



Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 55, No. 230 2016. 1



◆特集:新しいエネルギー変換

http://www.htsj.or.jp/dennetsu/dennetsu55-j.html



左: イオン液体に有機分子を溶解させて作製した光アップコンバーターが,太陽光の赤色部分(バンドパス フィルターにより抽出,半値幅 10 nm)を青色光に変換する様子.

右: 試料の光吸収スペクトルおよび発光スペクトル.光吸収と三重項生成を担う分子(右)および発光を担 う分子(左)を図内に示した.

(特集記事「分子間エネルギー移動を用いた光子のエネルギー上方変換(村上陽一)」より)



メタマテリアルの模式図

MPによる電磁場増強.

(ベクトルは電場を,コンターは磁場の大きさを示す)

左図は波長選択的熱ふく射エミッターのためのメタマテリアルである.これは右図に示すように光によって 金属部に反平行電流を励起させ,誘電体層内において強い磁場の増強効果が得られる共鳴現象(マグネティ ックポラリトン, MP)を利用している.これにより,共鳴波長等の熱ふく射物性を自由自在に制御すること が可能である.

(特集記事「メタマテリアルによる自由自在な熱ふく射制御:熱と光の新たなエネルギー変換に向けて (櫻井篤)」より) No 230

January

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

〈追悼〉

笠木伸英先生を偲ぶ

Michael LESCHZINER (Imperial College London) 1

〈特集:新しいエネルギー変換〉

特集「新しいエネルギー変換」にあたって鈴木 雄二 (東京大学)		8
フォノンエンジニアリングによる熱電材料の開発塩見 淳一郎(東京大学)		9
メタマテリアルによる自由自在な熱ふく射制御:熱と光の新たなエネルギー変換に向けて	-	
櫻井 篤(新潟大学)		18
温度分布制御マイクロフローリアクタによるアンモニア燃焼反応機構の検証		
中村 寿(東北大学)		24
分子間エネルギー移動を用いた光子のエネルギー上方変換 …村上 陽一 (東京工業大学)		32
電極相界面極限利用を実現するレドックスフロー電池		
		41

〈セミナー〉

〈国際活動・会議報告〉

熱物質輸送国際センター(I	CHMT)の	現状と	こ今後の課	題				
					吉田	英生	(京都大学)	 54
第24回 IIR 国際冷凍会議((ICR2015)	報告			渡邉	澂雄	(中部電力)	 59

〈博物館めぐり〉

〈お知らせ〉

〈編集出版部会ノート〉	79
 新入会員一覧	76
・編集出版部会からのお知らせ	75
事務局からの連絡	
日本伝熱学会主催 第4回 国際伝熱フォーラム	74
優秀プレゼンテーション賞(第 53 回日本伝熱シンポジウム)について	73
第 53 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集	69

Vol.55, No. 230, January 2016

CONTENTS

<opening-page< th=""><th>Gravure:heat-page></th><th></th></opening-page<>	Gravure:heat-page>	
Y	oichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)	
А	tsushi SAKURAI (Niigata University) ····· Opening Pa	ige
<eulogy></eulogy>		
To the Memory of	Professor Nobuhide KASAGI	
Y	uji SUZUKI (The University of Tokyo)	
S	anjoy BANERJEE (The City University of New York)	
Ν	Iichael LESCHZINER (Imperial College London)	1
<special issue:="" n<="" td=""><td>New Energy Conversion Technologies></td><td></td></special>	New Energy Conversion Technologies>	
Preface for the Spe	cial Issue "New Energy Conversion Technologies"	
Y	uji SUZUKI (The University of Tokyo)	8
Development of Th	nermoelectric Materials by Phonon Engineering	
Ji	inichiro SHIOMI (The University of Tokyo)	9
A Flexible Therma	Radiation Control with Metamaterial: Toward New Energy Conversion of Heat and Light tsushi SAKURAI (Nijgata University)	18
Validation of Amm	onia Combustion Chemistry by a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile	
H	isashi NAKAMURA (Tohoku University)	24
Energy Upconvers	ion of Photons by Using Intermolecular Energy Transfer	
Y	oichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)	32
Redox Flow Batter	ies with Advanced Flow Field Design and Improved Electrode Properties	
S	hohji TSUSHIMA (Osaka University)	
Т	akahiro SUZUKI (Osaka University)	41
<reports on="" sen<="" td=""><td>ninar / International Activity / International Conference ></td><td></td></reports>	ninar / International Activity / International Conference >	
Report on the 14th	Kansai Heat Transfer Seminar	
H	isato MINAGAWA (The University of Shiga Prefecture)	
Y	oshiki NOGUCHI (Ryukoku University)	51
Present Status and	Future Issues about International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT)	
Н	ideo YOSHIDA (Kyoto University)	54
Report on the 24th	IIR International Congress of Refrigeration-2015	
C	hoyu WATANABE (Chubu Electric Power Co., Inc.)	59
<museum td="" tour<=""><td>></td><td></td></museum>	>	
Visits to Musée de H	s Arts et Métiers, École Nationale des Ponts et Chaussées, and École Polytechnique in Paris ideo YOSHIDA (Kyoto University)	63
<calendar></calendar>		67
<announcement< td=""><td>s></td><td>69</td></announcement<>	s>	69
<note from="" j<="" td="" the=""><td>HTSJ Editorial Board></td><td>79</td></note>	HTSJ Editorial Board>	79

笠木伸英先生を偲ぶ To the memory of Professor Nobuhide KASAGI

東京大学名誉教授,科学技術振興機構 (JST)研 究開発戦略センター副センター長、本学会元会長 である笠木伸英先生におかれましては, 2015 年 7 月 29 日にご逝去されました. 享年 69 歳でいらっ しゃいました. 2014 年 8 月に京都で開催された国 際伝熱会議の議長を務められ、その直後から治療 にあたられていましたが, その甲斐無く旅立たれ てしまいました.ご葬儀は,先生のご遺志により ご家族のみでしめやかに執り行われました.8月2 日午後に先生の携帯からお電話頂き、本当に久し ぶりにお話ができると電話に出たところ、奥様か ら, 先生がご逝去されたこと, ご葬儀を済まされ たことを伝えられ、ご家族以外では最初に悲報を 知ることになりました.この追悼記事を書いてい る今でも全く信じられない気持ちで、市ヶ谷あた りを歩いているとばったりお会いするのではない か、突然研究室に立ち寄られるのではないか、と 考えてしまうぐらいです.

笠木伸英先生は、1947年5月8日,北海道にて お生まれになりました.都立新宿高校卒業後、 1966年に東京大学理科一類に入学されました.東 大紛争の影響で1971年に工学部舶用機械工学科を 卒業され、1976年に平田賢先生のもとで博士課程 を修了されました.学位論文のテーマは「体積力 を伴う乱流境界層の輸送機構に関する研究」でい らっしゃいました.修了後、ただちに東京大学講 師となられ、1977年に同助教授、1990年に教授に なられ、2012年に定年退職されました.

笠木伸英先生は,熱工学に関する非常に多岐に 渡る分野で活躍されてこられました.熱流体分野 では,感温液晶を用いた温度場の非接触計測,壁 乱流の準秩序構造とその伝熱機構に対する構造論 的モデリング,デジタル画像処理による3次元粒 子画像流速計の開発,直接数値計算(DNS)によ る壁乱流の熱伝達機構の解明,壁乱流の漸近挙動 を考慮した工学的乱流モデルの構築,せん断乱流 の熱・物質輸送機構の解明などを精力的に取り組 まれ,極めて多くの研究成果を挙げられました. 鈴木 雄二 (東京大学) Sanjoy BANERJEE (The City University of New York) Michael LESCHZINER (Imperial College London) Yuji SUZUKI (The University of Tokyo)



また,我が国における乱流知的制御の牽引役とし て,壁乱流の準秩序構造に基づいた摩擦抵抗低減 機構の解明,噴流のアクティブ制御,MEMS セン サ・アクチュエータ群を用いた壁乱流のフィード バック制御システムの開発を行い,準秩序的な流 れ構造を選択的に操作することにより,極めて高 効率の制御が可能であることを数値計算,実験の 両面から明らかにされました.2009 年には,河村 洋先生,長野靖尚先生(誠に残念ながら本年 6 月 にご逝去),宮内敏雄先生とともに,乱流工学の集 大成として,「乱流工学ハンドブック」をまとめら れています.

また、大規模集中発電を補完する小型分散発電 システムの有効性をいち早く提唱され、マイクロ ガスタービンを中心とする分散エネルギーシステ ムのためのエネルギー解析、固体酸化物形燃料電 池の電極反応の詳細解析などのエネルギー工学に 関連する成果も多く挙げられました.

これらの研究は、いずれも国内だけでなく国際 的にも高い評価を受けておられますが、先生の研 究活動はそれに留まらず、ANSI/ASMEの「計測の 不確かさ」PTC19.1 の翻訳と不確かさ解析の普及 に尽力され、また壁乱流 DNS のデータベースを構築 して HP上で世界の研究者に公開するなど、研究コ ミュニティ発展のための努力も惜しみなく続けて こられました. これらの研究活動を通じて,雑誌論文約 180 編, レビュー論文・解説約 160 編,国際会議論文約 300 編を公表され,また,博士学生 42 名 (うち外国人 8 名),修士学生約 150 名,学部生約 240 名を育て られました.

学会活動では、本学会第 50 期会長として 50 周 年記念事業に尽力されたほか、日本学術会議会員 (2005-2014 年)、日本機械学会会長 (2006 年)、 日本流体力学会会長 (1997 年) などを歴任されま した.また、International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena 国際会議を立ち上げたほ か、Int. J. Heat & Fluid Flow 誌の主幹編集者、 Assembly of World Conferences on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 会長、 International Centre of Heat and Mass Transfer 副会長、 Assembly for International Heat Transfer Conferences 副会長、OECD 科学技術政策委員会日本代表委員、 などを務められました.

受賞も数多く,日本機械学会論文賞(1987,1990, 2008,2010年),日本機械学会流体工学部門賞 (2004年),熱工学部門業績賞(1993年),国際功 績賞(2008年),米国機械学会フェロー(1994年), 王立スウェーデン科学アカデミー会員(2003年), 英国王立工学アカデミー国際フェロー(2007年), William Begell Medal(2010年), ICHMT Fellowship Award(2012年), Luikov Medal(2012年), Aurel Stodola Medal(2013年),などを受賞されています.

学内にあっては、キャンパス計画室員(1995年) として柏新キャンパスの構想にあたられたほか、 総長補佐(1995年)、評議員(2002年)、国際化推 進プロジェクト委員長、国際化推進室長(2002-2007年)などを通じて、新しい大学・工学のあり 方を議論され、それに向けた改革に大きな貢献を されました.また、21COE プロジェクト「機械シ ステム・イノベーション」拠点リーダー(2003-2008年)も務められ、開かれた国際環境の中で横 断融合的な研究活動を自ら生み出す仕掛けを育て ると同時に、優れた博士人材の育成に取り組まれ ました.

笠木先生のご研究の一つの転機になったのは, 1980年~1981年にかけて客員研究員として滞在さ れたスタンフォード大学時代だったのではないか と思います.先生は Thermosciences Divisions の R. Moffat 教授の研究室で感温液晶の応用をはじめと する乱流熱伝達関連の研究を進められました.ま だ本会が伝熱研究会だった頃の学会誌である伝熱 研究 21 巻 80 号(1981 年)に,その時の状況を 「スタンフォード大学滞在記」として書かれてい らっしゃいます.

当時,スタンフォード大学の乱流研究は1つの 黄金期であり、S.J. Kline, W. Kays, W. Reynolds, J. Ferziger, J. Kim, P. Moin, D. Chapman をはじめ とする多くの教員が精力的に研究を進めていまし た. 先生はきっとスタンフォードの層の厚さを痛 感されたのだと思います.また,それと同時に 「(前略) 周囲の米国人も小生が日本人だからゆっ くり話してやろうという心使いも薄く、話せぬ者 はおいておかれるという感じで、すっかり気が滅 入ってしまった次第です」と書かれていらっしゃ います. 欧米人と真っ正面から英語で議論する, 端から見ていても惚れ惚れする笠木先生のお姿を ご存じの方々(筆者自身も含め)には信じられな いと思いますが、先生のご性格から察するに、帰 国後、きっと血の滲むような努力をされたに違い ありません.

当時スタンフォードに在籍していたスタッフの うち, John Kim (現, カリフォルニア大学ロサン ゼルス校,写真), Parviz Moin (現,スタンフォー ド大学)とは同世代であり,その後の乱流研究で も競争相手だったので,良き友人であるとともに ライバル意識を強く感じていらしたようです.

筆者が笠木先生の研究室の門をくぐったのは, 1986年であり,平田賢先生が教授,笠木先生が助 教授でいらっしゃいました.研究室全体の研究会 とは別に,テーマごとに別れて笠木先生と突っ込 んだ議論をするミーティングがありました.卒論 生の最初のころは,何かご説明しようとして結果



John Kim 夫妻と第6回日韓熱流体工学会議にて (済州島, 2005 年3月)

を持っていっても、実験の前提や論理の不備を指 摘され、本題にたどり着く前の段階であえなく轟 沈することがほとんどでした.また、実験室には 敢えて足を運ばれなかったのだと思いますが、学 生に実験の状況を1つ1つ聞いた上で裏紙にスラ スラとポンチ絵や数式を書かれて、これから検討 すべき方向性を明確に示されていました.そのよ うな議論の中で、我々学生は、論理的な考え方を 学んでいったのだと思います.

当時の笠木先生の周りには,昼間は殺気を感じ るほどピンと張り詰めた空気がありましたが,夜 になると研究室で一緒にビールを飲んで学生の馬 鹿話に付き合って頂けることもありました.また,



筆者と International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements に参加し た際の旧市街にて(ドブロフニク, 1990年)



W. C. Reynolds 教授(故人,スタンフォード大学)を平田・笠木研究室の博士修了者でお迎えした夕食会. 左から,黒田(現,北海道大学),稲垣(現,茨城大学),西野(現,横浜国立大学),二宮(現,宇都宮大学)の各氏,笠木先生, Reynolds 先生,筆者(湯島・天庄にて,1994年4月11日)

その話の中でも,研究への考え方や人生観につい て我々が得ることが多かったと思います.新宿高 校水泳部の話や,子供の頃に禅寺に預けられた話, スタンフォード時代の研究の話など強く印象に残 っています.

筆者は修士学生時代に X 型熱膜流速計を用いた チャネル乱流計測の研究をしていました.一回 40 時間もかかる実験のうえ,再現性が得られず,全 く成果が出ませんでした.しかし,博士課程に入 ってから、ようやくまともな実験データが得られ るようになりました.また,先輩の学生だった黒 田氏(現,北海道大学)が行ったチャネル乱流 DNS の計算結果を用いた解析により,壁乱流計測 における X 型熱膜(熱線)流速計の原理的な問題 が明らかになってきました. そんなある日, 地下 実験室で実験準備をしていると、先生から電話が 掛かってきて,国際会議に出してみないか,とい うお話を頂きました. もちろん二つ返事で飛びつ きましたが、その最初に発表した国際会議の開催 地が当時まだユーゴスラビアだったドブロフニク でした. 先生は学生を海外旅行に慣れさせるため, 日本と現地の往復は一人で行動しなければならず 大変でしたが、今でも良い思い出です(写真左上).

また、当時の研究室には、優秀な先輩・後輩が 沢山いて、また全員が乱流に関する研究をテーマ にしていたので、様々な突っ込んだ議論ができま した.笠木先生ご自身、「研究室には波があって、 何度か黄金期があるものだ」と仰っていましたが、 その一つの黄金期に研究室に居られたことは、筆 者にとっては非常に幸運でした.乱流分野で笠木 先生のお名前は海外にも広く知られていたので、 当時としては海外から来訪される先生方も多く、 夕食に一緒に連れて行って頂くこともたびたびあ りました(写真左下).

筆者は、1994 年度に長野靖尚先生のもとで名古 屋工業大学の講師を勤めた以外は、笠木先生のも とで研究を続けてきました.先生の膨大な学内外 のお仕事の一部をお手伝いすることも多くありま したが、それも大学人としては良いトレーニング を受けたと感謝しております.准教授に昇任して しばらくしたら、「乱流はやるな」「分散エネルギ ーもやるな」と言い渡され、当時は崖から突き落 とされたような気持ちになったこともありました が、振り返ってみるとそのご指導のおかげで現在



定年退職記念祝賀会にて奥様と(東京會舘, 2012年3月16日)

の自分の研究があると痛切に感じています.

笠木先生は身内にも厳しいがそれ以上に自分自 身に一番厳しい先生でした.また,男気に溢れ, 正義感が人一倍強く,常に物事のバランスを考え ていらっしゃいました.「研究はしっかりした一段 一段の積み重ねでなければ駄目だ」,「目の前にい ない相手と競争しろ」,「分かれ道で迷ったら,よ り厳しい道を選べ」,「Think, Think, Think!(考え て考えて考え抜け)」,「Engineer としての高い職業 意識を持て」など,様々な研究に対する考え方や 人生観をお教え頂きました.常に,大学,学会, 日本の将来について考え,心配もされていらっし ゃいました.

2012年3月の最終講義では、「熱流体工学から社 会のための科学へ」というお話をされ、これまで の研究の総括をされるとともに、科学に対する社 会の期待と、それに応えるべき研究者・技術者の 使命について語られました.当日の祝賀会の準備 段階で「こういう会は大学人のエゴで行うものだ から、学外の人にはあまり宣伝するな」とのご指 示があり、OB会を中心に企画しましたが、それで も 160 名以上の参加者で会場は満員でした.会に は、奥様とお二人のお嬢様にもおいで頂き、参加 者一同、楽しいひとときを過ごさせて頂きました. 閉会の際のご挨拶では、大学とは違った立場でこ れからの我が国の科学技術の推進に貢献されたい という決意を表明されていらっしゃいました.

その後,JST の CRDS 副センター長,Crest 領域 統括だけでなく,日本学術会議,文科省技術参与, OECD 科学技術政策委員,様々な国際学会・会議 の組織委員など,大学時代以上に国内,海外を飛 び回って忙しくされていると伺っていましたが, わずか3 年半でこのような悲しいお知らせに接す るとは誰にも想像できませんでした.まだまだ我 が国のためになされたいことを沢山抱えられ,精 力的に活動されていた道半ばで亡くなられたこと に,先生のご無念はいかばかりだったかと存じま す.また,お忙しい中もご家族を常に大事にされ ていたので,現役引退後の悠々自適の生活もきっ と楽しみにされていたに違いなく,その意味でも ご無念だったに違いありません.

研究室の OB 会を万日(まんにち)会と呼びま すが,これは人生1万日が27歳5ヶ月となること にちなんで笠木先生が学生時代に設立されたもの です.研究室の大先輩の勝又一郎氏によれば、1 万日までが成長の世代,2万日(55歳)までが活 動の世代,3万日(81歳)までが思考の世代とさ れ,OB会では年齢よりも何万日世代かが重要です. 笠木先生の3万日をお祝いするのはまだまだ相当 先で、先生に少しお時間ができたらそれまでの研 究成果も見て頂きながらゆっくりお話できる, と 楽しみにしていましたが、叶わぬ夢になってしま いました. もとより, これまでのご恩をお返しで きる筈もないと思っていましたが, 西脇先生, 平 田先生、笠木先生と続いてきた熱流体研究室がど こに向かって行くかを見て頂くこともできません でした. 笠木先生の教え子の一人として恥ずかし くないように、また、先生の高い問題意識を忘れ ずに、これからも精一杯努力していくしかないと 思っています.

これまで本当にありがとうございました. ずっ と走り続けてこられた先生ですので, どうぞ安ら かにお眠り下さい.

笠木先生は、国内はもとより海外にも研究を通じた親しい友人が大勢いらっしゃり、訃報を知った多くの方々からお悔やみのメールを頂きました.
研究室に長期滞在されて交流を深められた方のうち、Sanjoy Banerjee 教授(1996年に滞在、当時University of California, Santa Barbara,現 The City University of New York), Michel Leschziner 教授(2006年に滞在,Imperial College London)から追悼文を頂きましたので、この紙面にてご紹介させて頂きます.

To the memory of Professor Nobuhide Kasagi

Professor Nobu Kasagi's unexpected passing is a great sorrow and loss to all of us who have known him. He was a truly fine human being, as well as a great engineering scientist, widely recognized for his many accomplishments. For his family to whom he was very close, we convey our deepest sympathies and condolences.

Though I had met Nobu on many previous occasions, the first time I got to know him well was at the 1995 International Conference on Multiphase Flow in Kyoto. An event of note was some rather raucous singing by the French contingent, notably Olivier Simonin that Nobu and I both enjoyed together. At that time Nobu, perhaps bemused by the cacophonous vocalizations, asked if I would be interested in spending a year in the Mechanical Engineering Department at the University of Tokyo as the Mitsubishi (Visiting) Professor. As we shared many common interests, such as turbulence structures interacting with deformable boundaries, I accepted with alacrity. So it was that I spent four months of my sabbatical from UC Santa Barbara at Tokyo in the Fall of 1996, working much harder than I had ever anticipated under Nobu's benevolent but eagle eye, which of course was a mark of the greatness of the man.

The time in Tokyo hosted by Nobu was one of the most enjoyable periods of my life. He was, as is well known, a gentleman in the best sense of the word. He was warm but always correct, welcoming but never effusive, solicitous of one's needs but never overwhelming and one of the most intellectually stimulating people I have worked with. His laboratory was an engine of unusual productivity and distinction, which the scholars he mentored nonetheless stashed with whiskey among the scientific paraphernalia- much appreciated by several of my visiting PhD students. He kept an unrelenting schedule himself, expecting others to work long hours with the same selfless devotion as his. But after work he would some times go out to sing karaoke with us and all our cares would fall away. Needless to say Nobu had a very fine voice!

There are many things I remember well about Nobu's persona. One of these was that he was meticulous and had the kindness and foresight to deal with even the most apparently trivial but essential details. When I first arrived in Tokyo, not only had he arranged for where I was to stay, but had even arranged for a personal stamp in Kanji so I could access a bank account. Another time, when my family, who had stayed on in Santa Barbara, was visiting Tokyo we all went to his laboratory at the university. The complex equipment bewildered my daughter who was five at that time but Nobu of course had toys for her to explain the chaotic nature of turbulence, including a double pendulum, which exhibited chaotic behavior! There is a picture somewhere in our archives, which illustrates this occasion.

Over the years, Nobu and I kept in touch. He was seminal in initiating the symposia on 'Turbulence and Shear Flow Phenomena', which have now become a well-known international forum for research in the area. I was the Chair of the first symposium, which was held in Santa Barbara, and it was due to Nobu and John Eaton's tireless efforts that the conference was so successful that it kicked off an outstanding series. We continued to meet often, either in Japan or in the US. Some years ago, I remember coming into Tokyo with a horribly stiff back and staying at the International House in Roppongi. Nobu and his wife, Hiroko, came to take me to dinner at a nearby restaurant, Enoteca. Nobu was concerned about my physical condition, but as always had a solution. "A bottle of Gevrey Chambertin (a Burgundy)' he said, 'will cure it or at least kill the pain much better than a massage', and of course it did! Nobu was always imperturbable and knew how to deal with a problem, often proposing an out-of-the-box solution.

His kindness and warmth were remarkable, and I will miss him greatly, as will all those who knew him. He will be remembered with affection and respect by those who knew him.

Sanjoy Banerjee CUNY, Sept. 2015

A Personal Tribute to Nobuhide Kasagi

Like many in our community, who were entirely unaware of Nobu's illness, I received the news of his untimely and tragic death with incredulity, followed by an intense feeling of loss and sadness at a life taken all too early.

Nobu's astonishing number of scientific, professional and societal achievements, and their lasting impact, stand proudly on their own plinth, and need not be retold and lauded in this personal tribute – save for one exception.

In 2006, Nobu was elected **Fellow of the British Royal Academy of Engineering** – an especially rare honour granted to foreign nationals. The one-sentence citation required to precede the detailed case for support read as follows:

Distinguished for his outstandingly innovative research contributions to engineering science and technology, covering a broad range of fundamental topics and applications; for his outstanding leadership role in Japan's mechanical engineering community - most notably, as President Elect of JSME and leader of Japan's premier 21st Century Center-of-Excellence Program on Mechanical Systems Innovation ; and his wholly exceptional dedication to building bridges between Japan's engineering profession and the international community.

What else need one say about this supreme academic professional who was dedicated to the promotion and exploitation of engineering science, to rearing and fostering the next generation of Japan's scientists, engineers and university academics, and to making Japan's engineering community a natural constituent in the global science and engineering fabric?

I have been fortunate to call Nobu my collaborator and – I like to think – my friend since 1997, when we joined forces with John Eaton, Pepe Humphrey⁺ and Martin Sommerfeld to establish the **Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP)** series of conferences, to



Meeting of the TSFP5 Organising Committee in Munich in 2006 (right-to-left: Nobu Kasagi, John Eaton, Michael Leschziner, Pepe Humphrey[†], Rainer Friedrich)

follow the earlier, highly successful **Turbulent Shear Flows** series. Among the four of us, Nobu was the principal driver of this initiative, displaying the singleminded determination and dedication that characterizes everything he tackled....and the rest is history: TSFP – the latest, TSFP-9, held in Melbourne in August 2015 – has become the principal global conference reporting research in turbulent flows. This is one of numerous legacies he leaves behind.

My closest and most rewarding interaction with Nobu came in 2006, when I had the privilege and pleasure of spending a 9-month sabbatical period in the legendary "Kasagi Laboratory" at Tokyo Daigaku. I shall always remain grateful to Nobu for his decisive role in securing the JSPS Senior Fellowship that supported my visit, and also for being a supremely meticulous and generous host. Attending dozens of informal seminars given by his students, and participating in outings and social "drinking-and-eating" gatherings, with Nobu almost invariably present and fully engaged, made it obvious to me why he was so admired and liked by his junior collaborators and students: it was not simply his supreme command of the science being researched, his global stature and prominent position in Japanese society, but his impeccable politeness, his tendency to listen patiently and with total attention before giving thoughtful and constructive feedback and guidance, and the charm he



Dinner at The Gore, South Kensington, London, 2012 (left-to-right: Nobu, Hiroko, Freda, Michael)

exuded, curiously contrasting a somewhat patrician presence that comes with being a member of the national elite. I will admit to leaving Tokyo rather humbled by his admirable leadership qualities.

During my time in Tokyo, and at gatherings in various locations in Japan and abroad, I gleaned a little of Nobu's qualities as a private individual – generosity and graciousness being at the top of my list. My wife, Freda, and I had the pleasure of sharing with Nobu and his vivacious and charming wife, Hiroko, a good number of excellent French and Italian meals – although I shall also cherish the many down-to-earth lunches we had in a simple, small noodle restaurant just outside Tokyo Daigaku.

Strong self-control was a major fix-point in Nobu's character. On one occasion, when Nobu and Hiroko visited us in our Central London apartment, Hiroko forgot her handbag in the taxi that brought them to us. Naturally, Hiroko displayed at least a modicum of concern (my wife would have been in sheer, unadulterated panic). Not so Nobu: calm and composure personified. Somehow, Nobu was confident the handbag would be returned – and, of course, it was, entirely as Nobu predicted.

Nobu was an intensely private individual, and he would probably forgive me for intimating that he rarely "let his hair down", at least in my presence. Even after several glasses of good French or Italian wine, he tended to remain rather serious, controlled and reflective. Our conversations rarely ventured into the realm of his private life – although I know that he was intensely proud of his two successful daughters. Our conversations usually revolved - or ended up revolving - around his concerns about Japan's role on the world stage, about its long-term ability to compete, as a manufacturing nation, with China, and about the impact of globalisation on the outlook and changing lifestyle of Japan's young generation. His pre-occupation with these profound national questions, even in the most informal of social settings, characterized a man who saw his life as a mission to improve the lot of Japan and mankind as a whole.

May he rest in peace and look benignly upon our inadequate efforts to build on his legacy.

Michael Leschziner Imperial College London, Sept. 2015

- 7 -

特集「新しいエネルギー変換」にあたって Preface for the Special Issue "New Energy Conversion Technologies"

いうまでもなく、東日本大震災以降、エネルギーは国民の最大関心事である.エネルギーを語る とき、我々の生活への直接的な影響だけでなく、 自給率 5%まで落ち込んだ我が国のエネルギーセ キュリティ、エネルギー価格上昇による国内産業 への影響などを考えなければならず、到底、科学 あるいは工学だけの議論で閉じることはできない.

平成27年7月に策定された長期エネルギー需給 見通し[1]では,年1.7%の経済成長を見込みながら も,今後の技術革新による省エネによって 2030 年度には13%のエネルギー需要抑制,17%の電力 需要抑制を見込んでいる.この時の電力割合は, 再生エネルギー19~20%,原子力17~18%として いる.また,その目標に向かうため,生産(再生 可能エネルギー,熱利用,二酸化炭素回収・貯留, 高効率火力発電,原子力発電,コージェネレーシ ョンなど),流通(電力貯蔵,超伝導送電),水素, 消費(産業・家庭・運輸部門,蓄熱・断熱技術, エネルギーマネジメントなど)などからなるロー ドマップ[2]も作成されている.

本学会に所属する多くの方々は、このような流 れの中で、エネルギーに係わる様々な研究開発に 取り組まれているものと拝察する.しかし、前述 のエネルギーと経済の深い関係を考えると、エネ ルギーの変換・貯蔵・輸送などに伴うコストは極 めて重要であり、この流れに直接的に貢献できる 即効性ある選択肢はそれほど多いわけではない.

一方, エネルギーでも,「付加価値の高いエネル ギー」という概念が存在する.大容量・低価格の グリッド電力に対して,はるかに単価が高いが, 持ち運びができていつでも使える電池はその代表 格である.最近では,ウエアラブルデバイスや無 線センサの持続電源のために,環境の振動・熱・ 電磁波などから発電する,エネルギー・ハーベス ティング[3]も注目されているが,これも高付加価 値のエネルギー源の1つである.高付加価値のエ 鈴木 雄二 (東京大学) Yuji SUZUKI (The University of Tokyo) e-mail: ysuzuki@mesl.t.u-tokyo.ac.jp

ネルギー源では、材料、加工技術などにコスト的 な制約が少ないため、選択しうるアプローチはグ リッド電力に比べると遙かに広い. 高付加価値エ ネルギーを出口としてスタートした幾つかの手法 が、将来的には大化けしてグリッド電力にも貢献 する技術として成長することを期待したい.

このような背景のもと、本特集では、エネルギ 一分野の中でも「新しいエネルギー変換」に焦点 を絞り、新進気鋭の5名の先生方にご寄稿を頂い た.塩見淳一郎先生(東京大学)には分子レベル からの材料設計と新しい熱電材料への展開、櫻井 篤先生(新潟大学)にはメタマテリアルによる新 しい熱ふく射制御、中村寿先生(東北大学)には 水素キャリアとしてのアンモニアとその燃焼機構 解明、村上陽一郎先生(東京工業大学)には非コ ヒーレント光を短波長化する光アップコンバージ ョン技術、津島将司先生(大阪大学)にはエネル ギー貯蔵に有効と考えられるレドックスフロー電 池内の反応輸送現象について、それぞれ判りやす く、また極めて興味深い解説をして頂いた.

我が日本伝熱学会の強みは、今回のエネルギー 関連の最先端研究に係わらず、研究の間口の広さ と個々の質の高さであると考えている.本学会の 特定推進研究[4]でも、エネルギーに関する新しい アプローチが様々議論されている.今回の特集が 諸兄の今後の研究の参考になれば幸いである.

参考文献

- [1] 経済産業省, エネルギー需給見通し, (2015)
- [2] 経済産業省, エネルギー関係技術研究開発ロ ードマップ, (2014).
- [3] 鈴木(監修),環境発電ハンドブック~電池 レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会 を目指して~,エヌ・ティ・エス,(2012).
- [4] 小澤・鹿園・花村, 特定推進研究課題報告書, 伝熱, Vol.53, No.225, pp. 99-101, (2014).

フォノンエンジニアリングによる熱電材料の開発 Development of Thermoelectric Materials by Phonon Engineering

1. 熱電変換材料

熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換でき る熱電変換は、素子だけで変換を実現する技術と して期待されている.可動部を必要としないため にメンテナンスフリーであり、電力密度が高いう えに微小化しても減らず、形状や熱源の種類を選 ばないことから、実装の多様性に優れている.例 えば、Internet of Things (IoT)などでニーズの増 加が見込まれるエネルギーハーベスティング電源 [1]、自動車[2]や工業炉[3,4]などの排熱利用、温水 利用とあわせた太陽熱発電[5]、インフラが弱い遠 隔地でのモバイル機器の充電[6]、トッピング発電 [7]などのコジェネ利用など、潜在的応用は多岐に 渡る.

しかし、これらの実装を進めるには、まだまだ 課題が多いのが現実である.その中でも第一の課 題として挙げられるのが、エネルギー変換効率の 向上である(同様に重要なコストについては7節 で述べる).熱電変換材料の変換効率ηは一般にカ ルノー効率η。に対して以下のように表される.

$$\eta = \eta_{\rm c} \frac{\sqrt{1 + Z\overline{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\overline{T}} + T_{\rm C} / T_{\rm H}} \tag{1}$$

ここで $T_{\rm H}$, $T_{\rm C}$, \overline{T} はそれぞれ材料の高温側温度, 低温側温度,平均温度である.従って,材料の変 換効率は無次元性能指数 ZT によって一意に決ま る. ZT は $S^2\sigma T/(\kappa_{\rm e}+\kappa_{\rm ph})$ で与えられる材料固有の物 性であり, S, σ , $\kappa_{\rm e}$, $\kappa_{\rm ph}$ はゼーベック係数,電気 伝導率,電子熱伝導率,格子 (フォノン)熱伝導 率である.すなわち,変換効率の向上のためには, 使用環境での温度域において S と σ が大きく, $\kappa_{\rm e}$ と $\kappa_{\rm ph}$ が小さい材料が必要となる.しかし,一般 に S と σ は負の相間を有することが多く,また σ と $\kappa_{\rm e}$ は同じキャリアによって輸送される量である ため正の相関を有し,一筋縄では行かない.

それに対して、近年、原理原則にもとづいて構

塩見 淳一郎 (東京大学) Junichiro Shiomi (University of Tokyo) e-mail: shiomi@photon.t.u-tokyo.ac.jp

造や材料を設計することで,熱電物性を制御する 研究が発展している.その中で著者らはフォノン 輸送の理解にもとづいてナノ構造化材料を設計・ 開発するフォノンエンジニアリング研究を進めて おり,本稿では,それらの概要を紹介する.

2. ナノ構造化材料の熱電性能

ZT の向上を目指した材料研究の熱電素子の歴 史は古いが、1990 年頃に Dresselhaus ら[8]が量子 井戸構造で量子閉じ込め効果によって熱起電力が 増大することを予測したことをきっかけに、極薄 膜,超格子,量子ドットなどのナノ構造の熱電性 能の研究が広く行われるようになった.ナノ構造 は比界面積が大きいことから、フォノン熱伝導率 を低減することにもなり、ナノ構造を用いた大幅 な性能向上が多数報告されている.

ナノ構造の熱電性能の研究は2つに大別できる. 1 つは,量子閉じ込め効果や周期性の効果を発現 するためにナノ構造を厳密に制御した研究である (エピタキシャル成長やリソグラフィー加工など を用いた研究)[9,10].もう1つは実用を念頭に制 御性とスケールアップ性をバランスした研究(ボ ールミル,焼結などを用いた研究[11,12])である.

前者は,量子閉じ込め効果に加えて,周期構造 で生じるフォノン波[13]の干渉効果によってフォ ノン輸送を阻害するなどの,新しい物理現象の発 現による性能向上が期待される(8節で説明する). 一方,後者は実用化に直結するバルク材料の性能 向上に大きく貢献してきた.これらの多くは,ナ ノ構造界面でのフォノン散乱を利用して熱伝導率 を低減することを狙ったものであり,厳密に構造 を制御する必要は必ずしもない.つまり,サイズ や方向に分布を有するナノ構造から成るバルク材 料でも良いことになり,より簡便・安価な製造方 法が適用できる.以上を背景に,近年,様々な形 態のナノ構造化バルク材料の研究が盛んに行われ ており,実験室レベルでは,例えば,鉛カルコゲ ナイド系の材料をナノ構造化することで,ZTが2 を超えるバルク材料も出てきている[12].

3. ナノ構造化材料のフォノン輸送

ここで,ナノ構造による熱伝導率の低減機構を フォノン気体運動論の観点から説明する.図1は ナノスケールの結晶が粒界を隔てて接合している ナノ多結晶体を模擬している.図1(a)のように, 粒径がフォノン平均自由行程よりも十分に大きい 場合は,フォノンは界面に達する前に他のフォノ ンに散乱されるので(拡散フォノン輸送),粒内の 熱伝導率は単結晶のそれと同じと考えることがで きる.一方で,図1(b)のように,粒径がフォノン 平均自由行程よりも十分小さい場合は,フォノン は他のフォノンには散乱されずに(弾道フォノン 輸送)界面よって散乱されるため平均自由行程は 粒径で制限され,粒内の熱伝導率は単結晶のそれ よりも小さくなる.

これは伝導率の(古典的)サイズ効果と呼ばれ, ボルツマン輸送でよく議論されるコンセプトであ る.半導体の電子の平均自由行程は一般にフォノ ンのそれよりも小さいため,粒径を電子の平均自 由行程よりも大きく保てば,フォノンの輸送を選



図1 ナノ構造化材料のフォノン輸送

択的に阻害でき,電気伝導を然程犠牲にせずに, 熱伝導率を低減できる.

以上の考え方はシンプルで良いが,実際には, フォノンの平均自由行程はフォノンの周波数,波 数,偏向によって大きく異なるため,図1(c)のよ うに拡散フォノンと弾道フォノンが混在した「準 弾道輸送」となる.従って,フォノン輸送の視点 からナノ構造内の熱輸送を考える際には,このよ うな強いマルチスケール性を考慮する必要がある.

4. フォノンエンジニアリング

東京大学・熱エネルギー工学研究室[14]では, フォノン輸送の科学から得られた材料の設計指針 をもとに材料開発を行うフォノンエンジニアリン グを実践するべく,理論・数値解析,物性計測, 構造作製の3つを一体としたアプローチによる研 究を進めてきた.材料の熱伝導率を計算・測定し, 構造との関連から得られる設計指針をもとに材料 を作製する「巨視的な練成」は従来から行われて いるが、ここではそれに加えて、3つのアプロー チをフォノン輸送物性のレベルで練成する「微視 的な練成」を行う点が特徴的である(図2).例え ば、計測においては単に熱伝導率を計測するので はなく,フォノンのモードに依存した熱伝導能(熱 伝導スペクトル)を計測し、理論・数値解析との 微視的な整合性を確認しながら研究を進める.ま た,構造作製においては,界面と内部の効果を分 離できるモデル試料を作製し、界面原子構造によ る熱伝導の制御性を明らかにしながら研究を進め る. これらによって、より原理原則にもとづく形 でフォノンエンジニアリングが行えるようになっ



図2 フォノンエンジニアリングの構図

てきている.次節以降では各アプローチの近年の 進展を概説する.

5. フォノン輸送の理論・数値解析技術

ナノ構造材料内のマルチスケールなフォノン輸 送とそれによって決定される実効的な熱伝導率を 計算するには、ある程度大規模な計算が必要とな る.一方で、熱伝導率の値は性能指数に敏感に影 響するため、高い計算精度が要求される. そこで 我々は, 第一原理計算を出発点としたマルチスケ ール・フォノン輸送解析法を開発してきた.手法 のフローチャートを図3に示す.まず,密度汎関 数理論を用いた第一原理計算によって原子間力定 数を求める.これをもとに、純結晶系であれば非 調和格子動力学法を用いて, 合金系であれば分子 動力学法を用いてフォノンの緩和時間を計算する. 分子動力学法は相対的にノイズが大きい反面、実 空間解析法であることから非均一系を取り扱いや すい利点がある.次に、得られたフォノン輸送物 性を入力として,緩和時間近似のもとでフォノン ボルツマン輸送方程式をモンテカルロ法によって 解く. モンテカルロ法を用いることによって, 実 際の熱電材料に見られるような複雑な界面形状に 対応することができるのと同時に、界面でのフォ ノンの透過・反射率を確率論的に導入することが でき, ナノ構造化バルク材料の解析への発展が可 能となる.なお、第一原理に立脚することで、ゼ ーベック係数や電伝導率もコンシステントに計算 することができる点も本アプローチの利点である. 以下では各要素について説明する.



図3 マルチスケール・フォノン輸送解析

5.1 単結晶材料の計算

近年盛んに行われている摂動論にもとづく単結 晶の熱伝導率の計算では、まず原子間力定数 (Interatomic Force Constant, IFC)を出発点とする. 基底状態の結晶において、i 番目の原子に働く α 方向の力は、IFC 及び平衡位置からの変位 u を用 いて以下のように記述できる.

$$F_i^{\alpha} = -\sum_{j,\beta} \Phi_{ij}^{\alpha\beta} u_j^{\beta} - \frac{1}{2!} \sum_{jk,\beta\gamma} \Psi_{ijk}^{\alpha\beta\gamma} u_j^{\beta} u_k^{\gamma} + \cdots$$
(2)

ここで、 Φ とΨはそれぞれ2次の調和IFCと3次 の非調和IFCである.この非調和IFCの厳密な計 算は長年困難であったが、密度汎関数摂動理論 (Density Functional Perturbation Theory, DFPT)など の発展により、2007年頃からシリコンやゲルマニ ウムなどの軽量で対称性の良い結晶に関しては正 確な解析が可能となった[15].その後、実空間原 子変位法[16]や調和IFCの差分から非調和IFCを 求める方法 [17]によって計算の効率性が増し、熱 電変換材料を含めた比較的複雑な結晶構造の計算 が可能となっている [18].なお、原理的にはさら に高次のIFC まで考慮することが可能であるが、 3次または4次の項まで含めるのが一般的である.

計算された IFC から熱伝導率を計算する方法は いくつかあるが、単結晶の場合は一般に格子動力 学法を用いて行われる.まず、調和 IFC から、ダ イナミカル・マトリックスを通して、フォノンの 分散関係を計算する.これをもとに、第一ブリル アンゾーン内の任意の波数ベクトルkおよび分岐 *s*におけるフォノン群速度 νksが求まる.次に、フ ェルミ黄金律にもとづきフォノンの生成及び消滅 の確率を通じて 3-フォノン散乱過程による緩和時 間 nksを計算する.なお、フォノン・フォノン散乱 過程としては、結晶の内部熱抵抗に第一義的に寄 与する 1 次の 3-フォノン散乱過程のみを取り扱え ば十分であることが多い.

最後にフォノン気体のボルツマン方程式を緩和 時間近似のもとで解くことによって熱伝導率を求 める.

$$\kappa_{\rm ph} = \frac{1}{3V} \sum_{\mathbf{k}s} C_{\mathbf{k}s} |\mathbf{v}_{\mathbf{k}s}|^2 \tau_{\mathbf{k}s} = \frac{1}{3V} \sum_{\mathbf{k}s} C_{\mathbf{k}s} |\mathbf{v}_{\mathbf{k}s}| \Lambda_{\mathbf{k}s} \qquad (3)$$

ここで、Cはボーズ・アインシュタイン統計に基づくフォノンモード(ks)あたりの熱容量、 Λ は平均自由行程、Vは結晶の体積である.



図4 第一原理計算から得られた累積熱伝導率

以上の計算で得られる格子熱伝導率の温度依存 性は実験での計測値と良く一致することが確認さ れている[19].加えて,式(3)によってフォノンモ ードごとの熱伝導能が求まることで,どのモード がどの程度熱伝導率に寄与しているか(熱伝導ス ペクトル)を知ることができる.図4は熱伝導率 への寄与をフォノン平均自由行程が小さいものか ら累積した「累積熱伝導率」である[20].これを 使ってナノ構造化した際の潜在的な熱伝導率の低 減効果を概算することもできる[21].

以上のような第一原理にもとづく単結晶の熱伝 導率計算は、最近では広く行われるようになって おり、それらを実装したソフトも複数公開されて いる[22-24]. 正確な計算を行うにはある程度の知 識と経験が必要ではあるが、専門家でなくても計 算が行うことができるようになっている.

5.2 ナノ構造化材料の計算

以上の単結晶の計算を,ナノ構造化材料の計算 に練成する.分子動力学法によって直接的にナノ 構造を計算することも原理的には可能できるが, 特に3次元材料(例えば粒径が数十ナノメートル の多結晶体)については,計算負荷が大き過ぎる. そこで,我々は単結晶計算から得られたフォノン 輸送物性をもとに,フォノン気体のボルツマン輸 送方程式を解くことでナノ構造化材料の計算を行 っている.ボルツマン方程式の解法はいろいろあ るが,ここではその中でも図1のような複雑な界 面形状を有する系の解析に適しているモンテカル ロ法を用いた解法[25-27]を概説する. フォノン輸送に関しては,以下の緩和時間で線 形化されたボルツマン輸送方程式が用いられるこ とが多い.

$$\frac{\partial f_s(\omega, \mathbf{r})}{\partial t} + v_s(\omega) \mathbf{e} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f_s(\omega, \mathbf{r}) = \frac{f_s(\omega, \mathbf{r}) - f_0(\omega, T)}{\tau_s(\omega, T)} (4)$$

ここで, f(ω)は分布関数, f₀はボーズ・アインシュ タイン分布関数, e はフォノンの伝播方向の単位 ベクトルである. これに 5.1 節で求めた群速度と 緩和時間を入力することによって、第一原理に基 づいた計算が可能となる.なお、ここでは簡単の ために、波数依存性を(分散関係より)周波数依 存性に置き換えて記述している. 線形化を行わず に,格子動力学に従って右辺の衝突項を厳密に表 して解く方法もあるが、フォノン輸送の計算の場 合は,一部の材料を除いて緩和時間近似が妥当で あるとされる. この場合, フォノンはそれぞれの 群速度に従って移流するとともに,ナノ結晶内部 でのフォノン散乱によって散乱確率 $P=1-\exp[-\Delta t/\tau_s(\omega)]$ で散乱する. ここで Δt は時間ス テップである.実際の計算においては、フォノン が散乱する度に、その全ての状態(周波数,偏向、 群速度, 方向) を局所温度に対応する平衡分布に 従ってリセットする.

また、分布関数を解くのでなく、系の片面から フォノンを1つずつ「打ち込んで」反対の面に透 過する確率(透過確率 T_P)を計算することで熱伝 導率を求める「レイトレーシング法」的な手法も 開発している[28]. この場合の熱伝導率は Landauerの公式

$$\kappa_{\rm ph} = \frac{3}{2} \sum_{\mathbf{k}s} C_{\mathbf{k}s} v_{\mathbf{k}s} \int_0^{\pi/2} T_{\rm P,\mathbf{k}s}(\theta) \cos\theta \sin\theta d\theta \qquad (5)$$

で与えられる.

フォノン・フォノン散乱(やその他の内部散乱) と界面散乱が独立な事象であると仮定すれば,計 算はさらに簡便になる.まず,内部散乱を無視し てレイトレーシング法を行い,得られる*T*Pをもと に界面散乱過程に対する平均自由行程を計算する.

$$\Lambda_{\rm bd} = \frac{3}{2} L \int_0^{\pi/2} T_{\rm P}(\theta) \cos\theta \sin\theta d\theta \qquad (6)$$

次に, Matthiessen 則を用いて内部散乱による平均 自由行程 Λ_{int} (= $v\tau$) と組み合わせて, 全体の平均 自由行程を求める.

$$\Lambda_{\mathbf{k}s}^{-1} = \Lambda_{\mathrm{int},\mathbf{k}s}^{-1} + \Lambda_{\mathrm{bd},\mathbf{k}s}^{-1} \tag{7}$$



そして、これを式(3)に代入すれば熱伝導率を計算 することができる.この手法には、先のボルツマ ン輸送方程式を解く手法と比較して計算付加を大 幅に軽減できるメリットがある.

いずれの手法においても、界面に到達したフォ ノンは界面透過確率に従って反射または透過する. この界面透過確率は、IFC をもとに非平衡グリー ン関数法[29],格子動力学法[30],Wave packet法 [31],非平衡分子動力学法[32,33]などによって計 算することができる.しかし、そのためには界面 の原子構造を決定する必要があり、焼結などによ って形成される実際の界面は多様であることを考 えると、現時点では、界面透過確率はパラメータ として扱うのが妥当であると考える.ただし、界 面透過確率は周波数の関数であるため、スカラー 量で表す工夫が必要である.

そのために,一般的な界面透過確率の周波数依 存性を踏まえて,界面透過関数をモデル式,

$$t(\omega) = (\gamma \omega / \omega_{\text{max}} + 1)^{-1}$$
(8)

で表すと、定数 y によって界面熱コンダクタンス が一意に決まる(その逆も真).つまり、界面熱コ ンダクタンスをパラメータとすれば、それによっ て一意に決まる界面透過確率を入力としてモンテ カルロ計算を行うことで、ナノ構造化材料の熱伝 導率が求まる.

このようにして計算した,シリコン(Si)ナノ 多結晶体(図 5(a))の熱伝導率の粒径および界面 熱コンダクタンスへの依存性を図 5(b)に示す.こ れから,平均粒径を 20 nm,界面熱コンダクタン スを 100Wm⁻²K⁻¹にできれば,熱伝導率をアモルフ アス Si の値よりも小さくできることがわかる.な お,粒径分布の標準偏差 0.35 まで広げて計算した 結果,平均粒径が同じであれば,分布の広がりは 熱伝導率に殆ど影響しないことがわかっている [28].

6. フォノン輸送物性の計測技術

6.1 単結晶のフォノン輸送物性

以上のように, 第一原理にもとづくフォノン輸 送の計算技術が発展すると同時に、実験によるフ オノン輸送特性の計測技術も発展している.フォ ノンの分散関係は従来から非弾性中性子散乱分光 [34]や非弾性 X 線散乱分光[35]を用いて計測され てきた.近年ではそれらの解像度が向上し、分散 関係に加えて、スペクトルピークの線幅や形状か らフォノンの寿命(または緩和時間)を見積もる ことができるようになってきている. 例えば、結 晶構造がシンプル(対称性が高い)であるにも関 わらず熱伝導率が非常に低いことで知られる PbTeの研究では、非弾性中性子散乱実験[36]と第 一原理フォノン輸送計算[37]の結果を直接比較し て、特定のモードの強い非調和性を明らかにする ことで,熱伝導率が低くなる機構を説明している. 最近では、フェムト秒のX線自由電子レーザーを 用いた時間領域での過渡的な計測も実現されてお り[38]、今後の発展が楽しみである.

また,最近,特に発展しているのが,熱伝導率 のサイズ効果の計測から平均自由行程を見積もる 手法である.主にサーモリフレクタンス法を用い て,レーザーのスポット径を変えるなどして加熱 領域をフォノンの平均自由行程より小さくするこ とで,熱伝導率のサイズ効果を誘起し,図4の累 積熱伝導率に類似したデータを得ることができる. 熱電変換材料のような熱伝導率が小さい材料に適 用するためには,加熱領域をレーザーの回折限界 よりも大幅に小さくする必要があるが,試料表面 にパターニングしたナノ構造に熱を吸収させるこ とで,加熱領域を数+ nm まで低減する手法も開 発されている[39-41].

6.2 界面原子構造と熱コンダクタンスの相関測定

前述のように,界面構造が決定すれば界面熱コ ンダクタンスや界面フォノン透過確率を計算する ことは可能であるが、実際に作製される材料の界 面構造(物理的および化学的)は作製法やプロセ ス条件(温度,圧力,表面科学処理など)に強く 依存するので, 適宜, 実験的な計測を交えて解析 する方が良い.しかし、例えば放電プラズマ焼結 によって作製された図5のようなSi多結晶体の界 面だけを抽出して界面熱コンダクタンスを計測す ることは至難の業である. そこで我々は, 平面 Si 層同士を焼結によって接合することで, 多結晶体 の Si-Si 界面を模擬したモデル界面を作製し,時間 領域サーモリフレクタンス (Time Domain Thermoreflectance, TDTR) 法[42]によって界面熱コ ンダクタンスに関する知見を得る技術を開発した. [43]

TDTR 法は試料表面に堆積した金属層をポンプ レーザーで加熱し、温度に依存して変化する表面 反射率をプローブレーザーで計測することによっ て表面温度の応答を計測し、熱伝導方程式などの 物理モデルをフィッティングすることによって、 試料の熱物性を同定する手法である.ただし, TDTR 法で計測するためには、試料がいくつかの 用件を満たす必要がある.まず,TDTR 法は熱浸 透深さ(~数 µm)の範囲内の物性のみ測定可能 であるため,図 6(a)のように表面側の Si 層は薄膜 である必要がある. さらに、物理モデルとの整合 性を担保するために, Si 薄膜層は膜厚や平行度, 平坦度を高精度で制御する必要がある.本手法で はSOI基板とSi基板を接合に利用することでこれ らの要件を満たした. SOI 基板は, Si 薄膜/SiO₂ 薄膜/Si 支持基板の3層構造を有し、各層の平行度 および平坦度が高い. SOI 基板の Si 薄膜側と Si 基板をプラズマ焼結によって接合した後に, SOI



図6 Si-Si 焼結界面の界面熱コンダクタンス

基板の Si 支持基板と SiO₂薄膜を選択的エッチン グによって除去して Si 薄膜のみ残すことで所望 の構造が得られる.

この手法を用いて、焼結温度や圧力、焼結前の 表面化学処理の方法、結晶方位などを変えながら 試料を作製することで、実際の材料で起こりうる 様々な界面構造を作り分けることができる.図 6(b)に得られた界面構造の TEM 像と計測された 界面熱コンダクタンスの関係を示す.例えば、あ る程度低温で焼結すると、表面に残存した自然酸 化膜が拡散して界面近傍に SiO_x ナノ粒子(x は 数%)として析出することで、界面熱コンダクタ ンスを大きく低減することが見て取れる.ナノ粒 子が存在しない箇所は結合が連続していることか ら、電気伝導は然程阻害されないことが期待でき る.また、100 面と 111 面の結晶方位の違いによ り、界面熱コンダクタンスが大きく低減されるこ ともわかる.

これらの計測によって, Si-Si 界面の熱コンダク タンスは界面構造によってオーダー(100-1000 Wm²K⁻¹)で制御できることがわかった.これと 図5の解析結果を合わせて考えると,ナノ多結晶 体の熱伝導率は,界面にSiO_x相を析出させて(な お,結晶方位は自然に不揃いとなる),粒径を 20 nm 程度まで低減できれば,10Wm⁻¹K⁻¹を切る熱伝 導率が達成できることになる.次節において,こ の設計指針にもとづいて Si ナノ多結晶体を作製 した例を概説する.

7. Si ナノ構造化シリコン熱電変換材料の作製

熱電変換の社会実装が限定的である理由として, 1節では効率を挙げたが、もう1つの大きな要因 として,材料とプロセシングのコストが挙げられ る.熱電変換では温度勾配を確立するために、あ る程度の厚みを持った材料が必要となる.その分, 他の技術と比較して材料のコストの割合が大きく, テルルなどの重元素を利用している限りは、なか なか産業への展開が見えてこない. 逆に言うと、 コストが大幅に抑えられれば、たとえ現状のZT=1 程度の材料であっても産業への展開が見えてくる. 応用の種類にも依るが、例えばエネルギーハーベ スティングでは, ZT=1 程度の性能があれば, セン サーネットワーク,スマート建築,動作モニタリ ングなどの小型通信機を駆動するのに十分な電力 を供給すことが可能である. つまり, これらのマ ーケットの拡大に向けた鍵は性能向上よりも,同 じ性能を如何にしてより安価な材料で再現するか にかかっている. そこで我々は Si を基盤材料とし た熱電変換材料の開発に取り組んできた. Si を用 いることで既存のシリコンテクノロジーとコンパ ティブルになり、モジュール作製の際のプロセス コストが軽減されるメリットもある. バルク Si 材料は、熱伝導率が高いため、一般的には良い熱 電材料とは考えられていないが、熱伝導率を大幅 に低減することができれば室温でも高い熱電性能 を発揮し得ることが Si ナノワイヤーの実験など で示されている[44,45].

ここでは、SiO_x相を含む Si ナノ多結晶体を開発 した研究を紹介する[46]. この研究では、プラズ マ CVD (PECVD)法を用いて合成した平均直径 6 nm のナノ粒子を放電プラズマ焼結することによ ってバルク材料を作製した.その際、Si ナノ粒子 の酸化時間を変えることによって試料内の酸素量 を制御する.その結果、図 7(a)の TEM 像のような、 70%のナノ多結晶相と 30%のアモルファス SiO_x相 から成る材料が得られた.アモルファス SiO_x相は ナノ多結晶相に囲まれるように点在しており、焼 結中に粒子表面の酸化膜が流動的に移動・凝集し て形成されたと考えられる.Siナノ多結晶相の平 均粒径は,焼結によって粒成長した結果,30 nm 程度であった.

得られた材料の熱伝導率はナノ構造化と SiO_x 相の混入により先行研究[47-49]の半分程度まで低 減された.一方,パワーファクター ($S^2\sigma$) は先行 研究より若干小さい程度に収まった.これによっ てZTは最大で850°CにおいてZT=0.58を示し, これまでの PECVDを用いた先行研究[48,49]に比 べ25%程度向上した.また,600°CまでのZTは ナノ構造化バルク Si 熱電材料のチャンピオンデ ータ[47]と同等となった.

以上によって,熱伝導率の低減により熱電性能



図7 Siナノ構造化バルク材料の熱電特性

が向上したが,目標の ZT=1 にはまだ及ばない. また,実用を考えると,より低温での性能向上が 望まれる.6.2節の解析結果からは,さらに粒径を 小さくし,界面構造を精密に制御することで熱伝 導率をアモルファス Si の値まで低減できる可能 性が示されており,これらの実現が直近の課題と なっている.

8. まとめと今度の展開

本稿では、マルチスケールにフォノン輸送を解 析する技術とモデル試料を作製して界面フォノン 輸送を計測する技術を組み合わせた、「フォノンエ ンジニアリング」によって、熱電変換材料を開発 する研究を概説した.このようなアプローチによ って、熱電材料を原理原則にもとづいて設計する ことで、経験的なアプローチでは難しいレベルで の性能向上やコストダウンを実現できればと考え る.なお、ここで紹介したフォノン粒子の運動論 にもとづくマルチスケール・フォノン輸送解析ツ ールについては、汎用性のあるソフトウェアとす るべく、インターフェースを整備しているところ である.

本稿ではフォノンの粒子性を利用した研究を中 心に紹介したが、近年研究例が増えているフォノ ンの波動性を利用した熱流制御に関しても研究を 進めている. ここで、フォノン波の干渉による制 御法のコンセプトを簡単に説明する.図8のよう な超格子構造において、界面がフォノンを鏡面反 射するとき,界面の間隔とフォノンの位相の関係 によっては進行波と反射波が干渉して,波が存在 できなくなる.これは波数空間で考えると、単位 胞が大きくなることでブリルアンゾーンが折り畳 まれ、分散関係(フォノンバンド)にギャップが 生じることと同じである. なお、ギャップによっ て特定のフォノンが存在できなくなるだけでなく, その上下のバンドの分散が小さくなることで、フ オノンの群速度が小さくなることも熱伝導率の低 減に寄与する.

このコンセプトにもとづいて、ボトムアップ(エ ピタキシャル)構造やトップダウン(リソグラフ ィー)構造を用いて、フォノン波の干渉によって 熱伝導率を低減する実験(いわゆるフォのニック 結晶)が報告されはじめており[50,51]、自己組織 化技術との融合により今後の発展が大いに期待で



きる.ただし、フォノン波の輸送に関する理論・ 解析技術はまだ不十分であり、それらの充実が今 後の課題である.例えば、図8のように界面反射 を利用してフォノン波を干渉させるためには、界 面の間隔がフォノンのコヒーレント長(フォノン 波の位相が保たれる長さ)よりも小さい必要があ るが、材料や構造に依存したフォノンのコヒーレ ント長に関する知見は未だに少ない.さらに、界 面の原子構造がフォノンの位相に与える影響を理 解することも重要である.

これらの理解が進み,それにもとづいて設計さ れたナノ界面構造が作製できるようになれば,フ オノン輸送をより緻密に制御(例えばバンドパス 制御など)することができるようになり,電子, スピン,マグノンなどの他の準粒子との独立制御 性が向上することが期待される.これは従来型の 熱電変換材料はもとより,スピンゼーベック効果 [52]を用いた新しい機構の熱電変換の性能向上に も繋がる.

謝辞

本稿で紹介した研究は、東京大学・熱エネルギ ー研究室の、志賀拓麿助教、堀琢磨氏、小宅教文 氏、村上拓氏、坂田昌則氏、三浦飛鳥氏、明戸大 介氏らとともに行ったものである.また、共同研 究者の Gang Chen 教授、野崎智洋教授、Keivan Esfarjani 教授、野村政宏准教授、Chris Dames 准教 授、Olivier Delaire 氏にも謝意を表す.これらの研 究の多くは、戦略的創造研究推進事業(さきがけ) および科学研究費助成事業(若手研究(A))の支 援を受けて行われた.

参考文献

- [1] http://www.micropelt.com/ (マイクロペルト社 ホームページ)
- [2] http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologi

es-office-waste-heat-recovery (DOE ホームページ)

- [3] プレスリリース: 排熱から電気をつくる「熱発電チューブ」の発電検証を開始(2013), http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100181.h tml.
- [4] 製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発 電技術の研究開発, NEDO 成果報告書, 20140000000112 (2015).
- [5] D. Kraemer, et. al, Nat. Mater. 10, 532 (2011).
- [6] http://tes-ne.com
- [7] K. Yazawa, et. al, Energy Conv. Manag 84, 244 (2014).
- [8] L. D. Hicks, M. S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* 47, 12727 (1993).
- [9] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, B. O'Quinn, *Nature* 413, 597 (2001).
- [10] H. Ohta, et. al, Nat. Mater. 6, 129 (2007).
- [11] B. Poudel, et. al, Science **320** (2008).
- [12] K. Biswas, et. al, Nature 489, 414 (2012).
- [13] M. Luckyanova, et. al, Science 338, 936 (2012).
- [14] http://phonon.t.u-tokyo.ac.jp
- [15] D. A. Broido, et. al, Appl. Phys. Lett. 91, 231922 (2007).
- [16] K. Esfarjani, H. T. Stokes, *Phys. Rev. B* 77, 144112 (2008); K. Esfarjani, G. Chen, H. T. Stokes, *Phys. Rev. B* 84, 085204 (2011).
- [17] Z. Tian, J. Garg, K. Esfarjani, T. Shiga, J. Shiomi,
 G. Chen, *Phys. Rev. B* 85, 184303 (2012).
- [18] J. Shiomi, K. Esfarjani, G. Chen, *Phys. Rev. B* 84, 104302 (2011).
- [19] T. Shiga, et. al, Phys. Rev. B 85, 155203 (2012).
- [20] D. Aketo, T. Shiga, J. Shiomi, *Applied Physics Letters* 105, 131901 (2014).
- [21] 塩見淳一郎, 伝熱, 50, 21 (2011).
- [22] ShengBTE (http://www.shengbte.org/)
- [23] ALAMODE(http://alamode.readthedocs.org/en/lat est/)
- [24] Phonopy (http://phonopy.sourceforge.net/)
- [25] S. Mazumdar, A. Majumdar, J. Heat Transfer 123, 749 (2001).
- [26] Q. Hao, G. Chen, M.-S. Jeng, J. Appl. Phys. 106, 114321 (2009).

- [27] T. Hori, G. Chen, J. Shiomi, Appl. Phys. Lett. 104, 021915 (2014).
- [28] T. Hori, J. Shiomi, C. Dames, Appl. Phys. Lett. 106, 171901 (2015).
- [29] N. Mingo, L. Yang, Phys. Rev. B 68, 245406 (2003).
- [30] H. Zhao, J. B. Freund, J. Appl. Phys. 97, 024903 (2005).
- [31] P. K. Schelling, S. R. Phillpot, P. Keblinski, *Appl. Phys. Lett.* 80, 2484 (2002).
- [32] Y. Chalopin et al., Appl. Phys. Lett. 101, 221903 (2012).
- [33] T. Murakami, T. Hori, T. Shiga, J. Shiomi, *Appl. Phys. Express* 7, 121801 (2014).
- [34] B. N. Brockhouse, A. T. Stewart, *Phys. Rev.* 100, 756 (1955).
- [35] E. Burkel, J. Peisl, B. Dorner, *Europhys. Lett.* 3, 957 (1987).
- [36] O. Delaire, et. al, Nat. Mater. 10, 614 (2011).
- [37] T. Shiga, T. Murakami, T. Hori, O. Delaire, J. Shiomi, *Appl. Phys. Exp.* 7 041801 (2014).
- [38] M. Trigo, et. al, Nat. Phys. 9, 790 (2013).
- [39] M. E. Siemens, et. al, Nat. Mater. 9, 26 (2010).
- [40] T. Oyake, M. Sakata, J. Shiomi, *Appl. Phys. Lett.* 106, 073102 (2015).
- [41] Y. Hu, L. Zeng, A. J. Minnich, M. S. Dresselhaus, G. Chen, *Nat. Nanotech.* **10**, 701 (2015).
- [42] D. G. Cahill, et. al, J. Appl. Phys. 93, 793 (2003).
- [43] M. Sakata, et. al, Nano energy 13, 601 (2015).
- [44] A. I. Boukai, Nature, 451 (2008).
- [45] A. I. Hochbaum, Nature, 451 (2008).
- [46] A. Miura, Z. Shu, T. Nozaki, J. Shiomi, ACS Appl. Mater. Interfaces 7, 13484 (2015).
- [47] S. K. Bux, et. al, Adv. Funct. Mater. 19, 2445 (2009).
- [48] G. Schierning, J. Appl. Phys. 110, 113515 (2011).
- [49] T. Claudio, Phys. Chem. Chem. Phys. 16, 25701 (2014).
- [50] M. Maldovan, Nature 503, 209 (2013).
- [51] J. Ravichandran, et. al, Nat. Mater. 13, 168 (2014).
- [52] K. Uchida, et. al, Nature 455, 778 (2008)

メタマテリアルによる自由自在な熱ふく射制御: 熱と光の新たなエネルギー変換に向けて

A Flexible Thermal Radiation Control with Metamaterial: Toward New Energy Conversion of Heat and Light

> 櫻井 篤 (新潟大学) Atsushi SAKURAI (Niigata University) e-mail: sakurai@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

ふく射(輻射)とは、車の輻(や=スポーク) のように一点からエネルギーや光、粒子が放射さ れる現象、あるいは放射されるものの総称である [1]. ふく射は光(電磁波)であり、特に物質の内 部エネルギーにより放射される光が熱ふく射であ る.

さて、その熱ふく射の研究であるが、歴史は古 く今から 100 年以上前に熱ふく射エネルギーは温 度の4乗に比例するという Stefan-Boltzmann の法 則が発見され、その後 Max Planck が黒体放射エネ ルギーの式を導き、それが量子力学の先駆けとな ったと言われている。そのような歴史の中で、現 代では熱ふく射の基礎研究は成熟したように思わ れた時代があったかもしれない。しかし近年、熱 ふく射の研究はナノテクノロジーとの邂逅によっ て新たな現象が次々と発見され[2-3]、Nature や Science といった有名雑誌に登場する機会が確実 に増えている。

そのブレークスルーのきっかけとなったのは London Imperial College の理論物理学者 John Pendry によるメタマテリアルの研究であろう[4]. メタマテリアルとは、サブ波長サイズの構造体に よって光を制御し、自然界には存在しない新しい 光学特性を持つ材料のことである.ナノフォトニ クスの分野でも、光の回折限界を遥かに凌駕する パーフェクトレンズの研究[5]や、物質に入射する 光を自由に曲げて透明化させる技術(クローキン グ)[6]といったホットな話題には事欠かない.

さて、このように光を自由自在に操れるならば、 熱ふく射でさえも同じようにコントロールするこ とが可能である.メタマテリアルを用いることで 熱ふく射を任意の波長帯で吸収・放射させること が可能となり、かつそのスペクトル幅や偏光とい った物性までも自由自在に制御できることになる. これによって熱ふく射制御の自由度が飛躍的に向 上することになり、ふく射伝熱現象が関わる様々 な分野において幅広い応用が期待できる.

本稿では、メタマテリアルを用いた熱ふく射制 御とそのエネルギー変換に関する研究を紹介する. 前半部は、ナノ構造の大面積化を目指した自己組 織化ナノ粒子アレイによる波長選択的太陽光吸収 材料について紹介する.後半部では波長選択的熱 ふく射エミッターに関して、その放射のメカニズ ムについて述べ、さらに応用例として太陽熱光起 電力発電と波長制御赤外線ヒーターに関する研究 を紹介する.

2. 波長選択的太陽光吸収材料

近年,再生可能エネルギー社会を実現するため に、太陽エネルギー利用の研究は一段と重要性が 高まっている.太陽エネルギーの利用技術として は太陽光発電が一般にも普及し、各地にメガソー ラーが建設されている.一方、日本ではあまり馴 染みはないが、太陽光資源の豊富な南ヨーロッパ やアメリカ西海岸などでは太陽熱発電も既に十万 世帯以上の電力を賄えるほど発展している. その 太陽熱利用であるが、次世代技術として後述する 太陽熱光起電力発電[7-9]が注目されている. これらの技術において鍵となるのは太陽光を吸収 して熱エネルギーに変換するための波長選択的太 陽光吸収材料である.理想的な太陽光吸収材料は, 太陽エネルギー[10]のうち多くを占める可視-近 赤外波長領域の光を完全に吸収する一方で、熱ふ く射として周囲環境に捨てられてしまう赤外領域 の光については全く放射しないといった波長選択 特性が求められる (Fig. 1). 著者らは、これまでに タングステンナノ粒子と SiO2 を混合したサーメ ット多層膜構造に着目し、広帯域ふく射吸収特性 を持つ波長選択性太陽光吸収材料を特性マトリッ クス法による電磁波解析と遺伝アルゴリズムによ り最適設計を行っている[11].



Fig.2金属ナノ粒子アレイによる太陽光吸収材料

一方,サーメット型の太陽光選択吸収材は金属 ナノ粒子が誘電体中にランダムに分散しているた め,光吸収メカニズムが複雑であり,そのため制 御が難しいという問題があった.そこで我々は, 金属ナノ粒子アレイを用いた太陽光吸収材料に着 目した[12].誘電体中に金属ナノ粒子を周期的に 配列することで,より単純な系で光吸収メカニズ ムを明らかに出来ることに加え,波長制御をより 効率的に行うことが出来る.

Fig.2 に金属ナノ粒子アレイによる太陽光吸収 材料の模式図を示す.まず Fig.2(a)はタングステン ナノ粒子(直径 40nm)を周期 50nm でタングステ ン基板上に整列させたもので, Fig.2(b)はそれを SiO₂層(厚さ 100nm)でコーティングしたもので ある.実際にはナノ粒子間のギャップを制御する ことは非常に難しいため、コアシェル型のナノ粒 子を自己組織的に配列することが有効である.Fig. 2(c)はタングステンナノ粒子を 5nm の SiO₂ シェル で覆ったものであり,Fig. 2(d)はさらにそれを SiO₂層でコーティングしたものである(実際はシ ェルと層の屈折率が同じであるのでシェルの部分



は見えない). 自己組織的に配列する場合には最密 充填構造を考慮する必要があるが,ここでは便宜的 に単純正方構造として解析する. 割愛するが両者の 計算結果はほぼ同じである. 三次元電磁波解析は, FDTD 法(Finite Difference Time Domain Method) に より行った. 解析ソフトウェアには Lumerical (Lumerical solutions, Inc.)を使用している.

計算結果を Fig. 3 に示す.まずタングステン基 盤のみの吸収率は可視光領域で 0.5 ほどである. これはタングステン自身のバンド間遷移による光 吸収である.次にタングステンナノ粒子を配列し た場合,波長 300nm 付近でほぼ吸収率 1.0 を示し ている(図中(a)).これは局在プラズモン共鳴に よるものと考えられる.局在プラズモン共鳴とは 入射電界によって金属ナノ粒子内の自由電子が集 団的に一方に偏り,電気双極子のように振る舞う 共鳴状態のことである[13].さらに SiO₂層でコー ティングすると光吸収のスペクトル幅が拡がって いることがわかる(図中(b)).この理由の一つと して SiO₂薄膜による光干渉効果が挙げられる.次 にコアシェル粒子アレイの場合は、タングステン ナノ粒子が SiO₂シェルに囲まれているため,局在 プラズモンの共鳴波長がシフトするが,この場合 も吸収率 1.0 を示している (図中(c)).この構造に SiO₂薄膜をコーティングした場合も同様に吸収ス ペクトル幅が拡がっている (図中(d)).吸収のピ ークが 301.9nm と 617.5nm にあるので,各々の波 長についてコアシェル断面の電磁場分布 (入射電 場で正規化)を可視化してみると (Fig. 4),粒子 間のギャップにおいても強い電場の増強が得られ ていることがわかる.これは各々の粒子による局 在プラズモン共鳴が相互作用し,ギャップ間でさ らに電磁場が増強されたものだと考えられる.こ のように局在プラズモン共鳴を上手に利用するこ とで可視光領域の光吸収を効率的に制御できる可 能性が示唆されている.

3. 波長選択的熱ふく射エミッター 3.1 マグネティックポラリトン

熱ふく射は本来,物質内部における電子や原子 核のランダムな相互作用から放射されるもので, 極めて広いスペクトルを持つインコヒーレントな 光である.しかし,メタマテリアルによって物質 内部の電子状態を人工的に制御できれば,熱ふく 射を特定の波長だけで放射させることが可能とな る.ここで前述したようにプラズモン共鳴という 現象は,ナノ構造によって自由電子の集団的振動 をコントロールするものであるから,波長選択的 熱ふく射エミッターに応用することは理に適って いる.このような研究は最近"サーモプラズモニ クス"という新たな分野になりつつある[14].

本稿では Fig.5 に示すような金属パターン/誘 電体層/金属基盤の三層で構成されたメタマテリ アルを紹介する.最上層の金属パターンについて は、これまでに正方形型に限らず線状型、十字型、 円盤型などといった様々な形状が提案されており、 それぞれ特定の波長で光を吸収/放射させること が可能である.物質の表面を機能化させるわけで あるから、このような二次元的なメタマテリアル は特に"メタサーフェス"と呼ばれている.

この特徴的な光吸収/放射メカニズムを説明す るために、これまでにいくつかの理論が提案され ているが、様々な形状に対して汎用的に適用でき る理論は未だ確立されていない.我々は、この共 鳴現象を説明するためにマグネティックポラリト



Fig.5メタマテリアルの模式図



Fig. 6 MP による電磁場増強. ベクトルは電場を, コンターは磁場の大きさを示す.



ン (MP) [15]に着目している. MP とは, Fig. 6 に示すように入射光の磁界成分によって上下2枚 の金属間において反平行電流が励起され、誘電体 層内において強い磁場の増強効果が得られる共鳴 現象のことである.これは研究者によって磁気モ ードや局在プラズモン共鳴など様々な呼び方があ り現在でも統一されていないが、磁場の変動によ り励起された現象であることを明確にするため本 稿では MP と呼ぶ.著者は、ジョージア工科大学 の Zhuomin Zhang 教授と共同研究を行い, MP を 上手に利用することで共鳴波長の位置やスペクト ル幅といったふく射物性を自由に制御できること を示し、その理論予測法を導き出している[16]. これはFig.6の電磁場分布が示すように、緑のサ ークルで表されるようなループ電流が形成されて いるとみなせることから, Fig. 7 に示すように金 属部分をインダクタ(L), 誘電体層をキャパシタ (C)に見立て, LC 共振回路としてモデル化するも のである. 図中の *L*m は相互インダクタンス, *L*k は電子の運動エネルギーを考慮した力学インダク タンスであり, *C*m は平行平板のキャパシタンス, *C*g は金属パターン間のギャップにおけるキャパ シタンスである. この LC 共振回路の全インピー ダンスは次式で表される.

$$Z_{\text{tot}}(\omega) = \frac{L_{\text{m}} + L_{\text{k}}}{1 - \omega^2 C_{\text{g}} (L_{\text{m}} + L_{\text{k}})} - \frac{2}{\omega^2 C_{\text{m}}} + L_{\text{k}} + L_{\text{m}} \quad (1)$$

ここでωは角周波数である. Z_{tot}(ω)=0となる条 件で LC 回路は共振状態となるから,その周波数 が熱ふく射の共鳴波長ということになる. これに より,設計者は任意の波長域で熱ふく射を吸収/ 放射させるために,メタマテリアルの形状や材料 の最適な条件を容易に割り出すことが出来る.

3.2 Solar-TPV への応用

熱ふく射エミッターは、前述した波長選択的太 陽光吸収材料と組み合わせることにより太陽熱光 起電力発電(Solar-Thermophotovoltaic(TPV))に 応用することが可能である.そのコンセプト図を Fig.8に示す.Solar-TPV 発電システムは、太陽光 吸収材料で太陽エネルギーの全てを一旦熱エネル ギーとして変換した後、熱ふく射エミッターによ り光電変換(PV)セルの高感度領域(近赤外光領 域)に整合した熱ふく射を放射させるものである. 一般的な太陽光発電は、太陽エネルギーのうち可 視光の一部しか利用できないため、単接合型太陽 電池では変換効率は理論的にも34%が限界である (Shockley-Queisser Limit).一方,Solar-TPV 発電 システムは、理想的には太陽エネルギーを一切無 駄にしない方法であることから、その変換効率は

ほぼカルノー効率に近い 85%の発電効率が期待 出来ると予想されている[17]. さらに熱源は太陽 光に限らず,発電プラントや製鉄所の廃熱などが 自由に選べることや,太陽熱発電と比べるとター ビンのような大型の回転機械も必要無く静音かつ メンテナンスフリーであることもメリットである.

しかしながら,熱ふく射エミッターは Wien の 変位則からも予想できるように,近赤外光を取り 出すためには1000K以上の高温で動作させる必要 がある.従って高温に耐えうる材料の問題や,発 電システム全体の熱損失をいかに抑えるかという



Fig. 8 Solar-TPV のコンセプト



Fig.9 熱ふく射エミッターの放射特性

伝熱学的な問題など解決すべき点は多い.これまで TPV 発電に関連する研究の多くは,理論,数値 解析によるもので,実証実験の例はまだまだ少数 にとどまっている.最近では MIT の研究グループ が 3.2%の発電効率を達成して注目を浴びており [7],今後さらに競争が激しくなると思われる.

我々のグループではメタマテリアルを用いた熱 ふく射エミッターを、この Solar-TPV 発電システ ムに応用することを検討している.前述の設計方 法に従って、タングステンによるパターニングと SiO₂層を用いた熱ふく射エミッターの解析を行っ た結果が Fig.9 である. PV セルにはバンドギャッ プの小さい InGaAsSb 太陽電池を想定している. この結果は、PV セルの高感度領域である 1.5-2.0 µm 付近に鋭いピークを持つ熱ふく射エミッター (表面温度は 1200K と仮定)が実現可能であるこ とを示している.現在、このメタマテリアルを作 製中であり、近い将来 TPV 発電の実証実験を行う 予定である.

3.3 波長制御赤外線ヒーターへの応用

加熱・乾燥プロセスは,幅広い産業分野におい て必要な生産プロセスである.その中で赤外線ヒ ーターは主要な役割を果たしており,特に発火性



Fig. 10 メタマテリアルの SEM 画像(画像提供: 北海道大学戸谷剛先生)

や爆発性を持つ溶剤の乾燥プロセスについては, 乾燥温度の低温化が急務である.溶剤は有機物で あるので特定の波長の光を吸収する.そこで蒸発 に有効な赤外線だけを選択的に照射できれば,極 めて高効率な乾燥プロセスが可能となる.

我々の研究グループは北海道大学の戸谷剛先生, 日本ガイシ株式会社との共同研究により,特定の 赤外線を放射する技術として,メタマテリアルを 用いた熱ふく射エミッターに着目している.

本研究で用いる熱ふく射エミッターは, Fig.5 と 同じ構造であり,金属部分には Au を,誘電体層 には Al₂O₃を使用している.まず LC 回路モデル と FDTD 法による設計では,トルエンの蒸発に有 効な波長 6-7 µm 付近の赤外線を放射させるため には,金属パターンの幅は 1.7-1.8 µm になると予 想した.北海道大学の実験施設において実際に作 製されたものが Fig.10 である.Au はスパッタリ ングにより成膜され,さらに Al₂O₃の成膜には原 子層堆積装置 (ALD)が用いられている.Au パ ターンは電子線描画装置による描画とリフトオフ により作製されている.詳しい作製プロセスは参 考文献[18]を参照されたい.

Fig. 11 に実験結果とFDTD 法による計算結果を 示す.実験での放射率は,Kirchhoff の法則を適用 し,積分球を持つ FT-IR によって垂直入射半球放 射率が測定されており,一方 FDTD 法での放射率 は垂直入射垂直放射率である.いくらかの不確定 要素が含まれるものの,両者は概ね良く一致して いる.wは正方形型の金属パターンの幅であり, 1.65µm から 1.80µm に大きくなるに従って,共鳴 波長は長波長側にシフトしていくことがわかる. 表1に,LC 回路モデルによる共鳴波長の理論予



Fig. 11 放射率の(a)測定結果と(b)数値解析の比較

表1 共鳴波長の理論予測と測定結果の比較

w (µm)	$\lambda_{\rm LC}$ (μ m)	$\lambda_{\exp}(\mu m)$
1.65	6.13	6.29
1.70	6.32	6.39
1.75	6.50	6.54
1.80	6.69	6.69

測値と実験による測定結果の比較を示しており, 両者は良く一致している.LC 回路モデルによる 検討でも共鳴波長の位置は金属パターンの幅に強 く依存することがわかっている[15].また,大き さの異なる金属パターンを複数配置すると,それ に対応した複数の共鳴を同時に起こすことも可能 であり[19],溶剤の種類に合わせた熱ふく射の多 波長制御も可能である.

4. おわりに

メタマテリアルの研究は歴史も 10 年程度と浅 く,次々と新たな知見が報告され,まさに日進月 歩の技術である.メタマテリアルのメタは"超越 した"という意味で使われており,自然界には存 在しない新材料によって光に限らない"波動"が 関わるあらゆる現象に革命を起こすかもしれない. これまでの型にはまらない分野を超えた研究が必 要となってきている.東工大の花村克悟先生が主 催する「ふく射に関する勉強会」では,異分野の 研究者との出会いがあり,また産業界の技術者か らは思いもよらない応用方法を提案されることが ある.赤外線ヒーターなどはその良い一例である. 最近では,東北大の円山重直先生と共同で局在プ ラズモン加熱を利用したがん治療の研究も始まっ ており,医療分野への応用も視野に入れている. このようにメタマテリアルを用いた新しい熱ふく 射制御が近い将来どんな形で応用されるのか,ま だまだ想像もしなかったような使い道が見つかる かもしれないと期待に胸が膨らむ思いである.

謝辞

共同研究者の北海道大学戸谷剛准教授,ジョージア工科大学 Zhuomin Zhang 教授,東北大学円山 重直教授,九州工業大学宮崎康次教授,日本ガイ シ株式会社近藤良夫氏,京セラ株式会社秋山雅英 氏,旭化成イーマテリアルズ株式会社山木宏氏に 感謝申し上げます.また日頃から学会や研究会等 において,多くの先生方や技術者の皆様からご指 導と励ましを頂きました.この場をお借りして御 礼を申し上げます.最後に,これまでの研究成果 は当研究室の卒業生と現学生の皆さんの努力の結 晶であります.本研究の一部は,科学研究費補助 金 若 手研究(B)(15K17985),挑戦的萌芽研究 (26630069)の援助を受けて行われました.

参考文献

- [1] 円山 重直, 光エネルギー工学, 養賢堂 (2004).
- [2] Maruyama, S. et al. Thermal radiation from two-dimensionally confined modes in microcavities, *Appl. Phys. Lett.*, **79-9**, (2001) 1393.
- [3] Greffet, J. J. et al. Coherent emission of light by thermal sources, *Nature*, **416-6876**, (2002) 61.
- [4] Pendry, J. B. et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 47-11, (1999) 2075.
- [5] Pendry, J. B. Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.*, 85-18, (2000) 3966.

- [6] Schurig, D. et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science*, 314-5801, (2006) 977.
- [7] Lenert, A. et al. A nanophotonic solar thermophotovoltaic device, *Nature Nanotech.*, 9-2, (2014) 126.
- [8] 芦田 友祐,吉田 純,花村 克悟,エバネッセント波効果を利用した GaSb 熱光起電力発電, 日本機械学会論文集 B 編, 79, (2013) 229.
- [9] 湯上浩雄,清水信,高温フォトニクス材料を 用いた熱光起電力発電システム,応用物理学 会誌,82,(2013)946.
- [10] http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/
- [11] Sakurai, A. et al. Computational design for a wide-angle cermet-based solar selective absorber for high temperature applications, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 132, (2014) 80.
- [12] Sakurai, A. et al. High-temperature solar-selective absorbers using core-shell nanoparticle arrays, *Proc. of the 1st PRTEC*, forthcoming.
- [13] 岡本 隆之, 梶川 浩太郎, プラズモニクスー 基礎と応用, 講談社 (2010).
- [14]高原淳一,熱工学とフォトニクスの出会い~ メタ表面を用いた熱輻射スペクトル制御, JSME TED Newsletter, 74 (2014) 2.
- [15] Sakurai, A. et al. Prediction of the resonance condition of metamaterial emitters and absorbers using LC circuit model, *Proc. of the 15th IHTC* (2014) IHTC15-9012.
- [16] Sakurai, A. et al. Resonant frequency and bandwidth of metamaterial emitters and absorbers predicted by an RLC circuit model, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 149, (2014) 33.
- [17] Fan, S. H. PHOTOVOLTAICS An alternative 'Sun' for solar cells, Nature Nanotechnology, 9-2, (2014) 92.
- [18] Totani T. Application of wavelength control technology of radiation to drying furnace, *Proc. of the 1st PRTEC*, forthcoming.
- [19] Sakurai, A. et al. Effect of polarization on dual-band infrared metamaterial emitters or absorbers, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 158-, (2015) 111.

温度分布制御マイクロフローリアクタによるアンモニア燃焼反応機構の検証

Validation of Ammonia Combustion Chemistry by a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile

中村 寿(東北大学 流体科学研究所; JST さきがけ) Hisashi NAKAMURA (Institute of Fluid Science, Tohoku University; JST PRESTO) e-mail: nakamura@edyn.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

世界の一次エネルギー供給の約80%は化石燃料 に依存しており[1], 化石燃料の消費量と二酸化炭 素の排出量の削減を進めるうえで、燃焼過程を含 むエネルギー変換機器(ここでは燃焼機器と呼称 する)の高効率化を進めることは極めて重要であ る.短~中期的には既存の化石燃料を使用しつつ, 再生可能エネルギー由来の炭化水素燃料の使用比 率を高めながら、燃焼機器のさらなる高効率化と 燃料組成変化に対する適合性向上を進めることが, 大きな方針の一つとなろう. 二酸化炭素の排出量 を一段と削減する観点からは、再生可能エネルギ ー由来かつ水素のように炭素原子を含まない燃料 の割合を増やしていくことも重要である.また, 水素は燃料電池にとっても有用な燃料であるため, エネルギー利用のベストミックスを考えるうえで も重要である.

再生可能エネルギーによる大規模な燃料生成を 実現するためには、その生成過程を飛躍的に改善 する必要があり,そのための研究開発の必要性は 論を待たない.一方で,我が国の国土が狭いこと と、再生可能エネルギーの単位面積あたりのエネ ルギー密度が低いことを考慮すれば、海外の再生 可能エネルギーを利用して燃料を製造・貯蔵し, 我が国に輸送・貯蔵したうえで利用することも考 える必要がある.このとき、密度が低く、沸点が 低い水素は、圧縮や冷却に要するエネルギーが膨 大となり、これらも再生可能エネルギーで賄うこ とは現実的でない. そこで、水素を輸送・貯蔵し やすい別の物質(水素キャリア)に変換して固定 し、利用地で水素を取り出す方法が考えられてい る.水素キャリアとしては、水素吸蔵合金[2]、錯 体系水素化物[3], 有機ハイドライド[4], 炭化水素 [5,6]など、様々な物質が考えられている.

本報では水素キャリアとしてアンモニアを取り 上げ,その燃焼利用に着目する.まず,アンモニ ア燃焼の背景を述べ,基礎研究分野における課題 を議論する.続いて,筆者が参画している科学技 術振興機構の「再生可能エネルギーからのエネル ギーキャリアの製造とその利用のための革新的基 盤技術の創出」領域・さきがけにおいて使用して いる独自の試験装置「温度分布制御マイクロフロ ーリアクタ」(マイクロリアクタ)の概要を述べ, これを使用したアンモニア燃焼研究の最近の状況 を紹介する.

2. アンモニア燃焼

アンモニアは他の水素キャリアと比べて単位体 積・質量あたりのエネルギー密度が高い,水素含 有密度が高い,という特徴がある[7,8].アンモニ アから水素を取り出して燃焼機器や燃料電池で利 用した場合,主要生成物は水と窒素であり,これ らは大気環境を循環してアンモニア生成地に戻る ため,他の水素キャリアのように水素を取り出し た後に使用済の水素キャリアを水素生成地に輸送 しなおす必要がない.この特徴はアンモニアを直 接燃焼利用する場合も同じである.直接燃焼利用 時にはアンモニアから水素を取り出す過程におけ るエネルギーやリソースに関するコストが不要と なり,一般に燃焼機器が有する良好な負荷変動特 性や始動特性の活用が期待できる.

アンモニアの燃焼利用自体は古くから実績がある.大戦中のベルギーでは燃料不足を補うために, アンモニアを使用したバスが運用された[9]. 冷戦 期に開発され,現在も有人航空機の最高速度記録 7,274 km/h (マッハ 6.72)を保持する X-15 はアン モニアを燃料とするロケット XLR99 をエンジン として用いた[10].体積あたりの発熱量が大きい ため燃料タンクが小型化できる,気化熱が大きい ため再生冷却の冷却剤として能力が高い,という アンモニアの燃料としての特徴を最大限有効活用 している. しかしながら,現在に至るまで大多数の燃焼機 器は炭化水素を燃料として用いており,脱硝設備 にアンモニアを利用することは広く行われている ものの,燃料としてアンモニアが燃焼機器に広く 利用されているとは言えない.炭化水素を燃料と する燃焼機器は,膨大な基礎・応用研究を通して, 長い年月をかけて少しずつ熱効率を向上させてき た.その過程において,燃料の燃焼特性を詳細に 把握し,これを再現する精緻な燃焼反応機構を構 築することで,燃焼基礎研究は重要な一翼を担っ てきた.したがって,将来のアンモニアを燃料と する「高効率」な燃焼機器の開発のために,アン モニアの燃焼特性を詳細に把握し,これを正しく 再現できる燃焼反応機構を構築することは重要で ある.

ここで燃焼反応機構とは、燃焼過程の各素反応 を修正アレニウス式でモデル化し、反応速度定数 を求めるためのアレニウスパラメータと関連する 化学種の熱物性・輸送係数を算出するためのパラ メータで構成されるデータ群である.構築された 燃焼反応機構は層流燃焼速度(伝播特性)や着火 遅れ時間(着火特性)といった基礎燃焼特性と比 較検証され、必要に応じてより精緻な理論計算や 計測で得られた反応速度定数に更新される.この プロセスを膨大な基礎研究成果に基づいて長年実 施した結果、いくつかの基本的な炭化水素燃料に ついては、近年の燃焼反応機構は非常に幅広い条 件で信頼できるものになりつつある.

前述の通り、アンモニアは現在でも脱硝設備に 広く用いられており、アンモニアによる NOx 還元 反応については多くの研究がなされている[11-14].また、炭化水素燃料(特に石炭)中に含まれ る微量窒素化合物としてアンモニアは代表成分で あり、燃焼過程における fuel NOx の生成源として、 アンモニアからの NOx 生成反応についても多く の研究がなされている[15-18].NOx 反応系はアン モニア酸化反応のサブ反応経路であるため、アン モニア燃焼反応機構の構築[19-22]においても重 要視されている.構築された燃焼反応機構は、層 流燃焼速度[23-28]や着火遅れ時間[29-34]の計測 結果を用いて比較検証されている.

多くの炭化水素燃料で常温・大気圧における量 論混合比の燃料/空気予混合気の層流燃焼速度は 約 40 cm/s であるのに対して,アンモニア/空気予 混合気のそれは約6 cm/s であり、アンモニア火炎 は極めて遅い伝播特性を有する. アンモニア/空気 予混合気の着火遅れ時間は炭化水素/空気予混合 気のそれと比較可能なほどデータがなく、アンモ ニアの非常に低い反応性のため、メタンや水素と の混焼条件におけるデータか、アンモニア/純酸素 /アルゴン予混合気の高温条件(1500K以上)にお けるデータに限られている.しかしながら、反応 系に炭素原子が介在することでNOx 反応経路[35] や着火温度[36]が大きく変化することが指摘され ており, また, ガスタービン燃焼器内の火炎を模 擬した実験では、火炎基部における中低温域の着 火特性の重要性が指摘されている[37]. こうした 背景から, 混焼条件でないアンモニア/空気予混合 気の中低温域における着火特性は、アンモニア燃 焼反応機構を検証するうえで必要不可欠である. しかしながら,着火遅れ時間計測に使用される衝 撃波管や急速圧縮試験機では、着火に至るまでの 温度・圧力を長時間既定することが原理的に難し い. したがって、アンモニアのように反応性の低 い燃料では、着火遅れ時間に代わる別の指標で着 火特性を評価する必要がある. これを実現する新 手法として、温度分布制御マイクロフローリアク タ(マイクロリアクタ) [38]を提案する.

3. 温度分布制御マイクロフローリアクタ

図1に温度分布制御マイクロフローリアクタの 概略図を示す.消炎直径(多くの炭化水素燃料で 約2.5 mm 程度)以下の内径の石英管をリアクタ として用いる.この石英管を外部熱源で加熱する ことで,図1に示すような温度分布を管内壁に形 成する.外部熱源として,管内の火炎の視認性を よくするために,水素/空気予混合平面火炎バーナ を用いることが多い.管内壁の壁面温度分布はリ アクタ出口側から挿入した熱電対で計測する.マ イクロリアクタ内に低温側から試験対象予混合気 を流入させると,管壁との熱伝達により所与の壁 面温度分布に従って予混合気の温度が上昇し,あ る位置で火炎が形成される.

数値計算は一次元予混合断熱火炎計算コード PREMIX をベースに、気相エネルギー方程式に壁 面との熱伝達項を追加した計算コードを用いる.

 $\dot{M}\frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p}\frac{d}{dx}\left(\lambda A\frac{dT}{dx}\right) + \frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\rho Y_k V_k c_{pk}\frac{dT}{dx} +$

 $\frac{A}{c_p}\sum_{k=1}^{K}\dot{\omega}_k h_k W_k - \frac{A}{c_p}\frac{4\lambda Nu}{D^2}(T_w - T) = 0 \quad (1)$

左辺最終項が追加した壁面との熱伝達項である. ここで、 \dot{M} , C_p , λ , T, ρ はそれぞれ予混合気の 質量流速,定圧比熱,熱伝導率,温度,密度であ る. Y_k , V_k , C_{pk} , $\dot{\omega}_k$, h_k , W_k はそれぞれ化学種 kの質量分率,拡散速度,定圧比熱,生成速度,エ ンタルピ,分子量である. Nu, K, A, D, x はそ れぞれヌセルト数,化学種の総数,流路断面積, 管内径,座標軸である. T_w は壁面温度であり,計 測した管内壁温度分布を用いる.

図2 に量論混合比のメタン/空気予混合気を用いた場合の火炎位置(火炎位置の壁面温度)と予 混合気の平均流入流速(U₀)との関係を示す.流入流速に応じて三種類の火炎動態が観察される. 高流速域においては, normal flameが観察される. 流入した予混合気は下流側の高温域で着火し,上 流側に向かって伝播する.その後,予熱された予 混合気の燃焼速度と局所の流速がつりあう位置で 火炎は定在する.流入流速の低下につれて火炎位 置は上流の低温側に移動し,ある流入流速以下で は低温壁への火炎からの熱損失が過大となり,火 炎は消炎する.すると,流入予混合気は再び下流 の高温側で着火,火炎が上流の低温側に向かって 伝播,消炎,の一連の現象を準定常的に繰り返す.



Fig.1 Schematic of a micro flow reactor with a controlled temperature profile.



Fig.2 Schematic of flame responses for a stoichiometric methane/air mixture in the micro flow reactor.

この着火と消炎を繰り返す非定常火炎を FREI (Flames with Repetitive Extinction and Ignition) と 呼んでいる. さらに流入流速を低下させると,非 常に微弱な安定火炎が形成される (weak flame).

これらの火炎動態は理論解析と数値計算でも確 認されている. このとき FREI が観察される領域 は点線で示される不安定解として得られる. 理論 解析の結果から、図2の normal flame 位置(安定 解), FREI 領域での不安定解, weak flame 位置 (安 定解) で構成される S 型の解は Fendell 曲線に相 当する[39]. すなわち, normal flame 位置はデフラ グレーションブランチ, FREI の着火位置と weak flame 位置は着火ブランチに相当する. Weak flame は非常に遅い伝播速度を示す定在火炎でありなが ら,着火現象を代表する定常解でもあるという, 特異な位置づけにある. Weak flame の極低流速条 件では燃料の投入熱量が小さいため(1W以下), 反応帯であっても気相温度と壁面温度にほとんど 差がなく、熱暴走を経て着火に至る直前の状態を 定在化している.

ガソリン PRF (Primary Reference Fuel) の一つ であり、その反応過程が詳細に調べられている *n*-heptane を用いて、weak flame と着火の関係をよ り詳細に調べた[40]. 図 3 に *n*-heptane を燃料に用



Fig.3 Image of weak flames for a stoichiometric n-heptane/air mixture (P = 1 atm; D = 2 mm; $U_0 = 3$ cm/s) [40].



Fig.4 Computed heat release rate profile of weak flames for a stoichiometric n-heptane/air mixture ($P = 1 \text{ atm}; D = 2 \text{ mm}; U_0 = 3 \text{ cm/s}$) [40].

いた場合の weak flame 画像を示す. また, 同一実 験条件の数値計算から得られた熱発生速度分布を 図4に示す.実験・数値計算のいずれも、三段の 酸化反応帯が観察された. ガス分析と数値計算に よる火炎構造の詳細な解析から、一段目は低温酸 化反応, 二段目は低温酸化反応で生成された CH₂OやH₂O₂が消費される部分酸化反応,三段目 は CO が CO2 に酸化される完全酸化反応であるこ とが分かった.n-Heptane は低温酸化反応と高温酸 化反応からなる二段着火を示すことが知られてい るが、本リアクタでは高温酸化反応をさらに二つ (二段目と三段目) に分離観察できることが分か った. すなわち, 非定常現象である着火過程を, weak flame により温度域別に定常分離観察できる. 通常は1 mm 以下の薄い火炎帯で起こる反応過程 を引き延ばして温度域ごとに分離観察しているこ とから、本手法を「火炎クロマトグラフィー」と

この多段酸化反応の応答に着目することで,燃料種や圧力等の各種パラメータが着火特性に及ぼす影響を計測できる.図5にオクタン価依存性を調べた結果を示す[41].オクタン価の上昇(燃料の反応性の低下)につれて,点線で示される低温酸化反応が弱くなり,三段目の主反応帯の位置がより高温側に移動している(より高温に至らなければ反応が開始しない).本手法による着火特性計測は,ガソリンPRFの圧力依存性[41],ディーゼルPRFのセタン価依存性[42],天然ガス成分の組成依存性[43],トルエン添加効果[44]等,さまざまなパラメータに対する着火特性計測に応用可能であることが示されている.

通常の着火では急峻な熱発生により温度が急激 に上昇するため、温度条件を規定して着火過程を 詳細に調べることは非常に難しい.一方、マイク



Fig.5 Responses of stoichiometric gasoline PRFs on weak flames (P = 1 atm; D = 2 mm; $U_0 = 2$ cm/s) [41].

ロリアクタの weak flame では、反応帯であっても 発熱に伴う気相と固相の温度変化を無視でき、実 験と数値計算の直接比較により規定された温度分 布場において着火過程を詳細に調べることができ る. すなわち、 ω_k の算出に使用する燃焼反応機構 を検証することができる.

この点について確認するために, エタノール/ 空気予混合気を対象に, weak flameの圧力依存性 について燃焼反応機構間の違いを調べた[45].図6 に量論混合比のエタノール/空気予混合気を用い た場合の weak flameの圧力依存性(輝度分布と火 炎画像)を示す.エタノールは低温酸化反応を示 さないため,前述の *n*-heptaneの二段目と三段目に 相当する二つの反応帯が観察された.ここで,低 温側を青炎,高温側を熱炎と呼ぶ.図5より,圧 力上昇に伴い青炎は強くなり低温側に移動し,熱 炎は1から2 atm でいったん強くなった後,2から 5 atm にかけて弱くなっている.

ここで、二つの燃焼反応機構を用いて熱発生速 度分布の圧力依存性を計算し、実験と比較する. 燃焼反応機構には、Marinov によって開発された 燃焼反応機構[46]と、Saxena & Williams によって 開発された燃焼反応機構[47]を用いた.図7に



Fig.6 Weak flame images and their luminosity profiles (stoichiometric ethanol/air mixture; D = 1 mm, $U_0 = 2$ cm/s) [45].

も呼んでいる.



Fig.7 Heat release rate profiles computed with Marinov's chemical kinetics [46] (stoichiometric ethanol/air mixture; D = 1 mm, $U_0 = 2 \text{ cm/s}$) [45].



Fig.8 Heat release rate profiles computed with Saxena&Williams's chemical kinetics [47] (stoichiometric ethanol/air mixture; D = 1 mm, $U_0 = 2$ cm/s) [45].



Fig.9 Pressure dependence of ignition delay time for a stoichiometric ethanol/air mixture in adiabatic, constant pressure condition (initial temperature: 1000 K) and mass burning rate for adiabatic, stoichiometric ethanol/air laminar flame (inlet temperature: 300 K) [45]

Marinov の燃焼反応機構を用いた熱発生速度分布 の圧力依存性を示す.実験と同様に、二つの反応 帯が得られている. 圧力上昇に伴い, 青炎は強く なり低温側に移動しているが,熱炎は強くなって いる.熱炎の圧力依存性は実験と計算で定性的に 異なる傾向が得られた. すなわち, Marinov の燃 焼反応機構は圧力上昇に伴う青炎の強化・熱炎の 弱化を過小評価している.図8に Saxena & Williams の燃焼反応機構を用いた熱発生速度分布 の圧力依存性を示す.実験と同様に二つの反応帯 が得られている. 圧力上昇に伴い, 青炎は強くな り低温側に移動し、熱炎は弱くなっている. 定性 的傾向は実験と同じである.しかし、実験では青 炎の発光強度が3 atm で熱炎と同程度,5 atm で熱 炎の 1.5 倍程度であることを考慮すると、数値計 算では青炎の熱発生速度が2 atmで熱炎と同程度, 5 atm では熱炎の 9 倍程度であり, Saxena & Williams の反応機構は圧力上昇に伴う青炎の強 化・熱炎の弱化を過大評価している.

二つの燃焼反応機構で全く異なる weak flame の 圧力依存性が得られたが,一般的な評価対象であ る燃焼速度や着火遅れ時間の圧力依存性はどうで あろうか?図9に質量燃焼速度と着火遅れ時間の 圧力依存性の計算結果を示す.二つの燃焼反応機 構は定量的にほぼ同じ質量燃焼速度と着火遅れ時 間の圧力依存性を示している.このことから, weak flame を利用した燃焼反応機構の検証を行う ことで,従来手法だけでは検証しきれない部分を 補完することができると考えられる.

4. 温度分布制御マイクロフローリアクタによる アンモニア燃焼反応機構の検証

マイクロリアクタは予混合気を予熱し,かつ滞 在時間が長い場であるため,反応性の低いアンモ ニアでも適用できる可能性が高い.また,前章で 述べたマイクロリアクタの特徴から,得られる試 験結果は中低温域の着火特性と強い関係があり, 既存の試験では全くデータのない領域を補完する ことが期待される.さらに,これまで化学発光撮 影で得られた輝度分布と数値計算で得られた熱発 生速度分布を比較し,燃焼反応機構の検証を実施 してきたが,新たに化学種の濃度分布を取得し, これを数値計算結果と比較することでより詳細な 燃焼反応機構の検証を実施し,より精緻な新しい アンモニア燃焼反応機構の構築が期待できる.

図 10 にマイクロリアクタで撮影された量論混 合比のアンモニア/空気火炎の画像を示す.比較の ために,量論混合比のメタン/空気火炎の画像も下 側に示す.メタンと同様に,高流速域における normal flame (図 10a),中間流速域における FREI

(図 10b),低流速域における weak flame (図 10c) が観察された.反応性の低いアンモニアでも、マ イクロリアクタで試験可能であることが確認され た.化学発光はアンモニア火炎特有の赤色光であ り, normal flame と weak flame の火炎帯はメタン と比べて数倍厚い.

アンモニア weak flame を対象に化学種分布計測 を行い、これを数値計算結果と比較検証すること を試みた.図11に実験装置の概略図を示す.内径 2mm, 外径4mmのリアクタ石英管に, ノズル形 状の石英管を融着し, 流路途中で極微量のオンラ インガスサンプリングを行い, 質量分析計で分析 した. ノズルプローブの外形は 1.6 mm, ノズル先 端の内径は 0.1 mm である. ノズルプローブの出 口と質量分析計の間を溶融石英のキャピラリーで 接続し、キャピラリーの内径と長さを適切に調整 することで、マイクロリアクタ内の流れ場を乱す ことなく、極微量のオンラインサンプリング(流 量約 0.2 cc/min) を実現した. 外部熱源として使用 する水素バーナの位置を変えることで、相対的に サンプリング位置の温度を変化させた.図12に計 測結果の一例を示す. 1270 K 付近で, アンモニア と酸素のモル分率が急速に減少し、水蒸気のモル 分率が急上昇している. N₂Oのモル分率も 1270 K 付近で急上昇しているが、1280Kで最大値をとり、 その後減少しており, N₂O は中間化学種としての ふるまいを示している. NO のモル分率は緩やか



Fig.10 Ammonia/air and methane/air flames in the micro flow reactor.

に上昇し、N₂Oのモル分率が減少している位置か ら急上昇を示している.このように、アンモニア weak flameの火炎構造を実験的に調べることに成 功した.

図13にTianらが開発した燃焼反応機構[19]を用



Fig. 11 Schematic of experimental setup for species measurement.



Fig. 12 Measured structure of ammonia/air weak flames.



Fig. 13 Computed structure of ammonia/air weak flames using a mechanism developed by Tian et al.[19]

いて得られた数値計算結果を示す.実験では,最 高温度 1300 K になる直前でアンモニアと酸素が ほぼ完全に消費されているのに対して,数値計算 結果は大きく異なり,酸化反応が完結していない. このような傾向は,既存のアンモニア燃焼反応機 構すべて[19-22]で観察され,共通してアンモニア /空気予混合気の着火特性を過小評価していると 考えられる.今後は計測精度の向上を図りつつ実 験データを増やして検証を進め,着火特性を過小 評価している反応経路を特定・修正し,新たなア ンモニア燃焼反応機構の構築を目指す所存である.

5. おわりに

水素キャリアとしてアンモニアを取り上げ,そ の燃焼利用を進めるうえで,基礎燃焼研究におけ る課題を議論した.特に,アンモニア/空気予混合 気の中低温域における着火特性データが不足して おり,これを取得するために,独自の温度分布制 御マイクロフローリアクタを導入した.さらに, 同リアクタの概要を説明し,これを用いたごく最 近のアンモニア燃焼研究成果を紹介した.マイク ロリアクタがアンモニア燃焼反応機構を検証する うえで有効であることを確認し,既存の燃焼反応 機構が共通してアンモニア/空気予混合気の着火 特性を過小評価していることを見出した.さらに 研究を進め,産業界に利用してもらえる新たなア ンモニア燃焼反応機構の構築を目指す所存である.

参考文献

- Key World Energy Statistics 2014, International Energy Agency (2014).
- [2] Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M., Int. J. Hydro. Energy **32** (2007) 1121–1140.
- [3] Orimo, S.-I., Nakamori, Y., Eliseo, J.R., Züttel, A., Jensen, C.M., Chem. Rev. 107 (2007) 4111–4132.
- [4] Okada, Y., Sasaki, E., Watanabe, E., Hyodo, S., Nishijima, H., Int. J. Hydro. Energy **31** (2006) 1348–1356.
- [5] Semelsberger, T.A., Borup, R.L., Greene, H.L., J. Power Sources 156 (2006) 497-511.
- [6] Brown, L.F., Int. J. Hydro. Energy 26 (2001) 381– 397.
- [7] Avery, W.H., Int. J. Hydro. Energy 13 (1988) 761–773.

- [8] Zamfirescu, C., Dincer, I., Fuel Process. Technol. 90 (2009) 729–737.
- [9] Krock, E., J. Inst. Petrol. **31** (1945) 213–223.
- [10] Wiswell, R., "X-15 propulsion system" 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA (1997).
- [11] Smoot, L.D., Hill, S.C., Xu, H., Prog. Energy Combust. Sci. 24 (1998) 385–408.
- [12] Miller, J.A., Branch, M.C., Kee, R.J., Combust. Flame 43 (1981) 81–98.
- [13] Skreiberg, Ø., Kilpinen, P., Glarborg, P., Combust. Flame **136** (2004) 501–518.
- [14]Koebel, M., Elsener, M., Kleemann, M. Catal. Today 59 (2000) 335–345.
- [15] Fenimore, C.P., Combust. Flame 19 (1972) 289– 296.
- [16] Mendiara, T., Glarborg, P. Combust. Flame 156 (2009) 1937–1949.
- [17] Naruse, I., Yamamoto, Y., Itoh, Y., Ohtake, K., Symp. (Int.) Combust. 26 (1996) 3213–3221.
- [18] Watanabe, H., Marumo, T., Okazaki, K., Energy Fuels 26 (2012) 938–951.
- [19] Tian, Z., Li, Y., Zhang, L., Glarborg, P., Qi, F., Combust. Flame 156 (2009) 1413–1426.
- [20] Miller, J.A., Bowman, C.T., Prog. Energy Combust. Sci. 15 (1989) 287–338.
- [21] Lindstedt, R.P., Lockwood, F.C., Selim M.A., Combust. Sci. Technol. 99 (1994) 253–276.
- [22] Hewson, J.C., Bolling M., Symp. (Int.) Combust. 26 (1996) 2171–2179.
- [23] Hayakawa, A., Goto T., Mimoto R., Arakawa, Y., Kudo, T., Kobayashi, H., Fuel **159** (2015) 98–106.
- [24] Ichikawa, A., Hayakawa, A., Kitagawa, Y., Somarathne, K.D.K.A., Kudo, T., Kobayashi, H., Int. J. Hydro. Energy 40 (2015) 9570–9578.
- [25] Pfahl, U.J., Ross, M.C., Shepherd, J.E.,
 Pasamehmetoglu, K.O., Unal, C., Combust.
 Flame 123 (2000) 140–158.
- [26] Lee, J.H., Kim, J.H., Park, J.H., Kwon, O.C., nt. J. Hydro. Energy 35 (2010) 1054–1064.
- [27] Zakaznov, F.Z., Kursheva, L.A., Felina, Z.I., Combust. Explos. Shock Waves 14 (1978) 710– 713.
- [28] Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., Kondo, S., Sekiya, A., J. Hazard. Mater. 155
(2008) 144-152.

- [29] Mathieu, O., Petersen, E.L. Combust. Flame 162 (2015) 554–570.
- [30] Takeyama, T., Miyama, H., Symp. (Int.) Combust. 11 (1967) 845–852.
- [31] Miyama, H., Endoh, R., J. Chem. Phys. 46 (1967) 2011–2012.
- [32] Bull, D.C., Combust. Flame 12 (1968) 603-610.
- [33] Drummond, L.J., Combust. Sci. Technol. 5 (1972) 175–182.
- [34] Fujii, N., Miyama, H., Koshii, M., Asaba, T., Symp. (Int.) Combust. 18 (1981) 873–883.
- [35] Miller, J.A., Walch, S.P., Int. J. Chem. Kinet. 29 (1997) 253–259.
- [36] Vandebroek, L., Verplaetsen, F., Berghmans, J., Van Den Aarssen, A., Winter, H., Vliegen, G., Van't Oost, E., J. Hazard. Mater. 93 (2002) 123– 136.
- [37] Won, S.H., Windom, B., Jiang, B., Ju, Y., Combust. Flame 161 (2014) 475–483.
- [38] 中村寿,手塚卓也,長谷川進,丸田薫,マイク ロ燃焼の新応用:燃料の着火特性計測と燃焼 化学反応の研究ツール,日本燃焼学会誌 55-173 (2013) 264-271.
- [39] Minaev, S., Maruta, K., Fursenko, R., Combust. Theory Model. 11 (2007) 187–203.
- [40]Yamamoto, A., Oshibe, H., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, K., Proc. Combust. Inst.

33 (2011) 3259-3266.

- [41]Hori, M., Yamamoto, A., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, Combust. Flame 159 (2012) 959–967.
- [42] Suzuki, S., Hori, M., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, K., Proc. Combust. Inst. 34 (2013) 3411–3417.
- [43]Kamada, T., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa,
 S., Maruta, K., Combust. Flame 161 (2014) 37–48.
- [44]Hori, M., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, K., Proc. Combust. Inst. 34 (2013) 3419– 3426.
- [45] Nakamura, H., Yamamoto, A., Hori, M., Tezuka, T., Hasegawa, S., Maruta, K., Proc. Combust. Inst. 34 (2013) 3435–3443.
- [46] Marinov, N.M., Int. J. Chem. Kinet. 31 (1999) 183–220.
- [47] Saxena, P., Williams, F.A., Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 1149–1156.

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構「再生可能エ ネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその 利用のための革新的基盤技術の創出」領域(さき がけ)の支援により行われた. 分子間エネルギー移動を用いた光子のエネルギー上方変換 Energy Upconversion of Photons by Using Intermolecular Energy Transfer

1. はじめに

光は粒子としての性質をもち、光子からなる. 一個の光子がもつエネルギー E_{ph} は、光の波長 λ の 単位を nm として次式で与えられる.

$$E_{\rm ph} = \frac{1.986 \times 10^{-16}}{\lambda} J = \frac{1.196 \times 10^5}{\lambda} kJ/mol$$
 (1)

光子のエネルギー下方変換は従来行われており, 蛍光灯においては *E*_{ph}の高い紫外光子を一旦蛍光 灯内の蛍光体に吸収させ,そのエネルギーの一部 を熱として散逸させた後,*E*_{ph}が低下した可視光子 を放出している.*E*_{ph}の低下が比較的容易なのは, 材料内で電子系の非熱的なエネルギーが格子系に 散逸されることにより,状態が熱的な平衡状態に 近づこうとする点を利用できるためである.

一方, *E*_{ph}の上方変換(upconversion, UC)には 特別な工夫を要し,従来は次の場合を除き殆ど行 われてこなかった.それらは,(i)非線形光学結晶 を用いた二倍波発生と,(ii)希土類イオンをドー プした材料による UC である.(i)では光のコヒー レンスと直線偏光が達成できるレーザーの共振器 内や極短パルス入射時に限られ,(ii)でも入射光に はコヒーレンスが要されるためレーザー光源を必 要とする[1]ものであった.すなわち,従来の UC はいずれもレーザー光源に限られたものであった. (詳細は文献[2,3]に記載.)

一方,UCが太陽光・ランプ光・LED光などの 非コヒーレントな光源に適用でき,かつ低強度の 光に適用可能となれば,人類の光利用の自由度が 増大することになる.非コヒーレント光に適用可 能な現状唯一の方法として,2005年頃から有機分 子の三重項-三重項消滅(TTA)を利用する方法(以 下,TTA-UC)が研究され始め[4,5],近年研究が活 発に行われている[6-8].本稿は,TTA-UCの意義 および原理の解説と,筆者らの研究から得られた 成果と知見の概説を行うものである. 村上 陽一 (東京工業大学) Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology) e-mail: murakami.y.af@m.titech.ac.jp

光に関する基本技術である UC には多彩な応用 が考えられるが、主な応用として、太陽光エネル ギー変換系の効率向上がある.太陽電池・水分解 光触媒・光合成材料などの、物質の電子励起状態 を用いる変換系では、系に固有な閾値波長 λ_a が存 在しており、 λ_g より長波長のスペクトル部分は未 利用で、エネルギー損失となっている(図 1a). すなわち各系には半導体のバンドギャップなどの



図1 (a) 波長に関する閾値*λ*gとUCの模式的表現. (b) エネルギーに関する閾値*E*gとUCの模式的表現. (c) アップコンバーターの実装形態に関する模式図. 閾値エネルギー*E*gが存在し、それより低エネルギーの光子は利用されておらず、光エネルギー変換 効率を制限する根本要因となっている. TTA-UC はこのような根本的制限を回避できる技術であり、 未利用な光スペクトル部分(未利用な光子群)を 二次エネルギー生成に利用可能な光に変換する技術である(図 1a, 1b).

図 lc に、光アップコンバーターが太陽電池等の デバイスに実装される際に想定される形態の模式 図を示す.この図では上から太陽光が入射し、ま ず λ_g より短波長の光がデバイスに吸収される. λ_g より長波長の光はデバイスを透過し、背面に設置 された光アップコンバーターに到達する.透過光 はそこでより短波長の光に変換され、背面のミラ ーにより反射され、デバイスへと再入射し、二次 エネルギー生成に寄与を行う.このように、実装 時に、物質を劣化させる働きの強い紫外光のよう な短波長光が光アップコンバーターに到達しない



図2 (a) 作製したプロトタイプ・アップコンバー ターが赤色の入射太陽光を青色の発光に変換する 様子.(b) 開発した光アップコンバーターの典型的 な光吸収スペクトル(右軸)と発光スペクトル(左 軸).この発光スペクトルは633 nmのレーザー光 入射により得られた.グラフ上部余白に,用いた 増感分子(右)と発光分子(左)の構造を示す.

ことは、応用に際する利点である.

図 2a に, 筆者らが作製したプロトタイプ・アッ プコンバーター[9,10]を示す. この写真ではバンド パスフィルタ(中心波長 625 nm, 半値幅 10 nm) を用いて赤色の太陽光を取り出し, それをルーペ により集光し, 明確に視認される青色発光を得て いる.本プロトタイプはガラス板を積層溶着した 容器内に,後述する独自に開発した液体試料を封 入し,その背面にアルミ蒸着により反射層を形成 したもので,図 1c の形態を想定したものである.

2. スピン状態と状態間遷移

2.1 スピンとその多重度

電子はスピン角運動量 1/2(単位 ħ,以下同様) をもつ.そのベクトル(スピンベクトル)の向き は磁場下で二通りに量子化され,矢印を用いて↑ および↓(それぞれスピン関数αおよびβに対応) と表される.図3は磁場 H_zをz軸と平行とした ときのαおよびβスピンの模式図を示す.図中の円 錐は歳差運動するスピンベクトルの先端の軌跡を 示す.なお,先端の軌跡上の位置は不確定性原理 から決定できない.分子内電子では分子内磁場が H_zを与える.スピンベクトルに許される向きの数 をスピン多重度(Spin multiplicity; M)といい,図 3の孤立電子では M=2 である.

以下,二電子が近接して相関が存在する場合を 考える.このとき二電子は交換相互作用により結 合し,互いの歳差の位相が揃い,一つのスピンベ クトルのように振る舞う.図4aに示すように,相 関の仕方には二通りが可能で,αスピンとβスピン とが互いにベクトルを打ち消し合う一重項状態 (記号S,スピン角運動量0,M=1)と,打ち消 し合わない三重項状態(記号T,スピン角運動量 1,M=3)とがある.図4aのように,三重項状態 ではスピンベクトルはH_zに対して三通りの向き



図3 磁場中における孤立電子のスピン状態.



図4 分子内で相関する二電子の状態を表す模式図.(a) 一重項状態および三重項状態,(b) 各状態に対応する電子軌道におけるスピン配置,(b) 各状態にある分子のもつ自由エネルギーの相対的関係.

をとる. H_zのもとでこれらの間のエネルギー縮退 は解けているが,通常その分裂幅は熱エネルギー (k_BT)より十分小さい.

2.2 自由エネルギー

パウリの排他原理から、一つの軌道には $\uparrow b \downarrow \phi$ スピンをもつ最大二個の電子まで収容される.図 4bに、横線で電子軌道を表し、縦方向に軌道のエ ネルギーをとった分子内軌道の模式図を示す.基 底状態(記号 S₀)では最高被占軌道(HOMO)に $\uparrow b \downarrow \phi$ の電子が入り、一重項状態となっている.そ れらのうち一方が一つ上の軌道(S₀における最低 空軌道,LUMO)に移った電子励起状態では、 HOMOに残った電子とLUMOに入った電子との 相関が一重項の状態(記号 S₁)と、三重項の状態 (記号 T₁)とがある.TTA-UCに用いられるのは、 これらの S₀, S₁, T₁の状態である.

続いて、これらの状態にある分子の自由エネル ギーについて説明する.分子間エネルギー移動の 可能性を決めるのはエンタルピーではなく、エン トロピー変化も考慮されたギブスの自由エネルギ ーである.図4cに、分子のエネルギーダイアグラ ムを示す.通常、T₁の自由エネルギー(E_{T1})は S₁のそれ(E_{S1})より低い.これは分子に関するフ ントの規則(Hund's rule)による.物理的には、 同種スピンの二電子は分子内で空間的近接が禁ぜ られるために、クーロン反発エネルギーが低下す ることに起因する. $S_1 \ge T_1 \ge 0$ エネルギー差 ΔE_{ST} は電子交換エネルギー $J \ge \Delta E_{ST} = 2J$ の関係がある [11]. このことから、相関する二電子の軌道の重 なりが大きくなるほど、すなわち同系統の分子で あれば分子サイズが小さいほど、 ΔE_{ST} は増大する. 分子では一般に次の関係が成り立つ[11].

$$E_{\rm T1} - E_{\rm S0} > E_{\rm S1} - E_{\rm T1} = \Delta E_{\rm ST} \tag{2}$$

2.3 状態遷移

スピン-軌道相互作用が非常に強い場合を除き, 一般に電子系とスピン系との結合は弱いため,光 学遷移においては一度に電子とスピン両方の状態 を変えることはできない.すなわち,光子の吸収・ 放出では,通常,一重項状態間または三重項状態 間の遷移のみが許容され,項間の光学遷移($T_{n\geq 1}$ $\leftrightarrow S_{n\geq 0}$)はスピン禁制となる.

光学遷移のレートはフェルミ黄金則により表現 される.ある波長について、観測される初期状態 iから終状態fへの遷移レート k_{obs} [s⁻¹]は、Pを遷 移に関わる摂動の演算子、 ψ を電子波動関数、 χ を 振動波動関数として次式により表される.

$$k_{\rm obs} \propto \left\langle \psi_i \left| \mathbf{P} \right| \psi_f \right\rangle^2 \left\langle \chi_i \left| \chi_f \right\rangle^2 \tag{3}$$

右辺の第一要素は遷移双極子モーメント、第二要

素は Franck-Condon 因子を表す.後者は光学遷移 においてだけでなく,後述のエネルギー移動過程 においても関連し,TTA-UC に用いる分子を選択 する際にも考慮されるべき因子である.

3. 方法と原理

3.1 エネルギーキャリア分子と媒体

TTA-UC は、光吸収および三重項状態の生成を 行う「増感分子(sensitizer)」と、TTA および発光 を行う「発光分子(emitter)」とを媒体中に共存さ せて行われる.後者に半導体ポリマーを使用した 研究例[12]もあるが、本稿は両者に分子を用いる 場合を扱う.筆者らはこれまで、増感分子にパラ ジウム錯体ポルフィリンの一種である PdPh₄TBP を、発光分子に perylene を用いており、本稿に示 す結果はいずれもこれらを使用したものである. 図5にこれらの分子構造とエネルギー図を示す.

分子の T_1 状態が励起エネルギーのキャリアと なりうるのは、一般に三重項寿命 τ_{Γ} は長く(μ s~ ms オーダー)、媒体中を拡散し、他の分子と衝突・ 会合し、分子間エネルギー移動を行うまでの時間、 励起状態を保持できるためである.(PdPh₄TBP で は $\tau_{\Gamma} \approx 260 \,\mu$ s [13], perylene では $\tau_{\Gamma} \approx 4 \,m$ s [14].)

従来,TTA-UC研究の多くでは有機溶媒が分子の熱運動(拡散)の媒体に用いられてきたが,高い揮発性と可燃性,蒸気の有害性などが応用に向けた障害であった.この問題に対して,筆者らはイオン液体(イオンのみからなる常温溶融塩,事実上不揮発かつ不燃)を用いることを着想,これを世界に先駆けて達成し[15,16],従来の問題を解決した(図2).続いて筆者らは,イオン液体を媒体とした試料における様々なキネティクスを解明している[13,14,17].



図5 PdPh₄TBP(左)とperylene(右)の分子構造,および,両分子の各状態の自由エネルギー. エネルギーの値は文献または実験による概測値.

3.2 TTA-UCの原理

図6に、TTA-UCを定性的に描写したエネルギ ーダイアグラムを示す.この図は、 $E_{ph} = h_{VI}$ の入 射光子が増感分子により吸収された結果、発光分 子から $E_{ph} = h_{V2} (> h_{VI})$ の光子が放出される過程を 示している.図6では、2.3節で禁制とした $T_1 \rightarrow S_0$ の光学遷移が描かれているが、これは後述の PdPh₄TBPにおける重原子効果に起因して禁制が 少し破れ、レートの低い光子の放出(りん光、 phosphorescence)を伴う遷移が存在することを表 すものである.本図の順に沿い、以下 3.2.1~3.2.5 に各過程の内容を述べる.

3.2.1 光吸収

光子 ($h_{\rm H}$)が増感分子に吸収されると,許容な S₀→S₁ 遷移により,増感分子は S₁となる. PdPh₄TBPでは図2bに示したように波長600-650 nm の範囲に光吸収があり,これはポルフィリン 類のQ帯による吸収である.ポルフィリン類が増 感分子として適するのは,これより短波長側に光 透過の窓があり,上方変換された短波長光が増感 分子に再吸収されることが殆ど起きないためであ る.なお,図2bで470 nm付近から急に立ち上が る光吸収は,主に perylene によるものである.

3.2.2 項間交差(ISC)

S₁となった増感分子では、図 4b のように、二 つの軌道にスピンが反平行($\uparrow \downarrow$)に入る. PdPh₄TBP における強いスピン–軌道相互作用(spin-orbit coupling; SOC)による磁気的擾乱により、いずれ かのスピンが反転すると、状態は直ちによりエネ ルギーの低い T₁ に変化する. これを項間交差 (intersystem crossing; ISC)とよび、そのレート k_{ISC} [s⁻¹]は、P_{SO}を SOC に関わる摂動の演算子,*i*: S₁ 状態、*f*: T₁状態として

$$k_{\rm ISC} \propto \frac{\left\langle \psi_i \left| \mathbf{P}_{\rm SO} \right| \psi_f \right\rangle^2}{\Delta E_{if}^2} \tag{4}$$

と表される.SOC は重原子効果等により生じる. 増感分子に PdPh₄TBP を用いるのは,Pd 原子によ る本効果を利用するためである.式(4)は, ΔE_{ST} が小さいほど k_{ISC} が増大することを示す.これは, 物理的には, $J (= \Delta E_{ST}/2)$ が小さいほどスピン反 転に要される磁気的エネルギーが少ないことに対 応する.式(4)は,増感分子に ΔE_{ST} が小さい分子を 選択することに,(i) ISC に伴う自由エネルギーの 特集:新しいエネルギー変換



図 6 TTA-UC の過程を表す定性的なエネルギーダイアグラム. 実線矢印は radiative transition, 破線矢印は non-radiative transition を表す.

損失を抑えること、および、(ii) k_{ISC} を高めることにより三重項生成量子効率を向上させること、の二重の意義があることを示している.

3.2.3 三重項エネルギー移動(TET)

T₁となった増感分子は、その寿命の間、励起状 態を保つ(PdPh₄TBPでは $\tau_{T} \approx 260 \mu s$). この間に 拡散を行い、試料中のS₀の発光分子に衝突すると、 図 7aに示すエネルギー移動機構(Dexter 機構)に より、エネルギーが発光分子へと移動する(triplet energy transfer, TET). この機構では、両分子間で 図 7aに示される電子スピン交換が行われ(前後で スピン角運動量は保存),増感分子の励起エネルギ ーが発光分子へと移動する.

ここでの衝突とは、両分子の電子雲が重なり始める Van der Waals 半径程度への近接を意味する. 電子雲の重なりは距離に対して指数関数で低下するため、Dexter 機構によるエネルギー移動は1-2 nm 程度以下の短距離でのみ発現する[11]. このため、分子には媒体中での熱運動が要される.

3.2.4 三重項一三重項消滅 (TTA)

励起エネルギーを受け取った発光分子には、そのエネルギーをなるべく長時間保持する性質が求められる.本研究では、この要求を満たす分子として前述の perylene ($\tau_{T} \approx 4 \text{ ms}$)を用いている.

二つの T₁発光分子が, 熱運動を経て互いに衝突 すると, ある確率で, 図 7b に示される電子スピン 交換を伴う分子間エネルギー移動, すなわち TTA が生じる. TTA の結果, 一方の発光分子が S₀に, 他方が S₁となる. 図 4c に示したように, $E_{S1} > E_{T1}$ であることから, TTA はいわば二分子のもつ励起 エネルギーの合算である. このような「合算」が 熱力学第二法則に反しないのは, ここでのエネル ギーが熱浴と非平衡な励起状態のエネルギーであ り、エクセルギー率1のものに対する変換である ためである.熱力学的には、これは電気エネルギ ーにおける変圧にあたる変換と考えることができ る.なお、TTA が熱力学第一法則を満たすのは、 分子では一般に式(2)が成り立つことによる.

一方, TTA の逆過程も熱力学的に可能だが(そしてそれは今の場合望ましくないが), それはキネティクスにより抑制される. TTA がその逆反応と 平衡しないのは, その後段に発光という高速な不可逆過程が控えているためである.

3.2.5 発光

 S_1 の発光分子は、 $S_1 \rightarrow S_0$ 遷移が光学許容である ことにより、短時間(通常 10 ns 以下)で S_0 に遷 移する.そのエネルギーは、発光分子の蛍光量子 効率にしたがって光子(h_{V_2})として放出され、光 子エネルギーの上方変換が完結する.



図 7 (a) 三重項エネルギー移動(TET) および (b) 三重項-三重項消滅(TTA) においてなされ る分子間での電子交換過程の模式図. 以上のように、TTA-UC とは、TET、TTA、お よびそれらに要される分子の熱運動と衝突を利用 し、入射光より短波長シフトした遅延蛍光を発生 する光子エネルギーの変換過程である.

4.得られた結果と知見

4.1 三重項エネルギー移動量子効率の決定

本節と次節 4.2 では,前節 3.2 で示した TTA-UC の過程のうち,特に 3.2.3 (TET) と 3.2.4 (TTA) に関して筆者らにより得られた結果と知見を概説 する.

上述のように、TET は分子間衝突を要する短距 離エネルギー移動過程である.これが拡散律速過 程であるためか、これまでの他の TTA-UC 研究で は、衝突時の TET 量子効率(Φ_{TET})を1と前提し て議論が行われてきている.すなわち、「ぶつかり さえすれば T₁エネルギーは必ず相手に移動する」 「寿命内にぶつかれないことが Φ_{TET} の唯一の制 限要因である」という前提である.しかし、この 前提が正しい保証は存在しない.むしろ、これは 問題の単純化のために置かれた暫定的・便宜的な 仮定と捉えられるべきである.

TET は分子間の「エネルギーのバトンリレー」 であるが、このバトンを相手に渡す際、ある確率 でバトンを落とす、すなわち励起エネルギーが熱 として散逸される可能性を考慮する必要がある.

筆者らは、TETのキネティクスを詳しく研究し、 この点を明らかにした[13].実験としては、試料 にナノ秒レーザーパルスと白色 LED から特定波 長を抽出した連続光とを直交して入射し、パルス 光により作られた T₁増感分子から S₀発光分子に エネルギーが移動してゆく様子を時間分解計測し た.連続光は、増感分子(PdPh₄TBP)と発光分子

(perylene)の三重項間光吸収($T_1 \rightarrow T_n; n \ge 2$)の 過渡変化を観測する目的に用いた.この実験結果 と、別途行った実験から決定した連続光波長にお ける三重項間の光吸収係数とを用い、 Φ_{TET} の値を 決定した[13].図8に五種類のイオン液体で作製 した試料を測定して得られた結果を示す. Φ_{TET} は イオン液体の種類や励起パルスのエネルギーによ らず約0.75であった.これから、従来無検証で用 いられてきた「衝突すれば Φ_{TET} =1」という前提が 必ずしも正しくないことが明らかになった.

本結果は、TET を行う分子の設計・選定におい



図8 実験から決定した PdPh₄TBP から perylene への三重項エネルギー移動量子効率. 五種類のイ オン液体で作製された試料に対し, 励起パルスエ ネルギーを変化させて計測した.

ては、Φ_{TET}を1に近づける検討努力が必要である ことを意味している. Dexter 機構は古くから知ら れる分子間エネルギー移動機構だが、その効率に 関する根本メカニズムは未解明と思われる. この 点の根本理解には、衝突時の分子の相対的配向や Franck-Condon 因子への考察が必要であろう.

4.2 UC 効率の粘度依存性の発見と解釈

筆者が TTA-UC の媒体にイオン液体を用い始め た当初[15], TTA-UC 効率(Φ_{UC})がイオン液体の 種類に依存することが見出された.Φ_{UC} 向上の指 針を見出すため、イオン液体の違いの影響を見出 すための実験を行ったが、当時は購入したイオン 液体に対し真空加熱による除湿のみ行い、未精製 で使用していたため、残留不純物のイオン液体ご との違いにより,傾向がよく見い出されなかった.

最近,筆者らはイオン液体の精製法を開発した. これによりイオン液体を精製して試料作製に用い, イオン液体の種類がΦuc に及ぼす原因を研究した. その結果,Φuc を決める最大の要因が,イオン液 体の粘度にあることを発見した[14].

図 9a に、複数のイオン液体を用いて作製した試料から測定された UC 発光強度の相対値($I_{UC,rel}$)を、イオン液体の粘度に対してプロットした結果を示す.これらの試料では励起波長(633 nm)における吸光度を一致させているため、本図の縦軸は Φ_{UC} に比例する.この図は、粘度と Φ_{UC} との間に明確な正の相関が存在することを示している.

この結果に関するアーティファクトの可能性の否定は,筆者らの論文[14]において示されている.

この知見は、分子のダイナミクスがΦ_{UC}を決める要因であることを示唆している.図8の結果よりΦ_{TET} にイオン液体種類への依存性はないため、 次の推論が導かれる:Φ_{UC}の支配要因はTTA 過程 中にある.かつ、そのキネティクスは、粘度の影響を受ける分子ダイナミクスの影響を受けている.

溶媒中で T₁分子が拡散して出会うと,図 9b に 示す溶媒ケージ (solvent cage)中で遭遇会合体 (encounter complex)を形成する.溶媒ケージ内 にいる間,両分子は,次の kinetic step に進むまで 近接距離で衝突を繰り返す.通常,会合体形成以 降の時間スケールは,分子拡散に要した時間より 十分短く,一連の過程は拡散律速である.

この遭遇会合体 ($[T_1 \cdots T_1]$) において,スピン角 運動量1をもつ両 T_1 分子間には交換相互作用が生 じる.したがって,ここでは4個の電子が相関す る.この点を要約したのが図10aである.すなわ ち,遭遇複合体の取りうる全スピン角運動量は2, 1,0のいずれかで,それらの多重度Mは5,3,1と なる.以降,これらの会合体を $^{M}[T_1 \cdots T_1]$ と書く. 溶媒ケージ内でどの多重度を生成するかの分岐確 率はスピン統計に従い,理想的には多重度を重み とした比,すなわち⁵[T₁ …T₁]が 5/9,³[T₁ …T₁]が 3/9,¹[T₁…T₁]が 1/9 となると考えられている.

ところが、最も確率の高い⁵[T₁…T₁]は、通常、 エネルギー的に先に進むことは不可能なため、図 10b に示すように再び解離するしかない.これは じゃんけんの「あいこ」にあたる、³[T₁…T₁]は、 その先のエネルギー条件を満たすなら、T₁ と S₀ の生成に進み、結果的に T₁励起エネルギーを一つ 失う.しかし、perylene はこの条件を満たしてい ないと考えられ、このレートは低いと考えられる. 1/9 の確率で生成する¹[T₁…T₁]は、式(2)からエネ ルギー条件を満たしており、これらの分岐の中で は最速で進み、直ちに S₁ と S₀ の生成に帰結し、 上方変換された光子を生成する.

筆者らは図 9a の結果に対し,次の二点のメカニ ズムを提案している[14]. 一点目は,溶媒粘度が 高いほど溶質の分子回転速度が低下するという Stokes-Einstein-Debye 関係式から導かれる点に基 づく. T₁分子は磁気双極子をもち,分子回転が十 分遅いときは,両 T₁分子間に磁気双極子-双極子 相互作用が働く.この相互作用は分子回転が高速 になると消失する(詳細は文献[14]).つまり,低 粘度なイオン液体中ではこの相互作用は消失し, 通常想定される図 10bのキネティクスになってい ると考えられる.一方,高粘度なイオン液体中で は分子回転が抑制され,磁気双極子-双極子相互作 用が発現する.これは磁気的作用力を生じ,前述 のISCの場合と同様,異なるスピン多重度間のISC を発生させると考えられる.すなわち,「高粘度 → 磁気的擾乱が作用 → スピン多重度間でのISC レ ート(k_{ISC})が増大」という論理から,キネティク スが図 10cへと変化し,¹[T₁…T₁]への帰着割合が 増大,その結果 Φ_{UC} が上昇したと考えられる.

二点目は、溶媒粘度が高いほど溶媒ケージ寿命 (ケージの堅さ)が増すので、会合体の解離レート(*k*-diff)が低下し、会合した T₁分子間の相互作 用時間が増大するはず、という一般論に基づく、 溶媒ケージ内における相互作用時間の増大は



図9(a) UC 発光強度(●の試料の値に規格化) のイオン液体粘度への依存性. 試料作製に用いた イオン液体一覧を余白に示す. 重複したイオン液 体があるが, それらは異なるメーカーから入手し たイオン液体の比較目的の使用.(b)溶媒ケージ に囲まれた遭遇会合体[T₁…T₁]の模式図.

a States of Two Triplets	Resultant Complex	Total Spin Angular Momentum	Spin Multiplicity (M)	Name of State	Statistical Probability
$T_1(\uparrow\uparrow) + T_1(\uparrow\uparrow)$	${}^{5}[T_{1}\cdotsT_{1}]$	2	5	Quintet	5/9
$T_1(\uparrow\uparrow) + T_1(\uparrow\downarrow)$	³ [T ₁ T ₁]	1	3	Triplet	3/9
$T_1(\uparrow\uparrow) + T_1(\downarrow\downarrow)$	${}^1[T_1 \cdots T_1]$	0	1	Singlet	1/9
b $T_1 + T_1 \xrightarrow{k_{diff}}_{k_{diff}}$	[≥] ⁵ [T ₁ …T ₁]	с	$T_1 + T_1 \xrightarrow{k_{diff}} k_{-diff}$	$5[T_1 \cdots T_1]$	
$T_1 + T_1 = \frac{k_{diff}}{\langle k_{diff} \rangle}$	$\stackrel{\geq}{=} {}^{3}[T_{1}\cdotsT_{1}] - \frac{k}{k}$	\rightarrow T ₁ + S ₀	$T_1 + T_1 \overleftarrow{k_{diff}}_{k_{-diff}} $	$ \frac{3[T_1 \cdots T_1]}{k_{rec}} $	$\xrightarrow{k_{\text{TD}}} T_1 + S_0$
$T_1 + T_1 \xrightarrow{k_{diff}} k_{-diff}$	$\stackrel{\Rightarrow}{=} {}^{1}[T_{1}\cdotsT_{1}] - \frac{k_{s}}{k_{s}}$	\rightarrow S ₁ + S ₀	$T_1 + T_1 \xrightarrow{k_{diff}} k_{\cdot diff}$	$\left \begin{bmatrix} 1 \\ T_1 \\ \cdots \\ T_1 \end{bmatrix} \right $	$\xrightarrow{k_{SG}}$ S ₁ +S ₀

図 10 (a) T₁分子の遭遇会合体において可能なスピン多重度と、その形成の統計的比率. (b) 異なる多重度間 で項間交差がない場合のキネティクス. (b) 項間交差がある場合のキネティクス. k_{diff} : 会合体の形成レート, k_{diff} : 会合体の解離レート. 添え字は ISC: Intersystem Crossing, TD: Triplet Decay, SG: Singlet Generation.

k_{ISC}/k_{-diff}比を増大させ、その結果図 10c のキネティクスの割合を相対的に上昇させると考えられる.以上二点の仮説は図 9a の結果を説明し、エンジニアリングとしてはΦ_{UC}の支配要因を見出し、その向上指針を得たことは有意義である.しかし、高粘度の追求はいずれその副作用、すなわち分子拡散性の低下という悪影響を生じるため、この指針によるΦ_{UC}の向上には限界が存在すると考えられる.図 9a で最高の *I*_{UC,rel}を示した[N₈₈₈₁][NTf₂]を用いて作製した試料は、Φ_{UC} ≅ 15-16%であった.しかし、[N₈₈₈₁][NTf₂]は、市販の(試料を作製可能な)疎水性イオン液体中では粘度が最高の部類で、これ以上高粘度な疎水性イオン液体は入手できていない.この向上指針を適用しうるイオン液体の粘度上限を、今後明らかにする必要がある.

5. まとめ

本稿では,光子のエネルギーを上方変換する, いわば光子エンジニアリングの基本技術について 解説した.これは太陽光などの非コヒーレント光 に適用可能な現状唯一の方法である.本技術分野 は発展期にあり,近年研究が活発になりつつある. しかし,本技術の応用実現にはまだ多くの技術的 課題が存在し,その解決には有機化学合成による 分子創出のみならず,流体中における輸送現象, 溶質分子ダイナミクス,状態変化のキネティクス を含む多様な学理に基づく取り組みが必要となっ ている.そのような中,本研究は,分子スケール の熱流体工学の視点から,本技術に関する課題解 決とメカニズム解明に取り組むものとなっている.

参考文献

- [1] Auzel, F., Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids, Chem. Rev., 104 (2004) 139. (この p. 140 右段に記載.)
- [2] 村上,太陽光エネルギーの変換効率向上を実現する光アップコンバーター,ケミカルエンジニヤリング,57 (2012) 1.
- [3] 村上,光エネルギー変換効率の向上に資する 光アップコンバージョン技術,『光』の制御技 術とその応用事例集(技術情報協会),第6章 第8節,(2014).
- [4] Islangulov, R. R. et al., Low Power Upconversion Using MLCT Sensitizers, Chem. Commun., (2005) 3776.
- [5] Baluschev, S. et al., Up-Conversion Fluorescence: Noncoherent Excitation by Sunlight, Phys. Rev. Lett., 97 (2006) 143903.
- [6] Singh-Rachford, T. N. and Castellano, F. N., Photon Upconversion Based on Sensitized

Triplet–Triplet Annihilation, Coord. Chem. Rev., **254** (2010) 2560.

- [7] Schulze, T. F. and Schmidt, T. W., Photochemical Upconversion: Present Status and Prospects for its Application to Solar Energy Conversion, Energy Environ. Sci., 8 (2015) 103.
- [8] Zhou, J. et al., Upconversion Luminescent Materials: Advances and Applications, Chem. Rev., 115 (2015) 395.
- [9] NE レポート 赤い光を青い光に高い効率 で変換、ありふれた有機材料で実現、日経エ レクトロニクス、8月20日号 (2012)14.
- [10] http://youtu.be/TrvGDZWaS-Y
- [11] Turro, N. J., Ramamurthy, V., and Scaiano, J. C., *Principles of Molecular Photochemistry*, University Science Books, (2009).
- [12] Keivanidis, P. E. et al., Up-Conversion Photoluminescence in Polyfluorene Doped with Metal(II)–Octaethyl Porphyrins, Adv. Mater., 15 (2003) 2095.

- [13] Murakami, Y. et al., Kinetics of Photon Upconversion in Ionic Liquids: Energy Transfer between Sensitizer and Emitter Molecules, J. Phys. Chem. B., **117** (2013) 2487.
- [14] Murakami, Y. et al., Ionic Liquid Dependence of Triplet-Sensitized Photon Upconversion, J. Phys. Chem. B, 118 (2014) 14442.
- [15] Murakami, Y., Photochemical Photon Upconverters with Ionic Liquids, Chem. Phys. Lett., 516 (2011) 56.
- [16] 村上,太陽光高効率利用に向けた相安定な光 アップコンバーターの開発,Thermal Sci. Eng.,
 20 (2012) 15.
- [17] Murakami, Y. et al., Kinetics of Photon Upconversion in Ionic Liquids: Time-Resolved Analysis of Delayed Fluorescence, J. Phys. Chem.
 B, 117 (2013) 5180.

電極相界面極限利用を実現するレドックスフロー電池

Redox Flow Batteries with Advanced Flow Field Design and Improved Electrode Properties

津島 将司 (大阪大学, JST さきがけ), 鈴木 崇弘 (大阪大学) Shohji TSUSHIMA (Osaka University, JST PRESTO), Takahiro SUZUKI (Osaka University) e-mail: tsushima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年,燃料電池や二次電池などの電気化学エネ ルギー変換デバイスへの期待が高まっている.そ の背景には高い(と期待される)エネルギー変換 効率や(従来まではあまり必要とされなかった) 時間応答性に優れたエネルギー貯蔵技術への社会 的ニーズの高まりにある.

本稿で取り上げる、レドックスフロー電池 (Redox Flow Battery, RFB)は、このような期待の もとに、この数年で著しい進展がみられており、 さらに、多様な形式のレドックスフロー電池が提 案されるなど、特に国外において活発な研究開発 が展開されている.

後述するように、レドックスフロー電池におい ては、マイクロスケールの細孔を有する多孔質電 極内での反応と輸送の制御が重要となる.活物質 を含んだ電解液を外部から電池本体に供給する構 造であることから、従来のリチウムイオン二次電 池などとは異なり、熱流体工学に立脚した電池設 計が一層に求められる電気化学エネルギー変換デ バイスといえる.

ここでは、レドックスフロー電池(Redox Flow Battery, RFB)を取り巻く最近の状況について概観 した後に、筆者らが進めている"電極相界面極限 利用を実現するレドックスフロー電池"の実現に 向けた取り組みについて紹介する.その上で、新 たな電気化学反応系や固液二相系レドックスフロ ー電池などの最新の国内外の研究開発状況ととも に将来についての展望を示す.

2. レドックスフロー電池

レドックスフロー電池は電解液中のイオンを活 物質とし、外部から電解液を電極に供給すること で充放電を行う二次電池である.この点で、固体 である金属や酸化物などを活物質とする通常の二 次電池とは異なる特徴を有する.すなわち、電池 容量は外部に貯蔵する電解液の容量により決まる. 一方で、電池出力は電解液を供給する電池本体内 部の電極面積により決まる.これより、電池容量 と電池出力を個別に設計でき、大型から小型まで 幅広いニーズに対応することが可能となる^[1].

加えて、ナトリウム硫黄 (NaS) 電池のように 電池を高温に保つ必要がなく常温で作動すること ができる. さらに、充放電管理についても簡便で ある. すなわち、各セルには電池外部に設置され た同一の電解液貯留タンクから同じ充電状態の電 解液を供給するため、単セルを積層してスタック を構成した場合でも、各セルの充電状態は均等に 保たれる. リチウムイオン二次電池において各セ ルの過充電を防止するためにセル毎に充電状態を 正確にモニタリングし、かつ、運転制御する必要 があることとは対照的である. さらに、電解液中 に溶解した活物質イオンの価数変化により充放電 を行うことから、活物質の回収・リサイクルも容 易である.

これらの優れた特徴を有するものの数年前まで は、民間企業、公的研究所、大学を問わず、国内 外の限られたグループのみにより研究開発が進め られてきたにすぎない.その理由として、従来の レドックスフロー電池は、エネルギー密度と出力 密度がリチウムイオン二次電池などに比較して低 く、携帯端末用や車載用の電源としての競争力に 劣っていた、ということが挙げられる.

しかしながら,近年,太陽光や風力などの再生 可能エネルギーの導入促進が進められたことで, 電力系統の安定化のための大規模電力貯蔵という 用途が電池デバイスのニーズとして加わり,その 結果,リチウムイオン二次電池に加えて,レドッ クスフロー電池やナトリウム硫黄電池などの大規 模電力貯蔵に適した二次電池システムへの期待が 高まっている.

我が国では「再生可能エネルギーの固定価格買

取制度」により、太陽光、風力、水力、バイオマ ス、地熱により発電した電力を電力会社が一定価 格で買い取ることを国が約束しており、2012年7 月1日の同制度のスタート以降、特に太陽光発電 の設備導入量が著しく増加している.しかしなが ら、太陽光や風力などは天候に左右されるため、

これらの電源を接続する電力系統に対して不安定 化をもたらす、という負の側面を持っている.実 際にいくつかの電力会社については、再生可能エ ネルギー発電設備の系統への接続申し込みについ て、回答を留保する事態にもなった^[2].再生可能 エネルギーの導入は今後も促進されることから^[3]、 電力系統への接続拡大のために、調整電源や地域 間連携線の一層の活用という運用面に加えて、蓄 電池の増強などの設備面からの方策の必要性が指 摘されている.

米国においては、カリフォルニア州が 2020 年ま でに再生可能エネルギーによる電力供給を全体の 1/3 にまで引き上げる、という目標を掲げている^[4]. 同州では 2010 年に電力網への電力貯蔵システム 設置を推進する州法 AB2514 を成立し、2013 年に は カリフォルニア州公益事業委員会(CPUC)が 同州の 3 大ユーティリティ企業(PG&E 社, SCE 社, SDG&E 社)に対し 1,325MW の電力貯蔵設備 の導入を 2024 年までに段階的に義務化するなど、 先進的な取り組みを進めている.このような社会 的状況を受けて大規模蓄電技術が脚光を浴びるこ ととなり、近年の研究開発動向と相まってレドッ クスフロー電池への期待と注目が集まっている.

レドックスフロー電池の開発の歴史については, 重松の解説^[1]に詳しく述べられており,原理的な 提案は1974 年の米国NASA によるものとされて いる.この時,活物質としては鉄-クロム (Fe/Cr) 系が用いられた.1985 年頃にはオーストラリア New South Wales 大のグループが,正極,負極と もにバナジウム(V) イオンを用いる全バナジウ ム型レドックスフロー電池 (All-Vanadium Redox Flow Battery)を提案した^[5-8].バナジウム系は鉄 -クロム系に比べて起電力が高い.また,両極に 同じバナジウムイオンを用いることで正極と負極 のイオンが電解質膜を介して混合しても,鉄-ク ロム系のように電池容量の低下が生じないなどの 利点を有する.この他にも活物質には様々な組み 合わせがあり,実証実験が行われるとともに,導 入実績もある.最近では,住友電工がスマートグ リッド実証システムとして,バナジウム系レドッ クスフロー電池(容量 1MW × 5 時間)を用い た実証実験を行っている^[9].さらに「大型蓄電シ ステム緊急実証事業」の一環として,北海道南早 来変電所に6万 kWh(容量 15MW × 4 時間)の 大型蓄電システムを設置し,2016 年からの稼働が 予定されている.

これまでの着実な研究開発が大規模実証実験に つながっている一方で、今後、蓄電システムとし て普及拡大するためには、低コスト化が必須であ り、導入コストベースで揚水発電と同水準である 2.3万円/kWhを達成する必要があると指摘されて いる^[10].そのための技術的課題として、エネルギ 一変換効率を一層に高めること、言い換えれば、 電池内部抵抗を一層に低減し高性能化すること、 が挙げられる.これにより、蓄電池本体サイズの コンパクト化が可能となり、コスト削減につなが る.

図1は活物質としてバナジウムを用いたレドッ クスフロー電池の模式図である.陽イオン交換膜 の両側に多孔質電極を配置した構造となっており, 多孔質電極に外部タンクから活物質を含んだ電解 液を供給し充放電を行う.バナジウム系レドック スフロー電池の電気化学反応式を以下に示す. <正極>

$$VO^{2+} + H_2O \xrightarrow{Charge} VO_2^+ + 2H^+ + e^-$$
 (1)

<負極>

$$V^{3+} + e^{-} \xrightarrow{Charge} V^{2+}$$
(2)

充電過程では,正極と負極にそれぞれ4価 (VO²⁺),3価(V³⁺)のバナジウム溶液を送液し, 正極から負極へ電子移動が生じる.結果,正極及 び負極の溶液はそれぞれ5価(VO₂⁺)と2価(V²⁺) へと変化する.逆に,放電過程では負極から正極 へと電子が移動し,負極溶液は3価に,正極溶液 は4価に変化する.さらに,充放電に伴って水素 イオン(H⁺)が電解質膜を介して両極間を移動す る.これらの電極反応は正極,負極の多孔質炭素 電極表面上で進行する.そのため,電極表面の反 応活性と多孔質電極内部への電解液の供給が重要 となり,電極材料の開拓と流路構造の設計が技術 的課題となる.



図1 バナジウムレドックスフロー電池

3. 電極相界面極限利用に向けた取り組み

我々のグループでは、熱流体工学の視点から、 レドックスフロー電池の高性能化のための研究開 発を進めている.特に、多孔質炭素電極と電解液 の相界面を電気化学反応場として極限まで利用し、 電池の内部抵抗(過電圧)を低減するための取り 組みを進めている.そのためには、電極材料に加 えて電解液供給の流路構造も重要であり、電極材 料から流路構造に至るスケールでの実験と解析を 行っている.主にバナジウム系を扱っているが、 得られる知見は反応系に限定されるものではなく、 様々な反応系のレドックスフロー電池に適用可能 なものである.

従来,多孔質電極には図2(a)で示すような数mm の厚さを有する多孔質炭素材料が用いられてきた. しかしながら,電池性能の向上という観点からは 電極厚さは薄いほうがイオン輸送抵抗および電子 輸送抵抗の低減につながる.あわせて,電極内に 十分な量の活物質イオンを輸送することが重要で あり,電解液供給のための流路構造の設計が電池 性能を左右する.

流路構造については、従来は図 2(a)に示すよう に電極両端から電解液を供給するフロースルー構 造が採用されてきた.しかしながら、前述のよう に多孔質電極をより薄くすることを考えた場合に は、この流路構造は圧力損失の著しい増大を招く ため現実的ではない.薄型電極の利点を生かしな がら低圧力損失を実現するための流路構造が必要 となる.そこで、図 2(b)のような電極面に蛇行流 路を配置する方法、さらには、図 2(c)のようによ り積極的に電極内に活物質を供給する櫛歯構造な どが考えられる.我々のグループでは、櫛歯構造 流路と薄型電極の採用を提案している.

図3は我々のグループで設計・製作したレドッ クスフロー電池の単セル構造である.単セルはエ ンドプレート,炭素集電体,ガスケット,多孔質 炭素電極,陽イオン交換膜から構成されている. 電極面積は約3cm²である.陽イオン交換膜には Nafion[®]を使用している.電解液流路構造として櫛 歯構造と蛇行流路の比較が可能である^[11].

図4に櫛歯流路と蛇行流路のそれぞれについて 放電時の電流電圧特性を比較した結果を示す.こ こでは、厚さが約400µm(圧縮前)の多孔質炭素 電極(SGL 10AA)を用いた.これより、櫛歯流 路において、特に高電流密度域で優れた放電特性



⁽a) 従来型(フロースルー+厚型電極) (b) 蛇行流路+薄型電極 (c) 櫛歯流路+薄型電極 図2 レドックスフロー電池の流路構造と電解液流動

を示すことがわかる^[11].このことは,蛇行流路で は活物質輸送が濃度拡散によっているため高電流 密度域において電極内での活物質輸送が十分では なく,その一方で,櫛歯流路では流入部と流出部 が多孔質電極によって接続されているため,多孔 質電極に対して濃度拡散ではなく移流による活物 質輸送となり,電極内部への十分な活物質の供給 が実現できていることを示している.



Interdigitated channels

図3 実験で用いたレドックスフロー電池の構造





図 5 多孔質炭素電極の熱処理前後の SEM 像

実験で用いた薄型多孔質炭素電極は図5のよう な直径 10μm 程度の炭素ファイバーから構成され ており、図6に示すように熱処理を施すことによ り電池性能が大幅に向上することも実験的に明ら かにしている^[11,12]. その要因としては,熱処理に よる炭素表面触媒活性の向上および多孔質電極内 部に存在するバインダー樹脂の消失による反応表 面積の増大などが挙げられる.



図7 電極材料のサイクリックボルタモグラム

図7は炭素電極材料に熱処理を施した場合と未 処理の場合のサイクリックボルタモグラムである. 測定は2.0M 硫酸水溶液中でVOSO4 濃度を0.5M, 掃引速度は 0.05 V/s として行った. 酸化還元ピー ク電位の差は、未処理電極においては 0.99 V であ るのに対して熱処理電極においては0.77Vである. すなわち,熱処理電極表面において反応活性が増 大していることを示している. さらに, 炭素電極 表面構造の違いを検討するために,X線光電子分 光分析 (XPS) を行った. 図8はC1sとO1sのそ れぞれのピークについてナロースキャン測定を行 ったものである. Cls ピークについては熱処理の 有無で有意な差が認められないが、O1s ピークに ついては C=O 成分の顕著な増大が認められる.別 途行った電極表面の元素分析結果から,熱処理に より酸素元素割合が増大することが確認された. これらの知見は炭素電極表面の酸素含有官能基が

反応活性サイトになるとの報告^[13]と合致するものである.



図8 多孔質炭素電極のX線光電子分光測定結果



図9 多孔質電極内流動解析結果

多孔質炭素電極の反応面積と活物質輸送につい ても熱処理の効果が考えられる.一つ目は,バイ ンダー樹脂に一部被覆されていた炭素電極面が露 出し,これにより実効的な電極表面積が増大する ことである.電気化学測定により,熱処理前後で 多孔質炭素電極の電気二重層容量が増加すること を確認している.加えて,バインダー樹脂の消失 は多孔質電極内流動を均一化する効果が考えられ る.図9は空隙率が80%と60%の多孔質電極を3 次元構築した上で電極内流動について数値解析を 行ったものである.空隙率が80%の条件において, 流動がより均一化している様子が見て取れる.流 動の均一化は実効的な反応表面積の増大につなが る.反応表面積の増大は炭素電極表面における局 所電流密度の減少をもたらすことから過電圧低減 につながるだけでなく,電極表面における活物質 濃度低下を抑制する効果がある.

より基礎的な検討を行うために、実験で用いて いるものと同等の直径 10µm の炭素ファイバーに ついて反応流動解析を行い、放電特性を示したも のが図 10 である^[14].単一または複数の炭素ファ イバーを電解液流れ方向(図中の下方から上方) に配置した場合の負極側炭素ファイバー周りの活 物質濃度分布についてもあわせて示している.

負極として複数(ここでは2本)のファイバー を用いることですべての電流密度領域でセル電圧 が向上し,限界電流密度も大きく改善されること がわかる.炭素ファイバー間隔をファイバー直径 の1.5倍と5倍に設定して解析を行ったところ, ファイバー間隔が近づくとファイバー後流におい て活物質濃度が減少するため,複数のファイバー によりもたらされる電極表面積の増大効果は限定 的となることがわかる.



図 10 炭素ファイバー電極の放電特性曲線と電極 周囲の活物質濃度分布

以上のことから、レドックスフロー電池におい ては、電解液の不均一流動などに起因する有効反 応面積の減少に加えて、炭素ファイバー電極周囲 の濃度境界層の形成が電池性能の低下をもたらす ことが明らかになった.次節では、これらの影響 を考慮した多孔質電極モデルを導入し、レドック スフロー電池における過電圧要因の解析を行う. 4. レドックスフロー電池の反応輸送・性能解析 レドックスフロー電池には多くのパラメータが 介在し、さらなる性能向上のためには、多孔質電 極構造や活物質流動などの様々な因子が及ぼす影 響について系統的に理解し、材料要素からシステ ム設計へとつなげる取り組みが重要である.数値 解析技術はこのような観点から非常に有用である. すわなち、信頼性のある解析モデルを構築するこ とにより、電池内部の反応輸送現象の基礎的解明 に加えて、各パラメータが及ぼす影響を定量的か つ網羅的に比較検討することが可能となる.

前節で示したように、レドックスフロー電池電 極内の反応流動解析においては、炭素ファイバー 電極周りの濃度境界層形成と電解液の不均一流動 などに起因する有効反応面積減少の影響を考慮し た多孔質電極モデルの導入が必要であり、解析モ デルの構築を行った^[15].



図 11 解析対象モデル

図 11 に解析で対象とした櫛歯構造フロー電池 の2次元断面の模式図を示す.電解質膜と多孔質 電極から構成され,正極側と負極側の流路はそれ ぞれに集電体を挟んで隣り合っている.解析は図 中の太枠の領域,すなわち,負極,電解質膜,正 極について行った.電解液は硫酸水溶液,活物質 は電解液中のバナジウムイオンとし,化学種とし て,H₂O,H⁺,HSO₄,SO₄²⁻,H₂SO₄,V²⁺,V³⁺,VO²⁺, VO₂⁺,を考慮した.電解液の流動については,連 続の式(1)とDarcyの式(2)を適用し,多孔質電極内 の二次元流動場を得た.このとき、境界条件として図中 Ω_1 に入り口側流路圧力 p_{in} 、 Ω_2 に出口側流路圧力 p_{out} を与えた.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k_p}{\mu} \nabla p \tag{2}$$

多孔質電極内のイオン種 *i* の輸送は Nernst-Planck 式にもとづく式(3)から計算した.

$$\nabla \cdot \left(-D_i \nabla c_i - z_i u_{mob,i} F c_i \nabla \phi_l\right) + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i \quad (3)$$

多孔質電極内における電気化学反応は、電極表 面でのバナジウムイオン濃度変化を考慮した次の Butler-Volmer 式を適用した^[16,17,18].

$$< \mathbb{E} \overline{k} \mathbb{E} >$$

$$i_{pos} = A i_{0, pos} \left(\left(\frac{C_{VO^{2+}}^{S}}{C_{VO^{2+}}} \right) e^{(1 - \alpha_{pos})F \eta_{pos} / (RT)} - \left(\frac{C_{VO^{2+}}^{S}}{C_{VO^{2+}}} \right) e^{-\alpha_{pos}F \eta_{pos} / (RT)} \right), \quad (3)$$

$$i_{0, pos} = F k_{pos} (C_{VO^{2+}})^{1 - \alpha_{pos}} (C_{VO^{2+}})^{\alpha_{pos}}$$

<負極>

$$i_{neg} = Ai_{0,neg} \left(\left(\frac{C_{V^{2+}}^{S}}{C_{V^{2+}}} \right) e^{(1-\alpha_{neg})F\eta_{neg}/(RT)} - \left(\frac{C_{V^{3+}}^{S}}{C_{V^{3+}}} \right) e^{-\alpha_{neg}F\eta_{neg}/(RT)} \right),$$

$$(4)$$
 $i_{0,neg} = Fk_{neg} (C_{V^{2+}})^{1-\alpha_{neg}} (C_{V^{3+}})^{\alpha_{neg}}$

ここで*C^si*は炭素電極表面における化学種*i*の濃度 を表している.これらの値の算出については,電 極表面に輸送される活物質流束*Ni*を考慮して,正 極については式(5)と式(6)を用いて求めた.負極に ついても同様に扱った.この際,電極表面での物 質伝達係数 *km*については式(7)から算出した.

$$N_{VO^{2+}} = k_{m1} \left(C_{VO^{2+}} - C_{VO^{2+}}^{S} \right)$$

= $k_{pos} \left(C_{VO^{2+}} \right)^{1-\alpha_{pos}} \left(C_{VO_{2}^{+}} \right)^{\alpha_{pos}}$
 $\times \left(\left(\frac{C_{VO^{2+}}^{S}}{C_{VO^{2+}}} \right) e^{(1-\alpha_{pos})F\eta_{pos}/(RT)} - \left(\frac{C_{VO_{2}^{+}}^{S}}{C_{VO_{2}^{+}}} \right) e^{-\alpha_{pos}F\eta_{pos}/(RT)} \right).$ (5)

$$N_{VO_{2}^{+}} = k_{m1} \left(C_{VO_{2}^{+}} - C_{VO_{2}^{+}}^{S} \right)$$

= $k_{pos} \left(C_{VO^{2+}}^{2} \right)^{1-\alpha_{pos}} \left(C_{VO_{2}^{+}}^{2} \right)^{\alpha_{pos}}$
 $\times \left(\left(\frac{C_{VO_{2}^{+}}^{S}}{C_{VO_{2}^{+}}} \right) e^{-\alpha_{pos} F \eta_{pos} / (RT)} - \left(\frac{C_{VO_{2}^{+}}^{S}}{C_{VO_{2}^{+}}} \right) e^{(1-\alpha_{pos})F \eta_{pos} / (RT)} \right)$ (6)

$$Sh = 0.24Re_{L}^{0.72} \cdot Sc^{0.31} = k_{m}d / D$$
⁽⁷⁾

電極の実効反応面積Aについては、電解液の不均一流動などに起因する有効反応面積の減少を考慮した. 図9で示したように有効反応面積は電極 圧縮の影響を受けることから、電極の圧縮前後の 空隙率&っとをの比の関数として、ファイバー直径d、 空隙率¢の多孔質電極の理論幾何表面積A_eを用い て次式から算出した^[18].

$$A = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{0.75} A_e \tag{8}$$

解析では、電気的中性の条件ならびに電解液中 の電位分布についても考慮し、解析には有限要素 法を用いて、すべて式を連成させて行い、輸送係 数などの各パラメータについては文献値^[16,17,18]を 参照した.

図 12(a)に電解液供給流量によるレドックスフ ロー電池の放電特性の実験結果を示す.供給流量 の減少にともない,低電流密度域においても過電 圧の増大が確認される.図 12(b)は同一条件におけ る解析結果である.炭素ファイバー電極周囲の濃 度境界層の形成を考慮しない場合,放電特性は電 解液供給流量に依存性しない.その一方で,電極 表面での物質輸送抵抗を考慮すると実験結果を再 現することがわかる.すなわち,レドックスフロ 一電池においては,通常の二次電池系と異なり電 極内に活物質を含んだ電解液を供給するため,流 動反応ともなう濃度境界層の形成をモデル化して 解析を行う必要があることがわかる.



(b) 解析結果



構築した解析モデルからレドックスフロー電池 の過電圧要因について各部材に関連して分離した ものを図 13 に示す.実験で用いたセルについては, 正極,負極,電解質膜,集電体などに起因する過 電圧が同等程度であることでわかる.反応過電圧 が全体の過電圧に占める割合は低く,バナジウム 系レドックスフロー電池では,十分な触媒活性と 表面積を有する電極であれば反応過電圧を抑制で きることがわかる.

一方で、イオン輸送と電子輸送に起因したオー ム抵抗が大きい.本解析では、電解質膜厚を 50µm としており、その分、電解質膜による過電圧が顕 在化している. このことから, 電解質膜の薄膜化 が電池性能の向上に有効な手段であることがわか るが、膜を介したバナジウムイオンのクロスオー バーは薄膜化するほど増大するため電流効率の低 下を招くこととなる. 今後は、レドックスフロー 電池向けに高分子構造を設計し,薄膜化と活物質 イオンの低透過性を実現する電解質膜の開発が期 待される.電子輸送抵抗についても、さらなる向 上の余地がある. バナジウム系レドックスフロー 電池では強酸電解水溶液を用いるため、金属材料 の使用は制限され,多孔質電極と集電体は炭素材 料である. 導電率は十分に高いとはいえない. 導 電率の改善には電極材料の炭化条件の見直しなど が考えられるが, 電極材料の場合には触媒活性も 求められるため, 双方を考慮した検討が必要であ る.



図 13 解析モデルにもとづくレドックスフロー 電池の過電圧要因の分離

電極相界面の輸送抵抗に起因した過電圧が低電 流密度域から顕在化していることは,通常の二次 電池とは異なり,レドックスフロー電池において 特徴的であるといえる.電極表面における活物質 濃度の低下が要因であることから,電極表面積の 増大と電極内流動の均一化により,さらなる低減 が可能であると考えられる.

4. まとめ

本稿では、レドックスフロー電池について、最

近の状況と我々のグループの取り組みを紹介した. レドックスフロー電池では,通常の二次電池系と は異なり,多孔質電極内に電解液を移流させるこ とでより高性能化が実現できる.そのため,セル に用いられる流路構造と多孔質電極は,反応に伴 うエネルギー損失の抑制が求められるだけでなく, 流動抵抗の低減も求められる.実際のシステムに おいては,入り口から出口にわたり電解液中の活 物質イオンの濃度分布も形成され,複雑な反応流 動場となる.電極内反応分布についても,いまだ 十分な知見は得られていない.以上のような観点 からも,熱流体工学が重要な役割を担う電気化学 エネルギー変換デバイスであるといえる.

材料開発についてもさらなる進展が期待できる. 本稿で示したように,電極反応面積の増大は過電 圧低減に効果的であると考えられる.我々のグル ープでは,電極反応表面積を飛躍的に増大させる ための検討も開始している.

最後に、ここ数年のレドックスフロー電池の進 展と将来展望について記したい.レドックスフロ ー電池は長く研究開発が進められてきたが、旧来 のフロースルー構造と厚型多孔質電極であった. これらは筆者の視点では第1世代と呼ぶべきもの であり、近年の大規模電力貯蔵システムとしての 期待の高まりから、現在でも多くの実証事業で採 用されている.しかしながら、社会実装につなげ るためには低コスト化の実現が不可欠であり、近 年、固体高分子形燃料電池の要素技術を適用する ことで大幅なセル性能の向上が報告されてきてい る.本稿で示した「櫛歯構造流路」と「薄型多孔 質電極」の組み合わせも同様に位置づけられ、第 2 世代と呼べるものと考えている.

筆者自身がさらに重要と考えるのは、その次の 第3世代ともいえるフロー電池を先導する研究を 展開することである.ここで第3世代と称するの は、新たなレドックス反応系も含めてフロー電池 に最適化されたセル構造と新規材料を見出し、採 用したシステムである.

新たなレドックス反応系としては,水素-臭素 (H₂/Br₂) [19]系,チタン-マンガン(Ti/Mn)系[20], さらには非金属の有機系活物質[21,22]が提案され るなど,世界中で活発な研究開発が進められてい る.

加えて、電解液中に固相活物質を混入して、固

液混濁液を供給するタイプのレドックスフロー電 池の提案もなされている[23,24]. 固相活物質はエ ネルギー密度が高く,非水溶性の有機電解液との 組み合わせによりセル電圧を高くすることが可能 となるため,新たな可能性を開くものとして期待 される.

いずれの形式においても、レドックスフロー電 池の社会実装と大量普及へ向けては、電池内の反 応輸送現象の基礎的理解とその制御が重要な課題 であり、我々のような熱流体工学、特に伝熱工学 を基盤とする研究者や技術者には大きな期待と責 任が寄せられていると信じて、筆者らは研究を進 めている.

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は,筆者が東京工業 大学在籍時に行われたものであり,関係各位に深 く感謝いたします. X 線光電子分光分析 (XPS) は,大阪大学 科学機器リノベーション・工作支援 センターの支援のもとに実施した.関係各位に謝 意を表します.

本研究を進めるにあたり,JST さきがけ「エネ ルギー高効率利用と相界面」領域の支援をいただ きました.関係各位に感謝いたします.とくに, 故笠木伸英先生におかれましては,同領域の研究 統括として,研究開始当初より貴重なご助言と励 ましをいただきました.心より感謝を申し上げ, 謹んでご冥福をお祈りいたします.

参考文献

- [1] 重松敏夫,電力貯蔵用レドックスフロー電池, SEI テクニカルレビュー, **179** (2011), 7.
- [2] 資源エネルギー庁,再生可能エネルギーの状況について,(2014).
- [3] 経済産業省,長期エネルギー需給見通し, (2015).
- [4] California Public Utilities Commission, Renewables Portfolio Standard 2nd Quarterly Report, (2014).
- [5] Sun, B. and Skyllas-Kazacos, M., A Study of the V(II)/V(III) Redox Couple for Redox Cell Application, J. Power Sources, 15 (1985), 179.
- [6] Sun, B. et al., Investigation of the V(V)/V(IV)System for Use in the Positive Half-Cell of a

Redox Battery, J. Power Sources, 16 (1985), 85.

- [7] Rychik M. and Skyllas-Kazacos, M., Characteristics of a New All-Vanadium Redox Flow Battery, J. Power Sources, 22 (1998), 59.
- [8] Skyllas-Kazacos, M. et al., All-Vanadium Redox Battery, JP2, 724, 817 (1997).
- [9] 中幡英章ら, スマートグリッド実証システムの開発, SEI テクニカルレビュー 182, (2013),
 4.
- [10] 経済産業省, 蓄電池戦略, (2012).
- [11] Tsushima, S. et al., Efficient Utilization of the Electrodes in a Redox Flow Battery by Modifying Flow Field and Electrode Morphology, *Proc. 15th Int. Heat Trans. Conf.*, (2014), IHTC15-9326.
- [12] Tsushima, S. et al., Cell Performance Improvement By Surface Modification of Porous Carbon Electrodes in Vanadium Redox Flow Battery, 226th meeting Electrochem. Soc., (2014), abs.605.
- [13] Maruyama, J. et al., Mechanism of Dioxovanadium Ion Reduction on Oxygen-Enriched Carbon Surface, J. Electrochem. Soc., 160-8, (2013), A1293.
- [14]津島将司、レドックスフロー電池におけるフ ァイバー電極周りの反応流動シミュレーショ ン、熱工学コンファレンス 2014 講演論文集, (2014), H121.
- [15] Tsushima, S. and Suzuki, T., Modeling and Simulation of an Interdigitated Vanadium Redox Flow Battery with Interfacial Mass Transfer Resistance, *Proc. of the First Pacific Rim Thermal Eng. Conf.*, (2016). (to be presented)
- [16] Shah, A. A. et al., A Dynamic Performance Model for Redox-flow Batteries Involving Soluble Species, *Electrochim, Acta*, **53**-27, (2008), 8087.
- [17] Knehr, K. W. et al., A Transient Vanadium Flow Battery Model Incorporating Vanadium Crossover and Water Transport through the Membrane, J. *Electrochem. Soc.*, **159**-9, (2012), A1446.
- [18] D. You et al., A simple model for the vanadium redox battery, *Electrochimica Acta*, **54**, (2009) 6827.
- [19] Lin G. et al., Advanced Hydrogen-Bromine Flow

Batteries with Improved Efficiency, Durability and Cost, *J. Electrochem. Soc.*, 163-1, (2016), A5049.

- [20] Dong, Y. R. et al., A Novel Titanium/Manganese Redox Flow Battery, 228th meeting Electrochem. Soc., (2015), abs.120.
- [21] Huskinson B. et al., A Metal-Free Organic-Inorganic Aqueous Flow Battery, *Nature*, 505 (2014), 195.
- [22] Chen, Q. et al., A Quinone-Bromide Flow Battery with 1W/cm² Power Density, J. Electrochem. Soc., 163-1, (2016), A5010.
- [23] Duduta, M. et al., Semi-Solid Lithium Rechargeable Flow Battery, *Adv. Energy Mater.*, 1, (2011), 511.
- [24] Petek, T. J. et al., Characterizing Slurry Electrodes Using Electrochemical Impedance Spectroscopy, J. Electrochem. Soc., 163-1, (2016), A5001.

第 14 回関西伝熱セミナー「自然エネルギー・環境問題の現状と今後の可能性」 Report on the 14th Kansai Heat Transfer Seminar

南川 久人(滋賀県立大学), 野口 佳樹(龍谷大学) Hisato MINAGAWA (The University of Shiga Prefecture) and Yoshiki NOGUCHI (Ryukoku University) e-mail: minagawa@mech.usp.ac.jp, y-noguch@rins.ryukoku.ac.jp

日本伝熱学会関西支部では、1989年以来途切れ ることなく、2年に1度宿泊付の「関西伝熱セミ ナー」を開催してまいりました.2015年は第14 回目となり、最澄によって開かれたと伝えられ、 約1200年の歴史を持つ由緒ある温泉である滋賀 県大津市のおごと温泉・びわこグランドホテルを 会場として「自然エネルギー・環境問題の現状と 今後の可能性」について考えるセミナーを開催い たしました.会場からは正面に琵琶湖が望める素 晴らしい環境でした.講師にはそれぞれの分野で の深い造詣を持たれた自然エネルギーや環境問題, 最新の伝熱技術に関するエキスパートの方々9名 (うち,国立研究機関1名,大学5名,企業2名) に来ていただき,話題提供していただきました.



当セミナーのフライヤー

セミナーは2015年8月28日(金)の13時に開 会し、初日に5件の講演と質疑応答がなされまし た.その前半3件は地球規模の環境・自然エネル ギーが取り上げられました.まず立命館大学・琵 琶湖Σ研究センターの熊谷道夫氏より、「地衡流渦 の制御とそのエネルギーの利用」と題した講演が 行われました.圧力とコリオリ力がバランスして 生じる渦流を地衡流渦と、琵琶湖の渦流を環流と 呼び、そのエネルギーが地球温暖化の進行に伴っ て増加していることが報告され、海洋や湖沼に形 成される地衡流渦を制御して、そのエネルギーを 利活用したり、水中環境の調整や大気中に発生す る低気圧の軽減に貢献したりする取り組みの一端 が紹介されました.

2 件目は国立研究開発法人海洋研究開発機構地 球情報基盤センターの大西領氏からの「先端的気 象シミュレーションによる乱流熱輸送現象の解 明」と題した講演で,計算機性能の向上に伴って, 気象シミュレーションの高解像度化や適用範囲の 拡大が続いていることや,大西氏のグループで開 発が進められている MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)と呼ばれる先端的な気象シ ミュレーションモデルの概要の紹介と, MSSG を 用いた乱流熱輸送過程に関する研究の紹介が行わ れました.

続いて、明星大学の熊谷一郎氏に「マントル内 部の不均質性が生み出す多様なプルームの姿」と 題した講演をいただきました.地球の進化におい て、マントル内部の熱物質輸送を担うプルームの 果たす役割は大きいそうで、近年、地震学的な観 測などから、マントル内部は熱的・組成的に不均 質であり、多様なプルーム像が見えつつあるよう で、講演では現在のマントル像や既存モデルでは 説明し難い「謎」について説明され、地球内部の ダイナミックな現象について流体力学的な視点か ら議論されました.



初日の講演会のスナップ(講演者は熊谷一郎氏)

初日の後半2件は、最新の伝熱技術に関するも ので、自動車の熱交換器と熱音響技術が取り上げ られました.まず株式会社デンソー・熱交換器開 発部の佐藤英明氏より「自動車用の最新熱交換器 の紹介」と題した講演があり、EV/HV化、過給 D/S化などパワートレーンの多様化に対応する、 パワトレ系冷却およびエアコンに用いる新型の熱 交換器について紹介していただきました.

初日の最後は滋賀県立大学の坂本眞一氏による 「熱音響技術の可能性と課題について」と題した 講演でした.熱音響技術は環境問題などの解決に 寄与できるとして,ここ数年注目をされており, この技術の基礎となる熱音響現象について説明さ れました.その後に,これまでの坂本氏の取り組 みや,今後の課題について詳細な説明がなされま した.

初日の講演はこれで終了となりましたが,それ ぞれの講演で活発な質疑討論が行われ,最後は30 分近く後ろにプログラムがずれ込むほどでした.

講演終了後,大多数の参加者が宿泊されました ので,ゆったりと温泉ならびに食事・懇親会を楽 しんでいただけました.参加者の方から,なかな か豪華な食事・懇親会であると言っていただきま した.写真撮影の後,お開きとなりましたが,そ の後も一室をさらなる懇親会に使用して, 伝熱・ 環境・エネルギーの話, それ以外の楽しい会話が, 夜遅くまで続きました.



懇親会の様子



集合写真



懇親会(二次会)の様子

さて、2日目の8月29日(土)は、9時ちょう どより講演が始まりましたが、参加者諸氏は少し 眠そうにも見えましたが、多数ご参集いただきま した.

2 日目は水素エネルギー,家庭用給湯器,太陽 熱発電と関西のエネルギー事情といったテーマで 講演いただきました.

まず,九州大学の高田保之氏によって「水素インフラ普及への課題と熱物性測定」と題した講演

が行われ、水素インフラに係る技術的な課題と九 州大学水素材料先端科学研究センターで行われて いる高圧水素物性測定研究の一端を紹介していた だきました.日本の水素ステーションは海外に比 べて非常に高価で、規制も厳しいことから、その 普及は思うように進んでいないという問題点や今 後の展望もお話しいただきました.

次いで、株式会社ノーリツ・研究開発本部の濱 田哲郎氏より、「家庭用給湯器の環境対応技術」と 題して講演いただきました.給湯器各商品の現状 を整理するとともに、キーデバイスである"熱交 換器"の技術についてユーモアを交えて紹介して いただきました.

さらに、新潟大学の松原幸治氏には「集光型太 陽熱発電の現状とソーラーレシーバの研究開発」 と題し、欧州や米国で実用化されている集光型太 陽熱発電(CSP, Concentrated Solar Power)が写真 を交えて紹介され、最新のプラントでは集光した 太陽光の集熱と蓄熱により 24 時間発電が可能で あることや、太陽熱発電プラントの現状と、高温 型の太陽集熱器(ソーラーレシーバ)の研究開発 の動向について解説がなされました.



2日目の講演会のスナップ(講演者は松原幸治氏)

本セミナー最後の講演は,大阪市立大学の西村 伸也氏による「関西のエネルギー事情と夏季の節 電・ヒートアイランド対策」で,東日本大震災を 契機としてわが国のエネルギー事情が一変したこ とや,電力を中心に,関西地域のエネルギー利用 の現状,電力需給が逼迫する夏季における節電と ヒートアイランド対策についての技術メニュー, それらを横断的に評価する手法を紹介していただ きました.2 日目も活発な質疑応答がなされまし たが,帰りの交通の関係から予定の正午をあまり 過ぎることもできず,心ならずも途中で議論を打 ち切らせていただいたりもしました.最後には, 日本伝熱学会関西支部長の中部主敬先生(京都大 学)より締めの言葉をいただきました.

参加者につきましては, 講師 9 名を含めて 63 名となりました.一般参加者は主に関西の方々で すが,遠く九州,四国からも参加いただきました.

最後になってしまいましたが、大変ご多忙中に もかかわらず、ご講演をお引き受けいただいた講 師の方々、ご参加の皆様には厚く御礼を申し上げ たいと思います.さらに、以下に名簿を示します 関西伝熱セミナー実行委員の諸氏には企画から会 場選定、講師との交渉、広報など、さまざまにお 世話になり、大変ありがたく思っております.特 に会場との交渉、懇親会、会計をご担当いただい た塩見先生とフライヤー、HPを始め広報にご貢 献をいただいた巽先生にはここに記して謝意を述 べさせていただきます.

関西伝熱セミナー実行委員 実行委員長:南川 久人(滋賀県立大学) 幹事:野口 佳樹(龍谷大学) 委員:塩見 洋一(龍谷大学),浅野 等(神戸大学), 後藤田 浩(東京理科大学),巽 和也(京都大学), 岩井 裕(京都大学),北川 石英(京都工芸繊維 大学),栗本 遼(滋賀県立大学)

熱物質輸送国際センター(ICHMT)の現状と今後の課題

Present Status and Future Issues about International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT)

1. はじめに

国際伝熱会議(IHTC)は大規模ながら4年に一度の開催であるのに対し,熱物質輸送国際センター(ICHMT, http://www.ichmt.org/)が主催あるいは共催する会議は中小規模ながら頻度が高いこともあり,伝熱に関する国際的な動きに強い影響を与えているのは国際伝熱会議アセンブリー(AIHTC)よりもICHMTである,ともいえます.ICHMTについては本誌に何度か報告記事が寄せられている[1-5]ものの,最近の実態は本会会員の皆様にあまり馴染みがないと思われますので,その概要を説明するとともに,問題点をお伝えしたいと思います.

2. 組織構成と選挙プロセス

現在ICHTMには31ヵ国(Australia, Austria, Belarus, Belgium, Brazil, Canada, China, Egypt, France, Germany, Hungary, India, Israel, Italy, Japan, Mexico, Morocco, New Zealand, Poland, Portugal, Romania, Russia, Serbia, South Korea, Sweden, Switzerland, Thailand, The Netherlands, Turkey, UK, USA) から 42のMember Institutions(以下MI, 日本からはHTSJ, JSME, SCEJの三つ)が加盟しています. Statutesや By-lawsに記されているようにICHTMの運営組織は

The General Assembly (GA)

(4年に一度IHTC中に開催, MIごとに1名の投票権) **The Scientific Council**(SC)

(任期は,以前は4年でしたが最近2年に変更になり ました.総勢200名以上で,日本からは2015年当初14 名でしたが現在12名です:石塚勝,宇高義郎,岡崎 健,川口靖夫,高田保之,高橋厚史,塚田隆夫,牧 野俊郎,円山重直,宮内敏雄,望月貞成,吉田英生)

The Executive Committee (EC)

(任期4年で3期まで,15名.図1に2014年8月の写真) で構成されます.IHTC開催翌年の1月に任期開始で, 今期の会長・副会長・事務局長・理事は表1のとおり です. 笠木伸英氏は2007年から理事を3期連続,2011 吉田 英生(京都大学) Hideo Yoshida (Kyoto University) e-mail: sakura@hideoyoshida.com

表1 理事会メンバー(2015年1月~2018年12月) President Kemal (Kemo) Hanjalic Bosnia Herzegovina Vice Presidents (2名) Japan (~2015年7月) Nobuhide Kasagi France (2015年10月~) Jacques Padet USA Terrence W. Simon Secretary General Faruk Arinç Turkey Executive Committee Members (15名) Cristina H. Amon Canada USA (Vice Chair) Yildiz Bayazitoglu Pedro Jorge Martins Coelho Portugal Renato M. Cotta Brazil UK Peter J. Heggs Yogesh Jaluria USA (Chair) Sadik Kakaç Turkey Alexander I. Leontiev Russia Denis Lemonnier France Leonid Dombrovsky Russia Peter Stephan Germany Paolo Di Marco Italy John Thome Switzerland Hideo Yoshida Japan Xing Zhang China **Financial Auditors** Renato M. Cotta Brazil

Jean-Francois SacaduraFrancePeter StephanGermanyPast PresidentsFranceMichel CombarnousFranceMaurizio CumoItalyRichard J. GoldsteinUSAGeoff F. HewittUKGraham de Vahl DavisAustralia



図1 理事とオブザーバー(2014年8月10日) 後列: Jaluria, Bar-Cohen, Zhang, Shafeyeva, Thome, Marco, Orlande, Coelho, van Steenhoven, Stephan 前列: Arinç, de Vahl Davis, Bayazitoglu, Goldstein, Padet, Simon (笠木・吉田はIHTC-15対応のため不在)

年から副会長としても2期連続でご在任中でしたが, 昨夏のご逝去で,わが国のみならず世界の熱科学工 学界が大きな損失を受けたことは残念な限りです.

GA, SC, EC間の選挙の関係は図2に整理したよう に複雑で、とりわけ新会長・新副会長の候補者指名 に、現会長のみならず元会長にも権限が付与されて いるため、組織が更新しにくい問題があります.理 事会の構成メンバーがもともと比較的年長者が多 い上に、年長者の出席率の方が高いために、実際の 議論の場がますます高齢化していることも否定で きない現実です.

筆者は2011年からECとして2期目です. 笠木氏の ご逝去もあり次期(2019~2022年)に向けてぜひと もわが国から次世代のECが選出されるように準備 する必要があります. そこで, ECの選挙権を有する SCの皆様, さらにはそのSCの候補リストを準備す る(実にあいまいなシステムですが,以下の下線部 のように国力相応?の人数を推薦すれば,そのまま 受け入れられる)伝熱学会理事会を中心とする皆様 への注意喚起をさせていただきたいと思います.

ここで、ICHMTの規約を読まれる方はほとんどないと思いますので、この機会に、少し長くなりますが該当部を引用します.

Election Processes of President, Vice Presidents, Executive Committee Members, and Scientific Council Members at ICHMT



図2 ICHMTのGA, SC, ECの選挙プロセス(笠木・吉田: 2014年4月作成)

まずSCです:

Statutes Article 14

14.1. Members of the Scientific Council are elected by the General Assembly from nominations by the Executive Committee, Scientific Council or the Institutional members for a period of two years and may be re-elected; **By-laws Article 3 (revised)**

Members of the Scientific Council are elected by the General Assembly, for a period of two years, on the basis of nominations received from the Scientific Council, the Executive Committee or any Institutional Member.

Call for nominations must be issued at least four months before the first Executive Committee meeting of a calendar year, or the last Executive Committee meeting prior to the meeting of the General Assembly. <u>The Executive Committee shall prepare the list of the</u> <u>nominees for the mail ballot from the nominations</u> <u>received.</u>

<u>The list of nominees for the ballot should ensure that</u> <u>countries active in the field are appropriately represented.</u> <u>Scientific Council members may be reappointed.</u>

Recipients of Honors and Awards of the Centre are exofficio members of the Scientific Council, subject to their acceptance.

Members of the Assembly for the International Heat Transfer Conferences are ex-officio members of the Scientific Council, subject to their acceptance.

次にECです:

Statutes Article 15

15.1. The Executive Committee is the body which organizes and carries out the activities of the Centre. Members of the Executive Committee are elected by the Scientific Council by a simple majority of those voting in a mail ballot conducted by the President of the Scientific Council. Nominations for membership on the Executive Committee may be made by any member of the Scientific Council or any Institutional Member. Executive Committee members serve a term of four years and may be re-elected twice;

By-laws Article 7 (revised)

Members of the Executive Committee (EC) are elected by, and from, the Scientific Council in a mail or email ballot conducted by the President of the General Assembly. Nominations from members of the Scientific Committee will be submitted to a Nominating Committee comprised of the President, all Past Presidents (subject to their agreement to serve) and those outgoing Executive Committee members who are not eligible for re-election. Based on these nominations, the Nominating Committee will prepare the final list of candidates for the election, taking into account the number of nominations, research activity, ICHMT participation of each nominee, and geographical, gender, and employment diversity.

The Secretary General will contact all candidates to confirm their willingness to serve and attend EC meetings. At least 19 names will be on the ballot from which 15 will be elected by receiving the most votes. In case of a tie, the winner will be determined by chance through drawing lot or similar procedures.

3. ICHMTとAIHTC

前報[5]で以下の報告をさせていただきました.

上記会議(2012年7月にBathで開催されたAIHTC・ICHMT のダブルヘッダー会議)では、AIHTCとICHMTの協力連 携に関して、より具体的なスキームを検討するための特 別委員会(F. Arinc, A. Bar-Cohen, G. de Vahl Davis, K. Hanjalic, N. Kasagi, T. Simon)が設置されました.目標とし ては、伝熱・熱科学の国際連合組織を両組織を核として形 成し、The International Council for Science (ICSU)のメン バーシップを獲得することです.なお、当面の組織的な融 合形式としては、AIHTCの現在の自治権を尊重しつつ、 AIHTCがICHMTの傘下に入るということが提案されてい ます.

しかし,残念ながら,その後の検討は委員会内に 温度差があり進みませんでした.そこで,2014年4月 26日にMarseilleで開催されたICHMT理事会では,笠 木氏と吉田とで図3に示す資料を準備して問題提起 しました.結果を先に申しますと,本提案は理事会 メンバーの賛同を得るには至りませんでしたが,今 から思い返せば笠木氏のご遺志の重要な柱の一つ として,本会の皆様にもお知らせしたいと思います.

図3 (スライド:1~11) 熱科学工学国際ユニオン(IUTSE)に向けて



1. ICHMT・AIHTC 両理事会への提案書表紙です.当時, 笠木氏は ICHMT と AIHTC の副会長を兼任しておられました.

国際活動・会議報告

	CSU currently has 31 Scientific Union Members 121 National Scientific Members 22 International Scientific Associates
Scientific Union Members -	AU. International Astronomical Union BRO, International Brain Research Organization BRO, International Brain Research Organization BRO, International Matternation Molice Mathematical Union NOLLA, Nternational Union for QUArenary Research Schertenational Socialized astropological Sciences UGS, International Union of Protogrammetry and Nenoclas Bischertenational Union of Astropological Sciences UGS, International Union of Cristellography UES, International Union of Cristellography UERG, International Union of Cristellography UERG, International Union of Cristellography UUS, International Union of Pure and Applied Biochysics UUSA, International Union of Pure and Applied Biochysics UUSA, International Union of Pure and Applied Biochysics UUSA, International Union of Pure and Applied Sciences UUSA, International Union of Pure and Applied Biochysics UUSA, International Union of Pure and Ap

2. Ref.1: The International Council for Science (ICSU, 国際科学会議)の下に多数の科学ユニオンメンバー が存在します. (JSCの http://www.scj.go.jp/ja/int/icsu/ から http://www.scj.go.jp/ja/int/icsu/icsu.pdf に概要.)



3. Ref.2: The International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) は, ICSUの科学ユニオ ンメンバーの一つです.



4. Ref.3: ICHMT は, IUTAM の加盟メンバーの一つ です. ICSU から見ると孫メンバーになります.

	ICHMT vs AIH	ITC
	ICHMT	AIHTC
Activity	Meetings, Seminars, Courses; ICHMT Digital Library (Begell House) (Statutes Article 9.1~9.7)	IHTC (every 4 years), IHTC Digital Library (Begell House)
Membership	National, regional and int'l Institutions (Statutes Article 10)	National organizations of 18 countries (Working Article I)
General Assembly	Representatives of institutional members, Past Presidents (EO)	One or two delegates from each member (Article IV Sec. 1)
Election system (freedom of constituents)	- Members of the Scientific Council to be elected by the General Assembly (By-Laws Article 3) - With candidates nominated by a Nominating Committee, President and Vice-Presidents to be elected by the General Assembly (By-Laws Article 4)	Host country (organization) to be determined 8 years in advance to IHTC; Immediate past chair of IHTC serves as President with Vice President & Secretary nominated by the next host country
EC Members (ICHMT) Officers (AIHTC)	Members of the Executive Committee to be elected by, and from, the Scientific Council (By-Laws Article 7)	President, Vice President, Secretary, Past Presidents (Article V Sec. 1)
Secretariat	Located in Ankara, Turkey	Located in the country hosting the upcoming IHTC
Budget	Run by EC and Secretariat	Run by the host country

5. 以下が提案の主部です. ICHMT と AIHTC を比較 してみました. 最大の違いは, ICHMT の活動は定常 的ですが, AIHTC の活動は4年に一度です (開催中 間年にアセンブリー会議は開催されます).



 6. ICHMT 理事会メンバーと AIHTC 理事会メンバー は結構重複しています. AIHTC は加盟各国(18 ヵ 国)から二人ずつの Delegate が出ていて、さらに正・ 副・元会長や事務局長等で 40 名を超えます.



7. IUTAM と同格の ICSU 科学ユニオンメンバーになる道を、短期あるいは長期で考えてみました.



8. ICHMT 組織構成の図示化です. 事務局はトルコ にあり, 定常的に事業収入があります.



9. AIHTC 組織構成の図示化です. 事務局は Secretary 個人で,予算もありません (Begell House 社の IHTC Digital Library から若干の入金可能性はあります). 各 IHTC は各開催母体内の予算で運営されます.



10. 両者が統一体になるための遷移過程を考えてみました.



11. 次回のIHTC-16をめどに最終的な形を考えてみました.

4. 今後に向けて

以上述べましたように、伝熱および熱科学に関し て、私たち日本が積極的に発言・行動していかない と現状はなかなか変わらないと思います.このため に、その中心となる日本伝熱学会が一丸となった国 際展開が必須であります.このことを最重要課題の 一つとして常に意識して行動していく必要があり ます.会員諸賢のご協力をお願いする次第です.

なお、6月にポーランドのクラコウで開催される Eurotherm2016 (http://www.eurotherm2016.agh.edu.pl/) で、IUTSE (あるいはWUTSE:冒頭の語がInternational でなくWorld) に向けた議論を進められないかと AIHTC前会長のBar-Cohen氏らと現在検討中である ことを付記します.

参考文献

- [1] 平田賢, 国際伝熱センターについて, 伝熱研究, 10-36(1971)1.
- [2] 森康夫,国際熱·物質伝達センター (International Centre for Heat and Mass Transfer) について, 24-95, (1985) 23.
- [3] 鈴木健二郎, International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT) - その最近の活動報告と会員 各位へのお願い-, 伝熱, **43-182** (2004) 3.
- [4] 笠木伸英,熱物質輸送国際センター (ICHMT) の最近の活動と今後の課題,伝熱,**50-210** (2011) 48.
- [5] 吉田英生,熱物質輸送国際センター(ICHMT) の 2011 年以降の活動,伝熱,**51-217** (2012) 52.

第 24 回 IIR 国際冷凍会議(ICR2015)報告 Report on the 24th IIR International Congress of Refrigeration-2015

> 渡邉 澂雄(中部電力) Choyu WATANABE (Chubu Electric Power Co., Inc.) e-mail: Watanabe.Chouyuu@chuden.co.jp

1. はじめに

国際冷凍学会(IIR; International Institute of Refrigeration)は、「国際冷凍協会をパリに創設することを目的とする国際條約」によって1920年に設立された組織であり、IIRの母体となった IARは1908年に設立された.日本は、この国際条約を1920年に調印、1924年に批准して、IIRに加入した.さらに、日本は、1954年に大幅改定した「国際冷凍協会に関する国際協定」という新条約に、1955年に調印をした.現在の加盟国数は58である.

国際冷凍会議(ICR; International Congresses of Refrigeration)は、IIR にとって、4年に一度行わ れる最大の行事であり、IIRの総会を行うと共に、 全ての冷凍分野における関係者がこの会議に集い、 最新の技術や学術、さらには地球環境政策に関す る情報を交換する.ICRは、1908年に第1回がパ リで開催され、1951年第8回のロンドン開催から は4年に一度となった。日本では1940年に開催 することが決まっていたが、戦争で流れた経緯が ある.ICR2015は、ICRの100年以上の歴史の中 で、今回初めて、日本の横浜で開催されたもので あり、日本の冷凍空調技術者・研究者の90年に亘 る宿願が結実したといっても過言ではない.

ICR2015 を IIR とともに共催した日本冷凍空調 学会は、定款の事業に IIR への連絡を掲げ、IIR の 日本窓口として活動している. なお、IIR の国家 会員としての機関は、公益社団法人としての日本 冷凍空調学会の監督官庁でもある内閣府である.

当日本伝熱学会は, ICR2015 協賛の 12 学会の一 つであった. なお, ICR2015 の後援は農林水産省 を含む 13 機関であった.

スポンサーは, プラチナが 20 機関, ゴールドが 12 機関, シルバーが 18 機関であり, この他に, 法人 1 機関と個人 15 名のご寄付を頂き, ICR2015 の財政を力強く支えていただいた.

2. 会議の概要

ICR2015の概要を以下に示す.

- ・開催期日:2015年8月16日(日)~8月22日(土) (7日間)
- ・開催場所:横浜市 パシフィコ横浜

写真1に8月18日(火)に行われた開会式の模様を示す.中央が林文子横浜市長,向かって右側中央から,和泉洋人内閣総理大臣補佐官,佐藤正水産庁加工流通課長,向かって左側中央から, Hendrik Van Der Ree 前 IIR 総会議長,小山繁日本 冷凍空調学会会長(九大教授)である.

写真2に参加登録の受付会場(2階)を示し,写 真3にフロアマップを示す.開会式とプレナリー 講演は1階で行い,その他は3階と4階を使用した.



写真1 ICR2015 開会式



写真2 参加登録の受付会場



写真3 フロアマップ

・参加者数とその内訳

ICR2015 における参加者総数は 1,185 人で,登録者は 1,121 人,同伴者が 64 人であった.参加者数の上位 10 か国は,日本 (439 人),中国 (193 人),ドイツ (60 人),フランス (59 人),米国 (56 人),韓国 (44 人),台湾 (38 人),英国 (28 人),スペイン (20 人),スウェーデン (19 人)であった.

・招待講演

開会式の前日(8月17日(月))に、渡部康一 慶應義塾大学名誉教授をはじめとする長老格の 日本人講師によって、8件のテクニカルサマリー 講演が行われた.開会式に引き続き、1件のプレ ナリー講演が行われ、さらにその後のテクニカ ルセッションにおいて、13件のキーノート講演 が行われた.招待講演と講演者の一覧を表1に 示す.

・講演論文数とその内訳

表2に講演論文の分野と分野別の件数を示す. IIRには、A1(極低温物理・工学)からE2(ヒートポンプ・エネルギー回収)までの10の委員会があり、ICRのテクニカルセッションも、基本的には、この10分野で並行して行われる. ICR2015では、協賛学会の空気調和・衛生工学会の協力を得て、S(持続可能かつ高性能ビルディング)分野を設定することができた.

ICR2015 における講演論文総数は 643 であり, 分野別では, B1 (熱力学と輸送過程), B2 (冷凍 設備), E2 (ヒートポンプ, エネルギー回収), E1 (空気調和)が上位であった.

講演論文数の上位 10 か国は、中国(145件), 日本(122件)、米国(40件)、フランス(38件)、 ドイツ(26件)、英国(24件)、台湾(23件)、ス ペイン(21件)、イタリア(20件)韓国(19件)、 であった.

・ワークショップ

ワークショップのテーマと講演数を表3に示す. ワークショップは14テーマからなり,講演総数は 83であった.

表1 招待講演と講演者

Plenary	Ken Koyama (Institute of Energy
Lecture	Economics, Japan)
Technical	Kouichi Watanabe (Keio University,
Summary	Japan)
Lectures	Hiroshi Honda (Kyushu University,
	Japan)
	Kenji Tojo (Tojo R&D Design Office,
	Japan)
	Mitsuhiro Udagawa (Kogakuin
	University, Japan)
	Sajio Sumida (Dr. Sajio Sumisda Clinic,
	Japan)
	Yasuyuki Sagara (The University of
	Tokyo)
	Shinsuke Kato (The University of
	Tokyo)
Keynote	Yoichi Ikeya (Sumitomo Heavy
Lectures	Industries, Ltd., Japan)
	Motohiko Nishimura (Kawasaki
	Heavy Industries, Ltd., Japan)
	Mark O. Mclinden (NIST, USA)
	Young Tae Kang (Korea University,
	South Korea)
	Jacques Gilpart (IIR President of Section
	C, France)
	Kuniaki Kawamura (Mayekawa Mfg.
	Co., Ltd., Japan)
	Gerald Cavalier (Cemafroid, France)
	Pega Hrnjak (University of Illinois
	(ACRC) and CTS, USA)
	Cien-Yuh Yang (National Central
	University, Taiwan)
	Per Lundqvist (KTH, Sweden)
	Yi Jiang (Tsinghua University, China)
	Shin-ichi Tanabe (Waseda University,
	Japan)
	Hsien-Te Lin (National Cheng-Kung
	University, Taiwan)

	Topics	Oral	Poster	Total
A1	Cryophysics,	14	9	23
	Cryoengineering			
A2	Liquefaction &	9	1	10
	Separation of Gases			
B1	Thermodynamics &	149	23	172
	Transfer Processes			
B2	Refrigerating	135	8	143
	Equipment			
C1	Cryobiology,	5	6	11
	Cryomedicine			
C2	Food Science &	23	10	33
	Engineering			
D1	Refrigerated	22	8	30
	Storage			
D2	Refrigerated	15	3	18
	Transport			
E1	Air Conditioning	51	18	69
E2	Heat Pumps,	73	22	95
	Energy Recovery			
S	Sustainable and	27	12	39
	High Performance			
	Buildings			
	Total	523	120	643

表 2 ICR2015 の分野と講演論文数

表 3	ワークショップのテーマと講演数	
WS1	Progress of Sorption Systems in Japan	8
WS2	Heating and Power From Low Temperature Heat	6
WS3	Heat Pump Systems R&D by NEDO	5
WS4	Low GWP Refrigerants: Joint International Research Opportunities	8
WS5	IEA HPP Annex 41 - Cold Climate Heat Pumps	12
WS6	Evaluating Low-GWP Refrigerants for Air-Conditioning Industry in High Ambient Temperature Countries	4
WS7	Current Global Status of Transition to Lower GWP Alternatives by Laws and Regulations	2
WS8	Database and Simulation Tools for Refrigeration on Cold Chain: Frisbee Database and Tools	6
WS9	Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants	9
WS10	Sustainable Innovation in Refrigeration Air Conditioning and Heat	8
WS11	IIR Working Party on Life Cycle Climate Performance Evaluation	3
WS12	ELICIT EU Project	5
WS13	Magnetic Refrigeration for Commercial Refrigerated Appliances	4
WS14	Magnetic Refrigeration: Materials & Systems For Commercialization	3
	Total	83

・文化行事

開会式の前日8月17日(月)に、横浜市民フォ ーラム「冷凍食品はここまで美味しくなる!」が 開催され、80人の参加を得て、翌日にNHKの番 組「あさイチ」で放映された.さらに、8月19日 (水)および20日(木)に開催したティーセレモ ニーには、約200人の参加者があり、日本文化を 多くの外国人に紹介できた.

開会式の前日8月17日(月)に歓迎レセプショ ンを開催し、8月20日(木)に学生および若手研 究者のレセプションを開催し、8月21日(金)に は特別晩餐会を開催した.写真4に特別晩餐会に おける鏡割りの様子を示す.10人着席できる円卓 を90も設置した全景は壮観だった.



写真4 特別晩餐会における鏡割り

・展示

展示は IIR と日本冷凍空調学会を含む 27 団体 が行った.写真5に IIR の展示ブースを示す.



写真 5 IIR の展示ブース

・テクニカルツアー

6 箇所で開催されたテクニカルツアーの一覧 を表3に示す.参加者総数は79人であった.

表	4	テク	二力	ルツ	アー	\mathcal{O}	暫
~	•	/ /				~	20

TV-I	MINATOMIRAI 21 District Heating and
	Cooling System
TV-II	Tokyo Sky Tree District Heating and
	Cooling System
TV-III	Home Appliance Recycling Factory
	HYPER CYCLE SYSTEMS
	CORPORATION Head Factory
TV-IV	Refrigeration and Heating System
	Building Facility Tokyo Denki University
	Tokyo Senju Campus
TV-V	KIRIN Beer Yokohama Work (Kirin
	Brewery Co., Ltd Yokohama Brewery)
TV-VI	Nichirei Foods the No.2 Funabashi Plant

3. おわりに

プラハで開催された前回の ICR2011 において, 日本は次回開催地としてチェコから IIR の旗を渡 された.東日本大震災の直後であったが,香川登 組織委員会議長・実行委員長(防衛大教授)は, ICR2015 では復興した日本の姿を見せると力強く 宣言された.それから,4年を経て,日本はICR2015 を盛会裏に開催することができた.

次回の ICR2019 は、カナダのモントリオールで 開催される. 写真 6 は、ICR2015 閉会式で、Didier Coulomb IIR 事務局長が ICR2019 の紹介を行って いる場面である.

なお、小職は、ICR2015 実行委員会で財務・募 金担当を勤め、組織委員会では4人の副議長のう ちの一人に過ぎない. ICR2015 全体の報告を小職 が行うことは僭越と思われるが、ご容赦願いたい.



写真6 次回 ICR2019 の紹介

参考文献

- 関田真澄, IIR の運営について、公益社団法 人日本冷凍空調学会ホームページ、 http://jsrae.or.jp/info/IIR%20unei.pdf, 2008.
- [2] ICR2015 ホームページ, http://www.icr2015.org/

パリの工芸・技術博物館,国立土木学校,エコール・ポリテクニークを訪ねて Visits to Musée des Arts et Métiers, École Nationale des Ponts et Chaussées, and École Polytechnique in Paris

1. はじめに

山本義隆の「熱学思想の史的展開」[1]に引用されている Merz の A history of European thought in the nineteenth century [2]の言葉は印象深い:

"the whole of Europe was illuminated by the light of science which emanated from Paris during the first third of this century."

確かに19世紀初頭は、イギリスやドイツもさるこ とながらフランスの科学が隆盛を極めていた.数 学・物理・化学・工学などの分野で思いつくフラ ンスの巨人の名前は枚挙に暇がない.そこで、こ れらの巨人との出会いを求めて、筆者がヨーロッ パでのフライト乗り継ぎ時間等を有効利用してパ リに立ち寄った記録から、表面的ではあるが写真 を中心に紹介させていただきたいと思う.以下、

 ・2008年8月 / 2015年9月: Musée des Arts et Métiers (工芸・技術博物館),

- 2012年9月:École Nationale des Ponts et Chaussées (国立土木学校),
- ・2010年5月 / 2011年9月: École Polytechnique (エコール・ポリテクニーク)

であるため若干古い情報も混在しているが,大き な変化はないと思うのでお許しいただきたい.

2. Musée des Arts et Métiers

3区(付図1参照)の地下鉄 Arts et Métiers 駅の 出口からすぐのところに, Prieuré Saint-Martin-des-Champs(サン=マルタン=デ=シャン小修道院)を 利用した工芸・技術博物館がある(図1).同館に は日本語のパンフレットも用意されていて「1794 年,"新しい便利な発明品の保管所"としてグレゴ ワール神父によって創立されました.」とある. 2000年に改築された同館には文字通り各時代を代 表する発明品や模型など3000点以上が展示されて いる.とりわけ印象深いものを年代順に紹介する と, Antoine- Laurent de Lavoisier(1743–1794)の実 吉田 英生(京都大学) Hideo YOSHIDA (Kyoto University) e-mail: sakura@hideoyoshida.com



図1 Musée des Arts et Métiers



図2 Lavoisier (1743-1794)の実験室



図3 Cugnot の砲車 (1770)

験室(図2),三輪で蒸気ながら世界最初の自動車

といわれる Joseph Cugnot の砲車 (1770) (図3), Jean-Joseph Étienne Lenoir の2ストローク内燃機関 (1861) (図4), Clément Agnès Ader の Avion III (1897) (図5) などが挙げられる. さらにスーパ ーコンピューターの父 Seymour Roger Cray (1925–1996) の Cray-2 (1985) (図6) もあり, 冷媒 Fluorinert で満たした容器にジャボ漬けする という冷却法は革新的だった.



図4 Lenoir の2ストローク内燃機関(1861)



図5 Ader の Avion III (1897)



図6 Cray-2 (1985)

3. École Nationale des Ponts et Chaussées

フランス特有の高度な専門職養成機関である Grandes Écoles (グランゼコール)の中で一番早く, 1747年に Louis XV により設立されたのが, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) である.

パリ中心部から鉄道 RER A4で東に18km ほど, Noisy-Champs 駅(付図2)で下車,南東に数百メ ートルほどのところに,その270年近い歴史とは対 照的なモダンなビルがある(図7).

ここを目指したのは他でもない Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836) に会いにいくため だ. Navier–Stokes 方程式で有名な Navier は当時の 最先端の橋梁技術者であった [3]. 同校の図書館 で Navier の像などがないかとたずねたら,専門の 方を電話で呼び出していただけた. ほどなくして 現れた美人が図書館アーカイブ部門長の Anne Lacourt さんだった. そして地下倉庫に案内され, 多数の巨人の像とめぐり会った(図8).



図7 École Nationale des Ponts et Chaussées



図8 地下倉庫に保管された巨人たちの像



図9 ENPC 旧館(1845–2008)(courtesy of ENPC)



図10 ENPC 旧館内 Navier 像 (courtesy of ENPC)



図12 Massy Palaiseau 駅からのバスの路線図



図13 École Polytechnique のメインホール

これらの多数の像からも十分実感できたことだ が, Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850), Augustin Jean Fresnel (1788–1827), Augustin Louis Cauchy (1789–1857), Gaspard-Gustave Coriolis (1792–1843), Antoine Henri Becquerel (1852–1908) などは同校の 卒業生あるいは関係者である. なお, Anne さんか らは,帰国後に図9と図10の写真を送っていただい た. 1845年から2008まで,地下鉄 Saint Germain des Prés駅 (6区)の北西 (7区 rue des Saint-Pères) にあ った旧館とその内部に展示された Navier 像である.

4. École Polytechnique

1794年に Gaspard Monge(1746–1818)と Lazare Nicolas Marguerite Carnot(1753–1823)(図11:次 ページ)によって創立された École Polytechnique は ENPC と並ぶ名門である. Lazare Carnot は、数 学者としての業績に加え、フランス革命戦争時の 軍人・政治家としても活躍した. Lazare Carnot の 子孫たちも熱力学第2法則の Sadi Carnot(後出)を はじめとして、20世紀初頭まで諸分野で活躍した.

同校にはパリ中心部から鉄道 RER B4で南南西 に16km ほどの Massy Palaiseau 駅(付図2)で下車, 南東側に出て図12に示す路線図のバスでアクセス できる. 巨大で高天井のメインホール(図13)に は,巨人たちの多くの像が壁に沿って並んでいる.

同校の卒業生・関係者としては以下の名前が筆 者には馴染み深い. Pierre-Simon de Laplace (1749– 1827, École Militaire 陸軍士官学校出身,図14)を 筆頭に, Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830, École Normale Supérieure 高等師範学校出身,図15), André-Marie Ampère (1775–1836), Joseph Louis Gay-Lussac (既出), Siméon Denis Poisson (1781– 1840), Claude Louis Marie Henri Navier (既出), Augustin Jean Fresnel (既出), Augustin Louis Cauchy

(既出), Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832), Benoît Paul Émile Clapeyron (1799–1864), Antoine Henri Becquerel (既出), Jules Henri Poincaré (1854– 1912), Benoît B. Mandelbrot (1924–2010) など. 中でも伝熱屋にとって最も身近な存在である Joseph Fourier は,知事としての政治的な業績もあ り[4], Lazare Carnot 同様に当時の巨人の多面性に は驚嘆する. なお,同校の旧館はパリ市内の地下 鉄 Cardinal Lemoine 駅 (5区) 近くの rue des École にある (図16).

博物館めぐり



付図2 パリ近郊のRER路線図 (http://parisbytrain.com/wp-content/uploads/2008/05/rer.pdf) (追記:本稿を10月に執筆後,11月13日夜同時テロが発生し多数の犠牲者が出たことは誠に遺憾である.)
本会主催行事

開催	H	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2016年						
5月	24(火) ~ 26(木)	第 53 回日本伝熱シンポジウム (開催場所: グランキューブ大阪(大 阪府立国際会議場))	2016.1.15	2016.3.11	実行委員会委員長 吉田篤正 大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学 分野内 Email: symp2016@htsj-conf.org Fax: 072-254-9231	
11 月	2(水) ~ 4(金)	The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT2016) (開催場所: Sendai International Center)	2016.4.29	2016.7.29	Organizing Committee Chair Taku Ohara URL:http://ifht2016.org/index.html	

本会共催,	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	
2015 年							
11 月	1 (日)	The 10th International Symposium on			日本実験力学会事務局 小林		
	\sim	Advance Science and lechnology in Experimental Mechanics (10th			Tel: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309		
	4 (水)	ISEM'15-MATSUE)			E-mail. onice-jsem@eig.migata-u.ac.jp		
		(開催場所:Kunibiki Messe(島根県))					
11月	11(水)	第 20 回可視化フロンティア PIV 講習 合 2015(土际)	2015.10.19		実行委員長 細川茂雄 (神戸大学)		
		云 2015(八阪)」 (開催場所:新大阪丸ビル新館)			E-man. nosokawa@meen.kobe-u.ae.jp		
11 月	12(木)	日本機械学会関西支部 第 340 回講習	2015.11.6		日本機械学会関西支部事務局		
	~	숲			Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049		
	13(金)	新エネルギーシステムのフロンティア			E-mail: info@kansai.jsme.or.jp		
		技術を子ふ (開催提訴・大阪科学技術センター8)					
		(所能物が)・八阪村子役州ビジノ 8 階中ホール)					
11月	13(金)	日本表面科学会関東支部 第2回関東			日本表面科学会関東支部・幹事 山本貴博(東		
		支部セミナー			京理科大学工学部)		
		ナノ表面界面を介したエネルキー・物 産齢送の計測トシミュレーション研究			E-mail: takaniro@rs.tus.ac.jp		
		Q 輸送の計測とシミュレ ション 切光 の最前線					
		(開催場所:東京理科大学森戸記念館)					
11 月	15(日)	International Gas Turbine Congress 2015			公益社団法人日本ガスタービン学会事務局		
	~ 20(余)	10kyo (101C2013 10kyo) 2015 年国際ガスタービン会議東京大			Tel: 03-3365-0095 E-mail: jøtc2015@øtsi org		
	20(亚)	<u> 숙</u>			2		
		(開催場所:虎ノ門ヒルズ)					
11 月	16(月)	第53回燃焼シンボジウム (開爆損託・ヘイバワ欧へ満担)	2015.7.10	2015.9.4	第53回燃焼シンボジウム事務局 西岡研究室		
	\sim 18(7k)	(開催場所:つくは国际会議場)			四(現波入字) Tel: 029-853-5121 Fax: 029-853-5207		
	10()1()				E-mail: sympo53@combustionsociety.jp		
11 日	10(-10)	ロナ機械学会眼帯士が、フティープマー	2015 11 11		URL: http://www/combustionsociety.jp/sympo53/		
пл	10(/)()	プ・セミナー2015 オープン・イノベ	2013.11.11		Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049		
		ーションが切り拓く新たな事業創造			E-mail: info@kansai.jsme.or.jp		
		(開催場所:大阪科学技術センター8					
11日	19(木)	階中ホール) 第 49 同化学工学の進歩講習合「理控・			ル受工受会重施支部		
11 73	~	ネッショルナエナシ連少語自云 塚見一 ネルギー 最新技術の基礎と応用			Tel: 052-231-3070 Fax: 052-204-1469		
	20(金)	(開催場所:名城大学名駅サテライト					
		キャンパス)	2015 0 21	2015.0.20			
11 月	20(金)	第 39 回人間-生活環境系シンポジウ	2015.8.21	2015.9.29	大会長 都築和代 (産業技術総合研究所) Tel: 029-861-6619		
	$21(\pm)$	∽ (開催場所:産業技術総合研究所・臨			Email: t-info-ml@aist.go.jp		
	()	海副都心センター別館)					
11月	26(木)	第5回潜熱工学シンポジウム	2015.9.18	2015.10.12	金沢大学理工研究域機械工学系 寺岡喜和		
	~ 27(A)	(開催場所:金沢大学サテライト・プ			Tel: 076-234-4750 E-mail: Latent heat@ml kanazawa-u ac in		
11 月	27(金) 29	World Engineering Conference and	2015.3.10	2015.6.1	E man. Latent_neatesm.Katazawa-u.ac.jp WFCC2015 運営事務局(株式会社コングレ内)		
11.73	(日)	Congress 2015 (WECC 2015)			Tel: 03-5216-5303		
	~	第5回世界工学会議			E-mail: wecc2015-reg@congre.co.jp		
	12月	(開惟場所: 京都国際会館)					
11月	2(水) 30(月)	The 12th International Conference on	2014.11.30	2015.3.31	ICOPE-15 実行委員会委員長 刑部直弘 (東京		
	~	Power Engineering 2015 (ICOPE2015)			海洋大学)		
	12 月	第12回動力エネルギー国際会議			E-mail: icope15@jsme.or.jp		
	4(金)	(開催場所:バシフィコ横浜)					

行事カレンダー

				-		
12 月	5(土)	No.15-47 第 18 回スターリングサイ	2015.7.3	2015.10.23	実行委員長 上田祐樹(東京農工大学)	
		クルシンポジウム			Tel: 042-388-7853 Fax: 042-388-7853	
		(開催場所・東京農工大学小金井キャ			E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp	
		いパマ DASE 木館)			, , , ,,	
12日	15(1k)	第 20 回粉信法体力学 3/2 ポジウム	2015 0 25	2015 10 22	CED20 宝行禾昌合東淼巳 (土州土学内田力学	
12 万	15(50)	829回数恒加座月子シンホンリム	2013.9.23	2015.10.25	CFD25 关门安良云事伤向(几川八于心用刀于	
	\sim	(開催場所:儿州大学筑祭キャンハス)			研究所新エネルキー力字部門内)	
	17(木)				Tel: 092-583-7776 Fax: 092-583-7779	
					E-mail: tananori@riam.kyushu-u.ac.jp	
12 月	16(水)	第 21 回可視化フロンティア PSP/TSP	2015.12.1		産業技術総合研究所 染矢聡	
		講習会 2015~蛍光燐光による定量可			E-mail: s.someya@aist.go.jp	
		視化」				
		(開催場所:LMJ 東京研究センター)				
12 月	17(木)	第24回微粒化シンポジウム	2015.8.31	2015.10.23	日本液体微粒化学会事務局	
	~	(開催場所・袖戸大学深江キャンパス			Tel: 06-6466-1588 Fax: 06-6463-2522	
	18(全)	《·// 展示// · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · // 》 · //			E-mail: info@ilass-iapan.gr.jp	
12日	10(亚)	NGTTNIK マコレビマ利益に開ナス国	2015 6 20	2015 8 15	ICETCUI5 200 出版 b 事政已	
12 月	27(金)	ISEISIS エコトヒノ科子に関うる国	2013.0.30	2013.8.15	ISEISIS シンホンリム事務向 TL 052 501 2241 F 052 501 5505	
	\sim	除シンボシワム 2015			Tel: 052-581-3241 Fax: 052-581-5585	
	29(日)	(開催場所:名古屋大学)			E-mail: isets15@intergroup.co.jp	
2016 年						
1 日	$21(\pm)$	第44回ガフタービンセミナー			ムガ社団注 日本ガフタービン学会	
1月	21(/下)					
	\sim	(開催場所:市泉入子板橋キャンパス)			E-mail: gisj-office@gisj.org	
	22(金)					
8月	7(日)	第 20 回国際乾燥シンポジウム	2015.11.30	2016.3.10	実行委員長 板谷義紀	
	\sim	(IDS2016)			Tel: 058-293-2532	
	10(水)	(開催場所:岐阜市長良川国際会議場)			E-mail: yitaya@gifu-u.ac.jp	
10 月	29(土)	The 5th International Conference on			ICHES2016 Nagoya 事務局	
	~	Human-Environment System(ICHES2016			E-mail:	
	11日	Nagoya)			iches2016office@davinci.nuac.nagoya-u.ac.ip	
	2(-k)	(開催場所:名古屋大学)				
11 🗆		The 11th Internetional Commencium on				
日月	1(火)	The Thin International Symposium on			日本実験刀字会事務局 小杯	
	\sim	Advance Science and Technology			1el: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309	
	4(金)	In Experimental Mechanics(11th			E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
		(BE/H) HER (A CONTRACT OF A C				
		(開催場所: Saigon Vissai Hotel)				

第53回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 吉田篤正

幹事 木下進一

- 開催日: 平成 28 年 5 月 24 日 (火) ~5 月 26 日 (木)
- 会 場: グランキューブ大阪(大阪府立国際会議場, http://www.gco.co.jp)
 - 所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島 5 丁目 3 番 51 号 電話 06-4803-5555
 - アクセス 京阪電鉄中之島線・中之島(大阪国際会議場)駅すぐ JR 大阪環状線・福島駅より徒歩約 15 分, JR 東西線・新福島駅より徒歩約 10 分 阪神電鉄本線・福島駅より徒歩 15 分
 - 大阪市中央公会堂(http://osaka-chuokokaido.jp)(重要文化財)
 - 所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島1丁目1番27号 電話 06-6208-2002

アクセス 地下鉄御堂筋線/京阪電鉄・淀屋橋駅より徒歩約5分 京阪電鉄中之島線・なにわ橋駅より徒歩約1分

講演申込締切:	平成28年1月15日(金)
講演論文原稿提出締切:	平成 28 年 3 月 11 日 (金)
事前参加申込締切:	平成28年4月8日(金)

ホームページ URL: http://htsj-conf.org/symp2016/

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - a) 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.
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分(発表 10 分、個別討論 5 分)で、各セッションの最後に総合討論の時間(5 分×セッション内の講演件数)を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞 (第 53 回日本伝熱シンポジウム)について」をご参照ください.

【参加費等】

● シンポジウム参加費

会員一般事前申込:12,000 円,会場申込:15,000 円非会員一般事前申込:15,000 円,会場申込:18,000 円会員学生事前申込:5,000 円,会場申込:7,000 円非会員学生事前申込:7,000 円,会場申込:8,000 円※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.

● 講演論文集 CD-ROM

日本伝熱学会会員:無料(講演論文はウェブ上で事前に公開します.参加者には当日,講演論文集 CD-ROMを配布します.参加されない会員のうち希望者には講演論文集 CD-ROM を事後にお送りし ます.)

非会員:9,600円(会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は無料となります.)

【懇親会】

- 開催日: 平成 28 年 5 月 25 日 (水)
- 会 場:大阪市中央公会堂
- 参加費:

一般 事前申込:8,000円,会場申込:10,000円,同伴配偶者無料
 学生 事前申込:4,000円,会場申込:5,000円

講演申込方法, 講演論文集, 執筆要綱

【研究発表申込方法】

- 原則としてウェブによる申込に限らせていただきます.本シンポジウムで準備するウェブサイトから 必要なデータを入力してください.ウェブによる申込ができない場合には、実行委員会事務局にお問い 合わせください.
- 申込の際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションの いずれで発表するかを選択してください.優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、 本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞セッション(第53回日本伝熱シンポジウム)につい て」をご参照ください.
- 発表申込時に,論文要旨(日本語で200~250字)を入力してください.講演論文集の抄録として科学 技術振興機構(JST)のデータベースに登録します.
- 講演発表申込は, 講演者1名につき1題目とさせていただきます.
- 講演の採否およびセッションへの振り分けは、実行委員会にご一任ください.

【講演論文集 CD-ROM】

講演論文集として電子版(CD-ROM版)のみを発行し,印刷版は発行しません. 講演論文はウェブ上で一定期間公開します.今回から講演論文のページ数が4 ~6ページに,本文の作成様式が1段組に変更されています.

- 講演論文集 CD-ROM を参加者に当日配布します. なお, 講演論文集 CD-ROM は参加できなかった会員にも希望があれば配布しますので,シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込みください.
- 講演論文の長さは1題目当たり A4 サイズで 4~6 ページです. 講演論文の作成様式は,1段組み×50 字×46 行です. カラーの使用が可能で,ファイル容量は最大で 2MB までとし,動画は含まないものとします.
- 講演論文原稿は, PDF ファイルで本シンポジウムのホームページから提出してください.
- 講演論文締切日までに提出されなかった講演論文は, 講演論文集 CD-ROM およびウェブに掲載されま せん. 十分にご注意ください.

【執筆要綱】

講演論文原稿の書き方

● 講演論文は以下に従って作成してください.また,書式の詳細ならびにテンプレート用の電子ファイルは、シンポジウムのホームページをご参照ください.

表題部分の書式: 原稿は,以下の四角囲い部に示すように,和文表題,和文副題,英文表題,英文副題, 和文著者名(会員資格,著者名,所属の略記),英文著者名,英文所属機関・所在地,英文アブストラクト, 英文キーワードの順に,幅 150mm に収まるようにレイアウトしてください.連名者がある場合には,講演 者の前に*印をつけ,英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください.

論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください. 講演申込時のデ ータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります.

本文の書式: 本文は表題部分に続けて、10 ポイント明朝体の1 段組み(1 行 50 字程度)、1 ページ当たり 46 行を目安として作成してください.

図表: 図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください.カラー表示が可能です.

参考文献: 参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のように まとめて列記してください.

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例:(1) 伝熱・他2名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

PDF ファイルへの変換: PDF ファイル作成のためのファイル変換時には,「フォントの埋め込みを行う」よう設定してください.提出前に必ず,変換後の PDF 原稿を印刷して確認してください.

お知	6	せ
40.24	5	Ľ

150mm 第53回日本伝熱シンポジウム原稿の書き方(和文表題: Gothic 14pt) MS-Wordの場合(和文副題:Gothic 12pt) Guide for the manuscripts (英文表題: Times New Roman 12pt) The case of MS-Word (英文副題: Times New Roman 12pt) (1行あける) 伝正 * 伝熱 太郎 (伝熱大) (会員資格 著者名[講演者には*印] (所属略称):明朝体 12pt) (1行あける) Taro DENNETSU (英文著者名: Times New Roman 10pt) Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 1-1, Nakaku, Sakai, 599-8531 (1行あける) (文頭に半角スペース5つを挿入する) English abstract (英文アブストラクト: Times New Roman 10pt, 100語程度) (1行あける) Key Words: Heat Transfer (英文キーワード: Times New Roman 10pt, 3~5個程度) (1行あける) 1. 大見出し 1.1 中見出し 講演論文原稿は電子版原稿 (CD-ROM)のみです.講演論文の長さは1題目あたりA4サイズで原 則4~6ページです. 原稿の作成には, 本ファイルをテンプレートとしてお使い下さい. 講演論文の作成様式は、1段組×50字×46行とし、カラーの使用が可能です.ファイル容量は最大で2MBまでとし アニメーションは含まないものとします.

冒頭部分(表題部分および本文書き出し部分)の書式

【講演論文の公開日】

- 講演論文は会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公開 します.従って、特許に関わる公知日は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.
- 会員が当該講演論文を後日原著論文として学術論文誌等に投稿される場合に配慮し、本講演論文集が 限られた範囲に配布されたものであることを明確にすべく、シンポジウム終了後、一定期間を経て講演 論文の公開を終了します.

【参加費等の支払い方法】

- シンポジウムのホームページから事前参加登録を行った後に、本紙に挟み込まれた「払込取扱票」を 用い、以下の記入例を参考にしてお支払いください.
- 参加費等の払込をもって「事前申込完了」とします.ホームページからの登録だけでは「完了」では ありません.払込が平成28年4月8日より後となった場合は会場当日申込扱いとし、会場受付にて差 額をお支払いいただきます.
- 銀行より振込まれる場合は、下記のゆうちょ銀行口座にお振込みください. その際、必ず1件ずつとし、氏名の前に参加登録 ID 番号を付けてください.

店名(店番):四○八(ヨンゼロハチ)店(408) 預金種目:普通 口座番号:4818989 口座名称(漢字):第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会 口座名称(カナ):ダイゴジュウサンカイニホンデンネツシンポジウムジッコウイインカイ

【ご注意】

- 講演申込の取消および講演論文原稿の差し替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますの でご遠慮ください.
- 論文題目と著者名が,講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください.
- ロ頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます.パーソナルコンピュータは各自ご持参ください.
- 参加費,懇親会費等は参加取消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、随時更新するホームページでご確認ください.

● その他,ご不明の点がありましたら,実行委員会事務局まで e-mail または FAX でお問い合わせください.

【お問い合わせ先】

第 53 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学分野内Email: symp2016@htsj-conf.org FAX: 072-254-9231

優秀プレゼンテーション賞(第53回日本伝熱シンポジウム)について

日本伝熱学会 学生会委員会 委員長 桃木 悟

第53回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます.日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい.

- 開催日: 平成28年5月24日(火) シンポジウム第1日
- 発 表 形 式:発表者1名あたり,発表内容をまとめた1枚のアピールスライド提出とポスタープレゼン テーションを行う形式をとる予定です.今回より口頭による3分間のショートプレゼンテ ーションは行わない予定です.詳細については,決定し次第,シンポジウムのホームペー ジに掲載いたします.
- 対 象: 企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で, 平成 28 年 3 月 31 日現在で 28 歳以下の者, または、申込当日に学生である者(ただし、社会人大学院生を除く).
- 応募資格:発表時(審査時)に、日本伝熱学会の会員(正員・学生員)であること、または入会申込 中であること.<u>なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要がありま</u> す.また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません.
- 応募件数:指導教員または研究グループ長等あたり、1名(1件)とします.
- 応募 方 法:第53回日本伝熱シンポジウム発表申込時に,本号掲載の研究発表申込方法に従って、"優 秀プレゼンテーション賞"の項目を選択し、"指導者氏名"および"研究分野の分類番号" を入力してください.なお,講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のもの とします.
- 審査・選考方法: 複数名の審査員による評価に基づいて選考し,受賞者を決定します.
- 表 彰: 受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます.

日本伝熱学会主催 第4回 国際伝熱フォーラム International Forum on Heat Transfer (IFHT2016)

趣 旨

日本伝熱学会は、世界最大かつ最もアクティブな伝熱の研究者・技術者集団として、世界中の研究者が集 い、新しい伝熱研究のトレンドを生み出す国際伝熱フォーラムを開催します.2004 年に京都でフォーラムが スタートし、2008 年には東京、前回、2012 年には長崎で第3回のフォーラムが開催され、毎回150 件を超 える発表で盛り上がりを見せています.第4回は、2016 年に仙台でフォーラムを開催します. 伝熱分野の 最先端を走る研究者によるキーノート講演も企画しています. 一般セッションでは伝熱の広い分野から発表 を募集します.多くの方々のご発表及びご参加をお願い致します.

開催日時 2016 年 11 月 2 日 (水) ~ 4 日 (金)

会場
 仙台国際センター
 〒980-0856 仙台市青葉区青葉山無番地(http://www.aobayama.jp/)

キーノート講演

Yoshinori Itaya	Gifu University, Japan
Arun Majumdar	Stanford University, USA
Young-Hoon Song	Korea Institute of Machinery & Materials, Korea
W. Q. Tao	Xian Jiao Tong University, China
Shohji Tsushima	Osaka University, Japan
Evelyn N. Wang	MIT, USA

フォーラム構成

- ・ キーノート講演
- ・ ポスターセッション(150件を予定:ショットガン形式の口頭発表+ポスター)
- The Nukiyama Memorial Award 受賞者による記念講演

スケジュール

2016 年 4 月 29 日 Short abstract (発表申し込み) 提出締切

5月31日 発表申し込みの受理通知

- 7月29日 Full manuscript (Copyright は著者が保持)提出締切 (A4, 2~6 ページ)
- 8月25日 Full manuscript 受理通知
- 9月15日 Final manuscript 提出締切
- 9月30日 事前参加申込締切
- Web ページ 最新情報は, http://ifht2016.org でご確認ください.

問い合わせ先 組織委員会委員長 小原 拓 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 流体科学研究所 Tel&FAX: 022-217-5277 E-mail: ifht2016@microheat.ifs.tohoku.ac.jp

> 実行委員会委員長 麓 耕二 〒036-8561 弘前市文京町 3 弘前大学 大学院理工学研究科 知能機械工学専攻 Tel&FAX: 0172-39-3676 E-mail: kfumoto@hirosaki-u.ac.jp



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 す る や 本 す る 、 、 、 、 、 、 、 、 、 関 係 、 、 、 、 、 、 、 、 、	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 してリンク形成(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/banner.pdf をご参照下さい.

【連絡先】

- ・総務部会長:小野直樹(芝浦工業大学):naokiono@sic.shibaura-it.ac.jp
- ・編集出版部会長:廣田真史(三重大学):hirota@mach.mie-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長:田口良広 (慶應義塾大学): tag@sd.keio.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員:笹部 崇(東京工業大学):sasabe.t.ab@m.titech.ac.jp
- ・事務局:大澤毅士・村松佳子: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.

事務局からの連絡

54 期入会(2015.9.16~2015.11.11)正3名

資	氏 名	所属	資	氏 名	所属
正	篠原 竜太郎	スズキ株式会社	正	佐々木 斉人	株式会社日阪製作所
正	山田 格	名古屋工業大学 大学院 工学研究科			

正誤表

「伝熱」2015年10月号 (Vol. 54, No. 229),追悼 (p. 1, 左コラム,下から 8,9 行目) (誤) 「1984年の・・・,1987年に」→(正):「1981年の・・・,1984年に」 熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度(W/cm²)に比例した直流電圧を出力します。 弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。 特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、 熱流束マイクロセンサー(HFM)では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。 熱流束

奈束セ



マイクロセンサ・

A REAL PROPERTY AND IN THE OWNER OF THE OWNER OWNER

特徴 最高速の応答(約 6µ秒)

- 850℃まで外部冷却不要 ● 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

● エンジン内壁の熱伝達状態観察 ● ロケットエンジンのトラバース実験 ● タービンブレード熱風洞試験 ● 自動車用エアーバッグ安全性試験 ● ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ



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

使用例

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





「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の 表面を通過する熱流束を29対の超高感度な 熱電対を用いて測定します。センサーは、 72m²の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0 パッケージングの最適化ポリマーと1-レベルパ ッケージングの金属の構造になっています。

使用例

電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定

- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

熱流束センサ-校正サービ

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

センサテクノス株式会社

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

URL www.senstech.jp

E-mail info@senstech.jp





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

29/4

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。



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

応答速度: 50ms 以下* 再現性: ±0.5% 較正精度: ±2% オプション: 輻射窓・視野角指定等 *応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

熱流計/輻射計

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



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

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板

当社取扱製品の適用分野

■温熱環境

■火災



■伝熱一般

■航空宇宙

■各種エンジン

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

■炉 ボイラー

■燃焼

水冷式 火炎強度熱流計



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

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

本学会元会長の長野靖尚先生ご逝去の悲しみが癒えないうちに, 笠木伸英先生の追悼文を本号に 掲載することになるとは, 未だに信じられない思いがします. 両先生のご冥福を心からお祈り申し 上げます.

今月号の特集は、鈴木雄二教授の企画による「新しいエネルギー変換」です.序文にもあります ように、東日本大震災以降、エネルギーの安全保障は国民の最大関心事の一つであり、本学会に所 属する多くの方もエネルギーに係わる様々な研究開発に取り組まれているものと思います.本号の 編集中にも、川内原発2号機の再稼働の一方で「もんじゅ」に対する原子力規制委員会の勧告など、 今後の日本のエネルギー供給に大きな影響を及ぼしそうなニュースが頻繁に飛び込んで参りまし た.そのような中、10月号では低品位の排熱を有効に利用する手法として、化学反応や物質移動を 伴う熱利用機器に関する特集を組みました.本号においては、「高付加価値のエネルギー」を創り 出す最先端の手法、原理について、ミクロな視点から5名の先生方にそれぞれ判りやすく、また極 めて興味深い解説をして頂きました.

また、これらの特集記事に加えて、隔年で開催される関西伝熱セミナーおよび初の日本開催となった国際冷凍会議の報告、熱物質輸送国際センターの現状と課題に関する報告、恒例となりつつなる「博物館めぐり」など、こちらもそれぞれ大変興味深い記事をご寄稿頂きました.最後に、お忙しいところ本号に快くご寄稿いただきました著者の皆様にこの場を借りて厚くお礼申し上げます.

廣田 真史 (三重大学) Hirota, Masafumi (Mie University)

副会長 功刀 資彰(編集出版担当,京都大学)

部会長 廣田 真史(三重大学)

委員

- (理事) 桑原 不二朗(静岡大学),野村 信福(愛媛大学),山田 雅彦(北海道大学)
- (協議員) 須賀 一彦 (大阪府立大学),鈴木 雄二 (東京大学),多田 幸生 (金沢大学),
 土屋 敏章 (富士電機(株)),中村 元 (防衛大学校),中山 浩 (中部電力(株)),
 西村 顕 (三重大学),服部 博文 (名古屋工業大学)
- TSE チーフエディター 花村克悟(東京工業大学)
- 編集幹事 伏信一慶(東京工業大学)

編集出版部会 連絡先: 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

廣田 真史

Phone & Fax: 059-231-9385 / E-mail: hirota@mach.mie-u.ac.jp