



# Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 61, No. 255 2022. 4

**Thermal Science and Engineering** 

ISSN 0918-9963 Vol. 30, No. 2 2022. 4



◆特集:温度・熱流・物性の測定手法の新展開

https://www.htsj.or.jp/journals/2121.html



金属板の表面形状を変化させ,強制対流場での熱交換特性を調べた際の測定例. PIV と LIF の同時計測 には従来2台のカメラが必要であったが,この方法であれば1台のカメラ,共通の画像から温度と速度 を算出できる.

(特集記事「蛍光・燐光による熱流動の定量可視化計測(染矢聡)」より)



【左図】産総研の保護熱板法による熱流センサの校正装置.設定した熱流密度の熱流が通過する状態で 熱流センサの出力電圧を測定し,その測定結果と不確かさを記した校正証明書を発行する.【右図】熱流 センサを壁面等へ貼り付けて使用する状況を模擬した評価装置を作製し,雰囲気やセンサの表面の条件 を変えたときの熱流センサの応答を調べるなどの取り組みを行っている.

<sup>(</sup>特集記事「熱流センサと熱流センサを用いた熱流計測の現状と課題(阿子島めぐみ)」より)



【左図】様々なカイラリティの単層 CNT が含まれる一般的な試料は,波長が異なる励起子吸収が重な りあった結果,黒色を呈する.単一カイラリティの単層 CNT からできた薄膜はカイラリティ毎に多彩 な色を示す.【右図】(10,3)単層 CNT 薄膜の複素屈折率スペクトル.反射,透過スペクトルを,ローレ ンツモデルやドルーデモデルなど KK 関係を満たす模型を組み合わせて再現することで複素屈折率スペ クトルを決定した.

(特集記事「カーボンナノチューブ薄膜の複素屈折率測定~波長選択放射・吸収膜応用に向けて~ (西原大志,宮内雄平)」より) No. 255

April

# 伝 熱

## 目 次

## 〈巻頭グラビア〉

染矢 聡 (産業技術総合研究所),阿子島 めぐみ (産業技術総合研究所), 西原 大志,宮内 雄平 (京都大学) ………表紙裏

# 〈追悼〉

柘植綾夫元学長を偲んで	山田	純(芝浦工業大学)	 1
柘植綾夫さんを偲んで・・・・・	上野	隆司(三菱重工業)	 4

## 〈特集:温度・熱流・物性の測定手法の新展開〉

# 〈ヒストリーQ〉

## 〈お知らせ〉

〈編集出版部会ノート〉		 5
<ul> <li>事務局からの連絡</li> </ul>		 2
第 59 回日本伝熱シンポジウム	プログラム (暫定版)	 5
第59回日本伝熱シンポジウム	タイムテーブル (仮)	 i3
第59回日本伝熱シンポジウムの	つご案内	 <b>i</b> 0

# Vol.61, No.255, April 2022

# CONTENTS

# < Opening-page Gravure: heat-page > Satoshi SOMEYA (AIST), Megumi AKOSHIMA (AIST),

(		$\mathcal{C}$			//	
Taishi NISHIHARA	, Yuhei N	<b>/IYAUCHI</b>	(Kyoto L	Univers	sity)	····· Opening Page

# <Eulogy>

In Memory of Former President Ayao TSUGE	
Jun YAMADA (Shibaura Institute of Technology)	· 1
To the Memory of Dr. Ayao TSUGE	
Takashi UENO (Mitsubishi Heavy Industries. Ltd.)	• 4
<Special Issue: Recent Topics of Measurement Methods for Temperature, Heat Flow, and Physical Properties $>$	
Preface to "Recent Topics of Measurement Methods for Temperature, Heat Flow, and Physical Properties"	
Tatsuya KOBARI (Hitachi, Ltd.)	• 7
Quantitative Visualization of a Heat and Fluid Flow Using a Fluorescence/Phosphorescence	
Satoshi SOMEYA (AIST)	· 8
X-ray Thermography and Its Applications	
Akio YONEYAMA (Hitachi, Ltd.)	16
Current Status and Issues of Heat Flux Sensors and Heat Flow Measurements Using Those Sensors	
Megumi AKOSHIMA (AIST)	23
Measurement in Heat and Mass Transfer with MEMS	
Osamu NAKABEPPU (Meiji University)	29
Complex Refractive Index Measurement of Carbon Nanotube Membranes	
- Toward Wavelength-Selective Radiation and Absorption Membrane Applications	
Taishi NISHIHARA, Yuhei MIYAUCHI (Kyoto University)	34
Development of Multifunctional Thermal Conductivity Measurement Equipment	
Kimihito HATORI, Seiichiro SANDOH, Takaaki AWANO (BETHEL Co., Ltd.)	40

# <History Q>

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 9)	
- Research of Low Temperature Science in the Katahira Campus of Tohoku University -	
Tsutomu NOJIMA (Tohoku University)	46
<calendar></calendar>	59
<announcements></announcements>	60
<note board="" editorial="" from="" jhtsj="" the=""></note>	85

柘植綾夫元学長を偲んで In Memory of Former President Ayao TSUGE

追悼

第46期会長を務められた柘植綾夫先生におか れましては、2021年4月8日に脳リンパ腫のた めご逝去されました.享年77歳であられました. ご葬儀は、近親者のみで執り行われました.柘植綾 夫先生に薫陶を賜った一人として、ここにご冥福を お祈り申し上げます.

柘植先生を初めて知ったのは、1999年サンディ エゴで開催された日米熱工学会議です.三菱重工の 偉い方がエネルギー問題について,格調高いスタイ ルで基調講演をされていた記憶があります.それ以 来ご一緒する機会はなかったので,柘植先生のこと も講演のこともすっかり忘れていました.2007年 度だったでしょうか,私が日本伝熱学会の理事(関 東支部,総務部会長)を務めていたときに、伝熱学 会の会長に就任されました.その時は、「今年は民 間企業の方が会長なんだ」くらいの認識でした.会 長になられてからは、強いリーダーシップを発揮し、 非常に精力的に組織改革に取り組まれていたのが 印象に残っています.伝熱学会が公益社団法人とな ったきっかけは、柘植先生の強い思いからでした.

このころはまだ, 柘植先生とお話をすることはあ っても, 少し遠い存在でした.ただ, 柘植先生が会 長を務められていたその年, 私の大学(芝浦工業大 学)で一大事があって, 柘植先生と深く関わること になります.当時学長を務めていた平田賢先生が体 調を崩されて, 学長を辞任されることになったので す.私は入職3年目だったので,「次は, どなたが 学長を務められるのかな」くらいにしか捉えていま せんでした.情報通の先生から,「山田先生, 元三 菱重工の偉い方が次の学長候補らしいよ.エネルギ ー関係の方なので知らない?」と耳打ちされました. 「えっ, それって伝熱学会の柘植会長?!」と驚い たのを覚えています.その時はまだ, 柘植先生のキ ャリアに関してほとんど知識がなく, 後に, 東京大 学では平田先生の研究室であったことをご本人か 山田 純(芝浦工業大学) Jun YAMADA (Shibaura Institute of Technology) e-mail: jyamada@sic.shibaura-it.ac.jp



ら伺い,納得しました.当時は,ただ,元気な方 (精力的に改革を進める方)が来られるんだ~程度 の認識で,学会でご一緒させて頂いているとはい え,他人事にように感じていました.

柘植先生が、2007年12月に着任されて、特に変 わったこともなく年は明けたのですが、新年度も近 い3月、平田賢先生の元で学長補佐を務められてい た先生に呼び出されて、「一緒に、学長補佐をして くれませんか」という依頼がきました.学会で少し ご一緒させていただいただけなのに、「何故、私に」 と思ったのですが、実は柘植先生が直接私を指名し たわけではなく、学長室のメンバーを固める中で、 先の先生が私を推薦したことがきっかけで、お声が けいただいたようです.お断りするわけにも行かず、 「あっ、あ、・・、分かりました」とお返事させて いただきました.それから柘植先生の大学運営を間 近で見る機会を得ることになります.

当時の私はというと、芝浦工業大学に教授として 着任して間もなかったこともあって、当たり前です が、私立大学運営なんて何をするのか全く分かりま せん.学長室の末席で、柘植先生が何をするのか静 かに観察していました.記憶があいまいですが、柘 植先生が最初にされたのは、各学部学科を回っての

ヒアリングです.大学内の各部局の状況を知ること と、その部局が抱える課題を直接知りたかったので はないかと思います. ヒアリングの感想として,「○ ○について面白い取り組みをされている先生がい ますね」や「大学って、本当にいろいろとすること があるんですね」などとおっしゃっていました.し ばらくして, 芭蕉の句「よく見ればナズナ (ぺんぺ ん草)花咲く垣根かな」をよく引き合いにだされて, 「いいものがたくさんあるのに、それをみなさんが 知らないんですね」と、今にして思えば、先生個人 の努力でいろいろな工夫をされているけれど,それ が組織として展開されていないことを気にされて いたのでしょう.大学として良い取組みあれば組織 として展開する,組織としてバックアップしないと いけない、ということを伝えたかったのだと思いま す.

大学の状況を一通り把握したあと行動にでられ ます.大学として目指すべき目標を定め,具体的な 取組みに落とし込んだ上で,2人の副学長と7名の 学長補佐が分担し,職員と協働して実施,推進する というものです.年度初めに行動計画をたてて進捗 管理をしたり,年度終わりにその成果をチェックし て次年度の目標に盛り込んだりと,当時,大学とし ては珍しい PDCA を回すというマネージメント手 法が導入されました.この PDCA を回すにあたり, 「常に進化する組織文化の醸成が大事だ」とよく話 されていました.手前味噌ですが,本学は教育改革 に積極的に取り組む大学として評価されています. これは,このころ,柘植学長が目指した組織文化が 引き継がれた結果だと思っています.



柘植先生の大好きなインド(タービン工場の竣工式)



インド出張,右から芝崎氏(三菱重工),本学イン ターンシップ中の学生,柘植先生,本学学生,丁氏 (本学国際部職員)

柘植先生の人材育成に関する思いについて触れ ておきたいと思います.少し古い話になりますが、 科学技術基本法が制定され、第1期基本計画(1996) ~2000年度)の中で、「ポストドクターなど1万人 計画」という政策があったのを覚えておられる方も 多いのではないでしょうか. ポスドクの数を1万人 に増やそうとした政策ですが, 柘植先生は, これを すごく憂いておられました.この政策は、バブル崩 壊後の不況下で,低下する企業の研究開発力や産業 の国際競争力に歯止めをかけるために,研究者を増 やすことを目的とし、大学や研究機関の正規職(常 勤,任期なし)に就くまで不安定な環境を支援する ものでした.一見素晴らしい政策に見えますが、そ の結果、ポスドクは増えたものの正規職のポストが 増えることは無かったせいで、多くの非正規の研究 者を増やすことになってしまいました. 柘植先生は, 博士号まで取得した優秀な人材が,不安定な待遇で 力を発揮できていない状況が我慢ならなかったの でしょう.博士課程には、アカデミアだけではなく 企業の研究者として働くことも視野に入れて進学 して欲しいと. また, 博士学生が企業から求められ るようにと、「**シグマ型統合能力人材**」と自ら定義 した人材の育成に力をいれていました.

柘植先生の言うシグマ型統合能力人材とは,自分 の専門に留まらず,幅広い工学知識を有し,それを 操作する能力(複眼的工学能力),知識資源を核と してビジネスをデザインし,マネジメントする能力 (技術経営能力),そして,国民意識を基盤とし,グ ローバルな視点で発想し,行動できる能力(メタナ ショナル能力)を兼ね備えた人を言います[1].柘 植先生の思い描く博士人材は,この三つに集約され ていますが,これらとは違った言い方で「博士人材 とは、真っ白なキャンバスに絵が描ける人」とも, よくおっしゃっていました.私はこの言葉が好きで, 今もそういう学生を育てたいと思っています.また, そのような博士人材が企業で活躍することを願っ ています. 少し長くなってしまったので、ここでお話しする のは控えますが、私個人としては、柘植先生からい ただいたもう一つの教えをきちんと実行しようと 心に決めています.昨年の春、学務が落ち着いたら、 ご挨拶に伺おうと思っていた矢先でした.本当に残 念です.

柘植先生,本当にありがとうございました.どう ぞ,安らかにお眠り下さい.

#### 参考文献

[1] 村上雅人ほか,シグマ型統合能力人材育成プロ グラム,工学教育, 59-5 (2011) 97 柘植綾夫さんを偲んで To the Memory of Dr. Ayao TSUGE

第46期会長の柘植綾夫さんが、2021年4月8 日に脳リンパ腫のため77歳で永眠されました.近 親の方だけでご葬儀が行われたとのことです.柘 植さんにお世話になった一人として、柘植さんの ご冥福を心よりお祈り申し上げます.

柘植さんは約 10 年前に東大病院に入院されて おられましたが,治療の甲斐があってすっかり回 復され,柘植さんがお好きなゴルフもご一緒して おりました.3 年ぐらい前には,柘植さんの御子 息が経営されている神戸三宮のイタリアレストラ ンで,ワインを楽しんだことがあり,それまでと 変わらずお元気でお過ごしと思っておりました.

コロナ禍の暗闇の中で木漏れ日が差し込み出し た昨年3月のある日のこと、一通のメールによっ て再び暗闇へと引きずり込まれたのを鮮明に覚え ています. 柘植さんが東大病院に再入院されたと の知らせが届いたのでした. コロナ禍の中,病院 へはお見舞いに行けず,ただ今お会いしなければ と悶々とする中,訃報が届いたのでした.

コロナは多くの人たちの最後の別れの場を奪い ました.未だに、私は御仏前で手を合わせること すらできていません.最後のお別れを言えなかっ た多くの人たちと共に、遠く離れたところから柘 植さんを偲んでおります.

柘植さんは産学官を生き抜いた人でした.企業 人である限り,産に力点があるものの,官と学に も積極的な姿勢を常に保ち,産学官のバランスを 保つことに努力され,産学官連携に貢献したお方 だったと考えます.

#### 1. 産の時代(1969年~2005年);三菱重工時代

柘植さんは,三菱重工時代には主に原子力プラ ントの熱流動の研究をされていました.原子力研 究推進室長,高砂研究所・所長,技術本部長・常 務取締役を歴任されました.企業人としては,熱 い思いを伝え,人を動かすマネージメント能力に 上野 隆司(三菱重工業(株)) Takashi UENO(Mitsubishi Heavy Industries.Ltd.) e-mail: takashi.ueno.45@mhi.com



秀でた方であったと感じます.

柘植さんは,企業の研究者であると同時に,学 会活動にも積極的に参画されました.

次頁の写真は第1回二相流のダイナミクスに関 する日米セミナーの記念写真で、柘植さんが左端 に写っています.1979年の写真で、柘植さんはま だ社員のころだと思いますが、日米の著名な先生 方がおられ、この頃から学会著名人との関係が構 築されていったのだと思います.

#### 2. 官の時代(2005年~2007年)

#### ;総合科学技術会議の常勤議員

2005 年1月6日,総合科学技術会議・議員に, 当時の総理大臣・小泉首相から任命されました. 就任当時,日本機械学会副会長として,JSME 談 話室「き・か・い」に「企業文化と国の行政文化 との共通性と相違性に,戸惑いと新鮮な驚きを感 じつつ,絶えず知的な刺激を楽しんでいます.」と 感想を述べられています.

その後,議員当時に出版された「イノベーター 日本」では,イノベーション創造能力強化の要は, 知の創造と社会・経済価値創造をシームレスに結 びつける機動的な研究資金投資の質と量の両面か らの一層の充実だと主張されています.



追悼

第1回二相流のダイナミクスに関する日米セミナー (1979年関西地区大学セミナーハウス) 一番左端に柘植さん

難しい表現をされていますが、私なりに解釈さ せていただくと、「時間をかけてとことん突き詰め る基礎研究」と「待ったなしで成果が求められる 実プラント安全運転の為の研究」への投資をバラ ンス良くすることが重要だと言われているような 気がします.

# 3. 学の時代(2007年~2008年) : 本伝熱学会会長の時代

柘植さんは 2007 年に本伝熱学会の会長に就任 されました.「学会の社会的使命と体制の検討委 員会」を立ち会上げられ,議論を重ねて主たる検 討課題を俯瞰して,伝熱学会会員の皆様に考えて いただきたい要点を纏められています.その要点 の一つに今後の改革の柱について検討されており, 伝熱学会の社会的価値の強化に向けた柱は,①イ



ベーションに資する活動,②社会及び子供たちへの技術的貢献による人材育成,③国際化,特にアジアでのリーダシップの確立といった3点を挙げ

られています.

また 2007 年, 芝浦工業大学の学長に就任されま した.産業界出身の学長ということもあり, 2009 年 2月 23日の朝日新聞に"産業人,組織に「喝」" という見出しで就任のメッセージが掲載されてい ます.

"企業でものづくりに携わったり,政府の総合科学 技術会議で科学技術行政に関わったりするうち, 日本の工学教育の現状に危機感を感じるようにな った.産業構造がキャッチアップ型からフロント ランナー型に変わり,産業界が白紙に絵を描ける ような人材を求めているのに,大学の方はそれに 対応できていない.(中略)企業では個人プレーと 組織プレーがうまく組み合わさって組織力を発揮 しているが,大学では個人プレーが多い.学術面 ではそれでいいが,運営や経営,教育ではもっと 組織プレーを活用すべきだ."

このメッセージは、柘植さんの産学官の豊富な 経験を通して得られた集大成のお言葉ではなかっ たかと考えます.研究開発の原点は、大学での教 育にある.学生が研究の楽しさ、苦しさを如何に うまく経験するか、学会の大切さを如何に良く認 識するかは、大学での教育が重要であり、その若 い頃の経験や認識が後の研究開発に重要な役割を 果たすのではないかと言われたかったのではある まいか,と考えます.

以上,三つの時代を生き抜いてこられた柘植さんを総括するのはおこがましい限りではあります が,柘植さんは隙間無く,常に張り詰めた人生を 全うされたのではないか.もう少し遊びのある, もう少し無駄のある時間も必要ではなかったかと 考える次第です.私は,何度か海外出張をご一緒 したことがあります.海外での会議が終了し,デ ィナーも終わり,やっとホテルにたどり着いた時, しかも夜遅く,決まって言われるのは,「私の部屋 で反省会をやろう」.夜遅くまで反省会,そして明 日の計画を熱心に語られる柘植さんには,「そろそ ろ休みませんか?」と言いたい気分でした.

今だから言えます.「柘植さん,もうゆっくりお 休みください!」きっと天国で,上野君はそう言 いたかったのだなあと考えて下さい.

改めて, 柘植さんの長年のご指導に対し深く感 謝申し上げますと共に, 心からご冥福をお祈りい たします. 特集「温度・熱流・物性の測定手法の新展開」にあたって Preface to "Recent Topics of Measurement Methods for Temperature, Heat Flow, and Physical Properties"

近年,データサイエンス,インフォマティクス, 機械学習,量子コンピュータ等の技術が急速に注目 を集め,シミュレーションや最適化,データ同化, ROM (Reduced Order Model), MBD (Model Based Design), HPC (High Performance Computing)等々が 学術だけでなく,産業に利用される状況が加速して います.アナログな実現象をデジタルデータとして 計算して扱うこれらの手法が急速な発展を見せる 中,実際に「使えるか」を判断するには,実現象をど れだけ再現できているかを評価する必要があります.

今日,測定技術は実現象をアナログ/デジタル変 換する役割を担っています.デジタルデータの計算 手法の利活用範囲が拡大する現在の潮流は,測定技 術の高度化の要求を従来より一層強固にしていま す.これまで対象とできなかった複雑現象の測定や, 測定精度の向上,さらに,容易性や信頼性の伴った 測定手法の開発,普及もより重要視されることが予 想されます.そこで本号では,温度,熱流,そして 物性の測定手法に焦点を当て,それぞれ2件ずつ寄 稿を募り,特集を組ませていただきました.

#### 温度の測定

産総研・染矢聡氏には、蛍光・燐光による熱流動 可視化について寄稿いただきました.私はこれまで、 蛍光・燐光による可視化手法は、温度に対する感度、 蛍光分子や測定系のセッティング、解析ソフトウェ アの面でハードルが高いイメージを持っておりま した.本稿ではそれらの観点を踏まえながら複数の 手法について具体的に解説いただいており、抱いて いたイメージは払拭されました.特に、広い範囲の 温度測定、PIV との同時計測、非定常可視化に対し て強力な手法であることを知りました.

日立製作所・米山明男氏には、高い透過能を有す る X 線によるサーモグラフィについて寄稿いただ きました.測定原理や、測定装置と測定分解能にお ける工夫について解説いただき、世界初の水の熱流 動場における三次元温度分布の測定事例を紹介い 小針 達也(日立製作所) Tatsuya KOBARI (Hitachi, Ltd.) e-mail: tatsuya.kobari.wr@hitachi.com

ただきました.更に,バイオメディカルやパワーデ バイスの分野への展望もお示しいただきました.

#### 熱流の測定

産総研・阿子島めぐみ氏には、熱流センサの評価 や最近の動向について寄稿いただきました.熱流セ ンサの校正装置とその不確かさ評価については、日 本の標準化を手動する産総研ならではの内容と思 いながら読ませていただきました.また、実は定量 化が難しい熱流センサの使用条件における挙動評 価例もお示しいただきました.

明治大学・中別府修氏には, MEMS 技術により作 られた微小な熱流東センサによる熱流測定につい て寄稿いただきました.本稿では,エンジンピスト ン頂面における高速現象の観察に MEMS 薄膜セン サを用いた事例を紹介いただきました.また,酵母 菌の代謝による微小な熱量を検出するバイオカロ リメトリや,メタン燃焼のクエンチにおける壁面熱 流束測定への応用事例を紹介いただきました.

#### 物性の測定

京都大学・西原大志氏,宮内雄平氏には,熱光起 電力発電における波長選択エミッタとして有力な CNT 薄膜を対象とした複素屈折率の測定手法につ いて寄稿いただきました.前回の伝熱シンポのふく 射のセッションにて「エリプソメータに依らない複 素屈折率評価」として反響が大きかったのを覚えて います.本稿では,他の物質系への適用可能性につ いてもコメントしていただいております.

ベテル・羽鳥仁人氏,山藤靖一朗氏,栗野孝昭氏 には,定常法による熱伝導率測定と,周期加熱放射 測温法による熱拡散測定について寄稿いただきま した.実測データを交え,測定結果からの接触熱抵 抗の切り分けや,異方性のある素材の熱拡散率の測 定事例について紹介いただきました.

最後になりますが,各稿の著者の皆様にはご多忙 中にも関わらず玉稿賜りましたことを,この場をお 借りして改めて心より感謝申し上げます.

## 蛍光・燐光による熱流動の定量可視化計測 Quantitative Visualization of a Heat and Fluid Flow Using a Fluorescence/ Phosphorescence

染矢 聡(国立研究開発法人 産業技術総合研究所) Satoshi SOMEYA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) e-mail: s.someya@aist.go.jp

#### 1. はじめに

流れの可視化とは熱流体の状態を示す光学的情報をカメラ等で取得・解析する技術である.近年のカメラは安価なものでも500枚/秒以上,高速度カメラではメガピクセルオーダーの解像度で1万枚/秒以上の速度で撮影可能である.数メガピクセルの空間解像度は数万点以上の多点同時計測を可能とし,点計測器の設置が困難な微小スケールや広域の計測にも対応できる.直感的・俯瞰的という古くから知られる魅力に加えて,高い時空間分解能は近年の流れの可視化計測のアドバンテージの一つとなっている.

本稿では熱の定量可視化手法について整理し, 特に蛍光・燐光を用いた熱流動計測の適用可能範 囲,適用事例についてまとめる.熱流体可視化技 術の利用を検討する一助となれば幸いである.

#### 2. 温度の可視化手法

表 1 に主な温度の可視化手法の特徴をまとめた. 2.1 レーザ誘起蛍光法(LIF)[1]

LIF は、蛍光強度やスペクトルが温度に依存し て変化する蛍光分子を液体に溶解あるいは気体に 混入させ、特定の波長の光で蛍光分子(またはイ オン)を励起して温度を測定する方法である.液 体用感温性蛍光分子としてはローダミンBやウラ ニンなどが良く知られており、オイルに可溶な感 温性蛍光分子はあまり多くない.気体用にはトル エンガスなどが使われる.分子トレーサは流れへ の追随性が良く壁近傍の測定も可能である.セン サ分子濃度が変化するため沸騰や凝固など相変化 を伴う場での定量的な温度計測への適用は難しい.

『ひとまずやってみる』という観点では, 蛍光分 子を溶かして明るさを撮影するだけでおおよその 温度情報を得られる使いやすい方法である.例え ばローダミンBなどはレーザーポインタ程度の弱 い励起強度でも明るく発光し, -1.0%/°C以上の温 度感度を示す.粒子画像流速測定法(PIV)との 同時計測も容易で,固体粒子と蛍光分子を液中に 分散させ,粒子による散乱光と蛍光をそれぞれ異 なる光学フィルタを付けたカメラで撮影すれば, 速度と温度の同時計測も可能である.

#### 2.2 分子タギング温度計測法(MTT)[2,3]

MTT法はLIF同様に分子トレーサを用いる方法 で,格子状あるいは線状のUVレーザ光で燐光を 励起し,流体中の特定部位のみを燐光でマーキン グする.格子や線の歪みから速度を,燐光寿命か ら温度を求める.速度計測を必要としない場合は, シート光で励起してLIF同様に利用できる.寿命 法による温度解析も可能で,温度感度が高く優れ た手法であるが,特殊な格子状励起や画像解析が 必要であり,市販の解析ソフト等がないため導入 のハードルが高い.

	流体	温度レンジ	トレーサ添加	光源	特徴
LIF	気/液(主と して水・ア ルコール)	~90℃(液)	分子	UV (気)/ UV ~緑(液)	比較的簡便で使いやすく,多くの先行研究実績 有.消光分子や不純物による消光に要注意.速度 計測との組合せ可能.
感温液晶	水・油	-30~120℃の うち約 10℃	粒子	白色光,単色 光	視野角依存性有.速度の同時計測への拡張容易.
感温粒子	気/液	-190~1240°C	粒子	UV~NIR	速度の同時計測への拡張容易.超臨界流体を含む 任意の流体に適用可能.
光干渉法	気/液	任意	不要	高コヒーレン トレーザ光	光路に沿った体積測定,高精度・高分解能測定可 能.温度変化に伴う密度/屈折率変化を測定.
MTT	気/液(水)	~50℃(液)	分子	308nm 他 UV	速度の同時計測への拡張可能.

#### 表1 温度の可視化手法

#### 2.3 感温液晶(LC)[4]

LCは古くからある手法で、過去には OHP やフィルムプロジェクター等のハロゲン光にスリット をつけるなどして利用されてきた.カプセル状の ものは直径 10~100 µm の範囲で入手可能である. LIF 同様簡便で使いやすく、粒子トレーサである ため速度情報も得られる.観察方向によって色が 変化するため高精度計測には高い技術を要するが、 定性的な計測には使いやすい手法である.ただし、 測定レンジが狭く 10°C ほどしかない.

#### 2.4 その他

感温粒子[5]は本稿 3 節で紹介する方法である. 市販粒子の他, 簡単に作成可能な粒子もあり, 任 意の作動流体に対応可能である. LIF の課題であ る消光を抑制できるなどのメリットがある.

マッハツェンダー干渉法[6]は代表的な光干渉 法であり分解能・精度が高いが,原理的に光路長 に沿ったボリューム計測を行うため,三次元性の 強い流れ場への適用は難しい.

他にもコヒーレント反ストークスラマン散乱 (CARS)[7]やレイリー散乱法[8]など気体の任意断 面における温度分布計測が可能な手法もあるが, これらは極短パルス光源や J/pulse オーダーの高 出力レーザなどハードウェア要件が厳しく,信号/ ノイズ比が小さいなど未だ開発途上である.

#### 2.5 温度の可視化手法の選択

沸騰や凝固を伴わない熱対流の可視化を行いたい読者は、まずはLIFを試すことをお勧めする. PIV等で多用される緑色のレーザシートで、目視では色味がわからないほど薄いローダミンB(約10<sup>-5</sup> mol/l)水溶液を照射し、カットオフ波長580 nm程度のハイパスフィルタ(シャープカットフィルタ)を付けたカメラで観察すると温度分布を可視化できる。特にPIVとの同時計測を行いたい場合は蛍光染料濃度が十分に薄いことが肝要である。図1はローダミンB水溶液(10<sup>-5</sup> mol/l)の発光スペクトル及びピーク波長(578 nm)における蛍光発光強度の温度依存性の例である.20℃から50℃の温度変化に対して-50%以上明るさが変化する。

ローダミンBは発がん性があるとされていた時 期があったが,最近のSDS[9]では『人に対して発 癌性があると分類できない化学品』とされている.

LIF を利用する際,消光に注意が必要である. 蛍光分子同士の衝突による濃度消光や酸素等消光 分子との衝突で発光量が減る他,光分解や流れ場 の構造物等による物理吸着,水溶液中の不純物に よる退色などを総じて消光という.例えばローダ ミンBは塩素や酸化塩素など強力な酸化剤によっ て不可逆な退色を示す.また,蛍光分子を溶解さ せた液体の排水処理も大きな課題である.

一方,感温粒子は,物理吸着や流体中の不純物 による退色などによる消光を受けず,相変化に伴 う濃度変化もない.排水からの除去も容易である. そこで,以下の章では感温粒子を用いた温度計測 に焦点をあてて紹介する.







図2 様々な感温性粒子

#### 3. 感温粒子による温度の可視化

#### 3.1 様々な感温粒子

図2は筆者が利用している4種類の感温粒子の 写真である.これらの粒子を適切に使い分ければ、 任意の作動流体の温度分布計測を実現できる.

<u>無機蛍光体粒子</u>:図2の右下は無機蛍光体粒子で市販品を購入して直接利用可能である.いくつかの粒子は酸素分圧に応答するが,多くの粒子は気体・液体の流体成分の影響を受けない.また,耐圧性が高く圧力の影響も受けない.ま1に記載の温度レンジ-190~1240°C は筆者の研究室で実際に確認した温度範囲であるが,蛍光体粒子は応答する温度範囲が広く,極低温や千数百度で利用できるとの報告[10]もある.化学的に安定で,有機溶媒等の流体にも利用できる.他の粒子と比べると密度が大きく,例えばYAG結晶は約4.5g/cm<sup>3</sup>、酸化イットリウムは約5g/cm<sup>3</sup>である.市販の蛍光体粒子の平均粒径は0.2µmから8µm ほどである.他のタイプの粒子では対応が困難な温度域や作動媒体での利用に適する粒子である.

中空多孔質シリカ粒子:図2右上は高い吸油性 を持つ化粧品用機能性パウダーとして市販されて いる中空多孔質シリカ(ゴッドボール®[11])に感 温性蛍光・燐光分子を吸着・焼結させた粒子であ る.写真からもわかるように殻の薄い中空粒子で ある.真密度は2.0g/cm<sup>3</sup>だが,かさ密度は0.21 g/cm<sup>3</sup>と軽く,平均粒子径が小さい(2~5µm)ため, 図2の4種類の中では最も空気中に浮遊させやす い.ルテニウム錯体,ユーロピウム錯体やプラチ ナポルフィリンなど感温性燐光物質を吸着させた 後,加熱炉で乾燥させるだけで作成でき,-190℃ から百数十℃まで利用できる.例えば,Eu(TTA) をゴッドボール®B-6Cに吸着させた粒子は,40℃ から120℃になると発光強度が-96%変化する.

中実ポリマー粒子: 左下は PIV 用のトレーサ粒子としても多用されるイオン交換樹脂や合成吸着剤などのポリマー粒子に、ルテニウム錯体、ユーロピウム錯体などの蛍光燐光分子を吸着させ、乾燥させたものである.上述の中空多孔質シリカ同様簡単に作成でき、高い感温性を示す.水中で使っても蛍光分子が溶けだすことはなく、あまり劣化することもない.母材となるポリマー粒子は様々なものが市販されており、密度1.01~1.03g/cm<sup>3</sup>,粒径 3µm~0.5mm 程度のものを入手できる.

顕微鏡観察用にサブミクロンサイズのポリスチ レン中実蛍光粒子が多く市販されている.これら は分散性が良く,粒径分布もシャープであるが, 筆者の知る限りは感温性の報告はない.

中空マイクロカプセル: 左上の写真は中空マイ クロカプセルで、ポリ乳酸などの生分解性樹脂や Poly (IBM), PtBS などのポリマーに感温性蛍光・ 燐光分子を溶かし、マイクロバブルをコアとした 液中乾燥法で作成したものである.図3に作成方 法の概要を示した. 1~2 種類の蛍光・燐光物質と 上述のポリマーをジクロロメタンに溶かし、分散 媒の中で超音波ホモジナイザや高速撹拌機で分散 させる. マグネティックスティーラーでゆっくり と撹拌しながら1~2日待てば完成である.ジクロ ロメタンは蒸気圧が高く,水に若干溶けるため, この手法の溶媒として適している.液中乾燥法の ためシャープな粒径分布を持ち,約1.00 g/cm3の 比重のものも作成できる.分散媒は純水や純水に 僅かな界面活性剤を添加したもの、PVA 水溶液な どである.分散媒の粘度や、殻となるポリマー溶 液の界面張力などで平均粒径を調整でき,筆者の 研究室では 0.5~8µm の範囲で作成している.



図3 感温性中空マイクロカプセルの作り方

**まとめ**: これら4種の感温粒子の使い分けについて、分かり易くまとめると以下のようになる. 1) 蛍光・燐光分子や錯体など有機系の感温物質の利用が困難な高温条件や反応性の高い作動流体では、無機蛍光体粒子を利用する.2) 気体の流れや、ポリマーが耐久できない約100℃超の温度帯の液体流れには中空多孔質シリカ粒子が使いやすい. 3) 水やアルコール、オイル等の液体流れには中空マイクロカプセルが適している.4) 観察範囲が広く大きな粒子が必要な場合や、より簡単に感温粒子を作成したい場合は中実のポリマー粒子を使う.

無機蛍光体粒子は UV 光源が必要だが,その他 は UV~緑の光源で励起できる.利用希望者には 提供しているので,関心がある方は試してほしい.

#### 3.2 温度計測方法

蛍光・燐光から温度を求める方法を図4にまとめた.ここに挙げる手法はLIF法,感温粒子法とも同じである.

**強度法**:強度法は最もシンプルで,流体の他, 固体表面の温度分布計測にもしばしば用いられる. 励起光をカットする光学フィルタ1枚をレンズに つけて画像を撮影するだけでよく, ハードウェア 構成がシンプルである.この方法では流体中の粒 子数密度が一様であり,励起光の強度分布が変化 しないと仮定する.既知の温度一様場で蛍光・燐 光画像を取得し、これを参照画像(基準)として、 温度が未知な条件における画像の相対的な輝度を, 事前に得た較正データに基づいて温度に変換する. 励起光の波長を除く広い波長範囲で蛍光・燐光発 光を捉えるため、明るく、温度変化に伴う発光強 度変化量も大きい.上述の仮定が成立しない場合 は仮定とのずれが誤差となるが、時間平均やアン サンブル平均が可能な準定常的な測定では励起強 度分布変動などの影響が小さくなるため、最も使 いやすい方法である.

二色強度比法 (二色法): 図4の二色強度比法は 二色 LIF 法とも呼ばれる方法で,2つの波長帯の 燐光を用い,各波長帯の燐光強度比から温度を求 める方法である.励起光をカットしつつ,それぞ れの波長帯の光のみを透過/反射するバンドパス フィルタを通して,2台のカメラで同時に画像を 取得する.ハードウェア構成は図4の3つの手法



図4 蛍光・燐光を用いた温度評価方法

の中で最も複雑になる.この方法はスペクトル形 状の変化から温度を求めるため参照画像を必要と しない.トレーサ粒子の数密度が時空間的に変化 しても,励起光強度分布が時空間的に変動しても, 二色強度比は原理的には影響を受けない.そのた め非定常計測,流体計測に適している.但し,2 画像の空間マッチングが必要など,ハードウェア のみならず,画像解析の点でも最も複雑である.

なお、図4に2とおりの二色強度比法を示した. ①は二種類の蛍光・燐光分子を中空マイクロカプ セルにドープした場合や、複数のエネルギーバン ドを持つ無機蛍光体粒子で見られる.2 つのピー ク波長帯を有し、これらの波長帯の発光強度の比 を利用する.②は発光スペクトルが1つのみピー ク波長をもつケースで、3.1 のいずれの粒子でも見 られ、温度による発光強度変化が小さい波長帯と、 変化が大きい波長帯の発光強度の比を利用する. いずれもスペクトル形状の相対的な変化を利用す ることから、二色法と呼ばれている.

**寿命法**: 燐光強度の減衰時定数を燐光発光寿命 といい,一般的に高温ほど短い.寿命法は燐光強 度の減衰プロセスを複数の画像として取得し,減 衰率から温度を得る手法である.励起光をカット する光学フィルタ1枚をレンズにつけて画像を高 速で撮影するだけであり,ハードウェア構成はシ ンプルである.二色法同様,トレーサ粒子の数密 度や励起光強度の時空間変動の影響を受けない計 測法とされており,非定常流体計測に適している.

#### 3.3 測定例

本節では様々な測定例を簡単に紹介する.

熱交換器周りの強制対流場の温度速度計測:前 節でいくつかの温度解析方法を示した. 蛍光・燐 光を用いた可視化に初めてトライする読者はまず 強度法から取り組むことをお勧めする. 強度法で は複数の温度既知の場で時間平均画像を取得し, ある基準温度における発光強度に対する相対発光 強度と温度との関係を求める. その後,評価対象 となる流れ場で,未知の温度分布を持つ瞬時の画 像または時間平均的な画像を取得し,先に求めた 関係を基に温度を算出する.

図5は金属板の表面形状を変化させ,強制対流 場での熱交換特性を調べた際の測定例である.高 さ1mm,幅1mmの突起を10mm間隔で設けてお り,流路幅は10mmである.金属板にはカートリ



図5 強度法を用いた温度速度計測例

ッジヒータ(300W)を埋め込んで70℃に保って おり,紙面下から上へ1L/minで入口温度26℃の 水を流している.感温性蛍光燐光物質として PtTFPP,樹脂にはポリ乳酸を用いて作成した感温 性中空マイクロカプセルをトレーサとし,励起光 はPIV用の緑色パルスレーザを用いた.この中空 マイクロカプセルを緑色で励起した場合の発光強 度の温度感度は-1.0%/℃であった.

右上はある瞬間における取得画像の例である. 小さな中空マイクロカプセルを利用しているため, 細かい粒状の濃淡画像になっている.この画像を 直接相互相関法でPIV解析して得た速度分布が左 下である.また,蛍光分子によるLIFと同様に強 度法で処理して求めた温度分布の例が右下である. 突起の後流で流れが剥離してよどみ域が形成され, 水の温度が最高約 55°C になっていることがわか る.図5右下は時間平均温度分布であるが,既知 の温度条件における時間平均画像を参照画像とし て,温度が未知の非定常な画像を解析すれば,非 定常温度分布を得ることも可能である.

PIV と LIF の同時計測には従来2台のカメラが 必要であったが、この方法であれば1台のカメラ、 共通の画像から温度と速度を算出できる. 図5の 温度解析は例えばフリーソフトの ImageJ を利用 するだけで実現でき、複雑な解析プログラムは不



図6 表面温度分布の非定常計測例[12]

要である. 二次元 PIV 解析ソフトは OpenCV や MATLAB でフリーのパッケージがある. 計測ツー ルは簡単に使えることも重要であり, 図5のよう なシンプルなアプローチを目的に応じて活用する ことが大切である.

<u>寿命法による非定常伝熱面温度分布計測例</u>:表 面温度分布の非定常計測例を図6に示した.本稿 では流体の測定に主眼を置いているが,可動部の 表面温度分布計測にも可視化が適しているため簡 単に紹介する.図6は可視化エンジンの石英ガラ ス製ピストントップの瞬時の温度分布を計測した 際の測定系と測定結果例を示している.ピストン を下部から励起及び観察した.エンジン点火後1 サイクル目から数千サイクル目まで,各サイクル の上死点位置におけるピストントップの温度分布 を寿命法で測定し,サイクルごとに火炎の衝突位 置が変化しつつ徐々にホットスポットが形成され る過程を評価した.この時のエンジン回転数は 750/1500 rpm で温度評価用の4枚の画像取得に要 した時間は100µs (40000fps x 4 枚)であった.

微細化した無機蛍光体粒子を塗布した後,有機 のバインダ成分を焼き飛ばして蛍光体粒子のみと し,バインダ兼火炎遮光膜の役割を果たすアルミ を蒸着してセンサ膜を形成した.蛍光体粒子の膜 厚は1~2µm ほどであり,アルミがなければ膜の向 こうが透けて見える程度の厚さである.アルミ表 面に煤がつくことはあるが,アルミに保護されて いるためセンサ膜はほとんどダメージを受けない.

150°C を超える高温計測では、この例のように バインダを飛ばしたり、セラミックバインダを使 う例が多い.例えば常圧における水の沸騰伝熱面 の温度分布計測では100~150°C に耐久するバイン ダ及びセンサ物質が適しているが、100~150°C 程 度の温度であれば高分子バインダも利用できる.



図7 寿命法による温度・速度同時計測

<u>気流の温度・速度分布計測(寿命法)[5]</u>: 燐光 寿命を用いた流体の温度・速度同時計測法の概念 図を図7上に示した.寿命法ではパルスレーザで 励起した感温粒子の燐光を高速度カメラまたはダ ブルシャッタカメラで撮影して2枚以上の連続画 像を取得し,PIVの検査領域同様の微小エリア内 の平均燐光強度の時間変化率から温度を求める. 連続画像のうち,適切な時間間隔の2枚以上の画 像を用いて PIV 解析により速度を求める.流れが 遅い場合は,減衰中の連続画像に限らず,次の励 起の後の粒子画像を用いて速度を解析する.

このアプローチは減衰中の燐光粒子像を捉える 必要があるため、燐光寿命や必要な露光時間に対 して粒子像の移動量が著しく大きい場合は適用が 難しい.また、約700°Cを超える高温場では一般 的に燐光粒子の発光強度や寿命が小さくなると同 時に赤熱の影響が大きくなるため、複数枚の連続 画像を撮影する寿命法はシグナル-ノイズ比が低 下し易くなる.一方、比較的遅い流れを対象にす る場合は、分光の必要がなく一台のカメラで撮影 した共通の画像から温度と速度を算出できる簡便 さというメリットがある.なお、周辺構造物から の蛍光を除いて感温粒子の発光のみを撮影するた め、寿命法、後述の二色法とも、励起から数マイ クロ秒遅れて撮影を開始する.

図7下は寿命法を用いて加熱平板に沿う上向き



図8 二色法による温度・速度同時計測

空気流れの温度・速度分布を測定した際の測定結 果例である.空気の流入速度 77.8cm/s, 平板温度  $60.0^{\circ}$ C (レイリー数= $3.8 \times 10^2$ ) で,加熱銅板の左 右に対称な流れを作り,一方を可視化,反対側で は熱電対で空気の温度を測定して比較した.この 測定では中空多孔質シリカ粒子 (平均直径  $2 \sim 5 \mu m$ )に Eu (TTA)を吸着・焼結させた粒子を シングルパルスレーザ (Nd:YAG, 355nm, 10Hz)で 励起し,1回の励起につき4枚の燐光減衰画像を 高速度カメラ (640×480pixel, 40000fps, 71.4  $\mu m$ /pixel)で撮影し,温度と速度を算出した.

熱電対と可視化計測の結果は最大でも 0.4℃ 以 内の差で一致した.一般的な PIV 法で計測した速 度や商用数値シミュレーションソフトによる計算 結果と比較したところ,境界層の内側,平板表面 から 1mm ほどの領域の測定は温度速度とも難し いものの,温度・速度の境界層の厚さや境界近傍 から境界層の外側での温度と速度は,それぞれ可 視化実験と CFD とで良く一致していた.

<u>気流の温度・速度分布計測(二色法)[5]</u>:二色 法による流体の温度・速度同時計測法の概念図を 図8上に示した.この方法では蛍光・燐光粒子の 発光スペクトルの形状が温度に依存して変化する 特徴を利用して,異なる波長帯での発光強度の比 から温度を算出する.図8では図4中の二色法① の例を示しているが②のタイプも同様に温度速度 同時計測が可能である.速度は通常の PIV と同様 にして求める.二色法はハードウェア構成が複雑 になるものの,寿命法による測定が難しい高速流 れの計測や,赤熱の強い温度条件や急激な温度変 化を伴う流れの極短い露光時間での計測にも有効 である.

図8下はスポット溶接支援用のトーチ(500W) から、高温の空気を冷たい銅ブロックに吹き降ろ した壁面衝突噴流を対象として、流れの温度速度 同時計測を行った例である.感温粒子は無機蛍光 体粒子のBAM:EuMnで1240°Cまでの温度応答性 を別途確認できている.この例では励起にUVダ ブルパルスレーザ(Nd:YAG, 355nm, 30Hz)を用い た.図中のTC1~TC5は可視化結果の検証用の薄 膜熱電対である.無機蛍光体が過剰に堆積するた め熱電対位置では可視化計測ができないが、熱電 対の上側の気流温度と熱電対の測定結果を比較し た.その結果,TC2の位置では数十度の誤差とな り精度の向上に工夫の余地が残ったが、差の小さ い部位では0.5°Cのみの差異であった.

なお、無機蛍光体粒子など UV レーザでの励起 が必要な感温粒子を用いる場合、海外の研究報告 では UV シングルパルスレーザと PIV 用のダブル パルスレーザ及び合計 3 台のカメラを用意して、 速度(PIV) と温度(二色法)を別のシステムで 同時計測している例が多い.

**その他の適用事例**:液体の流れへの適用例は比較的多く,単相の流れのみでなく,図9のように 潜熱蓄熱材料の相変化時の熱対流の温度速度計測 [13]などにも利用可能である.海外の研究報告で は,蛍光・燐光粒子が液滴の蒸発の影響を受けな



図9 エコカイロの相変化時の温度・速度

い点に着目して,噴霧液滴の温度計測[14,15]に適 用した試みもある.また,顕微鏡観察下において, 感温粒子の視線方向の3次元位置を特定しやすい 点に着目し,温度速度計測を試みる報告例[16,17] もいくつかある.

空調用のフロン代替物質や自然冷媒,炭化水素 冷媒,ワクチン保管等の冷凍冷蔵温度環境,ある いは LNG 等の冷熱を活用するためのシステム開 発など,0°C 以下の温度条件[18,19]で利用するこ とも可能である.その他,作動流体に蛍光・燐光 分子を溶かせないために LIF を適用できないケー ス,相変化など蛍光・燐光分子濃度を一定に保て ないケースにおいて,蛍光・燐光粒子を用いる手 法が有用である.

#### 4. おわりに

本稿では初めに LIF 法など代表的ないくつかの 温度分布可視化方法を紹介し、それぞれの特徴を 整理した.計測技術は『使う』ためのものである ため、目的にあった手法で、かつ、使いやすい方 法を選択することが大切である.LIF 法は他にも 多くの参考文献があるため、3 章では蛍光・燐光 感温粒子を用いる手法に絞って紹介した.

LIF も感温粒子法も市販ソフトウェアがあるが, パターンマッチングを行う PIV 速度計測と比べる と,明るさの情報を扱うこれらの手法はロバスト さに欠け,精度など信頼性の担保が難しくいため 普及しているとは言い難い.一方で,将来的にゼ ロエミッションを目指すためには,今まで以上に 熱の制御が重要であり,その開発を支援するため の温度計測技術も重要である.

社会的ニーズはあるので、計測技術開発の観点 では、如何に「使える」ものにするかが重要であ る.例えば、蛍光・燐光感温粒子では、超高温を 測定できる UV 励起の無機蛍光体も重要だが、既 に普及している PIV 用の緑色のレーザで励起でき る感温粒子(図5参照)が重要であり、筆者はこ れらの開発に取り組んできた.実績が十分とは言 えないが、複数種類の粒子が既にある.3.1節末尾 にも記載したが、これらの粒子は可能な範囲で提 供しているため、関心があれば試して頂きたい. LIF 法、感温粒子法に共通して強度法、寿命法、 二色法解析に利用可能な GUI 付ソフトウェアも 提供している.こちらも関心があれば試して頂き たい.

## 参考文献

- [1] 可視化情報学会編, PIVハンドブック(第2版), 森北出版(2018).
- [2] Hu, H. and Koochesfahani, M. M., A novel technique for quantitative temperature mapping in liquid by measuring the lifetime of laser induced phosphorescence, J. Vis., 6 (2003) 143–153.
- [3] Hu, H. and Koochesfahani, M. M., Molecular tagging velocimetry and thermometry and its application to the wake of a heated circular cylinder, Meas. Sci. Technol., 17 (2006) 1269–1281.
- [4] L.C.R. Hallcrest, Handbook of thermochromic liquid crystal technology, "https://www.lcrhallcrest.com/wp-content/uploads /2019/02/RD\_Handbook\_TLC\_Technology.pdf"
   (2019) (Accessed 2022.1.31)
- [5] Someya, S., Particle-based temperature measurement coupled with velocity measurement, Meas. Sci. Technol., 32 (2021) 042001.
- [6] 可視化情報学会編,可視化情報ライブラリー3 光学的可視化法,朝倉書店(2001).
- [7] Beyrau, F., Bräuer, A., Seeger, T. and Leipertz, A., Gas-phase temperature measurement in the vaporizing spray of a gasoline direct-injection injector by use of pure rotational coherent anti-Stokes Raman scattering, Opt. Lett., 29 (2004) 247–249.
- [8] Allison, P. M., McManus, T. A. and Sutton, J. A., Quantitative fuel vapor/air mixing imaging in droplet/gas regions of an evaporating spray flow using filtered Rayleigh scattering, Opt. Lett., 41 (2016) 1074–1077.
- [9] 安全データシート(Rhodamine B, A5102), 東京 化成工業株式会社(2018).
- [10] Allison, S. W. and Gillies, G. T., 1997 Remote thermometry with thermographic phosphors Instrumentation and applications, Rev. Sci. Instrum., 68 (1997) 2615–2650.

- [11]Web page of SuzukiYushi Industrial Co., Ltd. (https://www.suzukiyushi.co.jp/products/goddball/) (Accessed on 2022.1.31)
- [12] Someya, S., Okura, Y., Munakata, T. and Okamoto, K., Instantaneous imaging 2D temperature in an engine cylinder in a frame combustion condition, Int.J. Heat Mass Transfer, 62 (2013) 382–390.
- [13] Ouchi, Y., Someya, S., Munakata, T. and Ito, H., Visualization of the phase change behavior of sodium acetate trihydrate for latent heat storage, Appl. Therm. Eng., 91 (2015) 547–555.
- [14] Omrane, A., Santesson, S., Ald'en, M. and Nilsson, S., Laser techniques in acoustically levitated micro droplets, Lab Chip, 4 (2004) 287–291.
- [15] Särner, G., Richter, M. and Ald'en, M., Two-dimensional thermometry using temperature-induced line shifts of ZnO:Zn and ZnO:Ga fluorescence Opt. Lett. 33 (2008) 1327–1329.
- [16] Massing, J., Kaden, D., Kähler, C. J. and Cierpka, C., Luminescent two-color tracer particles for simultaneous velocity and temperature measurements in microfluidics, Meas. Sci. Technol., 27 (2016) 115301.
- [17] Massing, J., Kähler, C. J. and Cierpka, C., A volumetric temperature and velocity measurement technique for microfluidics based on luminescence lifetime imaging, Exp. Fluids, 59 (2018) 163.
- [18] Cates, M. R., Beshears, D. L., Allison, S. W. and Simmons, C. M., Phosphor thermometry at cryogenic temperatures, Rev. Sci. Instrum. 68 (1997) 2412–2417.
- [19] 安澤聡, et al., 低温における燐光分子の発光寿 命の温度依存性, 日本流体力学会年会 2021, 2021.9.21-23, オンライン.

X線サーモグラフィーの原理と応用

X-ray Thermography and Its Applications

 米山 明男((株) 日立製作所研究開発グループ 九州シンクロトロン光研究センター)
 Akio YONEYAMA (Hitachi Ltd., SAGA Light Source) e-mail: yoneyama@saga-ls.jp

#### 1. はじめに

サーマルマネージメント(熱の制御)は,省エネ ルギーや廃熱利用などによる持続可能な社会の実 現に必要不可欠なキー技術である.最適な制御には 材料やデバイス内部の熱(温度)の可視化が有効で あるが,現在広く普及しているサーモグラフィーや 熱ルミネッセンス線量計は赤外光や可視光をプロ ーブ光としているために物体表面の温度しか観察 することができない.このため,物体内部の温度や 熱の流れを非破壊で直接的に観察する方法はなく, 発熱対策が不可欠な高機能の半導体デバイスや電 池でも,有限要素法等を用いたシミュレーションに よる数値解析で主に熱対策設計が行われており,最 適化されているとは言い難い状況にある.

実測に基づいて各種の熱電材料や電子デバイス を構造レベルから最適化設計することが可能にな れば,高機能化だけでなく消費電力の低減も可能に なり,省エネルギー化に大きく貢献できると期待さ れる.そこで,我々はX線の高い透過能を利用して X線CTのように物体内部の温度を非破壊で三次元 的に計測できる「X線サーモグラフィー」の開発を 進めている.本稿では本X線サーモグラフィーの原 理,放射光を用いた原理実験[1],及びバイオメディ カルへの応用例について紹介する.

#### 2. X線サーモグラフィーの原理

#### 2.1 検出原理

室温域における固体及び液体の体積膨張率は非 常に小さく,温度によらす一定と見なすことができ る.基準体積を Vo,体積膨張係数をαとしたとき, 温度が dT [K]だけ変化としたときの体積 V は

 $V = V_0(1 + \alpha dT)$ 

となる.したがって,αが既知であれば体積の変化, すなわち密度の変化から温度の変化を検出するこ とができる.以上がX線サーモグラフィーの原理で

(1)

ある.

液体(水),金属(アルミニウム)及び半導体(シ リコン)を対象として,温度変化に伴う密度の変化 を計算した結果を図1に示す.この結果から,熱膨 張係数が最も大きな水でも,10Kの温度変化に伴 う密度変化は僅か3mg/cm<sup>3</sup>であることがわかる. このため,10K以下の温度分解能を得るためには, 従来のX線CTでは密度分解能が大幅に不足してお り,より高い密度分解能を有した計測法が不可欠と なる.そこで,本研究では近年着目されているX線 の位相情報を利用した高感度な「X線位相イメージ ング法」を採用した.



図1 水, アルミニウム, 及びシリコンの温度変化 に伴う密度変化.数 K の温度変化を検出するため には,密度変化の大きい水でも1 mg/cm<sup>3</sup>の密度分 解能が必要になる.

#### 2.2 位相イメージング法

X線は波長の短い電磁波であり,可視光と同様に 物体を透過した際に吸収による強度の減少と,位相 の変化(位相シフト)が同時に生じる(図2).従来 のレントゲンやX線CT(吸収イメージング)は, 強度の減少を画像のコントラストとして利用して いるのに対して,位相イメージングでは位相シフト を画像のコントラストとして利用している.

X線領域でも物質(被写体)とX線の相互作用は



図 2 サンプルを透過した際,吸収による 強度の変化と位相シフトが生じる.

複素屈折率

 $n = 1 - \delta + \mathrm{i}\beta$ 

(2)

で表すことができ,吸収イメージングは虚部 $\beta$ を, 位相イメージングは実部 $\delta$ を検出していることになる. X線の波長を $\lambda$ ,古典電子半径を $r_e$ ,単位体積 中に含まれるj種原子番号をZ,その数を $m_j$ ,原子 散乱因子の異常分散項(実部と虚部)をf'とf"とす ると,

$$\delta = \frac{\lambda^2 r_e}{2\pi} \sum_j m_j \left( Z_j + f'_j \right)$$
(3)  
$$\beta = \frac{\lambda^2 r_e}{2\pi} \sum_j m_j \left( -f''_j \right)$$

となるので,吸収と位相イメージングの感度比rは r = (Z + f')/f'' (4)

となる.

図3に各X線エネルギー(15,35,50keV)における元素番号に対するrを計算した結果を示す.原子番号が10以下の軽元素に対してrは3桁以上大きいことがわかる.すなわち,位相イメージングでは吸収イメージングに比べて1,000倍以上高い感度(高密度分解能)で密度差を検出可能なことが判る.



図3 各元素に対する感度比rの計算結果. 位相 イメージングは軽元素に対して感度1,000倍.

#### 3. X線サーモグラフィーの装置

#### 3.1 位相検出法

X線の位相シフトは現在の技術では直接的に検 出できないため、検出可能な強度に変換して検出す る必要がある.現在、位相シフトの変換・検出方法 として、

- 1. 単結晶のX線干渉計を用いて波の重ね合わせ により検出するX線干渉法[2]
- 2. サンプルによる X線の屈折角から検出する屈 折コントラスト法[3]
- 3. フレネル干渉縞から検出する伝搬法[4]
- X線回折格子によるタルボ効果を利用するタ ルボ干渉法[5]

が実現されている.上記各法のうち,X線干渉法は 位相シフトを直接強度に変換して検出しているた めに,位相の空間微分量を検出している 2.~4.の他 法に比べて1桁以上感度が高く,放射光を用いた計 測ではサブ mg/cm<sup>3</sup>以下の密度分解能を実現できて いる[6].そこで,本研究ではX線干渉法を採用した 位相イメージングシステムを基盤装置として利用 した.

#### 3.2 X線干渉計

X線干渉計の模式図を図4に示す.本干渉計は2 枚の薄い歯を搭載した2個の結晶ブロックで構成 されており,光学的な構成は可視光におけるマッ ハ・ツェンダー型と同一である[7].すなわち,本干 渉計に入射したX線は結晶ブロック1の1枚目の 歯(スプリッター,S)においてラウエケースのX 線回折によって2本の干渉ビームに分割され,結晶 ブロック1の2枚目の歯(ミラー1,M1)及び結晶 ブロック2の1枚目の歯(ミラー2,M2)で各々回 折され,結晶ブロック2の2枚目の歯(アナライザ ー,A)で結合されて干渉ビーム1及び2を形成す る.干渉計内のビームパス(物体波)にサンプルを 設置すると,サンプルによって生じた位相シフトが 波の重ね合わせにより,干渉ビームの強度変化とな







干渉計用位置決め機構

図 5 X線干渉計を採用した位相イメージングシステム.高エネルギー加速器研究機構 放射光施設 BL14C に常設されバイオメディカルや産業利用などで活躍中.

って現れる.したがって,強度変動から位相シフト を逆に定量的に検出することができる.

本干渉計を採用したイメージングシステムの概 要を図 5 に示す[8].本システムはX線干渉計とそ の位置決めステージ群,サンプルの位置決めを行う 試料ステージ群,参照波の位相を制御する位相シフ タとその位置決めステージ群,検出及び制御系から 主に構成される.入射X線(放射光)は干渉計の上 流に設置した非対称結晶により横方向に拡大され た後,干渉計に入射する.干渉計により形成された 2 本の干渉ビームのうち,像鮮明度(Visibility)が 良いビーム(O 波)を測定用のX線カメラ1で, 他方のビーム(H 波)をフィードバック用のX線カ メラ2 で検出している.

Visibility の良い干渉像を形成するためには, X 線干渉計を構成する各結晶ブロック間の相対的な 回転を prad (10<sup>-12</sup> rad) 以下の精度で安定化する必 要がある.このため、本システムでは干渉計用の位 置決めステージに剛性の高い固体滑り機構を使用 し,床からの振動を低減するためにアクティブ除振 機構を採用し、さらに 2 重のフードにより防音す ることで数 Hz 以上の機械的な振動を抑制してい る.また,数 Hz 以下の振動(ドリフト)は、X線 カメラ 2 で取得したX線干渉像に現れている干渉 縞が動かないように干渉計ステージの回転を制御 する補償機構(フィードバック機構)により抑制し ている. 現在,本システムは高エネルギー加速器研究機構 放射光施設(KEK PF)のビームライン(BL-14C) にて稼働中である.最大の観察視野は60×30 mm<sup>2</sup>, CT における密度分解能は0.3 mg/cm<sup>3</sup>(世界最高) に達しており[9],がんの無造影可視化と正常組織 との識別,アルツハイマー病βアミロイドの3次元 観察[10],薬剤投与における表在がんの *in vivo* 経時 観察[11]などバイオメディカルへの適用をはじめ, 南極古氷中に含まれるエア・ハイドレートの観察 [12],リチウムイオンバッテリー電解液のオペラン ド観察[13]などの地球環境や産業利用などにも幅 広く活用されている.

#### 3.3 サンプル加熱セル

液体等の経時的な 2 次元観察には図 6 に示した 液体用セルとヒーターを用いた. セルの大きさは幅 30 mm, 高さ 45 mm, 厚さ 10 mm (何れも内寸) で, X線の吸収を抑えるために厚さ 1 mm のアクリル板



図6 2次元経時観察用のセル

で構成している.本セルをイメージングシステムの 試料位置決め用 X-Z ステージに取り付け, リモー トでX線干渉計の物体波への挿入及び待避を行っ た.セラミックヒーター(サイズ 5×5×1 mm, 容 量 15 W)はセルの底面に貼り付けることで,単純 な熱伝播だけでなく,比熱の異なる物体(アクリル や油など)が混在した系や,水の対流を制限した系 など様々な条件における伝播の観察も行えるよう にした.

3次元観察には、図7に示した加熱サンプル系を 使用した.本系は金属製の液体セルとヒートシンク, ヒーターを内蔵し水を封入したポリエチレン製チ ューブ,及びチューブ回転機構から主に構成してい る.ヒーターのコードはチューブの回転を妨げるこ とがないように回転機構のベースに直接取り付け る構造にしており、CTの計測中でもヒーターによ りチューブ内の水を定常的に加熱・保温することが できる.チューブから金属セル内に伝播した熱は, 同セル下部の金属製ヒートシンクから逃がす構造 となっており,加熱開始後10分程度で温度平衡状 態になる.なお,ヒーターには上記2次元観察用と 同じセラミックヒーターを使用した.金属セル内部 の液体は密度差によって生じる位相差を避けるた めにチューブ内と同じ水にした.



図 7 3次元観察用の加熱サンプル系.温度を一 定に保つために、ヒーターをチューブ内部に設 置.

#### 3.4 計測条件

本計測におけるX線(放射光)のエネルギーは 17.8 keV に設定した.X線干渉像の検出(X線カメ ラ1)には、高速かつ高感度のファイバーカップリ ング型 CCD カメラを用いた.本検出器では、入射 X線を蛍光体(Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb(通称 GOS),厚さ 30 µm) により可視光に変換し、オプティカルファイバーで 可視光用冷却 CCD カメラ (水冷) に伝送し検出し ている.ファイバーのテーパー比は 1.4:1 (入射し た像を 0.7 倍に縮小), CCD カメラの画素数は 4008 × 2560, 画素サイズは 9  $\mu$ m (実効的なサイズは 12.5  $\mu$ m), 像の転送速度はフルフレーム時に 1.6 フ レーム/秒である.2 次元測定では転送速度を向上す るために Binning 4×4 (4×4 画素を 1 画素として取 り扱い高速読出しするモード)を利用し, 露光時間 を 200 ms とした.また, 定量的な位相シフト検出 のために走査数 3 の縞走査法を用いた[14].このた め, 1 枚の位相マップ (位相の空間分布像)の検出 に要する時間は約 1.3 秒である.なお,三次元計測 では密度及び空間分解能を優先して, Binning 2×2, 露光時間 1 秒とした (トータルの計測時間は 1 時間 15 分).

# 4. 原理検証及び生体への適用例

## 4.1 2次元時分割計測の結果

図6のセル内を水で満たし、ヒーター加熱に伴う 水の温度変化を経時的に観察した結果と、同条件を 用いて有限要素法によって算出した各像を図8に 示す[1].像のサイズは横21mm,縦24mm,時間分 解能(像の計測間隔)は1.3秒である.この結果から、加熱に伴いヒーター周辺の温度が徐々に上昇し、 次第に高温の領域が上部に帯(加熱帯)となって伝 わっていくことがわかる.また、5枚目(6.5秒)以 降の画像では、上面に到達した高温の帯が横方向に 広がっていることもわかる.計算画像と比較すると、 両者の熱の空間分布や熱の伝搬速度はよく一致し ており、本サーモグラフィーで正確に水の温度を検 出できていることが判る.



図8 ヒーター加熱による水の温度変化の経時 的な観察結果.計算とよく一致している.

図8と同様の方法により、水と油の2層混合液 体における熱の伝搬(温度変化)を計測した結果 を図9に示す.下部が水で上部が一般的な工業用 機械油である. なお、境界にはアクリルプレート などは一切設置せず,表面張力だけで両者が分離 されている.この結果から、はじめに水のヒータ 一近傍領域が図8と同様に加熱された後,加熱帯 が上部の境界まで上昇し、油との境界に達すると 横方向に分かれて広がること,加熱帯が衝突した 領域を起点として油が2次的に加熱されることな どがわかる. さらに、油でも加熱された領域が加 熱帯となって上部に伝わり、上端で横方向に広が ることなどもわかる.なお、水と油の境界で一部 の領域が不鮮明になっているのは、密度差が大き く正常に位相のアンラップを行えなかったことが 原因と考えられる.また、ヒーター下部ではアク リルまで加熱されていることがわかる.



図 9 水(下部)と油(上部)の2相液体のヒー ター加熱による温度変化.

#### 4.2 3次元非破壊計測の結果

図 7 のチューブ内のヒーターで常時加熱して熱 平衡を保った状態で、チューブに封入した水の温度 分布を位相 CT により非破壊で観察した. CT の投 影数 (プロジェクション数)は 500 (360 度, 0.72 度 ステップ)で、トータルの測定時間は 1 時間 15 分 である. 断面像の再構成計算には一般的な Sheep & Logan フィルターを採用したフィルタードバック プロジェクション法 (FBP 法)を用いた.

図 10 にチューブと内部に封入された水の三次元 温度分布像(温度ボリュームレンダリング像)を示 す[1]. チューブの直径は 8 mm, 高さ 15 mm であ る. また,内部を表示するために手前側半分をデジ タル的にカット(透過化)してある.黄色がより温 度の高い領域を,赤色が温度の低い領域を示してお り,位相差は 9 rad で温度に換算した場合 40 K であ る.この結果から,ヒーターに近い上部領域がより 高温になっており,ヒーターから離れるに従って温 度が次第に低下していることがわかる.なお,チュ ーブが白色(高温)に表示されているが,温度が高 いのではなく元々の密度が水に比べて低いためで ある.



図10 セルに封入された水の三次元温度分布像.

図 11 には図 10 の三次元像を二次元に展開した 像を示す.この結果から高さ方向(Z方向)には大 きな温度分布があるが(右図),動径方向(円筒の 半径方向)の分布は差が小さく,温度がほぼ均一に なっていることがわかる(左図).なお,左図断面 像について,温度変化の小さい領域における位相シ フト量のゆらぎ(標準偏差)を評価した結果 0.5 rad であった.本測定条件を用いて温度に換算すると 2.3 K になる.したがって,本測定における温度分 解能は約 2 K と考えられる.



図 11 図 10 の各断面方向の温度分布像

#### 4.3 生体サンプルへの適用結果

バイオメディカルへの応用として4.1と同様の方 法で、市販されている豚肉の切片をセル内に設置し、 ヒーターで加熱した際の熱伝搬を経時的に観察し た結果を図12に示す[15]. 画像のサイズは横12mm, 縦9mmで画像の間隔は17秒である(計測は1.3秒 で実施したが、熱の伝搬が遅いため間引いて表示). この結果から、ヒーター(画像外の下部に設置)の 加熱により、切片が徐々に加熱されて高音部が上部 に広がっていることが判る.なお、縦方向の黒い縞 (高温の縞)は脂肪(脂身)の領域であり、脂肪の 方が熱伝導率が高く、熱が良く伝わることが判る.



図 12 ヒーター加熱による豚肉切片の経時的な温 度変化.脂肪(黒い縦筋)から熱が伝わっている ことが判る.

#### 5. まとめ

物体内部の温度を非破壊で三次元的に観察する ことを目的として,高感度なX線位相イメージング 法を用いたX線サーモグラフィーを開発し,放射光 を用いた同システムにより原理的な検証実験を行 った.この結果,

- ヒーター加熱に伴う水の温度変化(空間分布)を
   1.3 秒の時間分解能で可視化することに成功した.
- チューブ内に封入しヒーターで加熱した水の温度分布を非破壊で三次元的に可視化することに 世界で初めて成功した.
- •3次元計測における温度分解能は2Kであった.
- バイオメディカルへの応用として、豚肉切片をヒーターで加熱し、熱の伝搬を経時的に観察することができた。

今後は、SiCパワーデバイスや電池などを対象と して、動作時の温度分布計測への適用を進めていく 予定である.また、パルスレーザーによる加熱と、 放射光や自由電子レーザーのパルス放射光を組み 合わせたポンプ&プローブ(P&P法)法を現在開発 中で[16], ns 以下の時間分解能で加熱に伴う物質中 の熱伝搬の可視化を目指している.更に,熱散漫散 乱(Thermal diffuse scattering)の強度から結晶性物 体の温度変化や分布を計測する手法の検討も進め ている[17].

#### 参考文献

- Yoneyama, A. et al., Three-dimensional X-ray thermography using phase-contrast imaging, Sci. Rep., 12674 (2018) 8.
- Momose, A., Demonstration of phase-contrast X-ray computed tomography using an X-ray interferometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section, 622-628 (1995) A 352
- [3] Davis, T. J., et al., Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials under hard X-rays, Nature, 595 (1995) 373
- [4] Snigirev, A., et al., On the possibilities high-energy synchrotron of x-ray phase contrast microimaging radiation, Review of Scientific Instruments 5486 (1995) 66
- [5] Momose, A., at el., Demonstration of X-Ray Talbot Interferometry, Japanese Journal of Applied Physics L866-L868 (2003) 42
- [6] Yoneyama, A., et al., Quantitative comparison of imaging performance of x-ray interferometric imaging and diffraction enhanced imaging, Medical Physics 4724-4734 (2008) 35
- [7] Becker, P. at al., The skew-symmetric two-crystal Xray interferometer, J. of Applied Crystallography 593-598 (1974) 7.
- [8] Yoneyama, A., et al., A phase-contrast X-ray imaging system—with a 60×30mm field of view based on a skew-symmetric two-crystal X-ray interferometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 217-222 (2004) 523.
- [9] Yoneyama, A., et al., Phase-contrast X-ray imaging system with sub-mg/cm<sup>3</sup> density resolution, J. of Physics: Conference Series 192007 (2013) 425
- [10] Noda-Saita, K., et al., Quantitative analysis of amyloid plaques in a mouse model of Alzheimer's disease by phase-contrast X-ray computed tomography, Neuroscience, 1205-1213 (2006) 138
- [11] Yoneyama, A., et al., Non-invasive and Time-

Resolved Observation of Tumors Implanted in Living Mice by Using Phase-Contrast X-ray Computed Tomography, Jap. J. Appl. Phys. 1864-1868 (2006) 45.

- [12] Takeya, S., et al., Observation of low-temperature object by phase-contrast x-ray imaging: Nondestructive imaging of air clathrate hydrates at 233K. Rev. Sci. Instrum. 053705 (2006) 77.
- [13] Takamatsu, D., et al., Quantitative Visualization of Salt Concentration Distributions in Lithium-Ion Battery Electrolytes during Battery Operation Using X-ray Phase Imaging, J. American Chemical Society 1608-1611 (2018) 140.
- [14] Bruning, J. H., et al., Digital Wavefront Measuring

Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses, Applied Optics, 2693-2703 (1974) 13

- [15] Yoneyama, A., et al., Visualization of thermal flow inside a biomedical sample using novel X-ray thermography, ECR 2020, C-08032 (2020)
- [16] Yoneyama, A., et al., Feasibility study of interferometric phase-contrast X-ray imaging using the hard-X-ray free-electron laser of the SPring-8 Angstrom Compact Free-Electron Laser, J. Sync. Rad. 1358-1361 (2020) 27.
- [17] 米山明男,他,熱散漫散乱(Thermal diffuse scattering)を用いた各種結晶性材料評価の検討, サンビーム年報・成果集,71-74 (2020) 10.

熱流センサと熱流センサを用いた熱流計測の現状と課題 Current Status and Issues of Heat Flux Sensors and Heat Flow Measurements Using Those Sensors

> 阿子島 めぐみ (産業技術総合研究所) Megumi AKOSHIMA (AIST) e-mail: m-akoshima@aist.go.jp

### 1. はじめに

熱移動や熱拡散現象を精確に捉えることは,熱物性値計測において常に課題であり,精密化に向けては不可欠である.また,各種機器や建造物の 省エネルギー化や熱設計においても,熱移動を把握することは,近年特に重要性が増している.

一般に,熱の流れは,多数の温度計を用いて複 数個所の温度を測定して温度分布を知ることで推 測することが多い.温度計は入手が容易かつ比較 的安価で広く普及しているセンサであることから 実用的であるが,温度分布と温度計測点間にある 物体の熱伝導率等の物性値・特性値等から熱移動 を推測する間接的な評価方法と言える.直接的な 熱の流れの測定には,熱流センサが利用される場 合もある.熱流センサは,熱流の向きと大きさを 計測することができるセンサであり,熱移動を捉 える際の有効なツールである[1-5].

本特集記事では,熱流センサおよび熱流センサ を用いた熱流計測の現状と課題について述べる.

#### 2. 熱流センサの概要

現在市販されている熱流センサは、平板型でその平板をその表から裏へ通過する熱流を計測する ことができるものが大部分である[6-8]. これらは、 1920 年代に Schmidt によって開発された熱流計測 デバイス[9]と同一の原理に基づくものであり、ゼ ーベック効果を利用したものである. さまざまな 大きさや材質のものが市販されている.

熱流がセンサを貫通するとセンサ平板の表面・ 裏面の間に僅かな温度差*ΔT*が生じる(図 1).

$$\Delta T = \frac{qd}{\lambda} \tag{1}$$

ここで, q は単位面積あたりを通過する熱流, すなわち熱流密度であり, d は平板型センサの厚さ, λ は平板型センサの熱伝導率である.式(1)はフーリエの法則から得られる.熱流センサの内部には 2

種類の材料の接合した熱電対を複数接続したサー モパイルがあり、 *ΔT* を検出することで熱流密度 を得ることができる.2 種類の材料を接合した熱 電対として, K 型や T 型などの所謂熱電対が用い られる場合に加えて、近年では Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>のような熱 電材料が用いられる場合[10]もある. 僅かな温度 差に対する1対の熱電対の熱起電力は小さいが, サーモパイルで総熱起電力を出力することによっ て感度の向上が図られている.1枚のセンサ内に 多数の熱電対を配するため,内部の構造は繊細で ある.わずかな熱流に対して表裏面間に大きな温 度差が生じる方が有利であることから,熱伝導率 が比較的低く、熱電対と導通しない絶縁性のある 材料が用いられることが多い. また, 熱流センサ は物体に貼り付けて使用し,使用後は物体から剥 がすことが想定されるため、その作業に耐え得る 強度も必要である.これらを考慮して材料や内部 構造を工夫した様々な機種が販売されている.し かし, 高感度性, 耐熱性, フレキシブル性, 耐圧 性などを全て備えることは難しい現状がある.







(a)埋設式, (b)表面貼付式

熱流センサで熱流を計測するためには,使用前 に熱流と出力電圧を関係づける感度係数が決定し ている必要がある.熱電対の熱起電力は完全には 温度に対して線形ではない.また,センサ平板は 複合材であるため式(1)のλは見かけ熱伝導率であ り,用いられている素材の熱伝導率も温度に依存 するため,センサ平板の熱抵抗 d/λには機種依存や 個体差,温度依存性がある.これらの理由から, センサ個体毎に感度係数の値付けが行われている. さらに,使用温度が変化する場合には,温度変化 の影響の補正も必要になることがある.

#### 3. 熱流センサの校正方法

熱流センサには、2 つの物体の間に挟んで物体 間の熱移動を測定する使い方と、物体(壁面等) に貼り付けて片面は空気中に暴露された状態で物 体への熱の出入りを測定する使い方がある(図 2).物体間に挟んで使用する場合は、センサと物 体との熱接触が良好である必要はあるが、固体伝 導による熱移動を捉えており, センサと物体との 熱接触が良好であれば再現性良く熱流の計測がで きる. 片面を物体に貼付して使用する場合には, 固体伝導・対流伝熱・ふく射伝熱の総和が計測さ れる. 実用的にはその使用方法が多く用いられる が,3成分の熱移動を捉えることから周囲環境の 影響を受けやすく、センサを貼付することで熱流 を計測する場の熱的条件を変化させてしまう可能 性もあり、計測される熱流が3成分の総和で区別 は困難であること等から熱流の計測結果の信頼性 に課題もある.

熱流センサの感度係数の決定(校正)には,熱 流センサを熱浴と冷浴で挟み込む定常法(図 1) で測定した結果から感度係数を決定する方法と, 使用される熱的条件を模した放熱面に貼り付けて 感度係数を決定する方法がある[1].前者は,所定 の熱流密度の熱流が熱流センサを通過する固体伝 導による熱移動の条件での校正であり再現性が良 く,値付けされる感度は固有感度とも呼ばれる. 後者は固体伝導に加えて対流やふく射も含めた熱 的条件での校正であり,値付けされる感度は実用 感度や見かけ感度とも呼ばれる.市販の熱流セン サの多くは,固有感度が値付けられている.



図3 保護熱板法 (a)2枚法, (b)1枚法

#### 3.1 保護熱板法

定常法は、測定対象(試験体)に一定強度の熱 エネルギーを継続的に与えながら充分時間が経過 して試験体温度の時間変化がなくなった定常的な 状態を観測することで熱伝導率を得る方法である が、具体例の一つが保護熱板法(Guarded Hot Plate method, GHP 法)[11, 12]である.

定常状態を観測するため、実際の測定では、熱浴には通電式のヒータを組み込んだ熱板、冷浴には水冷ヒートシンク、熱電対や白金抵抗体などの接触式温度計が用いられる.試験体の厚さdや温度差 *ΔT*の値が大きい方がそれぞれを精密に測定して信頼性の高い結果を得ることができるため、温度勾配が付きやすい低熱伝導材料の大型試験体の熱伝導率測定に適している.

理想的な断熱真空下では試験体には厚さ方向に のみ1次元的な温度勾配が生じるが,現実的には側 面からの熱損失で試験体の芯部と側面部では温度 勾配が異なる状態となり,図1に示す理想状態の実 現は難しい.そこで,側面からの熱損失を補償す ることで試験体の芯部を理想状態に近づけて信頼 性の高い測定を実現した方法がGHP法である. GHP法では熱板を中心の主熱板とその周囲の保護 熱板で構成し,保護熱板により側面部の熱損失を 補償することで,主熱板から冷却板へ極めて安定 かつ1次元に熱が拡散する状況を実現することがで きる.装置建てとしては,主熱板および保護熱板 からなる熱板から熱が両面へ拡散することを利用 した熱板に対して対称な構造の2枚法と,片側を保 温することで熱を選択的に片面へ拡散させる1枚法 がある(図3). GHP法は熱伝導率の絶対測定法で あり,各国標準研究所でも断熱材の熱伝導率測定 技術として採用されて国際比較[13,14]も実施され ている他,国内では建材試験センターによる断熱 材の熱伝導率測定[15]にも用いられている.

#### 3.2 保護熱板法による熱流センサの校正装置

図4および図5に,産業技術総合研究所(以下, 産総研)のGHP法を用いた熱流センサの校正を行 う熱流密度校正装置[16]のブロック図と外観写真 を示す.熱板から上下対称な2枚法の構造であるが, 校正対象物は1個であるので図4の熱板の上側を被 測定試験体スペースとする1枚法として使用してい る. 図4の熱板の下側の試験体設置スペースには熱 伝導率が既知の断熱材(NIST SRM 1450d)を設置 し、保温板を熱板と同じ温度に保温することで熱 板からの熱流が被測定試験体側へのみ選択的に流 れる状態を実現している. 保温側の断熱材をNIST SRMとした理由は、保温側へ一部の熱流が流れて しまう場合にもこの断熱材の熱伝導率と温度差か らその熱流の評価を可能にするためである.熱板 から保温側への熱流の有無をより簡易に検知する ため,熱板の主熱板直下の断熱材との接触面に小 型の熱流センサを設置し、その出力が0になるよう 熱板,保温板,冷却板の制御を行っている.

熱板はアルミニウム合金製で, 100 mm × 100 mmの主熱板と外形200 mm×200 mmで中央に102 mm × 102 mmの角穴が開いた保護熱板で構成され, 主熱板と保護熱板の間のギャップは約1 mm幅であ る. 主熱板と保護熱板は、それぞれ組み込んだ抵 抗ヒータを用いて独立に温度制御を可能とした. 冷却板や熱板の各所に熱電対を配置し、合計24カ 所の温度をモニタすることで、熱板の温度分布や 温度変化を評価し, 主熱板領域において冷却板へ ほぼ理想的な1次元定常熱伝導が実現されているこ とを確認することができる. 室温付近の温度条件 で熱流密度が0 W/m<sup>2</sup>を超えて100 W/m<sup>2</sup>以下の範囲 では、典型的な温度分布は、熱板内は標準偏差で 0.2 K以下, 主熱板内は0.1 K未満であり, 10分間あ たりの温度ドリフトは0.2 K以下に制御が可能であ る. 100 W/m<sup>2</sup>を超えて熱流密度が大きくなるにつ

れて熱板内の温度分布が有意となり不確かさは増加するが、180 W/m<sup>2</sup>まで校正が可能である.

校正対象物の熱流センサは、熱流検知部の一辺 が9 mm以上50 mm以下と主熱板よりも小さく、そ れを断熱材で覆って被測定試験体スペースの中心 に設置する.このとき、熱流センサが断熱材の中 にあることで1次元定常熱流が乱れることがないよ うに断熱材を十分厚くすることに加え、特にセン サの熱抵抗が周囲の断熱材に比べて顕著に小さい 場合には、センサの周辺にセンサと熱抵抗および 厚さが近い材料を設置して主熱板サイズの範囲で は熱抵抗の分布が無視できる状態を作る.



図4 産総研のGHP装置のブロック図



図5 産総研のGHP装置の外観

#### 3.3 熱流センサの校正の実際

産総研では、3.2の装置を用いて熱流センサの依 頼試験等を実施している.依頼試験では、熱流密 度が0W/m<sup>2</sup>を超えて100W/m<sup>2</sup>以下の範囲の2点以上 について、設定した熱流密度の熱流が通過する状 態で熱流センサの出力電圧を測定し、その測定結 果と不確かさを記した校正証明書を発行する.拡 張不確かさは2%(包含係数k=2)以上である.依 頼者は、その2点以上の校正結果を用い、熱流密度 を横軸に、出力電圧を縦軸にプロットした直線回 帰の傾きとして感度係数を得ることができる.

例として,熱流検知部が10 mm×9.1 mmの熱流 センサについて0 W/m<sup>2</sup>を超えて100 W/m<sup>2</sup>以下の範 囲で4点測定した例を図6に示す.冷却板の温度を 約23 ℃に保持しながら主熱板の発生熱流を設定値 に設定し,熱板内の温度分布が0.2 K以下になるよ う保護熱板のヒータ出力を調整し,定常状態(熱 板および冷却板の温度の時間変化が10分間あたり 0.2 K以下とした)と判断した時間領域での計測値 を,図6の時間アドレス250付近,550付近,800付 近,1000付近で60分間以上平均して得た結果のプ ロットの直線回帰の傾きとして感度係数が得られ る(図7).

# 3.4 熱流センサ校正のトレーサビリティと不確か さ評価

産総研の熱流密度評価装置において、熱流は通 電ヒータ(電流Iと電圧Vを印加)によるジュール 熱Q<sub>1</sub>である.測定中の熱損失Q<sub>loss</sub>を考慮すると、 主熱板領域(面積A)における熱流密度qは、

 $q = Q/A = (Q_{\rm I} - Q_{\rm loss})/A = (IV - Q_{\rm loss})/A$  (2) であるから,仕事量(長さ・質量・時間の組立量) と面積(長さ)の組立量である.Japan Calibration Service System認定事業者で校正したノギスとデジ タルマルチメータ (DMM)を用いて主熱板の寸法 とヒータに負荷する電流・電圧および校正対象の 熱流センサの出力電圧を計測することで,国際単 位系にトレーサブルな絶対測定を実現している.

熱流センサの校正では、測定された熱流密度qおよび熱流センサ出力電圧 $V_{out}$ は、それぞれに不確か さu(q), $u(V_{out})$ を有する. 簡潔にするため、これら を合成して $V_{out}$ 成分の拡張不確かさにまとめて表現 する. 具体的には、2点以上の測定値への直線回帰

 $V_{\rm out}(q) = C \cdot q + V_{\rm base} \tag{3}$ 

を求め、その感度係数*C*を利用して拡張不確かさ*U*を次式で得る.

$$U = k \cdot u'(V_{\text{out}}) = k \cdot \sqrt{\left(C \cdot u(q)\right)^2 + u^2(V_{\text{out}})} \quad (4)$$

kは包含係数である.図6の測定はqおよびVoutの有 効自由度が十分大きいことからk=2とする.校正対 象物である熱流センサは熱流が与えられていない



状況ではセンサ表裏に温度差は無く出力電圧はゼ ロ ( $V_{base}=0$ ) であると考えられるが,現実にはセ ンサ内部の配線や端子の接触抵抗の影響などで有 限になる場合があるため,式(3)は $V_{base}\neq0$ として*C* を求めることとしている.

u(q)は,式(2)において $Q_{\text{loss}} = 0$ を仮定して,

 $u^{2}(q) = (\partial q/\partial Q)^{2}u^{2}(Q) + (\partial q/\partial A)^{2}u^{2}(A)$ 

 $= (1/A)^2 u^2(Q) + (-Q/A^2)^2 u^2(A)$ (5)

式(5)のQおよびAの不確かさは以下である.ただし、 $Q_{loss}$ はQの不確かさ要素の一つとして扱う.

$$u^{2}(Q) = (\partial Q/\partial I)^{2}u^{2}(I) + (\partial Q/\partial V)^{2}u^{2}(V) + u^{2}(Q_{loss})$$

$$= V^{2} \cdot u^{2}(I) + I^{2} \cdot u^{2}(V) + u^{2}(Q_{loss}) \quad (6)$$

$$u^{2}(A) = (\partial A/\partial L_{1})^{2}u^{2}(L_{1}) + (\partial A/\partial L_{2})^{2}u^{2}(L_{2})$$

$$= L_{2}^{2}u^{2}(L_{1}) + L_{1}^{2}u^{2}(L_{2}) \quad (7)$$
ここで $L_{1}$ および $L_{2}$ は主熱板の1辺の長さである.  
熱流センサの出力電圧の不確かさ $u(V_{out})$ は,  

$$u^{2}(V_{out}) = \delta(V_{out})^{2} + u^{2}(V_{DMM}) +$$

$$\left( (V_{\text{out}} \times 0.00004 + 0.1 \times 0.00004) / \sqrt{3} \right)^2$$
 (8)

 $\delta(V_{out})$ は定常状態での測定値(平均値)の標準偏 差, $u(V_{DMM})$ はDMMの校正証明書記載の不確かさ である.図7の各点の不確かさをこの方法で評価す ると,いずれも2%となった.

#### 4. 熱流センサによる熱流計測の課題

3. において、熱流センサの使用方法が二通りあ り、特に実用的な表面貼付式での使用は課題が多 いことを述べた.熱流センサをより便利に計測の 信頼性も確保して使用するためには、表面貼付式 による使用時に周囲環境に応じて熱流センサの出 力がどのように変化するかの熱流センサの挙動に 関する情報が必要である.表面貼付式の使用時の 課題について記述された文献[1,2]もあるが,系統 的に調査して積み上げられたデータは整備されて いない. そこで筆者は、そのようなデータを蓄積 して実用感度の議論をすることや熱流センサの理 想的な使用条件(取り付け方,感度係数の扱い方) を得ることを目標に,熱流センサを壁面等へ貼り 付けて使用する状況を模擬した評価装置を作製し, 雰囲気やセンサの表面の条件を変えたときの熱流 センサの応答を調べるなどの取り組みを行ってい る[18]. 図8は開発中の評価装置のブロック図であ る. 容器内に熱流センサを貼付する模擬壁面(熱 板)があり,雰囲気(空気中,真空中など)や貼 付方法・密着性(グリース,接着テープなど),放 射率(センサの素材・表面状態,金属テープ被覆, 黒体スプレー塗布など), センササイズ (センサの 面積や厚さに対する熱的条件の変化など)を変化 させることができる.図9に一例を示す.閉じた 容器内で熱板ヒータに 1.98 W を印加しながら真空 中から空気中へと雰囲気を変え、その後容器の扉 を開けて室内の空気循環程度の気流を取り込み, 再度容器を閉じて熱板温度が真空中と同じになる よう熱板ヒータの出力を調整した時の実測データ である.真空中では主にふく射伝熱,空気中では ふく射伝熱に加えて熱板から空気への固体伝導に よる熱移動がある状況が推定されるので、真空中 と空気中の熱板温度とヒータ出力の比較から,ふ く射伝熱と空気への固体伝導の熱流を区別して推 測できる.また、容器の開閉の比較により、気流 による信号の不安定さや対流伝熱の寄与も推定で きる.



図8 表面貼付式で使用する際の挙動評価用装 置のブロック図



#### 5. 熱流センサに関連する最近の動向

古くから使われているゼーベック効果を利用し た平板型熱流センサについて述べてきたが,近年 は以前よりも広く普及してきており,更には新し いセンサの開発も行われている.例えば,カーボ ンナノチューブを用いた熱電変換材料インクと印 刷技術で作成されたフレキシブルなセンサ[19]が 実験室レベルでは開発されており,より薄くフレ キシブルなセンサの出現が待たれる.

更に、ゼーベック効果以外の原理、具体的には 異常ネルンスト効果で温度差を検知可能であると の報告があり、ワイル磁性体[20-22]を用いた新し い熱流センサ[23, 24]も期待されている.磁性体を 用いたセンサは、薄膜プロセスで基板上に製膜さ れたものが試作されている.熱流と出力される熱 起電力は,ゼーベック効果では方向が同じである が,異常ネルンスト効果では直行するので,新し い構造のセンサの出現も期待される.

#### 6. まとめ

省エネルギーを背景に、熱エネルギーの流れを 直接計測できる熱流センサが改めて注目されてい る.このセンサには、事前にその出力電圧とセン サを通過する熱流密度の関係付けが必要であり, 埋設式と表面貼付式の二通りの使用方法がある. 埋設式では再現良く固有感度を決定すること可能 であり、国内では産総研が校正装置を開発してSI トレーサブルな校正サービスを行っている.表面 貼付式では固体伝導,対流伝熱,ふく射伝熱の総 和を検出し周囲環境の影響を受けるため課題が多 い. 表面貼付式での熱流センサの挙動データを蓄 積して実用感度の議論をすることや熱流センサの 理想的な使用方法や解釈の検討が待たれている. 従来の平板型熱流センサに加えて, 最近では新し いセンサも開発・試作されている.熱流センサが より普及して便利に活用され、信頼性高く熱流を 計測することが実現し、エネルギー問題の解決に 役立つことを期待している.

#### 参考文献

- [1] 炭竃貞夫, 熱センサ入門一原理・構造と使い方, 啓学出版 (1984).
- [2] (社)日本機械学会,計測法シリーズ8 熱計測技術, 朝倉書店 (1986).
- [3] Bales, E., Bomberg, M., Courville, G., STP885 Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM: Philadelphia (1985).
- [4] SN. Flanders edt., proceedings of a workshop on Insitu Heat Flux Measurements in Buildings Applications and Interpretation of Results, CRREL: Hanover, (1991).
- [5] Baba, T., Ono, A., Hattori, S., Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 1399.
- [6] 京都電子工業㈱ 熱流センサカタログ (2004).
- [7] 英弘精機㈱ 熱流計シリーズ取扱説明書 Ver.7, https://eko.co.jp/wp/wp-content/uploads/2019/03/ 熱流計シリーズ取説 20180522\_V7.pdf (2018).

- [8] 江藤電気㈱,熱流センサー技術資料, http://www.etodenki.co.jp/ht\_flux/index.htm
- [9] Schmidt, E, Patent US1528383A (1925).
- [10]Yazaki, Y., Matsui, H., Proc. 38th Jpn. Symp. Thermophys. Prop., Tsukuba (2017), D133.
- [11]ISO 8302:1991 Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Guarded hot plate apparatus
- [12]JIS A 1412-1:2016 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導 率の測定方法-第1部:保護熱板法(GHP) (2016).
- [13]Zarr, R., Filliben, J. J., International Comparison of Guarded Hot Plate Apparatus Using National and Regional Reference Materials, NIST TN 1444, (2002).
- [14]Hay, B., Cortes, L., Doucey, B., Filts, J-Remy, Sokolov, N., Stacey, C., Zarr, R., Zhang, J., Thermal Conductivity **30**/Thermal Expansion **18** (2009) 7.
- [15]藤本哲夫, 建材試験情報 6 月 号 p.12 (2008).
- [16]Akoshima, M., Yamada, N., Proc. 37th Jpn. Symp. Thermophys. Prop., Tsukuba (2015), D133.
- [17]Akoshima, M., Yamada, N., Proc. 38th Jpn. Symp. Therrmophys. Prop., Tsukuba (2016), B321.
- [18]Akoshima, M., Proc. 42nd Jpn. Symp. Therrmophys. Prop., Tsukuba (2021), C323.
- [19]https://www.aist.go.jp/aist\_j/press\_release/pr2019/p r20190129\_2/pr20190129\_2.html
- [20]Ikhlas, M., Tomita, T., Koretsune, T., Suzuki, M., Nishio-Hamane, D., Arita, R., Otani, Y., Nakatsuji, S., Nat. Phys. **13** (2017) 1085-1090.
- [21]Sakai, A., Mizuta, Y. P., Nugroho, A. A., Sihombing, R., Koretsune, T., Suzuki, M., Takemori, N., Ishii, R., Nishio-Hamane, D., Arita, R., Goswami, P., Nakatsuji, S., Nat. Phys. 14 (2018) 1119-1124.
- [22]Sakai, A., Minami, S., Koretsune, T., Chen, T., Higo, T., Wang, Y., Nomoto, T., Hirayama, M., Miwa, S., Nishio-Hamane, D., Ishii, F., Arita, R., Nakatsuji, S., Nature 581 (2020) 53-57.
- [23]Zhou, W., Sakuraba, Y., Appl. Phys. Express 13 (2020) 043001.
- [24]Mizuguchi, M., Nakatsuji, S., Sci. Technol. Adv. Mat. 20 (2019) 262-275.

MEMS を用いた伝熱計測 Measurement in Heat and Mass Transfer with MEMS

#### 1. はじめに

MEMS 技術で製作されるセンサ・デバイスは微小,薄膜,集積が可能で,熱電対,測温抵抗体,サーミスタなど従来の温度・熱センサよりも,高速,局所,多機能な応用が可能である.筆者は,MEMS 技術で伝熱研究の領域拡大を目指し,いくつかの試みを行ってきた[1-4].ここでは,近年実施してきた 3 つのトピックを紹介する.

筆者が使用する MEMS 技術とは, PC上でのパタ ーン設計,レジストのスピンコート,マスクレス装 置による露光,湿式の化学的な現像,スパッタ装置 による薄膜蒸着,リフトオフ法による不要薄膜の除 去など,基本的なプロセスを組み合わせたもので難 易度は低いが,利用価値は格段に高いと感じている. 興味を持たれた読者には,ぜひ,近くのクリーンル ームを利用し MEMS を導入されることを勧める.

## 2. エンジン用熱流束センサ

エンジンの熱効率向上を目指したプロジェクト 研究内で, 薄膜 RTD (Resistance temperature device, 測温抵抗体)を用いたエンジン内壁面の熱伝達機構 の研究を実施してきた[5-6]. 図1に,可視化エンジ ンのピストン頂面に設置した MEMS 熱流束センサ を示す. 直径 10 mm のアルミ合金基板に左から S1, S2, S3, S4 と呼ぶ白金薄膜製の RTD を4 点形成し たもので,各 RTD は直径 570 µm,中心点間隔が S1S2:1 mm, S2S3:0.6 mm, S3S4:1.4 mm となってい る.

これらの RTD によりエンジン運転時の表面温度 を 120 kHz (回転数 2000 RPM 条件下でクランク角 0.1°刻み)のサンプリング周波数で記録し,センサ 内の非定常熱伝導解析で熱流束を算出する.薄膜構 造部には想定できない熱抵抗が存在するため,自己 発熱校正によって得られた熱抵抗値を解析モデル に反映させ,解析の定量性を担保している.

図 2 には回転数 2000 RPM, 圧縮比 13.0, IMEP

中別府 修(明治大学) Osamu NAKABEPPU (Meiji University) e-mail: onakabep@meiji.ac.jp

400 kPa で得られた代表的な局所熱流束の瞬時値と 筒内圧力を示している.当量比 0.7 の希薄条件のた め,圧力にもサイクル変動が見られているが,熱流 束センサで計測した局所の瞬時値は,黒線で示すア ンサンブル平均に対して 3 倍以上のピーク高さを 持ち,激しく変動していることが分かる.エンジン の熱効率向上には,冷却損失と呼ばれる既燃ガスか らエンジン内壁面への熱伝達を低減することが重 要であり,熱伝達の実像として,このように激しく 変動する熱流束の瞬時値の重ね合わせとしてアン サンブル値ができていることを理解しておく必要 がある.



図 1 ピストン頂面に設置した **MEMS** 熱流束セン サ



図 2 450 サイクルの瞬時熱流束の確率分布と 50 サイクル分の筒内圧変化

直列4 点熱流束センサは, エンジン内の流れの状 態や乱れのスケールを調べる目的で開発した[7]. この計測では, センサは, S1 から S4 を通る軸がタ ンブル流に対して 168°傾いて設置され, また, フ ァイアリング試験では, S2 にノイズが多く入り, 解析の幅は狭まってしまった. それでも, S1, S3, S4 の熱流束信号から, センサ列に沿う近傍移流速 度の推定と熱流束の FFT 解析を組合せることで熱 流束の変動要因のスケールの情報を抽出できた.

図3は、サイクル毎に上死点近傍 CA-10°~50° の範囲で3点の熱流束変動の相互相関解析から遅 れ時間を出し、熱流束変動要因が移流する速度を求 め、S1S3 抽出速度と S3S4 抽出速度が平均値の25% 以内の差で一致するものを選び、集計したヒストグ ラムである.速度0近辺は推定手法上検出されない ため欠けている.有効データ率は56/450と高くな いが、タンブル流れを示す負の速度にピークを持ち、 エンジン内で確率的に発生する逆向きの流れも検 出している分布を得ている.平均タンブル流速が 10 m/s レベルの条件下で絶対速度の平均値は8.5 m/s と得られており、推定速度としては悪くないも のと評価できる.

測定された熱流束は図 4 に示すスペクトルを持 ち、400 Hz 程度にピークを持ち、1 kW/m<sup>2</sup>レベルを 超えている 20 kHz 程度までの範囲が信号としての 意味を持っている. 相関解析で移流速度が得られた サイクルで、熱流束スペクトルを計算し、移流速度 と組合せ、熱流束変動要因のスケールを導出し、積 算したものを図5に示す. ●がデータであり、ガウ ス分布型のフィッティング関数 2 つで分布を良く 再現できることを示している. この例では、1.4 mm にピークを持つ小スケールの変動要因がタンブル流れ に乗ってセンサ上を流れることで、図4のスペクト ルになると説明される. 小スケールの要因は流れに 含まれる乱れ・渦に対応し、大スケールの要因は温 度斑・燃焼斑に対応するものと考えている.

隣接多点式の MEMS センサで壁面熱流束を高速 に計測し, 近傍の移流速度や変動要因の情報が再構 成できることは, エンジン筒内など密閉容器内の伝 熱を検討するうえで MEMS センサが重要なツール であることを示している.



図3 隣接3点の熱流束相関解析から推定したタン ブル流速



図4 熱流東スペクトルのアンサンブル平均



図 5 タンブル流速と熱流束スペクトルから求め た熱流束変動要因のスケール

#### 3. MEMS を用いたバイオカロリメトリ

細胞1個は1~10 pW レベルの発熱を示す.生体 試料を対象とした市販のカロリメータでは100 nW レベルが計測限界である. MEMS 技術で熱量計測 感度を極限まで高め,細胞レベルの代謝熱を捉える ことは,極限的なチャレンジの一つである.著者ら は、薄膜熱電対を多数集積した MEMS サーモパイ ルセンサを用い、試料セル内の細胞や微生物の発熱 を高感度で測るバイオカロリメトリの開発を通し て、熱量計測限界の拡張を試みてきた[8]. この研究 では、センサの熱量感度の向上、外来熱ノイズの低 減、増幅・記録系の内部ノイズの低減の3つが重要 な要因となる.

現在開発中のカロリメータでは、サーモパイルセンサを試料の上下に配置し、試料セルの発熱を上部センサと下部センサで捉える構造(図6左)にしている.これは、試料セルと下部センサの接触コンダクタンスが変化し、発熱量を正しく測れなくなる難点を緩和するものであり、上部センサでは約10%の熱量が検出されている.MEMSサーモパイルセンサ(図6右下)は22mm角の硼珪酸ガラス板に248個のTCを直列接続して配置してあり、試料がのる中央線に較正用の抵抗ヒータを備えている.単体で2.1~2.3 V/Wの熱量感度を持っている.サーモパイルは試料用、参照用の2枚を1つの銅板ホルダーに接着(図6右上)し、このセンサーホルダを上下に2つ、スペーサを介して配置し、センサブロックを構成している.

サーモパイル信号の増幅には 1 個のサーモパイ ルに対してプリアンプ4個を並列し,内部ノイズを 低減した増幅回路を使用している.

外部からの熱ノイズを低減し、安定な温度環境を 提供する恒温槽は、内側より、最内層のセンサブロ ック、第2層の密閉容器、第3層のアルミ容器、第 4層のインキュベータで構成し、第3層以内の各層



図 6 上下 2 層サーモパイル方式の模式図(左), MEMS サーモパイルセンサ(右上),銅板ホルダー に設置した差動サーモパイルセンサ(右下)

はペルチェ素子を用いた PI 制御により定温制御を 実施している. センサブロックの温度が 10 mK 以 内に整定するには約 30 分を要し,サーモパイル出 力の 20 分平均が 100 nW 以下に達するには約 1 時 間の整定時間がかかる. さらに 10 nW レベルの整 定には 10 時間レベルの時間が必要である.

2つの計測例を示す.図7は酵母菌の増殖過程の サーモグラムである.ガラスセル内に微量の酵母菌 と培養液10µℓを入れ,密封し,26.8 ℃の環境で約 4日間計測した.計測開始後12時間程度で,赤線 の発熱は最低レベル10nWとなり,その後24時間 程度まで一定の傾きで増殖し,その後,増殖スピー ドは鈍り,30時間で約10µWのピークを示し,発 熱は減衰していく.減衰過程でも,32時間程度以 降は減衰が緩やかとなり,酵母菌が飢餓状態で代謝 モードを変えていることがうかがえる.





12 時間~24 時間のトレンドを計測開始時刻まで 外挿すると約 60 pW となり,約3 個の酵母菌から 世代時間約 72 分の増殖を繰り返し,24 時間で100 万倍に増えた状態が計測されたことになる.

図8は,単一のブラインシュリンプ乾燥卵が試料 セル内で孵化する過程を測ったものである.赤線の 熱量は計測開始時の乱れが10時間で約50nWまで 低下し,その後,増加を示し,約30時間で150nW の発熱ピークをとり,緩やかに発熱が減少していく. 78時間,117時間,145時間の変動は大きなノイズ で,代謝信号の変動ではないと考えている.ブライ ンシュリンプの乾燥卵は人工海水に入れると約24 時間で孵化することが知られており,この例では,約30時間で孵化を起こしたものと考えている.

試作したバイオカロリメータでは、10 nW レベル の安定な熱量計測はまだ難しい状況にある.市販装 置の性能は超えているが、例えば単一酵母菌が成長 し分裂する過程を調べるには、さらに 1000 倍の感 度が欲しくなる.飛躍的な改善方法は見えていない が、研究開発の継続が重要と感じている.

#### 4. 櫛歯電極センサによるクエンチの観察

燃焼伝熱では、火炎が低温の壁面に近づき伝熱量 が増えると燃焼反応が継続できず、消炎する現象 (クエンチ)[9]は興味深い.これを捉えるには側方 から画像計測により反応帯の接近を観察したり、レ ーザー光の吸収で壁面近傍の化学種濃度を調べる など光学的なアプローチが主である.エンジン内な ど光学的手法が難しい燃焼容器内のクエンチ現象 を調べるため、薄膜熱流束センサと櫛歯電極センサ によるイオン電流計測を試みた[10].

図 9 はシリコン基板上に製作した直径 280  $\mu$ m の RTD 式熱流束センサと同極電極のピッチが 200  $\mu$ m の櫛歯型イオン電流センサである. 櫛歯電極では, 図 10 のように,正負の電圧を印加し,遠方からは ゼロ電位に見え,近づくと電界が交互に並んでいる 双極性電界を形成し,壁面に近づいてきた反応帯で 生成されるイオンをある距離から検出することが 期待される. 検出距離は電極ピッチで変わるため, 熱流束センサの周囲に,ピッチが大きい順にL(ピ ッチ 400  $\mu$ m), M(同 200  $\mu$ m), S(同 80  $\mu$ m)の三 種類の櫛歯電極センサを配置した.印加電圧±9 V の条件では,検出距離はL:500  $\mu$ m, M:270  $\mu$ m, S: 120  $\mu$ m 程度である. 容量 510 mℓ の開放型燃焼容器



図 9 熱流束計測用 RTD (Φ280 µm) とイオン電流 計測用の櫛歯電極 (ピッチ 200 µm, サイズ 1.1 mm × 1.1 mm)



図10 双極性電界とイオン電流計測回路



図 11 メタン層流予混合火炎のクエンチにおける 壁面熱流束と3 櫛歯センサによるイオン電流強度

の底部にセンサを設置し、メタンの層流燃焼火炎 のクエンチで応答を調べた.

図 11 は当量比 1.0 のメタン・空気予混合気の層 流燃焼火炎がセンサに接近し, クエンチを生じた場 合の熱流束, イオン電流強度のグラフである. イオ ン電流は, センサ面積, 電界強度で変わるため, 計 測されたイオン電流をセンサ面積と見かけの電界 強度(印加電圧/半ピッチ)で除した電流強度で示 している. 結果は, 熱流束の立上りに合わせて, ま ずピッチ 400 µm のセンサL でイオン電流が検出さ れている. センサ M, S には L と同じタイミングで 立ち上がる低いピークも見られるが, 遅れてセンサ
M で主ピークが検出され, センサ S では電流は僅 かでさらに遅れたピークを取る結果が得られた.

この結果は,壁面近傍の約500µm以内の領域で 壁面に近づいてくる反応帯の位置をイオン電流に よって検知可能なことを示している.壁面センサに より近傍距離の情報を遠隔的に得られることは特 筆すべきことであり,今後,イオン電流による反応 帯の距離や動きを捉える手法の開発に期待したい.

#### 5. おわりに

MEMS センサを使った伝熱研究に関して,著者 らの最近のトピック3つを紹介した.MEMSの導 入は,時間・空間分解能を上げ,集積による多機能 化や温度・熱的な手法に電磁気的な手法を組合せる ことも可能である.複雑な伝熱流動場を捉える壁面 センサとしての重要性や従来手法を超える計測機 器の可能性などを読者に感じていただけたら幸い である.

## 参考文献

- [1] 中別府, 磨田, 日本機械学会論文集 B 編, **72-722** (2006) pp.2524-253
- [2] 中別府, 坂寄, Thermal Science & Engineering, 14-4 (2006) pp.115-120
- [3] J. Ishii & O. Nakabeppu, Netsu Sokutei W39, (2012) pp.14-19
- [4] T. Yabuki & O. Nakabeppu, Int. J. Heat and Mass Transfer, **76** (2014) pp. 286-297
- [5] 出島,他,日本機械学会論文集,84-867 (2018) p.15
- [6] K. Dejima, O. Nakabeppu, Applied Thermal Engineering, 201 Part A (2022) 117747
- [7] 中別府,他,第58回日本伝熱シンポジウム講演 論文集,F121 (2021)
- [8] 中別府,他,日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集,(2018)
- [9] B. Boust, et.al., Combustion and Flame 149, (2007) pp.286-294
- [10]中別府,他,第59回日本伝熱シンポジウム講演 論文集,(2022)

## カーボンナノチューブ薄膜の複素屈折率測定 ~波長選択放射・吸収膜応用に向けて~

Complex Refractive Index Measurement of Carbon Nanotube Membranes - Toward Wavelength-Selective Radiation and Absorption Membrane Applications

> 西原 大志, 宮内 雄平 (京都大学エネルギー理工学研究所) Taishi NISHIHARA, Yuhei MIYAUCHI (Institute of Advanced Energy, Kyoto University) e-mail: nishihara.taishi.8x@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

熱ふく射の先進的応用技術の一つとして,熱光 起電力発電技術の開発が進められている[1-9].こ の発電方法では,高温の物体から発生した熱ふく 射を,光起電力セルに入射して発電を行う(図 1a). 原理上,ふく射エネルギーが光起電力セルのバン ドギャップ近傍の近赤外波長域に集中するほどエ ネルギー変換効率が高くなることから,放射率が 近赤外域だけ高く,かつ耐熱性も高い物質が,波長 選択エミッターと呼ばれる熱ふく射発生素子の材 料として適している.



図 1 (a) 熱光起電力発電の概念図. (b) 単一の単層 CNT の熱ふく射スペクトル. 写真は CNT の熱ふく 射の様子. 文献[10]から一部引用.

最近,我々のグループは、単層カーボンナノチュ ーブ(CNT)が、その様な特徴を持つ物質であるこ とを報告している (図 1b) [10]. 単層 CNT とは, 一 層のグラフェンシートを直径1から数ナノメート ル程度の円筒状に巻いた形状を持つナノスケール 物質 (ナノ物質) である[11]. これまでに,1000 K を 超える高温に加熱した1本の単層 CNT の暗視野顕 微観察により, 単層 CNT から, 狭帯域の近赤外熱 ふく射が放出される様子が観測されている(図 1b). この狭帯域性は、極めて細い物質である単層 CNT 内では一般的な物質と異なり,光や熱のエネルギ ーによって電子(負電荷)と正孔(正電荷)が対生 成された場合に、それらの粒子間に働くクーロン 引力が非常に大きいため、電子と正孔が互いに束 縛しあい相関を持って運動する 「励起子」と呼ばれ る水素原子様の量子状態が形成されることに由来 する[12]. 励起子は、水素原子に似た離散的なエネ ルギー準位構造を持つため、よく定まったエネル ギーを持ち、励起子の消滅に伴い、励起子のエネル ギーを反映した狭帯域の熱ふく射が発生する[10, 13]. 単層 CNT の格子構造自体も,炭素の強固な sp<sup>2</sup> 共有結合により,真空中であれば1000~1800℃以上 でも融解することなく安定であることから、 単層 CNT は近赤外波長選択エミッター材料として有力 な物質であると考えられる[14,15].

波長選択エミッターの様な,分光放射率の精密 な制御が求められる熱光学デバイスを設計するた めには,材料のマクロな光学特性を規定する複素 屈折率スペクトルの情報が必要となる.特に,単層 CNTには,「カイラリティ」と呼ばれるグラフェン の巻き方の自由度を反映して,構造が異なる種が 無数に存在し,励起子のエネルギーが構造によっ て決まるため,構造が揃った単層 CNT の複素屈折 率スペクトルが必要である.しかし,そのような, 単層 CNT の構造ごとの広帯域複素屈折率スペクト ルはこれまで報告されておらず,それが波長選択 エミッターを含む,CNT光学デバイスの開発の妨げ となっていた.本稿では,単層 CNT の基本的な特 徴を解説した後,我々が最近報告した単層 CNT 薄 膜の複素屈折率スペクトル[16]に関して,その測定 法,解析法に焦点を当てつつ紹介する.

## 2. 単一カイラリティ CNT 薄膜

単層 CNT には、直径や炭素結合の向きといった 構造が異なる種 (カイラリティ)が無数に存在する. 各カイラリティの単層 CNT の構造は、グラフェン シートの巻き方を表す「カイラル指数」と呼ばれる 2つの整数の組 (*n*,*m*)を用いて表すことができる (図 2a).カイラル指数は単層 CNT の物性を左右す る最重要パラメーターであり、例えば、その少しの 違いで、単層 CNT は半導体にも金属になる[17].



図 2 (a) カイラリティの表記法. カイラルベクトル C<sub>h</sub> (赤矢印) で結ばれた 2 つの炭素原子が重なるよ うにグラフェンシートを巻くと, (*n*, *m*) CNT となる. (b) 単一カイラリティ CNT 薄膜と混合カイラリテ ィ CNT 薄膜.

励起子の共鳴波長もカイラル指数によって異な り、様々なカイラリティの単層 CNT が含まれる一 般的な試料は、波長が異なる励起子吸収が重なり あった結果、黒色を呈する(市販されている CNT の 黒色はこれが理由).単一カイラリティの単層 CNT のみを大量合成する技術は未だ開発されていない が、混合物試料から特定カイラリティを分離する 技術は発達してきている[18, 19]. 混合試料とは異 なり、単一カイラリティの単層 CNT からできた薄 膜は,波長が揃った励起子吸収を反映して,カイラ リティ毎に多彩な色を示す(図 2b).励起子効果は 半導体型で顕著であることから[12],波長選択エミ ッターの材料としては,単一カイラリティの半導 体型 CNT の薄膜が最適である(分離法と薄膜作製 法の詳細は参考文献[16]を参照).

#### 3. 複素屈折率スペクトルの測定手法

物質の光に対する応答を表す光学感受率の様な 応答関数は、一般に複素数で記述される、したがっ て、感受率から求められる屈折率などの物性値も また、一般に周波数に依存する複素数で表される. その実部と虚部は、外場応答に関する因果律の要 請から, Kramers-Kronig (KK) 変換による相互変換 が可能である[20]. 透過がない物質の場合、反射ス ペクトルを測定し、そのKK変換から複素反射率の 位相(δ)を求め、反射率と位相から複素屈折率スペ クトルの実部nと虚部 $\kappa$ を決めることができる(図 3a).この方法は、測定が反射だけで済むという利 点があるが、厳密に KK 変換を行うには周波数 0 か ら無限大までの反射率スペクトルが必要となるた め[20]、原則、可視域だけの複素屈折率が必要な場 合も、赤外から紫外までの広帯域で反射スペクト ルを測定しなければならない(測定が難しい赤外、 紫外領域では何らかの模型による外挿値を使う場 合もある).



図3 複素屈折率測定の代表的な手法(a, b)と,本研 究で採用した手法(c).

また,薄膜試料に関しては,反射または透過係数 の偏光依存性を利用した分光エリプソメトリーが よく用いられる(図 3b) [21]. 偏光が 45°傾いた直線偏光の光を,入射角 $\theta$ を変えながら照射し,反射(または透過) P偏光とS偏光の振幅比 $\Psi$ と位相差 $\Delta$ の三組の物理量から $n \ge \kappa$ ,さらに薄厚dを求めることができる.単純な構造の薄膜の場合には,( $\Psi$ ,  $\Delta$ ,  $\theta$ )からフレネルの公式等を用いて(n,  $\kappa$ , d)が求まるが,それ以外の場合は,KK関係を満たす $n \ge \kappa$ の模型を考え,実験結果を再現するようにパラメータを決める.分光エリプソメトリー技術は強力だが,測定システムが比較的高価であることが初期導入のネックとなっている.

本研究では, CNT 薄膜に関して, 膜厚を触針式段 差計で直接測定し、反射、透過スペクトル測定から、 (*n*, *κ*)を決める手法を用いた(図 3c). 膜厚が既知と なることで、参照光の入射角を変える必要はなく、 透過率は垂直入射,反射率は入射角 10° で測定を行 った.フレネルの公式から入射角 10°の P 偏光と S 偏光の反射率の平均値は, 垂直入射の場合とほぼ 同じとなるため、測定では無偏光の光を入射光と して用い、得られた反射率を垂直入射の場合の反 射率として近似した.光学スペクトルは、遠赤外か ら近赤外領域までは一般的なフーリエ変換赤外分 光光度計(FTIR)で測定し、近赤外から可視までは ハロゲンランプ,分光器,CCD を組み合わせた自作 光学系で測定した.得られた反射,透過スペクトル を、ローレンツモデルやドルーデモデルなどKK関 係を満たす模型(後述)を組み合わせて再現するこ とで、最終的に CNT 薄膜の複素屈折率スペクトル を決定した.

#### 4. CNT 薄膜の光学スペクトル

試料として、サファイア基板に転写した薄膜(以下、基板上膜)と金属ワッシャーを支持体として膜中央部を自立させた薄膜(以下、自立膜)を用意した.図4に原料CNT分散液の吸収スペクトルと、薄膜試料の反射、透過スペクトルを示す.測定に用いた CNT は(10,3)種で、厚さが約37 nm、かさ密度が約1g cm<sup>-3</sup>の薄膜試料である.膜内では、CNT の配向は揃っておらず、面内ランダム配向となっている.まず、薄膜の原料となる CNT 分散液試料に関して、*S<sub>ii</sub>*で示した*i*番目のサブバンドの励起子共鳴による強い吸収に加え、フォノンサイドバンド吸収(図4a中の矢印)など、複数のピーク構造を観測した.一方、薄膜に関しても、分散液試料と似たピ

ーク構造を有している(図 4b-d). ピークシフトや 線幅の広がりが生じているが、薄膜中でも、分散液 試料中の CNT が有する基本的な光学特性が保たれ ていることを示している. 基板上膜では、サファイ ア側からよりも(図4d),CNT 薄膜側から測定光を 入射した時の方(図4c)が、励起子による反射が強 く起こっている. この結果は、サファイアと CNT 薄膜界面よりも、空気と CNT 薄膜界面の方が大き な屈折率差を生じていることを示唆している.吸 収特性を主に反映する透過スペクトルでは、Su 励 起子よりも高エネルギーでは、広いエネルギー域 に渡る一定のオフセット (ベースライン) 的な吸収 が観測され、また、自立膜では、低エネルギー側に 向かって透過率が減少する様子を観測した(図 4b; 基板上膜では基板の吸収により、この波長域は測 定できない).



図 4 (10,3)CNT 溶液の吸収スペクトル (a) と自立膜 (b),基板上膜 (c,d) の透過率 (T),反射率 (R) スペクトル. c,d はそれぞれ CNT 側,基板側から測 定光を入射させている.下軸は光子エネルギー (E), 上軸は波長 ( $\lambda$ )を表している (E[eV]= $hc/\lambda$ =1240 [eV nm] / $\lambda$  [nm], h はプランク定数, c は真空中の光 速).

## 5. 複素屈折率スペクトルの導出

測定した全ての反射,透過スペクトルを再現す る複素屈折率スペクトルを,微視的な複素光学感 受率の模型から導出する(図 5;式の詳細は[16]を 参照).複素光学感受率とは,物質中の双極子の電 場に対する線形応答を表す関数で、それと印加電場の総和の平方根が、物質全体の複素屈折率となる(図 5a).



図5(a) 複素屈折率と複素光学感受率.(b) 微視的な 複素光学感受率を表す模型. 点線と実線はそれぞ れ実部, 虚部を表す.

まず,励起子やフォノンサイドバンド等の共鳴 型の応答は、ローレンツモデルで表す. ローレンツ モデルは代表的な複素光学感受率模型の一つで, 共鳴周波数付近で実部が微分波形, 虚部がピーク 構造を示す.次に、低エネルギー側の透過率の減少 はドルーデモデルで表す. ドルーデモデルは自由 キャリアの応答を記述する際に用いられ、 ローレ ンツモデルの共鳴周波数がゼロの場合に対応する. さらに、Su 励起子よりも高エネルギー側のオフセ ット的な吸収に関しては, 虚部が階段型の関数に なる様な複素感受率を導入する. その様な複素光 学感受率の一般的な模型はないので、ここでは、位 相を 90° ずらした複素ローレンツ関数からなる級 数として導入した(詳細は参考文献[16]の補足資料 を参照).結果として、用いた全ての複素感受率が ローレンツモデルをベースにしており. ローレン ツモデルは因果律の要請を満たすことから、その 線形和で表される薄膜全体の単位密度あたり複素 光学感受率.

$$\tilde{\chi}(\omega) = \tilde{\chi}_{\rm C}(\omega) + \tilde{\chi}_{\rm D}(\omega) + \chi_{\rm B} + \sum_i \tilde{\chi}_{\rm L}^i(\omega),$$

並びに、複素屈折率  $\hat{n} = \sqrt{1 + \hat{\chi}}$  も KK 関係を満た す.ここで、 $\hat{\chi}_{L}^{i}, \hat{\chi}_{D}, \hat{\chi}_{C}, \chi_{B}$ はそれぞれローレンツモ デル、ドルーデモデル、階段型の関数、背景光学感 受率である.構築した複素感受率模型を用いて、サ ファイア基板上薄膜と自立薄膜の反射、透過スペ クトルを再現することができる.本研究では,界面 や媒質中の電磁波の伝搬を計算する光学伝搬行列 法[22]を用いてスペクトルを計算しているが,薄膜 内における電磁波の多重反射を考慮した一般的な 模型[21]でも同じ結果が得られる.図 4b-d の点線 は計算結果を示している.図 4b-d に示すように, 全ての光学スペクトルを上手く再現する模型のパ ラメータをフィッティングにより見つけることで, 辻褄のあう複素屈折率スペクトルを決定すること ができた.

最終的に得られた複素屈折率を図6に示す.重要 な特徴として、0.2 eV 以上の光子エネルギーでは、 実部、虚部ともに S<sub>11</sub> 励起子共鳴付近で非常に大き な値となっていることが挙げられる.ハンドブッ クなどに記載されている CNT の屈折率は約 1.5 程 度であるが、S<sub>11</sub> 励起子共鳴より高エネルギー側の 平均屈折率はそれと同程度であるのに対し、S<sub>11</sub> 励 起子共鳴での屈折率はその約 2 倍以上に達してい るなど、励起子共鳴近傍で劇的に屈折率が変化す ることがわかる.



図 6 (10,3) 単層 CNT 薄膜の複素屈折率スペクトル.

本研究では、同様な手順で5種類のカイラリティ の単層 CNT 薄膜の複素屈折率スペクトルを決定し た.図7にその結果をまとめるが、カイラリティに 敏感な励起子ピークの共鳴エネルギーの違い以外 は、類似のスペクトル形状を示している.この類似 性から、我々は5種類の単層 CNT 薄膜から得られ たパラメーターの平均値だけを使って、簡易的に 複素屈折率スペクトルを再現できるかを検討した. 図7の灰色で示した領域がその計算値を示してい るが、誤差±20%を考慮することで、ほとんどの実 験データがカバーできることがわかった.この結 果は、この 5 種類のカイラリティ以外の単層 CNT 薄膜の複素屈折率も、外挿によりある程度予測で きることを期待させる.この複素屈折率スペクト ルの経験式を用いれば、光起電力セルのバンドギ ャップに合わせた波長選択エミッターや、波長選 択吸収膜、さらに CNT と他の材料を組み合わせた 誘電体多層膜など、様々な光学および熱光学素子 の設計が可能となることから、データを広く公開 し誰でも利用できるようにすることが重要と考え、 現在、研究室のホームページ[23]にて、この経験式 から予測される単一カイラリティ CNT 薄膜の複素 屈折率スペクトルのデータを公開している.CNT 薄 膜を利用した光学素子等の開発に役立てていただ ければ幸いである.



図 7 5 種類の単層 CNT 薄膜の複素屈折率スペク トルの実部(a)と虚部(b).

## 6. おわりに

本稿では,波長選択エミッターの開発に向けた, 単層 CNT 薄膜の複素屈折率スペクトル測定を紹介 した.最後に,この手法の他の物質系への適用可能 性ついて手短にコメントしたい.まず,ある程度光 を透過する基板上の薄膜であれば,原理上,この手 法は適用できる.今回,膜厚は段差計で測定してい るが,参照光を薄膜側,基板側から入射した場合の 反射率(図4c,d)と,透過率(これはどちら側から 参照光を入れても等しい)の3つのスペクトルを同 時に再現すれば,複素屈折率だけでなく,膜厚もあ る程度決めることができる(ただし,吸収を決める 複素屈折率の虚部がゼロでないことが必要). また、本稿では、CNTの光学スペクトルの大きな 特徴である励起子共鳴近傍の複素感受率の模型と してローレンツモデルを用いたが、それが適用で きない場合も多いと考えられる.そのような場合 に頼りになるのが、ヒルベルト変換が多用されて いる信号処理分野の文献である(KK 変換における 周波数応答の実部と虚部を結びつけている変換は、 数学的にはヒルベルト変換と呼ばれるものである). 例えば、今回、階段型関数を導入するために、どの ように KK 変換を満たす関数として表現すれば良 いかを検討した際には、信号処理分野の文献を調 べる中で、階段型の形状を持つハイパボリックタ ンジェント(tanh) 関数が、複素ローレンツ関数の 特殊な級数の虚部として表現できることに気づき、 それを用いている.

KK 変換自体も、周波数ゼロから無限大の範囲の 主値積分で表されるので、取っ付きにくいと感じ ている光学分野外の研究者も少なくないと思われ るが、実は Igor Pro や Origin, MATLAB など、一般 的に利用されている解析アプリケーションの多く には、ヒルベルト変換があらかじめ実装されてい る. 従って、研究者自身はプログラムを自作する必 要はなく(赤外や紫外の外挿は必要)、一種類のス ペクトルを準備すれば、そのヒルベルト変換から 複素屈折率を計算することが可能である.こうい った知識を上手く組み合わせて用いれば、単純な 光学測定からでも、複素屈折率スペクトルを決め ることができる場合も多いのではないだろうか. もし、これらの知見が、今後の読者の研究の何らか のヒントになれば幸いである.

#### 謝辞

本稿で紹介した研究成果は,JST CREST JPMJCR18I, KAKENHI JP19K15384, JP21K14486の 支援を受け,片浦弘道 特命上席研究員,田中丈士 研究グループ長(以上,産業技術総合研究所),松 田一成 教授,高倉章 特定研究員,島崎雅史 大学 院生(以上,京都大学エネルギー理工学研究所)と の共同研究のもとで得られたものである.また,本 研究の一部(膜厚測定)は、文部科学省ナノテクノ ロジープラットフォーム事業(京都大学微細加工プ ラットフォーム)の支援を受けて実施されたもので ある. 参考文献

- Rephaeli, E. and Fan, S., Opt. Express, **17** (2009) 15145.
- [2] Datas, A. and Martí, A., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 161 (2017) 285.
- [3] Lenert, A., Bierman, D. M., Nam, Y., Chan, W. R., Celanovic, I., Soljačić, M., and Wang, E. N., Nat. Nanotechnol., 9 (2014) 126.
- [4] Bierman, D. M., Lenert, A., Chan, W. R., Bhatia, B., Celanovic, I., Soljačić, M., and Wang, E. N., Nat. Energy, 1 (2016) 16068.
- [5] Kohiyama, A., Shimizu, M., and Yugami, H., Appl. Phys. Express, 9 (2016)112302.
- [6] Woolf, D. N., Kadlec, E. A., Bethke, D., Grine, A. D., Nogan, J. J., Cederberg, J. G., Burckel, D. B., Luk, T. S., Shaner, E. A., and Hensley, J. M., Optica, 5 (2018) 213.
- [7] Suemitsu, M., Asano, T., Inoue, T., and Noda, S., ACS Photon., 7 (2020) 80.
- [8] Isobe, K., Okino, R., and Hanamura, K., Opt. Express, 28 (2020) 40099.
- [9] 櫻井篤, 伝熱, 55 (2016) 18.
- [10] Nishihara, T., Takakura, A., Miyauchi, Y., and Itami, K., Nat. Commun., 9 (2018) 3144.
- [11] Iijima, S. and Ichihashi, T., Nature, **363** (1993) 603.

- [12] Ando, T., J. Phys. Soc. Jpn., 66 (1997) 1066.
- [13] Konabe, S., Nishihara, T., and Miyauchi, Y., Opt. Lett., 46 (2021) 3021.
- [14] 伊丹健一郎, 宮内雄平, 西原大志, 高倉章, 山本貴博, 小鍋哲, 熱光変換素子, 特開 2019-193418.
- [15] 宮内雄平,西原大志,高倉章,小鍋哲,熱放射 体,光スペクトル変換素子,及び光電変換装 置,特願 2021-096124.
- [16] Nishihara, T., Takakura, A., Shimasaki, M., Matsuda, K., Tanaka, T., Kataura, H., and Miyauchi, Y., Nanophotonics, **11** (2022) 1011.
- [17] Saito, R., Fujita, M., Dresselhaus, G., and Dresselhaus, M. S., Appl. Phys. Lett., 60 (1992) 2204.
- [18] Yomogida, Y., Tanaka, T., Zhang, M., Yudasaka, M.,
   Wei, X., and Kataura, H., Nat. Commun., 7 (2016) 12056.
- [19] Yomogida, Y., Tanaka, T., Tsuzuki, M., Wei, X., and Kataura, H., ACS Appl. Nano Mater., 3 (2020) 11289.
- [20] 櫛田孝司, 光物性物理学, 朝倉書店 (1991).
- [21] 藤原裕之, 分光エリプソメトリー, 丸善出版 (2011).
- [22] 梶川浩太郎, 岡本隆之, Python を使った光電磁 場解析, コロナ社 (2019).
- [23] http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/functional/index.html

## 多機能熱伝導率測定装置の開発 Development of Multifunctional Thermal Conductivity Measurement Equipment

羽鳥 仁人,山藤 靖一朗,粟野 孝昭(株式会社ベテル) Kimihito HATORI, Seiichiro SANDOH, Takaaki AWANO (BETHEL Co., Ltd.) e-mail: k-hatori@btl-hrd.jp

## 1. はじめに

近年,地球温暖化により,カーボンニュートラル 達成年度が目標として決定されるなどして,新たな グリーンエネルギーの開発がクローズアップされ ている.一方で,それらのエネルギーは供給量やコ ストの限界があるため,今まで以上のエネルギーを 消費しては本末転倒である.伝熱工学を活用し熱を 有効活用し,省エネルギーを実現することがますま す重要となってくる.

我々も,熱伝導率の計測技術を通してエネルギー の有効活用への貢献をめざしている.特に近年では 電気製品の集積度が高まり,固体の熱伝導を活用し て熱マネジメントを行う必要性が高まっている.例 えば最近のスマートフォンやタブレット PC では, 従来型の PC のようにクーリングファンによる熱対 流による空冷が容易ではなく,同時に電子部品の集 積度が高まりプリント基板の温度が上昇しやすく なっている.

これら電子機器の熱マネジメントに用いられる 熱伝導材料は試料の大きさや熱伝導率の範囲がさ まざまであるため、単一の測定手法では対応は困難 である.このような状況を鑑みて、我々は異なる試 料サイズや熱伝導率に対応した測定装置を3種類、 サーマルインターフェースマテリアル等に適した 定常法、グラファイトシートなどの異方性材料に適 したスポット周期加熱放射測温法、薄膜微小領域に 適した周期加熱サーモリフレクタンス法の開発・製 造・販売をしている.

本稿では,定常法とスポット周期加熱放射測温法 について紹介する.

## 2. 各種の熱伝導率測定装置

## 2.1 定常法と非定常法

熱伝導率測定法は試料に定常的な温度勾配を与 えて測定する定常法と,過渡的な温度勾配を与えて 測定する非定常法に大別される.(非定常法は試料 の温度応答の時間変化を計測するため熱拡散率が 直接求められるが本稿では非定常法も広義の熱伝 導率測定法とする.)

定常法は直接熱伝導率が求められる反面,温度差 の絶対値を正確に測定しなければならないため試 料サイズを十分に大きくとる必要がある.非定常法 は,試料の温度応答の時間変化を計測するため,直 接得られるのは熱拡散率であるが,小さな試料の測 定が可能である.

#### 2.2 接触式と非接触式

試料の加熱と温度検出が接触式か非接触式であ るかも重要である.定常法は一般に接触式となる. 接触式の場合,接触熱抵抗の評価が必要となるが, 対象物に接触させて圧力を加えて表面或いは材料 全体が変形した状態で使用される材料は,接触式で 試料への圧力或いは厚みを制御した測定を行わな ければ実使用時の性能評価とならない.非接触式の 測定では,接触熱抵抗の考慮が不要である.一方で, 光加熱方式でなおかつ放射温度計等赤外線放射を 用いて温度変化を検出する場合は試料の表面処理 (カーボンスプレー等による黒化処理)が必要であ る.

我々が提供する2製品,定常法は接触式で試料への圧力と試料の厚みを制御した測定が可能であり, スポット周期加熱放射測温法は非接触で測定が可 能で,多様なニーズへの対応が可能である.

## 3. 定常法熱伝導率測定装置

#### 3.1 概要

本装置は、平板状材料の熱伝導率を測定する定常 法熱伝導率測定装置で、熱流センサを用いた比較法 [1,2,3,4]の一種である(株式会社ベテル製, SS-H40). 試料をセットすると、加熱ヒーターとチラーによっ て、自動的に温度勾配のついた定常状態を作り出す. 熱伝導率以外にも、熱抵抗、温度、熱流量、試料厚 さ、荷重などの情報が同時に得られる.特に、試料 厚さと荷重は自動的に任意の値に設定可能である.

定常法による測定方法には、いくつか種類がある. 定常法の中で絶対法と分類される方法として、保護 熱板法があり、断熱材の測定などに用いられること が多い.この方法は、加熱板の発熱量をそのまま試 料に与える熱流量とする.絶対法として重要である が、加熱板の熱リークが測定結果に影響を与えやす いなど取り扱いに注意を要することが多い.

これに対して, 熱流センサを用いて熱流量を求め る熱流計法というものがあり, 比較法に分類される. 熱流センサの校正が必要ではあるが, 絶対法にくら べ, 装置構成が簡易で扱いが簡単であるため, 実用 測定法として迅速性や簡便性が要求される場合に 適している.

一方で熱流計法においても,測定精度が熱流セン サの精度に依存したり,測定部からの熱損失により 熱流量に誤差が生じたり,あるいは試料の界面の接 触熱抵抗の評価が必要である等,正確な熱伝導率の 算出を行うためにはいくつかの注意が必要である.

本稿では,我々が提供する定常法の測定原理を紹 介すると共に,ジルコニアの測定結果から,測定試 料自体の正確な熱抵抗,熱伝導率の算出を行った事 例を示す.

#### 3.2 測定原理

本装置の構成を図1に示す.図1に示した記号の 意味を表1aに,添え字の意味を表1bに示す.本装 置は,ヒーターによる加熱部とチラーによる冷却部, 2つの熱流センサ,測定試料を固定する2つの銅製 カートリッジから成る.熱流量は,加熱部,冷却部 とカートリッジとで挟まれた二つの熱流センサに よって測定される.温度勾配は,二つのカートリッ ジ部の熱電対の測定値から算出される[4].

次に熱伝導率の算出過程を示す.加熱側と冷却側 のそれぞれの熱流センサで測定される電圧値 *E*<sub>1</sub>, *E*<sub>2</sub>,および熱流の経路面積*A*とすると,算出される 熱量 *Q*<sub>1</sub>と *Q*<sub>2</sub>は,

$$Q_i = \frac{A_i \cdot E_i}{H_i} \ (i = 1, 2)$$
 (1)

理論上,加熱ヒーター部からの熱流量と,二つの熱 流センサで計測される熱流量は等しいが,実際には カートリッジや試料側面からの熱伝達などにより, 熱流の一部は損失する.したがって,二つの熱流セ ンサの計測値の平均値を熱流量 $Q_{\rm m}$ とすると,



図1 定常法熱伝導率測定装置の構成図

記号	意味
λ	熱伝導率/Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
d	距離または厚み/m
Α	面積/m <sup>2</sup>
R	熱抵抗/KW-1
Т	温度/K
Q	伝熱量/W
Н	熱流センサの感度定数/VW <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>
E	熱流センサの測定値/V

表 1a 定常法熱伝導率測定装置の模式図の記号

表1b 定常法熱伝導率測定装置の模式図の添字

添字	意味
S	試料
m	測定領域
С	カートリッジ
F	カートリッジと試料の界面
1	高温側
2	低温側

$$Q_m = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \tag{2}$$

加熱側, 冷却側それぞれに取り付けられた熱電対に よって計測された温度を $T_1$ ,  $T_2$ とすると, 両熱電対 に挟まれた区間の熱抵抗 $R_m$ は,

$$R_m = \frac{T_1 - T_2}{Q_m} \qquad (3)$$

熱抵抗 *R*<sub>m</sub>には,両熱電対に挟まれた区間のカート リッジの熱抵抗 *R*'c<sub>1</sub>, *R*'c<sub>2</sub>と試料両面の接触熱抵抗 *R*<sub>F1</sub>, *R*<sub>F2</sub>が含まれているので,試料の熱抵抗 *R*<sub>s</sub>は,

$$R_{s} = R_{m} - R'_{c1} - R_{F1} - R_{F2} - R'_{c2} \quad (4)$$

ここで,温度測定部から,カートリッジと試料の接触面までの距離 d'。,カートリッジ厚さ dcを用いる

$$E_{c1} = R'_{c2} = \frac{d'_{c}}{\lambda_{c} \cdot A_{c}} = R_{c} \frac{d'_{c}}{d_{c}} \qquad (5)$$
$$R_{c} = \frac{d_{c}}{\lambda_{c} \cdot A_{c}} \qquad (6)$$

両面の接触熱抵抗の和 R<sub>F</sub>は,

$$R_F = R_{F1} + R_{F2}$$
(7)

よって,

$$R_s = R_m - 2R_c \frac{d'_c}{d_c} - R_F \quad (8)$$

測定試料の熱伝導率 *2*<sub>s</sub>は,測定試料厚さ *d*<sub>s</sub>,接触 面積 *A*<sub>s</sub>として,

$$\lambda_s = \frac{d_s}{R_c \cdot A_s} \tag{9}$$

実際の測定では、式(7)での接触熱抵抗分  $R_F$ を差し 引かないで、熱伝導率を計算している.したがっ て、実際の測定で算出される熱抵抗  $R_{s+F}$ は、

$$R_{s+F} = R_s + R_F = R_m - 2R_c \frac{d'_c}{d_c} \quad (10)$$

また, 実際の測定結果 *A*<sub>s+F</sub> は,

$$\lambda_{s+F} = \frac{d_s}{R_{s+F} \cdot A_s} \tag{11}$$

以上のように、定常法で直接計測される熱伝導率 は、接触熱抵抗の影響を含んでいる.次項では、厚 みの異なる複数のジルコニアの測定結果から、接触 熱抵抗を始めとする測定試料以外の熱抵抗を差し 引き熱伝導率を求める.

#### 3.3 測定条件及び測定結果

測定試料は、外形 40mm 角、厚さ1,2,3mmの 三種類の ZrO<sub>2</sub>(株式会社ニッカトー製、ジルコニア セラミックス(YTZ))である.試料と銅製カート リッジの接触面に熱伝導グリスを塗布する場合と しない場合の2つの測定条件下で測定を行った.表 2に測定条件を示す.表3に測定結果を示す.試料 の熱伝導率は厚みが薄くなるにしたがって低下す る.また、熱伝導グリスを塗布した場合のほうが、 熱伝導率の低下の度合いは緩和される. 試料は熱的 にほぼ均一で厚みが異なっても同等の熱伝導率と 考えられるため, 試料以外の熱抵抗が影響している と予想される.

表 2 測定条件

項目	条件			
外形	$40$ mm $\times 40$ mm			
厚さ(呼び値)	1mm, 2mm, 3mm (3 種)			
ヒーター温度(高温側)	60°C			
チラー温度(低温側)	23°C			
荷重	500N			
熱伝導グリス	塗布無し、塗布有り			

表 3 熱伝導率測定結果

熱伝導 グリス	厚さ (測定値) [mm]	熱伝導率 [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	熱抵抗 [KW <sup>-1</sup> ]
塗布無し	3.00	2.79	0.672
	2.01	2.52	0.498
	1.01	2.00	0.315
	3.03	3.37	0.563
塗布有り	2.03	3.24	0.391
	1.04	3.11	0.209

## 3.4 接触熱抵抗の評価

前述したように、本測定方法は接触式であるため、 試料と銅製カートリッジの間には接触熱抵抗が存 在する.接触熱抵抗の評価の為に、縦軸を熱抵抗値、 横軸を試料厚さとしたグラフを示す.熱伝導グリス を塗布した場合が図2、塗布しない場合が結果の図 3 である.

それぞれのグラフには、各測定点を線形近似した 式を示した.厚みがゼロのとき、試料の熱抵抗のみ が計測されていれば熱抵抗もゼロとなるはずであ るが、切片が存在する.試料自体の熱抵抗以外の熱 抵抗が含まれている.従って、測定結果から切片の 熱抵抗値を差し引いたものが、試料のみの熱抵抗と 考えられる.また、グラフの傾きAは試料厚さ1m あたりの熱抵抗を示すので、A[KW<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]となる.し たがってこの場合の、試料の接触面積 *s*=0.0016[m<sup>2</sup>] であるから、熱伝導率*A*は、

$$\lambda = \frac{1}{A \cdot s} = \frac{1}{0.0016A} \tag{12}$$

となる.

図2及び図3における、グラフの切片の値、グラ

フの切片の値を考慮して算出した熱伝導率, グラフ の傾きから算出した熱伝導率をそれぞれ表 4 に示 す.

熱伝導グリスを塗布した場合の熱抵抗(グラフ の切片の値)は、塗布しない場合に比べて、5分の 1程度となり、熱伝導グリスによる接触熱抵抗の低 減効果が確認できる.



図 2 熱伝導グリスを用いない場合の熱抵抗と試 料厚さの関係



図3 熱伝導グリスを用いた場合の熱抵抗と試料 厚さの関係

それぞれの厚みの試料について測定された熱抵 抗から、切片の熱抵抗を用いて補正を行うことで、 厚みによらずほぼ一定の熱伝導率が得られ、傾きか ら熱抵抗を計算した場合の値とも相対誤差 1.5%以 内で一致している.また、熱伝導グリスの塗布の有 無にかかわらず熱伝導率は 1%程度で一致している. 以上のことから、接触熱抵抗の影響が効果的に除去 されていることが分かる.

## 3.5 定常法熱伝導率測定装置のまとめ

本装置は熱流計法の利点である簡易な構造を生

かして,製品としての信頼性やユーザビリティを向 上させている.また,厚み及び圧力を自動で制御す る機能も搭載し,各種の材料を効率的に評価できる. 本手法は接触熱抵抗の影響を含む計測法ではある が,本稿で示したように効果的な補正方法も確立し ている.今後は,測定の不確かさ評価などを進めて さらなる測定精度の向上を進めていく予定である.

表4 接触熱抵抗を考慮した熱伝導率測定結果

熱伝導 グリス	厚さ (測定値)	熱抵抗 (切片)	熱伝導率 [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]		
	(例足値) [mm]		切片から	傾きから	
			計算	計算	
	3.00		3.50		
塗布無し	2.01	0.136	3.47	3.49	
	1.01		3.52		
塗布有り	3.03		3.53		
	2.03	0.026	3.48	3.53	
	1.04		3.55		

# 4.スポット周期加熱放射測温法熱拡散率測定装置4.1 概要

本装置は、シート状及び薄板上の熱拡散率を測定 する熱拡散率測定装置で、比熱容量及び密度から熱 伝導率への換算も可能である(株式会社ベテル製、 サーモウェーブアナライザ TA33/35). 試料の厚み 方向と面内方向の測定が可能で、例えばグラファイ トシートのように厚み方向と面方向で熱拡散率の 大きく異なる試料の測定に最適である[5,6]. また、 試料をスポット的に加熱することから、測定時の空 間分解能が高く、試料の場所ごとの熱拡散率を測定 するマッピング測定も可能である.本稿では、測定 原理の概要を解説した後、樹脂と金属を積層した材 料の厚み方向と面内方向の熱拡散率の異方性を評 価した結果を紹介する.

#### 4.2 測定原理

試料を周期的に加熱し、その温度応答を計測する 熱物性値測定法を周期加熱法と呼ぶ.また、物質中 を伝搬する温度変化のことを温度波と呼ぶ.温度波 は物質中を伝搬しながら急速に減衰し、ほぼ一周期 で減衰する.

周期加熱源  $P_{0}e^{i\omega t}$ によって熱拡散率 $\kappa$ の試料表面 をスポット加熱すると、加熱点における温度の交流 成分は  $T_{ac}=T_{0}e^{i\omega t}$ と表される.周期加熱源  $P_{0}e^{i\omega t}$ が周 辺に誘起する温度伝播は次式で表せる.

$$T_{\rm ac} = \frac{P_0}{4\pi\kappa rc} \cdot e^{-kr + i(\omega t - kr)}$$
(13)

*c* は単位体積あたりの比熱容量, *r* は点熱源からの 距離, *k* は次式で表される温度波の波数である.

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} = \sqrt{\frac{\pi f}{\kappa}} = \frac{1}{\mu} \tag{14}$$

ここでκは熱拡散率, μ は熱拡散長である. (13)式における温度波の位相は,

$$\theta = -\sqrt{\frac{\pi f}{\kappa}} \cdot r \tag{15}$$

で与えられる.

図 4 にスポット周期加熱放射測温法の模式図を 示す. 試料は表面から周期変調されたレーザー光に より周期加熱される. 裏面から放射温度計により, レーザー光による温度応答が検出される. 温度応答 の検出位置は, レーザー光の照射方向に直行した方 向にメカニカルステージで移動できる.

面内方向の熱拡散率を測定する際は、(15)式の rを加熱点からの距離 l とし、横軸に距離 l、縦軸に 位相  $\theta$  をプロットする.得られたグラフの傾きは  $a=-(\pi/\kappa)^{0.5}$ となるので、熱拡散率 $\kappa$ は、

(16)

$$\kappa = \pi f/a^2$$

となる.

加熱変調周波数を固定し位相の距離依存性を計 測し,距離に対する位相の傾き *a* を導出し,これを 上式(16)に代入して熱拡散率 *κ*を求める.加熱点と 検出点の距離を変化させながら計測することから 距離変化法と呼ばれる.

厚み方向の熱拡散率を測定する際は(15)式のrを 試料の厚さdとし、横軸に周波数の平方根 $\sqrt{f}$ ,縦軸 に位相  $\theta$ をプロットする.得られたグラフの傾き は  $b = - (\pi/\kappa)^{0.5}d$ となるので熱拡散率  $\kappa$ は、

$$\kappa = \pi \, d^{2}/b^{2} \tag{17}$$

となる.

加熱点と検出点を同軸にして,周波数に対する位 相の変化を計測し,得られた周波数と位相の関係か ら傾き b を導出し,これを上式(17)に代入して熱 拡散率  $\kappa$ を求める.周波数を変化させながら測定 することから周波数変化法と呼ばれる.

今回の測定対象試料は等方的な構造ではなく熱 拡散率の異方性があると考えられるため,正しく熱 拡散率を求めるためには試料の厚みと熱拡散率の 異方性を考慮した解析モデルが必要となるが,(18) 式で定義する熱的厚みを導入することでごく簡単 な変換で,数学的には等方的な場合とまったく同じ 取り扱いが可能になる[5].

$$d' = \sqrt{\frac{\kappa_{\parallel}}{\kappa_{\perp}}} \cdot d \tag{18}$$

d'は試験片の熱的厚みで、dは試験片の幾何学的 厚みである.  $\kappa_{\parallel}$ は面内方向の熱拡散率で、 $\kappa_{\perp}$ は厚み 方向の熱拡散率である.  $\kappa_{\parallel}$ 及び $\kappa_{\perp}$ をフィッティング パラメータとみなし前記した距離変化法で得られ た測定値をカーブフィッティングする.

測定結果の検証の為,認証値または,校正値を持 つ試料を測定した.産業技術総合研究所より頒布さ れたアルミナチタンカーバイド(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC)認証標 準物質NMIJ CRM5807-aで,300Kにおける熱拡散率 の認証値が9.51x10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>である(相対拡張不確か さ6.1%,包含係数k=2)[7].産業技術総合研究所に より値付けされた熱拡散率校正証明書付き等方性 黒鉛で,298Kにおける熱拡散率が92.5x10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>で ある(相対拡張不確かさ4.6%,包含係数k=2)[8]. アルミナチタンカーバイド及び等方性黒鉛を測定 した結果は,表5の通り認証値又は校正値と比較し て±5%以内で一致した.



図4 スポット周期加熱放射測温法の測定模式図

表5 検証用標準試料の測定結果

		熱拡散率 /x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			
試料名	測定方向	测学体	認証値		
		侧足恒	又は校正値		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiC	厚さ方向	9.79	0.51		
	面内方向	9.04	9.31		
英士州田朳	厚さ方向	91.8	02.5		
寺力性羔蛨	面内方向	92.5	92.5		

## 4.3 測定条件及び測定結果

測定試料は、コンデンサ用材料(ルビコン株式会

社製)で外形 20mm 角,厚さ 0.64mm である. 蒸着 アルミニウムとアクリル系樹脂を 2395 層積層した ものである. 試料の模式図を図 5 に示す.

スポット周期加熱放射測温法により面内方向に 直行した 2 方向及び厚み方向の熱拡散率を測定し た.表6に測定結果を示す.面内方向は厚み方向に 比べて熱拡散率が高い.これは,熱拡散率の高い蒸 着アルミニウム層が試料の面内方向に成膜されて いるため,この方向に熱が拡散しやすくなっている ためである.また,厚み方向はアクリル系樹脂及び 蒸着アルミニウムを積層した界面と直交しており, 熱が拡散する際に多数の界面を通過することで熱 拡散率が低くなっている.



図5 測定試料の模式図

表6 コンデンサ用材料の測定結果

測定方向	熱拡散率 /x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
厚み方向	0.11
面内方向1	1.83
面内方向2	1.83

# 4.4 スポット周期加熱放射測温法熱拡散率測定装置のまとめ

本装置は、シート状及び薄板状の熱拡散率を測定 する熱拡散率測定装置であるが、蒸着アルミニウム 及びアクリル系樹脂を積層した試料を測定するこ とで、試料の構造を反映した熱拡散率の異方性が計 測できることを示し、このような材料の測定に有効 であることが確認できた.

#### 5. まとめ

本稿では,定常法熱伝導率測定装置及びスポット 周期加熱放射測温法の原理と測定事例を紹介した. 比較的大きな試料を圧力や厚みを制御しながら測 定可能な定常法と,薄いシート状や板状の試料の熱 拡散率の異方性を非接触で測定可能な非定常法を 適材適所で活用することで,様々な材料の詳細な熱 伝導特性が評価できる.当社では今後も高機能な熱 伝導率測定装置を開発製造販売していく予定であ る.

定常法熱伝導率測定装置の開発に際しては,名古 屋市工業研究所様及び富士高分子工業株式会社様 のご協力を頂きました.深く御礼申し上げます.

ルビコン株式会社向山様には、スポット周期加熱 放射測温法用試料をご提供頂きました.深く御礼申 し上げます.

#### 参考文献

- [1] ASTM D5470-17, ASTM International.
- [2] ASTM C518-17, ASTM International.
- [3] 大串哲郎, 杉浦聡, 渡邉聡, 平田拓哉, 熱物性, 28 (2014) 22-28.
- [4] 梶田欣,服部真和,立松昌,松原和音,第55回 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2019) E124.
- [5] Kato, H., Baba, T., Okaji, M., "Anisotropic thermaldiffusivity measurements by a new laser-spotheating technique", Meas. Sci. Technol., 12 (2001) 2074-2080.
- [6] 羽鳥仁人, 粟野孝昭, 小林千賀子, 林健, 堀江航 太, 西剛史, 太田弘道, 第 39回日本熱物性シン ポジウム講演論文集 (2018) E112.
- [7] 熱拡散率認証物質 (NMIJ CRM5807-a) データ シート,産業技術総合研究所 (2016).
- [8] 羽鳥仁人, 大槻哲也, 久保田隆彦, 関根誠, 八木 貴志, 阿子島めぐみ, 第 37 回日本熱物性シンポ ジウム講演論文集 (2016) C311.

## 人と熱との関わりの足跡(その9) -東北大学片平地区における極低温の研究-

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 9) -Research of Low Temperature Science in the Katahira Campus of Tohoku University-

> 野島 勉(東北大学) Tsutomu NOJIMA (Tohoku University) e-mail: t.nojima@tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

1952年,東北大学片平地区の金属材料研究所(金研)にヘリウム液化機が日本で初めて導入され,国 内での絶対 0 度に迫る本格的な極低温研究が始ま った.金研の低温施設には当時全国から多くの研究 者が集まり,昼夜を問わず盛んに実験研究がなされ るとともに,ここで培われた低温科学の知識が国内 の研究機関に普及した.これらの歴史より,東北大 学金研は「日本の低温科学発祥の地」と呼ばれる. しかし,実はそれ以前からのヘリウム液化に向けた 努力と奮闘があった.

学内においてもヘリウム液化機導入後,低温科学研究は片平地区を中心として広範囲な分野へと波及し,液体ヘリウムの需要が急増することとなった. これに応えるため,1971年に全学共同利用施設となる「低温センター」が設立され,その後,現在の「極低温科学センター」へと発展を遂げている.最近では,東北大学全体での液体ヘリウムの使用量は年間25万リットルにも達するようになった.これは全国的に見ても屈指の値である.この発展は,へ



図1 当時の金属材料研究所低温研究棟 (齋藤報恩会より極低温科学センター低温科学 部へ寄贈された写真)

リウム液化機の能力向上だけでなく、ヘリウム供給・回収体制のソフト・ハード両面での進化に支えられたものであるが、同時にこれを可能にした歴代の低温関係の研究者、および技術職員の献身的な努力も見逃せない.

本稿では、過去の記録や筆者が見聞きした情報・ 体験を基に東北大学片平地区における極低温の研 究に係る歩みについて紹介する.2021 年に東北大 学極低温科学センターは設立 50 周年を迎えた.偶 然ではあるが、同年に本稿のきっかけとなった日本 伝熱学会創立 60 周年記念でのシンポジウム講演の 機会を与えられたことに、何かの縁を感じている次 第である.

## 2. 東北大学における液体ヘリウム供給体制の歩み 2.1 ヘリウム液化時代以前の奮闘(1929-1952)

東北大学での低温研究の歴史は、冒頭で述べた 1952年より20年以上前の金研低温研究室建設まで さかのぼることができる[1-4]. 大正の末期(1925年 頃),極低温における金属研究の重要性を認識した 金研初代所長の本多光太郎先生は,日本における低 温科学研究の開拓の必要性を感じ,低温研究室の建 設を立案した.当時欧州留学中であった青山新一先 生(当時理学部化学教室助教授,後に金研教授)を 担当者に指名し,命を受けた青山先生は,液体ヘリ ウム発祥の地である,オランダライデン大学 Kamerlingh Onnes 研究所滞在を経て日本に帰国し た. その後, 1929-1930年にかけて, 財団法人斎藤 報恩会(仙台)から主な援助を受け、空気液化機お よび水素液化機を含む,低温研究棟が建設された (図 1). 特に水素液化機は翌 1931 年に入所した神 田英蔵先生(後に金研教授および低温センター初代 センター長)により整備・運転され,液体窒素温度 (77 K) よりはるか低温の液体水素温度(20 K) ま での研究が可能となった.ここに日本の低温科学研 究の礎が築かれたわけである.

当時の世界的な情勢を見ると、1908年にオラン ダライデン大学の Kamerlingh Onnes が大気圧での 沸点 4.2K のヘリウムの液化に成功し, 1911 年にこ れを用いた水銀の超伝導を発見していた. 1926 年 には断熱消磁による 1 K 以下の極低温到達への可 能性も提案され, 1933年にバークレイの Giauque が 0.25 K に達していた. 一見, 日本の低温研究はかな り後発であったように思えるが、1930年当時、液体 ヘリウムが使える研究施設は世界中でも, ライデン 大学の他, ドイツの Physikalisch- Technische Reichsanstalt (PTR), ロシアのモスクワ大学, カナ ダのトロント大学等と数える程しかなかった[1,3]. 当時の液化方式は Onnes 型と呼ばれるカスケード 方式(液体窒素および液体水素で冷却したヘリウム ガスを Joule-Thomson 膨張で液化させる方式)を基 にしたものであり、液体水素を必須としていた.加 えてさらにこの方式では大量の液化が難しかった ことが広く普及しなかった要因と思われる.よって 国内初のヘリウム液化を目指して, すでに製品化の 段階にあった水素液化機(最初の水素液化は 1892 年 Dewar による)を導入したのは、賢明な判断であ ったと思われる.

とはいえ液体水素温度の研究でも当時としては 日本で初めてのこともあり、デュワー (魔法瓶) 用 のガラス材料の選別から始まって諸所の低温技術 に関する苦労があったようである[1,5,6]. 1934年 に英国ケンブリッジ大の Kapitza が、液体水素を使 わず、断熱膨張と Joule-Thomson 膨張のみで大量の ヘリウム液化が可能となる手法を開発して以降,青 山先生らは,この方式でのヘリウム液化機実現へ向 け新たな舵を切った[7,8]. しかし Kapitza 型は材料 および加工の両面において精度の要求が厳しかっ た. その上, 第二次世界戦中における資材面, 工作 面での難や国内の基礎研究への厳しい風当たり等, 様々な不運が重なり, 試作のヘリウム液化機は未完 成のまま終わった. 当時の時代背景や諸事情につい ては文献[2,3-4,6]を参照されたい. これとは別に神 田先生は 1938 年に脱着法という手法を用いて 6K というところまで迫っていたことも記しておきた い[3, 4]. ヘリウム液化を目指してあらゆる方向か らたゆまぬ努力が続いていた.

## 2.2 **ヘリウム液化機の導入と発展**(1952-1971) 第二次世界大戦敗戦後の混乱からしばらくして,

日本全体における研究復興への気運が高まるとと もに,金研でも袋井忠夫先生や神田先生の研究室で ヘリウム液化に向けて研究が再開していた. 1950 年頃,袋井先生が Jounal of Applied Physics の広告 で,ヘリウム液化機が市販されていることを見つけ, 同研究室の渋谷喜夫先生らに相談された. 彼らは, 「すでにヘリウム液化を誇る時代から,液体ヘリウ ムを利用して極低温物性を研究する時代になった という」観点からこれを購入すべく,政府(当時文 部省) への予算要求に奔走された. これが A. D. Little 社製の Collins 式液化機である(図 2). その後 様々な国内関係各所の先生方の尽力もあって要求 が認められ, 1952 年に日本初となるヘリウム液化 として金研に導入された.

Collins 式液化機液化機は図3にその概要を示す よう、2機の断熱膨張エンジンを有し、これにより ヘリウムを約10Kまで冷却後、Joule-Thomson膨張 により4Kまでさらに冷却して液化するという Kapitza型の延長にあるものであった.膨張エンジ ンがレシプロからタービンに変わった現在のヘリ ウム液化機においても、その基本的な設計観念は受 け継がれている.

この液化機は当時としても大変高価であり,戦後 の復興途上にある国内情勢および国際情勢(当時, 朝鮮戦争も勃発し GHQ の支配下にあった)より, 2代目は当分買えないと考えられた.そこで予算交 渉時の文部省の意向もあり,国内の物性研究者に共 同利用されることとなった.いわば現在の全国共同 利用施設の走りとなったわけである.導入までの苦 労は袋井先生や渋谷先生の記録[2,9]に残っている.

導入直後, 金研内でのヘリウム回収・精製設備も



図2 日本初の Collins 式ヘリウム液化機 左:設置当時の写真(東北大学資料館写真デー タベースより),右:現在金属材料研究所展示



整備されるとともに、国内の大学、研究機関から、 長い人は半年、短い人でも数週間滞在して、盛んな 低温研究がなされた.こうやって東北大金研で培わ れた極低温研究の手法や設備設計、低温技術のノウ ハウは全国に普及することとなった.この間、ヘリ ウム液化能力も4L/hから圧縮機を増強することに よって8L/hに上昇され、実験に使用された液体へ リウム量は、年間600-800Lに達した.当時の実 験装置の容量が3-5L程度とすると、一年中休み なく実験が行われていたことが伺える.

金研でのヘリウム液化機導入が成功を収めた背 景に,液体水素時代に培われた研究者および技術職 員(当時技官)の高い技術力と情熱があったことは 特筆すべきである. 製品化されてまだ間もないこと もあり、この頃の液化機および圧縮機等の周辺機器 は、日常的に故障が発生していたらしい.特に技術 職員の方々は液化機および周辺機器の分解修理を 含むメンテナンスを自力で実行されていた.これは 低温(熱力学)・真空・高圧・機械・電気にわたる 幅広い知識と経験を持ち合わせないと不可能なこ とである. 故障があった際には、日曜、祝日でも研 究最優先とばかり献身的に対応されたという話で ある[10]. また、この時代の液化に使われた圧縮機 は騒音が大きく,多くの技術職員は耳を悪くしたと いう話も聞く.現在とは比べ物にならない劣悪な環 境の中,頑張ってこられたことが想像される.

金研でのヘリウム液化機導入が成功裏に進むに つれ、Collins 式液化機は1958年の電気試験所(現 NIMS)を皮切りに、東京大物性研、大阪大等々と 様々な大学、研究機関に導入されることとなった. これにより全国共同利用施設として金研ヘリウム 液化機の使命は徐々に役目を終えることとなる.

## 2.3 東北大学低温センター発足(1971-1996)

金研低温施設のヘリウム液化機は,全国的な共同 利用研究のみならず,東北大学内の低温科学研究も 著しく発展させた.当初から液体ヘリウムの利用範 囲は,金研から片平地区にあった理学部,工学部, 電気通信研究所(通研)へと広がっていたが,他の 部局からも利用の要望も増え,8L/hの Collins 型液 化機では学内需要に応えられない状況になってき た.実際,供給量は1970年には年間4,000Lに迫る 勢いであった.そこで初代センター長となる神田先 生をはじめとする金研の関係者,片平地区低温研究 関係者らの尽力により,1971年に全学共同利用施 設となる低温センターが金研の構内に新しい建屋 とともに設立された(図4).

低温センターは、液体ヘリウムを供給と低温実験 機器開発という2本柱の使命をもって組織構成さ れた.単なる液体ヘリウムの供給のみならず、低温 物性物理学、低温工学の先導的発展を図った訳であ る.供給関係では、国産第1号機となる日本酸素社 製60L大型ヘリウム液化機(図5)、同社製ヘリウ ム回収・精製圧縮機、総量1,260m<sup>3</sup>の回収ガスボン ベカードル、フィリップス社製水素液化機等の設備 が主力機器として新たに導入された.60L/hという ヘリウム液化能力は当時としては飛びぬけて大き なものであるが、これをさらに国産製としたことは、 ヘリウム液化機開発に挑んできた神田先生の強い 思いによるものと聞く.神田先生は青山先生ととも



図4 1973年当時の低温センター建屋 (東北大学低温センター1973年広報誌より)

に前述の Collins 型液化機導入以前から,日本酸素 と共同してヘリウム液化機の試作を行っていた.へ リウム液化機の完全国産化は関係者の悲願でもあ ったように推測される.

機器開発関係では,共同利用実験室を設け,そこ に当時としては最高スペックとなる10Tの磁場を 発生する NbTi 超伝導マグネットとクライオスタッ ト,NMR 用 6 T 高均一超伝導マグネット,リーク ディテクター等の実験機器が整備された. 10 T 超 伝導マグネットは当初予定されたスペックの磁場 が出せず,当時機器開発の担当をされていた金研の 能登宏七先生や坂爪新一先生は苦労されたようで ある.線材の見直しをして、まき直しを行うことに より予定の性能を引き出すことに成功した.その後, 1978年に8mKまでの極低温,9Tまでの強磁場で 実験が行える<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 希釈冷凍機(米国 SHE 社製) も整備された. 希釈冷凍機の納入にまつわる詳細は 金研の小林典男先生の記事が極低温科学センター だよりに掲載されている[11]. これら共同利用機器 に関して、一日で消費される液体ヘリウム量が 10 Tマグネットで15L,希釈冷凍機で20Lと,当時 としてはかなり大きかったことも目を引く. つまり 通常の研究室では簡単に維持できない装置を用い た実験が,低温センターの豊富な液体ヘリウム供給 に支えられて可能となった訳である. 実際, これら の装置は学内のみならず学外からの研究者にも頻 繁に利用され、利用日数は 10 T マグネットで年間 300日、希釈冷凍機で150日に達した.

液体ヘリウム供給関係に話を戻すと,低温センターの目新しい機能として,各部局に設置されたサブ センターの存在が挙げられる.供給回収フロー図



図 5 日本酸素社製 60L ヘリウム液化機 (写真:東北大学極低温科学センター蔵)

(図 6) に示すよう、低温センターより遠く離れた 部局の研究者は、サブセンターにトラック運搬され た 100 L や 50 L の中型容器から,実験装置や小分 け容器へ液体ヘリウムの汲み込みができ、サブセン ター内で使用後のガスヘリウム回収もできるよう になった. 低温センターへ直接出向かなくてもサテ ライトとして機能するサブセンターで主な用事が 済む仕組みである.これにより,研究者にとって液 体ヘリウムの利便性はかなり良くなり,液体ヘリウ ムの需要やそれを利用する研究分野は年々と増加 していった.サブセンターは1971年に金研と工学 部(青葉山地区), 1972年に通研(片平地区), 1976 年に理学部(青葉山地区), 1981年に科学計測研究 所(科研,片平地区)へと順次設置されていった. 但し人員の追加は厳しく,どこのサブセンターも各 部局所属の技術職員によって運営されていた. 低温 センターとサブセンター間の情報交換や技術交流 は自然となされ、各部局の技術職員は「低温」とい うワードで連携されていた(低温関連の技術職員に よる忘年会や旅行といった交流も頻繁に行われて いたらしい).

一方,低温センターではサブセンターで充填され た回収ガスボンベを替わりの空ボンベに交換し,低 温センターヘトラックで運搬するという日々の業 務が発生することとなる.一回の運搬で可能な量は 5本組ボンベカードル35m<sup>3</sup>(液体に換算して50L) である.これは年間10,000L供給した場合の一日 の使用量に相当する.これに加え,前述の液体へリ ウム中型容器の供給・回収のための運搬も加わるこ とになる.ヘリウムの蒸発は待ってくれないため, どんな悪天候の中でも必要となれば,低温センター



図6 低温センターとサブセンターのヘリウム供給・回収フロー図

の技術職員はサブセンターにトラックで出向いた. 低温センターに昔から在籍していた技術職員との 世間話では,運搬にまつわる思い出話が今でもよく 出てくる.

さて順調に動き始めたように見えた低温センタ ーの 60 L 液化機および周辺機器は、設置から5年 を待たず膨張エンジントラブルや圧縮機ピストン 破損等といった問題を起こすようになった[12]. そ れでも Collins 型液化機の時代から培われた技術力 により,長期の中断なく安定供給がなされていたよ うである. 10 年後の 1981 年には液体ヘリウム使用 量は 20.000 L に達し、15 年後の 1986 年までに 4 年 計画の液化機の大規模改修を行いながらも年間使 用量が40.000Lに達している.20年後の1991年で は、60.000Lとさらに増加を続け、故障続きの液化 機は満身創痍となりながらもフル稼働といってよ い状況となった(ヘリウムの汲み込みロス等を考慮 に入れると,使用量の倍以上の液体ヘリウムを製作 していた). そこでより高い液化能力を持つヘリウ ム液化機への更新が学内からも強く要望されるよ うになった.

学内の低温センター関係者の多大な尽力により, 液化機更新の予算要求が認められ,1993年にそれ までの2.5倍となる150L/hの能力を持つヘリウム 液化機(スイス・リンデ社製 TCF50型)を含むヘ リウム液化システムが導入されることとなった(図 7).この能力上昇は膨張エンジンがレシプロ式から タービン式になったこと,当時職人芸であったJT 弁をはじめするバルブ調整が自動化されたことに よる.

液化能力の上昇に加え、この3代目の液化機の新 たな特徴は、液化機本体がヘリウムガスの精製機能 を内部に持つことであった.ユーザーより回収され てきたヘリウムガス中には、空気をはじめ多くの不 純物が含まれており、これらが低温で固化すると液 化機の膨張エンジンに大きなダメージを与える.よ って、2代目の液化機までは、図6に示すよう、ヘ リウムを液化する前段階として、液体窒素による精 製処理を行わなければならなかった.内部精製装置 の追加により、この作業の必要性がなくなり、高い 液化能力も相まって技術職員の労働環境は大幅に 改善されたと言える.この結果、1996年には70,000 L まで増加した液体ヘリウムの需要へも十分対応



図7 リンデ社製 150L ヘリウム液化機 (写真:東北大学極低温科学センター蔵)

できるようになった.

#### 2.4 極低温科学センターへの発展(1996-現在)

東北大学における極低温科学研究の新たな飛躍 を期して、1996年に「低温センター」は理学部物理 学科で独自に運営されていた「理学部附属極微少エ ネルギー物理学実験施設」と統合し、「極低温科学 センター」として新たに発足することになった.こ れまでの低温センターは極低温科学センター低温 科学部として、片平地区の金研、通研、科研、流体 研、反応研等の研究所群への低温研究支援を、極微 少エネルギー物理学実験施設は極低温科学センタ ー極低温物理学物部として、青葉山地区の理学、薬 学、工学研究科の支援を行うよう分業体制が敷かれ た.これにより片平地区の低温科学部では、それま で行っていた青葉山地区への液体へリウム配達や ガスボンベ回収業務がなくなった.

この改組と同時に、片平地区では、関連部局から の予算協力を得て、地下の共同溝を通して液体ヘリ ウムを使用する建物をつなぐヘリウムガス回収網 が建設された(図8).この結果、建物毎に回収配管 とガスバッグ、回収ガスを圧送するための小型のベ ビコンを設置すれば、どこでも液体ヘリウムを用い た実験が可能となった.これに伴いサブセンターに 設置された回収ガス圧縮機と高圧ガスボンベは廃 止され、ガスボンベのトラックによる運搬業務もな くなった.センターの業務負担が低減すると同時に 研究者の液体ヘリウムの利便性はさらに大きくな り、結果として液体ヘリウムの需要はさらに増加す ることとなった.極低温科学部による青葉山地区へ の液体ヘリウムでの供給体制が整う 2000 年までに は、年間使用量が 120,000 L までに達した.

それまで調子よく働いていた 3 代目ヘリウム液 化機も 2006 年頃から,電子部品やバルブ類の故障 が頻繁に起こるようになり,同年液化用圧縮機も大 きな故障に見舞われたった.通常,液化機およびそ の周辺機器の寿命は,概ね 10 年と言われており, この不具合は設置から 13 年間のフル稼働状態に近 い酷使によるものと考えらえた.そこで更なる液化 能力と効率向上および省電力化を狙った,液化シス テムの更新の計画を立てることとなった.

大学内でのマスタープランへの組み入れ,さらに 文科省への予算要求を含め,様々の関係者の協力を 得て,2009年度に200L/hの能力をもつ液化機(リ ンデ社製L280型)を含む,4代目のヘリウム液化 システムへの更新が実現した(図9).このシステ ムではこれまで以上の高効率化(液体ヘリウム1L 当たりの電力量と液体窒素量の低減)も図られたが,



図8 東北片平キャンパスヘリウムガス回収網(赤線)と共同溝内の配管の写真(左上)





特筆すべき新規性は、小分け容器に組み込むための、 液体ヘリウムポンプが導入されていることである. これにより、これまで 30 分程度かかっていた 100 L小分け容器への汲み出しが、5 分程度で済むよう になった.この効果もあって 2018 年にまでには、 年間使用量が 160,000 Lを超えるまでに至った.供 給先も、従来からあった金研、多元物質科学研究所 (多元研、旧科研・反応研・素材研が統合)に加え、 2009 年に原子分子材料科学高等研究機構、2014 年 より星陵地区の東北メディカルメガバンクが新た に加わった.

図 10 に 1971 年の低温センター設立から現在に 至るまでの東北大学全体の液体ヘリウム使用量の 推移を示す. 2000 年以降は,極低温物理学部による 青葉山地区への供給の合算となっているが,概ね 2/3 が低温科学部(片平地区)分である.これまで 述べて来たように,東北大学での液体ヘリウムの使 用量は年々増加の一途をたどってきた. 2009 年か ら 2012 年は,液化システム更新と東日本大震災の 影響,2020 年以降は新型コロナ感染症の流行が原 因で,実験数が減り使用量が落ち込むものの,それ らを除くと年間 250,000 L(片平地区で 160,000 L) という全国でも屈指の使用量を記録している.今後 も急増こそはないにしても,減少することはないと いう見込みである.

あらためて振り返って見ると,液体ヘリウム供給 の上昇は,その時々でのネックとなっていた問題 (液化能力,内部精製機作業,回収ガス運搬作業, ヘリウム汲み出し時間)を順次改善したことによる と気づく.もちろん,これらがうまく機能したのは,



ハード面での変化に対し、現場の職員が新たな機能 への理解, それに伴うルール作りとシステム構築, ユーザーへの情報発信や個別指導等々とソフト面 でも柔軟に対応できたからである. ヘリウムの注文 を一つとっても、現在ではかつての電話・ファック スから Web サイトからの注文へと変わり、 リアル タイムでの回収率や使用料金がわかるようなシス テムへと進化させたことが,ユーザーの利便性につ ながっている.また近年の高効率な液化システムの 内部は複雑であり、ブラックボックス化しているた め, 故障の際は, 分解修理という職人技だけでは太 刀打ちできず,コンピュータ制御や通信部をいかに 理解・利用して早期に原因を特定するかにもかかっ ている.これからも変貌する業務内容に、「低温」 という専門性を失うことなくいかに対応できるか が、今後の更なる発展のカギとなるであろう.

#### 3. 東北大学の極低温の研究の歴史

これまで,液体ヘリウム供給の歩みについて述べ てきたが,極低温の研究の歴史について以下簡単に 述べる.1952 年以前の液体水素を用いた低温研究 では,水素液化機を整備した神田先生の研究室の成 果が主となる.

神田先生らは来たるべく液体ヘリウム時代の準備期間として、また日本で液体水素温度(20K)を 手にした数少ない(多分当時は唯一の)研究室とし て、様々なテーマに取り組んでいた.例として、(1) 凝縮気体の物性(フッ素液体と固体)、(2)液体水素 温度までの相転移の研究(酸素の3重点以下の相転 移曲線)、(3)低温でのカロメトリー(アルコールの 液体・固体比熱,熱緩和,ガラスを含む結晶成長過 程),(4)低温での光の分光(ベンゼンやトルエンの 吸収スペクトル),(5)低温 X 線カメラ,等がある[1]. 室温や窒素温度でやってきた物性実験を,水素温度 でも同じようにできるようにするという方向性が あったように伺える.とにかく当時は何をしても相 当開拓的であったということであるし,ここで培っ た低温実験技術は後の液体ヘリウム時代において も大いに役立った.

さらに低温の数少ない研究者として,物性物理学 以外の問題も持ち込まれ,液化ガス製造の諸問題 (空気液化プラントでの爆発問題や重水素の製造) にも取り組んだ.当時の苦労や研究の詳細は文献 [1]を参照されたい.

最初のヘリウム液化機が導入された 1952 年から は、研究の方向やスピードが一変したようである. というのも Collins 式液化機の普及もあって、世界 的にも低温物理学が定着しつつあり、競争の時代に あったためである.前述したように、液体ヘリウム を利用した低温実験は全国共同利用の研究だけで なく、学内でも通研、理学部、工学部での研究に使 われていた.勉強不足なこともあり、筆者は全部の 研究を把握しきれていない.ここでは筆者の所属す る金研でのテーマの一部を抜粋する.

当時の世界的な流れとして、低温での磁気共鳴 (NMR や ESR)と超伝導を含む金属の基礎物性が あった.金研の神田先生の研究室では、古くから金 研での磁性研究の学風もあったことから、固体水素 のNMRや固体酸素の帯磁率、Fe 塩(Fe(NH4)2(SO4)2-6H2O等)やCo塩(CoCl2-2H2O等)のESRや常磁 性緩和の研究が行われた[1].特にFe塩やCo塩の 研究は、日本のお家芸となる「低次元磁性」の走り となった.これらの研究のため、断熱消磁法を用い て 0.03 K の極低温にも達していた(断熱消磁に用 いた大型水冷マグネットやガラスのクライオスタ ットは、斎藤報恩会の博物館に展示されていたが、 閉館とともにそのレプリカが極低温センター低温 科学部に移されている).

金研の袋井先生・武藤芳雄先生の研究室では,超 伝導,ドハースファンアルフェン効果,合金の輸送 特性,半導体の電流磁場効果,化合物半導体の光・ 超音波物性,高い臨界温度の超伝導化合物,といっ た低温での金属物性を開拓した[13].特に超伝導の 研究は,後に金研に設置された強磁場超伝導材料研 究センター(当時超伝導材料開発施設)での強磁場 マグネット開発にもつながる(金研で低温と強磁場 は深いつながりをもって発展してきた歴史もある).

この他,通研では超伝導エレクトロニクス等,理 学部では超伝導体,磁性体の極低温における基礎物 性等,工学部では超伝導マグネット応用等において 様々な研究が展開されるようになった.

1971年に低温センターが設立されから,その利 便性向上もあって,低温科学研究の分野はより学内 の広い範囲へと広がっていった.開設以前の金研, 通研,理学部,工学部に,教養部,科研,非水溶液 化学研究所(非水研)が加わり,それぞれ核断熱消 磁・光物性,微粒子磁性・重い電子系,分子物質の 光物性等が研究されるようになった.その後 1980 年代に入ると,歯学部(1980年),医学部,抗酸菌 病研究所(1983年),薬学部(1986年)いった部局 も液体へリウムを利用するようになった.そこでは 液体へリウムは極低温の基礎研究ではなく,SQUID (超伝導量子干渉計)といった超伝導デバイスや, MRI(NMR-CT)やNMR(分子構造解析用)装置内 の超伝導マグネットを冷却する手段として使われ るようになった.

低温センター20周年記念誌(1991年)に金研の 増本健先生(第7代低温センター長)が「液体ヘリ ウムは、かつては低温科学研究に携わる人達だけの 秘境の霊泉でしたが、液体ヘリウムの利用は今では 広く一般の科学研究における必須の実験手段にな って来ているのではないでしょうか」と述べられて いる[14]. つまり低温センター開設 20年後には、当 初基礎研究の一部でしかなかった低温科学の分野 が、低温の素子やマグネットといった機器開発へ使 われ、やがてはそれらを組み入れた低温機器利用を 含む分野まで広がったことになる.

1996年に極低温科学センターに改組されてから も、上記の分野広がりは維持されつつ、液体ヘリウ ムを使った実験数は増加した.図11に2020年の東 北大学における研究テーマの分布を示す.物性基礎 が全体の約50%、物性応用と材料研究が合わせて 約25%を占めている.化学・生物・薬学・農学研究 が15%と比較的大きな割合となるが、このほとん どがNMRに利用されている.数は少ないが、医学・ 医療関係(1%)や素粒子・原子核・放射光(0.5%) にも、守備範囲は広がっている.

共同利用機器を用いた低温実験環境の提供は,極



図 11 液体ヘリウムを利用した研究テーマ分布

低温科学センター改組後もセンターの液体ヘリウ ム供給と並ぶもう一つの柱となる業務であった (2006年の法人化後,共同利用の部分は解除された が、ユーザーの強い要望もあり現在でも実質的には 継続されている).上述の通り、低温センターの時 代では 10 T の超伝導マグネットや希釈冷凍機はそ の主力機器であったが,低温実験装置の普及やヘリ ウム供給能力の大幅な向上とともに、10 T 以上の 磁場を発生する装置は一般の研究室レベルでも所 有可能となり、1K以下の極低温に到達可能な研究 室も珍しく無くなってきた、それととともに、セン ターの共同利用頻度は減少してきた. 2000 年くら いから, 共同利用実験室の方針を「一般の研究室で は長期維持管理が難しい装置を集中管理して使い やすくする」、つまり低温を必ずしも専門としない 研究室へターゲットを変更し,実験室の再整備を進 めてきた.現在では、共同利用設備として、SOUID 磁化測定装置(MPMS)2台, SQUID 顕微鏡システ ム, リークディテクター2台, 9/11T 超伝導マグネ ット,トップローディング式 <sup>3</sup>He 冷凍機,ファラデ ー型マグネット付<sup>3</sup>He 冷凍機, ベクトル超伝導マグ ネットシステム,小型希釈冷凍機が整備されている. 特に SOUID 磁化測定装置, 各種超伝導マグネット, 希釈冷凍機の利用頻度は高く,夏期と冬期の休業期 間を除いて,常に実験室で誰かが実験している状況 に戻ってきている.この状況は今後の新既学内低温 研究者開拓へのきっかけとなるかもしれない.

## 4. ヘリウムを取り巻く環境の変化

「ヘリウムの一滴は血の一滴」とは、1952年当初

から低温センター設立後もしばらくの間,研究者の 間で使われてきた教訓である.これは当時ヘリウム ガスの入手が難しく[3],その貴重なヘリウムを苦 労して液化していたわけであるから,頷けることで ある.当時の先生方の話を聞くと,液体ヘリウムの 供給は,朝から15分刻みのスケジュールで行われ, 15分経ってもヘリウムが装置に溜まらない時は, 予冷不足・技術不足として中断されるという厳しい ものだったらしい[15].いわば供給者主導でヘリウ ム実験が行われたと言ってよいであろう.筆者が低 温の研究を始めた1980代後半には,研究室の先生 から昔話として聞いてはいたが,すでに「血の一滴」 という意識は薄れていたように思う.

一方,現在の状況を見るとヘリウムの注文は極低 温科学センターのホームページ上でいつでもでき, 100 L 単位で供給日や時間も指定して入手できる. センターの技術職員が,利用者の要望に応えて準備 する,利用者主導の体制となり,液体ヘリウムを使 った極低温実験はかなり身近になったと感じる.特 に物性科学研究では,液体ヘリウムは研究に必要な インフラの一つと言われるまでになっている.

ところが、近年「ヘリウム危機」と呼ばれるヘリ ウムの入手困難な状況が幾度となく生じるように なってきた.現在世界中で出回っているヘリウムは 天然ガスの副産物として産出され、0.3~1%のヘリ ウム濃度の天然ガスを低温分離精製することによ って得られるものである(昔はモナズ石中にあるへ リウムを高温で熱することにより抽出して得てい たらしい). しかしヘリウムを含む天然ガス田は世 界中でも米国 (57%), カタール (28%), アルジェ リア (9%), オーストラリア (3%), ロシア (2%), ポーランド(1%)といった限られた場所にしかなく (括弧内の数字は2018年の(株) ガスレビューの発 表による産出割合),日本はヘリウムの調達を 100%輸入に頼っている. 天然ガス田があればそこ に必ずヘリウムが存在するのではなく,分子が小さ く軽いため透過しやすいヘリウムを溜め込むため の,特殊な岩盤構造を持ったガス田にしかヘリウム がないのが実情である.日本は過去には米国から 95%を輸入していたが、2018年に予定された米国 土地管理局 (BLM) での備蓄ヘリウム輸出終了を見 越して、カタールにその軸足を移しつつある、2021 年の財務省統計によると米国から54%,カタールか ら44%の輸入へと変化している.いずれにせよ日本

におけるヘリウムの入手は国際情勢に左右される 不安定な要素を常に抱えていることになる.

記憶に新しいのは、2002年の米国湾岸スト、2007年の米国でのヘリウムプラントの不具合、2012年の米国での複数のヘリウムプラントの不具合と定期メンテナンス重複、2017年のカタール断交、2019年以降の需要と供給のアンバランスによるタイト化、による国内ヘリウム不足である。特に2019年以降のタイト化は、米国のシェールガス(ヘリウムを含まない天然ガス)による置き換えやBLMの民間払い出し、中国・韓国等アジア圏でのヘリウム需要国の新興等、の複合要因によるものである。この原稿を書いている2021-2022年では、これに新型コロナ感染症の影響による米国コンテナ船積荷の遅延問題も重なり、学術研究用のヘリウムが国内でほとんど入手できない状況になっている。

日本におけるヘリウムの用途は、本稿の主題であ る低温(冷却)だけでなく、多岐にわたっている. 図 12 に 2021 年の国内ヘリウム販売実績の内訳を 示す(日本産業・医療ガス協会の発表による).液 体としての利用は医療分野における磁気共鳴画像 イメージング (MRI, 16%) であり, 液体ヘリウム が磁気共鳴現象に不可欠な強磁場を発生させる超 伝導マグネットの冷却に使用される.一方,ヘリウ ムはガスとしても半導体(17%)や光ファイバー (9%)の製造プロセスに欠かせないものとなってい る.これはヘリウムガスの持つ高い熱伝導性や化学 的安定性(反応がないこと)による.この他、ヘリ ウムの原子サイズが小さい(小さな穴でも透過する) ことや天然の空気にほとんど含まれない(質量分析 しやすい)ことを利用して、リークテスト(13%) にも広く使われている. 溶接や分析, バルーン・飛 行船, その他も含めると, ガスとしてのヘリウム用 途が75%以上を占めることになる.

液体ヘリウムの学術研究利用に戻ると,その国内 販売量は全体の5%程度にしかならない(図12中 の低温工学がこれに相当).研究機関にはヘリウム 液化システムが設備されている所も多く,蒸発した ガスを回収して再液化していることから,実際の使 用量として比較したら,その割合は30~40%程度 まで増えると予測されている.とはいえ「ヘリウム 危機」と言える現状において,医療と産業(経済) を優先させれば,もともと商業的需要の小さい学術 研究にヘリウムが回ってこないことは致し方ない



図 12 2021 年国内ヘリウム販売量の内訳(日本 産業・医療ガス協会の報告データを集計)

ことなのかもしれない. 低温科学研究が過去だけで なく未来においても産業に多大な影響をもたらす こと(例えば, MRI, 量子コンピュータ, リニア新 幹線, 核融合炉等々)を考えると, この危機の中で もなんとか低温科学の火が絶えないようにさせた いものである. 様々の方面から支援・協力を低温関 係者の一人として切に願っている(2019年12月に 「ヘリウム危機」に臨んでの緊急声明が, 日本の 6 学会, 2協議会, 40研究機関の共同で発表されてい る[16]).

一方で石油と同様にヘリウムも掘り続けると近い将来(30年~40年後)枯渇してしまう,というより根本的な危機も囁かれて久しい.この場合,(i)新たなヘリウム生産技術,もしくは(ii)ヘリウムの代替えとなる原子・分子を使った技術,の開拓が必要であろう.(i)に関しては,例えば大気中に含まれる微量(500ppm程度)のヘリウムを採取する方法や将来的には核融合の副生成物として発生するヘリウムを採取する方法等が可能性としてはある.しかしこれらは大量生産には向かず,かつコストのかかる方法であることから有望とは言えないかもしれない.新たな技術の出現に期待している.

(ii)に関して言えば,絶対 0 度付近の極低温環境 を得るための寒剤としてのヘリウムの代替えはな い.現在使われている主な寒剤は,液体酸素(大気 圧での沸点90K),液体窒素(77K)液体水素(20 K)があるが,これを減圧して(蒸気圧を下げて) さらに冷却しようとしても,3重点(酸素で54K, 窒素で63K,水素で14K)で固化してしまうため, それより低温に達することが難しい.ヘリウムには 量子効果の影響で、この3重点がないことが鍵となっている(ただし、液体水素は20K以上の環境で 十分な場合(例えば高温超伝導体をつかった応用等 で)、冷却に使用した後、蒸発ガスを発電や燃料電 池等のクリーンエネルギーに変換できるため、低温 とエネルギー輸送を組み合わせた応用に発展でき そうである).一方、半導体や光ファイバー作製プ ロセスに不可欠なガスとしてのヘリウムの代替え 技術も、模索されてはいるが見つかっていない.上 述のようにヘリウムガスの高い熱伝導性と化学的 不活性さといった特徴が必要なわけだが、両方を同 時に満たす代替え元素はないというのが現状であ ろう.

以上のようにヘリウムは低温科学研究だけでな く様々な用途(特に産業面)で利用されているが, それを取り巻く入手環境は,これからも安泰とはい えない.筆者が関係する低温科学研究といった比較 的小さな利用規模で考えると,上述のような国際情 勢や資源問題に左右されないためには,研究機関に おいて100%に近いヘリウムリサイクル率を実現す ることが理想であろう(現状,東北大学では91%で 上げ止まりとなっている).貯蔵能力も含めたヘリ ウム液化システムが輸入量変動に対するバッファ となることも期待できる.そうなると今以上の利用 者への啓蒙と回収設備の徹底的な管理が求められ, 「ヘリウムの一滴は血の一滴」に近い教訓が戻る時 代が再び来るのかもしれない.

#### 5. おわりに

東北大学片平地区を中心とした,日本の低温科学 発祥の地としての,液体ヘリウム供給体制の歩みと 研究の歴史と現状を振り返ってきた.筆者が東北大 学で職を得たのは,1999年であり,それ以前から今 日に渡る90年以上の歴史は,過去の文献や先輩諸 氏から伝え聞いた事象を中心にして文章にした.十 分注意して,調べたつもりではあるが,正確な史実 を反映していない箇所も残っているかもしれない. 特に初代,2代目のヘリウム液化機を導入するまで の経緯は,本稿に登場する先生方だけでなく様々な 方の関与があり,よりドラマチックな展開があった と聞く(本稿ではそこまで踏み込めなかった).補 足や修正部があればご指摘いただけば幸いである.

近年, GM 冷凍機やパルス管冷凍機といった冷凍 機の進歩と普及により,液体ヘリウムを消費しなく

ても、電気さえあれば4K以下の極低温環境が得ら れるようになった. これらの冷凍機では動作流体と してヘリウムが使われるが,閉じたガス回路内で使 われるため実質的なヘリウム消費にはつながらな い. 医療現場では MRI 装置に対して冷凍機を接続 して, 蒸発したヘリウムガスを液体に再凝縮させる システムが普及しつつある. 実際. 図 12 における MRIの割合は2018年度では19%であり減少傾向に ある.一方,東北大学の現状を見ると,冷凍機を導 入する研究室の数は増え,液体ヘリウムの需要は減 少するものと予測されたが,依然としてその兆しは 見えない. 冷凍機そのものが高価なこともあるが, 装置の維持に必要な電気料金やメンテナンスにか かる費用がネックになっているようだ. ヘリウム液 化機で大量生産することによるコストダウンや,そ れぞれの実験方法の利点と欠点(例えば、冷凍機で は液体ヘリウムが不要であるが、冷えるのに時間が かり,装置の構造も制限される)を勘案すると,今 後液体ヘリウムと冷凍機をつかった実験装置の比 率はある値でバランスするのではないかと予測し ている.

幸いなことに、東北大学極低温科学センター(片 平地区)では、2022年3月に5代目となる液化シ ステム(230Lh)が導入される.青葉山地区では、 2023年度の稼働を目指して次世代放射光施設の建 設が進められており、ここでの液体ヘリム供給も極 低温科学センター(青葉山地区)がサポートするこ とになっている.これに伴って、学外へのヘリウム 液化サービスに向けた体制を整えつつある.ヘリウ ム不足の続く昨今において、東北大学のヘリウム供 給・回収システムの機能が大学内だけでなく、学外 (特に東北地方の地域産業)にも有効活用される時 代がくることを期待している.

#### 謝辞

本原稿の作成にあたって, 佐々木孝彦先生(金研 教授, 極低温科学センター長)から様々な資料の提 供をいただいた.これらの資料には, 以前に退職さ れた武藤芳雄先生と小林典男先生(いづれも金研教 授)が研究室に残されたものも多く含まれる.ここ に感謝します.

[本稿について] 本稿は,2021年に郡山で開催された日本伝熱シンポジウムのオーガナイズドセッション「人と熱との関わりの足跡」におけるご講演

に修正・加筆して頂いたものである.ご講演と本稿 のご執筆に心から感謝したい.(熱の科学技術史研 究会)

## 参考文献

- [1] 神田英蔵,低温 40 年の回顧と反省,物性 1972 年1月号,(1972) 1-1.
- [2] 袋井忠夫,わが国における低温物理研究の起源, 低温工学, **3-5** (1968) 240.
- [3] 武藤芳雄, 低温研究発祥の地・仙台, 低温工学, 33-6 (1998) 354.
- [4] 小林典男,金属材料研究所における低温研究の 歩み,金属材料研究所創立百周年記念誌,(2017)
   201.
- [5] 神田英蔵,軌道にのった極低温の実験研究,科学, 25-2 (1955) 59.
- [6] 長崎誠三, ヘリウムはなぜ液化できなかったか?, 固体物理, 13-10 (1978) 614.
- [7] 青山新一, 講義 XI, 金属の研究, 12 (1935) 282.
- [8] 青山新一,液体ヘリウム温度による低温の研究,

科学, 9-12 (1939) 445.

- [9] 渋谷喜夫, 思い出と所感, 低温工学, **10-1**(1975) 23.
- [10]丹野武,河野三尾留,熱き心をもって,東北大 学低温センター15周年記念誌,(1986)9.
- [11]小林典男,低温センターが生まれた頃,東北大 学極低温科学センターだより,12 (2021) 12.
- [12]佐藤常夫,液体ヘリウムの供給状況,東北大学 低温センター5周年記念誌,(1976)3.
- [13]研究部門・研究施設の歴史,金属材料研究所創 立百周年記念誌,(2017)69.
- [14] 増本健,東北大学低温センター20周年にあたって,東北大学低温センター20周年記念誌,(1991)1.
- [15]深瀬哲郎,液体ヘリウム事情今昔,東北大学極 低温センターだより,2(2001)1.
- [16]例えば,日本物理学会ホームページでの声明, https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.p hp

## 行事カレンダー

本会主催行事

平云工催门	ず					
開催	田	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2022 年						
5月	18(水) ~ 20(金)	第 59 回 日本伝熱シンポジウム	1月14日 (金)		実行委員会事務局 東海国立大学機構 岐阜大学/国立大学法人 名古屋工業大学 内 Email:symp2022(at)htsj-conf.org	

本会共催,協賛,後援行事

開催	日	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2022 年					·	
5月	12(木) ~ 13(金)	「新燃料の最新技術と課題」講習会			(一社) 日本機械学会総合企画 G 森本あかね morimoto@jsme.or.jp	
	24(火) ~ 25(水)	日本機械学会関西支部第 379 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	1(水) ~ 3(金)	第 27 回計算工学講演会			(一社) 日本計算工学会 office@jsces.org	
7月	13(水) ~ 14(木)	第 26 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 G 森本あかね morimoto@jsme.or.jp	
8月	7(日) ~ 10(水)	The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP13)			PSFVIP13 実行委員長 横野 泰之 TEL: 03-5841-0616 E-mail: yokono@mech.t.u-tokyo.ac.jp	
	19(金) ~ 21(日)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2022			日本混相流学会 office@jsmf.gr.jp	
	24(水) ~ 26(金)	日本実験力学会 2022 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	
9月	27(火) ~ 29(木)	日本流体力学会 年会 2022			(一社) 流体力学会事務局 Tel:03-3714-0427 E-mail: jsfm@fr7.so-net.ne.jp	

## 第 59 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第59回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 板 谷 義 紀

幹事服部博文

開催日:令和4年5月18日(水)~5月20日(金)

会 場:長良川国際会議場(https://www.g-ncc.jp)

<u>※状況によってはオンラインとのハイブリッド,もしくはオンラインのみの開催となる可能性</u> があります(最新情報はウェブサイトを御覧ください).

所在地 〒502-0817 岐阜県岐阜市長良福光 2695-2 電話番号 058-296-1200

アクセス 自動車:名神高速岐阜羽島 IC から岐阜環状線経由で約40分

東海北陸自動車道岐阜各務原 IC から国道 21 号,岐阜市街経由で約 40 分

(駐車場は有料です)

バス:岐阜駅バスターミナルより約20分+徒歩約2分

岐阜バス「市内ループ線」で長良川国際会議場北口下車

「三田洞線 K50・K55」で長良川国際会議場前下車

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

特別講演:5月19日(木)(詳細はシンポジウムウェブサイトに掲載します) ぎふ綜合健診センター・所長・理事 岐阜大学名誉教授・同医学部附属地域医療医学センター特任教授 村上 啓雄 氏 「COVID-19:2年余りの経験と、今後の課題」

総 会:5月19日(木)(詳細はシンポジウムウェブサイトに掲載します)

ウェブサイト: https://htsj-conf.org/symp2022/

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
  - a) 通常の一般セッション(口頭発表)
  - b) オーガナイズドセッション(口頭発表)
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します.
- 基調講演以外の,1講演あたりの割当時間は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)を設けます.
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、前号(2022 年 1 月号)本号掲載のお知らせ 「優秀プレゼンテーション賞(第 59 回日本伝熱シンポジウム)について」をご参照下さい.な お、ポスター形式の詳細等は、ウェブサイトに掲載します.
- オンサイト(登壇者と座長はオンサイトでの参加をお願いします.聴講者は任意とします),オン ラインのハイブリッド方式で開催します(ただし,蔓延防止措置等で会場が使用できない場合に はオンライン開催に変更します).オンラインでの参加方法は、参加登録者宛にメールで連絡い たします.

【参加費等】

- シンポジウム参加費 会員一般(早期申込:12,000円,通常申込:15,000円,非課税) 非会員一般(早期申込:15,000円,通常申込:18,000円,税込み) 会員学生(早期申込:6,000円,通常申込:7,000円,非課税) 非会員学生(早期申込:7,000円,通常申込:8,000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.
  ※会員とは、日本伝熱学会会員のほか、共催・協賛学協会の会員を含みます(ただし、税込みと なります.共催・協賛学協会についてはウェブサイトを御覧ください).
  ※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.
  ※早期申込は4月1日までです(申し訳ございませんが、終了しています).
- 講演論文集 CD-ROM 版:講演論文集の販売は, CD-ROM 版のみです
   講演論文集 CD-ROM 版: 5,000 円(シンポジウム後の販売になります.)

【意見交換会】

- 開催日:令和4年5月19日(木)
- 会場:都ホテル岐阜長良川(〒502-0817岐阜県岐阜市長良福光 2695-2)
- 参加費:一般(早期申込:10,000円,通常申込:13,000円,税込み)
   学生(早期申込:5,000円,通常申込:7,000円,税込み)
   ※早期申込は4月1日までです(申し訳ございませんが,終了しています).

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- 参加登録は本シンポジウムのウェブサイトの参加登録ページから行ってください.
- 支払い方法は、クレジットカードもしくは銀行振込みとなります、参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」としますので、銀行振込みをご選択された方はお気を付けください。
- 4月下旬までに参加登録を完了された方には事前に参加者キット(講演プログラム,参加票など) をお送りする予定です.
- オンライン開催となった場合には、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(2022年度会員)の皆様に対し、シンポジウムウェ ブサイトに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: パスワード:

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。

【講演論文の公開日】

• 講演論文集(電子版)の公開日は,2022年5月11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ください.

【お問い合わせ先】

第59回 日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 機械工学科 内/国立大学法人 名古屋工業大学 内 E-mail:symp2022@htsj-conf.org, Fax:058-293-2532 or 2491

## 第 59 回日本伝熱シンポジウム タイムテーブル(暫定版)

このタイムテーブルは,3月24日現在の暫定版です.

A 室	B 室	C室	D 室	E室	F室	G室	日室
A11 OS	B11 GS	C11 OS	D11 GS	E11 OS	F11 OS	G11 GS	H11 GS
9:00~10:30	9:00~10:40	10:00~10:40	9:00~10:40	9:00~10:40	10:00~10:40	9:00~10:40	9:00~10:40
				熱エネルギー材			
水素·燃料電池·		液滴・濡れ現象	キルフノカロ仁参	料・システムのため	乱流を伴う伝熱		
二次電池1・	沸騰・凝縮 1	の制御と理解1・	ノノ・マイクロロム熱	の熱・物質輸送	研究の進展1・	バイオ伝熱	分子動力学1
基調講演 1-2		基調講演	T	促進1・	基調講演		
				趣旨説明			
A12 OS	B12 GS	C12 OS	D12 GS	E12 OS	F12 OS	G12 GS	H12 GS
10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~12:25	10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~11:55	10:55~12:15
		冻冻 濡わ田角		熱エネルギー材			
水素·燃料電池·	油 勝い 認定 つ	心间・流化現象	ナノ・マイクロ伝熱	料・システムのため	乱流を伴う伝熱	表11-1/2011年 1	公了動力学っ
二次電池 2	/开加制。 决定和日 乙	の前御に生産 2・	2	の熱・物質輸送	研究の進展2	表研加主 1	刀丁動刀子 2
		佰付舑/供 1-2		促進2			
A13 OS	B13 GS	C13 OS	D13 GS	E13 OS	F13 OS	G13 GS	H13 GS
14:00~15:40	14:00~15:40	14:00~15:40	14:00~15:20	14:00~15:40	14:00~15:40	14:00~15:00	14:00~15:20
				熱エネルギー材			
水素·燃料電池·	計画を変合っ	液滴・濡れ現象	ナノ・マイクロ伝熱	料・システムのため	乱流を伴う伝熱		八フも上兴っ
二次電池3	) 予加馬・/ 英語伯 3	の制御と理解 3	3	の熱・物質輸送	研究の進展3	款钟/加生 Z	万于勤力子 3
				促進3			
16:00~18:00 優秀プレゼンテーション賞セッション(市民ギャラリー)							
16:00~18:00 日本伝熱学会特定推進研究特別ワークショップ (B 室)							

2022/05/18 (第1日目) 受付開始:8:30~

A 室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	日室
A21 OS	B21 GS	C21 OS	D21 GS	E21 SS	F21 GS	G21 OS	H21 OS
9:00~10:40	9:20~10:40	9:00~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40
水素・燃料電池・ 二次電池4	沸騰·凝縮4	液滴・濡れ現象 の制御と理解 4	ナノ・マイクロ伝熱 4	東海地区企業に よる部品開発・技 術開発の紹介1	自然対流 1	ふく射輸送とふく 射性質1	宇宙機の熱制御 1・ 基調講演 1-2
A22 OS	B22 GS	C22 OS	D22 GS	E22 SS	F22 GS	G22 OS	H22 OS
10:55~12:35	10:55~12:15	10:55~12:35	10:55~11:55	10:55~12:15	10:55~11:55	10:55~12:15	10:55~12:15
水素・燃料電池・ 二次電池 5	沸騰·凝縮 5	液滴・濡れ現象 の制御と理解 5	ナノ・マイクロ伝熱 5	東海地区企業に よる部品開発・技 術開発の紹介2	自然対流 2	ふく射輸送とふく 射性質 2	宇宙機の熱制御 2
A23 OS	B23 GS	C23 OS	D23 GS	E23 OS	F23 GS	G23 GS	H23 OS
14:00~15:40	14:00~15:20	14:00~15:20	14:00~15:40	14:00~15:00	14:00~15:20	14:00~15:20	14:00~15:20
水素・燃料電池・ 二次電池6	沸騰・凝縮6	液滴・濡れ現象 の制御と理解 6	多孔体内の伝熱	人と熱との関わりの 足跡(その5)	自然エネルギー	混相流	宇宙機の熱制御 3
15:50~16:35 特別講演(A 室) 16:40~17:40 総会(A 室) 18:00~20:00 意見交換会(都ホテル岐阜長良川)							

A室	B室	C室	D 室	E室	F室	G 室	日室
A31 OS	B31 GS	C31 GS	D31 OS	E31 OS	F31 GS		H31 GS
9:00~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40	10:00~10:40	9:20~10:40	9:20~10:40		9:20~10:40
燃焼伝熱研究の 最前線 1	計測技術 1	融解·凝固1	化学プロセスにお ける熱工学1・ 基調講演	伝熱研究への MEMS の利用 1	強制対流 1		ヒートパイプ1/ 熱音響
A32 OS	B32 GS	C32 GS	D32 OS	E32 OS	F32 GS		H32 GS
10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~12:35	10:55~12:15	10:55~12:15		10:55~12:15
燃焼伝熱研究の 最前線2	計測技術 2	融解・凝固 2	化学プロセスにお ける熱工学 2	伝熱研究への MEMS の利用 2	強制対流 2		ヒートパイプ 2
A33 OS	B33 GS	C33 GS	D33 OS	E33 GS			H33 GS
14:00~15:20	14:00~15:00	14:00~15:00	14:00~15:20	14:00~15:20			14:00~15:20
燃焼伝熱研究の 最前線3	電子機器の冷却 1	空調·熱機器 1	化学プロセスにお ける熱工学 3	物質移動1			ヒートパイプ 3
A34 OS	B34 GS	C34 GS		E34 GS			H34 GS
15:35~16:55	15:35~16:35	15:35~16:35		15:35~16:35			15:35~16:55
燃焼伝熱研究の 最前線4	電子機器の冷却 2	空調·熱機器 2		物質移動2			ヒートパイプ 4

2022/05/20 (第3日目)受付開始:8:30~

## 第59回日本伝熱シンポジウムプログラム(暫定版)

このプログラムは、3月24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18日(水)

#### <A 室>

- A11 9:00-10:30 水素·燃料電池·二次電池1
- オーガナイザー:西田 耕介(京都工繊大),伊藤 衡平(九州大), 岩井 裕(京都大),田部 豊(北海道大), 津島 将司(大阪大),徳増 崇(東北大)
- 座長:西田 耕介(京都工繊大), 徳増 崇(東北大)
- A111 基調講演 1:水素製造用水電解での貴金属利用と田中貴金 属工業での取り組み
- 藤田 光晴 (田中貴金属工業)
   A112 基調講演 2: HDV 向け PEFC 用電解質膜の耐久性目標・加 速耐気と課題
  - 金坂 浩行 (技研組合 FC-Cubic)

## A12 10:55-12:35 水素·燃料電池・二次電池2 座長:荒木 拓人(横浜国大)

- A121 アイオノマーが PEFC 触媒インクの分散構造に及ぼす影響
   笹部 崇 (東工大), 小椋 俊彦 (産総研), 岡田 康樹, 酒井 勝則, 平井 秀一郎 (東工大)
- A122 Numerical modeling and simulation of polymer electrolyte fuel cells with different ionomer to carbon ratios in catalyst layers
  - ALIZADEH Mehrzad, 鈴木 崇弘, 津島 将司 (大阪 大)
- A123 触媒層における Pt / C 表面がアイオノマーの吸着と形態変化に 及ぼす影響に関する分子論的解析
  - 郭玉婷, 馬渕 拓哉, 李高阳, 徳増崇(東北大)
- A124 酸素分子のアイオノマ−表面散乱が燃料電池触媒層の酸素輸送抵抗に与える影響に関する分子論的解析 ○ 堀 智紀, 馬渕 拓哉 (東北大), 杵淵 郁也 (東京大),
  - 嘿 笞杧, 馬渕 拍哉 (東北大), 杵漏 郁也 (東京大) 徳増 崇 (東北大)
- A125 エレクトロスプレー法による PEFC 低白金グラフェン触媒層の作製 と電池高出力化

○ 岡野 将也, 中野 湧介, 植村 豪, 田部 豊 (北海道 大)

#### A13 14:00-15:40 水素・燃料電池・二次電池3 座長:田部 豊(北海道大)

- A131 セパレ−タ−厚みが高温運転 PEFC 単セル内熱・物質移動現象に及ぼす影響
   西村 顕, 小島 勇哉, 伊藤 将吾, 廣田 真史 (三重大院)
- A132 高温運転 PEFC 単セル内連成現象に及ぼす部材厚みと MPL 有無の影響の数値解析評価
  ○ 豊田 恭平, 西村 顕, 河野 望 (三重大院), 三島 大 季 (三重大), 廣田 真史 (三重大院)
- A133 固体高分子形燃料電池内膜厚方向温度分布とセル内水蒸 気輸送の相互作用
  ① 重政 海都, 鈴木 大智, 朝岡 洸太, 荒木 拓人 (横国 大)
- A134 PEFC 正味水分移動に対するアノード水素供給条件の影響評価

⑦ 伊藤 博 (産総研), 王 仁傑, 石田 政義 (筑波大),
 染矢 聡, 宗像 鉄雄 (産総研)

A135 レーザ分光による低加湿・負荷変動運転 PEFC の水分濃度と
電圧変動の相関性評価
○ 西田 耕介,山谷 直輝, 尹 瀚文 (京工繊大),梅川
豊文 ((株)プラムテック),川崎 昌博 (地球研)

#### <B 室>

#### B11 9:00-10:40 沸騰・凝縮1 座長:永井 二郎(福井大)

- B111 人工発泡点付き伝熱面上の水の飽和プール沸騰における熱伝 達機構
  ○ 矢吹 智英, 矢島 翔太, 井生 奈那子, 田村 亮太, 宮 崎 康次 (九州工大院)
- B112 機械学習によるプール沸騰の気泡形成挙動の解析
  - 塚原 健, シェン ビャオ, 金子 暁子 (筑波大), 矢吹 智 英 (九工大)
- B113 一様金属多孔質体の内部構造制御による飽和プール沸騰限 界熱流束の向上
  - 関口 正, 林田 侑也, 森 昌司 (九州大)
- B114 底面および内部加熱粒子層のプール沸騰限界熱流束 ○ 坂下 弘人 (北海道大)
- B115 発泡金属を用いた拡張流路でプール沸騰強化に関する研究
   楊 少博 (東京大), 洪 思慧 (中山大), 党 超鋲 (福 井大), 陳 昱 (東京大)

#### B12 10:55-12:35 沸騰・凝縮2 座長:森昌司(九州大)

- B121 高速度赤外線カメラを用いた界面活性剤添加による沸騰熱伝達促進機構の観察
  ・ 井生奈那子,矢島翔太(九工大),田中孝典,柴田修平(富士電機),宮崎康次,矢吹智英(九工大)
- B122 マイクロチャネル内沸騰伝熱現象における流路間相互作用の評価 析上和哉,神田雄貴,○小宮敦樹(東北大)
- B123 TSP による沸騰伝熱面温度分布の高時空間分解能計測 ○ 馬場 宗明, 齋藤 慎平, 染矢 聡, 高田 尚樹 (産総研)
- B124 蒸気と窒素ガス供給中における密閉容器内壁の局所熱伝達率の測定
  - 田中 誠一 (明石高専)
- B125 深層学習と音響計測を組み合わせた沸騰の発生検知
   植木 祥高,橋本 俊作,芝原 正彦 (大阪大),荒 邦
   章 (原子力機構)

#### B13 14:00-15:40 沸騰·凝縮3

- 座長:矢吹 智英(九州工大)
- B131 ミクロ液膜形成を考慮した核沸騰熱伝達の数値シミュレーション ○ 大田 光希, 岡島 淳之介 (東北大)
- B132 格子ボルツマン法による相変化をともなう混相流解析 小島 岬,○田川 俊夫 (都立大)
- B133 含水多孔質板の接触による高熱流束の除去 高野 智也 (横国大・院学), ○ 奥山 邦人 (横国大)
- B134 核沸騰熱伝達データベース構築と予測手法の改良 秋山 直輝, ○ 永井 二郎 (福井大)
- B135 DNB 熱流束を予測する新しい機構モデル○ グエン タイン ビン, 大川 富雄 (電気通信大学)

## B14 16:00-18:00 日本伝熱学会特定推進研究特別ワークショ ップ

- 特定推進企画委員会: 鹿園 直毅(東京大,委員長), 小宮 敦樹(東北大,幹事), 飯山 明裕(山梨大,委員), 塩見 淳一郎(東京大,委員), 高松 洋(九州大,委員), 中別府 修(明治大,委員), 小藤 之貴(東京工大,委員), 上堀 徹(AGC,委員), 近藤 義広(日立アカデミー,委員), 芹澤 良洋(日本製鉄,委員), 津島 将司(大阪大,委員), 白樫 了(東京大,委員), 森 昌司(九州大,委員), 宮崎 康次(九州工大,委員)
- 座長:小宮 敦樹(東北大)
- B141 マイクロセンサー・デバイスを援用した次世代伝熱研究○ 中別府 修 (明治大)

- B142 細胞内における熱・物理的環境〇 白樫 了 (東京大)
- B143 太陽光エネルギー利用における伝熱工学の新展開 ○ 宮崎 康次 (九州工大)
- B144 未来型エネルギーシステムのための乱流伝熱/燃焼研究の新展開とさきがけ複雑流動
   店橋 護 (東京工大),後藤 晋 (大阪大)

#### <C 室>

#### C11 10:00-10:40 液滴・濡れ現象の制御と理解1

オーガナイザー:塩見 淳一郎(東京大), 田川 義之(東京農工大), ムテルドゥ ティモテ(東京大),イ エリム(東京大), シェン ビャオ(筑波大),喜多 由拓(九州大)

## 座長:塩見 淳一郎(東京大)

C111 基調講演: 固液界面の顕微観察の現状と課題○ 高橋 厚史 (九州大学)

## C12 10:55-12:25 液滴・濡れ現象の制御と理解2 座長:塩見 淳一郎(東京大)

- C121 招待講演1:高速マイクロ液滴の飛散現象に関する研究
   田川 義之, 鵜澤 雅, 藤田 裕太 (東京農工大学), Riboux Guillaume, Gordillo Jose Manuel (University of Sevilla)
- C122 招待講演2:高温水の撥水性における微細構造スケールの影響

 ムテルドゥ ティモテ (東京大), Lecointre Pierre (PSL Research University, Ecole polytechnique), Lehoucq Gaëlle (Thales Research and Technology), Checco Antonio (Stony Brook), Clanet Christophe, Quere David (PSL Research University, Ecole polytechnique)

## C13 14:00-15:40 液滴·濡れ現象の制御と理解3 座長:田川 義之(東京農工大)

- C131 ライデンフロスト液滴の相互作用の実験的研究 ○ イ グンハク, ムテルドゥ ティモテ (東京大学)
- C132 減圧環境下で高温壁面に衝突する液滴の Vapor rebound 現象
   畠中 龍太 (JAXA), Breitenbach Jan, Roisman Ilia

V., Tropea Cameron (TU-Darmstadt), 田川 義之 (農 工大)

- C133 温度履歴による濡れ性変化が及ぼす液滴衝突挙動およびクエンチ点への影響
   喜多 由拓 (九州大), 木田 健介 (九大院), 高山 翔,
- 日高 澄具, 河野 正道, 高田 保之 (九州大) C134 撥水キャビティー伝熱表面上の減圧沸騰 〇 シェン ビャオ (筑波大), 岩田 直樹, 日高 澄具, 髙橋 厚史, 高田 保之 (九州大)

C135 超疎水性階層構造を利用した 24 時間放射冷却型の凝縮デ バイス

> ○ 程 治中, 李 禮林 (東京大), Gunay Ahmet Alperen (中東工科大学), 郭 江, Sivasankaran Harish, 塩見 淳 一郎 (東京大)

<D 室>

## D11 9:00-10:40 ナノ・マイクロ伝熱1

座長:水口 将輝(名古屋大)

- D111 官能基修飾した三脚型トリプチセンSAMを用いた金/水界面熱 抵抗の評価
  ○ 今泉 孝規, 竹原 陵介 (東工大), 山下 雄一郎, 八木 貴志 (産総研), 庄子 良晃, 福島 孝典 (東工大)
- D112 SiC-Si 接合界面の熱コンダクタンスのマッピング測定 O Guo Rulei (The University of Tokyo), Mu FengWen (Chinese Academy of Sciences), Xu Bin, 塩見 淳一郎 (The University of Tokyo)
- D113 Drastic thermal conductance reduction of single-walled carbon nanotube after self-bundling
  FENG Ya (東京大), 佐藤 雄太 (産総研), 井ノ上 泰 輝 (大阪大), XIANG Rong (東京大), 末永 和知 (大阪大), 丸山 茂夫 (東京大)
- D114 グラファイトを用いた3次元的な熱流制御による高性能ヒートスプレッダの実現
  ご許斌, Liao Yuxuan,方正隆,長藤圭介,児玉高志(東京大),西川泰司((株)カネカ),塩見淳一郎(東京大)
- D115 細孔アレイ膜からの蒸発熱流束のモデリング
   今井 宏樹, 吉本 勇太, 高木 周, 杵淵 郁也 (東京 大)

## D12 10:55-12:35 ナノ・マイクロ伝熱2 座長:堀 琢磨(東京農工大)

- D121 カーボンナノチューブを電極に用いた高効率プラズマクラスターの生成
   鈴木 巧,井上 修平,難波 愼一,尾形 陽一,松村 幸彦 (広島大)
   D122 カーボンナノチューブに閉じ込められた水の相変化の直接観察
- 金 哲宇, 李 秦宜, LI Dawei, 廣川 颯汰, 生田 竜也, 高橋 厚史 (九州大)
- D123 単層カーボンナノチューブにおける水吸着のレイリー散乱分光分 析

○ 金田 遼太郎, 神前 航輝, 佐藤 周, 丸山 茂夫, 千足 昇平 (東京大)

- D124 単層カーボンナノチューブ凝集体の電気伝導率とパンドル効果 ○ 嶋田 優作, 寺内 一記, 伊達 寛紀, 藤井 武則 (東京 大), 井ノ上 泰輝 (大阪大), 丸山 茂夫, 千足 昇平 (東 京大)
- D125 階層的熱伝導評価によるカーボンナノチューブ線材の熱輸送機構の解明 佐藤 彰斗, 足立 建人,○ 児玉 高志 (東京大)

## D13 14:00-15:20 ナノ・マイクロ伝熱3 座長:児玉 高志(東京大)

- D131 ナノ多結晶におけるフォノンの平均自由行程の理論的予測 〇 堀 琢磨 (農工大), Dames Chris (UC Berkeley)
- D132 非化学量論組成の酸化ニッケル薄膜の作製及び正孔輸送層としての特性評価
   松尾 一平,上垣内 雅斗,井上 修平,松村 幸彦 (広島大)
- D133 連続励起された水の分子内振動から分子間振動への緩和
   一棚田慶崇, 戸谷剛, 小林一道(北海道大), 近藤 良夫(日本ガイシ株式会社)
- D134 CO2 による水平配向 CNT アレイの成長速度,寿命,成長開始制御 石丸 亮哉,○ 大塚 慶吾 (東京大),井ノ上 泰輝 (大阪大),千足 昇平,丸山 茂夫 (東京大)

<E 室>

- E11 9:00-10:40 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸 送促進1
- オーガナイザー:加藤 之貴(東京工業大), 鹿園 直毅(東京大), 中曽 浩一(岡山大)

#### 座長:能村 貴宏(北海道大)

- E110 趣旨説明
  - 加藤 之貴 (東京工大)
- E111 銅・マンガン複合酸化物から成る酸化還元型化学蓄熱材料の 開発

○ 窪田 光宏,陳 曉宇,小林 敬幸,山下 誠司,北 英
 紀 (名古屋大)

- E112 酸化コバルトの酸化還元反応を用いる小型高温蓄熱装置の放 熱挙動
  - 🔾 小林 敬幸, 窪田 光宏, 相場 康広 (名大)
- E113 熱化学エネルギー貯蔵に向けた塩化マグネシウム/アンモニア系 化学蓄熱材料の反応性向上
  絵野沢 哲太,吉田 咲紀,高須 大輝,加藤 之貴 (東 工大)
- E114 熱化学エネルギー貯蔵のための水酸化カルシウムを用いた高熱 伝導率複合材料の開発
  ○ 望月 恭輔, 舩山 成彦, 玉野 聡一朗, 加藤 敬, Zamengo Massimiliano, 高須 大輝, 加藤 之貴 (東工 大)
- E12 10:55-12:35 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質 輸送促進 2

#### 座長:中曽 浩一(岡山大)

E121 共有結合性有機骨格(COF)を吸着媒体とした水蒸気吸着 蓄熱の探究

○ 王 暁晗, 後藤 駿斗, 村上 陽一 (東工大)

 E122 充填層における Ca(OH)2 脱水反応のエクセルギー効率の数値 解析
 ○ ザメンゴ マッシミリアーノ, 船山 成彦, 高須 大輝, 加藤 敬, 加藤 之貴, 森川 淳子 (東工大) E123 ゼオライトの劣化による蓄熱輸送システムへの影響の定量的評価

○ 齋藤 壮呉, 宮川 大河 (早稲田大), 藤井 祥万 (東京 大), 中垣 隆雄 (早稲田大)

- E124 Zeolite/Al composites using a host matrix with spike surface for adsorption cooling
  チュムナンワット スパナット、岡田 裕貴,大田 真司,児玉 昭雄,滝口 昇,汲田 幹夫 (金沢大)
- E125 湿り空気を用いた直接熱交換式ヒートポンプのポテンシャル
   弘中 秀至, 大賀 誠志, 花木 基史, 深井 潤 (九州 大)
- E13 14:00-15:40 熱エネルギー材料・システムのための熱・物質 輸送促進 3
- 座長:村上 陽一(東京工大)
- E131 金属潜熱蓄熱槽の蓄熱・放熱挙動予測 西村 勝彦,○ 小松 洋介, 鹿園 直毅 (東大)
- E132 500℃ 級三元系合金相変化マイクロカプセルの開発
   清水 友斗,川口 貴大,KURNIAWAN Ade,能村 貴 宏 (北海道大)
- E133 バルバッハ配列磁場による常磁性流体の対流誘起○ 吉村 駿哉, 金田 昌之, 須賀 一彦 (大阪府立大)
- E134 建築物の損傷評価のためのフレキシブル熱電デバイスの熱的接触

一 神成 勇希,市川 賀康,橋爪 洋一郎,森 健士郎,伊藤 裕久,中嶋 宇史 (東京理科大学),内田 秀樹 (日本 ゼオン),山本 貴博,元祐 昌廣 (東京理科大学)

- E135 ケミカル冷熱生成による排熱利用型オンデマンド空調の基礎検討
  一 梶本 こはる,中曽浩一,三野泰志,後藤邦彰(岡山大),丸岡伸洋,埜上洋(東北大)
- <F 室>

#### F11 10:00-10:40 乱流を伴う伝熱研究の進展1

- オーガナイザー:須賀 一彦(大阪府大),中村 元(防衛大), 店橋 護(東京工大),岩本 薫(東京農工大), 服部 康男(電力中央研),小田 豊(関西大), 塚原 隆裕(東京理科大),服部 博文(名工大)
- 座長:服部博文(名古屋工大)
- F111
   基調講演:気象と乱流伝熱

   服部 康男,須藤 仁,中尾 圭佑 (電中研)

## F12 10:55-12:35 乱流を伴う伝熱研究の進展 2 座長:小田 豊(関西大)

- F121 遷移域における管内旋回流の伝熱促進 菅原 義徳,船見 祐揮,山田 俊輔,○ 中村 元 (防衛 大)
- F122
   ケルビンヘルムホルツ不安定波による運動量・熱輸送の非相似 制御

○ 桑田 祐丞 (阪府大)

- F123 DNSとLESによる円形衝突噴流の衝突壁面近傍乱流熱伝達現象に関する研究
   服部 博文 (名工大),馬場 裕暉,水上 泰良 (名工大院),保浦 知也,田川 正人 (名工大)
- F124 粗さの幾何的特徴を変化させた粗面の壁面乱流摩擦抵抗に関する実験的研究
   山本 佳輝,田端 信哉,桑田 祐丞,須賀 一彦 (阪府大)
- F125 Application of RANS/LES hybrid approach to shape optimization of turbulent heat exchanger with modified surface geometry
   ① 金 書群, 森本 賢一 (東京大)

## F13 14:00-15:40 乱流を伴う伝熱研究の進展3 座長:中村 元(防衛大)

- F131 平行二線式熱線流速計によるせん断乱流における2方向速度 変動計測
  ○ 保浦知也,稲穂達也,服部博文,田川正人(名工大)
- F132 ガソリンエンジン壁面熱流束に対するピストントップ近傍の流動の 影響
  ○ 志村 祐康 (東工大), 鎌田 慎 (明治大), 横山 瑛士, 黄 進, 小須田 裕樹, 雨宮 壮一 (東工大), 中別府 修 (明治大), 店橋 護 (東工大)
- F133 感温塗料による乱流熱伝達場の画像計測における機械学習を 用いたノイズ低減 ○ 小田 豊,下田 将治,笠原 友宙,山崎 龍朗,松本 亮介 (関西大)
- F134 主流乱れを伴う境界層遷移の壁面温度ストリークに関する実験的研究
   原 峻平 (同志社大),加藤 豪 (同志社大院),稲岡
- 恭司 (同志社大)
  F135 波長の異なる三次元正弦波粗面の乱流熱伝達スケーリングに 関する直接数値解析
  ○ 矢ヶ崎 航, 名倉 梨花, 桑田 祐丞, 須賀 一彦 (阪府 大)

#### <G 室>

#### G11 9:00-10:40 バイオ伝熱

座長:佐野 吉彦(静岡大)

- G111 磁性ナノ粒子を用いた癌の温熱療法の局所加温に関する検討 ○ 久保田 竜平,石井 慶子,麓 耕二 (青山学院大)
- G112 近赤外線レーザーおよび金ナノロッドと皮膚表面冷却を用いたがん治療法の伝熱特性評価
   小保内秋芳(東北大学),古川琢磨(八戸高専),神田 雄貴,小宮 敦樹(東北大学)
- G113 フィット性の異なる衣服着用時の人体熱放散 ○ 島崎 康弘, 安藤 竜之介, 児玉 壮, 袁 継輝 (豊橋技 科大)
- G114 Rotational relaxation time of water: an IR approach 〇 Zhang Junkai, 松浦 弘明, 白樫 了 (東京大)
- G115 誘電分光による細胞内水分子ダイナミクスの測定に関する研究 〇 松浦 弘明, 高野 清, 白樫 了 (東京大)

## G12 10:55-11:55 熱物性1

## 座長:迫田 直也(九州大)

- G121 定常加熱サーモリフレクタンス法を用いた共有結合性有機骨格 の熱伝導率計測 ○ 後藤 駿斗,坂口 智也,村上 陽一 (東工大)
- G122 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複合材の 高解像度熱拡散率マッピング ○ 濱田 真旗,藤田 涼平,上野 藍,長野 方星 (名古屋 大)
- G123 n-スタックカラムナー集合体の精密な熱輸送特性評価

   竹原 陵介 (東工大), 劉 芽久哉 (産総研), 気谷 卓, 庄子 良晃, 森川 淳子, 川路 均, 福島 孝典 (東工大)

## G13 14:00-15:00 熱物性2

## 座長:長野 方星(名古屋大)

- G131 非凝縮性気体を含む2成分系混合流体のPVTx 性質および 粘性係数測定
  迫田 直也,緑川 優太郎,岡本 剛明,河野 正道(九 州大)
- G132 真空断熱材内部の微量ガスが断熱性能に及ぼす影響の評価 ○ 鈴木 俊圭 (三菱電機株式会社)
- G133 ネルンスト素子における熱電変換現象の実証 〇 高橋 侑暉, 宮町 俊生, 水口 将輝 (名古屋大)
- <H 室>

#### H11 9:00-10:40 分子動力学1

## 座長:芝原 正彦(大阪大)

- H111 界面ナノバブルの界面張力の定量化:ヤングの式はどこまで説明できるか?
   ) 手嶋 秀彰 (九州大), 楠戸 宏城, Bistafa Carlos, 山
- H112 液体アンモニア及びその界面のための反応性/非反応性分子モデルの検討
   仲村 友甫, DONATAS Surblys, 松原 裕樹, 小原 拓
- (東北大) H113 界面活性剤による固液界面熱抵抗低減と振動モードマッチングの関係:1次元振動子モデルによる解析
  - 松原 裕樹, Surblys Donatas, 小原 拓 (東北大)
- H114 Relationship between the internal electric field and the water rotational relaxation time in lysozyme solution
  - 胡 康, 白樫 了 (東京大)
- H115 ポリビニルアミン/ポリビニルアルコール複合膜内の気体の溶解拡 散過程の分子論的解析
  ○ 佐藤 康平, 吉本 勇太, 高木 周, 杵淵 郁也 (東京 大)

#### H12 10:55-12:15 分子動力学2 座長:山口 康隆(大阪大)

- H121 気泡核のサイズ分布の時間発展則に及ぼす初期サイズ分布の 影響の分子動力学解析 佐多 勇亮 (九州大院),○津田 伸一,渡邉 聡 (九州 大)
- H122 固液界面における核生成時の高時空間分解した物理量の描像に関する分子動力学的研究
   芝原 正彦, 西岡 拓水, 柏木 良太 (大阪大)
- H123 界面付着触媒ナノ粒子近傍の反応過程におけるエネルギー分配に関する分子シミュレーション ○ 藤井 祐作,藤原 邦夫,津島 将司,芝原 正彦 (大阪 大)
- H124 シリカ構造物近傍における水の凝固状態に関する分子動力学的研究
   内田 翔太 (大阪大/SCREEN ホールディングス),藤原邦夫,芝原 正彦 (大阪大)

## H13 14:00-15:20 分子動力学3 座長:小原 拓(東北大)

H131 Thermal resistance of solid-liquid interface: A comparison of EMD simulation with different conditions

○ 張 興宇, 藤原 邦夫, 芝原 正彦 (大阪大)

- H132 グリーン久保公方程式の近似で定義された,非平衡発達中の Ar 流における熱伝達,粘度,および摩擦の間の関係 ○ ゾロツキヒナ タチアナ,宮本 昌輝 (富山大学)
- H133 固体面上における準二次元液滴の濡れ広がりに関する非定常 非平衡分子動力学解析
   ○ 宮本 大悟, 大賀 春輝, 楠戸 宏城, 山口 康隆 (大阪 大)
   H124 亚海分子動力学系を用いた 度声すぐりをちすす Deigouille 済
- H134 平衡分子動力学系を用いた 壁面すべりを有する Poiseuille流れの流量抽出方法の提案
   大賀 春輝, 千崎 亮平 (大阪大), 大森 健史 (大阪市大), 山口 康隆 (大阪大)

#### <市民ギャラリー>

## BPA14 16:00-18:00 優秀プレゼンテーション賞セッション

- 学生会委員会:小宮 敦樹(東北大,委員長),
  - 西山 貴史(福岡大, 幹事),
    - 能村 貴宏(北海道大),田中 三郎(日本大),
    - 上野 一郎(東京理科大),
    - 上野 藍(名古屋大), 福江 高志(金沢工大),
    - 西田 耕介(京都工繊大),向笠 忍(愛媛大)
- BPA1401 自由界面に発生する密度差対流の乱流現象の赤外線計 測とスペクトル解析

○ 岡田 直樹, 李 艶栄, 稲垣 照美 (茨城大)

BPA1402 着衣模擬人体による水平衣服内気候の自然対流と熱移動 特性

三宅 哲也 (岡山県立大院), 春木 直人 (岡山県立 大)
- BPA1403 The estimation of heat loss and energy consumption required of strawberry cultivation in greenhouse ○ Khammayom Napassawan, 丸山 直樹, 廣田 真史 (三重大), Chaichana Chatchawan (チェンマイ 大) BPA1404 フィン型熱電デバイスの性能評価 ○ 阿部 遥斗, 新井 隆也, 宮岡 大, 佐々木 直栄, 田中 三郎 (日本大) BPA1405 地下水を用いた農業用空調システムの性能向上に関する研 究 ○ 大島 拓 (山梨大院), 鳥山 孝司 (山梨大) BPA1406 三次元伝熱解析と生体温熱プログラムを用いたサウナ入浴 時における人体深部温度変化の予測 ○ 石橋 輝, 西舘 来夢, 大坂 奈菜穂 (八戸高専), 苫米地 陸 (東京農工大), 古川 琢磨 (八戸高専) BPA1407 薄膜型熱電素子の性能評価 ○ 新井 隆也, 阿部 遥斗 (日本大), 小長谷 遼太, 高尻 雅之 (東海大), 宮岡 大, 佐々木 直栄, 田中 三郎 (日本大) BPA1408 移動界面を有する自然対流現象の熱と流れの同時可視化 計測 ○ 西山 幸輝, 宮川 泰明, 城田 農, 岡部 孝裕 (弘 前大) BPA1409 過飽和状態下でのミスト発生における白色 LED 光の透過 率変化特性 ○ 渡邊 樹, 安原 薫 (山形大) BPA1410 相変化蓄熱材 PCM の凝固・融解特性の可視化 ○ 後藤 開, 李 艶栄, 稲垣 照美 (茨城大) BPA1411 表面修飾無機固体/ポリマー界面における分子構造と親和 性の評価 ○ 斎藤 高雅,久保 正樹,塚田 隆夫,庄司 衛太 (東北大院工), 菊川 豪太, SURBLYS Donatas (東北 大流体研) BPA1412 ダスト付着による宇宙機のラジエータ表面のふく射物性の変 化 ○ 海野 嵩史 (山形大), 太刀川 純孝 (宇宙研), 江 目 宏樹 (山形大) BPA1413 沸騰気泡共振器における振動板の高速度撮影と沸騰音の 計測 ○ 小野 淳一郎 (東京理科大), 海野 徳幸, 結城 和 久 (山口東京理科大),谷口 淳,佐竹 信一 (東京理 科大) BPA1414 高温用潜熱蓄熱ペレットの基礎伝熱特性調査 ○ 月足 嶺, Ade Kurniawan, 佐藤 祐輔, 能村 貴宏 (北海道大) BPA1415 気泡微細化沸騰促進のための表面コーティング技術 ○ 野間 遼太郎 (山理大院), 海野 德幸, 結城 和久 (山理大), 佐竹 信一 (東京理大), 鈴木 康一 (山理 大) BPA1416 水溶液系相変化物質の凝固時に発生する膨張圧に関する 検討 ○ 中村 太一, 川南 剛 (明治大), 市場 元康, 堀井 克則 (パナソニック)
- BPA1417 溶融金属液滴の衝突過程における凝固と流動がもたらす界 面模様 ○ 大川 拓巳, 中川 裕亮, 前田 一明, 岡部 孝裕, 城田農(弘前大) BPA1418 光音響法を用いた温度依存性を持つ液体の熱物性の計測 技術の検討 ○ 鳥居 正太郎, 木下 進一, 吉田 篤正 (大府大), 加賀田 翔 (大工大) BPA1419 局所加熱により生成されるマイクロバブル周り流れ場の熱流 体解析 ○ 山田 透, 坂田 雄基, 篠﨑 健, 岩本 直樹, 石川 博章 (三菱電機), 名村 今日子, 鈴木 基史 (京都大) BPA1420 格子動力学法を用いた極小 2 次元フォノニック結晶の熱伝 導抑制メカニズムの調査 ○ 森田 路真, 志賀 拓麿, 塩見 淳一郎 (東京大) BPA1421 誘電分光による魚卵内水分子の回転緩和時間の測定 ○ 川合 晃生, 白樫 了 (東京大) BPA1422 架橋高分子材料の反応 DPD シミュレーションにおける相互 作用パラメータのボトムアップ探索 ○ 李 楷文 (東北大院), 菊川 豪太 (東北大), 川越 吉晃, Zhao Yinbo, 岡部 朋永 (東北大院) BPA1423 血液熱交換用カテーテル形状に関する検討 ○ 上野 藍香, 石井 慶子, 麓 耕二 (青山学院大) BPA1424 自立マイクロチャネル型バイオカロリメータを用いた単一細胞 熱分析の研究 ○ 梅野 錬, 焦 一航, 福田 海斗, 宮崎 康次, 矢吹 智英 (九州工業大学) BPA1425 透過型電子顕微鏡を用いたナノスケール空間内の気泡の研 究 ○ 廣川 颯汰, 手嶋 秀彰, FERNÁNDEZ Pablo, 吾郷 浩樹, 塘 陽子, 李 秦宜, 高橋 厚史 (九州大) BPA1426 熱力学安定・高効率・超低閾値なフォトン・アップコンバージョ ン固溶体結晶の創出と特性解明 ○ 榎本 陸, 星 めぐみ, 大山 滉永 (東工大), 縣 秀樹 (日産自動車(株)), 黒川 真一, 熊 均 (出光興産(株)), 植草 秀裕, 村上 陽一 (東工大) BPA1427 SOD ゼオライトを用いたリチウムイオン二次電池用正極材料 の合成 ○ 森 優太, 野村 信福, 師水 僚太, 中島 純一 (愛 媛大) BPA1428 近赤外イメージングのための吸収スペクトル標準化と回帰モデ ル構築 ○ 坂下 拓海, 中西 諒, Carandang Gia Ginelle, 角 田 直人 (都立大) BPA1429 壁面温度変動から推定される移流速度の物理的意味の検 ≣īF
  - 勝間 航平, 出島 一仁 (滋賀県大), 梅田 大輝
     (元・滋賀県大), 河崎 澄, 山根 浩二 (滋賀県大)
- BPA1430 弾性熱量効果を用いた冷却装置開発における作動流体の 伝熱性能評価
  WAY Sze Xuen (東北大学院工学研究科), SEBALD Gael, LOMBARDI Giulia (INSA Lyon -CNRS - Tohoku Univ.), 小宮 敦樹 (東北大学流体科 学研究所)

BPA1431 衝突噴流を用いた自然対流伝熱促進に向けた局所混合流 体現象評価

> ○ 小泉 匠摩 (東北大), TORRES Juan (ANU), 神田 雄貴, 小宮 敦樹 (東北大)

BPA1432 水平圧力勾配を付加した鉛直平行平板間共存対流の亜 臨界遷移パターン

〇 松川 裕樹 (東理大院), 小野寺 駿, 塚原 隆裕
 (東理大)

BPA1433 発汗量評価のための熱膜式ウェアラブル MEMS センサの開 発

> ○ 森下 裕樹 (東理大院), 市川 賀康, 向本 敬洋, 柳田 信也, 鈴木 立紀, 四反田 功, 元祐 昌廣 (東理 大)

BPA1434 感温液晶の利用によるロックインサーモリフレクタンスの高感度 化

高萩 敦 (名大), 井口 亮 (物材機構), 長野 方星 (名大), 内田 健一 (物材機構)

- BPA1435 High-resolution thermal conductivity mapping for one-dimensional materials with concurrent internal structure observation 〇 LI Dawei, 李 秦宜, 生田 竜也, 高橋 厚史 (九州 大)
- BPA1436 固体ナノ細孔内部における単一均一ナノバブルの音響計測 ○ PAUL Soumyadeep, ITO Yusuke, HSU Wei-Lun, DAIGUJI Hirofumi (Univ. Tokyo)
- BPA1437 炭素循環製鉄用ハニカム形 CO2 吸収材の形状設計 ○ 田中 宏治, 中垣 隆雄 (早稲田大)
- BPA1438 粒子数削減法を用いた多原子分子希薄気体流れの分散 低減型モンテカル□解析 ○ 白石 剛大, 今井 宏樹, 吉本 勇太, 高木 周, 杵 淵 郁也 (東京大)
- BPA1439 中性子ラジオグラフィによる流れの可視化に基づく自励振動と ートパイプの熱輸送特性評価

 〇 谷口 智哉, 杉本 勝美, 村川 英樹, 浅野 等 (神 戸大院), 飯倉 寛, 栗田 圭輔 (原研)

- BPA1440 高速気泡流に対する気泡内部温度を記述可能な3圧力2 流体モデル方程式の開発と数学的適切性の検証
  - 鮎貝 崇広 (筑波大院), 金川 哲也 (筑波大)
- BPA1441 水平円管内における水 油プラグ流の流動および伝熱特性

   藤田 優,渡邊 千博 (青学大院),藤原 明香,森本 崇志,熊野 寛之 (青学大)
- BPA1442 Measurement and modulation of the liquid slip length in graphene nanochannels 〇 Chen Kuan-Ting, Li Qin-Yi (九州大), 大森 健史 (大阪市立大), 山口 康隆 (大阪大), 生田 竜也, 高橋 厚史 (九州大)
- BPA1443 自励振動ヒートパイプで生じる振動流と脈動循環流の遷移 境界に関するシミュレーション ○ 大内 翔太, 黒瀬 築 (東京理科大学), 宮田 一司 (福岡大学)
- BPA1444 粒子充てん層の乾燥過程における空隙率,液飽和度および圧力損失の測定と予測
   溝渕 智也,濱本 芳徳 (九州大)

- BPA1445 有機溶媒の蒸気に誘起される超撥水面上水液滴の挙動 ○ 水戸 大夢,山田 寛,磯部 和真,堀部 明彦 (岡 山大)
- BPA1446 複雑ネットワークと機械学習を組み合わせたコミュニティ解析 による噴霧燃焼振動の駆動領域の推定
  - 榛葉 広之, 中村 洸介, 後藤田 浩 (東理大), 長
     尾 順, 黒瀬 良一 (京大)

# 第2日 5月19日(木)

## <A 室>

A21 9:00-10:40 水素·燃料電池·二次電池4 座長:徳増 崇(東北大)

- A211 マイクロデバイスとオペランド赤外観察による PEFC 触媒層の液水挙動と性能の解析
   鈴木 崇弘, 小林 亮太 (大阪大院), 柿沼 克良, 内田 誠, 飯山 明裕 (山梨大), 津島 将司 (大阪大院)
- A212 基材レス薄型 MPL による燃料電池内液水滞留抑制 ○ 相原 陸央,石川 湧大,内藤 弘士,酒井 勝則,笹部 崇,谷岡 明彦,平井 秀一郎 (東工大)
- A213 PEFC における MPL 細孔径分布が凝縮水排出と酸素輸送抵 抗要素に及ぼす影響 ○ 藤井 克裕, 飯塚 友俊, 植村 豪, 田部 豊 (北海道 大)
- A214 改良型電極流路構造を有する PEFC の面圧が液水排出と発 電性能に及ぼす影響

 ○ 金子 礼弥, 古川 達希, 西田 耕介 (京工繊大)
 A215 瞬間凍結を用いた X線 CT による燃料電池内液水分布の 3次 元計測
 ○ 藤川 健吾, 内藤 弘士, 笹部 崇, 河村 雄行, 平井

# A22 10:55-12:35 水素・燃料電池・二次電池5 座長:岩井 裕(京都大)

秀一郎 (東工大)

- A221 GDL 内液水凝縮の 3 次元非定常数値シミュレーション ○ 内藤 弘士, 平井 秀一郎 (東工大)
- A222 リチウム空気電池の酸素輸送を向上させる電極構造と電解液形成
   植村 豪, 宮前 涼介, 塚本 将弘, 田部 豊 (北海道大学大学院)
- A223 トルエン直接電解水素化プロセスにおける多孔質内物質輸送に 関する可視化調査
  ○ 張 淳弼, 重政 海都, 井上 海星, レイナ ファティマ, 荒 木 拓人, 寺尾 卓真, 長澤 兼作, 光島 重徳 (横国大)
- A224 回転円柱場を用いた白金電極の電気化学反応輸送特性解析 大森 将秀 (大阪大), CHAROEN-AMORNKITT Patcharawat (King Mongkut's Univ. Tech. Thonburi), 鈴木 崇弘, ○ 津島 将司 (大阪大)
- A225 Numerical analysis on optimization of porosity distribution in a reaction-diffusion system using an adjoint method

 CHAROEN-AMORNKITT Patcharawat (King Mongkut's Univ. Tech. Thonburi), LONG Mengly (Suranaree Univ. Tech), ALIZADEH Mehrzad, 鈴木 崇弘, 津島 将司 (大阪大)

# A23 14:00-15:40 水素・燃料電池・二次電池6 座長:津島 将司(大阪大)

- A231 SOFC 燃料極における異なる分子量を持つ気体の対向輸送に 対する全圧差の影響 ○ 岸本 将史, 仙石 建斗, 岩井 裕 (京都大)
- A232 SOEC の CO2 電気分解におけるカソード酸化挙動の観察と第
   一原理計算
   渡部 弘達, 茂木 翔太 (立命館大), 小倉 鉄平 (関西 学院大)
- A233 スズ負極全固体リチウムイオン電池の電極構造が電池性能に及 ぼす影響
  - 兒玉 学, 周 南昕, 平井 秀一郎 (東工大)
- A234 X線 CT を用いた全固体電池電気化学シミュレーション手法の検討
   岩本 頌平, 兒玉 学 (東京工業大学), 柳 和明, 羽二 生 大和, 藤井 雄太, 増田 直也, 樋口 弘幸, 末次 義幸
- (出光興産株式会社), 平井 秀一郎 (東京工業大学) A235 砥粒の高速吹き付けによる全固体リチウム金属負極電池の性 能向上

○ 髙嶋 快, 兒玉 学, 平井 秀一郎 (東京工業大学)

# <B 室>

# B21 9:20-10:40 沸騰・凝縮4 座長:河野 正道(九州大)

- B211 高速流動場中のサブクール沸騰の非定常挙動とその伝熱特性 〇 岡島 淳之介,新井 駿作 (東北大)
- B212 高温高圧下の発熱管群における強制対流サブクール沸騰の正味蒸気発生開始点
   新井 崇洋, 宇井 淳, 古谷 正裕, 大川 理一郎 (電中研)
- B213 熱出力振動下における発熱管群ボイルオフ時の有効冷却水位と沸騰二相流

   ・植田 翔多,新井 崇洋,宇井 淳,古谷 正裕,大川理一郎,白川 健悦(電中研)

   B214 冷媒に HFE-7000 を用いた場合のマイクロスリットチャネル内サ
- B214 冷媒に HFE-7000 を用いた場合のマイクロスリットナヤネル内セ ブクール流動沸騰熱伝達モデルの構築 ○ 日比野 廉, 中島 泰洋, 鹿野 一郎 (山形大)

# B22 10:55-12:15 沸騰・凝縮5

#### 座長:岡島 淳之介(東北大)

- B221 静止流における油焼入れの沸騰熱伝達特性○ 賀数 広海,藤山 周秀 (光洋サーモシステム株式会社)
- B222 移動高温面のラミナー噴流直下の非定常沸騰遷移現象の可 視化と伝熱特性評価 ○ 光武 雄一,渡辺 貴裕,高塚 大地,門出 政則(佐賀 大)
- B223 伝熱面上に形成された銅ナノ粒子層の構造制御による沸騰熱 伝達性能の変化 松本 康佑, 川口 達也, ○ 齊藤 卓志 (東工大)

B224 周期的な微細表面構造がスプレー冷却の急冷開始点に与える 影響
○ 河野 正道, 堀 智朗, 松清 泰平, 喜多 由拓, 日高

澄具, 高田 保之 (九州大), 福田 啓之 (JFE スチール)

B23 14:00-15:20 沸騰·凝縮6

# 座長:光武 雄一(佐賀大)

- B231 伝熱面の熱物性値が沸騰熱伝達計測に及ぼす影響
   う 吉田 雅輝,山田 俊輔,船見 祐揮,中村 元 (防衛 大)
- B232 着泡加熱細線による NOVEC7100 の沸騰開始過熱度の低減○ 久野 努,森 昌司,高田 保之 (九州大)
- B233 底面が共通で半径方向に狭い隙間を持つ銅伝熱面上での沸 騰伝熱と面上の液体挙動
  - 原村 嘉彦, 諸隈 崇幸 (神奈川大)
- B234 気泡合体時における純水温度と気泡間液膜の破断に関する研究
   諸隈 崇幸, 井上 拓海, 鈴木 竣介, 原村 嘉彦 (神奈)

○ 誦底 示辛, 升工 扣冲, 茹木 咳川, 际村 嘉彦 (神示 川大)

<C 室>

# C21 9:00-10:40 液滴・濡れ現象の制御と理解4 座長: 喜多 由拓(九州大)

- C211 固体表面における液滴のスプラッシュに関する数値解析 〇 魏 天一 (京都大), Yuan Zhicheng (東京大), Pillai Abhishek, 黒瀬 良一 (京都大)
- C212 動的濡れの非平衡分子動力学解析
   楠戸 宏城 (大阪大), 大森 健史 (大阪市大), 山口 康隆 (大阪大)
- C213 バイフィリック表面における移動接触線の数値解析 袁 志成, 〇 沈 佳杏, 李 禮林, 松崎 玄伸, 高木 周, 塩見 淳一郎 (東京大)
- C214 Drop impact on solid surface from the perspectives of artificial neural networks 〇 イー ジンズ,山中 晃徳,田川 義之 (農工大)
- C215 MD による固体と流体の界面張力の様々な算出法 新宅 実慶, 藤野 大成, 楠戸 宏城, ビスタファ カルロス (大
  - 阪大), 大森 健史 (大阪市大), 〇 山口 康隆 (大阪大)

# C22 10:55-12:35 液滴・濡れ現象の制御と理解5 座長:シェン ビャオ(筑波大)

- C221 Wettability and pinning of graphene layers with hydrophilic and hydrophobic defects 〇 ビスタファ カルロス, 松本 悠希, 楠戸 宏城, 山口 康隆 (大阪大)
- C222 濡れ性複合樹脂薄膜表面における水滴の濡れダイナミクス
   イエリム (東京大), 松崎 正幹, 松井 徳純 (日本ペイント), 塩見 淳一郎 (東京大)

C223 テクスチャ構造をもつダイアモンドライクカーボン基板上における蒸 発液滴の圧力駆動ぬれ転移

 SHAMIM Jubair, TAKAHASHI Yukinari, MOUTERDE Timothée, HSU Wei-Lun, CHOI Junho, DAIGUJI Hirofumi (Univ. Tokyo)

- C224 ナノスケール粗さを有する疎水性基板上に発生する trapped bubble の評価
   (網 圭子, 向 優作, 市川 賀康, 元祐 昌廣 (東京理科 大学)
- C225 接触線摩擦による液滴の動的挙動の理解と制御 ○ 塩見 淳一郎, 李 禮林, 二田 智史, WANG Jiayu (東 京大), DO-QUANG Minh, AMBERG Gustav (王立工科 大)

# C23 14:00-15:20 液滴・濡れ現象の制御と理解6 座長:イエリム(東京大)

- C231 凝縮膜を有する基板上のアルカン液滴の先行薄膜の形状測定 ○ 庄司 衛太, 星野 瑛, 齋藤 大河, 琵琶 哲志 (東北 大)
- C232 油面上に滴下した二成分液滴の濡れ広がりと自発的微粒化 ○ 長谷川 浩司, 岸本 裕矢 (工学院大), 萬崎 勇貴 (工 学院大院)
- C233 防曇表面における弾性毛管現象の影響 ○ 谷内田 大貴 (東京大), Laney Sophia, Michalska Martyna, Papakonstantinou Ioannis (UCL), ムテルドゥ ティモテ (東京大)
- C234 血液の液滴衝突現象の実験的解明○ 横山 裕杜, 田中 あかね, 田川 義之 (東京農工大)

<D 室>

# D21 9:20-10:40 ナノ・マイクロ伝熱4 座長:千足 昇平(東京大)

- D211 インクジェットプリントにおける微細構造浸透の X 線 CT 計測

   森崎 広大, 兒玉 学 (東工大), 倉本 信一, 加藤 弘
   -, 門永 雅史 (リコー/東工大), 伏信 一慶, 平井 秀一郎
   (東工大)
- D212 熱電気化学発電における導電度およびゼーベック係数の支配メカニズムの究明
   長 勇毅,池田 寛 (東工大),永塚 真也 (日本化薬),村上 陽一 (東工大)
- D213 常温型 Si 熱電デバイスに向けた低熱伝導率 Si バルク熱電材料の作製
  永廣 怜平,許 斌,大西 正人 (東京大),寺嶋 真伍, 岩瀬 英治 (早大),塩見 淳一郎 (東京大)
- D214 ナノ細孔を有する二次元材料を用いた熱流体発電素子中のイオン輸送現象の研究
   徐 騫, 大宮司 啓文, 徐 偉倫 (東京大)

# D22 10:55-11:55 ナノ・マイクロ伝熱5 座長:村上 陽一(東京工大)

- D221 T型ラマン分光法を用いた一次元ナノ材料の熱伝導マッピング

   か藤 聡馬,李 秦宜, LI Dawei, 生田 竜也, 高橋 厚
   史 (九州大)
- D222 スピン波伝搬による熱輸送現象の観測
   池田 優, 宮町 俊生, 水口 将輝 (名古屋大学)
- D223 シリコン基クラスレート化合物の熱電解析と性能向上
   、大西正人(東京大)、山本貴博,藤村幸司,清水裕、山本潔(古河電工)、塩見淳一郎(東京大)

# D23 14:00-15:40 多孔体内の伝熱 座長:須賀 一彦(大阪公大)

- D231 高ビオ数多孔質体に適用可能な非定常総括熱伝達率の提案の野村和生,佐野吉彦,桑原不二朗(静岡大)
- D232 伝熱促進を目的とした規則配列多孔質体の形状改善問題○ 森本 涼太, 佐野 吉彦, 桑原 不二朗 (静岡大)
- D233 高空隙率多孔体によるソーラーレシーバのふく射・対流・熱伝導
   連成解析
   、丸山 耀, 中倉 満帆, セルバン ベラン, 松原 幸治 (新 潟大)
- D234 銀ナノ粒子担持面における炭素堆積層の触媒酸化反応挙動 ○ 桐ケ谷 遼, 鈴木 崇弘, 津島 将司 (大阪大)
- D235 爆発圧着ポーラス銅管を用いた核融合炉ダイバータのヘリウム冷 却技術

○ 久保田 凌平, 結城 和久, 海野 徳幸 (山口東理大)

#### <E 室>

- E21 9:20-10:40 東海地区企業による部品開発・技術開発の紹 介1
- 産学交流委員会:近藤 義広(日立アカデミー,委員長) 西 剛伺(足利大,委員)

# 座長:近藤 義広(日立アカデミー)

- E211 六方晶窒化ホウ素を用いたシリコーン系低比重 TIM の開発 〇 片石 拓海 (富士高分子工業)
- E212 プリンティング製品と電子部品の熱設計技術) 畑 陽介 (ブラザー工業)
- E22 10:55-12:15 東海地区企業による部品開発・技術開発の 紹介2
- 座長:近藤 義広(日立アカデミー)
- E221 車用熱交換器の小型軽量化の取組みと省動力ニーズへ対応する製品紹介

   佐藤 英明 (デンソー)
- E222 1DCAE を活用した熱設計○ 安井 良 (河合電器製作所)

# E23 14:00-15:00 人と熱との関わりの足跡(その5)

```
オーガナイザー:河村 洋(東京理科大),
大久保 英敏(早稲田大),星 朗(東北学院大)
```

# 座長:永井 二郎(福井大)

- E231 韮山反射炉における熱と温度に関わる10のミステリー

   一 菅野 利猛 (木村鋳造所)
- E232 食品流通における"人と熱との関わり"○ 浅田 規, 土屋 敏章 (富士電機)
- E233 熱処理における"熱科学・熱技術"○ 河野 正道 (九州大)

# <F 室>

# F21 9:20-10:40 自然対流1

# 座長:木村 文義 (兵庫県大)

- F211 回転円筒容器の側面の加熱冷却に伴う熱対流 下浦 康平, 〇 庵原 竜典, 野口 尚史, 平田 勝哉 (同志 社大)
- F212 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
- 内山 旬, 李 艶栄, 稲垣 照美 (茨城大)
   F213 強制振動下における Hele-Shaw cell 内の伝播火炎の非線形 ダイナミクス
- 飯塚 滉介, 福田 真悟, 後藤田 浩 (東理大)
   F214 非定常薄液内温度差マランゴニ対流の局所加熱に対する応答 について
   ○ 工藤 正樹 (産技高専)

# F22 10:55-11:55 自然対流 2

# 座長:稲垣 照美(茨城大)

- F221 固体熱伝導を加味した三次元モデル内でのふく射・対流連成解析と光干渉計による自然対流境界層の妥当性評価
   髙木 松誠 (八戸高専), 小泉 匠摩 (東北大), 古川 琢磨 (八戸高専), 小泉 文樹 (東北大)
- F222 同一垂直面上に設置された垂直加熱平板列まわりの自然対流の流動と伝熱
   木村 文義, 木村 優希 (兵庫県立大), 北村 健三 (豊橋技科大)
- F223 環状容器内における低プラントル数流体の自然対流の遷移機 構 〇 益田 卓哉, 田川 俊夫 (都立大)

#### F23 14:00-15:20 自然エネルギー 座長:丸山 直樹 (三重大)

- F231 地中熱熱源計画に際した負荷変動の影響○ 山口 正敏, 堀野 義人, 鈴木 和則 (日本地下水開発 株式会社)
- F232 地熱発電用直触式復水器向け規則充填層の凝縮性能予測 ○ 日髙 貴弘, 福田 憲弘, 香月 紀人, 永原 駿一, 高上 泰彦 (三菱重工), 田之口 利恭 (三菱重工パワーインダスト リ−)

- F234 マイクロ波・超音波を用いる BDF の合成と応用 ○ 朱 寧, 久米山 光希 (静岡理工科大), 蒋 勇 (中国科 技大)

#### <G 室>

#### G21 9:20-10:40 ふく射輸送とふく射性質1

オーガナイザー: 宮崎 康次 (九州工大), 櫻井 篤(新潟大), 江目 宏樹(山形大), 花村 克悟(東京工大)

# 座長:櫻井 篤(新潟大)

- G211 ふく射影響下自然対流境界層の線形安定性解析 ○ 古川 琢磨 (八戸高専), 吉川 穣 (宮城県産業技術総 合センター), 和田 和幸 (八戸高専)
- G212 コロイド粒子の粘着性が及ぼす近赤外光散乱特性への影響に 関する数値解析
  ○ 藤井 宏之,羅 炫禹,青木 俊晃,井上 優輝,寺林 伊織,小林 一道,渡部 正夫(北大)
- G213 第一原理計算を用いた TiCN 系化合物の波長選択的ふく射特性の予測
  長野利春,早川翔大,三浦飛鳥,渡邊厚介,矢吹智英,河野翔也,中村和磨,宮崎康次(九州工大)
- G214 透明導電酸化物を用いた太陽光選択吸収材料の作動環境下 における性能評価 ○ 清水 信, 阿部 俊郎, 湯上 浩雄 (東北大)

#### G22 10:55-12:15 ふく射輸送とふく射性質 2

- 座長: 花村 克悟(東京工大)
- G221 揺動電磁気学を用いた量子物質の非平衡発光シミュレーション ○ 山賀 一輝, 南雲 延洋, 杉本 涼, 松野 優樹, 櫻井 篤 (新潟大)
- G222 表面フォノンポラリトンの導波モードによる黒体輻射限界を超えた 輻射熱輸送
   ○ 立川 冴子 (東京大), オルドネス-ミランダ ホセ, ジャラペー ル ロラン (LIMMS), ウー ユンフイ, グオ ヤンユー, アヌフリエフ ロマン,藤田 博之 (東京大), ヴォルツ セバスチャン (LIMMS), 野村 政宏 (東京大)
   G223 周期的金ナノスリットのふく射透過率スペクトル
- G223 周期的金刀刀切り (初近週~2007 N) ○ 磯部 和真,山田 寛,堀部 明彦 (岡山大)
- G224 高効率赤外線エミッターへの応用に向けたグラフェン FET の発光 測定実験 〇 味崎 航也, 松本 一輝, 櫻井 篤 (新潟大)

## G23 14:00-15:20 混相流

座長:廣田 真史(三重大)

G231 細線間液滴輸送を利用した霧からの水回収への霧流速の影響 〇 岡 隼矢,山田 寛,磯部 和真,堀部 明彦 (岡山大)

- G232 Effect of three-phase boundary line pinning on the interaction between interface nanobubbles
  ナグ サルタック, 塘 陽子, 手嶋 秀彰, 高橋 厚史, 河野 正道 (九州大)
- G233 磁性粒子含有マイクロカプセルの強制流動場におけるクラスター 形成様相の解明
  - 石井 慶子, 小倉 一起, 麓 耕二 (青学大)
- G234 カリウム触媒の増強による流動層式 PM 除去装置の連続再生 温度のさらなる低減 〇 山本 剛, 横尾 健人, 脇坂 明伸, 大島 一真, 岸田 昌浩 (九州大学)

#### <H 室>

# H21 9:20-10:40 宇宙機の熱制御1

オーガナイザー:長野 方星(名古屋大),戸谷 剛(北海道大学), 小田切 公秀(宇宙航空研究開発機構)

#### 座長:長野 方星(名古屋大)

- H211 基調講演1:火星ローバー「Mars 2020 Perseverance Rover」の熱設計と初期運用~火星サンプルリターンに向けて~ 〇大丸 拓郎 (Jet Propulsion Laboratory/NASA)
- H212 基調講演2: JAXA 研究開発部門における熱制御技術研究の現状と今後の展望
   岡本 篤 (宇宙航空研究開発機構)

# H22 10:55-12:15 宇宙機の熱制御2 座長:小田切 公秀(JAXA)

- H221 宇宙機熱制御への適用を目指した逆止弁付き自励振動型ヒートパイプの循環流化に関する一考察
   安藤 麻紀子 (宇宙航空研究開発機構), 曽根 航平, 永井 大樹 (東北大)
- H222 宇宙機のラジエータパネルへの適用を目指した CFRP 埋込自励 振動ヒートパイプに関する研究
   ○ 松原 幸世, 曽根 航平, 永井 大樹 (東北大)
- H223 金属 3D 積層造形ラティス構造の伝熱特性に関する研究 ○ 梅本 涼, 上野 藍, 長野 方星 (名古屋大)
- H224 Al-Cu-Al クラッド材の超小型衛星に及ぼす熱的効果 吉井 慧, 〇 戸谷 剛 (北海道大)

# H23 14:00-15:20 宇宙機の熱制御3 座長:戸谷 剛(北海道大)

- H231 将来の宇宙望遠鏡ミッションに向けた放射冷却 V-groove 構造の特性評価
   西城 大,小田切 公秀,安藤 麻紀子,鈴木 仁研,篠崎 慶亮,小栗 秀悟,松田 フレドリック,関本 裕太郎,堂谷 忠靖,小川 博之 (JAXA)
  H232 宇宙用観測機器の冷却を目指した極低温ループヒートパイプに
- □ 日本部(別機器の)市がを目前した極低温ルーノビー(パイソに 関する研究
   ○ 横内 岳史,常 新雨 (東北大),小田切 公秀 (宇宙航空研究機構),長野 方星 (名古屋大),小川 博之 (宇宙航空研究機構),永井 大樹 (東北大)

- H233 宇宙機の高精度温度制御に向けたループヒートパイプの蒸発器 コアにおける沸騰の影響に関する数値解析
  - 安達 拓矢, 常 新雨, 永井 大樹 (東北大学)
- H234 マルチエバポレータ型極低温ループヒートパイプの熱輸送モデル構築と特性評価
   小田切 公秀 (宇宙航空研究開発機構),常新雨,永
  - 井 大樹 (東北大), 小川 博之 (宇宙航空研究開発機構)

第3日 5月20日(金)

<A 室>

- A31 9:00-10:40 燃焼伝熱研究の最前線1
- オーガナイザー:勝身 俊之(長岡技科大), 佐藤 大輔(長岡技科大), 門脇 敏(長岡技科大),高橋 周平(岐阜大), 店橋 護 (東京工大)

# 座長:中村 寿(東北大)

- A311 平面バ−ナ−上に形成されるバイオガス-空気予混合火炎の不安定性に与える酸素富化の影響
  ○赤川 唯,野木 遼亮,佐藤 大輔,勝身 俊之,門脇 敏 (長岡技科大)
- A312 クロスフロー型液体アンモニア噴流の微粒化・蒸発に関する数値 解析
  - 北田 絢也, 温 健, 黒瀬 良一 (京都大)
- A313 予混合冷炎の着火特性解明のための HCHO 濃度とガス温度の同時計測
   李 耕宇, 李 敏赫, 鈴木 雄二 (東京大)
- A314 難燃性バイオシンガスの高負荷燃焼 竹原 裕貴, 楠 直也, 〇 奥村 幸彦 (香川大)
- A315 気体燃料を利用した二流体ノズルからの水噴霧を伴う水素燃焼 ○ 荒井 晃貴, 金岡 拓摩, 小林 大輔, 松本 亮介, 小田 豊 (関西大), 香月 正司 (阪大名誉)

# A32 10:55-12:35 燃焼伝熱研究の最前線2 座長:門脇 敏(長岡技科大)

- A321 表面反応によるラジカル消失がアンモニア・空気予混合火炎に及ぼす影響
   宮川 絢麻, 丹羽 紘章, 齋木 悠 (名古屋工大)
- A322 乱流燃焼研究における教師なし機械学習結果の特性

   小林 詢大, 源 勇気, 店橋 護 (東工大)
- A323 機械学習による火炎壁面干渉における壁面熱損失の予測モデル構築
  - 神永 拓輝, 源 勇気, 志村 祐康, 店橋 護 (東工大)
- A324 流体界面の一般化数理モデルによる火炎近似について ○ 大島 伸行 (北大) A325 遺伝的アルゴリズムを用いたメタン/水素混焼用簡易反応モデ
- ルの構築
   ) 廣瀬 海音, 中村 寿, 村上 雄紀, 下山 幸治 (東北 大)

# A33 14:00-15:20 燃焼伝熱研究の最前線3 座長:勝身 俊之(長岡技科大)

 A331 可視化エンジンにおける LIF 画像と壁面熱流束の関係

 ・鎌田 慎 (明治大),山口 泰尚 (明治大院),黄 進, 雨宮 壮一,志村 祐康 (東工大),中別府 修 (明治大), 店橋 護 (東工大)

- A332 高温壁前方よどみ流火炎を用いた最小着火エネルギー遷移条件の数値的特定
   中尾 太樹, 平野 芳樹, 手塚 卓也, 森井 雄飛, 中村寿, 丸田 薫 (流体研)
- A333 アンモニア火炎による金属壁面の窒化に関する研究
   ① 王 道遠, 李 敏赫, 鈴木 雄二 (東京大)
- A334 狭い空間内の燃え拡がりと流れ場に関する検討
   大徳 忠史, 鶴田 俊 (秋田県立大学)

# A34 15:35-16:55 燃焼伝熱研究の最前線 座長:齋木 悠(名古屋工大)

- A341 CH4-N2O 混合気の触媒燃焼特性とその応用 ○ 田島 伸悟, 五十嵐 健太郎, 勝身 俊之, 門脇 敏 (長 岡技術科学大学)
- A342 対向流拡散燃焼に基づく小型燃焼発電システムの開発
   佐藤 大輔 (長岡技科大), 仲地 秀太, 本田 海都 (長岡技科大院), 勝身 俊之, 門脇 敏 (長岡技科大)
- A343 触媒燃焼で直接加熱される金属ベースマイクロ熱電発電モジュ ールの開発
- ・柳 炅勳,李 敏赫,鈴木 雄二 (東京大)
   A344 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた N2O 熱分解に 関する研究

   ・原田 拓実,村上 雄紀,金山 佳督,玉置 健太,中村

## <B 室>

# B31 9:20-10:40 計測技術1

座長:森本 賢一(東京大)

寿(東北大)

- B311 多焦点式複眼レンズによるジェル型温度センサーの測定可能距離の拡張
  桑島 良統,○ 巽 和也,ブカン アントニー,栗山 怜子,中部 主敬 (京大)
- B312 青色 LED 光源下での感温液晶粒子からの散乱光を用いた液体内の温度計測法に関する研究
   鳥山 孝司 (山梨大),木内 優作 (山梨大院)
- B313 極性の有無による有機溶剤へのカーボンナノチューブガスセンサーの応答様相の違い
   張 孟莉, 井上 修平, 松村 幸彦 (広島大)
- B314 周期加熱に対する無機・有機感温塗料の応答時間遅れの評価 ○ 齋藤 慎平 (産総研),渡辺 紘大,安澤 聡,李 艶栄
  - (茨城大), 馬場 宗明, 高田 尚樹, 染矢 聡 (産総研)

# B32 10:55-12:35 計測技術 2 座長:田川 正人(名古屋工大)

B321 光干渉計を用いた超臨界二酸化炭素中の非定常熱輸送現象の可視化と熱拡散率の評価
神田 雄貴, 伊藤 春輝 (東北大), 陳 林 (中国科学院), 小宮 敦樹 (東北大)

B322 近赤外分光イメージングに基づく化学反応時の拡散係数分布 の推定

○ 中西 諒, 坂下 拓海, カランダン ジアジネル, 角田 直人 (都立大)

- B323 射出成形における溶融樹脂-金型界面の熱抵抗評価 ○ 栗田 章史, 吉村 洋平, 鈴木 信 (デンソー㈱), 横井 秀俊 (YOKOI Labo), 梶原 優介 (東京大)
- B324 近赤外光を用いた水蒸気分布の可視化 ○ 小澤 晋太朗, 飯塚 海斗, 角田 直人 (都立大)
- B325 光学式粘性センサによる涙液粘性率 in-situ 測定手法の開発 ○ 大西 健斗, 乙間 和俊, 田口 良広 (慶應義塾大)

# B33 14:00-15:00 電子機器の冷却1 座長:西剛伺(足利大)

- B331 微溶性ナノ流体によるリキッドチャンバーの伝熱促進技術
   海野 徳幸, 結城 和久 (山口東京理科大), 木伏 理紗子 (富山県大), 長岡 大夢, 三谷 敦志 (宇部マテリアルズ)
- B332 非共溶性混合媒体によるプール沸騰の限界熱流束 ○ 河南 治,河原 悠一郎,本田 逸郎,高垣 直尚 (兵庫 県大)
- B333 毛管力が作用する表面微細構造を有するアルミ製沸騰面の沸 騰伝熱促進
  橋本 佳樹, 濵﨑 翔太, 平原 宥伸, 近藤 智恵子, 本 村 文孝, 劉 宇飛 (長崎大)

# B34 15:35-16:35 電子機器の冷却2

# 座長:河南 治(兵庫県大)

- B341 うねりやひずみを伴う金属固体間の接触熱抵抗の予測方法の 提案
  ○ 中溝 裕己, WOO Wonsub, 安井 龍太 (東工大), 篠 田 卓也 (デンソー), 伏信 一慶 (東工大), 富村 寿夫 (熊 本大)
- B342 プリント基板上の銅パッドによる表面実装型パワー半導体パッケ ージの伝熱経路の熱インピーダンスへの影響 ○ 西 剛伺 (足利大)
- B343 ブリージング現象を用いた低沸点冷媒による浸漬冷却
   田中 大貴, 結城 和久, 海野 徳幸, 寺田 光希 (山口 東理大), 井出 拓哉, 大串 哲朗, 村上 政明 (ロータス)

#### <C 室>

# C31 9:20-10:40 融解·凝固1

# 座長:寺岡 喜和(金沢大)

- C311 均質および不均質流れを伴うスラリーの流動モデル ○ 小熊 寿弥, 阿部 駿佑, 浅岡 龍徳 (信州大)
- C312 矩形狭窄部を含む二次元流路内における氷スラリー流の熱流 動解析 ○ 塩見 凌大 (信州大院), 吉野 正人, 鈴木 康祐 (信州 大工)
- C313 矩形狭窄部を含む三次元ダクト内における氷スラリー流の熱流 動解析 〇 川上 嵩仁 (信州大院), 吉野 正人, 鈴木 康祐 (信州 大工)

C314 応カテンソルの不連続に基づく埋め込み境界 – 格子ボルツマン 法の融解・凝固問題への適用
 ○ 遠藤 円 (信州大院), 鈴木 康祐, 吉野 正人 (信州大工)

# C32 10:55-12:35 融解·凝固2

# 座長:浅岡 龍徳(信州大)

- C321 不凍タンパク質を添加したアイススラリーの基礎特性
   三上 修, 丸山 真実 (青学大院), 石井 寛崇, 井上 敏文 (ニチレイ), 熊野 寛之, 森本 崇志 (青学大)
- C322 等電点領域での両性界面活性剤添加が過冷度に及ぼす影響の検討
   森塚 健斗,丸子 勇武,難波 竜三郎 (中大院),松本浩二 (中大理工)
- C323 カチオン性界面活性剤と印加電圧がせん断応力に及ぼす影響 ○ 安藤 賢太, 深澤 健太, 秋山 裕汰 (中央院), 松本 浩二 (中央理工)
- C324 金属箔ベルトを用いた TBAB 水和物の連続生成時における結 晶構造の選択制御
- 中瀬 雅寅, 上坂 朋史, 寺岡 喜和 (金沢大)
   C325 カーボンナノチューブ分散潜熱蓄熱材の矩形蓄熱槽内自然対流融解
   玉田 凌也, 森田 慎一, 羽二生 稔大, 高井 和紀 (北)

見工大), 早水 庸隆, 権田 岳 (米子高専), 春木 直人 (岡山県大), 加藤 大介 (ボッシュ)

# C33 14:00-15:00 空調·熱機器1

# 座長:大西 元(金沢大)

- C331 U 字型 AMR 材料充填層を有する磁石回転型磁気冷凍機に おける温度特性評価 ○ 平野 繁樹 (近畿大), 須山 寛 (熊本大)
- C332 プロトタイプシステムによる磁気ヒートポンプの運転性能評価 ○ 鈴木 遼太郎, 川南 剛 (明治大)
- C333 海洋深層水冷熱利用冷房システム用熱交換器の伝熱性能評価
  - 有馬 博史, 西口 正尚, 秋庭 澪 (佐賀大)

# C34 15:35-16:35 空調·熱機器 2 座長:川南 剛(明治大)

- C341 多分岐構造をもつ熱交換器内の気液二相分配に関する研究
   、大野純一,佐藤 淳也,廣田 真史,丸山 直樹,西村 顕 (三重大)
- C342 渦発生体を付設したフィンレス翼型チューブ熱交換器の伝熱性 能
  - 大西 元 (金沢大), 角橋 宏一朗 (金沢大院)
- C343 レプリカ法による霜の三次元構造再構築
   高屋敷 昌弘 (東京大学(今年度), 三菱重エサーマルシステムズ(来年度)), 西村 勝彦, Sciazko Anna, 大西順也 (東京大学), 岡部 貴雄, 谷口 淳 (東京理科大学), 鹿園 直毅 (東京大学)

<D 室>

D31 10:00-10:40 化学プロセスにおける熱工学1

オーガナイザー:田之上 健一郎(山口大), 日出間 るり(神戸大), 弘中 秀至(九州大), 小林 信介(岐阜大)

# 座長:小林 信介(岐阜大)

D311 基調講演:吸着冷凍プロセスにおける材料開発への化学工学
 的アプローチ
 ○ 汲田 幹夫 (金沢大)

# D32 10:55-12:35 化学プロセスにおける熱工学2 座長: 弘中 秀至(九州大)

- D321 貧溶媒を用いたアンモニウムミョウバンスラリーの伝熱特性
   宮田 直希,大坪 拓夢,日出間 るり,鈴木 洋 (神戸 大)
- D322 粘弾性流体が掃引するキャビティ内における流動・伝熱特性
   ① 竹岡 璃功, 佐藤 秀紀, 日出間 るり, 鈴木 洋 (神戸 大学)
- D323 LiBr 吸収液を用いたサーマルトランジスタ装置の性能評価
   須網 暁, 小林 信介, 板谷 義紀 (岐阜大), 鈴木 洋,
   日出間 るり (神戸大), 中曽 浩一 (岡山大), 川村 公人 (アサヒクオリティーアンドイノベーションズ)
- D324 臭化リチウム吸収液を用いたサーマルトランジスタのシステム解析 ○ 鈴木 洋,日出間 るり (神戸大),板谷 義紀 (岐阜大), 中曽 浩一 (岡山大),川村 公人 (アサヒクオリティーアンドイノ ベーションズ)
- D325 サーマルトランジスタを用いたビール工場排熱再利用計画
   川村 公人 (アサヒクオリティーアンドイノベーションズ(株)),
   鈴木 洋,日出間 るり (神戸大),中曽 浩一 (岡山大),板
   谷 義紀 (岐阜大)

# D33 14:00-15:20 化学プロセスにおける熱工学3 座長:日出間 るり(神戸大)

- D331 高分子を含むライデンフロスト液滴における高分子添加量の影響
   増田 勇人,和田 光生,奥村 慎一郎,伊與田 浩志 (大阪市立大)
- D332 火炎式噴霧熱分解による白金/セリアナノ粒子の合成と構造評価

○ 長澤 剛, 峯岸 直也, 小酒 英範 (東工大)

- D333 バイオマストレファクションによる高カロリー燃料生成および特性評価
- 松浦 大晟, 佐々木 祐太, 田之上 健一郎 (山口大) D334 堆肥化熱の有効利用 ○ 渡部 吉規 (愛知工科大), 小林 信介, 板谷 義紀 (岐 阜大)

# <E 室>

# E31 9:20-10:40 伝熱研究への MEMS の利用1

オーガナイザー:中別府 修(明治大), 矢吹 智英(九州工大) 座長:鈴木 雄二(東京大)

E311 MEMS センサによる層流予混合火炎の壁面クエンチ過程の観察

○ 中別府 修, 鎌田 慎 (明治大)

- E312 How to measure the thermal contact resistance at the nanoscale
- 李 秦宜, 高橋 厚史 (九州大)
   E313 MEMS 熱流束センサを用いた三相界線近傍の蒸発熱輸送計 測
   四中 健太, 丸山 孝二 (九州工大), Bureš Lubomir,

Sato Yohei (ポールシェラー研究所), 宮崎 康次, 矢吹 智 英 (九州工大)

 E314 4 D プリンティングを利用した熱駆動マイクロアクチュエータの研究
 ○ 橋本 将明 (名古屋大), 佐藤 鳳也, 田口 良広 (慶應 大)

# E32 10:55-12:15 伝熱研究への MEMS の利用 2

# 座長:矢吹 智之(九州工大)

- E321 Bi2Te3-CsSnI3の界面熱抵抗測定
   宮崎 康次,松本 稜己,宮本 翔太郎,矢吹 智英,三 浦 飛鳥,渡邊 厚介(九州工大)
- E322 エンジン内壁面における非導電性燃料液膜検出のための MEMS 静電容量センサの研究
  平岡 郁恵, 中別府 修, 鎌田 慎 (明治大), 窪山 達 也 (千葉大), 高山 敏 (スズキ(株))
- E323 MEMS 微細加工を利用したフレキシブルループヒートパイプの研究

  上野 藍,川上 大河,橋本 将明, Abdulkareem ALASLI,長野 方星 (名古屋大学)
- E324 サブミクロンスケールパリレン流路構造を用いた低消費電力マイク
   □ Knudsen ポンプの開発
   陳 浩, 鈴木 雄二, 森本 賢一 (東京大)

# E33 14:00-15:20 物質移動1

# 座長:鹿野 一郎(山形大)

- E331 高分子収着剤を用いた密閉型水蒸気収着蓄熱ユニットの放熱・蓄熱挙動
   中野 宏紀, 堀部 明彦, 山田 寛, 磯部 和真 (岡山大)
  E332 メソポーラス金属有機構造体 MIL-101(Cr)における水の吸着
- 232 メリホーラス金属有機構造体 MIL-101(Cr)における水の吸着 と脱着に対する温度の影響

   費 舒波,高 嬌 (東京大),松田 亮太郎 (名大),遠
   藤 明 (産総研), Delaunay Jacques,徐 偉倫,大宮司
   啓文 (東京大)
- E333 数値解析を用いた霜結晶の生成抑制効果に及ぼす微細加工 面形状の影響に関する研究
  田岸未来子,中村新吾(富士電機),安喰春華,大 久保英敏(早稲田大)

- E334 サブ 10nm 細孔を有する単層二硫化モリブデンの表面帯電特 性評価 高元 昭秀, 王 志軒, 大宮司 啓文, ○ 徐 偉倫 (東京 大)
- E34 15:35-16:35 物質移動 2
- 座長:磯部 和真(岡山大)
- E341 チャネル内粒子乱流分散に寄与する流体流れの粒子慣性による変化
- 三戸 陽一 (北見工大)
   E342 シイタケ菌糸が生育した原木の吸水過程での軸方向の水の浸 透現象
- 小川 邦康 (慶應大), 八島 武志 (石川農林総研)
   E343 凍結真空, 低温, 高温乾燥した枝豆のメイラ−ド反応
  - 山本 隼大, 鹿野 一郎 (山形大), 及川 彰 (京都大)
- <F 室>

# F31 9:20-10:40 強制対流1

- 座長:保浦 知也(名古屋工大)
- F311 成層流体中を一定加速度で下降する球まわりの流れの水槽実験
   田崎 陽天, 植田 晃平, 沖野 真也, 花崎 秀史 (京大)
- F312 成層流体中を降下する球まわりの流れの数値計算 ○ 越馬 遼,太田 一成,久保田 純矢,沖野 真也,花崎 秀史 (京大)
- F313 マイクロ・サブミリチャンネル冷却デバイスの熱伝達特性評価 ○ 松田 浩輝, 永原 駿一, 桐木平 勝仁, 川水 努 (三菱 重工)
- F314 多孔質ソーラーレシーバ/リアクタの非定常伝熱特性評価
   中倉 満帆, 小島 帆嵩, 高橋 亮太, 松原 幸治 (新潟 大)

# F32 10:55-12:15 強制対流2

座長:松原 幸治(新潟大)

- F321 管内振動流場に設置したリブがストークス層に及ぼす影響 ○ 浅野 大樹 (明大院), 小林 健一, 佐々木 悠, 吉野 壮人 (明大)
- F322 脈動流によるはく離領域の伝熱促進に関する Reynolds 数と脈動周波数の影響
   長島 歩夢, 福江 高志 (金沢工大)
- F323 重畳波形をもつ脈動流がティアドロップディンプル面の伝熱総合 性能に与える影響の LES 解析
   ○ 猪熊 建登,村田 章,矢和田 祐己,岩本 薫 (東京農 工大)
- F324 矩形管路に実装した円柱まわりの沸騰伝熱促進に対する脈動流の有効性
  福江高志,浜谷慧一,松浦克樹(金沢工大),白川英観(富山高専),小糸康志(熊本大)

<H室>

# H31 9:20-10:40 ヒートパイプ1/熱音響 座長:上野 藍(名古屋大)

- H311 熱音響原動機の共鳴管内における定在波の速度分布計測 ○ 平田 樹生, 岡 孝昭 (明大院), 小林 健一 (明大)
- H312 記号リカレンス解析と機械学習を用いた航空機エンジン用シング ルセクタニ段ステージ燃焼器で発生する燃焼振動の事前検知
   ○ 馬場 健人,岸谷 宣成,後藤田 浩 (東理大),庄司 烈,吉田 征二 (宇宙航空研究開発機構)
- H313 太陽熱利用に向けた大きな吸熱面積を有するループヒートパイプの開発
   西川原理仁,石田 直輝,横山 博史,柳田秀記 (豊橋技科大)
- H314 自己再生ブリッジ振動型ヒートパイプに関する研究
   麓 耕二,石井 慶子 (青学大),宮川 滉平 (青学大 院)

# H32 10:55-12:15 ヒートパイプ2 座長:福島 啓悟(福井大)

- H321 金属焼結多孔質流路壁を有する自励振動ヒートパイプの熱輸送特性
   一ノ瀬 樹, 伊勢 拓哉, 黒瀬 築 (東京理科大), 宮田 一司 (福岡大)
- H322 自励振動型ヒートパイプの流動を模擬した単流路の内部流動および2次元温度分布の同時計測
   ○下田 陸斗, 麓 耕二,石井 慶子 (青山学院大)
- H323 動的液膜モデルを付加した自励振動ヒートパイプの数値解析 曽根 航平,松原 幸世,○ 永井 大樹 (東北大)
- H324 扁平管往復曲げ構造自励振動ヒートパイプの設計パラメータ検
   証
   鍋島 史花,安田 陽介 (日立製作所)
- H33 14:00-15:20 ヒートパイプ3

# 座長:望月 正孝(ザヒートパイプス)

(東京理科大)

- H331 数値計算を用いた BACH の熱輸送特性向上指針の提案○ 福島 啓悟, 鈴木 彰人, 永井 二郎 (福井大)
- H332 内部に空気が混在する密閉型水二相熱サイフォンの熱輸送特 性

○ 北村 智也, 須知 成光 (秋県大)

- H333 液柱往復振動に伴い生じる液膜の厚さに及ぼす液柱加減速の 影響
   ○ 三浦 正義 (千葉工大), 趙 懿斌, 齋藤 勇紀, 佃 篤,
- 伊東 弘行 (神奈川大) H334 可変コンダクタンスヒートパイプによる熱電素子の温度制御 〇 大串 哲朗 (アドバンスドナレッジ研究所), 山蔭 久明 (山 蔭技術士事務所), 竹市 剛志 (中部抵抗器), 飯田 努

# H34 15:35-16:55 ヒートパイプ4 座長:西川原理仁(豊橋技科大)

- H341 ナノカーボン材のウィック応用に向けた実験的研究
   森下 和彦, 尾崎 雅治, 李 秦宜, 高橋 厚史 (九州 大)
- H342 ウィック形状変更による高性能ヒートパイプの開発 ○ 上久保 将大 (古河電気工業)
- H343 インホイールモータ用 IGBT の沸騰冷却システムの開発
   望月 正孝 (ザヒートパイプス), 清水 浩, 加藤 有紀子, 河村 廣道, 川口 正樹, 新井 英雄, 田本 貞治, 石川 徹 (㈱ e-Gle), 熊谷 直武 (慶応大), 宇高 義郎, 陳 志豪 (天津大)
- H344 ナノ流体によるナノ粒子層をウィックとするヒートパイプの伝熱性能の改善

○ 王 萌蕾 (電通大), 大川 富雄



編集出版部会からのお知らせ 一各種行事・広告などの掲載について一



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:稲田孝明(東京電機大学):t-inada@mail.dendai.ac.jp
- ・編集出版部会長:永井二郎(福井大学):nagai@u-fukui.ac.jp
- ・広報委員会委員長:一柳満久(上智大学):ichiyanagi@sophia.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員:長谷川洋介(東京大学):ysk@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局:大澤毅士・村松佳子・山田麻子:office@htsj.or.jp
- 【注意】
- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルでお願いします.
- ・HP はメンテナンスの都合上,掲載は申込月の翌月,また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅 れがあることをご了承願います.
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります.pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合 はご相談ください.



センサテクノス株式会社 TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2424

URL www.senstech.jp

TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323





# 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

# 24 18/4

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



# 輻射センサー

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

# MEDTHERM 社(アメリカ)

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



# 熱流計/輻射計

熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft<sup>2</sup>sec(フルスケール) サイズ: 1/16 インチ(約 1.6mm)〜1 インチ(約 25.4mm) 最高温度: 200℃(水冷なし) / 1500℃(水冷) 出力信号: 0-10mV(DC・線形出力) 直線性: ±2%(フルスケールに対して) 応答速度: 50ms 以下\* 再現性: ±0.5% 較正精度: ±2% オプション: 輻射窓・視野角指定等 \*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

# 超高速応答同軸熱電対

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



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

【最小プローブ径】 0.015 インチ(約 0.39mm) 【熱電対タイプ】 【温度範囲】 T型(銅/コンスタンタン) - 270℃〜+400℃ J型(鉄/コンスタンタン) - 210℃〜+1200℃ E型(クロメル/コンスタンタン) - 270℃〜+1000℃ K型(クロメル/アルメル) - 270℃〜+1372℃ S型(白金10%ロジウム/白金) +200℃〜+1700℃

水冷式 火炎強度熱流計

# ITI 社(アメリカ)

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

# 高温用熱流板



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

最7

最高温度∶1900℃ 応答速度: 0.1s

最大熱流束レンジ: 0~3000W/cm<sup>2</sup>

当社取扱製品の適用分野 ■伝熱一般 ■温熱環境 ■炉

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

# 有限会社 テクノオフィス

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

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

# 編集出版部会ノート

# Note from the JHTSJ Editorial Board

前号の編集出版部会ノートに「コロナ禍の状況は,・・・2021 年 12 月中旬時点において国内では沈静化さ れた状況が続いて・・・」と記しましたが、その後オミクロン株による第6波が拡がり、2022 年3月現在で は収束といえる状況にありません。そのコロナ禍に加えて、ロシアによるウクライナ侵攻が2月下旬に始ま り、ウクライナの人達が最も甚大な被害・影響を受けているのはもちろんのこと、全世界のあらゆる人・あ らゆる業界が中長期的に揺り動かされるのではないかと危惧されます。社会の平和と心身の健康は、全ての 人が願うことですが、それらは不断の努力により得られるものだということを思い知らされました。

さて、本号では「温度・熱流・物性の測定手法の新展開」の特集を小針達也様(日立製作所)に組んでい ただきました. 伝熱の研究をする全ての人にとって、温度・熱流・物性の測定手法の理解と改良は必要不可 欠です. 私も研究を行うにあたって、これら測定の精度向上や、測定が困難な物性の評価について悩まされ ることも多いです. これらの測定手法技術の代表的な研究者の皆様から6件のご寄稿をいただきました. ご 多用にも関わらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます.

> 永井 二郎 (福井大学) Niro NAGAI (University of Fukui) e-mail: nagai@u-fukui.ac.jp

 企画・編集出版担当副会長 高松 洋(九州大学)
 編集出版部会長 永井 二郎(福井大学)
 委員
 (理事) 中原 真也(愛媛大学),丸山 直樹(三重大学),坂村 芳孝(富山県立大学)
 (協議員) 浅岡 龍徳(信州大学),小田 豊(関西大学),小針 達也(日立製作所),小宮 敦樹(東北大学) 武田 哲明(山梨大学),塚原 隆裕(東京理科大学),中川 慎二(富山県立大学) 矢吹 智英(九州工業大学)

 TSE チーフエディター
 鈴木 雄二 (東京大学)

 TSE 編集幹事
 李 敏赫 (東京大学)

 編集出版部会 連絡先:
 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

 福井大学 学術研究院工学系部門
 永井 二郎

 Phone: 0776-27-8537

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