

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

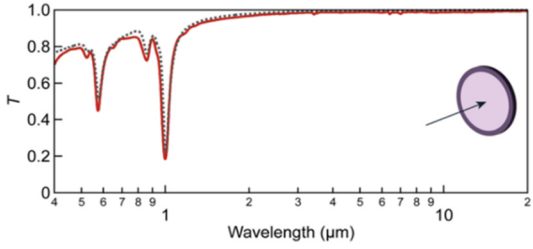
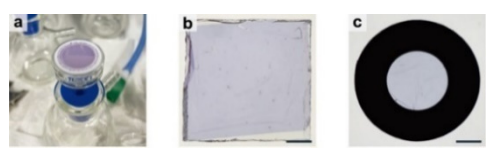
ISSN 1344-8692 Vol. 62, No. 260
2023. 7

Thermal Science and Engineering

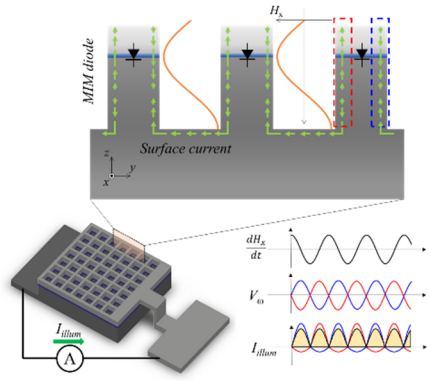
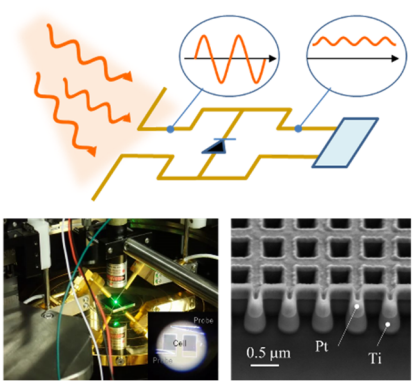
ISSN 0918-9963 Vol. 31, No. 3
2023. 7



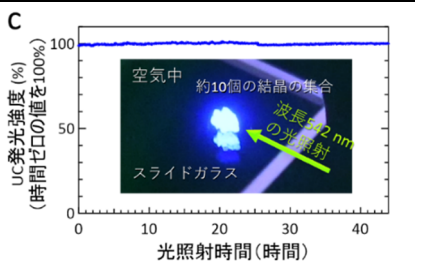
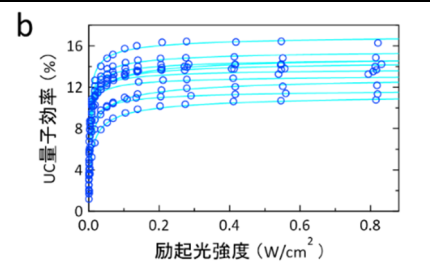
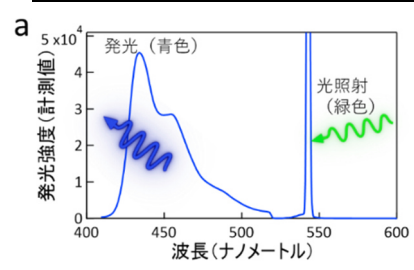
◆特集：ふく射伝熱（その2）



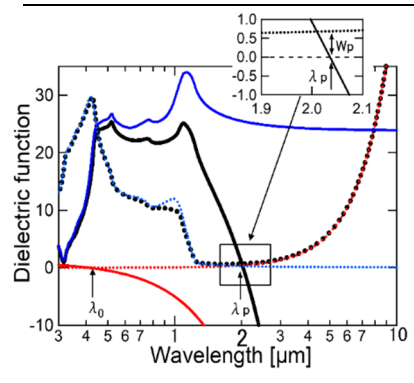
【上図】高純度(6,5)カーボンナノチューブ (CNT) 分散液を用いて作製した(a)濾過フィルター上の CNT 膜, (b)サファイア基板上の CNT 膜, および(c)金属ワッシャーを支持体とした自立 CNT 膜. スケールバーは 1 mm. 【下図】CNT 自立膜の透過率 (T) スペクトル, CNT を極限まで高純度化して利用することで, 鋭い励起子共鳴波長 ($\sim 1 \mu\text{m}$) より (特集記事「中遠赤外光吸収を持たない純炭素薄膜~カーボンナノチューブの熱ふく射制御応用に向けて~(西原大志, 劉知鋭, 宮内雄平)」より)



【左上図】レクテナを用いた熱ふく射の電力変換模式図. アンテナで吸収した電場振動をダイオードにより整流することで発電するため光子エネルギーの制限なく幅広い波長域の熱ふく射に対応【左下図】発電試験の様子と発電に成功したデバイス SEM 像【右図】開発した空洞共振器型光レクテナデバイス模式図. 磁場定在波によって生じる表面電流を整流することで発電が可能 (特集記事「ふく射伝熱に基づく熱の電力変換(清水信)」より)



PtOEP と ANNP の α 固溶体のアップコンバージョン. (a)波長 542 nm の緑色光照射時の発光スペクトル. (b)10 点の試料について測定した UC 量子効率の励起光強度依存性. 曲線は理論式によるフィッティング. (c)空気中で約 10 個の結晶の集合に波長 542 nm の緑色レーザー光 (強度: 20 mW/cm^2) を照射した際の UC 発光強度の時間安定性および写真 (510 nm ロングパスフィルタを通して撮影). (特集記事「太陽光エネルギーを有効活用する固体の短波長変換材料(村上陽一)」より)



第一原理計算 (RESPACK) で得られた WC の複素誘電率 $\epsilon(\lambda)$. 黒実線: $\text{Re}[\epsilon(\lambda)]$, 黒点線: $\text{Im}[\epsilon(\lambda)]$. 赤実線および赤点線はドルーデ寄与, 青実線および青点線はバンド間遷移の寄与を表す. (特集記事「太陽光吸収膜の生成(宮崎康次, 中村和磨)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

西原 大志, 劉 知鋭, 宮内 雄平 (京都大学), 清水 信 (東北大学) 村上 陽一 (東京工業大学), 宮崎 康次 (九州大学), 中村 和磨 (九州工業大学) ……	表紙裏
---	-----

〈新旧会長挨拶〉

第 61 期会長退任にあたって ……	高松 洋 (熊本高等専門学校) ……	1
第 62 期会長就任にあたって - 7/300 - ……	平井 秀一郎 (東京工業大学) ……	2

〈第 35 回日本伝熱学会賞〉

第 61 期 (2022 年度) 表彰選考委員会報告 ……表彰選考委員会 委員長 小原 拓 (東北大学) ……	3
日本伝熱学会学術賞を受賞して ……藤原 邦夫, 芝原 正彦 (大阪大学) ……	5
日本伝熱学会学術賞を受賞して ……巽 和也, 栗山 怜子, 中部 主敬 (京都大学) ……	6
日本伝熱学会学術賞を受賞して ……矢吹 智英 (九州工業大学), 田中 孝典 (富士電機), 宮崎 康次 (九州大学) ……	7
日本伝熱学会技術賞を受賞して ……上久保 将大, 小坪 優一, 神藤 陽介, 佐々木 泰海 (古河電工 (株)) ……	8
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……神田 雄貴 (東北大学) ……	9
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……チャロンアモーンキット パットチャラワット (キングモンクット工科大学トンプリー校) ……	10

〈第 60 回日本伝熱シンポジウム〉

第 60 回日本伝熱シンポジウムの報告 ……高橋 厚史, 手嶋 秀彰, 宮崎 康次, ……藏田 耕作, 伊藤 衡平, 迫田 直也, 吉田 敬介, 森 昌司, 河野 正道 (九州大学), ……桃木 悟, 山口 朝彦 (長崎大学), 鹿園 直毅 (東京大学), ……小宮 敦樹 (東北大学), 西 剛伺 (足利大学), 大久保 英敏 (玉川大学) ……	12
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 - 第 60 回日本伝熱シンポジウム - ……学生会委員会幹事 上野 藍 (名古屋大学) ……	24

〈特集：ふく射伝熱（その2）〉

太陽光吸収膜の生成	宮崎 康次（九州大学），中村 和磨（九州工業大学）	25
太陽光エネルギーを有効活用する固体の短波長変換材料		
	村上 陽一（東京工業大学）	30
中遠赤外光吸収を持たない純炭素薄膜～カーボンナノチューブの熱ふく射制御応用に向けて～		
	西原 大志，劉 知鋭，宮内 雄平（京都大学）	36
ふく射伝熱に基づく熱の電力変換	清水 信（東北大学）	43

〈行事カレンダー〉		49
-----------	--	----

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 61 期（2022 年度）総会議事録		50
編集出版部会からのお知らせ		52

〈編集出版部会ノート〉		55
-------------	--	----

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Taishi NISHIHARA, Zhirui LIU, Yuhei MIYAUCHI (Kyoto University),
Makoto SHIMIZU (Tohoku University),
Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology),
Koji MIYAZAKI (Kyushu University),
Kazuma NAKAMURA (Kyushu Institute of Technology) Opening Page

< New and Former Presidents' Addresses >

Retirement Address as the 61st President
Hiroshi TAKAMATSU (National Institute of Technology, Kumamoto College) 1
Inauguration Address as the 62nd President and 7/300
Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology) 2

< The 35th Heat Transfer Society Awards >

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2022
Taku OHARA (Tohoku University) 3
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Kunio FUJIWARA, Masahiko SHIBAHARA (Osaka University) 5
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Kazuya TATSUMI, Reiko KURIYAMA, Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University) 6
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology),
Takanori TANAKA (Fuji Electric Co., Ltd.), Koji MIYAZAKI (Kyushu University) 7
On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan
Masahiro UEKUBO, Yuichi KOTSUBO, Yosuke SHINDO,
Yasumi SASAKI (Furukawa Electric Ltd.) 8
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Yuki KANDA (Tohoku University) 9
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Patcharawat CHAROEN-AMORNKITT
(King Mongkut's University of Technology Thonburi) 10

< The 60th National Heat Transfer Symposium of Japan >

Report on the 60th National Heat Transfer Symposium of Japan

Koji TAKAHASHI, Hideaki TESHIMA, Koji MIYAZAKI, Kosaku KURATA, Kohei ITO,

Naoya SAKODA, Keisuke YOSHIDA, Shoji MORI, Masamichi KOHNO (Kyushu University),

Satoru MOMOKI, Tomohiko YAMAGUCHI (Nagasaki University),

Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo), Atsuki KOMIYA (Tohoku University),

Koji NISHI (Ashikaga University), Hidetoshi OHKUBO (Tamagawa University) 12

Best Presentation Award - 60th National Heat Transfer Symposium of Japan -

Ai UENO (Nagoya University) 24

< Special Issue: Radiative Heat Transfer: Part 2 >

Development of a Solar Absorber

Koji MIYAZAKI (Kyushu University),

Kazuma NAKAMURA (Kyushu Institute of Technology) 25

Solid-State Light Conversion Materials to Shorter Wavelength for Effective use of Solar Energy

Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology) 30

Pure Carbon Membrane without Mid- and Far-Infrared Optical Absorption

-Toward Spectral Control of Thermal Radiation using Carbon Nanotubes

Taishi NISHIHARA, Zhirui LIU, Yuhei MIYAUCHI (Kyoto University) 36

Power Conversion of Heat Based on Radiative Heat Transfer

Makoto SHIMIZU (Tohoku University) 43

< Calendar > 49

< Announcements > 50

< Note from the JHTSJ Editorial Board > 55

第 61 期会長退任にあたって
Retirement Address as the 61st President



高松 洋 (熊本高等専門学校)

Hiroshi TAKAMATSU (National Institute of Technology, Kumamoto College)

私の地元福岡で行われました第 60 回日本伝熱シンポジウムを最後に、第 61 期会長を退任いたしました。会員の皆様、この 1 年間大変お世話になりました。どうもありがとうございました。退任にあたりご挨拶申し上げます。

第 61 期は、2020 年から苦しめられてきたコロナ禍から脱し、少しずつ以前の「普通」が戻ってきた 1 年間でした。依然として国際活動が制限されていたなかで、これまで続いてきた地域国際セミナーを思い切って見直し、蓄熱の科学と工学に関する国際シンポジウムを 9 月に札幌にてハイブリッドで開催いただき、国内からは多くの方に対して参加いただきました。そして、締めくくりの第 60 回日本伝熱シンポジウムは通常通り対面で開催することができ、大変嬉しく思っております。実行委員長の高橋厚史先生はじめ実行委員会の皆様に感謝申し上げます。

学会活動が通常に戻ってくると、学会の運営に関する問題が顕在化してきます。残念ながら第 61 期の理事会や企画委員会はすべてオンラインでの開催となったこともあり、十分に議論できたかどうかは不明ですが、現在、日本伝熱学会が抱えている問題点は整理しました。

大きな問題の一つは、学会の運営に対する特定の会員の負担が極めて大きくなっていることです。ホームページの運用ひとつとっても、十分なセキュリティ対策を行いながら、速やかに情報の更新を自前で行っていくことは大変なことです。伝熱シンポジウムをはじめとした様々な行事の開催にも実行委員会の方々に多大なご負担をお願いしなければなりません。これまで、日本伝熱学会は日本伝熱研究会から続いてきた様々な文化ややり方を引き継ぎできました。「手作り」での行事開催はその一つです。しかし、多くの方々が様々なことで忙殺されている現状を考えると、最早限界に来ていると思います。経費がかかり、その分参加費

などが高くなったとしても、可能な限りアウトソーシングすべきだと考えます。実は、昨年 9 月の蓄熱のシンポジウムにはその考え方を導入しました。様々な業務の役割分担を考えながら最も重要な行事である日本伝熱シンポジウムの運営も見直していく必要があると思います。

もう一つ重要な点は、公益社団法人としての学会の運営です。多くの会員の方はご存じないと思いますが、公益社団法人は各年度の一般会計を原則として赤字にしなければなりません。それを額面通り捉えれば、公益社団法人は持続可能でないこととなります。そこで、これまで、黒字が出た分を国際会議等の特別な行事を行うための期限付きの基金として積み立てるという方法で運営してきました。しかし、これも国際会議を企画する動機としては適当だとは言えません。この問題は歴代の執行部の方々が悩んでこられたことですが、3 月に行われた内閣府による立ち入り検査の際に良い情報を入手したので、今後の運営はこれまでより楽になるのではと期待しています。

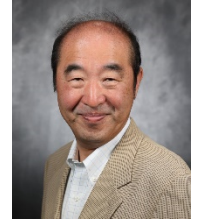
そのほかにも、学会の DX 化、国際活動の運営体制などいくつかの課題がありますが、それらはすべて平井新会長をはじめとする第 62 期の理事の方々に引継がせていただきました。大変申し訳ない気持ちでいっぱいですが、是非、一つずつクリアしていただきたいと思います。

以上は、運営上の話ですが、様々な対策を考えるに至っては、そもそも日本伝熱学会が何のためにあるのか、何故必要か、学会が発展するとはどういうことか、ということに立ち返って考える必要があると思います。最も重要なことは、本学会に関与されている方々が、カーボンニュートラルの達成など山積している世の中の課題の解決に貢献することだと思っています。是非、伝熱学会の外に目を向けて考えていただければと思います。皆様の今後のご活躍を心より願っております。

第 62 期会長就任にあたって

- 7/300 -

Inauguration Address as the 62nd President and 7/300



平井 秀一郎 (東京工業大学)

Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology)

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

第60回日本伝熱シンポジウムに行われました総会で第62期会長を拝命いたしました。会員の皆様、どうぞよろしくお願い申し上げます。

40年前、当時修士課程の学生で初めて伝熱シンポに参加したのも福岡でした。8年周期で全国をまわる伝熱シンポも5回まわったところです。この40年の間、伝熱の研究の手法と対象は、時代の要請などをうけて随分と変化しました。マクロな視点から理解するだけでなく、ナノ・ミクロの視点からも見ようということに変化し、今年の伝熱シンポは「ナノ・マイクロ伝熱」が6つのセッション、「分子動力学」が4つのセッションがあります。また、SGDsの中の環境とかCO₂とかの課題に対応して、「水素・燃料電池・二次電池」は初日から最終日までとおして10のセッションがあります。2001年には「燃料電池」というセッションが1つだけのときから見ると大きな変化です。伝熱の研究分野は、柔軟にかつ力強く対応してきている、学会員の弛まない対応力に驚く次第です。

ただし、この“変化”について、改めて考える時期が来ているのではないかと思います。今回の伝熱シンポジウムで、300件近い一般公演の中で、産業界の方だけで発表されているのは7件、7/300=2%しかありません。産業界と大学・研究所の共著が9%です。90%近くが大学・研究所だけの研究です。産業界の方は、いろんな現場に臨んでいる、その現場の中で、熱とか物質輸送が問題となり、今までの経験とか勘とかでない現象理解の上に立脚した、基礎をしっかり踏まえた解決が求められている。実際に役にたつ、新しい分野へと発展させる可能性がある研究テーマを、大学・研究所とは違った視点をお持ちの産業界の方と議論する機会が現状では少なく、増やす必要があると思います。「イノベーション」という言葉をよく耳にします。学者シュンペーターによるイノベーションとは、「新しい結合」「新しい捉え方」であり、異分野との協創が鍵となります。

藤岡前会長が2016年の会長就任の挨拶で、伝熱学会は企業の会員数の割合が日本機械学会とか化学工学会とかと比較して明らかに小さく、伝熱学においては産業界との相互連携なしに健全な発展は望めないと指摘されています[1]。大学・研究所の割合が極端に多いということは、伝熱という「村」の中での議論に終始してしまっている面があるのではないかと、「村」社会では、この先のさらなる展開が大きくなれない危惧があります。

伝熱という現象は、実際にはどのようなところでも生じています。逆の見方をすれば、伝熱の研究者は視点の違う方と話す機会が多いはずで、自分の専門と違う方と話して喧々諤々の議論に発展できれば、新しいものが生じる可能性があります。しかし、学会として異分野連携の促進として何をするのかは、以外に難しいと感じています。他学会との異分野連携セッションをつくっても、「実質的な議論」を生じさせるには難しい面があるように思います。「形」は求められていないのです。

伝熱シンポは、発表するのに、会員であることが必要となります。本来であれば、非会員の方が、まずは、一度、発表してみて、面白い議論ができた、ゆえに学会に入会しよう、という道があっても良いのではないのでしょうか。

本来は会長着任の挨拶を、もっと丁寧にすべきところです。会員各位から、異分野連携について、学会として、「こういうことをしてみたいか」でしょうか。」というメッセージを、私に直接でもいいし、支部をとおしてでも、いろいろと頂けるとありがたく存じます。何卒よろしくお願いいたします。

参考文献

- [1] 藤岡恵子, 第 55 期会長就任にあたって, 伝熱, 55-232 (2016) 1.

第 61 期（2022 年度）表彰選考委員会 報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2022

表彰選考委員会 委員長

小原 拓 (東北大学)

Taku OHARA (Tohoku University)

e-mail:ohara@ifs.tohoku.ac.jp

1. 日本伝熱学会賞

2022 年度（令和 4 年度）日本伝熱学会賞 学術賞，技術賞，奨励賞および貢献賞の選考結果についてご報告します。第 61 期は 2022 年 12 月 16 日応募・推薦締切として募集を行い，最終的に学術賞 5 件，技術賞 1 件，奨励賞 3 件の自薦・他薦の中から候補を決定しました。なお，貢献賞への応募・推薦はありませんでした。表彰選考委員会において厳正な審査を行った結果，学術賞 3 件，技術賞 1 件，奨励賞 2 件を受賞候補者として 2023 年 4 月の理事会に推薦し承認されました。各賞の受賞者は下記のとおりです。（順不同・敬称略）

授賞式は，福岡で開催された日本伝熱学会第 61 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：藤原 邦夫 (大阪大学)
共同研究者：芝原 正彦 (大阪大学)
「分子動力学による場の輸送量の開拓と固液界面熱輸送機構に関する研究」
第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，G314，2018.
第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，D323，2019.
第 57 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，A111，2020.
第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，J211，2021.
- 2) 代表研究者：巽 和也 (京都大学)
共同研究者：栗山 怜子 (京都大学)
中部 主敬 (京都大学)
「蛍光偏光法を用いた液体温度・粘度計測技術

の開発」

第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，H1434，2017.

第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，E134，2018.

第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，G321，2021.

第 59 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，B311，2022.

- 3) 代表研究者：矢吹 智英 (九州工業大学)
共同研究者：田中 孝典 (富士電機)
宮崎 康次 (九州大学)
「高速度赤外線カメラを用いた水の飽和プール沸騰における熱伝達機構の観察」
第 57 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，G112，2020.

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

- 1) 代表研究者：上久保 将大 (古河電気工業)
共同研究者：小坪 優一 (古河電気工業)
神藤 陽介 (古河電気工業)
佐々木 泰海 (古河電気工業)
「データセンタ向けヒートパイプの最大熱輸送量向上の技術」

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

- 1) 受賞者名：神田 雄貴 (東北大学)
「光干渉計を用いた超臨界二酸化炭素中の非定常熱輸送現象の解明」
第 59 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，B321，2022.

- 2) 受賞者名 : Patcharawat Charoen-amornkitt
(King Mongkut's University of Technology,
Thonburi)
「多孔質反応拡散系における数理最適化構造
に対するエントロピー生成と設計次元依存性
の解析」
第 59 回日本伝熱シンポジウム講演論文集,
A225, 2022.

1.4 貢献賞 (Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

該当なし

2. 名誉会員の顕彰

第 61 期では名誉会員として以下の 1 名の方(敬
称略)を上記付帯行事において顕彰しました。本
会の発展に大きな貢献をされました。

- 1) 中部 主敬 (京都大学)
第 45–47 期理事, 第 52–53 期理事, 第 56 期副
会長, IFHT2004 実行委員長.

3. 文部科学大臣表彰の推薦

令和 5 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰に
ついて、本会からは若手科学者賞 3 件, 科学技術
賞 (開発) 1 件を文部科学省に推薦いたしました
が, 残念ながら受賞には至りませんでした。

4. 謝辞

日本伝熱学会賞ならびに文部科学大臣表彰の選
考には、本会第 61 期表彰選考委員会委員の皆様
に多大なご協力を頂戴しました。また、会員の皆
様から推薦・応募をいただいたほか、特別推進研
究企画委員会の委員長 鹿園直毅先生、幹事 小宮
敦樹先生はじめ委員の皆様にご協力をいただき
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*



藤原 邦夫, 芝原 正彦 (大阪大学)
Kunio FUJIWARA, Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)
e-mail: k.fujiwara@mech.eng.osaka-u.ac.jp

この度、大変栄誉ある日本伝熱学会学術賞をいただきますことは、誠に光栄に存じます。選考にあられた皆様に心より感謝申し上げます。

今回受賞の対象となりました研究の題目は、「分子動力学による場の輸送量の開拓と固液界面熱輸送機構に関する研究」です。この研究は、藤原が社会人ドクターとして芝原研究室に在籍していた際に行っていた界面張力の局所分布に関する研究 (*J. Chem. Phys.*, 141, 034707, 2014 & 142, 094702, 2015) を深化・発展させ、固液界面の熱輸送機構に関して新しい観点から研究した内容となります。

通常の分子動力学解析では、個々の原子・分子が有する運動量やエネルギーをラグランジュ的に追従することに終始しますが、原子スケール空間内の局所体積で物理量の保存則を考えれば、微視的な輸送方程式に従いオイラー型の場の輸送量を算出することが可能です。この方法は古典分子動力学の範疇において、極限的に微小な局所で場の輸送量を算出することが可能です。本研究ではこのコンセプトに基づき、固液界面を通過する熱流束を極限的な空間分解能 ($<1\text{\AA}$) で空間分布として算出する解析技術を開発しました (*Appl. Phys. Lett.*, 114, 011601, 2019)。結果として、原子スケールの今まで意識しなかった印象的な熱輸送状態の描像が現れました。その後、原子スケール熱流束の空間的な構造に基づき固液界面熱輸送を制御する可能性を探る基礎的な研究を進め、原子構造が固液界面熱輸送機構に及ぼす影響を熱流構造に基づき明らかとしました (*Sci. Rep.*, 9, 13202, 2019)。

さらに研究を進め、基礎的な系ではありますが、固液界面における 3 次元的な熱流構造が明らかとなり、時空間平均された 1 次元的な熱流束値との定量的な差を示すことができました。しかし、特に熱流束の 3 次元構造算出は複雑なプログラムで計算誤差の評価にも神経を使い、また計算負荷も

大変高くなりました。そして、熱流構造とスペクトルとの対応を考えていくにつれ、極限的な局所で輸送量を得る学術的な意義も小さくなっていきました。ですが、巨視的な熱流体力学の支配方程式と通じるオイラー型の輸送方程式を原子スケールで使用する戦略は捨てられず、最終的に場の物理量の解釈をさらに微視的な観点に移行させる考えに至りました。

通常、原子スケールの局所体積で算出する輸送量は有意な値とみなされる時間平均値が使用されます。その時間平均中に局所体積に働く物理量を観測しますと、原子・分子の移動や相互作用により、時間平均値とは全く異なるオーダーの運動量やエネルギーが輸送されているのですが、ある基準で観測すればそれらが傾向をもって分布していることに気づきました。そして場の輸送量を瞬時的な物理量のレベルで整理し、原子・分子の運動と関連づければ新たな固液界面熱輸送機構の解釈が可能となりました。構築した理論は、単一の原子・分子の移動や相互作用に関連する物理量から成る空間における状態数を算出することを基礎とし、観測された状態数に所望の物理量をマッピングする一般的な方法論に関してです (*Phys. Rev. E*, 105, 034803, 2022)。時間平均された場の輸送量の解釈の自然な拡張だと考えておりますが、まだまだ発展の余地があります。さらに応用的な系における展開も踏まえて研究を続け、新しい観点から熱学の発展に寄与していきたい所存です。

最後になりましたが、藤原が学生時代にご指導頂きました杉本信正先生、吉永隆夫先生、また国内で特に分子動力学による研究を先駆的に行いこの分野で基礎を築かれた諸先輩方に心より感謝申し上げます。また、この研究は JST さきがけの支援を受け実施しました。総括の花村克悟先生をはじめ、ご関係の皆様にお礼申し上げます。

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*



巽 和也, 栗山 怜子, 中部 主敬 (京都大学)
Kazuya TATSUMI, Reiko KURIYAMA, Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University)
e-mail: tatsumi@me.kyoto-u.ac.jp

このたび、2022 年度 (第 61 期) 日本伝熱学会賞・学術賞をいただきまして誠に光栄に存じます。表彰選考委員会の皆様と推薦いただいた方々に感謝申し上げます。学生のときから伝熱シンポジウムに毎年参加し、発表してきた私 (巽) としては、名誉に思うとともに、大変嬉しく思います。

本計測手法は科学研究費補助金・若手研究(B) (2006-2007 年度) の研究助成を受けてはじめたものです。はじめて成果を発表したのも日本機械学会熱工学コンファレンス 2009, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, そして AJTEC2011 年でした。蛍光強度測定に基づく流体温度計測 (レーザー誘起蛍光法:LIF) を用いてマイクロ流路内の温度分布を測定するなかで、蛍光強度に依存せず、蛍光分子の運動に基づく計測手法はないか、と研究をはじめました。以降、測定精度を増大するために光学系と蛍光分子プローブの改良を少しずつ進めてきました。

蛍光偏光を利用した温度以外の状態量・物性に関する計測技術は古くから存在します。蛍光偏光の理論式は F. Perrin によって提唱されました。蛍光分子の蛍光偏光の度合いは液体で蛍光分子の回転ブラウン運動により緩和し、その値は蛍光分子の体積、流体の粘度、温度、蛍光寿命の影響を受けます。この特性を活かして、化学・生物学・医学の分野等にて、分子量の変化による蛍光偏光の変化を測定することで分子結合の検知等に用いられています。

本研究ではこれを液体温度計測に適用しました。液体の粘度も温度依存性を示すため、それを含めた液体温度変化による蛍光偏光の変化を測定することになります。研究ではマイクロ流路での流体の 2 次元温度計測が可能であることを示し、pH による消光、退色、励起光強度のばらつきの影響を大幅に低減できることを実証しました。

受賞者の一人 (栗山) は、本手法にてエバネッセント場を励起光とすることで壁面近傍数十 nm の領

域での液体温度計測を実現しています。さらに本手法を用いた定温の条件におけるマイクロ流路での 2 次元流体粘度計測の有効性も示しました。

本手法は蛍光強度変化の影響を低減できるため、センサと試料間の動作距離の範囲も広がります。これを活かして、ヘルスケア用の塗布型ジェルセンサに本手法を実装しました。これに、別途共同開発している多焦点複眼レンズと組み合わせることで動作距離の範囲が大きいセンサを構築しています。

本手法は蛍光強度の変化に強いという利点がありますが、蛍光の偏光成分を抽出するため、測定できる光の強度は低下し、受光素子には一定の感度が求められます。また計測系の製作と合わせて、適切な蛍光分子プローブの選定も重要であり、これに時間を要しました。偏光度が大きく、温度に対する感度も最大となる分子構造と蛍光寿命に基づいて蛍光分子を検討しました。一つの解として高分子に標識した蛍光分子を用い、結合による回転運動の緩和を利用して水での温度測定精度向上を実現しました。現在は、Ag ナノ粒子に蛍光分子を結合し、局在表面プラズモン共鳴による蛍光増強効果を利用したナノ粒子プローブの開発も進めています。

最後に、ともに実験と開発を進めてくれた学生らに、この場を借りて感謝の意を表します。

- [1] 鈴木淳史, 巽和也, 堀井悟史, 栗山怜子, 中部主敬, 蛍光偏光測定によるマイクロ流路内液体温度計測, 日本機械学会論文集 B 編, **83-853** (2017), 17-200.
- [2] Tatsumi, K. et al., Liquid temperature measurement method in microchannels by using fluorescence polarization, *Heat Mass Trans.*, **54** (2018), 2607.
- [3] Kuriyama, R. et al., Two-dimensional fluid viscosity measurement in microchannel flow using fluorescence polarization imaging, *Meas. Sci. Technol.*, **32** (2021) 095402.

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*



矢吹 智英 (九州工業大学), 田中 孝典 (富士電機), 宮崎 康次 (九州大学)
*Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology), Takanori TANAKA (Fuji Electric Co., Ltd.),
 Koji MIYAZAKI (Kyushu University)*
e-mail: yabuki.tomohide556@mail.kyutech.jp

この度は日本伝熱学会学術賞をいただき、大変
 光栄に存じます。ご推薦、ご選考くださいました
 皆様ならびに関係者の方々に感謝いたします。学
 生時代より、様々なことを学ばせていただいた伝
 熱学会より、研究を褒めていただけたことを大変
 嬉しく思っております。

研究課題名は「高速度赤外線カメラを用いた水
 の飽和プール沸騰における熱伝達機構の観察」で、
 高速度赤外線カメラを用いた沸騰時の伝熱面温度
 分布・熱流束分布の可視化を通じて、最も基本的
 な沸騰条件である大気圧の水の飽和プール沸騰に
 おける熱伝達メカニズムを調べました。

沸騰は他の伝熱形態と比較して高い熱伝達率を
 持つことはよく知られた事実です。しかしながら、
 なぜ沸騰は高い熱伝達率を持つのか?という問い
 に対して明快に答えるのは難しく、沸騰熱伝達メ
 カニズムには今でも不明な点が残されています。
 沸騰の描像をより正確に理解することは、学術的
 に興味深いだけでなく、信頼性の高い沸騰冷却技
 術や数値計算による熱伝達予測技術を開発するう
 えでも重要と考えられます。

熱伝達メカニズムを観察するには、高速度赤
 外線カメラを利用しました。ダルムシュタット工
 科大学、P. Stephan 先生のフッ素系冷媒の沸騰や液
 滴蒸発の詳細な観察を通じた一連の研究により、
 高速度赤外線カメラの沸騰・蒸発研究への有用性
 が広く認知されました。赤外線カメラ技術の進歩
 は目覚ましく、1cm 角以上の領域の温度分布を、
 100 μ m 以下の空間分解能、1000fps 以上の速度で
 撮影できるようになっています。また、カメラに
 内蔵の冷凍機でセンサを冷却しており、極めて良
 好な SN 比が実現されています。本研究は、計測
 技術に依るところが大きく、高速度赤外線カメラ
 技術がなくては、研究目的の達成は無かったと言
 えます。

研究では、どの伝熱素過程（気泡底部のミクロ
 液膜の蒸発か気泡運動が誘起する対流熱伝達）が
 壁面熱伝達に重要な役割を担っているのか調べる
 ことを一つの重要な目的に設定しました。結果と
 しては、対流熱伝達が大半の熱を輸送しているこ
 とがわかりました。一方で、ミクロ液膜の蒸発は
 極めて高い熱流束・熱伝達率を示すものの、伝熱
 面全体に対する面積占有率が小さく、それが要因
 になって全熱輸送への寄与が 25%以下と限定的で
 あることが示されました。

相変化現象なのに対流熱伝達が支配的なのはな
 ぜ?という疑問が生じます。我々が調べたのは、
 伝熱面表面（固液界面）における熱伝達の割合で
 あり、対流によって壁面から流体側に輸送された
 熱が、その後どういった熱輸送経路を辿って遠方
 へ輸送されるかは、高速度赤外線カメラ技術だけ
 では残念ながら調べられません。気液が複雑に入り
 組んだ壁面直上の空間における熱と流体の流れ
 を実験的に観察するのはほぼ不可能に近いので、
 現在は、数値計算を利用して熱流動場を詳細に観
 察することで、沸騰において対流が高い熱伝達率
 を実現しているメカニズムを調べています。

本研究は、JST さきがけの熱制御領域において
 2017年からの約4年間のプロジェクト内で実施い
 ました。研究方針がなかなか定まらず、成果
 にも結び付かない中で、いろいろと試行錯誤しな
 がら右往左往していた苦い経験は、結果的には自
 らの成長につながって良い思い出になっておりま
 す。素晴らしい機会を与えてくださり、また、厳
 しくご指導いただいた研究総括の花村先生に感謝
 申し上げます。

最後になりますが、伝熱研究の進展に寄与すべ
 く精進いたしますので、今後ともご指導ご鞭撻の
 ほどよろしく願いいたします。

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



上久保 将大, 小坪 優一, 神藤 陽介, 佐々木 泰海 (古河電工(株))
Masahiro UEKUBO, Yuichi KOTSUBO, Yosuke SHINDO, Yasumi SASAKI (Furukawa Electric Ltd.)

このたび日本伝熱学会第 61 期総会におきまして、技術賞の栄誉をいただき、心より光栄に存じます。表彰選考委員会をはじめ関係者のみなさまに心よりお礼申し上げます。

今回は、「データセンタ向けヒートパイプの最大熱輸送量向上の技術」に関する内容をご評価いただきました。2020 年に徳島県で開催された第 58 回日本伝熱シンポジウムでの口頭発表、およびそれに関連した文献、特許が該当します。以下、開発内容について紹介します。

本技術を使用した製品の外観を図 1 に示します。データセンタで使用されるサーバ内の半導体の冷却に図 1 のようなヒートパイプヒートシンクが使用されております。近年、半導体の高速化、高性能化に伴う発熱密度の増加に対して従来のヒートパイプでは熱輸送性能が限界を迎え始め、今後の技術トレンドとしても半導体の発熱量の増加は継続する見込みでありました。一方でデータセンタはスペースの都合から、使用するヒートパイプの本数を増加させることが困難な状況でした。このような背景から、ヒートパイプ 1 本あたりの輸送できる熱量（最大熱輸送量）を向上させる技術が必要となりました。

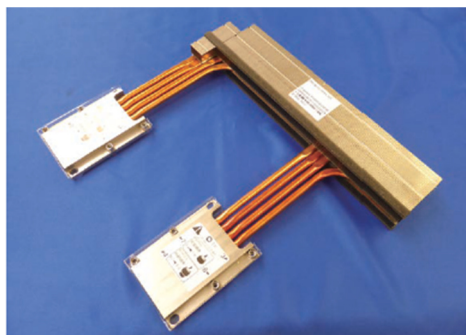


図 1 データセンタ向けヒートパイプヒートシンクの外観

最大熱輸送量を大幅に向上させたデータセンタ

向けヒートパイプの構造を図 2 に示します。蒸発部は銅粉の焼結体、断熱部は銅短繊維の焼結体、凝縮部はグループ（溝）で構成されます。

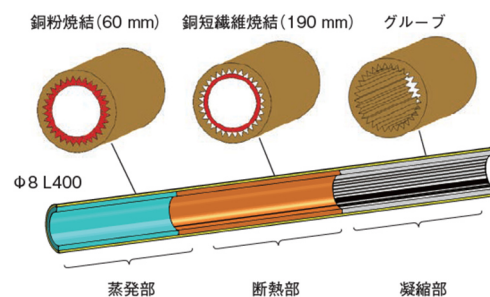


図 2 データセンタ向けヒートパイプの構造

ヒートパイプ内部では、図 3 のように蒸発部で蒸発した蒸気が凝縮部に向かう蒸気の流れと、凝縮部で凝縮された液が蒸発部に向かう流れが対向しております。そこで断熱部に銅短繊維の焼結体を設置することによって気液分離を促進し、従来のヒートパイプと比較して最大熱輸送量 2 倍を実現しました。

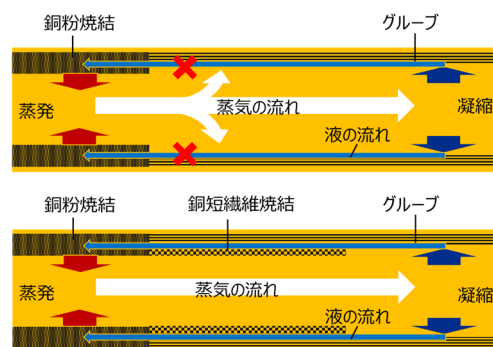


図 3 ヒートパイプ内部の液、蒸気の流れ

最後になりましたが、本技術の開発にご協力いただいた社内外の関係者の皆様に、あらためて深く感謝申し上げます。今後もヒートパイプヒートシンクの性能の向上を通して、電子機器の発展に貢献して参ります。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

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

神田 雄貴 (東北大学)

Yuki KANDA (Tohoku University)

e-mail: y.kanda@tohoku.ac.jp

この度は、日本伝熱学会第 61 期総会におきまして、栄誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。ご指導をいただきました先生方、ご選考をいただきました先生方、および学会事務局の皆様にご心より御礼申し上げます。

私事ではございますが、私をはじめ日本伝熱シンポジウムで発表しましたのが、博士課程前期一年生のとき、今から 8 年前の第 52 回日本伝熱シンポジウム（福岡国際会議場）でございました。研究者・教員の立場となり、同じ福岡の地（会場も同じ福岡国際会議場）で奨励賞をいただきましたこと、ご縁を感じますとともに大変感慨深いものがございました。

受賞対象となりました「光干渉計を用いた超臨界二酸化炭素中の非定常熱輸送現象の解明」は私が 2020 年 4 月に東北大学流体科学研究所 助教着任直後にはじめた研究であり、東北大学流体科学研究所 小宮敦樹教授のご指導のもと、取り組んできた研究であります。また本研究は中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) 陳林教授との国際共同研究として進めてまいりました。

超臨界流体は、気体と液体の間接的な輸送特性をもつ流体であり、液体に比べて低粘性、高拡散性を有します。また圧縮率が大きいこと、臨界点近傍では密度に依存する溶解度などの物性が温度や圧力の微小変化で大きく変化します。このような特性から、超臨界流体は物質の抽出や分離に応用できます。とくに超臨界流体として最も用いられる水や二酸化炭素は、毒性や燃焼性がないため、有機溶媒に代わる低環境負荷な新たな分離・反応溶媒として注目を集めています。

本研究では、このような超臨界流体の特異な特性を応用することで、汚染土壌から汚染物質を分離する新しい土壌改質・浄化技術の確立を目指しています。しかしながら、超臨界流体中での物質

の溶解現象や熱物質輸送現象は未だ明らかでなく、輸送現象の実験的評価や数値シミュレーションが必要不可欠となります。

そこで、まず超臨界二酸化炭素中の熱輸送現象に着目し、独自に構築した超臨界二酸化炭素発生装置や温度制御観察セル、およびこれまでの研究にて構築してきました高速位相シフト干渉計を適用することで、超臨界条件下における熱輸送現象を実験的に評価する研究に取り組んできました。本研究では、はじめに臨界点近傍、Liquid-like、および Gas-like な状態における超臨界二酸化炭素中の温度場を、実験的に可視化することに挑みました。可視化の結果、観察セル内部に存在する微小な温度変化による密度変化を干渉縞変化として計測し、臨界点近傍、Liquid-like、および Gas-like な状態において異なる干渉縞（密度）分布を観測しました。さらに Gas-like (7.5 MPa, 320.5 K) の条件において、観察セル壁面に任意の温度差を与え、超臨界流体中の非定常熱輸送現象を可視化しました。本研究では、熱拡散率 $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ の条件における超臨界二酸化炭素中での非定常熱輸送現象の計測に成功しました。ここまでの研究では、超臨界二酸化炭素中における熱輸送現象にアプローチしてきましたが、物質輸送現象についても研究を進めており、これまでの研究で得た熱輸送に関する知見を統合して、超臨界流体中での物質の溶解現象、熱物質輸送現象の解明に挑みます。

最後になりましたが、2020 年 4 月から東北大学流体科学研究所の助教に着任いたしました。超臨界流体の研究に加え、伝熱工学の観点から CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) や脱塩・淡水化技術に関わる研究にも取り組んでおります。微力ながら伝熱分野の研究発展に貢献できるよう精進いたします。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。

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*



チャロンアモーンキット パットチャラワット (キングモンクット工科大学トンブリー校)
Patcharawat CHAROEN-AMORNKITT (King Mongkut's University of Technology Thonburi)
e-mail: patcharawat.cha@kmutt.ac.th

On behalf of our research group comprising Prof. Shohji Tsushima, Assoc. Prof. Takahiro Suzuki, and Mehrzad Alizadeh, we would like to express our deepest appreciation to the Heat Transfer Society of Japan and the selection committee for recognizing the scientific merit of our research and awarding us the Young Researcher Award. This prestigious honor serves as a testament to the collective efforts, perseverance, and dedication exhibited by our team throughout this research endeavor. We are truly humbled and honored to receive such recognition among a distinguished group of researchers and scholars.

Our research, entitled "Entropy generation analysis on topologically optimized porous structure in reaction-diffusion systems under various design dimensionalities" started in 2020 subsequent to the completion of my doctoral studies at Osaka University. Our project initiated from a fundamental question: how can we identify the porous structure that yields the utmost achievable performance for electrochemical energy devices? Prior investigations in this field often relied on trial and error approaches or size and shape optimization to discover improved structures for electrochemical energy device applications. In this context, we introduced topology optimization to search for the optimal structure of electrode of electrochemical energy devices. Notably, our research group is among the pioneering groups to employ topology optimization for such purposes. However, it is crucial to address the numerical nature of the obtained solutions, as their derivation is dependent on the chosen objective function, algorithm, and tuning parameters. To mitigate this ambiguity, it is imperative to substantiate the solutions with a

well-established theoretical approach.

In our research, we sought to establish a theoretical foundation supporting the optimized structure by hypothesizing that the optimized electrodes would correspond to a system with minimal entropy generation. Entropy generation analysis, a theoretical approach commonly employed in evaluating the performance of thermal systems, served as our guiding principle. Nevertheless, assessing and investigating entropy generation in the porous media of electrochemical devices presented a complex challenge, given the nonequilibrium nature of the system and the presence of chemical reactions. To overcome these challenges, we turned to the realm of nonequilibrium thermodynamics, a theoretical framework that enables the assessment of local entropy generation rates in systems not in global equilibrium.

We integrated the concept of entropy generation analysis based on nonequilibrium thermodynamics into our investigation of the system throughout the topology optimization process. This significant work was initially presented at the prestigious Japan Heat Transfer Symposium in both 2021 and 2022, and subsequently published in the International Journal of Heat and Mass Transfer (Charoen-amornkitt et al., Int. J. Heat Mass Transf., 202, 2023). Building upon these foundations, we further extended our research to encompass more intricate systems, as evidenced by our publications in Chemical Engineering Science (Alizadeh et al., Chem. Eng. Sci., 275, 2023) and the proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference (Alizadeh et al., Proc. IHTC17, 2023). Moreover, we explored the utilization of topology optimization techniques to optimize the porous

structure of polymer electrolyte membrane water electrolyzers, with findings published in ECS Transactions (Charoen-amornkitt et al., ECS Transactions, 111, 2023).

We firmly believe that the contributions made through this study have the potential to unveil groundbreaking electrode structures that have remained undiscovered thus far. Our aim is to establish a comprehensive theoretical framework that will empower future researchers to understand the theoretical limits and design electrodes capable of achieving the highest attainable performance without using the optimization process.

Finally, we wish to express our heartfelt gratitude to

the Japan Society for the Promotion of Science for their invaluable financial support through the Grant-in-Aid for JSPS Fellows (Grant Number 22J20603) and JSPS KAKENHI Grant (Grant Number 21H04540). Additionally, we would like to acknowledge the support received from the Office of the Permanent Secretary, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation (OPS MHESI), Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and King Mongkut's University of Technology Thonburi, under the grant number RGNS 65-084. Their support has been instrumental in enabling the successful execution of this study.

第 60 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 60th National Heat Transfer Symposium of Japan

高橋 厚史, 手嶋 秀彰, 宮崎 康次, 藏田 耕作, 伊藤 衡平,
迫田 直也, 吉田 敬介, 森 昌司, 河野 正道 (九州大学),
桃木 悟, 山口 朝彦 (長崎大学), 鹿園 直毅 (東京大学),
小宮 敦樹 (東北大学), 西 剛伺 (足利大学), 大久保 英敏 (玉川大学)
Koji TAKAHASHI, Hideaki TESHIMA, Koji MIYAZAKI, Kosaku KURATA, Kohei ITO,
Naoya SAKODA, Keisuke YOSHIDA, Shoji MORI, Masamichi KOHNO (Kyushu University),
Satoru MOMOKI, Tomohiko YAMAGUCHI (Nagasaki University),
Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo),
Atsuki KOMIYA (Tohoku University), Koji NISHI (Ashikaga University),
Hidetoshi OHKUBO (Tamagawa University)

1. シンポジウム概要

第 60 回日本伝熱シンポジウムは, 5 月 25 日 (木) から 27 日 (土) の日程で, 福岡国際会議場において第 56 回以来 4 年ぶりの完全対面方式で開催されました. 参加登録者数は 738 名 (ご招待者 47 名を含む), 講演数は特別講演 1 件を含んで 350 件となりました. ハイブリッド開催であった前回の第 59 回 [参加登録者数: 703 名, 講演数: 335 件] をやや上回り, 対面開催した 4 年前の徳島市での第 56 回 [参加登録者数: 768 名, 講演数: 370 件] に近い実績でした. 今年のシンポジウムでは例年通りの一般セッション, 優秀プレゼンテーション賞セッションに加えて, 新たな試みとしてオーガナイズドセッションにおいて基調講演を設定し, 合計 9 件のご講演を頂きました. また, 並行して特定推進研究特別ワークショップおよび産学連携イベントが行われました. 2 日目午後の特別講演・総会の後はホテル日航福岡において意見交換会を開催し, 総勢 253 名の方々にご参加いただきました. この人数は第 59 回の 213 名を上回っており, 第 56 回の 335 名に比べれば少ないものの, 新型コロナウイルスがある程度収束し 5 類感染症に移行したことを受けて, 少しずつ参加人数が戻りつつあるのではと推察されます.

以上, 本シンポジウムの概要について簡単にまとめました. シンポジウムの運営状況や各行事の様子につきましては, 各担当者による以下の記事をご覧ください.

(高橋 厚史, 手嶋 秀彰)



図 1 福岡国際会議場の外観

2. シンポジウムホームページと講演申込みと参加登録の管理

2.1 シンポジウムホームページ

伝熱シンポジウムの HP の型式は毎年ほぼ同じですが, 色合いとバナー画像は年度毎に更新されています. 10 年前ぐらいまで発行されていた冊子体の講演論文集のイメージです. 今回もその様式を踏襲しました. 昨年の岐阜シンポジウムの HP を雛形にして, 色合いについては 8 年前の福岡シンポジウムと同じワインカラーを基調としました. バナー画像は, 福岡らしい画像という事で, 福岡市提供の屋台の画像をベースに作成しました. 色合いの調整をおこなう css ファイルの調整は面倒な作業なのですが, その部分は 8 年前のものを使用しましたので, 今回の HP の管理については殆

ど手間をかける必要がなく、情報の更新のみに注力できました。

2.2 講演申込みと論文集の管理

講演の申込みから予稿集の受けと講演会プログラムの作成および予稿集の作成まで、伝熱学会が所有する独自の WEB システムを利用しました。今回のシンポジウムでは、シンポ実行委員としてだけでなく、このシステムの管理を担当する委員としても運営に参加していました。ここでは、この両方の立場から本シンポジウムにおける講演情報の管理について報告します。

使用した WEB システムの最初の版は、2014 年に京都で開催された第 15 回国際伝熱会議 (IHTC15) の時の収益を利用して作成されたものです。当初よりこのシステムは講演の情報をブラウザで管理する機能に加えて WEB 版の講演予稿集を作成する機能が実装されていました。それまではプログラム編集作業とは別に CD-ROM イメージを作成する作業が必要でしたが、このシステムを使うと、プログラム編成作業 (講演ブロック (A11, B22 等) や講演の順番の決定) を行うとその結果を踏まえた WEB 版の講演予稿集を出力しますので、実行委員としては CD-ROM のイメージを作成する手間がかなり低減されました。ただし問題点も残っていて、これまでに「プログラムの編成作業が直感的でなく面倒である」、「WEB だけで全ての作業ができなくてソースファイルを修正してアップロードしないと正常に動作しないバグが残っている」等の問題が報告されていました。

このシステムが稼動してから今回で 8 年が経過しています。この間には、ソースコードレベルで修正が必要となる事も多々ありました。今回は、これまで入力不要としていた共著者のメールアドレスを必須入力事項として新たに加える作業を行いました。自前のシステムを維持管理するのは大変なのですが、このような要求にも比較的簡単に対応できる利点があります。ただし、このような修正を重ねてきたため、一部の機能が正常に動作しない不具合も散見されるようになっていますが、今回のシンポジウムにおける講演申込み～プログラムの編成～WEB 版の講演予稿集の作成に至る一連の作業は、比較的スムーズにできたと思います。九州支部のシンポジウム実行委員会がこのシ

ステムを操作するのは 2 回目でしたので、使用経験を有する委員の存在が大きかったと思います。しかしながら、次の 8 年間も使い続けるのであれば、大規模な改修も必須であるようにも感じました。今年度は学会運営の DX 化も進めて行くようなので、歩調を合わせてシステムの改修も進めていければと思います。

2.3 参加者登録申込みの管理

前述の学会所有の WEB システムは、シンポジウムへの参加登録受けと決済をする機能も実装されていて、昨年まではこのシステムを利用して参加申込みを受付けていました。8 年前、最初にシステムが使用された伝熱シンポジウムではクレジットカード決済機能はありませんでしたが、このシステムは国際会議の開催にも使用する事を想定していたので、それから直ぐに実装に取り組みました。伝熱学会にオンライン決済代行業者の PAY.JP と契約してもらい、2017 年の第 54 回日本伝熱シンポジウム大宮からはクレジットカード決済が可能となりました。業者の選定と決済会社との契約は簡単ではなく、学会事務局には大変ご苦勞いただきました。苦勞して構築したシステムではありますが、次に述べる理由により今回からは外部のイベント管理会社を利用する事になりました。最大の理由は、WEB コマースが今では広く普及した事に伴いサイバー犯罪も増加したために、自前でクレジットカード決済を管理するリスクとコストが割に合わなくなってきた事です。次に、主に消費税の取り扱いの観点から会員資格の厳格な管理やチケット種別が細分化されたために、きめ細かな対応が必要なのですが、このシステムでは対応が困難で、結果として使いづらいシステムになっていた事があります。加えて、クレジットカード決済を代行してもらっている PAY.JP のサービスがいつまで利用できるのだろうかとの不安もありました。一般的に、決済業者と新しく契約するのは簡単ではなくて、さらに WEB プログラムの大掛かりな変更も必要となります。一方、最近ではリーズナブルな価格で利用できるイベント管理会社も増えてきましたので、そちらへシフトする事を決めました。

今回のシンポジウムでは、WEB ベースのイベント管理&グループ運営サービス Peatix を使用しま

した。最近、いろいろなイベントで使われるようになってきたシステムで、コストがチケット価格の(4.9%+99円)/1枚で、他のサービスよりも安かった事、独自フォームの作成等が比較的簡単だった事が選定した理由です。なお、これまで利用していたPAY.JPによる決済の手数料は3.3~3.6%ですので2~3%程度の負担増となりました。なお、オプションで請求書払いにも対応できるのですが、手数料が(5.39%+1100円)/1枚と高かったので採用せず個別に対応しました。Confitと春恒社の決済サービスについても比較検討しました。前者は伝熱シンポジウムで使用するには少しコストが高いと判断して早々に断念しました。後者については、使用料はPeatixよりもやや高い程度に収まっており、コーディングについては業者側で作業してもらえる利点がありました。ただ、Peatixで必要となるコーディング作業は、それほど難しくなかったもので、自分で作業できた方が調整や追加等の作業が行い易くて良いと判断して、Peatixの使用を決定しました。なお、Peatixは昨年の熱工学コンファレンスで使用されていたため、戸惑う参加者は少ないだろうと判断した事や、実際に運営側で使用した方々による評判が良好だった事も考慮しました。

Peatixでイベントを管理するには、まず管理者用のPeatixアカウントを開設し、イベントの期間と場所の登録、案内ページの作成、チケットの設定、参加者に入力してもらうフォームの作成が必要でした。全てWEBブラウザで作業するのですが、いずれも簡単にできました。発行するチケットの種別は複雑で、一般と学生のそれぞれに対して伝熱学会員、協賛学会員、非会員の3種類の区分があり、さらにそれぞれ早期申込みと通常申込みがあるので講演参加チケットだけで12種類設定する必要がありました。いずれも金額や取扱期間の設定等、慎重な作業が要求されるため、チケットの設定は少し大変でした。会員番号や参加証に記載するための名前と所属、早期申し込み者へ参加者キットを送付するための住所、等を入力させるためのフォームを作成する必要がありましたが、入力作業そのものは簡単でした。ただ、どのような情報を入力させるかを定めるための検討には気を使いました。

Peatixには、QRコードを利用したイベント参加

管理機能(支払い状況の確認機能)があるのですが、会場系の判断でその機能は使いませんでした。参加証は、早期登録された方には郵送し、前日までに登録された方には、受付横に用意したテーブルに並べておいて各自で受け取って頂きました。当日参加登録される方には、会場に表示しておいた参加登録ページのURLを示すQRコードを使って各自のスマートホンで手続きしてもらいました。その後に受付にて、担当の係がPCで支払状況を確認して参加者キットを渡すようにしました。できるだけ前日までに参加登録して頂くよう前もってお願いしていたので、当日の受付が渋滞する事は殆どなかったようです。皆様のご協力に感謝します。

Peatixではフォームを作成する事で参加者に関する追加情報を収集できるのですが、その管理はブラウザではできず、CSV形式のファイルをダウンロードしてエクセル等で管理する仕様になっています。Peatixが提供しているものとは別に実行委員会が発行する請求書と領収書の依頼がありました。件数が多い場合はマイクロソフトワードの差し込み印刷で対応する事を考えていましたが、さほど件数が多くなかったため、これについては実行委員会事務局の方で個別に対応して頂きました。

このシンポジウムの参加費の消費税の取り扱いについてですが、伝熱学会の総会も併設している事もあり、会員については非課税扱いとなりました。そのため、実行委員会には厳密な会員資格の確認が求められましたので、伝熱学会より会員名簿を取り寄せて、チェックしました。対象者全員について手動でチェックするのは大変ですので、Peatixからダウンロードしたファイルと取り寄せた名簿の会員番号と名前を照合するPythonスクリプトを作成して確認しました。一般会員の方はこのスクリプトで概ね一致する事が確認できました。一部、会員番号を正しく入力されていない方がいましたので、その場合、手動での名前の確認が必要でした。お願いなのですが、来年も同様の作業が必要となりますので会員資格の確認と正しい会員番号の入力をお願いします。名前のみで自動判定するのは表記の揺らぎの問題もあって難しいのです。学生会員の方は、新規入会者が大半ですので申込み時点では会員番号がわからない学生

が殆どで、70 名ほど手動でチェックする必要がありました。来年も必要となる作業ですので、学会の入会と会員番号の管理については早急に DX 化して参加登録時に新規入会した学生が会員番号を入力できるようにして頂きたいと感じた次第です。

(桃木 悟, 山口 朝彦)

3. プログラム

本シンポジウムには、特別講演、基調講演を含むオーガナイズドセッション、一般セッション、優秀プレゼンテーション賞セッションならびに特定推進研究特別ワークショップを合わせて 350 件のご発表を戴きました (表 1 にその内訳を示します)。コロナ禍が明けて、昨年より発表件数増となり感謝申し上げます。例年通り、講演室として 10 室を使用してプログラムを編成しましたが、GS 沸騰・凝縮、OS 水素・燃料電池・二次電池への発表申し込みが多く、最終日も時刻までセッションを設けることになりました。他、沸騰・凝縮と関係の深い OS 液滴・濡れ現象の制御と理解、OS ナノ・マイクロ伝熱にも多くの発表申し込みがあり、広めの会場を準備致しました。

プログラム編成では、先ず、総会、特別講演会、優秀プレゼンテーション賞セッションと特定推進研究特別ワークショップの開催時間を確保し、続いて一般セッション及び各オーガナイズドセッションのお申し込み数から、3 日間のセッションを設定しました。どのセッションにおいても 1 研究室だけのセッションとならないよう編成した結果、テーマをまとめることができないセッションもあり、総合討論において座長の先生にご苦労をおかけしたことをお詫びします。オーガナイズドセッションのプログラム編成と座長については、オーガナイザーの皆様にご依頼をいたしました。優秀プレゼンテーション賞セッションと特定推進研究特別ワークショップのプログラムについては、それぞれ学生会委員会と特定推進企画委員会に編成をお願いしました。ご尽力をいただきましたオーガナイザーの皆様ならびに各委員会の皆様にご感謝申し上げます。皆様のご協力の下、プログラムを編成することができました。厚くお礼申し上げます。

(宮崎 康次)

4. 講演論文集・プログラム冊子

本シンポジウムの講演論文集は基本的に電子版のみとし、シンポジウム 2 週間前の 5 月 11 日から公開しました。会員向けには会誌「伝熱」4 月号を通じて、参加者には登録されたメールを通じて閲覧のための ID とパスワードをお知らせし、サイトは一定期間を経て閉鎖致しました。プログラム冊子は例年と同様に紙媒体を作成し、タイムテーブル、プログラム、著者索引、企業広告、会場案内図を掲載しました。作成にあたり、プログラム編成およびシステム管理を担われた先生方には多くのご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

(宮崎 康次, 藏田 耕作, 手嶋 秀彰)

表 1 各セッションにおける講演数

(括弧内の数字は招待講演数)

(a) 特別企画セッション

特定推進研究特別ワークショップ (Workshop on HTSJ Promoted Research)	7 (7)
九州地区企業による部品開発・技術開発の紹介 (Introduction of Component and Technology Development by Companies in Kyushu Area)	4 (4)
特別講演 (Invited special lecture)	1 (1)

(b) オーガナイズドセッション

液滴・濡れ現象の制御と理解 (Understanding and control of droplet/wetting phenomena)	24 (2)
乱流を伴う伝熱研究の進展 (Progress of research on heat transfer with turbulence)	11 (1)
ふく射輸送とふく射性質 (Radiation transport and radiative properties)	7 (1)
燃焼伝熱研究の最前線 (Frontier of combustion heat transfer research)	18 (1)
水素・燃料電池・二次電池 (Hydrogen, Fuel cell, Secondary battery)	37 (2)
熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 (Promotion of heat and mass transport for thermal energy materials and systems)	12 (1)
化学プロセスにおける熱工学 (Thermal engineering in chemical process)	8 (1)
公開セッション「人と熱との関わりの足跡 (その 6)」 (The footprints of the relationship between humans and heat (Part 6))	3 (3)
優秀プレゼンテーション賞セッション (Best Presentation Award Session)	49

(c) 一般セッション

バイオ伝熱 (Bio Heat Transfer)	4
沸騰・凝縮 (Boiling and condensation)	29
電子機器の冷却 (Cooling of electronic equipment)	14
強制対流 (Forced convection)	8
ヒートパイプ (Heat pipe)	11
多孔体内の伝熱 (Heat transfer in the porous media)	8
物質移動 (Mass transfer)	3
計測技術 (Measurement technology)	13
融解・凝固 (Melting and solidification)	11
分子動力学 (Molecular dynamics)	17
混相流 (Multiphase flow)	5
自然対流 (Natural convection)	4
自然エネルギー (Natural energy)	3
空調・熱機器 (Air conditioning and Thermal equipment)	9
熱物性 (Thermophysical properties)	4
ナノ・マイクロ伝熱 (Nano and micro heat transfer)	26

5. 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。以下にご協力頂いた企業をご紹介します（敬称略）。

【機器展示】

- ・サイエンスエッジ株式会社
- ・株式会社テクトロニクス&フルーク
- ・英和株式会社
- ・日本カノマックス株式会社
- ・株式会社日工テクノ
- ・株式会社サーモグラフィティクス
- ・ニイガタ株式会社
- ・株式会社フォトロン

【カタログ展示】

- ・株式会社ベテル
- ・九州計測器株式会社

【広告】

- ・サイエンスエッジ株式会社
- ・株式会社ファンクショナル・フルイッド
- ・三浦工業株式会社

- ・英和株式会社
- ・株式会社日工テクノ
- ・華為技術日本株式会社

完全に対面実施となった今回、ウォーターサーバーを設置した休憩スペースに隣接した会場 5F の広間を機器展示スペースとしました。A-C 講演室を出るとすぐ企業展示にアクセスできるようになっており、多くの参加者にお立ち寄り頂きました。また、昨年同様、セッション間に企業広告のライドショーを実施しました。ご協力頂いた企業の皆様に厚く御礼申し上げます。

(伊藤 衡平, 迫田 直也)

6. 日本伝熱学会特定推進研究
特別ワークショップ

本学会は 2012 年（平成 24 年）に特定推進研究企画委員会を設置し、本学会の分野を大局的な学術の振興の中に位置付け、より学際的な研究アクティビティを確保しながら、社会の期待に応えるための社会的・科学技術的課題、あるいは我が国の今後の成長分野に特化した個別先鋭的な研究課題を客観的な根拠に基づいて設定し、活動を進めてきております。これを受けて、毎年の伝熱シンポジウムにおいて初日の午後に特定推進研究特別ワークショップを開催しております。2022 年度（令和 4 年度）は、シンポジウムが岐阜にてハイブリッドで開催され、本ワークショップもハイブリッド開催を踏まえた構成といたしましたが、本年度はシンポジウムが完全対面開催となりましたので、議論が活発に行えることを前提とした内容でワークショップを開催し、以下の 2 セッション 6 件の講演が行われました（以下、敬称略）。

A141 JST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学」
採択研究紹介

講演 1. 「加熱平板への液滴高速衝突現象および液滴衝突時の発生応力解析」

田川 義之（東京農工大学）

講演 2. 「物理現象の性質を満たす機械学習モデルによる流動・輸送現象の学習と予測」

堀江 正信（株式会社 RICOS）

講演 3. 「集光レーザーのマイクロ熱流体現象への

応用」

辻 徹郎 (京都大学)

講演 4. 「材料と流動・輸送現象に関わるスラリー乾燥・構造形成過程のその場計測」

鈴木 嵩弘 (大阪大学),

講演 5. 「力に応答する蛍光分子を用いた流体応力場イメージング法の開発」

栗山 怜子 (京都大学)

A142

講演 6. 特定推進研究企画委員会のこれまでの活動について

鹿園 直毅 (東京大学)

本ワークショップ開催時には一般セッションは行われず、優秀プレゼンテーション賞セッションと産学連携イベントが併催され、若手参加者は特に優秀プレゼンテーション賞セッションに参加する傾向にありましたが、本セッションにも図 2 に示すように多くのシンポジウム出席者に参加いただき、盛況に開催することができました。



図 2 ワークショップ会場の様子

本年度のワークショップは、特定推進研究企画委員会が設立されてから 10 年を過ぎたこともあり、これまでの 10 年の活動をまとめるとともに、その活動の成果が見える形となるワークショップ構成といたしました。第 1 セッションでは、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業「さきがけ」の“複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学” (総括: 後藤晋 (大阪大学)) の研究者 5 名による研究紹介が行われました。なお、この領域の立ち上げには、特定推進研究企画委員会推進課題「未来型エネルギーシステムのための乱流伝熱/燃焼研究の新展開」 (主査: 店橋護 (東京工大)) が貢献しました。第 2

セッションでは、特定推進研究企画委員会のこれまでの活動についてのサマリの報告がありました。

第 1 セッション冒頭には、さきがけ領域アドバイザーの東京工業大学店橋護先生より、今回のワークショップにてさきがけ研究者が発表を行うことになった経緯と、今年度の募集についての紹介がありました。その後、5 名のさきがけ研究者の発表があり、講演 1 では、田川義之さきがけ研究者より光学特性を利用した微小液滴衝突時の壁面発生応力の計測と解析についての研究紹介がありました。講演 2 では、堀江正信さきがけ研究者より研究紹介がありました。流動現象や輸送現象の支配方程式に注目し、微分表記による物理量変化を直接計算することで現象を予測する斬新的な研究紹介をいただきました。講演 3 では、辻徹郎さきがけ研究者より、光ピンセットと呼ばれる手法による粒子制御により、マイクロスケールにおける流動様相の可視化に関する研究紹介をいただきました。鈴木嵩弘さきがけ研究者からは、講演 4 として微細加工応用を意識したスラリー乾燥過程およびそのマイクロスケールにおける形成過程を追従したその場計測について研究紹介をいただきました。最後に講演 5 として、栗山怜子さきがけ研究者より、FLAP-PEG と呼ばれる蛍光分子を巧みに利用した微小流動場の流体応力分布を二次元可視化する計測法について詳細にご紹介いただき、そこに潜む問題点についてもご説明いただきました。何れのご発表も流体工学を基礎とした伝熱工学に関係するものであり、本ワークショップにご参加いただいた若手研究者らから多くの質問がありました。第 1 セッションの終わりには、さきがけ領域総括の後藤晋大阪大学教授に研究領域のご紹介をいただきました。

第 2 セッションでは、特定推進研究企画委員会委員長の鹿園直毅東京大学教授より、本委員会の設置からの 10 年半の活動紹介があり、これまでに実施された特定推進研究課題のうち、国プロジェクトや大型予算の獲得等に繋がった事例の紹介がありました。また、本委員会が検討している今後のミッションについての提案もありました。

本ワークショップにご参加いただきました皆様に、特定推進研究企画委員会として御礼を申し上げます。

(鹿園 直毅, 小宮 敦樹)

7. 産学連携イベント（ポスター展示）

企業会員活動の活性化及び産学の垣根を超えた連携・協力を目指して、2019年の徳島でのシンポジウム以来、4年ぶりに産学連携イベントとして、ポスター展示を開催しました（図3）。以前と同様に、学生ポスターセッションとの同室同時開催で、表2に示した計12団体にご出展いただきました。コロナ前のような立食形式でのケータリングの提供は、現状を鑑み、行いませんでしたが、イベント後にはポスター出展者と産学交流委員で意見交換会を開催し、大いに盛り上がりました。

（西 剛伺）



図3 産学連携イベントの風景

表2 産学連携イベント出展企業（団体）一覧

企業（団体）名	題目
IHI	熱流体・エネルギー技術に関する IHI の取り組みのご紹介
KOA	電子機器熱設計コンセプトの変化と電子部品メーカーの提案
WELCON	拡散接合による高性能熱対策部品
シーメンス	シーメンス 電子機器熱設計ソリューション
デンソー	自動車業界の伝熱技術
東亜電気工業	データセンター向け冷却システム（空冷、水冷）
ナブテスコ	ナブテスコのモーションコントロールと電動化技術
日本ケイデンス・デザイン・システムズ	半導体設計から F1 空力設計ができる Cadence の熱&流体解析技術の紹介
日立製作所	データ駆動型モデリング技術を活用した解析主導設計
ベテル	熱伝導率測定装置 SS-H40 の紹介
レゾナック	半導体だけじゃない！レゾナック熱マネジメント材料・熱ソリューション技術のご紹介
JEITA 熱設計技術 WG	JEITA 熱設計技術 WG の活動紹介

8. 企業特別セッション

シンポジウム二日目午前に企業特別セッション「九州地区企業による部品開発・技術開発の紹介」を開催しました。本セッションは、日本伝熱学会の公益性を重んじ、公開セッションとしました。

講演頂いた企業は、地元福岡県内に本社を置く企業2社、福岡県内に設計・製造拠点を有する企業2社の計4社です。コロナ前と同形式の対面のみで実施し、計53名の方々に聴講頂きました。快くご講演を引き受けて頂いた企業の方々に深く感謝致します。ご講演の題目、ご講演の風景は次の通りです。

1. 空間温度分布可視化システム等の開発 岩倉 宗弘 氏 九州計測器（株）



2. カーボンニュートラル時代のパワー半導体技術 新井 規由 氏, 原田 健司 氏, 松岡 実李 氏 三菱電機（株）パワーデバイス製作所



3. 熱制御技術と熱電変換技術の連携

川口 千恵子 氏 熱産ヒート (株)



4. デンカの放熱材料技術

岡田 拓也 氏 デンカ (株)



(西 剛伺)

9. 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例年シンポジウムの初日にポスター形式で開催しております。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セッションとして位置づけており、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。過去を遡りますと、平成15年(2003年)5月に広島国際会議場で開催されました第40回日本伝熱シンポジウムにて初めて「学生プレゼンテーション賞セッション」がプログラムされており、ここから数えて本年度は21回目の開催となります。学生プレゼンテーション賞セッションは、翌年の第41回日本伝熱シン

ポジウムでは、その名称を現在の「優秀プレゼンテーション賞セッション」に改称しており、対象を学生から若手研究者に拡げております。

本年度の伝熱シンポジウムは、徳島での第56回日本伝熱シンポジウム以来、完全対面開催となりましたので、BPAセッションもそれに合わせた対面形式開催で臨み、実行委員会の多大なご協力をいただきまして、図4に示すような盛会なセッションとなりました。

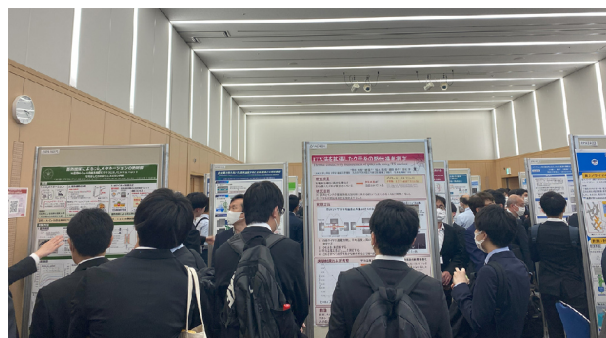


図4 BPAセッション会場の様子

会場では、工夫を凝らしたポスターの数々が展示され、中にはiPadを利用した動画を含んだプレゼンテーションも見られました。会場では、事前に発表者に作成依頼したアピールスライドを大型モニターにスライドショー形式で流し、多くの参加者に観ていただきました。講演申込数は49件となり、そのうち1件は審査対象要件を満たしていなかったことから、48件が審査対象となり、1発表につき5名の審査員による厳正の審査の結果、H1405 三村 憲吾 (北海道大学)、H1411 吉田 雅輝 (防衛大学校)、H1415 栗原 慧 (東京理科大学)、H1420 長野 利春 (九州工業大学)、H1428 池 幸太 (京都大学)、H1437 梅野 錬 (九州工業大学)、H1444 小泉匠摩 (東北大学) (敬称略、発表番号順) の7名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました。(本誌の「優秀プレゼンテーション賞 受賞者」の記事もご覧ください。) 受賞者7名は、シンポジウム2日目の総会時に受賞の紹介を受け、賞状の授与とシンポジウム実行委員長の九州大学高橋厚史先生とともに記念撮影が行われました(図5)。



図 5 高橋実行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、優秀プレゼンテーション賞の審査員の先生方、学生会委員会幹事の名古屋大学 上野藍先生をはじめとする学生会委員会委員の先生方、伝熱シンポジウム実行委員会の先生方に大変お世話になりました。この場をお借りして篤く御礼を申し上げます。

(学生会委員会 小宮 敦樹)

10. 公開セッション

人と熱との関わりの足跡(その6)

第2日目の午後に開催されたこのセッションは、「人と熱との関わり」をたどることを目的に、伝熱シンポジウムの開催地域における伝統技術や熱科学技術の発展を主な内容として、一般の方も参加できる公開セッションで、2018年に札幌で開催して以来、今年福岡で6回目を迎えた。コロナの影響で、昨年度までオンライン(ハイブリッド)開催もしてきたが、今回は完全な対面開催を行った。2021年度まで主宰してきた「熱の科学技術史研究会(主査 河村 洋)」に代わって、2022年度に発足した「研究会“熱事象の科学知・技術知”(主査 大久保英敏)」が引き継いだ。

企画段階で、「九州の伝熱と言えば…」的なイメージで、3つのキーワード、すなわち、「地熱利用」「焼き物」「長崎造船所」が出され、以下の話題を3名の方に提供頂いた。

H231(地熱): “火山地帯・九州と地熱発電”

本山達也, *丹山智之(九州電力)(*中島誠裕に変更)

H232(焼き物): “製品安定供給を目指した熱技術適用の歩み ~熱技術革新への追従に向けて~”

*山崎政男(TOTO)

H233(長崎造船所):

“三菱重工長崎の伝熱研究と社会実装”

*山田 明, 香月紀人, 中拂博之(三菱重工)

H231では、再生可能エネルギーとしての地熱を利用した発電の特徴と技術的な変遷、さらに事業環境の変遷などに関して、講演者が所属する九州電力を例に紹介頂いた。地熱資源が豊富な九州地区ではあったが、実用化はフラッシュ方式が開発された1960年代後半(大岳発電所)だったこと、隣接地に建設された八丁原発電所は、2系統(1号機, 2号機)で発電する国内最大出力を有するが、2号機運転開始に利用蒸気条件の変化によって出力低下が起これ、地下貯留槽の積極的管理が必要となったこと、発電所が出す熱源から作った温水を、当初は付近の温泉街に届けていたものが、地域における熱源として、別荘地の暖房や農業利用など各方面に利用され始めていること、などが紹介された。

H232では、九州の「焼き物=食器」ではなく、日本の陶磁器のルーツである、愛知の森村組が、衛生陶器を製造するために、福岡県小倉市(現北九州市)に設立した「東洋陶器(株)」,現在の「TOTO(株)」における衛生陶器製造の歴史と生産技術、特に焼成窯の変遷について紹介頂いた。すなわち、当社は、主力製品の衛生陶器をはじめ、水栓、ウォシュレット(温水洗浄便座)、ユニットバスなど、多種の住宅設備用品を製造しているが、衛生陶器の世界的需要は長期にわたって堅調であること、その中で、CO₂排出量が社内の4分の3を占める衛生陶器部門は、SDGsやカーボンニュートラルへの取り組みが喫緊の課題となる中で「風当たり」が強いことが紹介された後、「主要な伝熱装置」である焼成窯のCO₂削減策の基本技術である熱効率向上への取り組みが紹介された。創業当時(1917年)のそれが2%程度であったものが、現在のシングルデッキキルン(2022年稼働)では約50%になっていること、将来的には水素燃焼技術の導入も検討してはいるが、高温を利用する生産技術として、CO₂排出削減手段としての熱損失低減への取り組みは、「まだまだあり」ということが述べられた。

H233では、当初、長崎造船所史料館を中心に、

熱技術の紹介を企画していたが、当資料館が現在休館中で再開期日が未定のため、当造船所の発展と密接な関係にある、長崎研究所における 1970 年代以降の伝熱研究活動と、社会実装結果（製品）を紹介頂いた。すなわち、「超臨界圧変圧運転ボイラの開発」「地熱発電所の開発」「人工衛星用姿勢制御装置」、および「カーボンニュートラルへの取り組み」について、紹介があった。会場で、「学」出身の会員から、「大学の研究が、実機スケールの実験的研究には及ばないもどかしさを感じてきた」という発言に対し、「大学における独創的発想かつ精密な実験的研究は、企業の実機スケール研究の大きな拠り所となった」という講演者の回答は、大変印象深かった。

今回は 3 年ぶりの完全な対面開催で、会場には 50 名近くの参加があり、活発な質疑応答も相まって、活気溢れるセッションとなった（図 6）。

なお、H231 と H233 に関連して、本報告者（吉田）の Academic Grandfather である西川兼康先生（本会（旧伝熱研究会）第 15 代会長、1984 年九州大学退職）から直接聞いた言葉を、「熱の技術史的補足」として遺しておきたい。

- 1990 年代、伝熱研究会九州グループのとある宿泊付きイベントで、九州電力の地熱発電関係者が講演された際、生成蒸気・地下還元量の推算について、「学」出身の会員が「この推算方法では熱収支が取れていない。この結果には疑問がある」と切り出し、その場のやり取りは「一往復」で終了したが、講演終了後、西川先生が「〇〇君、あの質問は厳しすぎると私は思う。機械屋にしてみれば、確かに君の質問は正しいと思うが、昔の地熱屋は『山師』と言われる程いい加減だったのが、彼らのこのような計算で、ようやく議論可能な結果が出せるようになった。それを理解してやらないと、彼らは仲間に入って来ようとせず、学問は進まない。」と言われたこと。
- 学部学生時代、蒸気ボイラの講義（管内沸騰流の伝熱過程）中、ライフル管について西川先生から「ある国内企業 A 社から、『ボイラ製造にあたって、水管の高クオリティ域に、国外 B 社が製造している「リブド管」と呼ばれる内面溝付管を使用し、それ以外の領域に、国産の平滑管を使用したいが、B 社から「平滑管もうち

から買わないと、リブド管だけでは売らない』と言われ、困っている、全部 B 社の管を使えば、うちは儲けがなくなってしまう。』と持ち掛けられました。今（この講義で）紹介するライフル管と呼ばれる内面溝付管の性能試験を、九大の私の研究室で試験して、この管がリブド管と同等な性能を持つことがわかりました。さらに、クロスライフル管と呼ばれる管もテストしたところ、（圧力損失は大きくなるものの）管壁温度の急上昇がなくなったこともわかったので、私は A 社に『すぐにこの結果を持って、B 社に行って、「リブド管はもう買わん、全部国産の管を使う」と言いなさい』と言いました。後日 A 社から連絡が来て、『B 社が、「わかった。それではリブド管だけ売ります。平滑管は買ってもらわなくて良いから…、』と言いました』とのことで、大変うれしかったです。』旨を聞いたこと。

本シリーズは今回で 6 回目を迎えたが、引き続き「研究会“熱事象の科学知・技術知”」が主宰して、「伝熱工学と人の関わり」をたどるべく、実施したいと考えている。

（研究会“熱事象の科学知・技術知”（主査 大久保 英敏）、吉田 敬介（九州大学））



図 6 講演会場の様子

1 1. 特別講演

第 60 回日本伝熱シンポジウム特別講演会は、日本伝熱学会第 61 期総会の前に開催されました。講師は、介護老人保健施設たばるの前田豊樹医師にお願いしました。前田先生は、3 月まで九州大病院別府病院の内科に勤務されており、総合内科と温泉療法を専門とされています。

日本は温泉大国として知られており、その中で

も別府は全国的に有名な温泉地です。前田先生は、その別府温泉を利用した温泉療法についてわかりやすく解説してくださいました。温泉療法は、身体健康とリラクゼーションを促進するための自然療法の一つで、具体的な効果として、温泉の熱が血液循環を促進し、筋肉の緊張をほぐし、関節の柔軟性を改善する効果があり、温泉に含まれるミネラルが皮膚から浸透し、さまざまな病状の改善に寄与するとされているそうです。さらに、温泉は精神的な効果としてもストレスの解消や心のリラクゼーションに効果的であり、睡眠の質の改善にも役立つとのことでした。前田先生は、これらの内容を統計的なデータに基づいて丁寧に説明してくださいました。

講演後には、前田先生の講演内容が身近でわかりやすかったためだと思われそうですが、活発な質疑応答が行われ、入浴剤と温泉の効果の違いや、温泉とサウナの効果の違いなどについての質問がありました。

また、講演会前の講師控室では、前田先生を数名の先生方で囲んで懇談し、地球上で寒い地域と暑い地域では平均体温が変わるのか（答：変わらない）、哺乳類で平均体温は変わるのか（答：小さい動物ほど体温が高い）といった興味深い体温の話題で盛り上がりました。

最後にこのような興味深いご講演をくださった前田先生に、この場を借りてお礼申し上げます。

（森 昌司）



図7 特別講演の様子

12. 意見交換会

意見交換会は、本シンポジウム2日目の18時30分から20時30分まで「ホテル日航福岡」の都久志の間で開催されました。昨年度の岐阜におけるシンポジウムにて対面による講演および意見交換会（着座でのビュッフェ形式）が再開されたことに加えて、社会生活もコロナ禍前の状況を取り戻しつつあることから、立食ビュッフェ形式による意見交換会を実施することとしました。2015年に開催された第52回日本伝熱シンポジウムでも意見交換会をホテル日航福岡で実施しており、当時お世話になったホテルのスタッフの方が今回も担当していただいたことから、事前の打ち合わせから当日の運営まで大変スムーズに行うことができました。

会場としては、990 m²の部屋を貸し切り、250名程度の参加者を想定した料理とフリードリンクを準備しました。また実行委員会で九州地方の地酒を予め購入し、会場で参加者の皆様にお楽しみいただきました。持ち込みのお酒にも関わらず、日本酒の保管から当日のサービスまでご対応いただいたホテル日航福岡のご厚意に感謝する次第です。実際、当日までに受け付けた参加者の人数としては253名でした。意見交換会の流れとして、初めに2015年の福岡開催時と同様に集合写真の撮影を行いました（図8）。参加者の皆様が良い笑顔をされているのが、大変印象的です。会は実行委員長の高橋厚史氏（九州大）のご挨拶からはじまり、続いて第62期日本伝熱学会会長の平井秀一郎氏（東京工大）からご挨拶と共に伝熱学会の運営に対する抱負が語られました。乾杯は第61期日本伝熱学会会長を務められた高松洋氏（熊本高専）よりご発声をいただきました。歓談中は久しぶりの立食式ということもあり、最初から最後まで活発な交流がなされました（図9）。多くの国際会議のバンケットなどでは会の中盤に演奏などの出し物によって参加者を楽ませることが多いのですが、今回は参加者同士の交流に多くの時間を費やしたいとの思いから、出し物や参加者によるスピーチは実施しませんでした。コロナ禍によってオンラインツールが急速に普及し、効率的に会議や講演会が実施できるようになりましたが、関係者が同じ場に集うことによって交流を深められ、特に知人を通して新たな出会いを得られることが、

オンラインには無い大きな魅力であると考えています。閉会では来年度開催される第 61 回日本伝熱シンポジウムの実行委員長である鈴木洋氏（神戸大）からご挨拶をいただきましたが、我々実行委員会に大変貴重な日本酒のプレゼントをいただき、お心遣いに感謝を申し上げる次第です。

最後に参加されまし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からお礼申し上げます。次回の意見交換会で皆様にお目にかかれまことを大変楽しみにしています。

（河野 正道，森 昌司）

が、参加者の皆様にとって満足度の高いシンポジウムでありましたなら幸いです。

実行委員会メンバーの皆様とはコロナ禍で成熟したオンラインミーティングを駆使して何度も打ち合わせをさせていただきました。また理事会や企画部会の皆様、第 59 回岐阜の幹事、各種委員会の先生方には多くのご指導とご助言を賜りました。お陰様で久しぶりの対面方式でのシンポジウムを大過なく円滑に運営して無事終えることができました。支えてくださった皆様に深く感謝申し上げます。

（高橋 厚史，手嶋 秀彰）



図 8 意見交換会での集合写真



図 9 歓談の様子

13. あとがき

第 60 回日本伝熱シンポジウムは、コロナウイルスの影響による自粛を続けるか、国外の動向を鑑みて対面活動を再開するか、世間でも意見が分かれるタイミングでの運営となりました。そのため開催方式もハイブリッドか完全対面か、ぎりぎりまで悩むことになりましたが、現地で顔を合わせて活発に議論し交流される皆様方のお姿を見て、結果としてこの選択は間違っていなかったと感じております。会期中の慌ただしさで、お世話になった全国各地の皆様にご挨拶できず、お声を聴けないままになってしまったことだけが心残りです

第 60 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

顧問	高田 保之	九州大学
	鶴田 隆治	西日本工業大学
	高松 洋	熊本高等専門学校
	深井 潤	九州大学
委員長	高橋 厚史	九州大学
副委員長	森 昌司	九州大学
幹事	手嶋 秀彰	九州大学
監査	井上 浩一	北九州市立大学
	光武 雄一	佐賀大学
委員	麻生 裕之	福岡大学
	伊藤 衡平	九州大学
	井上 智博	九州大学
	梅原 裕太郎	九州大学
	喜多 由拓	King's College London
	藏田 耕作	九州大学
	河野 正道	九州大学
	迫田 直也	九州大学
	高尾 幸来	福岡大学
	谷川 洋文	九州工業大学
	津田 伸一	九州大学
	長山 暁子	九州工業大学
	西山 貴史	福岡大学
	濱本 芳徳	九州大学
	三浦 飛鳥	九州工業大学
	宮崎 康次	九州大学
	宮崎 隆彦	九州大学
	宮田 一司	福岡大学
	桃木 悟	長崎大学
矢吹 智英	九州工業大学	
山口 朝彦	長崎大学	
李 秦宜	九州大学	
劉 維	九州大学	
王 振英	九州大学	

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
 - 第 60 回日本伝熱シンポジウム -
Best Presentation Award
 - 60th National Heat Transfer Symposium of Japan -

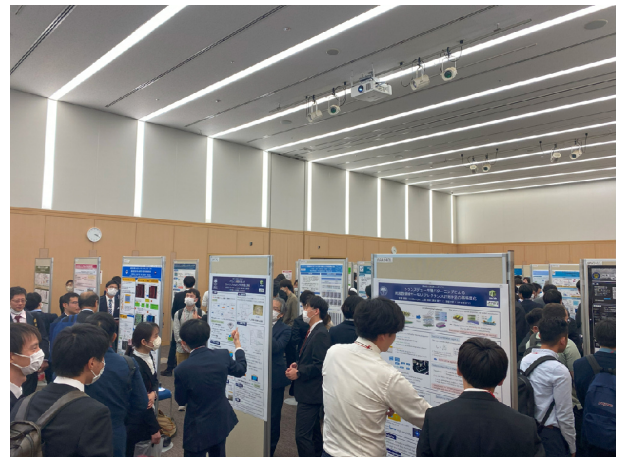
学生会委員会幹事
 上野 藍 (名古屋大学)
Ai UENO (Nagoya University)
 e-mail: ueno@mech.nagoya-u.ac.jp

令和 5 年 5 月 25 日に福岡市 (福岡国際会議場) で開催された日本伝熱学会総会において、第 60 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞 (Best Presentation Award: BPA) セッションで発表を行い、優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

2023 年度 受賞者

- ◆ 三村 憲吾【北海道大学】
蓄熱触媒による CO₂ メタネーションの熱制御
- ◆ 吉田 雅輝【防衛大学校】
可視透明ヒータを壁面とした矩形ミニチャネル内流動沸騰熱伝達の高空間分解能測定
- ◆ 栗原 慧【東京理科大学】
蛍光異方性を用いた流体温度分布と液体層厚さの同時測定
- ◆ 長野 利春【九州工業大学】
第一原理計算による切削工具サーメットの電子構造及び光学特性解析
- ◆ 池 幸太【京都大学】
ケミカルループ燃焼における Ni-Al₂O₃ 酸素キャリアの多孔質構造が反応特性におよぼす影響
- ◆ 梅野 錬【九州工業大学】
自立マイクロチャネル構造をもつ nW 分解能バイオカロリメータの開発
- ◆ 小泉 匠摩【東北大学】
低レイノルズ数浮力衝突噴流が自然対流温度境界層に与える影響評価

(順不同)



BPA ポスター会場風景



高橋実行委員長との記念撮影

今回の BPA セッションは 2019 年 (徳島) 以来の完全対面開催となり 49 件のポスター発表がありました。審査はアピールスライドの内容、ポスターセッションでの研究発表と質疑応答までを評価対象として行われました。

ポスター発表のレベルも年々より高くなり、発表者は日ごろの研究成果を分かりやすくかつ魅力的に伝えるため、様々な工夫を凝らしセッション時間を超えての活発な議論がなされていました。

太陽光吸収膜の生成

Development of a Solar Absorber

宮崎 康次 (九州大学), 中村 和磨 (九州工業大学)

Koji MIYAZAKI (Kyushu Univ.), Kazuma NAKAMURA (Kyushu Inst. of Tech.)

e-mail: miyazaki.koji.962@m.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ふく射伝熱で現れる吸収率, 反射率, 透過率は表面形状と物体の屈折率によって生み出されるものであるが, 我々はこれまで物質ありきで微細構造によるふく射特性制御を試みてきた[1-3]. その場合, 材料は自己組織化する微粒子や薄膜蒸着など微細加工技術を適用できる物質を選ぶため, ふく射伝熱の観点から優れた屈折率を持つ材料を選ぶことができなかった. そもそも目的にあった屈折率を有する材料が見つかるのであれば, 微細加工までしてふく射特性を制御する必要もない. このような事情は, 光物性の起源にまで踏み込んで特性を議論できなかったことに起因していたが, 近年の第一原理計算のめざましい進展からよい物質を非経験的に予測することが可能になってきている. 本稿ではこうした問題に対する最近の我々の試みについて, 実験と理論の共同研究の観点から研究を一歩進めることができたので紹介したい.

2. 切削工具サーメットの太陽光吸収

2.1 廃棄サーメット

サーメットとはセラミックスと金属(金属)の混合物を指す造語で, 機械的に硬く, 高温にも耐えるため切削工具の材料として使われている. 耐熱, 耐摩耗性に優れているとは言え当然寿命があり, 何度か再利用なされるもののいずれは廃棄処分となる. 一方, 太陽光吸収膜の研究において, 可視光を

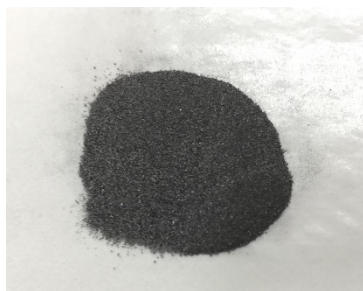


図1 廃棄サーメット粉末

透過しない金属と可視光を透過する酸化物セラミックスを混合させたサーメットで見かけの屈折率を調整し, 波長 $2\mu\text{m}$ 以下のみの光を吸収する取組みが進められている[3, 4]. このような状況にあつて, 福岡県リサイクル総合研究事業化センターが切削工具サーメットを扱う県内企業である株式会社丸和技研の先端技術を講演会で紹介しているところを偶然聞く機会に恵まれ, 海洋廃棄処理される黒いサーメット粉末を知ることとなった(図1). 太陽光吸収膜のアイデアを得るにあたり, サーメットは十分なキーワードの一致だったが, 加えて紹介されていた粉末が黒かったことから, この廃棄サーメットの赤外吸収率が低ければ, 高い特性を有する太陽光吸収膜になり得ると着想した. 講演されていた福岡県リサイクル総合研究事業化センターの担当者に会場ですぐにコンタクトし, 後日, 粉末を頂いてふく射性質を測定できた.

2.2 廃棄サーメット塗布膜の吸収率

黒い粉末を金属板に接着剤で固め, 垂直入射-半球反射率を測定した. 透過率を0と仮定して得られる垂直入射吸収率を図2に青線で示す. 比較のためサーメット切削工具表面の吸収率を赤線で示す. 横

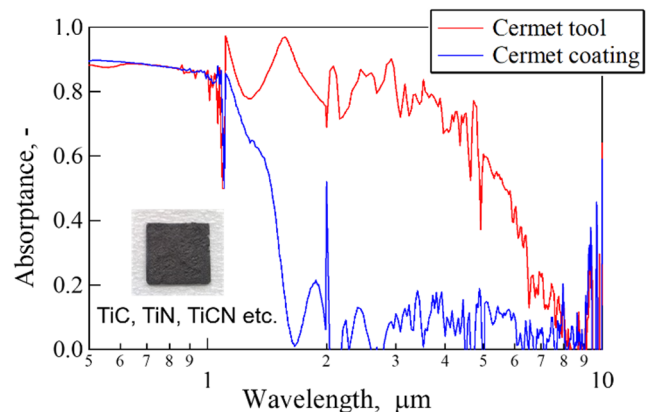


図2 垂直入射スペクトル測定結果

軸は光の波長，縦軸を吸収率としている．太陽光のほとんどは波長 $2\mu\text{m}$ 以下であるため， $2\mu\text{m}$ より短い波長で吸収率が高く， $2\mu\text{m}$ より長い波長で放射率 (=吸収率) が低い材料が太陽光吸収膜として優れている．定量的には性能指数で評価される．廃棄サーメット微粒子を塗布したサンプルの吸収率は $2\mu\text{m}$ 付近まで高い吸収率を持ち，その後，急峻に吸収率がほぼ 0 となる測定結果が得られた．サーメット工具表面の吸収率は $4\mu\text{m}$ 程度まで高い吸収率を持ち，さらに長波長側で緩やかな吸収率低下となっているため，サーメットが持つ光学物性に起因した吸収率なのか，粉末形状に起因しているのか明確でない部分を残しているものの，廃棄サーメット粉末を太陽光吸収材料として使える可能性を示したこと[5]は研究のモチベーションを高めることとなった．

2.3 廃棄サーメット粉末の元素分析

元素分析するまでもなく，切削工具の名称として TiCN サーメット工具などと呼ばれているため，母材は炭化チタン (TiC)，窒化チタン (TiN)，炭窒化チタン (TiCN) が主成分であると想定されるが，廃棄物であることから様々なメーカーで製造された工具の集まりでもあり，高い吸収特性を持つメカニズム解明の障壁となった．表面コーティングされている工具は黄色っぽく，粉碎する前に目視で取り除くことはできるが，それ以外の工具については，形状などの外観によって分類分けして元素分析することとなった．電子線プローブマイクロアナライザー (EPMA) で測定した結果，Ti, W, Ta, Mo, Ni, Co, Nb, V など実に多くの金属元素が含まれていた．そもそも TiC, TiN といった融点が 3000K を超える材料をどのように工具形状に固めるか，メーカーごとに複雑なノウハウがあると想像される．さらに X 線回折で調べたところ，いくつかの鋭い回折ピークが測定され，TiC, TiN に混ざって多くの窒化物，炭化物も確認された．当然，分類した切削工具ごとに成分が異なっていたが，概ね TiC, TiN に加えて炭化タングステン (WC) も主成分であることまで明確となった．

2.4 第一原理計算による光学特性予測

電磁波の伝播はマクスウェルの方程式で解けることから，フォトニック結晶やメタマテリアルと呼ばれる微細構造表面の持つ物体の光学特性が数値

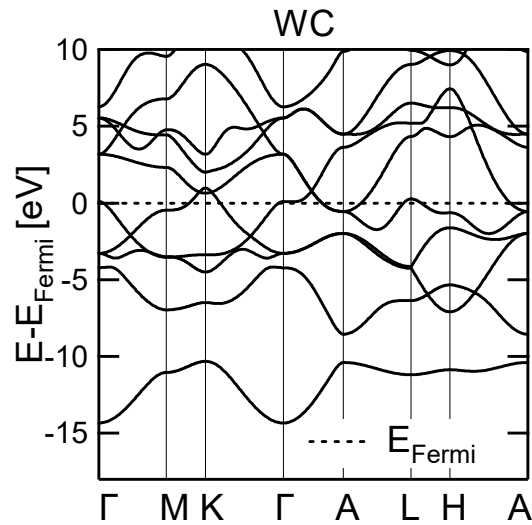


図3 WCの第一原理バンド構造

計算などで設計されてきた[6]．当然，物質の屈折率は物性値として既知であることが前提となる．ところで，物質中の電磁波については複素電気感受率，複素誘電率，複素屈折率を使って考察できる[7]．加えて近年の第一原理電子構造計算の発展により，バンド間遷移等も考慮して，非経験的に，リアリストイックに光学特性を扱うことができるようになってきている．たとえば，対象とする物質の電子構造をソフトウェア Quantum Espresso [8]で計算し，さらにその結果から RESPACK [9]等により光学特性を第一原理的に求めることが可能である．しかしながら，電子構造計算における交換相関汎関数の詳細，計算メッシュ設定，収束チェック等，多くの経験とノウハウが必須なことから，実験と理論の共同研究は欠かせない．今回の計算に関する詳細と議論は他に譲り[10]，得られた結果について以下に概略を説明したい．

今回とりあげた廃棄サーメットの主成分のひとつである WC のバンド構造について計算結果を図3に示す．フェルミレベルをバンド分散がよぎっていることから，WCが金属であることがわかる．一般的に伝導電子の多い金属のプラズマ角周波数は高エネルギー側に存在し，波長に換算するとおおよそ 200nm 程度と紫外光に相当する．従って，可視光はよく反射され，これが白っぽい金属光沢の由来でもある．TiC, TiN, および W についても WC 同様に金属的なバンド構造が得られ，図1,2に示してきたような黒い物性を単純には説明できないことがわかった．得られた電子構造をもとに RESPACK を

用いて WC, W, TiN, TiC の吸収スペクトル $\alpha(\lambda)$ を計算した:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon(\lambda)}}{1 + \sqrt{\varepsilon(\lambda)}} \right|^2 \quad (1)$$

ここで λ は光の波長, ε は複素誘電率である. 図 4 に四つの物質の $\alpha(\lambda)$ の比較を示す. 測定された廃棄サーメットの吸収率 (図 2) は, TiN, TiC, WC 等様々な構成成分の足し合わせと考えている. 当初, 波長 $2\mu\text{m}$ 付近での急峻な吸収率の抑制は TiC もしくは TiN に起因していると考えたが, 実際には Ti の次に多く含まれる W の炭化物 WC の光学特性が見事に $2\mu\text{m}$ で急峻な変化を示すことがわかった. 今後の物質探索においても急峻な変化を生み出すメカニズム理解は重要な指標になり得ることから, RESPACK で計算された複素誘電率をさらに詳しく考察することとなった.

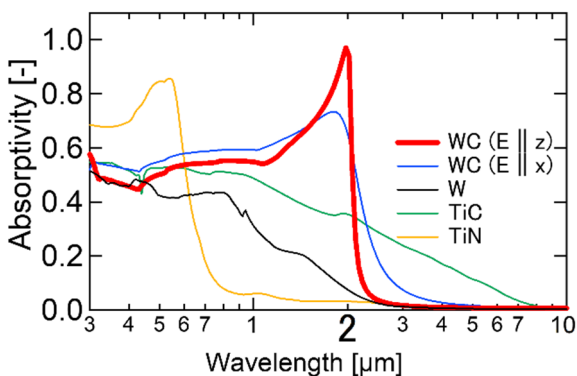


図 4 RESPACK により計算されたサーメット工具主成分の第一原理吸収スペクトル

2.5 炭化タングステンの複素屈折率

式(1)より, 吸収率 $\alpha(\lambda)$ と直接関係のある複素誘電率 $\varepsilon(\lambda)$ の波長依存性を見れば, WC の吸収率の急峻な変化のメカニズムが理解できると考え, $\varepsilon(\lambda)$ の解析を行った. 図 5 に $\varepsilon(\lambda)$ の解析結果を示す. 複素誘電率の実部を黒実線, 虚部を黒点線としてプロットしている. 式(1)に基づくと, 誘電率の虚部を 0 としたとき, 誘電率の実部が負になれば反射率は 1, 吸収率は 0 となる. 複素誘電率の実部が 0 となる波長がプラズマ励起の位置であり, WC の場合 $\lambda_p = 2\mu\text{m}$ である. λ_p での複素誘電率の虚部がプラズマ励起の線幅 W_p であり, この W_p が大きいとプラズマエッジはなだらかなになる. WC の場合, λ_p の位置での W_p が顕著に小さく, 結果, 非常にシャープなプ

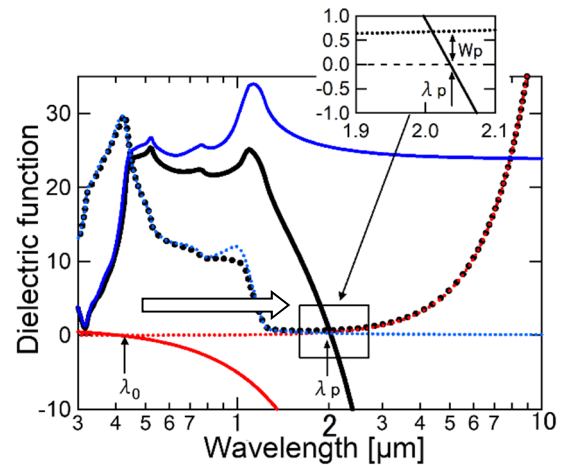


図 5 RESPACK で得られた WC の複素誘電率 $\varepsilon(\lambda)$. 黒実線: $\text{Re}[\varepsilon(\lambda)]$, 黒点線: $\text{Im}[\varepsilon(\lambda)]$. 赤実線および赤点線はドルーデ寄与, 青実線および青点線はバンド間遷移の寄与を表す.

ラズマエッジが現れた (図 4). 一方で, 吸収率がなだらかな変化を見せる W や TiC ではこのような複素誘電率の関係は見られない. 機械学習や何らかの手法で物質探索する際, 複素誘電率の実部と虚部の関係に注意を払って探索方針を設定することが本質的だろう.

前節でも触れた金属光沢ではない黒色を生み出すメカニズムについては, フェルミ準位近傍の自由電子に起因するドルーデ寄与とバンド間遷移に起因する項に分けて考察することができる. 我々は RESPACK の計算コードに改変を加えることで, 複素誘電率への各項の寄与を抽出した. 図 5 の赤実線はドルーデ寄与の実部, 点線が虚部である. また青実線はバンド間遷移に由来する複素誘電率への寄与の実部, 点線が虚部である. ドルーデ寄与から導かれるプラズマ周波数はエネルギーにして 3 eV , 波長にして $\lambda_0 = 400\text{ nm}$ 程度と一般的な金属の示す紫外域の値となっているが, バンド間遷移の効果を考慮すると, これが大幅に長波長側にシフトし, $2\mu\text{m}$ の低エネルギープラズマ励起に至ることがわかった. TiC, TiN でも同様な傾向が見られたが, WC におけるプラズマ周波数の長波長側へのシフトは, 他物質と比較しても特筆して大きいことがわかった.

3. ふく射特性計算の課題

たかが 1 kW/m^2 程度の太陽光エネルギーと言えど, 無料で降り注ぐエネルギーをどう扱うかは今後の

エネルギー有効利用を考える上で重要な課題と考えている。太陽光を相手とする場合、波長 $2\mu\text{m}$ を境に可視域で黒く、赤外域で白い太陽光吸収膜に着目するか、可視域で白く、赤外域で黒い放射冷却膜に着目することになるのは言うまでもない。電池でエネルギーを貯めることが主流となっているが、膨大なエネルギーを貯める上では熱エネルギーは比較的扱いやすいとも指摘されている[11]。太陽光吸収膜を利用した大型発電では、既に Pyromark2500 が実用的な黒体塗料として耐久性をクリアすれば決着と言われており[11]、伝熱工学が解決すべき問題は少なくなってきたかもしれないが、一方で放射冷却技術については、抜山賞を授賞した Yang 教授を始め、国内外でスタートアップ企業が立ち上がり、熾烈な競争が繰り広げられている。これからの季節、毎年、自動車キャビンの猛烈に高い温度に悩まされることになるが、 1kW/m^2 のエネルギーが微量ではないことを実感する。白い布についても、そのふく射特性が議論されており[12]、我々も冷却マスクについて考察したが[13]、本稿で紹介したようなマイクロな観点から理解するまでに至っていない。赤外域で黒いことを扱うには、化学分析で既に使われている FT-IR やラマン分光のように光とフォノンの相互作用も考慮しなければならず、定量的な解析としては電子のみを考慮する手法より、さらにハードルが高い [14]。ただし、太陽電池に照射された光がどのようにして電気となり熱エネルギーとなるのか、レーザー照射で物質がどのように加工されていくのかなど、伝熱工学に関わる様々な光の現象に対して、踏み込んだ議論を避けて通ることができそうにない。理論物理研究者の助けを大いに借りながら、光と物質の相互作用に関する理解を深めて、知見をふく射伝熱工学に活かすことを今後の課題として捉えたい。

4. おわりに

本稿では、廃棄サーメット工具微粒子の太陽光吸収膜への応用を通して、物質のふく射特性を考察する機会を運よく得られたことを紹介させて頂いた。理論物理研究者の献身的な努力によって、我々伝熱屋の光学特性に対する理解が少しは深まったと信じている。ここ数年の数値計算手法の進歩によって、マクスウェル方程式によって光の干渉を利用したふく射性質の制御から、さらに一步踏み込んだ物性

やその起源といったマイクロな議論までできるようになり、フォノンエンジニアリングで見られた熱伝導に対するマルチスケールな理解[15]がふく射伝熱でも一部可能になったと言える。このような理解を使いこなすまでには至っていないが、少なくともデータベースで物質を探すより深い考察に基づいた物質探索が視野に入ったと考えている。今後の課題として、電子に起因する光学特性に留まらず、さらに複雑なフォノン、電子、光子の相互作用に踏み込んだマイクロなアプローチを伝熱工学に取り込んで、新たなふく射伝熱制御手法を見出したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、九州工業大学工学専攻を修了した宮越哲也君、早川翔大君、現在修士2年の長野利春君の多大な貢献があったことを記して謝意を表す。本研究は公益財団法人福岡県リサイクル総合研究事業化センター研究開発事業「使用済みサーメットチップによる光熱変換材料研究会」の支援により進められました。

参考文献

- [1] Kihara, M. et al., Reflectivity of photonic crystals self-assembled with silica spheres, *J. Therm. Sci. & Tech.*, **1** (2006) 12.
- [2] Kihara, M. et al, Spectral reflectance of the close-packed structure of silica microspheres, *Int. J Thermophysics*, **29** (2008) 2136.
- [3] Zheng, Z. et al., Spectral emittance of a printed cermet for solar absorber, *Proc. of the 11th ATPC* (2016), OS14-09.
- [4] Cao, F. et al, A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers, *Energy & Environ. Sci.*, **7** (2014) 1615.
- [5] 宮崎康次, 光吸収体の製造方法, 太陽光吸収体, および太陽光吸収用のコーティング材, 特願 2021-14490 (2021).
- [6] 石原照也, メタマテリアルの技術と応用, シーエムシー出版 (2007).
- [7] 矢口裕之, 初歩から学ぶ固体物理学, 講談社 (2017).
- [8] Giannozzi, P. et al., Advanced capabilities of materials modelling with Quantum ESPRESSO, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **29** (2017) 465901.

- [9] Nakamura, K. et al., RESPACK: An ab initio tool for derivation of effective low-energy model of material, *Comput. Phys. Commun.*, **261** (2021) 107781.
- [10] Hayakawa, S. et al., Ab initio calculation for electronic structure and optical property of tungsten carbide in a TiCN-based cermet for solar thermal applications, *Sci. Rep.*, **13** (2023) 9407.
- [11] Weinstein, L.A. et al., Concentrating solar power, *Chem. Rev.*, **115** (2015) 12797.
- [12] Peng, Y. et al., Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric, *Nature Sustainability*, **1** (2018) 105.
- [13] 長野利春ら, 冷感マスクの赤外域放射特性, 熱物性, **36** (2022) 132.
- [14] M.コーエン, S. レイ, 現代の物性物理学, 吉岡書店 (2021).
- [15] Volz, S. et al., Heat conduction in nanostructured materials, *J. Therm. Sci. Tech.*, **11** (2016) JTST0001.
-

太陽光エネルギーを有効活用する固体の短波長変換材料

Solid-State Light Conversion Materials to Shorter Wavelength for Effective use of Solar Energy

村上 陽一（東京工業大学）

Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: murakami.y.af@m.titech.ac.jp

1. はじめに

太陽光の地表におけるエネルギー密度は約 1 kW/m² で[1], これはヘアドライヤーの消費電力と同等であり, 有意義な大きさのエネルギーである. その利用方法には太陽電池や光触媒が含まれる. 光触媒には様々な種類があり, 酸化チタンのような水分解水素製造・防汚・除菌を含む多目的に使えるもの[2], 二酸化炭素から有用な化合物を作る人工光合成を行うもの[3], 紫外光を用いてほぼ 100%の量子効率で水を水素と酸素に分解するもの[4]等がある. これらの光触媒は近年注目を集めている.

しかし, 光エネルギーの利用には特有の制限がつく. すなわち, 熱エネルギーの利用価値を評価する際には量[J]と温度[K]とを規定しなければならないように, 光エネルギーの利用価値を評価する際には量[J]に加えて波長[nm]も規定しなければならない. 波長が 400 nm より短い光を紫外光, 800 nm より長い光を赤外光といい, その間は可視光にあたる (図 1a). 光は光子 (フォトン) からなり, その 1 粒のエネルギー E は波長 λ に反比例する. すなわち, 同

じエネルギー量の光でも紫外光 (赤外光) はよりエネルギーの高い (低い) フォトンからなる. 紫外光は作用力がより高いため, より有用である.

太陽電池では材料の半導体が光を吸収する必要があるが, その際, 材料に固有なバンドギャップエネルギーより高いエネルギーのフォトンのみが吸収され, 発電に寄与する. バンドギャップ以下のエネルギーの光子は, どれだけ量があっても利用されない. 光触媒も同様であり, 無機物・有機物の区別によらず, 材料に固有なある閾値より高いエネルギーをもったフォトンのみが吸収・利用され, それ以下のエネルギーのフォトン (ある波長より長波長側の光) は利用されない. この側面が光エネルギーの変換効率を根本的に制限している.

このような制限は, 長波長の光をより短波長の光に変換できれば回避できる. このような光の短波長変換をフォトン・アップコンバージョン (photon upconversion, UC, 図 1b) という. 一粒のフォトンのもつエネルギーを上昇させるため, 「アップ」と呼ばれる. 図 1b の右側には, 以下に紹介する我々

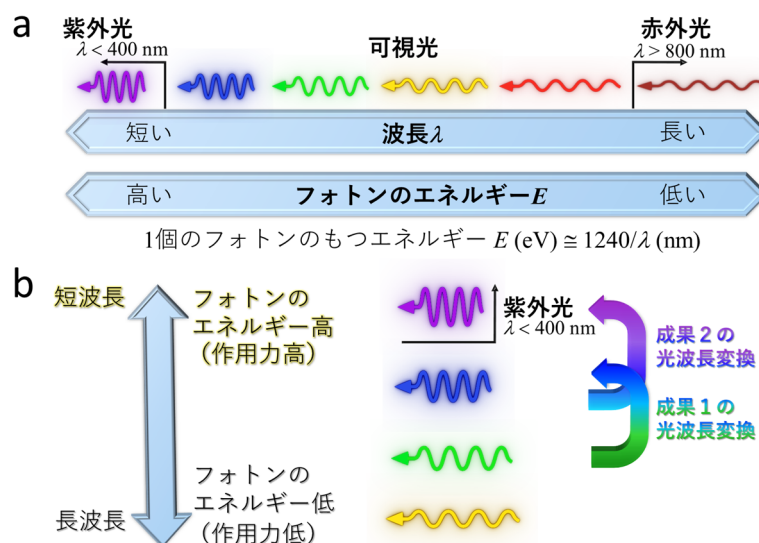


図 1(a) 光の波長とフォトンのエネルギーとの関係. nm はナノメートル, eV は電子ボルト. (b) 光の短波長化変換 (フォトン・アップコンバージョン) の概念模式図, および本稿で紹介する成果 1 と成果 2 で行った波長変換.

の「成果1」と「成果2」の波長変換を示している。

UCを有機分子間のエネルギー移動および三重項-三重項消滅（triplet-triplet annihilation, TTA）を用いて行う方式（TTA-UC）の研究が近年活発化している。筆者がこの研究を始めた2009年には世界で研究者が5名程しかいなかった。現在では研究者の数はかなり増え、最近では光化学討論会（光化学協会主催）で常設セッションもできている。筆者はミクロスケールの分子熱工学の観点からこの材料開発とメカニズム解明の研究を行ってきた[5-14]。

TTA-UCの原理は既に「伝熱」で詳述している[15]ので繰り返さない。本稿で紹介する我々の成果1, 成果2は論文[13,14]として出版している。本稿ではこれらの背景と成果の概要を紹介する。

2. 研究の背景と動機

TTA-UCでは、入射光子を吸収し励起三重項状態を生成する「増感分子」と、そこからエネルギーを受け取り、TTAを起こして短波長化した光（高エネルギー化した光子）を放出する「発光分子」とを組み合わせて行われる。増感分子：発光分子の分子数比は通常1:100から1:10000の間がよく用いられる[12,16]。以下、「エネルギー移動」は、分子間での励起三重項状態の移動を指す。

これらの分子には、光との相互作用が強い π 共役、特に芳香族部位をもつ分子がよく使用される。良いUC材料の設計の鍵は、(i) 増感分子から発光分子へのエネルギーの移動が熱力学的に可能な（ギブスエ

ネルギー変化が負となる）組み合わせを選ぶこと、(ii) そのエネルギー移動が物理的に可能なように発光分子群の中に少数な増感分子を均一に分散配置させること、および (iii) 発光分子間でのエネルギー移動が高効率に（即ち、なるべく失活させずに長時間励起状態を保ち、長距離伝搬できるように）行うこと、である。そのためには、増感分子・発光分子の設計開発に加え、材料の物理的形態の選択が重要となる。なお、励起三重項状態は酸素分子によって高速に失活するため、そのような失活を避けられる材料形態とすることも重要である。

2.1 成果1の背景と動機

TTA-UCの分野が2005~2010年に立ち上がり始めた頃、大半の材料は増感分子と発光分子とを有機溶媒に溶かした溶液を脱酸素処理した上で、ガラスなどの容器に密閉した形態であった[17]。この形態は、有機溶媒中に溶けた増感分子と発光分子がブラウン運動して衝突を繰り返すために分子間エネルギー移動が自ずと達成されること、殆どの有機溶媒が対象とする波長域で透明であること、および試料を作り易いことから、現在も含め、多くの研究者がこの形態に基づき成果を報告している。

しかし、この形態は容器が破損した際に漏洩する危険性があり、有機溶媒は揮発性、可燃性、生体への有害性が高いため、応用には適さない。このことから、UC試料の固体化が望まれており、その追求が最近活発化していた[18,19]。しかし殆どの場合において無酸素環境が必須であり、かつ連続的な光照

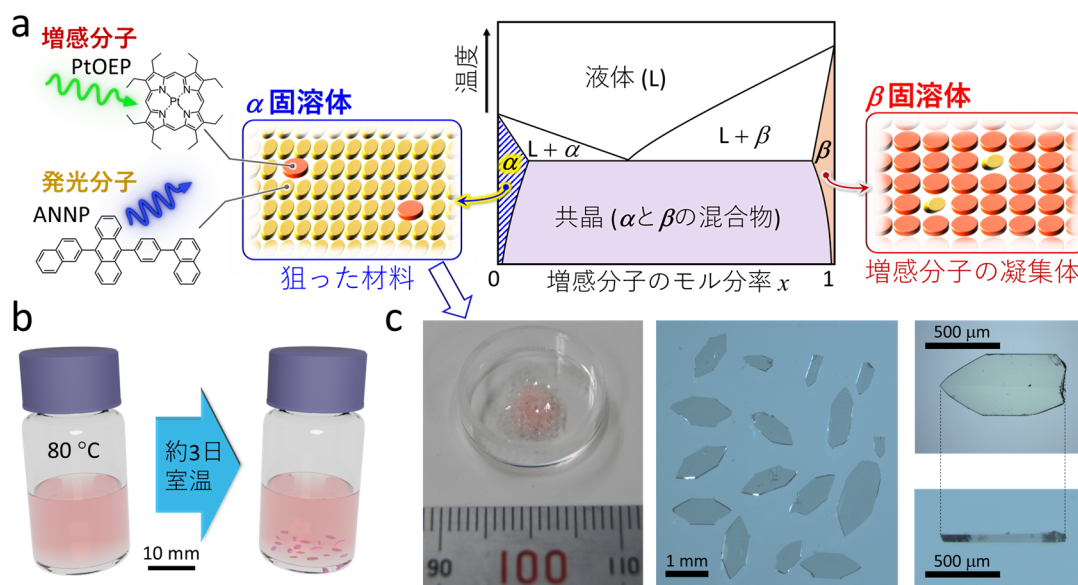


図2 成果1の材料創製。(a) 二成分の有限混溶共晶系相図の模式図。 α 固溶体が本研究で狙う相、 β 固溶体が増感分子の凝集体。(b) 結晶生成法の模式図。(c) 生成した固溶体 UC 結晶の写真。ピンク色は増感分子 PtOEP の色。

射に対する安定性のデータは示されていない。また、単純に増感分子と発光分子との混合溶液から結晶を析出させると、両者が分離した不均一な固体となり、そのような状態では増感分子から発光分子へのエネルギー移動が事実上行えないため、UC 効率は著しく低かった[20]。

そこで我々は、発光分子の結晶に、微量の増感分子を単分子レベルで分散させた熱力学安定な有機固体の創製を着想した[13]。図 2a に、一般的な有限混溶共晶系の相図（模式図）を示す。この模式図では横軸 x を増感分子のモル分率にとっている。すなわち、 $x=0$ 付近の α 相は発光分子の結晶に混合エントロピーの増大を駆動力として微量の増感分子が固溶した相、すなわち本研究で創製を狙う相、そして $x=1$ 付近の β 相は増感分子の結晶中に僅かに発光分子が固溶した相で、これは増感分子の凝集体であるので生成を抑止すべき相、となる。その成果を 3.1 節に示す。

2.2 成果 2 の背景と動機

「はじめに」で述べたように、紫外光は光触媒を効果的に機能させられ、貴重である。しかし地表における太陽光スペクトルには紫外光は僅かしか含まれない。光触媒では現状太陽光エネルギーの大半を捨てている[2-4]ことが課題である。可視光を紫外光に変換する UC（紫外 UC）を行う材料として有機溶媒溶液を用いた場合は、紫外 UC に必要な高い励起三重項エネルギーをもつ増感分子・発光分子と溶媒分子とが反応して前者を劣化させるため、光照射耐久性が著しく低かった[11]。

さらに、応用には基板上の固体膜であることがより望ましい。また、微小な擾乱や微量不純物に影響されやすい溶液中での各生成現象に頼るのではなく、既定の時間で高い再現性をもって成膜を行える工程が望ましい。このような欲求を動機として材料開発を行った。その成果を 3.2 節に示す。

3. 成果の概要

3.1 成果 1 の概要

α 相固体（図 2a）の選択生成を目指し、様々な青色発光分子の候補で結晶作製を試行錯誤した結果、図 2a に示す ANNP が、緑色光を吸収する増感分子である PtOEP と組み合わせられたときに目的を達成するものとして見いだされた[13]。試料作製は、まず PtOEP と ANNP をよく溶解するトルエンの溶

液を 80 °C に昇温後、これらを殆ど溶解しないエタノール（温度 80 °C）を加え、その後室温に静置し結晶析出を待った（図 2b）。約 3 日後、図 2c に示す透明・薄ピンク色の板状結晶を得た。ピンク色は PtOEP に由来すること（ANNP の結晶は無色透明）、濃紅色である PtOEP の凝集体は顕微鏡観察で見出されなかったこと、および結晶の光吸収スペクトルは PtOEP のトルエン溶液とほぼ同じであったことから、本結晶は本研究で創製を狙った α 固溶体と判明した[13]。また、光吸収係数から PtOEP:ANNP のモル比は約 1:50,000 と決められた。

図 3 に空气中で測定した試料結晶の UC 性能を示す。波長 542 nm の緑色光の照射により青色の UC 発光が得られた（図 3a）。この励起波長で UC 量子

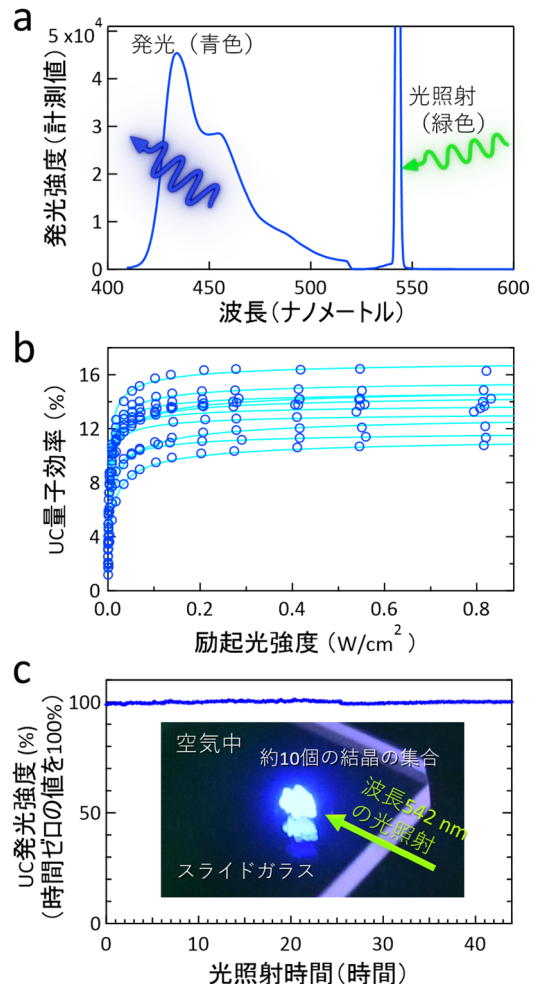


図 3 成果 1 の概要. (a) 波長 542 nm の緑色光照射時の発光スペクトル. (b) 10 点の試料について測定した UC 量子効率の励起光強度依存性. 曲線は理論的に（文献[12]の式 34）によるフィッティング. (c) 空气中で約 10 個の結晶の集合に波長 542 nm の緑色レーザー光（強度: 20 mW/cm^2 ）を照射した際の UC 発光強度の時間安定性および写真. 510 nm ロングパスフィルタを通して撮影.

効率（吸収光子数と放出光子数の比，50%が理論上限）の励起光強度依存性を計測したところ，図 3b のように，非常に低い励起光強度から UC 量子効率が高くなり，かつその絶対値も高いことから，本試料の高性能が明らかになった．空气中で波長 542 nm のレーザー光（強度：20 mW/cm²）を約 10 個の結晶の集合に連続照射したところ，少なくとも 44 時間の光照射では試料劣化（UC 発光強度の低下）は見られなかった（図 3c）．さらに，ソーラーシミュレーターを用いた計測では，自然太陽光強度の 0.2 倍以下という極めて低い閾値励起光強度をもつことが明らかになった[13]．これらの性能は従来では考えられなかった理想に近い高性能であり，従来研究の UC 材料の問題をほぼ全て解決している．

3.2 成果 2 の概要

まず，本目的に適する増感分子と発光分子の組み合わせを見出すため，様々な組み合わせの分子を示差走査熱量分析装置によって融解・固化させて，その二成分固体が紫外 UC を発現するかどうかスクリーニングした．その結果，図 4a に示す CBDAC および PPO が目的に叶うものとして見いだされた．2.2 節で述べた狙いを達成する工程として，図 4b に示す，水平方向に温度勾配をつけた温度場を一定レートで昇降温できる基板上への溶融成膜装置を設

計，製作した（詳細は論文[14]参照）．この装置のコンセプトを図 4b 右に模式的に示す．まず，二枚の円形ガラス基板間に，発光分子：増感分子のモル比が数万対一とした固体粉末を厚さ 200 μm のリング状スペーサーと共に挟み，上下から圧縮力を加えつつ発光分子の融点以上に昇温し，スペーサーの内側を分子の融液で満たす．続いて，一定の温度勾配 ΔT （図 4b 参照）のもと，典型的には 3 °C 毎分のレートで降温させ，融液の水平方向の一端から凝固・結晶化を開始させ，凝固が起きている地点を水平方向に一定の速さで移動させることにより，ガラス基板間に多結晶膜を生成した．装置から取り出した後，多結晶膜とガラス基板との付着力は弱いため，一方の基板に付着して得られた．多くの条件を試した中で最も高い UC 性能を示した試料の透過光下での顕微鏡観察写真を図 4c に示す．これらの写真から，温度勾配方向に結晶ドメインが伸長した多結晶膜が得られていることが分かる．なお，膜の形態と結晶性は ΔT および降温レートに強く依存した[14]．

図 5a に，図 4c の写真の多結晶膜に波長 440 nm の青色レーザー光を照射した際の発光スペクトルを示す．短波長側にスペクトル面積の約 6 割を占める紫外域 ($\lambda < 400$ nm) の UC 光が得られた．また，長波長側の発光はダウンコンバージョン発光であり，これは発光分子にエネルギー移動できなかった

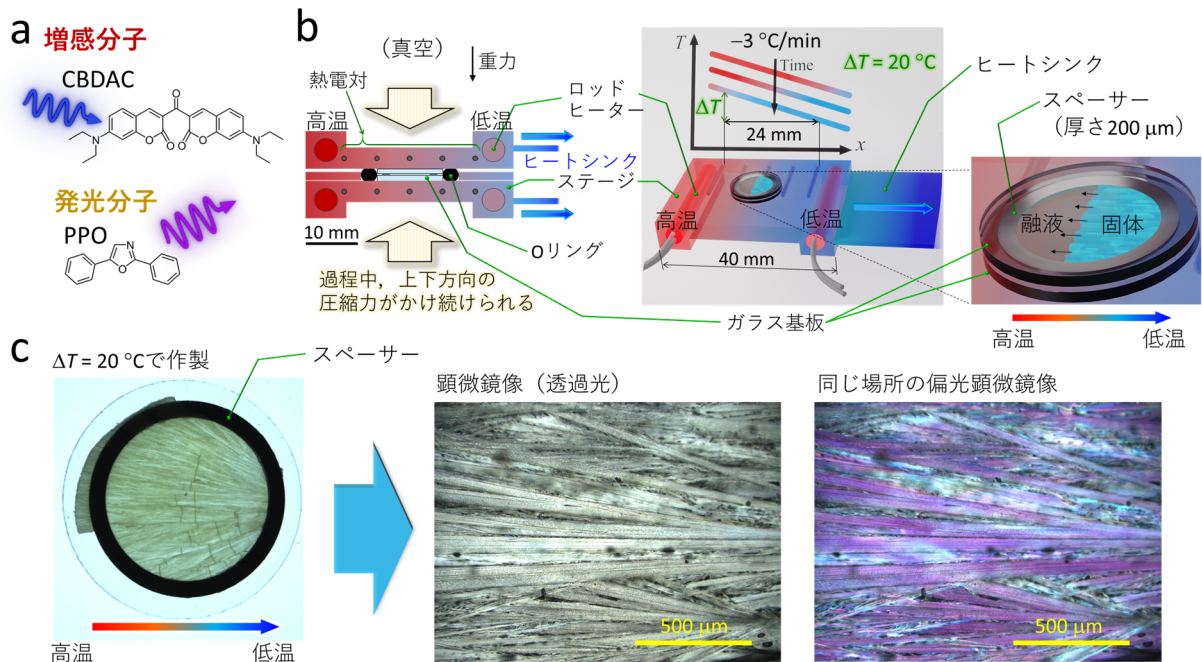


図 4 成果 2 の材料創製．(a) 見出した増感分子と発光分子の組み合わせ．(b) 開発した基板上成膜装置の模式図．温度勾配を保ちプログラム降温することで面内方向に融液からの結晶成長を行う．(c) 創製した固体膜の顕微鏡写真．偏光顕微鏡像では結晶ドメインが同じ色に見える．温度勾配方向に結晶ドメインが伸長した多結晶膜が生成されている．

増感分子からの蛍光である。この試料の UC 量子効率率は約 4.3 %（最大 50 %の定義）であり[14]、これはまだ改善の余地が大きい。その原因は CBDAC の三重項準位より PPO の三重項準位の方がやや高いことにあることが特定されている（図 5a で増感分子からの蛍光が強いのはそのため）。UC 量子効率の向上にはさらなる分子探索を要する。

この膜の耐久性を調べるため、空気中で波長 440 nm の青色レーザー光を連続照射した。図 5b に紫外 UC 発光の強度の時間推移を示す。空気中での照射にも関わらず 100 時間以上安定に紫外 UC を行えており、従来の紫外 UC の報告における試料（大半が不活性ガス中で評価され、かつ連続光照射の安定性は示されていない）から飛躍的な進歩を遂げた。

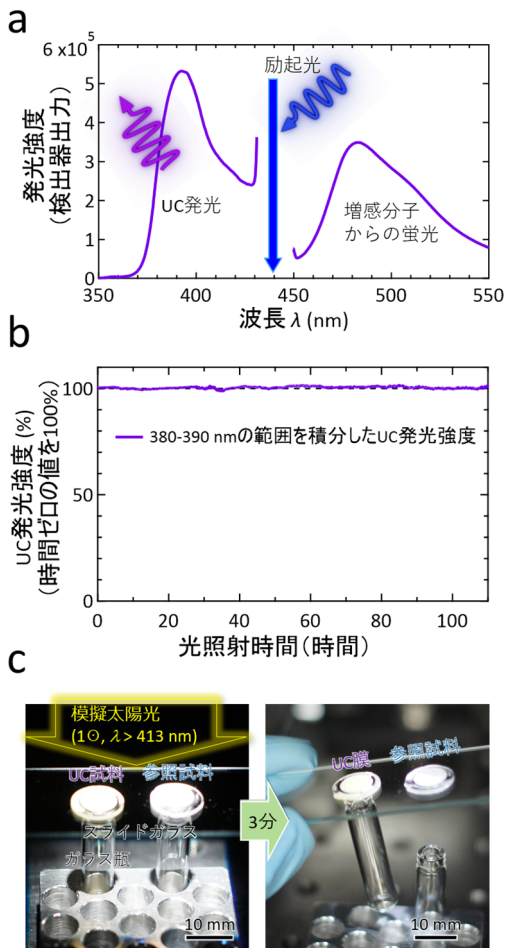


図 5 成果 2 の概要. (a) 波長 440 nm の青色光の照射時の発光スペクトル. (b) 空気中で基板上的多結晶膜に波長 440 nm の青色レーザー光（強度: 30 mW/cm²）を照射した際の UC 発光強度の時間安定性. (c) 紫外硬化樹脂を口に塗布したガラス瓶にスライドガラスを載せ、開発した紫外 UC 膜（左）および比較試料として増感分子抜き膜（右）とをその上に載せた上、紫外光を除去した太陽光シミュレーターの光を 3 分間照射した実験。

最後に、この紫外 UC 膜が有用であることのデモとして、図 5c に示す実験を行った[14]。この実験では、小さなガラス瓶の口に紫外硬化樹脂 (BD-SK CJ, Bondic) を薄く塗布し、その上にスライドガラスを置き、さらにその直上に紫外 UC 膜を成膜した円形ガラス基板を置いた。比較試料として、増感分子を入れずに成膜した試料（写真の右側）も設置した。両者の上から、フィルタで波長 413 nm より長波長の可視光のみを抽出したソーラーシミュレーターからの自然太陽光強度の光を 3 分間照射した。その結果、紫外 UC 膜を設置した方のみ接着が起り、簡単なデモではあるが、本試料の有用性が示された。

4. おわりに

本稿では、太陽光エネルギーの有効利用に資する光の短波長変換材料について、最近の我々の成果を紹介した。この技術、フォトン・アップコンバージョン (UC) は従来の蛍光の逆過程であり、分子、分子間エネルギー移動、およびその集合体の設計によって、光吸収-放出の波長、効率、および材料形態を選ぶことができる。励起三重項状態は、酸素分子と接触すると高速に失活する特性をもつが、本研究では稠密な有機結晶を創製することで、大気中でも長時間安定かつ自然太陽光強度以下で機能する従来になかった固体材料を創出した。その成果は 3.1 節、3.2 節に示したとおりである。これらはいずれも、少し前の本研究分野では遠い目標と思われたことを実現した画期的な成果である。

UC 分野の研究者がほぼ全員化学者である中、機械工学者・熱工学者である我々の存在は異質である。上述の成果が得られた鍵は、3.1 節では熱力学の概念の駆使にある。3.2 節では三次元 CAD を駆使し、温度コントローラー、熱電対、ヒートシンク、伝熱ブロックからなる温度勾配成膜を行う装置（図 4b）を設計・製作した点にあるが、これは典型的な伝熱工学の実験装置の製作の方法論である。つまり、熱工学の基底ベクトルを他分野に持ち込んでみると、未開の、他分野の人には来れない新空間を展開できる可能性がある。伝熱工学の方法論と学術は、熱工学者がいない領域においても輝きと重みを発揮しうる。研究修行は一生続くが、これからも熱工学者であることをアイデンティティとし、この貴重なコミュニティに深く感謝しつつ、非力な自分には何ができるのかを考えてゆきたい。

謝辞および注記

本研究に関する共同研究者の方々に深く感謝申し上げます。特に、一連の成果の縁の開始点となった東京工業大学物質理工学院 小西玄一准教授，日産自動車株式会社 中山達臣様，そして重要な寄与を頂いた出光興産株式会社の皆様に深く感謝申し上げます。本研究は科研費基盤(B)17H03183・20H02082の助成により行われた。本稿の図の多くは原著論文[13,14]の図の修正再使用である。これらの論文はクリエイティブ・コモンズ CC BY 3.0 でオープン化されており，その修正再使用は著作権上許されている。

参考文献

- [1] 太陽エネルギーの基礎知識，資源エネルギー庁 https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/attaka_eco/reference/pdf/sekkei/sekkei_1.pdf
- [2] Hashimoto, K. et al., TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55** (2005) 8269.
- [3] Bo, Y. et al., Recent Advances in Engineering Active Sites for Photocatalytic CO₂ Reduction, *Nanoscale*, **12** (2020) 12196.
- [4] Takata, T. et al., Photocatalytic Water Splitting with a Quantum Efficiency of Almost Unity, *Nature*, **581** (2020) 411.
- [5] Murakami, Y., Photochemical Photon Upconverters with Ionic Liquids, *Chem. Phys. Lett.*, **516** (2011) 56.
- [6] Murakami, Y. et al., Kinetics of Photon Upconversion in Ionic Liquids: Energy Transfer between Sensitizer and Emitter Molecules, *J. Phys. Chem. B*, **117** (2013) 2487.
- [7] Murakami, Y. et al., Kinetics of Photon Upconversion in Ionic Liquids: Time-Resolved Analysis of Delayed Fluorescence, *J. Phys. Chem. B*, **117** (2013) 5180.
- [8] Murakami, Y. et al., Ionic Liquid Dependence of Triplet-Sensitized Photon Upconversion, *J. Phys. Chem. B*, **118** (2014) 14442.
- [9] Murakami, Y. et al., Transparent and Nonflammable Ionogel Photon Upconverters and Their Solute Transport Properties, *J. Phys. Chem. B*, **120** (2016) 748.
- [10] Murakami, Y. et al., Triplet-Sensitized Photon Upconversion in Deep Eutectic Solvents, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2017) 30603.
- [11] Murakami, Y. et al., Visible-to-Ultraviolet (<340 nm) Photon Upconversion by Triplet-Triplet Annihilation in Solvents, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **22** (2020) 27134.
- [12] Murakami, Y. and Kamada, K., Kinetics of Photon Upconversion by Triplet-Triplet Annihilation: A Comprehensive Tutorial, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **23** (2021) 18268.
- [13] Enomoto, R. et al., van der Waals Solid Solution Crystals for Highly Efficient In-Air Photon Upconversion under Subsolar Irradiance, *Mater. Horiz.*, **8** (2021) 3449.
- [14] Enomoto, R. and Murakami, Y., Solvent-Free Temperature Gradient Melt Formation of Efficient Visible-to-UV Photon Upconversion Organic Films with Subsolar Threshold and Over 100 h Photostability in Air, *J. Mater. Chem. C*, **11** (2023) 1678.
- [15] 村上陽一，分子間エネルギー移動を用いた光子のエネルギー上方変換，*伝熱*, **55** (2016) 32.
- [16] Haeefele, A. et al., Getting to the (Square) Root of the Problem: How to Make Noncoherent Pumped Upconversion Linear, *J. Phys. Chem. Lett.*, **3** (2012) 299.
- [17] Singh-Rachford, T. N. and Castellano, F. N., Photon Upconversion based on Sensitized Triplet-Triplet Annihilation, *Coord. Chem. Rev.*, **254** (2010) 2560.
- [18] Gray, V. et al., Towards Efficient Solid-State Triplet-Triplet Annihilation based Photon Upconversion: Supramolecular, Macromolecular and Self-Assembled Systems, *Coord. Chem. Rev.*, **362** (2018) 54.
- [19] Joarder, B., Solid-State Photon Upconversion Materials: Structural Integrity and Triplet-Singlet Dual Energy Migration, *J. Phys. Chem. Lett.*, **9** (2018) 4613.
- [20] Monguzzi, A. et al., Low Power, Non-Coherent Sensitized Photon Up-Conversion: Modelling and Perspectives, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **14** (2012), 4322.

中遠赤外光吸収を持たない純炭素薄膜

～カーボンナノチューブの熱ふく射制御応用に向けて～

Pure Carbon Membrane without Mid- and Far-Infrared Optical Absorption

-Toward Spectral Control of Thermal Radiation using Carbon Nanotubes

西原 大志, 劉 知鋭, 宮内 雄平 (京都大学)

Taishi NISHIHARA, Zhirui LIU, Yuhei MIYAUCHI (Kyoto University)

e-mail: nishihara.taishi.8x@kyoto-u.ac.jp, miyauchi@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

有限温度の物体からは、熱ふく射として電磁波が放出され、そのスペクトルは Planck の法則と物体の分光放射率の積として記述される。黒体放射スペクトルを記述する Planck の法則では、物理定数以外の制御可能なパラメータは温度のみであるのに対し、物体の放射率は物質そのものの光物性や表面形状など、様々な要素に左右される。Kirchhoff の法則から、分光放射率は分光吸収率に等しい。したがって、太陽光熱変換や熱ふく射制御の研究では、用途に適した分光吸収率をもつ物質の探索・作製や、微細加工技術による表面のナノ・マイクロ加工などが行われる。例えば、太陽熱収集に用いられる吸収体（アブソーバ）には、太陽光を余すことなく吸収するための太陽光スペクトル領域（紫外から近赤外）での高い吸収率と、赤外放射による損失を防ぐためのゼロに近い中遠赤外放射率（＝吸収率）が望まれる。また、熱ふく射制御の先進応用技術の一つとして近年注目を集めている太陽光熱光起電力発電技術（STPV）[1-10] (図 1a) においても、赤外放射率の制御は重要である。図 1b と c に、1,500 K で動作する STPV システムに適したアブソーバと波長選択エミッタの吸収率、放射率スペクトルを模式的に示す（斜線領域）。STPV では、集光によりアブソーバで収集した高温太陽熱で波長選択エミッタと呼ばれる熱ふく射発生素子を加熱し、発生した近赤外熱ふく射を光起電力（PV）セルに照射して発電を行うが、波長選択エミッタの分光放射率が PVセルのバンドギャップ近傍にカットオフを持ち、ギャップ以下の光子エネルギーを持つ熱ふく射を発生しない場合、非集光（1SUN）及び最大集光条件での単セル型光起電力セルの限界効率（約 30%（1SUN）～41%（最大集光））を大きく超える高い原理効率（60～85%程度[1]）を持つ。アブソーバについては、集光によって入力パワーに対するアブソーバからの放射損失の割合を

ある程度小さくする余地はあるが、エミッタについては、PVセルのバンドギャップ以下の放射が損失につながるため、中遠赤外の放射率（吸収率）を抑えることが特に重要となる。

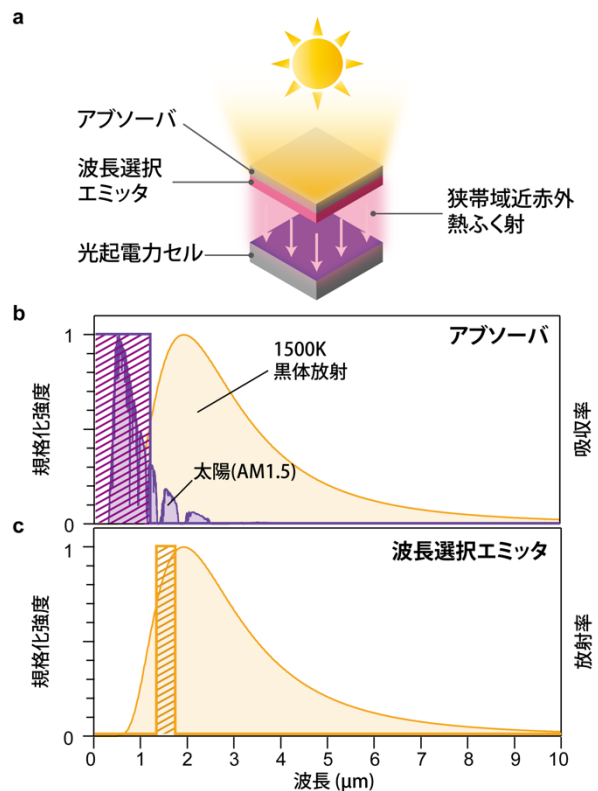


図 1 (a) 太陽光熱光起電力発電の概念図. (b) 太陽光スペクトルと理想的なアブソーバの吸収率（斜線領域）。1,500 K での動作時、熱リークを抑えるために 1,500 K の熱ふく射ピーク波長よりも低波長側に吸収のカットオフがある. (c) 理想的な波長選択エミッタの放射（吸収）率（斜線領域）。

固体の赤外域の電磁応答を決める誘電関数には、一般に、分極を伴う格子振動や自由な電子や正孔（キャリア）の低エネルギー遷移など様々な起源を持つ分極が寄与するが、自由キャリアによる中遠

赤外の広帯域応答は Drude 型応答として知られている[11]. バンドギャップを持つ半導体でも、ドーパされたキャリアや熱キャリアが存在することから、高温で赤外の自由キャリア応答に由来する吸収に対応する誘電関数の虚部をゼロにすることは難しい. そこで、通常は、熱ふく射強度が光子の状態密度と誘電関数の積の形で表されることを利用し、光子の状態密度の方を制御するという戦略が用いられる. こうした光子の状態密度制御は、物体表面のフォトニック加工やメタマテリアル加工によるフォトニックバンドギャップの形成等により可能となる[7-9]. しかし、作製コストが比較的高く、大面積化が困難な複雑な構造が必要になることや、微細化による耐熱性の低下など、課題は残されている.

このような背景の下、我々は1次元ナノ炭素物質であるカーボンナノチューブ (CNT) の特徴的な励起子光物性に着目した熱ふく射制御の研究を進めている (図 2a). 炭素材料と言えば、カーボンブラックとして知られる炭素微粒子やカーボンファイバーは黒色を呈しており、紫外から遠赤外までのほぼ全ての波長の光を吸収する、というのが一般的な常識といえる. これは、主としてギャップを持たないグラファイト系炭素物質の π 電子バンド構造に由来するが、その π 電子バンド構造自体を制御してグラファイト系物質にバンドギャップを与える方法が存在する. その方法とは、層状物質であるグラファイトの一層 (グラフェン) を、ナノサイズの直径を持つ円筒状に丸め、グラフェン上の電子波動関数を円周方向に量子化することである. このような円筒状ナノ炭素物質—CNT は、今から 30 年以上前に飯島澄男博士によって発見され[12], 後述のように、長年の研究を経て最近では高度に構造制御された CNT 薄膜も作製可能となりつつある. 構造制御 CNT 薄膜は、局所的にはグラファイトと同様の sp^2 炭素からなる純炭素物質でありながら、それ自体が顕著な波長選択吸収/放射特性を持ち、大面積膜の作製も容易であるという大きな利点がある. さらに、後述する励起子効果により、光学スペクトルの高い熱安定性も期待される. 伝熱 2022 年 4 月号[13]において、我々の CNT 薄膜の研究に関して、アブソーバと波長選択エミッタ素子の設計に不可欠な複素屈折率スペクトルの測定法

に焦点を当てた記事を寄稿したが、本稿では最近作製可能となった中遠赤外光吸収をほとんど持たない CNT 薄膜の広帯域基礎光学特性を紹介する.

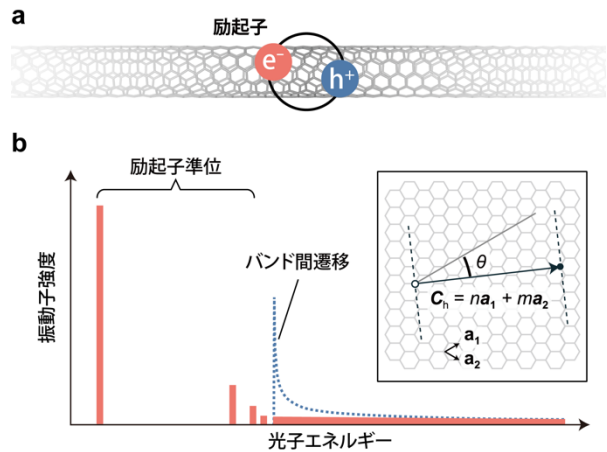


図 2 (a) CNT と励起子の模式図. 励起子は電子 (e^-) と正孔 (h^+) がクーロン引力で互いに束縛しあうことで形成される量子状態. (b) CNT の振動子強度スペクトルの模式図. 赤の領域が励起子に対応. 内挿図は、CNT のカイラリティの定義. グラフェンを巻いた時に重なる原子 (●, ○) を結ぶカイラルベクトル (C_h) でカイラリティを表す. a_1, a_2 は基本格子ベクトルで、この例のカイラルベクトルは $C_h = 6a_1 + 4a_2$, カイラル指数は (6,4).

2. CNT の基礎光学特性

CNT はグラフェンを直径 1 から数 nm 程度の円筒状に丸めた形状を持つ中空ナノ円筒物質である. CNT が入れ子構造になった多層型など様々な種類が存在するが、ここでは一層のグラフェンを丸めた単層型[14]の光学特性について紹介する. CNT には、「カイラリティ」と呼ばれるグラフェンの巻き方 (巻く方向と円筒直径, カイラル指数と呼ばれる二つの整数の組 (n, m) で表される (図 2b 内挿図)) の自由度を反映して、構造が異なる種が無数に存在する. カイラリティによって CNT は金属または半導体になり[15], 機械強度[16]や熱伝導率[17,18], 熱電応答[19]も変化する. CNT 中の電気伝導や低エネルギー光学遷移を担う π 電子の運動は、円周方向へは量子化されており、各 1 次元サブバンド内の電子の運動は、チューブの軸に沿った方向に制限されるため、CNT は擬 1 次元電子系とみなすことができる. このような電子の運動自由度が極端に

制限されている低次元系は、バルク材料とは大きく異なる電子状態密度特性を持ち、例えば、一般に1次元半導体ではバンド端で電子の状態密度が発散することが知られている（van Hove 特異性）。さらに、電子と正孔が空間的に強く閉じ込められ、かつ、弱いクーロン遮蔽の結果、半導体型 CNT の励起状態では、電子と正孔がクーロン引力で束縛された励起子と呼ばれる量子状態が極めて安定に存在する（図 2a）[20]。励起子は、水素原子に似た離散的なエネルギー準位構造を持つため、よく定まったエネルギーを持つ。光学ギャップを与える最低エネルギーの励起子共鳴は近赤外領域にあり、それより低エネルギー（長波長）の光子に対しては、半導体型 CNT は透明となる。励起子エネルギーは CNT の構造によって制御できるため、この特性は、波長選択アブソーバとして有望な特性である。

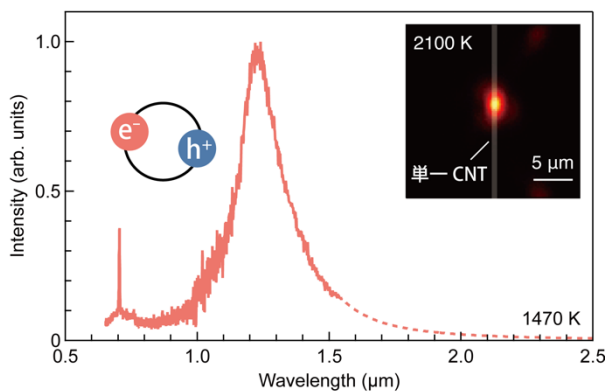


図 3 単一の半導体型 CNT の熱ふく射スペクトル。カイラル指数は (18,8), CNT 温度は 1,470 K. 約 1.5 μm 以下の波長領域までが測定結果で、長波長側の点線は、スペクトルを励起子とフォノンサイドバンドを考慮してフィッティングした曲線を外挿したもの。内挿図は、擬似色で表した、2,100 K での熱ふく射の様子。参考文献[21]のデータを引用。

また、半導体型 CNT 中の電子と正孔の束縛エネルギーはバルク半導体と比べて非常に大きく、単一の CNT を真空中で 1,000 K 以上の高温に加熱すると、励起子が熱生成され、その消滅に伴い励起子の離散的なエネルギーを反映した狭帯域熱ふく射が発生する（図 3）[21,22]。CNT の励起子熱ふく射は近赤外領域で生じ、一般的な半導体光起電力セルのバンドギャップエネルギーに近いことから、CNT は波長選択エミッタの有力な材料にもなりう

ると期待される。これらの理由から、我々は近年、CNT 薄膜の熱光学特性の研究を進めてきた。励起子の共鳴波長もカイラリティに依存するため[23]、カイラリティの揃った CNT 分散溶液[24]を用いることで、明確な励起子共鳴を反映した多彩な色を呈する CNT 薄膜を作製できる[25]。

伝熱 2022 年 4 月号では、この CNT 薄膜の複素屈折率スペクトルを紹介したが、その際、残された疑問点として、自由キャリアの寄与と考えられる Drude 型の応答が中遠赤外域で観測されていることを挙げた（後述の図 7 に再掲）。半導体型 CNT では、熱励起された電子と正孔が励起子を形成するため、自由キャリアの生成が抑制され、さらに励起子に振動子強度が集中することから、我々は、励起子エネルギー（光学ギャップ）以下の中遠赤外域の自由キャリア吸収はほとんど無いものと予想していた。にも関わらず、中遠赤外領域において、長波長で増大する吸収構造が観測され、その原因として、CNT に自然にドーパされた自由キャリアや、不純物として含まれた金属型 CNT の自由キャリア、または CNT を溶媒に分散させるために必要な界面活性剤など、様々な要素が候補として考えられる状況であった。最近の研究の進展により、界面活性剤の代わりにある種のポリマー分子を用いて CNT を分散・精製する方法を採用したところ、中遠赤外領域の複素屈折率スペクトルが大きく異なることがわかったので、ここでその結果を紹介する。

3. ポリマー分散単一カイラリティ CNT の作製

単一カイラリティ CNT 薄膜の原料として、CoMoCAT 法[26]で合成された試料（Sigma-Aldrich 社製）を用いた。この CNT 試料は、半導体型で、直径が 0.78 nm の (6,5) CNT を多く含んでいるが、他のカイラリティも混在している。この混合物試料から (6,5) CNT を選択的に抽出する方法として、 π 共役高分子ポリマー材料 Poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(6,6'-{2,2'-bipyridine})]（商品名 PFO-BPy）を用いる方法を採用した[27,28]。CNT 試料と PFO-BPy を適当な質量比でトルエンに入れ、バスソニケーションとチップソニケーションでよく混ぜ合わせる。混合溶液試料に遠心分離処理を行い、(6,5) CNT が分散された上澄み液を取り出すと、図 4a 内挿図に示した紫色の溶液が得られる。

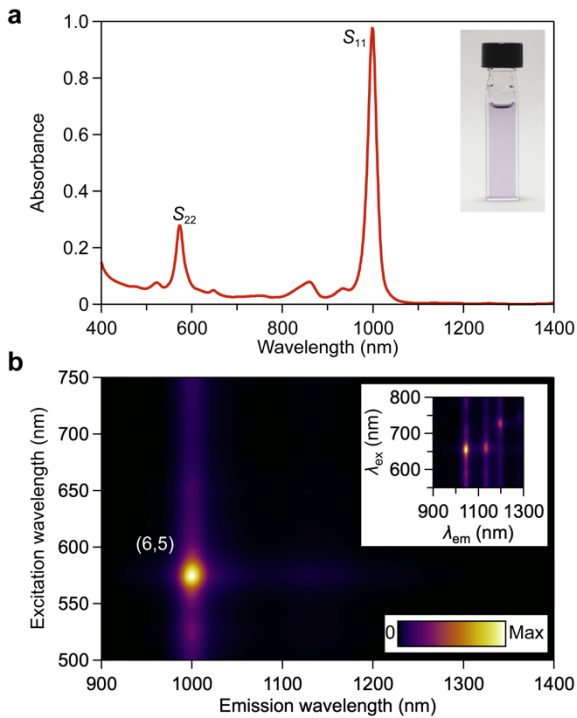


図 4 (a) (6,5) CNT 溶液（写真）の吸収スペクトル。 S_{11} 吸収から見積もった溶液の濃度は $1.5 \mu\text{g mL}^{-1}$ [29]。 (b) 発光励起 (PLE) スペクトル。縦軸は励起波長 (λ_{ex})，横軸は発光波長 (λ_{em})。内挿図は、多種 CNT を含んだ混合試料の PLE スペクトル。

図 4a に、トルエン溶液をレファレンスとして測定した (6,5) CNT 分散溶液の吸収スペクトルを示す。1,000 nm に観測された鋭い吸収ピークは、第一サブバンド (S_{11}) の励起子で、(6,5) CNT の光学吸収端を担っている。二番目に高い吸光度の 573 nm のピークは第二サブバンド (S_{22}) の励起子で、試料の紫色はこの励起子吸収の補色を反映している。また、 S_{11} , S_{22} 励起子よりも短波長側にある小さなピーク構造群は、フォノン散乱を伴う光吸収（フォノンサイドバンド）である。図 4b に、励起光の波長を変えながら測定したフォトルミネッセンス (PL) 強度を、励起波長と発光波長の二軸に対してプロットした発光励起 (PLE) マップを示す。この分光法は、CNT 研究では試料のカイラリティ純度を確認する方法としてよく用いられ、励起波長と発光波長の両方が共鳴する場合に、発光強度が極大となる。この励起と発光の共鳴波長の組み合わせから、試料に含まれるカイラリティを同定することができる [30]。多種カイラリティを含む試料の場合（図 4b の内挿図）、複数の発光極大が観測されるのに対し、

(6,5) CNT 溶液の PLE マップでは、(6,5) CNT に対応する発光極大のみが観測され、(6,5) CNT の純度が非常に高い試料であることを示している。

4. CNT 薄膜の作製と光学スペクトル

CNT 薄膜は、CNT のトルエン中分散溶液を吸引濾過することで濾過フィルター上に成膜した（図 5a）。成膜後、純トルエンを吸引して流すことで、さらに余分なポリマーやゴミを取り除き、溶液試料と同様の鮮やかな紫色を呈する薄膜を得た。用いたフィルター孔の直径は 100 nm で、フィルターを透過した濾液の吸収スペクトルには CNT の信号がほとんど観測されなかったことから、CNT の長さは 100 nm と同程度、またはそれよりも長いと考えられる。濾過フィルターをアセトンで溶かし、薄膜をサファイア基板や金属ワッシャーに転写後、エタノールで洗浄し、最終的に真空環境下の 300°C でアニーリングを行うことで、CNT 以外の残留分子を除去した。図 5b と c はそれぞれ、基板上膜と自立膜の写真で、膜の背面から光を照らして撮影したが、光を透過する紫色の薄膜が得られた。

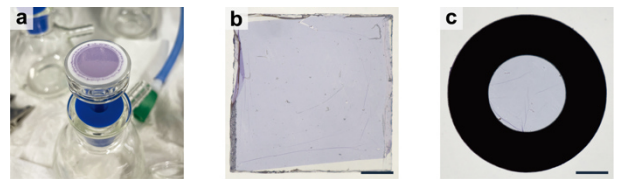


図 5 (a) 濾過フィルター上の (6,5) CNT 膜. (b) サファイア基板上 CNT 膜. (c) 金属ワッシャーを支持体とした自立 CNT 膜. スケールバーは 1 mm.

図 6a-c に、Fourier 変換赤外分光光度計 (FTIR; JASCO FT/IR-6600) と紫外可視近赤外分光光度計 (JASCO V-770) を組み合わせて測定した、ポリマー分散 CNT 薄膜の広帯域反射率、透過率スペクトルを示す。測定は全て室温条件で行った。図 6a は自立膜の透過率スペクトルで、溶液試料（図 4a）でも観測された S_{11} , S_{22} 励起子、ならびにそのフォノンサイドバンドの吸収がディップ構造として観測されている。顕著な特徴として、 S_{11} 励起子の共鳴波長よりも長波長側には明確な吸収構造はなく、4-20 μm の中遠赤外領域で透過率が 1 に近いこと、つまり、これまでの試料で観測されていたような長波長で増大する吸収構造を持たないことがわかった。

図 6b と c は、次節で述べる複素屈折率スペクトル決定のために測定した基板上膜の光学スペクトルで、参照光をそれぞれ CNT 側，サファイア基板側から入射して測定した。サファイア基板の強い中赤外光吸収があるため、4 μm 以下の波長領域の光学スペクトルをプロットしている。透過率スペクトルは、自立膜と似た特徴を示している。反射率スペクトルに関しては、観測光の入射方向によってスペクトルが大きく変化する。CNT 側から入射した場合の方が、 S_{11} 励起子のピークが強く観測され、または S_{22} 励起子の応答は入射方向によって反転している。これは、CNT 薄膜とサファイアの屈折率差が CNT 薄膜と空気のそれよりも小さく、サファイア基板から入射した場合には CNT の反射の信号が小さくなるためである。

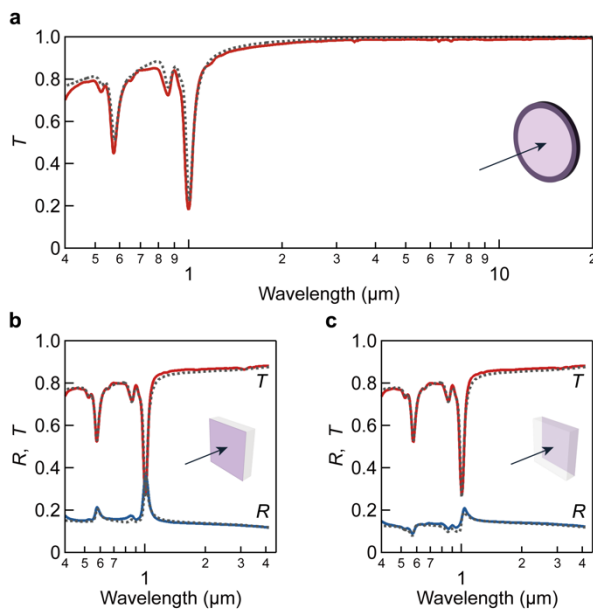


図 6 (a) 自立膜の透過率(T)スペクトル。(b,c) 基板上膜の反射率(R), 透過率スペクトル。内挿図のように、CNT 側 (b) とサファイア基板側 (c) から参照光を入射して測定。

5. 複素屈折率スペクトルの決定

得られた薄膜の光学スペクトルから、複素屈折率スペクトルを決定する。その方法や式の詳細は、参考文献[25]や伝熱 2022 年 4 月号に譲り、ここではエッセンスを簡単に説明する。複素屈折率スペクトルは、外場応答に関する因果律の要請から、実部と虚部が独立ではなく、Kramers-Kronig (KK) 関係を満たさなければならない[11]。そこでまず、KK

関係を満たす微視的な複素光学感受率のモデルからスタートし、様々な振動子の複素光学感受率と背景光学応答の和として表される全体の複素感受率($\hat{\chi}$)から、複素屈折率(\hat{n})のモデルを導出する($\hat{n} = \sqrt{1 + \hat{\chi}}$)。この屈折率モデルの実部と虚部は KK 関係を満たしており、これを用いて、光学伝搬行列法[31]や、薄膜内における電磁波の多重反射を考慮した一般的なモデル[32]で光学スペクトルを計算し、基板上膜と自立膜の実験結果を再現するように複素光学感受率のパラメータを決定する。

図 6a-c の点線は計算結果であり、全ての実験結果を上手く再現するパラメータが見つかった。このパラメータの中には膜厚も含まれており、伝熱 2022 年 4 月号で少し触れたが、全ての光学スペクトルを上手く再現しようとする、おおよその膜厚も見積もることができる。計算から見積もった薄膜厚は 26 nm で、かさ密度が約 1 g cm^{-3} の薄膜であることがわかった。これは、界面活性剤によって分散した CNT を用いた薄膜とほぼ同程度の値である。

図 7 に、得られた複素屈折率スペクトルを、界面活性剤分散 CNT 薄膜のものと合わせて示す。カイラリティは異なっているため、励起子吸収の波長が異なっている(直径 0.75–0.92 nm の界面活性剤分散 CNT 薄膜群の中では、線幅や中遠赤外域での構造など、励起子共鳴吸収波長以外のカイラリティ依存性はあまり大きくないことがわかっている[25])。この結果から、分散・精製方法により、複素屈折率スペクトルが大きく異なることが明らかとなった。吸収を表す虚部に注目すると、ポリマー分散 CNT 薄膜では、中遠赤外で複素屈折率の虚部がゼロに近く、長波長側に向かって増加する Drude 型の応答を示す界面活性剤分散 CNT とは対照的なスペクトルとなっている。このような、中遠赤外光吸収の不在は、超高温での単一 CNT の熱放射スペクトルが励起子に支配されていたことから期待されるように、キャリアドープされておらず、欠陥や金属型 CNT などの不純物の影響を無視できるような真性半導体型 CNT では、室温程度では、励起子効果も相まって自由に運動できる熱キャリア濃度が非常に少ないことを示唆している。一方、界面活性剤分散 CNT 薄膜に Drude 型の中遠赤外吸収が現

れた原因はわかっていないが、単一カイラリティの純度が高いポリマー分散試料で消失したことから、分離しきれず膜内に残留している金属型 CNT 由来の可能性が高いのではないかと考えている。ポリマー分散 CNT 試料では、ピーク構造もシャープで、励起子やフォノンサイドバンド以外の吸収が抑制された、選択性の高い吸収特性が観測されており、純粋な CNT 薄膜が本来有する光学特性により近い特性が得られているものと考えられる。ただし、今回採用したポリマーを用いる手法では、分離・精製可能なカイラリティの種類に強い制限があるため、工学的には、より多様なカイラリティの抽出が可能な界面活性剤を用いた方法において、今後さらに純度を向上させられることが望ましい。そうした今後の取り組みに向けて、今回検討した中遠赤外の複素屈折率スペクトルは、CNT の構造純度評価における一つの有用な基準になりうるものと考えている。

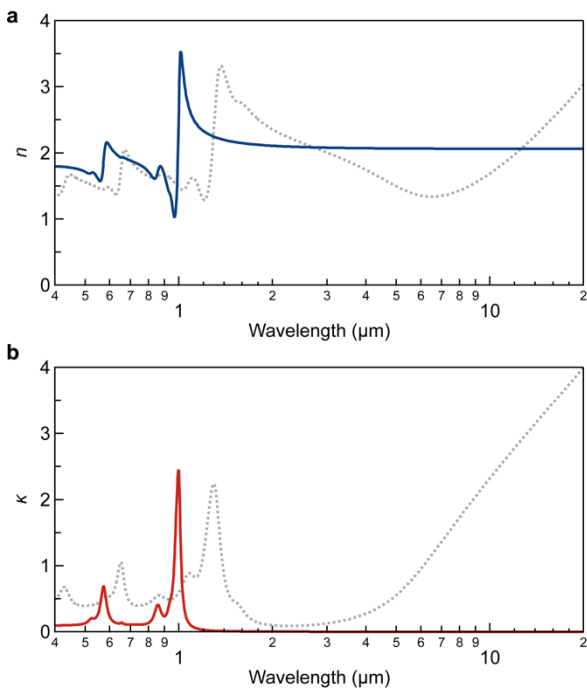


図7 ポリマー分散 CNT 膜（実線）と界面活性剤分散 CNT 膜（点線）の複素屈折率スペクトルの実部（a）と虚部（b）。界面活性剤分散 CNT 膜については、参考文献[25]のデータを引用してプロットした。ポリマー分散 CNT 膜については (6,5)CNT, 界面活性剤分散 CNT 膜については (10,3) CNT の純度が高い薄膜となっている。

6. おわりに

本稿では、最近作製に成功した、中遠赤外光吸収を持たない単一カイラリティ CNT 薄膜について、作製方法から複素屈折率スペクトルの測定法、その光学特性の特徴について述べた。キャリアドーブされていない高純度・真性半導体型 CNT 薄膜では、長波長で増大する Drude 型の中遠赤外吸収はほとんど現れないことがわかった。このことは、熱的に励起された電子と正孔がクーロン力で引きつけあって励起子を形成するため、室温程度では自由に動き回れる熱キャリアの濃度が極端に小さいことに由来すると考えられる。今回分離精製した CNT のカイラリティは (6,5) で、他にも PFO と呼ばれるポリマーを用いると (7,5) CNT を得ることができる。しかし、この二種は直径が比較的細く、界面活性剤分散で分離可能な (10,3) CNT のようなより大径のものとは比べて耐熱性が劣る点を含め、高温でのふく射制御応用には未だ課題が残されている。ただし、今回の研究により、原理的には可能と期待していた、アブソーバやエミッタ応用で問題となる中遠赤外吸収のほとんどない CNT 薄膜の作製が可能であることが確かめられた点は、CNT 薄膜の熱ふく射制御応用に向けて重要な進展であると考えている。今後の分離精製技術のさらなる発展により、他の様々な半導体型 CNT でもカイラリティ純度が高い薄膜を作製することでできれば、高温での熱ふく射制御に十分な耐熱性を有する、中遠赤外吸収がほとんどない CNT 薄膜の作製も可能になると期待している。

謝辞

本稿で紹介した研究成果は、JST CREST JPMJCR18I, KAKENHI JP19K15384, JP21K14486, JP22K18287 の支援を受け、高倉章 特定研究員、寺西開知 大学院生（以上、京都大学）との共同研究のもとで得られたものである。

参考文献

- [1] Harder, N.-P. and Würfel, P., *Semicond. Sci. Technol.*, **18** (2003) S151.
- [2] Rephaeli, E. and Fan, S., *Opt. Express*, **17** (2009) 15145.
- [3] Datas, A. and Martí, A., *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **161** (2017) 285.

- [4] Lenert, A., Bierman, D. M., Nam, Y., Chan, W. R., Celanović, I., Soljačić, M., and Wang, E. N., *Nat. Nanotechnol.*, **9** (2014) 126.
- [5] Bierman, D. M., Lenert, A., Chan, W. R., Bhatia, B., Celanović, I., Soljačić, M., and Wang, E. N., *Nat. Energy*, **1** (2016) 16068.
- [6] Kohiyama, A., Shimizu, M., and Yugami, H., *Appl. Phys. Express*, **9** (2016) 112302.
- [7] Woolf, D. N., Kadlec, E. A., Bethke, D., Grine, A. D., Nogan, J. J., Cederberg, J. G., Burckel, D. B., Luk, T. S., Shaner, E. A., and Hensley, J. M., *Optica*, **5** (2018) 213.
- [8] Suemitsu, M., Asano, T., Inoue, T., and Noda, S., *ACS Photon.*, **7** (2020) 80.
- [9] Isobe, K., Okino, R., and Hanamura, K., *Opt. Express*, **28** (2020) 40099.
- [10] 櫻井篤, 伝熱, **55** (2016) 18.
- [11] 櫛田孝司, 光物性物理学, 朝倉書店 (1991).
- [12] Iijima, S., *Nature*, 354 (1991) 56.
- [13] 西原大志, 宮内雄平, 伝熱, **61** (2022) 34.
- [14] Iijima, S. and Ichihashi, T., *Nature*, **363** (1993) 603.
- [15] Saito, R., Fujita, M., Dresselhaus, G., and Dresselhaus, M. S., *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 2204.
- [16] Takakura, A., Beppu, K., Nishihara, T., Fukui, A., Kozeki, T., Namazu, T., Miyauchi, Y., and Itami, K., *Nat. Commun.*, **10** (2019) 3040.
- [17] Yamamoto, T., Watanabe, S., and Watanabe, K., *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 075502.
- [18] Marconnet, A. M., Panzer, M. A., and Goodson, K. E., *Rev. Mod. Phys.*, **85** (2013) 1295.
- [19] Ichinose, Y., Yoshida, A., Horiuchi, K., Fukuhara, K., Komatsu, N., Gao, W., Yomogida, Y., Matsubara, M., Yamamoto, T., Kono, J., and Yanagi, K., *Nano Lett.*, **19** (2019) 7370.
- [20] Ando, T., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **66** (1997) 1066.
- [21] Nishihara, T., Takakura, A., Miyauchi, Y., and Itami, K., *Nat. Commun.*, **9** (2018) 3144.
- [22] Konabe, S., Nishihara, T., and Miyauchi, Y., *Opt. Lett.*, **46** (2021) 3021.
- [23] Kataura, H., Kumazawa, Y., Maniwa, Y., Umezu, I., Suzuki, S., Ohtsuka, Y., and Achiba, Y., *Synth. Met.*, **103** (1999) 2555.
- [24] Liu, H., Nishide, D., Tanaka, T., and Kataura, H., *Nat. Commun.*, **2** (2011) 309.
- [25] Nishihara, T., Takakura, A., Shimasaki, M., Matsuda, K., Tanaka, T., Kataura, H., and Miyauchi, Y., *Nanophotonics*, **11** (2022) 1011.
- [26] Kitiyanan, B., Alvarez, W. E., Harwell, J. H., and Resasco, D. E., *Chem. Phys. Lett.*, **317** (2000) 497.
- [27] Ozawa, H., Ide, N., Fujigaya, T., Niidome, Y., and Nakashima, N., *Chem. Lett.*, **40** (2011) 239.
- [28] Eckstein, K. H., Hirsch, F., Martel, R., and Hertel, T., *J. Phys. Chem. C*, **125** (2021) 5700.
- [29] Sanchez, S. R., Bachilo, S. M., Kadria-Vili, Y., Lin, C.-W., and Weisman, R. B., *Nano Lett.*, **16** (2016) 6903.
- [30] Bachilo, S. M., Strano, M. S., Kittrell, C., Hauge, R. H., Smalley, R. E., and Weisman, R. B., *Science*, **298** (2002) 2361.
- [31] 梶川浩太郎, 岡本隆之, Python を使った光電磁場解析, コロナ社 (2019).
- [32] 藤原裕之, 分光エリプソメトリー, 丸善出版 (2011)

ふく射伝熱に基づく熱の電力変換

Power conversion of heat based on radiative heat transfer

清水 信（東北大学）

Makoto SHIMIZU (Tohoku University)

e-mail: makoto.shimizu.a3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

「熱」は我々の社会の中で最も身近なエネルギーであり、例えば国内産業分野における最終エネルギー消費形態の5割以上は熱として消費されている。しかしながらそのうち3割以上は未利用廃熱となっている[1]。したがって熱の有効利用はエネルギー利用の高効率化を進める上で大きな意義を持つ。熱の利用方法を考えた場合には温水としての利用がシンプルだが利用先が限定される等、大量の熱利用は困難である。したがって電力変換により電力源として利用することが望ましいと言える。このような熱の電力変換は新たな電力源創出や、太陽エネルギー高度利用にも繋がる。加えて、蓄熱技術と組み合わせることで電力供給の安定化にも貢献が可能であり、今後のグリーン成長社会実現の上で重要な役割を果たすと考えられる。

熱の電力変換を考えた場合は火力発電に代表される熱機関を用いた電力変換が一般的であり、産業廃熱の電力利用においてはボイラー・タービンを用いた発電方法が広く普及している。また太陽熱を用いた集光型太陽熱発電システムにおいても発電部分は蒸気タービンが用いられている。これら熱機関に基づく電力変換は一般に大規模なものが多く、経済性および機能性の観点から小・中規模のシステムでは導入が困難な場合も多い。また、近年、熱電変換技術の研究も進展しているが[2]、民生用、運輸用、産業用ともに開発・試作または基礎研究段階のものも多く、実用化されているものはまだ少ない。

これに対して我々はふく射伝熱に基づく熱の電力変換技術に関する研究を行ってきた。伝熱媒質が光（電磁波）であるため、光の波動的性質に基づくスペクトル制御によって必要な波長域に限定した熱輸送を実現することで熱源と発電部分との間での温度差をつけやすいといった利点がある。また、光の制御は伝導伝熱や対流伝熱における熱

の制御よりも制御の自由度が高く、適切な制御によって従来よりも高効率な電力変換を実現する可能性を有する。

本稿では、熱光起電力発電 (Thermophotovoltaics; TPV) を用いた一般に 1000°C 以上の高温熱源からの熱ふく射を電力変換するシステムに関して我々が行ってきた研究を中心に紹介し、加えて低温熱源からの熱ふく射を電力変換するためのシステムとしてレクテナを用いた光波発電に関する研究について紹介する。

2. TPVを用いた熱の電力変換

2.1 TPVの概要

TPV は高温熱源からの熱ふく射を光起電力 (PV) セルによって電力へ変換するシステムであり、廃熱、燃焼器、集光太陽光等によって加熱されたエミッタと呼ばれる中間体からの熱ふく射を電力へ変換する (図1参照)。一般に PV セルには III-V 族の化合物半導体等を用いたナローバンドギャップセルが用いられ、セルの感度波長において高い放射密度が得られるよう、エミッタは 1000°C 以上の温度で使用されることが多い。熱源の温度は太陽表面温度 (約 6000 K) より低いが、エミッタと PV セルの距離が近く大きな形態係数が実現できるため、数 W/cm^2 の比較的大きな発電密度が実現可能である。

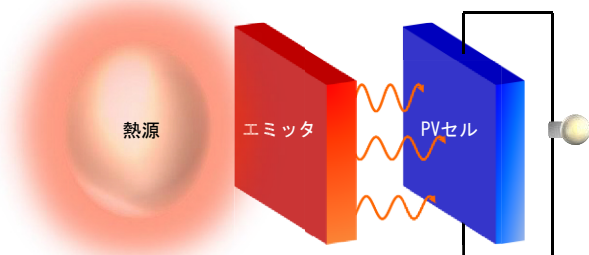


図1 TPV 発電システム概要図

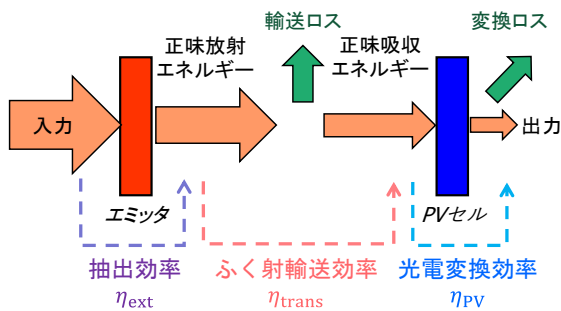


図2 TPV 発電システムのエネルギーフロー

一方、変換効率の観点から見ると最近 MIT と NREL のグループが 2000°C 超の熱源を用いたもので 40% 超の効率を達成している[3]. TPV 発電のシステム効率 (η_{system}) は図 2 に示すエネルギーフローとそれに対して定義される各効率で表すことができ、このうちエミッタから PV セルへのふく射輸送効率 (η_{trans}) および PV セルにおける光電変換効率 (η_{pv}) が支配因子となる。高い η_{trans} 実現のためにはシステム設計が重要であり、高い η_{pv} 実現のためにはエミッタからの熱ふく射スペクトルと PV セル感度波長とのマッチングが重要である。感度波長との高いマッチングを実現する方法として、波長選択熱放射技術がこれまでに研究されている。フォトンクス技術に基づく様々な方法がこれまでに提案されているが、1000°C 以上の高温で波長選択熱放射を実現するためには、材料科学や材料力学等の知見も取り入れる必要がある。このような高温における熱放射制御技術を我々は高温フォトンクスと呼び、これまでに金属表面の微細構造[4]や金属と誘電体の多層膜構造[5]に基づく制御技術を報告している。

この波長選択熱放射技術に加えて近年、PV セルと組み合わせた感度波長とのマッチング技術が注目されている。TPV ではエミッタと PV セルの距離が近いため、PV セル感度波長外の熱ふく射をエミッタへ戻すことで実効的に感度波長の熱ふく射のみ輸送することが可能となり、これをフォトンリサイクリングと呼ぶ。フォトンリサイクリングのためには高い感度波長外反射率 (R_{ob}) を実現することが重要である。一般に半導体は感度波長外の熱ふく射を透過するためセル裏面に電極も兼ねた金属反射層 (Back-surface-reflector; BSR) を形成することで高い R_{ob} が実現される。しかしながら通常の太陽電池の設計概念では感度波長内の

光を損失無く吸収することが重要であるため、セルの高ドープ層におけるフリーキャリア吸収や反射防止構造に伴う多重反射に伴う吸収が存在し、反射率は高くない。例えば筆者が実験で使用している GaSb セル (JX Crystals 社から購入) の R_{ob} は約 30% である。一方、最近 90% を超える R_{ob} を有するセルが報告されており、特にセル裏面と金属層の間にギャップを設け干渉に伴う吸収損失を大幅に低減させた Air-bridge 構造と呼ばれる TPV セルでは平均 98% の非常に高い R_{ob} が実現されている[6]。尚、先述した効率 40% 超を達成している研究においても二接合型で且つ高い感度波長外反射率を有する PV セルが用いられている[3]。

2.2 フォトンリサイクリング効果に対する各パラメータの影響

フォトンリサイクリングの効果を生かすためにはセルで反射された熱ふく射をエミッタへ高効率に戻す構造が必要であり、これは η_{trans} と大きく相関する。そこで我々が行っている集光太陽光を熱源に用いた Solar-TPV システムにおいて η_{trans} とシステム効率 η_{system} の相関を異なる感度外波長反射率のセルを仮定して解析した[7]。

また、一般に 1000~2000°C においてはエミッタ温度が高いほど感度波長とのマッチング向上により高い PV セル光電変換効率を得ることができる。また、一般に耐熱性に劣る波長選択エミッタと炭化ケイ素やグラファイトといった高い耐熱性が期待できる黒体的エミッタはフォトンリサイクリングを考慮した場合どちらの方が高い効率を示すかは疑問である。そこでエミッタのスペクトル特性および耐熱性を考慮して到達可能なシステム効率の比較を行った。解析においては入力エネルギー密度 200W/cm² 以下、また波長選択エミッタを用いた場合の最高到達温度を積層型で報告されている耐熱温度である 1400°C 以下[8]、太陽光の吸収面は黒体吸収面として解析を行った。

図 3(a) に示す通り、ふく射輸送効率の向上によって到達可能なシステム効率 η_{system} は増大し、感度外反射率 $R_{\text{ob}}=0.30$ の PV セルを用いた場合は波長選択エミッタの方が黒体エミッタよりも高いシステム効率を示す。一方で $R_{\text{ob}}=0.98$ の PV セルを用いた場合は $\eta_{\text{trans}}=0.75$ を境に黒体エミッタの方が高いシステム効率を示している。これは波長選択エミッタの上限温度が 1400°C であり、高ふく射

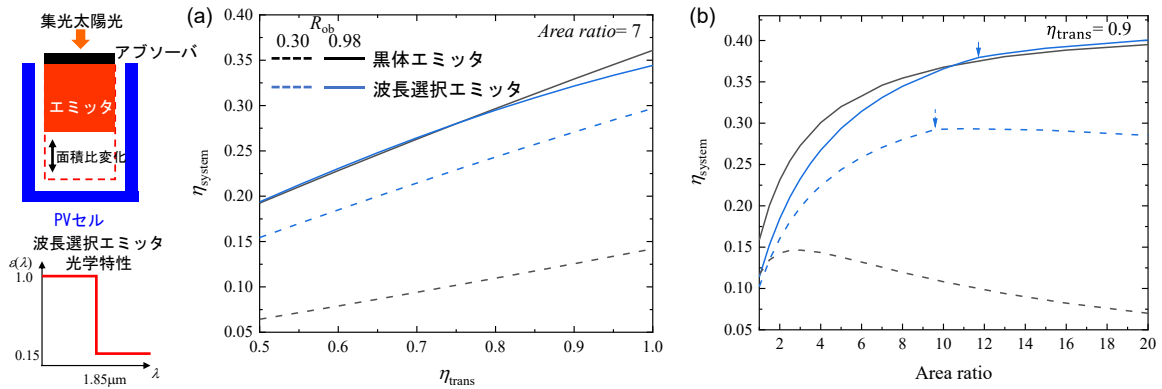


図3 (a)Solar-TPVにおけるシステム効率のふく射輸送効率依存性. 波長選択エミッタは図に示す GaSb セルのバンドギャップを想定した波長 $1.85\mu\text{m}$ でカットオフを持つ特性を示す. カットオフ波長以上での放射率は高温での自由電子散乱増大による放射率増大を考慮した $\epsilon = 0.15$ を用いた. (b)ふく射輸送効率 0.9 の系におけるシステム効率の面積比依存性. 青矢印は波長選択エミッタにおいて入力エネルギー密度が設定上限の $200\text{W}/\text{cm}^2$ に達し, エミッタ温度が 1400°C 以下になるエミッタ面積比を示している.

輸送効率のシステムでは黒体エミッタが優位性を持つことを示している. また $\eta_{trans} = 0.50$ と半分以上の熱ふく射が系外に損失するシステムであっても $R_{ob} = 0.98$ の PV セルを用いた方が $R_{ob} = 0.30$ の PV セルに対して波長選択エミッタを用いた場合より高いシステム効率を得られており, PV セルの感度波長外反射率の向上が TPV 高効率化の上では非常に重要であることがこの解析結果からもわかる.

図 3(b)には $\eta_{trans} = 0.90$ においてアブソーバとエミッタの面積比を変化させた場合における黒体エミッタと波長選択エミッタの η_{system} を示す. エミッタ面積比が大きくなると全放射量に対するアブソーバからの再放射割合が相対的に小さくなる. したがって図 2 に示した抽出効率が大きくなり η_{trans} と η_{pv} がシステム効率の支配因子となる. $R_{ob} = 0.30$ の場合は面積比約 10 において波長選択エミッタを用いた場合に最大の効率を得られるのに対し, $R_{ob} = 0.98$ の場合には面積比が大きくなるほど η_{system} は向上し, 波長選択エミッタの場合に面積比 20 において $\eta_{system} = 40\%$ となった. また, 面積比約 10 までは黒体エミッタの方が高効率を示していたが, それ以上では波長選択エミッタの方が高効率となった. これは面積比の増大によって平衡温度が低下したからである.

以上のように入力エネルギー密度 $200\text{W}/\text{cm}^2$, 波長選択エミッタの耐熱性 1400°C 以下という条件では R_{ob} 次第で光子リサイクリング効果により耐熱性が高い黒体エミッタにおいて高効率が

実現できることが示された. 一方で, 入力エネルギー密度が小さくなり黒体エミッタの平衡温度が低下する場合には波長選択エミッタを用いた方が高い効率を得られる. このように熱ふく射のマネジメントとエミッタおよび PV セルのスペクトル制御技術により TPV を用いた高効率な熱の電力変換が可能であることが分かる.

3. レクテナを用いた熱の電力変換

3.1 レクテナの概要

前節では TPV を用いた 1000°C 以上の高温熱源における熱の電力変換について説明し, エミッタにおける波長選択熱放射または PV セルにおける感度波長外反射率の向上によって高効率変換が可能であることを説明した. 一方, PV セルを用いる場合は感度波長が半導体のバンドギャップに依存する. したがって低温熱源からの光子エネルギーが小さい光を電力変換するためにはバンドギャップの小さな半導体を用いる必要があるが, バンドギャップが小さいと室温で真性領域となるため TPV を 300°C 以下の低温域で応用することは本質的に困難である (図 4(a)参照). そこで我々はレクテナを用いた中・遠赤外光の電力変換技術開発に取り組んでいる.

レクテナは図 4(b)に示すようにアンテナとダイオードから成るデバイスであり, 電磁波をアンテナで内部の電場振動に変換し, ダイオードによって整流することで電力として抽出する. したがって感度波長はアンテナの設計次第で制御可能であ

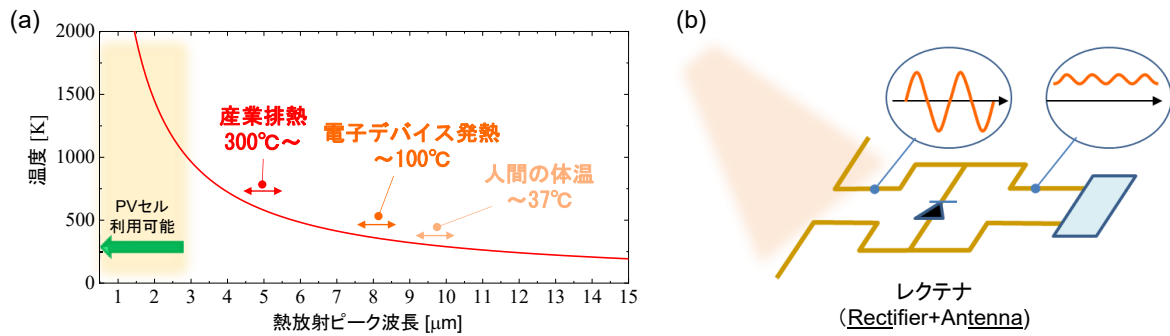


図 4 (a)熱放射ピーク波長と熱源温度の関係および各種熱源の主波長域 (b)レクテナによる電力変換概要

り、原理的にあらゆる波長における電磁波の電力変換が可能であり低温熱源からの熱ふく射電力変換への応用が可能である。これは従来の PV セルを用いた光電変換が光の粒子性に基づく発電技術であるのに対し、光の波動性に基づく光波発電技術と言うことができ、研究開発要素は全く異なる。

本技術はこれまで無線送電技術としての研究開発が主に行われており、数 GHz の周波数帯における電磁波に対しては 90% 超の非常に高い電力変換効率が実証されている[9].

一方で赤外から可視光波長域の電力変換に用いるレクテナは光レクテナ等と呼ばれ、原理自体は古くから存在し[10]、赤外光検出への応用例は以前から報告されているものの[11]、エネルギー応用に関する研究開発が近年大きく進展し注目を集めている[12-14]. ただし変換効率は 1% に満たず、従来のマイクロ波用レクテナとは大きな差がある。原因の一つがダイオードの応答周波数である。GHz 域では応答速度がナノ秒程度で良いが数十 THz 以上となる赤外から可視光域ではフェムト秒オーダーの応答速度が必要となる。そのため従来の pn 接合ダイオードやショットキー障壁ダイオードの応用は難しく、本質的に高速応答可能な金属—絶縁体—金属 (MIM) トンネルダイオードに基づくダイオード技術の開発が必要となる。しかしながら MIM トンネルダイオードにおいても整流性能を表す電流—電圧曲線の順バイアスと逆バイアスにおける非対称性とダイオード導電率がトレードオフになるといった課題がある。

ダイオード導電率が小さくなるとアンテナとダイオードのインピーダンスマッチング損失が大きくなる。したがってレクテナ高効率化のためには整流性能と導電率両性能が高いダイオードの実現が必要である。詳細は省略するが我々は酸素不定

比性トンネル層を導入する方法や[15]、トンネル層に数 nm の金属ナノ粒子を分散させた電場分布不均一構造を用いる方法[16]によってトンネル障壁形状を制御し従来方法では困難であった整流性能とダイオード導電率の両立を可能とする基盤技術を実現している。

3.2 空洞共振器構造に基づく光レクテナデバイス

上記の高速応答ダイオードに加えてアンテナとダイオードの結合構造開発も課題である。熱ふく射はコヒーレンスが非常に低いため複数のアンテナで生じた交流電場を一つのアンテナで整流することは出来ず、個々のアンテナにダイオードを組み合わせた構造が必要となる。また、アンテナで生じた電場振動を損失無くダイオードへ輸送する必要があり、且つ輸送線路がアンテナの吸収特性へ及ぼす影響も考慮する必要がある。加えてトンネルダイオードは数 nm のトンネル層が必要であり、安定したトンネル層作製プロセスも考慮した構造検討が必要である。

以上の観点から我々は空洞共振器構造をアンテナとした独自の光レクテナ構造を開発した[14] (図 5(a)参照)。金属マイクロキャビティ構造は空洞共振器として振る舞うことが知られており[17]、このキャビティ構造において電磁波の共振波長 λ_r は各次元での定在波の組み合わせによって、式 (1) のように表される。

$$\lambda_r = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{2n-1}{2L_z}\right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 L_x, L_y, L_z はそれぞれキャビティの長さ、幅、高さ、 l, m, n は各次元のモードを表す整数である。この構造では開口部で自由端となる電場定在波が生じ、電場定在波の節で磁場定在波の振

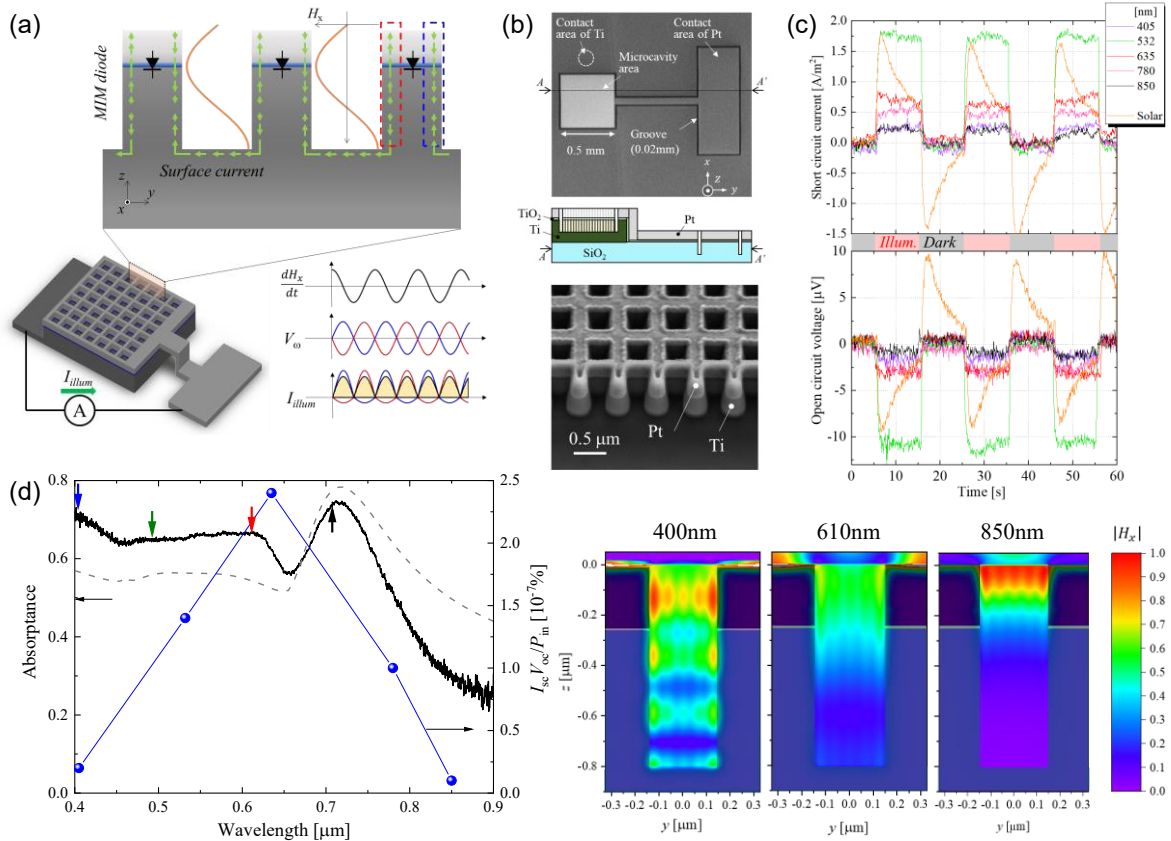


図 5 (a)空洞共振器構造に基づく光レクテナデバイスの概要 (b)作製した光レクテナデバイスの SEM 画像 (c)各レーザー光源及びソーラーシミュレーター光源に対する短絡電流密度および開放電圧測定結果 (d)作製試料の吸収率および各レーザー光源に対する変換概算効率および波長 400, 610, 850nm の入射光に対する電場シミュレーション結果. 吸収スペクトル中矢印は共振モード波長を示す. 文献[14]より転載.

幅が最大となる。磁場の振動が最も大きくなる位置では、空洞壁面に誘導電流が発生し、この位置にトンネル層を配置することで、MIM ダイオードが誘導電流を整流し、レクテナとして機能する。この構造によりダイオードとアンテナ間のオミック損失や、線路の光学特性への影響を防ぐことができる。この構造のもう一つの特徴は、従来多く用いられてきた平面アンテナに基づくデバイスでは半波整流だったのに対し、特別な回路を用いることなく、全波整流が可能な点である。また、デバイス形成面に対して垂直方向にトンネル層を有する構造となっており、原子層堆積法 (ALD) 等を用いたトンネル層の安定的な形成が可能である。さらに空洞共振器サイズによって原理的にあらゆる波長域での電力変換が可能となる。

発電特性を評価するため電子線リソグラフィを用いて可視光に共振波長を有する空洞共振器構造を作製し (図 5(b)), 波長の異なるレーザー光を用

いた発電性能評価試験を行い、光照射時に短絡電流および開放電圧が生じることを確認した (図 5(c)). ソーラーシミュレーターを用いて白色光を照射した場合にも発電できているが、時間経過と共に信号減少が見られ、これは入射白色光のエネルギー密度が他のレーザー光源の 160 倍であることに起因する熱起電力によるものだと考えられる。また、短絡電流密度は同様の入射光密度にも関わらず Sharma[12]らが報告した値に対し 100 倍以上大きな値が得られ、世界トップの値を示した。

図 5(d)に示すように出力概算値と入力からの効率を算出すると波長依存性が見られ、第二共振モード波長の光に対する効率が最も高い値を示した。効率が低かった短波長側と長波長側の光に対する磁場分布と比較するとトンネル層付近で高い磁場振幅を示していることから、作製したデバイスは想定通り機能していると考えられる。一方で効率は 10⁻⁶%オーダーであり、まだ応用の議論が

できるレベルではないものの、ダイオード特性の改善によって今後効率向上が期待できる。

以上示したようにレクテナを用いた電磁波の電力変換技術は光子エネルギーの小さい赤外の熱ふく射電力変換が可能であると考えられ、中・遠赤外が主波長となる 300°C 以下の低温熱源における熱の電力利用への応用が期待できる。

5. おわりに

本稿ではふく射伝熱に基づく熱の電力変換技術に関して、高温熱源用の TPV 発電と低温熱源用のレクテナ発電技術について我々がこれまで取り組んで来た研究内容を中心に紹介した。両発電技術に共通する点として、熱ふく射の光としての特性、特に波動性を考慮することで本質的に高効率な熱の電力変換が可能となる。熱ふく射は有限温度の全ての物体から放射されているエネルギーであり、あらゆる温度域、波長域で電力変換を可能とすることで膨大なエネルギー創出が期待できる。熱ふく射の電力変換には様々な研究分野における知見が必要であり、今後、分野横断的な連携を進めこれら技術の確立を目指したいと考えている。

謝辞

本稿で示した研究開発は NEDO「先導研究プログラム／未踏チャレンジ 2050」、JSPS 科研費 16H02117 の助成を受けて行われた。本研究遂行の上で多くのご助言をいただいた湯上浩雄先生および研究に携わった Liu Zhen 君をはじめとする学生の皆さん、また、今回執筆の機会を与えて下さった宮崎康次先生に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会長期エネルギー需給見通し小委員会（第6回）資料1.
- [2] 八馬弘邦 他, 熱電発電技術と応用製品, *Komatsu Technical Report*, 64 (2018) 47.
- [3] LaPotin, A. et al., Thermophotovoltaic efficiency of 40%, *Nature*, 604 (2022) 287.
- [4] Sai, H. et al., High-temperature resistive surface grating for spectral control of thermal radiation, *Appl. Phys. Lett.*, 82 (2004) 1685.
- [5] Shimizu, M. et al., Evaluation of thermal stability in spectrally selective few-layer metallo-dielectric

- structures for solar thermophotovoltaics, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 212 (2018) 45.
- [6] Fan, D. et al., Near-perfect photon utilization in an air-bridge thermophotovoltaic cell, *Nature*, 586 (2020) 237.
- [7] Shimizu, M. et al., Highly confined spectrally selective absorber-emitter for effective solar thermophotovoltaics, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 245 (2022) 111878.
- [8] Chirumamilla, M. et al., Metamaterial emitter for thermophotovoltaics stable up to 1400°C, *Sci. Rep.*, 9 (2019) 7241.
- [9] Itoh, K. et al., Highly Efficient High-Power Rectenna with the Diode on Antenna (DoA) Topology, *IEICE Trans. Electron.*, E105-C (2022) 483.
- [10] Hocker, L. O. et al., Frequency Mixing in the Infrared and Far-infrared Using a Metal-to-Metal Point Contact Diode, *Appl. Phys. Lett.*, 12 (1968) 401.
- [11] Matarrese, L. M. and Evenson, K. M., *Appl. Phys. Lett.*, 17 (1970) 8.
- [12] Sharma, A. et al., A carbon nanotube optical rectenna, *Nat. Nanotechnol.*, 10 (2015) 1027.
- [13] Davids, P. S. et al., Electrical power generation from moderate-temperature radiative thermal sources, *Science* 367 (2020) 1341.
- [14] Matsuura, D. et al., Optical rectenna with wide wavelength coverage from a hollow resonator coupled with a metal-insulator-metal tunnel diode, *Appl. Phys. Express*, 15 (2022) 062001.
- [15] Matsuura, D. et al., High-current density and high-asymmetry MIIM diode based on oxygen-non-stoichiometry controlled homointerface structure for optical rectenna, *Sci. Rep.*, 9 (2019) 19639.
- [16] Liu, Z. et al., Enhanced current density and asymmetry of metal-insulator-metal diodes based on self-assembly of Pt nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.*, 122 (2023) 093502.
- [17] Maruyama, S. et al., Thermal radiation from two-dimensionally confined modes in microcavities, *Appl. Phys. Lett.*, 79 (2001) 1393.

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2023年					
7月	14(金)	第10回「伝熱工学の基礎」講習会		第10回「伝熱工学の基礎」講習会 運営事務局 (株式会社プロアクティブ内) E-Mail : basic-lecture2023@pacmice.jp	

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2023年					
8月	24(木) ～ 26(土)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2023		(株) 学術出版印刷内 日本混相流学会事務局 TEL06-6466-1588 / FAX06-6463-2522 E-mail:office@jsmf.gr.jp	
	29(火) ～ 31(木)	日本実験力学会 2023 年度年次講演会		近畿大学 生物理工部 山本 衛 Tel: 0736-77-0345, 内線 4522 or 4531 Fax: 0736-77-4754 E-mail: ei@waka.kindai.ac.jp	
9月	13(水) 20(水)	No.23-63 講習会『伝熱工学資料(改訂第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用		(一社) 日本機械学会出版販売グループ熱工学部門担当 小倉	
	20(水) ～ 21(木)	No.23-13 講演会「第27回動力・エネルギー技術シンポジウム」		(一社) 日本機械学会総合企画グループ担当 伊澤 izawa@jsme.or.jp	
	20(水) ～ 22(金)	日本流体力学会 年会 2023		(一社) 日本流体力学会 03-3714-0427/FAX: 03-3714-0434 E-mail: info@nagare.or.jp	
	24(日) ～ 27(水)	33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-33)		ISTP-33 実行委員会幹事 渡邊則彦 nwatanabe@mec.sojo-u.ac.jp	
10月	4(水) ～ 5(木)	第51回日本ガスタービン学会定期講演会		(公社) 日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
11月	7(火) ～ 9(木)	日本熱物性シンポジウム 2023		日本熱物性学会事務局 jstp@iis.u-tokyo.ac.jp	
11月 12月	26(日) ～ 1(金)	International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (IGTC2023 Kyoto)		(公社) 日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
11月	27(月) ～ 28(火)	第32回微粒化シンポジウム		日本液体微粒化学会事務局 (株) 学術出版印刷 担当: 近藤 朋子 Tel. 06-6466-1588/Fax. 06-6463-2522 E-mail: information_atmz@ilass-japan.gr.jp	
12月	15(金) ～ 17(日)	第37回数値流体力学シンポジウム		(一社) 日本流体力学会 03-3714-0427/FAX: 03-3714-0434 E-mail: info@nagare.or.jp	

公益社団法人日本伝熱学会第 61 期（2022 年度）総会議事録

1. 日 時 2023 年 5 月 26 日（金）16:00～17:30
2. 場 所 福岡国際会議場 メインホール
3. 正会員数 972 名
4. 出席者 673 名（出席者 168 名，委任状出席 505 名）. 定款第 29 条の定めるところにより，これは定足数である正会員数の過半数（487 名）を上回り，総会は成立した．また，定款の改定に必要な，正会員数の 2/3（648 名）も上回った．

5. 議事経過

定款第 27 条により高松洋会長が議長となり，以下の議案について逐次審議した．

第 1 号議案 第 61 期（2022 年度）事業報告の件

議長より，公益社団法人日本伝熱学会第 61 期（2022 年度）総会議案（以下，「総会議案」と呼ぶ）の第 1 号議案第 61 期（2022 年度）事業報告について諮り，満場一致でこれを可決した．

第 2 号議案 第 61 期（2022 年度）会務報告の件

議長より，総会議案の第 2 号議案第 61 期（2022 年度）会務報告について諮り，満場一致でこれを可決した．

第 3 号議案 第 61 期（2022 年度）収支決算の件

議長より，総会議案の第 3 号議案第 61 期（2022 年度）収支決算について諮り，満場一致でこれを可決した．

第 4 号議案 第 62 期（2023 年度）役員・協議員選出の件

議長より，総会議案の第 4 号議案第 62 期（2023 年度）役員を選出について，以下の候補者について個々に諮った結果，満場一致でこれを可決した．

定款第 17 条第 1 項により退任する役員

理事	鹿園 直毅	理事	津島 将司
理事	永井 二郎	理事	服部 博文
理事	丸山 直樹	理事	坂村 芳孝
理事	伊藤 衡平	監事	緒方 寛

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより退任する役員

代表理事（会長）	高松 洋	理事（副会長）	小原 拓
理事	高橋 厚史		

第 62 期（2023 年度）に新たに選任される役員

定款第 17 条第 1 項により選任される役員

理事	鈴木 雄二	理事	岩井 裕
理事	佐々木 直栄	理事	服部 博文
理事	長野 方星	理事	山田 昇
理事	河野 正道	理事	有賀 義紀
監事	佐藤 英明		

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより選任される役員

理事	平井 秀一郎	理事	鈴木 洋
----	--------	----	------

第 5 号議案 定款の改定

議長より、総会議案の第 5 号議案定款の改定について諮り、満場一致でこれを可決した。

第 6 号議案 議事録署名人選任の件

議長より、本日の議事の経過を議事録にまとめるにあたり、議長に加えて議事録署名人 2 名を選任したい旨の提案があり、協議の結果、小原拓氏、鹿園直毅氏の 2 名を選任し、満場一致でこれを可決した。

第 6 号議案 第 62 期（2023 年度）事業計画の件

議長より、総会議案の第 6 号議案第 62 期（2023 年度）事業計画について報告を行った。

第 7 号議案 第 62 期（2023 年度）収支予算の件

議長より、総会議案の第 7 号議案第 62 期（2023 年度）収支予算について報告を行った。

以上により、本日の議事を終了した。

2023 年 5 月 26 日

公益社団法人日本伝熱学会第 61 期（2022 年度）総会

議長 高松 洋 _____ 印

議事録署名人 小原 拓 _____ 印

議事録署名人 鹿園 直毅 _____ 印



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

対象	対応	具体的な手続き (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。
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：白樫 了（東京大学）：aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：佐々木 直栄（日本大学）：sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：櫻井 篤（新潟大学）：sakurai@eng.niigata-u.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：李 敏赫（東京大学）：mlee@mesl.t.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：office@htsj.or.jp

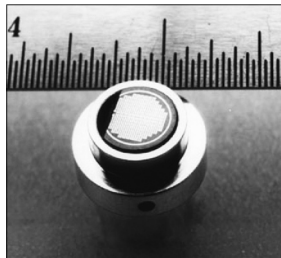
【注意】

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

熱流束センサー

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

熱流束 マイクロセンサー



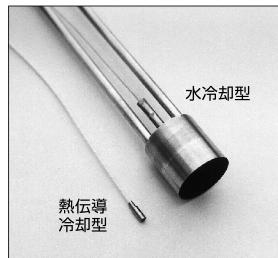
特徴

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

使用例

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

サーモゲージ

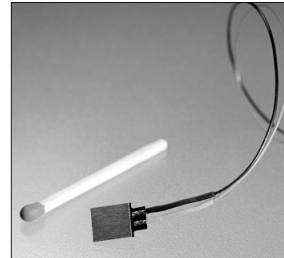


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタントで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



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

使用例

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

熱流束センサー 校正サービス

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



センサテクノ株式会社

URL

www.senstech.jp

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

E-mail

info@senstech.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

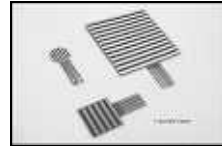
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

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

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



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

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

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

有限会社 テクノオフィス

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

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

今期より、編集出版部会長（理事）を拝命しました日本大学の佐々木直栄です。還暦を目前にして、このような大役を仰せつかったことを光栄に思います。本部会と私とのつながりは、企業から大学に籍を移して間もない2011年（第50期）に、花村克悟先生（第48・49期部会長）のお誘いを受けて、委員（協議員）を務めたことに始まります。高松洋先生（第50・51期部会長）のもとで、2年間編集出版業務に携わり、2012年10月号の特集記事「古くて新しいヒートパイプ」を担当しました。その後、第58回日本伝熱シンポジウム実行委員長〔委員（理事）〕として、中村元先生（第58・59期部会長）のもとで2年間編集出版業務に携わりました。振り返ってみると、50および60周年の記念すべきタイミングで本部会に関わっていたことに気がきます。永井二郎先生（第60・61期部会長）から部会長就任を打診された時には、「頼まれたら断れない」性格のままに快諾しましたが、その後の引継ぎ作業において部会長業務の実態が明らかになるにつれて、改善すべき課題が少なくないことに気が付き、身の引き締まる思いです。力足りるか不明ですが、より良い学会誌の実現を目指して、前向きに取り組んでまいります。

さて、本号では「ふく射伝熱」（その2）として、前号に引き続き、宮崎康次先生（九州大学）と田中三郎先生（日本大学）に特集を組んでいただきました。本号には、ふく射伝熱の制御やそもそも熱ふく射とは何かという根源に関わる内容について、第一線の研究者の皆様から4件のご寄稿をいただきました。ご多用にも関わらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

佐々木 直栄（日本大学）

Naoe SASAKI (Nihon University)

e-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 鈴木 洋（神戸大学）
編集出版部会長 佐々木 直栄（日本大学）
委員

（理事） 田之上 健一郎（山口大学）、矢島 健史（東京電力）

（協議員） 小川 邦康（慶應義塾大学）、櫻井 篤（新潟大学）、田中 三郎（日本大学）、大西 元（金沢大学）、
岡部 孝裕（弘前大学）、柏木 誠（青山学院大学）、小糸 康志（熊本大学）、志賀 拓磨（産業技術総合研究所）

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： 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1番地

日本大学 工学部機械工学科

佐々木 直栄

Phone: 024-956-8695

E-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp