

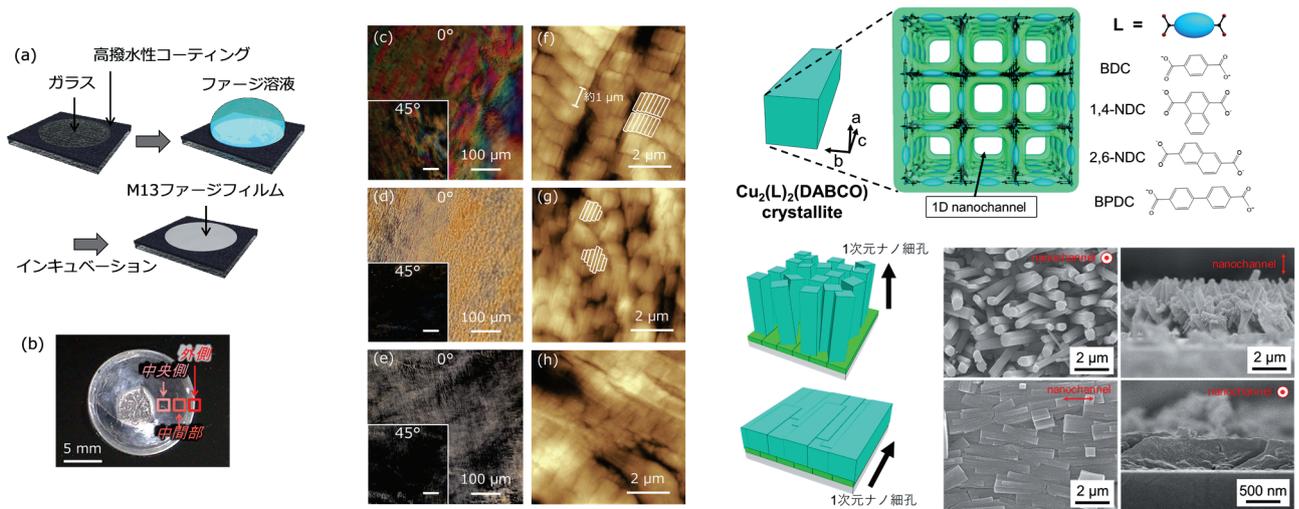
伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 63, No. 263
2024. 4

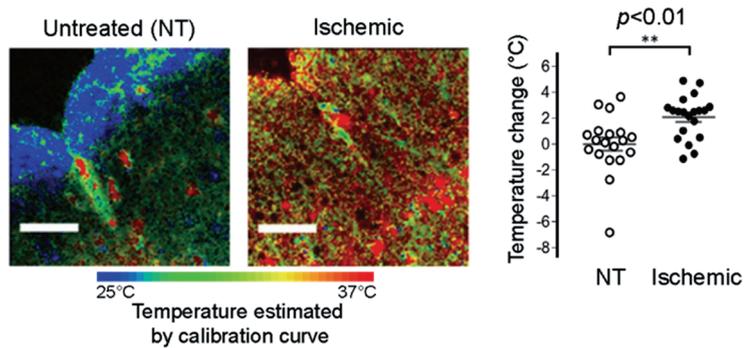
The logo for the Heat Transfer Society of Japan (HTSJ) is located in the bottom right corner. It consists of the letters 'HTSJ' in a bold, sans-serif font. The letters are white with a blue outline and are set against a background of three horizontal blue stripes.

◆特集：熱輸送の機能的制御

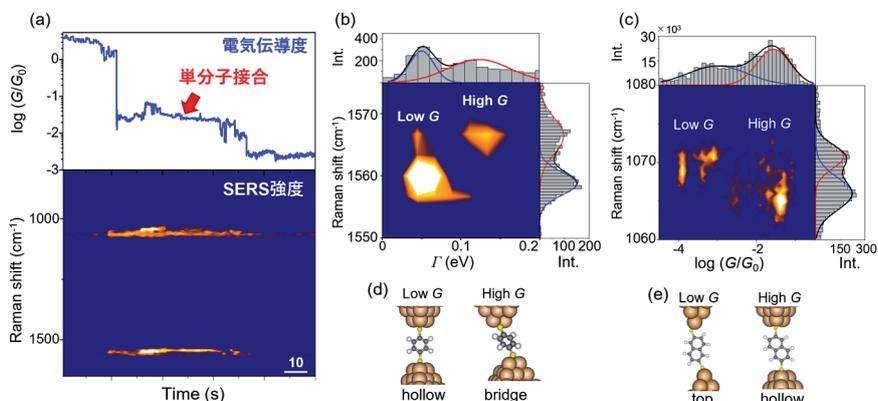


M13 ファージを素材とした熱伝導性フィルムの調製と顕微鏡観察 (特集記事「繊維状ウイルスを素材とする熱伝導性材料の創製 (澤田敏樹)」より)

$\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ MOF の構造と配向を変えた薄膜 (特集記事「材料化学的視点からの結晶性ミクロ多孔体金属有機構造体 (Metal organic framework) によるサーマルマネージメントへの取り組み (岡田健司)」より)



マウス脳スライスにおける温度イメージングと虚血 (Ischemic) 刺激依存的温度変化の可視化 (特集記事「生細胞内温度計測により解明した温度シグナリング機構 (岡部弘基)」より)



ベンゼンチオール (BDT) 単分子接合における表面増強ラマン散乱 (SERS) 計測の一例 (特集記事「単分子界面の熱輸送現象解明に向けた単分子接合の接続構造解析 (金子哲)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

澤田 敏樹 (東京工業大学)	
岡田 健司 (大阪公立大学)	
岡部 弘基 (東京大学, JST さきがけ)	
金子 哲 (東京工業大学)	……………表紙裏

〈特集：熱輸送の機能的制御〉

特集「熱輸送の機能的制御」にあたって	……………花村 克悟 (東京工業大学)	…………… 1
繊維状ウイルスを素材とする熱伝導性材料の創製	……………澤田 敏樹 (東京工業大学)	…………… 2
材料化学的視点からの結晶性マイクロ多孔体金属有機構造体 (Metal organic framework) による サーマルマネージメントへの取り組み	……………岡田 健司 (大阪公立大学)	…………… 8
生細胞内温度計測により解明した温度シグナリング機構 ……………	……………岡部 弘基 (東京大学, JST さきがけ)	…………… 13
単分子界面の熱輸送現象解明に向けた単分子接合の接続構造解析 ……………	……………金子 哲 (東京工業大学)	…………… 18

〈行事カレンダー〉 …………… 25

〈お知らせ〉

第 61 回日本伝熱シンポジウムのご案内	……………	…………… 26
International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024 (IWSEC2024) 開催のご案内	……………	…………… 28
第 61 回日本伝熱シンポジウム・IWSEC2024 タイムテーブル (暫定版)	……………	…………… 30
第 61 回日本伝熱シンポジウム・IWSEC2024 プログラム (暫定版)	……………	…………… 32
編集出版部会からのお知らせ	……………	…………… 47

〈編集出版部会ノート〉 …………… 51

Vol.63, No.263, April 2024

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Toshiki SAWADA (Tokyo Institute of Technology)
Kenji OKADA (Osaka Metropolitan University)
Kohki OKABE (The University of Tokyo)
Satoshi KANEKO (Tokyo Institute of Technology) Opening Page

< Special Issue: Thermal Science and Control of Spectral Energy Transport >

Preface to “Thermal Science and Control of Spectral Energy Transport”
Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology) 1
Development of Thermally Conductive Materials Composed of Filamentous Viruses
Toshiki SAWADA (Tokyo Institute of Technology) 2
Thermal Management by Crystalline Microporous Metal-Organic Frameworks from a Viewpoint of Materials Chemistry
Kenji OKADA (Osaka Metropolitan University) 8
Intracellular Thermal Signaling Revealed by Thermometry in Single Living Cells
Kohki OKABE (The University of Tokyo) 13
Geometric Analysis of a Single-Molecule Junction for Investigating Heat Transfer at the Single-Molecule Interface
Satoshi KANEKO (Tokyo Institute of Technology) 18

< Calendar > 25
< Announcements > 26
< Note from the JHTSJ Editorial Board > 51

特集「熱輸送の機能的制御」にあたって

Preface to "Thermal Science and Control of Spectral Energy Transport"

花村 克悟 (東京工業大学)

Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: hanamura.k.aa@m.titech.ac.jp

本特集「熱輸送の機能的制御」は、2017年から2023年にわたって展開された科学技術振興機構(JST)のさきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御(略称:熱制御)」に基づいている。小職はその研究総括を仰せつかり10名のアドバイザーおよび採択された26名のさきがけメンバーとともに熱制御に関する研究を進めてきた。

JSTにおける本領域は、文部科学省の選定した戦略目標「ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発」のもとに、上記のさきがけとCREST「ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出(現研究総括:丸山茂夫)」とともに2017年に発足した。この2017年当時、もう一つのCRESTとさきがけ(略称:相界面)両方の研究総括を仰せつかっていた小職に白羽の矢が立ち、一時はCRESTと2つのさきがけの3件の研究総括を担当することとなった。この相界面が終了する直前に、本さきがけを2017年度に立ち上げるため大急ぎでその概要と題目を考えることとなった。戦略目標には「ナノスケール熱動態…」といった少々聞き慣れない用語が冠されており、この意識と魅力的かつ熱一般の総花的ではない題目と概要が必要と考えた。また、熱輸送において極めて重要な界面については、相界面のCRESTとさきがけにより使われており、内容も界面を介して熱、化学種、イオン、電子などの輸送が含まれていたことから、その重複を避けるべきと感じた。このような境界条件を満足するためには、エネルギー輸送機構の原点に立ち返り、例えば熱ふく射であれば、光子あるいは電磁波としてその周波数ごとに丁寧に扱うことによりその制御性を高めることを追求することを考えた。可能な限り平仮名と漢字のキーワードを書き出したが、周波数ごとに分解することを意味する「分光」は特定の分野あるいは範囲に限定されることになることから適切ではなく、構造周期や

サイズ分布などにも応用展開できることを期待し、“スペクトル学的”との造語を使うこととした。もちろんこのような学問はないが、一般に親しみのある分光学的ではなくカタカナを敢えて使うことにより光学分野のみではなく、如何様にも受け取れるものと考えた。また過去の題目では「…の理解と…技術」などが一般的との指摘もあり、最終的にこの題目に落ち着いた。

巨視的な熱輸送の考え方に加えてフォトン、フォノン、マグノン(スピノン)といった準粒子によるエネルギー輸送、あるいは超格子構造や分子配向さらに共有結合有機骨格や金属有機骨格といった構造の特徴を活かし、それらの周波数あるいは構造周期サイズごとにエネルギー輸送量を制御することを目指した。このため、熱の専門家の他に物理学、化学、材料科学、スピントロニクス、医・薬学など多様な分野の研究者が参加した。この多様な分野の話題を全てのメンバーが理解することは不可能に近いが、慣れ親しんだ自身の分野に新たなアプローチを導入あるいは創造できる可能性を見出していただくことを期待し2ヶ月に1度の頻度で定例会を開催した。毎回4~5名のメンバーに進捗を報告していただくとともに、発表者以外のメンバーからの質問に丁寧に答えるいわば1つの仮想研究室のゼミのような会となった。終了後も『チーム熱制御』として情報共有や研究者ネットワークの拡張に余念がない。

本誌本号の4月号では、岡部弘基氏、岡田健司氏、金子哲氏、澤田敏樹氏の研究紹介、次号の7月号では、吉川純氏、原田俊太氏、藤原邦夫氏、南谷英美氏の紹介を予定している。

残念ながら全員を紹介することはできないが、これらの内容から多様な分野への展開あるいは共同研究あるいはスタートアップなどの起業化に発展されることを期待する。

繊維状ウイルスを素材とする 熱伝導性材料の創製

*Development of Thermally Conductive Materials
Composed of Filamentous Viruses*

澤田 敏樹 (東京工業大学)

Toshiki SAWADA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: sawada@mac.titech.ac.jp

1. はじめに

有機系の高分子材料では、分子鎖のアモルファスな配列がフォノンの平均自由行程を減少させるため、結果として熱伝導性が一般に低くなり、従来電子機器の放熱には不向きとされてきた。しかしながら、近年の研究から、高度に配向した高分子鎖であれば、長い共有結合を介してフォノンを効率的に伝導させることができるため、配向構造をもつ高分子材料はバルクの高分子材料よりも高い熱伝導率をもつことが明らかにされている。本項では我々が最近見出している、核酸の周囲をタンパク質が規則的に集合化した構造をもつ繊維状ウイルスを素材として、シンプルな流動配向法によって規則的に集合化させた階層的な集合構造をもつフィルムが高い熱拡散率を示す研究について紹介する。フィルム内のウイルスの集合構造の評価から、非共有結合を介した熱輸送にはマクロな範囲で高度に配向した集合構造が有用であることを実証した。さらに、高い熱拡散率を高温下(150°C)でも維持するためには、ウイルスが形成する規則的な集合構造が重要であることも明らかになった。高い熱伝導率をもつ有機系高分子材料の簡便な作製方法の確立とともに、新しい熱輸送の機構の解明が期待される。

2. 有機系高分子を素材とした熱輸送材

近年の電子デバイスの小型化や高集積化による発熱密度の向上に伴い、発熱位置からヒートシンクやヒートパイプといった放熱部への速やかな熱輸送が益々重要になっている。発熱部や放熱部は、一般に硬い金属や無機材料から構成されるため、必然的に生じる両者の空隙を柔らかい材料で密着させることができれば、効率的な放熱に繋がるものと期待される。有機系高分子材料は、加工性に優れた電気絶縁体であり、柔らかい特性をもつことから、フィルムやコーティング剤といった形態で発熱位置と放熱部を密着させて放熱させる熱界面材料とし

て有用な素材である。しかしながら、高分子材料の熱伝導率は、アモルファスな構造に起因する様々な欠陥や界面、また等方的な分子配向によって引き起こされるフォノンの散乱のため、非常に低い^{1,2}。有機系高分子材料の値は金属や無機材料と比較すると2~3桁低い³ため、効率的な放熱の妨げとなっている。これまでは、有機系高分子材料に高い熱伝導性を付与することを目指し、フィラーと呼ばれる金属あるいは無機材料とコンポジット化する手法や^{3,4}、配向させた高分子鎖の長い共有結合を利用した高熱伝導化が図られてきた。いずれも高い熱伝導率を達成できるが、より簡便に有機系高分子材料の熱伝導性を向上させる手法を確立することができれば、高熱伝導樹脂の簡便な構築に繋がるものと期待される。コンポジット化することなく、有機系高分子材料の熱伝導率を向上させるための手法は、高分子鎖の配向や配列や⁵⁻⁸、単層での自己集合化⁹、また高分子鎖間相互作用の制御¹⁰などが知られている。中でも、液晶性高分子のような高配向な高分子は、高分子の長い共有結合を介してフォノンが効果的に伝導されるため、有望な候補の一つである。実際に、精密な構造制御により高分子配向させると、配向させた高分子鎖の軸方向に対して熱伝導率が比例的に増大することが報告されている。最近では、合成樹脂のようないわゆる合成高分子のみならず、スパイダーシルクタンパク質(クモの糸の構成成分の一部)のような天然由来の生体高分子であっても、素材の特性に合わせて適切な手法により配向させると配向方向の熱伝導率が劇的に向上することも見出されている⁸。有機系高分子を素材として、簡便な手法で高熱伝導化することができれば、放熱効率を向上させる熱界面材料として有機系高分子の新たな利用法に繋がるものと期待される。しかしながら、有機系高分子は自身が一義的に決定できないランダムな高次構造をもつため、熱を媒介するフォノンが散乱しやすく、熱伝導性を向上させるのが難

しいという問題があり、特に非共有結合からなる分子集合体の熱伝導に注目が集まることはほとんどなかった。

筆者らはこれまで、様々な生体高分子を利用してソフトマテリアル応用する研究を進めてきた。中でも、繊維状ウイルスの一種である M13 バクテリオファージ (M13 ファージ, 図 1a) は、DNA と多数のタンパク質が規則的に集合化した生体高分子集合体であり、液晶形成するほど規則的に集合化する特性に加え、遺伝子工学により自在に機能化できることを利用することで、M13 ファージを素材として薬剤分子の徐放が可能なハイドロゲル^{11,12} やレアアース選択的な吸着剤^{13,14} など、構造制御された様々なソフトマテリアル素材として利用できることを明らかにしてきた^{15,16}。この M13 ファージは、直径 4.5 nm、長さ 900 μm と高いアスペクト比をもつ巨大な分子集合体であり、その構造に起因してファージは上述した通り液晶分子のように配向する。

そこで筆者らは、M13 ファージ自身が、らせん状タンパク質が良くパッキングした超分子集合体であり、さらにそれらが集合化する際には液晶配向することに焦点を当て、タンパク質が規則的に集合化した M13 ファージを階層的に集合化させることができれば (図 1b)、フォノンの散乱を防ぐことができ、熱伝導材料として機能するのではないかと着想した。高分子の配向は、一般的には高分子鎖の配向方向に対して熱伝導率の増加をもたらすが、それらは主に配向した高分子鎖の共有結合の持続長を伸展させることが主な焦点であった。M13 ファージは、良くパッキングしたタンパク質の超分子集合体であり、自身の繊維状構造ならびに液晶性に起因し、

潜在的な熱伝導性材料素材としてはたらくと期待される。

3. 繊維状ウイルス M13 ファージの集合構造

M13 ファージを規則的に集合化させる手法として、水溶液を乾燥すると溶質分子が端部分に濃縮して集積する、いわゆる「コーヒーリング効果」に着目した。M13 ファージの超純水溶液を、ガラスの周囲が円形に高撥水性の樹脂でコーティングされたスライドガラスにマウントし、25 °C で静置するだけといったシンプルな操作で M13 ファージのみからなるフィルムを調製した (図 2a)。フィルムの外側の厚さは、目視でも他の部位と比較して厚く (図 2b)、フィルムの外側ではコーヒーリング効果により濃縮が起きながら集合化していると考えられる。実際に厚さを測定した結果、外側では厚さが約 200 μm であるのに対し、中央側、もしくは外側と中央側の真ん中の部位 (中間部) では約 50 μm 程度であった。したがって、M13 ファージフィルムの外側では、規則的に液晶配向する溶液中と同じ様式で集合化し、他の位置と比較して効果的に濃縮が置きながら集合化していることが明らかとなった。

フィルムのそれぞれの位置におけるファージの集合構造を偏光顕微鏡 (POM) により観察して評価した結果、外側では層状構造をもつ輝度の高い像が観察された (図 2c)。一般に POM 観察では、溶質もしくは結晶性分子が配向した際に高い輝度として観察されることが知られていることから、フィルムの外側では M13 ファージは高度に配向した集合構造を形成しているものと考えられる。フィルムを水平に 45°回転させて POM 観察した結果、明るく観察されていた部位は暗くなり、逆に暗く観察されていた部位は明るくなったことから (図 2c 挿入図)、フィルムの外側では M13 ファージはスメクチック液晶のように層構造をもつ配向様式で集合化していることがわかった (詳細は後述)。一方でフィルムの中間部や中央側では、全体が一様に明るく観察され、層構造は観察されなかった (図 2d,e)。同様にフィルムを 45°回転させた結果、像全体が暗くなったことから (図 2d,e 挿入図)、フィルムの外側以外の部位では、M13 ファージはネマチック液晶配向していることがわかり、部位によって集合状態の規則性が異なっていることがわかった。輝度に着目すると、中央側より中間部の方がより明るく、外側

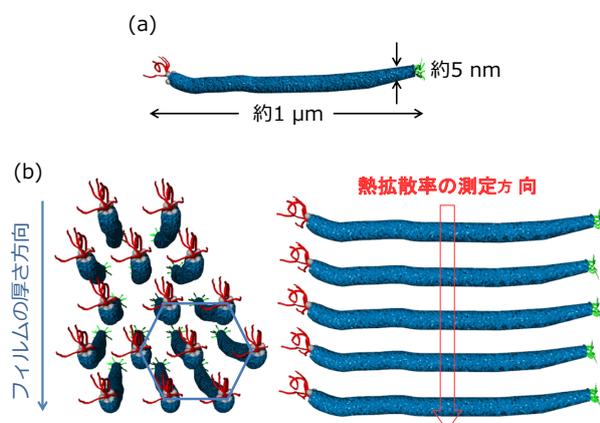


図 1 (a) M13 ファージの模式図 (b) 規則的に集合化した M13 ファージの上面図と側面図の模式図

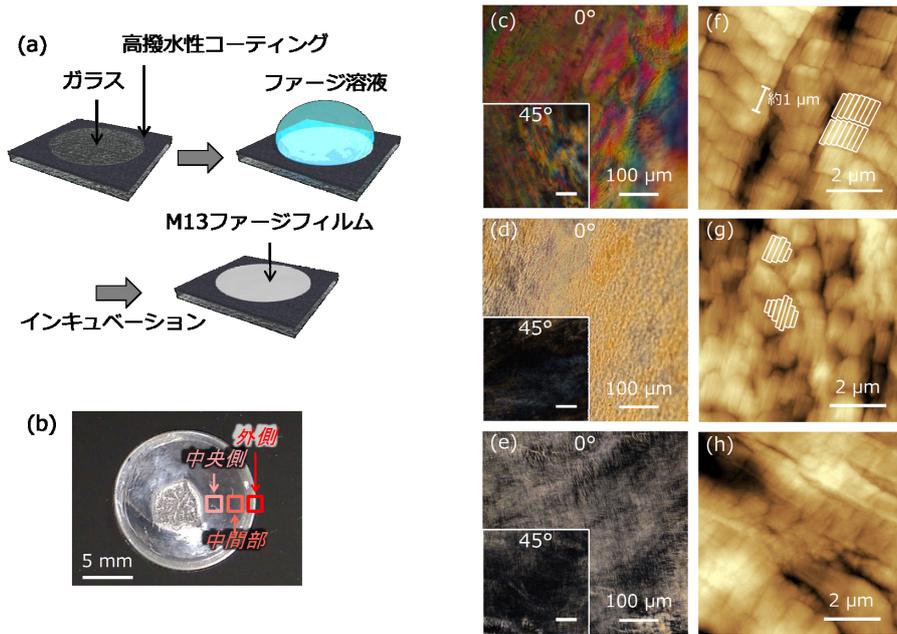


図 2 M13 ファージフィルムの調製と顕微鏡観察

(a) M13 ファージからなるフィルムの調製の模式図

(b) M13 ファージフィルムの外観：フィルムの位置を图中に示した。

(c-e) M13 ファージフィルムの POM 像：(c) 外側，(d) 中間部，(e) 中央側，挿入図は水平に 45° 回転させた際の POM 像を示した。

から内側に向かうに従い集合化の配向性や規則性は低下しているものと推察された。

原子力顕微鏡 (AFM) により M13 ファージの集合構造をより詳細に観察した結果、フィルムの外側では幅 1 μm 程度の屈曲した層構造が観察され (図 2f)、マイクロメートルオーダーでもスメクチック液晶配向しており、階層的な集合体が形成されていることがわかった。フィルムの中間部や中央側でも同様に POM で観察されたようにネマチック液晶配向している様子が観察された (図 2g,h)。すなわち、M13 ファージは、フィルムの位置によってその配向性や規則性が異なって集合化しており、外側ほどその配向度や規則性が高いことがわかった。

4. M13 ファージ集合体の高い熱拡散率とその構造因子

温度波熱分析法により厚さ方向に熱が伝わる速さである熱拡散率をフィルムのそれぞれの位置で測定した結果 (図 3)、フィルムの外側の熱拡散率は $0.63 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、有機系高分子 (ここでは主としてタンパク質) の非共有結合からなる集合体であるにもかかわらず、無機材料であるガラスに匹敵する値であった。重要なことに、この値は、別途調

製した規則的な集合構造をもたない無配向フィルムの熱拡散率 ($0.066 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$) の約 10 倍の値であった。一方でフィルムの中間部や中央側の熱拡散率は、無配向フィルムと比較して約 1.5 倍高い程度であり、フィルムの外側では極めて高い熱伝導性を示すことがわかった。つまり、ただ単に M13 ファージを素材としてフィルムを作れば高い熱伝導性をもつ訳ではなく、高い熱伝導性のためには、M13 ファージを高度に配向させながら集合化させる必要があることを示している。今回得られた熱拡散率の値は、例え非共有結合を介した有機系高分子からなる集合体であっても、タンパク質のような生体高分子を適切に集合化させることで、熱伝導材として機能する可能性を示している。そのため、この高い熱拡散率が得られる原因について明らかにするため、より詳細に集合構造を解析した。

小角 X 線散乱 (SAXS) 測定によりフィルムそれぞれの位置ならびに無配向フィルムの構造を評価した。その結果、例え無配向フィルムであっても、いずれも面間隔の逆数比が $1:\sqrt{3}:2$ となる位置にピークが見られ、分子レベルではいずれもヘキサゴナルにパッキングした密な集合構造を形成していることがわかった (図 4a)。ピークの位置にも違いは

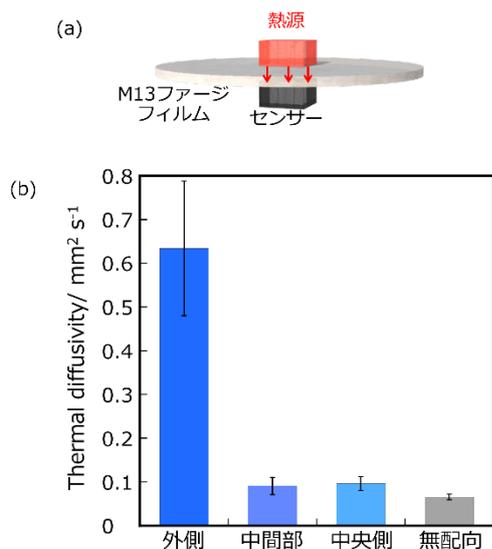


図 3 M13 フェージフィルムの熱拡散率

- (a) M13 フェージフィルムの熱拡散率の模式図
- (b) 調製した M13 フェージフィルムそれぞれの位置ならびに無配向フィルムの熱拡散率

ほとんど見られず、フィルムの位置によって集合構造は異なっているにもかかわらず分子レベルの集合状態はいずれも同じであることがわかった。つまり、溶媒の蒸発プロセスによらず、フェージは乾燥過程で分子レベルではヘキサゴナルパッキングすることがわかった。このことは見方を変えると、分子レベルよりも、より大きな集合状態が熱拡散率には寄与していることを示唆している。そこでフィルム内の M13 フェージ集合体の配向構造をより定量的に評価するため、二次元パターンの一次ピークの方位角スキャンを行い (図 4a)、X線を照射した範囲 (約 0.5 mm²) のマクロな M13 フェージの配向度を決定した。その結果、フィルムの外側では配向度が約 0.8 なのに対し、中間部や中央側では約 0.2 もしくは 0.01、無配向フィルムではほぼ 0 と算出され、外側ではフェージが広いスケールに渡って高度に配向していることが明らかとなった。

以上の構造解析の結果から、M13 フェージの分子レベルのパッキング構造は熱伝導には寄与しないと推察される。一方で、熱拡散率とマクロな配向度を比較すると、両者の関係に直線性はないものの、高い配向度の位置では高い熱拡散率を示すことが見出された。これらの結果は、M13 フェージの分子サイズを考慮すると極めて大きなスケール (数百マイクロメートル) に渡って高度に配向して集合化する

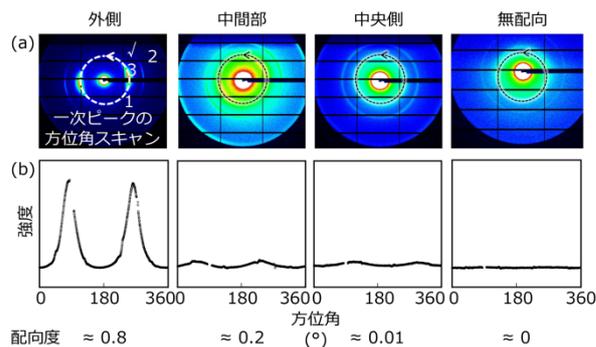


図 4 M13 フェージフィルムの SAXS 解析

- (a) M13 フェージフィルムそれぞれの位置ならびに無配向フィルムの二次元パターン
- (b) 二次元パターンの一次ピークの方位角スキャンから得られるピークプロファイルとその半値全幅から算出した配向度：ピークがシャープであるほど配向度が高いことを示す。

ることが、フォノンを効率良く伝導して高い熱伝導性を発現するためには重要であることを示している。この両者の関係について理解を深めるため、過去に報告されている異なる手法により M13 フェージが液晶配向したフィルムを調製し、同様の実験を行った。その結果、配向度は約 0.6 と高い値であったが、熱拡散率は今回調製したフィルムの中間部や中央側と同程度であった。すなわち、M13 フェージを広い範囲に渡り、極めて高度に配向させながら規則的に集合化させることで、おそらく集合体内でフォノンの拡散に繋がる構造的な欠陥が減少すると推察され、その結果として熱拡散率が向上しており、非共有結合を介していながら高い熱伝導性を示しているものと考えられる¹⁷。

5. M13 フェージ集合体が示す熱拡散率の耐熱性

生体高分子であるタンパク質は加熱プロセスによって容易に変性することが知られており、一般的な球状タンパク質の水中における変性温度は、一部の超好熱性タンパク質やウイルスのキャプシドなどを除き、約 60 °C 程度である^{18,19}。そのため、高い熱拡散率を示す M13 フェージからなるフィルムの加熱に対する安定性を評価することは、熱伝導性材料としての潜在性を明らかにする上では重要となる。軍用電子機器では、望ましい高温目標は 125 °C であるが、自動車用途では少なくとも 140 °C であるため²⁰、M13 フェージフィルムを 150 °C で

30 分間熱処理し、熱拡散率や集合構造の変化を評価した。

熱処理を施した後にフィルムを観察した結果、目視ではほとんど違いは見られなかった (図 5a)。フィルムそれぞれの位置における熱拡散率の値を同様に測定した結果、フィルムの外側の値は実験誤差の範囲内で熱処理前と同程度の値であったが、フィルムの中間部、中央側、また無配向フィルムの熱拡散率は熱処理によってわずかに減少した (図 5b)。重要なことに、熱処理を繰り返しても、少なくとも 5 回までは熱拡散率の値はそれ以上の変化を示さず、フィルムの熱安定性が実証された (図 5c)。以上の結果から、フィルムの外側で形成されている高度に配向した集合構造は、熱処理に対して熱拡散率を維持するためには不可欠であることが明らかとなった。

熱処理後のフィルムの POM 観察から、熱処理前と比較して集合構造にほとんど違いは見られず、150 °C での熱処理は POM スケールでは、フィルム全体に渡って M13 フェージの配向状態に影響を与えないことがわかった。一方で AFM 観察の結果、熱処理前にフィルムの外側で観察されていた層状の屈曲したドメインは、熱処理後には屈曲が消失したものの層状構造は依然として維持されており、フィルムの外側ではスメクチック液晶配向が維持されることがわかった。それとは対照的に、中間部ならびに中央側で観察されたネマチック液晶配向した集合構造は、熱処理後にはパッキングして、あるいは凝集している様子が観察された。すなわち、スメクチック液晶配向した集合構造は、熱処理による集合構造の緩和が抑制されていることを示している。また、SAXS 測定から配向度を算出した結果、マクロな配向度はフィルムの位置によらず大きな変化は無かった。以上の構造評価の結果は、M13 フェージが形成するスメクチック液晶配向が、熱処理に対する熱拡散率の維持に重要であることを示している。

さらに、熱処理前後のフィルム内の M13 フェージの二次構造を、全反射型赤外分光 (ATR/IR) 測定によって評価した結果、ピークの位置や半値幅にも変化は見られず、熱処理後もオリジナルの α ヘリックス構造が維持されていることがわかった。これらの結果は、熱処理後に観察されたマイクロメートルス

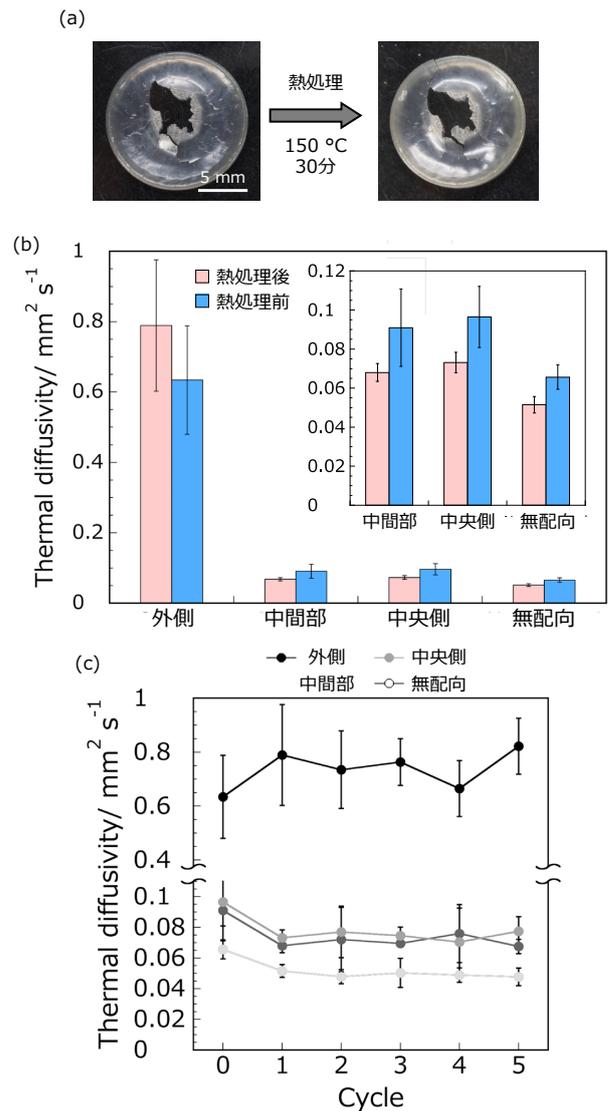


図 5 熱処理した M13 フェージフィルムの熱拡散率
 (a) 熱処理前後での M13 フェージフィルムの外観
 (b) 熱処理前後の M13 フェージフィルムの熱拡散率の比較
 (c) 繰り返し熱処理後の熱拡散率の変化

ケールでの構造変化が、M13 フェージを構成するタンパク質の二次構造変化によって引き起こされたわけではないことを示している。一方で、緩衝液に溶解した M13 フェージの二次構造の熱安定性を円偏光二色性 (CD) スペクトル測定によって評価した結果、溶液中での α ヘリックス構造の変性は 80 °C 程度で十分に進行していた。したがって、液晶配向したフィルム中の M13 フェージ集合体は耐

熱性をもっており、150 °C での熱処理後も高い熱拡散率が維持されることが明らかとなった²¹。

6. おわりに

核酸の周囲をタンパク質が規則的に集合化した M13 フェージを素材とし、それらが液晶配向して形成する階層的な集合構造が高い熱拡散率をもつことを見出した。その高い熱拡散率は、欠陥の少ない集合構造をマクロに渡って形成することによっておそらくは達成されており、生体由来の素材を階層的に集合化させることで、新しい熱伝導性材料の創製に繋がることを示唆している。さらにその集合体（フィルム）を 150 °C で熱処理しても高い熱拡散率は維持されており、M13 フェージの階層的な集合化は、高い熱伝導性のみならず熱処理に対する耐性にも重要であることもわかった。最近では、フィルムを調製する際の液滴サイズの制御や、遺伝子改変と機械学習を組み合わせるアプローチにより、さらなる高熱伝導化が可能になることも明らかにしている。これらの結果は、非共有結合を基にした高度に構造制御された分子集合体が熱伝導材として利用できる可能性を示しており、タンパク質のような有機系高分子を素材とした全く新しい次世代の熱伝導材を創製することに繋がると期待される。

謝辞

本研究は科学技術振興機構さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」（総括：花村克悟先生、JPMJPR1714）の支援を受けて行われました。花村先生のご指導と多大なご支援に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Z. Wang, J. A. Carter, A. Lagutchev, Y. K. Koh, N.-H. H. Seong, D. G. Cahill, D. D. Clott, *Science*, **787-790** (2007), 317.
- [2] H. G. Chae, S. Kumar, *Science*, **908-909** (2008), 319.
- [3] K. I. Winey, T. Kashiwagi, M. F. Mu, *MRS Bull.*, **348-353** (2007), 32.
- [4] Y. Shoji, T. Higashihara, M. Tokita, J. Morikawa, J. Watanabe, M. Ueda, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3417-3423** (2013), 5.
- [5] Y. Shoji, R. Ishige, T. Higashihara, J. Morikawa, T. Hashimoto, A. Takahara, J. Watanabe, M. Ueda, *Macromolecules*, **747-755** (2013), 46.
- [6] V. Singh, T. L. Bougher, A. Weathers, Y. Cai, K. Bi, M. T. Pettes, S. A. Mcmenamin, W. Lv, D. P. Resler, T. R. Gattuso, D. H. Altman, K. H. Sandhage, L. Shi, A. Henry, B. A. Cola, *Nat. Nanotechnol.*, **384-390** (2014), 9.
- [7] S. Shen, A. Henry, J. Tong, R. Zheng, G. Chen, *Nat. Nanotechnol.*, **251-255** (2010), 5.
- [8] X. Huang, G. Liu, X. Wang, *Adv. Mater.*, **1482-1486** (2012), 24.
- [9] R. Y. Wang, R. A. Segalman, A. Majumdar, *Appl. Phys. Lett.*, **173113** (2006), 89.
- [10] G.-H. Kim, D. Lee, A. Shanker, L. Shao, M. Kwon, D. Gidley, J. Kim, K. P. Pipe, *Nat. Mater.*, **295-300** (2015), 14.
- [11] T. Sawada, S. Kang, J. Watanabe, H. Mihara, T. Serizawa, *ACS Macro Lett.*, **341-345** (2014), 3.
- [12] T. Sawada, M. Yanagimachi, T. Serizawa, *Mater. Chem. Front.*, **146-151** (2017), 1.
- [13] T. Sawada, M. Asada, T. Serizawa, *ChemistrySelect*, **2712-2716** (2016), 1.
- [14] T. Sawada, H. Inomata, T. Serizawa, *J. Membr. Sci.*, **117595** (2020), 595.
- [15] T. Sawada, *Polym. J.*, **639-647** (2017), 49.
- [16] T. Sawada, T. Serizawa, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **455-466** (2018), 91.
- [17] T. Sawada, Y. Murata, H. Marubayashi, S. Nojima, J. Morikawa, T. Serizawa, *Sci. Rep.*, **5412** (2018), 8.
- [18] N. Poklar, J. Lah, M. Salobir, P. Macek, G. Vesnaver, *Biochemistry*, **14345-14352** (1997), 36.
- [19] V. A. Borzova, K. A. Markossian, N. A. Chebotareva, S. Kleymenov, N. B. Poliansky, K. O. Muranov, V. A. Stein-Margolina, V. V. Shubin, D. I. Markov, B. I. Kurganov, *PLoS One*, **e0153495** (2016), 11.
- [20] G. Lu, W. Hong, L. Tong, H. Bai, Y. Wei, G. Shi, *ACS Nano*, **2342-2348** (2008), 2.
- [21] T. Sawada, Y. Murata, H. Marubayashi, S. Nojima, J. Morikawa, T. Serizawa, *Viruses*, **608** (2018), 10.

材料化学的視点からの結晶性ミクロ多孔体金属有機構造体 (Metal organic framework) によるサーマルマネジメントへの取り組み

*Thermal management by crystalline microporous metal-organic frameworks
from a viewpoint of materials chemistry*

岡田 健司 (大阪公立大学)

Kenji OKADA (Osaka Metropolitan University)

e-mail: k_okada@omu.ac.jp

1. はじめに

筆者はこれまで無機ナノ材料を中心とした材料合成およびその機能性の開拓を主眼として研究を行っており、これまでは伝熱とは無縁の研究生活を送ってきた。そのため、伝熱の科学に関する専門的な知識が不足しているかもしれないが、材料化学者が材料化学的視点から伝熱の科学に取り組んできた内容を僭越ながら本稿ではご紹介させていただければと思う。

まず、材料化学者である私が伝熱の研究を始めるきっかけとなったのが、JST さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」に採択していただいたことです。それまで、私は多孔質材料の研究を行っており、私が開発してきた多孔質材料(具体的には後述させていただく)が伝熱の制御を行う材料としての可能性を秘めているのではないかと考えていた時期でした。そのタイミングで JST さきがけの「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」領域が発足しており、こんなチャンスは二度と無いと思い、応募させていただいた結果、幸運なことに採択して頂いた。初めて領域会議に参加させていただいたときは一人も知人はおらず、すごく緊張したことを今でも覚えている(結局、JST さきがけ研究期間中はコロナ期間と被っていたこともあり、最後まで少し緊張したままだったが)。また、領域会議では、伝熱のプロフェッショナルが多く、発表されていた内容もはじめは理解するに必死だった。最後の方にはなんとか、どんな課題が伝熱の分野にはあり、各研究者がどんなことを目指しているのかを把握することができたことは私にとって貴重な財産となった。

本稿では、まず私が扱っている材料を紹介させていただき、その後、JST さきがけの研究で目指してきたこと、また、得られた結果の一部を紹介させていただければと思う。

2. 金属有機構造体 (MOF)

現在、私がメインで合成している材料は金属有機構造体 (Metal Organic Frameworks, MOFs) である。MOF は金属イオン (無機部位) と有機配位子 (有機部位) の自己組織化により得られ、規則的なミクロ細孔を有する多孔質材料である。MOF は結晶性材料であることから、有機部位、無機部位が規則的に配列した骨格を持ち、均一で方位の揃ったミクロ細孔 (Sub nm~数 nm) が存在する (図 1)。金属種や有機配位子の種類を適切に選択することで、骨格のネットワークトポロジーを正確に設計できることから細孔の大きさや形を制御できる^{1,2}。更には、機能性の有機官能基を有する有機配位子 (あるいは特定の金属イオン) を用いて MOF を合成することで、特定の分子に対する強い化学的相互作用を生み出すなどのミクロ細孔の化学的特性を設計できるだけでなく、規則的に機能発現部位が配列することによりユニークな物理特性の設計が可能である。例えば、水分子に対する吸着点となるピラゾール配位子を有することに加えて、細孔内での水分子のネットワーク構造の形成に適した細孔構造を有する MOF-303([Al(OH)(PZDC)], PZDC²⁻ = 1-*H*-pyrazole-3,5-dicarboxylate) は極低湿環境においても大気中から水分子の吸着が可能であることから Atmospheric water harvesting の材料

Metal-Organic Framework (MOF)

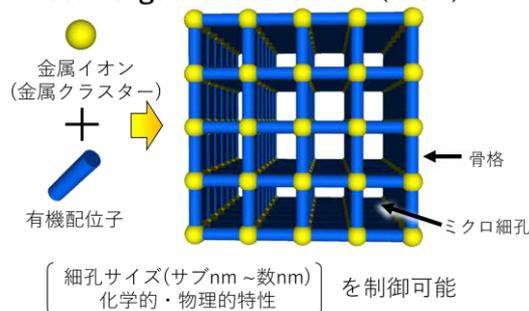


図 1 MOF の模式図.

としての利用が進んでいる³。このように MOF はその高い多孔性と高い化学的設計性を兼ね備えた材料あることから、次世代の多孔質材料として触媒やガス吸着体、ガス分離膜などへの応用が進んでいる。

「伝熱」に関して、材料化学的な観点で MOF を考えると、MOF は多孔質材料あることから多孔質シリカと同様に断熱材として捉えることができる。一方で、MOF が結晶性材料であることを考えると、熱輸送の役割を果たす部位と断熱的な役割を果たす部位を切り分けることができ、それらが 3 次元空間で規則的に分布していることになる。周期的な有機部位、無機部位で構成される骨格が熱輸送のパスとなり、マイクロ細孔は断熱的な役割を果たす。細孔の向き、有機部位、無機部位の配列の向きに方向性があることから、MOF は異方性の新規熱輸送媒体として大きな可能性を秘めている (図 2)。さらに、MOF は分子スケールでその構造を設計することができるため、熱輸送特性を分子スケールからボトムアップ的に設計できるポテンシャルを秘めた材料と考えることもできる。分子動力学法によると MOF は熱輸送に異方性を有することが報告されるなど、欧米、中国を中心に MOF を新規熱輸送物質とした理論研究に関する報告が増えている⁴⁻⁶。計算科学上は優勢熱輸送方向に数倍高い熱伝導率を示し、その値は一般的な高分子よりも一

桁高い $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ と絶縁材料でありながら高い熱伝導率を示すことが示唆されている⁷。しかし、国内外を見渡しても、実際に MOF による異方性の熱輸送を実現した研究例はなく、現状は理論研究で止まっている。その最大の要因が実用スケールの配向性 MOF が実現されていなかったためである。一般的に MOF は最大でも数 μm の結晶性粒子でしか得られないため、MOF の特徴であるマイクロ細孔の方向性、有機部位と無機部位の規則的な配列は一つの粒子内 (数 μm) で制限される。このような微小試料においては熱輸送距離が数 μm 程度となるため、実質的な異方性熱輸送の実現は困難である。

筆者らは材料としての MOF の高いポテンシャルを最大限活かすためには、MOF の結晶が配向した膜を形成する必要があると考え、これまで MOF の配向膜に関する研究に取り組んできた。そして無機物質である金属水酸化物を足場とした MOF のヘテロエピタキシャル成長を発見し、数 cm スケールの基板上での MOF 配向膜を世界で初めて実現してきた⁸⁻¹⁵ (図 3)。この MOF 配向薄膜は、MOF の結晶が実用スケール (cm スケール) において配向しているため、マイクロ細孔、あるいは、有機部位、無機部位が規則的に配列した骨格も周期性を保ち、方位を揃えたまま実用レベルで連結している。そのため、この MOF 配向薄膜を進展させ、理論的に報告されている MOF の異方性熱輸

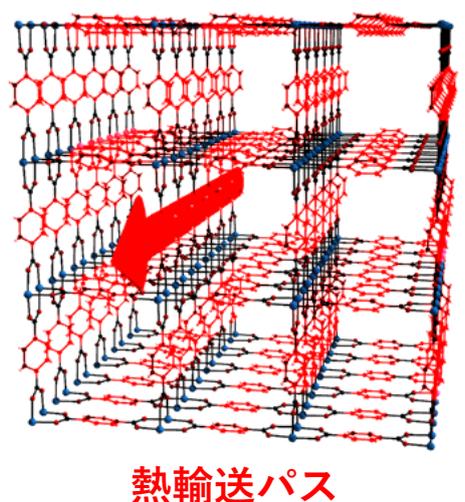


図 2 MOF 構造と熱輸送異方性の模式図。

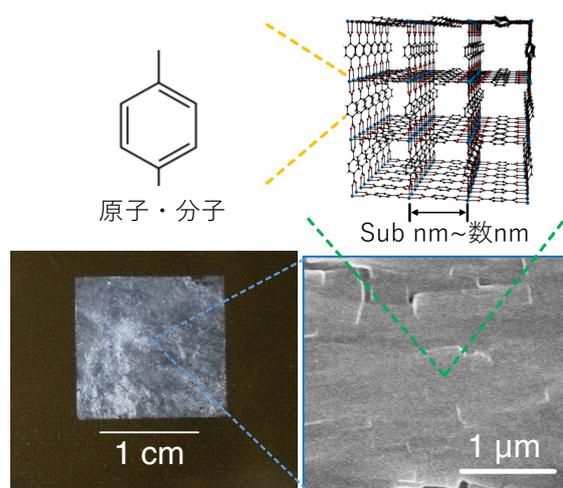


図 3 金属水酸化物を足場とした MOF のエピタキシャル成長手法で得られる MOF 配向薄膜。

送の実現および MOF の構造と熱拡散率の関係を明らかにすることを旨とし JST さきがけ研究を進めた。

3. 面内方向に異方的熱拡散率を示す

MOF 自立膜

上述のように筆者らはこれまで金属水酸化物を足場とした MOF のエピタキシャル成長手法の開拓を行ってきた。この手法ではシリコンやガラスなどの基板表面に金属水酸化物を配向成膜し、その配向成膜した金属水酸化物を足場かつ前駆体とすることで MOF の配向薄膜の合成を行ってきた。しかし、基板上に成膜した配向 MOF 薄膜においては、熱伝導率あるいは熱拡散率測定への基板の影響が大きく、MOF 薄膜の熱輸送特性の測定には利用できなかった。そのため、本研究を始めるにあたって配向 MOF 自立膜の合成に注力した。金属水酸化物の配向自立膜を、MOF を構成する有機配位子と反応させて MOF のエピタキシャル成長を行うことで、熱拡散率の測定に十分なサイズの配向 MOF 自立膜の形成を可能とした。配向 MOF 自立膜は、MOF の結晶が cm スケールにおいて配向しているため、マイクロ細孔、また、有機・無機部位が規則的に配列した骨格も周期性を保ち、方位を揃えたまま実用レベルで連結している。また、自立膜であるため、熱拡散(熱伝導)測定において懸念される基板の影響を考慮する必要がない。この手法を用いて、格子構造の異なる配向 MOF 自立膜を合成し、MOF の異方性熱輸送の実証を試みた。2 種類の MOF の配向自立膜 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 及び $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ (BDC : 1,4-benzenedicarboxylate, 1,4-NDC : 1,4-naphthalenedi-carboxylate, DABCO : 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane) を作製した。図 4a,b に $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ と $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ の格子構造模式図および自立膜の写真を示す。両方の MOF 薄膜において、15 mm×15 mm 以上のサイズの自立膜を得た。それぞれの配向自立膜の面内方向の熱拡散率異方性を測定した。 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ 、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ において *b* 軸方向である MOF のシートの積層方向を 0° と定義すると、 0° や 180° で熱拡散率は最大値となった。一方、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ では熱拡散率異方性は $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ よりも低い値を示した。熱伝導に関する理論計算によると、異方的な骨格構造を有する

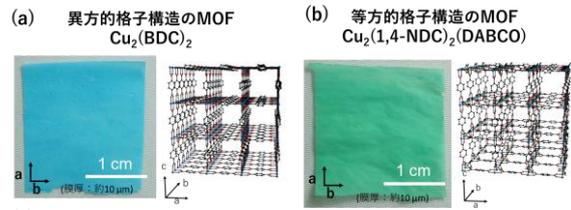


図 4 (a) Cu_2BDC_2 , (b) $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ 自立膜とその格子構造。

MOF においては細孔に平行な方向に熱伝導率が高いことが報告されている。 $\text{Cu}_2(\text{BDC})_2$ は異方的な骨格構造であり、*b* 軸方向の 1 次元細孔に平行な方位に優先的な熱拡散が観測された。一方、 $\text{Cu}_2(1,4\text{-NDC})_2(\text{DABCO})$ では *a*, *b*, *c* 軸と平行な 3 次元細孔構造をしている。*c* 軸に垂直な細孔断面積は、*a* 軸あるいは *b* 軸に垂直な細孔の断面積と比べて大きいので、*c* 軸方向にわずかに高い熱拡散率が確認できたと考察できる。これらの結果により、MOF の骨格構造と熱輸送に相関があることを実験的に示すことができたといえる。

次に MOF の格子構造と熱拡散率異方性の関係を明らかにするために、分子サイズの細孔が 1 次元に連なった 1 次元ナノチャンネルを有し、有機配位子の長さにより *c* 軸方向の細孔サイズの調整が可能な $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ (Linker: 1,4-benzenedicarboxylate (BDC), 2,6-naphthalenedicarboxylate (2,6-NDC), and 4,4'-biphenyldicarboxylate (BPDC), DABCO: 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane) 系 MOF (図 5) の配向薄膜形成を行った。これらの MOF の配向薄膜形成は達成されておらず、JST さきがけ研究にて、初めてこの MOF の配向薄膜形成を試みた。配向水酸化銅薄膜を足場かつ前駆体として MOF の合成を行った。その際に、溶液の pH を調整して水酸化銅の溶解の速度を制御することで、MOF の結晶成長プロセスの制御が可能となり、配向の異なる MOF 薄膜が得られることを見出した(図 6)¹⁰。

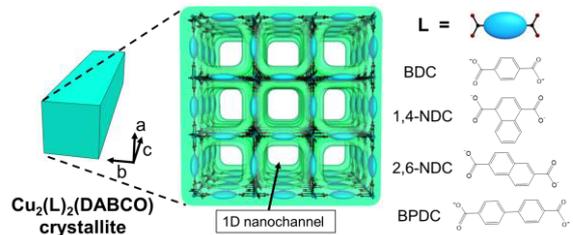


図 5 $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ MOF の構造模式図。

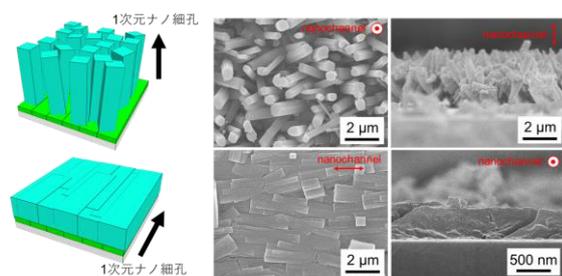


図 6 配向の異なる $\text{Cu}_2(\text{Linker})_2\text{DABCO}$ MOF の薄膜。

酸性の合成溶液を用いた場合、溶解-析出プロセスで MOF の形成が起こり、この MOF の 1 次元ナノチャンネルが基板に垂直に配向した配向薄膜が得られた。一方、塩基性の条件では、有機配位子が水酸化銅と直接反応するエピタキシャル成長により、1 次元ナノチャンネルが基板に平行に方位を揃えて配向した薄膜を得ることに成功した。この分子サイズの 1 次元ナノチャンネルは分子を配列する鋳型として利用することができる。そこで、分子（アゾベンゼン）をエピタキシャル成長条件で合成した MOF の配向薄膜に導入した結果、センチメートルスケールの大面積でアゾベンゼンが配向した薄膜の合成が可能となった。細孔への分子吸着過程での分子配向に関する基礎研究も進め、吸着量の増大により分子が細孔内で配向する様子を明らかにしてきた。1 次元ナノチャンネル方向に高い熱輸送および細孔への分子導入により熱輸送特性の向上が期待できるこの MOF において、優先熱輸送の方向を制御できるこの薄膜は、特定方向への排熱を可能とする有機系薄膜として期待できる。実際にこれらの MOF の配向自立膜を作製することで、面内熱拡散率を測定した結果、1 次元ナノチャンネル方向に高い熱拡散率が確認されただけでなく、細孔サイズと熱拡散率の関係を調査した結果、細孔サイズの大きい MOF つまり細孔断面積の大きな MOF において熱拡散率異方性が高い傾向を示した。また、配向 MOF 自立膜においては、MOF の細孔構造だけでなく、マイクロスケールにおける MOF 結晶の連続性も熱輸送特性に影響することがわかった。MOF の合成時に特定の結晶方位に対する結晶成長速度を抑制する作用がある分子を用いて結晶連続性の異なる配向 MOF 自立膜を作製し、面内方向の熱拡散率を示した結果、結晶連続性の向上に伴い面内熱拡散率の異方性が向上することが明らかとなった。これ

らの成果は 1 次元ナノ細孔を有する MOF が細孔方向に高い熱輸送を示すこと、細孔構造と熱拡散率の関係を初めて実験的に示した結果であり、新規熱輸送物質として MOF を実用化するための重要な知見を与える。

4. さいごに

MOF は結晶性の有機無機ハイブリッド材料であり、分子・格子構造の設計性が高いことから、熱輸送特性をその分子・格子構造で制御できる可能性を秘めている非常に魅力的な材料であると考えている。実際に欧米、中国を中心に MOF を新規熱輸送物質とした理論研究に関する報告が増えているなど材料としても魅力は高まっている。理論計算が進んでいた研究分野において、実験的に MOF 材料による異方的熱輸送および、細孔構造と熱輸送特性の関係を初めて明らかにした本研究成果は、MOF を新規熱輸送媒体とする実用に向けた大きな一歩になると考えている。ほとんどの MOF は絶縁体であり、有機分子を構成単位とした結晶のため柔軟性も有することから、特に電子デバイス（フレキシブルデバイスも含む）における熱輸送媒体としての利用などに期待できる。実際に 2021 年には MOF と同様の構造を有する結晶性マイクロ多孔体の共有結合性有機構造体（Covalent organic framework, COF）において、高い熱伝導を示す Low-k 膜として有望であるとの報告があるなど、新規熱輸送媒体として結晶性マイクロ多孔体は期待されている¹⁶。本研究により達成した MOF 配向薄膜においては面外方向だけでなく面内方向の任意の方向に MOF 結晶の方位、つまり、熱輸送方向を制御可能であることから、熱輸送（放熱・除熱など）のさらなる高効率化が可能な薄膜の創製が期待できる。本研究において、MOF 材料における熱輸送特性の制御・向上には、MOF の細孔構造だけでなくマイクロスケールにおける配向および結晶連続性を明らかにしてきたが、熱伝導率、またその異方性も実用化のためには向上の余地がある。本研究で得られた知見を基盤として、今後、計算分野の研究者と協力することで、異方的熱輸送媒体として最適な分子・格子構造の MOF 材料の開発を進めていきたいと考えている。また、この JST さきがけでの研究を通して「熱」制御の難しさと同時に、材料化学者とし

て材料化学的視点から貢献できる可能性があることを感じた。今後も新しい材料の合成を行い、ユニークな熱輸送特性を示していきたいと考えている。本稿の冒頭にも記載させていただいたが、伝熱に関する専門的な知識・測定、解析技術が不足していると感じているため、もし本稿を読んでいただき、私の扱う材料にポテンシャルを感じられたらぜひお声がけいただければと思います。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、共同研究者の高橋雅英先生（大阪公立大学）、深津亜里紗先生（大阪公立大学）、Paolo Falcaro 先生（Graz University of Technology）、Egbert Zojer 先生（Graz University of Technology）に心より謝意を表します。また、JST さきがけ研究期間中だけでなく、その後も継続して貴重なアドバイスをくださる JST さきがけのアドバイザー、メンバーの先生方に深く感謝します。最後に、研究に協力してくれた本研究室の学生の皆さんに感謝します。

参考文献

- [1] Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M. and Yaghi, O. M., *Science*, 341, (2013) 1230444.
- [2] Huang, Y.-B., Liang, J., Wang, X.-S. and Cao, R., *Chem. Soc. Rev.*, 46, (2017) 126.
- [3] Xu, W. and Yaghi, O. M., *ACS Cent. Sci.*, 6, (2020) 1348.
- [4] Wang, X., Guo, R., Xu, D., Chung, J., Kaviani, M. and Huang B., *J. Phys. Chem. C*, 119, (2015) 26000.
- [5] Wieser, S., Kamencek, T., Dürholt, J.P., Schmid, R., Bedoya-Martínez, N. and Zojer, E., *Adv. Theory Simul.*, 4, (2021) 2000211
- [6] Wieme, J., Vandenbrande, S., Lamaire, A., Kapil, V., Vanduyfhuys, L. and Van Speybroeck, V., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, (2019) 38697.
- [7] Babaei, H., McGaughey, A.J.H. and Wilmer C. E., *Chem. Sci.*, 8, (2017) 583.
- [8] Falcaro, P., Okada, K., Hara, T., Ikigaki, K., Tokudome, Y., Thornton, A., Hill, A.J., Williams, T., Doonan, C. and Takahashi, M., *Nature Mater.*, 16, (2017) 342
- [9] Ikigaki, K., Okada, K., Tokudome, Y., Toyao, T., Falcaro, P., Doonan, C. J. and Takahashi, M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 58, (2019) 6886.
- [10] Okada, K., Nakanishi, M., Ikigaki, K., Tokudome, Y., Falcaro, P., Doonan, C. J. and Takahashi, M., *Chem. Sci.*, 11, (2020) 8005.
- [11] Ikigaki, K., Okada, K. and Takahashi, M., *ACS Appl. Nano Mater.*, 4, (2021) 3467.
- [12] Okada, K., Mori, K., Fukatsu, A. and Takahashi, M., *J. Mater. Chem. A*, 9, (2021) 19613.
- [13] Baumgartner, B., Ikigaki, K., Okada, K. and Takahashi, M., *Chem. Sci.*, 12, (2021) 9298.
- [14] Okada, K., Mashita, R., Fukatsu, A. and Takahashi, M., *Nanoscale Adv.*, 5, (2023) 1795.
- [15] Baumgartner, B., Mashita, R., Fukatsu, A., Okada, K. and Takahashi, M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 61, (2022) e202201725.
- [16] Evans, A.M., Giri, A., Sangwan, V. K., et al., *Nature Mater.*, 20, (2021) 1142.

生細胞内温度計測により解明した温度シグナリング機構 Intracellular Thermal Signaling Revealed by Thermometry in Single Living Cells

岡部 弘基 (東京大学, JST さきがけ)
Kohki OKABE (The University of Tokyo)
e-mail: okabe@mol.f.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年, 温度は生命を担う細胞機能と関連する物理因子として注目されている. 生命は, 進化の過程で常に変動する過酷な環境温度に適応すべく体内温度恒常性システムを作り上げた. 一方で, 細胞の機能は幾万もの化学反応より成立するため, 細胞活動は大きな産熱を伴う. 細胞内の自発的な熱産生は, 体温調節などの環境温度適応機構において根幹を担うだけでなく, 細胞機能にとって効率的に利用すべきエネルギー源でもある. 生命が持つ, 温度変化や熱に対する回避と活用のシステムは生命現象を構成するあらゆる生理機能に強い影響を与えるため, 個体から細胞, 分子レベルに至る種々の生物学的階層において温度と生理機能の間には密接な関係が備わっている. このように細胞内温度変化と機能の間には興味深い関係が提唱されている.

2. 分子温度計を用いた細胞内温度計測

2.1 蛍光性温度センサーの開発

生命と温度の関係を深く理解するには, 生体の最小構成単位である細胞レベルにおいて温度応答や自発的な温度変動を観察することが必要である. 細胞内温度を計測する方法として, 分子温度計が注目されている. これは熱電対や熱量計測など, 数十 μm 程度の細胞内への適応が困難であった従来の温度・熱計測法とは対照的に分子レベルで機能するため, 細胞内部の微小空間の温度測定が可能である. 蛍光性温度センサーは蛍光特性が温度によって変化する分子デバイスであり, 筆者はこれを蛍光顕微鏡による検出と組み合わせることにより, 細胞内温度計測を開拓した. これまでに, 細胞に適応可能な高感度分子温度計として, 蛍光性ポリマー温度センサー (Fluorescent polymeric thermometer, FPT; 図 1) を開発した[1, 2]. このセンサーの機能は polyacrylamide を主鎖とする温度感受性ユニットと水分子感受性蛍光団ユニットが担っている. 低温の際には, 水分

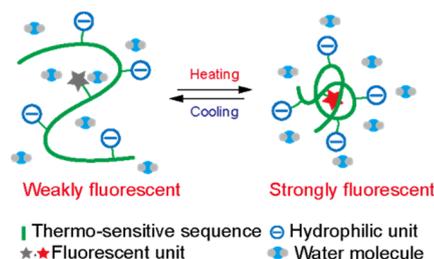


図 1 蛍光性ポリマー温度センサー (FPT) [1, 2].

子により蛍光は弱い状態であるが, 高温下では温感性ユニットの疎水性相互作用によってセンサーが収縮することにより水分子はセンサー外へ排除され, 蛍光強度の上昇や蛍光寿命の延長といった蛍光特性の大きな変化が生じる. この温度依存的变化は, 温度以外の環境因子 (pH, イオン強度, タンパク質濃度等) にはほとんど影響を受けない.

細胞内の温度センサーの信号は高感度蛍光イメージング法により検出した. 微弱な蛍光強度変化を高い信号・背景比かつ高い定量性で検出することのできる高感度カメラによるイメージング法やその定量解析法により, 微小かつ不均一な空間である細胞内において 0.1–0.2°C 程度のわずかな温度変化でも検出することができる.

2.2 細胞内温度分布の観察

蛍光性温度センサー[1, 2]を用いて細胞内の温度分布を定量的に検出するためには, 細胞内の形状や構造体, 蛍光性温度センサーの不均一な分布や励起光源強度や光褪色による信号強度の不安定性を回避した計測が必須である. この目的には, 蛍光強度ではなく, 異なる波長や偏光の強度比 (レシオ) や蛍光波長, 蛍光寿命をパラメータとして用いる. 特に, 蛍光寿命はダイナミックレンジが大きいことから, 変化量が小さい細胞内温度分布の可視化に適している.

最も精度の高い蛍光寿命解析法である時間相関単一光子計測法 (Time correlated single photon counting, TCSPC) と連結した蛍光寿命イメージング顕微鏡法 (Fluorescence lifetime imaging microscopy, FLIM) を用いた定常状態の COS7 細胞 (アフリカミドリザル腎臓由来) 内の FPT の蛍光寿命イメージングの結果, 細胞内の場所による温度の差が観察された[2]. 特徴的な温度分布は, 核内の温度が細胞質と比較して平均 1 °C 高温であることである (図 2A). 熱発生源としては, 核内の代表的反応である DNA 複製, 転写, RNA プロセッシング等が挙げられ, また, 細胞質と多重膜により隔離されている構造にも起因すると考察している. もうひとつの特徴は, 細胞質の中心体が高温を示す事である. γ -チューブリンと共局在することから確認された中心体における温度は周辺と比較して平均 0.8 °C 高温であり, その温度差は細胞間のばらつきが大きいという特徴を示した (図 2B). 熱発生の原因としては, 微小管の構築, ATP 駆動モータータンパク質に加え, リン酸化・脱リン酸化などといった中心体の多様な機能が考えられる. また, 細胞内の微小空間に発熱オルガネラとしてよく知られたミトコンドリアと関連して不均一な温度分布が形成されている様子も観察された (図 2C).

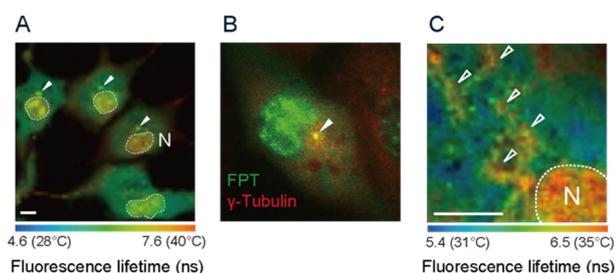


図 2 FPT と FLIM により可視化した COS7 細胞内の温度分布[2]. スケールバーは 10 μ m を示す.

2.3 生理現象における細胞内温度変動

細胞における発熱の生理的な意義のひとつは体温上昇である. 褐色脂肪組織細胞は, 発達したミトコンドリアと脂肪滴を構造的特徴とし, 定常的な体温の維持と刺激依存的な体温上昇を担う. これまでに, 蛍光性ポリマー温度センサー (FPT) により褐色脂肪組織細胞内において生理的な刺激 (β 3 アドレナリン受容体アゴニスト) 依存的な発熱による細胞内

の温度上昇を捉えた (図 3) [4]. さらに, 褐色脂肪組織細胞内における温度上昇はこの細胞の高い代謝活性を誘導する分化に依存的であり, それに必須な遺伝子である Apoptosis signal-regulating kinase 1 (ASK1) を欠損した細胞では発熱が抑制されていた (図 3) [3]. このような細胞内温度変化の性質がマウス個体での体温維持や呼吸活性の表現型とよく合致することから, 細胞内温度変化が生理的な意義を有する証拠として興味深い[3].

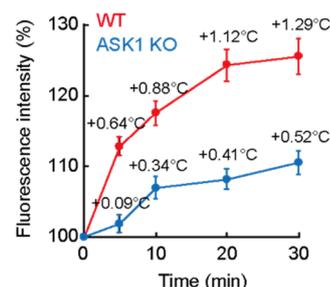


図 3 マウス褐色脂肪組織細胞中における β 3 アドレナリン受容体刺激時の細胞内平均温度追跡[3]. 野生型 (WT) と ASK1 ノックアウト (ASK1 KO) マウス由来の細胞を比較した.

また, 細胞内温度は病態とも深く関連する. 脳浮腫は, 脳梗塞などの虚血により急速に進行する重篤な脳疾患であるが, 脳浮腫発生のメカニズムの多くは不明である. 臨床において脳浮腫には低温療法が適用されること, また脳浮腫に 34°C 以上で強く活性化する温度感受性イオンチャネル TRPV4 が関与することから, 脳浮腫への細胞内温度変動の関与を調べた. 脳神経細胞内の温度を測定するために, 細胞膜透過型 FPT をマウス急性脳スライスに導入し, その蛍光寿命を FLIM により解析した結果, 培養液の温度変化に対し鋭敏に応答したことから, 脳スライス神経細胞内の温度イメージングが可能となった. 次に, 実際に虚血刺激を行なった脳スライスでは神経細胞内温度が無処理時と比較して約 2 °C もの上昇を示した (図 4). これを模倣して脳スライスに高温刺激を加えると脳浮腫症状であるサイズの増大が観察されたことから, 神経細胞内の虚血により誘起される自発的な温度上昇が脳浮腫の原因であることがわかった. さらにこの発熱の原因として神経活動を想定し, 虚血による温度上昇にグルタミン酸が関与する可能性を検証した. まず, グルタミン酸刺激により脳スライス内神経細胞内温度は

約 2 °C 上昇した。また、グルタミン酸受容体の阻害薬で処置したところ、虚血処置による脳内温度の上昇が抑制された。これらの結果から、神経活動依存的な細胞内の発熱が虚血時の温度上昇を担っていることを発見した。

以上の結果から、虚血状態にある脳内では神経活動により生じる自発的な発熱により神経細胞内温度が数度程度上昇し、これが引き金となって TRPV4 を活性化し、細胞内へのイオンや水分子の流入を誘発することが脳浮腫のメカニズムであると結論した。この結果は、細胞の自発的な活動に伴う温度変化が重篤な疾患を誘起すること、また、細胞内部の温度変化が細胞膜の温度感受性分子を活性化するという興味深い機構を明らかにした [4]。

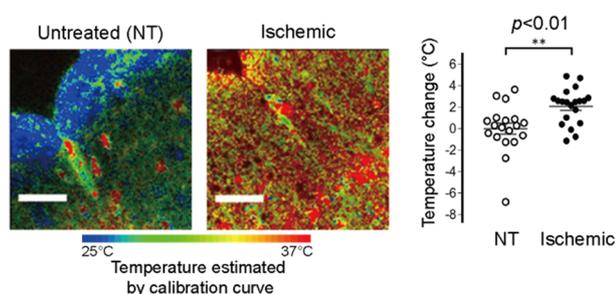


図4 マウス脳スライスにおける温度イメージングと虚血 (Ischemic) 刺激依存的温度変化の可視化 [4]。スケールバーは 50 μm を示す。

3. 細胞内温度変動値に関する 10^5 倍の乖離

FPT と定量的蛍光イメージング法を組み合わせることにより、生きた細胞内の温度変化追跡や温度分布のイメージング解析が可能となった。これにより発見した細胞内の温度変化や温度分布は細胞種や生理現象にかかわらず少なくとも $1\text{ }^\circ\text{C}$ 程度の時空間的変動があったが、これは細胞のサイズ (数十 μm 程度) を考慮すると非常に大きな値である。つまり、発熱・吸熱源を持たない熱伝導方程式を用いて細胞内を水と仮定した際に単一細胞の発熱量 (100 pW 程度) から単純に計算される温度変動は $1 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}$ 程度となり、実際の計測値より著しく小さい [5]。この見過ごせない大きな乖離から、かつて細胞内温度測定法の妥当性に疑問が投げかけられた。しかし、近年原理の全く異なる計測法 (数十種の蛍光性温度計・水のラマン分光・細胞表面と接触させる熱センサなど) が精力的に開発され、それを

用いた計測結果はいずれも細胞内の $1\text{ }^\circ\text{C}$ 程度の温度変動を報告した [6, 7]。この様な原理の異なる種々の測定法による計測値の一致から、この新しい計測法の妥当性が確認されたと考えられている [7, 8]。このことから、測定された大きな細胞内温度変化は計測法のエラー等の不確定要素に由来するわけではなく、細胞内熱移動が均一水溶液と本質的に異なる物理機構により生じていることに起因していると考えられる。

筆者は細胞内での温度変動が大きい結果を踏まえ、その物理的な機構を探索する (4.) 研究とともに、細胞内で発生した熱が細胞機能に貢献しているとの仮説の検証 (5.) の研究へと展開した。以下、それらについて述べる。

4. 細胞内熱移動の観察

細胞内の温度変化の機構を検証するために、細胞内熱移動の観察に挑戦した。これには制御可能な人工熱源に加えて、高い時間分解能における温度分布の時間変化の追跡が必要である。まず、人工的な熱源として、赤外 (IR) レーザー照射系を採用した (図 5)。水分子の吸収帯である 1480 nm のレーザー光を細胞内に集光させることにより水分子を直接励起し、細胞内局所に熱エネルギーを与えることで人工的に温度分布を作ることができる。

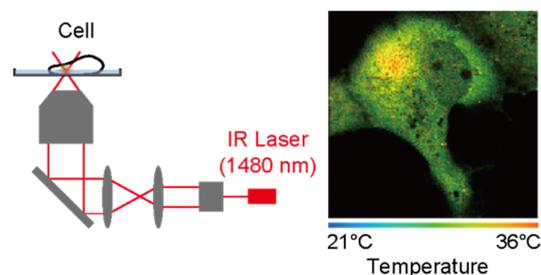


図5 赤外レーザー光照射による細胞内の局所加熱. FPT と FLIM により温度分布を可視化した。

従来技術による細胞内温度分布の可視化は、時空間分解能が低いために追跡への応用が困難であり、温度変動の物理的メカニズムの解明の妨げとなっていた。そこで蛍光寿命イメージング顕微鏡法 (FLIM) における解析法の改良や検出器の高感度化により、蛍光性ポリマー温度センサー (FPT) を用いて細胞内温度分布を高速で追跡する方法を開発した。赤外レーザーを照射して加熱することで、細

胞内の温度分布の変化を数十 ms の時間分解能かつ回折限界の空間分解能で追跡した。この結果、単一細胞の有限領域の平均温度緩和は、同サイズの水に比べて著しく遅い(約 1 秒)ことがわかった(図 6)。さらに、種々の加熱条件での温度分布追跡の検討から、熱伝導に依存しない細胞内温度緩和の存在を明らかにした。

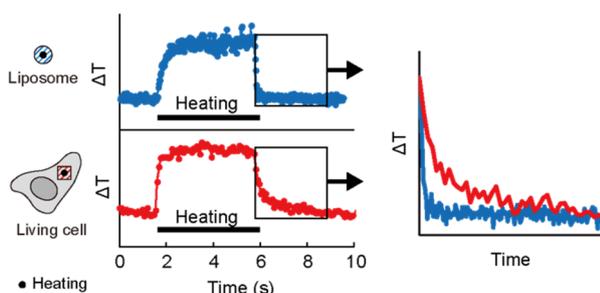


図 6 細胞内(赤線)とリポソーム内(青線)の一過的加熱時の温度追跡と有限領域の平均温度緩和の比較。

これにより、蛍光性温度計で記録できる細胞内の温度変化は単純な熱伝導方程式に従わない温度を含むことが、計算値との「 10^5 倍の乖離」を生む可能性を示した。加えて、細胞生物学的なアプローチによる努力の結果、この温度緩和が特定の細胞内分子や反応の影響を受けていることを解明した。しかし、細胞内の特定の分子が熱移動に与える影響の物理的機構を理解するには、今後の多角的な研究が必要である。

5. 細胞内温度シグナリング

5.1 温度シグナリング仮説

筆者の研究を含め、種々の蛍光性分子温度計により解明された細胞内の特定の反応に伴う温度変化や細胞小器官特異的な温度変化や温度勾配の存在は、それらが細胞機能と密接に関連していることを示唆している[6-8]。細胞内局所の温度環境の変化はそこに存在する生体分子の状態や活性に強く影響するため、筆者は細胞内で発生した局所的な熱が細胞機能に貢献しているのではないかと仮説を立て、これを細胞内温度シグナリングと呼ぶこととした[8, 9]。種々の細胞機能における温度シグナリングの関与およびその機構を検証するために、細胞内温度の観察と操作のアプローチを駆使して取り組ん

でいる。

5.2 温度シグナリングによるストレス顆粒形成

細胞内での熱の機能、すなわち温度シグナリングを調べるため、一過的かつ迅速な集合と離散を示すストレス顆粒(Stress granule, SG)の形成を選択した。SGは細胞が種々のストレス環境下において一時的に形成する膜を持たない細胞小器官である。主成分は mRNA やタンパク質であり、適応的な遺伝子発現調節の機能を有する。まず、SG形成を誘導する薬剤を添加した COS7 細胞内の FPT を用いた温度イメージングより SG 形成時に細胞内温度が有意に上昇を示すことがわかった。この温度変化が SG 形成を誘導したのか、SG 形成の結果であるのかを検討するため、細胞内局所加熱による SG 形成の有無を観察した。生細胞への赤外レーザー照射を人工熱源として用いた加熱による細胞内 mRNA の応答を確認したところ、SG の形成が観察された(図 7)。

これらの結果は、細胞内局所温度変動が実際に SG 形成に貢献していること、つまり細胞は局所的な発熱を積極的に「利用」していることを示している。興味深いことに、詳細な解析の結果、熱が SG 形成を誘導する機構としては、細胞で発生した熱は既に進行中の反応速度を上昇させるという古典的な温度上昇の効果というより、熱が SG 形成に至る反応を開始するという直接的な役割を担っていた。これは細胞内反応の制御が化学修飾や分子間相互作用といった生化学シグナリングにより担われているという従来の細胞内情報伝達機構とは大きく異なる現象であり、細胞内温度シグナリングが細胞機能を駆動する斬新な機構であることを示している。

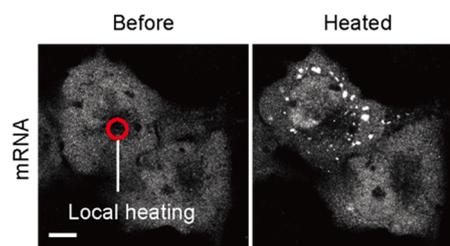


図 7 COS7 細胞内の局所加熱による SG 形成。SG は細胞内在性 mRNA を蛍光性アンチセンスプローブにより標識することで可視化した。スケールバーは 10 μ m を示す。

6. おわりに

分子温度計により、生きた細胞内の温度変化追跡や温度分布のイメージングが可能となった。これにより明らかとなった、細胞が自発的に作り出す温度上昇や温度勾配の形成の機構は、物理的に謎が多いだけでなく、それが担う細胞機能の存在から温度生物学における新たな視点を与える可能性がある。従来、細胞には温度に応答する数多くの分子群が知られており、これらと細胞内の発熱オルガネラや反応と関連づけることで、細胞内の熱力学に加えて、温度シグナリングの普遍性と意義が深まるだろう。今後、細胞内温度研究により巧妙な生命のメカニズムが発見されるかも知れない。

参考文献

- [1] Gota, C., Okabe, K., Funatsu T. et al., Hydrophilic fluorescent nanogel thermometer for intracellular thermometry, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, (2009) 2766-2767.
- [2] Okabe, K., Inada, N, Gota, C et al., Intracellular thermometry uncovers spontaneous thermogenesis and associated thermal signaling, *Nat. Commun.*, **3**, (2012) 705.
- [3] Hattori K., Naguro I., Okabe K. et al., ASK1 signalling regulates brown and beige adipocyte function, *Nat. Commun.*, **7**, (2016) 11158.
- [4] Hoshi, Y., Okabe, K., Shibasaki K., et al., Ischemic brain injury leads to brain edema via hyperthermia-induced TRPV4 activation, *J. Neurosci.*, **38**, (2018) 5700–5709.
- [5] Baffou, G., et al., A critique of methods for temperature imaging in single cells, *Nat. Methods*, **11**, (2014) 899–901.
- [6] Okabe, K., Sakaguchi, R., Shi, B. et al., Intracellular thermometry with fluorescent sensors for thermal biology, *Pflügers Archiv.*, **470**, (2018) 717–730.
- [7] Zhou, J., Del Rosal, B., Jaque, D., Uchiyama, S., Jin, D. Advances and challenges for fluorescence nanothermometry. *Nat. Methods* **17**, (2020), 967–980.
- [8] Okabe, K., Uchiyama, S., Intracellular thermometry uncovers spontaneous thermogenesis and associated thermal signaling., *Commun. Biol.*, **4**, (2021) 1–7.
- [9] 岡部弘基, 実験医学「細胞や臓器の局所温度がなぜ重要か—温度シグナリングを利用する生命現象 概論—温度シグナリング研究への誘い」 **38**, (2020), 1481-1483.

単分子界面の熱輸送現象解明に向けた 単分子接合の接続構造解析

*Geometric Analysis of a Single-Molecule Junction for
Investigating Heat Transfer at
the Single-Molecule Interface*

金子 哲 (東京工業大学)

Satoshi Kaneko (Tokyo Institute of Technology)

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

1. はじめに

今日のナノテクノロジーの進歩は目まぐるしく、評価に用いる計測機器の精度の向上によりナノメートルスケールでの現象が幅広い分野で話題となっている。特に有機-金属界面における熱輸送現象は、有機半導体の動作性能や不均一系触媒の反応性に深く関わっており、効率的なエネルギー活用の観点でも重要である。持続可能性の重要性が増している今日の動向を鑑みると、エネルギーの効率的な利用に向け、ナノスケールの界面における熱輸送現象の理解とその制御は今後一層、重要となる課題の一つといえる。

単分子が金属電極に接続された単分子接合は、究極的に一つ分子からなる分子-金属界面の基本単位であり、その輸送現象の解明は興味深い研究課題である[1, 2]。単分子接合は、分子と金属とが接続する2つの界面が非常に近接した特殊な界面構造とみなすことができ、量子効果や界面双極子に由来した興味深い現象が観測される[1, 2]。特に外力により容易に接続構造が変化し、その接続構造の変化に伴う物性の急激な変化は他の物質相と

は異なる特徴の一つといえる[2]。このような単分子接合における輸送現象に関する研究は電子輸送に関する研究が先行しており、熱輸送に関する知見は比較的少ないものの、近年、熱起電力等をはじめ様々な試みが行われている。一方、ナノ材料に対する計測手法に比べ[3]、単分子接合では実験的な制約が大きく、単分子・単原子スケールでの熱輸送現象の解明には課題も多い。本稿では、熱輸送現象に関連した単分子接合の物性計測について、特に電子状態に大きな影響を与える接続構造に着目し、その構造決定手法について紹介する。

2. 単分子接合の作製方法

まず、一般的な単分子接合の作製方法について説明したい。単分子接合の作製には金属ナノ接合の破断により形成されるナノギャップに捕捉された分子の信号を捉える Break junction (BJ) 法が広く用いられている[2]。BJ法では走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の探針を基板に接着させたのち、鉛直方向に引き上げることでナノギャップを作製する SPM-BJ 法 (図 1(a)) と電極として用いる金属

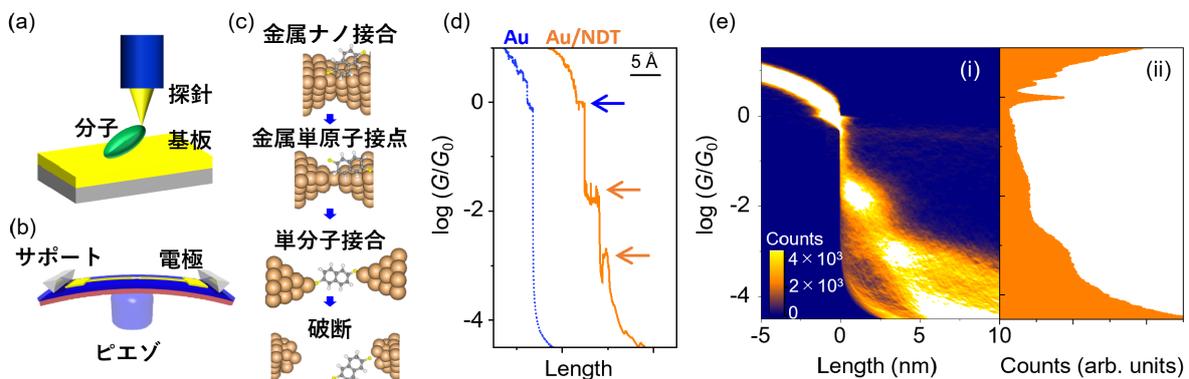


図 1 (a, b) BJ 法による単分子接合の作製方法. (a) STM-BJ 法. (b) MCBJ 法. (c) 破断過程のモデル図. (d) コンダクタンストレス. NDT 存在下(橙色, 実線), 清浄金電極(青色, 点線). (e) NDT 分子接合に関する (i) コンダクタンストレスの 2 次元ヒストグラム. (ii) コンダクタンスヒストグラム. (d, e) は ACS publications の許諾を得て 文献[4]の論文より一部修正して掲載.

ナノ構造体を3点曲げの方法で押し曲げ、破断させる Mechanically controllable break junction (MCBJ) 法が良く用いられている (図 1(b)). そのほかにも印加電圧により金属電極を破断させるエレクトロンマイグレーション (EM) 法や、クロスバー構造を活用した手法等も用いられている[1, 2]. ここでは MCBJ 法を例に単分子接合の作製方法について説明する (図 1(c)). 計測対象である分子の溶液を電極上に滴下し、標的分子の自己組織化単分子膜 (Self-assembled mono layer; SAM) を作製する. 電極上に SAM を作製した状態で基板を押し曲げることで、電極の中心部分に応力を加える. 応力を加えるに従い、電極の中心部分は徐々に細くなり、最終的に単原子接点が形成される. 原子接点が破断した後形成されるナノギャップに、表面上の分子が拡散し、捕捉されることで、単分子接合が形成する. 図 1(d)に金電極にナフタレンジチオール (NDT) を吸着させた際の金電極の破断過程における電気伝導度変化を示している[4]. なお、電気伝導度の単位 G_0 は電気伝導度の量子化単位で、その大きさは $2e^2/h$ (e は電荷素量, h はプランク定数)により計算され、およそ $77.5 \mu\text{S}$ である. 破断過程において、接合の伸長に対して平坦な電気伝導度を示している箇所は、単原子接点や単分子接合等の準安定構造が形成していることを示している. 金単原子接点の電気伝導度である $1 G_0$ の電気伝導度を示したのち、NDT に由来した準安定構造を示し、接合が破断している (図 1(d)). 以上に述べた単原子接点・単分子接合の形成は、確率的な事象である. そこで BJ 法では、通常数千回、接合の形成と破断を試行し、統計的に破断過程で観測される単分子接合の電気伝導度を決定する. 破断過程における電気伝導度変化に関するヒストグラムを作成すると図 1(e)の様になる[4]. 10^{-2} と $10^{-3} G_0$ に準安定構造が観測されている. のちに説明する通り、第一原理計算や振動分光計測等、種々の知見を組みわせることにより、これらの状態が単分子接合に対応するか、また、どのような接合構造に対応するかを決定する[2, 4].

3. 単分子接合における熱起電力計測

上記の様に作製した単分子接合に対して、熱起電力を計測する試みが行われている. MCBJ 法では電極の両端にヒーター機構と温度計を設置し

[5], STM-BJ 法では基板にヒーターと温度計を設置することが一般的である[6]. 単分子接合の電極の温度が有限な温度を示すとき、電極におけるフェルミ分布関数は低温極限の場合のステップ関数とは異なり、熱力学的な揺らぎを反映した曲線となる (図 2 (a, b)). 電極間に温度勾配が存在すると、この温度揺らぎの違いに由来して、ゼーベック効果により起電力が生じる. 単分子接合におけるゼーベック係数(S_J)は、Landauer の式を変形することで、以下の式(1)の様に表示される[7, 8].

$$S_J = -\frac{\pi k_B T}{3e} \left. \frac{\partial \ln \tau}{\partial E} \right|_{E=E_F} \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン係数、 T は温度、 e は電荷素量、 τ は透過率を表す. 式(1)はゼーベック係数がフェルミエネルギーにおける、電子輸送を担う伝導チャンネルの透過率曲線の傾きに依存していることを示している. すなわち、ゼーベック係数の符号を調べることで、電子輸送を担う軌道とフェルミエネルギーの相対的な位置関係が分かるため、分子軌道に関する知見を得ることが出来る[7]. ゼーベック係数の符号が正である場合は、透過率曲線の傾きは負であるため、最高被占有軌道 (Highest occupied molecular orbital; HOMO) を介し

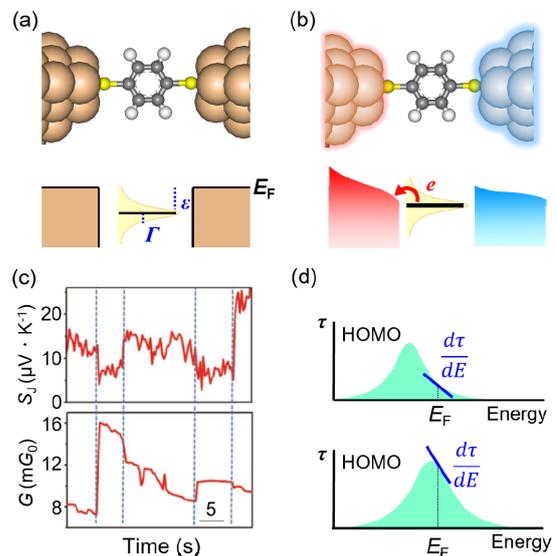


図 2 (a) BDT 単分子接合と対応する電子状態の概念図. (b) 電極間に温度勾配が生じた場合の電子状態変化の概念図. (c) 室温大気中における BDT 単分子接合の電気伝導度(G)と S の経時変化. (d) 接合構造の変化による透過率曲線の変化とゼーベック係数(S)の変化に関する概念図. (c) は文献[9]より許諾を得て転載.

て電子が輸送されている可能性が高い。

図 2(c)にはベンゼンジチオール (BDT) 単分子接合の構造変化にตอบสนองした熱起電力と電気伝導度の変化の計測例を示す[9]. 電気伝導度の変化に対応してゼーベック係数が変化している. 図 2(a)に示した, 単分子接合における分子軌道のフェルミエネルギーに対する軌道エネルギーの位置(ϵ)や金属-分子相互作用による分子軌道のブローニングの幅(Γ)は金属と分子がどのように相互作用するか依存して変化する. 従って, 透過率曲線上における伝導軌道に由来したピーク構造の形状は相互作用により変化するため, 接続構造の変化にตอบสนองして, ゼーベック係数の値は変化する (図 2(d)). 以上の事象は接続構造を能動的に動かすことで電子状態を変化させ, ゼーベック係数を変化させることが出来ることを示唆している.

そこで以下に単原子程度からなる金属原子接合の接続構造を変化させることで熱起電力を変化させた試みについて紹介する. 図 3 には極低温超高真空中で, MCBJ 法により作製した単原子接点のギャップ間隔(D)を周期的に変化させた際の熱起電力の変化を示す[10]. 特定の接合構造を保持した際の熱起電力の値(V_T)は電気伝導度(G)と連動して変化する, ギャップ間隔の増減に従い符号を含めて変化した (図 3(a)). 対応する変化について, 第一原理計算を用いてシミュレーションを行ったところ, 電気伝導度変化と熱起電力変化について実験結果の傾向を支持する結果を得た (図 3(b, c)). 金属単原子接点の電気伝導度は理想的には量子化単位に相当する $1 G_0$ を示すが, 接続構造の変化により電極上の欠陥や不純物に由来した電子散乱により, その値は変化する[11]. これらの散乱は量子干渉効果を引き起こし, フェルミエネルギー付近での電子状態に影響を与える[10]. 実際に量子化電気伝導度を示す金のナノ接合に対して熱起電力を計測するとその値は正負両方の値に幅広く分布する[10]. 従って, ギャップ間隔の変化により, フェルミエネルギー近傍の電子状態が変化するため, 符号が変化するような熱起電力変化が観測されたと考えられる.

以上の様に, 電気伝導度と連動した熱起電力変化が検出されており, 単分子接合に由来した熱起電力変化が検出されている. 一方で, 単原子・単分子スケールでの熱起電力現象・熱輸送現象の理

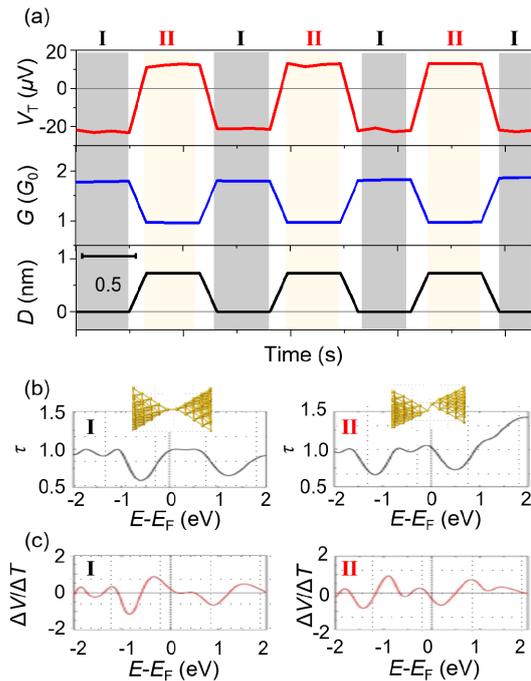


図 3 外力による電気伝導度と熱起電力のスイッチ現象の観測. (a)電気伝導度(G)と熱起電力のギャップ間隔(D)依存性. (b, c) 第一原理計算によるシミュレーション結果. (c) 透過率(τ) (d) 熱起電力. 挿入図は対応する構造モデル.文献[9]より許諾を得て転載.

解のためには, 未だ課題も多い. 課題の一つとして, 輻射熱の影響や分子の両端における温度勾配の不明瞭さが挙げられる. 現状では対照実験, シミュレーション, 実験毎での補正等の工夫により実験結果を校正しているものの, 実験的に分子両端の温度を決定し, 詳細な電極間距離等の構造情報を得る手法は確立していない. また, 近年になり熱輸送計測の試みが行われているが[12, 13], 接合構造の揺らぎに由来した信号の揺らぎが大きく, 接続構造に対応した熱輸送特性は未だ明らかになっていない. 単分子接合における接続構造の決定は単分子・単原子スケールでの熱輸送の解明に向けても重要な課題の一つであるといえる.

4. 単分子接合の構造解析

単分子接合の接続構造の解析方法は電気伝導度計測に立脚した手法がほとんどである. 前述した電気伝導度とプラトー長の解析から, 分子のサイズ等の情報を得ることは可能である[1]. しかし, この手法では電極金属に用いる金原子の移動によ

る変化が構造の情報に含まれてしまうことがあり、また、電子状態の似通った分子を電気伝導度で区別することは困難ある。一方、表面増強ラマン散乱 (Surface-Enhanced Raman Scattering; SERS) を用いた振動分光法では、SERS の特異な増強機構により、単分子の振動モードに由来した信号を取得することができる[14-16]。ナノ構造体が近接したナノギャップ中でプラズモン間の相互作用により形成される近接場により、SERS の信号増強は 10^6 - 10^8 倍に上るといわれている。単分子接合は単分子が金属のナノギャップに架橋した構造をしているため、このプラズモンカップリングにより形成される強い光増強場を利用することができる。更に、分子が金属に吸着した場合、金属と分子間の電子移動による共鳴効果により、近接場の効果に加えて信号が増強されるため、単分子の振動モードの検出が可能になる[14-16]。

図 4 には MCBJ 法による BDT 単分子接合における SERS 計測と SERS を用いた接続構造の特定例を示す[14, 15]。図 4 (a) は BDT が吸着した金電極の自己破断過程における、電気伝導度と SERS 強度変化である。計測では基板の湾曲を一定に保っており、電極中心部分が自発的に破断しているため、電極表面と対物レンズとの距離は変化していないことに注意していただきたい。破断過程において、金属ナノ接合の状態から、BDT 単

分子接合に対応する電気伝導度を示す状態に変化すると、SERS 強度が急激に増加し、接合が破断すると SERS 強度は減少した。単分子接合形成時における SERS 強度の急激な増加は分子が電極と結合したことによる、電荷移動共鳴効果の増大が要因として考えられる[14]。電気伝導度変化に着目すると、電気伝導度は大きなプラトー構造の中に複数の階段構造が観測されていることが分かる。この階段構造は単分子接合における、準安定構造に由来していると考えられる。そこで、この自己破断過程で、連続的に電流-電圧 (I - V) 曲線と SERS スペクトルを取得し、得られる情報から、準安定構造の接続構造の解明を試みた。

まず、図 2 (a) に示したモデルに従い電子が HOMO を介して輸送されると仮定し、以下の式を用いて I - V 曲線のフィッティングを行い、 ε と Γ の値を得た。

$$I(V) = \frac{8e}{h} \alpha(1-\alpha)\Gamma \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\alpha eV - 2\varepsilon}{2\Gamma} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{(1-\alpha)eV + 2\varepsilon}{2\Gamma} \right) \right\} \quad (2)$$

α は分子の両端における Γ の対称性を表すパラメーターであり、両端の Γ の合計に対する片側の Γ の値の比率を示し、対称な場合 α は 0.5 となる。また、SERS スペクトルから得られるラマンバンドに対して、ローレンツ関数によりフィッティングを行い、対応する振動モードの振動エネルギー

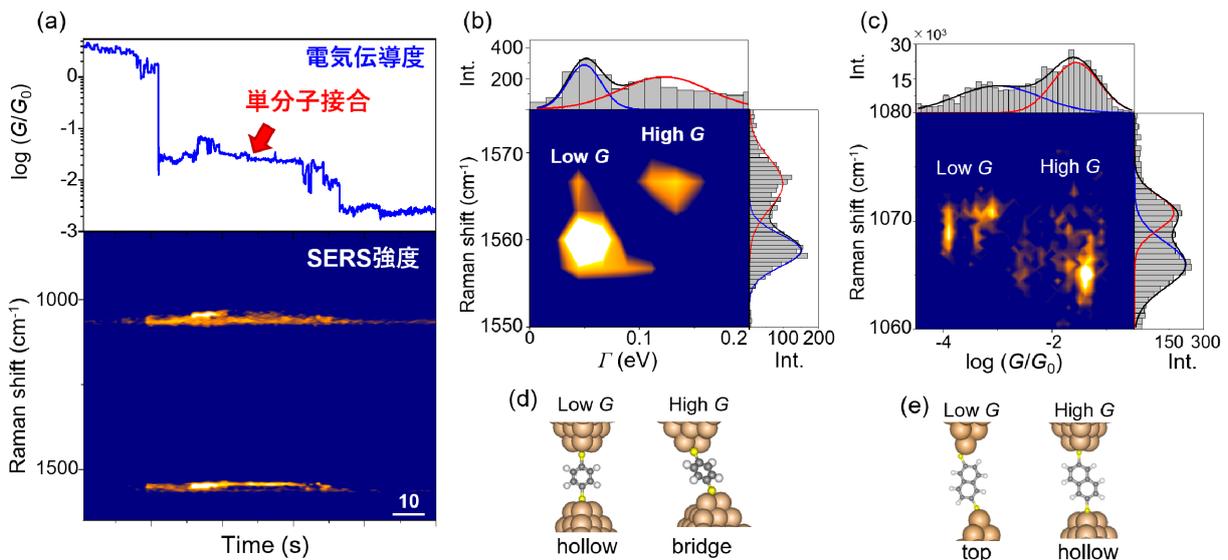


図 4 (a) MCBJ 法を用いた BDT 単分子接合における SERS 計測の例. (b) c) BDT 単分子接合の接合構造解析. (b) 波数とカップリングの関係図. (c) 接合構造のモデル図. (a), (b), (c)はそれぞれ、文献[14], [16], [4], より許諾を得て一部修正して転載.

を得た。図 4(b)は解析により得られた CC 伸縮振動エネルギーと Γ に関するヒストグラムである。観測されている電気伝導度領域には二つの状態に分類されることが明らかとなった[15]。計測により得られた、電気伝導度、振動エネルギー、 Γ を密度汎関数法と非平衡グリーン関数を用いた計算結果と比較を行った所、観測された構造はチオール基が原子二個上に吸着した bridge サイトと三個上に吸着した hollow サイトに対応していることが示された (図 4(c)) [15]。同様の解析により (図 4(c))、図 1(e)のヒストグラムで観測された NDT 単分子接合の二つの状態は hollow サイトと top サイトに由来していることが示された (図 4(e))。以上より、分光計測と I - V 計測を組み合わせることによって得られる複合的な知見を用いることにより、準安定構造のうち頻度良く観測される熱力学的に安定な接合構造について解析することが可能となる。

5. 接続構造の変位依存性

単分子接合が形成され電極間の距離の変化による接合構造の変化を明らかにするため、SERS と I - V 曲線の電極間距離依存性を調べた (図 5(a-g)) [17]。図 5(b-e)は、BDT 単分子接合とビピリジン (BPY) 単分子接合を伸長させた際の I - V 特性と 1600 cm^{-1} 付近に観測される CC 伸縮振動に注目した際の SERS スペクトル変化である。BDT と BPY それぞれに対して、接合を伸長させるに従い、BDT 接合では CC 伸縮振動のエネルギーがブルーシフトし、BPY 接合ではレッドシフトした。そこで複数の伸長過程について Γ と CC 伸縮振動エネルギーの変化 (Δv_{CC}) を調べた。図 5(f, g) はそれぞれの分子に対して単分子接合が破断した点を起点とし、 Γ と Δv_{CC} の伸長距離依存性を見積もった値である。BPY と BDT では CC 伸縮振動エネルギー変化の方向が逆であり、 Γ の変化が BPY の方がより急峻であった。伸長距離に対して連動した振動エネルギーと Γ の変化の違いは、二つの分子において芳香環と電極表面との相互作用が異なることを示唆している。BPY ではピリジン環が直接、電極と直接相互作用しているのに対して、BDT ではチオール基を介して電極表面と相互作用している。BPY では電子輸送を担う π 軌道と金の電子状態が直接相互作用しているため、変位に対してより急峻に

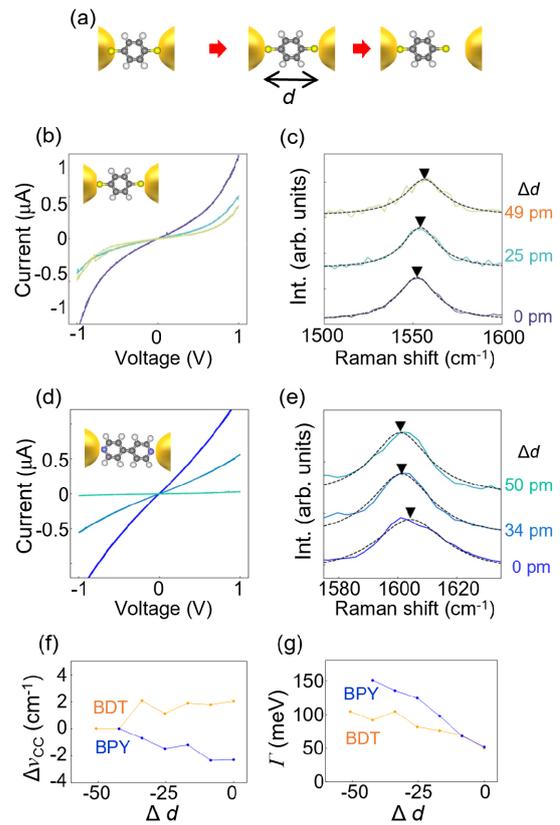


図 5: 接合構造の電極間距離依存性. (a) 接合の伸長の概念図. (b, c) BDT 単分子接合における (b) I - V 曲線と (c) CC 伸縮振動に関するラマンバンドの電極間距離依存性. (d, e) BPY 単分子接合における (d) I - V 曲線と (e) CC 伸縮振動に関するラマンバンドの電極間距離依存性. (f, g) CC 伸縮振動の振動エネルギーの変化量 (Δv_{CC}) とカップリングエネルギーの電極間距離依存性. 接合破断時を原点とした. 文献[17]より許諾を得て転載.

変化し、相互作用の解消により振動エネルギーに従いレッドシフトしたと考えられる。

6. まとめ

以上の通り、単分子接合ではその構造的特性から特徴的な輸送現象が観測される。単分子レベルで熱起電力等の物性と構造の関係を明らかにする研究が行われてきた。しかし、接続構造の不明瞭さが課題であった。一方で SERS と電気輸送特性を組み合わせ、二つの信号の同期性から接続構造の報の解明が進められ、吸着構造や分子が架橋しているナノギャップの変位に関する知見が見出されつつある。今後、振動分光の持つスペクトル情報を活用した温度の計測などへの発展が期待され

る。また、ナノスケール界面における伝熱を包括的に理解に向け、単分子接合のみならず単分子膜等における他の計測手法による知見と組み合わせ[18, 19], ナノスケール界面における熱輸送現象を解明し、更に制御していく取り組みが期待される。

謝辞

この度は、貴重な執筆機会をいただいた編集員の方々に感謝申し上げたい。本稿で紹介した研究成果は共同研究の賜物であり、東京工業大学の学生の皆様をはじめ、共同研究者の方々に心から感謝申し上げます。また、さきがけ「熱制御」領域でご議論を交わしてくださった皆様、特に産業技術総合研究所の志賀拓磨先生、九州工業大学の児玉高志先生には貴重なご高説を賜りましたこと、厚く御礼申し上げます。本研究の一部は JST さきがけ (JPMJPR18I3), 科研費 (20K05445) の支援を受けて行った。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Evers, F., Korytár, R., et al., Advances and Challenges in Single-Molecule Electron Transport, *Rev. Mod. Phys.*, **035001** (2020) 92.
- [2] 金子哲, 単分子接合における電気伝導度計測と接合構造の解析, *電気化学*, **217-222** (2020) 88.
- [3] 児玉高志, 単一ナノ構造材料の熱伝導計測. フォノンエンジニアリング—マイクロ・ナノスケールの次世代熱制御技術 —: エヌ・ティー・エス, **153-162** (2017).
- [4] Homma, K., Kaneko, S., et al., Dependence of Charge Transfer on the Adsorption Site at Metal–Molecule Interfaces: Implications for Single-Molecule Electronic Devices, *ACS Appl. Nano Mater.*, **8135-8140** (2023) 6.
- [5] Ludoph, B., and Van Ruitenbeek, J., Thermopower of Atomic-Size Metallic Contacts, *Phys. Rev. B*, **12290** (1999) 59.
- [6] Reddy, P., Jang, S. Y., et al., Thermoelectricity in Molecular Junctions, *Science*, **1568-1571** (2007) 315.
- [7] Wang, K., Meyhofer, E., et al., Thermal and Thermoelectric Properties of Molecular Junctions, *Adv. Funct. Mater.*, **1904534** (2019) 30.
- [8] Paulsson, M., and Datta, S., Thermoelectric Effect in Molecular Electronics, *Phys. Rev. B*, **241403(R)** (2003) 67.
- [9] Kaneko, S., Nakamura, Y., et al., Simultaneous Measurement of Electrical Conductance and Thermopower of Single Benzenedithiol Molecular Junctions, *Appl. Phys. Express*, **065201** (2015) 8.
- [10] Aiba, A., Demir, F., et al., Controlling the Thermoelectric Effect by Mechanical Manipulation of the Electron’s Quantum Phase in Atomic Junctions, *Sci. Rep.*, **7949** (2017) 7.
- [11] Agraït, N., Yeyati, A. L., et al., Quantum Properties of Atomic-Sized Conductors, *Phys. Rep.*, **81-279** (2003) 377.
- [12] Cui, L., Hur, S., et al., Thermal Conductance of Single-Molecule Junctions, *Nature*, **628-633** (2019) 572.
- [13] Mosso, N., Sadeghi, H., et al., Thermal Transport through Single-Molecule Junctions, *Nano Lett.*, **7614-7622** (2019) 19.
- [14] Kaneko, S., Murai, D., et al., Site-Selection in Single-Molecule Junction for Highly Reproducible Molecular Electronics, *J. Am. Chem. Soc.*, **1294-1300** (2016) 138.
- [15] Kaneko, S., Montes, E., et al., Identifying the Molecular Adsorption Site of a Single Molecule Junction through Combined Raman and Conductance Studies, *Chem. Sci.*, **6261-6269** (2019) 10.
- [16] 金子哲, 本間寛治, 西野智昭, 単分子接合に特有な表面増強ラマン散乱スペクトル挙動の解明, 表面と真空, **405-410** (2023) 66.
- [17] Kobayashi, S., Kaneko, S., et al., Tolerance to Stretching in Thiol-Terminated Single-Molecule Junctions Characterized by Surface-Enhanced Raman Scattering, *J. Phys. Chem. Lett.*, **6712-6717** (2020) 11.
- [18] Yuan, W., Ueji, K., et al., Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering, *ACS Nano*, **15902-15909** (2021) 15.
- [19] Fujii, S., Shoji, Y., et al., Visualization of Thermal Transport Properties of Self-Assembled Monolayers on Au(111) by Contact and Noncontact Scanning Thermal Microscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, **18777-18783** (2021) 143.

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
2024年					
5月 29(水) ～ 31(金)	第61回日本伝熱シンポジウム			第61回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 神戸大学大学院工学研究科 E-mail: symp2024@htsj-conf.org FAX: 078-803-6119	

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
2024年					
4月 18(木) ～ 19(金)	第57回空気調和・冷凍連合講演会			(公社) 空気調和・衛生工学会 半田務 handa@shase.or.jp	
5月 21(火) ～ 22(水)	日本機械学会関西支部第391回講習会 破壊力学の基礎と最新応用			日本機械学会関西支部 Tel:06-6443-2073 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
6月 10(月) ～ 12(水)	第29回計算工学講演会			(一社) 日本計算工学会 office@jsces.org	
17(月) ～ 18(火)	No.24-10 講演会「第28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	
7月 1(月) ～ 2(火)	The 8th International Symposium on Fuels and Energy (ISFE2024)			広島大学エネルギー超高度利用研究拠点	
19(金) ～ 21(日)	第50回可視化情報シンポジウム			一般社団法人可視化情報学会事務局 office@vsj.jp	
9月 4(水) ～ 6(金)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2024			(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	
17(火) ～ 19(木)	日本実験力学会 2024年度年次講演会			新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事務局 担当: 高木由紀子 / Tel: 025-368-9310 / Fax: 025-368-9309 / E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
25(水) ～ 27(金)	日本流体力学会 年会 2024			(一社) 日本流体力学会 03-3714-0427/FAX: 03-3714-0434 E-mail: info@nagare.or.jp	

第 61 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 61 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 鈴木 洋

幹事 村川 英樹

開催日：2024 年 5 月 29 日(水)～31 日(金)

会場：神戸国際会議場 (<https://kobe-cc.jp/ja/>)

所在地 〒650-0046 神戸市中央区港島中町 6-9-1 電話番号 078-302-5200

アクセス

神戸新交通 ポートライナー「市民広場」駅に直結

神戸国際会議場 交通アクセス (<https://kobe-cc.jp/ja/visitors/access/>)

特別講演：検討中

総会：5 月 30 日(木) (詳細はシンポジウムウェブサイトに掲載します。)

ホームページ：<https://htsj-conf.org/symp2024/>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - 通常の一般セッション(口頭発表)
 - オーガナイズドセッション(口頭発表)
 - 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分(発表 10 分, 個別討論 5 分)で、各セッションの最後に総合討論の時間(5 分 × セッション内の講演件数)を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、前号(2024 年 1 月号)掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞(第 61 回 日本伝熱シンポジウム)について」をご参照下さい。

【参加費等】

- 参加申込の時期
 - 早期申込:2024 年 4 月 12 日(金)まで
 - 通常申込:2024 年 4 月 13 日(土)以降
- シンポジウム参加費
(同時開催される International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024 と共通です。 双方に参加登録を行う必要はありませんのでご注意ください)

会員一般	早期申込:14,000 円(不課税)	通常申込:17,000 円(不課税)
共催・協賛学会一般	早期申込:15,400 円(税込み)	通常申込:18,700 円(税込み)
非会員一般	早期申込:18,700 円(税込み)	通常申込:22,000 円(税込み)
会員学生	早期申込:8,000 円(不課税)	通常申込:9,000 円(不課税)
非会員学生	早期申込:9,900 円(税込み)	通常申込:11,000 円(税込み)

 - ※ 特別賛助会員は 1 口につき 3 名, 賛助会員は 1 口につき 1 名, 参加費が無料になります。
 - ※ 名誉会員は参加費が無料になります。
 - ※ 学会員とは、日本伝熱学会会員のことを指します。
 - ※ 講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。
- 講演論文集電子版
講演論文集電子版のみの販売:5,000 円(税込み, シンポジウム後の販売になります。)

【意見交換会】

- ・ 開催日:2024年 5月 30日(木)
- ・ 会 場:ポートピアホテル(〒650-0046 兵庫県神戸市中央区港島中町6丁目10-1)
- ・ 参加費(早期申込締切:2024年 4月 12日)
(同時開催される International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024 と共通です。双方に参加登録を行う必要はありませんのでご注意ください)
一般 早期申込:10,000 円(税込み) 通常申込:13,000 円(税込み)
学生 早期申込:5,000 円(税込み) 通常申込:7,000 円(税込み)
※早期申込は4月12日までです。

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- ・ 参加費登録は本シンポジウムのウェブページから行ってください。
- ・ 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- ・ 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します。(詳細はシンポジウムウェブサイトに掲載します。)

【講演論文集電子版】

- ・ 講演論文集は電子版として参加者にウェブサイトからのダウンロードを通じて配布します。
- ・ 講演論文集(電子版)は、日本伝熱学会会員(2024年度会員)の皆様に対し、シンポジウムウェブサイトリンクされたページで公開します。
- ・ 電子版のダウンロードは、以下の閲覧IDとパスワードを用いてログイン後、閲覧・ダウンロードすることができます。

講演論文集電子版閲覧ID : nhts61kobe パスワード : 2024kobe

- ・ シンポジウムで座長をご担当される方は、この電子版を当日のセッションの参考資料としてください。
- ・ 講演論文集(電子版)の公開日は、2024年5月15日(水)を予定しています。この日が特許に係る公知日となります。シンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

【ご注意】

- ・ 参加費、意見交換会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・ 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するウェブサイトでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第61回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局
神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 村川英樹宛
E-mail:symp2024@htsj-conf.org FAX:078-803-6119

International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024 (IWSEC2024) 開催のご案内

IWSEC2024 実行委員会

委員長 津島 将司

副委員長 岩井 裕

開催日：2024年5月29日(水)～30日(木) (第61回日本伝熱シンポジウムの第1日目と第2日目)

(※第61回日本伝熱シンポジウムに参加される方はあわせてご参加いただけます)

会場：神戸国際会議場 (<https://kobe-cc.jp/ja/>)

所在地 〒650-0046 神戸市中央区港島中町 6-9-1 電話番号 078-302-5200

アクセス

神戸新交通 ポートライナー「市民広場」駅に直結

神戸国際会議場 交通アクセス (<https://kobe-cc.jp/ja/visitors/access/>)

ホームページ <https://htsj-conf.org/symp2024/IWSEC2024/index.html>

【ワークショップの形式】

- 講演発表形式は対面での発表として
 - Plenary Lecture (4件. 以下に記載)
 - General Sessionを実施します.
- 1講演あたりの割当時間(質疑を含む)は、Plenary Lectureは40分、General Sessionは20分です.

Plenary Lecture 1：5月29日(水) 10:40-11:20

Dr. Tetsuhiko Maeda, Center at Fukushima Renewable Energy Institute, AIST, Japan

Evaluation of water electrolysis in renewable energy and development of hydrogen energy systems

Plenary Lecture 2：5月29日(水) 13:30-14:10

Prof. Jianbo Zhang, Tsinghua University, China

A nanofluidic reactor for pure water electrolysis with no Ir, no membrane, and no added electrolyte

Plenary Lecture 3：5月30日(木) 9:00-9:40

Prof. Jungwon Park, Seoul National University, Country

Real-time nanoscale observation of catalysts in energy conversion systems

Plenary Lecture 4：5月30日(木) 10:40-11:20

Prof. Peng ZHANG, Shanghai Jiao Tong University, China

Data-driven design and optimization of thermal energy storage system for heating and cooling applications

【参加費等】

- 参加申込の時期
早期申込:2024年4月12日(金)まで
通常申込:2024年4月13日(土)以降
- ワークショップ参加費
(同時開催される第61回日本伝熱シンポジウムと共通です。双方に参加登録を行う必要はありませんのでご注意ください)

会員一般	早期申込:14,000円(不課税)	通常申込:17,000円(不課税)
共催・協賛学会一般	早期申込:15,400円(税込み)	通常申込:18,700円(税込み)
非会員一般	早期申込:18,700円(税込み)	通常申込:22,000円(税込み)
会員学生	早期申込:8,000円(不課税)	通常申込:9,000円(不課税)

- 非会員学生 早期申込:9,900 円(税込み) 通常申込:11,000 円(税込み)
※ 特別賛助会員は1口につき3名, 賛助会員は1口につき1名, 参加費が無料になります。
※ 名誉会員は参加費が無料になります。
※ 学会員とは, 日本伝熱学会会員のことを指します。
※ 講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。

・ 講演論文集電子版

講演論文集電子版のみの販売:5,000 円(税込み, ワークショップ後の販売になります。)

【意見交換会】

- ・ 開催日:2024年5月30日(木)
 - ・ 会場:ポートピアホテル(〒650-0046 兵庫県神戸市中央区港島中町6丁目10-1)
 - ・ 参加費(早期申込締切:2024年4月12日)
(同時開催される第61回日本伝熱シンポジウムと共通です。 双方に参加登録を行う必要はありませんのでご注意ください)
 - 一般 早期申込:10,000 円(税込み) 通常申込:13,000 円(税込み)
 - 学生 早期申込:5,000 円(税込み) 通常申込:7,000 円(税込み)
- ※早期申込は4月12日までです。

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- ・ 参加費登録は本ワークショップのウェブページから行ってください。
- ・ 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- ・ 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します。(詳細はワークショップホームページに掲載します。)

【講演論文集電子版】

- ・ 講演論文集は電子版として参加者にウェブサイトからのダウンロードを通じて配布します。
- ・ 講演論文集(電子版)は, 日本伝熱学会会員(2024年度会員)の皆様に対し, ワークショップウェブサイトへリンクされたページで公開します。
- ・ 電子版のダウンロードは, 以下の閲覧IDとパスワードを用いてログイン後, 閲覧・ダウンロードすることができます。

講演論文集電子版閲覧ID: nhts61kobe パスワード: 2024kobe

- ・ 講演論文集(電子版)の公開日は, 2024年5月15日(水)を予定しています。この日が特許に係る公知日となります。ワークショップ開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

【ご注意】

- ・ 参加費, 意見交換会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・ 本ワークショップに関する最新情報については, 随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024
(IWSEC2024) 実行委員会事務局宛
Email: iwsec2024@htsj-conf.org

第 61 回日本伝熱シンポジウム・IWSEC2024 タイムテーブル（暫定版）

このタイムテーブルは、2月16日現在の暫定版です。

大会2日目の特別講演をお願いしておりました五百旗頭先生が本年3月6日にご逝去されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。なお、今後特別講演の変更について検討させていただきますが、全体プログラムの変更もあるかもしれません。ご迷惑をおかけしますが、最新のプログラムは本シンポジウム HP でご確認ください。

2024/05/29（第1日目）

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A11 9:00～ 10:20 IWSEC2024 1	B11 OS 9:00～ 10:20 熱エネルギー材 料・システム のための熱・物質 輸送促進1 趣旨説明	C11 OS 9:00～ 10:20 燃焼伝熱研究 の最前線1 趣旨説明	D11 GS 9:00～ 10:20 電子機器の冷 却1	E11 GS 9:00～ 10:20 沸騰・凝縮1	F11 OS 9:00～ 10:30 乱流を伴う伝 熱研究の進展 1 基調講演	G11 OS 9:00～ 10:20 バイオ伝熱1 基調講演	H11 GS 9:20～ 10:20 融解・凝固1	I11 OS 9:00～ 10:20 液滴・濡れ現 象の制御と理 解1 基調講演
A12 10:40～ 12:20 IWSEC2024 2 Plenary lecture 1	B12 OS 10:40～ 12:20 熱エネルギー材 料・システム のための熱・物質 輸送促進2 基調講演	C12 OS 10:40～ 11:40 燃焼伝熱研究 の最前線2	D12 GS 10:40～ 12:00 電子機器の冷 却2	E12 GS 10:40～ 12:00 沸騰・凝縮2	F12 OS 10:40～ 12:20 乱流を伴う伝 熱研究の進展 2	G12 OS 10:40～ 11:40 バイオ伝熱2	H12 GS 10:40～ 12:00 融解・凝固2	I12 OS 10:40～ 12:00 液滴・濡れ現 象の制御と理 解2
A13 13:30～ 14:50 IWSEC2024 3 Plenary lecture 2	B13 OS 13:30～ 14:50 熱エネルギー材 料・システム のための熱・物質 輸送促進3	C13 OS 13:30～ 14:50 燃焼伝熱研究 の最前線3	D13 GS 13:30～ 14:50 電子機器の冷 却3	E13 GS 13:30～ 14:50 沸騰・凝縮3	F13 OS 13:20～ 15:00 乱流を伴う伝 熱研究の進展 3	G13 GS 13:30～ 14:50 多孔体内の伝 熱	H13 GS 13:30～ 14:50 融解・凝固3	I13 OS 13:30～ 14:50 液滴・濡れ現 象の制御と理 解3
15:10～17:10 優秀プレゼンテーション賞セッション（3F レセプションホール） 15:10～17:40 モノづくりセッション（C室） 15:10～17:10 日本伝熱学会特定推進研究特別ワークショップ（B室）								

お知らせ

2024/05/30 (第2日目)

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A21 9:00~ 10:20 IWSEC2024 4 Plenary lecture 3	B21 OS 9:00~ 10:20 熱エネルギー材 料・システム のための熱・物質 輸送促進 4	C21 OS 9:00~ 10:20 燃焼伝熱研究 の最前線 4	D21 GS 9:20~ 10:20 ナノ・マイクロ伝 熱 1	E21 GS 9:00~ 10:20 沸騰・凝縮 4	F21 SS 9:00~ 10:20 関西地区企業 による部品開 発・技術開発 の紹介 1	G21 OS 9:00~ 10:20 ふく射輸送とふ く射性質 1 基調講演	H21 GS 9:00~ 10:20 強制対流 1	I21 OS 9:00~ 10:20 液滴・濡れ現 象の制御と理 解 4 基調講演 1, 2
A22 10:40~ 12:20 IWSEC2024 5 Plenary lecture 4	B22 OS 10:40~ 12:00 熱エネルギー材 料・システム のための熱・物質 輸送促進 5	C22 OS 10:40~ 11:40 燃焼伝熱研究 の最前線 5	D22 GS 10:40~ 12:00 ナノ・マイクロ伝 熱 2	E22 GS 10:40~ 12:00 沸騰・凝縮 5	F22 SS 10:40~ 12:00 関西地区企業 による部品開 発・技術開発 の紹介 2	G22 OS 10:40~ 11:40 ふく射輸送とふ く射性質 2	H22 GS 10:40~ 12:20 強制対流 2	I22 OS 10:40~ 12:00 液滴・濡れ現 象の制御と理 解 5
A23 OS 13:30~ 14:50 水素・燃料電 池・二次電池 1	/	C23 GS 13:30~ 14:50 分子動力学 1	D23 GS 13:30~ 14:50 ナノ・マイクロ伝 熱 3	E23 GS 13:30~ 14:50 沸騰・凝縮 6	F23 SS 13:20~ 14:50 人と熱との関わ りの足跡 (その 7)	G23 OS 13:30~ 14:50 ふく射輸送とふ く射性質 3	H23 GS 13:30~ 14:50 物質移動	I23 OS 13:30~ 14:50 液滴・濡れ現 象の制御と理 解 6
15:10~15:55 特別講演 (検討中) 16:00~17:30 総会 (メインホール) 18:15~20:15 意見交換会 (ポートピアホテル)								

2024/05/31 (第3日目)

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A31 OS 9:00~ 10:20 水素・燃料電 池・二次電池 2	B31 OS 9:00~ 10:20 化学プロセスに おける熱工学 1 趣旨説明 基調講演	C31 GS 9:00~ 10:20 分子動力学 2	D31 GS 9:20~ 10:20 ナノ・マイクロ伝 熱 4	E31 GS 9:00~ 10:20 沸騰・凝縮 7	F31 GS 9:00~ 10:20 電子機器の冷 却 4	G31 GS 9:00~ 10:20 空調・熱機器 1	/	I31 GS 9:20~ 10:20 計測技術 1
A32 OS 10:40~ 12:20 水素・燃料電 池・二次電池 3	B32 OS 10:40~ 12:00 化学プロセスに おける熱工学 2 基調講演	C32 GS 10:40~ 11:40 分子動力学 3	D32 GS 10:40~ 12:00 ナノ・マイクロ伝 熱 5	E32 GS 10:40~ 11:40 沸騰・凝縮 8	F32 GS 10:40~ 12:20 電子機器の冷 却 5	G32 GS 10:40~ 12:00 空調・熱機器 2	H32 GS 10:00~ 12:00 自然対流	I32 GS 10:40~ 12:00 計測技術 2
A33 OS 13:30~ 14:50 水素・燃料電 池・二次電池 4	B33 OS 13:30~ 14:50 化学プロセスに おける熱工学 3	C33 GS 13:30~ 14:30 分子動力学 4	D33 GS 13:30~ 15:30 ヒートパイプ	/	/	G33 GS 13:30~ 14:30 熱物性	H33 GS 13:30~ 14:30 混相流	I33 GS 13:30~ 14:50 自然エネルギー
A34 OS 15:10~ 16:30 水素・燃料電 池・二次電池 5	/	/	/	/	/	/	/	/

第 61 回日本伝熱シンポジウム・IWSEC2024 プログラム（暫定版）

このプログラムは、2月16日現在の暫定版です。前頁のタイムテーブルとともに、修正・変更する場合があります。必ず、最新版を本シンポジウムウェブサイトでご確認ください。なお、登壇者以外の共著者の方が同一時間帯のセッションで重複している場合がありますが、ご容赦ください。また、個別のご要望には応じかねますので、ご了承ください。

第 1 日 5 月 2 9 日（水）

<A 室>

9:00-10:20 IWSEC2024 1

Impact of porous transport layers on the performance of PEM electrolysis cell –Bubble visualization–

- Songsong MA, Tomoko SAITOU, Takahiro KARIMATA, Hironori NAKAJIMA, Kohei ITO (Kyushu university)

Numerical simulation of the two-phase flow dynamics in an alkaline water electrolyzer considering bubble size effects

- Ryo KANEMOTO, Takuto ARAKI, Shigenori MITSUSHIMA (Yokohama National University)

Engineered porous reactors with tailored microstructure for energy conversion applications: a pore network modeling and metaheuristic optimization approach

- Mehrzad ALIZADEH (Osaka University), Jeff GOSTICK (University of Waterloo), Takahiro SUZUKI, Shohji TSUSHIMA (Osaka University)

Coarse-grained molecular dynamics study of ionomer morphology during the drying process of PEFC catalyst layer

- Guo YUTING (Kyoto University), Takuya MABUCHI, Gaoyang LI, Takashi TOKUMASU (Tohoku University)

10:40-12:20 IWSEC2024 2

[Plenary lecture]

Evaluation of water electrolysis in renewable energy and development of hydrogen energy systems

- Tetsuhiko Maeda (AIST)

A further improvement of boiling effect on water electrolyzer – Can hydrophobicity enhance it? –

- Yasufumi ISHIKAWA, Shota SUGAI, Shunsuke KAJIWARA, Linjun LI, Takahiro KARIMATA, Hironori NAKAJIMA, Tomoko SAITOU, ○ Kohei ITO (Kyushu University and Kyoto University)

Influence of operation conditions on H₂ production characteristics of biogas dry reforming membrane reactor

- Akira NISHIMURA, Shogo ITO, Mizuki ICHIKAWA, Souta YAMADA, Ryoma ICHII (Mie University)

Experimental analysis of overpotential in vanadium redox flow batteries induced by pulsating flow

- Pengfei SUN, Mehrzad ALIZADEH, Takahiro SUZUKI, Shohji TSUSHIMA (Osaka University)

13:30-14:50 IWSEC2024 3

[Plenary lecture]

A nanofluidic reactor for pure water electrolysis with no Ir, no membrane, and no added electrolyte

- Jianbo Zhang (Tsinghua University)

Exploring prospects and challenges in the multi-phase a direct toluene electro-hydrogenation electrolyzer

- Fátima Isabella Reyna-Peña, Antonio Atienza-Márquez, Yosei TAKIMOTO, Ryuhei SHIONO, Takuto ARAKI, Shigenori MITSUSHIMA (Yokohama National University)

Power output of the solvation difference flow battery for utilizing low-grade heat

- Yohei MATSUI, Yuki MAEDA, Makoto KAWASE (Central Research Institute of Electric Power Industry), Takahiro SUZUKI, Shohji TSUSHIMA (Osaka University)

<B 室>

B11 9:00-10:20 OS:熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 1

B111: OS 趣旨説明

- 加藤 之貴 (東工大)

B112: ケイ素含浸炭化ケイ素ハニカム支持体を用いた水酸化カルシウム複合化学蓄熱材料の最適化

- 藤居 和也, 船山 成彦, 高須 大輝, 加藤 之貴 (東工大)

B113: 中高温用 Al-Cu-Si 合金系潜熱蓄熱ベレットの開発とその熱物性調査

- 清水 友斗, 中村 友一, ジェーム メルバート, 能村 貴宏 (北海道大)

B114: イオン液体を用いた高真空対応液体冷却機構の開発

- 岡部 貴雄 (東京大), 杉谷 啓 (大同大), 西村 勝彦, 鹿園 直毅 (東京大)

B12 10:40-12:20 OS:熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 2

B121: 【OS 基調講演】カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵シ

ステムの役割

- 中垣 隆雄 (早稲田大)

B122: 酸化カルシウム/水系化学蓄熱材を用いた間接熱交換式固定層反応器の性能評価

- 佐伯 華奈, 杉山 司, 伊崎 剛義, 富田 健太, 玉野 聡一郎, 船山 成彦, 加藤 敬, 高須 大輝, 加藤 之貴 (東工大)

B123: 高温潜熱蓄熱ペレットを用いた 5kWh 級中高温用充填層型蓄熱装置の蓄放熱特性

- 中村 友一, 佐藤 祐輔 (北海道大), Shan Lianying, Chiu Justin (KTH), 能村 貴宏 (北海道大)

B124: ゼオライトを用いた高負荷時蒸気生成補助による熱供給機器の燃料削減化の検討

- 藤井 祥万 (東京大), Maharsi Theonesta, 松井 一騎, 齋藤 壮呉, 中垣 隆雄 (早稲田大), 矢島 健史 (東京電力)

B13 13:30-14:50 OS:熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 3

B131: 気固系化学蓄熱における高耐久伝熱促進法の検討

- 中曾 浩一, 碓本 拓未, 三野 泰志, 後藤 邦彰 (岡山 大)

B132: クリッピングされたレベルセット関数による対流伝熱面のトポロジー最適化

- NIU Qizhou, CHEN Di, KUMAR Prashant, HASEGAWA Yosuke (Univ. Tokyo)

B133: 層流における共役熱伝達のためのトポロジー最適化 – 固体と流体の熱伝導率比の影響 –

- 陳 迪, Kumar Prashant, 長谷川 洋介 (東京大)

B134: 高熱伝導性相変化材料による CO₂ メタネーションの熱制御

- 小出 浩明, 軍司 章, 杉政 昌俊 (日立製作所), 川口 貴大, 能村 貴宏 (北海道大)

B14 15:10-17:10 特定推進研究特別ワークショップ

<C室>

C11 9:00-10:20 OS:燃焼伝熱研究の最前線 1

C111: ガソリンサロゲート燃料の Explosive transition of deflagration とオクタン価に関する数値的研究

- 森山 陽太, 中尾 太樹, 角田 陽, 森井 雄飛, 丸田 薫 (東北大)

C112: 温度分布制御型マイクロローリアクタを用いた NH₃/CH₄ 混合気の燃焼特性に関する調査

- 石田 誉人, 玉置 健太, 金山 佳督, 手塚 卓也, 中村 寿 (東北大)

C113: アンモニア混焼乱流噴流予混合火炎の直接数値計算

- 諏訪部 匠史, Ye WANG, 鈴木 佐夜香, 店橋 護 (東工大)

C114: アンモニア・水素・空気予混合火炎による直接加熱がアルミニウムの表面組成におよぼす影響

- 中島 海斗, 宮川 絢麻, 齋木 悠 (名工大)

C12 10:40-11:40 OS: 燃焼伝熱研究の最前線 2

C121: MEMS センサを用いた壁面近傍における火炎挙動の推定

- 横山 友輝, 出島 一仁, 脇坂 頼明, 河崎 澄, 山根 浩二 (滋賀県立大)

C122: 櫛歯電極センサによる層流火炎の壁面クエンチにおけるイオン電流計測特性

- 谷川 郁馬, 小山 慶一郎, 須田 遥希, 勝部 雄仁, 中別府 修 (明治大)

C123: イオン電流捕集電圧のフィードバック制御による壁面近傍火炎のトラッキング計測

- 中別府 修, 小山 慶一郎, 谷川 郁馬 (明治大)

C13 13:30-14:50 OS: 燃焼伝熱研究の最前線 3

C131: 乱流条件下の火炎壁面干渉における exhaust gas 成層の効果

- 塩月 大和, Ye WANG, 鈴木 佐夜香, 店橋 護 (東工大)

C132: DNS データを用いた乱流予混合火炎面形状と火炎面近傍の熱と流れとの関係に関する研究

- 坪井 和也, 松家 隆雄 (岡山 大)

C133: 二流体噴射弁の噴射角が NH₃ ガスタービン燃焼器の排気特性に与える影響

- 志村 祐康, 倉田 修, 壹岐 典彦, Jo Hyun (産総研), オカフォー エケネチユク (九大), 山下 裕史 (東北大), 辻村 拓, 范 勇 (産総研)

C134: 弱旋回燃焼器内における燃焼振動の駆動メカニズム

- 植田 莉子 (東京理科大), 河合 真穂 (京都大), 後藤 田 浩, 難波江 佑介 (東京理科大), 長尾 順, 黒瀬 良一 (京都大)

C14 15:10-17:40 モノづくりセッション

<D室>

D11 9:00-10:20 電子機器の冷却 1

D111: 正方形薄型基板の面内方向熱伝導率測定法

– 熱伝導率測定可能範囲の数値解析による検討 –

- 大串 哲朗 (アドバンスドナレッジ研究所), 長尾 至成 (エーオーアール), 川野 正人 (日本ファインセラミクス協会)

D112: CPUクーラーの伝熱特性に関する研究

- 西 剛伺, 小林 千智, 柴田 千皓 (足利大)

D113: ロックインサーモグラフィ式周期加熱法による高熱伝導性材料の厚さ方向熱拡散率分布計測

– アンダーサンプリングの導入による薄さ限界の検証 –

- 金子 祐大, 藤田 涼平, 長野 方星 (名古屋大)

D114: プリント配線基板の異方性熱伝導を考慮した面内方向有効熱伝導率計測方法の検討

- 長谷川 稜, 畠山 友行, 木伏 理沙子, 石塚 勝 (富山県立大)

D12 10:40-12:00 電子機器の冷却 2

- D121: 車載用 ECU ジャンクション温度低減のための接触熱抵抗の予測
ー構造と伝熱の連成解析ー
○ 石井 宏武, 松岡 宏行, 伏信 一慶 (東工大), 篠田 卓也 (デンソー)
- D122: Thermal Interface Material の内部構造を考慮した熱抵抗モデルの検討
Wang Mingjie, 川口 達也, ○ 齊藤 卓志 (東工大), 森川 志門, 前田 光司 (コマツ)
- D123: 熱縮流が接触熱抵抗に及ぼす影響の検討のための熱伝導解析
○ 川口 真輝, 畠山 友行, 木伏 理沙子, 石塚 勝 (富山県立大学)
- D124: 熱損失に着目した定常法接触熱抵抗計測の計測精度の評価
○ 垂久楽夢 ウスマン, 畠山 友行, 木伏 理沙子, 石塚 勝 (富山県立大)

D13 13:30-14:50 電子機器の冷却 3

- D131: 伝熱計測による次世代自動車用電子機器発熱量の予測
○ 沈 元廷, 中溝 裕己, 伏信 一慶, 安井 龍太 (東工大), 篠田 卓也 (デンソー)
- D132: 直接冷却される簡素化ステータコイルの除熱量評価
○ 植村 祐介, 金田 昌之, 須賀 一彦 (大阪公大)
- D133: 電気絶縁されたモータコイルの等価熱伝導率の計測
○ 村上 翔紀, 廣川 智己, 河南 治, 本田 逸郎 (兵庫県立大), 村田 智洋, 黒岩 貴裕 (西芝電機)
- D134: ECU の伝熱設計における機械学習と熱回路網法を併用した解析時間の短縮
○ 橋本 一成 (デンソー), 安井 龍太, 松田 唯, 伏信 一慶 (東工大), 篠田 卓也, 近江 慶太 (デンソー)

<E室>

E11 9:00-10:20 沸騰・凝縮 1

- E111: 光ファイバセンサを用いた限界熱流束近傍における発熱管群表面温度分布計測
○ 新井 崇洋, 大川 理一郎, 宇井 淳, 古谷 正裕, 飯山 継正, 植田 翔多 (電中研)
- E112: ナノスケール測温抵抗体を使用した高速ナノポア沸騰温度測定
○ Cheng Xinyi (東京大), Paul Soumyadeep (Univ. Stanford), Ito Yusuke, Daiguji Hirofumi, Hsu Weilun (東京大)
- E113: 定量位相顕微鏡を用いたマイクロバブル周辺の熱流束の評価
○ 福原 誠士, 安田 直記 (京都大), 藤井 恵介 (オークリッジ国立研究所), 名村 今日子, 鈴木 基史 (京都大)
- E114: 水蒸気および不凝縮性ガスの順次供給中における密閉容器内の凝縮現象の可視化に関する研究
○ 田中 誠一 (明石高専), 佐藤 大峻 (明石高専専攻科)

E12 10:40-12:00 沸騰・凝縮 2

- E121: EHD 効果によって促進されるサブクール流動沸騰熱伝達の CHF 予測
○ 本間 青空, 鹿野 一郎, 矢板 優紀 (山形大)
- E122: 強制対流サブクール沸騰中の気泡生成頻度に及ぼす発泡核間干渉の影響
○ 大川 富雄, 辻村 玲摩 (電通大)
- E123: 鉛直二重管内の強制対流沸騰における流速・熱出力振動の周波数が伝熱流動特性に及ぼす影響
○ 池田 寛, 植田 翔多, 新井 崇洋, 大川 理一郎, 白川 健悦, 古谷 正裕, 宇井 淳 (電中研)
- E124: 管群流路における丸セル型スペーサの幾何寸法が液滴挙動に及ぼす影響評価
○ 大川 理一郎, 古谷 正裕, 新井 崇洋, 飯山 継正 (電中研)

E13 13:30-14:50 沸騰・凝縮 3

- E131: 異形態相関沸騰による狭隙間隙流動沸騰における限界熱流束促進
オミサンヤ マイオリ, 陳 志豪, ○ 宇高 義郎 (天津大)
- E132: 矩形ミニチャネル内沸騰熱伝達を支配する伝熱の素過程
○ 吉田 雅輝, 山田 俊輔, 船見 祐揮, 中村 元 (防衛大学校)
- E133: エタノール液中の気泡合体過程における気泡間液膜厚さに関する研究
○ 諸隈 崇幸, 安部 秀哉, 露木 真啓, 原村 嘉彦 (神奈川大)
- E134: 低圧域における Novec7100 のプール沸騰限界熱流束特性
諭 佳彤, ○ 陳 志豪, 宇高 義郎 (天津大)

<F室>

F11 9:00-10:30 OS:乱流を伴う伝熱研究の進展 1

- F111: 【OS 基調講演】乱流熱伝達現象のモデリングと DNS
○ 服部 博文 (名工大)
- F112: 温度による粘性変化を考慮した乱流熱伝達の直接数値解
○ 桑田 祐丞, 須賀 一彦 (大阪公大)
- F113: DNS による中程度のプラントル数壁面衝突噴流の乱流熱伝達現象に関する研究
○ 服部 博文 (名工大), 水上 泰良 (名工大), 保浦 知也, 田川 正人 (名工大)
- F114: 壁乱流における乱流熱輸送のスカリシティによる解析
○ 原 峻平 (同志社大), 福留 功二 (金沢工大), 稲岡 恭二 (同志社大)

F12 10:40-12:20 OS:乱流を伴う伝熱研究の進展 2

- F121: 機械学習による粗面乱流熱伝達の予測
○ 寺田 久雅, 足立 悠喜, 桑田 祐丞, 須賀 一彦 (大阪公大)
- F122: 強化学習による正方形ダクト乱流の制御

ー平均二次流れの熱的制御と伝熱性能評価ー

○ 関本 敦, 三谷 崇志 (岡山大)

F123: 随伴解析に基づく空間発達境界層におけるタービュレータの形状最適化

井本 みこと, ○ 亀谷 幸憲 (明治大)

F124: 非局所型渦拡散表現から見る乱流運動量輸送とスカラー輸送の非相似性について

Fang Tingting, Liu Zhuchen, 半場 藤弘, ○ 長谷川 洋介 (東京大)

F125: 多孔質壁面間熱対流乱流の究極状態に関する実験的研究

○ 上村 和輝, 河口 亮哉, 本木 慎吾, 河原 源太 (大阪大)

F13 13:20-15:00 OS:乱流を伴う伝熱研究の進展 3

F131: 塩分成層流体における格子乱流の速度場と密度場の計測

○ 古原 百華, 間瀬 敬太郎, 沖野 真也, 花崎 秀史 (京都大)

F132: バックステップ流れを用いた隣接多点 MEMS 熱流束センサによる移流速度推定の評価

○ 鋤柄 文也, 中別府 修, 長洞 舜樹, 服部 敦大 (明治大)

F133: チャネル乱流中に設置した柔軟薄膜の変位速度と乱流運動のスペクトル解析

○ 名木野 伸矢 (同志社大院), 守 裕也 (電気通信大), 原 峻平 (同志社大)

F134: 変動する主流中に置かれた加熱円柱周り熱流動場の数値解析

○ 保浦 知也, 田頭 奈樹, 服部 博文, 田川 正人 (名工大)

F135: ソルトフィンガー型対流における周期的運動

○ 沖野 真也 (京都大)

<G 室>

G11 9:00-10:20 OS:バイオ伝熱 1

G111: 【OS 基調講演】単一生細胞内の温度変動の発見と意義と機構

○ 岡部 弘基 (東京大)

G112: 短波長赤外顕微分光による水素結合エネルギーと水分活性に関する研究

川合 晃生, Zhang Junkai, ○ 白樺 了 (東京大)

G113: 微小環状表面電極による生体組織の非熱的アブレーション

○ 藏田 耕作, 内藤 大敬 (九州大), 高松 洋 (熊本高専)

G12 10:40-11:40 OS:バイオ伝熱 2

G121: リボソーム薬剤の常温乾燥保存に関する研究

ー乳酸脱水素酵素(LDH)内包リボソームの乾燥に対する保護物質の影響ー

芹澤 軌志 (芝浦工大), ○ 松浦 弘明

G122: 時間変化を伴う境界条件の違いによる生体内熱浸透深さの解析的評価

○ 谷 知輝, Chen Weiti (東北大学), Xin Shihe (フランス国立応用科学院リヨン校), 小宮 敦樹 (東北大学)

G123: 非定常熱環境に適応可能な生体温熱モデルの開発

○ 古川 琢磨, 西館 来夢 (八戸高専), 島崎 康弘 (豊橋技科大), 岡島 淳之介 (東北大)

G13 13:30-14:50 多孔体内の伝熱

G131: インクジェットプリントにおける多孔体内へのインク浸透の X 線 CT 計測

○ 安部 惇哉, 兒玉 学, 佐藤 圭将 (東工大), 倉本 信一, 加藤 弘一, 門永 雅史 (東工大/リコー), 伏信 一慶, 平井 秀一郎 (東工大)

G132: 繊維系多孔質体の浸透係数測定における内部不均一および異方性の影響

○ 山口 義幸 (兵庫県立大), 池田 勘太郎 (兵庫県立大院)

G133: 様々な粒子充填多孔質体の有効熱伝導率の推定フローチャート

○ 太田 健介, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎 (静岡大), 上澤 伸一郎, 吉田 啓之 (原子力機構)

G134: 湿潤吸着材粒子充てん層内の有効熱伝導率に及ぼす水分量, 温度および圧力の影響

○ 濱本 芳徳, 栗原 和哉 (九州大), 梅沢 修一 (東京電力)

<H 室>

H11 9:20-10:20 融解・凝固 1

H111: 埋め込み境界ー格子ボルツマン法による融解・凝固を含むステップ問題計算とノイマン解との比較

○ 青柳 悠人, 鈴木 康祐, 吉野 正人 (信州大)

H112: 矩形ダクト中の氷スラリー流シミュレーションにおける狭窄部にトラップされた粒子挙動

○ 井原 啓詞, 塩見 凌大, 川上 嵩仁, 浅岡 龍徳, 鈴木 康祐, 吉野 正人 (信州大)

H113: 円管内氷スラリー流の熱流動解析: 氷粒子形状が流動と熱伝達特性に与える影響

○ 中村 優花, 吉野 正人, 鈴木 康祐 (信州大)

H12 10:40-12:00 融解・凝固 2

H121: 高分子収着剤を塗布した冷却面上の着霜挙動

○ 大江 和磨 (岡山大)

H122: 過冷却液の凝固に及ぼす磁気熱量効果による内部急冷却の影響

○ 小菅 紫立 (明治大院), 堀井 克則 (パナソニック), 川南 剛 (明治大)

H123: アニオン性 pH 領域における両性界面活性剤添加水の濃度変化に対する過冷却の影響の検討

○ 竹内 潤平, 松本 浩二, 小川 拓馬, 牧野 洋平 (中央

大)

- H124: 鋳型物性の空間分布とマイクロ鋳造組織との相関
 ○ 木津 雄吾 (石川高専専攻科), 義岡 秀晃 (石川高専),
 堂田 邦明, Kornel F. Ehmann (ノースウエスタン大)

H13 13:30-14:50 融解・凝固 3

- H131: 過飽和溶液からの糖アルコール結晶の析出特性
 ○ 松本 侑樹 (青学大院), 森本 崇志, 熊野 寛之 (青学大)
- H132: 噴流による融解潜熱蓄熱に関する研究
 —融解(潜熱蓄熱)挙動の可視化による観察—
 ○ 田村 元彌 (北見工大院), 森田 慎一, 高井 和紀 (北見工大), 早水 庸隆 (米子高専), 玉田 凌也 (カヤバ)
- H133: 水平円管内を流れる糖アルコールスラリーの層流熱伝達特性の比較
 ○ 田中 伶治, 内生蔵 颯人, 阿部 駿佑, 浅岡 龍徳 (信州大)
- H134: プロピレングリコールを溶媒とするエリスリトールスラリーの蓄熱特性
 ○ 中嶋 朱音, 阿部 駿佑, 浅岡 龍徳 (信州大)

<I室>

I11 9:00-10:20 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 1

- I111: 【OS 基調講演】Tackling the centuries-old Leidenfrost effect
 ○ Zuanhai Wang (Hong Kong Polytechnic University)
- I112: 高温油中の水滴蒸発に伴う容器移動現象
 ○ 田川 義之, Pradipto Pradipto, 細川 明日架 (東京農工大)
- I113: 白色干渉顕微鏡を用いたナノオーダーの表面粗さによる接触線ピニングの観察
 ○ 平間 裕大, 手嶋 秀彰, 李 秦宜, 高橋 厚史 (九州大)

I12 10:40-12:00 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 2

- I121: 加熱面に衝突する氷粒子を含む液滴の伝熱特性
 ○ 岡部 孝裕, 木村 柚葵, 櫻井 琢, 城田 農 (弘前大), 岡島 淳之介 (東北大)
- I122: 熱水リキッドマール
 ロイ プリタム クマル, 松原 壘, ○ ムテルドウ テイモテ (東京大)
- I123: 凝固を伴う溶融錫液滴の衝突界面温度
 ○ 城田 農, 前田 一明, 中川 裕亮, 山谷 拓夢, 岡部 孝裕, 宮川 泰明 (弘前大)
- I124: ライデンフロストリキッドマールの自己推進
 ○ ロイ プリタム クマル (東京大), 天神林 瑞樹 (NIMS), ムテルドウ テイモテ (東京大)

I13 13:30-14:50 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 3

- I131: 薄液膜内温度差マランゴニ対流における非定常速度場の 3 次

元計測

- 伊藤 興希 (東京農工大), ○ 工藤 正樹 (産技高専), 西野 耕一 (横浜国大)
- I132: 近接する有機溶媒液滴に誘起される水滴内部流動
 ○ 山田 寛, 水戸 大夢, 磯部 和真, 堀部 明彦 (岡山大)
- I133: 酸化環境下における液体金属液滴の表面張力異方性
 ○ 脇本 辰郎, 原口 直基, 加藤 健司 (大阪公大)
- I134: ナノチューブに閉じ込めた水の 3 次元混相構造
 ○ 古賀 祈, 斉藤 良太, 李 秦宜, 生田 竜也, 高橋 厚史 (九州大)

<3F レセプションホール>

15:10-17:10 優秀プレゼンテーション賞セッション

- BPA01: 分子動力学シミュレーションによる表面修飾 Al₂O₃/混合溶媒界面における親和性の評価
 ○ 佐藤 悠都, 斎藤 高雅, 久保 正樹, 庄司 衛太 (東北大院), 菊川 豪太, SURBLYS Donatas, 小宮 敦樹 (東北大)
- BPA02: MOF ガラスの形成過程が構造と熱物性に与える影響に関する反応性力場を用いた分子動力学解析
 ○ 田中 一成, 藤原 邦夫 (大阪大), 岡田 健司 (大阪公大), 芝原 正彦 (大阪大)
- BPA03: 膜厚変化による Bi₂Te₃ 系合金のフォノン平均自由行程解析 —3 ω 法と NI 法を組み合わせたフォノン平均自由行程解析—
 ○ 滝沢 哲也, 高尻 雅之 (東海大)
- BPA04: 3 次元熱電変換デバイスの作製と評価
 —疑似ヒートシンクを用いた熱電変換デバイス—
 ○ 中島 拓海, 高尻 雅之 (東海大), 田中 三郎 (日本大)
- BPA05: SWCNT に添加した界面活性剤による熱物性の制御と n 型空気安定性
 —陽性界面活性剤の添加量, 分散媒の変更—
 ○ 須永 健斗, 高尻 雅之 (東海大), 三宅 修吾 (神戸高専), 日向寺 祥子 (東海大)
- BPA06: セリア多孔体デバイスへの直接照射による炭酸ガス熱化学分解
 ○ 三浦 陽奈, 太田 祥斗, 渋谷 爽風, 佐藤 俊輝, 中倉 満帆, 松原 幸治 (新潟大)
- BPA07: サーモフレクタンス法と Gibbs Excess 法を用いた多結晶シリコンの界面熱抵抗の測定
 ○ 永廣 怜平, 前田 晃輔 (東京大), ISOTTA Eleonora, JIANG Shizhou, SNYDER G. Jeffrey, BALOGUN Oluwaseyi (Northwestern Univ.), 塩見 淳一郎 (東京大)
- BPA08: 高純度半導体型カーボンナノチューブ薄膜における励起子熱放射の計測
 —熱エネルギーの高効率利用に向けた新規波長選択エミッタ実現に向けて—
 ○ 高橋 諒旭, 寺西 開知, 宮内 雄平, 西原 大志 (京都大)
- BPA09: 流れ方向と壁面せん断応力を測定可能な熱式シートセンサ
 ○ 三宅 弦太, 村上 晃一 (東京理科大), 大村 尚登, 水見 俊介, 大谷 好子 (三菱重工業), 水嶋 祐基 (静岡

- 大), 市川 賀康, 元祐 昌廣 (東京理科大)
- BPA10: PNIPAM ゲルを用いた自律型スペクトルスイッチングコーティングの解析による最適設計
- 高橋 匠, 戸森 央貴, 江目 宏樹 (山形大)
- BPA11: PEFC における炭化セルロースナノファイバーを用いた自立型 MPL の開発
- 中村 颯希, 境田 悟志, 田中 光太郎 (茨城大)
- BPA12: Ag を添加した Bi₂Te₃ ナノプレートの構造及び性能評価—界面散乱と新たな相によるフォノン散乱—
- 金子 奎介, 高尻 雅之 (東海大), 三宅 修吾 (神戸高専)
- BPA13: マイクロ光造形およびレーザ表面改質を用いた光熱駆動バイモルフマイクロアクチュエータの開発
- 田中 靖子, 山下 優 (慶應大院), 田口 良広, 橋本 将明 (慶應大)
- BPA14: BaSO₄ スクリーン印刷塗布膜の放射スペクトル
- RANJATOSON Messie (九州大), 長野 利春 (九州工大), 渡邊 厚介, 宮崎 康次 (九州大)
- BPA15: ナノワイヤネットワーク回路の温度・電流分布とシート抵抗の特性
- 若松 勇希, 杉原 悠太, 玉井 莞爾 (京都大院), 巽 和也, 栗山 怜子 (京都大)
- BPA16: 高融点金属の 2 次元超格子マイクロキャビティ構造を利用した狭帯域熱放射エミッタ
- Liu Zhen, 清水 信, 湯上 浩雄 (東北大)
- BPA17: 引張試験と熱伝導率から測定を用いたカーボン膜のフォノン平均自由行程の導入の検討—分散出力の比較における SWCNT の熱物性と構造評価—
- 山本 久敏, 高尻 雅之 (東海大), 三宅 修吾 (神戸高専), 葛巻 徹, 影島 誠 (東海大)
- BPA18: 畳み込みニューラルネットワークを用いた航空機エンジン用シングルセクタ予混合二段燃焼器内で発生する燃焼振動の事前検知
- 飯塚 岳大, 馬場 健人, 後藤田 浩 (東京理科大), 庄 司 烈, 吉田 征二 (JAXA)
- BPA19: 周波数領域サーモリフレクタンスにおける機械学習を用いた深さ方向の熱伝導率分布推定
- 池田 尉昭, 安倉 祐樹, BANERJEE Amit, 土屋 智由, 廣谷 潤 (京大)
- BPA20: 加熱面の熱物性を考慮した極低温流体のブル沸騰における過熱度の補正
- 久保田 政晴, 岡島 淳之介 (東北大)
- BPA21: 気泡微細化沸騰における蒸気泡高周波数振動と熱伝達特性の相関関係
- 大竹 晶, 小林 穂高 (東京理科大), 林 美鈴 (東京理科大), 黒瀬 築 (横浜国大), 上野 一郎 (東京理科大)
- BPA22: 加熱壁面の鏡面加工による自然対流境界層の三次元構造の可視化計測の検討
- 小笠原 照悟 (八戸高専), 赤嶺 政仁 (東京大), 井関 裕也, 沢村 利洋, 古川 琢磨 (八戸高専)
- BPA23: 2 色マイクロ粒子による温度速度場同時計測の開発
- 山口 研成, 石井 慶子 (中央大)
- BPA24: 蛇行流路を有する低封入率型ヒートパイプにおける内部流動の可視化
- 大島 章太郎, 大久保 建斗, 麓 耕二 (青学大)
- BPA25: 汎用デジタルカメラを用いた物体表面温度分布計測法の開発
- 黄 志文, 鳥山 孝司, 眞砂 文佳 (山梨大)
- BPA26: 加熱面に置かれた析出を伴う多成分液滴の蒸発と接触線近傍熱流束の可視化
- 安藤 杏将, 田口 和真, 岡部 孝裕 (弘前大)
- BPA27: 蛍光顕微鏡と干渉計を用いた三相界面における蒸発熱輸送特性の研究
- 畑中 健太, 深町 むく (九州工大), SATO Yohei (PSI), 矢吹 智英 (九州工大)
- BPA28: 様々な空隙率を持つ格子流路を流れる空気の熱流動数値シミュレーション
- 矢木 佑樹, 益子 捺 (新潟大院), 中倉 満帆, 松原 幸治 (新潟大)
- BPA29: レドックス型化学蓄熱のための CuMn₂O₄ ベースハニカム構造モジュールの蓄・放熱特性
- 陳 曉宇, 窪田 光宏, 小林 敬幸, 山下 誠司, 北 英 紀 (名古屋大)
- BPA30: 水面上放電で生成する基底状態と励起状態の OH ラジカルの挙動
- 上田 龍也, 野村 信福, 本村 英樹 (愛媛大)
- BPA31: 不均質な SAM 修飾表面上の水滴の濡れ挙動に関する分子動力学解析
- ZHAO Ziyi, 楠戸 宏城, 菊川 豪太 (東北大)
- BPA32: 三種類の骨格異性体を発現する共有結合性有機骨格の創出—それらのミクロ構造の解明と熱力学的安定性の究明—
- 王 曉晗, 和田 雄貴, 嶋田 光将, 小阪 敦子 (東工大), 足立 精宏, 橋爪 大輔 (理研), 矢澤 宏次 (日本電子), 植草 秀裕, 庄子 良晃, 福島 孝典, 河野 正規, 村上 陽一 (東工大)
- BPA33: 分子動力学法による共電解 SOEC 内部のガス挙動解析—Ni-YSZ 表面での H₂O/CO₂ の吸着・拡散特性—
- 谷内 太陽, 郭 玉婷, 岸本 将史, 岩井 裕 (京大)
- BPA34: 金属を用いた高温熱供給システムのための電気化学的高効率還元の実験的研究
- 長尾 晃二郎, 植村 豪, 田部 豊 (北海道大)
- BPA35: 新燃料 (H₂/NH₃) 燃焼下における円管周りの基礎伝熱特性—伝熱特性に及ぼす周囲ガス温度の影響—
- 藤井 睦月, 高木 康成, 奥村 幸彦 (香川大), 神原 信志 (岐阜大)
- BPA36: 粘弾性流体のチャネル乱流における流体粒子の加速度確率密度分布
- 南 匠 (同志社大院), 原 峻平 (同志社大)
- BPA37: バイオガストライリフォーミング熱源用太陽熱集熱器の伝熱特性および燃料電池と組み合わせたシステムの性能に及ぼす気象特性の影響評価
- 佐藤 稜太郎, 西村 颯, 山田 窓太, 市川 瑞樹, 市位 亮磨 (三重大院)
- BPA38: カーボンナノチューブ電極によるプラズマ放電: イオン生成における湿度の影響
- 木村 維吹, 大石 裕介, 井上 修平 (近畿大)
- BPA39: 外部刺激に対するヒメボタルの発光同期の変化
- 山崎 晃太郎, 佐々木 眞隆, 二宮 尚, 飯郷 雅之 (宇

都宮大)

- BPA40: 深層学習による銅合金上のサブクール沸騰音の音響認識
 ○ 前田 直哉, 青木 佑太, 海野 徳幸, 植木 祥高 (東京理科大), 結城 和久 (山口東京理科大), 関 洋治 (量研), 佐竹 信一 (東京理科大)
- BPA41: 高温作動時の固体高分子型燃料電池内液水挙動の可視化評価
 ○ 大林 優斗, 中川 勝文, 村川 英樹, 杉本 勝美, 浅野 等 (神戸大), 白勢 裕登, SCHREIBER Christopher, WAKOLO Solomon, DZRAMADO Eric, 犬飼 潤治 (山梨大), 伊藤 大介, 齊藤 泰司 (京成大)
- BPA42: レーザー熱治療下における人体皮膚組織の加熱制御可能性の検討
 ○ 田中 天統, 井関 祐也, 古川 琢磨 (八戸高専)
- BPA43: 短波長赤外線分光による氷点下水溶液中の水分子の水素結合状態と回転緩和時間の測定
 ○ 川合 晃生, 白樺 了 (東京大)
- BPA44: ステップを有する平板熱交換流路に関する共役熱伝達解析
 ○ 渡邊 優真 (同志社大院), 稲岡 恭二, 原 峻平 (同志社大)
- BPA45: 新型自己吸引沸騰型冷却手法の開発
 —第二報: 加熱面向き条件での性能評価—
 楊 少博 (東京大), 李 成智, ○ 伊藤 優太 (福井大), 洪 思慧 (中山大), 党 超鋌 (福井大)
- BPA46: 自由界面に発生する密度差・表面張力差対流の赤外線計測とスペクトル解析
 ○ 齋藤 謙太, 稲垣 照美, 李 艶栄 (茨城大)
- BPA47: 一端が開放された水平円筒容器内に発生する乱流自然対流の赤外線計測とスペクトル解析
 ○ 坂本 翔, 手塚 大紀, 李 艶栄, 稲垣 照美 (茨城大)
- BPA48: 混合冷媒 R454B および R454C の液相音速測定
 ○ 山内 陽斗, 西山 貴史, 高 雷 (福岡大)
- BPA49: 壁面温度に基づく流動推定法の開発とその検証
 ○ 中島 博貴, 出島 一仁, 河崎 澄, 山根 浩二 (滋賀県立大)
- BPA50: (講演取消)
- BPA51: プラズマアクチュエータの平板強制対流熱伝達促進効果を評価する手法に関する研究
 ○ 西澤 明訓, 大森 直毅, 畑本 明彩未, 西田 浩之 (東京農工大)
- BPA52: 自然対流伝達促進への応用を目的とした音響ストリーミング流が熱伝達促進に与える影響の評価
 ○ 高木 松誠 (東北大), MIRALLES Sophie, BOTTON Valéry (LMFA INSA Lyon), 小宮 敦樹 (東北大)
- BPA53: ISS 沸騰・二相流実験装置加熱部における熱損失解析および単相熱伝達の結果
 ○ 深澤 岳大, 廣川 智己, 河南 治 (兵庫県立大), 井上 浩一 (北九州市大), 大田 治彦 (九州大), 浅野 等 (神戸大), 今井 良二 (室蘭工大), 松本 聡 (JAXA)
- BPA54: 鉛直平行平板間自然対流で見られる縞状パターンの構造抽出
 ○ 松川 裕樹, 神山 一貴 (東京理科大), 荒木 亮, 塚原 隆裕 (東京理科大)

第2日 5月30日 (木)

<A 室>

9:00-10:20 IWSEC 4

[Plenary lecture]

Real-time nanoscale observation of catalysts in energy conversion systems

- Prof. Jungwon Park (Seoul National University)

Effect of gas compositions on H₂O/CO₂ co-electrolysis using solid oxide electrolysis cell

- Masashi KISHIMOTO, Riki NAKAMURA, Yuting GUO, Hiroshi IWAI (Kyoto University)

Experimental Study of Ammonia/oxygen mixture co-combustion in a constant volume combustion chamber and prediction of heat release rate by using machine learning

- Lijia FANG, Masato SANNO, Takanobu OKADA, Emir YILMAZ, Mitsuhsa ICHIYANAGI, Takashi SUZUKI (Sophia University)

10:40-12:20 IWSEC 5

[Plenary lecture]

Data-driven design and optimization of thermal energy storage system for heating and cooling applications

- Prof. Peng ZHANG (Shanghai Jiao Tong University)

Study on the output characteristics of the thermal boosters with different composite cells based on micro-encapsulated calcium chloride

- Linbin ZENG, Hiroshi SUZUKI (Kobe University), Ruri HIDEMA (Nagoya University), Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.)

Phase change material based heat exchanger for breathing air cooling

- Yuan ZHU (Southern University of Science and Technology)

Performance evaluation on Gd-based heat exchanger for thermomagnetic motor

- Guilherme Hitoshi KANEKO, Tsuyoshi KAWANAMI (Meiji University)

A23 13:30-14:50 OS:水素・燃料電池・二次電池 1

A231: FCV の水素充填における伝熱工学的課題

- 判田 圭, 山口 茂博 (本田技術研究所)

A232: 大型 FC 車用の充填プロトコル開発に向けた熱流体解析モデルの構築

- 田中 芳樹, 岡田 太一, 迫田 直也 (九州大)

A233: 充填層の毛管力を利用した水素のパッシブ生成器の流量応答性

富岡 薫平, ○ 奥山 邦人 (横浜国大)

A234: 誘電体バリア放電プラズマを用いたメタンの水蒸気改質の効率的化

○ 山角 柊太, 高倉 理央, 西村 卓朗, 柿木 隼人 (同志社大), 篠木 俊雄 (三菱電機), 平田 勝哉 (同志社大)

<B 室>

B21 9:00-10:20 OS:熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 4

B211: 上流に障害物を配置した平行多孔板間に誘起される進行波状攪乱による非相似伝熱促進

○ 関 鳳渤 (東京大), 劉 明, 韓 旭, 長谷川 洋介 (東京大生研)

B212: 合金系潜熱蓄熱材料を用いたケミカルループ型逆水性ガスシフト反応の性能評価

○ 滝沢 昂嗣 (積水化学工業, 北海道大), 三村 憲吾, 清水 友斗, メルバート ジェーム, 能村 貴宏 (北海道大)

B213: マイクロ波加熱下の水酸化カルシウム複合物質の脱水反応の熱解析

○ ザメンゴ マッシミアーノ (東工大), 永長 久寛 (九州大), 和田 雄二 (ZeroC), 森川 淳子 (東工大)

B214: 磁性流体を用いたヒートスイッチの熱移動制御に関する研究

○ 薄田 恭兵 (明治大院), 堀井 克則 (パナソニック), 川南 剛 (明治大)

B22 10:40-12:00 OS:熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 5

B221: ケイ素含浸炭化ケイ素フォームを用いた酸化カルシウム/水系化学蓄熱向け複合材料の数値解析

○ 船山 成彦, 高須 大輝, 加藤 之貴 (東工大)

B222: マイクロ波誘起非平衡プラズマを用いたメタン生成プロセスの最適化

○ 須網 暁, 小林 信介, 板谷 義紀 (岐阜大)

B223: ウルトラファインパブルの影響を受ける多孔質構造の評価

○ 弘中 秀至, 朴 株彬, 井上 元, 深井 潤 (九州大)

B224: 濡れた蓄熱器を用いた音波ヒートパイプにおける熱流の周波数依存性に関する実験

○ 千賀 麻利子, 長谷川 真也 (東海大)

<C 室>

C21 9:00-10:20 OS:燃焼伝熱研究の最前線 4

C211: 不活性ガスおよび炭化水素燃料の添加による水素火災リスク低減効果の実験検証

○ 佐藤 大輔, 新美 凱叶 (長岡技科大), 手塚 英昭 (東京電力)

C212: 開放空間における希薄水素-酸素火災のデトネーション遷移の可能性に関する研究

○ 岩田 和也, 和田 祥, 黒瀬 良一 (京都大)

C213: 予混合 DME 冷炎の中間生成物の時間分解計測

○ 周 萌, 鈴木 雄二, 李 敏赫 (東京大)

C214: 基礎的な燃焼解析の化学種質量分率に対する主成分分析の適用

○ 井草 光遥, 廣瀬 海音, 中村 寿 (東北大)

C22 10:40-11:40 OS:燃焼伝熱研究の最前線 5

C221: 高熱流束下での木材の熱分解による熱・物質移動現象の高感度撮影

○ 衣笠 透馬, 鶴田 俊, 大徳 忠史 (秋田県立大)

C222: 媒反応器を用いた CH₄-N₂O 混合気の燃焼特性評価

○ 佐藤 快哉, 森山 夏輝, 勝身 俊之, 門脇 敏 (長岡技科大)

C223: 酸化雰囲気アルミニウムの着火温度に及ぼす影響の調査

○ 李 敏赫, 鈴木 雄二 (東京大)

C23 13:30-14:50 分子動力学 1

C231: ふたつの異なる液体間の界面張力の熱力学的・力学的描像

小川 滯, 大賀 春輝 (大阪大), 楠戸 宏城 (東北大), ○ 山口 康隆 (大阪大)

C232: ナノチャネルの境界における粘性加熱と輸送特性の関係

○ 平野 雅道, ゴロツキヒナ タチアナ (富山大)

C233: 気泡核生成に与える非凝縮性ガス影響の分子動力学解析

○ 藤山 敬太, 大森 健史 (大阪公大)

C234: 蒸気性および気体性キャピテーションの双方を考慮した分子動力学解析

○ 津田 伸一 (九州大)

<D 室>

D21 9:20-10:20 ナノ・マイクロ伝熱 1

D211: CNT の硫酸への分散と薄膜作製

○ 遠藤 剛史, 西田 征矢, 嶋田 優作, 大塚 慶吾, 丸山 茂夫, 千足 昇平 (東京大)

D212: アンモニアボラン熱分解ガスを原料とした h-BN/グラフェン積層構造の無触媒 CVD 合成

○ 宮田 和香, 西村 帆貴, 日下部 健太, 大塚 慶吾, 丸山 茂夫, 千足 昇平 (東京大)

D213: 量子化学計算を用いた共有結合性有機骨格の生成可能性の予測的判断法の考案

○ 北野 智己, 村上 陽一 (東工大)

D22 10:40-12:00 ナノ・マイクロ伝熱 2

D221: 機械学習ポテンシャルを用いた Bi₂Te₃-CsSnI₃ 界面の熱伝導計算

小林 風之介, 河野 翔也 (九州工大), 王 青, 飯久保 智, ○ 宮崎 康次 (九州大)

D222: 物理モデルに基づくナノ多結晶体におけるフォノン輸送解析

○ 堀 琢磨, 安田 直生, 苫米地 陸 (東京農工大), 三好 英輔 (大阪公大)

D223: NEB 法による非結晶スズ・マグネシウム酸化物内のマグネシウム拡散障壁の推算

鈴木 巧 (広島大), ○ 井上 修平 (近畿大), 松村 幸彦 (広島大)

D224: ゼオライトにおける熱伝導特性とゲスト分子の寄与

○ 鎮目 邦彦, 塩見 淳一郎 (東京大)

D23 13:30-14:50 ナノ・マイクロ伝熱 3

D231: フォノン熱輸送スペクトル測定に向けた高周波変調時間領域ケー-モリフレクトランス法の開発

○ 志賀 拓磨, 山下 雄一郎, 八木 貴志 (産総研)

D232: 時間依存密度汎関数法によるダブルパルスレーザーにおける物質応答変化の解析

○ 小野 泉帆 (東北大), 小宮 敦樹 (東北大流体研), 江目 宏樹 (山形大)

D233: 気液界面から蒸発する水分子の速度分布計測

○ 佐藤 康平, 白石 剛大, 杵淵 郁也 (東京大)

D234: ナノワイヤネットワークの電流経路と温度分布

杉原 悠太, 若松 勇希, 玉井 莞爾 (京都大院), 栗山 怜子, ○ 巽 和也 (京都大)

<E 室>

E21 9:00-10:20 沸騰・凝縮 4

E211: 電解析出法による銅多孔質体の液体窒素中における急冷特性

○ 梅原 裕太郎, 定石 鈴木, 森 昌司 (九州大)

E212: 周期的な微細ピラー構造が付与された固体表面のスプレー冷却特性

○ 有吉 隆晃, 松永 泰平, 河原 朋美, 喜多 由拓, 高田 保之 (九州大), 福田 啓之 (JFE スチール), 河野 正道 (九州大)

E213: 高温面への液滴列衝突時の非定常遷移沸騰伝熱特性

○ 光武 雄一, 野間 格, 増本 友也, 門出 政則 (佐賀大)

E214: VOF 法と相変化モデルを用いたライデンフロスト液滴リバウンドの数値シミュレーション

○ 宮田 一司 (福岡大)

E22 10:40-12:00 沸騰・凝縮 5

E221: 動的濡れモデルに基づく数値シミュレーションによる多孔質体内部の蒸発現象の解明

○ 張 展鵬, シェン ピャオ, 金子 暁子 (筑波大), 常 新雨, 永井 大樹 (東北大)

E222: ナノ細孔内部の沸騰現象に関する研究

PAUL Soumyadeep (Stanford Univ.), 程 馨毅, 伊藤 佑介, 徐 偉倫, ○ 大宮司 啓文 (東京大)

E223: 液侵入流路のある伝熱面上の沸騰伝熱

○ 原村 嘉彦, 諸隈 崇幸 (神奈川大)

E224: 修飾グラフェン粒子堆積多孔体加熱面における沸騰伝熱促進

鈴木 潤季, ○ 佐藤 正秀 (宇都宮大)

E23 13:30-14:50 沸騰・凝縮 6

E231: 金属積層造形による 3 次元多孔質ウィックを有する沸騰伝熱面の伝熱特性

○ 馬場 宗明, 齋藤 慎平, 渡邊 真莉, 染矢 聡, 高田 尚樹 (産総研)

E232: 核沸騰伝熱促進加工を適用した傾斜平板伝熱面における流下液膜蒸発熱伝達

○ 平井 啓裕, 杉本 勝美, 浅野 等 (神戸大)

E233: 表面微細構造と濡れ性が沸騰伝熱特性へ及ぼす影響

○ 趙 晟惟, 吉田 悠人, 金子 暁子, シェン ピャオ (筑波大)

E234: パルス通電加熱法を用いた着泡加熱線による高濡れ性液体の沸騰開始過熱度の低減

○ 呉 菲菲, 梅原 裕太郎, 江藤 淳朗, 高田 保之, 森 昌司 (九州大)

<F 室>

F21 9:00-10:20 企業特別セッション

「関西地区企業による部品開発・技術開発の紹介 1」

F22 10:40-12:00 企業特別セッション

「関西地区企業による部品開発・技術開発の紹介 2」

F23 13:20-14:50 公開セッション

「人と熱との関わり足跡 (その 7)」

F231: ボイラの水循環と気液二相流研究の展開

○ 小澤 守 (関西大学)

F232: ボイラ製造における職人技 —ボイラ屋の意気込みと心意—

○ 木下 正成 (ヒラカワ), 小澤 守 (関西大学)

F233: 陶芸における熱 -土変じて珠玉となる-

○ 村田 真人 (井筒屋亀水窯), 藤岡 恵子 (ファンクショナル・フルイット)

<G 室>

G21 9:00-10:20 OS:ふく射輸送とふく射性質 1

G211: 【OS 基調講演】宇宙機のふく射熱輸送制御

○ 太刀川 純孝 (宇宙研)

G212: 二酸化バナジウム VO₂ を用いたスマートウィンドウの開発—VO₂ 焼結体および薄膜の光学特性—

○ 篠原 維月, 杉浦 史生, 馬場 将亮 (長岡技科大), 畑山 祥吾 (産総研), 齊藤 雄太 (東北大), 内田 紀行 (産総研), 武田 雅敏 (長岡技科大)

G213: ゴルゲル法により成膜した二酸化バナジウム薄膜の屈折率スペクトル

○ 磯部 和真, 亀井 遥瑛, 山田 寛, 堀部 明彦 (岡山大), 中西 亮太, 岡野 航佑 (岡山県工業技術センター)

G22 10:40-11:40 OS:ふく射輸送とふく射性質 2

G221: Study the impact of applying TiO₂ spectrally selective coating on greenhouse cover on its microclimate and energy demand

- バネシ メーディ, 小宮 敦樹 (東北大), 円山 重直 (東北大学名誉教授)
- G222: ピッカリングエマルションによるプラズモンカップリングを利用した吸収スペクトルの広域化
 - 江目 宏樹, 小泉 佑輔 (山形大), 小野 泉帆 (東北大), 野々村 美宗 (山形大)
- G223: 高濃度コロイド溶液のふく射散乱特性の粒径分布依存性に関する数値解析
 - 藤井 宏之, 羅 炫禹, 西川 小彌太, 小林 一道, 渡部 正夫 (北大)

G23 13:30-14:50 OS:ふく射輸送とふく射性質 3

- G231: プラズモニックメタマテリアルを用いた広波長帯域での角度選択的熱放射
 - 清水 信, ベンリヤス リハブ, リュウ ゼン, 湯上 浩雄 (東北大)
- G232: ペロブスカイト型サーマルフォトニクス発電の可能性
 - 伊藤 駿佑, 小野 滉太, 杉本 涼 (新潟大), 宮崎 康次 (九州大), ○ 櫻井 篤 (新潟大)
- G233: 周期/非周期多孔体モデルの光学特性に関するモンテカルロ解析
 - 中倉 満帆 (新潟大), 甲斐 拓弥, 斎藤 聖人, KHAI YI Kuan (新潟大院), 松原 幸治 (新潟大)
- G234: 体積式ソーラーレーザーにおける多孔体集熱効率向上のための放射率空間分布最適化
 - 劉 明, 長谷川 洋介 (東京大)

<H 室>

H21 9:00-10:20 強制対流 1

- H211: 非一様分布で流入する矩形管内脈動流中に設置された平板上の熱伝達特性
 - 加藤 来紀, 齊藤 弘順 (崇城大)
- H212: 扁平熱交換器の熱流体性能の分布に対する入口および出口位置の影響度評価
 - 寺本 ゆう莉, 福江 高志 (金沢工大)
- H213: 熱流体抵抗網法に基づくバイパス付きフィンヒートシンクの熱流体性能の逆解析
 - 能登 優年, 福江 高志 (金沢工大)
- H214: 多断面 3 成分 PTV 計測によるティアドロップディンプル付きチャネル流脈動化の影響評価
 - 大西 輝, 村田 章, 井上 昂典, 猪熊 建登, 岩本 薫 (東京農工大)

H22 10:40-12:20 強制対流 2

- H221: RANSとLESを用いたチャネル内乱流熱伝達における脈動条件とディンプル面形状の多目的最適化
 - 村田 章, 山本 翼, 猪熊 建登, 岩本 薫 (東京農工大)
- H222: 成層流体中を自由落下する球まわりの流れの二方向可視化実験
 - 梅田 哲平, 植田 晃平, 沖野 真也, 花崎 秀史 (京大)
- H223: 高熱流束の発熱体まわりの脈動流を用いた伝熱促進に関する

実験

- 松浦 克樹, 福江 高志 (金沢工大), 白川 英観, 畠山 潤平 (富山高専)
- H224: 脈動流によるはく離領域の伝熱促進に関する脈動波形の影響
 - 福江 高志, 長島 歩夢 (金沢工大)
- H225: はく離領域に実装された発熱部品の冷却性能最適化に向けた脈動流制御手法の研究
 - 小林 大希, 福江 高志 (金沢工大), 脇谷 伸 (広島大)

H23 13:30-14:50 物質移動

- H231: 製麴過程で生成された米麴内の自由水の MRI 計測
 - 小川 邦康 (慶應大), 前迫 晃一 (石川酒造), 多田 孝清, 石川 文啓 (KRI)
- H232: 殺菌効果を付与した氷スラリーの配管輸送の効率改善に関する基礎研究
 - 千綿 允尊, 岡田 龍史, 伊藤 恒輝 (中央大), 松本 浩二 (中央大)
- H233: プロピレングリコール水溶液を用いた高分子吸着剤蓄熱システムの蓄放熱
 - 西本 泰己 (岡山大)
- H234: 電界による水溶液中の物質移動制御の可能性
 - 梅澤 悠斗, 鶴田 俊, 大徳 忠史 (秋田県立大)

< I 室 >

I21 9:00-10:20 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 4

- I211: 【OS 基調講演】壁乱流中の気液二相流パターンと壁面性状操作の効果
 - 村井 祐一 (北海道大), 北川 石英 (京都工繊大), Yoon Dongik (サムソン重工)
- I212: 【OS 基調講演】泡のアナロジーによる性能向上への挑戦: 沸騰と水電解
 - 森 昌司 (九州大)

I22 10:40-12:00 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 5

- I221: 周方向に濡れ性変化を有する円柱に衝突する液滴の分裂および輸送挙動
 - 石川 拓, 磯部 和真, 堀部 明彦, 山田 寛 (岡山大)
- I222: ペア型バイフィリックパターンを用いた発展的な防曇表面
 - 谷内田 大貴, MUQUET Noémie (東京大), LANEY Sophia, MICHALSKA Martyna, PAPAKONSTANTINOU Ioannis (UCL), MOUTERDE Timothée (東京大)
- I223: バイフィリック表面上の親水性パッチが凝縮液滴の自発的跳躍に与える影響
 - 岡本 直樹, 谷内田 大貴, 長満 和樹 (東京大), LANEY Sophia, MICHALSKA Martyna, PAPAKONSTANTINOU Ioannis (UCL), ムテルドゥ テイモテ (東京大)
- I224: 基板上高濃度ナノフルイド液滴の超拡張濡れの発現条件の検討
 - 庄司 衛太, 星野 瑛, 琵琶 哲志, 久保 正樹, 塚田 隆夫, 菅居 高明, 阿尻 雅文 (東北大)

I23 13:30-14:50 OS:液滴・濡れ現象の制御と理解 6

- I231: 固体表面の分子形態が液滴の動摩擦に及ぼす影響
 ○ Yuanzhe Li, Yaerim Lee, Jiaying Shen, Timothée Mouterde, Junichiro Shiomi (The University of Tokyo)
- I232: 超撥水性表面の防曇性に対する振動の影響
 ○ 長満 和樹, 岡本 直樹, ムテルドウ ティモテ (東京大)
- I233: 微細構造が振動する接触線の動的ヒステリシスに及ぼす影響
 ○ 沈 佳杏, 李 禮林, 李 遠哲 (東京大), ZALESKI Stéphane (Sorbonne University), AMBERG Gustav (Sodertorn University), 塩見 淳一郎 (東京大)
- I234: 融解液滴内の気泡形成とその滑水性への影響
 ○ 雷 尚文, 李 禮林, 李 遠哲, 塩見 淳一郎 (東京大)

第3日 5月31日 (金)

<A室>

A31 9:00-10:20 OS:水素・燃料電池・二次電池 2

- A311: ショットピーニングとスパッタリチウム金属負極全固体電池性能の面圧依存性に与える影響
 ○ 福住 ひと, 兒玉 学, 平井 秀一郎 (東工大)
- A312: フロー型亜鉛空気電池の亜鉛極オランダ X 線イメージング
 ○ 久保田 峻平, KANG Wooseok, 兒玉 学, 平井 秀一郎 (東工大)
- A313: リチウムイオン電池活物質内の Li 輸送の数値解析—多結晶構造および Li 輸送の異方性の影響—
 ○ 松川 廉, 郭 玉婷, 岸本 将史, 岩井 裕 (京大)
- A314: アノード側デッドエンドセルを想定したプロトン伝導型セラミック燃料電池における発電特性解析
 ○ 村上 剛瑠, 永田 陽平, 天川 昂明, 李 坤朋, 荒木 拓人 (横浜国大), 森 昌史, 小林 駿, 松田 マリツ隆磨 (電力中央研究所)

A32 10:40-12:20 OS:水素・燃料電池・二次電池 3

- A321: アイオノマー側鎖長・等価質量が PEFC 触媒インク分散に及ぼす影響
 ○ 笹部 崇 (東工大), 小椋 俊彦 (産総研), 保智 裕人, 岡 遥人, 酒井 勝則, 平井 秀一郎 (東工大)
- A322: 燃料電池触媒層内アイオノマー表面における表面拡散時の酸素分子の輸送法則の解析
 ○ 水木 啓介, 馬淵 拓哉 (東北大), 杵淵 郁也 (東京大), 徳増 崇 (東北大)
- A323: カソード触媒担体粒子内のナノスケール細孔における屈曲度の定量化—TEM 像から再構築された構造内の水凝縮に基づく経路探索—
 ○ Otic Clint John (東京大), 片山 翔太, 荒尾 正純, 松本 匡史, 今井 英人 (FC-Cubic), 杵淵 郁也 (東京大)
- A324: ドライエントン試験後の電解質膜劣化解析によるラジカルエンチャーの添加効果の評価
 ○ 秋山 毅, 野中 徳子, 望月 則宏, 徳岡 麻里子, 増田 昭博 (東レリサーチ)

- A325: 氷点下環境における固体高分子形燃料電池高分子電解質膜内部のプロトン輸送特性の分子論的解析
 ○ 西澤 裕紀, 馬淵 拓哉, 上根 直也, 徳増 崇 (東北大)

A33 13:30-14:50 OS:水素・燃料電池・二次電池 4

- A331: 絞り流路で生じる GDL 内潜り流れによる酸素輸送促進効果の 1D モデル
 ○ 稲垣 昌英, 鈴木 孝尚 (豊田中研)
- A332: 極薄 GDL 構成と流路ピッチが PEFC 性能に与える影響
 ○ 佐藤 圭将, 張 紹玲, 笹部 崇, 河村 雄行, 内藤 弘士, 酒井 勝則, 松本 英俊, 平井 秀一郎 (東工大)
- A333: 部分親水化 MPL を用いた PEFC 内の液水・酸素輸送促進
 ○ 田中 雄也, 植村 豪, 田部 豊 (北大)
- A334: PEFC 電極・流路構造の濡れ性分布が液水輸送と発電特性に及ぼす影響
 ○ 石田 陸斗, 金子 礼弥, 西田 耕介 (京工繊大)

A34 15:10-16:30 OS:水素・燃料電池・二次電池 5

- A341: PEFC 正味水分移動の運転温度依存性評価
 ○ 伊藤 博, 遠藤 晃久, 石山 智大, 大平 昭博 (産総研)
- A342: 無水高温型 PEFC の運転性能向上のための流路構造
 ○ 市川 亮輔, 榊原 諒, 大村 詩音, 植村 豪, 田部 豊 (北海道大)
- A343: PEM 水電解気泡分布に及ぼす PTL 構造の影響 -X 線可視化を用いた考察-
 ○ 平楽 一真, 内藤 弘士, 笹部 崇, 平井 秀一郎 (東工大)
- A344: PEM 水電解の気泡挙動の 3 次元数値シミュレーション
 ○ 内藤 弘士, 平井 秀一郎 (東工大)

<B室>

B31 9:00-10:20 OS:化学プロセスにおける熱工学 1

- B311: 【OS 基調講演】マイクロ波化学プロセスのグローバルスタンダード化
 ○ 塚原 保徳 (マイクロ波化学)
- B312: マイクロ波加熱に関する無次元数を含む相関式
 ○ 朝熊 裕介, 矢形 凌平 (兵庫県立大), HYDE Anita, PHAN Chi (Curtin University)
- B313: 薄型平板放射ヒーターの放射エネルギー効率
 ○ 大村 奏斗, 小川 純輝, 小林 敬幸 (名大)

B32 10:40-12:00 OS:化学プロセスにおける熱工学 2

- B321: 【OS 基調講演】エネルギー貯蔵媒体としてのクラスレートハイドレート
 ○ 菅原 武 (大阪大)
- B322: シリカ被覆による硫酸ランタン系化学蓄熱材の機械的特性の改善
 ○ 杉本 直鴻, 春木 将司 (金沢大)
- B323: 非化学量論的化合物を利用したソーラーCO₂ 熱化学分解の実験とプラント解析

- 小山 佳子, 関根 祐希, 佐々木 孝輔, 下中 泰一郎, 中倉 満帆, 松原 幸治 (新潟大)

B33 13:30-14:50 OS:化学プロセスにおける熱工学 3

- B331: カーボンリサイクルを目的とした温度履歴予測モデルによる溶融スラグからの f-CaO 分離回収
- 齊藤 颯汰, 中垣 隆雄 (早稲田大)
- B332: 燃焼場を利用した高活性・高耐久な担持金属触媒粒子の合成に関する研究
- 長澤 剛, 峯岸 直也, 李 佩周, 小酒 英範 (東工大)
- B333: 包装用フォーミングチューブの熱シール機の伝熱解析
- 埜上 洋 (東北大), 橋本 哲, 宮本 秀史 (イシダ)
- B334: 3D プリンターで形成されたプラスチック伝熱面上での沸騰熱伝達特性に関する基礎実験
- 小糸 康志, 岩佐 芽依, 濱野 匠 (熊本大)

<C室>

C31 9:00-10:20 分子動力学 2

- C311: 狭所空間における二成分 Lennard-Jones 流体の拡散現象に関する分子動力学的研究
- 塩見 淳一郎, 藤原 邦夫, 芝原 正彦 (大阪大)
- C312: オリゴマーの分子動力学振動スペクトルの認識における機械学習アルゴリズムの性能
- ゴロツキヒナ タチアナ, 山本 恭嘉 (富山大)
- C313: 気液界面に存在する溶質分子が水の蒸発流束に与える影響の分子動力学解析
- 福満 大輔, 今井 宏樹, 佐藤 康平, 杵淵 郁也 (東京大)
- C314: メンズカスからの定常蒸発を伴う非平衡分子動力学系に誘発される流体駆動力の解析
- 田窪 晴紀 (大阪大), 楠戸 宏城 (東北大), 山口 康隆 (大阪大)

C32 10:40-11:40 分子動力学 3

- C321: 水中金ナノ粒子のレーザー照射下における伝熱場の分子動力学解析
- 川井 喜与人, 江目 宏樹 (山形大)
- C322: Effect of SO₃H groups on water adsorption of MIL-101: a molecular simulation study
- JIANG Hao, AUTI Gunjan, HSU Wei-Lun, DAIGUJI Hirofumi (Univ. Tokyo)
- C323: 火炎式噴霧熱分解における金属前駆体含有液滴の蒸発に関する分子動力学シミュレーション
- 峯岸 直也, 長澤 剛, 小酒 英範 (東工大)

C33 13:30-14:30 分子動力学 4

- C331: 複雑な表面形状を有する固液界面の熱抵抗: 平衡分子動力学系による抽出とその評価
- Surblys Donatas (東北大), 大賀 春輝, 山口 康隆 (大阪大), 小原 拓 (東北大)
- C332: 表面修飾 Al₂O₃/ポリプロピレン間の界面熱抵抗に及ぼす表面修飾率の影響

- 斎藤 高雅, 久保 正樹 (東北大院工), 塚田 隆夫 (東北大 NiChe), 庄司 衛太 (東北大院工), 菊川 豪太, Surblys Donatas (東北大流体研)

C333: ナノ構造を有する固液界面の局所熱抵抗に関する分子動力学的研究

- 芝原 正彦, 大木 祐利, 藤原 邦夫 (大阪大)

<D室>

D31 9:20-10:20 ナノ・マイクロ伝熱 4

- D311: 複数種の増感分子の同時固溶実現によるフォトン・アップコンバージョン結晶の高性能化
-太陽光エネルギー利用効率向上に資する波長変換材料の新コンセプト-
- 榎本 陸, 村上 陽一 (東工大)
- D312: 単層 CNT による 1D ヘテロ構造の太陽電池応用
- 邱 錫揚, 張 伯文, 王 淑慧 (東京大), 鄭 永嘉 (浙江大), 千足 昇平 (東京大), 松尾 豊 (名古屋大), 大塚 慶吾 (東京大), 項 榮 (浙江大), 丸山 茂夫 (東京大)
- D313: 細孔膜からの蒸発流束に細孔スケールが与える影響の解明
- 今井 宏樹, 杵淵 郁也 (東京大)

D32 10:40-12:00 ナノ・マイクロ伝熱 5

- D321: 共有結合性有機骨格にマニトールを相変材として導入した固体蓄熱材料のミクロ構造およびナノ空間への閉じ込め効果の解明
- 村上 陽一, 王 曉吟, 三井 翔磨 (東工大)
- D322: ナノ流体における伝熱促進
-実験的アプローチによるメカニズム解明-
- 橋本 俊輔, 山内 崇史 (豊田中研)
- D323: 交流電場下の微小温度勾配を用いたナノ粒子の濃縮
- 杉田 直哉, ABDELGHANY Ahmed, 市川 賀康, 元 祐 昌廣 (東京理科大)
- D324: 3D プリンティングとフローフォーカシングを組み合わせた高熱伝導率セルロースフィルム
- 彭 佳欣, 大長 一帆, 李 禮林, 塩見 淳一郎 (東京大)

D33 13:30-15:30 ヒートパイプ

- D331: 液柱移動により形成される液膜の AMR 法を用いた二相流シミュレーション
- 兒玉 学 (東工大), 三浦 正義 (千葉工大)
- D332: 液柱往復振動に伴い生じる液膜の厚さ分布の測定
-高速ビデオカメラによる液柱先端の追従撮影-
- 三浦 正義, 菊池 隼人, 人見 悠斗 (千葉工大), 伊東 弘行 (神奈川大)
- D333: 角度のついた分岐流路を有する自励振動型ヒートパイプの熱輸送に関する数値シミュレーション
- 大西 元 (金沢大), 大野 稜太郎 (金沢大院)
- D334: 窒素ループヒートパイプ内部の低質量流束凝縮流可視化に基

づく流動様式線図の検証

五味 篤大 (東京大), ○ 小田切 公秀 (JAXA), 永井 大樹 (東北大), 小川 博之 (JAXA)

D335: ループヒートパイプによる射出成型機排熱回収と樹脂材料乾燥利用の研究

○ 鎌田 慎, 渡邊 紀志 (名古屋大), 松波 明 (豊田合成), 長野 方星 (名古屋大)

D336: マルチエバポレータ型ループヒートパイプの熱スイッチング動作特性評価

○ 池田 美夕季 (名古屋大), 小田切 公秀, 秋月 祐樹, 小川 博之 (JAXA), 長野 方星 (名古屋大)

<E室>

E31 9:00-10:20 沸騰・凝縮 7

E311: 数値計算で観察したプール沸騰における対流熱伝達特性

○ 庄野 竜生, 畑中 健太 (九州工大), SATO Yohei (PSI), 矢吹 智英 (九州工大)

E312: 数値シミュレーションによるプール核沸騰におけるマイクロ液膜形成過程の評価

○ 石橋 輝, 大田 光希 (東北大), Stephan Peter (TU-Darmstadt), 岡島 淳之介 (東北大)

E313: PLIC-VOF 法を用いた核沸騰の数値シミュレーション

○ 長崎 孝夫, 青木 尊之 (東工大), 杉原 健太 (原子力機構), 内田 遥己 (東工大)

E314: Numerical study of pool boiling heat transfer on micro-structured surfaces using the lattice Boltzmann method

○ 罗 超, 田川 俊夫 (都立大)

E32 10:40-11:40 沸騰・凝縮 8

E321: 核沸騰伝熱性能の回帰学習に基づく伝熱面の評価

○ 松本 尚也, 塚原 健, 金子 暁子, シエン ピャオ (筑波大)

E322: 核沸騰熱伝達データベース構築と予測手法の検討 (機械学習と整理式改良)

武永 頼紀, 楠見 智也, ○ 永井 二郎 (福井大)

E323: 機械学習を用いた地上重力下および微小重力下での沸騰気泡挙動の解析

○ 岩上 秀汰, 佐伯 甫夢来, 廣川 智己, 河南 治 (兵庫県立大), 大田 治彦 (九州大), 浅野 等 (神戸大), 井上 浩一 (北九州市大), 松本 聡 (JAXA)

<F室>

F31 9:00-10:20 電子機器の冷却 4

F311: 銅/二酸化バナジウム複合材料を用いた電子チップの熱マネジメント

○ 馬場 将亮, 大月 一摩 (長岡技大), 杵鞭 義明 (産総研), 武田 雅敏 (長岡技大)

F312: ロータス型コルゲートフィンによる空冷性能の促進

結城 和久, 下田 大樹, 結城 光平, ○ 久保田 凌平 (山口東理大), 村上 政明, 大串 哲朗, 沼田 富行, 井手 拓哉 (LTS)

F313: タワー型ペーパーチャンバーの熱輸送特性

○ 萩野 春俊, タンロン ファン, 小塩 剛史, 齋藤 祐士, 川原 洋司 (フジクラ)

F314: 金属粒子焼結ウィックを有するペーパーチャンバーの熱輸送性能評価

○ 小塩 剛史, ファン タンロン, 萩野 春俊, 齋藤 祐士, 川原 洋司 (フジクラ)

F32 10:40-12:20 電子機器の冷却 5

F321: 電場下におけるマイクロフィン構造上のサブクール流動沸騰熱伝達に関する実験的研究

○ 山崎 雄斗, 鹿野 一郎 (山形大)

F322: 水平加熱面上を流れる界面せん断力を受ける液膜流の限界熱流束

○ 中野 拓哉, 廣川 智己, 河南 治 (兵庫県立大)

F323: FC-72 浸漬冷却におけるロータス型ポラス銅を用いた沸騰伝熱促進

○ 結城 光平, 結城 和久 (山口東理大), 大串 哲朗, 村上 政明, 沼田 富行, 井手 拓哉 (ロータス・サーマル・ソリューション)

F324: 新型自己吸引沸騰型冷却手法の開発

—構造パラメータが伝熱性能に及ぼす影響—

楊 少博 (東京大), 李 成智, 伊藤 優太 (福井大), 洪 思慧 (中山大), ○ 党 超鋳 (福井大)

F325: 新型自己吸引沸騰型冷却手法の開発

—第三報: 低圧条件での伝熱性能評価—

楊 少博 (東京大), ○ 李 成智, 伊藤 優太 (福井大), 洪 思慧 (中山大), 党 超鋳 (福井大)

<G室>

G31 9:00-10:20 空調・熱機器 1

G311: 定在波型熱音響原動機の共鳴管内に生じる自然対流

○ 小林 健一, 風間 駿介 (明治大)

G312: 飽和蒸気液化のための磁気冷凍装置の適用可能性検討と特性予測

嶋 稜太, 勝又 康太郎, ○ 川南 剛 (明治大), 中洲 智郎, 櫻山 元希, 室 嘉浩 (大阪ガス)

G313: AMR 型磁気ヒートポンプの温度差生成挙動に及ぼす熱交換媒体の流速変動の影響

○ 松下 廉, 川南 剛, KANEKO Hitoshi (明治大)

G314: アルミ製プレート式熱交換器の水熱伝達特性

○ 有馬 博史, 井田 悠生, 熊谷 隼真 (佐賀大)

G32 10:40-12:00 空調・熱機器 2

G321: Frost growth dynamics on AgI striped patterns

- 唐 瑾晨, 岡部 貴雄, 西村 勝彦, 鹿園 直毅 (東京大)

G322: 強制対流下における霜の3次元構造パラメータ定量化

- 西村 勝彦, 眞田 浩平, SCIAZKO Anna, Tang Jinchun, 岡部 貴雄, 鹿園 直毅 (東京大)

G323: 二相流体ポンプシステムに適用する表面張力を用いた気液二相流からの液分離器の開発

- 岡崎 峻, 宮北 健, 佐藤 洸貴, 岡本 篤 (JAXA)

G324: マイクロチャンネル熱交換器の性能に及ぼす内部構造の影響

- 原 俊輔 (日本大院), 宮岡 大 (日本大), 田中 三郎, 佐々木 直栄 (日本大)

G33 13:30-14:30 熱物性

G331: レーザにより表面炭化された PDMS 薄膜の熱伝導率測定の検討

- 木部 湧斗, 田中 靖子 (慶應大院), 橋本 将明, 田口 良広 (慶應大)

G332: 金属細線の熱伝導率測定

- 水谷 尚暉, 大村 高弘 (和歌山高専)

G333: 各種食材の熱伝導率測定

- 森田 涼帆, 大村 高弘 (和歌山高専)

<H室>

H32 10:00-12:00 自然対流

H321: 加振された立方体容器内での対流を抑制する振動数範囲について

- 衣川 竜世, 児玉 理人 (同志社大院), 谷川 博哉 (舞鶴高専), 平田 勝哉 (同志社大院)

H322: 自然対流の共鳴振動制御に向けた低レイノルズ数衝突噴流構成の検討

- 小泉 匠摩 (東北大), 古川 琢磨 (八戸高専), TORRES Juan (オーストラリア国立大), ARMFIELD Steven (シドニー大), ○ 小宮 敦樹 (東北大)

H323: 粘性と浮力が自然対流境界層の線形不安定性に与える影響

- 吉川 穰 (宮城県産技セ), 古川 琢磨 (八戸高専)

H324: 熱物性を考慮した水平対流の三次元伝熱解析による時空間発展の評価

- 山田 翔英 (八戸工専), 安藤 杏将, 岡部 孝裕 (弘前大), 江目 宏樹 (山形大), 古川 琢磨 (八戸工専)

H325: 鉛直下降流中に置かれた上向き加熱平板まわりの強制-自然共存対流の流動と伝熱

- 木村 文義 (兵庫県立大), 渡邊 大歩 (兵庫県立大院)

H326: 火災風下に発生する竜巻状渦のモデル化

- 篠原 雅彦 (消防研)

H33 13:30-14:30 混相流

H331: 水-油プラグ流の流動および伝熱特性に及ぼす形成条件の影響

- 木村 恭大, 江崎 寿一 (青学大院), 森本 崇志, 熊野

寛之 (青学大)

H332: 水-油プラグ流の形成条件が液膜厚さに及ぼす影響

- 森本 崇志, 坂本 真大, 熊野 寛之 (青学大)

H333: 流動層式 PM 除去装置のディーゼルエンジンへの適用とその捕集挙動

- 山本 剛, 山本 真輝, 横尾 健人, 岸田 昌浩 (九州大)

<I室>

I31 9:20-10:20 計測技術 1

I311: 抵抗線 CT 法における温度測定精度の検証と流速の推定

- 吉田 史彦, 出島 一仁, 稲輪 有治, 河崎 澄, 山根 浩二 (滋賀県立大)

I312: 無機感温塗料を用いた水の強制対流沸騰熱伝達の高速可視化

- 齋藤 慎平 (産総研), 渡辺 紘大 (茨城大院), 馬場 宗明, 高田 尚樹 (産総研), 李 艶栄 (茨城大), 染矢 聡 (産総研)

I313: エンジン吸気管・内壁面における燃料液膜計測技術の開発

- 安田 龍平, 李 明霖, 中別府 修 (明治大), 窪山 達也 (千葉大), 高山 敏 (スズキ)

I32 10:40-12:00 計測技術 2

I321: 金属 3D プリンターにより模擬した粒子状燃料デブリと炉内構造物間の接触熱抵抗測定

- 植田 翔多, 新井 崇洋, 古谷 正裕, 大川 理一郎 (電中研)

I322: ロックインサーモグラフィを用いた熱電モジュールの熱電性能評価方法の開発

- 中村 直樹, ALASLI Abdulkareem (名古屋大), 安藤 冬希, 内田 健一 (国立研究開発法人 物質・材料研究機構), 長野 方星 (名古屋大)

I323: 光学式粘性センサによる高速・非接触ドライアイ診断手法の開発

- 眼球状態のリアルタイムモニタリングとレーザー照射制御—

- 竹内 陸, 大西 健斗, 田口 良広 (慶應大)

I324: グラフェンドープと振動流によるネマチック液晶の誘電特性の制御

- WANG Han, 三好 智也, 鈴木 雄二 (東京大)

I33 13:30-14:50 自然エネルギー

I331: 隣接して構築された構造の異なるポアホールの熱抽出・放熱特性 (2)

- 山口 正敏 (日本地下水開発)

I332: pn 接合構造を用いた SWCNT 膜によるデバイスの開発

- 玉井 涼太, 高尻 雅之 (東海大)

I333: SWCNT と α -セルロースを用いた気化熱冷却 SWCNT 熱電発電デバイスの性能評価

- 熱源不要な熱電発電技術—

○ 仲澤 祐人, 高尻 雅之 (東海大), 田中 三郎 (日本大)

I334: 超臨界メタノールを用いた触媒利用バイオディーゼル生産に及ぼす予熱器長さの影響

○ 古田 健, 松村 幸彦 (広島大)



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

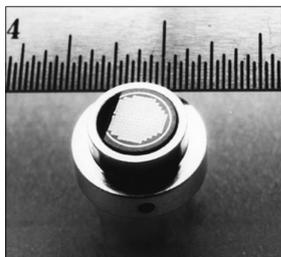
【注意】

- ・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



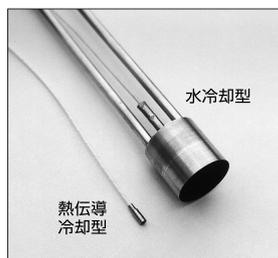
特徴

- 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

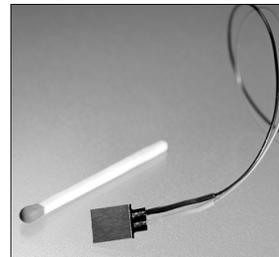


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタントで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

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)

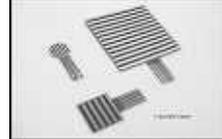
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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

本号では編集出版部会長の佐々木直栄先生に代わり、編集委員であり本号の特集を担当いたしました柏木誠が編集出版部会ノートの筆を執らせていただきました。

本号では「熱輸送の機能的制御」と題して、2017年から2023年にわたって展開されました“さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」領域”の特集を組ませていただきました。本特集は次号との連続特集になりますが、本号では特に“機能的制御”にフォーカスした4件の記事をご寄稿いただきました。これらの記事を御執筆いただいた先生方は伝熱とは異なる専門分野で活躍されている方々であり、いつもの「伝熱」の特集とは異なる雰囲気となったかと思えます。特集のPrefaceで花村先生も述べられていましたが、さきがけ「熱制御」領域では多様な分野から研究者が集まり、頻繁な交流、意見交換がなされたことで“新たなアプローチの導入や創造”が生まれ、そこから新規かつ独創的な研究成果が生まれました。本号の特集では、領域内でも伝熱とは異なる分野の先生方を選んで、ご寄稿をお願いいたしました。ご紹介できたのはさきがけ「熱制御」領域の研究成果のほんの一部に過ぎませんが、これらの記事が「伝熱」を読まれる皆様の研究への“新たなアプローチの導入や創造”の一つのきっかけになれば幸いです。

最後になりましたが、ご多用中にも関わらずご寄稿いただきました先生方に厚く御礼申し上げます。また、花村克悟先生（東京工業大学）にはさきがけにおけるご指導ご鞭撻だけでなく、Prefaceの執筆というご無理をご快諾していただきましたこと、厚く御礼申し上げます。

柏木 誠（早稲田大学）

Makoto KASHIWAGI (Waseda University)

e-mail: m.kashiwagi@aoni.waseda.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（早稲田大学）、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

