

ISSN 1344-8692 Vol. 41 No. 166

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

伝熱学会 40 周年記念号シリーズ

< 10 年間の伝熱研究の進展 ( その 1 ) >

2002.1

# 「伝熱」原稿の書き方

## How to Write a Manuscript of Dennetsu

伝熱 太郎 (伝熱大学)  
Taro DENNETSU (Dennetsu University)

### 1. はじめに

以下の注意事項に留意して、原稿を作成すること。

### 2. 「伝熱」用原稿作成上の注意

#### 2.1 標準形式

原稿は Microsoft Word 等を用いて作成し、図や写真等は原稿に張り込み一つのファイルとして完結させる。原稿の標準形式を表 1 に示す。

表 1 原稿の標準形式

用紙サイズ	A4 縦長(210mm×297mm), 横書き
余白サイズ	上余白 30mm, 下余白 30mm 左余白 20mm, 右余白 20mm
タイトル	1 段組, 45mm 前後あける (10 ポイント(10×0.3514mm)で 8 行分)
本文	2 段組, 1 段 80mm, 段間隔余白 10mm
活字	10 ポイント(10×0.3514mm) 本文 (Windows) MS 明朝体 (Macintosh) 細明朝体 見出し (Windows) MS ゴシック体 (Macintosh) 中ゴシック体 英文字・数字 Times New Roman または Symbol
1 行の字数	1 行あたり 23 文字程度
行送り	15 ポイント(15×0.3514=5.271mm) 1 ページあたり 45 行 ただし、見出しの前は 1 行を挿入

#### 2.2 見出しなど

見出しはゴシック体を用い、大見出しはセンタリングし前に 1 行空ける。中見出しは 2.2 などのように番号をつけ左寄せする。見出しの数字は半角とする。行の始めに、括弧やハイフン等がこないように禁則処理を行うこと。

#### 2.3 句読点

句読点は、および、を、や、は避

けること。

#### 2.4 図について

図中のフォントは本文中のフォントと同じものを用いること。

#### 2.5 参考文献について

##### 2.5.1 番号の付け方

参考文献は本文中の該当する個所に[1], [2,4], [6-10]のように番号を入れて示す。

##### 2.5.2 参考文献の引き方

著者名、誌名、巻、年、頁の順とする。毎号頁の改まる雑誌(Therm. Sci. Eng.など)は巻-号数のようにして号数も入れる。著者名は、名字、名前のイニシャル、のように記述する。雑誌名の省略法は科学技術文献速報(JICST)に準拠する。文献の表題は省略する。日本語の雑誌・書籍の場合は著者名・書名とも省略しない。

#### 参考文献

- [1] 伝熱太郎, 伝熱花子, 日本機械学会論文集 B 編, 80-100 (1999), 3000-3005.
- [2] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (1976).
- [3] Smith, A. et al., *Therm. Sci. Eng.*, 7-5 (1999), 10-16.
- [4] 山田太郎, やさしい伝熱, 熱講社 (1980).

原稿作成用のテンプレート (MS-WORD) は下記の伝熱学会のホームページよりダウンロードできます。

伝熱学会のホームページ

<http://www.htsj.or.jp/>

または学会誌「伝熱」のホームページ

[http://htsj.mh.sd.keio.ac.jp/dennetsu\\_templ-j.html](http://htsj.mh.sd.keio.ac.jp/dennetsu_templ-j.html)

# 伝 熱

## 目 次

新年にあたって .....	第 40 期会長 藤田 恭伸 (九州大学) .....	1
〈10年間の伝熱研究の進展 (その1)〉		
40周年記念号シリーズ発行にあたって .....	第 40 期編集出版部会長 瀧本 昭 (金沢大学) .....	2
バイオエンジニアリングにおける伝熱研究の進展 .....	山田 幸生 (電気通信大学) .....	3
環境・エネルギー .....	齋藤 武雄 (東北大学大学院) .....	9
伝熱数値シミュレーション: この10年間の進展 .....	河村 洋 (東京理科大学) .....	17
10年の伝熱研究の進展: 材料・デバイス .....	西尾 茂文 (東京大学) .....	24
〈支部活動報告〉		
キッズ・エネルギーシンポジウム 2001「熱」で物を動かす! .....	花村 克悟 (岐阜大学) .....	30
東海支部活動報告 .....	廣田 真史 (名古屋大学) .....	32
九州支部活動報告 .....	高松 洋 (九州大学) .....	33
中国四国支部活動報告 .....	西村 龍夫 (山口大学) .....	33
北陸信越支部活動報告 .....	岩城 敏博 (富山大学) .....	34
〈行事カレンダー〉 .....		
35		
〈お知らせ〉		
第 39 回日本伝熱シンポジウム .....		37
「伝熱」会告の書き方 .....		45
事務局からの連絡 .....		46
寄付会費 (2000.11.29) .....		48
日本伝熱学会入会申し込み・変更届用紙 .....		49
日本伝熱学会賛助会員入会申し込み・変更届用紙 .....		50
インターネット情報サービス		
● <a href="http://www.htsj.or.jp/">http://www.htsj.or.jp/</a>	最新の会告・行事の予定等を提供	
● <a href="mailto:htsj@asahi-net.email.ne.jp">htsj@asahi-net.email.ne.jp</a>	事務局への連絡の電子メールによる受付	

**Journal of The Heat Transfer Society of Japan**  
**Vol.41, No.166, January, 2002**

**CONTENTS**

New Year's Greeting	
Yasunobu FUJITA (Kyusyu University) .....	1
<b>&lt; Advances of Heat Transfer Research in the Past 10 Years: Part 1 &gt;</b>	
On the Momoir of the 40 <sup>th</sup> Anniversaty of The Heat Transfer Society of JAPAN	
Akira TAKIMOTO (KanazawaUniversity) .....	2
Recent Advances in Bioengineering in Heat Transfer	
Yukio YAMADA (University of Electro-Communications) .....	3
Environment and Energy	
Takeo S. SAITOH (Tohoku University) .....	9
An Overview on Development of Heat Transfer Simulation in this Decade.	
Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science) .....	17
Advances of Heat Transfer Research in the Past 10 Years: Material and Device	
Shigefumi NISHIO (The University of Tokyo) .....	24
<b>&lt;Report of Branch&gt;</b>	
Kids Energy Symposium 2001 Generation of Mechanical Power from Thermal Energy !	
Katsunori HANAMURA (Gifu University) .....	30
Report of Tokai Branch	
Masafumi HIROTA (Nagoya University) .....	32
Report of Kyushu Branch	
Hiroshi TAKAMATSU(Kyushu University) .....	33
Report of Chugoku-Shikoku Branch	
Tatsuo NISHIMURA (Yamatguchi University) .....	33
Report of Hokuriku-Shinetu Branch	
Toshihiro IWAKI (Toyama University) .....	34
<b>&lt;Calendar&gt;</b> .....	35
<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	37

新年にあたって  
*New Year's Greeting*

第 40 期日本伝熱学会会長 藤田 恭伸 (九州大学)  
*Yasunobu FUJITA (Kyusyu University)*



会員の皆様、明けましておめでとうございます。

昨年 9 月の同時多発テロ事件以来、騒然とした世情も終息に向かい、明るい展望と新たな展開に期待をこめて新年をスタートされたことと、お慶び申し上げます。

最近、産業の適地立地の旗印のもとで生産拠点の海外移転が、多くの分野で大規模に加速し、80 年代に指摘されていた産業の空洞化がますます現実味を帯びてきた感が致します。市場原理、コスト重視、グローバリゼーションを標榜する 21 世紀では生産工場の海外流出は必然であり、空洞化を杞憂する方策は「技術」や「知」の集積強化を基本にした、いわゆる技術立国を指向する外はないかと思われま。先端的、先導型、あるいは調和型の技術開発、要素技術の統合やシステム化に基づく技術の高度化などが、伝熱工学分野でも一層深化し、その過程で蓄積された叡智が人間、環境、エネルギー、生体、福祉、等々の問題解決に貢献できることを願っております。

さて、本会は 1961 年 11 月に伝熱研究会として設立されて以来、1991 年に伝熱学会への名称変更、1994 年の法人化を経て、昨年 5 月に第 40 期、40 周年を迎えました。これを記念する企画・行事として、「伝熱学会 40 周年記念号シリーズ」“10 年間の伝熱研究の進展”、“歴代会長”などが会誌 1, 3, 5 月号に連載されます。また、「伝熱学会 40 周年記念セミナー」“ナノテクと燃料電池”が伝熱シンポジウムの前日の 6 月 4 日に同会場で開催されます。皆様のご期待とご参加をお願いする次第です。

前期からの引継ぎで未解決のまま越年した懸案事項が少なくありません。出版物や講演の CD 記録などによる学会の知的財産の保存継承、国際交流活動の展開、技術相談対応の窓口開設など、長期展望のもとに結論すべき事項についても筋道をつけたいと思っております。幸いにも、ペイオフ対策を真剣に検討しなければならないほど、会計状況は超健全に推移しておりますので、数年後実行を目途に引当金を要する単発の新企画、行事、事業なども検討するつもりでおります。皆様のご協力を切にお願い致します。

最後になりましたが、皆様のご健勝とますますのご発展を願ってご挨拶と致します。

## 40 周年記念号シリーズ発行にあたって

*On the Momoir of the 40<sup>th</sup> Anniversaty of  
The Heat Transfer Society of JAPAN*

第 40 期編集出版部会長 瀧本 昭 (金沢大学)  
*Akira TAKIMOTO (KanazawaUniversity)*

昭和 36 年 (1961) に創設された伝熱研究会が、平成 13 年 (2001) に 40 周年を迎え、その記念として伝熱学会「40 周年記念号シリーズ」を発行することになりました。

前任の菱田公一編集出版部会長から伝熱会誌の出版責任者を担当するよう仰せつかり、2 年間の任期でということで気軽に引き受けたところ、昨年 5 月の日本伝熱シンポジウム (おおみや) での日本伝熱学会総会において第 40 期役員として選出可決された時に、40 周年であることの重大さによりやく気が付いたのは後の祭りでした。

伝熱学会 (研究会) の歴史について、早速調査したところ、伝熱研究会は昭和 36 年 (1961) 11 月 22 日に設立総会が開催され、第 1 期 (S36.11~38.3) 小林 明会長からスタートし、昭和 37 年 3 月に「伝熱研究」第 1 巻、第 1 号が発刊され、その後、昭和 46 年(1971)に第 10 期、昭和 56 年(1981)に第 20 期、平成 3 年(1991)に第 30 期、そして平成 13 年 (2001)に第 40 期を迎えることとなります。

この間、第 3 期の昭和 39 年 5 月 26 日に第 1 回伝熱シンポジウムが開催されたことで、年期はシンポジウムの開催回数に常に 2 プラスになっています。

創立記念行事は、以上のような年期と開催回数が異なるために、10 周年記念が 1972 年第 11 期の第 9 回伝熱シンポジウムで、20 周年記念が 1983 年第 22 期の第 20 回伝熱シンポジウムで、30 周年記念が 1993 年第 32 期の第 30 回シンポジウム (横浜) でそれぞれ実施されてきております。

以上の結果をもとに理事会において 40 周年記念行事について審議がなされ、1961 年から数えて 2001 年 11 月が厳密な意味で 40 周年となることから、第 39 回伝熱シンポジウム (札幌) において 40 周年記念行事を開催し、会誌 2002 年 1 月号を記念号とすることになりました。

早速、企画部会では小沢部会長のもと、記念行事に

ついでに検討が行われ、下記の事業が行われることとなりました。多数の参加をお待ちしております。

### 1. (社) 日本伝熱学会 40 周年記念セミナー

2002 年 6 月 4 日 14 : 00-17 : 00

厚生年金会館

『ナノテクノロジーと伝熱』

矢部 彰先生 (産総研)

『燃料電池 : エネルギーと環境の調和の  
視点から』

菱沼 孝夫先生 (北海道大学)

### 2. ウェルカムパーティ

2002 年 6 月 4 日 18 : 00-20 : 00

札幌ビール園

一般 : 4000 円, 学生 : 2000 円

編集出版部会でも、記念号について検討を行い、本年度委員の担当分として 1 月から 5 月号まで記念号シリーズを発行することとし、その内容については、伝熱研究の歴史あるいは将来展望など種々議論された結果、近年その進展が目覚ましい研究分野として「バイオ」、「環境エネルギー」、「シミュレーション」、「材料デバイス」、「マイクロ」、「電子冷却」、「宇宙」、「計測」の 8 テーマについて 10 年間の進展レビューし、その中心となって活躍されている方に 1 月号「10 年間の伝熱研究の進展」(その 1)、3 月号 : 「10 年間の伝熱研究の進展」(その 2)にご執筆をお願いすることに致しました。また、「知的財産の継承」として、歴代会長からのメッセージあるいは思い出話をその写真とともに 5 月号「伝熱 40 周年記念号」として発行し、現在、原稿のご執筆をお願いしているところです。どうぞご期待下さい。

最後になりましたが、大変ご多忙の中を快くご執筆いただきました山田幸生・齋藤武雄・西尾茂文そして河村 洋の各先生方に心から感謝申し上げますとともに、次号以降の先生方にもよろしくご依頼申し上げます。

## バイオエンジニアリングにおける伝熱研究の進展

*Recent Advances in Bioengineering in Heat Transfer*

山田 幸生（電気通信大学）

*Yukio YAMADA (University of Electro-Communications)*

### 1. はじめに

生体はエネルギー源となる物質を外界から取り入れ、それを元に生化学的な反応によってエネルギーを生み出して、生命を維持している。そのため、生体に関わる伝熱や熱輸送は、生化学的反応や物質輸送と強くカップリングしている。その結果、生体工学（バイオエンジニアリング）における伝熱現象を熱輸送のみで論じることはあまりにも現象を単純化し、本質を見失う恐れがある。従って、生体工学における伝熱研究は必然的に多かれ少なかれ物質輸送や生化学反応を伴う熱輸送の研究となる。これは一見、複雑で考慮すべき要因が多くなるため取り扱いが極めて面倒になる、という印象を与える。しかし、逆にこれがバイオエンジニアリングにおける伝熱研究を本質的に面白いものとしており、ある面では複雑な現象を本質を見失わずに如何に単純化しモデル化するか、という科学の方法論に従って楽しめる研究分野である。本稿では過去10年程度のバイオエンジニアリングにおける伝熱研究の進展を振り返り、また今後どのような課題が面白い研究対象となるかを考察したい。なお、筆者の浅学非才かつ不勉強で、全体を網羅することはできないため、重要な項目の抜け落ちや誤った記述がある場合には、遠慮なく指摘いただくと幸いである。

### 2. 生体内熱輸送および物質輸送

この分野は、主にmmからcmオーダーの大きさの生体組織を対象とした生体内の熱輸送および物質輸送現象論の研究であるが、 $\mu\text{m}$ オーダーの細胞レベルの研究もこれから盛んになると考えられる。

#### 2.1 生体内熱輸送

生体内熱輸送の研究は1948年のPennes[1]により導かれた生体伝熱方程式に遡る。これは、産熱

（代謝による発熱）を熱の湧き出し、動脈血による冷却を熱の吸い込みと考えて生体組織中の熱輸送をモデル化したエネルギー保存式であり、その簡便さのために生体内伝熱解析によく用いられる。このモデルでは動脈の分布や配向等による熱輸送の非一様性や方向性を考慮できないが、1985年にWaiubaum and Jiji [2]などによってそれを考慮し、有効熱伝導率をテンソル形式で表現した方程式などが導かれ、生体内熱輸送現象解析の精密化が行われた。これらの研究は1980年代には盛んに行われ、ほぼ成熟した感があり、1990年代には主に医学の面から生体伝熱方程式を応用した研究が行われた。しかし、生体組織内の動脈の分布や配向を知ることは容易ではないため、生体内熱輸送現象解析の臨床応用の一つである、癌の温熱治療の解析では、いまだにPennesの方程式が用いられることが多い。

生体組織では、動脈や静脈内の血流による熱輸送が現象を支配しているが、代謝による組織内の産熱は生化学的な反応であるため、その特徴が面白い効果を生み出す。ヘモグロビンの酸素飽和度と酸素分圧の関係を表す酸素解離曲線がS字曲線（アロステリック効果）となるため、産熱量は単に血流に比例するのみでなく、組織の酸素分圧、温度、炭酸ガス分圧などに依存する。その結果、血流量が減少すると組織温度が上昇するという現象[3,4]も見いだされている。

#### 2.2 生体内物質輸送

生体内物質輸送現象は、代謝に必要な酸素の輸送だけでなく、代謝産物である炭酸ガスなどや生体内のその他多くの物質輸送も存在するため複雑な様相を示す。それがかえって興味ある現象を引き出し、生体の巧妙な機能に結びついていることが多い。動物においては動脈と静脈が並行して配置されている場合が多いが、流れが逆方向である

ためいわゆる対向流になっている。この対向流は動脈血と静脈血の間の熱交換の効率を高めており、動物が環境の温度変化にうまく対応するための重要な機能を担っている。それに加え、動脈と静脈の対向流は熱交換だけでなく、物質交換にも巧妙に利用されている場合がある。

その典型例が魚の浮き袋に付随する奇網である。魚の浮き袋は浮力を保つためにある一定の体積を保持しなければならないが、深度が大きくなるとより高圧となるため浮き袋内の圧力もより高くななければならない。つまり何らかのポンプ作用によって浮き袋内のガス圧を高める必要がある。この圧力上昇は基本的に、奇網中の動脈と静脈の対向流により、静脈中の高い炭酸ガス分圧が動脈に輸送されることから達成される。このメカニズムには炭酸ガスの物質輸送だけでなく、生体内の生化学的反応やヘモグロビンの酸素解離曲線などが巧みに組み合わせられており[5]、大変興味深い生命の機能となっている。

物質輸送と流れがカップリングした現象として、細胞レベル（ $\mu\text{m}$  オーダー）の研究テーマが取り上げられ、盛んに研究されている。動脈硬化症の発生原因として、病変部位の局所的な血液・血管内表面間の物質（脂質や蛋白質）輸送と血流による剪断力との関係が議論され研究されている[6]。また、生体内の酸素輸送は極めて重要なテーマであるにも関わらず、細胞内酸素輸送のメカニズムが拡散現象だけでは説明ができない部分があったり[7]、細胞内酸素分圧分布がよく分かっていない[8]など、細胞レベルで解明すべき課題が豊富にある。伝熱学の知識・経験と技術を持つ研究者が今後大いに貢献できる分野であると確信している。

### 3. 温熱環境

この分野は、 $\text{m}$  オーダーサイズの熱輸送現象を対象とし、いわゆる人間工学の中で温熱快適性向上のための研究が主に行われている。研究内容は、(1)全身の体内における熱解析と、(2)人体と周囲との熱交換解析とに大きく分けられ、それぞれがより精密な解析と実験を行う方向に進展している。

全身の熱解析においては、全身をいくつかのブロックに分けてそれぞれのブロックでの産熱、血管反応（収縮・拡張）、血流量、および皮膚からの放熱、発汗などを考慮してエネルギー式を解き、

温度分布や血流分布を求めている。横山[9]や竹森ら[10]により、ブロックの細分化や、暑熱・寒冷に対する血管収縮・拡張などの生理学的反応モデルの精密化が行われている。

一方、人体と衣服および周囲との熱交換に関しては、体表面からの伝熱および水分の物質輸送が支配する現象であり、伝熱工学のこれまでの知識や技術を有効に活用して研究が進められている。通常の居室内や車内などの特殊な室内の温熱環境を快適に保つために工業的なニーズが高く、空調や建築関係学会でも盛んに研究されている。室内空間の空気の流れによる対流伝熱や壁面や物体とのふく射伝熱の精密化が庄司ら[11]や村上ら[12]によって行われている。

また、これらのシミュレーション結果を検証するためにサーマルマネキンによる実験も行われている。従来、サーマルマネキンは、体表面と周囲環境との熱交換の研究を目的に、金属で作製した人体モデルの表面に電気ヒータを埋め込んだものが主流であった。これでは条件が極めて限られているため、表面から水を湧き出させて発汗を模擬するサーマルマネキンも作製された[13]。しかし、これでもまだ体内から環境への放熱の場合しか実験ができず、環境から熱を吸収する場合や、温熱環境への人体の熱的反応は全く模擬することができない。今後、高齢者や子供、また、障害者など、健全な大人とは異なった熱的反応を示す人々を対象とする研究が必要となってくると思われる。従って、人体内部の産熱や熱輸送、血管反応を模擬することができる画期的なサーマルマネキンの開発が望まれる。

### 4. 生体と低温

人体は約  $37^{\circ}\text{C}$  で一定に保たれているが、組織の温度を下げることにより代謝を抑え、必要酸素量を少なくすれば臓器や組織をある期間保存することができる。このため臓器移植における時間および空間的 mismatches を大幅に改善することができ、医療の面からの臓器保存に対する期待が大きく、活発な研究が行われている[14]。

生体組織の低温化は(1)水の凝固点以上および(2)水の凝固点以下の範囲に分けられる。

#### 4.1 凝固点以上の低温と生体組織

凝固点以上の低温化のうち、全身を対象とした

場合には全身の温度を 25°C程度まで下げて代謝を抑えることができるため、臨床的には脳傷害の拡大を防止したり、長時間の外科手術を行う低温療法が行われている。この場合、頭部と胸部・腹部などの温度を別個に設定することができれば、生理学的に無理なく選択的に一部の臓器を冷却できるため、患者の負担を大きく軽減することができる。この分野では今後伝熱学が大きな貢献が可能であろう。

摘出臓器の短期的臓器保存では、水の凝固点以上の低温域が用いられる。しかし、この温度範囲における組織の生存に関しては、細胞内外の溶液やタンパク質、およびリン脂質二重層からなる細胞膜の機能や構造が温度変化によりどのように変化するかというような要素が深く関連している。このため熱移動だけでなく物質移動の観点、さらに生化学的変化やタンパク質や脂質の相変化の観点を欠かすことができない[15]。

これらの基礎的な研究に加え、冬眠中に体温が凝固点付近まで低下する冬眠動物や、低温の海水中で生存する魚の生存機構に注目した研究が行われた。ほ乳類は一般に体温が 20°C以下になると脳機能等が低下して生命を維持できなくなる。しかし、冬眠中に体温が 20°C以下になるほ乳類もあり、その生命維持機構はまだ十分には解明されていない。低温の海水中で生存する魚には凍結を保護するタンパク質（不凍タンパク質）が豊富に存在する。Rubinsky ら[16]はその効果について研究し、不凍タンパク質は細胞膜を透過するカルシウムイオンおよびカリウムイオンの量を減らすことを示している。また、トレハロース（糖）は細胞膜を低温で安定させる効果があることも研究され[17]、低温での生命維持に有効であることが解明された。

#### 4.2 凝固点以下の低温と生体組織

凝固点以下では組織が凍結し、代謝がほとんど完全に抑制されるため長期の組織保存（凍結保存）が可能となる。また、一方では組織を凍結破壊することにより不要な組織を除去する凍結手術も行われる。

凍結保存に関する研究は数多く行われており、凍結過程をうまく制御することで細胞が破壊されることなく保存が可能となることが分かっている。特に、凍結保存・融解後の蘇生率は冷却速度に大きく依存する。冷却速度が非常に小さいときは細

胞内の脱水が過度に進み、細胞が傷害を受ける。冷却速度を適度に上げると細胞外凍結が適度に進み、細胞内がほとんど凍結しないため蘇生率が増加する。さらに冷却速度を上げると、細胞内で十分な脱水が生じる前に氷結晶が成長して傷害を受けるため、蘇生率は減少する。さらに凍結速度を大きく上げると細胞内外が同時にアモルファス状態で凍結しガラス化するため蘇生率は再び増加に転じる。このような変化は、凍結に起因する細胞内外の化学ポテンシャル差がもたらす細胞膜を通じての水分の輸送現象と、氷結晶の生成に伴う体積膨張によって細胞膜や細胞実質が受ける傷害の程度が異なることに起因する。

このような凍結過程の実験的研究は低温ステージを備えた顕微鏡を用いることにより大きく進展し[18]、また、理論的研究では1980年代後半からの Rubinsky[19]の貢献が挙げられる。細胞膜が凍結により受ける障害が、化学ポテンシャルと水分輸送による過程のみではなく、氷結晶の生成による機械的な相互作用が関連していることも見いだされている[20,21]。

凍結による細胞の傷害（凍害）を防ぐためにグリセロールなどの高分子液を凍害防御剤として用いることもよく行われており、凍害防御剤の効果についても調べられている。このような凍結プロセスを総合的に研究することにより、凍結保存の最適なプロセスを白樫ら[22]が提案している。

さらに、Ishiguro and Rubinsky[23]により魚の不凍タンパク質が細胞の凍結過程にもたらす効果も研究されている。最近では人工細胞膜を用いた実験[24]や、マイクロ波による細胞凍結の制御[25]、植物細胞の凍結実験[26]なども行われてこの分野では日本の伝熱研究者の活躍が目覚ましい。

しかし、現在実用的に凍結保存が成功しているのは急速凍結によるガラス化が可能な赤血球や精子・卵子などの単細胞レベルである。これを組織レベルあるいは臓器レベルにまで拡大することは、生体組織工学や臓器移植の発展に伴い必要不可欠の技術となるだけでなく、凍結保存研究者の夢であり、それに向けて大いに研究が進められている。

#### 5. 光と生体の相互作用

光と生体組織の相互作用には各種のモードがあるが、ふく射的な相互作用、つまり、波動性を無

視して光をエネルギーの流れとして扱う場合には、伝熱工学的な観点から光と生体の相互作用を論じることができる。光の波長により生体との相互作用の様子は大きく異なり、それは生体組織の光学特性値の波長依存性によりもたらされる。光をエネルギーの流れとして扱う場合に必要となる生体の光学特性値は吸収係数と散乱係数であり、吸収が散乱よりも大きい場合には光エネルギーが生体組織の小さな体積で吸収され、組織が破壊される。一方、吸収が散乱よりも小さい場合には光エネルギーは吸収される前に生体内部に拡散的に広がる。前者の場合には医学的には治療に、後者の場合には診断に利用されることが多く、それぞれの分野で基礎研究および応用研究が行われている。

### 5.1 光による生体組織の变成・アブレーション

レーザメスで代表される光による組織切開や除去は、光エネルギーを局所の生体組織が吸収し、温度が急激に上昇してアブレーションが発生することを基礎的な現象としている。波長  $10.6\mu\text{m}$  の炭酸ガスレーザを用いたレーザメスの場合にはレーザのエネルギーが組織中の水を急速に蒸発させ、さらに炭化まで進む場合もあり、そのアブレーションのメカニズムは比較的よく解明され、臨床応用も進んでいる。一方、最近エキシマレーザを用いた生体組織の精密なアブレーションが臨床応用されつつあるが、紫外のエキシマレーザ光による生体組織のアブレーションのメカニズムは、まだ十分に解明されているとは言えない。生体組織が高分子のタンパク質から成るため、紫外光のエネルギーが分子の結合を直接破壊するという光化学反応仮説と、組織の温度が急激に上昇して熱的・力学的および音響学的に組織が破壊されるという熱・応力・音響学的仮説がある。そのアブレーション機構の解明の研究が行われているが[27]、まだ結論を得るまでには至っていない。医学関係研究者も興味を持っており[28]、今後、伝熱研究者の貢献が期待される分野である。

組織の除去にはいたらないまでも組織を变成・凝固させる治療法[29]も臨床的に有用であり、光伝播・温度上昇・タンパク質凝固などの一連の現象解明[30]とそれに伴う各種物性値の変化も伝熱研究の面白いテーマである。

### 5.2 光による生体診断

波長がおおよそ  $700\text{nm}$  から  $2\mu\text{m}$  の近赤外光域は

生物学的窓と呼ばれ、吸収係数が小さいため約  $10\text{cm}$  までの生体組織であれば透過光を観測することができる。一方、血液中の酸素担体であるヘモグロビンは、酸素飽和度により吸収スペクトルが変化する。この変化を近赤外光域で測定すれば生体組織の酸素状態を光で無侵襲的に計測し、生体診断に利用することができる。しかし、生体組織は散乱が強いため、純粋な吸収スペクトルを測定することは困難であり、光を強く散乱し弱く吸収する媒体中の光伝播に関する解析することにより、吸収スペクトルを抽出するなどの研究が重要となる。このような生体内の光伝播はふく射輸送方程式で記述することができ、伝熱研究者が得意とする分野である。

これまで伝熱学で対象とされてきたふく射輸送方程式は光の伝播速度が問題にはならない時間スケールであったが、生体を対象としてピコ秒オーダーの極短パルス光を用いることが研究され、ピコ秒オーダーの時間依存方程式の解を求めることが要求されている。強い散乱体内での光の伝播に対しては拡散近似が可能であるが、ピコ秒の時間レベルではその近似が破綻することから、厳密解と近似解の比較[31]などが行われた。

また、この応用として、光で生体の断層像を描き出す光 CT の研究が進められ、生体、特に頭部を対象とした光伝播解析[32]や、体表面での光強度分布から逆問題解法によって内部の光学特性値分布を推定する光 CT アルゴリズムの研究[33]もなされた。生体内光伝播解析とその医学的応用としてのイメージングに関するレビュー[34]も著されている。

生体組織内光伝播の研究は、血液の酸素飽和度だけでなく、皮膚の色と生理学的変化[35]、反射光スペクトルからの各種生体成分分析、など、今後多くの生体診断に応用されると考えられる。

## 6. 生体の温度・熱流計測

伝熱に関わる計測としては、体温測定が最も身近なテーマであるが、いわゆる体温計で体温を測る、熱電対やサーミスタを用いて体内局所の組織温度を侵襲的に測定するという以上の計測は簡便にはできず、非常に重要でありながら高度な技術が要求される。癌の温熱療法では体内の温度分布を  $1^\circ\text{C}$  よりも良い精度で無侵襲に計測することが

要求される。無侵襲で体内の温度分布をこの精度で測定することは容易ではないが、いくつかの手法が精力的に研究されている。無侵襲に人体の断層像を撮影することができる x 線 CT, MRI (核磁気共鳴断層像), 超音波断層像, マイクロ波断層像の技術などを用い, それぞれに使用する電磁波等に対する生体組織の物性値が温度依存性を有することを利用する。例えば, MRI を用いる手法では水素原子の磁気共鳴周波数が温度に比例することを用い, わずかな周波数の変化を検知して 1°C の精度で測定が可能となっている[36]。今後, さらに研究が進み, 体温測定技術が改良されるものと考えられる。

### 7. 生体工学における伝熱研究の応用

生体工学における伝熱研究の応用としては, 医療福祉分野, 温熱環境分野および食品分野が考えられ, 以下にそれらの分野における伝熱研究関連課題が挙げられる。

#### [医療福祉分野]

- ・癌の温熱療法 (ハイパーサーミア)
- ・低体温療法および手術 (ハイポサーミア)
- ・凍結手術
- ・レーザー手術
- ・臓器の冷凍保存・凍結保存
- ・人工臓器の熱・物質輸送
- ・光および熱による組織診断
- ・障害者等の体温調節・管理

#### [温熱環境分野]

- ・室内温熱環境
- ・衣服環境
- ・特殊環境の温熱環境管理

#### [食品分野]

- ・加工食品の製造 (凍結乾燥等)
- ・食品の調理

これらの課題の他にも面白い課題が数多くあると考えられる。伝熱研究者にとって面白いどのような課題があるかは, 医療福祉, 温熱環境, 食品のそれぞれの分野の現場で, 伝熱工学的な視点で課題を抱えている従事者とのコミュニケーションにより見いだされるものである。アカデミックな

研究成果を実用化するためにもそのような分野の信頼できる方々とのコミュニケーション・連携が重要であると考えられる。

### 8. 今後の新しい研究課題

バイオエンジニアリング (生体工学) は近年, これまで対象としてこなかった生体組織工学や遺伝子工学などを含むバイオテクノロジー分野にも急速にその研究対象を広げている。筆者の不勉強のためそのような分野にまではレビューができていない。今後, 細胞内の微小な温度分布や酸素濃度分布の計測, および, 細胞内のミクロな代謝をシミュレーションして細胞内部の熱輸送や物質輸送を推測するなどの細胞レベルの研究, さらに細胞内小器官レベル, 染色体・遺伝子レベル, DNA レベルに研究対象が拡大していくことが確実視される。これらのミクロレベル, ナノレベルの研究成果は, バイオテクノロジーのみでなく, より大きなサイズを対象とするバイオエンジニアリングに生かされ, さらに思いもよらない工業製品への応用などが見いだされるであろう。

### 9. 生体医用工学における伝熱関連成書・報告書等

本稿は, 次に掲げる調査報告書等を参考にした。報告書等の作成にご尽力いただいた各位に感謝申し上げます。

- ・日本機械学会 P-SC138 「臨床医学における熱工学問題の調査研究分科会報告」, 1991年3月。
- ・日本機械学会 P-SC202 「医用・生体熱工学に関する調査研究分科会報告」, 1991年3月。
- ・日本伝熱学会 「生体内における熱・物質・電磁波の輸送・伝播に関する研究会成果報告書」, 1999年3月。
- ・日本機械学会編 「バイオメカニクス概説」第4章バイオメカニクスの方法論, オーム社, 1993年1月。
- ・山田幸生, 棚沢一郎, 谷下一夫, 横山真太郎著 「からだの熱と流れの科学」, オーム社, 1998年10月。
- ・山田幸生編, 「特集:生体熱工学の現状と展望」, 日本機械学会熱工学部門 News Letter, No.29, 日本機械学会誌, Vol. 102, pp. 701-709 (1999.11)。

## 参考文献

- [1] H. H. Pennes, *J. Appl. Physiol.*, Vol. 1, pp. 93-122 (1948).
- [2] S. Weinbaum and L. M. Jiji, *J. Biomech. Eng.*, Vol. 107, pp. 131-139 (1985).
- [3] 山田幸生ほか, *医用電子と生体工学*, Vol. 31, pp. 68-73, (1993).
- [4] 山田幸生ほか, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol. 60, pp. 3693-3697, (1994).
- [5] H. Kobayashi et al., *Respir. Physiol.*, Vol. 78, pp. 45-57 (1990).
- [6] 工藤奨ほか, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol. 64, pp. 367-374 (1998).
- [7] E. Takahashi and K. Doi, *Am. J. Physiol.*, Vol. 271, pp. H1734-H1739 (1996).
- [8] 柴田政廣ほか, 第13回生体・生理工学シンポジウム論文集(計測自動制御学会), pp. 303-306 (1998).
- [9] S. Yokoyama et al., *Appl. Human Sci.*, Vol. 16, pp. 153-159 (1997).
- [10] 竹森利和ほか, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol. 61, pp. 1513-1520 (1995).
- [11] Y. Shoji et al., AJTE99-6471, *Proc. of 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, 1999, San Diego, USA.*
- [12] S. Murakami et al., *Building and Environment*, Vol. 35, No. 6 (2000).
- [13] 同前保彦ほか, *繊維機械学会誌*, Vol. 42, pp. 39-49 (1989).
- [14] B. Rubinsky, AJTE99-6528, *Proc. of 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, 1999, San Diego, USA.*
- [15] D. P. Siegel et al., *Biophysical Journal*, Vol. 66, pp. 460-468 (1994).
- [16] B. Rubinsky et al., *Am. J. Physiol.*, Vol. 262, pp. R542-R565 (1993).
- [17] R. A. Ring and H. V. Danks, *Cryo Letters*, Vol. 19, pp. 275-282 (1998).
- [18] J. J. McGrath and K. R. Diller, *ASME HTD-* Vol. 98, ASME, (1988).
- [19] B. Rubinsky, *J. of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 988-996 (1989).
- [20] H. Ishiguro and B. Rubinsky, *Cryobiology*, Vol. 31, pp. 483-500 (1994).
- [21] H. Takamatsu and B. Rubinsky, *Cryobiology*, Vol. 39, pp. 243-251 (1999).
- [22] 白樫了, 棚沢一郎, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol. 64, pp. 3861-3866 (1998).
- [23] H. Ishiguro and B. Rubinsky, *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, Vol. 41, pp. 1907-1915 (1998).
- [24] 多田幸生ほか, 第38回日本伝熱シンポジウム, E132 (2001).
- [25] 鶴田隆治ほか, 第37回日本伝熱シンポジウム, D125 (2000).
- [26] 中尾吉伸ほか, 第38回日本伝熱シンポジウム, E133 (2001).
- [27] 石黒ほか, 第35回日本伝熱シンポジウム, C131, (1998).
- [28] 石原美弥ほか, 第2回生体医用光学研究会講演論文集(日本光学会), pp. 134-137 (2001)
- [29] 徐ほか, 第32回日本伝熱シンポジウム, D224, (1995).
- [30] G. Müller and A. Roggan ed., *Laser-Induced Interstitial Thermotherapy*, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, USA (1995).
- [31] S. Kumar et al., *Applied Optics*, Vol. 35, No. 9, pp. 3372-3378, (1996).
- [32] Y. Yamada and Y. Hasegawa, *JSME International Journal, Series B.*, Vol. 39, No. 4, pp. 754-761, (1996).
- [33] H. Eda et al., *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, pp. 3595-3602, (1999).
- [34] Y. Yamada, *Annual Review of Heat Transfer*, Vol. VI, pp. 1-59, Begell House, New York (1995).
- [35] 島田美帆ほか, *光学*, 29巻6号, pp. 392-398 (2000)
- [36] K. Kuroda et al, *Magn. Reson. Med.*, Vol. 35, pp. 20-29 (1996).

## 環境・エネルギー *Environment and Energy*

齋藤 武雄（東北大学大学院 工学研究科）

*Takeo S. SAITOH (Tohoku University)*

### 1. まえがき

20世紀最後の10年間は、単に世紀末であるだけでなく石油の世紀の終焉を意味するepoch-makingな10年であったと言える。化石燃料多消費の結果、CO<sub>2</sub>による地球温暖化が顕在化し、また一方都市では、車やビルなどからの排熱が主要原因の都市温暖化（ヒートアイランド）が顕在化した。人類の環境やエネルギーに対する関心が飛躍的に高まったのも、この10年の特徴である。

本稿では、環境とエネルギーの2つの視点からみた最近の10年の進展を述べるとともに、21世紀に突入したのを機会に、21世紀の環境と人類が創造しなければならない環境に適合するエネルギー技術について伝熱学の寄与も盛り込みながら展望する。まず、前半はヒートアイランドと地球温暖化を例にとり、その進展と将来予測などを述べ、後半は化石燃料に替わる太陽エネルギーなどの新エネルギーについて紹介し、21世紀の新しいエネルギー技術の可能性を最新のデータを基に述べる。

### 2. ヒートアイランド（都市温暖化）

いまから約27年前の1975年、筆者は、大きなスケールの現象に強い興味を持った。その理由の1つは、実験室規模（たとえば物体の大きさが0.1～1m程度）の現象と都市や地球の規模（大きさが10～10000kmのスケール）の現象では、全く同じ現象なのだろうかという素朴な疑問を抱いたからであった。もう1つは、その頃漠然とではあるが、エネルギーなどをそのまま消費してゆくと、環境はどうなるのであろうかという疑問であった。もっとも、現在の地球温暖化や都市温暖化を明確に意識していた訳ではなかった。CO<sub>2</sub>による地球温暖化の可能性を筆者が初めて知ったのは1980年である。

このような背景のもと、ヒートアイランドの研

究を1977年からスタートした。地球温暖化は、ずっと後で1990年頃から研究を開始した。

以下、ヒートアイランドと地球温暖化の最近の研究を紹介するが、25年以上の長きに亘る研究を振り返り、つくづく研究の難しさと、人類は、余程慎重に歩まないと本当に“地球”や“都市”は滅亡するのではないかと危惧している。

#### 2.1 ヒートアイランドの実態

都市では、面積あたりのエネルギー消費が極めて大きいこと、田畑、緑地、水面などが少なく水分蒸発量が減ること、建物、道路などの建造物の蓄熱効果のために大気が熱せられること、などから、結果として周囲の郊外に較べて気温の上昇がおこる。等温線を描くと、ちょうど地図の島の等高線のように現れることから、これをヒートアイランド\* (Heat island: 熱の島)と呼んでいる[5]。

筆者の研究室では、これまでに東京の移動観測を延べ36回行っている。図1には、628人の熱中症急患数を記録した2001年7月に行った観測結果を示す。この観測では、新宿に最高気温(34.4℃)があらわれ、一方、石神井あたりでは30.5℃と低くでている。この都市部の最高気温と郊外の最低気温の差をヒートアイランド強さ( $\Delta T$ )と呼んでいる。この時の $\Delta T$ は3.9℃であった。 $\Delta T$ はヒートアイランドの発達の目安を示している。過去8年間の移動観測による東京の夏期のヒートアイランド強さは100年で約25℃の割合で急激に上昇していることがわかっている(地球温暖化では100年で2～3℃)。このことは要注意である。

また、ヒートアイランド特有の風系は、都市部での大気汚染物質の濃度を高めるため、温度上昇だけでなく、ダイオキシンやスギ花粉などを含む

\* 地球温暖化と対比して都市温暖化と呼ぶことがある。(筆者の命名)

各種汚染物質との複合汚染をもたらしている。

さらに、にわか雨の増加、環八雲の発生、冬季における乾燥化、生態系への影響などさまざまな方面で問題を引き起こしている。

なお、このようなヒートアイランド現象は、世界の各都市でも報告・研究されており、米国では、各大学や研究機関によってプロジェクトチームが結成されている。最近の例では、アトランタを対象とした「Project Atlanta」があり、都市化(スプロール化)とヒートアイランドの関係や雷雲の発生による雷雨(Thunderstorm)との関係などを明らかにしている[16]。

## 2.2 ヒートアイランドのシミュレーション技術

当初、ヒートアイランドの解析的および数値的研究は、主に物理学の気象学分野を中心に、モデリングをはじめ数値的解析手法などが広く研究されてきた。水平スケールが100km程度のいわゆるメソスケール(Meso-scale)でのマクロ的な取り扱いに主眼が置かれ、ヒートアイランド特有の循環(ヒートアイランドプルームを含む)などが明らかにされている。しかし、多数のヒートアイランド学者の研究努力に拘らず、有力なモデルは構築されなかった。その理由は、これまでの気象学的なアプローチでは、鉛直方向の運動方程式の導出に、いわゆる静力学平衡の仮定を用いてきたためである。これは都市キャニオンやマイクロスケールでの現象を含むヒートアイランドの微細構造を表現できない致命的な欠陥である。

それを打破するために筆者らは長年にわたり、伝熱学的アプローチによってヒートアイランドを解析しており、最近ではマイクロスケールを考慮したモデリングを提案している。

まず、図2に新宿副都心、練馬および大手町付近の都市構造物の水平および鉛直分布を示すが、筆者らはこれを多孔質体(Porous media)と近似し、都市大気の接地境界層に多孔質構造を組み入れることにより、これまで以上に都市構造物の影響を考慮できるマイクロスケールモデルを構築した。

その際、高津・増岡の多孔質モデル[17]を用いている。解析モデルおよび解析結果をそれぞれ図3、図4に示す。図4に示すように解析結果は都市大気を模擬した対流実験結果と良く一致する。このようにヒートアイランドのようなスケールにお

いても“伝熱学”の進展が大いに役立っている。図5は、新しいモデルに基づく2031年の東京の気温シミュレーション結果である。

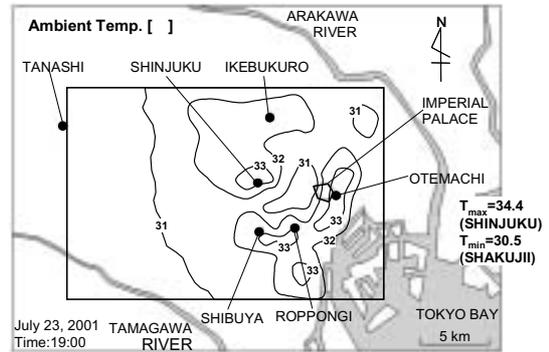


図1 ヒートアイランドの移動観測結果[15]  
(2001年7月23日19:00)

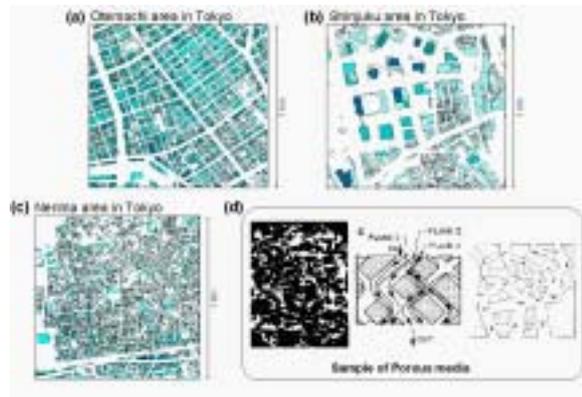


図2 都市構造物の水平および鉛直分布[18]  
(a)大手町 (b)新宿 (c)練馬 (d)多孔質モデル

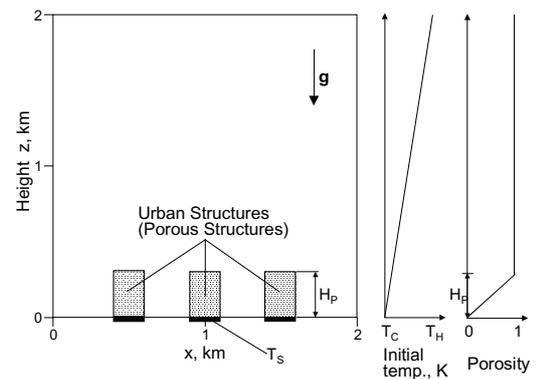


図3 解析モデル

## 2.3 都市空間の熱環境

最近、猛暑の夏が多かったこともありヒートアイランド問題が注目されるようになり、都市空間における熱環境に関する研究が多く行われるようになってきている。とくに興味深いのは放射環境(図6)であり、夏期の都市空間では、日射や建物・道

路などから熱放射によって人体が受ける熱放射量が非常に大きいということが指摘されている。筆者らの調査によると、夏期の都市空間で人体が受ける熱放射フラックスは  $1000\text{W}/\text{m}^2$  以上になることがわかっている。

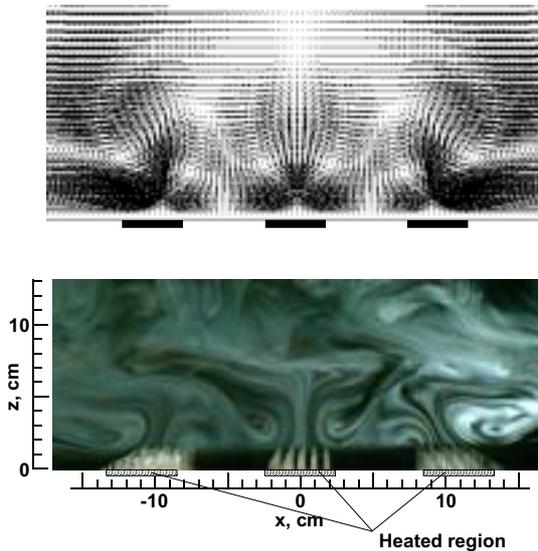


図4 解析結果(上)と対流実験結果(下)の比較[18]

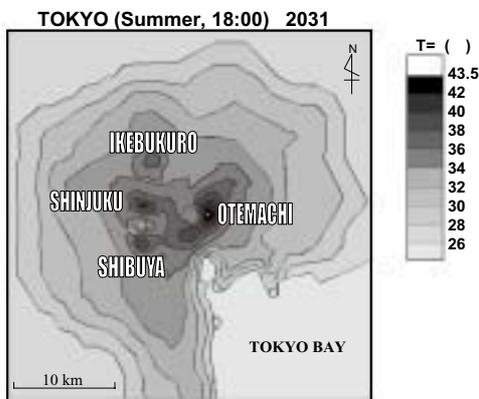


図5 2031年の東京の気温シミュレーション結果

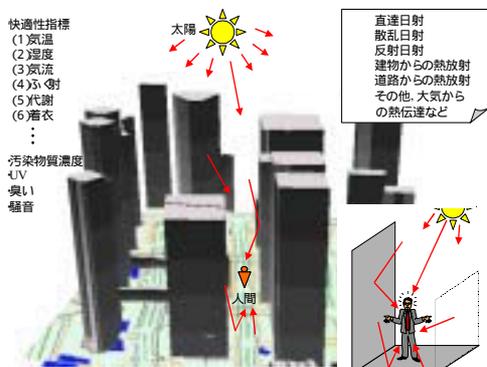


図6 都市空間の放射環境

### 3. 地球温暖化

21世紀最大の環境問題といわれるのが地球温暖化問題である。これに伴う気候変動には、ふく射、乱流、自然対流熱伝達、相変化（蒸発、凝縮、凝固、昇華など）、熱伝導といった様々な物理現象が様々な時空間スケールで含まれており、伝熱学的に見ても非常に興味深い研究対象である。

これまで、地球温暖化は、主に理学畑の研究者により研究されてきたが、次の理由で本当は工学しかも伝熱学を含む機械工学、化学工学などの分野が適していると思われる。まず、第1の理由は、 $\text{CO}_2$ による地球温度上昇を司るのは、諸現象のうち、ふく射が最も効き、この学問が最も進んでいるのは伝熱学（機械工学）である。第2の理由は、数値シミュレーション技術であることである。工学は、熱流体、構造解析等、3次元数値解析技術を得意としており、地球温暖化のように諸現象が極めて複雑に重畳する超大規模非定常計算は工学の中でも機械工学が適している。

以上の理由で、21世紀の環境時代には、改めて伝熱学が大いに役立つことを強調しておきたい。

#### 3.1 最近の数値モデルによる気候変動研究

地球温暖化問題の解明には、その包括的な実験・観測が非常に困難であることから、数値気候モデルによるシミュレーションが一般的に利用されている[19-21]。

1980年代は、計算機の性能による制約から、おおむね3次元大気と海洋表層部分のみを組み合わせた大気海洋混合層モデルが利用された。しかし、1990年代に入って10Gflops\*クラスのスーパーコンピュータが次々に利用され始め、現在では大気大循環モデル、海洋大循環モデルに陸面や海氷の数値モデルを組み合わせた大気海洋結合モデルを利用するようになってきている[19, 21]。表1に代表的な大気海洋結合モデルの解像度を示す（例えば、 $3.2 \times 5.6 \text{L}17$ は水平方向に $3.2 \text{度} \times 5.6 \text{度}$ 、鉛直方向に17層であることを示す）。

最近のコンピュータの開発状況を概観すると、我が国の地球シミュレータ計画や米国のASCIプロジェクトのように、数10 Tflopsレベルのスー

\* Gflops（ギガフロップス）：1秒間に浮動小数点演算を10億回行える性能

パーソナルコンピュータの開発が現在進められており、今後はこれらの数値気候モデルを、より高解像度、かつ、より詳細な物理モデル（より物理現象に忠実なモデル）を具備するよう発展していく方向に向かっている。また、これまでの気温上昇や降水量の変化といった地球温暖化に伴う直接的気候変化の予測に留まらず、降水量の地域的変化や土地利用変化に伴う水資源変化、産業活動に伴う温室効果ガス排出量の変化など、具体的な資源配分や経済活動に対する影響といった我々の生活に密着した予測情報を計算結果から推測・提供しようとしているのが現状である。

### 3.2 世界各国研究機関の予測と観測結果

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)では、昨年、気候変動に関する第3次報告書を取りまとめた[22]。この中では、様々な観測結果に基づく現状報告とシナリオに基づく数値気候モデルを利用した将来予測などが詳細にまとめられている。これまでの主な知見としては、

- (1) 気温上昇は低緯度より高緯度で大きく、また、秋から冬にかけて大きい。極域の冬の気温上昇は10℃近い。
- (2) 降水量は、現在の多雨帯である赤道域と高緯度で増加の傾向にあり、中間の亜熱帯・中緯度では変化が小さいか、やや減少の傾向にある。
- (3) 気温の上昇とともに蒸発量は増えるため、降水量とのバランスの結果、現在半乾燥地である亜熱帯から中緯度において乾燥地域が拡大する可能性が高い。

といった点がまとめられている。

図7、表2には、それぞれ、産業革命以降の地球表面平均気温の観測結果[23]と世界各国の数値モデルによるCO<sub>2</sub>倍増に伴う平均地表面気温予測を示す。観測結果からは、少なくとも産業革命以降、平均気温が上昇トレンドであることを示していることがわかる。表2にまとめたCO<sub>2</sub>1%漸増実験による平均気温上昇予測（80年後）では、ほとんどのモデルでの気温上昇量が1.5~2.0Kとなっており、1995年に報告された第2次報告書[24]に比べて、モデル間のばらつきがかなり少なくなっていることがわかる。図8は、筆者らが伝熱学的要素を踏まえつつ新たに構築した大気海洋混合層モデルによるCO<sub>2</sub>倍増平衡実験による地球温暖

化の計算の例である[25-29]。

表1 世界各国の数値気候モデルの解像度[22]

モデル名, 年	研究機関	解像度	
		大気	海洋
BMRC, 1998	BMRC	3.2x5.6L17	3.2x5.6L12
CGCM2, 2001	CCCma	3.8x3.8L10	1.8x1.8L29
CSM1.3, 2001	NCAR	2.8x2.8L18	2.0x2.4L45
ECHAM4/OPYC3, 1996	DKRZ	2.8x2.8L18	2.8x2.8L11
GFDL_R30, 1999	GFDL	2.25x2.3L18	1.875x2.25L18
GISS2, 1995	GISS	4.0x5.0L9	4.0x5.0L13
HadCM3, 2000	UKMO	2.5x3.75L19	1.25x1.25L20
MRI2, 2000	MRI	2.8x2.8L30	2.0x2.5L23
CCSR/NIES, 2000	CCSR/NIES	5.6x5.6L20	2.8x3.8L17

BMRC : Bureau of Meteorology Research Center  
 CCCma : Canadian Center for Climate Modeling and Analysis  
 NCAR : National Center for Atmospheric Research  
 DKRZ : Das Deutsche Klimarechenzentrum  
 GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory  
 UKMO : Goddard Institute for Space Studies  
 MRI : United Kingdom Meteorological Office  
 CCSR : Meteorological Research Institute  
 NIES : Center for Climate Research Studies  
 National Institute for Environmental Studies

表2 CO<sub>2</sub>1%漸増実験による予測結果[22]

モデル名, 年	気温上昇量[K]
BMRC, 1998	1.63
CGCM2, 2000	1.96
CSM1.3, 2001	1.58
ECHAM4/OPYC3, 1996	1.4
GFDL_R30, 2000	1.96
GISS2, 1999	1.45
HadCM3, 2000	2.0
MRI2, 2001	1.1
CCSR/NIES, 1999	1.8

### 3.3 今後の展望

昨年10月に仙台で開催された第6回CO<sub>2</sub>国際会議[30]においては、主にCO<sub>2</sub>循環サイクルについて非常に活発に議論され、シベリアや熱帯地方、海洋上などでのCO<sub>2</sub>フラックス観測結果についての報告や、その観測手法の開発、数値モデルを使った大気CO<sub>2</sub>濃度変化に伴う植生帯の移動予測、海洋におけるCO<sub>2</sub>吸収の化学反応モデルなどの計算結果が報告され、これまでmissing sinkと呼ばれてきたCO<sub>2</sub>循環サイクル中の数々の不明な点の科学的検証が確実に進んでいるとの印象を受けた。

しかし、将来の気候変動予測における最大の不確定要因である生態圏については、まだまだ研究の余地があるといえる。

CO<sub>2</sub>循環サイクルの数値的検証には、生態圏モデルの導入が不可欠であるが、現在の地球規模数値気候モデルには、植物の1年間成長変化をモデル

化したものが取り入れられているに留まっている[19]。数値モデル単体としては、森林学や生態学分野で、植物個体、森林、大陸といった様々なスケールでの数値モデルが開発されているものの、地球規模の数値気候モデルに本格的に取り入れた結果は極めて少ないのが現状である。また、大きなCO<sub>2</sub>吸収源と考えられている海洋においても植物プランクトン、動物プランクトンのような海洋生態系と炭酸カルシウムイオンのような化学反応系を含めたBiogeochemistry海洋大循環モデルが存在するが、まだまだ発展途上にある。このほか、土壌などに多く棲息している微生物を考えると、非常に長期間に亘る気候変動を考慮した場合には、直接的・間接的を問わず何らかの影響を地球気候に与えていると考えられるものの、地球規模での議論は未だ不十分と言える。

これら生態圏モデルの更なる発展により、地球温暖化問題についての理解が大幅に進むものと期待される。

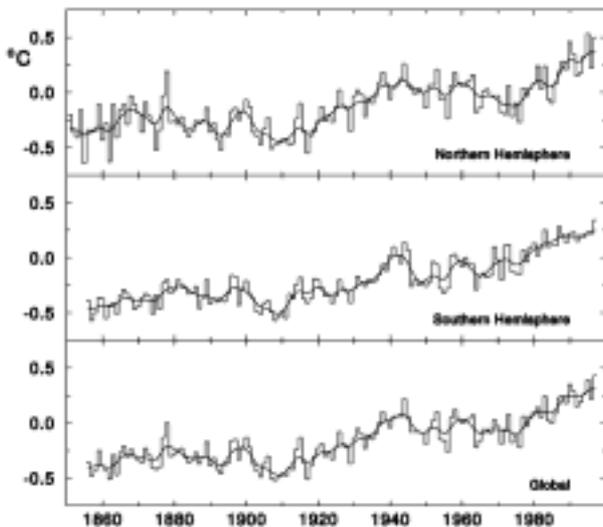


図7 地球表面気温の観測結果[23]

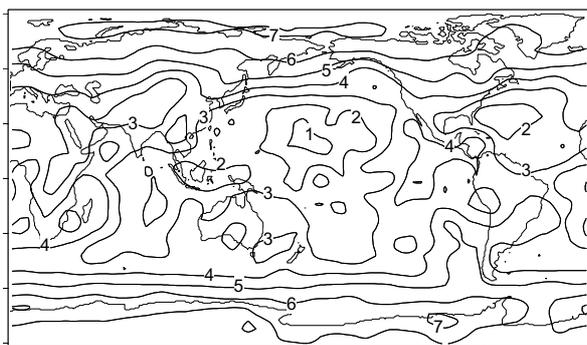


図8 CO<sub>2</sub>倍増平衡実験による年平均気温上昇[29]

#### 4. 21世紀のエネルギー技術

20世紀は、エネルギーの観点から振り返ると石油の世紀であった。人類は、安価でふんだんにある石油を大量消費しながら驚異的な技術革新と経済発展を成し遂げた。20世紀に化石燃料消費は約50倍にふえた。化石燃料と核燃料の現状での究極可採埋蔵量（石油、石炭、天然ガス、ウランなど）を基に、将来の人口増加をも加味すると、世界のエネルギー埋蔵量は、あと60年と出る[31]。米国エネルギー省の試算でも約100年である。

このように、“本当に”エネルギーは枯渇するのである。一方で、前節で述べたように化石燃料消費による地球温暖化(CO<sub>2</sub>が主因)や都市温暖化(熱が主因)など環境問題が深刻の度を増している。そこで、この節では、太陽エネルギーを積極的に利用することによる温暖化防止対策について具体例を挙げて述べる。たとえば、ソーラーハウス(熱・光)やソーラーランキンサイクルシステムなどである。

##### 4.1 自然エネルギー利用技術

図9は、世界全体の太陽電池(PVセル)のモジュールコストと累積生産量(MW)の関係を1975年から1998年までは実績値、それより先は筆者による予測値を示したものである。コストは、1994年の米ドルで表してある。この図から、現在の累積生産量は2GW(すなわち、100万kW級発電所2基分)に過ぎないが、このままで推移すると、2013年頃は12GW、2030年頃は、300GWに延びると見られる。21世紀前半に大きな可能性があることを示している。

一方、我が国の太陽電池の導入状況は、1994年に「住宅用太陽光発電システムモニター事業」が開始されてから急速に延び、2001年現在、約0.2GWである。全発電量に占める割合は、現在、0.04%であるが、2030年ごろには、累積導入量は約21GWになるとみられ、全発電量に占める割合も2%を超えると予想される。次に、世界の風力発電の導入状況であるが、EUを中心に急速な導入が進められ、2001年末の世界の累積発電量は、21.5GWとなっている。これは、PVの約10倍の容量であり、一歩先んじた形となっている。

図10には、世界の風力発電の累積発電量予測を

示す。2020年頃の予測では、風力だけで200GWに達するものと見られ、PVの約100GWを加えると再生可能エネルギー（太陽光+風力）で300GWを上回る勢いである。

#### 4.2 究極のソーラーハウス：ハービマンハウス

生活の基盤である住宅で消費するエネルギーは、現在、全体の14%を占め、これが2010年には25%に上がるとの予測がある。ここでは、著者らの研究室で20年以上研究を行って約5年前仙台市に建設したソーラーハウス[32][33]を紹介する。

このハウス（図11）は、21世紀を展望し、人類と自然の調和を標榜することからハービマンハウス（HARBEMANとはHarmony Between Man And Natureの略）と呼ぶ。暖房・給湯・風呂シャワーなどの温熱は屋根の南面のソーラーコレクタを用いて集め、冷房用の冷熱は、北面のスカイラジエータを用いて放射冷却現象を利用して春先に造った約4℃の冷たい水を用いる。地下には、水を満たした31トンと1.6トンの主タンクと補助タンクがあり、これらに温・冷熱エネルギーを蓄える。

この他、このハウスは、屋根やベランダに降る年間150トン以上の雨水をトイレなどの雑用水に用い、屋根および駐車場に太陽電池を設置し、約1.5キロワットの発電を行い、ソーラーコレクタなどのポンプ類やパソコン等の電源として用いる計画である。このハウスは、住宅で使う熱や電気などのエネルギーのほとんど100%を賄うことを目標にしており、年間2900万キロカロリーのエネルギーを供給できる。その意味で“自立ハウス”と呼べるものである。表3に、従来的一般住宅と比較したときの化石燃料消費量などの比較を示すが、従来の住宅と比し、化石燃料の消費量は約1/10（CO<sub>2</sub>排出は約1/7）である。すなわち、筆者が1994年以前に提示した1/10テクノロジーのコンセプト[34]を満たす。

#### 4.3 ソーラーランキンサイクルシステム

最後に、21世紀の新しいエネルギー変換・利用技術の1例として、最近、筆者の研究室で開発したソーラーランキンサイクルシステム（Solar Rankine Cycle System：SRCS）を紹介する。

20世紀のエネルギー技術の典型例は、巨大発電所（火発、原発など）やジャンボジェット機、自

動車などである。これは、いずれも、化石燃料の燃焼によって得られる1500℃以上の高温度（高ポテンシャル差）を利用したバルキーな技術である。しかし、前に述べたように、21世紀中には“本当に”化石燃料は底をつくとみられるから、これからのエネルギー技術は、非化石燃料技術、すなわち低ポテンシャル差技術である。エネルギー源も、化石燃料から太陽や風力、波力、地熱、海洋温度差、バイオマスなどの自然エネルギー（Renewable energy）が大宗を占めることになろう。これらの自然からふんだんに得られる温度はせいぜい200～300℃の中温度領域であるから、従来の、たとえば蒸気タービン、ガスタービン、スターリングエンジン、化石燃料エンジンなどの高ポテンシャル差技術に基づく熱機関は悉く動かない。このような低ポテンシャル差で動く機関の重要なコンセプトは“単純・重ね合わせ・繰り返し”である。英語で言えば、“Concept of Superposition”であろうか。

従来の、たとえば最新の1500℃～1600℃級ガスタービンを例にとって述べる。タービンは、完全3次元設計翼を採用した4段式で強制空冷を行っている。しかし、これでも段数はたった4段でしかも、軸方向どの断面をとってもすべて形や大きさが異なるバルキーなものである。また、高性能を達成するには1500℃～1600℃のタービン入口温度を必要とし、200℃程度では、うんともすんとも全く動かない。したがって、太陽エネルギーなどで得られる200℃～300℃の温度で稼働させるには、たとえばタービンを薄くして、その数を4段ではなく、全く同じものを400～4000段（枚）とし、1段1段で取り出せるパワーは小さくても400倍または4000倍すると、巨大な力となることを利用するのである。

さて、前置きはこれ位にして、最近筆者の研究室で開発した“ソーラーランキンサイクルシステム（SRCS）”を紹介する。これは、上記で述べた“Concept of Superposition（COS）”を満たす全く新しいソーラー熱発電システム（Solar Thermal Electric System）である。まず、SRCSの構成図を図12に示す。開発したSRCSは、CPCコレクタと潜熱スチームアキュムレータおよびスチームエキスパンダ（新型蒸気タービン）の三要素からなる。このSRCSの鍵は、この3つの要素をいかに効率よく設計・製作するかにかかっており、どれ1つ欠



ケーディング) ている。この SRCS を住宅用 (CPC 設置面積: 30m<sup>2</sup>, 作動媒体: 水蒸気) に設計すると, 夏の気象条件下で発電能力 2.6kW, 給湯能力 18kW (合計 20.6kW), 総合効率 53% となる。

本システムと現在実用段階に入りつつある太陽電池の比較を表 4 に示した。SRCS は発電, 暖房, 給湯など 30 以上の用途に使い, また, 燃料電池などとの組み合わせるなど広汎な応用性を有する。

21 世紀の有望技術の 1 つである。

### 5. あとがき

日本伝熱学会創立 40 周年記念企画として, 筆者に与えられたテーマ「環境・エネルギー」について, 過去 10 年を振り返り, 地球温暖化, ヒートアイランドおよび新しい自然エネルギー変換技術にわたってその進展を解説した。

21 世紀は, 人類が未経験の全く新しい“経験の世紀”であり, それに伴いエネルギー技術も全く新しいコンセプトの基に新たな発展が求められる。

伝熱も新たな 40 年に向けて, 再出発されることを祈りつつペンを擱きます。

おわりに, このような執筆の機会をお与え戴いた伝熱編集担当の高田保之先生と山田雅彦先生に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] , 49-齋藤武雄, 遠藤光緑, 日本機械学会論文集 B 編 445 (1983), 2035-2040.
- [2] Saitoh, T.S. and Fukuda, K., Bull. JSME, 28-235 (1985), 101-107.
- [3] 齋藤武雄, 千葉秀樹, 天気, 34-3 (1987), 194-204.
- [4] 齋藤武雄, 日本機械学会誌(1991.4), 11-15.
- [5] 齋藤武雄, 地球と都市の温暖化, 森北出版 (1992).
- [6] 齋藤武雄, 日本機械学会誌(1992.1), 33-39.
- [7] 齋藤武雄, 太陽エネルギー, 18-4 (1992), 10-19.
- [8] 齋藤武雄, 冷凍, 68-783 (1993), 20-25.
- [9] 齋藤武雄, 環境伝熱, 32-125 (1993), 1-8.
- [10] 齋藤武雄, 日本機械学会誌(1995.7), 29-32.
- [11] T.S.Saitoh et al., Atmospheric Environ., 30-20 (1996), 3431-3442.
- [12] 齋藤武雄, 空気調和・衛生工学, 70-11 (1996), 1-5.
- [13] 齋藤武雄, 冷凍, 72-836 (1997), 26-32.
- [14] 齋藤武雄, ヒートアイランド, 講談社ブルーバックス(1997).
- [15] 齋藤武雄, 山田昇, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集(2001), 191-192.
- [16] Bornstein, R and Lin, O., Atmospheric Environ., 34-3 (2000), 507-516.
- [17] 高津康幸, 増岡隆士, 鶴田隆治, 日本機械学会論文集(B 編), 60-571 (1994), 965-970.
- [18] Saitoh, T.S. and Yamada, N., Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science (2001), (in prep.)
- [19] Russell, G. L., J. R. Miller and D. Rind, Atmosphere-Ocean, 33-4 (1995), 683-730.
- [20] Flato, G. M.; G. J. Boer, W.G. Lee; N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader, A.J. Weaver, Climate Dynamics, 16(2000), 451-467.
- [21] Boville, B. A., and P. R. Gent, Journal of Climate, 11(1998), 1115-1130.
- [22] The third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, (2001).
- [23] Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin and I.G. Rigor, Res. Geophys., 37(1999), 173-199.
- [24] The second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, (1996).
- [25] Saitoh, T. S., and S. Wakashima, Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference (March 15-19, 1999, San Diego, California) CD-ROM.
- [26] Saitoh, T. S., and S. Wakashima, Proceedings of the 35th Intersociety of Energy Conversion Engineering Conference (July 24-28, 2000, Las Vegas, Nevada), 2(2000), 1026-1031.
- [27] Saitoh, T. S., and S. Wakashima, Proceedings of the 36th Intersociety of Energy Conversion Engineering Conference (July 29-August 2, Savannah, Georgia), II(2001), 1033-1038.
- [28] Wakashima, S., and T. S. Saitoh, Thermal Science & Engineering, 9-4(2001), 11-12.
- [29] Saitoh, T. S., and S. Wakashima, Extended Abstracts of the 6th International Carbon Dioxide Conference, II (2001), 845-848.
- [30] Saitoh, T. S. and S. Wakashima, Extended Abstracts of the 6th International Carbon Dioxide Conference, II (2001), 845-848.
- [31] 齋藤武雄, ENEREGY, (2000), 48-51.
- [32] 齋藤武雄, 藤野哲爾, 太陽エネルギー, 4-6(1998), 35-42.
- [33] 齋藤武雄, 藤野哲爾, 太陽エネルギー, 25-1(1999), 49-55.
- [34] 齋藤武雄, 日本機械学会 メカライフ, 36(1994), 4-5.

## 伝熱数値シミュレーション：この10年間の進展

*An Overview on Development of Heat Transfer Simulation in this Decade.*

河村 洋（東京理科大学）

*Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science)*

### 1. はじめに

日本伝熱学会の40周年記念にあたり、この10年間の伝熱に関連するシミュレーション分野での進展を展望することが筆者の役目となった。伝熱の三形態は、熱伝導、対流熱伝達、熱ふく射といわれる。最近では、これらにマイクロ伝熱を加えるべきであろうが、この分野は、この10年間の進歩がとくに大きかったため、別に項目が設けられている。そこで本稿では、筆者の能力の範囲内で、主として対流熱伝達の分野でのいくつかのトピックスについて書かせていただきたい。

かつて本誌に、「伝熱工学の将来」という特集号があり（1996年4月）、筆者が、「数値解析伝熱研究の将来」というタイトルで記事を書かせていただいた[1]。そこでは、その10年間における伝熱シミュレーションの動向を、次の5項目で特徴づけている。

- (1) 2次元シミュレーションから3次元シミュレーションへ
- (2) 定常シミュレーションから非定常シミュレーションへ
- (3) モデルからより基礎的な方程式の直接解へ  
(例：乱流の直接シミュレーション)
- (4) 平均的な取り扱いから統計的な取り扱いへ  
(例：ふく射伝熱のモンテカルロ法)
- (5) 均質化した取り扱いから非均質な取り扱いへ  
(例：気泡成長・流動)

この特徴は、この10年間をとっても変化していない。むしろ、さらにその傾向が明確になってきたと思われる。その理由は、上記の特徴がいずれもより大きな計算能力を必要とするものであるのに対し、近年のコンピューターの進展が、一層顕著であるからと云える。そこで本稿では、まずこの10年間のコンピューターの進展を概観して見たい。

### 2. この10年間のコンピューターの発展

ひとくちにコンピューターといってもその種類は幅広いが、大きくスーパーコンピューターとパソコン（一部のワークステーションを含む）について、我々が一般的に利用できる範囲を中心に、トピック的に、10年前と現在を比較してみたい。

#### (1) スーパーコンピューター

10年前にも、むしろスーパーコンピューターは存在し、重要な役割を果たしていた。というよりは、他の種類のコンピューターの力が未だ弱かったため、ある程度大型の計算は、スーパーコンピューターによる以外なかった。当時は、スーパーコンピューターといえほとんどベクトル型のスーパーコンピューターで、一部にベクトルCPUをさらに並列に並べた機種が提供され始めていた。典型的な計算速度は、1CPUあたり2Gflops程度であった。（Flopsは計算速度の単位で、一秒間に行える浮動小数点計算の回数である。1Gflopsとは、1秒間に $10^9$ 回（10億回）の計算が実行できることを意味する。）

これに対し、現在の状況は、ベクトル型スーパーコンピューターの代表的なスペックは、代表的な大学共同利用の計算機センターに設置されている機種で、単一CPUで10Gflops、主メモリーは、8~16GBである。しかも、これらが64台程度並列に接続されている。また、機種もベクトル型のみならず通常のCPU（スカラーCPU）を多数並列に配置するいわゆる超並列型も多く設置されている。一般のユーザーがこれらのCPUをすべて占有して使うことはむずかしいが、後にも述べるように、大型計算の代表例ともいえる乱流の直接数値シミュレーション(DNS)は、10年前には、当時としては超大型の計算を実施しうる特別なユーザーにのみ可能であったが、現在では、広く行われている程度のレイノルズ数( $Re_\tau=180$ )の計算は、

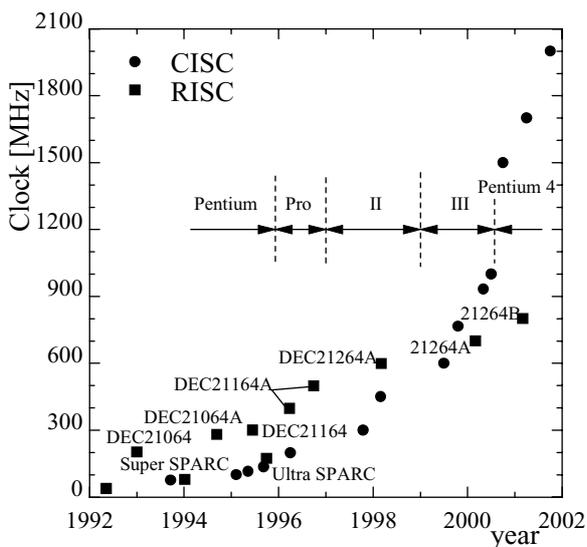


図1 CPUのクロック周波数の推移

単一のCPUを用いて、ジョブの待ち時間を入れても一ヶ月以内に終了させることが可能になり、世界的に最高級のレイノルズ数の計算も、一般ユーザーとしてでも実施することが可能となった。これは、計算機の進歩のみならず、それを広く利用可能とする体制が整備されたことも重要である。その一つは、むろん利用料金の低廉化であるが、他の一つは高速ネットワークの普及である。これによって、全国どこにいても、最も条件のよいコンピュータを使用することが可能となったことが大きい。

## (2) パソコン

このほぼ10年間のパソコン及び一部のワークステーション用CPUのクロック周波数の高速化を、図1に示す。10年前のCPUのクロックは、いずれも100MHz以下であった。そこにDEC社のAlpha系列のCPUが、275MHzで提供され、当時としては非常に高速であった。他方、Intel社はPentium系列のCPUを発売して次々と高速化し、現在では、Pentium 4が2GHzに到達している。（両者はビット数が異なるので、実際の計算速度はクロック数のみでは比較できない。）このように、この10年間では、クロック速度は、ほぼ50~100倍になったと云える。また、10年前では、メモリーが高価で大容量を積むことはむずかしかったが、現在では、1GBを搭載することも可能になり、3次元の計算もパソコン上で可能となった。

しかし、実際の計算速度は、クロックの速さのみでなく、CPUの処理する語長、データをメモリ

ーから読み込む速度、CPUの直近の作業用メモリー（キャッシュ）、計算の規模等にも依存する。実際の計算速度を比較する方法として、我国では、いわゆる「姫野ベンチ」がよく知られている。これは、姫野氏（理研）が提唱されたベンチマークテストで、ポアソン方程式（流れ場における圧力や熱伝導の計算に現れる）をヤコビ法（繰り返し解法）で解く際の計算速度をFlops単位で測定するものである。これはむろん、コンピュータの計算速度の一側面のみを表すものであるが、対流伝熱の分野では有効な測定法である。プログラムの詳細や測定結果は、Web上で公開されている[2]。

これによれば、現在の最高速度のAlpha系、Pentium系ともに、測定結果は約500MFlopsで、これは、5~6年前のベクトル型スーパーコンピュータの計算速度に匹敵する。なお、現在最速のベクトル型スーパーコンピュータの測定計算速度は約5GFlopsに達しており、パソコンよりはやはり10倍は速いが、その差は確実に縮まっている。しかし、スーパーコンピュータが不要となったわけではなく、世界最大クラスの大規模計算には、やはりスーパーコンピュータが必要であることには変わりがない。

## 3. 乱流熱伝達の直接数値シミュレーション

乱流及び乱流熱伝達の直接数値シミュレーション(DNS)は、この10年間に、コンピュータの発展の恩恵を受けて進展した分野の一つである。乱流のDNSそのものは、すでに約25年前から実施されていたが、均質乱流とよばれる固体壁のない乱流についてであった。熱伝達も扱える壁面乱流のDNSが最初に公表されたのは、15年ほど前[3,4]で、その後、この10年間の発展には著しいものがあつた。その一つの方向は、対象とするレイノルズ数とプラントル数の増加であり、もう一つの方向は、対象とする流れの複雑化である。

平行平板間乱流熱伝達に関するDNSのこの十数年間の進展を、図2に示す。横軸はレイノルズ数、縦軸は使用された格子点数である。10年前に行われていたDNSのレイノルズ数は、 $Re_{\tau}=180$  ( $Re_m=5,600$ )（ここで $Re_{\tau}$ は壁面摩擦速度 $u_{\tau}$ と平板間距離の半分 $\delta$ に基づくレイノルズ数、 $Re_m$ は平均流速と平板間距離 $2\delta$ 基準）であつたのに対し、現在実施できる最高クラスのレイノルズ数は、

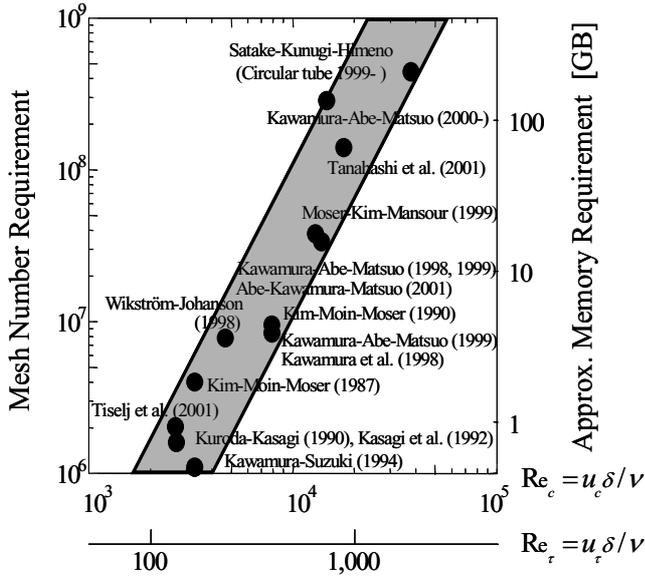


図2 平行平板間乱流のDNSの発展

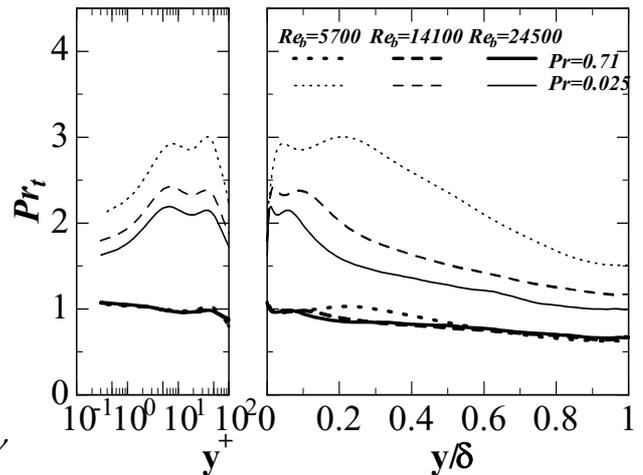


図3 DNSから得られた乱流プラントル数 (レイノルズ数とプラントル数の影響)

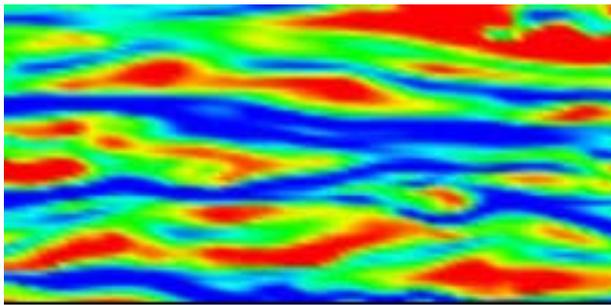
$Re_{\tau}=640$  ( $Re_m=24,000$ )である[5]。すなわち、この間のレイノルズ数の増加は約4倍であった。

格子点を見ると、この種のDNSが開始された当初の格子点数は2~3百万点程度であったが、現在の最大級のDNSは、約2億点を用いている。すなわち、この10年間で、100倍のメモリーが利用できるようになった。これを、この10年間に達成されたレイノルズ数の増加“4倍”と比較すると、DNSにおいてレイノルズ数を増加させることがいかに困難な過程であるかを物語る数字であるといえる。その理由は、よく知られているように、乱流の最小渦はレイノルズ数の増加とともに小さくなるので、それを解像するためにより多くの格子点数を必要とするためである。この傾向を外挿すると、10年後に可能なDNSのレイノルズ数は、10~20万程度であろうと予想される。このレイノルズ数は、実現現象と比較して、必ずしも十分に多いとは云えないが、逆にそれほど小さな値でもない。この程度までのレイノルズ数のデータを用いれば、乱流や乱流熱伝達に関する相似則を援用することにより、各種の乱流統計量をかなり高いレイノルズ数まで推測することが、広い範囲で可能になると考えられる。

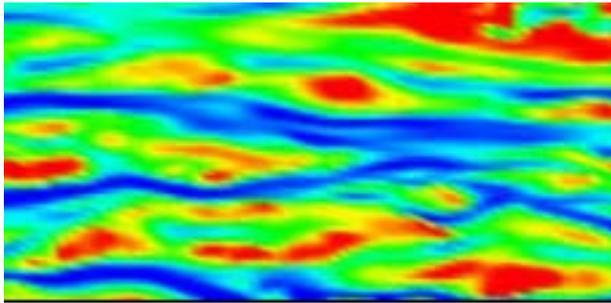
さて、このような乱流熱伝達のDNSを通して、この10年間に明らかになった成果の一つに、乱流プラントル数がある。よく知られているように、乱流プラントル数  $Pr_t$  は、渦拡散係数と熱拡散係数の比で、熱伝達の実用計算には広く用いられる

値である。乱流プラントル数は、流れ内の場所の関数であるのみならず、レイノルズ数や流体のプラントル数にも依存する。他方、実験からその値を正確に定めることはむずかしく、壁面漸近値やプラントル数に対する依存性については、これまで多くの議論がされてきたものの定説がなかった。図3は、3種のレイノルズ数 ( $Re_{\tau}=180, 395, 640$ ) と2種のプラントル数 ( $Pr=0.71, 0.025$ ) について、乱流プラントル数の分布を示したものである。これによれば、通常流体においては、乱流プラントル数の壁面値は、レイノルズ数によらず、 $Pr_t=1.1$  でほとんど一定をとる。壁面から離れるとその値はやや減少し流路中心付近では  $Pr_t=0.7$  程度の一定値にとどまる。したがってこれまで経験的に用いられてきた値、すなわち管内流では  $Pr_t=0.9$  で一定値とする近似は、きわめて妥当なものといえる。

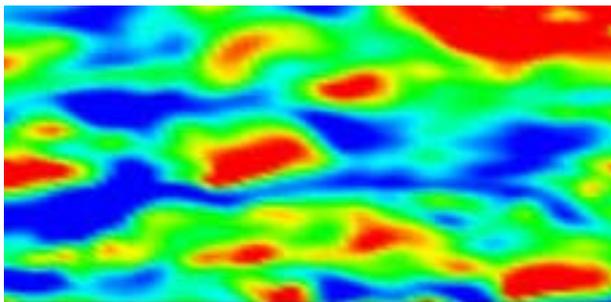
流体のプラントル数の影響についてみると、低プラントル数流体では、乱流プラントル数は大きな値をとることは、すでに知られていた[6]。これは、低プラントル数流体では、運動量の渦拡散が熱の渦拡散より大きいということである。図3によれば、この傾向はレイノルズ数の増加とともに減少し、通常流体の値に近づくことがわかる。しかし、レイノルズ数がさらに増大したとき、完全に通常流体の値まで到達するのかわかるか、わかっていない。他方、流体のプラントル数が大きくなる場合については、この図には示していないが、筆者らが[7]別途のDNSによって、少なくとも水



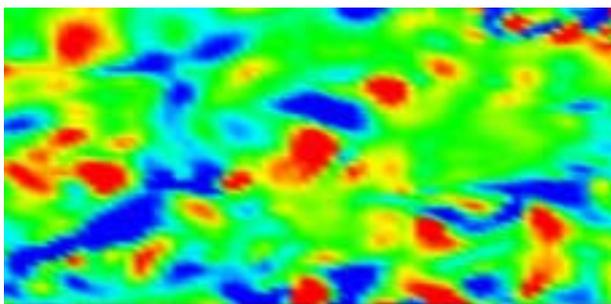
(a)  $u'$  ( $u'^+ > 3.5$ : red,  $u'^+ < -3.5$ : blue)



(b)  $\theta'$  ( $Pr=0.71$ ) ( $\theta'^+ > 3.5$ : red,  $\theta'^+ < -3.5$ : blue)



(c)  $p'$  ( $Pr=0.025$ ) ( $p'^+ > 0.06$ : red,  $p'^+ < -0.06$ : blue)

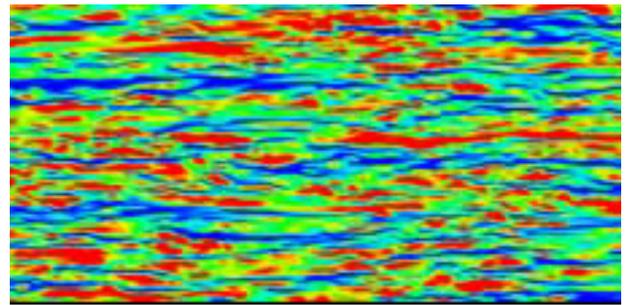


(d)  $p'$  ( $p'^+ > 2.5$ : red,  $p'^+ < -2.5$ : blue)

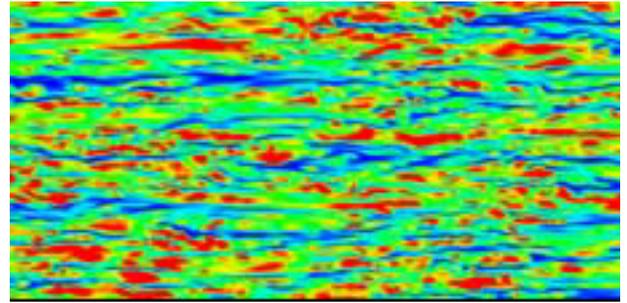
図 4A DNS から得られた速度，温度，圧力変動の等値域 ( $Re_\tau = 180$ , at  $y^+ = 10$ )

程度のプラントル数 ( $Pr=5.0$ ) までは， $Pr=0.71$  の場合とほとんど差がないことを確かめている。

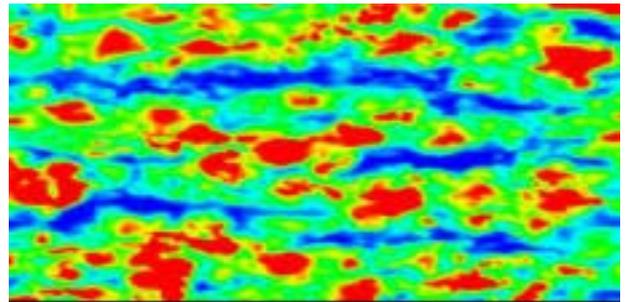
ここで，この10年間のDNSの進展を視覚的に実感していただくために，平行平板間乱流における流れ場と温度場を，10年前にはやっと可能であったレイノルズ数 ( $Re_\tau = 180$ ) と現在最高クラスの



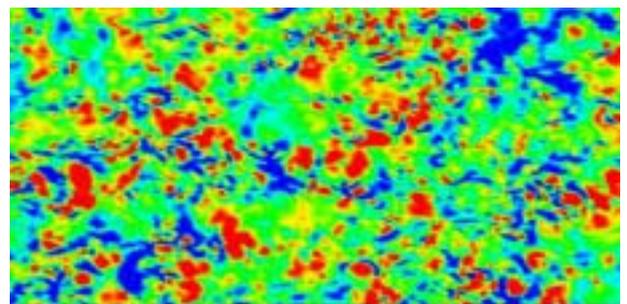
(a)  $u'$  ( $u'^+ > 3.5$ : red,  $u'^+ < -3.5$ : blue)



(b)  $\theta'$  ( $Pr=0.71$ ) ( $\theta'^+ > 3.5$ : red,  $\theta'^+ < -3.5$ : blue)



(c)  $\theta'$  ( $Pr=0.025$ ) ( $\theta'^+ > 0.12$ : red,  $\theta'^+ < -0.12$ : blue)



(d)  $p'$  ( $p'^+ > 3.5$ : red,  $p'^+ < -3.5$ : blue)

図 4B DNS から得られた速度，温度，圧力変動の等値域 ( $Re_\tau = 640$ , at  $y^+ = 10$ )

レイノルズ数 ( $Re_\tau = 640$ ) について，図 4A,B に比較してみた。レイノルズ数は，左欄が  $Re_\tau = 180$ ，右欄が  $Re_\tau = 640$  である。両者は，流路の間隔の半幅を  $\delta$  とするとき， $6.4\delta \times 3.2\delta$  の同じ寸法の領域を表示しているのので，左欄と右欄を比較すると，レイノルズ数の増加によって乱流の構造がいかに小さ

くなるかを知ることが出来る。示した図は、いずれも伝熱面に平行な断面内における等値域のカラー表示で、最上段が流速変動、次が温度変動 ( $Pr=0.71$ )、3段目が温度変動 ( $Pr=0.025$ )、最下段が圧力変動である。よく知られているように  $Pr=0.71$  は空気、 $Pr=0.025$  は水銀に対応する。流れ場と温度場、圧力場は、同じ瞬間のショットである。流れは、図中左から右に、一定の圧力勾配で駆動されており、上下の伝熱面から加熱されている（ただし、計算の便宜上、伝熱面は冷却面としている。）また、流れ場、温度場とも十分に発達していると仮定している。

図4の最上段の図では、赤は比較的高速の流れ、青は低速の流れを示す。したがって、赤は流れの中央部から壁面に向かう流れ (sweep)、青は壁から立ち上がる流れ (ejection) に対応している。よく知られているように、流れ方向に筋状のいわゆるストリーク構造がはっきりと見られる。その間隔も比較的一定なので、これらは準秩序構造と呼ばれている。なおよく観察すると、レイノルズ数が高い場合には、赤が支配的な領域と青が支配的な領域があることに気づく。つまり、細かいストリーク構造を包含してさらに大きな低速と高速の構造が存在するようである。この点は、現在この種の乱流研究の最前線の一つとなっている。

次の段の温度変動 ( $Pr=0.71$ ) の構造は、一見してわかるように、上の段の流れ場の構造とほとんど同一である。これが、よく知られた運動量輸送と熱輸送の相似性の現れである。ここでは、伝熱面を冷却面としているので、壁面に向かう流れ (sweep) がより高温で赤、壁から立ち上がる流れ (ejection) がより低温で青となり、色彩の上でも上段と対応するようになっている。

次に3段目は、プラントル数が低い場合 ( $Pr=0.025$ ) の温度変動である。この場合には、 $Pr=0.71$  ほどには流れ場との相似性は高くない。しかしそれでもなお、流れ場の赤と青のパターンをぼかすような形で、ちょうど速度場と対応する位置に同じ色の温度場のパターンが現れているのが興味深い。

最下段は、圧力変動の等値域である。圧力変動は、レイノルズ応力の等方化や乱流熱流束の収支に関連する重要な量であるが、流体内の圧力の測定は困難であるから、これはDNSが大きく寄与で

きる部分である。圧力の場合には、筋状ではなく斑点状の構造が現れているが、その際、高圧領域と低圧領域が流れの方向に交互に現れることが予測されていたが、現にこのDNSでもレイノルズ数が高い方に、そのような傾向がより強く見られている。

乱流のDNSにおけるこの10年間の他の顕著な進展は、各種の複雑な流れのシミュレーションが可能となってきたことである。これは、計算機の発達とともに計算手法の進歩によるところが大きい。その一例として、水面に表面波を伴う乱流のDNSがある。ちょうど、風によって湖面や海面に波が立つ状況である。この時の乱流物質伝達は、海洋への二酸化炭素吸収等の環境問題の解明にとって重要な課題であると云われている。図5には、このような一例として、功刀[8]によるDNSの結果を示す。この図は、水面上に風 (乱流) が吹き、乱流側の圧力変動と水面側の表面張力の相互作用により水面波の発生する様相がよく捉えられている。用いられた手法は、功刀の開発によるMARS法と呼ばれる手法で、表面張力を表面要素に作用する体積力として扱うことにより、多相の流れ場全体をあたかも一つの流体として解いている。解析から、水面の変形を導入することにより、界面に垂直な速度成分が大きくなり、これによって乱流スカラー輸送が著しく増大するという結果が得られている。このほか、液滴含む乱流のDNSを実施し、液滴の乱流熱伝達に対する影響を調べる試みもなされている[9]。

#### 4. 実用問題への応用例

この10年間の特徴の一つに、伝熱のシミュレーションが設計にも直接、間接に応用されはじめたことがあげられる。実現象は多くの場合、相変化を含んでいたり、境界条件が複雑であったりしてそれを完全にシミュレーションすることはむずかしい場合が多いが、最初に述べたように非定常、3次元の計算が可能になったことにより、必要な情報をかなり直接的に与えうるシミュレーションが可能となってきた。筆者が最近見聞したそのような一例として、ガスタービン翼の設計がある。ガスタービン内の流れは、動翼と静翼が干渉することにより、典型的な非定常かつ3次元の流れ場を呈する。これについて、3次元の非定常シミュ

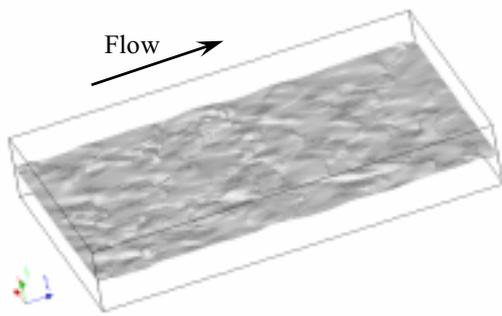


図5 表面波を伴う乱流のDNS (功刀[8])

レーションを行った結果を図6に示す[10]. 左側が第1段動翼, 右側が第1段静翼で, 赤い部分はエントロピー生成の大きい部分, 青が小さい部分である. 左側の翼から出たウエークと右側の翼との相対位置が調べられ, 圧力損失を減少させるように最適化されている. このように, 損失のメカニズムを流体力学, 熱力学, 伝熱工学の各方面から定量的に検討し, 設計に反映させうる時代に入ってきたことが実感される.

また, この10年間の発展で見逃せないものに, 相変化を伴う現象のシミュレーションの発達がある. その背景の一つには, レーザーのように極めて高熱負荷の加熱技術が発展して来たことがあげられる. これと対応するように, 矢部らによってCIP法と呼ばれる手法が提案され発展させられた. CIP法はCubic Interpolated Pseudo-particleの略だそうであるが, この方法の特徴は, その名称とは異なり, 筆者の理解する範囲では, 固体, 液体, 気体の物質の3形態を, 物質の状態方程式と圧力の解法を巧みに組み合わせることにより, 統一的な解法によって解析する点にある. これによって, たとえば, レーザー照射によって, 固体が急速に溶融から蒸発に至るような過程をシミュレーションできる. 詳細は, 提案者らの解説を参照されたい[11]. このほか, 固体面上の沸騰現象のシミュレーションも試みはじめられているが[12], これらは, 今後の10年間での進展が期待される分野といえよう.

実用面での10年間のこのほかの特徴の一つに, 汎用コードの普及があげられる. 現在では, 大学の研究室や研究所の一部を除いては, 自作のプログラムで熱流体解析を行うことはほとんどないと思われる. この理由の一つは, 従来これらの汎用

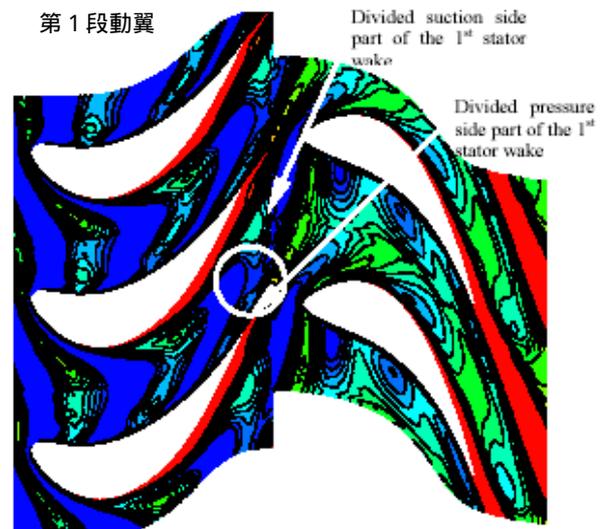


図6 ガスタービン内流れのシミュレーション (エントロピー生成分布) (武石[10])

コードは, ワークステーション上で動作させるのが常識であったが, 近年はパソコン上でも十分に動作するようになったことがある. また, 計算技術の上でも着実な進歩があった. この面での最近の進歩として特にあげられるのは, 非構造格子の採用とメッシュの自動生成, 移動境界の導入等であろう. これらによって, 回転機器を含めて実機を相当忠実に模擬した複雑形状の解析がパソコン上でも可能となってきた. これらの汎用コードは, 経験が蓄積されてその信頼性も向上しているが, 乱流モデルや入り口条件等にはどうしても近似が含まれるので, 得られた結果は十分な現象の理解とともに見ることが必要であるが, これらに注意つつ援用して行けば, 今後ますます設計には欠かせないツールとなろう.

## 5. あとがき

最後に, 今後10年の動向について, 多少気軽に述べさせていただきたい. まず計算機の発展については, これまでの10年間と同様に, 今後もCPUのクロック速度で100倍の発展があるかどうかは, 現在の方式の延長では疑問である. というのは, すでにCPUの発熱密度が大きく, 除熱が律則となる領域に近づいているからである. たとえば, 1~2年の間にハイエンドのパソコン用CPUの発熱密度は,  $100\text{W}/\text{cm}^2$ クラスに達すると見られている. これは, すでに常圧水飽和プール沸騰におけるバーンアウト熱流束と同程度である. この点

では、我々伝熱研究者の寄与できる部分が大きいと考えられる。それはさておき、単一CPUの速度向上は飽和傾向にあるとしても、10年後に予想される一般的なパソコンは、複数のCPUを搭載して、やはり50~100倍近い計算能力を入手しているであろうと思われる。このような方式は、すでにサーバー機では導入されているが、我々の行うような数値シミュレーションに適用すると必ずしも十分な結果は得られないので、今後進歩が期待される。また、計算手法の方からもこのような並列処理の方向に歩み寄って行く必要がある。この点からも、汎用コードは、研究分野にも今後より広く使われることにならうと思われる。この傾向は、欧米諸国ではすでに見られている。

アインシュタインの言葉に、「科学者は解ける問題を解き、技術者は解かねばならない問題を解く」という言葉があるそうである。伝熱シミュレーションの分野でも、「研究者は解ける問題を解き、技術者は解かねばならない問題を解く」と置きかえられそうな言葉であるが、ここで紹介したいくつかの事例は、解かねばならない問題が解けるようになってきたことを示している。これからの10年間で、計算機と計算手法の双方の進歩により、「解ける問題」の最先端を押し進めると同時に、「解かねばならない問題が解ける」フロンティアが、一層広がっていくことを期待したい。

本稿の準備にあたっては、功刀資彰氏（京都大学）、武石賢一郎氏（三菱重工業）に図のご提供等のご協力をいただいた。記して謝意を表したい。

#### 参考文献

- [1] 河村洋, 伝熱研究, 35-137 (1996) 37.
- [2] 姫野龍太郎 姫野ベンチマークテスト  
<http://w3cic.riken.go.jp/HPC/HimenoBMT/index.htm>
- [3] Kim, J. Moin, P. and Moser, R.. J. Fluid Mech. 177 (1987) 133.
- [4] Kim, J and Moin, P., Turbulent Shear Flows 6, Springer (1989) 85.
- [5] Abe, H., Kawamura, H. and Matsuo, Y., J. Fluid Eng. 123 (2001)382.
- [6] Kasagi, N. and Ohtsubo, Y., Turbulent Shear Flows 8, Springer (1993) 97.
- [7] Kawamura, H., et al. Int. J. Heat Fluid Flow, 19 (1998) 482.
- [8] 功刀資彰, 日本数値流体力学会誌 9-5 (2001) 153.
- [9] Iwasaki, T., et al. Int. J. Heat Fluid Flow, 22 (2001) 332.
- [10] 武石賢一郎, 日本機械学会熱工学講演会論文集 (2001) 331.
- [11] 矢部孝, 肖鋒, 日本数値流体力学会誌 7-2 (1999) 70.
- [12] Shirakawa, H., et al. Thermal Sci. & Eng., 9-6, (2001) 29.

10年の伝熱研究の進展：材料・デバイス  
*Advances of Heat Transfer Research in the Past 10 Years:  
Material and Device*

西尾 茂文（東京大学）  
*Shigefumi NISHIO (The University of Tokyo)*

1. はじめに

2001年12月21日付け科学新聞の記事「この一年を振り返る」では、「独創的研究は評価困難」という見出しを付け、近年の研究開発投資の増大に伴う評価（説明責任）と数十年後に花開く独創的研究への評価との両面性の難しさを記している。この記事を引き合いに出すまでもなく、科学技術動向を予測することは難しく、こうした予測は当たらないのが通例ではあろう。したがって先を予測するよりは、一定期間ごとにその期間に得られた進展を確認し総括しておくことの方がむしろ有益と思われる。こうした総括は、情報過多の時代にある現代においては極めて重要性である。こうした観点から、40周年企画として本企画を考えられた編集出版部会の方々に敬意を表したい。

上述のような事情にもかかわらず、敢えて予測するとすれば、21世紀前半の科学技術は情報・生命・材料あるいはこれらにかかわるデバイスをキーワードとして展開されると思われる。本稿では、このような時代のキーワードである材料とデバイス分野について「10年間の伝熱研究の進展」を概観することになるが、筆者はこの分野全域について精通しているわけではないので、話題が偏ることはお許し願いたい。また、わが国の伝熱研究は国際レベルにあると考えられるので、主たる話題は「わが国における伝熱研究」に限りたい。

2. 材料分野における伝熱

材料分野に関する伝熱（略して材料伝熱と呼んでおく）における課題は、熱的課題として多少広範囲に見ると、

- 1) 水素吸蔵特性のように、特定温度（範囲）において発現する材料機能自体に関わる課題、
- 2) 超電導材の常電導遷移防止のように、材料機能が発現する温度・熱環境の実現・維持

に関する課題、

- 3) 新材料の熱物性の課題、
- 4) ガラス強化や耐熱材料などのように、材料および材料構造物の熱応力・熱変形に関わる課題
- 5) 鋳造・成形、急速凝固、加工熱処理のように、熱プロセスを伴う材料製造過程・製造法に関わる課題、
- 6) レーザー加工やプラズマスプレイのように、材料の加工・処理時の熱プロセスに関わる課題

など、多岐にわたる。これまでの伝熱シンポジウムでは、射出成形やレーザー加工などについても多くの発表がなされてきたが、無論これら全般に渡り「10年間の進展」を概観することは筆者の能力を超えており、以下では主として5)を扱いたい。

2.1 10年前の材料分野における伝熱

10年間の進展を概観するためには、まず10年前の状況を概観することから始めるのがよいと思われる。

材料分野については、日本伝熱シンポジウムに注目すると、発足以来続いてきた凝固・融解等の現象別のセッション構成に対してオーガナイズドセッション（以下、OS）が取り入れられ、第25回(1988)では「半導体製造における伝熱」、第27回(1990)では「CVDプロセスにおける伝熱」、第29回(1992)では「鉄鋼業における伝熱」、「材料プロセスにおける伝熱」がOSとして行われ、以後、生産加工やマテリアルプロセッシングなどがシンポジウムにおける一領域として定着してゆくことになる。

一方、1990年には、棚澤一郎先生とLior先生とにより国際会議（王子セミナー）”Heat and Mass Transfer in Materials Processing”が行われた[1]。ここで取り上げられたプロセス等は、

- a) Crystal growth,

- b) Solidification,
- c) Casting and molding,
- d) Plasma spray,
- e) Laser and electron beam processing,
- f) New materials by rapid processing

などであった。また、1992年より棚澤先生を領域代表者として科学研究費補助金重点領域研究「新素材の製造・加工技術にかかわるマイクロ伝熱工学の展開」がスタートした[2]。ここでは、

- A) Molecular dynamics of condensation process,
- B) Micro/macro modeling of solidification process,
- C) High-precision measurement and active control of solidification process,
- D) Ultra-high rate cooling for manufacturing of rapidly solidified materials,
- E) Melting, evaporation and sublimation processes in ultra-high precision processing

の5班により研究組織が構成された。

すなわち、ほぼ10年前は、材料伝熱に関わる先駆的研究あるいは鉄鋼製造を中心とした材料伝熱研究が凝固・融解など現象別の関連領域で論じられていた時代から、材料伝熱の領域としての独自性が伝熱関係者の中で認知され始める時代への転換点であったと思われる。この背景には、半導体を始めとする材料技術の急速な進歩があったことはいうまでも無い。因みに、伝熱プロセスの塊である急速凝固に関する”Rapid Solidification of Metals and Alloys” [3]がJonesにより書かれたのは1982年、高温超電導体（酸化物超伝導体）の発見でノーベル賞が授与されたのが1988年、宮崎らの「レーザー加工技術」[4]が出版されたのが1991年である。一方、材料伝熱が領域として登場した背景には、無論、数値計算手法・能力の大幅な向上があることを忘れてはならない。

## 2.2 材料分野における10年間の伝熱研究の進展（：分協業時代の材料伝熱）

筆者は、伝熱の研究には熱交換器や蒸気発生器のように「熱を伝えること自体を目的とする機器・プロセスを扱う研究」と、熱駆動アクチュエータなどのように「熱が伝わった結果として起こる機能などを扱う研究」の双方があると思っている。従来の伝熱研究の主対象は前者であったが、本稿で論じている材料伝熱は後者の典型である。材料伝熱については、本章の初めに記したように

多岐にわたる課題があるが、しかし、従来の伝熱分野では鋼材の焼入れや加工熱処理のように高い冷却速度や冷却速度の空間的均一性が要求される課題に興味限定されてきた感がある。ここでは、冷却速度やその空間的均一性がターゲットとして与えられており、伝熱研究者はそれを満たすための研究を行えばよかった。しかし、半導体材料の結晶育成などでは、目的とする材料組織や構造を得るための熱的条件が定かではなく、それ自体をも研究目的とする必要がある。筆者が、材料伝熱の10年間の進展として、第一に挙げたいことはこうした分野に伝熱研究者が進出し始めたことである。そこでは、伝熱研究者が材料研究者とともに分業しながら協業することが必要であり、筆者はこれを『分協業時代』と呼んでいる。

## 2.3 材料分野における10年間の伝熱研究の進展（：凝固の基礎）

相変化現象は一般に、

- ・ 相変化分子運動論、
- ・ 界面安定性、
- ・ 三相界線（接触界線）運動論

などにより記述される素過程を介して、

母相過飽和状態⇒新相核生成（あるいは核活性化）⇒新相成長⇒界面形態形成⇒組織構造生成

といった素過程時系列により進行すると考えられる。こうした素過程時系列は、特に多成分系の凝固過程における固相組織・構造生成を支配するので、材料研究者による多くの研究がある[5]が、それらの知見を基礎に mushy zone（固液共存層）を含めて時系列を追跡できるモデルシミュレーションの大枠が材料伝熱において示されたことは大きな進展と考える[6]。

## 2.4 材料分野における10年間の伝熱研究の進展（：凝固システムおよび結晶育成システム）

文献[5]の後者に挙げられている材料伝熱と深く関連する課題、すなわち組成的過冷による凝固界面安定性や凝固界面速度と関連する組織制御、連続鋳造における流動・凝固・潤滑・伝熱・高速化などについては、残念ながら伝熱研究者の興味が集まらなかったようである。この原因は、材料分野において伝統的な凝固研究者グループが存在していることに加えて、上述したように、半導体製造プロセスと同様に、これらの問題における熱

的条件としてターゲットが明確に定められておらず、伝熱研究者にとって取り組みにくい課題であったことにもよると思われる。

一方、半導体材料については後に専門家により進展が総括されると思われるので本稿では詳細には述べないが、鋼材と異なり、かなりの研究が行われ、それらは文献[7]に要約されている。例えば、製造法の中心である Cz 法については、結晶形状、融液体流、ストライエーションの発生原因、磁場印加等による融液体流制御、融液中の酸素濃度分布などに関する多くの研究がなされ、現在では、るつぼ、融液、結晶および周囲壁を構成要素とし、熱伝導、放射および対流を含めた、より現実に近い総合熱解析の時代へと入ってきており、熱解析の知見をもとに新しい結晶育成プロセス（DLCZ 法や連続 Cz 法など）が提案され始めている[7]。

## 2.5 材料分野における 10 年間の伝熱研究の進展（：新材料開発への挑戦）

本章の最初に述べた 2) に関わる酸化物超伝導体の機能維持に関する研究や、5) に関わる急速凝固過程に関する研究あるいは従来から問題となっている鋼材の加工熱処理に関する研究などについては、いくつかの例はあるものの必ずしも活発であったとはいえなかったと考える。

一方、10 年前の伝熱研究において、まったく取り扱われていなかったが最近取り扱われるようになった材料の典型として、 $C_{60}$  やカーボンナノチューブなどのナノ材料が挙げられよう。例えばカーボンナノチューブは、水素吸蔵機能など注目すべき特性を有しており、周知のように次世代材料として大きな期待を集めている。このようなナノ材料を対象とした伝熱研究が開始されたことも、10 年間の大きな進展であろう。こうしたナノ材料に関する伝熱研究は、分子動力学手法[8]がもたらした典型的成果の一つと考えられるが、実験的研究に際しては CVD 研究などととも、伝熱研究に必要とされる装置に大きな変化をもたらした。

## 2.6 材料分野における 10 年間の伝熱研究の進展（：解析モデル）

上述のナノ材料に関する分子動力学計算や結晶育成プロセスに関する数値シミュレーションを初めとして、数値計算による材料伝熱の研究の進展には目覚しいものがあった。例えば、スプレーコーティングやスプレーフォーミングの基礎となる

衝突融液滴の低温面上での凝固について、液滴変形を含めて計算が可能となったこと[9]は、大学院生時代にライデンフロスト現象と格闘した筆者にとっては隔世の感がある。

一方、材料分野では、PFM(Phase Field Model)がここ 5 年ほどの間に大きく進展した。PFM では、固相では 1、融液相では 0 をとる秩序変数（相変数）の場合  $\Phi[r,t]$  として相変化系を扱う。この  $\Phi$  は、凝固界面において不連続な階段関数ではなく、極めて薄い遷移層によって  $\Phi=0$  と  $\Phi=1$  とを結んでいると考える。秩序変数の場合 **phase field** と呼び、相領域を区別する **phase field** に関する方程式と温度場に関する方程式とを連立させて解き、例えば  $\Phi=0.5$  の線を描くとその時刻における界面形状が特定される。この方法の魅力の一つは、界面での境界条件を取り扱わずに済むことなどから通常の数値計算に比べて計算プログラムが簡単なことである。PFM については、文献[10]によれば、デンドライト成長理論との一致が示され、合金系についての取り扱い方法についてもほぼ議論が収束し、凝固組織解析法としての実用性の検証に入っている。伝熱研究者においてもこの手法が検討され始められたことは、重要な進展と考える[11]。

## 3. 熱デバイス分野における伝熱

「デバイス」は文字通り装置であるが、電子デバイスや光デバイスなどに見られるように、形容詞をかぶせるとその形容詞により機能が付加された装置という意味になり、さらに最近の「デバイス」という言葉には「小さい」というイメージが暗黙のうちに内包されているように思われる。そこで、ここでは、こうした意味を含めて、「熱デバイス」について概観する。

熱デバイスとしては、

- 1) 文字通りの加熱デバイス
- 2) ペルチェ素子などの冷却デバイス
- 3) デバイスヒートパイプやサーモサイフォンなどの熱輸送デバイス
- 4) ヒートシンクなどの放熱デバイス
- 5) 気泡ポンプなどの熱駆動アクチュエータ
- 6) 分子モーターなどのマイクロ動力デバイス

などが考えられる。ここでは、3)～5) に話題を絞りたい。

### 3.1 10年前の熱デバイス分野における伝熱

ここでも、10年前の状況を概観することから始めよう。

伝熱シンポジウムに熱デバイスに関するセッションが現れたのは、私の調べた限りでは第23回シンポジウム(1986)での「ヒートパイプ」からであり、第24回(1987)には「電子機器等」、第27回(1990)には「電子機器の冷却」のセッションが現れ、第29回(1992)には「家電・電子機器における伝熱」がOSとして開催されている。コンピュータに注目すれば、10年程前は、スーパーコンピュータからノートブックPCへの主流移行期に相当しており、MPUがi386からi486に移行し、発熱量が急増しはじめる時期であった。

この周辺時期における熱デバイスの画期としては、さらに10年程前にTuckerman & Peaseによりマイクロチャネルヒートシンクが提案され[12]、Cotter[13]により半導体デバイスに内蔵されたマイクロヒートパイプが、Kurzweg & Zhaoにより単相強制振動流型熱輸送デバイスであるDream pipe[14]が、LittleによりMicrominiature Refrigerator (MMR)のスケーリング則[15]がともに1984年に提案され、1985年には浅井ら[16]によりバブルジェットプリンターの現象的研究が発表されている。

このように、ほぼ10年前は、現在研究対象あるいは実用化されている熱デバイスのプロトタイプが出揃い、その詳細な研究が開始された時期と考えられる。

### 3.2 熱デバイス分野における10年間の伝熱研究の進展（：熱輸送デバイス）

最近の10年間における熱輸送デバイスを取り巻く環境は大きく変化した。すなわち、1970年代のいわゆるオイルショックを契機として、熱輸送デバイスの典型である毛管力型ヒートパイプ（本稿では、封入流体の運動を利用して小温度差で大量の熱を運ぶ熱輸送デバイスをヒートパイプと総称する）は、宇宙機器とともに、ヒートパイプ式熱交換器を初めとするエネルギー機器への用途が主流となった。しかし、周知のように高集積化・高密度実装によりLSIチップの発熱量は最近の10年間に急速に増大してきており、PC分野におけるヒートパイプの需要が急速に高まった。ノートブックPCへのヒートパイプの搭載は1993年頃から始まり、現在では80%のノートブックPCがヒー

トパイプを搭載している。パワートランジスタについても同様であり[17]、LSI技術と熱輸送デバイスとの関連が極めて強くなったのが、ここ10年の大きな特徴である。軽量・小型化が不可欠なノートブックPCあるいはモバイルPCではヒートパイプの細径化が求められるが、毛管力型マイクロヒートパイプは熱輸送量が極めて小さく、外径数ミリの毛管力型ヒートパイプと放熱プレートとを組み合わせた冷却モジュールが主流となった[18]。

一方、細径化が可能なヒートパイプとして、振動流型ヒートパイプ[19]が登場し、その研究が進んだことは、ここ10年の進展の一つである。すなわち1994年に、二相自励振動式ヒートパイプが赤地[20]により紹介され、Dream pipeは逆位相単相強制振動流型ヒートパイプへと西尾ら[21]により発展した。前者はSEMOSヒートパイプ、後者はCOSMOSヒートパイプと呼ばれている[19]。

また、MCM(Multi Chip Module)のように分散発熱源を有するものに対し、発熱を拡散し冷却熱流束を軽減する熱デバイスをheat spreader（一般には板状）と呼ぶが、high-performance heat spreaderとしてVapor Chamberなどが登場した。従来のヒートパイプでは長さ方向への熱輸送・熱拡散を主眼とするが、heat spreaderでは厚さ方向の熱抵抗をも軽減する必要がある。

トップヒート型熱輸送デバイス[22]、大容量ループ型ヒートパイプ[23]などに加えて、このように多様な熱輸送デバイスが提案されたことは、ここ10年の重要な進展と思われる。

### 3.3 熱デバイス分野における10年間の伝熱研究の進展（：放熱デバイス）

ここでは、放熱デバイスとしてヒートシンクを対象とする。詳細については次号で予定されている電子機器に関する冷却を参照されたいが、この10年の進展は、最適化に関する知見が深まったことと思われる。

例えば、フィン型のヒートシンクについては、フィンピッチ、フィン肉厚、基板肉厚、基板材質、熱源寸法などの影響について検討され、最適化に関する知見が深まった[24]。また、マイクロチャネルヒートシンクについては、従来のチャネル寸法における伝熱関係式に基づくチャネル寸法、壁肉厚、壁材料、チャネル形状などについて最適化の試み[25]が多くなされるとともに、ポーラスメ

ディアとしての扱いなども行われるようになった[26]. 一方, マイクロチャネルヒートシンクに関連して, マイクロチャネルにおける熱流動特性が研究され始めた[27].

### 3.4 熱デバイス分野における10年間の伝熱研究の進展 ( : 熱駆動アクチュエータ等 )

ここ10年における機械工学の画期の一つとして, MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)を挙げることができよう. 熱デバイスについては総括する段階には至っていないと考えられるが, ナノ技術などとの関連を求めて, 最近の例のみでも以下のような研究が行われている.

- ・ マイクロモーター[28],
- ・ マイクロポンプ[29],
- ・ マイクロアクチュエータ[30],
- ・ マイクロ温度測定デバイス[31]~[35],
- ・  $\mu$ -TAS(Total Analytical System)[36][37],
- ・ マイクロバブル生成デバイス[38]

通常機器とは異なる力学に基づくこうした熱デバイスの研究が開始されたことは, ここ10年の大きな進展である.

## 4. まとめ

本稿でも記したように, 本稿では材料伝熱および熱デバイスの中でむしろ特定領域に注目してここ10年を概観した.

ここで扱った材料伝熱についても, 熱デバイスについても, 他分野の研究者・技術者との分協業の必要性が特記される研究分野であろうと思われる. 数多くの伝熱研究者・技術者が, こうした領域に興味を持つことを期待したい.

## 参考文献

- [1] Heat and Mass Transfer in Materials Processing, (Ed. by Tanasawa, I. and Lior, N.), Hemisphere Pub. Co.(1992).
- [2] 科学研究費補助金重点領域研究「新素材マイクロ伝熱」最終成果報告書 (研究代表者: 棚澤一郎), (1997).
- [3] Jones, H., Rapid Solidification of Metals and Alloys, The Institute of Metallurgists(1982).
- [4] 宮崎, レーザー加工技術, 産業図書(1991).
- [5] 榎本正人, 金属の相変態, 内田老鶴圃(2000)あるいは日本学術振興会製鋼第19委員会編, 凝固プロセス研究の最近の進展, (1998)
- [6] Hayashi, Y., Heat Transfer 1998, **1**(1998)287.
- [7] 今石宜之, 塚田隆夫, 新編 伝熱工学の進展 (日本機械学会編), 養賢堂, **1**(1995)227.
- [8] 丸山茂夫, 渋谷靖, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2001)341.
- [9] 尾崎徹志ほか2名, Therm. Sci. Eng., **9-6** (2001) 9.
- [10] 大出真知子, 東京大学学位請求論文, (2001).
- [11] 中別府修, 土方邦夫, 日本機械学会論文集 B, **64-618** (1998) 463.
- [12] Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., IEEE Electron Device Letters, **EDL-2**(1981)126.
- [13] Cotter, C.P., Proc. 5<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf., (1984), 328.
- [14] Kurzweg, U.H. and Zhao, L., Phys. Fluids, **27-1**(1984)2624.
- [15] Little, W.A., Rev. Sci. Instrum., **55-5**(1984)661.
- [16] 浅井朗ほか2名, 第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1985)7.
- [17] 大串哲郎ほか4名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2000)39.
- [18] 望月正孝, ヒートパイプ技術, **20-2**(2001)36.
- [19] Nishio, S., Preprints of 11<sup>th</sup> Intern. Heat Pipe Conf., **3**(1999)39.
- [20] 赤地久輝, 機講論, No.940-10, **III**(1994)606.
- [21] 西尾茂文ほか2名, 機論, **60**(1994)3498.
- [22] 井村英昭ほか2名, ヒートパイプ技術, **19**(2000)2.
- [23] 大串哲郎ほか3名, 日本機械学会2001年度年次大会講演資料集, **VII**(2001)432.
- [24] 古川裕一, 2001熱設計・対策技術シンポジウム (日本能率協会主催), (2001)3-3.
- [25] 井上剛良, 同上, (2001)3-4.
- [26] Kim, S.J. and Kim, D., ASME J. Heat Transfer, **121**(1999)639.
- [27] Palm, B., Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale, Begell House(2000)54.
- [28] 高橋厚史ほか3名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2000)215.
- [29] 松本壮平, 前田龍太郎, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2000)217.
- [30] 吉田英生ほか3名, 第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **III**(1999)755.

- [31] 梶井誠ほか4名, 第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (1999)193.
- [32] 宮崎康次ほか5名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (2000)213.
- [33] 佐藤洋平ほか4名, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (2000)389.
- [34] 鈴木孝充ほか2名, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (2001)325.
- [35] 中島健吾ほか3名, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (2001)333.
- [36] 貝森弘行ほか3名, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, (2001)629.
- [37] 小原拓, Majumdar, A., 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, (2001)631.
- [38] 縄田豊ほか2名, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, (2001)635.
-

## キッズ・エネルギーシンポジウム 2001

### 「熱」で物を動かす！

*Kids Energy Symposium 2001*

*Generation of Mechanical Power from Thermal Energy!*

花村 克悟 (岐阜大学)

*Katsunori HANAMURA (Gifu University)*

久しぶりに、好奇心に満ちたキラキラと輝く目を見た！ こんな印象を強く受けた1日だった。実験装置（大半は“おもちゃ”）の一つ一つの説明にうなづいたり、元気のいい小学生は説明を無視して自ら動かし始めたり、少々危険な装置にも身を乗り出して触れてみようとしたり、低学年の理科離れなど集まった学生には全く感じられなかった。これは昨年平成13年11月10日（土）に開催されたキッズ・エネルギーシンポジウムの様子である。

日本伝熱学会が主催で開催されるこのキッズ・エネルギーシンポジウムは今回で5回目となる。東京2回、大阪、九州、そして今回の名古屋。市内の「中部電力でんきの科学館」が会場であった。小学生5、6年生と中学1、2年生を対象として、2部構成とした。定員は小学生の部、中学生の部ともに70名とし、東海地区（愛知、岐阜、三重、静岡）に1万枚の広告を中部電力の広報部の協力を得て配布した。定員に満たるとの心配を吹き飛ばすかのように、それぞれ小学生300件および中学生200件を越す応募件数となり、同広報部がお断りする対応に追われるうれしい結果となった。その一部を紹介すると、「うちの子は4年生（お兄さんは対象学年）だけど入れてもらえないのか」「すぐに応募したのに何故はずれたのか」「来年はあるのか」「遠くの地域（郵便事情）を考慮して欲しい」など、その熱心ぶりに枚挙のいとまがない。ただし、最後のご意見については、東海4件の応募状況を見て、各県の応募総数に比例した重みを考慮して県毎に先着順とした旨をご理解いただきました。いやはや、中部電力の広報部の方々には大変なご努力をいただきました。というより、大変ご迷惑をお掛けしたのではないかと思います。結果的には、当日キャンセルもあり、小学生64名、中学生63名で行われた。

今回のテーマは“「熱」で物をうごかす！”で

した。本来はエネルギーや環境問題の重要性や熱とは何だろうか、といったことを少しでもわかってもらうことが目的ですが、むしろ難しい話はさておき、ちょっとした熱（お湯、ろうそく、アルコールランプ、気温など）でもおもちゃが動くことに興味をもってくれないか、ともくろんでいました。そこで、以下のような実験（おあそび？）をそれぞれ5グループに分けて1テーマ20分から30分で次々に体験してもらうこととした。

#### 小学生の部

1. 手作りスターリングサイクル（試験管と注射器、フライホイールにはコンパクトディスク）
2. 形状記憶合金で回る風車（形状記憶合金のワイヤーを2つの滑車に掛け、お湯に浸すと回り出す）
3. 太陽電池（熱から少し外れるが、物を動かすものとして太陽光も身近なエネルギー）
4. ぼんぼん船（夜店に陳列されていたろうそく1本ですいすい走る船）
5. 熱気球（直径1.2mの薄い油紙製の手作り品、ろうそくの炎で浮き上がる）

#### 中学生の部

1. 手回し冷凍機（圧縮機のハンドルを子供が回し、零下何度まで下げられるか、挑戦）
2. 水飲み鳥（大気中の熱をお辞儀という運動に変える驚異の鳥）
3. 熱電発電（温度差から電力が生まれる）
4. 宇宙の温度とエネルギー（天体の温度や発するエネルギーをスライドで紹介）
5. 自然対流（温度差で様々な液体を動かす）

さらに、「エネルギーって何だろう？」といった入門的な講演と「大空を翔る！」と題した航空宇宙に関する夢のある講演とを盛り込み、多少小学生や中学生には難しかった内容やキャッチコピー

からずれた内容のものもあるが、中身の濃いシンポジウムであったように思う。

私は当日の実験で小学生の部の熱気球を担当しました。熱気球も私と研究室の学生とで延べ1週間ぐらいかけて製作したものです。63名の小学生が5グループに分かれているため、ろうそくのみで浮かせることを5回連続して成功させる必要がありました。多少緊張しましたが、5回とも気球自身を浮かせ、さらに約20グラムの浮力を発生させることができ、自立して浮いたときには毎回、子供たちから歓声があがりました。そのときの様子が写真1に示されています（最も喜んでいるのは子供のような私かもしれません）。そのほかに、プールに浮かべた「ぼんぼん船」がろうそく1本で勢いよく走る（皆さんはどうやって走るかご存じですか？）のを興味深く見守る小学生の写真を写真2に、またアルコールランプでコンパクトディスクが飛び出すほど回転するスターリングサイクルの動作原理を聞き入る小学生の写真を写真3に、水飲み鳥のお辞儀を熱心に観察する中学生の写真を写真3に示します。

このシンポジウムを通して、熱やエネルギーや環境問題が子供たちの身近な物事となったかどうかは定かではありませんが、少なくとも熱を加えるだけで動き出すおもちゃがあること知ってくれたことと思います。また、我々実行委員としましても小学生や中学生の中には、こうしたシンポジウムに興味を持ち、熱心に参加してくる子供も多いことを改めて、もしくは初めて知ることができたように思う。東海支部としては、規模を縮小してでも毎年もしくは2年に1回程度で続けてはどうかとの意見があがり、その方向で動きつつある。



写真1 熱気球に大歓声の小学生

最後に、会場を提供していただきました中部電力の皆様、特に広報部の方々にはご尽力いただきました。さらに、関連するの方々にもこの場をお借りしてお礼申し上げたいと思います。ご苦労様でした。そして、ありがとうございました。



写真2 プールでぼんぼん船を走らせる小学生



写真3 アルコールランプでCDが回る試験管スターリングサイクル



写真4 水飲み鳥に首を傾げる中学生

東海支部活動報告  
Report of Tokai Branch

廣田 真史(名古屋大学)  
Masafumi HIROTA (Nagoya University)

< 第6回伝熱コロキウム >

日時：平成13年9月7日(金) 13:30~17:00  
場所：中部電力(株)でんきの科学館  
参加者：45名  
話題提供：3件

(1)乱流伝熱数値解析の最近の進展と課題

須賀 一彦(豊田中央研究所・機械1部 燃焼・流体研究室)

複雑場の乱流伝熱を高精度に数値解析するため、流れ場については3次非線型渦粘性乱流モデルや応力方程式モデル、温度場については勾配拡散乱流熱流束モデルの開発や改良を進めてきた。これらの有効性や課題点を応用計算例を通して議論する。

(2)熱・電併用吸着冷凍機の開発

金森 道人(中部電力・エネルギー応用研究所 環境技術グループ)

吸着冷凍機の再生工程で吸着材加熱とブロワによる冷媒蒸気の吸引・圧縮を併用させる新しい吸着冷凍サイクルについて、50kW級のパイロット機の運転試験研究を実施した。その結果、低温排熱55°Cの活用、冷水取り出し10°C以下、成績係数(電力基準)10以上を達成した。

(3)冷蔵庫の熱的設計について(省エネ目的)

下村 信雄(松下冷機・技術戦略知グループ 戦略企画チーム)

冷蔵庫の省エネルギー化を重点に、(1)周囲からキャビネットを介しての庫内への侵入熱量、(2)コンデンサーよりの庫内侵入熱量、(3)冷凍サイクルの低圧縮比化、に関する評価方法と設計への反映の方法について。さらに熱的設計へのシミュレーションの適用に関して。

< 東海支部講演会 >

日時：平成13年12月14日(金)  
会場：大同工業大学 交流室(名古屋市南区)  
講演会出席者52名(内学生18名)  
学術講演(13:00~15:45)

- (1) セラミック成形体の乾燥応力に与える加熱方法の影響  
板谷義紀, 内山茂, 森滋勝(名古屋大学)
- (2) 火炎に伴う熱膨張が微小重力場における固体燃焼過程与える影響  
中村祐二(名古屋大学), T. Kashiwagi, K.B. Mcgrattan, H.R. Baum(NIST)
- (3) 超音波による管外壁からの円管内部温度計測法の構築  
松本拓也, 加藤征三, 丸山直樹(三重大学)
- (4) 吸着ヒートポンプ用フィン付き伝熱管モジュールの設計  
上田健, 渡辺藤雄, 小林敬幸, 架谷昌信(名古屋大学)
- (5) 非等方性人工多孔質体の熱流動のモデリング  
梅本貴広, 桑原不二朗, 林朋博, 中山顕(静岡大学)
- (6) 水平加熱平板上自然対流の流動と伝熱(プラントル数の影響)  
北村健三(豊橋技術科学大学)
- (7) 回転チャンネル内乱流伝熱のDNSとそのモデリング  
長野靖尚, 服部博文, 石橋伸晃(名古屋工業大学)

特別講演(16:00~17:00)

「空調機と環境問題」

森田昭生(三菱重工業株式会社 冷熱事業本部 特別顧問)

懇親会(17:10~18:10)

九州支部活動報告  
Report of Kyushu Branch

高松 洋 (九州大学 機能物質科学研究所)  
Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University)

第1回支部講演会

日時：平成13年11月16日(金)  
場所：九州大学工学部 機械系大会議室(4階)  
参加者：50名  
内容：

- (1)「気泡ポンプ型ヒートパイプのマイクロ化に関する研究」  
吉野 浩一郎(九大大学院工学府航空宇宙工学専攻) 高橋 厚史(九大大学院工学研究院航空宇宙工学部門)
- (2)「微細加工表面を有するシリコンチップからのFC-72の沸騰熱伝達」  
魏 進家(九大大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻博士課程) 本田 博司(九大機能物質

- 科学研究所) 高松 洋(九大機能物質科学研究所)
- (3)「極微細線の熱物性値測定および物性評価」  
藤原 誠之(九大機能物質科学研究所) 張 興(九大機能物質科学研究所) 藤井 丕夫(九大機能物質科学研究所)
- (4)「急性および慢性肝不全治療用ハイブリッド型人工肝臓」  
中澤 浩二(九大大学院工学研究院化学工学部門) 船津 和守(九大大学院工学研究院化学工学部門)
- (5)「複雑系モデルに基づくアカデミック・ソサエティの盛衰予測ー科学技術立国を目指す我が国の研究機関としての大学における実事求是の模索ー」  
谷本 潤(九大大学院総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門)

中国四国支部活動報告  
Report of Chugoku-Shikoku Branch

西村 龍夫 (山口大学)  
Tatsuo NISHIMURA (YamatguchiUniversity)

<見学会・特別講演会>

日時：平成13年12月7日(金) 13:30- 17:00  
場所：ネクスト香川 参加者：14名  
愛媛大学の水上先生のお世話で見学会・特別講演会が行われた。

[特別講演会]

1. 高温高压流体技術研究所の概要と研究内容  
所長 森吉 孝
2. マイクロ波利用技術 研究参与 加藤俊作
3. マイクロ波水熱法による無機合成技術  
主任研究員 李 眞昊

[見学会]

(財)かがわ産業支援財団高温高压流体技術研究所

概要 高温高压流体技術研究所は平成7年に通商産業省の施策に呼応して、産・学・官の研究開発を牽引する「広域研究開発基盤施設」として設置された研究機関で、事業活動に直接結びつく実用化研究を行うことにより、技術の高度化と産業の進进行を目的としている。特に臨界点近傍における超臨界流体を含む高温高压流体の優れた特性・機能を利用した物質の抽出・精製、材料の調整・機能・反応等の研究開発を行っている。特別講演ではマイクロ波照射によって新しい機能を持った様々な物質創成が可能であることが示され、当研究所の成果が紹介された。質疑討論の後、研究所内の実験設備・機器を見学し、各種研究プロジェクトの説明を受けた。

北陸信越支部活動報告  
Report of Hokuriku-Shinetsu Branch

岩城 敏博 (富山大学)  
Toshihiro IWAKI (Toyama University)

<見学会・秋季セミナー>

日 時：平成 13 年 11 月 16 日(金)・17 日(土)

場 所：キリンビール北陸工場，マンテンホテル

参加者：40 名 (会員 35 名，学生 5 名)

金沢工業大学・棚谷吉郎先生のお世話で見学会・秋季セミナー(講演会)が行われた。若い研究者の講演発表が中心で活発な討論があった。

(1)スカラー拡散を伴う円形噴流の LES

金子嘉昭 (新潟大院)，須藤仁 (新潟大院)，  
松原 幸治 (新潟大工)，小林睦夫 (新潟大工)

[概要] 噴口から発達域までを対象とした Large Eddy Simulation を行い，サブグリッドスケールモデルとしてスマゴリンスキーモデルおよびダイナミックモデルを用いた結果を比較しながら，組織構造が検討された。「サブグリッドスケールモデルとしてのスマゴリンスキーモデルとダイナミックモデルとはどのようなものか?」「発達域で形成されるヘアピン型の渦の構造は?」などの質問があった。

(2)定常物質拡散の分子動力学的機構に関する研究

朝倉太郎(富山大院)，岩城敏博 (富山大工)，  
佐竹信一 (富山大工)

[概要] 2次元分子動力学法を用いて，一定濃度こう配の場における分子運動をシミュレートし，拡散速度と分子集団の力の変動，およびそれらの関連が調べられた。「領域の大きさに問題がないか?」「温度こう配のある系での拡散に研究を発展してほしい。」などの質問・意見があった。

(3)蒸気加熱式木質系廃棄物炭化処理装置

石田哲義 (北陸電力・技術開発研究所)

[概要] ダイオキシン類の法規制を満たすため，木質系廃棄物を蒸気加熱方式で炭化する低価格な処理装置を開発した。「実用上，大変有効な廃棄物炭化処理で，さらに進めてほしい。」「なぜ，電力会社がこのような研究をするのか?」「木には，もともと塩素は含まれていないのではないか?」などの意見や質問があった。

(4)非定常加熱による熱物性値の簡易測定(最適測定

条件の理論的検討)

姫野修廣 (信州大織)

[概要] 先に発表者らが開発した熱物性値簡易測定法を使うときの最適測定条件を 13 種類の代表的な非導電性物質について理論的な考察が行われた。

「最近，赤外線温度計は精度が高く，高価でない。この点を考えると，この研究の目的は?」「理論的には精度は 3%以内とのことだが，実際はどうか?」「最適な試料厚さは物性値によるのか，それともある程度の厚みが保証できれば良いのか?」などの質問があった。

(5)矩形導波管を用いたマイクロ波加熱による粒子層の乾燥特性

青木和夫(長岡技科大)，三河崇志(長岡技科大院)，  
P.Ratanadecho (長岡技科大院)，  
太嶋健司(長岡技科大院)，赤堀匡俊(長岡技科大)

[概要] 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱を粒子層の乾燥に適用し，毛管力による水分移動を考慮した乾燥過程が理論的，実験的に検討された。「粒子層内に生ずる温度ピークの数は必ず 2 つになるのか?」「粒子層内のマイクロ波の波長は含水飽和度に対して連続的に変化するのか?」「マイクロ波によって分子の運動エネルギーを変換するメカニズムは分子動力学で明らかにできるはずである。分子動力学を取り入れてはどうか?」などの質問・意見があった。

(6)フィン付き管熱交換器の熱流動特性に関する研究 大西 元 (金沢大)

[概要] フェンス付設フィン・伝熱管の組合せ構造の熱流動解析を可能とする数値解析コードを開発し，その熱流動特性が検討された。「直交座標系と円筒座標系を複合して用いる場合，2つの座標系の接合境界で不整合が生じないか?」「円管の後流を制御しても，伝熱促進にならないのではないか?」「熱交換器などではフィン表面上への水分の凝縮等もあるが，その点も含めての検討はされているのか?」「流体の蒸発・凝縮を考慮すれば，もっと応用できる。

## 行事カレンダー

## 本会主催行事

開催日		行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2002年						
6月	5日(水) ~ 7日(金)	第39回日本伝熱シンポジウム (北海道厚生年金会館、札幌市)	'02.1/18 (講演申込) '02.4/12 (参加事前 申込)	'02.3/15	第39回日本伝熱シンポジウム実行委員会 北海道大学大学院工学研究科機械科学専攻内 Fax:011-706-7889 E-mail:htsymp39@mech-me.eng.hokudai. ac.jp	'01.11
2003年						
5月	28日(水) ~ 30日(金)	第40回日本伝熱シンポジウム (広島国際会議場、広島市)	未定	未定		

## 本会共催,協賛行事

開催日		行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2002年						
1月	30日(水) ~ 31日(木)	日本機械学会関西支部第253回講習会 製品開発を加速する軽量化設計技術と応用 (建設交流館、大阪市西区立売堀)	'01.1/23	'01. 11/20	(社)日本機械学会関西支部 Tel:06-6443-2073, Fax: 06-6443-6049 E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp http://www.jsme.or.jp/ks/	
1月 2月	31日(木) ~ 1日(金)	第8回エレクトロニクスにおける マイクロ接合・実装技術	'01.9/3	'01. 11/20	(社)溶接学会 Mate 2002 事務局 Tel:06-6879-8698, Fax:06-6878-3110 E-mail:mate@jwri.osaka-u.ac.jp http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/jws/research/micro/Mate2002.html	
3月	4日(月) ~ 6日(水)	第5回CO2固定化とエネルギー効率利用 に関する国際シンポジウム 第4回世界エネルギーシステム国際会議 (東京工業大学百年記念館フェライト会議室)	7/31 '01.9/30		東京工業大学炭素循環素材研究センタ 玉浦 裕 Tel:03-5734-3292, Fax:03-5734-3436 E-mail:ytamura@chem.titech.ac.jp	
3月	14日(木)	可視化情報学会講習会 「ウェブレット解析の産業界への応用可能性」 (大成建設(株)本社新宿センタービル)	'012.2/28		〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14 日本大学理工学部機械工学科武井昌宏 Tel:03-3259-0749, Fax:03-3293-8254 E-mail:takei@mech.cst.nihon-u.ac.jp http://www.vs.j.or.jp	
4月	17日(水) ~ 19日(金)	第2回'02熱設計・対策技術シンポジウム (日本コンベンションセンター 国際会議場、 幕張メッセ)			〒105-8522 東京都港区芝公園3-1-22 社団法人日本能率協会技術・産業界成 事業部 熱設計・対策技術シンポジウム事務 局 佐藤敦、加藤久幸 Tel:03-3434-3917, Fax:03-3434-3593	
7月	22日(月) ~ 24日(水)	第30回可視化情報シンポジウム (工学院大学 新宿校舎)	'02.3/1	'02.5/10	(社)可視化情報学会 Tel:03-5993-5020, Fax:03-5993-5026 E-mail: info@vsj.or.jp http://www.vsj.or.jp/symp2002	
7月	23日(火) ~ 25日(木)	日本流体力学会 年会 2001 (主テーマ: 21世紀の流体力学) (仙台国際センター)	'02.3/29	'01.6/7	日本流体力学会年会2002運営委員会 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学流体科学研究所衝撃波研究セ ンター内 Tel/Fax:022-217-5285/5284 E-mail:ryu2002@ifs.tohoku.ac.jp http://nenkai02.fluid.mech.tohoku. ac.jp/	
8月	26日(月) ~ 29日(木)	第10回流れの可視化国際シンポジウム 10 <sup>th</sup> International symposium on Flow Visualization (ISFV10) (京都国際会議場)	'02.1/31	'01.5/31	ISFV10事務局・論文委員会委員長 川橋正昭(埼玉大学) RAN2001事務局(総務担当古畑朋彦) Tel:048-858-3443, Fax: 048-858-3711 E-mail:mkawa@mech.saitama-u.ac.jp	
2003年						
11月	2日(日) ~ 7日(金)	International Gas Turbine Congress 2003 TOKYO 8th Congress in Japan (江戸川総合区民ホール)	'01.5/31	'02.2/1	The Gas Turbine Society of Japan 7-5-13-402Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0023, Japan Fax:+81-3-3365-0387 E-mail:igt@nal.go.jp	

行事カレンダー

国際会議案内

開催日		行事名(開催国,開催地)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2002年						
4月	8日(月) ~ 10日(水)	1 <sup>st</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (南アフリカ, Kruger National Park)	'01.4/1	'01.6/30	<a href="http://www.walthers.co.za/conference/hefat">http://www.walthers.co.za/conference/hefat</a>	
4月	22日(月) ~ 24日(水)	HEAT TRANSFER 2002 7th International Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer (Greece, Halkidiki)	Submit Abstract as soon as possible	'01.12/	Rachel Green, Conference Secretariat, Heat Transfer 2002 Wessex Institute of Technology, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA Tel: 44 (0) 238 029 3223 Fax: 44 (0) 238 029 2853 Email: <a href="mailto:rgreen@wessex.ac.uk">rgreen@wessex.ac.uk</a>	
7月	14日(日) ~ 18日(木)	The 13 <sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena(ISTP-13) (カナダ, Convention Center, Victoria, BC)	'01.11/1 (Abstract)	'02.3/1	Dr.Sadic Dost, ISTP13, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Victoria, BC, Canada, V8W 3P6 <a href="http://www.istp13.uvic.ca">http://www.istp13.uvic.ca</a>	
8月	18日(日) ~ 23日(金)	第12回 国際伝熱会議 (フランス, グルノーブル)	'01.5/31	'02.2/1	東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 庄司正弘 Tel & Fax:03-5800-6987 E-mail: <a href="mailto:shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp">shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp</a> <a href="http://www.ihtc12.ensma.fr/">http://www.ihtc12.ensma.fr/</a>	

## 第 39 回日本伝熱シンポジウム

開催日：平成 14 年 6 月 5 日（水）～7 日（金） 会 場：北海道厚生年金会館（札幌市）

URL：<http://htsymp-me.eng.hokudai.ac.jp/>

### 【講演原稿等の提出方法】 論文原稿締切 平成 14 年 3 月 15 日（金）

本シンポジウムでは、昨年と同様に講演論文集を「CD-ROM 版」と「冊子版(印刷物)」の 2 様式で発行いたします。ただし内容は同じものとします。

講演論文 1 件につき下記のもの揃えて、平成 14 年 3 月 15 日(金)必着にてご提出願います。

#### 1 講演論文原稿の電子ファイル 1 部

- 原則として PDF ファイルで提出してください。
- ファイル名としては、講演申込時に発行された受付番号に拡張子「.pdf」をつけて下さい。(例:123.pdf)
- 提出していただいた PDF ファイルに問題があった場合は、再提出をお願いする場合がありますのでご了承ください。
- PDF ファイル以外では、日本語版 MS-Word95 以降、一太郎 8 以降の文書ファイル、ポストスクリプトファイル、PageMaker ファイルからの PDF ファイルへの変換、およびカメラレディ原稿からのスキャンを受け付けますが、変換作業料 5,000 円が必要となります。(変換作業料は 4 月 12 日までに下記口座まで郵便振替でご送金ください。その際、内訳としてファイル変換料であることを明記してください。)：郵便口座番号：02750-7-36400，加入者名：第 39 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
- ファイルは下記のいずれかの方法で送付していただきます。論文を受付整理する上で混乱の元になりますので、重複しての送付、複数の方法による送付は行わないようお願いいたします。
  - a) ホームページを利用した送付：<http://htsymp-me.eng.hokudai.ac.jp/>
  - b) 郵送(フロッピーディスク、CD-R など)：下記郵送先

#### 2 講演論文原稿の印刷物 1 部

- 論文原稿は原則として返却いたしません。返却を希望する場合、宛先を記入した返信用封筒(切手貼付)を同封願います。
- 別刷りは配布しません。

#### 3 講演論文原稿の印刷物のコピー 3 部

#### 4 JICST データベース用抄録 1 部

#### 5 提出物チェックシート

#### 書類郵送先・問合せ先

〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究科機械科学専攻 黒田明慈

Tel&Fax：011-706-6377，E-mail：[htsymp39@mech-me.eng.hokudai.ac.jp](mailto:htsymp39@mech-me.eng.hokudai.ac.jp)

### 【参加事前申込について】 参加事前申込締切 平成 14 年 4 月 12 日（金）

シンポジウムならびに懇親会等への事前申込は本号挟込の払込取扱票をご利用ください。

振込先：郵便口座番号：02750-7-36400，加入者名：第 39 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

- ・シンポジウム参加費（論文集代は含みません）
  - 一般（事前申込：10,000 円，会場申込：12,000 円），学生（事前申込：5,000 円，会場申込：6,000 円）
- ・講演論文集：伝熱学会会員：無料（CD-ROM 版は事前送付，印刷版はシンポジウム参加者に当日手渡し）
  - 非会員：8,000 円（会場受付で会員登録も可能です）
- ・懇親会参加費：一般（事前申込：8,000 円，会場申込：10,000 円，夫婦同伴者 1 名無料）
  - 学生（事前申込：4,000 円，会場申込：5,000 円）
- ・ウェルカムパーティ：一般 3,500 円，学生 2,000 円（当日受付は行いません）

### 【付随行事について】

伝熱学会 40 周年を記念して、シンポジウム前日(6 月 4 日)に「伝熱学会 40 周年記念セミナー」と「ウェルカムパーティ」を催します。詳細はホームページあるいは本誌 2001 年 11 月号をご覧ください。

## 提出物チェックシート

提出物をご確認の上、チェック覧にチェックしていただき、書類に同封してください。

講演受付番号		代表 著者名	
E-mail アドレス			
表 題			

提出物	部 数	提出方法	チェック覧
論文原稿ファイル	1	ホームページを利用した送付	*
		郵 送	*
		* 上記三つの方法の中からどれか一つの方法で送付し、利用した提出方法の覧にチェックをしてください。	
論文原稿	1	郵 送	
原稿のコピー	3		
JICST データ ベース用抄録	1		
本チェックシート	1		

## 論文原稿ファイルの形式

提出いただく論文原稿ファイルの形式に丸印を付けてください。

PDF		
PDF 以外の形式	MS-Word 95	
	MS-Word 97,98	
	MS-Word 2000	
	MS-Word 2001	
	一太郎 8	
	一太郎 9	
	一太郎 10	
	Postscript ファイル	
	PageMaker	
	紙	
	その他	
PDF への変換を依頼します。 代表著者名： _____		

## 講演論文の書き方

講演論文原稿の書式は、原稿見本に示すとおり従来の書式からほとんど変更はありません。詳しい論文の書式設定については、本シンポジウムのホームページにて解説いたしますのでご覧ください。

ここでは、今回から提出をお願いする PDF ファイルを作成するに当たり、特に注意していただきたい点について解説いたします。

### 文章，図，表，写真，数式 全ての素材の電子化が必要

PDF ファイルを用意するには、文章、図、表、写真、数式などの論文中で使用する全ての素材を電子化し、ワープロソフト等を利用してレイアウトする必要があります。

微妙な違いを表現する写真等、電子化の難しい素材の場合は、PDF ファイルには電子化したものを利用してレイアウトし、印刷用原稿には素材をしっかりと貼ってください。

### CD-ROM はカラー対応，印刷物はモノクロ

印刷物（本）の論文集は、従来通りモノクロで編集・印刷いたしますが、CD-ROM 版の論文集では、カラーの図及び写真を用いることができます。ただし文章中での色使用は避けてください。

### PDF ファイルのサイズは，1 論文当たり 1MB（メガバイト）以下に

#### 文書中で使用できるフォント

論文中では、本文、図・表等においても、下表のフォントを使用してください。これ以外のフォントを用いた場合、PDF ファイルを作成したコンピュータ以外では正しく表示されない場合がありますのでご注意ください。

#### 論文中で使用できるフォント一覧

	Windows	Macintosh
明朝体	MS 明朝	細明朝体
ゴシック体	MS ゴシック	中ゴシック体
Times	Times New Roman	Times
Arial	Arial	Arial
Symbol	Symbol	Symbol

### MS-Word 用テンプレートの利用

MS-Word を用いて講演原稿を作成する場合は、用紙設定、使用するフォント、スタイル等をあらかじめ設定したテンプレートファイルを本シンポジウムホームページにて提供しております。できるだけ、テンプレートの利用をお願いいたします。

### PDF ファイルを作成する際の Acrobat の設定

PDF ファイルは、Adobe Acrobat を用いることにより、プリンタで印刷するのと同じ手順で作成することができます。Acrobat には、PDFWriter と Distiller という二種類の PDF 変換方法がありますが、講演原稿用 PDF ファイル作成には出力解像度等を設定できる Distiller を用いてください。

各種ワープロソフトから Distiller を用いて PDF ファイルを作成する手順は、

1. Distiller の解像度等の設定
2. 使用するプリンタを Distiller に設定
3. 文書を印刷

となります。講演原稿用 PDF ファイルを作成する場合、Distiller の解像度設定は、Distiller を起動すると表示される画面から、[ジョブオプション]を[PrintOptimized]に設定してください。

講演番号，シンポジウム名，ページ番号等は，実行委員会にて挿入します





札幌市内ホテル・会場位置地図



No	ホテル名	住所	最寄
1	センチュリーロイヤルホテル	北5西5	札幌駅徒歩3分
2	ホテルクレスト札幌	北6西4	札幌駅徒歩1分
3	ホテルロイトン札幌	北1西11	地下鉄西11丁目徒歩3分
4	アリマックスホテル330札幌	南2西5	地下鉄大通徒歩3分
5	第一ワシントンホテル	北4西4	札幌駅徒歩1分
6	札幌ステーションホテル	北7西4	札幌駅徒歩1分
7	札幌ルナホテル	南3西9	地下鉄すすきの徒歩8分
8	チサンホテル札幌本館	北2西2	札幌駅徒歩5分
9	札幌リッチホテル	北1西3	札幌駅徒歩7分
10	厚生年金会館(シンポジウム会場)	北1西12	地下鉄西11丁目徒歩3分

☆ 会場の北海道厚生年金会館へは、札幌駅から車で約7分程度です。

☆ 西11丁目駅は地下鉄東西線、その他の最寄り駅は地下鉄南北線です。東西線と南北線は大通駅で乗り換えることができます。

## 第 39 回日本伝熱シンポジウム 宿泊・航空券のご案内

「第 39 回 日本伝熱シンポジウム」はサッカーのワールドカップと開催時期が重なります。札幌においても試合が行われるため、航空便や宿泊施設の確保が困難になる恐れがあります。早めに予約されることをお勧めいたします。

シンポジウムに参加される皆様に便宜をはかるため、下記の通り、宿泊・航空券のご案内をさせていただきます。申込用紙に必要事項をご記入の上、お申込みください。

## 1. 宿泊のご案内 (1泊朝食付 サ - ビス・税金込みのお 1 人様料金です)

クラス	ホテル名	室タイプ	宿泊料金	申込番号
シティホテル	センチュリーロイヤルホテル	シングル	13,000 円	A-1
		ツイン	10,000 円	A-2
	ホテルクレスト札幌	シングル	12,000 円	B-1
		ツイン	9,800 円	B-2
	ホテルロイトン札幌	シングル	12,000 円	C-1
		ツイン	9,800 円	C-2
ビジネスホテル	アリマックスホテル 330 札幌	シングル	10,000 円	D-1
		ツイン	9,500 円	D-2
	第一ワシントンホテル	シングル	9,000 円	E-1
		ツイン	8,500 円	E-2
	札幌ステーションホテル	シングル	9,000 円	F-1
		ツイン	8,500 円	F-2
	札幌ルナホテル	シングル	8,500 円	G-1
		ツイン	7,000 円	G-2
	チサンホテル札幌本館	シングル	8,500 円	H-1
	札幌リッチホテル	シングル	8,500 円	I-1
	厚生年金会館	シングル 受給者	6,544 円	J-1
			7,930 円	K-1
ツイン 受給者		5,966 円	J-2	
		7,237 円	K-2	

- (1) お申し込みは、申込記号で記入し、必ず第 2 希望もご記入ください。
- (2) ツインルームご希望のお客様は、申込書に同室者のお名前を必ずご記入ください。
- (3) 先着順に受付をし、満室になった場合は他のホテルをご利用いただく場合がございますので予めご了承ください。
- (4) 厚生年金会館、宿泊希望者のお客様で受給者の方は、必ず備考欄に受給者と記入して下さい。

## 2. 割引航空券のご案内 (同一便に 15 名様以上のご利用がある場合の適用となります)

区間	往 路			復 路			特別割引料金 (片道料金)
	月 日	出発予定時刻	記号	月 日	出発予定時刻	記号	
東京-札幌	6月4日	15:00~17:00	A	6月7日	18:00~20:00	ア	19,500 円
	6月5日	8:00~10:00	B	6月8日	10:30~12:30	イ	
関空-札幌 伊丹-札幌	6月4日	14:00~16:00	C	6月7日	16:30~18:00	ウ	25,000 円
	6月5日	9:00~10:30	D	6月8日	10:00~12:00	エ	
名古屋-札幌	6月4日	15:00~17:00	E	6月7日	17:30~19:00	オ	23,000 円
	6月5日	7:40~9:00	F	6月8日	10:00~12:00	カ	
仙台-札幌	6月4日	13:00~16:00	G	6月7日	17:00~19:00	キ	17,500 円
	6月5日	8:00~10:00	H	6月8日	12:00~14:00	ク	

- (1) 航空券をお申し込みのお客様は、宿泊とセットでお申し込みください。
- (2) 出発予定時刻は、本申込要項作成時点での航空が 往 に基づき記入しておりますので、1 時間前後程度の時間変更がある場合がございます。
- (3) 先着順に申込受け付けをいたしますので、満席になり次第締め切りとさせていただきます。
- (4) 申し込み内容以外のご要望がある場合は、申し込み備考欄に日程・区間・便名・希望する割引種別等を詳しく記入してお申し込みください。
- (5) 航空券のみのお申し込みはお問い合わせ下さい。

### 3. 取消し料金のご案内

#### (1) 航空券の取消し料金について

	20日前 取消手数料	13日前 取消手数料	7日前 取消手数料	当日 取消手数料
関空・羽田ー札幌 名古屋・仙台ー札幌	1,500円	3,000円	6,000円	9,000円
福岡ー札幌	2,000円	4,000円	8,000円	12,000円

※上記取消手数料と航空券片道につき420円の払戻手数料がかかります。

#### (2) 宿泊の取消し料金について

取消日時	4日前まで	前日まで	当日不泊	不泊(無連絡)
取消料金	無料	宿泊代金の20%	宿泊代金の80%	宿泊代金の100%

### 4. お申し込み方法

- (1) お申し込みは、必ずメールかFAXにてお申し込みください。(変更・取消しも同様にお願ひ致します。)
- (2) 申込締切日は、5月16日(木)
- (3) 締め切り日を過ぎた以降のお申し込みはご相談ください。
- (4) クーポン券等の発送は、ご出発の10日前を予定しております。
- (5) 通信費としてお申込み1名様につき500円を加算させていただきます。

お問い合わせ・ お申し込み先	〒060-0004 札幌市中央区北4条西4丁目伊藤ビル7階 JR北海道法人旅行札幌支店 コンベンションデスク 担当 定岡・小林 電話 011-223-5740 FAX 011-280-8386 E-mail : covdesk@jrhokkaido.co.jp
-------------------	--

### 第39回日本伝熱シンポジウム 宿泊・航空券等申込書

住所(〒-ホ)送付先):		会社 自宅 会社名(連絡大学):											
代表者	電話:	FAX:	e-mail:										
記入例	宿泊者氏名	年齢	性別	部屋タイプ	宿泊同室者氏名	年齢	性別	宿 泊 日				航 空 券	
								6/4(火)	6/5(水)	6/6(木)	6/7(金)	往 路	復 路
	ホカイ 知カ 北海 太郎	55	男	A-2	ホカイ ハナコ 北海 花子	50	女	A-2	A-2	A-2		A	ア

**「返金口座名」**

銀行名:  銀行支店名:  口座番号:  普通 当座

口座名義(リカネ):

返金時の際は、振込手数料を差し引いた金額を振り込みさせていただきます。

**< 備考欄 >**

## 「伝熱」会告の書き方

## 事務局からの連絡

### 1. 学会案内と入会手続きについて

#### 【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

#### 【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

#### 【会員の種別と会費】

会員種	資 格	会費(年額)
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	8,000円 但し、70才以上は0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

#### 【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

- 「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。  
(本年度発行予定：5, 7, 9, 11, 1, 3月号)
  - 正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
  - 賛助会員に口数分の冊数送付

- 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。

- 正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

#### 【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

(注意)

- 申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- 会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の手続きができず、会費未納のままとなります。
- 学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明(署名・捺印)が必要です。

### 2. 会員の方々へ

#### 【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします。

#### 【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金の手続きを行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

### 【変更届について】

(勤務先、住所、通信先等の変更)

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くことになります。

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

(学生会員から正会員への変更)

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からのご指導をお願いします。

(変更届提出上の注意)

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

### 【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届(郵便振替用紙に記載可)を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消します。

### 【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、至急納入をお願いします。特に、平成12年度以降の会費未納の方には「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

### 3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

### 事務局

《業務内容》

- i) 入会届、変更届、退会届の受付
- ii) 会費納入の受付、会費徴収等
- iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への学会誌「伝熱」、論文集「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- v) その他必要な業務

《所在地》

〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16  
社団法人 日本伝熱学会  
TEL, FAX : 03-5689-3401  
E-MAIL: [htsj@asahi-net.email.ne.jp](mailto:htsj@asahi-net.email.ne.jp)  
HP: <http://www.htsj.or.jp>

(土日、祝祭日を除く、午前10時～午後5時)

(注意)

1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス等の書面にてお願いします。
2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-46  
東京農工大学工学部機械システム工学科  
望月 貞成  
TEL:042-388-7088 FAX:042-388-7088  
E-Mail : [motizuki@cc.tuat.ac.jp](mailto:motizuki@cc.tuat.ac.jp)

## 寄付会費 (2000.11.29 現在) 85名 204,000円

資格	氏名	勤務先	資格	氏名	勤務先
正	荒木 信幸	静岡大学 工学部	名誉特	粟野 誠一	
正	飯田 嘉宏	横浜国立大学 大学院工学研究科	正	池上 康之	佐賀大学 理工学部
名誉特	石谷 清幹		正	石黒 博	九州工業大学 大学院生命体工学研究科
正	石田 哲義	北陸電力(株)技術開発研究所	正	石塚 勝	富山県立大学 工学部
正	稲田 茂昭	群馬大学 工学部機械システム工学科	正	稲田 孝明	産業技術総合研究所
正	井上 剛良	東京工業大学 大学院理工学研究科	正	今石 宣之	九州大学
正	岩城 敏博	富山大学 工学部	正	上原 春男	佐賀大学 理工学部
正	内田 麻理	(株)日立製作所 機械研究所	名誉	越後 亮三	芝浦工業大学 工学部
名誉	塩治震太郎	石川島播磨重工	正	大石 克巳	九州大学 大学院工学研究院
正	大串 哲朗	三菱電機(株)先端技術総合研究所	正	太田 照和	東北大学 大学院工学研究科
名誉(紳)	大原 清司	芦屋大学	正	大森 敏明	東京ガス(株)
正	岡崎 健	東京工業大学 大学院理工学研究科	正	小川 邦康	慶應義塾大学 理工学部
正	小澤 守	関西大学 工学部	正	小畑 良洋	独立行政法人産業技術総合研究所
正	海野 紘治	豊田工業大学 工学部	正	加治 増夫	近畿大学 生物理工学部
正	勝田 正文	早稲田大学	正	加藤 泰生	山口大学
正	上宇都幸一	大分大学 工学部	正	亀井 秀也	福島工業高等専門学校
正	河部 弘道	専修大学北海道短期大学	正	河村 洋	東京理科大学 理工学部
正	木枝 茂和	(株)日立製作所 機械研究所	正	工藤 一彦	北海道大学 大学院工学研究科
正	熊田 雅弥	岐阜大学 工学部	名誉	黒崎 晏夫	電気通信大学
正	小林 睦夫	新潟大学 工学部	正	小宮山淑方	富山工業高等専門学校
正	佐藤 勲	東京工業大学 大学院理工学研究科	正	佐藤 公俊	電気通信大学 電気通信学部
正	庄司 正弘	東京大学 大学院工学系研究科	正	鈴木健二郎	京都大学 大学院工学研究科
正	高橋 章	福島工業高等専門学校	正	瀧本 昭	金沢大学 工学部
正	武石賢一郎	三菱重工業(株)高砂研究所	正	田子 真	秋田大学
正	寺西 恒宣	富山工業高等専門学校	正	棚谷 吉郎	金沢工業大学
正	鳥居 薫	横浜国立大学 大学院工学研究院	正	鳥山 孝司	山梨大学 工学部
正	長田 孝志	琉球大学 工学部	正	長野 靖尚	名古屋工業大学 大学院工学研究科
正	中山 顕	静岡大学 工学部	名誉	中山 恒	University of Maryland
正	成合 英樹	筑波大学	正	西尾 茂文	東京大学 生産技術研究所
正	西田 哲也	水産大学校	正	野川 正文	アイシン精機(株)
正	長谷川淳一	一関工業高等専門学校	名誉	服部 賢	長岡技術科学大学
正	林 勇二郎	金沢大学	正	原村 嘉彦	神奈川大学 工学部
正	久角 喜徳	大阪ガス(株)	正	久野 勝美	(株)東芝機械システム研究所
正	菱田 公一	慶應義塾大学 理工学部	正	平田 雄志	大阪大学
正	福迫尚一郎	北海道大学 大学院工学研究科	正	藤田 秀臣	名古屋大学 大学院工学研究科
正	藤田 恭伸	九州大学 大学院工学研究科	正	本田 知宏	福岡大学
正	牧野 俊郎	京都大学 大学院工学研究科	正	増岡 隆士	九州大学 大学院工学研究院
名誉	松尾 栄二	大阪産業大学 工学部	正	松本 浩二	中央大学 理工学部
正	円山 重直	東北大学 流体科学研究所	正	水上 紘一	愛媛大学
正	三松 順治	岐阜大学 工学部	名誉特	宮部 英也	
正	望月 貞成	東京農工大学 工学部	正	桃木 悟	長崎大学 工学部
正	森 茂	金沢大学 工学部	正	森田 昭生	三菱重工業(株)
正	門出 政則	佐賀大学 理工学部	正	山岸 英明	釧路工業高等専門学校
正	山下 宏幸	福岡大学 工学部	正	山田 雅彦	北海道大学 大学院工学研究科
正	横堀 誠一	(株)東芝 電力産業システム技術開発センター	正	吉田 駿	九州大学 大学院工学研究院
正	吉田 英生	京都大学 大学院工学研究科	正	渡邊 激雄	中部電力(株)電気利用技術研究所

---

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

---

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届け用紙

広告

Leading Edge the Thermal Technology

## 編集後記

新年明けましておめでとうございます。いよいよ40周年記念号シリーズがスタート致しました。新年号は山田・高田委員の担当で、発行することができました。原稿執筆いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

本誌への原稿の投稿、また、本誌に対するご意見・ご要望など、お近くの下記委員ないしは編集出版事務局までお寄せください。

---

### 第40期編集出版部会委員

副会長	河村 洋	東京理科大学
部会長	瀧本 昭	金沢大学
委員		
(理事)	山田雅彦	北海道大学
	花村克悟	岐阜大学
	岩城敏博	富山大学
	牧野俊郎	京都大学
	西村龍夫	山口大学
(監事)	太田照和	東北大学
(評議員)	塚田隆夫	東北大学
	井上剛良	東京工業大学
	一宮浩市	山梨大学
	鈴木 洋	神戸大学
	高田保之	九州大学
(事務)	大西 元	金沢大学
TSE チーフエディター		
	西尾茂文	東京大学
TSE 出版担当		
	永井二郎	福井大学

平成 14 年 1 月 30 日

編集出版事務局：〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20  
金沢大学工学部人間・機械工学科  
瀧本 昭 / 大西 元  
Tel : 076-234-4741 / -4742  
Fax : 076-234-4743  
e-mail: [takimoto@t.kanazawa-u.ac.jp](mailto:takimoto@t.kanazawa-u.ac.jp)

## 複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F  
学術著作権協会 (Tel / Fax : 03-3475-5618)

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.(CCC)  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

### Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)  
41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan  
Phone / Fax : +81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

## 伝 熱

ISSN 1344-8692

Journal of The Heat Transfer Society of Japan  
Vol. 41, No. 166

2002年1月発行

発行所 社団法人 日本伝熱学会  
〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16  
電話 03(5689)3401  
Fax. 03(5689)3401  
郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan  
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,  
Tokyo 113-0034, Japan  
Phone / Fax : +81-3-5689-3401