

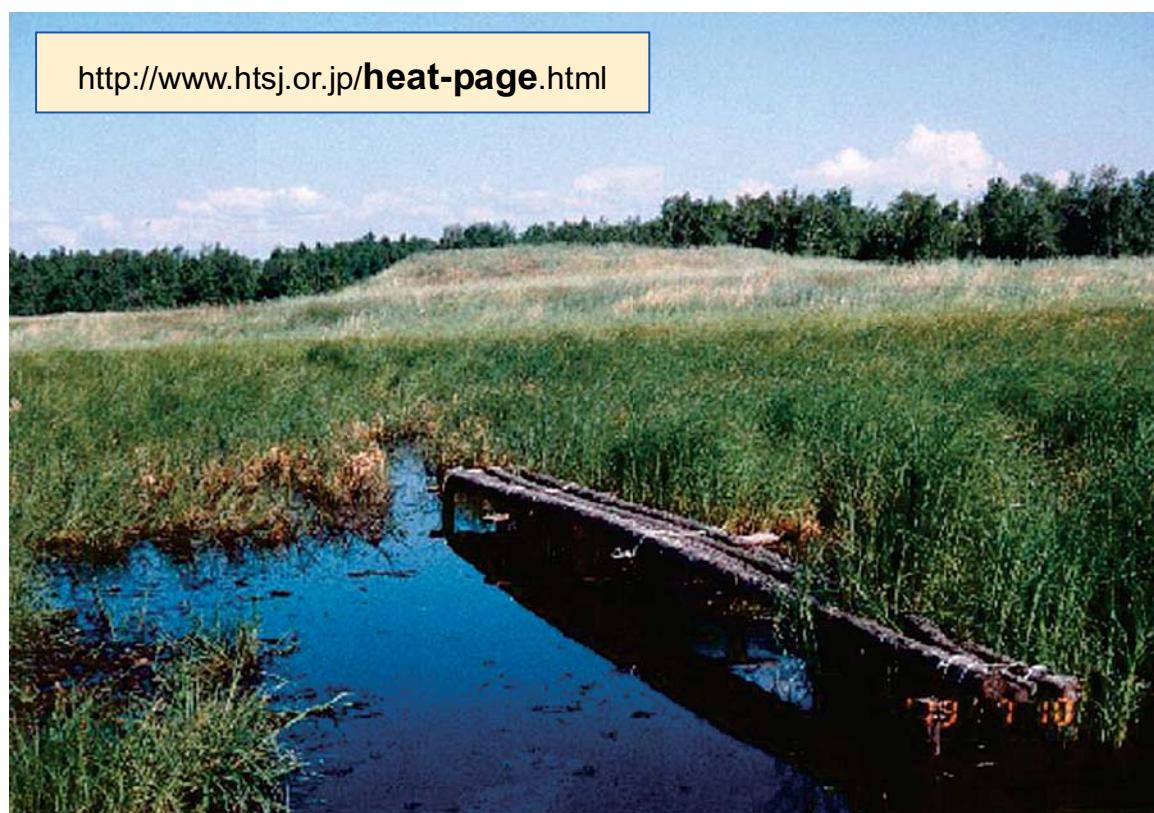
伝熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 46, No. 196
2007. 7

HJSJ

◆特集：地中熱利用◆



(2001. 7. 10 筆者撮影：シベリアヤクーツク近郊の森林実験場近くにて)

永久凍土に出来る不思議な小山：ピンゴ

Unique Small Hills Appearing on Permafrost: Pingo

近久武美（北海道大学）*Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)*
takemi@eng.hokudai.ac.jp

「シベリアの永久凍土搅乱」と題した学術振興事業団の研究プロジェクトの一員として、2001年7月にシベリアのヤクーツク近郊で行っていた森林火災の実験場を訪問する機会がありました。この写真は小さな沼とその中央に盛り上がった小山の写真です。7月頃のシベリアは私達が想像するよりもかなり高温で乾燥するため、大規模な森林火災が多数発生致します。そのほとんどは地表面をさっと撫でるような地表火なのですが、樹木全体が燃えるような樹幹火が発生すると、地盤が脆弱であるために焼け残った樹木も火災後数年でほとんど倒壊し、太陽光が直接地面に照射するようになります。すると永久凍土が融解し、この写真のようなアラスと呼ばれる沼が形成されます。こうした水の融解・凝固の繰り返しにより、写真中央部にあるような小山が作られることがあります。これをピンゴと呼んでおり、その真下にはレンズ状の氷が形成されております。以上、伝熱と関係した自然形状の一つを紹介させて頂きました。

筆者はこのプロジェクトの後も地道に森林火災影響のシミュレーションを継続しており、最近興味深い結果を得つつあります。例えば、森林火災の回数が今後増加してもあまり心配することはありませんが、温暖化の進行による延焼確率の増大影響は深刻であり森林面積が顕著に減少すること、その対策の一つとして適切な季節に林齡の高い森の一部にむしろ着火する方策が効果的であることなどです。今後、種々のアドバイスを頂ければ幸甚です。

伝 熱

目 次

〈新旧会長挨拶〉

「イノベーター日本」実現に貢献する日本伝熱学会	.....	第 46 期会長 柚植綾夫（三菱重工業）	.....	1
会長退任にあたって	.....	第 45 期会長 望月貞成（東京農工大学）	.....	2

〈追悼 鈴木健二郎先生〉

鈴木健二郎先生を偲んで	.....	牧野俊郎（京都大学）	.....	3
鈴木健二郎先生の想い出	.....	康倫明（株式会社ダイキン環境・空調技術研究所）	.....	6

〈第 19 回日本伝熱学会賞〉

平成 18 年度日本伝熱学会賞選考の報告	.....	表彰選考委員会委員長 牧野俊郎（京都大学）	.....	8
日本伝熱学会学術賞を受賞して	.....	Peter L. Woodfield（産業技術総合研究所）		
	.....	門出政則（佐賀大学），光武雄一	.....	9
日本伝熱学会学術賞を受賞して	.....	中別府修（明治大学），坂寄純一（東京工業大学・院）	.....	10
日本伝熱学会技術賞を受賞して	.....	中尾一成（三菱電機）		
	.....	弓倉恒雄（三菱電機冷熱エンジニアリング）		
	.....	尾崎永一（三菱電機），池内正毅（関西電力），辻森淳（関東学院大学）		
	.....	山中悟郎（元三菱電機），平田雄志（大阪大学名誉教授）	.....	11
日本伝熱学会奨励賞を受賞して	.....	小野綾子（北海道大学・院）	.....	12
日本伝熱学会奨励賞を受賞して	.....	塚原隆裕（東京理科大学・院）	.....	13
日本伝熱学会奨励賞を受賞して	.....	森本賢一（(独)海上技術安全研究所）	.....	14

〈文部科学大臣表彰〉

平成 19 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞	表彰選考委員会委員長 牧野俊郎（京都大学）	15
--------------------------------	-------	-----------------------	-------	----

〈第 44 回日本伝熱シンポジウム〉

第 44 回日本伝熱シンポジウムを終えて	実行委員長 茂地徹（長崎大学）	17
----------------------	-------	-----------------	-------	----

〈特集:地中熱利用〉

地中熱利用	辻俊博（名古屋工業大学）	20
建物基礎杭を利用した地中熱空調システム	大岡龍三（東京大学）	21
地熱型再生可能エネルギー利用の実用化研究	伊藤高敏，新堀雄一（東北大学）	28
基礎杭や群杭で地中に熱を蓄えた融雪と空調	宮本重信（福井県） 竹内正紀（福井大学），永井二郎（福井大学）	38
我が国における地中熱利用の現状 —北海道での導入事例を中心として—	長野克則（北海道大学）	42

〈特別寄稿〉

単結晶育成用 CZ 炉の数値解析	柿本浩一（九州大学），塚田隆夫（大阪府立大） 今石宣之（九州大学名誉教授）	49
生き物の不思議：凍結状態で生きる植物	上村松生（岩手大学）	58

〈巻頭グラビア：heat-page〉

永久凍土に出来る不思議な小山：ピンゴ	近久武美（北海道大学）	表紙裏
--------------------	-------------	-----

〈行事カレンダー〉 65

〈お知らせ〉

社団法人日本伝熱学会第 45 期（平成 18 年度）総会議事録	67
日本伝熱学会 関西支部主催 第 10 回関西伝熱セミナー2007	69
日本伝熱学会 東海支部・北陸信越支部合同企画 東海・北陸信越 伝熱セミナー2007	71
日本伝熱学会 東北支部企画 平成 19 年度秋季伝熱セミナーのご案内	73
日本液体微粒化学会（ILASS-Japan）・ILASS-Asia・日本エネルギー学会 主催 大阪大学大学院工学研究科 共催 第 16 回微粒化シンポジウム	74
編集出版部からのお知らせ	76
編集出版部会ノート	82

Vol. 46, No. 196, July 2007

CONTENTS

<New and Former President's Address>

Address as the New President

Ayao TSUGE (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)	1
---	---

Address as the ex-President

Sadanari MOCHIZUKI (Tokyo University of A&T)	2
--	---

<Memorial>

In Memory of Professor Kenjiro SUZUKI

Toshiro MAKINO (Kyoto University)	3
-----------------------------------	---

Memoirs of Prof. Kenjiro SUZUKI

Yoon-Myung KANG (Daikin Air-Conditioning R&D Laboratory, Ltd.)	6
--	---

<The 19th Heat Transfer Society Awards of HTSJ>

On Selection of Awards of the Heat Transfer Society of Japan, 2006

Toshiro MAKINO (Kyoto University)	8
-----------------------------------	---

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

Peter WOODFIELD (AIST), Masanori MONDE (Saga University), Yuichi MITSUTAKE	9
--	---

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

Osamu NAKABEPPU (Meiji University)

Junichi SAKAYORI (Tokyo Institute of Technology)	10
--	----

Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

Kazushige NAKAO (Mitsubishi Electric Cooperation)

Tsuneo YUMIKURA (Mitsubishi Electric Air Conditioning & Refrigeration Systems)
--

Eiichi OZAKI (Mitsubishi Electric Cooperation)
--

Masaki IKEUCHI (Kansai Electric Power Co., Inc.)
--

Atsushi TSUJIMORI (Kanto Gakuin University)

Goro YAMANAKA (OB of Mitsubishi Electric Cooperation)

Yushi HIRATA (Professor Emeritus of Osaka University)	11
---	----

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Ayako ONO (Hokkaido University)	12
---------------------------------	----

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Takahiro TSUKAHARA (Tokyo University of Science)	13
--	----

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Kenichi MORIMOTO (National Maritime Research Institute)	14
---	----

<The Commendation for Science and Technology by MEXT>

Prizes for Science and Technology, The Commendation for Science and Technology by the Minister of Education,

Culture, Sports, Science and Technology, 2007

Toshiro MAKINO (Kyoto University) 15

<The 44th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 44th National Heat Transfer Symposium of Japan

Toru SHIGECHI(Nagasaki University) 17

<Special Issue on “Utilization of Geothermal Energy”>

Special Issue on “Utilization of Geothermal Energy”

Toshihiro TSUJI (Ngoya Institute of Technology) 20

Geothermal HVAC System using Foundation Piles of Buildings

Ryozo OOKA (University of Tokyo) 21

Renewable Geo-energy Development at Practical Stage

Takatoshi ITO, Yuichi NIIBORI (Tohoku University) 28

Snow-melting System and Air-conditioning System with Heat Storage

in Underground using Foundation Piles or a Group of Piles

Shigenobu MIYAMOTO (Fukui Prefecture)

Masanori TAKEUCHI (University. of Fukui), Niro NAGAI (University. of Fukui) 38

Ground Thermal Energy Systems in Japan – Evaluation of actual GSHPs in Hokkaido

Katsunori NAGANO (Hokkaido University) 42

<Contribution>

Numerical Analyses of Czochralski Furnace for Single Crystal Growth

Koichi KAKIMOTO (Kyushu University) , Takao TSUKADA (Osaka Prefecture University)

Nobuyuki IMAISHI (Professor Emeritus of Kyushu University) 49

A Mystery of Living Organisms: Freezing Tolerant Plants

Matsuo UEMURA (Iwate University) 58

<Opening-page Gravure: heat-page>

Unique Small Hills Appearing on Permafrost: Pingo

Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University) Opening Page

<Calendar> 65

<Announcements> 67

「イノベーター日本」実現に貢献する日本伝熱学会

Heat Transfer Society of Japan as the Engine for Realization of “INNOVATOR JAPAN”



第46期会長 柏植綾夫（三菱重工業）
Ayao TSUGE (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)

日本伝熱学会は 1961 年に先輩方のご尽力によって創設されて以来、その目的である「伝熱に関する学理および応用についての発表、知識の普及、会員相互および国際的な交流を図ることにより、伝熱学の進展普及を図り、もって我が国の学術の発展に寄与すること」を実践してきた誇るべき 46 年の歴史があります。

その間本学会は、学術界および産業界において「知の創造」と「技術革新」、更には「社会・経済的価値創造：イノベーション創出」に貢献する多数の人材を輩出してきたことも特記することが出来ます。

21世紀の今、日本は明治維新、敗戦後の復興に次ぐ第三の国創りの重大変革期に入っていると言えます。

国内面では、急速に進む少子高齢化と労働人口減少の日本が如何に持続可能な発展を続けるかという「National Innovation」能力と、地球規模では、環境、エネルギー、経済の 3E 問題に代表される迫り来る危機に対処する「Global Sustainable Innovation」能力の、「競争」と「協調」の両面からの「イノベーション能力強化」の重要性が今ほど高まった時代は、日本および人類の歴史において無かったと言っても過言では無いでしょう。

同時に、この命題の解決に対する科学と技術の役割的重要性が益々高まっていることも、我々理学と工学で身を立てている会員は改めて認識し、それを行動に移さねばならない時代にあります。

科学には「あるもの」や「存在」を探求する「認識科学」と、「あるべきもの」や「当為」を探求する「設計科学」の両面がありますが、21世紀の今、伝熱学に求められているミッションは「設計科学の進化と技術化」、そしてそれを「社会・経済的価値に具現化：イノベーション創出」することです。特に、「少子高齢化と労働人口減少の顕在化が起こるまでのこの 10 年間が勝負」という危機意識を、

我々はもっと持たねばなりません。

この 10 年を無為に過ごした場合、10 年後の日本には最早、「National Innovation」も「Global Sustainable Innovation」も実行する体力は残されていないとの覚悟が必要です。

今年は第三期科学技術基本計画の実質スタートの年であり、科学技術駆動型イノベーション創出総合戦略、更には安倍総理のリーダーシップの下での「イノベーション 25」戦略がいよいよ具体的に実行に入る年でもあります。

まさに「イノベーター日本」実現への勝負の 10 年がスタートしたと言えます。

以上の認識の下、「認識科学」にとどまらず「設計科学の進化と技術革新」を目指す日本伝熱学会は、「イノベーター日本」実現に貢献するミッションを持ちます。

冒頭に掲げた学会の定款；「伝熱学の進展普及を図り、もって我が国の学術の発展に寄与すること」に、「社会・経済的価値創造に貢献する」を加え、その実現、すなわち“イノベーション創出活動”を会員全員が学会の内外にコミットしましょう。そして、その実践において、会員相互の「知の創造と社会・経済的価値創造を結ぶイノベーション・パイプライン・ネットワーク」の強化を提案します。

日ごろの研究と開発のネットワーク活動を学会の内外で地道に継続し、その成果を折々の学会活動、毎年の総会と伝熱シンポジウムにおいて“会員同士が共有”し“社会からも見える化”する、イノベーション・スパイラル作戦を実行しようではありませんか。この活動は次代を担う人材育成の強力な“場”にもなることでしょう。

参考文献

- [1]柏植、イノベーター日本、オーム社（2006）
- [2]日本学術会議「知の統合一社会のための科学に向けてー」（2007.3.22）

会長退任にあたって
On Retiring from the President



望月 貞成（東京農工大学）

Sadanari MOCHIZUKI (*Tokyo University of A&T*)

e-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp

第45期会長を務めさせていただきました。副会長、理事、部会の委員各位および会員の皆様の積極的なご協力のおかげで、当初の事業計画などすべて予定通り無事終了することができました。皆様に改めて厚く御礼申し上げます。

日本伝熱学会は、世界的にも他に例を見ない活発な活動を行っていると思います。その象徴は伝熱シンポジウムです。何百人もの伝熱研究者が一堂に会して研究を発表し議論しあう場を国内に持っている学会は、他に無いと思います。伝熱が絡む問題は様々な分野に存在し、それぞれの分野で伝熱研究は行われていますが、米国をはじめ諸外国には、個々の分野に分散した伝熱の研究者を束ねる学会は見当たらないことを考えると、伝熱シンポジウムおよびそれを主催する日本伝熱学会は世界に例を見ない文字通り特筆すべ存在と言えます。この伝統は一朝一夕に創られたものではなく、諸先輩の先見の明とご努力に負うところが大きいことは言うまでもありません。

日本伝熱学会の個人会員数は、過去10年間1400名あたりを上下し、あまり変化していません。バランスの取れた新陳代謝がなされているようです。他の伝統ある理工学系の学会の会員数が近年どちらかというと減少傾向にあるのに比べると対照的と言えるかと思います。

筆者は、東京農工大学で留学生センター長を仰せつかっておりますが、その立場を利用させてもらい、さまざまな国からの留学生に対して、それぞれの出身大学で「伝熱学」ないしは同等の講義が開講されているかを問うアンケート調査を行ったことがあります。また、先進国については、各大学のホームページを通じて開講科目を調べてみました。その結果、欧米の大学においては、例外なく「伝熱学」の講義は行われています。しかも、何科目にも分けて、詳細な講義を行っている大学も多いようです。中央・東ヨーロッパのチェコや

ルーマニアでも伝熱学が講義されています。また、アフガニスタンのカブル大学でも、機械工学科で Holman の教科書 Heat Transfer を用いて講義が行われています。このように、世界中の大学の理・工系の大学院や学部・学科ではほとんど例外なしに伝熱学は講義されています。これは、伝熱学が理・工学の重要な基礎の一つと認識されているからに他なりません。

以上、威勢のいい話を申し上げましたが、日本伝熱学会にも検討すべき問題が無いわけではございません。たとえば、次期理事会への引継ぎ事項リストには、短期的に処理できるものから、中・長期的な基本戦略を打ち立てて考える必要のあるものまで、18項目が記載されています。それらは46期理事会においてご検討いただくことになりますが、とりわけ、学会の長期的な基本戦略を考える場ないしは委員会を設けることについてご議論頂けるとありがたいと思います。さらに、そのような委員会を設ける場合、会長あるいは副会長が音頭をとる必要があろうかと思いますが、現状では、会長や副会長（総務担当副会長を除く）の任期が1年しかないため、学会の長期戦略を腰を据えて考えにくいきらいがあります。仮に会長の任期は1年であるとしても、何らかの形で理事会には連続して2年間以上在籍できるような仕組みを考えるとよいのではないかと思います。お亡くなりになられた鈴木健二郎先生が会長在任時に会長の任期問題を理事会で取り上げ話題にされたことがありました。その後この件はあまり議論されては来なかったようです。いずれにせよ、いわば成熟期にあると思われる日本伝熱学会にとっては、そろそろ将来を展望して長期戦略を打ち立てる必要があろうかと思われます。

以上、取り留めの無い話を申し上げましたが、退任のご挨拶にさせていただきます。

皆様どうもありがとうございました。

鈴木健二郎先生を偲んで
In Memory of Professor Kenjiro SUZUKI

牧野 俊郎（京都大学）

Toshiro MAKINO (Kyoto University)

e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

本学会元会長、京都大学名誉教授・芝浦工業大学教授 鈴木健二郎先生には、病氣ご療養のところ、2007年4月25日、東京でご逝去になりました。享年67、余りに早いご他界がありました。

近くにあって長く先生からご指導いただいた者として、ここに、ご業績といくぶんの個人的な想いを記し、ご冥福をお祈り申しあげます。

鈴木健二郎先生は、1940年1月3日、当時の中華民国上海市にお生まれになりました。その後、ご郷里の岡山市で成長されて、京都大学工学部に入学、1962年に同学部機械工学科を卒業されました。当時同学部では実質的な5年制(形式的には大学院修士課程1年退学制)をとっていましたので、先生もその道を進みました。先生は修士課程1年退学の後、1年だけ(株)神戸製鋼所にお勤めになりました。先生は、この1年のご経験をたいへん貴重なものとお考えになっていたようで、そのような経験のない私には、よく「君は修行が足らない」などと仰ったものです。

先生は、その1年の後、京都大学にもどられ、助手・助教授を経て、1986年に教授に昇任されました。先生がご担任になった講座(当時の小講座)は、京都大学の由緒ある講座でした。明治30年に京都帝国大学が創設されたときにまず開設されたのが、理工科大学の機械工学科と土木工学科でありました。その機械工学科の初代の教授は朝永正三先生で、その朝永先生は、物理学の振一郎先生の父君で哲学の三十郎先生の兄君でした。正三先生の次が菅原菅雄先生、その次が佐藤俊先生、そして鈴木健二郎先生がありました。

京都大学では、国際交流委員会委員長、大型計算機センター長、評議員、留学生センター長を兼任されました。2003年に定年退官され、京都大学名誉教授の称号を授与されました。



京都大学退官後には、芝浦工業大学大学院シニア教授となり、国際交流センター長、エネルギーフロー研究センター長を兼任されました。

先生は、海外においても、インペリアルカレッジ、デルフト工科大学、カリフォルニア大学バークレイ校、グルノーブル工科大学、スタンフォード大学日本センター、デルフト工科大学などの客員研究員や客員教授などを務められました。

また、文部省外国人留学生の選考等に関する調査・研究協力者会議委員、文部省学術審議会専門委員、国立情報学研究所 SINET 計画調整会議委員、最高裁判所任命知的財産関係専門委員などを務められました。

この間、先生は、永年にわたって流体力学・伝熱学・熱工学・エネルギー工学の教育と研究に努め、多くの優れた研究者・技術者を育成するとともに、多くの優れた業績を挙げて来られました。そのご業績を3つにとりまとめると、次のように理解しています。

第1には、複雑乱流の制御と伝熱促進に関する基礎研究がありました。エネルギー生産に関する工学系においては、エネルギー資源から得られる熱エネルギーをより利用しやすいエネルギーに変換する技術の進展が望まれますが、先生は、その技術の第一の基礎となる対流熱伝達現象のメカニズムを明らかにするために、熱エネルギー装置のなかで起こる複雑乱流と熱伝達のミクロ現象を流体力学的・伝熱学的に究明し、その現象を工学的に制御することをめざし、もって、エネルギーの有効利用を図るために具体的かつ実際的な手法を提案して来られました。

第2には、熱交換器の高性能化に関する研究がありました。エネルギー利用の高効率化を図るために、熱エネルギー装置のもっとも重要な要素機器である熱交換器の高性能化が重要な研究課題になりますが、先生は、熱交換器における熱エネルギー輸送を支配する流体の流れと熱交換器のフィンなどの機器要素の固体壁面との関係に注目して、新しい機能・形式をもつ熱交換器を提案し、その有効性を実験と数値計算によって明らかにし、もって、熱工学・エネルギー工学の学術的・実際的な進展に貢献されました。

そして、第3には、燃料電池とマイクロガスタービンの複合発電に関する研究がありました。今後の地球規模のエネルギーと環境の将来を展望するには、都市における分散型の電力供給システムが重要になりますが、先生は、この社会システム技術の構築のための最重点課題は燃料電池とマイクロガスタービンの複合発電にあると考え、上述の物理的・工学的な基礎研究に基づいて、系統的なエネルギーシステム工学の研究を企画・推進されました。この一連の研究は、先生の生涯の研究の集大成となるものがありました。

先生は、学術界の運営にも尽力され、日本混相流学会副会長、日本伝熱学会副会長、日本機械学会熱工学部門長、日本伝熱学会会長、日本機械学会関西支部長、エネルギー・資源学会副会長などを務めになりました。

国際的な活動としては、第9回せん断乱流国際会議(1993)、乱流熱・物質移動国際会議(1994)、第10回国際伝熱会議(1994)、第10回輸送現象国際会議(1997)、マイクロシステム伝熱輸送現象国際会議(2000)など、多数の国際会議の組織委員会の委

員・委員長として、会議の開催・運営に尽力されました。また、国際伝熱センターの活動・運営に参画し、科学委員会委員、理事会委員・副議長・議長を歴任されました。さらに、Heat Transfer Japanese Research, International Archives of Heat and Mass Transfer, International Journal of Transport Phenomena, Hybrid Methods in Engineering, International Journal of Heat and Mass Transfer, International Communication of Heat and Mass Transferなどのエディターや顧問委員を務めるなど、国際学術誌の編修に尽力されました。

これらの学術活動に対して、日本機械学会論文賞、日本伝熱学会学術賞、日本機械学会熱工学部門国際功績賞、ポーランド国高等教育省功績栄誉賞、国際伝熱センター Fellowship Award、日本機械学会熱工学部門永年功績賞などが贈られました。

以上のように、先生は、永年にわたって、流体力学・伝熱学・熱工学・エネルギー工学などを融合する総合的な工学研究を推進し、伝熱学の新領域への展開、流体熱工学の構築、さらには、熱交換技術とエネルギー変換技術の新展開を図り、斯学の進展に多大の貢献をなして来られました。また、国際的な学術界において指導的役割を果たして来られました。

先生には、2006年の夏、Sydneyで開かれた第13回国際伝熱会議の折にお目にかかりましたが、それが私には最後の先生になってしまいました。Sydneyの先生は、お元気そうで、かくしゃくとしていらっしゃるように見えました。国際伝熱センターの理事会議長として、国際的なリーダーの立場で堂々と振舞っておられた先生を、式典の大会場の片隅から拝察し、改めて鈴木先生の国際性を頼もしく感じていました。後に知ったことですが、先生は、このとき、すでに肝臓癌と戦っておられたとのことでした。

Sydneyの会議の折に、日本からMax Jacob Awardの候補を推薦しようという話を持ちあがりました。帰国後になん人かの伝熱・熱工学の者たちが集まって協議し、先生をこの賞に推すことにしました。2007年6月の同賞の推薦期限をめどに、先生のご業績をまとめ、また日本と欧米の研究者に推薦状を依頼するなどの作業を進めていました。同年4月、作業は完了に近づいていました。

2007年4月25日、同僚の吉田英生教授が、沈痛な面もちで私の部屋を訪ねて来ました。いつもは軽い冗談から入って来る彼のようすが異常であったのを憶えています。まさか、と思って絶句しました。その日は水曜日でした。二人はその日の「熱力学」の講義を休講にして、ご冥福を祈り、みなさんへのご連絡にときを送らせました。

鈴木健二郎先生は、たいへんご業績とともに、すばらしいご人脈、すばらしいお弟子さんを育てて逝かれました。その方々とともに、まだ先生のご逝去がしつくりと来ない私は、こののち時間を掛けて先生を偲びたく思っています。

振り返りますに、私には、上に記したご業績より、先生のお人がらに教えられることが多かった

のかと思います。先生には京都大学の機械系工学の同窓会に先生の同級生が多くいらして、お会いすると、その方々からは、「牧野先生、あのね、鈴木がねえ、...」と話しかけられて戸惑うことがよくありました。戸惑いながらも、先生はそんな方であったのかと思ってほっとするひとときをもったものです。

この7月、Vancouverでの日米熱工学会議の折には、小さい鈴木追悼セッションを催しました。11月に京都大学で開催の日本機械学会の熱工学コンファレンスでは、先生を偲ぶ追悼のセッションを設けます。どうぞお訪ね下さい。

鈴木健二郎先生のご冥福をお祈り申しあげます。

鈴木健二郎先生の想い出
Memoirs of Prof. Kenjiro SUZUKI

康 倫明（株式会社ダイキン環境・空調技術研究所）
Yoon-Myung KANG (Daikin Air-Conditioning R&D Laboratory, Ltd.)

鈴木健二郎先生には草創期の乱流数値解析や循環乱流の熱伝達など、古きよき時代に研究、指導をいただきました。当事、先生の滞在先だったインペリアルカレッジ、デルフト工科大学から時折いただくお便りは「眼からうろこ」でした。満を持して投稿した先生と共に著の論文は、数値解析という概念が理解してもらえず掲載まで苦労しましたが、いまとなればなつかしい想い出です。「新しいことは簡単には受け入れられない」こともあると学びましたが、先生の落ち着いた対応はいまも私の行動規範になっています。

先生の生き方について、「人をだますより、だまされる方がいい」という言葉が印象に残っています。京都大学退職記念の折に教室で語られたのですが、先生の誠実を示すと共に、当時先生が携わっていた大学運営の苦労がしのばれる言葉でした。

ご家族への愛情、とくに奥様への変わらぬ愛情は羨むほど暖かいものでした。先生の京大時代の門下生による「サヴァサヴァ会」という集まりがあります。気軽に“サヴァサヴァ”とあいさつできるような集まりにという先生の命名ですが、そこでサヴァサヴァ樂団という弦楽+フルートのアンサンブルをやっています。サヴァサヴァ二次会の酒席で、奥様の昭子様が晩学でバイオリンの稽古をされていると伺い、ではサヴァサヴァのメンバーでアンサンブルをやろうと盛り上がったのですが、しばらくほおっておいたところ、半年ほどたった5月の連休中に突然、先生から丁重なメールが届きました。どうも奥様が本気らしいという内容です。急遽、木枝茂和・香織夫妻、平井悦郎君ら関連メンバーに声をかけ、なんとか次のサヴァサヴァ会に間に合わせましたが、それもいま想えば先生の奥様への愛情からだったのです。京都大学ご退職記念パーティーではビオラで長女の麻子さん、孫の奈美ちゃんにもバイオリンで入って頂き大いに楽しませてもらいました。



2006年10月28日 京都聖護院御殿荘にて奥様と

先生の学位論文は振動燃焼の研究についてでしたが、その後の研究は複雑乱流の現象論、数値解析、その応用と研究を進められました。伝熱研究としては先が見えた段階に至っていたように思います。また、京大、芝浦工大を通じて国際交流に意欲を燃やされ、京大では留学生用のカリキュラムをまとめられています。近年は固体酸化物燃料電池を核とした分散電源システムの研究を主宰されていましたが、これからという時期に後進に道を譲ることになりました。芝浦工業大学に移られて4年、新しい仕事が立ち上がったところでした。

最後にサヴァサヴァ会のメンバーから寄せられたエピソードを紹介させて頂きます。

* * * * *

不肖の弟子で、今は伝熱とはまったく関係のない仕事をしておりますが、“Turbulence”的輪読で苦しんだこと、伝熱学会への参加など、学問の入り口を覗かせていただいたことが記憶に焼きついています。今は、不真面目な学生どもの指導も忘れ、安らかにお休みください。

1974年卒 馬場 稔

私たち学生と一緒にコンパでのお得意の歌は、村田英雄の「王将」だったような記憶があります。初めて聞いた時は、「勤勉実直の学者」の外見とは違って豪放な性格かなと不思議に思ったものでしたが、「吹けば飛ぶような将棋の駒に、賭けた命を笑わば笑え・・・」 そうか、一度の人生を信念を持って生きるという心意気だったのでは、と今になって気がつきました。あいかわらず、真意を読めない未熟者とお叱りを受けるかもしれません。

1976年卒 田中 純

研究室では厳しい先生で、研究のうえで妥協することは一切ありませんでした。その一方で、学生が何かを達成すると、まるで自分のことのように喜んでくださいました。弟子を私用に使ったりすることを戒めておられたようで、私達は少し寂しい思いをしました。その一方で対等な関係はお好きで、同窓生が国際会議の折りなどに奥様ともどもお誘いすると、おしゃべりをしながらワインや料理を楽しんでおられました。

1978年卒 川口靖夫

鈴木先生はボート部の部長も務められていた方で、突然の訃報に驚いております。
ご冥福をお祈りします。

1978年卒 岡部好男

鈴木先生は、先生というより兄のような頼もしく親しみやすい存在でした。一方で研究では、常にデータに厳格な方で私が実験や数値計算結果を持ってゆくと、いつも「データがまだ足りない」と口癖のようにおっしゃり、細かくご指導いただいたものでした。4回生の卒論を提出した春、当時の宇治の先生の官舎にお邪魔し、奥様に夕食をご馳走になった時のこと、奥様が「主人は家で、食事を味見する時にもすぐ「データが足りない」といってなかなかほめてくれないんですよ」とおっしゃったのを今でも覚えております。研究でも、プライベートでもデータに厳しい姿勢を貫いておられた鈴木先生のそんな生き方は、私がその後技術者として仕事を進めてゆく中で、常に心の中で

規範となりました。西京区にご自宅を新築された折も、完成早々にさっそくお招きに預かりました。その折、お忙しい研究の最中にこつこつと挑戦され、完成された巨大なジグソーパズルをお見せ頂きましたね。ジグソーパズルひとつでも手を抜かない、やると決めたらどこまでもやるお姿に感動したことを見えております。この時のことを思い出すたびに、「やると思えばどこまでやるさ。」という先生の十八番の歌声が、私の胸に響いて来ます。

1979年卒 千々木 亨

定例研究会で実験結果を報告しました。できが悪かったためか、質問や議論で日本人の学生も留学生もけんけんごうごう。收拾が付かないくらい騒然となりました。わたしは恥じ入ってじつとうつむいていました。すると、「この伝熱工学研究室のメンバーは、皆本当の家族のようなものだから、どんなこともフランクに話すのだよ。」といったことを、鈴木先生は両隣の留学生に英語で極めてにこやかに繰り返して仰いました。今でも忘れられません。

1988年卒 喜多茂雄

先生が居ると場が明るくなる、太陽のような存在でした。始終優しく、しかし時に厳しくご指導いただきました。今は明るい笑顔しか思い浮かびません。先生とは何度か海外にご一緒しました。ポルトガル、学会が終わりレンタカーを借りて、青い海が見えるレストランを目指しました。先生、最初は少し練習なさって、その時には、さすがの世界の健二郎先生も練習するんだなあ、と思いました。道中は結構な距離があった筈ですが、ドライブ中は始終奥様と楽しそうに会話をなさって、僕にはとても短く感じられました。その時、先生と一緒に見た青い海と、先生と奥様の写真、先生の笑顔が忘れられません。「チャンスの女神に後ろ髪は無い」先生が繰り返し仰っていた言葉を噛みしめています。

1989年卒 稲岡恭二

サヴァサヴァ

平成 18 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, 2006

表彰選考委員会委員長

牧野 俊郎 (京都大学)

Toshiro MAKINO (Kyoto University)

e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

学術賞、技術賞及び奨励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、各賞の授賞者を下記のように決定した（授賞研究の記載は順不同）。表彰式は、平成 19 年 5 月 24 日長崎市（長崎ブリックホール）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：

Peter L. Woodfield

((独)産業技術総合研究所)

共同研究者：

門出政則 (佐賀大学)

光武雄一 (佐賀大学)

Implementation of an Analytical Two-Dimensional Inverse Heat Conduction Technique to Practical Problems

International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.49, pp.187-197, 2006.

2) 代表研究者：

中別府 修 (明治大学)

共同研究者：

坂寄純一 (東京工業大学・院)

MEMS センサによる少数細胞の代謝熱モニタリング

Thermal Science and Engineering, vol.14, no.4, pp.115-120, 2006.

2. 技術賞

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

1) 代表研究者：

中尾一成 (三菱電機(株))

共同研究者：

弓倉恒雄 (三菱電機冷熱プラント(株))

尾崎永一 (三菱電機(株))

池内正毅 (元 三菱電機冷熱プラント(株))

辻森 淳 (関東学院大学)

山中悟郎 (元 三菱電機エンジニアリング(株))

平田雄志 (大阪大学・名誉教授)

針状らせんフィン付き吸収伝熱管搭載の高昇

温度型吸収ヒートポンプの開発

化学工学論文集, vol.32, no.6, pp.484-493, 2006.
ほか

3. 奨励賞

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

1) 研究者：

小野綾子 (北海道大学・院)

サブクールプール沸騰における限界熱流束発生機構の研究

第 43 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol.II, pp.563-564, 2006.

2) 研究者：

塚原隆裕 (東京理科大学・院)

大規模直接数値シミュレーションによる平面
クエット流の乱流熱伝達に関する研究

第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集,
vol.II, pp.369-370, 2005.

3) 研究者：

森本賢一 ((独)海上技術安全研究所)

熱流動の随伴解析を用いた再生熱交換器の形
状最適設計

第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集,
vol.I, pp.1-2, 2005.

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

ピーター ウッドフィールド ((独)産業技術総合研究所), 門出 政則 (佐賀大学), 光武 雄一
Peter WOODFIELD (AIST), Masanori MONDE (Saga University), Yuichi MITSUTAKE
e-mail: p.woodfield@aist.go.jp

1. Introduction

It is a great honor to receive this award from the Heat Transfer Society of Japan in recognition of our work with analytical solutions to inverse heat conduction problems (IHCP) [1]. Research into this topic in the Monde laboratory began over 10 years ago following a need to calculate surface temperatures and heat flux in boiling experiments based on temperature readings from thermocouples embedded 2 to 5 mm beneath the surface. Some inverse solutions from the literature were tested but were found unsatisfactory for the problem at hand.

2. IHCP Solutions in Monde's Laboratory

The first major breakthrough came with the idea to make use of a polynomial in the half-power of time to approximate the measured data [2]. Using this concept, further one-dimensional solutions in different coordinate systems were derived [3] and the solution was then extended to two dimensions [4]. To further improve the fit to experimental data one of Monde's doctor course students, J. Hammad, suggested dividing the data into time partitions and applying the inverse solution separately to each partition.

The time partition concept proved successful but some problems still remained. Particularly, it was unclear as to what criteria should be used to decide the size and position of the partitions. Unfortunately, it was sometimes necessary to adjust the size for different data sets. These problems were finally resolved in the proposal by Woodfield et al. [1] to replace the partition with a moving data window, the size of which was decided based on the Fourier number with the characteristic dimension being the distance from the surface to the deepest sensors.



P. L. Woodfield M. Monde Y. Mitsutake

3. The Monde Method

The basic approach used in our work is as follows:

1. Approximate the window of experimental data with polynomials in the half-power of time and cosine or Bessel eigenfunctions in space.
2. Apply Laplace transforms and solve in s -space.
3. Write the solution as a power series expansion about $s=0$ and apply inverse Laplace transforms.

References

- [1] Woodfield, P. L., Monde, M., and Mitsutake, Y., Implementation of an Analytical Two-Dimensional Inverse Heat Conduction Technique to Practical Problems, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **49** (2006) 187.
- [2] Monde, M., Analytical Method in Inverse Heat Transfer Problem Using Laplace Transform Technique, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **43** (2000) 3965.
- [3] Monde, M., et al. Estimation of Surface Temperature and Heat Flux Using Inverse Solution for One-Dimensional Heat Conduction, *J. Heat Transfer*, **125** (2003) 213.
- [4] Monde, M. et al., An Analytical Solution for Two-Dimensional Inverse Heat Conduction Problems Using Laplace Transform, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **46** (2003) 2135.

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



中別府 修 (明治大学), 坂寄 純一 (東京工業大学・院)
Osamu NAKABEPPU (Meiji University), Junichi SAKAYORI (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: onakabep@isc.meiji.ac.jp

この度、長崎ブリックホールで開催された日本伝熱学会第 45 期総会において、「MEMS センサによる少數細胞の代謝熱モニタリング」に対し、日本伝熱学会賞をいただきました。受賞者一同、大変光栄に思っております。また、第 44 回日本伝熱シンポジウムにおいて授賞講演の機会を賜り、ご推薦いただきました方々、選考委員会、シンポジウム実行委員会ならびに関係各位に対し心より感謝申し上げます。

授賞対象となりました論文は、*Thermal Science and Engineering*, Vol.14, No.4, pp.115-120 に発表したものです。本テーマは、マイクロ・ナノテクノロジーの効果的な熱工学への応用を模索しているとき、極微量の代謝発熱を行う生体細胞の活動を極限的に高感度な熱量計測でモニターできないだろうか、との着想から 2003 年に研究を始めたものです。ヒトの細胞は通常 1 個当たり 10pW 程度の代謝発熱をしていますがガン化すると代謝量が数～十倍に増える、アレルギー物質と反応し発熱が増えるなどの特性を利用し、医療応用が可能になるのではと、夢を描いています。

当時は中別府は東京工業大学に在籍しており、ナノカロリメトリを修論テーマとしていた出野恒平氏（キャノン）と共に、サーモパイアルセンサ、簡易恒温槽を試作し、酵母菌の活動をモニターする実験を開始しました。出野氏の修論研究内では、代謝モニタに関する良い結果は得られませんでした（ナノカロリメトリに関しては画期的成果を挙げている）が、これを引き継いだ坂寄（現ホンダ）とともに、サーモパイアルの高性能化と計測環境の安定化を目指して研究を進め、従来よりも高感度に少數細胞の代謝熱を計測できることが提示できました。

研究の概略を紹介します。装置は、3 重の恒温槽内に、350 の薄膜熱電対を直列接続したサーモパイアルセンサを設置し、センサ直上の酵母菌培養

液の発熱をローノイズアンプを介してモニタするものです。細胞の代謝により薄板サーモパイアルの中心部と周辺部に生じる微小な温度差を計測する装置となっています。研究を通じて得た知見は、酵母菌の代謝熱よりも培養液表面からの蒸発熱が非常に顕著であり、液体パラフィンで培養液と大気との接触を絶つことでこの問題は解決しました。また、恒温槽はペルチェ素子と PID 温度制御器を併用し熱ノイズの減衰性能と設定温度へ速やかに到達する応答性を支障ない程度に実現しました。サーモパイアル信号はローパスフィルタ付のアンプ 2 段で増幅ましたが、アンプ類も室温変動に影響されるため、極力恒温槽内に設置する工夫を行いました。これらの工夫の末に、約 1 万個の酵母菌の代謝熱 (200nW) を計測でき、長時間に渡り酵母菌の増殖挙動をモニタ可能なバイオ熱量計が実現できたのです。

熱ノイズ対策や電気系の改良でもう一桁程度少數の細胞に対しても代謝熱モニターは可能である感触を得ています。今後は、100 個単位や 10 個単位、究極的には細胞 1 個の代謝をモニタ可能とする技術の開発を目指したいと考えています。

これまで、第 43 回日本伝熱シンポジウム、日本機械学会熱工学コンファレンス 2006 等で本研究を発表しておりますが、学会員の皆様からはいつも良いアイディアやコメントをいただき、同時に研究を継続する活力と勇気をいただいてきました。学会活動を推進されてきた諸先輩方には感謝しております。

最後になりましたが、本授賞は、研究室のスタッフ、着実に研究を推進してきた学生たち、ご指導賜りました諸先生方、MEMS センサ制作に協力を頂いている東京工業大学メカノマイクロプロセス室の方々のおかげによるものと思っております。深く感謝の意を表させていただきます。

日本伝熱学会技術賞を受賞して

Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

中尾一成（三菱電機），弓倉恒雄（三菱電機冷熱エンジニアリング）
 尾崎永一（三菱電機），池内正毅（関西電力），辻森淳（関東学院大学）
 山中悟郎（元三菱電機），平田雄志（大阪大学名誉教授）



このたび長崎で開催されました日本伝熱学会第45期総会において「針状らせんフィン付き吸収伝熱管搭載の高昇温度型吸収ヒートポンプの開発」に対して、日本伝熱学会技術賞を頂きました。ご選考頂きました諸先生方に紙面をお借りして心よりお礼申し上げます。

地球温暖化を防止するために低温排熱を回収し、付加価値の高い高品位のエネルギーとして再利用できる省エネルギー機器として、排熱駆動の臭化リチウム／水系高昇温度型吸収ヒートポンプを開発しました。本システムは低圧段、高圧段に吸収器を搭載し、低圧段側で得た熱出力を高圧段の熱源とする第2種2段昇温サイクルで動作し、①高昇温度幅60Kの実現 ②90°C排熱から150°Cの高温出力の達成 ③熱出力に対して少ない消費電力での駆動による低コスト・経済性運転可能 ④独自に開発した熱物質移動特性に優れた高性能吸収伝熱管の採用による小型高性能化 ⑤ポンプ以外の稼動部無しや自動運転による高信頼性確保など優れた特長を持っています。

高昇温度幅の実現に向けては高性能吸収器用伝熱管の開発が最重要課題であり、流下液膜と伝熱管壁面との良好な濡れ性の実現と液膜乱れによる吸収促進、伝熱促進が必須条件でした。

そこで、各種伝熱管上の流下液膜の流动観察から、液濡れ性が良く、短波長で周期的な液膜変動を発生できる針状らせんフィン付き管の発案に至りました。伝熱管上における周期的な液膜変動が熱物質移動特性に好影響を及ぼすと推察し、その性能評価を行なうために垂直流下液膜式吸収器の熱物質移動特性を簡便かつ詳細に記述しうる数値解析モデルを開発しました。本モデルは蒸気吸収を伴う臭化リチウム水溶液流下液膜界面の液相側境膜における熱と物質の同時移動現象に相似則を仮定し、流下方向に分割した個々の流下液膜小領域に適用した解析モデル式を吸収管全長にわたり



吸収式ヒートポンプと針状らせんフィン付き伝熱管

積分して吸収管の物質移動係数と液膜熱伝達係数を求める一次元差分数值解析モデルです。本数值解析モデルは、①数値解析が困難であった伝熱管表面に突起などがある吸収促進管を対象とした熱物質移動特性の把握 ②従来の入口と出口の対数平均温度差・濃度差から求めた総括伝熱係数や総括物質移動係数に替えて、液膜気液界面近傍における液相側物質移動係数と流下液膜－伝熱管壁面間の液膜熱伝達係数による分離評価 ③温度、濃度、水蒸気吸収量などの液膜流下方向に沿った局所分布把握を可能にしました。

本モデル適用により以下の技術成果がもたらされました。①従来のコルゲート管の2.2倍、平滑管の4.9倍と優れた針状らせんフィン付き管の物質移動係数を検証 ②物質移動係数と液膜熱伝達係数の実験値を用いたシミュレーションから計算された単段長尺吸収器の昇温幅は20～30Kと2段昇温システムの実証結果を裏付け ③針状らせんフィン形状が熱物質移動特性に及ぼす影響を把握し、最適形状化に反映することができました。

最後に、システム開発と要素技術開発の同時開発を意識したプロジェクトでしたが、本開発に従事されました関係各位に謝意を表するとともに、日本伝熱学会の益々のご発展を祈念いたします。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



小野 綾子（北海道大学・院）

Ayako ONO (Hokkaido University)

e-mail: ayako-o@pop.qe.eng.hokudai.ac.jp

平成 19 年 5 月 24 日に長崎で開催されました日本伝熱学会第 45 期総会において、「サブクールプール沸騰における限界熱流束発生機構の研究」に対して、日本伝熱学会奨励賞を頂きました。ご推薦、ご選考下さいました先生方ならびに関係者の方々に心よりお礼を申し上げます。

沸騰は原子炉を始めとする大型高熱流束機器から LSI に代表されるような電子機器の冷却まで、汎用性の高い冷却技術ですが、限界熱流束(CHF)と呼ばれる除熱限界が存在します。この CHF は液体のサブクール度の増大とともに顕著に増大することが知られており、発熱密度のより大きな機器の除熱方法として有効ですが、CHF 増大の要因は明らかになっていません。この原因を突き止めようとしたことが本研究を始めるきっかけでした。研究の対象には、上向き面上の水のプール沸騰を選びました。この体系では、飽和沸騰とサブクール沸騰で CHF 近傍での沸騰の外観に大きな違いがないことから、CHF の増大は伝熱面ごく近傍の気液挙動に起因するものと考えました。しかし、CHF 近傍では蒸気塊が伝熱面上をすっかり覆ってしまい、上部からの光学的な観察は困難なため、触針法を採用することにしました。ただし、CHF の発生に密接に関連する蒸気塊下の気液構造のスケールは μm オーダーと非常に微細であるため、測定には高い空間分解能と位置精度が要求されます。

本研究では、種々の工夫を凝らすことで先端径 $5 \mu\text{m}$ 以下、位置精度 $1 \mu\text{m}$ 以下の高精度導電プローブを作成し、このプローブを用いて蒸気塊下の気液微細構造を詳細に調べました。その結果、サブクール沸騰では、飽和沸騰の CHF をはるかに凌ぐ高熱流束であっても、伝熱面と蒸気塊の間には常に液層が存在することが判明しました。この液層の厚さを決定する方法として、蒸気塊に対応する信号を特定し、その信号が消滅する位置までを液層厚さであるとする新たな方法を提案し、各サブ

クール度における液層厚さを求めました。その結果、液層厚さの熱流束への依存性はサブクール度毎に異なる傾向を持ち、既存の飽和沸騰におけるマクロ液膜厚さの予測式はサブクール沸騰では適用することはできないということがわかりました。また、測定の過程で、プローブを伝熱面から数 μm の位置に設置することで CHF 近傍での液層のドライアウト現象を捉えることができることを見出しました。このドライアウト信号を詳細に解析することで、壁面のドライアウトは蒸気塊滞留後半期に起こること、伝熱面は核沸騰領域でほとんどが濡れており CHF を境に急激に乾燥領域が拡大することが分かり、飽和およびサブクール沸騰の CHF 発生機構として「マクロ液膜蒸発モデル」が妥当であることを確認しました。

以上の結果から、CHF がサブクール度とともに増大する主要因は、蒸気塊下の液層がサブクール度とともに厚くなるためであることが分かりました。しかし、飽和沸騰からサブクール沸騰までの液層形成を統一的に説明できるモデルは提案されておりませんので、本研究では統いて飽和沸騰からサブクール沸騰までを含めた液膜形成モデルの検討を行ないました。モデルでは、発泡点密度が Poisson 分布に従って分布していると仮定して、一次気泡同士の接合によって形成される小合体泡が更に接合したときに小合体泡の間隙に取り残される液が液膜を形成するとしました。モデルから見積もった液膜厚さは実験結果を矛盾なく説明できる結果となりました。

最後に、卒論から現在に至るまでの 5 年間、懇切なご指導を賜りました坂下弘人准教授、測定装置の作成において多大なる助言を賜りました元・技術職員の村井郁夫先生に厚くお礼を申し上げます。そして、伝熱シンポジウムで本研究に対して意見や助言を下さった諸先生方に深く感謝の意を表させていただきます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



塚原 隆裕 (東京理科大学・院)
Takahiro TSUKAHARA (Tokyo University of Science)
e-mail: tsuka@rs.noda.tus.ac.jp

この度、修士・博士後期課程を通じて着手した研究活動について望外の評価を頂き、日本伝熱学会から奨励賞を賜りましたこと、大変光栄に存じます。ご推挙、ご選考下さいました諸先生方、選考委員の方々に心よりお礼を申し上げます。

今回受賞の対象となりましたのは「大規模直接数値シミュレーションによる平面クエット流の乱流熱伝達に関する研究」で、東京理科大学理工学部・河村洋教授のもとで行いました研究テーマの一つです。平面クエット流れとは、平行平板間の流体が両壁面間の相対運動によって駆動される流れ場です。水平方向には一様で、簡単な形状の流れ場であることから、そのクエット乱流は壁乱流の一形態として古くから理論的・実験的研究が盛んに行われてきました。さらに、そのクエット乱流における熱伝達を解析することは、相対運動する物体間の熱流動特性を評価する上で基礎的な知見を与える、さらには得られた解析結果を乱流モデル構築・改善に反映していくことで応用分野への貢献が期待できます。また、熱工学的な分野だけではなく、ポアズイユ乱流と同様にカノニカルな壁乱流であることから、クエット乱流に見る乱流構造の解明は、壁乱流物理における統一的理解を目指す上で極めて重要であると認識しています。

乱流現象とその熱伝達の研究に際し、支配方程式をより厳密に解く直接数値解析 (DNS) が、過

去 20 年の間で数多く行われてきました。しかし、ポアズイユ乱流に比べ、クエット乱流における DNS は少なく、その乱流熱伝達の解析例も数限られているのが現状です。これは、実験による検証が困難であることに加え、クエット乱流特有の大規模な乱流構造の把握が問題になるためです。過去の研究により、クエット乱流には、平板間距離サイズの大きな縦渦の発生によって、大規模な速度変動が流れ方向に非常に伸びて存在することが知られており、それを計算領域内に十分に捉えることは、従来、困難がありました。一方で、大型計算機の目覚しい発達に伴い、計算領域を大きく拡張した DNS が可能となった今、世界最大級の計算領域を用いたことで、クエット乱流の大規模構造を捉えることに成功しました。大規模構造が流れ方向に有限長であること（平板間距離の約 30 倍、図 1 参照）を見出し、構造が及ぼす熱輸送への寄与を調べました。摩擦係数・熱伝達率等の統計量に見る有意な影響から、十分な計算領域をもって有限長の構造を捉えることは、熱流動特性を評価する上でも重要であることを示しました。

今後は、大規模構造の発生・維持のメカニズムの理解を深め、より幅広いレイノルズ数・プラントル数における乱流熱伝達の調査を行い、他の壁乱流形態と比較していくことで、壁面周りの乱流熱伝達の解明に貢献していきたいと存じます。

今現在、スウェーデン王立工科大学 (KTH) に訪問研究として、数値計算のみならず実験の経験を積んでいる最中で、幅広く着想的な研究が行える研究者となるため精進しております。今回の受賞を機に再度、身を引き締め、伝熱工学の進展に努めていきます。

最後に、学位取得に至るまで温かくご指導を頂きました河村洋教授（東京理科大学理工学部機械工学科）をはじめ、お世話になりました諸先生方、研究室の皆様方には、改めて感謝の意を表します。

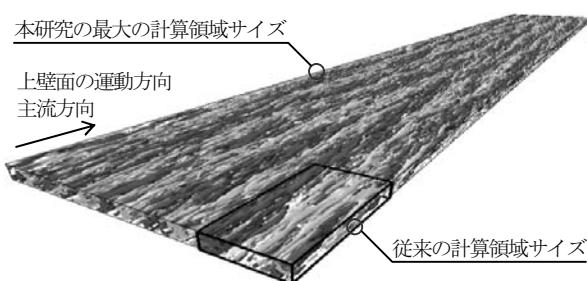


図 1 クエット乱流における大規模構造。主流方向速度変動成分を可視化：高速 (灰色), 低速 (濃灰).

日本伝熱学会奨励賞を受賞して
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



森本 賢一 ((独)海上技術安全研究所)

Kenichi MORIMOTO (National Maritime Research Institute)

e-mail: morimoto@nmri.go.jp

日本伝熱学会第 45 期総会におきまして、「熱流動の随伴解析を用いた再生熱交換器の形状最適設計」に対し、日本伝熱学会奨励賞をいただきました。ご推薦、ご選考賜りました諸先生方ならびに関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

近年、省エネルギー・低環境負荷を実現する観点から熱流体システムの高効率化に対する期待が高まっております。多くのエネルギー機器において、熱交換器はエネルギーの有効利用を促進する重要な構成要素となっていますが、本研究では、熱交換器内の運動量・熱輸送の同時最適化を実現する観点から、熱流動の随伴解析を用いた形状最適設計手法を構築することに取り組みました。以下に、本研究の概略を紹介させて頂きます。

マイクロガスタービンを中心とする小型発電装置が従来の大型発電によるエネルギー供給体系を変革する高効率分散エネルギーシステムとして注目を集めています。早期実用化に向けた研究開発が各方面で展開されていますが、本研究はその一環として、再生熱交換器の高性能化・コンパクト化に向けた具体的な設計指針を示すことを目的として開始されました。

従来から様々な熱交換器が提案されていますが、気体間で熱交換を行うガスタービン用の再生熱交換器としては、波状に折り曲げた隔壁により流路を構成するプライマリー・サーフェス型熱交換器が有望視されています。いかに圧力損失を抑えつつ伝熱特性を向上させるかが重要な設計課題の一つになります。しかし、レイノルズ数が数百程度の層流域においても熱交換器内部の熱流動は複雑な様相を呈するため、有効かつ一般的な形状設計手法は確立されておりません。

本研究に先行して、高温・低温流体を千鳥状に配置する対向流型熱交換器を対象とした熱流動数値解析により、波状流路内の伝熱・圧力損失特性に対する系統的な評価を行いました。波状変形が

流れ方向に対して傾き角を持つ斜め波状壁を用いることで、上下逆回転の渦構造対が形成され、強い 2 次流れによる伝熱促進を低圧力損失で達成できることが示されました。これらの知見が、今回受賞の対象となった形状最適化を行う原動力となりました。

従来の形状設計手法は主に物理的な直観あるいは経験的な知見に基づいており、最適な流路形状を得ることは非常に困難であると考えられます。他方で、変分原理に基づく最適制御理論が 1970 年代に理論的な最適解を与える形状最適化法として導入され、近年の計算機性能の飛躍的な向上に伴い、流体機器の設計問題への適用を試みる研究例が多く報告されるようになりました。本研究では、これらの研究に着想を得て、これまで行われてこなかった熱交換器の形状設計への随伴解析の適用を試みました。本研究では対向流型熱交換器の形状最適化に向けた第一段階として、伝熱・圧力損失特性を同時に考慮した単管流路の形状最適化手法を構築しました。斜め波状壁を用いた流路に適用し、その有効性を示す結果が得られております。

一連の研究を通じて、苦しみと楽しみを伴う大変貴重な経験をさせて頂きました。今回の受賞を励みに、さらなる研究の進展を図るべく今後とも研究活動に努めていく所存です。

本研究の遂行にあたり、終始懇切なご指導を賜り、筆者をお導き下さいました東京大学大学院工学系研究科鈴木雄二先生に心より感謝申し上げます。また、最高の研究環境を与えて頂き、多大なご指導を賜りました笠木伸英先生に深謝申し上げます。最後に、本受賞は多くのご助言を頂いた鹿園直毅先生をはじめとする諸先生方、ならびに多くのご支援を賜った笠木・鈴木研究室、鹿園研究室の皆様のおかげによるものであります。ここに深く感謝の意を表させて頂きます。

平成 19 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞

Prizes for Science and Technology, The Commendation for Science and Technology
by the Minister of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2007

表彰選考委員会委員長
牧野 俊郎 (京都大学)
Toshiro MAKINO (Kyoto University)
e-mail: a50141@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

平成18年5月に標記の大典表彰候補者の公募があり、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3件について科学技術賞の授賞が決定された。平成19年4月17日に表彰式が行われ、受賞者には賞状と楯が授与された。以下には、4月10日報道発表のための業績概要(受賞者記)を紹介する。

【科学技術賞 (開発部門)】

Development Category

高効率 HFC-134a ターボ冷凍機の開発

青木素直 (三菱重工業(株))
川上 孝 (三菱重工冷熱システム(株))
入谷陽一郎 (三菱重工業(株))
関 亘 (三菱重工業(株))
上田憲治 (三菱重工業(株))

大規模空調用途の熱源機器には、電動のターボ冷凍機と化石燃料を直接燃焼させる吸収冷凍機がある。吸収冷凍機はエネルギー効率が低く CO₂ 排出量がターボ冷凍機の2倍以上と大きいが平成12年以前では市場の約8割を占めていた。ターボ冷凍機も低負荷時の性能が低く、またオゾン層を破壊する恐れのある冷媒を使用している等の課題があった。

本開発では、冷媒にオゾン層を破壊する恐れのないHFC-134a を使用し、全運転域で高効率となるターボ冷凍機を開発し市場投入した。このため、高効率2段ターボ圧縮機と蒸発器、凝縮器共に高性能な熱交換器を開発、最適な運転制御が可能な新型制御盤を開発、更にインバータで駆動する可変速機を開発した。

本開発により、当社従来機に対し20%以上の効率向上を達成し、電力使用量、CO₂ 排出量を20%以上削減可能とした。可変速機では通年運転の場合、電力使用量、CO₂ 排出量共に45%削減を可能とした。

本成果は、国内の大規模空調機市場の主力を吸収冷凍機から高効率電動ターボ冷凍機へ転換させ、CO₂ 排出量の削減と地球温暖化防止に寄与している。

主要特許 :

- 特許第 P03572234 号、蒸発器および冷凍機。

主要論文 :

- High-Efficiency Turbo Chiller (NART-series), *Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning 2002 講演論文集*, pp.259-264, Dec. 2002.

【科学技術賞 (技術部門)】

Technology Category

点接触式固体熱物性テスターの開発

高橋一郎 (山形大学)
熊坂利治 (米沢電線(株))

近年、多様な新素材が数多く開発されており、それらの物性評価が重要となっている。しかし、熱伝導率などの熱物性計測を工業現場で行なうのは容易でなく、したがって広範囲な固体材料に適用でき、簡便にその場測定できるような熱物性テスターが渴望されている。

本開発は、温度プローブを被測定物体へ10秒間押しつけるだけで熱伝導率などの熱物性値が同時に求められる測定理論と小型装置を開発したものである。この装置の特色は、点接触測定であることから、特別な形状の試験片を必要とせず少量でも測れること、被測定物体の表面近傍における局所的な熱物性が評価できることなどである。

本開発により、各種金属材料からセラミックス、高分子樹脂材料などの固体材料について熱物性が簡便に測定でき、また、その場測定が可能であることから、成形品の樹脂密度(結晶化度)分布の検出や、金属や樹脂部品などの劣化度の評価、材料分別・同定などに熱物性情報を活用することができるようになった。

本成果は、広範囲な固体材料の熱物性計測が簡便にできることの他、その場測定によって熱物性情報を非破壊的品質検査に応用することが可能となり、わが国の工業技術の高度化に寄与している。

主要特許 :

- ・特許第 3430151 号, 温度プローブおよび熱物性測定装置ならびに熱物性測定方法.

主要論文 :

- ・Development of Thermophysical Handy Tester for Non-Destructive Evaluation of Engineering Materials, *International Journal of Thermophysics*, pp.1597-1610, Sept.2004.

【科学技術賞 (理解増進部門)】

Public Understanding Promotion Category

全世代を対象とした熱現象や環境エネルギー

問題の理解増進

永井二郎 (福井大学)

環境エネルギー問題(特に地球温暖化防止)の重要性を一般市民が理解し行動する必要性が高まる中にあって、「熱現象」や「エネルギー」は実態として目に見えないため、分かりにくく正確な理解が得にくい状況にあるため、環境エネルギー問題の正しい理解と対応が阻害されている。特に近年の子供たちの理科離れや家庭内における環境問題に対処するためには、科学技術の面白さを実験・実習を通じて普及する必要性がある。

本活動では、小・中・高校生から大学生・一般市民(主に主婦)にわたる全世代を対象として、適宜実験や実習を交えながら、各種熱現象や環境エネルギー問題(特に地球温暖化問題)を楽しく分かりやすく学習する講座を約 10 年間にわたり実施してきた。具体的には、「温度・熱とは何か?」をテーマとした サーモグラフィーを用いる面白実験、「エンジン」をテーマとした スターリングエンジンカーの製作実習、「地球温暖化防止と省エネルギー」をテーマとした 熱やエネルギーに関する講義、「太陽熱淡水化」をテーマとした簡易太陽熱淡水化装置の製作実習、様々な工夫を加えた熱力学や伝熱学の講義、などを行っている。

本活動により、地域の全世代の熱現象や環境エネルギー問題に対する理解の増進に寄与している。

主要論文 :

- (1) 体験して初めてわかるモノづくりと設計 一機械工作体験スクールー, *国立オリンピック記念青少年総合センター研究紀要*, 第 3 号, pp.199-203, Mar.2003.
- (2) 高大連携による高校の理科教育支援 ～サイエンス・パートナーシップ・プログラム事業の効果～, *応用物理教育*, 第 28 卷, 第 1 号, pp.41-44, May 2004.



表彰式における文部科学大臣表彰科学技術賞の受賞者 ((社)日本伝熱学会推薦)

(後列左から 上田憲治, 関 亘, 青木素直, 川上 孝, 入谷陽一郎 の各氏 ;

前列左から 永井二郎, 高橋一郎, 熊坂利治 の各氏)

第 44 回日本伝熱シンポジウムを終えて
Report on the 44th National Heat Transfer Symposium of Japan

実行委員長 茂地 徹(長崎大学)

実行委員 宮良 明男(佐賀大学), 桃木 悟(長崎大学), 山口 朝彦(長崎大学)

Toru SHIGECHI¹, Akio MIYARA², Satoru MOMOKI¹, Tomohiko YAMAGUCHI¹

(1 Nagasaki University, 2 Saga University)

1. はじめに

茂地 徹

第 44 回日本伝熱シンポジウムを、平成 19 年 5 月 23 日(水)～5 月 25 日(金)の 3 日間の会期で、長崎ブリックホールにて開催しました。会期前日の 22 日(火)には長崎に事前に到着される参加者のために、午後から夕方にかけて参加登録の受付とウェルカムパーティーを設定しました。今回のシンポジウムでは 371 件の講演発表と 720 名の参加者がありました。講演者、参加者、後援・共催の学協会および関係各位の皆様方のご協力とご支援をいただき、例年のように成功裡に終えることができましたこと厚くお礼申し上げます。

今回は会場の確保が難しい地方都市での開催でしたが、全講演のポスターセッション形式による発表、放射線被爆に関する特別講演、およびグラバー園夜間独占使用による懇親会など地方観光都市の特徴を生かした新しい試みを行いました。以下に、ポスターセッション形式のプログラムの企画・構成やシンポジウム事業の運営に関する現場からの生の声を現地で開催に携わった実行委員から報告します。

2. プログラム部会より

～ ポスターセッションの試みについて～

宮良 明男

ポスターセッションは第 43 回日本伝熱シンポジウムの優秀プレゼンテーション賞セッションで実施されましたが、一般セッションでの実施は初めての試みです。これまでの伝熱シンポジウムでは、研究者間の討論を重要視しており、論文発表の後に発表者全員が前に座って質疑応答を行う形式がとられてきました。諸先輩方からは、昔はもっと激しい討論が行われた、最近は質問が優しくなってきた、・・・というような声も聞いてはいますが、それでも質の高い活発な質疑応答が現在も

続いている、その中で揉まれることで若い研究者が育ってきました。我々もその中の一人です。口頭発表&全体討論のメリットは、自分自身が質疑応答に加わることができること以上に、他の研究者がどのような点に興味や疑問を持っているのかを知ることができること、少し専門が違う分野でも質疑応答を聞くことでその研究の状況を知ることができること、重鎮の先生や著名な先生方の意見を聞くことができること等、多々あります。その一方で、現在の伝熱シンポジウムのように 10 を越えるセッションが同時に開催される場合には、興味のある発表が同じ時間帯に行われることも多く、聞きたい講演が重なっているため聞けないといった不満の声も多く聞かれます。私自身、最近の伝熱シンポジウムでは大きな会場の端から端まで走り回らなければならない時間帯がありました。実行委員会がポスターセッションの実施を考えはじめたきっかけは、10 以上のセッションを実施する部屋の確保が困難であったことでしたが、検討を進めるうちに、数多くのセッションが同時に開催される際の問題点を解決するためにポスターセッションを開催したいという気持ちに変わっていきました。

ポスターセッションの運営方法については、会期中の時間割、セッション数、1 セッションの時間と時間配分、ショートプレゼンテーションの有無や講演時間、全体討論の有無等の問題を議論して、最終的に以下のように決定しました。

- ・セッションは 4 つの会場で、同じ時間割の下に実施する。
- ・1 セッションは 150 分で、3 分間のショートプレゼン、総合討論、ポスター発表を行なう。
- ・ショートプレゼンと総合討論は、A と B の 2 つのグループに分け、セッション開始後すぐに A グループが実施し、セッション開始 75 分後に B グループが実施する。

- ・それ以外の時間は、AとBの両方のポスター発表を実施する。

理論的には、シンポジウム参加者は同じ時間帯に別々のセッションで行われている全てのポスター発表に対する質疑応答の機会を得たことになります。ショートプレゼン&総合討論を前半と後半に分けて行ったのは、「ショートプレゼンからポスター発表までが一貫して実施できるために、シンポジウムらしく総合討論がより濃密になること」、「前半と後半の区別をはっきりつけることで、メリハリのきいたセッション運営ができる」と、「分野の異なる2つの分野が一緒になったセッションにも対応しやすいこと」などの理由からです。一方で、前半と後半の切り替えや発表者&聴衆の移動が慌しくなることが懸念されたのですが、参加者全員のご協力により、結果として大きなトラブルも無く、スムーズなセッション運営ができました。また、発表者からも、ポスター前にずっと立っているのも疲れるので、途中に座る機会があって助かったとの声もありました。

ショートプレゼン後の総合討論は初めての試みでしたので、座長の先生方にはご苦労をおかけしたようです。「座長の役割が良く分からぬ」、「総合討論では何をすればいいのか」、「3分間の短い発表の後では内容が分からず質問が出ない」、「ポスターセッションだから総合討論は不要ではないか」等の意見がありましたが、前記したようなこれまでの伝熱シンポジウムでの全体討論の重要性を考えて、検討の末総合討論の時間を設けました。実行委員会としても不安は大きかったのですが、実行委員会の意図を座長に伝え、最後は座長の皆様に討論の運営をお任せしました。伝熱シンポジウム開催中に、いくつかのセッションを見て回ったところ、確かにこれまでのシンポジウムと比べて聴衆からの質問は出にくいうようでしたが、それでも個別の研究に対して活発な質疑応答がなされていたようです。また、座長の皆様もそれぞれで考えていただいた上で、討論を導くような質問をされたり、重鎮の先生に意見を求めたり、ポスター発表の後にまとめの討論の時間をつくられたりと、工夫がなされていました。ポスター発表はどのセッションでも活発に行われ、ほとんど全てのポスターでセッション開催中質問者が絶えることがなく、発表者が忙しく質問に答えていた

ようです。

シンポジウムを終えた今、今回の伝熱シンポジウムのプログラム、セッション運営が皆様からどのような評価を受けているかが気になります。幸い、なかなか良かったとの声も届きましたし、実行委員の一人が帰りの電車で、「ポスターセッションだったので学生同士の質問ができたので良かった」、「普通はなかなか質問が出来ないからね」との学生同士の会話を耳にしました。定量的でも統計的でもないデータですが、これらの事実に基づき、一応の成功を得たと評価したいところです。

オーラルセッションよりポスターセッションが良い、とまでは言えませんが、セッション会場数の確保が困難な場合の伝熱シンポジウムの実施方法を考える材料の一つとして、今回の伝熱シンポジウムがお役に立てるのであれば幸いです。

3. 伝熱シンポジウムを運営して ～地方大学の観点から～

桃木 悟、山口 朝彦

長崎で初めての伝熱シンポジウムを開催するにあたり、最初に問題となったのは会場の確保です。伝熱学会のホームページに掲載されている過去のシンポジウムの参加者と講演件数によると、過去7年間の講演件数と参加者数はいずれも400件、700人以上となっています。講演室の数も10を越えていて、長崎のような地方都市では、そのような会場を確保するのは困難です。当初は、ブリックホールだけでなく複数の会場を使用する予定で仮予約までしていたのですが、参加したい講演が重複してしまう問題の解決を試みる良い機会であると考えて、思いきってポスターセッション形式でのシンポジウムを開催する事としました。経緯、内容、感想等については、プログラムやセッション計画を統括していた佐賀大学の宮良明男先生より詳細に述べられています。なお、ポスターセッションによって確保すべき部屋数を減らせるので、シンポジウムの運営経費も節約できるとの甘い考えでスタートしたのですが、実際に計画を作成していくと、ポスターセッションに起因する経費が無視できず、むしろ高く付く事がわかりました。既にポスターセッションを前提として会場を確定させていたので、実行委員、特に会場での業務を統括した長崎大学の藤本登先生の献身的な頑張で

乗り切る事となりました。

次の問題は実行委員の確保です。長崎大学の伝熱研究者(当初は5人しかいませんでした)だけでは到底運営できませんので、近隣の大学、高専や企業からも運営に参加してもらう事になるのですが、移動に要する費用や時間を考えると九州全体からというわけにはいきません。幸いにして、隣県の佐賀大学には、門出、宮良の両先生をはじめとし若いアクティブな伝熱研究者が多數いましたので、シンポジウムの要であるプログラムやセッションの運営と計画を佐賀大学に担当して頂きました。シンポジウム運営の中心は佐賀大学であったといってもいいかもしれません。もちろん、九州の要である九大の諸先生(特に若い先生)方にも、運営のアドバイスから当日の会場業務までシンポジウムの運営に深く参加していただきました。大変、感謝しています。熊本大学の鳥居先生と三菱重工の深川、小阪両氏に懇親会の運営をお願いして、どうにか実行委員会を組織できました。絶妙のタイミングで藤本先生が長崎大学教育学部に転任してきたのは、非常に幸運でした。また、同時期に佐賀大学に着任された椿先生にも着任早々実行委員として参加して頂きました。椿先生には、コンピュータを利用した佐賀大学と長崎大学での情報の共有にも尽力して頂き、おかげで長崎と佐賀での共同作業を極めてスムーズに進める事ができました。このような幸運にも恵まれ、スタッフ不足についても何とか解決する事ができました。

ポスターセッション形式という事もあり、シンポジウムの会場や運営方法を決定するのに時間を要したのですが、グラバー園での園庭パーティー形式での懇親会については、その企画について聞いた瞬間に決定しました。その後は、晴天となる事をひたすら祈る事になったのですが、幸いにして、雨に打たれる事なく懇親会の終了を迎える事ができました。シンポジウムに参加された皆様の日頃の行いの良さに感謝する次第です。

今年のシンポジウムでは、一般セッションの他に、優秀プレゼンテーション賞セッションと高効率エネルギー変換システム研究会のセッションが実施されました。例年よりも企画数は少なめだったかもしれません。特別講演は、被爆地長崎という事で、長崎大学病院の大津留晶先生に放射線被

爆に関する講演をお願いしました。長崎や広島で原爆の被害について教育を受けた方には、放射線被爆について世間ではあまり知られていないという現実を感じた事があるかと思います。エネルギー機器の開発に携わる機会が多い伝熱研究者には、是非とも知っておいて頂きたいと考え、チエルノブリ原発事故後の被爆状況の調査や治療に実際に行って確認された先生に講演を依頼しました。少々ネガティブな印象を持たれた方が居られたかもしれません、我々技術者が知るべき事、乗り越えるべき事を紹介して頂いたという点で、有意義な講演であったと確信しています。

長崎国際観光コンベンション協会には、補助金と企画の両面でお世話になりました。同協会の担当者によると、長崎で講演会を開催した場合、例年の2割増程度の人が集まるそうなのですが、残念ながら今回のシンポジウムでは、講演件数が371件、参加者数が720名と例年よりも僅かながら少ない結果となりました。それでもこの数字ならば、学会最大の行事である伝熱シンポジウムの実行委員としての最低限の役目は果せたものと思います。ひとえに、シンポジウムを運営するにあたってアドバイスを頂いた前回シンポジウム実行委員会の長野先生、田川先生および服部先生、ポスターセッション導入という大幅な予定変更を協力的に支えて頂いた学会理事会と企画部会の諸先生方、会場にて献身的に働いた学生アルバイトの諸君、そしてシンポジウム実行委員の諸先生方の努力のお陰です。本誌を借りて御礼申し上げます。なお、参加者の減少について悲観的に考えるところがないので、別のところで検討して頂くとして、開催終了直後のシンポジウム実行委員会では、「伝熱研究者はまじめな方が多く、観光地だからとの理由で参加を決めず、単に長崎が遠くて都合がつかなかったので参加を見送られたのではないか」と、極めて都合良く考えています。ただし、私個人としては、まだ訪問した事のない土地でのシンポジウム開催を期待しています。

シンポジウムから2ヶ月以上が経過し、やや時期を逸した感も否めませんが、シンポジウムのホームページ <http://nhts44.mech.nagasaki-u.ac.jp> に、会場にて撮影した写真を掲載しています。ご訪問ください。

地中熱利用

Special Issue on “Utilization of Geothermal Energy”

辻 俊博（名古屋工業大学）

Toshihiro TSUJI (Ngoya Institute of Technology)

e-mail: tsuji.toshihiro@nitech.ac.jp

地球自身が保有し、宇宙へ散逸する熱エネルギーの一部を利用することができれば、地球の営みを妨げることなく、人類社会の持続的進歩が可能と期待される。そのため近年、自然エネルギーの活用が推奨され、NEDO事業等に関連して風力、太陽光、太陽熱、バイオマス、地中熱など実用化に向けた研究が進められている。

日本伝熱シンポジウムにおいても、熱エネルギーの有効利用として注目されている「地中熱利用」に関する報告が昨今なされるようになった。しかしながら、参加者の多くはこの「地中熱利用」の意義（有用性）と実用化の難しさをあまり認識されていないように感じられる。そこで本特集では、「地中熱利用」を話題として取り上げ、それを専門に研究を進められている先生方に、様々な観点から研究（技術開発）の進捗状況と問題点について実施例を含めて解説して頂くことをお願いした。

北海道大学の長野克則先生には、地中熱の定義、利用方式および地中熱源ヒートポンプ（GSHP）の国内外における導入実績を示して頂いた。そして、寒冷地である北海道の自然環境下における個別住宅および大学施設への地中熱ヒートポンプの導入事例を詳細に紹介して頂いた。これらの事例については、自らが開発されたGSHP設計・性能予測ツールが施工に活用され、寒冷期の半年間に亘る実証実験により、大幅なエネルギーとCO₂の削減が達成されたことが確認されている。また、寒冷地以外での地中熱ヒートポンプの導入についても十分効果を望めることが示唆されている。

東北大学の伊藤高敏先生には、地下深度数kmにある高温岩体に人工的に亀裂を発生させ、水を注入して蒸気を生成し、その蒸気を地表に取り出して発電を利用するホット・ドライ・ロック（HDR）発電システムのアイデアを紹介して頂いた。そして、国内外のいくつかの実規模実験について、岩体にある多数の亀裂の集合体（貯留層）における応力挙動

を考察することにより、貯留層の特性を分類できることを示すとともに、実用化に向けた最新技術開発の動向にも言及頂いた。一方、東北大学の新堀雄一先生には、砂礫層含まれる地下水を熱源とする地中熱利用ヒートポンプについて解説して頂いた。地下水を利用できる場合には、単に熱伝導で地中熱を採取するよりも多量の熱利用が可能で、地中温度も短時間で回復するなどの利点が、解析と実験で実証されている。

東京大学の大岡龍三先生には、高額な地盤掘削コストが地中熱利用の普及の妨げになっているという観点から、ビル等の施工における基礎杭を地中熱交換器として利用するアイデアと基礎杭の分類および種々の熱交換方式の特徴について事例を挙げながら解説して頂いた。そして、基礎杭の強度を保つために杭周囲に熱交換パイプを配置する方式の空調システムを提案され、従来の空冷ヒートポンプの一部をこのシステムで置き換えれば、短期間で導入コストの回収が可能であるとの評価がなされている。

福井県雪対策・建設技術研究所の宮本重信氏、福井大学の竹内正紀先生、永井二郎先生には、コンクリート基礎杭を利用した地中熱交換による融雪と空調について、実用化に到った技術開発の経緯を失敗談とともに紹介して頂いた。特に、夏季に多数の杭を最適な間隔で設置した熱交換杭群内の水に蓄熱することにより、冬季の長期間に亘って融雪が低ランニングコストで可能になること、そして気象条件の異なる他の寒冷地の融雪についてもその効果を十分期待できることが実証されている。

ご執筆を快くお受け頂きました先生方には深く感謝申し上げます。また、地中熱利用については、伝熱に関わる様々な要素技術が含まれているため、伝熱を専門とする多く方が研究協力され、将来的な地中熱交換システムの改良と普及が進むことを期待します。

建物基礎杭を利用した地中熱空調システム

Geothermal HVAC System using Foundation Piles of Buildings

大岡 龍三（東京大学）
Ryozo OOKA (University of Tokyo)
e-mail: ooka@iis.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

地中熱利用ヒートポンプシステムは、通常の空気熱源式ヒートポンプに比べ、ヒートポンプの成績効率がよくなることより、将来における省エネルギー技術として大きな期待が寄せられている。

わが国においても地中熱ヒートポンプシステムへの注目は高く、近年多くの導入物件が報告されている。しかしながら、わが国では、地中熱交換器埋設のための地盤掘削費が欧米に比べ高いことから適用物件増加の障害となっており、導入の進んでいる欧米諸国に比べて、未だ広く一般に普及されているとは言えない状況にある。例えば、米国においてボアホールの掘削費用が1m当たり3000円程度なのに対し、日本では近年費用縮減の努力がなされつつあるが、1m当たり10000円以下の掘削費で請け負う業者は少ない。相賀ら[1]の研究例では、ボアホール方式の地中熱交換器を用いた8000m²規模の事務所ビルでは、単純投資回収年を36~58年と試算している。商業ベースに乗る一般的な閾値として、単純投資回収年を10年程度とする必要がある。

そこで地盤掘削費の削減のため、基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムが提案されている。これは欧米ではエネルギー・パイプといい、近年特にポピュラーになってきている。日本においては、竹内・宮本ら[2]が、既成コンクリート杭を地中熱交換器として融雪システムの提案を行っている。また森野ら[3]が鋼管杭を利用した採熱実験を行っている。

この成果を皮切りに、日本においても様々な建物基礎杭を利用した地中熱空調システムが導入さ

れている。本稿では、地中熱空調利用に関わる各基礎杭の特性とその導入可能性について述べ、現在、日本で導入されている建物基礎杭を利用した地中熱空調システムの事例について紹介する。

2. 基礎杭の分類と特性

基礎杭の分類は、①支持機構、②杭材の種類・製造方法、③施工方法等により行うことができる。支持機構に関しては、地盤と杭周囲の摩擦力のみで建物を支持させる摩擦杭と、硬質地盤に貫入した杭先端の支持力をも利用する支持杭に分類される。摩擦杭は支持層が深い場所に用いられ、支持杭は軟弱な地盤に用いられる。さらに後述する場所打ち杭は一般に支持杭である。また杭長も一般に摩擦杭よりも支持杭の方が長くなる。杭材の種類・製造方法については、現在では大きく、鋼管杭、既製コンクリート杭、場所打ちコンクリート杭に分類できる。コンクリート杭と鋼管杭の既成杭の施工は油圧ハンマーによってなされてきたが、振動公害から中掘工法やプレボーリング工法になっている。ねじりに強い鋼管杭については、近年では小口径は杭回転圧入を行うに至っている。杭回転圧入工法は建設廃土がでないこと、地盤を締め固める効果等の、長所を有している。PC杭は既製コンクリート杭の中で代表的なものである。PC杭は高強度のコンクリートを、遠心力を利用し、密に打設した後、蒸気養生し、その後プレストレスを付与して製造される。PHC杭はPC杭を更に高強度にしたものである。場所打ちコンクリート杭の場合、大口径杭の施工が可能であり、その一本当たりの支持力、特に鉛直支持力は、鋼管杭や

表1 様々な基礎杭とその特性

	支持機構	杭径[mm]	建築面積／杭本数[m ²]
鋼管杭	摩擦・支持	200~2000	10~100
既製コンクリート杭	摩擦・支持	400~1000	10~30
場所打ち杭	支持	1000~4000	30~100

PC杭の場合に比して大きくとることができる。そのため単位建築面積当たりの杭本数が場所打ち杭の場合には他の杭にくらべて少なくなる。以上の杭材の種類・製造方法で分類した3つの種類の基礎杭の特徴を表1に示す。

3. 基礎杭を用いた地中熱採熱方式

地中熱採熱方式に関しては、鋼管杭とPC杭における方式はほぼ同じであるが、場所打ち杭における方式は少々異なるため、これらを分類して説明する。

3.1 鋼管杭と既製コンクリート杭における方式

钢管杭と既製コンクリート杭は、特別な場合は除き、場所打ち杭に比べて小径であるため採熱方式は限られてくる。钢管杭と既製コンクリート杭とも通常、杭内は空洞となっているためその部分を利用して採熱方式を考えることが一般的である。現在考えられる工法としては、図1に示すようにUチューブ方式、間接二重管方式、等が考えられる。Uチューブ方式は最も簡単な方式であり、杭の中空部にUチューブを挿入し、空隙部分をグラウト材等で補填する。二重管方式は、杭の中空部を冷却水などで満たし、杭表面全体を利用して熱交換を行う方式である。図2にこれら熱交換方式の実施例を示す。

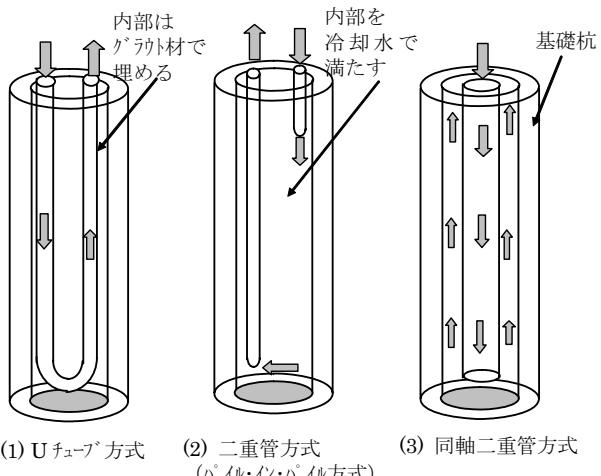


図1 既製杭の熱交換方式

Uチューブ方式の代表例として、札幌市立大学、東洋文化大学キャンパス等がある。二重管方式の代表例は、基礎杭を利用した融雪システムの技術を援用した、福井県立図書館や福井県教育センターなどが代表例である。図3にこれら導入建物例を示す。

二重管方式の方が熱交換のための地中との接触面積として杭全体の表面積を利用できるため、Uチューブ方式に比べて熱交換性能がよくなる。このことは濱田ら[4]の実験や黄・大岡ら[5]の数値解析等により確認されている。二重管を同軸二重管方式にすれば、熱交換性能は更に向かうことが期待できるが、同軸二重管作成のためのコスト増



熱交換器用鋼管杭設置状況
(札幌市立大学・北大長野教授より提供)

(1) Uチューブ方式



Uチューブ挿入状況



PHC杭頭部配管状況
(福井県教育センター)

(2) 2重管方式

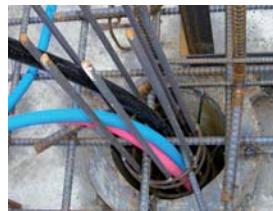


図2 既製杭を利用した熱交換方式の実施例



(1) 札幌市立大学桑園キャンパス
熱交換杭 : 鋼管 51 本 (4.5m~5.7m)
熱交換方式 : U チューブ方式

(2) 大東文化大学板橋キャンパス
熱交換杭 : PHC 杭 23 本
熱交換方式 : U チューブ方式

(3) 福井県教育センター
熱交換杭 : PHC 杭 70 本 (25m)
熱交換方式 : 2 重管方式

図 3 既製杭を用いた地中熱利用空調システムの実例

加の危険性も伴う。U チューブ方式以外では、既製コンクリート杭を打撃工法で設置するケースでは過度の打撃によって杭底の鉄蓋やコンクリートにひび割れが生じ、循環水漏れの危険性を伴う。また既製コンクリート杭においては、コンクリートが融出し、それがヒートポンプの熱交換器に炭酸カルシウムとして付着することにより、ヒート

ポンプの性能を低下させる危険性が指摘されている。両者の特質を比較すると熱交換性能では二重管方式、安定性では U チューブ方式が有利であると言える。

3.2 場所打ち杭の採熱方式

大都市部においては、10~15 階以上の高層建築が多く、そこでは大きな支持力が得られる場所打



(1) U チューブ挿入方式
(スイスチューリッヒ空港)
出典 : Geothermie.ch No.40 (2006)



(2) U チューブ杭周囲配置方式
(秋田市立山王中学)



(3) U チューブ杭周囲配置方式
(著者ら)



(4) らせん管方式
(四国電力本社ビル)

図 4 場所打ち杭を利用した熱交換方式

ち杭が相対的に安価となるため多く用いられている。さらに、既製杭では機械設置の制約から場所打ち杭が選定されることもある。したがって、場所打ち杭を熱交換器としてうまく利用することは、大都市部に地中熱利用空調システムを展開させる上で非常に重要である。場所打ち杭に関しては通常、口径が大きいため多くの方式が試みられている。最も単純な方式は、Uチューブを複数本、杭の鉄筋籠内に挿入し、コンクリートを充填する方式である。スイスチューリッヒ空港で用いられているのがこの方式である。しかしながら鉄筋籠内にUチューブを挿入する場合、Uチューブの断面積分のみ杭の断面欠損となり、建築構造上の問題となることが考えられる。すなわち、この方法では、杭の構造上耐力にある程度の余力がある場合を除き、断面欠損に応じて、杭径を太くする、あるいは、杭本数を増やすなどの措置が必要となる。この断面欠損を避けるため、杭の外周部にUチューブを配置する方法が考えられる。秋田市立山王中学校や著者らの方法がこれに当たる(図4参照)。

著者らの方法では、鉄筋籠の外周に、複数本のUチューブを配置する方法を採用している。この場合、Uチューブは鉄筋籠に直接接触させず、鉄筋籠を杭穴に固定させるために利用するスペーサー部分に設置する。このため、杭の構造上の断面欠損は生じず、問題を回避することが可能である。さらにUチューブを杭の外周部に設置することから、比較的多くの数のUチューブをある程度の間隔をおいて設置することができる。著者らの実験によると、この方式で、直径1.5mの場所打ち杭周辺に8対のUチューブを設置した場合に、季節平均で杭長1m当たり、約160~200Wの採放熱能力が見込まれることが確認できた。これはUチューブ1本当たり、約20~25W/mであり、一般的なUチューブの採放熱能力の半分であるが、Uチューブを1本の杭周辺に密集して設置するために生ずる熱干渉の影響を考えれば比較的よい成績であるといえる。著者らの方法は、東京大学柏キャンパス環境研究棟、前川製作所本社ビルなどに採用されている。

それ以外の場所打ち杭を利用する方法として、四国電力本社ビル[6]では、鉄筋籠内にUチューブを螺旋上にして配置している。この方式は、挿入できるUチューブの長さを最大限にし、できるだ

け熱交換面積を大きくすることにより、大きな採放熱能力を期待するものである。

4. 基礎杭を利用した空調システムの設計手法とライフサイクルコストの評価

基礎杭の長さ、径、本数などは、通常、地盤条件、上部からの荷重条件などによって決定される。通常、杭から採放熱できる熱量は、その建物の空調負荷に比べて小さく、建築の空調負荷に合わせて、杭の本数、長さ等を増やすことは不経済である。したがって、基礎杭を利用した空調システムを導入する場合には、別の熱源と併用することが一般的である。異なる2種類の熱源を一つの建築に利用することは、無駄が多いように思われるが、一般に事務所ビルにおける中央制御方式の空調システムでは低負荷運転に対応するため、熱源機器を台数分割して設置する。したがって、その熱源機器のうちの何台かを地中熱利用の熱源機器とすれば、無駄がなく合理的となる。そのような地中熱利用方式の採用を前提として、以下では、標準的な中規模ビルにおいて基礎杭を利用した地中熱利用空調システムと従来の空調システムとのコスト比較を行い、地中熱利用空調システムの導入の可能性を探る。

表2 検討対象建物概要

検討地域	東京
用 途	事務所
延床面積	6,600m ² (空調面積: 4,840m ²)
建物規模	地上8階、地下なし
運転時間	平日: 8時~18時(日・祭日・土:なし)

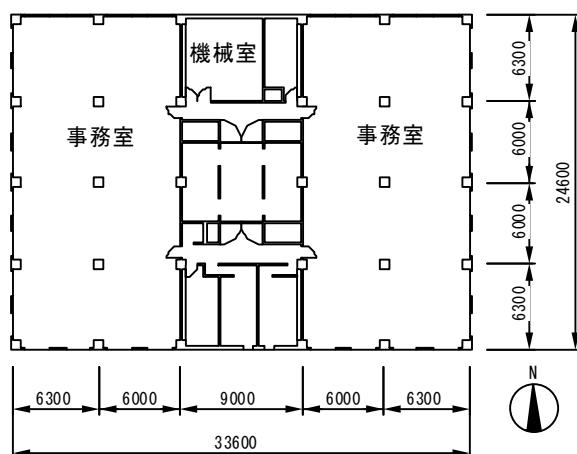


図5 検討対象建物平面図(基準階)

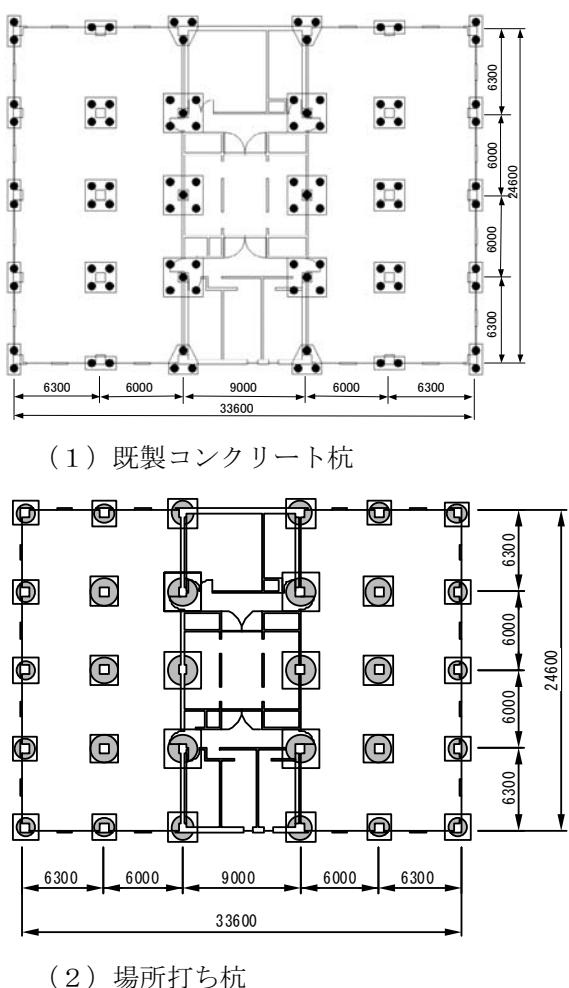


図 6 杭伏せ図

4.1 建物モデルの設定

建物規模および平面形状は、空気調和・衛生工学会で熱負荷計算用の標準問題として定められている中規模事務所ビルをモデルとした。表2並びに図5に建物概要と基準階平面図を示す。建物杭

方式および本数は建設地の地盤状況などで決定されるが、モデルでは、既成コンクリート杭(PHC杭)と場所打ち杭の二つの方式について検討を行う。両システムとも杭長を20mと仮定し、建物平面形状・規模から構造計算により本数を算出した。地中熱交換方式は、PHC杭の場合には、竹内・宮本らが確立した2重管方式(パイプインパイプ方式)、場所打ち杭の場合は著者らが開発した方式(前節参照)とした。図6にそれぞれの杭伏図を示す。

4.2 空調システム設定

図7に比較を行った空調システムを示す。比較を行う空調システムは、熱源機器を台数分割して設置した中央熱源方式とし、通常システムは一般的な空冷HP方式、地中熱利用システムは、空冷HPを台数分割した1台を地中熱利用の水冷HPに置き換えたシステムとした。

表3にそれぞれの空調システムの熱源容量設定を示す。熱源容量は、冷房のピーク負荷で決定した。まず、地中熱利用システムの水冷HP容量を、実測結果、実大実験結果より推定した。既製コンクリート杭の場合は、福井県教育センターの実績値より杭1本当たりの採放熱能力を $60W/(m \cdot 本)$ とし、 $60W/(m \cdot 本) \times 20m \times 94\text{本} = 112kW$ と算出した。また場所打ち杭の場合の地中からの採放熱能力は著者らの実大実験結果より $160W/(m \cdot 本)$ とし、 $160W/(m \cdot 本) \times 20m \times 30\text{本} = 96kW$ と算出した。両方の地中熱空調システムの採放熱能力がほぼ変わらないことより、双方のシステムで用いられる水冷HPの能力を27RTとし、残りの負荷を空冷HP2台で分割し、1台58RTとした。比較を行う通常システムは、水冷HP27RTを空冷HPに置き換えたシステムとした。

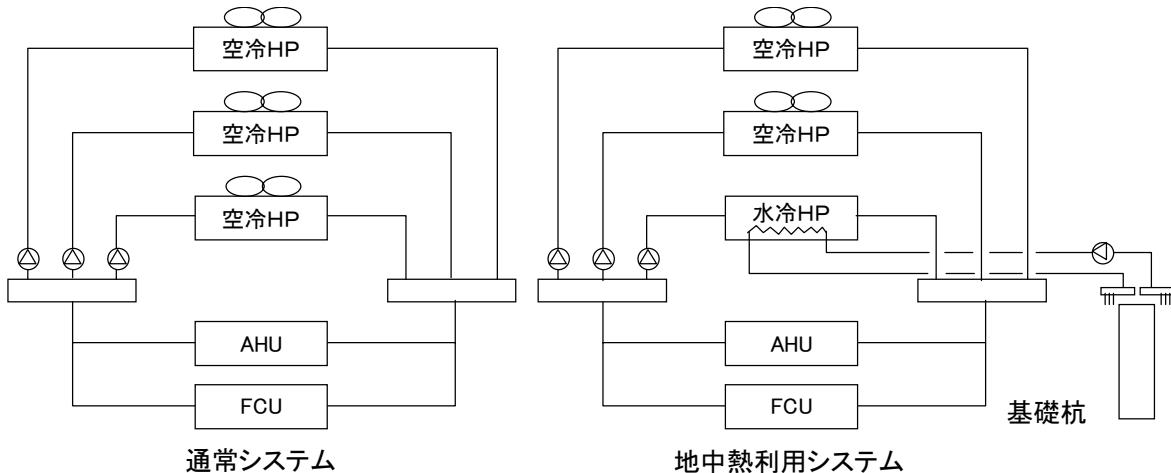


図7 空調システム熱源系統図

表3 比較する空調システムの概要

	通常システム (空冷 HP)	地中熱利用システム (空冷,水冷 HP 併用)	
		既製コンクリート杭	場所打ち杭
冷房負荷[GJ/年]		1,418	
冷房ピーク[MJ/h]		1,825	
暖房負荷[GJ/年]		628	
暖房ピーク[MJ/h]		1,013	
地中採放熱量[W/m 本]	—	60	160
杭本数[本]	—	94	30
杭長[m]	—	20	20
地中採熱量[kW]	—	112	96
熱源容量	空冷 HP	27RT×1, 58RT×2	58RT×2
	水冷 HP	—	27RT×1
	合 計		144RT

4.3 計算条件と計算方法

計算は、設定した条件および HP の期間成績係数などから部分負荷効率も考慮した年間エネルギー・シミュレーションにより各システムのランニングコストを算出した。HP の期間成績係数は、著者らが開発した最新のものを利用した。次に熱源システムに関わる部分(地中熱利用システムに関しては熱交換杭・熱源水配管・ポンプも含む)のイニシャルコストを、実施工並びに試験施工から算出した熱交換杭施工費などから算出し、イニシャル・ランニングコスト差から単純投資回収年数を算出した。二重管方式の施工費については福井県教育センターの実績値を、場所打ち杭方式に関しては、閑根・大岡[7]の試験的に行った低コスト施

工費を用いて計算した。なお計算比較対象は通常システムの一部分が地中熱利用システム(水冷 HP + 熱交換杭)に置き換わった部分のみに限定した。

4.4 計算結果

表4に単純投資回収年を示す。単純投資回収年は、4.8~9.4 年となり、通常のボアホールタイプの地中熱空調システムの単純回収年 36~58 年に比較して、格段に短縮され、十分に商業使用としての可能性のある結果が得られた。

5. 今後の課題と展望

今回の検討で、基礎杭利用地中熱空調システムを導入した場合のコスト回収年は 4.8~9.4 年と、ボアホール型の地中熱交換器を利用する場合に比

表4 Cost Payback Year

空調方式	通常システム	地中熱利用システム	
		PHC 杭 (パイプインパイル)	場所打ち杭 (著者ら)
利用杭・径・長・本数		f600 20m 94 本	f1500 20m 30 本
期間成績係数(冷房／暖房)	2.90/2.70	6.00/5.43	6.00/5.43
ランニングコスト[千円]	20,282	19,569	19,569
差額	—	713	713
空冷 HP 價格[千円]	6,020	—	—
水冷 HP 價格[千円]	—	3,297	3,297
熱源水ポンプ[千円]	—	695	695
同上設置工事[千円]	—	56	56
熱源水配管工事[千円]	—	4,954	3,062
熱交換杭工事[千円]	—		4,725
純工事計[千円]	6,020	9,002	11,835
一般管理費[千円]	903	1,350	1,775
請負金額[千円]	6,923	10,352	13,611
差額	—	3,429	6,688
回収年	—	4.8	9.4

べて大幅に改善する結果が得られた。したがって、数値的には民間市場に普及できるだけのポテンシャルは達成できたと考えられる。しかしながら、地中熱利用空調システムはまだ十分に普及段階にあるとはいえない。その理由としてまず、省エネルギー・システム、自然エネルギー・システムとして十分な認識がなされていないことがあげられる。したがって、コスト回収に関して言えば、太陽光発電システムとほぼ同等のパフォーマンスを示すのにも拘わらず、自然エネルギー利用導入の選択肢として考慮されていない。この問題をクリアするためには、本システムがいかに省エネルギーや環境負荷低減に貢献するかといった事を説明し、クライアントの理解と合意を得るオピニオンリーダーが必要である。更にラベリング制度を活用するなど、地中熱利用に関して何らかのシンボル性を付与することが重要であると考えられる。また現時点で導入されている物件数が少ないため、信頼性が獲得されていないという現状もある。この点については、一件ずつ、物件数を増やし、信頼性を獲得していくこと以外方法はない。この時に、いい加減なものを作ったり、問題点を放置したままにしておくと、信頼を失うので注意が必要である。

更に、基礎杭利用地中熱空調システムは、設計する側、管理する側に立てば、面倒なシステムであることは確かである。一般的な事務所建築の場合、基礎杭のみですべての空調負荷をまかなうことはほぼ不可能であるため、どうしても熱源システムを分割する必要性が出てくるからである。そのため省エネルギー効果があることは理解されながらも、導入に積極的にならない場合もある。しかしながら建築における省エネルギー・自然エネルギー利用を実現するためには、小さなポテンシャルを積み上げていくことが肝要であり、それこそが、技術者が努力しなければならない部分であると著者は考える。管理が面倒だから導入しないということは、技術者としての怠慢と敗北に他ならない。

更に、高性能水冷式ヒートポンプの研究開発、省

エネルギー技術として税制上の優遇措置や補助措置があればより望ましい。

以上のことクリアし、まずは、基礎杭利用地中熱空調システムを普及させるべきである。そうすれば、地中熱利用のための水冷式ヒートポンプ等の市場が形成され、安価で高性能な製品の開発が促進される。そしてそのことは、いつの日か地盤掘削技術にブレークスルーが生じたときに、専用の地中熱交換器を利用したシステムにも容易に波及することが期待できる。

参考文献

- [1] 相賀 洋・石野久彌・三小田憲司・富家貞男 (2002) ポアホール地中熱交換器を用いた地中地盤蓄熱システムの性能評価に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 555, 77-84
- [2] 竹内正紀・宮本重信他 (1993) 基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション. 空気調和・衛生工学会論文集, 52, 59-69
- [3] 森野仁夫・岡建雄・庄子博之 (1995) 鋼管杭による土壤採熱実験と採熱量の予測. 日本建築学会計画系論文集, 475, 22-33
- [4] 濱田靖弘・窪田英樹他 (2001) 空調用エネルギー・パイルに関する研究. 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 353-356
- [5] 黄錫鎬・大岡龍三他 (2004) 大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究 (その3), 数値シミュレーションによる地中熱交換器の差異による採・放熱効果に関する検討. 日本建築学会大会学術講演会梗概集 D-II, pp.1383-1384
- [6] 安岡稔弘・竹川忠克他 (2006) 杭基礎を利用して自然エネルギーによる土壤蓄熱空調システム. 第40回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, 33-36
- [7] 関根健太郎・大岡龍三 (2006) 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その16) 場所打ち杭を利用した熱交換器の低コスト施工法の検討. 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集

地熱型再生可能エネルギー利用の実用化研究

Renewable Geo-energy Development at Practical Stage

伊藤 高敏, 新堀 雄一 (東北大学)

Takatoshi ITO, Yuichi NIIBORI (Tohoku University)

e-mail: ito@ifs.tohoku.ac.jp, yuichi.niibori@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

異常な気候変動が世界各地で頻発し、その原因とされる地球温暖化問題への意識が広く高まっている。また、これに呼応して、化石燃料以外の、自然界において様々な形態を取りながら流れているエネルギー（以下、広義の意味でエネルギーフローと呼ぶ）を高度に利用することで、温室効果ガスを代表するCO₂の排出抑制に貢献する技術が注目されている。その仕組みは様々であるが、図1のように大きく2つに分類できる。すなわち、太陽光を源とするエネルギーフローを利用するものと、地熱を源とするエネルギーフローを利用するもの、見方を変えれば、地面を境界として、それより上と下のエネルギーフローをそれぞれ利用するものである。ここで前者の太陽光型では、人間の生活空間が対象となるので機器の設置も容易で利用し易く、実用化が進んでいる反面、エネルギーフローが日照や季節変動の影響を受け易く、不安定なことが課題になっている。一方、後者の地熱型では、極めて安定なエネルギーフローが期待できるものの、直接的には人間の手が届かず、

目で見ることすらできない、地面の下を対象とすることが主な障壁となって開発がなかなか進まなかつた。しかし、長年に渡る努力の末に幾つかのブレイクスルーがもたらされ、現在では利用技術が実用化の目前、ないしは実用の域に達して、その普及促進が民間レベルで図られるまでに至っている。本報では、その地熱型エネルギーフローを利用する技術の典型であり、著者らが研究開発に携わってきた、HDR発電ならびに地中熱利用ヒートポンプ(GeoHP)を取り上げ、各技術におけるブレイクスルーと、その現状を報告する。

2. Hot Dry Rock (HDR) 発電システム

2.1 基本概念

米国、英国、そして日本で実施された大規模な研究フェーズを経て、今現在、オーストラリアやヨーロッパで実証試験が進められている本構想は、そもそも1970年代初頭に米国ロスアラモス研究所から提案された、図2(a)のように一見極めて単純なアイデアに始まる[1]。それは、深度数kmにあって数百度と高温な岩体中に、人為的にき裂状の流路を造り、その内部に流した水を周囲にある高温な岩体の熱で加熱して熱水や蒸気に変え、それを地表に取り出して発電に利用するというものである。いわば人工き裂を伝熱部とする巨大なボイラを地下に造ろうとするものであり、単純かつ合理的なものようである。しかしながら、発電を目的とする以上、熱水・蒸気を生産する仕組みに加えて、その生産を20~30年という長期に渡って持続することが必要となるが、図2(a)の方式が提案された当初には時間というスケールがあまり考慮されておらず、もし理想的な形で具体化できても短期間で熱水・蒸気の生産が止まってしまうはずである。その理由を具体例で示そう。ここで、図2(a)のき裂表面からの熱供給量を見積もるために、温度がv₀で一様な半無限岩体があり、その表面温

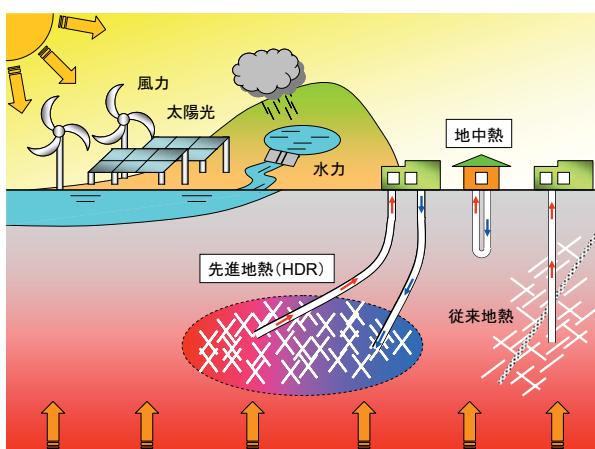


図1 地熱型および太陽光型の自然エネルギー フローの活用

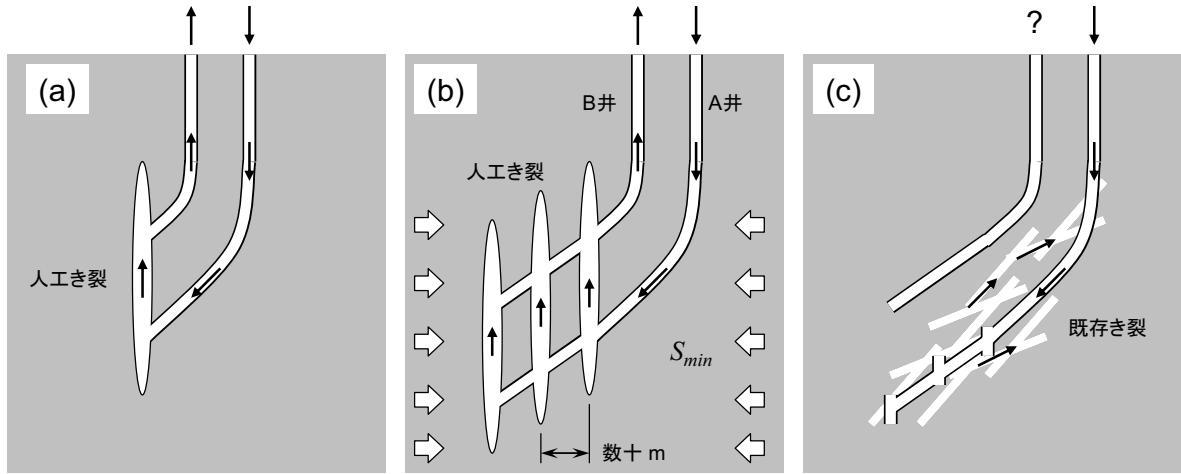


図2 貯留層モデルの変遷

度が時刻 $t = 0$ より Δv だけ低下するという問題を考える。その基礎方程式は

$$\frac{\partial v^2}{\partial x^2} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

v は岩体温度、 x は岩体表面位置を原点とし、岩体の奥行き方向に取った座標、 c 、 ρ 、 k はそれぞれ岩体の比熱、密度、熱伝導率である。上式を下記の初期条件と境界条件を満足するように解く。

$$v|_{t=0} = v_0, \quad v|_{x=0} = v_0 - \Delta v \quad (2)$$

その解は良く知られているように下記の通りとなる。

$$v = v_0 - \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{c\rho}{k t}} \right) \right\} \Delta v, \\ q|_{x=0} = -k \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{c\rho k}{\pi t}} \Delta v \quad (3)$$

ここで、 erf は誤差関数、 $q|_{x=0}$ は岩体表面、つまり、き裂表面における熱流量である。上式を用いて熱流量の時間変化を求めた結果が図 3(a)である。ただし、 $\Delta v = 100$ [K]と仮定した。また、地下の高温部は花崗岩が多くを占めていることから、その一般的な物性値として $c = 7.9 \times 10^2$ [J/(kg·K)]、 $\rho = 2.5 \times 10^3$ [kg/m³]、 $k = 2.4$ [W/(m·K)]とした。同図の結果より、き裂表面の冷却が始まった直後、つまり、き裂内に流入した低温の水がき裂表面と接触し始めた頃には、 2000 W/m³ という、いわゆる自然エネルギーとしては比較的大きな量の熱が、き

裂表面から流体側に供給されることがわかる。しかし、その量は時間と共に急激に減少し、高々約 1 年で既に初期値の 1%程度まで減少してしまう。その約 1 年後 ($t = 10^4$ [h]) における岩体内部の温度分布を式(3)によって求めた結果が図 3(b)である。これを見ると、約 1 年が経過しても冷却範囲が幅 20 m 程度の岩体表面近くに留まっており、それより離れた部分は初期状態から全く変化していない。これらの結果は次のように解釈できる。つまり、き裂周囲の岩体中における熱移動は伝導によって起こるが、岩体の熱伝導率は例えば金属に比べると 1/100 以下であって非常に小さい。このため、き裂面から水に伝わる熱量に対して、岩体中を移動する熱量が遠く及ばず、その結果、図 3(a)のように熱の供給が短時間で滞ってしまうということである。熱伝導性の問題である以上、仮にマグマのような高温の熱源が近くにあったとしても、その他の条件が上記解析の仮定と同じなら、き裂表面からマグマまでの距離が 20 m 以上離れててしまえば相変わらず図 3(a)のような結果となるはずであるし、そのような近距離に図 2(a)のような構造を造ることは、そもそも通常はあり得ない。この意味において、高温岩体の熱を使って熱水・蒸気を生産することは、蒸気の生産に足る十分な熱が燃焼部のような熱源から伝熱部に絶えず供給されることを前提とする、いわゆるボイラとは本質的に異なっており、その違いに応じた独自の仕組みが必要となる。なお、図 3(b)の結果は、仮に 100×100 m² 規模のき裂面をうまく形成できたとして、それを伝熱部として抽出できるのは、如何なる工

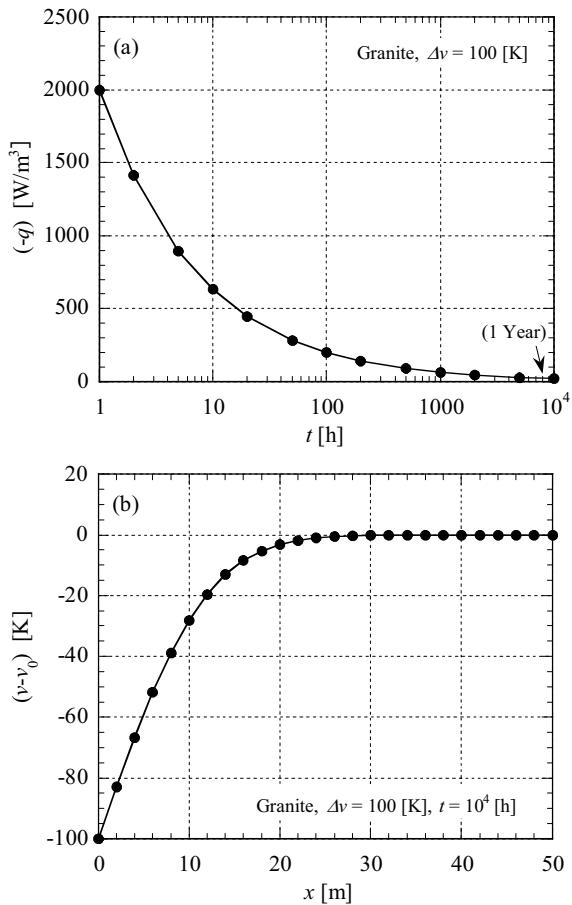


図3 (a)き裂面から流入する熱流量の時間変化と
(b)き裂周囲岩体中の温度分布

夫をしようともいざれ $100 \times 100 \times 40$ m³ という領域の岩体に蓄積された熱量に過ぎないことを意味しており、その程度の熱量では時間的にも量的にも非常に限られた発電しかできないことは明かである。

一方、地下にある高温な岩体は、当然のことながら地質学的なスケールで広がっており、一辺が数 km に及ぶ大きな体積を有する。よって、その中の連続する大きな領域を、ある程度任意に確保することが可能であるし、その対象領域を十分大きくとれば、岩体に蓄えられた熱という密度の小さいエネルギーであっても、当然のことながら領域全体の総量としては極めて膨大なものとなる。これらのことを見ると、下記のような仕組みができれば、高温岩体の熱による熱水・蒸気の持続的な生産が可能となるはずである。すなわち、発電所を必要年限だけ稼働させるための総エネルギー（効率を考えれば、その複数倍）に相当する

熱を含む大きさの領域を高温岩体中に確保し、そして、同領域内の熱を、熱水・蒸気の生産に必要な量だけ少しづつ、限なく抽出する仕組みを造ればよい。さらに、それを具体化する方策は、図3(b)の結果から明らかである。つまり、図2(a)の構造では、き裂面から 20 m 程度までの範囲にある熱しか原理的に回収することができないことを考慮して、同じ構造を図2(b)のように数十 m の間隔で多数設ける。こうすれば、システム全体を流れる水の総量は変えずとも、個々のき裂内の流量が減り、その結果、き裂周りの熱が減る割合も小さくなるので、持続的な熱水・蒸気の生産が可能となるはずである。なお、多数のき裂で構成される流路／伝熱部の集合体を貯留層と呼ぶ。

2.2 既存き裂

上記のような考え方から、高水圧を負荷して岩体を破壊する水圧破碎という方法で、およそ 2~4 km の深度に半径が数十から百 m 規模の円板状き裂を平行に複数作成することを目指す実規模実験が、米国のフェントンヒル、日本の肘折等のフィールドでそれぞれ実施された[2]。ここで、破壊力学の教えるところによれば、無限体中の円板状き裂は、その物体中に作用する最小の圧縮応力 (S_{min}) と直交するように成長する。また、 S_{min} の方向は、一般に km オーダーの近距離内であれば場所によらずあまり変化しない。これらのことから、岩体中に掘削した坑井で、適当な間隔を置いて水圧破碎を複数回実施すれば、その回数に応じた複数のき裂が作成され、それらの向きは半ば自動的に図2(b)のようにそろははずである。このようなことから、実規模実験における目標の達成は容易なものと当初は考えられていた。ところが、いずれの実規模実験でも、1 本目の坑井（以下、A 井）で実施した水圧破碎によって複数のき裂を作成することに成功したものの、各き裂は予想された図2(b)のようには成長せず、そのため、2 本目の坑井（以下、B 井）をき裂と接続することに多大な努力を要することとなった。そして、その原因が詳しく調べられた結果、まず、複数の円板状き裂が平行に形成されるという上記のモデルが、有意な欠陥が存在しない、いわば良質の岩体を前提としているのに対して、実際の岩体中には既存き裂が一般に数多く存在すること、そして、そのような状況の中で水圧破碎を行うと、既存き裂に沿つ

て主な流路が形成されてしまうことがわかった。一方、既存き裂は成因が様々なので、その向きが最小圧縮応力 S_{min} と直交関係にあるとは限らず、様々な向きの既存き裂が存在する上、その長さも様々である。これらのことから影響して、図 2(b)の姿と大幅に異なり、実際には図 2(c)のような流路が水圧破碎で形成されたものと理解された。ただし、既存き裂の存在は、流路の構造を複雑にする反面、それを逆手にとってうまく利用できれば、人為的にき裂を多数作成するという労を要せずに岩体中に限なく配置された流路のネットワーク、つまり貯留層を形成することが可能となるはずである。このような発想の下に、岩体中に形成される貯留層の構造や特性を確率統計的な手法によって評価する試みが、その後盛んに行われた。しかし、地表調査や、たとえ 1, 2 本の坑井を掘削しても確実な情報は坑井から高々十 m 前後の範囲について得られる程度に過ぎず、それだけでは貯留層の評価に必要となる既存き裂の分布等の情報を十分に入手することができないという新たな問題に直面することになった。これは貯留層の特性を事前に推定できないことを意味し、その通りであれば HDR 開発上の大変な障害となることが危惧された。

2.3 シェアリング

他方、それらの試みと並行して各地の実規模試験における実験結果の解析が進められた結果、全ての既存き裂が等しく透水性を有するわけではなく、シェアリングを起こしやすい既存き裂に沿って水が流れやすい傾向にあるという事実が次第に明らかになってきた。ここでシェアリングとは、き裂内水圧の増加によってき裂面間の摩擦力が低下し、き裂面せん断応力の大きさまで下がったときに起こる、き裂面間の相対的な滑りのことである。き裂面がもし真に平らなものならば、シェアリングが起きた場合当然ながらき裂開口幅は変化しない。しかし、実際のき裂面は岩石の不均質さに起因して、目に見える程度に大きな凹凸があるのが一般的であり、そのようなき裂にシェアリングが起きれば、凹凸が噛み合わなくなってしまってき裂面間に隙間ができることになる。

問題のシェアリングが起こる条件は、次のように表される。

$$\tau \geq \mu(S_n - p) \quad (4)$$

p はき裂内水圧、 S_n および τ はそれぞれき裂面に作用する垂直応力およびせん断応力、 μ はき裂面の摩擦係数である。また、 S_n と τ は、岩体に作用する圧縮応力、つまり地殻応力の大きさ S_i ($i = 1, 2, 3, S_1 > S_2 > S_3$) と、地殻応力の作用方向に対するき裂面の向きによって変化する。したがって、ある既存き裂にシェアリングが起こるかどうかは、 μ , p , S_i ($i = 1, 2, 3$) と S_i の各軸に対するき裂面の向きという様々な条件に左右されることになるが、いわゆるモール円を使うと各因子とシェアリングの関係を幾何学的に表現できる（図 4）。ここで、図中の 3 つの半円がモール円であり、最も大きな半円と、それ以外の 2 つの半円で挟まれた、薄墨色の領域が、 S_i ($i = 1, 2, 3$) という大きさの地殻応力が作用する岩体中にあって、任意の向きを持つ既存き裂上の S_n と τ が取り得る範囲となる。なお、 S_n と τ の組み合わせは、き裂の向きと 1 対 1 に対応する。斜めの直線（以下、シェアリングの臨界線と呼ぶ）は、式(4)の不等号を等号に置き換えた関係を示している。よって、図中のハッチングをした部分が式(4)を満足する範囲となり、その範囲に含まれる S_n と τ の組み合わせに対応する向きを持つ既存き裂がシェアリングを起こすことになる。もし水圧破碎によって既存き裂内の水圧 p が上昇すると、各モール円は、その形状と相対位置を保持したまま左に移動する。このとき、ハッチングの部分は当然拡大するので、シェアリングを起こす、既存き裂の向きの範囲が広がることになる。ただし、その結果として A 井に注入した水が様々な方向へ流れ行くことになるので、A 井へ注入した水の量に対して B 井へ戻ってくる量が少なくなる。

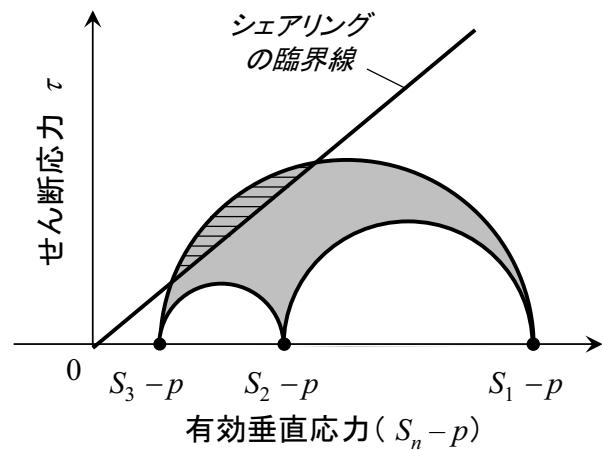


図 4 モール円とシェアリング



図 5 貯留層特性の分類

つまり回収率が小さくなるはずである。一方、モール円が右の方にあって臨界線と全く交差しない状況もあり得る。この場合であっても、水圧破碎時に負荷する p を大きくすれば、やがてシェアリングの条件に達することになるが、そのためには相対的に p をかなり大きくすることが必要となるはずである。以上のような考察の下に著者らは、実規模実験が実施された代表的な幾つかのフィールド、すなわち、米国のフェントンヒル、フランスのソルツ、英国のロゼマノウスおよび日本の肘折について、モール円とシェアリングの臨界線との相対的な位置関係を評価し、その結果から予想される貯留層の特性と、実験結果を比較してみた。その結果、貯留層の形態が予想通り図 5 のように分類でき、さらに、その特性を定量化できることが明らかになった[3]。すなわち、フェントンヒルのようにシェアリングの臨界線とモール円が離れていて、既存き裂のシェアリングが自然状態で起きにくい状況では、水圧破碎時には比較的大きな水圧が必要となるものの、循環時には大きな回収率が期待できる。逆にソルツのようにシェアリングの臨界線とモール円が深く交差していくシェアリングが容易に起こる状況では、水圧破碎時には比較的低い水圧で十分に加圧が可能であるものの、循環時の回収率は低いものとなる。ここで前者を閉鎖型貯留層、後者を開放型貯留層と呼ぶ。一方、ロゼマノウスや肘折のようにシェアリングの臨界線がモール円にちょうど接するような状況では、循環時の坑口圧を低く保てば大きめの回収率を期

待できるが、水圧を高くするとシェアリングを起こすき裂の範囲が拡大して回収率が低下してしまう。このような貯留層を中間型貯留層と呼ぶ。

2.4 開発現状

以上のように、肘折を含む世界各地で実施された貴重な実規模実験の結果として現在では、HDR 開発当初に想定されていたように欠陥のない岩体というものは極めて希で、既存き裂を多数含む岩体が一般的であるものの、全ての既存き裂が等しく透水性を有するわけではなく、シェアリングを起こしやすいき裂ほど透水性が大きいという考え方方が支配的となっている。そして、そのような考え方を前提とすれば、上記のように過去の実規模実験で明らかになった貯留層特性を統一的に解釈することが可能となる。このことは、貯留層の想定位置における地殻応力と間隙水圧の状態さえわかれば、貯留層の特性を事前に推定できることを意味する。こうして地下き裂ネットワーク構造の定量評価が可能になり、さらには、生産井および注水井の位置や長さなどを工学的に設計することも可能となりつつあるのが現状である。このような最近の技術進展を背景に、上述のソルツでは 6 MW の商用発電を行う HDR システムが近く実現する見込みである。また、HDR (HFR) による商用発電を目指す、全く新規のプロジェクトがオーストラリアでスタートし、3~5 MW の発電出力をを持つデモプラントを数年内に完成させる予定で開発が進んでいる[4]。

3. 地下水流を活用した GeoHP の設計

3.1 基本概念

地中熱利用ヒートポンプは Geothermal Heat Pump の略から GeoHP と呼ばれることが多くなってきている[5]. GeoHP システムの説明を初めて聞いた方から、しばしば「地熱」と「地中熱」との違いは何かを問われる。その違いは、利用する地下の深度と利用形態にあると言える。従来の地中熱利用が数 km の地下をイメージするのに対し、GeoHP は地表から通常約 100 m 以浅の地下の熱を利用する。また、「地熱」と言えば「地熱発電」を思い浮かべるが、GeoHP システムは、冷暖房や給湯、さらに融雪等に用いられ、その利用形態が発電とは全く異なる。むしろ、ヒートポンプ等の運転に電力を消費することから、電気のユーザーとなる。すなわち、このシステムは、いわゆるエアコンと同じ原理であり、エアコンが熱源を外気に求めるのに対し、GeoHP は地下に熱源を求める。たとえば、冬季には、投入した電力の 3 倍程度の熱を地下からもらい、投入電力の 4 倍弱の熱を利用施設に供給するシステムである。ここでの「地下」とは、前述のように、通常、地表から約 100 m 以浅を指していて、冬は熱源とし、夏は冷熱源として利用される。地下の温度は、外気と比較して、室内において利用しようとする温度と近い。このことが、GeoHP の大きな特長となる。地下との熱交換を行うために通常ポリエチレン製の U 字管 (U チューブと呼称される) を地下に挿入する。ボアホール(井戸)を用いる場合は、U チューブを井戸に入れ、その周りの空気をグラウト材により追い出し、地下と連結させる。欧米の中で、本システムの導入が最も進んでいるスイス[6]では、3 人の作業員により、トラック搭載型の掘削機を用いて、掘削、U チューブ挿入、グラウト材の施工を 1 日で行い、掘削費はおおむね 1 メートルあたり 5 千円程度である。

わが国でもここ数年このシステムの導入が各地で進み始めているが、その場合、一番の問題は、欧米に比較して高い掘削費にある。安くても上述の例の 2 倍から 4 倍程度になるというのが現状である。小規模な掘削の市場がこれまで限られていることから、GeoHP の市場が今後広がれば、掘削費もある程度抑えられていくと期待するが、砂礫層の多い日本ではそこにも限界があるように思え

る。この話をスイスのコンサルタントになると、「数十年前は日本と同じように掘削費が高かつた」と言われ、わが国の事情を説明するが、なかなか理解されない。確かにトラック搭載型の掘削機を 7 台持ち、常にヨーロッパ中をフル稼働させているコンサルタントから見れば、わが国の状況は大幅に遅れていると言われても致し方ない。いずれにしても、このシステムを広くわが国に普及させるためには実績作りが重要であり、サイトに応じて施工を検討し、最適な方法を模索していく必要がある。

著者らは、逆にわが国においてしばしば見られる砂礫層に着目して GeoHP システムの導入設計を考えている。砂礫層は多く地下水を含み、その流れによる熱移動のメリットを設計に活かせば、掘削深度 (熱交換を行う U チューブの長さ) を抑えることが可能になる。仮に、地下水の流れにより熱伝導型に比較して 3 倍の熱が採れれば、掘削費は 3 分の 1 になり、既存のシステムと十分に競争し、かつ化石燃料利用の低減につながる。

ここでは、地下水の流れを考慮した GeoHP システムの設計についてこれまでの著者らの試みを簡単に紹介する。

3.2 設計指針

図 6 に坑井を用いた GeoHP システムの概要図を示す。本システムの制約条件として重要な点は、暖房時に U チューブ内の循環流体が少なくとも凝固しないことにある[7]。

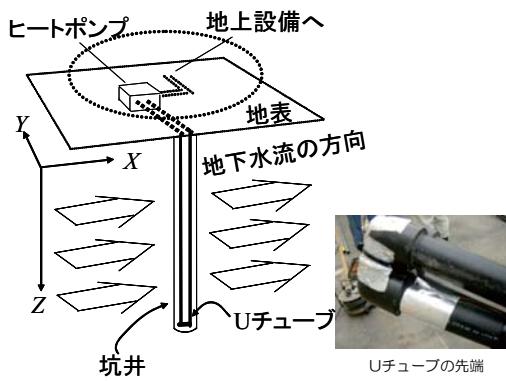


図 6 坑井を用いた GeoHP の概念図と U チューブ

暖房時において、ヒートポンプは循環流体の温度を強制的に下げ、負荷熱量を貯うように U チューブ内と地下周囲との温度差を維持しようとする。

したがって、所定量以上の熱負荷をかけると循環流体が凝固し、システムが稼動しなくなる。熱伝導型の場合は、この制約条件をピーク負荷の際も満たし、冬季、夏季の負荷のバランスを考慮して、30年から50年間稼動するように設計する（無論、実際の設計では、COP をなるべく高く維持するために、循環流体の温度が 0°C 以下にならないようにも配慮される）。

これまでの解析によれば、地下の熱移動が伝導支配の場合、採熱等によって地下の温度が変化する領域は、坑井から半径 5 m までになる[8, 9]。逆に言えば、その程度の影響範囲に抑えるように坑井の深さ(U チューブの長さ)を決める必要がある。しかし、地下水が流れている場合、熱負荷による地下の影響領域の大きさは熱伝導に比較して単純でない。図 7 は簡単に地下水の流れと採熱の関係を知るために行った数値解析の概念図である。

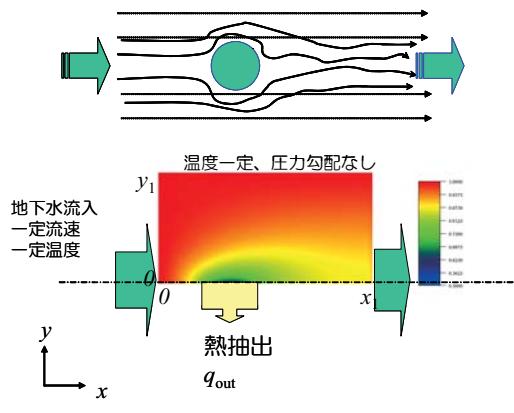


図 7 地下温度分布に及ぼす地下水の影響の
解析概念図 [7,10]

ここでは、先に示した図 6 の体系において z 方向の温度分布を無視し、 x - y 平面に平行な一様な地下水の流れが存在すると考えている。坑井周囲には流れに乱れが生じ、また地下の透水性も一様でないが、ここでは簡単に採熱面を x 軸上に投影する。基礎方程式は、2 次元の熱拡散と対流(移流)を考慮したもので、地下の熱移動の解析に一般的に用いられる式である[10]。ここで着目する点は、採熱によって U チューブ内が凝固点に達しないことであるが、通常、U チューブ内にはエチレン glycole を 30% 程度含んだ流体(凝固点-12°C 程度)を循環流体とすることが多いことから、そのよ

うな場合は、地下水自体が凝固しないことが制約条件になる。また、地下水の流れを伴う場合においてもう一つ重要なことは、周囲の地下温度が、負荷を解除した後にどの程度の時間で初期の温度に回復するかである。その理由は、地下水の流れが比較的大きい場合(10^{-5} m/s 以上[7])、伝導型の場合とは異なり、地下における蓄熱の効果は期待できない。冬季と夏季との年間を通した採熱のバランスではなく、より短期的な熱バランスを知る必要があるためである。たとえば、仮に、1 日の間に数時間の熱負荷を地下に掛ける場合、負荷を掛けない時間内に地下水の流れにより初期温度に戻るとき、熱交換器である U チューブの長さは、稼動を想定する 30~50 年間の熱負荷の冬季と夏季とのバランスではなく、年間での最大負荷を地下に掛けても、GeoHP を利用しない時間帯（深夜から朝までなど）において初期温度に戻るように設計すれば良いことになる。

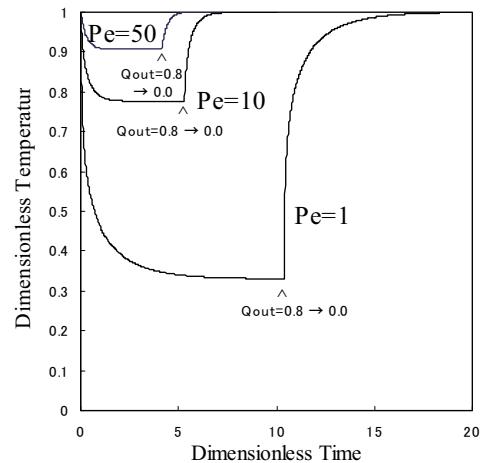


図 8 温度回復時間の計算例 [10]

図 8 は所定熱抽出量 Q_{out} によって図 7 における熱抽出部における平均温度 Θ の様子を計算した例である。ここで、 Q_{out} および Θ は無次元数で、次のように定義される[10]。

$$Q_{out} = \frac{q_{out}l}{\lambda_e(\theta_{in} - \theta_{LB})} \quad (5)$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_{LB}}{\theta_{in} - \theta_{LB}} \quad (6)$$

q_{out} は熱抽出量の平均値[W/m²]、代表長さ l は坑井

外周の半分の値, θ_{in} は地下の初期温度[K], θ_{LB} は当該システムの限界温度[K]（下限温度）であり, U チューブ内温度が不凍限界温度になる場合のチューブ外側(地層側)の温度, あるいはチューブ内の循環流体に不凍液を用いている場合には, 地下水の凍結温度である。 λ_e は有効な熱伝導率 [W/(m·K)]を意味する。また θ は温度[K]であり, この場合は熱抽出部の平均温度となる。なお, 通常, 热伝導型の GeoHP システムにおいて, Q_{out} の値は $0.4 < Q_{out} < 0.8$ にあり, この範囲に収まる程度に負荷を抑え, GeoHP を設計することが必要となっている[7, 8]。

さらに, 図中の P_e はペクレ数であり,

$$P_e = \frac{ul}{k_h}, \quad k_h = \frac{\lambda_e}{\rho c_p} \quad (7)$$

ここで, u は x 方向のダルシーフ流速[m/s], ρ および c_p は地下水の密度[kg/m³]および比熱[J/(kg·K)]であり, k_h は熱拡散係数[m²/s]である。なお, これらの詳細な値は, 著者らの既報にあるので参考されたい[5-7]。地下水のダルシーフ流速 u を 10^{-6} m/s ~ 10^{-4} m/s とすると, ペクレ数 P_e はおおむね $0.1 < P_e < 50$ の範囲にある。図 8 からわかるように, P_e が大きい場合(地下水水流速が大きい場合), 代表長さである坑井周囲長さの半分の値 ($=l$) は通常 0.24m 程度であり, 仮にダルシーフ流速 u が 10^{-5} m/s とすると, 代表時間 $t^*(= l/u)$ は 6.7 時間となる。すなわち, 無次元時間 1 は 6.7 時間を意味する。本研究において定義したペクレ数が 10 以上の範囲では, 定常状態に至る時間は, 実際の時間に換算して数時間であることが確認できる。このような場合には, 地下の温度分布は負荷に速やかに対応でき, 地上の最大の熱負荷に応じた井戸の深さを定めれば, 热負荷の年間の変動を厳密に考慮する必要がないことになる。また, 図 8 からわかるように, 地下水の流れが早い場合には, 本システムの限界値(無次元温度 0)よりも高い温度で定常になっており, さらに大きい熱負荷をかけることが可能である。つまり, 热負荷量が所定の値をとる場合, 热伝導型に比較して熱交換器の長さを短くすることが可能となる。

3.3 適用例

前節において述べた知見を実際に試みた例を紹介する。中部電力の大町営業所のあるサイト（長

野県大町市）では地下水水流が大きいことが知られており, その値は, 観測井により 10^{-4} m/s に至ることが確認されている。そこで, この地域に 100 m の坑井を設け GeoHP を導入し, 強制的な熱負荷実験を行った。

図 9 は試験時における U チューブ周囲の温度値である。熱負荷試験は, 事務所の窓を全開して強制的に暖房負荷を掛けた。外気温度は多少変動したが, 試験の定常時では 20 kW (209 W/m)の採熱量であった。この値は Q_{out} に換算すると 6.6 であり, 通常の 7 倍の負荷を掛けていることになる。

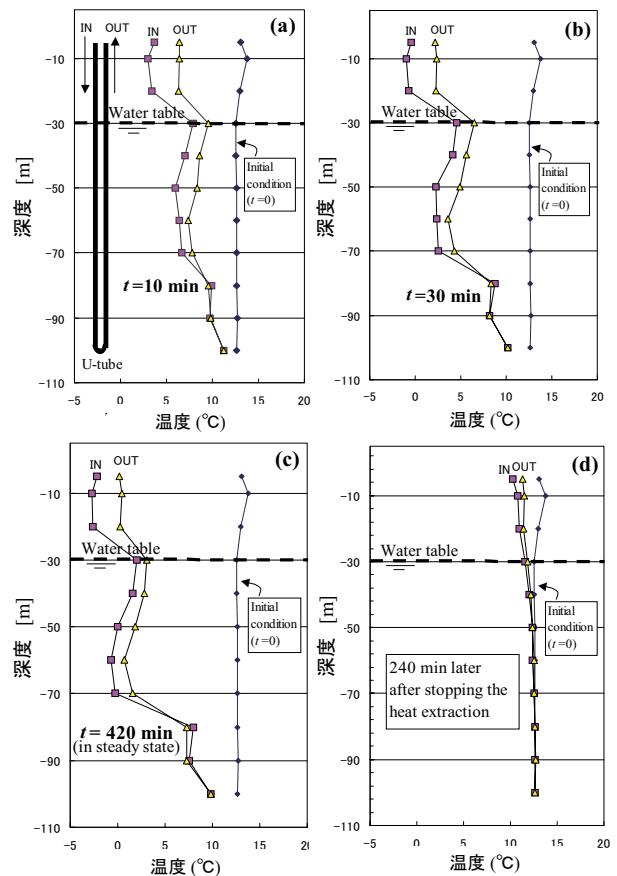


図 9 中部電力大町営業所における強制熱負荷試験の結果 [10, 11]

図 9(a)は, 初期状態および強制熱負荷試験を開始して 10 後, (b)30 分後, (c)420 分後(7 時間後)のそれぞれの温度分布であり, また, 図 9(d)は, 強制熱負荷試験を終了し, 4 時間後の温度分布である。各図には, 地表から U 字管に循環流体が入る方向を往路(IN), 地下から地表に向かい方向を復路(OUT)として表示してある。本熱負荷試験では約 7

時間後には定常状態に達した。図 9(a)から(c)より、地下の温度が採熱により 10°C 強減少することがわかるが、図 9(d)に示すように、熱負荷試験後速やかに温度が回復しており、その時間は 4 時間程度である。なお、地下水表面は地下 30 m にある。

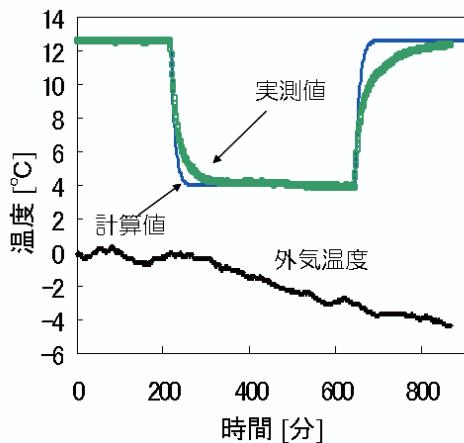


図 10 実測値の平均値と計算値との比較 [10, 11]

図 10 は地下水が存在する地下 30 m から 100 m における温度の値を平均して、時間に対して表した実験値と計算値との比較を示したものである。併せて外気温度の変化を示している（実測値）。ここで横軸の時間において、200 分の時点まで初期温度をモニタリングしており、そこから強制熱負荷試験を開始し、620 分の時点まで(420 分間)強制熱負荷試験を行っている。計算値は、図 7 に示したモデルを用いて、周囲の外気温を一定と仮定して計算を行ったものであるが、おおよそ実測値を表し、強制負荷試験後に速やかに温度回復していることを旨く説明している。大町営業所の地下水流を P_e 数により表すと 55 になり、地下流による効果を十分活かした設計を行うことができる。通常の熱伝導型の採熱量は $20\sim40 \text{ W/m}$ と言われ、この実験では 209 W/m を採熱してもシステムの限界に達していない。つまり、7 倍程度大きい熱負荷を賄うことができる。このことは U チューブの長さを熱伝導型の設計より $1/7$ にできることを意味し、掘削費用の大幅な削減につながる。なお、当サイトでは併せて、夏季における強制負荷試験も実施し、同様に高い放熱量を確認している[11]。

ある国では、地下水を直接くみ上げ、熱交換後に河川に放流し、高い採熱量を記録している例があるが、地下水のくみ上げは地域によって制限さ

れることが多く、また、仮に可能であっても地盤沈下の原因になる。本研究の立場は、あくまでも地下水から熱のみを利用しながら、地下水への熱的負荷を考慮し、また地下水資源を保持するものである。わが国には、地下水の豊富な地域に加え、温泉利用が盛んに行われており、そのような地域での GeoHP システムは COP が極めて高くなることが期待できる。現在、いくつかの試みが開始されている[12]。また、本報では地下水の流速が 10^{-5} m/s 以上という比較的高い例を説明してきたが、その値より低い場合の設計に地下水の流れを考慮する手法についても検討が進められている[13]。

4. おわりに

地熱のエネルギーは膨大であるにもかかわらず、地下の熱伝導性の制限から我々は容易にそのエネルギーを利用することはできないとされてきた。本報では、そのような地熱型エネルギーフローを積極的に利用する技術として、著者らによる研究開発を紹介した。HDR 発電ならびに地中熱利用ヒートポンプ(GeoHP)は、一見全く異なる技術であるが、それを実用化する鍵は、いずれも地下の持つ不確実性にどのように立ち向かい回避していくかにある。また、最近では、熱負荷の大きい空港施設の基礎杭に熱交換器を敷設する例（スイスチューリッヒ空港）などの試みもある一方、U チューブを用いず、地下のき裂を使い、2 本の坑井により流体を循環させ採熱あるいは放熱を行おうとするアイデアもある。その場合にはまさに HDR 技術と GeoHP の技術が直結する。無論、伝熱学の観点からは、特に解析において両者は大きく共通している。各位からの今後更なるご協力、ご支援をお願いする次第である。

参考文献

- [1] Smith, M.C. et al., Manmade Geothermal Reservoirs, Proc. UN Geothermal Symp., San Francisco, 3 (1975) 1781.
- [2] Brown, D. et al., Fluid Circulation and Heat Extraction from Engineered Geothermal Reservoirs, Geothermics, 28 (1999) 553.
- [3] Ito, T. and Hayashi, K., Role of Stress-controlled Flow Pathways in HDR Geothermal Reservoirs, Pure and Appl. Geophys., 160 (2003) 1103.

- [4] 伊藤高敏, 先進地熱エネルギー技術の新展開, 日本機会学会誌, 108 (2005) 36.
- [5] 新堀雄一, 講座 「地中熱利用ヒートポンプシステム」 卷頭言 本講座をはじめるにあたり, 日本地熱学会誌, 27 (4), (2005), 259.
- [6] Rybach, L. and Eugster, W.J.: Reliable Long Term Performance of BHE systems and Market Penetration -the Swiss Success Story, Proc. 2nd Stockton International Geothermal Conference (1998) 87.
- [7] 新堀雄一, 岩田宜己, 森不可止, 深谷玄三郎, 坑井を用いた地中熱利用 HP の設計と地下水流动との関係についての一考察, 日本地熱学会誌, 24 (4), (2002), 339.
- [8] Rybach, L. and Sanner, B: Ground-source Heat Pump Systems, The European Experience, Proceeding of the 1999 Workshops International Geothermal Days - Oregon, (1999) 159.
- [9] Sanner, B., Phetteplace, G. and Hellstrom, G.: Introduction to Computer Models for Geothermal Heat Pump, Proceeding of the 1999 Workshops International Geothermal Days, (1999) 175.
- [10] Niibori, Y., Iwata, Y., Ichinose, S. and Fukaya, G., Design of the BHP System Considering the Heat Transport of Groundwater Flow, Proceedings of World Geothermal Congress 2005 (CD-ROM) Paper No. 1422, (2005).
- [11] 岩田宜己, 小林利文, 深谷玄三郎, 横原恵一, 新堀雄一, 地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプの実証試験, 日本地熱学会誌, 27 (4), (2005), 307.
- [12] 松沢隆志・新堀雄一, 星野リゾート地熱利用プロジェクトと 400m 地中熱交換井による採熱テストの概要, 日本地熱学会平成 15 年度学術講演会要旨集, (2003), 46.
- [13] 新堀雄一, 中込 理, GeoHP システム設計への比較的遅い地下水流速の反映について, 日本地熱学会平成 17 年度学術講演会要旨集, (2005), A35.

基礎杭や群杭で地中に熱を蓄えた融雪と空調

*Snow-melting System and Air-conditioning System with Heat Storage
in Underground using Foundation Piles or a Group of Piles*

宮本 重信 (福井県), 竹内 正紀 (福井大学), 永井 二郎 (福井大学)

Shigenobu MIYAMOTO (Fukui Prefecture)

Masanori TAKEUCHI (Univ. of Fukui)

Niro NAGAI (Univ. of Fukui)

e-mail: shi-miya@fklab.fukui.fukui.jp

1. はじめに

筆者らは約 20 年前に歩道舗装内に埋設した放熱管に地下水を流して歩道上の雪を溶かし、冷たくなった水を車道に散水する融雪の開発を行った。歩行者には水はね無しで優しく、地下水(熱)はカスケード利用されて安価となるこのシステムは、今日では北陸や東北の市街地で最も代表的な融雪になった。当時、この開発は地下水の過剰揚水で地盤沈下になると福井県環境保全課から叱りを受けた。そのことが地中の熱だけの利用の契機になった。

日本の緯度での数十 m までの地中温度は、地表面での熱収支から年間平均気温プラス 2°C ほどとなり、福井は雪国としては 16°C 弱と高い。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/(m³·K) と大きい。このような福井の気象と地盤が筆者らに開発させたシステムを紹介する。

2. コンクリート基礎杭を熱交換杭に兼用

2.1 融雪 [1]

舗装内埋設の放熱管に 16°C の地下水を流して降雪強度に対応する速度で雪を融かすには、放熱管を浅くに設置することや舗装の熱伝導率を福井特産の珪石骨材の使用で 2 倍にするなどの技術を促した。そのことは運転継続で地下水より低温になる地中熱利用でもヒートポンプなしでの融雪を可能とした。

ほぼ 12 階建までのビルに使われるコンクリート杭の多くは、工場で遠心成型製造され内部が中空である。杭底に鉄板を取り付け、その中空部に貯水する。その水中部に内径 2cm 程のポリエチレン管を投入する(図 1)。循環ポンプの稼働で、そ

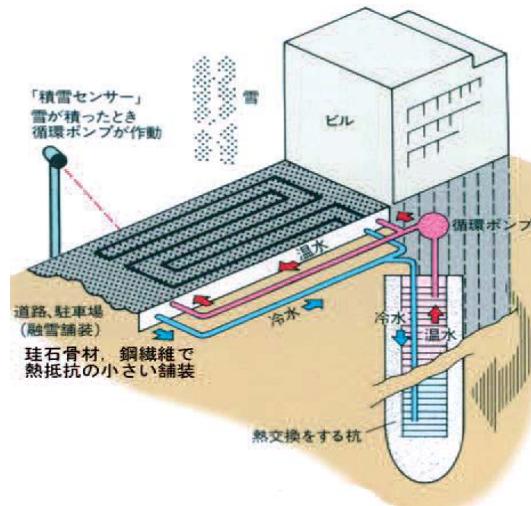


図 1 基礎杭兼用利用した地中熱融雪



写真 1 県立音楽堂の基礎杭を用いた地中熱融雪

のポリエチレン管を通って融雪面からの雪を溶かした冷水は杭底近くに流れ、そこから杭内貯水部にとれる。冷水は更に数時間かけてゆっくりと周囲の熱を集熱しながら杭頭へと流れる。こうして温度を回復した水は融雪路面の放熱管へ流れ、路面上の雪を融かす。

ボーリング孔にUチューブを埋設するなどの地中熱システムはその熱媒体が数分で一巡するが、貯水部の大きいこのシステムでは一巡が数時間となる。地中熱集熱に付加されたこの貯水（熱）が変動の大きな降雪負荷に効果を発揮する。

この基礎杭兼用の融雪システムは福井県立音楽堂など4箇所で稼働している（写真1）。

2.2 冷房暖房への適用 [2]

ほぼ年間平均気温の地中熱は、冬温かく夏冷たく、ヒートポンプの熱源として空気熱源に比べて省エネルギーとなる。その熱交換器も、空気に比べて熱容量の大きな水熱源であれば小型化でき、原理上は安価になる。そこで県立図書館に基礎杭兼用利用の地中熱融雪が施工された折に、地中熱利用の冷暖房を導入した。ここでは、空気熱源ヒートポンプ出力1,065kWと併せて、地中熱での出力170kWの熱は、地下の貯水施設に深夜電力で蓄熱され、日中の開館時に利用されている。

建物全体の杭の間で熱的干渉がないようにと4mほど離れた杭を選び、内径45～60cmのコンクリート基礎杭を熱交換杭として用いて配管を実施した。この現場ではコンクリート基礎杭を強く打撃したことから80%の杭から漏水した。細い纖維屑を用いたラジエーター用水漏れ防止液を投入し、その8割を回復させた。こうしたことでも現在は、夏には杭210本を冷房に利用し、冬には124本を融雪に、残り86本を暖房に用いている。

5年経過の現在、一次側の循環ポンプを含めた成績係数は冷房、暖房でそれぞれ3.16, 2.66で、同図書館に設置された空気熱源ヒートポンプのそれぞれ2.82, 1.82に比べて高い。

このコンクリート杭の中空を貯水として利用した融雪システムや冷暖房が数年運転されると、コンクリート杭壁起源の炭酸カルシウムの析出が管路や熱交換器に見られた。しかし、大きな貯水槽の直接利用は捨てがたく、これらのトラブル回避に取り組んでいる。それらが解決されれば、冷暖房の性能などは更に向上するであろう。

杭長が約20mの杭であれば、その建物の基礎杭全部を利用しても冷暖房の負荷を賄えるフロアーは二階分ほどであろう。従って、他の冷暖房との最適な組み合わせや杭の種類形状配置などを、建物支持だけから設計するのではなく熱交換杭としての機能を含めて設計することが求められる。

3. 夏の熱を群杭効果で地中に保存して融雪

3.1 近接する橋梁基礎杭（鋼管杭）の利用 [3]

地盤の上の舗装に比べて橋面は熱容量が小さいことから凍結しやすく、雪も積もりやすい。沖積平野の橋の多くには杭基礎、とりわけ鋼管杭が多用される。鋼管杭であれば鋼の厚さが薄く杭の内径は大きい。また、建築杭に比べて橋の杭は近接して設置される。この大口径杭が近接する特徴は地中熱融雪を行うと周囲の地盤から地中熱が入らないで夏になっても杭内水温が回復しないことが数値シミュレーションで示された。

しかし、逆に、夏の日中に循環ポンプを運転させて路面の太陽熱を杭とその周囲に移動させると、その蓄えられた熱が拡散せずに冬まで保存される。筆者らは、以前に前述のコンクリート基礎杭利用融雪で夏の蓄熱を行ったが、12月には自然状態より1～2°C高い程度にまで拡散して効果が乏しかった。そこで季節間蓄熱は無理だと判断していたが、これは地中熱を得るために杭相互の間隔が離れた杭を選んだことによる破綻であった。

福井平野の下流部に位置する新清永橋、ここでは右岸橋台2行6列12本と左岸の3行8列24本の合計36本の鋼管杭（平均直径55cm、杭長35m、杭間隔2～2.5m）を地中蓄熱杭として1,820 m²の融雪を行った。杭は杭底閉塞の回転貫入杭が用いられ、配管工事がされた（写真2）。その他の工夫も行い、融雪面積当たりで約2.5万円/m²の建設費と従来の地中熱融雪の約1/5、電熱融雪の約1/2となった。蓄熱運転は360時間/年で、12月でも36本の杭の平均水温は26°Cとなると計算された。2006年12月竣工され、現在蓄熱中である。

3.2 専用熱交換杭群を最適間隔に設置した蓄熱[4]

福井市中心部を流れる足羽川に架かる幸橋は河



写真2 橋台基礎鋼管杭への送水用ポリ管設置

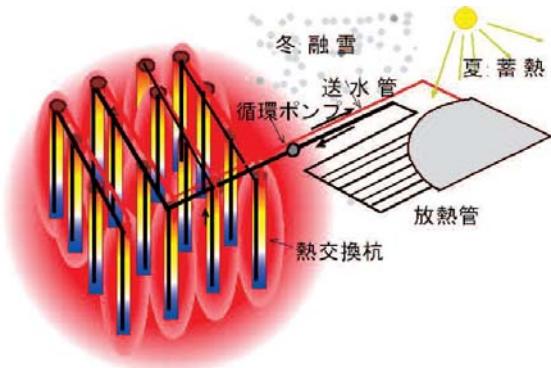


図2 群杭効果を利用した夏の蓄熱での融雪

川改修などで架け替えとなり、桁高の制約で12mmの鋼板を床版とする鋼床版橋が採用された。この鋼床版橋は、厚さ25cmの鉄筋コンクリート床版に比べて熱容量が小さいので、晴天の早朝自動車のフロントガラスに霜が付くのと同じように結露凍結する。この結露凍結はスリップ事故を招く。長大橋はいずれもこの軽い鋼床版橋で、瀬戸大橋でも結露凍結対策のために年15日ほど融雪剤を散布している。幸橋ではこの結露凍結にも対処できる融雪システムを検討した。

この橋では施工上の制約で内部が中空の基礎杭は使えなかった。そこで専用熱交換杭を用いるとして、杭はボーリングより安価な基礎杭の施工法を用いた。この施工では、レキ層上面までの杭長24mまでが経済的な施工なので、従来のボーリング方式の75mの杭に比べて杭本数は増える。この多数の杭を用いて大きな熱塊を作り、そのことで夏の熱を冬まで保存することを考えた(図2)。

筆者らは、融雪路面上では積雪の有無で区分して全天日射量・気温・雲量・雲タイプ・風速・降雨などの気象観測データを取り込み、舗装体と放熱管熱媒体との熱収支計算を行い、それを杭内熱媒体と杭周囲の土との熱収支にリンクさせる3次元の汎用数値シミュレーションソフトの開発を行ってきた。この計算ソフトに'99年1月から'01年3月までの福井の気象データを読み込んで計算を行って最適な杭設置間隔を見つけることを行った。

融雪面には内径16.1mmの放熱(集熱)管を15cm間にかぶり40mmで設置するとし、熱交換杭は長さ24m、杭内径127.8mm、融雪面積当たりの杭長を2m/m²とした。その条件で、杭の設置間隔を1m, 1.5m, 2m, 4mと変えて、さらに設置間隔を25mにして融雪面積を1/2にする(融雪面積当たりの

杭長は4m/m²)という五つの条件で数値シミュレーションを実施した。

杭内平均水温は夏の蓄熱で高くなり、秋には路面温度が高くならないことから蓄熱運転は停止するが、周囲の杭に阻まれ熱拡散できず、12月1日でも4m, 2m, 1.5m, 1mの杭間隔で各々23.3°C, 32.1°C, 36.2°C, 41.0°Cとなる。しかし、25m間隔融雪面積1/2では18.3°Cで、蓄熱しても拡散する。杭間隔の狭い1m間隔では融雪運転に伴い急激に温度が低下し、1月末には最も低くなる。4m間隔や25m間隔融雪面積1/2は運転しても急激には低下しない。杭の設置間隔が広すぎると蓄熱された熱は冬までに拡散する。狭すぎると高温にはなるが蓄熱領域が狭く蓄熱量は少くなり、融雪で冬の途中に蓄熱ストックがなくなる。最大残雪深の比較から杭間隔は約1.5mが最適だと分かった。

この杭間隔1.5mと25m間隔融雪面積1/2の条件での残雪深を比較した。蓄熱せずに迎えた'99年1~3月では1.5m間隔での最大残雪深は25m間隔融雪面積1/2の約3倍になるが、蓄熱後の'00年からはほぼ同じ残雪深となる。このことから、季節間蓄熱では杭相互の熱的干渉という群杭効果は融雪面積当たり杭長を1/2にすることが分かった。

そこで、福井市内に鋼管杭を1.65mの間隔で5行5列25本の杭を熱交換杭として設置し、融雪(集熱)面には面積155m²の鋼纖維補強着色コンクリート舗装を設置しての実験を行った。

杭群の中心点付近の温度変化は図3に示すように、深さ4~16mで3月に16.5°Cであったものが蓄熱によって9月には27.6°Cになり、12月でも

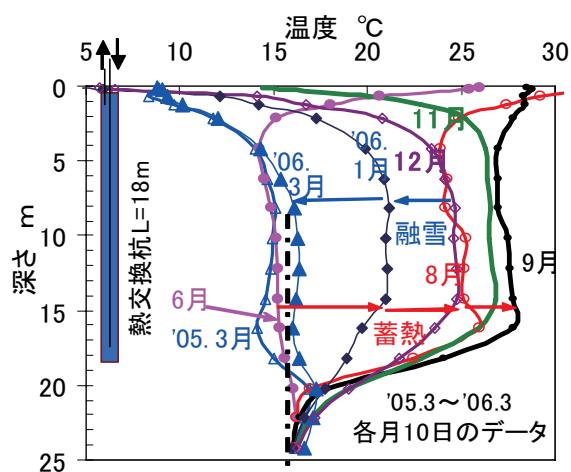


図3 中心部地盤の温度プロファイル



写真3 鋼床版橋での放熱管の設置（幸橋）

24.5°Cである。融雪後の3月でも16°Cとなった。その高温熱で自然積雪95cmの平成18年豪雪でも融雪面上は一時的な数cmの積雪に止まった。

以上の実験と並行して幸橋(融雪面積3,920m²)へのこのシステムの適用を進めた(写真3)。9行42列の378本の钢管杭を間隔1.5mで河川敷に設置した(写真4)。

数値シミュレーションでは、気象データが2008年まで2006年度と変わらないとすると、地中深さ約23m、幅13.5m、長さ63mの地中が2008年11月に約35°Cになる。その融雪能力は250W/m²の電熱融雪と同等と計算された。

本システムの建設費は約5万円/m²で、循環ポンプの電気は融雪面積当たり約5W/m²で蓄熱運転を含めても電気代は約100円/(m²年)である。なお福井市の同規模の電熱融雪は、建設費が約5万円/m²、電気代が約1,500円/(m²年)である。

このシステムの二酸化炭素排出量は建設時約140kg-CO₂/m²(融雪面)、50年間の循環ポンプの運転で70kg-CO₂/m²、計210kg-CO₂/m²となる。電熱融雪では50年使用でその25倍となる。

このほか、福井市内で钢管杭長さ19mを6行6列36本設置し、既存駐車場370m²を融雪するシステムが供用され始めた。180W/m²の電熱融雪と能力と建設費が同じであった。それと全く同じ施設を秋田市の気象条件で運転する計算では180W/m²の電熱融雪とほぼ同じ残雪深となった。これは、秋田市では福井に比べて夏の気温は低いが、降雪はドカ雪タイプでないことによると思われる。

札幌市内でも実験施設を設けて実験を行った。路面を常時プラスの温度にする運転は負荷が大きくて破綻するが、融雪だけであれば一時的な残雪



写真4 河川敷での9行42列378本の杭設置

は生じるが駐車場としては供用できると見込まれた。

4. おわりに

筆者らが融雪の研究を始めた頃から、降雪量は変動するものの全体として少なくなってきた。このことに地球の温暖化を感じ0°Cの雪を融かすために化石燃料や電気の高質なエネルギーを使うことは犯罪だと考え自然熱の利用を進めた。福井の近年の降雪の減少は筆者らには不都合な真実であるだけに、開発してきた大地と共に共生の技術が冷暖房を含めて普及されて、地球温暖化防止に役立つことを願っている。

参考文献

- [1] 宮本重信, 竹内正紀, 木村照夫, 基礎杭利用による地熱融雪法の設計施工運転と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.609/VI-41, 1998.12.
- [2] 梅田正浩, 宮本重信, 加賀久宣, 竹内正紀, 基礎杭利用地中熱空調システムの研究開発実証化施設の稼働後の運転実績, 日本冷凍空調学会年次大会, 2004.10.
- [3] 宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 中川毅信, 藤井政志, 橋梁基礎杭を利用した地中への季節間蓄熱融雪, 橋梁と基礎, Vol.40, 2006.4
- [4] 宮本重信, 青木靖, 竹内正紀, 永井二郎, 五十嵐俊介, 藤井政志, 広松淳, 夏に熱, 群杭効果で地中に保存して融雪, 寒地技術論文・報告集 vol.22, 06-II-029, 2006.11.

我が国における地中熱利用の現状 —北海道での導入事例を中心として

Ground Thermal Energy Systems in Japan – Evaluation of actual GSHPs in Hokkaido

長野 克則 (北海道大学)
Katsunori NAGANO (Hokkaido University)
e-mail: nagano@eng.hokudai.ac.jp

1. はじめに

民生部門のエネルギー消費量が伸び続けている。さらなるエネルギーの効率的利用による省エネルギーの推進に加えて、再生可能エネルギーの大幅な利用拡大なくして CO₂ の大幅削減はあり得ない。民生部門における暖冷房・換気・給湯用の熱源装置やシステム全体の高効率化と併せて、再生可能エネルギーの活用において最も現実的で効果が高いのは高効率ヒートポンプと蓄熱の導入であると考える。中でも地中熱利用は、蓄熱媒体として、そしてヒートポンプの主たる熱源として安定性と利用場所の普遍性から欧米で普及が進んでいる。我が国でも最近、徐々にではあるが認知されるようになり導入件数が増えてきた。本報では、まず地中熱とは何かを概説した後、筆者らがコミッショニングに参加している地中熱利用システムの最新の実測データから省エネルギー性と環境性について考察を加える。

2. 地中熱の定義

地中熱とは、大凡地下 200 m 以浅の地盤に賦存するエンタルピーと解釈できる。その起原は地表面から流入する太陽エネルギーと地殻深部からの地核エネルギーの合成であるが、火山地帯を除くと後者の影響度合いは前者に比べて極めて小さい。一般に、深さ 10 m より深い地点の温度は外界の気温変動に依らず年間を通じてほぼ一定温度となる。これを不易層温度と呼ぶ。この不易層の温度は一般にその地域の年平均気温よりも 1.5 °C 前後高い。一方、より深い地層の温度は、地殻深部の熱流の影響を受けて、深さが 100 m 増す毎に 2 °C 前後上昇する。これを地温勾配と呼ぶが、地層の平均的な有効熱伝導率を 2.0 W/m/K として、地下深部からの熱流を計算すると、1 m²あたり 0.04 W と小さいことがわかる。一方、地表面温度は地域にもよるが、我が国では不易層温度に対して

±15 °C 前後は変動する。したがって、浅層地盤のエンタルピーを温熱源として利用する場合には、地下水を含めて、大局的にみると太陽起源のエネルギーを利用していること他ならない。

3. 地中熱利用の方法

3.1 GTES の分類

地中熱利用 (GTES; Ground Thermal Energy System) は、「持続可能な地中の熱利用」であることが条件である。地下水においては汲み上げと還元、エネルギーについては蓄熱と放熱、もしくは採熱と熱回復 (リチャージ) が必要となる。

さて、GTES は、地盤を蓄熱体として地中に未利用の温熱や冷熱を積極的に蓄熱し、それを直接、またはヒートポンプを用いて熱利用する地下蓄熱 (UTES; Underground Thermal Energy Storage) と、地盤や地下水を熱源、または排熱吸収源として利用する地中熱源ヒートポンプシステム (GSHP; Ground Source Heat Pump System) の 2 つがある。

まず、UTES であるが、図 1 に示すように、帶水層蓄熱 (ATES; Aquifer TES), 挖削孔 (ボアホール) 蓄熱 (BTES, Borehole TES), 岩洞蓄熱 (CTES; Rock Cavern TES), ダクト蓄熱 (DTES: Duct TES) の 4 種類に分類できる [1]。

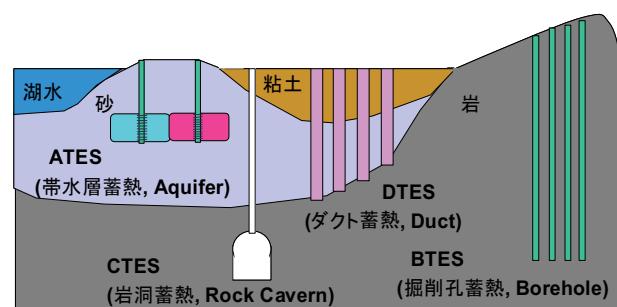


図 1 地下蓄熱(UTES)の分類

次に、地中熱源ヒートポンプ (GSHP) は大きくは図 2 にあるように Closed 型と Open 型に分けら

れる。Closed 型は地中または湖沼に設置した熱交換器を用いて間接的に熱利用するものである。地中熱利用の場合、垂直または水平に埋設した地中熱交換器 (GHEX; Ground Heat Exchanger)を用いるが、これを地中結合型ヒートポンプ (GCHP; Ground Coupled Heat Pump System)と呼ぶ。国内では、地中熱利用と言えばその多くは垂直型 GHEX を使用した GCHP を指すことが多い印象を持つ。一方、オープン型は、地下水や湖沼の水を直接、ヒートポンプの熱源として利用して、利用後は汲み上げた地下水を、帯水層に還元するものである。

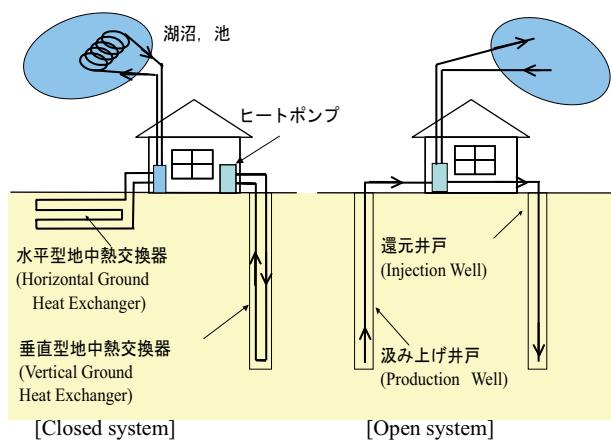


図2 地中熱源ヒートポンプ(GSHP)の種類

GHSP と UTES は異なるコンセプトから発展してきたが、実際には UTES と GSHP の区別は難しい。例えば、垂直型 GHEX を多数有する大規模な GSHP では、意識せずとも暖房時終了時は冷蓄熱、冷房終了時には温蓄熱がなされており、これは、明らかに BTES の範疇に入る。Sanner らは、年間の採放熱量のバランスを考え、その差が 25 %未満であれば UTES、25 %以上であれば GTES と区別することを提案している [2]。

4. 地中熱利用の現状と GSHP の導入状況

4.1 世界の GSHP の導入状況

UTES や GSHP が本格的に開発されたのは、二度の石油危機を経た 1980 年代初頭、国際エネルギー機関 (IEA; International Energy Agency)が設立され、そこに蓄熱による省エネルギーに関する実施協定(ECES; Energy Conservation through Energy Storage)やヒートポンプ実施協定 (HPP; Heat Pump

Program) がスタートして、UTES や GSHP に関するいくつかの ANNEX が設けられ、参加国による協働研究が活発化してからである。しかし、その後の石油価格の下落などにより GTES はなかなか普及には至らなかったものの、欧州ではその後も地道な研究開発が続けられて掘削方法の改良や樹脂製 U チューブの開発による GHEX 設置コストの削減、ヒートポンプユニットのコンパクト化と性能向上などハード面に加えて、認定制度、設計・施工ガイドライン、汎用設計ツール、施工者教育などのソフト面の整備も相まって、欧米では 1990 年代半ばから設置数が飛躍的に伸びることとなった。その結果、2005 年までにスウェーデン、ドイツ、スイス、オーストリア、米国、カナダを中心に世界各国で合計約 128 万台相当(出力 12kW 機換算、合計 15.3MW)の GSHP が設置されるに至っている [3]。特に、スウェーデンでは、ここ数年、地中熱ヒートポンプシステムは年間 3 万以上の GSHP が導入されている状況が続いている [4]。

4.2 国内の GSHP の導入状況

図3に国内の GSHP 導入件数の推移を示す [5]。1980 年代初頭、北海道を中心に十数件の導入例が見られるが、その後は年間数件の導入があるに過ぎなかった。しかし、2000 年以降、徐々に増えはじめ、2005 年 3 月現在では大小併せて冷暖房・給湯用で合計 100 件強、融雪用で合計 25 件強となっている。これは GHEX 構築の大幅なコストダウンが進んできたところに、著者らと共同開発により量産型の小型ヒートポンプ暖房ユニットが国内暖房機メーカーから 2004 年に販売開始されたことによるところが大きい [6]。

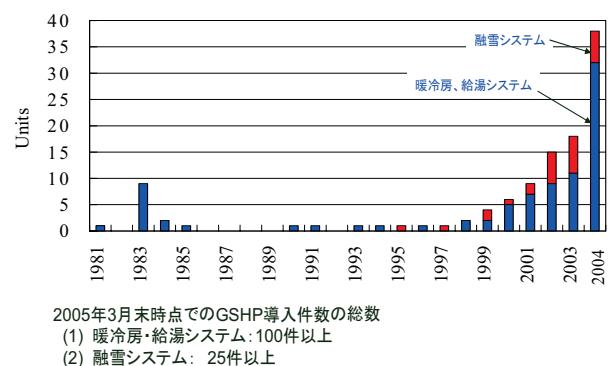


図3 我が国の GSHP 導入件数の推移 [5]

この他、建物の基礎杭そのものを地中熱交換器とした空調システムが国内でも 10 カ所程度ある。この方式は欧州では”Energy Pile”方式と呼ばれています。チューリッヒ国際空港ターミナルビルに導入されているのは有名であるが、最近では年間数十棟以上に導入されている[7]。このように国内においても GSHP は家庭用、商業建物、融雪システム共に加速度を増して導入が進んできている。

5. GSHP 設計・性能予測ツール Ground Club

著者らは、複数の地中熱交換器に対してエンジニアリング的に十分な精度を保ちながら超高速で演算を行えるアルゴリズムを編みだし、それを基にユーザーフレンドリーな入出力インターフェースや LCA を備えた、世界最先端の GSHP 設計・性能予測ツール（通称 Ground Club）の開発を行った[8] – [10]。本ツールの大きな特徴は、①複数埋設管であっても、時間毎の熱負荷に対応した数年間の計算を超高速で行う、②複雑な GHEX のレイアウトにもマウスによる簡単な入力により柔軟に対応できる、③数種類の地中熱交換器に対応できる、④代表的なヒートポンプの性能特性や室内側熱交換器の特性を内包しておりシステムのエネルギー消費量やランニングコスト、LCC、LCCO₂ の評価が行える、⑤ユーザーフレンドリーなインターフェースをもっており運転状況などの計算結果や LCA の結果などをグラフィカルに表示して直感的に結果を判断できる点にある（図 4 参照）。使いやすさ、計算速度、システム評価ができる点など、従来からある海外の設計ソフトウェアを凌駕している[11]。本ツールは国内外で権利化されて、2006 年夏に北海道大学とライセンス契約を結んだヒートポンプ関連企業からネットを通じて頒布され誰もが使えるようになった[12]。

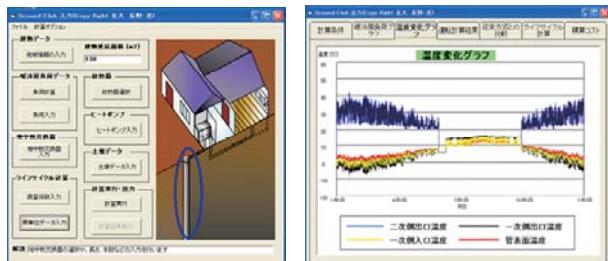


図 4 GSHP 設計・性能予測ツール”Ground Club”

6. 住宅における GSHP 暖房の最新事例 [13], [14]

6.1 対象住宅の概要

対象住宅は 2005 年 11 月に住居として札幌近郊長沼町の丘陵地に建設されたローエネルギー型の建物である（写真 1）。建物は木軸在来工法による一部 2 階建てで、居住部の延べ床面積は 200 m² で、南面に正対して横長に建てられている。超高断熱に加え、温度交換効率が 90% の第一種熱交換換気装置（頑熱型）が導入されたことにより、住宅の熱損失係数 Q 値は 0.94 W/m²/K である。熱貫流率（K 値）が 1.16 W/m²/K の高性能木製サッシが南面に 52m² 配置され、高い断熱性能、南面の大きな高性能窓、厚いコンクリートスラブを持つ、典型的なパッシブソーラーハウスとなっている。



写真 1 長沼・ローエネルギー住宅

暖冷房熱源として GSHP が採用された。一次側には深さ 100 m のシングル U チューブを有する垂直型 GHEX が 2 本接続された。ヒートポンプユニットには先に述べた最大出力 10 kW のインバータ搭載冷暖房兼用機が採用された。図 5 に本ヒートポンプユニットの性能を示す[15]。一次側還り温度 0 °C – 二次側送り出し温度 35 °C の条件下、熱出力 10kW の場合の COP は 3.7 であるが、圧縮機の回転数を下げて出力を 5 kW とした場合には COP は 4.4 と最大出力時に比べて大幅に高くなる。

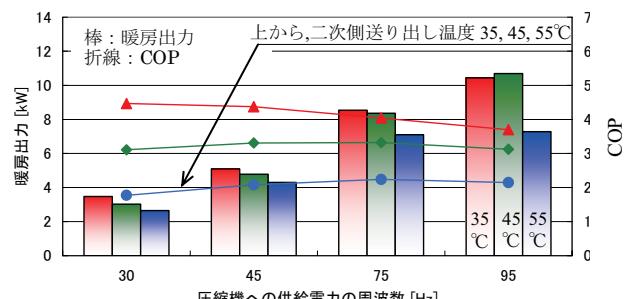


図 5 ヒートポンプユニットの性能 [15]

二次側設備としては敷設率が 77 %にのぼるコンクリートスラブ埋設型の温水床暖房である。ここで、本住宅の Q 値が $0.94 \text{ W/m}^2/\text{K}$ であることから、室温を 20°C 、厳冬期の日平均気温を -5°C として暖房負荷を概算すると、日射や内部発熱を考えないとしても 4.7kW にすぎない。これは、床表面温度を室温よりわずか $2\sim3^\circ\text{C}$ 程度高くすることで十分供給できる熱量である。従って、床暖房に循環される温水温度は大凡 30°C と非常に低温で十分であり、高い COP が期待できる。

6.2 暖房期間における GSHP の性能実績

(1) 1月代表日における温度変化および COP

図 6 上段に 2007 年 1 月 20 日のヒートポンプの運転状況と室温と外気温の変動を示す。日平均気温は -2.7°C であった。この日を含め前後一週間は二次側送り出し温度は 30°C 一定で運転されていた。一次側往き・戻り温度はそれぞれ 1°C , 4°C 前後で推移していた。室内空気温度は朝方 18°C になるが、室内に日射が入り込むと上昇し 26°C を超えている。床温が上昇し二次側還り温度も上がると、ヒートポンプユニットの回転数が下がり熱出力は低下するが、最終的には圧縮機が停止し、同時に一次側循環ポンプも停止する。

図 6 下段には日積算の GSHP 热出力 Σq_{out} , GSHP 消費電力量 ΣW_c と循環ポンプ合計消費電力量 ΣW_p (一次側、二次側の両方) を示す。ここで、COP は、 $\Sigma q_{out}/\Sigma W_c$ を、SCOP は $\Sigma q_{out}/(\Sigma W_c + \Sigma W_p)$ から算出している。日平均では、圧縮機消費電力は 0.76kW で、地中から 3.5kW を採熱して室内に暖房出力として 4.1kW を供給している。この日の、日平均 COP は 5.39 と非常に高い値であった。また一次側、二次側循環ポンプの消費電力量も加味した SCOP も 4.25 (一次側循環ポンプの消費電力量だけを加味した場合には、SCOP' は 4.59) と同様に高い値が得られた。この様な高い COP は、インバーター制御の高効率ヒートポンプユニットだけではなく、高効率な DC 循環ポンプ、住宅の高い熱性能と低温放射暖房により達成し得た値である。

(2) 全暖房期間における熱収支および SCOP

2006 年 11 月 1 日から 2007 年 3 月 31 日までの 5 か月間の暖房運転をまとめたものを図 7 に示す。期間全体では、ヒートポンプ圧縮機の消費電力量は 2.2MWh であり、その約 4 倍にあたる 8.8MWh

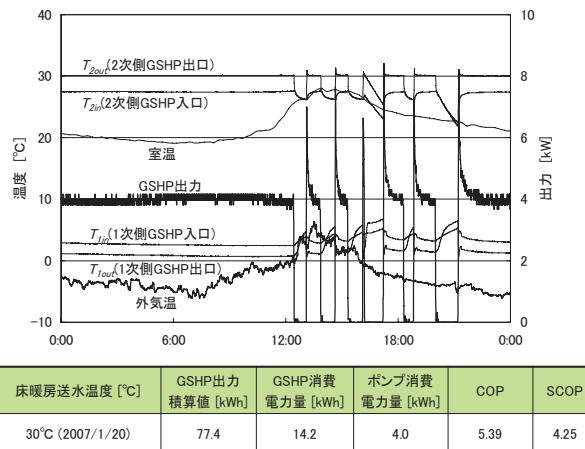


図 6 代表日における実測結果 (2007/1/20)

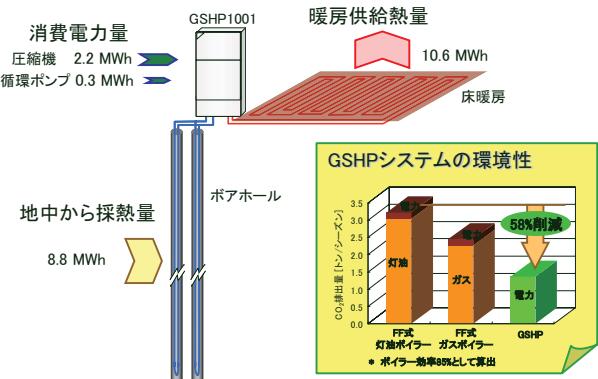


図 7 暖房期間のエネルギー収支と CO_2 排出量

を地中から採熱し、約 5 倍にあたる 10.6MWh 热量を暖房に供給した。このとき CO_2 排出量は 1.3ton であり、灯油 FF 式ボイラー方式の 3.2ton , ガス FF 式ボイラーの 2.5ton に比べるとそれぞれ 58% , 48% の削減と試算された。このような寒冷地におけるローエネルギー型住宅では暖房消費エネルギーは現状の約半分にすることができるが、その上で GSHP を導入することで CO_2 排出量をさらに 50% 以上削減できることが実証された。

7. 非住宅建物における基礎杭利用 GSHP の実例

7.1 システム概要 [16], [17]

2006 年 4 月に開学した札幌市立大学の看護学部・新棟の教官棟 (延床面積は約 $2,400\text{m}^2$, 写真 2) に、計 51 本の建物の鋼管基礎杭 (口径 $600\sim800\text{ mm}\phi$, 長さ $6\sim9\text{ m}$) を地中熱交換器とした GSHP システムが導入された(写真 2)。鋼管基礎杭を地中熱交換器として利用した空調システムとし

ては世界初となる。著者らは、熱源の基本計画当初から札幌市の地中熱利用プロジェクトチームに参画し、計画・基本設計を行ってきたが、竣工後もコミッショニングを合同で行っている。本システムの計画・設計には先に紹介した著者らが開発した GSHP 設計・性能予測ツールが用いられた。



写真2 札幌市立大学の看護学部・教官棟

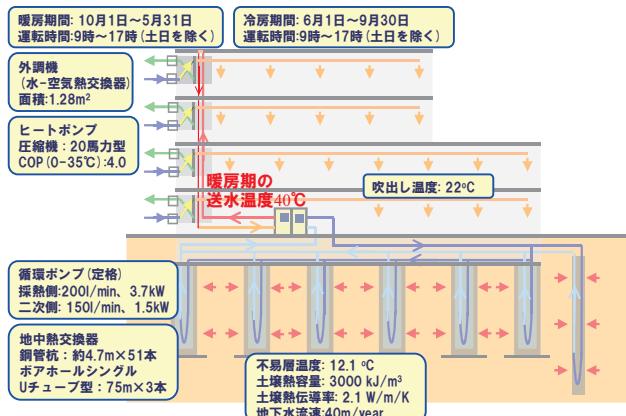


図8 鋼管基礎杭を利用したGSHPの系統図

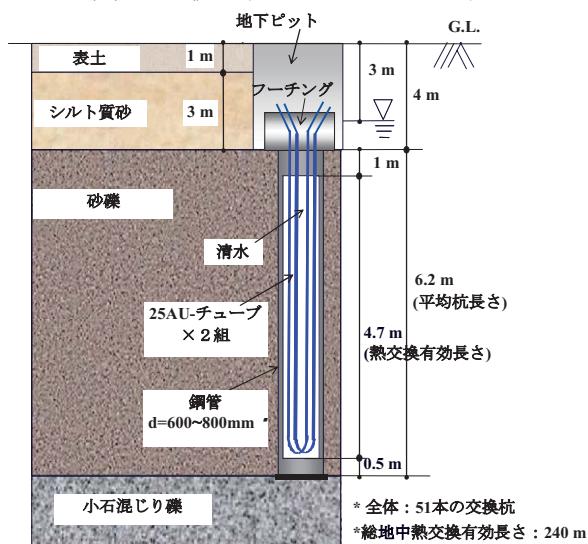


図9 鋼管基礎杭のGHEXとしての利用方法

GSHP による製造温熱は外調機における導入外気の加温用に使用されている（図8）。また夏期には地中の冷熱で導入外気を冷却するフリークーリングもされている。これは地盤の温度回復のためのリチャージともなっている。基礎杭を地中熱交換器として利用する方法としては、先端閉塞杭を回転圧入により敷設した後、杭内部に水を充填してそこに熱交換用の高密度ポリエチレン製Uチューブを2本ずつ挿入する方法を採用した（図9）。

この地域は豊平川扇状地の端部にあたり、厚い砂礫層が発達しており豊富な地下水流れが予想された。著者ら事前に行った長期間の熱応答試験の結果、当地点の地下水水流速は約 40 m/year と推定された。この地下水水流速は設計時の計算に反映した。

二次側システムとしては出力 50 kW のヒートポンプユニットにより製造された 37 °C 前後温水が外調機へ送られて、導入外気の加温に使用される。事前の計算により、出力 50 kW を確保しながら一次側送り出し温度が -2°C 以下とならないように、長さ 75 m の垂直型 GHEX が 3 本追加された。

基礎工事は 2005 年 2 月より開始された。写真3 上は、底盤となる GL-4 m 位置で露出した 51 本の杭頭部の状況であり、各基礎杭に U チューブが 2 本ずつ挿入しているところである。写真3 下は、フーチング部の配筋から左右に分かれて 2 本の U チューブが取り出されている状況である。



写真3 鋼管基礎杭を利用したGSHPの施工状況

7.2 暖房期間の温度変化およびエネルギー収支

図 10 に、暖房運転期間中（2006 年 10 月 13 日から 2007 年 4 月 18 日）の各部の温度とエネルギー収支を示す。一次側送り出し、戻り温度の平均はそれぞれ、4.1, 8.1 °C であり、このとき、地中から 61.7 MWh とほぼ当初の予想に近い熱量が汲み上げられた。一次側送り出し温度は最低でも常に 1.0 °C 以上を維持していた。計算に比べて温度低下が小さかったが、この理由としては地下水流れが予想以上に大きかったことが考えられる。

暖房運転期間中のヒートポンプユニット単体の COP は 4.49 であった。しかし、採熱に要する一次側循環ポンプの消費電力量を加味した SCOP は 2.73 に低下した。これは暖房運転当初、低負荷時に圧縮機が停止しているにも関わらず一次側、二次側循環ポンプ共に常時運転されていたことによる。これらについては昨年度中に改善され、来年度は 3.3 以上の SCOP を確保できる見通しである。

7.3 暖房期間の CO₂ 排出量とランニングコスト

図 11 に本システム（暖房のみ）とガスボイラーシステムの場合の CO₂ 排出量とランニングコストの比較を示す。CO₂ 排出量は 14 ton と、ガスボイラ方式に比べて 5.5 ton (27% 減)、灯油ボイラ方式に比べると 13 ton (47% 減) の削減が見込まれた。また、ランニングコストはほぼ予想通り 35 万円であり、ガスボイラ方式、灯油ボイラ方式に比べて共に約 45 万円の削減になっていることが、実証された。

8. まとめ

本稿では、GSHP が導入された寒冷地の住宅、非住宅建物について暖房期の実データを基に主に環境性について論じた。その結果、両者共に CO₂ 排出量は一般的な灯油暖房方式に比べて 50% 前後であり、大きな削減効果があることが示された。このような大幅な削減効果が得られる熱源システムは GSHP だけであると言っても過言ではない。

関東以南についての導入効果については紙面の制約で紹介できなかったが、特に基礎杭などのように複数の GHEX を有するシステムでは、暖冷房による地盤の季節間にわたる蓄熱効果が功を奏して年間平均で非常に高い SCOP が得られることが著者らの計算結果や実証実験から示されている。

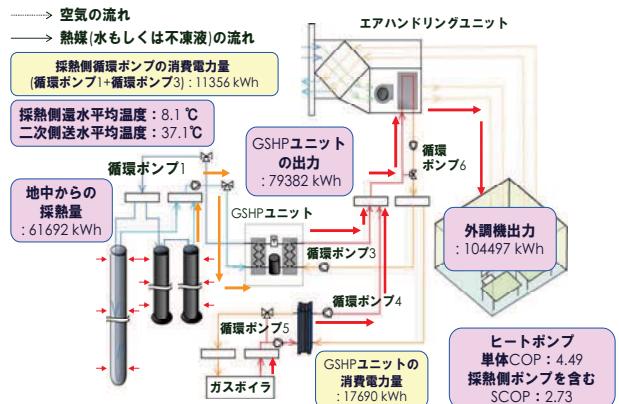


図 10 暖房期間中の平均温度とエネルギー収支

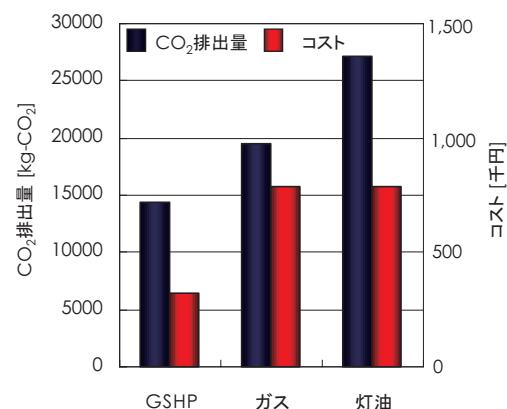


図 11 CO₂ 排出量とランニングコストの比較

今後は、欧州で見られるような地域冷暖房規模の巨大 GTES プロジェクトの検討が国内でも期待されるが、大規模システムにおいては、補機の制御や循環水量を如何に合理的に設計・調整するかが SCOP 向上の鍵を握る。インバーターの導入は即効性があるが、より低循環水量・大温度差でも同等の採熱量を確保できる地中熱交換器の工夫や、同等の COP を確保できるヒートポンプを用いることで、さらなるシステム効率の向上が望める。また、施工面では、プレファブリックされた樹脂のヘッダシステムがコストダウンに効果的である。この場合、各系統には必ず流量管理用の流量指示計と流量調節弁の設置が必要である。

普及の障害は何かと尋ねられると、多くが設置コストであると答える。確かに GHEX 設置費用分だけコストは割高になるのだが、GSHP については NEDO の住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業補助金が適用されるので、建設時にうまくこの制度が活用できるように準備を進め

れば、既存のセントラル暖冷房方式に比べてほぼ同程度の初期費用で済むようなレベルまでコストダウンは進んでいる。一方、ランニングコストは電力料金体系によって大きく異なるので一概には言えないが、少なくとも北海道においては灯油暖房に比べて燃費は1/3から1/4程度になるので、魅力は大きい。このように、GSHPは省エネルギーで環境負荷も小さく、またコスト的にも魅力的な信頼性の高いシステムであることが徐々に実証されてきた。したがって、今後、導入によるCO₂削減量が統計上に現れる位までの大きな普及への最大の障害は、実は、認知度の拡大であると著者は考えている。そのためには、しっかりととした計画・設計・施工と共に、竣工後のコミッショニングと運転データの公表、さらには性能保証や認証制度の充実が欠かせないことを痛感している。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、北海道大学地中熱利用システム工学講座・射場本忠彦氏、成田樹昭氏、武田清香氏、元博士課程の葛隆生氏、札幌市・小谷勉氏、新日鐵エンジニアリング(株)・中村靖氏、(株)サンポット・真賀幸八氏・仁木康介氏、(株)日伸テクノ・柴田和夫氏、(財)ヒートポンプ・蓄熱センター・中山悦子氏には多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] B. Nordell, IEA ECES ANNEX8 Final Report, www.ltu.se/polopoly_fs/1.5013!ax8slutrapport.pdf (2000).
- [2] B. Sanner, New Trends and technology for under ground thermal storage (UTES), Proceedings of 7th International Conference of Thermal Energy Storage (MEGASTOCK '97), (1997) 677-684.
- [3] L. Rybach, The advance of geothermal heat pumps -world-wide, IEA Heat Pump Center Newsletter 23-4, (2005) 13-18.
- [4] IEA Heat Pump Program ANNEX29, <http://www.annex29.net> (2007).
- [5] (財)ヒートポンプ・蓄熱センター「地下熱利用とヒートポンプシステム研究会(主査:北海道大学・長野克則)」, 独自アンケート調査結果 (2005).
- [6] サンポット(株), <http://www.sunpot.co.jp/> (2007).
- [7] ENERCRET Nägele Energietechnik GmbH & Co., <http://www.enercret.com/page/index2.html> (2007).
- [8] 長野克則, 葛隆生他, 土壤熱源ヒートポンプシステム設計支援ツールの開発とその応用, 平成15年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (2003) 1037-1040.
- [9] 長野克則, 葛隆生他, 土壤熱源ヒートポンプシステム設計支援ツールの開発とその応用 その2, その3, 平成16年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (2004) 1671-1678.
- [10] K. Nagano, T. Katsura et al.: Development of a design and performance prediction tool for ground source heat pump system, Proceedings of 8th IEA Heat Pump Conference, (2005).
- [11] Buildingphysics.com, Earth Energy Designer - EED 2.0- Dimensioning of heat extraction boreholes, <http://www.buildingphysics.com/earth1.htm> (2007).
- [12] ゼネラルヒートポンプ工業(株), <http://www.zeneral.co.jp/>, (2007).
- [13] 長野克則, 堀彰吾, 武田清香他: ローエネルギーハウスにおける暖房・換気性能および室内温熱環境の実測, 空気調和・衛生工学会北海道支部第41回学術講演会論文集, (2007) 253-256.
- [14] 武田清香, 長野克則, 堀彰吾他: ローエネルギーハウスにおける年間暖冷房性能の予測, 空気調和・衛生工学会北海道支部第41回学術講演会論文集, (2007) 257-260.
- [15] サンポット(株), GSHP1001技術資料, (2006).
- [16] K. Nagano, T. Katsura, S. Takeda et al., Design and Performance Prediction of the Ground Source Heat Pump System at Soen Campus of Sapporo City University, Proceedings of IEAs 10th Energy Conservation Thermal Energy Storage Conference ECOSTOCK 2006, (2006).
- [17] 長野克則, 葛隆生他, 札幌市立大学桑園キャンパスの地中熱ヒートポンプシステムの概要と冷房運転評価, 空気調和・衛生工学会北海道支部第41回学術講演会論文集, (2007) 257-260.

単結晶育成用 CZ 炉の数値解析

Numerical Analyses of Czochralski Furnace for Single Crystal Growth

柿本 浩一 (九州大学), 塚田 隆夫 (大阪府立大), 今石 宣之 (九州大学名誉教授)

Koichi KAKIMOTO (Kyushu University), Takao TSUKADA (Osaka Prefecture University)

and Nobuyuki IMAISHI (Professor Emeritus of Kyushu University)

e-mail:imaishi@cm.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

昨今の情報化社会は、電子や光を用いたデバイス無しには成立しない。この電子、光デバイスの実現のためには、その基板となる単結晶材料の高品質化が必須である。この高品質化を達成するには、計算機による熱と物質の輸送現象の定量的な解析が必須となってきている。この研究は、1980年代に開始されているが、最近では精度の高い解析例が報告されている。本報告では Czochralski (CZ) 炉を用いた半導体シリコンと酸化物単結晶の育成過程の数値解析に関する最近の進展について解説する。

2. 半導体シリコンの結晶成長

2.1 LSI 用シリコン結晶育成プロセスの解析

2.1.1 LSI 用シリコンの動向

集中演算処理装置(MPU)で世界をリードしている(株)インテルのムーア氏の予測によれば、メモリー容量の増加は3年ごとに2倍の容量にと増加している。このように、記憶容量が指数関数的に増加しているにもかかわらず、メモリー単価は下降しているのが現状である。この様な状況の下においても利潤を生むためには、MPU の素材となるシリコン単結晶の直径を大きくし、1枚のウェハーから取れるチップの数を増加させる方法が現在とられている。最近使用されているウェハーの直径は 300mm であり、今後 450mm まで増加すると考えられている。このように大きな単結晶を育成するためには、直径約 800mm 程度の石英坩堝内の約 160Kg の溶融シリコン原料が必要であり、プラントル数が 0.016 と小さいためにグラスホフ数やレーリー数が大きくなる。このために溶融シリコンの流動は非定常 3 次元の構造となり、不安定となる[1-3]。

一方、シリコンウェハーの特性に関しては、シリコン原子 1 個が欠落した空孔欠陥の凝集体の存

在が問題となっている。この欠陥がウェハー表層

に存在すると、トランジスタを作成した時に正常に動作しないこととなり、この欠陥の形成を抑制する必要がある。この欠陥形成は、結晶育成中の固液界面近傍の温度勾配により決定されるために、結晶中の温度場の精密制御が重要であることがわかっている[4-6]。

以上のような観点から、シリコン融液の流動を制御することが必須となってきている。すなわち、融液の流動の抑制が必要となってくる。このために、静磁場をシリコン融液に印加する方法が、近年採用されてきている。特に、融液の直径が増加してきているために、今後益々磁場印加結晶育成法は重要な技術となってくる。

2.1.2 水平磁場印加結晶成長法の解析例

シリコン単結晶は、ほとんどチョクラルスキイ法により製造されている。

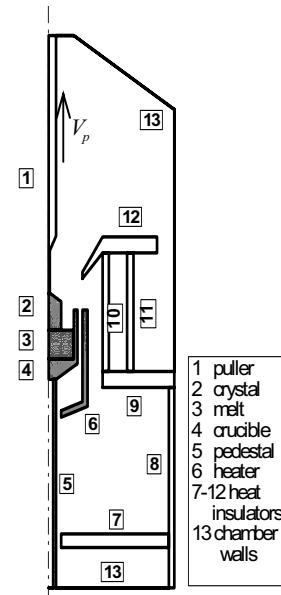


Fig. 1 Schematic of a Si CZ Furnace [7].

300mmの大口径シリコン単結晶の育成には、この結晶育成法に水平磁場を印加する方法が採用されている。この水平磁場印加法は、結晶引き上げ軸に対して垂直方向に磁場を印加するために、従来の軸対称の解析方法は適用できない。このために、3次元の数値解析が必要不可欠である。

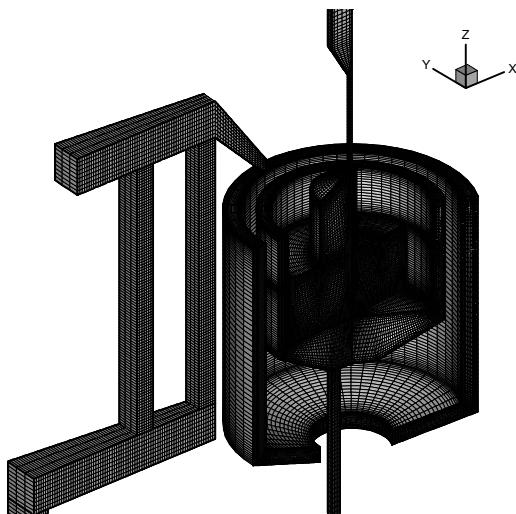


Fig. 2 Computational grid of TMCZ for Si [7].

そこで、Liu ら[7,8]は2次元軸対称問題と3次元非軸対称問題を結合する新たなアルゴリズムを開発し、小型炉に対してこれを適用した。図1は、炉の構成図であり、灰色部は3次元解析の対象部である。図2に、その計算格子の図を示す。

ここに示す計算格子は、3次元領域で364,500のコントロールボリューム、22,400個の輻射面、さらに2次元領域では、6,170のコントロールボリューム、1,609個の輻射面により構成されている。

ここで、本解析に用いた式を次に示す。結晶育成炉内の流体と固体中の熱と物質の輸送は、下記の式により記述した。

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] - \rho \vec{g} \beta_T (T - T_m) + \vec{J} \times \vec{B}, \quad (2)$$

$$\rho c \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (3)$$

ここで、 \vec{V} 、 ρ 、 p 、 μ 、 \vec{g} 、 β_T 、 \vec{J} 、 \vec{B} 、 c 、 k は、それぞれ速度、密度、圧力、粘性係数、重力加速度、体膨張係数、電流密度、磁束密度、比熱、熱伝導

度である。さらに、電磁場解析においては、下記の式を用いて解析を行っている。

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}), \quad (5)$$

$$\vec{E} = -\nabla \Phi, \quad (6)$$

ここで、 σ 、 \vec{E} 、 Φ はそれぞれ、電気伝導度、電界、電位である。

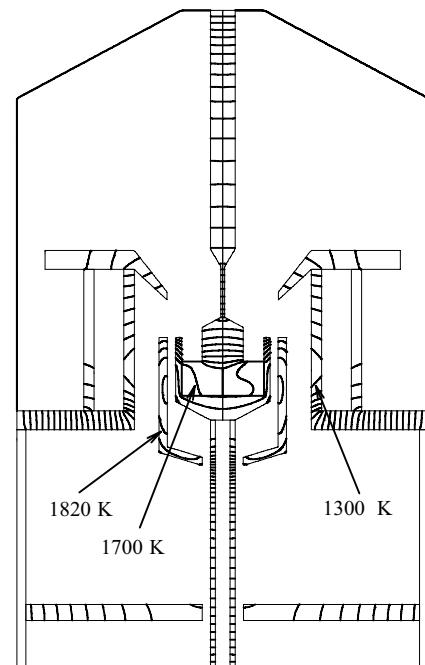


Fig. 3 Temperature distribution in a furnace in planes parallel (left) and perpendicular (right) to magnetic fields [9].

輻射計算のときの形態係数の算出方法に関しては、軸対称2次元のエレメント対の場合、軸対称2次元と3次元のエレメント対の場合、3次元のエレメント対の場合の3つの場合に分類して解析可能である。詳細に関しては他の報告に掲載済である[7-10]。

図3は、炉に印加した水平磁場に平行面内と垂直面内の温度分布を示す。これより、水平磁場に平行面内では対流は抑制されて、より伝導による熱の輸送が優勢となってきていることがわかる。

一方、水平磁場に垂直面内では、磁場による抑制効果は少なく、対流による熱の輸送が存在することがわかる。

図4は、炉中心部の温度分布である。X方向に水平磁場を0.1T印加した場合の温度分布である。水平磁場の非軸対称性を反映して、X方向に低温部が形成されていることがわかる。

このように、水平磁場印加法は3次元性を持った結晶育成方法であるが、結晶や坩堝の回転を導入することにより、軸対称な結晶の育成が可能となる。

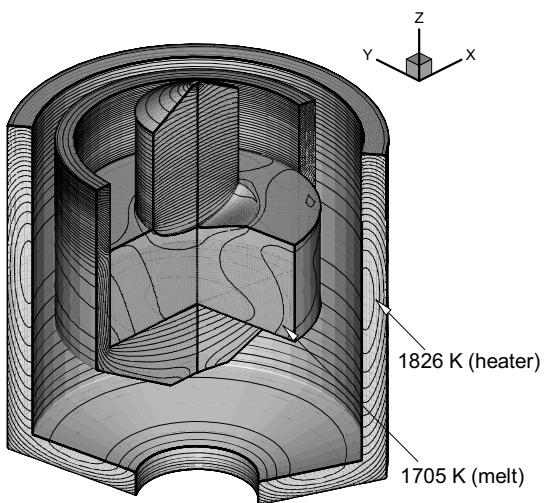


Fig. 4 Temperature distribution in the center of a furnace[10].

さらに、印加する磁場を発生するコイルの形状は有限であるために、均一な磁場を融液に印加することは不可能であるが、磁場の設計の最適化により、所望の温度分布を形成し目的に適応した結晶の育成が可能となってきている。

3. 酸化物単結晶成長

3.1 酸化物単結晶育成炉解析の課題

酸化物単結晶は、電子デバイス材料、固体レーザ材料、光学素子など広く産業界で使用されており、その多くはチョクラルスキー(CZ)法により育成されている。前節のシリコン単結晶と同様に、酸化物単結晶の品質は融液内対流をはじめとする結晶育成炉内の輸送現象と密接に関係するため、結晶の高品質化に当たっては炉内の諸現象を十分に把握し、制御する必要があり、炉内諸現象を理解する有効な手段として数値シミュレーション、

特に炉構成要素全てを考慮した総合熱解析が注目され、多くの研究が行われている。

酸化物単結晶及び融液は、シリコンをはじめとする半導体単結晶及び融液と比較すると、以下の二つの特徴を有する。一つは、結晶（場合によっては融液も）が可視及び赤外光に対して透明あるいは半透過性の場合が多いため、結晶内伝熱に対して伝導伝熱に加え輻射伝熱が寄与することである。結果として、吸収係数が小さい結晶の育成においては、固液界面形状が融液に対して著しく凸になることが実験的に知られている[11,12]。二つ目は、融液のプラントル数が相対的に大きいため（半導体： $\sim 10^2$ 、酸化物： >10 ）、融液内温度場ひいては固液界面形状が融液内対流の影響を受けやすいことである。その結果、CZ炉による育成時に、結晶回転数や結晶径の増加に伴い固液界面形状が融液に対して凸から凹に反転する、いわゆる“界面反転現象”が起こる。この現象のメカニズムを定性的に説明すると、結晶の回転数の増加に伴い、固液界面直下の対流モードが自然対流支配（ルツボ壁から結晶に向かう流れ）から結晶回転による強制対流支配（結晶からルツボ壁に向かう流れ）に変化するためである。以上の特徴を考慮し、酸化物単結晶育成プロセスを対象とした数値シミュレーション、特に最近の総合熱解析の多くは、結晶内輻射伝熱の影響を考慮し、固液界面形状に及ぼす結晶の光学厚さ（吸収係数）や対流（結晶回転数）の影響を検討した研究が多い。酸化物単結晶の品質を左右する結晶内のコアの形成、気泡の混入あるいはクラックの発生が固液界面形状に依存することを考慮すると、結晶の光学特性や操作条件と固液界面形状との相関を定量的に明らかにすることは結晶の高品質化において極めて重要である。本節では、酸化物単結晶育成プロセスの総合熱解析に関する最近の研究を紹介する。

3.2 酸化物CZ炉の総合熱解析

総合熱解析は、シリコン単結晶と同様、CZ炉を構成する全ての要素を考慮し、炉の幾何学形状、操作条件及び各種熱物性値を入力データとして、融液内速度場、炉内温度場、固液・気液界面形状及び結晶引上げ速度もしくは高周波コイルの電流量（酸化物単結晶育成の多くは高周波加熱CZ炉が利用される）を求める解析である。結晶内輻射

伝熱の解析には、基本的に輻射輸送方程式を解く必要があるが、当初は結晶内部を完全に透明、一方結晶表面は厚さの無い不透明な膜により覆われていると仮定し、輻射輸送方程式を解かずに閉区間の面輻射の解析法を適用した解析が行われた。

Xiao ら[13,14]は、YAGあるいはGGG単結晶を対象とし、結晶が透明の場合は輻射により結晶内を通過する伝熱量が増大するため固液界面が融液に対して著しく凸形状となることを理論的に示し、既往の実験結果を定性的に説明した。しかし、実際の酸化物単結晶の吸収係数は、ゼロあるいは無限大ではなく、結晶の組成や育成雰囲気の条件によって広範に変化するので、熱流動解析とともに輻射輸送方程式の解析が必要となる。Kobayashi ら[15]は、輻射輸送方程式の解法に P_1 近似を適用し、LN 単結晶育成を対象とした CZ 炉の総合熱解析を行い、固液界面形状に及ぼす結晶光学厚さ a_s (吸収係数) の影響を検討した。ただし、融液は不透明 ($a_f=\infty$) とした。図 5 は、各光学厚さにおける固液界面形状に及ぼす結晶回転レイノルズ数 Re ($=r_c^2\omega/\nu$) の影響を示したものである。ここで、 r_c 、 ω 及び ν は、ルツボ半径、結晶回転速度及び融液の動粘度である。また、図中の Δz は、中心軸上の固液界面の(ルツボ底面からの)高さと結晶/融液/ガス接触線の高さとの差を示し、固液界面が融液に対して凸形状の場合 Δz は負となる。図から、いずれの光学厚さにおいても、 Re 数の増加に伴い固液界面形状は融液に対して凸から凹に変化し、固液界面の反転現象が生じることを示している。また、 Re 数が比較的小さい場合は、光学厚さの減少に伴い固液界面は融液に対してより凸となり、結

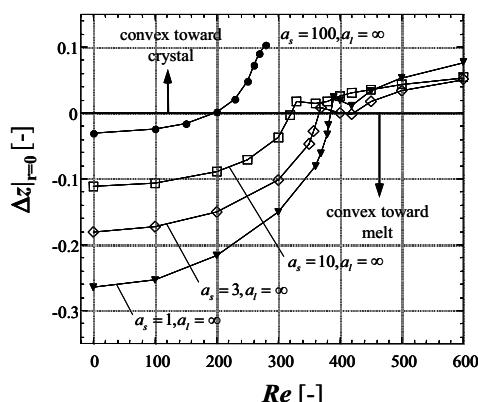


Fig.5 Effect of the crystal rotational Reynolds number on the melt/crystal interface shape [15].

果として固液界面が反転する臨界 Re 数 ($\Delta z=0$ となる Re 数) も増加することがわかる。Kobayashi ら[16]は、以上の総合熱解析結果（結晶内の温度分布）をもとに結晶内でのクラックの発生に関する熱応力の解析を行い、結晶内熱応力に及ぼす結晶光学厚さの影響を明らかにした。熱応力は、固液界面がほぼ平坦、すなわち臨界 Re 数において最小値を取り、さらに Re 数が増加すると急激に増大する。また、比較的 Re 数が小さい場合に光学厚さに対して熱応力は最大値を取ることが示された。

Kobayashi ら[15,16]が適用した P_1 近似は、光学厚さが比較的小さい場合 ($a_s < 1$) には適用できない。しかし、前述したように実際の酸化物単結晶の吸収係数は広範に渡ることから、これに対応するためには輻射輸送方程式のより厳密な解析法を総合熱解析に適用する必要がある。Hayashi ら[17]は、輻射輸送方程式の解法として Discrete ordinate (DO) 法を適用し、より広範な光学厚さの結晶に対して Kobayashi ら[15]と同様の解析を行い、LN 単結晶の固液界面形状に及ぼす結晶光学厚さの影響を検討した。結果として、 $a_s < 0.1$ では固液界面形状の光学厚さ依存性がほとんど無いことを示した。

以上述べた総合熱解析では、いずれも結晶内輻射伝熱の解析において結晶表面を拡散反射面と仮定している。これに対して、最近 Budenkova ら[18-21]は結晶表面が鏡面反射の場合も対応可能な輻射輸送方程式の解法を開発し、これと総合熱解析を統合することにより結晶内温度場及び固液界面形状に及ぼす結晶表面輻射特性の影響を BGO

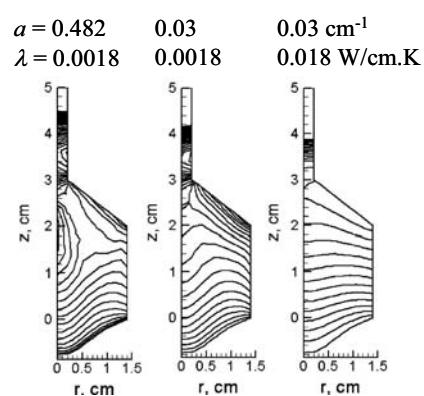


Fig.6 Effects of absorption coefficient and thermal conductivity on the temperature field in crystal [19].

単結晶育成を対象として検討した。ここで、結晶の吸収係数は3バンドモデルにより考慮し、融液は不透明と仮定した。結果として、結晶表面が拡散反射面に比べ鏡面反射面の場合、特に育成初期の結晶肩部形成時において固液界面形状が融液に対して著しく凸形状になることを示した。これらの結果は、結晶直胴部に比べ結晶肩部表面の輻射特性が固液界面形状に強く影響することを示唆している。また、結晶表面が鏡面反射面の場合、比較的熱伝導率が小さく、吸収係数が大きい結晶においては、図6に示すように結晶肩部近傍の中心軸周辺に低温領域が発生することが示された。彼らは、この低温領域の発生が酸化物単結晶におけるコア形成の原因である可能性を指摘している。

3.3 3次元融液内対流を考慮した総合熱解析

酸化物融液内対流は、結晶の大口径化に伴い3次元非定常性を示すことはよく知られている。酸化物融液のプラントル数が比較的大きいことを考慮すると、融液内対流の3次元非定常性が結晶内温度分布や固液界面形状に影響を及ぼすことは容易に想像がつく。しかし、従来の総合熱解析は、その全てが融液内対流を軸対称、定常状態と仮定してきた。これに対して、最近 Tsukada ら[22,23]は、3次元非定常融液内対流を考慮した酸化物CZ炉の総合熱解析を試みた。彼らは、既存の軸対称定常総合熱解析[15]と融液だけを対象とした3次元非定常熱対流解析[24]を以下のような手順に従

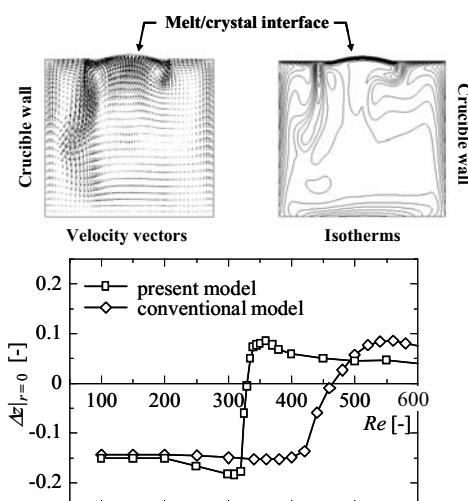


Fig.7 Effect of the crystal rotational Reynolds number on the melt/crystal interface shape [23].

い統合した。すなわち、1) 3次元非定常熱対流解析から得られた融液内速度場の時空間平均値を求める。2) この平均化された融液内速度場に基づき軸対称定常総合熱解析を行い、炉内温度場並びに固液界面形状を求める。3) 新しい固液界面形状を考慮した格子生成を行った後、総合熱解析で得られた融液自由表面上の軸対称熱流束分布、ルツボ壁面上の軸対称温度分布を境界条件として、3次元非定常熱対流解析を行う。以上の1)~3)を固液界面形状が収束するまで繰り返す。図7は、この手法により得られた結晶回転Re数が400の場合の融液内速度場及び温度場のスナップショット及び固液界面形状に及ぼすRe数の影響を示す。ここで、結晶の光学厚さは20、融液は不透明であり、融液自由表面形状は平坦と仮定された。図7に示すように、融液内対流の3次元非定常性を考慮することにより（図中present modelに相当）、固液界面が反転する臨界Re数が小さくなることがわかる。これらの結果は、融液内対流の3次元非定常性を考慮することの重要性を示唆しているが、Tsukada らの研究[22,23]はその一手法の提案であり、今後より高精度かつ簡便な方法の開発が必要である。

4. 融液内派生流動とパターン形成

4.1 CZ炉における派生流解析の動向

シリコンCZ炉や酸化物CZ炉において、融液内に生じる派生流に起因する表面温度のパターンが観察される例が多い。これらの派生流とパターンの形成メカニズムに関する最近の検討結果を紹介する。これらは、対象を融液だけに限定した3次元非定常熱流動解析に基づいて派生流動の発生条件やその挙動を明らかにしたものである。派生流発生に伴って、固液界面近傍での温度および溶質濃度の時空間的変動が生じ、局所の結晶成長速度や不純物濃度も時空間的に変動する。これらの変動が結晶品質に及ぼす影響を定量的に評価する手法の開発が今後の課題となっている。

4.2 酸化物CZ炉でのパターン形成

酸化物融液表面上のスポーツパターンの形成メカニズムに関しては、Rayleigh不安定性やMarangoni不安定性などの諸説が実験的に提唱されていたが、Jing らは融液内対流の詳細な3次元

非定常解析を通して、そのパターン形成メカニズムが Marangoni 不安定性に起因することを数値的に示した。彼らの一連の研究（例えば、[25]）によれば、融液表面からの輻射熱損失により融液表面直下に温度境界層が形成される。この温度境界層内の垂直方向の温度勾配がある臨界値を超えると Marangoni 不安定性による多角形状の対流セルが発生し、これとルツボ中心に向かう主流とが重畠することによりスパークパターンが融液表面上に形成される。さらに、Jing ら[26]は実プロセスの操作条件とスパークパターン形成との関係を明らかにすることを目的として、高周波コイルとルツボとの相対位置による熱環境の変化のパターン形成に及ぼす影響を理論的に検討し、コイル位置が相対的に低い場合にスパークパターンが出現することを明らかにした。一方、Szmyd らはパターン形成メカニズムとして、融液表面からの放熱に伴う温度勾配による自然対流（浮力駆動）の可能性を示唆した[27]。しかし、この種の派生流は Top-seeded Bridgeman 法など融液対流が弱い育成炉でのパターン形成の主原因となり得るが、融液の流れが強い CZ 炉では、融液表面から極めて大きな放熱が無い限り、副次的要因と考えられる。

一方、融液表面上に見られるウェーブ状のパターン形成に関しても、詳細な数値シミュレーション

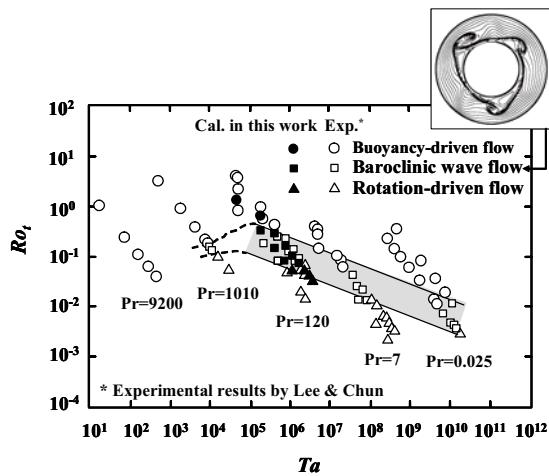


Fig. 8 Flow regime diagram. Baroclinic wave flow regime exists between the buoyancy-driven and the rotation-driven flow regimes [24].

$Ro_T = g\beta\Delta Th / 4\omega^2(r_c - r_s)^2$, $Ta = 4\omega^2(r_c - r_s)^5 / \nu^2 h$
where r_c is the radius of crucible, r_s the radius of crystal and h the melt depth.

ンが最近 Jing ら[24]により行なわれた。図 8 に示すように、実験的に得られた Lee ら[28]のロスピー(Ro)数とテラー(Ta)数に関する流动状態図と数値計算結果を比較することにより、その発生メカニズムが浮力と結晶回転によるコリオリ力との間の相互作用に起因する baroclinic 不安定性であることを実証した。

4.3 シリコン CZ 炉でのパターン形成

Kakimoto ら[29]は 1993 年に、シリコン CZ 炉において結晶および坩堝の回転速度のある組み合わせ範囲内で、baroclinic 不安定性が生じ融液流れが複雑な 3 次元振動流になることを明らかにした。多くの産業用 CZ 炉の融液表面に温度パターンが観察されるが、この発生メカニズムは未だ十分解明されていない。今後大型 CZ 炉の 3 次元非定常数値解析例が増し、融液の 3 次元流动および温度分布のパターン解析が実施され、パターン発生メカニズムも明らかになると期待される。

4.4 Hydrothermal wave との関連性について

Azami ら[30]は、主に外壁から加熱され、中央に置かれた炭素棒で冷却される環状プール内の浅いシリコン融液表面の温度を観察し、周方向に一定速度で伝搬するスパーク状のパターンを確認し、このパターンの発生機構を Hydrothermal wave (HTW) と推測し、シリコン CZ 炉内の温度パターン発生原因の一つと考えた。HTW は、下から加熱される静止液層内の垂直方向の温度勾配がある臨界値を超えると多角形の対流セルが発生する Marangoni 不安定性とは全く異なる現象である。液面上に温度勾配を与えると、液層内には表面張力対流が発生する。この流れは通常 2 次元定常流であるが、温度勾配がある臨界値を超えると、流れに一定の角度 (Pr 依存) で斜交した軸を持つ、ロールセル状の一群の派生流が生じる [31,32]。これが HTW である。矩形プール内の HTW については比較的理解が進んでいたが、環状プール内の HTW についての研究は、シリコンオイルの環状プールを用いた Schwabe ら[33]の微小重力および地上での実験や Garnier ら[34]の地上実験が知られるのみであった。Li ら[35], Shi ら[36]は Schwabe らの実験と同一サイズ（内壁半径 $r_i=20\text{mm}$, 外壁半径 $r_o=40\text{mm}$ ）の環状プール内の HTW 現象の数

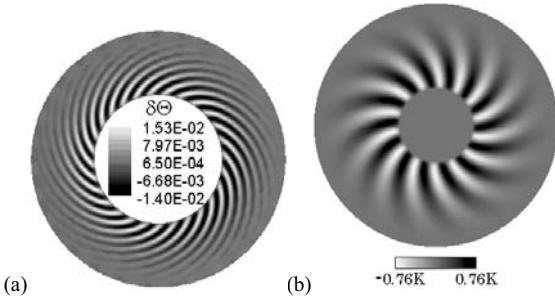


Fig. 9 Surface temperature pattern of HTW in annular pool obtained by simulation for (a) silicone oil ($Pr=6.7$) $d=1\text{mm}$, at $\Delta T=6\text{K}$ and (b) silicon melt ($Pr=0.01$) $d=1.5\text{mm}$ at $\Delta T=47\text{K}$.

値解析を実施した。その結果、シリコンオイル ($Pr=6.7$) の浅い液層（深さ 1mm）の場合、図 9-a に示す螺旋形の温度パターンが、周方向および半径方向に低温壁から高温壁へ向けて一定速度で伝搬する。このパターンは対数螺旋関数で近似でき、温度パターンと温度勾配のなす角度は約 63° であり、矩形プール内の HTW と等価な現象である [36]。ただし、対数螺旋の原点はプールの中心から僅かに偏倚している。周方向の波数 m の値は温度差 ΔT によって変化する。また、HTW 発生の臨界温度差（臨界マランゴニ数 $Ma_c = \sigma_{Tr} \Delta T_c / \mu a$ ）の値や周方向の波数は液深 ($D=d/r_0$) に強く依存する。微小重力下での HTW 発生条件の液深依存性を図 10 に示した[38]。波数は、液深の増加とともに減少する。数値計算と Schwabe らの実験結果の傾向は類似しているが、線形安定解析の結果[37,38]および Sim ら[39]の数値解析結果は異なる傾向を示している。この相違の原因は未解決である。重力下では、定常な表面張力対流は安定化し、HTW 発生にはより大きな温度差を必要とする。数値解析や線形安定解析はともにこの傾向を示すが、実験結果との定量的一致には至っていない。

液深 1.5mm のシリコンメルト ($Pr=0.01$) の場合には図 9-b に示すパターンが得られる[40]。この場合の波数は $m=14$ であり、同じ液深のシリコンオイル液層の場合の $m=20$ に比して波数は小さい。また、パターンの曲がりも少なく、温度勾配との角度は $10\sim15^\circ$ で、これも矩形プール内の HTW の特性とほぼ一致している。

環状プールを中心軸周囲にゆっくりと回転させると、HTW 発生条件は変化する。高 Pr の場合

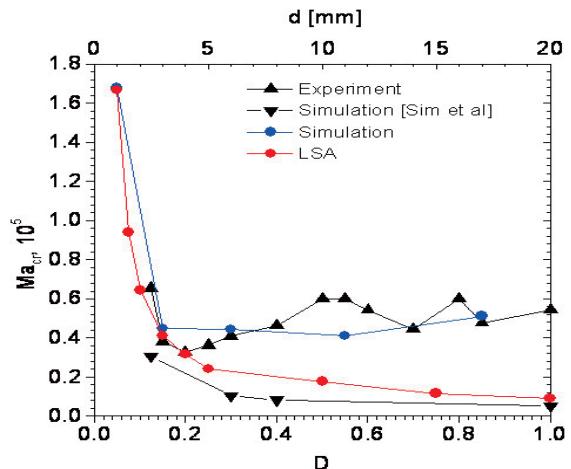


Fig. 10 Critical Marangoni number for the incipience of HTW in annular pool as a function of liquid depth.

には臨界マランゴニ数は低下し[37]、低 Pr の場合には増大する[41]。回転速度と Pr 値が環状プール内の HTW 発生条件に及ぼす効果の詳細は分かっていない、矩形液層内の HTW に関する線形安定解析[42]等が参考になる。

このように、Azami らの観察した浅い液層での温度パターンが HTW であることは確認出来たが、実際の CZ 炉内の融液はかなり深く、融液流れの全体像は浮力対流が支配的であり、HTW が CZ 炉内の温度パターン発生の主要因子にはなり難いと思われる。さらに、溶融シリコンの表面張力およびその温度依存性は、酸素濃度の影響を強く受けるため[43]、シリコン CZ 炉における表面張力対流の影響については不明な点が残されている。

5. おわりに

以上半導体シリコンや酸化物の単結晶育成用の CZ 炉に関する解析について最近の動向を概説した。半導体シリコン結晶中の酸素やドーパントさらには点欠陥類の濃度と分布の制御が強く求められており、数値解析による検討が今後益々必要性を増すと考えられる。また、本解説では省略したが、シリコン結晶育成分野では、IC 用の高品質単結晶以外にも、太陽電池用の単結晶および多結晶の生産が盛んになっている。太陽電池用シリコン結晶の生産コストを低減するためには、省電力と結晶成長の高速化が不可欠である。太陽電池用単結晶シリコンの CZ 炉の内部構造物（輻射シール

ド, 断熱層) の最適設計や操作条件策定のために数値解析が有効に用いられた[44]が, 多結晶シリコンの連続鋳造プロセスの最適化にも, その有効利用が期待されている。

酸化物結晶育成の場合, 物質の種類も多岐にわたっており, 制御すべき品質因子が異なる場合が多い。高温融液の物性値が不明な物質も多く, 数値解析の手法の開発のみならず, 研究遂行には物性値データベースなどのインフラ整備が必要不可欠である。今後, より多くの関係者の参画が期待される分野である。

参考文献

- [1] Krauze, A. et al., Numerical 3D modeling of turbulent melt flow in a large CZ system with horizontal DC magnetic field, II: comparison with measurements, *J. Crystal Growth*, **265** (2004) 14.
- [2] Vizman, D. et al., Three-dimensional modeling of melt flow and interface shape in the industrial liquid-encapsulated Czochralski growth of GaAs, *J. Crystal Growth*, **266** (2004) 396.
- [3] Kalaev, V.V. et al., Prediction of bulk defects in CZ Si crystals using 3D unsteady calculations of melt convection, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **5** (2003) 369.
- [4] Voronkov, V.V. et al., Nucleation of oxide precipitates in vacancy-containing silicon, *J. Appl. Phys.*, **91** (2002) 5802.
- [5] Falster, R. and Voronkov, V. V., A perspective from crystal growth and wafer processing on the properties of intrinsic point defects in silicon, *Defect and Diffusion Forum*, **200-2** (2002) 125.
- [6] Falster, R. et al., Dielectric breakdown distributions for void containing silicon substrates, *Microelectronics Reliability*, **41** (7) (2001) 967.
- [7] Liu, L.J. and Kakimoto, K., Partly Three-dimensional global modeling of a silicon Czochralski furnace. I. Principles, formulation and implementation of the model, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **48** (2005) 4481.
- [8] Liu, L.J. and Kakimoto, K., Partly three-dimensional global modeling of a silicon Czochralski furnace. II. Model application: Analysis of a silicon Czochralski furnace in a transverse magnetic field, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **48** (2005) 4492.
- [9] Liu, L.J. and Kakimoto, K., 3D global analysis CZ-Si growth in transverse magnetic field with rotating crucible and crystal, *Crystal Res. Technol.*, **40** (2005) 347.
- [10] Liu, L.J. et al., An analysis of temperature distribution near the melt-crystal interface in silicon Czochralski growth with a transverse magnetic field, *J. Crystal Growth*, **282** (2005) 49.
- [11] Cockayne, B. et al., Facetting and Optical Perfection in Czochralski Grown Garnets and Ruby, *J. Mater. Sci.*, **4** (1969) 450.
- [12] Kvapil, Ji. et al., Czochralski Growth of YAG:Ce in a Reducing Protective Atmosphere, *J. Crystal Growth*, **52** (1981) 542.
- [13] Xiao, Q. et al., The Role of Internal Radiation and Melt Convection in Czochralski Oxide Growth: Deep Interfaces, Interface Inversion, and Spiraling, *J. Crystal Growth*, **128** (1993) 188.
- [14] Xiao, Q. et al., Heat Transfer and Interface Inversion during the Czochralski Growth of Yttrium Aluminum Garnet and Gadolinium Gallium Garnet, *J. Crystal Growth*, **139** (1994) 147.
- [15] Kobayashi, M. et al., Effect of Internal Radiative Heat Transfer on Interface Inversion in Czochralski Crystal Growth of Oxides, *J. Crystal Growth*, **235** (2002) 258.
- [16] Kobayashi, M. et al., Effect of Internal Radiation on Thermal Stress Fields in CZ Oxide Crystals, *J. Crystal Growth*, **241** (2002) 241.
- [17] Hayashi, A. et al., Numerical Simulation of the Czochralski Growth Process of Oxide Crystals with a Relatively Thin Optical Thickness, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **47** (2004) 5501.
- [18] Yuferev, V.S. et al., Variations of Solid-Liquid Interface in the BGO Low Thermal Gradients CZ Growth for Diffuse and Specular Crystal Side Surface, *J. Crystal Growth*, **253** (2003) 383.
- [19] Bundenkova, O.N. et al., Simulation of Global Heat Transfer in the Czochralski Process for BGO Sillenite Crystals, *J. Crystal Growth*, **266** (2004) 103.

- [20] Bermudez, V. et al., Effect of the Shouldering Angle on the Shape of the Solid-Liquid Interface and Temperature Fields in Sillenite-type Crystals Growth, *J. Crystal Growth*, **279** (2005) 82.
- [21] Bundenkova, O. et al., Effect of Internal Radiation on the Solid-Liquid Interface Shape in Low and High Thermal Gradient Czochralski Oxide Growth, *J. Crystal Growth*, **303** (2007) 156.
- [22] Tsukada, T. et al., A Global Analysis of Heat Transfer in the CZ Crystal Growth of Oxide: Recent Developments in the Model, *J. Crystal Growth*, **303** (2007) 150.
- [23] Jing, C.J. et al., Global analysis of heat transfer considering three-dimensional unsteady melt flow in CZ crystal growth of oxide, *J. Crystal Growth*, in press.
- [24] Jing, C.J. et al., Numerical Studies of Wave Pattern in an Oxide Melt in the Czochralski Crystal Growth, *J. Cryst. Growth*, **265** (2004) 505.
- [25] Jing, C.J. et al., Three-Dimensional Numerical Simulation of Spoke Pattern in Oxide Melt, *J. Crystal Growth*, **200** (1999) 204.
- [26] Jing, C.J. et al., Effect of RF Coil Position on Spoke Pattern on Oxide Melt Surface in Czochralski Crystal Growth, *J. Crystal Growth*, **252** (2003) 550.
- [27] Szmyd, S.J. et al., Fluid flow pattern in Bridgeman and Czochralski configurations, in A. Gelfgat edit. *Studies on Flow Instabilities in Bulk Crystal Growth*, Transworld Res. Network, 2007
- [28] Lee, Y.S. et al., Prandtl Number Effect on Traveling Thermal Waves Occurring in Czochralski Crystal Growth, *Adv. in Space Res.*, **24** (1999) 1403.
- [29] Kakimoto, K. et al., Ordered structure in non-axisymmetrical flow of silicon melt convection, *J. Crystal Growth*, **126** (1993) 435.
- [30] Azami, T. et al., The Role of Surface Tension-Driven Flow in the Formation of a Surface Pattern on a Czochralski Silicon Melt, *J. Crystal Growth*, **233** (2001) 99.
- [31] Smith, M. K. and Davis, S. H., Instabilities of Dynamic Thermocapillary Liquid Layers. Part 1. Convective Instabilities, *J. Fluid Mech.*, **132** (1983) 119.
- [32] Kuhlmann, H. C., *Thermocapillary Convection in Models of Crystal Growth*, Springer, 1999.
- [33] Schwabe, D. and Benz, S., Thermocapillary Flow Instabilities in an Annulus under Microgravity-Results of the Experiment Magia, *Adv. Space Res.*, **29** (2002) 629.
- [34] Garnier, N. and Chiffaudel, A., Two Dimensional Hydrothermal Waves in an Extended Cylindrical Vessel, *The European Phys. J.*, **B19**, (2001) 87.
- [35] Li, Y-R. et al., Thermocapillary Convection in a Differentially Heated Annular Pool for Moderate Prandtl Number Fluid, *Int. J. Thermal Sciences*, **43**, (2004) 587.
- [36] Shi, W.Y. and Imaishi, N., Hydrothermal waves in differentially heated shallow annular pool of silicone oil, *J. Crystal Growth*, **290** (2006) 280.
- [37] Shi, W.Y. et al., Effect of pool rotation on thermocapillary convection in shallow annular pool of silicone oil, *J. Crystal Growth*, **294** (2006) 474.
- [38] Shi, W.Y. et al., Thermocapillary-buoyant convection of silicone oil in a differentially heated annular pool, Presented at 2nd Topical Meeting on Experiments in Space and beyond (Brussel)", 2007.
- [39] Sim, B.C. et al., Oscillatory Thermocapillary Convection in Open Cylindrical Annuli (Part 2. Simulations), *J. Fluid Mech.*, **491**, (2003) 259.
- [40] Li, Y.R. et al., Three-Dimensional Oscillatory Flow in a Thin Annular Pool of Silicon Melt, *J. Crystal Growth*, **260** (2004) 28.
- [41] Shi, W.Y. et al., Influence of pool rotation on the thermocapillary convection in annular pool of silicon melt by numerical simulation, *CD Proc. ASV (Hong Kong)* (2007)
- [42] Zebib, A., Thermocapillary instabilities with system rotation, *Physics of Fluids*, **8** (1996) 3209.
- [43] 牛 王剛ら, シリコン融液の表面張力に及ぼす酸素分圧の影響, 日本結晶成長学会誌, **23** (1996) 374.
- [44] Lan, C.W., Recent progress of crystal growth modeling and growth control, *Chem. Eng. Sci.*, **59** (2004) 1437

生き物の不思議：凍結状態で生きる植物 *A Mystery of Living Organisms: Freezing Tolerant Plants*

上村 松生（岩手大学）
Matsuo UEMURA (Iwate University)
e-mail: uemura@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

日本国内に見られる無霜地帯は、ごくわずかな地域に限られており、そこに生きる生物は低温（あるいは、凍結）条件下で生存していく仕組みを有している（データは [1] を使用）。私達が研究を続けている岩手大学が立地する岩手県盛岡市は厳しい冬が長く続き、1年のうち約4ヶ月は平均最低気温が氷点下に達する。種子が発芽してからその場所で一生を終えるまで野外で生息する多年生植物は、気温低下とともに生体温度が低下し、氷点下温度では体内水分の凍結という動的変化が生ずる。彼らは、そのような重大な影響を及ぼす現象に適応する能力を備えていないと、到底、生きてはいけない。

水が体内で凍ると、どのような影響があるだろうか？生体物質のほとんどが水溶性であることや生体を維持するための多くの反応が酵素を介した触媒反応であることを考慮すると、水が氷になる影響は計り知れない。さらに、生体を構成する多くの高分子物質（例えば、タンパク質、核酸、生体膜など）の表面近傍には、多くの水分子が結合、あるいは、相互作用してそれらの構造を安定化しているため、それらの水分子が氷になり除去されてしまうと、これらの高分子物質の立体構造が破壊され、機能を失ってしまう。それに加えて、凍結前には適当な濃度で溶解していた細胞内に存在する可溶性物質（糖、アミノ酸、陽イオン、陰イオンなど）は、水が凍結することで著しく濃縮される。これらによって、生体が多くの犠牲を払って維持してきた恒常性は破壊され、傷害が発生する危険度が増し、細胞の置かれた状況は非常に厳しく異常なものとなる。

野外で冬を越す植物は、当然、このような過酷な状況を克服して生きる手段を持っていることになる。興味深いことに、温帶や亜寒帯を起源とする植物は、夏の間はほとんど凍結に耐えられない

が、秋から冬にかけて気温の低下と日長の短縮を感じ、低温に対する抵抗性を獲得、あるいは、増大し、厳しい冬を生き延びるための態勢を作り上げる能力を有している。この現象は「低温馴化（Cold Acclimation）と呼ばれ、多くの異なった応答が一度に起こる非常に複雑なものとして知られている [2-3]。

野生の植物ばかりでなく、多くの栽培されている植物にとっても、寒冷気候に適応する能力の大小は重要な意味を持つ。地球規模での気候変動が進み、全球的には平均気温の上昇が確実に見られるが、地球上を局所的に見ると、様々な異常気象が頻発していることも事実である。局地的寒波の到来、既に芽吹いた後に襲来する春先の異常低温、氷点近辺で起る雨の氷結、局地的な豪雪など、世界各地で見られる異常気象による被害も膨大な額に上る [4]。また、私達が食料としている作物の寒冷適応能力を 1°C でも上昇させることができれば、生産量の増大や耕作不適地を利用した農地の拡大も可能になる。

このようなことから、私達は、様々な植物や植物由来の細胞を用いて、凍結傷害が発生する機構やその修復機構、さらには、氷点下の温度に適応して生きる能力を獲得する分子機構を理解すべく研究を続けてきた。本稿ではその一端を紹介し、読者の方に植物が持つ不思議な世界の一つを楽しんでいただきたい。

2. 植物の凍結様式

植物は、凍結温度に遭遇した際に多様な適応戦略を見せる。図 1 は私達の研究分野では教科書とも言える Levitt 博士による総説 [2] にあるチャートを改変引用したものであるが、凍結温度で生育可能な植物が適応様式によっていくつかのグループに分けられることがわかる [5-6]。

生息場所などを選ぶことにより、凍結温度を避

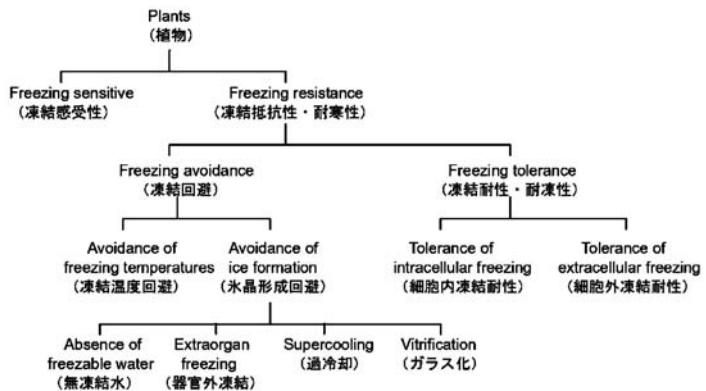


図1 凍結温度における適応戦略による植物の分類 (Levitt, 1980 [2] を改変)

けるものも少数存在するが、ほとんどの植物は否応なしに凍結温度に曝される。植物の中には、気温が凍結温度になってしまっても、氷晶形成を避けるものが存在する(凍結回避)。凍結水がほとんど無い程までに乾燥する植物(コケの一部など)、水分を移動すること(脱水濃縮されることになる)により氷晶が形成されない仕組みを持つ植物(器官外凍結:バラ科やツツジ科の花芽、針葉樹の葉芽など)、水分は移動しないが氷に変換するのを防いでいる植物(過冷却:リンゴやナシなどの樹木の木部柔細胞など)、さらには、自然界ではごく希にしか見られないが、乾燥が進んで溶質が多量に溶け込んだ水分が微小な空間に閉じこめられたまま冷却される過程で水分がガラス状態になる組織・器官(ガラス化:一部の種子がかなり低温まで冷却されると起こりうる)などが知られている。

一方、多くの植物は、気温が氷点下にさがると積極的に氷晶を形成する(凍結耐性)。植物細胞はお互いに密に分布しているのではなく、細胞と細胞の間に水蒸気を始め様々な物質を含んでいる空間(細胞間隙)が存在する。細胞間隙には氷晶の核となりうる細菌や物質が存在し、さらに、細胞内に比較すると溶質濃度も低いことから、氷点下になって氷が最初にできる場所と考えられている(細胞外凍結)。ある氷点下温度では、水の化学ポテンシャルは氷のそれより高いため、細胞内の水は細胞間隙の氷に引きつけられ、温度低下に伴って氷晶は成長し、細胞内は次第に脱水されることになる。従って、細胞外凍結をする植物が生存するには、温度の低下に加えて細胞内からの脱水の進行に耐えることが必須となる。このような細胞

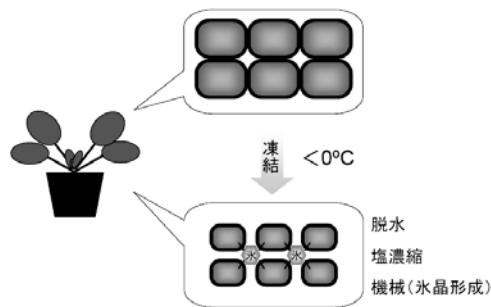


図2 細胞外凍結では複数のストレスが生じる

外凍結によって氷点下温度で生活しているものは、多くの草本類や木本類、さらには、コケ類などがある。

細胞内への氷晶の侵入(細胞内凍結)は、温度低下が急速な場合や細胞内から細胞外への脱水速度が遅い場合などに希に観察される。しかし、細胞内凍結をして生存している細胞は未だ確認されていない。つまり、細胞内凍結は致死的であると考えられている。

3. 植物の凍結傷害発生機構

以上述べたように、植物が持つ凍結温度への応答機構は非常に多様であるが、これ以降は、私達が研究対象としている細胞外凍結をする植物に限って話を進める。

細胞外凍結によって発生する傷害は、細胞内からの脱水によって起こる場合が多い[7]。傷害の種類と発生頻度は、細胞の生理的状況(凍結に強いか弱いか)、あるいは、試料が凍結される温度によって大きく異なっている。以下の知見は、組織切片ではなく、観察が容易で定量的解析が可能なプロトプラスト(植物細胞を細胞壁分解酵素で処理して細胞壁を取り除き、単細胞に分離したもの)を用いた実験で得られたものである。凍結に弱い低温馴化前の細胞を用いた場合、比較的高い凍結温度では、凍結過程で収縮した細胞が融解過程で膨張する際に破裂してしまう現象がよく見られる。さらに凍結温度が低くなると、細胞膜と細胞の中にある膜系(葉緑体包膜や液胞膜など)が相互作用して膜の独立性を失い、ついには細胞膜の半透過性が失われ、細胞の恒常性が崩壊し死に至る。この時、脱水によって生体膜同士の相互作用の結果、生体膜が通常形成している脂質二重層が崩れ、

個々の生体膜の機能が失われると考えられる。凍結に強い低温馴化後の植物から単離されたプロトプラストでは、凍結温度に関わらず、同様に、細胞膜の半透性を失うことが原因で傷害を受ける。

さらに、細胞のまわりに形成された氷晶による機械的ストレスも傷害の発生を導く。水から氷への変換は急激な体積増加をもたらし、その結果、細胞は圧迫される。細胞壁はある程度の圧力を受け止めそれに耐えることが出来るが、圧力が大きくなりすぎると、耐えきれずに崩壊してしまう。また、氷晶の表面によって細胞の最も外側にある細胞膜が傷つけられてしまうことも考えられる(第4項を参照)。一方、細胞内からの脱水の進行に伴って、細胞内に溶解している塩類などの可溶性物質が濃縮される。凍結前の細胞内溶質濃度に依存するが、 -5°C まで凍結されると細胞内の水の70~80%が脱水される。従って、凍結前と比較すると、可溶性物質の濃度が大きく増加するため、pHや電気的状態の変動による高分子物質(タンパク質など)に析出や代謝反応速度の低下などの可能性がある。

以上のように、植物の凍結過程で発生するストレスは多岐にわたり、しかも、それぞれがかなり重大である。もう一度上記の傷害を考えてみると、多くの傷害は膜に関連して発生することがわかる。従って、植物は膜系を保護することを中心にして、

発生するストレスを回避、あるいは、それらのストレスに耐えうる能力を発達させなければならず、温帯や亜寒帯に生息する植物はそのような能力を有していることになる。

4. 植物の低温馴化機構

多くの凍結傷害の発生が膜に関連していること、さらに、細胞に存在する多くの膜系のうち細胞膜が最も凍結ストレスに弱いという事実から、私は、夏から冬にかけて(あるいは、実験室内で低温に暴露する低温馴化の過程で)、どのように細胞膜が凍結ストレスに強くなっていくのかという点に興味を持って研究を続けてきた。

実験室内で低温馴化処理($2\sim 5^{\circ}\text{C}$, 2日~数週間)を行うと、多くの植物は凍結耐性を増大する。例えば、モデル植物として世界中で広く使われているシロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)は、 2°C で24時間処理しただけで、生存可能温度が -4°C から -11°C に低下する(図3)。シロイヌナズナは低温に最も早く応答することで知られているが、他の植物でも、凍結耐性増大までに必要な時間は長くなるが、低温馴化に応答し、凍結耐性を増大させる。それぞれの植物が示す最大凍結耐性は異なっている(例えば、ライムギは -30°C 、オートムギは -12°C 程度)が、それは、遺伝子に書き込まれている情報を基にして、遺伝的に決定されて

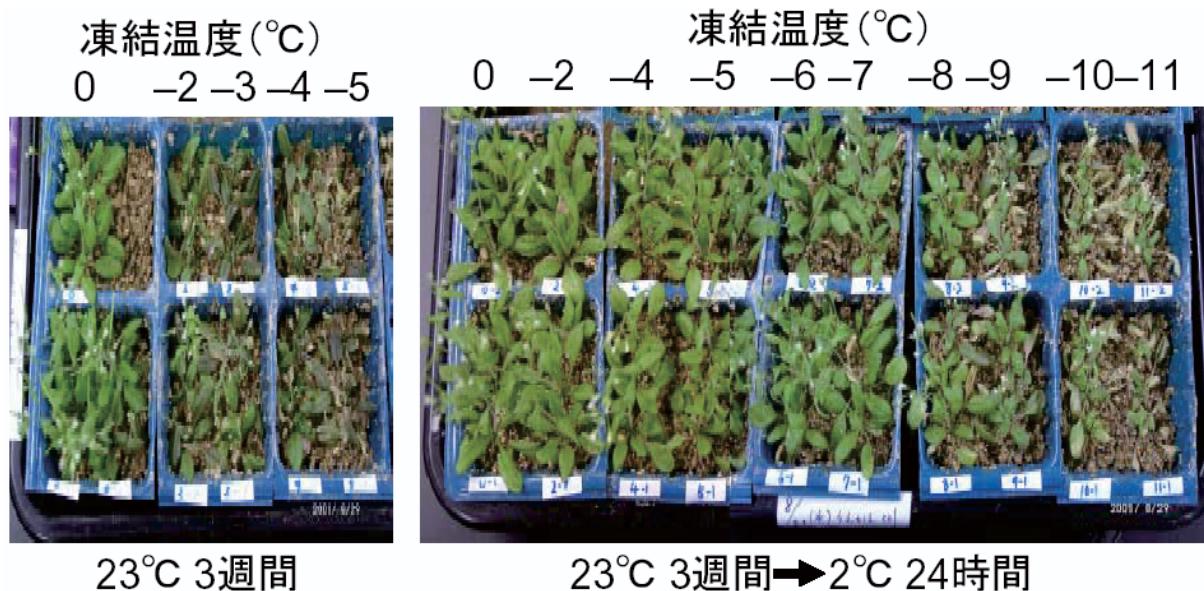


図3 低温馴化前後でのシロイヌナズナ植物体の凍結耐性。低温未馴化(23°C , 3週間)個体は -4°C が生存下限温度であるが、低温馴化(2°C , 24時間)個体は -10°C まで生存が可能になる。

いると考えられる。

植物は、一般に、低温馴化に応答して細胞膜脂質組成が大きく変動する。今まで調べられた植物（ライムギ、シロイヌナズナ、キクイモ、クワ、オーチャードグラスなど）では、共通して、細胞膜のリン脂質含量が増加する[7]。リン脂質は、他の脂質と比べて水和度が高いものが多く、凍結過程で起こる膜表面からの脱水を減少させ、細胞膜の不安定化を押さえているものと予想される。事実、プロトプラスト細胞膜と脂質小胞（リポゾーム）の融合によって細胞膜リン脂質含量を変化させると、凍結耐性を大きくすることが出来る[8]。不飽和脂肪酸を含むホスファチジルコリンから構成されるリポソームと低温馴化前の植物から単離されたプロトプラストを融合する（つまり、低温馴化後の細胞膜に近づける）と、凍結傷害の発生が押さえられる。従って、細胞膜脂質変動と凍結傷害発生が強く関連していることを示している。

低温馴化過程におけるリン脂質の増加に伴い、細胞膜に含まれる糖脂質（グルコセレブロシド）が大きく減少するものが多い[7]。グルコセレブロシドは、融点が高い脂質であると同時に、水和度が非常に低い。従って、凍結過程においては脱水が進行するため、水和度の高い脂質と相分離を起こし、その結果、グルコセレブロシドの多い部分が凍結過程で不安定化されると示唆されている。

低温馴化過程においては、細胞膜に含まれているタンパク質成分も大きく変動する。シロイヌナズナの遺伝子の完全解読（2000年）とタンパク質解析技術の急速な進歩（質量分析）を利用して、私達は、低温馴化に応答するシロイヌナズナ細胞膜タンパク質を網羅的に解析した[9]。その結果、38個の低温応答性細胞膜タンパク質を同定し、それらのタンパク質を7つのグループに分類した。特に、脱水や酸化ストレスから膜を保護すると考えられるタンパク質や膜修復に関与するタンパク質などは、低温馴化1日目に急速に増加しており、シロイヌナズナにおいて急速に凍結耐性が増大する時期と一致していた。

中でも、膜修復関連タンパク質は、凍結傷害からの回復を考えると興味深い。機械的ストレスがかかると、細胞膜に“孔”が生じることは、動物細胞などでよく知られている。凍結の場合、氷晶と細胞膜が接触、あるいは、ごく近傍に共存する

場合、細胞膜に“孔”が生じる可能性がある。この“孔”をカルシウム依存的に修復するために必要なタンパク質がシナプトタグミンである。事実、シロイヌナズナの低温馴化過程で、シナプトタグミン様タンパク質は急速に増加する[9]。また、プロトプラストの凍結融解後の生存率は、周囲（懸濁液）にカルシウムイオンが存在しないと大きく減少することもわかっている。以上のことを考え合わせると、細胞外凍結によって形成された氷晶が細胞膜に機械的なストレスを与えると、その結果生じた細胞膜の“孔”をカルシウムイオンとシナプトタグミン様タンパク質が修復し、生存を維持している可能性が浮き上がってくる[10]。

さらに、低温応答性細胞膜タンパク質の一つであるリポカリん様タンパク質も凍結耐性増大に関与していることが明らかになった[11]。リポカリん様タンパク質を過剰発現させた遺伝子組換体は、遺伝子を組換えていない野生型より凍結耐性が高い。リポカリん様タンパク質と細胞膜脂質の相互作用を調べた結果、細胞膜に存在する酸性リン脂質と強い親和性を有することが明らかになった。さらに、これらの酸性リン脂質を含むリポゾームとリポカリん様タンパク質を混在させ凍結融解を行ったところ、リポカリん様タンパク質を含まない場合に比べて、リポゾームの安定性の低下を抑えることが示された。従って、低温馴化に応答して細胞膜で増加するリポカリん様タンパク質は、酸性リン脂質と相互作用し、細胞膜の凍結脱水ストレスに対する抵抗性を増しているものと考えられる。

一方、同定された低温応答性細胞膜タンパク質の中にチューブリンやHIRタンパク質などの細胞膜「ラフト」領域に局在すると考えられるものが含まれていた。細胞膜ラフトとは、動物細胞で見出されたスフィンゴ糖脂質とステロールに富む細胞膜上の微小な領域（マイクロドメイン）を指し、そこに存在するタンパク質分析の結果から、シグナル伝達や細胞内輸送などのプラットフォームとして重要な機能を果たしていることが推察されている[12]。植物細胞においても、同様なマイクロドメインが細胞膜上に存在し、動的な変動を繰り返しながら、様々な生理応答に関与しているものと推測されている[13-14]。私達は、細胞膜マイクロドメインが低温に応答し、低温馴化過程にお

ける細胞膜の作りかえや細胞膜－細胞壁の相互作用などに関わっている可能性があるのではないかと考え研究を進めている。現在までに、低温馴化過程前後の植物から細胞膜マイクロドメイン領域を単離し、そのタンパク質・脂質組成解析を進めているが、予想通り、細胞膜マイクロドメインは低温に応答し、脂質やタンパク質組成を変化させていることがわかりかけてきた。今後は、低温もしくは凍結シグナルの受容や膜の低温“安定性”にマイクロドメインが何らかの関与をしている可能性を調べていく予定である。

5. 岩手大学 21世紀 COE プログラム 「熱－生命システム相関学拠点創成」

以上述べたような研究に加えて、岩手大学が創立以来積み重ねてきた植物の耐冷性、低温適応に関する研究成果を基盤に、熱（温度）環境に対する生命システム応答の可塑性や多様性について、ライフサイクルや進化的時間軸を含めて観点から解析することを目指す21世紀 COE プログラム「熱－生命システム相関学拠点創成」が平成16年度からスタートした。本プロジェクトは、生命科学・農学だけに対象分野を狭めず、生物から見出された熱応答システムに基づく新しい工学デバイスの開発や生物の熱応答シミュレーションモデルを構築し、ポストゲノム時代に向けた革新的な学問領域「熱－生命システム相関学」の創成を目指している。この目的を達成するため、生命科学研究（連合農学研究科）と工学的研究（工学研究科）を融合させた博士課程寒冷圏生命システム学専攻を岩手大学大学院連合農学研究科内に設置し、本学が位置する寒冷環境を最大限に活用した教育研究を継続して行っている。このような研究拠点形成は、従来の専門分野にとらわれずに生物学・物理学・情報学・環境学などの境界領域を統合した視野の広い、かつ、基礎的研究に基づいた独創的研究を立案・遂行できる優秀な若手研究者育成に大きく貢献するものと思われる。同時に、将来、国際的なレベルで活躍できる岩手大学卒業生を数多く排出し、関連分野を積極的にリードする人材を育成するといったアウトプットを目指している。

プロジェクト発足以来4年目にさしかかっているが、国際シンポジウム（3回）、COE フォーラム（50回）など地方大学ではなかなかチャンスがな

い国際的研究者を招聘したイベントも開催できるようになった。また、学長を初めとする大学首脳部や事務局の理解を得て、研究教育の活性化を行っている。尚、21世紀 COE プログラムの詳細はホームページ (<http://www.iwate-u.ac.jp/coe/>) でご覧いただける。

6. 終わりに

植物が夏から冬にかけて凍結耐性を増大していく仕組みは、非常に不思議なものである。約110年前、ドイツの Hans Molisch 教授（東北大学植物生理学教室の教授も務められた）が細胞の凍結過程を記録した論文 [15] を出版して以来、多くの研究者達は細胞が凍結下でどのように挙動するのか、知りたくて研究を続けてきた。まだ全貌解明というのほど遠いが、多くの新たな知見が報告されるとともに、複雑な寒冷適応様式が一層明らかになってきた。

馴化という現象は、その情報は親から子どもには伝わらず、同一世代の中で発現させる遺伝子を変えることにより、短時間で必要な形質を獲得する現象である。言葉を換えてみると、状況が許せば、地球規模での気候変動によって局所的に急激に気象条件が変動する場合にも対応できる可能性を秘めている。しかし、私達は、低温馴化の仕組みを理解したとは到底言える状況ではない。最近の分子生物学的知見の急速な蓄積と分析技術の進歩によって、私達が使える解析手段は格段に増え、しかも、改良された。後は、それを使う私達が頭を柔らかくして、新しい切り口で未解決の問題を解決していくことが要求されている。

植物細胞の凍結傷害発生は、細胞膜の損傷が初発原因であることはほぼ間違いない。しかし、凍結によって細胞膜が構造的・機能的損傷を受ける機構、あるいは、低温馴化過程における凍結耐性が増大する分子機構などについての詳細な解明は不十分であると言わざるを得ない。急速に発展した分子生物学的解析手法はもちろんあるが、従来から用いられている生理・生化学的アプローチを有効に使用し、現象をきちんと理解した上で研究を進めていく必要がある。また、植物の最大凍結耐性や低温馴化速度、凍結様式などについては、千差万別である。従って、一つの材料に偏ることなく、様々な角度から多くの材料を用いて研究を

行うことが必要である。

7. 謝辞

本稿は、筆者の研究室で精力的に実験を行ってきた研究員、学生諸君の多くの成果を基に書かれたものである。全員の名前を挙げることは出来ないが、ここに心から感謝したい。平成16年度から始まった21世紀COEプログラムに伴い、COE特任准教授やCOE研究員など15名を越える新しい顔ぶれが加えることができた。彼らが私達の研究グループにもたらした刺激は非常に大きく、学生諸君もその恩恵を多大に受けている。さらに、COE発足に伴って、生命科学以外の領域に関わっている方々からのコンタクトや講演依頼が増加した。本稿を執筆するきっかけも、平成18年度東北支部秋季伝熱セミナーで講演させていただいたことである。セミナー講演に当たって大変お世話になった岩手大学工学部・藤田尚毅先生および廣瀬宏一先生に感謝申し上げたい。また、本稿をまとめるに当たってお世話していただいた東北大学・丸田薰先生にも併せて感謝申し上げたい。

なお、本稿に述べられている研究の多くは、科学研究費補助金、独立行政法人・農業・食品産業技術総合研究機構・生物系特定産業技術研究支援センター支援事業、農林水産省形態生理プロジェクト、岩手大学学長裁量経費、岩手大学大学院連合農学研究科長裁量経費などの援助によって行われた。岩手大学に赴任して以来9年間、様々な形で支援していただいた全ての方々にこの場を借りて感謝したい。

参考文献

- [1] 気象庁ホームページ
- [2] <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- [3] Levitt, J., Responses of Plants to Environmental Stresses, Academic Press (1980)
- [4] Steponkus, P.L., Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation, Annu. Rev. Plant Physiol. **35** (1984) 543-584.
- [5] National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) Homepage.
<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/billionz.html>
- [6] 酒井昭, 植物の耐凍性と寒冷適応, 学会出版センター (1982).
- [7] 酒井昭, 植物の分布と環境適応, 朝倉書店 (1996).
- [8] Steponkus, P.L., Uemura, M., Webb, M.S., In: Advances in Low Temperature Biology (P.L. Steponkus ed.), JAI Press, London, **2** (1993) 211-312.
- [9] Steponkus, P.L., Uemura, M., Balsamo, R.A., Arvinte, T., Lynch, D.V., Transformation of the cryobehavior of rye protoplasts by modification of the plasma membrane lipid composition. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **85** (1988) 9026-9030.
- [10] Kawamura, Y., Uemura, M., Mass spectrometric approach for identifying putative plasma membrane proteins of *Arabidopsis* leaves associated with cold acclimation. Plant J. **36** (2003) 141-154.
- [11] Kawamura, Y., Yamazaki, T., Minami, A., Uemura, M. Tolerance to freezing stress in *Arabidopsis* involves membrane repair following mechanical stress caused by ice crystal growth. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. (in press).
- [12] 重松智美, 富永陽子, 上村松生, シロイヌナズナ低温応答性細胞膜タンパク質の機能解析. 低温生物学会誌 **52** (2006) 175-180.
- [13] Brown, D.A., London, E., Functions of lipid rafts in biological membranes. Annu. Rev. Cell Dev. Biol. **14** (1989) 111-136.
- [14] Bhat, R.A., Panstruga, R., Lipid rafts in plants. Planta **223** (2005) 5-19.
- [15] Martin, S.W., Glover, B.J., Davies, J.M., Lipid microdomains – plant membranes get organized. Trends Plant Sci. **10** (2005) 263-265.
- [16] Molisch, H., Untersuchungen fiber das Erfrieren der Pflanzen (Translated into and reprinted in English in 1982 in Cryo-Letters 3:332-90) (1987)

行事カレンダー

行事カレンダー

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名(開催地、開催国)	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2007年					
6月	23日(土) 第26回混相流シンポジウム 札幌コンベンションセンター	'07.2.28	'07.4.20	〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学 工学研究科 機械宇宙工学専攻 日本混相流学会講演会 2007/第26回混相流シンポジウム実行委員会 藤川重雄 TEL:011-706-6429, FAX: 011-706-7889 E-mail:fujikawa@eng.hokudai.ac.jp http://ring-me.eng.hokudai.ac.jp/~jsmf2007/	
6月	22日(金) ～ 24日(日) 日本混相流学会 年会講演会 2007 札幌コンベンションセンター	'07.2.28	'07.4.20	〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学 工学研究科 エネルギー環境システム専攻 日本混相流学会年会講演会 2007 実行委員会事務局 村井 祐一 TEL: 011-706-6372, FAX: 011-706-7889 E-mail:murai@eng.hokudai.ac.jp http://ring-me.eng.hokudai.ac.jp/~jsmf2007/	
7月	3日(火) 4日(水) 「伝熱工学資料(出版準備中の新版)」の内容を教材にした熱設計の基礎と応用 東京工業大学大岡山キャンパス百年記念館4階フレイト会議室	'07.6.24		〒160-0016 東京都新宿区信濃町35 社団法人日本機械学会 総務グループ 村山ゆかり TEL: 03-5360-3500, FAX: 03-5360-3507 http://www.jsme.or.jp/ted/lecture07.htm	
7月	24日(火) ～ 26日(木) 第35回可視化情報シンポジウム 工学院大学 新宿校舎	'07.3.2		〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 流体工学研究室 藤原暁子 E-mail: fujiwara@fel.t.u-tokyo.ac.jp TEL: 03-5841-6287, FAX: 03-5841-8542 http://www.visualization.jp/	
8月	6日(月) ～ 8日(水) 日本実験力学会 2007年度年次講演会 埼玉大学東京ステーションカレッジ	'07.4.16	'07.6.8	〒338-8570 さいたま市桜区下大久保225 埼玉大学大学院理工学研究科 富岡了 TEL: 048-858-3459, FAX: 048-858-9197 E-mail: toyooka@env.gse.saitama-u.ac.jp	
8月	1日(水) ～ 7日(木) 「機械の日・機械週間」			〒160-0016 東京都新宿区信濃町35 社団法人日本機械学会 総合企画Gr. 高橋正彦 TEL: 03-5360-3505, FAX: 03-5360-3509 http://www.jsme.or.jp/kikainohi	
9月	20日(木) ～ 21日(金) 日本機械学会関西支部第291回講演会 神戸大学瀬戸記念会館	'07.9.13		〒550-0004 大阪市西区靭本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人日本機械学会関西支部事務局 E-mail: jsme@soleil.ocn.ne.jp TEL: 06-6443-2073, FAX: 06-6443-6049 http://www.kansai.jsme.or.jp/	
9月	23日(日) ～ 26日(水) No.07-201国際会議 第13回国際スタートリングエンジン会議 早稲田大学国際会議場	'07.2.15	'07.5.15	ISEC2007 実行委員会事務局 〒239-8686 横須賀市走水1-10-20 防衛大 学校 システム工学部機械システム工学科 香川 澄 TEL: 046-841-3810, FAX: 046-844-5900 E-mail: isec2007@isec-info.org http://www.isec-info.org/isec2007/	
9月	26日(水) ～ 27日(木) 可視化情報学会全国講演会(岐阜 2007) 岐阜大学			〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部 山下 新太郎 E-mail: yamasita@visualization.jp TEL: 058-293-2431, FAX: 058-230-1892	
11月	23日(金) 24日(土) 熱工学コンファレンス 2007 京都大学 吉田キャンパス	'07.7.7	'07.10.10	〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大 学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 熱工学研究室内 E-mail: tedconf07@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp TEL: 075-753-5255, FAX: 075-753-5203 http://www.jsme.or.jp/ted/thermal07/	
11月	23日(金) ～ 25日(日) エコトピア科学に関する国際シンポジウム 2007 名古屋大学IB電子情報館			〒463-8603 名古屋市千種区不老町名古屋 大学エコトピア科学研究所 ISETS 事務局 佐野 E-mail: isets07@esi.nagoya-u.ac.jp TEL: 052-789-4310, FAX: 052-789-4310	
12月	2日(日) ～ 7日(金) 第9回国際ガスタービン会議 京王プラザホテル	'06.12.31	'07.4.30	Gas Turbine Society of Japan Fax: +81-3-3365-0387 E-mail: igtc@rainbow.dti.ne.jp http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/igtc/	

行事カレンダー

12月	19日(水) ～ 21日(金)	第21回数値流体力学シンポジウム 秋葉原ダイビル		〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 社団法人日本流体力学会 第21回数値流体力学シンポジウム 実行委員会事務局 鳴英志 TEL:042-759-8461, FAX:042-759-8272 http://www.nagare.or.jp/cfd/cfd21	
-----	-----------------------	-----------------------------	--	--	--



社団法人日本伝熱学会第45期(平成18年度)総会議事録

1. 日 時 平成19年5月24日(木) 16時10分~17時40分
2. 場 所 長崎市茂里町2-38 長崎ブリックホール 大ホール
3. 正会員数 1,204名
4. 出席者 684名(うち委任状出席553名)。これは定足数(正会員数の過半数)を上回り、総会は成立した。
5. 議事経過
議長に望月 貞成氏を選出し、次の議案について逐次審議した。

第1号議案 第45期事業報告の件

議長より、社団法人日本伝熱学会第45期(平成18年度)総会議案(以下、総会議案と呼ぶ)の第1号議案第45期事業報告について諮り、満場一致でこれを承認した。

第2号議案 第45期会務報告の件

議長より、総会議案の第2号議案第45期会務報告について諮り、満場一致でこれを承認した。

第3号議案 平成18年度収支決算の件

議長より、総会議案の第3号議案平成18年度収支決算について諮り、満場一致でこれを承認した。

第4号議案 平成19年度事業計画の件

議長より、総会議案の第4号議案平成19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 平成19年度収支予算案の件

議長より、総会議案の第5号議案平成19年度収支予算案について諮り、満場一致でこれを可決した。

第6号議案 日本伝熱学会賞の授賞の件

議長より、総会議案の第6号議案日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞・優秀プレゼンテーション賞授賞について選考経過についての報告がなされた。本年度の日本伝熱学会賞授賞者は、次のとおりである。

日本伝熱学会学術賞
• 代表研究者: Peter L. Woodfield ((独)産業技術総合研究所)
共同研究者: 門出政則(佐賀大学)
光武雄一(佐賀大学)

• 代表研究者: 中別府修(明治大学)
共同研究者: 坂寄純一(東京工業大学・学)

日本伝熱学会技術賞
• 代表研究者: 中尾一成(三菱電機(株))
共同研究者: 弓倉恒雄(三菱電機冷熱プラント(株))
尾崎永一(三菱電機(株))
池内正毅(元 三菱電機冷熱プラント(株))
辻森淳(関東学院大学)
山中悟郎(元 三菱電機エンジニアリング(株))
平田雄志(大阪大学・名誉教授)

日本伝熱学会奨励賞
• 小野綾子(北海道大学・学)
• 塚原隆裕(東京理科大学・学)
• 森本賢一((独)海上技術安全研究所)

日本伝熱学会優秀プレゼンテーション賞(所属は第43回日本伝熱シンポジウム当時)
石井秀和(慶應義塾大学) 佐々木誠一(慶應義塾大学)
川村英雄(東京理科大学) 櫻井篤(東北大学)
渡部弘達(東北大学)

総会議事録

第7号議案 名誉会員の顕彰の件

議長より、総会議案の第7号議案名譽会員の顕彰について報告された。本年度の名譽会員顕彰者は次のとおりである。

秋山光庸	宮武 修	鳥居 薫	片岡邦夫
上原春男	竹越栄俊	宮本政英	曾田正浩
荻野文丸	高城敏美	藤田恭伸	架谷昌信

第8号議案 第46期役員選出の件

議長より、総会議案の第8号議案第46期役員選出について以下のとおりに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16条第2項により退任する役員

理事（会長）	望月貞成	理事（副会長）	牧野俊郎
理事（副会長）	康 倫明		

定款第16条第2項ただし書きにより退任する役員

理事（副会長）	宮内敏雄
---------	------

定款第16条第1項により退任する役員

理事	佐藤 純	理事	吉田英生
理事	辻 俊博	理事	青木和夫
理事	小山 繁	理事	田中 収

定款第16条第3項により退任する役員

理事	茂地 徹
----	------

第46期に新たに選任される役員

定款第16条第2項により選任された役員

理事（会長）	柘植綾夫	理事（副会長）	横堀誠一
理事（副会長）	門出政則		

定款第16条第2項ただし書きにより選任された役員

理事（副会長）	森 康彦
---------	------

定款第16条第1項により選任された役員

理事	近久武美	理事	廣田真史
理事	姫野修廣	理事	吉田篤正
理事	森 英夫	理事	松野孝充

定款第16条第3項により選任された役員

理事	大原敏夫
----	------

理事	河村 洋
----	------

第9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、牧野俊郎氏、宮内敏雄氏の2名を選任した。

以上により、本日の議事を終了した。

平成19年5月24日

社団法人日本伝熱学会第45期(平成18年度)総会

議長 望月 貞成 _____ 印

議事録署名人 牧野 俊郎 _____ 印

議事録署名人 宮内 敏雄 _____ 印

日本伝熱学会 関西支部 主催
第 10 回関西伝熱セミナー2007
— 世界遺産 高野山 で エネルギー・環境問題を考える —

1989 年（平成元年）より関西で 2 年に 1 度開催してきました「関西伝熱セミナー」が今年度で第 10 回を迎えます。これまで、第 1 回（1989 年）六甲山上、第 2 回（1991 年）芦屋奥池、第 3 回（1993 年）神戸住吉、第 4 回（1995 年）神戸、第 5 回（1997 年）大津、第 6 回（1999 年）和歌山、第 7 回（2001 年）芦屋奥池、第 8 回（2003 年）京都貴船、第 9 回（2005 年）奈良、で開催してきましたが、第 10 回は世界遺産である高野山の宿坊という静かな環境の中で、エネルギー・環境問題について企画いたしました。国家のエネルギー・ビーチから、都市でのヒートアイランド問題、住環境におけるエネルギー問題、新エネルギーとして期待される燃料電池、バイオマス発電の最前線、さらには新商品・新技術開発の事例を紹介いただきます。これらのご講演ならびにご参加いただいく皆様との討論を通じて、エネルギー・環境問題における、伝熱研究・技術の役割、課題、そして今後の展開についてのイメージを共考できればと念願しております。エネルギー・環境問題に興味のある多数の方々の積極的なご参加を期待しております。

開 催 日 時	2007 年 9 月 14 日（金）～ 15 日（土）
会 場	高野山 普賢院（宿坊） 〒648-0211 和歌山県伊都郡高野町高野山 605 番地 http://www.fugen-in.com
参加登録費	一般：25,000 円、 学生：15,000 円 ただし、セミナー参加費、講演要旨集、宿泊（1 泊 2 食）を含みます。
定 員	100 名
申込方法	氏名、所属、参加種別（一般、学生）、連絡先（住所、電話番号、電子メールアドレス）を明記し、電子メールあるいは FAX にてお申し込み下さい。受付後、詳しいご案内を差し上げます。
申込先	浅野 等（実行委員会幹事、神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻） Tel & Fax : 078-803-6122, E-mail : asano@mech.kobe-u.ac.jp
申込締切	8 月 29 日（水）（ただし、申込者数が定員に達し次第、受付を終了いたします。）

プログラム

— 第 1 日目 9 月 14 日(金) —	
12 : 00	受付
13 : 00～13 : 50	招待講演 「ビジョン牽引型エネルギー技術開発プログラム—TRIPLE 50—」 西尾 茂文 東京大学 理事（副学長）
13 : 50～15 : 40	<セッション 1：ヒートアイランド> オーガナイザー：吉田 篤正（大阪府立大学）
基調講演	「ヒートアイランドの特性と対策技術の評価」 水野 稔 大阪大学 名誉教授
一般講演	「太陽熱高反射塗料の自動車への応用と環境改善効果」 吉田 好邦 東京大学大学院 新領域創成科学研究科
	「ヒートアイランド対策を考慮した設計提案」 長谷川 淳 (株)竹中工務店 大阪本店設計部
	「大阪府におけるヒートアイランド対策について」 大原 幸三 大阪府 環境農林水産部みどり・都市環境室
15 : 50～17 : 40	<セッション 2：住環境への取組> オーガナイザー：笠井 一成 ((株)ダイキン環境・空調技術研究所)
基調講演	「室内温湿度制御への吸放湿材の利用」

一般講演	鉢井 修一 「潜熱・顕熱分離空調システム」 稻塚 徹 「住宅における二酸化炭素排出量削減の取組」 石田 建一 「熱連系を考慮した新しい集合住宅向けコーチェネレーション (隣組コーチェネシステム) の開発」 山口 秀樹 「セッション3: 古くて新しい伝熱技術」 オーガナイザー: 浅野 等 (神戸大学)
19:00~20:20	<セッション3: 古くて新しい伝熱技術> オーガナイザー: 浅野 等 (神戸大学)
一般講演	「家庭用小型ガス焚き過熱蒸気発生器の開発」 松本 亮介 「シェルプレート熱交換器の自然冷媒への適用」 町田 明登 「直接接触潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムの開発」 高橋 和雄
	(株)前川製作所 技術研究所 (株)神戸製鋼所 機械研究所
- 第2日目 9月15日(土) -	
9:00~11:00	<セッション4: 燃料電池開発の最先端> オーガナイザー: 岩井 裕 (京都大学)
基調講演	「PEFC技術の現状と課題」 谷本 一美 産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー部門
一般講演	「自動車用燃料電池の実用化課題」 久保 則夫 日産自動車(株) 総合研究所 燃料電池研究所 「家庭用 SOFC コージェネレーションの開発状況について」 栢原 義孝 大阪ガス(株) エネルギー技術研究所 「PEFC, SOFC 部材の開発状況」 芳片 邦聰 大日本印刷(株) 研究開発センター関西研究所
11:10~12:10	<セッション5: バイオマス発電の取り組み> オーガナイザー: 澤井 徹 (近畿大学)
一般講演	「小型バイオマスガス化発電システムの概要」 笹内 謙一 中外炉工業(株) 「产学連携研究によるバイオマスエネルギーの有効利用への取り組み」 赤松 史光 大阪大学大学院 工学研究科
12:20	解散

日本伝熱学会東海支部・北陸信越支部合同企画 東海・北陸信越 伝熱セミナー2007

今年度のセミナーは、東海支部と北陸信越支部の合同開催の形で、地域的に中心に当たる岐阜県高山市で開催します。特別講演、両支部からの研究講演および研究発表を予定しておりますので、東海・北陸信越地区はもとより、全国各地から多数のご参加をお待ちしております。

記

期日：平成19年9月21日（金）午後～22日（土）午前
会場：飛騨地域地場産業振興センター（〒506-0025 高山市天満町5-1-25）
Tel : 0577-35-0370 Fax : 0577-33-4325 http://www.takayama-cci.or.jp/bureau/shisetsu/shisetsu_04.html
交通：高山駅から徒歩5分程度
宿泊：国民宿舎 飛騨（〒506-0031 岐阜県高山市西之一色町3-1043-1）
Tel : 0577-32-2400 <http://www.hidanet.ne.jp/~k-hida/>
交通：高山駅から車で10分、徒歩20分程度
参加費：一般（会員、非会員） 13,000円（資料代、宿泊費、懇親会費含む）
学生（会員、非会員） 8,000円（同）
定員：90名

連絡先：伝熱セミナー2007準備委員会・代表（兼：東海支部関連の問合せ先）
岐阜大学工学部機械システム工学科 三松 順治
e-mail : mimatsu@gifu-u.ac.jp, Tel&Fax: 058-293-2532

北陸信越支部関連の問合せ先：
信州大学 繊維学部 機能機械学科 姫野 修廣
e-mail : nhimeno@shinshu-u.ac.jp, Tel: 0268-21-5431

スケジュール：

9月21日（金）
12:30 受付
13:15 開会挨拶
13:40～16:55 講演会
13:40-14:20 研究講演① 「ノンスキャン三次元CT計測法による
乱流予混合火炎の瞬間三次元構造情報の獲得」
石野 洋二郎 氏（名古屋工業大学）
14:20-15:00 研究講演② 「地中熱源利用の融雪・空調の開発－現状と課題－」
永井 二郎 氏（福井大学）
15:10-16:10 特別講演 「(伝熱) △ (生体)」
石黒 博 氏（九州工業大学）
16:15-16:55 企画講演 「東海・北陸信越の伝熱研究概要について」
三松 順治 氏（岐阜大学）
18:30～21:30 夕食・懇親会（宿泊施設内）

9月22日（土）

9:00～11:50 講演会
9:00-9:20 研究発表 I 「二次元曲がり流路内乱流熱輸送の直接シミュレーション」
*松井暁彦、松原幸治、反町洋之、小林睦夫（新潟大学）
9:20-9:40 研究発表 II 「T形合流管内の乱流混合に関する実験解析」
*竹内一平、廣田真史（名古屋大学）、中山浩（中部電力）
9:40-10:00 研究発表 III 「生物試料内の水晶形成に及ぼす超音波照射の影響」
*塚本春樹、多田幸生、瀧本昭、大西元（金沢大学）
10:00-10:20 研究発表 IV 「自然対流場における伝熱特性の圧力依存性」
*西田志郎、小野浩一、丸山直樹（三重大学）
10:30-11:10 研究講演③ 「熱物性値の簡易測定法の開発」
姫野 修廣 氏（信州大学）
11:10-11:50 研究講演④ 「多孔質体理論による複雑伝熱シミュレーション」
中山 頸 氏（静岡大学）

11:50 閉会挨拶
12:00 解散

※最終プログラムや最新情報につきましては、東海支部ホームページをご参照下さい。
<http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu Tk/>
※ 都合により、講演順序の変更があることをご了承ください。

参加申し込み方法：

「伝熱セミナー2007（東海・北陸信越）申し込み」と明記の上、

- (1)申込者氏名（ふりがな）
- (2)一般または学生の区別
- (3)所属
- (4)連絡先（住所、電話、Fax、e-mail）
- (5)通常参加（1泊2日）or部分参加（宿泊無、半日等）
- (6)研究分野（研究紹介用に簡単に記述下さい）
- (7)研究室 or 研究G等のH PのU R L
- (8)その他ご要望など

を、できるだけ e-mail にて御申し込み下さい（Fax でも可）。宿泊は相部屋となりますので、御申し込み時に、御希望をお知らせ頂ければ、考慮させて戴きます。（できれば、交流の為もあり、御一任下さい。）複数人数を一括して申し込まれる場合には、異なる部分が、明確に判別できるように、御連絡いただければ幸いです。なお、部分参加の場合、参加範囲に応じた参加費を戴きます。また、申込み多数で、講演会場の収容人員を超える場合には、部分参加の方よりも、通常参加の方を優先させて戴きますので御了解下さい。

申込期限： 平成19年8月31日（金）

申込先： 岐阜大学 三松 順治 & 信州大学 姫野 修廣 （下記アドレスで、自動的に転送されます。）
e-mail : fph2918@gifu-u.ac.jp, Fax (三松が受信後、データ化して転送します。) : 058-293-2532

日本伝熱学会東北支部企画 平成 19 年度秋季伝熱セミナーのご案内

ことしほは山形の番ですよ、皆さん。今、飛んでる町の代表に“白鷹町”があります。とても面白い町です。そこの、パレス松風という温泉保養施設で開催致します。

昨年の良かった点は、本セミナーを学生発表討論の場とし、主役を学生にしたこと。そして、今までに問題となっている技術者倫理をテーマに熱い議論があったことでしょう。

悪かった点は、余りなかったですね・・・、いや「もうちょっと安く、たっぷり酒を」との声も聞こえてきました。そこをなんとか改善したい。皆さん来てくださいね。

(当番校：山形大学)

開催日時：平成 19 年 10 月 20 日（土）～ 21 日（日）（ゴルフ、ふるさと森林公園散策など自由）

会 場：鷹野湯温泉「パレス松風」 〒992-0821 山形県西置賜郡白鷹町大字十王 5687-8

Tel : 0238-85-1001 (代), Fax : 0238-85-1005

E-mail : 0120-281004, <http://www.shirataka.or.jp/palace/>

参加費 : セミナーのみ (資料代を含む) 3,000 円 (学生 2,000 円)
交流会とも (宿泊代を含む) 12,000 円 (学生 10,000 円)

定 員：約 50 名

交 通：車でお越し戴くと便利です。JR 利用の方は山形駅か赤湯駅から、マイクロバス送迎可能です。
参加申込の際、自家用車、送迎要(JR 山形駅、JR 赤湯駅)のいずれかをお書き添え下さい。

申込方法：参加者名と発表者名・所属研究室名・タイトルなどを書きメールでお申込下さい。予稿集を作成しますので、後日原稿をメールで御願い致します。なお、執筆様式などの制約はございません。
ご自由に作成して下さい。

申込先 : 山形大学大学院理工学研究科 赤松研究室 E-mail : akamatsu@yz.yamagata-u.ac.jp

申込締切 : 10 月 1 日（月）(ただし、申込者数が定員に達し次第、受付を終了いたします。)

スケジュール

10 月 20 日（土）

13 : 00 : 受付

昼食は隠れ蕎麦屋をご利用下さい。(http://www.sgcic.jp/kanko/sobaya/soba_map.html)

13 : 15 : 学生激論セミナー (1)

1 件の発表 12 分と質疑応答 5 分。(全 6 件、各大学へ公募します)

15 : 00 : 学生激論セミナー (2)

山形大学院理工学研究科博士後期 蒼野他人男

15 : 40 : 特別講演の部 (1)

ディーゼルエンジン開発四方山話

山形大学工学部 100 年誌編纂員 小室秀一

16 : 20 : 特別講演の部 (2)

液体水素およびスマッシュ水素技術の開発と環境問題への応用

東北大流体科学研究所 教授 大平勝秀

17 : 00 : 入浴/散策

18 : 00 : 交流会

21 : 00 : 二次会

各大学から、ご自慢のお酒を持参して戴ければ交流会二次会が楽しくなりますね。
よろしくお願ひ致します。

10 月 21 日（日）

08 : 00 : 朝食後、自由解散。

以上

日本液体微粒化学会 (ILASS-Japan)・ILASS-Asia・日本エネルギー学会 主催
大阪大学大学院工学研究科 共催
第16回微粒化シンポジウム
— 広領域に広がる微粒化技術 —

協賛 ILASS-Korea, エネルギー・資源学会, 応用物理学会, 化学工学会, 可視化情報学会, 自動車技術会, 静電気学会, 石油学会, 日本画像学会, 日本ウォータージェット学会, 日本エアロゾル学会, 日本化学会, 日本ガスターイン学会, 日本機械学会, 日本原子力学会, 日本工業炉協会, 日本航空宇宙学会, 日本混相流学会, 日本耳鼻咽喉科学会, 日本伝熱学会, 日本塗装技術協会, 日本塗装工業会, 日本燃焼学会, 日本農業学会, 日本バーナ研究会, 日本マリンエンジニアリング学会, 日本薬学会, 日本流体力学会, 農業機械学会, 農業施設学会, 農業生産技術管理学会, 農業土木学会, 粉体工学会, 粉体粉末冶金協会（依頼中を含む）

微粒化技術は、エネルギー機器・金属粉末製造・医薬・農薬・食品・塗装など、広く利用されているためその重要性はますます高まっています。本シンポジウムは、多方面からの研究者・技術者が集まり、研究成果や研究開発中に生じた問題点や解決策の報告をとおして、産官学が一体となって微粒化技術の新しい展開をはかることを目的としています。

また、本シンポジウムでは新たな試みとして、特に重要な内容に関してラウンド・テーブル・ディスカッションとオーガナイズド・セッションを設定します（下記、内容の項目をご参照ください）。

開催日時 2007年12月20日（木）～21日（金）
会場 大阪大学 吹田キャンパス コンベンションセンター
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1
(大阪モノレール「阪大病院駅前」駅から徒歩7分；阪急「北千里」駅から徒歩25分)
詳細は <http://www.handai-kouenkai.org/convention/map/index.html> をご参照ください。

内容 一般講演、特別講演、技術懇談会および微粒化関連の機器展示とカタログ展示等を企画しております。
ラウンド・テーブル・ディスカッション：「ノズル内キャビテーション」
オーガナイズド・セッション：
① エンジンスプレー(ガソリン噴霧) ② エンジンスプレー(ディーゼル噴霧)
③ 噴霧の蒸発・混合・燃焼 ④ 微粒子生成 ⑤ 混相流・気泡

一般講演：

- ◆ 噴霧燃焼、造粒、噴霧冷却、表面処理等の工業技術における微粒化
- ◆ 医療・製薬、コロイド、エマルジョン等の化学工業における微粒化
- ◆ 液体の分裂機構、噴霧の挙動、二相流等の流体力学的解明と微粒化
- ◆ 分裂機構のモデリング、噴霧運動の数値シミュレーション等の数値解析手法
- ◆ 液滴の蒸発・混合・形成過程、混相流、マイクロバブル
- ◆ 環境保全、計測技術など、その他微粒化関連分野

優秀講演賞：40歳以下の若手講演者を対象にした優秀講演賞の表彰を行ないます。

一般講演の種類：つぎの2つがあります。

- (1) 研究講演 [A4原稿4-8頁]：研究や開発の成果を公表するもの。
- (2) 速報講演 [同2-4頁]：研究や開発途中の新事実や問題点を指摘するもの。
資料や事例なども含みます。

なお、講演の採否は学会にご一任下さい。

講演申込方法

(1) 講演申込 (お申し込み受付開始は 9 月中旬を予定しています。)

2007 年 10 月 5 日(金)までにホームページ (<http://www.lass-japan.gr.jp>) からお申ください。
または、講演論文担当事務局に直接ご連絡いただいても結構です。

(2) 論文原稿締切

2007 年 11 月 16 日(金)までに、執筆要領にしたがって作成した原稿を「講演論文担当事務局」宛にご送付ください。昨年度とは原稿のフォーマットが異なりますので、http://www.lass-japan.gr.jp/toukou/paper_format.doc よりダウンロードしてご使用ください。
なお、ダウンロードできない方は講演論文担当事務局までご連絡下さい。

—講演論文担当事務局—

〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138

大阪市立大学大学院工学研究科 機械物理系専攻 流体工学分野

「微粒化シンポジウム」 講演論文担当幹事 脇本辰郎

TEL : 06-6605-2965 FAX : 06-6605-2953

E-mail : wakimoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp

(3) 講演方法について

講演時間は 25 分 (発表 15 分、討論 10 分) を予定しています。講演会場には液晶プロジェクターを用意しますので、講演者は PC をご持参いただきますようお願いします。

参加申込方法

(参加申込みのホームページ上からのお申込み受付開始は 9 月中旬を予定しています。)

(1) 参加費

参加費には講演論文集代等を含みます。技術懇談会は 12 月 20 日の講演終了後を予定しています。なお、協賛学協会の会員の方々は「会員」の資格で参加できます。

- ・会員 事前申込 6,000 円 (申込期限後 7,000 円) 　・学生 3,000 円
- ・非会員 事前申込 9,000 円 (申込期限後 10,000 円)
- ・技術懇談会 5,000 円 (学生は 1,000 円)

(2) 事前申込方法

2007 年 12 月 14 日(金)までに、下記の郵便振込口座または銀行口座に合計額を振込み、ホームページ (<http://www.lass-japan.gr.jp>) からお申ください。または、①氏名・②所属・連絡先(電話・FAX・E-mail 含む)、③技術懇談会参加の有無を明記の上「参加担当事務局」に直接お申込みください。

—郵便振替口座—

口座番号 : 00950-7-246218

口座名称 : 日本液体微粒化学会

—銀行口座—

みずほ銀行 日吉支店 普通口座番号 : 2101416

口座名称 : 日本液体微粒化学会

—参加担当事務局—

〒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 燃焼工学研究室

「微粒化シンポジウム」 参加担当幹事 赤松史光

TEL : 06-6879-7253 FAX : 06-6879-7247

E-mail : akamatsu@mech.eng.osaka-u.ac.jp

実行委員会

委員長 千田 二郎 (同志社大学)

展示担当幹事 森吉 泰生 (千葉大学)

講演論文担当幹事 脇本 辰郎 (大阪市立大学) ・ 宋 明良 (神戸大学)

参加担当幹事 赤松 史光 (大阪大学)

委 員 西田 恵哉 (広島大学) ・ 小田 哲也 (鳥取大学) ・

和田 好充 (同志社大学)



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）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務部会長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部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を総務部会長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部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）・総務担当副会長補佐評議員（ML担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載（バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・ 総務部会長：山田 純（芝浦工業大学）：jyamada@sic.shibaura-it.ac.jp
- ・ 編集出版部会長：近久武美（北海道大学）：takemi@eng.hokudai.ac.jp
- ・ 広報委員会委員長：芝原正彦（大阪大学）：shiba@mech.eng.osaka-u.ac.jp
- ・ 総務担当副会長補佐評議員：小川邦康（慶應義塾大学）：ogawa@mech.keio.ac.jp
- ・ 事務局：倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・ 原稿はWordファイルまたはtextファイルでお願いします。
- ・ HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・ MLで添付ファイル配信する場合は、pdfあるいはjpgファイルで2MB以下にお願いします。

46期新入会員 (2007.4.10~2007.7.5) 正20名・学生27名・賛助1社

資	氏名	所属	資	氏名	所属
学	服部 吉晃	愛媛大学	正	宇田村 元昭	東京工業大学
学	焼野 蘭子	東京大学	正	張 信栄	同志社大学
学	松村 武紀	福井大学	正	松野 雄史	東芝燃料電池システム㈱
学	高島 茂	東北大学	正	後藤田 浩	立命館大学
学	中川西 学	群馬大学	学	石川 桂	東京大学 工学部
学	藤井 義喜	東京工業大学	学	徳永 敏士	九州工業大学
学	徳永 将貴	長崎大学	学	筈見 元紀	東京農工大学
学	高尾 裕	九州大学	学	桑原 悠介	静岡大学
学	安部 裕喜子	東京理科大学	学	中林 勇太	北海道大学
正	中村 直人	東邦ガス株式会社	正	水口 尚	琉球大学
学	神津 崇	慶應義塾大学	正	長谷川 洋介	東京大学
学	山内 裕文	中央大学	正	古澤 宏一朗	㈱本田技術研究所
学	秋本 高寛	中央大学	正	村井 悠	㈱本田技術研究所
学	出川 貴雅	東京工業大学	正	惣川 真吾	日本ガイシ㈱
学	牧野 総一郎	東京理科大学	正	大徳 忠史	横浜国立大学
学	宮田 一司	九州大学	正	鈴木 友行	フタバ産業㈱
学	佐野 吉彦	静岡大学	正	深谷 昌春	㈱富士通ゼネラル空調技術研究所
学	田中 三郎	九州工業大学	正	奥山 亮	㈱富士通ゼネラル空調技術研究所
正	寺島 幸士	株式会社いすゞ中央研究所	正	松崎 純平	松下電器産業株式会社
学	杉崎 覚	東京農工大学	正	山本 研二	㈱日立製作所
正	江頭 竜	旭川工業高等専門学校	正	森山 修司	トヨタ自動車株式会社
学	福井 薫	北海道大学	学	金子 高広	芝浦工業大学
学	ノルシャズワン ヒルミ	九州大学	正	石川 温士	石川島播磨重工業㈱
学	植田 忠伸	神戸大学	賛	株式会社栗本鐵工所	

46期寄付会費 (2007.4.10~2007.7.5) 3名 6,000円

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	日向野 三雄	秋田県立大学	正	吉田 英生	京都大学
正	門出 政則	佐賀大学			

(社)日本伝熱学会 第46期(平成19年度)役員・評議員

会長

副会長
(企画、国際・広報)
(編集出版)
(総務)

柘植 綾夫(三菱重工業)
横堀 誠一(武藏工業大学)
門出 政則(佐賀大学)
森 康彦(慶應義塾大学)

理事

中部 主敬 [†] (京都大学)	近久 武美 [‡] (北海道大学)	工藤 一彦(北海道大学)
稻村 隆夫(弘前大学)	山田 純 [*] (芝浦工業大学)	廣田 真史(名古屋大学)
姫野 修廣(信州大学)	吉田 篤正(大阪府立大学)	村上 幸一(愛媛大学)
森 英夫(九州大学)	河村 洋 ^{**} (東京理科大学)	松野 孝充(トヨタ自動車)
大島 伸行(北海道大学)	石塚 勝(富山県立大学)	

†:企画部会長, ‡:編集出版部会長, *:総務部会長, **:伝熱シンポジウム担当

監事

山田 幸生(電気通信大学) 大原 敏夫(デンソー)

評議員

武田 靖(北海道大学)	山田 雅彦(北海道大学)	河合 洋明(北海道工業大学)
小原 拓(東北大学)	栗山 雅文(山形大学)	廣瀬 宏一(岩手大学)
泉 正明(石巻専修大学)	小野 直樹(芝浦工業大学)	宗像 鉄雄(産業技術総合研究所)
田口 良広(慶應義塾大学)	三矢 輝章(リコープリンティング)	古畑 朋彦(群馬大学)
鹿園 直毅(東京大学)	橋本 克己(電力中央研究所)	古市 紀之(産業技術総合研究所)
丸山 直樹(三重大学)	三松 順治(岐阜大学)	中村 直人(東邦ガス)
濱田 幸弘(名古屋市工業技術振興協会)	板谷 義紀(名古屋大学)	松原 幸治(新潟大学)
寺西 恒宣(富山工業高等専門学校)	松田 理(石川高等専門学校)	岩井 裕(京都大学)
柴田 豊(ダイキン環境)	福谷 和久(神戸製鋼所)	芝原 正彦(大阪大学)
浅野 等(神戸大学)	加賀 邦彦(三菱電機)	野津 滋(岡山県立大学)
森田 慎一(米子工業高等専門学校)	亀谷 岳文(JFEスチール)	逢坂 昭治(徳島大学)
井上 浩一(九州大学)	岩本 光生(大分大学)	河野 正道(九州大学)
長山 曜子(九州工業大学)	小川 邦康(慶應義塾大学)	泰岡 顕治(慶應義塾大学)
望月 高昭(東京学芸大学)	鈴木 雄二(東京大学)	平井 秀一郎(東京工業大学)
井上 剛良(東京工業大学)	長坂 雄次(慶應義塾大学)	平澤 茂樹(神戸大学)
大曾根 靖夫(日立製作所)	横野 泰之(東芝)	伏信 一慶(東京工業大学)
白樺 了(東京大学)	佐藤 洋平(慶應義塾大学)	大黒 崇弘(日立国際電気)
長谷川 達也(名古屋大学)	角口 勝彦(産業技術総合研究所)	中別府 修(明治大学)
黒坂 俊雄(神戸製鋼)	吉田 憲司(大阪大学)	

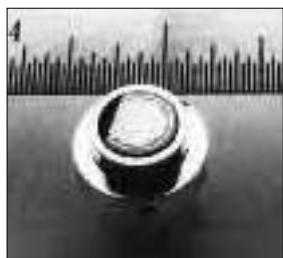
委員会委員長

伝熱シンポジウム実行委員長
表彰委員会委員長
学生会委員長
第15回国際伝熱会議準備懇談会委員長
広報委員会委員長
国際交流会委員長
TSEチーフエディター
产学交流委員会委員長

河村 洋(東京理科大学)
門出 政則(佐賀大学、理事・副会長)
堀部 明彦(岡山大学)
吉田 英生(京都大学)
芝原 正彦(大阪大学)
佐藤 勲(東京工業大学)
河村 洋(東京理科大学)
大曾根靖夫(日立製作所)

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



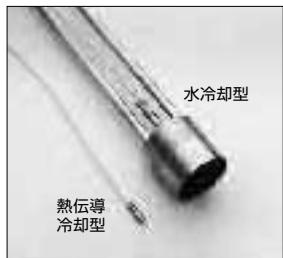
特徴

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

使用例

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

ガードン型円形フォイルセンサー

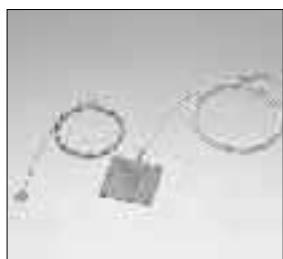


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 燃却炉・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と薄いので、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
- 热交換器の効率測定
- 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。

センサテクノス株式会社

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

URL

www.senstech.jp

E-mail

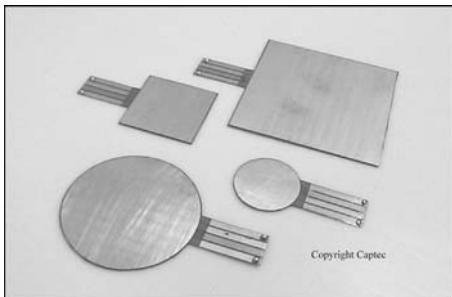
senstech@td6.so-net.ne.jp

テクノオフィスは、独自の高度技術を持つ海外メーカーの 熱流計／熱流束センサーをご紹介しています。

CAPTEC 社（フランス）

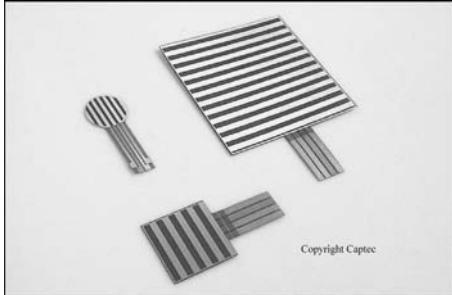
CAPTEC 社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ:	5×5~300×300 [mm] (厚み: 0.4 [mm])
熱抵抗値:	0.00015 [°C/(W/m ²)]
熱伝導率:	2.7 [W/mK]
温度範囲:	-200~200 [°C]
応答速度:	約 200 [ms]
柔軟性:	フレキシブルー直径 30 [mm] に彎曲 リジッドー平面用
オプション:	温度計測用 T 型熱電対内蔵
特注品:	最高温度 350 [°C]または 380 [°C], 防水加工

輻射センサー



サイズ:	5×5~50×50 [mm]
厚み:	0.25 [mm]
温度範囲:	-200~250 [°C]
応答速度:	約 50 [ms]
柔軟性:	直径 30 [mm] に彎曲
オプション:	温度計測用 T 型熱電対内蔵
特注品:	最高温度 350 [°C]または 380 [°C]
波長領域:	広帯域(可視+赤外)／標準(赤外)

【アプリケーション】

◇伝熱一般 ◇温熱環境 ◇サーマルマネキン ◇食品／調理－焼成オーブン ◇コンクリート・地中埋設

○当社では、CAPTEC 製品に最適なデータロガーも取扱っております。お気軽にお問い合わせ下さい。

有限会社 テクノオフィス (CAPTEC 社日本総代理店)

URL: <http://www.techno-office.com/>

- 本 社: 〒225-0004 神奈川県横浜市青葉区元石川町 3712-3-206 TEL. 045 (901) 9861 FAX. 045 (901) 9522
- 神戸出張所: 〒655-0031 兵庫県神戸市垂水区清水が丘 3-14-15-208 TEL. 078 (787) 4351 FAX. 078 (787) 4352



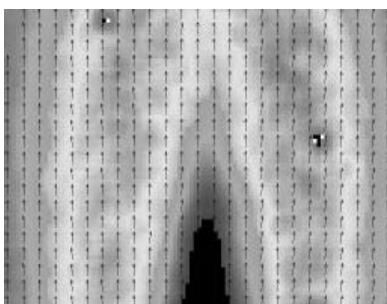
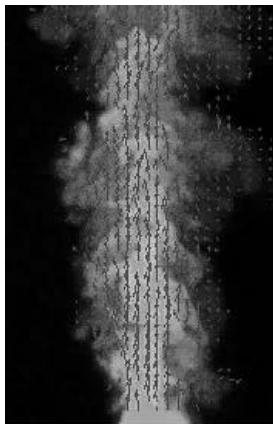
LAVISION GMBH

WE COUNT ON PHOTONS

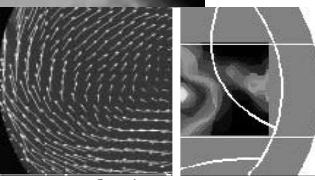
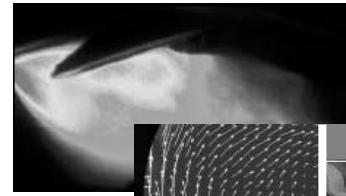
Get The Whole Picture!

PIVをアップグレードして、LIF、Raman、Rayleigh、LII、等の技術と組み合わせた複合計測システムを構築し、種々のアプリケーションでのソリューションを提供します。

gas mixing + velocity



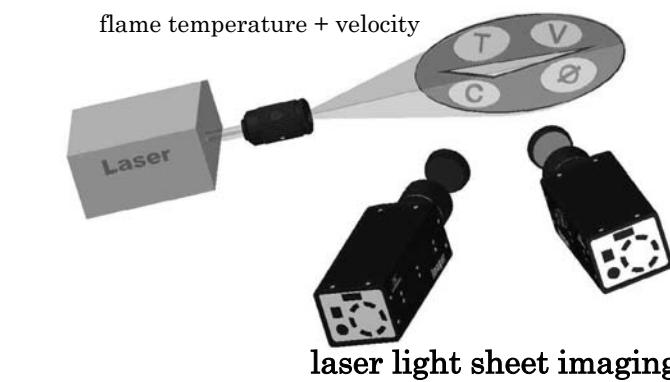
in-cylinder imaging



flame temperature + velocity



spray imaging

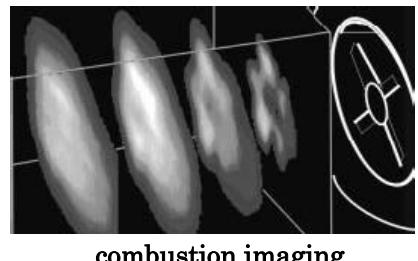


laser light sheet imaging

high resolution particle imaging



velocity imaging



combustion imaging

Multi-Parameter Laser Imaging

アプリケーション	Laser Imaging Techniques						計測システム
	Mie	LIF	PIV	Raman	Rayleigh	LII	
流れ 流体力学	流れ構造 バタネーション	流れの可視化 ミキシング	流れ場	組成 温度	気体濃度 気体温度		FlowMaster FluidMaster
噴霧	液滴 バタネーション	液体(燃料)質量 液体／蒸気	流れ場	液体／蒸気 温度			SprayMaster SizingMaster
	プレーナー液滴サイズ計測	質量流束					
燃焼 エンジン	粒子 液滴	ラジカル、燃料 化学プロセス	流れ場	ガス組成 温度	気体濃度 気体温度	すす	FlameMaster EngineMaster
プラズマ	粒子 生成	種 反応画像	流れ場				PlasmaMaster
材料試験 表面変形	高度画像相関						StrainMaster
	2次元&3次元の変形、歪み場、応力						
上記全ての アプリケーション	(超)高速イメージング						High-Speed MasterSystem
	過渡現象、時-空間相関の時系列過程						

LaVision社 FlowMaster PIV 日本総代理店

本広告の製品仕様は改善のため予告無く変更する場合があります


KANOMAX
 日本カノマックス株式会社

本社 T565-0805 大阪府吹田市清水2番1号

流体計測ディヴィジョン

□東京事務所 TEL. (03)6825-9090
□大阪事務所 TEL. (06)6877-8679<http://www.kanomax.co.jp/fgroup.html>

お問い合わせ先

TEL:03-6825-9090

E-mail:fluids@kanomax.co.jp

編集出版部会ノート

Note from the Editorial Board

吉田英生先生を部会長とする第45期出版部会の後をうけ、下記の委員構成により今期の出版を担当させていただくことになりました。吉田先生はご存知のとおり大変博識であり、さらに緻密なお仕事をされる方でしたので、同様なレベルの仕事を行うことにして非常な不安を感じておりますが、どうぞよろしくお願ひ致します。前部会の担当期間の前後において、表紙デザインの変更、伝熱に関連したグラビアの掲載、種々のQシリーズの企画が行われ、会誌の質もかなり変化致しました。新編集部会ではこうして構築された構成を維持し、継続性を保つことを基本に考えております。皆様に興味を持っていただけるような特集や記事集めをする所存ですので、本誌への原稿の投稿、本誌に対するご意見やご要望など、忌憚無くお寄せいただければ幸いです。みなさまのアイデアをお借りしながら、会員に喜んでいただける会誌作りをしていきたいと思います。これから2年間どうぞよろしくお願ひいたします。

近久武美 (北海道大学)
Takemi Chikahisa (Hokkaido University)
e-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

副会長 門出政則 (佐賀大学)
委 員
(理 事) 姫野修廣 (信州大学)
村上幸一 (愛媛大学)
(評議員) 黒坂俊雄 (神鋼リサーチ)
大黒崇弘 (日立国際電気)
鹿園直毅 (東京大学)
長谷川達也 (名古屋大学)

部会長 近久武美 (北海道大学)
吉田篤正 (大阪府立大学)
森 英夫 (九州大学)
加賀邦彦 (三菱電機)
角口勝彦 (産業技術総合研究所)
中別府 修 (明治大学)

TSE チーフエディター 河村 洋 (東京理科大学)
編集幹事 佐竹信一 (東京理科大学) 岩本 薫 (東京農工大学)

編集出版事務局：
北海道大学大学院工学研究科エネルギー環境システム専攻 近久武美
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
Tel: 011-706-6785 Fax: 011-706-7889
takemi@eng.hokudai.ac.jp

複写される方へ

社団法人 日本伝熱学会は有限責任中間法人 学術著作権協会（学著協）に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、学著協より許諾を受けて複写して下さい。但し、社団法人日本複写権センター（学著協より複写に関する権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。（注意：社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

有限責任中間法人 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3 階
Tel : 03-3475-5618 Fax : 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

注意：複写以外の許諾（著作物の転載・翻訳等）は、学著協では扱っていませんので、直接、社団法人 日本伝熱学会へご連絡ください。

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

Notice for Photocopying

If you wish to photocopy any work of this publication, you have to get permission from the following organization to which licensing of copyright clearance is delegated by the copyright owner.

<All users except those in USA>

Japan Academic Association for Copyright Clearance, Inc. (JAACC)
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Phone 81-3-3475-5618 FAX 81-3-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

<Users in USA>

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

伝 热

ISSN 1344-8692

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

Vol. 46, No. 196

2007 年 7 月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

(日本伝熱学会論文集)

Vol. 15, No. 3

July, 2007

発行所 社団法人 日 本 伝 热 学 会

〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16

Tel : 03-5689-3401, Fax : 03-5689-3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by The Heat Transfer Society of Japan

16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo 113-0034, Japan