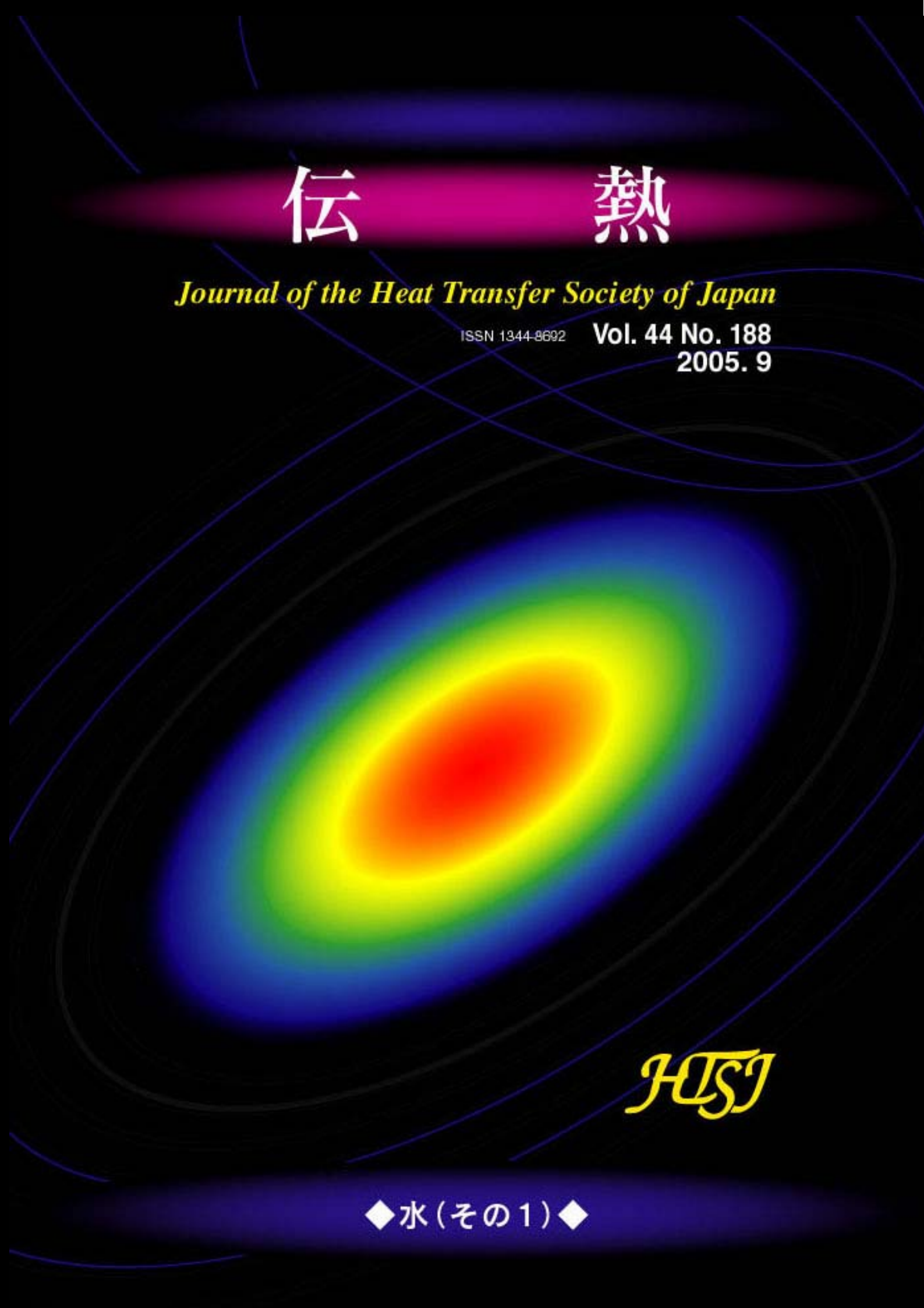
伝　熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 44 No. 188
2005. 9



◆水（その1）◆

「伝熱」原稿の書き方

How to Write a Manuscript of Dennetsu

伝熱　太郎（伝熱大学）
Taro DENNETSU (Dennetsu University)
著者が了解するときは記入→　*e-mail: taro@dennetsu.ac.jp*

1. はじめに

以下の注意事項に留意して原稿を作成すること.

2.「伝熱」用原稿作成上の注意

2.1 標準形式

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

表 1　原稿の標準形式

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

2.2 見出しなど

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

2.3 句読点

句読点は　，および　．を用い，　、や　。は避けること.

2.4 図について

図中のフォントは本文中のフォントと同じものを用いること.

2.5 参考文献について

2.5.1 番号の付け方

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

2.5.2 参考文献の引き方

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

参考文献

[1] 伝熱太郎，伝熱花子，伝熱のフォーマットに関する取り決め，日本機械学会論文集 B 編，**80-100** (1999) 3000.

[2] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (1976).

[3] Smith, A. et al., How to Write a Manuscript of Dennetsu, Therm. Sci. Eng., **7-5** (1999) 10.

[4] 山田太郎，やさしい伝熱，熱講社 (1980).

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

原稿は，特に指定のない限り，出版部会長宛てに e-mail で提出して下さい．なお，ヘッダー・フッターや最後の横棒は，編集出版部会で整えますので，記入する必要はありません.

Vol. 44 2005

No. 188 September

伝　熱

目　次

〈Editor-in-Chief of TSE からのお知らせ〉

本会との合同編集による日本機械学会英文論文誌の発刊について
（日本伝熱学会論文誌 TSE の独立冊子版から学会誌との合本版への移行）　西尾　茂文（東京大学）・1

〈水（その1）〉

水のダイナミクスを光で見る ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 天羽　優子（山形大学）・・・・・・・・ 3
ヒトの生体における血流による熱移動の仕組みと体温調節・・・・・ 大川　洋子（福井県立大学）・・・・・・・・・ 7
雪結晶の様々な形ができる条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 神田　健三（中谷宇吉郎 雪の科学館）・・・・・・・・ 12
水から水素エネルギーを ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 田路　和幸（東北大学）・・・・・・・・ 15
高温ガス炉核熱を用いた熱化学水素製造法の研究開発
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・笠原　清司，久保　真治，小川　益郎（日本原子力研究所）・・・・・・・・ 25

〈特別寄稿〉

沸騰の科学（３） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 甲藤　好郎（東京大学名誉教授）・・・・・・・・ 31
Micro and Nanoscale Phenomenon in Bioheat Transfer・・・・・・・・ John C. BISCHOF (Univ. of Minnesota)・・・・・・・・ 36

〈エデュケイションQ〉

「プロメテウスの贈りもの」こぼれ話（２）・・・・・・・・・・・・・・ 相原　利雄（東北大学名誉教授）・・・・・・・・ 46

〈International Letter〉

Substitution of Petroleum Based Fuels by Biomass Fuelsin Engines and Furnaces in Brazil
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

〈Heart Transfer〉

熱気球の伝熱 …… 鈴木　雄二（東京大学） …… 65

〈行事カレンダー〉 …… 67

〈お知らせ〉

第 16 回　東海伝熱セミナー　「熱流体計測の最前線」 …… 69
九州伝熱セミナー in 湯布院　～燃料電池と吸着応用～ …… 70
第 43 回日本伝熱シンポジウム開催案内 …… 71
社団法人 日本伝熱学会　プライバシーポリシー …… 72
事務局からの連絡 …… 73
編集出版部会ノート：雪まろげ …… 丸田　薫（東北大学） …… 82

日本伝熱学会 2005 年度（第 44 期）会長・副会長・理事・監事

◆会　長　庄司　正弘（産業技術総合研究所）

◆副会長　勝田　正文（早稲田大学）　久角　喜徳（大阪ガス）　宮内　敏雄（東京工業大学）

◆理　事　佐藤　勲（東京工業大学）　吉田　英生（京都大学）　花村　克悟（東京工業大学）
池川　昌弘（北海道大学）　円山　重直（東北大学）　辻　俊博（名古屋工業大学）
青木　和夫（長岡技科大学）　竹中　信幸（神戸大学）　逢坂　昭治（徳島大学）
小山　繁（九州大学）　長野　靖尚（名古屋工業大学）　田中　収（三浦工業）
森　治嗣（東京電力）　康　倫明（ダイキン）

◆監　事　工藤　一彦（北海道大学）　青木　博史（豊田中央研究所）

Vol. 44, No. 188, July 2005

CONTENTS

< Announcement from Editor-in-Chief of TSE >

Publication of JSME Int. J. by Combination with HTSJ
(Switch of Publication of TSE from Separated Booklet to One Volume Bound with Journal of HTSJ)
Shigefumi NISHIO (University of Tokyo, Editor-in-Chief of TSE) ····· 1

< Water (1)**>**

Water Dynamics Observed by Broadband Spectroscopy
Yuko AMO (Yamagata University) ····· 3

Structure of Fever Displacement by Blood Flow and Regulation of Body Temperature in Organism of Human
Yoko OHKAWA (Fukui Prefectural University) ····· 7

Conditions for Forming Various Patterns of Snow Crystals
Kenzo KANDA (Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice) ····· 12

Hydrogen Energy from Water
Kazuyuki TOHJI (Tohoku University) ····· 15

R&D of the Thermochemical Hydrogen Production Using Nuclear Heat from High Temperature Gas-cooled Reactor
Seiji KASAHARA, Shinji KUBO, Masuro OGAWA (Japan Atomic Energy Research Institute) · 25

< Contribution >

Science of Boiling (3)
Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of the University of Tokyo) ····· 31

Micro and Nanoscale Phenomenon in Bioheat Transfer
John C. BISCHOF (Univ. of Minnesota) ····· 36

< Education Q >

Gleanings of “Prometheus’s Gift” (Part 2)
Toshio AIHARA (Professor Emeritus of Tohoku University) ····· 46

< International Letter >

Substitution of Petroleum Based Fuels by Biomass Fuels in Engines and Furnaces in Brazil
Eitaro YAMANE (University of Sao Paulo) ····· 51

< Report on International Conference and Seminar >

Review of ISTP-16: Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering in the Heart of Europe
(August 29th-September 1st 2005, Prague)
Jaroslav HEMRLE (Tokyo University of A&T) ····· 55

US-Japan Seminar : Nanoscale Transport Phenomena
Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology) , Taku OHARA (Tohoku University) ····· 60

< Museum Tour >

Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice

Kenzo KANDA (Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice) ····· 62

< Heart Transfer >

Heat Transfer Problem of Hot-Air Balloon

Yuji SUZUKI (The University of Tokyo) ····· 65

< Calendar > ····· 67

< Announcements > ····· 69

Note from the Editorial Board: Snow roll

Kaoru MARUTA (Tohoku University) ····· 82

本会との合同編集による日本機械学会英文論文誌の発刊について（日本伝熱学会論文誌 TSE の独立冊子版から学会誌との合本版への移行）

Publication of JSME Int. J. by Combination with HTSJ (Switch of Publication of TSE from Separated Booklet to One Volume Bound with Journal of HTSJ)

西尾　茂文（東京大学）
Shigefumi NISHIO (University of Tokyo, Editor-in-Chief of TSE)
e-mail: nishios@iis.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

本会理事会は，日本機械学会熱工学部門WEBジャーナルのエディターに本会推薦枠を設け，同ジャーナルを本会と合同編集による発行とし，質およびサーキュレーションともに高い論文誌に育てることを目的として，日本伝熱学会論文誌 TSE（Thermal Science and Engineering）の独立冊子版としての発行を平成17年9月号をもって中止することを決意いたしました.

本稿は，本件に関する経緯，今後の対応などをお知らせすることを目的としております.

2. 経緯

TSE は，独自の論文掲載基準，エディター制度，エディターコメントの掲載，早期掲載などを特徴として，わが国発の質の高い論文誌を目指して平成 5 年に第 1 巻が発行されました.

しかし，各位のご努力により投稿論文数は暫増しているものの，十分な論文投稿数は得られておらず，また海外からの投稿が少なく，海外の読者も極めて少数に限られており，課題を抱えております．そこで，（1）熱物性，燃焼，混相流など関連する分野の学協会が合同編集する国際誌に衣替えすること，（2）WEB ジャーナルとすること，などにより TSE の国際的知名度を向上させることを検討するため，第 43 期理事会の下に「TSE 検討委員会」が，塩冶震太郎第 42 期会長，長野靖尚第 42 期副会長，増岡隆士第 43 期副会長，および Editor-in-Chief の私をメンバーとして構成されました.

一方，日本機械学会においても，サーキュレーションやインパクトファクターなどの改善を目指して，その国際論文誌 JSME Int. J.の発行形態が議論され，その編集権を部門に移管すること，エディター制とすること，WEB ジャーナルとすること，熱工学部門および流体工学部門で互いに独自に WEB ジャーナル（熱工学部門編集の WEB ジャーナルを JSME Int. J.-TED-WEB と略記）を平成 17 年中に発刊することなどを中核とする方針が示されました.

そこで，レベルの高いわが国発の国際誌発行を目指して，独立冊子体としての TSE の発行を中止し，JSME Int. J.-TED-WEB の合同編集化の道を上記検討委員会および TSE エディターにて検討いたしました. 因みに，以下に比較しましたように，JSME Int. J.のインパクトファクター（2003 年）は，他の国際誌に比べて高いとはいえない状況です.

J. Fluid Mechanics	1.811
AIChE J.	1.667
Int. J. Heat & Mass Transfer	1.293
ASME J. Heat Transfer	1.252
JSME Int. J. (B)	0.280

TSE のエディター間の議論では，サーキュレーションやインパクトファクターに問題のある JSME Int. J.の合同編集化には疑念も示されましたが，議論の結果，「TSE 検討委員会」で以下の結論に達しました．すなわち，上記インパクトファクター比較に示されるような環境において，わが国の関連学協会が英文論文誌に関して徒に「群雄割拠」し続けることは得策ではなく，現在のインパクトファクターやサーキュレーションは芳しくないがわが国発の国際論文誌としてはこれらが改善される可能性が最も高い JSME Int. J.-TED-WEB の編集に協力することが有益であるとの結論です.

その後，JSME Int. J.-TED-WEB につき，日本機械学会熱工学部門代表エディターと本会代表エディターとの合同編集とすること，JSME Int. J.-TED-WEB にその旨を明記することなどを中心として，日本機械学会と交渉を行い，これらにつき合意に達しました．また，日本機械学会では，他の

学協会との合同編集を円滑に行うため, 論文誌名に JSME をいれず，Journal of ○○○という形式に統一することを決めていただいております．因みに，JSME Int. J.-TED-WEB の論文誌名は，Journal of Thermal Science and Technology を候補としております.

３．今後の措置

以上の経緯により, TSE につき以下の措置をとることが本年 9 月の本会理事会にて承認されました.

① 独立冊子版としての論文誌 TSE の発行は平成 17 年 9 月号をもって中止する.

② 日本伝熱学会会員の論文投稿権利を保障するため，平成 18 年 1 月号の学会誌「伝熱」より，これに論文（原則として和文論文）を掲載する事とする．つまり，平成 18 年 1 月号より，学会誌「伝熱」と TSE との合本出版となる．投稿規定は現在の TSE と同一とする．TSE の論文査読等に関する Editor-in-Chief は河村洋教授（東京理科大学）とする.

③ 日本伝熱学会を構成している化学工学あるいは原子力工学関係など機械工学以外の分野を専門とする会員の英文論文投稿権を確保するため, 化学工学および原子力工学関係の学会誌が本方針と類似した方針をとる場合には，日本伝熱学会もそれに協力する.

４．おわりに

平成 13 年 1 月号より，小竹先生から TSE の Editor-in-Chief を引き継ぎほぼ 5 年が経過いたしましたが，残念ながら以上のような結論に至りましたことを深くお詫びいたします．併せて，これまで論文を投稿いただきました諸氏に深く感謝いたします.

上記のように, 独立冊子版としての TSE 発行は中止いたしますが，学会誌「伝熱」との合本発行としての TSE は発行を続けます．今後とも，TSE に良質の論文をご投稿くださいますようお願い申し上げます．なお，TSE への投稿論文は，当面の間，本会事務局にお送りください.

また，JSME Int. J.-TED-WEB は本年中の早期発刊を目指して，吉田英生先生（京都大学），高田保之先生（九州大学），小林秀昭先生（東北大学）を中心に準備が進んでおります．独立冊子版としての TSE 発行中止の趣旨を生かすためにも，是非 JSME Int. J.-TED-WEB にも良質の論文をご投稿くださいますようお願い申し上げます.

水のダイナミクスを光で見る

Water Dynamics Observed by Broadband Spectroscopy

天羽　優子（山形大学）
Yuko AMO (Yamagata University)
e-mail: apj@cm.kj.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

水は，我々にとって非常に身近な物質である．紀元前にタレスが「万物の根源は水である」と主張して以来，その時代の技術と考え方で研究がなされてきた[1].

しかし，まだ，水について完全な理解をするに至っていない．たとえば，水の密度は4℃で最大になることは誰でも知っているが，水分子の第一原理計算によってこれを再現することができていない．

家庭の冷凍庫で氷を作ると，Ice Ih という六方晶の結晶構造のものができるが，水の分子動力学シミュレーションで温度を下げて，計算機の中で水が Ice Ih の形で凍結するようになったのも，ごく最近のことである[2].

現在，計算機実験と実験の両方から，水の研究が続けられている．ここでは，光を使った古典的な分光法で水がどのように見えるかについて説明し，水のダイナミクスをどのように考えるべきか議論したい．

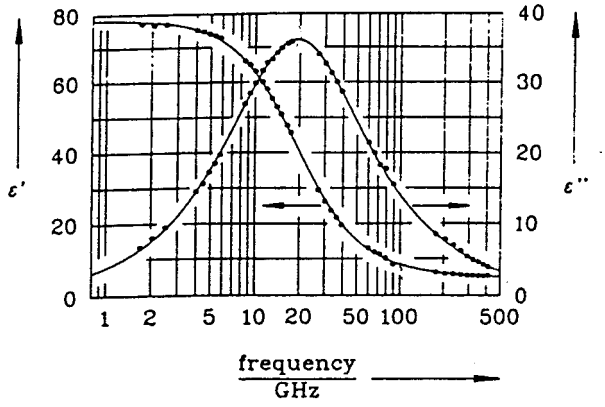


図１　水の誘電緩和（J. Barthel et al, Chem. Phys. Lett. 165 (1990) 396-373[3]）

2. 分光法と水

2.1 誘電緩和測定

水の誘電率の周波数依存性を室温で測定すると，図 1 のようになる．

実部は周波数の低いところで約 80 で，20GHz 付近で減少し，再びほぼ一定になる．実部は，ずっと周波数の低い領域まで 80 のまま変わらない．このことは，水の静的誘電率が室温で約 80 であることに対応している．虚部のことを誘電損失といい，20GHz 付近でピークを示す．虚部のスペクトルに，角周波数 ω を掛けたものが，その波長での電磁波の吸収係数となる．

2.2 遠赤外線吸収

図1の誘電損失にωを掛けて吸収係数になおしたものと，遠赤外線領域での吸収スペクトルをつないだものが図 2 である．

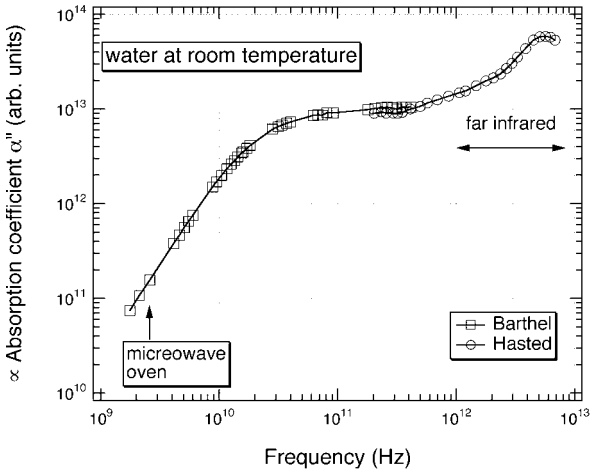


図2　マイクロ波から遠赤外領域の水の吸収スペクトル（遠赤外のデータは，Hasted et al, Chem. Phys. Lett, 118(1985) 622-625[4]）

周波数が増えるに従って吸収スペクトルが急激に増加するが，スペクトルの幅が非常に広く，目立

った鋭いピークは存在しないことがわかる.

図中に microwwave oven と示したのは, 我が国で使われている電子レンジの加熱周波数である. 吸収スペクトルの低い方の裾野の部分に電磁波のエネルギーを与えることで加熱を行っていることがわかる.

2.3 赤外吸収

図 3 に, 水の赤外吸収スペクトルを示す. 振動数の低いところで急激に増加しているのが赤外吸収である. なお, 次に述べるラマン散乱のスペクトルも重ねて示してある.

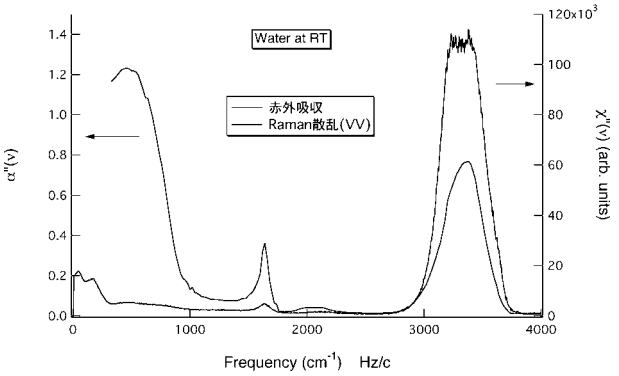


図 3　水の赤外吸収とラマン散乱

赤外吸収は, 水分子の分子内振動によって起きる. 水の分子内振動のうち, 赤外領域に現れる基準振動は次の 3 つである.

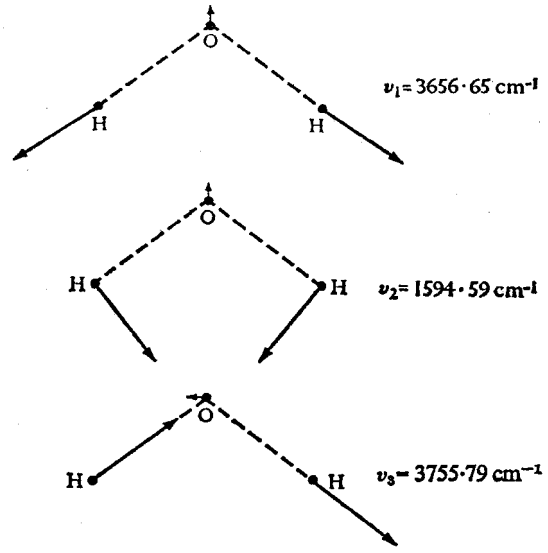


図 4　水の基準振動[5]

上から順に, 対称伸縮振動, 変角振動, 逆対称伸縮振動である. それぞれの振動数に対応する位置に吸収のピークが存在することがわかる. なお, 図 3 の横軸は, 赤外分光の慣例として cm^{-1} を用いているが, これは, 周波数 Hz を光速度(cm/s)で割ったものであり, 光速度を掛けることでいつでも周波数になおすことができる.

図 3 に示したように, 基準振動に対応しない吸収が 2200 cm^{-1} と 800 cm^{-1} 付近に存在する. 800 cm^{-1} 付近のものは, 水分子の libration によるもので, 2200 cm^{-1} は libration と変角振動の結合音であると解釈されている.

水の赤外吸収スペクトルの低振動数側は, 図 2 の遠赤外領域の吸収にそのままつながっている.

2.4 ラマン散乱

ある波長の光を物質に入射させて, 散乱された光を観測すると, 元の波長からすこしずれた波長の光が散乱されてくる. これをラマン散乱という.

波長がずれる理由は, 分子の振動と入射した光がエネルギーをやりとりするため, 分子振動のエネルギーに相当する分だけずれた波長の光が散乱されるからである.

図 3 に, 水のラマン散乱スペクトルを示した.ただし,測定した散乱強度を, 温度因子で補正し周波数の 3 乗で割って, 感受率になおしている.

それぞれのピークの相対強度は赤外吸収と異なるが, 赤外吸収とほぼ対応する位置に散乱のピークが存在する. 赤外吸収もラマン散乱も, 図 4 の分子内振動によって生じているので, 同じ振動数のところに吸収や散乱のピークが出てくる.

図 3 で示したより高い振動数領域（近赤外領域）には, 水の基準振動の倍音や結合音による吸収・散乱のピークが存在し, さらに周波数が高い領域（紫外領域）になると, やがて, 電子遷移による吸収が起きるようになる.

図 3 の 300 cm^{-1} 以下(低振動数領域)のところに, 散乱のピークが 2 つある. これは, 水の分子間振動によるものである. 実は, 赤外吸収にも対応するピークが存在するが, 性能のよい遠赤外線の光源と検出器の実現が技術的に困難であったため, 最近になってようやくこの領域の測定が広く行われるようになってきている.

水の低振動数ラマン散乱のスペクトルを説明するため, Walrafen は図 5 のようなモデルを提案した. 図中の白い棒で示したのが分子内共有結合, 白黒の

棒で示したのが分子間水素結合である. 水分子の酸素側に別の水分子 2 個の水素が水素結合し，2 個の水素側はそれぞれ別の水分子の酸素と水素結合するというモデルである.

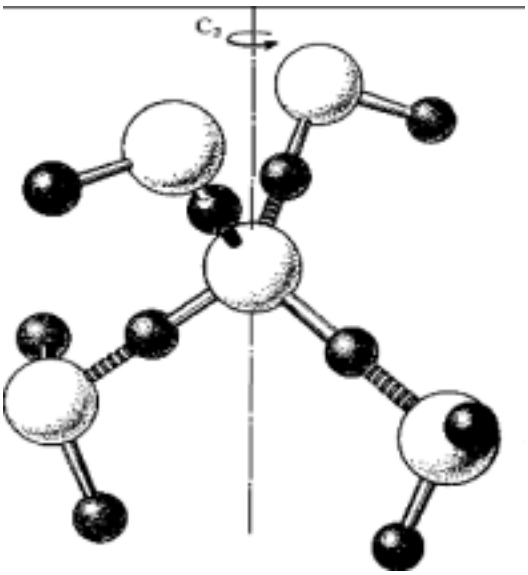


図 5　水の四面体モデル[6]

3. 水の動的構造

光の吸収や散乱が起きるときには, それに対応した分子の運動がある.

まず, 赤外領域では，個別の水分子の基準振動とその結合音による光の吸収や散乱が起きる. 遠赤外線領域では分子間の振動による吸収や散乱が観測される. しかし, 水の場合は, 遠赤外線領域にまで, 25GHz にピークを持つ誘電損失の影響が及んでいるので, 分子間の振動と誘電損失の両方が遠赤外線領域の吸収に寄与している.

水は，図 5 のように水素結合でつながりながら，三次元的ネットワークを形成している. しかしこのネットワークは完全なものではなく, あちこちでゆがんだり，一部が切れたりしている. 熱揺らぎで分子が動くと, 新しいネットワークが出来たり壊れたりしている. この時間スケールは，約 1ps 程度である.

水の分子動力学シミュレーションによると, たまたまあちこちの水素結合が一度に切れることがあり，水分子数十個が一度に配置を換えて，水素結合の組み替えが起きる. この時間スケールと，水の誘電緩和の特徴的な周波数である 25GHz がほぼ対応する. 図 1 に示した誘電緩和は，水分子数十個が協同的に運動することによって生じる電気双極子モーメントの揺らぎによるものであると考えられている.

遠赤外線領域の水の吸収は, 分子間振動によるものであるが, 振動のユニットである図 5 の構造が壊れるまでの間だけ振動することで起きている.

このように，水の構造を考えるには，同時に運動の状態も考えなければならない. 長時間における平均的な分子間距離は, X 線や中性子を用いて測定することができるが, 観測する時間スケールや空間スケールによって，見えてくる構造が異なる. このような構造を「動的構造」と呼んでいる.

4. 水の正しい理解のために

4.1 水と電子レンジ

電子レンジによる水の加熱の説明で「水の振動を励起することによって加熱する」というものを見かけることがあるが，これは間違いである. 水の分子内振動は赤外領域であり, 電子レンジの加熱周波数より 2 桁以上高周波数領域にある. 正解は，前述したように「水分子の誘電損失に対応する吸収スペクトルの低い方の裾野にエネルギーを与えている」というものである.

この周波数領域には, 分子の運動の明確なエネルギー準位というものがもはや存在しない. ランダムに動き回る分子をほとんどそのまま電磁波で揺さぶって加熱しているというイメージの方がより適切であると思われる.

4.2 水と遠赤外線

遠赤外線を利用したことを謳う製品が多数出回っており，水についても「遠赤外線処理」でいい水を作ったという宣伝がなされることがある.

水の分光実験の結果からは, 水に遠赤外線を照射しても, 加熱以上の効果はないということがわかる. もともと, 遠赤外線領域の吸収のもとになっているのは，分子全体の libration であったり，分子数十個が一度に崩れるといった運動である. このような運動を外から電磁波で叩いても, そこには崩れやすい運動のユニットしかなく量子準位も無いので, 速やかにそのままランダムな分子運動＝熱に変わってしまう. マイクロ波から遠赤外線領域にわたる吸収スペクトルのどこを電磁波で叩いても, 得られる効果に変わりはない.

なお，製品の「遠赤外線」の波長領域は，分光でいうところの遠赤外線だけではなく, 赤外線の領域まで含んでいる. だから，製品でいうところの「遠

赤外線」は，ほとんどが通常の「赤外線」でしかない．なぜわざわざ発振・検出の両方が難しい「遠赤外線」と言っているのか謎である．

4.3 水は何でもすぐ忘れる

水の分子動力学計算の結果と，分光実験の結果を合わせると，液体の水の中には 10ps 以上にわたって存在する安定構造は無いという結論が出る．図 1 の誘電緩和は，どこまで低い周波数まで延長しても，実部は 80 のまま，虚部は 0 のままである．時間スケールの極めて遅い運動は，水の中には存在しない．

従って，外から電磁波や磁場など，何らかの物理的な作用を及ぼしたとしても，その作用が消えれば水は 10ps 以内に元の状態に戻ってしまう．

どういうわけか，水について「何らかの処理をした効果を記憶させることができる」という誤解が後を絶たず，そういう理屈で水処理装置の宣伝がなされていることも多い．しかし，そのような話はオカルト以外の何物でもない．

もし，何かの処理をして水の性質が変わったという結果が出た場合には，水の中の水分子以外の物質の変化を調べればよい．化学変化や不純物組成の変化であれば，分子運動とは無関係に保たれるからである．

物質の変化に基づかない水の物理的変化が起きるという可能性は，今のところ，実験・シミュレーションのいずれの結果からも導くことができない．

5. まとめ

以上，水について，分光とシミュレーションの結果を簡単に紹介し，水の動的構造の現状での理解についてまとめた．

水については俗説が非常に多く，プロの研究者でも間違ったモデルに基づいて実験結果を説明していることがある．その誤解の多くは，水の変化を考えるのに，物質の変化ではなく物理的変化によるものだと思いこんだことから生じている．水は，確かに，他の液体一般と比べると変わった性質を持ってはいるが，それは通常の科学を逸脱するような異常ではない．

純水の状態は，温度・圧力を決めれば一通りに決まる．これ以外の変化は，物質の変化によるものと考えるべきであり，研究手段としては分析化学の出番となる．このことを忘れずに，間違った情報には惑わされないように注意していただければと思う．

参考文献

[1] 水の研究史年表，化学 51 (1996) 676.

[2] Matsumoto, M., Sauto, S. and Ohmine I., Molecular Dynamics Simulation of the Ice Nucleation and Growth Process Leading to Water Freezing, Nature, 416 (2002) 409.

[3] Barthel, J.,Bchhuber,K., Buchner, and R., Hetzenauer, H., DIELECTRIC SPECTRA OF SOME COMMON SOLVENTS IN THE MICROWAVE REGION. WATER AND LOWER ALCOHOLS, Chem. Phys. Lett. 165 (1990) 396.

[4] Hasted, J. B., Husain S. K., Frescura, F. A. M. and Birch, J. R., FAR-INFRARED ABSORPTION IN LIQUID WATER, Chem. Phys. Lett, 118(1985) 622.

[5] カウズマン・アイゼンバーグ，水の構造と物性，みすず書房(1975).

[6] Walrafen,G. E., Raman Spectral Studies of Water Structure, J. Chem. Phys., 40(1964) 3249.

ヒトの生体における血流による熱移動の仕組みと体温調節

Structure of Fever Displacement by Blood Flow and Regulation of Body Temperature in Organism of Human

大川　洋子（福井県立大学 看護福祉学部）
Yoko OHKAWA (The Faculty of Nursing and Welfare Sciences, Fukui Prefectural University)
e-mail: ohkawa@fpu.ac.jp

1. はじめに

「水」はヒトの生体において欠かせない，生命活動の源である．体重の 13 分の１が血液であり，その３分の２が血漿という水分で構成されている．血液を含めて身体全体の水分量は，30～40 リットルで体重の 60%を占める．特に子供は 70%の水分量を体内に保つ仕組みになっている．これだけの水分が体内に必要とする理由は，水は物質の動きや化学変化，調節などの生命活動に欠かせない媒体となっているからである．水分の摂取量と排泄量のバランスは，血液の流れである血流によって組織との浸透圧で調節している．

本稿では体内の水を運ぶ血流をキーワードとし，体内で産生された熱が血流によって移動し，体温を恒常性に保つメカニズムを新生児の皮膚温からみた寒冷馴化過程から述べる．さらに，癒し効果として注目されてきている足湯をヒントに，湯の条件による足浴の実験結果を紹介して，ヒトの日常生活や精神活動など癒しにも欠かせない「水」について述べる．

2. ヒトの体温調節と熱移動の仕組み

ヒトは恒温動物であり，生存活動にとって重要な体熱源を自身の代謝熱を利用し，環境温度変化に対して体温をほぼ一定に維持することができる．これは生体の活動エネルギーの供給源となる代謝過程が温度依存性であるため，恒温動物は体温を環境温度より高めに保ち，代謝エネルギーの産生速度を速め，ヒトの体温は主に中心部の温度である深部温度を指し，全身均一ではなく，身体の中心部は高く恒温性であり，皮膚や四肢などの末梢部は外気温の影響を受けて一般的に低く，変温性である（図 1）．

体温の恒温性を保つために，生体の熱産生（heat production）と熱放散（heat loss)が外部環境との関係で決められている．温暖な環境下で安静時のヒトの身体の部位による熱産生は，脳・肝臓・骨格は約 20％で，心臓が約 10％で，いわゆる基礎代謝量である．この基礎代謝量（basal metabolism:BM）は生命を保持するための最低限の覚醒時代謝量である．これは，年齢・性別・活動・栄養・季節などに影響を受け，身体全体の熱産生量も変わる．一方，熱放散は放射，対流・伝導蒸発によって熱の移動が行われ，環境温が 24℃の安静時でのその割合は 67%，10％，23％を占めている[1].

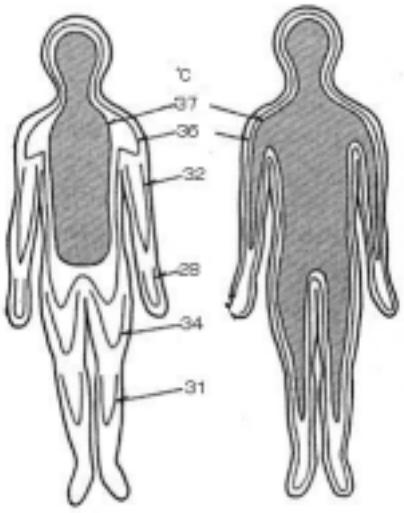


図 1. 寒冷環境（左）と温暖環境（右）における体内温度分布
(文献[3]，p8 より引用，一部改変)

まず，放射による熱交換は，体表面積・平均皮膚温度，環境の平均放射温度に依存している．皮膚や衣服の色，立位か座位かなどによって熱放散率が変動する．また，対流による熱交換は体表面と空地との温度差や風などの空気の動きに依存し，身体内部では血流による熱移動がなされている．次に，伝導は身体の内部では組織間の熱伝導がみられ，体熱の分配や平均化などの役割をもってい

る．皮膚と外部との物理的接触によっても伝導は起こるが僅かである．さらに，蒸発は体表面からの水分の蒸発であり，0.58 kcal/g が失われ[2]，気温の上昇などや活動などによって発汗や呼吸によって水分量の蒸発が増加する．ちなみに，発汗反応は深部温度が 36.9℃以上で起こるとされている．

このように，身体内部では熱産生と熱放散の２つの熱移動によって体温が一定に保たれているが，その調節機構は，末梢と中枢の温度受容器によって営まれている．末梢の温度受容器は皮膚であり，環境温を探知している．皮膚には冷点と温点の２種類の受容器があり，特に冷点は温点より皮膚の表層に存在し，優勢的に働いていると考えられている．つまり，環境温度の低下を探知しやすい仕組みをもち，皮膚からの冷感覚刺激の増減というパターンで中枢に送られていると推測される[1]．次に，中枢の温度受容器は，視床下部にある神経細胞による活動であり，温度が上昇すると活動する温ニューロンは，血管拡張と発汗などの熱放散に働き，温度が下がると活動する冷ニューロンが血管収縮，ふるえなど熱産生を促進する．この２つのニューロンは相互依存的に作用している[1]．

体内では熱産生部位から各臓器や組織に血流に乗せて熱が移動する．多くの臓器への血流は，代謝に必要な物質の供給や老廃物の運搬などの役割を担うが，皮膚への血流は熱の運搬と体外への放散的に働くことを主な役割としている[3]．皮膚においては毛細血管網を形成し，熱の移動に重要な役割を果たしているが，最大の特徴は動静脈吻合が存在し，自律神経系の支配によってその血流が調節されている．サーモグラフィーによる皮膚温の測定は，皮膚の毛細血管に送られてきた血流による熱放散をタイムリーに探知することができ，なおかつ，血流を支配している自律神経検査として活用されている．

3. 新生児の皮膚温による寒冷馴化過程

ヒトは恒温動物であり，深部温は一定の体温を保っている．しかし，その調節機構は成長発達過程とともに整い，生まれた当初から体温調節機能が発達しているわけではない．

新生児は出産を境として恒常性に優れた母体内の環境から母体外の冷たい環境へと急激に変化する[4]．出産間際の母体の深部温は約 38℃前後に上昇しているが，母体外は環境温が 24～26℃で保たれ，約 10℃以上の差がある．この環境温は，新生児にとっては非常に冷たい寒冷環境である．この寒冷刺激は新生児の第一呼吸（産声）の確立に役立っているが，寒冷環境の暴露に適応していかなければならないストレスフルな状態にある．しかも視床下部にある体温調節中枢はまだ未熟であること，新生児は体重に対する体表面積が大きく，成人１に対して約 2.9 倍と高いこと，脂肪層が少なく，組織内の水分含有量が多く，熱絶縁機能が小さいことなど，成人に比べ，熱産生よりも明らかに熱放散されやすい身体のつくりのまま生まれてくるのである[5]．そのため，出生直後は直腸温で容易に 36℃以下（初期体温下降）になり，生存活動が脅かされやすい．新生児は充分な保温に努め保護されながら，母体外の寒冷環境に馴化しなくてはならない[6]．

そこで，出生直後から約１週間の新生児の皮膚温を測定し，寒冷環境に馴化していく様相の一部を筆者が行った研究結果を紹介する．

3.1 研究方法

皮膚温の測定はサーモグラフィーで測定し，生後１日目から６日目までの経時的な変化をみた．測定部位は鼻尖部・頬部・耳朶部・手背部の皮膚温５カ所と体温として腋窩温を測定した．寒冷環境への馴化過程をみるために，皮膚温は交感神経に支配されている動静脈吻合が存在する鼻尖部と，末梢血管網が多い手背部の変化を前額部との温度較差を分析した．前額部は血管作動性神経がほとんど作用しない部位であり，寒冷刺激でもほとんど皮膚血管収縮は認められない部位である．

被験者は成熟新生児（正期産成熟児）10 例とし，最も安静状態が保持できた授乳後 90 分後の皮膚温を比較した．環境温として新生児のベッド周辺の温度が一定であることを確かめ，データを収集した．

3.2 結果

図２に示したように，腋窩温は１日目から７日目まで 37℃を維持し，各膚温は約 32℃代～33.5℃で推移していた。

鼻尖部と前額部，手背部と前額部の温度較差をみると，鼻尖部（図 3）は生後４日目まで 32℃前後で推移し，手背部（図 4）は１日目に 32℃台であったが，徐々に下降し，３日目で 31℃台まで下降

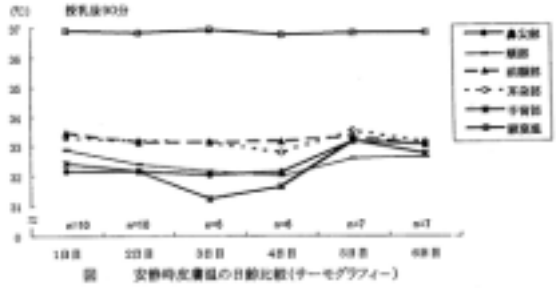


図2. 安静時の新生児皮膚温による日齢比較

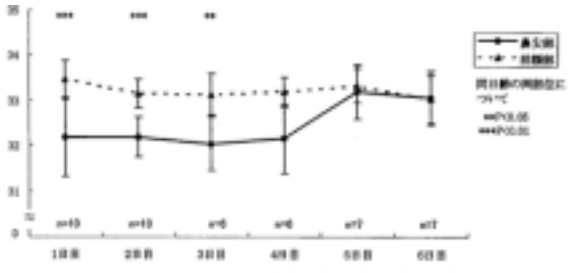


図3. 鼻尖部－前額部の皮膚温較差（授乳後90分）

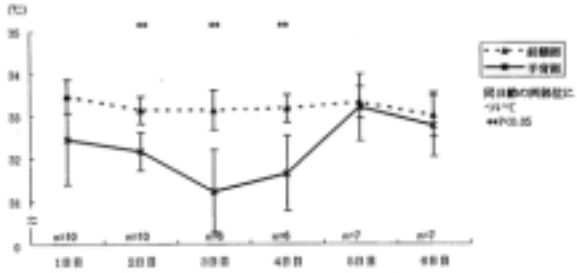


図4. 手背部－前額部の皮膚温較差（授乳後90分）

した。一方，前額部は１日目から６日目まで33℃代を維持し，ほぼ一定であった。温度較差は鼻尖部では３日目まで有意に前額部より体温帯にあり，手背部は２日目から４日目であった。しかし，生後５日目になると，鼻尖部・手背部ともに前額部の皮膚温に達していた。

3.3 考察

出生直後の新生児は呼吸の確立と同時に，寒冷環境に馴化していかなければならない．しかし，新生児の体温調整能と身体的特徴は決して馴化しやすいというわけではないため，出生直後の新生児の保温は，細心の注意と看護が必要である．すなわち，新生児の身体を暖めることにより，末梢の皮膚で暖められた血液は，血流に乗って中心部に移動し，体温が保持されるのである．自律神経はその血流の流れ方を微妙に調節し，深部温の体温を恒常性と維持しているのである．結果で示したように，新生児の腋窩温は生後１日目から37℃を推移し，恒常性が保たれていた．これは皮膚末梢血管において，熱放散の調節が行われていることを示唆するものである．体温は一定であっても皮膚温はタイムリーに環境温を感知し，生後４日目までは，皮膚末梢部位において交感神経が優位に作用し，血流を調整し，熱放散に対して抑制的に働いている．

何故，この時期に皮膚温の一過性低下が起こるかは，新生児の身体的特徴の影響があると考えられる．新生児は，生理的体重減少や新生児黄疸などが出現し，ピークを迎える時期が出生後から５日目までに起こる．つまり，生理的体重減少は，出生直後の呼吸や皮膚からの不感蒸泄の増加，便の排泄に見合うだけの哺乳量が充分ではないため，出生時体重の５～10%の正常範囲でおこる．その間，新生児特有の褐色細胞が背部，頸部などに存在し，熱を産生させてエネルギーを補充し，均衡を保っているものの，過剰なエネルギー産生はほとんどない．また，胎児期には胎盤からの酸素を効率よく運搬するために，多くの赤血球が産生されていた．ちなみに胎児のヘモグロビンは約19.0g/dl に達し，成人男性よりも多い（約 16g/dl）．しかし，出生後の呼吸開始とともに，肺で酸素の取り込みが容易となり，過剰となった赤血球は，生後２日目以降，盛んに破壊される．その赤血球は最終的に肝臓でビリルビンに換え，体内へ排泄する．その結果，生理的黄疸が出現してくる．すなわち，新生児は熱産生量が最低限であるということと，肝臓においてビリルビン代謝にそのエネルギーを必要とすることから，肝臓への血流分配を確保する結果，末梢での血流を少なくしていることが推察される．従って，末梢血管が収縮し，血流を下げ熱放散は抑制され，その結果として一時的な皮膚温下降の様相を呈したと考えられる．

ところが，５日目になると，新生児の授乳量は増えて熱産生量が増加し，さらにビリルビンも尿や便から排泄されることにより肝臓への血流分配も少なくて済むようになる時期と一致する．このように，新生児の生命活動に寄与するために，各

臓器の体外生活への適応現象との関連で，自律神経による血流分配の調節機能が働き，結果として皮膚温の低下を呈する．寒冷環境への馴化過程のなかで，新生児の皮膚温の特性は，５日までは末梢の皮膚温を下げ，熱放散を極力抑制するように優先的に働いていると考えられる．

以上のことから，新生児の寒冷環境の馴化過程の皮膚温による様相は，環境温の温度入力と血流の流れを調節し，体温を保持した結果を示している．さらに，血流を調整する自律神経，特に交感神経の発達状態を反映しているともいえる．このように，体内において血流という水分の流れによって熱が移動し，生命活動を支え，それは出生直後から活発に働いている．

4. 外界の水と体内の水との熱交換作用
―足浴と温熱効果－

最近，温泉地に足湯が設けられ，観光客の人気を呼んでいる．気軽に足を温泉につけ，旅の疲れをほぐすというねらいもある．確かに，足を湯につけるだけで，リラックス感を得る体験は多い．このような足湯は，看護の現場では日常的に行われ，下肢の血流を促進することによってリラクゼーション効果，入眠効果，疼痛軽減などの効果が実証されている[7-9]．その主な湯の種類は，お湯（真湯）や入浴剤をいれた湯などで行われている．そこで，湯の条件によって足浴効果にどのような違いが出てくるかを目的に，実験的に検証した研究結果を紹介する．

4.1 研究方法

女子大学生 10 名を対象に，真湯・入浴剤湯・温泉湯の３種類で足浴を行い，皮膚表面温度の変化と保温持続効果を比較検討した．足浴の方法は３種類の湯による足浴を 10 分間ずつ, 異なる日に実施した．足浴効果は足背・手背・頸部・顔の皮膚温をサーモグラフィーで, 足浴後 60 分間の変動を５分毎に測定し検討した．また，被験者には温度感覚の主観的データも同時に聴取した．

湯量は 40 リットルとし，湯温は 40℃に保つよう恒温水槽 TR-2A を使用して足浴を行った. 用いた３種類の湯として，水道水を温めた真湯，入浴剤は市販のバスロマン５g を真湯に混入した．温泉水はＦ県内のナトリウム・カルシウム硫酸塩泉で PH7.6，温泉源での温度 25.5℃のものを使用した.

4.2 結果

足背・頸部・顔の皮膚温は足浴終了後，60 分間で徐々に下降した．図 5 に示したように，足浴直後の皮膚温の上昇は足背皮膚温が約 3.5℃上昇し，他の皮膚温より最も高い上昇をみたが，３つの湯の条件による有意な差はみられなかった．次に手背の上昇温度（図 6）は，約 0.6～1.6℃で，温泉水による上昇（約 1.6℃）が最も高く，足浴終了直後・25 分後・30 分後に他の湯より有意に高いことが明らかになった．頸部（図 7）と顔の皮膚温の変化は，0.2～0.5℃の上昇をみたが，３つの湯の条件による温度変化に差があるとはいえなかった. また,

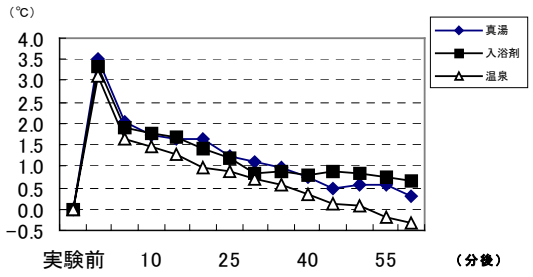


図5. 足背皮膚温の推移

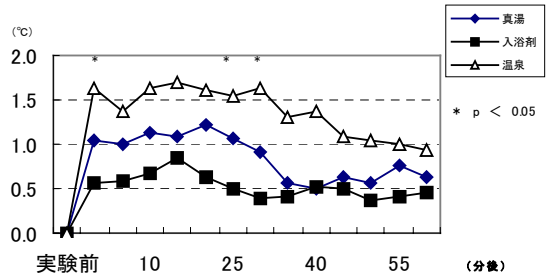


図6. 手背皮膚温の推移

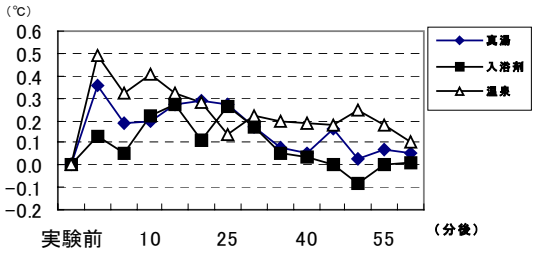


図7. 頸部皮膚温の推移

皮膚温測定とともに足浴部位の主観的な温度感覚を聴取した．その結果，足浴終了後 60 分後においても温泉水は冷めてきたという感覚よりもちょうど良いと回答したものは 10 人中 6 人が自覚し，真湯や入浴剤湯の 4 人よりやや多かった．

4.3 考察

温泉水の含有成分による化学的作用をみると，食塩の作用は，ほとぼり感が長く，炭酸泉や硫化水素泉は血管拡張，血圧降下，利尿作用などがあると言われている[10]．湯治に代表されるように，日本では古くから病気治療に温泉浴が応用されてきた．本実験に使用した温泉水は，ナトリウム・カルシウム硫酸塩泉であることから，真湯や入浴剤湯より温泉水による効果を期待した．しかし，足浴によって加温された足背の保温持続効果は，湯の条件による差があるとはいえず，温泉水による保温持続効果を期待する結果は得られなかった．このことは，源泉の温泉水を調達し，10 人の被験者毎に取り置きしておいた温泉水を暖め直して使用したことが一つの原因とも考えられる．温泉水の効用を高めるためには温泉水の成分を酸化させないことが重要である．源泉の湯であっても汲み置きして保管している期間中に，その効能が減少したのではないかと考えられる．

足浴は看護の臨床場面では頻繁に行われるケアである．温湯に足をつけることにより，外界から暖められた湯の熱が皮膚へ移動し，温熱刺激となり，局所的に血管拡張作用と血流増加作用を起こし，湯の条件に関わりなく，皮膚温の上昇となった．さらに，足背はもとより，手背・頸部・顔など遠隔部位へ血流促進が生じていたことも立証することができた．特に温泉水による足浴において，他の湯に比較し，動静脈吻合が多く存在する手背において保温持続効果が現れた．これは，温泉水による成分が自律神経の副交感神経による血管拡張をもたらし，温熱効果を高めたことが考えられる．つまり，リラックス状態や痛み軽減は，交感神経より副交感神経が優位に作用することから，温泉水は他の湯より癒す効果が期待できるのではないかと推察される．

いずれにせよ，体内の水の流れとしての血流にのった暖かい熱は，リラックス感を運ぶという，精神的な役割を果たしているとも解釈できる．

5. おわりに

本稿では体内において血流という水の流れにのせ，体温の保持という基本的な生命活動を担い，また，身体的側面だけではなく，精神的にリラックス感などを助長することに寄与していることを述べてきた．

お腹が痛いとき，その部位に手をあててみると，表面的に炎症症状がなければ，その部位はとても冷たく感じることが多い．痛みが軽減してくるとその部位に暖かさが戻ってくる．痛みがあることは交感神経が緊張状態となり，血管は収縮し，血流が悪くなり，熱の移動が小さくなる．部分的であっても身体の冷たさは，何かしら不健康のサインであり，それは血流という体内の水の流れによって知らされている．体内での血流は，身体に必要な栄養素，酸素，老廃物，熱を運搬するという生命線であるとともに，身体からの健康状態をサインとして送っていると解釈できる．そして，血流によって外殻と深部との熱移動によって体温を調節できることは健康の一つの証であろう．

参考文献

[1] 黒島晨汎，環境生理学，理工学社，(1993).

[2] 中山昭雄，入来正躬，エネルギー代謝・体温調節の生理学, 新生理化学大系 22, 医学書院, (1987).

[3] 中山昭雄，温熱生理学，理工学社，(1981).

[4] 中山昭雄，松村京子，体温調節機能発達，新生児医学大系　第２巻　小児発達学，医学書院，(1986).

[5] Thomas , K., Termoregulation in Neonates. NEONATAL NETWORK，**13**-2, (1994)15-22.

[6] 仁志田博司，新生児入門第２版，医学書院，(1995).

[7] 平松則子，入眠を促す援助としての足浴効果について　足浴が及ぼす生理的変化，日本看護科学学会誌，**14**-3, (1994) 208-209.

[8] 戎利光, 勝木豊成　他, 温泉入浴の保温効果，保健の科学，**43**-2, (2001) 169-173.

[9] 中谷純，大塚吉則，他，高齢者における足欲の睡眠時間に与える影響，日本温泉気象物理医学誌，**66**-3, (2003) 165-170.

[10] 杉山尚，温泉治療学総論，温泉医学，**10**-26, (1990)

雪結晶の様々な形ができる条件

Conditions for Forming Various Patterns of Snow Crystals

神田　健三（中谷宇吉郎 雪の科学館）
Kenzo KANDA (Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice)
e-mail: yuki-mus@blue.hokuriku.ne.jp

1. 人工雪とナカヤ･ダイヤグラム

「雪博士」として知られる中谷宇吉郎（1900～62）は，世界で初めて人工雪をつくることに成功し，結晶の様々な形がどのような条件下で作られるかを明らかにした．

宇吉郎は北海道大学の教授になった 1932 年, 雪の研究を開始した．その前年，アメリカの W. A. Bentley[*1] が撮った雪の結晶の写真集（参考文献［1］）が出版され，この本の出現が，宇吉郎が前から心がけていた日本の雪の研究に着手する引き金になった[3].

宇吉郎はまず，十勝岳の中腹の山小屋で 3000 枚もの雪の結晶写真を撮り，結晶の分類を行った（図 1）．そして，どんな気象状態のときにどんな結晶が降るかも調べた．

次に, 人工的に雪の結晶を作ることをめざした．そのためには，雲の中と同じような低温の部屋で実験することが望ましく，北大に－50℃まで下が

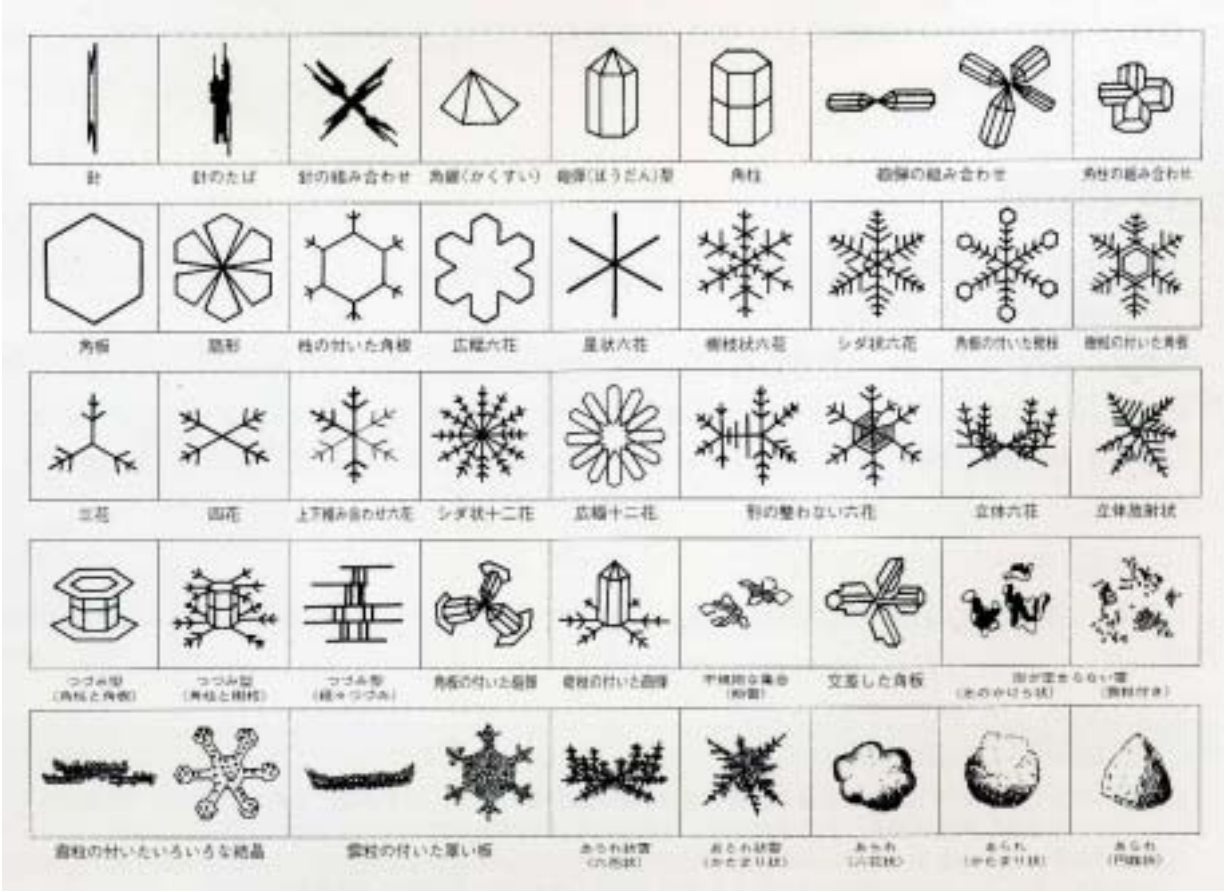


図 1. 中谷宇吉郎による雪の結晶の分類
（SNOW CRYSTALS（参考文献[2]）に掲載された分類）

*1 (注) : W. A. Bentley の関連ホームページ　http://www.bentley.sciencebuff.org/index.htm

図 2. 人工雪製作装置
（雪の科学館に展示されている）

る性能の低温室が作られた．そして，1936 年，世界で初めて人工雪を作ることに成功した．

人工雪のための実験装置は図 2 のようものであった．二重のガラス管の底に置いたビーカーの水をヒーターで暖めると，水蒸気が上昇し，装置の上端につるしたうさぎの毛に結晶ができた．部屋の温度が低いので水蒸気は冷え，うさぎの毛が核になって結晶ができたのである．次に，部屋の温度を変えたり，ヒーターの温度を変えて水蒸気の量を変えて実験すると，今度は違う形の結晶ができた．そこで，温度と水蒸気の量のいろいろな組み合わせによって実験を行い，結晶の形と 2 つの量(気温と水蒸気量)の問の関係を調べていった．

実験をまとめた図 3 は，後に「ナカヤ･ダイヤグラム」と呼ばれるようになったが，この図から，例えば，樹枝状の結晶は気温が－15℃前後で水蒸気が多いときにできることや，同じ温度でも水蒸気が少ないと角板ができること，又，針の結晶ができるのは－6℃前後の温かいときであることな

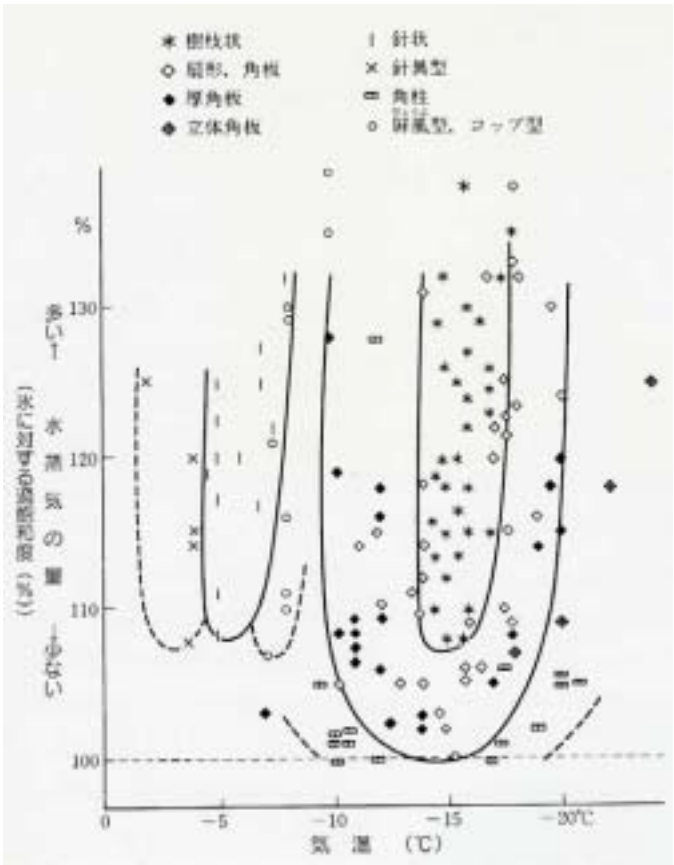


図 3. ナカヤ・ダイヤグラム
（過飽和度･･･雲粒として液体状態で浮遊しているものも含めた水分量を表す）

どがわかる．

この図から，降ってきた雪の結晶の形を見ればその結晶が成長した雲の状態が推定できることになり，このことを宇吉郎は「雪は天から送られた手紙である」と表現した．その手紙を読むための「字引」が，ナカヤ・ダイヤグラムなのである．

2. ナカヤ・ダイヤグラムで「手紙」を読んでみる

雪の手紙を「読む」とき，ナカヤ・ダイヤグラムは，雲の気象条件と結晶の形の関係というより，気象条件と「成長の仕方」の関係だと理解しておくことが大切だと考えられる．なぜなら，結晶が生まれてから地上に届くまでの間に，気象条件は変化するからである．冬の雲はふつう何層もあり，仮に１層だけだとしても，その中の条件が一様であるとは考えにくい．結晶をとりまく条件はいろいろ変化するが，それぞれの条件での成長の仕方がナカヤ・ダイヤグラムで表されるのである．

結晶は中心から外に向かって成長する．そのため，結晶の中心部には初期の，つまり上空の雲の気象条件が反映し，結晶の周辺部には後半の，つまり比較的低いところの雲の条件が示されることになる．

そして，成長中のそれぞれの段階での雲の条件は，結晶の１本の枝先の形に表される．

例えば，枝先が尖った樹枝状なら，－15℃前後で水蒸気が多いところで成長したと考えられる．また，枝先が扇のように広がっていたら，それは角板ができる条件だったと考えればいいので，水蒸気が少ない雲の中で成長したと推測できる（図4）．

雲（又は広く大気全般）の条件の複雑さから，千変万化の雪の結晶が形成され，全く同じ結晶は存在しないとすら言えるのである．

参考文献

[1] W. A. Bentley and W. J. Humphreys, SNOW CRYSTALS, McGraw-Hill, （1931）[Dover 社からペーパーバック].

[2] Ukichiro Nakaya , SNOW CRYSTALS － NATURAL AND ARTIFISIAL , Harvard University Press, （1954）.

[3] 中谷宇吉郎， 雪，（岩波新書）（1938），［雪（岩波文庫），中谷宇吉郎集第２巻（岩波）に収録］.

[4] 中谷宇吉郎雪の科学館，天から送られた手紙［写真集 雪の結晶］，（1999）.

[5] 中谷宇吉郎雪の科学館「雪の体験学習実行委員会」，学習テキスト「雪とあそぼう」実験教室，（2003）.

[6] 神田健三，宇吉郎直筆・英語版「雪は天から送られた手紙である」（その 1），雪氷，67-1（2005）pp.56-57，同（その 2），雪氷，67-2（2005）pp.193-195.

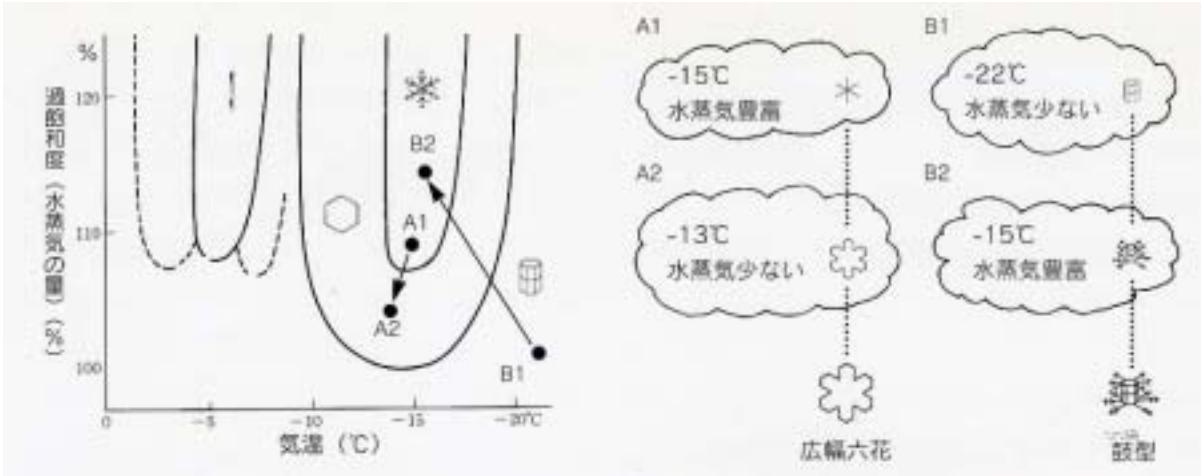


図 4. 気象条件が変化するときの結晶形の例
（2 層の雲の中で成長したときの形のでき方と，ナカヤ・ダイヤグラムの上での変化）

水から水素エネルギーを

Hydrogen Energy from Water

田路　和幸（東北大学）
Kazuyuki TOHJI (Tohoku University)
e-mail: tohji@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

1. はじめに

太陽光を利用した水の直接分解による水素製造は，現状では困難である．そのため，太陽電池を用いて電気を作り．水の電気分解により水素を製造する方式が検討されている．しかし，エネルギー変換効率が十分でないこと，電力輸送の効率，さらにシステムコストなどの問題点が指摘されている．また，シリコンを基盤とする太陽電池は，シリコンの製造に膨大な化石エネルギーを利用しているのも事実である．本報では，水よりも酸化還元電位が 1／4 と低い硫化水素（H_2S）から水素を製造し，イオウ循環システムを構築することで化学量論的に水の分解をもたらすシステム，すなわち，化石燃料をまったく使わない水素製造法を紹介する．

まずはじめに，太陽光で硫化水素を分解して水素を製造するための硫化物半導体光触媒の検討と開発，そして，最終的に水から水素を製造するため，イオウを循環させながら水素を製造するシステムを構築するために必要な要素技術の検討を行った．

具体的に図 1 の反応システムを構築するため，まず、硫化水素が溶解したアルカリ溶液中の光触媒に太陽光を照射して水素を製造する．光触媒の素材には、バンドギャップが 2eV 程度の硫化物半導体を用いてストラティファイド（ナノカプセル型）光触媒を開発した．このようにして，第一段階で太陽を光源とする光エネルギー変換による水素製造を行った．そして，硫化水素の分解で生成した副生成物のイオウクラスターと水との水熱反応もしくは，生命活動のエネルギーの一つである硫酸還元菌などにより，原料である硫化水素を効

図 1　太陽エネルギーとイオウ循環を利用した水素製造スキーム

率的に生成する第 2 段階反応の検討も行った.

2. 光触媒の歩み

酸化チタンを用いた光触媒で著名な藤嶋昭博士も古くは水を分解して水素を得ることを夢見て研究を行っていたそうである．本多・藤嶋効果で知られる電気化学的手法により，光エネルギーを化学エネルギーである水素に変換する方法の発見は, 1977 年のことである[1]. この研究に続き，アメリカの Bird らが光触媒という観点から研究を発展させた[2]. このようにして，当初の目的は達成されてはいないが，光触媒は環境重視型社会の発展と伴に，様々な場所で利用されるようになった. 光触媒は，抗菌・浄化目的と水素製造を目指した用途に大別できる．前者は，酸化チタンを基本として実用化段階まで進んでいるが, 後者は, 未だ, その方向性を見ないまま絶え間なく研究が進められている.

水素製造用光触媒は, 電気化学の分野で生まれ, 触媒化学の中で発展してきたと言える. そのため, 触媒粉体の比表面積，すなわち粉体表面の反応サイトを増加させるための方法が取られてきた．または，固体物理の助けを借りて，物質科学的に可能性のある粉体の探索が主流となって膨大な種類の水素製造光触媒の報告が行なわれた．しかしながら，水を直接太陽光を用いて効率的に分解できる光触媒は未だ見つかっていない. これら 30 年の研究成果は，酸化・還元サイトを完全分離した光触媒を可視領域にバンドギャップを有する素材でいかに作るかがかぎと言われてきた．その試みの一つが，ヘロブスカイト型の層状物を利用して反応サイトの分離を試みた研究および後述するストラティファイド型光触媒である.

2.1 光触媒を用いた水素生成の原理

光触媒の素材である半導体は，伝導帯(Conduction band)と価電子帯(Valence band)とが適当な幅の禁制帯(Band gap)で隔てられたバンド構造を有する．そして，バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射すると，価電子帯の電子が伝導帯に励起され，その結果として価電子帯に正孔(hole), 伝導帯に電子(electron)を生じる. そして, これらの正孔や電子が電気分解と同様に酸化や還元反応を引き起こす．水の分解では正孔により水が酸化されて酸素に，一方で電子により還元されて水素になる．ここで重要なのは，バンドギャップの大きさと伝導帯・価電子帯のポテンシャルである．図 2.1 に半導体のバンド構造と水の光分解の関係を示す．水の分解が可能なバンド構造は伝導帯の底が H^+/H_2 の酸化還元電位(0V vs. NHE at pH0)よりも負，価電子帯の上限が O_2/H_2O の電位(+1.23V vs. NHE at pH0)よりも正でなくてはならない．すなわち，伝導帯と価電子帯が水の還元および酸化電位を挟む位置にあればよい．そして，光触媒が可視光で動作するようにバンドギャップは小さいことが望ましい[3].

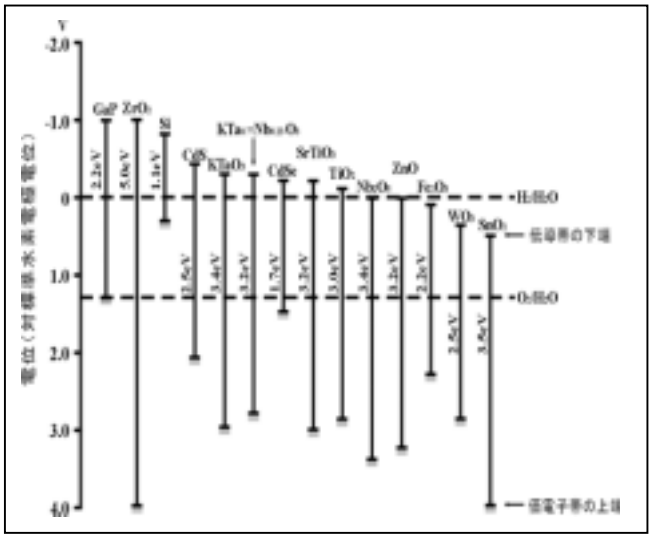


図 2.1　半導体のバンド構造と水の光分解の関係 (pH=0)

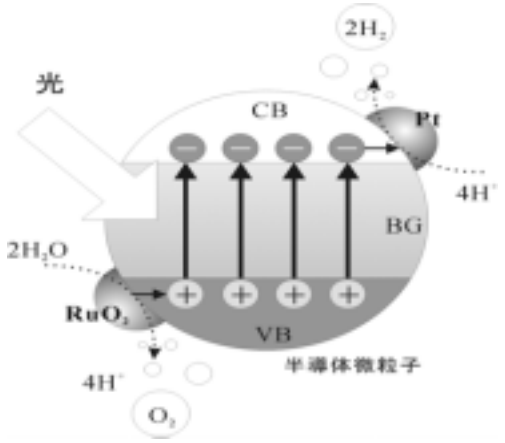
このように光触媒を用いた水の光分解反応は原理的には非常に単純で簡単なように見えるが，実際には, 生成した電子や正孔の寿命や動きやすさ, その電荷分離，酸化還元反応における過電圧や反応活性点というような複雑な因子が関わってくる. そのため，Pt のような助触媒を担持したりすることにより，電荷や酸化還元反応の反応場の分離や酸化還元反応の速度論的因子を有利にすることもしばしば行われる[4,5]. 図 2.2 に助触媒担持型光触媒の代表例として $Pt/TiO_2/RuO_2$ 粒子[6,7]の模式図を示す. また, ある材料が光触媒的に水を還元・酸化して水素や酸素を生成できるポテンシャルを持っているかを判断するための手段として，しばしば犠牲試薬を用いた反応も行われている．反応溶液としてアルコールや EDTA などの酸化されやすい有機物(還元剤)を溶かした水溶液を用いると,

光照射によって生成した正孔が不可逆的にこれらを酸化するために，光触媒中には電子が過剰になり水素生成反応が促進される[8,9]．逆に，Ag+のような電子受容体(酸化剤)を含む水溶液を用いると，伝導帯の電子が不可逆的に消費され，正孔による水の酸化に伴う酸素生成が促進される[10,11].

2.2 可視光応答型光触媒の開発

太陽光によって水素を効率的に生成するには，バンドギャップが可視光を吸収できるほど小さいこと，伝導帯および価電子帯の準位が水素および酸素を発生できるレベルにあり，かつ光触媒自身が安定という条件を満たす必要がある. これまで，この条件を満たす実用的な光触媒の開発は困難とされてきた．しかし近年，いくつかの新しい研究成果が報告されている．

産業技術総合研究所の研究グループは，ニッケルをインジウム・タンタル酸化物にドープした酸



化物半導体 $In_{1-x}Ni_xTaO_4$（x=0～0.2）を用い，可視光一段励起による水の完全分解（水素 : 酸素 = 2 : 1）にはじめて成功した[12]．ニッケルを添加することによって，可視域の短波長側の光に対する光触媒活性が著しく向上し，その量子効率は 402nm の光に対して 0.66%と報告されている．また，植物の光合成メカニズムである二段階光励起反応を模倣した可視光による水分解についても報告している[13].

東京大学のグループでは，太陽光中に多く含まれる 600nm 付近までの可視領域の光に応答し，水を分解できる光触媒の開発を目的とし，オキシナイトライド・オキシサルファイド系光触媒材料に着目し, その可視光応答性について検討している．特に $LaTiO_2N$，Ta_3N_5，TaON，$Sm_2Ti_2S_2O_5$ などが 600nm 付近まで十分な吸収を示すことを見出している[14,15]．しかし，上記２つの研究グループにおいても太陽光を用いて高効率で水の完全分解は達成されていない.

3. 新しい概念での光触媒と水素製造のアプローチ

先に示したように, 太陽光と光触媒を利用して, 水の直接分解からエネルギー利用を目的として水素を製造するためには，もう一度原点に戻った検討が必要と考える．まずは，水素と水素製造に必要な原料に立ち戻ってみる．

3.1 水素と水素製造の原料

水から水素を作り利用しようとするアイデアは 1870 年ころに登場している．当時の SF 小説，ジュール・ベルヌの“不思議の島”には「水はそれを作っている水素と酸素として，単独あるいは一緒になって用いられ, 熱と光の尽きない源として, 石炭にはとても能わざる燃料として利用されるだろう. 水こそ未来の石炭なのだ.」と語る一文が掲載されている．この当時の SF 小説の発想には月面旅行，海底旅行，ロボットなど今日実現しているものが数多くあり，水素エネルギーは，21 世紀に確立しなければならない技術の一つである．

水素は，「燃えると水になる」ように環境に影響を与えず，かつ単位重量当たり石油の約３倍のパワーを持っているエネルギーである．この究極のエネルギーと言われる水素は，自然界には単独で存在せず，炭化水素，水，硫化水素などの化合物として存在する．そのため，他のエネルギーを用いて，これらの化合物を分解して水素を作らなければならない．しかし，現実的には，エネルギーは，現代社会の基盤であり，21 世紀のエネルギーと言われる水素も安価に製造しなければならない. そのため，現状では，化石エネルギーを熱分解して製造する方法が有力とされている. このように, 水素はクリーンであっても，その原料は枯渇が心配されている化石エネルギーであり，さらに副生成物として膨大な CO_2 の発生を伴うなど多くの問題を抱えている．よって水素を真のクリーンエネルギーにするには，無限のエネルギー源である太陽エネルギーを利用し，かつ安価な化石エネルギー以外の原料から水素を製造しなければならない. このことから，確かに，太陽光を利用して水を原

料として水素を製造することは原理想的である．

このような背景の中，太陽光を利用して電気化学的に水を分解することを提案したのが先にも示した 1977 年，Nature 誌に発表した本田・藤島の研究であった．この研究と並行して，溶液中のイオンの光吸収を利用した水素を生成する反応系の研究もなされた．Jortner らは，I イオンを含む酸性溶液中で[16]，また原らは，S イオンを含むアルカリ溶液中で，高い量子効率で水素を生成することを示した[17]．しかし，これらの反応は全て，光の波長 250nm 以下というエネルギーの高い紫外光を用いなければならない．このように，水溶液中でのイオンを介した反応によっても水素が製造できるという新しい知見が得られている．さらに，我々が達成したい太陽光（光エネルギー）を利用した水素（化学エネルギー）の製造は，言い換えれば自然界で日常的に行われている光合成である．そこで，もう一度，自然界の光合成を学んでみることにする．

自然界の光合成反応で最も代表的な反応はラン藻植物や高等植物の光合成である．ラン藻植物や高等植物は光合成によって水と二酸化炭素から酸素と糖を生成する．この糖が水を光分解したときの水素に相当するものであり，生命活動におけるエネルギー源となっている．ラン藻植物や高等植物の光合成は Z スキームと呼ばれる 2 段階の光励起過程から成り立っている．地球上の長い生命淘汰の歴史の中を生き延びてきた，このシステムは光合成の理想系と考えられる．Z スキームを光触媒に適用して考えると，水素生成と酸素生成をそれぞれ担う 2 種の光触媒を用いて，水の分解を行わせることになる．この場合，酸素生成用光触媒の伝導帯の電子を水素生成用光触媒の価電子帯に受け渡す反応中間体が必要となる．光触媒による Z スキーム反応の試みは荒川らにより報告されている[13]．では，自然界に存在する 1 段階の光励起過程から成り立つ光合成はどのようなものだろうか？

ラン藻植物や高等植物と異なり，緑色細菌や紅色細菌などの光合成細菌の光化学系は１つしか存在しない．すなわち，1 段階の光励起過程から成り立っている．光合成細菌の光合成では硫化水素や有機物を電子供与体とするので酸素は放出されない．光合成細菌の例として紅色および緑色硫黄細菌が挙げられる．これらの菌は，CO_2 を炭素源，H_2S を光合成反応の水素供与体として利用して光合成独立栄養的生育をする．また，光合成細菌は，窒素源が不足した条件下で，ニトロゲナーゼの作用により H_2 を放出することが知られている[18]．

つまり自然界において 1 段階の光励起過程で光合成反応が成り立っているものは，水ではなく，硫化水素や有機物など水よりも酸化が容易な物質を電子供与体としていることになる．よって，上記の３つの要素（水，イオン，硫化水素）を含んだ反応系，すなわち，水と同じ分子構造を持つ硫化水素をアルカリ水溶液に溶かしたイオウイオンを利用することに注目した．

硫化水素に注目すると，その分解エネルギーは，水の４分の１程度である．すなわち，水より低いエネルギーで水素を得ることができるはずである．すなわち，水よりも簡単に硫化水素は分解し，水素を製造できることになる．また，硫化水素は，天然には硫化水素泉中や火山ガス，さらに石油の脱硫行程や金属精錬の過程で大量に発生していることも知られている．この工業的に発生する硫化水素は，大量のエネルギーを必要とするクラウス法により硫黄として回収されている．この廃棄物としての硫化水素を太陽エネルギーにより分解し，クリーンエネルギーである水素を得ることは，環境問題を配慮した新しい水素製造技術に成りえると考える．このように水素の原料を有害物質である硫化水素に求め，それを高効率で分解できる光触媒を開発すれば良いことになる．

3. 2 自然を模倣した光触媒の開発（ストラティファイド光触媒）

アルカリ溶液に溶解した硫化水素の分解反応の効率を向上させるには，用いる半導体微粒子の比表面積を増大させる必要がある．すなわち，ナノ粒子の光触媒を用いることになる．しかし，ナノ粒子は，小さくなればなるほど，比表面積は増大するが，それに伴い微粒子化効果によりバンドギャップが広がる．この現象は，太陽光を有効によく利用するという観点ではマイナスの要因になってしまう．このことから，ナノ粒子を用いながら，ナノの問題点を克服した微粒子を開発する必要がある．そこで，自然界に学んだ新しい触媒構造を検討した．その結果生まれた新しい概念の光触媒が，ストラティファイド光触媒である．その着想

は，自然界を学ぶところから始まる．

自然界に学ぶと光合成を行う植物や光エネルギーを利用して生命維持を行う細菌は，細胞の中で光エネルギー変換を行っている．すなわち，細胞が光触媒として働き，細胞膜を介して生成した電子とホールが分離され，それにより生命維持に必要な物質の合成（化学エネルギーへの変換）が行われている．このナノレベルで配列制御された分子膜を持つ細胞は，自然が作り出した理想的な光エネルギーの化学エネルギー変換システムと言える．この自然が作り出したエネルギー変換の方法に学び，この細胞機能を可視光領域にバンドギャップを持つナノ粒子を配列結合させて作ることができれば，ナノ粒子の利点を活かし，ナノ粒子の欠点を克服した新しい光触媒を設計できると考える．

我々は，ナノテクノロジーを用いて溶液中でナノ粒子をカプセル状に配列させた光触媒を開発し，この細胞を模倣した光触媒のことをストラティファイド（カプセル型）光触媒と呼んでいる[19,20,21,22,23,24].

3.3 可視光応答性半導体へのストラティファイド型微粒子調製方法の適用

太陽光を利用した水素製造を目指すには可視光領域で動作する光触媒の調製が必要不可欠である．そこで可視光応答性半導体である CdS に Stratified 微粒子の調製方法を適用した．CdS はこれまでも光触媒材料として注目されてきており，硫化アルカリ水溶液中の水素生成反応に活性を示すこともすでに報告されている[24]．JIS 規格の太陽光（JISC 8911）によると太陽光 1kW/m^2 に対し，ZnS の励起波長に相当する 350nm までの光子数は 2.1 ×10^{19} 個/s・m^2，CdS の励起波長に相当する 510nm までの光子数は 4.5×10^{20} 個/s・m^2 とされており，CdS を用いることで利用可能な光子数は ZnS の 20 倍ということになる．

3.3.1 $Cd(OH)_2$ を前駆物質としたストラティファイド CdS 微粒子の調製

CdO よりも $Cd(OH)_2$ の方が容易に硫化することから $Cd(OH)_2$ を前駆物質として選択した．また CdS のみでの光照射実験を行った結果，水素生成が困難であったことから Pt を助触媒として使用した．CdS に Pt を担持すると反応活性が向上することはすでに報告されている[25]．そこで Pt の担持法として光電着法を選択した．Stratified CdS 微粒子の調製方法を以下に示す．

(1) $Cd(OH)_2$ 微粒子の調製

0.1M NaOH 100ml に NaCl 409mg(7mmol)を溶解し，0.01M $Cd(NO_3)_2$ 100ml を攪拌しながら加える．この過程において $Cd(OH)_2$ の白色懸濁液が生成する．調製された $Cd(OH)_2$ を fine-$Cd(OH)_2$ 微粒子と称する．

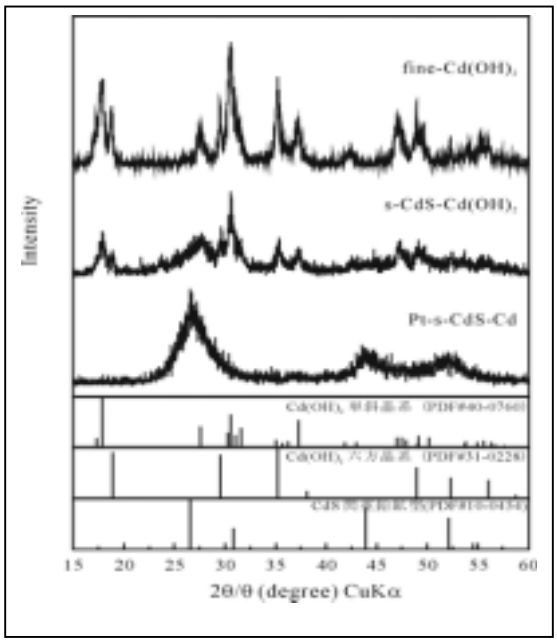


図 3.3.1　Stratified CdS 微粒子の各調製段階における XRD パターン

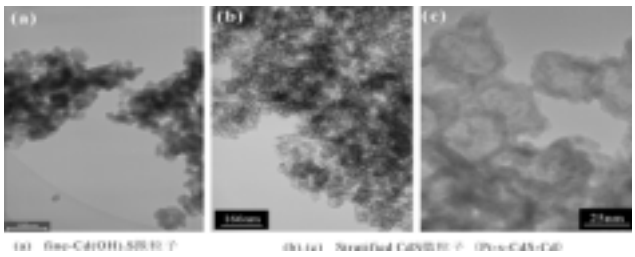


図 3.3.2 $Cd(OH)_2$微粒子の調製時にお図ける添加イオンの影響

fine-$Cd(OH)_2$微粒子の XRD スペクトルを測定した結果, 図 3.3.1 に示すようにブロードなピークとシャープなピークが確認された．これらはブロードなピークが単斜晶，シャープなピークが六方晶と同定された．また TEM による fine-$Cd(OH)_2$ の観察から，図 3.3.1-2 に示すように約 30nm 程度の超微粒子が生成していることが確認された．

NaCl 添加は単斜晶系の $Cd(OH)_2$ 超微粒子を調製するのに効果があることが，様々な添加イオンの影響を調べた結果から判明している．添加イオンを変化させた場合の XRD パターンを図 3.3.3 に示す. NaCl を投入しない場合, 調製された $Cd(OH)_2$ 粒子は六方晶系のシャープな XRD ピークを示し，結晶粒径が大きいことが確認されている．

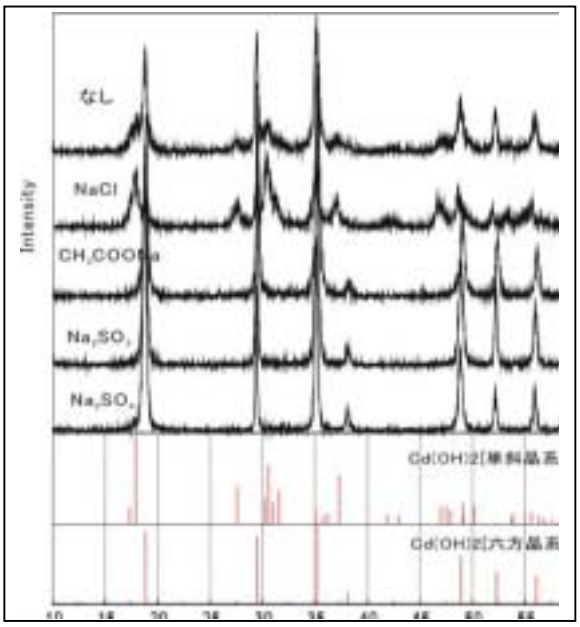


図 3.3.3　Stratified CdS 微粒子の各調製段階における XRD パターン

(2) $Cd(OH)_2$ の硫化

0.1M Na_2S 5ml を(1)の白色懸濁液に攪拌しながら加える．この過程において $Cd(OH)_2$ の一部が硫化されて CdS となり，白色懸濁液は黄色に変化する．この段階の粒子を回収し，XRD を測定した結果，図 3.3.1 に示すように先の $Cd(OH)_2$ のピークに加え CdS（閃亜鉛鉱型）のブロードなピークが確認された．この粒子を s-CdS-$Cd(OH)_2$ 微粒子と称する．

(3) 白金の光電着

(2)の懸濁液に 9.65×10^{-3}M H_2PtCl_6 10ml を加え，500W 超高圧水銀ランプ（ワコム電創 BMP-500D1）を 5 分間照射する．この過程において CdS が励起し，その励起電子で Pt が CdS 表面に光電着される．終了後，メンブランフィルターで吸引濾過し，60℃のオーブンで乾燥させて回収する．この粒子を Pt-s-CdS-$Cd(OH)_2$ 微粒子と称する．

(4) 黒色化処理

Pt-s-CdS-$Cd(OH)_2$ 微粒子を 0.1M Na_2S 100ml 中で分散させ，攪拌しながら 550W キセノンランプ（ワコム電創 KXL-552HPF）で 10min 光照射する．この過程において黄色の粒子は黒色を帯びて茶色に変化する．ZnS の時と同様に考えると Cd 金属が CdS 上に析出したものと考えられる．この粒子を Pt-s-CdS-Cd（Stratified CdS）微粒子と称する．Pt-s-CdS-Cd 微粒子に対して XRD を測定した結果，図 3.3.1 に示すように $Cd(OH)_2$ のピークが消失し，CdS のピークのみが確認される．また Pt-s-CdS-Cd 微粒子を TEM で観察すると 5nm サイズの微粒子が 30nm サイズのカプセル状に配列した構造を持ち，ZnS の場合と類似した構造が確認できる（図 3.3.2）．

上記の調製過程における粒子の変化を模式化すると図 3.3.4 のようであると考えられる．

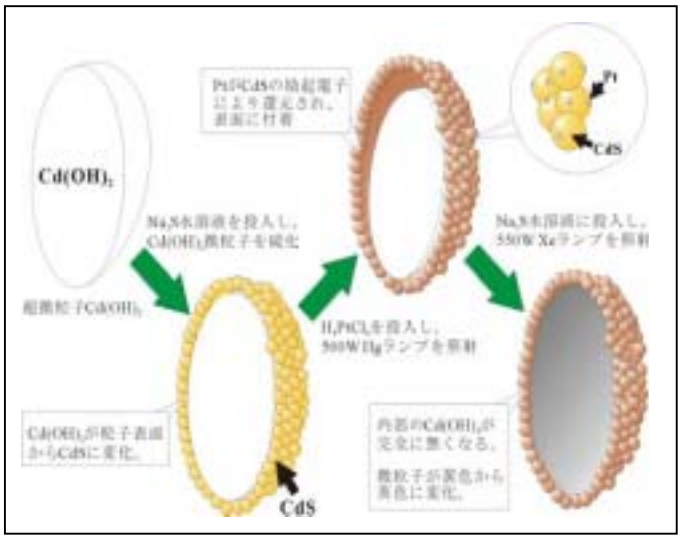


図 3.3.4　Stratified CdS 微粒子の形成過程

3.4 ストラティファイド CdS 光触媒の反応活性評価

反応活性の評価には図 3.4 (a)に示すような光照射実験装置を使用した．反応容器は光反応部（下部）と気体定量部（上部）から構成されており，気体定量部はパイレックス製でシリンダー部に気

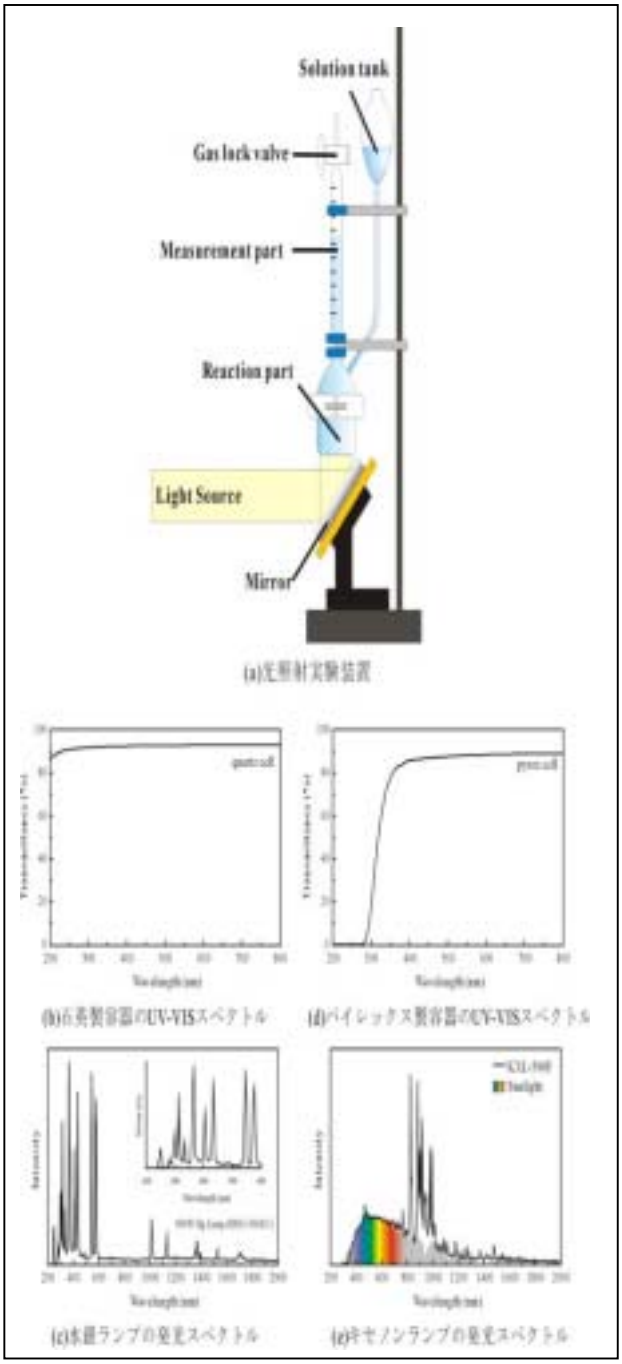


図 3.4　光照射実験装置

体定量用の目盛が振ってある．以下にその詳細を示す．

光反応部はパイレックス製の容器を使用し，光源には 550W キセノンランプ（ワコム電創 KXL-552HPF）を使用した．図 3.4 (d)にパイレックス製反応容器の UV-VIS スペクトル，図 3.4 (e)に 550W キセノンランプの発光スペクトルを示す．反射鏡には紫外～可視光用のもの（シグマ光機 TFAH100-15-0.3）を用いた．光照射実験中は光反応実験装置の過剰な温度上昇を防ぐため，送風機による系全体の冷却を行った．

3.5 光触媒の反応活性評価（ストラティファイド CdS 微粒子の量子収率）

Stratified CdS 微粒子の光触媒反応性を検討するため量子収率の測定を行った．測定には Stratified CdS 微粒子 200mg と 0.1M Na_2S 水溶液 150ml を用い，可視光用の照射実験装置で行った．さらに直径 4cm の窓を反射ミラーの上方に設置し，反応容器底面に照射される光の面積を限定した．光量はこの窓を通して，サーモパイルパワーメーター (GENTEC Detector: PS-310, Monitor: TPM-300CE) で測定した．量子収率は実験時において水素生成速度が最大となるところで評価した．これは実験において照射開始後から水素生成速度が徐々に加速することと，反応の進行により溶液中の反応物が減少して生成速度が減少することから生成速度が最大になるときを評価するのが妥当であると判断したことによる．実験の結果，Stratified CdS 微粒子の最大水素生成速度は 1.7mmol/h であった．この値を量子収率に換算する．量子収率の計算は以下のように行った．

①Xe ランプのスペクトル分布(図 3.4(e))から各波長の強度(I_i)と光子エネルギー(Pi)かけてエネルギー強度(PIi)を求める．

$$Ii \times Pi = PIi$$

②各波長のエネルギー強度を全て合計し積分強度(PI)を求める．

$$\Sigma PIi = PI$$

③積分強度が光触媒に照射される全エネルギー W[実測値=13w]に一致するための換算係数 K を求める．

$$\frac{W}{PI} = K$$

④これらから以下の式が成り立つ．

$$W = K \times PI = K \times \Sigma PIi = \Sigma (K \times Ii \times Pi)$$

各波長のエネルギーを Ei とすると

$$Ei = K \times Ii \times Pi$$

また，各波長の光子数を Ni とすると

$$Ei = Ni \times Pi$$

であるから Ni は

$$Ni = K \times Ii$$

となる．

⑤CdS の吸収波長（280～512nm）以下の波長の

Ni を合計し有効光子数 N を求める．

N = ΣNi （波長領域）

⑥1 秒間に生成した水素の分子数 n から反応に使われた電子数が 2n であることが分かる．1 光子が一つの励起電子を生成すると考えると，生成反応に関与した光子数は $2n$ となる．これを有効光子数に対する割合を百分率で計算し，量子収率 Q とする．

$$Q = \frac{2n}{N} \times 100(\%)$$

上記のようにして求めた結果，量子収率はおよそ 7.7%となった．

この CdS の量子収率は ZnS の値と比較すると約半分であるが，太陽光において利用可能な光子数が ZnS の 20 倍であるので，水素生成量としては ZnS の約 10 倍に達すると考えられる．

この量子収率と太陽光の光子数（JIS 規格）をもとに，太陽光 $1m^2$ における 1 時間当たりの予想される水素発生量を計算する．先に述べたように CdS が利用可能な光子数は 4.5×10^{20} 個/s・m^2 であるから，$1m^2$・1 時間当りのモル数に換算すると 2.7mol/h・m^2 となる．これの 7.7%が水素生成に利用されることになるので，太陽光 $1m^2$ における 1 時間当たりの予想される水素発生量は 4.6L/h・m^2

図 3.5　H_2S を溶解したアルカリ溶液中で Xe ランプからの可視光を受けストラティファイド CdS 光触媒が水素を発生している様子

（0℃，1atm）となる．この結果は最も高かった水素生成速度が維持できる環境を仮定しているので，実際に実験を行った場合，3～4L/h・m^2 程度になると予想される．1983 年，CdS 光触媒に硫化ナトリウム水溶液中で太陽光を照射すると約 1 dm^3/s・m^2 の水素が得られたと報告[26]されたが，それ以後の数多くの報告[27,28]は，この研究に用いた光触媒を凌いでいない．

図 3.5 に Xe ランプからの光エネルギーを受けてストラティファイド CdS 光触媒が水素を発生している様子を示す．

4. 硫化水素を溶解したアルカリ水溶液中の触媒反応

アルカリ水溶液中での硫化水素の光分解反応は，式 1 から 3 のように進行する．電子は，水素発生（陽イオンの還元）に利用され，ホールは陰イオンの酸化に利用される．本反応では，酸素の発生は見られないことから，ホールは，溶液中の最も多く存在する SH^-イオンを酸化し，S_2^{2-}クラスターを生成すると考える．事実，水素の発生が始まると溶液の色が無色から S_2^{2-}イオンの吸収により黄色に着色することからもわかる．また，溶液中の水素イオンは，SH^-の解離により補われることになり，溶液の pH は変化しない．この反応は，触媒がない場合，SH^-イオンの分解に必要な光エネルギーは 250nm という紫外光が必要である．よって触媒は，このエネルギーを小さくするために働き，CdS 微粒子は，600nm 付近まで活性化エネルギーを下げたことになる．

$$\text{触媒} + h^+ \rightarrow e^- + h^+ \quad 1)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad 2)$$

$$2SH^- + 2h^+ \rightarrow S_2^{2-} + 2H^+ \quad 3)$$

このことから，触媒表面での電子移動に注目したナノ構造を制御したストラティファイド構造が，固体内電子の平均自由行程よりはるかに小さいナノ粒子の利用と粒子中で生成した電子とホールを反応サイトまで再結合することなく到達できるように，触媒微粒子内での電場勾配を形成するために，反応活性が飛躍的に向上したものと考える．

5. H_2S の完全分解から H_20 の完全分解へ

先に示した反応式からわかるように，反応系に水を利用しているが，化学量論的には，硫化水素の完全分解になっている．このことから，水素と等量の硫黄が生成することになる．実際は，S_2^{2-} という硫黄クラスターとして，水溶液中で安定に存在する．このことから，生成した硫黄クラスターと水との反応で硫化水素を作ることにより硫化水素の完全分解反応を化学量論的には，水の完全分解に置き換えることができる．すなわち，この硫黄循環が達成できると，結果として水から水素を生成したことになる[31,32]．そこで，以下に，上記の問題について我々が検討している事項を紹介することにする．

5.1 硫黄と水から H_2S を作る（図 5.1）

火山地帯へ行けば，硫化水素の卵の腐ったような悪臭を感じられたことがあると思う．これは，高温・高圧の地下環境において，水に溶けた硫化物が水で還元されて，硫化水素を発生させているためである．この自然現象を利用すれば，簡単に硫化水素を作ることができると考える[29]．既に，オートクレープを用いて，硫黄との熱水反応により硫化水素の生成を確認している．その結果，生成したイオウクラスターの約 60%が，硫化水素に還元され，また一部は酸化されチオ硫酸を作ることがわかった．このことから，全てのイオウクラスターを硫化水素に還元するためには，還元剤が必要となることがわかる．また，この反応に必要な熱エネルギーとしては，自然エネルギーの一つである地熱，もしくは工業的に発生する余剰熱エネルギーを考えている．

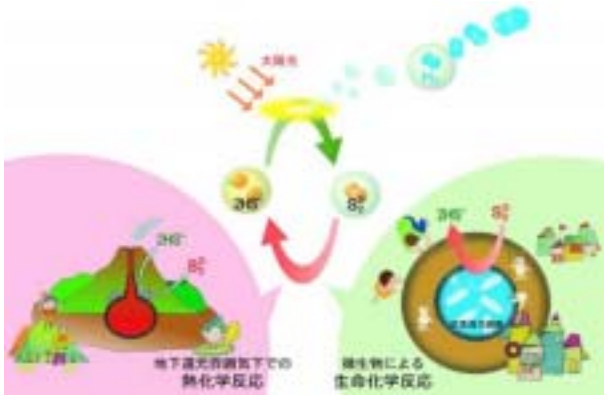


図 5.1 イオウと水から硫化水素を作る．

また、図 5.1 の右下に示すように、バイオエネルギーを利用して硫黄クラスターと水から硫化水素を作ることも可能である。この反応には，硫黄還元細菌の利用を検討している．この細菌は，ゴミ集積場等で硫化水素の発生の原因をもたらしている悪玉細菌[30]である．我々は，この細菌の培養を，生ゴミ・水・硫黄クラスターから硫化水素を生成することがわかっている．この反応を効率的に進めるため，最適な硫酸還元菌の探索と培養を進め，上記反応のメカニズムを研究中である．

6. イオウ循環を利用した水素製造の利点

上記の反応を含めて提案する光エネルギー変換システムをまとめると，硫化水素の光分解により水素と硫黄を作り，硫黄と水との反応で硫化水素に戻すことになる．この硫化水素を用いた光エネルギー変換システムの特徴をまとめると以下のようになる．

- 金属硫化物を変えれば，太陽光をより有効に利用できる可能性がある．
- 塩素ガスの発生がないため，海水の利用が可能である．
- 酸素の発生がないので，爆発の危険性が小さい．
- エネルギー変換に利用する原料が安価である．
- 温泉が使える．

などである．

参考文献

[1] K. Honda. and A. Fujishima , *Nature*, 238, 37 (1972).
[2] A. J. Bard, *Science*, 207,139-144 (1980).
[3] 佐藤真理，季刊 化学総説 No.23，106-112 (1994).
[4] 佐藤真理，化学工業, 39, 206 (1988).
[5] 佐藤真理，触媒, 33, 209 (1991).
[6] D. Dounghong, E. Borgarello, and M. Grätzel, J. Am. Chem. Soc., 103, 4685-4690 (1981).
[7] E. Borgarello, J. Kiwi, E. Pelizzetti, M. Visca, and M. Grätzel, J. Am. Chem. Soc., 103, 6324 (1981).
[8] T. Kawai and T. Sakata, Nature , 282, 283 (1979).
[9] T. Kawai and T. Sakata, Chem. Lett., 81 (1981).
[10] M. Lanz and G. Calzaferri, J. Photochem. Photobiol. A, 109, 87 (1997).

[11] F. Saladin, I. Kamber, K.Pfanner, and G. Calzaferri, J. Photochem. Photobiol. A, 109, 47 (1997).
[12] Z. Zou, J. Ye, K. Sayama and H. Arakawa, Nature, 414, 625 (2001).
[13] K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe and H. Arakawa, Chem. Commun., 23, 2416 – 2417 (2001).
[14] A. Kasahara, K. Nukumizu, T. Takata, J. N. Kondo, M. Hara, H. Kobayashi, K. Domen, J. Phys. Chem. B, 107, No. 3, 791-797 (2003).
[15] G. Hitoki, T. Takata, J. N. Kondo, M. Hara, H. Kobayashi and K. Domen, Chem. Commun.,16, 1698 – 1699 (2002).
[16] Jortner, et.al. , J. Phys. Chem., 68, 247 (1964).
[17] K. Hara, K. Sayama and H. Arakawa, J. Photochemistry and Photology A: Chemistry 128, 27-31 (1999).
[18] K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe and H. Arakawa, Chem. Commun., 23, 2416 – 2417 (2001).
[19] T. Arai, K. Shinoda, B. Jeyadevan, K. Tohji and A. Kasuya, IAPA Conference Series 3, 75-78 (2001).
[20] K. Shinoda, T. Arai, H. Ohshima, B. Jeyadevan, K. Tohji and A. Kasuya, Materials Transaction, 43 1512-1516 (2002).
[21] 田路和幸，硫酸と工業，55，7-14 (2002).
[22] 田路和幸, エネルギー・資源, 23, 15-20 (2002).
[23] J. F. Reber and K. Meier, J. Phys.Chem. 88, 5903-5913 (1984).
[24] N. Bühler, K. Meier and J. F. Reber：J. Phys.Chem. 88, 3261-3268 (1984).
[25] I. B. Rufus, B. Viswanathan, V. Ramakrishnan, J. C. Kuriacose, J. PhotoChem. Photobiol. A: Chemistry 91, 63-66 (1995).
[26] N. Buhler, J. F. Reber and K. Meier ； J. Phys. Chem. 88, 3261-3268 (1984).
[27] E. Borgarello, K. Kalyanasundaram, M. Grätzel and E. Pelizzetti, Helvetica Chimica Acta, 65, 243-248 (1982).
[28] A. Linkous, N. Z. Muradov and S. N. Ramser, Int. J. of Hydrogen Energy, 20, 701-709 (1995).
[29] 荒井健男，田路和幸，ナノ学会誌，1，81-88 (2003).
[30] 荒井健男，松本高利，篠田弘造，田路和幸，水素エネルギーシステム，28，8-14 (2003).

高温ガス炉核熱を用いた熱化学水素製造法の研究開発

R&D of the Thermochemical Hydrogen Production using Nuclear Heat from High Temperature Gas-cooled Reactor

笠原　清司，久保　真治，小川　益郎（日本原子力研究所*）
Seiji KASAHARA, Shinji KUBO, Masuro OGAWA (*Japan Atomic Energy Research Institute**)
e-mail: kasahara.seiji@.jaea.go.jp

1. 緒言

燃料電池・電気分解によって電気との相互変換が可能であるエネルギー媒体として，水素が近年注目を受けている．それを受けて多種の水素製造法の研究開発が行われている．エネルギー媒体としての水素の消費量が急激に大きくなることが予想されること，CO_2 排出削減の社会的要求が高まっていることから，CO_2 を排出せずに大規模に水素を生産できる方法が望ましい．熱化学水素製造法は熱化学反応を組み合わせることによって水から水素を製造する方法であり，CO_2 を排出しない熱源を用いることによって，これらの要求を満たすことができる．そのため，原子炉の核熱に対する期待が高まっている．熱化学水素製造法では，熱源の温度が高い方が原理的に高い水素製造効率を得られる．そのため，他の原子炉と比較して高温の熱を供給可能な高温ガス炉は熱化学水素製造法の熱源として適している．

日本原子力研究所(原研)では図1に示すように，高温ガス炉水素製造システムを構成する高温ガス炉，高温ガス炉と水素製造プロセスとのシステムインテグレーション技術，水素製造プロセスの各々について，研究開発を進めている．本稿では，高温ガス炉水素製造システムの研究開発の経緯と現状を，熱化学水素製造法 IS プロセス (iodine-sulfur process, ヨウ素-硫黄プロセス)に重点を置いて概説する．

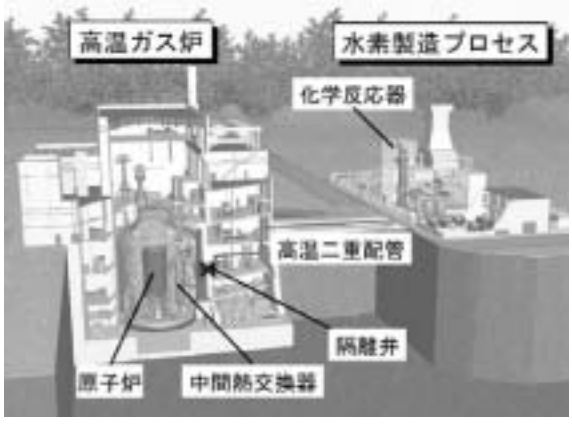


図１　高温ガス炉水素製造システムの概念図

図２　高温工学試験研究炉(HTTR)

表１　HTTR の主な仕様 [2,3]

項目	仕様
原子炉熱出力	30 MW
冷却材	ヘリウムガス
原子炉出口冷却材温度	850 ℃ (定格運転)
	950 ℃ (高温試験運転)
原子炉入口冷却材温度	395 ℃
1次系冷却材圧力	4 MPa (ゲージ圧)
1次系冷却材流量	12.4 kg/s (定格運転)
	10.2 kg/s (高温試験運転)
炉心有効高さ	2.9 m
炉心等価直径	2.3 m
出力密度	2.5 MW/m^3
燃料	二酸化ウラン、被覆燃料/黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3-10 wt% (平均 6 wt%)
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製 (2･1/4Cr-1Mo鋼)
主冷却回路数	1ループ

* 平成 17 年 10 月 1 日より独立行政法人 日本原子力研究開発機構 (Japan Atomic Energy Agency)

2. 高温ガス炉

高温ガス炉は，広い温度範囲で相転移を起こさず化学的に安定なヘリウムを冷却材とし，耐熱性の高い黒鉛を主要構造材・減速材として用いることを特徴とした原子炉である．

原研では，高温ガス炉の技術基盤の確立を目的として，わが国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor, HTTR)を建設し，高温ガス炉の安全性の実証等に関する試験研究を進めている[1,2]．HTTR の概念図を図 2 に，主な仕様を表 1 に示す．

HTTR は 1998 年に初臨界を達成し[3]，2001 年には熱出力 30MW，原子炉出口冷却材温度 850℃の運転を達成した[4]．さらに 2004 年には，原子炉出口冷却材温度 950℃の運転に世界で初めて成功した[1]．この時の運転履歴を図 3 に示す．この運転によって，熱化学水素製造法が要求する温度の熱を高温ガス炉が供給しうることが示された．

長期連続試験による運転・保守のデータとノウハウの蓄積を行い，高温ガス炉の実用化に役立てる事が HTTR の今後の課題である[5].

3. システムインテグレーション技術

図１に示すように，原子炉で生成した熱は中間熱交換器において１次ヘリウムから２次ヘリウムへ熱交換され，２次ヘリウムは高温二重配管を経由して水素製造プロセスへ送られ，水素製造の化学反応の熱源として利用される．原子炉と水素製造プロセスの接続はこれまでに例がなく，これらを安全かつ経済的に接続するためにシステムインテグレーション技術の研究開発を進めている[5]．原子炉と水素製造プロセスを安定に運転するためには，化学反応器で発生する２次ヘリウムの温度変動を原子炉の運転に影響のない範囲まで緩和する制御技術の開発が不可欠である．この温度変動は，水素製造停止等の異常時のみでなく，起動・停止の通常運転時においても生じる．そこで，２次ヘリウム系において化学反応器の下流に配置した蒸気発生器で温度変動を緩和する制御技術を考案し，図 4 に示すモックアップモデル[6]を用いて，制御技術の妥当性を検証する試験を行った[7].

モックアップモデルは，高温ガス炉を模擬した電気ヒーターを用いてヘリウムガスを加熱し，HTTR と同じ温度・圧力の条件で試験を行うことができる．水素製造法は，メタンの水蒸気改質法で模擬した．試験の結果，図 5 に示すように，化学反応器出口での 2 次ヘリウムの温度変動が最も大きくなる化学反応停止時においても，蒸気発生器出口では±10℃以下の変動に緩和されており[7]，制御技術の妥当性を検証することができた．

可燃性ガスの爆発時の原子炉の安全性確保に関しては，可燃性ガスの漏洩防止，漏洩の拡大防止，爆発による爆風圧の影響軽減を考慮して安全設計を行っている[5]．また，中間熱交換器伝熱管等におけるトリチウムの移行挙動を明らかにし，製品水素への移行量の評価[8,9]，異常時に高温ガス炉と水素製造システムを隔離するための高温隔離弁の開発を進めている[10].

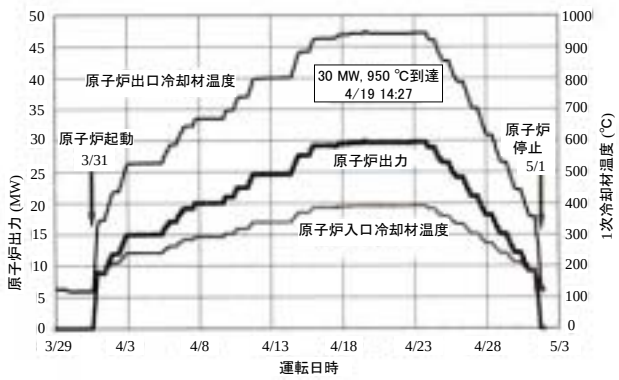


図 3 原子炉出口冷却材温度 950℃の達成 [1]

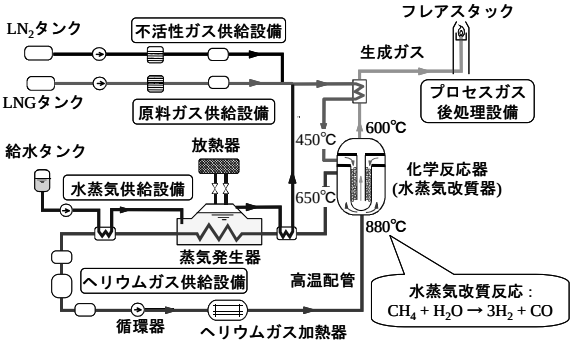


図 4 モックアップモデルの概念図 [6]

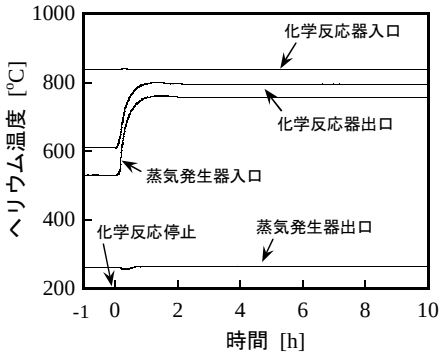


図 5 化学反応停止時のヘリウム温度変化 [7]

4. 熱化学水素製造法 IS プロセス

4.1 熱化学水素製造法の原理

図 6 に水蒸気を直接分解する反応の G-T(ギブズエネルギー-温度)線図を示す．反応を進行させるには反応物と生成物のエンタルピー差⊿H を与える必要がある．⊿H は，反応に要する仕事を表すギブズエネルギー変化⊿G と熱を表す T⊿S で構成される．反応温度によって⊿G は異なり，⊿G > 0 となる温度の場合には⊿H の全てを熱でまかなうことはできず，一部は電気などの仕事で供給しなければならない．電気分解はこの場合に相当する．熱だけで反応を進行させようとした場合には⊿G = 0 となる温度 T_d 以上の熱が必要となる．水蒸気の場合，この温度は T_d = 4310K と非常に高温である[11].

水以外の物質を含む複数の反応を組み合わせて，全体で水を分解するプロセスを構成する事を考える．この場合，図 7 に示すように，各反応の⊿G = 0 となる温度を直接熱分解の場合より低くする事が可能であり(T_H, T_L)，より低温の熱のみを用いて水素を製造することが可能となる．これが熱化学法の熱力学的原理である．

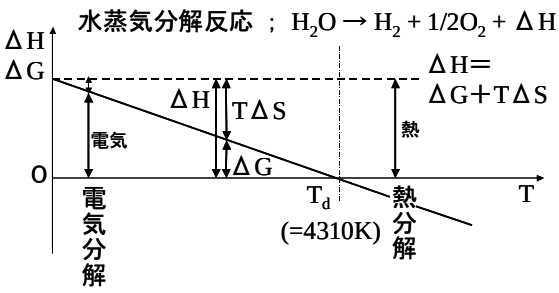


図 6 水蒸気の直接分解の G-T 線図

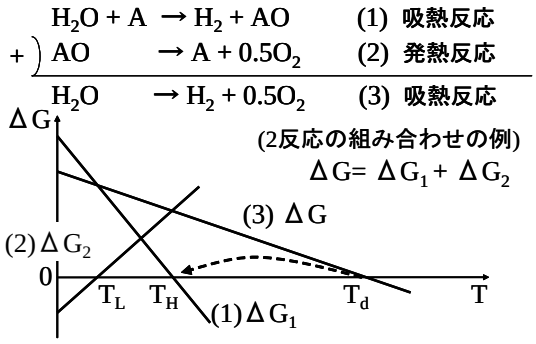


図 7 熱化学法の G-T 線図

4.2 IS プロセスの概要

1960 年代に熱化学法の可能性が熱力学的に示されて[12]以来，反応に介在させる物質の異なる多数のプロセスが提案されてきた[13]．原研ではこれらの中から，反応数が少ない，主反応中に電気化学反応を含まない，固体反応を含まないという特徴を持ち，プロセス内最高温度(約 850 ℃)が高温ガス炉の出口温度とマッチしている IS プロセスを選定し，研究開発を進めている．IS プロセスは米国 General Atomics 社から提案されたプロセスで，以下の反応で構成される[14].

$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow H_2SO_4 + 2HI$ (式 1)

$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + 0.5O_2$ (式 2)

$2HI \rightarrow H_2 + I_2$ (式 3)

プロセス外から供給された原料水はヨウ素(I_2)，二酸化硫黄(SO_2)と反応して，硫酸(H_2SO_4)とヨウ化水素(HI)が生成する(式 1，ブンゼン反応)．これらの酸は分離され，熱分解される．H_2SO_4 分解反応(式 2)で生じた酸素と，HI 分解反応(式 3)で生じた水素は生成物としてプロセス外に取り出され，残りの物質はブンゼン反応に戻る．これらの反応を総合すると，水から水素と酸素が生成し，他の物質はプロセス内を循環するだけとなる．

4.3 原研における IS プロセス研究

原研での IS プロセス研究は 1980 年代に始まった[15]．以来，実用化に至るまでを水素製造規模によって 4 段階に分けて研究を進めている[16-18]. 各段階の概要を表 2 に示す.

第 1 段階のラボスケール試験においては，水素製造規模 1 L/h(標準状態)の装置で 48 時間にわたり連続して水素製造を行い，IS プロセスの原理を実証した[19].

第 2 段階のベンチ試験においては，プロセス制御技術開発，水素製造熱効率の高効率化研究，耐食性装置材料検討の 3 つの分野に関して研究が行われた.

表 2　原研における IS プロセス研究の概要

	ラボスケール試験	ベンチ試験	パイロット試験(予定)	HTTR-IS 試験(予定)
水素製造規模 [m^3/h(標準状態)]	～ 0.001	～ 0.05	～ 30	～ 1000
熱供給法	電気加熱	電気加熱	高温ヘリウム熱交換（電気加熱）	高温ヘリウム熱交換（HTTR加熱）
装置材料	ガラス	ガラス	工業材料	工業材料
プロセス圧力	大気圧	大気圧	高圧	高圧

IS プロセスによる安定した水素製造を行うためには，ブンゼン反応溶液組成を安定に維持することが重要である[20]．そのため，ブンゼン反応溶液組成の自動制御法を開発し，水素製造試験装置を用いて検証を行った．図 8 に水素製造試験装置の概念図を示す．その結果，図 9 に示すように約 1 週間にわたり連続で水素製造量 31 L/h(標準状態)の運転を行うことができた[21]. これによって，ブンゼン反応溶液組成の自動制御法の有効性が確認された.

ベンチ試験の水素製造試験装置では，ブンゼン反応において高濃度の硫酸・ヨウ化水素が得られた場合を想定しても，水素製造熱効率は 6.4 %にとどまると考えられる[22]．HI 蒸留塔に供給される HI-I_2-H_2O 溶液の HI 濃度が擬共沸濃度以下であるため，蒸留塔頂から H_2O 84 mol%の HI-H_2O 共沸混合物が留出する．このとき，HI に同伴する H_2O の蒸発熱によって HI 蒸留塔の所要熱量が増大する．これが低熱効率の主要な原因であると考えられる．高効率化に必要な高 HI 濃度溶液を得るための方法として, 図 10 に示すような電解電気透析(Electro-electrodialysis, EED)が研究されている．図 11 に示すように，HI 濃度 10.6 mol/kg-H_2O の HI-I_2-H_2O 擬共沸溶液を 15　mol/kg-H_2O まで濃縮できることが実証された[23].

パイロット試験以降では高温，高圧の下で H_2SO_4, HI, I_2 など腐食性の高い物質を用いるため，耐食性装置材料が必要となる．原研などが実施した腐食試験によって選定された候補材料を図 12 に示す[18].

硫酸分解反応器，SO_3 分解反応器は高温・高圧の腐食性プロセス流体にさらされるため，高い耐食性・耐熱性が求められる．また，プロセス流体とヘリウムとの間で熱交換が行われるため，装置の破損や流体の漏洩によってヘリウム配管にプロセス流体が入ることを防ぐ必要がある．これらの装置について，高い耐食性・耐熱性を有するセラ

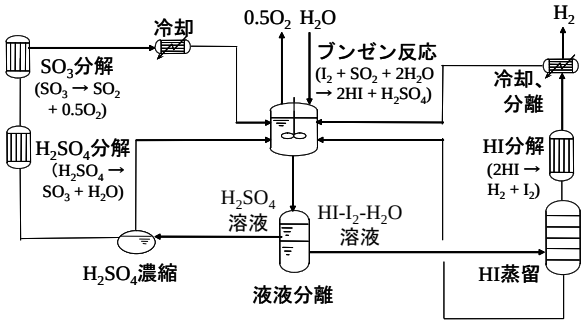


図 8 水素製造試験装置の概念フローシート

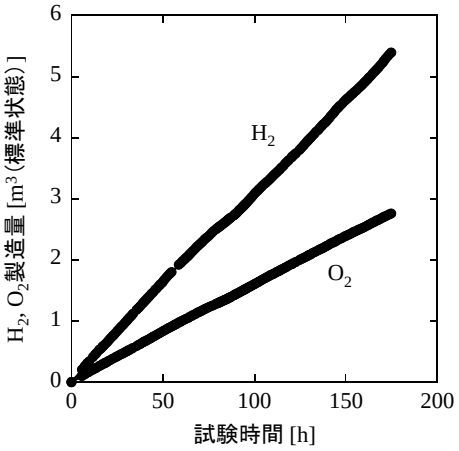


図 9 ベンチ試験における連続水素製造試験 [21]

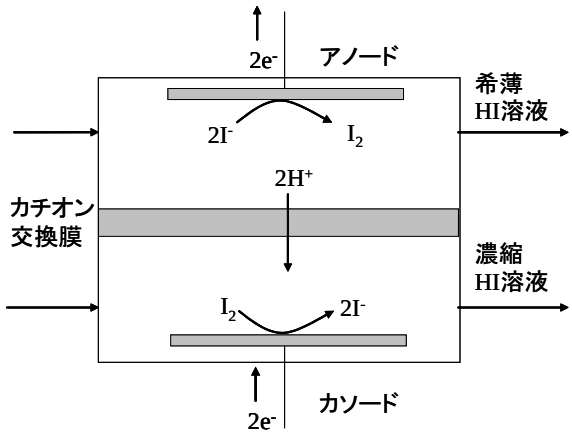
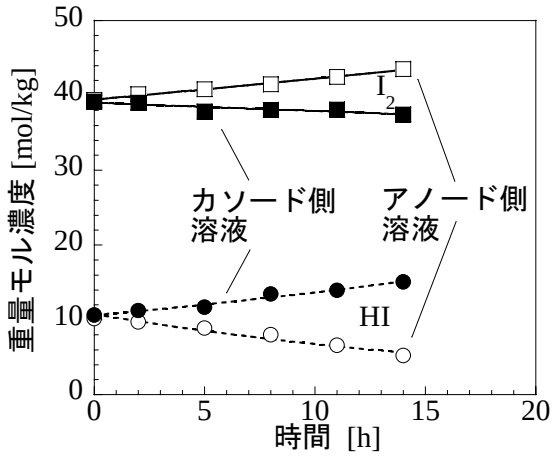


図 10 電解電気透析(EED)の概念図



セル温度; 110 [℃], 電流密度; 9.9 [A/dm^2]

図 11　EED による HI 濃縮 [23]

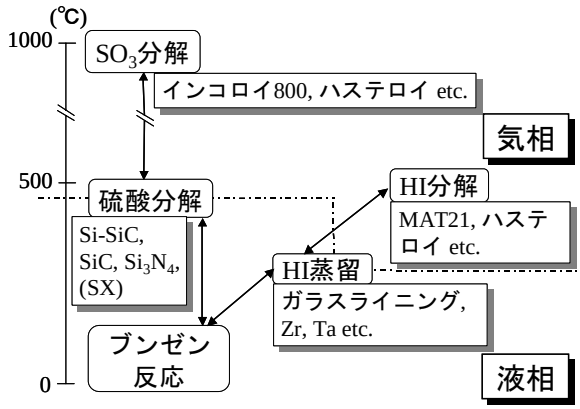


図 12 耐食性装置材料の候補 [18]

ミックスを熱交換部材とする反応器概念の検討，熱交換部材の熱応力解析・試作試験などが行われた．その結果，熱交換部材の構造成立性が確認された[24, 25].

4.4 計画

原研では現在，IS プロセス研究の第 3 段階であるパイロット試験への移行を計画している．その中で主となるのが，水素製造量 30 m^3/h(標準状態)規模の水素製造装置の製作とそれを用いた水素製造試験である．ここでは，IS プロセスプラントの工学的成立性の検証を行う予定である[21]．熱源はヘリウム流量 100 g/s 規模の電気加熱ヘリウム循環設備を用いる．水素製造効率向上のため，ベンチ試験における水素製造装置の機器構成に HI 濃縮装置等の装置を追加する．装置材料としては，図 12 に示したベンチ試験で選定された材料を想定している．

5. 結言

原研における高温ガス炉水素製造法の研究開発の経緯と現状を概説した．高温ガス炉については水素製造プロセスに必要な温度を達成し，システムインテグレーション技術では，水素製造プロセスの温度変動が原子炉の運転に影響を及ぼさないようにする見通しを得た．水素製造プロセスでは，熱化学法 IS プロセスのベンチ試験を完了し，パイロット試験を計画している．パイロット試験後，HTTR と IS プロセスを接続した，核熱による水素製造試験が行われる予定である．この試験により，2020-30 年ごろの熱化学水素製造システムの実用化への見通しが得られるものと期待される[5].

参考文献

[1] Fujikawa, S., Hayashi, H., Nakazawa, T., Kawasaki, K., Iyoku, T., Nakagawa, S. and Sakaba, N., J. Nucl. Sci. Technol., 41-12 (2004) 1245.

[2] Shiozawa, S., Fujikawa, S., Iyoku, T., Kunitomi, K., Tachibana, Y., Nucl. Eng. Des., 233 (2004) 11.

[3] 山下清信，藤本望，竹内光男，藤崎伸吾，中野正明，梅田政幸，竹田武司，茂木春義，田中利幸，日本原子力学会誌, 42-1 (2000) 30.

[4] 藤川正剛，大久保実，中澤利雄，川崎幸三，伊与久達夫，日本原子力学会和文論文誌，1-4 (2002) 361.

[5] 塩沢周策，小森芳廣，小川益郎,日本原子力学会誌, 47-5 (2005) 342.

[6] 稲垣嘉之，小貫薫，西原哲夫，久保真治，大橋弘史，武田哲明，小川益郎，塩沢周策,日本ガスタービン学会誌, 31-6 (2003) 47.

[7] Ohashi, H., Nishihara, T., Takeda, T., Maeda, Y., Sato, H., Inaba, Y., Hayashi, K., Takada, S., Inagaki, Y., Proc. 12th Int. Conf. Nucl. Eng., Arlington, Virginia, USA, April 25-29, (2004) ICONE12-49419.

[8] 武田哲明，岩月仁，日本原子力学会誌 43-8 (2001) 823.

[9] Takeda, T., Iwatsuki, J., Inagaki, Y., J. Nucl. Mat., 326 (2004) 47.

[10] 西原哲夫，榊明裕，稲垣嘉之，高見和男，日本原子力学会和文論文誌, 3-4 (2004) 69.

[11] 野村幹弘，笠原清司，小貫薫，JAERI-Research, 2002-039 (2002).

[12] Funk, J. E. and Reinstrom, R. M., I&EC Process Design and Development, 5 (1966) 336.

[13] Yalçin, S., Int. J. Hydrogen Energy, 14-8 (1989) 551.

[14] Russell, J. L., Jr., McCorkle, K. H., Norman, J. H., Porter, J. T., II, Roemer, T. S., Schuster, J. R., Sharp, R. S., Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami Beach, USA, March 1-3, (1976) 1A105.

[15] Shimizu, S., International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research —Near-future chemistry in nuclear energy field—, Oarai, Ibaraki, Japan, February 15-16, (1989) 324.

[16] Onuki, K., Nakajima, H., Ioka, I., Futakawa, M.

and Shimizu, S., JAERI-Review 94-006 (1994).

[17] Onuki, K., Kubo, S., Kasahara, S., Ishiyama, S., Nakajima, H., Higashi, S., Masaki, T. and Takeda, T., Proc. 12th Int. Conf. Nucl. Eng., Arlington, Virginia USA, April 25-29, (2004) ICONE12-49364.

[18] Kasahara, S., Kubo, S., Hino, R., Onuki, K., Nomura, M., and Nakao, S., Proc. AIChE 2005 Spring National Meeting, Atlanta, Georgia, USA, April 10-14, (2005) 75a.

[19] Nakajima, H., Sakurai, M., Ikenoya, K., Hwang, G.-J., Onuki, K., and Shimizu, S., Proc. 7th Int. Conf. Nucl. Eng., Tokyo, Japan, April 19-23, (1999) ICONE-7104.

[20] Kubo, S., Nakajima, H., Kasahara, S., Higashi, S., Masaki, T., Abe, H., Onuki, K., Nucl. Eng. Des., 233 (2004) 347.

[21] Terada, A., Kubo, S., Okuda, H., Kasahara, S., Tanaka, N., Oota, H., Kanagawa, A., Onuki, K., Hino, R., Proc. 13th Int. Conf. Nucl. Eng., May 16-20, Beijing, China, (2005) ICONE13-50183.

[22] Kubo, S., Kasahara, S., Inaba, Y., Ishiyama, S., Onuki, K., and Hino, R., Nucl. Eng. Des., 233 (2004) 355.

[23] Hwang, G.-J., Onuki, K., Nomura, M., Kasahara, S., and Kim, J.-W., J. Membr. Sci., 220 (2003) 129.

[24] Ota, H., Kasahara, S., Terada, A., Kubo, S., Onuki, K., Hino, R., Inatomi, T., Ogura, K., Kobayashi, M., Hodotsuka, M., Maruyama, S., Proc. 13th Int. Conf. Nucl. Eng., May 16-20, Beijing, China, (2005) ICONE13-50494.

[25] Kanagawa, A., Kasahara, S., Terada, A., Kubo, S., Kawahara, Y., Hino, R., Watabe, M., Fukui, H., Ishino, K., Takahashi, T., Proc. 13th Int. Conf. Nucl. Eng., May 16-20, Beijing, China, (2005) ICONE13-50451.

甲藤好郎先生ご遺稿

「沸騰の科学（３）」

Science of Boiling (3)

甲藤　好郎（東京大学名誉教授）

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

３．強い核沸騰

春の陽炎，夏の入道雲

春が来て，私たちの住む台地に緑が萌え出る頃，うららかな陽光に暖められた野原から陽炎（かげろう）が立ちのぼります．しかし，いつか時が経って夏の激しい日差しが照りつけるようになると，紺碧の空を背景に真白な入道雲が巨大な姿を現すでしょう．同じ太陽の光に照らされる大地でも，その受ける熱の強弱で私たちに見せる光景を随分違ったものにするわけです．

ところで前の２章で，日頃，身近に見るタイプの核沸騰，つまり「弱い核沸騰」をテーマにしてその状況を観察して来ました．しかし夏の入道雲ではありませんが，加熱の強さをこれよりもっと強めたら一体どんなことになるでしょうか．そこで，これからその大切な話に入ろうと思うのですが，ただいつまでもガスレンジにかけた鍋の中の沸騰では，強い加熱も困難ですし，加熱面上の加熱の強さにも偏りがあります．それに加熱面の温度はもちろん，伝わる熱の強さすら正確にはわかりません．そこでまず，本章の説明用の簡単な実験装置の様子を見ておくことにしましょう．

さて，２章でお話した鍋の中の水の沸騰のように，一つの容器に入れた液体をそのまま加熱した時の沸騰を「プール沸騰」と言っています．そしてこのプール沸騰の実験に必要な加熱面として最も簡単なのは，容器内の液体中に２本の電極を入れ，その二つの電極の間に水平に張ったニクロム線や白金線に電流を流して電気抵抗で発熱させるやり方です．この時，小なりと言えども針金表面が沸騰を起こす加熱面になり，針金に消費される電力をメーターで測れば，加熱面から出る熱の強さが分ります．また，金属の電気抵抗の値は一般に温度で変わるので，針金の電気抵抗の測定から逆に針金の温度，つまり加熱面の温度を知ることが出来ます．

しかしなにぶんにも針金は細いので，通常の沸騰に現れる気泡の大きさや蒸気のかたまりの大きさに比べて加熱面寸法が大変に小さく，針金の温度も局部的に変化しやすく，さらに発泡点の分布も限られるため，とかく特殊な沸騰状況になりがちです．そこで，それを避けるため，直径 10 ないし 20 ミリメートル位の銅の棒を用い，その一方の端を特殊の電気ヒーターで加熱，それから銅棒を伝わって来る熱を利用して，もう一方の端面の上で沸騰を起こさせる方法が考えられます．この時，銅棒の熱伝導の方向に温度が下がりますが，その温度勾配の測定から，加熱面を通過する熱の強さ（それは温度勾配に比例します）を知ることが出来，同時に温度勾配を外挿して加熱面の温度を求めることが出来ます．なお銅棒内部の温度を測るには熱電対（ねつでんつい）と言うものを使います．これは平行に並べた二種類の異なる金属細線の端同志を接合したもので，その２接点の温度の相違によって細線内に起電力が生じる性質を利用する温度計で，これを銅棒にあけた細い孔の中に差込んで局所温度を正確に測ることが出来るのです．

沸騰の様相の変化

さて，十分な大きな容器に蓄えた液体の中に，いまお話したような直径 10 ないし 20 ミリメートル位の銅棒端面，つまり平らな円形加熱面を上向き水平に置いた時，この加熱面上に生じる沸騰の様子を，しばらく見て行くことにしましょう．

ここでは，実験の条件を明確にするため，まず液中に沈めた補助ヒーターで容器内の液体を加熱しながら常に液温を飽和温度に保つようにしておきます．そして，銅棒の下端の電気ヒーターに適当な強さの電流を流して加熱しますと，やがて液体に触れている上端の円形加熱面温度が飽和温度より少

し高くなります. この加熱面温度と飽和温度の差を, 一般に加熱面の「過熱度」と言いますが, ２章で見たように加熱面上に泡を発生させるには, ある大きさ以上の過熱度が必要です. 従って過熱度がまだ小さい間は, 過熱面上に気泡の発生が見られず, 加熱面から出る熱は, ただ液体の普通の自然対流で取り去られています.

そこで電気ヒーターの電流を増し, 液体に触れている加熱面の温度をあげていきますと, やがて加熱面上のどこか１, ２の点から蒸気泡の発生が始まります. これが沸騰の開始であって, ここでそれまでの自然対流の状態とは異なる伝熱状態へ不連続な変化を生じるわけです. そしてその後, 気泡の連続的な発生によって, 前にお話したところの「弱い核沸騰」の状態に移り, さらに加熱面からの熱の強さを上げるにつれて発泡点の数が増え, 加熱面上に散らばるようになります. なお各発泡点からは, それぞれ小さな蒸気泡が列を作って立ち上がっており, 瞬間写真をとってみると前後の気泡同志が互いに分かれているのが分ります. つまり弱い核沸騰では, 隣接する発泡点同志も, また一つの発泡点から発生する気泡同志も互いに干渉せずに分かれていると言う特徴があって, この弱い沸騰の領域のことを学問的には「孤立気泡域」と言う難しい言葉で呼んでいます.

しかし, さらに加熱面温度を上げていくとやがて, 加熱面上の発泡点密度が大きくなり, 発生, 浮上する多くの気泡もこみ合ってきて, 次第に混乱の様相が濃くなって来ます. そして写真観察をはじめいろいろの方法で調べた結果によると, 発泡点からつぎつぎに出る気泡が前後つながる形で細い連続蒸気柱に見えるものが出来たり, 加熱面の少し上の方で浮上中の気泡同志がいろいろに合体したり, とにかく各種の複雑な状況を呈します. しかし少し大胆に言うことを許して頂けるなら, こうした状況は, 前にあった弱い核沸騰の状態から, 次項で説明する新しい核沸騰の状況, つまり「強い核沸騰」への移り変わりの状態にすぎないのです.

強い核沸騰の出現

実際, もっと加熱面温度があがると, 沸騰はこれまでとはまるで違った新しい様相のものになります. すなわち, いま実験に使っている円形加熱面（直径 10 ないし 20 ミリメートル程度）と同じ位のかなり大きな蒸気のかたまりが, 加熱面上をひとり占めする形で, 時間の経過と共に, つぎつぎ成長と離脱を繰り返す状況が観察されるようになるのです. そして詳しくはすぐ後でお話するように, この大きな蒸気のかたまりは, 実は加熱面から伝わる熱の全部を消費して, 加熱面近くで絶えず作られている蒸気の集合して出来るものなのです. つまり, 現在の沸騰は加熱面から強い熱を受けながら, その全部を使って加熱面近くで多量の蒸気を発生, 加熱面の上に前述のような大きな蒸気のかたまりを次々に作っているものであり, これこそまさに沸騰そのものの状態と言っても過言ではないでしょう. そして, これをここでは弱い核沸騰に対応して, わかりやすく「強い核沸騰」と呼ぶことにしましょう. 学問的には, この沸騰領域のことを「干渉領域」, また時には「発達した核沸騰」と言います. 干渉というのは, 加熱面上で多数の発泡点が近接し, 隣り同志が互いに影響を受け合っていることを指しているのです.

さて前述のように,「強い核沸騰」では加熱面の上に蒸気の大きなかたまりが次々に発生するのですが, しかし２章で見た「弱い核沸騰」だって, 加熱面上の発泡点から小さな気泡が次々に発生しているわけです. だから, これだけを見ますと, 大きな蒸気のかたまりと小さな気泡と, 大きさの規模が違うだけで, それ以外は両者の性質に違いがないように見えます. 当然,「強い核沸騰」は「弱い核沸騰」に比べて本当に異質なものだろうかという疑問が生じます.

もちろん, これは科学的に大切な問題です. そこでいま,「強い核沸騰」で生じる大きな蒸気のかたまりの挙動を高速カメラで撮影, 観察してみることにしましょう. するとまず, 蒸気のかたまりが十分大きくなって加熱面から離脱したあと, ほとんど間髪を入れず加熱面上に次の蒸気のかたまりが成長を始めるという連続的な蒸気生成の特徴がみられるのです. これに対し弱い核沸騰の場合は, 発泡点から気泡が離脱後, 次の気泡の成長開始までの間に「待ち時間」があり, 気泡発生が間欠的だったことを思い出して頂けると思います.

また, やはり高速カメラを用い, 強い核沸騰の蒸気のかたまりが加熱面上で成長して行く途中の体積変化を撮影し, それを定量的に分析してみますと, 加熱面から出ている熱の全部が加熱面上で蒸気の発生に消費されるとした時の蒸気の体積増加の計

算結果にちょうど一致することが分ります．そしてこのことは，前後２個の蒸気のかたまりの間に「待ち時間」がほとんど無いという前述の実験事実とも，ちゃんと合致することになります．一方，弱い核沸騰の場合は，２章でお話したように，加熱面上での蒸気発生には加熱面から出る熱の一部しか使われていません．それに気泡の成長も，成長の始めは速いが終わり頃は遅く，速度が途中で大きく変化しているものだったのです．

なお「強い沸騰」の場合，前述のように加熱面からの熱が，加熱面近くで全部，蒸気生成に使われてしまうことを知りましたが，これはもう，それ以外の領域で液体の過熱を生じ得ないことを意味します．つまり沸騰容器内の液体の温度は，加熱面上を除いて全面的に飽和温度に保たれることになるのです．

加熱面を覆う薄い核沸騰液層

とすると，私たちが次に当面する大切な問題は，前述のようにして加熱面の上に大きな蒸気のかたまりを次々に作り出している蒸気そのものが，一体どこで，どのようにして作られているのかということでしょう．そこでとりあえず，加熱面上の強い核沸騰の状況を真横から写した瞬間写真を見てみると，あたかも水栽培のヒヤシンスやクロッカスの球根が下向きに小さな根を沢山出すように，加熱面上の大きな蒸気のかたまりの下には沢山の微小な蒸気噴流が付いていて，それらが加熱面の上に垂直に立っているという状況に気付くのです．もちろん，このように沸騰の外側から写した写真だけでは，加熱面の周辺の様子しか見えず，蒸気のかたまりに邪魔されて加熱面内部の方の状況はよく分りません．しかし，２，３の巧妙な間接的観測の助けを借りて，加熱面内部の方も同様な状況にあることが明らかにされています．その説明はややこしくなるので，ここには省略しますが，いずれにせよこの状況を多少モデル化して表現してみるならば，加熱面全面を薄い液体の層が覆っており，その液層内に沢山の微小な蒸気噴流が加熱面に垂直に立って，液層の上に滞留している蒸気のかたまりに下からさかんに蒸気を吹き込んでいるという状況になります．

そして，これら加熱面上に立つ微小な蒸気噴流は，弱い核沸騰での発泡点と同じく，加熱面上に分布する微細な凹みの所に作られるものです．ただ現在は，加熱面温度が前より高く，従って随分小さな凹みに至るまで活性化しているので，その上に立つ蒸気噴流は加熱面上に非常に密に分布することとなり，たがいに隣同志押し合うために非常に小さな直径のものになっています．また，弱い核沸騰では各発泡点で間欠的な気泡発生があったのに対して，ここでは前記のように定常的な流れの蒸気噴流が形成されています．この場合，加熱面から伝わる熱は，まず液層内の液体部分を熱伝導で噴流の気液界面まで伝わって，そこで蒸気を連続的に蒸発させています．またこのような状況であればこそ，加熱面から出る熱は全部，加熱面近くで蒸気発生に使われ，また加熱の強さに比例した一定の速度で蒸気の発生が続くのです．

もちろん，蒸気のかたまりと加熱面の間にはさまれて存在する前記の薄い液層は，この蒸発のために時々刻々液量が減って行くわけです．従って，この状況下に加熱面上に何時までも沸騰が続くためには，まわりの液体から加熱面上の液層に，何らかの方法で液体が補給され，蒸気発生が途切れないようになっていなければなりません．そしてプール沸騰の場合には，十分に成長した蒸気のかたまりが液層から離れて浮上する時，そのあとに流れ込む液体によって液層への液体補給が生じると考えられます．つまりプール沸騰では，このような間欠的な液体補給が定常的な沸騰を支えているわけですが，なおそれに加えて，現在のように比較的小さい寸法の加熱面（直径 10 ないし 20 ミリメートル位）の場合は，加熱面の周辺から，まわりの液体が加熱面上の薄い液層へ連続的にしみこむ現象も与っている筈です．

それにしても，このように蒸気のかたまりと加熱面の間にはさまれ，その中に加熱面に垂直な多数の微小な蒸気噴流を持つ薄い液層，このような状況が，それでは一体どうして作り出されるのでしょうか．その物理的原因の説明は，少し準備がいるので４章にゆずることにしますが，この加熱面上の液層は，強い核沸騰の蒸気発生や伝熱特性を支配し，しかも核沸騰の限界問題（５章）にも重要な役割を持つ大切なものですから，今後これを「核沸騰液層」と呼ぶことにいたしましょう．

自律的な熱伝達

例えば高温の物体を冷たい風の中にさらす時，冷却されて行く物体の表面から出る熱は周囲の空気

に伝わり，そして風に持ち去られます．このように一般に物体の表面が，それとは温度の違う流体の流れに接している時，物体表面と流体の間に起こる熱の交換のことを特に熱伝達（ねつでんたつ）と言います．この種の伝熱状態に初めて注目したのは，イギリスのかの有名なニュートン（1643－1727）ですが，今では自動車のラジエーター，ガス湯沸し器，エアコン，その他，私たちの身近な装置の中でも常に利用されている伝熱状態です．そしてこの「熱伝達」の性能の良否は，物体表面と流体間の単位温度差あたり，物体表面の単位面積を通して単位時間に，どれだけの熱量が伝わるかで決めることが出来ますが，それは流体の熱伝導率の大小など流体固有の性質だけでなく，物体表面近くの流体の流れの強さや運動の状態によっても大きく変ります．例えば冬，同じ温度の風にさらされていても，風が強ければ強いほど私たちは寒く感じることからもそれは分るでしょう．

さて「強い核沸騰」の場合は，いま見て来たように，加熱面からの熱は，加熱面上で蒸気を作り出すのに全部消費されてしまいます．そして，その伝熱状況は，加熱面からの強い熱を受けながら，加熱面のごく近傍に沸騰によって自然に作り出される流体の挙動，その自律的と言っていいような状態に支配されるものと言って過言ではありません．実際，この強い核沸騰の「熱伝達」は，加熱面の形，向き（水平，垂直など），あるいは液体の深さなど，いろいろ条件が変ってもその影響をほとんど受けない自律的な熱伝達になることが知られています．特に印象的な例を挙げるならば，液体の深さがその自由液面からわずか２，３ミリメートル程度のごく浅い位置に円形加熱面（直径 10 ミリメートル程度）を水平，上向きに置いて沸騰させても，熱伝達の強さは，液体がずっと深い普通のプール沸騰時とあまり変らないのです．なおこの非常に低い液位の時，加熱面上の沸騰によって出現する蒸気のかたまりは，しゃぼん玉のように薄い液膜に包まれた，美しくきれいなドーム状のものになります．そしてこのドーム状の蒸気のかたまりが膨張すると破れ，また直ぐに薄い液膜に包まれた次の蒸気のかたまりが成長を始めるといった状態が見られます．

ところで現在はプール沸騰を考えているわけですが，強い核沸騰の熱伝達は前述のように自律性が強いため，仮に容器内の流体を人工的にかなり強くかきまわしてみても，熱伝達にあまりその影響が現れないことを付け加えておきましょう．前に「強い核沸騰」は「発達した核沸騰」とも呼ばれることを記しましたが，そのように呼ばれる一つの根拠はこんなところにもあるのです．

サブクール液内での強い核沸騰

前に２章では，沸点より低温のサブクール液の中で起こる「弱い核沸騰」の話をしましたが，「強い核沸騰」の場合は一体どうなるのでしょうか．そこで，いままでと同様，直径 10 ないし 20 ミリメートル位の円形加熱面をとり，これをサブクール液中において，強い核沸騰をさせる時の状況について説明しておきましょう．

さて，飽和液内の強い核沸騰では，前に述べたように蒸気のかたまりが加熱面から離れると，ほとんど間髪を入れず次の蒸気のかたまりの成長が加熱面上に始まるものでした．しかしサブクール沸騰になると，加熱面から蒸気のかたまりが離れた後，しばらく間をおいてから，次の蒸気のかたまりの成長が始まるようになります．なぜなら，蒸気のかたまりが離脱して裸になった核沸騰液層の上に，周囲から冷たいサブクール液が入れ替わりにやって来ますから，液層から出る蒸気は凝縮され，また時には液層自体も冷却されるわけです．従ってその後，加熱面からの加熱によって，加熱面近くの液体の温度が少なくとも飽和温度まで回復してから，次の蒸気のかたまりの成長が始まるわけです．なお現在，蒸気のかたまりはサブクール液を押し退けながら拡大膨張して行くわけですから，蒸気の一部はどうしても凝縮を受け，それだけ蒸気のかたまりの体積の増加温度が減ることになります．

そして他の条件は変えずに，ただサブクール度だけをさらに上げて行くと，後続の蒸気のかたまりの成長開始までの待ち時間はさらに長くなり，またその成長速度も遅くなるでしょう．そしてサブクール度が非常に大きくなると，今まで蒸気のかたまりと呼んで来たものは姿を消して，加熱面上の薄い蒸気膜状の形に変っていくと同時に，さらにサブクール度が進めば，遂には加熱面上の蒸気噴流からの蒸気がもはや合体出来ず個々に凝縮するような状態になっていくことなどが想像されます．

自由浮上中の気泡や気体のかたまり

これまでの観察から，２章の「弱い核沸騰」では比較的小さな気泡が現れ，また本章の「強い核沸騰」では大きな蒸気のかたまりの現れることを知りました．そこでこれらの事に関連して，沸騰自体とは少し話しが離れますが，静止液体の中をただ一個の気泡（あるいは気体のかたまり）が浮上する時の状態について，参考までに触れておきましょう．そして結論から先に言えば，それは気泡の大きさによって次のような４つの特性領域に分かれるのです（ただし以下の出て来る気泡の寸法は静止した水中を空気が浮上する時のものと思って下さい）．

まず第１は，サイダーとかビールを入れたコップを静かに置いておく時に見られるような，非常に微細な気泡の浮上に関係する領域で，気泡は球形のまま液中を真っ直ぐに上昇します．この時ちょっと不思議なことですが，浮上中の気泡はあたかも固体の球であるかのようにふるまいます．つまり浮上する気泡は，それが固体球である時と同じ大きさの粘性抵抗を液体から受け，それが気泡の浮力と釣り合って浮上速度が定まるのであって，気泡が大きいほど浮上速度が速くなります．

第２は，気泡がもう少し大きくなった領域で，その浮上特性は前の第一領域に似ていますが，ただ気泡が固体球のようにふるまうのではなく，ここでは気泡内部に生じる気体の流れが少し影響を持つようになるため，第一領域の水準より多少大きめの浮上速度を持つようになります．

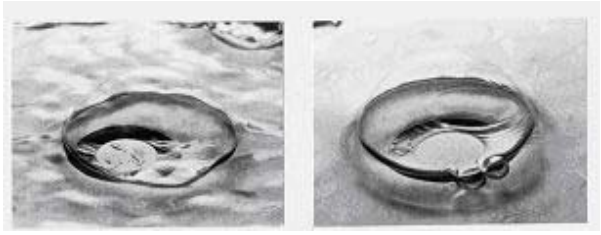
しかし第３の領域に入ると，これまでとは状況がまるで違うものになります．この領域は，気泡の大きさが直径２，３ミリメートルから，その２，３倍程度の大きさまでにわたる領域で，偏平な回転楕円体状の気泡が，らせん形ないしジグザグ形のやや複雑な軌跡を描きながら（ある意味で一種の波のような性質を示しながら）液中を上昇して行きます．しかも，この領域では気泡の大きさが増すと浮上速度がかえっておそくなります．

そして最後の第４の領域は，私たちが口にくわえたストローコップの中の水に空気を吹き込む時に出来る程度，ないしそれ以上の大きさの気泡，従って，気泡というより気体のかたまりと言うべき領域ですが，その気体のかたまりは不規則なきのこ状ないし球冠状の形を取って，液中をほぼまっすぐ上昇します．そしてこの領域では，気体のかたまりの大きさの増加と共に浮上速度が再び増して行きます．

さて，いま上述の４領域を順次つなげてみると，気泡の大きさが増すに従い気泡の浮上速度は，第１，第２領域で増加して極大点に至った後，第３領域では減少して極小点に至り，第４領域で再び増加して行くことになります．また，第１，第２領域では気泡の浮上速度に液体の粘性が強い影響を持つのに対し，第３，第４領域ではほとんど粘性の影響がありません．そして前にも述べましたように，例えば第３領域における気泡の上昇運動は，気液界面の一種の波のような運動によって生じていると言った見方をすると物理的に理解し易いのではないかと思います．

（次号に続く）

［実験の写真］**低水位核沸騰**
（元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供）



Heat flux=1.78X10^5 W/m^2　　3.79X10^5 W/m^2

Micro and Nanoscale Phenomenon in Bioheat Transfer

John C. BISCHOF
(Univ. of Minnesota, Depts. of Mech. Eng., Biomedical Eng. and Urologic Surgery Minneapolis, MN 55455 USA)
e-mail: bischof@umn.edu

1 Introduction

Two important applications of bioheat transfer in medicine are thermal therapies and cryopreservation, the latter more generally termed biopreservation. In thermal therapies, various energy source (hyperthermic) or sink (cryothermic) technologies are being used to locally destroy tissue in the body. Two main targets of thermal therapies are cancer and cardiovascular disease. The American Cancer Society statistics list the projected incidence of various organ cancers in the U.S. in 2005 as over 200,000 for each of both prostate and breast, over 20,000 male kidney cancers, and close to 20,000 primary liver cancers and a much higher incidence of colorectal cancer (100,000) which often metastasizes to the liver [1]. In addition, the American Heart Association lists the annual incidence of cardiovascular disease in the U.S. population as: 13,000,000 with coronary heart disease and over 2,000,000 with atrial fibrillation [3]. Clearly, finding adequate therapies for these diseases, and non-terminal diseases such as benign prostatic hyperplasia (BPH) or benign breast cancers is important to the medical field. It is important to note that many different potential therapies exist for these diseases including surgical resection (or intervention), radiation, chemotherapy and, to a growing extent for selected patients, thermal therapies.

The growing importance of thermal therapies can be seen in recent reviews published within many of the surgical subspecialities including cardiac [9], urologic [11], breast [12] and hepatic surgery [13]. Thermal therapies are usually accomplished by the use of minimally (or non) invasive probes which either act as a hyperthermic energy source (microwave, radiofrequency, high intensity focused ultrasound and laser) or cryothermic energy sink (Argon Joule Thomsen and cryogen circulation) probe technologies [14] [4]. In urology alone there are now over a dozen companies which produce such probes. These probes are used predominantly for treatment of prostate and kidney disease including cancer and BPH. Interestingly, the technology for the probes is typically where the emphasis is placed, while it is equally important to understand the probe tissue interactions and the ensuing injury as discussed in this review. In particular, molecular (nanoscale), cellular (microscale) and tissue level (nano, micro and macroscopic) events are correlated to the therapeutic outcome. Reviews which begin to address the quantification of temperature, injury and the mechanisms which connect them are increasingly available [14] [4] [15] [16].

While this review will not dwell specifically with biopreservation, there can be overlapping micro and nanoscale events particularly in the cryothermic regime with thermal therapies, which will be referred to and thus some mention is warranted here. In particular, molecular (lipid and protein - nanoscale) and cellular (dehydration and intracellular ice formation - microscale) events during biopreservation are typically important in defining outcome. The various forms of biopreservation include: hypothermic storage (above 0 °C), cryopreservation (frozen storage usually below –80 °C), vitrification or glass formation usually in the same temperature regime as cryopreservation, or freeze drying or drying without freezing. One important issue is that a cryo or bioprotective agent is often added to the system prior to cooling or drying with the intent to preserve rather than destroy the cell or tissue system. There are many important bioheat and biotransport challenges with the introduction of the bioprotective agent. In addition, challenges exist in controlling the alteration of the temperature and/or moisture content to achieve the preserved state followed by thaw (or rehydration) and use. Many reviews on this topic are available, some from an engineering perspective are listed here: [17] [18] [19].

2 Importance of Biophysics

Initially, researchers involved in the field of bioheat transfer were interested only in the measurement, control and prediction of temperature as a way to control biomedical application outcomes. This has been changing over the last several decades as the importance of biophysics and biology are increasingly included in bioheat transfer assessments. Before discussing these recent biophysical developments, a brief mention of the importance of thermal properties and heat transfer measurement and modeling in this field is warranted. Tabulation of existing thermal property data in biomaterials are reported in [20] [21] [22] although it should be noted that low temperature [23] and cryogenic biomaterial property measurement is an evolving area of research [24]. The heat transfer processes in biological systems, particularly blood perfused tissues has occupied a tremendous amount of effort since the Pennes bioheat

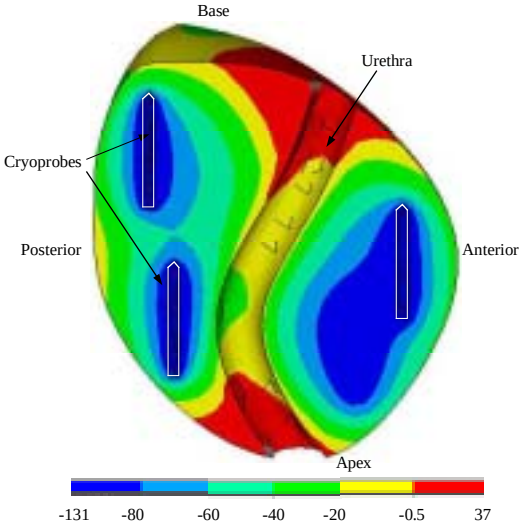


Figure 1. Finite Element model of a multi-probe cryosurgery within a patient specific prostate model. Figure reprinted from [4].

equation was first introduced [25]. Reviews of heat transfer in blood perfused tissues can be found in [26] and [27], and some listings of blood perfusion values of certain tissues can also be found [22] although it should be emphasized that perfusion can vary locally in tissue and is temperature dependent as shown in [8] and reviewed in [4]. During thermal therapies, there have been numerous attempts to match up modeling with experimental measurements in both cryosurgery [28] [29] [30] as well as hyperthermia [8] which are generally reviewed in [31] and [4]. The ultimate goal is to obtain and model patient specific thermal information during a given intervention as shown for cryosurgery in Figure 1.

Unfortunately, it has become clear that although understanding temperature is critical, it alone is often insufficient to explain many injury outcomes (i.e. preservation or destruction after a thermal insult). It thus has become necessary for engineers to supplement traditional principles of heat and mass transfer with the physics of the process occurring in the biological system by the construction of biophysical models. As the importance of biophysics becomes clearer, the necessity to measure biophysical properties such as cellular dehydration [32], intracellular ice formation [33], and protein denaturation and hyperthermic cell killing reviewed in [22] are increasingly important in understanding bioheat transfer process outcomes. Some of these biophysical properties are tabulated from the literature in [4] and begin to point the way to a better understanding of both temperature and biophysics within biological systems especially during thermal therapies and biopreservation procedures.

This review will focus predominantly on biophysical and biological aspects which occur at the nano and microscale (i.e. molecular, cellular or tissue) that are important to bioheat transfer process outcomes particularly in thermal therapies. The engineering goal is the measurement and prediction of these events to understand the relationship between temperature change and injury and the mechanisms which connect them.

3 Nanoscale Biophysics

At the molecular level, both lipid and protein events occur during cryothermic and hyperthermic temperature excursions which are correlated with injury. General reviews of lipid phase change with temperature and hydration [34] [35] and heat and cold protein denaturation [36] [37] are available. These changes can be measured and in some cases quantified in individual lipid and protein systems with a variety of techniques including differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transform infra-red spectroscopy (FTIR), NMR, x-ray, electron microscopy techniques (especially freeze fracture) and circular dichroism [35] [38]. However, only a few techniques, such as DSC and FTIR, have been used for in situ measurement of protein [38] and lipid changes [40] within whole cells and tissues.

3.1 Cryothermic

It is well known that thermotropic events (phase change) in lipids at cryogenic temperatures can change the lipid organization and fluidity in lipid systems [34] and cells [40]. Phase diagrams for individual lipids can be constructed based on temperature and hydration (mole H_20/mole lipid) [35] [41]. The thermodynamic driving forces (i.e. hydration and temperature) which drive bulk lipid membranes (composed of many types of lipids) to undergo phase separation and phase changes from liquid crystal lamellar (hydrated) to gel (less hydrated) and even inverted micellar (Hex II) are being actively studied [35] [42] [43]. It should be noted that both phase separations and the Hex II phase change are thought to be highly correlated with membrane lesions which ultimately destroy cellular viability upon thawing as shown in various plant systems [44] [45]. It is likely that lipid phase change and separation are also important in defining injury to mammalian cell membranes; however, it has not been as clearly demonstrated as in plant systems particularly pertaining to cryotherapy. Interestingly, one important Hex II forming lipid (Phosphatidylethanolamine, a short chain length lipid which allows the inverted micelle to form in the plasma membrane) is present in high quantities in liver cell membranes, a notoriously difficult cell (and tissue) type to cryopreserve [46].

Injurious events to proteins including denaturation, aggregation and “salting out” can also occur during cryothermic interventions. Proteins in solution (i.e. pharmaceutical products) can experience dramatic pH and concentration changes during freeze/drying which induce protein aggregation [47] which is of considerable

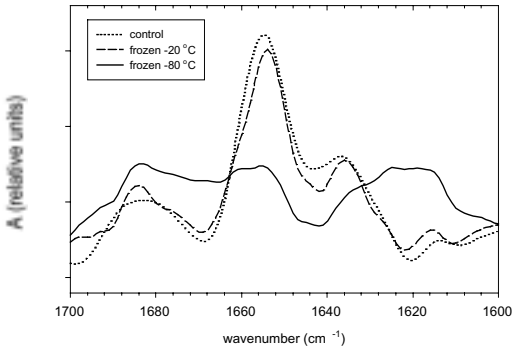


Figure 2. FTIR spectra of prostate cancer (AT-1) cell pellets after freeze-thaw. Figure reprinted from [6].

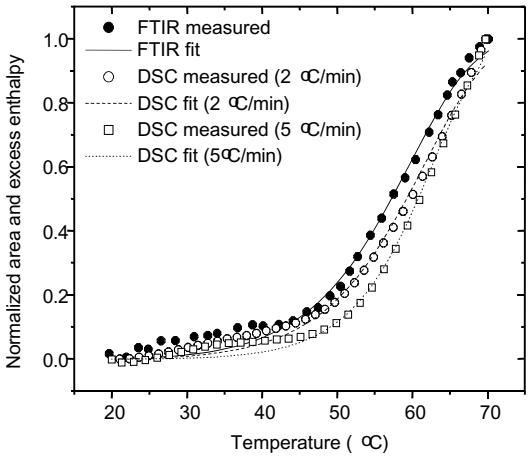


Figure 3. FTIR and DSC kinetics of protein denaturation in situ in AT-1 cell pellets are equivalent. Figure reprinted from [8].

interest to the pharmaceutical industry as aggregation reduces yield. In whole cells, we have shown in collaboration with John Crowe's group (UC Davis), that lipid changes are rather mild (release of free fatty acids and consequent increased fluidity), but protein denaturation or aggregation occurs after cooling slowly to –80 ºC vs. –20 ºC in pellets of tumor cells [6]. Specifically, the alpha helix band near 1650 (1/cm) in Figure 2 is greatly reduced after freezing to –80 ºC but remains roughly intact in the –20 ºC freeze case. Similarly, the beta sheet band at 1620 (1/cm), which correlates with protein aggregation, is greatly enhanced after freezing to –80 ºC suggesting a significant denaturation event. Interestingly, cellular viability also decreases with the end-temperature [48]. The lower temperature in turn increases the osmotic pressure in the unfrozen fraction which may affect the macromolecular stability due to hydration water in these systems [43]. Thus the question of how the lipid and protein changes participate in the destruction of the cells and whether this can be measured and predicted in a reproducible manner is an important question for future research in cryotherapy.

3.2 Hyperthermic

In hyperthermic injury, lipid and protein events are also important in defining cellular viability. There has been a wealth of work over the last several decades in the field of hyperthermia for treatment of tumors, and the debate about whether lipids or proteins are most important in defining thermal injury has been ongoing [49]. In the case of hyperthermic treatments, the activation energies for individual protein phase changes which are usually in the 100 – 400 kJ/mole range have been well documented in the literature and can be predicted on temperature and time basis using an Arrhenius or Reaction Rate Theory approach as reviewed in [4]. Activation energies for processes which are augmented by lipid phase change (i.e. membrane dye leakage) are usually in the 10's of kcal/mole as also reviewed in [4].

Evaluation of multiple lipid and protein groups together in situ is much more difficult although it has been attempted [50]. In the case of proteins, Lepock has used DSC to measure multiple denaturation peaks indicative of protein groups within various cell types in situ including fibroblasts [51], hepatocytes [52] and other cell types [39]. More recently, both FTIR and DSC have been used on AT-1 prostate tumor cells to evaluate protein denaturation [38]. This work has shown that both direct enthalpic (DSC) and indirect protein structural changes (FTIR) normalized peak area changes of protein denaturation correlate and can be used to identify an activation energy for overall protein denaturation within cells in situ (see Figure 3). Future work in this area will continue to focus on correlation between individual protein group peaks (i.e. cytoskeletal vs. membrane vs. cytosolic etc.) and lipid events which can be monitored and controlled, perhaps with additives, to obtain specific injury outcomes.

4 Microscale Biophysics

At the cellular level there are numerous well studied events which are correlated with cryothermic and hyperthermic injury. Cryothermic events include cellular dehydration and intracellular ice formation while hyperthermic events include cell membrane hyperpermeability and blebbing. Biophysical models and parameters which correlate to these events have recently been reviewed and tabulated for a variety of systems [4].

4.1 Cryothermic

In the cryothermic regime, cell injury has been correlated with biophysical changes including cellular dehydration and intracellular ice formation. These events are inversely dependent on cooling rate and have been studied extensively especially since the inception of the thermal microprocessor controlled cryomicroscope [53].

Dehydration events, which occur at lower cooling rates, induce elevated concentrations both within and outside of cells which are believed to participate in the creation of the lipid and protein events described in the nanoscale section above and generally termed “solution effects” injury. In addition, the presence of large stable intracellular ice, which occurs at fast rates of cooling, is strongly correlated with cell destruction probably by disruption of membranes and organelles. This dependence on cooling rate (high leading to IIF and slow to solution effects injury) has led to the Two-Factor hypothesis of Mazur, which is still very much in use today for explanation of freezing injury in a variety of cell types [54].

After induction of freezing within the system, ice will reject solute, creating unfrozen fractions with concentrations that follow the liquidus of the phase diagram (Osm ~ (T_{phw} – T)/1.86), where Osm is the osmolality of the unfrozen fraction, T_{phw} is the phase change temperature of water and T is the temperature of the system. This increased concentration leads to an osmotic pressure difference across cell membranes exposed to the unfrozen fraction thereby setting up a driving force for exosmosis of water from the cell, or dehydration. This has been modeled originally by Mazur [55] and is presented here in a simplified form:

$$\frac{dV}{dt} = L_p A(\pi_i - \pi_o) \qquad (1)$$

where V is the cell volume, t is time, L_p is the hydraulic permeability (μm/min-atm or m^3/N•s), A the surface area of the cell, and π is osmotic pressure (atm or N/m^2) with subscripts i and o indicating intracellular and extracellular respectively. The extracellular osmotic pressure can be linked to the liquidus as already noted. One can also introduce a constant cooling rate, B (K/s or ºC/s) into the equation so that the volume changes are calculated with temperature dV/dT = 1/B•dV/dt, which is often a more convenient expression to compare with experimental data. The permeability in Eqn. 1 was later modified to include temperature dependence by Levin [32] using an Arrhenius expression. The permeability of a variety of cell types is reviewed and documented in [4].

If the cooling rate is sufficiently rapid, the kinetics of water transport will be slower in comparison to the supercooling of the intracellular cytoplasm and intracellular ice formation (IIF) can occur. The incidence of IIF correlates strongly with cell death in many cell types (i.e. 50% IIF in many cell populations yields 50% survival) [56]. The driving force for nucleation of ice is based on cytoplasmic supercooling, $\Delta T = T_{phs} - T$, where T_{phs} is the equilibrium phase change temperature of the cytoplasm. As cells dehydrate, the T_{phs} will decrease thereby also reducing supercooling and the driving force for nucleation. Thus, it is necessary to include a model of water transport in a model of IIF as originally developed using heterogeneous nucleation theory [33]. If cooling is sufficiently rapid, water becomes trapped within the cell and supercooling increases until ice nucleates and grows yielding IIF. This event has also been studied extensively in many cell types and related to heterogeneous nucleation theory by Toner originally in 1990 and reviewed in 1993 [33] [56]. The model is given in simplified form as:

$$PIF = 1 - \exp\left[-\frac{1}{B} \int_{T_{seed}}^{T} A\Omega \exp\left[-\frac{\kappa}{\Delta T^2 T^3} \right] dT \right] \qquad (2)$$

In this expression, PIF is the probability for intracellular ice formation in a given cell population, B is the cooling rate (K/s), T_{seed} is the temperature of ice seeding in the population, ΔT is supercooling as already noted, and T is absolute temperature (K). The Ω and κ are heterogeneous nucleation parameters, where Ω is called the kinetic and κ the thermodynamic parameter of the nucleation model respectively. Ω is related to the ability of water molecules to jump the interface and join the ice phase, while κ is related to the Gibbs Free Energy for formation of a critical nucleus of ice. These terms can be further broken down into individual biophysical parameters much like those of water transport above, and are similarly documented recently for a number of cell types [4]. One interesting additional effect in intracellular ice formation occurs at high salt concentrations and seems to be associated with a eutectic formation. There is some evidence suggesting that given sufficient supercooling and the presence of the eutectic phase, eutectic crystals can propagate from extracellular to intracellular compartments and that this also correlates with injury[57].

Once these changes have been measured and biophysical parameters obtained, injury can be predicted for any cooling condition, although it is important to mention that while large stable IIF appears to be lethal, dehydration injury can be more subtle and likely involves a number of different molecular events such as protein denaturation and lipid changes that contribute to injury. Attempts to predict this “solution effects” injury due to dehydration is less well developed and remains an important area of research in bioheat transfer.

4.2 Hyperthermic

An important difference between hyperthermia and thermal therapy is the temperature range of interest which is usually between 42 - 45 °C for periods up to hours vs. above 50 °C for minutes in many thermal therapeutic interventions. In the case of hyperthermic treatments (lower temperatures, longer times), there are biological effects such as the development of thermotolerance correlated with Heat Shock Protein synthesis which reduce and in some cases can stop the kinetics of thermal Injury. Clonogenic survival data for tumor cells suggest two different thermal injury kinetic regimes. At lower temperatures (below 43°C) thermotolerance can develop and hence injury is

attenuated and accumulates at a much smaller rate [49]. At temperatures of 43 °C and higher, the uniform kinetics have led to simplified models of injury accumulation such as the "Thermal Dose" equations of Sapareto and Dewey [58]. Ultimately, the thermotolerance induction at lower temperatures has been a major challenge to the treatment of tumors by hyperthermia and is likely to have contributed to diminished use in the clinic. Recent work focuses on the kinetics of the Heat Shock protein synthesis, an important variable in the induction of thermotolerance [59].

Thermal therapies on the other hand (higher temperatures shorter times), induce an insult with the intent to focus on the uniform kinetics of injury above 43 °C which is similar to "burn injury" studied in skin since the 1940s [60] and reviewed in [31] [22]. The Arrhenius model can be expressed as shown in Eqn. 3:

$$\frac{d\Omega}{dt} = A\exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \tag{3}$$

where Ω is the non-dimensional damage accumulation in a given time, τ is the time to accumulate injury Ω (s), t is time (s), T = temperature in Kelvin. A = frequency factor parameter (1/s) ΔE is the activation energy parameter (cal/mole), and R is the Universal gas constant (cal/mole K). By realizing that Ω = 1 when t = τ, one can differentiate both sides, linearize (dΩ/dt = 1/τ), and take the natural logarithm of both sides to obtain:

$$\ln\tau = \frac{\Delta E}{RT} - \ln A \tag{4}$$

This expression allows an easy comparison of the model to experimental data graphed as ln τ vs. 1/T where the slope will be ΔE/R and the y intercept ln A. This first order kinetic expression has been used to describe hyperthermic injury to lipids, proteins, cells, and tissues as recently reviewed [4]. The assays used to determine injury range from macromolecular phase change (see section #3.2 nanoscale hyperthermic), to cellular hyperpermeability, membrane blebbing (See Figure 4), dye uptake, clonogenic survival, or even histological assessments.

An example of the relative kinetics of these injury measurements (i.e., cell hyperpermeability to the dye Calcein AM, uptake of the dye Propidium Iodide and clonogenic survival) is shown in Figure 5 [7]. Here it is important to note that the kinetics measured relate to the assay and although each is correct, they all have slightly different implications to survival. The polyanionic Calcein molecules leak out of the cell first and have the smallest activation energy (81 kJ/mole), propidium iodide uptake takes longer and shows a higher slope (and activation energy 244 kJ/mole) and finally clonogenics, which requires days to measure, has the highest slope at 526 kJ/mole. The small activation energy of Calcein leakage is consistent with transport across a compromised cell membrane. Since the lipid portion of the membrane is held together only by hydration forces, it melts easily just a few degrees above physiological temperature leading many to believe that the lipid bilayer is the most vulnerable component of the cell to heat damage. On the other hand, protein activation energies (typically ranging above 100 kJ/mole) are much higher

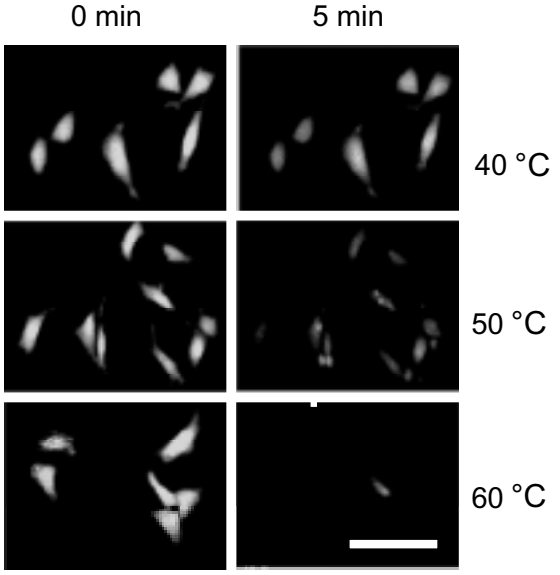


Figure 4. Calcein dye leakage from AT-1 prostate cancer cells. Increased leakage (hyperpermeability) and membrane blebbing at higher temperature and time is shown. Figure reprinted from [7].

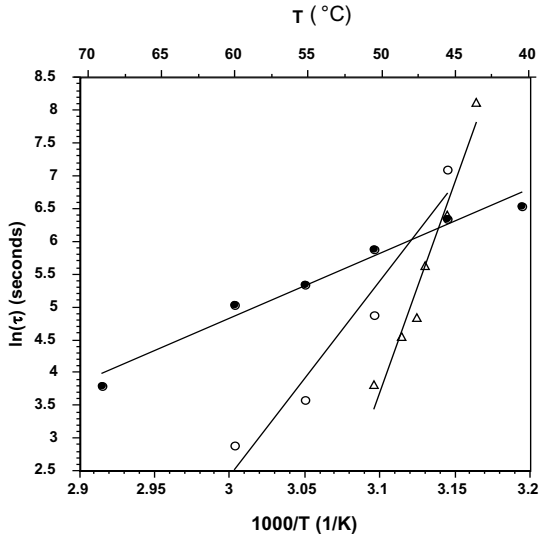


Figure 5. Arrhenius plot for Calcein leakage (•), Propidium Iodide Uptake (o), and Clonogenics (Δ) in The Dunning AT-1 prostate cancer system. Figure reprinted from [7].

and correlate partially with propidium iodide uptake, but almost certainly with cell viability and reproduction by clonogenics where the activation energy is the highest. This has led many others to believe that protein denaturation is the most important event in cell killing [49]. It is still not entirely clear which event (and thus measurement) is rate limiting in the injury process and hence injury is still suggested to be multifactorial in cells and tissues and is an active area of research in bioheat transfer.

Interestingly, an exhaustive look at the literature suggests that the two biophysical parameters which define injury during hyperthermia (E and A) are not independent. In fact, a simple expression has been found which relates them for all systems (macromolecular, cell and tissue): $\ln A = -9.2639 + 1.591\Delta E$ [4]. It has been previously suggested by Eyring for proteins that this relationship between the parameters is actually a reflection of the relatively stable ΔG change during denaturation. This becomes more evident when one considers that $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ and ΔH is related to activation energy E, and $T\Delta S$ to frequency factor A. Hence while the activation enthalpy for the process may drop, the relative entropy change also decreases thereby maintaining ΔG relatively unchanged. This insensitivity of ΔG to temperature has also been suggested for lipid system phase change [35].

5 Tissue Biophysics (*in vitro*)

The biophysical changes that occur in cellular systems are also present in tissues. These have been investigated in many in vitro systems. However, the existence of cell-cell, cell-extracellular matrix (ECM) (cell-interstitial), and cell-vascular space interactions can lead to important differences from isolated cell behavior.

5.1 Cryothermic

In explanted or model (artificial) tissues, both molecular and cellular events continue to occur as already described, but with additional complexities due to cell-cell contact and cell-extracellular matrix contact. In addition, when one also considers the freezing of tissue in situ (see section #6.1), there are additional blood flow and inflammatory changes after the freezing event which are important to the outcome.

While molecular changes in whole tissues have been reported routinely in plant systems, especially lipid phase changes which create membrane lesions [44] [45], the same level of scrutiny at the molecular level has not been applied to mammalian systems. There is, however, indirect data suggesting that molecular changes are important in native (and artificial) tissues after freezing. In particular, freezing has been shown to dramatically affect the biomechanical properties (modulus) in both native and artificial tissues, and it dramatically affects ultimate tensile strength (UTS), strength to failure (STF) in artificial tissues [61]. The presence of a cryoprotective

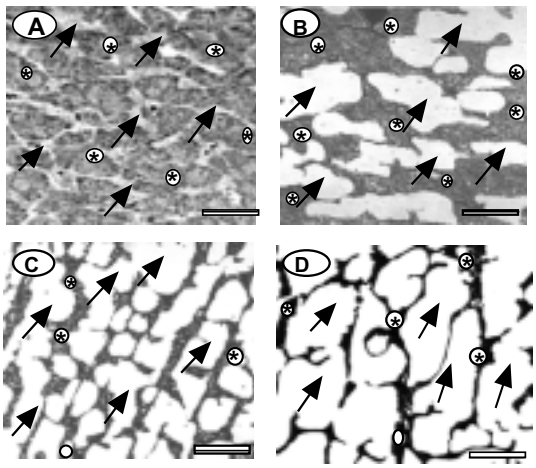


Figure 6. Light micrographs of rat liver tissue cooled at 5 C/min to various subzero temperatures (A – 0, B –4, C –8 and D –20 C) and immediately slam frozen. Arrows show vascular extracelluar space and stars the cellular space which shrinks. Figure reprinted from [5].

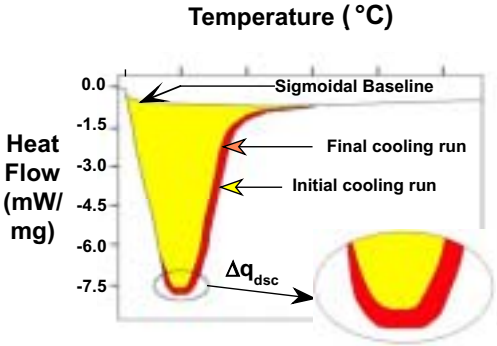


Figure 7. Thermograms from an initial and final cooling run with liver tissue showing a differential heat release Δq_{dsc} which correlates with the total intracellular water in the sample. Figure reprinted from [10].

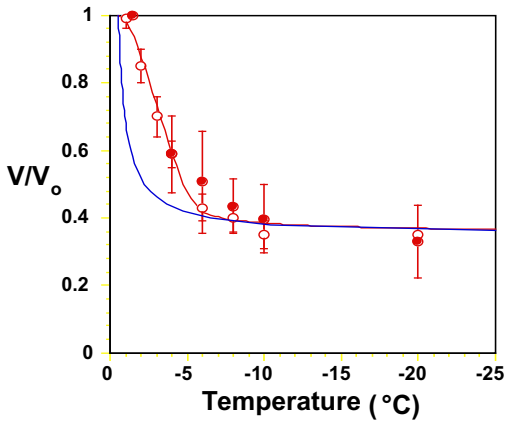


Figure 8. Comparison of water transport at 5 C/min in rat liver from freeze substitution technique (closed circles - Fig. 4) and DSC technique (open circles - Fig. 5). Figure reprinted from [10].

solution greatly reduces these effects in both artificial [62] and native tissues [24]. We hypothesize that freezing can move bulk water in the absence of either serum or cryoprotective agent (CPA) thereby yielding bulk biomechanical property changes. However, there may be further changes due to freezing induced injury/changes to the ECM which require further study.

The study of microscale biophysical changes in explanted or model tissues has been a topic of some effort in the last decades. In artificial tissues and pancreatic islets these measurements can be made directly by bright field microscopy [63] [64]. In optically thick tissue slices, other techniques are necessary. Our lab has developed two new methods for this approach including direct microscopic freeze substitution (FS) technique as well as an indirect DSC technique as reviewed in [65]. These are shown in Figures 6 - 8.

While dehydration is still governed in principle by Eqn. 1, there is a new geometric relationship between cells and extracellular space in tissues vs isolated cells which shows up predominantly in a reduced surface area term. This can alter the biophysical changes of cellular dehydration and intracellular ice formation as reviewed in [65]. In simple terms, the cell is embedded in interstitial space, while blood vessels are also present throughout the tissue. By at first neglecting the interstitial space, this leads to a simple two-compartment system based on cell and extracellular/vascular space which can be modeled with a Krogh cylinder approach first suggested by Rubinsky for tissue freezing applications [66]. This can also be approached in a more realistic but complex way by using network thermodynamics. Using this approach Diller has modeled deydration during freezing in a tissue [67], as well as mass transport in kidney and pancreatic islets prior to freezing [68] [69]. Cell-cell water transport communication has been addressed by coupled transport between cells as first suggested by Levin for packed cell systems [70]. This approach has been modified to model cell-cell water transport in hepatocyte spheroids [71] and Rana sylvatica frog liver [72]. This phenomenon has also been suggested/observed to occur in tumors as there can be differential dehydration in tumor cell nests [73]. In general, the individual cells of a tissue tend to transport water more quickly than the cells within the tissue. A review of the work of our group on both measurement and modeling of water transport in a variety of tissues during freezing is available [65].

Biophysical response within artificial tissues suggests that cells form intracellular ice more readily in tissues due to enhanced water trapping as already mentioned, but also due to cell-ECM as well as cell-cell contact issues. Toner's group showed that IIF in hepatocytes was enhanced after placing them in a collagen sandwich over suspension [63]. Our initial studies with fibroblasts and smooth muscle cells in fibrin vs. collagen show the fastest rates of IIF in fibrin, then collagen, monolayer and finally cells in suspension (unpublished result 2005). In addition, to cell-ECM enhancement, several studies now show that cell – cell propagation of ice in tissues can greatly enhance the kinetics of IIF. Acker and McGann have worked extensively with monolayers to show cell-cell IIF propagation, while Karlsson's group has performed similar, but more controlled experiments in cells grown on micropatterned surfaces [74] [75]. Based on Karlsson's work, a modified model of IIF which accounts for the additional cell-cell propagation pathways in addition to the traditional extracellular to intracellular propagation has been proposed [75] and was recently used in a simulation of intracellular ice formation within a cryosurgical iceball albeit in the absence of cellular dehydration [76]. Other models of both dehydration and intracellular ice formation within whole tissues already exist [77] [29], however they do not incorporate cell-cell ice formation. An important area of research is to measure and model intracellular ice formation by both extracellular and cell-cell mechanisms in tissue.

5.2 Hyperthermic

While "burn injury" studies in vivo in skin have been reported since the 1940's by Henriques and Mortiz [60], kinetic measurements of molecular and cellular changes in vitro especially from tissues and organs that might be thermal therapeutic targets have only rarely been reported [22]. One important exception is information with regard to tissues which are high in collagen (rat tail, joint capsule, myocardium, skin etc.) where injury is inferred to be tied to collagen denaturation which can be measured by a variety of techniques including DSC birefringence loss, loss of transparency, shrinkage and other approaches [78] [79] [4].

There is thus a need to measure the kinetics of injury at the cellular (or molecular level) in tissues that are thermal therapeutic targets. Our group has worked with several assays to allow effective measurement of injury kinetics in both normal and malignant tissues, particularly urologic tissues (prostate and kidney). We have been able to use a combination of dye uptake (propidium iodide or Ethidium homodimer) and histology to assess injury after thermal insult using a novel tissue culture protocol. In short, we take the tissue directly from the donor animal, slice it and heat it asceptically and then culture it for 48 – 72 hours at 20 – 37 °C depending on the tissue in order to see degradative changes. We have published a series of articles which document thermal thresholds of injury in human BPH, rat prostate tissue, kidney tissues, and others as reviewed in [4]. One example of this approach is the new thresholds that have been reported for human BPH and prostate cancer[80] [81]. One manufacturer originally designed their microwave probe to operate at 45 °C for 1 hour and now based in part on this evidence have shifted to higher temperature shorter times (i.e. 60 °C for

minutes) with equal expectance of tissue necrosis.

6 Tissue Biophysics (*in vivo*)

In vivo tissue biophysics include all aspects of biophysics already discussed with the important addition of blood flow and the biological sequelae of inflammation and ensuing wound healing. It is important to understand how blood flow changes with temperature and when and if permanent stasis will occur after a thermal insult thereby delimiting the maximum extent of the thermal lesion. Blood flow, inflammation and wound healing are all interrelated and require monitoring at the wound site over time to best understand the outcome of the thermal therapy.

6.1 Cryothermic

While there are many changes that can be measured at the molecular, cellular or explanted tissue level, it is important clinically to also have endpoints that can be measured within in vivo tissues after a thermal intervention to assess the efficacy of the treatment. One such endpoint is the perfusion defect, or absence of blood flow in a particular region of tissue, which can be measured clinically by MR contrast agent (gadolinium) exclusion or by fluorescence contrast in animal models as shown in Figure 9. We have recently verified that perfusion defect corresponds quantitatively with histological necrosis in both rat AT-1 Dunning prostate cancer, LNCaP Pro 5 human prostate cancer (grown in a dorsal skin fold of a nude mouse), and in the skin of both Copenhagen rats and nude mice [2] [82]. We have also shown that cryothermic injury thresholds in vivo are in general much higher (i.e. easier to reach) than in vitro in both AT-1 and LNCaP cells lines as reviewed in [19]. We interpret this as evidence that vascular injury as assessed by permanent vascular stasis is important in defining the ultimate lesion in vivo. We have been able to augment these in vivo lesions even further using an inflammatory molecule (TNF-alpha) which we hypothesize to be acting at the level of the endothelium [82]. Lastly, we have shown that cryolesions tend to reperfuse after freezing. This means that there is a stasis due to the freezing event, followed by a reperfusion of the iceball after thawing and then an ultimate stasis event some hours thereafter. This is consistent with the literature on frostbite injury as recently reviewed [16] [83].

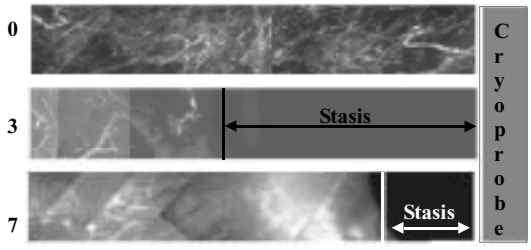


Figure 9. Perfusion defects as imaged by FITC labeled Dextran exclusion from cryolesions in AT-1 Dunning prostate cancer after 3 and 7 days vs. control day 0 (see left hand label). Figure reprinted and redrawn from [2].

Furthermore, the extent and rate at which an injury heals is important clinically and can be measured. We have measured wound healing within porcine kidney tissue after a cryosurgical treatment [84]. This work has shown that wound healing is already quite apparent at 1 week post cryoinjury within the porcine kidney, which is in contrast to hyperthermic lesions [8] and reviewed in [85]. These results are in agreement with the clinical literature. Would healing after thermal injury is an active area of research particularly as new drugs and molecules are being used to accentuate the lesion with unknown would healing effects.

6.2 Hyperthermic

Quantification of injury kinetics as well as the extent of injury are also important to in vivo hyperthermic thermal injury outcomes. Diller's group has worked for many years in showing the effects of hyperperermeability at the level of the microcirculation as a measure of burn injury kinetics in vivo [86]. The extent of the thermal lesion can also be measured by perfusion defect which at 3 days correlates with histological necrosis within prostate cancer and skin after a heat injury in vivo [87]. We have also shown that hyperthermic lesions of a sufficient temperature and time (thermal therapy) in porcine kidney do not reperfuse as cryothermic lesions do [8].

The extent of the hyperthermic injury in vivo is greater than would be expected within the same tissue using our in vitro tissue culture method (and/or cell culture methods) [87]. This can be interpreted to mean that microvascular shut down and stasis is important in defining the ultimate lesion after a heating event in vivo, or more simply it is easier to destroy the microvasculature than it is the cells of the tissue or tumor. Interestingly, we have found that first order kinetics (temperature and time dependence) describes many molecular and cellular thermal injury processes but not blood flow alterations during thermal injury. Blood flow is a complicated biophysical process which requires a non-linear fitting to temperature and time as outlined in [8].

We have also found that the ability of the tissue to heal or regenerate in hyperthermic lesions can be different than in cryothermic lesions. We feel this is in part a reflection of the large amount of thermally fixed tissue (molecularly denatured) in the center of the lesion which is difficult for the body to break down. Further work is necessary in this important area [8] [85].

7 Conclusion

Ultimately, temperature change drives biophysics and results in a biological outcome in the system of interest. Thus, it continues to be important to accurately measure and predict temperature during biomedical applications in any system of interest. Temperature measurements are improving for some applications such as using MR thermometry during thermal therapy in the clinic [88]. Prediction and therefore treatment planning for complicated thermal surgeries such as shown in Figure 1, however, can only be accomplished with accurate information for thermal properties, blood flow and system (or patient) specific geometry which often are not available. Finally, continuing to improve the mechanistic connections between temperature and the biophysics and the ultimate outcome (injury, inflammation and wound healing) remains important and often not well understood in thermal therapy applications. One exciting emerging area within this context is the use of mechanistic and vascular based thermal therapeutic adjuvants which can greatly augment thermal lesions in vivo [82] [89] [90]. In conclusion, the quantification of thermally induced biophysics and biological outcomes are important goals for the future of the field of bioheat transfer.

Acknowledgements

The author was supported by a grant from the Alexander von Humboldt Foundation as well as 2R01CA075284. The author also thanks Dr. Rachana Visaria for a critical reading of the manuscript.

References

[1] 2005 American Cancer Society.
[2] Hoffmann, N.E. and J.C. Bischof. *J Biomech Eng*, p. 310-6 (2001) 123(4).
[3] 2005 American Heart Association.
[4] He, X. and J.C. Bischof. *Crit Rev Biomed Eng*, p. 355-422 (2003) 31(5-6).
[5] Pazhayannur, P.V. and J.C. Bischof. *J Biomech Eng*, p. 269-77 (1997) 119(3).
[6] Bischof, J.C., et al. *Cryobiology*, p. 22-32 (2002) 45(1).
[7] Bhowmick, S., D.J. Swanlund, and J.C. Bischof. *J Biomech Eng*, p. 51-9 (2000) 122(1).
[8] He, X., et al. *Int J Hyperthermia*, p. 567-93 (2004) 20(6).
[9] Garrido, M.J., M. Williams, and M. Argenziano. *J Card Surg*, p. 216-20 (2004) 19(3).
[10] Devireddy, R.V. and J.C. Bischof. *J Biomech Eng*, p. 559-69 (1998) 120(5).
[11] Gillett, M.D., et al. *Mayo Clin Proc*, p. 1547-55 (2004) 79(12).
[12] Kacher, D.F. and F.A. Jolesz. *Radiol Clin North Am*, p. 947-62, vii (2004) 42(5).
[13] Erce, C. and R.W. Parks. *Br J Surg*, p. 272-89 (2003) 90(3).
[14] Diller, K.R. and T.P. Ryan. *Journal of Heat Transfer*, p. 810-829 (1998) 120.
[15] Gage, A.A. and J. Baust. *Cryobiology*, p. 171-86 (1998) 37(3).
[16] Hoffmann, N. and J. Bischof, in *Life in the Frozen State*, E. Benson, B. Fuller, and N. Lane, Editors. 2002, Taylor & Francis: London.
[17] Coger, R. and M. Toner, in *Handbook of Biomedical Engineering*, Bronzoni, Editor. 1995, CRC Press. p. 1567-1577.
[18] Karlsson, J. and M. Toner, in *Principes of Tissue Engineering*, Vacanti and Langer, Editors. 2000, Academic Press: San Diego. p. 293-307.
[19] Han, B. and J.C. Bischof. *Cell Preservation Technology*, p. 91-112 (2004) 2(2).
[20] Bowman, H., E. Cravalho, and M. Wood. *Ann. Rev. of Biophysics and Bioengineering*, p. 43-80 (1975) 4(00).
[21] Chato, J., in *Heat Transfer in Medicine and Biology*, A. Shitzer and R. Eberhardt, Editors. 1985, Plenum: New York. p. 167-192.
[22] Diller, K.R., J.W. Valvano, and J.A. Pearce, in *The CRC Handbook of Thermal Engineering*, F. Kreith, Editor. 1999. p. 4114-4187.
[23] Zhang, A., et al. *Cell Preservation Technology*, p. 157-162 (2004) 2(2).
[24] Grassl, E., V.H. Barocas, and J.C. Bischof. in *ASME IMECE*. 2004.
[25] Pennes, H.H. *J. App. Physiol.*, p. 93-122 (1948) 1.
[26] Charney, in *Advances in Heat Transfer*, Y.I. Cho, Editor. 1992, Academic Press.
[27] Arkin, H., L.X. Xu, and K.R. Holmes. *IEEE Trans Biomed Eng*, p. 97-107 (1994) 41(2).
[28] Hoffmann, N.E. and J.C. Bischof. *J Biomech Eng*, p. 301-9 (2001) 123(4).
[29] Devireddy, R.V., D. Smith, and J. Bischof. *ASME Journal of Heat Transfer*, p. 365 (2002) 124(2).
[30] Bischof, J.C. and B. Han. in *Proceedings of 12th International Heat and Mass Transfer Conference, Grenoble, France*. 2002. Grenoble, France.
[31] Diller, K., in *Advances in Heat Transfer*, Y.I. Cho, Editor. 1992, Academic Press.
[32] Levin, R.L., E.G. Cravalho, and C.E. Huggins. *Cryobiology*, p. 415-29 (1976) 13.
[33] Toner, M., E.G. Cravalho, and M. Karel. *Journal of Applied Physics*, p. 1582-93 (1990) 67(3).
[34] Caffrey, M. *Biochim Biophys Acta*, p. 123-7 (1987) 896(1).
[35] Milhaud, J. *Biochim Biophys Acta*, p. 19-51 (2004) 1663(1-2).
[36] Joly, M. *A physico-chemical approach to the denaturation of proteins.*, London: Academic Press. (1965).
[37] Privalov, P.L. *Critical Reviews in Biochemistry & Molecular Biology*, p. 281-305 (1990) 25(4).
[38] He, X., et al. *Ann Biomed Eng*, p. 1384-98 (2004) 32(10).
[39] Lepock, J.R. *Methods*, p. 117-25 (2005) 35(2).
[40] Crowe, J.H., et al. *Cryobiology*, p. 76-84 (1989) 26(1).
[41] Quinn, P.J. *Subcell Biochem*, p. 25-95 (1989) 14.

[42] Wolfe, J. and G. Bryant. *Cryobiology*, p. 103-29 (1999) 39(2).
[43] Parsegian, V.A., R.P. Rand, and D.C. Rau. *Proc Natl Acad Sci U S A*, p. 3987-92 (2000) 97(8).
[44] Steponkus, P.L. and D.V. Lynch. *Journal of Bioenergetics & Biomembranes*, p. 21-41 (1989) 21(1).
[45] Yamada, T., et al. *Planta*, p. 770-8 (2002) 215(5).
[46] Borel Rinkes, I.H., et al. *Cell Transplantation*, p. 281-92 (1992) 1(4).
[47] Pikal-Cleland, K.A., et al. *Archives of Biochemistry & Biophysics*, p. 398-406 (2000) 384(2).
[48] Smith, D.J., et al. *Cryobiology*, p. 13-28 (1999) 39(1).
[49] Lepock, J.R. *Int J Hyperthermia*, p. 252-66 (2003) 19(3).
[50] Lepock, J.R., et al. *Can J Biochem Cell Biol*, p. 421-7 (1983) 61(6).
[51] Lepock, J.R., et al. *J Cell Physiol*, p. 14-24 (1988) 137(1).
[52] Lepock, J.R., H.E. Frey, and K.P. Ritchie. *J Cell Biol*, p. 1267-76 (1993) 122(6).
[53] Diller, K. and E. Cravalho. *Cryobiology*, p. 191-199 (1970) 7.
[54] Mazur, P. *American Journal of Physiology*, p. C125-C142 (1984) 247.
[55] Mazur, P. *Journal of General Physiology*, p. 347-69 (1963) 47.
[56] Toner, M., in *Advances in Low-Temperature Biology*, P. Steponkus, Editor. 1993, JAI Press Ltd.: London. p. 1-51.
[57] Han, B. and J.C. Bischof. *Cryobiology*, p. 8-21 (2004) 48(1).
[58] Sapareto, S.A. and W.C. Dewey. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, p. 787-800 (1984) 10(6).
[59] Wang, S., K.R. Diller, and S.J. Aggarwal. *J Biomech Eng*, p. 794-7 (2003) 125(6).
[60] Henriques, F.C., Jr. *Archives of Path.*, p. 489-502 (1947) 43.
[61] Devireddy, R.V., et al. *Tissue Eng*, p. 1089-100 (2003) 9(6).
[62] Neidert, M.R., et al. *Tissue Eng*, p. 23-32 (2004) 10(1-2).
[63] Yarmush, M.L., et al. *Annals of the New York Academy of Sciences*, p. 238-52 (1992) 665.
[64] de Freitas, R.C., et al. *Cryobiology*, p. 230-9 (1997) 35(3).
[65] Bischof, J.C. *Annu Rev Biomed Eng*, p. 257-88 (2000) 2.
[66] Rubinsky, B. and D.E. Pegg. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, p. 343-58 (1988) 234(1276).
[67] Diller, K.R. and J.F. Raymond. *Cryo Letters*, p. 151-162 (1990) 11.
[68] de Freitas, R.C., et al. *Annals of the New York Academy of Sciences*, p. 191-204 (1998) 858.
[69] Lachenbruch, C.A. and K.R. Diller. *Journal of Biomechanical Engineering*, p. 574-83 (1999) 121(6).
[70] Levin, R.L., E.G. Cravalho, and C.E. Huggins. *Cryobiology*, p. 549-58 (1977) 14(5).
[71] Korniski, B. and A. Hubel. *Ann N Y Acad Sci*, p. 183-90 (1998) 858.
[72] Devireddy, R.V., et al. *Cryobiology*, p. 327-38 (1999) 38(4).
[73] Bischof, J., K. Christov, and B. Rubinsky. *Cryobiology*, p. 482-92 (1993) 30(5).
[74] Acker, J.P., J.A. Elliott, and L.E. McGann. *Biophys J*, p. 1389-97 (2001) 81(3).
[75] Irimia, D. and J.O. Karlsson. *Biophys J*, p. 1858-68 (2002) 82(4).
[76] Stott, S.L., D. Irimia, and J.O. Karlsson. *Technol Cancer Res Treat*, p. 113-23 (2004) 3(2).
[77] Bischof, J.C., Rubinsky, B. *ASME Journal of Heat Transfer*, p. 1029-1035 (1993) 115(4).
[78] Pearce, J.A. and S. Thomsen, in *Optical and Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue.*, Welch A.J. and van Germert M.J.C., Editors. 1995, Plenum: New York.
[79] Wright, N.T. and J.D. Humphrey. *Annu Rev Biomed Eng*, p. 109-28 (2002) 4.
[80] Bhowmick, P., et al. *Int J Hyperthermia*, p. 421-39 (2004) 20(4).
[81] Bhowmick, S., et al. *Int J Hyperthermia*, p. 73-92 (2004) 20(1).
[82] Chao, B.H., X. He, and J.C. Bischof. *Cryobiology*, p. 10-27 (2004) 49(1).
[83] Hoffmann, N.E. and J.C. Bischof. *Urology*, p. 40-9 (2002) 60(2 Suppl 1).
[84] Rupp, C.C., et al. *Cryobiology*, p. 167-82 (2002) 45(2).
[85] Coad, J.E. and J.C. Bischof. *Thermal Treatment of Tissue: Energy Delivery and Assessment V Proceedings of SPIE*, p. 27-36 (2003) 4954.
[86] Aggarwal, S.J., et al. *J Burn Care Rehabil*, p. 104-20 (1994) 15(2).
[87] Bhowmick, S., N.E. Hoffmann, and J.C. Bischof. *Microvasc Res*, p. 170-3 (2002) 64(1).
[88] Hynynen, K. and N. McDannold. *Int J Hyperthermia*, p. 725-37 (2004) 20(7).
[89] Griffin, R.J., et al. *Int J Hyperthermia*, p. 575-89 (2003) 19(6).
[90] Han, B., A. Iftekhar, and J.C. Bischof. *Technol Cancer Res Treat*, p. 103-11 (2004) 3(2).

エデュケイション Q

「プロメテウスの贈りもの」こぼれ話（２）

Gleanings of "Prometheus's Gift" (Part 2)

相原　利雄（東北大学名誉教授）
Toshio AIHARA (Professor Emeritus of Tohoku University)

3. 熱現象の実例（つづき）[1]

3.3 温泉たまご

専門家以外の読者に，非定常の抽象的な熱現象を理解して貰うのは，容易な事ではない．思案の末，誰にでも馴染深い実例として「温泉たまご」を取り上げた．　（以下，原文[1]のまま）

通常，鶏卵の白身の凝固温度（固くなる温度）は73℃あたりですが，黄身の凝固温度は68℃前後です[2]．俗に「温泉たまご」と呼ばれるものは，この凝固温度の差と非定常熱伝導の原理を巧みに利用したもので，伝熱学的には結構すすんだテクニックです．

具体的には，図 3（イ）の様に，卵をゆでる湯の温度を70℃前後に保ち，20 分程度ゆっくり加熱すれば，卵の中の温度は白身の凝固温度より低く，黄身の凝固温度より高く保たれるので，黄身だけが固まり，白身が半熟の「温泉たまご」が得られます．

一方，図（ロ）の様に，沸騰した湯（100℃）の中で数分間ゆでれば，外表面近くはすぐ温度が上がって白味の凝固温度を超えますが，中心部はまだ黄身の凝固温度より低いので，黄身が半熟で白身が固まった通常の「半熟たまご」が得られます．実際には，鍋の大きさや形状，卵の温度など，加熱条件によって多少の違いがでますので，若干の試行が必要でしょう．

なお，物質の融点や凝固点の違いと，非定常熱伝導の原理を利用する温泉たまごのテクニックは，工業的にもっと活用されるべきだと思います．

---

[1] 本章で紹介するものは，拙書[1]からの抜粋であり，それらの転載・複製等に際しては，筆者ばかりでなく，出版元の裳華房の許諾も必要である．

[2] 白身は 62℃から 65℃で流動性を失い，70℃あたりでほぼ凝固しますが，完全な凝固には 80℃以上での加熱が必要です．黄身は 65℃から 70℃の範囲で凝固します．また通常の「半熟たまご」や「完熟たまご」をゆでている最中に，鶏卵の温度が 60℃を超えた辺でしばらく一定になることがありますが，これは外周にある白身（蛋白質）が凝固する際に熱を吸収するためです．

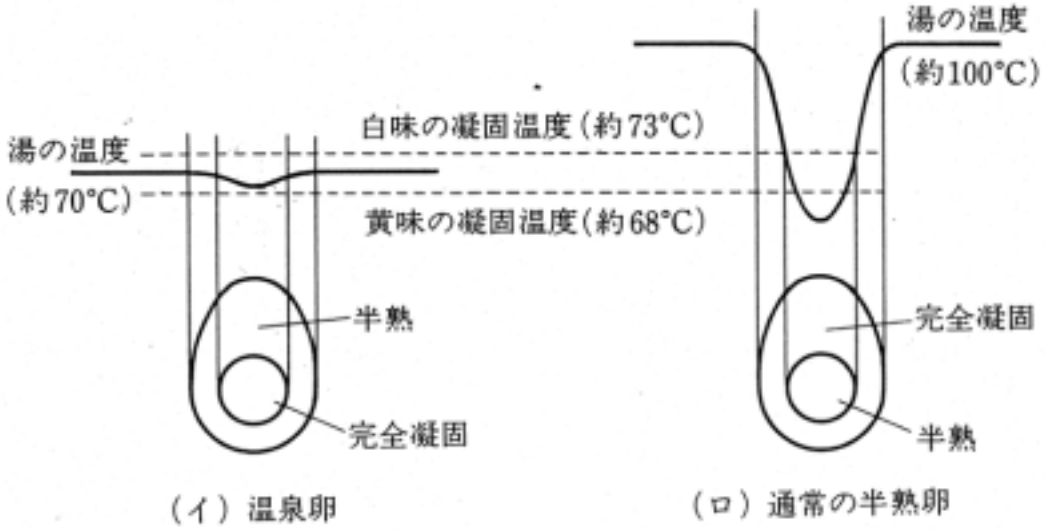


図 3　温泉たまごと半熟たまご[1]

3.4 日本刀を作る

図 4（イ）は，日本刀の断面図である．もし固い物を押し切ろうとした場合，静力学的には鋭い刃先に強大な引張り応力がかかり，肉の薄い刃先からクラックの入る事が予想される．一方，固い物に一閃（いっせん）切り込んだ場合はどうなるであろうか．

実際に，低強度合金で出来た模擬刀[3]に鉈（なた）程度の鈍い刃をつけ，直径 6cm ほどの木杭に鋭く切り下ろすと，いささか居合の心得があるせいか，かなり深く切り込む事ができた．しかし，ゆっくり押し切ろうとすると，予想通り，木杭に当てた部分の少し手前の刃にクラックが入り，模擬刀は折れてしまう．これは，材料力学的には当然の帰結である．

すなはち，一閃（いっせん）切り込んだ場合には，木杭に当った刃の部分は他の部分より遅れがちのため，刀身全体の慣性力が木杭に当った部分に集約され，刃に長手方向の圧縮力が働き，クラックの発生を防いでいるのである．実際の日本刀は複合材であるから，刀の折れる機構はもっと複雑だが，本質的なメカニズムはこれと大同小異であろう．

前項の「温泉たまご」と同様に，過渡ないし動的現象は，定常ないし静的現象と全く逆の傾向を示すことがあるので面白い．以下，日本刀の製法を拙書「プロメテウスの贈りもの」[1]から紹介しよう．　（以下，原文のまま）

伝統工法で鍛えた日本刀は，折れず，曲がらず，刃味良く，美しい工芸品です．日本刀には，まず良い鉄が必要です．そこで古代精錬法の「たたら」と呼ぶ炉を使って，砂鉄から 2 ないし 3kg の玉鋼（たまはがね）を作ります．

これを木炭で加熱しては，鎚（ハンマー）で十回ないし十数回も「素延べ」と「折返し[4]」を重ねて不純物を取り除き，炭素の含有量が異なる数種類の鋼を計 1.3kg ほど得ます．そして図 4（イ）の様に，炭素が少なくて粘り強い鋼を芯の部分に，また炭素が多くて脆いが硬い鋼を刃の部分に使い，炭素量が中位の鋼を皮金（かわがね）にして，叩いて圧着（合わせ鍛え）しながら形を整えます[5]．

次いで焼入れするのですが，ここでも巧妙な工夫がなされます．一般に鋼は，約 730℃以上の高温からゆっくり冷やすと粘い組織（パーライト）となり，急速に冷やすと極めて硬い組織（マルテンサイト）になる性質があります．この違いを利用するため，焼刃土と呼ばれる特殊な粘土を刀身に塗り，乾いてからヘラで図 4（ハ）の様に，刃部の土だけを削り落します．

---

[3] ザック合金など．市販の居合刀がこれに該当する．

[4] 通常，刀身の重ね（厚さ）は 5.5 ないし 7.5mm 位です．仮に 10 回折り返したとすると 2^{10} 枚になるので，厚さ 6 ミクロン程度の鉄の箔が 1024 枚も重なって圧着され，刀身を形作っている事になります．これは，曲げや衝撃に対して非常に柔軟強靭な構造であり，また刀身にチョウジ油を頻繁に塗り込めば，オイルレスメタルなみの防錆効果が生じます．日本刀が，折れず，曲がらず，錆にくい事がうなずけます．

[5] 心金（しんがね）には炭素量 0.3 ないし 0.45%の中炭素鋼を、刃金（はがね）には炭素量が 0.6%から 0.8%の高炭素鋼を用います．

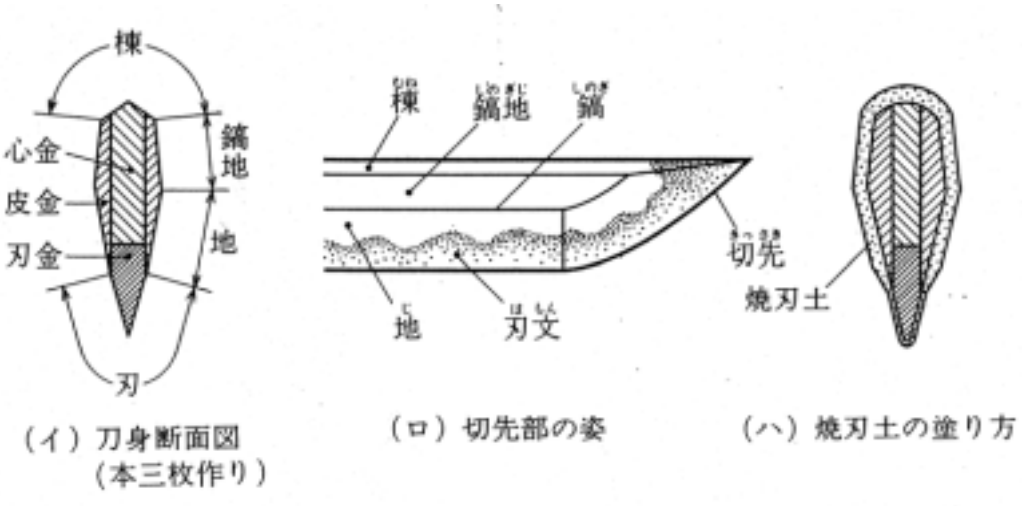


図 4　日本刀の構造[1]

この刀身を高温に加熱した後，水槽に入れて焼入れすると，厚い焼刃土が熱抵抗となって，地や棟の部分はゆっくり冷え，強じんなパーライト組織となります．一方，露出した刃の部分は急冷されて焼が入り，好みの刃紋と硬さのマルテンサイト組織が得られます．マルテンサイト組織はパーライト組織より比容積が大きいので，焼き入れの際に刃部が棟部よりも長くなります．その結果，刀身は棟の方に反って，日本刀特有の美しい姿が得られるのです[6].

ただし，非常に高温の刃部を裸のまま水に入れると，瞬時に全体が水蒸気の膜で覆われる膜沸騰となり, 熱伝達が劣化して焼きが強く入りません．そこで, 焼刃土を刃部から削り落とす際, 図 4 (ハ) の様に焼刃土を刃面に薄く残してやります．こうすると，核沸騰への遷移が早まるので，刃部は核沸騰によって効果的に急冷され，好み通りの焼きが入ります．これは原子炉などでも使われている技術です.

最後に研ぎ上げて日本刀が完成する訳ですが，刃と地の金属組織の違いから，その境界には天の川のように美しい模様が現れます．この模様は，温水で穏やかに焼き入れたときは細やかに，水で強く焼き入れたときは荒々しくなりますが，美的な観点から，前者を「匂い」，後者を「沸え」と呼んでいます.「匂いでき」の作刀は，備前長船の流派（備前伝）が著名です．一方「沸えでき」の作刀は，相州（今の神奈川県）で始められました．これは，鎌倉時代末期の元寇（1274 年と 1281 年）の折，襲来した蒙古兵が皮革の防具を用いていたので，これに対するゾリゾリとした切れ味を得るため，鎌倉幕府が全国の刀鍛冶を集めて作刀研究をさせた結果，開発された新技術（相州伝）なのです．その中心になったのが，有名な五郎正宗です.

焼き入れの湯加減は，各刀匠の秘伝とされており，その秘伝を盗んだ弟子の悲話なども伝わっています．精密な温度計などなかった当時，刀鍛冶達は火色（鉄が赤熱した色具合）を見ながら焼き入れをした訳ですが，金属学的な分析に基づく推定では，その焼き入れ温度は実に適切なものだったそうです．加えて，防錆と耐衝撃性を発揮する多層複合材構造，非定常伝熱の巧みな利用と核沸騰への遷移促進など, 日本の刀鍛冶が 1000 年以上も前に，今日の伝熱学や金属学の学理にかなった優れた技法を考案していた事は，眞に敬服に値します.

4. 拙書「プロメ…」執筆で心掛けたこと

4.1 検討なしに他者の式や図を転載・引用しない

これには理由がある．私[7]が企業の中央研究所で, 熱電素子の応用研究に従事していた 1960 年頃のことである［2-4］．独学で伝熱学に挑戦し始めたばかりの私にとって，Max Jakob の大著 Heat Transfer Vol. 1 & 2［5］はバイブルであった.

ある時，複雑系の放射伝熱を大型コンピュータで数値計算する必要に迫られた．当時は大型計算機といえども，まだ FORTRAN 対応ができておらず，マシン語で書いたプログラムを Punch Tape[8] で入力していた時代である．そこで簡単なモデルについて試算し，その結果を解析解と対比して計算精度をチェックする事にした.

丁度 Jakob の Heat Transfer Vol. 2 に適当な形状係数の式が載っていたので, それとの対比を試みた．しかし，どうしても数値計算結果と解析解とが合わない．私も若かったから，Jakob の著書にミスがあるのではないかと，大それた事を考えた．研究所の図書室にあった他の伝熱学の洋書[9]数冊を調べたが，いずれも Jakob の大著に載っている式と同じである．まだ駆け出しの頃で，教えを乞う師も身近に居なかったため，てっきり私の数値計算が間違っていると思い込み，暫くは自信をなくして仕舞った．後で判った事だが，私が調べた洋書は，いずれも，彼の後継者達の手になるものであった.

それから数年を経たある日，図書室で Jakob とは別門の著者による新刊書が書棚にあるのを見つけた. 何気なく例の形態係数の式を調べてみると，Jakob の著書に載っていた式と違う箇所がある.

---

[6] この刃部の膨脹によって, 刃先側で刀身方向の予圧縮状態が常時維持され，刃先にクラック（愛好家の間では「刃切れ」と呼ぶ）が生じない様になっている.

[7] 本稿では「書く」ことをテーマの一つにしているため，「筆者」を用いると，その文章を書いた本人か，私自身かの区別がしにくい．このため，「筆者」と書くべき処を，「私」と一人称で呼称させて頂く.

[8] ホレリスカードより更に一世代前の入力方法.

[9] 当時, 日本語で書かれた伝熱学の教科書はほとんどなかった.

その式を使って，震える手で幾例か試算してみると，全て私の数値計算結果と一致するではないか．

これで全てが明らかになった．数年前，私が調べた伝熱書の著者達は，何の疑いもなく師の著書に載っている式をそのまま自著に転載していたのである．問題の式は，その後 Jakob の改訂版で訂正がなされた．

この事件以来，私はものを書くとき，他者の導出した式や図を，検討なしに転載・引用する事はせぬ様にしている．これは，故甲藤好郎先生の信条でもあった[10]．

学術論文は最初から批判的な姿勢で読むので，仮に誤りがあっても著者の責任に帰す事ができ，読む方もその誤りを見抜けなかった不明を恥じればそれですむ．しかし教科書は，洞察力も批判力も乏しい初学者が読者であるから，そうはゆかない．しかも，その教科書で過った知識を得た者が，後進にその誤りを更に伝えて行く事になるから，真に恐ろしい．従って教科書を書く際は，論文を書く時の何倍もの注意が必要である．もし，初学者相手の教科書だから気軽に書けると思っている方が居られるなら，それは若い頃，教科書の誤記で苦労した事のない幸せな方であろう．

かつては，原稿が本になるまでに多くの人の手を経たので，どれほど注意しても，誤記を皆無にする事は実務上不可能であった．今日まで，私の著わした教科書や啓蒙書について，心ある方々から折に触れ，誤記の指摘や示唆を頂戴してきた．これは，著者自身への助けとなるばかりでなく，それを読む者にとっても恩恵である．本稿を借りて，篤く御礼申し上げたい．

4.2 人を惹きつける表現

この題目について私が語るなど，真におこがましい．むしろ，谷崎潤一郎の文章読本［7］を学んで頂いた方が有益だと思っている．しかし，谷崎の書を読むにはそれなりの覚悟が必要だし，その時間もないと言う人のために，敢えて私の経験を披露させて頂く次第である．

解りやすい表現・人を惹き付ける表現の基本は，言葉でなく心だと思う．美辞麗句に飾られた文章でも，「読む人のために」と言う思いが書き手になければ，人を惹き付けまい．

また，著者が関心の薄い事象について語る時は，多くの場合，説得力を欠く文章になる．従って，ひとたび筆を取る時は，語るべき事象について情熱を燃やさなければならない．と言って，自己主張が過ぎると，読む者は消化不良を起す．講話が語る者と聴く者とで成立つ様に，書物も書く者と読む者とが居て初めて成立つのである．

もう一つ大切な事は，百知って一を語る姿勢である．谷崎によれば，文章の品格は，無用の言葉を削った分だけ向上すると言う．私の場合，一たん草稿を纏めた後で，言葉削りに専念し，草稿のほぼ 50％ないし 70％程度にまで短縮している．

更に谷崎は「古典文の精神にかえれ」と説いている［7］．私は，かつて相当量の古典を学んだ経験があり［8］，その効用を知っているので，谷崎の示唆を全面的に支持する．世間では，自然科学の研究者にとって，文系の学習は無用と思っている様だが，それは誤解である．実際の処，研究者の大半は，論文や著書，諸々の申請書や報告書など，膨大な数の書類を書いている筈である．

私は以上に加え，原稿を書き終えた時点で音読し，滑らかに読めない処を更に修正している．かつてテレビ放映で，幼児達に歌声や狂言，落語などを聞かせ，その反応を調べるシーンを見たことがある．意外な事に幼児達は，狂言に最も強く反応していた．狂言の滑らかな語り口が，幼児達に心地よい響きを与えたからであろう．我々は目で文章を読むが，脳の中ではその視覚信号に音読信号が自動的に印加され，その上で理解記憶の回路に送られているのではないか．滑らかに音読できぬ文章は，読んでいて苛つくものである．

最後になるが，差別用語[11]を使わない，著作権（5.1 項）を侵害しない，等の気配りは必須である．

5. 知的財産権について

我が国では，科学技術創造立国を目指して，2003 年 3 月，知的財産基本法が施行された．それに呼応して「特許裁判所」の機能を実現するため，東京高等裁判所と東京・大阪の両地方裁判所に知的財産権訴訟の専門部が設置され，2004 年 4 月 1 日からは専門委員制度が発足した．さらに本年 4 月 1 日からは知的財産高等裁判所が新設され，旧知的財産専門部は全てそちらに移行した．

---

[10] 文献［6］の自序を参照．

[11] 例えば「エスキモー」を「イヌイット」と置換える．

知的財産権は，著作権，産業財産権（工業所有権），その他（回路配置利用権，種苗法や不正競争防止法など）に大別される．国立大学の法人化と相前後して，知的財産（以下知財と略記）分野の業績が産学で注目を集める様になり，また本稿の主題の一つである「表現」や「説得」にも関連あるので，触れておきたい[12].

（以下次号に続く）

参考文献

[1] 相原利雄，プロメテウスの贈りもの（暮らしのなかの熱），ポピュラーサイエンス　247，裳華房（2002）.
[2] 相原利雄，伝熱研究，**36-142** (1997) 12-14.
[3] 相原利雄，低温工学，**32-10** (1997) 466-472.
[4] 相原利雄，日本機械学会論文集 B，**64-627** (1998) 3527-3529.
[5] Jakob, M., Heat Transfer, Vol. 1 & 2, John Wiley & Sons (1957).
[6] 甲藤好郎，伝熱概論，養賢堂 (1964).
[7] 谷崎潤一郎，文章読本，中央公論社 (1960).
[8] 相原利雄，東北大学学報，平成 9 年 2 月号.

[12] 私は法律の専門家ではない．従って，法解釈に誤りがあった場合は，ご容赦願いたい．

Substitution of Petroleum Based Fuels by Biomass Fuels in Engines and Furnaces in Brazil

山根　英太郎（サンパウロ大学）
Eitaro YAMANE (University of Sao Paulo)
e-mail: yamaneit@usp.br

1. Introduction

The energy crisis occured in 1973 affected the brazilian economy and demanded the substitution of fuels derived from petroleum by alternative fuels because at that time about 80% of the petroleum was imported.

Considering the extent of the brazilian territory, a good product for the intended substitution is obviously the biomass fuel.

Some alternatives were considered at that time: substitution of gasoline by ethyl alcohol, diesel oil by ethanol and vegetable oils, and fuel oil by ethanol or coal. In 1975 the brazilian government established a National Alcohol Program to produce ethanol for energetic purpose.

Whereas the substitution of gasoline by ethanol in Otto cycle engines was very successful, there were serious problems in the tentative of substitution of diesel oil by ethanol or vegetable oil in Diesel cycle engines and also in the substitution of fuel oil by ethanol in existing boilers and ordinary furnaces.

2. Fuel substitution in Otto cycle engines

Brazil is essentially a tropical country. Many agricultural products can be used to produce ethanol: sugar cane, manioc, sorghum, corn, wood, etc. At present, the ethanol is made from sugar cane.

For the production of 1 liter of ethanol, it is produced also about 12 liters of vinasse which is a residual liquid with a pH of 3.5. How to dispose this vinasse is a serious problem. One form to use this residual liquid is as a fertilizer.

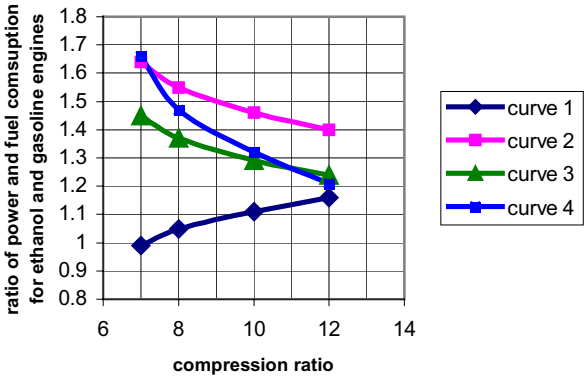


Fig. 1 Comparison of power and fuel consumption between ethanol and gasoline engines

The ethanol presents a smaller heating value when compared with gasoline. The lower heating value of ethanol is 26790 kJ/kg, which is only 60% of the value of gasoline. So, it is expected that the comsuption of ethanol shall be higher than gasoline. But the octane number of ethanol is higher than gasoline; then, it is possible to use higher compression ratio in ethanol engines, up to 12, without knocking problems. In this manner, the efficiency of alcohol engines is higher than ordinary gasoline engines.

From the data of reference [1], Figure 1 can be drawn. This Figure shows curves representing a comparison between Otto cycle alcohol engine and gasoline engine. The gasoline engine taken as reference has a compression ratio of 7 and same piston displacement as the alcohol engines. These curves are theoretical, following the model of Taylor [2] and the abscissa is the ethanol engine compression ratio. The curve 1 represents the ratio between the power of

Fig. 2 Photo of service station fuel nozzles for gasoline and alcohol, showing a densimeter, above the alcohol nozzle at right side, to guarantee the alcohol purity.

ethanol engines and the power of the gasoline engine; the curve 2 represents the ratio between the mass specific fuel comsuption of ethanol engines and the specific fuel comsuption of the gasoline engine; the curve 3 represents the ratio of volumetric specific fuel comsuption of ethanol engines and the correspondent comsuption of gasoline engine; the curve 4 represents the ratio of mass specific fuel comsuption of both engines for same power delivered.

Thus, using higher compression ratio, ethanol engines can have an increase of power of about 10% when compared with correspondent gasoline engine with same piston displacement. On the other hand, the fuel comsuption of ethanol engines can reach a figure of more 25%, in volume, when compared with gasoline engine. However, considering that the ethanol can be utilized in lean mixtures, as usually is done, a reduction in the increase of fuel comsuption can be obtained, but with a sacrifice of power increase in alcohol engines.

The ethanol has a high octane value; so, the alcohol engines do not need additives to the fuel for knocking supression. Additionally, considering also the alcohol combustion characteristics, these engines pollute less than gasoline engines. The production of carbon monoxide by ethanol engines is negligible when compares with gasoline engines.

In the 1980 decade the ethanol fuelled automobiles reached a peak of around 95% of the cars manufactured in Brazil (Fig. 2). But this figure decreased to about 5% in the 1990 decade due to problems related to alcohol availability, mainly because there was a competition with sugar, which is produced from the same sugar cane, with a price that was favourable in international market.

3. Fuel substitution in Diesel cycle engines.

There was also a brazilian tentative to substitute the diesel oil by ethanol in Diesel cycle engines.

But unfortunately this idea was proved to be unsuccessful. Considering the problem of ignition of the fuel-air mixture at the conditions existing in the engine cylinder, the cetane number of ethanol was increased adding some additives. However the researches involving this matter did not solve satisfactorily this problem.

Since the compression ratio in Diesel cycle engines is already high, the substitution of diesel oil by ethanol does not have the same effect obtained in Otto cycle engines concerning the increase of thermal efficiency of the cycle by raising the compression ratio.

Therefore, considering the small heating value of ethanol when compared with diesel oil and the above mentioned problem of ignition of the ethanol-air mixture in the cylinder, the tentative of substitution of diesel oil by ethanol in existing Diesel cycle engines was not successful.

4. Fuel substitution in steam generators and furnaces

At the time of the 1973 petroleum crisis, the steam generators and heating furnaces in the brazilian industry were using petroleum derived fuel oil.

For a given steam generator, or a heating furnace, designed and manufactured to use fuel oil, the tentative of substitution of this oil by ethanol also failed.

In the case of steam generators, for example, the

mass flow rate of ethanol burned must be higher than the mass flow rate of oil because the heating value of ethanol is much lower than the value of the fuel oil, for the production of same heat generated in the boiler furnace.

For this condition, that is, for same heat generation in the furnace of the boiler, the comsuption of ethanol shall related to the ratio of the heating value of both fuels that is, in this case, 1.64 times the comsuption of fuel oil.

However, for the stoichiometric reaction, the air-fuel ratio in the case of ethanol is approximately 9 kg of air for each kg of ethanol and for the case of fuel oil (as bunker-C type) the ratio is around 14.5. Considering these figures, even burning 1.6 times, in weight, more ethanol, the mass flow rate of flue gas produced in both cases, differs less than about 7% for same value of heat generated in the furnace.

Thus, it seems that the fuel substitution does not change the heat transfered by convection to the fluid in the boiler.

But there is a great effect in the value of radiation heat transfer between the flame and the evaporation tubes of the boiler because the flame formed in the combustion process of ethanol, at the condition existing in the furnace, is a nonluminous bluish flame presenting a very low emissivity. This flame is well different from the yellowish luminous flame with high emissivity observed in the case of combustion of fuel oil. Thus, while in the case of combustion of fuel oil, the boiler section of the steam generator receives more radiative heat transfer from the flame than convective heat transfer for the vaporization process, in the case of combustion of ethanol the radiant heat transfer becomes very small.

Consequently the mass flow rate of saturated steam produced in the boiler decreases when it is used ethanol in substitution of fuel oil in existing boilers, for same heat generated by combustion in the furnace of the boiler.

When compared with the case of fuel oil, the ethanol flue gas then leaves the boiler section at higher temperature because it rejected less heat to the boiler tubes and reaches the superheater where the saturated steam entering this section has a smaller mass flow rate than before. The result is a significant increase of the temperature of the superheated steam leaving the superheater, when compared with oil fired boiler case, and introduces a serious problem in the superheated steam temperature control.

Summarizing, the overall effect that can be observed when it is used ethanol in substitution of fuel oil in existing steam generators, for same heat generated in the boiler furnace, is:

a- smaller mass flow rate of steam produced;

b- higher temperature of the superheated steam in the outlet of steam generator, not compatible with the requirement of the steam conditions in the inlet of steam turbines or in other thermal equipments.

Thus, the tentative of substitution of fuel oil by ethanol, in existing steam generators designed originally to use fuel oil, was not also well succeeded at that moment

5. Present situation regarding substitution by biomass fuel in engines and conclusion

Recently it was unveiled a new brazilian government plan to produce the so called biodiesel, following the examples of Germany and USA. According to this plan, it is programmed to use, as later as 2008, at least 2% in volume of biodiesel mixed with diesel oil for Diesel cycle engines. Four years later, the plan will impose a mixture of at least 5% biodiesel.

The biodiesel shall be made through a reaction of transesterification between ethanol and a vegetable oil using a catalyzer. Many vegetable oil can be produced in Brazil to obtain the biodiesel, as for example: palm oil, castor oil, soy bean oil, peanut oil, sun flower oil.

To fulfill the 2% target, it is needed to produce 800.10^3 m^3 per year of biodiesel. At present, the biodiesel is produced in a batch process but there are researches aiming to produce in a continuous process. At this moment, the production cost of biodiesel is up to 30% higher than the cost of diesel oil.

The use of biodiesel in Brazil has the objective of:

a- reduction of production of air pollutants;

b- reduction of the dependence of imported petroleum;
c- stimulate the production growth of vegetable for energetic use in different regions of the country. Concerning Otto cycle engines, recently manufactured automobiles are designed to use:
a- gashol: a mixture of gasoline and 25% in volume of anhydrous ethanol;
b- only hydrated ethanol;
c- compressed natural gas;
d- a mixture of different fuels.
In this last case **d**, the automobile is equipped with a Otto cycle multi-fuel, also called flex-fuel, engine which uses a mixed fuel in any proportion of gasoline and ethanol. At present, more than 50% of the automobiles manufactured in Brazil is equipped with this type of engine. The fuel tank of these automobiles is filled, in any proportion, with ethanol and gasoline.

Basically, a lambda sensor measures the oxygen content in exhaust gas and a electrical signal is delivered to the control system of the engine to adapt automatically to the conditions needed for the fuel mixture entering the cylinder.

Illustratively, according to actual tests, a car equipped with a multi-fuel engine that can use ethanol, gashol, or any mixture of these two fuels, attain, when it uses only ethanol,a power 5% higher and a comsuption of about 40% higher for same distance driven, compared with the same engine using only gashol.

Some multi-fuel engines can use other different fuels. Besides ethanol and gasoline, the tank can be filled with naphtha; and the same car can have a compressed natural gas tank. But for using the CNG the driver must activate a switch in the car panel.

Concluding, it can be observed that a effort is being taken in this country to substitute petroleum derived fuels by biomass fuel. The multi-fuel engine, mentioned above, offers a flexibility toward the use of different type of fuels in the same car. The driver can fill the fuel tank with any choice, and in any proportion, of fuels, according to the price (at present the price of ethanol is about half the price of gasoline) or the availability of the fuel at that moment.This is particularly a good alternative for a country as Brazil which is in a process of economic development and is preoccupied with ambient pollution and energy availability.

References

1. Yamane, E., Problems of Fuel Substitution in Automotive Engines, the Brazilian Case, Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 85, No. 763, pp. 619-623, July, 1982.
2. Taylor, C. F. and Taylor, E. S., The Internal Combustion Engine, International Textbook Co., 1962.

Eitaro YAMANE completed his undergraduate course (1961) and received the doctorate degree (1970) in mechanical engineering, both at the Faculty of Engineering of University of Sao Paulo, Brazil. He was recipient of Mombusho Scholarship to study and engage in research at University of Tokyo. He is a Professor of Mechanical Engineering at University of Sao Paulo. His current interest includes energy alternatives and conversion".

Review of ISTP-16: Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering in the Heart of Europe (August 29th-September 1st 2005, Prague)

Jaroslav HEMRLE (Tokyo University of A&T)
e-mail: hemrle@mmlab.mech.tuat.ac.jp

1. Introduction

The 16th *International Symposium on Transport Phenomena* (ISTP-16) was held from August 29th to September 1st in Prague, Czech Republic. According to the organizers, the purpose of the ISTP series is to offer a platform for multidisciplinary meeting of researchers, scientists and practitioners for exchange of information and discussion in the area of transport phenomena.

The choice of the *Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering* (PCTFE) to situate the most recent assembly of its ISTP series to Prague appears somewhat paradoxical from geographical point of view. Pacific region, with the World's largest ocean, dramatic landscapes infamous for vivid volcanic and tectonic activities, is rarely associated with the Czech Republic, a small country right across the globe, at the very center of Europe, characteristic by peaceful hilly landscape, which is old and stable even on geological time-scale, and with no sea whatsoever. However, geographic reasons are just about irrelevant among scientific communities of the present age.

The Czech host and the partner in organizing ISTP-16 was the *Faculty of Mechanical Engineering of the Czech Technical University in Prague*. The Czech Technical University (CVUT - abbreviation of its Czech name) is naturally proud on its long tradition (it was formally established in the year 1707), as well as on the fact that it is still the leading technical university in the Czech Republic, currently with 7 faculties, just above 20,000 students, and 3,000 members of staff. The Faculty of Mechanical Engineering itself has celebrated 140 years anniversary last year, and at present has almost 5,000 students at all degree levels.

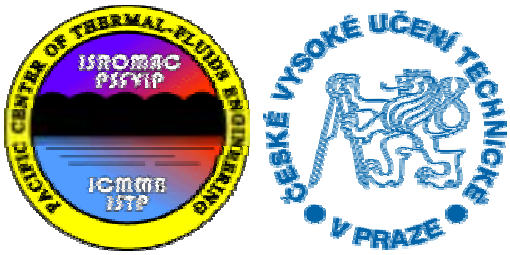


Fig. 1 Symbols of the organizers: PCTFE and CVUT.

Fig. 2 View of the Prague Castle across the Vltava River spanned by the 15th century Charles Bridge.

Fig. 3 Main building of the Faculty of Mechanical Engineering of CVUT in Prague. (Source: CVUT)

2. Participation statistics

The efforts of the organization committee led by Prof. Jan Ježek for CVUT and Prof. Sadanari Mochizuki for PCTFE were rewarded by wide international interest. In all, 457 authors and co-authors from 30 countries participated in preparing contributions for ISTP-16. The number was dominated by authors from Japan, 182, or almost 40%. The next largest number of authors was from Taiwan (about 20%) and the Czech Republic (10.5%).

The final number of attending registered participants reached 178 from 17 countries, which was even stronger dominated by Japan, from where 43% of the participants came, with the Czech Republic (22%) and Taiwan (15%) being again the other most represented countries. Altogether, the participants from the Pacific region counted for more than 63% of the participants. The statistics of participants are summarized in Figure 4.

Aside Prof. Ježek and Prof. Mochizuki as the main organizers, the participants were greeted at the opening ceremony by the president of PCTFE, Prof. Wen-Jei Yang, who welcomed wide international participation, stressed importance of transport phenomena in modern science and technology, and also mentioned his suprisingly long and intensive relationship with the hosting city of Prague. On behalf of CVUT, the participants were welcomed by the dean of the Faculty of Mechanical Engineering of CVUT Prof. Petr Zuna, and member of the international organizing committee Prof. Jiří Šesták.

3. Contributions

3.1 Plenary lectures and overview of sections

In the course of the symposium, the participants had the opportunity to attend three plenary lectures given by Prof. Ichiro Tanasawa (“An Outlook on Cryobioengineering with Primary Focus on Cryopreservation”), Prof. Yildiz Bayazitoglu (“Nano-to-Macro scale Modeling of Photonics Thermal Transport”, presented by Prof. Wen-Jei Yang), and by Prof. Jiří Šesták (“Transport Phenomena and non-Newtonian Fluid Mechanics in Mechanical Engineering”).

Other, some 105 oral presentations and 31 posters

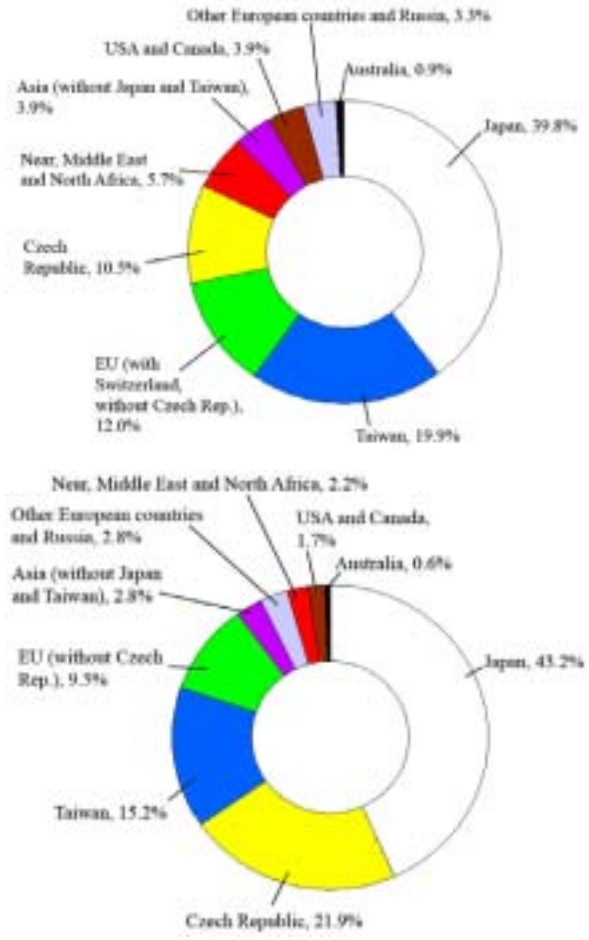


Fig. 4 Statistics of nationalities of all authors and co-authors (above), and registered participants (below).

Fig. 5 Opening ceremony. From the left: Prof. Jan Ježek (main organizer), Prof. Petr Zuna (dean of the Faculty of Mechanical Engineering of CVUT), Prof. Wen-Jei Yang (president of PCTFE), Prof. Jiří Šesták (international organizing committee), and Prof. Sadanari Mochizuki (main organizer and vice-president of PCTFE). (Source: CVUT)

Table 1 Statistics of presented contributions by section.

Section	Oral	Posters	Total
Turbulence and flow instabilities	11	3	14
Two phase flow	9	4	13
Chemical process systems	3	-	3
Environmental systems	5	4	9
Fluid dynamics in micro-systems	13	4	17
Heat and mass transfer	31	11	42
Rheologically complex systems and biofluid dynamics	6	-	6
Heat exchangers	3	-	3
Electronic equipment cooling	4	5	9
Boundary layer and free shear flows	8	3	11
Experimental and computational fluid dynamics - gases	10	3	13
Experimental and computational fluid dynamics - liquids	10	5	15
Combustion and reacting flows	13	3	16
Industrial aerodynamics and wind engineering	2	3	5
Totals	128	48	176

were divided into 20 sections. The list of all sections, and number of oral and poster presentation in each section is given in Table 1, from which it is seen that the section “Heat and Mass Transfer” was the largest with total number of 42 contributions.

3.2 Heat and mass transfer section

From the best evaluated presentations in the Heat and Mass Transfer section, rather large number of contributions was related to heat or mass transfer in pulsating and oscillating flows. Prof. M. Hishida presented heat transport of superposed oscillatory and slow steady flow in a loop channel, demonstrating up to 40-fold increase of thermal energy transport rate with small increase of work done by the flow. Similar system inspired by avian lungs was analyzed experimentally and numerically, as reported in the presentation of E. Sakai, with accent on generation of the steady flow component in avian lungs, flow patterns, and their influence on augmented mass transport – rather modest attitude of the young presenter did not harm the presentation, which was among the best the present reviewer had seen during ISTP-16. Prof. H. Saitoh presented systematic study of flat plate oscillating in a flow in vertical rectangular channel, based on hydrogen bubble flow visualization,

Fig. 6 First plenary lecture given by Prof. Ichiro Tanasawa (above). The keynote speakers Prof. Tanasawa and Prof. Šesták during their presentations (below, left and right photo respectively). (Source: CVUT)

color schlieren method visualization of thermal boundary layer and local heat transfer measurement.

Several presentations from the section of Heat and Mass Transfer were related to the effects of strong magnetic fields on fluid flows and heat transfer in various settings. Prof. J. Szmyd reported on results of numerical simulation of natural and magnetizing convection of air, as a representative of paramagnetic fluids, in a cubic space with temperature difference between opposing walls, with particular interest in possibilities of control of heat transfer by varying orientation of the strong, 10 Tesla, magnetic field. Prof. H. Ozoe presented results on effect of strong magnetic field on water mist behavior, again demonstrating wide possibilities for control of this kind of flows by magnetic means.

Numerical study combining effects of heat and solute diffusion together with buoyancy effects was

used to analyze complex phenomena of double diffusive natural convection of block of light hot solution in water, as presented by Prof. K. Kamakura. The size of the initial solute block was shown to significantly affect the formation of salt-fingers, with a single finger being formed in the case of small block, while wide spreading with large number of fingers occurred in the case of larger blocks.

Other topics, among many others in Heat and Mass Transfer, included impingement heat and mass transfer of synthetic jet (Dr. Z. Trávníček), effect of Görtler vortices on heat transfer on concave wall (P. Sobolík), or two views on the problem of perspiration and cloth comfort (Prof. A. Narumi and K. Machová).

3.3 Fluid dynamics in micro-system and other sections

Although PCTFE has recently started its series of International Symposia on Micro and Nano Technology (ISMNT), the recent popularity and importance of this topic was to be witnessed also during ISTP-16, proof of which is that “Fluid Dynamics in Micro-Systems” formed with 17 contributions the second largest section of the conference. Three out of five of the best received presentations of this section were related to flow visualization and velocity field measurement in micro and nano domains. Prof. Uemura presented modification and application of holographic system for 3D PIV in micro-domains. Particle tracking Velocimetry of ferromagnetic nanoparticles using dark-field optical microscope system was applied to study of the effect of magnetic field on the growth and dispersion processes of cluster formation in microchannel flows, as presented by Prof. H. Kikura. High frequency PIV was used for study of micro-sheath flow inside a micro flow cytometer, presented by Prof. M.-W. Wang.

Liquid slip in microchannels (C.-Y. Soong), flows with nanoparticles (presentations of C.-C. Chieng and P.-Y. Hsiao), and study of deposition processes in inkjet printing (T.-M. Liou) were among other numerous topics presented in this vivid area. Naturally, other 12 sections of ISTP-16 brought large number of various other topics, even short review of which is beyond the scope of the present article.

4. In closing

If the present reviewer felt that some points of the organization of ISTP-16 would deserve further improvement, these were rather in the reign of common issues shared by practically all similar meetings, than particular shortcomings of this interesting meeting. Unfortunately, strikingly low was the participation of female researchers. There were just about 10 women participants, or some 5% - huge disproportion reasons for which are certainly worth some consideration. Another matter that the present reviewer would like to see at similar meetings is somewhat stricter, clearly stated and more strongly enforced policy on participants’ conduct from the organizers, for example to save other participants from last moment cancellations without explanation.

Being the 13th largest city of the enlarged European Union, and enjoying unprecedented interest of foreign

Fig. 7 The historical building of the Bethlehem chapel hosted concert of classical music for all organizers, participants and their company. (Source: CVUT)

and domestic investors, city of Prague is rapidly regaining its position of important business, scientific and cultural center. Nevertheless, the historical charms of the city of Prague and the Czech Republic are untouched and inescapable. The organizers therefore facilitated tourist tours to Prague and nearby Karlštejn castle for participants and their accompanying persons. The cultural peak of the conference was the concert of classical European music in the historical building of the Bethlehem chapel, which is used as the representative space of CVUT.

The meeting therefore delivered what it promised – bringing closer fluid dynamics, transport, and heat transfer communities of two remote regions, the Pacific region and the Central Europe, with wide international participation from other regions, into a motivating scientific and cultural encounter. The next meeting, ISTP-17, is scheduled on September 2006 back “home” in the Pacific region, Toyama, Japan. If it follows the ISTP series tradition, it will be an event worth fitting in into ones schedule.

Jaroslav HEMRLE, received M.Sc. summa cum laude (1998) at the Czech Technical University of Prague, Dept. of Aerospace Engineering, and Dr. Eng. (2004) at Tokyo University of A&T. At present, he works as a Research Associate at the Dept. of Mechanical Systems Engineering at TUAT. His current research topics include rarefied gas effects on flows and heat transfer in microstructures, heat and mass transport by oscillating flows in microstructures, and phase change heat transport devices.

日米セミナー：ナノスケール輸送現象

US-Japan Seminar : Nanoscale Transport Phenomena

岡崎　健（東京工業大学），小原　拓（東北大学）

Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology) and Taku OHARA (Tohoku University)

１．はじめに

標記のセミナーが，2005 年 7 月 4 日－7 日の 4 日間にわたって，松島において開催された．このセミナーは，JSPS (Japan Society for Promotion of Sciences) および NSF (U.S. National Science Foundation)の日米科学協力事業として，少人数の日米研究者間で特定のテーマについて突っ込んだ討論をすることを目的としたセミナーである．マイクロスケールの伝熱に関するこの枠組みのセミナーは，1993 年以来 3 年ごとに開催され，今回が 5 回目となる．すなわち，

1993: July 11−14,　Kanazawa
Molecular and Microscale Transport Phenomena
(C.L. Tien and S. Kotake)
1996: August 7−10,　Santa Barbara
Molecular and Microscale Transport Phenomena
(C.L. Tien and K. Hijikata)
1999: August 8−11,　Sendai
Molecular and MicroscaleThermophysical Phenomena in Nanotechnology
(A. Majumdar and S. Kotake)
2002: June 24−26,　Berkeley
Nanoscale Thermal Science and Engineering
(A. Majumdar and K. Okazaki)
2005: July 4−7,　Matsushima
Nanoscale Transport Phenomena
(G. Chen and K. Okazaki)

と，日米における研究の動向を微妙に反映してテーマを変化させながら，12 年間に渡って継続してきた．当初は，マクロ伝熱からスケールダウンした米国側・分子運動から積み上げようとした日本側，固体の米国側・流体の日本側，応用研究の米国側・基礎研究の日本側，というように，同じミクロ伝熱とはいえ両者の志向は大きく異なっていたが，最近は，双方で理解が進み，お互いの興味が重なるようになってきたことにより，ギャップを感じることはあまりなくなってきた．今回は，界面反応やバイオシステムなど今日的課題において重要なナノスケールの輸送現象をセミナーの主題としたが，日米の双方からこの主題にきちんと則した研究発表がなされ，活発な議論が行われた．

セミナーは，これまでより多少参加者の範囲を広げ，博士課程の学生やポスドクなどを含めて，日本側 30 件，米国側 25 件，計 55 件の発表が行われた．

２．セミナーの内容

セミナーでは，研究発表及び討論を以下の 5 セッションに分けて行った．

(1) Carbon nanotubes and novel nanostructured materials
(Co-chairs: J. R. Lukes and S. Maruyama)
(2) Transport in bio and liquid systems
(Co-chairs: P. E. Phelan and S. Takagi)
(3) Thermophysical properties of nanostructures and novel measurement techniques
(Co-chairs: M. Asheghi and Y. Nagasaka)
(4) Interface and nanoscale reaction and transport
(Co-chairs: J. B. Freund and M. Shibahara)
(5) Solid-state energy conversion and light & matter interaction (Co-chairs: A. Shakouri and T. Inoue)

各セッションは，①短時間（1 件 5 分）の口頭発表，②ポスター発表による個別の討論，③全員参加によるパネルディスカッション，の 3 部構成により，個別討論及び全体討論に十分な時間を確保して行われた．また，セッションテーマに関連の深いキーノート講演 2 件が行われた．セミナーの最後には，総括討論を行った．以下にこれらの詳細について述べる．

キーノート講演

“CVD generation of single-walled carbon nanotubes and their applications” (by S. Maruyama)では，カーボンの供給源としてアルコールを用いた CVD によるカーボン

ナノチューブの高純度生成技術と，カーボノチューブを用いてナノ構造を作成する手法が紹介された．また，”Heat and mass transport in nanostructured materials & devices” (by A. Majumdar)では，薄膜・超格子・ナノチューブ／ナノワイヤ・量子ドットなどいわゆる低次元化された構造におけるフォノン伝導についての議論や，水溶液中でデバイ長以下のスケールで構造を形成した際に発現する特異なイオン輸送現象についての議論が展開された．

カーボンナノチューブ及び革新的ナノ構造材料

カーボンナノチューブは，生成技術の成熟を経て利用技術の開発が進みつつあり，その輸送特性が極めて重要な課題となっている．メカニカルな挙動（運動量の輸送）や熱輸送特性，接点における界面熱抵抗，熱伝導率の測定法などについて議論が行われた．また，ナノ構造材料として注目されているナノワイヤやクラスターの熱伝導特性や，レーザーを用いたナノ構造の製作技術が報告された．

バイオ及び液体システムにおける輸送現象

ナノ構造の製作技術やナノ現象の計測技術の進展に伴って，ナノスケールで極めて高効率なエネルギー装置あるいは輸送装置としてのバイオシステムが注目を集めている．これまでの 10 年間に応用技術が急速に発達した MEMS とは異なり，バイオシステムにおいては，液体（特に水）を媒体とした熱・物質（イオン）輸送現象が極めて重要である．イオンやバイオ分子の選択的輸送を可能にするナノフルイディクスのコンセプト，生体膜のマルチスケールシミュレーションの考え方，血管内の物質移動，ナノ粒子懸濁液の熱輸送特性の計測結果と理論などが報告された．

ナノ構造の熱物性及び革新的計測技術

薄膜の熱伝導率などナノ構造が示す特異な熱流体物性を高精度で計測する手法を確立し，計測されたデータを系統的に理解することは，ナノシステムの今後の発展の基礎として不可欠な重点課題である．リプロン計測による高分子単分子膜の粘弾性測定，近接場光計測によるナノスケール熱物性計測，マイクロ熱物性計測システムの応用，燃料電池膜におけるプロトン輸送メカニズム，固体結晶のナノ構造制御による特異な熱伝導率の発現，超格子固体における熱現象，応用デバイスにおけるナノスケール熱伝導，分子動力学解析によるフォノン輸送特性，ナノシステムにおける応力の定義に関する議論などが報告された．

界面及びナノスケールにおける反応及び輸送現象

ナノシステムにおいては，界面における化学反応や輸送現象がバルク現象に卓越してシステムの機能を支配するため，バルクと異なる界面特有の輸送現象を見出してその特性を把握することが，新しい機能をもつナノシステムを開発するために必要不可欠である．結晶界面におけるフォノンの挙動や界面熱抵抗，燃料電池電極における表面触媒反応，固体表面への水蒸気の吸着，分子衝突によるエネルギー伝達，ナノバブルの表面における力学的平衡状態や異種分子の取り込み，固液界面における熱抵抗や濡れ性など，様々な現象とその特性が紹介され，そのメカニズムが議論された．

固体物理学的エネルギー変換および光・物質干渉現象

熱電変換など固体物理学的なエネルギー変換プロセスや，光・電磁波と物質との相互干渉は，重要な応用技術であるペルチェ素子やレーザー加工などのキーとなる現象であると共に，最近では熱放射の制御など新たな応用も広がりつつある．ナノスケール熱放射の原理と可能性，フォトニック結晶の熱放射特性，マイクロスケール構造表面による熱放射の波長特性の選択，様々な熱電変換素子の特性，物質に照射された光から熱へのエネルギー変換などが議論された．

総括討論

総括討論では，以上のセッションの成果をまとめ，今後の取り組みについて議論が行われた．MEMS 応用が一定の成熟段階に達して現在はナノ構造による新機能の発現に重点が移りつつあること，バイオシステムや各種界面における輸送現象の理解が決定的に重要であること，今後も日米の緊密なコラボレーションが必要であることなどがコンセンサスとして得られた．

３．むすび

日米で真剣なセミナーを行うことは，相手の個々のテーマや研究の動向について情報を得るためだけではなく，自分たちのコミュニティを見つめ直すためにも重要である．この意味では，進取の気性や目標の設定など，米国側のアクティビティの根本にあるものを覗いてみることにも価値があろう．日本側も十分なインパクトを養いつつ，今後も日米で活発なインタラクションが望まれるところである．次回のセミナーは 2008 年にアメリカ（本土）で開催の予定である．

最後に，東工大においてセミナー事務にご尽力いただいた伏信一慶先生に厚くお礼申し上げます。

中谷宇吉郎 雪の科学館

Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice

神田　健三（中谷宇吉郎 雪の科学館）
Kenzo KANDA (Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice)
e-mail: yuki-mus@blue.hokuriku.ne.jp

1. はじめに

「雪は天から送られた手紙である」という言葉で知られる中谷宇吉郎（1900～62）は，世界で初めて人工雪をつくることに成功し，雪や氷の結晶，着氷，凍上，霧，水資源など，低温科学の諸分野を開拓した「雪博士」である．宇吉郎は随筆家としても知られ，自分の研究の過程を味わい深い文体で紹介し，科学や芸術から身近な暮しの話題まで，健筆をふるった．また，科学映画を作り，岩波映画製作所の創設にも寄与した．油絵や墨絵を描き，助六を踊るなど，趣味も豊かであった

「中谷宇吉郎雪の科学館」は，宇吉郎の生家があった片山津温泉に隣接する潮津町に加賀市が建設し，平成 6 年（1994）11 月に開館した．

館建設の目的は，郷土出身の優れた科学者の人間像とその業績，研究対象だった雪と氷の科学の魅力を紹介し，市民や青少年への科学普及に寄与することであり，また，温泉をいくつも持つ加賀市の観光スポットの一つとして，多くの観光客の来訪を期待している．

図 1. 中谷宇吉郎の文化人切手
（2000 年に発行された）

2. 建築・霧・映像

建築設計は磯崎新氏が担当した. 柴山潟に接し，白山を望むという景観を生かした設計であり，直線的な構造，古寺を思わせるような外壁，雪の結晶を象徴した 6 角の塔が 3 つ並ぶ外観などが特徴である．

中庭は，宇吉郎の最後の研究地・グリーンランドから運ばれた 60 トンの岩石が敷きつめてあり，ここに人工の霧（「霧の彫刻」という）が流れ，幻想的な雰囲気がつくられる．宇吉郎の次女・中谷芙二子氏の創案によるものである．

映像ホールでは，「科学するこころ―中谷宇吉郎の世界」を毎日 7 回上映している．かつて宇吉郎が監修した映画の一部も取り込み，新たに制作したもので，宇吉郎の生涯や雪の研究を理解するのに役立つ内容である．

写真 1. 中谷宇吉郎雪の科学館
（背景に柴山潟と白山）

3. 展示室には雪氷実験コーナーも

展示構想は宇吉郎門下の樋口敬二氏をチーフにした委員会によってまとめられたもので，宇吉郎の「ひととなり」，「雪の結晶」，「氷の結晶」など 5 つのゾーンで構成されている．

展示の解説は，随筆の表現を生かし，基本的に宇吉郎自身の言葉で行うかたちになっている．

最初のコーナーの「ひととなりゾーン」では，年代を追って，ゆかりの品，写真，ことばなどで紹介している．恩師・寺田寅彦をはじめ，各界の人との出会いや交流にも注目して欲しい．

写真 2. ひととなりゾーン

「雪の結晶」ゾーンでは，世界で初めて人工雪を成長させることに成功した，北海道大学にあった常時低温研究室の様子を復元している．そして，写真パネル，レプリカ，立体視，ビデオなど，さまざまな手法で雪の結晶について紹介している．

「氷の結晶」ゾーンには，「チンダル像」実験の体験コーナーがある．氷に強い光をあてると，氷の内部が融けだし，融ける形が雪の結晶とよく似た 6 角形になる．これがチンダル像で，イギリスの科学者チンダルが発見し，宇吉郎が詳しく研究したものである．用意してある氷を操作して入館者が実験し，スクリーンに拡大投影させて観察する．

写真 3. チンダル像

（氷に光をあてると，氷の内部が融けて雪に似た形になる．この場合の“伝熱”は放射）

新たな体験コーナーとして，数年前から「ダイヤモンドダスト」の実験も行っている．冷凍庫の中で雪の赤ちゃん･氷晶を発生させるこの実験は、美しく不思議な実験として人気がある．姿を変える水についての格好の教材だと考えている．

4. 生誕 100 年，開館 10 周年を経て

1994 年に開館した後，2000 年は宇吉郎の生誕 100 年，2004 年は開館 10 周年の節目にあたり，それらを記念するイベントが開催された．

生誕 100 年には，東京，北海道などでも記念のイベントが開催され，宇吉郎の文化人切手が発行され，『中谷宇吉郎集』全 8 巻（岩波書店）も刊行された．館や加賀市では，記念フォーラム，「寅彦と宇吉郎の絵画展」，全国コンペによる「雪のデザイン賞」の作品展，日本雪氷学会全国大会などを開催した．

このうち，「雪のデザイン賞」を実施したのは，雪結晶の美しさとともに，宇吉郎自身がデザインを楽しんだことが背景にあった．「雪のデザイン賞」は好評だったことから，その後も隔年開催により，コンペは第 3 回（2004 年）まで行われた．入選作品の中から，「雪と氷の ABC カルタ」，「六花氷モールド」など新しいグッズも誕生した．

2000 年は，ミレニアムとして特集を組むマスコミが多く，朝日新聞は「過去 1000 年でもっとも傑出した日本の科学者」を選ぶ読者投票を行ったが，宇吉郎は 6 位に選ばれた．

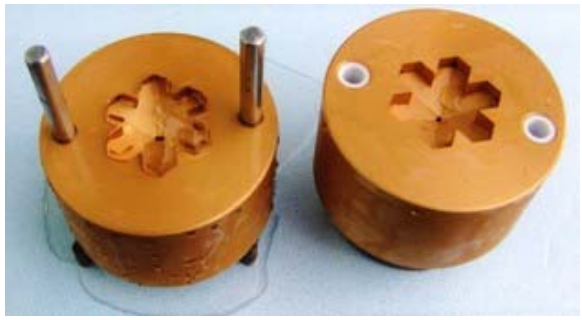


写真 4. 六花氷モールド

（氷を挟むとみるみるうちに氷のペンダントに．金属の“伝熱”（熱伝導）の教材になる）

写真 5. 雪洞のなかで結晶を観察

（大雪山麓旭岳温泉で）

2004 年の「10 周年のつどい」では歩みをふり返った．10 年間に 33 万人余りが入館者した．

2004 年から 3 年継続の予定で「子ども雪博士教室」（文科省・科博委託事業）として，月 1～２回，子ども対象の実験などの行事を行っている．その一環として，年末には，美しい雪が降る北海道の大雪山麓へ親子で出かけ，結晶観察などを行っている．

今年（2005），11～12 月には，バルト 3 国の 1 つ，ラトビア共和国で，宇吉郎と雪氷を軸にした展覧会が開催される．

5. 来館案内

住　所：〒922-0411 石川県加賀市潮津町イ-106
電　話：0761-75-3323
開館時間：9：00～17：00（入館は 16：30 まで）
休館日：水曜日（祝日の場合は開館），年末年始
入館料：大人 500 円．75 才以上 250 円．高校生以下無料．（団体割引）20 名以上で 1 人 420 円
交　通：北陸自動車道片山津インターから車で 5 分．JR 加賀温泉駅からバス（CAN BUS）で 15 分．小松空港から車で 15 分
ホームページ：
http://www.city.kaga.ishikawa.jp/yuki/

熱気球の伝熱

Heat Transfer Problem of Hot-Air Balloon

Hea r t Transfer

鈴木　雄二（東京大学）
Yuji SUZUKI (The University of Tokyo)
e-mail: ysuzuki@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

最近, 熱気球に乗る機会があった.「どうせ乗るなら」と，風任せで飛んで行くコースを選んだ．ナイロン製の気球は膨らむと直径 15m ほどで, 人間は下にぶら下がった籐編みのバスケットに乗る．気球の下にはバーナーが取り付けられていて，パイロットがプロパンガスをを間欠的に燃やして気球内の温度を 100ー120℃に保つ. 重量は人間を入れて 500kg 程度とのことである．バスケットに乗ってパイロットの説明をいろいろ聞いていると, 突然浮き上がった. この感覚は他に経験したことがなく，ほとんどショックなしにスルスルと上昇していく．みるみるうちに 50m，100m と上がっていく．さっき離陸した場所にいた人たちは米粒のようになってしまった.

空気の流れと一緒に流されるので，風はほとんど感じず，バーナーを焚いていないときは鳥の鳴き声が下から聞こえてくるほど静かで心地よい．あっという間に 650m ぐらいでまで上昇し，分散した雲が下に見えるほどになった．雲に気球の影が映り，周囲に虹のような模様が見える．山好きな方には周知のことかもしれないが，Mie 散乱の波長依存性から生じるブロッケン現象というのだそうだ．ナスカの地上絵は古代人が熱気球から見たという説もあるから，こんな景色も見たのかなぁと感激した.

グライダーの操縦もそうであると聞いたが，良いパイロットは風を読むことができるらしい．高度によって風向きが違うことを利用して，風任せとは言いながら，3km 離れた目標に 1 メートル以下まで近づくことも不可能ではないとのことだった.

フライトはまだ続いていたが，ひとしきり景色を楽しんだあとで，よせばいいのに熱気球の伝熱が気になってきた．そもそも，大人５人が乗れるだけの浮力があるのだろうか？折角暖めた空気がすぐに冷えてしまわないか，など.

まず，直径 15m の気球内の空気の質量は，30℃で 2000kg もあり, 120℃では 500kg の浮力が得られる. 気温が 0℃では 700kg の浮力が生じ，夏と冬では積載できる重量が 200kg も違うようだ.

風に乗っているので，気球の空気に対する相対速度はほぼ 0 であり，熱気球は外側から自然対流で冷やされる. 気球を直径 15m の球と仮定するとグラスホフ数は 10^{13} と非常に大きく，乱流状態が予想される．気球外側のヌセルト数をグラスホフ数の 1/4 乗でエイヤッと計算すると，10^3 程度となる. 間欠的に強烈な燃焼ジェットが吹き込まれる気球内側の流れがどうなっているかわからないが，強い対流によって良く混ざっていると勝手に仮定し，気球内部の空気温度変化の時定数を計算すると約 20 分となる. 従って，浮力を 10%以内に保つには 2 分おきにバーナーを焚く必要がありそうだ．実際の熱気球の状況と比較的近いようだが，同時に，真面目に計算するのは結構難しそうだということも判った.

そうこうしているうちに，小 1 時間のフライトも終わりに近づいてきた．飛行しているあたりは収穫の終わった畑が多く，パイロットは地上のサポートに無線で連絡し, どの辺に降りるかを連絡している. わずかな横風に流されながら，みるみる地面が近づいてきた．気球に地上のサポートの人たちが併走してきて, バスケットを捕まえた. 無事に降りられた, と思う間もなく,「はい，このまま倒れまーす」のパイロットの声と共にバスケットごとドーンと横倒しになった．風の状況が悪いと，横倒しのまま引きずられることもあるようで，初フライトの着陸の状態が熱気球の好き嫌いをだいぶ左右するらしい．人の乗る部分が籐編みなのはこのためか，ということがやっと判った.

またチャンスがあれば，今度はもうちょっと熱計算の予習をして行こうかな.

行事カレンダー

本会主催行事

開催日		行事名(開催地，開催国)	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2005 年						
9 月	9 日(土) ～ 10 日(日)	“古都　奈良”伝熱セミナー 「産学連携による新産業の創成」 奈良市男女共同参画センター大会議室 なら 100 年会館小ホール　ホテル日航奈良	’05.8.24		森 幸治(セミナー委員会委員長，大阪電気通信大学) Tel/Fax 072-820-9034, E-mail: k-mori@isc.osakac.ac.jp	7 月号
10 月	21(金) ～ 22(土)	日本伝熱学会東海支部企画 第 16 回東海伝熱セミナー「熱流体計測の最前線」	先着 50 名		〒432-8561 浜松市城北 3 丁目 5-1 静岡大学工学部 機械工学 桑原不二朗 Tel/Fax 053-475-1048 E-mail: tmfkuwa@ipc.shizuoka.ac.jp HP: http://www.kjp.or.jp/hp_71	9 月号
11 月	18(金) ～ 19(土)	九州伝熱セミナー in 湯布院 ～燃料電池と吸着応用～ 日本伝熱学会九州支部主催	'05.11.3		九工大、宮崎康次 Tel: 093-695-6030 E-mail: miyazaki@life.kyutech.ac.jp)	9 月号
2006 年						
5 月	31 日(水) ～ 6 月 2 日 (金)	第 43 回日本伝熱シンポジウム 名古屋国際会議場	'06.1.20	'06.3.13	第 43 回日本伝熱シンポジウム実行委員会 名古屋工業大学 しくみ領域内 FAX: 052-735-5343, E-mail: nhts43@thermo.mech.nitech.ac.jp HP: http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/	9 月号

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
2005 年						
9 月	2 日(金)	日本熱電学会　熱電講習会 2005 ―熱電変換の基礎と応用― (名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール　名古屋市)			〒464-8603　名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科　河本邦仁 Tel:052-789-3327　Fax:052-789-3201 E-mail:morita@mail.apchem.nagoya-u.ac.jp	
9 月	5 日(月) ～ 7 日(水)	日本流体力学会年会 2005 (工学院大学新宿校舎)	’05.4.30		〒152-0011　東京都目黒区原町 1-16-5 社団法人 日本流体力学会 TEL:03-3714-0427　FAX:03-3714-0434 E-mail:jsfm@rf7.so-net.ne.jp	
9 月	11 日(日) ～ 15 日(木)	Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology Whistler, British Columbia, Canada			Co-Chairs: M. Ishizuka, Toyama Prefectural University http://www.engconfintl.org/5aq.html	
9 月	12 日(月) ～ 15 日(木)	第 3 回人間－生活環境系国際会議 (文化女子大学　東京都)	’04.11.20	’05.3.31	〒151-8523　東京都渋谷区代々木 3-22-1 文化女子大学 被服衛生学研究内 第 3 回人間－生活環境系国際会議事務局 Tel＆Fax：03-3299-2336 e-mail：iches2005@bunka.ac.jp URL：http//jhes-jp.com/iches05	
9 月	16 日(金)	日本機械学会関西支部　第 278 回講習会 「プロとして使う英語を磨く (Polishing Your Professional English)」			〒550-0004　大阪市西区靱本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073　FAX:06-6443-6049 E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp	
10 月	20 日(木) ～ 21 日(金)	第 9 回スターリングサイクルシンポジウム (海上技術安全研究所　三鷹市)	’05.5.27	’05.9.9	〒160-0016　東京都新宿区信濃町 35 番地 社団法人 日本機械学会　担当 滝本 TEL:03-5360-3504 e-mail: takimoto@jsme.or.jp	
10 月	20 日(木) ～ 21 日(金)	日本機械学会関西支部　第 279 回講習会 「応力計測の基礎とその応用」			〒550-0004　大阪市西区靱本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073　FAX:06-6443-6049 E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp	
10 月	31 日(月) ～ 11 月 1 日 (火)	可視化情報学会全国講演会(新潟 2005) (朱鷺メッセ　新潟市)			〒950-2181　新潟市五十嵐２の町 8050 Tel:025-262-6726 Fax:025-262-6726 E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp 藤澤延行 Tel:025-262-7266 Fax:025-262-7268 E-mail akabayas@cc.niigata-u.ac.jp 赤林伸一	

11 月	5 日(土)、 6 日(日)	熱工学コンファレンス (岐阜大学　岐阜市)	’05.6.10	’05.9.9	〒501-1193　岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学工学部機械システム工学科 熱工学コンファレンス 2005 実行委員会 熊田雅彌，檜和田宗彦 Tel:058-293-2530(熊 田) 、 -2531(檜 和 田) Fax:058-230-1892 URL:http://flame.mech.gifu-u.ac.jp/thermal2005/index.html	
11 月	17 日(木)、 18 日(金)	日本機械学会関西支部 ステップアップセミナー2005 「基盤産業と先端産業における技術経営―ものづくりによる関西経済の活性化―」 (新梅田研修センター・ホール　大阪市)			〒550-0004　大阪市西区靱本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073　FAX:06-6443-6049 E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp	
11 月	17 日(木) ～ 19 日(土)	第 14 回微粒化シンポジウム 「微粒化の可能性への挑戦」 (八戸グランドホテル　八戸市)	’05.9.9	’05.10.17	〒031-8501　八戸市大字妙字大開 88-1 八戸工業大学 工学部 機械情報技術学会 教授 大黒正敏 Tel: 0178-25-8044　Fax: 0178-25-2008 E-mail: daikoku@hi-tech.ac.jp	
11 月	18 日(金) ～ 22 日(火)	日本地熱学会平成 17 年学術講演会 (ウェルハートピア雲仙小浜　長崎県小浜町)	’05.8.26	’05.9.22	〒108-0071　東京都港区白金台 3-18-6-103 日本地熱学会事務局 Tel: 03-3473-7290 Fax: 03-3473-7290 URL: http://wwwsoc.nii.ac.jp/grsj/	
12 月	5 日(月) ～ 7 日(水)	第 43 回燃焼シンポジウム (江戸川総合区民ホール)	’05.7.15	‘’05.9.22	〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻内 Tel/Fax: 03-5841-7488 E-mail: sympo43@combustionsociety.jp URL: http://www.combustionsociety.jp/sympo43	
12 月	8 日(木) ～ 9 日(金)	The Fifth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2005) (東北大学流体科学研究所)			東北大学 流体科学研究所 AFI2005 実行委員 太田 信 Tel:022-217-5309　Fax:022-217-5311 E-mail:ota@fmail.ifs.tohoku.ac.jp	
12 月	13 日(火) ～ 15 日(木)	第 19 回数値流体力学シンポジウム			〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27 日本流体力学会 TEL:03-3817-1808 FAX:03-3817-1803 http://www.fsis.iis.u-tokyo.ac.jp/cfd18/	
2006 年						
2 月	2 日(木) ～ 3 日(金)	12th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics” (Mate 2006)	’05.9.1	’05.11.18	〒101-0025　東京都千代田区神田佐久間町 1-11 (社)溶接学会　Mate 2006 事務局 TEL:06-6879-4166 FAX:06-6879-4166 E-mail:mate@casi.osaka-u.ac.jp	
6 月	11 日(日) ～ 15(木)	Second International Conference on Transport Phenomena in Micro and Nanodevices Il Ciocco Hotel and Conference Center Barga, Italy	'05.11.30		Co-Chair: Professor Nobuhide Kasagi Department of Mechanical Engineering The University of Tokyo Hongo, Tokyo 113-8656 E-Mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp	
8 月	13 日(日) ～ 18 日(金)	The International Heat Transfer Conference IHTC-13		'05.7.31	IHTC-13 Conference Managers GPO Box 128 SYDNEY NSW 2001 AUSTRALIA Phone: + 61 2 9265 0700 Fax: +61 2 9267 5443 Email: ihtc-13@tourhosts.com.au http://ihtc-13.mech.unsw.edu.au/	5 月号
8 月	27 日(日) ～ 9 月 1 日 (金)	10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-2006)	’06.2.28	’05.12.15	〒554-0022　大阪市此花区春日出中 2-14-9 日本液体微粒化学会 事務局 ㈱学術出版印刷気付 事務局長 近藤 健 Tel:06-6466-1588　Fax:06-6463-2522 E-mail:info@ilass-japan.gr.jp	
9 月	4 日(月) ～ 8 日(金)	The Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-17)		’06.03.18	〒939-0398 富山県射水郡小杉黒河 5180 富山県立大学工学部 機械システム工学科 教授 石塚 勝 Tel:0766-56-7500 Fax:0766-56-6131 e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp	

日本伝熱学会東海支部企画　　第 16 回　東海伝熱セミナー　「熱流体計測の最前線」

日本伝熱学会東海支部では標記のセミナーを下記の通り開催いたします。ふるってご参加くださいますようご案内申し上げます.

記

日　　時：　平成１７年１０月２１日（金）午後～１０月２２日（土）午前
場　　所：　財団法人厚生年金事業振興団　厚生年金健康福祉センター
ウエルサンピア浜松
〒432-8036　浜松市東伊場 2-14-1　℡ 053-458-2800　FAX 053-458-2811
ホームページ　http://www.kjp.or.jp/hp_71
参 加 費：　一般（会員，非会員）１３，０００円（宿泊の有無同額）
学生　８，０００円（宿泊の有無同額）
（宿泊費，懇親会費，朝食，資料代を含む）
ただし，講演会のみの参加の場合（懇親会，宿泊無しの場合）５，０００円
定　　員：　５０名（先着順に受付）

プログラム（熱流体計測の最前線）:

１０月２１日（金）
13:10～17:00　話題提供
「PIV による複雑流の計測とデータ処理」 廣田 真史　氏 （名古屋大）
「乱流の時系列ステレオ PIV 計測と乱流燃焼の CH-OH PLIF/ステレオ PIV 同時計測」
店橋　護 氏（東工大）
「レーザ顕微鏡を用いた微小領域の温度分布測定」 川田　善正　氏（静岡大）
「高クヌッセン数流れのフォトニック・アナリシス」 新美 智秀　氏 （名古屋大）
18:00～　懇親会　懇談会
１０月２２日（土）
9:00～11:40 話題提供
「車両空調用送風機の低騒音化」酒井 雅晴　氏（DENSO）
「流速，温度，濃度計測におけるレーザ応用技術－LDV，LIF，PIV の最新技術」
松本　雅則　氏（ダンテック・ダイナミクス株式会社）
「色彩場中の固体粒子・気泡可視化トレーサー移動検出による３Ｄ速度場測定」 三松順治氏（岐阜大）
11:40～11:50　閉会

参加申し込み方法：
「第１６回東海伝熱セミナー申し込み」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 アドレス），(5)フル参加か講演会のみの参加か（その他ご要望）をできるだけ e-mail でお申し込み下さい（郵送，ＦＡＸも可）．宿泊は１室５名となりますので，申し込み時に相部屋希望等をお知らせ下さい．できるだけ研究室などでまとめてお申し込みいただければ幸いです.（参加費は当日受付にて徴収します.）

申込期限：　平成１７年１０月１１日（火）
申込先：〒432-8561 浜松市城北３丁目５－１　静岡大学工学部　機械工学科　桑原　不二朗
e-mail　tmfkuwa@ipc.shizuoka.ac.jp）　　Tel/Fax　053-475-1048
支部ＨＰ　http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/
セミナーＨＰ　http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/15th_seminar.htm

九州伝熱セミナー in 湯布院
～燃料電池と吸着応用～
日本伝熱学会九州支部主催

九州地区では、今年もセミナーを開催します。燃料電池と吸着応用をメインテーマに、また両方に共通する多孔質について話題提供頂き、理解を深めたいと考えています。また、これら燃料電池技術や吸着応用技術に関する課題を、議論したいと考えています。例年通り、温泉とお酒の準備も万全です。九州はもとより全国各地からのご参加をお待ちしております。

期日：　１１月１８日（金）～１９日（土）
会場：　ゆふとぴあ（西部ガスグループ保養所、http://www2.odn.ne.jp/yufutopia）
　　大分県大分郡湯布院町大字川上宇野の草 1947-38、TEL：０９７７－８５－５８０１
交通：　JR 由布院駅から／車で 6 分／徒歩で 30 分
高速バス由布院駅前停留所から／車で 6 分
　　大分自動車道湯布院インターから／車で 15 分

スケジュール：
１１月 18 日（金）
12 時　　受付
13 時　　講演会
支部長挨拶　小山繁（九州大学）
　　１３：００～１４：１５　増岡隆士（北九州市大）「多孔質内の熱流動について」
　　１４：１５～１５：３０　吉田英生（京大）「固体酸化物型燃料電池（SOFC）の熱管理」
休憩
　　１５：４５～１７：００　佐々木一成（九大）「燃料電池の次世代材料開発と熱工学への期待」
17 時　　お風呂
19 時　　夕食、管巻き会
11 月 19 日（土）
7 時～　朝食
9 時～　講演会
　　０９：００～０９：４５　岡野浩志（西部技研）「ハニカム吸着体とそれを応用した空気処理装置」
　　０９：４５～１０：３０　濱本芳徳（九大）「吸着現象を用いた温湿度の独立制御」
休憩
　　１０：４５～１１：３０　BAE Sang-Chul（佐賀大）「水素吸蔵合金の水素貯蔵及び冷凍機への応用」
　　１１：３０～１２：１５　シャハ　ビデュット　バラン（九大）
　　「Low Temperature Driven Adsorption Chillers for Macro and Micro Cooling」

参加費：会員、非会員ともに 16000 円。学生は 10000 円。当日集めます。宿泊費、初日夕食、翌日朝食含む。
申込：　電子メールにてお願いします。件名を「九州伝熱セミナー参加」と記し、
①氏名、②所属、③役職、④電話、⑤電子メールアドレスを明記の上、miyazaki@life.kyutech.ac.jp へ、
11 月 3 日（木）までに申し込みください。準備の都合上、お早めに申し込みいただければ、幸いです。
問合せ先：九工大、宮崎康次（電話：０９３－６９５－６０３０、電子メール：miyazaki@life.kyutech.ac.jp）

第 43 回日本伝熱シンポジウム開催案内

開　催　日　　平成 18 年 5 月 31 日 (水) ～ 6 月 2 日 (金)
会　　場　　名古屋国際会議場
（〒456-0036　名古屋市熱田区熱田西町 1 番 1 号，TEL: 052-683-7711）

研究発表申込締切　　平成 18 年 1 月 20 日 (金)
論文原稿締切　　平成 18 年 3 月 13 日 (月)

【シンポジウムの形式】
- セッションの構成： 研究分野を「大分類」で 15（「小分類」で 50）程度に分類して研究発表を募集し，この分類に準じてセッションを構成する予定です.
- 講演形式： 発表（10 分）ごとに個別討論（5 分）を行い，セッションの最後で総合討論（5 分×各セッションの講演数）する方式を採用します.
- 一般セッションのほかに特別セッションが企画されています．若手研究者を対象とする「優秀プレゼンテーション賞セッション」はポスター形式で行われる予定です.

【研究発表申込方法】
- Web による申込とします.
- 研究発表申込は，講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます.
- 詳細は会誌「伝熱」（平成 17 年 11 月号）およびホームページに掲載いたします.

【論文】
- 論文の長さは 1 題目あたり A4 用紙 2 ページです．原稿作成のフォーマットは前回と同様になる予定です（2 段組，片側 26 字×60 行）.
- 執筆要項は会誌「伝熱」（平成 17 年 11 月号）およびホームページに掲載いたします.

【参加登録費等】
詳細は会誌「伝熱」（平成 17 年 11 月号）およびホームページに掲載いたします.

【懇親会】
- 開催日　平成 18 年 6 月 1 日 (木)
- 会　場　全日空ホテルズ ホテルグランコート名古屋
(〒460-0023　名古屋市中区金山町一丁目 1 番 1 号，TEL: 052-683-4111)

【お問い合わせ先】
第 43 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
名古屋工業大学　しくみ領域内
FAX: 052-735-5343,　E-mail: nhts43@thermo.mech.nitech.ac.jp
ホームページ　http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/

第 43 回日本伝熱シンポジウム実行委員会　　委員長　長野 靖尚

社団法人 日本伝熱学会　プライバシーポリシー

社団法人　日本伝熱学会
制定： 2005 年 9 月 3 日（理事会承認）

日本伝熱学会は，個人情報の重要性を認識し，その収集・利用・管理について，次の通り適切に取り扱うよう努めます.

（1）個人情報の収集
日本伝熱学会は，本学会の事業目的に沿ったサービスの提供のため，特定の個人を識別できる情報を必要な範囲で収集します．個人情報を収集する際は，その目的を明示するとともに，提供者の意思に基づいて行うことを原則とします.

（2）個人情報の利用
日本伝熱学会は，収集した個人情報を収集目的の達成のために必要な範囲で利用します．ただし，次のいずれかの場合には収集目的以外に利用または提供することがあります.

1. 法令の規定に基づくとき
2. 提供者の同意があるとき
3. 事業目的の達成に必要な範囲内において個人データの取扱いの全部又は一部を委託する場合（例えば，配送等のサービスを委託した会社に名前と宛先を知らせる場合）
4. その他，総会，理事会で承認された事業計画を達成するために正当な理由があるとき

（3）個人情報の管理
日本伝熱学会は，収集した個人情報が外部へ漏洩したり，破壊や改ざんを受けたり，紛失することの無いよう適切な管理に努めます．ただし，提供者自身により開示されたり，または公開されている個人情報については，本学会の管理の対象外とします.

（4）個人情報の開示および訂正等
日本伝熱学会は，個人情報の提供者から自己に関する個人情報の開示の請求があったときは，原則として遅滞なく開示します．また，自己に関する個人情報の訂正等の申し出があったときは，原則として遅滞なく訂正等を行います.

（5）Web サイトにおける扱い
本サイトの利用は，利用者の責任において行われるものとします．当ホームページおよび当ホームページにリンクが設定されている他のウェブサイトから取得された各種情報の利用によって生じたあらゆる損害に関して，本会は一切の責任を負いません．本会 Web サイトでは会員への有用な情報・サービスを提供するために他の Web サイトへリンクを貼っています．リンク先での個人情報の安全確保に関しては当学会では一切責任を負いません．利用者個人の判断によって利用をしてください.

（6）プライバシーポリシーの変更について
法律の変更に準じる為，または，その他の理由により，予告無くプライバシーポリシーに変更を加える可能性があります．日本伝熱学会の収集した個人情報に対しては，常に最新のプライバシーポリシーが適用されます．このような変更は，いかなるものであれ，日本伝熱学会の Web サイトに掲載され，掲載日より効力を発揮するものとします.

（7）個人情報の取り扱いに関する問い合わせ先
日本伝熱学会における個人情報保護に関してご質問などがある場合は，下記までご連絡下さい.

〒113-0034 東京文京区湯島 2-16-16
社団法人 日本伝熱学会
電話（03）5689-3401
FAX（03）5689-3401
郵便振替　00160-4-14749
e-mail: office@htsj.or.jp

事務局からの連絡

１．学会案内と入会手続きについて

【目的】

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

【会計年度】

会計年度は，毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです.

【会員の種別と会費】

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

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき，次の特典があります.

1. 「伝熱」,「Thermal Science and Engineering」を郵送します.
   （本年度発行予定：5，7，9，11，1，3月号）
   - 正会員，学生会員，名誉会員，推薦会員に 1 冊送付
   - 賛助会員に口数分の冊数送付
2. 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます.
   - 正・学生・名誉・推薦の各会員に 1 部，賛助会員に口数分の部数（但し，伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る）

【入会手続き】

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

（注意）

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

２．会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

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

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください.請求書はお申し出のない限り特に発行しません.会費納入状況は事務局にお問い合せ下さい.会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい.その他の送金方法で手数料が必要な場合には,送金者側の負担にてお願い致します.フリガナ名の検索によって入金の事務処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります.

【変更届について】

（勤務先，住所，通信先等の変更）

勤務先,住所,通信先等に変更が生じた場合には,巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい．通信先の変更届がない場合には，郵

送物が会員に確実に届かず,あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります．また,再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くことになります.

（賛助会員の代表者変更）
賛助会員の場合には,必要に応じて代表者を変更できます.

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

（変更届提出上の注意）
会員データを変更する際の誤りを防ぐため,変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いします.

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

【会費を長期滞納されている方へ】
長期間，会費を滞納されている会員の方々は，至急納入をお願いします．特に，平成15年度以降の会費未納の方には「伝熱」「Thermal Science and Engineering」の送付を停止しており，近く除名処分が理事会で決定されます.

３．事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております.

事　務　局

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

《所在地》
〒113-0034　東京都文京区湯島2-16-16
社団法人　日本伝熱学会
Tel/Fax: 03-5689-3401
E-mail: office@htsj.or.jp
HP: http://www.htsj.or.jp
（土日，祝祭日を除く，午前10時～午後5時）

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

〒152-8550
東京都目黒区大岡山2-12-1-I1-54
東京工業大学大学院理工学研究科
機械宇宙システム専攻
宮内　敏雄
Tel/Fax: 03-5734-3183
E-Mail: tmiyauch@mes.titech.ac.jp

「伝熱」会告の書き方

「伝熱」会告の書き方のテンプレート（MS-WORD）は，下記の伝熱学会のホームページよりダウンロードできます.

伝熱学会のホームページ：http://www.htsj.or.jp/den_guide.html

44 期新入会員（2005.8.1～2005.9.20）　4 名

資	氏　名	所　属	資	氏　名	所　属
正	荻原　慎二	東京理科大学　理工学部	正	中村　忠浩	パナソニックエレクトロニックデバイス㈱
学	渡部　弘達	東北大学　大学院工学研究科	正	西川　泰司	㈱カネカ

44 期寄付会費（2005.8.1～2005.9.20）　5 名　15,000 円

資	氏　名	所　属	資	氏　名	所　属
名	藤本　哲夫	名城大学	正	佐藤　公俊	広島工業大学工学部
正	若林　英信	京都大学大学院工学研究科	正	横山　信博	明星電気㈱
正	森　　茂	金沢大学大学院自然科学研究科			

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届出用紙

（右の該当に○を記入）　1．正会員・学生会員入会申込書
2．変更名（書面による届出のみ受付け）

（注意）　・楷書体で明瞭に記入　・氏名にふりがなを付す
・通信文は余白に記入　・申込時に郵便振替にて会費納入

0	申込年月日					年			月			日									
1	会員資格	正・学																			
2	氏名																				
3	ふりがな																				
4	生年月日	1	9			年			月			日									
5	＊勤務先・学校	名称																			
6																					
7		〒				—															
8		所在地																			
9																					
10		TEL																			
11		FAX																	共通・専用		
12		電子メール																			
13	自宅	〒				—															
14		住所																			
15																					
16		TEL																			
17		FAX																			
18	通信先＊＊	勤務先・自宅							自宅情報を会員名簿に記載しない・・・												
19	学位																				
20	最終出身校																				
21	卒業年次	T・S・H																			
22	専門分野 基礎的分野			・			←（下記の専門分野の番号）														
23	専門分野 応用分野			・																	
24	学生会員の場合：指導教官名＊＊＊																				印

※専門分野

基礎的分野

1: 強制対流　2: 自然対流　3: 表面張力駆動対流　4: 沸騰・蒸発・凝縮　5:混相流
6: 融解・凝固　7: 熱伝導　8: 放射　9: 反応・燃焼　10:物質移動
11: 多孔質伝熱　12: 極低温　13: 熱物性　14: 計測・可視化　15:数値シミュレーション
16: EHD・MHD　17: 混合物　18: マイクロ伝熱　19: 分子スケール伝熱　20:その他（　　）

応用分野

1: 熱交換器　2: 蓄熱　3: 冷凍・空調　4: 電子機器・情報機器　5: ﾋｰﾄﾊﾟｲﾌﾟ・熱ｻｲﾌｫﾝ
6: 航空・宇宙機器　7: 海洋機器　8: 火力発電プラント　9: ガスタービン　10: 地熱
11: 燃料電池　12: 熱電変換　13: エネルギー貯蔵　14: 原子力発電プラント　15: 製鉄
16: 材料・加工　17: 流動層　18: 廃棄物処理　19: 生体・人間熱科学　20: バイオ・食品
21: エンジン　22: 住環境　23: 都市環境　24: 地球環境　25: 建築・土木
26: MEMS　27: レーザー　28: グリーンエネルギー・小型分散エネルギー　29: その他（　　）

*)　学生会員入会申込者は学校名，学部，学科，研究室名，学年（M2，D3 など）を記す．
**)　郵送物発送先として通信先を必ず記入する．
***)　学生会員入会申込者は，指導教官の署名・捺印を受ける．
****)　会員名簿等作成時に自宅情報の掲載を希望しない場合はレ点をつける．

日本伝熱学会　賛助会員新規入会申込み届け用紙

0	申込年月日					年			月			日

※ご記入に際しての注意
日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので，代表者の所属に変更がありましたら，書面にて事務局宛ご連絡くださるようお願いします.

1	会員資格		賛助会員													
2	代表者氏名															
3	ふりがな															
4	代表者勤務先	名称(所属)														
5																
6		〒				―										
7		所在地														
8																
9		TEL														
10		FAX												共通・専用		
11	口数		口													

日本伝熱学会入会のご案内

１．学会の会計年度は毎年 4 月 1 日から翌年 3 月末日までです.
２．賛助会員の会費は 1 口 30,000 円／年で，申し込みは何口でも結構です．申し込み口数により，次のように分けております．A（3 口），B（2 口），C（1 口）
３．会員になりますと「伝熱」「Thermal Science and Engineering」をお申し込み口数 1 口につき各 1 部お送りします.「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数 1 口につき 1 部無料でさしあげます. この伝熱と Thermal Science and Engineering は通常，年 6 回（5，7，9，11，1，3 月号）発行しております. 但し，日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては，前年度の会費を年度末までに完納された会員に限り当該年度のものを無料でさしあげます．なお，年度途中でご入会された方には残部の都合でお送りできない場合もありますので，あらかじめご承知おきください.
４. 本学会では, 事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてています. 簡単な書式の領収書はご用意できますが，それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願い申しあげます.

申込書送付先；〒113-0034　東京都文京区湯島 2-16-16
社団法人日本伝熱学会事務局　　Tel/Fax；03-5689-3401

会費の振込先；
(1)郵便振替の場合―郵便振替口座　00160-4-14749　　社団法人日本伝熱学会
(2)銀行振込の場合―みずほ銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941
社団法人日本伝熱学会
(3)現金書留の場合―上記の事務局宛に御送金下さい.

広告

センサテクノス

広告

テクノオフィス

広告

日本カノマックス

編集出版部会ノート：雪まろげ

Note from the Editorial Board: Snow roll

5 年ほど前, 当時在籍していた秋田県立大学（本荘キャンパス，秋田県南部・由利本荘市）でのある二月のできごとです．強い風と共に，晩冬の雪というのでしょうか，真冬のサラサラのものとは違う，湿気を多く含んだ雪が夜半から降り続き，そしてやんだ朝のことでした．いつものように出勤したところ，大学敷地内の運動場，周囲のたんぼを含む広い平地に，おびただしい数の筒状の雪のかたまりがあったのです．

急いで長靴を履き，運動場へ出てみました．膝近くまで雪に埋もれながらその雪のかたまりの一つに近づいてみると，それは雪をロール状に丸めたような円筒形で，直径が 30cm から大きいもので 50cm 以上, 長さがやはり 50cm 近くあることがわかりました．そうした雪のかたまりが，周囲を見渡すかぎり，数百かそれ以上，雪原にちりばめられたようになっていたわけです．あまりにも不思議な光景でした．

それぞれの筒には，地面を転がった跡がありましたので，転がりながら大きくなったことが想像されました. 転がるとすれば強風によってですが, この大きさで転がるのかどうか, 押してみました．直径，長さが 50cm ほどもあり，比較的湿った雪ですので，とても重く，大人の力でも転がすのがやっとです．果たしてこれほどの強風が吹くのだろうかとの，疑問が残りました．

その日は山形県北部でも同様の現象が観察され, テレビのローカルニュースで報道されたと聞きました．雪俵（ゆきだわら)，雪まろげという名称であること，日本では東北地方の日本海沿岸地域でまれに見られる現象であることを知りました．少し調べた程度では，科学的に既知なのかさえ，未だにはっきりしないのです．ただ，雪まろげを詠んだ芭蕉の句があることがわかりました．

きみ火をたけ　よきもの見せむ　雪まろげ

松尾　芭蕉

「雪と光の造形」（朝日新聞社)という写真集に, 雪が斜面を転がってできた中空の雪の筒の写真が掲載されていること，またこれを英語で Snow roll ということが最近わかりました．Snow roll というキーワードでは，海外の HP から種々の綺麗な写真を見つけ出すことが出来ました．

本号の特集は「水」であります．「水」に関する広範な話題を，種々の切り口で集めようという主旨で編集いたしました．話題の豊富さに本号だけでは対応できず，次回も引き続き「水」の予定でございます．どうぞお楽しみに．

雪まろげ，遠方にも多数（筆者撮影）

丸田　薫（東北大学）

Kaoru MARUTA (Tohoku University)

e-mail: maruta@ifs.tohoku.ac.jp

副会長　　勝田正文（早稲田大学）　　部会長　吉田英生（京都大学）

委　員

（理　事）森　治嗣（東京電力）　逢坂昭治（徳島大学）　小山　繁（九州大学）

（評議員）丸田　薫（東北大学）　杉山智之（日本原子力研究所）　中込秀樹（千葉大学）

加藤之貴（東京工業大学）　永井二郎（福井大学）　田坂誠均（住友金属工業）

平澤茂樹（神戸大学）

TSE チーフエディター　西尾茂文（東京大学）　　TSE 出版担当　永井二郎（福井大学）

編集出版事務局：京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 吉田英生・犬山健二

606-8501 京都市左京区吉田本町　Tel/Fax：075-753-5255　yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

複写される方に

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

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

アメリカ合衆国における複写については，次に連絡して下さい.

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

Notice about photocopying

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

Except in the USA

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

In the USA

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

伝　熱　　ISSN 1344-8692

Journal of the Heat Transfer Society of Japan
Vol. 44, No. 188　　2005 年 9 月発行

発行所　**社団法人　日 本 伝 熱 学 会**
〒113-0034　東京都文京区湯島 2-16-16
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
Tel/Fax : +81-3-5689-3401

社団法人　日本伝熱学会
〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16　Tel/Fax.03-5689-3401