

日本伝熱学会  
創立50周年記念特別号

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 51, No. 215  
2012. 4

*JHSJ*

◆特集：創立50周年を迎えて



日本伝熱シンポジウム講演論文集全巻 (第1回~第48回)

日本伝熱シンポジウムアーカイブ

The Archives of National Heat Transfer Symposium of Japan

目次
(1) 対流伝熱
1.1 異質流体吹き出し層流境界層の熱伝達
1.2 湖底界圧流体の自由対流熱伝達の解析
1.3 湖底界圧水の管内乱流熱伝達に関する一考察
1.4 ゆるく曲がついた円管内の発達した層流熱伝達
1.5 曲管内強制対流熱伝達に関する研究(第2報:乱流域)
1.6 軸方向に気流の流れのある同心円管中の回転体表面熱伝達率
(2) 非ニュートン流体への伝熱
2.1 円管内の非ニュートン流動熱伝達
2.2 発熱するスクリューの熱伝達の研究(第5報:円管内乱流)
2.3 スクリュー-蒸気混合物の垂直上昇流について
(3) 誘導伝熱
3.1 ビーカ内の誘導
3.2 自由対流表面誘導の研究
(4) ツール誘導の熱伝達率について
(5) 商業内誘導熱伝達に関する研究(第2報)
(6) 二相流中の細孔のパーシアウト現象
(7) 不均質、水原子炉における油膜の熱伝達
(8) 熱伝導度および温度測定
4.1 多孔質材料の高温熱伝導率測定
4.2 非定常熱伝導率測定法における温度効果
4.3 音波および超音波による気体温度測定法(第一報)
(9) 熱伝導および放射伝熱
5.1 輝度分布に関する研究
5.2 赤外線スペクトルによる燃焼の基礎的研究(第1報)
5.3 高温気体中における燃料蒸気の燃焼
5.4 熱伝による気柱の振動の研究
(10) 熱と物質の同時移動
6.1 旗車乾燥過程における熱と物質の同時移動

6.2 水蒸気ともなう熱移動について
6.3 乱流層内に置かれた半球の熱伝導および物質移動
6.4 旗車時の自己蒸発時間差に関する実験研究
(7) 複合伝熱機構
7.1 光葉層と管壁間の伝熱
7.2 あつみのあるフィン付伝熱面の温度分布と効率
7.3 スチームジャケット-膜蒸留熱交換器の熱伝導係数

第1回日本伝熱シンポジウム講演論文集

【左・上】目次

【左下】論文の抜粋

1-3 湖底界圧水の管内乱流熱伝達に関する一考察

九州大学 山崎 清

1-1 異質流体吹き出し層流境界層-熱伝達

論文抜粋内容: 異質流体吹き出し層流境界層-熱伝達に関する研究の要旨と数式。図1: 層流境界層の発達を示すグラフ。図2: 熱伝達率の分布を示すグラフ。

本研究は対流伝達の問題を、詳細的に検討することが目的である。物理的現象の理解を深めることには、数値的・実験的アプローチが有効である。本研究では、実験的データを基に、理論的モデルを構築し、その適用性を検証する。図1は、層流境界層の発達を示すグラフであり、図2は、熱伝達率の分布を示すグラフである。

第1回日本伝熱シンポジウム(昭和39年)では7分野(対流伝熱、非ニュートン流体への伝熱、沸騰伝熱、熱伝導度および温度測定、燃焼および放射伝熱、熱と物質の同時移動、複合伝熱機構)計29件の発表が行われた。当時は当然ながら論文集のテキスト、式、図表のすべてが手書きであった。ワープロの導入はその15年以上後であり、第22回(昭和60年)でほぼ半数、そして第30回(平成5年)を最後にすべてがワープロ原稿となった。第25回(昭和63年)より分冊となり、第32回(平成7年)よりA4版の講演論文集が出版されている。なお、左図の赤鉛筆による下線は、若かりし頃の某名誉教授の手によるものである。

高松 洋(九州大学)

Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University)

# 伝 熱

## 目 次

### 〈日本伝熱学会創立 50 周年記念〉

日本伝熱学会 50 周年記念式典

……………勝田 正文（早稲田大学），横堀 誠一（東京都市大学）…………… 1

### 〈特集：創立 50 周年を迎えて〉

学会のライフサイクルとサステナビリティー日本伝熱学会の半世紀

……………長島 昭（慶應義塾大学名誉教授）…………… 6

熱物性研究 50 年のトレンド

……………荒木 信幸（静岡理工科大学），長坂 雄次（慶應義塾大学）…………… 20

ふく射研究と伝熱ー日本伝熱シンポジウム 50 年ー

……………越後 亮三（東京工業大学名誉教授）…………… 26

我が国における微小重力伝熱研究の 50 年……………河村 洋（諏訪東京理科大学）…………… 31

バイオ伝熱研究の 50 年……………谷下 一夫（慶應義塾大学）…………… 45

### 〈国際活動・会議報告〉

第 3 回 熱と流れのシミュレーション・アジア国際シンポジウム

……………川口 靖夫（東京理科大学）…………… 57

日本伝熱学会創立 50 周年記念 九州伝熱セミナー in 由布院 報告

……………有馬 博史（佐賀大学）…………… 60

### 〈巻頭グラビア〉

日本伝熱シンポジウムアーカイブ……………高松 洋（九州大学）……………表紙裏

### 〈行事カレンダー〉…………… 61

### 〈お知らせ〉

第 49 回日本伝熱シンポジウムのご案内…………… 62

日本伝熱学会創立 50 周年記念 第 49 回日本伝熱シンポジウムプログラム（暫定版）…………… 67

優秀プレゼンテーション賞（第 49 回日本伝熱シンポジウム）について…………… 82

編集出版部会からのお知らせ…………… 83

編集出版部会ノート…………… 87

# Vol. 51, No. 215, April 2012

## CONTENTS

### <The 50th Anniversary>

50th Anniversary of Heat Transfer Society of Japan

Masafumi KATSUTA (Waseda University)

Seiichi YOKOBORI (Tokyo City University) ..... 1

### <Special Issue>

On Lifecycle and Sustainability of an Academic Society

– Fifty Years of The Heat Transfer Society of Japan

Akira NAGASHIMA (Professor Emeritus Keio University) ..... 6

A General Tendency of Japanese Research on Thermophysical Properties

Nobuyuki ARAKI (Shizuoka Institute of Science and Technology)

Yuji NAGASAKA (Keio University) ..... 20

Heat Transfer in Radiation Studies

– National Heat Transfer Symposium of Japan in the Past Fifty Years –

Ryozo ECHIGO (Professor Emeritus Tokyo Institute of Technology) ..... 26

Research on Heat Transfer under a Microgravity in These Fifty Years

Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science, Suwa) ..... 31

Fifty Years Progress in Bio-Heat Transfer

Kazuo TANISHITA (Keio University) ..... 45

### <Report on International Conference>

Report on the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2011

Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science) ..... 57

Report on 50th Anniversary of HTSJ, Kyushu Heat Transfer Seminar in Yufuin

Hirofumi ARIMA (Saga University) ..... 60

### <Opening-page Gravure:heat-page>

The Archives of National Heat Transfer Symposium of Japan

Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University) ..... Opening Page

<Calendar> ..... 61

<Announcements> ..... 62

<Note from the Editorial Board> ..... 87

## 日本伝熱学会 50 周年記念式典

50<sup>th</sup> Anniversary of Heat Transfer Society of Japan

勝田 正文 (早稲田大学), 横堀 誠一 (東京都市大学)

Masafumi KATSUTA (Waseda University) and Seiichi YOKOBORI (Tokyo City University)

e-mail:katsuta@waseda.jp, s-yokobo@tcu.ac.jp

### 1. はじめに

日本伝熱学会は前身の日本伝熱研究会の創立 (1961 年 11 月 22 日) から数えて満 50 周年を迎えたので、これを記念して創立 50 周年記念式典が 2011 年 11 月 26 日 (土曜日) に東京の経団連会館で盛大に開催された。学会の 50 周年記念行事は、昨年 5 月の岡山における第 48 回日本伝熱シンポジウムを皮切りに本年 5 月の富山でのシンポジウムまで、足かけ 2 年にわたって多様な記念行事が計画されているが、この式典は記念行事の中核に位置するものである。当日はやや寒いのが快晴に恵まれ、全国から 150 名の会員に参加を頂き、無事終了した。記念事業実行委員会の下に置かれた式典小委員会の立場から、その概要を報告する。後に添付した写真によって当日の雰囲気は十分感じて頂けるので、文章は簡潔な記載に止めた。

### 2. 式典の概要

50 周年記念式典は大きく 3 部構成とした。第 1 部から 2 部までは休憩を挟んで国際会議場で宇高義郎横浜国立大学教授の司会で進められた。開会直後の第 1 部では笠木伸英準備委員長の挨拶のあと、記念講演として長島昭元会長に「学会のライフサイクルとサステナビリティ」と題して 1 時間の興味深い講演を頂いた。内容は本号で詳しく再録される。



第 1 部の講演会

休憩後の第 2 部で式典に移り、勝田正文準備委員長と笠木伸英会長の挨拶に続いて、本会と関係の深い官学から下記 5 氏による来賓の祝辞を頂いた (登壇順)。

文部科学省審議官	加藤 善一氏
経済産業省審議官	中西 宏典氏
日本学術会議会長	大西 隆氏
日本機械学会会長	佐藤 順一氏
日本冷凍空調学会会長	片倉 百樹氏

各氏とも、学会のこれまでの活動と重要性など、事前に十分検討された内容で本会に対する期待が込められたご挨拶であった。忙しい中、臨席頂いたことに対して厚く御礼申し上げたい。

続いて 50 周年を記念して選定した功労者表彰に移り、代表者として岐美格元会長に笠木会長から表彰状が手渡され、岐美先生から答礼のご挨拶を頂いた。第 2 部は横堀誠一準備副委員長が参加の御礼を兼ねた閉式の辞によって 1 時間で終了した。第 3 部のパーティに移る前に、参加者全員が壇上に集まり、一堂に会した記念写真を撮った。ここまでの次第は、WEB を通じてオンライン通信され、参加できない遠方の会員に便宜を図った。

### 3. 祝賀パーティ

第 3 部の祝賀パーティ会場は、ロビーを挟んだ国際会議場の向いのホールで伏信一慶東京工業大学准教授の司会で進められた。パーティではあまりお話をお願いせず、林勇二郎前会長の挨拶と大先輩の谷口博北海道大学名誉教授による乾杯にとどめた。およそ 1 時間のパーティであったが、全国から来て頂いた会員は久しぶりの出会いも多かったようで、各所で楽しそうな話合いの場が生まれた。矢部彰先生の手締めで、盛会のうちに 6 時に閉会した。以下に記録と今後の参考に簡単なメモをまとめておく。

## 4. 開催まで

### 4.1 会場と日程の決定

2年前の札幌における第47回日本伝熱シンポジウムの最中の第1回準備委員会から準備が開始され、ここで日時が決った。会場の選定は手間取り、発会に縁ある学士会館の予約が叶わず、晩秋の都内の土曜日は結婚式の予約がすべてに優先されることを学んだが、経団連会館の予約までに半年を要した。さらに3月の東関東大震災も考えて日程先送り案も出されたが、震災経験ある関西と東北の委員から、むしろ元気を出す意味でも予定どおり行うべきとのご意見で予定どおりの開催となった。

### 4.2 記念式典小委員会

今後の学会を背負っていただく中堅の先生を中心にチームを組み、作業を分担して頂いた。滞りなく準備が進んだのは、まさにこのメンバーの献身的な協力の賜物である。創立50周年記念式典小委員会メンバーは下記の各氏（敬称略）：

委員長 勝田正文、副委員長 横堀誠一  
委員（五十音順）宇高義郎、小林健一、  
佐藤洋平、鈴木雄二、納富信、福山佳孝、  
伏信一慶、宗像鉄雄 事務局長 大澤毅士

とくに広報・連絡は作業量が膨大なものとなった。WEB全盛ではあるが、全会員にはハガキにてご連絡して、参加者のみ連絡をいただき、事前振込みをお願いした。伝熱シンポジウムで協賛頂いている関連学協会、賛助会員にも送付した。これらの作業は佐藤洋平慶応義塾大学教授にお世話になった。

表1 主な作業（順不同）

1	会場（選定、予約から事前調整まで）
2	当日の企画全般
3	当日の進行（司会と運営）
4	会場の受付（参加者リストと名札を含む）
5	式典に関する広報（全会員向）、他学会への招待
6	功労者表彰（審査、連絡、賞状作成）
7	来賓の対応（依頼からエスコート）
8	当日の配布物（9の資料以外）
9	資料（DVDとファクトデータ）
10	当日のWEB配信
11	記録（写真、録音）
12	パーティ（司会と運営）

## 5. 資料の整備

準備期間はおよそ1年半あったが、配布物の検討は間際の対応となった。この中で50周年記念でも

あり、創立時点での会員もご存命である今を逃しては記録が散逸する危惧もあったので、ささやかな歴史を振り返ることのできる資料を編纂した。先号で学会誌に閉じこみで掲載した「学会50年の歩み」がそれである。鈴木雄二東大教授と横堀準備委員会副委員長で構想を具体化した。当初は会員数の推移などの計数のみを振返るファクトデータのみを考えていたが、50年分の学会誌アーカイブを鈴木先生が詳細に点検されて立派なものが完成した。笠木会長には海外の関連機関や著名な先生への祝辞をお願いした。小冊子は最終的に長島元会長に監修頂いた。

## 6. 配布物

記念ロゴ入りの紙袋に封筒、式次第、50周年を振り返る資料、過去の伝熱シンポジウムの全講演発表をアーカイブしたDVD、お祝の飴、名札等を配布した。

中でもDVDは記念準備委員会の中に設けられた出版委員会で作成されたもので、門出政則佐賀大学教授、永井二郎福井大学教授ほかの労作であり、厚く御礼申し上げる。



配布物一式

## 7. 功労者表彰

最後に表彰について説明する。学会の大規模な顕彰は法人化に前後して20年ほど前に名誉会員制度を制定して以来であり、周年に伴う功労者の表彰は始めてであった。そこで、準備委員会の中に小委員会（宇高義郎先生と小林健一先生ほか）を設けて慎重な審議を重ねた。会長、副会長、理事部会長、シンポジウム委員長などの経験者と在会45年以上の会員を表彰するというガイドライ

日本伝熱学会 創立 50 周年記念功勞表彰者

(敬称略・五十音順)

① 会員功勞者 146 名

相原利雄	青木博史	赤川浩爾	秋山光庸	安達 勤	荒川 淳	荒木信幸
飯田嘉宏	石黒亮二	石塚 勝	一色尚次	伊藤正昭	伊藤龍象	稲葉英男
井上 晃	植田辰洋	上原春男	宇高義郎	越後亮三	塩治震太郎	大久保英敏
大隅正人	太田照和	大野正規	大原清司	岡垣 理	岡崎 健	小笠原光聰
小笠原光信	荻野文丸	小澤 守	小野信輔	笠木伸英	片岡邦夫	勝田勝太郎
勝田正文	神永文人	川上 靖	河村 洋	菊池義弘	幾世橋広	楠田久男
工藤一彦	国井大蔵	熊田雅彌	黒崎晏夫	黒澤 昭	小林清志	小林信雄
児山 仁	斎藤孝基	坂口忠司	櫻井 彰	佐藤 勲	佐野川好母	茂地 徹
庄司正弘	芹澤昭示	曾田正浩	高城敏美	高坂彬夫	高田保之	高松 洋
瀧本 昭	武石賢一郎	竹越栄俊	田中 修	棚澤一郎	谷口 博	玉木恕乎
近久武美	千葉孝男	千葉徳男	柘植綾夫	戸田三朗	鳥居 薫	永井伸樹
長島 昭	中島賢一郎	仲田哲朗	中谷 洵	中西重康	長野靖尚	中部主敬
中村泰人	中山満茂	中山 恒	成合英樹	成瀬哲生	西尾茂文	西川兼康
野村雅宣	架谷昌信	長谷川敏男	蜂巣 毅	服部 賢	花村克梧	林勇二郎
原 利次	原村嘉彦	久角喜徳	菱田公一	飛原英治	平田 賢	深野 徹
福迫尚一郎	藤井照重	藤江邦男	藤掛賢司	藤田秀臣	藤田恭伸	藤本哲夫
堀 雅夫	本田博司	前川 博	前田昌信	牧野俊郎	増岡隆士	増田英俊
松尾栄二	松村博久	松本健一	円山重直	水谷幸夫	岐美 格	三石信雄
宮内敏雄	宮武 修	宮本政英	望月貞成	森 治嗣	森 康夫	森 康彦
森下輝夫	森田昭生	門出政則	山川紀夫	山口譽起	山崎慎一郎	山田 純
山田幸生	山之上寛二	横堀誠一	吉田 駿	吉田英生	頼実正弘	

② 在外会員功勞者 6 名

玄 在民 傳 武雄 川路正裕 JHO SHIGIE 明 賢國 日引 俊

③ 出版事業功勞者 2 社

株式会社 大應 アイハラ・デザイン・オフィス株式会社

④ 職員功勞者 3 名

石塚 健 大澤毅士 倉水裕子



功勞者表彰状

ンで 146 名の表彰候補者を理事会に上申して決定した。併せて永年在外の会員 6 名と会務協力者 5 名も表彰した。最年長は小笠原光信元会長で 98 歳になられたがお元気でお礼状を頂いた。式典後半の表彰で代表者として岐美格元会長に笠木会長から渡された表彰状は B4 サイズのクラシックなものでフォルダを付けた。欠席者には昨年暮れに郵送した。

8. おわりに

式典小委員会としては意を尽して準備を整えたつもりであったが、振り返ると当日を含めてご迷惑、ご心労をお掛けした向きにはお許し願いたい。とりわけ全国遠方からご出席いただいた会員には経済的ご負担を頂いた。関係者を代表して深甚なる感謝の意を申しあげたい。

当日のスナップ写真から



受付



長島昭慶應義塾大学名誉教授の記念講演

式典における来賓のご祝辞



文部科学省  
加藤 善一 審議官



経済産業省  
中西 宏典 審議官



日本学術会議  
大西 隆 会長



日本機械学会  
佐藤 順一 会長



日本冷凍空調学会  
片倉 百樹 会長

学会（創立 50 周年記念事業実行委員会）



笠木 伸英 会長（兼実行委員会委員長）



宇高 義郎 副委員長（1, 2 部の司会）



勝田 正文 式典委員長  
開式の辞



横堀 誠一 式典副委員長  
閉式の辞

功労者表彰



功労者代表の岐美元 会長へ表彰状贈呈



記念パーティ



林勇二郎前会長の挨拶



矢部彰産総研理事の閉会挨拶



谷口博北海道大学名誉教授の乾杯



## 学会のライフサイクルとサステナビリティ — 日本伝熱学会の半世紀

*On Lifecycle and Sustainability of an Academic Society - Fifty Years of The Heat Transfer Society of Japan*

長島 昭 (慶應義塾大学名誉教授)

Akira NAGASHIMA (Professor Emeritus Keio University)

e-mail: nag@cj9.so-net.ne.jp

### はじめに

皆様とご一緒に 50 周年を祝うと同時に、これまでに多大の貢献をなされてこられた多くの諸先輩に心からの感謝と敬意をお伝え申し上げます。

私事で恐縮ながら、伝熱研究会が発足した 1961 年に私は研究者の卵となり、学会が 50 周年を迎えた 2011 年の 3 月で私は職業としての研究を退任致しました。日本伝熱学会の 50 周年を祝うと同時に、自分の研究の生涯が学会とぴったりと重なっていることに特別な感慨をおぼえております。

### 1. 学会のライフサイクル

#### 1.1 学会の視点

学術的な組織や研究集会にとって、年数はどういう意味を持つのだろうか。人間に寿命があるように、学術組織にもライフサイクルがあるのだろうか。人の生涯に活躍期があるように、あるいは食品に賞味期限があるように、学会にもピークや賞味期限があるのだろうか。また、人が長生きを願うように、学会もサステナビリティを願うべきなのだろうか。

本稿は“学会”に焦点を絞っている。これには二つの理由がある。第一に、伝熱学における保守本流ともいべき主要な諸課題については、既にそれぞれエキスパートの先生方の講演が行われ、あるいはレビュー論文が発表された[1]。私はそれらとは重複を避け、別の視点からのお話を申し上げたい。第二に、半世紀前に私は米国に留学したが、当時の米国は第 2 次大戦後の特異な空気がまだ残る繁栄期にあり、新しい分野や会議などが次々に創設されていた。それ以来、新分野や新学会、新会議の栄枯盛衰を見て考えさせられてきた。

学会のライフサイクルは、創設からの経緯を辿って種々の特色や課題のピークを見ることで考え、学会のサステナビリティは、将来へ向けての学会の在り方として考える。

前述の主要課題のレビューは、詳細な資料と統計に基づく客観的な歴史記録であったが、本稿では逆に統計や公式資料を離れて、むしろ個人的な経験を軸として伝熱研究分野や伝熱学会の半世紀を考えてみることにしたい。

#### 1.2 先端と伝統と

学術の課題はその時代の要請を受けている。従って学術分野や研究課題には、芽生え時代と成長した大樹時代と、そして老樹時代があるはずである。しかし一方では、欧州の古い学会のように、何世紀にもわたって受け継がれている学会がある。学会にとって永続不変も一つの社会的期待であるらしい。

昨年カナダで住人に聞いた話だが、近所の人たちが住宅を磨き上げて値が上がり売って移ってってしまう。美しい邸宅地なのに親代々の付き合いや先祖から受け継ぐ伝統が無いのは寂しいということであった。

輝かしい最新最高だけでは社会は成り立たない。伝熱学会がサステナブルであり続けるには、土台となる分野コンセプトの伝承と蓄積、そして先端の追及や次世代へのイノベーションの両方を果たさなくてはならない。

### 2. 伝熱学会発足の前後

#### 2.1 きっかけとしての原子力

社会のニーズと学会発足の対応を考えると、伝熱学の発足時とその後の推進における大きな社会的要因の一つは原子力であった。奇しくも伝熱学会 50 周年目が、原子力のかかわる大災害の年となった。伝熱学会も役割を深く広く考えることを迫られている。

伝熱学会の発足の前段階としては、1950 年代には原子力平和利用が始まり、宇宙、ミサイル開発などとともに、伝熱研究が社会に広く認知され、伝熱学が大学の教育科目に取り入れられる契機と

なっていた。

1959年には、戦争で長く休刊していた日本機械学会の年鑑が復刊された。工学系の学会の年鑑は学術と産業技術と社会の現況を反映している。この年に学部2年生となって機械学会に入会した私にも、年鑑(図1)が配布された[2]。今これを見ると、主要項目には隔世の感がある。熱および熱力学の章には原子力という項が登場している。西川兼康先生が熱伝達の項の担当で、「このように伝熱の研究が最近とみに盛んなのは、主としてミサイルと原子力の開発という実際上の要求によるものである」という記述がある。この分野の関係者の高揚した気持ちや発展への期待などを反映しており、当時の若い研究者たちの心の盛り上がりも思い出される。

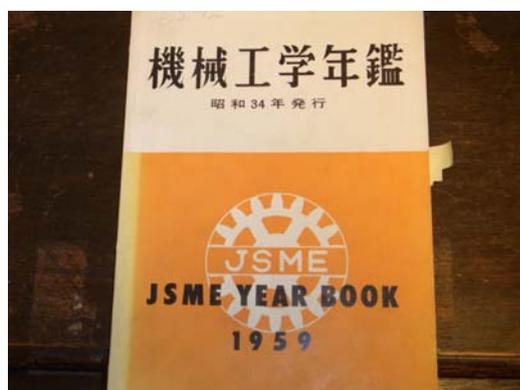


図1 復刊された機械工学年鑑

学会創設の1960年代はじめの日本の大学では、研究費は極度に乏しくて、研究設備も不備であった。測定主要部だけでなく、例えばセンサーや弁、回路などまで、材料から自作が普通であった。そういう中で機械学会に沸騰やバーンアウトなどの調査研究分科会が設けられ、精力的な研究活動の推進役となっていった[1]。コンピューターは無かったが、考えようによっては計算尺、対数表、機械式計算機などの利用は、原理の理解や教育に効果が大きかったのではなかろうか。外国図書・文献は予算も外貨割り当ても無くてほとんど買えなかった。こういう状況で、学会に設けられる研究協力の委員会などは研究費を得るのに効果を発揮した。

コピー機登場もまだなので、文献は写真に写すなどして廻し読みであった。研究者の国外渡航は困難で、厳しい審査があった。戦後何年も経って

いたのに、特に若い研究者は世界の研究情報に飢えていた。

学会創立を気楽には考えなかった当時の日本でも、伝熱シンポジウムと伝熱研究会ほどいねいに設立準備された学会は珍しいと思う。一つの特色は早い時期から国際対応を意識していたことである。国際要請もあったのであろうが、リーダーの先生方の見識であり、当時としては珍しいことであった。その結果、国際伝熱のアジア地区の世話役になったり、後の国際伝熱会議の東京開催にもつながった。若い研究者にとっては、最初から国際対応を重視した伝熱分野は魅力的であった。

## 2.2 伝熱シンポジウム初期の思い出

次節で触れるように私は1962年に米国に留学したが、日本に帰国してから1965年の東大本郷で開催された第2回伝熱シンポジウムに出席した。会場では九大、広大、京大、阪大、名大、東大、東工大、東北大、北大等から名だたる先生方が陣取り、その張りつめた雰囲気には私は圧倒された。平田賢先生や藤井哲先生などはまだ若手で、棚沢一郎先生はじめ、その後の大先生方も大学院生であった。

その後何年も、伝熱シンポジウムや機械学会の熱工学講演会などでは、講演発表後の討論が果てしなく続けられることがあった。セッションが終わって座長も聴衆も居ない部屋で、演壇に立つ講演者と一人の討論者だけが延々と議論しているのも目にした。激しい討論は伝熱分野のひとつの伝統となり、高揚する日本の伝熱研究を支えた。

現在になって思うと、この燃え上がるような異様な熱気の間を作ることは学会の重要な役割で、ネット上だけでは決して形成出来ない。この共感、参加感、歴史臨場感こそが若い研究者を分野に誘い込み、研究を進展させる原動力となる。

当時の日本の研究状況は、研究費も施設も貧弱で、海外文献も入手が容易でなく、海外渡航制限も厳しい状況であった。日本伝熱学会発足の前後の国際環境としては、1960年ごろに2大伝熱雑誌の登場、第2回国際伝熱会議の開催(ボールドーとロンドン)などが相次いだ。エネルギー関係では、戦争で途絶えていた国際蒸気性質会議が1963年にニューヨークで開催された。その後1967年には日本機械学会のセミインターナショナル会議が開催され、1968年には日本機械学会の歴史で初め

ての本格的国際会議（単独ではなく火力発電技術協会、日本ボイラ協会と共催）として、第7回国際蒸気性質会議が東京で開催され、機械学会も開催経験を積んでいった。東京で国際伝熱会議が開催されたのはその6年後1974年のことであった。

### 3. 日本伝熱研究会発足のころの米国

#### 3.1 研究者人脈の形成

51年前の1961年に私は大学院生となったが、その年に学会の前身である日本伝熱研究会が発足して入会申し込みをした。1962年には機関誌「伝熱研究」創刊号が出て、その赤い表紙が印象的であった。そしてその年の夏に私は米国留学に出発した。まだ修士課程の学生であったが、事情があって米国ではフルタイムの研究者の卵として滞在した。

50年前の米国は圧倒的な繁栄期であった。米国の主要大学では、第2次大戦中あるいは戦後にナチスや欧州の戦乱を逃れて来た多数の学者たちが、新天地で意欲的に活動している時代であった。さらにまた、各大学の若い研究者たちの多くは、欧州や東欧、そして日本と韓国、台湾、インドから頭脳流出した人々で、やはり新しい分野を虎視眈々とねらっていた。そのような人々によって、多くの新しい学問分野や、新しい学会や、新しいシンポジウムが次々に創設されていた。熱工学の関係する分野は、動力、伝熱、燃焼、冷凍空調、熱物性、いずれも興隆期で、ASMEのシンポジウムなども大きな部屋が満杯であった。

当時の研究者たち、あるいは当時新設されたシンポジウムや学会について、その後の50年間を思い起こしてみると感慨を覚えずにいられない。研究課題にも学会にも研究者にも、時流と運による栄枯盛衰があった。

#### 3.2 人脈—競争と協調

私の米国での指導教授 Joseph Kestin (図2) は第2次大戦中、ポーランドのワルシャワ大学の助教授であったときにナチスのユダヤ人迫害にさらされた。迫害を逃れるため一度は米国移住を目指して大西洋を渡ったものの、ニューヨークの移民局で入国拒否され、再び戦時下の欧州に舞い戻って各地を転々とし、大変な苦難を経験したようである。その後戦時中ロンドンに設立されていたポーランド亡命大学の教員として終戦を迎えた。

1953年頃に米国東部アイビーリーグのブラウン大学に教授として迎えられ、私が行ったころは50歳前後の気力満々の時期であった。



図2 Prof. J. Kestin

経歴を紹介したのは、実はこのような苦難の経歴は当時は珍しいことではなかったからである。ボストン周辺の著名大学にもその他の全米の大学にも、似たような経験を経た亡命教授たちが大勢いて特異な人脈あるいは情報網を形成していた。当時の米国には欧州その他からは頭脳流出教授たちも居てお互いに交流して援けあい、各大学間の人事交流や、目新しい研究分野の誕生、米欧の交流にも影響している時代であった。国際的な伝熱コミュニティもこのような環境で育ったといえよう。この人々が米国の研究活性化に果たした役割は大きい。米国人も当時はおおらかで寛容であった。また多数の頭脳流出組が居て、互いに激しく競い合っていた。若い頃にこの活気ある環境の中に浸ることが出来たことは幸せであった。伝熱研究の分野は、このような環境の中で生まれた多くの新分野のひとつであったのであり、分野間の競り合いも伝熱の発展要因になったと感じる。

#### 3.3 1960年代の米国社会と研究

1963年頃の米国は、ソ連との極めて激しいつばぜり合いがあった。ある日、ブラウン大学の研究棟へ行くと、人々がひきつった顔でひそひそ声で話し合っていた。その日の朝に、ケネディ大統領がキューバのソ連ミサイルの廃棄を求めて、ソ連のフルシチョフ首相に最後通告を送ったのだという。第3次世界大戦の瀬戸際の恐怖を実感した。冷戦には研究者も学生も局外者ではいられなかった。研究課題や研究費に冷戦の影を意識し始めるのはこのころからであったと思う。

また、欧州や日本と違って、1960 年代の米国では民権運動が国を二分していた。1963 年は米国で大規模な行進が行われ、多くの学生や教員も参加していた。州兵に保護されて南部の路上に座り込む白人学生に、保守派の白人が近づき、手に持った卵を額にゆっくりと押しつける。やがて卵が割れて、じっと目をつむったままの学生の顔に卵の中身が流れ落ちていくテレビの大写しを見て、私たち留学生も大きな衝撃を受けた。研究者の中には影響を受ける人もあり、大学の中も変わっていく。例えばブラウン大学で私のよく存じ上げていた化学の有名教授は、MIT に移り、後の大学紛争の発言者となっていた。

当時、象徴的な出来事で記憶に残っていることがある。リベラルな北部なのに、ある日街の通りで歩行者がみな立ち止まって私の後ろの方を凝視している。振り返ったら、黒人男性が若いブロードの白人女性と腕を組んで歩いてくるのが見えた。その凍りついたような張りつめた空気は、当時の米国人の隠しきれない感情を代弁していた。北部の大学でさえ、例えばブラウン大学に初めて黒人学生が正規学生として入学したのは筆者が帰国した後のことであった。

1963 年暮れにケネディー大統領が暗殺された。私はまさにその日に米国を離れ、欧州へと旅立った。その当時の民権運動のリーダーのひとり、マルティン・ルーサー・キング牧師の演説「私には夢がある」にこういう意味の一節がある。「私たちは長い苦しい運動を続け、山の峠の目の前まで来た。私自身は多分、峠には到達できないであろう。しかし若い皆さんは峠にのぼることができる。そしてあの峠の向こうに、白人と黒人の子供が一緒に遊ぶ未来を見ることができるのだ。」半世紀後の今でさえ、ユーチューブでこの演説を聞くと、70 歳を過ぎた私の体が感動で震えるほどの迫力がある。しかし彼は、この演説のあと間もなく銃で暗殺された。

### 3.4 国際性、学会の盛衰

日本では 1960 年ごろはまだ国際会議開催は手の届かない特別なものであったのに、米国で私のボスである Kestin 教授が自分の個人企画で国際会議を開催したのには驚いた。Kestin 教授は、学術で国際というのは当たり前のことではないか、ただ International と名付ければよいのだと言われた。

事実、1963 年開催のこの会議には欧州からノーベル賞級の学者たちが気楽に集まった。だれかの企画で開催された研究会がもし成功すると継続開催され、いずれ学会に育っていく。しかし興味が失われると停止、統合されていった。その柔軟なライフサイクルは学問を盛んにする基本であると思った。前例や権威でがんじがらめになると、本当の新しい芽は生まれてこない。

米国へ行ってもう一つ仰天したのは、学生が休暇を利用して海外旅行することであった。当時の日本では夢で、小田実の海外旅行記「何でも見てやろう」が大変なベストセラーになっていた。国際性はやはり実見が有効である。先日聞いた話だが、新潟県は昭和 20 年代から高校生を県として送り出すことを始め、その中から原子力分野の人材も出たという。

### 3.5 国際蒸気性質会議

伝熱学の重要な応用はエネルギーである。高温高圧の水蒸気のデータは、昔から火力発電所と原子力発電所の設計・製造・運転に使われる最重要課題であった。1963 年ニューヨークで開催の第 6 回国際蒸気性質会議には、主要工業国の産業界と学界の大家たちが参加した。図 3 の写真前列の左端は有効エネルギーで有名な Keenan, 3 人目は工業熱力学の教科書で世界で知られた E. Schmidt, 右端の若い人はその後ソ連の大臣にもなった熱力学の Sychev である。中央に谷下教授、後ろに私の姿がある。



図 3 第 6 回国際蒸気性質会議 (1963, New York)

図 4 の写真の時には、前列左端の菅原菅雄教授が E. Schmidt 教授と流ちょうにドイツ語で会話されていたので、私はさすが戦前留学派は違うと感心した。その右は谷下市松教授とソ連の大物として知られた Vukalovitch 教授、後列の二人は米国と英国の電力業界の実力者であった。こうして定められた国際標準値を使って、世界中の大規模発電プラントが建設・運転されたので、この学会は大きな経済影響を伴った。この会議の次回は 1968 年に日本で開催されたのだが、日本機械学会の主催する本格的国際会議の嚆矢であったので、国際世話役の ASME は心配したらしくプログラムは米国で印刷して持参した（図 5）。なんとなくユーモラスで、当時の米国人の日本理解を象徴している。



図 4 ドイツ語で歓談される菅原先生(1963)



図 5 第 7 回 ICPS のプログラム(1968)

大分後であるが、1974 年の東京での国際伝熱会議のお手伝いをさせられた。たしか昔の経団連会館の大ホールだったと思うが、Grigull 教授の特別講演で、1 枚 1 枚のスライドがお話途中で茶色に泡状に焦げていくので、われわれ裏方は手に汗にぎる緊張であった。熱の学会でありながら断熱ガラスが不十分だったのであろう。それまでの学会

発表では大きな模造紙に図を描いて 1 枚ずつめくりながら講演するスタイルだったのが、スライド映写になった頃で、まだ映写機も性能が不十分であった。その後、OHP 時代を経てパワーポイントにかわったが、昔の手書きの図は今のきれいな図よりも迫力があつたような気がする。

### 3.6 学問分野間の壁と人脈

伝熱分野の魅力の一つは、その横断的な性格にある。それには国内外に広がる人脈が大きな効果を持っている。

米国の場合の例を考えると、一般に出身校などのほかにも幅広い人脈を形成するチャンスがあることがわかる。欧州から移住した人々の人脈と世界中からの頭脳流出者の人脈には先ほど触れた。新しく人脈形成をする一つの重要な仕掛けは、米英の大学の学寮の生活である。昔の留学時代に見たブラウン大学もオックスフォード大学も、クラシックな学寮の教育を重んじる典型的な大学であった。学寮の目的は安い宿舎ではない。

1990 年代以降、私は 2 つの大学で国際交流担当理事を 10 年続けたが、大学訪問では学寮を見学することを心がけた。米国のある古い大学を訪問したときに聞いた話は興味深かった。その大学が戦前の 1930 年代に中国の大学に寮を寄付した。そのときの条件はただひとつ、中国人と米国人をルームメイトにすることであったが、そこで作られた人脈は長く両国の関係に大きな貢献をした、とのことであった。

また、中国の有名大学の寮を見学したときに、案内の先生がいうには、自分はこの寮のこの部屋で 4 年間過ごしたが、同じ部屋だった仲間 6 人とは家族よりも親密な付き合いが今も続いていて、その 6 人は今は世界に散って、世界の情報を交換し合っているということであった。このような仕掛けを欠いている日本では、国際人脈の形成にはやはり学会への期待がある。

人脈には多様な波及効用がある。ご存知のように、米国等では学位を取った大学で教員として採用されることは避けている。日本では、こうする理由としてインブリーディングの弊害をなくすためだと理解されている。しかし私はもうひとつ重要な効果があるように思う。それは人のネットワーク作りという効果である。同じ大学を出た人が他の多くの研究機関に居ることは、研究情報の交

流に大きな効果がある。また分野や大学を客観的に観る目が養われる。分野にこだわらないことがごく普通の感覚になる。昔から欧米で、理学と工学とが境目を感じさせず、医学の分野とも研究交流や大学院生の相互の転身が行われ、分野の境界にこだわらずに研究課題を選ぶ感覚はこうして育まれた。

### 3.7 教科書の新鮮さ

新しい分野の発展には教育が大切で、教育には教科書が大切である。1962 年当時は伝熱学は新しい分野だったから、教科書はまだ模索状態であった。米国で 1 冊の教科書を見て大変感動した。

「Transport Phenomena」[3]であった。この 1 冊の本は世界の教育科目新設や教育手法にも大きな影響を与えたと思われる、その後世界中でこの流れを組んだ教科書が多数出版された。

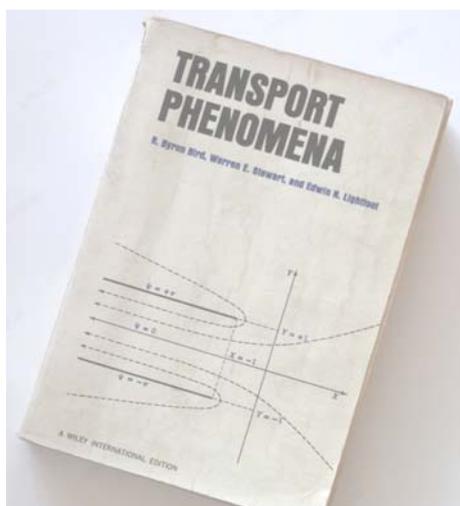


図 6 コンセプトを示す教科書

まず表題が新鮮であった。それぞれ別個に長い発展の歴史のある一見異なる 3 種類の輸送現象（移動現象）を、単純な定式化と分子論から始めて統合的に、易しく簡潔に説明する力は格別なものがあつた。周知のとおり、熱伝導現象は古代から知られ、フーリエその他応用数学の発展を促し、地球の年齢予測からエネルギー利用の技術まで、幅広く研究されていた。粘性現象は古代の水路からロケット技術の開発まで、やはり幅広く研究され、Navier-Stokes の式や境界層の概念などをはじめ、過去に多くの成果を生んできた。拡散現象についても歴史の経緯があつた。入門書であつたとはいえ、現実の技術的応用にも配慮し、分子レベ

ルの視点から統一的に説明し始めるというのは、若い学生の心に響くものがあつた。

この本にはさらに前駆があつた。Hirshfelder らの「Molecular Theory of Gases and Liquids」[4]がそれで、さらにその前には、序曲ともいふべき S. Chapman らの「Mathematical Theory of Non-Uniform Gases」[5]が存在した。どれもが 1950 年代の出版で、ひとつのパラダイム転換を思わせる。Hirshfelder らの本は厚さ 5 センチ以上もある大冊で、日本では当時の外貨制限で洋書が入手難である上に、価格も若い研究者には天文学的であつた。ところがその頃、作行会という団体が発足し、日本の若い研究者支援に給与額にも匹敵する使途自由のお金を毎月提供すると発表した。幸い私も第 1 期に採用された。その最初のお金で Hirshfelder らの厚い本を買った喜びは今も忘れることはできない。この作行会は、本田宗一郎氏らの巨額の寄付によることが同氏の死後何年も経って公表されたが、日本の学術に大きな貢献をした義挙であつたと思う。

伝熱分野の今後の新しい展開を考える時にも、やはり新しい教育概念や新しい教科書・著作も重要な役を果たすことと思われ、その促進の役を学会にも期待する。

## 4. 伝熱学の横断的性格

### 4.1 理学と工学の壁

昔の話題に戻るが、流体熱物性データ評価の小さな研究会を作ろうかという相談があり、理学系学会と工学系学会の大先生方何人かがこころよくお集まり下さつた。私が驚いたのは、長年似た課題に取り組みされていた先生方が、理学と工学では互いに名前もご存じなかつたことであつた。理学と工学の境が当時の日本では厳然と存在し、しかもそれがあたりまえと思われていた。私が理学とも工学ともつかない熱物性という分野に惹かれ、また伝熱学という理学と工学にまたがった分野に興味を持ったのは、このような時代背景もあつた。伝熱学は、現象に対しては理学的・学術的に対応し、応用については工学的・技術的に対応するという特色が見えて興味深かつた。

私はその 10 年後に今度はイギリスのオックスフォード大学の研究所に滞在したが、ここは逆に保守的な考え方の牙城で、理学と工学技術の位置

づけの古典的な違いを再び考えさせられた。日本での一部の誤解に、イギリスでは技術を科学より低いレベルに見ているというのがある。私がイギリスで感じたのはそうではなくて、技術は社会的には高い評価を得ているのだが、科学とは別のカテゴリーに分類されているということであった。

#### 4.2 異分野交流・国際交流と学会

伝熱分野は初期から国際的なつながりは極めて重要であった。第 2 次大戦による学者の国際分散が戦後の人的ネットワーク作りに大きな役割を果たしたことは既に触れた。国際会議の開催、ユネスコの研究センターの設立、国際学術誌の創刊、若い研究者の離合集散、学者招聘に活用された。

過去 50 年間で日本でも異分野間の交流は大変盛んになった。最近ではインターネット応用のさまざまな情報交流が貢献したと思われる。しかし、日本では、学会や学術会議はじめ、理工医生物などの分野間の交流と人の転身には、50 年前の米国にくらべてさえ、まだまだ自然な雰囲気欠けているように思える。人事の公募制、ポスト制度、任期付きポジションなどが導入されたのはまだそう昔ではないし、十分定着したとはいえない。伝熱学会のように発足時から欧米と考え方の近かった学会にとっては、これからもこの改善に貢献を期待したい。

幅広い人脈の存在には、あまり気づかれないもうひとつの効果がある。それは評価文化への効果である。さまざまな教育や研究組織の評価活動に参加した結果として感じたが、欧米にくらべて日本社会では評価文化がなかなか定着しない。その背景が人脈や人の移動や広がりにもあるように思われる。

ネットによる情報だけでなく、このような、多様で複雑な人的ネットワークが、学術の盛衰にも生きている。海外からの頭脳流入が少なく、学寮その他のシステムの不備な日本では、どうすればよいのだろうか？その点、可能性としては学会の活動の余地がある。伝熱分野でも若手のための夏の行事が、各地域の世話役の先生方の努力で早い時期から続けられたことなどは高く評価される。

#### 4.3 研究・学会と社会

1960 年代と 1970 年代の研究環境において、米国だけでなく日本でも、社会情勢が大きな影を落とした。日本の技術者が政治や経済や社会問題へ

の関わりを避ける傾向は昔からであったとみえて、70 年以上前に、経済界のリーダーだった藤原銀次郎（図 7）は次のように述べている。

「日本の官庁をごらんください。技術者を局長にも課長にもしていない。何故かと言えば常識が無いからです。（中略）いくら工業大学の卒業生だからと言って、経済の知識、法律の知識の一通りは通じているものでなければ、これからの時代に立派な仕事は出来ません。（中略）機械の知識だけ授ければ、他のことは何も知らなくて良いというような教育が今日の片輪な技術家を生み出したのだと私は考えるのです。」（1930 年代、藤原工大設立の抱負）。

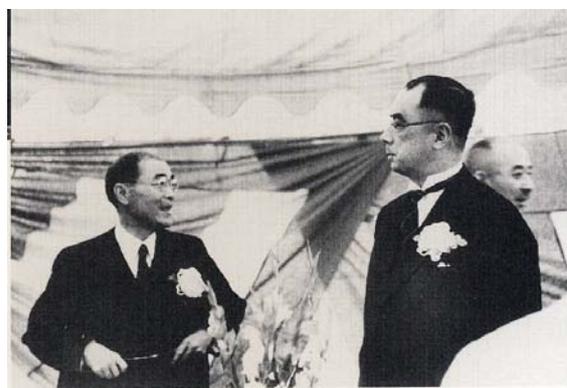


図 7 藤原銀次郎(左)と小泉信三(1939 年ごろ)

ごく最近では良くなったとはいえ、今でもかなり当てはまる言葉ではないであろうか。

工学技術にとっては、社会との関連は理学分野よりも強い。伝熱研究会発足のころの社会では第 2 次大戦直後からの科学技術への高い期待がまだ継続中で、科学技術で明日は今日よりも良い社会になる、という明るいムードはまだあった。しかし 1960 年代以後は産業発展と伝熱学興隆の一方で、科学技術への信頼がゆらぎ始めた時期であった。きっかけの一つは環境汚染であった。

科学技術の研究課題にもイデオロギーなど社会や思想の動向が反映されてきた。核実験も、ある国が行うものは悪であり、ある国が行うものは善であるとされた。科学技術史や技術思想の当時の本にもイデオロギーを前提とするものが多かった。

伝熱研究の関わる研究課題の中では、環境・公害、原子力、エネルギーなど、社会のさまざまな人々の思想や生き方の違いが反映するものがある。専門学会の役割としては、専門家の意見交換の場

を用意し、専門家の統一見解の形成をはかることは大変重要である。これまでの伝熱学会は学術や技術的成果を重んじるあまり、社会の人々に通じる統一見解の形成やその呼びかけの活動は不十分であった。

#### 4.4 伝熱学会の成熟期と社会

1960-1970 年代は、宇宙開発競争が米国とソ連の冷戦の焦点となり、科学技術研究のすみずみまで影響が及んだ。熱工学研究でも、例えば材料熱伝導率測定分野では、スペースシャトルの断熱タイルの熱伝導率データが、両国の技術スパイの中心課題となっていると雑誌タイム誌でも取り上げられた。機密保持は重要で、知人であった米国の大学教授は、研究室のロッカーも信用しなかった。測定依頼された断熱タイルのサンプルを常に自分のかばんで持ち歩いて、測定は大学院生に触らせないように、夜、自分自身で行っているとのことであった。ロンドンで開催されたシンポジウムでは、NASA の招待講演者が講演後に断熱タイル見本を提示すると、某国の研究者たちが演壇までダッシュするには仰天した。

米国では早くから一部の基礎熱物性データでさえ配布先に注意していた。1970 年代でもウランの物性データまではよいのだが、プルトニウムのデータになると要注意であった。研究施設を見学に行っても、プルトニウム物性測定装置は大変厳しい管理と制限であった。私がトリチウム熱物性の推算データについて国際会議で発表しようとしたら、親しい米国人の先生から発表は慎重にと助言を受けたこともあった。その後の核拡散防止の考えにつながるわけで、日本では原子力研究の公開原則などとナイーブなことを言っていた時代で、国による理解度の違いを考えさせられた。当時の伝熱研究者には、同様なさまざまな経験があったことと思われる。

#### 4.5 ネットの影響－業績評価・検索手段・データベース

研究者の社会的な位置づけとしては、業績評価に数量的な視点が強く入ってきたのは 1970 年前後から特に顕著になったように思われる。ネット評価万能はバイオ分野ほどでないかわり、引用件数統計では熱関連研究は引用で負ける不利な立場になっていった。また採用にも昇進にも学位取得にも論文件数が判断基準に登場した。このために論

文激増期に入ったが、数が増えるとともに平均的には個々の論文の影響力は落ちていったように思う。伝熱分野も例外ではなかった。その後、引用件数統計を含め、数量評価の弊害は目に余るようになっていった。新しい評価メカニズムが必要で、それには学会の主導が必要であろう。

一方では、検索手段の発達の反面として、研究で得られた成果の整理・分類やデータ蓄積への個人の努力が適切に評価されなくなった。1980 年代以後、データベース研究が低調なひとつの原因はそのせいであろう。伝熱分野でも刻々と得られる研究成果をそれぞれきちんと評価して、単なる検索を超えた評価と蓄積への努力が必要である。これも学会への期待は大きい。

1980 年頃だったと思うが、世界的なデータセンター CINDAS を創設した Touloukian 教授（パデュー大学）は、ある学会でデータ評価の重要性について講演した。金属の熱伝導率のデータのバラツキの図を示して、「実はデータは既にこのように満点の星のように存在している。これらのデータに使われた研究費は私の試算ではデータ 1 点で平均 500 ドルである。この満点の星空にさらに 1 点星を加えるために研究費を出すべきか、それともこの中に銀河を見出す研究に研究費を出すべきか、よく考えなくてはならない」と述べた。

その点で日本の伝熱分野が世界に誇るべき成果は、日本の伝熱工学資料の刊行であったと思う。1959 年の初版の序文によれば、その準備は 1953 年に開始され、刊行までに 6 年をかけたとのことである。単なる知識の切り売りでなく、評価された知識の体系的集積と社会への提供は素晴らしい構想であり優れた成果であった。願わくば、今後はさらにデータベースのイノベーションにも伝熱分野が先鞭を切ってもらいたいと思う。

産業界全般のためのデータベースの国家的整備については、通産省（経産省）などにより日本の知的基盤整備計画という 10 年計画が実施され、私も深く関わった。信頼できるデータの系統的整備は、伝熱分野に限らず、現在でも未完成の仕事が多く残されている。1 個人や 1 企業の手には負えないので、学会のリードが必要である。

#### 4.6 交流の道具として重要な“用語”

学会の役割には研究交流の場を整備することがあるが、交流の共通の道具として学術用語の整備

がある。この地味な作業が熱工学関連の分野で進展したのは、実質的には 1970 年前後かと思う。1960 年代の伝熱分野はさまざまな背景の人が集まったので、さまざまな用語が飛びかっていた。学会の講演発表にも用語へのこだわりがあった。熱伝達率、伝熱係数の使い分けなど、相手によって用語を言い直すこともあり、大先生のお弟子さんたちもこだわるし、我々ノンポリも一時は気を使ってずいぶん悩まされた。

戦後の米国でも同様で、世界から集まった研究者には共通語が無い場合もあった。1962 年の留学当時、例えば流体の「粘性率」だけについても *viscosity*, *viscosity coefficient*, *coefficient of viscosity*, *dynamic viscosity*, *fluidity* (逆数) などとそれぞれの用語に強い主張者がおり、実に難しいものだった。私の米国での指導教授は、戦中戦後の苦難の遍歴から独、英、仏、露、ポーランド、ポルトガルなどの諸言語を自由に操る人で、それだけに用語の正確な使い方には厳しい人であった。

余談だが、言葉を学ぶのが好きな点が Kestin 教授のお眼鏡にかなったのか、後年こんなこともあった。1974 年ごろ、Kestin 教授のお供でドイツ各地を旅行した際にゲッティンゲンで境界層理論の Schlichting 教授のお宅を訪問した。境界層理論の本は Kestin 教授の英訳によって一層の世界的な評価を得ていた。ずっと前にも米国で両教授の次回翻訳打ち合わせを傍聴させていただいたことがあったが、その綿密な打ち合わせには感銘を受けていた。ゲッティンゲンで夕食をご一緒した時には、Schlichting 教授の愉快的な話題も伺った。ドイツで最も長い間、最も若い教授であったこと、the great

professor と呼ばれるのは、実は体が大きいからだなどとジョークを交えた話もあった。しばらくして Kestin 教授から、Schlichting 先生の *Boundary Layer Theory* をお前が日本語に翻訳しないか、と恐れ多いお誘いを受けた。

日本では文部省学術用語 (昭和 29 年版) の改訂作業が 1970 年をはさんで 2 回あり、私も機械学会の用語委員会を手伝わされた。熱工学関係では、当時は偉い先生方の主張による違いのほか、熱輻射と熱放射など漢字制限による違い、熱物性と熱定数など技術分野による違い、率と度と係数など物理学・化学・工学間の違い、熱拡散率と温度伝導率など元の言語による違い、そしてボイラとボイラーなど英語つづりにこだわる違い、などなど、複雑怪奇な時代であった。若い委員を加えたのは、年輩の偉い先生だけを委員にするとそれぞれの主張で納まりがつかなくなるのを心配したのかもしれない。

その後 1970 年代の改訂になってやっと、例えば“エネルギー”を“エネルギー”に統一することができた。面白いのは、例えば自動翻訳機などでは今でも昭和 29 年版の用語集が入れられているものがあると見えて、特許関係などの訳文にまことに古い用語が散見される。用語だけでなく、標準やデータでも注意を要する。

用語の統一は広域や境界分野の研究討論や共同プロジェクト推進にも重要で、学会の本来の重要課題のひとつである。明治時代の人も早くから痛感していたとみえて、図 9 に示すのは 1901 年の日本機械学会の術語 (用語) 集である。



図 8 Prof. Schlichting



図 9 機械遺産に指定された術語集 (1901 年, 蒸気および蒸気機械の部)

#### 4.7 学問分野の細分化

学問分野や学会としては、長く一つの学会が続くものと、次々と分かれていくものがある。博物学や社会学などの先生の話では、学問のスタートは分類にあるという。昆虫採集でも花の観察でも、まずこれはどういう名なのか、どの種に属するのか、どういう系列かと調べる。天文でも歴史でも思想でも、分類と位置づけから学問が出来上がっていくという。

オックスフォード大学の有名なピットリヴァー博物館に行くと、展示館の手前半分の展示は近代的な展示なのだが、後ろ側半分はなんともいえない雑然とした広がりである。もちろん後ろ側の方が断然面白い。多分、博物館創設の頃はしっかり分類したのだろうが、その後の大先生たちが探検・調査の新しい収集品を次々と持ち込み、次々と新しい項目を増やしていったために、分類体系が追いつかなくなってしまうのであろう。学会や学術分野の展開の順序も面白い。例えば日本工学会ができてから、機械学会や電気学会ができ、その後に交通機械の学会が、次に自動車工学が、そして部品であるばね学会や歯車工学が、というような専門分化する。

その点、伝熱学は横連結型なの面白い。連結型でも幾つかの形があり、伝熱学のように現象観察からスタートするものと、制御工学のように理論からスタートするものなどがある。

### 5. 課題の変遷とトピックス

#### 5.1 流れとして見ると

人により見方にかなり違いがあると思うが、ここで 50 年間の熱工学に関係ある成果や課題を流れとしてごく大まかに振り返って見る。学術的な見方ではない。

##### 1950-60 年代

戦後花開いた測定技術の進歩による新現象・新発見。社会の要請による原子力、宇宙などの新分野。量産化技術。

##### 1970 年代

材料研究など産業必要性の拡大、オイルショックとエネルギー研究。公害・環境問題。高効率化や性能向上への努力。発見された諸現象の学問への昇化。データへの関心。課題選択や機密など冷戦の影響。

##### 1980-90 年代

コンピューターの活用やシミュレーション技術など研究手法の進歩。温暖化問題。製造現場の海外移転。熱現象の微視的手法。

##### 2000 以降

センシング、計測技術の発展。多様なネット利用。

研究課題は突発的に新変化があり、研究手法は流行がうねりのように変化していく。しかし 50 年経ってもあまり変化がないのが、例えばデータの誤差意識で、1980 年代に ASME の提言もあったのに、福島以後の議論では見られない。

当然のことだが、伝熱分野の中だけを見ても、50 年間に研究課題の多様な変遷があった。沸騰や対流伝熱、その他の主要課題別の変遷を辿るのも面白いが、これらはすでにエキスパートの先生方によって詳しいレビューがなされている。

伝熱学の基礎には熱力学があり、流体や固体の物性や力学がある。私は熱力学からスタートしたが、間もなく流体の熱物性研究に惹かれた。立場としては、伝熱の諸課題の変遷をやや客観的に見る立場にあったわけだが、初期の伝熱学では大きな流れとして現実の現象から理論化へ、そして現実の工学技術的应用から学術的な体系確立へという変遷が見てとれた。仮説や理論が先に出て、後に応用が生まれるという物理学などの伝統的な例とは逆方向で、特徴に面白い違いがあった。しかしその後、論文数偏重などもあったためか複雑な複合現実課題からきれいな表現可能な課題へという変遷があった。さらに最近では理論先発型の研究も見られることはそれなりに喜ばしいことである。しかし昔からの確立された他の学術分野と同じになってきたともいえるので、やや寂しい感じもする。伝熱分野としては、仮説を自由に構想する純粹の理論研究は別として、現実の現象を見ること、特に工学技術的現象を見ることが先行すべきかと思っている。このあたりは、これから伝熱学が再びピークを迎えることができるかという分かれ目かもしれない。

#### 5.2 若者を惹きつけたトピックス

少しここで肩の凝らない話題も 2-3 触れてみる。半世紀の間には、伝熱学の分野でも、ある日突然面白い報告が登場して大勢の話題をさらう動き

もあった。これは新しく若い研究者を惹きつけるのに大変効果があった。

1960 年代後半にヒートパイプが登場した。銅の棒よりはるかに軽い金属棒が、銅よりはるかに多くの熱を伝えるというのである。私は ASME の会誌に出た記事で読んで嘘かと思ったが、本当であった。物理学のある大先生は、熱伝導は大昔に原理が分かっているのに、工学分野ではまだ研究課題になるのですかと皮肉を言われた。ヒートパイプの面白い点は、科学的発見ではなくて技術的発見であることであった。原理は古代からだれでも知っている蒸発・凝縮と毛細管現象である。このようなものが 20 世紀後半にもなって初めて登場することもあるのだと大いに刺激を受けた。私もそれならばと思って、熱の半導体や熱の増幅装置など考えてみたが、当時特許でも取っておけばよかったと少し後悔している。

大昔に登場してもおかしくないのに近年になって発見・発明された“技術的発見・発明”には、ハングライダーや境界層、沸騰現象など、いくつももあった。抜山先生（図 10）の沸騰曲線が象徴するように、物理学的原理は既知なのに、工学的には新発見で、しかも技術として大きな波及効果をもたらすものはまだ今後も期待できる。工学技術の素晴らしさである。



図 10 抜山四郎

1970 年前後には、熱伝導率の臨界異常という報道があった。液体の臨界点付近で熱伝導率が数十倍、数百倍にもなり得るというのであった。これを熱交換器に使えばすごいというので機械学会でも話題になり、研究会で一色先生が盛んに質問されたのを覚えている。その後の研究で、現象そのものは確認されたのだが、温度範囲があまりに

狭くて応用には使えないことがわかり、話題から消えた。

そのほかにも気液臨界点付近に面白い現象が多いことは、よく知られた通りで、伝熱研究でも多くの関連研究が発表された。また、1980 年ごろ以降、物質の超臨界抽出など、工業応用でも多くの話題があった。

間もなく今度は、当時のソ連で異常水発見という報道があった。この物質は水分子で構成されていて沸点が摂氏 600 度付近だということで、これは画期的な伝熱媒体や作動媒体になると、熱工学の一部の人は色めき立った。物理学会の特別討論会に聞きにいったところ、広い会場が満杯で後ろでやっと立ち見をした。しかしこれも残念ながら、量のごくわずかしかつくれなことがわかり、夢と消えた。

常温核融合や高温超伝導も大きな話題で、伝熱分野との関連もあるが、ここでは省略する。

研究の活性化には、一方では伝熱シンポジウム創設のころのような、軍事、原子力、宇宙開発、あるいは高効率火力発電といった現場からの強い要求が有効であるが、また一方では、1970-80 年代のヒートパイプ、異常水（ポリウォーター）、臨界異常現象、高温超伝導現象、カーボンナノチューブのような“想定外”の刺激的な話題も有効である。

そして想定外の話題は観察や実験から生まれてくる。今後も面白い技術的発見が期待できそうな分野はあり、例えば臨界域だけでなく微小系にも生じる分子ゆらぎの影響などもある。相変化の関わる伝熱では核生成 nucleation の問題なども観察・実験が興味深い。相変化といえば、1960 年代、1970 年代には、プリゴジーンの非平衡熱力学で、核生成理論の議論が熱現象だけでなく遺伝学の突然変異まで飛び火する面白い展開もあった。彼はノーベル賞を受賞した。話は別だが、ずっと後年になってプリゴジーン教授とは日本で夕食の席に同席してお話を伺う機会があった。その時初めて聞いたのは、第 2 次大戦後の日本の科学政策の進め方について、プリゴジーン教授が占領軍側の助言者のひとりとして貢献されていたという話であった。柔軟な発想展開が当時から評価されていたのであろうか。

### 5.3 社会から見えることの重要性

福島の問題では、技術が平常から市民に見えていることの重要性が浮き彫りになった。新しい技術の登場による社会の混乱は過去に多くの例がある。図 11 は蒸気動力の登場による混乱を示す英国の銅版画だが、製造工業や輸送手段の革新は、大都市集中の労働問題や環境汚染の混乱を引き起こした。社会の理解と対応再構築には長い時間を必要とした。昨年、ミュンヘンの科学博物館、DeutscheMuseum に行つてエネルギー系の展示を見た。半世紀前の 1963 年以來、折々の訪問の度ごとにエンジンなどの展示物は縮小され、エネルギーの展示も影が薄くなった。この博物館創設時の貢献者に Linde が加わっていたというのに、冷凍技術や伝熱、熱力学は目立つ展示には現われず、熱機関は航空エンジンなど有っても蒸気機関は昔に比べて大幅に縮小されていた。伝熱は独立展示は無い。エネルギーは核エネルギーと太陽エネルギー、風力があるが、発電機器はエネルギーでなく電気部門であった。すべての問題に熱が関係するのはわかっているのに、熱の展示は印象が薄かった。

一方、それに比べて例えば数学のフラクタルな



図 11 新技術登場直後の混乱(英国の銅版画)

どは、一種の遊びのようであっても、人間の想像力を強く刺激するようで、比較的目立つ展示があった。また、物理学はあるが化学は影が薄い。昔からの鉱業、航空、船舶、天文に並んで、最近の計算機が大きな展示で、若い人が熱心に見ていた。これらの分野はいずれも歴史や原理の説明が上手で興味を誘い、さらに今後の発展への配慮があり、印象的であった。

博物館は教育効果が大きく、次世代の若い人を

惹きつけるのに重要である。直接にも間接的にも伝熱学が見えるようにすることは必要である。日本の博物館は近年の経費削減でますます技術は見えなくなった。伝熱学会も、熱が表面化しやすい新しい技術を紹介したり、熱を媒介にして新次元を示すなど寄与に期待する。

## 6. 学会のサステナビリティ

### 6.1 伝熱学会百年へ向けて

さて学会のサステナビリティであるが、学会の行方を見通すのは難しい。なぜなら学会をとりまく社会が変化するからである。

伝熱学会だけではないが、激動の世界で大学や学会の将来を危ぶむ声は多くある。学会は嵐の中で風前の灯だという人もある。学会が衰退して、学会員が意気消沈するのでは困る。孔子の有名な言葉に人の年齢にふさわしい行いを示す言葉があるが、50 歳については“天命を知る”とある。学会も天命を知るべきなのだろうか。

ジョークながら人の老化度のスケールがある。50 歳については“近頃の若いもんは、といい始めたら老化度 50 歳”とした。これでいうと、学会 50 歳は一般に若い会員に対して不満が出やすい年代で、それは会の老化でもある。

サステナブルな学会は、発足時の大目標と特質は保持しつつ、時代の変化に合った柔軟な展開を行っていくことが必要である。

あるテレビ番組で仏教のお寺の衰退が取り上げられていた、僧侶が登場して寺の危機を語ると、コメンテーターがこんなことを言った。「世論調査では仏教への人々の期待は依然として高いのに、僧侶は自分たちがいかに悩んでいるかばかりを語り、社会の人々が何に悩んでいるか、何を求めているかを語っていない。」まことに耳に痛い言葉で、学会や大学も自問しなくてはならない。伝熱学会も、伝熱研究の危機や研究者の悩みを語るのではなく、社会が何を求めているかを語らなければ、学会としての寿命を終えていくであろう。

### 6.2 3.11 と学会

3.11 以後、残念ながら科学技術不信は高まった。日本経済新聞の短歌の投稿欄に出ていた入選歌にこんなのがあった。「先端と信じおりに水かけて、布で掩うと原始極まる」。私は社会の科学技術不信が極まったと感じる。



図 12 地に落ちた信頼（シドニー美術館）

事件直後の諸学会の対応を見て、社会的役割について考えさせられた。多くの学会が総会、懇親会などを取りやめたり延期したのは残念なことであった。学会の役割には専門家間の情報交流、意見交流の場を作ることがある。それは機動的にタイムリーに行われなくてはならない。あの混乱のさなかでこそ、学会員の意見交換の場を緊急に開かなければいけなかったのではなかろうか。連絡が届きにくいなら集まれる人だけでもよい、停電ならローソク片手でもよい、食べ物無しならビスケット片手でもよかった。その成果は別として、学会の素早い行動が社会に安心感を与えることにも配慮すべきであった。昔、冬のトロントへ行ったとき、雪の夕方、車が駆けまわっているダウンタウンからふと見上げると、トロント大学の 8 階の窓にポッと灯かりがともっていた。街でビジネスに夢中になる人々が見上げれば、少なくともあの灯りの部屋では将来のことを考えている人が居るのだと思うだけで、安心感が出るのではないだろうか。

### 6.3 社会が求めるもの、学会の役割

以前に通産官僚某氏からこう言われた。「大学の先生方は、研究がいかに先端的であるか、どんな素晴らしいことが出来るかをおっしゃる。しかし、社会には経済不況があり、国際紛争があり、貧困化があり、高齢者問題があります。それらに今どう応えるかが重要なのです。国がお金を出すのは“出来ること”でなく“必要なこと”なのです。」

私も社会の専門家不信を心配する一人であるが、専門性をどう具体的課題に実現するかが問題である。精神論や哲学論では足りない。具体的な課題

に専門家の意見や提案を集約し、統一的な見解を示すのは、なんといっても専門学会の役割である。この点に本来の工学系学会の重要な使命がある。

今回伝熱学会の 50 年を振り返る場合にも、専門分野のレビュー講演以外にも、やや広い視点で社会への貢献のレビューもあっても良かったかもしれない。

身近な一例を挙げると、例えば健康である。伝熱研究の成果は住居、空調、冷凍、調理、環境などに貢献した結果、生活環境や食品状況は飛躍的に改善し、世界でも傑出した長寿社会が実現した。また、例えば風邪薬の箱の記載を見ると、成分  $a$  が  $x \text{ mg}$  と書いてある。大きな槽で混ぜて、この小さな 1 錠個々に一定量ずつを含ませるには物質移動、拡散現象の研究が関係している。

### 6.4 研究者個人と学会

ブダペスト宣言を挙げるまでもなく、近年は科学あるいは技術の社会性が強調されるようになった。技術者には特に社会的視点が要求されている。工学系のカリキュラムに、教養や社会基礎科目が置かれ、文理融合が叫ばれる。

それはそれで結構なのだが、私は最近次のように考えるようになってきた。例えば、伝熱学会 50 周年の記念シンポジウムにおける各専門分野の先生方のレビュー講演の講演内容は、学者が長年にわたり渾身の力で世界と競争して達成できたもので、専門を極めるためには、社会性などに目をやる余裕はあるはずがないということである。それではどうすればよいのか。それには社会と専門家とをつなぐ何かの仕組みが必要である。それが学会の役割ではないだろうか。新しいメカニズムが必要である。横断性、国際性を特徴としてきた伝熱学会こそが取り組む必要があるだろう。

それには人が必要で、細分化した専門家のほかに、何でも知っている、なんでもやる人が必要といわれる。レオナルド・ダヴィンチを探すのは難しい。しかし、そういう人を探しておく、あるいは接点をキープしておくのも学会の役割である。1 人では不可能でも、複数の人々の協力体制を組んで、社会から何を問われても何か答えることができる、この可能性は学会にある。

### 7. 結言

現在の社会には問題が多すぎる。しかし、それ

でも将来をポジティブな方向に見ることは大切である。ポジティブには、もしも我々が科学者ならば、我々は真理に近づいている、真理へ向かって努力しているのだと確信することである。我々が技術者、工学者ならば、社会は良い方向へ進歩している、われわれはそのために働いているのだと確信することである。

19 世紀の偉大な歴史家ランケは、王様から「古代からの歴史を見て、人間は進歩していると思うか？」という問いかけにこう答えたという。「人間は進歩致しません。しかし人間の作る組織は進歩致します。」学会は人間の作った組織である。学会という組織には進歩が期待できるのだと思う。



図 13 歴史家ランケ

今の混乱の社会にあって、少しでも前を見て、かなたの空に希望の星を見出だし、それに向かって専門家を結集し、社会の力を盛り上げて推進するのが学会の役割である。伝熱学会も、研究の素晴らしさだけを語るのではなく、社会の期待にどう応えるかを語らなくてはならない。

#### 参考文献

- [1] 本田博司,凝縮熱伝達の 50 年,尾添紘之ら,自然対流伝熱研究 50 年の回顧,成合英樹,原子力発電プラントと伝熱,庄司正弘,沸騰研究の 50 年,中山恒,伝熱機器 50 年の進展,伝熱,51-213(2011) 5-35,および 51-214(2012)21-50. 資料としては,日本伝熱学会半世紀の歩み,伝熱,51(2012)1-15,など.
- [2] 機械工学年鑑,日本機械学会,(1959).
- [3] Byron Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., Transport Phenomena. Wiley (1960).
- [4] Hirshfelder, J.O., Curtiss, C.F., Bird, R.B., Molecular Theory of Gases and Liquids, Wiley,(1954).
- [5] Chapman, S., Cowling, T.G., Mathematical Theory of Non-Uniform Gases, Cambridge U.P., 2<sup>nd</sup> ed., (1951).

## 熱物性研究 50 年のトレンド

### *A General Tendency of Japanese Research on Thermophysical Properties*

荒木 信幸 (静岡理工科大学), 長坂 雄次 (慶應義塾大学)  
*Nobuyuki ARAKI (Shizuoka Institute of Science and Technology)*  
*Yuji NAGASAKA (Keio University)*  
*e-mail: araki@ob.sist.ac.jp*

### 1. プロローグ

大学の管理運営に没頭する毎日で時間が全く取れないことから、熱物性研究 50 年間のレビューを真正面から取り組むことはできなかった。代わりに自分の経験に基づく狭い範囲における 50 年のトレンドをトピックス的にとりあげる。

さらに、最近、マイクロ伝熱に関わる熱物性研究が、脚光を浴びていることに鑑み、これまでのトレンドと将来に向けての展望につながる研究成果のレビューを慶応大の長坂雄次教授に執筆いただくことでご容赦いただければ幸いである。

さらにまた、数多くある熱物性の種類の中で、移動物性、特に熱伝導率に関する研究を中心に話を進めることをお許し願いたい。

### 2. 熱物性研究の黎明期からの流れ

#### 2.1 伝熱シンポジウムの発足当初の状況

まず、日本伝熱研究会の発足当初を熱物性研究の黎明期と勝手に位置づけ、伝熱シンポジウムの第 1 回 (1964 年, 京都), 第 2 回 (1965 年, 東京), 第 3 回 (1966 年, 仙台) で発表された論文を分析する。熱物性に関する論文は、それぞれ、29 編中 2 編, 38 編中 1 編, 51 編中 2 編であり、合計 118 編中 5 編の 4.2%であった。

内容は、いずれも熱伝導率関係で、測定法に関連する提案が 3 編, 測定値の分析が 2 編であった。この中には、ステップ状加熱法[1]や定速昇温法[2]の提案が行われるなど、熱伝導率を迅速に求めたいとする要求への対応が示されていた。また、時間がかかりすぎるとの批判のある定常法を比較法と絶対法の 2 種類の装置を作成しながら多孔質耐火断熱レンガの熱伝導率を 900°C の高温まで測定し、比較検討している研究[3]には、頭の下がる思いである。いつの世においても、まずは、標準的な手法が大切であるとの思いを深くしている。

このような傾向がしばらく続いたが、1970 年代

後半になって、伝熱研究者の中に、熱伝導率のデータの入手が難しいことなどを改善すべきとの意見があって、新たな動きが生まれた。そこに至る過程と背景をたどってみる。

#### 2.2 熱物性シンポジウムの開催とその周辺事情

##### 2.2.1 当時の米国と日本の状況

1970 年代の前半から高度経済成長期が過ぎ、石油ショックによる新エネルギー開発や技術の高度化などへの発想の転換が必要となり、新規材料の開発とその物性、特に、手に入りにくい熱物性データの必要性が増していた。

米国では、一足先にそのような傾向にあって、1950 年代の後半頃から、系統的な熱物性データの測定・収集・評価に関する研究が盛んに行われていた。1957 年に Purdue 大学に設置された TPRC (Thermophysical Properties Research Center) の熱物性値の収集・評価・データ集発行活動は、その典型的な例である。その後、TPRC は、1973 年に、CINDAS (Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis) の 4 部門の一つとして組織替えされた。荒木は、1976 年に半年ほど滞在し、TPRC の活動に参加した。

当時の所長の Y.S. Touloukian 教授は、図 1 のような銅の熱伝導率のデータ[4]を持ち歩き、予算獲得を図っていた。これは、当時、世界中で測定されたデータを集めてプロットしたもので、銅のようなポピュラーな材料であっても測定者によって大きく異なることを示したもので、10 K の極低温付近では、20 から 20,000 W/(m·K) と実に 3 桁もの間にばらついている。そして、推奨値は、数あるデータ群の外側にある。これは、銅の純度を含めた物性論的考察および低温技術の進歩に伴う測定値の傾向から定められたものである。

熱伝導率の測定においては、測定方法の種類によっての系統的な誤差が生じやすく、定常状態の

実現のために非常に長時間を必要とする場合が多く、測定が難しいとの位置づけになっていた。また、試料自体においても、熱伝導以外のふく射や対流による移動が加わりやすい場合が多く、その程度を見積もること、補正を加えることなどが研究の対象になりつつあった。

図2は、長島・長坂[5]によるトルエンの熱伝導率が測定年代と共にどのように変わっているかを整理したもので、年々小さくなっている。その主な理由は、液体の熱伝導率データに関しては発表年代が古いほど、平行平板法や同心円筒法等の定常法の実験技術が未熟で、加熱による対流の影響が大きいためである。言うまでもないが、対流による系統的誤差は、見かけ上の熱伝導率を大きくする。特に測定技術としては、1970年代から登場した非定常細線法の意義は大きく、その後の液体熱伝導率標準データを目指す研究では、ほぼすべてこの方法が用いられた。このように測定結果を種々の観点から評価し、推奨値を選んでプロットしたのが、図3である[6]。TPRCの推奨値(破線：1970年当時)より小さな値となっている。また図中には、現在国際的に認められている推奨値[7]も示してある。このような活動は、熱物性値データの標準化を目指すものであって、いつの時代にあっても極めて重要であり、国家としてあるいは国際的に取り組むべきことである。国際蒸気性質会議がその方向性を示唆してくれている。

### 2.2.2 熱物性研究会の発足とシンポジウムの開催

上述のように、日本は、米国に遅れること約20年、熱物性データの重要性が認識されて、測定さ

れた熱物性データを公表できるシステムを構築しようとして北大の関先生、慶應大の長島先生らが音頭をとっての活動が始まり、1980年に第1回日本熱物性シンポジウムが東京で開催されるに至った。

詳しいいきさつは、熱物性学会創立30周年記念誌、熱物性「研究のベクトルと学会のベクトル」[8]を参照いただくとして、熱物性シンポジウムの開催の趣旨[9]をまとめて示したい。尚、熱物性研究会の設立が先にあったのではなく、シンポジウ

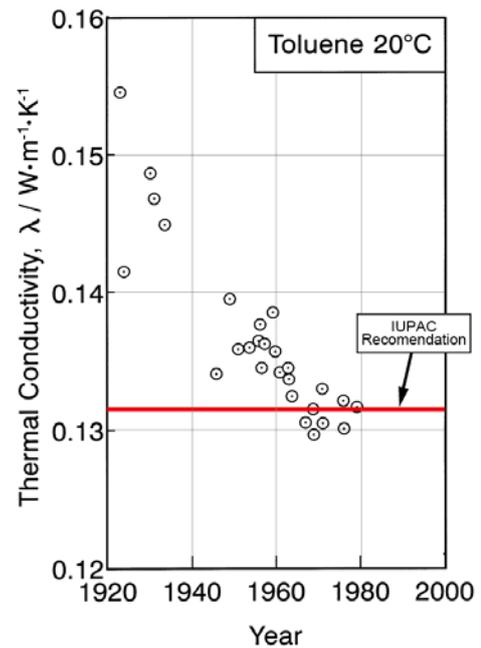


図2 トルエンの熱伝導率の発表年代推移[5]と標準値[7]

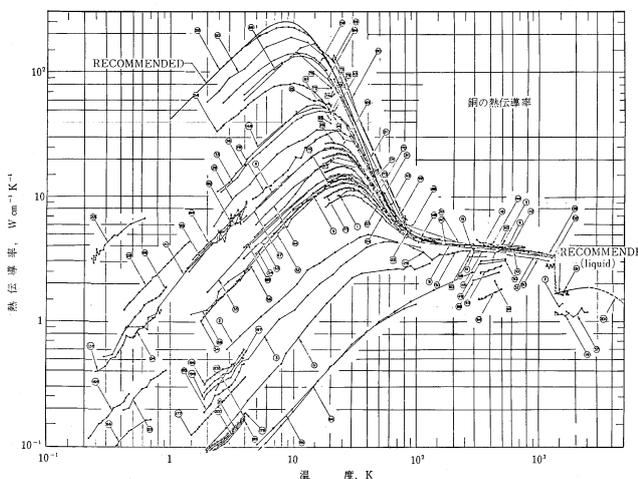


図1 銅の熱伝導率[4]

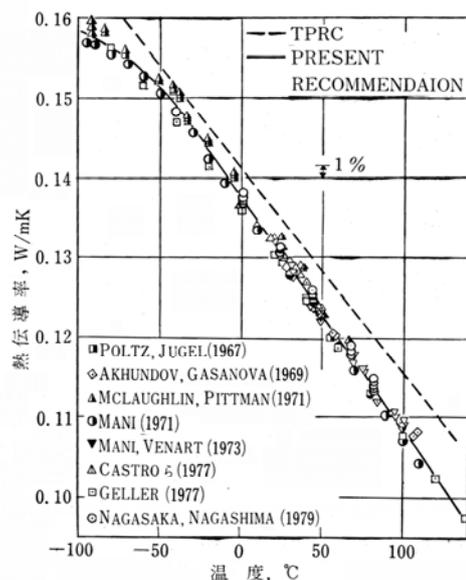


図3 トルエンの熱伝導率[6]

ムの期間中に設立が決められたもので、あくまでも発表の機会提供を目的化したものであった。

- ・データ重視；講演前刷集の論文集化（タイプ印書の義務化、適切な査読の実施、など）。
- ・論文集の国際化；英語論文を奨励、1 ページ目のタイトルやアブストラクトなどを英文で表記、図表の表記・説明の英文化。
- ・組織の国際化；著名な外国人研究者を特別講演者として招待、日米セミナーの開催。

国際化としては、その後さらに、アメリカ熱物性シンポジウムとヨーロッパの熱物性会議 (ECTP) と連携して、熱物性に関する国際組織委員会を創設し、ATPC (Asian Thermophysical Properties Conference) を立ち上げるに至った。

第 1 回熱物性シンポジウムの発表論文数は、42 編で、特別講演は、R. Tye 氏の米国の熱物性研究の紹介と谷下市松先生の国際蒸気性質会議の 50 年の歴史の話であり、当時の日本から世界を見る目をいただいた。セッションには、6 件のレビュー講演が含まれている。その内容は、測定法(9)、断熱材・建築材(5)、液体(5)、固体・高温(6)、多孔質・湿り物質(6)、生体・衣類・食品(5)、一般的問題(4) — カッコ内の数字は件数 — など、身の回りの物質の熱伝導率のデータを取り上げたものが多く、発表者の専門分野も、食品や衣類など伝熱シンポジウムではあまり見かけない分野まで広範囲に分布していた。論文の内容としては、データを重視している傾向が強いものの伝熱シンポジウムの初期の状態と大きくは変わっていない。

### 3. 熱物性研究のトレンドと現況

#### 3.1 伝熱シンポジウムの状況

これらの内容が、48 年後の第 48 回伝熱シンポジウム (2011 年、岡山) でどのように変わってきているのか、そのトレンドを探ってみる。

発表論文数は、375 編、熱物性に関する論文は、24 編の 6.4% であった。総論文も熱物性関連論文数も 48 年前の約 10 倍に増加している。しかし、熱物性の割合は、4.2% から 6.4% と 1.5 倍に増えてはいるが、大きな増加とは言えない。熱物性セッションとして 3 枠 12 件が設けられているが、分子動力学、マイクロ伝熱、優秀プレゼン賞のためのセッションにも熱物性関係の論文が含まれているので数が増えている。分子動力学分野では、熱伝

導率を直接求めるというよりは、フォノンなどの移動特性を求めることに留まっている論文があるので、解釈によってその数は増減する。

論文内容は、従来の加熱法による分類などでは全く対応できないほど複雑で細分化している。しかも、扱う対象が、マイクロ・ナノサイズ化し、時間分解能もピコ秒のオーダーになっている。また、微細化によって現れる物理現象を利用しての熱物性測定に研究分野が拡大している。物性の種類としては、熱伝導率、熱拡散率、平衡物性、溶解度、拡散係数、粘性率、pVT 性質などであるが、熱伝導率、熱拡散率を求める論文が半数の 13 編を占める。

研究対象物として、分散系複合材料などオーソドックスなものもみられるが、ハイドレートや熱電変換材料などの新しいエネルギーに関連するもの、Si 薄膜やカーボンナノチューブなどの新素材の熱物性を探る動きが活発化している。特に、カーボンナノチューブについては、凝集体で扱う場合と単体 (Single walled carbon nanotube, SWNT) の場合があるが、その論文数は 5 編に及んでいる。熱伝導率が 3,000 W/(m·K) にも達するのは本当かとの観点から測定実験あるいは分子動力学の手法を使つての研究が進められている。

#### 3.2 熱物性シンポジウムの状況

上述した伝熱シンポジウムと同じ時期の第 32 回熱物性シンポジウムの内容と比較検討してみる。

熱物性関連の発表論文数は、熱物性シンポジウムが 183 編と圧倒的に多いのは、独立したシンポジウムの故に当然と思われる。その内容の傾向は、伝熱で多くの割合を占めていた、マイクロ・ナノスケール、MEMS 関係の論文が、25 編、分子動力学手法を使ったものが 5 編程度で、全体の 16% と割合としては少ない。一方、日常的な身の回りの熱現象を取り扱った論文の割合が、44 編、24% と発足当初より大幅に多くなってきている。これは、熱物性学会として、生活環境懇話会とか建物外皮の熱物性とシステムデザイン研究分科会など身近な題材を取り上げた分科会を立ち上げて、研究分野の裾野を広げてきたことが効を奏していると感じる[8]。

また、測定しにくく、時間がかかる熱伝導率を素早く、正確に求めようとする方法の研究開発は、

固体に対しては、レーザフラッシュ法や周期的加熱法などの非定常加熱法が汎用的に使われるようになった。特に、レーザフラッシュ法は JIS 規格 [20]として制定されるなど、通常の均一試料に対する比較的高温領域までの標準的な熱拡散率測定法としての位置づけが確立したように思われる。但し、分散系不均質材料や層状試料などに対する扱いは、熱拡散率と熱伝導率との相関関係が十分に整理されたとは言えず、誤った使い方が行われていることが多く、啓蒙活動の必要性を痛感する。

液体に対しては、細線加熱法が、標準的な位置づけにあるが、高温融体や導電性流体に対する測定法の確立が望まれる。

一方、世の中は、マイクロマシンや高集積化電子デバイスなど、ますます微細化の方向にある。伝熱、熱物性の研究者の興味もその方面に集中する傾向にある。この分野の熱物性研究のトレンドについてのまとめを次の章で長坂が担当する。

#### 4. マイクロ・ナノの熱物性研究のトレンド

##### 4.1 マイクロ・ナノ伝熱研究と熱物性研究

マイクロ・ナノスケールの伝熱研究は、国内では 1990 年前後から活発になってきたように思う。特に 1993 年に金沢で第 1 回が開催された、ナノスケール輸送現象に関する日米セミナーの意義は大きく、この分野の日米双方の若手研究者の多くがこのセミナーから育った。その後、本セミナーは 3 年に 1 回、日米で交互に開催され、昨年 12 月には第 7 回が志摩で開催された [10]。マイクロ・ナノスケールのシステムでは、いわゆる「伝熱研究」と「熱物性研究」の境界が従来よりさらに明確でなくなる。その最大の理由は、マイクロ・ナノシステムで発現する特異な機能の多くは、その熱物性値がバルクと大きく異なることに強く依存するからである。例えば、カーボンナノチューブが特異的に大きい熱伝導率を有することが明らかになっているから、その伝熱工学的な様々な応用が検討されているのであり、「マイクロ・ナノサイズの物の性質がシステムの性能を左右する」ということが言える。実際、上記日米セミナーでも、様々なナノ材料の熱伝導率測定や分子シミュレーションに関する研究は、これまでも数多く報告されている。

##### 4.2 マイクロ・ナノ熱物性測定的重要性 [11]

マイクロ・ナノスケールの熱物性測定を一言で表現すれば、「少なくとも一片の長さが  $\text{nm} \sim \mu\text{m}$  サイズの物質の熱物性を測定すること」である。これまでの多くの熱物性測定が  $\text{mm} \sim \text{m}$  サイズのバルクな物質を対象としてきたのに対し、測定対象のサイズを従来の千分の一から百万分の一に小さくすることは、単に小さい材料の性質を明らかにする以上の多面的効果がある。以下にそのメリットをまとめる。

###### (1) マイクロ・ナノサイズ材料の熱物性データ

例えば、単層カーボンナノチューブの熱伝導率がダイヤモンド並みに大きいのは、エネルギーのキャリアであるフォノンの平均自由行程が非常に長いために、フォノンが散乱されずにバリスティックに伝導されているためである。また、多結晶のマイクロ・ナノサイズ材料の場合は、製造法により結晶構造が大きく変化するため、熱伝導率が同じバルク材料の値と大きく（オーダーが）異なる。このような小さい材料の熱物性のサイズ効果依存性や超格子のような人工的周期構造の熱物性を明らかにするためには、マイクロ・ナノスケール熱物性測定法が不可欠である。

###### (2) 高い空間分解能の効果

マイクロ・ナノスケールの熱物性測定が可能になると、数  $\mu\text{m}$  から数  $\text{mm}$  の長さスケールで変化している熱物性の 2 次元分布計測が可能になる。例えば、有機溶媒系の塗布フィルムの品質は、乾燥プロセス中の熱・物質移動に大きく左右される。乾燥中の表面張力の空間分布を明らかにする熱物性測定法が開発されれば、現象解明に役立つはずである。また空間分解能が向上すれば、異方性を持つ材料の熱物性測定も可能になる。

###### (3) 高い時間分解能の効果

システムのサイズが小さくなると、様々な輸送現象の時定数が飛躍的に小さくなる。例えば、 $1\text{mm}$  のサイズで  $1\text{s}$  要する非定常熱伝導現象は、同じ物質を  $1\text{nm}$  まで小さくすれば  $1\text{ps}$  で終了することになる。このことは、熱物性測定の時分解能を飛躍的に向上させることになり、高速に変化している非定常現象における熱物性変化をリアルタイム計測することが可能になる。

###### (4) その場測定

時間・空間分解能を飛躍的に向上させることに

よって、従来は熱物性測定用に加工したサンプルが必要だった系でも、その場測定 (in situ あるいは生体では in vivo) が可能になり「すぐにフィードバックがかけられる生きた熱物性」が利用できる。

**(5) 極限環境での熱物性 (超高温・極低温・超高压など)**

空間分解能が高い測定法を利用すれば、バルク試料であっても必要な試料サイズを小さくすることが可能になる。このことは、試料の温度・圧力を非常に高くしたり低くしたりする場合に大きなメリットになる。例えば、高温用の装置を非常にコンパクトにすることが可能になり、高温実験の安全性向上や様々な系統的誤差要因となる温度分布の影響等を低減することが可能になる。

**(6) 極微量サンプル**

極微量体積での熱物性測定が可能になると、生体試料や高価なサンプル (試作段階で少量しか製造できない場合など) の熱物性測定が可能になる。

**4.3 マイクロ・ナノ熱物性測定の実例**

マイクロ・ナノスケール熱物性測定法の実例は、国内外で最近 10 年間に数多く報告されている。ここでは、そのすべてをレビューする不可能なので、著者の一人 (長坂) の研究室における最近の研究例を、表 1 に示した。いずれの方法もその基本的な測定原理として、近接場光、温度波の干渉、ソーレー効果、レーザー誘起表面波、熱的ゆらぎによる表面波など、マイクロ・ナノ系で顕著になる

物理現象を利用しているため、本質的にマイクロ・ナノスケールの熱物性測定に有利である。最近では、熱物性計測からさらに一步踏み込んで、これらの計測技術を応用して「熱物性センシング」という発想で新たな研究分野を開拓している[17].

**4.4 ナノ・マイクロスケール熱物性ハンドブック**

日本国内のナノ・マイクロ輸送現象の研究レベルは非常に高く、また研究に携わっている若手研究者の国内外の評価も高い。この機をとらえ、当該研究分野の現時点の集大成を目指し、「ナノ・マイクロスケール熱物性ハンドブック」[18]が現在出版準備中である (編集委員長:長坂雄次 (慶應義塾大学), 編集幹事:宮崎康次 (九州工業大学))。本ハンドブックは、従来の「熱物性ハンドブック」[19]の長さスケールという観点の不足を補い、また最新の基盤データニーズに応えるべく、日本熱物性学会創立 30 周年記念事業の一環として企画された。A 基礎編, B 測定・シミュレーション編, C データ編の 3 部で構成され、57 名の共著者による執筆・編集が現在進められている。

**5. エピローグ**

本誌の特集記事「伝熱・熱工学の各分野の研究の将来」に「より速く、より微細に、より論理的に一熱物性研究の将来」[21]と題する記事を寄稿した。今から 16 年前になる。

当時は、ピコ秒で加熱して薄膜の熱拡散率を測定するピコ秒反射法[22]が提案され、原子間力走

表 1 マイクロ・ナノスケール熱物性センシングの例.

	熱物性センシング技術	計測可能な熱物性値	応用対象	空間分解能 (達成目標)	時間分解能 (達成目標)	必要サンプル量 (達成目標)	異方性・分布計測	従来技術と比べた他の優れた特徴
(a)	近接場 (蛍光) 光学熱物性顕微鏡 [12]	熱伝導率 温度伝導率	ナノ材料	~10nm	-	-	3 D	表面形状、温度変化も同時検知可能
(b)	フォトサーマル赤外検知法 [13]	熱伝導率 温度伝導率	多層薄膜	~10nm	-	-	3 D	多層薄膜の物性値を非破壊で検知可能
(c)	ソーレー強制レイリー散乱法 [14]	拡散係数 ソーレー係数	多成分混合液体	~10 μm	~1ms	~1 μL	2 D	拡散係数分布や異方性検知可能
(d)	レーザー誘起表面波法 [15]	粘性率 表面張力	液体 (非ニュートン含む)	~10 μm	~10ms	~10 μL	2 D	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>6</sup> mPa.s の広範囲粘性率に適用可能
(e)	リブロン表面光散乱法 [16]	粘性率 表面張力 (表面粘弾性)	ポリマー溶液	~10 μm	~100ms	~10 μL	2 D	単分子膜による表面粘弾性の測定も可能

査型顕微鏡 (AFM) を熱伝導率測定に応用しようとする試み[23,24]が行われるなど、「より速く」と「より微細に」の究極に達したと感じた。また、分子動力学的手法が、熱物性値の推算に役に立つとの期待感が膨らみ始め、「より論理的に」を加えた。

現時点では、この単純な時間や空間の微小化の追求ではなく、近接場光や熱的ゆらぎによる表面波の利用など、より微細になったことによって現れる物理現象を利用しての熱物性測定に研究分野が拡大していることを実感した。伝熱、熱物性に関する若い世代の研究者に希望を持たせる方向として、歓迎したい。

伝熱研究に掲載した 16 年前の記事の直後に、熱物性誌に「キャッチフレーズ」と言うタイトルの巻頭言[25]を寄稿した。これは、「より速く、より微細に、より論理的に」に加えて、「より確実に」を加えたいとする話である。これは、日常的な工業製品の設計に必要な熱物性値のデータは、ごく普通の状態の物質の物性値であり、それらを正確に知りたいとの要求の方が圧倒的に多い。我々は、この現実を踏まえながら、確度の高いデータを提供する努力を失ってはいけないとの思いが込められている。

最後になるが、本記事の共著者になっていただいた長坂教授には、突然のお願いにもかかわらず、素晴らしい熱物性研究の方向性を提示いただいたことに厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] 小林清志, 熊田俊明, 第 3 回日本伝熱シンポジウム前刷集, (1966) 1-4.
- [2] 小澤丈夫, 金成克彦, *ibid.*, (1966), 9-12.
- [3] 石川平七, 田中甫, 第 1 回日本伝熱シンポジウム前刷集, (1964), 61-63.
- [4] Touloukian, Y. S. et al., *Thermophysical Properties of Matter*, TPRC Data Series, 13vols, Plenum Pub. (1976).
- [5] Nagashima, A., *Appl. Mech. Rev.*, **41-3**, (1988) 113-128.
- [6] 長坂雄次, 長島昭, 第 1 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1980) 67-70.
- [7] Ramires, M. L. V., Nieto de Castro, C. A., Perkins, R. A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M. J. and Wakeham, W. A., *J. Chem. Ref. Data*, **29-2**, (2000) 133-139.
- [8] 創立 30 周年記念企画実行委員会編, 熱物性, 熱物性学会創立 30 周年記念誌 (研究のベクトルと学会のベクトル), (2010).
- [9] 関信弘, 第 1 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1980), 巻頭言.
- [10] 7th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena –Science and Engineering–, December, 11-14, (2011), Shima, Japan.
- [11] 長坂雄次, 機械の研究, **59-10**, (2007) 1011-1018.
- [12] Fujii, T., Taguchi, Y., Saiki, T. and Nagasaka, Y., *Sensors*, **11-9**, (2011) 8358-8369.
- [13] Sato, T., Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., *Proc. 19th European Conference on Thermophysical Properties*, (2011) 83.
- [14] Niwa, M., Ohta, Y. and Nagasaka, Y., *J. Chem. Eng. Data*, **54**, (2009) 2708-2714.
- [15] Muramoto, Y. and Nagasaka, Y., *J. Biorheology*, **25-1**, (2011) 43-51.
- [16] Nishimura, Y., Miyamoto, T., Miyake, R., and Nagasaka, Y., *Proc. 9th Asian Thermophysical Properties Conference*, (2010), No.109117.
- [17] 田口良広, 長坂雄次, 日本機械学会誌, **111-1071**, (2008) 2-5.
- [18] 日本熱物性学会編, ナノ・マイクロスケール熱物性ハンドブック, 養賢堂 (2012 年出版予定).
- [19] 日本熱物性学会編, 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂 (2008).
- [20] 日本規格協会, JIS 規格書; JIS H7801, (規格案作成, 荒木ら), (2005).
- [21] 荒木信幸, 伝熱研究, **35-137**, (1996) 25-26.
- [22] Baba, T., Takeuchi, N., Ono, A., 第 16 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1995) 365-368.
- [23] Dinwiddie, R., *Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Conf. Thermal Conductivity*, (1994) 668.
- [24] 中別府修, 土方邦夫, Chandrachud, M., Lai, J., Majumdar, A., 日本機械学会論文集 B, **62-593**, (1996) 284-290.
- [25] 荒木信幸, 熱物性, **10-2,3**, (1996) 47.

## ふく射研究と伝熱

－ 日本伝熱シンポジウム 50 年 －

*Heat Transfer in Radiation Studies*

－ National Heat Transfer Symposium of Japan in the Past Fifty Years －

越後 亮三 (東京工業大学名誉教授)

*Ryozo ECHIGO (Professor Emeritus Tokyo Institute of Technology)*

*e-mail: rechigo@q08.itscom.net*

### 1. はじめに

本学会創立 50 年を迎えての記念事業の一環として開催された伝熱セミナーでの講演と本稿執筆の機会を得たことに謝意を表したい。しかしながら与えられた課題「ふく射伝熱研究の 50 年」は研究の一線から離れて久しい筆者にとっては荷が勝ちすぎ、50 年に及ぶ学術的な *critical review* など至難である。そこで日本伝熱シンポジウムを中心に筆者が接してきた我が国のふく射「伝熱」研究と研究者の話題を綴って、責めのごく一端を果たすことをご容赦頂きたい。学会（研究会）設立時に大学院生であったわれわれの世代は本学会における学会活動を他の学会よりも大切にし、毎年開催されるシンポジウムをバイオリズムとしてきたひとが多い。興味深い議論による啓発等国内外でも稀な優れた知的集団であることに対する魅力が底流にあると思われる。

### 2. 学術としてのふく射の生いたち

もともとふく射研究は天文学で生まれ発展した学問である。星の観察、星雲の構造解明のために電磁波の広い範囲にわたる射出・吸収・散乱等のふく射の基本物理と輸送理論の主に 2 つの分野で展開されてきた。当該分野の発展と併行して中性子物理（原子炉内拡散）、プラズマ物理等の分野に



図 1 典型的な渦巻き星雲

も広く応用され、前者では解析法として開発された *Lethargy* (多群化法)、炉の臨界条件を規定する *Buckling* 等の新しい概念形成、後者でも中間・遠距離作用力 (*Coulomb* 力) を考慮した *Fokker-Planck* の式の導入などの相乗効果もあって著しい進歩をとげた。これに対しふく射「伝熱」研究はその学術成果を本家本元のふく射研究にフィードバックしてきたか、あるいは今後その可能性があるのか大変興味深い。

### 3. 伝熱学におけるふく射研究

いままであまり指摘されたことはないが伝熱学にはその基礎をなす定理、法則がきわめて少なく、代わって～法、～現象、～の関係、～の式等と呼ばれるものが多い。そのなかでふく射分野では定理、法則が伝熱の他の専門分野（伝導、対流、相変化、物質伝達等）に較べてみると比較的多いことがわかる。ふく射以外の分野では伝熱学で得られた成果が学術の構築・体系化を進めていく中心になっているのであるが、ふく射伝熱の分野では物理学からの「借り物」を基礎として研究活動が行われ、成果がふく射の学術体系に組込まれるレベルのものはほとんどなかった。最近惑星科学に興味をもち限られた領域ではあるが解析研究をとおして見る筆者の経験では、マントル対流始め熱的な多くの課題に  $Nu \sim Ra$  関係式等伝熱学の手法・成果が逆に利用されているが、いまなお継続して続けられているふく射研究の最新の成果が伝熱におけるふく射研究に反映されていない現実をみて慨嘆せざるを得ない。境界領域の学術が日進月歩で展開される一方で伝統的な学術領域内で創出された新しい成果の領域間の移転が円滑に行われていない現実をどのように考えるべきであろうか。後に具体例を挙げて説明するが、ふく射「伝熱」研究の活性化と発信力を高める努力が求められる所以がここにある。

#### 4. 日本におけるふく射伝熱研究

伝熱シンポジウムにおける発表件数は初回（1964 京都）の 30 件から第 37 回（2000 神戸）の 500 件まではほぼ右肩上がりに増え、その後横ばい状態であるのに対し、ふく射関連では図 2 にみるとおり第 10 回までは少ないがそれ以降は平均件数をはさんで不規則に変化し、伝熱全般にみられるような活性化は起きていない。表 1 には第 10 回までのふく射セッションの座長と発表件数を示す。この頃のふく射伝熱は宇宙工学、機器設備の高温化をうけて大いに期待されたこともあって、前半の座長には学会立ち上げの中核を担った方々が務められ、後半に伝熱学会第 2 世代へ引継がれた様子が窺える。残念ながら第 1 世代の先生方が主宰される研究室ではその後ふく射研究を中心に据えた研究活動が行われた形跡はなく、第 2 世代でふく射研究のいわゆるプロフェッショナルが登場するも伝熱研究を支える屋台骨の形成には至らなかった。国際的にもほぼ同様で、IJHMT とほぼ同年（1961 年）に創刊されたふく射研究学際的専門誌 JQSRT (Journal of Quantitative Spectroscopy and



図 2 ふく射セッションにおける発表件数  
(総数:447,年平均:9.3)

表 1 シンポジウム初期におけるふく射セッションにおける座長と発表件数

回数	開催地	座長(所属)	件数
第 1 回	京都	国井大蔵 (東大)	4
第 2 回	東京	甲藤好郎 (東大)	4
第 3 回	仙台	大塚芳郎 (東北大)	4
第 4 回	名古屋	佐藤 俊 (京大)	3
第 5 回	福岡	小林清志 (東北大)	4
第 6 回	札幌	森 康夫 (東工大)	4
		小茂鳥茂 (慶大)	3
第 7 回	東京	谷口 博 (北大)	4
第 8 回	大阪	武山武郎 (東北大)	3
		越後亮三 (九大)	4
第 9 回	広島	長谷川修 (九大)	3
		谷口博 (北大)	4
第 10 回	仙台	越後亮三 (九大)	2
		国友 孟 (京大)	3

Radiative Transfer) に掲載されている論文の多くは惑星、気象、プラズマ科学あるいは輸送方程式の解法等であり、伝熱由来のものは殆ど見当たらない。最近のふく射研究の動向分析については最後に述べる。

#### 5. ふく射伝熱セッションの全体像

図 3 には過去 48 回の伝熱シンポジウムで発表された講演をふく射の細項目（伝熱工学資料改訂 4 版による）に従って整理した結果を示す。初期の頃は燃焼等を含めて 1 セッションがやっと成立するくらいの時期から経年とともに増加はしたものの通年平均としては約 9 件強、セッション数で 2 ～ 3、その間かなりの変化はあるものの高度経済成長などの波に乗ることもなく、総じて云えば低調であったことは否めない。細項目をみても物性（3,8）と対流共存系伝熱（4,5）を合わせたものが殆どを占め、ニーズ主体の研究が多い。本会とほぼ同時期に設立された太陽エネルギー学会の影響もあった。また研究機関別の講演発表件数と所属者が務めた座長の回数を表 2 にまとめた。敢えてコメントを述べるとすれば単科大学でも多数の発表がある一方でいわゆる中核となる大学でも同程度ないしそれ以下で、関係者にはそれぞれ我が国におけるふく射「伝熱」研究の置かれている立場等感慨深いものもあると思われる。

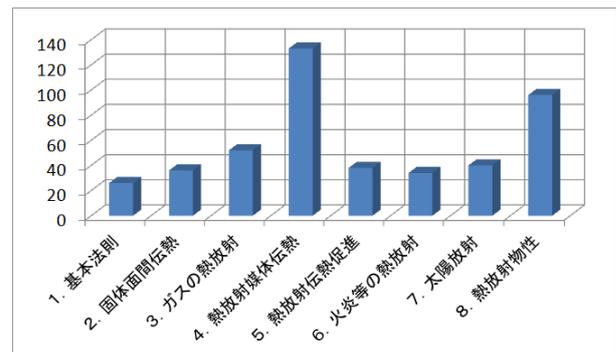


図 3 細項目発表件数（1～48 回シンポジウム）

表 2 機関別講演数と座長回数

講演数		講演数		座長回数	
京大	61	大分大	15	京大	25
東工大	61	阪大	14	東工大	16
北大	39	山梨大	6	東北大	16
東北大	36	東大	5	北大	14
北見工大	31	芝浦工大	3	九大	10
九大	29	横浜国大	3	北見工大	9
名大	21	長崎大	3	名大	5

### 6. ふく射伝熱研究に携わった人々

ふく射伝熱セッションに出席する人々は限られた顔触れで少人数ながら酷しい討論と緊張感があり、あまり家族的な雰囲気ではなかった。ここで本セッションにおける講演件数も比較的多く（概ね 10 件程度以上）、活躍された研究者の世代別構成を表 3 に示す。北海道はふく射研究の活発な地域でユニークなのは北見工大からの発表はすべて金山公夫、馬場弘両氏の連名で 31 件にのぼり、定年退職後も両氏の地道な共同研究活動は続いている。固体面、塗装面のふく射特性、さらに太陽エネルギー利用での発表が多い。北大では谷口博氏、工藤一彦氏は多くの課題の中でも火炉内伝熱で実績を上げ、また充填層内ふく射伝熱、解析方法に関する研究にも成果を残している。早坂洋史氏は伝熱方程式の解法に関する研究発表が多い。東北地方で東北大学において増田英俊氏が角関係を考慮したふく射交換、円山重直氏が中心になって微粒子系、プラズマ、その他多くの課題にふく射研究の展開を続けている。関東地方では伝熱研究に関連する大学が最も多いなかであってふく射研究に特化する研究室は限られている。特に東大では国井大蔵氏のあとふく射研究はほぼ途絶え、全国の大学、研究機関に巣立って行った若い研究者のなかにもふく射の専門家が排出していない。東工大では森康夫氏門下の黒崎晏夫氏が院生時代から一貫してふく射研究に携わり、伝導・対流との共存の複合伝熱系に多くの成果を残し、同門の山田幸生氏は高温熱交換器内伝熱促進法への応用、その後輸送系解法の研究も行なっている。黒崎門下の山田純氏は山梨大、芝浦工大と転じたが当初繊維集合体に関するふく射特性から最近は皮膚の光学特性等バイオ関連に進展するユニークな研究で注目されている。筆者（越後亮三）は燃焼系のふく射現象を皮切りに複合伝熱系、燃焼促進法、省エネルギー技術への応用にも結果を出した。花村克悟氏は石英多孔体内燃焼・伝熱系の研究に加えて最近近接場光 (evanescent wave) 関連の基礎・応用研究を進めている。中部地区にあっては名大の化学工学系で長期間ふく射研究が引継がれてきた。中心は架谷昌信氏、板谷義紀氏等が展開してきた半透過性液体、粒子群等化学工業の基礎を支える課題に成果を挙げた。関西地区では京大において第 0, 1 世代の菅原晋雄氏、佐藤俊氏の伝統を

引継ぎ多くの成果が開花した。国友孟氏は輝炎ふく射で学位を取得し、その後は主として気体ふく射のスペクトル構造、固体面、酸化皮膜、塗装面等の表面ふく射特性で多くの成果を収め、ふく射分野初の日本機械学会論文賞を授与されたが、1986 年に病を得て夭逝された。研究活動は牧野俊郎氏に引継がれ、若林英信氏等とともに 2 度の同論文賞を得るなどふく射「伝熱」研究の中核となっている。阪大での伝統的な燃焼研究に関連して岡本達幸氏が気体吸収バンド構造と伝熱の研究を行なってきたが京工織大に転じた。九州地区では九大から筆者と上宇都幸一氏が転出した後ふく射研究は途絶え、大分大では上宇都氏が主として輸送系を中心に広範囲の課題に対し多くの成果をあげたことは特筆に値するものの、2008 年に病に倒れ現職教授のまま不帰の客となられた。表 4 に日本機械学会論文賞が授与されたふく射関連研究の一覧を示すが、他分野に較べて少なく、委細は省くが審査方法に些か疑問がある。

表 3 機関別研究者の構成 (敬称略)

	第1世代	第2世代	第3世代
北見工大		金山公夫 …	馬場 弘
北大	斎藤 武 …	谷口 博 …	工藤一彦 早坂洋史
東北大	増田英俊		
東大	国井大蔵		
東工大	森 康夫 …	黒崎晏夫 … 山田幸生	山田 純
名大	杉山幸男 …	越後亮三 …	花村克悟
京大	佐藤俊 …	架谷昌信 …	板谷義記
阪大		国友 孟 …	牧野俊郎
九大	長谷川修 …	(越後亮三) …	岡本達幸
大分大			(上宇都幸一) 上宇都幸一

表 4 日本機械学会論文賞授与一覧

	日本機械学会論文賞	
1982	アルミニウムおよびアルミニウム合金の室温以下における熱ふく射性質の研究	国友孟、辻本聡一郎、 神田誠
1984	ガスエンタルピーとふくエネルギー間の効果的変換方法と工業炉への応用	越後亮三
1988	金属実在面の熱ふく射性質の研究	牧野俊郎、丹羽哲也、 河西智彦
1996	赤外ふく射支援による精密射出成形法に関する研究	黒崎 晏夫、佐藤 勲 齊藤 卓志
2004	実在表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法	牧野俊郎、若林英信
2006	フォトサーマル赤外検知法による高温傾斜機能材料の熱物性値測定に関する研究	佐野彰彦、長坂雄次
2009	空間分解反射光計測に基づく皮膚のふく射物性の推定	山田純、有田悠一、安 炳 弘、三浦由将、高田定樹

## 7. 新しい学理の創出と学際障壁

ふく射研究が学際的发展を遂げていく上で各学術分野間の成果の継承・移転がどのように行われてきたか、3 の事例を通じて考えてみる。

### 7.1 Beer の法則？ それとも Bouguer の法則？

ふく射光強度  $I$  の減衰に関する式

$$I = I_0 \exp(-\kappa s) \quad \kappa: \text{吸収係数}, s: \text{長さ}$$

は Beer (1825-1863) の法則あるいは Beer - Lambert (1728-1777) の法則として専門書に掲載されるが、稀に Bouguer 名が末尾に連記されることがある。“Glossary of Meteorology (AMS 1959, 1994)”によれば実際には下記 注) のとおり Pierre Bouguer (1698- 1758) が Beer 生誕の 100 年も前の 1729 年にエッセイのなかで明らかにし、歴史的には Bouguer の法則とすることが正しく、Beer は有限厚さの溶液に応用したに過ぎないとしている。これは学問の形成・評価・伝承がどのように行われてきたかを示す重要な問題を含んでおり、今日においては学術研究成果が専門領域を超えてどのように移転されるかという課題に繋がっている。

### 7.2 Stefan-Boltzmann の法則の場合

Stefan-Boltzmann の法則はどのように構成されたのであろうか。Stefan と Boltzmann は師弟関係にあり、Stefan が実験結果から絶対温度の 4 乗の関係式を導いたのに対し Boltzmann は光子のふく射圧力と内部エネルギーの関係式を用い、熱力学的考察から理論的に導いたもので、法則の呼称にふさわしい。後年、Wien, Planck 等によって統計力学的手法によって求められた黒体ふく射波長分布の公式からも Stefan-Boltzmann の法則は一層厳密に理論的に求めることができるようになった。

注) First stated by Pierre Bouguer in his Essay on the Gradation of Light (1729), Bouguer also recognized that this law is independent of the attenuation mechanism. Although exponential attenuation with distance is attributed to Bouguer, Lambert, or Beer, the historically correct term is Bouguer's law, which is also valid for turbid media to the extent that multiple scattering is negligible. By a slight distortion of history we might say that Beer's law is an extension of Bouguer's law to solutions of fixed thickness but variable concentration of the absorbing solute.

### 7.3 「衝効果」・・・乏しい成果の移転

衝効果 (opposition effect, opposition surge, opposition spike または Seelinger effect) という用語はふく射「伝熱」研究者にはほとんど馴染がなく、欧米で出版されている専門書中にも記述がない。伝熱関係者に広く読まれているふく射の優れた専門書[1]をみると満月について興味深い記述がある。満月と木星の写真を比較 (図 4) して示すが、満月時には月・地球・太陽がほぼ一直線に並び (図 5 上部)、月周辺部に陰りがなく平面鏡のような均等な明るさである (equal bright without darkening edge) ためには、反射の物理法則に反する奇妙な現象 (図 5 下部) として取り上げている。



図 4 満月と木星の写真 (反射光) の比較

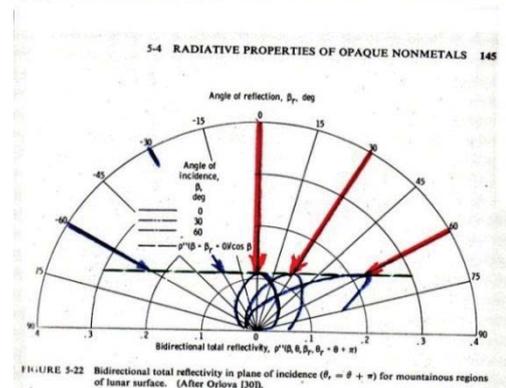
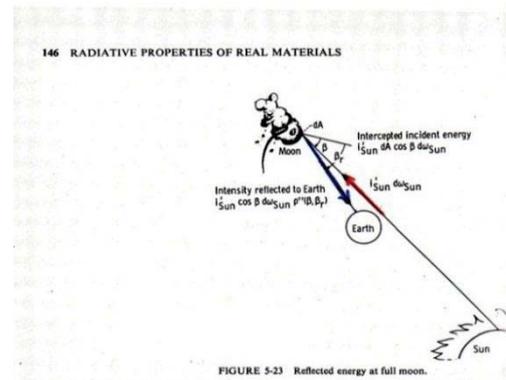


図 5 満月時の地球・太陽の位置とふく射反射則 (2 方向鏡面及び乱射成分)

すなわち反射の一般的な現象は入射角に対する鏡面反射成分と入射角によらない乱反射成分から構成され、図中に示されているように均等な反射光が再現されるためには月面周辺部に入射する太陽光はそのまま太陽（地球）方向に反射されることが必要で、反射の物理に反するとしている。本書にはこの課題に関する研究結果の引用文献も掲載されていて、それらの論文では周辺部にある山岳等の粗い地形[2,3]が原因であるとしている。しかし解析結果は現象を正しく説明するに至っていない。

一方 Wikipedia で調べてみると惑星科学会関連では 1950 年代以降かなり多くの研究成果が公表され、1980 年代になって月面 (regolith) の指向反射率を表現するために Hapke パラメータと呼ばれる準経験モデルによって説明することに成功し、現在でも人工衛星による惑星、天体の観測などの研究が続いている。なお、H. von Seelinger は 1887 年に土星観測において先駆的な研究成果を公表している。衝効果の研究成果および基礎をなす手法がふく射伝熱に取入れられていれば現在のふく射「伝熱」研究の側面に影響があったものと考えられ、専門領域間の学術移転の難しさを示している。

#### 7.4 ふく射研究の宝庫 JQSRT

今回のセミナーと本稿をまとめるために文献調査に携わってみて伝熱におけるふく射研究の現状にやや危機感をもつに至った。ふく射研究最前線の動向を探るために前述の JQSRT の最新の論文 116 編 (July-Dec. 2011) [4], と 40 編 (Jan-March. 2012) [5] の表題, アブストラクトを調査した。本誌の Impact Factor は 2.006 (IJHMT:2.422, J. H.T., ASME: 0.94) でかなり高い評価を得ている。筆者も過去に論文投稿をしたこともあり、また故上宇都幸一氏は本誌の Editorial Board のメンバーを務めた。掲載されている論文はスペクトルの微細構造から大気、天体の現象解明、物体の帰属・特定、プラズマをはじめ輸送系の解析方法の提案も非常に多岐にわたり、また波長範囲でみると真空紫外線 (VUV) からミリ波に至るまでの広範に及ぶ。この間日本からの掲載論文は国立天文台の「彗星の観察」[6], 東北大の「氷の光学定数」[7], 東工大の「HO<sub>2</sub> 基のサブミリ波構造」[8], 京大の「核融合プラズマ関連スペクトル測定」[9] の 4 件と非常に少ない。伝熱分野からの掲載論文はない。

#### 8. あとがき

伝熱学よりずっと以前から発達してきたふく射学を基礎にすえたふく射伝熱学は境界領域との連携がとられた形跡は見当たらない。さらにふく射関連分野の研究は国際的には順調に発展し、次の世代に継承されているが日本国内を見渡しても極めて低調であり、このままでは後継者の育成が覚束ないばかりか、我が国からふく射研究が消滅する危険性を予感させる。ただ本会でも活性化著しいマイクロ・ナノスケール伝熱の中にある先進的なふく射研究に対して一条の光明をみる思いがする。本稿を締めくくるにあたり、本学会のふく射研究者が国際的に積極的な学術交流の接点を持ち、国内あるいはアジア地区を含め本学会の先達が行なったように新企画の横断的なシンポジウムの開催を進めることが求められる。

#### 参考文献

- [1] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer* (McGraw-Hill 1972)
- [2] Saari, J.M. and Shorthill, R.W., Review of Lunar Infrared Observations, in S. F. Singer (ed.) "Physics of the Moon" vol.13, AAS Sci. Tech Seris, 1967
- [3] Harrison, J.K. Non-Diffuse Infrared Emission from the Lunar Surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.12, pp.689-697, 1969
- [4] *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* Vol.112 (July-Dec. 2011)
- [5] *ibid* Vol.113 (Jan.-March 2012)
- [6] Zubko E., Furusho R., et.al. Interpretation of Photo-Polarimetric observation of comet 17P/Holmes, *ibid* Vol.112 Issue 11 pages1848-1863 (July 2011)
- [7] Iwabuchi, H. and Yang, P, Temperature dependence of ice optical constant, *ibid* Vol.112 Issue 15 pages2520-2525 (Oct. 2011)
- [8] Mizoguchi, A., Yagi A., Kondo K., Sato T.O. and Kanamori H., Submillimeter-wave measurements of N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> pressure broadening for HO<sub>2</sub> radical generated by Hg-photosensitized reaction, *ibid* Vol.113 Issue 4 pages279-285 (March. 2012)
- [9] Shikama, T., Naka, N and Hasuo, M., Observation of the A<sup>2</sup>Δ-X<sup>2</sup>Π transition spectra of CD molecules under a magnetic field relevant to fusion, *ibid* Vol.113 Issue 4 pages294-298 (March. 2012)

## 我が国における微小重力伝熱研究の 50 年

*Research on Heat Transfer under a Microgravity in These Fifty Years*

河村 洋 (諏訪東京理科大学)

*Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science, Suwa)*

### 1. はじめに

日本伝熱学会が日本伝熱研究会として発足したのは 50 年前の 1961 年であるが、この年は、宇宙開発においても、記念すべき年であった。それは、当時のソビエト連邦の宇宙飛行士ガガーリンが、はじめて宇宙に出て地球の周りを周回したからである (図 1 左)。飛行時間は 108 分であった。アメリカにとっては、すでに最初の人工衛星 (1957 年のスプートニク 1 号) においてもソ連に先行されていたので、これは非常に大きな衝撃であった。そのため、当時の大統領ケネディは、1961 年の 5 月に米国議会で、1960 年代のうちに人類を月に送る、という有名な演説を行った (図 1 右)。ケネディ自身は、その 2 年半後の 1963 年に凶弾に倒れたが、月へ人を送るという目標は、1969 年にアポロ 11 号によって実現された。なお、ケネディが倒れたニュースは、ちょうど日米間の人工衛星を使った実験の最初のニュースとして我が国に伝えられたことも良く知られているが、このことは、当時すでに宇宙技術が人々の生活の中にも浸透し始めていたことを示している。現在では、GPS による位置測定など、人工衛星等の宇宙技術は、我々の

生活に欠かせないものとなっている。

他方、ソ連邦も月へ人を送ろうとしたが、月へ到達出来るロケットの開発に失敗したことなどでその目標は断念し、目標を宇宙基地と宇宙における有人活動に切り替えた。1971 年には、人が長期に滞在出来る最初の宇宙ステーション、サリユート 1 号を打ち上げた。サリユート 1 号には、3 人のソ連人宇宙飛行士が 22 日間滞在したが、帰還途中のカプセルの空気漏れのために、着地時には死亡していたという事故があった。その後、ソ連邦の宇宙ステーション計画は進行し、ミールと呼ばれる世代に移行した。ミールのコア部分は 1986 年に打ち上げられ、次第にモジュールが拡張されて、そこで得られた多くの経験と技術は、現在の国際宇宙ステーションにも受け継がれている。

アメリカも、アポロ計画が 1972 年に終了した後は、地球周辺での宇宙技術開発や有人活動に力点を移していった。スペースシャトルは、宇宙と地球を往復出来る新しいタイプの宇宙船で、最初の飛行は、1981 年のコロンビア号であった (図 2)。



図 1 左：最初に宇宙を飛んだ人となったガガーリン。右：米国議会で 1960 年代中に人を月へ送ると演説するケネディ。(©NASA)



図 2 最初のスペースシャトル、コロンビア号の打ち上げ (1981 年)。初期においては、太陽光熱による温度上昇を抑えるため燃料タンクが白いのが特徴。(©NASA)

## 2. 我が国の微小重力伝熱実験の黎明期

我が国における微小重力伝熱実験の始まりは、熱科学一般にまで範囲を広げると、東京大学の熊谷清一郎先生による液滴の燃焼実験であろう[1]. 最初は実験室内で木製のチョーク箱を燃焼容器にして、それをシュリーレンや光学カメラの光軸を通して落下させたとのことである. 国産ロケット H-II 開発の中心であった五代富文氏[2]によると、その後 1956 年頃には、七輪（こんろ）を燃焼容器にして、当時としては大変高級な高速連写の出来るニコンをくくりつけて落下させ、七輪の空気取り入れ口から内部を撮影していたそうである（図 3）. その後 1970 年頃には、内部にシュリーレン撮影系を備えた立派な落下装置が開発されている[1].

実験は液滴燃焼で、現象の時定数が小さいので短時間の微小重力実験に適しており、当時、国際的にも最先端の研究であったし、現在においても重要な研究課題である. 一連の研究の中で、液滴の表面に発生する温度差による表面張力差に起因するマランゴニ効果についても、検討が行われている（磯田[3]）. マランゴニ効果については、後に説明する.



図 3 初期の微小重力燃焼実験（五代富文氏[2]による）.

微小重力における我が国最初の伝熱研究としては、筆者の知る限りでは、小竹進先生（本学会第 30 期会長）が行われた沸騰実験[4]ではないかと思う. 筆者が微小重力実験を始めた頃、小竹先生から直接に、ご自分も落下実験をやったことがあるとのお話をうかがった記憶がある. 沸騰気泡は、浮力で伝熱面から離脱すると考えられがちであるが、下向きの伝熱面では、気泡は下向きに射出もされる. したがって、重力の減少した環境下での沸騰を観察することは、沸騰のメカニズムの研究にとって非常に重要であり、現在に至るまで、微小重力伝熱研究の最も重要な課題の一つである.

## 3. 宇宙開発の進展と日本伝熱シンポジウムにみる微小重力伝熱及び熱関連研究

この度本学会の 50 周年記念事業として、日本伝熱シンポジウム講演論文集の CD 化が実現した. そこで本稿では、これを活用して、日本伝熱シンポジウムに見る我が国の微小重力環境における伝熱および関連研究の進展をまとめて見た. したがって、文献を網羅した完全なサーベイというよりは、日本伝熱学会から見たこの分野の研究動向となっていることをご理解頂きたい.

### 3.1 微小重力伝熱研究と我が国の有人宇宙活動の立ち上がり

日本伝熱シンポジウムにおけるこの分野の研究発表と宇宙開発の動向を、表 1(a,b,c,d)に示す. 日本伝熱シンポジウムにおけるこの分野の最初の発表は、第 17 回に松本、斉藤ら[5]によって、表面張力駆動対流と題して行われた. 研究の動機は、液表面の火炎伝播であった[6]. その翌年（1981 年）にはスペースシャトルの打ち上げが開始されて、微小重力を利用した研究に関する関心が高まった. 国際的にも、当時急速に発展していた半導体製造におけるマランゴニ対流の影響の重要性が

表 1(a) 日本伝熱シンポジウムにみる微小重力熱・伝熱研究発表及び関連事項（1961-1983）

年	伝熱回数	講演 (関連誌を含む)	関連事項
1961	—	日本伝熱研究会発足	ガガーリンの宇宙飛行
1964	1	日本伝熱シンポジウム開始	
1969	6	微小重力沸騰実験 (小竹, 機論[4])	アポロ 11 号月面着陸
1970	7		日本初の人工衛星おおすみ
1971	8	表面張力駆動効果(磯田, 機械の研究[3])	宇宙ステーション・サリュート 1 号
1980	17	表面張力駆動流(松本[5],[6])	小型ロケット(TT-500A)による微小重力実験(材料系)
1981	18		スペースシャトル打ち上げ開始(STS-1)
1982	19	表面張力共存対流(前川[7])	
1983	20	マランゴニ共存対流	

認識され始めていた。それを反映して、第 19,20 回には、前川、棚沢[7]によって、結晶成長を動機とする研究発表が始まり、この頃から次第に“マランゴニ効果”という言葉が用いられ始めた。

1985 年以降は、微小重力やマランゴニ対流関連の研究発表が継続して行われるようになり、その研究対象も、液層や結晶成長に関する基礎的なテーマから、沸騰や微小重力を利用した物性値測定などに広がっていった。阿部ら[8]は、フランスでの航空機による弾道飛行を利用した微小重力実験を行い、気泡の合体や合体気泡底部の液膜等の観察を行っている。

1985 年には、初代の日本人宇宙飛行士候補として、毛利衛氏、向井千秋氏、土井隆雄氏が選任され、日本人の宇宙への進出と微小重力実験への期待が高まった。しかし翌年(1986 年)にはスペー

スシャトル・チャレンジャー号が発射直後に爆発するという大事故が発生し、対策のためにスペースシャトルの運行がほぼ 3 年間停止するという停滞があった。他方、ソ連邦では、より本格的な宇宙ステーションであるミールの建設がこの頃(1986 年)から開始され、その後の国際宇宙ステーションへと繋がって行った。

1991 年にソ連邦が崩壊すると、その経済事情から一時はミールの運用も危ぶまれたが、米国にも経済事情があり、かつロシアに蓄積された有人宇宙技術を拡散させずに有効に取り込む意味もあって、両大国は宇宙において協調の時代に入った。1992 年には米ロ間で宇宙における協力協定が結ばれて、現在の国際宇宙ステーションの建設と運用への途が開かれた。しかし、そのために宇宙ステーションの設計は大きな変更を余儀なくされ、その建設計画は大幅に遅れ、我が国の微小重力実験の実施にも大きな影響があった。

1992 年には、毛利衛宇宙飛行士が、日本人として始めてスペースシャトルに搭乗し、FMPT(First Material Processing Tests)と呼ばれる一連の微小重力実験を行った。内容は、材料生成が中心であったが、微小重力下におけるマランゴニ対流や気泡除去等の流体関連実験も行われた。これらの実験のほかに、毛利氏は微小重力環境での体操や、大きな液滴を作って浮遊させる(図 4)などのデモンストレーションを行って見せたので、多くの人々にも、宇宙における無重力状態が身近なものになった。

表 1(b) 日本伝熱シンポジウムにみる微小重力熱・伝熱研究発表及び関連事項 (1985-1992)  
(注: SN;セッション, マ対流: マランゴニ対流, ( )内の数字は, 発表件数)

年	回数	講演	関連事項
1985	22	液層マ対流(1), 結晶成長マ対流(1)	初代日本人宇宙飛行士候補(毛利氏ら 3 人)
1986	23	液層マ対流(2), 結晶成長マ対流(1)	ミール建設開始, チャレンジャー号事故
1987	24	回転系(1)	
1988	25	結晶成長(2), 沸騰二相流(2) 宇宙熱技術(9): SN	スペースシャトル運用再開
1989	26	回転系(1), 液層マ対流(1)	
1990	27	沸騰二相流(1), 液層マ対流(1), 物性測定(1) 宇宙技術(5): SN	
1991	28	沸騰二相流(1), 液層マ対流(1)	ソ連邦の崩壊 小型ロケット(TR-IA)及び落下施設(JAMIC)による微小重力実験の開始(日本)
1992	29	液柱内マ対流(1), 液滴内マ対流(1) 沸騰二相流(1), ヒートパイプ(1) 宇宙航空 SN 宇宙技術(5)	毛利宇宙飛行士 スペースシャトル搭乗, FMPT 実施



図 4 スペースシャトル内で大きな真球状の水滴を作って浮遊させる毛利宇宙飛行士 (©NASA)

### 3.2 地上（大気圏を含む）における微小重力実験手段

1990 年代に入ると、我が国でも、比較的身近に（といっても、大がかりであるが）、微小重力実験のできる環境が、相次いで整い始めた。その一つは、小型ロケットによる微小重力実験の提供である。ロケットを弾道飛行させても、実際には重力は存在しており、遠心力などの外力と釣り合っているだけであるが、内部はあたかも重力がないかのような状態になるので、便宜上、無重力あるいは微小重力と言っている。宇宙ステーションの場合も、同様である。

小型ロケット（TR-1A）は、当時の NASDA によって運営され、1991 年からほぼ 1 年ごとに 1998 年の 7 号機まで打ち上げられた。約 100km 上空まで打ち上げ、約 6 分間の微小重力が得られた。液柱内のマランゴニ対流実験は、東久雄氏（当時航技研）や（故）平田彰氏（早大）を中心に行われ、伝熱シンポジウムにも報告がある[9]。後半には、筆者も加わった。沸騰実験も行われている[10]。

同じく 1991 年から、北海道の閉山した炭鉱施設を利用して、鉛直落下による微小重力実験が出来るようになった。これは、深さ 700m の縦坑のうち、500m を落下に使い 200m を制動に使うという大がかりなもので（図 5）、得られる微小重力時間においても、質においても、世界最高の施設であった。（株）地下無重力実験センター（JAMIC:Japan Microgravity Center）が運営しており、一日 1～2 回の落下実験が可能であった。10 秒という短時間であるが、良好な微小重力が得られたので、燃焼実験や沸騰実験が適していた。阿部ら[11]は、この施設を使って、非共沸混合液体の沸騰気泡の観察を行ない、濃度差マランゴニ効果の影響を見出している。その他にも、微小な結晶成長、物性値測定、宇宙用機器の開発試

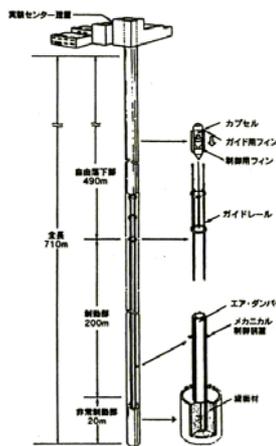


図 5 JAMIC：落下型の微小重力実験施設。世界最高の性能であった。（地下無重力実験センターによる）

験、生体・細胞関係などの実験が多数行われ、微小重力利用研究に大きな貢献をしたが、閉山後の産炭地支援の縮小と共に、2003 年に閉鎖された。その施設や成果については、冊子がまとめられている[12]。この他、岐阜県土岐市にも日本無重量総合研究所が運用する微小重力時間 4.5 秒の落下施設があったが、現在はこれも終了している。現在国内で最も高低差のある落下施設は、北海道赤平の植松電機にある施設（約 50m）で、約 3 秒間の微小重力が得られる。北海道宇宙科学創造センター（HASTIC）が運用している。

もう一つの短時間微小重力実験手段は、航空機のパラボリックフライトによるものである。原理は、前述の小型ロケットと同様であるが、小型ロケットが空気の希薄な上空まで上昇するのに対し、航空機は空気中を飛行するので、風の影響を受けるために微小重力の質は他に比べてよくない。しかし、比較的簡単に実現出来ることと、一回のフライトで 7～10 回程度の微小重力が得られることから、初期的な準備のためには、大変有効な手段である。研究者が、その場に搭乗して実験装置を操作出来、研究者がパイロットと十分に連絡を取りながら実験出来ることも、他の手段に比して、大変大きな特徴である。その日の状態にもよるが、0.1g 以下程度の微小重力が、20 秒間得られる。フライトは、名古屋の小牧飛行場からダイヤモンドエアサービス（株）が運行しており、現在も継続して実施されている。図 6 は、微小重力実験用に用いられているジェット機（MU-300）である。



図 6 微小重力実験に用いられるジェット機。20 秒間の微小重力が得られる。機体に、Micro Gravity Flight の文字が見える。（ダイヤモンドエアサービス（株）による）

### 3.3 国際宇宙ステーションの建設と微小重力伝熱研究の拡がり

1990年代に入ると、宇宙ステーションに日本の実験棟「きぼう」を建設する計画も具体化し、当時は JEM (Japan Experiment Module) と呼ばれていた。初期フェーズで行う科学実験の募集が 1992 年に行われ、翌年 1993 年には結晶成長 (流体科学を含む) と生体分野から約 50 テーマが候補テーマとして採択されて、一次選定テーマと呼ばれた。筆者の液柱内のマランゴニ対流実験も採択され、そのときには、5~6年後には実施出来るという説明を受けたと記憶しているが、実際には、前述の宇宙ステーション計画に大きな変更があって、米国、EC、日本、カナダ等の西側諸国にロシアも加わって国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station) の建設が合意され、最初のモジュールであるロシアのザーリヤが打ち上げられたのは、すでに 5 年後の 1998 年であった。その後しばらくは順調に建設が続き、2000 年からは、宇宙飛行士の ISS への滞在が開始された。

しかし、あと 3~4 年で「きぼう」での実験が出来るだろうと言われ始めた頃、再びスペースシャトルに大事故が発生した。2003 年のコロンビア号の空中分解である。良く知られているように、主翼の断熱タイルに打ち上げ時に損傷が起き、帰還の大気圏再突入時に、そこから高温ガスが侵入して空中分解した。そのため、スペースシャトルの運行は約二年間停止され、ISS の建設も中断された。このときは、前述の「きぼう」の一次選定テーマに採択されてから、すでに 10 年が経過していた。

他方、研究面では、マランゴニ対流や微小重力下の沸騰、二相流など伝熱や熱関連の研究が活発になり、伝熱シンポジウムにおいても、毎回 7~10 件の発表が行われるようになった (表 1-(c),(d))。その中から、いくつかの代表的な分野を概観する。

#### 3.3.1 マランゴニ効果

マランゴニ対流とは、液体の表面に、温度や成分濃度の分布に起因して発生する流れである。イタリアの物理学者 Carlo Marangoni(1840-1925)が、濃度差に起因するマランゴニ対流を研究し、一連の論文を発表している[13]ので、彼の名を冠してこのように呼ばれている。しかし、それよりも前に、James Thomson[14]がワインの涙 (図 7) の発

生原因について、これが水の中のアルコールの濃度分布に起因するマランゴニ効果に依ることを説明している。なお余談であるが、有名なジュール・トムソン効果を発見したり、絶対温度の概念を示して絶対温度 K の名の由来となっている William Thomson (Kelvin 卿) は、この James の弟である。マランゴニ対流については、筆者[16]がべつに解説記事を書いているので、本稿では以下に基本的な事項のみを述べたい。

表 1(c) 日本伝熱シンポジウムにみる微小重力熱・伝熱研究発表及び関連事項 (1993-2003)

年	回数	講演件数	関連事項
1993	30	熱・伝熱(4) 宇宙熱技術(3)	「きぼう」一次選定 テーマ決定
1994	31	熱・伝熱(3) 宇宙熱技術(1)	純国産ロケット HII 打ち上げ
1995	32	微小重力 SN 熱・伝熱(5)	ミールとスペース シャトルのドッキ ング
1996	33	熱・伝熱(10)	
1997	34	熱・伝熱(6) 宇宙熱技術(1)	
1998	35	熱・伝熱(8) 宇宙航空 SN 宇宙熱技術(3)	国際宇宙ステーシ ョン (ISS) 建設開始
1999	36	熱・伝熱(7) 宇宙熱技術(1)	
2000	37	熱・伝熱(8) 宇宙熱技術(1)	ISS に人の滞在開始
2001	38	熱・伝熱(9) 宇宙熱技術(2)	
2002	39	熱・伝熱(10) 宇宙熱技術(3)	
2003	40	熱・伝熱(8) 宇宙熱技術(2)	コロンビア号事故 はやぶさ打上げ



図 7 ワインの涙 (水分中のアルコール濃度差に起因するマランゴニ対流)

一般には、液体の温度が低下すると表面張力は増加するので、マランゴニ対流は、表面上を温度の高い方から低い方に向かって流れる。このマランゴニ対流が微小重力との関連で注目されるようになったのは、半導体等の結晶成長において、地上では自然対流が生じて生成した単結晶に欠陥が生じやすいのに対し、微小重力下ではそのようなことがなくより良質の結晶が得られると考えられていたのに対し、実際にロケットを使った微小重力下での実験を行ってみると、縞状の欠陥が観察されたことによる[15]。これは、微小重力下では、自然対流は抑制されるものの、結晶材料の熔融状態における表面の温度差によるマランゴニ対流に起因すると解釈され、このことを契機にして、マランゴニ対流の研究が活発化した。

**(1)液柱等（液層，液滴）におけるマランゴニ効果**

結晶成長の方法には、チョクラルスキー法や、ブリッジマン法などがあるが、微小重力下で容器に非接触で成長させる方法に、フローティングゾーン法がある。図 8(a)がその模式図で、上部を素材の多結晶とすると、中間部分をリングヒーターや高周波で加熱し、その下を冷却することにより単結晶を下部に形成する。このとき中間の熔融部では中央の温度が高く両端部（固体に接する部分）の温度は低いので、中央から両端に向かうマランゴニ対流が発生する。基礎実験では、この半分を取り出して、二つの円柱端面の間を液体で橋渡した“液柱”を形成し、一端を高温、他端を低温に保った実験を行うことが多い（図 8(b)）。流れは、表面を高温側から低温側に流れ、液柱の内部で逆

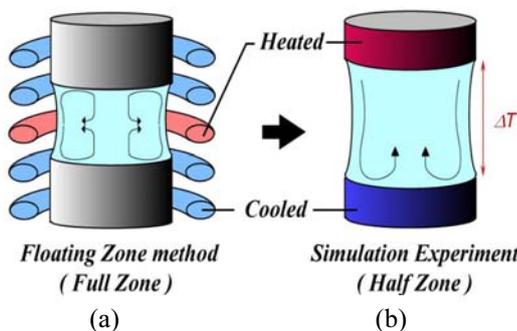


図 8 (a): フローティングゾーン法（非接触の結晶成長法の一つ）、(b): ハーフゾーンモデル（マランゴニ対流の基礎実験は、この形状で行われることが多い。）

方向に流れて循環する。これを、ハーフゾーンモデルと呼んでいる。前述のように、筆者が「きぼう」の一次選定テーマとして提案して採択されたのも、この形状の実験である。

図 9 は、図 8(b)を上部ロッドの端面から見下ろしたときの画像で、白い微粒子は、可視化のためのトレーサー粒子である。図 8(b)において上部ロッドを加熱、下部ロッドを冷却すると、液柱表面で下向きで内部で上向きの定常流が発生する。次第に温度差を大きくすると、流れは、振動的となり周方向の成分も現れ始める（図 9(b)）。これを振動流への臨界点と呼んでいる。さらに温度差を増大すると、中央部に粒子の不在領域が現れて、この形状が周方向に回転する(図 9(c))。この場合は周方向に 3 回対称の形状なので、モード  $m=3$  と呼んでいる。このモード数は液柱のアスペクト比（高さ／直径（または半径））に依存し、アスペクト比が小さいほど、モード数は増加する。さらに温度差が増大すると、粒子は一つの閉曲線状に集合し、この形状が回転する(図 9(d))。この現象を粒子集合現象（PAS: Particle Accumulation Structure）と呼んでいる。さらに温度差を増大すると、粒子集合現象も崩れて、カオティックな流れになる。

液柱内マランゴニ対流に関する発表は、1990 年代に入ると、日本伝熱シンポジウムにおいても

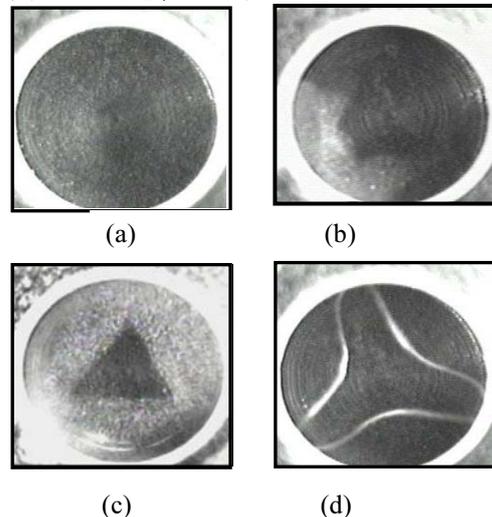


図 9 液柱内マランゴニ対流に生起する流動パターン（直径 5mm、流体はシリコンオイル） [17].

- (a): 定常流, (b): 振動流（往復振動）,
- (c): 粒子不在領域の形成（回転振動）:
- (d): 粒子集合現象（回転振動）

前述の平田ら[9]の発表を皮切りに、今石らによる数値解析 ([18]など) や、筆者らのグループによる粒子集合[19]、振動制御[20]などの一連の研究、西野らによる 3 次元計測 ([21]など)、宗像らによるフローティングゾーン法における結晶成長[22]、松本、松本らによる低プラントル数液柱 ([23]など) 等が、多数発表された。

液柱以外の体系では、プール状の液層については、Hydrothermal Wave と名付けられた進行波と液柱内マランゴニ対流における振動流との関係が検討された[24]。その他、自然対流との共存対流[7]、磁場の影響[25]などの発表がある。

液滴におけるマランゴニ効果は、燃焼や宇宙での液滴放熱器において重要であり、工藤・黒田らによる数値解析がなされている ([26]など)。他方、温度勾配のある固体面上の液滴は、マランゴニ効果によって自発的に移動するが、これについて、村田・望月ら ([27]など) や、凝縮に関連して宇高ら ([28]など) の研究がある。また、液滴に関してマランゴニ効果が顕著に表れる現象の一つに、温度差の異なる液滴の非合体がある。すなわち、二つの液滴を押しつけて合体させようとしたときに、両者に温度差があると、直ちには合体しない。理由は、液滴表面に発生するマランゴニ対流が、空気層を液滴の接触面に供給するためである。図 10 は、上野ら[29]によるそのような実験の例で、液滴直径は 5mm、温度差約 10K、重力下での実験で、両者を押しつけても、ある程度までは、合体しない。図 10(a)の白い筋はトレーサーの微小粒子で、液柱底部の中心に集まって上昇し、上面では旋回する一種の粒子集合現象 (図 8(d)に類似) が発生している。

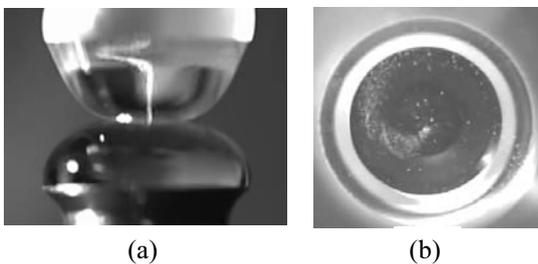


図 10 温度の異なる液滴の非合体[29].

(a)二つの液滴をある程度押しつけても合体しない。白い筋はトレーサー粒子。(b)上から見た図。粒子の筋が上面では旋回している。(a)と(b)の撮影条件は、やや異なる。

## (2)表面張力温度係数が正の液体 (Self Rewetting Fluid)

前述のように、一般の流体では表面張力は、温度が高くなると、減少する。すなわち、表面張力の温度係数は負であるが、炭素数 4 以上のアルコールと水の混合流体では、これが正になることが知られている (阿部[30])。たとえば沸騰気泡の底面のように温度分布のある伝熱面に流体が接している場合 (図 11)、通常流体であれば高温側の表面張力が小さいので、マランゴニ効果によって、流体は高温側から低温側に流れ高温部分はますます乾く傾向になるが(図 11(a))、表面張力の温度係数が正の流体では、マランゴニ効果は流体が再び高温部分を濡らす方法に働くため (図 11(b))、伝熱の促進効果が期待される。ヒートパイプの場合にも、同様に作動液体を蒸発部へと輸送する効果が期待される。このようなことから、この種の流体を、Self Rewetting Fluid と名付けており、最近では国際的にもこの名称が使われるようになってきている[31]。Self Rewetting Fluid のプール沸騰では、バーンアウト熱流束が増大することが報告されている[30]。また最近では、この種の水溶液に、さらにナノ粒子を含有させると、より顕著に正の温度係数を発現させ得ることが見出されている ([31], [32])。実際にこの種の流体を作動流体に用いたヒートパイプでは、水を作動流体にした場合に比して、ドライアウト特性が顕著に改善されることが報告されている[33]。

凝縮熱伝達の場合にも、正の表面張力温度係数は、伝熱を促進する方向に作用する。凝縮においては、滴状凝縮が膜状凝縮よりも高い熱伝達率を与えることは良く知られているとおりであるが、一旦液滴が出来ると、液滴の頂部は底部よりも温度が高いため、表面張力温度係数が正であればマランゴニ効果は、液滴の形成を促進する方向に作用する。これに加えて、宇高ら ([28,34]など) は

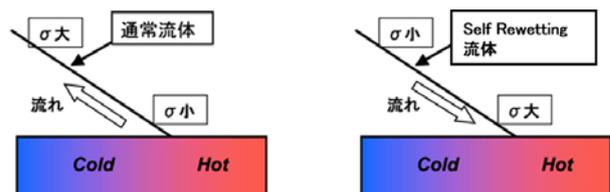


図 11 Self Rewetting Fluid : 表面張力( $\sigma$ )の温度係数が正の液体。自発的に高温壁を濡らす。

温度勾配のある伝熱面上では、この種の液体による液滴は、自発的に低温側から高温側に移動することに着目し、この結果、凝縮伝熱の妨げとなる厚い液膜や大きな液滴を排除することが出来て、熱伝達の促進につながることを示している。

これらの例に見るように、表面張力温度係数が正の液体 (Self Rewetting Fluid) は、とくに相変化を伴う伝熱において、大変“好ましい”特性を持っている。そのため、マランゴニ効果の実際的な応用として、今後さらにこの方面の研究の発展と実用分野の拡大が期待される。

### (3) マイクロハイドロダイナミクスへの応用

マランゴニ効果をはじめとする表面張力現象は、微小重力 (マイクログラビティ) において顕在化するが、同時に微小スケールの流体现象 (マイクロスケール) においても重要である。通常のスケールでは重力に隠れている表面張力が、スケールが小さくなると共に顕在化するからである。したがって、微小重力下では、地上におけるマイクロハイドロダイナミクス現象を、拡大して観察することができる。

マイクロスケールにおいては、液体の駆動が重要な課題の一つである。これについて、吉田ら[35]は、マランゴニ効果を利用したマイクロポンプを提案している。また高橋ら ([36]) はマイクロ気泡の周囲のマランゴニ対流によるポンプ効果について発案し検討している。

マランゴニ効果によって、微小な気泡や液滴を移動させることもできる。元祐ら([37])は、レーザー光などによってマイクロ気泡の周囲を非対称に加熱することにより、気泡をマランゴニ効果によって移動させる実験結果を発表している。また、液滴についても、既述のように、温度勾配のある面上での自発的な移動については、村田ら ([27]) など、宇高ら ([28]) などによる一連の研究が、伝熱シンポジウムにおいても発表されている。

このような応用の一例として、 $\mu$ TAS (Micro-Total Analysis System)における微量サンプルの迅速な形成がある。図 12 は、マイクロ液滴を形成する方法の一つで、微細なピン(この場合は直径 2mm)を液中に一旦浸し、その後引き上げることにより微小液滴をピンの先端に形成している[38]。このとき、ピン先端にマイクロリットル以下の液滴が形成され、その体積の再現性も極めて良好である。

他方、液滴の体積を変化させようとするとき、ピンの直径を変更する必要があるが、ピンの温度を変化させると、液滴の形成過程で円錐形の液体表面にマランゴニ対流が発生するため、形成する液滴の体積を制御することが可能となる[38]。

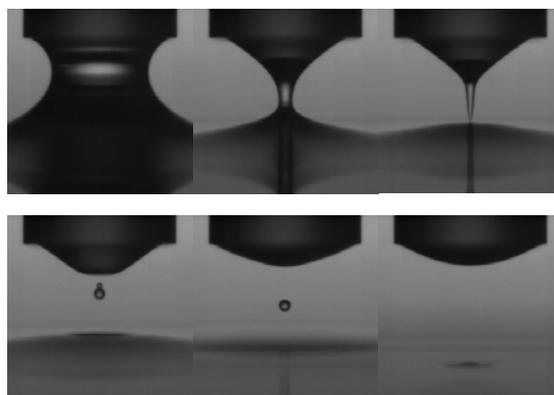


図 12 微細ピン分注法によるマイクロ液滴の形成 (ピン温度を変化すると、マランゴニ効果によって、形成されるマイクロ液滴の体積制御が可能になる[38].)

### 3.3.2 沸騰熱伝達と二相流

沸騰熱伝達と二相流は、元来重力加速度が大きな影響を持つ現象であるから、これらについて重力加速度の影響を調べることは、宇宙における沸騰や二相流の利用のためにも、また地上におけるこれらの現象のメカニズムを理解する上でも、非常に重要な課題である。すでに述べたように、我が国でも小竹[4]による先駆的な実験をはじめとして、阿部ら[11]による落下塔を用いた微小重力実験、大田らによるロケット実験[10]や透明な伝熱面を用いた航空機実験[39]、が行われてきた。

沸騰熱伝達に対する重力加速度の影響について、たとえば、飽和プール核沸騰熱伝達率に関する良く知られた Rohsenow の式では、熱流束  $q$  は伝熱面過熱度を一定とすると、重力加速度  $g$  に対して  $g^{1/2}$  に比例する。また、バーンアウトに至る臨界熱流束は、Zuber の式によれば、 $g^{1/4}$  に比例する。すなわち、スペースシャトルのように重力加速度が地上の  $10^{-4}$  あるいはそれ以下となるような環境では、核沸騰域の熱流束は地上の 100 分の 1 まで、臨界熱流束は 10 分の 1 まで低下することとなる。これまでに行われたこの種の微小重力実験は限られているが、ミュンヘン工科大学の Straub[40]が

自身の一連の微小重力実験やその他の微小重力実験をまとめた結果では、実際には上述の予測値よりもかなり高い熱流束が得られている。

強制対流沸騰熱伝達や二相流も、重力加速度の影響を強く受ける。近年、宇宙機器の大型化に伴い、宇宙用の放熱器などにおいて、二相流の重要性が増加している。伝熱シンポジウムにおいても、すでに 20 年前の 29 回 (1992 年) 頃から、この種の発表が行われている(藤井ら[41]など)。また、最近には、大田らを中心に微細管内の強制対流沸騰熱伝達の実験を、宇宙ステーションにおける長時間の微小重力実験へ発展させようとする計画が進められている[42]。今後、宇宙への進出の拡大と共に利用エネルギーが増大するに従い、沸騰と二相流の研究はますます重要になると考えられる。またそれらの成果は、地上における沸騰や二相流の利用技術の改善にもつながるものである。

### 3.3.3 宇宙熱機器における伝熱技術

地球の周りを周回する人工衛星や、「はやぶさ」のように太陽を周回する人工惑星（以下、衛星に代表させる）においても、伝熱技術は重要な役割を果たしている。すなわち、人工衛星もスペースシャトルも、内部で発生した熱は、最終的には宇宙空間に放射（輻射）で放出される。発熱が小規模な場合には、衛星等の筐体を通じて熱伝導で外面まで移動させ、表面から放熱させるが、宇宙ステーションやスペースシャトルのように大容量の放熱を必要とする場合には、放熱板（ラジエーター）を設置して、そこまでは単相流や二相流、またはヒートパイプで輸送する。以上のように、宇



図 13 国際宇宙ステーションの太陽光パネル（上に展開）と放熱ラジエーター（下に展開）。（スペースシャトルがドッキングしている。）(©NASA)

宙機器においては、熱放射、接触熱抵抗、沸騰と二相流などが、重要な研究開発及び熱設計項目である。

図 13 に、国際宇宙ステーションのラジエーターがよくわかる写真を示す。蝶の羽のように上に開いているのが太陽光パネル、下に配置しているのが放熱ラジエーターである。太陽光パネルは太陽に向けるのに対し、ラジエーターは放熱をよくするために太陽光に平行に展開している。余談であるが、宇宙ステーションにスペースシャトルがドッキングした模様を離れた位置から撮影出来たのは、この写真の機会（2011 年 STS-134）が唯一であった。

日本伝熱シンポジウムにおいても、29 回（1988 年）から宇宙熱機器に関するセッションも設置されるようになり、表 1(c,d)に見るように、近年では毎回何件かの宇宙機器に関する報告が継続的に行われている。接触熱抵抗に関しては、鳥居ら（[43]など）の一連の研究がある。ヒートパイプでは、宇宙用のループ型ヒートパイプに関する発表が多く、大串らによる[44]や[45]などがある。

実際の人工衛星(惑星)の熱設計については、日本伝熱シンポジウムにおいても、大西が「はやぶさ」についての解説をしている[46]。そのなかで、打ち上げ時から軌道上、あるいは小惑星への着地時等、幅広く変化する周囲環境に対応して、如何にして機体や各機器の温度を許容範囲に収めるかの各種の方策が述べられている。そのためには、たとえば、温度の高いときには熱放射を促進するために大きな放射率の面が、他方温度の低いとき

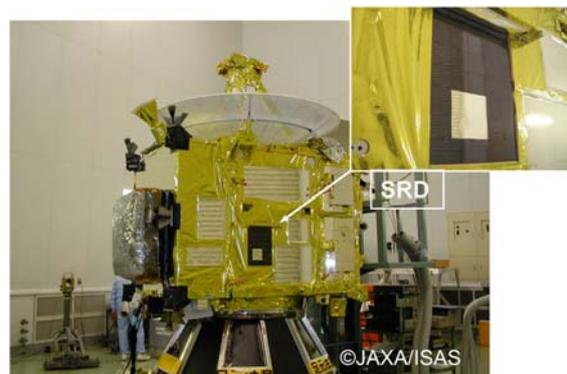


図 14 「はやぶさ」と温度依存性放射率素子 (SRD:Smart Radiation Device)。その左の大きな黒いボックスがイオンエンジン部分[46]。(©JAXA/ISAS)

には熱放射を抑制するために小さな放射率の面が望ましい。これを実現するために、熱放射率が温度に依存する熱放射素子（SRD:Smart Radiation Device）を開発し、実際に「はやぶさ」に装備している。その原理と開発過程は、伝熱シンポジウムにおいても発表されている[47]。図 14 は装備された SRD（黒色）が見える側から見た「はやぶさ」の写真である。放熱面以外の大部分の表面は、黄色のポリイミドフィルム断熱材で覆われている。これらの結果、「はやぶさ」の送信機等の温度が、許容範囲に制御されたことが観測されている[46]。その後「はやぶさ」は、一昨年（2010 年）地球に帰還したことは、よく知られているとおりである。その間の通信の断絶と回復、イオンエンジンの故障と復帰等についてはしばしば報道されてきたが、それらを熱制御の技術が支えていたことを知るのには、熱技術に関わる者として、極めて興味深い。

#### 4. 日本実験棟「きぼう」における微小重力科学実験の開始と日本人宇宙飛行士の長期滞在

コロンビア号の事故（2003 年）以来、スペースシャトルの打ち上げはしばらく休止を余儀なくされたが、2005 年には、野口宇宙飛行士も搭乗したフライトで復帰し、その後再調整を経て翌 2006 年からからは、本格的に復帰した。その後は、国際宇宙ステーションの建設も順調に進んだ。先に

表 1(d) 日本伝熱シンポジウムにみる微小重力熱・伝熱研究発表及び関連事項(2004-2011)

年	回数	講演件数	関連事項
2004	41	熱・伝熱(6) 宇宙熱技術(1)	
2005	42	熱・伝熱(8) 宇宙熱技術(3)	スペースシャトル 復帰
2006	43	熱・伝熱(7) 宇宙熱技術(1)	スペースシャトル 本格復帰
2007	44	熱・伝熱(7) 宇宙熱技術(1)	
2008	45	熱・伝熱(12) 宇宙熱技術(3)	きぼう建設開始 きぼうにおける科学 実験の開始
2009	46	熱・伝熱(8)	きぼうの完成 輸送機 HTV-1 号機 の成功
2010	47	熱・伝熱(8) 宇宙熱技術(2)	はやぶさの帰還
2011	48	熱・伝熱(6) 宇宙熱技術(2)	輸送機 HTV-2 号機 スペースシャトル 終了(STS-135)

述べた筆者の提案した液柱内マランゴニ対流実験は実施テーマとして採択され、かつ「きぼう」における最初の科学実験に指定された。実験パラメーターの決定や実験方法の最終検討に追われる一方、最初の科学実験であるため、実験の実施方法や、JAXA との運用体制の調整も重要な仕事であった。2008 年の 2 月には、土井宇宙飛行士が搭乗したフライトで「きぼう」の保管庫部分が最初に運ばれ、続いて 5 月には、星出飛行士が搭乗して「きぼう」の与圧室（本体部分）が運ばれて、星出飛行士らの作業で国際宇宙ステーションに取り付けられた。この段階で、与圧室内の実験が可能となった。これらの作業は極めて順調で、我が国の有人宇宙施設の建設技術の高さを、国際的にも示すことが出来た。

実験の実施に至る過程は、すでに何度か文章にしているので[48],[49]採録しないが、「きぼう」での最初の科学実験であったため、技術的な面のみならず、実験運用チームとの調整、報道機関への対応等も重要な任務となった。宇宙飛行士には実験装置の組み立てや改修を依頼し、実験そのものは地上からの遠隔コマンドによってつくば宇宙センターから操作した。「きぼう」の実験テーマ候補に選定されてからは 15 年が経過していたが、研究面でも実験技術の準備面でも、つねにすべきことがあり、長期間待ったという認識はなかった。また、15 年前には重視していなかったマイクロハイドロダイナミクスのような研究観点も新たに変わった。

図 15 に、実験装置の概要を示す。軌道上に形成した液柱は直径 30mm、長さ最大 60mm で、流体

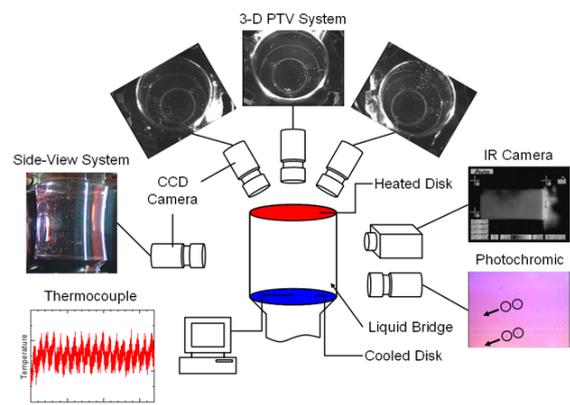


図 15 「きぼう」内に設置したマランゴニ対流実験装置と計測系

はシリコンオイルである。計測系は、温度変動の計測用熱電対、側方観測カメラ、3次元計測のための高温側端面からの観測カメラ(3台)、表面温度測定用の赤外線カメラ、表面流速測定のためのフォトクロミック流速測定系を備えており、これらを必要に応じて選択して利用するようになっている。

実験は2008年8月22日から開始した。開始すると装置は順調に作動して液柱は形成出来たものの、液柱内に気泡が混入してそれが時間と共に成長する事態に直面した。液柱内に気泡が混入することは、これまでの小型ロケットの実験等で経験していたが、短時間であったため、気泡は小さいままで、混入していても大きな障害にはならないか、あるいは、対流を発生させることによって自然に外部へ放出された。ところが、宇宙ステーション実験は毎日が数時間に及ぶので、気泡は大きく成長してとても自然には放出されず、一時は実験を中断して対策を練らないといけないとまで思った。しかし、試行錯誤するうちに、マランゴニ効果を利用して気泡を液柱周辺部に移動させ、さらに気泡膜内にマランゴニ対流を発生させることにより、気泡を破裂させることが出来るようになった[48],[49]。これは、地上におけるマイクロバブルのハンドリングにも応用出来る知見である。

その結果、気泡のない最大長さ60mmの液柱も形成することが出来るようになり(図16)、その後は順調に実験が進行し、マランゴニ対流が定常流から振動流に遷移する条件を、複数のアスペクト比(長さ/直径)や流体粘性に対して求めることが出来た。主な実験結果は、すでに国際伝熱会

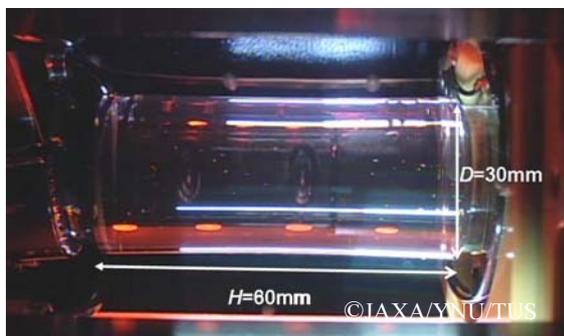


図16 「きぼう」に形成した大液柱。  
(液体：シリコンオイル、直径30mm、  
長さ：最大60mm、右：高温ディスク、左：  
低温ディスク。) ©JAXA/YNU/TUS

議(IHTC14)に発表し、その後関連の学術誌に掲載されている[50]ので、ここでの再録は控えたい。実験は、その後、断続的に本稿の執筆時まで継続し、実験対象を液滴とする実験にまで拡大している。図17はその中で得られた対向した二液滴の画像である。これらを用いて、液滴の合体・非合体、マランゴニ対流の相互干渉などの知見を得ることが出来る。地上では重力加速度の方向性があるため、このようにほぼ対称の対向する二液滴を形成することは困難で、宇宙における軌道上実験のメリットを生かした実験と言える。

この間に、「きぼう」は2009年に若田宇宙飛行士による船外実験装置の取り付けによって完成した。若田宇宙飛行士は、日本人としてはじめて宇宙ステーションに4ヶ月半長期滞在して2009年7月に帰還した。続いて野口宇宙飛行士が2009年から2010年にかけて160日間滞在し、直近では、2001年に古川宇宙飛行士が165日間滞在して帰還した。「きぼう」で行われた物理系、化学系、ライフ系等の実験や各種の教育や商用利用のイベントの数は、正確には把握していないが、すでに百件を超えていると思われる。また、日本人宇宙飛行士によって、宇宙から見た日本や地球の映像や無重力での生活の様子が伝えられ、子ども達をはじめとする多くの人々の宇宙や科学への関心と理解を高めた。

## 5. あとがき

以上本稿では、日本伝熱学会の50年と国際的な宇宙開発や我が国における微小重力実験の発展を、重ね合わせてみた。日本伝熱研究会が発足した1961年は、ちょうどガガーリンが人類初の宇宙飛



図17 液柱を分離させて形成した対向二液滴。二液滴の間に、分離の際に発生したサテライト微小液滴も見える。

行をした年であり、50 周年を迎えた 2011 年は、スペースシャトルがその役目を終えて退役した年にあたる。その間に世界の宇宙開発には二つのピークがあった。その一つはアメリカのアポロ宇宙船による月面到達であり、もう一つはスペースシャトルを活用した国際宇宙ステーションの建設と運用である。前者のアポロ計画の時代には、我が国は小型ロケットや初の人工衛星を打ち上げていた段階であったが、後者の国際宇宙ステーション計画においては、我が国独自の実験棟「きぼう」を建設して運用し、複数の日本人宇宙飛行士が次々と宇宙ステーションに滞在して、その活動を人々に伝えるようになった。また、スペースシャトルの退役後は日本の補給機 HTV（このとり）が、国際的にも宇宙ステーションへの重要な輸送手段の一翼を担うほどに成長している。

微小重力科学実験についてみると、1960 年代にまず米国がロケットや人工衛星を利用して先行していた頃、我が国では、実験室内や既存の建物内で 1~2 秒の落下実験が行われていた段階であった。また 1980 年代頃からは、ヨーロッパが伝熱を含む基礎研究にも定常的にロケット実験の機会を提供して、広範な分野でリードして来た。しかし、「きぼう」の完成とその順調な運用が始まってからは、その施設においてもその安定した運用においても我が国が先頭に立ったと国際的にも認知されていえる。

かつては、「Space factory (宇宙工場)」が目標とされた時期があった。しかし現在では、ある NASA 幹部の言葉を借りれば、「宇宙から持ち帰るものは、Product (製品そのもの)ではなく、Knowledge である。」と広く認識されている。これに加えて、わたしは Knowledge and Encouragement であると思う。すなわち、宇宙で直接に物資を生産して地球に持ち帰るのではなく、宇宙で行う様々な実験から得られた知識や宇宙飛行士達の経験や想いを、地球上での科学技術の発展や、子ども達の夢を育む教育に役立てていく時代になっている。

この 50 年間で、我が国の微小重力下での科学実験の環境は飛躍的に発展し、研究も進展した。「きぼう」の利用経験も蓄積され始めている。今後、この微小重力環境を活用するさらに斬新な研究テーマが多数提案されて、熱・伝熱のみならず、幅広い科学技術の新たな展開をもたらすことを期待したい。

最後に、これまで長期間にわたり協力して頂いた共同研究者の西野耕一教授（横国大：現在の代表研究者）、上野一郎准教授（東理大）、大西充及び松本聡主任研究員（JAXA）に、さらにこの間、研究と実験を支えてくれた多くの学生諸君に、心からの謝意を表したい。

また、本稿をまとめるにあたり、50 周年記念事業の一環として編纂された日本伝熱シンポジウム講演論文集総覧は、我が国の伝熱研究の動向を知る上で極めて有効であった。門出政則委員長をはじめとする 50 周年記念事業出版委員会各位のご尽力に敬意を表したい。

#### 参考文献

- [1] 熊谷清一郎, 燃焼におよぼす重力の影響, 科学 (岩波書店), **47-12** (1977) 756.
- [2] 五代富文, ニコンを落として, 宙の会, [http://www.soranokai.jp/pages/nikon\\_droptower.html](http://www.soranokai.jp/pages/nikon_droptower.html)
- [3] 磯田浩, 表面を加熱された液体の流動-1, 機械の研究 (養賢堂), **23-11**(1971)1505.
- [4] 小竹進, 沸騰におよぼす重力の影響, 日本機械学会論文集 (第 2 部), **35-272**(1969)800.
- [5] 新免則英, 松本洋一郎, 斉藤孝基, 表面張力駆動流に関する研究, 17 回伝シ論文集, (1980)A306.
- [6] 松本洋一郎, 斉藤孝基, 同上, 日本機械学会論文集 B 編, 46-402(1980)282.
- [7] 前川透, 棚沢一郎, 塩冶震太郎, 落合淳一, 長方形水平流体層における重力・表面張力共存自由対流の研究, 19 回伝シ論文集, (1982)B114.
- [8] 岡利春, 阿部宜之, 杉口卓也, 森康彦, 長島昭, 微小重力下における沸騰現象の観察, 28 回伝シ論文集, (1991)B131.
- [9] 西澤伸一, 平田彰, 今石宣之, 地上および微小重力環境下における液柱内マランゴニ対流現象, 29 回伝シ論文集, (1992)C124.
- [10] 大田治彦, 東久雄ら, 透明伝熱面を用いた微小重力場のプール核沸騰熱伝達 (第 4 報 TR-1A ロケットによる実験), 35 回伝シ論文集, (1998)B124.
- [11] 阿部宜之, 岩崎晃, 微小重力を利用した単一沸騰気泡の観察, 35 回伝シ論文集, (1998)C323.

- [12] 澤岡昭(編), 地下につくられた小さな宇宙, (株)地下無重力実験センター, (2000).
- [13] Marangoni, C., Ueber die Ausbreitung der Tropfen einer Flüssigkeit auf der Oberfläche einer anderen, *Annal. Der Physik und Chemie*. CXLIII, No. 7,(1871) 22.
- [14] Thomson, J., On certain motions observable at the surface of wine and other alcoholic liquors, *Phil. Mag. Ser.*, 10-67,(1855)330.
- [15] Eyer, A., Leiste, H., Nitsche, R., Floating zone growth of silicon under microgravity in a sounding rocket, *J. Crystal Growth*, 71-1 (1985) 173.
- [16] 河村 洋, マランゴニ対流における振動流とその制御および粒子集合現象, 日本機械学会論文集 (B 編), 70-700(2004)3025.
- [17] 田中志穂, 上野一郎, 河村 洋, 液柱内温度差マランゴニ対流における粒子集合現象, 日本機械学会論文集 (B 編), 70-692(2004)167.
- [18] 安廣祥一, 今石宣之, 依田真一, 液柱内の 3 次元非軸対称振動型 Marangoni 対流の数値解析, 34 回伝シ論文集, (1997) B213.
- [19] 田中志穂, 上野一郎, 河村洋, 液柱内マランゴニ対流における動的粒子集合とその構造, 37 回伝シ論文集, (2000) I232..
- [20] 工藤正樹, 塩見淳一郎, 上野一郎, 河村洋, アンベリ, 液柱内温度差マランゴニ対流における振動流の能動的制御, 39 回伝シ論文集, (2002)G124.
- [21] 西野耕一, 河村洋, 斎田浩明, 山本英, 小型ロケット実験による液柱マランゴニ流の 3 次元観測, 33 回伝シ論文集, (1996)E311.
- [22] 宗像鉄雄, 棚澤一郎, フローティングゾーン結晶育成過程に対する高周波加熱の影響, 33 回伝シ論文集, (1996)E132.
- [23] 松本聡, 林田均, 小宮敦樹, 依田真一, 夏井秀定, 安廣祥一, 今石宣之, 低 Pr 数流体の液柱マランゴニ対流遷移現象, 41 回伝シ論文集, (2004)A312.
- [24] 多ヶ谷恵美, 上野一郎, 河村洋, 液柱内マランゴニ対流における表面進行波と薄液膜内 Hydrothermal wave の関係について, 40 回伝シ論文集, (2003)F142.
- [25] 榎本拓郎, 田川俊夫, 導電性ハーフゾーン液柱の振動マランゴニ対流に及ぼす外部磁場の影響, 46 回伝シ論文集, (2009)F332.
- [26] 工藤一彦, 黒田明慈, 戸谷剛, 液滴内 3 次元過渡表面張力対流の解析, 32 回伝シ論文集, (1995)C325.
- [27] 村田章, 望月貞成, 温度勾配を有する壁面上での微小液滴移動現象の分子動力学シミュレーション, 42 回伝シ論文集, (2005)B243.
- [28] 陳志豪, 宇高義郎, 田口岳志, マランゴニ滴状凝縮における伝熱面温度勾配下の表面張力差液体移動機構, 47 回伝シ論文集, (2010)B224.
- [29] Ueno, I. & Miyauchi, A., Particle behavior in non-coalescence head-to-head droplets formed between coaxial rods with temperature difference, 3rd Int. Symp. on Physical Sciences in Space (ISPS2007), Nara, (2007) 174-175.
- [30] 阿部宜之, 自己浸濡性流体について, 40 回伝シ論文集, (2003)C212.
- [31] Savino, R. Cecere, A. Di Paola, R. Surface tension-driven flow in wickless heat pipes with self-rewetting fluids, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 30 (2009) 380.
- [32] Abe, Y., et al., Heat pipes with self-rewetting fluids and nano self-rewetting fluids, 15<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf. Session XI, Clemson, USA (2010).
- [33] 瓜田侑己, 阿部宜之, 佐藤正秀ら, 液相合成銀ナノ粒子を含む Self-rewetting 流体の構造, 物性とヒートパイプの熱輸送特性, 45 回伝シ論文集, (2008)C1513.
- [34] Utaka, Y., Kamiyama, T. Condensate drop movement in Marangoni condensation by applying bulk temperature gradient on heat transfer surface.
- [35] 吉田英生, 戸田博健, 多田茂, 斎藤元浩, 熱電素子によるマランゴニ効果を用いたマイクロアクチュエータ, 36 回伝シ論文集, (1999)H312.
- [36] 高橋厚史, 波多野祥子, 永山邦仁, マイクロ気泡周りのマランゴニ効果とその応用, 同上, H311.
- [37] 竹内洋之, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, レーザー誘起界面張力勾配を利用した単一微小気泡の操作, 45 回伝シ論文集, (2008)E1503.

- [38] 植村豪, 河村洋, ナノリットル液滴形成におけるマランゴニ対流の影響, 44 回伝シ論文集, (2007)C343.
- [39] 坂田淑乃, 河南治, 大田治彦ら, ESA 航空機を利用した微小重力下におけるプール沸騰熱伝達実験, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 26-3(2009)204.
- [40] Straub, J., Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity, *Advances in Heat Transfer*, (2001) Academic Press, pp.57-172.
- [41] 藤井照重, 中澤武ら, 微小重力下における気液二相流の挙動について, 29 回伝シ論文集, (1992)C122.
- [42] 大田治彦, 浅野等, 河南治, 今井良二, 鈴木康一, 新本康久ら, 微小重力下の強制流動沸騰熱伝達に関する軌道上実験の提案, 同上, p.213.
- [43] 秋吉亮, 堀政義, 鳥居薫, 宇宙用コールドプレートにおける接触熱抵抗, 29 回伝シ論文集, (1992)C141.
- [44] 大串哲朗, 矢尾彰ら, 微小重力下におけるフレキシブルループ型ヒートパイプの熱輸送特性, 36 回伝シ論文集, (1999)E335.
- [45] 石川博章, 野村武秀, 斉藤康之, 川崎春夫, 岡本篤, 畠中龍太, リザーバ内蔵ループ形ヒートパイプの軌道上熱特性, 47 回伝シ論文集, (2010)I133.
- [46] 大西晃, 小惑星探査機「はやぶさ」の熱設計, 43 回伝シ論文集, (2006)F231.
- [47] 島崎一紀, 太刀川純孝, 大西晃, 長坂雄次, 宇宙用放射率可変デバイスの熱放射特性, 38 回伝シ論文集, (2001)D211.
- [48] 河村 洋, 「きぼう」におけるマランゴニ対流 (MEIS) 実験に至る道のりを振り返る, 日本マイクログラビティ応用学会誌, **25-3** (2009)150.
- [49] 河村 洋, 「きぼう」における最初の科学実験, マランゴニ対流実験の準備から実施まで, ながれ, **30-1**(2011)9. <http://www.nagare.or.jp/publication/nagare/archive/4333/4334.html>
- [50] Kawamura, H, Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I. Report on microgravity experiments of Marangoni convection aboard international space station, *J. Heat Transfer*, **134** (2012) 0311005.
-

## バイオ伝熱研究の 50 年 *Fifty Years Progress in Bio-Heat Transfer*

谷下 一夫 (慶應義塾大学)  
*Kazuo TANISHITA (Keio University)*  
*e-mail: tanishita@sd.keio.ac.jp*

### 1. バイオ伝熱の起源

病気や運動時における発熱時の「熱い感覚」や寒冷地での「寒い冷たい感覚」を経験する事により、人類は古くから熱との関わりの中で生き延びて来た。即ち、経験的な生体の熱現象に対する認識は、人類が生き延びるための知恵として、継承されて来たと思える。しかしながら生体の熱現象を客観的に捉えようとしたのは、近代科学が芽生えた頃で、有名な Galileo Galilei (1564-1642) は初めて空気式の体温計を発明した[1]。その後 Padua の Sanctorius 教授(1561-1636)は、実際に複数のヒトの体温を測定した。国内では慶應義塾大学医学部の創設者北里柴三郎博士は、体温計を製造する企業を立ち上げ、現在日本を代表する医療企業となっている。一方において、「冷感覚」に関しては、興味深い事に、Robert Boyle (1627-1691)が低温における動物の振る舞いについて研究していた。その後 1949 年には、畜産分野において牛精液の凍結保存が Christopher Polge が試み、その後の凍結保存や凍結医療の起源になったと思われる。

その後、体温に対する関心は、体温の制御機構の研究として展開して、生理学における主要な分野となった。例えば筋肉からの熱放散のメカニズムに関しては、Hermann von Helmholtz (1821-1894) が取り組み、その後の医学や工学における学術分野発展の基となった。この段階で熱工学的な手法が導入され始めたと思われる[1]。まず工学としての展開は、熱環境と快適性に関する課題である。1923 年と 1924 年に McConnell et al. は Trans. ASHVE に温度と湿度の生理的応答に関する論文を発表し、その後の空調分野における温度快適性の研究の基になった。一方機械工学分野では、Taylor が ASME Mechanical Eng. (1955)に人体における伝熱機構の論文を発表して、生体伝熱工学的な進展が始まった。同時に生理学においては、生体における温熱制御機構の研究が進展しており、

生体の受動的のみならず能動的な温熱制御機構 (Hardy, JD (1961))の本格的な研究が進展し、生理学のみならず臨床医学分野においても大きく研究が展開されている。

このような起源をもつバイオ伝熱に関して、積極的な工学的アプローチは、1970 年頃から行われており、海外では、Chato, JC 教授, Diller, KR 教授, Rubinsky, B 教授, Shitzer, A 教授, Bishof, J 教授らの貢献が顕著である。特に Shitzer 教授は、1985 年に *Heat Transfer in Medicine and Biology* を編集出版された[2]。基礎から応用まで詳しく書かれた本で、バイオ伝熱に関心を持つ研究者には貴重な情報源である。国内における、バイオ伝熱のフロントランナーは、棚沢一郎教授である。棚沢一郎教授のリードの基で、次々と優れた研究が生まれており、白檜了准教授[3-4]、山田幸生教授[5-6]、円山重直教授[7-8]、石黒博教授[9-10]、高松洋教授[11-12]、山田純教授[12-13]、多田幸生准教授[14-15]らの顕著な貢献により世界的なレベルのバイオ伝熱の研究が展開されている。筆者も助手時代に棚沢教授から多くの勇気を頂き、今筆者が活動出来ているのも棚沢教授のご指導と激励のお陰と感謝している。さらに伝熱学会や日本機械学会においても生体熱工学に関する研究分科会(山田幸生教授が主査をされた)が複数設置され、異分野の研究者も多く参加されて、活発な議論が展開された。

バイオ伝熱の研究は図 1 に示されるように生体組織内の伝熱と凍結保存・手術の課題に分けられる。生体組織内の伝熱と凍結の両者において、伝熱学的アプローチを実行するために必要となるのは生体熱物性値であるが、依然として「正確な」生体熱物性値が広い条件の基で得られていないため、正確な伝熱現象の解析の障壁となっている。この 2 つの課題は医療にも関連しており、特に最近では低侵襲治療としての温熱療法に大きな関心が集まっている。

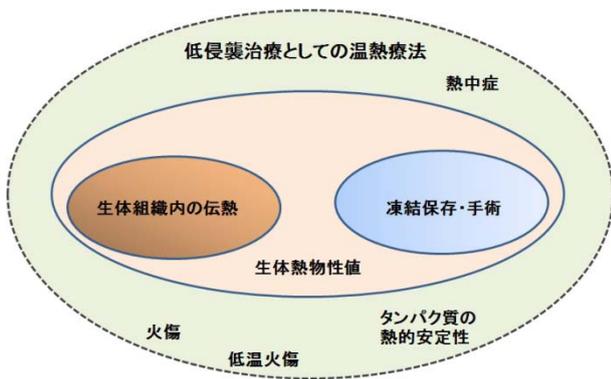


図 1 バイオ伝熱の課題

## 2. 生体組織内の伝熱

生体組織内における熱移動を明らかにするためには、生体組織構造や血管構築の複雑さを定量的に把握し、それらの微視的不均質構造に対応できる熱的計測方法を開発する必要がある。この観点に基づく研究は、70 年代後半から活発に行なわれるようになって来た。特に熱現象を積極的に利用する温熱療法では、生体組織内の伝熱を正確に把握する必要がある。

生体組織における伝熱は、熱媒体としての血液が主要な役割を演じており、血液灌流量の各組織における分布の違いにより巧みな温熱制御が行なわれている。従って生体内の熱移動量を求めるためには、血液による影響を把握する工夫がなされているが、伝熱機構が組織内の血管網や微視的構造に依存するので、正確な伝熱機構の把握が難しい。

### 2.1 Pennes の生体内熱移動の式

生体組織内の熱移動の解析、組織内血液灌流量の見積りをする場合、従来 Pennes[16]により得られた以下に示すような生体内熱移動の式 (Bioheat Equation) と言われるエネルギーバランスの式がよく用いられている。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_t \nabla^2 T + \rho_b w_b c_b (T - T_a) + q_m \quad (1)$$

$T$ : 組織温度,  $T_a$ : 動脈血の温度,  $\rho$ : 組織の密度,  $\rho_b$ : 血液の密度,  $c$ : 組織の比熱,  $c_b$ : 血液の比熱,  $k_t$ : 組織の熱伝導率,  $w_b$ : 組織単位体積あたりの血液流量,  $q_m$ : 組織単位体積あたりの代謝熱

この関係は熱伝導方程式に、血液灌流によって運ばれた熱が等方的な熱発生をしていることを表わす項と、代謝による熱発生を加えたものである。この式は極めて簡便な方程式であるため組織内の熱移動を求める際ひんばんに用いられている。Pennes の式では、 $T_a$  の温度で熱交換が行なわれる血管内に流入して来た血液が、瞬間的に熱平衡に達し、組織温度  $T$  に変化すると仮定し、その際のエンタルピー変化が血液灌流の結果、吐き出される熱量としている。しかしながら、生体内熱移動の式(1)は血管網の局所的な幾何学的形状や実際の血液灌流の状態を考慮していないため、微小血管内血流と組織との間の熱移動現象を正しく表現しているものではない。従って右辺第二項の血液灌流による影響を表わす項は、見かけの熱発生を表わす項と解釈すべきであろう。

### 2.2 組織内血管網における伝熱

血液循環系における熱移動は太い血管よりも細い血管系において顕著であるが、微小血管系の幾何学的構築が複雑であり、伝熱モデルの構築が困難である。そこで簡略化された血管床における伝熱モデルにおける各血管レベルでの伝熱量が検討されている。組織内に真っ直ぐな血管が隣同志の血管と一定の距離を隔てて分布しているとして、Chen and Holmes[17]は血液の温度変化が、周囲の組織との熱伝達のみによって決まるという仮定のもとに、循環系の各部位に対して簡単な計算を行なった。Chen and Holmes[17]は、血液の温度が周囲の温度に十分近づく時の血管の長さを平衡長さ  $X_{ej}$  として定義し、実際の血管の長さ  $L$  との比  $L/X_{ej}$  の大小によって各部位の熱交換の度合を評価した (表 1)。平衡長さ  $X_{ej}$  は、内径が 1mm 以上の太い動脈では、 $L$  に比べて非常に長いいため熱交換量はわずかで、一方内径が  $10\mu\text{m}$  以下の細動脈や毛細血管では、 $L/X_{ej} \gg 1$  となり血液の温度はほとんど周囲組織の温度に等しい。従って、主な熱交換は、内径が  $0.2\sim 0.5\text{mm}$  程度の細い血管床で生ずるといふ。これは従来熱交換は最も細い毛細血管レベルで行なわれると予想されていた見解と異なり興味深い結果である。Chato[18] も血管系における熱伝達をグレッツ問題としてとらえ、Chen and Holmes[17]と同様な結果を得ている。

表 1 血管網における伝熱：血液の温度が周囲の組織温度に十分に近づくまでの血管の長さを熱平衡長さとしている。  $X_{ei}$

$j$	血管の各部位	血管の体積が占める割合 (%)	血管内半径 $r_i$ ( $\mu\text{m}$ )	平衡長さ $X_{ei}$ (m)	実際の血管長と平衡長さとの比 $L_i/X_{ei}$
1	大動脈	3.30	5000	190	0.002
2	動脈	6.59	1500	4	0.05
3	動脈分枝部	5.49	500	0.3	0.3
4	終端分枝部	0.55	300	0.08	0.1
5	*	1.00	175	0.009	1
6	細動脈	2.75	10	$5 \times 10^{-6}$	400
7	毛細血管	6.59	4	$2 \times 10^{-7}$	6000
8	細静脈	12.09	15	$2 \times 10^{-6}$	800
9	静脈終端部	3.30	750	0.1	0.1
10	静脈分枝部	29.67	1200	0.3	0.3
11	静脈	24.18	3000	5	0.04
12	大静脈	5.49	6250	190	0.002

### 2.3 Weinbaum and Jiji による生体内熱移動の式

Weinbaum and Jiji [19]は、組織内の熱移動を正確に把握するためには微小血管の大きさや形状を明確にする必要があるとして興味深い実験を行なっている。ウサギの腿の血管にシリコンラバーエラストマーを注入して固化した後、脚を切断してグリセリン溶液に浸すと組織が透明となり、シリコンが注入されている血管のみが見えてくる。その薄片の標本を作製して顕微鏡下での血管網の形状や大きさの観察が可能となる。その結果、組織は皮膚表面から三層の異なる構造に分かれていることが解り、三層モデルを提唱した (図 2)。

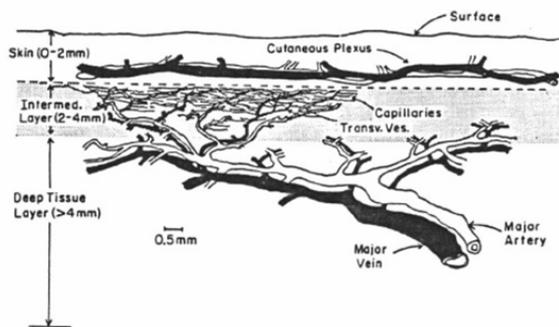


図 2 ウサギの腿の血管網による三層モデル

まず最も深い組織部位では内径  $300\mu\text{m}$  程度の動脈と静脈が  $1\text{cm}$  ほど離れてお互いに対向流となるように一対をなしている。その一対の動静脈の間で対向流熱交換が行なわれている。中間層では、内径  $50\mu\text{m}$  以下の血管網が分布しており多孔質媒体内の流れと見なすことも出来る。中間層の血管網では血液と組織との間でほぼ完全な熱平衡に達していると考えられる。外側の層は表皮直下の血管網である。さらに Weinbaum and Jiji[19]は、ウ

サギ腿組織内の温度分布を熱電対により測定した。

腿にステンレス針を穿刺し、針内に  $80\mu\text{m}$  径の熱電対を挿入する。その後針のみを抜き取ると熱電対のみが組織内に残り、熱電対を移動させることにより温度分布を測定した。測定後シリコンを注入して測定部位付近の構造を調べた。このようにして得られた温度分布では、深部層、中間層、外層に対応する領域が明確に把握出来る。特に深部層における一対の対向流血管付近の温度分布が注目に値する。つまり対向流血管のために局所温度勾配は、平均温度勾配よりも大きくなっており動脈及び静脈と組織との間での熱移動量が大きくなる。Weinbaum ら[19-20]は、主要な熱交換が毛細血管網ではなく、径が  $50\mu\text{m}$  以上の血管で生じているという Chen and Holmes[17]や Chato[18]が主張している見解とこの測定結果がよく一致していることを強調している。とくに Weinbaum ら[19-20] は主要な熱交換は内径が  $50\mu\text{m}$  以上の対向流となっている血管の間で行なわれており、熱平衡には達していないと指摘し、そのような血管を熱交換の著しい血管 (thermally significant vessel) と表現している。この点から考えると、生体内熱移動の式の血液灌流を表わす項は、毛細血管網では血液と組織がほとんど熱平衡に達しているため極めて小さな値になることを指摘し、生体内熱移動の式の血液灌流を表わす項の妥当性について疑問を投げかけ、次のような問題点を指摘している。

まず第一に、熱交換の著しい血管では、動脈血温度  $T_a$ 、静脈血温  $T_v$ 、組織温  $T$  は、それぞれ異なる値を示す。第二に、局所の血液灌流は等方的ではない。第三に、局所の血管網の幾何学的形状を考慮していない。そこで Weinbaum and Jiji[19]は対向流による熱交換が局所の組織内の熱移動に影響を与えるとして対流の効果を考慮に入れた新しい生体内熱移動の式(2)を提唱した。組織と血流との間でのエネルギーバランスを考えると、熱伝導方程式に一対の対向流血管と組織との間での熱交換を表わす項と代謝による熱発生項が加わった形の式が得られる。対向流血管の間での熱交換は、血管の方向によって決まるため、異方性物質の熱伝導率を表わす場合と同様に、テンソルの形の有効熱伝導率を定義して、対向流による見かけの熱伝導の促進の度合を表わした。そのテンソル有効熱伝導率(3)を用いると、エネルギーバランスを表わ

す式は、対流熱伝達を表わす式に類似して来る。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (k_{ij})_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} = - \frac{\pi^2 \rho_b^2 c_b^2 n a^4 u^2}{k_i^2 \sigma} \frac{\partial \ell_i}{\partial x_i} \ell_j \frac{\partial T}{\partial x_j} + q_m \quad (2)$$

$$(k_{ij})_{eff} = k_i (\delta_{ij} + \frac{\pi^2 \rho_b^2 c_b^2 n a^4 u^2}{k_i^2 \sigma} \ell_i \ell_j) \quad (3)$$

$n$ : 単位体積あたりの血管数密度,  $a$ : 血管内半径,  
 $u$ : 血管内平均流速,  $\ell_i, \ell_j$ : 血管軸の方向余弦,  
 $\sigma$ : 血管の形状係数

しかしながら, Weinbaum and Jiji[19] が導いた新しい生体内熱移動の式を解くためには, 血管網の幾何学的形状が既知であることが必要であるため簡便な方法ではないが, 血管網の微視的構造を考慮したものとしては初めての試みで極めて注目値する. Weinbaum and Jiji の式については, 動静脈及び組織温の設定などに関しては, 論争を呼び, 興味深い議論が展開された.

## 2.4 Arkin らによる生体内熱移動の式

Arkin ら[21]は Pennes の式に考慮されていない対流による影響を, Weinbaum and Jiji の厳密であるが複雑な扱いよりも簡便に通常の対流項に準じた形で以下の式のように表わした.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k(w) \nabla^2 T + \rho w_b c_b (T - T_a) - \rho c \bar{v} \nabla T + q_m \quad (4)$$

右辺第三項の対流項中の速度  $\bar{v}$  は, ある一定な組織体積内での平均速度としている. 第二項のような形で血液流の影響が入る場合を, 灌流モード (perfusion mode) とし, 第三項のような対流の形で熱が移動される場合を対流モード (convection mode) とすると, 実際の血管網での現象について, この両者を如何に区別するかが重要である. Arkin ら[21]はこの区別をするために, 加熱ヒーターと温度検出部とをある一定な配列で並べた測定プローブを考案し, そのようなプローブによる測定から, 両者を区別する可能性を論じている.

いずれにしても, Pennes の生体内熱移動の式の

欠陥を補う新しい式については, 実際の組織の血管網の微視的構造と, 血流速度とを対応させながらそれぞれの組織について個別に議論して行く必要があるため, さらに具体的な実験データとの比較検討が必要と思われる.

## 3. 生体物質の熱物性値の研究

生体物質 (組織) の熱物性値は, 構造が一様な工業材料の場合と異なる特異性がある. そもそも生きている細胞が集積して構成される生体組織の場合に, 工業材料の熱物性値と同等な考え方が適用できるかが疑問である. そこで, 必然的に純粋な (genuine) 熱物性値ではなく, 見かけの疑似 (apparent or pseudo) 的な熱物性値として捉え, 熱物性値を適用する目的に応じて見かけの熱物性値を適用する事になる. 生体物質の熱物性値の特異性は以下の通りである[22][23].

- ① 生きている生体組織の熱物性値は, 生きている状態で生体内で (in vivo) 計測する事が望ましい. 組織を体外から取り出した段階で, 組織は変成して, 生体として生きている状態から大きく変化する.
- ② 細胞から構成される生体組織は一様ではないため, 測定の間スケールによって, 熱物性値の意味が変わってくる.
- ③ 侵襲的な計測の場合には, 生体組織の局所的な破壊を最小限に抑えられるようにする必要がある.
- ④ 生きている組織は, 時々刻々状態が変わるので, 短時間に測定可能な方法が望まれる.

これまでの生体物質の熱物性値を計測する研究を以下に紹介する.

### 3.1 侵襲的方法

#### 3.1.1 非定常加熱法

Chato[24] は早くから生体物質の熱伝導率の非定常測定に着手し, 直径 0.7mm のサーミスタを先端に取り付けた針を測定部位に穿刺する方法を考えた. サーミスタ温度が一定になるように与える電力を制御し, 周囲への熱損失の時間的変化から周囲組織の有効熱伝導率を得るという方法である. Balasubramaniam and Bowman[25]は, サーミスタ加熱法において, サーミスタ内部の熱伝導をも考慮に入れて, 熱伝導率と温度伝導率を同時に測定す

る方法を考え、直径 0.75mm のサーミスタにより測定を行なっている。

プローブの加熱による温度上昇の領域を示す長さのスケールは、血液の微小循環のスケールよりもはるかに大きいので、得られる見かけの熱伝導率には必然的に血液流の影響が必ず含まれる。従って測定された組織における血液灌流の状態を明確にしておく必要がある。そこでサーミスタ加熱により熱伝導率と温度伝導率の同時測定する方法を Valvano ら[26]がさらに発展させ、有効熱伝導率の変化から血液灌流を求めている。組織内に埋入されたサーミスタプローブが、周囲組織と熱平衡に達した後、一定温度上昇するように加熱される。その時のサーミスタ自身の熱伝導方程式と、血液灌流を含むプローブ周囲組織に対する生体内熱移動の式の解析解を求め、定常解より熱伝導率が決められる。実際の測定では、非定常データから定常状態での応答を見積って有効熱伝導率を求める。さらに非定常解より温度伝導率を求める。摘出されたラットの肝臓にリングル液を灌流させ、灌流量を制御することによって、灌流の影響による組織の有効熱伝導率の変化を測定し、組織内灌流量を求めることを示している。

組織内の熱移動現象には血液流が大きな役割を演じているので、血液自体の熱的性質も当然把握する必要がある。血球のサスペンションである血液の熱伝導率の測定も短時間に行なう必要があるが、谷下ら[27]は、ポリエステル被覆の白金細線による非定常細線加熱法により、イヌの血液の熱伝導率を求めている。

### 3.1.2 パルス減衰法

サーミスタ加熱法では、加熱及び温度測定用プローブを穿刺して測定をおこなうため、プローブが細くとも組織の損傷が必然的に伴う。さらに実際使用されているサーミスタの形状は完全に球ではないため前提となる理論モデルの妥当性が問題となる。そこで Chen ら[28]は、サーミスタに一定なパワーをパルス的に与え、その後のサーミスタの温度下降から周囲組織の熱伝導率を決める方法を考案した。この方法では、プローブの加熱により温度上昇が生ずるプローブ周囲の領域が広がるため(サンプリング体積が増加)、プローブから離れた損傷のない場所の性質を反映することが出来、プローブの形状や性質による影響が小さくなると

いう利点がある。

## 3.2 非侵襲的方法

### 3.2.1 超音波加熱法

超音波を音響レンズにより集束させ、焦点部の組織をパルスの加熱し、その時の温度変化を測定することによって組織の温度伝導率及び血液灌流量を求める方法が、Newman and Lele[29]によって考案された。この方法の特徴は、組織のある特定の部位を直接超音波によって加熱するため、サーミスタプローブが埋入された場合のように、組織と加熱面との不連続面が生じないことである。生体内熱移動の式から組織内の温度分布を求め、温度分布から血液灌流がある場合と無い場合の有効温度伝導率を決めることが出来る。(Nakayama and Tanishita [30])

### 3.2.2 表面接触法

棚沢ら[31]は、皮膚表面に金属棒を接触させ、接触させた瞬間以降の金属棒の温度変化を測定することにより、皮膚直下の組織の熱伝導率を非侵襲的に求める方法を考案した。サーミスタ加熱法においてプローブを組織内に埋入させるという侵襲を避けるため、組織表面をサーミスタにより加熱して温度変化を測定し、内部組織の熱伝導率を測定する方法が Patel ら[32]によって試みられている。組織表面に付着されたサーミスタを断熱材で被う。このような系に Pennes の生体内熱移動の式を適用し、血液灌流を含む有効熱伝導率を求めている。実際にはプローブ表面と組織表面が完全に接触していない場合があるので、不完全接触による熱抵抗も考慮している。さらに摘出されたラットの肝臓及び生体内 (in vivo) の肝臓の表面における測定から、血液灌流による影響も明確に捉えている。

## 3.3 物質拡散係数

生体機能を司るためには、生体では低分子から高分子に至る様々な物質が移動して、代謝や排出が行われている。その中でも呼吸性ガスである酸素及び炭酸ガスは受動的に輸送されるために、対流拡散の保存則によって解析が可能となり、例えば古くから生理学領域においては、血管から組織への酸素輸送の保存方程式によって組織内の酸素濃度分布が計算によって求められ、代謝機能などが検討されている。その際に必要となるのがガス拡散係数である。さらに人工肺の開発においても

酸素と炭酸ガスの交換性能が重要であるが、この場合も輸送的性質である拡散係数が必要となる。そこで、血液や生体組織の酸素及び炭酸ガスの拡散係数を非定常法によって計測する方法が開発され、血液や組織の様々な条件の基での拡散係数が求められている[33-36].

#### 4. 生体組織の凍結

生体組織の凍結では、生体組織を保存する目的と破壊して凍結手術のための相反する目的があるが、両者とも凍結過程における生体組織の損傷のプロセスを明らかにする必要がある。前者の場合には、食糧の凍結輸送、畜産、さらに幹細胞などの有用細胞の保存などの応用がある。後者の場合には、凍結融解による生体組織の局所破壊を達成して、凍結による低侵襲治療が可能になる。凍結による損傷のプロセスを明らかにするためには、凍結融解による伝熱と物質輸送プロセスが重要で、特に時間-温度履歴と熱的損傷との関係を明らかにする必要がある。

そこで、凍結プロセスと生体組織の生存率との関係で重要なパラメータが冷却速度である。生存率と冷却速度との関係を図 3 に示す[37]。まず冷却速度が低い A の状態を考える。冷却速度が低いために、細胞内からの脱水が顕著で、細胞内の溶質効果により生存率が低くなる(溶質効果)[38]。溶質効果は、脂質とタンパクの変性に関わり、最終的には細胞損傷の原因となる。次第に冷却速度が高くなり、生存率が極大に達する(B点)。この場合には脱水が起きる前に細胞外凍結が生じて、細胞損傷が免れるために、生存率が最大になる。さらに冷却速度が増加すると、細胞内の過冷却状態となり細胞内凍結が生じて、氷晶形成のために細胞損傷が生じる。さらに冷却速度が増加すると、氷晶のない凍結、即ちガラス化(vitrification)の状態が得られる。氷晶がないので、細胞損傷が回避され、生存率が増加する。ただ、冷却速度を高める必要があるので、伝熱過程が律速になり、伝熱工学的にはさらなる工夫が必要な部分である。DMSO は、氷晶形成を制限する効果があるために、凍結保存の際に添加される。このように冷却速度は凍結過程に主要な影響を与えるので、冷却速度を任意に調節しながら凍結過程を観測する事が大事となる。Rubinsky[39]はそのような観点から、図

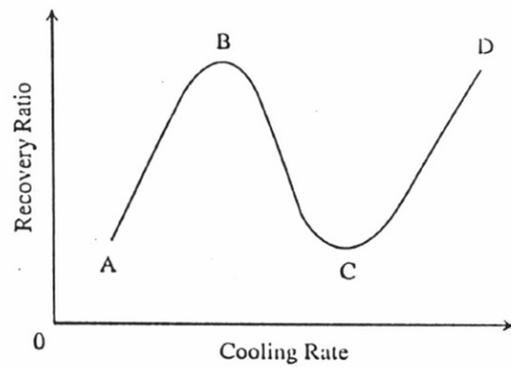


図 3 冷却速度と回復率(生存率)との関係

4 に示されるような任意に冷却速度を変えて方向性のある凍結過程を観測する装置を考案した。細胞損傷に至る熱的履歴は、冷却速度、最終温度、保持時間及び融解速度であり、これらの要因に関して明確に把握する必要がある。

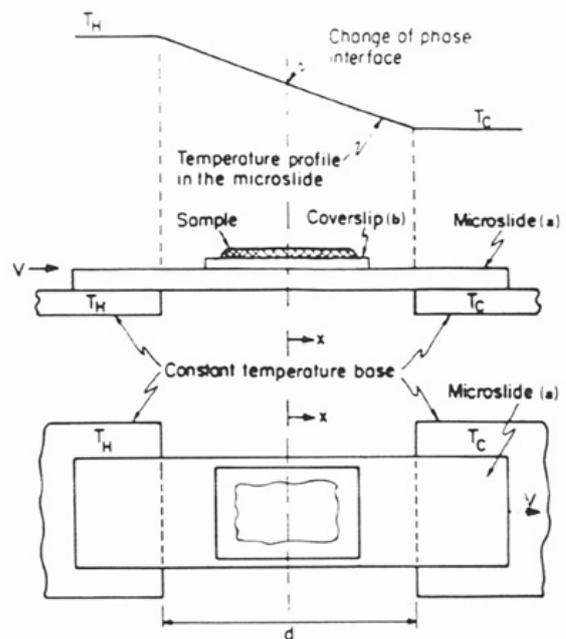


図 4 方向性凍結を可能にする工夫[39]

例えば、悪性腫瘍細胞の損傷を達成する熱的履歴の条件を表 2 に示す[38]。冷却速度や最終温度などは、細胞によって大きく異なっている。熱的履歴の条件は、予め十分に細胞毎に調べておくことが肝要で、一律な凍結手術は無理である事が分かる。

凍結手術による低侵襲治療も大きく進展している。凍結による損傷の閾値が比較的予測が可能に

表 2 腫瘍細胞に対する損傷効果を  
与える熱履歴[38]

Minimum thermal histories required to induce direct cellular injury in various systems*						
Study	Year	CR (°C/min)	ET (°C)	HT (min)	TR (°C/min)	Cell/Tissue System
McGrath et al. <sup>22</sup>	1975	100	-20	1	800	HeLa S-3 cervical carcinoma
Zacarian <sup>23</sup>	1977	Rapid	-35	1	NA	HeLa cervical carcinoma
Jacob et al. <sup>24</sup>	1985	1	-20	10	1	Walker mammary adenocarcinoma
Yang et al. <sup>25</sup>	2000	~5	-10	0	0.5	MBT-2 bladder carcinoma
Kremer and Duffy <sup>26</sup>	2000	2	-16.1	0	Fast	Human endometrium
Bischof et al. <sup>21</sup>	2001	5	-30	0	200	ELT-3 rat uterine leiomyoma
Tatsutani et al. <sup>20</sup>	1996	5	-40	5	37	ND1-human prostate adenocarcinoma
Smith et al. <sup>9</sup>	1999	5	-80	0	200	AT-1 rat prostate adenocarcinoma
Bischof et al. (unpublished)	2002	50	-40	0	200	LnCap Pro 5 human prostate adenocarcinoma

CR = cooling rate; ET = end (minimum) temperature; HT = hold time; NA = not available; TR = thawing rate.  
\* For ease of comparison, the minimum thermal history that reduced viability to under 15% was entered into the table.

なっており、前立腺癌への適用が多く、2010年の米国における凍結手術は15000例行われている。凍結手術の問題点は、病変部位の境目の認識精度で、細胞破壊が不完全だと癌の再発が生じてしまう。過度な凍結は病変部位の境目の神経や血管などの正常組織を複雑に損傷させてしまうので、凍結部位の制御が極めて重要となる。そこで、生体組織内の伝熱モデルに基づく凍結部位の同定が必要となるが、PennesのBioheat equationを適用する場合に、大きな障害となるのが血流の影響であり、見かけの熱伝導率をどのような値にするのが妥当なのかの判断である。生体組織の構築はそれぞれの臓器で大きく異なるため、それぞれの臓器におけるBioheat equationを立てる必要がある。バイオ伝熱の大きな課題であろう。さらにTNF- $\alpha$ という多機能なサイトカインを前処理として投与すると前立腺の腫瘍組織が縮小している[41]。組織を直接凍結させるための凍結プローブにも伝熱工学的工夫がなされており、液体窒素の利用、ジュールトムソン効果の利用、液体笑気(N<sub>2</sub>O)、ペルチエール素子の利用などがある。この辺も伝熱工学によるさらなる発展が期待される。凍結保存や凍結手術に関する研究に関して、国内の伝熱研究者によって活発な研究が展開されている[7][9][10][11][12][14][15]。

### 5. バイオ伝熱による医療技術の革新

医療技術は時代の流れと共に革新的な進歩を遂げている。50年代の抗生物質の発明、70年代の非侵襲イメージング技術、80年代の遺伝子診断治療が医療を大きく変革させた。これらに続く医療技術の革新は、低侵襲治療であろう。90年代から内視鏡による治療が進展し、大きく切開しないで治療する技術が広がっている。最近では手術ロボッ

トによる遠隔操作が可能となり、従来困難であった手術が出来るようになってきている。さらに内視鏡のみならず、血管内ステントにより動脈硬化による狭窄や動脈瘤を治療する血管内治療も進展しており、従来の外科の手法が大きく変革し、切開手術から低侵襲化に移行している。切開手術の問題点としては、切開による生体の免疫システムの抑制、術時の腫瘍細胞の転移の拡大や術後の痛みと入院期間の増大が医療現場で指摘され、低侵襲の技術に期待が集まっている。こうなると工学者の出番である。

そこで、伝熱工学的な手法も重要な低侵襲治療技術に有効であり、その代表例として温熱(焼灼)療法に注目が集まっている。温熱(焼灼)療法の殆どは、病変部のみを熱的に損傷させて治療を行うので、病変部位を正確に狙う事が可能であるという点では内視鏡よりメリットのある方法とも言える。温熱療法として、凍結療法、低体温法、高体温法、熱焼灼などが既に臨床現場で試みられている。低体温法は、主として脳虚血性疾患を対象としているが、それ以外は殆ど癌治療を目的としている。熱的な効果によってがん細胞を特異的に損傷させて治療する方法である。

#### 5.1 急性虚血性脳卒中における低体温治療

低体温法は、脳を保護する有効な方法とされている。心臓麻痺の場合の脳保護にも低体温による改善が認められている。低体温法の原理は代謝を抑制する事で、体温が1度下がると代謝が5%低下する。それで低体温の目標温度は28から33°Cとされているが、表皮からの冷却では効率が悪く、血管内にカテーテルを挿入して血液を直接冷却する方法が臨床現場で行われるようになった[42]。ただ、臨床現場では冷却方法に関しては患者の症状に応じて、経験的に選択しているので、伝熱学的なアプローチが導入されることで、より客観的な冷却方法のガイドラインが示せるのではないかと思われる。さらに伝熱学的には、血液中に熱交換器を挿入しているだけであるが、冷却速度や到達温度の制御の観点からは、伝熱学的にかなりの工夫の余地があるのではと思われる。

#### 5.2 熱焼灼療法

熱焼灼の方法として、ラジオ波、凍結、レーザー、集束超音波がある。ラジオ波は針電極により高周波電流を流して、熱により焼灼する方法で、

神経や心筋を刺激しないという利点があり、肝臓癌や腎臓に適用される。凍結による方法では、凍結プローブにより患部を凍結させて腫瘍細胞を損傷させる。超音波画像によるナビゲーションが可能で、肝臓癌、腎臓、前立腺に適用される。

レーザー照射は、患部に針を刺して、レーザービームを照射する[43]。超音波やMRIでナビゲーションにより正確なレーザー照射が可能になり、有望な低侵襲温熱療法である。例えば、前立腺癌へのレーザー照射による温熱療法であるが、MRIによる温度分布の計測を行い、bioheat equationによってレーザー照射による組織の温度上昇を予測して照射条件を決める。さらに、最近では細胞が熱の受けた際に発現する細胞を保護するタンパク質であるヒートショックプロテインが発現する事が分かっており、これらを考慮した計算機シミュレーションにより照射による治療計画を立てる。

非侵襲で熱焼灼治療が可能になる方法が集束超音波による治療法である[44][45]。超音波ビームを音響レンズにより導入するだけで、熱焼灼治療が出来るので、有望な治療法と考えられている。MRIでナビゲーションが可能となり、遠隔操作が可能である。前立腺、肝臓、乳癌、腎臓、膵臓、脳に対する適用が試みられている。しかしながら、周辺の健常部位に損傷を与えずに、患部のみを焼灼できるようにするための有効性と安全性に関しては、さらに研究が必要である。集束超音波の治療効果のメカニズムは、まず機械的エネルギーから熱エネルギーへの変換であろう。細胞では、43℃以上で60分経過すると増殖機能が失われる。56℃以上になると熱的毒性が生じ、細胞の凝固壊死により不可逆的な損傷を与える。80℃以上では、短時間で死に至る。短時間（3秒以下）に照射する事により、加熱部位を局所的に限定が可能である。

一方において、集束超音波の効果は、キャビテーションによる損傷効果と言われているが、現象が複雑で予測が困難である。しかしながら、集束超音波の生物学的影響は、治療に有効である面が多い。例えば、癌特異的な免疫の増強の可能性、T細胞（リンパ球の1種）の増加、抗腫瘍応答、ヒートショックプロテインの発現などである。副作用としては、わずかな疼痛の発生や希に皮膚に火傷が生じる事であるが、温度制御を精密に行う事によって回避できるであろう。米国では既に集

束超音波による治療例が蓄積されて、表3に示す[45]。このように臨床応用が進んでいる集束超音波であるが、残念ながら日本の企業からの製品はない。

表3 集束超音波による固形癌の臨床例 [45]

	症例数	装置	結果
前立腺	20	経直腸	100% 応答
	402	経直腸	87.2% バイオプシー陰性
肝臓	11	体外	91% 焼灼の確認
	474	体外	完全損傷
乳房	23	体外	100% 応答
	24	体外	79% バイオプシー陰性
腎臓	13	体外	腫瘍の縮小
	1	体外	2/3の腫瘍が縮小
肉腫	153(骨)	体外	焼灼を確認
	77(軟組織)	体外	
子宮	55	体外	安全と有効性を確認

### 5.3 熱による低侵襲治療技術の安全性と有効性を確保する鍵

熱焼灼による低侵襲治療技術の安全性と有効性を確保するための必要条件は、病変部位のみを的確に損傷させ、健常部位を傷つけない事である。そのためには、生体組織内の伝熱機構を正確に把握するための伝熱モデルとその検証が必要である。信頼性の高い伝熱モデルを確立するためには、生体内の温度場を非侵襲的に計測する温度イメージング技術が必要となる。MRや超音波によって非侵襲的に生体内の温度場を計測する技術が有望であろう。生体組織内の伝熱機構を解析するためには、最近でも Pennes による Bioheat equation が使われている。前述のように血液灌流によって運ばれた見かけの等方的熱発生をどのように見積もるかが不明で、実際には経験的に決めていた事が多い。そもそも生体組織は、臓器毎に血管網が異なり、血流は局所的に変動する。そのような生体組織において、血管網と血流分布のデータが必要であり、それらのデータに基づいた伝熱モデルが必要である。さらに、生体組織の構造に基づいた生体熱物性値が得られれば、正確に伝熱機構を持つ事が出来、手術前の計算機シミュレーションに基づいた正確な時空間的温度制御が可能になるであろう。さらに生体組織を局所的にせよ熱刺激を与えると、細胞の損傷のみならずヒートショックプロテインが発現するなど、興味深い生物学的

応答が見られる。そこで、正確な伝熱機構の解析と連携して、熱刺激に対する生物学的応答のメカニズムを明らかにする必要がある、Thermo-biology という新しい領域の可能性が伺える。

#### 5.4 再生医療技術に貢献する伝熱工学

最近京都大学の山中教授により発見された iPS 細胞が、将来様々な臓器を再生する事が可能であることで、再生医療に注目が集まっている。特に iPS 細胞のように未分化な細胞を分化誘導させて 3 次元組織の再構築を達成するという組織工学 (Tissue Engineering) という分野も大きく進展している。このような組織再生の新技术に脱細胞化がある。この方法は、国内で余り知られていないが、米国では、実用化が飛躍的に進んでいる最新技術である。脱細胞とは、細胞を界面活性剤などにより除去し、細胞の足場である細胞外マトリックスのみを残し、その足場に新たな細胞を播種して組織を再生するという発想である。Ott, Mattiesen は、Nature Medicine に脱細胞化によって新たな心臓を再生した実験を発表している[46]。ラットの心臓を脱細胞化した後に、別のラットの心臓の細胞を播種した所、新たな心臓になり、拍動を始めたという。このような脱細胞化技術は、勿論心臓再生の実用化には至っていないが、軟組織の再生の治療が既に行われている。脱細胞化には、凍結融解による方法も使われている[47]。多分界面活性剤による脱細胞よりも的確に脱細胞されるのではないと思われるが、再生医療技術に伝熱工学が関わるといふ点は、興味深い。

#### 5.5 国内の医療技術の現状と課題

前述のように、集束超音波などによる温熱療法が、伝熱工学的な視点を基盤にして医療技術として加速的に発展している。これらの新しい先進的な医療技術は、低侵襲化して患者に対する負担を大幅に軽減し、これまで困難であった治療が可能になるなど、患者に対する恩恵が大きい。最近手術ロボット (ダヴィンチ) が前立腺癌に限定して、保険適用が認められた。この事は先進的な医療技術が医療現場に加速的に浸透している事を意味しており、先進的な工学技術が医療分野に必須となる時代になっている。世界に誇るものづくりの伝統を持っている我が国では、残念ながらものづくりと医療との間に大きな乖離がある。低侵襲治療に見られるように、現在では治療技術に大き

なイノベーションが起きているが、その治療技術に関しては、海外企業による製品が 88.8% (財団法人医療機器センター、医療機器産業研究によるデータ) となっている。折角レベルの高い工学技術を有する我が国では、その宝が医療分野に生かされていない状態が続いている。この問題は、20 年以上前から、医療に関連する学会などで指摘されていたが、状況の変化は見られなかった。そこで、日本機械学会、電気学会、精密工学会などのものづくりの基盤的な学会と、日本内視鏡外科学会、コンピュータ外科学会、人工臓器学会、生体医工学会などの医学的の学会とが連携して、日本医工ものづくりコモンズ (代表北島政樹国際医療福祉大学学長) を 2009 年の 11 月に発足させて、ものづくり現場と医療現場を融合させて、日本から優れた医療機器を生み出す事を目標に活動を開始した。医療技術の開発に関しては、米国とドイツがこれまでトップランナーで、新しい先進的な医療機器が生まれていたが、最近ではイエスラエル、韓国、中国、シンガポールなどにおいても医療技術開発に重点を置き始め、基盤的な研究も進んでいる。筆者の印象では、加速的に進んでいるという表現の方が適切のように思われる。このような状況の中で、日本において医療技術の開発が停滞した状況が続けば、海外諸国の医療機器が日本の病院の中を埋め尽くす事になる。実は既にそれに近い状況になっている。最近では経産省のプロジェクト、医療特区、地方自治体による医療技術開発の推進などが目立つようになり、医工連携による研究開発の体制が取られるようになってきた。しかしながら、医療応用を可能とするためには、薬事の壁と保険収載の壁を乗り越えなくてはならない。そのためには、ものづくり側 (工学側) と医療側 (医学側) との連携や融合を本格的に実現すべき時に来ていると思われる。我が国では、医工連携は必ずしもうまく行っていない。革新的な技術を生み出すためには、基盤的な研究が大事で、伝熱学と生物医学との融合領域であるバイオ伝熱が果たす役割が大きいと思われる。

#### 参考文献

- [1] Chato, J.C., Reflections on the history of heat and mass transfer in bioengineering, J Biomech Eng, 97-101 (1981) 103.

- [2] Shitzer, A. and Eberhart, R. C.(Ed.): Heat Transfer in Medicine and Biology Vol.I & II, 1985, Plenum Press.
- [3] Provin, C., Takano, K., Sakai, Y., Fujii, R., Shirakashi, R., A method for the design of 3D scaffolds for high-density cell attachment and determination of optimum perfusion culture conditions, *J Biomech*, 1436-1449 (2008) 41.
- [4] 白樫了, Reuss, R., Schulz, A., Sukhorukov, V.L., Zimmermann, U., 巨大単膜リポソームと Jurkat 細胞の電気融合に及ぼす電場の影響, 日本機械学会論文集 B 編, (2011) JBR-0076
- [5] H. Zhao, F. Gao, Y. Tanikawa, and Y. Yamada, "Time-resolved diffuse optical tomography and its application to in vitro and in vivo imaging," *J. Biomedical Optics*, paper No. 062107(CID) (2007) Vol. 12.
- [6] K. Maruo, T. Oota, M. Tsurugi, T. Nakagawa, H. Arimoto, M. Hayakawa, M. Tamura, Y. Ozaki, Y. Yamada, "Noninvasive Near-infrared Blood Glucose Monitoring using a calibration model built by a Numerical Simulation method -Trial Application to patients in an Intensive Care Unit (ICU)-," *Applied Spectroscopy*, pp. 1423-1431 (2006) Vol. 60.
- [7] Maruyama, S., Takeda, H., Aiba, S., Sasaki, Y., Komiya, A., Heat transfer control of biological tissue utilizing non-equilibrium thermo-electric device for precise cryosurgery, *Low Temp Med*, 94-99 (2008) 34.
- [8] 円山重直, 高島茂, 小宮敦樹, 関隆志, 山家智之, 高精度温度制御加熱装置による温熱治療とその評価, 日本機械学会論文集, 167-171 (2009) 75
- [9] Ishiguro, H. and Imai, H., Time-series recrystallization of ice crystals during constant-temperature storage of rapidly frozen tissues, *Cryobiology and Cryotechnology*, 77-81 (2010) 56.
- [10] Ishiguro, H. and Horimizu, T., Three-dimensional microscopic freezing and thawing behavior of biological tissues revealed by real-time imaging using confocal laser scanning microscopy, *Int J Heat and Mass Transfer*, 5642-5649 (2008) 51
- [11] S. Zawlodzka, H. Takamatsu, Osmotic Injury of PC-3 Cells by Hypertonic NaCl Solutions at Temperatures above 0°C, *Cryobiology*, 58-70 (2005) 50.
- [12] H. Takamatsu, S. Zawlodzka, Contribution of Extracellular Ice Formation and the Solution Effects to the Freezing Injury of PC-3 Cells Suspended in NaCl Solutions, *Cryobiology*, 1-11(2006) 53
- [12] 山田純, 有田悠一, 安柄弘, 三浦由将, 高田定樹, 空間分解反射光計測に基づく皮膚のふく射物性の推定, 日本機械学会論文集 (B 編) pp. 2034-2039 (2008) Vol. 74.
- [13] Kazuo Naito, Jun Yamada, Tatsuya Ogawa and Sadaki Takata, 2010. 5, Measurement of Scattering Phase Function of Human Skin, *Japan Journal of Thermophysical Properties*, pp. 101-108 (2010) Vol. 24.
- [14] Y.Hayashi, N.Momose and Y.Tada, Micro-freezing of Biological Material, *Thermal Science & Engineering*, (1994) Vol.2.
- [15] 多田幸生, 村山栄治, 林勇二郎, 生体細胞の凍結におけるマイクロ挙動と生存状態の連関, 日本機械学会論文集 (B 編), (2005) 71 巻
- [16] Pennes, H.H.: Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm, *J. Appl. Physiol.*, 93-122 (1948) 1(2).
- [17] Chen, M.M. and Holmes, K.R.: Microvascular Contributions in Tissue Heat Transfer, In *Thermal Characteristics of Tumors*, Proc. Conf. N.Y.Academy of Science and National Cancer Institute, 137-150 (1979)
- [18] Chato, J. C.: Heat Transfer to Blood Vessels, *J.Biomech. Eng.*,110 (1980) 102.
- [19] Weinbaum, S. and Jiji, L. M.: A New Simplified Bioheat Equation for the Effect of Blood Flow on Local Average Tissue Temperature, *J. Biomech. Eng.*, 131-139 (1985) 107.
- [20] Weinbaum, S., Jiji, L.M. and Lemons, D.E. : Theory and Experiments for the Effect of Vascular Microstructure on Surface Heat transfer Part I: Anatomical Foundation and Model Conceptualization, *J. Biomech. Eng.*, 321-330 (1984) 106.

- [21] Arkin, H., Holmes, K.R., and Chen, M.M.: Theory on Thermal Probe Arrays for the Distinction Between the Convective and Perfusive Modalities of Heat Transfer in Living Tissues, *J. Biomech. Eng.*, 346- 352 (1987) 109.
- [22] Tanasawa, I. and Tanishita, K.: Genuine and Pseudo- Thermophysical Properties of Biological Media, *Int. J. Thermophysics*, 149 (1984) 5(2)
- [23] Bowman, H. F., Cravalho, E.G and Woods, M.: Theory, Measurement, and Application of Thermal Properties of Biomaterials, *Ann. Rev. Biophysics Bioengineering*, 1975, 43.
- [24] Chato, J.C.: A Method for the Measurement of the Thermal Properties of Biological Materials, *Thermal Problems in Biotechnology*, ASME, 1968, 16.
- [25] Balasubramaniam, T.A. and Bowman, H.F.: Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of biomaterials: A Simultaneous Measurement Technique, *J. Biomech. Eng.*, 148-154 (1977) 99.
- [26] Valvano, J.W., Allen, J.T. and Bowman, H.F.: The Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity, thermal Diffusivity and Perfusion in Small Volumes of Tissue, *J. Biomech. Eng.*, 192- 197 (1984) 106.
- [27] 谷下一夫, 長坂雄次, 長島昭, 山口隆美, 菅原基晃: 非正常細線加熱法による血液の熱伝導率の測定, *日本機械学会論文集*, 1784 (1981) 47(421)
- [28] Chen, M.M., Holmes, K.R. and Rupinkas, V.: Pulse-Decay Method for Measuring the Thermal Conductivity of Living Tissues: *J. Biomech. Eng.*, 253-260 (1981) 103.
- [29] Newman, W.H. and Lele, P.P.: A Transient Heating Technique for the Measurement of Thermal Properties of Perfused Biological Tissue, *J. Biomech. Eng.*, 219-227 (1985) 107.
- [30] Nakayama, N. and Tanishita, K., Measurement of thermal diffusivity of biomaterials by focused ultrasonic beams, *Biomedical Materials and Engineering* (1994) 4.
- [31] 棚澤一郎, 勝田直: 生体における熱定数の計測, *バイオメカニズム*, 17 (1973) 2.
- [32] Patel, P.A., Valvano, J.W., Pearce, J.A., Prahl, S.A. and Denham, C.R.: A Self-Heated Thermistor Technique to Measure Effective Thermal Properties From the Tissue Surface, *J. Biomech. Eng.*, 330 (1987) 109.
- [33] 堀 重之, 棚澤一郎, 谷下一夫, 中野国男, 桜井靖久: 血液の酸素吸収に関する基礎的研究, *日本機械学会論文集*, pp.1854-1861 (1980) Vol.46.
- [34] 谷下一夫, 棚澤一郎, 山口隆美, 菅原基晃: 血液における炭酸ガスの拡散係数の測定, *日本機械学会論文集*, pp.1945-1954 (1984) Vol.50
- [35] K. Tanishita, I. Tanasawa, T. Yamaguchi, M. Sugawara: Facilitated diffusion of carbon dioxide in whole blood and hemoglobin solutions, *Pflugers Archiv European J. of Physiol.*, pp.83-90. (1985) Vol.405
- [36] 鈴木秀雄, 中山雅彦, 尾谷知哉, 片岡則之, 谷下一夫: 筋肉組織の炭酸ガス拡散係数と熱伝導率の測定, *日本機械学会論文集*, pp.1077-1083 (1991) Vol.57.
- [37] Tanasawa, I, Nagata, S., Igarashi, J, Fundamental study on cryopreservation of living organs using daphnia, *Proc of Int Congress of Refrigeration*, 1-6 (1991)
- [38] Hoffmann, N.E. and Bischof, J.C. The cryobiology of cryosurgical injury, *Urology*, 40-49 (2002) 60.
- [39] Rubinsky, B. and Eto, T.K., Heat transfer during freezing of biological materials, *Annual Review of Heat Transfer*, 1-38 (1990) 3.
- [40] Rossi, M.R., Tanaka, D., Shimada, K., Rabin, Y. Computerized planning of prostate cryosurgery using variable cryoprobe insertion depth, *Cryobiology*, 71-79 (2010) 60.
- [41] Jiang, J., Goel, R., Schmechel, S., Vercellotti, G., Forster, C., Bischof, J, Pre-conditioning cryosurgery, *Cryobiology*, 280-288 (2010) 61.
- [42] Dae, M.W., *Am J Physiol.* H1584-H1591 (2001) 282
- [43] Fuentes, D., Oden, J.T., Diller, K.R., Hazle, J.D., Elliott, A., Shetty, A., Stafford, R.J., Computational modeling and real-time control of patient-specific laser treatment of cancer, *Annals*

- Biomedical Eng, 762-782 (2009) 37.
- [44] Kennedy, J.E., Haar, G.R., Cranston, D., High intensity focused ultrasound: surgery of the future?, The British J Radiology, 590-599 (2003)76.
- [45] Kennedy, J.E., High-intensity focused ultrasound in the treatment of solid tumours, Nature Reviews Cancer, 321-327 (2005) 5.
- [46] Ott, H.C., et al. Perfusion-decellularized matrix: using nature's platform to engineer a bioartificial heart, Nature Medicine, 213- 221 (2008) 14.
- [47] Crapo, P.M., Gilbert, T.W., Badylak, S.F., An overview of tissue and whole organ decellularization processes, Biomaterials, 3233-3243 (2011)32
-

### 第3回 熱と流れのシミュレーション・アジア国際シンポジウム

*Report on the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2011*

川口 靖夫 (東京理科大学)

*Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science)*

*e-mail: yasuo@rs.noda.tus.ac.jp*

#### 1. 本会議の概要

本シンポジウム (略称 ASCHT) は伝熱と流体力学のシミュレーションを対象とするアジア地域の研究者が中心となって集まる会議で、第1回を中国・西安 (2007年)、第2回を韓国・済州島 (2009年) にて開催しています。第3回は日本で開催されることとなり、京都大学百周年時計台記念館を会場とし、会期を2011年9月22日から26日までの5日間としました。議長は河村洋 (諏訪東京理科大学)、共同議長は陶文銓 (Tao Wen-Quan, 西安交通大学, 中国)、Hur Nahmkeon (Sogang Univ., Korea) の各教授が務めました。また、昨年が日本伝熱学会の50周年にあたるため、50周年記念事業の一環として開催しました。

#### 2. 今回の会議の内容

本シンポジウムの会議内容を示すため、表1にセッション一覧、表2にプレナリー・キーノート講演一覧を掲載します。講演は基調講演1件、キーノート講演9件、一般講演123件が3室の平行セッションにて行われました。参加者数は169名、参加国 (参加者数) は、日本 (68)、中国 (57)、台湾 (20)、韓国 (15)、イギリス (4)、インド (2)、イラク (2)、ロシア (1) という構成となりました。この会議の参加者は第1回には中国が多数、第2回には韓国・日本・中国の3国が主体でしたが、第3回を数えてますます多国間の国際会議の色彩を強めてきました (図1)。オープニングでは河村会議議長より東アジアにおける文化交流の歴史、この会議を京都で開催する意味に言及した挨拶があり、プレナリーでは住明正教授 (東京大学) から、リチャードソンの業績から説き起こして地球温暖化に関わる最新の気象・大気シミュレーションの成果が解説されました。

表1にみるとおり、本シンポジウムではふく射・対流・伝導等様々な伝熱現象、また単相・混

相・相変化などの流れのシミュレーションに関する発表が大きな部分を占めました。日本を含むアジア地域ではエネルギー・環境問題が喫緊の課題であり、省エネルギーや新エネルギー機器の熱設計が重要となること、こうした新規開発の機器は設計ノウハウの蓄積に乏しいため、流体や熱移動の解析にシミュレーションを有効に活用して開発を加速するニーズが高まっているためと想像されます。バンケットでは、日本伝熱学会会長・International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT) 副会長、笠木伸英教授 (東京大学) から、伝熱のシミュレーション研究への期待をこめてご挨拶を頂きました。シミュレーションが既知の現象を解釈するに留まらず、現象発見や新しいコンセプトに基づく機器開発を主導する役割が期待されています。マイクロ・ナノスケールでのシミュレーションは、本シンポジウムにおいても関心を集め、しばしば白熱した議論が交わされました。

講演室を廻ると各室とも若手や院生の登壇発表が目立ちました。中には厳しい質問に立ち往生する院生も居ましたが、研究結果を国際的な舞台で発表したいという熱意が伝わり、活力の感じられるシンポジウムでした。

#### 3. ASCHT11 を振り返って

日本でのシンポジウム開催に、アジア地域から若手を含む参加者をいかに多く集められるか、という問題に頭を悩ませました。会場に使わせて頂いた京大のシンボルとなる時計台記念館は、大正時代のモダンを表す建物で、各室は大きく、天井が高く、アカデミックな雰囲気を会議にもたしてくれました。一方ホールの内装・施設は最新で、快適な環境でオープニングとプレナリー講演を楽しむことができました。会場の雰囲気を伝えるために、期間中に撮った写真を図2に掲載します。

バンケットでは京都の雅な伝統文化に触れてもらう企画もあり、内外の参加者からたいへん好評でした。

春に東日本大震災（2011年3月11日）が起こり、原発の事故による放射性物質の漏洩が大きなニュースとなって世界中を駆け巡りました。この影響による参加者のキャンセルを心配し、ホームページには最新の情報を開示して、参加者の不必要な不安を軽減するようにしました。そのかいもあってか、開催日を迎えると、あまりキャンセルはなく、No showも5件と極めて少なかったことは大変幸いでした。この研究分野の発展性と、各国から参加者を誘ってくれた共同議長や国際実行委員各位の熱意に依るものであります。

本シンポジウムの開催にあたっては、日本伝熱学会から50周年記念行事としての位置づけとご支援を頂きました。またICHMTの共催、日本伝熱学会関西支部の共催、さらに京都大学GCOE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」、関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団、鹿島学術振興財団からご支援を頂きましたことに、深甚なる謝意を表したいと存じます。また献身的にシンポジウムを支えてくださった中部主敬現地実行委員長（京都大学教授）、須賀一彦プログラム委員長（大阪府立大学教授）をはじめとする実行委員各位に、心からお礼を申し上げます。

次回第4回を、2013年1月に香港科学技術大学にて開催することがスムーズに決まり、このことも本会議が成功裏に行われたことを示すものと考えています。

(ASCHT11 事務局長)

表1 セッション一覧

Environmental & Radiative Heat Transfer
Turbulent Heat Transfer-1, 2
Natural & Mixed Convection
Conductive & Conjugate Heat Transfer-1, 2
Heat Exchangers
Engineering Applications
Optimization & Control Methods
Turbulent Flows-1, 2
Multiphase Flows
Flows with Phase Changes
Flows with Chemical Reactions
Bio Fluid Dynamics
Acoustics & Others
Simulations of Complex Phenomena
Micro/Nano & Rarefied Flows
Lattice Boltzmann Simulations
Molecular Dynamics Simulations-1, 2
Numerical Schemes-1, 2
Interface & Boundary Capturing Schemes

表2 プレナリー・キーノート講演一覧

Plenary	Sumi, Akimasa, The Univ. of Tokyo, Japan	Present Status and Future Direction of Weather Prediction and Climate Simulation
Keynote	Emerson, David R., STFC Daresbury Lab., UK	Advances in Modeling Non-equilibrium Flow at the Micro- and Nano-scale
	Ha, Man-Yeong, Pusan National Univ., Korea	Natural Convection in the Enclosure in the Presence of a Solid Body
	He, Ya-Ling & Tao, Wen-Quan, Xi'an Jiaotong Univ., China	Multiscale Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow Problems in Energy and Environmental Engineering
	Ishihara, Keiichi N., Kyoto Univ., Japan	Electricity Planning in Japan by 2030 through Scenario Analysis
	Kim, Kwang-Yong, Inha Univ., Korea	Optimization of Film-Cooling Holes Using Surrogate Modeling
	Lee, Changhoon, Yonsei Univ., Korea	Acceleration Behavior of Particles in Near-wall Turbulence
	Shibahara, Masahiko, Osaka Univ., Japan	Molecular Dynamics Study on the Influence of Nanostructure Geometry on the Liquid Molecular Local Non-equilibrium Behaviors at Liquid-Solid Interfaces
	Yu, Bo, China Univ. of Petroleum, China	Proper Orthogonal Decomposition and its Application in Thermal Science and Engineering



図1 会場（京都大学百周年時計台記念館）前での集合写真（2011年9月23日）



図2 左：会場に入る参加者，右：セッションでの討論

日本伝熱学会創立 50 周年記念 九州伝熱セミナー in 由布院 報告

Report on 50<sup>th</sup> anniversary of HTSJ, Kyushu Heat Transfer Seminar in Yufuin

有馬 博史 (佐賀大学)

Hirofumi ARIMA (Saga University)

e-mail: arima@ioes.saga-u.ac.jp

去る 2011 年 12 月 16 日 (金), 17 日 (土), 九州支部主催の「日本伝熱学会創立 50 周年記念 九州伝熱セミナー in 由布院」が, 大分県由布院市にある西部ガスの社員用保養施設「ゆふトピア」で開催されました。

今回は, 日本伝熱学会 50 周年記念に当たり「九州の伝熱研究 — 過去と未来の 50 年」と題して講演会を企画しました。1 日目は 3 名の先生方をお招きして招待講演会を行いました。また, 2 日目は若手研究者講演会と題して伝熱研究の次世代を担う学生達による計 6 件の講演会を行いました。図 1 にプログラムを示します。本セミナーは参加者数が 66 名 (教員・研究者 23 名, 学生 43 名) と多くの方々にご参加いただきました。

1 日目の招待講演会では, ご招待の先生方から長年携われて来た伝熱研究の歴史や苦労話, 裏話など, 資料や写真を交えながらお話をいただきました。どれも貴重なお話ばかりで参加者にとって非常に充実した時間となりました。2 日目の若手研究者講演会では, 九州内にある大学の各研究室から推薦の学生達が現在進行中の研究について発表を行いました。講演内容が多岐の分野に跨っていたこともあり, 特に参加した学生達には他の分野に触れることで良い刺激となったのではないかと思います。

最後に, ご多忙の中遠方よりご来場いただきました講演者の方々, 当日の会場設営・運営を支えていただいた教職員と学生の方々, そしてセミナー参加者の皆様に, 事務局一同心よりお礼申し上げます。また, 宿泊施設の利用を快くお引き受けいただきました「ゆふトピア」の皆様にも厚く御礼申し上げます。

○講演資料や写真につきましては, 九州支部 HP ([http://heat.mech.kumamoto-u.ac.jp/htsj\\_kyushu/](http://heat.mech.kumamoto-u.ac.jp/htsj_kyushu/)) をご覧ください。

12 月 16 日 (金)
13:30~16:50 講演会
・ 本田 博司 (九州大学名誉教授) 「沸騰・凝縮熱伝達の促進に関する研究-個人的な経験を中心にして-」
・ 増岡 隆士 (九州大学名誉教授) 「多孔質内自然対流のこれまでの研究について」
・ 山田 明 (三菱重工株式会社 技術統轄本部 長崎研究所 主幹研究員) 「三菱重工長崎研究所の熱工学(燃焼と伝熱)50 年」
18:30~ 夕食・懇親会
12 月 17 日 (土)
9:30~11:45 講演会
・ 奥祐一郎 (九州工業大学大学院 D2) 「マイクロ波凍結による冷凍保存の改善」
・ 地下大輔 (九州大学大学院総合理工学府 D2) 「矩形微細流路内の凝縮」
・ 三島文也 (佐賀大学大学院工学系研究科 M2) 「可視化によるプレート式蒸発器におけるアンモニアの沸騰流動特性に関する研究」
・ 立川能成 (大分大学工学研究科 M2) 「UVP 法による RMCz 法融液対流の測定」
・ 田中雄樹 (九州大学大学院 M2) 「マイクロビーム MEMS センサを用いた流体の熱伝導率測定に関する研究」
・ 久保 考央 (熊本大学 B4) 「電子基板の熱伝導特性に関する理論的研究」
12:00 解散

図 1 セミナーのスケジュール



図 2 セミナー参加者

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
5月～ 6月	30(水) ～1(金) 日本伝熱学会創立50周年記念 第49回日本伝熱シンポジウム	2012.1.20  事前参加 申込締切 2012.4.13	2012.3.16	第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会 富山県立大学 工学部 機械システム工学科 機械エネルギー工学講座内 Fax: 0766-56-6131 E-mail: nhts49@ml.pu-toyama.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10
11月	13(火) ～ 15(木) 第3回 国際伝熱フォーラム 3rd International Forum on Heat Transfer	事前参加 申込締切 2012.8.31	2012.7.31	〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学 研究系 IFHT2012 実行委員会事務局 宮崎康次 Tel/Fax:093-884-3168 E-mail:miyazaki@mech.kyutech.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
4月	18(水) ～ 20(金) 第46回空調和・冷凍連合講演会 (開催場所：東京海洋大学 海洋工学部 85周年記念会館)	2012.1.13	2012.2.24	社団法人 日本冷凍空調学会 第46回空調 和・冷凍連合講演会係 〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町13-7 日本橋大富ビル5F Tel: 03-5623-3223 Fax: 03-5623-3229 E-mail: y.uda.pa@jsrae.or.jp	
5月	29(火) ～31(木) 第17回計算工学講演会 (開催場所：京都教育文化センター)	2012.1.23	2012.3.23	社団法人 日本計算工学会 事務局 石塚弥生 講演会担当者 高野直樹 Tel:03-3868-8957 Fax:03-3868-8957 E-mail:office@jcses.org naoki@mech.keio.ac.jp URL: http://www.jcses.org/koenkai/17/index.htm	
6月	21(木) ～ 22(金) No.12-11 第17回動力・エネルギー技 術シンポジウム (開催場所：九州大学医学部キャンパス 百年講堂)	2012.1.30	2012.4.30	幹事 河野正道(九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門) 〒819-0395 福岡市西区元岡744 九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 Tel/Fax:092-802-3099 E-mail:kohnno@mech.kyushu-u.ac.jp	
7月	14(土) ～15(日) 日本実験力学学会2012年度年次講演会 (開催場所：豊橋技術科学大学)	2012.3.30	2012.5.25	〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1 豊橋技術科学大学 機械工学系 鈴木新一・足立忠晴 Tel: 0532-44-6678 0532-44-6664 Fax: 0532-44-6661 E-mail: jikken@rm.me.tut.ac.jp	
8月	9(木) ～11(土) 日本混相流学会年次講演会2012 (開催場所：東京大学 柏キャンパス)	事前参加 申込締切 2012.7.6	2012.6.4	実行委員事務局 幹事 大宮司 啓文・陳 昱 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 日本混相流学会年次講演会2012・第31回混相 流シンポジウム実行委員会事務局 Tel: 04-7136-4658, 04-7136-4603 Fax: 04-7136-4603 E-mail: nenkai@jsmf.gr.jp	
8月	9(木) 第31回混相流シンポジウム (開催場所：東京大学 柏キャンパス)	事前参加 申込締切 2012.7.6	2012.6.4	実行委員事務局 幹事 大宮司 啓文・陳 昱 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 日本混相流学会年次講演会2012・第31回混相 流シンポジウム実行委員会事務局 Tel: 04-7136-4658, 04-7136-4603 Fax: 04-7136-4603 E-mail: nenkai@jsmf.gr.jp	
12月	5(水) ～7(金) 第50回燃焼シンポジウム (開催場所：愛知県産業労働センター ウインクあいち)	2012.7.20	2012.9.14	第50回燃焼シンポジウム事務局 〒458-0015 愛知県名古屋市中種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 内 Tel:052-789-2710 Fax:052-789-5123 E-mail:sympo50@combustionsociety.jp URL: http://www.combustionsociety.jp/sympo50/	

## 日本伝熱学会創立 50 周年記念 第 49 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 石塚 勝  
幹 事 坂村芳孝

**開 催 日 :** 平成 24 年 5 月 30 日 (水) ~ 6 月 1 日 (金)  
**会 場 :** 富山国際会議場 (大手町フォーラム) (<http://www.ticc.co.jp/>) [受付および A~G 室]  
所在地 〒930-0084 富山県富山市大手町 1 番 2 号 電話 076-424-5931  
ANA クラウンプラザホテル富山 (<http://www.anacrowneplaza-toyama.jp/>) [H, I 室]  
所在地 〒930-0084 富山県富山市大手町 2 番 3 号 電話 076-495-1111  
アクセス JR 富山駅より市内環状線セントラムで約 7 分 国際会議場前下車 徒歩 0 分  
富山空港よりタクシーで約 20 分

### 日本伝熱学会創立 50 周年記念特別パネル講演 :

平成 24 年 5 月 31 日 (木) 15:10~16:40 (A 室)  
演 題 : 「伝熱研究の過去・現在, そして, 私たちはどこへ行くのか」  
司 会 : 圓山重直 (東北大)  
パネリスト : 門出政則 (佐賀大)・吉田英生 (京大)・高田保之 (九大)・鹿園直毅 (東大) (敬称略)

**総 会 :** 平成 24 年 5 月 31 日 (木) 16:50~18:20 (A 室)

**事前参加申込締切 :** 平成 24 年 4 月 13 日 (金)

**ホームページ URL :** <http://www.htsj.or.jp/nhts49/>

### 【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) を設けます。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定に従って下さい。
- ・優秀プレゼンテーション賞セッションについては, 本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。

### 【参加費等】

- ・シンポジウム参加費
  - 一般 (事前申込 : 12,000 円, 当日申込 : 14,000 円)
  - 学生 (事前申込 : 5,000 円, 当日申込 : 6,000 円)
- ・講演論文集  
日本伝熱学会会員 : 無料 (電子版はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日に冊子体・CD-ROM を配布します。不参加者のうちの希望者には, CD-ROM を事後にお送りしますので, 開催後 1 ヶ月以内に, 日本伝熱学会宛てにご氏名・送付先を明記の上, メ

ールにてお申し込み下さい。)

非会員：8,000 円(冊子体)。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、無料になります。

【懇親会】

- ・開催日：平成 24 年 5 月 31 日(木) 18:30~20:30
- ・会場：ANA クラウンプラザホテル富山 3 階 大宴会場「鳳」(講演会場隣接)  
〒930-0084 富山県富山市大手町 2 番 3 号 電話 076-495-1111
- ・懇親会費  
一般(事前申込:8,000 円, 当日申込:10,000 円。同伴配偶者無料)  
学生(事前申込:4,000 円, 当日申込:5,000 円)

【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、学会誌 2012 年 1 月号に挟み込まれた「払込取扱票」を用い、以下の記入例を参考にしてお支払い下さい。なお、郵便局にある一般の「払込取扱票」でもお支払いいただけます。その際は、記入例に準じた内容(参加登録 ID、参加者氏名、支払い内容、金額、代表者名、連絡先など)を記入して下さい。
- ・払込みをもって「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。払込みが 4 月 14 日以降になった場合は当日申込扱いといたします。
- ・4 月 14 日以降も 5 月 19 日までは、当日申込の扱いでウェブからの参加登録および払込みを受け付けます。当日に受付でお渡しすべきものを予め準備しておく等の作業を行いますので、できるかぎりウェブからの登録および事前の払込みを行っていただけますようご協力をお願いいたします。なお、例年のように、シンポジウム当日の参加申込もできます。
- ・銀行より振込まれる場合は、次のページに記載のゆうちょ銀行口座にお振込み下さい。その際、必ず 1 件ずつとし、氏名の前に参加登録 ID 番号を付けて下さい。

登録 ID は参加申込時に発行される「4桁の数字(予定)」です。

お支払いいただく項目を○で囲んで下さい。

振込手数料はご負担下さい。

「通信欄」の合計金額をこちらにご記入下さい。

1枚の用紙で複数の参加者の登録が可能です。本登録の代表者の方のご所属の連絡先・お名前・電話番号を「ご依頼人」の欄にご記入下さい。

この受領証は、大切に保管してください。

00	口座記号	口座記号・番号はお間違えないよう記入して下さい。	金額	千	百	十	万	千	百	十	円
007501	1	108512	金額	3	4	0	0	0	0	0	0
加入者名	第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会										
通信欄	参加登録 ID	参加者氏名	内容(該当に○)	金額							
1.	0001	伝熱 太郎	○シンポ ○懇親会	20,000 円							
2.	0002	岡山 花子	○シンポ ○懇親会	9,000 円							
3.	0003	富山 二郎	○シンポ ○懇親会	5,000 円							
事前払込×切：4月13日(金)				合計金額	34,000 円						
〒○×△ - ○□□×											
富山県富山市○○○△△△											
伝熱大学 工学部 伝熱工学科											
依頼人 伝熱 太郎 様											
(ご連絡先電話番号) ○×△ - ○□□ - ×□△□											
裏面の注意事項をお読みください。(ゆうちょ銀行)											
これより下部には何も記入しないでください。											

口座記号番号	007501
加入者名	第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会
金額	千 百 十 万 千 百 十 円
	3 4 0 0 0
おなまえ	伝熱太郎 (伝熱大学)
依頼人	代表者の方のお名前をご記入下さい
料金	
備考	

ゆうちょ銀行振込口座

店名 (店番) : ○七九 (ゼロナナキュウ) 店 (079)

預金種目 : 当座

口座番号 : 0108512

口座名称 (漢字) : 第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

口座名称 (カナ) : ダイヨンジュウキュウカインホンデンネツシンポジウムジッコウイインカイ

**【ご注意】**

**【講演論文集 (電子版)】**

- ・講演論文集 (電子版) は、日本伝熱学会会員 (2012 年度会員) の皆様に対し、ホームページにリンクされたウェブサイトを通じて公開します。公開日は 2012 年 5 月 23 日 (水) を予定しています。特許に係わる公知日もこの日になります。
- ・電子版は、ホームページのトップページ (日本伝熱学会のホームページからもリンクが張られています。この場合には、日本伝熱シンポジウム) → 講演論文集 (電子版) と辿っていただき、当該ページに入り、以下の閲覧 ID とパスワードを用いてログインの後、閲覧・ダウンロードすることができます。なお、このサイト上での講演論文公開は、従来から行ってきました日本伝熱学会会員への郵送による講演論文集 CD-ROM 事前配布に代わるものです。
- ・講演論文集 (電子版) 閲覧 ID : nhts49toyama, パスワード : 2012toyama
- ・シンポジウムで座長をご担当下さる皆様におかれましては、この電子版を当日のセッションの参考資料として下さい。

**【講演論文の公開日】**

- ・講演論文は、会員を対象に、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。
- ・したがって、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。

**【交通と宿泊】**

- ・交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照ください。

**【ご注意】**

- ・口頭発表用として実行委員会が準備する機器は、原則として液晶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下さい。
- ・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。
- ・変更事項については、随時ホームページ上に掲載しますので、ホームページをご参照下さい。
- ・その他、ご不明な点がございましたら、実行委員会事務局に E-mail または Fax でお問い合わせ下さい。

**【お問い合わせ先】**

第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局

富山県立大学 工学部 機械システム工学科

機械エネルギー工学講座内

E-mail: nhts49@ml.pu-toyama.ac.jp

FAX: 0766-56-6131

第49回日本伝熱シンポジウム[富山]

タイムテーブル[第1日: 5月30日(水)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A11 沸騰1 9:30-10:50	B11 バイオ伝熱1 9:50-10:50	C11 混相流1 9:30-10:50	D11 輻射1 9:30-10:50	E11 自然 エネルギー1 9:30-10:50	F11 多孔質体の 伝熱1 9:50-10:50	G12 OS 非線形熱流体 現象と伝熱1 10:20-12:20	H11 分子動力学1 9:30-10:50	I11 OS 燃焼研究 の最前線1 9:30-10:50
A12 沸騰2 11:00-12:20	B12 バイオ伝熱2 11:00-12:20	C12 混相流2 11:00-12:20	D12 輻射2 11:00-12:40	E12 自然 エネルギー2 11:00-12:20	F12 多孔質体の 伝熱2 11:00-12:20		H12 分子動力学2 11:00-12:20	I12 OS 燃焼研究 の最前線2 11:00-12:20
A13 沸騰3 13:30-14:50	B13 計測技術 13:30-14:30	C13 混相流3 13:30-14:50	D13 凝縮 13:30-14:50	E13 自然 エネルギー3 13:30-14:50	F13 多孔質体の 伝熱3 13:30-14:50	G13 OS 非線形熱流体 現象と伝熱2 13:30-14:50	H13 分子動力学3 13:30-14:50	I13 OS 燃焼研究 の最前線3 13:30-14:50
		SP1 優秀プレゼン テーション賞 ショートプレゼ ンテーション 沸騰・熱機器 15:00-15:30	SP2 優秀プレゼン テーション賞 ショートプレゼ ンテーション 反応・燃焼 ・流動 15:00-15:30	SP3 優秀プレゼン テーション賞 ショートプレゼ ンテーション 熱輸送・物性 15:00-15:30	SP4 優秀プレゼン テーション賞 ショートプレゼ ンテーション マイクロ・ナノ スケール現象 15:00-15:30			
15:40-17:00 優秀プレゼンテーション賞 ポスターセッション(富山国際会議場3Fホワイエ)								
産学連携イベント(富山国際会議場3Fホワイエ)								

第49回日本伝熱シンポジウム[富山]

タイムテーブル[第2日: 5月31日(木)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A21 福島第一原子 力発電所災害 に係る伝熱学 会特別委員会 企画伝熱シン ポジウム特別 セッション 9:30-11:30	B21 マイクロ伝熱1 9:30-10:50	C21 混相流4 9:30-10:50	D21 OS 水素・ 燃料電池1 9:30-10:50	E21 ヒートパイプ1 9:30-10:50	F21 強制対流1 9:50-10:50	G21 反応・燃焼1 9:50-10:50	H21 分子動力学4 9:30-10:50	I21 OS 燃焼研究の 最前線4 9:30-10:50
	B22 マイクロ伝熱2 11:00-12:20	C22 電子機器の 冷却1 11:00-12:20	D22 OS 水素・ 燃料電池2 11:00-12:20	E22 ヒートパイプ2 11:00-12:20	F22 強制対流2 11:00-12:20	G22 反応・燃焼2 11:00-12:20	H22 分子動力学5 11:00-12:20	I22 OS 燃焼研究の 最前線5 11:00-12:40
A23 沸騰4 13:30-14:50	B23 マイクロ伝熱3 13:30-14:50	C23 電子機器の 冷却2 13:30-14:50	D23 OS 水素・ 燃料電池3 13:30-14:50	E23 ヒートパイプ3 13:30-14:50	F23 強制対流3 13:30-14:30	G23 数値 シミュレーション 13:30-14:30	H23 分子動力学6 13:30-14:30	I23 OS 燃焼研究の 最前線6 13:30-14:50
15:10 - 16:40		日本伝熱学会創立50周年記念特別パネル講演(A室)						
16:50 - 18:20		総会(A室)						
18:30 - 20:30		懇親会(ANAクランプラザホテル富山3階大宴会場「鳳」(講演会場隣接))						

## 第49回日本伝熱シンポジウム[富山]

タイムテーブル[第3日: 6月1日(金)]

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
A31 沸騰5 9:15-10:35	B31 マイクロ伝熱4 9:15-10:35	C31 電子機器の 冷却3 9:15-10:35	D31 OS 水素・ 燃料電池4 9:15-10:35	E31 空調・熱機器1 9:15-10:35	F31 強制対流4 9:15-10:35	G31 自然対流・ 複合対流1 9:15-10:35	H31 熱物性1 9:35-10:35	I31 融解・凝固1 9:15-10:35
A32 沸騰6 10:45-12:05	B32 マイクロ伝熱5 10:45-12:05	C32 電子機器の 冷却4 10:45-12:05	D32 OS 水素・ 燃料電池5 10:45-12:05	E32 空調・熱機器2 10:45-12:05	F32 強制対流5 10:45-12:05	G32 自然対流・ 複合対流2 10:45-12:05	H32 熱物性2 10:45-12:05	I32 融解・凝固2 10:45-12:05
A33 沸騰7 13:15-14:35	B33 マイクロ伝熱6 13:15-14:35	C33 電子機器の 冷却5 13:15-14:35	D33 OS 水素・ 燃料電池6 13:15-14:35	E33 空調・熱機器3 13:15-14:35	F33 強制対流6 13:15-14:35	G33 自然対流・ 複合対流3 13:15-14:35	H33 熱物性3 13:15-14:35	I33 融解・凝固3 13:15-14:35
A34 沸騰8 14:45-16:25	B34 マイクロ伝熱7 14:45-16:45	C34 物質移動・ 加工技術 14:45-16:45	D34 OS 水素・ 燃料電池7 14:45-16:25	E34 空調・熱機器4 14:45-16:45	F34 強制対流7 14:45-15:45	G34 自然対流・ 複合対流4 14:45-16:25	H34 熱物性4 14:45-15:45	I34 融解・凝固4 14:45-16:05

## 日本伝熱学会創立 50 周年記念 第 49 回日本伝熱シンポジウムプログラム（暫定版）

このプログラムは 2 月 26 日現在の暫定版です。修正・変更する場合があります。必ず、最新版を本シンポジウムホームページでご確認ください。著者として登録された方が同一時間帯のセッションで重複しないようにしておりますが、それ以外の個別のご要望には応じられないことをご了承ください。

### 第 1 日 5 月 30 日（水）

#### < A 室 >

A11 9:30—10:50 沸騰 1

- A111 アルコール水溶液を用いた樹脂製微細流路内の衝突流沸騰  
\*上野智弘（芝工大），遠原晃一，大塚秀一，小野直樹
- A112 スプレーノズルを用いた高温加熱面冷却  
\*吉崎丈宏（工学院大），大竹浩靖
- A113 スプレー冷却における水温と液滴径が極小熱流束に及ぼす影響-2-  
\*中世古誠（JFE スチール）
- A114 過熱面の衝突噴流冷却時における固液接触状況の観察  
\*永井二郎（福井大），大西宏紀

A12 11:00—12:20 沸騰 2

- A121 高温面に衝突する微小液滴の熱伝達 -表面性状と液滴挙動-  
\*深谷侑輝（九大院），福田慎也，フセイン スハイラ，日高澄具（九大），河野正道，高田保之
- A122 高温面上への液滴衝突時の非定常沸騰中の表面温度と表面熱流束の非定常計測  
\*光武雄一（佐賀大），スーハイミ イリアス，アロック モズムンダ，門出政則
- A123 ブタノール水溶液の沸騰における発生気泡内蒸気成分の測定  
\*山岸睦英（神奈川大・工），宮城裕基，西口昇太郎，庄司正弘
- A124 ブタノール水溶液を用いた加熱面の急冷における沸騰伝熱特性  
\*泉翔太（神奈川大・工），西口昇太郎，庄司正弘

A13 13:30—14:50 沸騰 3

- A131 プール沸騰気泡下における伝熱面温度分布の計測  
\*劉維（原研），高瀬和之，永武拓
- A132 加熱細線を用いたサブクールプール沸騰における蒸気泡微細化過程  
\*大澤朋宏（東理大学），洪定杓（東理大），上野一郎
- A133 サブクール・プール沸騰における伝熱面からの気泡離脱挙動に対する接触角の影響に関する数値解析的検討  
\*小瀬裕男（京大），功刀資彰

- A134 親水・撥水複合伝熱面におけるサブクール沸騰  
\*田代雅浩（九大院），スロト バンバン，日高澄具（九大），河野正道，高田保之

#### < B 室 >

B11 9:50—10:50 バイオ伝熱 1

- B111 細胞外凍結による細胞の損傷・死滅の数学モデルの提案と生存曲線の予測  
石黒博（九州工業大学），\*野澤正和（秋田高専）
- B112 生体擬似組織を用いた不可逆エレクトロポレーションによる細胞壊死範囲の評価  
\*松下将大（九大），吉井峻，藏田耕作，福永鷹信，高松洋
- B113 エレクトロポレーションによる生体ファントムの極短時間温度上昇の検出法  
\*藏田耕作（九大），吉井峻（九大院），内田悟（九大），福永鷹信，高松洋

B12 11:00—12:20 バイオ伝熱 2

- B121 魚肉組織の冷凍・解凍における溶液効果の数値シミュレーション  
\*奥祐一郎（九工大），谷川洋文，鶴田隆治
- B122 共焦点マイクロ PIV による血管内皮細胞近傍の高分解能速度分布および細胞形状計測  
\*向山卓哉（慶大院），杉井康彦（東大），菱田公一（慶大）
- B123 鼻腔内エアコンディショニング機能のボクセル熱流体解析  
\*荒木冬人（千葉大），太田和生（千葉大院），田中学（千葉大），世良俊博（理研），覚正信徳，横田秀夫，小野謙二，高木周
- B124 人工心肺の局所体積平均モデル  
\*佐野吉彦（静大），安達純，中山顕

B13 13:30—14:30 計測技術

- B131 感温液晶を用いた温度場計測  
\*谷口拓弥（富大工院），山根岳志（富大工），吉田正道
- B132 光ファイバ型キャピティ・リングダウン分光法に基づく水蒸気濃度計測技術の開発  
\*西田耕介（京工織大），津島将司（東工大），平井秀一郎
- B133 水の近赤外吸収特性に基づく水溶液の温度・水分量同時イメージング法の開発  
\*角田直人（九大），有本英伸（産総研），近藤克哉（鳥取大），山田幸生（電通大）

## &lt; C室 &gt;

- C11 9:30—10:50 混相流 1
- C111 SF6-水による水平管群の気液二相流計測  
\*石川温士(IHI), 今井良二, 田中貴博
- C112 ナノバブルのブラウン運動に与える界面構造の影響  
\*関口智大(東工大), 川口達也, 齊藤卓志, 佐藤勲
- C113 マイクロバブルインジェクションによる自然対流の伝熱促進  
\*大里拓也(京工繊大院), 北川石英, 萩原良道, 村井祐一(北大院)
- C114 超親水面を利用したマイクロバブルの壁面付着抑制  
\*岩崎航(京工繊大院), 北川石英, 萩原良道, 村井祐一(北大院)
- C12 11:00—12:20 混相流 2
- C121 中性子ラジオグラフィ及び数値シミュレーションによる超臨界水熱合成反応器内の混合状態の可視化  
\*杉岡健一(東北大), 高見誠一, 足立潤, 塚田隆夫, 阿尻雅文, 杉本勝美(神戸大), 竹中信幸, 齊藤泰司(京大)
- C122 垂直チャネル内固気発達分散流における重力の効果  
\*三戸陽一(北見工大), 池田祥太
- C123 微細気泡を含んだ気液二相流におけるボイド率の高時間分解能計測  
\*上澤伸一郎(筑波大院), 金子暁子(筑波大), 野村康通(筑波大院), 田村尚也(筑波大), 阿部豊
- C124 気泡追跡法による大口径円筒管内における気泡挙動の三次元評価  
\*金井大造(原子力技術研究所), 古谷正裕, 新井崇洋, 白川健悦, 西義久
- C13 13:30—14:50 混相流 3
- C131 水平円筒容器内に生じる固液混相媒体の音響流(円形平板型振動子の場合)  
大成将仁(福井大学), \*岩本翔平, 木村龍輔, 太田淳一
- C132 炭酸ガスの超音速二相流中に発生する斜め衝撃波に関する研究  
\*川村洋介(豊橋技科大院), 中川勝文
- C133 相互干渉する二液滴回りの圧力分布に関する研究  
\*池田元洋(宇大院), 塚田将吾, 二宮尚
- C134 空気中に吹き出された水噴流の界面挙動と崩壊現象  
\*生田隆平(信州大学), 小泉安郎, 高瀬和之(原子力機構), 吉田啓之
- SP1 15:00—15:30 優秀プレゼンテーション賞ショー  
トプレゼンテーション 一沸騰・熱機器一
- SP11 ブタノール水溶液の限界熱流束促進に関する研究  
\*西口昇太郎(神奈川大), 庄司正弘
- SP12 扁平多穴管内冷媒の低質量速度域に於ける蒸発熱伝達率と圧力損失の実験的研究

- \*田中千歳(東大院), 党超鋺, 松岡文雄, 飛原英治
- SP13 圧電素子フィルムを用いた沸騰エネルギーハーベスターの特性評価  
\*加藤洋平(長岡技科大), 山田昇
- SP14 顕微高速干渉計法を用いた孤立気泡周りの液相温度場計測  
\*濱口拓矢(明大院), 矢吹智英, 中別府修(明大)
- SP15 高温加熱面の濡れ開始機構に関する研究  
\*永鷺望(サンデン), 大堀哲矢(工学院大), 大竹浩靖
- SP16 Self-rewetting 溶液を用いた自励振動型ヒートパイプの流動可視化(ブタノールとペンタノールの場合)  
\*石田卓也(弘前大), 麓耕二, 川路正裕(ニューヨーク大), 川南剛(神戸大), 稲村隆夫(弘前大)
- SP17 空気除湿と除湿剤再生に関するスプレー塔の物質移動特性  
\*丹田翼(広大), 松村幸彦, 北原博幸(トータルシステム研究所)
- SP18 エジェクタ冷凍サイクルのエジェクタデザインに関する実験的研究  
\*齊藤優輔(慶應大), 福島隆広(慶大院), 松尾亜紀子, 佐藤春樹
- SP19 翼型チューブによるフィンアンドチューブ熱交換器の高性能化  
\*菊池肇(金沢大院), 大西元(金沢大), 多田幸生, 瀧本昭

## &lt; D室 &gt;

- D11 9:30—10:50 輻射 1
- D111 冬の日の室内の生活空間におけるふく射伝熱と対流伝熱  
\*井手満帆(京大), 若林英信, 牧野俊郎
- D112 エバネッセント波を利用した GaSb ショットキー熱光起電力発電  
\*吉田純(東工大), 芦田友祐
- D113 宇宙用多層断熱材(MLI)の曲がりによる断熱性能変化  
\*川崎春夫(JAXA), 畠中龍太
- D114 絶対温度 0 K の数値解析による実現  
\*越後亮三(東工大)
- D12 11:00—12:40 輻射 2
- D121 Spectral Radiative Properties of Plastic Films for Greenhouse Using Inverse Method  
\*アルマハトウリ アデル アブドゥラ(東北大院), 江目宏樹, 岡島淳之介(東北大 流体研), 円山重直
- D122 高温環境下における金属表面のふく射スペクトルの推移に関する実験・計算  
\*若林英信(京大), 春次良彦, 牧野俊郎
- D123 表面プラズモンポラリトン干渉による近接場熱ふく射のスペクトル制御  
\*花村克悟(東工大), 平島大輔((株)データフォーシーズ)
- D124 多層構造サーメットによる波長選択的太陽光吸収材のふく射物性シミュレーション  
\*櫻井篤(新潟大), 谷川博哉, 松原幸治
- D125 表面微細周期構造による波長選択性ラジエータ

- \*戸谷剛 (北大工学研究院), 石川直幸 (北大工学院), 脇田督司 (北大工学研究院), 永田晴紀
- D13 13:30—14:50 **凝縮**
- D131 R1234ze(E)/R32 混合冷媒の扁平多孔管内凝縮熱伝達  
\*地下大輔 (九州大), 小山繁
- D132 非水平平滑管内における共沸混合冷媒 R1234yf/R32 凝縮熱伝達に関する研究  
\*汪琳琳 (東京大学新領域人間環境学)
- D133 マイクロ構造を有する凝縮面上の熱伝達特性  
\*徳永敦士 (宇部高専), 山脇将太 (九工大), 長山暁子 (九工大), 鶴田隆治
- D134 伝熱面機能化による凝縮熱制御に関する基礎研究  
\*池内飛鳥 (信州大院), 小泉安郎 (信州大), 吉沢翔太
- SP2 15:00—15:30 **優秀プレゼンテーション賞ショートプレゼンテーション —反応・燃焼・流動—**
- SP21 固体燃料の熱分解およびガス化に及ぼす灰分と CO<sub>2</sub> の反応の影響解明  
\*下村聖実 (東工大), 渡部弘達 (東工大院), 岡崎健
- SP22 SOFC 燃料極の表面温度分布にメタン改質反応が与える影響  
\*高橋忠将 (京都大), 岩井裕, 齋藤元浩, 吉田英生
- SP23 多並列配置型ガスバーナにおける火炎の相互干渉と加熱特性  
\*花島梨沙 (慶大院), 山田弘道, 植田利久, 横森剛, 相墨智 (東京瓦斯)
- SP24 カーボンナノチューブによる充填層の有効熱伝導率の向上  
\*李承珪 (広島大), 井上修平, 射場勇士, 松村幸彦
- SP25 超薄膜熱電対を用いた PEFC 触媒層表面の局所温度分布その場測定  
\*堀内悠平 (横国大院工), 宍戸達哉, 西田洋介, 荒木拓人
- SP26 サーペンタイン型流路における多孔体界面流れの実験的研究  
\*西村航 (大阪府大院), 山本龍宜 (大阪府大), 金田昌之, 須賀一彦
- SP27 音響タフト法による気体超音波流量計の開発  
\*阿部堯 (東工大), 川口達也, 齊藤卓志, 佐藤勲
- SP28 空中超音波を利用した非接触流量計測法に関する研究  
\*塚田圭祐 (東工学), 井原智則, 木倉宏成
- < E室 >
- E11 9:30—10:50 **自然エネルギー 1**
- E111 再生可能エネルギーと熱電変換利用による災害対策用スマート熱電水併給システム  
\*矢野歳和 (宮城大学), 高橋唯華, 伊藤成香, 新野正之 (JAST), 木皿且人 (JAXA)
- E112 アンモニア/水を用いたプレート式熱交換器の性能試験
- \*池上康之 (佐大海エネ), 有馬博史, 森崎敬史, 古川崇之, 岸川泰大, 園田浩太郎
- E113 太陽熱コレクターの気候変化に対応した制御方法の解析  
\*白井敦士 (神戸大), 平澤茂樹, 川南剛
- E114 潜熱蓄熱複合型小型オーガニックランキンサイクルシステムの数値解析  
\*若嶋振一郎 (長岡技科大), 星朗 (一関高専), 山田昇 (長岡技科大)
- E12 11:00—12:20 **自然エネルギー 2**
- E121 ペレットストーブの性能評価に関する研究  
\*梅村太志 (富山大), 川口清司 (富山大), 宮博信 (アドバンストエネルギー開発)
- E122 電力供給を可能とする薪ストーブの提案  
\*星朗 (一関高専), 丸山貴大, 野崎武三 (野崎商工)
- E123 低温度差駆動熱機関に関する研究  
\*足立一馬 (米子高専), 森田慎一, 堀部明彦 (岡山大), 春木直人
- E124 地熱地中加温栽培に関する実験的研究  
\*河本修平 (米子高専), 森田慎一, 福本明彦 (鳥取県農林総合研究所), 堀部明彦 (岡山大), 春木直人
- E13 13:30—14:50 **自然エネルギー 3**
- E131 井戸内循環ポンプによる大地熱採熱促進  
\*大橋知明 (山形大院), 横山孝男, 半澤茂兵衛 (半澤ボーリング), 高野涼介 (山形大), 渡辺泰世
- E132 帯水層蓄熱井戸選定と井戸流誘起を考慮した数値解析  
\*横山孝男 (山形大), 東瀬多美夫 (竹田総合病院), 王欣 (山形大), 菅野他人男 (尾花沢市役所)
- E133 雪の融解潜熱を利用した除湿式木材乾燥システムの開発—熱交換器および乾燥条件の改良—  
\*須藤喜昭 (山形大院), 安原薫 (山形大), 沼澤貞義 (沼澤工務店)
- E134 舗装体内部での熱交換を加味した融雪舗装体解析  
\*山口正敏 (日本地下水開発), 横山孝男 (山形大), 沼澤喜一 (日本地下水開発), 堀野義人, 安原薫 (山形大)
- SP3 15:00—15:30 **優秀プレゼンテーション賞ショートプレゼンテーション —熱輸送・物性—**
- SP31 蛇行流路内粘弾性流体流れの伝熱特性に与える流体物性の影響  
\*永坂亘 (京大), 巽和也, 中島理 (京大院), 中部主敬 (京大)
- SP32 高負荷タービン翼の端壁面上における旋回を有するフィルム冷却に関する研究  
\*坂元秀行 (阪大), 武石賢一郎, 小田豊, 近藤慎平
- SP33 オリフィスを過ぎる粘弾性流体流れにおける乱流構造の PIV による解析  
\*鶴見大誓 (東理大院), 川田翔子 (東理大), 川瀬友宏 (東理大院), 塚原隆裕 (東理大), 川口靖夫
- SP34 相変化蓄熱物質の液相状態における熱物性の解明  
\*一色俊洋 (茨大院), 上江洲智政, 稲垣照美 (茨

- 大工)
- SP35 ソーラー強制レイリー散乱法を用いた油層内 2 成分溶液のソーラー係数及び物質拡散係数同時測定-新しい測定原理と方法の開発-  
\*岩浅信太郎 (慶大学), 小場健太郎, 長坂雄次 (慶大理工)
- SP36 CuO 粒子を用いたクールブラックコーティングのふく射特性に関する研究  
\*江目宏樹 (東北大院), バネシ メディ (東北大流体研), 岡島淳之介, 小宮敦樹, 円山重直
- SP37 蛍光を利用した光拡散性界面の半球透過特性の計測  
\*小柴嘉恵 (芝浦工大), 川井博和, 越野誠也 (資生堂), 高田定樹, 山田純 (芝浦工大)
- SP38 異なるふく射環境下における人体熱収支の把握に関する研究  
\*佐藤正一朗 (岡県大), 島崎康弘, 吉田篤正 (阪府大), 野津滋 (岡県大)
- SP39 木質外装された建物壁面の熱負荷特性に関する研究  
\*小澤卓也 (阪府大), 木下進一, 吉田篤正

## &lt; F 室 &gt;

- F11 9:50—10:50 多孔質体の伝熱 1
- F111 真空下におけるガラスビーズの熱伝導率測定実験-固体惑星科学への応用に向けて-  
\*坂谷尚哉 (宇宙研), 小川和律, 飯島祐一, 本田理恵 (高知大), 田中智 (宇宙研)
- F112 液滴付加による蒸発および凝縮を伴う高温粒子層の冷却特性  
\*赤堀匡俊 (長岡技科大), 青木和夫, 江原秀和 (長岡技科大), 林良輔
- F113 膨潤性ゲルを用いた膨潤過程について  
\*長野友紘 (長岡技科大), 青木和夫, 赤堀匡俊
- F12 11:00—12:20 多孔質体の伝熱 2
- F121 多孔体界面乱流の応力方程式モデル  
\*桑田祐丞 (阪府大), 須賀一彦, 金田昌之
- F122 SiC ポリユメトリック・ソーラーレーザの乱流放射伝熱  
\*ヤング チェン (静大), 佐野吉彦, 中山顕
- F123 充填層内の対流および輻射伝熱を考慮した伝熱解析  
\*朝熊裕介 (兵庫県立大)
- F124 多緩和時間格子ボルツマンモデルによる異方性多孔質体内自然対流解析  
\*向井健二 (富山大学), 森口浩明, 外山智也, 内田洋助, 金森拓哉, 瀬田剛
- F13 13:30—14:50 多孔質体の伝熱 3
- F131 ヒートアイランドと接地逆転層の強度に関する数値解析的評価  
\*桑原不二朗 (静大工), 板津典彦 (静大学), 松岡佑輔 (静大院), 本山英明 (静大工)
- F132 多孔質体で被覆された固体角柱まわりの熱流動特性  
\*布川遼 (静岡大), 柿本益志, 小澤誠也, 増岡隆士 (九州大)

- F133 多孔質角柱まわりの強制自由複合対流熱伝達  
\*伊藤正悟 (静岡大), 柿本益志, 増岡隆士 (九州大)
- F134 サブチャンネル装荷型ポーラス体の高熱流束除去特性  
\*結城和久 (山口東理大), 鈴木康一
- SP4 15:00—15:30 優秀プレゼンテーション賞ショートプレゼンテーション-マイクロ・ナノスケール現象-
- SP41 音響浮遊液滴の伝熱流動に関する研究  
\*下西国治 (筑波大), 阿部豊, 金子暁子
- SP42 ミクロ相分離を用いたポーラスフィルムの作製と熱電半導体への応用  
\*畑迫芳佳 (九州工大), 加藤邦久, 宮崎康次
- SP43 レーザ放射圧を用いたマイクロチャンネル内気液界面極近傍の液流速測定法の開発  
\*小澤孝太 (慶大院), 田口遼, 佐藤洋平 (慶大理工)
- SP44 インフライトプラズマ CVD によるシリコン量子ドット合成: 収量及び粒径分布計測  
\*山田陸 (東工大), Gresback Ryan, 岡崎健, 野崎智洋
- SP45 近接場蛍光を用いたナノスケール温度センシング手法の開発-高感度温度計測を実現する融着型近接場プローブ作製パラメータの検討-  
\*瀬戸大地 (慶大学), 藤井拓郎 (慶大院), 田口良広 (慶大理工), 斉木敏治, 長坂雄二
- SP46 水晶基板上での水平配向単層カーボンナノチューブの成長過程  
\*井ノ上泰輝 (東京大), 長谷川大祐, Badar Saifullah, 千足昇平, 丸山茂夫
- SP47 極薄液膜における撥水過程の分子動力学  
\*高野晋 (東理大院), 上野一郎 (東理大)
- SP48 拡張アンサンブル分子動力学法によるスリット型細孔中に閉じ込められた水分子の融点の推定  
\*金子敏宏 (慶大院理工), 泰岡顕治 (慶大理工), 光武亜代理, Zeng Xiao Cheng

## &lt; G 室 &gt;

- G12 10:20—12:20 OS 非線形熱流体现象と伝熱 1
- G121 円管まわりの液体層のマランゴニ対流の磁気制御  
\*田川俊夫 (首都大)
- G122 温度差マランゴニ効果による懸垂液滴内対流場遷移と Hydrothermal Wave 不安定性  
\*渡辺拓実 (東理大学), 上野一郎 (東理大), 洪定杓
- G123 矩形孔内に形成した自由液膜内温度差マランゴニ対流-液充填率が対流場に及ぼす影響-  
\*池袋紘一 (東理大学), 上野一郎 (東理大), 洪定杓
- G124 熱浮力を持つ流体塊の熱及び運動量輸送におけるプラントル数の影響  
\*井垣一人 (北大), 阿部竜太, 田坂裕司, 熊谷一郎, 村井祐一
- G125 磁場の影響下での液体金属の対流パターン  
\*柳澤孝寿 (海洋機構), 宮腰剛広, 山岸保子, 浜野洋三, 櫻庭中 (東大), 田坂裕司 (北大), 武田靖 (東工大)

- G126 環状液層内の表面張力対流の安定限界  
\*今石宣之 (九大), 石万元 (重慶大), Ermakov Michael (IPM, RAS)
- G13 13:30—14:50 OS 非線形熱流体現象と伝熱 2
- G131 ガリウム液滴のスパイラルピーリング  
\*田坂裕司 (北大), 熊谷一郎, 村井祐一
- G132 交流電場と温度勾配により生じる流れを利用した表面反応の促進  
\*石田明彦 (東理大), 元祐昌廣, 本阿弥眞治
- G133 輻射熱損失による火炎面不安定の非線形ダイナミクス  
\*後藤田浩 (立命大), 井川拓哉, 牧紘士郎
- G134 変形可能なゲル粒子層中を運動するブルームが作る流れの脈動現象  
\*熊谷一郎 (北大), 田坂裕司, 村井祐一
- <H室>
- H11 9:30—10:50 分子動力学 1
- H111 ナノ構造による伝熱面の濡れ制御と固液界面の熱物質伝達特性  
土屋良登 (九州工大院), \*藤井真哉, 長山暁子 (九州工大), 鶴田隆治
- H112 アルコール添加による水の壁面抵抗低減についての分子動力学解析  
\*中岡聡 (阪大工院), 山口康隆 (阪大工), 黒田孝二 (大日本印刷), 中島但, 藤村秀夫
- H113 固体壁面上における水-アルコール混合物液滴の濡れ挙動に関する分子動力学解析  
\*スルプリス ドナタス (阪大工院), 山口康隆 (阪大工), 黒田孝二 (大日本印刷), 中島但, 藤村秀夫
- H114 固体表面上に接する液滴の三相界面における力学的バランスに関する分子動力学考察  
\*西田翔吾 (阪大工院), スルプリス ドナタス, 山口康隆 (阪大工), 黒田孝二 (大日本印刷), 中島但, 藤村秀夫
- H12 11:00—12:20 分子動力学 2
- H121 電場中における氷の結晶成長の分子動力学シミュレーション  
\*吉田洋平 (金沢大院), 多田幸生 (金沢大), 瀧本昭, 大西元
- H122 荷電コロイド粒子周りのイオン分布とコロイド粒子間の有効相互作用  
\*池田一郎 (京都大学), 松本充弘
- H123 有効ポテンシャルをもつ荷電コロイド粒子系の構造解析  
\*倉田博文 (京都大・工), 池田一郎, 松本充弘
- H124 分子動力学シミュレーションに基づく散逸粒子動力学相互作用モデルの構築手法の検討  
\*吉本勇太 (東京大学), 美馬俊喜, 杵淵郁也, 高木周, 松本洋一郎
- H13 13:30—14:50 分子動力学 3
- H131 グラフェンを用いた両面濡れの分子動力学シミュレーション
- \*関口和巳 (東理大学), 上野一郎 (東理大), 洪定杓
- H132 固液界面の熱抵抗とエネルギー輸送機構にナノ粒子付着が与える影響に関する分子動力学的研究  
\*芝原正彦 (阪大工), 松本拓也
- H133 分子動力学法による鉛テルルの格子熱伝導解析  
\*村上拓 (東京大学), 志賀拓磨, 堀琢磨, チャンジーン (マサチューセッツ工科大学), 丸山茂夫 (東京大学), エスファジャーニー ケイワン (マサチューセッツ工科大学), チェン ガン, 塩見淳一郎 (東京大学)
- H134 LJナノリボンのパルス加熱における拡散存在下でのコヒーレントフォノンの伝播のスペクトル特性  
\*奥村勇太 (富山大), ソロツキヒナ タチアナ
- <I室>
- I11 9:30—10:50 OS 燃焼研究の最前線 1
- I111 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いたディーゼルサロゲート燃料のセタン価と燃焼特性  
\*鈴木聡史 (東北大), 堀幹人, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫 (東北大流体研)
- I112 高温予混合火炎の拡散・熱的不安定性に及ぼす熱損失の効果  
\*門脇敏 (長岡技科大), トエ トエ アウン
- I113 微小重力場における低伸長率  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$  対向流予混合場中の球状火炎  
\*高瀬光一 (東北大流体研), 李星, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 勝田真登 (JAXA), 菊池政雄, 丸田薫 (東北大流体研)
- I114 流体粒子追跡による HCCI 燃焼における火炎形態の分類  
\*福島直哉 (東工大院), 片山牧人, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄
- I12 11:00—12:20 OS 燃焼研究の最前線 2
- I121 木質燃料内部の導管構造が燃焼に与える影響  
皆木潤 (長岡技大), \*鈴木正太郎, 増田渉
- I122 木質系バイオマス内部における軽質タール分解メカニズム  
\*鮫島三郎 (東工大), 渡部弘達 (東工大院), 岡崎健
- I123 固体燃料管内燃え拡がりにおける固相への熱輸送と消炎現象との関係  
\*村上翔太 (北大院), 松岡常吉 (北大工), 永田晴紀, 中村祐二,
- I124  $\text{CO}_2$  の反応性に着目した  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  石炭燃焼の反応メカニズムの解明  
\*渡部弘達 (東工大院), 荒井郁也, 岡崎健
- I13 13:30—14:50 OS 燃焼研究の最前線 3
- I131  $3 \times 3$  マイクロノズルアレイ上に形成される火炎群の構造に関する数値解析  
\*成田知弘 (北大工), 中村祐二, 五反田邦博 (中部大), 平沢太郎
- I132 マイクロフレームにおけるバーナ径の影響  
\*鷲見昌紀 (中部大), 五反田邦博, 平沢太郎, 中村祐二 (北大工)
- I133 温度分布制御マイクロフローリアクタ型モデルを

利用した予混合火炎の着火・燃焼時における熱・物質拡散効果についての検討  
\*西田拓郎 (慶大院), 松本卓大 (慶應大), 植田利久, 横森剛, 丸田薫 (東北大)  
I134 メソスケールの流路内におけるボルテックスパースティングに及ぼす不活性ガスの影響  
\*栗本崇志 (広大院), 唐津裕治, 下栗大右, 石塚悟

## 第2日 5月31日 (木)

### < A室 >

- A21 9:30—11:30 特別セッション「福島第1原発事故を受けてわが国のエネルギー問題を考える」  
総司会：小澤守 (関西大)
- A211 福島原発事故の経過  
丸山結 (原子力機構)
- A212 大震災後の持続可能な電力需給に向けて  
藤岡恵子 (ファンクショナルフルイッド)
- A213 伝熱学会の役割：現象の究明・検証のあり方を考える  
圓山重直 (東北大)
- A214 総合討論  
司会・問題提議：小澤守 (関西大)  
パネラー：門出政則 (佐賀大), 高田保之 (九大), 丸山結 (原子力機構), 藤岡恵子 (ファンクショナルフルイッド), 圓山重直 (東北大)
- A23 13:30—14:50 沸騰 4
- A231 アンモニアの水平内面ら旋溝付管内蒸発熱伝達率の整理式作成の試み  
\*桃木悟 (長崎大), 浦充貴, 成宮克侑, 福永哲也, 茂地徹, 山口朝彦
- A232 プレート式蒸発器におけるアンモニア沸騰熱伝達のポイド率測定に関する研究  
\*有馬博史 (佐賀大 海エネ), 三島文也 (佐賀大院), 小山幸平 (佐賀大 海エネ), 福浪 透 (佐賀大院), 池上康之 (佐賀大 海エネ)
- A233 対向2気泡の合体に関する研究  
\*諸隈崇幸 (神奈川大工), 庄司正弘, 宇高義郎 (横国大工)
- A234 擬似二次元空間における沸騰気液構造の解明  
\*皆川寛 (芝工大院), 大西哲也 (芝浦工大学), 西田元輝, 丹下学 (芝浦工大)

### < B室 >

- B21 9:30—10:50 マイクロ伝熱 1
- B211 バブルテンプレート法によって製造された中空ポリ乳酸マイクロカプセルの大きさと均一性  
\*モリノ ジェイ (東大), 大宮司啓文, 竹村文男 (産総研)
- B212 シリンダ状細孔を持つメソポーラスシリカの水蒸気吸着速度  
\*大宮司啓文 (東大), 増田泰明, 松岡文雄, 飛原英治, 遠藤明 (産総研)
- B213 地中隔離における多孔質内超臨界 CO<sub>2</sub>/水の二相流動 LBM  
\*植村豪 (東工大院), 野田豊人, 津島将司, 平井

- 秀一郎
- B214 高圧水中におけるナノスケール CO<sub>2</sub>液滴分布の時間発展  
\*松井陽平 (東工大), 植村豪 (東工大院), 津島将司, 平井秀一郎
- B22 11:00—12:20 マイクロ伝熱 2
- B221 MEMS 技術を用いたホログラフィックインジケータの研究  
\*湯本真之 (明大院), 中別府修 (明大)
- B222 光アップコンバーターのダイナミクス：イオン液体中でのエネルギー・分子輸送  
\*村上陽一 (東工大), 菊池仁美, 河合明雄
- B223 随伴方程式に基づく面発光レーザーの最適時空間温度分布制御に関する研究  
\*森本賢一 (東大工), 金民城 (東大院), 鈴木雄二 (東大工)
- B224 近赤外吸収画像を利用した発熱細線周りの水の温度分布推定 - 吸光度分布のガウス関数和近似による解析的 Abel 逆変換 -  
\*中田智士 (鳥大), 角田直人 (九大), 近藤克哉 (鳥大), 有本英伸 (産総研), 山田幸生 (電通大)
- B23 13:30—14:50 マイクロ伝熱 3
- B231 界面熱抵抗の物質依存性に関する実験的研究  
\*廣谷潤 (九大院), 生田竜也 (九大工), 西山貴史, 高橋厚史
- B232 時間領域サーモリフレクタンス法を用いたグラフアイトと薄膜の界面熱コンダクタンス計測  
\*小宅教文 (東京大学), 岩佐優太郎, 千足昇平, 丸山茂夫, 塩見淳一郎
- B233 周期加熱サーモリフレクタンス法を用いたリップチップ実装構造パンプ接続部の熱抵抗測定手法の開発-評価用パッケージ基板の測定-  
\*加藤穰 (慶大), 大坪慶貴 (慶大院), 田口良広 (慶大理工), 長坂雄次
- B234 多孔薄膜 Si の面方向熱伝導率と電気伝導率測定  
\*萩野春俊 (九州工大院), 川原庸介, 後藤愛美 (九州工大), 宮崎康次, 檜和田徹 (ファジィ)

### < C室 >

- C21 9:30—10:50 混相流 4
- C211 管群流路内におけるサブチャンネル間相互作用  
\*新井崇洋 (原子力技術研究所), 古谷正裕, 金井大造, 白川健悦
- C212 イソブタン冷媒を用いた二相流ノズルのエネルギー変換効率の向上に関する研究  
\*吉岡大志 (豊橋技科大院), 中川勝文 (豊橋技科大)
- C213 離散粒子法と格子気体法の結合による固体微粒子-流体間相互作用の検討  
\*山口朝彦 (長崎大), 金丸邦康, 浅野等, 竹中信幸
- C214 非焦点面および焦点面画像を併用した噴霧流中液滴の空間分布計測手法の開発  
\*林健太郎 (慶大院), 一柳満久 (上智大), 菱田公一 (慶大理工)

- C22 11:00—12:20 電子機器の冷却 1  
膜内水分クロスオーバーの予測  
\*麻雅哉 (京工織大), 西田耕介, 津島将司 (東工大), 平井秀一郎
- C221 Investigation and performance evaluation of Aluminum water heat pipes  
\*カブサオ ジェラルド (フジクラ)
- C222 Challenges in the Thermal Management of Next Generation Advanced Packaging Designs  
\*Singh Randeep (Fujikura Ltd.), Masataka Mochizuki, Yuji Saito, Kazuhiko Goto, Koichi Mashiko
- C223 レーザはんだ付け時の基板上はんだ融解状態均一化に関する研究  
\*木伏理沙子 (富山県大), 畠山友行, 石塚勝
- C224 有効熱伝導率を用いた PCB 熱設計手法の検討  
\*近藤大二 (富山県大), 畠山友行, 石塚勝
- C23 13:30—14:50 電子機器の冷却 2
- C231 ピンチオフ領域を考慮した長チャンネル MOSFET のコンパクトエレクトロサーマルモデル  
\*伏信一慶 (東工大)
- C232 マルチコアプロセッサのホットスポット: 電力マップ, 温度, 実装条件の関連を調べる解析モデル  
\*中山恒 (サームテック)
- C233 R1234ze(E)を作用流体とした CPU 冷却器の性能評価  
\*山下誠也 (九州大), 小山繁, 渡辺和也
- C234 LED パッケージからの発熱量の直接測定法について  
\*富村寿夫 (熊大), 牛島啓行, 隈元一善, 小糸康志
- < D 室 >
- D21 9:30—10:50 OS 水素・燃料電池 1
- D211 水素吸蔵合金層内における水素吸放出時の層内ひび割れ現象と発生条件および伝熱に及ぼす影響  
\*関孝士朗 (九大院), 濱本芳徳 (九大工), 江藤淳朗, 仮屋圭史, 森英夫
- D212 高圧電気化学方式水素ポンプの特性の特性解析  
\*伊藤衡平 (九大), 吉住寛, 難波卓
- D213 分子動力学を用いた水和ナフィオン内プロトン・水分子輸送特性の解析  
\*馬淵拓哉 (東北大), 徳増崇
- D214 繊維状多孔質電極内の樹脂偏析機構の解明  
\*井上元 (京大工), 石部直之 (九大工)
- D22 11:00—12:20 OS 水素・燃料電池 2
- D221 小型表面コイルによるステップ状加湿時の PEM 内含水量の NMR 計測  
\*小川邦康 (慶大理工), 拝師智之 (MRTechnology), 伊藤衡平 (九大)
- D222 高分解能軟 X 線イメージングによる PEFC 発電時の MPL/GDL 液水輸送解析  
\*ディーワンサイ ペンサイ (東工大院理工), 笹部崇, 津島将司, 平井秀一郎
- D223 中性子ラジオグラフィを用いた固体高分子形燃料電池における GDL・流路内の滞留水挙動の可視化  
\*村川英樹 (神戸大院), 杉本勝美, 宮田広大, 浅野等, 竹中信幸, 齊藤泰司 (京大炉)
- D224 低加湿条件下の PEFC 内水蒸気・電流分布計測と
- D23 13:30—14:50 OS 水素・燃料電池 3
- D231 PEFC 流路内のガス流速計測技術開発と発電分布解析  
\*深堀大地 (東工大), 津島将司, 西田耕介 (京工織大), 平井秀一郎 (東工大)
- D232 PEFC の流路構造及び壁面濡れ性がカソード内液水輸送に与える影響  
\*石崎勇吾 (京工織大), 谷口僚 (ダイキン), 西田耕介 (京工織大), 津島将司 (東工大), 平井秀一郎
- D233 固体高分子形燃料電池におけるマイクログループを用いたミクロ・ナノ多孔質からガスチャネルへの排水性能向上  
\*岡部晃 (横国大院), 宇高義郎
- D234 可変ガス流路を有する固体高分子形燃料電池の特性  
\*谷川洋文 (九工大), 池田裕介 (九工大), 鶴田隆治 (九工大)
- < E 室 >
- E21 9:30—10:50 ヒートパイプ 1
- E211 OHP を用いた小型衛星の熱制御  
\*宮崎芳郎 (福井工大), 岩田直子 (宇宙機構), 河合宏紀 (福井工大), 小川博之 (宇宙機構), 福田盛介
- E212 直管型自励振動ヒートパイプにおける熱輸送メカニズム  
\*市川貴大 (横国大), 加藤俊介, 森昌司, 奥山邦人
- E213 自励振動型ヒートパイプの熱輸送特性に及ぼす凝縮ガスの影響  
\*センジャヤ ラフレス (東工大), センジャヤ ラフレス, 柳原慎也, 鈴木祐二, 井上剛良
- E214 温度制御可能な自励振動ヒートパイプの圧力測定  
\*岩田直子 (宇宙機構), 小川博之, 宮崎芳郎 (福井工大)
- E22 11:00—12:20 ヒートパイプ 2
- E221 ループヒートパイプの開発  
\*田中清志 (機振協), 勝田正文 (早大), 大川清一郎, 河田道人
- E222 サーモサイホン型ヒートパイプの冷却特性  
\*薄井龍右 (日本大学), 松島均
- E223 平板型蒸発器を用いたループヒートパイプの熱性能  
\*塩賀健司 (富士通研), 尾形晋, 中西輝, 林信幸, 水野義博
- E224 PTFE ウィックを用いたマルチエバポレータ/コンデンサ型ループヒートパイプの動作特性  
\*奥谷翔 (名大院), 長野方星 (名古屋大), 岡崎俊 (JAXA), 小川博之, 永井大樹 (東北大)

E23 13:30—14:50 ヒートパイプ3

E231 Wettability Enhancement of Sintered Copper Wick Heat Pipe by Coating of Nano Alumina  
\*Thanh-Long Phan(フジクラ), Masataka Mochizuki, Yuji Saito, Yoji Kawahara, Mohammad Shahed Ahamed

E232 ベーパーチャンバーの可視化実験(蒸発部の伝熱特性)

\*小糸康志(熊本大), 野中雄策, 佐藤晃, 富村寿夫, 望月正孝(フジクラ)

E233 相変化を伴う並列細管熱輸送デバイスの内部流画像解析

\*安孫子和沙(農工大), 村田章, 齋藤博史, 岩本薫

E234 中性子ラジオグラフィによる可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)の可視化

\*杉本勝美(神戸大院), 浅野等, 村川英樹, 竹中信幸, 永安哲也(三菱電機), 一法師茂俊

## &lt; F 室 &gt;

F21 9:50—10:50 強制対流 1

F211 強制空冷式ヒートシンクのフィン形状が熱伝達特性に及ぼす影響

\*日光貴洋(富山大院), 川口清司(富山大), 渡辺大輔

F212 曲がりチャンネル内乱流熱伝達におけるレイノルズ数の影響

\*信田啓介(新潟大院), 大石友也, 松原幸治(新潟大), 櫻井篤

F213 マイクロチューブ圧縮性流れの管摩擦係数の算出法に関する研究

\*川嶋大介(首都大院), 浅古豊(首都大)

F22 11:00—12:20 強制対流 2

F221 微量ミスト混入による後向きステップ流れの再循環領域における流動・温度場の空間的測定

\*宮藤義孝(沖縄高専), 瀬名波出(琉球大), 加藤純郎, 川平卓音, 大城文弥, 松田昇一

F222 狭い空間内の衝突噴流群の流れ場と熱移動解析

\*松田昇一(琉球大学), 野崎直矢, 加藤純郎

F223 はく離再付着過程における熱流動挙動に関する研究

\*山田俊輔(防衛大), 中村元, 高木明佳

F224 対称翼前縁付け根部のフィルム冷却が馬蹄渦と熱伝達に及ぼす影響に関する LES

\*小田豊(阪大), 武石賢一郎, 香園晋太郎

F23 13:30—14:30 強制対流 3

F231 DNS による乱流境界層熱伝達場のスカラー輸送における線形性の検証

\*服部博文(名工大), 山田翔平, 保浦知也, 田川正人

F232 加熱平板上を発達する乱流境界層の温度場多層構造に関する研究

\*保浦知也(名工大), 戸田祐介, 田川正人, 長野靖尚(名産研/名工大)

F233 回転ポアズイユ流の乱流構造の抽出と平均化

\*飯田雄章(名工大), 三輪智志, 野々川佑也

## &lt; G 室 &gt;

G21 9:50—10:50 反応・燃焼 1

G211 カーボンナノ物質の燃焼合成に及ぼす燃焼ガスの影響

\*奥山正明(山形大), 富村寿夫(熊本大)

G212 充填層型誘電体バリア放電を用いた高圧オゾン生成に及ぼすヘリウム混合の影響

\*石丸和博(岐阜高専), 前田宗大

G213 固体の燃焼過程における振動燃え拡がり現象の伝熱的解析

\*大徳忠史(秋田県立大), 榎恭輔, 鶴田俊

G22 11:00—12:20 反応・燃焼 2

G221 水素-酸素-アルゴン理論予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的研究

\*中原真也(愛媛大), 松尾佳憲(愛媛大院), 西部祥平, 阿部文明(愛媛大)

G222 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた低級アルカン燃料の Weak flame の高分解能観察

\*鎌田大輝(東北大), 中村寿(東北大流体研), 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫

G223 燃料液滴列の燃拡がり挙動に及ぼす水乳化の影響

\*山田圭祐(大阪府大), 各務尚大, 海野裕太, 片岡秀文, 瀬川大資, 角田敏一

G224 相変化を伴う化学反応進行と密度変化に関する研究

\*田之上健一郎(山口大学), 林達也, 西村龍夫

G23 13:30—14:30 数値シミュレーション

G231 CUDA FORTRAN 及び C を用いた GPU による熱流体方程式の高速化

佐竹信一(東理大), \*吉森本, 鈴木貴之

G232 時間領域差分法を用いた極短パルスレーザ光の媒質内伝搬特性解明

\*赤嶺賢彦(東工大), ドアン ホン ドク, 伏信一慶

G233 ラマン分光法, 密度汎関数法による低加湿環境下での固体電解質膜内プロトン輸送解析

\*宝来淳史(日産自動車), 田淵 雄一郎, 岩本祐樹(東工大), 津島将司, 平井秀一郎

## &lt; H 室 &gt;

H21 9:30—10:50 分子動力学 4

H211 SiO<sub>2</sub>-水/IPA 界面近傍における液膜中の構造と物質輸送に関する分子動力学的研究

\*小坂秀一(東北大院), 菊川豪太(東北大流体研), 中野雄大(東京エレクトロン), 小原拓(東北大流体研)

H212 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響

\*村上翔(大阪大), 芝原正彦, 小原拓(東北大)

H213 微小液滴の蒸発冷却

\*松本充弘(京都大・工), 立見純一

H214 MD-LBM 連成計算における微小気泡の解析

\*稲岡篤志(京大・工), 松本充弘, 並河遼

- H22 11:00—12:20 分子動力学 5
- H221 All-atom モデルによる各種アルカン飽和液中の熱伝導に関する分子動力学解析シミュレーション  
\*羽田城司(東北大工), 菊川豪太(東北大流体研), 小原拓
- H222 アルカンの気液界面近傍における構造と輸送特性  
\*Hari Krishna Chilukoti (東北大院), 菊川豪太(東北大流体研), 小原拓
- H223 経路積分セントロイド分子動力学法を用いた液体水素の熱物性評価  
\*永島浩樹(東北大), 津田伸一(信州大), 坪井伸幸(九工大), 越光男(東大), 林光一(青学大), 徳増崇(東北大)
- H224 原油増進回収における CO<sub>2</sub> 溶解現象の分子動力学シミュレーション  
\*平井秀一郎(東工大院), 小寺厚, 植村豪, 津島将司, 河村雄行(岡山大)
- H23 13:30—14:30 分子動力学 6
- H231 クラスレート水和物のゲスト-水分子間水素結合が分子運動へ及ぼす影響の第一原理分子動力学シミュレーション  
\*平塚将起(慶大理工), 大村亮, Sum Amadeu(コロラド鉱物大), 泰岡頤治(慶大理工)
- H232 メソポーラスシリカ薄膜に吸着した水の分子シミュレーション  
\*山下恭平(東大院), 大宮司啓文(東大)
- H233 プロトン移動機構のモデルとしての n-ヘプタン酸化反応の遷移状態の分子動力学の記述  
\*ゾロツキヒナ タチアナ(富山大), 服部慶太
- < I 室 >
- I21 9:30—10:50 OS 燃焼研究の最前線 4
- I211 蛍光体微粒子を利用した二色蛍光法による高温空気流二次元温度測定  
\*林健太郎(慶大院), 磯谷弘志(慶應大), 植田利久, 横森剛, 平沢太郎(中部大)
- I212 噴霧燃焼法により合成したコアシェル粒子の創製メカニズム  
\*長谷川寛(慶大院), 植田利久(慶應大), 横森剛
- I213 メタン・空気予混合火炎における石英/アルミナ壁面の化学的効果  
\*齋木悠(名工大), 鈴木雄二(東大工),
- I214 パルスアーク放電で生成した OH の PLIF 計測を用いた金属表面上の化学的消炎機構の検討  
\*林偉栄(東大院), 鈴木雄二(東大工)
- I22 11:00—12:40 OS 燃焼研究の最前線 5
- I221 アルコール系バイオ燃料の高圧乱流燃焼特性に関する研究  
\*宗吉俊吾(東北大院), 鈴木拓朗, 工藤啄(東北大流体研), 小林秀昭
- I222 四平面 PLIF による乱流予混合火炎の三次元火炎構造の解明  
\*志村祐康(東工大院), 村山大樹, 店橋護, 宮内敏雄
- I223 外部レーザー加熱を伴う管内下方伝播火炎における乱流火炎への遷移過程の観察  
\*谷山由和(北大工), 藤田修, 朴俊成
- 1224 非線形動力学理論を用いた希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器の希薄吹き消えの検知と制御  
\*篠田雄太(立命大), 小林将紀, 後藤田浩, 立花繁(宇宙航空研究開発機構)
- 1225 8 インチ管状火炎バーナにおける高周波振動燃焼に関する実験的研究  
\*奈須健一(広大院), 下栗大右, 石塚悟
- I23 13:30—14:50 OS 燃焼研究の最前線 6
- I231 電線火災時にみられる熔融ポリマー落下に伴う熱的衝撃に関する研究  
\*薄木太一(北大工), 中村祐二, 若月薫(消防研究センター)
- I232 複数燃料液滴の二段点火における液滴間干渉の研究  
\*森上修(九大), 西山洋平, 橋本英樹, 村瀬英一
- I233 ふく射 2 色法による超音速ジェット of 2 次元温度分布測定  
\*高橋周平(岐大工), 吉田英史(岐大院), 井原禎貴(岐大工), 若井和憲, 西田俊介(東大院), 津江光洋(東大工), 今村幸(日大生産工), 田口秀之(JAXA), 小島孝之
- I234 定在音場における流体振動が保炎に及ぼす影響  
\*嶺井航(日大理工航空), 岩田修幸, 齊藤允教, 勝俣雅人, 田辺光昭
- 第 3 日 6 月 1 日 (金)
- < A 室 >
- A31 9:15—10:35 沸騰 5
- A311 MEMS センサによる核沸騰熱伝達機構の研究 (伝熱壁表面温度の同定と高速制御)  
\*矢吹智英(明大院), 中別府修(明大)
- A312 薄膜熱デバイスを用いたミニチャネル内の流動沸騰に関する研究  
\*齊藤拓也(明大学), 矢吹智英(明大院), 中別府修(明大)
- A313 ナノ流体によるプール沸騰 CHF 促進機構 - ナノ粒子析出面の発泡点密度 -  
\*坂下弘人(北大)
- A314 マイクロチャネル沸騰系における扁平気泡と伝熱面間の薄液膜形成機構と特性  
\*張耀華(横国大院), 木原啓, 宇高義郎
- A32 10:45—12:05 沸騰 6
- A321 極細クライオプローブの熱伝達率測定と沸騰伝熱特性  
\*岡島淳之介(東北大流体研), 小宮敦樹, 円山重直
- A322 水平蒸発管内における低 GWP 混合冷媒 HFO1234yf/R32 の伝熱特性  
\*党超鋌(東大), 李敏霞(天津大学), 飛原英治(東大)
- A323 大きな単一気泡底部液膜に形成されるドライパッチ近傍の熱流束の分布と変化  
\*原村嘉彦(神奈川大)

- A324 低圧低沸点水における沸騰熱伝達の機構とその促進  
\*三浦浩 (工学院大院), 大竹浩靖 (工学院大)
- A33 13:15—14:35 沸騰 7
- A331 ハニカム多孔質体による過渡沸騰熱伝達の向上  
\*森昌司 (横浜国大), 長龍之介, 奥山邦人
- A332 多孔構造面の水液膜蒸発伝熱特性  
\*平澤茂樹 (神戸大), 中島拓弥, 瓜本哲也, 川南剛
- A333 多孔質伝熱面を有する狭隘流路内限界熱流束  
\*浅野等 (神戸大院), 川崎敬, 竹中信幸
- A334 沸騰・凝縮によって励起される円柱構造物の振動に関する研究  
\*小室吉輝 (京大工・原子核), 河原全作, 功刀資彰, 横峯健彦
- A34 14:45—16:25 沸騰 8
- A341 液体の核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造と伝熱特性  
\*尾崎美智央 (横国大院), 宇高義郎
- A342 気泡周りに生じるアルコール水溶液のマランゴニ対流の観察  
\*河合健太郎 (芝工大), 江田祐樹, 新井里枝, 小野直樹
- A343 高発熱素子の浸漬沸騰冷却に関する研究  
\*小佐野佑介 (日本大学), 松島均
- A344 沸騰を伴う伝熱流動の数値解析評価  
\*福多将人 (東芝), 光武徹, 山本泰
- A345 電磁波加熱による過渡沸騰遷移に関する研究  
\*鈴木翔太 (筑波大院), 金子暁子 (筑波大), 阿部豊, 鈴木政浩 (原子力機構), 瀬川智臣, 藤井寛一
- <B室>
- B31 9:15—10:35 マイクロ伝熱 4
- B311 3次元細孔構造をもつSBA-16薄膜内部のイオン移動現象  
\*黄峻浩 (東大), 大宮司啓文, 片岡祥 (産総研), 遠藤明
- B312 エバネッセント波照射ラマンイメージング法による固液界面極近傍のイオン濃度非侵襲計測  
\*佐藤洋平 (慶大理工), 大熊将宗 (慶大院), 深山陽介 (慶大理工)
- B313 自発ラマンイメージング法によるマイクロチャネル流温度分布非侵襲計測法の開発  
\*栗山怜子 (慶大院), 佐藤洋平 (慶大理工)
- B314 ナノ・マイクロ階層構造が液滴の濡れ特性に及ぼす影響  
\*長山暁子 (九工大), 水本和也 (九工大), 鶴田隆治 (九工大)
- B32 10:45—12:05 マイクロ伝熱 5
- B321 レーザー誘起誘電泳動を用いた小型拡散係数センサーの開発 -電界強度分布のシミュレーションによる測定条件の検討-  
\*的場良明 (慶大学), 岡哲大, 田口良広 (慶大理工), 長坂雄二
- B322 フォトサーマル赤外検知法によるパリレン/垂直配向カーボンナノチューブ複合材料の熱伝導率評価 -パリレンCとNの熱伝導率向上の比較-  
\*多和田孝達 (慶大学), 佐藤翼 (慶大院), 田口良広 (慶大理工), 長坂雄次
- B323 表面処理した垂直配向単層カーボンナノチューブ薄膜の熱抵抗の測定  
\*射場勇士 (広島大), 井上修平, 松村幸彦
- B324 局所的ダメージを有する MWNT における熱伝導に関する実験  
\*林浩之 (九大院), 生田竜也 (九大工), 西山貴史, 高橋厚史
- B33 13:15—14:35 マイクロ伝熱 6
- B331 透明なカーボンナノチューブフレキシブルトランジスタ  
\*相川慎也 (東大), 北島旭, エイナルソン エリック, トウラキットセーリー ティーラボン, 千足昇平, 丸山茂夫
- B332 水晶基板上での水平配向単層カーボンナノチューブの成長過程  
\*井ノ上泰輝 (東大), 長谷川大祐, Badar Saifullah, 千足昇平, 丸山茂夫
- B333 触媒 CVD 法における単層 CNT 成長の分子動力学  
\*久間馨 (東京大学), 野口拓哉, 千足昇平, 丸山茂夫
- B334 四重極質量分析装置による単層カーボンナノチューブ合成過程のその場分析  
\*井上修平 (広島大), 富永隆嗣, 射場勇士, 松村幸彦
- B34 14:45—16:45 マイクロ伝熱 7
- B341 分子動力学法を用いた極薄液膜の撥水挙動  
\*高野晋 (東理大院), 上野一郎 (東理大)
- B342 分子動力学法による合金化したシリコン結晶のフォノン輸送解析  
\*堀琢磨 (東大), 志賀拓磨, 丸山茂夫, 塩見淳一郎
- B343 摂動論的アプローチによる合金結晶のフォノン輸送解析  
\*志賀拓磨 (東大院), 堀琢磨, 丸山茂夫, 塩見淳一郎
- B344 ボルツマン方程式に基づく固体中のエネルギー輸送解析  
\*今西保奈美 (京大工), 正尾裕輔, 松本充弘
- B345 カーボンナノチューブ束へのアルカンの吸着特性: グランドカノンカルモンテカルロシミュレーション  
\*カノン ジェームズ (東大), Vlugt Thij (Delft 工大), 丸山茂夫 (東大), 塩見淳一郎
- B346 ナノ構造化バルク熱電材料のマルチスケールフォノン輸送解析  
\*塩見淳一郎 (東大), 陳剛 (MIT)
- <C室>
- C31 9:15—10:45 電子機器の冷却 3
- C311 シリコーングリースの低温下における熱伝導率および接着強度測定

- \*大串哲朗 (広国大), 増本博光 (三菱電機), 赤尾洋, 小林実, 赤木茂樹, 長岡秀忠, 辰巳賢二 (JAROS), 菊池雅邦, 川田正國 (日本大学)
- C312 熱回路網法によるマイクロプロセッサのシリコンダイの非定常温度予測  
\*西剛伺 (日本 AMD), 畠山友行 (富山県大), 石塚勝
- C313 直線フィン温度分布フィッティング法によるグラフィートシートの熱伝導率測定  
\*西川泰司 ((株) カネカ), 三代真琴, 滝沢和宏 (東工大), 大串哲朗 (広国大)
- C314 直線フィン温度分布フィッティング法によるプリント基板の熱伝導率測定  
\*仁木雄大 (三菱電機), 大串哲朗 (広国大), 青木久美 (三菱電機), 小林孝
- C32 10:45—12:05 電子機器の冷却 4
- C321 振動解析によるダブルブレードピエゾファンの性能改善  
\*ジャリルバンド アハマド (フジクラ)
- C322 フィンヒートシンクの熱伝達に与える小型軸流ファンの影響  
\*福江高志 (富山県大), 畠山友行, 石塚勝, 舟渡裕一, 小泉雄大 (コーセル)
- C323 軸流ファンの MRF 法シミュレーションによる PQ 特性  
\*小泉雄大 (コーセル), 畠山友行 (富山県大), 福江高志, 石塚勝
- C324 軸流ファンの無次元旋回力係数モデル (適用範囲の検証)  
\*中村元 (防衛大)
- C33 13:15—14:35 電子機器の冷却 5
- C331 IT 設備連係制御技術における室内温度環境保全手法  
\*沖津潤 (日立), 間瀬正啓, 鈴木英一, 野尻徹, 佐野健太郎, 清水勇人
- C332 IT 設備連係制御技術における稼働履歴に基づく空調効率導出手法  
\*間瀬正啓 (日立), 沖津潤, 鈴木英一, 野尻徹, 佐野健太郎, 清水勇人
- C333 IT 設備連係技術における IT 機器入気温度予測手法  
\*清水勇人 (日立製作所), 佐野健太郎, 沖津潤, 間瀬正啓, 鈴木英一, 野尻徹
- C334 IT 設備連係技術における熱流体解析に基づく省エネ負荷配置の実証  
\*佐野健太郎 (日立製作所), 清水勇人, 沖津潤, 間瀬正啓, 鈴木英一, 野尻徹
- C34 14:45—16:45 物質移動・加工技術
- C341 SiC 基板の短パルスレーザ支援ピア加工の基礎研究  
\*岩谷直樹 (東工大), ドアン ホン ドク, 伏信一慶
- C342 アルミニウム空気電池のメカニカルチャージによる二次電池化  
\*曾我宏輔 (東工大), 川口達也, 齊藤卓志, 佐藤勲
- C343 シャワークリーニングによる環境汚染物質除去に関する実験的研究 (シャワー密度とシャワー水量の影響)  
姫野修廣 (信州大), \*平岩雄一 (信州大院), 深見清貴
- C344 木質バイオマスの粉碎における粉碎原料の粒度と乾燥の影響  
\*小林信介 (名大・工), 板谷義紀 (岐大・工)
- C345 液体ビームシェパーを用いたレーザー加工  
\*ドアン ホン ドク (東工大), イン エントウ, 岩谷直樹, 伏信一慶
- C346 粉体材料の減圧乾燥における熱・水分移動特性に関する研究  
\*細見悠介 (阪府大), 室屋陽平 (阪府大院), 吉田篤正, 木下進一
- < D 室 >
- D31 9:15—10:35 OS 水素・燃料電池 4
- D311 固体高分子形燃料電池用ガス拡散層内液水移動制御による酸素移動促進  
\*是澤亮 (横国大院), 大徳忠史 (秋田県立大), 遠藤昭史 (横国大), 宇高義郎 (横国大工)
- D312 ぬれ性分布を利用したマイクロポーラス層付きガス拡散層内の液水制御  
\*遠藤昭史 (横国大), 是澤亮 (横国大院), 大徳忠史 (秋田県立大), 宇高義郎 (横国大工)
- D313 固体高分子形燃料電池用ガス拡散層内のガス拡散係数計測手法の開発  
\*三木雄太 (早大院), 酒井隆志, 中垣隆雄, 勝田正文, 青木敦, 佐藤和之, 久保則夫
- D314 カーボンペーパー内液水飽和度と有効拡散係数との関係  
\*金子春樹 (横国大), 永井慎哉, 荒木拓人
- D32 10:45—12:05 OS 水素・燃料電池 5
- D321 燃料電池触媒層の白金量低減が性能・耐久性に及ぼす影響  
\*佐藤和之 (日産自動車), 田淵雄一郎, 大間敦史, 河瀬元明 (京大院工)
- D322 白金担持・非担持カーボン混合による PEFC 触媒層構造の制御と評価  
\*鈴木崇弘 (東大院), 津島将司, 平井秀一郎
- D323 固体高分子形燃料電池内の生成水移動現象に及ぼす MPL の機能メカニズム  
\*近久武美 (北大), 門脇主将, 田部豊
- D324 撥水性微細孔内部における液滴の輸送特性に関する分子論的研究  
\*福島啓悟 (東北大), 美馬俊樹 (東大), 杵淵郁也, 徳増崇 (東北大)
- D33 13:15—14:35 OS 水素・燃料電池 6
- D331 アノード・カソード温度面分布データを活用した PEFC 単セル内熱・物質移動現象の解明  
\*西村頭 (三重大院), 近藤俊俊, 山内泰介 (三重大), 飯尾和寛 (三重大院), 廣田真史
- D332 水分輸送の温度依存性を考慮した PEFC 非定常解析  
\*佐藤暁 (横国大院工), 官林亮, 樋口勝 (横国大

- D333 工), 三宅聡 (横国大院工), 荒木拓人  
 カーボン凝集体間抵抗を考慮した PEFC 電極内熱  
 電気輸送解析  
 \*井上元 (京大工), 松岡孝洋 (九大工), 河瀬元明  
 (京大工)
- D334 PEFC 氷点下起動時におけるカソード触媒層内氷  
 形成プロセスの観察と反応分布解析  
 \*田部豊 (北大), 市川亮輔 (北大院), 近久武美
- D34 14:45—16:25 OS 水素・燃料電池 7
- D341 リチウムイオン電極内移動現象の低エネルギー X  
 線 in-situ 可視化  
 \*洪偉豪 (東工大院理工), ディーワンサイ ペンサ  
 イ, 小林玄器, 津島将司, 菅野了次, 平井秀一郎
- D342 リチウムイオン電池用炭素負極の構造評価と充放  
 電特性  
 \*田村壮司 (東工大院), 津島将司 (東工大), 菅野  
 了次, 平井秀一郎
- D343 櫛刃構造流路によるフローバッテリーの電極有効  
 利用  
 \*佐々木肖 (東工大院), 津島将司, 平井秀一郎
- D344 酸化物イオン伝導の特性長さを利用した SOFC 電  
 極内有効反応厚さの予測  
 \*岸本将史 (京都大), 岩井裕, 齋藤元浩, 吉田英  
 生
- D345 SOFC 単セルシミュレーションへの電極劣化モデ  
 ルの適用  
 \*香山貴彦 (京都大), 岩井裕, 齋藤元浩, 吉田英  
 生

## &lt; E 室 &gt;

- E31 9:15—10:35 空調・熱機器 1
- E311 温室におけるダクト循環システムによる温度場形  
 成  
 \*伊吹竜太 (宮城大), マスード ベーニア (シドニ  
 ー大)
- E312 着霜現象を伴う熱および物質移動  
 \*松本享将 (玉川大), 舟木智之, 松本享将, 大久  
 保英敏
- E313 ダブルスピーカー型熱音響デバイスの蓄熱器の温  
 度分布に及ぼす音波位相の影響  
 \*野田英嗣 (九大院), ウィジャバラガ アディカ,  
 小清水孝夫 (北九州高専), 迫田直也 (水素エネル  
 ギー国際研究センター), 河野正道 (九大), 高田  
 保之
- E314 進行波音波による熱音響冷却の数値シミュレーシ  
 ョン  
 \*経田僚昭 (富山高専), 多田幸生 (金沢大), 瀧本  
 昭, 大西元
- E32 10:45—12:05 空調・熱機器 2
- E321 Dehumidification behavior of connected circulating  
 fluidized beds with organic sorbent powder  
 \*Sukmawaty (Okayama Univ.), Akihiko Horibe,  
 Naoto Haruki, Daiki Hiraishi
- E322 Numerical Study on Steam Generation Process in a  
 Novel Adsorption Heat Pump System  
 \*薛冰 (九大), 中島数矢, 野田敦嗣, ウィジャヤ  
 ンタ アグン トリ, 中曾浩一, 深井潤

- E323 小型発電機の排ガスを利用した海水淡水化蒸留器  
 の研究  
 \*田中大 (久留米高専)
- E324 地中熱交換器の伝熱特性に及ぼす自然対流の影響  
 \*行徳俊希 (佐賀大), 宮良明男, 椿耕太郎
- E33 13:15—14:35 空調・熱機器 3
- E331 三流体熱交換器における一般的評価  
 \*青木和夫 (長岡技科大), 石川信幸 (仙山高専),  
 赤堀匡俊 (長岡技科大)
- E332 エアコン用熱交換器における親水特性に関する研  
 究  
 \*早瀬岳 (三星電子), 柳采法, 崔容華
- E333 酸化マグネシウム/水系ケミカルヒートポンの充  
 填層材料の伝熱性向上に関する検討  
 \*ザメンゴ マッシミリアーノ (東工大)
- E334 細管内強制対流凝縮熱伝達特性を利用した潜熱回  
 収熱交換器の高性能化  
 \*山下隼平 (横国大院), 山内将希 (横国大), 宇高  
 義郎 (横国大工), 小林正和 (パロマ), 佐野泰洋
- E34 14:45—16:45 空調・熱機器 4
- E341 熱交換器一体型遠心ファンの熱流動特性 (羽根高  
 さが伝熱性能に及ぼす影響)  
 \*大江健司 (富山大院), 川口清司 (富山大), 渡辺  
 大輔
- E342 インナーフィン型プレート熱交換器の性能に及ぼ  
 す熱交換器構造の影響  
 \*佐藤究 (日大工), 藤川直之, 松浦竜平, 安齋孝,  
 松康太郎 (東京プレス), 佐々木直栄 (日大工)
- E343 炎天下駐車時における車室内温度低減 (吹出し位  
 置の違いによる換気方法の検討)  
 \*北川智大 (富山大院), 川口清司 (富山大), 豊原  
 良太 (富山大院), 渡辺大輔 (富山大)
- E344 エジェクタ機構の形状設計に関する数値解析  
 \*伊藤達哉 (慶大院), 佐藤春樹 (慶大理工), 松尾  
 亜紀子
- E345 エアコンの冷房 COP に及ぼす室外熱交換器洗浄の  
 影響  
 \*大塚涼平 (日大工), 橋内尚明, 中島寛章, 井上  
 行雄 (ショーワ), 佐々木直栄 (日大工)
- E346 湿度操作による空気清浄の研究 (湿度操作量と除  
 去率の関係)  
 \*小野田渚 (明大院), 比企野公久 (明大学), 中別  
 府修 (明大)

## &lt; F 室 &gt;

- F31 9:15—10:35 強制対流 4
- F311 溝付チャンネル内乱流と伝熱の数値解析  
 \*大西将気 (北大工), 氏家隆 (北大工院), 黒田明  
 慈
- F312 球帯状凹凸部とリブ状凹部の組み合わせ配置によ  
 る扁平流路内伝熱促進  
 \*太田アウン (デンソー), 稲垣充晴, 下谷昌宏,  
 鳥越栄一
- F313 ディンプル付き流路流れの非定常熱伝達に関する  
 数値解析  
 \*佐藤範和 (豊田中研), 金田謙治, 稲垣昌英, 堀

- 之内成明
- F314 リブ付き流路内乱流熱伝達の空間発展型 DNS (等温加熱の場合)  
\*風間駿介 (新潟大), 三浦貴広, 松原幸治, 櫻井篤
- F32 10:45—12:05 強制対流 5
- F321 オリフィスを過ぎる粘弾性流体流れにおける乱流構造の PIV による解析  
\*鶴見大誓 (東理大院), 川田翔子 (東理大), 川瀬友宏 (東理大院), 塚原隆裕 (東理大), 川口靖夫
- F322 オリフィスを過ぎる粘弾性流体流れにおける乱流熱伝達の実験的解析  
\*川田翔子 (東理大), 鶴見大誓 (東理大院), 川瀬友宏, 塚原隆裕 (東理大), 川口靖夫
- F323 リブ列を有する平行平板間における粘弾性流体の乱流熱伝達の数値解析 (第 2 報: 摩擦抵抗及び熱伝達率の非相似性とレイノルズ数依存性)  
\*塚原隆裕 (東理大), 川瀬友宏 (東理大院), 川口靖夫 (東理大)
- F324 壁面からのポリマー溶液滲出による乱流摩擦抵抗低減の実験的研究 -PIV・PLIF 同時計測による物質拡散に関する考察-  
\*大槻知弘 (東理大院), 黒澤太希, 本澤政明 (東理大), 岩本薫 (農工大), 安藤裕友 (海技研), 千田哲也, 川口靖夫 (東理大)
- F33 13:15—14:35 強制対流 6
- F331 印加磁場下の磁性流体矩形管内強制対流熱伝達の伝熱特性  
\*本澤政明 (東理大), 関根司 (東理大学), 澤田達男 (慶大理工), 川口靖夫 (東理大)
- F332 流動層内粒子対流熱伝達の評価  
\*梅川尚嗣 (関大), 富岡佑介 (関大院), 網健行 (関大), 小澤守
- F333 短い垂直円管内水の過渡乱流熱伝達  
\*畑幸一 (京大エネ理工研), 甲斐尚人 (京大), 白井康之, 増崎貴 (核融合研)
- F334 蛇行流路内における低レイノルズ数粘弾性流体流れの乱れと伝熱特性 -第 3 報 3 次元流動場の測定と解析-  
中島理 (京大院), \*巽和也 (京大), 永亘 (京大院), 中部主敬 (京大)
- F34 14:45—15:45 強制対流 7
- F341 衝撃波の影響を受けた格子乱流の実験的研究  
\*北村拓也 (名古屋大学), 長田孝二, 酒井康彦, 佐宗章弘, 原崎辰耶, 齋藤大輝, 寺島修
- F342 T 形合流管における高・低温空気流の乱流混合促進と制御  
堀秀一郎 (三重大・院), \*廣田真史 (三重大), 浅野秀夫 (デンソー), 松田拓也 (三重大・院), 丸山直樹 (三重大), 西村顕
- F343 ボルテックスジェネレータを用いた伝熱促進 (翼型と熱伝達特性の関係)  
\*五十嵐隼 (富山大院), 川口清司 (富山大), 渡辺大輔
- < G 室 >
- G31 9:15—10:35 自然対流・複合対流 1
- G311 ガラス面に囲まれた空間内の非定常ふく射-対流複合伝熱解析における外来照射の影響  
\*酒井清吾 (横浜国大), 的場建人 (横国大院), 円山重直 (東北大流体研)
- G312 ヘリウムガスを利用した自然循環流の制御に関する研究  
\*武田哲明 (山梨大学), 野村真司 (山梨大院), 船谷俊平 (山梨大学)
- G313 一様な鉛直下降流中に設置された水平上向き加熱くさびまわりの強制-自然共存対流の流動と伝熱  
\*北村健三 (豊橋技科大), 山崎慎司, 光石暁彦, 木村文義 (兵庫県立大)
- G314 円筒容器内の水平な加熱回転円板上の共存対流熱伝達特性  
\*小笠原一樹 (岩大院), 廣瀬宏一 (岩大工)
- G32 10:45—12:05 自然対流・複合対流 2
- G321 円筒形断熱構造体の目地部における自然対流熱伝達  
\*浅岡秀紀 (静岡大), 柿本益志, 鈴木巧, 高橋一弘 (明星工業株式会社), 中川幸雄, 下野和昭
- G322 加熱 V 字キャビティまわりに生じる自然対流の流動と伝熱  
\*木村文義 (兵庫県大), 野口達夫 (兵庫県大院), 北村健三 (豊橋技科大)
- G323 多孔質による自然対流抑制を使った太陽熱コレクターの放熱低減の実験  
\*坪田良平 (神戸大), 平澤茂樹, 川南剛
- G324 感温性ゲルと空気を内包したカプセルに関する研究  
\*長谷川雅人 (金沢大), 田村賢次, 川端信義
- G33 13:15—14:35 自然対流・複合対流 3
- G331 自然対流層列の伝熱数値解析  
姫野修廣 (信州大), \*松井彰良 (信州大院), 田下明広
- G332 水平上向き加熱面の自然対流熱伝達促進 -円筒発熱体を上方に設置した場合の効果-  
堀部明彦 (岡山大), \*下山力生 (岡山工技), 春木直人 (岡山大), 境健司
- G333 相変化蓄熱物質の液相状態下における熱物性と水平密閉矩形容器内自然対流熱伝達  
\*稲垣照美 (茨大工), 上江洲智政 (茨大院), 一色俊洋
- G334 着霜を伴う熱移動に及ぼす空気温度の影響  
\*鈴木勇士 (玉川大), 吉岡諒 (玉大院), 大久保英敏 (玉川大)
- G34 14:45—16:25 自然対流・複合対流 4
- G341 立方体内の自然対流における不安定性解析  
\*ホアン F. トーレス (東北大院), ダニエル アンリー (LMFA, ECL), 小宮敦樹 (東北大流体研), 円山重直
- G342 水平上向き加熱平板まわりの自然対流の数値解析  
\*光石暁彦 (豊技大), 北村健三

- G343 表面性状改良による空冷熱伝達率向上  
\*秋葉美幸 ((株) 東芝), 和田国彦
- G344 部分加熱された水平円管内流れに及ぼす外部磁場印加効果  
\*金田昌之 (大阪府大), 尾岡弘樹, 須賀一彦
- G345 都市キャノピー上部の熱対流乱流構造における非一様表面条件の影響  
\*服部康男 (電中研), 道岡武信, 石原修二 (電力計算センター), 須藤仁 (電中研), 平口博丸, モーエン チンポー (米国大気研究センター)
- < H室 >  
H31 9:35—10:35 熱物性 1
- H311 二酸化炭素の分離に適するクラスレート水和物の相平衡測定  
\*飯野健人 (慶大理工), 杉中卓也, 大村亮
- H312  $O_3 + O_2 + CO_2 + H_2O$  系についての 3 相(気 + 液 + ハイドレート) 平衡測定  
\*宍戸一駿 (慶大理工), 室町実大 (慶大院), 大村亮 (慶大理工), 森康彦
- H313 蓄熱式空調システムに用いる蓄冷媒体に適したセミクラスレートハイドレートの平衡温度測定  
\*徳富潤紀 (慶大理工), 佐藤快, 大村亮
- H32 10:45—12:05 熱物性 2
- H321 レーザー誘起表面波法を用いた液状食品の粘性率センシングに関する研究 -食用鶏卵を用いた粘性率モニタリングによるゲル化過程の評価-  
\*滝口広樹 (慶大院), 柴田賢祐 (慶大理工), 長坂雄次
- H322  $Dy^{3+}, Tm^{3+}$  を添加した希土類酸化物  $Y_2O_3$  の蛍光温度依存性  
\*大矢晃輔 (慶大院), 石和田尚弘, 植田利久 (慶大理工), 横森剛
- H323 固体の熱輸送性質の非接触測定法の研究 -赤外温度計測の検討-  
\*内田悟 (九大工), 山口直樹 (九大院), 藏田耕作 (九大工), 出口祥啓 (徳島大), 高松洋 (九大工)
- H324 常温駆動マイクロビーム水素センサに関する研究  
\*塩入雅貴 (九大), 田中雄樹, 福永鷹信, 藏田耕作, 高橋厚史, 高松洋
- H33 13:15—14:35 熱物性 3
- H331 773 K, 100 MPa までの高温, 高圧域における水素および窒素の PVT 性質測定  
\*迫田直也 (九大), 本村晃一, Supriatno, 久保圭祐, 新里寛英 (産総研), 河野正道 (九大), 高田保之, 藤井丕夫 (産総研)
- H332 欠陥を有するカーボンナノチューブの界面熱コンダクタンスの巨視的測定  
\*山田寛 (九大院), 西山貴史 (九大工), 安原崇弘 (九大院), 高橋厚史 (九大工)
- H333 極低温領域における FRP の熱物性計測 -接触熱抵抗を利用した温度補正の提案-  
\*早川和樹 (東工大), 山田祐太, 鈴木祐二, 井上剛良
- H334 カーボンペーパー内の液水分布状態による有効熱伝導率への影響  
\*西田洋介 (横浜国大院工), 橘伸佳, 荒木拓人
- H34 14:45—15:45 熱物性 4
- H341 自然冷媒系混合物の実用化に不可欠な熱物性データの精密測定  
\*宮本泰行 (富山県大)
- H342 牛骨に由来するゼラチングルの比熱容量および密度の測定  
\*藤野淳市 (福岡大), 本田知宏
- H343 水の比熱  
\*田中修 (三木再生エネルギー開発研究所)
- < I室 >  
I31 9:15—10:35 融解・凝固 1
- I311 潜熱輸送スラリーの安定化に関する研究  
\*鈴木洋 (神戸大院工), 藤井真 (神戸大工), 札場健人 (神戸大院), 菰田悦之 (神戸大院工)
- I312 直接接触式潜熱蓄熱装置の放熱性能改善  
\*能村貴宏 (北海道大), 坪田雅功, 大矢哲平, 沖中憲之, 秋山友宏
- I313 氷スラリー内における氷粒子の挙動が伝熱特性に及ぼす影響  
\*富樫憲一 (神戸大), 小宮拓郎, 川南剛, 麓耕二 (弘前大), 平澤茂樹 (神戸大)
- I314 層流化を伴うアイススラリーの流動および熱伝達特性  
\*澤田成吾 (信大院), 田村史人, 熊野寛之 (信大工)
- I32 10:45—12:05 融解・凝固 2
- I321 微細流路内を流れる不凍タンパク質水溶液の凝固過程における氷-溶液界面近傍の温度場・速度場・濃度場計測  
\*大西洋輔 (京工織大), 萩原良道, 前田穰, 中川嘉章, 北川石英
- I322 微細流路内を流れる氷スラリーへの不凍タンパク質添加の影響  
\*中川嘉章 (京工織大), 大西洋輔, 萩原良道
- I323 氷の付着力制御を目的としたシランカップリング剤から生成される薄膜の開発  
\*村端圭祐 (中大院), 稲場浩之 (日立ソリューションズ), 松本浩二 (中大理工), 林圭佑 (中大院)
- I324 界面活性剤の過冷度に及ぼす効果の検討  
\*白井大介 (中大院), 五十嵐淑人 (ニコン), 松本浩二 (中大理工)
- I33 13:15—14:35 融解・凝固 3
- I331  $CH_4 + CO_2$  混合ガス/水界面におけるクラスレートハイドレートの結晶成長  
\*上野弘貴 (慶大理工), 赤津覚, 大村亮
- I332 エリスリトールの過冷却に関する研究 (試料体積・接触面積・異質浮遊粒子の影響)  
\*安達卓宏 (千葉大), 中嶋達也 (千葉大院), 田中学 (千葉大)
- I333 矩形管内における氷の結晶方向変化  
\*小泉公彦 (金沢大), 寺岡喜和
- I334 伸縮性のある膜を用いた凝固の伝播による過冷却

の解消

\*山田雄大（東工大），大河誠司

- I34 14:45—16:05 融解・凝固 4
- I341 冷却材中における溶融物ジェットの崩壊微粒化挙動に及ぼす界面固化の影響  
\*岩澤譲（筑波大），阿部豊，金子暁子，黒田泰平，松尾英治（筑波大院），海老原健一（原研），坂場弘（三菱重工），小山和也（MFBR），伊藤和宏（兵庫県立大），成合英樹（筑波大）
- I342 低融点合金を用いた非接触薄板凝固法のシミュレーションと試作実験  
\*三橋由幸（芝工大），松村一樹，山田崇，小野直樹
- I343 セルオートマトン法を用いた合金融液のマイクロ凝固シミュレーション  
\*多田幸生（金沢大），山崎亮輔，義岡秀晃（石川高専），瀧本昭（金沢大），大西元
- I344 合金融液の過冷却凝固におけるマッシュ域の成長（二次元凝固における一次アーム間隔選択の理論）  
\*義岡秀晃（石川高専），多田幸生（金沢大），柳谷竜登（石川高専），林勇二郎（国立高専機構）

## 優秀プレゼンテーション賞（第49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 齊藤卓志

第49回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で学生・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。企業・大学・研究機関等の多数の皆様にご参加いただきたく、お願いいたします。

開催日：平成24年5月30日（水） シンポジウム第1日  
発表形式：発表者1名あたり3分のショートプレゼンテーションとポスタープレゼンテーションを行っていただく予定です。各プレゼンテーションは、以下の内容を予定しています。

○ショートプレゼンテーション（SP）15:00～15:30

- ・1人あたりの発表時間は3分です。スケジュールがタイトなため、発表時間厳守ですので注意してください。なお、SPでは質疑応答の時間は設けません。
- ・発表資料はPDFファイル（動画不可、上限3MB/人）を事前提出していただきます。学生会委員会側でノートパソコンを用意し、その中にファイルをコピーして発表時に使用する予定です。なお、PDFファイルのページ送りは学生会委員が担当する予定です。

○ポスタープレゼンテーション（PP）15:40～17:00

- ・講演番号により、前半および後半の発表時間帯を設定します。詳細な時間スケジュールは後日連絡します。
- ・ポスターを貼るパネルのサイズは、縦2100mm×横1200mmで、縦長に設置されます。また、貼り付けには画鋸を用います。

対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成24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・学生会員）、または入会申込中であること（事前の入会を強く推奨）。注：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す。また、過去に本賞を受賞された方は応募できません。

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します。

<最新情報はシンポジウムのホームページに公開します>



## 編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

対 象	対 応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています。)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載, MLでも配信	申込者は、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌: 1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐評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評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(伝熱に関する分野に限る)	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評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評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）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又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 <a href="http://www.htsj.or.jp/banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/banner.pdf</a> をご参照下さい。

### 【連絡先】

- ・総務部会長：大久保英敏（玉川大学）：ohkubo@eng.tamagawa.ac.jp
- ・編集出版部会長：高松洋（九州大学）：takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：津島将司（東京工業大学）：tsushima@mech.titech.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：党超鋌（東京大学）：dangcb@k.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：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ください。
- ・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

---

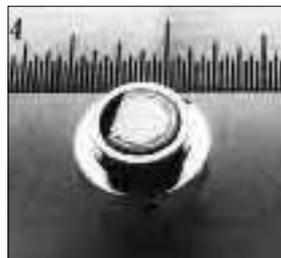
第 50 期入会 (2011.11.1~2012.31) 正 3 名

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
正	内田 浩基	株式会社富士通研究所	正	茂木 仁	株式会社中村自工
正	宮崎 隆彦	九州大学			

# 熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 ( $W/cm^2$ ) に比例した直流電圧を出力します。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

## 熱流束マイクロセンサー



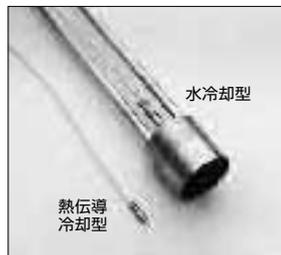
### 特徴

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

### 使用例

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

## ガードン型円形フォイルセンサー

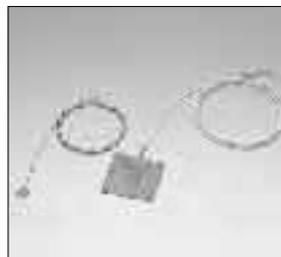


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 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

## シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いため、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

### 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

## 熱流束センサー 校正サービス

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

センサテクノ株式会社

〒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](http://www.senstech.jp)

E-mail [senstech@td6.so-net.ne.jp](mailto:senstech@td6.so-net.ne.jp)



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

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

### CAPTEC 社(フランス)

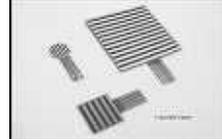
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。  
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

#### 熱流束センサー



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

#### 輻射センサー



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

### MEDTHERM 社(アメリカ)

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

#### 熱流計/輻射計



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

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

\*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

#### 超高速応答同軸熱電対

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



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

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

### ITI 社(アメリカ)

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

#### 高温用熱流板



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

#### 水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C  
応答速度: 0.1s  
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm<sup>2</sup>

#### 当社取扱製品の適用分野

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

#### 有限会社 テクノオフィス

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

## 編集出版部会ノート *Note from the Editorial Board*

1年間続いた50周年記念特集号も本号で最後となります。荒木信幸先生、越後亮三先生、河村洋先生、谷下一夫先生には、先生方が長年にわたり身骨を砕いて研究を行ってこられたそれぞれのご専門分野を振り返っていただきました。また、昨年11月26日に行われた日本伝熱学会50周年記念式典の報告と、長島昭先生の記念講演の内容も掲載しています。現在、伝熱学会将来検討委員会では、伝熱学会の現状分析に基づき様々な面から学会のあり方等の議論を行い笠木会長への答申案を作成中です。多くの会員にとって学会は「存在する」ものであり、それはほぼ定常状態にあると思いがちです。これに対して、長島先生のご講演では「学会のライフサイクル」や「学会のサステナビリティ」について述べられています。「だれかの企画で開催された研究会がもし成功すると継続開催され、いずれ学会に育っていく。しかし興味が失われると停止、統合されていった。その柔軟なライフサイクルは学問を盛んにする基本である」や「伝熱学会も、研究の素晴らしさだけを語るのではなく、社会の期待にどう応えるかを語らなくてはならない」という話は示唆的です。自分の研究と教育のことで精一杯だというのが普通だと思われそうですが、やはり「研究とは、学会とは」ということについて一度、根本から考え直してみる必要があると思います。5月末の第49回日本伝熱シンポジウムの折にはパネル討論会が行われることになっています。活発な議論になることを期待しています。

高松 洋 (九州大学)

*Hiroshi Takamatsu (Kyushu University)*

*e-mail: takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp*

---

副会長 岡崎 健 (東京工業大学)	部会長 高松 洋 (九州大学)
委員	
(理事) 加藤泰生 (山口大学)	坂下弘人 (北海道大学)
田川正人 (名古屋工業大学)	西村伸也 (大阪市立大学)
安田俊彦 (日立造船)	
(評議員) 小原 拓 (東北大学)	木下 泉 (電力中央研究所)
藏田耕作 (九州大学)	伏信一慶 (東京工業大学)
上野一郎 (東京理科大学)	梅川尚嗣 (関西大学)
奥山正明 (山形大学)	佐々木直栄 (日本大学)
佐藤恒之 (秋田工業高専)	野村信福 (愛媛大学)
堀部明彦 (岡山大学)	森 昌司 (横浜国立大学)
TSE チーフエディター 門出政則 (佐賀大学)	
編集幹事 石田賢治 (佐賀大学)	

編集出版事務局：

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 高松 洋

〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地

Tel&Fax: 092-802-3123, [takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp](mailto:takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp)