による加速効果および気体加熱効果の影響について概説した．PA は高電圧電極を持ち，金属製プローブによる直接計測が困難であるため，PIV や BOS といった非接触計測による流れ場や密度場の可視化が取り組まれている．しかし，詳細な温度場は明らかになっていない．そこで，気流温度上昇と熱伝達率変化を推定する手法を提案し，実験によりその妥当性を検証した．その結果，PA による冷却性能は，推力と消費電力によって特徴づけられることが示された．冷却性能を向上させるためには，PA の推力電力比を最大化するといった性能改善が求められる．また，2.1 節で紹介したバースト駆動を用いると渦列を形成でき，さらに消費電力を抑えられるため更なる冷却効果が得られると考えられる．今後は，気体加熱場の詳細な理解およびモデル化の高度化が，対流冷却デバイスとしての実用化に向けて重要である．

謝辞

本稿の執筆に際し，東京農工大学の西田浩之先生より貴重なご助言ならびにご校閲を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．

参考文献

[1] Kim, K.-S. et al., Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU, Appl. Therm. Eng., **23-9** (2003) 1137–44.

[2] Kraus, A. D., *Thermal analysis and control of electronic equipment*, Taylor & Francis, (1983).

[3] Khattak, Z. and Ali, H. M., Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: A critical review, Int. J. Heat Mass Transf., **130** (2019) 141–61.

[4] Xie, J. et al., Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system, Appl. Therm. Eng., **126** (2017) 583–93.

[5] Zhang, Q. et al., A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization, J. Syst. Arch., **119-102253** (2021) 102253.

[6] Christen, D. et al., Energy efficient heat sink design: Natural versus forced convection cooling, IEEE Trans. Power Electron., **32-11** (2017) 8693–704.

[7] Kim, S. et al., Fluid flow and heat transfer characteristics of corona wind in cross-cut finned channel, Int. J. Therm. Sci., **184** (2023) 107962.

[8] Uehara, S. and Takana, H., Surface cooling by dielectric barrier discharge plasma actuator in confinement channel, J. Electrostat., **104** (2020) 103417.

[9] Moayedi, H. et al., Parametric study of DBD plasma actuator for heat transfer enhancement in flow over a flat plate at low Reynolds numbers, J. Electrostat., **124** (2023) 103825.

[10] Wang, J. et al., Review on the recent development of corona wind and its application in heat transfer enhancement, Int. J. Heat Mass Transf., **152** (2020) 119545.

[11] Deylami, H. M. et al., Numerical investigation of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel, J. Electrostat., **71-4** (2013) 656–65.

[12] Jafroudi, S. S. M. et al., Heat transfer enhancement through a rectangular channel by DBD plasma actuators as vortex generators, The European Physical Journal Plus, **136-5** (2021) 492.

[13] Emori, K. et al., Enhanced heat transfer by burst-mode actuation of dielectric-barrier-discharge plasma actuator in microchannel flow at low Reynolds number, Proceeding of International Heat Transfer Conference 17, Begellhouse, (2023) 8.

[14] Benard, N. and Moreau, E., Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control, Exp. Fluids, **55-11** (2014) 1846.

[15] Rodrigues, F. et al., Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators, Exp. Therm. Fluid Sci., **90** (2018) 55–65.

[16] Liu, Y. et al., A comparison study on the thermal effects in DBD plasma actuation and electrical heating for aircraft icing mitigation, Int. J. Heat Mass Transf., **124** (2018) 319–30.

[17] Yan, R. et al., Enhanced heat transfer in Poiseuille–Rayleigh–Bénard flows based on dielectric-barrier-discharge plasma actuation, Phys. Plasmas, **30-3** (2023).

[18] Kolbakir, C. et al., An experimental study on different plasma actuator layouts for aircraft icing mitigation, Aerosp. Sci. Technol., **107** (2020) 106325.

[19] Roth, J. et al., Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma, 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, (1998) 328.

[20] Jukes, T. N. et al., Jet flow induced by a surface plasma actuator, Proc Inst Mech Eng Part I J Syst Control Eng, **222-I5** (2008) 347–56.

[21] Hui, W. et al., Heat transfer characteristics of plasma actuation in different boundary-layer flows, Phys. Fluids, **34-3** (2022) 034110.

[22] Debien, A. et al., Streamer inhibition for improving force and electric wind produced by DBD actuators, J. Phys. D Appl. Phys., **45-21** (2012) 215201.

[23] Nakano, A. and Nishida, H., The effect of the voltage waveform on performance of dielectric barrier discharge plasma actuator, J. Appl. Phys., **126-17** (2019) 173303.

[24] Benard, N. and Moreau, E., Role of the electric waveform supplying a dielectric barrier discharge plasma actuator, Appl. Phys. Lett., **100-19** (2012) 193503.

[25] Xue, M. et al., Vortices induced by a dielectric barrier discharge plasma actuator under burst-mode actuation, AIAA J., **58-6** (2020) 2428–41.

[26] Mishra, B. K. and Panigrahi, P. K., Spatiotemporal structure of flow field by a dielectric-barrier-discharge plasma actuator using phase-resolved particle image velocimetry, Phys. Fluids (1994), **36-11** (2024) 117137.

[27] Emori, K. et al., Classification of flow-field patterns in burst-mode actuation of a dielectric-barrier-discharge plasma actuator, Phys. Fluids (1994), **34-2** (2022) 023601.

[28] Benard, N. et al., Time-dependent volume force produced by a non-thermal plasma actuator from experimental velocity field, J. Phys. D Appl. Phys., **46-24** (2013) 245201.

[29] Kotsonis, M. et al., Measurement of the body force field of plasma actuators, J. Phys. D Appl. Phys., **44-4** (2011) 045204.

[30] Albrecht, T. et al., A method to estimate the planar, instantaneous body force distribution from velocity field measurements, Phys. Fluids (1994), **23-2** (2011) 021702.

[31] Kotsonis, M., Diagnostics for characterisation of plasma actuators, Meas. Sci. Technol., **26-9** (2015) 092001.

[32] Merzkirch, W., *Flow Visualization 2nd Edition*, Academic Press, (2012).

[33] Correale, G. et al., Nanosecond-pulsed plasma actuation in quiescent air and laminar boundary layer, J. Phys. D Appl. Phys., **47-10** (2014) 105201.

[34] Takashima (Udagawa), K. et al., Characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma sustained by repetitive nanosecond pulses, Plasma Sources Sci. Technol., **20-5** (2011) 055009.

[35] Ukai, T. et al., Temporal variation of the spatial density distribution above a nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma actuator in quiescent air, Phys. Fluids (1994), **30-11** (2018) 116106.

[36] Cristofolini, A. et al., Schlieren imaging in a dielectric barrier discharge actuator for airflow control, J. Appl. Phys., **111-3** (2012) 033302.

[37] Komuro, A. et al., Visualization of density variations produced by alternating-current dielectric-barrier-discharge plasma actuators using the background-oriented schlieren method, Plasma Sources Sci. Technol., **28-5** (2019) 055002.

[38] Kaneko, Y. et al., Visualization of the Electrohydrodynamic and Thermal Effects of AC-DBD Plasma Actuators of Plate- and Wire-Exposed Electrodes, Actuators, **11-2** (2022) 38.

[39] Settles, G. S. and Hargather, M. J., A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques, Meas. Sci. Technol., **28-4** (2017) 042001.

[40] Raffel, M., Background-oriented schlieren (BOS) techniques, Exp. Fluids, **56-3** (2015) 60.

[41] Tirumala, R. et al., Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters, J. Phys. D Appl. Phys., **47-25** (2014) 255203.

[42] Hatamoto, A. et al., Surface temperature characterization of dielectric barrier discharge plasma actuator in quiescent air, J. Phys. D Appl. Phys., **56-15** (2023) 155203.

[43] Kaneko, Y. et al., Background-oriented schlieren measurement of near-surface density field in surface dielectric-barrier-discharge, Meas. Sci. Technol., **32-12** (2021) 125402.

[44] Moreira, M. et al., Development of a Background-Oriented Schlieren (BOS) System for Thermal Characterization of Flow Induced by Plasma Actuators, Energies, **16-1** (2023) 540.

[45] Hui, W. et al., Unsteady spatial temperature characterization of AC-SDBD plasma actuation using a calibration schlieren technique, Exp. Fluids, **67-1** (2026) 14.

[46] Suzen, Y. et al., Numerical simulations of plasma based flow control applications, 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2005) 4633.

[47] Shyy, W. et al., Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, J. Appl. Phys., **92-11** (2002) 6434–43.

[48] Omori, N. et al., Experimental evaluation of gas heating and flow modification effects by plasma actuator in forced-convection heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, **247** (2025) 127136.

電気流体力学研究と先進熱輸送への応用

Research on Electrohydrodynamics and Applications to Advanced Heat Transfer

西川原　理仁（名古屋大学）
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University)
e-mail: nishikawara@nagoya-u.jp

１．はじめに

絶縁性の液体に高電界をかけると電気力が発生し流動が起きる．これを電気流体力学（EHD）現象と呼び，絶縁性液体に働く電気力は以下の式で表される[1].

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} \quad -\frac{1}{2}\mathbf{E}^2\nabla\varepsilon \quad +\frac{1}{2}\nabla\left\{\mathbf{E}^2\rho\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T\right\} \quad (1)$$

ここで，$\mathbf{f}$ は電気力ベクトル，q は電荷密度，$\mathbf{E}$ は電界ベクトル，ε は誘電率，ρ は密度である．第一項はクーロン力，第二項は誘電泳動力（DEP），第三項は電歪力である. クーロン力は液体中の電荷，つまりイオンに働き，後の二項は分極により発生する力である．DEP に関しては，誘電率の空間勾配が必要なため大きな温度勾配や気液界面の存在が必要である．

EHD による流動は，電極を設置するだけで実現できるため，構造がシンプルかつ軽量であり，機械的可動部を必要としない．その結果，低騒音・低振動での動作が可能であり，電気的に流動を制御できるという特長を有する．このような特性から，EHD はポンプ，アクチュエータ，インクジェットプリンタ，各種熱流体機器などへの応用が検討されている. EHD 流動を液単相系で利用することで，ポンプ機能，流量制御，局所的な流動生成などが可能となる．一方，気液二相系に適用した場合には，微小重力環境下での沸騰の実現，相変化熱輸送の促進，気液界面の駆動，気液分離，さらには気泡や液滴の操作といった多様な機能が実現できる．

著者グループはこれまでに，ミリからマイクロスケールの EHD ポンプの開発，EHD ポンプを利用した熱流体機器の開発，DEP を利用した相変化熱輸送の促進，それらに関連した EHD 数値シミュレーションなどを行ってきた[2-6]．本稿ではこれらの研究開発に関して概説する．

２．イオンドラッグ式 EHD ポンプの温度依存性

EHD ポンプを流体ループ用のポンプとして利用する場合，ポンプ特性に及ぼす作動流体の温度依存性は重要である．そのためここではイオンドラッグ式 EHD ポンプの圧力流量特性における温度依存性を実験および数値計算にて調査した[2].

図 1 に製作した２直列の EHD ポンプの概略図を示す. EHD ポンプの中でも電荷注入現象を利用したものはイオンドラッグポンプと呼ばれ，鋭利な電極が必要となる．電荷を注入するエミッタ電極は厚さ 0.1 mm，長さ 0.5 mm，コレクタ電極は幅 0.3 mm, 高さ 0.3 mm, 隙間高さ 0.4 mm であり，電極間距離は 0.2 mm とした. 流路長さは 16 mm, 流路高さは 1 mm，奥行きは 5 mm である．ポンプ本体は 3D プリンタ，電極はステンレス製でワイヤ放電加工により成形及び加工を行った．ポンプの重さは 11g である．エミッタ電極をグランド，コレクタ電極に＋1.5 kV の電圧を印加した．事前に両極性で試験を行い上記の極性にて良い性能が

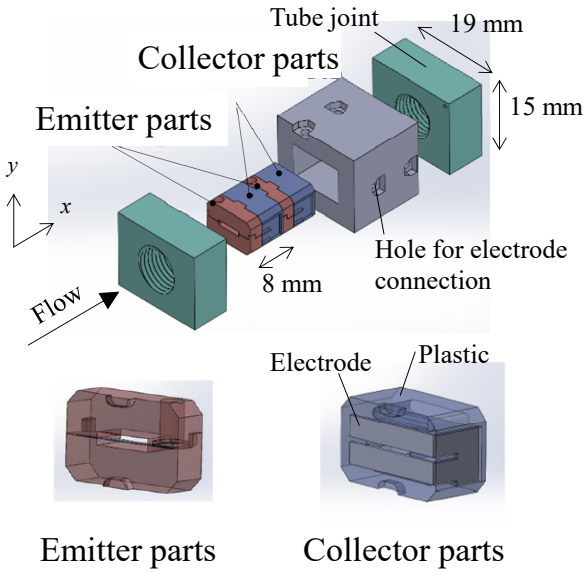


図1　イオンドラッグ式 EHD ポンプの概要

得られることが確認できており，本ポンプではエミッタから負の電荷注入が行われていることになる．ポンプ上流側にあるアルミプレートの温度を恒温水槽により変化させることで温度制御を行った．また，液体温度はポンプ前後の温度を測定し，それらの平均値を動作温度とした．温度は 3 °C，25 °C，45 °C で行った．ポンプ前後に接続した差圧計でポンプ発生圧力を測定し，ポンプ下流側にある容積式流量計により流量を測定した．流量調整用バルブの開度を全開から全閉まで段階的に変化させることで圧力流量特性を取得した．作動液体としてフッ素系溶剤（Vertrel XF）を用いた．

数値解析に関しては，定常，層流，非圧縮を仮定し，外力はクーロン力のみとした連続の式とナビエストークス方程式により流れ場を記述し，電荷の保存則とガウスの法則により電場を記述した．電荷の保存則は，注入電荷および正負の解離電荷についてそれぞれ記述し，解離電荷については解離の電界依存性を考慮した．クーロン力は電荷密度と電場の積で表されるため，流動場と電場と電荷分布が連成する．実験では 2 対の直列 EHD ポンプを使用しているが，数値解析では 1 対のポンプで計算を行い，発生圧力を 2 倍にすることで調整を行っている．物性の温度依存性は，密度，導電率，誘電率，粘性係数，イオン移動度，電荷注入量に関して考慮した（図 2）．

図 3 が実験および数値シミュレーションによって得られた圧力流量特性である．流量の増加に対して圧力が直線的に低下することがわかる．$Q = 0$ cm^3/s における発生圧力は 3 °C が 480 Pa，25 °C が 380 Pa，45 °C が 330 Pa を示し，温度の上昇とともに減少した．数値解析において，温度の上昇に伴い電荷注入量を低下させることで実験と同様な結果が得られたことから，本作動流体では温度の上昇とともに電荷注入量が低下したものと考えられる．温度の上昇に伴い圧力流量特性曲線の傾きが小さくなるのは，主に粘度の低下によるものであることが数値解析よりわかった．本研究で用いたモデルにより，EHD ポンプ特性を予測可能であることが示された．

イオンドラッグポンプについては電荷注入現象に起因する電極や流体の劣化が報告されており，実用に向けては耐久性について対策することが必要である．

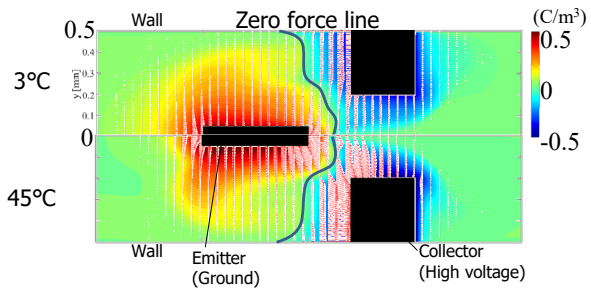


図2　解離電荷密度およびクーロン力ベクトル分布の温度依存性

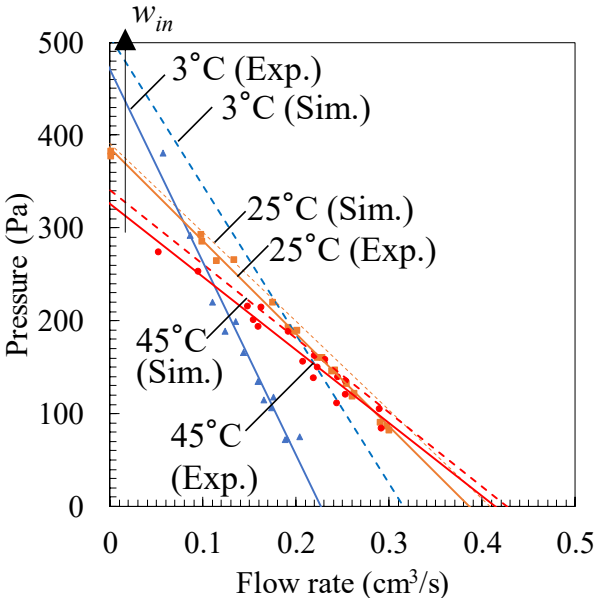


図3　圧力流量特性の温度依存性

3．マイクロ EHD ポンプに関する研究

EHD ポンプは電圧の増加とともに発生圧力も増加するが，最大印加電圧は液体の絶縁破壊電圧で決まる．絶縁破壊電圧は電圧を電極間距離で除した電界でおおよそ決まりフッ素系冷媒なら 10 kV/mm 程度である．そのためミリスケールでは kV 級の電圧が必要になるが，マイクロスケールでは数十から数百 V 程度まで電圧を低くすることができ，高電圧を嫌う機械にも応用が可能となる．そのためマイクロスケールでの EHD ポンプの特性を理解することは応用範囲を拡大する上で重要である．そこで本研究では，マイクロスケールの EHD ポンプの開発を目指し，非対称電極を有するコンダクションポンプのスケール効果について実験および数値計算により調査した[3].

本研究で用いた EHD ポンプの電極 1 対分の形

状を図 4 に示す．ここで扱うポンプはコンダクションポンプであり，2 つの電極は壁に埋め込まれおり，角部が流体に曝されていないため電荷注入の影響を小さくできる．電極寸法，流路高さの比は先行研究[7]を基に設計し，$L_1 : L_2 : L_3 : L_4 : h$ =1 : 1 : 3 : 20 : 4 とした．流れ方向に対して不平等な電場にすることによって正味の流れが発生する．寸法比は固定し，スケール（電極間距離 L_2）のみを 500 μm～5 μm まで変化させた．支配方程式は前章と同じであるが，無次元化している．特に重要な無次元数は $C_0 = \sigma L_2/2\varepsilon\mu_i E_0 = (L_2/2)/L_{travel}$（ここで，$\sigma$ は導電率，ε は誘電率，μ_i はイオン移動度，E_0 は電界強度）でありコンダクション数と呼ばれ，解離電荷が再結合するまでに電気泳動によって進む距離(L_{travel})と電極間距離の比を表す．電荷注入はなしと仮定した．作動流体は HFE 7100 を用いた．印加電圧 V_0 は代表電界 E_0 (= V_0/L_2)が各スケールで同じになるように最大 2 kV/mm まで変化させた．この時，500 μm，50 μm，5 μm のそれぞれのスケールで，C_0 = 7.1–57，0.71–5.7，0.071–0.57 となる．数値計算結果は L_2 = 50 μm に対応する実験結果とのフィッティングによってその妥当性を確認している．

図 5 に各スケールでの電荷密度分布を示す．電極付近では電極と逆極性の電荷密度が高い領域が形成されていることが分かる．線は正と負のそれぞれの平衡状態の電荷密度の等値線であり，これより内側をヘテロチャージ層と定義した．赤線の内部が負のヘテロチャージ層，青線の内部が正のヘテロチャージ層を示す．L_2 = 500 μm では正負の独立したヘテロチャージ層が形成されているのに対し，L_2 = 50 μm と 5 μm では正と負のヘテロチャージ層が重なっていることが分かる．スケールの低下とともに流路に占めるヘテロチャージ層の割合が大きくなっており，オーバーラップしている領域も広がっている．この傾向は平行平板電極の

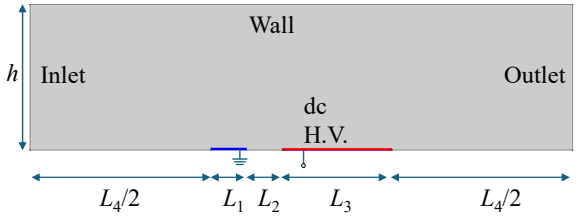


図4　マイクロ EHD ポンプ形状

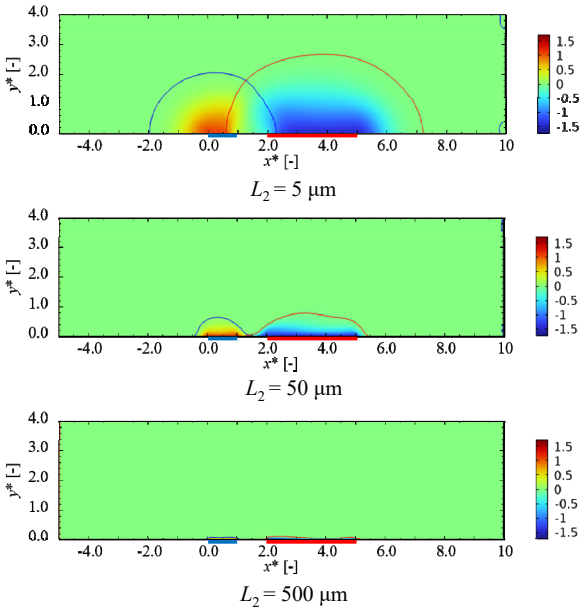


図5　各スケールでの電荷密度分布とヘテロチャージ層形状

結果[8]と一致する．これはヘテロチャージ層の厚さがスケールに関係なく，電荷の電気泳動速度 $\mu_i E_0$ と緩和時間 ε/σ との積に比例するためである．各スケールでの正と負のヘテロチャージ層の長さの比を比較すると，500 μm では電極寸法比（1:3）程度であるのに対し，スケールが小さくなるにつれ，ヘテロチャージ層の比が 1:1 に近づくことが分かり，非対称性が減少していることが分かった．EHD コンダクションポンプは電極を非対称にして流れ方向に対してクーロン力を非平衡にしてポンプとして機能させているため，スケールの小さいポンプにおいてはヘテロチャージ層の非対称性を考慮して電極形状を設計する必要があることが分かった．

4．EHD ポンプを用いたループヒートパイプ式ヒートスイッチの開発

近年，宇宙開発において特に月探査の開発競争が激しくなっている．月面では昼は 100 °C，夜は -190 °C と昼夜で大きな温度差があり，そのような環境の中でローバは電子機器やバッテリーを適温に保つ必要がある．昼は発熱する機器を冷却・放熱し，夜は極寒から断熱・保温する必要がある．長期探査には昼夜で熱制御を切り替えるヒートスイッチ技術が不可欠であり，これを省エネルギーで行うことも同時に求められる．

そこで本研究では，EHD ポンプを利用して省エネルギーで昼夜の熱制御を可能にする新しいデバイスを開発している（図 6）[4]．無電力で高効率な放熱が可能なループヒートパイプ（LHP）と EHD ポンプを組み合わせることで，昼間は LHP が通常動作し，電子機器から発生する熱を宇宙空間へ放熱し，夜間は EHD ポンプによって流量を制御することで断熱状態を実現する．LHP の循環駆動力は毛細管力であり，ポンプ動作に電力を必要としないため，高効率かつ低消費電力な放熱が可能である．本システムでは LHP の液管部に EHD ポンプを組み込んでいる．昼間は EHD ポンプを停止した状態であり，LHP は通常どおり動作する．月面ローバ内部で発生した熱は蒸発器で作動流体を蒸発させ，蒸気としてラジエータへ輸送され，ラジエータ表面から宇宙空間へふく射により放熱される．凝縮した作動流体は液体として再び蒸発器へ戻り，この循環は蒸発器内の多孔体で生じる毛細管力によって維持されるため，外部電力は不要である．一方，極低温環境となる夜間には，電子機器を保温するためにヒータによる加温が必要となるが，LHP が動作し続けると過剰な放熱によりヒータ電力が増大してしまう．そこで，夜間には EHD ポンプを作動させ，LHP の流体循環とは逆方向に圧力を付加することで流動を抑制し，熱輸送を停止させる．これにより，断熱状態を実現し，夜間のヒータ電力を低減できると考えられる．LHP を制御する方法はこれまでにいくつか提案されている．電気ヒータや熱電素子を補償室（CC）に装着し温度制御する方法，蒸気管にバルブを設置し流量を制御する方法，CC 内に非凝縮性ガスを導入しその圧力によって制御する方法などがある．LHP の液管に EHD ポンプを設置し流量を制御する本手法は，これらと比較して圧力損失が低いため LHP の通常動作時への影響が少ない点と EHD ポンプの制御が低い消費電力で行える点，軽量である点，機械的可動部がない点において優れていると考えられる．

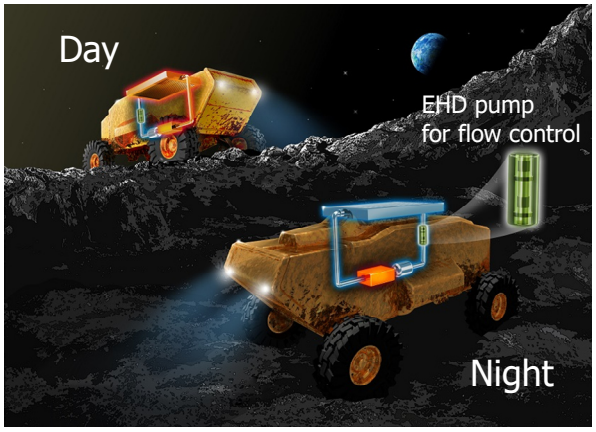


図6　EHD ポンプを用いた LHP 式ヒートスイッチの概要

これまでに 10 kPa 級の EHD ポンプを開発し，JAXA の保有する試験機用 LHP の液管に組み込むことによって LHP の動作を停止させることに成功し，ヒートスイッチとして機能することを確認した．またシュラウド温度を常温から−5 °C まで変化させた熱真空試験では，EHD ポンプによって LHP 蒸発器を一定温度に制御できることを実証した（図 7）．消費電力は 30 mW 程度であり，またこの時 2 つの熱流動モードによって温度を制御していることも判明した．今後は実用に向けてさらなる低温環境での評価が必要となっている．

５．DEP を用いたマイクロチャネル蒸発器の研究

電界の空間勾配があるところの気泡に働く DEP 力は以下の式で表される[9]．

$$\mathbf{F}_{DEP} = 2\pi r^3 \varepsilon_l \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_l}{\varepsilon_v + 2\varepsilon_l} \nabla \mathbf{E}^2 \qquad (2)$$

ここで，r は気泡半径，ε_l は液体の誘電率，ε_v は気体の誘電率である．通常，気泡の誘電率は液体の誘電率より低いため，電界の弱くなる方に DEP 力が働く．Castaneda らは，スリット電極による DEP 力を用いて液膜のプール沸騰を微小重力下で実現

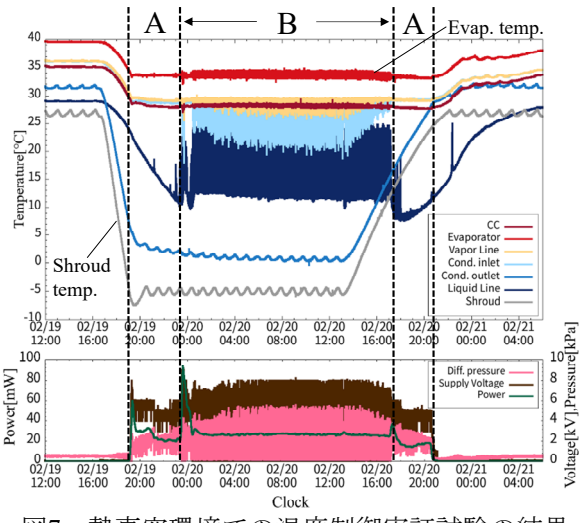


図7　熱真空環境での温度制御実証試験の結果

している[10]．この電極構成において通常重力下においても電圧印加によって加熱面温度が低下することが報告されている[10, 11]．しかし，管路内の強制対流沸騰において同様の手法が有効かどうか明らかではない．そこで本研究では，マイクロチャネル蒸発器の体系にて DEP 力の効果を実験および数値計算にて調査した[5, 6].

図 8 に示すように静電場解析を実施し，式(2)に基づいて気泡に作用する DEP 力を計算した．マイクロチャネル内に発生する気泡に流れ方向に DEP 力が作用する拡大電極を設計した．拡大電極の入口と出口の高さはそれぞれ 0.25 mm と 1.0 mm で，流路入口部，電極部，出口部の長さはそれぞれ 4 mm, 3 mm, 4 mm である．下部電極は接地し，上部電極には高電圧を印加する．また下部電極は加熱面であり，沸騰によって気泡が発生する．x 方向に沿って電場が減少するにつれて，流れ方向に正の DEP 力が発生していることが分かる．x = 4 mm の入口付近に負の強い DEP 力が発生しているが小さい領域であるため影響は小さいと判断した．さらに，図 9 に示すように気泡をマイクロチャネル内に設置した体系にて流動と静電場の非連成解析を実施し，蒸発器内の気泡に作用する DEP 力と流体力学的な力について調査し，低流量（50 kg/m^{2}s），高電界（5 kV/mm）の条件下で気泡に作用する抗力の 10 倍以上の DEP 力が作用することを明らかにした[6].

DEP マイクロチャンネル蒸発器を実験的に評価するため，設計したものと同じ寸法の電極を製作した．流路幅は 1 mm で，電極と絶縁壁はそれぞれ銅とポリテトラフルオロエチレン（PTFE）製である．下部電極にはニクロム線ヒータと T 型熱電対を組み込んだ．流体ループ内に設置し，正味の流れを発生させるため，ギアポンプを使用した．

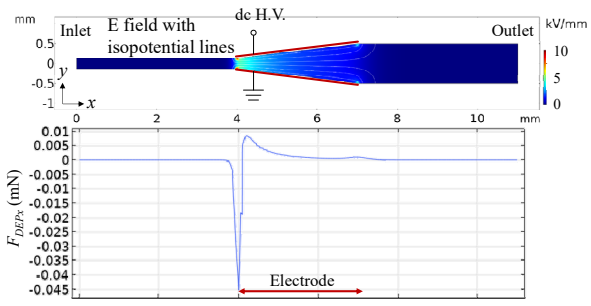


図8　DEP 電極を用いたマイクロチャネル蒸発器と DEP 力の分布

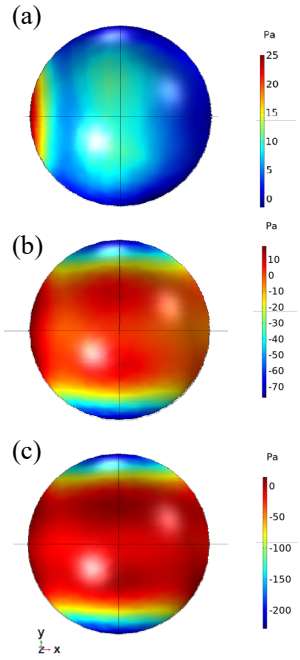


図9　数値計算による気泡表面における応力分布（(a) 250 V，(b) 500 V，(c) 1,250 V，内向きを正としている）

流量を一定に保ちながら，ヒータによる熱負荷を増加させ，DEP 電極に印加する電圧をヒータ出力毎に 0～750 V まで変化させ，加熱面温度の変化を調査した．

図 10 は，質量流束 G = 101 kg/m^{2}s における電圧印加していない時の加熱面温度と電圧印加した際の加熱面温度との差を示している．熱流束の異なる 3 条件の結果を示している．どの印加電圧においても電圧印加していない時の加熱面温度より温

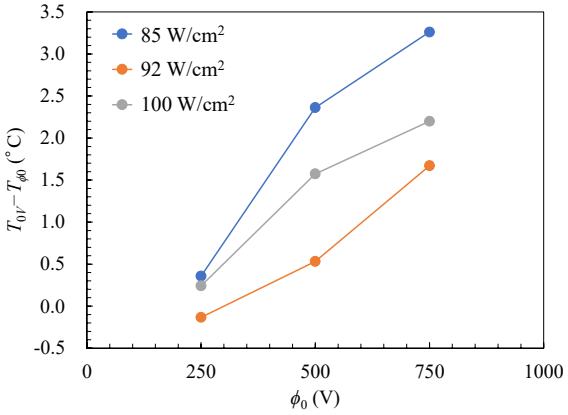


図10　電圧印加による蒸発器加熱面温度変化（G = 101 kg/m^{2}s）

度が低下していることが分かり，最大 3.3 °C の温度低下を計測した．また，印加電圧が増加すると温度低下量が増大している．数値計算において，印加電圧の増加によって誘電泳動力が増加することが分かっており，誘電泳動力の増加によって温度低下量が増大したと考えられる．この結果より，拡大電極によってマイクロチャネル蒸発器の伝熱性能が向上することが示された．設計した拡大電極で発生する DEP 力は強制対流沸騰促進に十分であることが分かった．

６．おわりに

本稿では，著者グループによる EHD 研究と，EHD を利用した熱流体機器の研究開発事例について紹介した．EHD を活用することで，従来の機械式ポンプでは実現困難であった流動の生成や制御が可能となり，熱制御技術に新たな展開をもたらすことが期待できる．とくに，パワー半導体をはじめとする狭い空間に実装される電子機器の冷却や，地上とは環境・制約が大きく異なる宇宙機の熱制御への応用が有望である．本稿が，読者の抱える課題解決に向けた一つの糸口となれば幸いである．

参考文献

[1] Stratton, J. A., *Electromagnetic theory*, John Wiley & Sons (2007).

[2] Nishikawara, M., Yoneda, R., Shinagawa, Y., Yanada, H., Miyakita, T., Sawada, K., Temperature Dependence of the Characteristics of an Electrohydrodynamic Pump with Plate-Bar Electrodes, IEEE Trans. Ind. Appl., **56-1** (2020) 704–710.

[3] Nishikawara, M., Ueda, T., Yokoyama, H., Yanada, H., Scaling Effect on Micro Electrohydrodynamic Conduction Pump with Flush Electrode, Proc. 22nd IEEE Int. Conf. Dielectric Liquids (ICDL), (2023) 194.

[4] Nishikawara, M., Miyakita, T., Seshimo, G., Yokoyama, H., Yanada, H., Demonstration of Heat Switch Function of Loop Heat Pipe Controlled by Electrohydrodynamic Conduction Pump, Appl. Therm. Eng., **249** (2024) 123428.

[5] Nishikawara, M., O'Connor, N. J., Yagoobi, J., Dielectrophoretically Enhanced Microchannel Evaporator with a Diverging Electric Field, Case Stud. Therm. Eng., **79** (2026) 107794.

[6] Nishikawara, M., O'Connor, N. J., Yagoobi, J. S., Numerical Study of Dielectric Fluid Bubble Behavior in Microchannel Evaporator in Presence of Diverging Electric Field, IEEE Trans. Ind. Appl., **59-2** (2023) 2413–2420.

[7] Pearson, M. R., Yagoobi, J., Experimental Study of Linear and Radial Two-Phase Heat Transport Devices Driven by Electrohydrodynamic Conduction Pumping, J. Heat Transf., **137** (2015) 022901.

[8] Vázquez, P. A., Talmor, M., Yagoobi, J., Traoré, P., Yazdani, M., In-Depth Description of Electrohydrodynamic Conduction Pumping of Dielectric Liquids: Physical Model and Regime Analysis, Phys. Fluids, **31** (2019) 113601.

[9] Jones, T. B., *Electromechanics of Particles*, Cambridge Univ. Press (2005).

[10] Castaneda, A. J., O'Connor, N. J., Yagoobi, J. S., Didion, J. R., Martins, M. S., Hasan, M. M., Dielectrophoretically Assisted Electrohydrodynamic-Driven Liquid Film Flow Boiling in the Presence and Absence of Gravity, J. Heat Mass Transf., **145** (2023) 031601.

[11] Kano, I., Subcooled Flow Boiling under an Electric Field on Surface Enhanced by Diamond Particles Deposition, Int. J. Heat Mass Transf., **134** (2019) 959–969.

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合先／ウェブサイト
11 月				
2026 年 7 月 24 日（金）	第 13 回「伝熱工学の基礎」講習会	2026 年 6 月 25 日（水）		（公社）日本伝熱学会 電話（03）6820-9018，FAX（03）5981-6012 E-mail：htsj-office@asas-mail.jp

本会共催，協賛行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	
2026 年				
8 月				
2026 年 8 月 7 日（金）～9 日（日）	可視化情報シンポジウム	2026 年 5 月 1 日(金)	2026 年 6 月 19 日(金)	第 53 回可視化情報シンポジウム・事務局 TEL：076-264-6469 E-mail：symp2026@vsj.jp
2026 年 8 月 31 日(月)～9 月 2 日(水)	日本実験力学会 2026 年度年次講演会	2026 年 5 月 11 日（月）	2026 年 7 月 3 日（金）	日本実験力学会 富山大学 都市デザイン学部 小野英樹 Tel :076-445-6876 Fax : 076-445-6876 E-mail: annual26@jsem.jp
2026 年 8 月 31 日（月）～9 月 2 日（水）	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2026	2026 年～5 月 8 日（金）	2026 年 7 月 21 日（火）	混相流シンポジウム 2026 実行委員会 委員長 金子 暁子（筑波大学） E-mail: mfsymp2026@jsmf.gr.jp
9 月				
2026 年 9 月 24 日（木）～26 日（土）	日本流体力学会 年会 2026	2026 年 6 月 19 日（金）	2026 年 8 月 28 日（金）	年会 2026 実行委員会 E-Mail: jsfm2026-ml@shinshu-u.ac.jp
10 月				
2026 年 10 月 26 日(月), 27 日(火)	熱工学コンファレンス 2026	2026 年 6 月上旬	2026 年 8 月 28 日（金）	日本機械学会実行委員会事務幹事 上野 藍（名古屋大学） E-mail：tedconf26@jsme.or.jp
2026 年 10 月 28 日(水), 29 日(木)	第 54 回日本ガスタービン学会定期講演会	2026 年 7 月 17 日(金)	2026 年 9 月 18 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 E-mail:gtsj-office@gtsj.or.jp
2027 年				
3 月				
2027 年 3 月 12 日（金）～3 月 15 日（月）	24th IACM Computational Fluids Conference (CFC 2027)		2026 年 7 月 10 日(金)	CFC 2027 共同議長 松本純一（国立研究開発法人産業技術総合研究所） TEL: 050-3521-0511 E-mail: matsumoto-junichi@aist.go.jp

公益社団法人　日本伝熱学会　第 64 期（2025 年度）総会議事録

1. 開催日時：2026 年 5 月 27 日（水）　16 時 15 分～17 時 45 分
2. 会　　場：札幌コンベンションセンター（大ホール）
　　北海道札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1－1
3. 正会員数： 896 名

議事経過

【開会】

・議長挨拶と定足数確認

定款の規定により会長 須賀一彦は開会を宣言した．その後，議事進行役の店橋護副会長より，2026 年 5 月 27 日現在の日本伝熱学会の正会員数 896 名中，出席者 741 名（内訳：現地出席者 113 名，委任状提出者 604 名，議決権行使で賛成票 24 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 64 期事業報告

店橋総務担当副会長より，第 64 期事業について資料に示され，研究会，学術講演会の開催として，沖縄にて開催された第 62 回日本伝熱シンポジウム，HTSJ 国際伝熱シンポジウムの実施，IUTAM シンポジウム，国際乱流熱物質輸送シンポジウム等の国際会議の開催，産学交流委員会によるモノづくりセッション及び企業特別セッションの開催，講習会委員会による「伝熱工学の基礎」と「計測技術」講習会の実施，各支部による伝熱セミナー他の開催について報告された．また，学会誌，学術図書等の刊行として，学会誌「伝熱」，学術論文集「Thermal Science and Engineering（TSE）」及び伝熱シンポジウムの講演論文集の発行，研究及び調査の実施として，産学交流委員会による「伝熱技術の鉄鋼業への産業応用」イベント，次世代研究者による伝熱技術研究会による研究会，細胞内熱ダイナミクス研究会によるセッションやワークショップ開催について報告された．学会賞（学術賞，登鯉賞及び奨励賞），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された．さらに，国際的な研究協力の推進については，AICHT 及び AUTSE 関連の活動について報告された．

以上について，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 64 期会務報告

店橋総務担当副会長により，第 64 期会務報告について資料に示され，2025 年 5 月 16 日に開催された第 63 期の定時総会後に，2025 年 6 月 24 日のオンラインによる第 63 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 5 回の理事会の開催，64 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，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 22 名の増，永年正会員は 4 名減，名誉会員は 3 名減，学生会員は 6 名減，賛助会員は 2 社増，特別賛助会員は 1 社増であることが報告された．

以上について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 65 期役員・協議員選出

須賀会長より，第 65 期（2026 年度）役員選出について，第 64 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，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　足立　高弘，井上　修平，大島　翼，近藤　良夫，齊藤　泰司，大宮司　啓文
戸谷　剛，林　謙年

監事　廣田　真史

定款第 17 条第 1 項但し書きにより退任する役員
理事　須賀　一彦，宮良　明男，服部　博文

定款第 17 条第 1 項により選任される役員
新任理事　稲垣　昌英，岩本　薫，木村　文義，江目　宏樹，坂本　明洋
堀内　敬介，森田　慎一，山田　寛
新任監事　堀部　明彦

定款第 17 条第 1 項但し書きにより選任される役員
新任理事　小原　拓，高橋　厚史，松村　幸彦

続いて，新協議員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．

(4) 第 4 号議案　細則の改定
須賀会長より，細則の改正（第 3 章 会員及び会費の 3-1（1）正会員 及び 3-11）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．

(5) 第 5 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，店橋護氏，宮良明男氏が指名され，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．

(6) 第 6 号議案　第 64 期（2025 年度）収支決算状況報告
近藤財務担当副会長より，第 64 期（2025 年度）収支決算について，現在監事による監査を実施中であることが報告され，6 月にオンラインによる臨時総会にて決議を諮ることが報告された．

(7) 第 7 号議案　第 65 期（2026 年度）事業計画
店橋総務担当副会長より，第 65 期（2026 年度）事業計画について，札幌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 65 期（2026 年度）収支予算
近藤財務担当副会長より，第 65 期（2026 年度）収支予算について資料に示され報告された．

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．

2026 年 5 月 27 日
公益社団法人日本伝熱学会第 64 期（2025 年度）総会

議長　須賀　一彦　印

議事録署名人　店橋　護　印

議事録署名人　宮良　明男　印

2026 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，2027 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

2026 年 12 月 11 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.

九州大学大学院工学研究院　高橋 厚史
E-mail: takahashi@aero.kyushu-u.ac.jp
TEL 092-802-3015
（〒819-0395 福岡市西区元岡 744）

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：岩本薫（東京農工大学）：iwamotok@cc.tuat.ac.jp
- 編集出版部会長：長野方星（名古屋大学）：nagano@mech.nagoya-u.ac.jp
- 広報委員会委員長：矢吹智英（九州工業大学）：yabuki.tomohide556@mail.kyutech.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 ファイルでお願いします．
- HP はメンテナンスの都合上，掲載は申込月の翌月，また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います．
- ML では，原則としてテキスト文の送信となります．pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください．

Thermal Science and Engineering（TSE：日本伝熱学会論文集）投稿規程

１．論文内容：　熱科学・工学分野の論文で，以下の特色を有するものを対象とします.
(1)独創性のあるオリジナル論文
(2)未発表のプログラムの主要部分を掲載した数値解析論文
(3)新計測法，データ処理手法を再現可能なように記載した論文
(4)熱科学・工学に係わる論文で他の論文集では掲載され難い特異的な論文
(5)生データを記載した有用な実験研究結果
(6)良く整理された Review 論文
(7)その他，エディターが熱科学・工学分野の進展に寄与すると認めた論文

２．言語：日本語又は英語

３．投稿資格：特に制限を設けない.

４．掲載論文の種別と長さ
(1)原著論文：著者の原著であって，一般への公開刊行物に掲載済みまたは投稿中でない論文.
但，本学会主催のシンポジウム等に発表した論文は，原著論文として投稿出来ます．また，本学会以外でも，配布の限定された国内外のシンポジウム等の論文集，紀要，広報誌等に掲載された論文に新たな結果や考察を付け加えた場合も，同じ扱いとします.
論文の長さは，最低２頁以上とし，最大頁は定めず，読者に充分内容が伝わるために必要と認められる頁数とします.
(2)ショートノート：原則として４頁以下で，速報的に研究成果を公表するもの.
(3)一般論文・記事：論文に関する討論及びコメントや，研究に関する記事，すでに他の刊行物に掲載された論文等を必要に応じて掲載するもの．長さはとくに定めず，必要と認められる頁数とします.

５．著作権：原著論文の著作権は，本会に帰属させ，本会の著作権規程に従って取り扱います．ただし著者が将来自らの学術的著作物に用いる場合には，本会が制約を加えることは，原則としてありません（本会著作権規定をご参照下さい）.
また，本誌に投稿されるいずれの種別の論文・記事においても，著作権を他の学会や機関に委譲している部分については，著者の責任において，掲載許可を取得するものとします.

６．投稿形式および方法：
論文は MS-WORD により記述し，下記の(1)～(3)のいずれかによって，投稿して下さい.
(1)原稿と投稿表紙を，査読と刷り上り配置の確認のために，原則として一旦 pdf ファイルの形式で，電子メールに添付して「９．投稿先」に記載のチーフエディターにお送り下さい.
(2)日本伝熱シンポジウム論文集からの投稿の場合は，シンポジウム論文集の様式によって執筆し，実行委員会の案内に従ってご提出下さい.
(3)あるいは，原稿のコピー３部と表紙１部をチーフエディターあてに郵送でお送り下さい.
いずれの場合も，掲載決定後最終的には，TSE の様式に従った原稿の MS-WORD ファイルおよび署名捺印した投稿表紙を，提出して頂きます.
投稿規程，投稿表紙，原稿書式（テンプレート）は，本学会のウエブサイト上でホーム→Journals→学会論文集，にあります．この形式による投稿が出来ない場合は，チーフエディターにご相談下さい.

７．論文掲載料：　無料.（2026 年 1 月号より J-Stage でのオンライン公開のみとなるため，カラーページも無料となります．抜き刷りは製作できません.）

８．TSE 編集委員会
編集委員長（チーフエディター）：鈴木 雄二（東京大学）
編集委員（エディター）：
田部 豊（北海道大学），桑原 不二朗（静岡大学），岩井 裕（京都大学），
堀部 明彦（岡山大学），藏田 耕作（九州大学），横峯 健彦（京都大学），
大川 富雄（電気通信大学），宮崎 康次（九州大学），千足 昇平（東京大学），
保浦 知也（名古屋工業大学），下栗 大右（広島大学），熊野 寛之（青山学院大学），
河南 治（兵庫県立大学）
幹事：李 敏赫（東京大学）

９．投稿先：

チーフエディター　鈴木 雄二
〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1　　東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻
e-mail：tse@mesl.t.u-tokyo.ac.jp　　TEL&FAX　　03-5841-6411

以上

Thermal Science and Engineering (TSE: Transaction of HTSJ) Submission Guidelines

1. Type of paper: An article with either one (or more) of the following category(-ies) in the field of thermal science and engineering
   (1) Technically original research paper
   (2) Technically original document of numerical calculation consisting of the major part of unpublished source code
   (3) Technically original document of new measurement or data processing technique with its details to reproduce the results
   (4) Technically original research paper on thermal science and engineering in general that may be unique enough to be accepted for publication in other journals
   (5) Technically original document of valuable experimental research results with law experimental data
   (6) Well-organized review paper
   (7) Other type of research paper or document that the editor acknowledges the contribution to the progress of thermal science and engineering

2. Language: Japanese or English

3. Authorship requirement: No restrictions

4. Categories and length of the article:
   (1) Research paper: Technically original research paper or document of the author(s) that has neither been published nor submitted to publicly accessible journal or publication.
   Research papers presented at symposiums and other meetings of HTSJ (Heat Transfer Society of Japan)'s can be submitted as a Research paper. Also, a research paper published in other publication, such as, the proceedings of symposium or other meeting except for HTSJ's, proceedings of university or research institution, newsletter, and relevant publication, with limited distribution and public access can be considered in the same manner if the paper is amended or modified by adding new research results or discussions.
   Length of the paper must be prepared so as to sufficiently inform the contents to the readers. It is not shorter than 2 pages, but is not limited with maximum page number.
   (2) Short note: Less than or equal to 4 pages in general in order to publish the preliminary and quick report of research result.
   (3) General paper/article: Other paper or article in general, such as, discussions or comments on other article, article on research activity in general, or paper that has already been published in other journals or etc. if it is submitted in legally appropriate manner. General paper/article has no length limitation.

5. Copyright: The copyright of technically original paper or article shall be transferred to HTSJ, and subject to its copyright guideline. HTSJ in principle shall not prevent from the author(s) to use in future the contents of the paper or article in his/her own academic publications. (Please refer to the copyright guideline of HTSJ's.)
   The author(s) must get permission prior to the submission to TSE of the use of any part of the paper or article of which the copyright had been transferred to other organization(s), such as academic society(-ies) or publisher(s), from the organization(s).

6. Submission: The article shall be prepared in MS-WORD format and be submitted through either one of the followings:
   (1) Convert both the manuscript and the Submission Coversheet into pdf format in order to review and to confirm the printing format, and then send it to the Editor in Chief in "9. Submission address."
   (2) Submission from the proceedings of the Symposium (annual National Heat Transfer Symposium of Japan, organized by HTSJ) shall be prepared by following the Symposium's proceedings format, and the author(s) is advised to submit to TSE according to the guidance of Symposium's executive committee.
   (3) Send hard copy of manuscript (three copies) and the Submission Coversheet (one copy) to the Editor in Chief by mail.
   Please note that an electronic version of MS-WORD formatted manuscript and the signed copy of Submission Coversheet shall be submitted by the author(s) if the paper is accepted for publication.
   Submission Guidelines, Paper Format and the Manuscript Template can be found on HTSJ's website (Home -> Journals -> Transactions of HTSJ "Thermal Science and Engineering".) Please contact the Editor in Chief if the author has any problem in submitting the manuscript in the above format.

7. Paper publication fee: Free (As of 2026.1, TSE becomes an online journal on J-Stage. There will be no additional cost for color pages, but reprints are no longer available.)

8. TSE Editorial Committee
   Committee Chair (Editor in Chief): Yuji Suzuki (The University of Tokyo)
   Committee Members (Editors): Yutaka Tabe (Hokkaido University), Fujio Kuwahara (Shizuoka University), Hiroshi Iwai (Kyoto University), Akihiko Horibe (Okayama University), Kosaku Kurata (Kyushu University), Takehiko Yokomine (Kyoto University), Tomio Okawa (University of Electro-Communications), Koji Miyazaki (Kyushu University), Shohei Chiashi (The University of Tokyo), Tomoya Houra (Nagoya Institute of Technology), Daisuke Shimokuri (Hiroshima University), Hiroyuki Kumano (Aoyama Gakuin University), Osamu Kawanami (Hyogo University),
   Secretary General: Minhyeok Lee (The University of Tokyo)

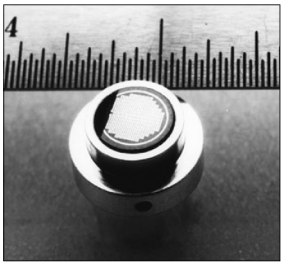
9. Submission address
   Yuji Suzuki, Editor in Chief (The University of Tokyo)
   Dept. of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
   e-mail：tse@mesl.t.u-tokyo.ac.jp　　TEL&FAX　03-5841-6411

:--

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/cm²）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



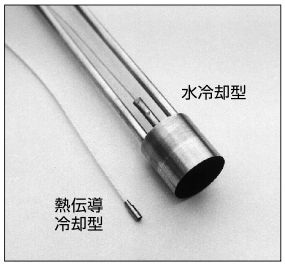
特 徴

- 最高速の応答（約 6μ秒）
- 850℃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バース実験
- タービンブレード熱風洞試験
- 自動車用エアーバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ

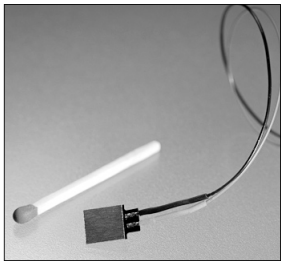


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとなっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

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、72m²の広さを持ち、厚さは0.4㎜です。レベル-0パッケージングの最適化ポリマーと1-レベルパッケージング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。

センサテクノス株式会社
〒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
URL www.senstech.jp
E-mail info@senstech.jp

TECHNO

■ 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）

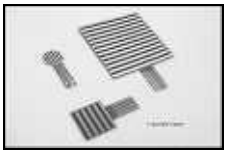
CAPTEC（キャプテック）社は，独自の高度技術により，低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で，熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは，輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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/ft^{2}sec（フルスケール）
サイズ：1/16 インチ（約 1.6mm）〜1 インチ（約 25.4mm）
最高温度：200℃（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%
較正精度：±2%
オプション：輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等

【最小プローブ径】
0.015 インチ（約 0.39mm）

【熱電対タイプ】	【温度範囲】
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，高温用熱流板や火炎強度熱流計など，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 火炎強度熱流計



最高温度：1900℃
応答速度：0.1s
最大熱流束レンジ：0〜3000W/cm^2

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

本広告に掲載されている内容は 2010 年 9 月現在のもので、製品の仕様は予告なく変更される場合があります。

「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。



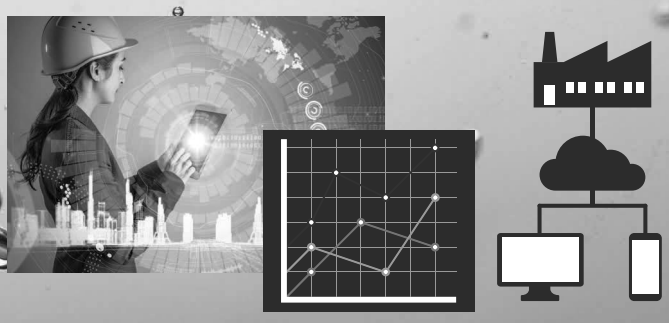
■ 射出成形用二次冷却システムUWT-1000WHX



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。



FunctionalFluids

株式会社ファンクショナル・フルイッド

〒550-0004 大阪市西区靱本町1-4-5 千代田ビルアネックス5F
Tel: 06-6445-5433　Fax: 06-6445-5432
info@functional-fluids.co.jp
http://www.functional-fluids.co.jp

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

本号では，西川原理仁先生（名古屋大学）にお願いして，特集「電気流体力学と伝熱」を組んでいただきました．熱流体に関する研究の中から，「電気流体力学」に関わる研究トピック 5 件をご寄稿いただきました．ご多用中にも関わらずご寄稿下さりました皆様に厚くお礼申し上げます．

さて，日本伝熱学会第 65 期の編集出版部会は，下記の方々と協力して，会誌「伝熱」の編集出版業務を進めてまいります．何卒よろしくお願いいたします．昨年度まで幹事を務められた古川琢磨先生（芝浦工業大学）をはじめ，64 期で委員任期を終えられた地下大輔先生（東京海洋大学），仮屋 圭史先生（佐賀大学）に深く感謝申し上げます．

長野　方星（名古屋大学）
Hosei NAGANO (Nagoya University)
e-mail: nagano@mech.nagoya-u.ac.jp

企画・編集出版担当副会長　　高橋　厚史（九州大学）
編集出版部会長　　長野　方星（名古屋大学）
委員
（協議員）西川原 理仁（名古屋大学），石崎 拓也（宇宙航空研究開発機構），
山崎 匠（東北大学），鎌田 慎（名古屋大学），上野 藍（名古屋大学），
橋本 将明（慶應義塾大学），小田切 公秀（宇宙航空研究開発機構），
廣川 智己（兵庫県立大学）

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