

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 221  
2013. 10

*HTSJ*

◆特集：再生可能「熱」エネルギー利用技術



(a) 上空からの全景<sup>(1)</sup>



(c) タワー部への集光の様子



(b) 地上からの風景



(d) 外燃式ガスタービン試験機

図1 Gemasolar プラントおよび外燃式ガスタービン（混合ガスタービン）システム。

### 高効率太陽熱発電のための外燃式ガスタービンシステムの研究開発

Research and development of external fired gas turbine system for efficient solar power generation

松原幸治（新潟大学），吉田一雄（エネルギー総合工学研究所，新潟大学）

Koji MATSUBARA (Niigata University), Kazuo YOSHIDA (The Institute of Applied Energy, Niigata University)

近年，欧州と米国で集光型太陽熱発電（CSP, Concentrating Solar Power）が実用化し，MENA 地域（中東・北アフリカ地域），中国およびインドのサンベルト地域への導入が検討され始めた．図 1(a)~(c)は，スペイン南西部に建設された最新のタワー集光型太陽熱発電システム（Gemasolar プラント）である<sup>(1)</sup>．2650 基のヘリオスタットが 185 万平方メートルのソーラーフィールドに展開し，タワー上部において熔融塩に集熱する．集熱温度は 500℃以上である．加熱された熔融塩は蓄熱タンクに一時蓄えられ，熱交換器で過熱蒸気を発生させ，水蒸気タービンの熱源となる．19.9MW の発電が可能であり，蓄熱時間は 15 時間である．この太陽熱発電を高効率化するためには，集熱温度を上昇させる必要があり，ビームダウン太陽集光装置等の新規集光系や，高温型集熱・蓄熱システム，ならびに，外燃式ガスタービンシステム（図 1(d)参照）の研究開発が行われている<sup>(2,3)</sup>．

(1) S. Arias, Presentation of Gemasolar plant (2012).

(2) K. Matsubara, Y. Kazuma, A. Sakurai, S. Suzuki, L. Soon-Jae, T. Kodama, N. Gokon, C. Hyun Seok and K. Yoshida, High-temperature fluidized receiver for concentrated solar radiation by beam-down reflector system, Proceedings of SolarPACES2013, (2013), accepted.

(3) 吉田一雄・児玉竜也・郷右近展之，太陽熱発電・燃料化技術－太陽熱から電力・燃料をつくる，コロナ社，(2012)．

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

高効率太陽熱発電のための外燃式ガスタービンシステムの研究開発

……………松原 幸治（新潟大学），吉田 一雄（エネルギー総合工学研究所，新潟大学）……………表紙裏

### 〈2012 Max Jakob 賞〉

Max Jakob Memorial Award を受賞して……………中山 恒（名誉会員）…………… 1

### 〈特集：再生可能「熱」エネルギー利用技術〉

高効率再生可能熱発電に向けた外燃式ガスタービンシステムの研究開発

……………松原 幸治（新潟大学）…………… 6

集光型太陽熱発電……………吉田 一雄（（財）エネルギー総合工学研究所，新潟大学）…………… 13

建物における再生可能「熱」エネルギーシステム ……三浦 貴広（東洋熱学工業（株））…………… 21

ヒートパイプ BACH による浅層地中熱源利用の試み……………永井 二郎（福井大学）…………… 27

### 〈海外レター〉

インペリアル・カレッジ・ロンドンでの滞在記……………後藤田 浩（立命館大学）…………… 33

### 〈会議報告〉

第 4 回熱と流れのシミュレーション・アジア国際シンポジウム（ASCHT'13）報告

……………須賀 一彦（大阪府立大学）…………… 37

第 8 回実験熱流体世界会議（ExHFT-8）報告……………川口 靖夫（東京理科大学）…………… 40

〈行事カレンダー〉…………… 43

### 〈お知らせ〉

平成 25 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ…………… 45

第 51 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集…………… 46

優秀プレゼンテーション賞（第 51 回日本伝熱シンポジウム）について…………… 48

事務局からの連絡

・編集出版部会からのお知らせ…………… 49

・新入会員一覧…………… 50

〈編集出版部会ノート〉…………… 54

## Vol.52, No.221, October 2013

### CONTENTS

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

- Research and Development of External Fired Gas Turbine System for Efficient Solar Power Generation  
Koji MATSUBARA (Niigata University) and  
Kazuo YOSHIDA (The Institute of Applied Energy, Niigata University) ..... Opening Page

#### < The 2012 Max Jakob Awards >

- Receiving the Max Jakob Memorial Award  
Wataru NAKAYAMA (Honorary Member) ..... 1

#### < Special Issue >

- Research and Development of External Fired Gas Turbine System for Efficient Power Generation from  
Renewable Heat Source  
Koji MATSUBARA (Niigata University) ..... 6
- Concentrating Solar Power  
Kazuo YOSHIDA (The Institute of Applied Energy, Niigata University) ..... 13
- Renewable "Thermal" Energy Systems in Buildings  
Takahiro MIURA (TONETS Corporation) ..... 21
- Attempts for Utilizing Shallow Underground Heat Source by Heat Pipe BACH  
Niro NAGAI (University of Fukui) ..... 27

#### < International Letters >

- Diary from Imperial College London  
Hiroshi GOTODA (Ritsumeikan University) ..... 33

#### < Reports >

- Report on the 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2013 (ASCHT '13)  
Kazuhiko SUGA (Osaka Prefecture University) ..... 37
- Report on the 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and  
Thermodynamics (ExHFT-8)  
Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science) ..... 40

< Calendar > ..... 43

< Announcements > ..... 45

< Note from the JHTSJ Editorial Board > ..... 54

## Max Jakob Memorial Award を受賞して Receiving the Max Jakob Memorial Award

中山 恒 (名誉会員)

Wataru NAKAYAMA (Honorary Member)

e-mail: watnakayama@aol.com

### 1. はじめに

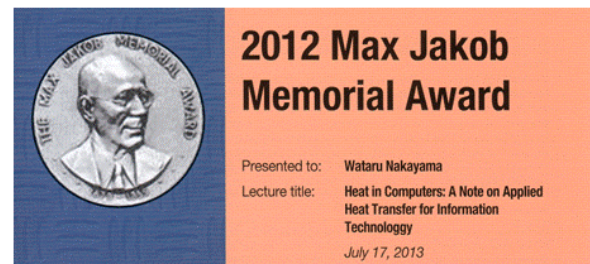
このたび Max Jakob Memorial Award 受賞の光栄に浴しました。賞の授与は 2013 年 7 月 15-19 日、Minneapolis で開催された ASME Summer Heat Transfer Conference のなかで行われました。この機会に Jakob 賞の紹介と、私が行った記念講演の概要などを記します。

### 2. Max Jakob 賞の紹介その他

Jakob 賞は伝熱学会が誕生したのと同じ 1961 年に、伝熱学の基礎を築いた Max Jakob を記念するために創設された。Max Jakob の略歴を図 1 に記してある。また、図 1 には受賞記念講演の際に配布されたパンフレットの表紙 (部分) も示してある。選考が行われた翌年に実際の受賞行事があり、賞のタイトルには選考時の年が記されるので、私が頂いた賞には 2012 の冠が付いている。

図 2 はこれまでの受賞者の記録で、我が国からは抜山四郎先生 (1968)、西脇仁一先生 (1978)、森康夫先生 (1988) が受賞されている。かつて私は、これら大先輩の先生方が受賞された場に居合わせると云う幸運に恵まれた。なかでも抜山先生が受賞されたのは 1969 年同じ Minneapolis で、まだ 30 代前半であった私は会場の後方から畏敬の念をもって見守っていたのを思い出す。なお、沸騰伝熱の抜山曲線を世界に知らしめたのは、Max Jakob が 1949 年に著した伝熱学の教科書であった [1]。

近年、伝熱研究者の層が厚くなり、賞選考委員会の仕事もたいへんになってきているようである。受賞に値する研究者は多数居り、そのなかで選んで頂いたのは巡りあわせの幸運としか言いようがない。なんとなく因縁めいたこと、賞の開始年が伝熱学会の創設年であり私が東工大森研に入った年でもある、Jakob が米国に移住したのは私が生まれた年である、などを考えたくなる。以下思い



Max Jakob (1879-1955)

1879年 Ludwigshaven(Germany)に生まれる

1902年 Technische Hochschule München  
Electrical Engineer Degree

1903年 Diplom-Ingenieur in Applied Physics

1904年 Doktor Ingenieur

1925~1935 年

Physikalisch-Technische Reichsanstalt

1936年 米国移住

1941年 Illinois Institute of Technology  
Heat Transfer Laboratoryを開設

以降、伝熱学の流れを作る。

沸騰伝熱の抜山曲線を世界に知らしめたことでも知られる。

1955年 逝去

図 1 Max Jakob 略歴

つくままにあれこれ記すことにする。

図 1 の略歴にもあるように Max Jakob の最初の diploma は「電気工学」であった。電気と熱が関連し合う問題は根源的なテーマで、Jakob を後に伝熱研究へと導いたのだろうと想像できる。私が長年取り組んできたコンピュータの熱問題もこの延長にある。伝熱学は発電や電力利用機器の開発と設計に資する役割を果たしてきた。後に工業技術の拡大とともに、伝熱学の役割も広く拡散することになるが、「応用の観点を欠くな」といしましめる Jakob の言葉“Heat transfer is but a means to better serve relevant engineering applications, both old and

## Previous Recipients

1961 Ernest R. Eckert, U.S.A.	1987 S. George Bankoff, U.S.A.
1962 Llewellyn M.K. Boelter, U.S.A.	1988 Yasuo Mori, Japan
1963 William H. McAdams, U.S.A.	1989 James P. Hartnett, U.S.A.
1964 Ernest Schmidt, Germany	1990 Richard J. Goldstein, U.S.A.
1965 Hoyt C. Hottel, U.S.A.	1991 Franz X. Mayinger, Germany
1966 Sir Owen Saunders, U.K.	1992 William M. Kays, U.S.A.
1967 Thomas B. Drew, U.S.A.	1993 Benjamin Gebhart, U.S.A.
1968 Shiro Nukiyama, Japan	1994 Geoffrey F. Hewitt, U.K.
1969 S.S. Kutateladze, U.S.S.R.	1995 Arthur E. Bergles, U.S.A.
1970 Warren M. Rohsenow, U.S.A.	1996 Robert Siegel, U.S.A.
1971 James W. Westwater, U.S.A.	1997 John R. Howell, U.S.A.
1972 Karl A. Gardner, U.S.A.	1998 Alexander I. Leontiev, Russia
1973 Ulrich Grigull, Germany	1999 Adrian Bejan, U.S.A.
1974 Peter Grassmann, Switzerland	2000 Vedat Arpacı, U.S.A.
1975 Robert G. Deissler, U.S.A.	2001 John C. Chen, U.S.A.
1976 Ephraim M. Sparrow, U.S.A.	2002 Yogesh Jaluria, U.S.A.
1977 D. Brian Spalding, U.K.	2003 Kenneth J. Bell, U.S.A.
1978 Niichi Nishiwaki, Japan	2004 Vijay K. Dhir, U.S.A.
1979 Stuart W. Churchill, U.S.A.	2005 Ping Cheng, China
1980 Ralph A. Seban, U.S.A.	2006 Kwang-Tzu Yang, U.S.A.
1981 Chang-Lin Tien, U.S.A.	2007 Wen-Jei Yang, U.S.A.
1982 Simon Ostrach, U.S.A.	2008 Suhas Patankar, U.S.A.
1983 Bei Tse Chao, U.S.A.	2009 Ivan Catton, U.S.A.
1984 Alexander Louis London, U.S.A.	2010 Amir Faghri, U.S.A.
1985 Frank Kreith, U.S.A.	2011 Dimos Poulikakos, Switzerland
1986 Raymond Viskanta, U.S.A.	

図 2 過去の受賞者一覧

new.”がある。近年の伝熱研究の趨勢を見ると、物理現象の理解に重点が置かれるあまり、応用の観点を欠きがちである。これにはとくに第二次大戦後の大規模工業成長期に培われた伝熱研究の伝統が大きな影響を及ぼしている。即ち、大規模設備の開発には物理現象の理解が最優先課題であった。物理現象研究は大学における伝熱研究の主流となり、多くの研究者を輩出した。1950年代～1970年代あたりが伝熱研究の初期の‘良き時代’であったと言えよう。時代が進むに従い、伝熱研究が対象としてきた大規模技術は成熟期に入った。一方、伝熱研究者人口は増加し、在来型工業技術に関連する研究ニーズとの間にギャップが生じるに至った。平たく申せば、物理現象研究はできるが、何に應用するか分からないと云った状況に置かれる研究者が増えた。あるいは、研究論文の執筆、研究資金申請などに際して應用に関する枕詞は思いつくが、実際にはどうしてよいか分からない研究者が増えた。これは世界的な傾向で、我が国における研究環境の推移に関しては伝熱学会 50 周年記念原稿[1]で触れた通りである。

さて、Jakob 賞は上述の‘良き時代’環境のもとに生まれた賞であり、歴代の受賞者はアカデミックな研究で名を上げた方々である。一方、Jakob の應用に関する理念に立ち戻る必要があることが、

近年多くの研究者に共有されてきた。賞選考委員の間でも議論されたと伺った。私の場合、大学にも籍を置き、大学院生の時代も含め長い年月の間には基礎研究もしてきたが、なんと云ってもおよそ 20 年間に及ぶ日立機械研究所における研究が主たる業績となっている。もう一つの展開は、情報技術時代に入り、電子機器に関連する伝熱研究のテーマが増え、これに従事する研究者の母体が大きくなってきた。研究対象を共有する仲間が増え、有志が Jakob 賞へ私を推薦してくれた。かくして、これまでの受賞者から見ると毛色が変わった私が選考されたようである。

折しも ASME Heat Transfer Division は 75 周年を迎え、Summer Heat Transfer Conference では記念行事が行われた。このような折に、日頃考えてきた伝熱研究に関する所見を述べる機会を与えられたのも何かの縁であろうと思った。

## 3. 記念講演の内容と解説

このところ私には伝熱研究の歴史を顧みる仕事が続いた。先の伝熱学会 50 周年記念行事では、我が国における伝熱研究の発展を顧みる機会を与えて頂いた[1,2]。今回の受賞に際しては記念講演と論文執筆の依頼があり、今度は自分がしてきた研究を纏めて解説することになった。そこで、コンピュータと熱問題に関する研究の総括を私なりに纏めることにした。しかし、過去に行った研究開発の話ばかりでは若い世代の人たちに興味を持って貰えるか不安であったし、自分自身も将来につながる話でないと熱が入らない。幸いなことに今日に至るまで、日本機械学会の RC 研究分科会(エレクトロニクス実装のプロセスと製品における信頼性評価と熱制御に関する研究分科会)に参加させて頂いており、企業の人たちが抱えている問題に接したり、自分なりに考え付いたテーマに取り組んだりしてきた。最近の研究結果を織り込みながら講演内容をまとめたが、その過程で以前の研究を今日の状況に合うように改めたくなったりして時日を費やした。また、電子機器冷却に関連した最近の研究趨勢についても一言物申したくなった。以下、講演“Heat in Computers: A Note on Applied Heat Transfer for Information Technology”の概要を記す。講演では述べる時間がなかった説明も含めてある。

(1) 伝熱研究の対象としてのコンピュータ：

Jakob の言葉にある“relevant engineering applications”を様々な対象にあてはめてみると、コンピュータは特異であることが分かる。伝熱研究の対象として代表的なもの、たとえば熱交換器や原子炉の炉心などは、数十年はおろか世紀を経ても巨視的形態に変化はない。伝熱研究のテーマを設定する際、これはたいへん便利な状況で、単純化したモデルシステムを対象に物理現象の解明に的を絞ることが出来る。コンピュータは通念からすると箱であり、外観上なんらの変哲もない。しかしその中身はかなりのスピードで変化を遂げている。最も急速な変化を遂げているのが発熱源である集積回路チップとその周辺のパッケージ形態である。さらに、‘コンピュータ’は箱に収まっているものばかりではない。コンピュータはあらゆるものなかに入り込んでおり、いまや世界全体が巨大な通信網で結ばれたコンピュータと云ってもよい。コンピュータ対象の伝熱研究には、このような形態変革に関する視点が必要である。1970年代から1980年代後半にかけて、大型電子計算機が経験した空冷から水冷への転換は、コンピュータの実装形態の変化と軌を一にしている。

(2) コンピュータの実装形態に関する解釈：

コンピュータの基本部品として、論理演算を遂行する L (logic) 要素と、配線を内蔵した W (wire) 要素を考える。複数の L 要素を 2 次元平面である W 要素に展開し、基本基板を構成する。2 次元展開は、フォトリソグラフィや印刷といった生産技術から決められた形態である。コンピュータの処理容量を増やすには、より多くの L 要素をシステム内に収容する。これには基本基板の面積を拡大するか、L 要素を微小化するか、二通りの展開がある。何れの展開にも技術上、経済上の制約がある。これらの制約のもとに、システムは基板を配列した形態、モジュール階層形態、さらにはこれらの複合構造形態をとるようになる。技術の進展はある種のサイクルを生み出している。1970年代～80年代の大規模コンピュータでは、基板配列形態から 2 次元展開形態へと移行した。今日、システムからさまざまな部品に至るまで、再び 3 次元実装形態への移行が必須と見られている。このような形態変化には冷却方法の転換が必要であり、伝熱研究の計画には将来のシステム形態移行に関

する予測が必要になる。さらに、システム形態の移行に伴って、実装の多重階層化が進む。このことは熱設計に‘複雑さの壁’を齎す。

(3) スーパーコンピュータ：

大規模コンピュータのなかでも最大級であるスーパーコンピュータについて考察を巡らした。今日のスーパーコンピュータの処理性能は 10 x Peta FLOPS (10<sup>16</sup> Floating Operations Per Second) のレベルで、どこが世界一になったかで火花を散らしている。しかしながら今の性能を 100 倍にし、Exa (10<sup>18</sup>) FLOPS の性能を実現するにはどうしたらよいか、大きな研究課題になっている。現在の技術展開を単純に外挿すると、コンピュータセンターに隣接して原子力発電所を建てる必要があるとの指摘もある。首をひねりたくなる話で、一体どうなるのか私なりに手がかりを求めるモデルを考え、解析をしてみた[3]。

コンピュータにおける計算の遂行には幾何空間と時間を利用するわけであるが、時間要素は発熱と結びついている。これまでの技術ではかなりのウエイトが時間の短縮に置かれ、高発熱に対応する冷却法の研究が必要とされてきた。一方、幾何空間のほうはシステム内の信号転送時間に影響する。スーパーコンピュータでは、システム規模の拡大に伴いシステム占有体積が増大し、体積増大の抑制が最重要課題になってくる。システム体積には冷却流路が含まれるので、体積抑制の影響は冷却流路のためのスペースに及ぶ。モデルに基づく計算によれば、Exa FLOPS コンピュータでは冷却流路幅は 200 $\mu$ m になる。この寸法のチャンネルはマイクロチャンネルの分類に入る。しかし、これまでの研究で想定されてきたマイクロチャンネルは長さがおおよそ 1cm であったのに比べ、上述のマイクロチャンネルは 1m の長さに及ぶ。幸いなことにチャンネルあたりの熱負荷は低くなる。システム発熱量の増大を抑制する必要があるからである。

このシナリオに従うと、熱に起因する信頼性問題にも質的变化が生じる。即ち、従来の熱設計では電子回路の最高温度を制限値以下に抑えることが目標であった。温度はトランジスタなど回路構成材料の劣化に影響し、劣化は温度が高いほど早まるとは云うものの、緩慢に進む過程である。一方、長いマイクロチャンネル (Very Long

Micro-channel (VLMC) と呼ぶことにする) では、冷却流が停滞すると熱流束は低いものの急速な温度上昇を招く恐れが生じる。かくして VLMC の設計と冷却流制御では robustness の確保が核心になる。

#### (4) 熱設計ツールとしての数値流体(CFD)解析:

コンピュータと CFD は相互に補完し合って発展してきた。今日、パソコンでもかなり複雑な CFD 解析が出来るようになり、また CFD プログラムを提供するベンダーが増え、熱設計ツールとして役だっている。しかしながら、小型で高密度実装された機器の熱解析ではプログラムユーザーの苦勞が絶えない。例として、携帯液晶プロジェクターの熱設計を取り上げた[4]。CFD シミュレーションに取り掛かる以前に、プログラムユーザーは入力データを用意しなければならない。対象の幾何形状や構成が複雑である場合、入力データの準備はモデル化作業であり、この段階でのモデル化はユーザーそれぞれによるアートである。複雑伝熱系をモデルに落とし込む作業は、今日膨大な数の設計者が行っている。しかし、彼らが日々直面している困難は、伝熱研究の視野の外に置かれている。

#### (5) ミクロ世界における‘複雑さの壁’:

熱設計で用いられる指標はトランジスタのジャンクション温度である。ジャンクション温度はトランジスタ構造のなかの最高温度を意味するが、実際の熱設計では厳密な意味でのジャンクション温度は用いられたことはない。真のジャンクション温度推定は極めて難しいからである。実際にはチップの平均温度を近似的にジャンクション温度と見なしてきた。しかし、最近のマルチコアプロセッサの登場により、チップ上の温度分布をより詳細に解析する必要が高まってきた。チップ上の局所高温領域(ホットスポット)を捉える実験が行われ、ホットスポット解消のための様々な対策が検討されるようになった。ホットスポットを視覚に捉えるには、赤外線透過する冷却液や冷却チャンネル材を用い、赤外線映像を撮影する。映像をより鮮明にするために、チップの厚みを通常の厚みより 1/5 ~ 1/10 にする。かくしてチップ上の電子回路にとっての熱環境は、実際の使用環境とは著しく異なったものになる。かかる環境のもとに得た情報は実環境での温度に変換する必要

がある。しかしながら、そのような試みは十分になされていない。伝熱研究者はホットスポット映像を格好の動機づけ材料と捉え、高性能冷却を目指す研究を進めてきた。映像に十分な解釈を施さずに、である。一方、電子回路研究者は伝熱過程を熱抵抗回路網で捉える。重点は大規模回路網を如何に効率良く解くかに置かれ、伝熱は電気の流れと異なり拡散現象であると云う視点を欠きがちになる。

ホットスポット関連の論文は膨大な量に達しているが、温度情報解釈の欠如は広く見られる。問題はチップ上の発熱源と温度の分布をどのような詳細さ(解像度)で捉えるかに帰着される。解像度に対応する温度は、チップ寸法、熱源寸法、チップ表面での境界条件に影響される。従って多元パラメータ問題を解くことになり、これには系統的解析解を導くことができるモデルが必要である。私はこの課題に取り組んで最近論文にまとめた[5, 6]。検討結果のうち特記すべきことがらは下記の通りである。解像度がほぼ 1mm から詳細になると温度は解像度に対して鈍感になる。従って、マルチコアプロセッサ上で機能回路ブロックごとに温度制御をする方法は理に叶っている。しかし、温度の絶対レベルは実装環境に大きく依存するので、赤外線映像を実装環境に応じて解釈し直す必要がある。さらに解像度を数 $\mu\text{m}$  高めると、チップの上部構造、即ち配線層と酸化膜層が熱流分配に大きな影響を及ぼすようになる。従って、真のジャンクション温度を求めるにはこれら上部構造を解析モデルに取り込まなくてはならない。しかし配線層の構造は複雑で、マイクロスケール複雑構造をどのようにモデル化するかが重要課題になる。この問題に関しては以前「伝熱」誌への寄稿でも触れたが[7]、取り組み法に関する構想は未だ纏めてきていない。

#### (6) 電気-熱統合設計:

これまでのコンピュータでは概ね冷却デバイスを設置するためのスペースに余裕があった。伝熱研究では十分なスペースが与えられているとの暗黙の了解のもとに、高性能冷却法の研究が盛んに行われてきた。今日でもこの前提は多くの電子機器冷却研究に継承されている。これは便利な前提で、伝熱研究者は発熱量だけ知ればよい。しかし、伝熱研究者にとって都合の良い環境は急速に失わ



れつつある。既に指摘したように、小型機器では冷却空気のためのスペースが減少し、このために流路の複雑化を招き、CFD 解析のためのモデル化が難しくなっている。将来のスーパーコンピュータでは冷却流路のスペースが極度に制限されるだろう。この傾向はあらゆるクラスのコンピュータに共通して見られる。冷却流スペースが減少すると、回路からの発生熱が電気回路を通じて拡散せざるをえない。電気-熱・統合設計が重要になってくる。既に米国と欧州では、電気-熱統合設計のための研究教育プログラムへの取り組みが始まっていると聞いた。

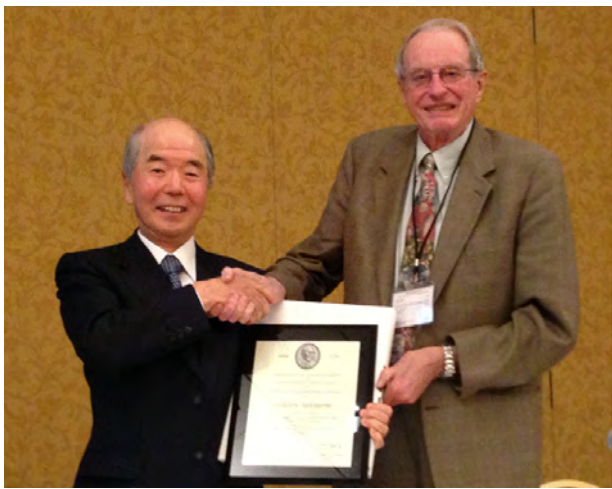


図3 記念講演の後で Jakob 賞選考委員長の Kenneth Bell 教授と

#### 4. あとがき

講演内容を核とするレビュー論文を ASME Journal of Heat Transfer に寄稿することになっている。詳細な内容は論文を参考にして頂けると幸いである。

講演と論文執筆の準備をしながら次のことを痛切に感じた。私なりの研究業績を積むことが出来たのは、我が国伝熱研究界の重層でかつ広がりを持った発展があったからこそである。大先輩の先生方が払われた開拓者としてのご尽力を心に深く刻む次第である。私個人にとっては恩師、森康夫先生から直接賜ったご指導が何物にも代え難い宝物である。また長年にわたり仲間に加えて頂いた伝熱学会の諸兄に厚く御礼申し上げる。更に、

我が国の発達した工業技術がなかったら、私は Jakob の理念に沿う仕事を出来なかったであろうと思う。とくに、コンピュータの進歩を担ってきた我が国メーカーの一端に籍を置くことがなかったら、今日こうしてコンピュータの熱問題を語る機会を訪れなかったであろう。とりわけ、日立機械研究所で良き研究仲間と上司に恵まれたのは幸運であった。日立には社外に出て新鮮な刺激を得ることを奨励する方針があり、私はその恩恵に存分に浴した。コンピュータの研究開発を担当する研究所の方々、及び製造を担当する工場の方々から頂いた様々な支援と教唆も忘れることが出来ない。これからも、命運続く限り研究を楽しみたいと願っている。

#### 参考文献

- [1] 中山 恒, 伝熱学会 50 年:回顧と展望, 伝熱, **50-212** (2011) 22.
- [2] Nakayama, W., The Heat Transfer Society of Japan, the Fiftieth Anniversary: Retrospect and Prospect, Heat Transfer Engineering, **24-4**(2013) 409.
- [3] Nakayama, W., A Card Stack Model to Elucidate Key Challenges in the Development of Future Generation Supercomputers, IEEE Access, **1-1**(2013) doi 10.1109/ACCESS.2013.2272175.
- [4] Maguire, L., Nakayama, W., Behnia, M., and Kondo, Y., A CFD Study on the Effect of Shrinking Box Size on Cooling Airflows in Compact Electronic Equipment – The Case of a Portable Projection Display Equipment, Heat Transfer Engineering, **29-2**(2008)188.
- [5] Nakayama, W., Study on Heat Conduction in a Simulated Multi-Core Processor Chip: Part I – Analytical Modeling, ASME Journal of Electronic Packaging, **135-2**(2013) doi 10.1115/1.4023291.
- [6] Nakayama, W., Study on Heat Conduction in a Simulated Multi-Core Processor Chip: Part II – Case Studies, ASME Journal of Electronic Packaging, **135-2**(2013) doi 10.1115/1.4023292.
- [7] 中山 恒, 伝熱研究の未踏領域: 物性ならざる物性に関する研究, 伝熱, **48-205**(2009)1.

## 高効率再生可能熱発電に向けた外燃式ガスタービンシステムの研究開発

*Research and Development of External Fired Gas Turbine System for Efficient Power Generation from Renewable Heat Source*

松原 幸治 (新潟大学)

Koji MATSUBARA (Niigata University)

e-mail: matsu@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

特集『再生可能「熱」エネルギー利用技術』では、太陽熱、大気熱、地熱、ならびに、バイオマスや各種廃棄物等の燃焼熱の利用技術を取り上げる。本稿では、再生可能な熱源を利用するための外燃式ガスタービンシステムの研究開発について解説し、引き続き、他の各分野で活躍する研究者から話題を提供して頂く構成とした。

バイオマス等の燃焼熱を利用する発電システムでは、内燃機関が用いられることもあるが、燃焼ガスによる熱機関内部の汚れが問題となるため、燃料の多様性を確保するためには、外燃機関が有効である。外燃機関として水蒸気タービンが通常用いられるが、ガスタービンを外燃機関化する試みが研究されている[1,2,3]。新潟大学の機械系研究グループは、二つの燃焼器を有することで、部分的に外燃方式を取り入れた混合ガスタービンシステム[4,5]の研究開発を進めており、本稿ではシステムの概要、日本とアジアにおける導入の可能性、さらに太陽熱利用への発展性について論述する。

### 2. 外燃式ガスタービンの概要

図1は、再生ガスタービンサイクルに外燃機関としての要素を加えた混合ガスタービンサイクルの構成を表わす。このサイクルは、タービンの上流側に設置される一次燃焼器に加えて、下流側にも二次燃焼器を設置し、二次燃焼器において廃油やバイオマス等の精製度が低い多様な燃料を燃焼させる。二次燃焼器からの排気ガスは熱交換器を介して圧縮空気を加熱するため、タービンを通過しない。このため、低質燃料による燃焼ガスに含まれる粒状物質やタールがタービン内部を汚損することが無く、精製度が低い様々な燃料を燃焼させて利用することが可能である。一次燃焼器による燃焼ガスはタービンを通過するため基本的には

内燃機関であるが、二次燃焼器による燃焼ガスはタービンを通過しないため外燃機関としての性質も有する。一次燃焼器を用いず、二次燃焼器だけで運転するとき、完全な外燃機関となり、EFガスタービンないし外燃式ガスタービン (External Fired Gas Turbine) と呼ぶ。

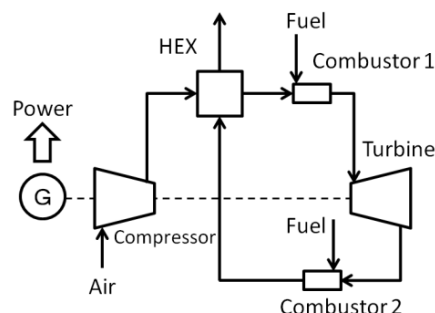


図1 混合ガスタービンサイクル (外燃式ガスタービンサイクル) 構成



図2 混合ガスタービンシステム (外燃式ガスタービンシステム) 試験機

図2は、2kW級混合ガスタービンシステムの試験機である。二つの燃焼器を有するため、通常ガスタービンに比べて運転条件が多様である。研究グループでは、HYSYSによる解析と試験機による実験を通して最適な燃料比の選定方法を検討

すると共に、制御モデルの開発を進めている (PCT 国際出願済み[6])。

### 3. 外燃式ガスタービンの国内導入の可能性

近年、国内でバイオマス発電所が急速に増えている。神奈川県川崎市のバイオマス発電所 (33MW) や、新潟県糸魚川市のサミット明星パワー (50MW)、九州ウッドマテリアル・バイオマス発電所 (12MW) を始めとして、火力発電所と比較して小規模ながら、相当数の発電所が稼働しており、増え続けている[7]。これらのバイオマス発電所では、建築廃材や製材残材を熱源とした水蒸気タービンが用いられている。国内では、岩手県葛巻町の木質バイオマス発電設備 (120kW) ように内燃機機関を用いた小規模バイオマス発電所も存在するが、水蒸気タービンによる中規模発電所が主流である。

表 1 各種発電所の比較

名称	所在地	仕様	出力/ 面積
東新潟火力	新潟県	ガス・蒸気結合サイクル	4810MW 85.2 万 m <sup>2</sup>
大飯原子力	福井県	PWR	4710MW 188 万 m <sup>2</sup>
奥只見水力	新潟県・福島県	フランス水車	560MW 1150 万 m <sup>2</sup>
川崎バイオマス	神奈川県	蒸気タービン	33MW 2.2 万 m <sup>2</sup>
九州ウッドマテリアル・バイオマス	大分県	蒸気タービン	12MW 2.0 万 m <sup>2</sup>
GEMASOLAR (太陽熱)	スペイン南部	蓄熱蒸気タービン	19.9MW 185 万 m <sup>2</sup>
Valle1 & Valle2 (太陽熱)	スペイン南部	蓄熱蒸気タービン	100MW 102 万 m <sup>2</sup>

これら国内の水蒸気タービンによるバイオマス発電システムは、燃焼ガス温度が 540℃程度であり、元の化学エネルギーからより大きなエクセルギーを取り出して利用するには、燃焼温度を上げてガスタービンを導入することが有効である。ガスタービンを導入すると、熱効率が水蒸気タービンほど高くないが、500℃以上の高温排熱が得られるため、排熱を有効利用することが可能である。排熱を利用してさらに水蒸気タービンを運転するコンバインドサイクルを導入すると熱効率は飛躍的に上昇する。水蒸気タービンを混用しない場合は、復水器が不要となるメリットがある。バ

イオマス発電所は、通常、水が少ない場所に設置され、復水器が空冷式となり性能低下につながるため、復水器が不要となるメリットは大きい。したがって、外燃式ガスタービンをバイオマス発電に応用するとエネルギー変換効率の向上やシステムの簡素化に繋がるため、次世代のバイオマス発電において、水蒸気タービンシステムに替えて外燃式ガスタービンサイクルが導入される見込みは十分ある。

### 4. 外燃式ガスタービンの外国導入の可能性

新潟大学研究グループは、前述の混合ガスタービンサイクルの研究開発を進める一方、海外での再生可能エネルギーの研究開発の状況を調査し、混合ガスタービンサイクルの導入の可能性を検討している。これまでインドとヨーロッパにおいて調査し、混合ガスタービンサイクル (ないし外燃式ガスタービンサイクル) の応用先として、バイオマス発電だけでなく、太陽熱発電も有望であることが示唆された。

#### 4.1 インド熱物質輸送シンポジウム研究動向

2011年12月25日より翌2012年1月5日の間、南インドの二つの地域を訪問し、再生可能エネルギーを含むエネルギー分野の研究の進展状況を調査した。

この旅行の前半は、インド工科大学マドラス校で開催された第 21 回インド熱物質輸送シンポジウム (第 10 回 ASME 熱物質輸送シンポジウムと併催) に出席し、同校の研究設備を見学した。同校はチェンナイ市ギンディー国立公園の中に建設されており、キャンパスの熱帯植物林にはシカやサル等の多様な動物が息づくインドでも珍しい大学である。チェンナイはタミルナーデュー州の州都であり、人口 470 万人の南インド最大の都市であるが、イギリス統治時代の旧名マドラスを用い続けている。

このシンポジウムの本会議では 283 件の研究発表があり、そのうち再生可能エネルギーに関する講演 (Renewable and clean energy technologies) は 14 件であった。当初期待していた程、本会議において再生可能エネルギーの研究発表は多くなかったが、初日に再生可能エネルギーのワークショップが開催され、バイオマスエネルギーを利用した小規模発電システムや、太陽熱利用の研究紹介が

行われた。本会議において、James Klausner 教授（米国フロリダ大学）による太陽熱利用造水システムに関する基調講演があり、バイオマスだけでなく太陽熱にも高い関心が寄せられている。



図3 インド農村に多数導入されたシェフラ式ディッシュ太陽集熱装置

会議の開催期間中、K Srinivas Reddy 博士（IIT マドラス，機械工学科）の研究室において、シェフラ式ディッシュ太陽集光鏡による太陽集熱実験設備を見学できた。ディッシュとは、放物曲面鏡を利用した追尾式太陽集光鏡であり、スターリングエンジンと組み合わせて太陽熱発電等に利用される。通常のディッシュ型ミラーは、太陽追尾によって鏡と集熱部が共に回転するため、集熱方法に制約が生じるが、集熱部を鏡から分離して固定式にしたディッシュ反射鏡がドイツ人技術者シェフラ氏によって開発され、シェフラ式ディッシュと呼ばれる（図3参照）。同博士の研究室では、このシェフラ式ディッシュによって太陽集熱し、約200℃の過熱水蒸気を発生させる実験を行っている。

Reddy 博士によると、インドには、このシェフラ式ディッシュを利用した太陽熱利用給湯システムや吸収式冷房システムが農村などに相当数導入されている。同博士の研究室では、この他に固定床方式と流動層方式のバイオマス燃焼器も研究している。同じ機械工学科の A. Ramesh 教授の研究室では、バイオマスガス化ガスを燃料とする火花点火エンジンによる小規模システムの研究を行っている。以上のように、インドでは農村等に導入される比較的小規模な熱利用や発電システムの研究が活発である。

チェンナイでの熱物質輸送会議で気になったことの一つに、再生可能エネルギーを志向する研究動向が見られる一方で、原子力に関する講演発表が多いことであった。前述の発表件数 283 件に対して、原子力システム伝熱問題（Heat transfer in nuclear energy systems）の講演は 34 件であった。南インドでは、大学や空港等の公共機関で停電はなかったが、ホテルではほぼ毎日のように停電があり、電力が大変不足していることを実感した。このため、インドでは再生可能エネルギー技術の実用と普及に熱心な一方で、同国で商用炉の運転を開始したトリウム燃料サイクル発電に対する期待が高い。

#### 4.2 PSG カレッジ研究動向

南インドへの旅行の後半はコインバトールを訪問した。2012年1月1日にコインバトールに移動し、2日と3日、PSG カレッジを訪れた。コインバトールは、チェンナイと同様タミルナードゥ州に属し、チェンナイから西へ約500km離れた高原地帯に位置する。綿花で栄える人口130万人の商業都市である。PSGは、大学のみならず、幼稚園や小中高等学校も運営し、自動車教習場、病院、鋳造工場等を経営するコインバトール地域の企業グループである。

PSG カレッジでは、S. Balachandran 教授（エネルギー研究科）の研究室を訪問し、風力発電設備、太陽光パネル設備、バイオガス発生システム、バイオマスガス化発電設備を見学した。

図4は、PSG カレッジに設置されたバイオマスガス化炉であり、レシプロエンジン発電機用のバイオマスガスを発生させる固定床式円筒炉である。高さ約3mの円筒炉の上部から木片等のバイオマスを取り入れ、下から空気を吸引して部分酸化させ、バイオマスガスを発生させる仕組みである。

この装置には、“SOLID BIOMASS GASIFIRE”（固体バイオマスガス化炉）と記載されたプレートを確認できた。バイオマスガスには粒状物質やタールが含まれるため、そのまま内燃機関に取り込むと汚損するため、水噴霧等で洗浄して不純物を取り除いた後、内燃機関に導く。内燃機関には、“Cummins Gas Engine”，“CUMMINS DIESEL”と書いたプレートが貼って有り、ディーゼルエンジンを改造したバイオマスガス化発電用エンジンである。インドでは、農村地域に同様のバイオマス発

電システムが導入されており、バイオガスの洗浄方法にも技術が有るが、それでも内燃機関の内部の汚れの問題が起こり易いことを大学スタッフから伺った。



図4 バイオマスガス化炉 (インド)

#### 4.3 TERI 研究動向

2012年9月9日～15日の間、モロッコ・マラケシュ開催の SolarPACES2012 に出席し、太陽熱利用および外燃式ガスタービンの研究資料を収集し、16日にデリーに移動し、TERI(The Energy Resource Institute) を訪問した。TERIはNPO 法人として運営されるが、活動内容は日本での国立研究所に当たり、エネルギー資源分野の約800人の研究者が勤務する。インドには再生可能エネルギー省が有り[8]、再生可能エネルギーの導入に国を挙げて取り組んでいることが伺えるが、TERIは同省の管轄下にはないものの、研究上の交流が盛んである。

TERI 本部は、ニューデリーの Indian Habitat Center に有り、実験キャンパスをデリー郊外グルガオンに持つ。この実験キャンパスにおいて、ロータリー式バイオマス液化装置およびバイオマスガス化エンジン発電装置を見学できた。前者による液化燃料は重油のように黒く濁っており、現地の研究者は“crude”と表現した。この液体燃料から蒸留によって軽質成分等を分離することができる。エンジン発電装置は、PSG カレッジの発電システムと同様、ディーゼルエンジンを改造した内燃機関を利用するものであったが、バイオマスのガス化に横型ロータリーガス化炉を用いている。前述の通りバイオガスの汚れが問題となり易いことから、ガス清浄化のためガス化方法の改善が続けら

れている。

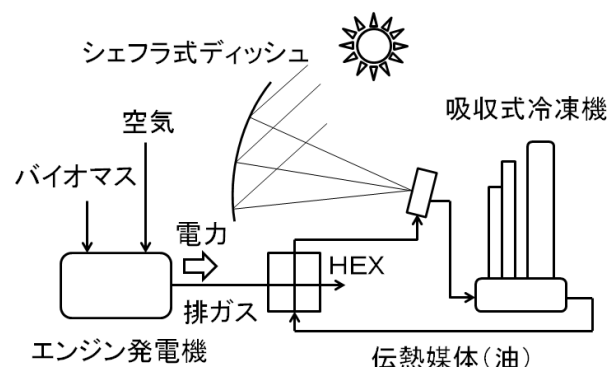


図5 複合自然エネルギー利用システム (インド)

TERI 実験キャンパスに太陽熱研究設備が隣接しており、ディッシュ型集熱スターリングエンジン発電装置や、図5のような複合自然エネルギー利用システムが研究されている。後者は、バイオマスガス化発電装置の排熱を、シェフラ式ディッシュミラーによる太陽熱で200℃に昇温し、吸収式冷房システムの熱源に利用するシステムである。このエリアのゲストハウスは、電気、冷暖房を全て自然エネルギーで賄っており、レストランからの生ごみは全て生物分解して地域の植物の肥料に用いている。このエリアでは、化石燃料を利用する内燃機関は禁止されており、ソーラーカーで移動が行われている。ゲストハウスではインドの企業技術者に対してワークショップを開催している。

#### 4.4 欧米からの技術の波及効果

このように、インドではバイオマスや太陽熱の利用に関心が高く、現在は小規模システムが主流であるが、今後、中規模システムに移行する可能性があり、外燃式ガスタービンが導入される余地がある。アジアの再生可能エネルギーの今後を考えるには、先進地であるヨーロッパからの技術の波及効果も考慮する必要があるため、本節で考察する。

ヨーロッパやアメリカでは、太陽熱発電所が商用運転している[9]。本節では、アジア地域への波及効果について考察する。集光太陽熱発電 (CSP, Concentrated Solar Power) の概要と各システムの詳細については、本特集に別途掲載された解説記事に譲り、本稿では、太陽熱発電の今後の発展とガスタービン導入の可能性について論考する。

最新のタワー集光太陽熱発電システムは、多数のヘリオスタットでタワー上部の一点に太陽光を集め、硝酸塩系溶融塩を熱媒体として、約 560°C で集熱と蓄熱を行い、水蒸気タービンによって発電する。図 6 は、スペインに建設された太陽熱発電所の例であり、出力約 20MW、24 時間発電が可能である。表 1 に記載したように、ヨーロッパに最近建設された太陽熱発電所は出力が 20MW～100MW であり、数 GW クラスの火力発電所と比較すると大規模とは言えないが、最近のバイオマス発電所と同等な規模で有り、水力を除く新エネルギーの発電所としては有意義な規模である。



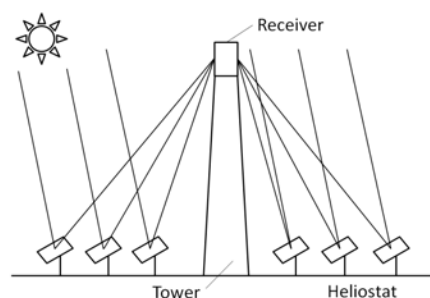
図 6 タワー集光太陽熱発電システム (スペイン)

現在のところ、このような集光型太陽熱発電はヨーロッパとアメリカのサンベルト地域を中心に普及が進んでいるが、2013 年 5 月にスペインを訪問した際、現地の太陽熱発電所において、今後は日射の豊富なアジア地域にも技術展開する可能性があることを伺った。ただし、アジアはモンスーンの影響で、一部の乾燥地帯と除くと、夏季に雨量が多い多湿地域であるため、さらに高性能化することが望ましく、そのための技術革新が必要である。

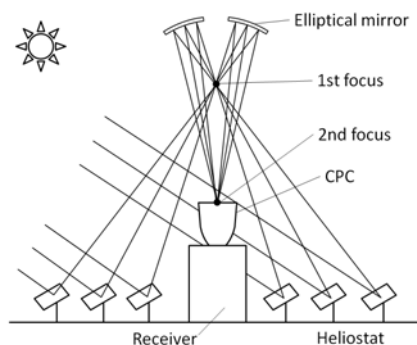
CSP の高性能化のため、集光性能を向上させる必要がある。図 7(a) の従来型タワー集光装置と比較して、図 7(b) のように二次楕円鏡を利用したビームダウン集光装置によって、さらに集光度を上げることが提案されている。このようなビームダウン集光システムは、最初イスラエルで開発されたが、日本では三鷹光器株式会社が研究開発を進めており、新潟大学の児玉教授研究グループによって太陽熱燃料化への応用研究が取り組まれている[10,11]。

このビームダウン集光装置の利点として、集光度の向上によって集熱温度の上昇が期待できることや、集熱位置を低くできるため、伝熱流体のポ

ンピングパワーを抑制できることが挙げられる。今後、ヨーロッパやアメリカの太陽熱発電がアジアに普及する際、応用が期待されており、外燃式ガスタービンを太陽熱発電に応用する際の追い風となる。



(a) タワー集光システム



(b) ビームダウン (BD) 集光システム

図 7 タワー太陽集光装置の種類

#### 4.5 外燃式ガスタービンのアジア導入の可能性

本章で見たように、インドでは太陽熱とバイオマスエネルギーに関する研究活動が活発であったが、いずれも小規模なシステムを扱うものが多く、発電に関してはレシプロ式内燃機関によるものが主流であった。今後、スケールメリットの向上のため水蒸気タービンを利用した中規模発電システムが導入される見通しがあり、これがさらに外燃式ガスタービンに置き換えられる可能性や、あるいは、現在の小規模システムから外燃式ガスタービンによる中規模システムに直接移行する可能性も考えられる。ヨーロッパやアメリカでの太陽熱発電技術のアジアへの波及の動向も重要であり、今後、より条件の厳しいアジアのサンベルト地域に太陽熱発電所が建設される際、さらに集光度を向上した集光システムによって発電効率を向上さ

せることや、図8のように、これを外燃式ガスタービンと組み合わせた発電システム[12,13]の導入が期待される。

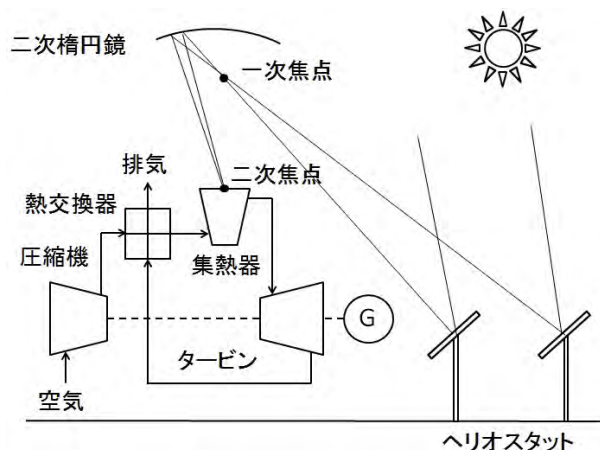


図8 高効率太陽集熱ガスタービンシステム（高温空気タービンシステム）の概念図

## 5. あとがき

本稿では、新潟大学研究グループによる外燃式ガスタービンの研究開発の概要と、その国内および外国への導入の可能性について論考した。

著者がチェンナイを訪問した12月は、同地域で最も過ごしやすいと言われる時期であったが、日中30℃を超える暑い日が続いた。大学やホテルはよく整備されているが、それらの敷地を一步出ると、街中でゴミが腐敗し、川が腐り、路上に野犬が徘徊する地域である。コインバトルでは、10歳に満たない少年が働く姿があり、周囲に理由を尋ねたところ、「彼は貧しいから」との答えであった。日本では、毎日1人当たり、石油換算して10リットル以上の化石燃料を消費する暮らしが当たり前のようにになっているが、全く別世界に暮らす人の方が南インドでは多数派であり、それでも人々はきさくで優しく、滞在中、男女を問わずよく話しかけられた。

著者がEFガスタービンの研究を開始した2009年当時、再生可能エネルギーの研究は、国内よりも外国、特にアジアへの導入を目標とした方が進展しやすいと思われ、アジア地域の研究動向の調査にも着手した。しかしながら、2011年3月に東北大地震があり、最近では国内での再生可能エネルギーの導入に関心が高まっている。そのような状

況ではあるが、世界は多様であり、研究フィールドを国内に限定せず、アジアやヨーロッパの状況にも目を向けることで、世界の趨勢から見て有効な将来像を描くことができると考え本稿を執筆した。

## 謝辞

名古屋学院大学特任教授・和田幸子先生からインドでの学術調査についてご指導頂きました。新潟大学教授・児玉竜也先生、宮崎大学准教授・長瀬慶紀先生、三鷹光器株式会社社長・中村勝重様および同社研究開発スタッフの方々からビームダウン集光装置について、エネルギー総合工学研究所・参事（新潟大学特任教授）・吉田一雄先生および新潟大学准教授・櫻井篤先生から太陽熱発電システムに関して情報を提供して頂きました。新潟大学研究補佐員・山口智春様と田岡美希様には図面整理を補助して頂きました。本稿を執筆できたことはこれらの方々のお蔭であり、ここに感謝の意を表します。

本稿に記載された研究開発の一部は、科研費基盤研究(B)「アジア伝統的エネルギー利用地域におけるバイオEFガスタービンの実地試験と導入促進」(課題番号23404004, 研究代表者:松原幸治)、科研費基盤研究(B)「高効率太陽熱発電のための高温型粒子流動層式ソーラー集熱/蓄熱システムの開発」(課題番号25289357, 研究代表者:松原幸治)の助成により行われました。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] D. Cocco, P. Deina and G. Cau, Performance Evaluation of Small Size Externally Fired Gas Turbine (EFGT) Power Plants Integrated with Direct Biomass Dryers, *Energy*, **31** (2006), 1459-1471.
- [2] A. Traverso, A. F. Massardo and R. Scarpellini, Externally Fired micro-Gas Turbine: Modeling and Experimental Performance, *Applied Thermal Engineering*, **26** (2006), 1935-1941.
- [3] H.I.H. Saravanamuttoo, H. Cohen, P.V. Straznicky and G.F.C. Rogers, ガスタービン基礎と応用一発電用からジェットエンジンまで (翻訳:藤原仁志), 東海大学出版会, (2012).

- [4] 田沼勇人・松原幸治・櫻井篤・小浦方格, E F ガスタービン試験装置の検討, 日本機械学会北陸信越支部第 49 回総会・講演会, (2012), 1-2.
- [5] 田沼勇人・松原幸治・櫻井篤・小浦方格, 混合ガスタービンサイクルの研究, 日本伝熱学会北陸信越支部 2012 年秋季伝熱セミナー講演論文集, (2012), 1-2.
- [6] 松原幸治・田沼勇人, 混合タービン発電装置, 国際出願 PCT/JP2013/051486, (2012).
- [7] バイオマスエネルギー, 横山伸也, 芋生憲司, 森北出版, (2009).
- [8] 和田幸子, 再生可能エネルギー先進国インド, 日報出版, (2010).
- [9] 吉田一雄・児玉竜也・郷右近展之, 太陽熱発電・燃料化技術－太陽熱から電力・燃料をつくる, コロナ社, (2012).
- [10] T. Kodama, N. Gokon, Thermochemical Cycles for High-Temperature Solar Hydrogen Production, *Chemical Reviews*, **107**, (2007), 4048-4077.
- [11] T. Kodama, N. Imaizumi, N. Gokon, T. Hatamachi, D. Aoyagi, K. Kondo, Comparison Studies of reactivity on nickel-ferrite and cerium-oxide redox materials for two-step thermochemical water splitting below 1400°C, *Energy Sustainability Conference & Fuel Cell Conference*, Washington DC, USA, (2011), 7-10.
- [12] 児玉竜也・郷右近展之・松原幸治・櫻井篤, 太陽光を利用した集熱蓄熱装置, 特願 2012-195427 号, (2012).
- [13] K. Matsubara, Y. Kazuma, A. Sakurai, S. Suzuki, L. Soon-Jae, T. Kodama, N. Gokon, C. Hyun Seok and K. Yoshida, High-temperature fluidized receiver for concentrated solar radiation by beam-down reflector system, *Proceedings of SolarPACES2013*, (2013), accepted.
-



## 集光型太陽熱発電 Concentrating Solar Power

吉田 一雄（一般財団法人エネルギー総合工学研究所  
新潟大学大学院 自然科学研究科）  
Kazuo YOSHIDA (The Institute of Applied Energy  
Niigata University)

### 1. はじめに

太陽エネルギーは地球外から供給される唯一の一次エネルギー源であり、しかもその賦存量は人類のスケールから見れば無限である。日本では、太陽エネルギーを用いる発電というと太陽光発電（PV）を思い浮かべる人が多いが、世界では集光型太陽熱発電（CSP, Concentrating Solar Power）も有望な発電技術の一つとして認識されている。国際エネルギー機関（IEA）の地球温暖化抑制技術に関する出版物である ETP2008 では、地球温暖化抑制に重要な 17 の技術の一つとして CSP が挙げられている[1]。

集光型太陽熱発電は、名前の通り太陽光を集光し、一旦熱に変えて発電するものである。このため蓄熱システムや既存のボイラと組み合わせることができ、日射がない時間帯でも比較的lowコストで発電することが可能である。したがって、CSP は電力需要曲線に合わせた電力供給が比較的容易にできることになり、これをディスパッチャビリティと呼んでいる。また、雲の通過による日射の変動がある場合においても、PV では日射の変動により出力は大きく変化するが、CSP では熱慣性や機械的慣性のために出力の変動は極めて平滑である。

本稿では、CSP に特徴的な集光・集熱技術と蓄熱技術を中心に説明する。併せて世界の CSP ポテンシャルと今後の市場の動きについてもその概略を記述する。

### 2. 太陽光の集光と CSP の適地

#### 2.1 集光の重要性

周知のように、地表における太陽エネルギーのフラックス強度は低く、一般に高々  $1\text{kW}/\text{m}^2$  程度である。したがって、太陽熱で高温を得るためには太陽光を集光して狭い面積により多くの光エネルギーを入れ、放熱面積を狭くして熱損失を可能な

限り小さくする必要がある。

図 1 は集光・集熱用コレクタの熱効率と、光から熱への変換をするレシーバの温度との関係に及ぼす集光度「C」の影響を示している。集光度が高くなるほど、コレクタ効率は高温においても高効率となる。なお、簡単のため本計算においてはレシーバの熱損失は放射損失のみ考え、放射率  $\epsilon$  は温度に無関係に 0.2 としている。コレクタ効率にカルノー効率を乗じたものをプラントのシステム効率とすると、図 2 に示すように、集光度が高くなるほど最高効率点は高温側にシフトし、しかも最高効率も上昇する。

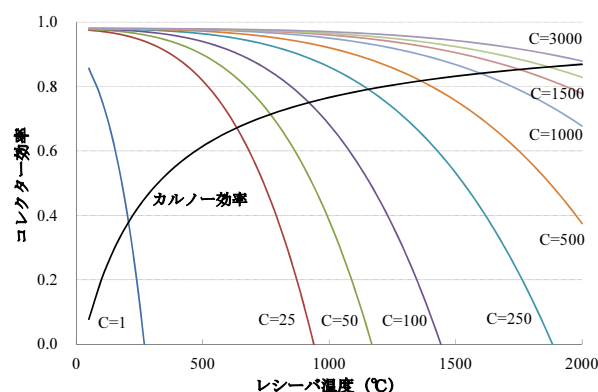


図 1 コレクタ効率とレシーバ温度の関係[2]

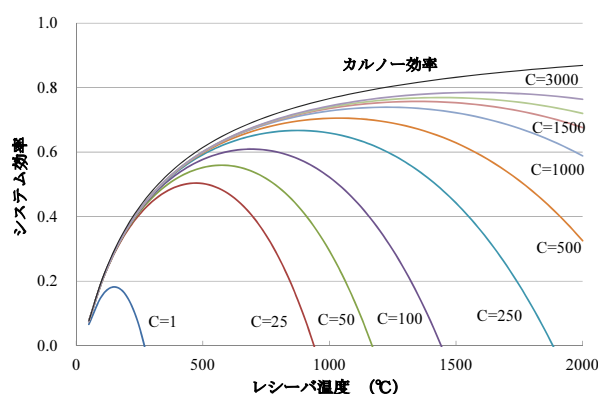


図 2 システム効率とレシーバ温度[2]

このように集光度が高くなるほど高温高効率の運転が可能であるが、現実には使用する材料の制限などにより現実の稼働温度は決められることが多い。各集光・集熱技術の稼働温度については、後述する。

## 2.2 CSP の適地

地表に降り注ぐ太陽光には太陽からまっすぐに来る直達光と、それが空気中の分子やエアロゾルによって散乱された散乱光とがある。太陽光を集光するためには、光のベクトルがほぼ揃っていないなければならない。したがって、集光できるのは直達光 (DNI, Direct Normal Insolation) のみである。このため CSP の設置に適する地域は、直達光が豊富なサンベルトと呼ばれる地域である (図 3)。サンベルト地域は、空気が乾燥しているために DNI が高く、年間  $1800\text{kWh/m}^2$  以上に上る。特に、サハラ砂漠や米国南西部など世界で最も適した地域の DNI は  $2700\text{kWh/m}^2$  以上にもなる。サンベルトは、太陽光のフラックス強度が最も高いと思われる赤道付近にはなく、北半球、南半球とも緯度がほぼ  $20\sim 40$  度の範囲に分布している。この分布は大気の大循環によるもので、いわゆる中緯度高圧帯にあたる。この辺りは温度が高く乾燥した下降流のため、大気中に光を散乱させるエアロゾルなどが少なく、DNI は強くなる。

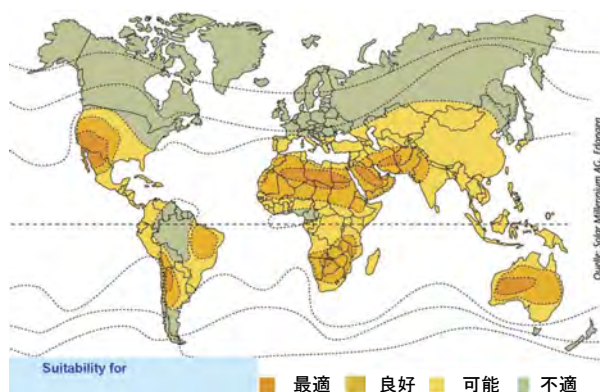


図 3 世界の CSP の適地分布[3]

## 3. 代表的な集光・集熱技術

CSP の主要な集光・集熱技術は、図 4 に示すように、4 通りある。すなわち：

### a. パラボラ・トラフ型

- b. リニア・フレネル型
- c. パラボラ・ディッシュ型
- d. タワー型

これらのコレクタは、DNI を常に捕捉する必要があるので、必然的に太陽を常に追尾する必要がある。コレクタには図 4 上に示すような 1 軸で太陽を追尾し、線で集光するタイプと、2 軸で追尾し点で集光する (図 4 下) 点集光タイプとがある。線集光のコレクタは集光度が低く高温の運転には不向きである。稼働温度は一般に高々  $500\sim 550^\circ\text{C}$  である。一方、点集光型は集光度が高く高温運転に向いている。特にパラボラ・ディッシュ型の集光度は高く、太陽炉として使用する場合には数千  $^\circ\text{C}$  が得られる。

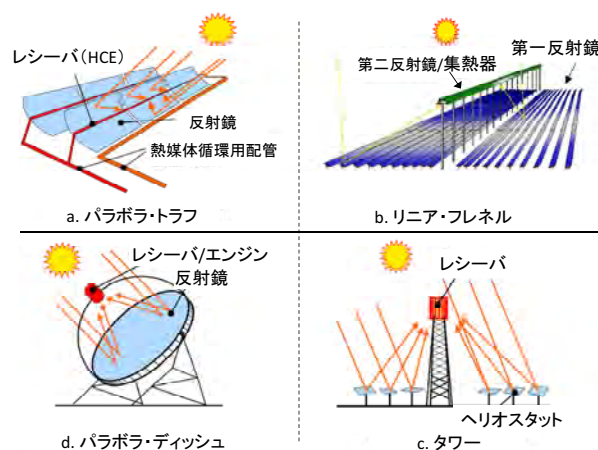


図 4 代表的な集光・集熱技術

### a. パラボラ・トラフ型 (Parabolic Trough)

パラボラ・トラフ型コレクタ (以下 PTC) は、断面が放物線の反射鏡と、その焦線上にあるレシーバで構成されている。放物線の中心軸に平行に入射する太陽光は、反射鏡で反射されると必ず焦点 (焦線) へと集光する。集光太陽光はレシーバ表面で熱へと変換され、レシーバチューブ内を流れる HTF (Heat Transfer Fluid, 熱媒体) を加熱する。一般の CSP プラントでは、高温の HTF で水蒸気をつくり、蒸気タービンを回して発電する構造となっている。PTC を用いた CSP プラントは、1980 年代半ばからカリフォルニアの Mojave 砂漠で商業運転が開始され、現在も発電を続けている。したがって、他の方式に比べ圧倒的に長い商業運転の実績があり、現在建設されている CSP プラン

トの大部分は PTC を使用している。

一般に PTC は年間に得られるエネルギー量を最大とするため、長手方向を南北方向に設置し、東から西へと移動する太陽を 1 軸で追尾する。凹面の反射鏡がレシーバと一体で回転するため、地上の固定配管との間は可動ジョイントが必要となる。また、強風下での運転は困難であり、一般に風速 15m/s 以上になるとアパチャを風下にむけた耐風姿勢とする。



図 5 パラボラ・トラフ型コレクタ

PTC は技術的には成熟し、現在は積極的にコストダウンが行われている。さまざまな観点でコストダウンが図られているが、中でもコレクタの大型化は効果的である。これはレシーバあたりの反射鏡面積を増やし、反射鏡単位面積当たりの支柱や駆動系の数を減らすことでコストダウンを図るものである。従来のコレクタではアパチャは一般に発電に使用されるもので約 5.8m であったが、現在は 1m 広いものが市場に投入されつつあり、最近では 9m のものも開発されて実験サイトで評価中である。

PTC に使用されるレシーバは、一般に真空二重管方式となっている。これは、図 6 に示すように、HTF が流れるステンレス管の外側に透明なガラス管がある構造で、二つの管の間は  $10^{-4}$  torr の真空になっている。ガラス管とステンレス管の接合部はペローズ構造となっている。これは両者の熱膨張の差を吸収しなおかつ真空を維持するためである。ステンレス管の表面には、選択吸収膜と呼ばれる特殊な被膜が形成されている。これは、 $400^{\circ}\text{C}$  程度で運転されるプラントの場合、 $350\text{nm}\sim 2300\text{nm}$  程度までの太陽からの電磁波を可能な限

り多く吸収し、かつ約  $2300\text{nm}$  以上の波長をもつ電磁波の放射を抑え、放熱損失を低減する特性を有する被膜である。

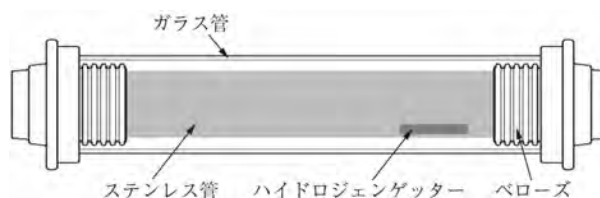


図 6 レシーバ[2]

レシーバ表面層で熱へと変換された太陽エネルギーはステンレス管内を流れる HTF を加熱する。一般にパラボラ・トラフ型プラントでは HTF として合成油（ビフェニルとジフェニルエーテルの混合物）が用いられている。これは炭化水素系合成油の中でも高い耐熱性を有するが、それでも使用温度は高々  $400^{\circ}\text{C}$  である。合成油は高温で長時間使用すると徐々に熱分解し、水素を放出する。水素はレシーバのステンレス管壁を透過し、真空部分に侵入する。水素は熱伝導率が高いため、真空部分に侵入するとレシーバの熱損失が急増する。これを抑制するため、レシーバには、図 6 に示すように、真空部分にハイドロジェンゲッターが挿入されている。このように選択吸収膜の使用やハイドロジェンゲッターのような工夫により、放射熱損失と対流熱損失を可能な限り抑制し、高効率なレシーバが生産されている。

上述のように、合成油を HTF として用いた場合、その耐熱温度から稼働温度は高々  $400^{\circ}\text{C}$  となっている。一方、熱バランスから考えた PTC の最大効率点は、一般に  $500\sim 550^{\circ}\text{C}$  程度である。稼働温度の上昇はランキンサイクル効率向上、蓄熱コストの低下につながり、高効率低コスト発電の実現にも有効である。このため、HTF として  $565^{\circ}\text{C}$  程度まで使用できる硝酸塩系の熔融塩を用いる動きや、PTC で直接水蒸気を製造する DSG (Direct Steam Generation) を採用する動きが始まっている。

#### b. リニア・フレネル型 (LFR, Linear Fresnel Reflector)

LFR は、図 7 に示すように、細長い反射鏡（一次反射鏡）を水平に多数並べ、各反射鏡がその中心軸周りに回転して太陽を追尾し、上方の固定レ

シーバへ集光する。一次反射鏡は断面が放物線となるよう平面鏡を規定のフレームに接着して制作される。レシーバ上部には2次反射鏡が置かれ、レシーバから外れた1次反射鏡からの反射光を再度反射し、レシーバチューブに集める構造となっている。PTCと異なりレシーバが固定であるため地上の固定配管との接続は容易である。

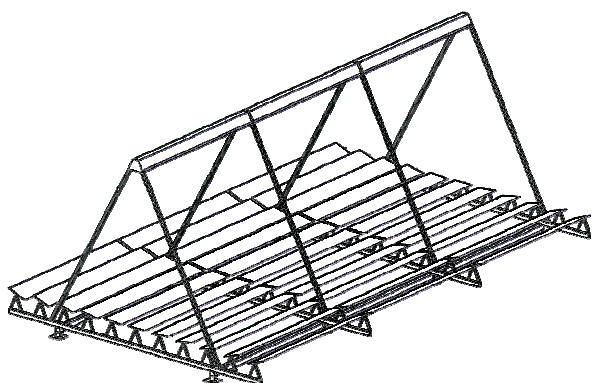


図7 リニア・フレネル型コレクタ[4]

LFRは細長いほぼ平面の反射鏡が地面に平行に置かれているため、PTCと比較して風の影響を受けにくい。このため、LFRは堅牢なフレーム構造は不要であり、コレクタは軽量・低コストとなる。PTCの代表的なタイプであるEuroTroughコレクタが $135\text{kg/m}^2$ であるのに対し、図7のコレクタは $28\text{kg/m}^2$ とおよそ1/5程度である[5]。LFRはこのように軽量であることから、建造物の上に設置し、吸収式冷凍機の熱源や工場のプロセス熱供給用に使用するなど用途が広がっている。

LFRは、図4に示す4種類の集光・集熱コレクタの中で土地利用効率(=アパチャ面積/土地面積)が最も高いという特徴がある。敷地に設置できる反射鏡の総アパチャ面積は、PTCが土地面積の約30%程度であるのに対し、LFRの場合には60~80%と倍以上になる。一方、LFRはPTCと比較して集光効率は低いという欠点も併せ持つ。特に、太陽の高度が低い朝と夕方では、集光効率は著しく低下する。しかし、上記の土地利用率が倍以上高いことから、単位土地面積あたりに得られる熱量は、LFRの方がPTCよりも大きい[5]。

#### c. パラボラ・ディッシュ型 (Parabolic Dish)

本タイプは、常に太陽方向に中心軸を向けた放

物面で太陽光を反射し、その焦点近傍に設置したレシーバで熱へと変換し、一般にはスターリングエンジンを回して発電するものである。各種CSPの中で集光度が最も高く、高温が得られるため高効率の発電が可能である。米国のSandia国立研究所の実験では、太陽光-電力変換効率は31.25%を記録している[6]。一方、パラボラ曲面全体を常に太陽の方向に向けなければならないため大型化が困難であり、一般に出力は3kW~25kWと小型である。パラボラ・ディッシュ型はモジュラー性に優れており、分散型発電設備に適しているため、送電線の設置が困難な島しょ部、山間部などでも用いられるが、多数の装置を並べて発電するソーラ・ファームも建設されている。

パラボラ・ディッシュは集光効率が極めて高く発電効率も高いという長所があるが、大型化が困難なこととCSPプラントの特徴である蓄熱やボイラと組み合わせが難しいという欠点もある。

#### d. タワー型 (Power Tower もしくは CRS, Central Receiver System)

タワー型は、図8に示すように、タワーの周りに配置した多数のヘリオスタットで反射した太陽光を、タワー上部のレシーバに集光し、熱へと変換して発電するものである。なお、ヘリオスタットとは、太陽を追尾しながら常に一定の方向に光を反射する装置である。図8はスペインのセビリヤ東部にあるGemasolarと呼ばれるプラントであるが、このタワー高さは140m、タワーから最も離れたヘリオスタットはタワー中心から北側に900m近く離れている。Gemasolarの主要諸元を表1に示した。



図8 Gemasolar プラント (スペイン南西部) [7]

表 1 Gemasolar の主要諸元

発電容量	19.9MWe
蓄熱容量	15hr
総アパチャ面積	304,750m <sup>2</sup>
設備稼働率	75%
年間発電量	110GWh

ヘリオスタットは、図 9 に示すように、垂直に立てた支柱の上に反射鏡フレームを搭載した構造で、支柱上部の駆動部分は 2 軸で太陽を追尾する。Gemasolar で使用されているヘリオスタットは反射鏡面積が 120m<sup>2</sup>/基あり、それが 2,650 基使用されている。図 8 では、ヘリオスタットはタワーを中心に同心円状に配置されている。その他、タワーの片側にのみ（北半球ではタワーの北側）にのみヘリオスタットを配置する場合もある。どちらの配置を取るかはレシーバ形状などにより変わる。ヘリオスタットは単純にタワーの周りに同心円状に配置するのではなく、多数のヘリオスタットがより多くの光を効率よくレシーバに向けて反射できるように配置されている。すなわち、各ヘリオスタットの太陽光の入射角をできるだけ小さくしてコサイン損失の低減を図り、周りのヘリオスタットとの入射光や反射光の干渉（シャドーイングやブロッキングと呼ばれる）を最小にするようにヘリオスタットの配置方法が工夫されている。



図 9 Gemasolar のヘリオスタット[8]

タワー型で使用される HTF には熔融塩、水/水蒸気、空気がある。それぞれ長所短所があるが、最近はより蓄熱を重視しているため、蓄熱媒体と兼用可能な熔融塩を重視する傾向にある。Gemasolar は 2011 年に運転を開始したスペインの

プラントであるが、熔融塩を HTF として使用し、レシーバ出口の熔融塩温度は 565℃となり、それによって製造される蒸気温度も高く高効率の発電が可能である。このため、HTF として熔融塩を使用するプラントが注目されており、米国でも SolarReserve 社が 110MW のプラントを建設している。また、他メーカーも同技術の開発を急いでいる。

一方、HTF が水/水蒸気の場合には直接蒸気タービンを回すことができるため、これを使用しているメーカーもある。また、HTF として常圧空気を用いる動きもある。熔融塩や水/水蒸気を HTF とする場合にはチューブラレシーバが使用されるが、常圧空気の場合には、空気の熱伝導率の低さを補うため、セラミック製のハニカムをレシーバとして使用することが多い。この場合、ハニカムの管路にほぼ平行に集光太陽光を入れてハニカム内部を加熱し、そこに空気を流して広い伝熱面積で空気を加熱する構造となっている[9]。

タワー型の発電方式は、他の CSP と同じように、蒸気タービンを回すランキンサイクルが一般的である。しかし、タワー型は線集光と比較して集光度が高く高温を得やすい特徴を生かし、圧縮空気を太陽熱で加熱してブレイトンサイクルを回して発電する技術の開発も行われている。本方式は 2000 年頃からヨーロッパを中心に開発が行われ、レシーバで 1000℃程度の高圧高温空気を製造し、ガスタービンを回すことに成功している[10]。現在はこの技術を利用したコンバインドサイクルの開発が進行中である。

#### 4. 蓄熱技術

冒頭でも既述したように、CSP の長所は日射がない時間帯でも発電できることである。スペインの電力需要曲線を図 10 に示すが、CSP は昼間の時間帯のみならず夜間の電力供給も行うことが可能である。これを実現する技術が蓄熱技術であり、PV と二次電池の組み合わせよりも蓄熱設備を組み込んだ CSP の方が発電コストはずっと低い。

現在実用化されている蓄熱システムは、硝酸塩系熔融塩の顕熱を利用し、高温・低温のタンクを用いる 2 タンク顕熱蓄熱システムである。これには直接方式と間接方式とがある。直接方式は図 11 に示す Gemasolar で使用しているもので、レシーバで 565℃に加熱した熔融塩をいったん高温タンク

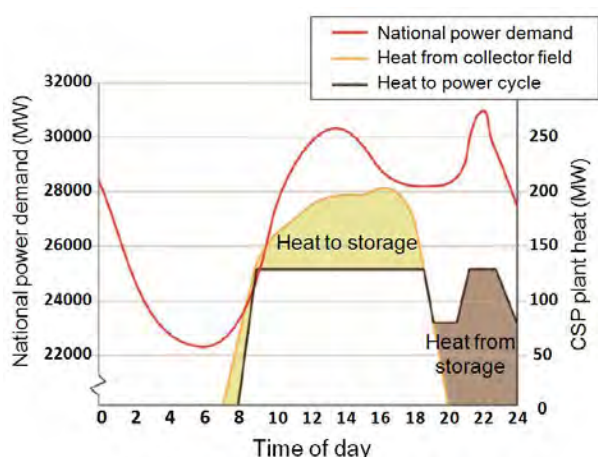


図 10 ディスパッチャビリティ[11]

クのため、それを徐々に使用しながら蒸気を発生し発電する。温度が 290℃程度まで低下した熔融塩は低温タンクにためられ、日中再び太陽熱で加熱されるサイクルを繰り返す。このシステムでは  $\Delta T$  が 275℃あり蓄熱コストは低い。GemSolar は 15 時間の蓄熱能力があり、冬場を除き 24 時間運転が可能である。そのため年間の設備稼働率は約 75%となっている。

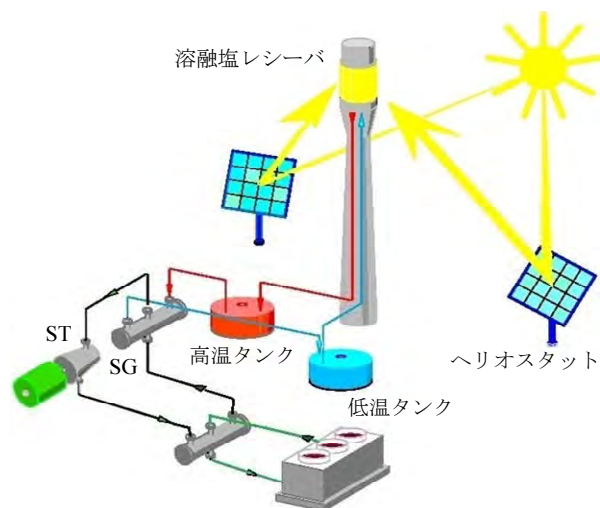


図 11 直接 2 タンク蓄熱方式 (GemSolar) [7]

HTF に合成油を用いるパラボラ・トラフ型プラントでは、間接 2 タンク方式の熔融塩蓄熱システムが用いられている。このシステムでは、高温側熔融塩温度は合成油よりも低く高々 380℃程度である。一方、使用される 2 成分硝酸塩系熔融塩の融点 (約 225℃) が制約となり、低温側は約 290℃

となっている。したがって、 $\Delta T$  は 100℃未満となり、蓄熱コストは相対的に高い。したがって、合成油を用いるパラボラ・トラフ型プラントでは、蓄熱コスト低減のため、高温及び低温の熔融塩を一つのタンクに貯蔵する工夫や、低融点の熔融塩の利用もしくは高温運転が可能な HTF の使用が考えられている。また、熔融塩の代わりに安価なコンクリートを使用する固体蓄熱方式も開発されている。

CSP のディスパッチャビリティをより低コストで実現するため、次世代蓄熱技術の研究・開発も活発である。開発の方向性としては、エネルギー密度を高くすることと低コスト化である。現在、顕熱蓄熱に代わって注目されているのが、相変化を利用する潜熱蓄熱である。稼働温度条件によりさまざまな材料が検討されている。現時点で最も有望な材料の一つは、低コストと融点を広く選べることから硝酸塩系熔融塩を PCM (Phase Change Material) 蓄熱材料として用いるものである。これは熱伝導性が低いことが欠点であるが、それを向上させるために、フィンの数を増やす等により伝熱面積を増加させる工夫や、グラファイトとの複合化を図っている。また、より高温の用途には金属 PCM の使用が考えられている。中でも融点が約 580℃の Al-Si 合金に注目が集まっている。次世代の蒸気ランキンサイクルを使用するタワー型 CSP として最適な相変化温度を有するためである。PCM の次の世代の蓄熱材料としては、可逆的な化学反応を利用する化学蓄熱の使用が考えられている。硫黄、金属酸化物や金属水酸化物等を用いる研究・開発が進行中である。

## 5. 発電コスト

CSP の設備費の内訳は約半分が集光・集熱関係であり、残りが蓄熱設備、発電装置、BOP (補機、付帯設備) 等となっている。集光・集熱系は、発電部分と比較して十分に技術開発が進んでいるとは言えない。このため、コレクタの研究開発、大量生産や国際標準化の促進などによりコストダウンを図る動きが活発である。

CSP の発電コストは、燃料である太陽エネルギーは無料であるため、設備費と運転費が大きく影響するが、それだけでは決まらない。CSP の場合、発電コストはプラント規模が大きく影響する。

10MW のプラントを基準に考えると、80MW のプラントでは発電コストはおよそ半分程度になる。

また、プラントの蓄熱容量が大きくなると設備費は増大するが、発電コストはむしろ低下する。これは蓄熱の導入により稼働率が高くなり、設備費と比較して発電量が増加するためである。

さらに、当然ながら DNI の量も発電コストに影響し、DNI が年間 2000kWh/m<sup>2</sup> のスペイン南部と北アフリカや米国南西部のように 2700 kWh/m<sup>2</sup> 以上ある地域とを比較すると、後者の発電コストは 20~30%低い。2007 年に運転を開始したラスベガス近郊のパラボラ・トラフ型のプラントの発電コストは 10c\$/kWh といわれているが、操業コストだけを考えると、3 c\$/kWh とのことである[12]。

### 6. 太陽熱発電のポテンシャルと市場

現在、CSP プラントの総発電容量は世界で 2.5GW を超えている。その大部分はスペインであるが、1980-年代半ばから CSP による発電を続けている米国がこれに続いている。近年は中東北アフリカ地域や南アフリカ等に CSP の設置が拡大している。

ドイツの国立研究機関である DLR の試算によると、パラボラ・トラフ型プラントを世界の DNI が年間 2000 kWh/m<sup>2</sup> 以上ある地域に設置すると、その発電量は年間 300 万 TWh になるという[13]。なお、この試算では実際に設置可能な土地面積だけを考慮している。この発電量は世界の電力需要の 150 倍以上であり、日射条件が良いサハラ砂漠の 200km 四方の土地に設置すると、計算上は世界中の電力需要を十分賄えることになる。表 1 は CSP ポテンシャルが高い地域の年間 DNI 量別の発電量の計算値である。アフリカが世界の発電量の約半分、そのまた半分がオーストラリアである。CSP の設置に適するサンベルト地域は、図 3 に示すように、必ずしも電力の大消費地に近い地域にあるわけではない。ドイツは、北アフリカの砂漠地帯で CSP による発電を行い、その発電量の半分で地元の諸国の国内消費を賄うとともに、高压直流送電によりヨーロッパへ送電する計画を立てている。これはデザーテック計画と呼ばれており、ヨーロッパ諸国をはじめ米国や日本企業も参加を表明している。現在はアラブの春の影響や、EU 諸国の経済的問題のため停滞気味であるが、経済

の安定を取り戻すとともに活動は活発化されると見込まれる。

表 2 主要地域の年間 DNI 量別発電量 (TWh) [13]

DNI Class (kWh/m <sup>2</sup> a)	Africa	Middle East	Australia	Central South America
2000-2099	102,254	3,432	6,631	31,572
2100-2199	138,194	12,443	18,587	20,585
2200-2299	139,834	39,191	36,762	24,082
2300-2399	141,066	60,188	87,751	20,711
2400-2499	209,571	71,324	148,001	6,417
2500-2599	203,963	34,954	207,753	3,678
2600-2699	178,480	32,263	142,490	5,120
2700-2800+	346,009	36,843	49,625	11,827
Total	1,459,371	290,638	697,600	123,992

DNI Class (kWh/m <sup>2</sup> a)	USA	Mexico	India	China
2000-2099	14,096	1,606	7,893	8,332
2100-2199	17,114	3,378	1,140	18,276
2200-2299	21,748	3,650	550	43,027
2300-2399	16,402	5,807	774	28,415
2400-2499	23,903	15,689	426	11,197
2500-2599	8,116	7,134	13	11,330
2600-2699	2,326	1,534	119	2,180
2700-2800+	0	1,878	15	3,079
Total	103,705	40,676	10,930	125,836

日本は DNI が十分に高いとは言えず、CSP による発電コストは現在の設備費から考えるとかなり高くなる。また、日本はオーストラリアのような CSP ポテンシャルが高いサンベルトから遠くしかも周りを海に囲まれており、長距離送電は現実的ではない。このような日本では、オーストラリアのようなサンベルトで太陽熱を利用して輸送可能な燃料を製造し、日本に輸送して使用することは可能である。このようなソーラフューエルを製造する技術を培うことで、今後のエネルギー安全保障の一翼を担うと見込まれる。

### 7. おわりに

CSP は古くて新しい技術であるが、悠久かつ莫大なポテンシャルを持つ太陽エネルギーを用い、電力需要曲線に合わせた電力供給が可能であり、なおかつ二酸化炭素削減効果も大きいことから注目度は高い。CSP の主要な集光・集熱技術は 4 種類あるが、大規模発電設備に向くのはパラボラ・トラフ型、リニア・フレネル型およびタワー型である。現在はパラボラ・トラフ型がほぼ市場を席卷しているが、今後は高温高効率の発電が可能なたワー型や設備費が低く発電のみならず熱供給へ

の適用が考えられるリニア・フレネル型もシェアを拡大していくと見込まれる。

CSPはサンベルトのような乾燥したDNIが高い地域への設置が特に有効である。しかし、これらの地域と電力の大消費地とは必ずしも一致しない。このため、デザータック計画として知られているように、送電効率が高い直流高圧送電で消費地までCSPで発電した電力を送電する計画も進行している。

日本の集光・集熱技術は世界の最先端とは言えないが、その他のCSP関連分野については高い技術力を有している。今後の日本にとってインフラ輸出は必須である。CSPの分野に関しても、集光・集熱技術を磨き、プラント建設の実績を作ることによって、日本の技術輸出のポートフォリオに入れることが可能であると考えている。さらに、CSPの技術を培うことで、ソーラフューエル製造に使用する高温太陽熱供給技術を保有することができ、日本のエネルギー安全保障にもつなげることになるであろう。

#### 参考文献

- [1] Energy Technology Perspectives 2008, IEA (2008).
- [2] 吉田一雄, 児玉竜也, 郷右近展之, 太陽熱発電・燃料化技術, コロナ社(2012).
- [3] 旧 Solar Millennium 社資料.
- [4] Industrial Solar 社資料, <http://www.industrial-solar.de/>.
- [5] Trieb, F., et al., Concentrating Solar Power for Seawater Desalination, DLR (2007).
- [6] Andraka, C. E. and Powell, M., Dish Stirling Development for Utility-Scale Commercialization, SolarPACES (2008).
- [7] Arias, S., プレゼンテーション資料 (2012) Torresol Energy 社 HP, <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/home/en>
- [8] Lata, J., et al., First Surrounding Field of Heliostats in the World for Commercial Solar Power Plants - Gemasolar, SolarPACES (2010).
- [9] F. Téllez, F., et al., Thermal Performance of “SolAir 3000 kWth” Ceramic Volumetric Solar Receiver, SolarPACES (2004)
- [10] Heller, P., et al., Test and Evaluation of a Solar Powered Gas Turbine System, SolarPACES (2004)
- [11] ESTELA 資料, <http://www.estelasolar.eu/>
- [12] Richter, C., et al., Concentrating Solar Power Global Outlook 09, SolarPACES, Greenpeace, and ESTELA (2009).
- [13] Trieb, F., Global Potential of Concentrating Solar Power, SolarPACES (2009).



## 建物における再生可能「熱」エネルギーシステム

Renewable "Thermal" Energy Systems in Buildings

三浦 貴広 (東洋熱工業株式会社)

Takahiro MIURA (TONETS Corporation)

e-mail: takmiura@tonets.co.jp

### 1. はじめに

地球温暖化、化石燃料枯渇などにより、再生可能エネルギーが注目を集めている。図1に示すように、世界のエネルギー消費の約78%は化石燃料であり、再生可能エネルギーは19%、原子力は約3%である[1]。このように、エネルギー消費は化石燃料に大きく依存しており、地球温暖化対策のためには、今後の再生可能エネルギー利用拡大が不可欠である。

弊社は、空調衛生設備施工会社として、様々な再生可能エネルギーが導入された建物の施工に携わってきた。その施工経験を交えながら、最近の建物に導入された再生可能エネルギー技術（地中熱ヒートポンプ、太陽光発電、雪冷房、木質ボイラ）を紹介する。

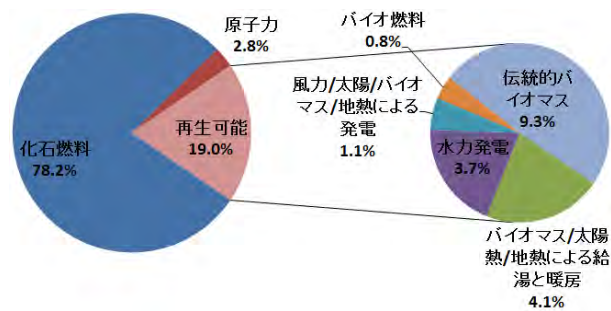


図1 世界の最終エネルギー消費における再生可能エネルギーの割合 (2011年) [1]

### 2. 地中熱ヒートポンプ

地中熱利用が再生可能エネルギーであることは、我が国ではあまり認識されていない。地中熱とは、おおそ地下200mより浅い地盤に賦存する温度が数十℃以下の低温の熱エネルギーであり、その起源のほとんどは太陽エネルギーである。

一般に、深さ10mより深い地点の温度は、その地域の年平均気温よりも約1~2℃高い温度で、ほぼ一定温度となる不易層が存在する。そのため、

外気よりも夏期は低温、冬期は高温となり、ヒートポンプによる冷暖房に対して、有効な温度環境である。

地中熱ヒートポンプの問題点としては、掘削コストが高いこと、空気熱源ヒートポンプと比べて実績が少ないことが挙げられ、今後の普及による改善が望まれている。

地中熱ヒートポンプシステムは、密閉型と開放型の二つに分けられる。密閉型は、熱交換器を地中に埋設または湖沼などに沈めて、間接的に熱利用するものである。一方、開放型は、地下水や湖沼の水を汲み上げて地上のヒートポンプの熱源に直接利用するものである[2]。

#### 2.1 密閉型地中熱ヒートポンプ

密閉型は、熱移動が地盤内の熱伝導によるため熱交換器が比較的大きくなってしまいが、地下水が利用できなければならない開放型よりも適用範囲が広い。

密閉型は地中熱交換器の埋設方法により垂直方式と水平方式に分けられる。垂直方式では地下数十~百数十mをボーリングするボアホール(Bore-hole)方式が代表的であるが、建物の基礎杭を利用する方式もあり、掘削コスト低減が望めるため注目されている。水平方式は、地面から1~2m程度の深さに熱交換器を埋設する方式で、施工コストは比較的安い採熱能力が低い[2]。

水平方式の密閉型地中熱ヒートポンプシステムが採用された事例を紹介する。東京電機大学東京千住キャンパスは、近隣に河川があり、地下水位が高く、GL (Ground line : 地盤面) -2,000mm程度の掘削で水が湧き出してくる。地下水流れ(移流)による見かけ上の有効熱伝導率上昇の効果は大きく、GL-2,000mm付近の有効熱伝導率は約2.0 W/(m・K)と比較的高い値であった。以上の事から、本敷地の特性を生かし、図2、図3に示すような水平埋設方式を採用している。GL-2,000mmと

GL-1,000 mmの2段で地中熱採熱コイルを埋設し、ヒートポンプによって床冷暖房を行っている[3].

### 2.2 開放型地中熱ヒートポンプ

開放型は、地下水が豊富にあり、条例等により地下水の利用が制限されていない地域である必要があるが、少ないイニシャルコストで多くの地中熱を得ることができる[2], [4].

井水熱利用ヒートポンプを導入したA病院の熱源システム概略図を図4に示す. 敷地内には豊富な井水が存在しており、15~20℃と安定した温度の井水は一度井水槽に溜められる. 冷房、暖房または給湯を行う各種ヒートポンプの運転により井水槽の温度が上昇もしくは下降した際に、一定温度を保つように井水の汲み上げを行う. また、利用後の井水は隣接する河川に放流される[5].

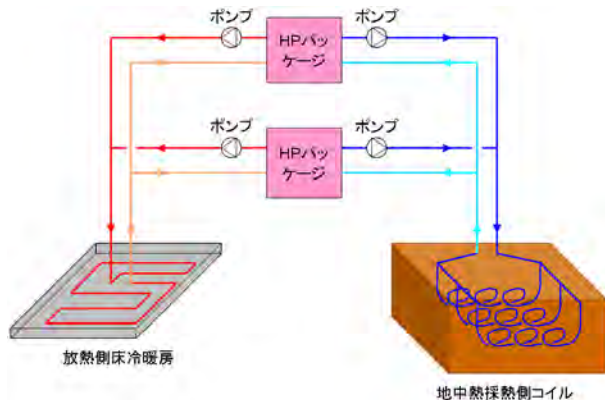


図2 地中熱利用床冷暖房システム概略図(東京電機大学東京千住キャンパス)[3]



図3 地中熱採熱側コイル敷設状況

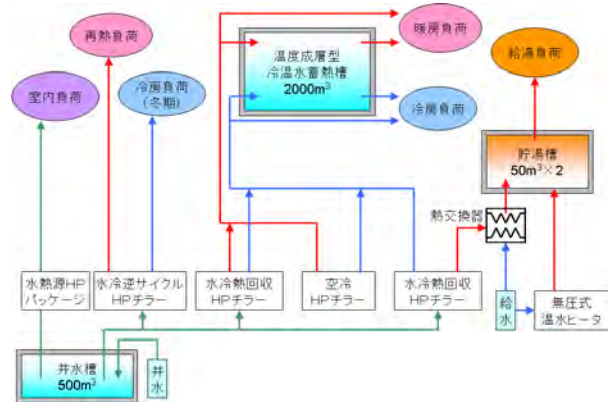


図4 井水熱利用熱源システム概略図(A病院)[5]

### 3. 太陽光発電

太陽光発電が再生可能エネルギーであることは周知のことであろう. ここでは、太陽電池パネルを設置する際の留意点を中心に述べる.

一般に、固定型太陽電池パネルの最適な傾斜角度は、設置地点の緯度よりやや小さい値となる. 東京では、方位角は真南、傾斜角度は30°付近が最も発電量が多くなる. ただし、方位角真南±45°以内、傾斜角度15~45°の範囲であれば、最大発電量からの低減量が10%以内であるため、その他の要因を踏まえて設置角度は決定される. 太陽電池パネルは面積が広く薄いため、風の影響を受けやすい. したがって、これに耐えられる強度にする必要がある. また、入射した太陽光は季節、時刻によって様々な方向に反射するため、この反射光が周囲の人間の活動・生活に悪影響を及ぼさないように注意する必要がある.

太陽電池パネルを屋上に設置する場合には、夏期において副次的にそのパネルがつくる日影によって屋根表面の温度を下げ、外部からの通過熱量を減少させる効果も期待できる[6].

実際の建物に太陽電池パネルを設置した事例を紹介する. 前述の東京電機大学東京千住キャンパスでは、表1に示す太陽電池モジュールを屋上に設置している. 1号館と4号館の太陽電池は、パワーコンディショナ(PCS)を介して商用電源と系統連系している. 2号館の太陽電池は、発電した直流電力を交流に変換せず、そのままLED照明へ送電することで変換ロス削減を行っている[3].

A病院では、地上レベルに20kWの太陽電池パネルを設置することで来院者にも見やすいようにしている[5].

表 1 太陽電池の仕様（東京電機大学東京千住キャンパス）[3]

	1号館	2号館	4号館
太陽電池種類	多結晶シリコン	単結晶シリコン	単結晶シリコン
モジュール最大出力	92.5W	84.0W	84.0W
モジュール数	120	60	120
最大出力	11.1kW	5.0kW	10.1kW
出力制御	PCS 10kW 系統連系	直流制御 4.5kW 直流送電	PCS 10kW 系統連系

#### 4. 雪冷房

雪国においては、雪は厄介な存在であるが、夏に雪があれば冷房などに利用することができる。雪冷房では、夏までに雪を貯蔵できる広い断熱施設が必要であるが、冷熱をつくるランニングコストが抑えられる。夏暑く、冬は雪が多い日本の気候は世界的にも珍しく、全国には既に100箇所以上の雪氷冷熱利用施設が稼働している[7]。

雪冷房は、空気と雪の熱交換を行う全空気式と、水と雪の熱交換を行う冷水循環式に大別される。いずれの方式でも、時間と共に雪の形状が変わるため、伝熱の取扱いが難しい。特に雪が少なくなった場合には、熱交換量が低下する。

##### 4.1 全空気式

全空気式は雪塊表面と送風空気の間で直接熱交換を行い、冷風を取得する方式である。全空気式では、空気中の汚染物質である塵埃や各種有害ガスが雪表面で吸収除去されるフィルタ効果が期待できる。得られる冷風温度が低すぎる場合は、空調室内の還気と冷風を混合することで温度調節が可能である[7-10]。

図5に、JAえちご上越わかば地区雪室低温貯蔵施設の全空気式雪冷房システム概略図を示す。熱源となる雪は春先に雪倉庫へ貯蔵される（図6）。5月初旬から貯蔵した雪山に、天井面設置の給水管から散水して、冷却用空気の風洞を雪山の上から床ピット（図7）までの間に開ける（図8）。冷却用空気をこの風洞に流して、玄米保管用冷房（5℃）に利用する（図9）。この方式では、かなりの量の冷水が得られるが、これを後述の冷水循環式に用いた事例も存在する[9]。

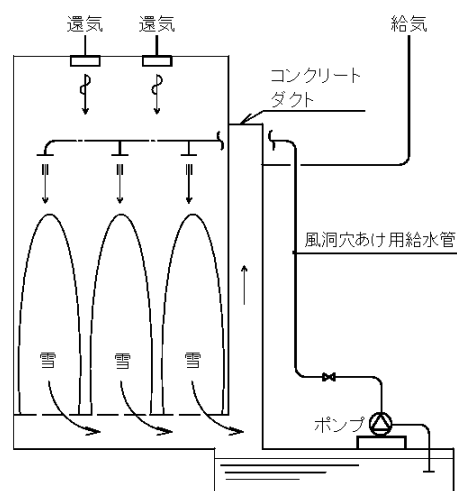


図5 全空気式雪冷房システム概略図（JAえちご上越わかば地区雪室低温貯蔵施設）



図6 雪倉庫内貯蔵状況



図7 床ピット



図8 風洞用穴あけ作業



図9 熱交換後の状況

#### 4.2 冷水循環式

冷水循環式は、雪塊に水を直接接触させ冷水を取得し、その冷水を冷熱源に利用する方式である。雪と水の熱交換なので全空気方式よりも熱交換速度が速いが、融雪水に含まれる不純物を除去する必要がある。

図10に、札幌市モエレ沼公園ガラスのピラミッドの冷水循環式雪冷房システム概略図を示す。雪倉庫（図11）の雪に散水して（図12）、得られた融解水は融解水槽に貯留される。融解水ポンプによりプレート型熱交換器に送水して、間接的に空調機に冷熱が供給され、ピーク時（7, 8月）の冷房に利用される。安定した冷水温度の確保および雪の不要な融解の抑制を考慮して、融解水槽は一定の熱容量をもった水蓄熱槽の機能も持たせ、水槽温度が6°C以下の場合、雪に散水されずに循環する。また、雪倉庫内の水槽落ち込み末端部に高さ25cmの越流堰を設

けて、雪塊を常に水没させて安定かつ均等な雪の融解とともに、砂利など異物の流入防止を図っている [11], [12].

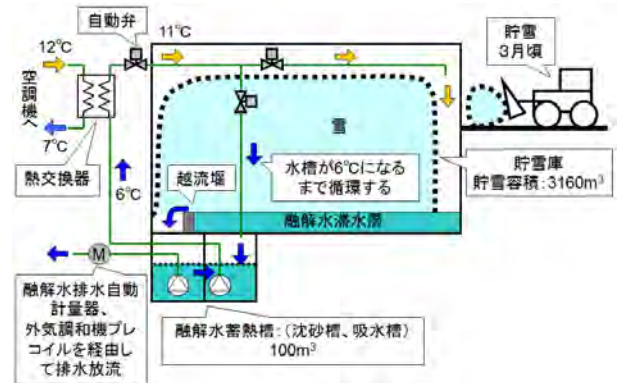


図10 冷水循環式雪冷房システム概略図（札幌市モエレ沼公園ガラスのピラミッド） [11], [12]



図11 雪倉庫



図12 散水実験状況

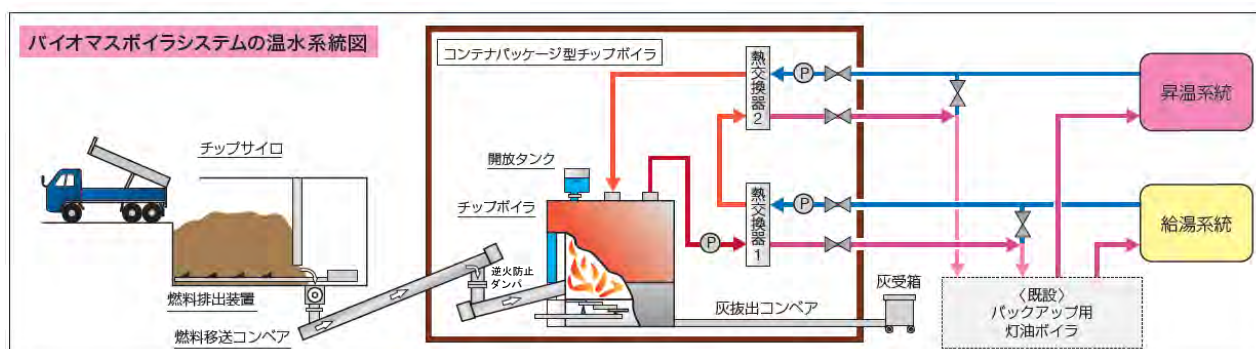


図13 木質チップボイラシステム概略図 (なごみの里)

## 5. 木質ボイラ

バイオマス利用には木材、生ごみ、糞尿などを発電や熱利用に用いるものが挙げられるが、弊社が携わったバイオマス利用の多くは木質ボイラであるため、木質ボイラに関して述べることにする。

現在、ボイラの燃料は化石燃料が一般的だが、カーボンニュートラルによる二酸化炭素排出量削減効果、安価な燃料コストなどにより、木質ボイラが注目されている。ボイラ効率も80%以上と、化石燃料ボイラと比較しても遜色のない木質ボイラが開発されている。しかしながら、木質燃料のエネルギー密度が小さいため広い燃料保管場所が必要、灰処理が必要、温度制御性の悪さなどのデメリットも存在する。

木質ボイラは燃料の形状によりペレットボイラ、チップボイラと薪ボイラに大別される。ペレットボイラは、木材を粉砕、乾燥、成形したペレットを燃料とするため、燃料が均一で安定な燃焼が得られる。チップボイラは、木材を破砕または切削したチップを燃料とするため、燃料コストが安い。薪ボイラは、さらに燃料コストが安い、燃料の自動投入ができない[13]。

島根県にある温泉施設「なごみの里」に採用された木質チップボイラシステム概略図を図13に示す。運搬車両で搬入された木質チップは、まずサイロで一次保管される。サイロに保管された木質チップは燃料排出装置(プッシュフィーダ)、燃料移送コンベアを経て、自動で木質チップボイラに供給される。木質チップボイラで加熱された温水は2つの熱交換器に直列で接続され、給湯と昇温に利用される。灯油ボイラは木質チップボイラのバックアップで使用され、能力の足りない時に起動する。

この木質チップボイラは、乾燥工程を含んでいる

ため、湿量基準含水率50%までの木質チップを使用する事が出来る。また、施設周辺に木質チップ製造業者が存在し、輸送コストが抑えられている。

日常管理としては、木質チップサイロの残量確認、木質チップの補給、ボイラ本体の灰受けボックスと集塵機の灰出しなどを行う。

## 6. おわりに

最近の建物に導入された再生可能エネルギーシステムとして、地中熱ヒートポンプ、太陽光発電、雪冷房と木質ボイラについて述べた。いずれのシステムも自然エネルギーを利用するため、地域性の影響があり、完全に汎用なシステムは造りにくい。汎用性と専用性をうまく使い分け、全体のシステムとして、より良いモノにしていくことが重要ではないだろうか。

## 参考文献

- [1] REN21, Renewables 2013 Global Status Report, <http://www.ren21.net/>, (2013).
- [2] 北海道大学地中熱利用システム工学講座, 地中熱ヒートポンプシステム, オーム社, (2007).
- [3] 井山義信, 中村弘和, 関根雅文, 他 11 名, 東京電機大学東京千住キャンパスの省 CO2 実現に向けた取組み その1~その3, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2012) 1619-1630.
- [4] 大谷具幸, 他 7 名, 地下水利用型地中熱利用の導入可能性評価の試み — 遮水層の連続性と地下水水質に関する検討 —, 応用地質, **51-6** (2011) 257-264.
- [5] 塚見史郎, 相川慎夫, 他 4 名, 次世代型グリーンホスピタルの建築環境性能検証に関する

- 実践研究 第1報～第2報, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2012) 1519-1526.
- [6] 櫻井賢一, 太陽光発電 — パネルの設置方法と建物外皮負荷低減, 空気調和・衛生工学, **81-7** (2007) 539-544.
- [7] 媚山政良, “夏の雪” 雪氷冷熱エネルギー資源, 日本機械学会誌, **108-1045** (2005) 930-931.
- [8] 伊藤親臣, 媚山政良, 岸浪紘機, 伊東宏城, 本間弘達, 飯嶋和明, 浸水式雪冷房システムの開発とその特性, 日本雪工学会誌, **24-2** (2008) 111-121.
- [9] 媚山政良, 諸岡雅美, 雪のまちみらい館と雪冷房システム, 日本雪工学会誌, **15-4** (1999) 292-295.
- [10] 飯嶋和明, 媚山政良, 王愛栄, 小関多賀美, 近藤昌人, 雪冷房によるアンモニアガスの吸収効果, 日本機械学会論文集 B 編, **63-614** (1997) 3390-3395.
- [11] 岡敦郎, 石川弘道, 石川昌司, 札幌市モエレ沼公園ガラスのピラミッドにおける空調設備の運転実績 自然エネルギー(大気, 雪)を利用した空調設備(第1報)概要紹介, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2004) 1703-1706.
- [12] 岡敦郎, モエレ沼公園ガラスのピラミッドにおける自然との融和を図った空調システム, 北海道建築指導センター センターレポート, **160** (2007) 6-9.
- [13] 福岡県森林林業技術センター, 木質ボイラー導入の手引き, 大同印刷, (2011).
-

## ヒートパイプ BACH による浅層地中熱源利用の試み

*Attempts for Utilizing Shallow Underground Heat Source by Heat Pipe BACH*

永井 二郎 (福井大学)

Niro NAGAI (University of Fukui)

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

### 1. はじめに

今回、「再生可能「熱」エネルギー利用技術」特集の記事の一つとして、地中熱利用に関して執筆する機会を頂いた。本来は、地熱発電や地中熱利用ヒートポンプシステム等を含めた地中熱あるいは地熱利用技術の現状と課題を整理して学会会員の皆様にお届けすべきところであるが、筆者にはその知見や能力が無く、本稿はあくまでも、筆者が近年関与した地中熱利用研究開発事例を紹介するに留め、範囲の狭い内容となっている。ご了承願いたい。

まず、筆者が地中熱利用技術に係わるきっかけとなった“水循環による地中熱利用融雪システム”の概要を紹介し、次に福井県オリジナル技術の“新型ヒートパイプ BACH”の概要や特徴を述べる。続いて、ここ数年間、福井県内で実証試験を行ってきた3つの地中熱利用実証試験概要を述べる。

- ✓ 地下埋設防火水槽の鉄蓋周囲融雪・凍結防止
- ✓ 苛性液タンク凍結防止システムの省電力化
- ✓ 無動力空調システム (夏季冷却, 冬季加熱)

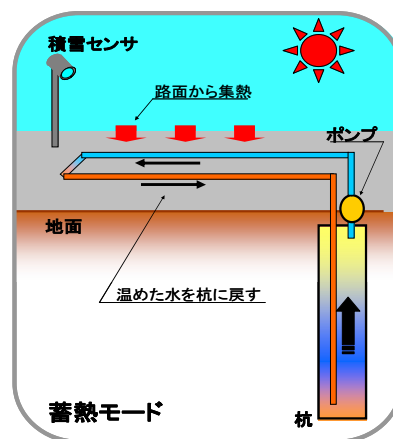
いずれも、ヒートパイプ BACH により浅層地中熱源と地上間を無動力で熱輸送させている。

### 2. 水循環による地中熱利用融雪システム

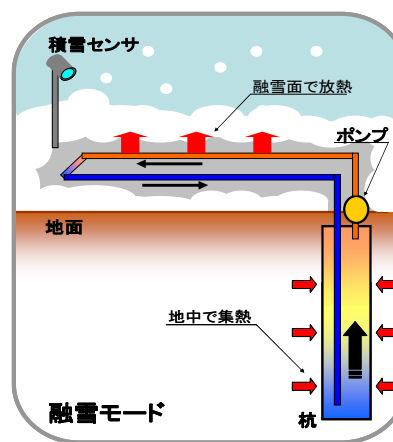
#### 2.1 閉ループ水循環による融雪システム [1~4]

筆者は、2007年本誌の「基礎杭や群杭で地中に熱を蓄えた融雪と空調」[1]と日本機械学会誌の「地中熱・太陽熱を利用する融雪システム」[2]を分担執筆した。そこで述べたように、日本では地表から地下約5m~数十mの範囲の浅層地中温度は四季を通じてほぼ一定であり、地表面での年間熱収支により、年間平均気温プラス1~2℃となる。福井は雪国としては16℃弱と比較的高い。さらに、福井平野は沖積平野に位置し粘土・砂・シルトの軟弱層が15~40mあり、ビルや橋には基礎杭が使われる。この地盤は約1.5W/(m・K)の熱伝導率だが、地下水で満たされ容積比熱は約3MJ/(m<sup>3</sup>・K)と大きい。

このような福井の気象と地盤を活用して、図1に



(a) 夏季：太陽熱を地中に蓄熱



(b) 冬季：地中熱を融雪に利用

図1 地中熱・太陽熱を利用する融雪システム

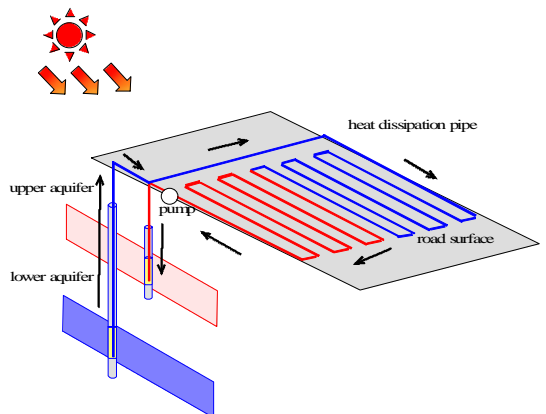
概要を示す「地中熱・太陽熱利用融雪システム」を開発し、一部社会実装を実現した[3, 4]。路面下の細管と地中に埋設した熱交換杭により閉ループ流路を構成し、その中に純水あるいは不凍液を充填する。夏季は太陽熱により路面温度が上昇し、水循環させることにより路面の太陽熱を地下数m~数十mの地中に蓄熱する。冬季は、降雪あるいは積雪センサーによりポンプ運転を制御し、地中熱を路面に輸送することで融雪を行う。これまで福井県内での社会実

装に加えて札幌市での実証試験にも成功した。融雪能力（＝路面での放熱熱流束）はシステムの設計により可変であるが、実装されたシステムでは 100～300W/m<sup>2</sup> を実現した。初期コストは数万円/m<sup>2</sup> オーダーであり、今後社会実装の拡大を期待している。

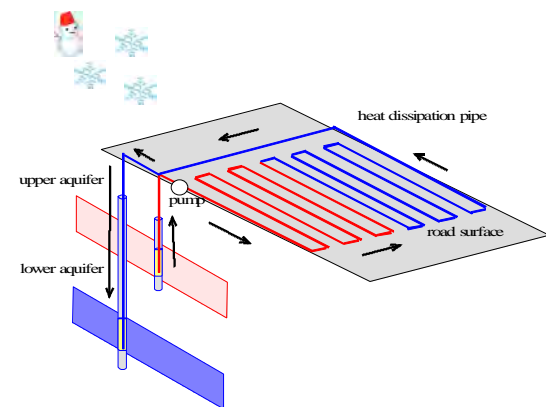
## 2.2 帯水層間の水循環による融雪システム [5]

2.1 で述べた融雪システムでは、少なくとも地下20～30m まで熱交換杭を埋設する必要があるが、初期コストの低減にも限界がある。また閉ループの水漏れ対策等の課題もある。そこで、日本の主要都市が多く存在する沖積平野の帯水層に着目し、異なる深さの帯水層間で地下水を循環させることで融雪システム実現を目指した。そのシステム概要を図2に示す。夏季は、下層の帯水層から地下水を汲み上げ、路面下で太陽熱を吸収し高温になった地下水を上層の帯水層内に放流する。冬季には、上層の比較的高温の帯水層地下水を汲み上げ、路面下で融雪に活用し、低温になった地下水は下層の帯水層に放流する。

2011年～2012年にかけて、福井市内で本システムの実証試験を行った[5]。上層帯水層が地下6～10m、



(a) 夏季：太陽熱を上層帯水層に蓄熱



(b) 冬季：上層帯水層地中熱を融雪に利用  
図2 帯水層間地下水循環型融雪システム

下層帯水層が地下11～16mの福井市内個人住宅地において、駐車場融雪を目的として施工・計測を行った。その結果、夏季は上層帯水層温度が25℃まで上昇するものの、冬季（11月末）では18℃まで低下しており、季節間蓄熱としては不十分である。ただ、福井の平均地中温度16℃よりは高温であり、冬季の融雪能力は約300W/m<sup>2</sup>を示し、良好な融雪効果の実証された。また当初心配されたポンプや配管目詰まりのトラブルは発生しなかった。

## 3. 新型ヒートパイプBACHの概要

ヒートパイプは、無動力で高温部から低温部へ効率よく（見かけの熱伝導率が非常に大きく）熱輸送するデバイスである。現在、CPU冷却等で広く用いられるヒートパイプは、ウィック式あるいはサーモサイフォン式ヒートパイプと呼ばれるもので、高温部での作動液蒸発と低温部での凝縮により熱輸送を実現している（詳しくは、例えば「伝熱」2012年10月号の「古くて新しいヒートパイプ」特集号を参照）。筆者は、後述の通り2006年より防火水槽融雪システムに関する研究を始めたが、その際に初めてサーモサイフォン式ヒートパイプを購入し使用した。その簡易な構造と高い性能に感動した記憶がある。

その2006年とほぼ同時期の2007年に、福井県敦賀市にある（財）若狭湾エネルギー研究センターが、一風変わったヒートパイプを発明・出願した（その後、特許として確定）[6]。図3にその基本的な概念図を示す。ループ状の密閉配管内に作動液を比較的多く充填する。高温部に設置した「気泡生成部」から、蒸気泡が連続的に生成され、その泡の浮力によ

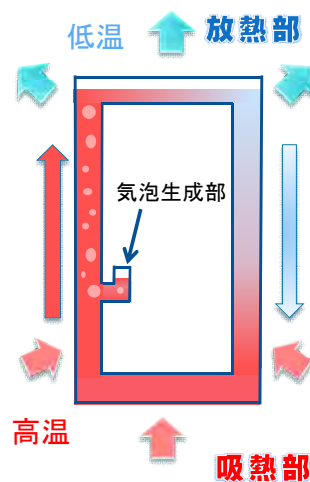


図3 ヒートパイプBACH（ボトムヒート）



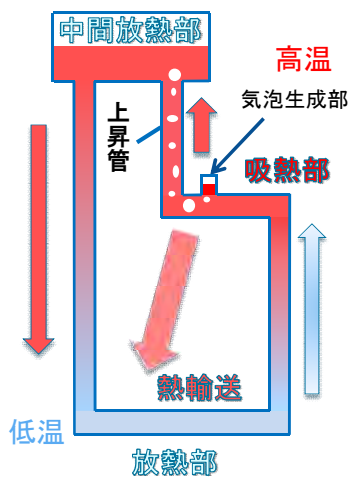


図4 ヒートパイプ BACH (トップヒート)

り液循環が誘起され、潜熱輸送+顕熱輸送により熱輸送を実現する。「気泡生成部」で生成された蒸気泡は、放熱部で凝縮し、下降管に流入することはない。

筆者は2007年以降、若狭湾エネルギー研究センターや県内中小企業と共に、この新しいヒートパイプの共同研究・開発を行い、関連特許を出願してきた[7,8]。また、当時の若狭湾エネルギー研究センターの新宮所長と相談し、このヒートパイプを「気泡駆動型循環式ヒートパイプ (Bubble-Actuated Circulating Heat pipe) 略称: BACH」とネーミングした。この BACH について、大変有り難いことに、前述の伝熱「古くて新しいヒートパイプ」特集号に大串先生が取りあげて頂いた[9]。また、図3に示したようなボトムヒート (下部吸熱・上部放熱) 状態 BACH の基本的な熱輸送特性や「気泡生成部」の基礎理論は、参考文献[10]を参照願いたい。

通常のウィック式あるいはサーモサイフォン式ヒートパイプでは、トップヒート (上部吸熱・下部放熱) では性能が激減してしまい、少なくとも全長が数 m では作動しない。後述のように地中熱源利用を考えると、数 m オーダーで動作するヒートパイプが必要である。2007年の BACH 発明当初から、上手く工夫すれば、図4に示すトップヒートも BACH は実現できるのではないかと期待していた。つまり、BACH は気泡の浮力を用いるため、どうしても気泡が上昇する部分が必要である。そのため図4に示すように中間放熱部を設けて、泡ポンプ効果により液循環駆動力を得て、後はサイフォンの原理に従い、下部の放熱部までは液体のみが循環するようにした。その結果、トップヒート状態で BACH が作動するこ

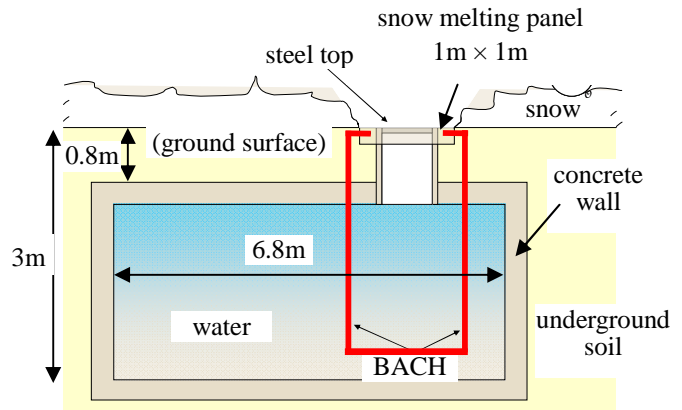


図5 防火水槽鉄蓋周囲融雪・凍結防止システム

とが確認され、その熱輸送特性把握や伝熱モデル構築を行った[11]。現在、その汎用的な熱設計ツールの完成に向けて基礎研究を行っている。

#### 4. 地下埋設防火水槽の鉄蓋周囲融雪・凍結防止

普及しているコンクリート製防火水槽は、図5に示すように地下数 m の位置に埋設されている。この防火水槽に関連して、寒冷積雪地の火災現場では、積雪により地表面の吸管投入孔 (鉄製) の場所発見が遅れたり、鉄製の蓋が凍結して、消火活動が遅れが生じる可能性がある。2006年から筆者は、(株)ホクコンとの共同研究として、サーモサイフォン式ヒートパイプにより防火水槽内の水 (冬季は10°C程度) から吸熱し鉄蓋周囲で放熱することで、鉄蓋周囲の局所的な融雪と鉄蓋の凍結防止が可能かどうか、実証試験を行った。その結果、比較的気象条件が緩やかな福井県越前市では、ヒートパイプにより凍結防止が可能で局所的な融雪効果も示された[12]。しかし、より寒冷で豪雪地域での適用を考えると、ヒートパイプの高性能化が必要とされた。そこで前節で述べた BACH の適用を検討することとした[13,14]。

図5は、地中の防火水槽と設置された BACH の位置関係を示す概要図である。図6は、実際に設置し

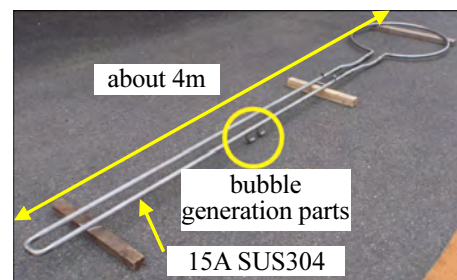


図6 本システムで用いた BACH の写真

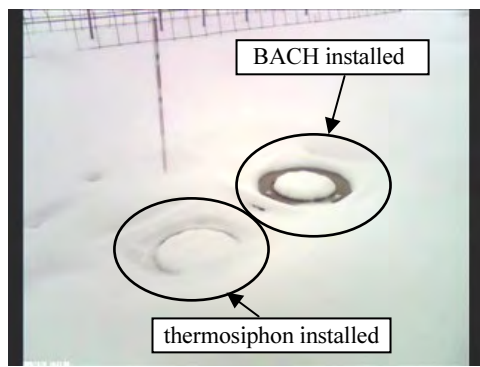


図7 2009年12月福井県大野市での融雪状況

た BACH の写真である。BACH の全長は約 4m，配管は 15A の SUS304 製で，(株) 共和製作所の設計製作品である。「気泡生成部」は水槽水面より少し下の位置になるよう設置し，作動液 (HFC-134a) は気泡生成部より少し上部に液面が位置するだけ充填した。この作動液量では，図 3 に示したような液循環は起こりえず，あたかもサーモサイフォン式ヒートパイプが 2 本ある状態に近い。しかし，実験室における熱輸送性能把握実験の結果，BACH の熱輸送量はサーモサイフォン式ヒートパイプ 2 本分よりもさらに 2 倍以上を示した[12]。その要因は明確にされていないが，恐らく，「気泡生成部」が片方の配管に設置されており，左右非対称になっているため，作動液が BACH 内部で振動しやすい状況にあり，振動する液面により管内壁面に薄液膜が形成され，良好な蒸発が起きているためと考えている[13]。

図 7 は，豪雪地域である福井県大野市に設置した本システムの融雪状況の写真である。この日の気象条件は，最低気温 $-1.7^{\circ}\text{C}$ ，最高気温 $3.0^{\circ}\text{C}$ ，自然最大積雪深 60cm であった。図に示すように，円形の BACH 放熱部真上部分の雪が融けて，鉄蓋の位置が容易に分かる。図には示さないが，鉄蓋周囲の温度も  $0^{\circ}\text{C}$  以上を保ち，凍結防止効果が確認できた。

並行して，本システム全体の温度場計算プログラムを作成した。気温や日射量等の気象条件と BACH の熱輸送特性を入力条件として，地表面での熱収支や地中熱伝導の計算を連動させた。福井県大野市，山形県山形市，岐阜県高山市，兵庫県和田山町の 4 地域について本システムの温度場を計算したところ，融雪効果と凍結防止効果が共に確認出来た。電力を一切用いず，寒冷積雪地における消火活動を阻害する要因を除去できるシステムとして，本年 4 月より (株) ホクコンの商品として販売が開始された。

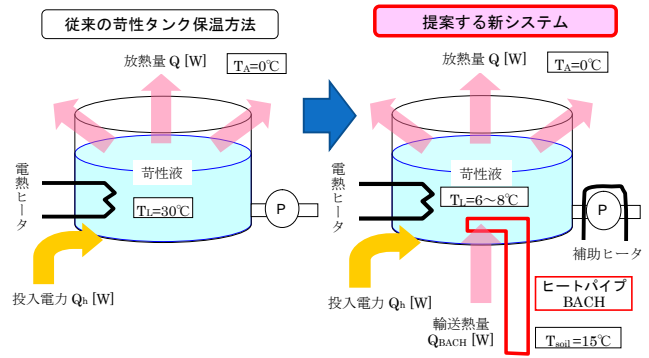


図 8 苛性液タンク凍結防止システム

### 5. 苛性液タンク凍結防止システムの省電力化

染色業等で用いられる苛性ソーダ液 (NaOH 水溶液) は，通常濃度 49wt% で地上タンク内に保管され，必要に応じてポンプで送液される。この苛性ソーダ液の凝固点が約  $5^{\circ}\text{C}$  であるため，図 8 左側に示すように，冬季の凍結を防ぐためにタンク内に電熱ヒーターを設置し約  $30^{\circ}\text{C}$  に保温されているが，この省電力化が課題となっている。まずはタンクの断熱が重要であり，その次に浅層地中熱の利用が考えられる。図 8 右側に示すように，ヒートパイプ BACH により無動力で地上タンクに熱輸送し，苛性ソーダ液の凍結防止が消費電力ゼロで実現できる可能性がある。ただし，これにはタンク液温に制限があり，BACH が作動するにはタンク液温が地中温度より低い条件でなければいけない。筆者は (株) フクセンとの共同研究として，2010 年から本システムの実証試験を行ってきた[7]。本稿では主に 2012 年度に行った試験結果を述べる[15]。

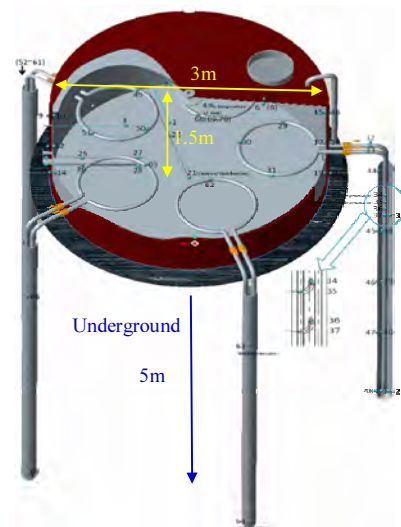


図 9 10<sup>3</sup>m 苛性液タンクと 5 本の BACH

図9は、実証試験全体の模式図である。10m<sup>3</sup>の苛性液タンク(直径約3m,高さ約1.5m)に5本のBACHが設置されている。タンク周囲の地中には、φ165mmの鋼管杭を埋設し、その内部に20Aステンレス管のBACH吸熱部(全長約5m)を設置した。このBACHも、4と同様に(株)共和製作所の設計・製作品である。鋼管杭内には水を充填してある。気泡生成部は地表から350,550mmの2箇所を設置した。作動液はHFC-134aである。タンク内には、5kWの電熱ヒーター(ON/OFF制御)も設置した。

2012年12月～2013年2月にかけて、苛性液設定温度を変更しながら、隔週でBACHのON/OFFを切り替えて温度および電熱ヒーター消費電力を計測した。苛性液温が10℃の場合は、地中との温度差が小さいためBACHの熱輸送量も比較的小さく、BACHのON/OFFによる消費電力の違いは明確には現れなかった。しかし、2013年2月に平均外気温が約2℃で2週間推移した間、完全に電熱ヒーターをOFFにした状態でも苛性液温は約7℃を保った。この結果から、本システムにより電熱ヒーター無しで凍結を防止できることが実証された。

### 6. 無動力空調システム(夏季冷却, 冬季加熱)

2.で述べた通り、地下5m～数十mの地中は年間を通じて温度一定(福井では約16℃)である。夏季の気温30数℃や冬季の気温0℃と地中温度の有意な差を考えれば、ヒートパイプを用いた無動力で緩やかな空調(夏季の冷却, 冬季の加熱)実現も、原理的には不可能ではないだろう。

筆者は、3.で述べたBACHの研究開発に参画する

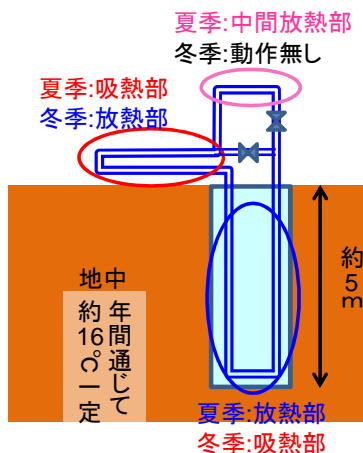


図10 BACHによる無動力空調システム概念図

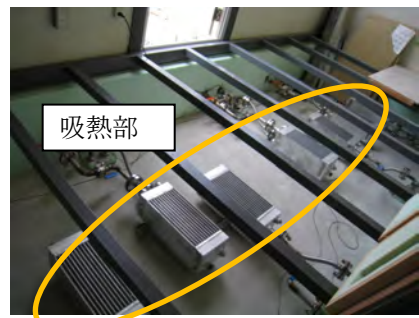
中で、図10に示すような「熱輸送方向切り替え可能BACH」を共同出願した[8]。図3や図4に示すように、BACHのボトムヒートとトップヒートは構成要素が一部異なるため、熱輸送方向に応じて別個に製作していた。そこで、2箇所での弁開閉操作によって、ボトムヒート状態とトップヒート状態を切り替え可能とする仕組みが考案された。この「切り替え可能BACH」を用いれば、図10に示すように1つの装置により、夏季はトップヒート状態で作動させ地上で吸熱・地中で放熱が実現し、冬季はボトムヒート状態で作動させ地中で吸熱・地上で放熱が実現する。

まずは、その「切り替え可能BACH」の熱輸送特性を把握するための試験を行った[16]。この試験は、図10に示す空調システムの事業化を検討する(有)松本鉄工所を代表として、複数企業と福井大学が参画した共同研究により実施した。使用したBACHは、4.と5.と同じく(株)共和製作所の設計・製作品である。配管材料や直径、作動液等は、4.と5.で用いたものと同様のものである。地中熱交換部の長さは、比較のため2m, 4m, 6mの3通りで行った。その結果、BACH1本あたり、トップヒート状態では最大で約300W、ボトムヒート状態では最大で約100Wの熱輸送能力を示した。ボトムヒート状態の方が性能が低下する理由は、ボトムヒートに弁切り替え後の作動液充填割合が100%に近いためである。

この試験結果をふまえて、図11に示すような小屋



(a) 小屋の側面写真



(b) 小屋の床下写真

図11 無動力空調システムの実証用小屋

を2013年3月に設けた。この小屋には、図10に示した切り替え可能BACHを8本設置した。小屋は2つあり、1つは地中熱交換長さが4m、もう1つは6mである。室内から床下へ送風機で空気を送り、床下で熱交換した空気が室内に還流する仕組みとなっている。今夏の気象条件下で、室内の気温が35～40℃と高温になった場合、BACHの作動(=冷却効果)が確認出来た。今後、夏季冷却効果の定量的な評価と、冬季加熱効果の実証試験を行う予定である。

## 7. おわりに

以上とりとめもなく、浅層地中熱を利用するシステム(特に、ヒートパイプBACHを用いたもの)の実証試験例を紹介した。浅層地中熱は、深層の地熱と異なり、一次エネルギー源とは言い難い。浅層地中熱は、自然状態では地表での熱収支で温度が定まり、温熱源として地上で利用すれば地中温度は低下し、冷熱源として利用すれば地中温度は上昇するため、あくまでも巨大な顕熱蓄熱層と捉えるべきものである。その蓄熱層を有効に利用出来るシステムの実現ため、多くの方のご意見・ご批判を参考にしながら、今後も地道に研究開発を続けていきたい。

## 参考文献

- [1] 宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 基礎杭や群杭で地中に熱を蓄えた融雪と空調, *伝熱*, **46 - 196** (2007), pp.38-41.
- [2] 永井二郎, 宮本重信, 竹内正紀, 地中熱・太陽熱を利用する融雪システム, *日本機械学会誌*, **112 - 1087** (2009), pp.456-457.
- [3] 永井二郎, 宮本重信, 大澤良和, 五十嵐俊介, 柴田和夫, 竹内正紀, 季節間蓄熱を援用した地中熱融雪の数値シミュレーション, *日本機械学会論文集(B編)*, **76 - 767** (2010), pp. 1090-1101.
- [4] Nagai, N., Takeuchi, M., Yamahata, S., Miyamoto, S., Yamazaki M., Geothermal Snow-Melting System Utilizing Solar Heat Storage into Underground through Seasons, *Proc. 7th International Conference on Snow Engineering*, (2012), pp.337-352.
- [5] 塚本充紀, 永井二郎, 宮本重信, 建石豊, 地下水循環型の季節間帯水層蓄熱・融雪システムの実証試験, *日本機械学会2012年度年次大会講演論文集*, G060053 (2012), pp.1-4.
- [6] 新宮秀夫, 大谷暢夫, ループ型ヒートパイプ, 特許第4771964号 (2011).
- [7] 永井二郎, 高野武史, 中山修一, 出所敏美, 池田倫史, タンク液貯留の冷却防止装置, 及び保温機能を備えた液貯留タンク, 特願2011-035017.
- [8] 鳥取章二, 永井二郎, 熱輸送方向を切り替え可能なヒートパイプ, 特願2011-075859.
- [9] 大串哲朗, 各種熱輸送デバイス, *伝熱*, **51-217** (2012), pp.39-46.
- [10] Nagai, N., Iwamoto, A., Onishi, T., Shingu, H., Advances and Opportunities in Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe (BACH), *Frontiers in Heat Pipes*, **1 - 2** (2010), pp.1-7.
- [11] 永井二郎, 浅野真臣, 鳥取章二, 気泡駆動型循環式ヒートパイプ(BACH)のトップヒート化と熱輸送特性, *日本機械学会2011年度年次大会講演論文集*, G060023 (2011), pp.1-5.  
Nagai, N., Asano, M., Tottori, S., Development of Top-Heat Type of Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe (BACH) and its Heat Transport Characteristics, *Proc. 3rd International Forum on Heat Transfer*, (2013), pp.1-3.
- [12] 永井二郎, 中野哲成, 竹内正紀, 前川義和, 谷口晴紀, ヒートパイプを用いた防火水槽鉄蓋周辺融雪システムの検討, *日本冷凍空調学会論文集*, **27 - 3** (2010), pp.271-279.
- [13] 永井二郎, 鈴木健介, 前川義和, 谷口晴紀, ヒートパイプ BACH を用いた防火水槽融雪システムの検討, *第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集*, **I** (2010), pp.247-248.
- [14] 永井二郎, 三田村拓哉, 前川義和, 谷口晴紀, ヒートパイプ BACH を用いた防火水槽鉄蓋周辺融雪システムの検討, *第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集*, **II** (2013), pp.428-429.
- [15] 永井二郎, 計榮嬴, 高野武史, 出所敏美, ヒートパイプ BACH による浅層地中熱利用液体タンク保温補助システム, *日本機械学会第18回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集*, A233, (2013), pp.245-246.
- [16] 塚本充紀, 鈴木恵祐, 永井二郎, トップ・ボトムヒート切替可能 BACH の熱輸送特性, *日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会講演論文集*, 1108, (2013), pp.1-2.

## インペリアル・カレッジ・ロンドンでの滞在記

*Diary from Imperial College London*

後藤田 浩 (立命館大学)

Hiroshi GOTODA (Ritsumeikan University)

e-mail: gotoda@se.ritsumei.ac.jp

立命館大学 学外研究員制度を利用して、2012年10月から英国インペリアル・カレッジ・ロンドン 化学工学科 (Department of Chemical Engineering, Imperial College London, United Kingdom) で Visiting Academics として研究活動を行っている。海外レターとして、インペリアル・カレッジ (IC) での研究滞在記をロンドンから発信させて頂く。

## 1. インペリアル・カレッジ・ロンドン

## 化学工学科

ロンドン中心部のサウスケンジントン (South Kensington) は高級住宅エリアとしてよく知られているが、1862年のロンドン万国博覧会の跡地に築かれた自然史博物館 (National History Museum)、科学博物館 (Science Museum)、Victoria 女王の夫 Albert 公に捧げられた演劇場 ロイヤル・アルバート・ホール (Royal Albert Hall)、Edward 7世によって設立された王立音楽大学 (Royal College of Music) など、英国の文化・歴史を発信するエリアでもある (図1)。その中心に位置する IC は、2007年にロンドン大学から独立し、Imperial College of Science, Technology and Medicine を正式名とした3学部 (医学部、理学部、工学部) 22学科から構成される理系大学となり、今日の英国のみならず世界を代表する研究拠点大学の地位を築いている。

私が所属する化学工学科は王立音楽大学の隣りに位置し (図1)、航空工学科と一緒の ACE Extension, Bone Building にある。Royal College of Science 化学科の後身である化学工学科の現在の教員数は37名であり、化学工学科は主に7つの研究グループを構成している。生体、マルチスケール、持続可能エネルギー、分子材料領域を対象とした化学工学のトピックを反応・触媒、材料、物性・解析、輸送・分離、システムをキーワードにして基礎から応用まで幅広く取り扱っている。私の専門は燃焼工学ではあるが、マルチスケールの相界面現象の物理を扱う研究グループ: Complex Multiphase System Group (CMSG) [3]で、相界面現

象の非線形ダイナミクスの理論的・数値的研究を進めている。

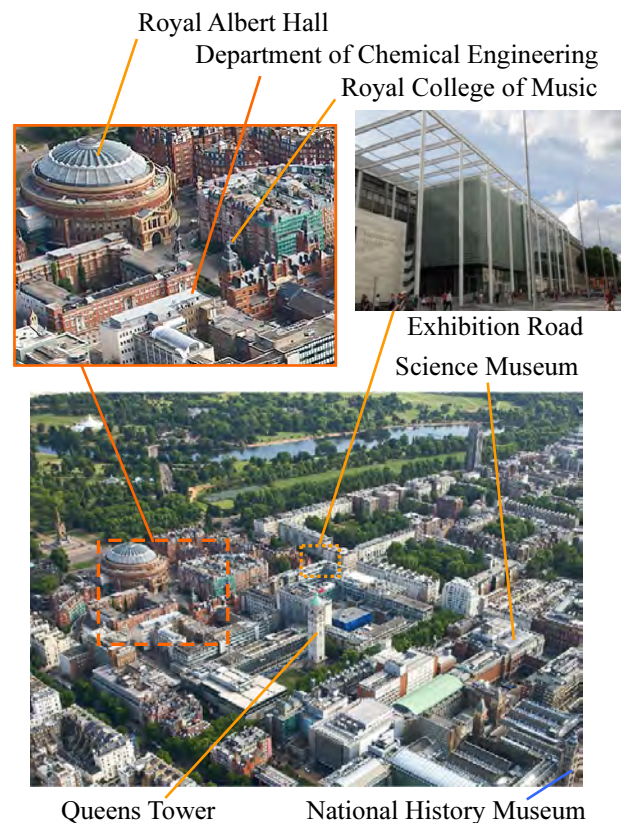


図1 South Kensington エリアと IC [1]

化学工学科は、英国政府だけでなく、石油会社からの多額の研究助成を受けて、CO<sub>2</sub>回収・固定化技術に関する研究・教育に力を注いでいる印象を強く受ける。ACE Extension の中央部にあるパイロットプラント設備 (図2) はCO<sub>2</sub>回収の研究のみならず、化学工学科の学生の実習にも使用されている。また、博士課程に在籍する学生の教育の一環として、各研究室から1名だけ選ばれた博士課程の学生が研究室を代表して、年に1度の研究室対抗プレゼンテーションで研究内容を競い合う。上位3名に優秀賞が授与され、博士課程の学生を奨励する教育が積極的に行われている。

図2 CO<sub>2</sub>回収用のパイロットプラント設備[2]

## 2. Complex Multi phase System Group での研究活動

Complex Multiphase System Group (CMSG) は、化学工学科では非常に珍しく、応用数学を専門とする Prof. Serafim Kalliadasis によって運営され、ポスドク4名、博士課程4名で構成されている(図3)。メンバーの国籍はイギリス、ドイツ、スイス、スペイン、ギリシャ、ロシア、インドなど様々で、非常に国際性が強く、私には大変居心地の良い研究環境である。グループ内では、密度汎関数理論を用いたコロイドやキャピラリーの濡れのダイナミクス、固液境界線近傍の流動ダイナミクス、複雑な気液界面の運動を記述する非線形発展方程式の分岐解の解明などを研究対象に、ミクロからマクロレベルまでの様々な相界面のダイナミクスを理論的・数値解析的に明らかにしようとしている。グループ内のミーティングは毎月行われ、Visiting Academics の身である私も例外ではなく、他のメンバーと同様に、研究の進捗状況をプレゼン形式で伝えている。メンバーの約8割が各国の数学科・物理学科出身であることから、グループ内のディスカッションでは難解な数式が多く、機械工学科出身の私には相当厳しいものもある。

図3 CMSG の集合写真  
(左端: Prof. Serafim Kalliadasis)

私は非線形発展方程式の解構造に関する3つの研究課題に携わっている。具体的には、

① 反応拡散系のパターン形成、高速の反応面を伴った位相乱流、固相と気相に挟まれる薄い液相の変形運動を記述する Kuramoto-Sivashinsky (KS)/generalized KS 方程式の解の時空構造(図4)[4], [5].

② 固相表面粗さから生成される外部ノイズの影響を考慮に入れた Noisy-KS 方程式の解の時空構造(図4)

③ 磁場 Rayleigh-Bénard 対流を記述する非線形力学系モデル[6]に関連した Coupled Lorenz 方程式の解の決定論的性質

の解明などを力学系理論をベースとした複雑系数理学の視点から取り組んでいる。研究課題①, ②については、Prof. Kalliadasis と Dr. Marc Pradas, ③については、数学科に所属する Sebastian Krumscheid も含めて共同で研究を進めている。

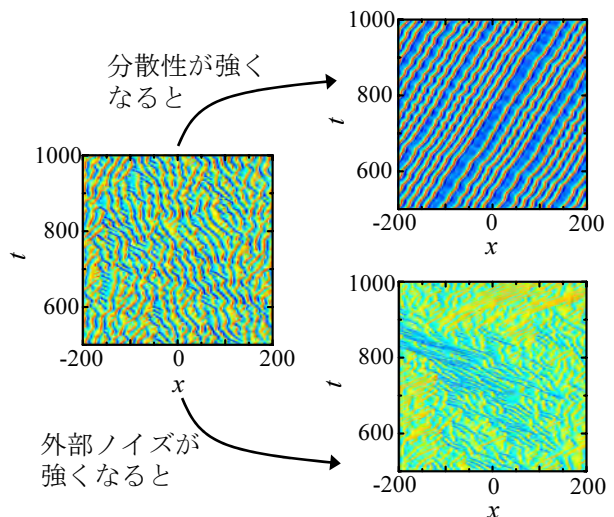


図4 gKS/Noisy-KS 方程式の解の時空構造

## 3. IC 滞在中における国内外での研究活動

上述の研究トピック以外に、輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の数値シミュレーション[7]や宇宙航空研究開発機構 航空本部 推進システム研究グループ 立花 繁 主任研究員との共同研究として進めているガスタービン燃焼不安定のダイナミクスの解明[8], [9]も IC 滞在中に進めている。輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の分岐構造に関する研究内容を11月にアメリカ サンディエゴで開催された第65回 米国物理学会 流体力学部門 年次大会 (65th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics) の「カオス、フラクタル、力学系II」の

セッションで発表した。このとき、同セッションで熱音響不安定を記述する非線形力学系の分岐構造を発表していた英国 ケンブリッジ大学 工学部 Dr. Matthew Juniper が、ガスタービン燃焼不安定の研究内容[8]を紹介していた[10]。そのことがきっかけとなり、1月にケンブリッジ大学 工学部燃焼グループの招待セミナーで約1時間の研究発表を行った(図5)。セミナー終了後にペンブローク・カレッジ (Pembroke College) の食堂で、Dr. Juniper と彼のポスドク、博士課程の学生らと一緒に昼食をとった。映画「ハリーポッター」の魔法学校の食堂のモデルとなったオックスフォード大学 グレート・ホールと同様に、私が昼食をとったカレッジの食堂の壁にもいくつかの肖像画が飾られており、Navier-Stokes 方程式を作った Stokes の肖像画(図5)が飾られていた。Stokes はアイルランド出身の数学者であり、このカレッジの卒業生であるということをこのとき初めて知った。

ケンブリッジ大学での招待セミナーから2ヶ月ほど過ぎた4月に、CMSG で進めている研究課題①の一部をリーズ大学で開催された第55回 英国応用数学会議 (55th British Applied Mathematics Colloquium) の「制御・カオス」のセッションで



図5 ケンブリッジ大学 工学部 燃焼グループ 招待セミナーでの研究発表と Stokes の肖像画

研究発表した[5]。応用数学の分野で研究発表を行ったのは、機械工学科出身の私にとっては初めての経験である(図6)。CMSG のグループでは毎年、この会議で研究発表を行うことが義務づけられており、私も例外ではなく、グループ内での発表練習を行い、当日の研究発表に臨んだ。

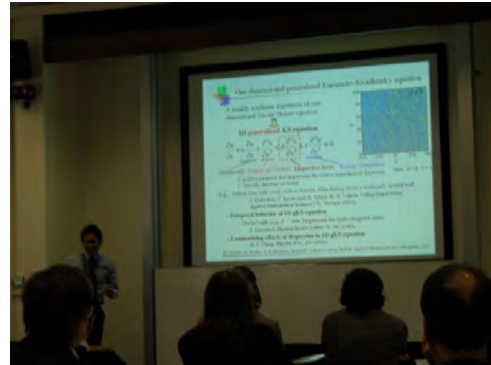


図6 第55回 英国 応用数学会議での研究発表

5月には、Prof. Kalliadasis と機械工学科の Prof. Yannis Hardalupas が世話人となり、ICの機械工学科の招待セミナーで約1時間の研究発表を行った(図7)。セミナーでは、力学系理論の基本的な考え方や燃焼不安定のダイナミクスの解明とその工学的応用の可能性を発表した[6-9], [11]。発表後の夜に、ベルギーのブリュッセルに入り、ブリュッセル自由大学 (Universite Libre de Bruxelles) で開催されたソルベー研究会 反応系のパターンと流れの不安定性 (Solvay Workshop, Patterns and Hydrodynamic Instabilities in Reactive Systems) に出席した。Scientific Committee を務めていた Prof. Kalliadasis が、年末頃からこの研究会での発表を私に強く勧めていたため、輻射熱損失の影響を受けた火炎面挙動の短期予測に関する研究内容を発表した(図8)。高校化学で習ったアンモニアソーダ法、いわゆるソルベー法の Ernest Solvay が設立した国際ソルベー協会 (National Solvay Institute) は、物理学者 Einstein, Schrödinger, Bohr, 湯川秀樹や数学者 Poincaré が研究発表したソルベー会議 (Solvay Conference) の他に、特定の研究領域を対象としたソルベー研究会を3年ごとに開催している。私が発表した研究会も数ある研究会の一つである。国際ソルベー協会の事務局には、KS方程式の蔵本 由紀 京都大学 名誉教授がエントロピー生成極小の原理や著書「現代熱力学: 熱機関から散逸構造へ」などで有名な化学者 Prigogine に贈った書(図8)があり、ケンブリッジ大での Stokes の肖像画と同様に感銘を受けた。



図 7 IC 機械工学科 招待セミナーでの研究発表

私は立命館大学に籍を残したまま IC に滞在しているが、当然ながら、私自身の研究室の運営も行っていかなければならない状況であった。平成 24 年度 日本燃焼学会奨励賞の受賞者を対象とした 6 月の討論会での研究発表[12]も含め、2 ヶ月半に一度程度は日本に一時帰国している。ロンドン時間の早朝から定期的に学生とスカイプで研究の進捗状況や研究室内行事などの打ち合わせした後、IC に出勤することで日本と IC での研究の両立を可能な限り努めている。

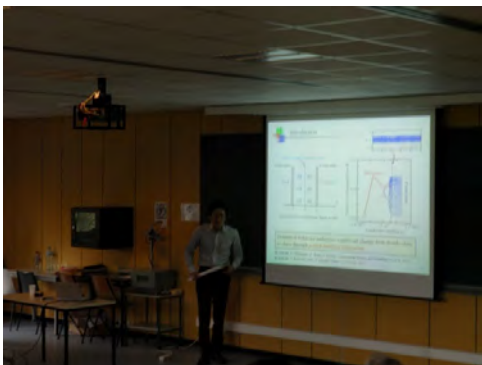


図 8 ソルバー研究会での研究発表

#### 4. 最後に

IC に滞在中の研究活動を中心に、海外レターを執筆させて頂いた。私が IC での研究活動を始めた数日後の夜に CMSG の隣りの実験室で水素漏れによる火災事故が起きた。グループの居室が封鎖され、メンバーが別々の部屋に移動したままである現状や事故後の Visiting Academics 向けの危機管理対策など、本稿では触れられなかったが、興味ある方は個人的に聞いて頂ければと思う。

本稿執筆の貴重な機会を頂いた京都大学 中部主敬 教授からは、機械工学科 Prof. Yanniss Hardalupas と Prof. Alex Taylor が運営する研究室の施設見学の機会までも頂いた。化学工学科 Prof. Serafim Kalliadasis からは、IC 滞在中に数多くの貴重な研究機会を頂いた。航空工学科で研究活動をしておられた(独)海洋研究開発機構 大西 領 研究員には、IC での研究生活等で大変お世話になった。立命館大学 宮野 尚哉 教授には、IC 滞在中の本研究室の運営を分担して頂いた。(独)宇宙航空研究開発機構 立花 繁 主任研究員からは、IC 滞在中にガスタービン燃焼不安定の共同研究で多大なる力添えを頂いた。改めて深く感謝申し上げます。

最後に、私が不在の中、研究室活動を積極的に進めてくれた立命館大学 本研究室メンバー一同に感謝する。

#### 参考文献

- [1] <http://www3.imperial.ac.uk/interactivemap>
- [2] <http://www3.imperial.ac.uk/chemicalengineering/discovery/facilities/plant>
- [3] <http://www3.imperial.ac.uk/complexmultiphasesystems>
- [4] H. Gotoda, M. Pradas and S. Kalliadasis, *63th British Applied Mathematics Colloquium* (2013).
- [5] H. Gotoda, M. Pradas and S. Kalliadasis, *Chaos*, (2013) Submitted.
- [6] H. Gotoda, R. Takeuchi, Y. Okuno and T. Miyano, *Journal of Applied Physics* 113, 124902 (2013).
- [7] H. Gotoda, T. Ikawa, K. Maki and T. Miyano, *Chaos* 22, 033106 (2012).
- [8] H. Gotoda, H. Nikimoto, T. Miyano and S. Tachibana, *Chaos* 21, 013124 (2011).
- [9] H. Gotoda, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki and S. Tachibana, *Chaos* 22, 043128 (2012).
- [10] <http://www.sms.cam.ac.uk/media/1379230>
- [11] H. Gotoda, T. Miyano and I.G. Shepherd, *Physical Review E* 81, 026211 (2010).
- [12] 後藤田 浩, 日本燃焼学会誌 55, 221 (2013).



第4回熱と流れのシミュレーション・アジア国際シンポジウム (ASCHT'13) 報告  
 Report on the 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2013

須賀 一彦 (大阪府立大学)

Kazuhiro SUGA (Osaka Prefecture University)

e-mail: suga@me.osakafu-u.ac.jp

1. はじめに

Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow は、伝熱と流体力学の数値シミュレーションにかかわる研究発表を対象として、アジア地域を中心とする研究者が集まる一連の会議で ASCHT (アシュート) と略します。発足のいきさつから、日本・中国・韓国の3ヶ国から常任の共同議長を各1名選出し、2007年から隔年で開催されています。今回報告いたします ASCHT'13 は、2011年9月に河村 洋教授 (諏訪東京理科大学) が中心となって京都で開催された第3回会議[1]に続き、写真1に会場看板を掲載いたしましたように第4回として、2013年6月3日から6月6日までの会期で中国、香港科学技術大学にて行われました。本会議の名誉議長を Wei Shyy, 議長を Tianshou Zhao, Huihe Qiu の各教授 (香港科学技術大学), 共同議長を Wen-Quan Tao (中国, 西安交通大学), Nahmkeon Hur (韓国 Sogang Univ.) の各教授と小生が務めました。



写真1 ASCHT'13の会場看板



写真2 講演風景

2. 会議の概要

本シンポジウムの概要を伝えるため、表1, 2

表1 プレナリー・キーノート講演一覧

Plenary	Toshio Miyauchi (Tokyo Inst. Tech., Japan)	<i>Direct numerical simulation of turbulent combustion</i>
	Wen-Quan Tao (Xi'an Jiaotong Univ., China)	<i>Some recent developments of finite volume method</i>
	Jaw-Yen Yang (Nat. Taiwan Univ., Taiwan)	<i>Accurate modeling and simulation of thermal conductivity of nanocomposites via phonon Boltzmann transport equation</i>
	Gihun Son (Sogang Univ., Korea)	<i>A level-set method for computation of droplet motion in an inkjet printing process</i>
Keynote	Kazuyoshi Nakabe (Kyoto Univ., Japan)	<i>Manipulation and deformability estimation of single biocell by flow control and electric detection in a microchannel</i>
	Kun Xu (HKUST, Hong Kong, China)	<i>Direct modeling for computational fluid dynamics and unified gas-kinetic scheme for non-equilibrium flow simulations</i>
	Lixing Zhou (Tsinghua Univ., China)	<i>Advances in large-eddy simulation of two-phase and droplet combustion</i>
	Oh Joon Kwon (KAIST, Korea)	<i>Prediction of HAWT rotor blade performance by a coupled CFD CSD method</i>
	Guihua Tang (Xi'an Jiaotong Univ., China)	<i>Numerical study of heat transfer in nano-porous super insulation material</i>

にプレナリー・キーノート講演一覧とセッション・タイトル一覧を示します。表1に示しましたようにプレナリー講演は日・中・韓・台湾の4ヶ国地域から各1件、キーノート講演は日・中・韓の3ヶ国から計5件の構成でした。また、一般講演の投稿論文総数は226件あり、合計180編の論文が採択され、表2に示しましたように10件のタイトルからなる計34セッションに分かれて活発な発表が行われました。一例として写真2に講演風景を掲載します。セッション・タイトルからも顕著なように、従来からのテーマとマイクロ・ナノ伝熱、マルチスケール・マルチフィジックス熱流動や生体伝熱など比較的新しいテーマとの発表割合も他の国際会議と変わらず、研究テーマのグローバル化が進んでいることが伺えました。

参加者総数215名の国・地域別の内訳は、日本41、中国121、韓国28、香港11、台湾8、タイ3、インド2、ロシア1でした。(全体集合写真を写真3に掲載します。)また、一般登録が98名、学生登録が117名と若手の数が多い、活気あふれる会議でありました。その一方で、未熟な講演や質疑

表2 セッション・タイトル一覧

Single-phase fluid flow and heat transfer (1-9)
Multi-component and multiphase problems (1-4)
Micro/nano fluid flow and heat transfer (1-4)
Computational methods (1-5)
Industrial applications (1-5)
Experimental methods (1-2)
Multi-scale and multi-physics modeling (1-2)
Uncertainty analysis
Reacting flows
Bio-fluid dynamics and heat transfer

応答も散見され、アジア地域の学術における伸びしろの大きさとともに、日本の経験ある研究者がますますリーダーシップを発揮してこの地域の学術発展を牽引していかなければならないことを痛感させられました。

また、今回は香港ということで昼食や夕食会では、円卓を囲んでの広東料理に皆、舌鼓を鳴らしました。アジア、特に東アジアの漢字文化を共有する我々においては、英語によるコミュニケーションだけではなく筆談も交えての会話も弾み、友好を深めることができました。この交流の中から、



写真3 全体集合写真 (2013年6月3日)

将来の共同研究などに発展していくことが大いに期待されます。

なお、本会議の精選論文集がこれまで各回の ASCHT の Special Issue を刊行してきた *Progress in Computational Fluid Dynamics (Inderscience)*誌に加えて、*Communication in Computational Physics (Global Science)*と *Applied Thermal Engineering (Elsevier)*の各誌からも刊行される予定です。

### 3. ASCHT の今後

前回の京都での会議終了後に、それまで計3回（2007年第1回：中国・西安，2009年第2回：韓国・済州島，2011年第3回：京都）の ASCHT を共同で牽引してこられた日本側議長の河村教授が勇退され、小生が後任を引き継ぎました。その時の宿題となったのが、ASCHT を経済成長著しいアジア各国により広げて発展させていくということでした。今後、アジア地域隆盛の源泉となるのは科学技術水準の向上に他ならず、そのためには ASCHT の裾野をより広くしていかなければならないという共通認識からです。第1回の会議の一般参加者は中国からがほぼ全て、第2回の会議では日・中・韓の3ヶ国が主体でしたが、第3回の京都での会議では、日・中・韓に加えて台湾、インド、ロシアなどの合計8カ国・地域から一般参加者を得るなど着実に広がってきました。そこで京都の会議終了後も ASCHT の実行委員会メンバ

ーでは、機会あるごとにこの件について議論を重ねてきました。なかなか特効薬のような案は見つかりませんが、人脈をフルに活用して台湾、インド、タイ、インドネシアなど経済発展の著しい各国・地域の有望な若手研究者に継続的に関与してもらうよう、将来の ASCHT の発展を見据えて、地道に働きかけ続けています。まだまだ十分ではありませんが、今回も比較的多くの国・地域から参加者を得ることになった要因であると考えています。

会議2日目に行われた国際諮問委員による会議で、日・中・韓以外の第4国の開催が検討されました。うれしいことに複数の候補国から、将来の開催に前向きな意見が出されました。慎重に議論された結果、次回第5回には会議開催のためのインフラ、サポート等の諸事情のため、第4国開催は見送られ、韓国・釜山で2015年秋に開催されることが決まり、会議3日目のバンケットで披露されました。しかし、第6回目以降の会議では、第4国、第5国での開催の実現性がより増し、ASCHT がますます発展していくものと期待されます。

（ASCHT 共同議長）

### 参考文献

- [1] 川口靖夫, 第3回 熱と流れのシミュレーション・アジア国際シンポジウム, 伝熱 *J. Heat Transfer Society of Japan*, **51-215** (2012) 57.

## 第8回実験熱流体世界会議 (ExHFT-8) 報告

*Report on the 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*

川口 靖夫 (東京理科大学)

*Yasuo KAWAGUCHI (Tokyo University of Science)*

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

### 1. 会議の概要

2013年6月16日～20日の日程で、第8回実験熱流体世界会議 (World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, ExHFT-8) が開催されました。会場はポルトガル、リスボンにある ITS (Instituto Superior Técnico, 写真1) でした。この会議は宮城県松島町で開かれた第6回 (2005年) [1], クラコフでの第7回 (2010年) に続くもので、伝熱学、流体力学、熱力学研究の新しいアウトカム、アイデアや方法論を発表し、交流する国際的なフォーラムを用意することを目的としています。本会議は実験的研究が主体ですが、理論や数値解析との比較は対象として

います。研究分野は、表2のセッションタイトルの通りですが、それに限定されていません。

会議のために President of Assembly として本学会元会長笠木伸英教授, 8名の Officer, 36名の Member, 61名の Lead Scientist が世界各国から選出され, Local Organizing Committee とともに運営にあたります。発表の条件として4ページまでの Extended abstract が要求され, 2名の専門家による査読があります。発表申込は450件以上ありましたが, フルペーパーまで提出した数はオーラル発表179件, ポスター発表90件 (60%) まで絞り込まれました。

表1 特別講演と講演者

Nu-Re Lecture	B.E. Launder, U. Manchester, U.K.
Keynote Lectures	K.D. Kihm, U. Tennessee, U.S.A. D. Arvizu, NREL, U.S.A. S.K. Saha, Bengal Eng. Sci. U., India J. Rose, Queen Mary U. London, U.K. C. Tropea, Tech. U. Darmstadt, Germany B. McKeon, Cal. Tech., U.S.A. G. Morini, U. Bologna, Italy E. Mastorakos, U. Cambridge, U.K. L. Guo, Xi'an Jiaotong U., China S. Wereley, Purdue U., U.S.A. M. Jermy, U. Canterbury, N.Z. F.T. Pinho, U. Porto, Portugal

### 2. セッションとキーノート・レクチャー

この会議では熱流体研究に顕著な貢献をした研究者に Nusselt- Reynolds Prize が贈られます。今回はレイノルズ平均を施したナビア・ストークス方程式を、閉じた方程式系とするための数学的乱流モデルの開発[2]に貢献した Brian E. Launder 英国マンチェスター大学教授に授与されました (写真2) 講演は Nu-Re Prize Lecture と12件のキーノート・レクチャー (表1), オーラル発表169件 (表2), ポスター発表82件が行われました。

### 3. 会議の開催状況

幅広い分野を対象とする大規模な国際会議はどうかとも散漫で玉石混交といった印象を与えるも



写真1 会場となった Instituto Superior Técnico と大学のエンブレム



写真2 左：Nu-Re Prize を受ける B.E. Launder 教授，中央：表彰委員長 C.W.M. van der Geld 教授，右：President of Assembly 笠木伸英教授

のですが、この会議では違和感なく様々な発表からの刺激を楽しめました。多くの参加者は会場に留まって熱心にキーノート・レクチャーやセッションに参加していたように見受けられました。また no-show も少数に抑えられました。会議の成功の理由は 1) 伝熱学を中心として、その基礎となる流体力学、熱力学、また伝熱学の応用に位置づけられるエネルギーや環境システムの研究を視野に収めていて一体感があること、また 2) 会議が「実験」をキーワードとして設定してあることも、求心力をもつ理由ではなかったかと考えます。さらに 3) 査読プロセスで厳しい条件を課しているため、十分なコンテンツのある発表が集まっていることを指摘しておきます。

会議参加者は 303 名にのぼり、世界の地域別ではヨーロッパ 176 名、アジア 78 名、南北アメリカ 36 名、オセアニア 8 名、アフリカ 5 名となりました。各地の研究者数を想像し、参加し易さの係数を掛けると、偏りなく世界各地から研究者を集めることのできた会議であると思われまます。なお参加者の属する国数は 38 カ国であり、日本からは最多となる 38 名の参加者がありました。

会議の社交プログラムとしては、ボートに乗ってのウェルカム・レセプション、バンケット会場に行く途中でリスボン歴史地区からベレン地区、王宮のあるシントラからヨーロッパ最西端であるロカ岬を訪れました。

ロカ岬では寄る辺のない大洋に一番乗りを目指して船出していったポルトガル人達の勇気を思い、

表2 セッション名と各セッションでの発表数

セッション名	件数
Heat and Mass Transfer	28
Fluid Mechanics	17
Measuring Techniques and Image Processing	14
Heat and Fluid Flow in Micro/Nano Scales	19
Boiling Heat Transfer	13
Turbulence	10
Multi-Phase Flows	19
Chemical Reaction and Combustion	7
Interdisciplinary Areas in Heat and Fluid Flow	4
Advanced Energy Systems	5
Advanced Environmental Systems	5
Aerospace and Aeronautical Technology	2
Biotechnology and Medical Systems	3
Cryogenics	2
Heat Exchanger	17
Manufacturing Processes	2

土地の歌である「ファド」には帰らぬ人を悼む悲しみや運命に耐える人の強さを想像しました。

ベレン地区の「発見のモニュメント」近くには世界地図があり、日本にもその「発見」の年号—1541 が書かれています。「発見された」側としては心穏やかではありませんが、「新たな発見をし、それを適切な方法で発表することにより先取権を得る」という考え方は大航海時代に始まり、現代にまで貫かれています。学会での研究発表や特許の世界ではこの考えが常に意識されています。私達も当時ヨーロッパで始まった思想の中で暮らしていることを再認識しました。

#### 4. おわりに

今回の ExHFT-9 は、2017 年の 6 月第 1 週を候補として、ブラジルのイグアスにて開催される計画が発表されました。次回も日本から多くの皆様が参加され、国際的な熱・流体の研究者コミュニティに貢献して下さることを期待します。

#### 参考文献

- [1] 第 6 回実験熱流体世界会議 (ExHFT-8) 報告, 笠木, 円山, 吉田, 伝熱, 44-186, No.5 (2005) 32.
- [2] Jones, W. P. and Launder, B. E., The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, **15** (1972) 301.

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					
5月 21(水) ～ 23(金)	第51回日本伝熱シンポジウム (開催場所:アクトシティ浜松・コン グレスセンター)	2014.1.17	2014.3.14	実行委員会委員長 中山 顕(静岡大学大学院 工学研究科) Tel: 053-478-1046 Fax: 053-478-1046 E-mail: tnhts51@ipc.shizuoka.ac.jp URL: http://thermo.web.nitech.ac.jp/nhts2014/index.html	
8月	第15回国際伝熱会議 ジュール・エネ ルギーコンテスト (JENECON) (開催場所:国立京都国際会館)			第15回 国際伝熱会議実行委員会 イベント部 会長 須賀 一彦(大阪府立大学大学院工学研 究科) E-mail: jenecon@ihtc-15.org URL: http://www.ihtc-15.org/jenecon/index.html	
8月	The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15) (開催場所:国立京都国際会館)		Abstract 締切済み Full Paper 2013.12.15	実行委員会委員長 吉田 英生(京都大学大 学院工学研究科) E-mail: info@ihtc-15.org (日本語可) URL: http://www.ihtc-15.org/index.html/	

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					
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/	
10月 21(月) ～ 22(火)	日本機械学会関西支部 第328回講習 会 応力計測の基礎とその応用(計測 およびデモンストレーション付き) (開催場所:大阪科学技術センター)	2013.10.11		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/	
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 2013.9.14	Abstract 2013.6.14 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 ISEM'13-Sendai) (開催場所:仙台市戦災復興記念館)	事前登録 2013.9.20	Abstract 2013.5.24 Full Paper 2013.7.10	日本実験力学会事務局担当 林 〒700-0005 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)	2013.7.5	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)	2013.7.12	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 Pio)	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/	

行事カレンダー

12月	13(金) ～ 15(日)	ISETS'13 (International Symposium on EcoTopia Symposium) (開催場所:名古屋大学)	事前登録 2013.9.30	Abstract 2013.7.16 Full Paper 2013.9.30	実行委員長 成瀬一郎(名古屋大学エコトピア科学研究所) E-mail: isets2013@intergroup.co.jp URL: <a href="http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets13">http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets13</a>	
12月	17(火) ～ 19(木)	第27回数値流体力学シンポジウム (開催場所:名古屋大学東山キャンパス)	2013.10.1	2013.10.31	CFD27 実行委員会事務局(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科 附属計算科学連携教育研究センター内) Fax: 052-788-6215 URL: <a href="http://www.nagare.or.jp/cfd/cfd27/">http://www.nagare.or.jp/cfd/cfd27/</a>	
12月	18(水) ～ 19(木)  19(木) ～ 20(金)	16th Annual Conference of ILASS-Asia  第22回微粒化シンポジウム (開催場所:長崎大学坂本地区キャンパス1)	2013.9.2	2013.10.25	「第22回微粒化シンポジウム」講演論文担当幹事 鶴大輔(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1 九州大学 大学院総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門) Tel: 092-583-7893 Fax: 092-583-7593 E-mail: <a href="mailto:dtsuru@ence.kyushu-u.ac.jp">dtsuru@ence.kyushu-u.ac.jp</a> 「16th ILASS-Asia」講演論文担当幹事 林潤(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 マイクロ機械科学部門) Tel: 06-6879-7253 Fax: 06-6879-7254 E-mail: <a href="mailto:j.hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp">j.hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp</a> URL: <a href="http://www.ilass-japan.gr.jp">http://www.ilass-japan.gr.jp</a>	
12月	21(土)	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)	2013.8.22		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: <a href="mailto:sekine@jsme.or.jp">sekine@jsme.or.jp</a> URL: <a href="http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm">http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm</a>	
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: <a href="mailto:secretary@compsafe2014.org">secretary@compsafe2014.org</a> URL: <a href="http://www.compsafe2014.org">http://www.compsafe2014.org</a>	

## 平成 25 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では本年度も各賞の表彰を実施いたします。つきましては、下記の要領に従って本年度の学術賞、技術賞、および奨励賞の候補者推薦募集を行いますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。

### 1. 対象となる業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近3年間の **Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行った研究者とその共同研究者とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と厳密に一致する必要はありません。また、**Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された論文は、日本伝熱シンポジウムにおける発表の有無にかかわらず、授賞の対象となります。
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします。
- (3) 奨励賞の対象は、原則として、最近3回の日本伝熱シンポジウムのいずれかにおいて優秀な論文を発表した若手研究者（発表時に30歳程度以下の者）とします。
- (4) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限ります。
- (5) 贈賞数は、学術賞2件程度、技術賞1件程度、奨励賞4件程度とします。

### 2. 選考方法

- (1) 各賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行います。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

### 3. 提出書類

- (1) 申請書・推薦書 1通
  - ・ 申請書・推薦書の書式は、学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
  - ・ 学術賞、技術賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意ください。
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料 6部
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部 (学術賞、奨励賞のみ)

### 4. 提出期限

平成 25 年 12 月 20 日 (金)

### 5. 提出先および問い合わせ先：

〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

北海道大学 工学研究院 近久 武美 宛

E-mail : [takemi@eng.hokudai.ac.jp](mailto:takemi@eng.hokudai.ac.jp) Tel, Fax: 011-706-6785



## 第 51 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 51 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 中山 顕  
幹事 桑原不二朗

開催日： 平成 26 年 5 月 21 日（水）～5 月 23 日（金）  
会場： アクトシティ浜松・コンgresセンター (<http://www.actcity.jp/>)  
所在地 〒430-7790 静岡県浜松市中区板屋町 111-1 電話 053-451-1111（代表）  
アクセス 東海道新幹線/東海道本線 JR 浜松駅から徒歩 5～10 分

講演申込締切： 平成 26 年 1 月 17 日（金）  
講演論文原稿提出締切： 平成 26 年 3 月 14 日（金）  
事前参加申込締切： 平成 26 年 4 月 11 日（金）

ホームページ（URL：<http://thermo.web.nitech.ac.jp/nhts2014/index.html>）

### 【シンポジウムの形式】

- ・ 講演発表は以下の形式で実施します。
  - a) 通常の一般セッション（口頭発表）
  - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッション
- ・ 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- ・ 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 51 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

### 【講演発表申込み方法】

- ・ 原則としてウェブによる申込みに限らせていただきます。本シンポジウム実行委員会で準備するウェブサイトから必要なデータを入力してください。ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせください。
- ・ 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択してください。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 51 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。
- ・ 発表申込み時に、講演論文の要約（日本語で 200～250 字）を入力してください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・ 講演発表申込みは、講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- ・ 講演の採否および各セッションへの振分けは、実行委員会にご一任ください。

### 【講演論文集】

- ・ 本年度より講演論文集として電子版（CD-ROM 版）のみを発行し、印刷版は発行しません。講演論文はウェブ上で一定期間公開します。
- ・ 講演論文集（CD-ROM 版）を参加者に当日配布します。なお、講演論文集（CD-ROM 版）は参加できなかった会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に実行委員会事務局にお申込みください。
- ・ 講演論文の原稿は 1 題目あたり A4 サイズで原則 2 ページです。講演論文の作成様式は、の 2 段組×片側 26 字×60 行です。
- ・ 講演論文集（CD-ROM 版）に掲載された講演論文は、本学会の論文誌“Thermal Science and Engineering”にそのまま投稿することができます。その場合は 8 ページ以内のフルペーパーを掲載することができます。

カラーの使用が可能で、ファイル容量は最大で2MBまでとし、動画は含まないものとします。詳細は会誌1月号の「お知らせ」に掲載します。ただし、掲載の可否は通常の査読プロセスを経て決まります。

- ・講演論文原稿の執筆要綱は、会誌1月号の「お知らせ」および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- ・講演論文原稿は原則としてPDFファイルで提出していただきます。
- ・原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集（CD-ROM版）およびウェブに掲載されません。十分にご注意ください。

#### 【講演論文の公開日】

- ・講演論文は、会員にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公開します。したがって、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意ください。
- ・会員が当該講演論文を後日原著論文として学術論文誌等に投稿される場合に配慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にすべく、シンポジウム終了後、一定期間を経て公開を終了します。

#### 【参加費等】

- ・シンポジウム参加費  
会員一般           (事前申込：12,000円、会場申込：14,000円)  
非会員一般       (事前申込：14,000円、会場申込：16,000円)  
会員学生           (事前申込：5,000円、会場申込：6,000円)  
非会員学生       (事前申込：6,000円、会場申込：7,000円)
- ・講演論文集（CD-ROM版）  
日本伝熱学会会員：無料（講演論文はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日、講演論文集（CD-ROM版）を配布します。参加されない会員のうち希望者には講演論文集（CD-ROM版）を事後にお送りします。）

#### 【懇親会】

- ・開催日：平成26年5月22日（木）
- ・会場：ホテルクラウンパレス浜松
- ・参加費：一般（事前申込：8,000円、会場申込：10,000円 同伴配偶者無料）  
          学生（事前申込：4,000円、会場申込：5,000円）

#### 【交通と宿泊】

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

#### 【ご注意】

- ・講演申込みの取消しおよび講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- ・論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- ・口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- ・参加費、懇親会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- ・その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会事務局までe-mailまたはFAXでお問い合わせください。

#### 【お問い合わせ先】

第51回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局  
静岡大学 工学研究科 機械工学専攻内  
e-mail：tnhts51@ipc.shizuoka.ac.jp  
FAX：053-478-1046

## 優秀プレゼンテーション賞（第51回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会  
委員長 桑原不二朗

第51回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成26年5月21日（水） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり3分程度のショートプレゼンテーションと60分程度のポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成26年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表時（審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）であること、または入会申込中であること。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第51回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”および“研究分野の分類番号”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。



## 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協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協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関する分野に限る）	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協議員に送信してください。審議の結果掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）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

---

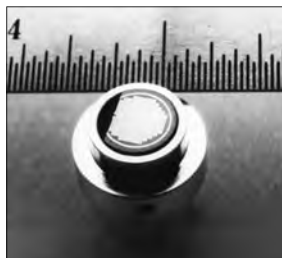
52 期入会 (2013.6.7~7.29) 正 2 名 学生 1 名

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
学	重信 剛也	広島大学大学院工学研究科	正	谷村 利伸	コマツ研究本部
正	西川 浩之	名古屋大学情報科学研究科			

# 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、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



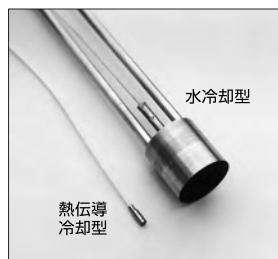
### 特徴

- 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ブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 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

## サーモゲージ



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。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)
- 米国防空局のファイヤー・スモークテスト

## gSKIN<sup>®</sup> 熱流束センサー



「gSKIN<sup>®</sup>」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72 $m^2$ の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

### 使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

## 熱流束センサー 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

URL

[www.senstech.jp](http://www.senstech.jp)

〒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

E-mail

[info@senstech.jp](mailto:info@senstech.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

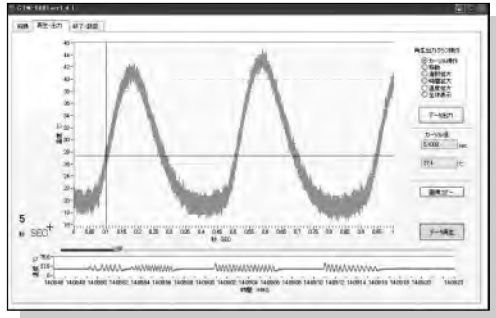
#### 有限会社 テクノオフィス

〒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 1 ch
- 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*

ここ数年、海外での再生可能エネルギー研究動向を調査する機会があり、アジアとヨーロッパを訪問し、各地の研究機関や太陽熱発電所において研究情報を収集しました。私が初めて外国に行ったのは、1994年の国際伝熱会議（英国ブライトン市開催）に出席した26歳の時でしたが、高校生の娘は、高校在学中にアメリカ研修プログラムがあり、私よりずっと若くして海外に出るようになります。2011年にチェンナイに出張した際、帰路、バンコクのスワンナプール国際空港に未明に着き、乗り継ぎのため数時間過ごしましたが、空港の中は昼間のように店舗が営業しており、アジアやヨーロッパからのたくさんの旅行者がショッピングや食事をして過ごしています。世界は再生可能エネルギーを志向する一方で、世界的に人の移動は昼夜を問わず活発になっており、よりたくさんのエネルギーを消費する経済システムが進化し続けているように感じられます。この相対する二つの動きはいずれも人間活動の本当の姿であり、再生可能エネルギーの問題を考える際に同時に意識する必要があると感じています。今回の特集『再生可能「熱」エネルギー利用技術』は、当該分野の第一線で活躍する研究者から最新の研究動向をご寄稿頂いたものです。学会員の皆様のための生きた情報源となれば幸いです。

松原幸治（新潟大学）

*Matsubara, Koji (Niigata University)*

*e-mail: matsu@eng.niigata-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CⅢ

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