

ISSN 0910-7851

Vol.37 No.145

# 伝熱研究

*Journal of The Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 0918-9963

Vol.6 No.2

# **THERMAL SCIENCE** AND **ENGINEERING**

## 日本伝熱学会第36期（平成9年度）役員

会 長 副 会 長  理 事 (編集出版) 中国四国  (企 画)  北 海 道 北 陸 信 越  (総 務) 東 海 監 評 員	(編集出版) (企 画) (総 務)  森 岡 齋(徳 島 大) 小 澤 由 行(高 砂 熱 学)  早 坂 洋 史(北 大) 竹 内 正 紀(福 井 大) 松 尾 篤 二(三 菱 重 工)  辻 俊 博(名 工 大) 鳥 居 薫(横 浜 国 大) 山 本 春 樹(旭 川 高 専) 中 部 主 敬(京 大) 浜 辺 謙 二(川 崎 重 工) 加 藤 征 三(三 重 大) 中 村 泰 久(東 邦 ガ ス) 中 山 頭(静 岡 大) 松 田 仁 樹(名 大) 稲 葉 英 男(岡 山 大) 佐 藤 春 樹(慶 大) 菊 地 義 弘(広 島 大) 田 中 収(三 浦 研 究 所) 斎 藤 明 宏(新 潟 工 科 大) 姫 野 修 廣(信 州 大) 稲 村 隆 夫(弘 前 大) 青 木 秀 之(東 北 大) 松 田 理(石 川 高 専) 時 田 雄 次(大 分 大) 中 島 忠 克(日 立) 富 山 明 男(神 戸 大) 西 野 耕 一(横 浜 国 大) 井 上 剛 良(東 工 大) 田 上 守(神 奈 川 大) 一 宮 浩 市(山 梨 大) 飛 原 英 治(東 大) 水 上 川 紘 一(愛 媛 大) 前 川 透(東 洋 大) 宮 内 敏 雄(東 工 大) 佐々木 章(秋 田 高 専) 吉 田 英 生(東 工 大) 武 内 洋(工 技 院 北 工 研)	長 島 昭(慶 大) 藤 田 恭 伸(九 大) 塩 冶 震 太 郎(石 播 重 工) 飯 田 嘉 宏(横 浜 国 大)  部 会 長 九 州 熊 田 雅 弥(岐 阜 大) 井 村 英 昭(熊 本 大) 五 十 嵐 喜 良(東 北 電 力)  部 会 長 西 尾 茂 文(東 大) 藤 田 秀 臣(名 大) 太 田 照 和(東 北 大) 中 島 健(神 戸 大)  東 北 関 東 山 田 幸 生(工 技 院 機 械 研) 満 淵 邦 彦(東 大) 大 隅 正 人(三 洋 電 機) 堀 政 義(石 播 重 工) 宗 像 鉄 雄(工 技 院 機 械 研) 勝 田 正 文(早 大) 奥 山 邦 人(横 浜 国 大) 本 田 知 宏(福 岡 大) 鶴 田 隆 治(九 工 大) 浅 古 豊(都 立 大) 松 島 均(日 立) 鳥 居 修 一(鹿 児 島 大) 岸 浪 紘 機(室 蘭 工 大) 矢 部 彰(工 技 院 機 械 研) 大 河 誠 司(東 工 大) 山 脇 栄 道(石 播 重 工) 小 林 信 雄(トヨタ自動車) 長 坂 雄 次(慶 大) 原 村 嘉 彦(神 奈 川 大) 高 田 保 之(九 大) 小 宮 山 正 治(阪 大) 久 角 喜 徳(大 阪 ガ ス) 福 山 佳 孝(東 芝) 松 本 浩 二(宮 崎 大) 中 込 秀 樹(東 芝) 菱 田 誠(千 葉 大) 神 永 文 人(茨 城 大) 塩 津 正 博(京 大) 佐 藤 勲(東 工 大) 村 上 周 三(東 大) 廣 瀬 宏 一(岩 手 大) 岡 田 昌 志(青 山 学 院 大) 長 崎 孝 夫(東 工 大)
---	--	---

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進(東 洋 大)

# 伝熱研究 目次

## 〈随想〉

学会討論と科学技術の進歩 ..... 円山重直 (東北大学) .....1

## 〈特集：生体細胞の凍結保存〉

特集「生体細胞の凍結保存」にあたって

..... 第36期編集委員会 姫野修廣 (信州大学繊維学部機能機械学科)  
井村英明 (熊本大学工学部知能生産システム工学科) .....3

細胞懸濁液の細胞外凍結過程における微視的構造 ..... 石黒博 (筑波大学構造工学系) .....4

生物体凍結における伝熱と細胞の生残

..... 多田幸生、林勇二郎 (金沢大学工学部人間・機械工学科) .....13

生体凍結保存技術と細胞膜透過係数 ..... 白樫了 (東京大学生産技術研究所) .....21

細胞の凍結傷害 ..... 藤川清三 (北海道大学低温科学研究所、大学院地球環境科学研究科) .....29

エビの幼生を保存する ..... 黒倉寿 (東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻) .....37

魚肉タンパク質の冷凍変性 ..... 土屋隆英 (上智大学理工学部化学科) .....43

凍結魚の解凍過程における生化学的品質劣化と伝熱

..... 御木英昌 (鹿児島大学水産学部食糧保蔵学研究室) .....52

## 〈研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究-その3〉

「研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究-その3-」の編集にあたって

..... 第36期編集委員会 小澤由行 (高砂熱学工業) .....61

学のみに通じる技術は失敗以上の失敗 ..... 三浦隆利 (東北大学) .....62

「未成功研究の原因 - 研究の目標設定について考える -」 .. 矢部彰 (工業技術院機械技術研究所) .....66

研究計画に関する失敗談 ..... 西尾茂文 (東京大学生産技術研究所) .....69

ワンモアチャレンジを欠いた未成功 ..... 岡崎健 (東京工業大学) .....73

「パンドラの箱」 ..... 飯田嘉宏 (横浜国立大学) .....75

ひとを説得することのむずかしさ ..... 原村嘉彦 (神奈川工科大学) .....77

## 〈世界のホットユース〉

イリノイ大学アルバナ・シャンペイン校滞在記 ..... 榊原潤 (筑波大学構造工学系) .....80

## 〈行事カレンダー〉

.....83

## 〈支部活動報告〉

北海道支部活動報告 .....84

東北支部活動報告 .....84

関東支部活動報告 .....86

北陸信越支部活動報告 .....86

関西支部活動報告	87
中国四国支部活動報告	89
九州支部活動報告	89

## 〈お知らせ〉

第35回日本伝熱シンポジウム	92
第35回日本伝熱シンポジウム 併設展示会のご案内	117
第35回日本伝熱シンポジウム・レクチャーコースのご案内	117
1998年度熱工学講演会	118
日本伝熱学会関西支部 第5期定時総会・講演討論会	119
第32回 空気調和・冷凍連合講演会	119
2nd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation	120
VJSJ-SPIE98 - Yokohama “International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow”	120
PSFVIP-2: The 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing	121
東京大学生産技術研究所 教官候補者の公募について	121
「伝熱研究」会告の書き方	122
「伝熱研究」原稿の書き方	123
事務局からの連絡	124
日本伝熱学会、正会員学生会員入会申込み、変更届用紙	125
日本伝熱学会、賛助会員入会申込み、変更届用紙	126

## インターネット情報サービス

- <http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>  
最新の会告・行事の予定等を提供
- [htsj-info@mes.titech.ac.jp](mailto:htsj-info@mes.titech.ac.jp)  
最新の情報を電子メールで受け取りたい方のための電子メールアドレスの登録受付
- [htsj@mes.titech.ac.jp](mailto:htsj@mes.titech.ac.jp)  
事務局への連絡の電子メールによる受付

**Journal of The Heat Transfer Society of Japan**  
**Vol.37, No.145, April, 1998**

**CONTENTS**

**<Essay>**

Discussion in Conference and Development of Science and Technology Shigenao Maruyama (Tohoku University) .....	1
---	---

**<Special Issue: Cryopreservation of Biological Cells>**

Preface to Special Issue: Cryopreservation of Biological Cells Nobuhiro Himeno (Shinshu Univ., Dept. of Functional Machinery and Mechanics) Hideaki Imura (Kumamoto Univ., Dept. of Mechanical Engng. and Materials Science) .....	3
Ice Crystals and Biological Cells during Extracellular Freezing of Cell Suspensions Hiroshi Ishiguro (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba) .....	4
Heat Transfer and Viability of Cell during Freezing of Biological Tissue Yukio Tada (Dept. of Human and Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering) Yujiro Hayashi (Dept. of Human and Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering) ...	13
The Technique of Cryopreservation of Biological Materials from the view point of Membrane Permeabilities Ryo Shirakashi (Institute of Industrial Science, University of Tokyo) .....	21
Freezing Injury of Biological Cells Seizo Fujikawa (Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University. Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University).....	29
Preservation of Shrimp Larvae Hisashi Kurokura (Dept. of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo) .....	37
Freeze Denaturation of Fish Proteins Takahide Tsuchiya (Dept. of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Sophia University) ....	43
Deterioration of Biochemical Quality and Heat Transfer in the Thawing Process of a Frozen Fish Hidemasa Miki (Laboratory of Food Preservation, Faculty of Fisheries, Kagoshima University) ....	52
<b>&lt;From Research Notes: Still Unsucceeded Research on Heat Transfer Subjects- III ---&gt;</b>	
Preface to "From Research Notes"---Still Unsucceeded Research on Heat Transfer Subjects- III --- Yoshiyuki Kozawa (Takasago Thermal Engineering Co. Ltd.) .....	61
Through My Failure of Researches That Engineers Can't Understand Takatoshi Miura (Tohoku University) .....	62
Balance between the Importance for the Research and the Difficulty of Research Targets Akira Yabe (Mechanical Engineering Laboratory, AIST, MITI) .....	66

Failure on Research Planning	
Shigefumi Nishio (Institute of Industrial Science, University of Tokyo) .....	69
One More Challenge for Real Success	
Ken Okazaki (Tokyo Institute of Technology) .....	73
Pandora's Box	
Yoshihiro Iida (Yokohama National University) .....	75
Difficulty to Prevail on Others	
Yoshihiko Haramura (Dept. of Mechanical Engineering, Kanagawa University) .....	77
<b>&lt;World Hot Youth&gt;</b>	
My Wonderful Time in University of Illinois at Urbana-Champaign	
Jun Sakakibara (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba).....	80
<b>&lt;Calendar&gt;</b> .....	83
<b>&lt;Reports on the Activities of Chapters&gt;</b> .....	84
<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	92

## 学会討論と科学技術の進歩

*Discussion in Conference and  
Development of Science and Technology*

円山 重直 (東北大学)

*Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)*

## はじめに

私たちは講演会やシンポジウムなどの学会で研究成果を発表しています。学会における成果の発表と討論は研究の進展に重要な役割を果たしています。学会にわざわざ出かけて行って成果を発表するのは、発表によって自分の研究成果を出席者に誇示し、自分の研究業績を積み上げるだけのものでしょうか。

討論によって意見を交換し、その研究を発展させるのが学会の重要な役割であると考えます。これは、日本伝熱シンポジウム(以下「伝熱シンポ」と略記します)が長い間培って来たものです。活発な討論があって初めて学問の新しい発展があり、新しい科学技術の進展も望めるのではないのでしょうか。形式的な実績作りや仲間内のなれ合い討論の学会からは科学技術の大きな進展は望めません。

伝熱学会の将来や伝熱学の在り方については、既に多くの諸先輩方が本誌で議論しておりますし、私自身も意見を述べさせていただいております。本稿では、学会における討論の在り方や討論と学問領域の発展について、私見を述べさせていただきます。

## おいたち

私は、いわゆる流体力学の世界で学生時代を過ごしました。研究成果を国内の流体力学関連の学会で発表しましたが、当時は、学会の討論が白熱することはありませんでした。次第に発表になれて来るに従い、「学会発表なんて実績作りに行くものだ」と不遜ながら侮るようになってきました。

博士論文の内容の一部を海外の学会で発表させて頂いたとき、日本国内の学会とは全く違う雰囲気には驚いたことを覚えています。ある研究発表では、出席者の1人から「お前の研究は、私が10年前にやっており、この研究では新しい成果が出

ていない。」という意見が出るのです。また、他の発表では発表者と質問者の意見が合わず、セッション終了後に他の出席者も交えて熱い議論が交わされました。そのような討論を国内の流体関連学会で経験したことのない私にとって、これは大きな驚きでした。

その後、研究者の端くれとして相原利雄東北大学名誉教授のもとで伝熱の研究を行いました。初めて出席した伝熱シンポは、私にとって新たな驚きでした。教科書に名前が出ているような著名な大先生方が、講演会の最前列に陣取って若手研究者に鋭い質問を浴びせているのです。当時の私にとって、これは若者をいじめているようにしか見えませんでした。時折、若手研究者も「生意気に」反論したりすると、議論に熱が入り座長が治められなくなることもしばしばでした。このようなことは、当時の国内の流体関連学会では考えられないことでした。

私が自然対流の発表をしたとき、大先生が目の前でどのくらい自然対流の知識が有るかと言う質問をされ、冷や汗をかいた記憶があります。「これは大変な学会に所属したもんだ」と当時は思ったものでした。

## 現 状

伝熱シンポの出席を重ねる内に、漸く発表と討論を楽しむことが出来るようになりました。特に有り難いのは、色々な立場の研究者や先生方から意見を頂くことで、自分の研究がどの様な位置に有るかを考えることが出来る点です。また、先輩達からのコメントから研究の欠陥や弱点を修正することが出来ます。さらに、質問に答えている間に新たな研究の展開を思いついたり、質問者から新しいアイデアを教えていただくことも多いのです。自分たちのグループで考えていたら5年以上

かかることを、一瞬で気付かせてもらえるのですから儲けものです。

私自身が一聴衆として質問するときは、分からないところを教えて頂いたり、発表者の研究を発展させるために有益と思われるコメントを出来るだけ前向きに言うことを意識しているつもりです。しかし、自分の研究が完全であると思われる方々にとって、私の愚問は耳障りかもしれません。

学生の発表についても、なるべく上記の視点に立って討論しているつもりです。しかし、ある講演会の廊下で聞いた学生の会話の中に、「私に質問されないで良かった」と言う言葉を聞いて愕然としました。私の質問やコメントは、小姑のいびりにしか聞こえなかったのではないかと。

### 先輩達の思い

前述でのべた学生の会話は、私が伝熱シンポに初めて遭遇した時の立場と大先生の質問に似ています。つまり、先生達が会場の最前列に陣取り、質問を浴びせているのは、若者を虐めていると言うより、学問の発展を願うむしろ自然な姿とも考えられるのです。以前、ある著名な先生のお一人が中堅の先生に向かって「この頃の君の質問は優しすぎていかん」とおっしゃっていたことは、研究に対する真摯な気持ちに起因するのでしょうか。権威に溺れず、伝熱の研究を討論して行こうとする大先輩達の思いが「伝熱学会」でなく、「伝熱研究会」と言う形で長い間発展してきた理由かもしれません。

逆の見方をすれば、有能な研究者を蹴落とすのは簡単です。もし、彼がつまらない研究をしているのなら、それを誉めて何も非難せず、建設的なコメントもしなければ良いのです。その研究者は一生無駄な研究を行い、時間と能力を無駄に浪費することになるでしょうから。

もし、自分の研究が完全なものだと言う虚勢を捨てて、研究の進展を望むつもりで発表すれば、大先生のコメントも若手研究者の質問も研究の糧としてとらえることによって、討論を有意義なものとする事が出来るでしょう。分からないことを探求するのが研究です。

意見や立場が異なる場合には、誰に対しても自分の意見をはっきり述べるべきです。前節で述べた国際会議で、ある発表者の研究は無意味だと言

った話には、後日談があります。それを言われた研究者も言った研究者も懇親会では旧知の友のように親しく会話をしているのです。そんな雰囲気も以前の伝熱シンポの懇親会と似ています。

最近の伝熱シンポでは、仲間同士の形式的な討論もないわけでは有りません。また、少しつつこんだ討論をすると、その後の懇親会や発表会場で顔も合わせない方がおられます。完成された研究のみを発表するのならば討論は不要だし、その様な研究は学会誌に直接投稿すれば良いのです。伝熱シンポは若手研究者と大先生が火花を散らせて討論し、それを通して双方が有益なものを吸収し、新しい展開へと発展させる楽しさを味わいたいものです。

### 開かれた研究の新しい展開

新しい学問領域の学会は討論が活発です。完全主義の研究のみを発表したり、その分野の権威と言われる先生の顔色を伺っていたのでは、自分の研究に遅れを取るからです。1970年代に始まったオイルショックで、日本の伝熱研究は研究者と学問領域の底辺を広げることが出来ました。私の推測では、その頃の伝熱関連学会の討論はもっと活発だったのではないのでしょうか。

今、地球環境は人類の緊急課題となっています。その中で伝熱研究も新しい展開と大きなブレークスルーが待っているかもしれません。環境問題などの新しい流れに乗り遅れないように伝熱研究が展開をするためには、従来の学問常識に捕らわれない新しい発想と、それを受け入れて活発に討論する学会が不可欠です。

もし、伝熱研究者に他分野を受け入れる柔軟な姿勢が養われていれば、新たな科学技術の発展と展開を夢見て新分野を開拓し、その成果を伝熱シンポで発表・討論することが出来るのではないのでしょうか。心を開いて討論することによって、新しい発見や発想追求する研究の喜びを分かち合おうではありませんか。

向こう見ずで出しゃばりの一研究者の戯言として読んで頂ければ幸いです。



特集「生体細胞の凍結保存」にあたって

Preface to Special Issue: Cryopreservation of Biological Cells

第36期編集委員会

姫野 修廣 (信州大学繊維学部機能機械学科)

井村 英明 (熊本大学工学部知能生産システム工学科)

Nobuhiro HIMENO (Shinshu University, Dept. of Functional Machinery and Mechanics)

Hideaki IMURA (Kumamoto University, Dept. of Mechanical Engng. and Materials Science)

近年の伝熱研究の進歩と多様化は著しいが、その中でも生体関連の研究は最も関心の高い分野の一つであろう。昨年の第34回日本伝熱シンポジウムでもフロンティアフォーラムの一つとして「生体内における熱・物質・電磁波の輸送・伝播」が採り上げられ、その後本学会で同テーマに関する研究会（「生体内における熱・物質・電磁波の輸送・伝播に関する研究会」）が発足し活動中であることはご存じのとおりである。

ただ生体関連の研究は、従来の伝熱学的知識の他に生物学、医学、化学といった幅広い分野の知識が要求され、本学会の多くの研究者にとって関心はあるものなかなか入っていくにくい分野の一つではなかろうか。実際、上記研究会に参加しているメンバーを見ても工学、医学は言うまでもなく、家政学、生活科学といった分野の研究者も参加しており、また工学の中でも熱工学、バイオメカニクス、メカトロニクス、情報工学…といった具合に各メンバーの専門分野は極めて多彩で広範囲にわたっている。そこで最近の研究状況がある程度まとまった形で紹介し、この分野に多少なりとも関心をお持ちの研究者の参考になればと、本特集を企画した。ただし生体関連の伝熱研究といっても幅広く、また過去にも本学会誌（1994年4月号）で「生体内熱現象の解明の新技術」という特集が組まれていることから、重複を避けるためにも今回は特に「生体細胞の凍結保存」というテーマに焦点を絞った。

なお本特集テーマに関しては、本学会でも数年前から日本伝熱シンポジウムにおいて毎年何件か研究発表されるようになったが、そのきっかけとなったのは、カリフォルニア大学バークレー校機械工学科の Boris Rubinsky 教授の研究であろう。1986年サンフランシスコで開かれた第8回国際伝熱会議において同教授は生体組織の凍結保存と凍結手術に関して伝熱工学の立場を取り入れた基調講演を行ったが、この講演が本学会の研究者に及ぼした影響は非常に大きいように思う。筆者などはこれによって伝

熱工学の新たな発展の可能性を知ったし、これまで本学会で発表されている研究のほとんども Rubinsky 教授の研究を意識したものである。研究の動機としては、他にも当時日本のいくつかの大学病院で生体肝移植が成功し、臓器バンクに対する関心が高まったこともあろうが、いずれにせよ本学会で発表されている研究のほとんどは、Rubinsky 教授と同様、伝熱工学的立場に立脚した生体細胞凍結に関する基礎的研究である。ただ他の学会ではそれ以前から生体細胞の凍結保存に関しては研究が進められており、それらは主として精子、卵子、血液の冷凍保存や生鮮食料品の保存のように、本学会での研究に比べて実際の側面の強い研究のように思われる。

そこで本特集を企画するにあたり、こうしたこれまでの研究状況を踏まえ、生体細胞の凍結に関する基礎的側面と実際の応用に即した実際の側面の両方から概観できるよう心がけた。

具体的には、筑波大学の石黒助教授には氷結晶と血液細胞の形態学的相互作用、金沢大学の多田助教授にはモデル化や解析的取り扱いを中心とした生物体凍結における伝熱と細胞の生残、東京大学の白樫講師には生体細胞の凍結保存において重要となる細胞膜の物質透過率の影響、また北海道大学の藤川助教授には生体細胞の凍結保存時における凍結傷害のメカニズムの詳細についてご執筆いただき、基礎的側面に重きを置いた研究の紹介をお願いした。また応用的側面に関しては、東京大学の黒倉教授にエビの幼生の凍結保存、上智大学の土屋教授に魚肉タンパク質の冷凍変性、鹿児島大学の御木教授に凍結魚を解凍する際の諸問題についてご執筆いただき、実際の側面からの研究の紹介をお願いした。当初はこれらの他にも執筆項目を考えていたが、種々の事情により割愛せざるを得なかった。ただ本特集によりある程度は「生体細胞の凍結保存」について概観していただけるものと思う。最後に、各執筆者の方々には、年度末の最も忙しい時期にもかかわらず快く執筆をお引き受けいただき、深く感謝いたします。

## 細胞懸濁液の細胞外凍結過程における微視的構造

*Ice Crystals and Biological Cells during Extracellular Freezing of Cell Suspensions*

石黒 博 (筑波大学構造工学系)

Hiroshi ISHIGURO (Institute of Engineering Mechanics,  
University of Tsukuba)

## 1. はじめに

## 1.1 生体細胞の凍結保存とその必要性

生体細胞の凍結保存とは、細胞を *in vitro* の状態で凍結により、生命機能を損なわず、長期間保存し、解凍後、元の状態に戻すことである。その有効性は、低温の代謝抑制効果に基づいている。凍結保存の技術は、医療、農林、畜産、食品などの広い分野で利用されると共に、将来のバイオインダストリーの基盤技術の一つとなる可能性を秘めており、さらなる発展・拡大が望まれる。

## 1.2 凍結保存の現状

細胞の凍結保存は、歴史的には、Polger<sup>(1)</sup>による精子の凍結保存の偶然の成功(グリセロールの凍結保護物質として有効性の発見)に始まる。現在、凍結保存は、血液細胞、性殖細胞などの単一細胞や骨髄、角膜、皮膚などの極限られた組織に対して、ある程度、実用されている。しかし、スケールがより大きく、複雑な構造や機能をもつ組織や臓器などの凍結保存は、未だ、可能でない<sup>(2,3)</sup>。

この背景には、凍結保存対象である生体材料の複雑性・多様性、現象の階層構造と複雑性があると共に、経験的に先行した技術に対してその現象の素過程やメカニズムの解明が必ずしも十分でないことがあると考えられる。

1.3 凍結保存に対する伝熱工学の関わり<sup>(3,4,5)</sup>

伝熱工学では、生体細胞を物理的(伝熱工学的)構造物と見なし、細胞の凍結保存の過程を熱・物質移動や相変化という観点から取り扱うことにより、複雑性・多様性の中から普遍的な一般性のある知見を導くことができる。また、凍結保存に対するプロセス設計や関連の諸量や物性値の計測の必要性もある。さらに、凍結保存の方法論としてのブレイクスルーも望まれる。

## 2. 背景

## 2.1 細胞の生存率と細胞損傷の原因

細胞の凍結・融解後の生存率は、細胞の種類、凍結保護物質の種類と濃度、冷却速度や加温速度、保存温度などの熱的条件に依存する。ガラス化状態が誘起される超急速冷却の領域を除くと、生存率は、一般的に、冷却速度に対してベル形の分布形状を有し、最大生存率とそれに対応する最適冷却速度が存在する。最適冷却速度より高い冷却速度での生存率の減少は、主に、細胞内での氷晶形成が引き起こす細胞の膜構造の機械的損傷のためである。一方、最適冷却速度より低い冷却速度での細胞損傷の原因としては、1)凍結過程での細胞内外の水溶液中の電解質の濃縮(溶液効果)、および、2)凍結過程で成長する氷結晶が細胞に及ぼす機械的作用やそれに基づく細胞・細胞間の機械的作用が挙げられる。

この低速凍結での損傷機構は、特に、人間の赤血球を用いて盛んに研究され、低温生物学において論争が行われてきた。歴史的には、まず、1)の効果の主因であるという Lovelock<sup>(6,7)</sup>による塩害説が強い定説であった。その間、2)の効果による機械的損傷も溶血の重要な原因の一つであるという Nei<sup>(8,9)</sup>による仮説、および、凍結過程での細胞の浸透圧的な収縮が直接の損傷原因であるという Meryman<sup>(10)</sup>による仮説が提唱されたこともあった。ところが、その後、Mazur<sup>(11,12)</sup>は、Lovelockの実験条件の一般性の欠如を指摘し、凍結過程の未凍結水溶液の割合とその中のNaClの濃度とを独立に変化させ得る巧みな実験により、低速凍結過程での赤血球の生き残りは主に未凍結水溶液の割合に依存するという結果を得て、その損傷は2)の効果によると主張した(Unfrozen Fraction仮説)。その結果の一部を図1<sup>(12)</sup>に示す。グリセロールとNaClの重量比 $R=5.4$ の場合である。赤血球の凍結・融解後の生存率は、未凍結水溶液の重量割合 $L>0.2$ 以上では、NaClのモル濃度 $m_s$ との相関が主であるのに対し、 $L<0.2$ では、 $L$ に支配的に依存する。また、ヘマトクリット(懸濁液中の赤血球の体積割合)の増加に対する赤血球の生存率の減少に対して、Nei<sup>(13)</sup>や、その後、

Mazur<sup>(14)</sup>は、細胞同士の機械的作用の重要化を主張した。これに対し、Pegg<sup>(15,16,17)</sup>は、あくまでも1)の効果に基づいて現象を説明しようとした。歴史的には、2)の効果が重要な損傷原因の一つであるという説は姿を消すかのように思えたが、MazurらによるUnfrozen Fraction仮説により蘇ってきた。

### 2.2 凍結過程における氷結晶と細胞の相互作用

細胞の凍結保存では、細胞懸濁液はマクロな生体材料であり、凍結保護物質の条件や熱的条件は、その生存性を制御するマクロな伝熱工学的条件である。細胞の損傷機構や凍結保護物質の保護機構の解明の課題と関連して、このマクロ条件から細胞スケールレベル（未凍結水溶液や氷の状態、氷結晶と細胞の相互作用の特性）、さらに、電子顕微鏡レベル（細胞の膜構造の変化）<sup>(18,19)</sup>や分子レベル（生体高分子や水、氷の構造）<sup>(20,21)</sup>への階層的な影響過程を十分に理解する必要がある。ここで、(1)氷結晶の形態特性、および、(2)氷結晶と赤血球間の相互作用の特性は、(a)氷結晶や未凍結水溶液が赤血球に及ぼす力（細胞まわりの力学的雰囲気）を規定する因子であると共に、(b)細胞内外の水溶液の溶質の濃度（細胞まわりの化学的雰囲気）とも関連する。

以上の背景において、本稿では、凍結過程で細胞が受ける機械的作用の観点から、マクロ条件に対する細胞スケールレベルでの現象に注目する。すなわち、人間の赤血球懸濁液の細胞外凍結過程における氷結晶の形態特性、氷結晶と細胞の相互作用の特性、および、それに基づく細胞が受ける機械的作用の可能性に対して、マクロ条件として1)凍結保護物質を主とする添加剤の種類、2)ヘマトクリット、3)凍結保護物質の濃度、4)方向性凝固条件の影響などにつ

いて述べる。

### 3. 実験材料

実験材料は人間の赤血球懸濁液で、光学顕微鏡で微視的凍結挙動が観察できるようにヘマトクリット  $Ht=1\sim 10\%$ とした。懸濁用水溶液は、生理食塩水(154mM NaCl)や各種凍結保護物質などを添加した生理食塩水である。

### 4. 実験方法

試料の凍結には、凍結界面での温度勾配とその伝播速度を独立に設定できる方向性凝固法を用い、凍結過程の観察・記録のために、方向性凝固ステージを装着した光学顕微鏡とビデオシステムを用いた。図2の方向性凝固ステージは、二つの銅ブロックから成り、各々、試料の凝固温度より高温と低温に温度設定される。マイクロスライド上の試料中には、勾配Gの直線温度分布がほぼ実現しており、試料は、ステージ上を指定された速度Vで移動するため、冷却速度 $H=G \cdot V$ である。温度勾配ほぼ一定( $G=15.3\sim 22.5\text{ }^\circ\text{C/mm}$ )の条件で、試料の移動速度を変化( $V=0\sim 7.73\text{ mm/min}$ )させ、冷却速度を変化( $H=0\sim 117.9\text{ }^\circ\text{C/min}$ )させた。

### 5. 各種添加剤の影響

一般に、凍結保護物質は、低分子量の細胞膜透過型と高分子量の非透過型に大別される。前者の保護効果は後者に比べ大きい。その作用機序に関しては、溶液効果に対する保護効果が大きいことが知られているが、非透過型はその保護機序に関して十分には理解されていない。

赤血球懸濁液として6種類の水溶液を用いた。生理食塩水(154mM NaCl)、4種類の凍結保護物質であるグリセロール(20%v/v)(略称:Gly,  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ , MW=

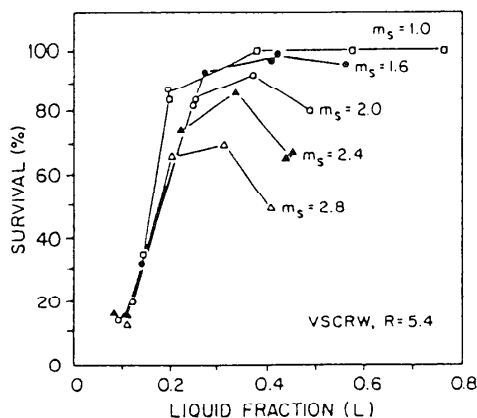


図1 未凍結水溶液の割合に対する赤血球の凍結・融解後の生存率

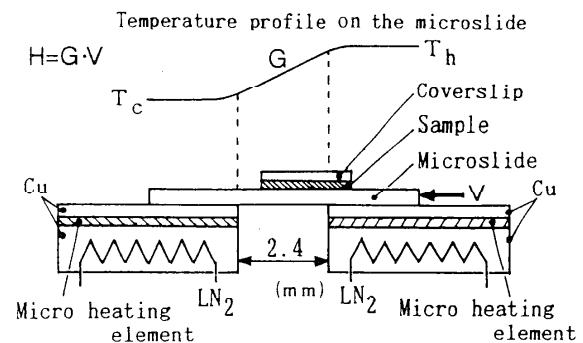
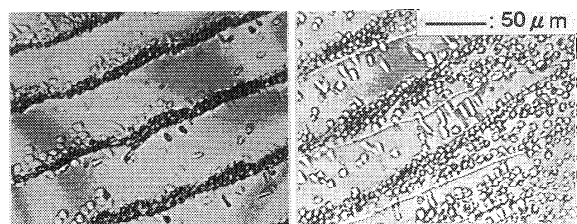


図2 方向性凝固ステージ

92.1)、ジメチルスルホキシド(2.00M)(略称:DMSO,  $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ , MW=78.14)、デキストラン(20.0wt%)(略称:Dxt,  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  MW= $4 \times 10^4$ )やポリビニルピロリドン(13.4wt%)(略称:PVP,  $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$  MW= $4 \times 10^4$ )を各々添加した生理食塩水、および、グリセロール(20%v/v)と不凍タンパク質(20mg/ml)を添加した生理食塩水である。GlyとDMSOは代表的な細胞膜透過型で、DxtとPVPは細胞膜非透過型である。不凍タンパク質はWinter flounder (*Pseudo- pleuronectus americanus*)、または、Ocean pout (*Macrozoarces americanus*)の血清から抽出、精製された不凍ポリペプチドで、グリセロールで保護された赤血球懸濁液に対するその添加の効果を調べた。

なお、以下の写真で、左側が低温側、右側が高温側で、氷結晶は低温側から成長し、粒子状に見えるのが赤血球である。

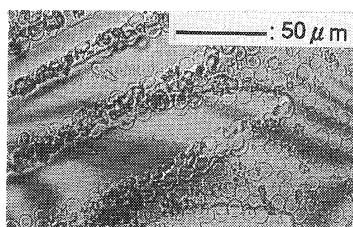
### 5.1 生理食塩水の場合(22,23,24)



a-1)氷結晶先端から  
約0.25mm低温領域

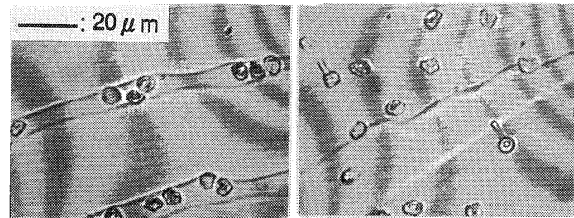
a-2)先端領域

a)H=10.0°C/min,G=20.0°C/mm,V=0.50mm/min(Ht=10%)



b)氷結晶先端近傍

H=6.9°C/min,G=15.3°C/mm,V=0.45mm/min(Ht=4%)



c)セル状氷結晶間の未凍結水溶液中の赤血球

d)氷結晶による赤血球の変形例

H=8.94°C/min,G=21.3°C/mm V=0.42mm/min(Ht=1%)

H=18.3°C/min,G=22.9°C/mm V=0.80mm/min(Ht=1%)

図3 凍結過程の氷結晶と赤血球(PS)

生理食塩水の赤血球懸濁液(PS)の凍結過程における氷結晶の形態の特徴は、試料の極く低い移動速度での平坦な固液界面のセル状(指状)界面への遷移、および、その遷移移動速度以上のセル状構造である。セル状構造は、試料の移動速度の増大に対して、結晶先端の曲率半径の減少など、微細化する。セル状氷結晶の場合の代表例を図3に示す。図3 a),b)に示すように、セル状氷結晶は、低温側程、その幅が広く、未凍結水溶液の溝の幅は狭い。また、成長する氷結晶が赤血球の存在により形態変化を受けることはほとんどない。

一方、分散する赤血球の大部分は、氷結晶からの機械的作用(氷壁からの反発力)により、氷結晶間の未凍結水溶液の溝中に集積され、低温側では、さらに詰め込まれ、互いに密着する。Ht=1%の図3c)では、赤血球は溝中に一列に並んでいるが、Ht=10%の場合(図3 a-1)には、密に詰め込まれる程度は著しい。これらの赤血球は、溝中の高濃度の電解質水溶液にもさらされるため、脱水、収縮する。また、いくらかの赤血球は、氷結晶とガラス板の間に挟まれ、著しく変形する(図3 d))。以上のことは、赤血球が氷結晶や周囲の他の赤血球から機械的作用を受けることを示す。

### 5.2 凍結保護物質を添加した生理食塩水の場合

凍結保護物質を添加した生理食塩水の場合には、細胞膜透過型、非透過型を問わず、いずれの場合も、氷結晶と赤血球の微視的挙動は、著しく変化する。すなわち、氷結晶の構造は高次化し、氷結晶と赤血球の相互作用の特性は柔軟化する。

グリセロールを添加した場合(PS+Gly)(22,23,24)を図4に示す。PSの場合と異なり、セル状氷結晶(1次アーム)に2次、3次の高次アームを伴う樹枝状構造である(図4a))。試料の移動速度の増加に対して、結晶の方向性はより強く、分岐したアームの配列はより規則的になると共に、結晶構造の長さスケールの減少、高次アームの発生、結晶先端の曲率半径の減少など、微細化、高次化する。

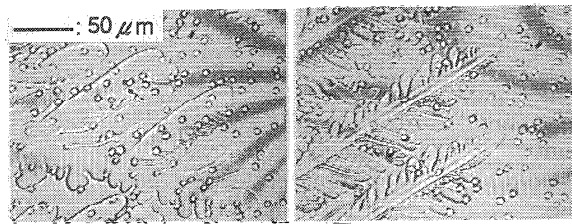
高次アームの発生機構は、結晶成長の理論から理解され、固液界面近傍の液相中の温度分布と熱平衡凝固温度分布の差である組成的過冷却に基づく、局所的に平坦な界面の形態学的不安定化の結果である。グリセロールの添加や試料の移動速度の増加により、組成的過冷却とそれによる界面形態的不安定化が促進され、結果として、高次構造に遷移しやすくなる。

氷結晶の先端近傍での固液界面と赤血球の相互作用

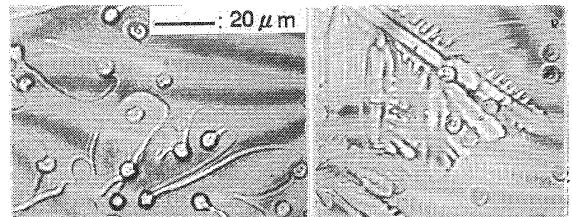
用の代表例を図4b)に示す。図4b-1)では、界面は赤血球の形状に従って柔軟に変形しながら、赤血球を包み込むように成長する。この場合、赤血球の存在がしばしば氷結晶の分岐点となる。この相互作用の様式は、試料の移動速度が高い図4b-2)でも同様で、氷結晶の先端が赤血球の存在により分岐する。

一方、赤血球は、氷結晶の成長により押し動かされることはほとんどなく、赤血球は凍結以前のように分散したままで静止しており、互いに接触することも無い。また、分岐点に位置する赤血球は、生理食塩水の場合と異なり、著しい変形は受けない。さらに、図4c)の赤血球は、結晶先端近く同様、分散したままで、その形もはっきり見える。従って、グリセロールの添加により、氷・細胞間の相互作用が柔軟化し、赤血球が氷結晶や周囲の他の赤血球から受ける圧迫やせん断などの機械的作用が軽減される。

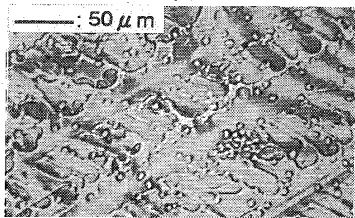
細胞膜透過型凍結保護物質であるDMSO<sup>(25)</sup>や非透過型のDxt、PVP<sup>(26)</sup>を添加した生理食塩水の場合も、PS+Glyの場合と、定性的に同様の添加効果を



a-1)H=11.0°C/min a-2)H=31.2°C/min  
G=20.0°C/mm,V=0.55mm/min G=20.4°C/mm,V=1.53mm/min  
a)氷結晶先端領域



b-1)H=21.6°C/min b-2)H=40.5°C/min  
G=25.0°C/mm,V=0.86mm/min G=25.0°C/mm,V=1.62mm/min  
b)固液界面と赤血球の相互作用



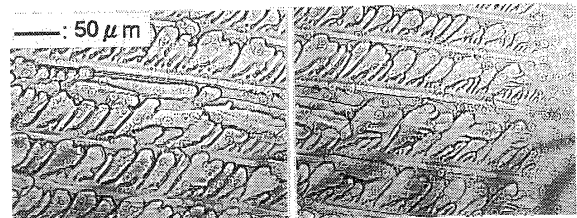
c) a-2)の氷結晶先端から約0.25mm低温領域  
図4 凍結過程の氷結晶と赤血球(PS+Gly,Ht=1%)

示す。例えば、PS+DMSOの場合の凍結過程の氷結晶と赤血球の例を図5に、PS+Dxtの例を図6に示す。PSの場合に比べ、氷結晶の形態は、等しい冷却速度で、高次アームを伴い、微細化する。氷結晶は赤血球に対して、分岐を含め、固液界面を柔軟に変形させながら成長するため、赤血球は動かされることがほとんどなく分散したままである。これは、細胞膜透過型、非透過型を問わず、凍結保護物質は、氷結晶・細胞間の相互作用を柔軟化し、細胞に対する機械的作用を軽減する効果をもつ<sup>(27)</sup>。

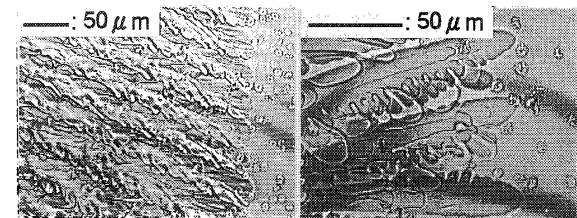
### 5.3 不凍タンパク質を添加した場合<sup>(24,28,29)</sup>

自然界の低温環境を生き抜く生物は、低温に対する独特の防御法を身につけている。その一つに、極海や北温帯の海に生息する魚の体の凍結回避のための特殊なタンパク質(不凍タンパク質)がある。そこで、グリセロールで保護された赤血球懸濁液に対するこの不凍タンパク質の効果を調べた。

PS+Gly+AFPの場合、2種類の不凍タンパク質の効果は同様で、氷結晶の基本的形態は、針状の独特の形態をとり、試料の移動速度には依存せず、前節までのセル状や樹枝状構造と著しく異なる。その例を図7a)に示す。方向性の強い針状結晶は、ある程度、束の状態で、針の向きに間欠的に成長する。次に、針状結晶の側面から新たな氷結晶が発生し、針状結晶の間の未凍結水溶液中を高温側・低温側の両



a)氷結晶先端から約0.25mm低温領域 b)先端領域  
図5 凍結過程の氷結晶と赤血球(PS+DMSO,Ht=2%)  
(H=38.6°C/min,G=15.3°C/mm,V=2.53mm/min)

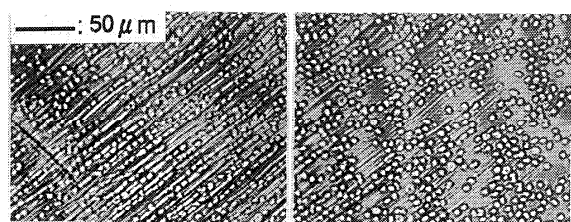


a)先端領域 b)固液界面と赤血球の相互作用  
図6 凍結過程の氷結晶と赤血球(PS+Dxt,Ht=2%)  
(H=10.8°C/min,G=15.3°C/mm,V=0.71mm/min)

方に向かって急速に成長し、同様の針状結晶となる。低温側程、針状結晶は稠密であり、未凍結水溶液の割合が小さい。この針状結晶は微細で、その太さスケールは赤血球の直径（約  $8\ \mu\text{m}$ ）より小さい。

この針状構造は、組成的過冷却に基づく形態学的不安定により形成されるアーム構造とは著しく異なり、氷結晶の形態に対して、不凍タンパク質の影響が支配的である。その作用機構は次のように考えられている。タンパク質は、六角プリズム形の氷結晶の底面と柱面のうち、柱面に吸着し、その結晶面に水分子がさらに吸着することを抑制する（凝固点降下と  $a$  軸方向への氷結晶の成長の抑制）。従って、氷結晶は底面に垂直な  $c$  軸方向に成長することにより、針状の構造が形成される。針状氷結晶の形態が、赤血球の存在により変化を受けることはない。

一方、針状結晶の先端近傍の多くの赤血球は、高温側に向かって成長する氷結晶により、引きずり動かされたり、押し動かされる。一部の赤血球は、低温側へ伸びる氷結晶により、低温側へ動かされる。



a-1)氷結晶先端から  
約0.25mm低温領域  
a)H=20.5°C/min,G=20.0°C/mm,V=1.03mm/min



b-1) b-2) b-3)  
b)氷結晶との相互作用による赤血球の破壊例  
(H=3.17°C/min,G=20.0°C/mm,V=0.16mm/min)

図7 凍結過程の氷結晶と赤血球  
(PS+Gly+AFP, Ht=10%)

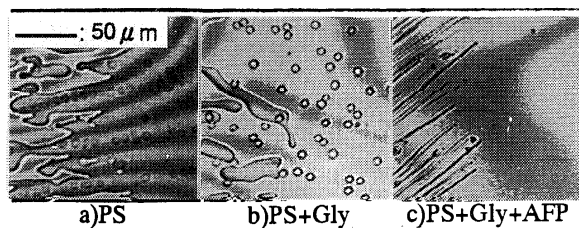


図8 融解直後の赤血球の状態

すべての赤血球は、温度が低下し氷結晶の成長と共に針状結晶の間に挟まれ、動かなくなる。凍結の進行と共に、赤血球は氷結晶からの直接的作用により、変形し、破壊にまで至る。その過程は頻りに観察され、その例を図7b)に示す。同図b-1)~b-3)は、同一位置の時系列変化を示しており、b-2), b-3)は、b-1)に対して、各々、約2秒、5秒後である。b-1)中の明瞭な形の丸い赤血球は、急に、b-2)のように平たく変形させられ、その後、b-3)のように次第に形が不明瞭になり、見えなくなる。この赤血球の移動、変形や破壊は、氷結晶からの圧縮やせん断などの機械的ストレスが原因であることを示す。

#### 5.4 融解直後の赤血球の状態

凍結・融解後の赤血球の状態に対する添加物の影響をPS, PS+Gly, PS+Gly+AFPの場合について図8に示す。PSの場合、赤血球は、凍結過程でセル状氷結晶間の未凍結水溶液中に集積し、詰め込まれるが、融解直後、その未凍結水溶液の溝に対応する位置でゴースト（赤血球から内容物が出た抜け殻）状態で観察され、生存していない。これに対して、PS+Glyの場合、多くの赤血球が元の形を保ち、凍結過程同様、分散したままで生存している。他の凍結保護物質や熱的条件についても、生存率の差異を除けば定性的に同様である。また、PS+Gly+AFPでは、凍結過程で赤血球が破壊され、その内容物が外に放出されるため、融解するや否や、赤血球の陰も形もなく、ゴーストさえもない。

PS+Gly+AFPの場合、針状結晶であるいずれの冷却条件においても、赤血球は完全に破壊される。従って、本研究で用いた濃度の不凍タンパク質の添加は、グリセロールを用いた赤血球の凍結保存に対して逆効果をもつが、同時に、この結果は大変重要な示唆を含む。すなわち、不凍タンパク質の添加量は、 $1 \times 10^{-3}\ \text{M}$ のオーダーで他の溶質のモル濃度に比べわずかであるため、水溶液中の浸透圧状態に及ぼす影響は小さく、赤血球はグリセロールにより、化学的に（溶液効果から）保護されている。不凍タンパク質添加による赤血球の完全な破壊は、タンパク質が凍結過程における氷結晶の形態を著しく変化させ、氷結晶が赤血球に直接的に機械的作用を及ぼし、赤血球を損傷させるためである。氷結晶からの機械的作用の観点から、凍結過程における氷結晶の形態特性や氷結晶と赤血球の相互作用の特性は、その生存性に対する影響因子の一つである。

### 6. ヘマトクリットの影響<sup>(30)</sup>

PS, PS+Gly, PS+Gly+AFPに対して、Ht=1%と10%の結果から、ヘマトクリットの影響を考える。

PSの場合、氷壁の赤血球に対する強い機械的な作用により、赤血球はセル状氷結晶間の未凍結水溶液の溝中に集積され、詰め込まれる。その結果、ヘマトクリットが大きい場合、これらの赤血球は互いに密着し、赤血球間でも強い機械的作用を及ぼし合い、この効果は、ヘマトクリットの増加に対して、大きくなると考えられる。

PS+Glyの場合、氷結晶は固液界面を赤血球に応じて柔軟に変形させながら、赤血球を穏やかに包み込むように成長する。この固液界面と赤血球の相互作用の特性は、氷・細胞間の機械的相互作用が弱いことを示す。さらに、氷・細胞間の相互作用により、赤血球が寄せ集められることがなく、分散したままであるため、赤血球同志の接触が発生し難く、細胞・細胞間の機械的相互作用は起こり難い。従って、グリセロールは、氷・細胞間の機械的作用とそれによる細胞・細胞間の機械的作用を緩和する効果を有する。しかし、ヘマトクリットの増加に対して細胞・細胞間の機械的作用は重要化すると考えられる。

PS+Gly+AFPの場合、針状氷結晶は直線的で、その方向性は強く、その太さは赤血球の大きさより小さく、氷結晶間の未凍結水溶液の幅は、概ね赤血球の大きさ程度であるため、未凍結領域で分散している赤血球は、氷結晶の成長と共に、直線的に再配列させられる。従って、個々の赤血球は、直接、氷結晶との強い機械的作用をもつが、赤血球同志の接触とそれによる赤血球間の機械的作用は生じ難い。

凍結過程において、赤血球が受ける圧迫、せん断、変形などの機械的作用は、基本的には、氷結晶からもたらされるが、氷結晶が、直接、赤血球に及ぼす作用と細胞同志の接触による作用に分けられる。この機械的作用の可能性は、赤血球懸濁液の水溶液の種類、ヘマトクリットや冷却速度により定まる、氷結晶の空間スケールを含めた形態特性や氷結晶と赤血球との相互作用の特性に、直接、依存する。このことは、細胞損傷に重要な影響をもつ因子の1つは、凍結過程における未凍結水溶液の割合<sup>(12)</sup>よりも、むしろ、赤血球まわりの水溶液溝の大きさであることを示唆する。

### 7. 凍結保護物質濃度の影響<sup>(31)</sup>

グリセロールを添加した生理食塩水の赤血球懸濁液に対して、グリセロール濃度Cと冷却速度Hに対する氷結晶の形態の分類とその領域分けを図9に示す。領域Pは、平坦な界面の条件を、領域I、IIおよびIIIは、各々、1次アーム、2次アーム、3次アームの出現する条件を示す。グリセロール濃度の増加に対して、1次、2次、3次アームの出現する冷却速度が、各々、低下する。以上の特性は、グリセロール濃度と冷却速度の増加に対する氷結晶の形態構造の高次化・微細化を示しており、両マクロパラメータの増加が、固液界面近傍の水溶液中の組成的過冷却の促進とそれに基づく固液界面の形態の不安定化の促進を引き起こすためである。

氷結晶先端近傍での氷結晶と赤血球の相互作用の様式の分類と、グリセロール濃度と冷却速度に対するその領域分けを図10に示す。領域Iは赤血球が氷により押し動かされる条件を、領域IIは赤血球が押し動かされずに変形を受ける条件を、領域IIIは赤血球が押し動かされずに変形を受けず、元の形状を保持する条件を示す。

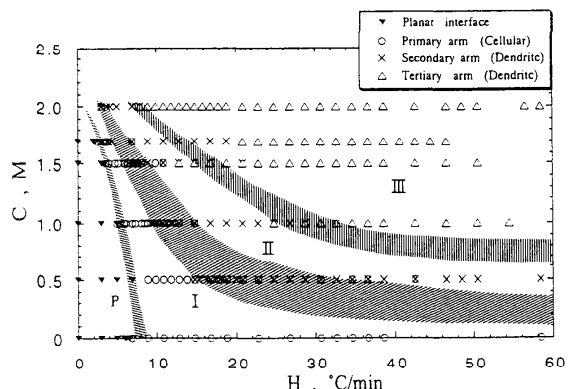


図9 氷結晶の形態構造に対するグリセロール濃度と冷却速度の影響

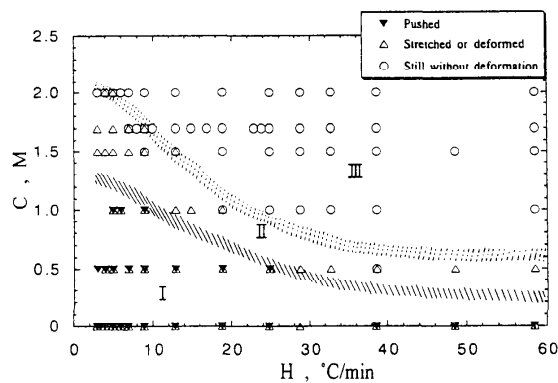


図10 氷・赤血球間の相互作用に対するグリセロール濃度と冷却速度の影響(Ht=2%)

域Ⅲは赤血球の移動も変形もない領域を表す。C=0, 0.5Mの場合、本研究のHの全範囲で、赤血球の移動または、変形が見られるのに対し、C=1.0Mの場合H $\geq$ 25°C/minで、C=1.5, 1.7, 2.0Mの場合、ほぼH $\geq$ 10°C/minの範囲で移動も変形もなく赤血球は分散したままである。従って、グリセロール濃度と冷却速度の増加に対して、氷結晶による赤血球の移動や変形は次第になくなり、相互作用の特性は柔軟化する。これは、氷結晶の赤血球に対する機械的作用が緩和すると共に、赤血球間の接触と氷結晶からの機械的作用に基づく細胞・細胞間相互作用が起り難くなることを示す。

図9と図10の比較で、3次アームが出現する領域Ⅲと赤血球の移動も変形も見られない領域Ⅲはほぼ一致する。これは定性的には、固液界面の組成的過冷却のために固液界面が形態学的に不安定化し、氷結晶が微細・高次構造を取りやすい条件下で、氷・細胞間相互作用が緩和されやすいためであると考えられる。

#### 8. 方向性凝固条件の影響<sup>(32,33)</sup>

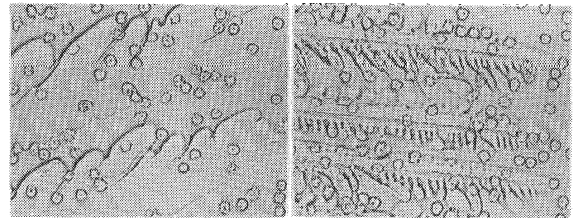
従来、冷却過程のマクロ条件は、主に、冷却速度Hだけで規定されてきたが、温度勾配Gとその伝播速度Vは、結晶の形態形成に対して独立の影響をもち、方向性凝固法では、等しい冷却速度H=G $\cdot$ V<sub>i</sub>に対して、(G,V)の組み合わせを変化させることができる。PS, PS+DMSO, PS+Dxtの3種類の赤血球懸濁液に対して、温度勾配G=2.5~78.0°C/mmの間の6通りの条件とし、ほとんどの場合、冷却速度H=2.0~500.0°C/minの間の10通りとなるように、試料の移動速度(V=0.06~32.68mm/min)を設定した。

PS, PS+DMSO, PS+Dxtいずれの場合も、氷結晶の形態はアーム構造であり、その形成機構は組成的過冷却に基づく固液界面の形態学的不安定化であるため温度勾配の減少と冷却速度の増加に対して、氷結晶の形態は高次化、微細化する。

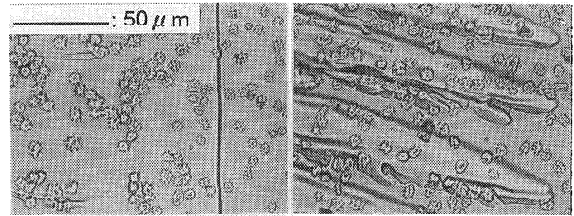
PS+DMSOの場合の例を図11に示す。図11c)では平坦な界面であるが、図11d)では1次アームから分岐した2次アームがある。図11a)でも2次アームであるが、d)に比べ、1次アームの間隔が広く、先鋭な構造であり、冷却速度の増加した図11b)では3次アームが出現する。

PS+DMSOの場合の氷結晶の形態の分類と、GとHに対するその領域分けを図12に示す。領域Pは、平坦界面の領域で、領域I、II、IIIは、各々、1

次、2次、3次アームの出現する領域を示す。温度勾配の増加に対して、1次、2次、3次アームの出現する冷却速度が各々、増加する。また、5.2節での結果と同様に、DMSOの添加により、氷結晶の形態は、等しい(G,H)の組み合わせに対して、高次化、微細化するため、PS+DMSOの場合の1次、



a)G=15.3°C/mm,H=10.0°C/min, b)G=15.3°C/mm,H=75.0°C/min



c)G=78.0°C/mm,H=10.0°C/min, d)G=78.0°C/mm,H=75.0°C/min

図11 凍結過程の水結晶と赤血球(PS+DMSO,Ht=2%)

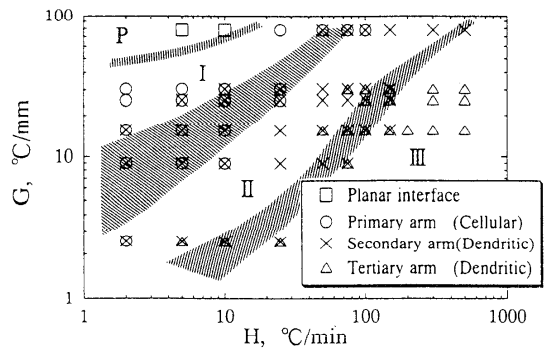


図12 氷結晶の形態構造に対する(G,H)の影響 (PS+DMSO,Ht=2%)

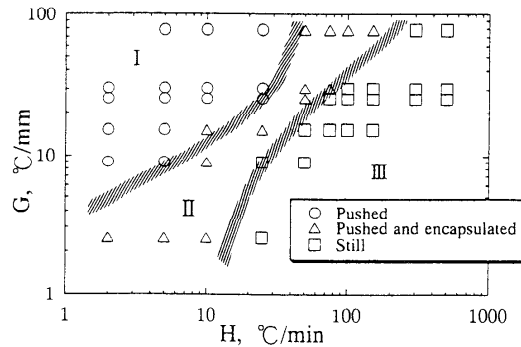


図13 氷・赤血球間の相互作用に対する(G,H)の影響 (PS+DMSO,Ht=2%)



、2次、3次アームが各々出現する領域は、PSの場合に比べ、(高いG,低いH)の方向に移動する。この特性は、PS+Dxtの場合にも定性的に同様である。

一方、PS+DMSOの場合、平坦界面により赤血球は、PSの場合同様、押し動かされる(図11c)。図11a),d)で、赤血球は氷結晶によりわずか押された後、氷の中に取り込まれる。図11b)では、氷結晶は赤血球に対して固液界面を柔軟に変形させながら成長すると共に、氷結晶は赤血球の存在により分岐し、この過程で赤血球は動かされることなく分散したままである。

GとHに対する相互作用の様式分類とその領域分けを図13に示す。領域Ⅰは赤血球が氷により押し動かされる条件を、領域Ⅱは赤血球が氷結晶によりわずか動かされ、取り込まれる条件を、領域Ⅲは赤血球の移動のない条件を表す。領域Ⅰ、領域Ⅱでは赤血球の変形も見られる。温度勾配の減少と冷却速度Hの増加に対して、相互作用の特性が柔軟化する傾向がある。また、PSの場合に比べ、凍結保護物質の添加により、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの各領域は、氷結晶の形態の領域分け同様、(高いG,低いH)の方向へずれ、全体的に相互作用の特性が柔軟化する。

## 9. まとめ

本研究結果に基づいて、氷結晶と細胞の相互作用の特性を「柔軟性のない特性」と「柔軟性のある特性」に大別できる。特に、懸濁用の水溶液の種類に対して、PS、PS+Gly+AFPは前者に分類され、凍結保護物質を添加したそれ以外の水溶液は後者に分類される。前者では、氷結晶の細胞に対する機械的作用が大きく、後者では凍結保護物質により緩和されている。これは、Mazurらの主張する機械的作用の重要性を微視的観点から支持している。

凍結保護物質濃度の増加、温度勾配の減少、冷却速度の増加による、組成的過冷却に基づく氷結晶の形態の高次化、微細化過程は、水溶液中の溶質の初期濃度、溶質や溶媒の拡散係数、相平衡図の液相線の特性、固液界面張力などの物性値に依存する。さらに、同様のマクロ条件で、氷結晶と細胞の相互作用の特性を柔軟化する傾向があるが、この過程では、結晶成長に関わる因子に加え、固・液・細胞間の界面エネルギー、液相の粘性係数や分子間隔、細胞の形状、大きさ、細胞膜の物質透過性、液相凝固時の体積増加などが影響をもつと考えられる。今後、マクロ条件の影響を詳細に体系化するには、関連の物

性値の違いを各種添加物で明らかにする必要がある。

また、本結果を含め、マクロレベルから細胞スケールレベル、さらに微細なスケールレベルへ及び各階層間の現象の連結が必要である。

## 10. おわりに

米国では、凍結保存や凍結手術など生体の凍結の研究に関わりをもつ伝熱工学の研究者は、日本に比べ、数が多く、その層も厚く、新しい情報が発信されている。また、機械工学分野の研究者がSociety For Cryobiology (国際低温生物学会)やAmerican College of Cryosurgery (米国凍結手術学会)の会長を務めたりもする。これは、私見であるが、このような日米間の違いは、日本では他者との類似点に自分のアイデンティティ(自己同一性:自分が自分たる所以)を求めるのに対して、米国では他者との相違点にアイデンティティを求める面があるという文化的背景の違いが少なからず影響を及ぼしている様に感じられる。

昨年、4月に、米国、イリノイ大学アーバンシャンペイン校で開かれた「生体熱工学の将来」というワークショップに参加した。生体熱工学の将来に関して、PhDの学生も含め若い研究者が活発に発言するのに驚いた。論文や著書で高名を拝する、生体熱工学で名を成した偉い先生は議論の交通整理役ともいう感じであった。この印象を米国のある教授に話したところ、これが米国の教育の成功している点であると返事が帰ってきた。妙に、感じ入ったことを覚えている。

最後に、細胞の凍結保存は、伝熱工学とは異なる、医学、生物学、農学などの分野で生まれ、発展してきたが、今後、伝熱工学も含めた関連分野の総合的集約により、学問的・技術的に、凍結保存が進歩することを願う次第である。

## 参考文献

1. Polge, C. et al., Nature, 164(1949)666
2. 阿曾・隅田, 低温医学(1983), 朝倉書店
3. 棚沢, 機誌93-864(1990)926
4. 石黒, 機誌, 99-927(1996)107
5. 石黒, 熱工学シンポジウム講演論文集No. 97-6(1997)89
6. Lovelock, J.E., Biochim. Biophys. Acta 10(1953), 414
7. Lovelock, J.E., Biochim. Biophys. Acta 11(1953), 28
8. Nei, T., Cryobiology 4(1967), 153.

9. Nei, T., *Cryobiology* 4(1968), 303.
10. Meryman, H. T., *Nature* 218(1968), 333.
11. Mazur, P., et al., *Biophys. J.*, 36(1981), 653.
12. Mazur, P. and Rigopoulos, N., *Cryobiology* 20 (1983), 274.
13. Nei, T., *Cryobiology* 18(1981)229
14. Mazur, P. and Cole, K., *Cryobiology* 22(1985)509
15. Pegg, D. E. and Diaper, M. P., *Biophys. J.* 54(1988), 471.
16. Pegg, D. E. and Diaper, M. P., *Cryobiology* 26 (1989), 30.
17. Pegg, D. E., *Cryobiology* 18(1981)221
18. 藤川, 日本冷凍協会論文集4-1(1987)11
19. Fujikawa, S., *Cryobiology* 32(1995)444
20. 村勢ほか, 日本冷凍協会論文集3-1(1986)13
21. 村勢, 機誌, 99-927(1996)90
22. 石黒・Rubinsky, 機論B60-572(1994)1349
23. Ishiguro, H. and Rubinsky, B., *Proc. 10th Int. Heat Trans. Conf.*, Vol.4(1994)43.
24. Ishiguro H. and Rubinsky B., *Cryobiology* 31-5(1994) 483
25. 石黒・喜多, 第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1995)91
26. 石黒・尾山, 同上(1995)89
27. 石黒, 低温生物工学会誌41-2(1995)100
28. 石黒・Rubinsky, 機論B60-579(1994)3748
29. Ishiguro H. and Rubinsky B., *Int. J. Heat Mass Transfer*, to be published(1998)
30. 石黒・Rubinsky, 機論B60-579(1994)3755
31. Ishiguro H. and Koike K., *Proc. Int. Conf. on New Frontiers in Biomech. Eng.*(1997)349
32. 石黒ら, 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(I)(1997)274
33. 石黒ら, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集 No.97-25(1997)236

## 生物体凍結における伝熱と細胞の生残

*Heat Transfer and Viability of Cell during freezing of Biological Tissue*

多田 幸生、林 勇二郎（金沢大学工学部人間・機械工学科）

Yukio TADA and Yujiro IIZASIII (Dept. of Human and Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering)

## 1. はじめに

生体に含まれる水は、重量あたり約70から90%を占め、物質移動や種々の生化学反応の媒体として、さらには生体高分子の立体構造化の立役者として生体の生命活動と深く関わっている。凍結保存は、低温化と活性水分の低減により代謝機能を抑制し、生存状態を維持した生体の長期保存を目的とするが、冷却操作によっては致命的な損傷が発生する。これは、生体内の水が、無機塩溶質と水和した自由水や蛋白質などの高分子と結びついた結合水の状態が存在し、さらにそれらが細胞内外の狭い領域に閉じ込められていることに起因する。このような水分の化学的・物理的な拘束性が、凍結の過程において、細胞外での優先的な凍結、細胞の脱水・収縮、細胞内での微細氷晶の形成などの細胞レベルのマイクロ現象、さらには分子レベルの現象を発生させ、これが各種の機械的・膠質的損傷<sup>(1)</sup>をもたらす要因となっている。これらの損傷を回避あるいは最小限に抑えて保存するためには、凍結に伴うマイクロ挙動を組み込んだ輸送現象論を基盤とした高度なレベルの熱制御の確立が必要となっている。

凍結保存の研究は医学、農学、低温生物学、さらには工学の分野からのアプローチがなされている。なかでも、最近の伝熱学の実践は、米国、日本、英国を中心に活発である。しかし、分子レベルの生物代謝に関わる生体の生存を、個体あるいは細胞が集合した組織を対象に、高い解像度をもって記述できる輸送現象論を構築するには、伝熱研究の斬新なパラダイムシフトが必須である。

本稿では、これまで著者らの研究室で進めてきた単細胞ならびに組織細胞の凍結モデルを紹介するとともに、生物体における伝熱過程と細胞の生存の関連について述べ、生体複雑系におけるマイクロスケールな輸送現象論の新たな展開を探る。

## 2. 凍結におけるマクロ伝熱とマイクロ現象

生物体は、高分子蛋白による構造水を含む細胞を中間単位とした重階層構造のもとで、分子・原子レベルでの代謝にはじまる各階層での物質・エネルギーの輸送が制御され、最終的に最上位である個体の生命活動を維持している。このような生物体の凍結保存における損傷機構の究明には、図1に示される階層的な取り扱いが必要である。まず、マクロスケールには、固相、固液共存相（マッシュ域）、液相の3領域からなる相変化熱伝導の問題となる。次いで、ミクロスケールには、細胞外の優先凍結、細胞膜を通じた水分移動、細胞の変形、過冷却状態からの細胞内氷晶の形成など、細胞レベルでのマイクロ挙動の問題となる。このレベルでは、氷晶による機械的損傷が生じる。さらに、分子レベルでは、細胞の脱水・収縮により、細胞内電解質溶液の濃縮による塩析<sup>(2)</sup>や高分子蛋白質のcross-linking<sup>(3)</sup>などの細胞の生死に関わる損傷が発生するため、最終的にはこのレベルでの取り扱いが究極となる。すなわち、生存に関わる分子レベルの状態を、ミクロレベルの挙動を媒介として制御するのは、潜熱を除去する熱操作であり、直接的には場の温度あるいはその勾配を規定するマクロスケールの伝熱である。このため、生物体における生存状態を評価し得る物理量を直接的・間接的に熱伝導方程式に組み込まなければならない。

生物体凍結に関する従来の研究<sup>(4)~(23)</sup>を集約し、図2に示す。伝熱研究の対象が単細胞から組織体へ、また、現象のスケールがマクロからマイクロへ、さらに近年では細胞の生存状態に関わる分子レベルへと拡張されつつあることが判る。以下では、これらの研究のなかで、単細胞の凍結におけるマイクロ挙動、および組織細胞の凍結モデル、ならびに凍結後の細胞の生残率の推算を含めた凍結損傷の機序について概説する。

3. 単細胞の凍結

3.1 凍結におけるマイクロ挙動

生物体の構成要素である単細胞を対象に、その凍結過程におけるマイクロ挙動を観察例をもとに説明する<sup>(13)(14)</sup>。小麦プロトプラストを懸濁した試料液の凍結および解凍過程の様相を組写真で図3に示す。

冷却により、まず細胞外で氷晶が出現する(図3(2))。細胞外では、氷晶からの溶質の排出により溶液が濃縮されるため、凝固点降下を伴いながら凍結が進行する。他方、細胞外の氷晶に挟まれた細胞は、周囲の濃縮溶液との浸透圧差により脱水・収縮する。冷却速度が大きいと、水の流出が冷却に追従できないため細胞内の過冷却状態は増大し、やがてある過冷

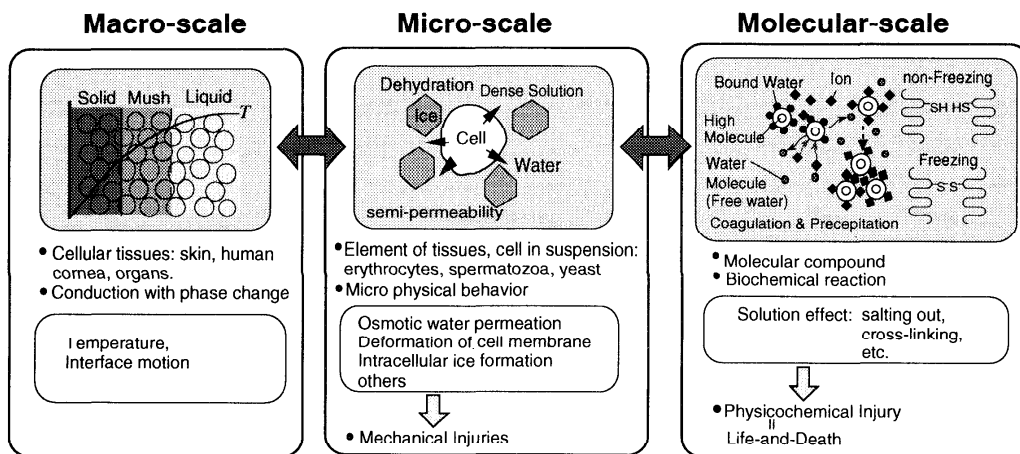


図1 生物体凍結における階層的取り扱い

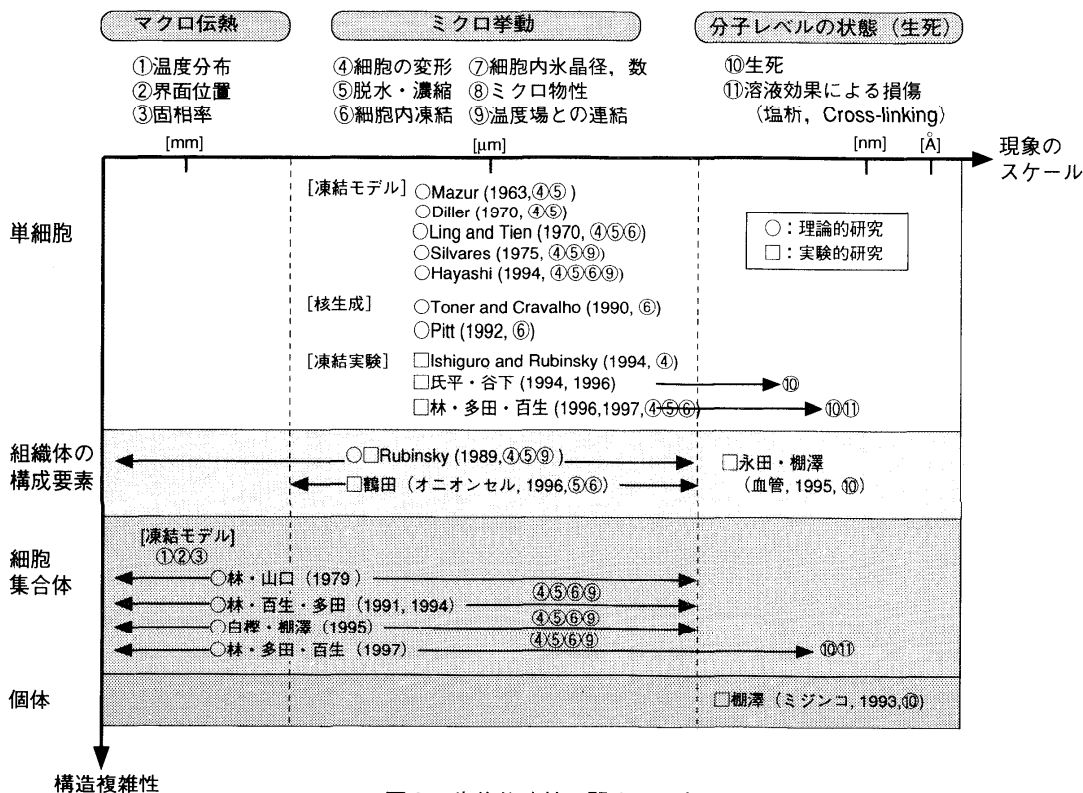


図2 生物体凍結に関する研究

度で細胞内に微細な氷晶が発生する。しかし、ここの結果は冷却速度が小さいため、細胞内に氷晶は形成されず、細胞の形状は変形し溶液は濃縮するにとどまる。(図3(3))。解凍過程では、細胞外の氷晶が融解し、細胞のまわりは水溶液と氷の共存状態となる(図3(5))。氷晶の融解の進行とともに細胞外溶液の希釈が進み、水分が細胞内に流入する。このため、細胞は吸水によって膨張し(図3(6)~(8))、最終的にはほぼ元の球形に回復する(図3(9))。図4は凍結後(25°C)および解凍後(10°C)の細胞の様相を冷却速度をパラメータに示したものである。冷却速度が大きくなるにつれて細胞内外の浸透圧差に基づく水分移動の時間が短くなるため、脱水量が少なくなる。また、30°C/min以上の冷却速度のもとでは細胞全体が暗化する現象(フラッシング)が観察される。これは光の波長程度(数千Å)程度の微細氷晶が瞬時に細胞内に発生し、光を乱反射させて細胞内が暗化したためと考えられる。細胞内に氷晶が形成されると細胞膜や内部の機械的損傷が生じ、解凍後、細胞が破壊あるいは元の形状に戻らず、損傷を受けていることが判る。

### 3.2 凍結モデル

単細胞の凍結・解凍の過程をモデル化し、図5の状態図上で説明する<sup>(23)(24)</sup>。ここでは、細胞とそれ取り囲む領域(細胞外)からなるセル要素を考える。(a)は常温でのセル要素の状態であり、細胞内外の浸透圧は平衡状態にある。冷却により、まず細胞外で氷晶が現れ、そのあと凍結曲線 $C_A=g_A(T)$ に沿って平衡凝固が進行し、共晶温度 $T_{A,e}$ で完全固相となる。

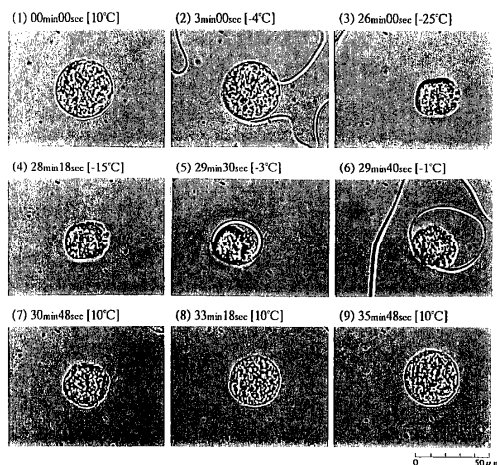


図3 小麦プロトプラストの凍結・解凍の様相  
(冷却速度 1°C/min, 昇温速度 10°C/min)

他方、細胞は平衡温度に達しても凍結せず太線で示されるように、凍結曲線 $C_B=g_B(T)$ を下回る過冷状態で温度低下する。即ち、細胞外の優先的な凍結は溶液を濃縮するため、浸透圧差による水分移動が生じ、その間、細胞は過冷却状態をとりながら脱水・収縮する(b)。過冷度が核生成に必要な臨界値に達すると、細胞内で核生成が起こり(c)、再熱と濃縮を伴って平衡状態に移行し、これ以降は共晶温度 $T_{B,e}$ まで凍結曲線 $C_B=g_B(T)$ に沿って平衡凝固する(d)(e)。(e)を初期状態とする解凍過程では、まず、共晶温度で細胞の中の融解が開始し(f)、ついで細胞外溶液の共晶温度で細胞の外が融解する(g)。細胞の外は、凍結曲線に沿って融解していく。細胞の内外に自由水が出現することにより水分移動が可能となり、この場合、細胞は脱水する。脱水により細胞内では氷晶の融解が促進され、(h)点の濃度で全ての氷晶が融解する。図中の細い破線は、細胞内の浸透圧が、細胞外の浸透圧と釣り合う溶液濃度であり、この線よりも下では細胞は脱水し、上では吸水する。したがって、細胞の中が完全に融解した後も細胞は脱水し、破線を境にして脱水から吸水に水分移動の方向が逆転する(i)。以降、吸水により細胞体積は回復していくが、(j)点で細胞の外が完全に融解した後も浸透圧差は解消されな

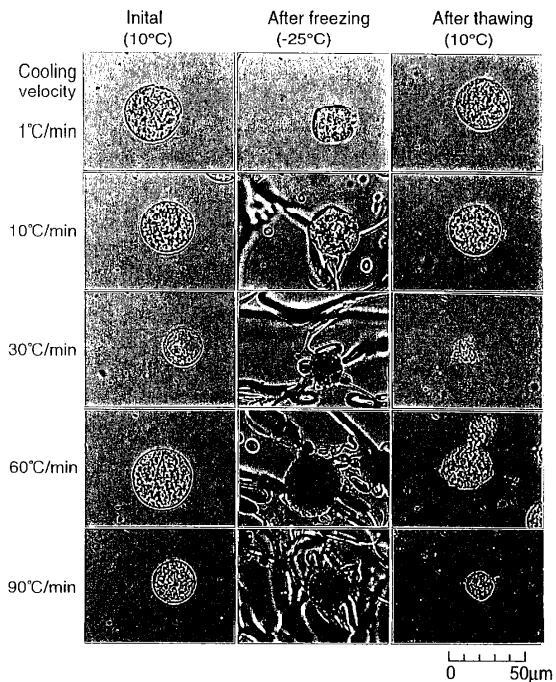


図4 小麦プロトプラストの凍結および解凍後の様相

いため、水分流入が継続し、最終的にはもとの等張状態へ戻る(k)。上記のモデルに基づき、以下の基礎式が導出される。

[溶質保存]

$$C_A \phi_A (1 - f_A) = C_{A,i} \phi_{A,i} \quad (1)$$

$$C_B \phi_B (1 - f_B) = C_{B,i} \phi_{B,i} \quad (2)$$

[凍結固相率]

$$\begin{aligned} f_1 &= 0 & (T > T_{A,i}) \\ f_2 &= \phi_{A,i} - \phi_{A,i} \frac{C_{A,i}}{g_A(T)} & (T_{A,i} > T > T_{B-\Delta T}) \\ f_3 &= 1 - \phi_{A,i} \frac{C_{A,i}}{g_A(T)} - \phi_{B,i} \frac{C_{B,i}}{g_B(T)} & (T_{B-\Delta T} > T > T_{A,e}) \\ f_4 &= 1 - \phi_{B,i} \frac{C_{B,i}}{g_B(T)} & (T_{A,e} > T > T_{B,e}) \\ f_5 &= 1 & (T_{B,e} > T) \end{aligned} \quad (3)$$

[細胞膜を通じた水分移動]

$$\dot{m} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t} = KS (\Pi_A - \Pi_B) \quad (4)$$

$$K = K_g \exp \left\{ -\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_g} \right) \right\} \quad (4)$$

[熱バランス式]

$$V \left\{ (\rho C)_n - \rho L_H \frac{\partial f_n}{\partial T} \right\} \frac{\partial T}{\partial t} = hA(T(t) - T_\infty) \quad (n=1,2,3,4,5) \quad (6)$$

ここで、Cは濃度、φは体積率、fは凍結固相率、Πは浸透圧、Tは温度、ΔTは過冷却度、Kは水分の膜透過係数、K<sub>g</sub>は参照温度での膜透過係数、Eは膜透過に対する活性化エネルギー、Rは気体定数であり、添字A,Bは各々細胞外と細胞内領域を、iは初期状態、eは共晶を表す。なお、式(3)(6)で表されるセル要素の凍結固相率f<sub>n</sub>の添字n(=1,2,3,4,5)は細胞内外の氷晶形成によって現れる5つのステージ(図5の(a)~(e))にそれぞれ対応する。以上の式を連立させて解くことにより、温度に対する細胞の体積、細胞

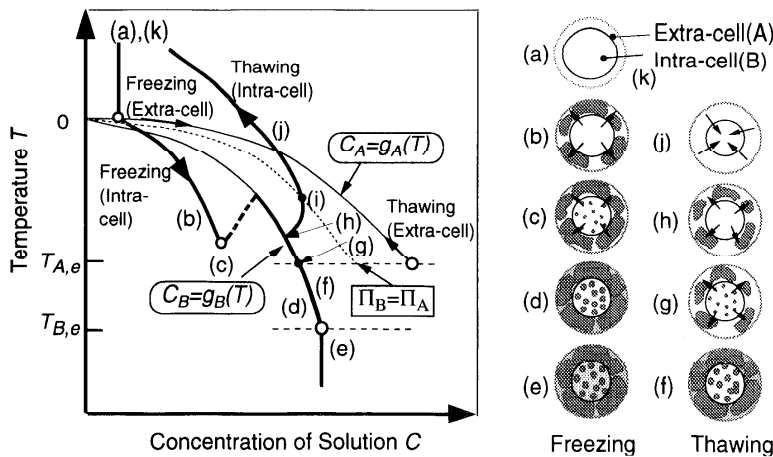


図5 細胞の凍結・解凍モデル

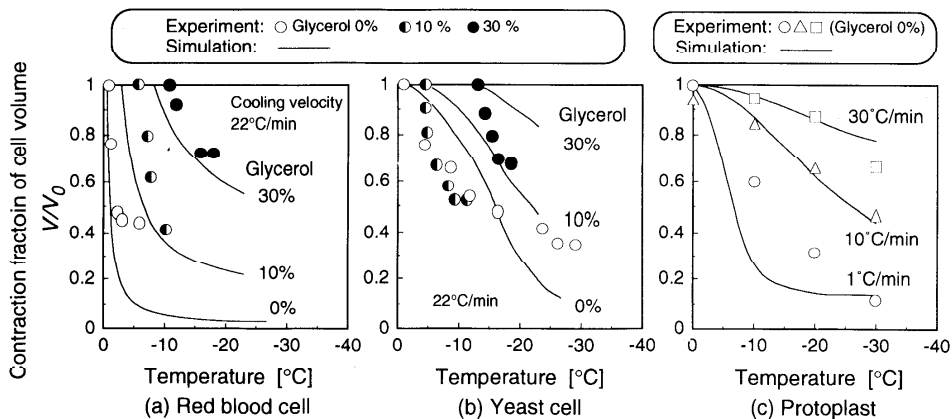


図6 凍結過程における細胞体積率の経時変化

Biological substance	Permeability K <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> /(N·S)]	Activation energy E [J/mol]
Human red blood cell	1.87x10 <sup>-12</sup>	13.8x10 <sup>2</sup>
Yeast cell	2x10 <sup>-14</sup>	45x10 <sup>2</sup>
Protoplast of wheat	5.5x10 <sup>-15</sup>	20x10 <sup>2</sup>

内外での氷晶形成による固相率が求められる。

赤血球, イースト菌, 小麦のプロトプラストの凍結過程における細胞の体積変化についての実験および解析結果を温度の関数として図6に示す<sup>(25)</sup>。ここで, Glycerolは凍結損傷を軽減する目的で添加される代表的な細胞膜透過型の凍害防御剤であり, その濃度をパラメータにしている。まず, Glycerolを添加しない場合について見ると, 温度に対する細胞の脱水量は, 赤血球, イースト菌, 小麦プロトプラスト順に多い。すなわち, 膜透過係数が大きく, 体積当たりの表面積の大きい細胞ほど脱水しやすいこと

を示しており, 細胞のマイクロ物性に応じた冷却操作の必要性を表している。また, 図8(a)(b)の結果から細胞膜透過型の凍害防御剤であるグリセロールを添加すると, 細胞の脱水・収縮による損傷が軽減されること, またその効果は高濃度ほど顕著である。図中に実線で示される解析結果は実験結果とほぼ一致しており, 解析モデルの妥当性が窺える。

なお, 単細胞の凍結に関する研究として, 細胞と細胞外氷晶の相互作用<sup>(10)</sup>, ヒメダカの受精卵の凍結実験<sup>(12)</sup>などが報告されている。

#### 4. 組織細胞の凍結

##### 4.1 凍結モデル

生物体の凍結は, 生物体の表層部から内部への伝熱過程を介して進行するため, 組織全体を均一な速度で冷却することが難しい。このような組織の寸法効果の影響を記述し得る凍結モデルとして, 生体組織を細胞内と細胞外からなるセル要素 (図5) の考

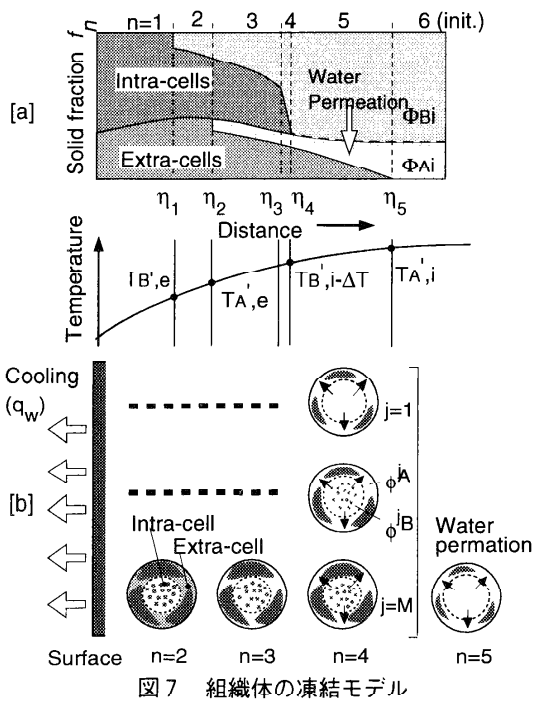


図7 組織体の凍結モデル

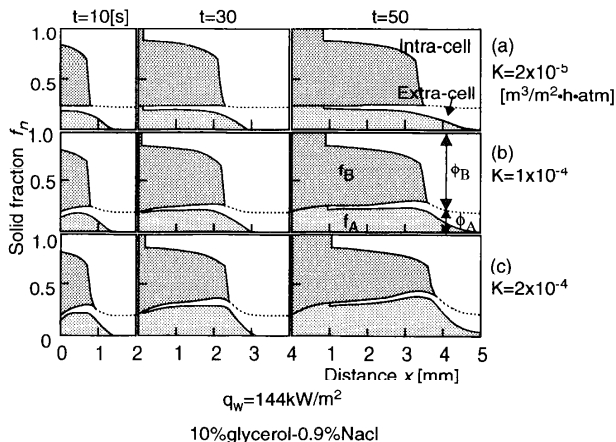


図8 凍結固相率および体積率の経時変化

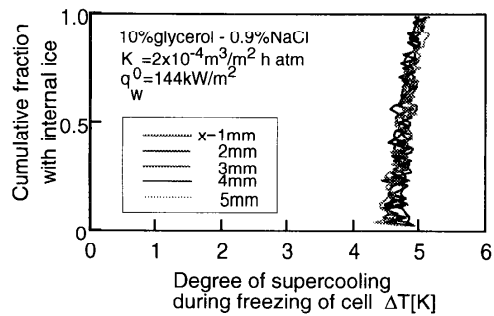


図9 細胞凍結における過冷却度

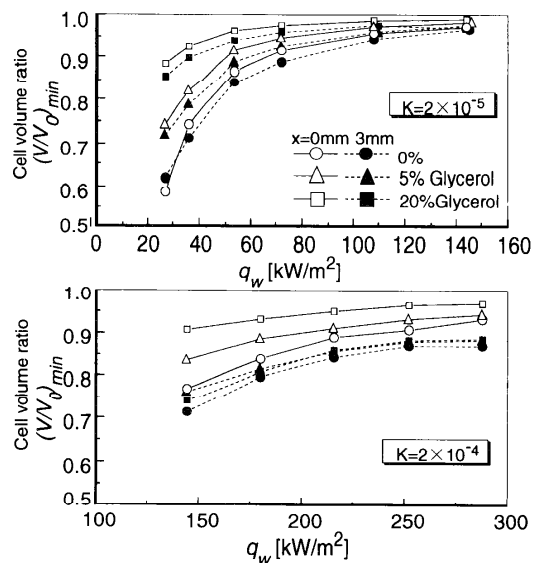


図10 細胞の体積率と組織表面の熱流束

え方を拡張した集合体モデルが提示されている<sup>(18)</sup>. 凍結モデルを図7に示す. 組織内の伝熱場は凍結の状態により現れる6つの領域よりなる(図7(a)). ここで,  $f$ はセル要素集合体の凍結固相率,  $\Phi$ は体積率を表す. 細胞外が部分凍結している  $n=3,4,5$ の領域では, 細胞膜を通じた水分移動により  $\Phi_A, \Phi_B$ が変化する. また, 細胞内が過冷却状態にある  $n=4$ の領域では, 核生成により過冷却が解消され, 細胞内に微細氷晶が形成される. 核生成の開始は個々の細胞で異なり,  $n=4$ の領域では核生成開始までの待ち時間に応じて細胞ごとに脱水量の違いが生じる(図7(b),  $n=4$ ). 各領域の熱伝導方程式は凝固潜熱を発熱項として組み込むことにより次式となる.

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \kappa_n \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} - \rho_w L_H \dot{m} \quad (7)$$

$$\kappa_n = \lambda_n / [(\rho C_p)_n - \rho_w L_H (df_n / dT)] \quad (8)$$

: ( $n=1,2,3,4,5,6$ )

以上のモデル計算で得られた結果を図8から図10に示す<sup>(18)</sup>. 計算条件は, 細胞内外が塩化ナトリウム水溶液で満たされているものとし,  $C_{A,i}=C_{B,i}=0.9$  wt%, セル要素の直径が10 $\mu$ m, 等張状態でのセル要素に対する細胞の体積率  $\phi_{B,i}=0.9$ , 組織寸法  $L=10$ mmとし, 組織体表面の熱流速  $q_w$  および細胞の膜透過係数  $K$ がパラメータとなっている. 細胞体積率および凍結固相率の分布を冷却面となる組織体表面からの距離との関係で図8に示す. 細胞内外の氷晶形成, 水分移動による細胞の脱水・収縮など凍

結が組織体表層部から内部へ進行していく様子が判る. また, 組織細胞の凍結の過程が細胞の膜透過係数により異なることが判る. すなわち, 膜透過係数が十分小さく, 水分移動が殆ど生じない図8(a)では, 細胞内外の凍結が独立したものとなる. これに対して膜透過係数が大きい図8(c)では, 冷却速度が小さくなる組織内部では, 細胞の脱水を伴いながら細胞内外の凍結が同時に進行している.

以上のマクロスケールでの結果をミクロスケールで分析すると図9と図10となる. 細胞凍結における過冷却度は図9に示されるように個々の細胞で異なり, 凍結挙動の複雑さが窺える. また, 図10は組織体の中で最も脱水量が多かった細胞の体積率を組織体表面の熱流速との関係で表したものである. ここで細胞の体積率は等張状態での体積  $V_0$ で規格化した値であり, この値が小さいほど脱水量が多く, 損傷を受けやすくなる. これより, 冷却速度の低下ならびに膜透過係数が大きくなるにつれてにつれて細胞の脱水量が多くなり, 脱水に伴う損傷を受けやすくなることが判る. また, 組織体表層部と比較して内部の細胞は脱水量が多くなり, 組織体の寸法効果が生じていることが判る.

以上の結果から, 生物体の凍結においては, 細胞の膜透過係数などのミクロ物性に支配される細胞スケールでの現象が組織体内での伝熱過程を通して発生することが理解される. なお, 組織細胞の凍結を扱った研究として, Krogh cylinder (血管とそれを取

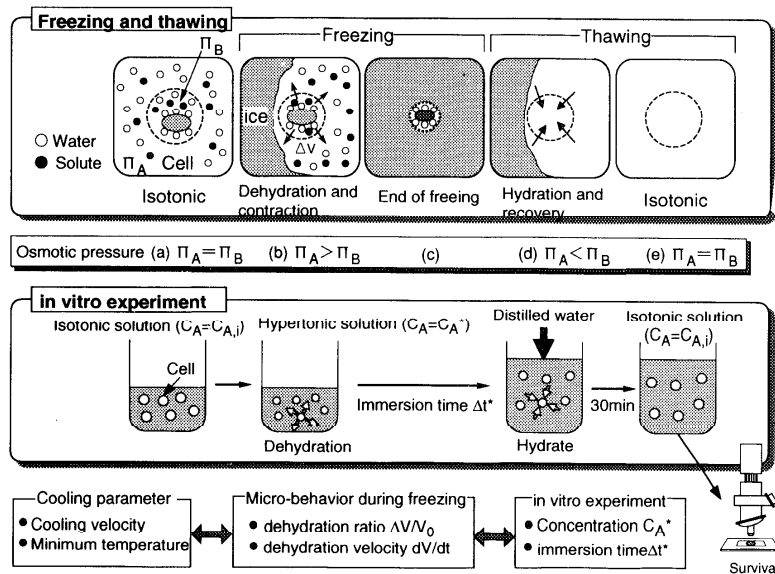


図11 in vitro な浸透圧実験



り囲む領域)の凍結モデル<sup>(15)</sup>,オニオンセルの凍結伝播機構<sup>(16)</sup>,細胞集合体を単位要素とした凍結モデル<sup>(20)</sup>,血管の凍結実験<sup>(21)</sup>,ミジンコの凍結における凍害防御剤の効果<sup>(22)</sup>などが報告されている。

### 5. 凍結損傷の機序

生存を第一義とする生物体の凍結保存においては、凍結によって生ずる損傷の評価は必須の課題である。本節では、凍結損傷と前節で述べたマイクロ挙動との連関について述べるとともに、凍結後の細胞の生残率を定量的に推算した事例について述べる。細胞の凍結過程では、細胞の脱水・濃縮による高

子蛋白質の cross-linking や塩析,細胞膜へのストレスなどの膠質損傷(溶液効果による損傷),ならびに細胞内氷晶による機械的損傷などが生じる。従来の研究の多くはこのような損傷の実体を解明することを主眼としてきたが,その損傷をマクロ量と連結するには至っていない。生存状態を維持しながら脱水・収縮しうる細胞容積には限界があるとした Meryman による最小容積仮説(Minimum cell volume theory)<sup>(26)(27)</sup>が提示されているものの,細胞の生存状態を定量的に推算する方法は確立されるには至っていない。このような観点から,(1)凍結過程における細胞内外の状態のその場計測,(2)in vitro な浸透圧実験,により細胞の生存状態とマクロ量の連関が追求されている。(1)の研究として,氏平ら<sup>(11)</sup>は,サーミスタ加熱法による細胞凍結過程における有効熱伝導率の測定を行い,温度変化に伴う細胞内外の水と氷の状態変化と細胞の生残の連関について検討している。(2)の研究としては,in vitro な浸透圧実験と凍結実験を組み合わせた凍結損傷の定量的な推定が行われている<sup>(13)</sup>。その概要を以下に紹介する。

in vitro な浸透圧実験の方法を図 11 に示す。これは、凍結過程で生じる細胞の脱水・収縮および解凍過程で生じる吸水・回復の現象を試験管内での浸透圧操作により実現し,それに伴う細胞の生存状態の変化(溶液効果による損傷の程度)を直接調べる実験である。具体的には,細胞を一定濃度の高張溶液に懸濁し,浸透圧差により細胞を脱水・収縮させる。時間  $\Delta t^*$  だけ浸漬させた後,溶液に蒸留水を加えて等張濃度まで希釈し,30分間放置する。この過程で

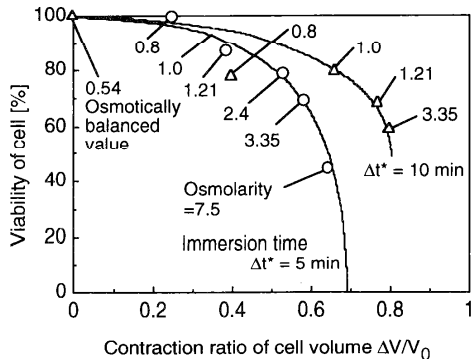


図 12 浸透圧実験における細胞の生残率

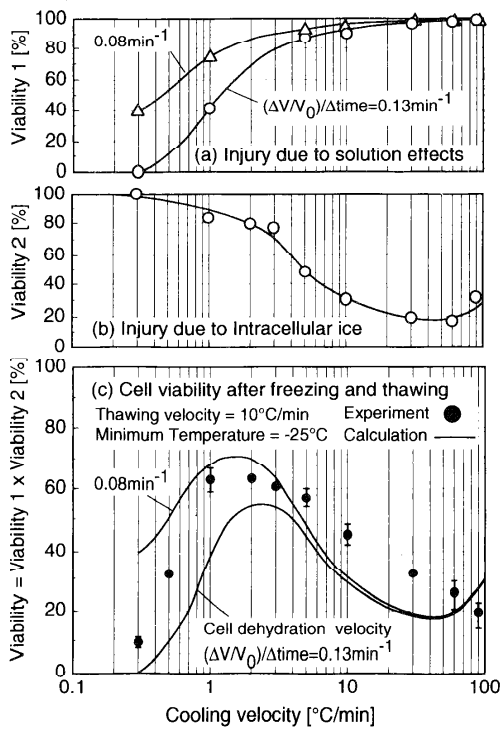


図 13 細胞の生残率の推算

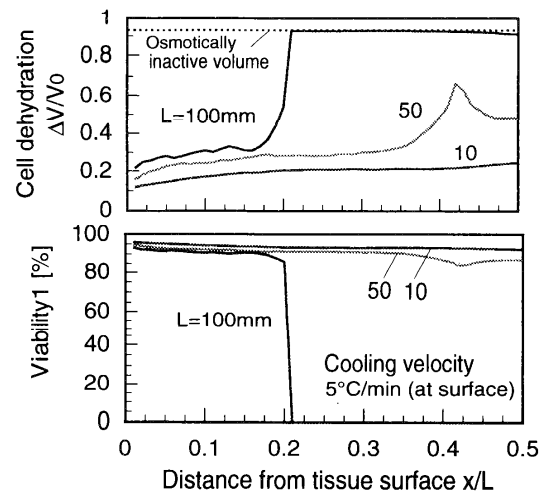


図 14 組織体における細胞の生残率の分布

は、浸透圧差により細胞は吸水・回復する。以上の浸透圧操作の後、細胞の生残率を求める。図12に浸透圧実験から求めた細胞の生残率と脱水量の関係を示す。これより、細胞の脱水量が溶液効果による損傷を記述する有効な指標となり得ることが判る。このような *in vitro* な浸透圧実験と凍結実験を組み合わせることにより、解凍後の細胞の生残率を定量的に推算した推定した結果が図13である。分子スケールの挙動である細胞の生死の実態が細胞レベルの溶液や氷晶の発生の状態と関連づけられる。また、生残率が冷却速度に依存すること、したがって、細胞の集合体である組織体においては、内部の伝熱過程が細胞の生死と連結することが理解される。

組織体における細胞の生残率を推算した例を図14に示す<sup>(13)</sup>。これは、図7の凍結モデルによる数値シミュレーションと図12の生残率の推算法を組み合わせることで解析的に求めた結果である。計算条件は、セル要素の直径が40 $\mu\text{m}$ 、等張状態でのセル要素に対する細胞の体積率 $\Phi_{B,i}=0.9$ 、到達温度 $T_{\infty}=-80^{\circ}\text{C}$ とし、組織体寸法 $L$ をパラメータとしている。細胞が溶液効果によって受ける損傷は組織体の寸法によって異なることが判る。すなわち、組織寸法が小さい場合には、細胞の脱水量および細胞の生残率は組織体内ではほぼ一様となるのに対して、組織体寸法が大きい場合には細胞の脱水量および生残率の場所的な差異が大きくなる。冷却速度が低下する組織体内部では細胞の生残率は大幅に低下している。したがって、冷却速度が非一様となる組織体の凍結においては、凍害保護物質などによる細胞の至適冷却速度の範囲の拡大が重要であることが理解される。

## 6. おわりに

細胞の生存を第一義とした生体凍結に対する現象論を確立するため、細胞およびその集合体である組織を対象に、マクロスコピックな伝熱、ミクロスコピックな細胞の挙動、さらには分子レベルで生ずる生死を連成した新たな現象論の展開を示した。しかし、ここでの輸送現象論の解像度は細胞レベルであり、分子レベルの挙動は細胞レベルの挙動を媒介として、実験情報が組み込まれたに過ぎない。近い将来、さらに解像度の度合いは高くなると期待されるが、それは必ずしも輸送現象論の精緻化によってなされるものとは限らない。かと言って、高分子蛋白との結合水、および無機塩と水和した自由水からなる複雑系に、分子動力学を直接的に投入するのも芸

がない。*in vitro* な実験例に示されるように、現象論にあっても間接的な手法が一つの方途となるかもしれない。

## 文 献

- (1) 藤川清三, 日本冷凍協会論文集, 4-1(1987), pp. 11-25.
- (2) Lovelock, J.E., *Biochimica Biophysica Acta*, 11(1953), pp.28-36.
- (3) Levitt, J, *Cryobiology*, 1-1(1964), pp.11-16.
- (4) Mazur, P., *J. General Physiology*, 47(1963), pp.347-369.
- (5) Diller, K.R., *Cryobiology*, 9-5(1972), pp.429.
- (6) Ling, G.R., and Tien, C.L., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 92-3(1970), pp.393-398.
- (7) Silveiras, O.M., Cravalho, E.G., Toscano, W.M., Huggins, C.E., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 97-4 (1975), pp. 582-588.
- (8) Toner, M., Cravalho E.G., *J. Appl. Phys.*, 67-3(1990), pp.1582-1593.
- (9) Pitt, R.E., Chandrasekaran, M. and Parks J.E., *Cryobiology*, 29(1992), pp.359-373.
- (10) Isiguro, H. and Rubinsky, B., *Cryobiology*, 31(1994), pp.483-500.
- (11) 氏平政伸, 青木勝敏, 山口亮, 谷下一夫, 機論, 62-598, B(1996), pp.2414-2422.
- (12) Ujihira, M., Aizawa, N., Tanishita, K., *Bio-Medical Mater Eng.*, 4-2(1994), pp.115-125.
- (13) Tada, Y., Momose, N., Murayama, E. and Hayashi, Y., *Proc. International Conference on New Frontiers in Biomechanical Engineering*, (1997), pp.357-360.
- (14) 多田幸生, 百生登, 蔣蓉, 林勇二郎, 日本冷凍協会論文集, 13-3(1996), 321-329.
- (15) Rubinsky, B., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 111 (1989), pp. 988-997.
- (16) 鶴田隆治, 川水努, 野中功, 増岡隆士, 機論, 62-598, B(1996), PP.2446-2451.
- (17) 林勇二郎, 山口邦彦, 冷凍, 54-621(1979), PP.575-583.
- (18) Hayashi, Y., Momose, N. and Tada, Y., *Thermal Science and Engineering*, 2-1(1994), pp.85-88.
- (19) Hayashi, Y. and Momose, N., 18th Int. Congress of Refrigeration, (1991), paper Np.295.
- (20) 白樫了, 棚澤一郎, 機論, 61-587, B(1995), PP.286.
- (21) 永田眞一, 二宮淳一, 棚澤一郎, 第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1995), PP.87-88.
- (22) 棚澤一郎, 永田眞一, 木村直宏, 日本冷凍協会論文集, 10-13(1993), pp.111-116.
- (23) Hayashi, Y., Momose, N., Tada, Y. and Takimoto, A., *Proc. of 10th International Heat Transfer Conference*, 4, (1994), pp.37-42.
- (24) 百生登, 多田幸生, 林勇二郎, 日本冷凍協会論文集, 13-3(1996), 331-340.
- (25) 林勇二郎, 百生登, 多田幸生, 日本冷凍協会学術講演会論文集, (1996), pp.261-264.
- (26) Meryaman, H.T., *Cryobiology*, 8(1971), pp.489-500.
- (27) Meryaman, H.T., *Ann.Rev.Biophysics*, 3(1974), pp.341-363.

## 生体凍結保存技術と細胞膜透過係数

*The technique of cryopreservation of biological materials  
from the view point of membrane permeabilities*

白樫 了 (東京大学生産技術研究所)

Ryo SHIRAKASHI (Institute of Industrial Science,  
University of Tokyo)

## 1. はじめに

生体の凍結保存は食用には一般的に用いられている手法であるが、医用用途でも、昨年から施行された臓器移植法をうけて重要性が増しつつある。本稿では、医用用途の生体凍結保存をおこなう際の生体組織を構成する細胞(あるいは単一細胞)の膜透過現象の重要性に言及したい。即ち、細胞膜透過現象を記述する膜透過係数を知ることは、凍結保存をおこなう上でどの様な意義があり、具体的にはどの様に利用されるべきであるか、という点について私見を交えて論じていくことにする。

## 2. 医用凍結保存法と protocol の設計

臨床利用される生体の凍結保存から解凍までの手順は、通常、次の7段階を経て利用される<sup>(1)</sup>。

- 1) 必要な組織、細胞の提供者の存在の把握
  - 2) 組織、細胞の摘出
  - 3) 組織、細胞の凍結保存施設への輸送
  - 4) 抗生物質による滅菌
  - 5) 組織、細胞の screening
  - 6) 凍結保存(前処理過程と凍結過程の2過程を順番に行う。前処理過程において凍害防御剤を臓器に吸収させた後、凍結過程で冷却-凍結して保存する。)
  - 7) 解凍と凍害防御剤の除去
- 手順の1)から5)は凍結を伴わない低温保存においても同様に適用される。一方、6)、7)は凍結保存においてのみおこなわれ、特に、6)の過程で生体がダメージを受けやすい。様々な生体について、この過程(以後、凍結保存過程)の protocol を決定する為には、現象の予測、protocol の評価、protocol に関わる物理・化学量の最適化法、の3つが整って初めて可能になる。現状で protocol は経験的に決められている原因は、上記の3要素にわからない点が多いことも一因ではあるが、むしろこれらの要素の観点からの整理が不十分であるためであると思われる。

てならない。そこで、現在受け入れられている事実に基づいて3要素を整理し、protocol の設計までの道筋を概観することで、表題の細胞膜透過の重要性を明らかにしていきたい。

凍結保存過程で進行する現象は、現在にいたるまで多くの人により研究されてきている<sup>(2)</sup>。通常、生体は全重量の80%近くが水分であることより、凍結過程では、水分の凍結がもたらす細胞内自由水の膜透過現象と、氷晶の生成に伴う体積膨張によって特徴づけられる。細胞を冷却すると細胞外凍結が優先的に起こり、それに伴う細胞外の化学ポテンシャルの低下により、細胞の内外に化学ポテンシャル差が生じる。このポテンシャル差を駆動力として細胞内で過冷された自由水が細胞膜を通じて細胞外へ流出する。冷却速度が速く、細胞内に自由水が存在しているうちに核生成温度に達すると細胞内凍結を起し細胞にとっては致命的な破損が生ずる(凍害)。冷却速度が遅いと細胞内の自由水が全て外部に流出し、細胞は過収縮をおこし、内部のイオン濃度の上昇(塩害)、あるいは細胞内 organelle の凝集変性のために細胞内の高分子の構造が不可逆変化をおこし致命傷に至るといわれている。凍結過程において、冷却速度に対する viability が凸形になるのは、以上の様に説明されている。

前処理過程では、凍害の元凶である細胞内の自由水を極力排出し、且つ、細胞内 organelle 間の凝集や塩害を避けるため、凍害防御剤(CPA)と呼ばれる溶質を加えた水溶液に生体をあらかじめ浸漬することで細胞内の自由水と CPA を置き換える。この際、生体を構成する細胞は、組織内を拡散してきた CPA と細胞内の浸透圧差により収縮し、ついで CPA の細胞内の浸透と共に緩和する<sup>(3)</sup>。凍結保存過程は、以上の様に CPA を細胞内に吸収させる前処理過程と凍結過程に分けられる。

凍結保存過程の protocol の評価は、生体組織がもつ機能を凍結-解凍後も保持しているか否かとい

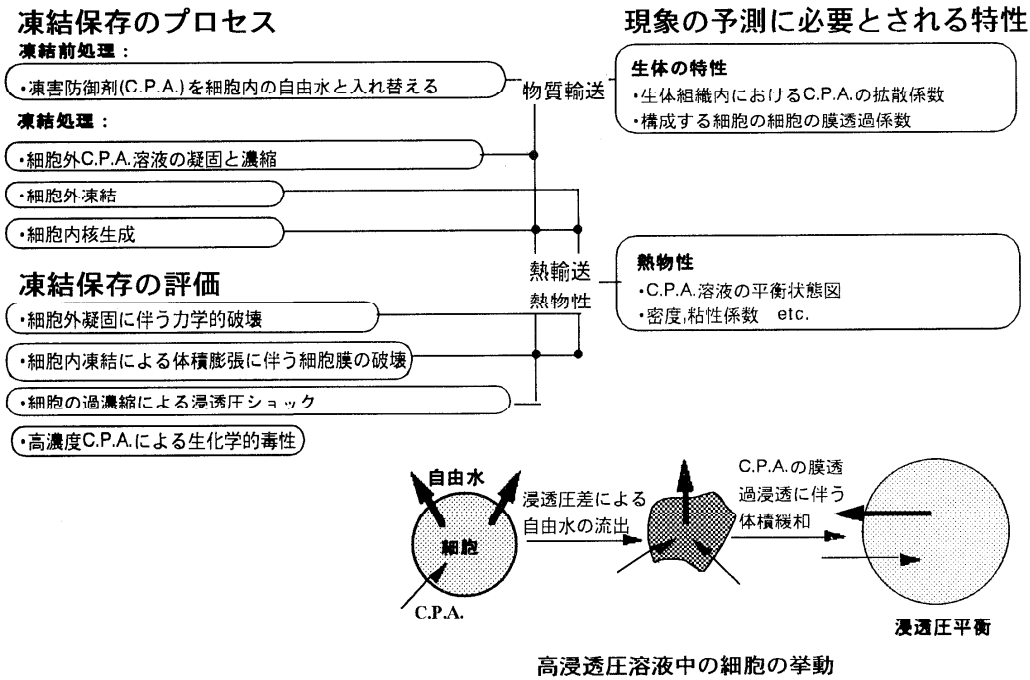


図1 熱物質移動の観点から見た生体凍結保存過程の概略図

う点で判断されるべきである。生体組織が必要とする機能は、生体組織の幾何構造を保持する機能と細胞の生理学的機能、に大別できる。こうした機能が喪失される主要因は、前者の場合は細胞外の水分凍結による組織の力学的破壊であり、後者の場合は細胞死である。細胞死の原因は、水分の凍結に伴う細胞膜の力学的破壊<sup>(4)</sup>、浸透圧非平衡環境下における過収縮によるorganella間距離の近接、あるいは細胞内電解質の濃縮によるorganellaの変性<sup>(4),(5)</sup>、凍害防御剤自身に起因する生化学的毒性<sup>(4)</sup>、であるとされている。以上、凍結保存過程でおこる現象と凍結保存の評価について簡潔に説明したまとめを、図1に示した。

さて、凍結保存過程のprotocolを最適化する場合に問題となるのは、凍結過程において緩慢冷却をする以外に生体組織内部の物理量（冷却速度や温度分布）を均一に保つことが出来ないことである。緩慢冷却では、CPA水溶液濃度が低い場合は巨大な氷晶ができるが、CPA水溶液濃度が共晶点付近の場合は氷核生成が抑制される現象がみられる。これはガラス化(vitrification)と呼ばれる現象で液体の粘性が過度に高い場合水分子の拡散が抑制される為におきると考えられている<sup>(6)</sup>。図2に兎の腎臓をガラス化したものを示す。氷晶が全く見えず透

き通っているのがわかる。ガラス化は凍結過程の履歴に殆ど影響を受けないと言われている。従って、生体の大きさに関わりなく凍結保存できる究極の凍結保存法の一つと考えられ、凍結過程のprotocolの問題点を、ほぼ全て解決したといえる。ガラス化法で生体組織を凍結保存をする試みは、Fahyらによって多年続けられているが<sup>(6)</sup>、実際には凍結過程をおこなう段階で生体内、細胞内が高濃度のCPAで均一に満たされている必要があることが大きなネックとなっていて一般的に実用されていない。

前処理のprotocolで生体内と細胞内を高濃度のCPA水溶液で均一に満たそうとすると、問題になる点は、protocolの評価で述べた細胞に対する高濃度CPA水溶液の化学的毒性と浸透圧ショックである。化学的毒性と浸透圧ショックは区別が難しいが、Fahyらは毒性が強いと言われているジメチルスルフォオキシド(DMSO)について浸透圧ショックが細胞死の原因であることを実験的に示す実験を試みている<sup>(7)</sup>。浸透圧ショックは急激なCPA水溶液濃度変化を避ければ回避できる問題である。そこで前処理のprotocolとしてCPA水溶液濃度を徐々に上げていく方法が考えられ、その速度は、CPAが細胞の膜を透過して内部に浸透する現象が



図2 兎の腎臓：ガラス化（右），凍結（左）  
文献(6)より引用

律速段階となる。即ち、protocolの最適設計には細胞膜透過が重要になるのである。

### 3. 細胞膜透過の記述と protocol の評価

本章では、細胞膜透過の定量的記述と、定量化された値から著者らが提案している前処理過程の protocol の評価をおこなう方法について論ずる。

細胞膜の輸送現象は、大きくわけて受動輸送と能動輸送があるが、能動輸送は、輸送と細胞膜内の化学反応が共役するので輸送にエネルギーを必要とする。一方、受動輸送は化学反応と共役していない<sup>(6)</sup>。通常の CPA の膜透過は受動輸送により膜を透過し、非平衡熱力学における線形現象方程式で記述されることが多い。線形現象方程式の説明は本稿の主題とは直接関わりが薄いので詳しくは文献<sup>(9)</sup>にゆずるが、基本式を式(1)に示す。本質的には膜を隔てた圧力差と溶質の濃度差（化学ポテンシャル）を共役駆動力にし、Onsagerの相反定理が成立するとして、体積流と拡散流を記述した式である。

$$\begin{aligned} J_v &= L_p \Delta P + L_{pD} RT \Delta C_i \\ J_D &= L_{pD} \Delta P + L_D RT \Delta C_i \end{aligned} \quad (1)$$

溶媒を水とした場合、膜を透過する体積流の拡散流を記述する式は、Kedem, Katchalskyにより物理的に理解しやすい形にまとめられており、以下の様に記述される。

$$\begin{aligned} J_v &= -L_p \sigma_a RT (C_a^o - C_a^i) - L_p RT (C_e^o - C_e^i) \\ J_a &= (1 - \sigma_a) C_a^m J_v + \omega_a RT (C_a^o - C_a^i) \\ C_a^m &\equiv (C_a^o - C_a^i) / \ln (C_a^o / C_a^i) \end{aligned} \quad (2)$$

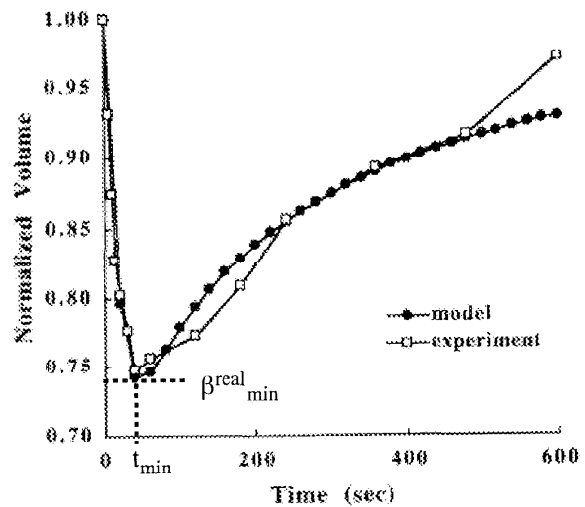


図3 細胞体積分率の測定値と計測値<sup>(3)</sup>  
(1M DMSO 3°C Human islet)

ここで、式(2)が導き出される過程において稀薄溶液近似が仮定されている点に注意しておく。式(2)で記述される膜輸送を決定するパラメータは、3つ ( $L_p$ ,  $\sigma$ ,  $\omega$ ) 存在する。 $L_p$  ( $m^3/(Nsec)$ ) は、水力学的透過係数 (hydraulic conductivity) であり、膜により一意に決められるパラメータで、単位圧力差 (浸透圧を含む) により膜を透過する体積流のフラックスの程度を表す。 $\sigma$  は反発係数 (reflection coefficient) とよばれ、1以下の値をとる溶質によって異なる無次元パラメータである。 $\sigma$  は溶質の浸透圧の理想半透膜からのずれを示し、溶質が膜を透過しない場合 (理想半透膜状態) では1になり、膜を透過する場合は1より小さい値をとる。 $\omega$  は溶質透過係数 (solute permeability coefficient) と呼ばれ、体積流が存在しないときの溶質の拡散の程度を表すパラメータである。以上より、ある膜について、一つの  $L_p$  と溶質ごとに  $\sigma$  と  $\omega$  がわかれば、膜を透過する物質流れは記述できることになる。

細胞膜へ Kedem-Katchalsky 式 (K-K 式) を適用する場合、溶質として CPA と電解質 (共に水溶液) を仮定し、さらに、細胞内の非浸透圧成分を仮定することが多い。普通、電解質は CPA 等にくらべてはるかに膜透過しにくいので、 $\sigma=1$ ,  $\omega=0$  とする。細胞膜を透過するフラックスに K-K 式を用いて、細胞内の CPA と電解質の保存式と細胞体積の保存式が式(3)で記述できる。

$$\begin{aligned} \frac{d(C_a^i \beta)}{dt} &= J_a (S_0 / V_0), \quad \frac{d\beta}{dt} = J_v (S_0 / V_0) \\ C_e^i \beta &= C_{e0}^i (1 - \varepsilon) = \text{const.} \end{aligned} \quad (3)$$

この式を使い細胞を一定濃度の膜透過性CPA水溶液に浸漬した場合の細胞体積の計算結果を、細胞体積の実測値と共に図3に示す<sup>(3)</sup>。但し、式(3)の $\beta$ は細胞の浸透圧成分の体積分率を表す。

定量化することで現象の予測が可能になったので、次にどの様にしてprotocolの評価をおこなうか論じていきたい。前章の最後に述べたが、protocolの評価は前処理過程の場合は、浸透圧ショックが細胞死の原因であることが多いことから、浸透圧ショックの原因である細胞の過収縮の程度を評価の指標として用いることが適当と考えられる。そこで、標準生理食塩水相当の浸透圧における値でnormalizeした細胞体積分率を評価関数として用いることを提案する。即ち、図3の $\beta^{\text{real}}_{\text{min}}$ (または $\beta_{\text{min}}$ )の値が限界値 $\beta^{\text{real}}_{\text{crit}}$ (または $\beta_{\text{crit}}$ )を下回った場合、細胞のviabilityが落ちると仮定して、protocolの評価を $\beta_{\text{min}}$ の値でおこなうのである。

#### 4. 膜透過係数の測定法とその問題点

前章で膜透過係数が現象の予測とprotocolの評価をおこなう上で重要であることを述べた。この章では実際の膜透過係数の測定法の紹介と問題点を論じていきたい。

膜透過係数の測定において重要な点は、1)細胞の体積変化の履歴を的確に記述する膜透過係数が求められること、2)  $(L_p, \omega, \sigma)$ の組が一意に再現性よく測定できること、である。現在までに細胞膜の膜透過係数の測定装置は、Microdiffusion method, Micropipet perfusion method, Microperfusion chamber method<sup>(10)</sup>など、様々なものが提案されているが、測定の基本原理は同一である。即ち、遊離した細胞を、組成が既知の水溶液に浸漬して測定した細胞体積の時間変化(図3)と、膜透過係数 $(L_p, \omega, \sigma)$ をパラメータとして計算した細胞体積の時間変化を、式(4)に従って最小2乗近似させてパラメータを決定する。

$$F(L_p, \omega, \sigma) = \sum_{i=1}^n \{ V_{\text{exp}}(t_i; L_p, \omega, \sigma) - V_{\text{cal}}(t_i; L_p, \omega, \sigma) \}^2$$

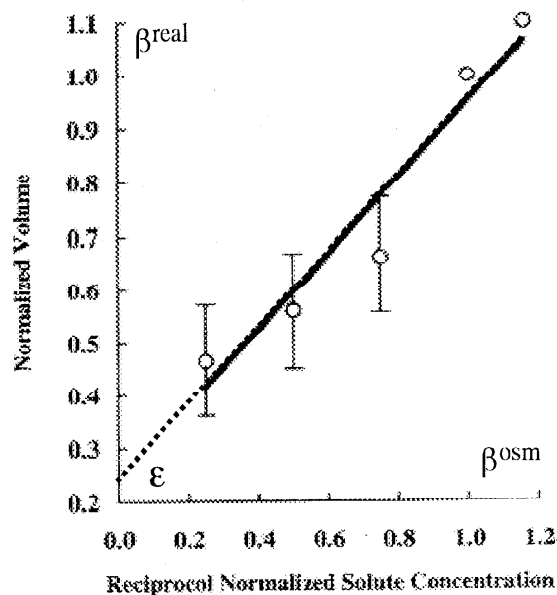


図4 細胞内非浸透圧成分の測定<sup>(3)</sup>

$$\frac{\partial F}{\partial L_p} = \frac{\partial F}{\partial \omega} = \frac{\partial F}{\partial \sigma} \approx 0 \quad (4)$$

細胞内の非浸透圧成分の体積分率は、縦軸に見かけの細胞体積分率、横軸に浸透圧成分の体積と基準となる浸透圧での浸透圧成分の体積の比 $\beta^{\text{osm}}$ をとったグラフ上に、浸透圧(初期 $C_{e0}$ (Osmol)から $C_e$ (Osmol)に浸漬)をかえて平衡したときの細胞体積をプロットして浸透圧=0 (mosmol)の点まで外挿して求める<sup>(3)</sup>。図4にヒト臍臓isletについての測定例を示す。実測される細胞体積分率 $\beta^{\text{real}}$ 、式(3)の細胞体積分率 $\beta$ と浸透圧比から求めた $\beta^{\text{osm}}$ には以下の式の関係がある。

$$\beta = \beta^{\text{real}} - \varepsilon, \quad \beta^{\text{osm}} (1 - \varepsilon) = \beta, \quad C_e \beta^{\text{osm}} = C_{e0} \quad (5)$$

細胞表面積は、時間変化するものとして扱う場合と一定値として扱う場合があるが、体積変化の履歴を記述できればよいので、一定値として膜透過係数を定義したほうが簡便である。

現在、一般的におこなわれている膜透過係数の測定方法は、2つの問題点が存在する。一つは細胞の大きさを正確に測ることが細胞の形態によっては困難である点である。測定装置によって細胞体積の測定法は様々であるが、大きく分けて、単一細胞を撮影した画像からはかるものと、多数の細胞をマイクロアアの篩いにかけて、通過した細胞

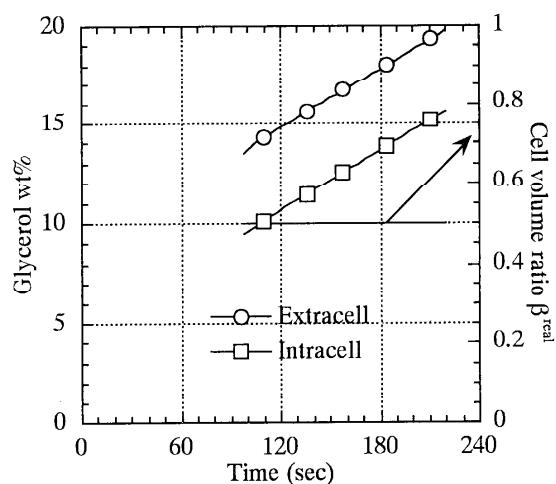


図5 最適設計された内皮細胞の前処理過程 protocol

の直径とポアの大きさの関係からはかるもの、がある<sup>(10)</sup>。いずれの方法においても計測値は測定の方法に依存しやすい。いま一つの問題は、3つの膜透過係数( $L_p, \omega, \sigma$ )を1変数のデータから決定している点である。原理的には膜輸送現象を記述する3変数(CPA濃度、電解質濃度、細胞体積分率)の履歴は、1つの変数(細胞体積分率)の履歴からではわからないので、細胞体積分率が同一の履歴を示す( $L_p, \omega, \sigma$ )の組が他に存在する可能性がある。測定装置が異なるとパラメータの値が、一桁程度ばらつく事があるのはこの為であると思われる。

### 5. 前処理過程のprotocolの最適設計

この章では、著者らが提案している細胞膜透過係数を用いて評価関数を計算して、前処理過程のprotocolの最適設計をおこなう方法について解説する。

前処理過程では、細胞にダメージを与えずに、組織内と細胞内にCPAを均一に充満させることが目的である。CPAは組織内を拡散して組織内の細胞に至るわけだが、拡散過程については本稿ではふれない。従って、前処理過程のprotocolで操作できるパラメータは細胞外のCPA水溶液の濃度の時間変化となる。細胞外細胞をCPA水溶液に浸漬すると、図3の様に収縮-緩和する。最適protocolは、最小細胞体積分率 $\beta_{min}^{real}$ が許容値 $\beta_{lim}$ になるような条件を満たしつつ、式(2)、(3)より計算できる細胞外の

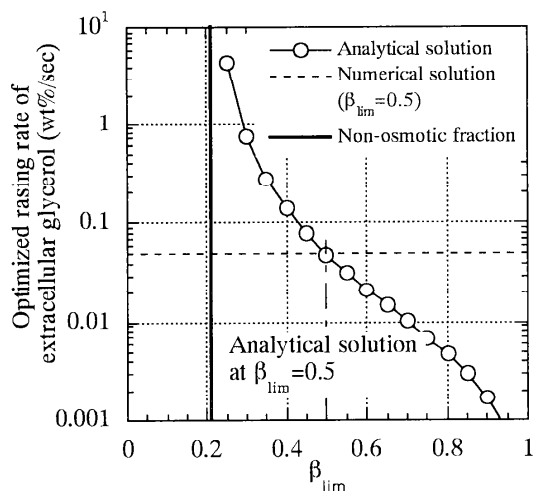


図6 解析解による前処理過程 protocol の最適化

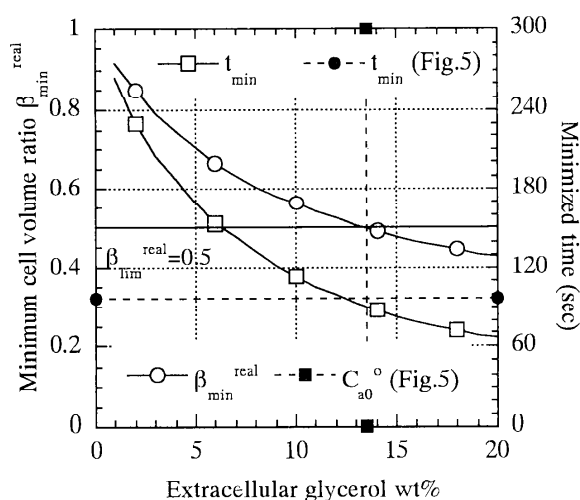


図7 前処理過程における $\beta_{min}^{real}$ ,  $t_{min}$ の予測値

CPA水溶液の濃度を目的値まで最短時間で上げてゆくプロセスに相当する。図5に著者らが実測した内皮細胞の膜透過係数( $L_p=6.06e-15(m^3/(N \text{ sec}))$ ,  $\omega=2.80e-12(mol/(N \text{ sec}))$ ,  $\sigma=0.98$ ; 機論に投稿中)を用いて計算したprotocolの例を示す。図から細胞外のCPA水溶液の濃度は、最初にある濃度に一定時間浸漬した後、経過時間に比例して上昇していることがわかる。また、細胞体積分率は、細胞外のCPA水溶液の濃度が上昇している間、一定値を保っている。このことは、CPA水溶液の濃度上昇速度をより簡便に求められることを示している。即ち、体積分変化がないので、式(2)の体積分フラックスを0

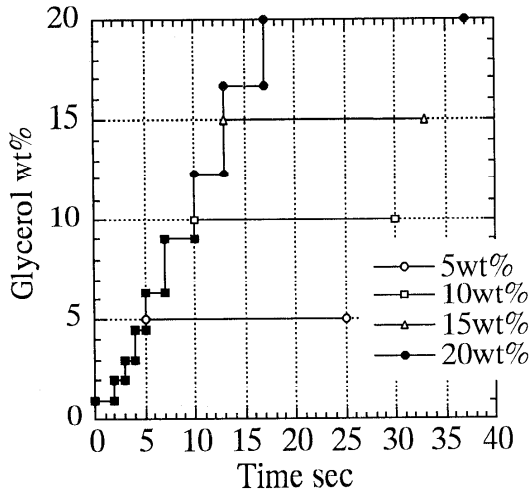


図8 ブタ内皮細胞の前処理過程 protocol

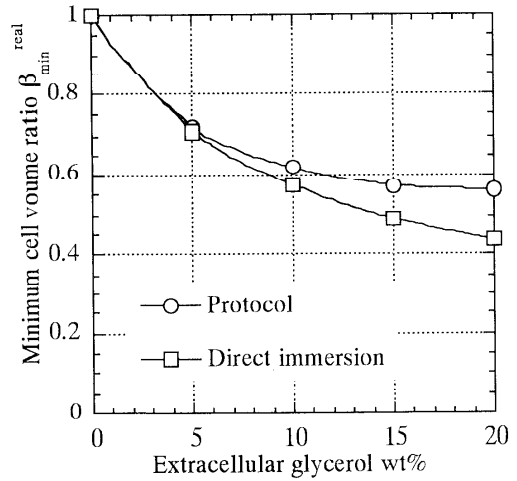


図9 数値計算予測した評価関数  $\beta_{\min}^{\text{real}}$

とすると、式(3)と併せて細胞外CPA水溶液の濃度変化は次式で表せる。

$$C_a^o = C_{a0}^o + \frac{\omega_a RT (1 - \epsilon) - \beta_{\text{lim}} C_{e0}^o (S_0 / V_0) (t - t_{\min})}{\sigma_a \beta_{\text{lim}}^2} \quad (6)$$

図6に図5と同じ膜透過係数を用いて、式(6)から求められたCPA水溶液の濃度上昇速度を許容値  $\beta_{\text{lim}}^{\text{real}}$  に対してしめす。但し、 $\epsilon=0.213^{(12)}$ とした図中に図5の最適化 protocol 計算からもとめたCPA水溶液の濃度上昇速度を記入した。図6からもわかるように、式(6)から最適なCPA水溶液の濃度上昇速度は求められる。

初期CPA水溶液濃度と保持時間は、図3の  $\beta_{\min}^{\text{real}}$  ( $=\beta_{\text{lim}} + \epsilon$ ) と  $t_{\min}$  を式(2), (3)から計算することで推定できる。図7に図6と同じ膜透過係数を用いて計算した  $\beta_{\min}^{\text{real}}$  と  $t_{\min}$  の値を初期CPA水溶液濃度に対して計算したグラフを示す。図中に図5で計算した  $\beta_{\min}^{\text{real}} = \beta_{\text{lim}}^{\text{real}}$  の初期CPA水溶液濃度と保持時間を記入してあるが、図5の値と良く一致している。

以上の議論より、protocolの最適設計で重要な値は、図7の  $\beta_{\min}$  (または  $\beta_{\min}^{\text{real}}$ )、 $t_{\min}$ 、CPA水溶液の濃度上昇速度の3つの値であることがわかる。

### 6. ブタ頸動脈の内皮細胞に関する前処理過程の protocol 評価実験

この章では、protocolの最適設計に用いる基礎式であるK-K式から求めた細胞最小体積分率  $\beta_{\min}$  に

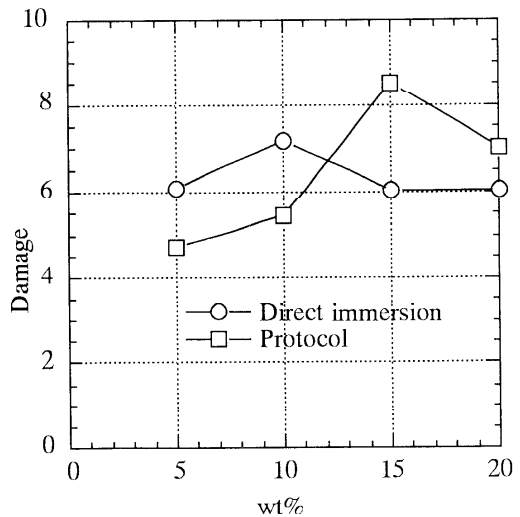


図10 色素排除試験法による viability の評価

による protocol 評価と実際の細胞の viability の比較を、ブタ頸動脈の内皮細胞を用いた予備的実験でおこなった結果について述べる。

実験はブタ頸動脈を、濃度5,10,15,20wt%のグリセリン水溶液(CPA)に直接浸漬。または図8に示す段階的に濃度をあげる protocol で浸漬し、各試料の内皮細胞の viability を、トリパンプルーを用いた色素排除試験法で評価した。一方、同じ2種類の protocol をK-K式に基づいて評価関数である細胞の最小体積分率を計算し、実験的に求めた viability と比較して妥当性を調べた。



図9に、試料を直接浸漬した場合と、図8の protocol を用いた場合の細胞の最小体積分率  $\beta_{\min}^{\text{real}}$  の計算結果を示す。計算した評価関数  $\beta_{\min}^{\text{real}}$  は、予め別の実験<sup>(11)</sup>で求めた内皮細胞の最小体積分率  $\beta_{\min}^{\text{real}}$  の限界値  $\beta_{\text{cri}}^{\text{real}} \sim 0.5$  と比較すると、直接浸漬した場合は 15wt% 以上で  $\beta_{\min}^{\text{real}} < \beta_{\text{cri}}^{\text{real}}$  となるので viability が落ち、その他の場合は限界値  $\beta_{\text{cri}}^{\text{real}}$  より大きいことがわかる。図10に試料を色素排除試験法で評価した viability を示す。但し、直接浸漬と図8の protocol を用いた場合の damage の値は添加した色素の初期濃度が異なるため比較できない。実験の技術が未熟なため確証はできないが、直接浸漬の場合は、グリセリン水溶液濃度が 10wt% までは変化が少ないが、15wt% 以上になるとダメージが大きくなる傾向がみられる。一方、図8の protocol を用いた場合は全てのグリセリン水溶液濃度にわたって変化がない。これは、計算により予測された傾向と概略で一致しているので、K-K 式を膜透過現象の定量的記述の手段として使えると同時に、protocol の最適化設計にも適用できるのではないかと考えている。

## 7. おわりに

以上、生体の凍結保存過程の最適設計法について、細胞膜透過係数の重要性を主張する立場から解説した。現状の細胞膜透過係数の測定法に関する問題点をまとめると、

1) 測定装置による値のばらつきの原因である細胞体積の測定に依存する非定常計測法を脱却する測定法の開発。少なくとも2種類の変数の計測が必要である。

2) 測定値の精度、精度の許容範囲の検定。測定された値が protocol の設計に適用できる為にはどの程度の測定誤差まで許されるか知る必要がある。

本稿では、ガラス化法を念頭において話を進めてきたが、これは、ガラス化法が医用の臓器の生体凍結保存としては凍結過程に存在する本質的な障害を全てクリアーできる可能性があり、操作が著しく簡単になる可能性があるからである。このことを念頭に置いて、生体凍結保存全体としての技術的あるいは工学的問題を以下にまとめる。

1) 凍害防御剤の生体組織の有効拡散係数の測定。あるいは生体組織内への凍害防御剤の拡散促進技術の開発。

2) 細胞内への凍害防御剤の膜透過促進技術の開

発。

3) 浸透圧ショックと化学的毒性の分別法の開発。

4) 高濃度でガラス化がおきる臨界冷却速度に関する知見。(共晶点濃度のグリセリン水溶液は、冷却速度に依存せずガラス化されるとされているが実測値が殆どない)

5) ガラス化法の場合の解凍時の再結晶に関する知見。

そして、実際に生体を移植することが困難である医学生物分野以外の人間にとっては、生体に要求される機能からみた、簡便な viability の評価方法が望まれる。

とかく医用の凍結保存では細胞や組織の種類により個別に議論しがちに思われるが、敢えて細胞-生体を普遍的に扱い、工学的設計手法を導入した私見を紹介した。諸氏、諸先生方の御意見、アドバイスを頂ければ幸いに存じます。

## おもな記号

$\Delta P$ : 細胞内外の静水圧差(Pa)

$L_p$ : 水力学的透過係数 ( $\text{m}^3/(\text{N sec})$ )

$\omega$ : 溶質透過係数 ( $\text{mol}/(\text{N sec})$ )

$\sigma$ : 反発係数

$J$ : 細胞膜透過流束

( $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sec})$ ,  $\text{mol}/(\text{m}^2\text{sec})$ )

$\beta$ : 細胞内の浸透圧成分体積分率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$\epsilon$ : 標準浸透圧で正規化された

非浸透圧成分体積分率

$S$ : 細胞膜面積 ( $\text{m}^2$ )

$C$ : モル濃度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )

$R$ : 一般ガス定数 ( $\text{J}/(\text{mol K})$ )

$T$ : 温度 (K)

添字

a: 凍害防御剤

e: 電解質 (理想浸透圧相当; 正則溶液)

0: 初期状態

i: 細胞内

o: 細胞外

v: 体積流

m: 細胞内外の平均濃度

min: 最小細胞体積

lim: 設定限界値

real: 測定された見かけの値

osm: 浸透圧比からもとめた値

参考文献

- (1) J.J.McGrath,K.R.Diller Ed., Low Temperature Biotechnology, ASME,(1988),91
- (2) 例えば, H.T.Meryman, Ed., Cryobiology, Academic press, (1966), 213,  
日本冷凍協会編, 冷凍空調便覧 5 巻 食品・生物・医学編 第5版, (1993), 353
- (3) 例えば, R.C. de Freitas, K.R.Diller, J.R.T. Lakey, R.V. Rajotte, Cryobiology 35, (1997), 230
- (4) H.T.Meryman, Cryobiology, Academic Press, (1966), 213
- (5) S. Fujikawa, Cryobiology 32 (1995), 444
- (6) G.M.Fahy, D.R.MacFarlane, C.A.Angell, H.T.Meryman, Cryobiology 21, (1984), 407
- (7) G.M. Fahy, Cryo-Letters 5, (1984), 79
- (8) 日本化学会編, 膜は生きている, 大日本図書, (1993), 2
- (9) S.G.Schultz, (鈴木泰三 ほか2名訳), 生体膜輸送の基礎, 化学同人, (1982), 71
- (10) J.J.McGrath, Cryobiology 34, (1997), 315
- (11) D.E.Pegg, C.J.Hunt, L.P.Fung, Cell biophysics 10, (1987), 169
- (12) E.G.Toner, D.R.Cravalho, J.Armant, Membrane Biol. 115, (1990), 261

細胞の凍結傷害

Freezing Injury of Biological Cells

藤川 清三 (北海道大学低温科学研究所、大学院地球環境科学研究科)  
 Seizo FUJIKAWA (Institute of Low Temperature Science, Graduate School of  
 Environmental Earth Science, Hokkaido University)

1 緒言

生物材料の凍結保存は実用技術として発達してきた。このため生物と凍結との相互作用の判定は主にその生死が基準になり、細胞レベルでの凍結傷害機構および凍結適応機構の詳細については深く研究されて来なかったきらいがある。凍結保存技法をさらに有効に利用するためには、凍結と生物細胞の相互作用を十分理解する必要がある。このため、まず自然界で起こる凍結による傷害のメカニズムを知り、これに対してどのように生物が適応しているかを理解することが重要である。

この報告では主に植物細胞を用いて行われている、自然界で起こる平衡凍結による凍結傷害発生機構と、自然界の生理的な低温順化の結果起こる細胞および分子レベルの変化がこの凍結傷害の防御にどのように関わっているかを概説する。これとともに本来凍結耐性のない細胞における凍結傷害発生機構についても述べ、凍結保存技法が如何に傷害発生を防御するかを概説する。

2 平衡凍結による傷害発生機構

細胞が氷点下温度にさらされると、まず細胞外に氷晶が形成される。細胞を外界から仕切る原形質膜は、水分の選択的透過を許す半透膜として機能するとともに氷の浸入の障壁として働く<sup>(1)</sup>。このため、細胞外水分が凍結しても氷晶は細胞内に浸入せず細胞内は一時的過冷却状態となり、細胞内外に化学ポテンシャル差ができる。冷却速度が十分遅いときは、この化学ポテンシャル差を埋めるように細胞内水分は細胞外へ流出し細胞外凍結が起こる。このような凍結を平衡凍結といい、自然界でおこるゆっくりした気温低下はほとんどの場合細胞外凍結をもたらす<sup>(2)</sup>。

平衡凍結で細胞は、細胞内外のすべての溶液が固

化する少なくとも $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の温度まで、細胞外氷晶形成により、 $273\text{-T}/1.86$ 式で導かれる浸透圧ストレスを受ける。Tは凍結温度を示し、浸透圧ストレスは温度低下とともに増加することになる。さらに温度低下とともに細胞外氷晶量も増え、これによるストレスも増加する。平衡凍結では、凍結耐性のない生物細胞は氷点下数度の凍結にも耐えられない一方、高い耐性をもつ細胞は $-20^{\circ}\text{C}$ 以下、時として液体窒素温度までの凍結にも耐えることができる<sup>(3)</sup>。このため平衡凍結に対する耐性は何度

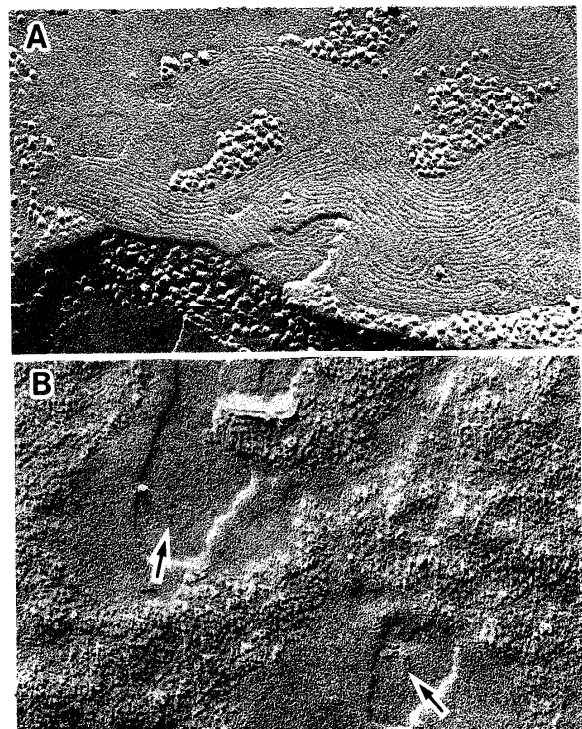


図1 凍結傷害を起こしたクワノキ皮層柔細胞の原形質膜の微細構造変化を示すフリーズ・フラクチャー電顕増。A: ヘキサゴナル相。10万倍。B: フラクチャージャンプ(矢印)として現れる膜融合部<sup>(5, 20)</sup>。10万倍。

の凍結温度まで細胞が傷害を受けず耐えられるかにより現す。

### 2-1 原形質膜の微細構造変化

自然界でおこる平衡凍結により細胞外凍結を起こし傷害を受けた植物細胞の原形質膜には共通した微細構造変化が発生することがフリーズ・フラクチャー電顕で認められている<sup>(4)</sup>。これら微細構造変化は、膜破断面でみられるタンパク質粒子の凝集発生と、凝集部における膜構成脂質2重層が非2重層構造であるヘキサゴナル<sub>II</sub>層へ相転移する現象(図1A)、および凝集部における膜融合現象として捉えられる。膜融合部は凍結下ではフラクチャー・ジャンプ部位として認められる(図1B)<sup>(5)</sup>。

### 2-2 原形質膜の微細構造変化と凍結傷害発生の関係

平衡凍結により発生する原形質膜の微細構造変化と凍結傷害発生の間には密接な関係があることが、低温順化前後の種々草本植物の柔細胞<sup>(6)</sup>、種々木本植物の柔細胞<sup>(7)</sup>(図2)、および種々担子菌類の3次菌糸<sup>(8)</sup>(図3)などであまねく知られている。

### 2-3 傷害発生の分子機構

平衡凍結傷害の発生と関連のある原形質膜の微細構造変化は、凍結による単なる温度低下による膜脂質の相分離現象ではないこと<sup>(9)</sup>、さらに脱水と低温の相互作用による膜脂質の相分離温度変化現象でもないことが確かめられている<sup>(9)</sup>。微細構造変化は凍結により原形質膜が他の膜と異常接近した部分にのみ起こる、物理的な膜相互作用の結果である(図4)<sup>(10)</sup>。

脂質モデル膜を使った実験により、膜脂質2重層が異常接近することにより、逆ミセル中間体(IMI)が隣接2重膜間に作られ、このときの温度(T)と膜脂質組成(Z)の違いによりIMIは、ヘキサゴナル<sub>II</sub>相の形成、またはインターラメラアタッチメント構造を経て融合することが示されている(図5)<sup>(11)</sup>。凍結下で観察される微細構造変化はまさにこの異常接近による膜相互作用の発生を反映したものである<sup>(12)</sup>。

ヘキサゴナル<sub>II</sub>相の形成は半透膜としての原形質膜の機能の損失により傷害をもたらすと考えられている<sup>(12)</sup>。一方、膜融合の発生は膜の不安定化

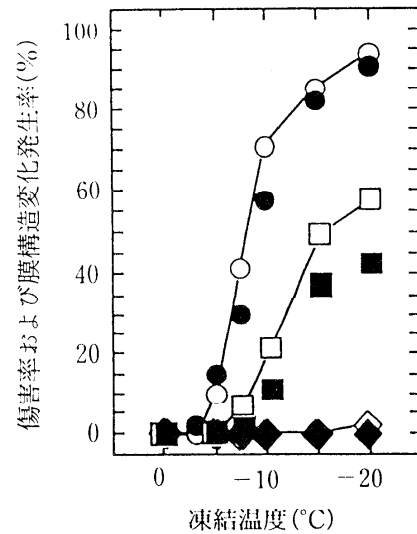


図2 凍結傷害発生と原形質膜微細構造変化の関係。クワノキ皮層柔細胞の夏(○)、秋(●)、冬(◇)の凍結傷害発生率。同じく夏(●)、秋(■)、冬(◆)の凍結による原形質膜微細構造変化の発生率<sup>(7, 20)</sup>。

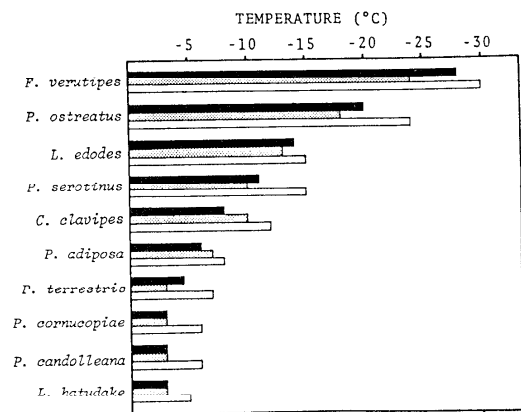


図3 種々キノコ3次菌糸における凍結傷害発生温度(□)、トノブラスト(■)および原形質膜(■)の微細構造変化発生温度の関係<sup>(8, 20)</sup>。

をもたらし、融解中に融合部から膜の小胞下が起こり原形質膜が破壊され障害が起こることが示された<sup>(13)</sup>。

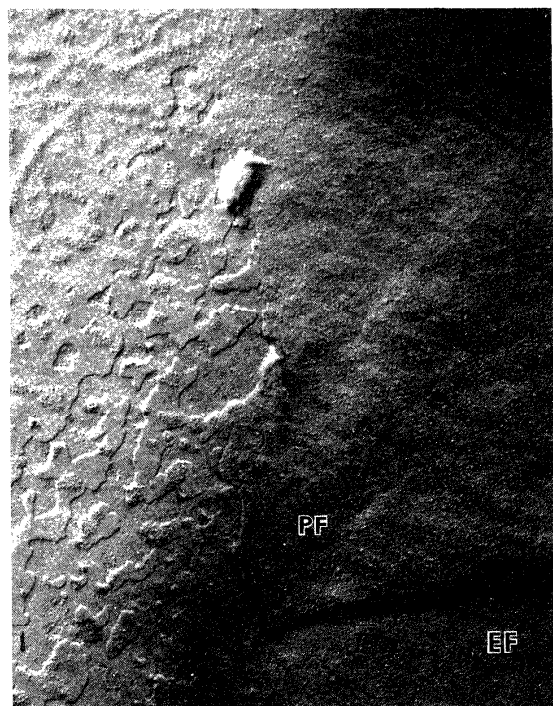


図4 凍結によるキノコ3次菌糸の原形質膜微細構造変化が膜異常接近により起こることを示すフリーズ・フラクチャー電顕増<sup>(10)</sup>。微細構造変化は異常接近が起こっている写真左半分においてのみ発生している。PF,EF: 原形質膜破断面。6万倍。

#### 2-4 膜の異常接近の原因

Steponkus のグループ<sup>(12)</sup>および Wolfe のグループ<sup>(14)</sup>は傷害をもたらす膜異常接近は、凍結による脱水が引き起こす細胞収縮のみにより起こる現象と考えている。一方、筆者は脱水収縮に加え、細胞外氷晶成長による細胞の著しい変形が異常接近に大きな影響を持つと考えている。多くの植物細胞において、浸透圧脱水に比べ、同レベルの脱水をもたらす凍結で傷害度が大きくなるのがこの理由である<sup>(10)</sup>。単なる浸透圧脱水では細胞質はほぼ相似的な収縮を起こすが、凍結ではこれに加え細胞外氷晶成長による著しい細胞の変形が起こり異常接近部位が増加する(図6 A,B)。浸透圧脱水では異常接近部位は原形質膜と隣接したプラスチドなどの細胞内器官膜の間に限られるが、凍結では細胞の

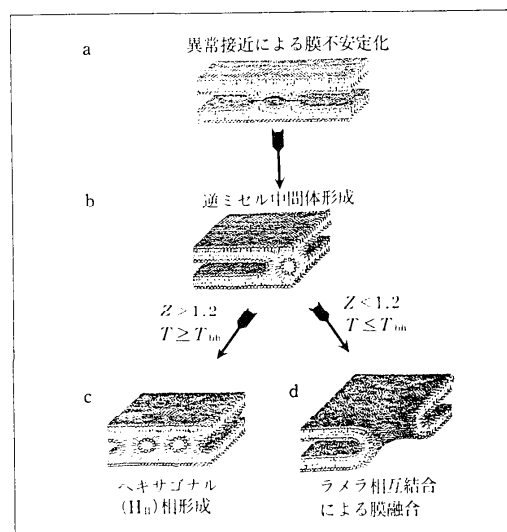


図5 膜異常接近によるヘキサゴナルII相 ( $H_{II}$ ) および膜融合の形成を示す模式図<sup>(11, 12, 20)</sup>。Z: ラメラ相/ $H_{II}$ 相の脂質極性基の表面積の割合。 $T_{hh}$ : ラメラ相から $H_{II}$ 相への転移温度。

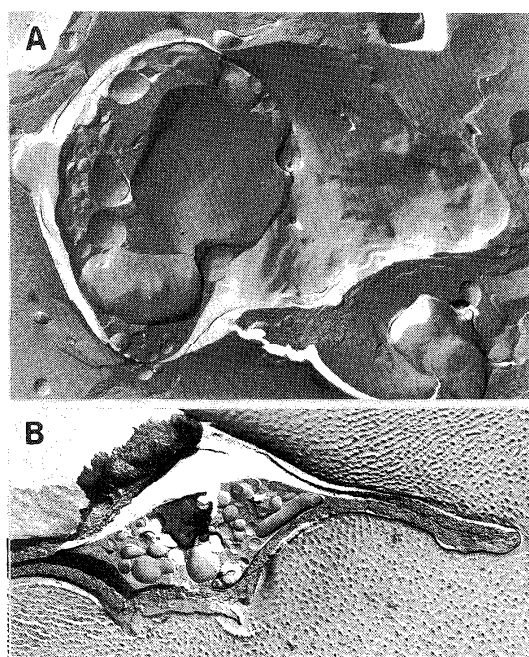


図6 浸透圧脱水 (A: 3万倍)と凍結 (B: 3万倍)による、キノコ3次菌糸の変形度の違いを示すフリーズ・フラクチャー電顕増<sup>(10)</sup>。

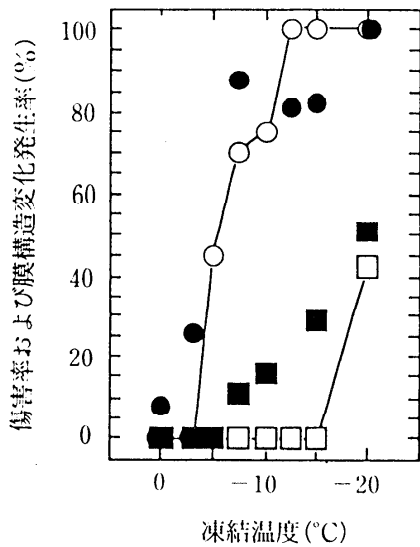


図7 アスパラガス茎頂細胞内に透過した0.5M グルコースによる凍結傷害緩和効果と原形質膜微細構造変化の関係。コントロール (○) およびグルコース処理 (□) による傷害発生率、およびコントロール (●) およびグルコース処理 (■) による原形質膜微細構造発生率<sup>(20, 26)</sup>。

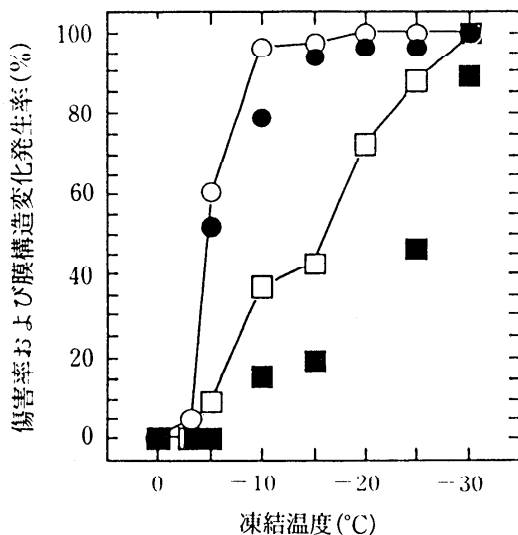


図8 キャベツ葉細胞外の1.0M グルコースによる凍結傷害緩和効果と原形質膜微細構造変化の関係。コントロール (○) およびグルコース処理 (□) による傷害発生率、およびコントロール (●) およびグルコース処理 (■) による原形質膜微細構造発生率<sup>(20, 26)</sup>。

著しい変形により同一細胞の原形質膜同士の異常接近さえ起こる。

### 3 平衡凍結による傷害の防御機構

低温順化の結果、植物には原形質膜自体の構造変化<sup>(15)</sup>、細胞質における可溶性糖質の蓄積<sup>(16)</sup> などの変化に加えて、細胞壁の構造特性の変化<sup>(17)</sup>、さらにアポプラスト成分の変化<sup>(18)</sup> など様々な変化が起こる。平衡凍結による傷害発生機構を凍結脱水および細胞外氷晶成長による細胞の変形・収縮がもたらす膜の異常接近によると考えると、低温順化の結果起こるこれらの様々な変化が果たす役割が推定できる。

#### 3-1 原形質膜の役割

Steponkus のグループ<sup>(12)</sup> および Wolfe のグループ<sup>(14)</sup> は、ライ麦葉の平衡凍結傷害の原因である膜の異常接近は、低温順化の結果おこる原形質膜脂質組成および分子種の変化により軽減されると推定している。彼らはいずれも低温順化の結果、原形質膜に増加する極性基部位の水和度の高い脂質の存在が、水和斥力により異常接近を軽減する役割を持つと考えている。しかし、原形質膜の脂質変化は異常接近防止を果たす可能性はあるが、それが異常接近を防止する機構のすべてではないことも示されている<sup>(9)</sup>。

#### 3-2 細胞質の役割

低温順化により植物細胞質内には様々な可溶性糖質が蓄積され、これらは凍結耐性の獲得に強く関与している<sup>(16)</sup>。凍害防止剤としての糖の役割はよく知られているところである<sup>(19)</sup>。細胞外に添加した糖質 (図7)<sup>(20)</sup> および細胞内に取り込まれた糖質 (図8)<sup>(20)</sup> がともに植物細胞の膜の異常接近を防止し、凍結傷害を軽減することが凍結保存実験で示されている。

これとともに、細胞膜表層の糖鎖の存在が膜融合を防止し耐凍性を高めることがモデル膜を使った実験で示されている<sup>(21)</sup>。この事実は凍結下の膜表面の糖の役割を考える上で興味ある。非常に高い耐凍性をもつ木本植物柔細胞では低温順化による構造変化後さらに、凍結による脱水が引き金となり、エンドプラズミックレテキュラム (ER) が原

形質膜直下に整列する現象がみられる<sup>(22)</sup>。このER表面に多量の糖鎖が存在し、原形質膜とER以外の細胞内器官膜の異常接近を防止することにより高い耐性が獲得される可能性が指摘されている。

植物の場合、可溶性糖の存在は、それ自体が凍害防止剤として異常接近を防ぎ傷害を防止する役割を持つとともに、糖蓄積が2次ストレスとして働き、何らかの耐性獲得変化をもたらし、より耐性の高い状態を獲得する可能性も考えられる。比較的低濃度(0.5M)の糖存在下の培地で数週間常温で培養した熱帯性植物カルス由来不定胚は液体窒素温度までの凍結耐性を示すことが知られている<sup>(23)</sup>。

### 3-3 細胞壁の役割

草本植物の場合、一般に細胞壁を持つ細胞より細胞壁を欠くプロトプラストのほうが遥かに高い耐性をもち<sup>(24, 25)</sup>、細胞壁の存在は凍結傷害を加速する傾向がある。これは細胞壁外部で成長する氷晶が細胞壁の変形をもたらし、結果として、膜の異常

接近部位の増加につながる著しい細胞の変形をもたらすためと考えられる<sup>(26)</sup>。低温順化により木本植物の細胞壁の構造特性は大きく変わる<sup>(17)</sup>。この事実は少なくとも木本植物の場合、細胞壁も凍結適応に何らかの役割を果たしていることを示唆する。平衡凍結傷害が脱水と細胞外氷晶成長による細胞の変形・収縮によりもたらされると考えると、低温順化により細胞壁が変形しづらくなることが害を防ぐ一つの要因と考えられる。しかし、草本植物の細胞壁が低温順化の結果、肥厚し堅固になる傾向があることは知られているが、その傷害防御に対する役割の評価はなされていない。

### 3-4 アポプラスト成分の役割

細胞外氷晶が形成される、生きて細胞以外の細胞間隙や細胞内腔空間、すなわち植物のアポプラストには低温順化により様々な不凍蛋白質(AFP)が蓄積することが知られている<sup>(18)</sup>。植物に蓄積するAFPは過冷却度を高めるよりむしろ氷晶形成自体

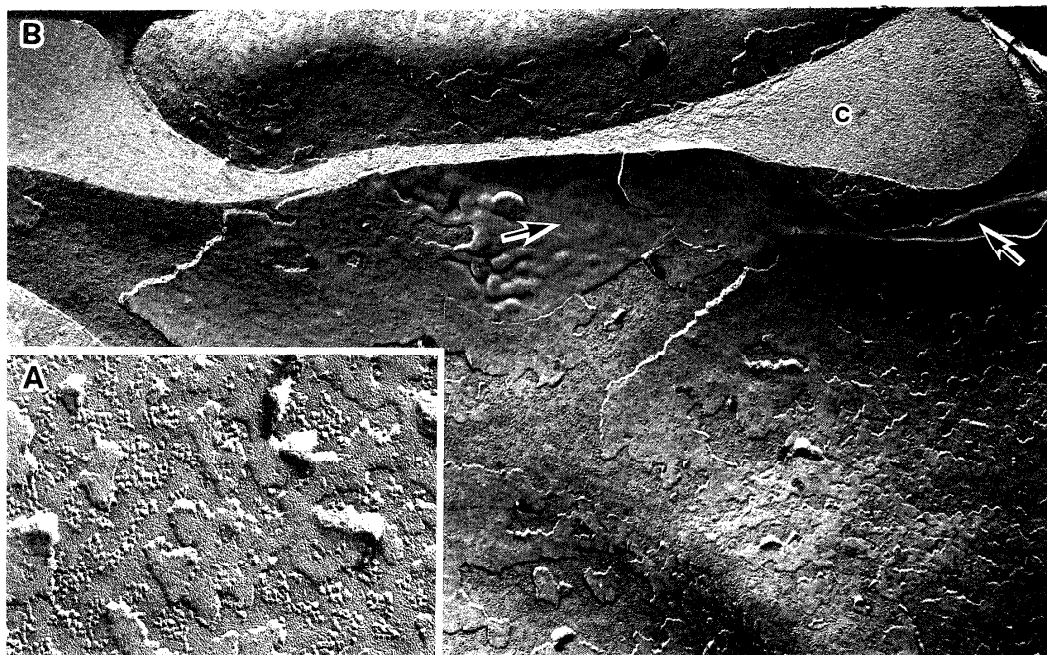


図9 平衡凍結ヒト赤血球の原形質膜微細構造変化を示すフリーズ・フラクチャー電顕増<sup>(27)</sup>。A: 膜異常接近による融合部。9万倍。B: 膜蛋白質の欠如した小胞(矢印)の形成。c: 赤血球横断面。3万倍。

を阻害する役割をもつ<sup>(18)</sup>。このため AFP の存在により細胞外氷晶は小型化し、異常接近をもたらす凍結ストレスの一つである細胞外氷晶形成による機械的ストレスを減じる働きがあると考えられる。AFP の存在下で平衡凍結した小麦実生の葉の凍結傷害はこれを欠く場合に比べ、明らかに傷害が軽減する<sup>(18)</sup>。凍結傷害の原因である膜の異常接近は、脱水収縮のみでなく、細胞外氷晶による細胞変形も深く関わっていることを強く示唆する事実である。

#### 4 非平衡凍結による傷害発生

##### 4-1 軽度の細胞外凍結ストレスによる傷害

本来凍結耐性を持たないほ乳類などの細胞において、膜異常接近をもたらすにいたらない、より軽度の凍結ストレスが細胞レベルでの傷害をもたらす場合がある。

遊離細胞であるヒト赤血球の場合、平衡凍結は細胞同士の異常接近をもたらす、これまで述べたような膜異常接近による原形質膜の微細構造変化が起こる(図9A)<sup>(27)</sup>。しかし、このような変化に至らない、冷却速度をやや早めた非平衡的凍結によっても赤血球膜には傷害が起こる。この傷害は、凍結により原形質膜上に形成される蛋白質を欠く脂質小胞の形成(図9B、矢印)と関係がある<sup>(28)</sup>。

さらに、凍結耐性の低い低温順化前のライ麦の葉由来のプロトプラストにおいて、平衡凍結による異常接近障害は $-10^{\circ}\text{C}$ 付近で起こるが、未だ異常接近を起こさない $-5^{\circ}\text{C}$ 付近で膜の小胞化が起こる現象が知られている。小胞化した膜の部分に相当する膜表面積が減少し、融解中に過度の復水が起こり細胞はパンクして傷害にいたる<sup>(15)</sup>。

これらの事実は、凍結耐性の低い細胞には、異常接近による傷害が起こる以前の、より軽度の凍結により細胞レベルの傷害が起こる場合のあることを示す。これらの害の原因として、脱水自体が膜にもたらすストレス<sup>(15)</sup>、凍結濃縮した溶質による塩害<sup>(29)</sup>、さらに未凍結フラクションのサイズの減少による機械的ストレス<sup>(30)</sup>などが考えられているが、いずれの仮説も膜の分子レベルでの傷害発生機構を明瞭に説明していない。

##### 4-2 細胞内凍結による傷害

細胞内に大型氷晶が形成される細胞内凍結はす

べての細胞にとって致命的である<sup>(1)</sup>。自然界で生物は細胞内凍結を回避する様々なメカニズムをもつ。植物のアポプラストの氷核形成物質の存在は、細胞外氷晶形成を促進することにより細胞内水分の過度の過冷却を防ぐ、細胞外凍結を促進させ細胞内凍結を防止する一つのメカニズムである<sup>(18)</sup>。しかし、植物細胞の中には、細胞内凍結の恐れが高いにも拘わらず、積極的に過冷却能を高めることにより、過冷却限度である $-40^{\circ}\text{C}$ 付近の温度まで適応可能な細胞もある<sup>(9)</sup>。

凍結保存で冷却速度が早すぎる場合、細胞内水分が十分に脱水される前に細胞内残存水分の過度の過冷却が起こり細胞内凍結が起こる。凍結保存の過程で問題になる細胞内凍結発生のメカニズムは、凍結による膜自体の構造変化により細胞内植氷が起こるとする仮説<sup>(15)</sup>、温度低下による細胞外氷晶の構造(大きさ)変化により細胞内植氷が起こるとする仮説<sup>(1)</sup>、および凍結下で原形質膜直下および細胞質内に氷核形成の触媒部位ができることにより細胞内凍結が起こるとする仮説<sup>(31)</sup>などがある。

細胞内凍結した細胞の膜には凍結下で電子顕微鏡的に明らかな氷晶による物理的損傷が見られるとともに<sup>(32)</sup>、このような細胞は融解によりさらに著しい膜の破壊を起こし傷害に至る<sup>(33)</sup>。

#### 5 結語

急速凍結による細胞内凍結により起こる細胞レベルの傷害は、細胞内氷晶が膜にもたらす機械的損傷の結果であるという比較的共通した認識が得られている。一方、緩速凍結により細胞外凍結を起こしたときの傷害の原因は必ずしも明確ではなかった。しかし、細胞外凍結をもたらす平衡凍結による傷害の基本は、脱水と細胞外氷晶成長による細胞の変形・収縮をもたらす膜の異常接近によることを示す多くの結果が集まりつつある。

凍結保存技術は、自然界で起こるような平衡凍結に耐えない、本来凍結耐性をもたない生物細胞を液体窒素温度まで保存する技術である。この技法は、凍結傷害の原因を膜の異常接近によると考えるならば、基本的に、冷却速度の調節と凍害防止剤の添加により、膜の異常接近を防止する技法であると言える。細胞内透過型凍害防止剤は、凍結下で細胞内残存水分量を高い値で保持すること<sup>(34)</sup>により細



胞レベルでの脱水収縮を軽減し、ひいては膜の異常接近を防止する効果をもつ。さらに、凍害防止剤は膜表面で蛋白質、脂質などの生体高分子表面に結合し、水の代わりまたは水を保持することにより<sup>(19)</sup>、分子レベルで膜の異常接近を防止する効果を持つと考えられる。

これとともに、凍結保存で用いる、平衡凍結に比べ速い冷却速度は、凍結中に起こる細胞からの脱水量を軽減させ、これら残存水分が低温でガラス化することにより<sup>(3,5)</sup>膜の異常接近を防止する効果を高めるといえる。凍害防止剤の存在はさらに、細胞透過型、非透過型凍害防止剤ともに細胞外氷晶成長を著しく抑制することにより、細胞の変形を防止する効果を持つ。冷却速度の増加はさらに細胞外氷晶を小型化し、異常接近をもたらす原因の一つである、機械的影響を軽減する効果を持つ。

凍害防止剤はまたその束一的効果により、凍結下での脱水量の減少、塩濃度増加の抑制、未凍結フラクシオンのサイズの減少防止などにより、異常接近に至らない、より軽度の凍結ストレスにも敏感な細胞の保護効果をも示す。

生体高分子と水の相互作用、さらにその間に介在することにより凍結による物理・化学的ストレスを緩和する凍害防止剤の役割についての分子レベルでの解明が依然残された重要課題である。

## 文献

- Mazer, P.: *Cryobiology*, (Meryman, H. T. ed.), Academic Press (1966), 214.
- Levitt, J. (ed): *Responses of Plants to Environmental Stresses*, Academic Press (1980), 1.
- Sakai, A. and Larcher, W. (eds.): *Frost Survival of Plants*, Springer-Verlag (1987), 1.
- 藤川清三：低温生物工学会誌、Vol.42 (1996), 26.
- Fujikawa, S. and Steponkus, P. L.: *Cryobiology*, Vol.27 (1990), 665.
- Uemura, M., Joseph, R. A. and Steponkus, P. L.: *Plant Physiol.*, Vol.109 (1995), 15.
- Fujikawa, S.: *Trees*, Vol.8 (1994), 288.
- Fujikawa, S.: *Cryobiology*, Vol.28 (1991), 191.
- 藤川清三：植物細胞工学、Vol.4 (1992), 319.
- Fujikawa, S. and Miura, K.: *Cryobiology*, Vol.23 (1986), 371.
- Siegel, D. P.: *Chem. Phys. Lipids*, Vol.42 (1986), 279.
- Steponkus, P. L., Uemura, M. and Webb, M. S.: *Adv. Low Temp. Biol.*, Vol.2 (1993), 211.
- Fujikawa, S.: *Cryobiology*, Vol.32 (1995), 444.
- Wolfe, J.: *Cryobiology*, Vol.13 (1992), 23.
- Steponkus, P. L.; *Ann. Rev. Plant Physiol.*, Vol.35 (1984), 543.
- Sauter, J. J. and Kloth, S.: *Protoplasma*, Vol.137 (1987), 45.
- Fujikawa, S., Kuroda, K. and Ohtani, J.: *Micron*, Vol.27 (1996), 181.
- Griffith, M. and Antikainen, M.: *Adv. Low Temp. Biol.*, Vol.3 (1996), 107.
- 酒井昭（編）：凍結保存、朝倉書店 (1987), 15.
- 藤川清三：化学と生物、Vol.34 (1996), 656.
- Park, Y. S. and Haung, L.: *Biochem. Biophys. Acta*, Vol.1124 (1992), 241.
- Fujikawa, S. and Takabe, K.: *Protoplasma*, Vol.190 (1996) 189.
- Panis, B., Totte, N., Van Nimmen, K., Withers, L. A. and Swennen, R.: *Plant Science*, Vol.121 (1996), 95.
- Tao, D., Li, P. H. and Carter, J. V.: *Physiol. Plant.*, Vol.58 (1983), 527.
- Murai, M. and Yoshida, S.: *Plant Cell Physiol.*, Vol.39 (1998), 97.
- Jitsuyama, Y., Suzuki, T., Harada, H. and Fujikawa, S.: *Cryo-Letters*, Vol.18 (1997), 33.
- 藤川清三：低温医学、Vol.23 (1997), 139.
- Fujikawa, S.: *J. Cell Science*, Vol.49 (1981), 369.
- Lovelock, L. E.: *Biochim. Biophys. Acta*, Vol.10 (1953), 414.
- Mazer, P. and Rigopoulos, N.: *Cryobiology*, Vol.20 (1983), 274.
- Toner, M.: *Adv. Low Temp. Sci.*, Vol.2 (1993), 1.
- Fujikawa, S.: *Cryobiology*, Vol.17 (1980), 351.
- Fujikawa, S.: *Cryo-Letters*, Vol.15 (1994), 223.
- Chen, T. H. H., Kartha, K. K., Constabel, F.

and Gusts, L, V.: *Plant Physiol.*, Vol.75  
(1984), 720.

35. Steponkus, P. L., Langis, R. and Fujikawa,  
S.: *Adv. Low Temp. Sci.*, Vol.1 (1992), 1.

## エビの幼生を保存する

*Preservation of shrimp larvae*

黒倉 寿 (東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻)

*Hisashi KUROKURA (Dept. of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo)*

## エビの卵・幼生凍結保存技術の必要性

マングローブ林とは、熱帯・亜熱帯の河口域の潮間帯に広がる林のことであり、汽水域に適応した顕花植物によって構成される。マングローブ林は、陸上から供給される懸濁粒子や栄養塩等のトラップとなり、多くの生物の生息域となっている。このような林がなくなることは、それ自体が環境破壊であるのみならず、周辺の珊瑚礁等の環境へも重大な影響を与える。ところで、東南アジアを中心とした開発途上国で、エビ養殖業の急速な発展が、マングローブ林の破壊の原因として、国際的に問題となっている。東南アジアで養殖されているのは、主に、クルマエビ属のウシエビ

(*Penaeus monodon*) である。このエビは、我が国では、ブラックタイガーと呼ばれ、比較的安価なエビとしてスーパーマーケットなどで売られている。ウシエビの池中養殖は台湾に始まり、1970年代から、東南アジア各国に広がった。この問題に関して、開発途上国の無垢な自然に、集約的エビ養殖業という近代技術がもたらした結果、自然が破壊されたかのような解釈がされているが、そのような、解釈は一面的である。第一に、タイなどの先進的な国を除くと、東南アジアのエビ養殖池で生産されるエビの収穫量は、1回の生産につき1ヘクタールあたり1トン以下であり、その技術を集約的な技術とは呼べない。第二に、マングローブ林は手つかずの自然ではない。マングローブは家具等の木材として利用され、その林には炭焼き小屋があり、エビ・カニ・魚などが漁獲されている。開発途上国は、環境と文化に根差して、持続的にマングローブ林を利用していたのである。その中には、マングローブ林の水路を利用したり、マングローブ林を切開いて行う養殖業があった。たとえば、東南アジアにおける主要なエビ生産国であるインドネシアは、ミルクフィッシュ

(*Chanos chanos*) の養殖業の発祥の地の一つであ

る。これらの地域のエビ養殖池は、ミルクフィッシュの養殖池を転用したものが多く、また、そうでない場合にもミルクフィッシュ池と似たような立地(マングローブ林)にエビの養殖池が造られている。つまり、立地や池の構造から考えると、先行して存在した養殖形態に、エビ養殖が導入されたのである。ミルクフィッシュの養殖は、環境破壊としてあまり大きな問題になっていない。この魚の養殖が持続的・安定的に行われているため、新たな池の開発を必要としないことと、換水をほとんど行わない施肥養殖であるために周辺の環境に与える影響が小さいからである。ミルクフィッシュの養殖技術は、地域の風土に適応した、持続的な成熟した技術といえる。ミルクフィッシュには、大量斃死をとまなう重篤な感染症がほとんどない。水温や塩分の変化強く、高塩分・高温に耐える。飼育水の水質の悪化にもよく耐え、共食いもしない。このような特性のために、浅く広い池に施肥を施し、飼育水をほとんど交換せずに、餌を与えずに飼育することが可能なのである。これに対して、ウシエビはやや低い塩分濃度を好み、水質の悪化に弱く、共食いをする。感染性の疾病も多い。したがって、外から餌を与えて飼育し、十分な換水を行って安定した環境で飼育しなければならない。マングローブ林を切開いて造った伝統的な池を、ただ、水深を深くしただけでは、十分な池の管理が行えない。ウシエビの養殖を持続的に行おうとすれば、動力等も必要となり、池の建設費用も高く、生産に必要な費用が高い。これに対して、マングローブ林を切り開いただけの池は建設費用も低く、換水に潮汐を利用すれば動力も不要で、生産費用が低い。価格競争で集約的養殖に勝つことが出来る。しかし、このような池では持続的に生産を続けることが出来ない。一旦、疾病が発生すると、それ以後、疾病を防除することができず、池が放置され、新たな池が作られることになる。言い換えれば、環境を食いつぶすこと

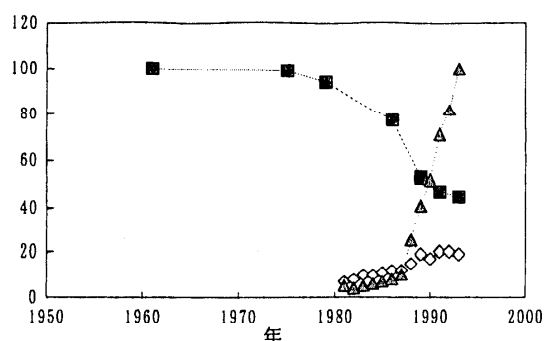


図1. タイにおけるマングローブ林(■)・エビ養殖池(◆)の総面積およびエビの総生産量(▲)の変化。文献1のデータより作図。マングローブ林・エビ養殖池の総面積は、1961年のマングローブ林の総面積を100とし、エビの生産量は1993年の値を100として表した。

によって生産費用を下げているのである。エビ養殖業は東南アジアにおける重要な輸出産業である。この産業を止めることはできない。一地域で養殖業が衰退すれば、新たに他の場所に養殖池が開発される。従来のエビ養殖の形態(粗放的生産)を続けていけば、マングローブ林の破壊が国際的に広がってことになる。図1にタイのマングローブ林の面積の変化とエビ養殖池の総面積、エビの生産量の変化を乗せた<sup>(1)</sup>。1980年代の後半から、池の総面積の増加が抑制され、それともなう、マングローブ林の破壊がくい止められていることがわかる。ここで、注目すべき事は、池面積の増加をとまわずに、生産量が増加していることである。つまり、タイは、エビ養殖の飼育密度を増す(集約化する)ことによってマングローブ林の破壊をくい止めたのである。この間に、多くの池が、建設費用のかからないマングローブ林の地域から、より土地代が高く建設費用もかかる海岸から離れた地域へ移動している。集約的生産がそれを可能にしたのである。エビ養殖の集約化は、沿岸環境を破壊から救う。マングローブ林破壊の本質は、近代的技術の導入にあるのではなく、技術の未成熟にある。持続的生産のための費用に、適正な利潤を上乗せして、現在の粗放生産に価格対抗できれば、マングローブ林の破壊を止めることができる。池の生産低下の直接的な原因は疾病である。持続的で集約的な生産技術には、疾病の予防が必要である。近年、短期間の間に東南

アジア各地に広域的に流行したエビの感染症がいくつかあり、これらがエビ養殖に壊滅的な被害を与えた。これらの疾病を克服しなければ、集約的なエビ養殖は成り立たない。エビ養殖は、原料である稚エビを生産する過程(種苗生産)と、稚エビを商品サイズまで育てる過程(養殖業)とに分けられる。通常、養殖業者は種苗生産業者から原料を購入して、養殖を行う。疾病の広域化は、種苗生産に使われる親エビあるいは、生産された稚エビの移動にもなる病原体の拡散が原因であると想像される。病原体を保有しない、疾病に強い種苗を確実に供給できるよう、種苗生産・供給システムを合理化することが必要である。その方法として考えられているのが、エビの受精卵あるいは幼生の凍結保存である。この技術が完成すれば、エビの受精卵あるいは幼生を凍結保存している間に、その一部を使って、病原体の検査を行い、その後の正常な発育なども確かめた上で、種苗を供給することが可能となる。また、現在は、種苗生産施設の規模と、エビの産卵量の関係から、産卵された卵のうち一部のみが種苗生産に使われ、多くの受精卵が廃棄されている。保存することによって、このような無駄も省くことができ、親エビ資源の保護にもつながる。このように、エビの卵・幼生の凍結保存は、環境の調和した養殖業の発展のために、重要な技術の一つとして、その開発が期待されている。

### 大きな卵黄をもつ受精卵の凍結保存

ニワトリの受精卵をそのまま凍結保存する技術はまだ開発されていない。ニワトリ卵は、その大きさから、急速に凍結して中の水分をガラス状のアモルファスとして固化することが困難である。それが可能な程度に、卵から脱水を行うことも、水を他の溶媒と入れ替えることも難しい。魚卵の大きさは種によって様々に異なるが、小さなものは、500 $\mu$ 程度である。大きさだけを考えればニワトリの卵よりは凍結保存が容易であるかもしれない。水産生物の中では、魚卵は、しばしば、凍結保存の研究対象とされている<sup>(2,3,4)</sup>。しかしながら、魚卵の凍結保存技術もまだ開発されていない。魚の受精卵は端黄卵で、胚の部分と卵黄の部分に分かれる。この外側を卵膜腔が取り囲み、全体を卵膜が取り囲んでいる(図2)。外側の卵膜は2次膜で胚の細胞膜ではない。魚の受精卵を凍結する

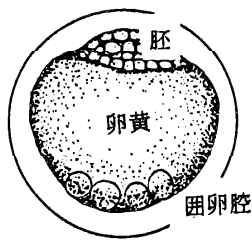


図2. 魚の受精卵 (16細胞期)

場合、凍結保護物質を、卵膜を透過して胚に浸透しなければならぬ。胚から凍結保護物質を除去したり、過剰な水分を取り除く場合にも、卵膜を介して行わなければならない。さらに、胚の部分と卵黄の部分では、凍結保護物質の浸透速度が異なり、水分含量も違っている。このような構造が、魚卵の凍結保存を複雑で困難なものにしている。魚卵の凍結保存の主要な目的は遺伝子の保存である。そこで、受精卵の凍結保存に換わる方法として、次のような技術が検討されている。精子の凍結保存は多くの魚種で可能である。一つの方法はこれを利用するものである。何らかの方法で核を破壊して遺伝的に不活性とした卵に、凍結保存した精子を授精して、保存した精子の遺伝子で発生を進める(人為的雄性発生誘導)。この他に、魚類の卵膜や卵黄を取り除いた、胚細胞の凍結保存を保存する方法もある<sup>(5)</sup>。この方法では、発生中の受精卵の胚の一部を取り除いて、凍結保存した胚細胞をここに移植して、一種のキメラとして発生を進める。保存した胚細胞が生殖系に取り込まれ生殖細胞として発達すれば、保存された遺伝子を復活させることが出来る。これらの方法は、確かに、受精卵の凍結保存と同様に、有効な遺伝子保存法である。しかし、胚を発生させるたびに良質な卵を確保せねばならず、季節によらない種苗の確保や、卵の無病証明などの種苗生産システムの合理化には役立たない。これらの方法が可能であるとしても、受精卵の凍結保存技術の開発は必要な研究である。

エビの受精卵は、魚卵に比べれば小さく、凍結保存はさらに容易と考えられるが、凍結保護物質の毒性に関する報告が数例あるのみであり<sup>(6,7)</sup>、まだ成功例はない。エビの卵割は全割で、卵径は200から300 $\mu$ で魚卵に比べるとさらに小さい。魚の場

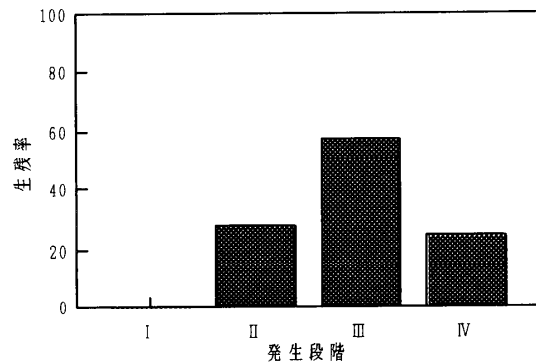


図3. シオミズツボウムシの夏卵を卵割期(I)、原腸陥入期(II)、対称期(III)、発眼期(IV)で凍結保存し解凍した後の生残率(%)

合同様に、卵を取り囲む外側の膜や、卵黄の存在が凍結保存の障害になっているとすれば、卵から孵化した後の幼生の段階で凍結保存の方が容易であるかもしれない。ヒトやマウスなどの哺乳類の受精卵の凍結保存では、通常、桑実胚、胞胚などの初期胚が凍結保存される。この段階では、個々の細胞の全能性がまだ保たれており、いくつかの細胞が破壊されても、全体として修復可能である。後期胚はすでにモザイク卵となっており、個々の細胞の発生運命はすでに定まっている。胚の一部が凍結傷害を受ければ、その修復は困難である。このような理由から、哺乳類では初期胚が凍結保存される。この考え方は、必ずしもすべての胚に当てはまるわけではない。哺乳類以外、特に無脊椎動物の胚では比較的遅い発生段階の胚や幼生を凍結保存した場合に良い結果が得られている。図3には、シオミズツボウムシの夏卵の凍結保存の結果を、胚の発生段階別に示した<sup>(8)</sup>。シオミズツボウムシではsymetric stageと呼ばれる段階で凍結耐性が高まる。この段階では、すでに体の基本的な体制が出来上がっている。また、二枚貝ではトロコフォアと呼ばれる幼生の段階で凍結保存に成功している<sup>(9)</sup>。これらのことには、卵黄物質の残存量・細胞の大きさ、種のもつ再生能力等が複雑に関係していると思われるが、脱皮を繰り返して成長するエビのような甲殻類では、幼生の段階を含めて凍結保存の可能性を検討してみることも、有力な研究方向であると思われる。

甲殻類の幼生

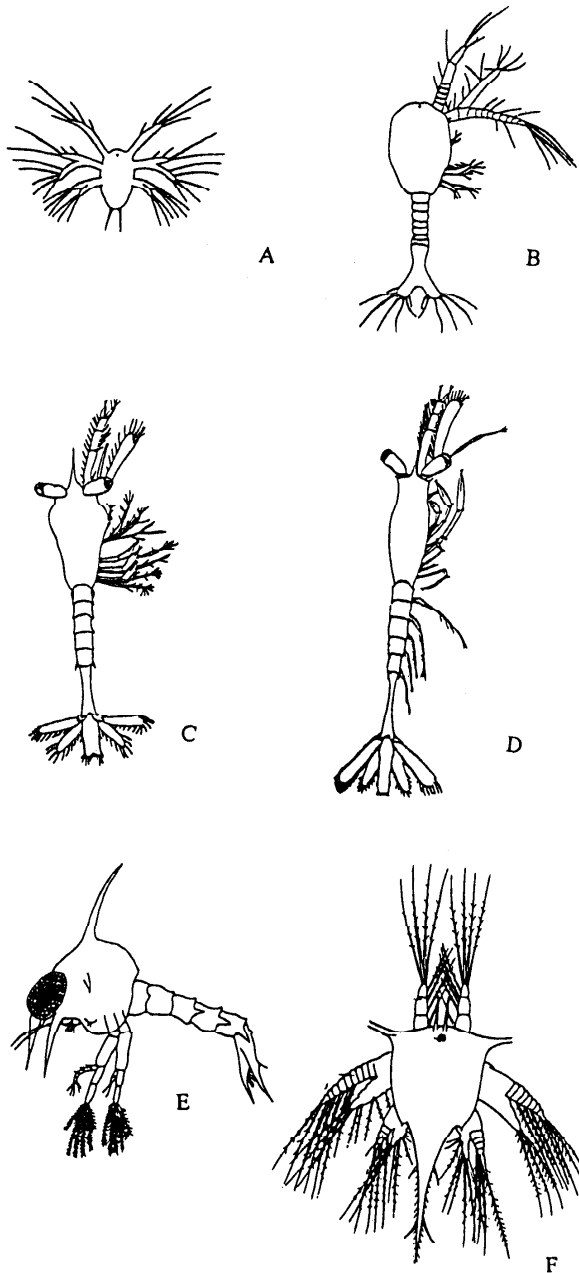


図4. 甲殻類の幼生

A. クルマエビのノウプリウス, B. クルマエビのポストラーバ, E. カニのゾエア, F. タテジマフジツボのノウプリウス.

甲殻類は様々な幼生の段階を持つ(図4). クルマエビ属は交尾によって雌が雄から精包を受け取り, 放卵の際に精包から放出された精子が卵と体外で授精する. 孵化した幼生はノウプリウス幼生と呼ばれ, 6回の脱皮を行って, ゾエア幼生となり, ミシス幼生を経て, 親エビと同じ形のポストラーバとなる. 同じ幼生期のそれぞれの脱皮ごとの幼生はノウプリウスⅠ期, ノウプリウスⅡ期のように令期で呼ばれる. それぞれの令期は大きさや形態が少しずつ違うことから, 凍結保存に対する耐性も異なると予想される. これらそれぞれの幼生に対して, 検討しなければならない凍結条件は多項目におよぶ. 温帯地方に位置する日本では, 我が国で養殖されているクルマエビ

(*Penaeus japonicus*) の産卵盛期は限られており, 親エビの入手も困難である. この問題を乗り越えて, ノウプリウス幼生一般の凍結保存の可能性を検討するために, クルマエビと同様にノウプリウス幼生を持つ飼育可能な実験動物で, 基礎的な研究を行うことが考えられる. タテジマフジツボ (*Balanus amphitrite*) は我が国の潮間帯に一般的に生息する付着性の甲殻類で, クルマエビと同様にノウプリウス幼生の段階を持つ. 幼生の大きさはほぼ同じである. 飼育は容易で, 十分な餌料を与え, 適正な温度で管理すれば, 周年的に産卵する. 産卵後すぐにノウプリウスⅠ期の幼生が卵から孵出し, 数時間のうちに脱皮してノウプリウスⅡ期の幼生となる. この幼生は珪藻を餌料として飼育することが可能で, 水温20℃前後では, ほぼ1週間でキプリス幼生となり, キプリス幼生は付着変態して付着個体となる. このように, 短い飼育期間で成体となるため, 凍結後の正常発生の観察も容易で, タテジマフジツボは, ノウプリウス幼生の凍結保存の研究に適した実験動物である.

タテジマフジツボ・ノウプリウス幼生の凍結保存

最近, タテジマフジツボ・ノウプリウス幼生の長期保存に成功した. これは, ノウプリウス幼生の長期保存のとしては初めての成功例である.

図5に, タテジマフジツボのノウプリウスⅡ期の幼生を28日間液体窒素中に凍結保存後, 解凍, 飼育した時の, 生残率の変化を示した. 解凍した時点では, 約80%の幼生が生存しているが, 解凍後24

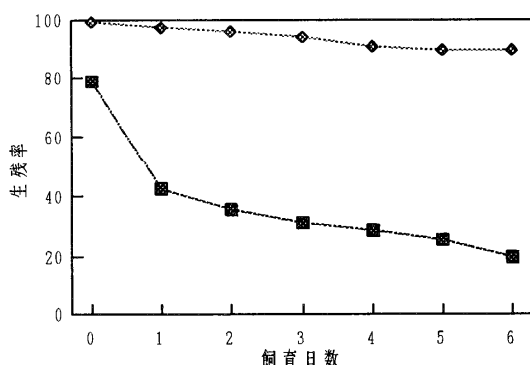


図5. 凍結保存したタテジマフジツボの飼育結果.  
凍結した幼生 (■), 凍結しなかった対照群 (◆)

時間以内に、生残個体のほぼ半分が死亡する。その翌日にも、死亡する個体が観察されるが、これらは、ノウプリウスⅡ期からノウプリウスⅢ期への脱皮に失敗して死亡した個体である。ノウプリウスⅢ期以後の死亡は少なく、最終的に約20%の個体がキブリス幼生となった。この実験では、ノウプリウス幼生を20℃から-5℃まで5℃/分の速度で、-5℃から-30℃までを0.5℃/分の速度で冷却し、その温度に20分間保った後に、液体窒素に浸して急速に冷却する二段階凍結法を用いた。-5℃からの冷却速度を緩慢冷却、緩慢冷却で冷却した後に保持する温度を保持温度、保持する時間を保持時間、液体窒素による冷却を急速冷却と呼ぶことにする。表1に、保持温度を-30℃、-40℃、-50℃とし、保持温度からそのまま解凍した時の生残率と、急速冷却を行って3日間、液体窒素に保存した後の生残率を示した。生残率は解凍後1日の生残率である。-30℃の保持温度では、急速凍結の前には80%以上の個体が生き残っていたが、急速凍結によってその約半数が死んでいる。ところが、-50℃の保持温度では、緩慢冷却の過程で80%の個体が死亡したものの、急速凍結後に解凍したノウプリウスの生残率は、保持温度から解凍したものと変わらない。-50℃までの緩慢凍結で死ななかつた個体は、急速凍結によってほとんど死なないのである。ノウプリウス幼生の凍結保存は、少なくともタテジマフジツボでは可能であった。有用甲殻類であるクルマエビ属のノウプリウス幼生の凍結保存についても、今後、受精卵の保存に変わって、その可能性を検討するべきであろう。

表1. 急速凍結前後の生残率の変化

タテジマフジツボのノウプリウス幼生を-30、-40、-50℃の保持温度まで、ただちに解凍した場合の生残率と液体窒素(-196℃)に浸して急速凍結を行い3日間保存した後に解凍した生残率(%)の比較 ( )内は標準偏差 n=3

	保持温度		
	-30℃	-40℃	-50℃
急速凍結前	84.2(7.2)	57.2(7.2)	19.9(6.3)
急速凍結後	44.4(25.8)	41.9(15.0)	19.0(9.2)

### 研究の限界と将来

水産生物の卵や幼生の凍結保存に関する技術開発は、水産学、特に水産増養殖学に関わる研究者によって行われている。技術の必要の発生から考えれば、これは当然のことであり、それらの研究では、彼らが持っている、実験材料の特性や飼育・観察に関する知識と経験が生かされている。しかしながら、その研究手法は基本的に試行錯誤によっている。表1に示した結果は、急速凍結を行う直前の幼生の水分含量の違いによって生じたと考えられる。緩慢凍結の過程は、幼生の細胞からの脱水の過程と考えられる。その程度が、保持温度によって違うのであろう。このような問題では、脱水の効率、残存する水分量、溶媒の比熱、凝固熱の発生等、物理的な要素からの解析が重要である。溶媒中の幼生の密度や凍結に用いられるストロー管中の幼生の位置によっても、解凍後の生残率に違いがあることも経験している。おそらくは、熱の伝わり方の違いによって、氷結晶生成や脱水の効率が違ってくるのであろうが、そのような解析も、生物学に基礎を置く研究者の手に余るところである。また、将来の実用化の段階では、凍結用の機械装置の開発等、工学的な知識も必要とされる。水産生物の凍結保存技術の開発は、水産学、低温生物学、物理学、工学にまたがる学際的な分野である。今後の研究の発展には、水産学の外からの研究者の参加が不可欠である。水産生物は極めて多様である、そのような材料を取り扱うことは、水産学の外からの研究者の、本来の研究分野に対しても、多くの情報をもたらすものと考えられる。

文献

1. Menasveta, P. : *Aquaculture Asia*, 2 (1), 38-44 (1997).
2. Harvey, B. : *Cryobiology*, 20, 440-447 (1983)
3. Hagedorn, M., Hsu, E.W., Pilatus, U., Wildt, D.F., Rall, W.F. and Blackband, S. J. : *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 7454-7459 (1969)
4. Zhang, T. and Rawson D.M. : *Cryobiology*, 33, 1-13 (1996)
5. Nilsson, E. and Cloud, J.G. : *Aquat. Living Resour.*, 6, 77-80 (1993)
6. Subramoniam, T. and Newton, S. S. : *Current Science* 65 (2), 176-178 (1993)
7. Newton, S.S. and Subramonia, T. : *Cryobiology*, 33, 172-177 (1996)
8. Toledo, J.D. and Kurokura, H. : *Aquaculture*, 91, 385-394 (1990)
9. Toledo, J.D., Kurokura, H. and Kasahara, S. : *Nippon Suisan Gakkaishi* 55 (9), 1661 (1989)



## 魚肉タンパク質の冷凍変性

Freeze Denaturation of Fish Proteins

土屋 隆英 (上智大学理工学部化学科)

Tukahide TSUCHIYA (Dept. of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Sophia University)

### 1. はじめに

移植用臓器や精子の保存、細菌、ウイルス等の感染病原体の保存法として冷凍技術は欠くべからざるものとなっている。近年、大いなる発展をするバイオテクノロジー研究に必要な酵素等研究試料の保存にも極めて重要な技術である。また、身近な所では年々急増する輸入食糧品の輸送も冷凍にして運ばれることが多く、冷凍技術の応用範囲は拡大し続けている。

国内での食糧保存には凍結させない水温等過冷却温度近くでの貯蔵法が開発されているが、長期間の保存には冷凍貯蔵に勝るものはない。特に水産物を長期間保存したり、マグロ等遠隔漁場から消費地への運搬には冷凍法が品質低下を防ぐ最も適した手段となっている。しかしながら冷凍貯蔵法は有効であるが優れた点ばかりではなく、水産物に少なからず悪影響を与え商品価値を落とす原因ともなる。その為凍結温度、凍結速度、解凍法等は日夜改良されてきたが、物理的方法の改良だけでは凍結貯蔵中に生じる水産物の品質低下を抑えることが出来ない。

魚肉に対する凍結貯蔵の影響を調べた研究は1910年代の形態学的<sup>(1)</sup>観察に始まり、1930年代に化学的研究<sup>(2)</sup>、凍結魚肉からの溶出タンパク質量の測定<sup>(3)(4)</sup>、さらに凍結魚肉のパネルテストと塩溶性タンパク質溶出量との相関関係の明確化<sup>(5)</sup>へと結びつく(図1)。これらの研究成果として凍結貯蔵中に起る魚肉の品質低下は筋原繊維タンパク質の冷凍変性によることが知られるようになった。

凍結魚肉の品質低下原因について、今日まで行なわれた研究の要約は次の通りである。

- ① 氷晶の成長による細胞膜や構成器官の物理的破壊<sup>(6)</sup>
- ② 氷晶成長により濃縮された高濃度無機塩類とタンパク質との接触による変性<sup>(7)</sup>
- ③ 細胞内の pH 変化に誘導されたタンパク質荷電量的変化<sup>(8)</sup>

- ④ 水和水の減少によるタンパク質溶解度の減少とタンパク質同士の異常結合形成<sup>(9)</sup>
- ⑤ 凍結貯蔵中におこる脂質分解と、分解脂質とタンパク質との不溶物形成<sup>(10)</sup>
- ⑥ 重金属イオンとタンパク質との結合による不溶物形成<sup>(11)</sup>

などが指摘されており、①～⑥の単独もしくは複数の影響で、凍結すると魚肉が品質低下するものと思われる。しかしながらこれらの要因のみでは細胞の凍結障害やタンパク質の冷凍変性機構の全てを説明することは出来ない。魚肉の凍結、貯蔵、解凍の各過程で起こる、タンパク質と水や氷との相互作用などについてはまだ知られていない事が多い。①～⑥について考えた場合凍結魚肉の品質低下の抑制法として、凍結法の技術改良ばかりでなく魚肉タンパク質自身の冷凍変性をいかに化学的に制御するのも重要な課題である。

魚肉タンパク質の冷凍変性抑制研究の端緒となったものは1961年西谷ら<sup>(12)</sup>による添加物を利用したスリ身の製造に関するものであった。資源量が膨大であるにもかかわらず、未利用資源として残されていたスケトウダラのミンチにスクロースやソルビトールとともにリン酸塩を加えて凍結貯蔵したスリ

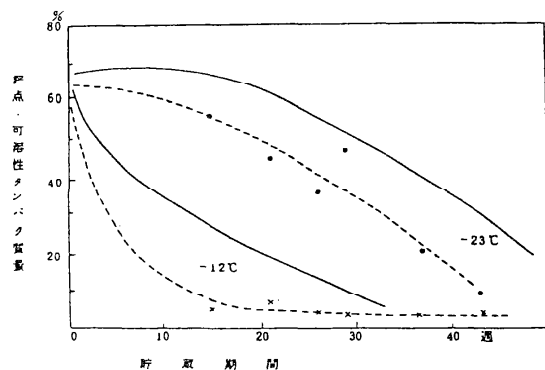


図1 -12°Cと-23°Cで解凍したタラ肉の官能検査とアクトミオシンの溶出性  
——官能検査 ---- 可溶性アクトミオシン

身が良好な物性をもつかまほこ原料となりうることを実証されたことによる。この技術の開発が冷凍スリ身の生産量を飛躍的に伸ばした。この成功により他の新しい冷凍変性抑制剤の開発にも拍車がかかり、タラ肉<sup>(13)</sup>やサバ肉<sup>(14)</sup>に対するグリセリンの冷凍変性制御効果<sup>(15)</sup>も見出された。

新しい冷凍変性抑制剤の開発には、抑制剤が有効に機能するために必要な性質や構造を知るのが重要である。またタンパク質の冷凍変性機構を解明する上で、魚肉やその構成タンパク質の凍結時の挙動を知ることも必要である。

## 2. 魚組織

### 2.1 魚肉

凍結魚肉や凍結フィラーは新鮮魚肉と比べ品質が低下しており、サシミ等生で食べると、味や香り、風味が落ちているのに気づく。調理品でも魚本来の味や香りが失なわれているし、加工原料とした場合でも良好な物性をもつ製品を作る事が出来なくなる。凍結魚肉を光学顕微鏡で観察すると、肉中に氷晶が生成し筋膜や細胞質膜の破壊<sup>(16)</sup>それに付随して細胞質成分の漏出<sup>(17)</sup>が認められる。その上筋繊維間に間隙が生じたり、筋繊維同士の間合<sup>(18)</sup>あるいは凝集したのが認められる。凍結による組織破壊は解凍時のドリップ生成につながり、味や香り成分の漏出原因となる。これと同時に光学顕微鏡では観察されない魚肉タンパク質の冷凍変性も起る。変性をうける程度は魚種<sup>(19)</sup>により異なるが、いずれにしろ長期間凍結貯蔵すると魚肉タンパク質の殆どが変性する。

凍結時、最も冷凍変性しやすいタンパク質はDyer<sup>(2)</sup>が指摘したように筋原繊維タンパク質である。それ以外にマグロやカツオ等のミオグロビンのメト化<sup>(20)</sup>による肉色変化や、無脊椎動物肉のスポンジ化<sup>(21)</sup>などがあげられる。ここでは魚肉のうち冷凍の影響を最も大きく受ける筋原繊維タンパク質を中心にその凍結貯蔵時の挙動を述べる。

### 2.2 筋原繊維

魚、畜肉いずれも筋肉を特徴づけるのは収縮の担い手となる筋原繊維である。魚肉を凍結貯蔵しても、筋原繊維構造の崩壊はわずかしか起らない。そのわずかな変化は収縮単位・サルコメア同士を結合させているZ膜のタンパク質の破壊で、一単位に断片化<sup>(22)</sup>してしまうことである。すなわち凍結貯蔵は筋原

繊維の構成タンパク質に構造上の大きな変化を起こすのではなく、サルコメアを断片化しそれにより肉質の軟化を招くことである。

## 3. 魚肉タンパク質

### 3.1 アクトミオシン

魚肉は70~80%の水と15~20%のタンパク質とわずかの糖質、脂質、灰質よりなる。全タンパク質の約60%が筋原繊維タンパク質で、収縮の担い手となるばかりでなく、魚肉の安定性や加工製品の品質の善し悪しも決定している。筋原繊維にイオン強度が0.6のNaClかKClを加えると、構造が壊れアクトミオシンと呼ばれるミオシンとアクチンの複合体が抽出される。アクトミオシンは筋原繊維と異なり矢尻構造を取るが生化学的性質は筋原繊維と同じであるので、筋収縮の試験管内モデルとして研究対象となっている。

Dyerらの凍結魚肉の品質低下に関する研究はこのアクトミオシンを中心に進められてきた。アクトミオシンを一定期間、-20℃で貯蔵すると、解凍後可溶化してくるタンパク質量は凍結前のそれと比べ減少する。貯蔵期間が長くなると可溶化するアクトミオシン量はさらに減少する。その上可溶化したアクトミオシンでも粘度は下がり、沈降速度は大きくなる<sup>(23)</sup>。さらにATPase活性も時間とともに減少する(図2)。これらの結果よりアクトミオシンは凍結時、次のように変化したものと推定される：凍結するとアクトミオシンは不溶化し、その分可溶化するタンパク質量は減少する。可溶化アクトミオシン

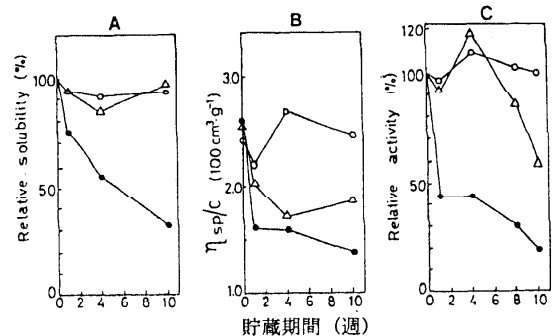


図2 コイアクトミオシン凍結貯蔵中の物理化学的性質の変化

A: 溶出タンパク質量 B: 粘度 C: ATPase 活性  
●: コントロール ○: 0.2M グルタミン酸 △: 1.0M グルコース

でももはや未凍結のものと同じ性状をしているわけではなく、分子のからまりや、分子同士の会合が起り、棒状分子がみかけ上球状分子に変化したり、みかけの分子量が増加したかのように観測されるようになる。これは酵素の活性部位の構造変化をまきこむものでもある。

凍結アクチンミオシンを電子顕微鏡観察（図3）すると、冷凍前のアクチンミオシンは典型的な矢尻構造をとるのに対し、凍結直後のものでは不鮮明な矢尻構造になるばかりでなく、ミオシンとF-アクチンとが解離しているのも認められる。凍結時間が長くなるとそれらが互いにかからまりあいながら凝集し、さらに大きな凝集体へと成長していくのが観察される<sup>(24)</sup>。この時遠心上清の可溶性画分に来るアクチンでももはや未凍結のものとは構造は異なり矢尻構

造は観察されず、小さな凝集体を形成している。構造上の変化と同時に生化学的性質である酵素活性の激な低下や Cysteine の SH 基量の減少<sup>(24)</sup>、疎水性相互作用の変化<sup>(25)</sup>、正味電荷量の変化<sup>(26)</sup>、塩析域の移動<sup>(27)</sup>などの変化もあわせて観察されるようになる。

冷凍変性について、Connell<sup>(28)</sup>は凍結魚肉からのアクチンとミオシンの抽出量が貯蔵期間に並行して同じ割合で減少するが、アクチン量は変化しない事から、アクチンミオシンの冷凍変性はミオシンが変性することによって引き起こされると結論した。しかし、後述するようにアクチンも冷凍変性するので、アクチンミオシンの変性はミオシンのみによるのではなくミオシンとアクチンの複合体として冷凍変性すると考えるのが妥当である。

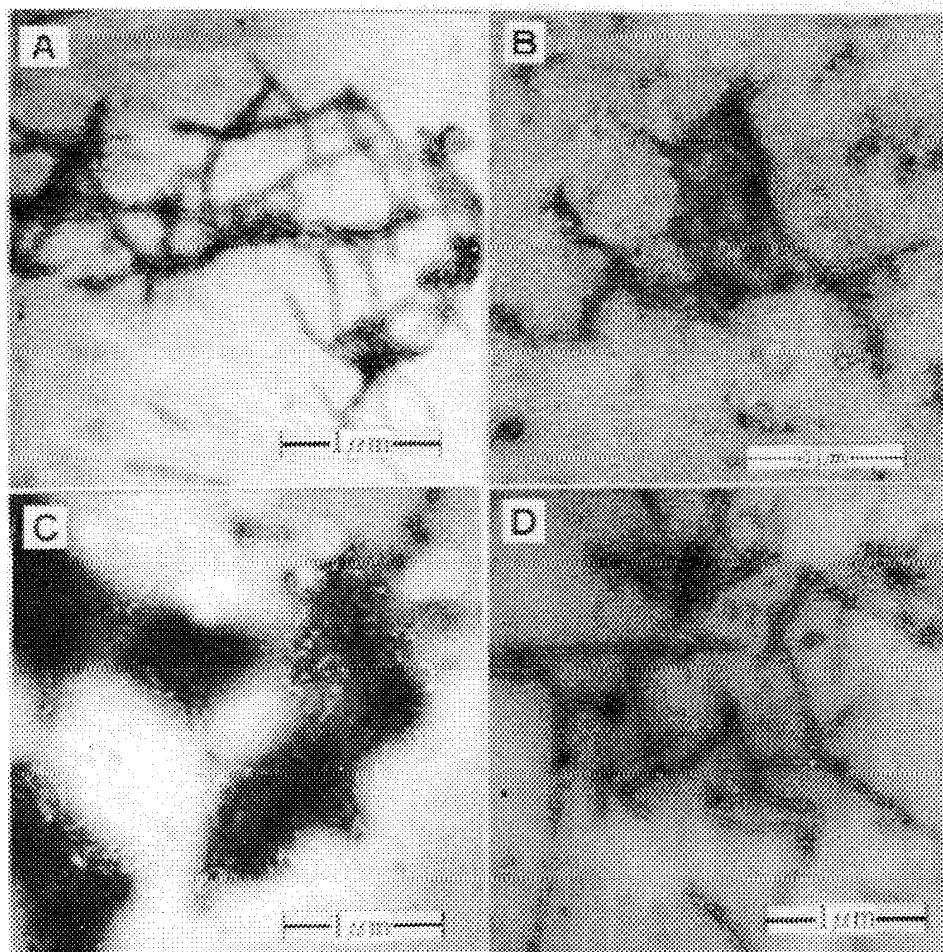


図3 コイアクチンミオシンの電子顕微鏡像

A : 凍結前

B : -20°Cで凍結後直ちに解凍

C : -20°Cで8週間凍結貯蔵

D : グルタミン酸添加、-20°Cで9週間凍結貯蔵

### 3.2 ミオシン

魚からミオシンを精製するのは極めて困難であったので、魚ミオシンに関する研究は畜肉に比べはるかに遅れていた。それでもミオシンの凍結変性に関する研究は僅かずつ進められていた。Connell はタラミオシンを凍結貯蔵した時、分子は構造変化せず、分子同士の側面会合で凝集すると報告した<sup>(29)</sup>。この結果はウサギやマスのミオシンを電子顕微鏡観察した Buttkus<sup>(25)</sup>により支持されていた。しかしコイミオシンを試料とした場合、 $-20^{\circ}\text{C}$ で凍結貯蔵すると溶解度や ATPase 活性の減少なども起こる上、Trp 由来の蛍光強度の変化や  $\alpha$ -helix 量の減少、SH 基のわずかな増加等、分子の内部構造も変化している結果が得られ、アクトミオシンの結果と同じ傾向であることを報告した。これらのことよりミオシンの冷凍変性は会合体を形成するだけでなく、分子の構造変化も起すことで Connell の説を訂正する必要があることを著者らは主張<sup>(30)</sup>した。

凍結するとミオシン ATPase の失活速度はアクトミオシンのそれより大きくなり、ミオシンはアクトミオシンより失活しやすいことを示している。凍結魚肉のミオシンでも凍結時間が長くなると失活速度がより大きくなることから、ミオシンはアクトミオシンより凍結による影響をうけやすいことを示していた。

ミオシンは生体内でフィラメントを形成している。単離したミオシンでも低イオン強度に放置するとフィラメントを形成する。イオン強度の下げ方の違いにより、ミオシンは紡錘型と垂鈴型の異なる2種のフィラメントを形成する。これらのうち紡錘型フィラメントが凍結に対して最も安定で、ミオシン分子の溶解状態のものが最も不安定である。溶液中でのミオシンのとる型の違いにより冷凍変性をうける度合いも異なってくる<sup>(31)</sup>。

一方、ミオシンは巨大分子でプロテアーゼ処理すると ATPase 活性を持つヘビーメロミオシン(HMM)とフィラメント形成能を持つライトメロミオシン(LMM)の二つのサブフラグメントに分かれる。両サブフラグメントとも凍結貯蔵した時の可溶性タンパク質量に変化が認められないが、HMMATPase は速やかに失活するし、LMM のパラクリスタル(偽結晶)形成能も影響を受け、両サブフラグメントともに凍結による影響をうけていた<sup>(31)</sup>。

### 3.3 アクチン

筋肉タンパク質中ミオシンについて多いアクチンは冷凍変性しないタンパク質と言われていた<sup>(29)</sup>。単離したG-アクチン(globular,球状)を凍結貯蔵しても不溶化せず、溶解度からでは変性したかどうか判断す出来ない。しかしG-アクチンに二価イオンを加えて重合させたF-アクチン(Fibrous,繊維状)は凍結により影響を受け、電子顕微鏡では繊維構造が不鮮明になるのが観察される。耐凍性が高い思われていたアクチンですら冷凍変性する。アクチンはミオシンほど凍結損傷は小さいものの、構造変化を伴う冷凍変性をするので、アクチンは冷凍変性しないとする従来の説を訂正する必要がある。

なお筋肉中でアクチンと結合する収縮調節タンパク質トロポミオシンも冷凍変性しないタンパク質と言われたいた。しかし、その分子の内部構造は僅かであるが変化しており、安定であると言われるものでも詳細に調べると冷凍の影響をうけているのがわかる。

### 3.4 結合組織

魚結合組織含量は畜肉と比べて低い、魚肉の筋隔や筋鞘、筋膜等の成分として筋の構造維持の役割をはたしている。魚を凍結した時結合組織に大きな構造変化は認められないが、筋膜は脱水し硬化するなどの変化をうけ<sup>(32)</sup>、結合組織の構成タンパク質が冷凍変性している可能性が伺われる。しかし結合組織の冷凍変性に関する研究は少なく、凍結により結合組織の構成タンパク質が受ける影響については不明な点が多い。

### 3.5 筋形質タンパク質

筋肉タンパク質中の約20%を占める筋形質タンパク質は各種酵素の宝庫であるが、魚肉の品質低下と筋原繊維タンパク質の変性との相関が報告された後、これらのタンパク質に関する変性研究の興味は失なわれた。しかし近年固定化酵素やバイオセンサーなどの材料として利用されるようになり、これらの酵素の貯蔵法の再検討も必要となってきた。

筋形質中に含まれるタンパク質には球状のものが多く凍結貯蔵でも失活しないと信じられている。しかし乳酸脱水素酵素はサブユニット間の結合が切断され活性に変化が生じ失活したりもする<sup>(34)</sup>。凍結すると Trp 蛍光強度や  $\alpha$ -helix などの内部構造に変化したのが認められ、ミオシン等と同様凍結の影響を受け変性するものと思われる。

変性しにくいと考えられる球状タンパク質でも凍結貯蔵すると分子構造上の変化を起す。特にサブユニットからなるタンパク質は容易に解離、変性し凍結の影響を大きく受ける。

4. 冷凍変性と架橋構造の形成

球状タンパク質が pH、熱、尿素処理で引き起こされる変性は分子の“ほどけ”で説明される。しかしアクトミオシンやミオシンの凍結時の凝集や不溶化は“ほどけ”のみでは説明できない。以前、魚アクトミオシンの冷凍変性はタンパク質間に S-S 結合が形成されて凝集すると考えられ、冷凍変性におけるこの結合の役割が強調されていた。しかし著者らはコイアクトミオシンの冷凍変性機構を解明する過程で、凝集は S-S 結合の形成のみでは説明出来ないことを指摘した<sup>(35)</sup>。

コイアクトミオシンを一定期間凍結貯蔵し解凍後表1のように単独もしくはそれらを組合わせて添加すると、ホモジナイズ後の可溶性タンパク質量に違いがみられる。これらの試薬は KCl がイオン結合、1.5M Urea が水素結合、8M Urea が水素結合、イオン結合、疎水結合、2-ME は S-S 結合、KOH がイオン結合を切断するものと考えられている<sup>(36)</sup>。

試薬を単独で添加したものでは可溶性アクトミオシン量は凍結時間によって減少する。各種試薬を組合わせたものの中で 8M Urea+0.5M 2-ME では、8週と長期間凍結貯蔵したものでも 100%近く可溶化でき(図4)、凍結前のアクトミオシン量とほぼ同じになる。他の試薬を組合わせたものでは 100%

表1 凍結アクトミオシンの溶解条件

Protein	Group	Storage condition (M KCl)	Water	Solubilizing agent			
				KCl (M)	Urea (M)	ME <sup>1</sup> (M)	KOH (M)
Actomyosin	A-a	0.05	added*	—	—	—	—
	-b	0.05	added	—	1.5	—	—
	-c	0.05	added	—	8	—	—
	-d	0.05	added	—	—	0.5	—
	-e	0.05	added	—	1.5	0.5	—
	-f	0.05	added	—	8	0.5	—
	-g	0.05	added	—	—	—	0.2
Actomyosin	B-a	0.05	—	0.6	—	—	—
	-b	0.05	—	0.6	1.5	—	—
	-c	0.05	—	0.6	8	—	—
	-d	0.05	—	0.6	—	0.5	—
	-e	0.05	—	0.6	1.5	0.5	—
	-f	0.05	—	0.6	8	0.5	—
	-g	0.05	—	0.6	—	—	0.2
Actomyosin	C-a	0.6	—	0.6	—	—	—
	-b	0.6	—	0.6	1.5	—	—
	-c	0.6	—	0.6	8	—	—
	-d	0.6	—	0.6	—	0.5	—
	-e	0.6	—	0.6	1.5	0.5	—
	-f	0.6	—	0.6	8	0.5	—
	-g	0.6	—	0.6	—	—	0.2

<sup>1</sup> β-Mercaptoethanol  
\* Concentration of KCl, less than 0.0025M

近くにはならず、8M Urea +0.5M 2-ME で凝集にかかわる結合を全て切断することが出来るものと考えられる<sup>(35)</sup>。

以前より指摘されていた S-S 結合の寄与については、-20℃で8週間貯蔵したアクトミオシンに 2-ME を加えても約 30%しか可溶化出来ない。このことからアクトミオシンを凍結貯蔵するとタンパク質間に S-S 結合だけではなく、イオン結合や水素結合、疎水結合等が形成され、時間経過とともにそれらの結合数がさらに増加したものと推察される。その結果タンパク質の水和に寄与する親水性残基数が減少し、アクトミオシンが凝集したものと考えられる。なおアクトミオシンの凝集は氷晶成長にとりま

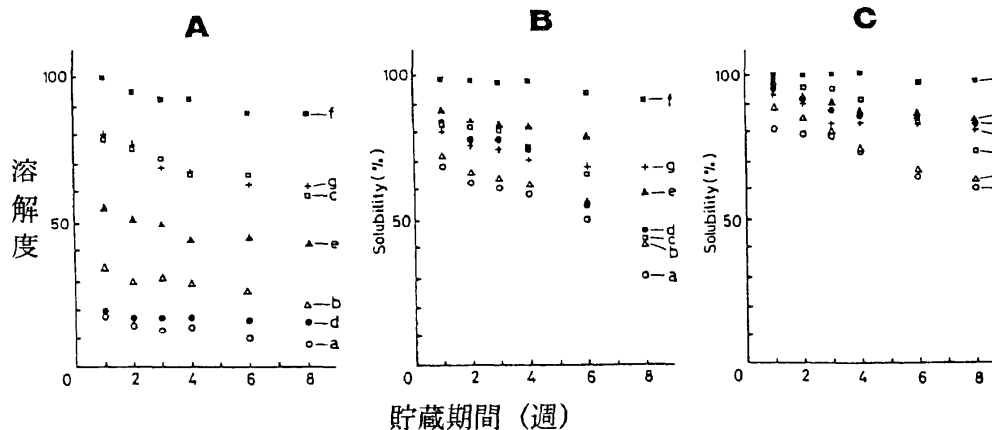


図4 各種溶解試薬による凍結アクトミオシンの溶解度  
A, B, Cは表1に対応

る。なおアクチオシンの凝集は氷晶成長にともない、タンパク質を囲う水の量が減少したため、疎水性残基が表面に露出する。露出した疎水性残基はタンパク質間で疎水結合を形成し、解凍中再び水が移動してきても、一度出来た結合は切断されず、逆に水が疎水結合を補強するため凝集物の可溶化がより困難となる。

アクチオシンの結果はその構造から考えると、結合は始めにミオシン尾部同士で起こりそれが引き金となり凝集体が形成され、さらに成長して不溶化するものと思われる。

### 5. 冷凍変性の原因

魚肉タンパク質の冷凍変性の前記した原因について吟味してみると：

- a. タンパク質溶液が凍結する過程で生じる不凍液中で塩が高濃度に濃縮され、その塩とタンパク質が接触することで起る変性は溶液中から NaCl や KCl を除いてもタンパク質は冷凍変性<sup>(66)</sup>すること、NaCl や KCl が含まれたタンパク質溶液でもグルタミン酸やグルコース等を加えて凍結すると冷凍変性は抑制される<sup>(67)</sup>。このことから高濃度の NaCl や KCl 等がタンパク質を冷凍変性させる第1要因とは考えられない。
- b. 凍結貯蔵中に生成するホルムアルデヒド、溶存ガス、脂質等がタンパク質を変性させるとする説に対しても、タンパク質溶液からそれらが除去されていても冷凍変性するので、これも変性の主要因とは考え難い。
- c. 冷凍変性したアクチオシンは分子構造変化する

るとともに凝集し不溶化する。この構造上の変化を考えると、タンパク質の脱水が冷凍変性の最もおおきな原因と思われる。すなわち凍結によりタンパク質と水との一定関係がくずれた時、アクチオシンやミオシンは変性<sup>(6)</sup>する。この点に関し冷凍変性抑制物質の効果がホフマイスター順列に一致することからもこの説が支持されている。

### 6. 冷凍変性と分子構造

#### 6.1 棒状分子

筋肉タンパク質は水溶性、塩溶性、不溶性の3種に大別される。水溶性タンパク質は主に球状分子であり、塩溶性タンパク質はミオシンを代表とするように棒状分子が多い。ミオシンあるいは LMM は  $\alpha$ -helix 含量が高く、かつ2本の  $\alpha$ -helix 鎖が疎水結合した2重らせん構造をとっている。その分子表面には親水性の残基が位置し水和している。

棒状タンパク質を凍結すると氷が成長するに従い分子を周りの水が移動するため、水和水は減少する。水が失われると水和に関わる親水基は別のタンパク質のそれとイオン結合するようになり、タンパク質会合体が生成する。またコイルの表面で水をさけるように位置している疎水性残基や2本鎖の形成にかかわる疎水性残基がともに、水の減少にともなって表面に露出する。これらの疎水性残基も別のタンパク質の疎水性残基間で疎水結合を形成し、イオン結合とともにタンパク質会合体の形成に働く。棒状分子では凍結時分子の“ほどけ”がわずかしか観察されず、凍結貯蔵中や解凍後も  $\alpha$ -helix 構造を保ちながら別のタンパク質と接触し側面会合する。結果的

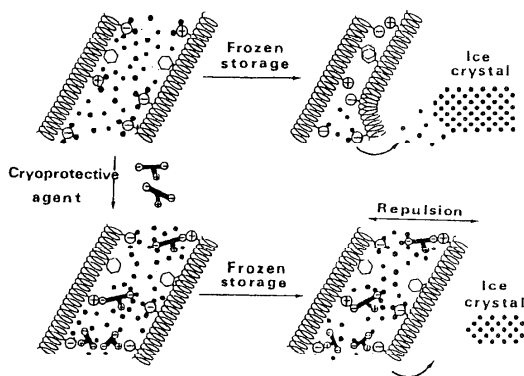


図5 棒状分子の冷凍変性とグルタミン酸

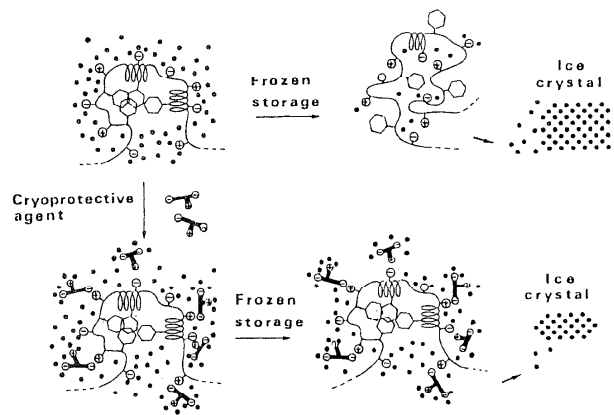


図6 球状分子の冷凍変性とグルタミン酸

に Side-to-Side 結合した大きな凝集体へ成長する (図5)。解凍後はタンパク質の周りに水が戻ってきても、親水性残基はすでにタンパク質間で結合を作っているため、水に参加出来ず可溶化に必要な量の水をとらえる出来ず、水和水が不足する。その為タンパク質は沈澱したままである。

### 6.2 球状タンパク質

ミオシン頭部やアクチン、球状の各種酵素類を凍結すると生物活性が失われる。これらを長期間凍結した時の構造上の変化としては、疎水性残基やSH基が分子内部から表面へ露出してくるのが観察される。通常、球状タンパク質は分子構造維持のため分子内にイオン結合、水素結合、S-S結合の他に疎水結合が形成されている。

球状タンパク質溶液を凍結貯蔵すると棒状分子の時と同様、タンパク質の周りを満たす水が氷晶生成のため移動し、タンパク質の周りは疎水性の環境へと変化する (図6)。その結果溶液中で疎水結合を形成し水層をさけるようにタンパク質内部に留っていた疎水性残基は表面へ露出し、球状構造がくずれことで分子の“ほどけ”が生じる。一旦露出した疎水性残基は別のタンパク質の疎水残基と疎水結合し凝集体となる。凍結時間が長くなるとその凝集体も成長する。球状タンパク質を冷凍した場合分子の“ほどけ”を経て凝集していく点で、棒状分子の凝集体形成とは異なる。すなわち球状タンパク質と棒状タンパク質の冷凍変性への過程は分子構造上の変化をともなった凝集体となるかならないかの違である。

しかしながらタンパク質がいかなる構造をとろうと凍結すると冷凍変性する。その引き金となるのは凍結による水分子の移動で、その結果タンパク質の水和水が減少し脱水、凝集へと一連の過程を経る。

### 7. 冷凍変性抑制物質

タンパク質の冷凍変性は凍結法や温度、解凍法などを改良するのみでは抑制出来ない。そのため細胞やタンパク質を凍結する前に糖や多価アルコールあるいはその関連物質を凍結保護剤として加える手法がとられる。

冷凍スリ身に対するスクロース等の有効性の発見に引きつづき、魚肉タンパク質に冷凍変性抑制効果をもつ物質の検索が行なわれた。その結果、抑制に

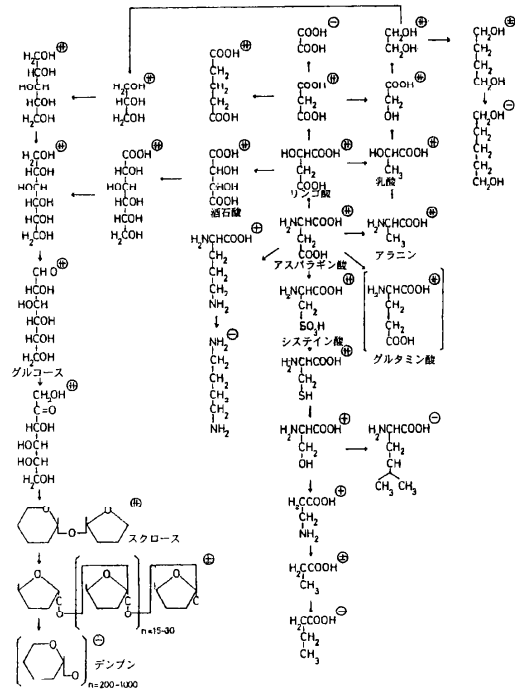


図7 冷凍変性抑制物質とその効果

顕著な効果をもつ物質として単糖類、少糖類、分子量の小さい多糖類、ジアルコール、多価アルコール、ヒドロキシカルボン酸、ジ-、トリ-カルボン酸、アミノ酸類とその誘導体が見いだされた (図7)。

魚肉タンパク質に顕著な効果をもつアミノ酸を中心として、冷凍変性抑制効果を持つにはどのような構造が必要なのであろうかを検討すると、抑制物質として機能するためには次の条件が必須である<sup>(38)</sup>。

- ① 物質中に COOH、OH、OPO<sub>3</sub>H<sub>2</sub> のいずれかの官能基が必須で、さらに COOH、OH、NH<sub>2</sub>、SH、SO<sub>3</sub>H、OPO<sub>3</sub>H<sub>2</sub> 等の補助官能基をもつこと (表2)
- ② これらの官能基が物質上で適当な距離と立体配座をしていること
- ③ 抑制剤が適当な大きさであること

表2 凍結保護物質として必要な官能基

Essential groups	Supplementary groups	Function in cryoprotective effect
-COOH	-COOH -NH <sub>2</sub> -SO <sub>3</sub> H	Ionic coating " " " "
-OH	-OH -SH	H-bond coating S-S bond coating
-OPO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	-OPO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	Ionic coating

これらの条件を満たすアミノ酸にはリジン、アルギニンの塩基性アミノ酸、グルタミン酸、アスパラギン酸の酸性アミノ酸がある。特にグルタミン酸は冷凍変性抑制剤として顕著な効果をも持つ上、安価であるので使用しやすいので、グルタミン酸の働きについて述べる。

グルタミン酸は条件①、②、③を満たしている。中性溶液中でグルタミン酸は解離した2つのカルボキシル基と1つのアミノ基をもつ。タンパク質溶液に加えられたグルタミン酸はタンパク質中のリジン、アルギニンのアミノ基と、またグルタミン酸、アスパラギン酸のカルボキシル基とそれぞれイオン結合する。例えばコイミオシンにはこれら4種のアミノ酸が40%以上含まれているので、水溶液中でこれらの残基が全て表面に存在し、かつ解離してグルタミン酸とイオン結合すると仮定するならば、グルタミン酸がタンパク質の表面をコーティングした形になる。タンパク質にグルタミン酸が結合するとタンパク質の表面電荷は増加し、その分水和量が増す。またコーティングされたタンパク質溶液を凍結すると、タンパク質の周りの水は移動するが、グルタミン酸が結合して増加した電荷のため水和量が増した分脱水されにくくなる。さらに脱水されてもグルタミン酸でコーティングされているため、他のタンパク質との間に電気的斥力が生じ、未添加タンパク質間でのような会合の形成が抑制される。また解凍後再びタンパク質の周りに水が移動してきた時、表面電荷が増した分容易に水和するので可溶化する。さらに球状分子の“ほどけ”はグルタミン酸のコーティングにより未添加のものより脱水されにくくなり、分子内の疎水性残基の露出が抑えられ、結果的にタンパク質内の疎水結合の崩壊が抑えられる。

各種実験によりグルタミン酸の冷凍変性抑制効果は、グルタミン酸がタンパク質と結合したことでもたらされたもので、水の構造を変え結果的に冷凍変性を抑制する糖類とは異なる機構<sup>(39)</sup>で働いていると考えられる。

冷凍変性抑制作用は多角的であり、抑制剤の開発も広い分野から物質を検索する必要性があること、冷凍変性の研究も多面的に進めるのが重要である。

## 8. おわりに

タンパク質の冷凍変性機構を解明する上で最大の障害は凍結過程での系中のタンパク質の挙動を直接

測定する手段をもたないことである。それ故冷凍変性の研究は凍結前と貯蔵後のタンパク質の物理化学的性質を調べることで、凍結、貯蔵、解凍時の各段階でのタンパク質の変化を推定する間接的方法に頼らざる負えない。このような状況のもと、松本や野口により導入された冷凍変性抑制剤の検索と抑制効果をもつ物質の共通構造を見出す方法はタンパク質の冷凍変性を研究する上で一つの有力な手段である。

それでも冷凍変性の機構は複雑で凍結や解凍時のタンパク質の挙動、組織中のタンパク質の動き、水との関係など研究しなければならない課題が多い。今後の発展が期待される。

## 文献

1. Foruyn, A.D.B., C.R. III Congr. Int. Froid., Vol. 2 (1913), 584
2. Smith, C.S., Biochem. Bull., Vol. 3 (1932), 396
3. Reay, G.A. and Kuchel, C.C., Ann. Rept. Food Investigation Bd. Gr. Br., Vol. 1936 (1937), 93
4. Finn, D.B., Proc. Roy. Soc., vol. B111 (1932), 396
5. Dyer, W.J., Food Res., Vol. 16 (1951), 522
6. Weld, C.B., Biol. Board Can. Manuscript Repl. Expl. Stas., No. 12 (1927), 63
7. Dyer, W.J. and Dingle, J.R., "Fish and Food" (ed. by Borgstrom), Academic Press, New York (1961), pp 275-327
8. Finn, D.B., Contrib. Can. Biol. and Fisher., Vol. 8 (1934), 313
9. 松本重一郎、冷凍、Vol. 47 (1972), 206
10. Dyer, W.J. and Morton, M.L., J. Fish. Res. Bd. Canada, Vol. 13 (1956), 129
11. 北林邦次、石川宣次、北水研報、vol. 26 (1963), 111
12. 西谷喬助、武田二美雄、田村馨、田中修、福見徹、北林透、相沢悟、北水試月報 Vol. 18 (1961), 122
13. Love, R.M., J. Food Sci. Vol. 27 (1962), 544
14. 太田冬雄、西元諄一、鹿大水産紀要 Vol. 12 (1963), 14
15. Linko, R.R. and Nikkile, O.E., J. Food Sci., Vol. 26 (1961), 606
16. Love, R.M., J. Sci. Fd. Agric., Vol. 8 (1957), 238
17. 田中武夫、"食品の水" (日本水産学会編) 恒星社厚生閣、東京 (1973) pp 63-82
18. 小嶋秩夫、冷凍、Vol. 62 (1987), 1274
19. 田中和夫、東海水研報、Vol. 116 (1985), 67
20. 渡部終五、橋本周久、冷凍、Vol. 62 (1987), 1302



21. 小山光、冷凍、Vol.62 (1987), 1320
22. Noguchi,S. and Matsumoto,J.J., Bull.Japan. Soc. Sci.Fish.,Vol.36 (1970), 1078
23. Ohnishi,M.,Tsuchiya,T. and Matsumoto,J.J., Bull. Japan.Soc.Sci.Fish., Vol.44 (1978), 755
24. Buttkus,H.J., J.Food Sci., Vol.35 (1970), 588
25. 坐間幸一、私信
26. 右田正男、大竹茂夫、Vol.22 (1961), 327
27. Oguni,M., Kubo,T. and Matsumoto,J.J., Bull. Japan.Soc.Sci.Fish., Vol.41 (1975), 1113
28. Connell,J.J., J.Sci.Fd.Agric., Vol.13 (1962), 13
29. Connell,J.J., Nature, Vol.183 (1959), 664
30. Matsumoto,J.J.,Tsuchiya,T.,Noguchi,S.,Ohnishi,M. and Akahane,T.,Present at 26th Int.congr., Pure and Applied Chemistry(Tokyo,1977)
31. Akahane,T.,Tsuchiya,T. and Matsumoto,J.J., Cryobiology, Vol.18 (1981), 426
32. Tanaka,T., "The Technology of Fish Utilization" (ed. by Kreuzer,R.), Fishing News Book Ltd,London (1964), pp121-125
33. Chilson,O.P.,Costello,L.A. and Kaplan,N.O., Biochemistry, Vol.4 (1965), 4
34. Nakajima,S.,Tamiya,T., Akahane,T.and Matsumoto,J.J., Bull.Japan.Soc.Sci.Fish., Vol.49 (1983), 1265
35. Tsuchiya ,Y., Tsuchiya ,T. and Matsumoto,J.J., "Advances in Fish Science and Technology" (ed. by Connell,J.J.) Fishing News Book Ltd, Farnham (1980), pp434-438
36. Kauzmann,W., "Advan.Protein Chem."(ed. by Anfinsen,C.B.and Edsall,J.T.),Academic Press, Orland(1959), pp1-63
37. Tsuchiya ,T., Tsuchiya ,Y. Nonomura,Y. and Matsumoto,J.J., J.Biochem., Vol.77(1975) 853
38. Matsumoto,J.J., "Chemical Deterioration of Proteins"(ed. by Whitaker,J.R. and Fujimaki,M.), American Chemical Society, Washington (1980), pp95-124
39. Frank,F., "Water Relation of Foods" (ed. by Duckaorth,R.B.),Academic Press,London(1975), pp 3-22

## 凍結魚の解凍過程における生化学的品質劣化と伝熱

*Deterioration of biochemical quality and heat transfer  
in the thawing process of a frozen fish*御木 英昌 (鹿児島大学水産学部食糧保蔵学研究室)  
Hidemasa MIKI (Laboratory of Food Preservation, Faculty  
of Fisheries, Kagoshima University)

## 1. はじめに

近年、冷凍技術の進歩とコールド・チェーン（低温流通機構）の整備により、冷凍（凍結）食品は優秀な品質のものが得られるようになった<sup>(1)</sup>。しかし、優れた凍結食品でも、不適当な解凍操作のため、その品質が低下することは十分に考えられる<sup>(2)</sup>。凍結魚の場合、解凍は品質保持上、凍結と同様に重要な操作であるが、自然放置や水浸漬などの簡単な方法で容易にできることから、従来あまり重視されなかった。最近では、生鮮魚に近い高品質魚を得る解凍法や、輸入量の増大に伴い大量処理可能な能率の良い大規模解凍装置の開発・改善の要求が高まってきた<sup>(3)</sup>。冷凍水産物の解凍条件についても多くの実験的研究があるが、凍結魚の種類・形態・量および解凍条件が種々異なる場合に、ある限られた実験結果を適用することは必ずしも適当でない場合が多い。また、解凍は凍結と異なり逆の加熱操作のため、被解凍物の温度上昇を招き、その上高温の環境におかれるため、食品は品質劣化を起し易い。食品は生物起源の材料で、新鮮なものほど生物活性が高く、熱に敏感であるのが特徴である。とくに魚肉は畜肉と違って組織が柔らかいため微生物作用を含め品質劣化が速く、それらの温度依存性は大である。

解凍の対象となる食品を大別すると、魚・肉・野菜類の冷凍生鮮品の外に、加熱調理したフライ類など多種の調理冷凍食品がある。

ここでは、冷凍生鮮食品の中で冷凍水産物の生産高が45.5%(93,913トン：平成8年)<sup>(4)</sup>と大半を占める。そこで、凍結魚を対象に凍結状態から融解して元の生鮮状態に戻す場合の解凍条件および装置等の基本的問題について概説する。なお、大部分の魚介類（海産動物）は筋肉組織を持った食品(muscle foods)を構成し、動物タンパク質を主要成分としているため、他の動物食品のモデルとして適用範囲が広い<sup>(5)</sup>。さらに、解凍条件を最適化するための品質劣化および伝熱の計算例についても紹介する。

## 2. 解凍条件

解凍の良否を決定するには、主に解凍前の品質、解凍速度および解凍終温度の三点<sup>(6)</sup>が必要といわれるが、この他に解凍方法（加熱方法、加熱媒体の種類と状態<sup>(7)</sup>）の影響も挙げられる。これらの影響因子を含め、凍結魚介類の解凍条件について述べる。

## 2.1 解凍前の品質

一般に低い品質の凍結魚は、それが最良の条件で解凍されても元以上に復元して品質が向上することはあり得ない<sup>(8)</sup>。ゆえに、解凍前の原料および凍結・貯蔵条件が充分吟味され、凍結魚の品質が保証されていることが必要である。このように、解凍前の品質が良ければ、生鮮魚に近い状態の解凍魚を得ることが可能である。解凍魚の品質は、一般には凍結魚の品質と見なされているが、正確には凍結前の品質に、凍結・貯蔵過程で生じた品質劣化を含むものとする。凍結貯蔵中に品質低下を起した魚は、ドリップ(drip)が多量に流出する<sup>(1)</sup>。この品質低下の主な要因は、凍結によるタンパク質の変性(凍結変性)であることが知られ、多くの研究がある。この成因については、現在でも詳しくわかっていない。いずれにしろ、解凍硬直(後述)の場合を除き、解凍中に多量のドリップが出る凍結魚は、すでに凍結魚の品質として不適格といえる。

## 2.2 解凍速度

解凍速度の定義や急速解凍と緩慢解凍の区別は明確にされていないが、低温でゆっくり解凍する緩慢解凍が良いとする意見<sup>(9)</sup>と、低温で速く解凍する急速解凍<sup>(10)</sup>が良いとする相異なる二つの意見がある。両者には、それなりの意味があり用途によっては使い分けられて良い場合がある。低温でしかも短時間に解凍を行う低温急速解凍は、後述のとおり理論上限界があるが、解凍媒体の種類や流速または試料の形態・サイズを変えることによって可能である。一般に、解凍速度が速くなるにつれて被解凍品の表面部と内部との温度差が大きくなり、表面部が解凍

温度(熱媒体温度)に近い高温にさらされる度合が大きくなる。

一方の低温緩慢解凍の場合、被解凍品の表面部が高温にさらされることは少なく、部位間の温度差も小さくほぼ均一に解凍される。

カツオ凍結肉を縦 5×横 5×厚さ 7cm に成形して片面(5×5cm)だけを残して周囲を断熱し、厚さ方向に 1 次元的に種々の媒体温度で低温蒸気解凍(真空解凍)を行った例では、媒体温度(解凍温度)が高いほど解凍時間(解凍速度)は短(速)くなる。その反面、内部と表面部との温度差は開いてくる。これらの関係をわかり易く示したのが図 1<sup>(10)</sup>である。

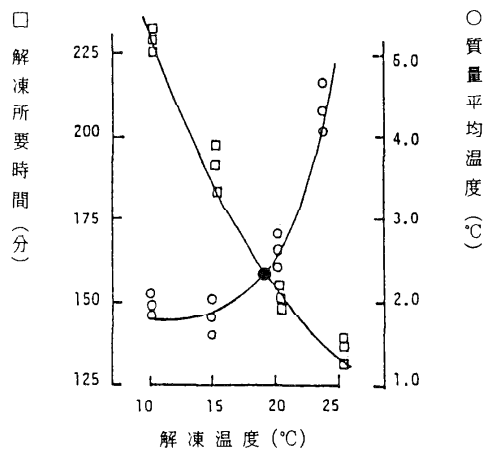


図 1 各凍結温度(真空凍結)における解凍時間と解凍ムラ(質量平均温度)の関係<sup>(14)</sup>

この図は、解凍温度を横軸にとり、左側の縦軸に解凍時間を、右側の縦軸に解凍終了時(この場合、中心温度が 0°C に達した時点)の表面部と内部の温度差を解凍ムラとして表わした。なお、解凍終了時の表面部と内部との温度差は解凍終温度分布(終温分布)<sup>(11)</sup>とすべきであるが、ここでは、解凍ムラ<sup>(11)</sup>として質量平均温度(mass average temperature)<sup>(12)</sup>に換算して平均的な値で表示した。この図から、両曲線の交差する点が解凍速度と解凍ムラの間を満足する解凍温度に近いと思われる。さらに、解凍速度は、解凍温度の他に加熱媒体の種類(水、空気)や状態(流速)等によって解凍表面の表面熱伝達率が変わるため、これらの影響により大きく左右される。また、同じ解凍温度であっても解凍速度が変われば解凍ムラも当然変わってくる。なお、両者の関

係を満足する解凍温度が、品質上からも適当な解凍条件になるかは疑問である。この問題については、解凍過程における時間・品温・品質という三者の動的变化の中で論ずる必要があろう。このことについては後で触れるが、品質上からみた解凍適温は従来の研究結果から、一般に空気・水解凍の場合 10~20°C の範囲にあることが知られている<sup>(13)</sup>。

表 1 各種解凍法における解凍条件の違いによる解凍時間、解凍ムラ(質量平均温度)、および熱媒体の熱伝達率<sup>(14)</sup>

解凍条件 方法	解凍温度 (°C)	解凍時間 (分)	解凍ムラ (°C)
静止 空気 解凍	10	360	3.3
	15	336	4.0
	20	258	6.4
	25	210	8.6
流水* 解凍	10	335	2.3
	15	285	3.3
	20	248	8.2
	25	193	7.4
散水** 解凍	10	329	4.1
	15	280	6.2
	20	222	8.5
	25	188	9.3

\* : 流速=2.5m/分

\*\* : 水量=130ml/cm<sup>2</sup>・分

表 1<sup>(14)</sup>に示したように、各解凍法における解凍時間と解凍ムラ(質量平均温度)の関係からみた解凍適温も上記の温度範囲にあることがうかがえる。

ところで、急速解凍か緩慢解凍かの是非について、酵素的反応および微生物増殖の観点から言えば、できるだけ低温で迅速に解凍することが適当と思われる。しかし、低温で急速には伝熱理論上は相反する操作なので、品質劣化を最も少なくする解凍条件は、前にも触れたように伝熱理論と反応速度論の観点から見出す必要がある。緩慢解凍は、死後硬直の前に凍結された新鮮なもので、解凍中に解凍硬直を起こした肉が顕著に収縮するような場合にとくに必要とされる。とくに、収縮型の鯨肉<sup>(15)</sup>やマグロ肉では<sup>(16)</sup>、筋収縮に関する ATP(adenosine triphosphate)を徐々に消失させるため、-5~-1°C の温度帯を 5~6 時間でゆっくり通過させて解凍することが望ましい。この他、緩慢解凍の利点として融けた水が細胞や組織に吸収されて復元する時間的余裕があるとされていたが、吸水能の弱っている細胞でも吸水時間はせいぜい 10~20 分間で充分であることから、この点に関する緩慢解凍の必要

性はとくにないといわれる<sup>(17)</sup>。凍結の場合には、凍結速度が緩慢であれば氷結晶が細胞外で大きく成長し、魚肉の筋肉細胞に物理的損傷を与え、品質劣化をもたらす。解凍の場合は、解凍速度が品質に及ぼす作用は凍結の場合と異なって小さく、むしろ次に述べる解凍終温度の方が大きい。

### 2.3 解凍終温度

融解点を越えてからも解凍操作を続ける場合が多いが、解凍終温度はできる限り低い方がよい。解凍ドリップが出る場合には、解凍終温度の上昇とともに急速にその量が増加する<sup>(18)</sup>。生鮮解凍の場合でも、高温ほど品質劣化の進行が速くなることから、解凍終温度の上昇は危険である。

カツオの背肉から円柱状にくり抜いた成形肉(外径 2.8cm×厚さ 4.0cm)を断熱したリンプル・ホルダーに詰め、軸方向(筋肉繊維と垂直)へ加熱するようにして自然解凍(15℃)を行った解凍曲線を図2に示した。

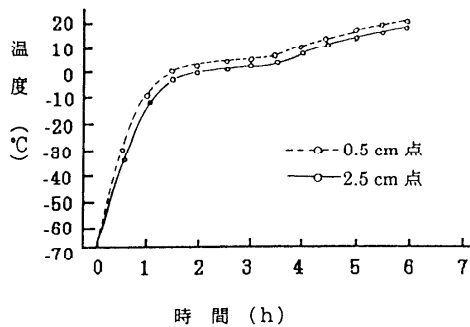


図2 15℃静止空気解凍中のカツオ肉片の表面部(0.5cm点)と内部(2.5cm)における温度変化<sup>(14)</sup>

この図で、破線と実線は加熱表面からそれぞれ0.5、2.5 cmの深さの測温点を表わしているが、2.5 cm

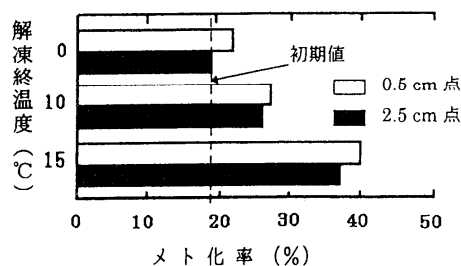


図3 各解凍終温度(図2参照)におけるカツオ肉片(4cm点)の表面部(0.5cm点)と内部(2.5cm点)の肉色変化<sup>(14)</sup>

点の解凍終温度がそれぞれ0、10、15℃に到達したときに肉色の褐変度(メト化率)を測定した結果を図3に示した。

自然解凍(静止空気)であるため、表面部(0.5 cm点)と内部(2.5 cm点)の温度差(解凍終温度)が小さく(図2)、各解凍温度でも表面部と内部の色変(褐変度)の差も小さくなっている。また、解凍終温度が高くなるにしたがって色変の進行が顕著である。このことから、解凍終温度が品質に大きく影響することがわかる。

## 3. 解凍方法

### 3.1 装置の種類

解凍方法は、表2に示すとおり各種に分類されるが、被解凍品(凍結魚)の形態(ラウンド、ブロック、フィレ、包装品など)、サイズおよび処理量(工場用、業務用-病院・レストラン、家庭用)および用途により選択される。加熱方式により、外部加熱(空気・水・接触解凍)か内部加熱(電気解凍)かの二方式に大別される。

表2 解凍法の分類<sup>(5)</sup>

空気解凍	静止空気解凍(微風解凍を含む) 加湿送風解凍 加圧送風解凍
水解凍	水浸漬解凍 { 静止水中解凍 流水解凍 発砲解凍 加圧解凍
	スプレー解凍
	水蒸気解凍 { 減圧解凍 常圧解凍
接触解凍	コンタクト解凍 アルミ接触解凍
	電気抵抗解凍 { 高周波解凍 誘電加熱解凍 遠赤外線解凍 静電気解凍
組み合わせ解凍	上の解凍の組み合わせ

\* 加熱解凍は含まず。

### 3.2 装置の特性

外部加熱方式の場合、解凍を能率的に行うには、凍結品が一定のもので加熱媒体を用いるのであれば、解凍温度の外に表面熱伝達率 [ $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ] を大きくする工夫がなされている。たとえば、空気、水等の流体の場合には、流速(量)の増大の外、圧縮空気(3気圧)の循環<sup>(19)</sup>、浸漬水中での発泡(空気の吹き込み、超音波等に)、低温蒸気(常圧、減圧<sup>(20)</sup>)の利用等がある。

空気を媒体とする流動空気解凍(エアブラスト式)では、被解凍品の表面が解凍後期に乾燥し品質を損なう。これを防ぐには、風速を2 m/s以上に上げないようにする<sup>(9)</sup>。この乾燥問題を解決するために、相対湿度98%以上の高湿度流動空気(最大3 m/s)を発生させて解凍する高湿度解凍装置が開発されている。この装置は、主に生食用の凍結マグロ(4つ割以下のサイズ)やブロック凍結エビの解凍に適している<sup>(21)</sup>。

内部加熱方式である誘電加熱は、冷凍すり身の解凍に適しているといわれる。しかし、内部加熱と言えども、加熱は食品表面から先に行われる傾向があり、操作によっては食品の表面や突起部分がとくに過熱され易く、過熱により変質する危険がある。そのため、高周波(電磁波)の加熱では、部分加熱の危険性のある $-5 \sim -3^\circ\text{C}$ 以上までの解凍は困難である。そのため、工場などの大規模装置では、性能や経費の面でまだ難点があるとして、コンタクト・フリーザーと伝熱方式が同じである接触解凍装置が1978年頃より製作され<sup>(22)</sup>、凍結すり身用として使用されている。また、冷凍すり身の場合は薄片状にスライスして、らいかいできる程度まで解凍する方法がとられている<sup>(23)</sup>。また、魚フィレの凍結ブロックの場合には、誘電加熱により凍結品の表面

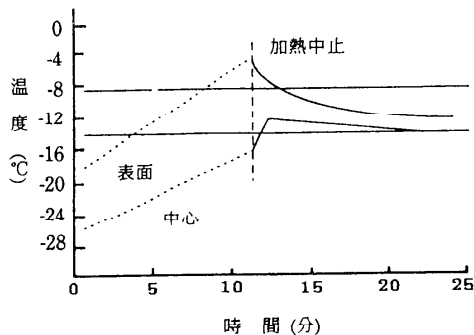


図4 解凍魚フィレの凍結ブロック(4cm厚)の誘電加熱( $850\text{W}/\text{m}^2$ )によるtemperingと均温化<sup>(24)</sup>

郡を $-5^\circ\text{C}$ 付近まで急速に昇温してから加熱を止め、その後低温に放置して全体の温度を $-15 \sim -12^\circ\text{C}$ の範囲内になるように均温化させる“Tempering”の方法が提案されている(図4)<sup>(24)</sup>。これは、ギロチン・カッターで切れ易い温度まで昇温して fish finger (約18gの方形魚肉片で、フィッシュ・スチック様の冷凍食品-イギリス)<sup>(25)</sup>などを製造する場合に向いているとされる。

一方、電磁波の一つである遠赤外線を利用した解凍装置が最近開発されている。この他、電気的方法による内部加熱解凍法や上記のような外部加熱との組み合わせ方式<sup>(26)</sup>があるが、本稿では割愛する。

## 4. 解凍魚の品質

### 4.1 解凍過程の品質変化

被解凍品のサイズが大きい場合やカツオの肉色変化のように温度の影響を受けやすい場合には、品質劣化を伴うため、最適な解凍条件を事前に設定する必要がある。そこで、筆者は解凍過程で温度ともに刻々変化する品質変化を予測することを試みている。魚類の客観的品質指標として、有用な理化学的指標がいくつか見出されている<sup>(27)</sup>。とくに、“生きのよさ”を表す生鮮度指標K値(ヌクレオチド分解度)<sup>(28)</sup>と肉色の色変指標のメト化率(メトミオグロビン生成率)<sup>(29)</sup>は、生鮮魚の場合と同様に高品質の解凍魚にも適用できることがわかっている。そこで、これら品質指標を用いて品質劣化の速さを反応速度論的解析を行い、品質劣化速度の温度依存性を表す動力学的特性値(活性化エネルギー、頻度因子)を求めた。これらの動力学的特性値(Kinetic parameter)を適用して、品温が変動する場合の品質変化を式(1)のCharmの式<sup>(12)</sup>に適用して、カツオの解凍曲線から解凍過程の品質変化を計算した。

$$2.303 \log\{a/(a-x_t)\} = \int_0^t e^{-E_a/RT} dt \quad (1)$$

ここで、 $a$  = 初期K値の残存量( $100 - K_0$ 値)、 $x_t = t$  [h]までのK値の変化量( $K_t$ 値 $-K_0$ 値)、 $a - x_t = t$  [h]後のK値の残存量( $100 - K_t$ 値)、 $A$  = 頻度因子(定数)、 $E_a$  = 活性化エネルギー [ $\text{J}/\text{mol}$ ]、ガス定数  $8.319$  [ $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ]、 $T$  = 絶対温度[K]。ただし、 $K$ 値 =  $\{(H_xR + H_x) / (ATP + ADP + AMP + H_xR + H_x)\} \times 100$  で、 $K$ 値の添え字0、 $t$ は、それぞれ  $t=0$ 、 $t$ の時間を示す。また、ATP = アデノシン三リン酸、ADP = アデノシン二リン

酸、AMP = アデニール酸、IMP = イノシン酸、  
H<sub>x</sub>R = イノシン、H<sub>x</sub> = ヒポキサンチンである。

解凍実験には1尾(ラウンド)の凍結カツオ(体長  
47cm×体重 2.3kg)を用い、静止空気解凍(15℃)  
を行なった。その結果を、図5に示した。

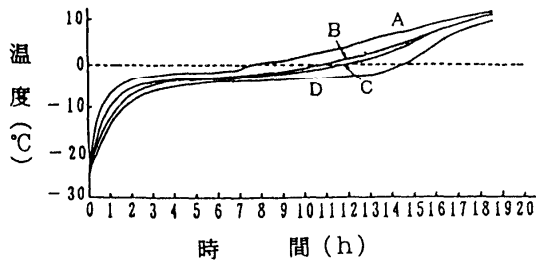


図5 凍結カツオの静止空気解凍(15℃)における解凍曲線<sup>(12)</sup>

解凍曲線のA~Dの記号は、表層から背骨(中心)までのカツオ胴体の各部位を表している。実際の解凍曲線(時間-温度履歴)からK値およびメト化率の変化率をそれぞれ経時的に計算し、プロットした結果を図6に示した。

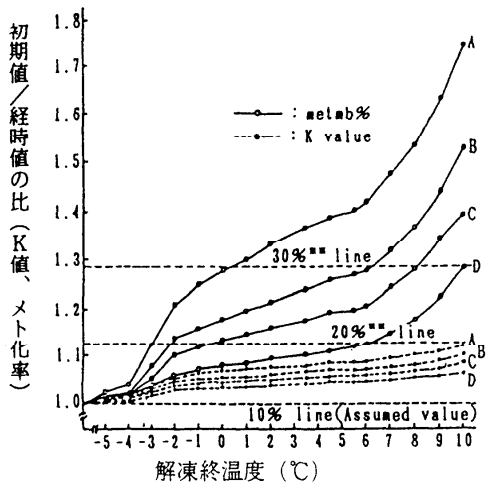


図6 凍結カツオの解凍過程(図2)における品質変化(K値、メト化率)の予測計算<sup>(12)</sup>

初期の残存ヌクレオチド = 100 - K値(初期値)  
経時の残存ヌクレオチド = 100 - K値(経時値)  
初期の残存オキシミオグロビン = 100 - メト化率(初期値)  
経時の残存オキシミオグロビン = 100 - メト化率(経時値)

縦軸はK値およびメト化率の残存率(100 - K値)、(100 - メト化率)で表し、それぞれ初期値に対する経時値との比を表している。解凍の進行とともに品温が上昇し解凍終温度は高くなるに従って、K値およびメト化率の変化も大きくなっていく様子がわかる。また、メト化率がK値の変化より速く進むことがわかる。これは、本来K値(酵素反応)とメト化率(非酵素反応)では反応系が異なるためと思われる。なお、これらの鮮度低下速度定数( $k_f$ )および色変速度定数( $k_c$ )の温度依存性を表す動力学的特性値( $E_a$ , A)は、表3<sup>(30)</sup>に示した。なお、死後硬直における魚筋肉にはATPの分解と再生の同時反応<sup>(31)</sup>、また0℃より5、10℃の方が死後硬直が延長される<sup>(32)</sup>と報告されているため、これらの点を考慮した $K_f$ および $K_c$ のデータ整備が今後必要である。

表3 カツオ筋肉の鮮度低下速度定数( $K_f$ )および色変速度定数( $K_c$ )の動力学的特性値( $E_a$ :動力学的特性値、A:頻度因子)<sup>(14)</sup>

反応速度定数(1/h)	温度範囲	$E_a$ (kcal/mol)	A(1/h)
$K_f$	> -2℃	3.34	$6.93 \times 10^4$
	-2 ~ 10℃	12.16	$1.46 \times 10^{35}$
	< -10℃	1.57	$2.09 \times 10^{-2}$
$K_c$	> -2℃	6.02	$6.22 \times 10^{14}$
	-2 ~ 5℃	21.6	$3.70 \times 10^{67}$
	< -5℃	4.37	$5.10 \times 10^8$

ところで、凍結カツオにおいてK値の初期値を10%と仮定した場合の静止空気解凍(15℃)では、解凍終温度(中心品温)が10℃になっても表面部は、すし種・さし身の限界とされるK値20%の線を越えないことが予測される。一方のメト化率の場合は、初期値が10%であったとすると、カツオ肉の色調変化が肉眼で認識されるレベルのメト化率30%に表面部Aが達するのは、中心部Dの解凍終温度が1℃に達したときである。

いずれにせよ、解凍速度の遅い静止空気解凍の場合でも、解凍終温度が-5℃から-3℃までの間にあるいわゆる“半解凍”の状態で解凍を止めれば、品質劣化の速いカツオも色変を顕在化させることなく安全に解凍できると思われる。この半解凍の有用性については、従来から経験的に知られている<sup>(33)</sup>が、上述のように速度論的解析からも裏付けられる。

#### 4.2 解凍魚の品質と貯蔵性

最近の生鮮魚の流通状況を見ると、一度凍結したものを解凍し、それを鮮魚として販売することがある。いわゆる解凍食品(フローズン・チルド食品：frozen chilled foods)<sup>(33)</sup>と言われるもので、水産物では解凍魚に当たる。解凍魚は腐りやすいと言われる。しかし、新鮮なゴマシバの凍結魚(-20℃)を80分間流動空気解凍(15~18℃)してから、0℃で再貯蔵して腐敗日数を調べた結果、36日以内の凍結貯蔵魚では腐敗に至る貯蔵期間に鮮魚(未凍結魚)との差は認められていない<sup>(34)</sup>。凍結前または凍結魚の鮮度が低いと解凍後の貯蔵期間は同レベルの鮮度のそれより短くなる。一般に凍結魚は劣るものだという認識が残っているため、解凍魚と知らされた場合に、高鮮度の解凍魚であったとしても消費者のイメージは異なり、価格の面などで種々のトラブルが生じやすい状況にあるという。そこで、生鮮魚(未凍結魚)と解凍魚(凍結魚)とを見分ける鑑別の問題が提起されている<sup>(35)</sup>。この問題に関する国内外の研究は未だ少なく、鑑別法も確立されていないのが実状である。試験的には、解凍魚の鑑別はあくまで凍結の事実を判別するもので、活魚を急速に凍結した直後でも凍結による微細な変化が検出される。これらの微細な構造(組織)変化は、官能検査では認識されない領域のものである。活魚のマアジ(体重26~45g)を急速凍結後に空気解凍(17℃)した場合に、“さし身”レベルの解凍魚になることが認められている<sup>(36)</sup>。なお、微生物的問題は、10℃の空気、水および真空の各解凍法では品質上生じなかったと言う豚肉での報告がある<sup>(37)</sup>。

以上のように、解凍魚の利用が生食用か加工用かによって解凍魚に対する期待は異なるため、用途に応じた解凍法と品質評価法の選択が必要となる。

### 5. 解凍操作と伝熱

凍結魚介類に限らず凍結品を合理的に解凍するには、品質劣化を最小にする伝熱方法を検討する必要がある。それには、前節で述べたように解凍魚の品温変化から品質の変化率が計算できるため、最適解凍条件の予測は可能である。その結果、能率的な解凍装置の設計やそれに応じた凍結品の形態やサイズの規格化にも役立つと期待できる。

凍結・解凍時間を求める解析は、Plank や Neumann 等による多くの解析解があるが、温度変

化や温度分布の計算には有効でない<sup>(38)</sup>。しかし、近年、電子計算機の導入により種々の数値解法がある。なかでも、有限要素法(以下FEMと略す。)は2、3次元の任意形状で、しかも温度依存性のある熱物性値や境界条件の変化を扱える点で最も実用的な数値計算法と言われる<sup>(39)</sup>。

ここでは、凍結魚の解凍過程における伝熱計算に必要な魚肉の伝熱物性値の推算法およびFEM<sup>(40)</sup>による熱伝導方程式の数値計算例を紹介する。

#### 5.1 魚肉の伝熱物性と推算

水産食品の伝熱操作は、凍結から高温加熱までと操作温度の範囲が広い。まず、食品の主要成分(水分、脂質、固形分)の量から伝導伝熱の3物性値(以下、伝熱物性値という。)といわれる密度、比熱および熱伝導率を推算する方法について説明する。また、水の相変化を伴う場合の凍結点以下の温度域での伝熱物性値の取扱いについて簡単に述べる。

##### 1) 未凍結状態

水分、脂質および固形分からなる3成分系食品の伝熱物性値が、各成分の重量分率(X, Y, Z)または容量分率(X<sub>v</sub>, Y<sub>v</sub>, Z<sub>v</sub>)から加成的に推算できるモデルが提案されている。水産食品の伝熱物性値の推算式は、伝熱機構の直列モデルによるものが適当と思われる<sup>(41)</sup>。

そこで、水産食品を3成分系食品(水分、脂質、固形分—主にタンパク質)として扱い、有効比熱、有効密度および有効熱伝導率をそれぞれ温度の関数として、次式に示した。

$$C_e(T) = C_w(T)X + C_f Y + C_d Z \quad (2)$$

$$\rho_e(T) = \rho_w(T)X + \rho_f Y + \rho_d Z \quad (3)$$

表4 水と氷、脂質、固形分の物性値<sup>(42)</sup>

種類	成分 [Kg/Kg]	比重 [Kg/cm <sup>3</sup> ]	比熱 [Kcal/Kg °C]	熱伝導率 [Kcal/mh°C]	
水分	水	X	$\rho_1=100$	$C_f=1.00$	$k_1=0.48$
			$\rho_2=918$	$C_2=0.49$	$k_2=2.00$
脂質	>0℃ -10℃	Y	$\rho_f=130$	$C_f=0.50$	$K_f=0.15$
			$\rho_{f0}=1300$	$C_f=0.37$	$K_f=0.15$
固形分	>0℃ -10℃	Z (1-X-Y)	$\rho_d=900$	$C_d=0.30$	$K_d=0.42+$
			$\rho_d=900$	$C_d=0.30$	$K_d=0.42$

\* 0.26(タンパク質)<sup>(39)</sup>

$$k_e(T) = 1 / \{ X_v / k_w(T) + Y_v / k_f + Z_v / k_d \} \quad (4)$$

ここで、各成分の重量分率等の他は式(2)～(4)の記号および物理常数は表4<sup>(42)</sup>に示した。

なお、水分の伝熱物性値は温度依存性を有するため、それぞれ  $C_w(T)$ ,  $\rho_w(T)$ ,  $k_w(T)$  とした。それに従い、食品の有効伝熱物性値は、それぞれ  $C_e(T)$ ,  $\rho_e(T)$ ,  $k_e(T)$  となる。

2) 凍結状態

食品を凍結点以下に冷却すると水分は一部氷結晶を生成し、全水分に対する氷結晶の割合は凍結率  $\xi$  [ ] として、次の Heiss の式<sup>(43)</sup>で与えられている。

$$\xi = 1 - T_f / T \quad (5)$$

ここで、 $T_f$  [°C] は凍結点で、 $T$  [°C] <  $T_f$  である。食品成分の中で脂質量が僅少として ( $Y=0$ )、 $T_f$  以下の温度域での凍結食品のエンタルピー  $H$  [kcal/kg] は、次式で与えられる<sup>(44)</sup>。

$$H = \{ H_1 (1 - \xi) + H_2 \xi \} X + (1 - X) H_d \quad (6)$$

ここで、 $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_d$  は、それぞれ水、氷、固形分のエンタルピーである。

凍結食品の有効熱容量  $C_e$  は、(6) 式を微分して整理すると得られる。

$$C_e(T) = dH/dT = X \{ C_1 + (C_2 - C_1) \xi + (H_2 - H_1) d\xi / dT \} + (1 - X) C_d \quad (7)$$

式(7)における氷と水のエンタルピーの差 ( $H_2 - H_1$ ) は、次式のように氷の融解潜熱  $L_i$  [kcal/kg] とした<sup>(45)</sup>。

$$H_2 - H_1 = -L_i \quad (8)$$

$L_i$  は、温度依存性があり、次式で与えられている<sup>(45)</sup>。

$$-L_i = -79.68 - 0.4982T + 0.008232T^2 = a' + b'T + c'T^2 \quad (9)$$

ここで、 $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$  の係数は、それぞれ  $-79.68$ ,  $-0.4982$ ,  $0.008232$  となる。

(7)式に(8), (9)式を代入して整理すると、

$$C_e(T) = (C_2 + c'T_f) X + (1 - X) C_d + (b' + C_1 - C_2) X T_f / T + a' X T_f / T^2 = C + B/T + A/T^2 \quad (10)$$

ここで、

$$A = a' X T_f \quad (10 \cdot 1)$$

$$B = (b' + C_1 - C_2) X T_f \quad (10 \cdot 2)$$

$$C = (C_2 + c'T_f) X + (1 - X) C_d \quad (10 \cdot 3)$$

したがって、凍結点以下の有効熱容量、すなわち有効比熱  $C_e(T)$  は、(10)式のように簡単な半理論式として表せる<sup>(44)</sup>。脂質量( $Y$ )を加えた3成分系の場合でも、係数  $A$ ,  $B$ ,  $C$  の内容が異なるだけで同型の式が得られる。また、凍結食品の  $H$  は(10)式を積分することによって容易に得られる。

本稿では、示さないが(10)式より得られた  $H$  の半理論式の項中にも同様な係数  $A$ ,  $B$ ,  $C$  が存在する。これらの係数を最適化手法により文献値(21品目の凍結食品)のデータを対象に決定した。各食品ごとに求められた係数を用いて  $H$  を再計算し、文献値との適合性を検討した。その結果、14品目については最大で  $1.72$  kcal/kg 以内の誤差でよく一致した<sup>(44)</sup>。これより、(10)式より得られた  $H$  の式は従来の式の中では精度が高いものと思われた。なお、より精度の高い理論式を得るためには、 $T_f$  および(5)式の取り扱いについてさらに検討する必要がある。

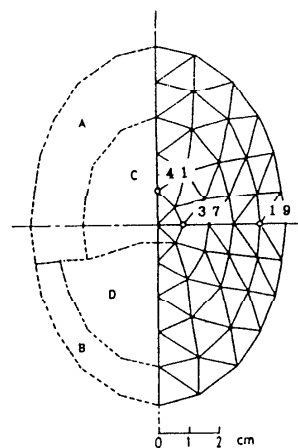


図7 凍結カツオにおける解凍曲線の測定点と計算点(胴体断面を左右対称としてFEM計算)<sup>(46)</sup>  
○印: 該当する節点の番号  
A~D: 成分および熱物性値の測定部位



ある。

### 5.2 解凍曲線の計算

-25℃の凍結カツオ（体重 2.3kg）を用いて、静止空気解凍（空気温度 15±0.5℃）を行った。温度の測定点と解析点は、胴体中央断面を図 7 に示すように背骨を中心に左右 Y 軸対称とした片面の要素分割図の各節点（19, 37, 41）とした。

図中の A～D は、それぞれ背肉表層部、腹側肉、背肉内層部および腹腔部（内臓）とした。各部位の水分と脂質量の測定値を表 5 に示した。

表 5 各部位(図7)の水分および脂質の測定値<sup>(5)</sup>

部位	水分(X) [W/W]	脂質(Y) [W/W]
A	0.724	0.008
B	0.726	0.008
C	0.721	0.007
D	0.764	0.030

$$\text{固形分}(Z) = (1 - X - Y) \text{ [W/W]}$$

これら 2 成分量 X, Y より伝熱物性値が推算できることは前に述べた。これらの成分量、各節点の座標 (x, y) および初期条件、環境条件を入力し、凍結カツオの解凍過程の温度変化を各節点につき FEM により計算した。なお、2 次元非定常熱伝導方程式はガラーキン法<sup>(40)</sup>により定式化した。その結果、図 8(上)に示すような解凍曲線が得られ、同図(下)に示す実測値とほぼ近似した。

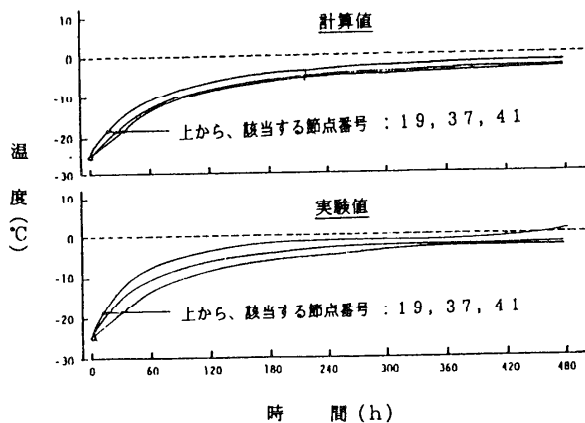


図 8 凍結カツオにおける凍結曲線の計算値(FEM)と測定値<sup>(46)</sup>

したがって、熱物性値や境界条件がこのように種々異なる伝熱解析には FEM は有用と思われた。

一方、凍結魚の解凍過程の解凍曲線（温度-時間の履歴曲線）が計算できれば、解凍後の鮮度、肉色などの品質劣化特性値を適用して品質変化も同時に計算可能となる。

### 6. おわりに

生鮮魚の凍結・解凍操作の巧拙が、解凍魚の品質に重大な影響を及ぼす。なかでも、カツオ・マグロの肉色保持の問題は、解凍中または解凍後に移った感さえすと言われる<sup>(16)</sup>。マグロの場合でも、カツオの場合と同様に赤身の肉食変化を最小にする解凍条件の設定が事前に可能と思われる。

凍結・解凍時に魚類筋肉細胞の機械的破壊や内部応力が生じることが報告され<sup>(47)</sup>、魚体の身割れ等の原因になる。このような場合、温度や伝熱速度が水産食品の品質に大きく影響する。さらに、本稿で述べたように解凍過程で起こる魚肉の色変や鮮度低下は、品温-時間履歴と生化学的品質劣化の温度依存性から決定されるため、伝熱解析が重要な役割をする。

以上の通り、凍結・解凍過程の伝熱が魚の品質に大きく関係する事を述べた。最近では生き造りのような高鮮度魚が要求される傾向にあり、このような高鮮度状態を保持する凍結・解凍技術の開発が望まれる。これには、細胞レベルでの基礎的検討が今後必要である。

### 文 献

1. 新井健一, 外 9 名共著: 「水産食品学」(須山三千三, 鴻巣章二編), pp.204-218, 恒星社厚生閣, 東京(1987).
2. 太田冬雄, 石神次男, 上田忠雄, 是枝 登, 武田健二, 平山義武: 冷凍, 42(472), 91(1967).
3. 田中和夫: 冷凍, 45(508), 99(1970).
4. 日本冷凍食品協会: 平成 8 年冷凍食品に関する諸統計(1997 年 8 月).
5. 田中和夫: 「冷凍空調便覧(V 巻)」, 新版, 第 5 版, pp.191-197, 日本冷凍協会, 東京(1993).
6. 田中和夫: ニューフードインダストリー, 11(6), 2(1970).
7. 金子昇平: 「冷凍食品事典」(日本冷凍食品協会監修), pp.523-530, 朝倉書店, 東京(1982).
8. 田中和夫: 冷空技, 31(367), 71(1980).
9. 中出政司: 冷凍, 45(508), 114(1970).

10. 御木英昌, 西元諄一: 鹿大水産紀要, 24, 161(1975).
11. 尾藤方通: 日水誌, 41(10), 1031(1975).
12. H.Miki and J.Nishimoto: 「Storage Lives of Chilled and Frozen Fish and Fish Products」(ed. by IIR Commissions, C2, D3, Aberdeen, UK., Oct. 1985), pp. 145-151, Paris(1986).
13. 田中和夫, 小嶋秩夫: 「食品冷凍工学」, pp. 189-271, 恒星社厚生閣, 東京(1976).
14. 御木英昌, 西元諄一: 冷論, 4(2), 15-25(1987).
15. 田中和夫, 田中武夫: 冷凍, 35(388), 79(1960).
16. 田中武夫, 西脇興二, 角田聖斉, 富松隆夫: 冷論, 1(2), 71(1984).
17. 田中武夫: 東海区水研報(C), (33), 37(1984).
18. 太田冬雄: 「水産加工技術」(太田冬雄編), pp. 27-51, 恒星社厚生閣, 東京(1976).
19. 熊谷義光: 冷凍, 45(508), 122(1970).
20. 田中武夫: '83 食品流通機器ダイジェスト, 105(1983).
21. 篠山茂行: 冷凍, 70(809), 215-232(1995).
22. 田中武夫: 冷空技, 32(371), 71(1981).
23. 野口栄三郎: 「蒲鋒製造ミニ事典」, pp. 72-73, 光琳, 東京(1983).
24. A.C.Jason: IFST Proceedings(reprinted), 7, 146(1974).
25. J.J.Waterman: Torry Adv. note, (85), p. 8.
26. C.Jason and H.R.Sanders: Food Technol., 16(6), 101(1962).
27. 太田冬雄, 御木英昌, 是枝 登: 鹿大水産紀要, 24, 181(1975).
28. S.Ehira, H.Uchiyama, F.Uda and H.Matsumiya: Nippon Suisan Gakkaishi, 36(5), 491(1970).
29. 鈴木信興, 橋本周久, 松浦文雄: 日水誌, 39(1), 35(1973).
30. H.Miki and J.Nishimoto: Nippon Suisan Gakkaishi, 50(2), 281(1984).
31. WHITAKER, J.R.: Adv. Food Res., 9, 1(1959).
32. 永井 慎, 崎之原文子, 進藤 穰, 御木英昌: 平成 9 年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 145(1997).
33. 熊谷義光: New Food Industry, 25(1), 30-33(1983).
34. 奥積昌世, 清水達也, 松本 明: 日水誌, 47(2), 239(1981).
35. 小長谷史郎: 「水産食品の鑑定」(日本水産学会編), pp. 93-112, 恒星社厚生閣, 東京(1979).
36. 西元諄一, 青木伸實: 鹿大水産紀要, 20(1), 163(1971).
37. C.S.Bailey, J.James, A.G.Kitchell and W.R.Hadoson: J.Sci.Fd.Agric, 25, 81-97(1974).
38. 化学工学協会編: 「食品化学工学」(化学の進歩 14), pp. 62-66, 槇書店, 東京(1985).
39. G.S.Comini, S.Del Guidice, R.W.Lewis, O.C.Zienkiewicz: Int.J.Num.Meth.Engng., pp. 613-624, 8(1974).
40. L.J.Segerlind (川合忠彦監訳): 応用有限要素解析, pp. 1-418, 丸善, 東京(1978).
41. 矢野俊正: New Food Industry, 20, 55-73(1979).
42. 田中和夫: 冷凍, 29, 86-102(1976).
43. 渡辺尚彦: 「加熱と冷却」(食品工学講座 5), p. 122, 光琳, 東京(1991).
44. H.Miki and K.Hayakawa: Lebensm.-Wiss. u. Technol., 29(7), 659-663(1996).
45. R.E.Lacey and F.A.payne: Transactions of the ASAE, 34, 1836-1841(1991).
46. 御木英昌: 熱物性, 5(4), 309-316(1991).
47. C.A.Miles and M.J.Morley: J.Food.Tecnol., 12(4), 387(1977).

## 「研究ノートから：-伝熱問題に関する未成功研究-その3-」の編集にあたって

Preface to "From Research Notes"---Still Unsuccessful Research on Heat Transfer Subjects- III ---

第36期編集出版委員会

小澤 中行 (高砂熱学工業)

Yoshiyuki KOZAWA (Takasago Thermal Engineering, Co., Ltd.)

「伝熱研究」の1996年4月号では、伝熱学会発足3周年を記念して『伝熱工学/熱工学の将来』と題した20件の寄稿が掲載されている。それから2年が経過した本号では、伝熱学会発足5周年を迎えて、今後『夢のある企画』を会員の皆様にお届けできれば理想的であった。

岐阜大学の熊田先生を部会長に仰いだ今期の編集出版委員会でも、昨年の5月にこの伝熱研究の「新たなあり方」が議論された。その中では毎号続いてきた(特集)も、もうそろそろ「種が尽きたのではないか」といった極端なご意見もあった。

何事もある程度継続するとマンネリズムに陥る。それにも拘わらず形式的に継続することは、当事者には却って苦痛を伴うことさえしばしばある。このような一種の閉塞状態を打破するには、圧倒的な革新に迫る新規のアイデアを発掘・創造するか、あるいはもう一度原点に立ち返って考え、整理してみるのが良いとよく言われる。

この編集企画は、上述のブレーク・スルーの方法の中では後者を狙ったものである。そこで第1回目では、伝熱研究会の発足当時から先進的で精緻な伝熱研究を主導してこられた先生方に過去を振り返って戴いて、敢えて未成功・失敗という観点から寄稿をお願いした。第2回目では、学問としての伝熱研究/伝熱工学/熱工学から実用技術としての伝熱技術/伝熱機器/伝熱システムの開発で遭遇された未成功・失敗を主に企業の技術者にご寄稿願った。今回第3回目では、前2回までの40~50年という歳月の経過と技術開発への直接的で具体的な貢献という伝熱研究の目的の広がりを受けて、今日現在の大学等に在籍されておられる第1線の研究者から見た「伝熱研究のあり方」を総括して戴いた。

何も伝熱研究に限った事ではないが、未成功・失敗の原因は、やはり

- (1)目的・目標・計画・戦略の立て方
- (2)結果を評価・判断する因子・基準・方法の問題
- (3)現象・事象・市場の分析・表現・論述の精緻さ・

分かりやすさ・先見さ

に関係していることは確かである。これらについて伝熱研究独特のフレームワークができれば、ケース・バイ・ケースと言われる失敗は、ある程度整理できよう。また一般に失敗の対局にあると見なされる成功とて、研究や技術の分野で大切なその成功度をより合理的に議論することも可能になろう。

一方、「失敗を克服したい」という欲求は、誰も同じように意識されている。しかしこの失敗を克服する方法となると、現状は上述の失敗の原因より一層主観的な範囲に留まっている。すなわち、「失敗は成功のもと!」との格言であったり、「何事も失敗を恐れず、執念深く努力する!」といった抽象的、あるいは観念的な方法が、実際問題に遭遇した場合でも、やはり強く主張される。

失敗の要因分析や克服方法のいずれも、極めて「人間臭い」問題である。すなわち社会性の強い問題である。であるがゆえに、科学技術者はとすると避けて通りたいものである。しかし、科学技術が広くかつ深く浸透した今では、やはり避けられない問題と捉える必要があろう。極言すれば、昨今話題である地球規模の環境問題とて、人間がいなければ起こらない問題であろうし、逆に既に起こったあるいは今後起こるかもしれない地球規模の環境問題については、人間の叡智すなわち広義に捉えた科学技術の進化と共有しか、その克服の道はなからう。

2年前の編集企画であった伝熱工学/熱工学の将来を伝熱研究の「光」として、この編集企画は伝熱研究の「影」の部分を担当すれば理想的であろう。そこで会員の皆様には、是非とも今一度両者を読み比べて戴いて、伝熱研究の将来を真に展望できる多様なご主張を来る5月の第35回伝熱シンポジウムの席でご披露下さるようお願いしたい。

最後に、年度末のお忙しい時期に、困難を押しして今回ご執筆下さった6人の先生方に改めてお礼を申し述べたい。

学のみに通じる技術は失敗以上の失敗

Through My Failure of Researches That Engineers Can't Understand

三浦 隆利 (東北大学)

Takatoshi MIURA (Tohoku University)

1. 緒 言

筆者は、講座の継続性と自己の興味から、エネルギープロセス関連の伝熱解析を主として研究してきた。その中で行ってきた研究は、①熱および物質移動係数を懸垂糸なしで計測するための浮遊滴の蒸発、②滴群からの熱および物質移動問題として取り扱った噴霧乾燥塔内伝熱挙動解析、③未乾燥粒子の塔壁付着を防止するための付着噴流解析、④粒径分布を少なくした乾燥実験を実現しようとした均一微粒化生成方法の解析、⑤化学反応がある物質の熱物性値を測定しようとした熱伝導率・熱拡散率測定法の開発、⑥膨張・収縮する物質内の熱応力解析、⑦コークス内の亀裂が成長する場合の変形も含めた輻射伝熱解析、⑧空隙率の高い領域である高炉内レースウェイにおける燃焼・熱分解解析、⑨実際に燃焼炉を試作して行った燃焼特性に関する数値解析、⑩DEMを用いたロータリードライヤー内粒子運動の解析、⑪フェーズフィールドモデルを用いた氷生成過程におけるデンドライト形状推算、⑫移動層の解析を行うためCDQを対象に行った解析、などである。制御・操作範囲の拡充、現象解明・プロセスの改良、合理的設計方法などの確立を目指し、実験と数値解析を行ってきた。助教時代には恩師に「新規の技術は研究しません、従来技術の精緻化を使命として研究します」と云ったこともあり、特に目新しい研究が含まれていない。そのため研究費の確保が難しく苦しんでいるというのが実状である。

2. 論文化は成功とは限らない

論文化しても新技術を生み出し、事業化されたわけでもなく、他の研究者に引用されるだけ、それも悪い例で引用される場合がある。再度、実験し直す情熱も持ち合わせていないし、論文を引っ込めなくなる。例えば図1に示すように、浮遊滴の蒸発実験はダクト内の中央部分に金網を設け気流速度を遅くし、それと等しい終末速度の滴を浮遊させるのであるが、段々蒸発して直径が1mm以下になると吹き飛んでしまう。この欠点は、Re数の実験範囲に明瞭であり、改良版の

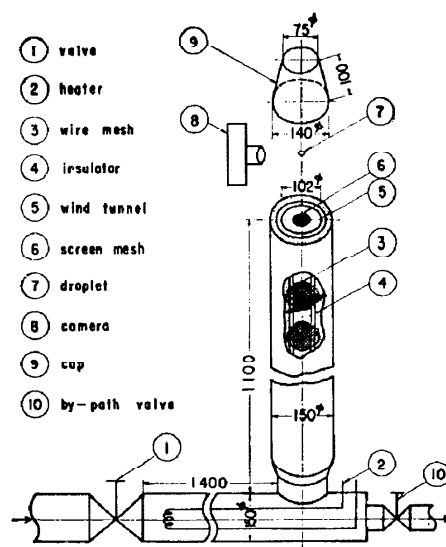


図1 実験装置の模式図

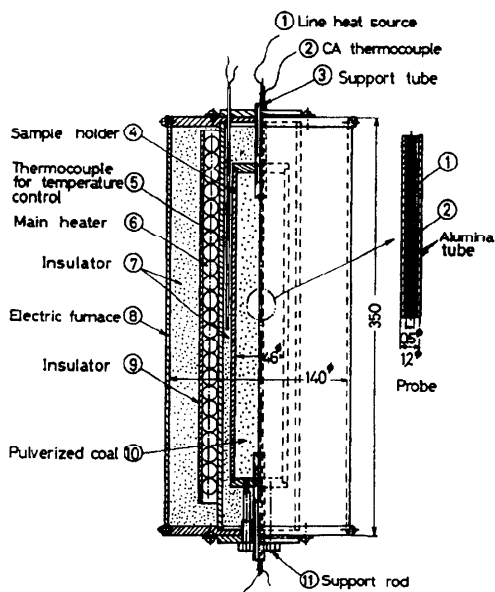


図2 測定部の詳細

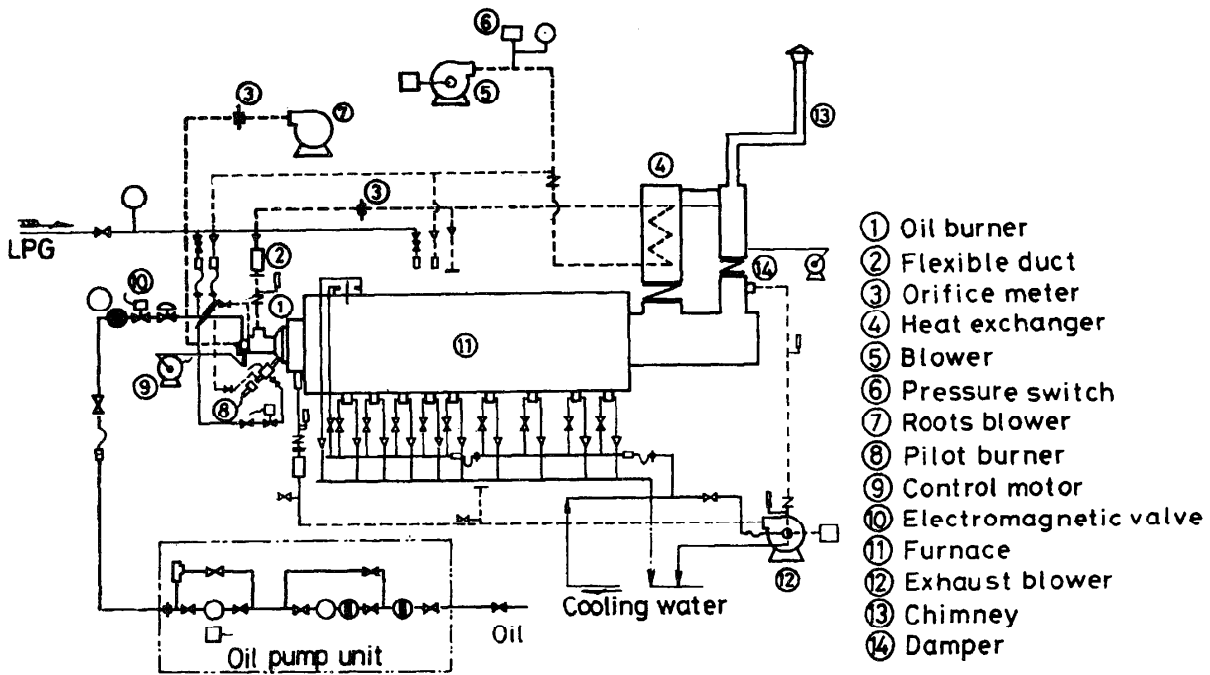


図3 燃焼実験装置の模式図

実験を示されたことがあった。2～3mmの直径の水  
 滴を浮遊させるのは簡単であり、ふあふあと楕円形を  
 保持しながら浮き上がる。

一方、装置の開発を狙ったのは図2に示すような熱  
 伝導率測定装置であり、反応性の物質に適するように  
 連続昇温過程で測定できる方法を開発した。細線加熱  
 法の応用であり充填層のような低熱伝導率を有する物  
 質に最適であると意気込んだが、充填する作業や熱線  
 の作製で手間の掛かる方法であり、測定機器企業から  
 何の反応もなかった。測定機器として事業化するには、  
 装置の精選化・手軽さが不可欠と痛感した。

### 3. 燃焼炉への挑戦

複合微粒化方式ノズルを引っさげて恩師が昭和 57  
 年に開設した工学部付属燃焼限界実験に配置換えにな  
 った。大学で燃焼炉を作る例もなく、企業の実験炉を  
 見学しながら設計し製作した(横型φ500I.D.×7500)。  
 図3のように測定用観察窓を多数箇所付設したが、軽  
 質の液体燃料を用いる場合には、30cm以内で容易に燃  
 え尽きるため、観察窓のそれ以降の設置が不要になり、  
 実験炉の製作の困難さを体験した。また熱損失を抑制  
 するため、耐火・断熱煉瓦を25cmにしたところ、炉  
 内壁温度を定常にするのに20時間以上も要し、学生に  
 多大の迷惑を掛けた。これらの経験を基に縦型の炉を

製作し、横型と合わせ、バーナ種、スワール数、二段  
 燃焼割合など変化させた実験を行い、数値計算結果と  
 比較した。このような実用器に近い燃焼装置の実験に  
 においては測定値も計算値も精度の点で誤差を生じる場  
 合が多いため、定量性の点で問題がある。どのように、  
 どこを測定できるかを基準とした実験炉の製作方針が  
 必要であろう。

### 4. コークス炉内の伝熱解析

高炉用コークスに求められるのは還元材と通気性の  
 保持材としての2つの機能である。高炉を円滑に運転  
 するには、通気性を保持するために粒径と熱間強  
 度が大きい方が良いわけである。この値は、コークス  
 炉内の熱応力・亀裂成長解析を行う上で、不可欠であ  
 るが、物性値として報告されている例は殆ど見あた  
 らない。従来の試験はコークス炉から生成したコークス  
 塊から円筒・球形の試験片を切り出し、圧縮試験を行  
 い引張強度への換算を行うため、気孔径・気孔率によ  
 りばらつきが大きく測定精度の向上がコークス品質評  
 価方法の確立に不可欠であった。そこで試験片を石炭  
 を充填して加熱しセラミックス片形状のようなコーク  
 スを製造・試験したが、コークスの製造の段階で中央  
 部で破断し試験にまで至るのは100個に1個あれば良  
 い方であった。そこでコークス製造の段階から熱応力

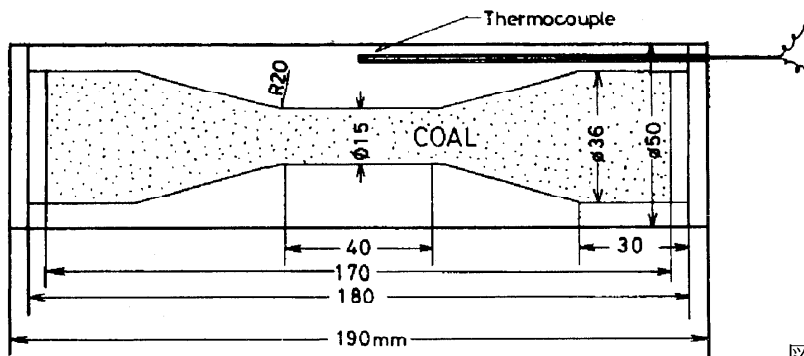


図4 試験片作成金型の詳細

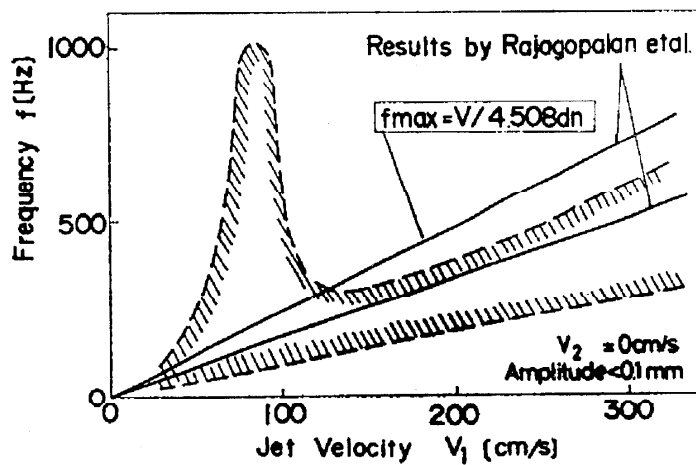


図5 均一径滴の生成範囲

計算を行い、図4に示すような理想的な試験片形状を開発した。しかし、これも試験片の中央部で破断してしまい、試験に至るのはごく僅かな数であった。世界で初めての研究内容であり是非にも思った研究であったが、手間と時間が余りにも掛かる実験であった。現在はこの経験を基に円筒形のコークス片の試作と熱間試験も可能な研究内容に変更した。研究では中止する勇気と進める勇気が欲しいが、智慧を使わないとどちらに進んでも苦勞ばかりである。

### 5. 微粒化方法

液滴の径の均一性と生成数を制御するため、スピーカーによる振動をノズルに与えて微粒化の挙動を観察した。いわゆるレーリー脚の層流液柱の微粒化時における最大周波数・波長理論に対抗し、最大周波数に至る前に強制的に振動を与えた場合にどうなるかを検討した。結果的には、図5に示すように低周波数の振動の時にノズルの振幅が大きく(0.5mm 以内)微粒化挙動の解析に至らず、実験範囲内における挙動の定性的な

解析で終了した。しかも層流状態の液柱分裂のテーマであり、分裂の様子は芸術的でもあり、何時間見ても飽きないのであるが、実用化に至らず興味本位で終了してしまった。今なら振動数の影響を流れの解析と共にできそうである。乱流で実用的な液体の微粒化においては殆ど理論的な研究が行われずにノズルチップの開発研究だけと云っても過言ではない状況であり、二流体ノズルで何故、ある程度以上の微粒化用空気量を吹き込んでも滴径が一定になるのかを検討してみた。気流と液流の運動量から液流の軌跡を計算できることが分かった。しかし例えば離散要素法でも用いて新たな切り口を見つける方がそれ以上の研究を進展させる上で必要である。

### 6. 氷生成過程におけるデンドライト形状推算

水から氷が生成する現象およびそれが樹枝状に成長する過程を推算する方法を開発してみた。水の中に微小固体に相当するクラスター(エムブリオ)を生じる。このエムブリオがある臨界寸法を超えると凍結が始まる

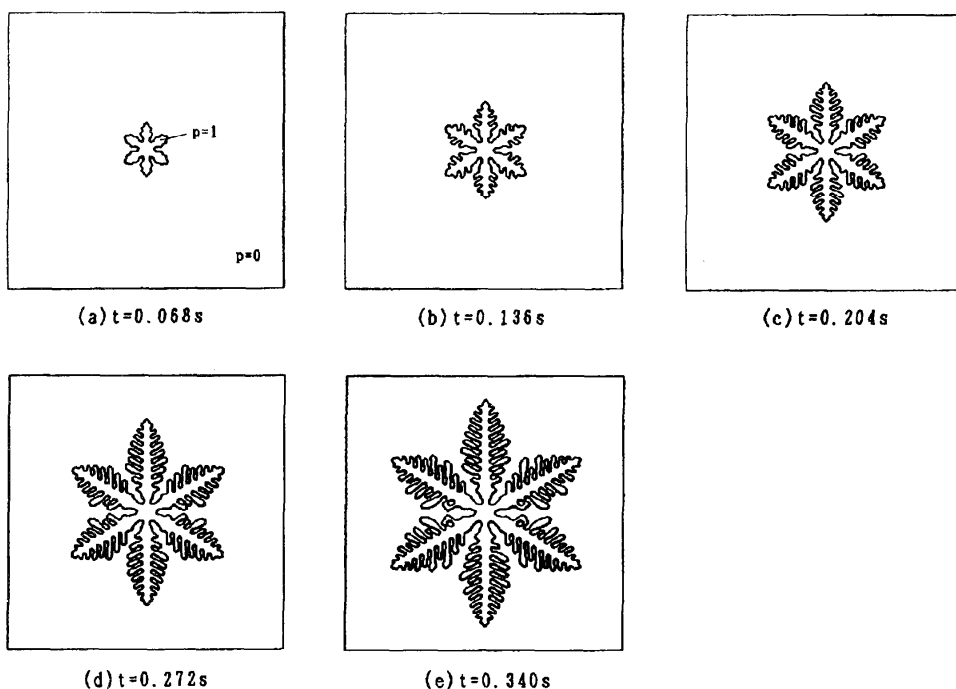


図6 氷デンドライト形状の計算結果 ( $\Delta T = 3.2 \text{ K}$ )  
 $\bar{\epsilon} = 3 \times 10^{-6} \text{ cm}, \tau = 2 \times 10^{-4} \text{ s}, \sigma_l = 0.08, \alpha = 0.01, \gamma = 10, \delta = 0.04$

として、この生成速度を核生成速度として核生成数が1を越えると過冷却解除になることを示した。またデンドライトの成長に伴う形状をフェーズフィールドモデルを用いて推算した。結局、伝熱板表面の粗さの過冷却解除に与える影響、図6に示すように成長速度と過冷却の関係で遷移域を見出し、デンドライト成長に伴うフラクタル次元などを見出し、「何故」という問題に対応できた点では評価できた。しかし、これを工業的に応用する知見とする場合にどうすれば良いのかで困った。過冷却を何度も繰り返す中でエムプリオが生成され、核生成個数を抑えることにより冷却管中の凍結を防止する対策になるか、どの位の寸法の氷が生成されるのか、そういった問題に置き換えて解析を試みる必要があったのにも拘わらず、そこまで研究が進めないうで終了した。そういった点で研究は失敗と云える。

## 7. 結 言

研究失敗の結論を述べても始まらないが、現状で必要なのは技術の発信ではないかと思う。現状の論文から幾らの数の技術が生まれたのであろうか？大学では論文の執筆も必要であるが、技術を事業化する起業化精神への情熱も必要ではないだろうか？教官も学生も

一緒になって起業化を行うには、R&Dを支える学問も市場性・経済性などを考察する総合力が必要である。学問だけで技術の企業化は不可能であり、正確な制御、安全性の確保、それら技術のスケールアップなど課題は山積され、3～5年位は技術の精緻化に掛かる、そのためにも技術を確実にモノにすることが重要である。その事業化過程に教官が主体的に参画し、人間社会に有用な技術を事業化することが要望されている時代ではないだろうか？そういう点で失敗の最たるものが、有効な学の社会化・頭脳化を実行して来なかったことではないかと考える。しかし未だ技術シーズの企業化の道が閉ざされたわけではなく、この後の人生に期待したい。

「未成功研究の原因－研究の目標設定について考える－」

Balance between the Importance for the Research and the Difficulty of Research Targets

矢部 彰 (工業技術院機械技術研究所)

Akira YABE (Mechanical Engineering Laboratory, AIST, MITI)

1. はじめに

最近、研究目標について考えさせられることがあった。それは、国立研究機関を変革すべきである、また、エージェンシー化すべきであるという現在進行中の行革の議論の時であった。「なぜ国立研は変革されなければならないのですか?」「それは、国立研の使命であり、また、国立研への期待である新しい産業を起こすという役割を果たして来れなかったからである。」「世界をリードするような超高性能省エネルギー技術やエネルギー有効利用技術シーズを開発してきた自負はあるのですが。」「いや、現在の情報産業や環境産業を零から作り出すような役割を国立研は期待されているのだ。今後は新しい産業分野を作り出すことを目指して努力してほしい。」こう言われると、反論は難しく、ある程度の変革は容認せざるを得ない。今まで努力してきた省エネルギーの推進は、「スーパーヒートポンプ」のプロジェクトや「EHD (電気流体力学) 熱交換技術」の研究などであるが、投資回収年を低減し排熱利用を飛躍的に促進することが目標であった。現在も一步一步実用化に結び付ける段階に留まっており、新しい産業分野を作り出すところまで行っていないので、まだまだ未成功であると考え込んでしまった。省エネルギーを革新的に促進し、今の熱関連産業と同じ規模の新たな産業をもう一つ作り出さない限り国立研は良い成果を出しているとは、言ってもらえないと認識させられた。

しかしながら、新たな産業を起こすという目標は、野球で言えば場外ホームランを打つようなものであると思う。ホームランは大きな目標であるが、工学であるからには、野球と同じようにヒットも大事ではなからうか。また、ホームランを打てなければ役割を果たしていないのだろうか。エンジニアリングを支える工学は、もっと体系だったもので、工学の体系を作り上げる中から新しい産業の芽が出てくるとは考えられないのか。ヒットを打てるレベルまで行かない限り、ホームランは狙えないのではないかと、などと思いをめぐらせ、ホームランまでの道筋の途中にあるいろんなレ

ベルの研究目標について整理してみたいと考えた。

2. 工学における研究目標とその大きさ

研究・開発の目標設定の方法、研究課題の重要性、研究評価のあり方に関する検討は、現在までも行われてきており、参考になる記述が多い<sup>(1)(2)</sup>。しかしながら、学問的側面、技術的側面、さらに社会的側面まで含むような研究目標についての議論はまだあまりないように思われる。工学における研究目標を自分なりに整理して考えると表1のようなになる。もちろんどの研究にも、独創性、研究の必要性・必然性、そしてチャレンジングなブレークスルー的課題は備わっていることが成功する研究の前提である。

表に示した研究目標の特徴は、以下のようである。

- (1) どの目標も重要な目標であり、それ自身で評価されるに値すること。
- (2) 番号の大きいほど前の番号の内容を包含する大きな目標になっていること
- (3) 学問体系が出来上がって、そこから技術シーズが生み出され、その内の成功例が新たな産業に育って行くというプロセスを想定していること。

表1 工学における研究目標

1. 新しいアイデアを考案し特許をとる。
2. 実験や理論解析を論文の形に纏めて発表する。
3. 学問の体系化、学問分野の確立に貢献する。
4. 技術シーズとして確立し、実証する。
5. 経済性、社会性も良好にして実用化する。
6. 新しい産業分野を作り出す。

一方、この表に示すように種々の視点の研究目標が存在することにより、以下の問題点が発生し、未成功・失敗という評価が生じる。

- (1) より大きな番号の目標を達成するという観点からすると、前の番号の目標を達成していても次の番号の目標に対しては未成功という評価の場合が多々あること。今回の未成功研究の特集記事を書か



れた方々の内容にも、より実用に近づけるといふ観点からは未成功と判断されたという記述の多いこと。

- (2) 研究を開始する最初の段階から、実用化や新しい産業分野への展開まで考えて置かなければ、実用化や産業育成の視点からの評価には対応できないこと。
- (3) 研究評価は、研究者本人だけでなく、組織の評価、組織から独立した外部評価と評価者の視点か広がる傾向にあり、専門家だけでなく、誰にも分かりやすいより説得力を持つ目標とそれへのアプローチの説明が求められるようになってきていること。
- (4) 成功・未成功を判断する評価の視点は、時代と共に変化することも予測した上で、研究開発の目標を設定すべきであること。
- (5) より大きな目標を最初から求められると、一步一步の積み重ねの思考が出来にくく、着実な学問体系の構築に貢献しないような研究が増えやすいこと。

### 3. 工学の進むべき道と

#### 「未成功・失敗」を恐れない挑戦の必要性

このように考えると、より大きな研究目標の設定、また、より説得力を持つ研究評価への対応を可能にする研究計画の作成は、かなり難しいことが理解できる。排熱回収の分野で言えば、最初から膨大な量の排熱の存在する常温近傍の小温度差排熱を対象として新たな産業を起こすことを目的とする研究が最もインパクトの大きい研究であろうが、たいへん難しい課題である。この大きな目標を最初からねらうのではなく、回収排熱量は相対的には小さいものの、排熱回収を促進する熱サイクルや回収・利用方法を研究し、また平行して、小温度差熱回収用高性能熱交換器を研究開発しつつ、次第に回収排熱温度を低下させていく長期計画の方が、有効であり大切であろう。このことは、長期的戦略でより大きな研究目標を目指し、長期戦略の中での重要なポイントとして現在の研究課題を選定しながら、着実に研究を積み重ねてゆくことが大事であることを意味している。実用化や産業分野の創生という大きな目標にはすぐ対応できないため、「未成功」や「大きな成果なし」と判断されるかもしれないが、戦略を持って大きな目標も目指す姿勢が工学にとって重要であろう。

図1は、伝熱も主要な構成要素であり、工学の代表選手である「機械」の今後進むべき方向に関する筆者

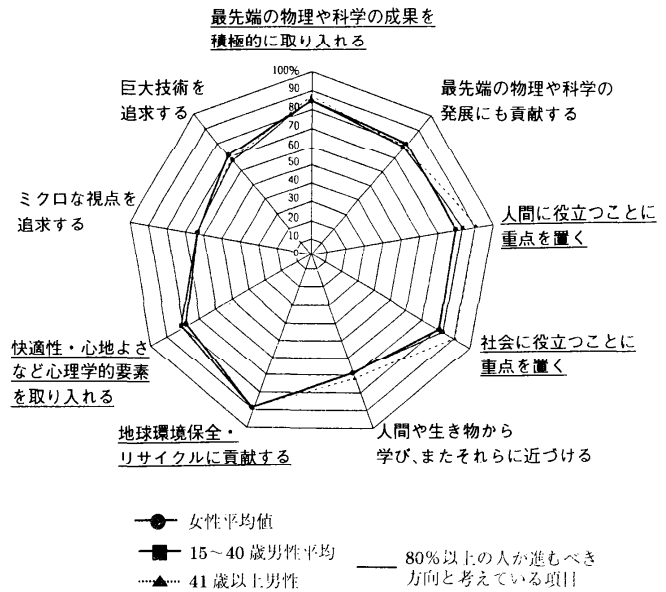


図1 21世紀前半における機械工学の進むべき方向

らが行ったアンケート結果である<sup>(3)</sup>。性別、年代、専門分野に関係なく、地球環境保全・リサイクルに貢献し、人間および社会に役立ち、快適性・心地よさなどの心理学的要素も追求する姿が、工学の進むべき道として期待されている。これらは、現在まで工学のあまり得意としてこなかった領域に対して強い要求がなされていると判断できる。たとえば、エネルギー有効利用で言えば、都市におけるエネルギー利用をどう分析し、有効利用に結び付けるのか。汚れた排熱からどう熱回収するか。快適性を損なわずにいかに省エネを進めるかなど難しい課題が山積みである。研究課題自身に心理学的要素や社会的因子が入ってきて、まさに、答があるかどうかわからない問題を解く必要に迫られていると言えよう。研究目標の設定の難しさだけでなく、社会的因子、心理的因子の入る現象の複雑さを考えると、「未成功・失敗」の山を築きながら、問題解決の糸口を探る努力が是非とも必要であると思われる。

「未成功・失敗」を恐れない挑戦が強く求められている状況である。

#### 4. 「未成功研究」の特集について考える

未成功研究の原因についての私の見解は、どのくらい大きな目標を持つかで、研究は成功とも、未成功とも判断できるというものである。しかし、伝熱問題に特有の難しさがあるとしたら、未成功研究の領域はさらに広がるはずである。現象が複雑であったり、複数の伝熱形態が共存していて、現在でもまだ現象解明が出来上がっていない伝熱現象に関しては、数多くの未

成功研究があると思われる。たとえば、氷生成などの凝固開始条件、水に関連した熱交換器の汚れの問題、沸騰限界熱流束時の気泡や気泡下部薄液膜の動的挙動、剥離や乱流挙動などである。今後、社会的因子や心理的因子が増えれば、さらに、現象解明の未成功研究は増えると思われる。

「未成功研究」の特集の意義について考えてみると、二つの点を指摘できる。一つは、研究目標の設定は、オリジナリティーのある発想から始まって工学的実用化の検討段階まで考えても、多大な調査・検討を伴う膨大なプロセスである。そのプロセスの中で注意すべき点やノウハウを、未成功研究の経験の中から教えていただくことが出来たなら大変参考になるであろうこと。二つ目は、研究者の生涯取り組める研究テーマの数は、そんなに多くはないので、少しでも失敗しないようにしてほしいというアドバイスなのかもしれない。たとえば、研究者のライフサイクルとして35年を考え、一つの研究テーマに5年ぐらいかけて、平行して10テーマ研究するとしても、研究テーマ数は70にしかない。こうしてみると、研究テーマ選びは、重要な作業であり、未成功研究の情報や原因分析は役立つと思われる。

## 5. おわりに

未成功研究かどうかは、どのくらい大きな研究目標を設定するかで決まるもので、より大きな研究目標を持たば、重要な研究成果を挙げたとしても、研究は未成功と判断されやすいこと、また、未成功を恐れない挑戦が今後も重要であることを述べさせていただいた。何らかのご参考になれば幸いです。

### [参考文献]

- (1) 矢澤清弘「研究開発成功の手引」日本規格協会
- (2) 森康夫「研究課題の重要性」機論B, 49, 444, pp. 1567-1568(1983)
- (3) 日本機械学会「機械工学 100年のあゆみ」第5章機械工学の未来, pp. 254-259(1997).

## 研究計画に関する失敗談

### Failure on Research Planning

西尾 茂文（東京大学生産技術研究所）

Shigefumi NISHIO (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

#### 1. 話の前提条件

原稿を書くときには、いつも書き出しに困る。今回は、自己紹介から始めてみる。私は、理屈っぽい性分から、自分の研究テーマを分類しておかなくては気が落ち着かないようであり、現在は、研究室の課題を、1)液相の相変化現象（蒸発・沸騰、凝固・凍結）における素過程と伝熱、2)振動励起熱輸送現象とその応用、3)熱・流体现象におけるマイクロ場拘束効果、4)各種熱制御技術の開発と分類している。

また、これらの研究を展開する上で、a)体系的観点から考えること、b)現象の観察を重視すること、c)（私の経験でいえば超電導磁石や非晶質合金あるいはパワーデバイスなど）できるだけ新しい展開が期待できそうな技術領域に関連するよう課題を設定することなどを基本方針としてきたように思う。無論、数値実験がかなり可能となった現在では観察の中に数値実験による観察も含まれようし、新しい技術領域の判断も個々人の方向感覚により当然異なると思う。

こうした方針については、その経緯の中で、成功したと思うことも、失敗したと思うことも色々ある。そこで、「研究ノートから：－伝熱問題における未成功研究－」という企画の一部であるが、本稿では当初の企画内容にあったと書かれている「伝熱研究における失敗談」の「伝熱研究」を広義に解釈させていただき、失敗談を中心に書かせていただくことにした。企画者

の方々の意図と多少異なった内容かも知れないが、ここで記す内容が何かの役に立てば幸いと思う。

#### 2. 「体系化への興味と拘泥」からの失敗

自己紹介の次に、上記のテーマ 1)あるいは方針 a)に関する大きな失敗例を記しておこう。体系的観点からいえば、液相の相変化現象は、相変化分子運動論（蒸発・凝固速度など）、界面安定論（種々の界面不安定）、三相界線運動論（いわゆる濡れ）などを媒介として、過飽和母相の形成、異相核生成、異相成長および界面形態形成といった素過程により異相構造が形成される現象と考えている。こうした素過程に関する知見は、原理から考える上で、また現象を観察する上でも極めて重要であると思う。これらに注目して体系的に記述された相変化の教科書あるいは専門書は UC Berkeley の Van P.Carey 教授のものしかないと思うが、いずれにしても例えば気泡核生成についてはかなりの知識が集積されている。

さて、若い先生方と酒を飲みながら伝熱学会の体質を議論している時に、気泡核生成の話になり、ある伝熱シンポジウムでのやり取りが話題となった。つまり、気泡核生成を利用したバブルジェット・プリンター BJP の開発に関して、キャノンの浅井氏が初めて伝熱シンポジウムで発表講演をしたときのことである。発表内容の中心は、気泡核生成そのものであったと思う

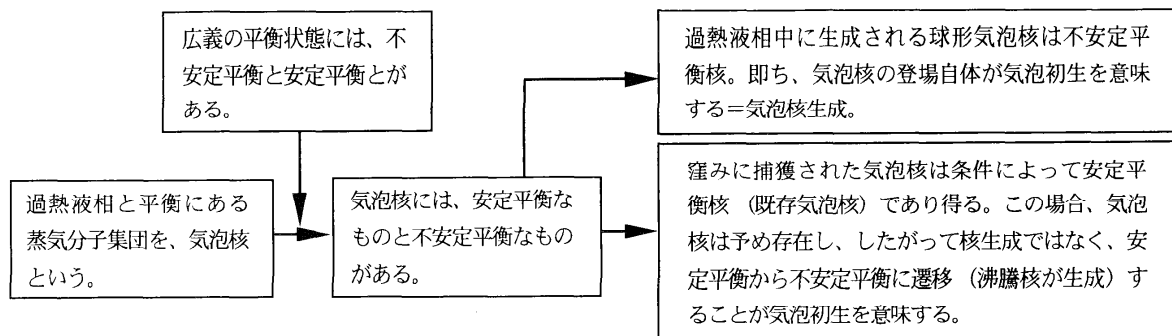


図1 「沸騰核生成」という言葉の理解

が、会場から「そんなことはもう分かっている」との否定的指摘があったそうである。ここで浅井氏の名誉のために付け加えておくが、浅井氏は相変化に関してもきちんとした物理的見識をお持ちの方である。例えば、一般の沸騰開始は核生成ではなく核活性化であるのに、なぜ沸騰研究者は「沸騰核生成」という言葉を使用するのかと質問されたことがあるのを記憶している。指摘は全く正しいと思う。つまり、「沸騰・核生成」あるいは英語の Boiling Nucleation は浅井氏の指摘通り物理的に考えて適切ではないと思う（私見では、図1に示したように、「沸騰核・生成」と理解すると正しくなると思う）。いずれにしても、伝熱工学が学問としての香りあるいは体系化を指向しながら、言語的にも整備されていないことは、反省すべきであると思う。

本稿の趣旨である失敗談から話がそれたが、失敗談と反省はここから始まる。即ち、恐らく上述の質問(?)をしたのは、性分からして、また言い方からして私ではなかったかと思うからである。赤面する思いがするが、避難の矛先を逸らすため犯人探しはやめるとして、反省の本題に入ろう。ご承知のように、BJP は、気泡形成による体積膨張を利用した力学装置であり、最近ではマイクロアクチュエータの一つの候補ともなっている秀逸デバイスである。この BJP の発想は、沸騰研究者が「沸騰により熱を伝えること」のみに拘泥している限り、生まれてこない。即ち、失敗あるいは反省の内容は、BJP は、原理からすれば沸騰研究者からこそ発想されるべき展開であり、私のようにプラントなどにおける蒸気生成技術や鋼材冷却などの冷却技術のみを念頭に置いて研究してきた沸騰研究者にとって斬新な内容の発表であったにもかかわらず、それをくみ取れなかったことである。

端的に言えば、体系化あるいは定まった視点に拘泥し、その新しい展開に目を閉ざしていたということである。また、熱を伝えることだけに拘泥し、熱が伝わった結果何が起きるのかという視点が無かったということである。伝熱の体系化の重要性を否定するつもりは全くない（むしろ徹底的な体系化を急ぐべきと思う一人である）が、伝熱工学が「自然界にないものを創造する工学」の一つであることを、再認識させてくれた貴重な失敗であった。

### 3. 「現象から技術へ」の発想による失敗

次に、方針 c) に関する失敗を記しておきたい。かなり前の話になるが、沸騰を利用してものを冷やす場合に表面に適切な厚さの断熱層を設けると逆に速く冷える（現在では「断熱層のパラドクス」と称している）現象の研究を行っていたことがある。この仕事は超電導磁石の安定化とも関係があり、九州大学の伊藤先生のご配慮で、超電導磁石関係の科研費のグループに入れていただいた。その時分は伝熱分野で超電導磁石を扱っている研究者は少なく、超電導磁石における熱的問題を理解するために、超電導磁石の専門家の会議などに出席し勉強をさせていただいた。その結果、当時の博士課程の大学院生 Chandratilleke 君（現在、東芝）とともに静的安定化の観点からの研究ができたと思う。

当時の計画では、この研究を（図2に示したようにより現実に近いと考えられる）動的安定化へと発展させるつもりであったが、その後その計画を中断し、超電導システムに関する研究自体も中断させてしまった。動的安定化への展開を断念した理由は、ある企業の専門家から、動的安定化は現実の安定化手法としては当分使えないとのコメントを得たことである。当面使え

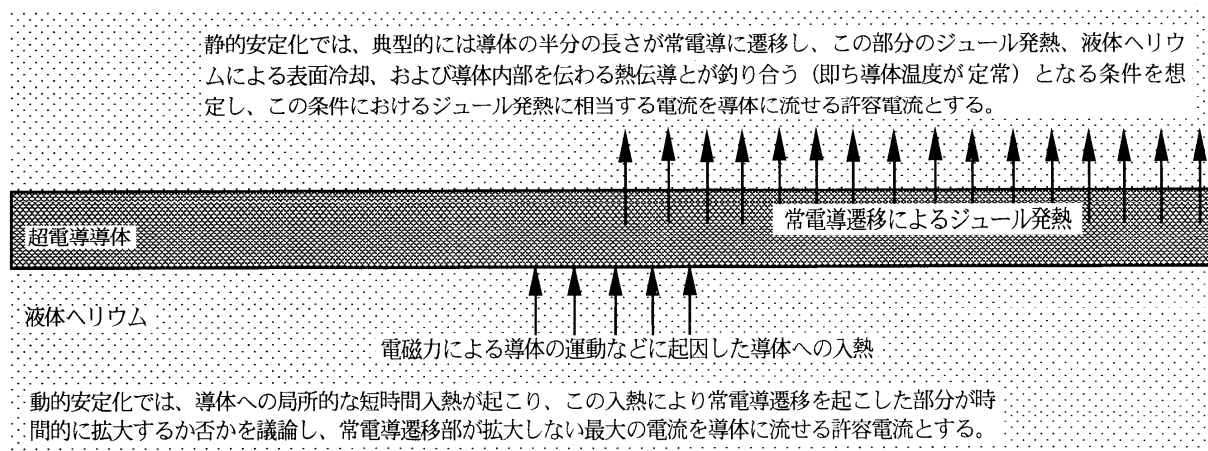


図2 超電導導体安定化の典型的概念（動的安定化の方が現実的であり許容電流も格段に高い）

ないとすると、使えるようになる頃には在来超伝導材料と酸化物超電材料との競合の時代に入り、酸化物超電導体については安定性の問題は少ないと言われており、したがって動的安定化の研究は中断すべきであると思ったからである。

一方、超電導磁石やシステム自体の研究を中断してしまった理由は、今から考えれば、この研究を沸騰に関する研究の延長上でしか考えていなかったことである。超電導システム自体の熱的問題は山積しており、

(沸騰のみでなく) 伝熱的あるいは熱工学的観点に立てば、中断する必要など全くなかったと思う。これも、現象にのみ目が行き、技術としての目をもたなかった失敗であると思う。即ち、前項で述べたように、伝熱研究者が自分の専門現象(前項の例では例えば相変化)をもち、これを展開することにより何か新しい技術(前項の例ではBJPなどの力学装置)が開発できないかと考えることも重要であるが、工学者として当然もつべき資質、即ち、まず自らが創造したい技術(本項の例では超電導磁石あるいはシステム)があり、そのためにすべての知識(本項の例で言えば沸騰や伝熱に限定せず熱工学的知識さらには工学的知識)を動員して技術を作り上げるといった観点をもたなかったがための失敗であったと思う。この点については、現在強く反省している。

話題となった頃にご多分に漏れず研究室で研究を開始した半導体素子の冷却技術についても、全く同様の失敗をした。ここでは反省を棚上げして、我が身に弁解のための逃げ道を作っておきたい。情報用半導体素子の冷却技術を中断した理由は、高熱負荷冷却に関するニーズがつかめなくなったことである(現在は、前述の2)や3)のテーマに関連してパワー用素子の冷却技術として再開している)。しかし、昨年の沸騰に関する国際会議で、IBMの2006年までの戦略紹介を含む

Bar-Cohen教授の講演を聞いて、半導体素子の高熱負荷冷却については、研究を続行してきた米国の研究室と大きな差がついてしまったことに改めて気が付いた。情報は自ら集めるべきことは勿論であり、そのためには大学が社会にとって有意義な種を発信すべきであることは無論であるが、我が国の企業あるいは社会も高いハードルのニーズを効果的に発信して欲しいと思う。

#### 4. 「すぐに成果を」による失敗

次に、教育に関する失敗を記しておきたい。大学の教官となって約20年が経過したが、その間に、時代を変えると自負できる「大きなテーマ」を掲げたかと省みると、20年の経験に疑問の念が沸いてくる。それでも、任官当初は「時代は水素」と信じ、水素エネルギーに関する研究を志したが、水素は中間媒体ということもあり、いつの間にか熱制御の研究へと流れてしまった。

なぜ、「大きなテーマ」を掲げられなかったかということを反省してみると、第一に自らの能力の問題、第二に自分の勉強不足に気付く(無論、これらに関しては前から気が付いてはいたが)。しかし、ここでは、これらを再び隠蔽して人のせいに見せよう(だから結局は失敗が生きない)。すると、教育システムがいけないのではないかという逃げ道ができる。つまり、修士課程の学生を対象にして考えると、2年間の間に修士論文として発表できるテーマを選ばなければならない。特に、度胸の据わっていない(無論今でも度胸は据わっていないが)若かった時代にはそうであったように思える。

このように考えた途端に、テーマは縮小する。研究動機、問題提起、解決方法、結論といった「成功」への道筋がある程度自分の頭の中にあるテーマまで、テーマが縮小してしまう。そこで、最近狭くなったの

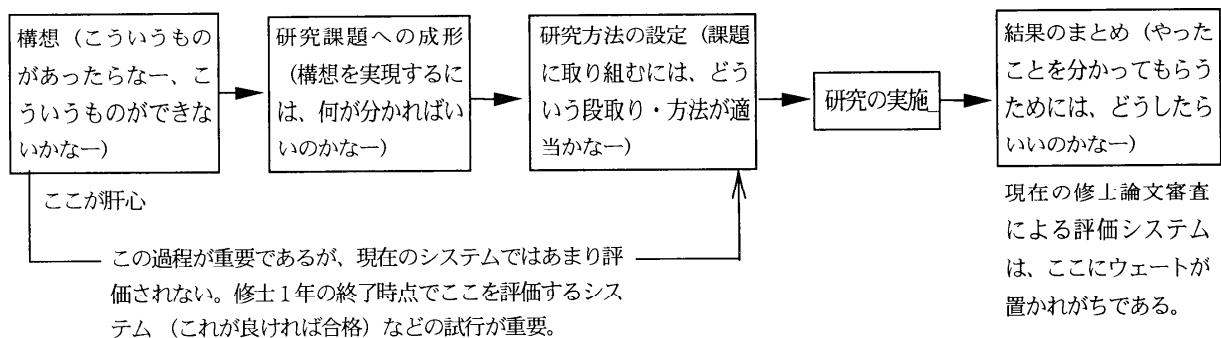


図3 発想や計画・企画力を養う評価システム

で、これは「大学院学生に対する評価システムが悪いせいだ」と思いこむようになった。つまり、「大きなテーマ」を大学院学生とともに実行するためには、図3に例示したように、2年間の最終結果のみの評価ではなくて、途中の研究動機、問題提起あるいは解決方法などの段階で十分に意味があれば、それを評価するシステム（あるいは雰囲気）が必要だという逃げ道に至る。

しかし、これは逃げ道ではなくて、本当の評価であるとも思っている。単なる解釈や改良あるいは体系的完成度だけではなく、独創性を期待するとすれば、こうした評価のシステムや雰囲気作りが是非とも必要であると思う。

#### 5. 「一見奇異な現象への憧れ」による未成功研究

最後に、企画者の方々の要望である未成功研究について記しておきたい。

自慢にもならないが、失敗に終わった研究は、私の研究室の場合、数限りなくある。前項でテーマが縮小することを記したが、縮小したテーマでも失敗している。つまり、研究室在籍者と一緒に行う研究は、最初の私の目論見がはずれ、方向転換することが多い。この意味では、大学院学生などにとっては大きな迷惑であろうと思う。これは基本的に私の責任であるが、過去の例を書くとき当事者にも被害が及ぶと申し訳ないので、現在のところ失敗しているが成功するかも知れない未成功研究の例を挙げさせていただきたい。無論、この例についても、私の責任であることをまずは断っておきたい。

ここで例として挙げるのは、熱伝導における非フーリエ効果に関する研究である。非フーリエ効果の研究を始めようと思った動機は、ASAME J.Heat Transfer (Vol.117, p.568)のMitraらの論文を読んだことである。周知のように、均質系では非フーリエ効果に関する緩和時間は極めて短い。しかし、ある種の不均質系では、この緩和時間に相当する時間スケールがかなり長くなると言われてきた。論文では、図4に概略を示したように、ポロニーヤソーセージなどを試料として、この緩和時間相当の時間スケールが10秒のオーダーで実測されたことが報告されている（通常の非フーリエ効果とは機構が異なると考えられるので、メモリー効果と呼んでおく）。一見奇異な現象には目がないので、条件反射のようにこのテーマの研究を開始した。研究計画は、まずは再現実験をして、その後この種の現象が発現する試料条件を調べ、そして機構を調べるため

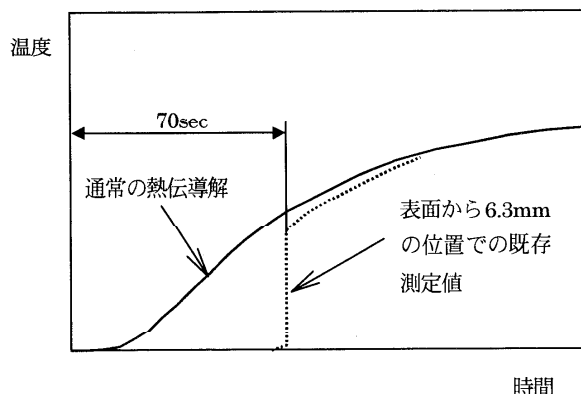


図4 熱伝導メモリー効果の概念図

にモデル実験をするといった具合の計画であった。

早速、ポロニーヤソーセージによる再現実験を開始した。再現実験の成功を疑う気持ちなど全くなく、成功するに決まっていると思いこんでしまった。しかし、結果は通常の熱伝導解によく一致する実験結果が得られたのみであった。その時点でも、まだ現象に関する疑いは無く、水分を含む不均質系ならメモリー効果が再現できるはずと思い、別のソーセージや肉、さらには繊維質の野菜まで買い込み実験をやらしてもらった。しかし、結果は変わらず、メモリー効果を捉えることはできなかった。現在でも実験を続けてもらっており、今後成功するかも知れないが、失敗の原因は今でもつかめない。研究担当者にとっては、よく考えもせず一見奇異な現象への憧れにより研究をスタートする私の性癖は、迷惑そのものであると思う。

以上で本稿を終えたいが、失敗あるいは反省すべきことは、他にも沢山ある。例えば、人並みとは思いますが、若い間に成果が出にくい（と思った）エネルギー研究を迂回し、熱制御の研究に重点を置いてきたことも、地球環境問題を引き起こした現世代に属する立場からすれば反省すべきことであろうし、研究計画の失敗でもあるかも知れない。はじめに記したように、現象の観察に重点を置き、「数値計算は、研究としては数値実験であり、数値計算の結果を観察・整理し、物理法則などの形にまとめてこそ意味がある」などと思得を切った、数値計算結果主体の研究を嫌ってきたことも、時代を見誤った失敗かも知れない。

## ワンモアチャレンジを欠いた未成功

*One More Challenge for Real Success*

岡崎 健 (東京工業大学)

Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology)

## 1. はじめに

何を持って成功あるいは失敗と考えるかは、当然のことながらその研究の目的によって大きく異なる。ある現象の解明自体が目的ならば、程度の差こそあれ現象解明がなされたら成功ということになるだろうが、その現象を利用して具体的な装置あるいは製品の創生や大幅な改善に生かされなければ技術開発研究としては未成功であろうし、ものができても社会のニーズに合致せず日の目を見なければ企業の研究としてはこれも未成功あるいは失敗ということになるだろう。

それでは大学の研究なら基礎現象の解明に徹してもそれで良いかという、必ずしもそうではない。25年ほど前にある大御所の先生が、「基礎研究は徹底的に基礎に、応用研究は徹底的に応用に徹せよ。中途半端はダメ」と言われたことがあるが、たとえ基礎研究でも、具体的な何かの問題点の本質的な解決や新しい技術の創生に生かされ得ることを、たとえそれが後々の話であろうとも、必ず想定して研究テーマを設定し、常にそれを十分意識して研究を進めるべきであると最近強く考えるようになってきている。なぜなら、現象解明がほぼできて満足してしまい、これを応用して技術のブレークスルーに生かすチャレンジを放棄したままで、その意味で未成功(未完成)のままで終わっている研究経験を自分としても多く持っているからである。

## 2. 電極上での放電の不安定

博士課程在学中の昭和51年頃、電極上での放電の不安定による均一放電からアーク放電への遷移を、温度場と電気場がカップリングした不安定現象としてモデル化し、アーク発生を支配するパラメータの導出とその発生限界を明らかにする理論的研究を行っていた。これは、MHD発電の電極上でのアーク発生が電極材料を浸食し電極の寿命を低下させる原因を究明し、アーク発生を抑制した長寿命電極の開発へつなげることを目的としていた。理論解析はうまくいき、このような現象をモデル化できた“成功感”にひたった。ジュール発熱と熱散逸の比で表される新しい無次元数が導

出され、アークへの遷移限界を求めることができた。また、境界条件の検討から、電気伝導性が低く熱伝導性が高い電極材料を用いればアークの発生が大幅に抑制されることを見出した。そのような材料は当時は無いものの将来的には半導体電極などにより実現される可能性があると考えたが、その後もこれをアーク抑制技術として実証することなく現在に至ってしまった。ある意味では未成功のままであった。この間に、MHD発電以外の分野ではあるが、実際に半導体的な電極を利用してアーク発生を抑制し均一な放電場を維持させる装置が実現し、大気圧下非平衡プラズマ発生や高出力ガスダイナミックレーザの放電場に応用例が出てきている。現象解明にとどまらず、理論解析結果をもとに当初の目的であるアーク抑制の実証研究まで発展させておくべきであったと感じている。

3. 微粉炭燃焼の極低NO<sub>x</sub>化

昭和48年のオイルショック以降、エネルギー源の多様化と石炭埋蔵量の豊富さから、我が国の親設大型火力発電所は石炭火力、特に微粉炭火力が主流となる方向にあった。微粉炭燃焼技術自体は非常に古くから既に確立されていたが、環境保全の気運の高まりの中で、石炭を徹底的にクリーンにかつ高効率で燃焼させるためには新たな技術開発が必要で、各ボイラメーカーがしのぎを削っていた。石炭燃焼で発生する主な環境汚染物質はNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、灰微粒子である。このうちSO<sub>x</sub>と微粒子については燃焼制御では低減できず全て排煙処理(脱硫、集塵)に頼らざるを得ないが、NO<sub>x</sub>については生成・消滅機構が複雑なかわりに逆に燃焼制御で大幅な低減が可能となる。そのNO<sub>x</sub>は石炭燃焼の場合は空気中のN<sub>2</sub>起源のいわゆるThermal-NO<sub>x</sub>ではなく、石炭中のN分を起源とするFuel-NO<sub>x</sub>が主体であり、低減原理はThermal-NO<sub>x</sub>の場合とは大きく異なる。このような理由から昭和53年に赴任した豊橋技科大で筆者は微粉炭燃焼におけるNO<sub>x</sub>の生成機構の解明を研究テーマの一つの柱とし、以来15年にわたって研究を行ってきた。

非常に苦勞して微粉炭の一次元燃焼を安定に実現できるようにしてから、燃焼の進行に伴う  $\text{NO}_x$  の生成・消滅挙動や灰粒子の生成機構と微量有害元素濃縮などについて興味深いデータが得られるようになった。この頃ボイラメーカーでの低  $\text{NO}_x$  微粉炭燃焼技術の進歩は著しく、Fuel-N が全て転換するとすると約 2000 ppm にもなる  $\text{NO}_x$  を、燃焼制御のみで 100 ppm レベルにまで低減することが可能となり、この技術で世界をリードするようになっていた。このとき、Fuel- $\text{NO}_x$  がここまで低減されると、さらなる極低  $\text{NO}_x$  化にはそれまではあまり深くは考慮されていなかった Thermal- $\text{NO}_x$  の寄与をきちんと解明しておくことが必要と考え、Thermal- $\text{NO}_x$  を分離して検討することにした。

詳しい内容は省略するが、結果的に空気中の  $\text{N}_2$  起源の  $\text{NO}_x$  は、Thermal- $\text{NO}_x$  の生成機構としてよく知られる Zeldovich- $\text{NO}_x$  ではなく、粒子のまわりで生成される Prompt- $\text{NO}_x$  が主体でこれが 30 ppm にも達することが、実験および理論解析により明らかにされた。微粉炭燃焼での Prompt- $\text{NO}_x$  などそれまで聞いたことがなかったので、新しい現象の発見ということで“成功感”にひたり論文にまとめた。ところが、ある学会での発表の折、厳しい質問を受けた。「そういうメカニズムによる  $\text{NO}_x$  生成があることはわかったが、これを減らす方法はどの様に考えているか」と。現象に興味集中するあまり、当初の目的である“さらなる低  $\text{NO}_x$  化”が視野の外になってしまっていたことに気づきやすい思いをした。しかし、この新しいメカニズムによって生じる  $\text{NO}_x$  の低減方法については、やらなくてはと思いつつも未だ具体的な考えには至っていない。現象解明という点では成功したかもしれないが、極低  $\text{NO}_x$  化への適用という当初の目的からすれば未成功のまま現在に至っている。この出来事以来、基礎研究であっても、研究の途中で常にその本来の目的に立ち返ることの重要性を痛感している。

#### 4. 微粉炭燃焼でのサブミクロン粒子

同じ微粉炭燃焼関連の研究で、別の意味での失敗経験を持っている。先にも述べた通り微粉炭燃焼では原炭中の灰分に起因する灰微粒子（フライアッシュ）が生成する。実際の微粉炭燃焼システムでは高効率電気集塵器で質量としてはほとんどの灰粒子が捕集されるが、粒径  $1\mu\text{m}$  以下のサブミクロン粒子に対する電気集塵効率は低い。このサブミクロン粒子は質量分率は低いものの原炭中の揮発性微量有害元素が濃縮される傾

向があるため、その生成機構と元素分配を詳しく調べてみることにした。それまでは主たるサブミクロン粒子の生成経路は、微粉炭粒子近傍の還元雰囲気下で灰の主成分の一つである  $\text{SiO}_2$  が蒸気圧の高い  $\text{SiO}_2$  となって気相中に放出され、これが外周の  $\text{O}_2$  により酸化され CVD 的な均核生成による超微粒子生成であると考えられていた。筆者らは、これとは別に、もとの微粉炭中のフラグメントからのサブミクロン粒子生成が、炭種によってはサブミクロン粒子生成の主要な生成経路となることを明らかにしたが、その研究過程で、不思議なことにサブミクロン粒子中に Fe 分が多量に含まれることに遭遇した。何故こんなことが起きるのか。実験上の問題で石炭の粉碎中などに微細な鉄粉でも含まれてしまったのだらうと軽く考え、深く原因追及するのを放置したまま時間が経った。その後、米国の研究者らにより、石炭中のパイライト ( $\text{FeS}_2$ ) からその酸化物としてフュームが形成され、これがサブミクロン粒子の新たな一つの重要な生成経路となり得る、との内容の論文が発表された。以降この論文が世界的に広くリファアーされるようになった。せっかく予期しない新しい結果が実験で出ていたのに、この原因追及を放置したため他人に先を越されてしまった苦い経験として残っている。

#### 5. おわりに

元来自分は物事に対して楽天的で、どんな結果になってもそのいいところだけを見て成功した気分になるところがあり、今回、教訓となるような失敗例をいざ書くとすると適当な題材がなかなか見当たらなかった。しかし、これを機会にこれまでの研究を振り返ってみると、もう一歩先まで踏み込んでいればその内容が数倍にも広がった可能性を放棄したことになっている例が多々あることを改めて認識した。うまくいったと思った時こそ、その研究を開始した時の本来の目的を十分見つめ直し、その具現化に生かすべくもう一段深い追求をすることによって研究の幅が大きく広がること、さらに、予期しない結果が出たときこそ、その原因の徹底的な追求をすべきことを、強く肝に銘じておきたいと考えている。



## 「パンドラの箱」

*Pandora's Box*

飯田 嘉宏 (横浜国立大学)

Yoshihiro IIDA (Yokohama National University)

手の届く本棚に、既に古くなったノートが一冊有り、「パンドラの箱」と表記してある。めったに開かなくなってから何年経つだろう。最初にこの研究ノートを用意したのは、確か修士課程2年の時で、当時は毎日のように記入していた。特に実験に関して思い浮かんだ小さなアイデアやヒントを初め、新しい研究テーマの着想などが一杯メモしてある。あれから35年余も経ち、ノートは何冊も溜まったが、開く頻度は次第に減った。

「パンドラの箱」の話をご存じの方は多いだろう。遠いギリシャ神話の昔だ。天界から火を盗んだプロメテウス(技術の創始者)に罰を与えるべく、ゼウスは粘土をこねて人形を作らせ、これに命を与えて美しい乙女パンドラをプロメテウスの近くに与えた。人間界に与えられた最初の女である。パンドラは、ヘルメスなど多くの神々からの贈り物を入れた玉手箱を土産にして人間界へとやって来た。箱の蓋を開けることは固く禁じられていたが、そこは人の性、ある日そっと開けると、もやもやと怪しいものが立ち上り四方の人間界に散っていった。それらは何と、あらゆる害悪、災い、悩みや不幸の種だった。しかし、ただひとつ中に入っていた幸せの「希望」は、いつも通りのぐずぐずした性質で隅にいたので、驚いたパンドラに蓋を閉められ箱の中に閉じこめられてしまったのである。

研究ノートにこのタイトルを付けたのは、こうした類の話が大好きだったせいもある。しかし当時、寝ても覚めても食事中も実験のことばかりが頭にあり、小さな問題に対しても多くの思いつきを得た。直ちにノートに付けるのが習慣だったが、実はそれらのほとんどが役に立たず、隅っこに遠慮がちに書かれた思いつきが実は次第に膨らみアイデアとなって、実験に案外な解決を与えてくれるのであった。常にこうした調子であったから、研究の思いつきは玉石混濁、しかも拙いもの多数の中にわずかの良い種がある。沢山あるただの石もわずかの玉を生むための必然なのだ、と考えるようになっていた。ちょうど、災い、悩み、妬み

などの中にわずかな希望があって、初めて人間界に愛着が持てるように。これが研究ノート「パンドラの箱」の由来である。周りの友人たちは怪訝な顔をして笑っていたが。

さて今回「不成功(失敗)研究談」ということで原稿を依頼されたが、上記した「パンドラの箱」の如く著者の場合はほとんどが小さな失敗の連続であった。たくさん失敗すれば凡人にもわずかの希望はあるもので、それらを食いつないで研究者の端くれを今もやっている。しかしこれらの小さな失敗を書き連ねても余り意味はあるまい。一方、大した研究をしてきたわけでないから大きな失敗は少ない。敢えて失敗談をと問われれば、周囲にご迷惑をかけた失敗例がある。ラプラス変換を利用した熱拡散率と熱伝導率の同時測定法実用化の例だ。まずは、本方法を紹介する。

独立して研究室を構えたのは40歳頃であった。しかし備品としては古い電気炉1台と1ペンのレコーダー1台だけ、研究費も少ない。この条件で何が出来るから研究テーマを探った。それまでは主に沸騰伝熱や二相流の研究をしていたが、院生時代に仲間たち(北大、熊田先生ら)が熱拡散率の測定法開発を行って居り、試料の境界条件をステップ状など数学的条件に実験を合わせるのに苦労していたのを思い出した。一方、当時著者は化学工学の手法に各種優れたものがあることを勉強して知っていたので、その内の「パラメータ推定法」の考え方を熱物性値測定に応用できないかと考えていた。いろいろの手法を考察したが、うまいものはない。思いついたのはラプラス変換であった。学生時代の経験によれば、これを使うと偏微分方程式が一挙に解けてしまう。これを物理測定に使えないか。

この頃、ミシガン州大の Beck らの論文にヒントを得て開発したのが、固体の熱拡散率と熱伝導率を、従来法と違って任意の境界条件で、つまり任意の加熱入力で測定できるラプラス変換法<sup>(1)</sup>である。初期条件一様の下で一次元熱伝導基礎式にラプラス変換を施して

常微分方程式にし、その一般解に温度応答のラプラス積分を代入して熱拡散率を、さらにフーリエの式のラプラス変換と温度および熱流束連続性から熱伝導率を決定する。この方法はそれまで数学的手法であったラプラス変換を、物理的測定に本格的に利用したものと見え、境界条件任意なので多くの特徴を持つ。

原理式を導出し、シミュレーションで確かめ、次いでソーダガラスを試料にして実験に移った。ところが驚いたことに、一番初めの実験からして東工大片山先生らのデータと温度依存性を含めて非常に良く一致したのである。この時の感激と驚きは忘れられない。新しい原理なのに最初から確かな熱物性値が得られるなど、普通は考えられないからである。その後各種合成樹脂、金属、粉体などの測定で実績を積んだ。簡単な加熱法と、温度応答を切り替えて測定するためのペンレコーダー1台で、高い確度と精度の測定が出来るのである。データ処理に少し手間がかかるが困難ではないし、非常に有効な方法になると興奮していたものである。

伝熱シンポジウムで相次いで成果を発表していた頃、某企業がこれに関心を持ってくれ、熱伝導率と熱拡散率の同時測定装置として実用化することを提案してきた。当方としても十分に自信があったのでこれに応じ、日米独特許を取ると共に、当方が試験装置を、企業側が演算処理装置を担当してそれぞれ実用開発に当たった。試料を2枚の標準試料間に挟んで行う、定常法と似た測定体系が実用的に便利なので選んだが、それぞれ開発して組み合わせた装置による結果は、合成樹脂類、ゴム、セラミックス、ガラス等の通常固体についてかなり良い結果を得、商品化の目処は十分に立ったと判断された。

しかしここに問題が起こった。実用化が視野に入ったので企業側が市場調査を行った所、被測定物が断熱材の場合でないと、同時測定法でも商売になり難いというのである。早速今までやってなかった断熱材の実験に入った。しかし、どうしても満足するべき結果がでない。本来は影響受けない筈の加熱入力の如何によっても結果は変わるし、必要な精度が出ないのであった。断熱材の熱伝導率といえば、その値(測定値)が1割相違ただけで材料費は1割違い、売れ行きに影響してメーカーの死活にも繋がる。従って相応の精度(再現性)と確度が必要だが、その実現が困難なのであった。予想外の結果に驚いて良く検討したところ、断熱材の熱伝導率過小で断熱材中には余り熱が流れないので

に温度応答が出、しかし2枚目の標準試料に熱が余り届かないので応答が出にくい。時間が長く一次元仮定からずれる、等の結果であることが判った。断熱材の場合、各種誤差原因が結果に対して極めて敏感に効いたのであった。こうしてやむなく開発を中止した。

断熱材についてのこの失敗の原因は、通常材料に関する成功に気が甘くなり、熱伝導率が3桁から1桁小さな断熱材の性質を十分寸借しなかったせいである。同じ物性値と言っても1桁以上違うと、理学的には兎も角工学的には内容がかなり相違することを知らされた。断熱材の測定には定常法が適当であり、短時間且つ短距離の媒体で測る細線加熱法等はともかく、非定常法は余り適当ではない。気が甘くなったせいで成功のみ考え、考えるべき失敗を予測しなかったことこそ失敗の原因であった。ラプラス変換法でも、短時間、短距離媒体で測定する体系を早期に気付くべきであった。後の祭りである。

さて、既に老年期に足がかかっているせいか、楽しいこと(苦しかったことも楽しい)ばかりが頭にあり、この原稿依頼にも初めは何を書いて良いか判らなかつた。しかしよく考えてみると、前記したように研究生活のほとんどは小失敗の連続であり、慢心があって自省がないと大失敗をし、一方わずかの希望に支えられて出発し執念深く続けた結果、多少の成功例があったに過ぎないことを思い出している。成功が判っていたら研究をやる価値はないものだし、結局は「失敗(不成功)は成功の基」、との月並みな結論である。若い日に「パンドラの箱」の名の研究ノートを作ったのも、この所以だろう。

#### [参考文献]

- (1) 日本機械学会編、熱物性値測定法—その進歩と工学的応用—、p.34-44, 1991、養賢堂

ひとを説得することのむずかしさ

*Difficulty to Prevail on Others*

原村 嘉彦 (神奈川工科大学)

*Yoshihiko IIRAMURA (Dept. of Mechanical*

*Engineering, Kanagawa University)*

1. はじめに

研究テーマ・手法に関しては、あきらめていないことだけで、失敗例をと言われても、困ってしまいます。それでも、若い研究者の参考になればと思い、少し違った観点から、すなわち、自分の考えを他人に分かってもらうことの難しさについて経験したことをお話ししたいと思います。

2. モデル図のむずかしさ

私が専門としてきた沸騰分野で、40年近く前に提案された限界熱流束のモデルがあります。物理的なイメージを持って提案したのは、Zuber<sup>(1)</sup>で、流体力学不安定モデルと呼ばれるものです。このモデルは、基本的な特性を非常に単純なモデルで説明している反面、想定している状況と実際の気液の挙動に食い違う点が多い、モデルの中に理論上おかしいところがある、といった問題点があり、日本の研究者には信奉者が少なかったのですが、米国では主流となっていました。私<sup>(2)</sup>は1983年に、これに対抗できるモデルを提案しましたが、その論文の中で使用した図は、いろいろな面で問題を含んでいたように思います。モデル図を描く場合、論文に1つしか載せないわけですから、現実との対応を重視するか、理想化したものを描くか、どちら

かを選択しなければなりません。しかし、1度出た図は、それを見た人にイメージを焼き付け、2度目に少し変えたぐらいでは、そのイメージを払拭することは難しいようです。図1が、最初に発表した図です。ご丁寧にも、蒸気茎（伝熱面から気泡塊に向かって立ち上がる蒸気の流路）を等間隔に、しかも一定の幅で描いてあります。これと、そのほかの状況に対して描いたモデル図に対して、蒸気茎はランダムに分布するのではないかとか、蒸気茎はだんだん広がってこそ隣と合体して蒸気塊を作れるのではないかとか、いくつかのご批判をいただきました。経験も浅く、細部まで配慮が行き届かなかったわけですが、時間とともに変化

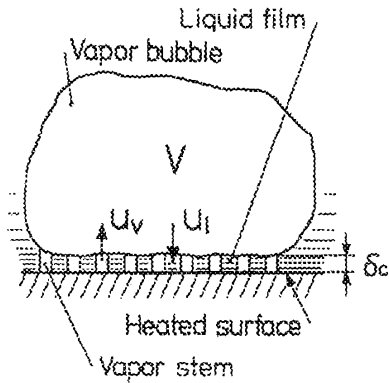
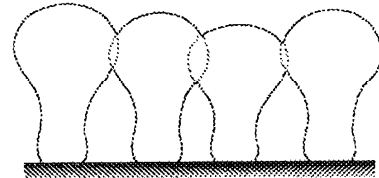


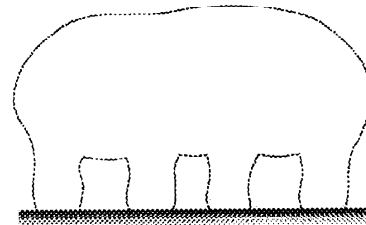
図1 水平平板上、高熱流束核沸騰モデル図



(a) Primary bubbles are generated on the surface.



(b) Primary bubbles grow and merge.



(c) Liquid is splashed out as long as any unstable wave exists on the interface of vapor stems. This is why the thickness of liquid layer is controlled with hydrodynamic instability.

図2 モデルにおいて想定された気液の挙動

していく状況(図2)を動かない図面で表現するのは難しいと、今でも説明の難しさを感じています。

### 3. 慣れないことは懇切丁寧に

私は、学部生の時代から制御に興味があり、自動制御を習ったときには木製のサーボ弁を自作して空気圧で姿勢制御する模型飛行機を作りかけたくらいです。遷移沸騰は、元来不安定な領域で、これを自動制御で安定化しようと言う試みを10年ほど前に始めました。実際に安定化するシステムを構築するとともに、当然理論的なアプローチも始めました。最初の1年間、ブロック線図がうまく描けませんでした。伝熱面表面温度は遷移沸騰の熱伝達特性を通して、伝熱面温度を不安定にするはずですが、実際に限界熱流束を越えて伝熱面温度が上昇していく場合、たとえ加熱をやめても、伝熱面の深部の高温のところから熱が表面まで伝わって、表面温度はしばらく上がり続けます。これを表現するためには、伝熱面温度が深さ方向に一様であると仮定できないわけです。ちょうど同じ頃、九州大学の伊藤先生<sup>(9)</sup>のところでも、同じような安定解析を試みていましたが、正しい結果は得られていなかったと思います。(一巡伝達関数のベクトル軌跡は、すべての沸騰領域で $\omega \rightarrow 0$  に対して実数  $-\infty$  に漸近すべきところが、遷移沸騰でそうなっていません。)この状況をうまく表すブロック線図を気付くのに、約1年を要しました。図3は、後にこのブロック線図を、伝熱面内部の温度をフィードバックさせる場合の解析に拡張して発表したときのものです<sup>(9)</sup>。まずは表面温度を比例積分微分制御を用いてフィードバックする系に対して安定解析しました。フィードバックのパラメータは、ゲイン $K$ 、積分時間 $T_i$ 、微分時間 $T_d$ の3つですから、何とかこのパラメータを決定できる線図が描けます。

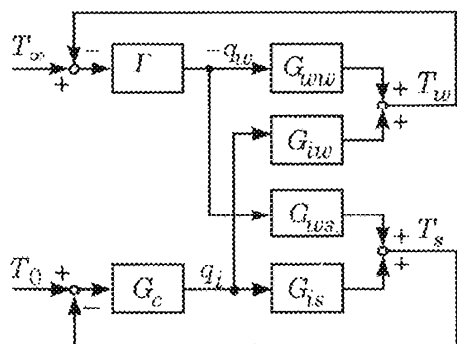


図3 伝熱面の温度制御ブロック線図

図4がそれです。これらの結果を1987年に機械学会に投稿しましたが、掲載否になってしまいました。主な理由は、表面温度をフィードバックするのは非現実的だと言うことでした。安定性を解析できるブロック線図を提示したことだけでも重要なことだと、今でも思っています。しかし思い返してみると、アピールの仕方や内容の説明に不十分なところがあったのは確かです。

ほとんど同じ内容を取り扱っている論文に、比較的最近出された、ドイツの Auracher のグループによるものがあります<sup>(9)</sup>。比例制御・比例積分制御・熱電対の応答遅れを考慮した比例制御の3とおりしか扱っていないため、安定解析結果が表示し易くなっています。この論文の特徴は、以下のとおりです。

1. 最初に、最も単純な比例制御の場合の根軌跡を示して、制御系を安定にするゲインに上限値と下限値が存在することを示している。
2. 次に、沸騰曲線の傾きに対して比例制御が安定となるゲインの範囲(安定限界マップ)を示している。
3. 最後に、比例積分制御や比例制御で熱電対の遅れを考慮した場合の安定限界マップを示している。

このように、単純な系で十分に説明した後、いくぶん複雑な場合まで拡張していますし、実は、以前から制御系のブロック線図や安定性の問題について発表してきました(文献(6)など)。伝熱を専門とする人間にとって、普段はあまり使うことのない制御の話は、どうしても取っ付きにくいはずですが、人があまりやらない分野や手法について発表するときは、直感的に理解できるように、発表する側が十分な準備をする必要があるのだと感じる次第です。

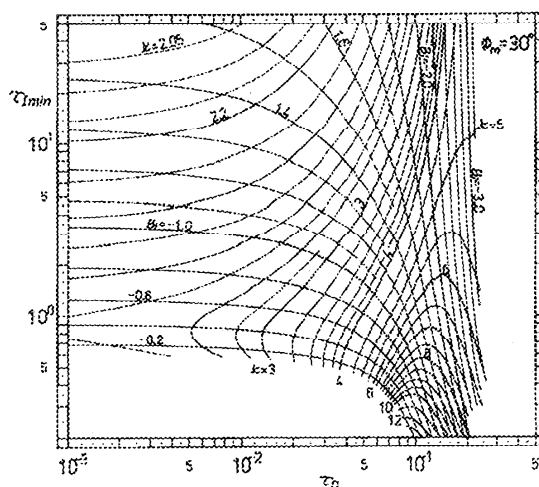


図4 制御パラメータ決定のための線図

#### 4. 思い込みは禁物

掲載否と言うことではありませんが、もう一つ同じような経験をしました。伝熱面の裏側を一様熱流束で加熱する場合に、遷移沸騰において温度の不均一が発生する条件を明らかにした論文を、10年ほど前に書きました。この論文の前半では、円板状の伝熱面を題材にとり、温度分布のモードにどのようなものがあるかを示し、それぞれのモードの安定限界と、不均一なモードのうち最も不安定なモードの発散・収束速度について論じました。その議論の中では、モードはそれぞれ独立に扱うので、制御をして温度を一定に保つことを前提にしていることとなります。一方後半では、高温面を放冷する過渡実験の場合の数値シミュレーションの結果を示した上、均一なモードと最も不安定な不均一モードの発散速度を比較して、過渡実験では不均一なモードが十分に成長する時間がないことを示しました。

後になって、この論文はおかしいというご批判を受けました。その主張は、私の論文で最も不安定としている不均一なモードは、均一な、すなわち温度制御によって安定化されるべきモードに比べるとより安定だから、論文で示されている解析は無意味だということでした。均一なモードは制御で安定化することを前提としていますし、実は、この2つのモードの発散速度の比較は、私の論文の最後の部分に書いてあるものなのです。この批判を受けてもう一度論文を読み返してみますと、論文の書き方がまずかったことに気がきました。均一なモードの解析を、不均一モードの解析とは別個に、基礎式から導き出していました。均一なモードは、半径方向0番、周方向0番、軸方向1番の番号付けが可能な、不均一なモードと包含的に扱えるものでした。つまり論文で $\xi$ と書いていた均一モードの発散速度は、 $\beta_{001}$ と書くべきだったわけです。あの書き方では誤解しても仕方がないと反省することしきりです。

#### 5. むすび

自分自身の未熟なところをさらけ出してしまった感じですが、本企画の意図に沿うことができたでしょうか。読者の皆様方も、こんなことを起こさないように、論文を提出される前や講演をされる前にちょっとでも思い出していただければ幸いです。誰が書いたかは、すぐ忘れていただきたいのですが。

#### 文献

- (1) Zuber, N., "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer", AECU-4439 (1959).
- (2) 原村・甲藤, "限界熱流束に対する新しい流体力学的モデル--プール沸騰・強制流動沸騰(飽和液中に沈められた加熱面)の限界熱流束", 日本機械学会論文集 B 編 49-445 (1983) 1919-1927.
- (3) 伊藤・高田・中島・北村・白石, "高温面の水冷却に関する研究(第1報 試験装置の製作および動作特性)", 第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1985) 100-102.
- (4) 原村・松島, "定常遷移沸騰のフィードバック制御におけるパラメータの決定方法", 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1992) 305-306.
- (5) Blum, J., Marquardt, W. and Auracher, H., "Stability of Boiling System", Int. J. Heat Mass Transfer, 39-14 (1996) 3021-3033.
- (6) Marquardt, W. and Auracher, H., "An Observer-Based Solution of an Inverse Heat Transfer Problems", Int. J. Heat Mass Transfer, 33-7 (1990) 1545-1562.
- (7) Haramura, Y., "Temperature Uniformity Across the Surface in Transition Boiling", Trans. ASME, J. Heat Transfer, 113 (1991) 980-984.

## イリノイ大学アルバナ・シャンペイン校滞在記

*My Wonderful Time in University of Illinois at Urbana-Champaign*

榊原 潤 (筑波大学構造工学系)

Jun SAKAKIBARA (Institute of Engineering Mechanics,  
University of Tsukuba)

私は、1996年3月に慶應義塾大学にて学位を取得後、同年4月から翌年2月までの10ヶ月間に日本学術振興会特別研究員としてイリノイ大学(米国)に滞在しました。今回はそのときの出来事をざっくりばらんに紹介させていただきます。

## 1. イリノイ大学について

イリノイ大学は米国中西部の大都市シカゴ周辺に4つのキャンパスを有する州立大学で、私が滞在していた理論応用力学科 (Department of Theoretical and Applied Mechanics, 通称TAM, 図1) はシカゴから南へ200kmほど下ったところの Urbana-Champaign (アルバナ・シャンペイン) キャンパスにあります (<http://www.tam.uiuc.edu>)。Urbana と Champaign はそれぞれ別々の市ですが、このキャンパスはこれら二つの市にまたがっているため University of Illinois at Urbana-Champaign (略してUIUC) と呼ばれています。この町は約150年前に開拓され、古い建物と緑に囲まれた落ち着いた雰囲気がありますが、一歩町をでるとそこは果てしなく続く大豆畑であり、見える物といえば畑とサイロと地平線しかありませんので、車でのドライブは退屈を極めます。人口は約10万人でそのうち4万人程度を学生や大学職員が占めています。治安は概ね良好ですが、町の北部 (University Ave. と I74 のあいだ) には貧民街があり、麻薬ディーラーの巣窟となっているのでそこには近づかないほうが身のためです。一般にアメリカは危険だという印象がありますが、全面積の99.9%は安全なわけで、危険な0.1%がどこであるかを知っていさえすればなにも怖がることはないと思います。

## 2. 新しい生活のスタート

日本を出発して同日、シカゴから双発のプロペラ機に乗って小さなローカル空港の Champaign 空港へ到着しました。乗り合いタクシーにのって約15分、町で一番背の高い建物である20階建てのホテル、「University Inn」にチェックインしました。派手なホテルではありませんが小ざれいで、大学の主要な研究所へ歩いて

10分くらいで行けますのでとても便利です。日本からのお客さんのために何度かここを予約し、好評でした (Tel:217-384-2100)。チェックイン後、ただちに受け入れ先である TAM のある Talbot Lab. と呼ばれる建物に歩いて行き、Adrian 教授を訪ねました。Adrian 教授は Particle Image Velocimetry (PIV) と呼ばれる流体の画像計測の分野で先駆的な人物で<sup>①</sup>、PIV の開発と乱流計測への応用を学位論文のテーマにしていた私にとっては神様のような存在です。学会等でお会いしたことは何度かありましたが、本人の居室のドアをノックするときはやはり緊張しました。「トントン」とすると、「カムイン」ととても低い声が聞こえたのでドアを開けると、教授がこちらに向いて座っています。「ハイ、ジュン、ハワユウ」とにっこり笑顔で迎えてくれました。一言二言はなしをすると、こんどは講師の Dr. Richard Keane が登場、こちらも以前からよく知っていたので再会を喜び合い、イリノイでの10ヶ月がスタートしました。

さて、到着してまずやらなくてはならないのが住むところを探すことです。早速、Dr. Keane に相談し、電話帳を広げると Apartment のところにいっぱい広告が載っています。その広告のなかに「Town & Country, Complex, プール付き」と書かれたのが目にとまりました。「プール付き」なので結構高そうだな、と思いまし

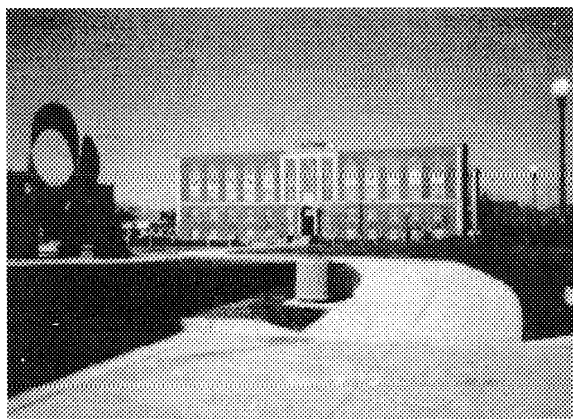


図1 理論応用力学科(TAM)外観

たがとりあえず電話してみると、月々\$460で広さ42畳の1LDKという破格の物件です。その日のうちに契約して次の日にはDr.Keaneに貸していただいたベッドと共に入居しました。日本と違って敷金礼金などがなくて、補償金の\$99だけでアパートが借りられました。

次に必要なものはなんといっても車です。市内にはバスがあるため車が無いと生きられないということはないのですが、やはり便利で行動範囲が大きく広がることを考えると、短い期間で多くの経験をするためにも車は必須です。とはいっても、新車は値段が高いため中古車を買うことになるのですが、すぐには見つからないので、とりあえずレンタカーを借りることにしました。再び電話帳を広げ、Automobile Rentalの項を見ながら片っ端に電話をしたところ、フォードのディーラーで96年式Escortを\$475/月で借りられることを知り、早速契約しました。これは破格の値段で、通常HertzやAvisでは\$600~700はかかるようです。その一ヶ月後にはDr.Keaneに紹介していただいた中古自動車屋でGMのChevrolet Corsica (90年式)というセダンを\$4600で購入しました。結局この車は、帰国直前に中国人の友達に\$2800で売却できたため、レンタカーよりは安い金額で車を所有することができました。

### 3. 食べ物

みそ汁とご飯がないと生きていけない、という日本人は珍しくないでしょう。私も例外ではなく、頻りに日本食を買い求めに行ったことを記憶しています。Champaignにはアジア食材店が数件あり、私がよく通った「Amko」という店にはほとんどすべての日本食、例えば白菜や長ネギなどの生鮮野菜、しばづけや水戸納豆、イカの塩辛や梅干し、喜多方ラーメン、かっぱえびせんやグリコのポッキー、バックのところてんなど、日本の価格の1.2倍程度の安値で購入することができました。お米はもっぱらカリフォルニア米の「錦」を愛好していました。焼き海苔を巻いた梅干し入りおにぎりを学校に持っていったときなどは、「なんだその真っ黒いボールは？」と奇妙な目で見られましたが、その味は最高でした。日本食レストランの「鎌倉」へは、しばしば西野先生と足を運びました。豚カツやチキンかつ、鉄板焼きや寿司パーもあって日本食を堪能できますが、なんといっても店で日本語が使えるのが妙に嬉しく思われました。

日本食以外では、ファーストフード形式の中華料理屋「Yeng Jin」を愛用していました。\$4程度でたらふ

くチンジャオロースが食べられます。メキシコ料理の「Land Mexico」ではチキンエンチラダに生のコリアンダーリーフや激辛のグリーンソースをたっぷりかけて喰い、コップの縁に塩のついたマルガリータカライムをいれたメキシコビールのCoronaを飲みます。ステーキハウスの「Alexander」や「Round Barn」では500gぐらいの肉を平気でたிராげていました。厚さ3cmの肉をザックザック切るときのあの感触、口の中でわき出す肉汁のうまいことうまいこと。

こんなに食を堪能していたにもかかわらず、体重のほうは増えることはありませんでした。というのも昼食はTAMの目の前にあるベーグル屋でホワイトクリームをサンドしたパッピースードのベーグルを食べるに留めていたからです。総じて、食べ物の値段が安いく、いい気になって食べていると本当に太ってしまいますから、適度に食べる量をセーブすることを心がけた方がよいと思います。

### 4. 研究活動

TAMは流体力学と固体力学の2グループに分かれており、正規の教官(Faculty)は両グループあわせて23人です。流体力学グループでは私が直接お世話になったPIVの先駆者Ronald Adrian教授、Vortex Dynamicsで有名な学科長のHassan Aref教授、乱流のDNSで知られるRobert Moser教授、燃焼のDNSが専門のScott Stewart教授などが教鞭を執られています。また、私が滞在していた期間に横浜国大の西野耕一先生も文部省在外研究員として滞在されており、生活のことや研究のことなどでなにかとお世話になりました。

Adrian教授のグループには、私が滞在していた期間に修士学生2名、博士学生3名、研究員5名の計10名が所属していましたが、教授が各人の進捗状況を把握するための個人面談を週1回1時間ずつ行い、極め



図2 筆者居室にて

て多忙な中でも研究に対しては多くの時間を費やしておられました。Adrian教授はPIVで有名なのですが、その他に水平加熱面による自然対流の乱流構造に関する研究<sup>(2)</sup>が教授のライフワークとして挙げられます。Adrian教授の学位論文は氷の上における自然対流がテーマであり、それ以来、一貫して関連テーマの研究を続けてこられました。近年、Adrian教授のもとでDr.Keaneや新潟大学の藤沢延行先生が感温液晶粒子を用いた温度計測によってサーマルプルームの三次元構造の抽出を行っており、私もそのなごれを継承するかたちで、温度場の三次元計測手法の開発を行うことになりました。当初は感温液晶粒子を用いる予定でしたが、よりダイナミックレンジの広い計測法としてレーザー誘起蛍光法(LIF)による温度計測法を開発することとなりました。一般に蛍光強度は温度に依存するため、蛍光染料を溶解した水にレーザーを当てるとその蛍光強度から温度を知ることができます。しかし、このとき問題となるのが励起光強度の変動です。すなわち、温度分布によって光が屈折するため励起光であるレーザー光の強度が変動して、計測結果に多大なる誤差を生じるからです。これを克服するために、ここでは温度依存性の少ない蛍光染料と温度依存性の高い染料を同時に混ぜて、それぞれの蛍光強度の比から温度を求める手法を開発しました(図3)<sup>(3)(4)(5)</sup>。

このような計測法を開発を行うにあたって、光学部品やコンピュータ関連物品の発注を頻繁に行う必要がありました。物品の発注は電話で製造元や代理店から見積もりを採った上で、TAM専属秘書のMrs.Sydneyにお願いしました。Sydneyは極めて迅速で、発注後数日で品物が送られてくることもありました。また、私が日本へ一時帰国した際に秋葉原で購入した電子部品の立て替え分を、インターネットホームページ上の円→ドル換算レートを基にすぐさま現金化してくれたの

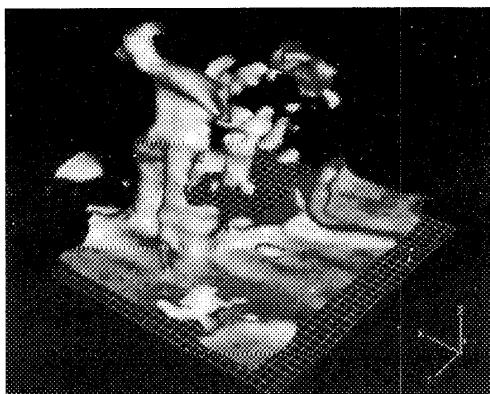


図3 水平加熱面より上昇する温度プルーム

には大変驚きました。立て替え払いのできない日本の国立大学とは大違いです。このほか、物品を購入するために学内の売店を利用することもあります。電気工学科にあるEEストア(EEはElectrical Engineeringの略)では抵抗やコンデンサ、TTL ICやオペアンプ、テスターなど電気工作に必要なものを入手することができますし、化学工学科のストック・ルームでは各種薬品、ビーカーなどのガラス製品、文房具などを手に入れることができます。こうした売店は現金を扱わない代わりに、Facultyの研究費に対応するアカウント番号を示すことで必要な物品を購入することができます。こうしたサービスはアメリカの大学では一般的ですが、日本では聞いたことがありません。

滞在期間中には、上述の温度計測に関する研究の他に、若手のSiggi Throddsen教授と共同で液滴の衝突に関する実験も行いました<sup>(6)</sup>。液滴が落下して固体の水平面に衝突すると、液滴は膜状になって時間と共に広がりますが、その液膜の先端は波状になることは誰しもが見たことのある現象でしょう。この現象をストロボ・ランプで可視化し、波数のレイノルズ数依存性や時間的変化、周方向への波の伝搬などについて結果を得ています。一方、海洋で発生するLangmir渦に関する非線形解析を専門とするWilliam Phillips教授とは、回転円筒内流れにおける不安定性と乱流構造に関して現在も共同研究を行っています。

#### 4. おわりに

Throddsen教授やPhillips教授とは研究以外にも頻繁にお酒を飲みに行ったり映画を見に行ったりと親しくつきあっていました。帰国後も時々電話を通じてお互いの近況を話し合っていますし、学会などで再会したときは実に嬉しいものです。こうした心の通じ合う親友を作ることこそが海外研修での最も重要な意義であると考えております。

#### 文献

- (1) Adrian, R.J., Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **23**, pp.261, 1991
- (2) Adrian, R.J., Ferreira, R., Boderg, T., Turbulent Thermal Convection in Wide Horizontal Fluid Layers, *Exp. Fluids*, **4**, pp.121, 1986
- (3) 榎原 潤, Adrian, R.J., 二色 LIF による多点温度計測法の開発, 第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.421, 1997
- (4) Sakakibara, J., Adrian, R.J., Whole Field Measurement of Temperature in Water using Two-Color Laser Induced Fluorescence, *Experiments in Fluids*掲載予定
- (5) <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakakiba/pivj.html>
- (6) Throddsen, S.T., Sakakibara, J., Evolution of the Fingering Pattern of an Impacting Drop, *Physics of Fluids*掲載予定



## 行事カレンダー

## 本会主催・共催行事

開催日	行事名 (開催地、開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号	
1998年						
5月	27(水) ~29(金)	第35回日本伝熱シンポジウム (名古屋、名古屋国際会議場)	'98.1.23	'98.3.13	第35回日本伝熱シンポジウム準備委員会 藤田 秀 臣 Tel.: 052-789-2702, Fax.: 052-789-2703 E-mail: sympo@siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp http://siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp/sympo	Vol. 36 No. 143
	27(水)	The Frontiers Forum 準備セッション・ (名古屋、名古屋国際会議場: 第35回日本伝熱シンポジウムにて開催)	企画応募 '98.1.23		東京大学生産技術研究所 西尾 茂 文 Tel.&Fax.: 03-5411-0694	Vol. 36 No. 143
	27(水)	第35回日本伝熱シンポジウム・レクチャーコ ース「接触熱抵抗評価法の基礎と最近の進展」 (名古屋、名古屋国際会議場: 第35回日本伝熱シンポジウム会場)	先着100名		東京大学生産技術研究所 西尾研究室 レクチャーコース係 Tel.: 03-3402-6231 内2286, Fax.: 03-3401-6575	Vol. 36 No. 145

## その他の関連行事

開催日	行事名 (開催地、開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	備 考	
1998年						
6月	8(月) ~12(金)	International Symposium on Heat and Mass Transfer in Biological and Medical Engineering (Kusadasi, Turkey)	伝熱研究 参照	伝熱研究 参照	筑波大学構造工学系 石 黒 博 Tel.: 0298-53-5267, Fax.: 0298-53-5207 E-mail: ishiguro@kz.tsukuba.ac.jp	Vol. 36 No. 141 参照
	27(土) ~29(月)	Second Trabzon International Energy and Environment Symposium (TIEES-98) (Trabzon, Turkey)	Abstract '97.11.15		東京農工大学工学部機械システム工学科 望 月 貞 成 Tel./Fax.: 0423-88-7088 E-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp http://www.cc.tuat.ac.jp/motizuki/tiees	Vol. 36 No. 142 参照
7月	8(水) ~10(金)	Microscale Heat Transfer (Eurotherm Seminar 57) (Poitiers, France)	Abstract '98.2.1	'98.5.15	Dr. D. Lemonnier LET-ENSMA Tel.: +33-5-49 49 81 00, Fax.: +33-5-49 49 81 01 E-mail: euro57@let.univ-poitiers.fr	Vol. 37 No. 144 参照
8月	23(日) ~28(金)	第11回国際伝熱会議 (大韓民国、慶州)	Abstract '97.6.2	'97.10.1	九州大学工学部 藤 田 恭 伸	Vol. 36 No. 140 参照
9月	1(火) ~4(金)	8th International Symposium on Flow Visualization (イタリア、ソレント)	Abstract '97.12.22	'98.5.22	Prof. G. M. Carlomagno Facolta di Ingegneria - DETEC Tel.: +39-81-7682178, Fax.: +39-81-2390364 E-mail: carmagno@unina.it http://www.detc.unina.it/8isfv/	
12月	1(火) ~3(木)	第2回高温エネルギー変換システムおよび関 連技術に関する国際シンポジウム (愛知、名古屋大学シンポジウム)			RAN98事務局 Tel.: 052-789-3913, Fax.: 052-789-3910 E-mail: narai@mhlab.nuce.nagoya-u.ac.jp	Vol. 36 No. 142 参照
1999年						
3月	15(月) ~19(金)	第5回ASME-JSME熱工学合同会議 (米国、サンディエゴ)	Abstract '98.3.2	'98.6.15	東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 庄 司 正 弘 Tel.: 03-3812-2111 Ext.6406, Fax.: 03-5800-6987 E-mail: shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp, a-j99@photon.t.u-tokyo.ac.jp (投稿用)	Vol. 36 No. 143 参照
5月	17(月) ~19(水)	The 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-2) (米国、ホノルル)	Abstract '98.8.1	'98.11.10	東京農工大学工学部機械システム工学科 望 月 貞 成 Tel./Fax.: 0423-88-7088 E-mail: psfvip-2@mmlab.mech.tuat.ac.jp http://www.cc.tuat.ac.jp/psfvip-2	
	23(日) ~25(火)	2nd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation (イタリア、ピサ)	Abstract '98.5.15	Mat '99.2.18	Dr. Paolo Di Marco Energy Department, University of Pisa http://docenti.ing.unipi.it/~d6600/pisa99/	Vol. 37 No. 144 参照

<支部活動報告>

北海道支部活動報告

①伝熱セミナー'97講演会

日時：平成9年7月10日(木) 15:00～18:00

場所：室蘭ユースホテル研修室

参加者：23名

内容：講演会

- (1)「Solar Collectorと伝熱」  
Ahmed Hamza H. Ali (室蘭工大院)
- (2)「エコハウスについて」  
鎌田 紀彦 (室蘭工大)
- (3)「雪の利用と伝熱」  
媚山 政良 (室蘭工大)
- (4)「風力タービンについて」  
岸浪 紘機 (室蘭工人)

②伝熱セミナー'97見学会

日時：平成9年7月11日(金) 10:00～13:00

場所：白鳥大橋、入江温水プール

参加者：6名

内容：見学会

③日本伝熱学会北海道支部・断熱材研究会合同講演会

日時：平成9年10月31日(金) 15:00～17:30

場所：北海道大学工学部第二会議室

参加者：22名

内容：講演会

- (1)「環境、エネルギー分野での最近の産業界の伝熱研究の動向とその応用」  
石川島播磨重工業 小熊 正人
- (2)「マイクロカプセル化相変化物質の熱輸送システムへの適用」  
北海道工業技術研究所 武内 洋
- (3)「可変断熱特性を有する断熱材について」  
北海道工業大学 河合 洋明

(北海道支部担当理事 早坂 洋史)

東北支部活動報告

1. 春期講演会

日時 平成9年7月3日(日) 13:30～17:00

会場 石巻専修大学本館2階第一会議室

参加者 20名

内容 「加熱回転円板上の対流熱伝達に関して」

廣瀬宏一(岩手大)

「代替冷媒熱物性研究の最新情報」

東之弘(いわき明星大)

「熱と生物」

鈴木均(石巻専修大)

2. 東北支部総会

日時 平成9年7月7日(月) 15:00～16:30

会場 東北大学工学部青葉記念会館5F大会議室(501)

参加者 8名

内容 平成8年度決算報告

平成9年度予算案

平成9年度事業企画案

その他

[支部第2期(第36期)役員]

支部長 齋藤武雄(東北大)

副支部長 山田悦郎(秋田大)、三浦隆利(東北大)

幹事 戸田二郎(東北大)、太田照和(東北大)、稲村隆夫(弘前大)、佐々木章(秋田高専)、廣瀬宏一(岩手大)、青木秀之(東北大)、青木秀敏(八戸工大)、菅原征洋(秋田大)、千葉陽一(岩手大)、梅宮弘道(山形大)、栗山雅文(山形大)、小川清(日本大)、島田了八(石巻専修大)

監事 幾世橋広(東北大)、五十嵐喜良(東北電力)

3. 秋期伝熱セミナー

日時 平成9年10月18日(土)～19日(日)

会場 青森県十和田湖町焼山洗心荘

参加者 39名

内容 「電気流体力学による熱伝達の促進」

佐藤正毅(八戸工大)

「日本のV-I号(パルスジェット)開発とその前後」

一色尚次(日本大)

「4号機排煙脱硫装置・系列下による省エネルギー上の考察」

野場克久(東北電力)

「北のまほろば山内丸山遺跡」

成田滋彦(青森県教育庁)

[概要] 秋期セミナーは仙台地区を離れ1泊することによって東北地区会員の交流を深めることを目的にしている。今回は講演件数を例年より1件減らして4件として日程に余裕を持たせた。東北支部長の

齊藤武雄先生の挨拶で始まり、上記の講演会が行われた。内容は大学関係者の研究的なテーマから企業現場技術者による事例報告、地元青森で全国的に注目されている遺跡の話までバラエティに富んでいたが、各講演に対し、参加者は熱心に聴講、質問・討論が活発になされた。特に一色先生の御講演は当時の最先端の研究・開発の第一線の状況を時にはユーモアを交えてのお話であったが、若手研究者・学生にはその研究への取り組み方に得るところも多かったように思われた。

#### 4. 特別講演会

日時 平成9年11月7日(金) 13:00～15:00  
会場 東北大学工学部青葉記念会館中研修室(7F)  
参加者 22名  
内容 「Transportation Safety・New Math Lessons Learned」  
Floyd A. Wyczalek (FWLilly Inc.)

[概要] 電気自動車、燃料電池自動車、ソーラーカーおよび超伝導ビークル開発の権威であるFloyd A. Wyczalek氏による特別講演会が行われた。旅客機の安全性について、地上を走る自動車などとその事故率の比較を含む興味ある話題であった。

#### 5. 第1回環境エネルギー技術講演会(共催)

日時 平成9年12月11日(木) 13:00～17:30  
会場 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻中講義室、プロセス解析工学講座  
参加者 25名  
内容 「自然エネルギーを利用した先進住宅の提案」  
齋藤武雄(東北大)  
「ふく射の伝熱制御による省エネルギー技術」  
円山重直(東北大)  
「昨今の省エネルギー開発研究批評」  
新井紀男(名古屋大)  
「世界土地利用エネルギーモデルによるバイオマスエネルギー・ポテンシャル評価」  
山本博巳(電力中央研究所)  
見学会 プロセス解析工学講座

[概要] 日本伝熱学会環境エネルギー技術研究会(主査・三浦隆利)との共催で講演会を行った。太陽エネルギー、燃焼エネルギー利用の今後を考える上で貴重な講演をいただいた。またバイオエネルギー・ポテンシャル評価のためのバイオマス・フロー分析手法に関する研究をご紹介いただいた。

#### 6. 化学工学会東北支部講習会(共催)

日時 平成10年1月26日(月) 13:30～18:00  
会場 東北大学工学部青葉記念会館4F大研修室  
参加者 56名  
内容 「通産省における地球環境対策技術研究」  
水野建樹(資源環境技術総合研究所)  
「東北電力における地球環境対策への取り組み」  
齋藤喜久(東北電力)  
「地球環境の変動と世界の食料需給」  
川島博之(農業環境技術研究所)  
「栗田工業におけるISO14001認証取得活動」  
杉本和雄(栗田工業)  
「資源リサイクルと化学の役割」  
奥脇昭嗣(東北大)

#### 7. 先進工学セミナー(共催)

日時 平成10年3月11日(水)11:00～18:00  
会場 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻中講義室  
参加者 44名  
内容 「流動層研究の昨今」  
堀尾正靱(東京農工大)  
「火災の研究の昨今」  
早坂洋史(北海道大)  
「粉粒体挙動解析の昨今」  
東谷谷(京都大)  
「移動現象解析の昨今」  
荻野文丸(京都大)  
「高効率燃焼研究の昨今」  
香月正司(大阪大)  
「凍結を含む低温環境を利用した工業技術の利用例とその研究状況」  
稲葉英男(岡山大)  
「レオロジーにおける数値解析の昨今」  
梶原稔尚(九州工大)

[概要] COP3などでCO2排出量の削減が叫ばれる中、様々な分野で活躍されている講師による最先端の研究およびその動向について講演いただいた。独創的な化学工学あるいは機械工学的手法による研究結果を解説していただき、参加者との活発な討論が行われた。

(東北支部担当理事 太田照和)

関東支部活動報告

①講演会（日本機械学会百周年記念熱工学シンポジウムと共催）

日時：平成9年7月17日（木）  
 場所：東京国際フォーラム  
 講演（生体における伝熱と物質移動）：  
 (1)生体における伝熱の将来展望：Prof. John C. Chato (University of Illinois)  
 (2)生体組織凍結の医用工学的応用：Prof. Boris Rubinsky (University of California)  
 参加者：50名

②講演会（AIST講演会と共催）

日時：平成9年7月23日（水）  
 場所：工業技術院つくば研究センター共用講堂  
 講演：  
 (1) Advances in low temperature bioengineering : Prof. Boris Rubinsky (University of California)  
 (2)培養細胞へのメカニカルストレス負荷の効果：牛田多加志（工業技術院産業技術融合領域研究所）  
 参加者：30名

③講演会

日時：平成9年8月5日（火）  
 場所：東京農工大学工学部 多目的会議室  
 講演：Heat Transfer Measurements in Ribbed Channels --- An Application of Infrared Thermography --- : Prof. Giovanni M. Carlomagno (Univ. of Naples)  
 参加者：40名

④講演会（日本機械学会熱工学講演会と共催）

日時：平成9年11月5日（水）-11月7日（金）  
 場所：工業技術院筑波研究センター共用講堂  
 基調講演：  
 (1)水素エネルギー技術の開発動向：福田健三（エネルギー総合工学研究所）  
 (2)新冷媒の国内外状況：渡部康一（慶應義塾大学）  
 (3)中間評価を終えたエコエネプロジェクトの概要：米田文重（通商産業省近畿通産局）  
 (4)シリコン融液のマランゴニ対流の不安定性と表面張力温度係数：日比谷孟俊（日本電気）  
 (5)ハイブリッド型人工肝臓の開発における物質移動モデルの有用性：大島宣雄（筑波大学）  
 参加者：200名

⑤シンポジウム（日本伝熱学会マイクロスケール

熱・流体现象に関するシンポジウムと共催）

日時：平成10年3月17日（火）  
 場所：東京工業大学百年記念館 フェライト会議室  
 講演：  
 (1)マイクロマシンにおける熱・流体现象：藤田博之（東京大学）  
 (2)バブルジェットプリンターにおける熱・流体现象：浅井朗（キヤノン）  
 他13件  
 参加者：75名

（関東支部担当理事 山田幸生）

北陸信越支部活動報告

1. 支部設立総会および平成9年度春季講演会

日時 平成9年5月9日（金）～10（土）  
 場所 大安寺温泉萬松閣（福井市）  
 参加者 41名

内容

- ・記念行事 座禅体験と法話（大安禅寺住職）
- ・支部設立総会
  - (1)北陸信越研究グループの事業報告と決算報告、
  - (2)北陸信越支部の設立承認、(3)支部規則の承認、
  - (4)支部役員選出、(5)事業計画と予算案審議、(6)その他
- ・記念祝賀会
- ・グループ講演
  - (1)下向き伝熱面による酒家臭化リチウム水溶液への水蒸気吸収促進  
 姫野修廣(信州大織), 日向滋, 桐田勇治(信州大院), 小林弘典(信州大学)
  - (2)生物体凍結におけるドライアイスの昇華  
 多田幸生(金沢大工), 棚田順子(金沢大院), 将蓉(金沢大工), 林勇二郎
  - (3)液中内におけるドライアイスの昇華  
 澤田壮之(長岡技科大院), 青木和夫(長岡技科大院), 有波亮(長岡技科大院)
  - (4)鉛直平板よりの自然対流熱伝達に及ぼす形状効果  
 竹内正紀(福井大工), 木村照夫, 永井二郎, 林田勝也(福井大院)

[支部第1期(第36期)役員]

支部長 前川 博(新潟大)  
 副支部長 竹越栄俊(富山大), 竹内正紀(福井大)  
 幹事 齊藤明宏(新潟工科大), 姫野修廣(信州大), 平澤良男(富山大), 松田 理(石川高専), 木村照夫(福井大)  
 監事 平田哲夫(信州大), 瀧本 昭(金沢大)

2. 平成9年度秋季セミナー

日 時 平成9年10月17日(金)~18(土)  
 場 所 新潟工科大学, かんぼの宿柏崎(柏崎市)  
 参加者 32名  
 内 容

・グループ講演

- (1)自己拡散に関する分子動力学的研究  
 中嶋誠世(富山大), 岩城敏博(富山大工)
  - (2)周期接触導体間の熱伝導  
 小川豊之(新潟大院), 小林睦夫, 前川博, 松原幸治(新潟大工)
  - (3)平行平板を貫通する円柱まわりのフローパターン  
 森脇晃洋(新潟大院), 前川博(新潟大工), 小林睦夫, 松原幸治
  - (4)矩形導波管を用いたマイクロ波による水の加熱  
 青木和夫(長岡技科大), 綿貫順也(長岡技科大), 横山忠司, 服部賢(長岡技科大)
  - (5)水粒群と水の直接接触式熱交換器の伝熱特性  
 河田剛毅(長岡高専), 服部賢(長岡技科大), 中嶋聖也(長岡技科大), 橋本陽介(富士ゼロックス)
- ・懇親会  
 ・見学会 新潟工科大学, 柏崎刈羽原子力発電所

(北陸信越支部担当理事: 竹内正紀)

関西支部活動報告

①第4回定時総会・講演討論会

日時:平成9年4月25日(金) 13:00-19:30  
 会場:京大会館 101号室  
 参加者:37名  
 講演:  
 ・分散粒子の計測法の現状  
 佐藤行成(日本カノマックス)  
 ・ディーゼル燃焼過程におけるすす生成の可視化

塩路昌宏(京都大学)  
 ・減圧沸騰噴霧の計測とモデリング  
 千田二郎(同志社大学)  
 ・乱流場における液滴挙動の解析  
 松浦敬三(原子燃料工業)  
 総会:議題および報告  
 ・第3期事業報告・決算報告, 第4期事業計画  
 ・予算審議, 第4期役員選出  
 ・支部企画委員会所属の若手の会を解消し, 支部担当研究会”伝熱応用技術研究会”設置(平成11年3月31日まで)  
 ・特別講演:交通機関の高速化と次世代交通機関  
 赤木新介(大阪大学)  
 ・懇親会:京大会館特別室にて

②講演討論会

日時:平成9年7月28日(月) 15:00-17:00  
 場所:大阪大学工業会館  
 参加者:22名  
 講演:  
 ・流動層内管群周りの可視化と伝熱特性  
 小澤 守(関西大学)  
 ・固気混相流による原子力ロケットの推力改善について  
 片岡 勲(京都大学)

③講演討論会

企画:企画委員会・伝熱応用技術研究会 合同企画  
 日時:平成9年12月8日(金) 13:00~17:00  
 場所:神戸大学瀧川記念学術交流会館  
 参加者:26名  
 講演:  
 ・プレートフィン型熱交換器を使用した蒸気焚アンモニア吸収式冷凍機の開発  
 藤田 優(日立造船)  
 ・気候変動に対応した空調機器の取り組み  
 蛭子 毅(ダイキン工業)  
 ・石炭ガス化複合発電技術の現状について  
 藤井健一(川崎重工業)  
 ・テラー・クエット流系の分岐現象と混合特性  
 大村直人(神戸大学)

④講演討論会

日時:平成10年1月30日(金) 13:00-15:00  
 場所:京都大学機械系工学専攻214講義室  
 参加者:27名  
 講演:  
 ・Higher-Order Compact Schemes for Numerical Simulation of Incompressible Flows  
 A. O. Demuren(Old Dominion University)

⑤関西伝熱セミナー

日時：平成9年8月29日（金）-8月30日（土）

場所：いこいの村びわ湖

参加者：78名

講演：

- ・宇宙における排熱技術  
藤井照重（神戸大学）
- ・宇宙用熱輸送装置の開発  
大串哲朗（三菱電機）
- ・宇宙往還機用水フラッシュ蒸発器の開発  
竹村 正（川崎重工業）
- ・生体組織の凍結保存について  
棚澤一郎（東京農工大学）
- ・生体細胞凍結保存の評価  
谷下一夫（慶應義塾大学）
- ・ヒューマンコンフォートメータの研究開発  
松木照幸（コマツ）
- ・自動車開発における流れの数値解析  
姫野龍太郎（日産自動車）
- ・レーザー技術の流体計測への応用  
松本雅則（松下インテック）
- ・バーチャルリアリティを用いた住環境評価  
長光左千男（松下電器産業）
- ・サーバーラボラトリー  
小林健一（東京工業大学）
- ・企業におけるイントラネットとマルチメディア  
秦 務（松下電器産業）  
西條淳夫（三洋電機）  
多久島朗（シャープ）
- ・熱源としての河川水利用に伴う環境影響予測  
中村安弘（大阪大学）
- ・建築環境分野における温熱シミュレーション  
横井睦己（大成建設）
- ・ダイオキシン類削減「新ガイドライン」とごみ  
焼却用廃熱ボイラの計画について  
芝川重博（タクマ）
- ・地球に優しい空調技術—氷蓄熱—  
毛馬大成（ダイキン工業）
- ・冷蔵庫の省エネルギー技術  
下村信雄（松下冷機）

⑥第2回国際熱・物質移動シンポジウム

日時：平成9年12月2日（火）

場所：京都リサーチパーク

参加者：30名

発表論文数：17論文（韓国、中国、台湾、日本、  
日本在住外国人など）

⑦その他

拡大幹事会：

- ・平成9年4月25日（第1回、京大会館）

- ・平成9年7月28日（第2回、大阪大学工業会館）
  - ・平成9年12月16日（第3回、京大会館）
  - ・平成10年3月19日（第4回、大阪大学工業会館）
- 議題：支部事業、支部役員、関西伝熱セミナー、  
国際熱・物質移動シンポジウム、支部企画等審議、  
報告；日本伝熱学会理事会報告、キッズエネル  
ギーシンポジウムなどの審議

⑧伝熱応用技術研究会（関西支部担当）

・第1回会合

日時：平成9年5月30日（金）

場所：シャープ株式会社新庄工場11会議室

参加者：23名

講演：

- ・φ6熱交換器の開発  
吉田かおり（ダイキン工業）
- ・流動層熱交換器における固気混相流の伝熱・  
流動現象  
梅川 尚嗣（関西大学）

・第2回会合

日時：平成9年9月12日（金）

場所：堺市クリーンセンター東第2工場管理棟  
会議室

参加者：24名

講演：

- ・空調用熱交換器の性能解析  
加賀 邦彦（三菱電機）
- ・ごみ発電プラントの運転訓練シミュレータの開  
発  
森原 隆雄（クボタ）

見学：堺市クリーンセンター ごみ焼却スー  
パー発電設備

・第3回会合（企画委員会共催の講演討論会とし  
て実施）

日時：平成9年12月8日（月）

場所：神戸大学瀧川記念学術交流会館

参加者：26名

・第4回会合

日時：平成10年2月20日（金）

場所：川崎重工業 健康保険組合 六甲山荘

参加者：19名

講演：

- ・冷蔵庫開発における熱流体解析の適用事例  
山下 潤（東芝）
- ・コルゲートフィン型ヒートシンクの冷却特性  
田坂誠均（住友金属工業）

（関西支部担当理事 中島 健）

中国四国支部活動報告

①研究討論会および見学会

日 時：平成9年5月9日（金）  
場 所：山口大学共同研究開発センター研究室  
参加者：30名  
内 容：

(1)研究討論会

- ・「直円管内流れの遷移過程」  
須藤浩三（広島大）、檜原秀樹
- ・「壁面からの断続的吹き出しによる熱伝達促進」  
鈴木洋（広島大）、日野本博幸、兼光健一、菊地義弘
- ・「直列異径2円柱挿入の平板強制対流熱伝達への影響」  
鈴木豊彦（鳥取大）、今若直征、王暁、落合義孝、小田哲也
- ・「シミュレーションデザイン法による多管式熱交換器の設計例」  
森岡斎（徳島大）、大岡五三実
- ・「白金表面からの水およびエタノールの沸騰開始」  
水上紘一（愛媛大）、古谷英樹、阿部文明、向笠忍
- ・「中温潜熱蓄熱槽の放熱現象」  
稲葉英男（岡山人）、李中民、堀部明彦、尾崎公一
- ・「一方方向凝固過程における対流制御と結晶成長」  
西村龍夫（山口大）、小谷和雄

(2)見学会

- ・山口大学ベンチャービジネスラボラトリー

②中国四国伝熱セミナー・山口

日 時：平成9年9月12日（金）～13日（土）  
場 所：山口県セミナーパーク  
参加者：72名  
内 容：

- (1)セッション1「環境とリサイクルエネルギーの現状と将来」
- ・基調講演「微量温暖化ガス、酸性雨問題とエネルギー利用」 鈴木善三（資源研）
  - ・講演「環境コンビナートにおけるエネルギー収支」 前田禎彦（宇部興産）
  - ・講演「ごみの燃料化・RDF発電」  
宮本政英（山口大）
  - ・講演「産業用ボイラにおける高効率廃棄物発電への取組み」 有馬謙一（三菱重工）
- (2)セッション2「環境調和型エネルギー利用を考える」
- ・基調講演「環境調和型エネルギーを考える」

- 大岡五三実（徳島大）
- ・講演「省エネルギーと熱の有効利用」  
城下隆（前川製作所）
- ・講演「21世紀の流動層技術」  
中嶋敬（荏原製作所）
- ・講演「石炭の高度利用発電技術」  
伊藤貞夫（中国電力）

③特別講演会

日 時：平成10年1月29日（木）  
場 所：岡山大学工学部機械工学科会議室  
参加者：35名  
内 容：

- ・「低温環境下の伝熱現象」  
福迫尚一郎（北海道大）
- ・「圧縮・吸収ハイブリットヒートポンプの研究開発」  
遠藤肇（三井造船）

（中国四国支部担当理事 森岡 斎）

九州支部活動報告

1. 特別講演会

- ・日時：平成9年9月5日(金)14:00~17:00
- ・会場：九州大学工学部2号館4階405号室
- ・参加者：41名
- ・特別講演：

(1) The Formula of Enthalpy of Liquid and Gas Refrigerants at Saturation Temperature

Zheshao Chen(中国科学技術大学)  
飽和状態における冷媒の液体のエンタルピ、蒸発潜熱および蒸気のエンタルピに関する式が導かれ、それらの式が実験データと良く一致することが示された。

(2) 多成分蒸気の管内凝縮

小山 繁(九州大学機能物質科学研究所)  
多成分系（2成分および3成分）のフロン混合物の管内凝縮に関する理論的および実験的研究について講演が行われた。

(3) Heat Transfer Challenges in Harnessing Fusion Energy

Mohammad Zahid Hasan(佐賀大学理工)  
原子核融合の原理が解説され、その場合に発生する高熱流束伝熱問題(冷却問題)が示された。そして、その冷却法および解析結果が紹介された。

## 2. 伝熱セミナー

- ・日時：平成9年10月3日(金), 4日(土)
- ・会場：国民宿舎めかり山荘(北九州市門司区)
- ・参加者：52名(一般：22名、学生：30名)
- ・開催担当：鶴田隆治(九州工業大学)
- ・講演：13:00~16:10

## (1) 水蒸気を吸着する吸着剤充てん層内の熱および物質伝達に関する数値解析

濱本芳徳(九州大学院)

水蒸気を吸着する吸着剤充てん層内における熱および物質伝達の過渡現象に関する数値解析を行った。解析モデルに考慮した各種のメカニズム、例えば、吸着剤粒子内の物質拡散係数や充てん層の有効熱伝導率の圧力・温度依存性などが現象に及ぼす影響についての検討を行った。

## (2) 非共沸混合冷媒の水平管内の凝縮

石橋 晃(九州大学院)

管断面で蒸気と液のバルクの状態が非平衡にあるとしたモデルを用いた、水平管内の二成分混合冷媒の凝縮特性の予測法の提案を行い、その予測計算結果と実験値の比較、および蒸気相の物質伝達に関する検討を行った。また、この予測法を用いて混合冷媒プロパン/ブタン及びプロパン/イソブタンを用いた向流式熱交換器の凝縮特性の予測を行った。

## (3) 物性値プログラム PROPATH を用いた熱力学線図作画プログラムの作成・開発

桃木 悟(長崎大工)、久松 聖民(長崎大院)、茂地 徹(長崎大工)

冷凍空調分野で使われている2種類の熱力学線図--圧力-エンタルピ線図と湿り空気線図(h-x線図)--を作成するシステムを開発した。得られる線図のフォーマットはPost Scriptである。物性値の計算には流体の熱物性値プログラムパッケージPROPATHを使用しており、PROPATHが網羅している多くの物質に対して作画でき、圧力や温度等の範囲や各構成線の刻み幅の変更も可能である。

## (4) 磁性流体を用いた氷蓄熱の基礎的研究

稲富康利(九電工)

氷蓄熱の製氷方式の一つである過冷却製氷に、磁性流体を用いる応用例を示した。また、磁場の制御による磁性流体の形状変化が水の過冷却解除に及ぼす影響を、下面冷却のモデルで実験的に明らかにした。さらに、二重管式熱交換器において、冷却面に磁性流体の壁面膜を設けた管内連続製氷の特性について実験結果を報告した。

## (5) 平面噴流沸騰系の限界熱流束

王 迅(佐賀大理工)

平面噴流沸騰系の限界熱流束は衝突噴流沸騰系と比較して、その特性が十分明らかにされていない。

また、サブクールの影響についての研究は殆ど行われていない。そこで、密度比が1603~6.6の広範囲に渡り限界熱流束を測定し、噴流速度、加熱面長さ、サブクールの影響について調べた。また、限界熱流束直前の加熱面上の流動状態の観察を行った。飽和状態での限界熱流束に対しては、原村・甲藤が提案する限界熱流束の理論予測式が適用可能であった。飽和・サブクール条件に適用できる面噴流沸騰系の限界熱流束の整理式の提案を行った。

## (6) 高速流下における膜沸騰熱伝達特性の研究

木下満盛(大分大院)

熱間圧延工程におけるワークロールの冷却について拘束された高速流の冷却水と高温伝熱面の実験と解析を行い、伝熱特性を求めることが目的である。実験は流路の高さ2.48 mmの3種類を使い、それぞれ伝熱面温度が130~160℃を定常法で、300~330℃を非定常法で行う。結果として、低温伝熱面(130~160℃)では核沸騰の影響が大きく、高温伝熱面(300~330℃)では流路の形状の違いにより、蒸気膜がけずられて完全な膜沸騰の状態を維持することができなく流速の影響が小さくなると思われる。今後は、さらに伝熱面温度600℃のデータが必要である。

## (7) 円筒型浸透膜内の物質伝達について

一法師茂俊(熊本大工)

円筒型浸透膜外に溶媒が存在し、膜内を溶液が流れる場合に生じる浸透量を整理することを試みた。浸透量は浸透現象と対流による物質伝達の二つの過程に依存すると考え、浸透現象に関してはKatchalskyらの輸送方程式およびvan't Hoffの式を、対流による物質伝達に関しては気体における物質伝達の整理法として知られるステファンの法則に基づいた整理法を溶液に拡張することにより新たに提案された整理式を用い、実験値を±25%以内で整理することができた。

・特別講演：16:30~17:30

高温水蒸気加熱器の開発と実用化

西川日出男(九州工大工)

講演者が三菱重工業(株)に勤務中に経験された厳しい条件下の水蒸気加熱器の開発について講演された。特に、高温・高圧下で使用するバルブの開発で苦労された経験談には興味を引かれた。

## 3. 講演会

- ・日時：平成10年1月13日(火) 14:30~17:00
- ・会場：九州大学工学部2号館4階405号室
- ・参加者：32名
- ・特別講演  
伝熱工学的アプローチによる高分子射出成形高品位化



黒崎晏夫(電気通信大学)

高品位な射出成形品を作るための可視化実験を行って、問題点を明らかにし、CO<sub>2</sub>ガスレーザを照射する方法によって高品位化に成功した例が示された。

・講演

サイクル計算における PROPATH の応用

山口俊樹(長崎大学)、山口朝彦(長崎大学)、  
金丸邦康(長崎大学)、伊藤猛宏(九州大学)

ガスタービンサイクルと蒸気サイクルを組み合わせたコンバインドサイクルを始めとする発電プラントのサイクル計算、またそのサイクルの作動媒体をアンモニア-水混合物とした場合のサイクルを計算するために、PROPATH(流体の熱物性プログラムパッケージ)を用いて開発したサイクル構成機器のプログラムパッケージと、PROPATHをフローシートシミュレーションプログラム ASPEN PLUS(Aspen Technology, Inc.)へ組み込んだ例が報告された。

#### 4. 特別講演会「熱工学研究の最先端」

- ・日時：平成10年3月10日(火)10:00~17:10
- ・会場：福岡県春日市春日公園 6-1 九州大学筑紫  
キャンパス 共通管理棟大会議室
- ・参加者：50名

・特別講演

- (1) 界面活性剤による吸収促進  
飛原英治(東京大学)
- (2) 地球環境保全を考慮した熱利用システムと作動流体  
佐藤春樹(慶応義塾大学)
- (3) 空調用熱交換器の技術課題とメーカーにおける開発  
蛭子 毅(ダイキン工業株式会社)
- (4) 燃焼と高効率力学エネルギー変換  
越後亮三(芝浦工業大学)
- (5) 地殻環境熱工学からの発想による無侵襲  
血流計の提案  
幾世橋廣(東北大学)
- (6) 生体の凍結保存  
棚澤一郎(東京農工大学)

この講演会は九州大学機能物質科学研究所と伝熱学会九州支部の共催で開催された。6名の講師の先生方はその分野の第一線でご活躍中の若手の研究者および其の界を引っ張ってこられたリーダー格の先生で、大変有意義な講演会であった。

(九州支部担当理事 井村英昭)

## 第35回日本伝熱シンポジウム

平成10年5月27日～29日, 名古屋国際会議場

主催 日本伝熱学会 共催 日本機械学会, 化学工学会 他 後援 日本学術会議

### 【開催日】

平成10年5月27日(水)～29日(金)

### 【講演会場】

名古屋国際会議場(名古屋市熱田区熱田西町1-1)

TEL:(052)683-7711 FAX:(052)683-7777

金山駅(JR東海道本線・中央線, 地下鉄名城線, 名鉄)より地下鉄名城線・名古屋港行き「日比野」1番出口, または同・新瑞橋行き「西高蔵」2番出口下車徒歩5分(名古屋港行きにご乗車になり日比野駅を利用された方が便利です。)

交通の詳細は会議場のホームページをご参照下さい。  
<http://www.u-net.city.nagoya.jp/ncc/index.html>

### 【シンポジウム参加費】

当日申込(講演論文集は含みません。)

一般(1名):8,000円 学生(1名):4,000円  
(事前申込は4月17日をもって締め切りました。)

### 【講演論文集】

○シンポジウム参加者(会場受付にて受け取り)

日本伝熱学会会員:無料(1セット)  
非会員:8,000円(1セット)

○シンポジウム不参加者

日本伝熱学会会員:無料(1セット)で後日郵送  
非会員:9,000円(1セット・送料込み)で後日郵送

○追加注文

会場受け取り:8,000円(1セット)  
後日郵送:9,000円(1セット・送料込み)

### 【懇親会】

日時:5月28日(木) 18:30～20:30

会場:サイプレスガーデンホテル  
(名古屋市熱田区金山町1-9-8)

TEL:(052)679-1661 FAX:(052)679-1662  
金山駅(JR東海道本線・中央線, 地下鉄名城線, 名鉄)南口より徒歩1分

会費:当日申込

一般7,000円(同伴者1名は無料)  
学生3,000円

(事前申込は4月17日をもって締め切りました。当日申込の懇親会費は, シンポジウム講演会場総受付でお支払い下さい。)

### 【参加・講演の問い合わせ先】

〒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 機械工学専攻  
第35回日本伝熱シンポジウム事務局・廣田真史  
TEL:(052)789-2702 FAX:(052)789-2703  
E-mail:sympo@siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp  
<http://siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp/~sympo>

### 【シンポジウム受付】

5月27日(水)8:50から名古屋国際会議場  
2号館1階ロビーにて行います。

### 【発表の形式】

セッションの運営は座長に一任しますが, 発表時間は1題目につき10分です。なお, 準備委員会が用意できる発表機器は, オーバーヘッドプロジェクター(OHP)のみですのでご了承下さい。

### 【レクチャーコース】

日時:5月27日(水) 18:30～20:30

会場:A室(名古屋国際会議場 2号館1階)  
テーマ:接触熱抵抗評価法の基礎と最近の進展

講師:鳥居 薫 教授(横浜国立大学)  
参加費:一般:1,000円, 学生:500円  
(当日会場にてお支払い下さい。)

定員:100名

### 【The Frontiers Forum 準備セッション】

日時:5月27日(水) 18:30～20:30

会場:B室(名古屋国際会議場 2号館2階)

テーマ(1)「分子伝熱のフロンティア研究」  
企画代表者 井上剛良(東工大),  
丸山茂夫(東大), 小原拓(東北大)

テーマ(2)「熱・流動におけるスケール効果」  
企画代表者 芹澤昭示(京大)

参加費:無料

### 【日本伝熱学会第36期総会】

日時:5月28日(木) 15:20～16:30

会場:K室(名古屋国際会議場 1号館4階)

### 【国際セッション】

日時:5月28日(木) 16:40～17:40

会場:I室・J室(名古屋国際会議場 1号館3階)  
(2セッション並行で開催します。)

I室:題目 "Constructual Theory: Growth, Shape and Structure for Minimal Thermal Resistance Between a Volume and One Point"

講師 Adrian Bejan 氏 (J. A. Jones Professor of Mechanical Engineering, Duke University)  
司会 長坂雄次(慶応人学)

J室:題目 "Effect of Mass Diffusion on Boiling Heat Transfer of Binary Mixtures"

講師 Satish G. Kandlikar 氏 (Professor of Mechanical Engineering Department, Rochester Institute of Technology)  
司会 藤田恭伸(九州大学)

### 【宿泊・弁当(昼食)の問い合わせ先】

近畿日本ツーリスト・団体開発事業部 岩月・中野  
TEL:(052)583-8166 FAX:(052)583-8169

## 第 1 日 5月27日 (水)

## &lt;A 室&gt;

- 【乱流構造と伝熱1】 9:10~10:30  
座長 太田 照和 (東北大工)
- A111 吹き出し吸込みによる摩擦低減制御下にある壁面乱流温度場の DNS  
黒田 明慈 (北大工), \*広瀬 敬幸 (北大院),  
工藤 一彦 (北大工)
- A112 ダクト内液乱流における縦渦への高分子の影響  
\*奥田 崇之 (名古屋役所), 村井 進 (京工織大院),  
花 英俊, 萩原 良道 (京工織大), 田中 満
- A113 曲管における流動抵抗低減剤添加水の流動及び熱伝達特性  
稲葉 英男 (岡山大工), \*春木 直人 (岡山大院),  
堀部 明彦 (岡山大工), 尾崎 公一
- A114 Local Heat Transfer and Flow Behavior in a Flow Passage with 60°V Ribs  
\*Robert KIML (Tokyo Univ. of A. & T.), 望月 貞成,  
村田 章

- 【乱流構造と伝熱2】 10:40~12:00  
座長 宮内敏雄 (東工大)
- A121 自軸回転を有する円管内乱流熱伝達の DNS  
\*佐竹 信一 (富山大工), 功刀 資彰 (東海大工),  
嶋田 哲 (富士通ゼネラル)
- A122 スパン方向に温度勾配を設けたチャンネル乱流のスペクトル法による直接数値解析  
\*青木 泰高 (京大院工), 岩井 裕,  
松原 幸治 (新潟大院), 鈴木 健二郎 (京大院工)
- A123 開水路乱流場における層状渦構造と自由表面との相互干渉  
\*永翁 龍一 (資環研)
- A124 自由表面を伴う乱流場におけるスカラー輸送の直接数値シミュレーション  
寺尾 忠久 (東大院), 水矢 亨,  
\*花崎 秀史 (東大工, 東北大), 笠木 伸英 (東大工),  
加地 邦彦 (東大)

- 【乱流構造と伝熱3】 13:20~14:40  
座長 河村 洋 (東理大)
- A131 減衰等方性固気二相乱流における熱輸送 (第1報 One-Way Coupling)  
\*佐藤 洋平 (機械研), Simonin Olivier (IMFT),  
菱田 公一 (慶大理工)
- A132 減衰等方性固気二相乱流における熱輸送 (第2報 Two-Way Coupling)  
佐藤 洋平 (機械研), 早川 啓朗 (慶大院), \*鈴木 智之,  
菱田 公一 (慶大理工)
- A133 乱流の coherent 微細構造の統計的性質  
店橋 護 (東工大), 宮内 敏雄, \*岩瀬 識 (東工大)

- A134 Analysis of Turbulent Czochralski Convective Flows by Orthogonal Decomposition  
Samir Rahal (航技研), 吉原 正一, 大西 充, \*東 久雄

- 【乱流構造と伝熱4】 14:50~16:10  
座長 中部 主敬 (京大工)
- A141 単一気泡の変形と周囲流れの乱流構造  
\*藤原 暁子 (慶大院), 俣田 英裕,  
菱田 公一 (慶大理工), 前田 昌信
- A142 円柱による周期的発生渦の壁面との干渉による崩壊現象  
\*川田 将嗣 (岐阜大院), 磯口 健太 (岐阜大学),  
三松 順治 (岐阜大工)
- A143 粗面をもつ正方形流路内の乱流熱伝達  
廣田 真史 (名大), 藤田 秀臣, \*小荒井 元一 (名大院),  
湯浅 裕行
- A144 乱流境界層の準秩序構造に及ぼす逆圧力こう配の影響  
\*保浦 知也 (名工大), 若杉 知寿, 辻 俊博 (名工大),  
長野 靖尚

## &lt;B 室&gt;

- 特別セッション  
【生産において期待される伝熱研究】  
「エネルギー重電環境機器など」 9:10~10:30  
オーガナイザー: 真家 孝 (石川島播磨), 福山 佳孝 (東芝)  
座長 真家 孝 (石川島播磨)
- B111 熔融塩炉1次系に生ずる崩壊熱による自然循環流れ  
\*三田地 紘史 (豊橋技科大),  
小田 勝也 (豊橋技科大), 鈴木 孝司 (豊橋技科大),  
中西 康彦
- B112 ガスタービンシステムのエクセルギー解析 (燃焼に伴うエクセルギー損失特性)  
\*高城 敏美 (阪大工), 木下 進一
- B113 コンバインドサイクル発電用排熱回収ボイラにおける高性能伝熱管の開発  
\*大橋 幸夫 (東芝, 研究開発センター), 永根 浩平,  
鷲田 朗秀, 木村 賢一
- B114 誘導電動機の接触熱抵抗と冷却性能  
\*高橋 研二 (日立機械研), 桑原 平吉, 川崎 伸夫,  
梶原 憲三 (日立), 藤垣 哲朗

- 特別セッション  
【生産において期待される伝熱研究】  
「エレクトロニクス・家電・半導体など」 10:40~12:20  
オーガナイザー: 石塚 勝 (東芝), 大串 哲郎 (三菱電機)  
座長 石塚 勝 (東芝)
- B121 ハイブリッド筐体によるサブノートパソコンの冷却技術  
\*宮原 昭一 (富士通研), 木村 浩一, 西井 耕太, 石塚 賢伸
- B122 超薄型ノートパソコンの熱設計  
小林 孝 (三菱電機), \*大串 哲郎, 角 憲明, 藤井 雅雄

- B123 マイクロチャンネル熱交換技術の開発  
\*川野 浩一郎 (東芝), 水上 浩, 岩崎 秀夫, 石塚 勝
- B124 冷蔵庫用蒸発器の空気側三次元熱流体解析(第1報:6列蒸発器の定常解析)  
\*小井戸 哲也 (東芝), 北川 晃一, 山下 潤
- B125 パソコン版熱流体シミュレーションシステムの開発  
\*小川 修 (松下電器産業), 長光 左千男, 服部 宜弘, 今川 常子, 児玉 久

特別セッション

【廃棄物未利用エネルギーなどの有効利用における伝熱】  
13:20~17:30

オーガナイザー: 藤井 照重 (神戸大), 畑田 敏夫 (日立機械研), 佐藤 幹夫 (電中研)

13:20~15:20

座長 吉川 邦夫 (東工大)

- B131 冷凍機冷却式超電導磁石を有する連続磁気分離装置の開発  
\*磯上 尚志 (日立機械研), 佐保 典英, 高木 武夫, 森田 篠
- B132 金属微粉固化体の力学・伝熱特性  
中原 崇文 (愛工大), 吉川 俊夫,  
\*岡田 教嗣 (愛工大), 木平 勉 (㈱沖テック), 鈴木 恒 (岡本プレス㈱)
- B133 太陽熱集熱パターンによる水素吸蔵合金冷凍システムの最適運転法の検討  
\*広 直樹 (三洋電機メカトロニクス研究所), 名迫 賢二, 松本 和夫, 大隅 正人
- B134 ヒートポンプ利用下水採熱システムの開発—江別アメニティ下水からの採熱試験結果について  
\*渡辺 伸央 (北海道電力総合研究所), 渡辺 恭吾, 小林 裕一
- B135 下水を利用した熱交換システムの検討  
\*楠本 寛 (日立機研), 福島 敏彦, 寺崎 政敏 (日立土浦)
- B136 コンバインドプラントの排ガスボイラにおけるエクセルギー評価  
\*山下 智也 (神戸大), 藤井 照重, 浅野 等, 杉本 勝美

15:30~17:50

座長 畑田 敏夫 (日立機械研)

- B141 スーパーごみ発電プラント運転訓練シミュレータ  
\*都志 武史 (㈱クボタ), 筒井 泰治, 平井 祐則, 和田 從義, 浅野 等 (神戸大), 藤井 照重
- B142 高温空気をを用いた廃棄物の燃焼/ガス化 (その1:廃棄物燃焼/ガス化システム)  
\*吉川 邦夫 (東工大)
- B143 高温空気をを用いた廃棄物の燃焼/ガス化 (その2:コンパクト高温空気予熱器の開発)  
\*小坂 仁 (東工大), 岩橋 崇, 吉川 邦夫 (東工大), 持田 晋 (日本ファーンエス工業㈱), 坂井 勝 (電源開発), 村松 清貴

- B144 高温空気をを用いた廃棄物の燃焼/ガス化 (その3:高温空気燃焼炉の伝熱特性)  
\*岩橋 崇 (東工大), 小坂 仁, 吉川 邦夫 (東工大), 松尾 護 (日本ファーンエス工業㈱)
- B145 ごみ焼却灰溶融炉の溶融熱性能の研究  
\*黒田 幸生 (石川島播磨重工), 水野 昌幸, 成澤 道則, 井上 里志, 小能 正人
- B146 ごみ焼却炉における廃棄物エネルギーなどの有効利用  
\*桂木 格 (川崎重工), 菊池 昭二美
- B147 ごみ焼却炉内熱流体シミュレーション  
\*劉 大偉 (タクマ), 西垣 正秀, 古谷 忠裕

<C室>

【回転場の流動と伝熱1】 9:10~10:30

座長 望月 貞成 (東京農工大)

- C111 円筒容器内の水平な加熱回転円板からの対流熱伝達  
廣瀬 宏一 (岩手大工), \*坂坂 和郎 (岩手大院), 岩泉 剛 (岩手大), 横山 孝男 (山形大工)
- C112 液面に静止円板をもつ回転円筒容器内における非定常熱流動現象  
稲室 隆二 (京大工), \*東田 泰斗 (京大院), 荻野 文丸 (京大工)
- C113 通過流を伴う回転円盤対向面の熱伝達  
\*河村 隆雄 (岐阜高専), 本田 博司 (アイコクアルファ)
- C114 衝突噴流による回転円板からの熱伝達  
\*野尻 正理 (岐大院), 土方 保夫 (岐大), 桧和田 宗彦 (岐大工), 熊田 雅弥

【回転場の流動と伝熱2】 10:40~12:00

座長 荻野 文丸 (京大工)

- C121 ツイスト座標系を適用したスワール流の数値解析  
\*貝森 公大 (東北大院), 佐藤 親宏, 戸田 三朗 (東北大工), 橋爪 秀利
- C122 永久磁石式渦電流リターダの冷却特性 (リターダフィン角度の影響)  
\*吉田 敬介 (九大), 篠原 健治郎 (住友金属), 石田 昭佳
- C123 貫流を伴う回転キャビティ内の流れと熱伝達  
\*吉永 潔 (農工大), 齊藤 弘順, 望月 貞成 (農工大), 村田 章 (農工大 BASE)
- C124 軸流を伴う回転二重円管内の局所熱伝達特性  
\*宮城 哲哉 (岐大院), 熊田 雅弥 (岐大工), 池山 正隆 (IHI)

【生産加工プロセスにおける流動と伝熱1】 13:20~15:00

座長 横山 孝男 (山形大工)

- C131 エキシマレーザーによる高分子材料のアブレーションに関する基礎的研究 (第3報)  
石黒 博 (筑波大構造), \*山本 博之 (筑波大院), 小河原 崇博, 菊地 薫 (機械技研), 山田 幸生

- C132 エキシマレーザーアブレーションにおける被加工高分子材料の挙動の検討  
伏信 一慶 (東工大), \*横山 康 (東工大院),  
佐藤 勲 (東工大), 黒崎 晏夫 (電通大)
- C133 キャリア輸送特性を利用した半導体のエキシマレーザーアブレーションのモニタリング手法  
伏信 一慶 (東工大), \*深井 優 (東工大院),  
佐藤 勲 (東工大), 黒崎 晏夫 (電通大)
- C134 マイクロ波加熱成形による膜状 PVC 樹脂の性能評価  
\*内藤 誠仁 (名大院), 板谷 義紀 (名大工), 架谷 昌信
- C135 外部誘導型低温プラズマ発生器の開発とその応用  
\*稲田 茂昭 (群馬大), 岸 勇祐 (東京パーツ工業),  
土屋 昌久, 加藤 篤
- 【生産加工プロセスにおける流動と伝熱2】 15:10~16:50  
座長 黒崎 晏夫 (電通大)
- C141 チョクワルスキー単結晶成長プロセスのモデリング  
荻野 文丸 (京大工), 稲室 隆二, \*小堂 厚司 (京大院)
- C142 ホットランナ内樹脂固化・流動層実験とシミュレーション  
横山 孝男 (山形大工), \*佐藤 敦 (富士ゼロックス株),  
伊藤 忠一 (世紀株)
- C143 液相メタノール合成反応における触媒内の輸送現象の影響  
\*劉 秋生 (神戸商船大), 竹村 文男 (機械技研),  
矢部 彰, 梶山 士郎 (三菱ガス化学)
- C144 高温板のラミナ水冷特性に及ぼす板移動速度の影響  
\*原口 洋一 (住友金属), 播木 道春, 東海林 成人
- C145 高分子ポリマー液滴の変形流動時の非定常挙動  
\*三松 順治 (岐阜大工), 佐藤 信人 (岐阜大学)
- 【ふく射物性】 17:00~18:20  
座長 上宇都 幸一 (大分大工)
- C151 Simple Approximations for the Spectral Radiative Properties of Pulverized Coals in Combustors  
Noam Lior (University of Pennsylvania (USA)),  
Changsik Kim, \*Norio Arai (Nagoya Univ.)
- C152 LBLデータベースを用いた単色放射強度の絶対測定  
円山 重直 (東北大流体研), \*柏 隆之 (東北大学),  
島村 健男 (東北大院)
- C153 高速ふく射スペクトル法の開発 -金属表面の温度・性状診断への応用-  
\*牧野 俊郎 (京都大), 羽田 哲 (京都大院),  
下清水 良之, 若林 英信 (京都大)
- C154 半無限固体表面におかれた繊維による散乱  
\*山田 純 (山梨大)
- D111 水平平行二平板間自然対流における対向壁面への熱伝達  
\*池田 雅弘 (芝浦工大), 平田 賢 (芝浦工大)
- D112 大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱  
\*北村 健三 (豊橋技科大), 上岩 史欣 (豊橋技科大院),  
三角 利之 (鹿児島高専)
- D113 直列二円柱まわりの強制対流から自然対流への遷移におけるヒステリシス現象  
\*プラボウオ (広島大院), 本村 洋 (広島大),  
鈴木 洋 (広島大工), 菊地 義弘
- D114 流下流体による狭い同心円筒間ギャップに生じる自然対流制御  
\*横堀 誠一 (東芝), 栗田 智久, 飛松 敏美, 小倉 健志,  
末園 暢一, 松本 富士男
- 【密閉空間内の自然対流1】 10:40~12:20  
座長 尾添 紘之 (九州大)
- D121 仕切り板のある密閉容器内の自然対流熱伝達解析  
\*脇屋 傑 (玉大院), 亀ヶ谷 博 (玉大工)
- D122 円筒容器内対流における組織構造に関する研究  
古本 隆行 (名大院), 堀田 和弘, \*辻 義之 (名大工),  
久木田 豊
- D123 密閉容器内の自然対流場に対する加振の影響  
\*石田 秀士 (阪大基礎工), 新開 誠 (阪大院),  
木本 日出夫 (阪大基礎工),
- D124 非線形性の強い問題に対するタイムスペース法の適用  
齋藤 武雄 (東北大工研), \*若嶋 振一郎 (東北大院)
- D125 側壁加熱を受ける容器内二層流の熱対流  
\*アンヘル ベタンクルト (計算流体研), 橋口 真宜,  
桑原 邦郎 (宇宙研), 玄 在民 (KAIST)
- 【密閉空間内の自然対流2】 13:20~15:00  
座長 辻 俊博 (名工大)
- D131 二重拡散ロールオーバー現象に対する加熱条件の影響  
\*宗像 鉄雄 (機械研), 棚澤 一郎 (東京農工大)
- D132 温度と濃度浮力が逆方向に働く場合の気体の二重拡散対流  
\*鎌倉 勝善 (富山高専), 尾添 紘之 (九州大機能研)
- D133 水平温度勾配下における二重拡散界面上に形成されるブルーム  
西村 龍夫 (山口大工), \*作良 総俊 (山口大工院),  
後藤 邦彰 (山口大工)
- D134 二重拡散対流によって生じた多層対流層の吸収合体機構  
\*日向 滋 (信州大織), 姫野 修廣, 桜井 正幸,  
岩佐 昌征, 市村 市夫
- D135 二重円管内密度成層中での自然対流熱伝達  
\*姫野 修廣 (信州大織), 日向 滋,  
渡辺 雅邦 (信州大院), 井上 忍 (信州大学)
- 【密閉空間内の自然対流3】 15:10~16:50  
座長 齋藤 武雄 (東北大工研)
- D141 垂直平行平板間に発達する自然対流の乱流熱伝達  
\*稲垣 照美 (茨大工), 丸山 真治 (茨大院)
- D142 偏心した水平二重円管内の水の自然対流熱伝達 (第2報)  
廣瀬 宏一 (岩手大工), \*八戸 俊貴 (岩手大院),  
武藤 克博 (岩手大)

&lt;D室&gt;

【物体周りの自然対流1】 9:10~10:30

座長 宮本 政英 (山口大工)

- D143 鉛直面に加熱部と冷却部を共有する矩形流体槽内の自然対流  
\*石原 勲 (関西大工), 松本 亮介, 妹尾 聡 (長谷川鉄工)
- D144 種々の繊維屑を充填した密閉容器内の自然対流熱伝達  
\*能登 紀幸 (福井大院), 木村 照夫 (福井大工), 竹内 正紀, 永井 二郎
- D145 矩形容器内における水・固体微粒子懸濁液の自然対流  
\*大山 和也 (青学大院), カン チェドン (青学大), 岡田 昌志

【物体周りの自然対流2】 17:00~18:00

- 座長 北村 健三 (豊技大工)
- D151 衣服内気候に関する研究 (第1報) 水平円柱周りの自然対流熱伝達  
\*大場 理世 (神戸大院), 中島 健 (神戸大工), 能登 勝久
- D152 三次元自然対流の熱伝達の抑制と促進 (流体種類による効果)  
能登 勝久 (神戸大工), \*三橋 聡 (神戸大院), 中島 健 (神戸大工)
- D153 傾斜矩形管内のヘリウム/空気・対向置換流に関する実験的研究  
\*徳井 洋介 (千葉大学), 田中 学 (千葉大工), 菱田 誠, 文沢 元雄 (原研)

<E室>

【遷移沸騰】 9:10~10:10

- 座長 吉田 敬介 (九大工)
- E111 気泡微細化沸騰における気泡挙動と固液接触  
\*兎原 剛史 (東北大院), 熊谷 哲 (東北大工)
- E112 真空中での非平衡蒸発に関する基礎研究 (第2報)  
\*柴田 勇木 (東北大院), 江原 真司, 橋爪 秀利 (東北大工), 戸田 三朗
- E113 衝突噴流系沸騰熱伝達に関する研究 (過熱面上の動的接触角の測定)  
\*大竹 浩靖 (Purdue 大), Raymond Viskanta, Frank P. Incropera, 小泉 安郎 (工学院大)

【核沸騰1】 10:20~12:20

- 座長 水上 紘一 (愛媛大工)
- E121 Boiling Heat Transfer Enhancement in a Small Diameter Tube Below Atmospheric Pressure on Natural Condition  
\*Chowdhury Feroz MD. (茨城大理工), 神永 文人 (茨城大工), 後藤 功次 (茨城大理工), 松村 邦仁 (茨城大工)
- E122 微小発熱体からの沸騰気泡の挙動  
\*下窪 貴史 (東工大学), 高木 周 (東工大工), 井上 剛良
- E123 ニオブ (Nb) 薄膜超電導体の熱安定性 (第2報)  
伊藤 猛宏 (九大工), \*久保田 裕巳

- E124 パルス加熱される金属細線上の蒸気生成・消滅挙動 (広い加熱速度範囲における観測結果)  
飯田 嘉宏 (横国大工), 奥山 邦人, \*佐々木 博邦 (横国大院), 金 政焄
- E125 ナノ秒パルスレーザー加熱による核生成と圧力発生  
\*上野 一郎 (東大工院), 井田 徳昭 (東大工学), 庄司 正弘 (東大工)
- E126 伝熱面を往復運動させた場合の沸騰熱伝達  
\*北原 章 (福島高専), 亀井 秀也

【核沸騰2】 13:20~15:00

- 座長 塩津 正博 (京大)
- E131 過熱面上での接触角に関する研究  
\*永井 二郎 (福井大工), 竹内 正紀, 木村 照夫, 金島 長規 (福井大院)
- E132 白金表面からのエタノールの沸騰開始  
\*水上 紘一 (愛媛大), 向笠 忍, 阿部 文明
- E133 核沸騰特性に及ぼす表面性状の影響  
\*土師 生也 (東船大), 留森 英樹 (東船大院), 本谷 大樹, 刑部 真弘 (東船大)
- E134 液体窒素のフラッシングに関する実験的研究 (壁面性状の違いによる現象への影響)  
\*渡辺 敏晃 (水産大), 森越 義和 (室蘭工大院), 花岡 裕 (室蘭工大), 戸倉 郁夫
- E135 溶融金属面での強制対流沸騰熱伝達に関する実験的研究  
\*西村 聡 (電中研), 植田 伸幸, 西 義久, 古谷 正裕, 木下 泉, 山口 剛司 (電通大)

【核沸騰3】 15:10~16:50

- 座長 庄司 正弘 (東大工院)
- E141 気泡成長に伴う伝熱面温度変化の数値解析 (単一気泡の場合)  
\*林 尚男 (九大院), 白 強 (九大工), 藤田 恭伸
- E142 単一気泡成長の数値シミュレーション  
\*白 強 (九大工), 藤田 恭伸
- E143 液体ナトリウム中の水平円柱における沸騰開始過熱度  
\*塩津 正博 (京大), 畑 幸一 (京大エネ理工研), 竹内 右人, 白井 康之 (京大), 濱 勝彦 (京大エネ理工研), 堺 公明 (動燃)
- E144 混合冷媒HFC-134a/HCFE-123のプール核沸騰熱伝達  
藤田 恭伸 (九大工), \*筒井 正幸
- E145 非凝縮性気体を含む液体の減圧沸騰開始 (第2報: 液体中の気体の拡散に関する改良)  
\*向笠 忍 (愛媛大工), 和田 一宏 (愛媛大院), 水上 紘一 (愛媛大工)

【沸騰凝縮利用機器】 17:00~18:20

- 座長 吉田 駿 (九大)
- E151 ペローズ型気液相変化マイクロアクチュエータのモデリング  
\*加藤 重雄 (日本工大), 田端 真佐子 (日本工大院), 野口 隆弘

- E152 次世代低温度差エンジンに関する研究  
齋藤 武雄 (東北大工研), \*早川 公視 (東北大院)
- E153 Solar-Powered Organic Rankine Systems for Domestic Electric-Power Generation  
\*Cuan-Hsien Kuo (Univ. Michigan), Wen-Jei Yang, 新井 紀男 (名大高エネ), 古畑 朋彦, 森 幸一 (東洋テクニカ),
- E154 銅粒溶射による沸騰伝熱促進管  
望月 正孝 (フジクラエネルギー技術開発), Aliakbar Akbarzadeh (メルボルン工大), 益子 耕一 (フジクラエネルギー技術開発), Thang Nguyen, 永田 雅克, \*齋藤 祐士
- <F 室>
- 【蓄熱蓄冷1】 9:10~10:30  
座長 佐藤 勲 (東工大)
- F111 相変化物質スラリーの伝熱特性  
\*大谷 雄一 (三菱重工), 川田 章廣, 角谷 修二, 長 伸朗 (中部電力), 渡邊 激雄, 神農 良英
- F112 氷スラリーの伝熱特性  
\*長 伸朗 (中部電力), 渡邊 激雄, 神農 良英, 川田 章廣 (三菱重工), 角谷 修二, 大谷 雄一
- F113 低濃度水溶液を利用することによるスタティック型氷蓄熱器の高性能化に関する研究  
\*笹口 健吾 (熊本大), 吉山 智明 (熊本大院), 大坪 孝広 (熊本大学)
- F114 改良もぐり堰水蓄熱槽とダイナミック製氷装置を組合わせたピークシフト設備  
\*梁取 美智雄 (日立機械研), 大平 昭義, 住友 健次 (日立半導体事業部), 宮下 健太郎, 桜井 浩二, 野口 好之
- 【蓄熱蓄冷2】 10:40~12:20  
座長 渡邊 激雄 (中部電力)
- F121 急減圧下に曝された水滴の蒸発による凍結挙動  
佐藤 勲 (東工大), \*橋本 優 (東工大)
- F122 水平固体冷却面における水溶液の凍結と離脱  
\*平田 哲夫 (信州大工), 石川 正昭, 長坂 恒次 (信州大院)
- F123 流動水溶液による冷却管内製氷特性  
稲葉 英男 (岡山大工), 堀部 明彦, 尾崎 公一, \*二浦 秀俊 (岡山大院)
- F124 振動冷却面におけるスラッシュアイスの生成挙動  
\*河部 弘道 (専大短大), 福迫 尚一郎 (北大院工), 山田 雅彦, 柳田 弘毅 (北大院)
- F125 水平矩形流路内を流れるスラッシュアイスの採冷熱特性  
\*川南 剛 (北工大), 福迫 尚一郎, 山田 雅彦
- 【蓄熱蓄冷3】 13:20~15:00  
座長 宮武 修 (九工大)
- F131 エタノール水溶液を利用した自然冷媒の開発  
\*大久保 英敏 (玉川大), 福知 正啓 (玉川大院), 西尾 茂文 (東大生研)
- F132 非等温内壁温度分布を有する球カプセル内の接触融解の理論解析  
\*齋藤 武雄 (東北大・工研), フォミン セルゲイ (カザン州立大学)
- F133 円筒カプセル内の複合融解の解析  
\*星 朗 (東北大工研), 齋藤 武雄
- F134 Study on Energy Storage Characteristics of Rock Bed by Using Solar Radiation Simulation System  
岸浪 紘機 (室蘭工大), \*Ahmed Hamza H.Ali, 鈴木 淳
- F135 Free Convection-Dominated Melting of a Phase Change Material in a Horizontal Cylindrical Annulus  
\*A. S. Mujumdar (McGill Univ.), S. Devahastin (Natl. Univ. Singapore), 新井 紀男 (名大高エネ), 古畑 朋彦
- 【蓄熱蓄冷4】 15:10~16:50  
座長 三田地 紘史 (豊技大)
- F141 形状安定化処理パラフィン充填潜熱矩形蓄熱槽の蓄熱特性に及ぼす傾斜角の効果  
稲葉 英男 (岡山大), \*尾崎 公一, Ping Tu, 堀部 明彦
- F142 蓄熱材複合化による潜熱蓄熱槽の放熱特性の改善  
大石 明 (九大院), \*児玉 芳一, 加納 誠, 深井 潤 (九工大), 宮武 修
- F143 潜熱蓄熱・スプレーフラッシュ蒸発ハイブリッドシステムによる海水淡水化  
宮武 修 (九工大), \*小糸 康志 (九大院), カピル エナムル, 野田 英彦 (九工大), 大村 伸吾 (九大院)
- F144 CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>化学蓄熱層における反応・流動解析  
\*関谷 禎夫 (北大院), 近久 武美 (北大工), 菱沼 孝夫, 沢田 信之 (北電総研), 渡辺 恭吾
- F145 地下帯水層蓄熱に関する研究 ~システム成績係数の向上を目指して~  
梅宮 弘道 (山形大), \*渋谷 郁子 (山形大院)
- 【エネルギー利用】 17:00~18:20  
座長 岸浪 紘機 (室蘭工大)
- F151 雪国エコロハウス ~ダクト集熱システムを利用した換気機能の評価~  
梅宮 弘道 (山形大工), \*笠原 辰一 (山形大工院)
- F152 エネルギー回生を行う省エネルギー電気自動車の開発  
齋藤 武雄 (東北大・工研), 安藤 大吾 (東北大院), \*蔵田 和義, 星 朗 (東北大・工研)
- F153 照明による太陽電池の夜間利用におけるエネルギー収支  
\*上村 光宏 (東大生研)
- F154 微細氷晶の空気搬送による冷熱輸送特性  
佐藤 勲 (東工大), \*中坂 幸博 (東工大), 黒崎 晏夫 (電通大)

<G室>

- 【伝導伝熱】 9:30~10:30  
 座長 齋藤 彬夫 (東工大)
- G111 研削加工時に発生する被加工物表面熱流束の逆問題解析  
 \*磯部 佳成 (山口工技センター), 加藤 泰生 (山口大工),  
 田戸 保 (宇部工専), 香川 正信 (山口工技センター)
- G112 普遍的熱伝導方程式による有限媒質中の高速温度応答特性  
 \*唐 大偉 (静岡大工), 荒木 信幸
- G113 接触熱抵抗の分子動力学モアリング-接触点の力学的変形と熱伝導-  
 \*若林 英信 (京都大), 鈴木 宏治 (京都大院),  
 牧野 俊郎 (京都大)
- 【熱物性値と測定法1】 10:40~12:00  
 座長 長坂 雄次 (慶大理工)
- G121 Influence of Imperfections in Working Media on Diesel Engine Indicator Process: Part 1- Theory  
 \*Stanislav N. Danov (Nagoya Univ.),  
 Ashwani K. Gupta (Univ. of Maryland),  
 Norio Arai (Nagoya Univ.)
- G122 Influence of Imperfections in Working Media on Diesel Engine Indicator Process: Part 2- Results  
 Stanislav N. Danov (Nagoya Univ.),  
 \*Ashwani K. Gupta (Univ. of Maryland),  
 Norio Arai (Nagoya Univ.)
- G123 クラスレート水和物生成系における二液相界面と水和物膜の力学的性質  
 \*重富 徹 (慶大), 大村 亮 (慶大院), 磯島 護,  
 森 康彦 (慶大理工)
- G124 非定常短線加熱法による熔融塩の熱伝導率および熱拡散率の同時測定  
 \*張 興 (九大機能研), 戚 智健 (九大総理工), 牧 祥,  
 富村 寿夫 (九大機能研), 藤井 丕夫
- G125 位相シフト干渉計とスライド式セルを用いた物質拡散係数の測定  
 円山 重直 (東北大流体研), \*小宮 敦樹 (東北大・院),  
 矢花 純 (三菱重工機), 塚本 勝男 (東北大理学研究科)
- 【熱物性値と測定法2】 13:20~15:00  
 座長 山田 悦郎 (秋大工)
- G131 砂粒, 空気および水の混合物質の熱伝導率測定 (第2報 混合物質の温度が-12~+91°Cの場合)  
 \*藤野 淳市 (福岡大), 本田 知宏, 山下 宏幸
- G132 紙の熱及び物質移動特性の研究  
 中原 崇文 (愛工大), \*服部 貴之 (愛工大院),  
 青木 聡子 (竹田設計工業株)
- G133 微小加熱サーミスタによるベントナイトの熱物性値測定法  
 \*三木 憲一 (北大院), 信太 拓, 坂下 弘人 (北大),  
 熊田 俊明

- G134 動的光散乱法による凝固点近傍における融液の粘性挙動 (第1報:  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  の測定)  
 \*飯田 敦 (慶大院), 増喜 明彦 (慶大),  
 長島 昭 (慶大理工), 長坂 雄次
- G135 ソーレー効果を用いた強制レイリー散乱法による拡散係数の測定 (第4報: 干渉縞の鮮明度の影響)  
 \*松丸 直樹 (慶大院), 矢彦沢 美奈 (慶大),  
 長坂 雄次 (慶大理工)
- 【熱物性値と測定法3】 15:10~16:30  
 座長 森 康彦 (慶大理工)
- G141 非定常熱伝導現象に対する複合材料の応答と温度伝導率  
 \*山田 悦郎 (秋田大学), 小松 喜美 (秋田大学院),  
 高橋 カネ子 (秋田大学)
- G142 動的格子加熱法による高熱伝導材料の温度伝導率測定の研究 (第1報)  
 \*牛久 哲 (慶大院), 長坂 雄次 (慶大理工)
- G143 Reflectance thermometryを用いた薄い部材の非接触熱拡散率測定  
 \*大曾根 靖夫 (日立機械研), アルン・マジュムダ (UCB)
- G144 レーザフラッシュ法による薄膜の熱拡散率測定  
 \*鈴木 雅登 (静岡大院), 荒木 信幸 (静岡大工),  
 唐 大偉, 牧野 敦

特別セッション

- 【セラミックスなどの先進材料における伝熱】 16:40~18:20  
 オーガナイザー・司会: 荒木 信幸 (静大), 中村 泰久 (東邦ガス),  
 渡邊 激雄 (中部電力), 森 聡明 (名工研)
- G151 傾斜機能材料の非定常温度応答と熱物性値の考え方  
 \*荒木 信幸 (静岡大工), 牧野 敦
- G152 フォトサーマル赤外検知法による傾斜機能材料の熱物性値評価の研究 (第3報,  $\text{Ni/ZrO}_2$  系 FGMの逆問題解析)  
 佐藤 務 (慶大院), \*梅野 真 (慶大),  
 長坂 雄次 (慶大理工)
- G153 高輻射材料をコーティングした多層壁における非定常熱移動解析  
 新井 紀男 (名大高エネ), \*橋本 みゆき, 鎌田 祐一,  
 古畑 朋彦, 岩田 美佐男 (ノリタケ)
- G154 組織制御による窒化ケイ素セラミックスの高熱伝導化  
 \*平尾 喜代司 (名工研), 渡利 広司, マヌエル プリト,  
 鳥山 素弘, 神崎 修三
- G155 超音波測定を用いた伝熱シートの開発  
 木村 直樹 (古河電工), \*難波 研一, 齋川 潤

<H室>

- 【多孔質体の伝熱1】 9:10~10:30  
 座長 青木 和夫 (長岡技大)
- H111 多孔質体内乱流のモデリングに関する一考察  
 桑原 不二郎 (静大工), \*青木 俊直 (静大工院),  
 中山 顕 (静大工)



- H112 多孔質内の乱れ生成と散逸 <I室>  
\*高津 康幸 (九工大), 増岡 隆士
- H113 積層多孔質層内自然対流のカオス挙動  
増岡 隆士 (九工大), \*谷川 洋文, 山崎 祐光 (九工大)
- H114 多孔質体内熱分散の異方性  
\*桑原 不二朗 (静大工), 中山 顕
- 【多孔質体の伝熱2】 10:40~12:00  
座長 増岡 隆士 (九工大)
- H121 多孔質体内における相変化現象のMRI計測  
\*片山 優 (東工大), 井上 剛良 (東工大),  
鈴木 祐二, 藤井 義久 (鹿島建設)
- H122 MRIによる多孔質構造と内部流動の可視化  
\*小川 邦康 (東工大・炭素循環セ), 松家 剛 (東工大学),  
平井 秀一郎 (東工大・炭素循環セ), 岡崎 健
- H123 金属多孔質体を応用した高負荷除熱機器の開発 (II)  
\*江原 真司 (東北大院), 柴田 勇木,  
戸田 三朗 (東北大工), 橋爪 秀利
- H124 多孔質薄膜による水分の吸着脱着時の伝熱特性  
時田 雄次 (大分大), \*エルマリナ (大分大院)
- 【電子機器の冷却1】 13:20~14:40  
座長 功刀 資彰 (東海大)
- H131 グループ式ヒートシンク  
\*永石 幸治 (東大院), 西尾 茂文 (東大生研)
- H132 電子機器におけるヒートパイプ式ヒートシンクの自然対流冷却  
\*中里 典生 (日立機械研), 平澤 茂樹,  
森 利行 (日立情報通信), 浜岸 真也, 辛島 靖治
- H133 ヒートパイプによる電子機器の冷却  
\*難波 研一 (古河電工), 貫川 潤, 木村 裕一, 橋本 信行
- H134 ミニチュアヒートパイプを用いたノートPC冷却  
望月 正孝 (株フジクラ), 益子 耕一, 斉藤 祐土,  
ニューエン・タン, \*高宮 明弘
- 【電子機器の冷却2】 14:50~16:10  
座長 西尾 茂文 (東大生研)
- H141 平板フィン型ヒートシンクの熱・流れ数値解析手法の開発(噴  
流中に置かれたヒートシンクの流れ解析モデル)  
\*笹尾 桂史 (日立機械研), 本間 満, 西原 淳夫,  
新 隆之 (日立汎用)
- H142 電子機器筐体内に実装されたファン付きヒートシンク搭載  
CPU モジュール基板群の強制空気冷却  
\*近藤 義広 (日立機械研), 大橋 繁男, 中島 忠克,  
布施 昭平 (日立 PC 事業部)
- H143 ピンフィン型ヒートシンクの強制空冷特性  
\*篠原 健治郎 (住金総研), 田坂 誠均, 東城 裕樹,  
林 千博 (住金), 大湊 公彦 (住金精圧)
- 【分子動力学1】 9:10~10:30  
座長 飛原 英治 (東大工)
- I111 固体面上の気泡核生成に至る分子挙動  
丸山 茂夫 (東大工), \*木村 達人 (東大工院)
- I112 分子動力学法を用いた固液界面における気泡発生機構に  
関する研究  
吉田 篤正 (岡大工), \*早川 巳治裕 (岡大工院),  
林 克彦 (岡大工), 鷲尾 誠一
- I113 過熱液体中の気泡発生の分子シミュレーション  
金城 友之 (名大院), \*松本 充弘 (京大工)
- I114 分子動力学法による代替フロン熱物性値評価 (第一報,  
平衡MD法による輸送係数算出方法の検討)  
\*熊坂 信教 (慶大), 長坂 雄次 (慶大理工)
- 【分子動力学2】 10:40~12:20  
座長 丸山 茂夫 (東大工)
- I121 グラファイト表面に衝突する気体分子の散乱挙動  
\*山西 伸宏 (東大), 松本 洋一郎
- I122 Quantum Effect of Molecule-Surface Collision on Energy  
Transfer Process  
\*Tatiana N. Zolotoukhina (Mech. Eng. Lab),  
Akira Yabe, Susumu Kotake (Toyo Univ.)
- I123 自己拡散に関する分子動力学的研究  
\*中嶋 誠世 (富山大院), 岩城 敏博 (富山大)
- I124 拡散速度についての分子動力学的考察  
\*河原 治 (富山高専)
- I125 二成分気相核生成の分子動力学シミュレーション  
\*大口 晃司 (名大院), 秦岡 顕治 (理研),  
松本 充弘 (京大工)
- 【分子動力学3】 13:20~15:00  
座長 松本 充弘 (京大工)
- I131 熱力学第1法則の分子動力学  
\*小竹 進 (東洋人工)
- I132 分子動力学解析における境界条件の検討  
\*佐藤 隆昭 (芝工大), 越後 亮三 (芝工大)
- I133 金属内包フラーレン生成の分子動力学シミュレーション  
\*山口 康隆 (東大工院), 丸山 茂夫 (東大工),  
堀 真一 (東大工学)
- I134 LJ 分子クラスターのフラクタル成長  
\*増田 俊輔 (東洋人院), 前川 透 (東洋人工)
- I135 薄膜形成のクラスタ成長に及ぼす基板温度の影響  
\*木下 淳一 (静大), 長谷 隆
- 【分子動力学4】 15:10~16:30  
座長 岩城 敏博 (富山大)
- I141 分子動力学法による電解質水溶液への水蒸気吸収過程に  
関する研究  
\*大宮司 啓文 (東大院), 飛原 英治 (東大工)

- I142 分子動力学法による気液界面での凝縮過程の研究 (水分子の投入シミュレーション)  
鶴田 隆治 (九工大), \*田中 弘之 (九工大院),  
福元 弘紀, 稲田 努 (九工大学), 増岡 隆士 (九工大)
- I143 分子動力学法による凝縮過程に関する研究  
\*宮崎 康次 (東工大院), 井上 剛良 (東工大)
- I144 混合流体の気液界面構造と界面張力  
\*鈴木 大吾 (東北大), 小原 拓 (東北大流研)

<J室>

【層流伝熱1】 9:10~10:30

座長 木本 日出夫 (阪大基礎工)

- J111 一様発熱平板から空気へのふく射を伴う層流強制対流熱伝達  
\*竹内 正紀 (福井大工), 木村 照夫, 永井 二郎,  
林田 勝也 (福井大院)
- J112 高温加熱円柱後流に形成されるカルマン渦構造  
\*矢作 裕司 (芝浦工大),
- J113 脈動流中に挿入されたブラフボディ周りの流動及び熱伝達に関する数値解析 (第2報)  
\*大前 和広 (京大院), 稲岡 恭二 (京大工), 中部 主敬,  
鈴木 健二郎
- J114 円形衝突噴流における熱移動過程  
一宮 浩市 (山梨大工), \*山田 祥生 (山梨大院),  
功刀 資彰 (原研)

【層流伝熱2】 10:40~12:20

座長 一宮 浩市 (山梨大)

- J121 加熱回転管内の流れと熱伝達  
\*石垣 博 (航技研), 望月 宗和
- J122 フィン付き管の伝熱特性に関する三次元定常数値解析 (第4報)  
\*大西 元 (京大院工), 稲岡 恭二, 中部 主敬, 鈴木 健二郎
- J123 狭い平行平板流路中の低密度気体のチョーク流れと熱伝達  
\*石 偉 (山口大院), 宮本 政英 (山口大), 加藤 泰生,  
栗間 諄二
- J124 内管が軸方向に運動する同心環状流路内の非ニュートン流体の十分に発達した層流熱伝達  
茂地 徹 (長崎大), \*山口 朝彦, 桃木 悟,  
東井上 真哉 (ダイフク株), Y. Lee (オタワ大)
- J125 随伴作用素表現に基づく対流熱伝達問題の数値解析と伝熱最適化問題への応用  
\*桃瀬 一成 (阪大基礎工), 吉田 茂行 (阪大院),  
木本 日出夫 (阪大基礎工)

【凝縮伝熱】 13:20~15:00

座長 本田 博司 (九大機能研)

- J131 波流凝縮液膜の数値計算  
\*宮良 明男 (佐賀大理工)

- J132 電場による薄液膜の粒状化シミュレーション (凝縮・蒸発の影響)  
\*山下 勝也 (東芝), 矢部 彰 (機技研),  
成合 英樹 (筑波大)
- J133 自然系混合冷媒用二重管式凝縮器の伝熱性能の予測計算  
\*兪 堅 (九大機能研), 石橋 晃 (九大院),  
小山 繁 (九大機能研)
- J134 実排ガスにおける伝熱管の凝縮熱伝達 (各種パラメータの影響)  
\*刑部 真弘 (東船大), 矢木 清之 (東船大院),  
伊東 次衛 (東船大)
- J135 実排ガスにおける伝熱管の凝縮熱伝達 (蒸気濃度の影響)  
\*伊東 次衛 (東船大), 矢木 清之 (東船大院),  
刑部 真弘 (東船大)

【蒸発伝熱】 15:10~16:10

座長 戸田 三朗 (東北大工)

- J141 噴霧気流によるメタノール改質装置の高効率化  
\*吉田 圭一 (慶大院), 筒井 良子,  
琴田 公一 (慶大理工)
- J142 超親水性光触媒による沸騰・蒸発熱伝達の制御  
\*高田 保之 (九大工), 田中 克典, 貝嶋 一剛,  
伊藤 猛宏, 渡部 俊也 (東陶機器), 下吹越 光秀
- J143 セレートフィン付鉛直矩形流路内を流下する純冷媒の蒸発熱伝達に関する実験  
小山 繁 (九大機能研), 大原 順一 (沼津工専),  
\*正木 謙一 (九大総理工院), 桑原 憲 (九大機能研)

【直接接触伝熱】 16:20~17:20

座長 飯田 嘉宏 (横浜国大工)

- J151 懸垂ワイヤに沿う液体の流下挙動と気-液間伝熱特性  
\*野崎 隆 (慶大理工), 内海 俊紀 (能開大), 梶 信藤,  
森 康彦 (慶大理工)
- J152 非水溶性熱媒体を用いた液液直接接触熱交換促進に関する研究  
稲葉 英男 (岡山大), 堀部 明彦, 尾崎 公一,  
\*横山 直樹 (岡山大院)
- J153 凝固を伴う溶融アルミニウムの自発的微細化現象  
\*松場 賢一 (北大院), 杉山 憲一郎 (北大工)

第2日 5月28日 (木)

<A室>

【はく離流における伝熱1】 9:00~10:40

座長 熊田 雅弥 (岐阜大)

- A211 流路内突起列まわりの流れと熱伝達に関する三次元数値解析  
\*中島 円 (東北大院), 太田 昭和 (東北大)
- A212 くぼみ付き流路内の共鳴物質移動促進について  
西村 龍夫 (山口大), 岡 直樹 (山口大院), \*吉中 良充,  
国次 公司 (山口大)

- < B 室 >
- A213** 馬蹄渦のフローパターンの変化とその影響因子  
松口 淳 (防衛大), 津田 宜久 (新日鐵),  
\*鶴野 省三 (防衛大)
- A214** フィンを取り付けた角柱周りの馬蹄渦  
\*松口 淳 (防衛大), 鶴野 省三, 津田 宜久 (新日鐵)
- A215** 立方体突起まわりの流れと熱伝達  
\*中村 元 (防衛大), 五十嵐 保, 筒井 敬之
- 特別セッション**  
【航空宇宙における伝熱】 9:10~12:30  
オーガナイザー: 加藤 征三 (三重大), 中原 崇文 (愛工大),  
青木 美昭 (三菱重工), 山本 孝之 (川崎重工)
- 【はく離流における伝熱2】 10:50~12:30**  
座長 五十嵐 保 (防衛大)
- A221** 急拡大流路内流れと熱伝達の三次元数値解析  
\*渋谷 一幸 (東北大院), 中島 円,  
太田 照和 (東北大工研)
- A222** 後向きステップ流れの再付着領域における伝熱機構  
\*古市 紀之 (岐大工院), 八賀 正司 (高山短大),  
熊田 雅弥 (岐大工)
- A223** 剥離領域を有する矩形流路内凍結熱伝達  
山田 雅彦 (北大工), 福迫 尚一郎, \*呉 喆 (北大院)
- A224** リブ付きチャンネル内の強制対流層流熱伝達  
\*三戸 陽一 (航技研), 笠木 伸英 (東大)
- A225** 渦発生体による平行平板強制対流の伝熱促進  
\*田中 武雄 (日立機械研), 伊藤 正昭, 畑田 敏夫
- 【乱流のモデル化と数値シミュレーション】 13:30~15:10**  
座長 笠木 伸英 (東大工)
- A231** Exact Formulations and Nearly Exact Numerical Solutions for Convection in Turbulent Flow Between Parallel Plates  
\*Stuart W. Churchill (Univ. of Pennsylvania),  
Norio Arai (Nagoya Univ.)
- A232** 直接数値シミュレーションによるミニマルフローユニットにおける壁乱流制御  
吉田 英生 (東工大工), \*樋口 和宏 (東工大院),  
野崎 貴司 (豊田自動織機), 多田 茂 (東工大工),  
小林 健一, 越後 亮三 (芝浦工大工)
- A233** 衝突/循環を含む複雑乱流場に適用できる代数式型熱流束モデルについて  
\*安倍 賢一 (豊田中研), 須賀 一彦
- A234** 改良2層モデルによる乱流伝熱解析 (第2報, 温度場2層モデルの構築)  
\*服部 博文 (名工大), 長野 靖尚
- A235** 代数熱流束モデルによる粗面壁乱流熱伝達解析  
杉山 均 (宇都宮大), 秋山 光庸,  
\*田中 美恵子 (宇都宮大院)
- B211** 大気再突入飛行体の空力加熱現象における課題  
安部 隆士 (宇宙科学研究所)
- 10:00~11:20**  
座長 山本 孝之 (川崎重工)
- B212** ハニカム型コールドプレートの伝熱特性に関する研究 (第一報)  
\*安田 智有 (慶大院), 長野 方星 (慶大),  
大西 晃 (宇宙研), 長坂 雄次 (慶大理工)
- B213** 液滴ラジエータの放熱特性に関する研究  
\*大谷 雄一 (三菱重工), 藤原 誠, 渡部 正治
- B214** 透明伝熱面を用いた微小重力場のプール核沸騰熱伝達 (第4報 TR-1A ロケットによる実験)  
\*大田 治彦 (九州大), 川路 正裕 (トロント大),  
東 久雄 (航技研), 川崎 和憲 (日産自動車),  
岡田 繁信 (島津製作所), 依田 真一 (宇宙開発事業団),  
中村 富久
- B215** 二重円筒内希薄気体における自然対流の分子シミュレーション  
\*宇佐美 勝 (三重大), 西出 武史
- 11:30~12:30**  
座長 青木 美昭 (三菱重工)
- B216** 極超音速流中のギャップにおける伝熱特性  
\*松浦 正昭 (三菱重工), Arndt Wittner (Aachen 工大),  
武石 賢一郎 (三菱重工), 佐藤 洋一
- B217** 超音速フィルム冷却における噴射マッハ数の影響  
\*滝田 謙一 (東北大工), 升谷 五郎
- B218** SST燃料ヒートシンクの解析  
\*鷲頭 忠生 (川崎重工業), 柴田 勉,  
高須 徹 ((財)日本航空機開発協会)
- 【粒子層における伝熱】 13:30~15:10**  
座長 岡田 昌志 (青学大)
- B221** 水分供給による粒子層の蒸発を伴う伝熱特性  
\*赤堀 匡俊 (長岡技科大), 青木 和夫,  
移川 秀弥 (長岡技科大院)
- B222** 反応による多孔質粒子層の熱伝導性と粒子構造の変化  
\*藤岡 恵子 (阪大院), 大井戸 清道,  
平田 雄志 (阪大院基礎工)
- B223** 2種類の蛍光体を利用した流動粒子温度の非接触測定  
佐藤 勲 (東工大), \*亀山 弘徳 (東大院),  
黒崎 晏夫 (電通大)

- B224 流動層内の水平円管周りの粒子挙動と熱伝達特性  
(粒子径の影響)  
\*イルハン F (山口大院), 宮本 政英 (山口大),  
加藤 泰生, 栗間 諄二
- B225 粗大粒子流動層中に置かれた伝熱管群に作用する加振力  
\*永橋 優純 (高知高専), 浅古 豊 (都立大工),  
J. R. Grace (Univ. British Columbia), K. S. Lim

<C室>

- 【ふく射伝熱1】 9:20~10:40  
座長 円山 重直 (東北大流体研)
- C211 非灰色モデルを用いた燃焼炉内におけるふく射伝熱特性の  
数値解析  
\*諏訪 義和 (東北大), 太田 洋, 青木 秀之, 三浦 隆利
- C212 逆モンテカルロ法による形状放射逆問題解法の検討  
\*小熊 正人 (IHI), 水野 昌幸
- C213 灰色壁で囲まれた非灰色ガス系のふく射伝熱高速解析手法  
の開発  
\*小原 伸哉 (北大工院), 工藤 一彦 (北大工),  
黒田 明慈, 石橋 伸哉 (北大工院)
- C214 ふく射伝熱逆解析により求められた灰色吸収係数分布 (非  
灰色ガス系の測定値を入力した場合)  
工藤 一彦 (北大工), 黒田 明慈, \*藤兼 剛 (北大工院),  
小熊 正人 (IHI)
- 【ふく射伝熱2】 10:50~12:30  
座長 工藤 一彦 (北大工)
- C221 自己断熱型ガス-ガス熱交換器の伝熱特性に及ぼす主要  
パラメータの影響  
\*富村 寿夫 (九大機能研), 藤井 丕夫,  
飯田 拓二 (九大総理工), 明里 好孝,  
越後 亮三 (芝浦工大)
- C222 高温耐熱材料, ガラスセラミックスの輻射伝熱特性  
\*鎌田 祐一 (名大・高エネ), 岩田 美佐男 (関ノリタケ),  
高橋 英則 (名大理), 都竹 泰, 新井 紀男 (名大・高エネ)
- C223 セリア多孔体による高温ガスエンタルピーの光変換  
\*上宇都 幸一 (大分大)
- C224 吸収線データベースとの比較による吸収バンドモデルの検討  
\*田中 友啓 (阪大院), 岡本 達幸 (阪大工), 森宗 厚吏,  
高城 敏美
- C225 ふく射・伝導複合伝熱下の水蒸気昇温過程に及ぼす狭域  
内非一様性の影響  
\*岡本 達幸 (阪大工), 田中 友啓 (阪大院),  
森宗 厚吏 (阪大工), 高城 敏美

- 【ふく射伝熱3】 13:30~14:50  
座長 牧野 俊郎 (京都大)
- C231 Numerical Prediction of Radiation Transfer in a Boiler  
with Nonisothermal, Nongray Gases and Anisotropic  
Particles  
\*郭 志雄 (東北大流体研), 円山 重直
- C232 狭域輻射モデルによる予混合火炎の消炎と可燃限界の解析  
\*Yiguang Ju (東北大工), 滝田 謙一, 升谷 五郎,  
Hongsheng Guo (Queen's Univ. Canada),  
Fengshan Liu (Natl. Res. Council Canada)
- C233 住空間への適用を目的とした熱放射環境シミュレーション  
-その2:放射と対流の連成解析による人体の温熱感予測-  
\*宮永 俊之 (電中研), 中野 幸夫,  
前田 幸司郎 (電力計算センター)
- C234 炉内伝熱の支配要因の研究  
\*青木 修一 (東邦ガス), 中村 泰久

<D室>

- 【二相流のモデル化と数値解析1】 9:20~10:40  
座長 長崎 孝夫 (東工大)
- D211 MARS 法によるダクト内水平流体層のスラグ流解析  
\*功刀 資彰 (東海大), 小瀬 裕男 (原研)
- D212 9速度 ILG モデルによる熱流体のシミュレーション  
\*小林 朋能 (山形大院), 松隈 洋介 (山形大), 阿部 豊,  
安達 公道
- D213 蒸発管内における強制対流熱伝達の数値シミュレーション  
\*加治 増夫 (近大生物理工), 澤井 徹,  
山内 庄司 (高松高専), 中西 重康 (龍谷大理工)
- D214 気液混相乱流における管内壁への液滴伝達に関する研究  
\*マチダ エドガー アキオ (横浜国大院),  
鳥居 薫 (横浜国大), 西野 耕一
- 【二相流のモデル化と数値解析2】 10:50~12:30  
座長 萩原 良道 (京工繊大)
- D221 過飽和水を用いたマイクロバブルの発生メカニズムの研究  
\*寺門 秀一 (筑波大院), 矢部 彰 (機械技研, 筑波大),  
竹村 文男 (機械技研)
- D222 上昇球形気泡のガス置換  
\*竹村 文男 (機械技研), 矢部 彰
- D223 気体発出モデルを用いたシャンペン現象のシミュレーション  
松井 剛一 (筑波大構工), \*文字 秀明, 村ト 望,  
田中 伸和 (電力中研)
- D224 核沸騰における気泡挙動と熱伝達の数値解析  
\*市川 靖 (東工大), 長崎 孝夫 (東工大総理工)
- D225 水平管群沸騰のボイド構造の数値解析  
\*藤本 貴行 (九大院), 白 強 (九大工), 日高 澄具,  
藤田 恭伸

- 【高性能コンパクト熱交換器】 13:30~15:10**  
 座長 大原 敏夫 (デンソー)
- D231 改良シングルブロー法によるルーバードフィン熱伝達特性評価  
 \*八木 良尚 (東京能開短大), 望月 貞成 (東京農工大)
- D232 シャープターンをもつ長方形流路内の熱 (物質) 伝達 (流路隔壁設置角度の影響)  
 廣田 真史 (名大), 藤田 秀臣, アハマド シュハダ (名大院), \*柳田 真, 梶田 明男 (中部電力)
- D233 小型電子除湿器の最適化に関する研究  
 \*池上 康之 (佐賀大), 作本 展威 (佐賀大院), 西村 靖典, 上原 春男 (佐賀大)
- D234 ダブルスバイバル型触媒反応器の伝熱特性  
 毎原 玲香 (名大院), 古畑 朋彦 (名大高温エネ), 新井 紀男, W.B.Retallick (Univ. of Pennsylvania), \*S.W.Churchill
- D235 直接混合軸流サイクロン型固気熱交換器の開発  
 \*中村 光宏 (住友金属), Imansya Ibnu Hakim (九大総理工院), 清水 昭比古 (九大総理工), 横峯 健彦, 佐藤 征一 (九州共立大)

<E室>

- 【ヒートパイプ・熱サイフォン1】 9:20~10:40**  
 座長 井村 英昭 (熊大工)
- E211 ループ型振動ヒートパイプのカオス実験  
 \*前沢 三郎 (成蹊大工), 和泉 智水 (成蹊大院), 魏 啓陽 (成蹊大工), 赤地 久輝 (アクトロニクス)
- E212 ループ型振動ヒートパイプの伝熱特性  
 \*魏 啓陽 (成蹊大工), 和泉 智水 (成蹊大院), 前沢 三郎 (成蹊大工), 赤地 久輝 (アクトロニクス)
- E213 ヒートパイプ式太陽光熱ハイブリッドパネルの集熱性能特性  
 \*周防 五月 (シャープ), 多久島 朗
- E214 二成分不溶性混合媒体を用いたヒートパイプの伝熱特性 (混合割合の影響)  
 \*寺西 恒宣 (富山高専), 植原 悟之, 瀧本 昭 (金沢大工)
- 【ヒートパイプ・熱サイフォン2】 10:50~12:30**  
 座長 中西 重康 (龍谷大理工)
- E221 水平加熱面と多孔質体との狭間隙における沸騰気泡分布密度に及ぼすパラメータの影響  
 \*角口 勝彦 (資環研), 山本 格, 田代 守文
- E222 蛇行閉ループ式熱輸送管  
 永田 真一 (東大生研), \*瀧田 義治 (東大工院), 白樫 了 (東大生研), 西尾 茂文
- E223 陽子線ラジオグラフィ法による蛇行細管ヒートパイプの沸騰および凝縮現象の可視化  
 \*高橋 修 (京大工), 河原 全作, 芹澤 昭示, 河野 益近, 柿木 俊平 (京大院), 赤地 久輝 (アクトロニクス株)

- E224 自励振動ヒートパイプの研究  
 \*宮崎 芳郎 (福井工大), 赤地 久輝 (アクトロニクス), 有川 政之 (福井工大)
- E225 ヒートパイプの気体力学的起動特性  
 \*浅野 等 (神大工), 藤井 照重, 松下 正 (日立製作所), 村田 卓也 (神大院)
- 【ヒートパイプ・熱サイフォン3】 13:30~14:50**  
 座長 芹澤 昭示 (京大工)
- E231 焼結金属ウイックの浸透係数  
 \*小佐井 博章 (九州東海大), 森延 真一郎 (長尾製作所)
- E232 圧力制御型ヒートパイプによる高精度均熱炉  
 \*丹波 純 (計量研), 新井 優
- E233 サーマサイフォン型ヒートパイプの変動現象  
 忽那 泰章 (龍谷大理工), \*塩見 洋一, 中西 重康
- E234 円筒型浸透膜内の物質伝達に関する数値解析  
 \*一法師 茂俊 (熊大工), 井村 英昭, 吉田 昌史 (熊大工)

<F室>

- 【燃焼における伝熱1】 9:20~10:40**  
 座長 新井 紀男 (名大高温エネ)
- F211 多成分拡散を考慮した水素拡散火炎の数値解析とその精度に関する評価  
 \*木下 進一 (阪大工), 塩谷 仁, 高城 敏美
- F212 水素・空気乱流予混合火炎の二次元構造  
 \*店橋 護 (東工大), 宮内 敏雄, 名田 謙 (東大院)
- F213 素反応モデルを用いた対向流拡散火炎の消炎に対する統一的解釈  
 齋藤 武雄 (東北大工研), 山田 善久 (東京ガス株), \*徳田 泰 (㈱日本エアシステム)
- F214 水蒸気吹込みによる NOx 低減に関する詳細素反応機構を考慮した数値解析  
 \*山下 博史 (名大工), 趙 黛青 (NEDO), 古畑 朋彦 (名大高温エネ), 新井 紀男
- 【燃焼における伝熱2】 10:50~12:30**  
 座長 山下 博史 (名大工)
- F221 Effect of Fuel Injection Rate on Heat Transfer in a Diesel Engine During the Combustion Process  
 Stanislav N. Danov (Nagoya Univ.), \*Norio Arai, Ashwani K. Gupta (University of Maryland)
- F222 CDQ 内部におけるコークス部分燃焼に関する数値解析  
 \*中川 辰二 (東北大院), 宮内 寛太, 青木 秀之, 三浦 隆利
- F223 高温予熱空気燃焼工業炉における燃焼・伝熱解析について  
 \*谷口 博 (北海学園大), 新井 紀男 (名大高温エネ変換), 工藤 一彦 (北大院), 青木 康修
- F224 往復流動超断熱燃焼熱機関に関する研究  
 \*花村 克悟 (岐大工), 松原 徹 (岐大院)

- F225 Vガッタ後流に放出される Vortex Tube の可視化  
\*倉谷 尚志 (神大院), 齊藤 剛, 池田 裕二 (神大機分セ),  
中島 健 (神大工)
- 【燃焼における伝熱3】 13:30~14:30  
座長 高城 敏美 (阪大工)
- F231 木材の自然発火と伝熱  
\*早坂 洋史 (北大工),
- F232 混合燃料液滴の燃焼における微小爆発の発生に及ぼす初期液滴直径の影響  
\*三上 真人 (山口大), 橋本 英俊 (山口大院),  
池田 光優, 小嶋 直哉 (山口大)
- F233 燃焼における浮力流れに関する数値解析  
柳田 玄一郎 (愛知工大), \*林 直樹 (愛知工大院)

<G室>

- 【自然エネルギー利用1】 9:00~10:40  
座長 佐久間 俊雄 (電中研)
- G211 真空二重ガラス管コレクターのための反射鏡形状に関する研究  
\*趙 春江 (北見工大), 金山 公夫, 馬場 弘, 遠藤 登,  
川上 英樹(シロキ工業)
- G212 ソーラーシミュレータによる炭素繊維シート空気式集熱器の性能測定  
\*姜 希猛 (北見工大), 金山 公夫, 馬場 弘, 遠藤 登
- G213 光の反射屈折及び塩の拡散を考慮したソーラポント性能の計算及び実験  
\*李 相一 (北見工大院), 前田 佳邦,  
金山 公夫 (北見工大), 馬場 弘, 遠藤 登
- G214 日射を受ける流下水膜の熱伝達特性  
\*宋 保銀 (岡山大工), 稲葉 英男, 堀部 明彦, 尾崎 公一
- G215 スカイラジエータの冷却性能シミュレーション  
齋藤 武雄 (東北大工研), \*鈴木 雅教 (東北大院)
- 【自然エネルギー利用2】 10:50~12:30  
座長 金山 公夫 (北見工大)
- G221 寒冷地における地下エアトンネルによる戸建て住宅の熱環境改善に関する研究  
\*三木 康臣 (北見工大), 三治 広明 (日本精工㈱)
- G222 ヒートパイル融雪システム  
梅宮 弘道 (山形大工), \*羽賀 恵寿,  
木下 義隆 (山形大工院)
- G223 真空式太陽熱利用海水淡水化システムの造水性能  
\*川原 隆 (慶大院), 豊嶋 慶徳 (慶大学),  
楢崎 祐三 (荏原製作所), 神谷 一郎,  
佐藤 春樹 (慶大理工)
- G224 植物による温熱環境の制御に関する研究  
\*橋本 博文 (筑波大)
- G225 自然エネルギー自立ハウス (ハービマンハウス) の性能シミュレーションに関する研究  
齋藤 武雄 (東北大工研), \*藤野 哲爾 (東北大院)

- 【自然エネルギー利用3】 13:30~14:50  
座長 佐藤 春樹 (慶大理工)
- G231 Solar Sterilization of Naturally Contaminated Water  
齋藤 武雄 (東北大工研), \*H.H. EL-Ghetany (東北大院)
- G232 長期日射測定データに基づく太陽エネルギー利用のための日射特性  
\*馬場 弘 (北見工大), 金山 公夫, 遠藤 登
- G233 形状記憶合金によるエネルギー変換  
\*佐久間 俊雄 (電中研), 岩田 宇一
- G234 太陽・廃熱利用の有機ランキンサイクルの動作特性  
\*山本 高久 (名大院), 古畑 朋彦 (名大高温エネ),  
新井 紀男, 森 幸一 (東洋テクニカ)

<H室>

- 【計測技術1】 9:00~10:40  
座長 菱田 公一 (慶大理工)
- H211 Improvement of Image Cross Correlation Based PIV to Detect High Speed Flow Field Exhibiting Large Velocity Gradients  
\*Janos ROHALY (Kobe University), Yuji Ikeda,  
Tsuyoshi Nakajima
- H212 Multi-Intensity-Layer PIV  
\*池田裕二 (神大機分セ), 山田直樹 (神大院),  
中島 健 (神大工)
- H213 DP 法を用いた高速気流計測法の開発  
二宮 尚 (宇大工), 秋山 光庸, 杉山 均,  
\*志田 勝巳 (日立プラント建設)
- H214 アセトンによる Molecular Tagging 法を用いた流れの計測  
\*加藤 祐造 (神大院), 藤田 昌生 (神大), 中島 健
- H215 壁面近接場における流速計測のためのエバネセント波 LDV  
山田 純 (山梨大), \*高原 大輔
- 【計測技術2】 10:50~12:30  
座長 秋山 光庸 (宇大工)
- H221 半導体レーザ分光による温度・濃度計測  
\*宮崎 和宏 (神戸大院), 池田 裕二 (神大機分セ),  
中島 健 (神戸大工)
- H222 超音波CTによる環境場の三次元計測  
\*朱 寧 (静岡理工大), 加藤 征三 (三重大)
- H223 MRIによる温度・流速測定法の精度評価  
小川 邦康 (東工大炭素循環セ), \*當房 誠 (東工大院),  
入口 紀男 (シーメンス旭),  
平井 秀一郎 (東工大炭素循環セ), 岡崎 健
- H224 狭帯域ブーナブル近赤外 LD を用いた空間濃度分布測定  
\*川口 達也 (慶大院), 菱田 公一 (慶大理工), 前田 昌信
- H225 蛍光による時系列壁面温度分布計測  
\*高松 伴直 (慶大院), 津田 勝巳,  
菱田 公一 (慶大理工), 前田 昌信

- 【計測技術3】 13:30~15:10  
座長 中島 健 (神大工)
- H231 高温空気・炭化水素燃焼の発光分光画像解析におけるアーベル変換およびフーリエ変換の検討  
\*石黒 哲也 (名大院), 北川 邦行 (名大高エネ), 新井 紀男, 古畑 朋彦,  
Ashwani K. Gupta (Univ. of Maryland)
- H232 高温空気・プロパン燃焼炎中のラジカル発光およびゆらぎの分光画像解析  
\*小西 慶幸 (名大院), 北川 邦行 (名大高エネ), 新井 紀男, 古畑 朋彦
- H233 LIF を利用した感温粒子の特性評価  
二宮 尚 (宇大工), 秋山 光庸, 杉山 均,  
\*高山 久幸 (宇大院)
- H234 乱流燃焼の DNS による半導体レーザー吸収分光の誤差解析  
宮内 敏雄 (東工大), 店橋 護, \*斎藤 敏彦 (東工大)
- H235 希薄気体中の固体粒子に働く熱泳動力の測定  
\*結城 和久 (東北大), 森山 剛 (九州大総理工), 清水 昭比古 (九州大総理工), 横峯 健彦
- <I 室>
- 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱1】 9:00~10:40  
座長 吉田 英生 (東工大)
- I211 放電プラズマと触媒の併用による NOx の除去  
\*金 賢夏 (豊技大), 桂 進司, 水野 彰
- I212 放電脱硝プロセスの数値計算と出現質量分析法によるラジカル計測  
\*伊藤 衡平 (豊橋技科大), 恩田 和夫, 間野 隆 (豊技大院), 萩原 勝幸
- I213 非平衡プラズマ化学反応によるメタノール直接合成における不活性ガス希釈効果  
\*奥本 衛 (豊技大), 蘇 振洲, 桂 進司, 水野 彰
- I214 沿面放電を用いたメタンと水からのメタノール合成  
\*吉高 恵美 (東工大), 井上 剛良 (東工大)
- I215 大気圧下極短パルス無声放電によるメタン・水からのメタノール直接合成  
\*岸田 拓也 (東工大学), 山田 展英 (東工大), 小川 邦康 (東工大・炭素循環セ), 岡崎 健
- 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱2】 10:50~12:30  
座長 水野 彰 (豊技大)
- I221 微小重力下における液体金属のゼーベック効果対流  
\*田川 俊夫 (九大機能研), 尾添 紘之, 柿本 浩一, 稲富 裕光 (宇宙研)
- I222 強磁場下におけるらせん管内水銀流れの MHD 流動・伝熱特性  
\*高橋 実 (東工大原研), 百崎 洋一 (ニューメキシコ大院), 井上 晃 (東工大総理工)
- I223 磁場下における磁性流体の細管内強制対流沸騰熱伝達  
\*本郷 卓也 (東工大), 高橋 実 (東工大), 井上 晃
- I224 臨界点近傍における二酸化炭素中での放電現象に関する基礎的研究  
吉田 英生 (東工大), \*中村 聡一郎 (東大院), 古田 基 (東工大), 小林 健一, 多田 茂, 越後 亮三 (芝浦工大)
- I225 固体表面近傍の熱・物質移動現象におよぼす大気圧下非平衡プラズマの影響  
\*野崎 智洋 (岐阜大), 川野 茂 (岐阜大院), 岡崎 健 (東工大炭素循環セ), 熊田 雅弥 (岐阜大)
- 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱3】 13:30~15:10  
座長 恩田 和夫 (豊技大)
- I231 二円板まわりの二次元電析に及ぼすマイグレーション効果  
\*入江 常雅 (静大), 下本 豪紀, 長谷 隆
- I232 電場による落下液膜の不安定挙動  
\*儲 仁才 (東大院), 棚澤 一郎 (農工大), 西尾 茂文 (東大), 高野 清, 白樫 了
- I233 DC-EAF スラグおよび熔鋼の流動と伝熱に関する数値解析  
王 开力 (中国科学院化工冶金研), \*謝 裕生, 古畑 朋彦 (名大高エネ), 新井 紀男
- I234 パルス放電プラズマによる室内空気浄化に関する研究  
\*木佐貫 善行 (豊橋技大), 藤山 雄一, 野口 公伸, 李 成華 (LG 電子), 姜 光玉, 水野 彰 (豊橋技大)
- I235 方形波パルス無声放電を用いた非平衡プラズマ化学反応によるシリコン酸化膜のCVD特性  
\*石丸 和博 (岐阜高専), 岡崎 健 (東工大炭素循環セ)
- <J 室>
- 【噴流・せん断層の流動と伝熱1】 9:20~10:40  
座長 土屋 良明 (信州大工)
- J211 レーザ誘起蛍光法を用いた水噴霧の粒径・流速同時計測に関する研究  
\*曹 兆敏 (横浜国大院), 小林 佳史, 西野 耕一 (横浜国大), 鳥居 薫
- J212 フラップ型電磁アクチュエータ群による噴流構造の能動制御  
\*鈴木 宏明 (東大院), 島 宏樹 (東大), 笠木 伸英 (東工大), 鈴木 雄二, 下山 勲, 三浦 宏文
- J213 三次元噴流による衝突噴流熱伝達  
\*大石 大輔 (岐大工院), 桧和田 宗彦 (岐大工), 大橋 利忠 (岐大), 田中 光三 (岐阜高専), 親川 兼勇 (琉球大)
- J214 脈動噴流の衝突熱伝達特性 (第2報)  
\*栗間 諄二 (山口大), 太田 努 (山口大院), 宮本 政英 (山口大)

- 【噴流・せん断層の流動と伝熱2】 10:50~12:10  
座長 鳥居 薫 (横浜国大)
- J221 軸対称衝突噴流よどみ域における熱伝達機構 (DPIVとLIFによる速度温度場の同時計測による解析)  
矢野 雅崇 (慶大院), \*五十嵐 保光,  
菱田 公一 (慶大理工), 前田 昌信
- J222 不足膨張噴流による衝突平板上の温度分布に関する研究  
\*屋我 実 (琉大), 与那嶺良一 (琉大院), 宮城 司,  
瀬名波 出 (琉大), 親川 兼勇
- J223 末広ノズルを用いた空気の衝突噴流による熱伝達の実験 (第4報 ノズルピッチの影響)  
\*郡司 陽介 (新菱冷熱工業),  
庄司 幸嗣 (東北学院大工), 佐藤 恭三
- J224 二次元衝突噴流中に設置した弾性支持円柱まわりの流動特性  
\*羽田 喜昭 (長野高専), 土屋 良明 (信州大工),  
倉澤 英夫 (長野高専), 中部 主敬 (京都大院),  
鈴木 健二郎

- 【不安定性・外乱】 13:30~14:50  
座長 矢部 彰 (機械研)
- J231 流動過冷却水の安定性に関する研究  
\*山口 広一 (桐東芝)
- J232 サブクール沸騰インスタビリティ による加熱ロッド振動への影響  
\*M. R. Nematollahi (東北大院), 戸田 三朗 (東北大工),  
橋爪 秀利
- J233 非線形熱対流の空間スペクトル解析  
\*佐藤 真 (東洋大院), 石井 孝治, 前川 透 (東洋大)
- J234 電磁場中におかれた液体金属自由表面の外乱  
\*林 聖哲 (名大), 岩井 一彦, 浅井 滋生, 新井 紀男

第3日 5月29日 (金)

<A室>

- 【対流熱伝達の促進・制御1】 9:20~10:40  
座長 青山 善行 (愛媛大工)
- A311 2次元チャンネル流れにおける壁面振動の影響  
\*須藤 仁 (新潟大院), 坂井 隆浩, 松原 幸治,  
小林 睦夫 (新潟大工)
- A312 超音波定在音場中の粒子の挙動に関する研究 (続報)  
\*野村 信福 (愛媛大), 村上 幸一, 吉川 幸紀 (愛媛大院)
- A313 逆転流動層内における水平加熱円管よりの熱伝達特性  
山田 雅彦 (北大院), 福迫 尚一郎, \*沢田 逸郎
- A314 反応性ガス流れ中で触媒表面反応を伴う水平円柱周りの対流熱伝達  
広井 透 (名大院), \*板谷 義紀 (名大工), 松田 仁樹  
(名大難処理研), 架谷昌信 (名大工)

- 【対流熱伝達の促進・制御2】 10:50~12:30  
座長 千田 衛 (同志社大)
- A321 粗き面における伝熱促進と圧力損失の関係について  
\*加藤 健司 (阪市大),  
Kwing-So Choi (Univ. Nottingham), 東 恒雄 (阪市大)
- A322 超微細凹凸面による流動抵抗変化に関する研究  
長谷川 雅人 (筑波大院), \*金子 和史 (東理大院),  
矢部 彰 (機械技研), 松本 壮平 (機械技研),  
成合 英樹 (筑波大), 牧 博司 (東理大)
- A323 The Study on Heat Transfer of Surfactant Solution as Drag-Reducing Flow  
\*Li Pei-Wen (AIST MITI), Daisaka Hisashi (Keio Univ.),  
Kawaguchi Yasuo (AIST MITI), Yabe Akira,  
Hishida Koichi (Keio Univ.), Maeda Masanobu
- A324 界面活性剤添加による抵抗軽減と伝熱促進  
\*佐藤 公俊 (岐阜大院), 三松 順治 (岐阜大工), 熊田 雅弥
- A325 強制対流冷却のエントロピー法による性能評価について  
\*小木曾 建 (東京工科大)

- 【対流熱伝達の促進・制御3】 13:30~15:10  
座長 東 恒雄 (阪市大)
- A331 長方形断面柱をおいた平行平板間流路の流れと熱伝達 (放出渦による伝熱促進機構について)  
\*中川 慎二 (同志社大院), 新田 憲司,  
千田 衛 (同志社大), 吉川 進三
- A332 円管内縦渦の流動と熱伝達  
\*瀬名波 出 (琉球大), 石川 周司 (琉球大院),  
屋我 実 (琉球大), 親川 兼勇
- A333 回転平板と成層流体の組み合わせによる二重壁間の熱移動の促進と抑制  
\*吉田 哲也 (福井大院), 木村 照大 (福井大工),  
竹内 正紀, 永井 二郎
- A334 パヨネットチューブ内Uターン部対流熱伝達特性測定  
持田 あけの (北大工), \*大杉 寛 (北大院), 青木 康修,  
黒瀧 学, 工藤 一彦 (北大工), 黒田 明慈
- A335 極小規模人工竜巻における速度測定と対流熱伝達  
\*青山 善行 (愛媛大工)

- 【対流熱伝達の促進・制御4】 15:20~16:40  
座長 親川 兼勇 (琉球大)
- A341 千鳥配列のピンフィン群の熱伝達に及ぼすピンフィン高さ  
と直径の比の影響  
\*松本 亮介 (関西大工), 吉川 進三 (同志社大工),  
南條 崇 (同志社大院), 千田 衛 (同志社大工)
- A342 内部縦フィン付き管の3次元乱流熱流動の数値解析  
\*金丸 邦康 (長大工), 茂地 徹, 山口 朝彦
- A343 Flow and Heat Transfer in a Channel with Convergent Walls and Circular Fins (Entrance Fin Height to Diameter Ratio = 1) Second Report  
\*Karel Balatka (Tokyo Univ. of A & T),  
Sadanari Mochizuki, Akira Murata
- A344 リプレットによる矩形狭流路内膜冷却効率の向上  
\*三浦 恭 (東船大院), 刑部 真弘 (東船大)



## &lt;B室&gt;

## 特別セッション

【自動車における伝熱】9:50~12:30

オーガナイザー:長野 靖尚(名工大), 青木 博史(豊田中研),  
大原 敏夫(デンソー), 平尾 康彦(三菱重工)

展望講演 9:50~10:40

座長 長野 靖尚(名工大)

B310 自動車における最近の熱技術課題  
片桐 晴郎(豊田中研)

10:50~12:30

座長 青木 博史(豊田中研)

B311 自動格子を用いたエンジン冷却水解析  
\*栗山 利彦(ダイハツ工業)

B312 内外気2層式エアコンシステム

\*内田 五郎(トヨタ自動車), 加藤 行志,

宮嶋 則義(デンソー), 四方 一史, 上村 幸男

B313 冬季におけるカーエアコン内部の冷媒挙動の解析

\*畔柳 功(デンソー), 山本 憲, 鳥越 栄一, 小林 修,  
掛布 光孝(豊田中研)

B314 エバポレータインの凝縮伝熱性能解析

\*長田 裕司(豊田中研), 青木 博史,

大原 敏夫(デンソー), 畔柳 功

B315 ルーバーフィン内の流れの可視化

\*村本 博宣(カルソニック株), 生井 一憲,

望月 貞成(東京農工大)

【都市・地球環境に関する熱物質伝達1】13:30~14:50

座長 岡崎 健(東工大炭素循環セ)

B321 単一スリットつきチャンネル内の火災旋風に関する研究

\*佐藤 晃由(消防研究所), K.T.Yang(ノートルダム大学)

B322 都市温暖化のモデリングの向上と3次元シミュレーション

齋藤 武雄(東北大・工研), \*山田 昇(東北大院)

B323 ミスト化を利用した環境適合型排熱回収システム

\*瀧本 昭(金沢大工), 近藤 典行(金沢大院),

多田 幸生(金沢大工), 林 勇二郎

B324 凝縮液膜およびミスト化を利用した物理吸収法によるガス分離回収の促進

瀧本 昭(金沢大工), 小東 宏次(三菱重工),

\*松田 理(石川工高専)

【都市・地球環境に関する熱物質伝達2】15:00~16:00

座長 瀧本 昭(金沢大工)

B331 CO<sub>2</sub>長期隔離のためのハイドレート微粒子化海洋中層希釈溶解

\*平井 秀一郎(東工大・炭素循環セ), 田部 豊(東工大・院),

田中 豪(東工大・学), 岡崎 健(東工大・炭素循環セ)

B332 CO<sub>2</sub>ハイドレート膜の伝播速度および膜厚の測定  
\*田部 豊(東工大院), 平井 秀一郎(東工大・炭素循環セ),  
上條 聡(東工大院), 岡崎 健(東工大・炭素循環セ)

B333 CO<sub>2</sub>ハイドレート膜の解離温度近傍での強度異常\*綾 威雄(船舶研), 山根 健次, 波江 貞弘,  
成合 英樹(筑波大)

## &lt;C室&gt;

【微小重力下の流動と伝熱1】9:40~10:40

座長 塩冶 震太郎(石川島播磨)

C311 微小重力下で浮遊する液滴の位置・速度制御装置の開発  
工藤 一彦(北大工), 黒田 明慈, \*町田 昭二(北大院),  
佐藤 崇, 津田 雄一郎

C312 微小重力下での臨界点近傍流体の相転移

\*東 久雄(航技研), 古原 正一, 大西 充, Samir Rahal

C313 MARS法による微小重力下での気泡切断解析

功刀 資彰(東海大), \*山登 拓郎(原研・慶應大院),  
柘植 秀樹, (慶應大)

【微小重力下の流動と伝熱2】10:50~12:10

座長 東 久雄(航技研)

C321 液柱マランゴニ対流における振動流の観察

\*河村 洋(東理大), 原田 尚幸(東理大院)

C322 液柱内の振動型マランゴニ対流の数値解析

\*安廣 祥一(九大機能研), 今石 宜之,  
依田 真一(宇宙開発事業団)

C323 微小重力場を利用した単一沸騰気泡の観察

\*阿部 宜之(電総研), 岩崎 晃

C324 3次元球状液滴内過渡表面張力対流の解析

\*戸谷 剛(北大工), 黒田 明慈, 工藤 一彦

【複合対流伝熱1】13:30~14:50

座長 藤井 丕夫(九大機能研)

C331 加熱平行平板間強制・自然複合対流の流動遷移と熱伝達

\*鈴木 洋(広工大), 本田 秀紀, 入江 優(広大院),  
菊地 義弘(広工大)

C332 鉛直二平板間流路を緩やかに上昇する流れの遷移について(片側加熱と両側加熱の対比)

\*鈴木 孝司(豊技大), 三田地 紘史,  
吉村 宏(豊技大院), 西井 良明

C333 傾斜加熱平板に沿う複合対流の流動と熱伝達

\*斉藤 朗(富山商船高専), 山崎 郭滋(高知高専),  
三田地 紘史(豊技大)

C334 ステップを有する垂直平板上の複合対流熱伝達の不安定挙動に対する一検討

岸浪 紘機(室蘭工大), \*鈴木 淳, Ahmed Hamza H. Ali,  
鶴喰 正人

【複合対流伝熱2】 15:00~16:00

- 座長 菊地 義弘 (広工大)
- C341 複合対流熱伝達に及ぼす熱移動媒体の種類の影響  
一宮 浩市 (山梨大工), \*鳥山 孝司 (山梨大院)
- C342 水平回転円柱廻りの熱伝達率の研究  
中原 崇文 (愛工大), \*渡辺 英雄 (愛工大院),  
三栗谷 理 (三菱エンジニアリング㈱),  
森本 高雄 (竹田設計工業㈱), 玉水 昌行 (愛知県警)
- C343 レーザホログラフィ干渉法による熱拡散現象の解析 (温度差のある二流体が対向する場合)  
\*丸山 直樹 (三重大工), 加藤 征三,  
S. タベジャマート (東北大院)

<D室>

【二相流の流動と伝熱1】 9:20~10:40

- 座長 清水 昭比古 (九州大学)
- D311 パルス流動層の伝熱促進 (粒子物性の影響)  
\*西村 顕 (名大院), 出口 清一 (名大理工総研),  
松田 仁樹 (名大難処理研), 架谷 昌信 (名大工),  
Arun S. Mujumdar (McGill 大工)
- D312 マルチノズル固気混相衝突噴流熱伝達に関する研究  
\*江口 晃弘 (ダイキン工業), 齋藤 昭彦 (九大総理工院),  
横峯 健彦 (九大総理工), 清水 昭比古
- D313 固体粒子混入による乱流伝熱制御の数値シミュレーション  
\*荒井 穰 (東大工), 水矢 亨 (東大院),  
笠木 伸英 (東大工), 鈴木 雄二
- D314 回転ドラム内の固気流動・伝熱現象の数値解析  
\*佐直 順治 (東北大院), 北村 祐一郎,  
青木 秀之 (東北大工), 三浦 隆利

【二相流の流動と伝熱2】 10:50~12:30

- 座長 松井 剛一 (筑波大構工)
- D321 水平細管内等密度液・液系二相流に関する研究  
\*草野 剛嗣 (徳島大), 逢坂 昭治, 仮屋崎 侃 (福岡大),  
梶谷 純平 (徳島大院)
- D322 気液二相スラグ流における流動特性と気液相分布  
\*森 幸治 (阪大工), 近藤 喜之 (阪大院),  
高橋 敦 (阪大工), 松本 忠義 (阪大工)
- D323 受動的安全PWRの事故時における加圧器水位振動の解析  
\*浅井 雅也 (名大・工), 辻 義之, 与能本 泰介 (原研),  
久木田 豊 (名大・工)
- D324 中性子ラジオグラフィによる分流器内気液二相流の可視化  
\*柴田 豊 (ダイキン工業), 蛭子 毅, 浅野 等 (神戸大),  
竹中 信幸, 藤井 照重, 松林 政仁 (原研)
- D325 スプレーフラッシュ蒸発の機構と微粒化特性  
\*小坂 暁夫 (富山大工), 中川 陽子 (石川島播磨),  
瀧本 昭 (金沢大工)

【二相流の流動と伝熱3】 13:30~15:10

- 座長 加治 増夫 (近大生物理工)
- D331 流下液膜に生ずる馬蹄形表面波 (渦)の成長過程  
\*野底 武浩 (琉球大), 儀間 悟, 長田 孝志
- D332 垂直管外等温流下液膜 (最小濡れ膜流量と液膜上波の特性)  
小泉 安郎 (工学院大), \*横倉 隆宏
- D333 曲がり二重管内環状二相流における液膜の流動特性  
\*渡辺 修 (愛工大), 栗山 尚二 (愛工大院)
- D334 サブチャンネル内気液二相環状流の乱流混合 (気液導入法の影響)  
\*川原 顕磨呂 (熊本大工), 佐田富 道雄,  
富野 貴義 (熊本大院)
- D335 空気-水系噴霧流における液膜挙動に関する研究  
\*橋 信仁 (横国大院), 鳥居 薫 (横国大), 西野 耕一,  
北川 哲也, 新井 達紀 (横国大院)

【二相流の流動と伝熱4】 15:20~16:20

- 座長 佐田富 道雄 (熊本大工)
- D341 二相流エジェクタの効率が冷凍サイクルの向上に与える効果について  
中川 勝文 (豊技大), \*武内 裕嗣 (デンソー),  
横関 敦彦 (豊技大院)
- D342 高温真空中での水蒸発に伴う圧力上昇と凝縮挙動  
\*高瀬 和之 (原研), 功刀 資彰 (東海大),  
山崎 誠一郎 (川重), 藤井 貞夫
- D343 The Effect of System Constraint on Coolant Injection Mode of Energetic Fuel-Coolant Interactions  
\*H. S. Park (JAERI), Yamano Norihiro, Maruyama Yu,  
Moriyama Kiyofumi, Yang Yanhua, Sugimoto Jun

<E室>

【膜沸騰・極小熱流束1】 9:00~10:40

- 座長 藤田 恭伸 (九大工)
- E311 膜沸騰蒸気膜の伝播的崩壊に関する研究 (伝熱面温度が液の過熱限界温度以上にある場合の蒸気膜崩壊機構に関する考察)  
大竹 浩靖 (工学院大), \*坂本 恭淑 (工学院大院),  
小泉 安郎 (工学院大)
- E312 圧力波による高温粒子表面上の膜沸騰の崩壊挙動の可視観測  
阿部 豊 (山形大), 小林 朋能 (山形大院),  
\*出口 幹 (山形大学)
- E313 圧力波下の蒸気膜を隔てた液液界面挙動と微粒化機構に関する研究 (第2報 高速流が重畳する高温液滴界面)  
\*井上 晃 (東工大)
- E314 クエンチ温度と自発的蒸気爆発発生温度領域との関係  
\*松村 邦仁 (茨城大), 成合 英樹 (筑波大院), 江頭 靖貴
- E315 逆溶解性高分子添加による蒸気爆発抑制に関する研究  
\*高島 武雄 (横国大), 飯田 嘉宏, 東山 拓 (横国大院)

- 【膜沸騰・極小熱流束2】 10:50~12:30 <F室>
- 座長 成合 英樹 (筑波大)
- E321 下向き伝熱面の膜沸騰伝熱特性に及ぼす膜の乱れの影響  
時田 雄次 (大分大), \*Djati Walujastono
- E322 水平細線の浸漬急速冷却過程における極小熱流束点におよぼす蒸気挙動の影響  
\*田中 一雄 (九大総理工), 本田 博司 (九大機能研), 山城 光, 高松 洋
- E323 回転水中紡糸法で製造される  $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$  合金細線の非晶質度に及ぼす水温の影響  
\*畠 奎常 (九大総理工), 本田 博司 (九大機能研), 高松 洋, 中濱 妃早子 (九大総理工)
- F324 球周りサブクール膜沸騰における液体温度境界層の挙動  
\*蓬萊 徳秀 (神船大), 大辻 友雄
- E325 有限長の垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達 (第4報: 過渡実験の沸騰特性)  
\*山田 昭 (長崎大), 茂地 徹, 桃木 悟, 金丸 邦康
- 【生体と食品の伝熱1】 13:30~15:10
- 座長 山田 幸生 (機技研)
- E331 生体組織の凍結・融解過程における三次元的マイクロ構造  
石黒 博 (筑波大構造), \*堀水 貴 (筑波大院)
- E332 凍結保護物質を添加した赤血球懸濁液の細胞外凍結過程の微視的構造  
石黒 博 (筑波大・構造), 小池 一人 (筑波大・院), \*山口 拓也
- E333 凍結濃縮によるタンパク質の結晶化に関する研究  
中別府 修 (東大工), \*村上 陽一 (東工大学), 井上 剛良 (東工大工), 土方 邦夫
- E334 生体の凍結挙動に及ぼす超音波の影響  
\*平啓 国男 (久留米高専), 松本 健一
- E335 玉ねぎ表皮組織の細胞内凍結と脱水現象  
\*鶴田 隆治 (九工大), 石本 優子 (九工大院), 増岡 隆士 (九工大)
- 【生体と食品の伝熱2】 15:20~16:40
- 座長 石黒 博 (筑波大構造)
- E341 生体細胞のガラス化におけるマイクロ挙動と損傷  
多田 幸生 (金沢大工), \*座光寺 誠 (金沢大院), 百生 登 (富山県立大), 林 勇二郎 (金沢大工)
- E342 生体凍結保存の前処理に関わる細胞膜透過係数の必要精度  
\*白樫 了 (東大工院), 棚澤 一郎 (東農工大)
- E343 ヒト頭部内光伝播のハイブリッド拡散・Radisosity 解析  
高橋 修一 (ダイキン), \*山田 幸生 (機技研)
- E344 レーザ加熱治療法開発の基礎研究  
前間 篤 (国立国府台病院), 橋本 大定 (東京警察病院), 幕内 雅敏 (東大医), 庄司 正弘 (東大工), 横谷 定雄, \*渡辺 誠, 福留 寛樹 (東大工学)
- 【ヒートポンプ・冷凍・空調1】 9:20~10:40
- 座長 小口 幸成 (神余川工大)
- F311 スタックを有する共鳴管内音響流の可視化  
\*國廣 賢治 (関大院), 小澤 守 (関大工), 河本 明 (関東芝)
- F312 深夜電力蓄熱-冷・温熱生成型  $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$  系ケミカルヒートポンプ試作器の開発  
小倉 裕直 (九工大), \*藤本 真司, 岩本 博嗣, 阿部 孝, 鹿毛 浩之, 松野 儀三, 馬場 誠一郎 (九電), 牟田 信次
- F313 流下液膜における表面張力不安定  
\*藤田 勇 (東大院), 飛原 英治 (東大工)
- F314 水平多段管上を流下する臭化リチウム水溶液膜中への水蒸気吸収  
清田 正徳 (徳島大), 森岡 斎, \*佐野 嘉宣 (徳島大院)
- 【ヒートポンプ・冷凍・空調2】 10:50~12:30
- 座長 松田 仁樹 (名大工)
- F321 混合冷媒用蒸気圧縮式ヒートポンプシステムの性能予測法  
屋良 朝康 (九大機能研), \*大隈 亨 (九大院), 小山 繁 (九大機能研)
- F322 R407Cとプレート式熱交換器を用いた高性能ヒートポンプの開発  
\*櫻場 一郎 (中部電力), 渡邊 激雄
- F323 水-エタノール系を作動媒体とするヒートポンプの研究 - 第1報 液封式圧縮機を想定したサイクル解析 -  
\*遠藤 尚樹 (機技研), 矢部 彰, 山下 巖 (東京電機大)
- F324 水蓄熱式ビル用マルチエアコンの性能特性  
\*渡邊 激雄 (中部電力), 川村 淳, 神農 良英
- F325 寒冷地用蓄熱式ガスエンジンヒートポンプの性能評価  
\*熊倉 晋 (北大院), 近久 武美 (北大工), 菱沼 孝夫, 村瀬 光則 (北海道ガス)
- 【ヒートポンプ・冷凍・空調3】 13:30~15:10
- 座長 小山 繁 (九大機能研)
- F331 R134a/PAG 油系のプール核沸騰熱伝達率の濃度依存性  
\*佐藤 智明 (神奈川工大), 高石 吉登, 小口 幸成
- F332 冷媒の水平内面溝付管におけるポストドライアウト熱伝達  
\*森 英夫 (九大), 吉田 駿, 大石 克巳, 福田 健一 (九大院)
- F333 熱・流体管路網法による複数冷媒パスを有する空調用熱交換器の凝縮器性能の予測  
\*加賀 邦彦 (三菱電機先端総研), 山田 賢一 (三菱電機住環研), 古藤 悟 (三菱電機先端総研), 吉田 孝行 (三菱電機住環研)
- F334 着霜現象に及ぼす湿度の影響  
大久保 英敏 (玉川大工), \*齋藤 修 (玉川大院), 篠原 憲太 (玉川大工), 和田 達雄
- F335 衝突噴流による円環状霜層の昇華特性  
稲葉 英男 (岡山大工), 堀部 明彦, 尾崎 公一, \*高本 直樹 (岡山大院), 今井 誠士 (松下冷機)

- 【ヒートポンプ・冷凍・空調4】 15:20~16:20
- 座長 小澤 守 (関大工)
- F341 シリカゲルの水蒸気吸着における熱・物質移動機構  
\*山本 英里 (名大院), 小林 潤, 渡辺 藤雄,  
松田 仁樹 (名大難処理), 架谷 昌信 (名大院)  
金森 道人 (中部電力)
- F342 有機系粉末状吸着剤の流動層化に伴う熱物質伝達  
稲葉 英男 (岡山大工), 尾崎 公一, 堀部 明彦,  
\*亀田 澄広 (岡山大院), 木田 貴久 (日本エクスラン工業株)
- F343 繊維系水蒸気吸着剤充填層の熱物質伝達特性  
稲葉 英男 (岡山大工), 尾崎 公一, 堀部 明彦,  
\*下山 力生 (岡山大院), 木田 貴久 (日本エクスラン工業株)

<G室>

- 【融解・凝固1】 9:00~10:40
- 座長 稲葉 英男 (岡山大工)
- G311 二波長ホログラフィ干渉法を用いた水溶液凝固過程の熱及び物質伝達評価  
\*対馬 昇 (東京農工大), 鳴海 明 (神奈川工科大),  
中根 一郎, 柏木 孝夫 (東京農工大)
- G312 マッシュ域の形成と場の発達  
林 勇二郎 (金沢大工), 多田 幸生, \*渡辺 誌朗 (金沢大院),  
義岡 秀晃 (富山商船高専), 國峰 寛司 (明石高専)
- G313 マッシュ域における結晶の形態と成長  
\*義岡 秀晃 (富山商船高専), 神谷 光真 (金沢大院),  
林 勇二郎 (金沢大工)
- G314 単一液滴の凍結挙動に関する実験的研究  
\*麓 耕二 (釧路高専), 山岸 英明, 福迫 尚一郎 (北大工)
- G315 固体面に衝突した熔融金属液滴の凝固現象  
浅海 晴久 (九大院), 深井 潤 (九大工),  
\*尾崎 徹志 (九大院), 宮武 修 (九大工)

【融解・凝固2】 10:50~12:30

- 座長 山田 雅彦 (北大工)
- G321 二次元衝突噴流による水平含水層の凍結挙動  
稲葉 英男 (岡山大工), 堀部 明彦, 尾崎 公一,  
\*中島 義人 (岡山大院)
- G322 管群型潜熱蓄熱槽の凝固・融解特性に関する研究  
\*平澤 良男 (富山大工), 中山 豊 (富山大院),  
竹越 栄俊 (富山大工)
- G323 連続供給型水直接接式熱交換器の伝熱特性に関する基礎的研究  
\*中嶋 聖也 (長岡技大院), 河田 剛毅 (長岡高専),  
服部 賢 (長岡技大), 白樫 正高
- G324 電場付与に伴う過冷却水の凝固に関する研究  
\*深尾 剛 (㈱リコー), 大河 誠司 (東工大), 斎藤 彬夫
- G325 超音波振動による水の過冷却解消の能動制御  
\*稲田 孝明 (機械技研), 張 旭, 矢部 彰, 田中 誠,  
小澤 由行 (高砂熱学)

- 【融解・凝固3】 13:30~15:30
- 座長 林 勇二郎 (金沢大工)
- G331 液膜流形成による霜層の防除機構  
山田 雅彦 (北大工), 福迫 尚一郎,  
\*藤井 伸英 (東北電力), 河部 弘道 (専修大道短大)
- G332 疎水性液体中における水平氷層の融解熱伝達  
山田 雅彦 (北大院), 福迫 尚一郎,  
\*瀧川 宗一 (ヤマハ), 山本 春樹 (旭川高専)
- G333 飽和水蒸気中に置かれた水平氷円柱の融解挙動  
山田 雅彦 (北大工), 福迫 尚一郎, \*岡田 眞 (北大院),  
河合 洋明 (道工大)
- G334 矩形導波管を用いたマイクロ波による凍結粒子層の融解  
青木 和夫 (長岡技科大), 綿貫 順也 (長岡技科大),  
\*横山 忠司, 赤堀 匠俊 (長岡技科大)
- G335 温度分布を考慮した透過性壁面上での接触融融  
\*岡 峰夫 (Panda Lab)
- G336 水平氷円柱の温度・濃度複合融解  
菅原 征洋 (秋田大), \*沢木 昭祥 (秋田大院),  
藤田 忠 (秋田大)

<H室>

- 【限界熱流束1】 9:20~10:40
- 座長 三島 嘉一郎 (京大原子炉)
- H311 短管における強制流動サブクール沸騰限界熱流束のモデリング  
\*木下 秀孝 (筑波大院), 成合 英樹 (筑波大構造工),  
稲坂 富士夫 (船舶技研)
- H312 A Comprehensive Model For Critical Heat Flux  
\*Yao-Hua ZHAO (IIS, Univ. of Tokyo)
- H313 非定常沸騰熱伝達の数値シミュレーション  
\*賀 纒 (東大工院), 庄司 正弘 (東大工), 丸山 茂夫
- H314 三相界線付近の流動と伝熱のシミュレーション  
\*原村 嘉彦 (神奈川大)
- 【限界熱流束2】 10:50~12:30
- 座長 熊田 俊明 (北大工)
- H321 核沸騰気泡下の温度変動の検討  
\*関根 郁平 (苫小牧高専)
- H322 沸騰限界熱流束に及ぼす気泡下部蒸気泡界面の振動効果  
\*矢島 健史 (筑波大院), 矢部 彰 (機械技研&筑波大),  
牧 博司 (東理大), 高橋 克行
- H323 流動脈動条件下における低流速域でのCHF  
\*村上 竜太 (関西大院), 梅川 尚嗣 (関西大), 小澤 守,  
三島 嘉一郎 (京大炉), 日引 俊, 齊藤 泰司
- H324 高熱流束サブクール沸騰における気泡構造  
\*田中 宏明 (東大工院), 西尾 茂文 (東大生研)
- H325 スポレーション中性子源の固体ターゲット冷却における限界熱流束  
\*武田 知昇 (京大院), 日引 俊 (京大炉), 齊藤 泰司,  
三島 嘉一郎

- 【限界熱流束3】 13:30~15:10  
座長 門出 政則 (佐賀大理工)
- H331 一様加熱垂直円管内の強制流動沸騰における上流限界熱流束 (熱流束および壁温変動と流動状況)  
\*横谷 定雄 (東大工), 渡辺 誠, 庄司 正弘
- H332 コサイン分布発熱円管内の液体窒素強制対流限界熱流束  
\*竹中 信幸 (神大), 藤井 照重, 石井 宏和 (神大院)
- H333 広範囲なサブクール度および圧力下, 水の上方流における垂直円柱の沸騰臨界熱流束  
\*福田 勝哉 (神戸商船大), 畑 幸一 (京大エネ理工研), 塩津 正博 (京大), 櫻井 彰 (未来エネルギー研)
- H334 広範囲なサブクール度および圧力下, 水の上方流における垂直円管内の沸騰臨界熱流束  
\*畑 幸一 (京大エネ理工研), 福田 勝哉 (神戸商船大), 塩津 正博 (京大), 櫻井 彰 (未来エネルギー研)
- H335 水の上方流における垂直円柱および垂直円管内表面の沸騰臨界熱流束機構  
\*櫻井 彰 (未来エネルギー研), 塩津 正博 (京大), 畑 幸一 (京大エネ理工研), 福田 勝哉 (神戸商船大)
- 【限界熱流束4】 15:20~16:40  
座長 竹中 信幸 (神大)
- H341 水平線および垂直線のサブクールプール沸騰限界熱流束  
\*坂下 弘人 (北大), 大森 武志 (北大学), 榎野 大創, 熊田 俊明 (北大)
- H342 FC-72 中の水平円柱における過渡熱伝達  
\*笠川 隆 (京大), 畑 幸一 (京大エネ理工研), 塩津 正博 (京大)
- H343 垂直二重円管内自然対流沸騰系の限界熱流束  
\*門出 政則 (佐賀大), 光武 雄一, 林 正憲 (佐賀大院)
- H344 二重円管型熱サイフォンの限界熱流束  
Md. A. Islam (佐賀大院), 門出 政則 (佐賀大), \*光武 雄一
- <1室>
- 【分子・ミクロスケールの伝熱1】 9:20~10:40  
座長 小原 拓 (東北大流体研)
- I311 磁性コロイドクラスターのフラクタル成長  
\*森本 久雄 (東洋大院), 前川 透 (東洋大工)
- I312 シリコンクラスターのレーザー解離  
丸山 茂夫 (東大工), \*木村 大 (東大工院), 坂本 雄志 (東大工学), 井上 満 (東大工)
- I313 不規則ポテンシャル系における電子クラスター  
\*児玉 勇司 (東洋大院), 前川 透 (東洋大工)
- I314 分子軌道法によるメタンからのメタノールへのプラズマ反応解析  
山本 昌弘 (三重大), \*加藤 征三
- 【分子・ミクロスケールの伝熱2】 10:50~12:30  
座長 前川 透 (東洋大)
- I321 液体粘性の温度依存性に基づくマイクロポンプ  
\*松本 壮平 (機械技研), Andreas Klein (ドレスデン工科大), Andreas Schroth (マイクロマシンセンター), 前田 龍太郎 (機械技研)
- I322 マイクロマシン内のマイクロカンチレバーのレーザーステイクシヨリカバリー  
\*伏信 一慶 (東工大)
- I323 局所温度制御技術を用いた制限酵素活性の局所化  
\*平野 研 (豊技大), 松浦 俊一, 今用 浩司, 桂 進司, 水野 彰
- I324 シランカップリング剤水溶液による氷スラリー生成機構のマイクロ観察  
齊藤 剛士 (筑波大院), \*矢部 彰 (機技研, 筑波大), 稲田 孝明 (機技研), 張 旭, 田中 誠
- I325 炭酸ガスのプラズマ反応を利用した改質  
加藤 征三 (三重大), 奥山 元洋 (三重大院), \*久村 和明
- 【分子・ミクロスケールの伝熱3】 13:30~15:10  
座長 松本 洋一郎 (東大工)
- I331 原子間力顕微鏡を用いたナノストラクチャーの熱物性計測  
\*井下田 真信 (東工大院), Li Shi (UCB), John Veresi (UCSB), Arun Majumdar (UCB), 井上 剛良 (東工大)
- I332 ポイントコンタクトにおける伝熱特性  
\*梶井 誠 (東工大院), 中別府 修 (東大工), 井上 剛良 (東工大)
- I333 電子トンネル現象における普遍則  
児玉 勇司 (東洋大院), \*池田 芳典, 前川 透 (東洋大)
- I334 分子動力学法による多層薄膜へのレーザービーム照射シミュレーション  
\*江里 幸一郎 (原研), 功刀 資彰 (東海大), 横峯 健彦 (九大総理工), 田中 昌明 (九大), 清水昭比古 (九大総理工)
- I335 半導体基板表面のマイクロ溝における銅膜の3次元加熱流動形状解析  
\*平澤 茂樹 (日立機械研), 齊藤 達之 (日立デバイス開セ), 山口 日出
- 【分子・ミクロスケールの伝熱4】 15:20~16:40  
座長 井上 剛良 (東工大)
- I341 DSMC 法を用いた希薄気体中粒子に働く熱泳動力の評価  
\*結城 和久 (東北大), 清水 昭比古 (九州大)
- I342 Phase Field Model による溶液の凝固シミュレーション  
\*中別府 修 (東大), 松本 洋一郎
- I343 イオン周りの水の微視的構造  
\*渡辺 徹 (東北大院), 小原 拓 (東北大流体研)
- I344 水分子間のエネルギー伝播  
\*小田桐 大 (東北大院), 小原 拓 (東北大流体研)

第35回日本伝熱シンポジウム(名古屋)

第1日目(5月27日(水))

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室	J室
9:10~10:30 [A11] 乱流構造と伝熱1	9:10~10:30 [B11] センソリング(特別セッション)「生物学的な伝熱研究」エクス・グラシア・機器など	9:10~10:30 [C11] 回転場の流動と伝熱1	9:10~10:30 [D11] 物体周りの自然対流1	9:10~10:10 [E11] 遷移沸騰	9:10~10:30 [F11] 蓄熱蓄冷1	9:30~10:30 [G11] 云霧伝熱	9:10~10:30 [H11] 多孔質体の多相伝熱1	9:10~10:30 [I11] 分子動力学1	9:10~10:30 [J11] 層流伝熱1
10:40~12:00 [A12] 乱流構造と伝熱2	10:40~12:20 [B12] センション(特別セッション)「生体における伝熱研究」エクス・グラシア・家電・半導体など	10:40~12:00 [C12] 回転場の流動と伝熱2	10:40~12:20 [D12] 密閉空間内の自然対流1	10:20~12:20 [E12] 核沸騰1	10:40~12:20 [F12] 蓄熱蓄冷2	10:40~12:20 [G12] 熱物性値と測定法1	10:40~12:00 [H12] 多孔質体の多相伝熱2	0:40~12:20 [I12] 分子動力学2	10:40~12:20 [J12] 層流伝熱2
13:20~14:40 [A13] 乱流構造と伝熱3	13:20~15:20 [B13] 特別セッション「廃棄物・エネルギーなどにおける伝熱」	13:20~15:00 [C13] 生産・加工プロセスにおける流動と伝熱1	13:20~15:00 [D13] 密閉空間内の自然対流2	13:20~15:00 [E13] 核沸騰2	13:20~15:00 [F13] 蓄熱蓄冷3	13:20~15:00 [G13] 熱物性値と測定法2	13:20~14:40 [H13] 電子機器の冷却1	3:20~15:30 [I13] 分子動力学3	13:20~15:00 [J13] 凝縮伝熱
14:50~16:10 [A14] 乱流構造と伝熱4	15:30~17:50 [B14] 特別セッション「廃棄物・エネルギーなどにおける伝熱」	15:10~16:50 [C14] 生産・加工プロセスにおける流動と伝熱2	15:10~16:50 [D14] 密閉空間内の自然対流3	15:10~16:50 [E14] 核沸騰3	15:10~16:50 [F14] 蓄熱蓄冷4	15:10~16:30 [G14] 熱物性値と測定法3	14:50~16:10 [H14] 電子機器の冷却2	15:10~16:30 [I14] 分子動力学4	15:10~16:10 [J14] 蒸発伝熱
18:30~20:30 レクチャーコース	18:30~20:30 The Frontiers Forum 準備セッション	17:00~18:20 [C15] 広く射物性	17:00~18:00 [D15] 物体周りの自然対流2	17:30~18:20 [E15] 沸騰凝縮器	17:00~18:20 [F15] エネルギー利用	16:40~18:20 [G15] 特別セッション「セラミックスなどの先進材料における伝熱」	16:20~17:20 [H15] 蒸発伝熱		16:20~17:20 [J15] 蒸発伝熱

第35回日本伝熱シンポジウム (名古屋)

第2日目 (5月28日 (木))

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室	J室
9:00~10:40 [A21] はく雑流に おける伝熱1	9:10~9:50 [B21]セッション 「航空宇宙における伝熱」 休憩 10:00~11:20 [B21] 特別セッション 「航空宇宙における伝熱」 休憩 11:30~12:30 [B21] 特別セッション 「航空宇宙における伝熱」	9:20~10:40 [C21] ふく射伝熱1	9:20~10:40 [D21] 二相流の モデル化と 数値解析1	9:20~10:40 [E21] ヒートパイプ 熱サイフォン 1	9:20~10:40 [F21] 燃焼に おける 伝熱1 休憩 10:50~12:30 [F22] 燃焼に おける 伝熱2	9:00~10:40 [G21] 自然 エネルギー 利用1 休憩 10:50~12:30 [G22] 自然 エネルギー 利用2	9:00~10:40 [H21] 計測技術1	9:00~10:40 [I21] 電場・磁場・ 電荷移動下 での伝熱1	9:20~10:40 [J21] 噴流・ せん断層の 流動と伝熱1
10:50~12:30 休憩 [A22] はく雑流に おける伝熱2	10:50~12:30 休憩 [B22] 粒子層 における 伝熱	10:50~12:30 [C22] ふく射伝熱2	10:50~12:30 [D22] 二相流の モデル化と 数値解析2	10:50~12:30 [E22] ヒートパイプ 熱サイフォン 2	10:50~12:30 [F23] 燃焼に おける 伝熱3	13:30~14:50 [G23] 自然 エネルギー 利用3	10:50~12:30 [H22] 計測技術2	10:50~12:30 [I22] 電場・磁場・ 電荷移動下 での伝熱2	10:50~12:10 [J22] 噴流・ せん断層の 流動と伝熱2
13:30~15:10 [A23] 乱流の モデル化と 数値シミュ レーション	13:30~15:10 [B23] 高性能 コンバクト 熱交換器	13:30~14:50 [C23] ふく射伝熱3	13:30~15:10 [D23] 高性能 コンバクト 熱交換器	13:30~14:50 [E23] ヒートパイプ 熱サイフォン 3	13:30~14:30 [F23] 燃焼に おける 伝熱3	13:30~14:50 [G23] 自然 エネルギー 利用3	13:30~15:10 [H23] 計測技術3	13:30~15:10 [I23] 電場・磁場・ 電荷移動下 での伝熱3	13:30~14:50 [J23] 不安定性・ 外乱
屋 食 (12:30~13:30)									
15:20~16:30 総 会									
16:40~17:40 国際セッション									
18:30~20:30 懇 親 会 [サイプレスガーズンホテル]									

第35回日本伝熱シンポジウム(名古屋)

第3日目(5月29日(金))

A室	B室	C室	D室	E室	F室	G室	H室	I室
9:20~10:40 [A31] 対流熱伝達の 促進・制御1	9:50~10:40 [B31] 特別セッション 「自動車にお ける伝熱」	9:40~10:40 [C31] 微小重力下 の流動と 伝熱1	9:20~10:40 [D31] 二相流の 流動と伝熱1	9:00~10:40 [E31] 膜沸騰・極小 熱流束1	9:20~10:40 [F31] ヒートポンプ 冷凍・空調1	9:00~10:40 [G31] 融解・凝固1	9:20~10:40 [H31] 限界熱流束 1	9:20~10:40 [I31] 分子・ミクロ スケールの 伝熱1
10:50~12:30 [A32] 対流熱伝達の 促進・制御2	10:50~12:30 [B31] 特別セッション 「自動車にお ける伝熱」	10:50~12:10 [C32] 微小重力下 の流動と 伝熱2	10:50~12:30 [D32] 二相流の 流動と伝熱2	10:50~12:30 [E32] 膜沸騰・極小 熱流束2	10:50~12:30 [F32] ヒートポンプ 冷凍・空調2	10:50~12:30 [G32] 融解・凝固2	10:50~12:30 [H32] 限界熱流束 2	10:50~12:30 [I32] 分子・ミクロ スケールの 伝熱2
13:30~15:10 [A33] 対流熱伝達の 促進・制御3	13:30~14:50 [B32] 都市・ 地球環境に 関る熱物質 伝達1	13:30~14:50 [C33] 複合対流 伝熱1	13:30~15:10 [D33] 二相流の 流動と伝熱3	13:30~15:10 [E33] 生体と食品 の伝熱1	13:30~15:10 [F33] ヒートポンプ 冷凍・空調3	13:30~15:30 [G33] 融解・凝固3	13:30~15:10 [H33] 限界熱流束 3	13:30~15:10 [I33] 分子・ミクロ スケールの 伝熱3
15:20~16:40 [A34] 対流熱伝達の 促進・制御4	15:00~16:00 [B33] 都市・ 地球環境に 関る熱物質 伝達2	15:00~16:00 [C34] 複合対流 伝熱2	15:20~16:20 [D34] 二相流の 流動と伝熱4	15:20~16:40 [E34] 生体と食品 の伝熱2	15:20~16:20 [F34] ヒートポンプ 冷凍・空調4	15:20~16:40 [G34] 融解・凝固4	15:20~16:40 [H34] 限界熱流束 4	15:20~16:40 [I34] 分子・ミクロ スケールの 伝熱4

食(12:30~13:30)

休

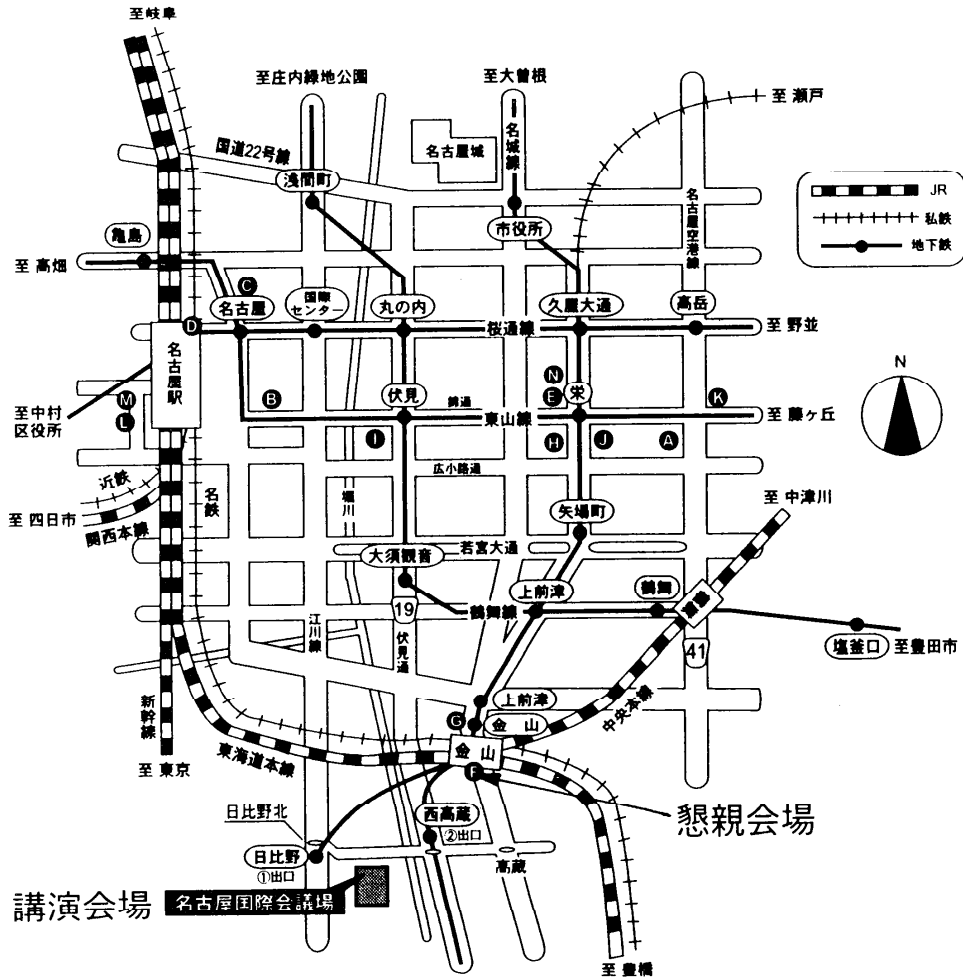
休

休

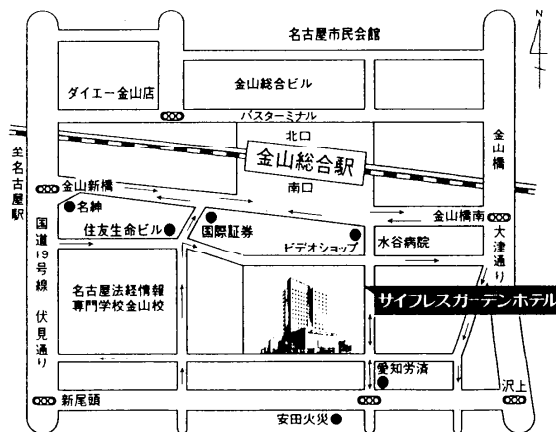
休



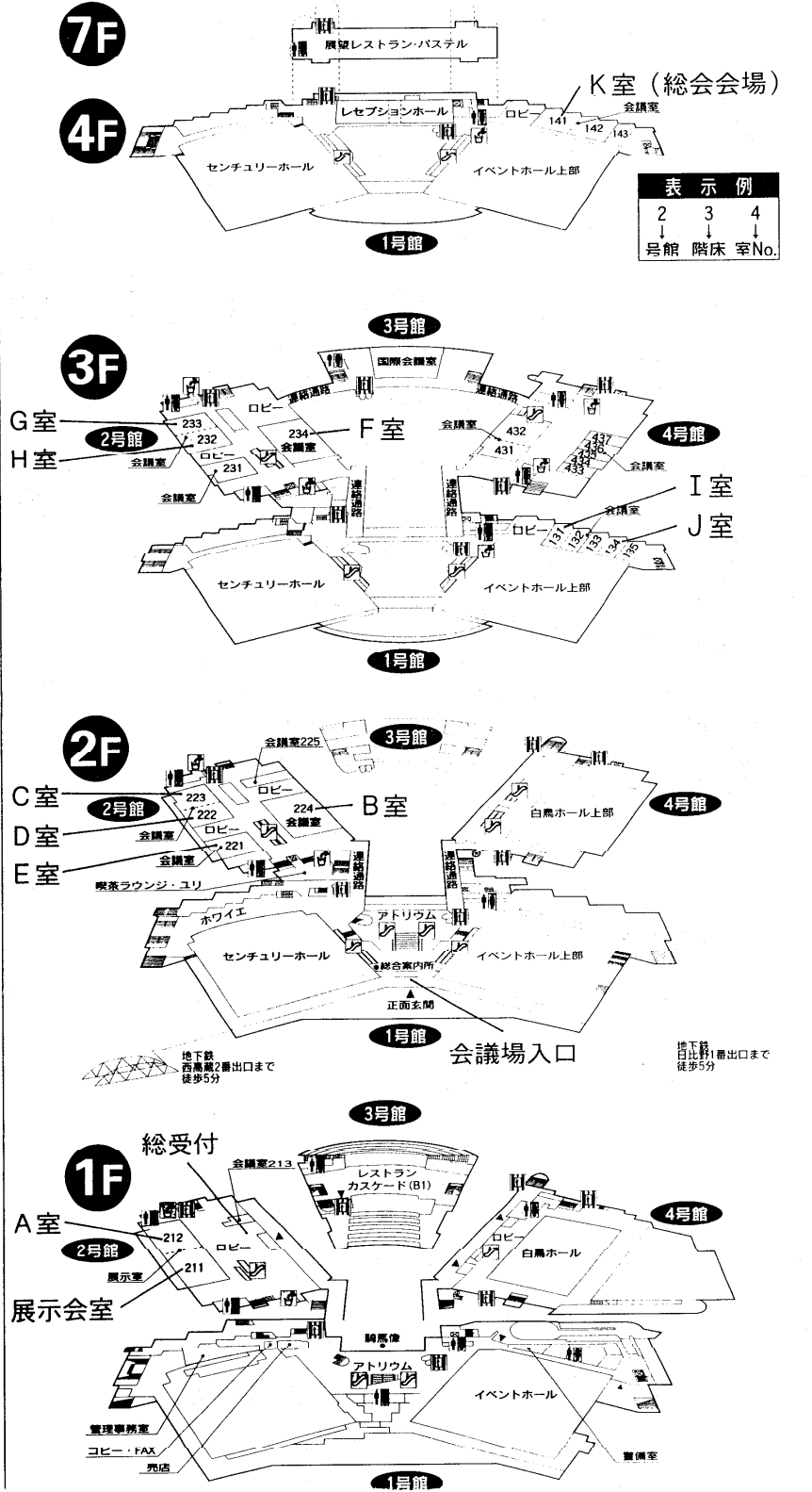
第35回日本伝熱シンポジウム 交通のご案内



懇親会会場



第35回日本伝熱シンポジウム 講演会場案内図



### 第35回日本伝熱シンポジウム 併設展示会のご案内

日本伝熱学会東海支部では、第35回日本伝熱シンポジウム（平成10年5月27日～29日、名古屋国際会議場）の講演会場において、下記の通り企業展示会を開催いたします。出展内容は、伝熱に関連した計測機器・コンピュータソフトウェアからエネルギー機器まで多岐にわたっておりますので、伝熱シンポジウム参加者の皆様方におかれましてはぜひお立ち寄り下さいますようお願い申し上げます。

日 時：平成10年5月27日（火）～29日（金）

会 場：名古屋国際会議場 2号館1階 211展示室（伝熱シンポジウム総受付の正面）

出展予定企業（50音順）：アイシン精機、旭流熱システム、エナジーサポート、計算流体力学研究所、神戸製鋼所、CRC総合研究所、真空理工、ゼネレクス、ソフトウェアクリエイドル、ダイキン工業、中部電力、デンソー、東芝、ナック、日本カノマックス、日本ヒューレットパッカー、ビジュアルテクノロジー、日立製作所、フルーエントジャパン、前川製作所、三菱重工業、三菱電機、理経、菱名工業

### 第35回日本伝熱シンポジウム・レクチャーコースのご案内

#### 『接触熱抵抗評価法の基礎と最近の進展』

講 師： 鳥居 薫教授（横浜国立大学）

内容の概略： 接触熱抵抗の基礎を概説するとともに、最近、特に関心が高くなってきた低接触荷重における接触熱抵抗問題を中心に、(1)高接触荷重で平面の場合、(2)低接触荷重でうねりを有する面の場合、(3)感圧紙による接触圧力分布を用いた評価法、(4)雰囲気圧力の影響、(5)高接触荷重で平坦な面の場合の熱抵抗低減法、(6)低接触荷重の場合の熱抵抗低減法など、接触熱抵抗の特性と評価法について解説する。

開催日時： 平成10年5月27日（水）（時間は、午後6:30～8:30を予定）

開催場所： 日本伝熱シンポジウム会場（開始時刻、会場の詳細につきましては、本号の伝熱シンポジウムプログラムをご参照下さい）

参加費： 一般1,000円、学生500円（当日、会場前にて申し受けます）

定 員： 100名（定員になり次第申込を締め切りますので、お早めにお申し込み下さい）

参加申込方法： レクチャーコース参加申込と題記し、お名前、御所属、連絡先をご記入の上、下記宛にお申し込み下さい。

〒106-8558 東京都港区六本木七丁目2-1

東京大学 生産技術研究所 第二部 西尾研究室 レクチャーコース係

TEL 03-3402-6231内線2286、FAX 03-3401-6575

1998年度熱工学講演会

(日本機械学会熱工学部門, 同東海支部合同企画)  
 [協力 日本機械学会流体工学部門, 同バイオエンジニアリング部門]  
 [協賛 日本伝熱学会, 日本燃焼学会, 日本熱物性学会  
 (以上予定)]

開催日: 1998年11月14日(土), 15日(日)  
 会場: 名古屋工業大学(名古屋市)

WWW(<http://heat.mech.nitech.ac.jp/tedconf/>)でも最新情報を公開していますのでご覧ください。

募集テーマ:

- A 「一般セッション」熱工学の全分野  
 B 「オーガナイズドセッション名/オーガナイザ(セッション内容に関する問い合わせ先)」

- (1) 氷蓄熱の基礎現象  
 岡田昌志(青山学院大)  
 [岡田: 電話(03)5384-1111, okada@me.aoyama.ac.jp]
- (2) 熱流動制御のフロンティア  
 笠木伸英(東京大学)  
 [笠木: 電話(03)3812-2111, kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp]
- (3) 乱流輸送現象のモデリングとシミュレーションの新たな試み  
 長野靖尚(名古屋工業大学), 安倍賢一(豊田中央研究所)  
 [長野: 電話(052)735-5325, nagano@heat.mech.nitech.ac.jp]
- (4) 混相流の流動と伝熱  
 社河内敏彦(三重大学), 深野 徹(九州大学), 村瀬道雄(日立製作所)  
 [社河内: 電話(059)231-9384, shako@mach.mie-u.ac.jp]
- (5) ふく射伝熱・物性研究の新展開  
 工藤一彦(北海道大学), 円山重直(東北大学)  
 [工藤: 電話(011)706-6376, kudok@eng.hokudai.ac.jp]
- (6) マイクログラビティにおける相変化現象  
 大田治彦(九州大学), 賞雅寛而(東京商船大学)  
 [大田: 電話(092)641-1101, ohta@mech.kyushu-u.ac.jp]
- (7) 気液相変化に関わる素過程  
 飯田嘉宏(横浜国立大学), 宇高義郎(横浜国立大学)  
 [宇高: 電話(045)339-3909, utaka@post.me.ynu.ac.jp]
- (8) 相変化を伴う界面に関する数値シミュレーション  
 高田保之(九州大学), 丸山茂夫(東京大学)

[高田: 電話(092)642-3398, takata@mech.kyushu-u.ac.jp]

- (9) 液体燃料の燃焼と計測  
 香月正司(大阪大学), 新井雅隆(群馬大学)  
 [香月: 電話(06)879-7252, katsuki@mech.eng.osakau.ac.jp]
- (10) エンジンシステムの熱管理  
 片桐晴郎(豊田中央研究所)  
 [片桐: 電話(0561)63-4077, e0222@mosk.tytlabsco.jp]
- (11) 次世代廃棄物燃焼処理技術  
 杉島和三郎(環境システムエンジニアリング), 竹内正雄(資源環境技術総合研究所)  
 [竹内: 電話(0298)58-2222, mtake@nire.go.jp]
- (12) ヒートポンプ, 蓄熱システムによる熱エネルギーの有効利用  
 荒木信幸(静岡大学), 柏木孝夫(東京農工大学)  
 [荒木: 電話(053)478-1047, tmnarak@eng.shizuoka.ac.jp]
- (13) 熱流体現象への分子的アプローチ  
 加藤征三(三重大学), 南部建一(東北大学), 松本洋一郎(東京大学)  
 [加藤: 電話(059)231-9383, seizo@mach.mie-u.ac.jp]
- (14) 生物における流れ・構造相関と熱・物質輸送問題  
 大場謙吉(関西大学), 谷下一夫(慶應義塾大学), 山口隆美(名古屋工業大学)  
 [山口: 電話(052)735-5049, takami@pfsi.mech.nitech.ac.jp]

講演申込み締め切り日 : 1998年6月12日(金)  
 講演原稿提出締め切り日 : 1998年8月14日(金)  
 申込み方法 : ホームページ内にある「申込みフォーム」にご記入の上, お申込み下さい。  
<http://heat.mech.nitech.ac.jp/tedconf/regist.html>

講演論文集 : 通常の論文集のほか, CD-ROM化版も発行します。

問い合わせ先:

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町  
 名古屋工業大学大学院工学研究科  
 都市循環システム工学専攻 長野 靖尚  
 [電話(052)735-5325, FAX(052)735-5359]  
 メール: tedconf@heat.mech.nitech.ac.jp

## 日本伝熱学会関西支部 第5期定時総会・講演討論会

日本伝熱学会関西支部は標記の支部総会・講演討論会を開催いたします。とりわけ支部会員各位にはよろしくご出席いただきたくご案内申し上げます。

日時：平成10年4月24日（金）13:00-19:30

場所：京大会館（京都市左京区吉田河原町15-9 TEL: 075-751-8311, FAX: 075-761-5403）

講演：13:00-14:00 司会 片岡勲（大坂大学）

1. 「コンバインド型コージェネレーションの検討と実際事例の紹介」 須恵 元彦（川崎重工業(株)）
2. 「ごみ焼却用廃熱ボイラー」 芝川 重博（(株)タクマ）

14:10-15:10 司会 小澤守（関西大学）

3. 「臨海地域における流れ場と光化学オキシダント濃度の予測」 山口 克人（大阪大学）
4. 「CO<sub>2</sub> 海洋処理法とCO<sub>2</sub> ハイドレート」 綾 威雄（船舶技術研究所）

総会：15:20-16:00

特別講演：16:10-17:40 司会 荻野文丸（京都大学）

「酸性雨関係の話題（仮題）」 京都大学防災研究所大気災害部門 植田 洋匡 教授

懇親会：17:40-19:30 京大会館

（懇親会参加費 5,000 円）

本件に関するお問い合わせは下記にお願いします。

564-8680 吹田市山手町 3-3-35

関西大学工学部小澤守

TEL&FAX: 06 368 0807 E Mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

## 第32回 空気調和・冷凍連合講演会

共 催 空気調和・衛生工学会，日本冷凍空調学会，日本機械学会（幹事学会）

協賛（予定） エネルギー・資源学会，化学工学会，可視化情報学会，計測自動制御学会，高圧ガス保安協会，低温工学協会，電気設備学会，日本音響学会，日本空気清浄協会，日本建築学会，日本原子力学会，日本混相流学会，日本太陽エネルギー学会，日本鉄鋼協会，日本伝熱学会，日本熱物性学会，日本燃焼学会，日本ボイラ協会，日本流体力学会

開 催 日 1998年4月22日（水）～24日（金）

会 場 総評会館・大会議室

〔東京都千代田区神田駿河台3-2-11 / 電話(03)3253-1771 (代)〕

参 加 費 一般2000円（学生無料）

講演論文集 3000円

問い合わせ先 〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階 / (社)日本機械学会  
第32回空気調和・冷凍連合講演会係 / 電話(03)5360-3505 / FAX(03)5360-3508

講 演 38件 講演時間：講演15分，討論5分の計20分

4月22日（水）13.25～16.40

4月23日（木）9.30～15.50

4月24日（金）10.00～16.00

## 2nd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation

May 23-25, 1999-Pisa, Italy

The first International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation was held in Rome, and was attended by about 220 delegates from more than 35 countries. The Symposium is organized by the Assembly of World Conferences on Experimental Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics, and the ENEA Institute of Thermal-Fluid Dynamics, with participation of the Japan Society of Multiphase Flow.

Contributed papers are solicited dealing with experimental work, theory, analysis, design, numerical studies, modelling of fundamentals and applications of two-phase flow, including heat and mass transfer, fluid mechanics and thermodynamics aspects. Papers are also solicited reporting measurement techniques, visualization techniques, instrumentation, and analysis of experimental data as well as theory or numerical results.

### DEADLINES

<b>May 15, 1998</b>	Three copies of abstracts due to the Lead Scientists closest to your region.
<b>May 29, 1998</b>	Authors to be notified of abstracts acceptance.
<b>July 24, 1998</b>	Full length manuscript due to the Lead Scientist.
<b>December 10, 1998</b>	Authors to be notified of paper acceptance.
<b>February 18, 1999</b>	Author-prepared mats due.

Lead Scientists for Japan:

Prof. Y. Tsuji, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka 565, Tel. & Fax: 06-879-7315; E-mail: [tsuji@mech.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:tsuji@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

Prof. T. Fukano, Faculty of Engineering, Kyushu University 36, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812, Tel.:092-642-3392, Fax: 092-641-9744; E-mail: [fukanot@mech.kyushu-u.ac.jp](mailto:fukanot@mech.kyushu-u.ac.jp)

Prof. A. Serizawa, Kyoto University, Department of Nuclear Engineering, Yoshida, Sakyo ku, Kyoto 606, Tel. & Fax: 075-753-5829; E-mail: [serizawa@kuiae.kyoto-u.ac.jp](mailto:serizawa@kuiae.kyoto-u.ac.jp)

For further information and abstract see: <http://docenti.ing.unipi.it/~d6600/pisa99/>

**VSJ-SPIE98 - Yokohama(December 6-10, 1998)**  
“International Conference on Optical Technology and  
Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow”

### Sponsored by:

Visualization Society of Japan

SPIE-The International Society for Optical Engineering

**Conference Chair:** T. Kobayashi(Univ. Tokyo)

**2 pages abstract due : April 30**

Further information is available at : <http://www.vsj.or.jp/vsjspie/>

**Announcement and Call for Papers***PSFVIP-2: The 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing**Sheraton Princess Kaiulani Hotel, Honolulu, Hawaii, USA, May 16-19, 1999**Sponsored by Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering(PCTFE)*

Papers describing current research on flow visualization and image processing from principles to applications are hereby solicited. Those pertaining to fundamental techniques and applications are appropriate. Topics include, but are not limited to, flow-field visualization, surface flow visualization, computer-assisted flow visualization, graphical display of data sets, digital image processing and others.

The official language is English. Initial selection will be based on submitted abstracts of about 500 English words. The abstracts should contain: (1) paper title, (2) five key words, (3) authors' names, affiliations and full address of all authors, and (4) name, address, phone, fax numbers and E-mail address of the author to whom subsequent correspondence should be directed. The abstract should contain sufficient information to enable the scope and nature of the paper to be assessed. Final acceptance will be based on review of the full length manuscript. All accepted papers will be published in the CD-ROM proceedings, which allow authors to include color figures, video clips and animations, to be distributed prior to the symposium. After a formal review, those papers presented at symposium will be published in the Journal of Flow Visualization and Image Processing.

Aug. 1, '98	Three copies of abstract due(by mail or E-mail)	Sep. 1, '98	Notification of abstract acceptance
Oct. 31, '98	Three copies of full length manuscript due		
Dec. 15, '98	Notification of final paper acceptance	Jan. 20, '99	Final manuscript due

Abstracts should be sent to the Conference Chairman: Professor S. Mochizuki  
Dept. of Mechanical Systems Eng., Tokyo University of Agriculture and Technology

Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

E-mail: psfvip-2@mmlab.mech.tuat.ac.jp

Phone/Fax +81(Japan)423 88 7088

Home Page: <http://www.cc.tuat.ac.jp/~psfvip-2>

**東京大学生産技術研究所 教官候補者の公募について**

1. 公募人員： 教授 1 名
2. 所属： 生産技術研究所第二部
3. 専門分野： 生産システム学または環境保全機器学
4. 研究・業務内容： FA、CAD/CAM、CIM、FMS、物流工学、メンテナンスなどの生産システムに係わる研究、あるいは廃棄物処理技術、水質汚濁防止技術、大気汚染防止技術などの環境保全機器に係わる研究を行う。
5. 応募資格： 博士の学位を有し、上記のいずれかの専門分野の研究・教育に十分な熱意と業績を有し、大学の運営と学生指導に十分な日本語能力を有する 50 才前後の方。
6. 着任時期： 平成 11 年 4 月 1 日 (予定)
7. 応募締切： 平成 10 年 9 月末日
8. 提出書類： (1)上記の専門分野におけるこれまでの研究内容および今後の研究計画の概要 (400 字程度) . . . . . 2 部  
(2)履歴書 . . . . . 2 部  
(3)業績リスト . . . . . 2 部
9. 書類提出先および問い合わせ先：  
106-0032 東京都港区六本木 7-22-1  
東京大学 生産技術研究所 第二部  
主任教授 増沢 隆久  
Tel 03-3402-6231 内線 2270 Fax 03-3478-0216

## 「伝熱研究」会告の書き方

印刷は原稿からそのままオフセット印刷を行いますので、鮮明な原稿にして下さい。大きさは、この外枠に入るように縦 115 mm 以内、横 170 mm 以内に収まるようにして下さい。この範囲に入らないものは、「伝熱研究」原稿の書き方に従って下さい。

115 mm

170 mm



30

# 「伝熱研究」原稿の書き方

伝熱 太郎 (伝熱大学)

(1行)  
(2行)  
(3行)  
(4行)  
(5行)  
(6行)  
(7行)  
(8行)

42 mm

## 1. 「伝熱研究」用原稿の標準形式

用紙サイズ：A4 縦長 (210mm × 297mm), 横書き  
 余白サイズ：上余白 30 mm, 下余白 30 mm  
 左余白 20 mm, 右余白 20 mm  
 コ ラ ム：2段組とします。  
 1 コラム 80 mm, コラム間隔 10 mm  
 活字サイズ：10ポイント(10×0.3514=3.514mm)の全角文字を標準とします。英文字・数字には半角文字が好ましい。  
 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=5.271 mm)  
 1 行あたり 45 行となります。

15 ポイント行間  
15 ポイント行間

題日の部分は、編集委員会で作成いたしますので、8行の空白(=42 mm)を用意しておいてください。また、表題・氏名・所属の和文および英文は別紙にご用意下さい。なお、2頁以降は、最初の行から2段組で本文をお書きください。

## 2. 「伝熱研究」用原稿作成上の注意

- (1)印刷は原稿からそのままオフセット印刷で行いますので、この点を考慮の上、写真・図表等には特に注意して鮮明なものをご使用下さい。
- (2)原稿枚数は原則として最大10枚(図表込み)を越えない下さい。
- (3)原稿は出力フォーマットに従って作成の上編集委員会までご送付下さい。
- (4)図表は、原稿内に直接張り込んで下さい。
- (5)原稿の頁数は各頁の上すみに青鉛筆で薄く1/8, 2/8のように記入して下さい。
- (6)本手引きの各種寸法及び文字数等は、お手持ちのワープロの機能によっては、必ずしもこれらを満足できないかもしれません。このような場合には適宜これにできるだけ近くなるように、原稿をおつくりくださいますようお願い申し上げます。
- (7)本文の体裁・項目の分け方などは、自由にお書き下さい。

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入  
22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

### その他の事項

・可能ならば、字体に関しては、本文には明朝体を使用し、見出しにはゴシック体を使用して下さい。

20

20

30

## 事務局からの連絡

## 1. 学会案内と入会手続きについて

## 【目的】

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

## 【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

## 【会員の種別と会費】

会員種別	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。

- 「伝熱研究, THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。  
(本年度発行予定: 4月号, 7月号, 10月号, 1月号)  
・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付  
・賛助会員に口数分の冊数送付
- 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。  
・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

## 【入会手続き】

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

(注意)

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、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いたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いします。

## 【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金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いたします。

## 【退会届について】

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

## 【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々には、至急納入をお願いします。特に、平成8年度以降の会費未納の方には「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

## 3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

## 事務局

(業務内容)

- 入会届、変更届、退会届の受付
- 会費納入の受付、会費徴収等
- 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- 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「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- その他必要な業務

(所在地)

〒113 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

(土日、祝祭日を除く、午前10時～午後5時)

(注意)

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

〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

横浜国立大学 大学院 工学研究科

人工環境システム学専攻 飯田 嘉宏

TEL:045-339-4010 FAX:045-339-4010 (又は4012)

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

(右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書  
2. 変更届 (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 ・申込み時に郵便振替にて会費納入

0	申込年月日	1	9	9	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		所在地											
8		TEL											
9		FAX											
10		電子メール											
11	自宅	〒											
12		住所											
13		TEL											
14		FAX											
15	通信先 **	勤務先・自宅					自宅情報を会員名簿に掲載しない ****						印
16	学位												
17	最終出身校												
18	卒業年次	T・S・H											
19	専門分野	基礎的分野											
20		応用分野											
21	学生会員の場合: 指導教官名 ***												

※専門分野

基礎的分野

- 1: 強制対流    2: 自然対流    3: 高速気流    4: 沸騰・蒸発    5: 凝縮    6: 混相流  
7: 融解・凝固    8: 熱伝導    9: 接触熱抵抗    10: 放射    11: 反応・燃焼    12: 物質移動  
13: 多孔質伝熱    14: 直接接触伝熱    15: 電場・磁場・電荷移動    16: 分子動力学    17: 極低温    18: 熱物性  
19: 計測・可視化    20: 数値シミュレーション    21: 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    5: ヒートパイプ・熱パイプ  
6: 航空・宇宙機器    7: 海洋機器    8: 海水淡水化    9: 火力発電プラント    10: ガスタービン  
11: 内・外熱機関    12: 地熱    13: 燃料電池    14: 熱電変換    15: 熱エネルギー貯蔵  
16: 原子力発電プラント    17: 化学プラント    18: 建築・土木    19: 製鉄    20: 材料・加工  
21: 流動層    22: 廃棄物処理    23: 住環境    24: 都市環境    25: 地球環境  
26: 生体・人間熱科学    27: バイオ・食品    28: 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, レ印を付ける.

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	1	9	9	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下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. 本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「伝熱研究」をお申し込み口数1口につき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。  
この伝熱研究は通常、年4回(4, 7, 10, 1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。  
尚、年度途中でご入会の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下さい。
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をご用意できますが、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します。

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

会費の払込先：

- (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—第一勧業銀行 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。

## 複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部  
〒107 東京都港区赤坂 9-6-42-704  
Phone 03-3475-4621/5618  
Fax 03-3403-1738

### Notice about Photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27, Congress St.  
Salem, MA 01970  
Phone (508)744-3350  
Fax (508)741-2318

## 伝熱研究

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol. 37, No.145

1998年4月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

Vol. 6, No. 2

April, 1998

発行所 社団法人 日本伝熱学会

〒113 東京都文京区湯島 2-16-16

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

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

## 伝熱研究 VOL.37, NO.145

### 〈随想〉

学会討論と科学技術の進歩 ..... 円山重直 (東北大学) .....1

### 〈特集：生体細胞の凍結保存〉

特集「生体細胞の凍結保存」にあたって

..... 第36期編集委員会 姫野修廣 (信州大学繊維学部機能機械学科)  
..... 井村英明 (熊本大学工学部知能生産システム工学科) .....3

細胞懸濁液の細胞外凍結過程における微視的構造 ..... 石黒博 (筑波大学構造工学系) .....4

生物体凍結における伝熱と細胞の生残

..... 多田幸生、林勇二郎 (金沢大学工学部人間・機械工学科) .....13

生体凍結保存技術と細胞膜透過係数 ..... 白樫了 (東京大学生産技術研究所) .....21

細胞の凍結傷害 ..... 藤川清三 (北海道大学低温科学研究所、大学院地球環境科学研究科) .....29

エビの幼生を保存する ..... 黒倉寿 (東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻) .....37

魚肉タンパク質の冷凍変性 ..... 土屋隆英 (上智大学理工学部化学科) .....43

凍結魚の解凍過程における生化学的品質劣化と伝熱

..... 御木英昌 (鹿児島大学水産学部食糧保蔵学研究室) .....52

### 〈研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究 - その3 〉

「研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究 - その3 -」の編集にあたって

..... 第36期編集委員会 小澤由行 (高砂熱学工業) .....61

学のみに通じる技術は失敗以上の失敗 ..... 三浦隆利 (東北大学) .....62

「未成功研究の原因 - 研究の目標設定について考える -」 .. 矢部彰 (工業技術院機械技術研究所) .....66

研究計画に関する失敗談 ..... 西尾茂文 (東京大学生産技術研究所) .....69

ワンモアチャレンジを欠いた未成功 ..... 岡崎健 (東京工業大学) .....73

「パンドラの箱」 ..... 飯田嘉宏 (横浜国立大学) .....75

ひとを説得することのむずかしさ ..... 原村嘉彦 (神奈川工科大学) .....77

### 〈世界のホットユース〉

イリノイ大学アルバナ・シャンペイン校滞在記 ..... 榊原潤 (筑波大学構造工学系) .....80

## THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol.6, No.2

1. Direct Numerical Simulation of Turbulent Pipe Flow with Nonuniform Surface Heat Flux (in Japanese).....1  
Satake, S. and Kunugi, T.

2. Natural Convection Heat Transfer of Fluid with Temperature-Dependent Specific Heat(in Japanese).....9  
Tanaka, A., Kubo, S. and Akino, N.

3. Heat Transfer Characteristics of Annular Type Heat Pipes Rotating around the Horizontal Axis .....21  
Mizuta, K., Hashimoto, R., Takahashi, Y. and Huang, S.