

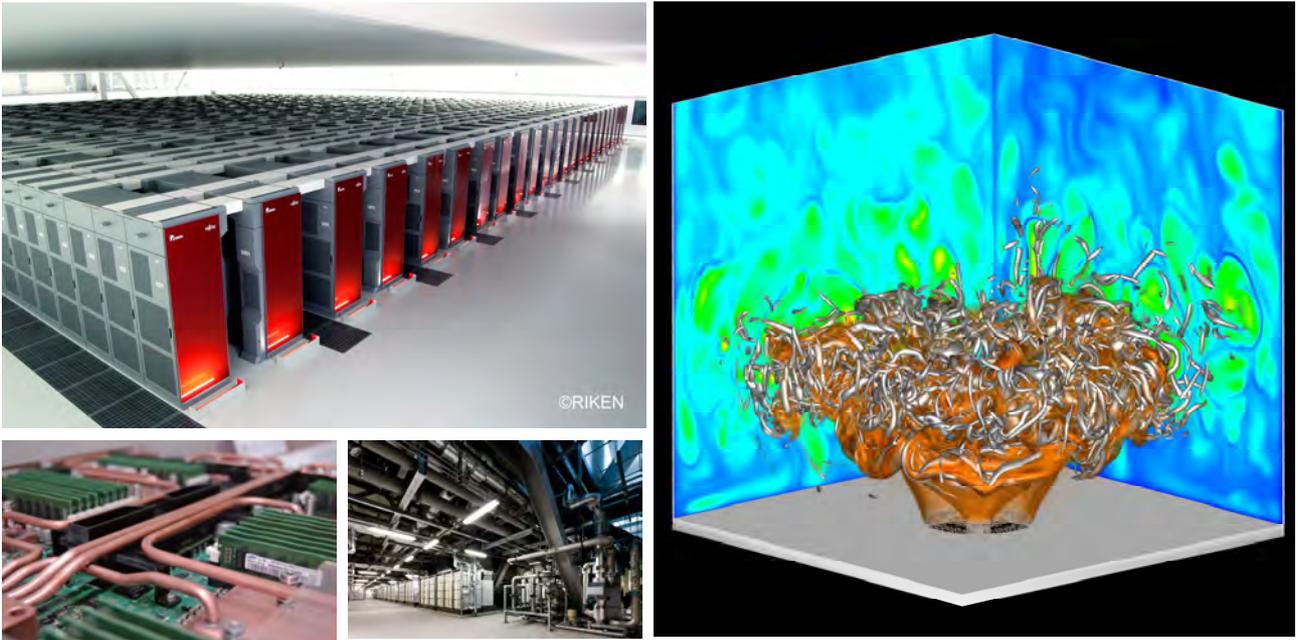
# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 220  
2013. 7

*JHSJ*

◆特集：スーパーコンピュータと伝熱



### スーパーコンピュータ「京」 *The K computer*

スーパーコンピュータ「京」は、2011年6月と11月に世界最速を達成した演算性能10ペタフロップス（1秒間に一京回の演算）を超える超巨大並列システムである。「京」は2012年9月末より共用を開始している。864ラックの計算機筐体と216ラックのディスク筐体、合計1080ラックが幅50m奥行き60mの広大な計算機室に並んでいる（左図上）。計算機室には柱が1本もない。計算機をなるべく密に、なるべく均一に並べるためである。床下は深さ1.5mのフリーアクセスとなっており、総延長約1000km、総本数約20万本にもなる通信ケーブルの半数が配線されている（残りの半数は筐体上部に配線されている）。フリーアクセス内には電源ケーブルやCPU冷却水配管も設置されており、冷却空気のサブライチャンバとしても機能している。CPU等が取り付けられたシステムボードには冷却水配管が張り巡らせられており、CPUと通信用LSIを30°C以下に保っている（左図下-左）。メモリ部分は空冷となっており、冷却空気が滞留しホットスポットが発生しないように念入りに冷却空気の流路設計がなされている。半導体部品の寿命は温度が10°C低下すると2倍に伸びる（アレニウスの法則）。水冷方式を採用したことで、空冷の場合と比べCPU温度を50°Cないし60°C下げることができ、故障率を下げるとともに消費電力やエラーの低減に大きく寄与している。

「京」を冷却する空調機やCPU冷却装置は計算機室の直下階に設置しており、10MW以上の電力を消費する計算機の安定稼働を支えている（左図下-右）。

関口 芳弘（理化学研究所）

Yoshihiro SEKIGUCHI (RIKEN)

### 乱流燃焼の直接数値計算 *Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion*

ガスタービン燃焼器や自動車用ICエンジン等、多くの実用燃焼器は乱流燃焼状態にある。乱流燃焼は乱流と火炎という二つ複雑現象が相互に干渉する現象であるため、現在でもその詳細は明らかではない。乱流燃焼は計算科学の中でも最も解析が困難な現象の一つであり、十数年前までは乱流燃焼の詳細な数値解析は不可能であると信じられていた。筆者らが詳細な燃焼反応を考慮に入れた乱流燃焼の三次元直接数値計算（DNS）が可能であることを示したのは2000年である。過去2年間に主要学術雑誌において発表された乱流燃焼に関する論文の約40%以上には何らかの形で乱流燃焼のDNSが用いられており、乱流燃焼DNSは乱流燃焼研究における有力な研究手法の一つとなっている。右図はガスタービン燃焼器を模擬した矩形燃焼器内の旋回乱流予混合火炎のDNS結果を可視化したものである。燃料は水素と空気の前混合気であり、渦構造が速度勾配テンソルの第二不変量の等値面（灰色）で、熱発生率（化学結合エネルギーから熱エネルギーへの変換量）がボリュームレンダリングと呼ばれる手法で示されている。強い旋回を有する燃焼流は極めて複雑な構造を呈し、それらは高密度なエネルギー変換（乱流燃焼速度の増大）に大きく寄与している。燃焼室側面に示した分布は壁面熱流束を表しており、このDNSから乱流火炎構造と熱損失の関係も議論できる。さらに、このようなDNSは、ガスタービン燃焼器で問題となる振動燃焼や燃焼騒音等の機構解明とそれらの制御手法の構築にも寄与する。

店橋 護, 志村 祐康, 福島 直哉（東京工業大学）

Mamoru TANAHASHI, Masayasu SHIMURA, Naoya FUKUSHIMA (Tokyo Institute of Technology)

# 伝 熱

## 目 次

### 〈新旧会長挨拶〉

- 第 52 期会長就任にあたって……………宇高 義郎 (横浜国立大学) …… 1  
 第 51 期を振り返って……………門出 政則 (佐賀大学) …… 2

### 〈第 25 回日本伝熱学会賞〉

- 平成 24 年度日本伝熱学会賞選考の報告  
 ……表彰選考委員会委員長 石塚 勝 (富山県立大学) …… 3  
 日本伝熱学会学術賞を受賞して  
 ……宇高 義郎 (横浜国立大学), 柏原 雄貴 (東京電力), 尾崎 美智央 (日産自動車) …… 4  
 日本伝熱学会学術賞を受賞して……………佐藤 洋平, 栗山 怜子 (慶應義塾大学) …… 5  
 日本伝熱学会学術賞を受賞して  
 ……中野 雄大 (東京エレクトロン), 菊川 豪太, 小原 拓 (東北大学) …… 6  
 日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………岡島 淳之介 (東北大学) …… 7  
 日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………渡部 弘達 (東京工業大学) …… 8  
 優秀プレゼンテーション賞 受賞者 — 第 50 回日本伝熱シンポジウム —  
 ……学生会委員会幹事 田部 豊 (北海道大学) …… 9

### 〈平成 25 年度文部科学大臣表彰〉

- 平成 25 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰  
 ……表彰選考委員会委員長 石塚 勝 (富山県立大学) …… 10

### 〈第 50 回日本伝熱シンポジウム〉

- 第 50 回日本伝熱シンポジウムの報告  
 ……圓山 重直 (東北大学), 小宮 敦樹 (東北大学), 小澤 守 (関西大学)  
 ……田部 豊 (北海道大学) …… 11

### 〈特集 : スーパーコンピュータと伝熱〉

- スーパーコンピュータのトレンド……………庄司 文由 (理化学研究所) …… 15  
 「京」にみる冷却技術  
 ……塚本 俊之 (独立行政法人理化学研究所), 草野 義博, 平井 慶太 (富士通株式会社)  
 ……魏杰 (富士通アドバンステクノロジー株式会社) …… 21

「京」に見る設備技術	関口 芳弘 (理化学研究所)	27
スーパーコンピュータを用いた大規模乱流燃焼解析	店橋 護・志村 祐康・福島 直哉 (東京工業大学)	33
スーパーコンピュータによる生体力学シミュレーションとその医療応用	高木 周 (東京大学)	39
スーパーコンピュータを用いた大規模計算：気象	高橋 桂子 (独立行政法人海洋研究開発機構)	45

### 〈ネイチャーQ〉

アリなどの昆虫社会における共同と裏切り	辻 和希 (琉球大学)	51
---------------------	-------------	----

### 〈特別寄稿〉

LNG とエクセルギー	久角 喜徳 (大阪大学)	56
-------------	--------------	----

### 〈随想〉

見慣れなかった熱力学変化	牧野 俊郎 (近畿職業能力開発大学校)	62
--------------	---------------------	----

### 〈巻頭グラビア〉

スーパーコンピュータ「京」	関口 芳弘 (理化学研究所)	表紙裏
乱流燃焼の直接数値計算	店橋 護, 志村 祐康, 福島 直哉 (東京工業大学)	表紙裏

〈行事カレンダー〉		67
-----------	--	----

### 〈お知らせ〉

社団法人日本伝熱学会第 51 期 (平成 24 年度) 総会議事録		69
国際賞「抜山記念賞 (The Nukiyama Memorial Award)」推薦公募のお知らせ		72
The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15) 第 15 回国際伝熱会議		73
日本伝熱学会関西支部主催 第 13 回関西伝熱セミナー2013「先の先の伝熱技術 in 六甲」		74
編集出版部会からのお知らせ		75
編集出版部会ノート		80

CONTENTS

<New and Former President's Address>

Inauguration Address as the 52nd President Yoshio UTAKA (Yokohama National University) .....	1
The 51st Year in Retrospect Masanori MONDE (Saga University) .....	2

<The 25th Heat Transfer Society Awards>

On Selection of Awards of the Heat Transfer Society of Japan, 2012 Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University) .....	3
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Yoshio UTAKA <sup>1</sup> , Yuki KASHIWABARA <sup>2</sup> , Michio OZAKI <sup>3</sup> (1 Yokohama National Univ., 2 Tokyo Electric Co., 3 Nissan Motor Co.) .....	4
Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Yohei SATO, Reiko KURIYAMA (Keio University) .....	5
Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Takeo NAKANO <sup>1</sup> , Gota KIKUGAWA <sup>2</sup> , Taku OHARA <sup>2</sup> (1 Tokyo Electron Ltd., 2 Tohoku University) .....	6
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Junnosuke OKAJIMA (Tohoku University) .....	7
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Hirotatsu WATANABE (Tokyo Institute of Technology) .....	8
Best Presentation Awards Yutaka TABE (Hokkaido University) .....	9

<The Commendation for Science and Technology by MEXT 2013>

The Commendation for Science and Technology by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology 2013 Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University) .....	10
--	----

<The 50th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 50th National Heat Transfer Symposium of Japan Shigenao MARUYAMA <sup>1</sup> , Atsuki KOMIYA <sup>1</sup> , Mamoru OZAWA <sup>2</sup> , Yutaka TABE <sup>3</sup> (1 Tohoku University, 2 Kansai University, 3 Hokkaido University) .....	11
---	----

<Special Issue>

Trend of supercomputer Fumiyoshi SHOJI (RIKEN) .....	15
Cooling Technology of the K computer Toshiyuki TSUKAMOTO <sup>1</sup> , Yoshihiro KUSANO <sup>2</sup> , Keita HIRAI <sup>2</sup> , Jie WEI <sup>3</sup> (1 RIKEN, 2 Fujitsu Limited, 3 Fujitsu Advanced Technologies Limited) .....	21

The Plant Technology of the K computer Yoshihiro SEKIGUCHI (RIKEN) .....	27
Huge Numerical Simulation of Turbulent Combustion on Supercomputer Mamoru TANAHASHI, Masayasu SHIMURA, Naoya FUKUSHIMA (Tokyo Institute of Technology) .....	33
Biomechanical Simulations using Supercomputer and their Medical Applications Shu TAKAGI (The University of Tokyo) .....	39
High Performance Computing for Weather Keiko TAKAHASHI (Japan Agency for Marine and Earth Science and Technology (JAMSTEC)) .....	45
<b>&lt;Nature Q&gt;</b>	
Cooperation and Cheating in Insect Societies Kazuki TSUJI (University of the Ryukyus) .....	51
<b>&lt;Contribution&gt;</b>	
LNG and Exergy Yoshinori HISAZUMI (Osaka University) .....	56
<b>&lt;Essay&gt;</b>	
Strange Change in Thermodynamics Toshiro MAKINO (Kinki Polytechnic College) .....	62
<b>&lt;Opening-page Gravure:heat-page&gt;</b>	
The K computer Yoshihiro SEKIGUCHI (RIKEN) .....	Opening Page
Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion Mamoru TANAHASHI, Masayasu SHIMURA, Naoya FUKUSHIMA (Tokyo Institute of Technology) .....	Opening Page
<b>&lt;Calendar&gt;</b> .....	67
<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	69
<b>&lt;Note from the JHTSJ Editorial Board&gt;</b> .....	80

第 52 期会長就任にあたって  
*Inauguration Address as the 52nd President*



宇高 義郎 (横浜国立大学)

*Yoshio UTKA (Yokohama National University)*

このたび、門出会長の後を受けて、第 52 期を担当いたします。どうぞよろしくお願い申し上げます。

第 52 期は、学会の区切りとしての第 50 期から 2 年目ということになります。第 50 期には、開始と締めにあたる 2 回の伝熱シンポジウムに挟まれた 1 年の間に、記念式典を始め多くの行事が行われました。それらの中でとりわけ、伝熱学会の 50 年を引っ張ってこられた先生方の記念講演、あるいは伝熱各分野のエキスパートの先生方による研究総括などは、伝熱学会 50 年の伝統が確認され、また自身の記憶に深く残る企画でした。諸先輩方のご努力によって、これまでゆるぎなく成長してきた本学会を、皆様とともに改めて確認することができた年となりました。

同時に第 50 期には、次の 50 年のスタートを切るべく、会長から将来検討が諮問され、その答申においていくつかの提言がなされました。

その骨組みの一つは、伝熱シンポジウムの特別セッションなどでも説明された、特定推進研究課題を実施してゆくことです。本学会の学術活動を社会に積極的に役立て、また本会の活性化を企図するものです。本会の前身の日本伝熱研究会・初代会長小林明先生は会誌に「伝熱工学は非常に多方面の応用対象を持つところにその特色があり、それだけに、その進歩もまた多方面からの寄与によってはじめて可能となるのであって、個々の学会や協会などの局限された範囲にとどまるようでは充分ではありません」と記されています。特定推進研究は、その言葉に通じるような、現代的なレベルでの学際的研究と産業界との連携を進めながら、新規な学術大系の構築・研究領域の開拓、あるいは既存研究の深化・拡大・応用展開を図るものです。

もう一つは、国際展開についてです。周辺国の

発展に伴って、最近の 10 年少々、国際的な研究活性度が低下傾向にあるのが、伝熱分野を含めた我が国の学術界に共通していると言われていきます。世界の中でも特に活発な熱関連の学会と自認している本会のパワーによって、アジアを中心に国際的なプレゼンスを高めてゆくことが急がれるところです。

一方、我が国の内外は激しく動いており、また多くの問題を抱え、厳しい状況が続いています。そのような中、本学会に直接関連するエネルギーの問題はまだまだ不透明な状況で、特に社会的重要性が高まっている事項です。科学技術基本計画などに見られるように、社会からの学術への期待は大きく、エネルギー技術の中核を担っている本学会からの積極的なアクションが期待されるところです。

新たな 50 年のスタートが切られた第 51 期には、新設の国際賞の授与、特定推進研究課題の立ち上げなどが着実に実施に移されてきました。それらを受けて第 52 期では、継続性を重視し、将来検討の提言をさらに確実に、形のあるものに進めることを重要な任務と位置付けております。

さらに、来年の夏には 1974 年の東京開催から 40 年を経て、我が国で再び実施される第 15 回国際伝熱会議については、既に組織委員会、実行委員会、論文委員会などにより、準備が着々と進んでいるところです。学会としても必要な支援をしていくことが重要と考えております。

それらに加えていくつかの課題も存在しておりますが、幸い副会長の近久先生、藤岡様、佐藤先生、あるいは理事、協議員の皆様方は、経験が豊富で有能な方ばかりです。それらの方々と 1 年間ご一緒できますので、安心して会務を進められるものと考えております。会員の皆様方のご理解と暖かいご協力をお願い申し上げる次第です。

第 51 期を振り返って  
The 51<sup>st</sup> Year in Retrospect



門出 政則 (佐賀大学)  
Masanori MONDE (Saga University)

第 50 期の笠木伸英会長の後を受け、第 51 期会長を引き受けて以来、あっという間に 1 年が過ぎ去ったという思いでいます。幸い、笠木前会長が、日本伝熱学会の 50 周年記念事業を成功裏に収められると同時に、次の 50 年に向けての貴重な方針を示されました。その 1 つは、「抜山記念国際賞」の創設です。これは、伝熱学会の国際的プレゼンスの向上と世界の伝熱コミュニティとの連携を深めるための賞です。その 2 は、将来検討委員会からの答申を受けた特定推進研究企画委員会を設置したことです。それは、「特定推進研究」を促進させること、また「アジア地区委員会」を設置して熱研究コミュニティの国際的地位の向上を図り、更に発展させることに取り組もうとしたためです。

「抜山記念国際賞」については、第 1 回授与式を第 3 回国際伝熱フォーラムにて挙行することが出来ました。受賞者である Peter Stephan 博士の受賞記念講演も第 1 回受賞者として最もふさわしい講演内容で、多くの方々から高い評価を受けました。出席者の多くの方々から抜山賞が国際的な賞として今後更に高い評価を受けることを期待するという評価もいただき、ますますの船出となりました。

次に、「特定推進研究」においては、第 52 期会長になられる宇高義郎先生を委員長とした特定推進研究企画委員会メンバーの熱心な検討と努力によって、既に 4 件の研究課題が設定されています。また、シンポジウムにおいて特別企画「エネルギー・環境戦略と特定推進研究による伝熱研究の展開」と題し、2 件の基調講演と 4 件の特別推進研究の研究内容の紹介がありました。基調講演では、研究者が科学者として国際的に果たすべき役割や使命、更には、益々複雑・混迷化しているエネルギー政策に対して伝熱学会に期待される役割について高い視点からの貴重な話題提供がなされました。また、特別推進研究の紹介では、新たな視点

からエネルギーの有効利用を捉えた研究や、地球温暖化問題に対してエネルギーと気象という視点から切り込もうとする研究内容の紹介がありました。現在日本が直面しているエネルギー問題と環境、特に再生エネルギーの今後の動向について社会の要請をどう受け止めるかという時勢を得た企画がなされました。直面するエネルギー問題に向けて、伝熱学会会員一人一人がより前進することを期待しています。また、福島原発事故の収束への道は始まったばかりで、より安全なデブリの冷却技術の確立とその処理に向けて、伝熱学会が果たすべき役割はまだ多く残されています。原子力の安全技術に関わりが深い伝熱学会も責任を持って対応する必要があります。

最後に、学会会員にとって多少耳が痛い内容ですが、この学会が直面している財政について触れておく必要があるでしょう。財務担当の秋吉副会長からも説明があった通り、学会の会費収入と経常支出を比較すると、毎年約 200 万円の赤字体質となっています。その赤字は、国際伝熱フォーラムとシンポジウムでの事業で補填されている状況です。従って、会費の値上げか事業収益を上げることが求められています。もちろん、学会活動を縮減し会員へのサービスを低下させるという方法もあります。財政問題については、会員諸氏のご理解をいただきながら、学会としてより良い方向を見出していくことが求められています。

今後、宇高義郎新会長のリーダーシップの下、会員一丸となって、本学会の使命と役割がより推進されていくことを期待しています。

最後に、石塚勝、秋吉亮、飛原英治の各副会長、理事各位、第 49、50 回日本伝熱シンポジウム実行委員会、各種委員会の委員、支部役員の皆様、会員諸姉兄、並びに事務局の大澤局長、倉水様のご支援ご協力に心からお礼申し上げ、退任の挨拶とさせていただきます。

## 平成 24 年度日本伝熱学会賞選考の報告

*On Selection of Awards of the Heat Transfer Society of Japan, 2012*

表彰選考委員会委員長

石塚 勝 (富山県立大学)

Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)

e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp

平成 24 年度日本伝熱学会賞学術賞, 技術賞, 奨励賞および貢献賞について公募を行い, 所定の手続きにより慎重に審査した結果, 各賞の授賞対象者を下記のように決定した (授賞対象の記載は順不同). 表彰式は, 平成 25 年 5 月 30 日に仙台市 (ウェスティンホテル仙台/仙台トラストシティ) で開催された学会総会において行われた.

### 1. 学術賞

#### Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 代表研究者: 宇高 義郎 (横浜国立大学)

共同研究者: 柏原 雄貴 (東京電力)

尾崎 美智央 (日産自動車)

「核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造」

第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 653-654, 2010.

*International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 222-230, 2013.

2) 代表研究者: 佐藤 洋平 (慶應義塾大学)

共同研究者: 栗山 怜子 (慶應義塾大学)

「自発ラマンイメージング法によるマイクロスケール温度分布非侵襲計測」

第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. III, pp. 493-494, 2012.

*Microfluidics and Nanofluidics*, Online, Nov. 27, 2012.

3) 代表研究者: 中野 雄大 (東京エレクトロン)

共同研究者: 菊川 豪太 (東北大学)

小原 拓 (東北大学)

「脂質二重膜の構造と熱伝導特性」

第 45 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 515-516, 2008.

*Journal of Chemical Physics*, Vol. 133, 154705, 2010.

### 2. 技術賞

#### Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

(該当無し)

### 3. 奨励賞

#### Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 研究者: 岡島 淳之介 (東北大学)

「マイクロチャンネル内強制対流沸騰熱伝達を利用した極細クワイオプローブの冷却特性」

第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. I, pp. 215-216, 2010.

2) 研究者: 渡部 弘達 (東京工業大学)

「噴霧流におけるマイクロ爆発およびパッピング挙動の解明」

第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 629-630, 2011.

### 4. 貢献賞

#### Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 受賞者: 桃木 悟 (長崎大学)

受賞理由: 国際伝熱フォーラム 2012 開催への顕著な貢献

2) 受賞者: 宮崎 康次 (九州工業大学)

受賞理由: 国際伝熱フォーラム 2012 開催への顕著な貢献

3) 受賞者: 坂村 芳孝 (富山県立大学)

受賞理由: 第 49 回日本伝熱シンポジウム開催への顕著な貢献

日本伝熱学会学術賞を受賞して  
*On Receiving Scientific Contribution Award  
 of the Heat Transfer Society of Japan*



宇高 義郎 (横浜国立大学), 柏原雄貴 (東京電力), 尾崎美智央 (日産自動車)  
*Yoshio UTAKA(Yokohama National Univ.), Yuki KASHIWABARA(Tokyo Electric Co.)  
 and Michio OZAKI(Nissan Motor Co.) e-mail: utaka@ynu.ac.jp*

この度、仙台において開催された伝熱学会総会にて日本伝熱学会賞学術賞を会長より授与されました。ご関係の皆様にご感謝いたしますとともに、大変光栄なことと思います。

今回の受賞の対象となった研究は「核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造」と題したものです。プール核沸騰における生成蒸気泡下部の伝熱面上に形成されるマイクロ液膜の存在は、1960年代から指摘されています。そのようなマイクロ液膜の伝熱特性を決める厚さ測定に関する研究は、1980年代まで引き続き発表されてきました。その後は、一部を除いて、マイクロ液膜からの蒸発に関する定量的評価に係る議論はあまり進んできませんでした。また、学会関係の一部の先生からは、「マイクロ液膜蒸発の影響は大きくない」との意見も耳にするところでありました。気液相変化現象において、非定常的なマイクロ液膜の出現が、熱伝達への貢献において重要な役割をもっているだろうと考える私にとっては、その特性を定量的に明らかにする必要性を感じた次第です。

従来のマイクロ液膜構造に関係した測定の方法は2種類に大別されます。一つは、マイクロ液膜を通しての熱伝導による熱移動量に相当する液体蒸発を仮定し、伝熱面の温度変化から厚さを推定する方法です。他は、ニュートンリングとして現れる光干渉の原理を使って、マイクロ液膜厚さを直接測定する方法です。前者の伝熱面温度変化から推量する方法は、伝熱面の温度測定技術に強く依存しますが、近年はMEMS技術によりその方法も進化してきております。また、光干渉法も初期の頃には水銀灯などが用いられていましたが、その後レーザー光の利用により測定精度が向上しています。

従来の研究はそのような状況にあります。また、たまたま我々は2成分蒸気のマランゴニ凝縮あるいはマイクロチャンネル内の沸騰現象など、ミクロン

オーダーの厚さを持つ薄液膜が伝熱に大きく寄与する現象を研究する過程で、レーザーの消光を利用して液膜厚さを測定する方法を開発してまいりました。本研究では、前述の2種類の方法とは異なる点を一つの特徴として、レーザー消光法を核沸騰過程におけるマイクロ液膜厚さ測定に適合させるのも一つだろうと考えました。ただし、これまで対象としてきた現象とは異なり、プール沸騰系ではバルクの液体がレーザー透過を阻害することになるので、その影響を除くための特殊なプローブ構造を開発しました。用いるレーザー光透過性の高い光ファイバーとバルク液体からの保護部品から構成されるプローブを、生成気泡に上方から挿入する形式としました。プローブについては核沸騰気泡の運動を阻害しにくいように、なるべく小さく作りました。

概略、以上のような測定装置に特殊な工夫と、また液膜厚さの測定データ解析を加えて、何とか初期液膜厚さ構造をほぼ確定したかと思っています。しかし、それらの「工夫」を加えるほど、実験測定のスマートさは失われ、装置はだんだんややこしく、扱いにくくなりました。学生泣かせのものに変わってゆき、そのためか結局、今回の論文にたどり着くまで修士課程の大学院生が連続して6人となり、 $6 \times 2 = 12$ 年 (+α)の歳月を要してしまいました。関連の学生さんには苦労もあったと思います。また、指導教員としてもずいぶんと気が長く続いたものだと感じています。

現在は、レーザー光干渉法を用いて、より詳細な研究を進めております。本研究の価値としては、おおよそのマイクロ液膜の構造を明らかにできた点にあると考えていますが、さらなるマイクロ液膜特性およびその核沸騰熱伝達への影響の解明を、今後も引き続き進めてゆこうと考えております。皆様のご指導ご鞭撻よろしくお願いたします。

日本伝熱学会学術賞を受賞して  
*Scientific Contribution Award of the Heat Transfer  
 Society of Japan*



佐藤 洋平, 栗山 怜子 (慶應義塾大学)  
 Yohei SATO, Reiko KURIYAMA (Keio University)  
 e-mail: yohei@sd.keio.ac.jp

このたび仙台市で開催されました日本伝熱学会第 51 期総会におきまして、日本伝熱学会学術賞をいただき、大変光栄に存じております。受賞研究は「自発ラマンイメージング法によるマイクロスケール温度分布非侵襲計測」と題し、次世代の熱流動多変量分布計測の基盤技術確立を目指しております。

流れを全く乱さずに方程式を支配する物理量の時空間分布を精確に捉えることは、実験に携わる研究者にとっては究極の憧れです。20 世紀の終わりには PIV・LIF による同時計測が可能となり、そして 21 世紀に入りマイクロ、そしてナノスケールへの展開が加速され、「熱流体計測技術」は成熟期を迎えたと思われていました。一方、科学技術の融合化、更に横幹化へのシフトとともに、例えば、細胞周りのイオン拡散流束計測や環境デバイス内の界面分子選択輸送計測への拡張が期待されるようになりましたが、依然として粒子や色素等の蛍光プローブ混入は余儀なくされていました。

2004 年にある国際会議で「マイクロ PIV・LIF は万能な計測技術ではない！理想的な流れ場しか扱えないではないか！？」とご指摘を頂いたのが、本研究に着手するきっかけでした。四六時中考えておりましたが、2007 年秋にパリで開催されたマイクロ TAS にて、先駆者である諸先生方が 1980～90 年代に「非線形ラマン散乱」に基づいた計測技術開発に一斉に着手し、やがて撤退されたお話を突然思い出したことが、ブレークスルーでした。そして、レーザとカメラの性能が飛躍的に進歩することが予想できたので、約 5 年後に訪れる「古典回帰（ラマン効果）」と「技術革新（ハードウェア）」とのランデブー（温故知新）を予見し、ラマン散乱に基づいた計測技術開発に着手することができました。

2008 年の開始当初は、分光器を何とか購入して、現有のレーザとカメラで試行錯誤を繰り返してお

りましたが、結果が殆ど得られず、身内からも疑問の声が出るほどでした。しかし諦めずに前進できたのは、

- ①エバネッセント波や共焦点スキャナによる革新的な計測技術開発に成功した自信があったこと
- ②信頼でき、そして信頼してくれた学生に恵まれていたこと

でした。毎日のように学生が失敗した実験結果を見せてくれましたが、やがてその中にヒントが隠されていることに気づき、自発ラマンイメージング法によるイオン群の速度・濃度分布同時計測に成功し、そして温度分布計測（第 49 回日本伝熱シンポジウム、*Microfluid. Nanofluid.*, 2012）も可能となりました。「ラマン効果」とは、物質の分子振動に応じて入射光の振動数（波長）とは異なる散乱光が発せられる現象です。熱流体力学の観点からは、「分子」をトレーサとして扱うことによって、速度、温度や濃度の計測が可能となったばかりではなく、有機溶媒や気体へと、裾野を広げることできます。現在、当研究室では、フェムト秒レーザを用いて気体からの非線形ラマン散乱光を撮像することにより、気体の熱流動計測も可能となっております。

更に最近まで盲亀浮木と考えられていた計測技術と分子動力学計算とのハイブリッド化も不可能ではなくなりました。と申しますのは、両者とも「分子」を対象とすることにより、お互いの時空間スケールのギャップがなくなりつつあるからです。

末筆ではございますが、日本伝熱学会の関係者の皆様方、研究に欠かせない技術、哲学、真摯な態度そして信念を御指導・御鞭撻頂きました慶應義塾大学の菱田公一先生、前田昌信先生（名誉教授）、谷下一夫先生（名誉教授）、小原實先生（名誉教授）、そして困難な研究に果敢に挑んで頂いた卒業生の方々に厚く御礼申しあげます。

日本伝熱学会学術賞を受賞して

*Scientific Contribution Award  
of the Heat Transfer Society of Japan*



中野 雄大 (東京エレクトロン (株)), 菊川 豪太, 小原 拓 (東北大学)  
*Takeo NAKANO (Tokyo Electron Ltd.), Gota KIKUGAWA, Taku OHARA (Tohoku University)*  
*e-mail: takeo.nakano@tel.com*

このたび、日本伝熱学会第 51 期総会におきまして、日本伝熱学会学術賞をいただき誠に光栄であるとともに大変うれしく存じます。受賞対象の研究は、中野が東北大学の修士課程、博士課程で小原・菊川研究室に在籍していた時に取り組んでいた課題で、脂質分子が形成する二重層構造内及び界面における熱輸送特性について分子動力学 (MD) シミュレーションを用いて明らかにしたものです。本賞をいただきましたのも伝熱シンポジウムで研究成果の発表の機会を与えて下さり、様々な方から大変有益なご意見やご助言を賜りましたお陰です。また、ご推薦、ご選考下さいました先生方には厚く御礼申し上げます。

脂質は生体膜を構成する基本要素で、親水基の頭部と疎水基の尾部を持つ両親媒性の分子であり、水中において自己組織化し、尾部に 2 本の炭水素鎖を持つような脂質分子の場合では頭部を水側に向け、尾部同士を向かい合せて膜厚 3~5 nm 程度の安定した二重膜構造を形成しています。そのため 3 次元の流体とは異なり、二重膜中の脂質分子は膜側方へは拡散するものの垂直方向への運動は制限され、特定の配向を持った 2 次元的な性質を持っています。脂質膜は生体由来の材料であるため膜の融合・分裂過程やドラッグデリバリーシステム (DDS) などへの応用として薬物の選択透過性といった物質輸送現象の解析が多く行われています。一方で、生体膜に細孔が開くエレクトロポレーションの過程では熱の効果は重要な因子の 1 つですが十分な理解は得られていません。

また、異方性や特異な界面特性を持つナノスケール構造を利用し、特殊な熱エネルギー伝搬特性を持つデバイスを作ろうとする試みに対して薄膜、ナノワイヤ、超格子など固体材料による微細構造ではフォノンや電子による熱エネルギー伝搬のメカニズムが良く知られ、これらの理論が新規デバイスの開発に大いに貢献しています。しかし、液

体材料やソフトマターについては、ナノスケールではその強い界面力や自己組織化能を利用して、固体材料と同様に微細構造を形成し維持することが出来るにもかかわらず、固体のフォノン伝導理論に匹敵する確立された理論が存在しないことから現象の描像を明らかにする十分な研究が行われてきませんでした。そのため、分子シミュレーションを用いて熱輸送特性の基礎的知見を得ることはこの「未知の領域」に対して意義深いものと考え取り組んできました。

本研究ではリン脂質の 1 つで最も一般的なジラルミトイルフォスファチジルコリン (DPPC) 分子で膜を構成し、膜面に対して、側方方向と垂直方向へそれぞれ 1 次元的な熱流束を与えて温度勾配を発生させる非平衡分子動力学 (NEMD) シミュレーションを用い、熱伝導率を評価し、熱エネルギーの輸送メカニズムについて解析を行いました。膜面に対して垂直方向の二重膜の熱伝導率は、尾部が向かい合った界面において大きな熱抵抗にもかかわらず側方方向の熱伝導率よりも 2.5 倍大きいことがわかりました。脂質単層と比較するとさらに大きく 4.8 倍もの違いが生じています。これは、膜垂直方向への熱エネルギーは比較的脂質分子尾部の配向が揃っているため主に共有結合を介して伝搬するのに対し、側方方向では分子間相互作用による伝搬の割合が増加していることに起因します。このようにソフトマターに対しても特定の配向を持つナノ構造では熱輸送特性の異方性が確認されました。

現在では企業でナノスケール輸送現象の解析に従事しておりますが、「未知の領域」が多く残されており、MD シミュレーションによる輸送現象の研究は、未だに試行錯誤の連続です。今後も本学会で勉強させていただきながら、分子伝熱の産業応用に取り組んでいきたいと考えております。(中野記)

## 日本伝熱学会奨励賞を受賞して

*Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan*



岡島 淳之介 (東北大学)

*Junnosuke OKAJIMA (Tohoku University)*

*e-mail: okajima@pixy.ifs.tohoku.ac.jp*

ウェスティンホテル仙台にて開催された日本伝熱学会第 51 期総会にて、名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。この場を借りまして、これまでにご指導を頂きました諸先生・先輩方、ご推薦頂きました先生、選考委員の先生方に心より御礼を申し上げます。

受賞対象になりました「マイクロチャネル内強制対流沸騰熱伝達を利用した極細クライオプローブの冷却特性」は、私が学生時代に東北大学流体科学研究所の円山重直教授のもとで行った研究であり、外科手術手法の一つである凍結手術をより低侵襲で行うために開発した冷却デバイス（クライオプローブ）の冷却特性評価を行ったものです。

凍結手術とは生体組織を急速に冷却し、凍結させることで病変部を破壊する手法であり、肝臓、腎臓、前立腺、皮膚などのがん治療などに利用されています。一般的なクライオプローブは直径が小さいものでも 1.5mm の棒状であり、決して侵襲性が低いとは言えません。そこでツベルクリン反応検査に用いられる 25 ゲージの注射針（外径 0.55mm）のような冷却器の実現を試みました。細い冷却器、すなわち「極細クライオプローブ」が実現されれば、皮膚の小さなシミやホクロ、シワなどを最小限の傷で凍結させることができ、さらに将来的にはカテーテルや内視鏡と組み合わせることも可能となります。

しかしながら、細くなると、冷媒が流れる流路の流動抵抗が増し流量が低下する上に、体積に対する表面積比が増加、すなわち冷媒の熱輸送量に対してクライオプローブ表面からの伝熱量の比率が増加し、低温を維持することが難しくなります。一般的なクライオプローブは液体窒素の沸騰熱伝達、もしくはアルゴンガスの Joule-Thomson 効果により冷却しておりますが、これらの冷却手法は極細クライオプローブには適しません。本研究では常温の液体フロンを、注射針よりさらに細い毛

細管を用いることで膨張させ、冷却することを考案しました。さらに凍結・融解を含む生体伝熱解析プログラムを作成し、数値計算で凍結手術を模擬し、実現性を検討しました。

このように概念設計はできたのですが、肝心のクライオプローブ自体を作ることにかかなりの時間を要しました。望みどおりの細さを有する毛細管を探すことはもちろんのこと、常温の液体フロンの圧力が 4MPa を超えているため、毛細管の接続部の耐圧が問題となりました。多くの会社に製作の可能性を問い合わせ、最終的にあるステンレスパイプメーカーに依頼し、外径 150 $\mu$ m 内径 70 $\mu$ m の内管と外径 550 $\mu$ m 内径 300 $\mu$ m の外管を作成してもらい、これらで二重管を作り、極細クライオプローブを作ることができました。

作成した極細クライオプローブで様々な実験を行い、また冷媒の状態変化を計算するプログラムを作成し解析し比較することで、内部での冷媒の温度・圧力変化、また流動様相などを明らかにしました。このように新たな冷却デバイスを開発し、その熱流動特性を明らかにするという目標は達成することが出来ました。しかし、実用化はまだされておられません。医療機器の実用化には、動物実験による安全性評価や、臨床試験をクリアする必要があります。まだ多くの壁があります。

現在は、東北大学流体科学研究所の伝熱制御研究分野円山研究室の助教として、血流などを含む生体内の伝熱現象とマイクロスケールの相変化伝熱現象の 2 つの研究をしながら、このクライオプローブの実用化の模索をしております。私は従来型の型にとらわれない分野横断的な研究を心がけていきたいと考えております。若輩者ではございますが、微力ながら伝熱工学の発展に貢献したいと考えておりますので、これからもご指導・ご鞭撻の程、宜しく願い申し上げます。

## 日本伝熱学会奨励賞を受賞して

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



渡部 弘達 (東京工業大学)

Hirotatsu WATANABE (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: watanabe.h.ak@m.titech.ac.jp

このたび、仙台市で開催された日本伝熱学会総会におきまして、日本伝熱学会奨励賞を頂きました。大変光栄であるとともに、今後研究を進める上で大きな励みとなります。御推薦、御選考下さいました先生方ならびに関係者の方々、また日本伝熱シンポジウムで、議論をさせていただいた方々に深く御礼申し上げます。

今回受賞対象となりました「噴霧流におけるマイクロ爆発およびパuffing挙動の解明」は、水と油の乳化物であるエマルジョン燃料噴霧滴のマイクロ爆発やパuffing（蒸気吹き出し）といった二次微粒化現象を、シャドウイメージングにより直接可視化し、50  $\mu\text{m}$  程度の噴霧滴における二次微粒化の発生を明確に示すとともに、二次微粒化が噴霧特性を著しく向上させることを明らかにしたものです。

エマルジョン燃料滴を加熱すると、油中水滴が突沸し、マイクロ爆発やパuffingといった二次微粒化が発生します。これらの現象は、よく知られているのですが、今までは、主に懸垂線を用いた単一液滴実験によって、研究が進められてきました。しかし、液滴を懸垂線に固定する都合上、液滴径が、1 mm 程度になってしまい、噴霧滴よりも大きくなってしまふのが難点でした。かくいう私自身も、東北大学の三浦隆利先生の研究室で博士課程の学生だった頃、この手法でマイクロ爆発の研究を行っておりました。懸垂線を用いますと、液滴位置を固定できるため、加熱中のエマルジョン液滴が、瞬間的に破裂するマイクロ爆発やパuffingを観察することが比較的容易になり、さまざまな検討を行うことができます。懸垂線の影響や、この単一液滴を使用した実験から得られた知見が、大きさの異なる噴霧滴において適用できるかどうかについては検討の余地を残しており、学生だった頃、この点が心残りでありました。

その後、東京工業大学の岡崎健先生の研究室に、

助教として着任し、石炭燃焼と向き合う日々が始まるのですが、石炭燃焼の研究を進める傍ら、噴霧滴でも、二次微粒化は本当に起きるのだろうか？といった、学生の頃、心残りだったテーマを忘れることができず、またシンプルな好奇心から、本受賞対象となった、噴霧流におけるマイクロ爆発およびパuffing挙動の直接可視化に取り組むことに致しました。噴霧の可視化とはいいいましても、高温の気体の中を、高速で飛行する噴霧滴が、あるとき突然、二次微粒化により破裂する瞬間を明確に捉えるのは、一筋縄ではいかず、研究を始めた頃は、可視化方法について試行錯誤を繰り返しました。また、二次微粒化後の液滴形状はランダムかつ非球形で予想が難しく、粒径計測を行う場合、位相ドップラー法などの手法はあまり適しておりません。そこで、シャドウイメージングに着目しました。シャドウイメージングとは、噴霧滴の背面から、光源を照射し、その影を撮影する手法です。手法はシンプルなのですが、二次微粒化のような複雑な挙動を可視化する場合、まさに、シンプルイズベストでして、噴霧滴の内部で、油中水滴が突沸し、気泡が生成した後、二次微粒化が発生するというプロセスの可視化に成功しました。さらに、1 mm 程度のエマルジョン滴と 50  $\mu\text{m}$  程度のエマルジョン滴の二次微粒化挙動の差異の要因が、マイクロ爆発発生までの時間スケールにあることを示し、油中水滴の凝集過程に差異が生じていることを示すことができました。

この受賞は多くの方々に支えられております。博士課程時に御指導を賜りました三浦隆利先生、本研究を進めるにあたり、様々な助言を頂いた岡崎健先生、また本研究をサポートしてくれた研究室の皆様にも深く感謝申し上げます。今後も、伝熱研究ならびに燃焼研究の進展に貢献できるよう精進する所存ですので、御指導のほどよろしくお願い申し上げます。

優秀プレゼンテーション賞 受賞者  
— 第 50 回日本伝熱シンポジウム —  
*Best Presentation Award*

学生会委員会幹事  
田部 豊 (北海道大学)  
*Yutaka TABE (Hokkaido University)*

平成 25 年 5 月 30 日に仙台市 (ウェスティンホテル仙台) で開催されました学会総会において、第 50 回日本伝熱シンポジウム (仙台) 優秀プレゼンテーション賞セッションにて発表を行い、見事優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

2013 年度 受賞者

- ◆ 平塚 将起 (慶應義塾大学)  
「ゲスト - 水分子間相互作用がクラスレート水和物の振動スペクトルに及ぼす影響の第一原理分子動力学シミュレーション」
- ◆ 中川 侑香 (大阪府立大学)  
「透過性壁面乱流におけるスパン方向の流れ構造について」
- ◆ 田中 千歳 (東京大学)  
「矩形細管流路内流動沸騰伝熱の可視化」
- ◆ 青山 祐介 (北海道大学)  
「凍結固定化法を用いた固体高分子形燃料電池における MPL 内水輸送現象の CRYO-SEM 観察」
- ◆ 小野 公德 (東北大学)  
「カーボンナノ粒子製造プロセスにおける粒子核生成速度および濃度に関する反応温度の最適化」  
(順不同)



平塚さん



中川さん



田中さん



青山さん



小野さん



優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景



優秀プレゼンテーション賞受賞者との記念撮影

平成 25 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰  
*The Commendation for Science and Technology by the Ministry of  
Education, Culture, Sports, Science and Technology 2013*

表彰選考委員会委員長  
石塚 勝 (富山県立大学)

Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)  
e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp

平成 24 年 5 月に表記の大臣表彰候補者について公募があり、本学会は表彰選考委員会での選考を経て候補を推薦した。その結果、下記の若手科学者賞の 1 件について授賞が決定された。平成 25 年 4 月 16 日に文部科学省において表彰式が執り行われ、本学会においては第 50 回日本伝熱シンポジウム (仙台) の総会において、受賞者に登壇してもらい、受賞の披露を行った。以下に受賞対象に関連する業績概要を紹介する。なお受賞者一覧などは

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/25/04/1332785.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/25/04/1332785.htm)  
をご参照いただきたい。



塩見 淳一郎 氏

【若手科学者賞】  
*Young Scientists' Prize*

分子シミュレーションを用いたナノ構造の熱物性の研究

塩見 淳一郎 (東京大学)

### 業績内容

炭素ナノ材料は高い熱伝導が期待されてきたが、その機構の詳細や実用環境での頑強性が不明であることが材料開発や工業応用におけるボトルネックとなっていた。また、熱電変換材料の材料設計のためには高精度の解析が必須であるが、第一原理に基づくフォノン輸送解析技術は電子のそれと比較して未発達であった。

そこで受賞者は、非定常熱伝導や熱伝導率のサイズ効果の計算を通じて炭素ナノ構造の非フーリエ熱伝導特性を示し、構造欠陥や周囲環境のフォノン輸送特性への影響を明らかにした。さらに、熱電変換材料のフォノンモードごとの熱伝導率への寄与を評価し、ナノ構造化や合金化における最適なナノ粒界サイズや混合比を同定することで、高性能材料の設計指針を示した。

これらの研究は、従来の分子動力学法を発展させて炭素ナノ材料のフォノン輸送やそれへの環境効果を明らかにしたものであり、分子動力学法の基礎物理および工学研究への有用性を大きく高めたことが高く評価される。また、第一原理に基づく熱伝導解析を実現し、さらに合金化やナノ構造化の影響にまで発展させた研究成果は、長年希求されていた原理原則に基づく熱電変換材料の開発を実現しており、応用展開に向けて非常に大きなインパクトをもつものである。

### 主要論文：

“Non-Fourier heat conduction of single-walled carbon nanotubes”, *Physical Review B*, pp. 155401-1~6, 2006 年 5 月発表。

“Thermal conductivity of half-Heusler compounds from first principles calculations”, *Physical Review B*, pp. 104302-1~9, 2011 年 9 月発表。

## 第 50 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 50<sup>th</sup> National Heat Transfer Symposium of Japan

圓山 重直 (東北大学), 小宮 敦樹 (東北大学)  
小澤 守 (関西大学), 田部 豊 (北海道大学)

Shigenao MARUYAMA, Atsuki KOMIYA (Tohoku University)  
Mamoru OZAWA (Kansai University), Yutaka TABE (Hokkaido University)

### 1. シンポジウム概要

第 50 回日本伝熱シンポジウムが、平成 25 年 5 月 29 日 (水) から 5 月 31 日 (金) にかけて、宮城県仙台市 (会場: ウェスティンホテル仙台およびトラストシティカンファレンス仙台, 図 1 参照) で開催されました。東北地区の仙台で日本伝熱シンポジウムが開催されるのは今回で 7 回目となります。シンポジウムの開催にあたり日本学術会議、仙台観光コンベンション協会による後援の他、23 学協会の共催・協賛を受けることができました。



図 1 シンポジウム会場

2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災から約 2 年余りが経ちました。仙台市内は平常を装っていますが、東北沿岸部での復興は依然として進んでいません。本会議によって、この様な東北地方の現状を参加者に知っていただくことも重要と考えています。

今回の会場は参加者の利便性を考え、仙台市中心部のホテルといたしました。会員参加費は前回と同額にしましたので、諸会議を会場近くの東北大学流体科学研究所で開催したことや、会場の都合で一部の部屋が手狭で立ち見が出るなど、ご不便をおかけしたことをお詫び申し上げます。

今回のシンポジウムにおける講演論文数は 351 件となり、参加者の総数は事前・当日登録を併せて 710 名となりました。初日の午後には、企画部学生会の先生方の協力のもと、優秀プレゼンテーション賞セッション行われました。2 日目にはメイン会場の A 室で特定推進研究特別セッションが開催され、基調講演および特定推進研究の 4 テーマについての報告・議論が行われました。午後には東北大学加齢医学研究所の川島隆太教授による「スマート・エイジング ～脳科学の研究成果を社会実装する～」という題目の特別講演が開催され(図 2 参照), 300 名超の参加者が集いました。



図 2 川島隆太教授による特別講演

総会後の懇親会では 321 名の方々に参加いただきました。ここでは東北 6 県の実行委員が持ち寄った銘酒を並べた「東北銘酒コーナー」(図 3 参照)を設け、東北の味を楽しんでいただきました。

今回のシンポジウムでも多くの企業から、機器展示等のお申し込みをいただきました。ご協力いただきました企業各社に御礼申し上げます。また、第 49 回日本伝熱シンポジウム (富山) 実行委員会 (委員長石塚勝先生) の皆様、特に富山県立大学の坂村正孝先生、島山友行先生には運営・準備に関して多くの助言を賜り感謝申し上げます。

以上、第 50 回日本伝熱シンポジウムの概要をまとめさせていただきますが、シンポジウムの運営状況や各行事についての詳細は、担当者による以下の記述をご覧ください。

(実行委員長 圓山重直, 幹事 小宮敦樹)



図 3 懇親会での「東北銘酒コーナー」

## 2. プログラム

今回のシンポジウムの発表件数総数は 351 件で、前回の富山 (371 件) や前々回の岡山 (374 件) より若干少ない件数となりましたが、セッションでの討論は例年通り活発でした。オーガナイズドセッションは「水素・燃料電池」・「燃焼研究の最前線」・「非線形熱流体現象と伝熱」・「蓄熱・ヒートポンプ技術と熱・物質移動」で、69 件の発表がありました。

実行委員会では講演者の方々には申し込み時に希望セッションを選んでいただき、プログラム編成を行いました。特に 3 日目の午後のセッションは仙台空港発の航空機の出発時刻も考慮しながら編成しております。プログラムの全体的なバランスについては、実行委員会のプログラム担当で意見を出し合い、過去のデータを参考にして参加者が一部屋に集中しないように考慮いたしました。プログラムの取り纏めおよび論文集の準備等は、岡島淳之介実行委員 (東北大学) にご尽力いただきました。最後に各セッションの座長選出には、実行委員会をはじめ多くの皆様にご協力をいただきましたことを御礼申し上げます。

(小宮敦樹)

## 3. 講演論文集・CD-ROM・プログラム冊子 配布いたしました講演論文集・CD-ROM・プロ

グラム冊子はこれまでのシンポジウムと同様のデザインで作成をいたしました。表紙には仙台市を象徴する伊達政宗騎馬像 (名札にも使用) を採用し、二分冊での冊子といたしました。学会理事会での決定により、シンポジウムでの講演論文集 (冊子体) の配布が今回で最後となり、次回以降は CD-ROM とプログラム冊子のみとなります。

今回は企業広告 (15 社) をプログラム冊子に掲載しました。ご協力いただきました企業各社には改めて御礼申し上げます。

(小宮敦樹)

## 4. 会場・受付

前回の仙台大会 (第 42 回) では、中心部より離れた仙台国際センターで開催をいたしました。今回のシンポジウムでは、参加者の皆様に歩いて会場に来ていただけるよう、仙台中心部の「ウェスティンホテル仙台」を確保し開催いたしました。市中心街のホテルということもあり、会場使用料が高額となりましたが、ホテル側と交渉し、何とか開催できるようになりました。また、会員参加費を前年と同額にするために、多くの会議用機材を会場近くの東北大学流体科学研究所から借用搬入するなどし、経費節減を行いました。

初日の受付では、初日に多くの参加者が来られることを予想し、計 5 箇所受付業務を対応いたしました結果、混雑することなく初日の受付業務を終えることができました。

今回のシンポジウムでは、会場が大きく 2 箇所に分かれてしまうことが大きな問題点でしたが、立て看板等を設置することで参加者の混乱を避けるようにいたしました。しかし、初日は会場に迷う参加者が若干おられました。ここにお詫び申し上げます。2 日目以降は大きな混乱もなくシンポジウムを進めていくことができました。

(小宮敦樹)

## 5. 日本伝熱学会特定推進研究特別セッション 「エネルギー・環境戦略と特定推進研究による伝熱研究の展開」

東日本大震災に伴う福島第一原発事故に端を発して、我が国のエネルギー計画は大きな見直しを迫られています。原発の停止する中で、化石資源依存度が増加し、輸入燃料費とともに CO<sub>2</sub> 排出量

も増加しています。現状では政府のエネルギー戦略も見通しが立っておらず、我が国の産業界、国民すべてにわたって大きな岐路に立っているといつて過言ではないでしょう。その中であって日本伝熱学会はエネルギーの高効率利用、省エネルギーは勿論のこと熱科学・熱技術の新たな展開をも志向しつつ、学会独自の特定推進研究を選定し、その活動を開始しました。今回、伝熱シンポジウム実行委員会にお願いして、題記の特別セッションを5月30日(9:30-11:35)に開催させていただきました。本特別セッションでは特定推進研究企画委員会からの全体説明に続いて、エネルギー、環境分野でご活躍の二人の講師に加えて、4つの特定推進研究の代表者から各課題の概要をご紹介いただき、ご参加の皆様とともに伝熱研究の将来像などについて意見交換を行いました。本特別セッションにおいて提供された話題は以下の通りです(敬称略)。

#### 開催趣旨説明

- ・「日本伝熱学会『特定推進研究』について」

宇高 義郎(特定推進研究企画委員会委員長、横浜国立大学)

#### 基調講演

- ・「我が国の研究開発戦略と伝熱研究への期待」

笠木 伸英((独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター上席フェロー)

- ・「未利用熱の活用技術研究開発の最新動向(国のプロジェクトを中心に)」

小原 春彦((独)産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門 副研究部門長)

#### 特定推進研究の紹介

- ・「波長選択ふく射輸送とエネルギー変換」

花村 克悟(東京工業大学)

- ・「エネルギー極限利用のための大フラックス輸送ダイナミクス」

鹿園 直毅(東京大学)

- ・「気候モデルにおける重要要素に関する基礎的検討と非専門家への翻訳、さらにその予測精度の評価に向けた検討会」

吉田 英生(京都大学)

- ・「伝熱工学が作る医療機器の新展開」

谷下 一夫(早稲田大学)

各講演者から大変熱のこもった、また貴重な話題が語られ、非常に有意義な会合になったと思

います。本セッションは伝熱シンポジウムの中で最も大きい会場を使わせていただきました。企画担当者として、折角大きな会場をご用意いただいたのに参加者が非常に少なければどうしようといった危惧もありましたが、用意しました配布資料200部のうち50部程度の残部が出ただけで、約150人もの方々にご参加いただきました。他の部屋では通常のセッションが並列して進行していたにも関わらず、このように多数の方々に参加いただいたことは、伝熱研究の将来のあり方にご関心を持たれている方が多いことの傍証でもあらうと推察しております。本特別セッションを企画いたしました特定推進研究企画委員会といたしまして、ご参加いただきました各位に心より感謝する次第です。

最後になりましたが、圓山先生を始めとする伝熱シンポジウム実行委員会の皆様並びに本企画にご賛同いただきご登壇いただきました関係各位に心より感謝申し上げます。

なお、本特別セッションにおきまして配布いたしました資料につきましては本会ホームページに掲載しておりますので、当日、ご参加いただけなかった方々にも是非一度ご覧いただければ幸いです。

(特定推進研究企画委員会 小澤 守)

#### 6. 優秀プレゼンテーション賞セッション

本セッションは、本学会会員である学生や若手研究者をエンカレッジする場として、毎年、シンポジウムの場を借り、学生会委員会(現委員長:齊藤卓志)が企画・運営しているものです。今期の講演申込みは35件でありました。近年の減少傾向にも歯止めがかかり(昨年度は34件)、これからの継続性、さらなる盛り上がりを期待できると考えております。

シンポジウム初日、4室に分れたショートプレゼンテーション(各講演3分)とそれに続く80分間のポスターセッションの形式で例年通りに行われました。いずれの発表もレベル・意欲ともに非常に高く、学生プレゼンテーション賞に向けて、研究室の代表として十分に準備がなされたものであると感じました。また、ポスター会場は、最後の最後まで大勢の方々が大盛況であり、通り抜けることも困難なほど、また終了時間が過ぎても質

疑討論が終わらないほどの熱気で溢れていました。発表者も、時間を忘れて真摯にかつ熱心に自分の研究を説明していました。

発表について、審査員スコアおよびポスター会場における投票を学生会委員会にて慎重かつ厳正に検討した結果、平塚将起（慶應義塾大学）、中川侑香（大阪府立大学）、田中千歳（東京大学）、青山祐介（北海道大学）、小野公德（東北大学）、（敬称略/順不同）以上の 5 名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました。惜しくも受賞に至らなかった発表者も全体的に非常に良い発表をしているとの感想を多くの関係者からいただきました。

末筆ながら、お忙しい中、困難な審査を長時間にわたり親切かつご丁寧に行っていただいた審査員の皆さまに、そして多大なご協力をいただいたシンポジウム実行委員会に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

（学生会委員会 田部豊）

### 7. あとがき

今回、伝熱シンポジウムを東北地区でお引き受けするにあたって、実行委員会はオール東北で組織していこう、との言葉が実行委員長よりあり、その言葉の通り、東北 6 県の実行委員メンバーが丸となって準備を進めてまいりました。圓山実行委員長のもと、多方面の先生方からご指導を賜り、また、ご参加いただきました参加者の皆様のご協力によって、5 月 31 日 16 時に無事にシンポジウムを終えることができました。厚く御礼申し上げます。

実行委員の東北地区の皆様には、プログラム編成、懇親会イベントの依頼、当日の会場係としての活動等、事務局からの依頼に対して快く引き受けてくださり、かつ迅速な対応をしていただき、大変感謝しております。また、前日の準備からアルバイトとして働いてくれた学生諸君は、自ら仕事を見つけて積極的に動いていただき、とても感謝しています。御礼申し上げます。

現在、シンポジウムの後処理を行っており、まだまだ落ち着くことはできませんが、今回のシンポジウムで培ったこと、次回へ繋げるべきことを整理し、第 51 回の浜松メンバーへバトンタッチしたいと思います。

（小宮敦樹）

### 第 50 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

顧問	相原 利雄	(東北大学名誉教授)
	太田 照和	(東北大学名誉教授)
	戸田 三朗	(東北大学名誉教授)
委員長	圓山 重直	(東北大学)
副委員長	小原 拓	(東北大学)
	廣瀬 宏一	(岩手大学)
幹事	小宮 敦樹	(東北大学)
委員	鎌田 長幸	(八戸工業高等専門学校)
	大黒 正敏	(八戸工業大学)
	野田 英彦	(八戸工業大学)
	稲村 隆夫	(弘前大学)
	麓 耕二	(弘前大学)
	若嶋 振一郎	(一関工業高等専門学校)
	福江 高志	(岩手大学)
	須知 成光	(秋田県立大学)
	野沢 正和	(秋田工業高等専門学校)
	足立 高弘	(秋田大学)
	田子 真	(秋田大学)
	泉 正明	(石巻専修大学)
	島田 了八	(石巻専修大学)
	星 朗	(東北学院大学)
	青木 秀之	(東北大学)
	伊賀 由佳	(東北大学)
	伊藤 悟	(東北大学)
	江原 真司	(東北大学)
	大平 勝秀	(東北大学)
	岡島 淳之介	(東北大学)
	菊川 豪太	(東北大学)
	斎藤 泰洋	(東北大学)
	杉岡 健一	(東北大学)
	滝田 謙一	(東北大学)
	塚田 隆夫	(東北大学)
	徳増 崇	(東北大学)
中田 俊彦	(東北大学)	
中村 寿	(東北大学)	
橋爪 秀利	(東北大学)	
丸田 薫	(東北大学)	
宮田 一司	(東北大学)	
遊佐 訓孝	(東北大学)	
伊吹 竜太	(宮城大学)	
矢野 歳和	(宮城大学)	
赤松 正人	(山形大学)	
奥山 正明	(山形大学)	
高橋 一郎	(山形大学)	
門叶 秀樹	(山形大学)	
安原 薫	(山形大学)	
横山 孝男	(山形大学)	
東 之弘	(いわき明星大学)	
佐々木直栄	(日本大学)	

## スーパーコンピュータのトレンド

### Trend of Supercomputer

庄司 文由 (理化学研究所)

Fumiyoshi SHOJI (RIKEN)

e-mail: shoji@riken.jp

### 1. はじめに

スーパーコンピュータは、ものづくりや自然科学の研究の現場で、もはや無くてはならない存在となっている。例えば自動車の設計においては、車体の空力特性や衝突時の変形の解析など、開発期間の短縮とコストの削減に大きく寄与している。また、大気と海洋について精緻なモデルを構築し、数十年あるいは数百年後の地球の気候を予測したり、心臓を仮想的にコンピュータ上に再現し、疾患の原因を推定したり、その影響を評価するなど、その応用範囲は今後ますます広がっていくと考えられる。

日本においては、富士通 (株) と (独) 理化学研究所が共同で開発したスーパーコンピュータ「京」[1][2][3][4]が、政府の事業仕分けの対象となり大きく報道されたことや、その後 2011 年 6 月と 11 月に世界一を達成したことで、スーパーコンピュータの認知度は大きく向上した。

一方、トップレベルのスーパーコンピュータの演算性能は、指数関数的に上昇を続けているが、その中身を詳細に見ていくことで、近年のスーパーコンピュータ開発のトレンドが見えてくる。

本稿では、スーパーコンピュータ「京」を含めた近年のランキング上位のスーパーコンピュータをさまざまな角度から分析することで、最近のスーパーコンピュータ開発のトレンドを明らかにすると共に、今後の開発の方向性を考察する。

最初に、トップレベルのスーパーコンピュータ演算性能の推移を概観したのち、演算性能には直接影響しないメモリ容量、メモリ帯域幅のトレンドを分析する。また、近年特に重要視されている消費電力の傾向も併せて分析する。

最後に、スーパーコンピュータのアーキテクチャの種類とそれらの特徴を分析し、今後のスーパーコンピュータの開発の方向性について言及する。

### 2. 近年のスーパーコンピュータのトレンド

#### 2.1 演算性能 (LINPACK 性能)

図 1 は、TOP500 リストの 1 位のスーパーコンピュータの演算性能の推移である。

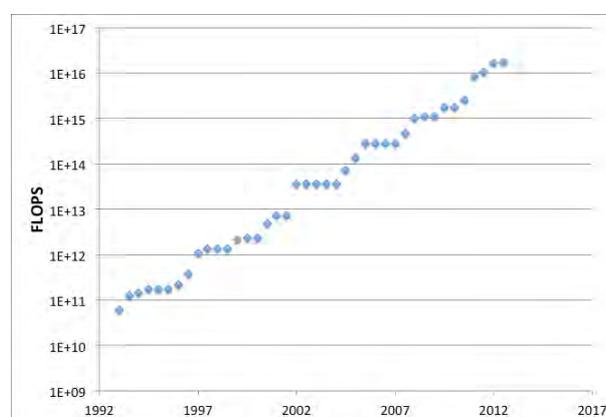


図 1 TOP500 リストの No.1 の演算性能の推移

TOP500 リストとは、世界のスーパーコンピュータの上位 500 位までのランキングで、6 月と 11 月の年 2 回更新される[5]。ランキングの指標となるのは、LINPACK と呼ばれる大規模連立一次方程式を解くベンチマークソフトを実行した際の演算性能である。

1993 年以来、世界一のスーパーコンピュータの演算性能は、年率で 1.9 倍以上という猛烈なペースで上昇を続けている。これは半導体の集積度が 18 ヶ月で 2 倍になるというムーアの法則 (Moore's law) をも上回っている。これはすなわち、トップレベルのスーパーコンピュータの性能向上は、半導体集積度の向上だけでは説明できないことを意味する。これについては、2.3 で詳述する。

#### 2.2 国 (地域) 別に見た傾向

図 2 は、米国、中国、ヨーロッパ、日本のそれぞれにおける最も速いスーパーコンピュータが世界の中で何位だったかを示したグラフである。そ

それぞれの国（地域）におけるスーパーコンピュータの開発戦略が垣間見えて興味深い。

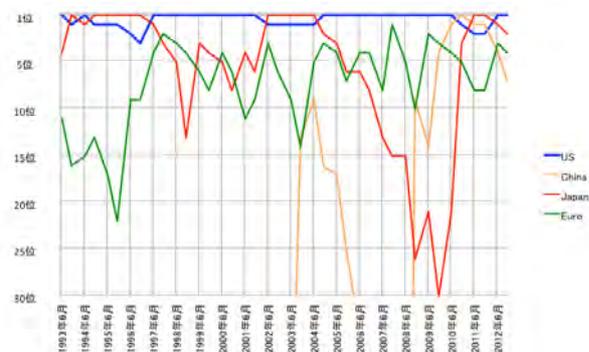


図 2 主要各国（地域）の No1 マシンの TOP500 におけるランキングの推移

米国は、1995年に始まったASC計画をはじめとして、国を挙げてスーパーコンピュータの開発を強力に推進してきた。その結果、米国製のスーパーコンピュータは、1993年以降のほとんどの時期で世界の座を保持しており、それらを開発・製造したIBM, Crayといった米国スーパーコンピュータベンダは世界のスーパーコンピュータ市場をリードしている。

中国は、これまでこの分野でほとんど注目されて来なかったが、2008年頃から積極的な投資を続け、急速にランキングを上げてきた。その結果、2010年11月に天河1A(Tianhe-1A)で初めての世界一を達成した。天河1Aは、構成する大部分のパーツは米国製で、ノード間を結合するネットワークと制御用CPUのみが自国製だったが、近年は、国内で設計製造したCPUを用いたシステムで1ペタフロップス規模のシステムを構築するなど、スーパーコンピュータを構成するための要素技術の蓄積が急速に進んでいる。

ヨーロッパは、CPUやネットワークなどの要素技術は持たないため、演算性能で世界一を目指すことはせず、応用の部分に注力するという戦略を一貫して推し進めてきている。近年はPRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe)という組織を中心として、ヨーロッパ全体を俯瞰したスーパーコンピュータの重層的な配備や計算資源の相互利用等が進められている[6]。

一方日本は、1993年から1996年頃にかけて、旧航空宇宙技術研究所（現（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）と富士通（株）が開発した数値

風洞や、筑波大学と（株）日立製作所が開発したCP-PACS等で世界一となり、この分野を席卷していたと言って良い。その後ややランキングを下げたものの、2002年に旧海洋科学技術センター（現（独）海洋研究開発機構）とNECが開発した地球シミュレータで世界一となり、5期に渡りその座を維持した。しかし、国家プロジェクトとして世界トップクラスを狙えるようなスーパーコンピュータの開発が途絶えたため、ランキングが急速に低下し、2009年には日本で最速のスーパーコンピュータがTOP500の上位30位にも入らないという極めて深刻な事態となった。その後、東京工業大学のTSUBAME2.0が2010年11月にランキング4位を獲得し、続いて「京」が2011年6月および11月にランキング1位となったことで、ようやく世界に伍するところまで回復することができた。

このように、日本においては、国が主導するプロジェクトによる集中的な開発により、この分野における競争力を維持してきたという側面があり、今後も国としてスーパーコンピュータ技術を維持・発展をしていくためには、開発プロジェクトを継続的に立ち上げていくことが重要である。

### 2.3 システムを構成するコア数

図3は、TOP500の上位10位の過去10年間のデータから抽出した、システムを構成する総コア数の推移である。

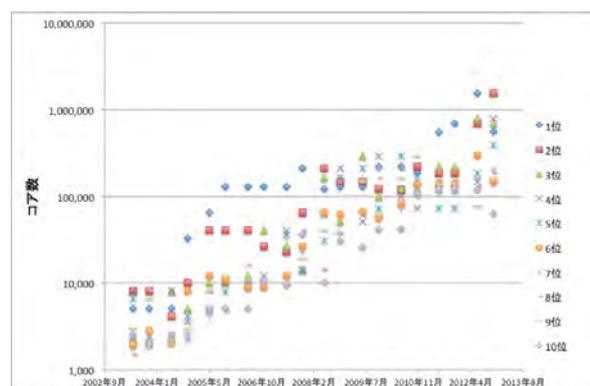


図3 システムを構成するコア数の過去10年間の推移（TOP500 上位10位のシステムについて集計）

2.1で、TOP500上位のシステムは、ムーアの法則を上回るスピードで演算性能が向上しているこ

とに触れたが、これはすなわちシステムを構成するための半導体 (=CPU (Central Processing Unit)) の数を増加させながら性能を上げていることを意味する。実際に、かつてはひとつの CPU で構成されていたスーパーコンピュータが複数の CPU を搭載した並列型となり、さらに最近では数千、数万、数十万規模の CPU を搭載したシステムも登場している。図 3 から、システムを構成する総コア数が急激に増加していることがわかる。ランキング 1 位のマシンのコア数の増加率は、年率で約 1.6 倍となっており、コア数の増加が演算性能の向上に大きく寄与していることがわかる。

コア数の増加は今後も続くと考えられているが、その場合に重要となるのが、高密度の実装技術と、それに伴う熱集中に対応できる冷却技術である。

## 2.4 メモリ量

次にシステムが搭載するメモリ量の推移を見る。メモリ搭載量が多ければ多いほど、より大きな系の計算をより少ない CPU (ノード) 数で実行できるため、利用者から見た利便性は向上する。ただ、メモリを増設することにより、コストや消費電力が増加する一方で、演算性能の向上に対する寄与は限定的である。(LINPACK は、より大きな元数で測定した方が高い実効性能になるが、測定時間が元数の 3 乗で増えるため、故障発生リスクが増えるなど、メモリ増設の効果は見えにくい)。

結果として、TOP500 の上位にランクされるような大規模なスーパーコンピュータの場合、演算性能に対する搭載されるメモリ量は減少する傾向にある。

ここでは、TOP500 の登録データのうち、 $N_{max}$  を用いてメモリ量の傾向を見る。 $N_{max}$  は LINPACK で解く連立一次方程式の元数を指定するパラメータだが、LINPACK 実行時の使用メモリ量はおよそ  $N_{max}^2$  に比例すること、多くのシステムでは LINPACK 測定時に搭載メモリ量のほとんどを使うように  $N_{max}$  を決めることから、 $N_{max}^2$  から搭載メモリ量の傾向を推定することが可能と考えた。

図 4 は、 $N_{max}^2$  を各システムの理論演算性能で割ったもの、すなわち、近似的に性能あたりのメモリ搭載量と解釈できるものの推移である。

グラフが示す通り、全体として右肩下がりで推移しているが、これは既に述べたようにメモリを

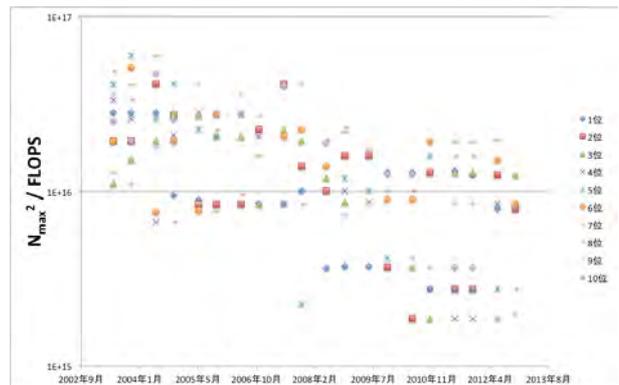


図 4 理論演算性能あたりの  $N_{max}^2$  の推移

増量することで得られるメリット(利便性の向上)に対し、デメリット(コスト増、消費電力増等)の方が大きいと考えられる。

また、2008 年頃から、性能あたりのメモリ搭載量が特に少ないグループがグラフに現れるが、これらは、グラフィックス処理用に開発されてきた GPU (Graphics Processing Unit) を汎用的な計算に用いる GPGPU (General Purpose GPU) 等を搭載したアクセラレータ型スーパーコンピュータである。アクセラレータの場合、構成上アクセラレータボード上のメモリ容量が少なく、汎用型スーパーコンピュータと比較すると、性能に対するメモリ容量が小さくなるケースが多い。

## 2.5 メモリ帯域幅

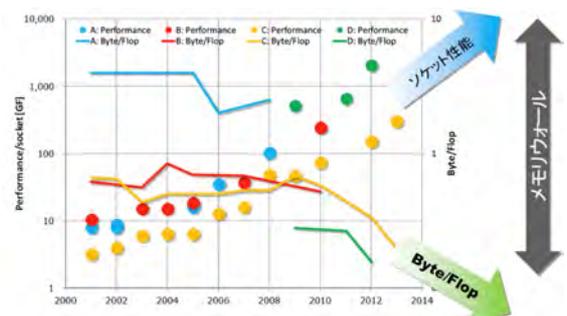


図 5 単体 CPU の性能とメモリバンド幅の推移 (文部科学省 今後の HPCI 計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ (第 3 回) 配布資料[7]より)

スーパーコンピュータでアプリケーションプログラムを実行する際、CPU の演算性能がいくら高くても、演算で使用するデータの供給が追いつかなければ高い実効性能は得られない。その意味で、

メモリバンド幅は、データ供給能力に直結する極めて重要な性能要件である。

図5は、4つCPUベンダが製造したCPU単体の演算性能と、メモリバンド幅を演算性能で割ったもの(Byte/FLOP)の推移である。CPU単体の性能(=ソケット性能)が急速に向上する一方で、Byte/FLOPは特に近年右肩下がりとなっていて、メモリバンド幅の性能向上がCPUのそれに追いついていないことを示している。LINPACKのようにオンチップメモリを有効に活用できるため、メモリバンド幅に対する要求が高くない場合は影響が少ないが、流体計算のような高いメモリバンド幅が必要となるアプリケーションは、十分な実効性能を得にくくなってきている。

その一方で、Byte/FLOPを維持するには、消費電力や設置面積の増加が避けられないため、メモリバンド幅が相対的に小さくなる傾向は今後も続くものと見られている。

## 2.6 消費電力

スーパーコンピュータの消費電力は、近年特に注目されており、消費電力あたりの演算性能でランキング付けをするGreen500というプロジェクトが注目を集めている[8]。

2.3で述べたように、スーパーコンピュータの構成は大規模化・複雑化の方向に向かって進んでおり、このままでは構成が大きくなるにつれて消費電力が増加してしまう。しかし、システム全体の消費電力が数十MWクラスとなると、電気料金や受電設備の問題から、現実的な運用が困難になるという状況に直面する。

そのため、次のマイルストーンであるエクサフロップス級のスーパーコンピュータの開発では、低消費電力化が極めて重要な課題のひとつとして認識されている。

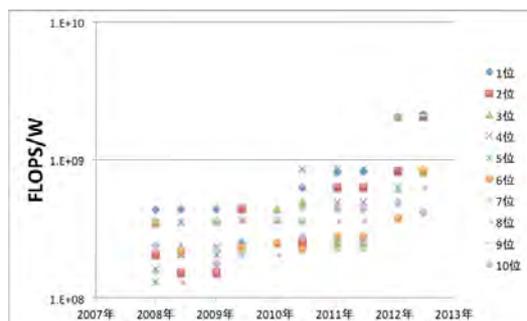


図6 ワットあたりの演算性能の推移

図6は、各システムのLINPACK性能を測定時の消費電力で割ったものである。この値が大きいほどより少ない電力で高い演算性能が得られることを意味する。

集計が始まった2008年からの4年間で、No.1のシステムで見ると約5倍の電力効率の改善が達成されており、低消費電力化が急速に進展していることがわかる。

GPGPU等のアクセラレータ型は、メモリ帯域幅やメモリ容量が少ないことが、逆に電力効率の面では有利に作用するため、Green500の上位のほとんどはアクセラレータ型スーパーコンピュータである。

## 2.7 機器構成について

既に述べたGPGPUに加え、多数のコアを高密度に集積したMIC (Many Integrated Core) もアクセラレータとして普及が進んでいて、最新のTOP500リスト(2012年11月)では、上位500台中53台がアクセラレータを搭載したタイプとなっている。

このようなアクセラレータ搭載型スーパーコンピュータは、CPUとアクセラレータで別々のメモリ空間を意識したプログラミングが必要となるため、既存ソフトウェアのポータビリティや、新規のアプリケーション開発の際の困難さ等がある一方で、既に述べたように優れた省電力性を持つことなどから、スーパーコンピュータのアーキテクチャとしてその重要性が増してきている。

## 2.8 「京」の優位性について

ここでは、これまで見てきた指標の観点から、「京」といくつかのスーパーコンピュータを比較し、「京」が優位な部分とそうでない部分について考察したい。

表1 最近のTOP500ランキング上位の状況

順位	2011年6月		2011年11月		2012年6月		2012年11月	
	システム名(国)	演算性能	システム名(国)	演算性能	システム名(国)	演算性能	システム名(国)	演算性能
1	K computer(日)	8.16	K computer(日)	10.51	Summit(米)	16.32	Titan(米)	17.59
2	天海1A(中)	2.57	天海1A(中)	2.57	K computer(日)	10.51	Singapore(米)	16.32
3	Ugandara(米)	1.76	Japan(米)	1.75	Mira(米)	8.16	K computer(日)	10.51
4	星雲(中)	1.27	星雲(中)	1.27	SuperM100(韓)	2.90	Mira(米)	8.16
5	TSUBAME200(日)	1.19	TSUBAME200(日)	1.19	天海1A(中)	2.57	ARGON(韓)	4.14

表1は、「京」が初めて世界一になった2011年6月から直近の2012年11月までのランキングの

推移をまとめたものである。「京」は2期連続で世界一になった後、米国ローレンス・リバモア国立研究所の Sequoia や米国オークリッジ国立研究所の Titan に抜かれ、徐々にランキングを下げてきている。

しかし、2.1 で述べたように、TOP500 の No.1 マシンの演算性能の向上が年率 1.9 倍以上であることから、時間が経てば後発のマシンに追い抜かれるのは必然だったと言える。

一方、その他の指標はどうだろうか。最新のランキングで1位の Titan と2位の Sequoia と「京」を、LINPACK 性能、LINPACK の実行効率、演算性能あたりのメモリ容量、演算性能あたりのメモリバンド幅、演算性能あたりの通信バンド幅と比較する。

表2 Titan, Sequoia と「京」の比較

システム名	Titan	Sequoia	「京」
LINPACK性能 (PFLOPS)	17.59	16.32	10.51
LINPACKの実行効率(%)	64.8	81.1	93.2
演算性能あたりのメモリ容量 (TB/PFLOPS)	25.7	76.3	122.1
演算性能あたりのメモリバンド幅 (B/FLOP)	0.2	0.2	0.5
演算性能あたりの通信バンド幅 (B/FLOP)	0.019	0.10	0.39

表2に示す通り、「京」は、LINPACK 性能では劣るものの、それ以外の LINPACK 実行効率、メモリ容量、メモリバンド幅、通信バンド幅、すなわち利用者から見た利便性に関わる指標で圧倒的に優位である。つまり「京」は、実際のアプリケーションを実行した際に、高い実行効率を出しやすい使いやすいスーパーコンピュータであると言える。

その証拠に、実際のアプリケーションを使った大規模シミュレーションの成果で競うゴードン・ベル賞において、「京」を用いた論文が2011年と2012年に連続して受賞している。特に2012年は、ランキングで「京」よりも上位の Sequoia を用いた論文を抑えての受賞であり、実際のアプリケーションで真価を発揮する「京」の特徴が端的に表れた成果であると考えている。

### 3. TOP500 についての考察

TOP500はLINPACKという単一の指標で評価するため、計測が容易でエントリーしやすい。実際に

世界の主要なスーパーコンピュータはほとんどすべて登録されており、1993年からの蓄積もありデータベースとしての価値が非常に高い。

また、シンプルで曖昧さが少ないため、スーパーコンピュータに詳しくない業界以外の人にも理解しやすい。以上の背景から、数あるスーパーコンピュータ向けのベンチマークの中でも特に重要なものとの認識が定着し、最近では年2回のリストの更新の際、一般向けのニュースで取り上げられることも少なくない。

その一方で、LINPACKを指標とし続けることへの批判も多い。連立一次方程式の直接解法は、近年の計算科学の現場では、実際に使われることはほとんどない。また、多くのアプリケーションで性能を出すために重要な要素となるメモリ容量、メモリ帯域幅、通信帯域幅については、LINPACKでは実質的に評価されないため、2.8で触れたように、LINPACKの性能は出ても、実際のアプリケーションでは思った程の性能が出ないスーパーコンピュータが増えてきているのも事実である。TOP500の存在は、そのような傾向を助長しているという批判もある。

興味深い事例がある。米国イリノイ大学に設置された BlueWaters というスーパーコンピュータは、11.61ペタフロップスという理論演算性能を持ち、容易にランキング上位に相当する LINPACK 性能を出せると見込まれるが、BlueWatersを運用する米国 NCSA (National Center for Supercomputing Applications) は、自分たちの目的が、LINPACKではなく、実際のアプリケーションで高い実効性能を出すことであるとして、敢えて TOP500 へのエントリーを行わなかったというケースである。

スーパーコンピュータの評価指標を見直そうという動きもある。HPC チャレンジベンチマーク[9]は、スーパーコンピュータのあらゆる性能を28項目に渡り評価できるベンチマークだが、その中の重要な4項目については、HPC チャレンジアワードとして年に1度表彰が行われる[10]。ちなみに「京」はこの HPC チャレンジアワードにおいて、2011年は4項目すべてで、2012年は3項目で No.1 の認定を受けた(残り1項目は2位)。このことから、「京」が総合的な性能評価で見れば現在も世界一であると考えている。

HPC チャレンジのような試みを通じて、

LINPACK だけで評価される状況が徐々に改善され、使いやすさ、性能の出しやすさに配慮したスーパーコンピュータが正当に評価されるような環境づくりが進むことを期待したい。

#### 4. まとめ

TOP500 ランキングのデータから、最近のスーパーコンピュータの開発トレンドを分析した。

最近のスーパーコンピュータは、半導体集積度のスピードを超えるペースで性能向上が続いており、それを支えるために全体のコア数が増加傾向にあること、また、LINPACK で評価されないメモリ容量、メモリバンド幅は相対的に減少傾向にあること、システムの規模が拡大する中で、全体の消費電力の増加を抑えるために、低消費電力化が大きな課題となっていること、そのための現時点での最適解としてアクセラレータ型スーパーコンピュータが急速に増加しているなどを解説した。

最後に、さまざまな評価指標を用いて、ランキング上位のスーパーコンピュータと「京」を比較し、どこに優位性があるのかについて分析した。

今後のスーパーコンピュータ開発は、2018 年から 2020 年頃の実現を目指すエクサフロップス級スーパーコンピュータをターゲットに、既に競争が始まっている。

我が国も、「京」の経験を踏まえて良い部分は継続・発展し、そうでないところは改善しながら、この分野で世界をリードする立場になることを期待する。

#### 参考文献

- [1] 横川三津夫, 庄司文由, 京速コンピュータ「京(けい)」とは何か, 日本原子力学会誌, **14-18**, Vol.52, No.12 (2010).
- [2] 庄司文由, 京速コンピュータ「京(けい)」とその利用, 応用物理, **574-578** 第 80 巻, 第 7 号 (2011).
- [3] 黒川原佳, 庄司文由, システム概要- 世界トップクラスの演算性能と使いやすさを両立-, 情報処理, **759-766**, Vol.53, No.8 (2012).
- [4] 宇野篤也, 黒川原佳, 庄司文由, 京コンピュータの先進技術, 計算工学,**28-32**, Vol.17, No.4 (2012).
- [5] <http://www.top500.org/>
- [6] <http://www.prace-project.eu/>
- [7] [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/1322027.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/1322027.htm)
- [8] <http://www.green500.org/>
- [9] <http://icl.cs.utk.edu/hpcc/>
- [10] <http://www.hpcchallenge.org/>

## 「京」にみる冷却技術

Cooling Technology of the K computer

塚本 俊之 (理化学研究所)

Toshiyuki TSUKAMOTO (RIKEN)

草野 義博・平井 慶太 (富士通株式会社)

Yoshihiro KUSANO, Keita HIRAI (Fujitsu Limited)

魏杰 (富士通アドバンステクノロジー株式会社)

Jie WEI (Fujitsu Advanced Technologies Limited)

### 1. はじめに

「京」は国家プロジェクトとして理化学研究所と富士通が共同で開発したスーパーコンピュータで、2011年6月と11月に2期連続で世界最速を達成した10ペタフロップス(1秒間に10の16乗の浮動小数点演算)を超える超巨大並列システムである。

「京」の本体は864台の計算機筐体とディスク筐体216台で構成されており、88,128個のCPU(Central Processing Unit: 中央演算処理装置)が並列に動作し1PB以上のメモリを有する。

「京」のCPU(SPARC64<sup>™</sup> VIIIfx)は、理論演算性能128ギガフロップス(1秒間に128×10の9乗の浮動小数点演算)に対して消費電力が58Wと汎用CPUとしてはトップクラスの数値を誇るが、システムの規模が大きいため、発生する熱量も膨大となる。

一般には半導体部品の寿命は温度が10℃下がると2倍に伸びると言われており(アレニウスの法則)、安定した運用を維持するためには10MW以上の発熱を効率的にかつ安定的に除去する冷却システムが重要な技術要素となる。

事実、世界で初めて10ペタフロップスを達成したLINPACK(注1)計測時には29時間半に亘って全てのCPUが連続して稼働する必要があった。世界一獲得は優れた冷却システムの賜物と言うことができる。

この冷却システムは、計算機筐体側の冷却システムと施設側の冷却設備インフラで構成されており、本稿では計算機筐体の冷却システムについて紹介する。まず、CPUの発熱と冷却についての考え方とその動向および「京」の熱設計における目標を述べる。続いて「京」で採用したハイブリッド冷却システムの技術と実装について、水冷システムと空冷システムに分けて詳細を説明する。

(注1) LINPACK

連立一次方程式の解を求めるプログラムで、コンピュータの性能計測プログラム。主に浮動小数点演算の性能を計測することができ、著名なスーパーコンピュータの性能比較プロジェクト「TOP500 Supercomputer Sites」の標準ベンチマークとして採用されている。

### 2. CPUの発熱と冷却技術

CPUの演算性能は、この10年で20倍に増加し、その一方で発熱密度も2.5倍に増加した。CPUの発熱密度の推移を図1に示す。2000年に20W/cm<sup>2</sup>程だった発熱密度は、2012年には50W/cm<sup>2</sup>を超え、数年後には70~80W/cm<sup>2</sup>に達する。これは、冷却しなければ計算上CPU温度が3分で1000℃まで上昇してしまう領域である。さらに近い将来、原子炉の被覆管表面の発熱密度の約半分にあたる100W/cm<sup>2</sup>レベルに達する可能性もある。

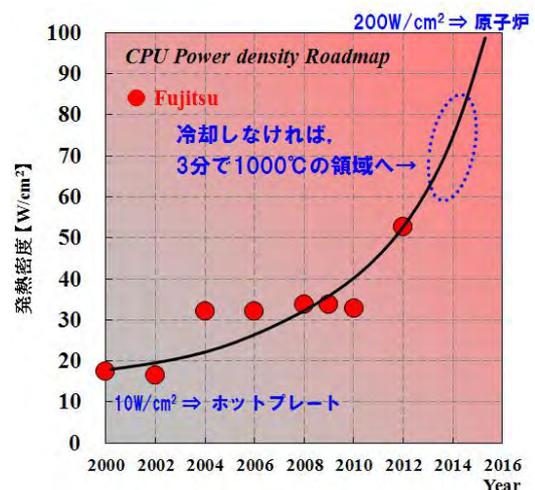


図1 CPUの発熱密度の推移

HPCシステムの冷却では「高密度実装」や「高効率冷却」と同時に、このCPUの「高発熱密度」にも対処しなければならない。空冷から水冷へ転換はそのひとつの方法である。図2に、富士通製PRIMEPOWER HPC2500のヒートシンクと「京」の水冷クーリングプレート(CP: Cooling Plate)の実装構造を示す。このCPは、ヒートシンクと比較して1/10以下の体積で4倍高い冷却性能を持つ。

図3に空冷と水冷、沸騰冷却の単位面積当たりの熱伝達量(熱流束)を示す。水冷は空冷の100倍近い伝熱性能があり、さらに沸騰は、水冷の10倍以上の性能があることが判る。今後の発熱密度70W/cm<sup>2</sup>を超える冷却では、この沸騰域の潜熱輸送を利用する技術も考える必要がある。そこでは、軽量化、低コストを満足する部材の利用や高熱伝導材の開発、接触熱抵抗の低減などが重要な技術になる。

素子レベルでは、発熱増加や大型化が進む一方で、3次元実装などの新しい形態も開発されており、素子やパッケージに直接冷媒を流す素子一体化冷却の技術もひとつの開発課題になっている。装置レベルでは、省エネや高効率冷却を考慮した完全水冷化、気化熱利用の実用化に向けた製造技術や運用方法も考えていかなければならない。さらに、大きな空調レベルでは、自然環境に配慮した外気利用、河川海水利用、排熱回収等の環境にやさしい技術開発にも注意を向ける必要がある。

### 3. 京の熱設計

「京」システムは高い目標性能を達成するため、CPUとICCを合わせて176,256個の大規模LSIと約70万枚のDIMM(Dual Inline Memory Module: メモリ素子を搭載した基板)で構成している。このような大規模システムでは、システム信頼性の確保と低消費電力化が課題となる。故障率および消費電力の大きな比率を占める大規模LSIは部品温度を低下させるにつれて大幅に寿命が延び、さらに消費電力が減少するという特徴を持つ。図4にLSI動作温度と寿命の関係を示す。LSI動作温度を数十℃低減すると部品の寿命が大幅に延びることがわかる。

これらの特徴を利用するため、CPUおよびICCの動作温度は30℃以内を目標とし、DIMMの部品温度は60℃以下を目標とした。この熱設計を低コ

ストで効率良く実現するために、CPUおよびICCは水冷、DIMMは空冷とするハイブリッド冷却システムを採用した。

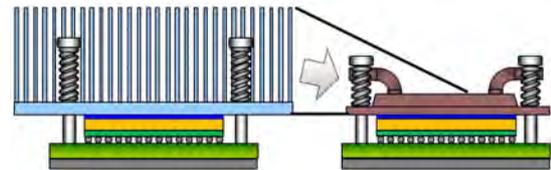


図2 空冷ヒートシンクと水冷クーリングプレート

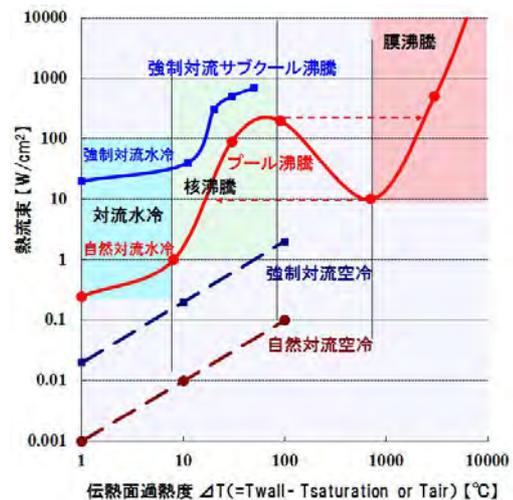


図3 空冷と水冷、沸騰の熱伝達(熱流束)

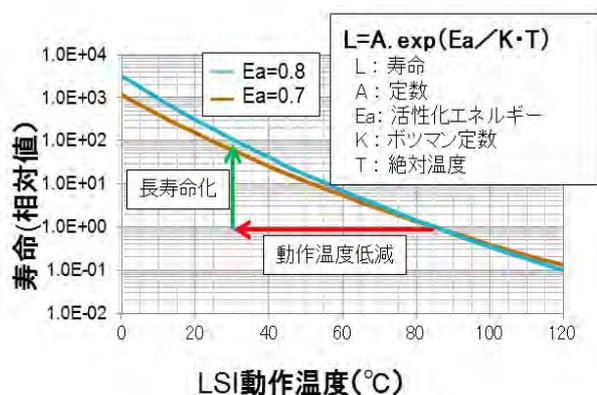


図4 アレニウスの法則

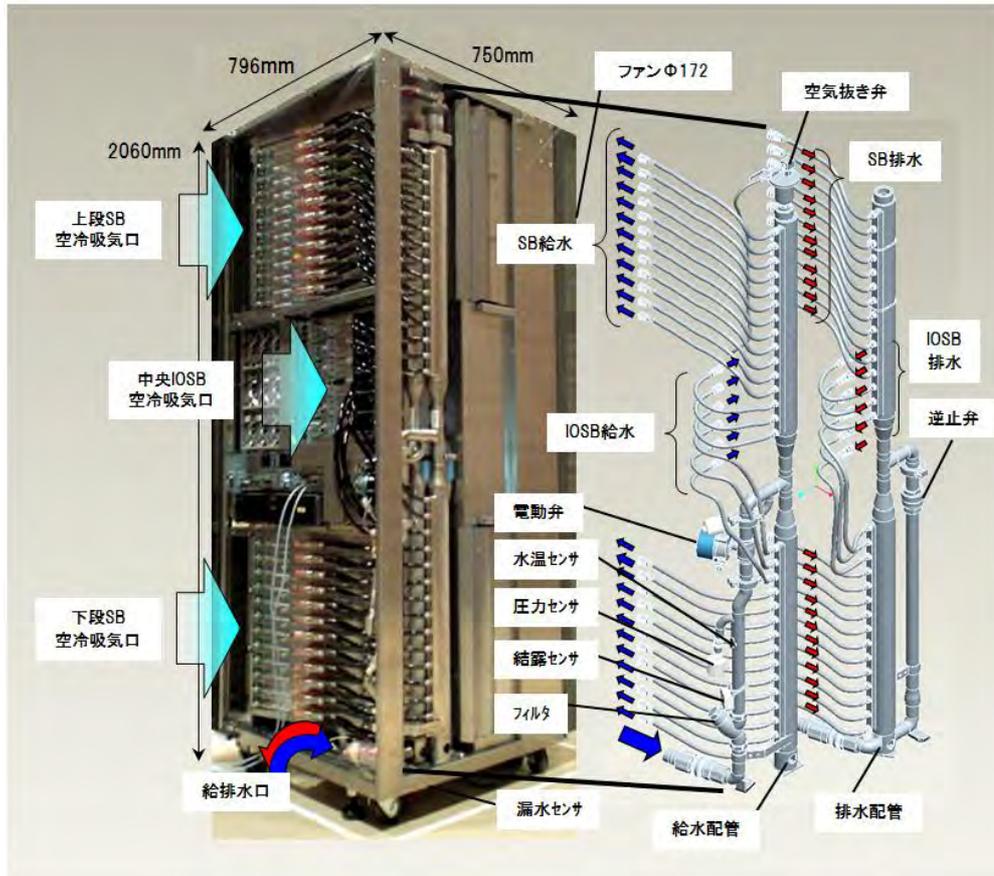


図5 筐体の冷却システム（冷水配管構造）

「京」の水冷システムの特徴は、「シンプルな分岐と配管構成による、高密度実装と高信頼性の両立」と「制御部品を最小限に抑えた、低コストと高信頼性の実現」、「脱着可能な配管構成による、組立性・保守性に優れた構造」の三つになる。

空冷システムの特徴は、「SB(System Board : CPU など主要部品を搭載するボード)の斜め実装による、高密度実装と冷却効率の追求」と「エアダクトの冷却風制御による、低風量・高効率冷却の実現」、そして、「冗長ファンと逆流防止機構による、低電力と低騒音の実現」になる。

#### 4. 水冷システム

本章では、筐体及び SB の水冷システムについて述べる。

##### 4.1 筐体の水冷システム

筐体の水冷システムの構造を図5に示す。前面右側に2本の配管（給水側、排水側）を縦に実装しており、その配管からボードへの給排水用のホ

ースが分岐している。このうち各24本はSB給排水ホースで、残りの各6本はIOSB (IO System Board : CPU など主要部品の他にディスクインタフェース部品等を搭載するボード)給排水ホースである。そのほか、この給排水管はセンサ（水温センサ、圧力センサ、結露センサ）や、給排水調整部品（空気抜き弁、電動弁、逆止弁、フィルタ）を備えている。これらを全て2本の配管系に収め、最終的には給水配管と排水配管の二つの配管系部品で構成される水冷システムとした。

給排水配管は24枚のSBと6枚のIOSBへの分配流量をバランスさせるため、配管長さ方向に対し中央から給排水を行い、流路系統内の配管径をコントロールし、更に給排水のホースも圧力損失がバランスする範囲内で均等長さに設計した。その結果、30分岐の流路の圧力損失差は±5%以内に抑えられた。また分岐流量をバランスさせ各ボードに均等に冷水を供給することで筐体流量を最小限に抑えられた。配管の実装に関しては徹底的な

省スペース化を行い、筐体前方右コーナー部の極小スペースに給水管・排水配管を収めた。

この水冷配管の特徴は流量調整弁などの特別な制御部品を用いることなく、配管や水冷部品の圧損をバランスさせ流量をコントロールするシンプルな構造にしたことである。シンプルな構造にすることで配管単体の徹底した品質確保と高効率・高信頼な水冷システムを実現した。

#### 4.2 SB の水冷システム

SB に実装される CPU と ICC パッケージ、および一部の電源制御素子 POL は、ひとつの水冷ユニット (LCU: Liquid Cooling Unit) で冷却している。水冷ユニットは CPU および ICC 冷却用の複数の CP から構成され、それぞれを並列 2 系統の配管経路で連結している (図 6)。SB の水冷ユニットへの冷却水の給排水は、保守性を考慮し水冷ユニットの SB 前方に設置している液体コネクタを介して行う。

「京」は 2 万枚以上の SB で構成されるシステムであり、循環水量を抑え効率良く冷却することが課題であった。水冷ユニットは 8 つの CP のうち 4 つずつを並列 2 系統の配管経路で接続し、均等流量の冷却水を各 CP に流す設計とした (図 7)。さらに CP 内部は冷却水循環流量を最小限に抑えるため微細チャンネル流路構造を採用した。これらの工夫により筐体内全ての CP において、冷却水流量ばらつきを ±3% 以内に抑える効率的な冷却を実現した。

配管で連結、一体化した水冷ユニットを SB に取り付けるためには、それぞれの寸法ばらつきを吸収する構造が必要になる。CP を連結する銅配

管の寸法や形状を工夫し、取り付け時の寸法誤差や配管部の応力を緩和する構造とした (図 8)。この一体化構造により、水冷ユニットの強度と信頼性を大幅に向上した。さらに、薄型軽量化により、高密度実装を可能にした。

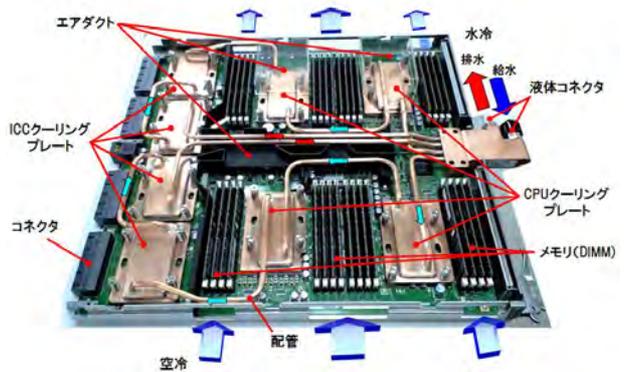


図 6 SB 水冷ユニット (LCU) と冷水の流れ

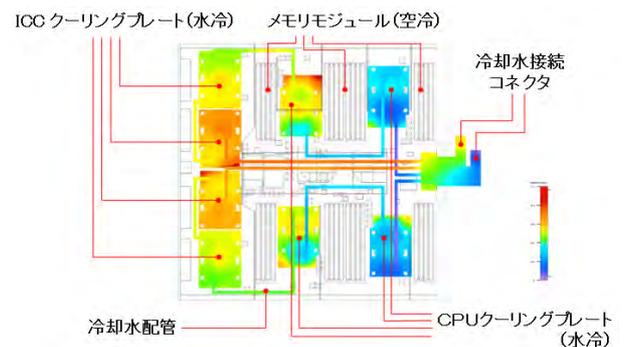


図 7 SB 水冷ユニット (LCU) の熱流体解析

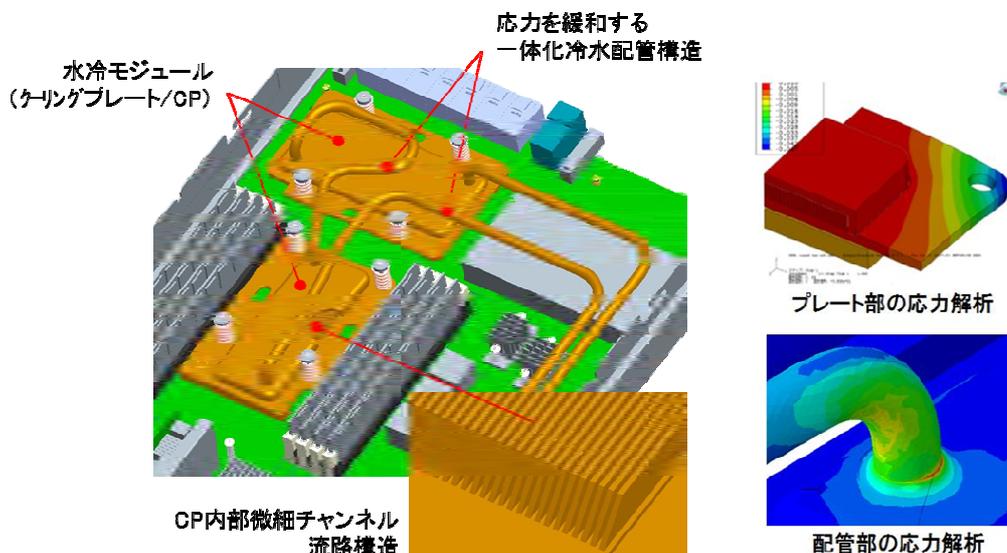


図 8 クーリングプレートの構造と応力解析

### 5. 空冷システム

「京」の空冷システムは特徴的な筐体構造となっている。3章でも紹介した通り、筐体内にSBを斜めに搭載し、上段12枚のSBを6台(5+1冗長)のファンで冷却している。SBの「斜め実装」構造と冷却風の流れを図9に示す。これは、水冷配管やケーブルエリアを確保し、BPやファンの保守性、SBへの給排水のための液体コネクタの接続操作性を確保しつつ、SB冷却風の損失を極力抑えるために採用した実装形態である。この斜め実装により、保守性を確保しつつ冷却風の損失を90度のSB実装と比較して1/2に低減した。また、ファン近傍に搭載した冷却風の逆流防止機構により冗長ファンの削減が可能となり、逆流防止装置がない場合と比較してファン台数を1/2に低減した。

図10に冷却風の流体解析結果を示す。SBの空冷対象部品は、メモリ(DIMM)および電源制御部品である。冷却風はSB斜め前方より入り、対象部品を冷却した後斜め後方から排出される。このような構造にしたことで冷却風量のSB内で不均一が問題となったが、熱流体解析を行いSBの構造部品配置とエアダクト形状を見直しと供給側と排気側の板金の開口部形状や位置等を最適化した。冷却風量を均一にすることで、風量を抑えつつメモリの温度ばらつきを10℃以内に抑える効率的な空冷を実現した。

### 6. まとめ

これまで述べたように、「京」は図11に示すような水冷と空冷のハイブリッド冷却システムを採用することで、10MWを超える熱量を効率的に除去している。2013年4月時点の運用データを見ると、水冷システムでは15℃±1℃の冷水でCPU/ICCを冷却し、17~18℃となって熱交換器に戻している。また、空冷システムでは吹出し温度21℃の空気ですメモリ等を冷却し、24℃となって空調機に戻している。

施設の冷却能力を考慮すると、冷媒の流量を減らして水と空気の入口と出口の温度差をもう少し大きくすることも可能と考える。今後は「京」のハイブリッド冷却システムと施設の冷却システムとのバランスを調整することで、より効率的な運用を目指していきたい。

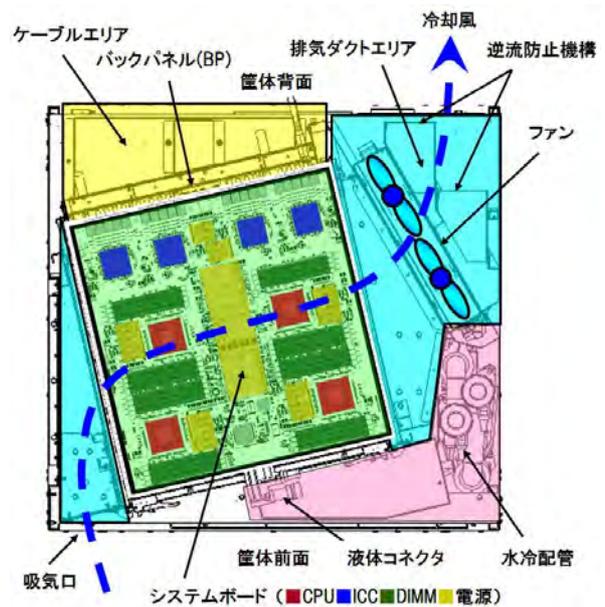


図9 SBの「斜め実装」構造と冷却風の流れ

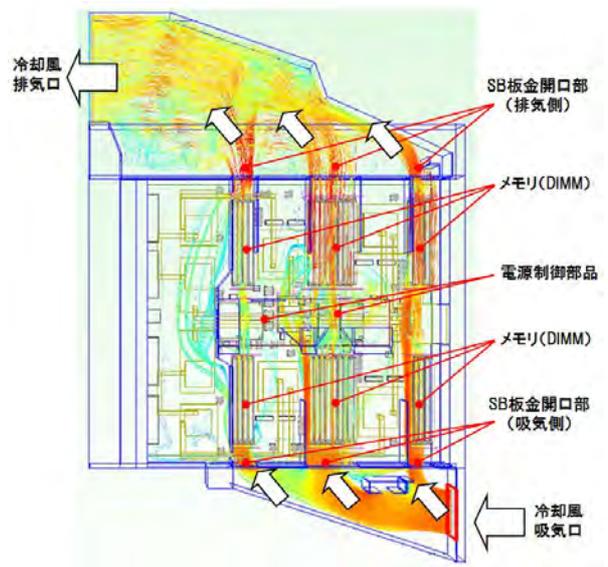


図10 SB冷却風の流れ(流体解析)

「京」は共用開始以降、24時間連続運用を継続しているが、ハイブリッド冷却システムも極めて安定に稼働しており、冷却システムのトラブルは一件も発生していない。また「京」本体の故障も非常に少なく、設計時の想定を上回る優秀な実績を残している。CPU/ICC への水冷クーリングプレート適用とメモリの空冷というハイブリッド冷却システムの採用は成功であったと考えられる。

参考文献

- [1] 特集, スーパーコンピュータ「京」, 情報処理, Vol. 53No. 8, 752-807 (2012).
- [2] 特集, スーパーコンピュータ「京」, 雑誌 FUJITSU, Vol. 63No. 3, 231-351 (2012).
- [3] 山中, スパコン「京」で復活した水冷技術, 日経ものづくり, 66-71 (2012).
- [4] 久保, スーパーコンピュータ『京』を支える冷却技術, 日本冷凍空調学会, (2013)

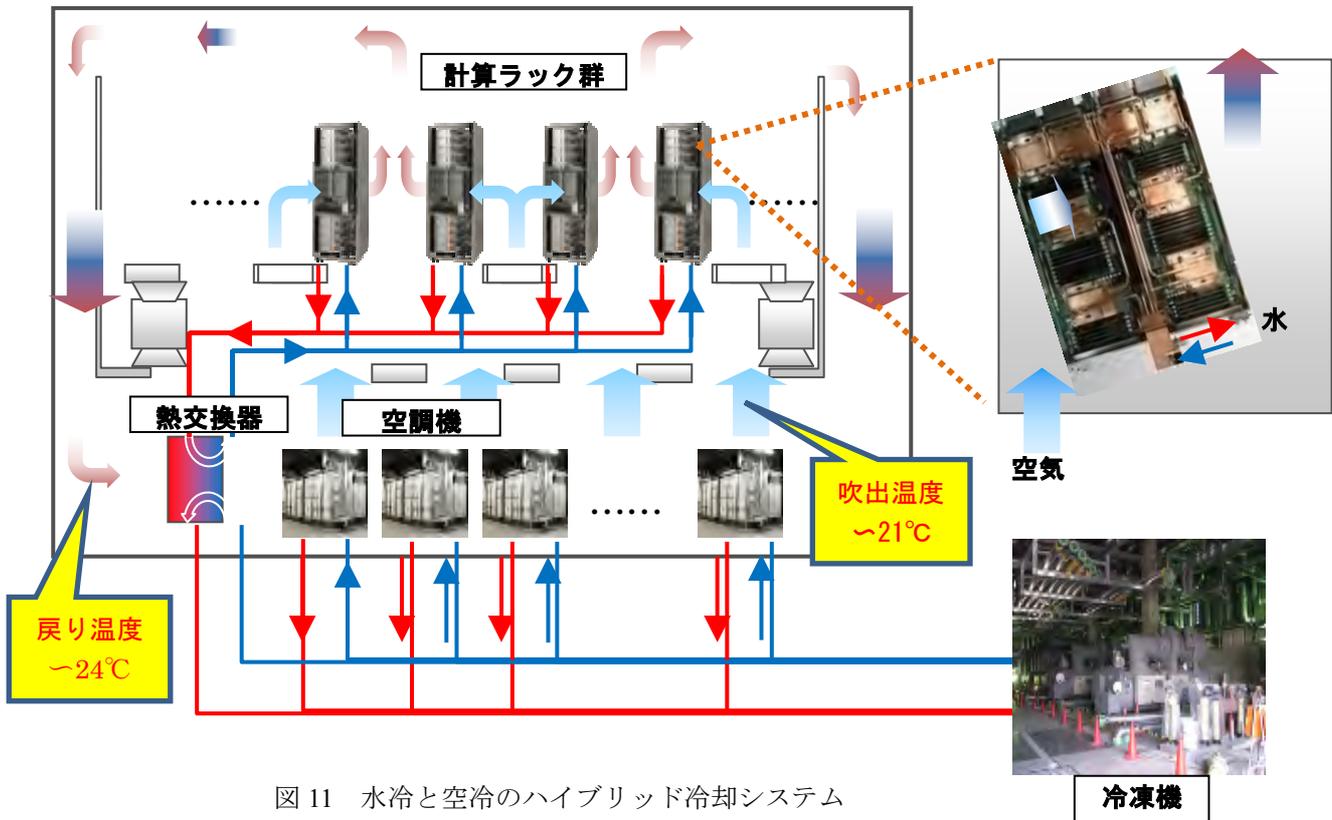


図 11 水冷と空冷のハイブリッド冷却システム

## 「京」に見る設備技術

The Plant Technology of the K computer

関口 芳弘 (理化学研究所)  
Yoshihiro SEKIGUCHI (RIKEN)  
e-mail: sekiguchi@riken.jp

### 1. はじめに

スーパーコンピュータ「京」は、10MW 以上もの大電力を消費する。JOB により変動する電力を要求に応じて安定に供給し、発生した熱は迅速かつ完全に除去する必要がある。「京」を収容し電力や冷熱を供給する建屋及び設備は、「京」と一体不可分なものである。その意味で計算科学研究機構の施設群は「世界初のスパコンプラントである」と言ってもよいであろう。

本施設は、他の計算機施設にはない数々のユニークな特徴を持っている。柱が1本もない広大な計算機室、コージェネ発電設備 (CGS) と高速遮断器を組み合わせる無停電電源装置 (UPS) と同等な機能を持たせた電源システム、CGS 廃熱回収によるエネルギー高効率運用、大風量にもかかわらず非常に静かな空調機、正確に温調された CPU 冷却水設備などである。これらはすべて「京」の設置を迅速かつ容易にし、安定かつ安全に稼働させるために採用したものだ。ユニークではあるが新たに技術開発を行ったり、最新の技術を採用したものではない。既存の技術、こなれた技術、枯れた技術、つまり安定に使える技術を新たな発想で巧く組み合わせることで実現する。すなわち「レガシーシステム」である。



図1 計算科学研究機構の建物群

### 2. 施設概要

地域・地区	準工業地域, 防火地域指定なし	
敷地面積	20,000.01 m <sup>2</sup>	
建築面積	8,561.44 m <sup>2</sup>	
延床面積	計算機・研究棟	20,257.66 m <sup>2</sup>
	熱源機械棟	2,079.01 m <sup>2</sup>
	特高設備棟	274.50 m <sup>2</sup>
構造	鉄筋コンクリート造および鉄骨造	
階数	計算機・研究棟	地下1階, 地上6階, 塔屋1階
	熱源機械棟	地上2階
	特高設備棟	地上2階
工期	着工: 2008年3月	
	竣工: 2010年5月	
設計・監理	日建設計	
施工	建築	大林組
	電気	きんでん・九電工・三機工業JV
	空調衛生	三機工業
	コージェネレーション	川崎重工業

### 3. 柱のない計算機室

「京」本体が置かれる計算機室は 3000 m<sup>2</sup>=60m×50m に及ぶ広大な広さを有している。東側には 600 m<sup>2</sup> の準備室 (倉庫) が設けられているが、壁は撤去可能であり、最大 3,600 m<sup>2</sup>=60m×60m までの拡張が可能である。これは概ね公共の体育館の 2 倍の広さである。この広大な計算機室を柱なしで構成した。これにより計算機の配置上の制限がなくなり、自由に計算機をレイアウトすることができ、「京」の性能を最大限に引き出すことができる (グラビアページ左図上)。

無柱とするために、二つの技術を用いた。ひとつは「免震構造」である。地震が来ると一般の建物は地震によってひねられる。ひねりにより建物が倒壊することを防ぐために、柱や梁を太くしたり、柱の本数を多くしたり、筋交い (ブレース) をたくさん入れたりする。ところが免震構造にすると、建物全体がほぼ水平に揺れるだけになるた

めひねりに抗する必要がなくなる。

計算機・研究棟は、49 台の積層ゴム免震装置で支えられている。この免震装置が中心から最大 70cm 変位することによって、地震動を建物に伝えなくする、震度 6 強の地震に対して計算機棟内での最大加速度は 200gal 以下に抑えられ、計算機が倒れたりずれたりすることを防ぐ。免震設計にあたっては、建築基準法で決められた地震波モデルはもちろん、実際の観測波や東南海連動地震において想定される地震波においてもシミュレーションを行い、安全性を確保した。

もうひとつは「橋梁技術」をもちいたことである。「京」本体を収容する計算機室は 3 階部分である。高い位置に作られる大きな計算機室を無柱化するために、橋梁に使われる技術を用いた、図 2 に計算機棟の断面を示す。3 階計算機室と 2 階空調機室の部分に着目していただきたい。2 階空調機室に三角形のトラス構造を見ることができであろう。計算機室はこのトラスによって支えられている。つまり、計算機室は幅 60m 長さ 60m の「トラス橋」と同じ構造で造られているのである。

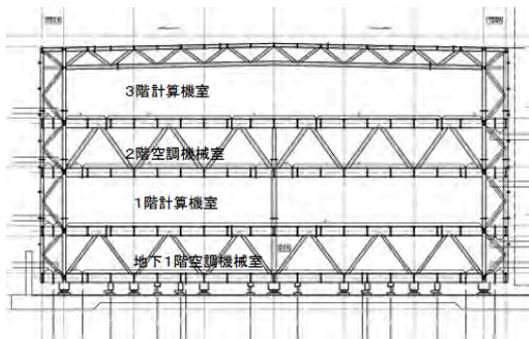


図 2 建物断面

#### 4. CGS による UPS 代替機能の実現

計算機施設では停電及び瞬時電圧低下対策が求められる。そのために無停電電源装置 (UPS) を設置するのが一般的である。本施設は一部の重要負荷 (外部からネットワークを通じて情報のやり取りを行うフロントエンド設備, データを保存するストレージ部分, 研究の継続が必要な研究棟部分) を停電保護の対象としている。保護対象負荷の需要電力は設計時想定で 5,000kW 以上もあり、一般的な蓄電池式 UPS ではイニシャルコストの増大, 設置場所の確保のため建築面積の増大, 数

年ごとの蓄電池の交換などランニングコストの増大などから採用は困難であった。また、近年の大規模なスーパーコンピュータにおいては計算機のシャットダウンに要する時間は数時間にも及び、UPS での保護時間 (通常 5 分ないし 10 分間) では完了せず、蓄電容量がまったく不足している問題もあった。

そこで重要負荷系統への電源供給としてコジェネ発電設備 (CGS) と高速限流遮断器を組み合わせ、停電対策を行うこととした。商用側が停電ないし瞬時電圧低下を発生した場合、3/4 サイクルで高速遮断することによって CGS の運転を継続する。これにより冷却設備を含めた計算機の停電および瞬時電圧低下保護を行うシステム構成としている (図 3)。

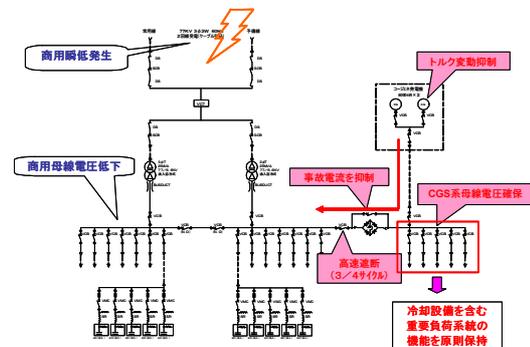


図 3 電源システム

しかし、「京」の消費電力は 10,000kW 以上にもなるため、その冷却系の電力も含めると CGS での保護も現実的ではなく、商用電源で給電せざるを得なかった。しかし商用電力による給電であっても極力停止しない方策が求められた。

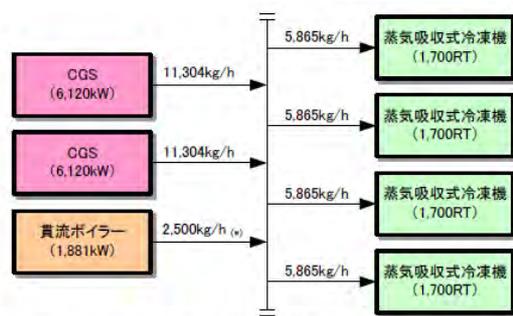
立地点での瞬時電圧低下の実績では、発生頻度は年 3 回ないし 4 回程度であり、その電圧低下率は小さく継続時間も短い場合が多かった。スパコン自体の回路には多数のコンデンサが組み込まれているため、スパコン自身の持つ電荷によって、軽微な瞬時電圧低下では停止しない (瞬低保持時間を 0.1 秒程度と想定)。ところが、軽微な瞬低でも影響を受けやすいのは、冷凍機や空調機を駆動する動力盤に組み込まれた電磁接触器と呼ばれるスイッチであることが分かった。電磁接触器は電磁石の磁力により接点を保持するスイッチである。電源が喪失すると電磁石の磁力もなくなり、非常に短時間でスイッチは開放されてしまう。すなわ

ち、軽微な瞬時電圧低下においてスパコン自体は生き残るが、電磁接触器が開放されてしまうために冷却系が停止し、結果としてスパコンも停止してしまうのである。

そこで、軽微な瞬時電圧低下でスパコンを停止させないため、動力盤には1秒間接点の閉路状態を保つことのできる開放遅延型電磁接触器を採用した。これにより軽微な瞬時電圧低下で冷凍機、空調機を停止させることがなくなる。「京」の運用開始後、瞬時電圧低下は数回発生したが全く影響を受けず、「京」の稼働率向上に貢献している。

### 5. CGS を用いた高効率熱源システム

本施設には最大出力6,120kW 都市ガス燃料ガスタービンCGSが2機設置されている。CGSは「京」の電源信頼性において非常に重要な機能を持つだけでなく、常用発電機として年間を通じて運転を継続するため、この排熱利用をベースとした熱源としても活用している。年間を通じて非常に大きな冷房需要があるため、CGS排気ガスからの排熱を回収して利用することができる。また「京」は投入するJOBによって消費電力が数MW単位で変動するため、「京」の使用状況に合わせてCGSの発電電力を増減する事で契約電力を低減する事ができる。CGSの導入により全電力を商用から受電する場合と比べ、契約電力を約8,000kW低減できており、電力基本料金だけで年間1.5億円の光熱費を削減している。



(\*) 貫流ボイラーは不足蒸気を補う形で、蒸気圧力によりON-OFFを行う。

図4 CGSと熱源の熱バランス

CGSは負荷率が高いほど効率が上がるため、通常時はCGS1台を、LINPACK等の高負荷時はCGS2台を運転し、不足電力分を商用電力で賄うのが基本的な運用となる。本施設のCGSは、総合熱効

率75%程度（発電効率30%程度、排熱回収効率45%程度）ときわめて高効率な設備である。回収された排熱は蒸気として蒸気吸収式冷凍機に供給され、そこで10℃冷水を製造し「京」の冷却に使用している。CGS1台あたりの熱出力は約9,000kWであり、COP1.4の高効率吸収式冷凍機にて12,600kWの冷熱に変換される。回収熱量が不足する場合は、貫流ボイラーを起動させて補う（図4）。

構内で消費される総電力を16,000kWとし、CGS発電機出力を50%~100%の変化させた時の電力に換算した1次消費エネルギーをグラフに表すと、図5となる。グラフから分かるとおり、CGS発電電力が高いほど1次エネルギー消費が小さくなる事が分かる。

これは、「PUE/DCiE計測方法に関するガイドライン(Ver2.1)」による都市ガス燃料の1次エネルギー換算係数を0.35としているので、CGSの総合効率が35%以上であるなら、商用電力よりも1次消費エネルギーが低くなるのは当然である。この0.35という換算係数は、商用電力の火力発電所で発電した場合の需要家受電端での平均効率の値である。商用電力の火力発電所は排熱回収を行わずに大気中あるいは海水中に排熱を捨ててしまっているため、需要家受電端での熱効率は35%程度になってしまう。よってCGS発電電力が大きいほど総合効率も高くなり、それに伴い1次消費エネル

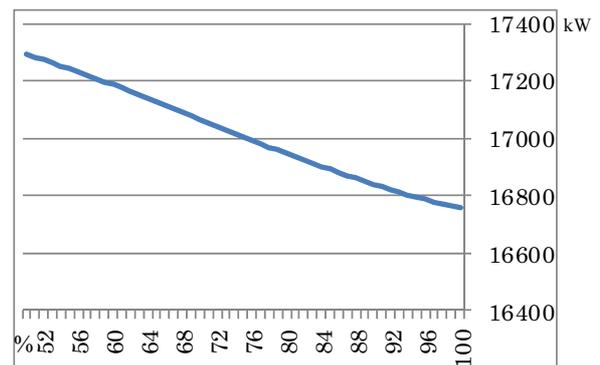


図5 発電機出力と1次エネルギー消費量

ギーも低減されるのである。

なお、構内総需要電力が16,000kWに対し、発電機最大出力での1次消費エネルギーが16,750kWと大きい値となっており、需要電力よりも1次消費エネルギーの方が大きくなっているよう

に見える。これは熱回収分を考慮していないためである。CGS からの排熱回収による製造冷熱 12,600kW を COP6 の電動式ターボ冷凍機で製造すると、2100kW 消費電力が増加する。よって、すべてを商用電力から受電する場合と比べると、あきらかに 1 次消費エネルギーは低減されていることがわかる。

## 6. 高効率な空調・CPU 冷却システム

「京」が設置される計算機室は 3000 m<sup>2</sup>もの大空間である。計算機室の床下、フリーアクセスの深さは 1.5m とした。床下深さが 1.5m を超えると消防法上「階」とみなされ、消防設備等の設置が必要となるため基準以下としたものである。このフリーアクセス空間を配線スペースとしてだけでなく、CPU 冷却水の配管スペースや冷却空気のサブライチャンバとしても使っている。一般的なデータセンターのように計算機室面積がさほどでもなければ、空調機は計算機室周り同一階に設置可能であるが、3000 m<sup>2</sup>もの大空間に均一に冷風を送るためには、空調機を計算機室直下に配置せざるを得ない。上階に計算機室、下階に空調機械室という配置となるが、上下階には冷却空気が循環するため層間区画が取れず、建築基準法上 2 層で 1 階とみなされている (図 6, グラビア左図下-右)。

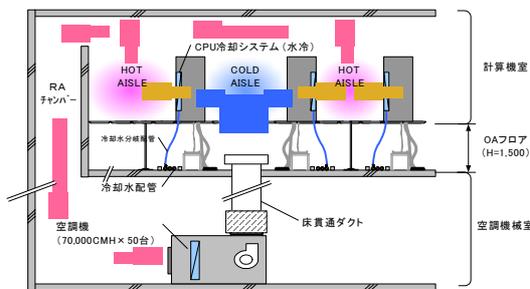


図 6 空調機械室・計算機室断面図

駆動動力は風速が速いほど、流路の圧力損失が大きいほど大きくなる。本施設は、空調機を計算機室の直下階に設置し、計算機直下のフリーアクセス内に直接吹き込む構造となっている。フリーアクセスからコールドアイルまでは冷風を高速に吹きこむ。計算機を冷却したあとの温まった空気はホットアイルから天井に昇り、ゆっくりと下階の空調機室へと戻す。これにより風速が速く損失が大きい部分であるダクトを最短とし、ダクト圧損などによる損失エネルギーを低減することがで

きた。また、フリーアクセス内へ直接吹き込むため、静圧のみならず動圧も有効利用し、空調機の全圧効率すべてを活用したシステムとすることができた。

通常のア空調機に用いられるベルト式シロッコファンの効率は 30%程度に留まる。それに対して今回採用したダイレクトドライブプラグファンの全圧効率は 70%にもなる。これによりファンモータの容量=消費電力をシロッコファン方式に比べ 1/3 程度にすることができた。

高効率ファンを採用したことにより、全ての空調機を運転しても空調機械室内の騒音値は 75dB 程度であり、会話も可能なレベルである。機械室内がうるさいということは、要するにエネルギー変換効率が悪く、本来は空気の搬送動力になるべきエネルギーが騒音のエネルギーに変換されてしまっているということである。低騒音の空調機を採用したことにより、冷却空気で連続的につながっている計算機室の騒音環境の悪化も防ぐことができています。

また、「京」では CPU と通信用 LSI を直接水で冷やす方式を採用している。水は空気の 4 倍の熱容量があり、非圧縮性流体でもあるので冷却媒体の搬送動力を空冷の 1/4 以下にすることができ、施設の消費エネルギーを大幅に低減できる。計算機筐体には純水で供給しているが、一次冷水は空調用冷水と共用化している。「京」は JOB により CPU 負荷とメモリ負荷の割合が変化する。一次冷水を共用することにより、CPU 負荷が高い場合にもメモリ負荷が高い場合にも、熱源の負荷変動を抑え安定運転が可能となるようにしている。CPU 冷却水は 2 階空調機室に設置した熱交換器を介して各筐体へ送水している。送水温度は 15°C±1°C に制御されており、CPU 温度が 30°C 以下となるように冷却している (図 7)。



図 7 CPU 冷却水設備



高い計算であり、システムの最大消費電力と同等であると考えられる。LINPACK 試験時、CGS は2台運転しており、それぞれの負荷率は 78%，1 台あたりの発電出力は 3,800kW，合計発電電力は 7,600kW であった。CGS の負荷率が 100%ではなかったため、CGS 総合効率は最大負荷時よりは劣っていた。LINPACK ベンチマーク試験は約 30 時間にわたって行われたが、高い電力需要が安定して続いていたため、PUE は 1.34 となった (表 1)。またこのときの施設全体の消費電力量の内訳を、図 9 に示す。

	項目	単位	測定値
1	都市ガス		
A	都市ガス燃料使用量	Nm <sup>3</sup> /期間	68.528
B	ガス燃料のエネルギー換算	kWh/期間	772.844
B'	ガス燃料二次エネルギー換算	kWh/期間	270.495
2	電力供給 (二次エネルギー)		
C	受電電力量	kWh/期間	294.750
D	発電電力量	kWh/期間	202.300
3	消費エネルギー (二次エネルギー)		
E	計算機電力量	kWh/期間	418.620
G	研究棟消費電力量	kWh/期間	2.630
H	計算機用空調機電力量	kWh/期間	49.740
I	熱源、ポンプ等電力量	kWh/期間	20.640
	<b>PUE</b>	-	<b>1.34</b>

表 1 LINPACK 時の PUE

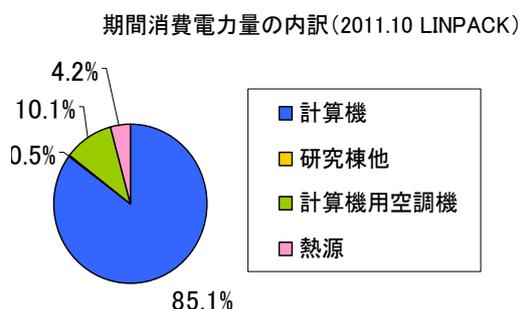


図 9 LINPACK 時の消費電力量内訳

LINPACK ベンチマーク試験後、「京」はソフトウェアの調整運転を経て、昨年 9 月末から共用運転に入っているが、「京」の消費電力は 10,000kW ~ 12,000kW の範囲で推移している。この程度の消費電力であれば CGS 1 台運転により、電力、回収熱量とも十分である。都市ガス単価の高騰もあり、商用からの受電電力を主とし、「京」の消費電力変動に合わせて CGS 発電電力を増減させ、不足する電力を補うように運用している。毎月の PUE はほぼ 1.4 程度である。このことから、「京」の消費エネルギーの 1/3 程度のエネルギーで冷却が可能であることが示された。

この PUE 値は、日本データセンター協会環境・

基準 WG「PUE/DCiE 計測方法に関するガイドライン (Ver2.1)」によって計算したものである。PUE=1.4 程度での施設運用は、大規模、高密度に設置されたされたスパコン施設として、大変優れたものとなっていると自負している。ただし、PUE は本来他施設と比較しその優劣を競うものではない。ガイドラインにおいても「自社内 (グループ企業内) のデータセンターで比較する際に用いる指標として活用することを推奨する」と述べられており、「PUE/DCiE 値を ILF (IT 機器の消費エネルギー)、CLF (冷却の消費エネルギー)、PLF (電力ロス等) に分類し、(中略) 3 つに分類することにより、現状の消費エネルギーの比率を把握することができ、改善対象の発見が容易になる」ことが目的であることに注意したい。今後の運用においても、PUE 値を指標にして改善点を発見し、より効率的な施設運用を心がけていきたいと思う。

## 8. おわりに

スパコン施設は「使ってなんぼ」のものである。高性能のスパコンも何年かすれば陳腐化してしまう。旬の間に使い倒していただき、どんどんと研究成果を出してもらうことが使命である。だから「京」の稼働率を絶対に落としてはならず、少しでも上げる必要があるのである。

昨今の電力事情の悪化への対応も苦慮したもののひとつである。昨年夏、関西電力管内では 15% の節電の必要があった。しかも計画停電の可能性もあった。計画停電が実施されると毎日 2 時間停電してしまう。これは大変困る。大規模システムである「京」は、シャットダウンにも立ち上げにも数時間を要する。計画停電が実施されたらほとんど稼働できなくなってしまうのである。

このときも CGS は役立った。15% の節電に加えてさらに大幅な節電に協力できる需要家は、計画停電のリストから除外してもらえたのだ。節電時間帯は CGS 出力を上げ、大きく節電に貢献し、かつ「京」の稼働も予定通り実施することができたのである。

## 参考文献

- [1] 特集, スーパーコンピュータ「京」, 情報処理, Vol.53No.8, 752-807 (2012).
- [2] 特集, スーパーコンピュータ「京」, 雑誌 FUJITSU, Vol.63No.3, 231-351 (2012).

## スーパーコンピュータを用いた大規模乱流燃焼解析 Huge Numerical Simulation of Turbulent Combustion on Supercomputer

店橋 護・志村 祐康・福島 直哉 (東京工業大学)

Mamoru TANAHASHI, Masayasu SHIMURA, Naoya FUKUSHIMA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: mtanahas@mes.titech.ac.jp

### 1. はじめに

近年のスーパーコンピュータの高速・大容量化は、乱流燃焼研究の進展に大きく寄与している。乱流燃焼は火力発電や自動車エンジン等において熱エネルギーを取り出す重要な現象であるが、現象自体が持つ複雑さから未解明な部分が多く残されている。これは、乱流燃焼では乱流と火炎(燃焼反応)という二つの異なる物理現象が相互に干渉することに起因しており、乱流燃焼現象は計算科学の中でも最も解析が困難なものの一つである。東日本大震災以降、我が国の一次エネルギー供給において燃焼によるエネルギー変換の重要性が高まっており、更なる燃焼技術の高度化が必要とされている。また、従来の燃料とは異なる Bio fuel や Oxy fuel 等の乱流燃焼特性を明らかにし、低CO<sub>2</sub>排出燃焼技術の確立も急務である。

本稿では、乱流燃焼の直接数値計算(DNS)を中心に、スーパーコンピュータを用いた燃焼研究の動向について紹介する。乱流燃焼のDNSについては幾つかの解説[1-4]において記しているため、多少の重複があることはお許し願いたい。

### 2. スーパーコンピュータと乱流燃焼のDNS

#### 2.1 スーパーコンピュータの高速化

1980年頃までのコンピュータの演算速度はムーアの法則(1.5年で2倍)にほぼ従って向上した。その後、集積技術の限界から一時的に演算速度の向上率は低下したが、近年では並列計算技術やGPU利用技術により3.5年で10倍である[5]。図1は、1993年以降の世界最高速スーパーコンピュータの演算速度の推移[6]を示している。旧航空宇宙技術研究所(現JAXA)の数値風洞、地球シミュレータ等に続いて、久しぶりに我が国の京コンピュータが2011年に世界最速コンピュータとなった。地球シミュレータが世界1位の座から陥落してから約7年ぶりであった。2012年11月現在で

世界最高速スーパーコンピュータは米国オークリッジ国立研究所のTITANであり、その演算速度は約17PFlopsである。これまでのスーパーコンピュータの演算速度向上率が維持されたとすると、2020年頃には1Exa Flops (Exa: 10<sup>18</sup>, 100京)のスーパーコンピュータが実現されるであろう。

図1には、過去の主要な非燃焼乱流のDNS(乱流熱伝達も含む)で用いられた格子点数の推移も示した。ここで、一様等方性乱流(HIT)、平行平板間乱流(TCF)及び乱流混合層(TML)の基本的乱流場について、我が国とその他の諸外国の研究者によるものに別けて図示した。乱流のDNSの規模は、最高速スーパーコンピュータの演算速度とほぼ同様に増大している。これはコンピュータの高速化にあわせて記憶容量も同時に大容量化するためであり、京コンピュータ(約10PFlops)を用いれば10<sup>12</sup>(1兆)の格子点を、2020年に1Exa Flopsの演算速度が実現されれば10<sup>14</sup>(100兆)の格子点を用いた乱流のDNSが実現されるものと予測される。プラントル数が1程度以下の流体の乱流熱輸送についてもほぼ同様な格子点を用いた解析が可能となる。

このようなまとめ方を著者が始めたのは、約15年前の1998年頃であったが、その当時Exaという単位は天文学等でしか使用されないものであり、Pの上の単位は何かと調べた記憶がある。その頃、2020年~2030年頃にExa Flopsのスーパーコンピュータができるはずと講演しても、聴衆にはなかなか理解されなかった。計算機科学の研究者にExa Flopsのスーパーコンピュータがほしいと話せば、それは無理と一蹴されていた。しかしながら、2013年の現在、我が国でもExa Flopsスーパーコンピュータ開発の計画が進行している。1Exa Flopsスーパーコンピュータによる100兆格子点とは、格子点数という観点からは自動車周りの完全シミュレーションが可能となることを意味して

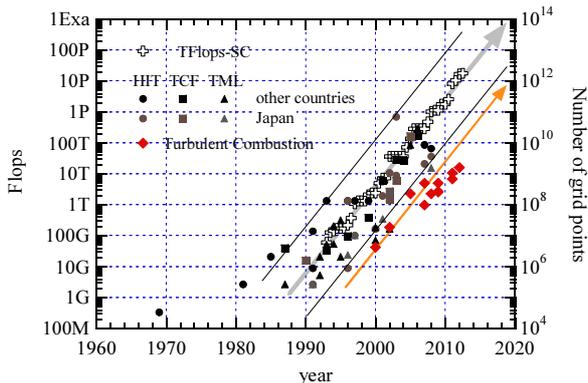


図 1 世界最高速スーパーコンピュータの演算速度と乱流・乱流燃焼 DNS の格子点数

いる。すなわち、自動車サイズ以下の流体機器（燃焼，沸騰，高圧等の付加的要素が含まない流動と伝熱のみ）については，モデル化無しに解が求まる可能性がある。

## 2.2 乱流燃焼 DNS の特徴

燃焼流では，圧縮性流体の支配方程式に加えて，化学種の保存方程式を同時に解析する。燃焼反応に関与する化学種は，水素のような単純な燃料に対しても 10 種類程度，メタンやプロパン等では 50 種類程度，ガソリン等では数百種類となる。また，それぞれの化学種の反応速度を求めるには，素反応と呼ばれる複雑な化学反応の組み合わせを考慮に入れる必要がある。解析に必要な素反応の数は，水素に対しても 30 程度，メタンやプロパン等では 300 程度であり，ガソリン等に至っては数千と考えられている。乱流燃焼の DNS では，これらの化学種数に応じた化学種保存方程式を同時に解析する必要がある。

火炎厚さは通常 1mm 以下であり，この中で複雑な化学反応が生じている。薄い火炎内で温度，密度及び化学種組成が急激に変化し，これに伴い輸送係数と熱物性値も大きく変化するため，これらも考慮に入れる必要がある。通常 1mm 以下の厚さの火炎を解像するために，火炎内に 10~20 点程度の格子を配置する必要がある。この格子点は解析に用いられる化学反応機構に依存する。乱流予混合燃焼の場合，必要とされる格子点は乱流場のコルモゴロフ・スケールと火炎厚さの比にも依存する。乱流燃焼では，コルモゴロフ長さと同程度であった場合，乱流のみの解析に比べて  $10^3$  倍程度の格子点を必要とする。ただし，解析する化学種数( $N_f$ )も複雑な燃料では増加するため，記憶容量は  $10^3(N_f+4)/3$  倍程度となる。

燃焼反応を構成する素反応の中には極めて速い反応速度を有するものが含まれており，時間積分間隔はナノ秒のオーダーである。このため，非圧縮性乱流の DNS に比べて約  $10^3$  倍，圧縮性乱流の DNS に比べて約 10 倍程度の演算時間が必要である。このようなことから，乱流燃焼の DNS は，非圧縮性乱流のみの DNS に比べて極めて莫大な計算資源（簡単な見積では計算負荷は約  $10^7(N_f+4)/3$  倍）を必要とする。このため，乱流燃焼場の DNS は 15 年前までは不可能であると信じられていた。世界初の三次元 DNS は著者らによって行われ，2000 年に発表された[6]。この DNS は，当時の超並列スーパーコンピュータを用いて約 2 年の歳月をかけて行われた。

## 2.3 乱流燃焼 DNS の将来

乱流燃焼の DNS に用いられた格子点数も図 1 に示した。図示した乱流燃焼の DNS は水素を燃料としたものであり，12 化学種と 27 素反応からなる詳細化学反応機構が用いられている。上述の見積では約  $5 \times 10^3$  倍程度の記憶容量が必要とされるが，乱流の最大 DNS の格子点数の動向と比較するとほぼこの見積の分だけ格子点は少ない。乱流燃焼の DNS に用いられる格子点の増加率も，世界最速スーパーコンピュータの演算速度の向上率と一致している。京コンピュータを用いれば  $10^{10}$  (100 億)，2020 年に 1 Exa Flops の演算速度が実現されれば  $10^{12}$  (1 兆) の格子点を用いた乱流燃焼の DNS が実現されるものと予測される。メタン燃料の場合，使用可能な格子点数は約 1/3~1/4 程度であり，1 Exa Flops のスーパーコンピュータで約 3000 億 ( $6700^3$ ) の格子点の DNS が実現される。ガソリン等の主成分であるヘプタンの場合，550 化学種と 2500 素反応程度の詳細化学反応機構であったと仮定すると，さらに使用可能な格子点数は減少し，1 Exa Flops のスーパーコンピュータで約 300 億 ( $3100^3$ ) となる。

前述のように，乱流燃焼の DNS の場合，記憶容量のみならず計算時間も極めて膨大となる。例えば，実際の自動車用エンジンの DNS に必要となる演算時間を試算する。対象を自動車用エンジンの 1 気筒，燃料はヘプタン程度として，計算には約 300 億 ( $3100^3$ ) の格子点を使用できるものとする。火炎の厚さ (約 0.3mm) とコルモゴロフ・スケールが等しいと仮定すると， $3100^3$  の格子点では，ちょうど 400cc 程度の体積を計算することができる化学反応機構には 544 化学種と 2446 素反応からなる詳細化学反応機構を採用し，テイラー・マイク

表 1 近年の乱流燃焼 DNS の計算条件

ID	$Re_\lambda$	Grids	Domain [mm <sup>3</sup> ]	Nt [bill.]	$\Delta t$ [ns]
P1	37.4	257×128×128	5×5×5	0.004	9
P2	120	1297×324×324	30×15×15	0.14	9
P3	223	3073×768×768	60×30×30	1.81	9
V1	97.1	1537×769×385	20×10×5	0.45	10
V2*	141.1	2305×577×1153	20×10×5	1.53	3.4
J1	97.1	1281×1025×513	20×16×8	0.67	10
S1	-	769×513×513	15×10×10	0.2	7.5
S2*	-	1537×1025×1025	15×10×10	1.61	3.5
C1	97.1	2049×257×2049	40×5×40	1.08	12

ロススケールに基づくレイノルズ数が 250 程度であったとする。詳細[1]は省略するが、例え 17PFlops の世界最高速スーパーコンピュータを用いたとしても計算には約 18 年を要する。1 Exa Flops の演算速度が実現されれば、これは約 4 ヶ月に短縮される。つまり、2020 年にはエンジン内乱流燃焼場の DNS が実現される可能性がある。この際に必要となる総主記憶容量は 1.6PB である。

このような解析を実際のエンジンの設計・開発に使用するには、約 4 ヶ月の CPU 時間は未だ長すぎる。解析時間をさらに短縮するには、化学反応項への陰解法の採用、現実的な簡略化学反応機構の開発等、幾つかの方法がある。燃焼流はいわゆるスティッフな問題の代表例であり、陽解法では前述のようにナノ秒オーダーの時間積分間隔を要求する。過去、計算機能力の不足を背景として、多くの陰解法が提案されてきた[7]。陰解法の精度が未検証であったため、乱流燃焼の DNS の多くでは陽解法が採用されている。著者らの研究[8]では、水素、メタン及びヘプタンを燃料とした場合に十数ナノ秒まで時間積分間隔を大きく設定可能であることが明らかにされている。この高速化は微々たるもののように感じられるかも知れないが、この時間間隔は音速によって規定されるクーラン条件の限界値である。反応項に対する陰解法の導入により、CPU 時間は 5 週間に短縮される。また、極めて膨大な化学種と素反応から構成される詳細化学反応機構から現実的な簡略化学反応機構を構築することも演算時間の短縮に貢献する。メタンを対象とした場合、簡略化学反応機構を採用することにより、総記憶容量が 2/3 程度、演算時間が 1/3 程度で同様な DNS が実行できる[8]。ヘプタンの場合は、総記憶容量と演算時間が 1/10 程度になるものと予測される。従って、CPU 時間は約 4 日、

総記憶容量は 160TB 程度となる。

近年、詳細化学反応機構の簡略化法に関する研究が進展しており、最新の簡略化法を用いたとしても 50 化学種程度までの簡略化が限界である[9]。ヘプタンの場合の 1/10 程度の化学種数までの簡略化とは、約 50 化学種である。効果的に簡略化を行えば、50 化学種程度で多くの燃料に対して許容範囲内で燃焼特性を再現できることから、50 化学種を対象とした DNS の実現が必要である。これはメタンの詳細化学反応機構と同程度の規模であることから、著者らは詳細化学反応 (53 化学種 325 素反応) を用いたメタン燃料の三次元 DNS に現在取り組んでいる。

### 3. 乱流燃焼 DNS の最先端

#### 3.1 乱流予混合火炎の最新 DNS

著者らが最近実行した、あるいは現在実行中の乱流燃焼の DNS を表 1 にまとめた。表中の P は等方性乱流中を自由伝播する乱流予混合火炎[6][11]、V は保炎用ロッドにより火炎が維持される V 型乱流予混合火炎[12]、J は平面噴流乱流予混合火炎[13]、S は矩形燃焼器内の旋回噴流乱流予混合火炎[14]、C は閉空間内での乱流予混合火炎[15]をそれぞれ示している。P1 は著者らが行った詳細化学反応機構を考慮に入れた世界初の 3 次元 DNS[6]である。Nt は DNS に用いられた総格子点数であり、最初の DNS の 400 万点程度から現在では、最大で約 18 億点にまで増加している。計算領域も当初の 5mm×5mm×5mm から 6cm×3cm×3cm へと 10 年余りで 3 桁近く大きくなっている。

#### 3.2 高レイノルズ数・高乱流強度火炎の DNS

詳細化学反応機構を考慮に入れた世界初の三次元 DNS から 10 年余りの歳月が経ち、現在三次元 DNS は乱流燃焼研究の強力な手段となっている。

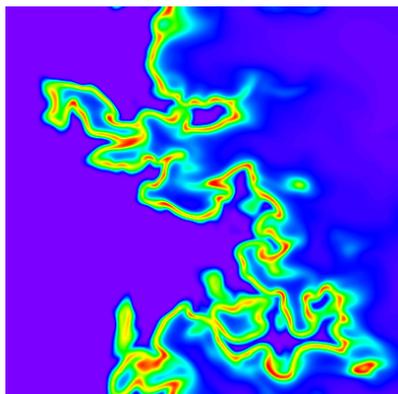


図2 高レイノルズ数乱流予混合火炎の DNS 例

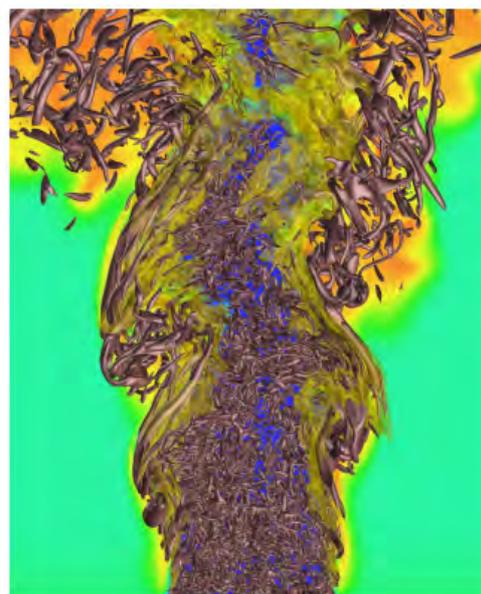


図3 平面乱流噴流予混合火炎の DNS 例

ただし、最新の DNS であってもレイノルズ数は実燃焼器に比べて低く、高レイノルズ数 DNS の実現が必要である。図2は、一様乱流中を自由伝播する水素・空気乱流予混合火炎の最近の DNS を示している[11]。可視化されている物理量は、熱発生率（化学結合エネルギーから熱エネルギーに変換される量）である。この DNS のテイラー・マイクロスケールに基づくレイノルズ数( $Re_\lambda$ )は約 120 である。さらに高レイノルズ数 ( $Re_\lambda \approx 220$ ) の DNS も実行されている。純粋乱流の DNS に比べると、このレイノルズ数は低いと感じるかも知れないが、著者らの知る限り乱流燃焼の DNS では最もレイノルズ数が高い。純粋乱流の研究に比べると 20 年程遅れているが、乱流燃焼の DNS も純粋乱流の場合とほぼ同じ道筋を辿っている。すなわち、実験では困難な乱流火炎の構造解明と DNS データを有効に用いた RANS や LES 用乱流燃焼モデルの構築と検証である[12][16]。

ここまでは、単に高レイノルズ数との表現を用いた。しかし、乱流燃焼は乱流と火炎の二つの物理現象の干渉であるため、乱流側だけの条件を規定することは適切ではない。乱流の速度スケールを大きくして、特性長さを短くすれば同じレイノルズ数となるが、ここで干渉する火炎の特性が固定されていれば（燃焼条件を規定すれば、火炎の特性スケールは決まる）、当然ながら乱流火炎構造は異なる。火炎の特性速度に比べて乱流の速度スケールを極めて大きく、火炎の長さスケールに比べて乱流の長さスケールを短くした場合、乱流と火炎は極めて強い干渉を起こす。このような条件を高強度乱流火炎と言う。このような火炎は実験室規模の燃焼器で形成することは困難であるが、実際に発電用ガスタービン燃焼器等では、この領

域が使用されているとの指摘もある。この領域では、乱流の微細渦構造の時間スケールと素反応の時間スケールが近くなるため、化学反応の絶妙なバランスで決定されている火炎内部の構造にまで乱流の影響が顕著に現われる。高乱流強度の条件では、一部のラジカルが通常ならば存在し得ない低温の予混合気中に乱流運動により輸送される。著者らはこのような構造をラジカル・フィンガリングと名付けている[17]。この領域の火炎構造を解明し、高精度にモデル化して行くことが、実用燃焼器の設計・開発には非常に重要である。

### 3.3 複雑燃焼場の DNS

一様乱流中を自由伝播する幾何形状が単純な乱流燃焼場から、乱流噴流火炎や高温ロッドで火炎が維持される V 型乱流火炎、さらにはガスタービンを模擬した矩形燃焼器内旋回乱流火炎、自動車用エンジンを模擬する定容容器内予混合火炎伝播など、より現実的な燃焼場に乱流燃焼の DNS は拡張されている。図3は平面噴流乱流予混合火炎の DNS 例[13]を示しているが、主流が有する強いせん断により火炎面は極めて複雑な構造となる。

乱流燃焼の DNS をより現実的な燃焼条件に近づけるには、圧力の問題を克服しなければならない。多くの燃焼器は数十気圧の高圧下で稼働されている。しかし、DNS のほとんどは大気圧下に限定されている。高圧下では動粘性係数が低下し、必然的に乱流場のレイノルズ数は上昇する。さらに、同じ予混合気であっても、圧力の上昇とともに

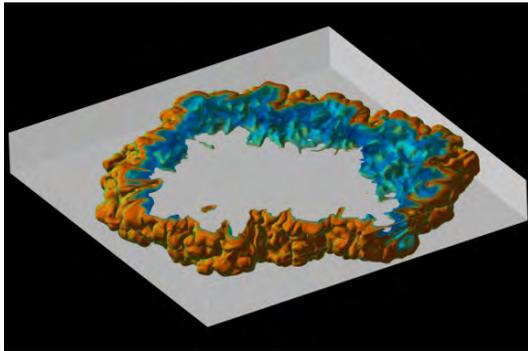


図4 定容容器内乱流予混合火炎伝播のDNS例

に火炎の厚さは薄くなるため格子分解能も上げざるを得ない。このため、高圧力条件でのDNSは非常に困難である。表1中のIDに\*を付けたDNSは、高圧力条件を目指したDNSであり、他のDNSが0.1MPaであるのに対して、\*を付したDNSは0.2MPaである。例えば、V型乱流予混合火炎の場合、0.2MPaのDNSには0.1MPaの3.4倍、約15億点の格子点を用いており、このことだけでも圧力を上げることが乱流燃焼のDNSにとって大変なことであることが理解できるであろう。

2020年に自動車用エンジン内の乱流燃焼のDNSを本当に実現するには、今から基礎研究として準備が必要である。図4は定容容器内の乱流予混合火炎の伝播に関するDNS例を示している[15]。このDNSは水素燃料を対象としたものであるが、4cm×0.5cm×4cmの薄型の定容容器を対象として約11億点の格子点を用いられている。定容容器には乱流状態の予混合気充填されており、強制着火後、火炎は伝播を開始する。火炎は上下壁面に衝突した後、壁面に沿って伝播を続ける。この過程で容器内圧力は上昇し、これに伴い未燃予混合気の乱流は強化され、レイノルズ数も上昇する。これは乱流燃焼速度の増大、さらには壁面熱損失の増大を引き起こす。

### 3.4 燃焼DNSの新たな展開

乱流燃焼のDNSの更なる応用例として、均一圧縮自着火燃焼(HCCI)のDNSが比較的多く報告されている。HCCIは高効率・低環境負荷が期待でき、ガスエンジンや自動車エンジンにおける新たな燃焼形態として期待されている。一部実用化されているが、自着火現象特有の制御性の悪さが問題となっている。著者らが行っているDNS例[18]では、燃料をメタンとして53化学種325素反応の詳細化学反応機構が用いられている。圧力条

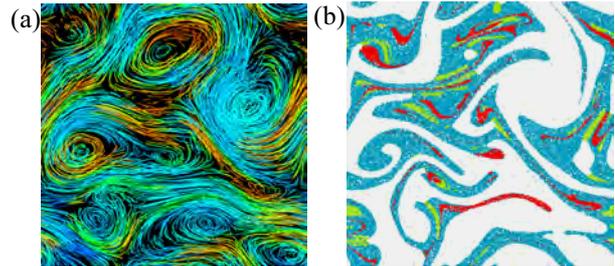


図5 HCCI燃焼のDNS例

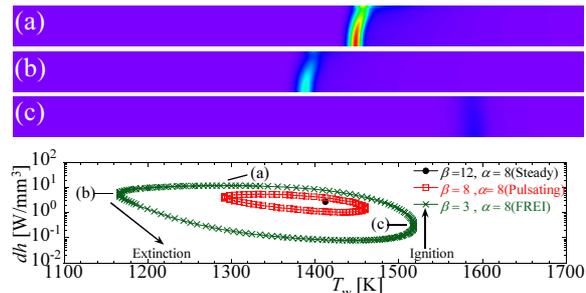


図5 マイクロ燃焼のDNS例

件は実機に近い約50気圧である。HCCI燃焼では予混合気を急速に高圧まで圧縮して自着火させるが、急激な燃焼を制御するために、温度や濃度に変動を与える。しかし、実際の燃焼形態は明らかにされていない。乱流状態でさらに局所的に温度や燃料濃度が異なる予混合気の燃焼形態を検討するために、流体粒子を追跡するラグランジュ粒子が同時に解析されている(図中(a))。粒子上の物理量の時間履歴から初期の予混合気状態とその燃焼形態を解析できる。一般には予混合気全体が自着火すると考えられているが、図中(b)に示すように予混合気の時間履歴により、自着火(赤色)、火炎伝播(青色)、火炎囲い込み(緑色)と火炎形態を分離でき、これはEGR等で初期に与える温度変動の状態により決定される。ここで、白色は未燃予混合気である。この解析は未だ二次元が限界であるが、近い将来三次元解析へと拡張され、HCCI燃焼の着火制御手法の確立に寄与するものと考えられる。

近年、分散型発電システム、ポータブル電源等のエネルギー源としてマイクロ燃焼技術が注目されている。マイクロ燃焼では流れは層流である場合が多いが、乱流燃焼のDNSで用いられる高精度な解析は小型燃焼器の特性解明にも応用できる。マイクロ・ガスタービンのDNS[14]もこの一例であるが、マイクロフローリアクター[19]を模擬したDNSも行われている。図5はマイクロフローリ

アクターの DNS 例[20]を示している。壁温勾配を有する小径円管では、温度勾配の大小により形成される火炎形態が異なる。この DNS から、着火—伝播—消炎を繰り返す FREI[19]と呼ばれる現象が流体と壁面間の熱授受量特性に起因していることが明らかにされつつある。

#### 4. まとめ

本稿では、スーパーコンピュータを用いた乱流燃焼研究について紹介した。2020年に1 Exa Flopsが実現されたとしても、計算速度の向上をただ待っていれば、エンジン内燃焼の完全シミュレーションが実現される訳ではない。これを実現するには、数値解析手法の開発に加えて、壁面と火炎の干渉（表面反応を含む）、高圧環境下の反応機構、高圧環境下の物性値等の物理・化学的な問題も解決しておく必要がある。壁面近傍の火炎の挙動は、エンジンの効率に極めて重要であるが、表面での化学反応については未解明な点が多く含まれており、壁面と乱流火炎の干渉についても現在研究が行われている段階である。また、多くの燃焼器内は高圧環境下であるが、その場合の化学反応機構も必ずしも確立されていない。なお、航空機や発電用ガスタービン、大型燃焼炉等の完全シミュレーションは100年後も不可能であるため、高精度な乱流燃焼モデル開発も必要であることは変わらない。

**謝辞:** 本稿の一部は、先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発支援プログラム）（No. GR038）による。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] 店橋護, 日本燃焼学会誌, **52-159** (2010) 39.
- [2] 店橋護, 福島直哉, 宮内敏雄, ながれ, **29-2** (2010) 85.
- [3] 店橋護, 志村祐康, 福島直哉, 自動車技術, **66-4** (2012) 82.
- [4] 店橋護, 福島直哉, 志村祐康, 由川格, ながれ, **31-4** (2012) 333.
- [5] <http://www.top500.org>
- [6] Tanahashi, M., Fujimura M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **28** (2000) 529.
- [7] Brown, P. N., Byrne, G. D. and Hindmarsh, A. C., SIAM J. Sci. Stat. Comput., **10**(1989) 1038.
- [8] Tanahashi, M., Sato, M., Shimura, M. and Miyauchi, T., J. Therm. Sci. Tech., **3-3** (2008) 391.
- [9] Sun, W., Chen, Z., Gou, X. and Ju, Y., Combust. Flame, **157-7** (2010) 1298.
- [10] Tanahashi, M., Nada, Y., Ito Y. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **29**(2002) 2041.
- [11] Shim, Y.-S., Tanaka, S., Tanahashi M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **33**(2011) 1455.
- [12] Minamoto, Y., Fukushima, N., Tanahashi, M., Miyauchi, T., Dunstan, T. and Swaminathan, N., Phys. Fluids, **23**(2011) 125107.
- [13] Shimura, M., Yamawaki, K., Fukushima, F., Shim Y.-S., Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., J. Turbulence, **13** (2012) N42.
- [14] Tanaka, S., Shimura, M., Fukushima, N., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **33**(2011) 3293.
- [15] Yenerdag, B., Fukushima, N., Shimura, M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. 22nd Int. Symp. Transport Phenomena, (2011)
- [16] Yoshikawa, I, Shim, Y.-S., Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **34** (2013) 1373.
- [17] Shim Y.-S., Fukushima, N., Shimura, M., Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. Combust. Inst., **34**(2013) 1383.
- [18] Katayama, M., Fukushima, N., Shimura, M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Proc. KSME-JSME Therm. Fluid Eng. Conf., (2012).
- [19] Maruta, K., Kataoka, T., Kim, M.I., Minaev, S., and Fursenko, R., Proc. Combust. Inst., **30-2** (2005) 2429.
- [20] 河尻翔太, 福島直哉, 志村祐康, 店橋護, 宮内敏雄, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **2-3** (2013) 516.

## スーパーコンピュータによる生体力学シミュレーションとその医療応用

*Biomechanical Simulations using Supercomputer and their Medical Applications*

高木 周 (東京大学)

Shu TAKAGI (The University of Tokyo)

e-mail: takagi@mech.t.u-toko.ac.jp

### 1. はじめに

少子高齢化が進んでいく現代社会において、活気のある社会を維持していくためには、年齢によらず多くの人々が健康的な生活を送る健康寿命を延ばすことが、より重要な意味を持つ。そのような観点から、重篤な病態に至る様々な疾患に対して、できる限り早くその徴候を察知し、治療を施す、あるいは事前に予防することが極めて重要となる。特に、日本人の三大死因である癌、心疾患、脳血管疾患を予測し、治療を支援するツールの開発が期待されている。このような状況のもと、患者個々の身体の特性に合わせた体に優しい医療の実現に向けて、MRI、CT、超音波などで取得された患者ごとの医用画像データに基づくシミュレーションにより、病態の予測や治療の支援、術後の経過予測などを行えるようになることが期待されている。本稿では、スーパーコンピュータを用いた人体に関する生体力学シミュレーションを通して、病態の予測と治療の支援を行なう次世代型の予測医療に向けたシミュレーション手法の開発について解説する。なお、ここでは、著者らの研究グループが行ってきた「京」コンピュータ向けに開発されたソフトウェアを中心に紹介するため、伝熱に関する問題は一部のみとなるが、手法そのものは伝熱の問題すなわちエネルギー方程式との連成にも容易に拡張可能である。

### 2. 医用画像データに適した

#### 生体力学シミュレーション手法

##### 2.1 生体力学シミュレーション

生体力学に関するシミュレーションは、筋骨格系・臓器の変形から血流まで、生体の力学に関わる動的挙動を再現し、そのメカニズムを解明すること、さらに、その結果を医療分野に応用する部分までをシミュレーションの対象としている。この際、生体力学シミュレーションに特有かつ重要

となるのが、MRI、CT、超音波などの医用画像データを基にした解析である。多くの場合に、医用画像データより得られた静的な画像データに対し、その動的挙動を表す支配方程式（質量保存式と運動量保存式など）を解くことにより、動的挙動を予測する。実際に計算に利用できる人体データの例を、図1に示す。これは、実際に生きているヒトのMRI、CTの医用画像データからコンピュータ上に人体を再構築したものである。データは、ボクセル形式で与えられている。ボクセルとは、2次元の画像データにおけるピクセルの概念を3次元に拡張したものであり、データを構成している離散的な点に関して、各点がどの臓器に所属しているか、といった物性値を持っているかの情報が与えられている。

生体力学シミュレーションは、従来は、主に計算規模の制約から、流体力学・固体力学をベースにした力学的側面に特化したシミュレーションが主であったが、最近では、生理学的効果を考慮に入れ、生体の持つ階層性を重視したマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションも行われるようになってきた。具体例として、久田俊明ら（東京大学）が開発している心臓シミュレータ（UT-Heart[1]）は、心筋細胞一つ一つの動きから心臓全体の拍動を再現し、「京」コンピュータ上で行われた最新の計算結果では、心筋細胞内で心筋を収縮させている2種類のタンパク質、アクチン分子とミオシン分子のクロスブリッジを再現するサルコメアレベルの力学を導入し、タンパク質分子 ↔ 心筋細胞 ↔ 心臓全体の3階層統合に世界で初めて成功している。さて、UT-Heartでは、有限要素法をマクロスケールの連続体計算に用いているが、以下では、ボクセルデータの適用により適した固定格子を用いた有限差分法に基づく手法を用いた解析について説明する。

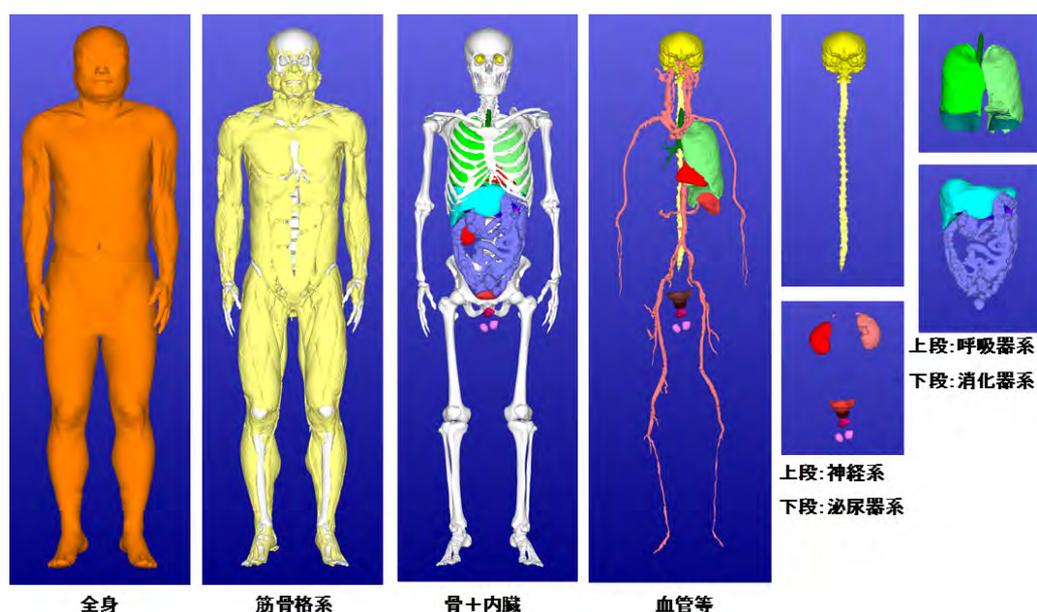


図1 生きたヒトより構築された人体ボクセルデータ ((独) 理化学研究所より提供)

## 2.2 医用画像データと計算手法

生体は血流を介して細胞に酸素と栄養分を供給し、老廃物を回収し、また体温を調整しながら、生命を維持している。口から入る水分や食料の移動、肺呼吸による酸素の取り込みも含め、生体を維持しているものは物質の流れである。心臓は血流を維持するポンプの役割を果たし、肺の動的挙動は酸素供給を維持する役割を果たしている。これらの例からもわかるように体内の組織・器官はいたるところで流体と接し、多くの場所で流動現象と組織・器官の形状変化が関連したものとなっている。すなわち、生体力学シミュレーションでは、血流と関連した疾患（心疾患、動脈瘤、動脈硬化・狭窄など）の再現をはじめ、様々な場面で流体構造連成の計算が必要となる。

生体力学、特に固体力学の分野を中心に、従来広く用いられている数値計算手法は有限要素法である。有限要素法では、境界（界面）がある場合には、基本的には境界に沿ってメッシュの生成を行う。例えば、臓器や血管壁などの形状に沿って計算メッシュ（要素）の生成を行なう。有限要素法はその数学的記述の美しさに加え、適切なメッシュ生成が行われれば、十分信頼できる結果を提供することが可能であり、実際の設計の現場でも広く用いられている。特に工業製品では、設計図のデータが CAD データとして電子化されている

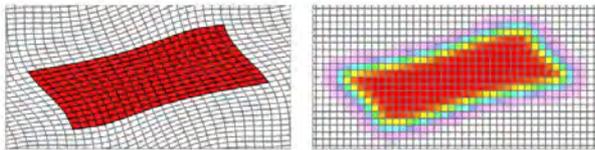
ため、そのまま CAD データの正確な位置情報を利用してメッシュ生成を行い、解析を進めることができる。一方、生体の場合には、そのような意味での設計図面は存在しない。多くの生体が同一の名称の組織・器官を有しているが、その形状や大きさはそれぞれの個体でまちまちであり、また CT, MRI, 超音波などで取得された医用画像データからは数百ミクロン以下のサイズにおける正確な寸法評価も困難となる。

さて、このような医用画像データを基にして、組織・臓器の形状に合わせたメッシュを生成し、流体構造連成の問題として解くことを考えた場合には、まずは画像データのピクセル毎に与えられる輝度値などの情報から、それぞれの組織・臓器の外形の抽出さらには抽出された外形を境界に持つメッシュの生成が必要となる。このメッシュ生成は、人体のような複雑な形状をしたものに対しては自動化が難しく、実際に時間がかかるのは計算時間そのものよりも、メッシュ生成に費やす時間である場合が多い。従って、医用画像データからなるべく特殊な知識を持たずにシミュレーションを行なえることが望ましい。これらのことを考慮して、医用画像データに適した流体構造連成手法の例として、界面で精度は落ちるがメッシュ生成のプロセスを必要としない固定格子を用いたオイラー型の流体構造連成手法の開発を行ってきた。

さらに、固定格子を用いた手法は、スカラー型の超並列計算機において、CPU ごとの計算のロードバランスをとりやすく、今後広く普及していくと考えられるメニーコア型の計算機では、便利性がより上がると考えられる。以下では、著者らが開発を進めている大規模並列計算に適した新しい流体構造連成の手法と、その手法を血流のシミュレーションに適用した例を紹介する。

### 2.3 オイラー型流体・構造連成法

一般的に流体の運動量保存式である Navier-Stokes 方程式は、固定した格子上で計算を行うのに適しているが、大変形を伴う固体では必ずしも適した手法にならない。そのため、従来、大変形を伴う弾性体の問題を扱うときには、固体側を Lagrange 的に扱う手法が広く使われてきた。著者らが開発した手法は、大変形する超弾性体に対しても固定格子を利用してオイラー的に扱う手法である。この手法では、各相を表す指標関数となるスカラー関数として、各相の体積率を表す VOF 関数を用いる。図 2 に、固相の変形に対する Lagrange 的扱いと、Euler 的扱いの違いについて示す。右図で赤い部分が固相の体積率が 1 となっているところに対応する。



(a) Lagrange 法 (b) Euler 法

図 2 固体の変形の記述方法について

ここで、各メッシュにおける固相の体積率を  $\phi_s$  と表すと、固相の時間発展は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi_s = 0, \quad (1)$$

この式は、一般に固定格子を用いて界面の時間発展を記述するために良く用いられる式である。さて、生体材料では水が主成分となり、非圧縮材料と見なすことができるので、質量保存を表す連続の式として、 $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  が成り立つ。また、運動方程式に関しては、固体側の応力を Cauchy 応力  $\boldsymbol{\sigma}$  として表記すると、

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}, \quad (2)$$

応力  $\boldsymbol{\sigma}$  を与える構成方程式は、各相の体積率を用いて、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \phi_f \boldsymbol{\sigma}_f + \phi_s \boldsymbol{\sigma}_s \\ &= (1 - \phi_s) \left( -p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \right) + \phi_s \boldsymbol{\sigma}_s, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、固体側の構成方程式として超弾性体の式を考える。たとえば、生体のモデリングでしばしば用いられる Mooney-Rivlin 体の場合は、左 Cauchy-Green 変形テンソル  $\mathbf{B} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$  ( $\mathbf{F}$  は変形勾配テンソル)を用いて、次式で与えることができる。

$$\boldsymbol{\sigma}_{MR} = (2c_1 \mathbf{B} + 2c_2 (\text{tr}(\mathbf{B})\mathbf{B} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) + 4c_3 (\text{tr}(\mathbf{B}) - 3)\mathbf{B}), \quad (4)$$

さて、構成方程式の中で、流体側は、現時点の速度場の情報から応力の計算が可能であるが、固体側は左 Cauchy・Green 変形テンソル  $\mathbf{B}$  の現時点における情報が必要となる。Lagrange 的に物質点を追跡する方法では、現時点の計算点の情報からこの値が直接求まるが、固定格子を用いた Euler 的方法では、 $\mathbf{B}$  の値の時間発展を計算する必要がある。本手法では以下に示すテンソル量  $\mathbf{B}$  の輸送方程式を固定格子上で数値的に解いて、時間発展している点に大きな特徴がある。

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{B} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{L}^T, \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{L} = \nabla \mathbf{v}$  は速度勾配テンソルである。 $\mathbf{B}$  は、対称テンソルであるため、式(5)を解くことは、6つの成分に対する式を新たに解くことに対応する。すなわち、本手法ではメッシュ生成のプロセスを省略できる代わりに、大変形する物体の物質点の情報を維持するために、式(5)で与えられるテンソルの移流方程式を新たに解くことになる。

本手法では固定格子を用いているため各計算ノードのロードバランスもとりやすく超大規模計算にも非常に適した手法となる。図3にこの手法を用いて、赤血球を模擬した 300 万個の超弾性体が管の中を流れていく様子を計算した結果を示す。この管の中には、血小板を模擬した粒子もばらまかれており、赤血球が存在することによりその影響で血小板の拡散が促進される様子が再現される。本手法は、「京」のフルノードを用いて、実効速度 4.5 ペタフロップス (実効性能 43%) を達成しており、流体構造連成手法として世界最速を記録した。「京」が 66 万を超えるコア数を持つスカラー計算機であることを考えると、

連続体の計算において、実効性能 40%以上を出しているのは、特筆すべき点である。定式化および計算精度の検証などの詳細については文献[2]を、また 4.5 ペタフロップを達成するために行った工夫については、文献[3]を参照して頂きたい。

なお、本手法の適用範囲は生体に限らず、通常の流体構造連成問題にもそのまま適用できる。画像データなどピクセルの輝度値をもとにして計算を始めるような系には特に適している。また、固い材料に対しても超弾性体の応力項を陰的に扱うことにより安定に解くことが可能となる[4]。

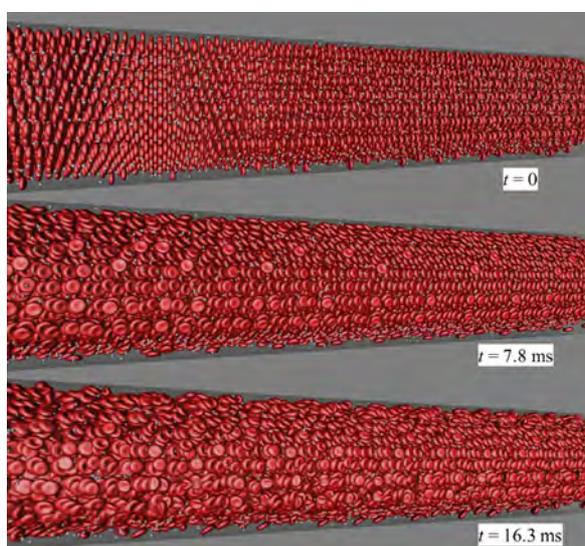


図3 多数の赤血球を模擬した弾性体を含む流れの計算

### 3. 血栓シミュレータへの利用

#### 3.1 心筋梗塞のシミュレーションに向けた血栓症のモデリング

心筋梗塞は、心臓の心筋細胞に酸素を供給する血管である冠動脈に動脈硬化が起き、その部分で血栓が成長し、血管を閉塞することにより引き起こされる疾患である。血栓が成長し血管を閉塞する疾患は血栓症と呼ばれる。血栓症は、動脈を起こした血管内皮細胞の損傷を受けた部分に血小板が吸着するところから始まり、血小板の凝集さらには血栓の成長、血液の凝固へと進展し、血管閉塞に至る。血栓形成の初期段階である血小板凝集は、血小板が血管壁へと吸着する一次凝集と血小板が活性化し、血小板同士の吸着にまで発展する

二次凝集の2つの段階に分けられる。一次凝集では、血小板表面の糖タンパク glycoprotein Iba (GPIba) と血管壁に吸着しているタンパク質 von Willebrand Factor (vWF) との間の結合が重要な役割を果たしている。この2つのタンパク質間の結合は血小板と血管壁の接触面において数十から数百個程度形成され、両者を結びつけている。また、より大きなスケールで見ると、血漿・血小板・赤血球の力学相互作用が血栓の形成に大きく関与している。血管壁に吸着した血小板に働く様々なスケールの力とそれを解析する方法を考える。血小板が血管壁に吸着したまま血栓の成長へと繋がり重篤な状態に向かうか、血流で吹き飛ばされてやがて血流中で溶解し事なきを得るかは、血小板と血管壁の間のタンパク質分子間に働く結合力の総和と血流によりもたらされる流体力の大小関係で決まる。すなわち、分子スケールのマイクロな現象と流体力学レベルのマクロな現象の相互作用の結果、血小板の吸着・脱離が決定されることとなる。このように血栓の形成過程は様々な時空間スケールの現象が複雑に影響しあいながら進行する典型的なマルチスケール問題であるため、スケール間を橋渡しするような大規模な連成解析が必要となる。

ここでは、血管壁上の vWF 分子と、血小板表面の GPIba 分子の間のタンパク質分子間の相互作用をモンテカルロ法で計算しながら、前節で説明した有限差分法に基づくオイラー型流体構造連成計算手法を膜-構造連成手法へと発展させて、両者を連成させたマルチスケールシミュレーションについて紹介する。すなわち、血流中を流れる多数の赤血球や血小板などの血球細胞については、流れ場と相互作用して変形しながら流れていく状態を膜-流体連成問題として詳細に解く。さらに血小板については、膜表面の GPIba 分子と血管壁の vWF 分子の分子間相互作用力を導入し、GPIba 分子と vWF 分子の結合・乖離を遷移状態理論に基づいてモンテカルロ法により計算する。この結果を、血小板と壁面の間に働く力として、上記の流体構造連成の計算の中に取り込んで連成させて解くことにより、血小板の壁面粘着まで取り込んだマルチスケールシミュレーションが達成される。膜-流体構造連成の部分の離散化も含めた計算方法の詳細

については文献[5]を、モンテカルロ法との連成によるマルチスケールモデリングの部分については、文献[6]を参照して頂きたい。実際の計算においては、以上の定式化を用いて、直交固定格子において有限差分法により離散化を行う。数値計算上は、格子解像度レベルでこのデルタ関数を鈍らして計算を実行することになる。この際、時間発展とともに $\nabla\phi$ の値が数値的に拡散していき、膜の周辺で界面の位置がぼやけてくるのが深刻な問題となる。このような方法を回避するために、数値拡散の影響が少ない移流スキームの開発を行った(MTHINC法)。詳細な定式化に関しては、文献[7]を参照のこと。

従来の知見より、赤血球の存在しない系においては、血小板の粘着が起きづらいことが知られている。ここでは、赤血球がもたらす力学的な効果に関連して、シミュレーションを行なった例を示す。実際の血管のように動脈硬化に伴う狭窄がある場合の結果を図4に示す。狭窄形状の違いにより血小板の粘着の様子が異なり、狭窄部が大きく盛り上がっている場合の方が、狭窄部に広く血小板が粘着している様子がわかる。なお、この計算においても赤血球が存在しない場合には血小板は粘着せず、血小板粘着にとって赤血球のもたらす液相(血漿)の揺らぎが重要であることが見てとれる。

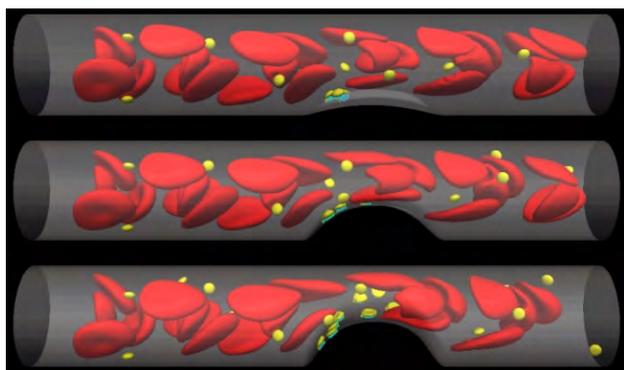


図4 狭窄部の影響が血小板粘着に与える影響

### 3. 超音波治療器の開発をめざして

高強度の超音波を患部に集束させて腫瘍の焼灼などを行うHIFU(High Intensity Focused Ultrasound)治療が、次世代型の低侵襲治療法として期待されている。特に、欧米の企業(GE, Phillips, Siemens他)

においては、脳の治療も含めて様々な部位に対するHIFU治療機器の製品化が急速に進んでいる。HIFU治療器においては、患部(ターゲット)への超音波集束における焦点制御とターゲット以外の部位における発熱の抑制が重要となる。特に硬さの大きく異なる骨などが存在する場合は、軟組織との音響インピーダンスの違いにより、超音波の複雑な反射・屈折が起こり治療上の大きな障害となるため、時間反転法と呼ばれる手法を用い、アレイ状に並べた多数の超音波発生素子の位相制御により焦点位置の制御を行う手法の導入が重要である。

時間反転法では、最初のステップで腫瘍の位置に仮想的に音源を置き、この音源からそれぞれの超音波素子に到達する圧力波形を記録し、この情報を用いて各素子にあてる位相や振幅を決定する。これにより、次のステップとして、素子側から照射された超音波が、仮想的においた音源のところに集束することが期待される。しかし、実際の治療器では、有限な数の素子で有限な領域を囲み、さらに超音波伝播の非線形性の影響などにより、音源への集束は必ずしも保証されていない。実際の系でどの程度の集束が期待できるか評価するために開発されたものが図5に示すHIFUシミュレータ(ZZ-HIFU)になる。このシミュレータでは、CT, MRI, 超音波などで取得された医用画像と、CADデータで与えられた超音波治療器のデータを結合することにより、超音波治療における時間反転法による焦点制御の精度に関して評価することができる。これまで、実際に生きているヒトの人体ボクセルデータを用いて、頭蓋骨越しの超音波照射や体深部にある肝臓への照射と温度上昇予測などのシミュレーションを行ってきた[8][9]。図6は、人体ボクセルデータを用いて、あばら骨越しに超音波を照射して体深部にある肝腫瘍を焼灼するシミュレーションを行った結果である。数値計算手法は有限差分法をベースにし、超音波伝播の部分の詳細な計算に加え、温度場の計算も行い、さらに温度上昇の影響でタンパク質が変性する効果も取り入れている。ここでは、タンパク質の変成を再現するために、Phase Field法を導入しAllen-Cahn方程式により、タンパク質の変成を相転移モデルで再現している。位相制御をすることに

よりターゲット近傍が適切に焼灼されている様子がシミュレートされている。詳細については文献[9]を参照して頂きたい。

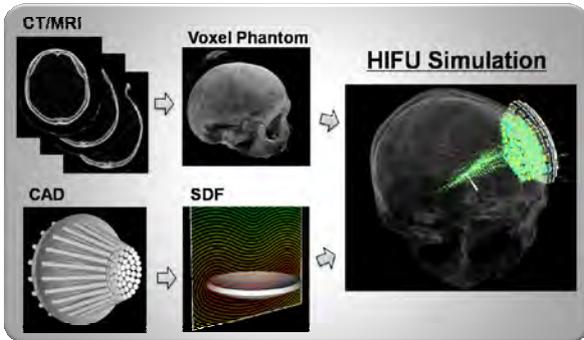


図5 CTとCADデータを用いたHIFUシミュレータ

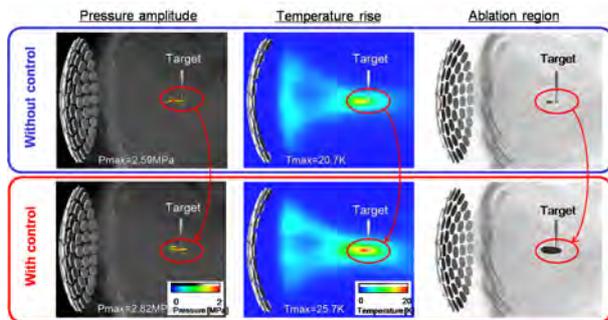


図6 肝腫瘍焼灼のシミュレーション (アレイトランスデューサの制御の有無による焦点、温度分布および熱変性領域の比較)

さて、当然のことではあるが、シミュレーション結果を信頼しきって治療を行うことはできない。実際に治療をする場合には、超音波の集束位置、温度分布および焼灼程度のモニタリングが重要となる。実際の治療時のモニタリングの手法として、MRIにより温度モニタリングをしながら腫瘍の焼灼を進めるMRI-Guided HIFUによるものが主流となつつある。これに対し、現在、東京大学のTSBMIプロジェクト<sup>[10]</sup>で我々が開発を進めている超音波治療器は、超音波でリアルタイムに観察しながら超音波で焼灼する方法である。この装置を実現させるために、腫瘍への集束および焼灼程度を判定するための診断プローブを組み込んだ診断・治療一体型のHIFU治療器の開発を行っている。すなわち、焦点

位置を高精度に制御し、かつ焼灼程度を判定するのに十分な解像度を持つ装置の開発を進めており、上記のHIFUシミュレータを用いた大規模シミュレーションにより超音波素子の配置および診断プローブのための開口径の検討なども行ない、国産初の治療器の開発を目指している。

#### 4. おわりに.

本稿では、「京」向けに開発を進めてきたソフトウェアの一部を紹介した。これらのソフトウェアは、今回紹介できなかったものも含め、[http://www.csrp.riken.jp/application\\_j.html](http://www.csrp.riken.jp/application_j.html) に公開されている。ぜひ、多くの方にご利用して頂きたい。

**謝辞：**オイラー型流体構造連成手法は、杉山和靖博士(理研)、血栓シミュレータの流体-膜連成手法の部分は伊井仁志博士(大阪大)、タンパク質分子間相互作用のモンテカルロ計算のモデリングは塩崎聖治博士(理研)、超音波シミュレータは、沖田浩平博士(日大)が実際のソフトウェアの開発を行った。記して感謝の意を表す。また、ソフトウェアの開発には、文部科学省プロジェクト「次世代生命体統合シミュレーションのソフトウェア開発」および「予測生命科学・医療および創薬基盤」の支援のもと行われた。

#### 引用文献

- [1] <http://www.sml.k.u-tokyo.ac.jp/>
- [2] K. Sugiyama *et al.*, *J. Comput. Phys.*, 230 (2011) pp. 596-627.
- [3] 杉山ら, *ながれ*, 32 (2013), pp.139-143.
- [4] Ii, S. *et al.*, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 65 (2011) 150-165.
- [5] Ii, S., *et al.*, *Commun. Comput. Phys.*, 12 (2012) 544-576.
- [6] 高木ら, *ながれ*, 2013年6月号掲載予定,
- [7] Ii, S. *et al.*, *J. Comput. Phys.*, 231 (2012), pp.2328-2358.
- [8] Okita, K., *et al.* *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 65, (2010) pp.43-66.
- [9] Okita, *et al.* *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol.64, (2010) pp.1395-1411.
- [10] <http://www.tsbmi.m.u-tokyo.ac.jp/>

## スーパーコンピュータを用いた大規模計算：気象

### High Performance Computing for Weather

高橋 桂子 (独立行政法人海洋研究開発機構)

Keiko TAKAHASHI

(Japan Agency for Marine and Earth Science and Technology (JAMSTEC))

e-mail: takahasi@jamstec.go.jp

#### 1. はじめに

気象予測が災害を未然に防ぐことを目的とするだけでなく、季節予測からさらに先の時間の気候変動予測は、今後、新しい産業への発展と展開も期待されており、気象・気候変動予測は、社会的な要請と期待が大きい。気象災害や気候変動の予測の最も有望な手段として、大気、海洋、陸面の状態を総合的に表現し、それらを連成した数値モデルによる予測シミュレーションがある。これまでも、気象災害予測は、台風や豪雨、竜巻などを対象に、多くの機関が取り組んできた課題であり、知見が蓄積されてきている。しかし、これまでの延長上での予測シミュレーションでは、飛躍的な予測精度の向上は見込めない。それは、気象現象や気候変動システムは、異なる時空間スケールの現象が互いに影響を及ぼし合う複合的な非線形現象であるので、これまでほとんど取りくまれてこなかったマルチフィジックス・マルチスケール現象として対象をとらえる必要があるからである。人間生活に重要な“水”の相変化と物理量の輸送過程に関わる降雨および豪雨予測は、学術的にも興味深く、難しい課題が山積している。これは、“水”が水蒸気、雨、雪、土壌水分など多様な形態で大気中に存在し、その動態変化過程を把握するとともに、相変化に伴う熱エネルギー変化をとらえる必要がある。加えて、台風や梅雨前線などのような総観スケール（1000km オーダーの空間スケールをもつ）現象は、大気における現象というだけでなく、大気と海洋表面との運動および熱エネルギーの交換を介して、100mほどの空間単位をもつ個々の雲の発生・発達・消滅過程によってもたらされる豪雨過程に影響を及ぼす。これらのマルチスケール・マルチフィジックス現象の予測シミュレーションの精度を向上させるためには、少なくとも以下の3つの課題の克服が必要不可欠である。第一に、全地球と着目する領域の両方に

対応可能な、総観測現象と雲の生成消滅過程の両方扱うことが可能な、大気—海洋—陸面を連成したシミュレーションコードが必要である。第二に、上記の時間、空間スケールが異なるシミュレーションを高精度・高安定な数値計算手法および、異なるスケール間の相変化やエネルギー変化を階層的に表現可能な物理モデルの確立である。第三に、時間的にも、空間的にも異なる複数のスケールをもつ現象を対象として扱うことから、超大規模計算を高速に実行できる計算機環境が必要である。これらの3つの課題のそれぞれについては、これまでに個別の科学的対象、個別の学術分野において、多くの知見と成果が集積されてきた。予測精度向上のためには、異なる時間・空間スケールを扱うことができるマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションのためには、個々のスケールの現象を可能な限り現実に則してモデル化し、スケール間の相互作用をどのように繋ぐか、ということに加えて大規模シミュレーションを高速に実行することが必要不可欠である。本稿では、上記の必要性を満たすような、複数の時間、空間ス

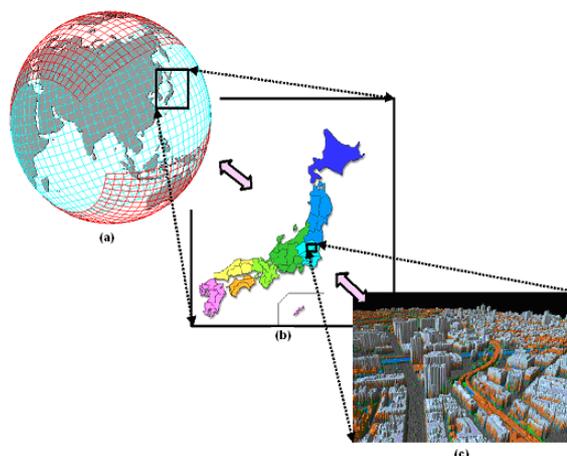


図1 MSSGが対象とするスケールの模式図

ケールをシームレスに扱え、全地球スケールから都市スケールまで同一のモデルで表現することが可能なシミュレーションモデル大気・海洋・陸面結合モデルとして開発した Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)の概要と成果を紹介する。MSSGの概要を図1に示す。MSSGは、全球から、領域スケール、都市スケール（各スケールは、それぞれ図1(a), (b), (c)に対応）の異なる時空間スケールをネスティング手法を用いて達成し、シームレスシミュレーションが可能である。

## 2. 予測モデルの特徴と計算手法

### 2.1 MSSGの概要

地球温暖化予測など全球を対象とするような長い時間と大きな空間を対象とする予測モデルは、これまで天気予報に用いられる予測モデルとは異なる予測手法が用いられてきた。天気予報に用いられる予測シミュレーションでは、対象とする現象の時間および空間スケールは、全球スケールでシミュレーションの対象とする現象とは、大きく異なる。温暖化予測やエルニーニョ予測などのシミュレーションは、解像度が約10km程度であれば、例えば、台風の特徴的な構造をとらえることができる。しかしながら、気象予測において重要な役割を果たす雲を解像するようなシミュレーションは、雲の生成単位である数100m単位の水平解像度が必要である。加えて、台風を例にとれば、全体が数1000mの子簿を持つ台風の構造のなかで、豪雨をもたらすような雲の構造は、数100m単位の雲から成り、それらの異なるスケールの相互作用が、風の強さと降雨量から定義される台風強度の推移に影響を与えている。これらのことを考え合わせると、乱流を伴う流れ場は Large Eddy Simulation モデルを採用して、数cmから数kmのスケールの渦を扱うこと、雲の単位を扱うことが可能な雲粒の粒子を扱うことができる雲微物理モデルを採用し、さらに、離散化して計算の精度を高く保ち、物理量を保存するような高精度かつ高速な計算スキームを用いることが、少なくとも必要不可欠である。

大気、海洋、陸面、氷床など、地球システムの構成要素それらの状態変化と流れを解く方程式系（力学過程と称される）、水の循環過程における水物質の相変化や放射過程など熱エネルギーの伝達

過程等を解く系（これらを総して物理過程と称する）、および運動エネルギーや熱エネルギーの相互作用はソース項により記述する。紙面の関係上、力学過程の方程式系を以下に示す。大気に対してのみ示すが、基本的には海洋においても同様の方程式系を用いる。MSSGの詳細については、文献[1-2]を参考にされたい。

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}} a \cos \varphi} \frac{\partial (G^{\frac{1}{2}} G^{13} \rho u)}{\partial \lambda} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}} a \cos \varphi} \frac{\partial (G^{\frac{1}{2}} G^{23} \cos \varphi \rho v)}{\partial \varphi} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}}} \frac{\partial (\rho w')}{\partial z^*} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}} a \cos \varphi} \frac{\partial (G^{\frac{1}{2}} G^{13} P v)}{\partial \lambda} = -\nabla \cdot (\rho u v) + 2f_z \rho v - 2f_\varphi \rho w + \frac{\rho u u \tan \varphi}{a} - \frac{\rho w v}{a} + F_z, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}} a} \frac{\partial (G^{\frac{1}{2}} G^{23} P w)}{\partial \varphi} = -\nabla \cdot (\rho w v) + 2f_z \rho w - 2f_\varphi \rho u - \frac{\rho u u \tan \varphi}{a} + \frac{\rho w v}{a} + F_\varphi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho w'}{\partial t} + \frac{1}{G^{\frac{1}{2}}} \frac{\partial P'}{\partial z^*} + \rho' \mathbf{g} = -\nabla \cdot (\rho w v) + 2f_z \rho w - 2f_\varphi \rho u + \frac{\rho u u}{a} + \frac{\rho w v}{a} + F_r, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P'}{\partial t} + \nabla \cdot (P \mathbf{v}) + (\gamma - 1) P \nabla \cdot \mathbf{v} = (\gamma - 1) \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + (\gamma - 1) \phi, \quad (5)$$

$$P = \rho R T, \quad (6)$$

$$\rho w' = \frac{1}{G^{\frac{1}{2}}} \left( G^{\frac{1}{2}} G^{13} \rho u + G^{\frac{1}{2}} G^{23} \rho v + \rho w \right). \quad (7)$$

連続の式(1)、独立変数  $\rho u$ ,  $\rho v$ ,  $\rho w$  を求める3次元完全圧縮系 Navie-Stokes 方程式(2), (3), (4)、熱力学方程式(5)、状態方程式(6)によって構成される。ここで、 $\rho'$ ,  $P'$ はそれぞれ  $\rho' = \rho - \bar{\rho}$ ,  $P' = P - \bar{P}$ で定義され、 $\bar{\rho}$ と $\bar{P}$ は、それぞれ標準大気密度と気圧を表す。 $f$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ ,  $\gamma$ は、それぞれコリオリ力、粘性係数、熱伝導率、比熱容量比を表わす。また、 $F$ は、 $\rho u$ ,  $\rho v$ ,  $\rho w$ で表される大気の運動による移流、断熱過程での時間変化項と雲の発生、消滅による水物質の相変化や放射などの非断熱過程による時間変化項による外力項、 $G$ は球面座標系で考える際のメトリック項、 $\lambda$ は緯度、 $\varphi$ は経度を表す。鉛直方向には  $z^*$ 座標系を採用した。 $z^* = H(z - z_S) / (H - z_S)$ で定義する。ここで $z$ は物理的な標高であり、 $z^*$ はモデルの鉛直座標上での高度となる。 $z_S$ は地表面の物理的な標高であり、 $H$ はモデルで定義する上端の物理的な標高である。 $z^*$ 座標系は、山岳など地表面上の地形の起伏に沿った座標系である。

### 2.2 計算手法

本節では、高い計算精度を実現するためにMSSGで採用している代表的な計算手法を紹介する。

3次元全球を扱う際には、水平方向の空間は

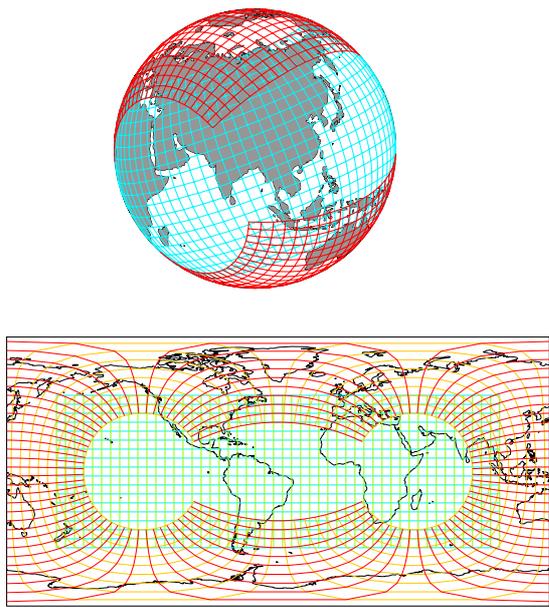


図2 Yin-Yang グリッドの模式図

Yin-Yang グリッド[3]上で離散化している。Yin-Yang グリッドは、3次元の2つのパネルをちょうど野球のボールのように、球面に張り付けた構造をした重合格子である。図2に、その略図と展開図を示す。図2上図はYin-Yang グリッドを全球上に張り付けた模式図、図2下図は展開図である。グリッドが重複する領域は、それぞれの領域内におけるグリッド上において計算を行い、各パネルの境界に相当するインターフェイス上のグリッドにおいてのみ、他方のグリッドから補間して値を決定する。ここで、従来の緯度経度座標系において、北緯45度と南緯45度、経度0度から270度のパネルをN系と呼び、緯度と経度方向に90度回転させたもうひとつのパネルをE系と呼ぶ。Yin-Yang グリッドは、緯度経度座標系の拡張であり、高精度の計算手法や領域モデルとしての境界条件の設定など、これまでに蓄積されてきた多くの緯度経度座標系における知見をそのまま活用することができる。また、緯度経度座標系では、北極や南極は特異点であるので、特異点の近傍ではグリッドが集中し Courant-Friedrichs-Lewy Condition (CFL 条件) が厳しくなる。しかし、Yin-Yang グリッドでは特異点が存在せず、全球ほぼ様な大きさのグリッドから構成できることから、緯度経度座標系に比べて CFL 条件を緩和できる。その反面、グリッドが重複して定義される重

合領域におけるグリッド上の計算と、2つのパネル間のインターフェイスにおける保存量の扱いに注意が必要である。

Yin-Yang グリッドのインターフェイスでは、グリッド点が規則的ではあるが不連続に存在するため、保存すべき物理量を精度よく計算する必要がある。質量を精度よく保存するために、図3に示す保存スキームを開発した[4]。保存のための十分条件は、重合領域のインターフェイスにおいて、E系からN系へE系上の円弧EFを介して流入するフラックスが、N系のグリッドABCDのフラックスの流入出フラックスの総量と{(ABEFDの面積)/(矩形ABCDとの面積)}の積であらわされるということに基づいて、定式化できる(図3)[4]。図4に示すように、開発したフラックス補間法を用いることによって、全地球の質量の時間変化は丸め誤差以下となり、質量の保存が可能である[4]。

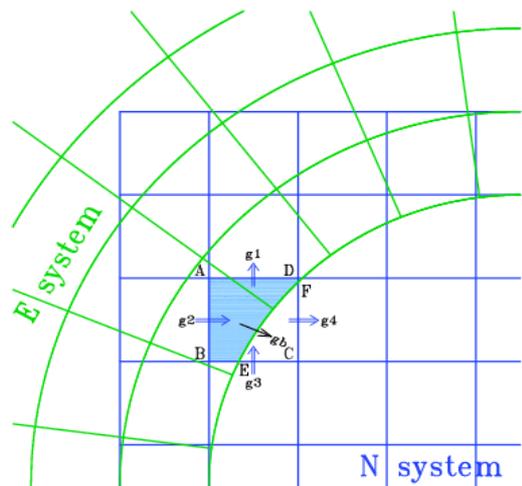


図3 MSSG 質量の保存のためのフラックスの補間手法

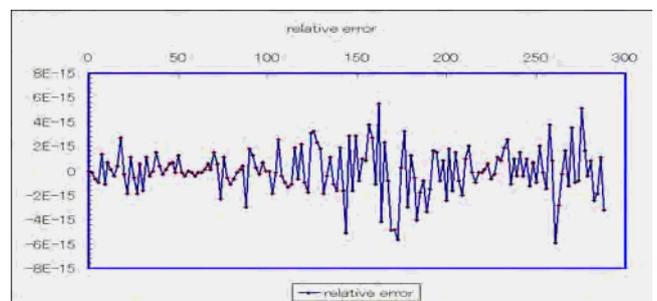


図4 N系とE系間の補間手法の計算誤差

### 3. シミュレーションの成果事例

#### 3.1 都市における蓄熱のシミュレーション

都市スケールでのシミュレーションを大気海洋結合モデルMSSGの中の大気大循環コンポーネント MSSG-A を用いてシミュレーションした結果を示す。東京の都心のある街区（有楽町周辺域：図5）に対して、土地利用データ、道路、交通量、人口排熱等のデータを整備し、気象データをシミュレーション対象領域の境界値として与えた水平、鉛直ともに5mの解像度のシミュレーション結果である。このシミュレーションは、ヒートアイランドなどに代表される都市域における熱的循環を詳細に再現し、都市域の蓄熱効果や今後のクーリング環境を効果的に選定するための基礎情報都市に利用することが可能である。

図6は、2005年8月5日15時から10分間の変化をシミュレーションした結果のうち、異なる高さでの温度分布のスナップショットである。図6の上段左図は7.5m、上段右図は12.5m、下段左図は32.5m、下段右図は102.5mのそれぞれの高さにおける15時10分時の温度分布のスナップショットである。道路上やビルの壁面で熱せられた大気塊が、地表面から暖められた大気がプルームとなって上昇する様子や、建物形状により風の非定常な流れの様子などがダイナミックに再現されている。高さ7.5m、12.5mに分布する暖められた40度を超える大気塊は、一定の場所に留まることはなく、揺らぎながら剥離を伴って移流する。32.5m、102.5mの温度分布において、建物に付着するような高温ポイントは、人工排熱として与えた境界条件による大気の高温化である。高温の大気塊の分布やその移流による変化が市のヒートアイランドにどのような影響を及ぼすかについては、さらに広域のシミュレーションの統計的な解析が必要である。

図7は、ある鉛直断面の流れの様子と温度分布のスナップショットを示している。ビルの風上、風下には渦が生成され、そこで比較的温度の高い大気が渦を形成している。ビルより高い上空での大気は、ビルで囲まれた高さの低い領域での大気の流れとは一線を画して、滑らかに流れており、ちょうど低層の温かい大気をパッキングするような状況がとらえられている。このような、ビルとビルに囲まれた大気の流れと、ビルより上空の大

気の流れの相互作用は、都市域において、どのように熱エネルギーが蓄積されるかを理解する上で重要である。その蓄熱メカニズムをとらえることが、今後、効果的に都市を冷却するための手法の検討と、複数の手法からひとつの施策を選択する際には、施策の選択根拠となる科学情報として活用されることが期待できる。



図5 計算対象領域：有楽町域の航空写真

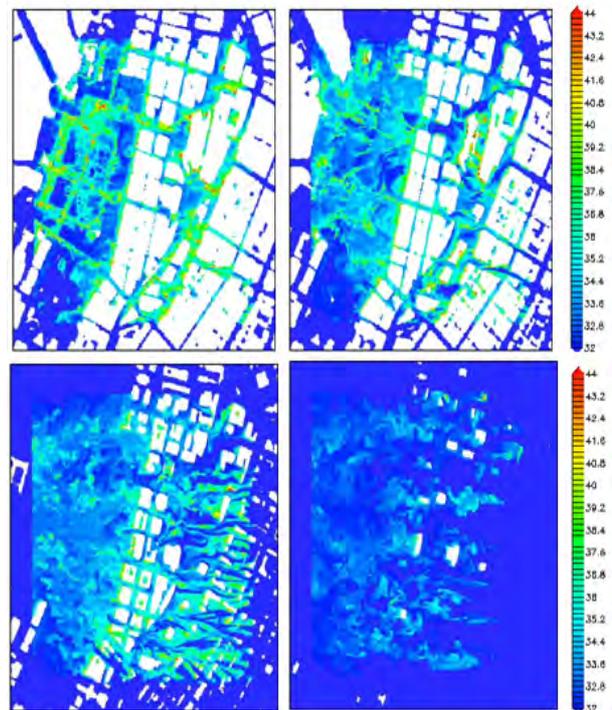


図6 5m解像度のシミュレーション結果

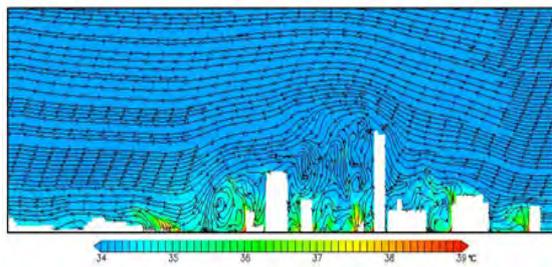


図7 鉛直断面の流線の様子と温度分布のスナップショット

### 3.2 台風のシミュレーション

日本領域において、大気海洋結合モデル MSSG を使用し、大気と海洋をともに水平 2.78km、鉛直 64 層で設定した 2003 年台風 10 号の強度を 120 時間（5 日間）予測シミュレーションの結果を図 8 に示す。台風の特徴である目の構造や豪雨をもたらすようなレインバンドの構造がよく再現されている。図 8(a)~(f)は、海洋表面温度分布、降雨分布と風速ベクトル分布の 3 時間ごとの時間変化を示す。台風目のなどの特徴的な構造が、時間経過とともに衰退し変化する様子が、シミュレーションの降雨分布からとらえられている。また、海洋表面温度の変化の時系列応答から、台風の進路の東側後方にあたる海水表面の温度が、台風の移動に伴ってより低い温度へ変化している。これは、台風の風からの運動量の伝搬によって、海洋表面の流れ場が変化し発散する流れの傾向となり、より深い海洋の温度の低い海水が表面に現れたことによるものである。これらの温度変化は衛星観測からもとらえられており、海洋表面の温度は、台風への熱的供給源である。このことは、台風と海洋との相互作用が、台風の強度予測の精度に影響を与えることを示唆している。しかし、この大気海洋相互作用のメカニズムについては、その重要性は認識されているものの、まだ解明されていない点が多い。

大気海洋相互作用の台風強度予測への影響を検討するために、バルク式の潜熱係数に着目し、実験室観測データ[5]とその値を外挿して、2006 年台風 16 号の強度予測シミュレーションを実施した。近年において最大に発達した台風である 16 号の最低気圧のシミュレーション予測値を図 9 に示す。図 9 の黄色線は、新しい潜熱係数[5]を用いたシミュレーションによる最低気圧の時系列変化、ピン

ク線は従来の潜熱係数を用いたシミュレーション結果、紺線は観測結果を示す。この結果より、新しい潜熱係数を用いたシミュレーション結果は、従来の潜熱係数を用いた時には再現できなかった最低気圧を示し、台風の発達が促進され、観測値により近い予測結果が得られた。このことから台風の発達の様子や強度予測は、大気海洋相互作用モデルに大きく影響を受けることが示唆される。図 8 の結果からは、観測値により近い再現を示した台風の発達は、衰退速度も遅らせている。現在の大気海洋相互作用モデルにおいてははまだ考慮していない効果、例えば海洋の冷却化による台風の衰退時への効果が、台風の強度と衰退のバランスに影響を与えていることが考えられる。

高解像度の気候海洋結合モデルの予測シミュレーションは、これまで観測データからでは困難であった台風の発生や発達、維持、消滅に関する科

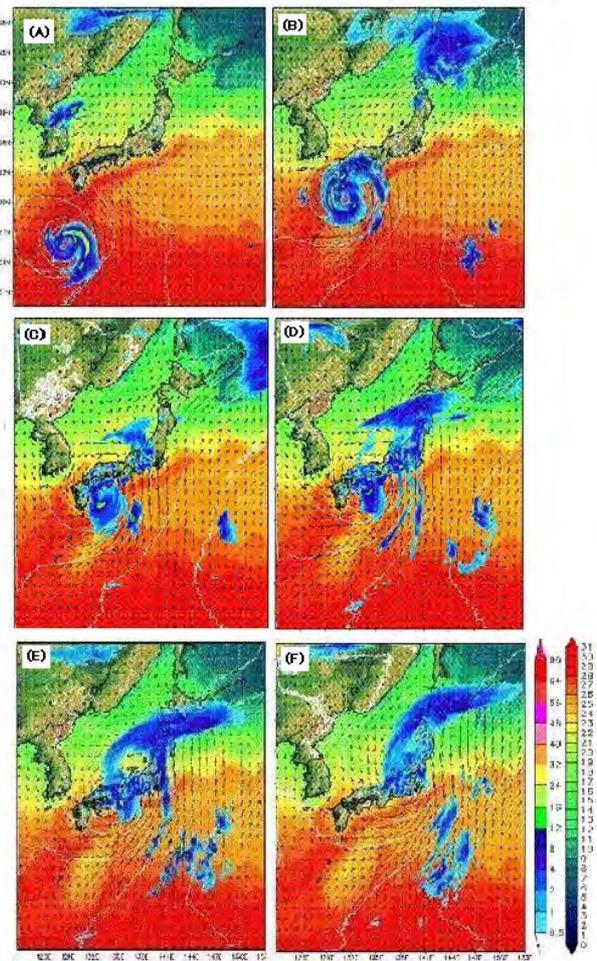


図8 MSSGによる2003年台風10号の予測シミュレーション結果

学的解明に貢献できる。高解像度の気象海洋相互作用をどのようにモデル化すべきであるか、あるいは、予測精度の向上にどれほどのインパクトがあるのかについての詳細な検討解析は、今後の課題である。

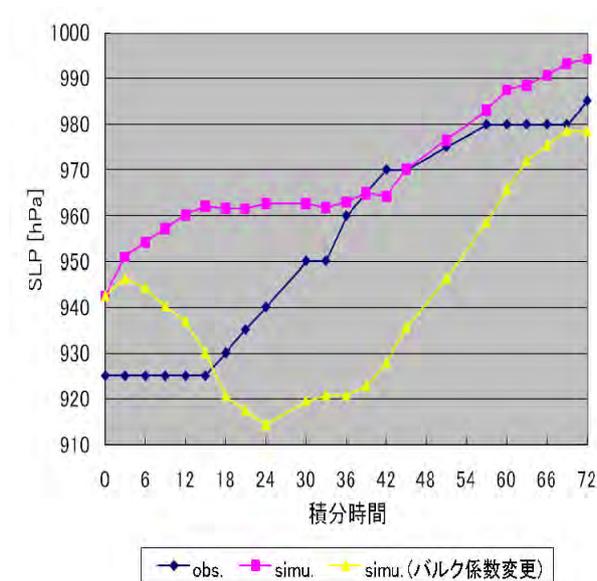


図9 2006年台風16号の最低気圧の時系列変化

#### 4. おわりに

地球温暖化に代表される“気候変化”である地球温暖化に伴い、エルニーニョ、インド洋ダイポールなどの“気候変動”が従来の統計的予測ではとらえられないような変化をきたしつつある。これらの変化が、台風などの局所的な災害をもたらす気象現象にどのような変化を受けるのかについての予測は、世界の各機関が取り組んできた課題であり、さらに積極的な研究開発が世界的に展開されようとしている。このような世界的な潮流の中において、気象海洋結合モデルによる予測シミュレーションによる予測精度の向上が不可欠である。本稿では、気象海洋結合モデル MSSG の概要と、MSSG を用いた都市の蓄熱過程および台風の強度予測を事例に挙げ、大規模計算による予測シミュレーションの結果を示し、現時点における再現性と予測可能性の一端を紹介した。台風や豪雨、ヒ

ートアイランド現象の解明など、私たちの生活環境に直結するような現象の解明は、雲の生成の単位である数10mから数100mのスケールと、それを取り巻く領域の気象や気候変動の変化を同時にとらえてゆく必要がある。また、気候変動の影響をも考えると、全球と領域、さらに都市スケールの気象や気候変動までを考えてゆく必要がある。これは、時空間的にマルチスケールの気象、気候変動現象をシームレスに繋げた相互作用をモデル化することの重要性を意味している。これらのシームレスなシミュレーションにおいて、伝熱過程を理解し、その過程を精度よく計算することが予測精度を大きく左右することを、本稿で紹介した事例も示唆している。今後、基礎的な伝熱および蓄熱過程を理解し、それらを実現現象の理解と予測に結び付けることがますます重要であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Takahashi, K. et al., World-highest Resolution Global Atmospheric Model and Its Performance on the Earth Simulator, Proceeding of SC '11 State of the Practice Reports, (2011) Doi: 10.1145/2063348.2063376.
- [2] Baba, Y. and Takahashi, K., Sugimura, T., and Goto, K., Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid, Monthly Weather Review, 138(2010) 3988-4005.
- [3] Kageyama, A. and Sato, T., The "Yin-Yang Grid" : An Overset Grid in Spherical Geometry. Geochim.Geophys.Geosyst., 5(2004) Q09005, doi:10.1029/2004GC000734.
- [4] Peng, X., Xiao, F. and Takahashi, K., Conservation constraint for quasi-uniform overset grid on sphere, Quarterly Journal Royal Meteorology Society, 132 (2006) 979-996.
- [5] Takagaki, N., Komori, S. et al., Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds,39-23(2012) DOI: 10.1029/2012GL053988.

## アリなどの昆虫社会における共同と裏切り

### *Cooperation and Cheating in Insect Societies*

辻 和希 (琉球大学)

*Kazuki TSUJI (University of the Ryukyus)*

*e-mail: tsujik@agr.u-ryukyu.ac.jp*

#### 1. はじめに

アリやシロアリの社会は超個体と呼ばれ、個体が共同し大きな機能を発揮する。共同は生物の世界にあまねく見られる現象である。生物の歴史をひもとけば、起源においては自己複製する分子に過ぎなかったものがやがて共同してゲノムや細胞になり、細胞が共同して多細胞生物個体になり、個体が共同し社会を作り、下位ユニットの共同により高次ユニットが繰り返し進化してきた。共同がいかにか安定的に維持されるのかは、進化生物学の最重課題の1つである。それは、共同は常に「裏切り」の脅威に晒されているからだ。「裏切り」とは共同体に「ただ乗り」し短期的利益をむさぼる突然変異低次ユニットのことだ。「裏切り者」(cheaters, free riders)は個と全体の潜在的対立を表面化させる。

生物進化のプロセスは自己複製するユニット間の増殖競争にたとえることができる。ユニットはときどきでたらめに突然変異するので、環境が変わっても、たまたまその環境で高い増殖力を発揮する変異形質を持つに至ったユニットが増えることで、生物は長い時間をかければ様々な環境に適応可能である。生物において最も基本的な自己複製ユニットは遺伝情報の伝達を担う分子(DNA, RNA)であると考えられるが、それより上のユニットにも自己複製子として性質が備わっている(個体が繁殖して個体を産むように)。裏切りとは、下位のユニットが上位ユニットの自己複製速度を犠牲にして増殖しはじめることである。身近な例は癌だ。癌は遺伝子が突然変異した細胞だが、上位ユニットである個体の生存を犠牲にして増え続ける。別の例にトランスポゾンがある、これは利己的遺伝因子とも呼ばれ、ときにゲノム全体あるいは個体の機能に負担をかけながらもゲノムの中で飛び回ってコピーを増やす。

#### 2. 裏切る理由とそれを防ぐ仕組み

私が昆虫の社会に注目するのは、裏切りの脅威から共同を守る一般的な生物学的仕組みを理解するためである。通常、日々発生する癌細胞は免疫機能によって除去されている。免疫は裏切りだけでなく共同体としての個体の利益を搾取しかねない部外者の侵入を防ぐのにも使われる。昆虫の社会にも個体における免疫のような仕組みが必要と想像される。実際にアリなどでは血縁関係のない個体がコロニーに侵入すると攻撃されるが、これはまさに社会免疫である。

我々は沖縄のトゲオオハリアリにおいて、内部の「裏切り」に対する社会免疫的な行動を世界で初めて直接観察した[1]。英語でワーカー(worker)と呼ばれる働きアリは通常は繁殖せず女王を助けているが、産卵能力を隠し持っている場合が多い。ワーカーはふつう交尾器が退化していて交尾ができないが、ハチ目昆虫では未受卵(減数分裂するので半数体)が正常に発生し雄になるため、その気になれば「息子」だけは自ら作ることができるのだ。ちなみにアリのワーカーはすべて雌である。トゲオオハリアリのワーカーも女王の存在下では滅多に産卵しない。しかし実験操作でワーカーを産卵可能な生理状態に変えると、産卵しない他のワーカーに激しく攻撃され、うまく産卵しても卵は破壊されてしまうことがわかった(図1)。このワーカーの間の「相互取り締まり行動(worker policing)」は「ワーカーは自ら産卵しない」という社会規範を互いに強制するまさに社会免疫だといえる。取り締まり行動はその後多くの種で確認され、アリやハチの共同社会を維持する一般的仕組みであると考えられるようになった[2]。

取り締まり行動が存在する適応上の意義は、繰り返し発生する裏切りにある。なぜ裏切りが生じやすいのか。共同は普通、ユニットの何らかの



図1 トゲオオハリアリの相互取り締まり行動.中央は産卵可能な生理状態の個体 (worker) で、産卵しない生理状態の多数の巣仲間へ攻撃されている (撮影: 川端俊一)

自己犠牲により成り立つ場合が多い. 超個体には、繁殖を担当する女王 (シロアリの場合は王も) と繁殖以外の労働を担当するワーカーがいるが、ワーカーは自身の複製行為である繁殖を放棄した自己犠牲者である. このワーカーの自虐行動は、行動をコードする遺伝子が次世代コロニーにどう広がるかに注目すれば必ずしも自己犠牲的とはいえないのだが[3], 要はコロニーの内部における自己複製競争という観点からは、自己複製 (繁殖) をする女王に対し、ワーカーが競争上負けているのである. 従って、何らかの「たがが外れ」、ワーカーが自己増殖を始めれば、それは少なくとも短期的にはコロニーの中で広がっていく可能性があるのだ. これは裏切りが繰り返し生じる背景である. 前述のようにワーカーが通常産むことができるのは雄だけだが、実は種によっては無性生殖で雌 (いわゆるクローン雌) を産む能力を持つものも知られ、実際そのような能力は有性生殖生物において繰り返し突然変異で生じ得ることが知られている.

無性生殖には自己複製競争上の大きなメリットがある. それは、同じ1個体の子孫をつくるにしても遺伝子の伝達効率が倍になり (減数分裂しないので)、また雄が必要なくなるので個体の増殖速度も倍になることだ. したがって有性生殖系統と無性生殖系統が競争をすれば無性生殖が短期決戦で勝つはずである. なのに、実際の高等動植物の大半がなぜ性をもつのかは進化生物学上の謎とされている.

### 3. クローンと性の使い分け

近年、アリやシロアリの社会において奇妙な無性生殖の実例が見つかっている. アリの女王は雄の精子を体内に長期保存し小分けに使いながら子供を作る. しかし、カーソルウマアリ、コカミアリ、ウメマツアリ、アシナガキアリ、ヒゲナガアメロアリなどでは、女王が雄の精子を使うのはワーカーを作るときだけで次世代女王を作る際には自身のクローンを作っていることが判明したのだ. ワーカーは次世代遺伝子プールには貢献しないので、遺伝子プールは女王由来の遺伝子だけで占められることになり、このような繁殖様式では雄は「絶滅」するはずである. しかし、実際にはこれらの種でも様々な対抗手段により雄も存続し続けている. たとえばコカミアリでは、おそらくワーカーになるべく作られた受精卵の一部において父親由来のゲノムだけが何らかの仕組み (母親由来のゲノムを排除し?) で残り、父親の「クローン雄」が生産される. このように、有性生殖が不妊のワーカー (労働力) を生産するためだけに使われるようになった結果、雄の遺伝子プールと雌の遺伝子プールは、別種のように隔離されたものになっている[4].

我々の共同研究グループは女王のクローン繁殖と性の維持が両立する事例をシロアリでも発見した[5]. シロアリのコロニーは翅アリである創設女王と王のペアにより始まるが、多くの種で創設女王は早死にし、生まれつき翅のない新女王がコロニーの産卵役を引き継ぐ. これまでこの新女王は王と女王の娘と考えられてきたが、実はヤマトシロアリではこれらは女王自身の「クローン」で、巣が存続する限り、初代女王の「遺伝的分身」女王が君臨し続けることが詳しい DNA 分析により判明したのだ. しかし、これでは王である雄は、自身の遺伝子を将来の遺伝子プールに残すことはできないように思われるが、そうではなかった. 実はクローンで産まれるのは母のコロニーを引き継ぐ翅のない女王だけで、ワーカーや兵アリ、そして新たな王国を築くべく巣を去る翅アリには王との交配で生まれた子孫がなるのだ.

この事例は性の適応的に意義に関して重要な示唆を与えるものである. 病原菌や多様な労働環境に対面するため遺伝的変異性が必要とされるワー

カーと、母巢を離れ新しい環境を経験する翅アリは有性生殖で作られ、母親と同じ場所に居残る後継女王はクローンで作るというこの発見は、性が環境変動への対応策であるとする「赤の女王説」[6]を支持する重要な証拠である。

#### 4. 裏切りが社会に与える負担

上記は下部ユニットに「利己的な」クローン増殖をする能力があるにもかかわらず、性や共同が維持されている例である。しかし、免疫の監視網をかいくぐり利己的クローン細胞である癌細胞が体内に蔓延してしまうこともある。超個体であるアリの社会にも、「超個体の体細胞」たるワーカー自身によるクローン繁殖が蔓延した事例が見つかった。アミメアリとクビレハリアリ（図 2）は奇妙なアリで、女王や雄がおらず代わりにワーカーが自分自身の「クローン」を残している。これら 2 種の近縁種ではすべて女王が有性生殖しているので、おそらくクローン繁殖能力を突然変異で獲得したワーカー（これはアミメアリとクビレハリアリで独立に起った）が種内に広がることで、ついには性と生殖的分業の両方が失われたものと想像される。しかし個体を死に至らしめる癌と違い、コロニー内部ではワーカー全員がクローン産卵しなおかつ採餌や子守りなどの労働もする平等社会が維持されている。



図 2 クビレハリアリ。雌はすべて生まれつき翅の無い「ワーカー」的形態を示すが、全個体がクローン産卵し全個体が労働する。白く細長いのは幼虫

一方、自分自身でクローン繁殖するワーカーの

出現でシステムそのものが崩壊した例も知られている。ケープミツバチという南アフリカに棲息するセイヨウミツバチの 1 系統では、他のコロニーに侵入し社会寄生する「働かないクローン働きバチ」が進化してしまった。このクローン寄生働きバチに寄生されたコロニーでは、やがてワーカーが働かないクローンワーカーにすべて置き換わりコロニーは滅亡する。こうなった理由には人為が関係しているのだが、いずれにせよ結果として、南アフリカでは「寄生クローンワーカー」の出現から 10 年程度で養蜂ミツバチ個体群そのものが壊滅してしまい、養蜂家はハチを総入れ替えしなくてはならなかった[7]。

上記 3 例は、自身でクローン繁殖するような突然変異下部ユニットが進化の歴史においてその後も生き残っていくか否かは、ちょうど良性と悪性の腫瘍があるように、自身でクローンを産むことそのものよりはその振る舞いが上位ユニット全体のパフォーマンスにどう影響を与えるかが鍵と想像される。

理論計算でも、裏切り行動の典型であるワーカーの自己繁殖が進化の過程で広がっていくか、あるいは取り締まり行動によって防止されるのかを決める大きな要素のひとつは、上位ユニットであるコロニーの適応度（自己複製速度）にあたる負の影響の大きさだといわれている[8]。我々は最近、取り締まり行動を直接観察した前述のトゲオオハリアリでこの「負の効果」の定量に成功した[9]。

トゲオオハリアリでは、女王フェロモンの伝達を遮断することで実験的にワーカーに産卵させることができる。フェロモン遮断コロニーではワーカーの間で激しい闘争が起り、勝ち上がった一部のワーカーが女王のように卵を産み始める。しかし、驚く事にこの混乱にもかかわらずコロニーの短期的な生産性（新成虫生産速度）には変化が見られなかった。しかし、長期的な影響がみられた。ワーカーの平均寿命が産卵しない場合よりも約 18% 短くなったのだ。ワーカーの寿命は潜在労働可能時間であるため、その短縮はコロニーの負担として評価できる。18% という値は「もしあるとしたら」と理論的に予測されたものに近い[8]。

さて、寿命短縮の具体的な理由は次のようなものだった。一部のワーカーが働くのをやめ産卵す

るようになると、他のワーカーたちが、産卵ワーカーに放棄された仕事の穴を埋めるかのように、通常よりも良く働くようになる。通常ペースを超え働いた結果、過労で早死にしてしまうのである。一方、産卵ワーカーの寿命は通常と変わらなかった（図3）。

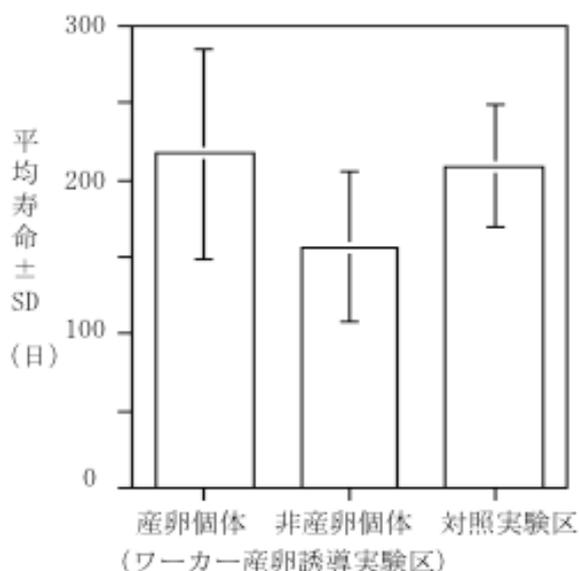


図3 トゲオオハリアリにおけるワーカー産卵誘導の寿命への効果。非産卵ワーカーは産卵ワーカーより寿命が短い（統計的に有意）。産卵ワーカーの寿命はワーカー産卵のない対照実験と同じ。

仕事の穴埋め（compensation）はアクシデントで特定の労働力が不足したときにコロニーの機能を維持するのに役立つ行動だと思われ、実際そのような柔軟性は多くの社会性昆虫に備わっている。しかしこの柔軟性は、裏切り者が出現した場合はかえって仇になる可能性があることを先のトゲオオハリアリの例は暗示している。それが実際に起こることがアミメアリで判明した。アミメアリは全個体がクローン繁殖しかつ働くという平等社会を持つと先に述べたが、それには例外がある。三重県の紀北町という場所で採れたアミメアリのコロニーには女王を思わせるような身体の大いなる個体が混じることが以前から知られていた。これら大型個体は「普通のアリ」の女王に似て頭には単眼を持ち、卵巣の大きさも通常の2倍以上ある。それゆえアリ学者は「アミメアリにも条件によっては

女王が現れる」と考えていた。しかし、我々が行ったDNA分析よればこれらは女王ではなく、通常個体とは異なるクローン系統で、働かず通常個体の労働に寄生しクローン産卵だけを行う「裏切り者」であることがわかったのだ（図4）[10,11]。癌という比喻を使ったのは、これらは近い過去に通常個体が突然変異で変化したもので、コロニーの中で異常に増殖しコロニーをすみやかに滅亡に導くからである。ただし、「社会の癌」が個体の死とともに滅ぶ癌細胞と違うのは、それらの悪行でコロニーが滅んでしまう前に、他のコロニーに感染し生き延びることである。通常アミメアリのコロニーは他コロニーの個体を侵入させないが、「社会の癌」はこの防衛線をも突破できるようなのである。ただし、その仕組みは未解明である。これはケープミツバチのクローン寄生者と並行して生じた類似現象だが、ケープミツバチと違い紀北町のアミメアリでは、「社会の癌」と通常のアミメアリが長期共存しているようである。この違いは、働きアリは働きバチと違い飛べないので長距離移動できないということと関係があるのではと我々は考えている。



図4 アミメアリにおける「社会の癌」。白い印をつけた個体が利己的クローン個体（撮影：森英章）

さて、社会の癌が感染したアミメアリのコロニーの通常ワーカーもやはり、社会の癌が働かない分を補うように過剰に働くことがわかった。アミメアリには若いワーカーが産卵と子守りを行い、産卵を止めた年長の個体が巣の外で働き餌を採る年齢分業があることがわかっている。社会の癌に感染されたコロニーでは、ワーカーは普通よりも

若いときに産卵を止めて巢外活動をするようになり、その結果早く死ぬのである[12].

実は近年、他個体に「移る」本当の癌細胞が有袋類のタスマニアデビルで見つかった。この稀少動物は移る癌による絶滅さえ心配されている[13]. これをアリの事例と比較すると、共同体の利益を蝕む利己性と、それを乗り越えるためのメンバー間の監視あるいは免疫、システムの柔軟性や効率的な労働・代謝のペースなど、個体の維持機構と社会の維持機構がよく似ていることが見て取れる。共同はメンバーを利己性へと誘う内部での低次ユニット間の競争と、利己性を抑制し結束を促す高次ユニット間の競争のバランスで、その機能が維持されてきたと考えられる。

### 5. おわりに

生物における共同には、一般に下位ユニットの間にゲーム理論で想定されている公共財ゲームの関係が成り立つと考えられている。公共財ゲームでは全員が協力するときグループ全体の利益が最大になるが、グループの中で個々の個体は裏切るほうがより大きな利益が得られる。この公共財ゲームでは、一般に制約がなければ裏切りが蔓延し共同は進化しないとことも理論的に判っている。しかし、やはり理論的には似た者同士が局所的に繰り返し出会うなど、特定の制約を入れた場合には協力が進化しうること判っている。我々はアミアリの社会の癌と通常個体の関係においても公共財ゲームが正確に成り立っていることを示した[11]. 昆虫の社会を研究する事で、生物のシステムにおける共同の起源に果たした制約条件も理解できるかもしれない。

### 参考文献

- [1] Kikuta, N. and Tsuji, K., *Queen and worker policing in the monogynous and monandrous ant, Diacamma sp.*, Behav. Ecol.Sociobiol. **180–189** (1999) 46.
- [2] Ratnieks, F. L. W. and Wenseleers, T., *Altruism in insect societies and beyond: voluntary or enforced?* Trends Ecol. Ecol.**45–52** (2008)23.
- [3] 辻 和希, シリーズ進化学 6 行動・生態の進化, 2 章, 岩波書店, 東京, 石川統, 齊藤成也, 佐藤矩行, 長谷川真理子 編集.
- [4] Fournier, D., Estoup, A., Orivel, J., Foucaud, J., Jourdan, H., Le Breton, J. & Keller, L. *Clonal reproduction by males and females in the little fire ant.* **1230–1234** Nature (2005) 435.
- [5] Matsuura, K., Vargo, E. L., Kawatsu, K., Labadie, P. E., Nakano, H., Yashiro, T., and Tsuji, K., *Queen succession through asexual reproduction in termites*, Science **1687–1687**(2009) 323(5922).
- [6] Van Valen, L., *A new evolutionary law.* Evolutionary Theory, **1–30** (1973) 1.
- [7] Oldroyd, B. P. *The Cape honeybee: an example of a social cancer.* Trends Ecol. Evol. **249–251** (2002) 17
- [8] Ohtsuki, H., and Tsuji, K. *Adaptive reproduction schedule as a cause of worker policing in social Hymenoptera: a dynamic game analysis.* Am. Nat. **747–758** (2009) 173.
- [9] Tsuji, K., Kikuta, N. and T. Kikuch. *Determination of the cost of worker reproduction via diminished life span in the ant Diacamma sp.* Evolution **1322–1331** (2012) 64.
- [10] Dobata S, Sasaki T, Mori H, Hasegawa E, Shimada M, Tsuji K. *Cheater genotypes in the parthenogenetic ant *Pristomyrmex punctatus**, Proc. R. Soc. B-Biol. Sci. **567–574** (2009) 276.
- [11] Dobata, S., Mori, H., Sasaki, T., Hasegawa, E., Shimada, M., Tsuji, K. *Persistence of the single lineage of transmissible “social cancer” in an asexual ant* .Mol. Ecol. **441–455** (2012) 20.
- [12] Dobata, S., and Tsuji, K. *Public goods dilemma in asexual ant societies.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, (submitted).
- [13] Murgia, C., Pritchard, J.K., Kim, S., Fassati, A. and Weiss, R.A. *Clonal origin and evolution of a transmissible cancer.* Cell **477–487** (2006) 126.

## LNG とエクセルギー

### LNG and Exergy

久角 喜徳 (大阪大学)

Yoshinori HISAZUMI (Osaka University)

e-mail: hisazumi@ed.jrl.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

LNG の価格が高騰している。これに加えて円安が進行しており、原発の停止状態が続く電力各社の電気料金が値上げされた。LNG はわが国に 1969 年に導入され、1973 年の石油危機では、エネルギー価格の高騰で省エネ機運が高まり、電力・ガス大手事業者は、LNG 冷熱発電の開発に積極的に取り組んだ。1977 年にこの冷熱発電の効率を評価できるエクセルギーの解説書が出版された[1]。

当時から約 40 年が経過し、節電の要請からエクセルギーが再び注目を浴びだした。著者は、幸いにも LNG 冷熱発電の開発に関わり、その後もエクセルギーを用いた設計経験から、若手技術者や学生にエクセルギーを体験してもらえらる web サイト[2]や書籍を出版した[3]。本稿では、LNG をいかにうまく活用するかをエクセルギーの観点から紹介したい。

### 2. LNG の価格

2013 年度の火力発電の燃料費は、2010 年度対比 5 兆円の増加と見込まれている[4]。2012 年度の我が国への LNG 受入量は、約 8,860 万トン。そのうちの約 7 割にあたる 6,274 万トンが LNG 火力の燃料として使われている。2013 年度の LNG 火力の燃料費は、昨年度とほぼ同程度の量が受け入れられると予想され、前年度比 9,252 億円増の 5 兆 4,115 億円と見込まれている。この額は、石油・石炭を合わせた火力燃料費全体の約 62% に相当する。単純に計算すると 2013 年度の LNG1 トン当たりコストは、約 8 万 6 千円となる。LNG 価格の高騰に対して、西欧諸国では、石炭が火力発電の燃料として見直され、我が国では電力・ガス大手事業者が、2017 年に米国産シェールガスを LNG で輸入する動きが具体化している[5]。図 1 に発熱量換算による燃料別輸入価格の推移を示す[6]。CIF 価格 (運賃・保険等のコストを含んだ LNG 価格)

0.5 円/MJ の LNG 1 トン当たりコストは、LNG の分子量を 18.4、発熱量を  $45\text{MJ}/\text{Nm}^3$  とすると、約 2 万 7 千円である。この約 3 倍に値上がりした燃料価格は、2008 年 9 月のリーマンショックで落ち込んだものの、景気の回復と化石燃料の枯渇並びにアジア諸国の経済発展に伴うエネルギー需要の増大から、今後も LNG 価格も含めて、高騰すると思われる。

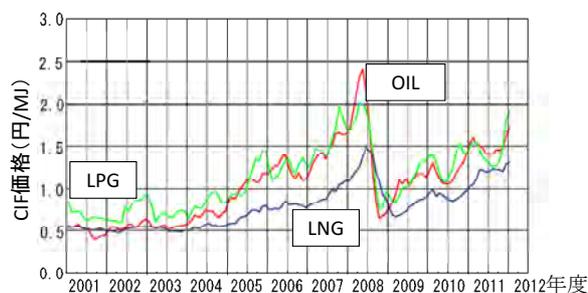


図 1 燃料別輸入価格の推移

### 3. LNG 冷熱利用

LNG は、メタンを主成分にエタン、プロパン、イソブタンからなり、大気圧での沸点は、約  $-160^{\circ}\text{C}$  である。外界の評価温度を  $20^{\circ}\text{C}$  とすると、LNG 1 トン当たりの冷熱と化学エクセルギーは、それぞれ約  $250\text{kWh}$  と約  $14,200\text{kWh}$  となる。天然ガスの液化には当初 LNG 1 トン当たり約  $850\text{kWh}$  の一次エネルギーが必要とされたが、最近では巨大な冷凍圧縮機を駆動するのに火力発電所用の高効率ガスタービンが転用され省エネが進んでいる[7]。

たとえばガス田からの天然ガスの産出圧力が  $4.5\text{MPa}$  の液化用圧縮動力は LNG1 トンあたり約  $260\text{kWh}$  との文献[8]があり、仮に動力と一次エネルギーの換算係数を 0.5 とすると、LNG 1 トン当たりの一次エネルギー消費は、約  $520\text{kWh}$  となる。産出天然ガス圧力が下がれば、当然この値は、大きくなるが、約 40 年前の液化プラントに比べ消費動力は約 4 割削減されたことになる。ガス田やシ

ェールガス鉱床の他、世界の LNG 液化基地、受入基地などの最新情報は文献[9]を参照されたい。海外の LNG 基地における冷熱利用の代表は、BOG (Boil off gas) 再液化であり、一部の基地での空気液化分離や台湾の冷熱発電を除いて、日本ほど LNG 冷熱利用に積極的でない。この理由は、ガスの送出圧力が 7MPaG と高く、LNG 冷熱の約 6 割が有効に利用できるためである。一方、日本の LNG 基地の冷熱利用[10]は、表 1 に示す冷熱発電[11]の他、空気液化分離 (7 基)、液化炭酸ドライアイス製造 (3 基)、冷凍倉庫 (2 基)、BOG 再液化 (2 基)、液化水素製造 (1 基)、エチレン液化 (1 基) [12]、冷水発生 (3 基) と多岐にわたる。

冷熱発電以外の設備の LNG 利用量は、50ton/h 以下であるが 24 時間同じ流量を必要とする。しかし冷熱発電では、ガスの送出量に応じて流量を変えることができ、LNG 利用量を大きくとれる。

表 1 の方式は、R: 単一冷媒ランキンサイクル、NG: 天然ガス直接膨張サイクル、MFR: 混合冷媒ランキンサイクルである。基地名の (供) は、ガバナーの代わりに減圧する際の圧力エネルギーを回収するためにガス供給所に設置されている天然ガスの直接膨張タービンであることを示す。

現在これらの冷熱発電の内、オゾン破壊係数の高い冷媒を使った方式やボイラー焚き蒸気タービンからガスタービンコンバインド方式に切り替わった基地の設備は、運用停止の状況にある。

表 1 わが国において建設された冷熱発電

基地	運開	出力 MW	方式	LNG t/h	送出圧力 MPaG
泉北第 2	1979	1.45	R	60	3.0
	1982	6.0	R/NG	150	1.7
知多共同	1981	1.0	R	40	1.4
北九州	1982	9.4	R/NG	150	0.9
知多	1983	7.2	R/NG	150	0.9
	1984	7.2	R/NG	150	0.9
日本海	1984	5.6	NG	175	0.9
根岸	1985	4.0	MFR	100	2.4
東扇島	1986	3.3	NG	100	0.8
	1987	8.8	NG	170	0.4
	1991	8.8	NG	170	0.4
姫路	1987	2.8	R	120	4.0
	2000	1.5	NG	85	0.7
泉北第 1	1987	2.4	NG	83	0.7
四日市	1989	7.0	R/NG	150	0.9
岩崎橋(供)	1996	1.15	NG	45	0.2
西島(供)	2002	5.0	NG	220	0.7

#### 4. エクセルギー

##### 4.1 エクセルギー誕生の歴史と普及状況

カルノーの論文「火の動力による考察」(1824) が「エクセルギー」に関する最初の論文である。

エクセルギーに対応する英語の述語として availability や available energy が 1950 年頃から使われ出したが、1956 年に Z.Rant が energy に倣ってギリシャ語を用い、exergy を造語したとされる。

この語は、当時のソ連、ドイツ、東欧圏を通じて広まり、1961 年にエクセルギーの研究成果を総括したドイツの雑誌「エクセルギー特集号」が組まれた。わが国でエクセルギーの導入活動が本格化したのは、石谷清幹氏による「エネルギー評価標準研究委員会」を通じてである。最近の動きとしては、エクセルギーをテーマとした科学研究費の重点領域研究「エクセルギー再生産の学理(1994 年度～1998 年度)」や普及本も出版されている [13-15]。しかしエネルギー関連産業ですら、なかなか実際に受け入れられていないのが現状である。

##### 4.2 エンタルピーとエクセルギーによる評価

著者は、2001 年 11 月に JSME 熱工学部門の岡山大学での特別企画セッション「熱力学 One-Point Lecture」においてエクセルギーの講演を行った[16]。

熱力学を学んでいない学生にも、難しい数式を使わずに比喻で「エクセルギーの大切さ」を理解してもらえるように考えた。図 2 に熱力学第一法則でのエネルギー消費機器の発熱量に対する有効熱と損失の関係と給与の支給額と控除の関係に喩えた類似性を示す。熱力学第一法則の熱精算では、外界条件がないエンタルピーにもとづく第一種損失しか表わせない。またプロセスに導入される入熱は、燃料、電力の他外気など異なる質のものを同等に扱う。一方給与の明細では、所得税など消費税がかからない項目のみである。

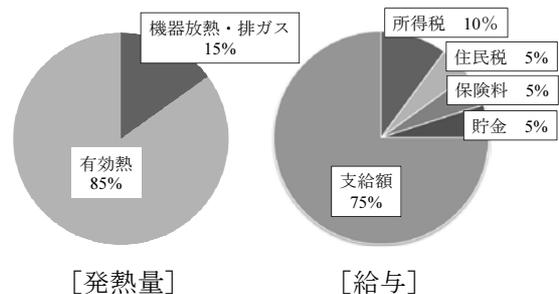


図 2 熱力学第一法則と給与の類似性

図3に熱力学第二法則でのエネルギー消費機器の有効熱量（投入エクセルギー）に対する有効仕事と損失の関係を家計簿の小遣いと消費税のかかった経費の關係に喩えた類似性を示す。熱力学第二法則の熱精算では、外界条件があるエンタルピーとエントロピーにもとづく第二種損失を電力や動力、蒸気などの有効仕事と同じ質で扱う。またプロセスに導入される入熱は、有効仕事と同質のものとなるため、外界条件と同じ外気などは有効熱量に含まれない。一方家計簿では、食費をはじめすべてに消費税がかかる経費である。したがって小遣いを増やすには、先ずは大きな経費の見直しが必要となる。この有効仕事と小遣いの類似性は以下の数式で表わせる。

$$\begin{aligned} \text{小遣い} &= \text{支給額} - (1 + \text{消費税}) \times (\text{必要経費}) \\ \text{有効仕事} &= \text{有効熱量} - (\text{外界温度}) \times \Delta S \end{aligned}$$

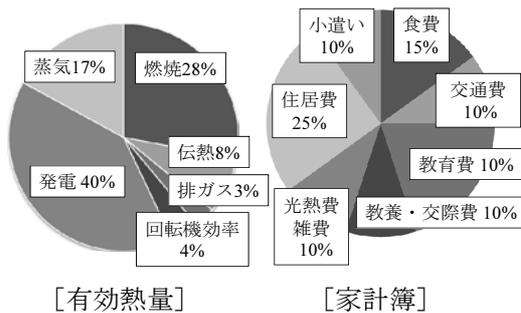


図3 熱力学第二法則と家計簿の類似性

表2にエンタルピーとエクセルギーによる評価の比較を示す。この比較表から両者をカメラに喩えれば、エンタルピーはレンズ付きフィルムカメラ、エクセルギーはデジタル一眼カメラとなる。

表2 エネルギー変換尺度の比較

項目	エネルギー変換尺度		備考
	エンタルピー	エクセルギー	
エネルギーの量	○	○	熱量は状態量ではない
エネルギーの質	×	○	エクセルギーは動力と質的に等価
基準温度の概念	×	○	流体の有効エネルギーを表現可能
圧力の評価	×	○	負担は定義式から違和感あるが負
組成の評価	×	○	純酸素・純窒素の混合で損失発生
排ガス・放熱損失	○	○	常にエクセルギー<エンタルピー
混合損失	×	○	異温度液体の混合で損失発生
燃焼損失	×	○	純酸素燃焼なら損失を大幅に低減できる
回転機損失	×	○	断熱効率 100%なら損失ゼロ
伝熱損失	×	○	温度差なしの熱交換なら損失ゼロ
減圧損失	×	○	流れの制御や計測でも損失発生

### 4.3 エクセルギー損失低減策

伝熱学会の会員に今更説明するまでもないが、エネルギー消費機器における最大のエクセルギー損失は、燃焼と伝熱である。伝熱はさておき燃焼に関しては、純酸素燃焼を行っても空気予熱を行うリージェネレータ[17]とほぼ同じ約 17%の燃料の化学エクセルギーに対する損失を生じる。ここで化学エクセルギーとは、都市ガス 13A では高位発熱量の約 92%であり、ガス給湯器の 1500℃燃焼（空気比 1.53）で約 36%の燃焼損失が生じる。

この損失に比べれば、純酸素燃焼やリージェネレータ燃焼は、大幅な損失低減策になる。既に販売が開始されている家庭用燃料電池は、LHV 発電効率 46.5%、総合効率 90%と発電出力 700W にしては極めて高い性能である[18]。この高い性能の根源は、燃焼損失を約 11%に抑えた点にある。

さらに発電効率を 55%に上げる取り組みもなされており[19]、後述で説明するが、エクセルギー面から見ると燃料利用率の向上に合わせた熱交換器類の伝熱に伴う損失低減が最大の課題となる。

### 4.4 エクセルギーデザイン学とは

これは、プロセスシミュレータ[20-21]を用いて、最適な機器構成をモデリングし、エクセルギー解析より求まる損失を機器性能の向上や運用条件により最小化させ、有効エクセルギーを増大させる手法である。PDCA (Plan-Do-Check-Action) は、業務改善の手法として知られている。

エクセルギーデザイン学ではこの手法と同様に Process modeling - Exergy Analysis - loss Evaluation - Payback Review を何度も繰り返し、現行技術レベルにおいて、CO<sub>2</sub>低減効果を加味しながら、最大の経済的効果が得られるプロセスを決定する学問領域である。エクセルギー解析を行わない従来の手法では、この作業を開発者が無意識の内に頭の中で行うが、エクセルギー解析の場合はそれを数値化して、「見える化」できる利点がある。ちなみにプロセスシミュレータの活用は、パソコンの導入に負うところが大きい。この 30 年間の IT 技術の進歩にはまったく驚かされる。プロセスシミュレータに関しては、1970 年に入ると各種の物性推算式が提唱され、エンジニアリングに活用され出した。日本の大学においても化学工学会システム・情報シミュレーション部会情報技術教育分科

会主催のプロセスデザイン学生コンテストが実施されている[22]. 著者も2003年から関西大学と2010年から大阪大学で機械工学専攻の特別講義でプロセスシミュレータを用いてエクセルギーデザイン学を受講学生に体験させている. 講義では, 主に LNG 冷熱発電とガスタービンなどを取り上げているが, 次項でその内容を紹介したい.

## 5. エクセルギーデザインによる LNG 冷熱発電

### 5.1 運用中の冷熱発電設備のエクセルギー効率

図4に代表的なプロパンランキン+天然ガス直接膨張サイクルによる LNG 冷熱発電のプロセスフローを示す. 熱源の海水温度に対する発電特性は文献[23]を参照されたい. 図5に LNG100ton/h, ガス送出圧力 1.9MPaG での LNG 冷熱発電のエンタルピーとエクセルギーによる熱精算図を示す.

エンタルピーでは, 熱源は海水であり, LNG の気化と発電に供される. 一方, エクセルギーでは有効熱量は LNG 冷熱であり, ガスの送出圧力やタービン出力の他, 各機器での損失に供される.

したがってこの設備のエクセルギー効率は, 自家使用のポンプ電力を差し引き, 56.9%となる.

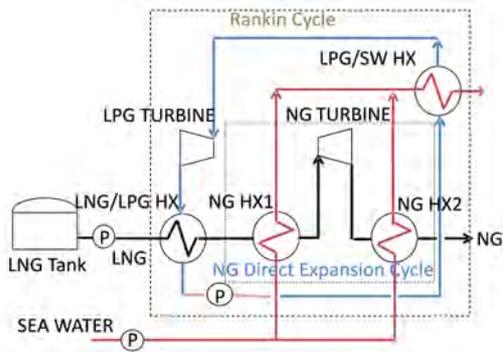


図4 LNG 冷熱発電のプロセスフロー

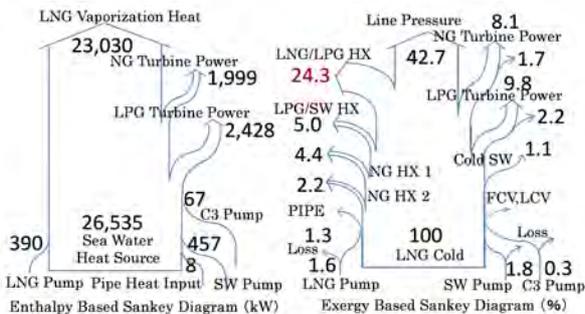


図5 冷熱発電の熱精算図 (評価温度 20°C)

### 5.2 冷熱発電へのエクセルギーデザインの適用

エクセルギー損失が24.3%もある LNG/LPG HX の他, 低温 NG の昇温 (HX1 と HX2) や LPG 気化 (LPG/SW HX) での伝熱に伴う損失を経済性や運用性を考慮しながら, ガス送出圧力やタービン出力に変換する必要がある. 先ず LNG/LPG HX の損失を低減するため, 表1の根岸基地で実績のある MFR 方式を NG 循環直接膨張と LPG ランキンに採用する[24]. しかし海水だけを熱源に用いては, LNG/LPG HX 以外の熱交換器での損失を低減できない. そこで図6に示すコージェネ温水 (95°C) をヒータ熱源に用いる新 LNG 冷熱発電のプロセスを検討した. 都市ガスの送出は, 高圧 7MPaG と中圧 1MPaG の幹線に, また 3MPaG は基地に隣接する大型火力用燃料ラインとして, その送出比率を 40%, 5%, 55%とした. エンタルピーでは投入熱量の約 1/4 を占める温水はエクセルギーでは, LNG 冷熱に対して僅か 3.2%である.

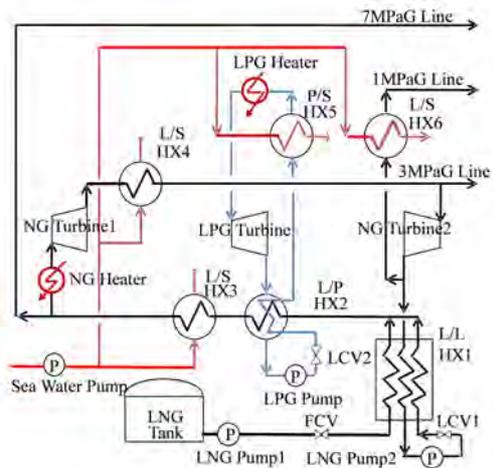


図6 新 LNG 冷熱発電のプロセス

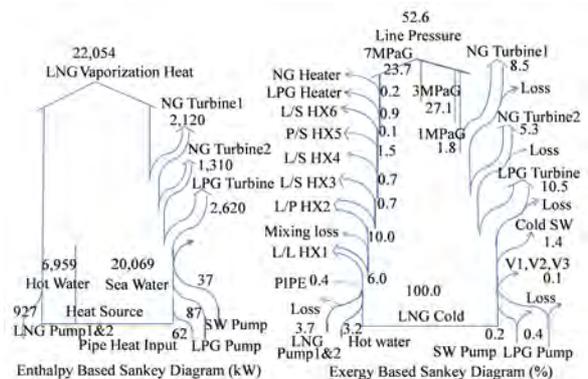


図7 新冷熱発電の熱精算図 (評価温度 20°C)

投入温水のエクセルギーは、LNG 1 トンの冷熱エクセルギー250kWh に流量 100ton/h を掛け 800kW となるが、温水を利用することで NG Turbine1 と LPG Turbine の出力をそれぞれ 230kW, 700kW 高められる。この設備のエクセルギー効率は、自家使用のポンプ電力を差し引き、投入温水も考慮に入れると 70.3%と現行設備に比べ約24%のアップとなる。このようにエクセルギーデザインの講義では、熱交換器の温度差に伴う伝熱損失がプロセスの見直しにより、有効な動力や圧力に変換できることを実際に体験してもらっている。

### 6. エクセルギーデザインによるガス利用

ここでは、送出された天然ガスをいかに有効に利用するかをエクセルギーの観点から説明したい。

第 1 は LNG 火力発電の高効率化である。ガスタービン入口燃焼ガス温度は今まで毎年約 25°C の高温化を達成してきており、現在 1600°Cクラスのコンバインドサイクルが試運転段階にある[25]。

発電端熱効率は、LHV 基準で 61.5%以上とあり、この値はエクセルギー効率では、都市ガス 13A の低位発熱量 40.4MJ と化学エクセルギー41.4MJ より、60%となる。最大のエクセルギー損失は、燃焼に伴う約 24.3%とボイラーの伝熱に伴う約 6.5%であり、残りのほとんどがタービンや圧縮機の効率による損失となる。1700°C級ガスタービンの開発ロードマップによれば、LHV 基準で 62~65%が目標とされている[26]。この 1700°C級ガスタービンでもやはり燃焼に伴う損失が約 23.0%と最大であるが、タービンと圧縮機の効率改善で上限の目標値は達成されると思われる。

第 2 は固体酸化燃料電池 SOFC による高効率化である。大型 LNG 火力発電への組み込みも検討されているが[27]、建設コストの面から実証はかなり先になると予想される。一方家庭用では、発電出力 700W で LHV 発電効率 46.5%を達成している[28]。著者の研究室では、エクセルギーデザインにより、家庭用 SOFC の効率改善余地の研究を行っている[29]。図 8 はセルスタックにおける燃料利用率を高め、LHV 発電効率を 55%に向上するためのプロセス条件の一例を示しており、図 9はそのエクセルギー熱精算図である。図9の( )内数値は、燃料利用率を高める前のエクセルギー熱精算図からの増減を表す。燃料利用率を高め

ば発電効率は増加するが、そのためには、熱交換器類の伝熱に伴うエクセルギー損失を減らす必要がある。

最後にエクセルギーの良さを再度強調するため、図 10 の家庭におけるエネルギー機器の効率と一次エネルギー使用量の関係を示したい[30]。この図は冬場の戸建て住宅の一日の電力需要を固定して、熱電比を 0.5~3.0 に 0.5 刻みで変化させた場合のエネルギー機器の効率と一次エネルギー使用量の関係を示す。SOFC の熱主逆潮運転を別にすれば、給湯使用量の増加に合わせ、エンタルピーでは効率が上がるが一次エネルギー使用量も増加する。一方エクセルギーでは、効率の向上に伴い一次エネルギー使用量は減少する。これは高エクセルギー効率の機器の購入が省エネにつながることを物語っている。

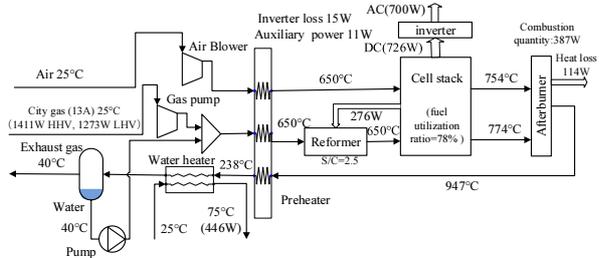


図 8 SOFC の運転フロー (一例)

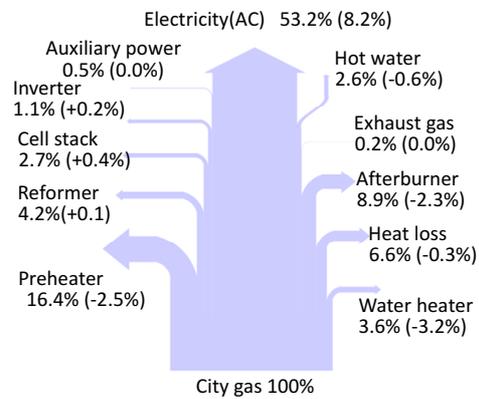


図 9 SOFC のエクセルギー熱精算図 (一例)

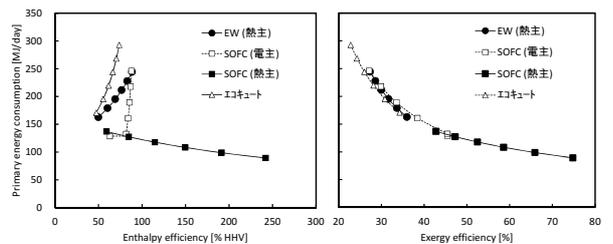


図 10 システム効率と一次エネルギー使用量

## 7. おわりに

LNG は、今後もわが国の基幹エネルギーとして重要な位置を占める。LNG 1 トン当たりの冷熱エクセルギーは、化学エクセルギーの僅か 1.76% に過ぎないが、40 年前は、省エネの機運のなかでこのエネルギー回収に各企業が必死で取り組んだ。

燃料価格が高騰する昨今において「もったいない」の精神に立ち返り、来年である 2014 年までには高効率な LNG 冷熱発電の開発に官民挙げて取り組み、わが国の戦略的輸出プラント商品となっていることが私の夢である。皆様にも是非エクセルギーデザイン学の深掘りをしていただきたい。

## 参考文献

- [1] 『熱管理士教本—エクセルギーによるエネルギーの評価と管理』, 石谷清幹著編, 共立出版 (1977).
- [2] <http://www.ed.jrl.eng.osaka-u.ac.jp/>.
- [3] 『エクセルギーデザイン学の理解と応用—続熱管理士教本』, 久角喜徳, 中西重康, 毛笠明志監修, 大阪大学出版会 (2012).
- [4] 日本総研, 円安により高まる火力発電燃料費の増加懸念(2013 年 5 月 2 日)No.2013-003, <http://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/researchfocus/pdf/6752.pdf>.
- [5] 東洋経済 ONLINE, シェール革命で世界はどう変わるか, <http://toyokeizai.net/articles/-/12863>.
- [6] 中部電力, LNG (天然ガス) の輸入価格の推移.
- [7] <http://www.chiyoda-corp.com/technology/lng/liquefaction.html>.
- [8] Shahrooz Abbasi Nezhad, Bizhan Shabani and Majid Soleimani, Thermodynamic Analysis of Liquefied Natural Gas Production Cycle in APCI Process, Journal of Thermal Science(2012), Vol. 21, Issue 6, pp. 564-571.
- [9] ガスエネルギー新聞, World Natural Gas Map 2013.
- [10] 国際 LNG 市場の動向と LNG 冷熱利用の現状と取り組み, エネルギー資源, Vol.27, No.5, pp.320-339 (2006).
- [11] 久角喜徳, LNG 冷熱発電, 機械工学便覧応用システム編 γ 5, エネルギー供給システム, 日本機械学会, pp.198-201 (2005).
- [12] [http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr\\_2011/1193064\\_4332.html](http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2011/1193064_4332.html).
- [13] 『エクセルギー工学—理論と実際』, 吉田邦夫編, 共立出版 (1999).
- [14] 唐木田健一『エクセルギーの基礎』, オーム社 (2005).
- [15] 『エネルギーの新しいものさしエクセルギー』, アベイラブルエナジー研究会編, (社)日本電気協会新聞部 (2010).
- [16] 久角喜徳, よくわかるエクセルギーと都市ガス事業におけるその活用事例, 熱工学講演会講演論文集, pp.654-648 (2001.11).
- [17] [http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/needs/1191093\\_3922.html](http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/needs/1191093_3922.html).
- [18] <http://www.osakagas.co.jp/topics/topics20130124.html>.
- [19] 次世代型高効率 SOFC プロトタイプ機, [http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr\\_2013/1201415\\_7831.html](http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2013/1201415_7831.html).
- [20] [http://www.aspentech.co.jp/product/pdf/HYSYS\\_SS.pdf](http://www.aspentech.co.jp/product/pdf/HYSYS_SS.pdf)
- [21] <http://www.virtualmaterials.com/vmgsim>
- [22] 第 11 回プロセスデザイン学生コンテスト, [http://altair.chem-eng.kyushu-u.ac.jp/scej\\_contest2012/](http://altair.chem-eng.kyushu-u.ac.jp/scej_contest2012/).
- [23] [http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/technical/1191168\\_3909.html](http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/rd/technical/1191168_3909.html).
- [24] 朴燦容, 久角喜徳, 堀司, 若林努, 毛笠明志, エクセルギーデザインによる韓国 LNG 基地での複合発電の導入検討, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2013.6).
- [25] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/491/491019.pdf>.
- [26] [http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001640/034\\_05\\_07.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001640/034_05_07.pdf).
- [27] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/483/483016.pdf>.
- [28] 若林卓, 家庭用燃料電池「エネファーム type S」, クリーンエネルギー Vol.21 No.8 (2012), pp.1-5.
- [29] 堀司, 後藤稔, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志, 家庭用燃料電池コージェネのエクセルギーデザイン, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2013.6).
- [30] 堀司, 平野駿, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志, エクセルギー解析による SOFC の高効率化, 第 31 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.383-386 (2012.6).

## 見慣れなかった熱力学変化 Strange Change in Thermodynamics

牧野 俊郎 (近畿職業能力開発大学校)  
Toshiro MAKINO (Kinki Polytechnic College)  
e-mail: toshiromakino.52s@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

私は本年3月に長年務めた大学を退職した。ついでに退職者は辞める前に大学の『工学広報』に“随想”を書くようにと言われた。大学の運営に携わった方々や一言をもつ方々はその主張をそこに述べるのであろうが、私にはそんなあたりがなかったので、熱力学についての思い出を書いた。友人に見せたところ、『伝熱』に投稿するとよいと勧められた。については、投稿する次第である。

### 2. 理想気体の熱力学

もう何年も前のことであるが、私の尊敬する大先生が伝熱シンポの講演で、圧力  $p$  が増加し同時に体積  $V$  も増加する変化、あるいは圧力  $p$  が減少し同時に体積  $V$  も減少する変化は存在しうるのであろうか、という問いかけをなされた[1]。つねづねよくお考えになる先生の言であったので、その問いかけはその後ずっと私の脳裏に焼き付いていた。

そういえば、高校の物理の教科書には、理想気体の定圧変化、定積変化、定温変化、可逆断熱変化が示されているが、 $p$  と  $V$  がともに増減する変化は明には現れない。大学の熱力学の講義では高校の教科書にはない自動車やガスタービンのサイクルなどの実際的なあたりにも話が及ぶが、そこ

でも  $p$  と  $V$  がともに増減する変化は明には現れない。ただ、大学の講義では高校の教科書にはないおまげが付いていて、理想気体と見なせる気体のすべての変化は近似的に式  $pV^n = \text{const.}$  の形で表されるとしている。すなわち、ポリトロープ指数  $n$  を  $0, 1, \kappa, +\infty$  と置くことによってそれぞれ定圧変化、定温変化、可逆断熱変化、定積変化を1つの式で表し、また、この代表的な4種の変化には近似できないより実際的な変化も  $n$  に適切な値を与えることにより表現できるとしている。ここで、特徴的に、 $n$  は  $n \geq 0$  である。すなわち、図1で、点  $O$  を出発点とする変化は  $O$  の周りの影つきの領域にしか及ばないことになる。いっぽう、 $p$  と  $V$  がともに増減する変化は、この表現によれば負のポリトロープ指数  $n$  をもち、その図では未開の領域にある見慣れない熱力学変化であることになる。その後、大先生は考察を進めて、負のポリトロープ指数が実現する条件を明示されたが[2]、私にはしっかりと来ないままであった。それは、大先生が示された条件からは見たままの具体的な系が見えなかったからである。

### 3. キッズ・エネルギー・シンポ

ところで、気体に熱を加えるとその体積が増し、逆に冷却するとその体積は減少するというのは熱

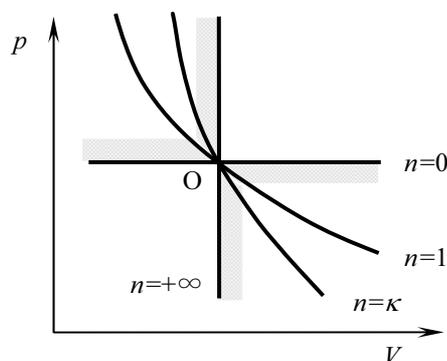


図 1



写真 1 [4]

力学の基本中の基本である。熱力学の講義では、その基本が暗に圧力が一定に近いという条件での加熱/冷却を想定していることを述べたうえで、その基本はあなたにとって知識か経験かと学生に尋ねることにしてきた。知識とは、中学校の先生がそうであると書いてあった、ではそうであるに違いない、というような経緯で得られた天下りの知識を指す。いっぽう、経験とは、何かそのような現象を見たことがある、感じたことがあるなどの当人の五感を通じて身についたあたりを指すつもりであった。大部分の学生は素直に知識であると答え、ごく少数の学生は黙って考え始めた。ならばお見せしようと教室で実験をやってみせることにしてきた[3].キッズ・エネルギー・シンポでも小学生を相手に同じ実験をやってみせた(写真 1) [4]. 教室に液体窒素を運んで大きいビーカーに移し、ゴム風船を大きく膨らませてその液面に押し付ける。すると、風船は縮んで張りがなくなるまでに小さくなる。風船を液面から離すと風船は膨らんでもとの大きい風船に戻る。私はこの実験を学生に熱力学の基本を体得させるためにやってきたつもりであった。しかし、ある年、この風船の中の

気体は、その実験の過程で圧力  $p$  と体積  $V$  がともに増減する負のポリトロープ変化を経ていることに気づいた。風船の中の気体は風船のゴムの張力に抗しながらその  $V$  を減少/増加させるため  $p$  も  $V$  も同時に減少/増加することに気づいたのである。こんな身近なところに負のポリトロープ変化を見出すとは、それまで私には想像できなかった[3, 5]. この風船の現象については、しかし、§5 に後述の議論があった。

#### 4. 高校生への熱力学の問題

それより後に、高校で理想気体の定圧変化、定積変化、定温変化、可逆断熱変化を学んできた高校生向けに熱力学の問題を作る機会があった。といっても、その問題は実際に使われることはなかった。それは図 2 に示す系についてのものであった。系を厳密に記述するためにいろいろなお断りをした後であれこれ尋ねるものであるが、その一部を省略形で述べると次のようなものである。シリンダーの中の長いピストンの両側に、初期には状態  $O$  で  $p, V, T$  がたがいに等しい同種の理想気体 A と B が入っている。気体 B は断熱されている。気体 A をゆっくり加熱していくと、気体 A と

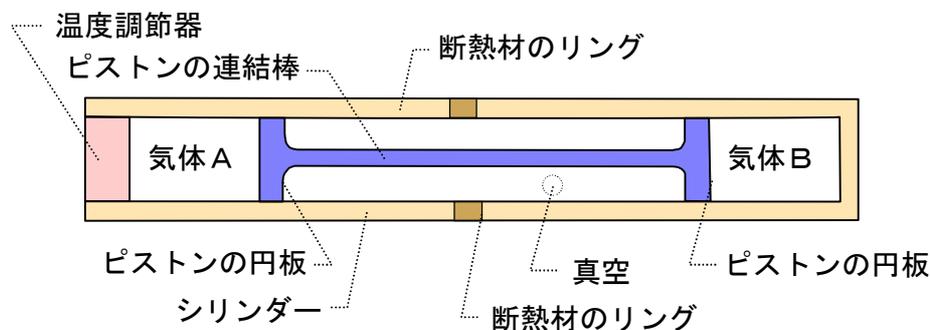


図 2

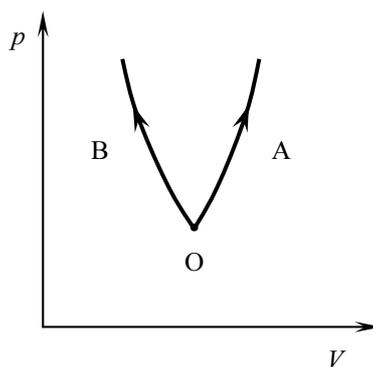


図 3

B の状態はどのように変化するか、その状態変化の軌跡を  $p$ - $V$  図に表せ、というものであった。ポイントは、ピストンが伸び縮みしないことと、ピストンの両側の気体の圧力がたがいに等しいことだけである。答は図 3 に示すとおりである。曲線 A は曲線 B と左右対称に描かれるべきである。気体 B は可逆断熱変化し、いっぽう、気体 A は高校や大学の教科書に明には現れない負のポリトロープ変化をする。しかし、この問題は高校物理の範囲を越えていない。私は高校物理の範囲で負のポリトロープ変化の一例を見出すことになった。これは、その問題の作成の前には想像できなかったことである。私はまた見慣れなかった熱力学変化に巡り会った。

### 5. その後の展開

この稿の『伝熱』への投稿を勧めてくれたのは京都大学の吉田英生教授であった。その後、親交のある友人たちに草稿を見せたとこ、写真 1 の風船の実験について、いくつかのご指摘をいただいた。

まず、山形大学の高橋一郎教授からは、牧野は体積  $V$  が減少するとゴムの張力が減少し圧力  $p$  は減少すると決めつけているが、Young-Laplace の式  $p-p_a=2\sigma r$  を考えるとそんなことは自明ではないというご指摘をいただいた。ここで、 $p$  は風船内の空気の圧力、 $p_a$  は大気圧、 $\sigma$  は風船のゴムの表面張力、 $r$  は風船を球体と見なしたときの半径である。 $\sigma$  の  $r$  依存性・温度  $T$  への依存性を考えると、果たしてそれでよいのか、というご指摘である。

横浜国立大学の宇高義郎教授からは、ゴムあるいは類似のものでは、 $r$  の減少よりも  $\sigma$  の減少の割

合が大きい物質あるいは条件があるとも思える、とのコメントをいただいた。この場合には、 $p$  と  $V$  はともに減少することになる。

芝浦工業大学の山田純教授からは、大きい風船と小さい風船を管で繋ぐと小さい風船が縮むという実験を見たことがあると教えていただいた。これは、小さい風船内の空気の圧力が、大きい風船内の空気の圧力より高いことを意味する。また、小さい風船が縮むという変化の過程に注目すれば、小さい風船内の圧力  $p$  が減少してその体積  $V$  が減少することを意味する。ただし、この場合には  $V$  の減少とともに物質質量も減少する。この変化の過程で比体積  $v$  あるいは  $(\sigma/r)$  はどのように変化するのでしょうか？

この実験↑について、九州大学の高松洋教授からは、大きい風船が縮むか小さい風船が縮むかは 2 つの風船の初期の大きさによるのご指摘があり、その条件について定量的なご説明があった。両方の風船の半径が自然の状態の半径の 1.38 倍を越える場合、小さい風船のほうが縮むとのことである。写真 1 の実験では、風船の半径は主要な過程において自然の状態の半径の 1.38 倍を越えているので、半径が小さいほうの風船が縮む山田教授の場合に当たるようである。

慶應義塾大学の長坂雄次教授からは、ゴムのエントロピー弾性を考えると、温度  $T$  が減少すると表面張力  $\sigma$  は減少すると教えていただいた。 $T$  が減少すると風船の半径  $r$  も減少するが、 $\sigma=\sigma(r, T)$  である。高松教授からの  $\sigma$  の  $r$  依存性についてのご指摘を併せて考えて、しかし、写真 1 の実験において  $r$  が減少するとき  $(\sigma/r)$  はどのように変化するのか、ポリトロープ変化の正負はどうであるのか？

さらに、吉田教授からは、風船はいったん膨らませると塑性変形して空気を抜いてももとには戻らないというご指摘があった。 $\sigma$ - $r$  関係は履歴にもよるのであろう。いまのところ、先の宇高教授のコメントがすべてであるようである。私の思考はこのあたりで止まってしまった。

## 6. おわりに

ともあれ、この1月余り、私は明らかにブレていた。今後もまたブレることがあるかもしれない。いまの段階でまとめると、たぶん、“負のポリトロップ変化は身近にも起こりうる”くらいであろう。

ところで、上記のようなご指摘をいただいたのは実にすばらしいことであった。ついては、私は当初の原稿を訂正することなく、私のブレ/思考錯誤の経緯を加筆し、おつき合いくださった友人たちに感謝する。

## 文献 と コメント

[1] 越後亮三: カルノーサイクルの熱力学に関する再評価と考察, 第 37 回日本伝熱シンポジウム

講演論文集, vol. II, pp. 527-528, May 2000.

- [2] 越後亮三: カルノーサイクルの熱力学に関する再評価と考察 (続報), 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol. I, pp. 243-244, May 2001.
- [3] 牧野俊郎: エデュケーションQ:「機械製作実習 スターリングエンジン」のテキスト, 伝熱, vol. 43, no. 180, pp. 34-43, May 2004.
- [4] 牧野俊郎: 熱についての実験・体験, “キッズ・エネルギー・シンポジウム 2008”テキスト, 日本伝熱学会, pp. 8-14, Sep. 2008.
- [5] このコメントは風船内の気体が理想気体であることを前提としているが、少なくとも圧力が大気圧に近い場合には  $N_2$  も  $O_2$  も凝縮する直前まで理想気体的である。このことは、キッズ・エネルギー・シンポ[4]の直前に算数をしてみて初めて気がついた。それまでは講義でも、 $N_2$  や  $O_2$  は室温・大気圧下では理想気体的であっても液体に近い状態では実在気体として扱わなければならないと述べていた。

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
2014年					
8月	10(日) ～ 15(金) The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15, 第15回国際伝熱会議) (開催場所: 国立京都国際会館)	2013.8.31	2013.11.30	info@ihtc-15.org	

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2013年					
6月 ～ 7月	第32回熱電変換国際会議(ICT2013) (開催場所: 神戸国際会議場)	事前登録 2013.3.15	Abstract 2013.1.15	ICT2013 実行委員会委員長 舟橋良次(産総研), 事務担当: 八野裕介(株)インターグループ 〒531-0072 大阪市北区豊崎 3-20-1 インターグループビル Tel: 06-6372-3053 Fax: 06-6376-2362 E-mail: ict2013@intergroup.co.jp URL: http://ict2013.its.org	
7月	第14回可視化フロンティア「PIV」講習会 2013 (開催場所: LMJ 東京研修センター)	2013.6.30		講習会実行委員長 染矢聡 (産総研) E-mail: s.someya@aist.go.jp URL: http://www.visualization.jp/event/detail/frontier2013.html/	
7月	第41回可視化情報シンポジウム (開催場所: 工学院大学 新宿キャンパス)	2013.3.15	2013.5.17	早稲田大学先端生命医科学センター 八木高伸 (〒162-8480 東京都新宿区若松町 2-2TWIns03C-204) Tel: 03-5369-7547 Fax: 03-5269-9062 E-mail: akanobu_yagi@akane.waseda.jp URL: http://www.visualization.jp/event/detail/symp2013.html	
7月	(一社)日本能率協会 TECHNO-FRONTIER 2013 (開催場所: 東京ビッグサイト東展示棟 1-3 ホール)			TECHNO-FRONTIER 事務局 担当 田部, 中野, 前田 〒105-8522 東京都港区芝公園 3-1-22 ((一社)日本能率協会 産業振興第2ユニット内) Tel: 03-3434-0587(直通) Fax: 03-3434-3593 E-mail: tf@convention.jma.or.jp URL: http://www.jma.or.jp/tf	
7月	『2013 TECHNO-FRONTIER 技術シンポジウム』第13回 2013 熱設計・対策技術シンポジウム (開催場所: 東京ビッグサイト会議棟)			(一社)日本能率協会 TECHNO-FRONTIER シンポジウム事務局 担当: 国部・和田・安江 (〒105-8522 東京都港区芝公園 3-1-22) Tel: 03-3434-0587 Fax: 03-3434-8076 E-mail: tech-con@jma.or.jp	
8月	日本混相流学会混相流シンポジウム 2013 (開催場所: 信州大学工学部)			日本混相流学会事務局 (〒554-0022 大阪市此花区春日出中 2-14-9 (株)学術出版印刷内) Tel: 06-6466-1588 Fax: 06-6463-2522 E-mail: office@jsmf.gr.jp	
8月	日本実験力学学会 2013 年度年次講演会 (開催場所: 由利本荘市文化交流館「カダーレ」)	2013.4.30	2013.6.25	秋田県立大学システム科学技術学部 須藤誠一 (〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4) Tel: 0184-27-2111 Fax: 0184-27-2188 E-mail: sudo@akita-pu.ac.jp URL: http://www.jsem.jp/event/Annual13/index.html	
9月	2013 年度日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所: 東海大学高輪キャンパス)	2013.5.17	2013.8.2	年次大会実行委員長 鈴木徹 E-mail: jsrae13@jsrae.or.jp URL: http://www.jsrae.or.jp/nenjitakai/2013/I/index.html	
9月	日本流体力学会 年会 2013 (開催場所: 東京農工大学小金井キャンパス)	2013.6.10	2013.7.22	日本流体力学会年会 2013 実行委員会 E-mail: nenkai13@ml.tuat.ac.jp URL: http://www.nagare.or.jp/	
9月 12月	2013 年度計算力学技術者(CAE技術者)資格認定試験 (開催場所: 日本機械学会会議室、他)	2013.7.5 2013.8.22		一般社団法人 日本機械学会 事業企画 G 関根 (〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35 番地 信濃町煉瓦館 5 階) Tel: 03-5360-3506 Fax: 03-5360-3509 E-mail: sekine@jsme.or.jp URL: http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm	
9月	No.13-58 講習会『伝熱工学資料(改定第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用 (開催場所: 日本機械学会 会議室)			(一社)日本機械学会 熱工学部門担当 大通 (〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35 信濃町煉瓦館 5 階) Tel: 03-5360-3500 Fax: 03-5360-3508	

行事カレンダー

9月	24(火) ～ 25(水)	日本機械学会関西支部第327回講習会 設計に使える熱流体解析の基礎と応用 (開催場所:大阪科学技術センター)	2013.9.17		一般社団法人日本機械学会関西支部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内) Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp URL: http://www.kansai.jsme.or.jp/	
9月	27(金) ～ 28(土)	可視化情報全国講演会(会津2013) (開催場所:会津大学)	2013.6.7	2013.7.29	実行委員長 会津大学先端情報科学研究センター環境情報科学クラスター 寺坂晴夫(〒965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀) Tel: 0242-37-2559 Fax: 0242-37-2531 E-mail: kashika@u-aizu.ac.jp URL: http://web-ext.u-aizu.ac.jp/conference/vis2013/	
10月	16(水) ～ 17(木)	第41回日本ガスタービン学会定期講演会 (開催場所:沖縄産業支援センター)	2013.6.17	2013.8.26	公益社団法人 日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 Fax: 03-3365-0387 E-mail: gtsj-office@gtsj.org URL: http://www.gtsj.org/	
10月	19(土) ～ 20(日)	熱工学コンファレンス2013 (開催場所:弘前大学文京キャンパス)	2013.7.1	2013.9.9	2013年熱工学コンファレンス実行委員会事務局(〒036-8561 弘前市文京町3 弘前大学理工学部知能機械工学科) 実行委員長 伊藤昭彦 Tel/Fax: 0172-39-3679 E-mail: aito@cc.hirosaki-u.ac.jp 幹事 麓 耕二 Tel/Fax: 0172-39-3676 E-mail: kfumoto@cc.hirosaki-u.ac.jp URL: http://www.jsme.or.jp/conference/tedconf13/	
11月	1(金) ～ 5(火)	ISTP24 (International Symposium on Transport Phenomena) (開催場所:山口東京理科大学)	事前登録 2013.9.1	Abstract 2013.6.1 Full Paper 2013.9.1	ISTP-24 実行委員長 鈴木康一(〒756-0884 山口県山陽小野田市大学通1-1-1 山口東京理科大学工学部 機械工学科) Tel: 0836-88-3500 Fax: 0836-88-3400 E-mail: istp24_info@rs.tus.ac.jp URL: http://web.apollon.nta.co.jp/istp24/	
11月	3(日) ～ 6(水)	The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (8th ISEM13-Sendai) (開催場所:仙台市戦災復興記念館)	事前登録 2013.9.24	Abstract 2013.5.10 Full Paper 2013.8.1	日本実験力学学会事務局担当 林 千太郎(岡山市北区理大町1-1 (岡山理科大学 工学部 機械システム工学科内)) Tel: 086-256-9615 Fax: 086-255-3611 E-mail: office-jsem@mech.ous.ac.jp URL: http://jsem.jp/ISEM8/	
11月	20(水) ～ 22(金)	第34回日本熱物性シンポジウム (開催場所:富山県民会館)	2013.6.28	2013.8.30	第34回日本熱物性シンポジウム実行委員会(〒930-8555 富山市五福3190 富山大学工学部機械システム工学科 平澤良男) Tel&Fax: 076-445-6783 E-mail: jstp2013@ml.kanazawa-u.ac.jp URL: http://jstp2013.w3.kanazawa-u.ac.jp/	
11月	30(土)	日本機械学会 No.13-47 第16回スターリングサイクルシンポジウム (開催場所:日本科学未来館)	2013.6.28	2013.10.25	実行委員長 関谷弘志(早稲田大学) 幹事 菊原浩司(早稲田大学) Tel&Fax: 0495-24-6293 E-mail: sekiya@waseda.jp kj.kikuhara@fuji.waseda.jp	
12月	4(水) ～ 6(金)	第51回燃焼シンポジウム (開催場所:大田区産業プラザ Plo)	2013.7.19	2013.9.13	第51回燃焼シンポジウム事務局(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻 土橋研究室内) Tel: 03-5841-7304 Fax: 03-5841-7313 E-mail: sympo51@combustionsociety.jp URL: http://www.combustionsociety.jp/sympo51/	
2014年						
4月	13(日) ～ 16(水)	COMPSAFE2014 (1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problem) (第1回安全・安心のための計算理工学国際会議) (開催場所:仙台国際センター)			COMPSAFE2014 事務局(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 吉村教授室気付) E-mail: secretary@compsafe2014.org URL: http://www.compsafe2014.org	

## 公益社団法人日本伝熱学会第 51 期(平成 24 年度)総会議事録

1. 日 時 平成 25 年 5 月 30 日(木)16 時 10 分～17 時 40 分
2. 場 所 ウェスティンホテル仙台 A 室(宮城県仙台市青葉区一番町 1-9-1)
3. 正会員数 1,071 名
4. 出席者 767 名(うち委任状出席 618 名). 定款第 29 条の定めるところにより, これは定足数である正会員数の過半数(536 名)を上回り, 総会は成立した. また, 定款第 43 条の定めるところにより, 第 6 号議案の定款改定については, 総会において正会員の議決権の 3 分の 2 (714 名)以上の多数による決議が必要となるが, これを上回り, 審議及び決議が可能となった.

### 5. 議事経過

定款第 27 条により門出政則会長が議長となり, 以下の議案について逐次審議した.

#### 第 1 号議案 第 51 期(平成 24 年度)事業報告の件

議長より, 公益社団法人日本伝熱学会第 51 期(平成 24 年度)総会議案(以下, 「総会議案」と呼ぶ.)の第 1 号議案第 51 期(平成 24 年度)事業報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

#### 第 2 号議案 第 51 期(平成 24 年度)会務報告の件

議長より, 総会議案の第 2 号議案第 51 期(平成 24 年度)会務報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

#### 第 3 号議案 第 51 期(平成 24 年度)収支決算の件

議長より, 総会議案の第 3 号議案第 51 期(平成 24 年度)収支決算について諮り, 満場一致でこれを可決した.

#### 第 4 号議案 第 52 期(平成 25 年度)事業計画の件

議長より, 総会議案の第 4 号議案第 52 期(平成 25 年度)事業計画について諮り, 満場一致でこれを可決した.

#### 第 5 号議案 第 52 期(平成 25 年度)収支予算案の件

議長より, 総会議案の第 5 号議案第 52 期(平成 25 年度)収支予算について諮り, 満場一致でこれを可決した.

#### 第 6 号議案 定款改定案の件

議長より, 総会議案第 6 号議案定款改定案について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第7号議案 第52期(平成25年度)役員・協議員選出の件

議長より、総会議案の第7号議案第52期(平成25年度)役員の選出について以下のとおり次期役員の提案がなされ、満場一致でこれを可決した。

定款第17条第2項により退任する役員

代表理事(会長)	門出 政則	理事(副会長)	石塚 勝
理事(副会長)	秋吉 亮		

定款第17条第2項ただし書きにより退任する役員

理事(副会長)	飛原 英治
---------	-------

定款第17条第1項により退任する役員

理事	近久 武美	理事	高松 洋
理事	田川 正人	理事	多田 幸生
理事	鶴田 隆治	理事	安田 俊彦
監事	藤岡 恵子		

定款第17条第1項ただし書きにより退任する役員

理事	圓山 重直	理事	宇高 義郎
----	-------	----	-------

第52期に新たに選任される役員

定款第17条第2項により選任される役員

理事(会長・代表理事)	宇高 義郎
理事(副会長)	近久 武美
理事(副会長)	藤岡 恵子

定款第17条第2項ただし書きにより選任される役員

理事(副会長)	佐藤 勲
---------	------

定款第17条第1項により選任される役員

理事	中部 主敬	理事	鹿園 直毅
理事	高野 孝義	理事	平澤 良男
理事	高橋 厚史	理事	二本柳 保
監事	安田 俊彦		

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより選任される役員  
理事 中山 顕

第 8 号議案 議事録署名人選任の件

議長より、本日の議事の経過を議事録にまとめるにあたり、議長に加えて議事録署名人 2 名を選任したい旨の提案があり、協議の結果、石塚勝氏、飛原英治氏の 2 名を選任した。

以上により、本日の議事を終了した。

平成 25 年 5 月 30 日

公益社団法人日本伝熱学会第 51 期(平成 24 年度)総会

議長 門出 政則 \_\_\_\_\_ 印

議事録署名人 石塚 勝 \_\_\_\_\_ 印

議事録署名人 飛原 英治 \_\_\_\_\_ 印

国際賞「**抜山記念賞 (The Nukiyama Memorial Award)**」推薦公募のお知らせ

日本伝熱学会会員各位

2013年6月10日  
国際賞選考委員会

日本伝熱学会創立50周年を記念して、国際賞「**抜山記念賞 (The Nukiyama Memorial Award)**」が創設されました。この国際賞は、伝熱学、熱科学、熱工学に関連した分野で国際的に秀でた活躍をしているおよそ50歳未満の科学者（隔年に1人）に授与される賞です。

第2回国際賞の公募を行いますので、皆様から多くの推薦をお待ちします。

提出書類：推薦書（NUKIYAMA Nomination Form）

提出期限：2013年9月10日（火）まで

提出先：門出政則（Chairperson）

〒840-8502

佐賀市本庄町1番

佐賀大学 大学院工学系研究科

機械システム専攻

Tel: 0952-28-8608; Fax: 0952-28-8587, E-mail: monde@me.saga-u.ac.jp

なお、抜山賞とその募集要領等の詳細は、日本伝熱学会のホームページに掲載中です。特に、Call for Nomination を参照して、Nomination Form を作成してください。

**日本語のページ** : [http://www.htsj.or.jp/NukiyamaAward\\_j.html](http://www.htsj.or.jp/NukiyamaAward_j.html) (未定, 更新中)

**英語のページ** : [http://www.htsj.or.jp/NukiyamaAward\\_e.html](http://www.htsj.or.jp/NukiyamaAward_e.html) (未定, 更新中)



The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15)  
第 15 回国際伝熱会議

— 講演募集 —

第 15 回国際伝熱会議 組織委員長 笠木伸英

国際伝熱会議は、各国の協力で 4 年ごとに開催される当該分野の最も権威ある国際会議ですが、1974 年に第 5 回会議が東京で開催されて以来 40 年ぶりにわが国で開催されます。

人やものや情報の移動、そして経済、教育、文化など、我々の生活に関与するあらゆるものがボーダーレス化する中で、直面する諸課題は相互に関連し、それらの解決においては価値観の異なる国や地域間の便益が衝突する複雑で困難な時代を迎えています。このような時代の牽引力あるいは舵取りとして、営々と続けられる科学研究と技術開発、そしてそれらの成果の社会導入は欠かせません。言うまでもなく、伝熱科学、伝熱技術はそのような科学技術のひとつであり、エネルギー、環境、交通、情報通信、バイオ医療などへの貢献が強く期待されています。このような期待に応えることは容易なことではありませんが、我々は着実にその方法を見つけていかねばなりません。世界の一流の研究者らが集う本会議は、そうした議論を行うために最も相応しい場であるといえます。

本会議では、参加者の皆様に最新の情報交換を進めていただくと共に、特別講演、キーノート講演、パネルなど、上記の課題について考えていただく機会を提供します。また新たな試みとして、査読を経て口頭発表される論文は、Begell House 社の IHTC Digital Library (IDL) に収録されて、広く世界の研究者の閲覧に供せられることになっています。

この貴重な機会に、研究者、技術者、教育者を含む多くの皆様のご参加を心からお待ちしたいと存じます。

開催日時 2014 年 8 月 10 日 (日) ~ 15 日 (金)  
会場 国立京都国際会館  
〒606-0001 京都市左京区宝ヶ池 (<http://www.icckyoto.or.jp/index.html>)  
ホームページ <http://www.ihtc-15.org/>  
日程

年	月	日	
2013	8	31	アブストラクト受付締め切り
	9	30	アブストラクト受理通知
	10		
	11	30	論文提出締め切り
2014	12		
	1		
	2	28	論文採否通知
	3		
	4		
	5	31	最終原稿締め切り
	6		
	7		
8	10	IHTC-15 開幕	

申込方法 アブストラクト投稿ホームページからお申し込み下さい。詳細は本会議のホームページを参照下さい。

講演発表形式 全ての発表は口頭発表形式で行われます。

問い合わせ先 [info@ihtc-15.org](mailto:info@ihtc-15.org)

主催 日本伝熱学会、日本学術会議

共催 The Assembly for International Heat Transfer Conferences

協賛 International Centre for Heat and Mass Transfer, 日本機械学会, 化学工学会

日本伝熱学会 関西支部 主催  
第 13 回関西伝熱セミナー2013  
「先の先の伝熱技術 in 六甲」

第 13 回を迎える関西伝熱セミナーは、六甲山に抱かれたすばらしい環境の中で、先の先の伝熱技術を議論いたします。伝熱基礎を支える学際的分野から、化学反応・ナノ技術・最新の計測技術や数値計算手法を、伝熱応用技術から、超伝導・アルミ熱交・熱電・バイナリー発電など現在注目されている技術の未来を見通す応用技術・先端技術を取り上げて、参加者の皆様と一緒に討論させていただきたく存じます。積極的なご参加をお待ちしております。

開催日時 平成 25 年 9 月 6 日 (金) ~ 7 日 (土)  
会場 瑞宝園 神戸市北区有馬町 1751 (<http://www.zuihouen.net/>)  
参加費 一般 25,000 円, 学生 15,000 円 (講演資料, 6 日夕食・宿泊, 7 日朝食込)  
参加定員 80 名  
参加申込締切 平成 25 年 8 月 9 日 (金)  
申込方法 氏名・所属・参加種別 (一般・学生)・連絡先 (電話・メールアドレス) を記載の上、電子メールで、下記担当者にお申し込みください。なお、参加費は下記口座に 1 名 1 振込で **申込締切日** までに送金ください。  
申込先・問合せ 兵庫県立大学大学院工学研究科 木村 文義  
Email: [kimura@eng.u-hyogo.ac.jp](mailto:kimura@eng.u-hyogo.ac.jp)  
銀行振込先 銀行名称 ; りそな銀行 姫路支店  
口座番号 ; 普通 0117109  
口座名 ; 関西伝熱セミナー 幹事 木村 文義

プログラム

第 1 日目 - 9 月 6 日 (金)

13:00-13:10 開会挨拶 日本伝熱学会関西支部長 吉田 篤正 氏 (大阪府立大学)  
13:10-13:50 「エネルギー技術の展開と今後の伝熱研究のあり方を考える」  
小澤 守 氏 (関西大学)  
(休憩)  
14:00-14:40 「ナノスケールにおける熱エネルギーの輸送と変換 - 分子熱工学の実践に向けて -」  
塩見 淳一郎 氏 (東京大学)  
14:40-15:20 「流速測定における新しいアプローチ : Imaging Spatial Filter Velocimetry (iSFV)」  
細川 茂雄 氏 (神戸大学)  
(休憩)  
15:30-16:10 「未来の熱電変換」

舟橋 良次 氏 (産業技術総合研究所)

16:10-16:50 「ヒートポンプ空調機へ適用するアルミ熱交換器の技術開発」  
藤野 宏和 氏 (ダイキン工業)

18:00-20:00 懇親会

第 2 日目 - 9 月 7 日 (土)

7:30- 朝食, チェックアウト  
9:00-9:40 「触媒反応プロセスにおける伝熱促進の重要性」  
西山 覚 氏 (神戸大学)  
9:40-10:20 「分散混相流中における流体粒子相互作用および熱伝達の数値シミュレーション」  
竹内 伸太郎 氏 (大阪大学)  
(休憩)  
10:30-11:10 「超伝導モータの開発」  
尾山 仁 氏 (住友電工)  
11:10-11:50 「温水バイナリー発電システムの開発」  
高橋 和雄 氏 (神戸製鋼所)  
11:50-12:00 閉会挨拶, 解散



## 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：宗像鉄雄（産業技術総合研究所）：t.munakata@aist.go.jp
- ・編集出版部会長：中部主敬（京都大学）：nakabe@me.kyoto-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：小宮敦樹（東北大学）：komy@pixy.ifs.tohoku.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：齊藤卓志（東京工業大学）：tsaito@mep.titech.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・倉水裕子：office@htsj.or.jp

### 【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはTextファイルをお願いします。
- ・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

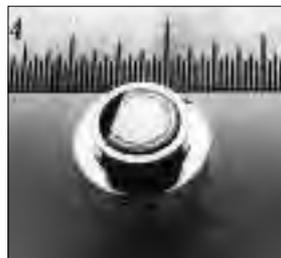
52期入会 (2013.4.1~6.6) 正 26名 学生 48名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	橋場 道太郎	株式会社 I H I	学	久保田 英之	東京工業大学大学院理工学研究科
正	臼井 祐司	新光電気工業 (株)	学	松永 一慶	中央大学大学院理工学研究科
正	尾崎 美智夫	日産自動車株式会社	正	鎌田 俊光	ダイキン工業 (株)
正	柏原 雄貴	東京電力株式会社	学	庄司 衛太	東北大学大学院工学研究科
正	李 艶栄	茨城大学 工学部	学	松本 尚子	熊本大学 自然科学研究科
正	畑 陽介	ブラザー工業株式会社	学	平塚 将起	慶応義塾大学大学院
学	板津 典彦	静岡大学	学	浮田 遼	立命館大学大学院理工学研究科
学	小宮山 智哉	東京工業大学 理工学研究科	正	越田 博之	日立化成株式会社
学	樋口 勝	横浜国立大学 大学院工学府	正	池田 利宏	Future Facilities 株式会社
学	池谷 隆宏	中央大学 大学院理工学研究科	学	杉本 俊樹	横浜国立大学 大学院工学府
学	本田 正人	中央大学 大学院理工学研究科	学	高橋 裕基	東北大学 大学院工学研究科
学	張 世英	中央大学 大学院理工学研究科	学	松井 陽平	東京工業大学 大学院理工学研究科
学	松下 将	玉川大学 工学部	学	市川 雄一	大阪大学 大学院工学研究科
学	川村 洋介	豊橋技術科学大学	学	SUHAIMI BIN ILLIAS	佐賀大学
学	後藤 稔	大阪大学 工学系研究科機械工学専攻	学	小田 奎	工学院大学 大学院
学	柏 拓貴	茨城大学	学	鹿妻 佑輝	新潟大学 大学院自然科学研究科
学	大丸 拓郎	東北大学大学院工学研究科	学	田邊 晃裕	新潟大学 大学院自然科学研究科
学	長谷 一毅	京都大学大学院エネルギー科学研究科	正	磯本 哲志	京都大学
学	山添 正裕	東京大学 工学系研究科	学	猪狩 慶一	芝浦工業大学 大学院理工学研究科
正	鈴木 研悟	北海道大学大学院工学研究院	学	深谷 侑輝	九州大学 大学院工学府
学	青山 祐介	北海道大学大学院工学院	学	濱谷 和樹	金沢大学 大学院自然科学研究科
学	檜原 健太	大阪府立大学大学院	正	瀬川 大資	大阪府立大学
学	川嶋 大介	首都大学東京 理工学研究科	正	末松 芳章	新日鐵住金 (株)
学	岡田 日貴	慶應義塾大学大学院理工学研究科	正	久保 正樹	東北大学 大学院工学研究科
学	野口 健之	慶應義塾大学大学院理工学研究科	正	加藤 崇典	電気化学工業 (株)
学	兼高 紀香	慶應義塾大学大学院理工学研究科	正	尾形 晋	株式会社富士通研究所
学	佐藤 翔太	秋田大学 工学資源学研究科	正	毎川 英利	日東電工 (株)
学	中川 侑香	大阪府立大学大学院工学研究科	学	井垣 一人	北海道大学 大学院工学院
学	伊藤 篤史	愛媛大学大学院理工学研究科	学	原 峻平	東京理科大学 理工学研究科
正	服部 真季	東京工業大学大学院理工学研究科	正	下栗 大右	広島大学
学	岸本 祥	慶應義塾大学大学院理工学研究科	正	中山 明	住友電気工業株式会社
学	比嘉 正樹	琉球大学大学院理工学研究科	正	中村 淳	富士電機株式会社
学	大屋 温輝	慶應義塾大学大学院理工学研究科	正	鳥山 温美	東北大学 大学院工学研究科
学	相良 昭人	北海道大学大学院工学研究院	正	清水 信	東北大学 大学院工学研究科
学	平尾 悠貴	信州大学大学院理工学系研究科	正	篠原 和彦	技術研究組合 FC-Cubic
学	山村 秀	宇都宮大学大学院工学研究科	正	三輪 修一郎	北海道大学 工学研究院
学	東海林 豊	東京工業大学大学院理工学研究科	正	柴垣 茂樹	ニッタ株式会社

# 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



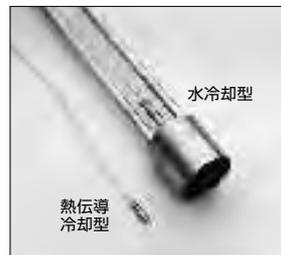
### 特徴

- 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

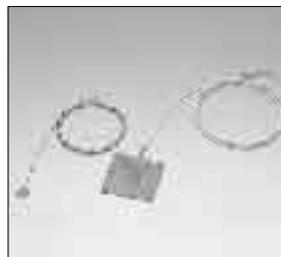


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 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

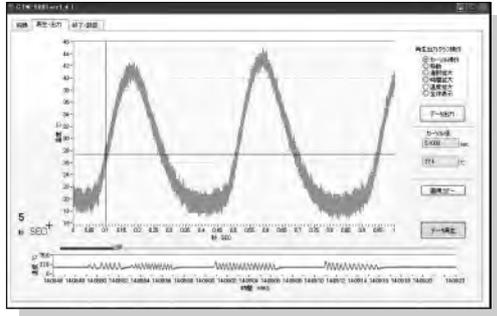
#### 有限会社 テクノオフィス

〒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>

# 高速温度測定装置 CTM-5001K

冷接点補償を確実にする熱電対と同じ素材で製作された  
脱着容易なコネクタを採用。

測定データはUSB接続されたPCに保存されます。



## <主な仕様>

- サンプルレート 0.1msec~1min
- -200~1250℃測定
- 温度測定数 1ch
- K型熱電対接続
- USBにて電源供給
- 温度分解能 約0.5℃
- 寸法：82(W)×130(D)×24(H)mm

## <主な用途>

- 内燃機関測定
- 射出成型、鑄造温度測定
- 急冷、急加熱想定

国内総販売元



株式会社

新興精機

〒812-0054 福岡市東区馬出一丁目18番3号

TEL : 092-641-8451 FAX : 092-641-8786

Email: info@shinkouseiki.co.jp <http://www.shinkouseiki.co.jp>

## 編集出版部会ノート

*Note from the JHTSJ Editorial Board*

5月末の仙台における日本伝熱シンポジウム期間中の総会を以って高松洋前部会長から第52期編集出版部会取り纏めの大役を仰せつかりました。これからの2年間、どうぞ宜しくお願いします。本部会を構成し、これからの会誌「伝熱」の編集出版をご担当下さる委員の先生方は以下に記載のとおりです。未曾有の大震災を経てアベノミクス効果の期待される昨今、様々なところでこれまでの体制、方針の見直し、変革が行われ続けています。本学会も「創立50周年を迎えて（昨期会誌の記念特集）」、次なる新たな展開に会員の皆様相互の意見交換が必須と考えます。その中心はもちろん「伝熱シンポ」ですが、「伝熱」はその媒体として企画記事の継続性を保ちつつ気軽な意見交換の場を提供できる風通し良いものでありたく思います。季刊（1, 4, 7, 11月号）の発行で、記事として特集の他に特別寄稿／プロジェクトQ・ネイチャーQ・エデュケーションQ・ヒストリーQ／Heat Transfer／博物館めぐり／海外レター／国際活動・会議・シンポジウム・セミナー等報告があり、支部だよりなども検討中です。ご忌憚なくご意見、ご要望をお寄せ下さい。また、皆様からのご寄稿、話題のご提供を心よりお待ちしております。

中部主敬（京都大学）

*Nakabe, Kazuyoshi (Kyoto University)*

*e-mail: nakabe@me.kyoto-u.ac.jp*

副会長 近久武美（編集出版担当，北海道大学）

部会長 中部主敬（京都大学）

委員

（理事） 高橋厚史（九州大学），二本柳 保（東北電力(株)），堀部明彦（留任，岡山大学）

（協議員） 加賀邦彦（三菱電機(株)），澤井 徹（近畿大学），芝原正彦（留任，大阪大学），  
白樫 了（東京大学），瀬名波 出（留任，琉球大学），早坂洋史（北海道大学），  
松原幸治（新潟大学），吉田敬介（九州大学）

TSE チーフエディター 花村克悟（東京工業大学）

編集幹事 伏信一慶（東京工業大学）

編集出版部会連絡先：

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C III

京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

中部主敬

Phone & Fax: 075-383-3605 / E-mail: nakabe@me.kyoto-u.ac.jp