

ISSN 0910-7851

# 伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1995 October  
Vol. 34 No. 135

〈小特集：21世紀を支える低温利用技術の現状と展望〉

ISSN 0918-9963

**THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING**

Vol. 3

No. 4

社団法人 日 本 伝 熱 学 会  
The Heat Transfer Society of Japan

## 日本伝熱学会第34期（平成7年度）役員

会 長 副 会 長  理 事 (編集出版) 東 北 中国四国 北陸信越 (企 画)  九 州 (総 務) 北 海 道 監 事 評 議 員	相 原 利 雄 (東 北 大) 林 勇 二 郎 (金 沢 大) 鳥 越 邦 和 (ダ イ キ ン) 斎 藤 彬 夫 (東 工 大)  部 会 長 東 海 增 岡 隆 士 (九 工 大) 熊 田 雅 弥 (岐 阜 大) 伊 藤 正 昭 (日 立)  部 会 長 笠 木 伸 英 (東 大) 前 川 博 (新 潟 大) 関 西 荻 野 文 丸 (京 大) 柳 謙 一 (三 菱 重 工) 水 野 彰 (豊 橋 技 科 大) 部 会 長 関 東 河 村 洋 (東 理 大)  伝熱シンポジウム準備委員長 関 西 松 木 健 次 (シャープ) 尾 添 紘 之 (九 大) 金 子 邦 彦 (東 大)  杉 山 憲 一 郎 (北 大) 前 田 昌 信 (慶 大) 鈴 木 立 之 (富 山 県 立 大) 平 澤 良 男 (富 山 大) 功 刀 資 彰 (原 研) 一 宮 浩 市 (山 梨 大) 丸 山 茂 夫 (東 大) 長 坂 雄 次 (慶 大) 縄 田 豊 (八 代 高 専) 田 中 宏 史 (福 岡 工 大) 山 田 明 (三 菱 重 工) 三 田 地 紘 史 (豊 橋 技 科 大) 廣 田 真 史 (名 大) 小 林 健 一 (東 工 大) 早 坂 洋 史 (北 大) 山 岸 英 明 (釧 路 高 専) 高 橋 一 郎 (山 形 大) 稲 室 隆 二 (京 大) 竹 中 信 幸 (神 戸 大) 片 岡 勲 (京 大) 鈴 木 豊 彦 (鳥 取 大) 加 藤 泰 生 (山 口 大) 数 土 幸 夫 (原 研) 東 之 弘 (い わ き 明 星 大) 中 島 利 誠 (お 茶 水 女 大) 田 辺 新 一 (お 茶 水 女 大) David Copeland (東 工 大)	塩 治 震 太 郎 (石 川 播 磨 重) 日 向 滋 (信 州 大) 石 黒 博 (筑 波 大) 森 岡 幹 雄 (石 川 播 磨 重) 神 永 文 人 (茨 城 大) 西 野 耕 一 (横 浜 国 大) 師 岡 慎 一 (東 芝) 中 山 昭 男 (九 州 産 大) 森 英 夫 (九 大) 長 野 靖 尚 (名 工 大) 大 原 敏 夫 (日 本 電 装) 大 河 誠 司 (東 工 大) 三 松 順 治 (岐 阜 大) 戸 倉 郁 夫 (室 蘭 工 大) 原 利 次 (日 本 工 大) 泉 正 明 (岩 手 大) 小 澤 守 (関 西 大) 増 田 雅 昭 (シャープ) 橋 本 律 男 (三 菱 重 工) 奥 山 喜 久 夫 (広 島 大) 森 康 彦 (慶 大) 飛 原 英 治 (東 大) 小 原 拓 (東 北 大) 中 谷 元 (三 菱 電 機) 新 井 紀 男 (名 大) 川 西 康 平 (三 菱 重 工)
--	--	---

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進 (東 大)

# 伝熱研究 目次

## 〈第7回日本伝熱学会賞〉

第7回日本伝熱学会賞の報告

.....第33期日本伝熱学会表彰選考委員会主査 福迫尚一郎（北大）..... 1

## 〈小特集：21世紀を支える低温利用技術の現状と展望〉

小特集にあたって.....第34期編集委員会..... 3

生体組織の凍結保存技術.....棚沢一郎（東大）..... 4

液材料の閉鎖系凍結乾燥技術.....小林正和（共和真空技術）.....10

冷凍法による海水淡水化技術.....長島義悟（二井造船）.....20

アイスブラスト（氷球）による洗浄技術.....川口利明・多田益太（太陽東洋酸素）.....24

昇華現象を利用した除霜技術.....今井誠士（松下冷機）.....28

LNG冷熱を利用した排ガス中炭酸ガスの固化分離技術

.....竹内善幸・広中正吾（三菱重工業）・島田 裕・徳政賢治（中国電力）.....34

凍土と地盤凍結工法.....生頼孝博（精研）.....40

低温微細潜熱スラリーの蓄冷熱システム開発の動向.....稲葉英男（岡山大）.....46

氷雪冷房と雪発電の現状と展望.....対馬勝年（富山大）.....56

製氷機開発技術の現状.....鳥光廣志・三成勝信（ホシザキ電機）.....62

過冷却現象を利用した製氷技術.....武谷健吾（日本製鋼所）.....67

非水溶性不凍液によるフラジルアイス製造技術.....渡辺 裕（東芝）.....73

氷水搬送による冷房と熱交換器の性能

.....浜岡幸夫・富山靖司（前川製作所）・栗山知広（日建設計）・森川大和（関西電力）.....78

リキッドアイススラリーよりの採冷熱研究の動向.....山田雅彦・福迫尚一郎（北大）.....84

## 〈研究トピックス〉

空気輸送による流動床燃焼ボイラーへの碎粒炭の吹き込み.....中島忠昭（三興空気装置）.....90

## 〈お知らせ〉

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ.....91

第33回日本伝熱シンポジウム研究発表募集.....93

東海支部企画「東海伝熱セミナー」.....96

関西支部講演討論会のご案内	97
第33回燃焼シンポジウム	97
第3回K S M E / J S M E 熱工学会議	98
分子スケール/ミクロスケール伝熱の材料プロセスその他の分野への応用に関する国際シンポジウム	99
The 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics	100
Call for Papers/ 4th International Symposium on Heat Transfer with Exhibition	101
地域振興のための日本工学会「公開講演会」	101
インターネットを利用した情報サービスのお知らせ	102
トピックス記事情報ご提供のお願い	103
「伝熱研究」原稿の書き方	104
「伝熱研究」会告の書き方	105
編集委員会だより	106
事務局からの連絡	107
日本伝熱学会 入会申込み, 変更届用紙	109

# Journal of The Heat Transfer Society of Japan

Vol.34, No.135, October, 1995

## CONTENTS

### <Heat Transfer Society Awards>

On Selection of the 7th Heat Transfer Society Awards

Shoichiro Fukusako (Hokkaido University) ..... 1

### <Special Issue : Utilization Technology of Cold Energy for the 21st Century>

Preface to Special Issue

Editorial Board ..... 3

Cryopreservation Technology of Biological Materials

Ichiro Tanasawa (University of Tokyo) ..... 4

Freezing–Drying Technology of Liquid Materials

Masakazu Kobayashi (Kyowa Vacuum Engineering, Ltd.) ..... 10

Status in the Freezing Desalination Process

Yoshinori Nagashima (Mitsui Engineering & Shipbuilding, Ltd.) ..... 20

Washing Technology Using Ice Blast (Ice Particles)

Toshiaki Kawaguchi and Masuta Tada (Taiyo Toyo Sanso, Ltd.) ..... 24

Defrosting Using Sublimation Phenomenon

Seishi Imai (Matsushita Reiki, Ltd.) ..... 28

Solidification Technology of Carbonic Acid Gas from a Exhaust Gas Using Cold Energy of LNG

Yoshiyuki Takeuchi, Shogo Hironaka (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

Yutaka Shimada and Kenji Tokumasa (Chugoku Electric Power Co., Ltd.) ..... 34

Frozen Soil and Ground Freezing

Takahiro Oorai (Seiken, Ltd.) ..... 40

Cold Energy Storage System Development of Fine Latent Material Slurry at Low Temperature

Hideo Inaba (Okayama University) ..... 46

Air–Conditioning and Electric Power Generation Using Snow and Ice

Katsutoshi Tsushima (Toyama University) ..... 56

Development Technology on Ice Making Machine

Hiroshi Torimitu and Katsunobu Minari (Hoshizaki Electric Machine, Ltd.) ..... 62

Ice Making Technology Using Water Super-Cooling Phenomenon	
Kengo Takeya (Japan Steel Work, Ltd.) .....	67
Frazil Ice Making Technology Using Water Immiscible Coolants	
Yutaka Watanabe (Toshiba Corporation) .....	73
Air-Conditioning & Heat Exchanger Performances by Ice-Water Slurry Transportation	
Yukio Hamaoka, Yasushi Toyama (Maekawa Manufacturing, Ltd.),	
Tomohiro Kuriyama (Nikken Sekkei, Ltd.)	
and Hirokazu Morikawa (Kansai Electric Power Co., Ltd.) .....	78
Research Trends on Cold Energy Release from Liquid-Ice Slurries	
Masahiko Yamada and Shoichiro Fukusako (Hokkaido University) .....	84
<b>&lt;Research Topics&gt;</b>	
Blowing of Fine Coal Particles to Fluidized Burning Boiler by Air Transportation	
Tadaaki Nakashima (Sanko Air Plant, Ltd.) .....	90
<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	91

## 第7回 日本伝熱学会賞の報告

第33期日本伝熱学会表彰選考委員会

主査 福迫尚一郎 (北海道大学)

学術賞 (森康夫元会長の拠金による), 技術賞 (同, 天野工業技術研究所), および今期より新たに設置された奨励賞 (同, Wen-Jei Yang 氏) について公募を行った。応募のあった学術賞6件, 技術賞6件, 奨励賞6件に対して慎重に審査を行い, 下記のように決定した。なお, 賞の贈呈式は, 5月25日に開催された山口市の総会において実施されました。

### 1. 学術賞 (順不同)

#### (1) 極微小平面伝熱面の超高速加熱時における沸騰核生成

掲載論文: 第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
日本機械学会論文集B編 60巻 572号

代表研究者: 飯田 嘉宏 氏 (横浜国立大学)

共同研究者: 奥山 邦人 氏 (横浜国立大学)

遠藤 哲也 氏 (横浜国立大学)

本論文は, 沸騰現象の本質を理解するため, 極微小平面伝熱面によりこれまでに類のない108K/s程度の超高速加熱を実現し, 伝熱面上の既存核に優先する液体内での蒸気気泡発生による沸騰熱伝達を実現したものである。即ち, 揺らぎ核生成の実験を通して, 理想的な沸騰に対する重要な知見を得たものであり, これは突沸現象, フラッシング, 蒸気爆発など, 液相の準安定性に関わる問題の究明につながるものとして評価される。

#### (2) よどみ域近傍の乱流伝熱機構

(PIVとLIFによる温度と速度の面的時系列計測)

掲載論文: 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
日本機械学会論文集B編 60巻 573号

代表研究者: 菱田 公一 氏 (慶応義塾大学)

共同研究者: 前田 昌信 氏 (慶応義塾大学)

榎原 潤 氏 (慶応義塾大学)

著者らがこれまで進めてきた熱・流動に関わるレーザ計測技術を発展させ, レーザ誘起蛍光法による二次元面での流速測定, さらには蛍光強さの温度依存性を利用した温度と速度の同時計測を実現し, 二次元衝突噴流よどみ点における渦対の時空間挙動と, それによる高温流体の温度境界層外への噴出現象を明らかにしたものである。なお, 本研究で確立された計測技術は, 乱流場における熱伝達機構などの解明につながるものと期待される。

### 2. 技術賞 (順不同)

#### (1) プレートフィン付き熱交換器の研究

(第1報 平板フィン付き熱交換器の局所熱伝達特性)

掲載論文: 第18回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
日本機械学会論文集B編 57巻 537号

代表研究者: 神坂 光男 氏 (三菱重工業)

共同研究者: 河村 友植 氏 (三菱重工業)

岩淵 牧男 氏 (富山大学)

高橋 恭郎 氏 (広島電機大学)

本研究は, スパイラルフィン付き管群の伝熱性能に及ぼす管径, 管ピッチ, フィン高さ, フィン厚さ, フィン密度の影響を広範囲にわたって調べ, 高精度の伝熱特性予測式を作成するとともに, 管群の最適化の方法を見いだしたものである。その成果は, インド・オーライヤ・コンバインドサイクル発電所をはじめ, その後のガスボイラの蒸発器等の技術開発に適用され, ボイラの高性能化・コンパクト化に寄与している。

#### (2) トランスピレーション冷却による防災ロボットの熱制御

掲載論文: 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
伝熱研究 Vol.28, No.109

代表研究者: 矢野 歳和 氏 (石川島播磨重工業)

共同研究者：越智 正雄 氏（石川島播磨重工業）

本研究は、蒸発潜熱を利用したトランスピレーション冷却と多孔質材を組み合わせ、水の消費量である透水量を最小としたうえで、1500℃におよぼ高温雰囲気下で機器の温度をほぼ常温に維持できる技術を開発したものである。適用範囲は、消防、防火、耐火の関連設備および製鉄所などの高温環境の改善などと幅広く、消防服や消防自動車についてはすでに開発の段階にある。

### 3. 奨励賞（順不同）

#### (1) 乱流スクラフフラックス輸送方程式モデルに関する基礎的研究

掲載論文：第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
受賞者：鹿園 直毅 氏（日立製作所）

既存のほとんどの乱流モデルでは、長さと時間スケールが独立に規定される。同氏の研究は、変動量の相関を考慮した斬新な手法により、プラントル数およびレイノルズ数の影響を含めた乱流モデルの一般化に成功したものである。ここでの成果は二成分蒸気凝縮へも応用されており、今後の発展が期待される。

#### (2) 円管内流動水溶液の限界過冷却に関する研究

掲載論文：第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
受賞者：竹谷 健吾 氏（日本製鋼所）

同氏は、過冷却水の円管内流動、水溶液の安定流動、および管内凍結に関する実験的、理論的研究を行い、

その限界条件の究明によりこの種の流動過冷却水を用いた連続製氷に対する基礎を確立している。さらに、水や水溶液の過冷却現象の研究を進めており、今後の発展が期待される。

#### (3) 微小発熱面からの沸騰伝熱

掲載論文：第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
受賞者：伏信 一慶 氏（東京工業大学）

同氏は、チップ内部でのミクروسケールの伝熱機構を追究し、チップ表面から冷却流体への放熱に寄与する面積は素子寸法に比して著しく大きいこと、およびチップ表面全体の伝熱特性は従来の経験式で整理できる可能性があることなどを明らかにしている。これらは将来の冷媒による高性能冷却の基礎となるものであり、今後の発展が期待される。

#### (4) 水液滴表面挙動の分子シミュレーション

掲載論文：第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集  
受賞者：松本 壮平 氏（工業技術院機械技術研究所）

同氏は、アルゴンや水を対象とした、極めて斬新な分子動力学法によるシミュレーション、および遠赤外線吸収スペクトルとの対応の調査により、気液界面の微視的構造や周辺分子運動の挙動の詳細を明らかにしている。これらの成果は、液体の表面張力や蒸発・凝縮現象の究明の基礎となるものであり、今後の発展が期待される。



## 小特集にあたって

第34期編集委員会

水の惑星と呼ばれる地球の陸地の約25%は、一年中氷河や凍土に覆われており、さらに、半年にもわたる降雪を加えると、全陸地の30～50%もの面積に冰雪が存在している。古代より積雪寒冷地に住む人々は、様々な方法で、寒さに耐える工夫と逆に寒さを活用する試みを実践されてきた。例えば、冷気を利用した食糧の凍結保存、低温発酵、雪の断熱性を利用した雪層保温、氷板による重量物の搬送、氷結河川・湖の路盤としての利用、雪の水資源としての利用など、寒冷地ならではの雪氷の利用が生活に密着して行われてきた。

我々に身近な低温に係わる現象としては、水の凍結・氷の融解現象があり、それらは降雪、結氷、結霜、凍土や動植物の耐凍機能の具備など自然界に様々な形で係わる低温現象である。また、水が他の固形物質などと混ざり合った状態での凍結融解現象は、固形物質の水による分子吸着、融解物質による水溶液の形成、水の過冷却や氷点降下を伴うもので通常の水の凍結現象と著しく異なる振舞いをする。さらに、低温環境のもとでは、水と氷の極端な物性値の差（熱伝導率、比熱、密度、強さなど）、氷の付着力や融解潜熱の大きさ、氷の摩擦係数の小ささ、氷結晶の成長性などの物理化学的特徴以外に低温での生物活性力の低下など興味ある性質が現れる。これらの低温に伴う水を主体とした様々な物理、化学、結晶学および生理的現象が多くの産業分野で、冷凍機技術の進歩にみられるような低温製造技術の発展と共に利用・活用されつつある。例えば、食品貯蔵・加工分野では、凍結を含む低温環境が、食品の物理構造的変化、化学的成分の変化や、微生物の影響による生理的変質などの防止に利用されている。特に、食品中の水分を凍結させない新低温度帯で食品保存を行う氷温貯蔵技術などの温度制御方法も伝熱工学上興味のあるところである。さらに、近年食品加工分野においては、低温状態と

真空または高圧状態などを組合わせた複合条件下での凍結乾燥・濃縮・粉碎・磨砕技術や低温による食品内酵素作用による低温醸造そして凍結による殺虫・殺菌作用も食品衛生上利用され始めている。医療分野においても、低温における細胞機能の低下を狙った低体温麻酔、血液などの生体組織の凍結保存そして凍結手術にみられる細胞組織の破壊の両面より、低温現象が積極的に利用されている。氷-水の大きな潜熱を利用した氷蓄熱技術も、夜間電力の有効利用の立場から我国に普及しつつあり、現状では約40種類もの特徴のある氷蓄熱システムが検討されている。

これら、食品、医療、空調分野以外にも低温に伴う諸現象が利用されている。例えば、土木分野での地盤凍結工法、凍結による管閉塞を目的とした凍結止水弁や氷粒子調合コンクリートなど、機械加工分野での氷球ショットブラストや凍結チャックなど、化学工学分野での固液混合体の凍結乾燥や海水の凍結淡水化など、さらに、氷の融解潜熱を利用した氷コンデンサー、生ゴミの凍結による防臭、霧の凍結による人工消霧、氷の小さな摩擦抵抗を利用した氷車輪など様々な分野で、意外なほど多く低温に伴う諸現象が利用されている。

本小特集は、このような低温に係わる諸現象を利用する具体的な例の一部を、その分野での専門家である諸先生に解説を賜り、低温現象の利用における意外な側面を本学会員の皆様にご理解願うことを主な目的として企画されたものであります。さらに今後、低温利用技術の新展開と熱力学、伝熱学的立場での低温現象の基礎・応用研究やその体系化に向けての興味を皆様に抱いて戴ければ大変幸せであります。

最後に、御多忙中にも拘わらず、解説記事のご執筆を賜りました著者の方々に、心より感謝の意を表す次第であります。

# 生体組織の凍結保存技術

棚沢一郎(東京大学生産技術研究所)

## 1. 背景

ある生物のからだ全体、あるいは一部の器官や組織などを、生命機能をまったく損わずに長時間にわたって保存する技術の確立は、生命科学と工学との境界領域の課題としてもっとも重要かつ興味あるものの一つである。例えば、最近肝臓などの臓器移植が話題となっているが、これに関する最大の問題点の一つは、需要と供給の時間的・空間的なアンバランスであり、もし提供者から摘出された臓器の長期間保存が可能になった暁には、大きな障害の一つが取り除かれ、社会的にも重要な問題が解決に向かうことになるであろう。

生物の器官や組織の保存には、いろいろな方法が試みられている。2、3日の保存で足りる場合には、氷点よりやや高いぐらいの温度の灌流液中での保存が普通である。しかし、長期にわたる保存が必要な場合には、極低温での凍結保存(cryopreservation)がもっとも確実な方法と考えられる。

周知のとおり、生体組織の代謝活動は温度とともに低下するから、例えば液体窒素温度(-196°C)程度の低温では実質上まったく代謝が停止し、凍結前の状態を半永久的に維持することも原理的には可能なはずである。

実際、バクテリア類、植物の種子、精子、卵細胞、受精卵、赤血球、骨髄細胞、角膜、皮膚などの凍結保存技術はすでにある程度まで確立している。しかし、これらはいずれも単細胞あるいは単純な形態・構造をもち寸法も小さいものであって、もっとスケールの大きいもの、あるいは複雑な構造をもつ生体組織についての凍結保存技術はまだ確立していない。(なお、付け加えるならば、寸法の小さい単細胞でありながら、まだ凍結保存に成功していないものがいくつかある。例えばヒトの血液中の血小板や顆粒球(granulocyte)などの凍結保存は完全には成功していない<sup>(1)</sup>。)

1986年にサンフランシスコで開かれた第8回国際伝熱会議の折、カリフォルニア大学バークレー校のBoris Rubinsky教授は凍結保存と凍結手術に関する基調講演<sup>(2)</sup>を行い、両者の伝熱工学的側面を強調した。筆者はこの講演に深い感銘を受け、生体組織の凍結保存技術の研究に手を染めてみることにした。手始めとして、各種の生命維持器官を備え、十分に複雑な構成をもった微小生物であるミジンコを用いて凍結保存実験を試みた<sup>(3)</sup>。幸いにしてある程度の成果を得たので、次に何を対象にすべきか思案していたところ、日本医科大学の二宮淳一先生から、血管の凍結保存についての共同研究の申し入れを受け、現在それを継続中である。

対象が生体であるとは言え、凍結保存で生起するいくつかのプロセスは、熱および物質移動現象にほかならない。そこには伝熱学の知識を応用する余地が十分にある。しかし、一方では「生きている」組織が対象であり、また細胞という極めて微妙な構成単位が究極の取扱い対象であるという点で、これまで我々が扱ってきた過程とはまったく異質の研究分野でもある。そして、このような同一性と異質性の共存が、凍結保存の研究を魅力的なものにしていると言えるのではないだろうか。

## 2. 最適冷却速度

生体組織を冷却し凍結させる場合、組織の構成単位である個々の細胞の内外で起こる現象は、冷却速度によって大きく変化する。これまでの研究により、凍結保存の成功率の高い冷却速度域は二つあると考えられている。図1はそれを定性的に示したものであり、横軸には冷却速度、縦軸には生存率がとってある。この図によれば、B点およびD点での生存率が他より高い値となっているが、そこで生ずる現象は次のようであ

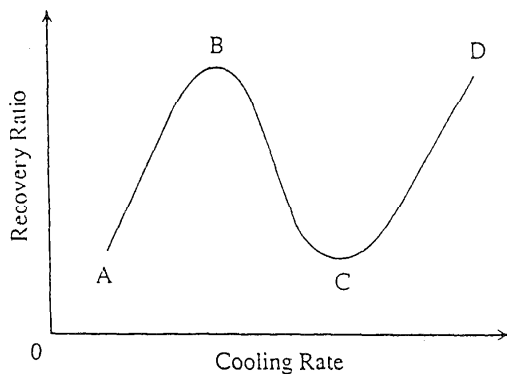


FIG. 1 QUALITATIVE RELATIONSHIP BETWEEN RECOVERY RATIO AND RATE OF COOLING

ろうと推測されている。

まずD点に対応するきわめて大きい冷却速度では、細胞内外の水はほとんど瞬間的に固体化し、氷の結晶構造が認められないアモルファス相に近い状態となる。これをガラス化(vitrification)と呼ぶが、この場合には細胞は損傷を受けない。例えば、ヒトの赤血球を保存液とともにストロー状の容器に入れて、液体窒素中に浸漬することにより100%に近い凍結保存の成功率が得られているが、このときの冷却速度は1000°C/min程度かそれ以上と推定され、ガラス化が起こっているものと考えられている。

一方、細胞の集合体である組織を比較的緩慢に冷却していくと、細胞の外部にある水溶液がまず凍結してそこに氷晶ができる。さらに冷却を続けると、細胞膜の内外の浸透圧の差により細胞内の自由水の一部が外部に浸出し、細胞外の氷晶の表面で凍結する。これを細胞外凍結(extracellular freezing)といい、図1のB点はこれに対応する。細胞外凍結では、細胞内の水分が失われるために細胞自体は収縮し、細胞内電解質が濃縮される。冷却がさらに進み細胞内に氷晶が形成されても大きくは成長せず、細胞膜や内部構造に害を与えない可能性がある。これまでの報告によると、ヒトのリンパ球(lymphocyte)、骨髄細胞などを0.1~1.0°C/minの速さで細胞外凍結させた場合、50~100%の生存率が得られている。

しかし、細胞外凍結を起こす冷却速度を選ぶには慎重でなければならない。あまり冷却速度を遅くし過ぎると細胞からの脱水(dehydration)が進み、細胞内電解質溶液が過度に濃縮されて、細胞膜に障害(塩害)が生ずることになる。また、細胞膜の過剰な収縮、および外部で成長する氷晶からの物理的な力に起因する損傷の可能性もある。

逆に冷却速度をB点よりは速く、ガラス化には至らない程度にすると、細胞膜を通しての水分の移動が間に合わず、脱水が十分に起こる前に細胞内で氷晶が生成される。このような細胞内凍結(intracellular freezing)が生じると、成長した氷晶により細胞膜が損傷を受け凍結保存の成功率は低下する(図1のC点)。

以上のことから、生体組織の凍結保存を成功させるには、冷却速度を極端に大きくしてガラス化を起こさせるか、細胞外凍結がうまく進行するような最適な緩慢凍結速度を選んでやればよいことになる。しかし、対象とする組織がある程度以上大きい場合には、伝熱による律速のために、全体を均一にガラス化することが不可能になる。この場合には細胞外凍結によるしか方法がないが、そのために必要な最適冷却速度は、対象とする組織によって異なるから、これを実験によって決定しなければならない。

### 3. 最適加熱融解速度

凍結保存した組織を加熱融解して復活させる過程についても当然伝熱学的な配慮が必要である。ただし、上に述べた冷却凍結の場合にくらべるとそれほど微妙な配慮は不要のようにも思われる。

加熱融解プロセスにおける問題は二つある。一つは、再結晶化(recrystallization)による氷晶の生成あるいは肥大化による力学的損傷、もう一つは細胞内への急速な水分の侵入によるショックである。前者は急速凍結(ガラス化)の場合、後者は緩慢凍結による細胞外凍結の場合に生じやすいと考えられている。いずれにせよ、対象とする組織それぞれに適した加熱融解速度を実験などによって求め、それを実現するような制御を行うことが必要である。

#### 4. 凍害防御剤

前述のように、細胞の凍結において問題となるのは氷晶の成長による力学的損傷、細胞からの脱水による塩害や細胞膜の変形による損傷などであり、これらを総称して凍害と呼ぶ。現在、生体組織の凍結保存を行う際には、組織をそのまま冷却し凍結させるのではなく、凍害を防止（あるいは緩和）するための物質を予め組織細胞に吸収させておくのが普通である。このような物質を凍害防御剤 (cryoprotectant, cryoprotective agent, CPA) と呼ぶ。1948年にC. Polge博士が凍結実験中に誤ってグリセリンを細胞に加えてしまい、これが試料の凍結保存の状態を著しく改善することを発見して以来、凍害防御剤を用いることは凍結保存における常識となり、現在でもより有効な凍害防御剤を発見しようという努力が続けられている。

凍害防御剤には、細胞膜透過型と細胞膜非透過型の2種類があり、後者は前者よりも分子量が大きい物質である。

凍害防御剤がなぜ有効に働くのかというメカニズムについては、さまざまな説明がなされているものいづれも完全ではない。細胞膜透過型の場合について言えば、細胞外凍結の際の水分の浸出に呼応して細胞内に侵入し、細胞の過度の収縮と脱水によるたんぱく質の変性を防止すると同時に、細胞内の氷晶の肥大化や、氷晶による細胞膜への力学的損失を軽減する働きをしているのではないかと推測される。

現在、生体組織の凍結保存に用いられている代表的な凍害防御剤は、グリセリンおよびジメチルスルフォキシド (DMSO) である。両者とも比較的分子量が小さく、細胞膜を透過して中に入り込むことができる。この他トレハロース、シュクロースなどの糖類も用いられることがある。問題は、対象とする生体組織についてどの凍害防御剤が最も適しているか、どの程度の濃度がよいのかを決定する理論的根拠がほとんどないことで、現在のところ経験と試行錯誤による以外にはまったく何の方法もないという状況である。

#### 5. 血管の凍結保存

##### 5-1. 血管の凍結保存の必要性

現在、ヒトの身体の各部位の血管に障害が生じ、代

替の必要が生じた場合の処置としては、人工血管、動物の血管、あるいは自分自身の血管の移植 (自家移植) などが行われている。血管の代替が必要になるもっとも代表的な症例は、心筋梗塞の主原因である冠状動脈 (心臓の筋肉に酸素や栄養物を供給している血管) の障害の場合で、米国では年間約360,000件の手術が行われており、その他の部位の血管代替手術も約100,000件に上る<sup>(4)</sup>。血管の代替の処置のうちで、人工血管の移植は、代替を必要とする血管の直径が大きい場合のみある程度可能であり実施例も多いが、冠状動脈の場合のように内径3mm程度の血管では、血栓形成による閉塞が問題となる。さらに、患者が若年層の場合には、身体の成長に伴って再移植を余儀なくされるという不都合がある。動物の血管 (すでに生命活動を停止したもの) の移植についても同様の問題がある。この点、患者自身の身体から採取した血管の移植 (自家移植) では拒絶反応の問題はなく、生きている組織の移植なので最も成功率が高いが、供給源として限りがあり、また採取した部位 (冠状動脈の代替手術では、大腿部の伏在動脈を使うのがふつうである) において痛みや麻痺などの後遺症が生ずることがある。さらに米国では、血管の自家移植を行った患者の15%が再発のため再移植を行っている<sup>(4)</sup>。

このようなことを考えると、血管についても、凍結保存技術の確立によって、需要と供給の時間的・空間的不均衡の是正を図ることが最良の解決策ではないかと考えられる。また、血管の凍結保存に成功すれば、その知見を他の生体組織の凍結保存に応用することも十分に可能なはずであり、現在大きな社会的問題となりつつある臓器移植に一つの解決策を提供することができるのではないかと考えられる。

##### 5-2 凍結保存の方法

すでに述べたように、生体の凍結保存を成功させるための重要項目は次の三つである。(1) 冷却凍結速度の最適化、(2) 加熱融解速度の最適化、(3) 凍害防御剤の種類 (複数物質の混用を含む) と最適濃度の選定。これらをどのように決定すべきかについての信頼できる理論がほとんどない現状では、研究者のこれまでの経験と勘に頼る以外にない。

図2に凍結装置の概略を示す。これは液体窒素を冷

却剤として用いた自製のプログラム・フリーザーで、供試生体組織の温度をきわめて精度よく制御しつつ変化させることができるようになっている。デュワー瓶⑧の中に供試体収納用の容器⑦を懸垂させ、収納容器に巻き付けたヒーター線への電力供給を制御することによって、供試体の温度をコンピュータ・コントロールできるようになっている。

収納容器の詳細は図3に示すとおりで、アルミ製円筒容器の外側に巻き付けたコンスタンタン線が加熱用ヒーターとなる。管壁には長手方向に熱電対が挿入してあり、その出力はデジタル電圧計②とパーソナル

コンピュータ①に送られる。

生体組織を凍結させる際には、まず実験動物から摘出した血管を、抗生物質を混入した凍害防御剤溶液に浸漬しつつ収納容器内に納め、ゴム栓をした後、図2のデュワー瓶内に入れる。そして加熱用コンスタンタン線への供給電流を制御しながら所定の冷却速度で凍結を進行させる。

筆者らの実験では、多くの場合、4℃から-3℃までは-3℃/min、-3℃から-40℃までは-1℃/minの冷却速度を採用し、過冷却防止のため-4℃付近で植氷を行った。-40℃まで冷却した後は、別の容器の液体窒素中に浸漬して保存した。

解凍の場合にも同様にヒーター入力制御による温度コントロールを行い、-196℃から-3℃まではほぼ15℃/min、-3℃から4℃までは0.5℃/minの温度上昇速度とした。

実験には主として実験用に育成されたラットの大動脈(長さ約10mm、外径約2mm、壁厚約0.2mm)を使用した。他にイヌの動脈(長さ約10mm、内径約2mm、壁厚約0.5mm)およびブタの頸動脈(長さ約80mm、内径約5mm、壁厚約1mm)も用いた。

凍害防御剤としては、イヌの血管の場合には10%グリセリン溶液、ラットおよびブタの血管の場合10%ジメチルスルフォキシド(DMSO)溶液を用いた。ただし、ここでの濃度は、細菌による感染防止のための抗生物質や補助成分(培養剤など)を混入した生理食塩水溶液中の質量分率である。

### 5-3 凍結保存の結果

以前に行ったミジンコの凍結保存実験の場合には、解凍後にミジンコの心臓の鼓動あるいは触肢等の器官の運動を確認して生死の判別をすることができた。しかし、血管の場合にはそのような判定法が使えないため、次のような方法を試みた。

(1)形態検査:凍結前の健全な血管と、凍結保存後に解凍した血管の形態・構造などを顕微鏡下で比較し、変化の有無を調べる。

(2)ATP(アデノシン3リン酸)量の比較:細胞の死によって細胞内のATPの量が減少することを利用して判定する。ATPの量はNMRなどにより測定する。

(3)細胞培養:解凍後の血管の内皮細胞あるいは筋組

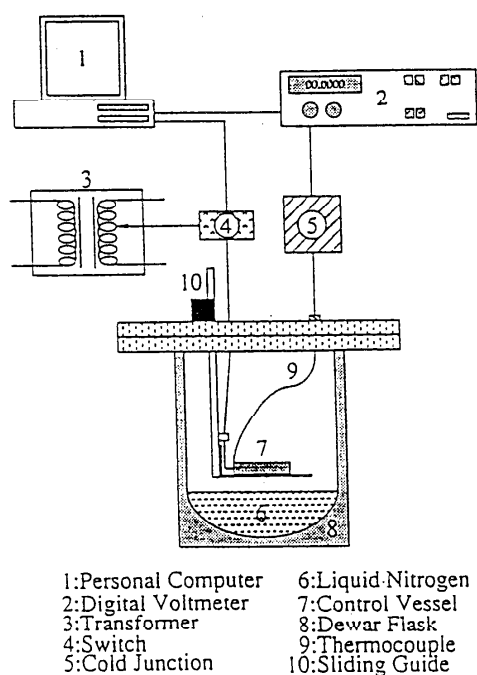


FIG. 2 EXPERIMENTAL SETUP

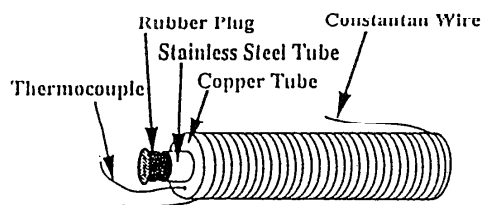


FIG. 3 CONTAINER FOR FREEZING AND THAWING BLOOD VESSEL

織細胞を培養し、それが増殖するかどうかにより成否を判定する。

(4) 同種移植: 解凍後の血管を、同種動物に移植し、移植された動物が生存できるかどうかを見る。生存できた場合には、数週間あるいは数か月後に解剖して、移植した血管を再摘出し、状態観察を行って成果を判断する。

以上の方法のうち、(1)はおおよその事前判定としてしか役に立たず、形態的に異常がないということがそのまま凍結保存の成功を保証するものではないことは明らかである。(2)に関しては、イヌの大腿動脈の凍結保存後のものについて、解凍後NMR法を用いて、血管組織中のATP量の測定を試みたが、筆者らが用いた装置では検出できなかった。これは、用いた装置の感度が低かったためと考えられるが、同時に血管のような非運動組織では、含まれるATPの量自体がごく微量であるためではないかとも思われる。

(3)の組織細胞培養は、ブタの頸動脈およびラットの大動脈について行った。凍結保存の後、解凍した組織から凍害防御剤を除去し、メスで1mm<sup>3</sup>程度の大きさに細分化した組織を、コラーゲン被覆を施した容器中に培養液とともに入れ、インキュベータ内に静置した。1週間経過後から培地の交換と顕微鏡観察を繰り返した結果、細胞の増殖が確認された。また、血管の内壁表面から内皮細胞のみを取り出して培養した場合についても増殖を確認した。

組織培養によって、一応凍結保存後の細胞の生存が確認されたことになるが、血管の凍結保存の最終的な成否は、(4)の同種移植によって判定すべきものと考えられる。著者らの共同研究チームでは、これまでに所定の冷却凍結プログラムにより凍結し、液体窒素中で4週間ないし16か月間にわたって保存したラットの動脈を32匹の同種のラットの腹部大動脈に移植した。1995年4月の時点では8匹が1週間以上(うち3匹は3か月以上)生存を続けた。生存率は最近になるにつれてさらに上昇しつつあり、凍結・解凍の技術および凍害防御剤の使用についてはほとんど問題がないものと判断している。

さらに、移植後2週間以上生存を続けた7匹のラットから移植した血管片を再度摘出し検査した結果、血管

TABLE 1. GROWTH RATE OF THE DIMENSIONS OF ALLOTRANSPLANTED BLOOD VESSEL

	Period after implantation	Percent increase in	
		Length	Diameter
A	2 weeks	22	26
B	1 month	35	39
C	1 month	29	33
D	2 months	61	93
E	2 months	52	86
F	4 months	79	116
G	2 months	38	52

の組織はいずれも健全な状態であって、凝血等による閉塞は見られず、内壁表面には内皮細胞が付着していることが確認された。また、移植前と再摘出後の血管の長さおよび直径を比較したところ、表1に示すようなデータが得られた。すなわち、7個の移植片のすべてについて、移植期間の長さに応じた成長が見られ、移植期間が最長の4か月経過後のものでは、長さが79%、直径が116%も増加していることが認められた。これは、移植された血管片が十分な活性を持っていることを示す有力な証拠であり、このことから筆者らによる血管の凍結保存技術が妥当なもの判断できる。

## 6. おわりに

本稿ではまず生体の凍結保存技術の研究がどのような重要性をもつかについて簡単に述べ、続いて生体組織の凍結保存を成功させるに必要なマクロなパラメータとその作用メカニズムを説明した。そして、研究の具体例の一つとして、筆者らが共同研究を実施している血管の凍結保存実験についてその概要を紹介した。

これまで多くの熱技術と伝熱学との関係がそうであったのと同様に、生体組織の凍結保存も技術が先行し、基礎研究が後を追いかけるといった傾向がある。筆者らが現在行っている動物の血管の凍結保存にしても、試行錯誤と経験から何とか制御パラメータの最適値を選んでいたのであって、組織細胞の内外で起こっている相変化を伴う伝熱、細胞膜を通しての水分・凍害防御剤・電解質溶液の移動、細胞の変形などの基本的現象の十分な理解の上で研究を進めているわ

けではない。

しかし、このような現状を何とか打開しない限り本当の意味での学問の進展は期待できないはずであり、そうだとすると、今後は細胞レベルでの現象の観察と解析が研究の重要な方向になるものと考えられる。実際、日本伝熱学会に所属する何人かの研究者の視点もその辺りにあるようで、例えば石黒ら<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup><sup>(7)</sup>は、赤血球を懸濁させた溶液を一方向凝固させる過程での氷晶の成長と赤血球との相互干渉の観察を続けており、また林ら<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup>は、細胞の凍結・解凍の際に生ずるミクロスケールの現象の理論的解釈を行い、凍害発生メカニズムとの関連づけを試みている。また、谷下ら<sup>(10)</sup><sup>(11)</sup>は、メダカの卵を用いて凍害の発生と凍害防御剤との関係を実験的に検討している。さらに、筆者らの研究室でも、生体組織の凍結保存実験と並行して、凍結過程の数値シミュレーションや、シミュレーションを行う際に必要となる細胞膜の浸透係数の測定などを実施している<sup>(12)</sup>。このような研究を押し進めていくことによって、これまでほとんど手探りの状態で行われてきた凍結保存技術の開発に堅固な理論的根拠が与えられることになるであろう。

筆者の私見では、今後の伝熱研究が目指すべき方向の一つは微視的なメカニズムの正確な把握であり、もう一つは他分野との境界領域への展開である。細胞というミクロスケールの構成要素から成り立っている生体組織における熱・物質移動現象の理解を必要とする凍結保存の研究は、伝熱研究者にとって正しく格好の課題といえることができるのではないだろうか。

#### 文献

(1) 高橋恒夫：「ヒト血管細胞の凍結保存：現状と将来」、第41回低温生物工学年会及びセミナー講演要旨、p.41(1995)。

(2) B. Rubinsky: "Recent advance in cryopreservation of biological organs and in cryosurgery," Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, vol.1, pp.307-316(1986)。

(3) 棚沢一郎、永田真一、木村直宏：「生体の凍結

保存に関する研究(ミジンコによる凍結実験)」, 日本冷凍協会論文集、10-3、(1993)、pp.111-116(1993)。

(4) R.T. McNally and C. McCaa: "Cryopreserved tissues for transplant," Low Temperature Biotechnology (J.J. McGrath and K.R. Diller, ed.), BED-vol.10/HTD-vol.98, ASME, pp.91-106(1988)。

(5) 石黒博、B. Rubinsky: 「生体細胞を含む水溶液の方向性凝固過程における氷結晶と細胞の微視的挙動」、日本機械学会論文集(B編)、60-572, pp.1349-1355(1994)。

(6) 石黒博、B. Rubinsky: 「凍害防護物質を含む赤血球懸濁の凝固過程における微細構造に対する不凍たんぱく質の影響」、日本機械学会論文集(B編)、60-579, pp.3748-3754(1994)。

(7) 石黒博、B. Rubinsky: 「方向性凝固過程における氷結晶と赤血球の微視的挙動に対するヘマトクリットの影響」、日本機械学会論文集(B編)、60-579, pp.3755-3761(1994)。

(8) Y. Hayashi, N. Momose, Y. Tada and A. Takimoto: "Heat and mass transfer at microscales during freezing of biological substance," Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf., Brighton, vol.4, pp.37-42(1994)。

(9) Y. Hayashi, N. Momose and Y. Tada: "Microfreezing of biological material," Thermal Science & Engineering, 2-1, pp.85-89(1994)。

(10) 山口亮、氏平政伸、相沢直樹、谷下一夫: 「生体組織の細胞外凍結による損傷の評価」、第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集、vol.1, pp.97-98(1995)。

(11) 氏平政伸、山口亮、谷下一夫: 「mmオーダーの生体組織の解凍過程に関する研究：解凍後の顕微鏡観察によるメダカ受精卵の形態保存」第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集、vol.1, pp.99-100。

(12) 白樫了、棚沢一郎: 「生体組織の凍結過程の数値シミュレーション」、日本機械学会論文集(B編)、61-587, pp.2642-2647(1995)。

# 液材料の閉鎖系凍結乾燥技術

小林 正和 (共和真空技術株式会社)

## 1. まえがき

### 1.1 研究の目的—その技術的背景

無菌製品、酸素(光)感受性製品、粉塵が操作員に有害ないし苦痛を強いる製品などを、原液ラインから乾燥製品の収集まで、完全な閉鎖系内で処理できる凍結乾燥システムの開発は、凍結乾燥技術が広く工業に活用されだした1960代初期からの長年の課題であった。しかし多くの挑戦にもかかわらず、今日も工業的凍結乾燥は殆ど全て開放空間での材料と容器のハンドリングを伴う棚段乾燥機で行われている。

この10年、バイオテクノロジーの進歩により、生物由来の微量成分の量産の道が開け、また、医薬製品の品質向上と、そのための管理規制の国際化討議が活発化する過程で、この難点が改めて厳しく論じられてきた。Cooperは、論文“バルク医薬品製造の諸問題:FDA査察所見”の中で、「しばしば最大の汚染問題を引き起こすのはトレイ乾燥機である。その内部は洗浄困難、トレイの保存と洗浄は煩瑣、製品のすさまじい環境への露出…」<sup>1)</sup>と指摘し、Avallon(FDA)は論評“無菌製品の規制上の諸問題”の中で、「無菌(非凍結乾燥)粉末の製造を滅菌された閉鎖系内で遂行するための現代技術は整っている」<sup>2)</sup>として、その設備を欠く事業所は容認できないと警告しているが、引用の通り、凍結乾燥品は勸告から除外せざるをえなかった。1990年の生物製品凍結乾燥に関する大規模な国際シンポジウムの冒頭講演<sup>3)</sup>で、Reylはバイアル(vial)注射剤・棚段凍結乾燥の難点を、品質一様性の見地からも論じて、閉鎖系内連続処理による均質化の必要を強調した。

### 1.2 閉鎖系凍結乾燥の従来の試み

#### (a) 凍結粒体の動的凍結乾燥

液や粉粒体材料のハンドリングに比べ、閉鎖系内凍

結乾燥システムの困難さは「凍結」にある。従来の非トレイ閉鎖系の多くの試みは、その前段で液材料を粒状凍結体に整え、その後段では、回転・攪拌・振動・掻き落とし、あるいはベルトコンベア等により真空室内を輸送しつつ乾燥して真空ロックから収集する動的システムで、60年代後半から70年代初期に各種の成功が伝えられた。凍結造粒の方法は次の2つに大別される:

i) 破碎造粒…ベルト(ドラム)フリーザーによる薄層の凍結体を碎き篩分けた1~2mm前後の凍結粒を真空ロックから乾燥室へ送る(造粒過程は開放系)。

ii) 液材料をノズルから液体室素その他の寒剤中に噴射して、液滴(0.5~1.0mm)を瞬時凍結し、同じく乾燥室へ。または真空空間に噴霧して蒸発凍結させる。

破碎凍結造粒の技術は液状食品(コーヒーなど)凍結乾燥(トレイ方式)の普及には貢献したが、真空室内の粒体ハンドリングは実用に至らなかった。その主な難点は、凍結乾燥粒相互の擦れによる微粉の発生、飛散と付着であった。60年代末から70年代半ばまでの国際集会で、開発者たちは「微粉化は僅か1~2%」と主張したが、「非トレイシステムで製品の損失を1%以下にすることは至難であり、工業的連続プロセスでは1%の微粉化は深刻な障害となろう(Lorentzen)」<sup>4, 5)</sup>との批判の正しさが立証されるのに年月は不要であった。

#### (b) 直立チューブ(静的)凍結乾燥

他方、Seffinga<sup>6)</sup>とMason<sup>7)</sup>は別々に閉鎖系への展望を持つ静的システムを開発した。Seffingaは直立シェルチューブのシェル側を循環冷媒で冷却しつつ、チューブ内に液材料を満たし、筒面上に成長する凍層が所定厚に達したとき、未凍結部分を筒から排除(次回処理まで保存)し、液の除去によって生まれたチューブ内空間を真空にして、凍層をシェル側から穏やかに加熱して乾燥し、下部の製品層に自然落下させる。注目されること少なく、定着しなかった方式ではあるが、



我々は発表当時からこの方式に関心を持ち続けた。

閉鎖系内材料ハンドリングの最大の障害:「凍結」=「流動の禁止/材料の固定」を逆手にとって、運動機構による機械操作に頼らずに、一括注入液を直立面に均等薄層に分配し、乾燥製品を自然落下により収集する手法に注目しながら、①製品自然落下の不確実(Masonは筒内冷媒/外筒面凍層とし、多孔円板で乾燥品を搔落す); ②均等厚凍層形成の不確実……液全域の深い過冷却に続くチューブ全域の瞬時軟雪状(Slush)凍結の可能性; ③注入液の相当部分が乾燥できずに次回処理となる、の諸難点を不成功の原因と分析してきた。

### 1.3 研究の経過—Seffinga方式の再検討

1986年、顧客から薬液バルクの凍結乾燥について無菌・無汚染の将来基準に適うハンドリング方式の検討要請があり、閉鎖系凍結乾燥システムの開発目標を、Seffinga方式の再検討と発展に置くことを決定した。すでに棚段凍結乾燥機内部のCIP(分解無し)の完全自動洗浄とSIP(分解無し)の高圧蒸気滅菌は必須条件となりつつあり、閉鎖系内の複雑な運動機構は不適切と判断した。液材料の自由な流動性と凍結/昇華過程の材料物性を活かし制御することにより、Seffinga方式の

諸欠陥を解決することをテーマとした。

個別的な実験をへて1987年に実験用システムを試作し、従来の直立チューブ方式の3つの難点を基本的に解決した。1990年7月には小規模生産(兼パイロット)規模の閉鎖系凍結乾燥システムの製作に成功し、その秋の真空産業展に展示した。これらの装置を用いて、薬液、食品を含む各種溶液の乾燥テストを続けた。1991年の国際冷凍会議(Montreal)<sup>8)</sup>、1994年の国際シンポジウム(東京)<sup>9)</sup>における発表に対して、内外の装置技術、及び生物・医薬技術の両者から、「このシステムは、世界最初の完全閉鎖系凍結乾燥システムとして定着するであろう」との共通の高い評価を受け、1993年度の論文<sup>10)</sup>は日本冷凍協会「学術賞」を受賞した。

## 2. 閉鎖系凍結乾燥システムの概要

### 2.1 システムの構成

その概要を図1に示す。右がシェルチューブを含む要部の垂直断面と系統図、左がシェルチューブと蓋A、Bの上面図である。以下に本システムの特徴点のみを要約する(通常型凍結乾燥機との共通点は省略)。

#### (a) 主な構成機器

システムは次の3部分から構成される。

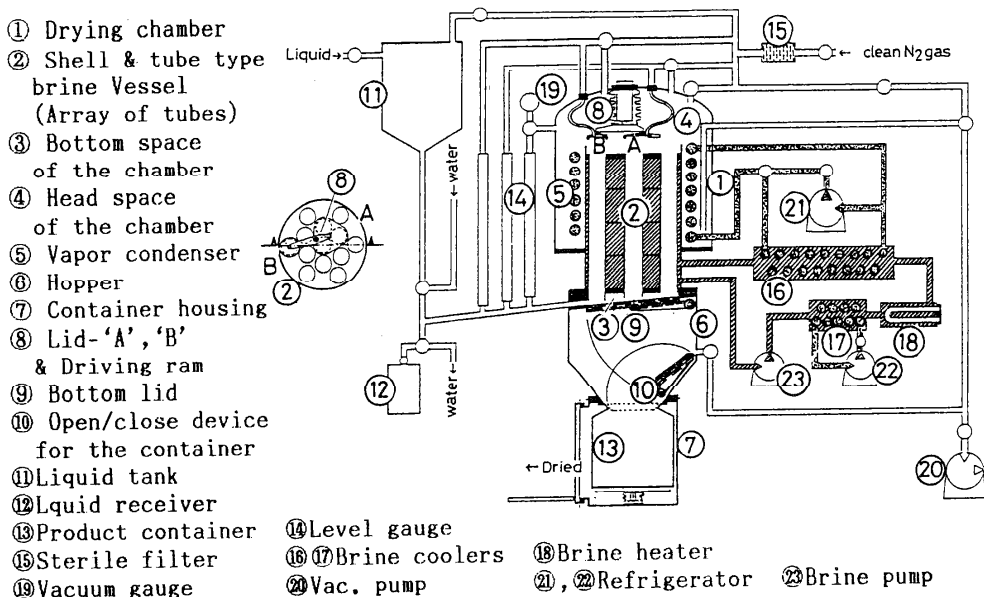


Fig. 1 - Diagram of the essential feature of a closed system freeze-dryer

- ①液タンク…単位バッチ注入量を一旦貯える。
- ①チェンバー…液タンクから一括注入された液を均厚層に分配し凍結後、真空下で昇華乾燥する。
- ⑥ホッパーと⑩製品コンテナ…乾燥製品を閉鎖系内で製品コンテナに収集、あるいは次工程へ送る。

(b) チェンバー①の構造

チェンバー(乾燥室)は次の4部分から構成される。

- ②直立シェルチューブ…チューブ内筒面がシェル側循環ラインにより約±50°Cの範囲で制御される(その機能は通常凍乾機の棚段に相当)。
- ③底部空間…上はシェルチューブ底面、下は底蓋⑨で限られ、高さは数cm。液をチューブに乾燥品をホッパーに送る(通常凍乾機材料搬入出部に相当)。
- ④上部空間…昇華水蒸気をトラップへ送る(通常凍乾機のトラップ連結管に相当)。この空間に機構⑧が装着される。
- ⑤トラップ…水蒸気を低温面(約-60°C)に凝結し真空を保持する。シェルチューブの周囲に配置。
- 以上、(a),(b)は、基本的にはSeffingaを踏襲したもので、次の(c)がその欠陥を解決した機構である。

(c) 液材料ハンドリング付属機構

次の諸機構の機能は、通常の凍乾法では機外(無菌室)の材料/容器ハンドリング、即ち、トレイへの液の計量充填と、棚上へのトレイ搬入に相当する。

- i) アイスライニング機構…液の注入に先立ち、清浄水(注射用水)を予冷チューブに供給し、チューブ内筒面とシェル底面に氷膜を形成後ドレーンする(氷膜は液とチューブ面との直接接触を防ぐトレイに相当する)。
- ii) ⑧多段階凍結機構…チューブ上蓋A, B及び同昇降機構から成り、液注入から凍結完了まで蓋A, Bがシェルに密着して、それぞれチューブのa群, b群の上端を塞ぐ(下記のiii, ivと共に、一括注入液を全チューブ面に均等配分する機構の一部)。
- iii) ヘッド圧調整機構…除菌フィルター⑮経由の調圧室ろ過ガスを供給してa, b, 及びo(蓋なし)の各チューブ群のヘッド圧を別々に調節する。
- iv) ⑭レベル監視機構…チューブ群内に注入された液面レベルを監視し、また成長する凍層厚を判断し、

ヘッド圧調整機構へ信号を送る。

## 2.2 主な工程

### (a) アイスライニング

予冷チューブに、清浄水(無菌製品では注射用水)を満たし、短時間保持してドレーンする。全チューブ面とシェル底面に約0.6mmの氷膜を形成する。

### (b) 均厚凍層の形成と予備凍結

- i) 蓋A, Bを降下してシェル上面に密着させ、a群(図1の例では、全13本中の3本)チューブは蓋A, b群(図1では1本)は蓋Bで上端を封じる。チューブ温度を所定値に制御する
- ii) 液タンクから所定量の材料をチューブに一括注入し、調圧機構によりa, b群のヘッド圧 $P_a, P_b$ とチェンバー上部空間圧 $P_o$ を、 $P_a = P_b > P_o$ に調整すれば差圧に応じて注入液はo群(図1では9本)に吸引され、a, b群レベルをそのチューブ下端に維持すれば注入液はa, b群チューブから排除され、下部空間とo群チューブのみを満たす。液は氷膜上に供給され、凍層は過冷却なしに均等に成長する。
- iii) 凍層の成長につれてo群チューブの液面は上昇する。これを監視し凍層が所定比率(図1の例では注入量の2/3)に成長したことを示すレベル信号により、各群のヘッド圧が、 $P_o = P_b > P_a$ に自動変換され、o群(9本)の未凍結液(1/3)がa群に移される。
- iv) a群の凍層が移送量の2/3に成長した時点で、ヘッド圧の再変換により未凍液はb群(1本)に移され、所定の凍層形成後の残液は、図1の例では注入液量の $(1/3)^3 = 1/27$ が受液器⑯に回収される。Seffinga方式では全チューブからであったドレーンは、この多段階凍層形成法により最終段1本分に減少する。
- v) 予備凍結の前段は凍層の順次形成と同時に遂行される。余剰液の排除後、共晶形成などの必要があれば所定のプログラムに沿ってチューブ温度が制御され所定の終点温度で予備凍結が完了する。

### (d) 乾燥工程

- i) 蓋A, Bは上昇してチューブからの昇華水蒸気流を妨げない位置までシェル上面から引き離される。
- ii) トラップが冷却され、チェンバー、ホッパー及び

コンテナ室が真空状態まで排気される。

- iii) シェル内循環ブライン温度が所定のロジックにより制御される。例えば、昇華期には、任意のチューブ(1~2本)の中心部空間に吊り下げられた温度センサーからの信号によって、当センサーが所定値(最適昇華温度)を維持するようにブライン温度が制御される。二次乾燥ブライン温度は、氷結晶昇華後の溶質部がガラス化温度以下を保って所定の残水率に達するように予め設定されたプログラムに沿って制御され、乾燥終点に至る。昇華期終点では筒面にライニングされた氷膜も消滅しており、筒面に付着せず乾燥製品は底蓋によりチューブ内に保持される。

#### (e) 乾燥製品の収集

- i) 真空保持のまま底蓋が開き、製品はホッパーをへて製品コンテナ内に自然落下する。落下後の製品形状・殆ど粉化するか、半ばケーキ形状を維持するかは溶液の種類と初期濃度などによって異なる。
- ii) 除菌濾過された乾燥室素ガスにより真空が破られ、機構<sup>⑩</sup>により窒素封入製品コンテナに蓋がセットされる(あるいは、製品は次工程へ送られる)。
- iii) 製品コンテナはコンテナ室から引き出され所定の位置に移される。

#### (f) 次バッチの準備

無菌製品の場合、あるいは異種製品への転換使用前には、システム内部と関連配管は自動洗浄(CIP)、高圧蒸気滅菌(SIP)、チェンバー内部の乾燥、真空完全性その他の確認検査などを経て終了する。

シェルチューブ面が氷膜で保護されているため、製品収集後のチェンバー内部は、昇華水蒸気に同伴して、飛散し、また落下時の擦れで軽く付着した僅かの製品微粉末が散在する程度で、同一非無菌製品の反復処理の場合にはトラップの融氷だけで次工程に移りうる。

### 3. 要解決3課題の結果とその検討

#### 3.1 実験と試験運転

##### (a) 実験装置

装置…主に試作機(3本チューブ、チューブ長=800mm、チューブ<内面電解研磨>内径=85mm)を使用、後に小型生産機(4本チューブ、チューブ同寸法)を併用した。

##### (b) 試料溶液

試料溶液…多数の食品/医薬品/化学メーカーからの依頼品を含め、多様な材料でシステムの全挙動をテストしたが、体系的実験試料としては、医薬品の代表的賦形剤のモデルとして、また物性データ文献が入手容易な溶液として、主にラクトース、スクロース、デキストリン、マンニトール水溶液を用いた。

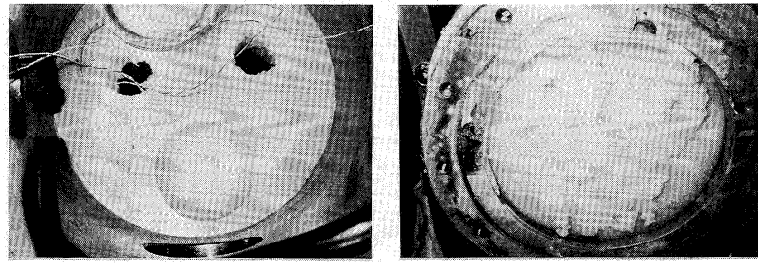
#### 3.2 薬液の過冷却と乾燥製品付着対策 筒面のアイスライニング

##### (a) 構想

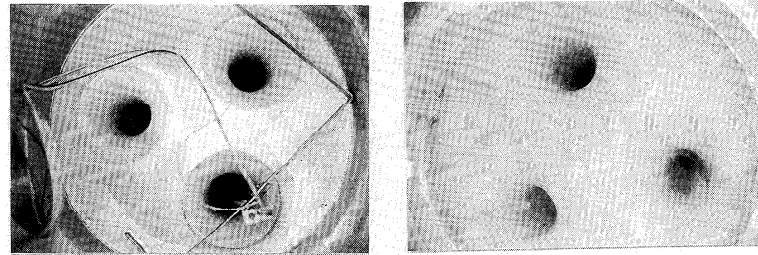
内筒面の表面処理は2課題の同時解決には適しなないと考えた。除菌濾過をへた薬液は-20℃前後まで過冷却する。その過冷却緩和には表面と液との「濡れやすさ」が、逆に付着緩和には液との「濡れにくさ」が要求される。我々は、その解決をアイスライニングに求めた。確実な均厚凍層の形成と、乾燥品の自然落下、乾燥残滓のない製品収集は、システムの必須の課題であり、氷膜自体はその分、凍結と昇華の熱負荷を増すことにはなるが、適度な均等厚のライニングに成功すれば、過冷却除去と水蒸気の透過性に優れる氷結晶構造により冷熱自体の節約も可能である。この構想の正しさは実験と各種試料の試験により確かめられた。

##### (b) 氷膜形成条件と必要膜厚

チューブ予冷温度(例、-10~-15℃); 注入水温(例、5~10℃); 注入/排出速度(水面昇降速度)(30~60mm/sec); 水面保持時間(1.0~1.5min)等の諸要因を変えて、ドレイン後にチューブ上下に著しい厚差を生まない条件を探し、残滓を残さない最低厚を求めた。氷膜厚は注入重量とドレイン重量との差から計算した。上下の厚差は測定していないが、差異が許容できるか否かは残滓付着の位置で判断した。確実な自然落下だけでなく、肉眼で観測できる僅かの残滓も許さない基準で、凍結乾燥後の残滓を観測した。平均厚 $\leq 0.4\text{mm}$ では僅かに残滓が認められる場合があり、 $0.5\sim 0.6\geq$ では各種条件下の反復で付着残滓を認めなかった。ただし、マンニトール溶液(殆ど全成分が結晶化凍結)の場合は、乾燥ケーキの膨張のため自然落下せず、例外的氷厚(例、1.5mm以上)を必要とした。



--without ice-lining-- Left, upper ends; Right, lower ends



--with ice-lining-- Left, upper ends; Right, lower ends

Fig. 2 - A comparison of frozen layer formations, with/without ice-lining

### (c) 過冷却防止効果

図2(写真)は、チューブ温度 $-5^{\circ}\text{C}$ 、19wt%デキストリン水溶液についてのアイスライニングの有無による凍層の差異を示す。アイスライニング後の凍層形成では、チューブ温度を $-3^{\circ}\text{C}$ としても、一様にチューブの中心軸に向かう針状氷結晶が全チューブ面から直ちにほぼ均等に成長した。しかし、アイスライニング無しの場合には、中央の部の液温が $-5^{\circ}\text{C}$ に達した後も、暫くは過冷却のまま経過し、不確定な経過時間(例、 $-5^{\circ}\text{C}$ 到達から1.7時間)後突然氷結し、氷結晶は、瞬時に過冷却状態のチューブ全域をslush(軟雪/雪混じり水)状に凍結し水蒸気通路となるべき空間を塞いだ。

### (d) 乾燥品、同残滓の付着防止効果

図3(写真)は、前図と同条件における、アイスライニングの有無による、製品落下時の差異を例示している。アイスライニング後の写真下(左、中)は、底蓋を水平に下げ、製品の半ばを引き出した状態。筒面には僅かの付着残滓も認められず、鏡面光沢を保って落下途中の製品を映している。下右は、静かに引き出された製品。他方アイスライニングの無い場合: 写真上左

は、3本のうち1本は自然落下しない状態で、上中は、その1本を強制落下後の3チューブの付着残滓を示す。上右は引き出された製品で、乾燥されたslushが詰っている。前述氷膜 $<1.5\text{mm}$ における膨張マンニトールの不落下は付着のためではないので、強制的の押し出した後のチューブ面に残滓は残らない。

## 3.3 多段階凍層形成による処理比率の改善

### (a) 構想

#### i) 多チェンバーシステム連続処理方式

製品溶液が無菌製品ではなく、低温ないし凍結保存可能な材料であれば、システムを多チェンバーシステムとして、Seffinga方式と同様に、全チューブ一斉に凍層形成後、全チューブの未凍液を受液器に回収し、これを次号チェンバーへの注入分に加え、連続処理することが合理的である。チェンバー数 $N$ 、単位処理サイクル時間 $\Theta$ であれば、 $\Theta/N$ の時差で、順次チェンバーをスタートさせることにより、所望期間の連続運転が可能である。しかし、少くない生物由来製品は低温/凍結によっても力価低下を生じ、

一般に無菌製品は長期間の連続運転になじまない。

## ii) 固定直立チューブ群のシェル状凍結法

所定の均等凍層をえて、多量のドレーンの難点を解決するには、注入液面より上部の内筒面を含む全筒面に均等凍層を形成させるねばならない。この方法は、シェル状凍結(shell Freezing)と呼ばれ、筒の回転により行われている。チャンバーを回転させたり、内部に複雑な機構を設けることなく、望ましくは新たな液濡れ表面部を作らずに…せっかくチューブ面と液との直接接触を氷膜で回避したのだから…この難点を解決することに集中した。前述の多段階凍層形成により、幾何級数的に本数を減らしたチューブ群に未凍液部を順送りする構想、及び、これをチューブ群のヘッド圧の調節により行う構想は比較的容易に生まれた。前段階のチューブ群から送られる液量と次段階のチューブ群に移す液量の比率を $m$ (図1の例、1/3)凍結段階数を $n$ (図1の例、3)と

すれば、注入量に対するドレーン量を $m^n$ (図1の例、1/27)に減少できる。 $m=1/3$ ,  $n=5$ で概算上はドレーンを0.4%にできる。しかし、その実現には次の2つの技術問題の解決を必要とした。

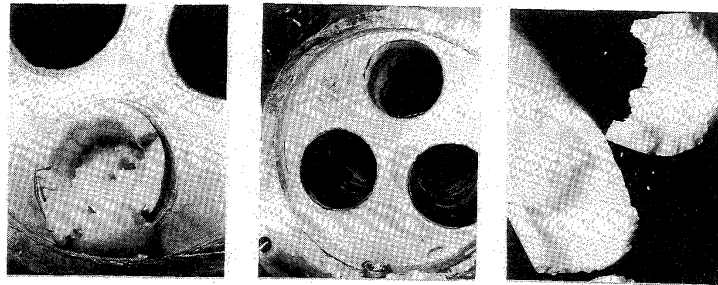
★凍層量、その比率(1- $m$ )をいかに監視検出するか?

その原理と監視機器の問題

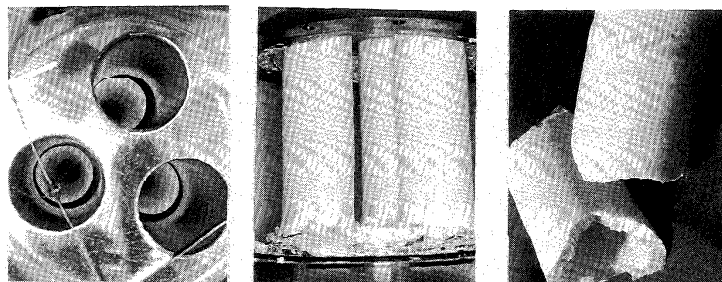
★凍層から溶質が排斥され、段階ごとに液濃度が増加することはないか? 濃縮回避の操作条件は?

(b)凍層量の検出

凍層と未凍液との界面、即ち凍結前線の凍層内氷結晶比率は低くケーキは軟弱であり、また、液材料によっては透明度に欠け、直接その界面を観測することは至難である。仮に可能だとしても、ブラインの流動状態によるブライン/チューブの境膜熱伝達係数には当然バラツキがあり、局所の界面位置が全凍層厚を正確に代表することはありえない。そこでチューブ内液面上昇により凍層量を検出する方法を採用した。凍層



--without ice-lining-- Left, One of the dried cakes did not fall; Center, (bottom view) residues on the tube surfaces, after being removed the cake by force; Right, the dried cake stuffed with dried material



--with ice-lining-- spontaneous falling of the cakes and mirrorlike tube surfaces: Left, (top view); Center, (bottom view); Right, the dried cake  
Fig. 3 - A comparison of tube surfaces and dried cakes, with/without ice-lining (after freeze-drying)

の成長につれて上昇する液面の変位は、溶液の種類・濃度・温度条件に依存するが、実験条件では、液面上昇幅は殆ど凍層厚以上、しばしばその2倍であり、正確に再現される。液面上昇は、主として氷結晶の量に支配され、溶液の凍結点曲線その他の物性が既知であれば、計算による概略予測が可能である。

各種のレベル計、変位測定計を試み、現在は磁歪方式による変位計・Model GYIL-200(SUNTEST Co. Japan)を採用している。図4のとおり、レベル上昇を1mm未満の精度で継続監視でき所定値の設定が容易である。

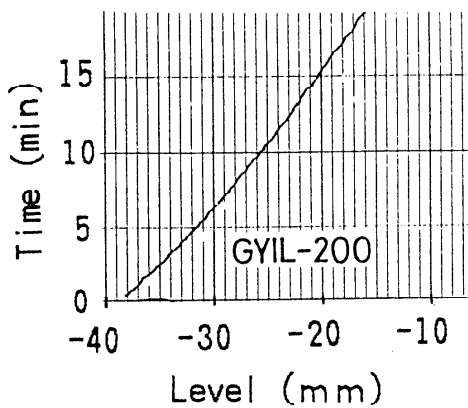


Fig. 4 - Level rise following the frozen layer growth monitored by a magnetostrictive displacement transducer. Level: distance from the top of the tube (Model GYIL-200/ SUNTEST Co., JAPAN)

(c)凍層からの溶質排斥と未凍部の濃縮現象

研究過程の半ばまで、我々には未凍液部の濃縮現象についての軽視があった。凍層形成の各種テストに便利な物性をもつため主に使用したデキストリンの場合は、20mm/2.5hrの緩慢凍結によっても濃縮現象が無視できたこと等の実験過程上の理由のほかに、凍結濃縮で著名なThijessen教授の次の叙述<sup>11)</sup>への吟味を欠く思い込みが禍した。「1%程度の稀薄溶液あるいは1cm/24hrの緩慢な凍層成長速度でなければ、感知できる濃縮はなく、濃度10%以上の溶液では残液部と凍層解凍液の溶質濃度は等しい」。

スクロース溶液を用いた、凍層量とレベル上昇との定量的観測と分析の過程で、図5( $\beta$ =凍層の率)に例示

のとおり、凍層成長17.5mm/0.5hr程度より緩慢な凍結では残液部の濃縮が観測され、多段階凍結の場合これを無視できないことが認められた。この濃縮は、氷結晶間隙に濃縮された溶液部の溶質が分子拡散により未凍液部分に移動するのではなく、直立面から水平に成長する針状氷結晶間隙の濃縮溶液部分が、その比重差により流下して、未凍部分の濃縮されていない液と置換する対流現象によるのであろう。凍層成長が急速であれば針状氷結晶間隙も狭く、凍結濃縮された溶液は氷結晶間隙に封じ込められる。幸い、試料中最も濃縮の顕著な溶液に属するスクロースの場合でも、-20℃

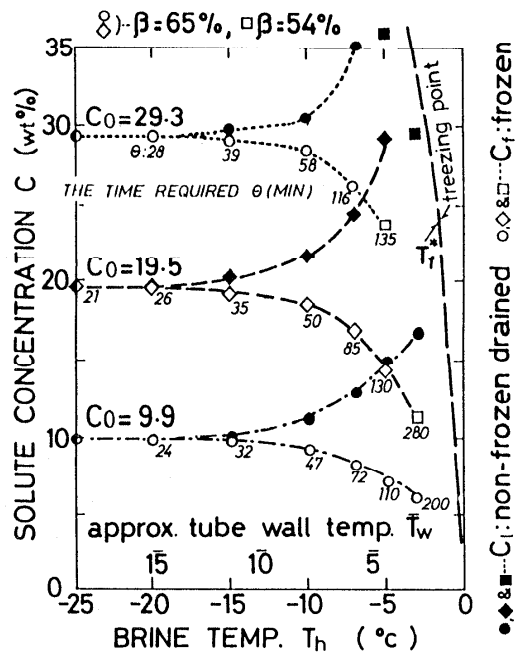


Fig. 5 - Changes of solute concentration  $C_f$  and  $C_1$  at  $\beta$  of 65% ( $\delta = 17.5\text{mm}$ ).  $\delta$ : Thickness of the frozen layer. (Sucrose aqueous soln)

程度の実現容易なブライン温度で、濃縮現象を許容範囲に抑制でき、製品ごとの事前テストで限界条件を確認しさえすれば、実用上の制約は少ないことが確かめられた。

d)多段階凍層形成の実験

ヘッド圧調整のためのチューブ上蓋は、社内実験機: 3本チューブ中の1本、小型生産機: 4本チューブ中の1本)としたので、多段階凍層形成の実験的確認は、残

液部比率 $m=1/2, 1/3$ 、段階 $n=1$ の実験によった。誤差の裕度として、標準最高液面をチューブ上端から数cm下に予定すれば、多段階反復によっても溢出し等の事故は回避できる見通しをえた。

#### 4. 凍乾工程と製品物性の特徴

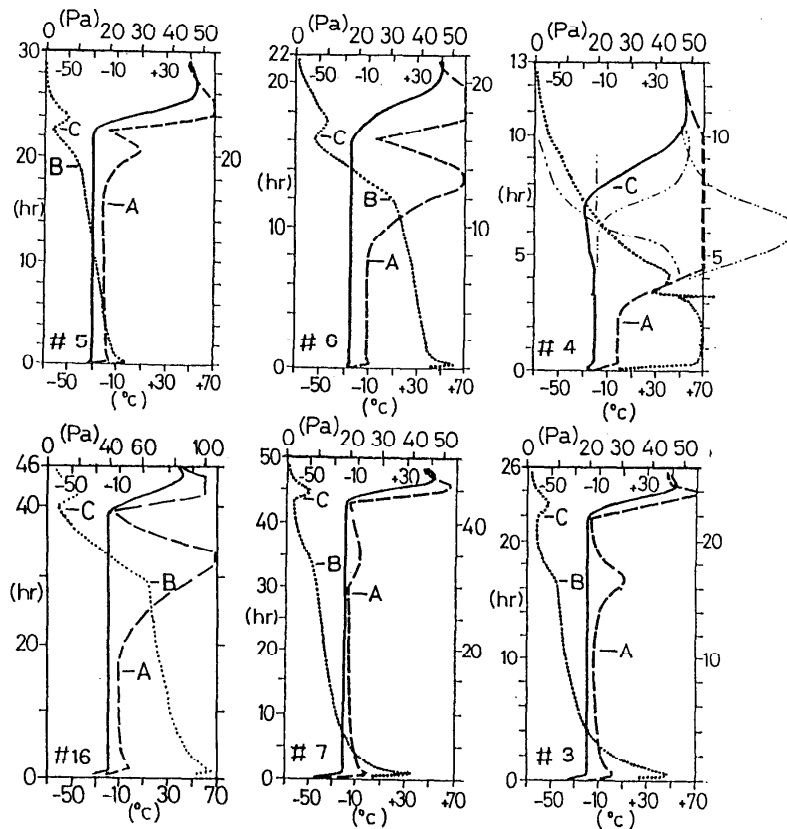
Seffinga方式の3つの主要な難点の解決を中心に、閉鎖系内の材料ハンドリング上の諸問題について要約したので、以下に、この閉鎖系における凍結と乾燥過程の特徴について簡単に要点を述べる。

##### 4.1 予備凍結工程の特徴

バラツキが避けがたい熱抵抗(例、トレイと冷却面)が存在しないため凍結速度が正確一様に制御でき、そ

の選択幅が広いことは当然であるが、アイスライニングにより過冷却に起因する氷結晶のサイズ、形状及び配列のバラツキが排除された。過冷却を伴う凍結過程では、いかに正確一様に凍結速度を制御しても、過冷却状態からの氷核生成が「いつ」「どこで」起こるかは偶然性を内在する確率過程であり、過冷却度のバラツキが氷結晶の形状と配列に著しく影響する。

アイスライニング筒面に形成される凍層は整然とした針状晶で孤立氷結晶層が存在しない。孤立氷結晶層(isolated ice crystal)は過冷却状態下の瞬時凍結の産物で、氷核から瞬時に過冷却領域全体に広がる微細(可視光線の波長より細い)樹枝状氷結晶が、その潜熱発生により昇温する過程で、微細な孤立氷結晶の集合配列に再結晶する結果であるが、それは乾燥過程のケ



points: A, beginning of the partial loss of good thermal contact;  
 B, partial end of the sublimation stage;  
 C, end-point of the sublimation

Fig. 6 - Typical drying curves of frozen Dextrine 19wt% aqueous solution in an ice-lined tube: Effects of freezing rate, sublimation temperature and layer thickness on the drying characteristics. (cf. Table I)

Table 1 - Effects of freezing rate, sublimation temperature and layer thickness on the beginning of the partial loss of good thermal contact.

⊖<sub>s</sub>: sublimation-drying time; δ: dried layer thickness at point A

Exp'l No.	°C		mm L(L <sub>dxt</sub> +l <sub>ice</sub> )	hr ⊖ <sub>s</sub>	%	m hr Pa/kg	
	t <sub>h</sub> (fr)	t <sub>m</sub> (sb)				ρ <sub>m</sub>	ρ <sub>m</sub> *
◇ # 2	-3.5	-20	12.2(11.3+0.9)	7.0	61	0.22	0.26
○ # 3	-30.0	-20	14.5(13.3+1.2)	22.0	82	0.75	> 0.26
◆ # 4	-3.5	-20	16.3(14.8+1.5)	8.0	56	0.23	0.26
● # 5	-5.5	-30	15.5(14.3+1.2)	22.5	88	0.26	> 0.11
⊙ # 6	-3.5	-25	20.2(19.5+0.7)	16.0	73	0.21	> 0.17
○ # 7	-48.0	-20	18.1(17.5+0.6)	43.0	89	0.98	> 0.26
# 14	-5.0	-20	19.6(18.6+1.0)	14.0	62	0.24	0.26
# 15	-5.0	-30	20.1(19.2+0.9)	42.0	88	0.24	> 0.11
# 16	-5.0	-20	27.8(27.0+0.8)	38.0	63	0.24	0.26

一キ内水蒸気移動を著しく妨げる。

凍層表面に形成される難透性表膜(水蒸気の透過が困難なフィルム)は無視できるほど薄弱である。トレイ等の容器内凍結では、全溶液が凍層となるから、最終時に凍結される凍層表面には氷結晶で排斥された高濃度溶質の固化膜が形成される。しかし、本システムでは凍層の成長は未凍液部分の排除によって中断され、その界面はまだ濃縮されていない溶液で洗われることになるからであろう。難透性表膜の排除ないし薄弱化もまた当然昇華過程を有利にする。

#### 4.2 乾燥工程の特徴

##### (a) 制御精度の向上

凍結過程と同様に、バラツキが避けがたい熱抵抗(例、トレイと冷却面)が存在せず、製品は制御されたチューブ温度以外の温度影響を殆ど受けないので制御精度は向上し、一次(昇華)乾燥と二次(脱湿)乾燥の内部物質(水蒸気)移動抵抗を支配する、氷結晶構造の改善は、外的乾燥条件制御精度の向上とあいまって、乾燥過程における製品品質の一様性を高めるとともに乾燥時間短縮を可能とした。

##### (b) 昇華温度監視による入熱制御

製品状態の監視信号によって、製品への加熱量を調節する、追値(フィードバック)乾燥制御……予めの反復実験により試行錯誤でプログラムを決定することなしに、最適条件を自動探索する一次乾燥制御が実現した。従来、この課題実現を阻んでいたのは、前項既述

の製品凍結物性と乾燥件の非均等性であり、また、平均的製品状態を連続監視するモニターの困難さにあった。製品局所に挿入した数点の温度センサーで、次第に深部へ移動する昇華面温度の平均値を監視することはできない。

本システムでは、チューブの中央部に吊るされた凍層に無接触のセンサーにより、昇華面温度を継続監視できる。乾燥初期からチューブ内凍層の凍結層が消滅し始めるまでは、昇華面の移動にもかかわらず、このセンサーは常に殆ど完全に昇華面に包囲され昇華面温度の影響しか受けない。製品の最適昇華温度をセットしておけば、このセンサー信号を受けて、ブライン温度は刻々に許容される最高温度を自動的に実現する。

##### (c) 乾燥過程の特徴

図6は、チューブ中央の品温センサー信号により昇華面温度を所定値に保つように自動探索された乾燥プログラムの若干例である。表1の実験番号(# )は図6の(# )他と対応している。凍結時チューブ温度= t<sub>h</sub>(fr); 昇華面品温= t<sub>m</sub>(sb); の設定によって、凍層とチューブ面の密着伝熱(good thermal contact)が部分的に失われはじめる時期(A点)が乾燥の中期から終点近くまで移動することに注目されたい。L=層厚; δ/L<sub>dxt</sub>(%)は、全製品層L<sub>dxt</sub>中、A時点までに昇華した部分δの比率である。詳しい説明は文献(10)にゆずる。

## 5. まとめと展望

### 5.1 本システムによる達成



この凍結乾燥システムは、「原液ラインから乾燥製品槽(または次工程)までの全工程を、自動洗浄滅菌可能な閉鎖系内で遂行する凍結乾燥システム」の諸要件を備える最初の「閉鎖系凍結乾燥システム」であり、従来の同種の試みが超えられなかったハードルを次の諸点で克服することによって達成された。

(a) 閉鎖系内ハンドリングのための運動機構を設けることなしに、系内へ一括注入した溶液を伝熱表面に均等薄層に分配し、凍結乾燥製品を密閉製品槽(あるいは次工程の閉鎖系に)送ることに成功した。

(b) 容器を用いずに直接溶液を閉鎖系に注入しながら、「製品残滓を1%以下にすることは至難」<sup>4)</sup>との、非トレイ方式の限界を克服した。

(c) 凍結過程における過冷却に付随する諸障害を、アイスライニングにより克服し、均厚凍層形成と凍結品の氷結晶マイクロ構造の最適化と均等化を達成した。

## 5.2 未達成課題と将来展望

### (a) 本方式のもつ時間短縮への限界性

本方式は今後の普及と定着の過程で多くの改良を加えようであろうが、現行凍結乾燥法のいま1つの難点「長すぎる凍結乾燥サイクル」を画期的に短縮するには、原理的・宿命的限界を持つ。それは「チューブ内面上の凍層」という凍結ケーキのマクロ形態のもつ限界性である。凍結乾燥サイクルの長期化(医薬、通常20~80hr)の主な原因は、ケーキ深部から表面までの昇華水蒸気の移動抵抗であり、その解決はケーキ層厚の極小化、望ましくは粒状化…直径D(例、2mm)球粒子の等価厚(体積/表面積)= $D/6(0.33\text{mm})$ …である。多段階凍層形成によりバッチのドレーンを1%未満に抑える方式は、本方式成功の1つの鍵ではあるが、凍層厚をチューブ径の15%程度以上にしなければドレーン1%未満は達成できない(段階数過剰)。円筒内面のケーキ表面積はケーキ底面積より狭く同厚でも等価厚(体積/表面積)はトレイ充填より小さい。本システムは前述のとおりケーキのマイクロ構造と製品の一様性を画期的に改善することにより、凍層マクロ形態の不利にもかかわらず、トレイ乾燥の時間をいくらか短縮したが、このシステムには、例えば粒状凍結なら期待できる「1時間未満の乾燥」に近づく将来展望はない。

### (b) 粒状凍結・閉鎖系凍結乾燥の可能性

溶液を粒状凍結すれば、乾燥時間を「1時間未満」に画期的に改善でき、無菌製品の連続運転が可能になる。連続操作期間を24時間程度(供給ラインの滅菌なしに無菌溶液を連続供給できる)に短縮でき、チェンバーの規模は1日生産量の1/24の収容容量でよくなる。従来の粒状凍結・閉鎖系凍結乾燥の試みは、装置の完成にもかかわらず、チェンバー内の製品微粉の飛散と残滓の付着により全て失敗した。成功は現在技術によっても至難であろう。しかし開ける展望は真に魅力的である。凍結乾燥技術の高名な長老であるRey博士は、現行の棚段凍結乾燥の難点指摘(既述)に続いて「閉鎖系内のノズルからの1.0~1.5mm液滴を瞬時凍結させ、振動輸送させつつ乾燥する」博士の構想<sup>9)</sup>を述べている。20年前に殆ど断念されたこの方式を、その間の事情に精通されている博士が改めて提出されたのは、賦形剤で微粉化を防ぐ処方技術や、粒体ハンドリングとその制御技術の進歩を前提としてのことかもしれない。Seffinga方式再検討の経験からしても「過去の失敗から学ぶ」とは、「失敗にこりる」ことではない。

## 文献

- 1) Cooper, D.E.: Pharm. Tech., June (1984), 72
- 2) Avallone, H.L.: J. Parent. Sci. & Tech., 44-4 (1990), 228
- 3) Rey, L.R.: Develop. Biol. Standard., 74(1991), 3 (Karger, Basel)
- 4) Lorentzen, L.: In "Advance in Preconcentration and Dehydration of Foods" (1974), 413, (Applied Science Publishers Ltd London)
- 5) Lorentzen, L.: Proc. 14th Int. Cong. Refrig. (Moscow, 1975), 269, (IIR, 1975)
- 6) Seffinga, G.: U.S.P., 3,264,745 (1966)
- 7) Mason, P.: U.S.P., 3,281,956 (1966)
- 8) Kobayashi, M., Harashima, K., Ariyama, H. & Yao, A.: Proc. 18th Int. Cong. Refrig. (Montreal, 1991), vol.4 p.1696, (IIR Paris, 1992)
- 9) Kobayashi, M., Ariyama, H. & Yao, A.: Proc. PDA Asian Symposium, (Tokyo, 1994)
- 10) 小林, 原島, 有山, 姚: 日本冷凍協会論文集, 10-1 (1993), 145
- 11) Thijessen, H.A.C.: In "Advance in Preconcentration and Dehydration of Foods" (1974), 117, (Applied Science Publishers Ltd London)

# 冷凍法による海水淡水化技術

長島 義悟 (三井造船)

## 1. はじめに

海水淡水化技術の開発が盛んに行われた時期に冷凍法も開発研究され始めた。ここでは冷凍法のうち、二次冷媒直接接触式に関する経験と技術について説明する。海水を冷却すると、海水の塩分濃度によって決まっている氷点に達し、さらに冷却すると海水は過冷却状態になり、氷の核発生とともに氷結晶の成長が行われる。氷結晶の内部には原理的に塩分を含まないので、これを母液から分離し、洗浄水にて洗浄すると淡水を得ることができる。

この過冷却状態を作るために海水と溶解しがたい冷媒を海水中に分散させ、この分散冷媒を蒸発させることによって、海水全体を過冷却状態に保持する方法が二次冷媒直接接触式冷凍法である。

攪拌とか冷媒の分散方法を工夫することによって、海水を均等に冷却でき、従って晶析装置内の全部の海水を晶析操作に有効であるように設計できる。

海水から氷を作成するための冷却熱量は氷を融解する際に取り返すことにし、海水の予冷却熱量は生産淡水と濃縮海水の排出時の熱量で相殺するとして、熱力学的な非可逆性と外部からの侵入熱量の系外への排出のためにヒートポンプを採用するなどし、全ての熱交換器の温度差を小さくすることにより、冷凍サイクルとしての成績係数が大きくとれるようにしている。

この方法の特徴は操作温度が低いために使用材料の腐食の問題が少なく、スケール発生などに関して考慮しなくてよいことである。また前記のように直接接触式海水冷却方式を採用しているために、伝熱面積は工夫次第で大きくできること、従って冷媒の蒸発温度を氷点の近くに保持し、即ち微小温度差で、大量の熱交換を行わせることができる特徴がある。

晶析装置は単に相変化をさせ氷結晶を所定量製造すればよいという装置ではなく、できるだけサイズが大で、表面積に対し体積の割合の大きい形状の結晶を製

造する必要がある。そのために海水は小さい温度差の下で冷媒に接触しており、局所的な過大な過冷却海水を作らない装置が必要であるが、本方法はこれを可能とする。氷結晶は母液よりも比重が軽いために、放置しておいても浮上分離するが、これをうまく利用する分離装置を設け、且つ洗浄水の散布により、さらに氷粒子上の付着母液と置換するという分離工程が考案され、これの合理的設計法の確立が行われたのである。

この場合に結晶の形状とサイズが分離装置の大きさを決めることになり、上記晶析装置の方で良い氷を作ればコンパクトな分離装置となるが、形が良くなく微細な結晶が製造されたならば大きい分離装置を必要とすることになる。従って晶析装置としては高効率化を考えるとともに、結晶の質を高めるための操作条件を見出し、設計方法を確立することが求められる。

本方法にはしかしながら、熱損失が外部からの侵入熱であるために、これを系外に動力を使用して排出しなければならないという原理的欠点と、海水に相互に難溶解といっても若干は溶解するために、例えば淡水中に規定以内とは言え冷媒が溶存するなどから感覚的に直接飲料としにくい等の欠点がある。

本技術は液体中の液体よりも軽い固体の取扱とか、晶析操作での冷媒の気体、液体それに氷と言う多くの相、成分を同時、同所にて扱うことが求められ、経験の蓄積が重要なことであったが、これを少しでも技術へと変えるべく努力してきたのが実状である。

## 2. プロセスの概要

Fig 1 に本プロセスの概略フローを示す。

海水は海水取水ポンプにより汲み上げられ、一部は冷却水として使用される場合もあるが、本プロセスとしては簡単な前処理操作を受けて、熱交換器に入り、排出する濃縮海水と生産した淡水とを加熱し、自らは冷却され晶析装置に流入する。

この装置は、全体が良く混合されていてどこをとっても同じ状態(濃度、温度、結晶化状態、冷媒の分散状態等)のように設計製作する完全混合槽型と、入口から出口に向かって次第に状態が変化する押し出し流れ型の二種類の間型が多いが、工夫の仕方によりどちらかに近づけることが試みられた。

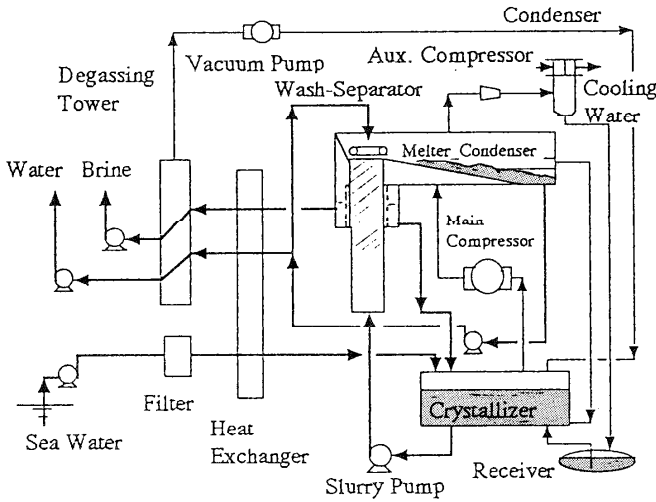


Fig.1 Schematic Diagram of Process

この装置へは原料となる海水の他に、分離装置からの帰りの濃縮海水(これはスラリー輸送とか晶析装置等での水濃度がせいぜい20%程度であるのに本プロセスでのエネルギー効率は海水の淡水への転換率が40%の場合に最高になることから使用するキャリア液)、融解・凝縮器からの液冷媒、副圧縮機ラインの高圧液冷媒等がある。

晶析装置から流出するものとしては、氷と濃縮海水のスラリーと冷媒蒸気がある。晶析装置におけるスラリー流量ベースの平均滞留時間は数分から20分程度、冷媒の装置内滞留量は数%程度である。

氷・濃縮海水のスラリーはポンプにより晶析装置から分離・洗浄装置へと輸送される。分離・洗浄装置の下部に達するとスラリーは断面積の拡大によりゆっくりとした上昇流となり、氷と濃縮海水とは別の速度で上昇する。

本装置の高さ方向の中間部に小孔が数多くあいたフィルター部があり、この小孔から海水のみ装置の横に流出させ、この部を前出の晶析装置への帰りの海水にするとともに生産した淡水に見合うだけ熱交換器に送り、脱ガス処理を行い系外に排出する。

残った氷粒子は後から来る氷粒子のために上昇を続ける。氷粒子群が自らの重量や、壁での摩擦に打ち勝ち高い所まで上昇する力は、孔より下の部分に構成される氷粒子群の層中を海水が流れる際のこの層の流動抵抗に基づく。小孔よりも上部では氷粒子群の上昇につれて、濃縮海水も引っ張られ上昇するが、海水がある高さになるとこれ以上上昇しないようになり、前記小孔に向けて流下する量と上昇する量とが釣り合うようになる。

もっとも氷粒子群の上昇速度が、静止粒子層中を流れる海水の流速に等しいか大きい場合は、装置のトップまで海水が上昇し、分離不十分のまま、融解・凝縮装置へと送られることになる。従って氷粒子層の海水透過率(透水係数)が氷の上昇速度を制限するので氷のサイズのみならず形状が重要になる。

適切に設計された装置では、装置のトップにおいて粒子層の空隙部には海水が脱液され、空気を注じており、氷の表面に付着した海水のみを対象に洗浄水と置換・洗浄することになる。

即ち海水が僅かに付着した氷粒子群を融解しても淡水は得られないので、付着海水を押し流すために、付着海水とはほぼ同じ量の既に生産した淡水の一部を洗浄水として散布してやり、付着海水との置換を行わすことになる。従って洗浄水は工夫次第で損失がほとんど無くなる上に、水の純度が向上することになるが、洗浄水の純度即ち生産淡水のそれは、洗浄後も氷になお付着している濃縮海水と氷を融解してできる純水との混合した濃度までの純度に達すると定常状態になるのであり、際限もなく高純度になることはない。

分離・洗浄装置のトップから機械的に運び出された氷粒子群は融解・凝縮装置において、晶析装置にて蒸発し、主圧縮機によりある圧力まで加圧された冷媒と直接接触して、氷の融解と冷媒の凝縮とが行われる。

このための装置内構造として柵の上に氷粒子群を置き、下部などから冷媒を導入して直接接触させるものと、生産淡水中に氷粒子群を落とし、このスラリー中に冷媒蒸気を噴出させて直接的に接触させるものとが考えられ、両者に関する試験を行った。

氷の粒子が晶析装置では独立しているのに対し、融解・凝縮装置においては洗浄操作を受けるために塊と

なる場合もあり、伝熱面積の確保が困難であった。

スラリー式融解・凝縮装置において適度に攪拌することが一つの答えであった。

凝縮した冷媒は炭化水素系の場合、生産淡水の上部に分離、浮上しており、淡水と混合しないようにして晶析装置に送られる。

融解・凝縮装置では冷媒のほとんどは凝縮するが、それでも未凝縮の冷媒蒸気は副圧縮機に送られ、昇圧されて冷却水(海水の場合が普通)に放熱して液化、冷媒貯槽を経て晶析装置に送られる。

生産した淡水の内洗浄水の損失分を除いた量が熱交換器に入り、原料海水を冷却後脱ガス装置を経て取り出される。淡水でも濃縮海水でもこの中には温度、圧力に相当した量のガスが溶解しており、温度は高い方が、圧力は低い方がその溶存量が少なくなるので熱交換器ではできるだけ加熱し、脱ガス装置では真空度を高めて操作する。

### 3. 熱バランス

Fig. 2 に冷凍サイクルを示す。

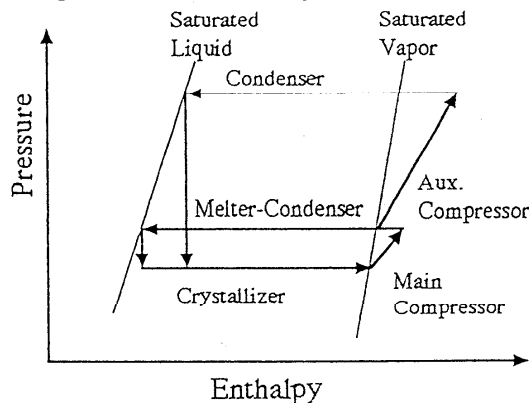


Fig.2 Cycle of Process

融解・凝縮器での操作が氷の融解温度よりも1.5℃高い状態で行われ、晶析装置が晶析温度即ち濃縮海水の氷点約3℃よりも1℃だけ低いとすると、温度差5.5℃のサイクルが主圧縮機の分担する冷凍サイクルである。未凝縮の冷媒蒸気のサイクルは1.5℃の蒸発温度と、通常の冷却水温度に基づく凝縮温度(例えば40℃)との間で構成される。

カルノーサイクルの冷凍成績係数は  
主圧縮機側で  $(273.2-4)/5.5 = 49.7$   
副圧縮機側で  $(273.2+1.5)/(40-1.5) = 7.1$   
のようになる。ほとんどの熱量は主圧縮機側が取り

扱うので、総合的な成績係数は大きいものとなる筈である。

Fig. 3 に熱バランスの概念図を示す。前述の通り、晶析のための熱量とか海水の予冷却熱量とかは相殺されるが、熱交換器のアプローチ分とか外部からの侵入熱量などの計  $L_a$  と主圧縮機仕事  $W_1$  とを系外に棄てるための  $W_2$  の仕事を加えねばならない。

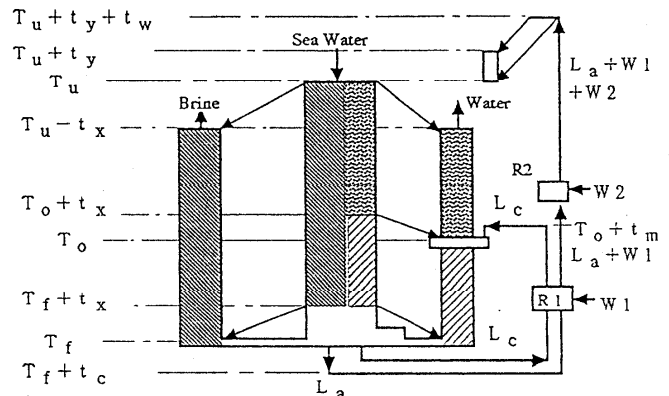


Fig.3 Heat Balance of Process

なおFig. 3 における記号説明は以下の通りである。

$T_u$  : 海水温度、 $t_y$  : 冷却水温度上昇、 $t_w$  : 凝縮器アプローチ、 $t_x$  : 予冷却器の温度差、 $T_0$  : 水の氷点、 $T_f$  : 晶析装置における氷点、 $t_m$  : 融解・凝縮装置における温度差、 $t_c$  : 晶析装置における温度差、 $L_c$  : 晶析熱量、 $L_a$  : 晶析装置におけるその他の熱量、R1: 主圧縮機、R2: 副圧縮機、 $W_1$  : R1 の仕事量、 $W_2$  : R2 の仕事量

### 4. 冷媒

海水と直接的に接触するので海水中に溶解する量が少なく、また冷媒中に水の入り込む量の少ない冷媒であって、できれば大気圧に近い蒸気圧を持つものが、有利であるとされてきた。

Fig. 4 に冷媒の蒸気圧、海水濃度、氷点間相互の関係を示す。この中で斜線の部分が本プロセスの概略的操作範囲である。

イソブタンは本操作範囲において、分離工程に不都合な水和物を作る恐れがあり、ノルマルブタンでは水和物は作らないが真空での操作となり、外部からの空気等の侵入に要注意である。そこでノルマル: イソの割合を7:3程度にした混合冷媒に関して水和物の発生を検討すると、それは認められないとのことから、これを採用してきた。

この冷媒は非共沸混合冷媒であるため、それなりの対応が必要であるけれども、図の通り真空操作は避けられる上に前記氷和物も発生せずとのことから望ましいものと言えた。

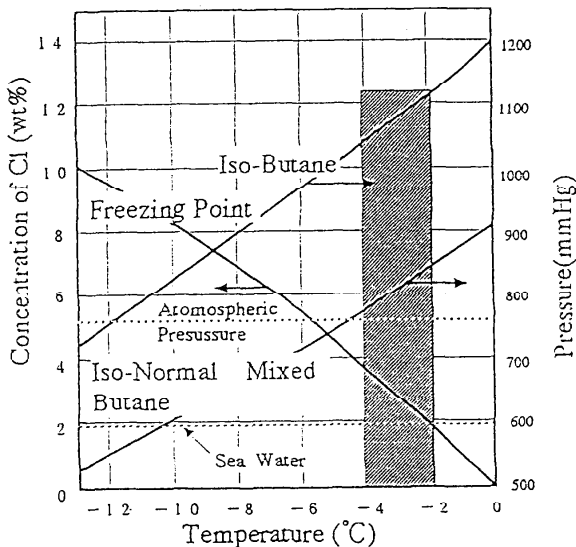


Fig. 4 Operating Diagram of Process

### 5. 運転結果と設計の方法

Fig. 5 に晶析装置の運転特性の一例を示す。

これはある程度の規模の装置に関する実験結果を他者のデータまで含めて筆者が勝手に整理し直したものである。○中に線の入ったデータは馬野らの、分離装置の開発がまだ進んでいない頃、従来型の分離装置で対応しようとして結晶の質に主に、注力した実験結果であり、○は米国での冷媒にR114を使用した高性能晶析装置でのデータ、●は筆者らの気泡による攪拌という簡単な装置による結果を示す。

晶析装置の特性を表示する方法が当時考えだされていて、それによって径の成長速度( $r$ )、スラリー中の水濃度( $1 - \epsilon$ )、単位体積当たりの製氷量( $P / \rho_c v'$ )、代表粒径( $l_m$ )、核発生速度( $F_v$ )等を一枚の図に表現したものである。

これらのデータの裏に冷媒蒸発温度と氷点との温度差があり、装置の設計が少しはできるようになった。

しかし分離・洗浄装置の方は透過率に関する粒径と粒子の形状係数が必要であり、晶析装置の方の体積平均径との間に存在するであろう関係が把握された。

このために晶析装置の概略が決まると、分離・洗浄装置の方も設計できるようになったのである。

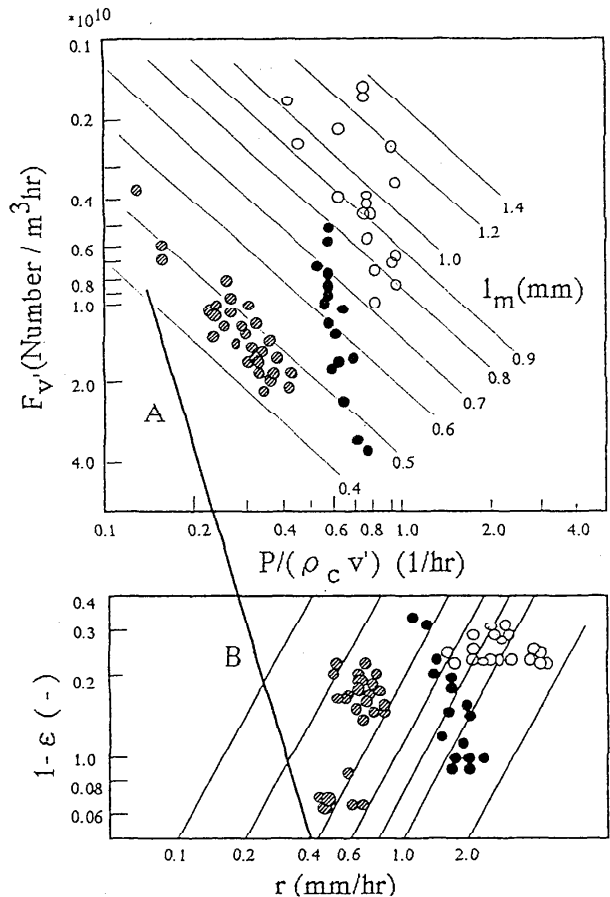


Fig. 5 Typical Data of Crystallizer

### 6. 今後

本装置の開発はコストダウンを目標として数年間継続されたが、まだ自動制御のためのデータなどは不足しており、マーケットが小さかったこともあって実用装置の提供などは行われなかった。

しかしながら昨今の猛暑と水不足から冷房装置に近い成績係数での冷房もでき、且つ造水も可能であるとされる本プロセスに関する関心が高まり、詳細な検討が行われるとともに、複合プラントとしての試験装置が製作される予定であり、今後の成果が注目される。

### 参考文献

長島他、海水淡水化のための冷媒直接接触、気泡攪拌式結晶缶における氷の晶析、化学工学論文集、第4巻、第5号(1978)、509 - 514

# アイス・ブラスト（氷球）による洗浄技術

川口 利明, 多田 益太 (大陽東洋酸素)

## 1. はじめに

最近の半導体、液晶、電子工業、光学・ガラス機器などの分野において、超クリーンな精密洗浄技術が要求されており、特に超LSIの製造工程では、デバイスの歩留り及び品質の向上を図るためにウエハ表面洗浄技術のより一層の高性能化が必要となっている。

当社は、1985年（昭和60年）に液体窒素を使った氷の製造技術を確認し、翌年に氷粒子の中に細胞を閉じ込め、壁面に衝突させて氷とともに細胞を砕く菌体破碎装置を製品化した。ここで紹介する氷粒子による半導体ウエハ表面の洗浄技術は、当社で開発した氷の微粒子製造技術及び噴射技術と半導体分野における半導体デバイスメーカーとの共同開発によって実現したもので、16~64MDRAMなどの高集積度デバイス製造の洗浄プロセスで威力を発揮するものと確信している。

ここでは、水の代わりに氷粒子を洗浄に利用することにより得られる効果（洗浄メカニズム）を中心に、装置原理・装置構成・性能について紹介する。

## 2. 装置原理

氷粒子による洗浄装置はアイス・ブラスト装置と呼ばれており、本装置の基本原理を図1に示す。

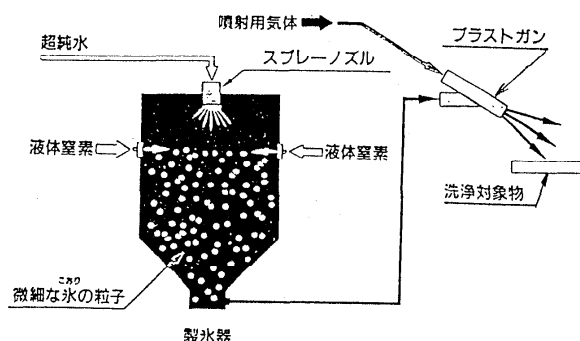


図1 アイス・ブラスト装置基本原理図

液体窒素（沸点-196℃）で冷却した製氷機内に、超純水をスプレーノズルで微噴霧化して、凍結させ、微細な氷粒子（図2）を瞬間的に製造する。

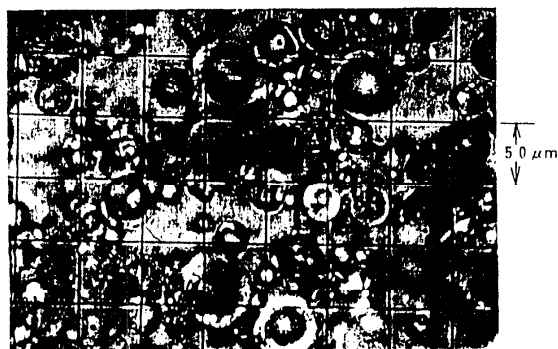


図2 氷粒子写真

ここで得られる氷粒子の粒子径は、スプレーノズルの特性とスプレー圧力により決定される。（図3）この方法では、スプレーノズルの口径を選定することにより20~100μmの範囲で氷粒子径を調整できる。

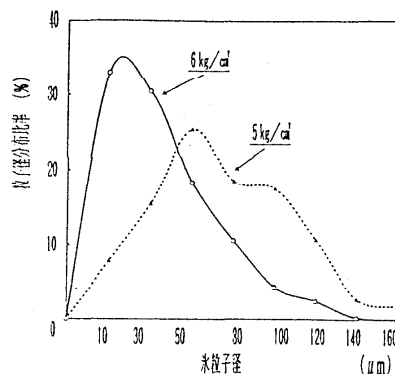


図3 氷粒子の粒径分布図

製氷機で生成した氷粒子は氷移送配管を通して噴射ガンに運ばれ、ここでキャリアガス（乾燥空気）で加速されて洗浄対象物に噴射される。

氷粒子の噴射速度は、噴射ガンの構造及びキャリアガスの圧力を変更することにより80~330m/secの範囲

で調整でき、洗浄力は、噴射速度の他に氷噴射量、噴射時間、角度及び距離等で決まる。

本装置で得られる氷粒子は、図2に見られる様に球状で、硬さはモース硬度3~4の為、氷よりも柔らかい対象物には表面加工処理および洗浄に使用でき、氷よりも硬い対象物には洗浄に使用できる。

### 3. 装置構成

図4にアイス・ブラスト装置の概略図を示す。本装置はウエハローダー部、洗浄部、乾燥部、ウエハアンローダー部及び製氷部より構成される。

ウエハローダー部より搬送ロボット1により洗浄部に運ばれたウエハは、洗浄部内に固定された2台の氷噴射ガンにより氷粒子を表裏両面に所定時間噴射される。この時ウエハは回転しながら水平移動することにより全面に均一な噴射を受けることができる。

洗浄されたウエハは搬送ロボット2により乾燥部にスピン乾燥され、乾燥終了後搬送ロボット3によりアンローダー部に収納される。

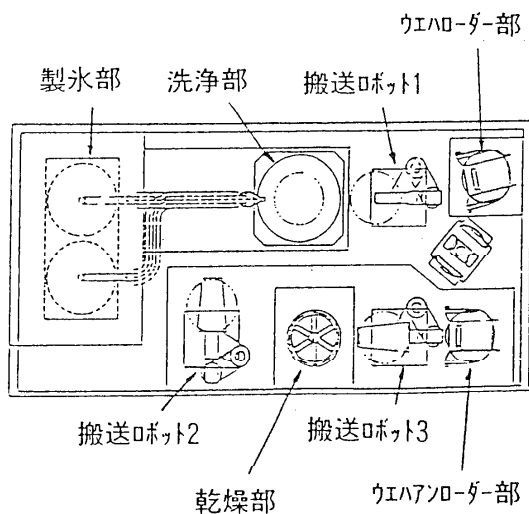


図4 アイス・ブラスト装置概略図

### 4. 性能

アイス・ブラスト装置を半導体ウエハ洗浄に適用した際の洗浄性能について紹介する。

表1<sup>1)</sup>は、スパッタリングでTiN膜を形成した後アイス・ブラスト洗浄とメガソニック洗浄を行い、各々の

付着ダスト除去率（粒子径別）を測定した結果であるが、0.6 $\mu$ m以上のパーティクル除去率ではほぼ同程度であるが、0.4~0.6 $\mu$ mの微小パーティクルではアイス・ブラスト洗浄の方が高い除去率を示しており、洗浄対象粒子径が微小になるほど効果的であることがわかる。

粒径 ( $\mu$ m)	アイスブラスト	メガソニック スクラバー
0.4~0.6	84.8%	47.9%
0.6~0.9	97.4%	97.9%
0.9~	97.6%	100%
Total	88.3%	56.3%

表1 TiN膜上のパーティクル除去

次に、スパッタリングしたシリサイド膜にアイス・ブラスト洗浄及び高圧ジェット洗浄を行い、配線間隔1.6~0.8 $\mu$ m、総延長2mのシリサイド配線を形成し、その配線の抵抗測定を行うことにより、各洗浄方法の良品率（歩留り）を比較したのが図5<sup>1)</sup>である。洗浄なしと比べても高圧ジェット洗浄ではほとんど洗浄効果が現れないのに対し、アイス・ブラスト洗浄では高い歩留りが得られている。

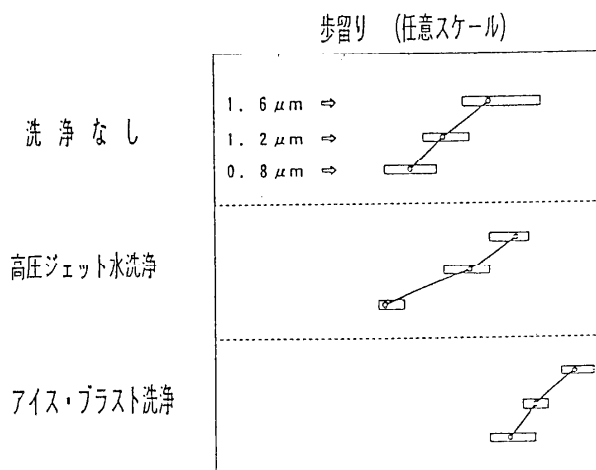


図5 配線歩留り評価（比較）

## 5. 洗浄メカニズム

以上のように、アイス・ブラスト洗浄は従来の水を利用した洗浄方法と比較して、高い洗浄性能が得られている。この洗浄メカニズムを解明するために我々は半導体デバイスメーカーと共同で検討を行ったので、その結果について紹介する。

まず図6<sup>2)</sup>にウエハ上に付着させたポリスチレンラテックス標準粒子(以下PSL粒子)の除去評価結果を示す。

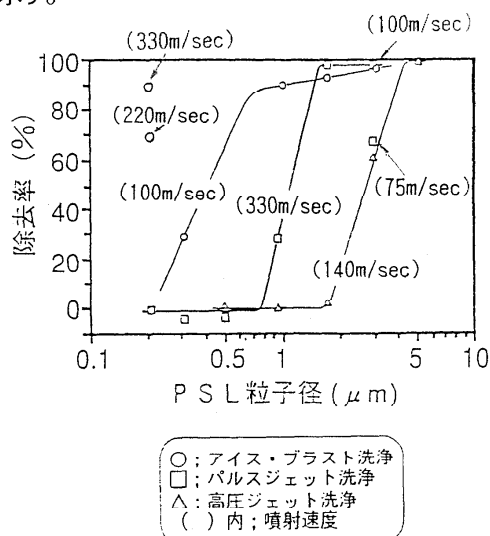
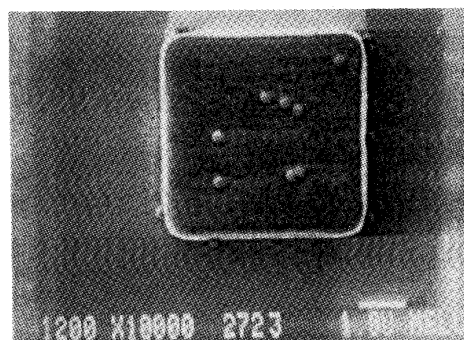


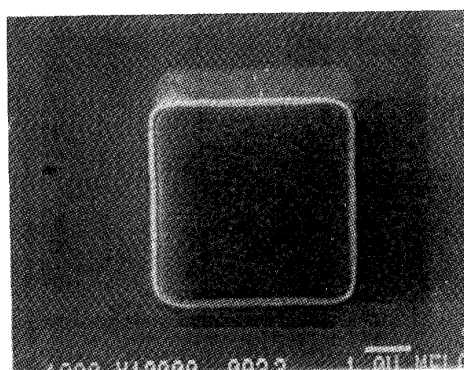
図6 PSL粒子の除去評価結果

本評価では、PSL粒子をウエハ上に分散塗布後、120℃にウエハを加熱して粒子の付着力を強化している。又、パルスジェットとは洗浄メカニズムを確認するために、氷粒子の代わりに水滴を噴射するもので、水と氷の比較として用いた。アイス・ブラスト洗浄では微小PSL粒子に対しても高い除去率が得られるが他洗浄方法では除去できる粒子径が1桁大きくなることからわかる。

次に洗浄の様子を示すデータとして図7<sup>2)</sup>を示す。本評価は、酸化膜によって約1μmの段差パターンを形成したウエハ上にPSL粒子を付着させたものをアイス・ブラスト洗浄し、洗浄後の様子を見ているが噴射角度30°の為氷粒子が直接衝突しない部分のPSL粒子も除去されているのがわかる。この現象は、氷粒子の固体衝突とは別に、流体(流動)による除去作用が示唆される。



洗浄前



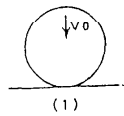
洗浄後 ↑噴射方向(角度30°)

図7 PSL粒子(0.174μm)除去の様子

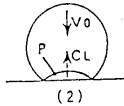
以上の結果より、図8<sup>2)</sup>に示すような洗浄メカニズムのモデルを立てた。これは氷粒子を液滴のような流体と考え、液滴の高速衝突による材料のエロージョンの概念と流体力学よりモデル化した。まず、氷粒子がウエハへ衝突した際、衝撃の反射波によって氷粒子内に衝撃圧が生じる。次に氷粒子が破砕または液化し、ウエハ面方向への流れ(放射流)となってパーティクルへの連続的外力(除去力)を生む。このモデルをアイス・ブラスト洗浄及びパルスジェット洗浄に適用した場合の洗浄力を計算したものを図8中に示すが、水と水の物性値の違いによりアイス・ブラスト洗浄の洗浄力が高いことがわかる。又、従来の水を利用した洗浄方法である高圧ジェット水洗浄は、図6に示されるようにパルスジェット洗浄よりさらに洗浄力が弱く、水による洗浄では実現が難しいレベルの洗浄力が氷粒子を利用することで得られることが確認された。



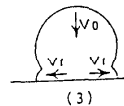
## 洗浄メカニズムのモデル



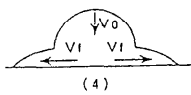
(1) 氷粒子の基板への衝突



(2) 氷粒子内の圧力上昇  
(衝撃圧)



(3) 氷粒子の破碎、水平方向  
への運動 (放射流の発生)



(4) 汚染物への連続的外力の  
発生、汚染物の移動  
(除去)

[液滴の衝撃圧 (接触面内の平均値)]

$$P = \frac{1}{2} \alpha \rho_L C_L V_0$$

[放射流の速度]

$$V_f = (\alpha C_L V_0)^{1/2}$$

[粒子に働く外力 (洗浄力)]

$$F = C_D \frac{\rho_L}{2} V_f^2 \frac{\pi}{4} d^2, C_D P \frac{\pi}{4} d^2$$

$V_0$ : 衝突速度、 $\rho_L$ : 液密度、 $C_L$ : 液中音速  
 $\rho_s$ : 基板密度、 $C_s$ : 基板中音速  
 $\alpha$ : 低減係数

$$\alpha = \frac{0.41}{1 + 5.9 (\rho_L C_L / \rho_s C_s)}$$

$C_D$ : 抗力係数、 $d$ : 粒径

レイノルズ数:  $R > 10^3$  で、 $C_D = 0.47$

洗浄力の計算例 (1  $\mu\text{m}$  径粒子への外力 [N])

アイス・ブラスト洗浄  $2.0 \times 10^{-5}$

パルスジェット洗浄  $1.3 \times 10^{-5}$

噴射速度 330m/sec

噴射角度  $60^\circ$

図8

又、アイス・ブラスト洗浄の氷粒子を利用する効果として、有機膜の除去が確認されている<sup>3)</sup>。この洗浄メカニズムとしては、氷粒子噴射時の低温により有機膜が硬化し、その硬化した膜に氷粒子がアタックすることによりクラックを生じさせ、有機膜を浮き上がらせることにより除去するものである。但し、アイス・ブラスト洗浄は指向性のある洗浄であり、有機膜の除去(脱脂洗浄等)に求められる凹凸面のある洗浄対象物には不向きなため、本効果の実用化には到っていない。

## 6. まとめ

アイス・ブラスト洗浄では、水と氷の物性の違いを利用することにより、従来の水を使用した物理的な洗浄では得ることの出来なかった高い洗浄力が得られることがわかった。又、本洗浄方法は従来の水洗浄と同様無公害な洗浄であり、今後半導体デバイス製造等の超微小粒子洗浄が必要な分野においての用途が期待されている。

なお、この解説を書くにあたり御協力頂いた三菱電機(株)菅野至氏に感謝致します。

## 参考文献

1) I. Kanno, T. Ohmori, T. Fukumoto, "Surface and Back Surface Simultaneous Cleaning by Ice Scrubber Cleaning". Proceeding of Microcontamination Conference, (1991), 625

2) 菅野 至, 「アイス・スクラバーによる微粒子除去」, セミコン関西技術セミナーテキスト, (1994), 19

3) 大森, 菅野, 福本, 小宮, 多田, 川口, 「アイス・スクラバー洗浄技術」, セミコン関西技術セミナーテキスト, (1990), 141

# 昇華現象を利用した除霜技術

今井誠士(松下冷機)

## 1. はじめに

湿り空気中で機能する低温熱交換器の伝熱面が $0^{\circ}\text{C}$ 以下になり、しかも湿り空気の露点温度より低くなると、伝熱面に拡散する外気中の水蒸気は昇華凝結して霜となり伝熱面に付着、成長し、霜層が形成される。この着霜現象の身近な例は、冷凍冷蔵庫の熱交換器や、エアコンが冬季に暖房運転を行う場合の室外熱交換器などに見られる。この霜層は断熱作用があり、しかも熱交換器の流動抵抗を増大させるために、冷却運転を続けると熱交換量が減少することとなる。熱交換器における理想的な着霜対策は無着霜運転の実現であるが、現在のところ、実用的な熱交換器の作動範囲で無着霜運転を行うことは不可能といえる。したがって、着霜をとまぬ熱交換器では付着した霜層を除去する除霜運転は避けられないことになる。

現行の熱交換器の除霜には、逆サイクルホットガス方式や電熱方式による熱交換器加熱融霜が多く用いられている。前者は主に暖房運転を行うエアコンに用いられる方法で、除霜時には暖房運転と逆のサイクルで運転を行い、室外熱交換器を凝縮器として機能させて、融霜を行うものである。後者は、主に冷凍冷蔵庫に用いられる方法で、熱交換器に取り付けられた電気ヒーターにより加熱し、融霜を行うものである。

着霜現象に関しては多くの研究が見られ、着霜条件による霜層構造の分類、着霜過程の分類、霜層の物性等の基礎的研究をはじめ、冷凍サイクルにおける着霜した熱交換器の熱効率、熱・物質伝達率、および霜層成長の理論解析などの実用的研究まで、数多くの研究が行われている。その一方で、除霜に関する研究は比較的少なく、逆サイクルホットガス方式を除霜に用いた場合の熱交換器特性に関する実用的研究<sup>1)~3)</sup>や、伝熱面加熱による融霜の研究<sup>3)~8)</sup>などが見られるのみである。これは、現行の熱交換器の除霜に逆サイクルホットガス方式と電熱方式による熱交換器加熱融霜

が多く用いられているためである。

しかしながら、こういった熱交換器加熱による融霜は、様々な問題点を有している。まず、熱交換器の温度を $0^{\circ}\text{C}$ 以上に昇温させる必要があるため、熱交換器および周辺機器へ供給する熱量が必要となる。また、その昇温による周囲空気への熱損失が避けられない。

ここでは、現行の除霜方法が有する上記のような課題を解決すべく検討された数少ない研究について紹介し、筆者らの行った、昇華現象を利用した除霜技術についても概説するものである。

## 2. 除霜に関する研究

除霜方法に関しては図1のように分類することがで

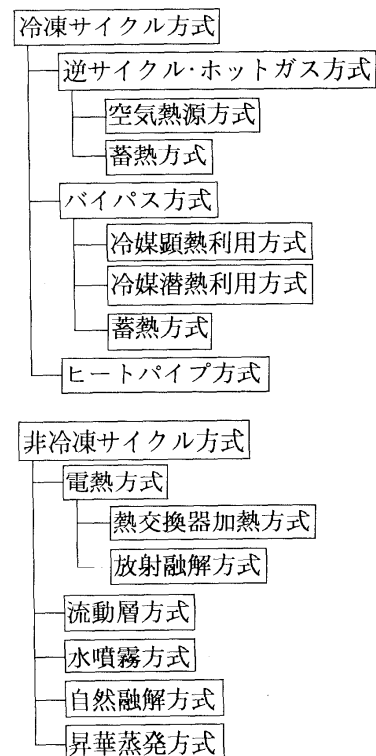


図1 除霜方法の分類

きる。この分類で現在、主に用いられているのは前述のように、逆サイクルホットガス方式と電熱方式の熱交換器加熱方式である。これらの方法の熱効率はそれほど高いものではなく、改善の余地があるように思われる。

## 2・1 放射熱エネルギーによる除霜

伝熱面加熱融霜の問題を解決する手法の一つとして、赤外線放射熱エネルギーを霜層表面へ直接照射し、融霜する方法が考えられる。これは、霜層の赤外線波長の吸収率の高さに着目したもので、加えたエネルギーの大部分が融霜に用いられることと、着霜熱交換器を冷却した状態で除霜を行えるという特徴を有する。

稲葉ら<sup>9)~11)</sup>は、赤外線放射熱エネルギーを、霜層表面へ直接照射させ、融霜する実験的研究を行った。稲葉らは融霜実験を行うにあたり、霜層の放射特性<sup>9)</sup>についても測定しており、可視光線および近赤外線領域の波長における霜層(高さ3mm)の直達単色透過率は氷層および水膜と比較すると非常に小さく、ほぼ一様な値となること、霜層の減衰係数は、可視光線、近赤外線、遠赤外線ランプの順に長波長を有する放射熱エネルギーほど大きく、霜層成長過程の場合、霜層高さに応じて2つの領域に分けることができること、霜層融解過程においては、霜層の反射率、透過率および吸収率の経時変化を明らかにし、長波長領域の放射を行う遠赤外線が霜層融解に効果的であることを示している。このことから、放射熱エネルギーによる融霜実験は遠赤外線を放射熱エネルギー源として用いて検討している<sup>10)・11)</sup>。その結果、霜層融解時間は霜高さによる影響は少なく、霜層質量に大きく依存し、周囲空気温度が上昇すると周囲空気からの伝導熱量および放射熱量が増大するため減少することなどを明らかにし、無次元整理式の提案を行っている。こういった、放射熱エネルギーを用いた除霜方法は、除霜時の熱交換器の温度上昇が小さく、家庭用冷蔵庫などに一部実用化されつつある。

## 2・2 流動層による除霜

流動層を用いた除霜に関する研究は、その優れた伝熱特性、伝熱面への湿り空気の直接接触の抑制、粒子

群の着霜面への衝突による霜成長の抑制および霜層の剥離効果などの利点を有する。Takeuchiら<sup>12)</sup>は、固気系流動層内における水平冷却円管周りの流動粒子による除霜機構を解明している。粒子群で着霜面が覆われている領域においては、粒子群の衝突および滑り効果により霜層発達抑制と霜の剥離・離脱が起こり、さらに流動粒子の持つ分流効果により離脱した霜粒子が定常的に流動層外へ排出される結果を得ている。また、相原ら<sup>13)</sup>は流動層内の管群蒸発器における除霜に関して、空塔速度の増大にともない流動化が良好となり、粒子の保有する運動エネルギーが増加するため、除霜効果が向上することを見出している。

## 2・3 昇華現象を利用した除霜

冷凍を目的とする場合においては、融解現象を用いて除霜を行うと問題を生ずることがある。例えば現在、アイスクリームの販売等に用いられるショーケースでは、熱交換器加熱による融霜を行うと商品も融解してしまうため、除霜を行わないまま冷凍機を運転するケースが多い。当然のことながら、こういった着霜運転における熱交換器の温度効率は低いものとなる。この冷凍用ショーケースの着霜運転による日本での消費電力量の増大分を概算すると、夏期2ヶ月だけでも2400万kWhにのぼる。電力消費量がピークとなる夏期に、融解による除霜を用いることができないために、これだけの電力を余分に消費していることになる。現段階では、冷凍ショーケース用熱交換器の無着霜運転の実現は不可能である。しかし、氷点下で除霜を行うことができれば、アイスクリームなどの商品を融解させることなく、霜を除去することができる。

氷点下での除霜を実現する方法としては、氷の昇華蒸発現象の利用が考えられる。表1に昇華蒸発を用いた除霜と従来の融解を用いた除霜の特徴を整理する。表1からも明らかなように、昇華蒸発を除霜に用いた場合には、熱損失が少なく、被冷凍物の融解も起こらない。しかし、昇華潜熱が融解潜熱と比較して大きいいため、除霜に必要な熱量が増大する可能性がある。したがって、周囲空気および冷凍機への熱損失を低減し、除霜熱効率を向上させることが昇華蒸発を除霜に適用する上で重要となる。

表1 昇華蒸発除霜と融解除霜の特徴

昇華蒸発を用いた除霜	融解除霜を用いた除霜
①氷点下での除霜が可能 なため、被冷凍物を融解 させることなく除霜する ことができる。	①除霜を行う際に熱交換 器を0°C以上に加熱する必 要があるため、被冷凍物 が融解する可能性がある。
②氷点下で除霜するため 加熱損失が少ない。	②冷凍機器を0°C以上に加 熱する必要があり、それ に伴う熱損失が不可避。
③除霜後の伝熱面は乾燥 状態となる。	③除霜後の伝熱面に融解 水が付着する。
④霜の昇華潜熱が融解潜 熱と比較して大きい。	④霜の融解潜熱が昇華潜 熱と比較して小さい。

ここでは、熱交換器の着霜量低減法および除霜法として可能性がある霜層の昇華蒸発現象について、著者らが行った研究結果<sup>14)・15)</sup>を紹介する。昇華蒸発の実験対象としては、基礎的な現象を把握するために、水平平板上の霜層を取りあげ、霜層下面は断熱状態とし、霜層上面は湿り空気の強制対流下にさらされる除霜系を対象とする。また、昇華蒸発をさらに促進させるために、霜層の上から赤外線放射熱エネルギーを照射した場合の霜層の昇華蒸発の促進効果についても検討する。

2・3・1 実験装置および方法

試験部の概要を図2に示す。試験部流路は高さ  $H = 90 \text{ mm}$  × 幅  $W = 300 \text{ mm}$  の矩形断面を有する風洞である。試験部流路の上面は放射熱エネルギーの透過性の高い、

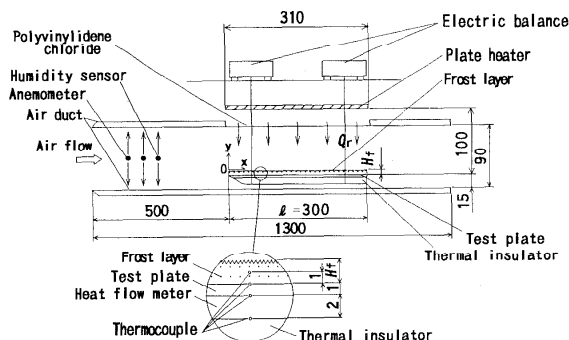


図2 試験部の概要

厚さ3  $\mu\text{m}$  の塩化ポリエチレンフィルムで仕切られている。霜層の昇華蒸発を促進するための赤外線放射板には、黒体塗料が塗布され、塩化ポリエチレンフィルムを介して放射熱エネルギーを霜層に照射する。着霜板は長さ300mm × 幅100mm × 厚さ1mmの銅板を用い、放射熱エネルギーの反射の影響を極力軽減させるため、表面に黒体塗料を塗布してある。

3. 実験結果および考察

3・1 霜層の昇華蒸発の経時変化

図3は、霜層の昇華蒸発量  $M_s$  の経時変化を放射熱エネルギー強度  $q_r$  をパラメータとして示したものである。実験条件は主流の湿り空気速度  $U_\infty = 8 \text{ m/s}$ 、主流の湿り空気温度  $T_\infty = 268.15 \text{ K}$  ( $-5^\circ\text{C}$ )、相対湿度  $\phi_\infty = 25\%$ 、初期霜層の平均高さ  $H_{fin} = 2 \text{ mm}$ 、霜密度  $\rho_f = 130 \text{ kg/m}^3$  である。図3中の矢印は、霜層長さ(図2の  $x$  方向)が着霜板長さ ( $\ell = 0.3 \text{ m}$ ) の99%となり、着霜板表面が露出し始めた時点を示したもので、これより後は霜層長さが次第に減少していくことになる。霜層長さの減少に伴い、昇華蒸発量の変化割合も次第に減少する傾向となる。 $q_r$  の増大とともに、昇華蒸発が促進され、 $q_r = 560 \text{ W/m}^2$  の場合では実験開始後  $t = 14 \text{ min}$  程度で着霜板前縁が露出し始め、 $t = 25 \text{ min}$  で霜層は完全に消失することとなる。

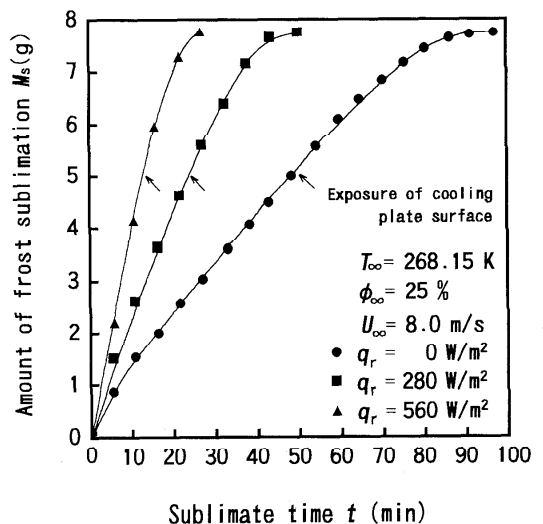


図3 霜層の昇華蒸発量  $M_s$  の経時変化

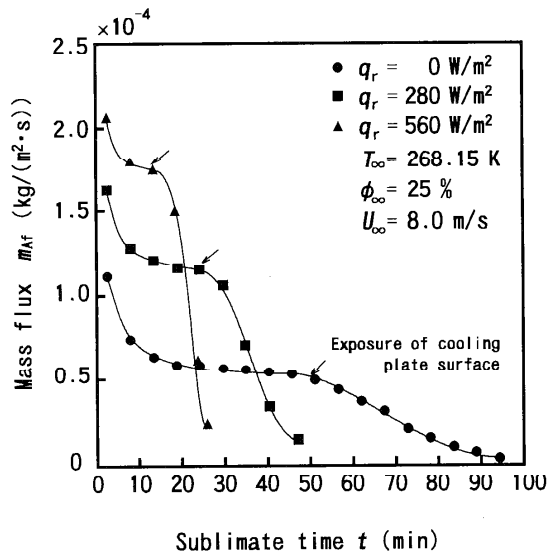


図4 昇華蒸発質量流束 $m_{Af}$ の経時変化

図4は、霜層の昇華蒸発質量流束 $m_{Af}$ の経時変化を放射熱エネルギー強度 $q_r$ をパラメータとして、主流速度 $U_{\infty} = 8 \text{ m/s}$ の場合について示したものである。霜層の昇華蒸発質量流束 $m_{Af}$ は次式で表される。

$$m_{Af} = \frac{\Delta M_s}{S \cdot \Delta t}$$

ここで、 $\Delta M_s$ (kg)は時間刻み $\Delta t$ で昇華蒸発した霜質量、 $S$ ( $0.03 \text{ m}^2$ )は着霜板投影面積で表される公称昇華蒸発面積、 $m_{Af}$ ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )は昇華蒸発質量流束である。図4より、昇華蒸発過程は大きく3段階に区分できることがわかる。初期状態における霜層の表面粗さは、高さ粗さで $0.5 \text{ mm}$ 程度と大きいため、第1段階では $m_{Af}$ は大きな値を示し、表面粗さの減少に伴い $m_{Af}$ も減少することとなる。その後、表面粗さが $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 程度の一定値となる第2段階では、 $m_{Af}$ は、ほぼ一定値を示すようになる。昇華蒸発が更に進行すると、物質伝達の大きい霜層の前縁部分から着霜銅板が露出し始める第3段階となり、昇華面積が減少するため、 $m_{Af}$ は緩やかに減少することとなる。また、第1段階における $m_{Af}$ の増大割合は $q_r$ が小さいほど顕著である。これは、 $q_r$ が小さいほど昇華潜熱に占める対流熱の割合が大きく、表面粗さが熱伝達に及ぼす影響が現れやすいためと考えられる。

### 3・2 霜層の熱収支

照射した放射熱エネルギーが有効に除霜促進に寄与しているか検討するためには、霜層の熱収支を把握する必要がある。

図5は $T_{\infty} = 268.15 \text{ K}$ ( $-5^{\circ}\text{C}$ )、 $\phi_{\infty} = 60 \%$ 、 $H_{fin} = 5 \text{ mm}$ 、 $U_{\infty} = 2, 8 \text{ m/s}$ 、 $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$ の場合において、実験開始後 $t = 1$ 分の着霜板前縁から $x = 150 \text{ mm}$ の位置での鉛直方向( $y$ 方向)の温度分布を示したものである。図5に示される $y$ 座標は霜層の先端で定義される霜層界面を基準とし、 $y < 0$ は霜層内、 $y > 0$ は主流の空気側を示す。図5より、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合、霜層が昇華蒸発すると、霜層の温度が低下し、主流空気から霜層内に熱が流入していることがわかる。霜層内部は、霜層界面から $y = -3 \text{ mm}$ 付近まで温度は低下し、それ以降はほぼ一定値となる。このことより、霜層界面下の $y = -3 \text{ mm}$ 付近まで、昇華蒸発が誘発されているものと考えられる。これに対して、 $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合では、放射熱エネルギーにより、霜層の温度が上昇し、逆に霜層内から主流空気へ熱が流出していることがわかる。また、霜層界面下の $y = -4 \text{ mm}$ 付近までは、霜層内の温度は霜層下部ほど高くなり、放射熱エネルギーの透過現象が確認された。これは霜層が多孔質構造を有するためと考えられる。

図6は $U_{\infty} = 8 \text{ m/s}$ 、 $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$ の場合にお

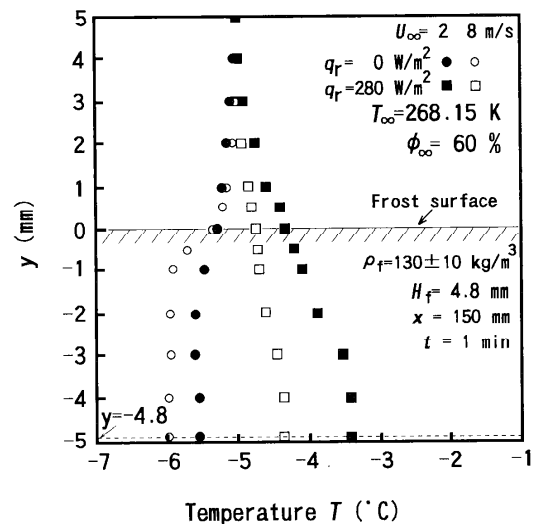
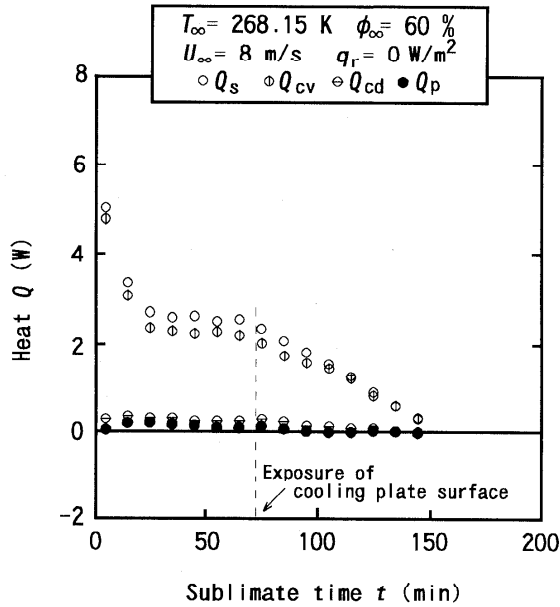
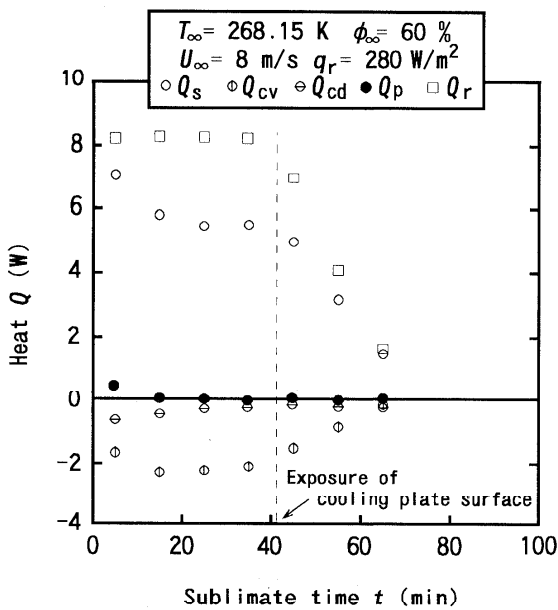


図5 霜層の鉛直方向温度分布



(a)  $q_r = 0 \text{ W/m}^2$  の場合



(b)  $q_r = 280 \text{ W/m}^2$  の場合

図6  $U_\infty = 8 \text{ m/s}$  の場合の熱エネルギー収支

ける霜層の熱エネルギー収支の経時変化を示したものである。図中の  $Q_s$  は昇華蒸発による潜熱量， $Q_{cv}$  は対流伝熱量， $Q_{cd}$  は着霜板下部からの伝導伝熱量， $Q_p$  は霜層，着霜板，熱流束センサの顕熱量の総計， $Q_r$  は放射伝熱量である。実験開始の初期段階において，昇

華蒸発による潜熱量  $Q_s$  は大きな値を示す。これは，表面粗さの影響が表れているものと考えられるが， $q_r = 280 \text{ W/m}^2$  の場合には， $Q_s$  の変化割合が低下している。また， $q_r = 0 \text{ W/m}^2$  の場合には， $Q_{cv}$  の減少が  $Q_s$  の減少に直接影響するのに対し， $q_r = 280 \text{ W/m}^2$  の場合には，霜層への放射熱エネルギーの供給により， $Q_{cv}$  の  $Q_s$  に及ぼす影響が弱まる傾向となる。 $q_r = 280 \text{ W/m}^2$  の場合の  $Q_{cv}$  は負の値となり，霜層から熱が流出していることわかる。すなわち，主流速度が大きい場合は，放射熱エネルギーを照射しても，対流により熱が霜層から流出するため，その効果は小さいことがわかる。また，顕熱量  $Q_p$  の影響は小さく， $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$  とともに  $Q_s$  の 2% 以下である。

### 3.3 除霜終了時間

図7は，実験開始から完全に霜層が昇華蒸発するまでの時間で定義される昇華蒸発終了時間  $t_{cs}$  と放射熱エネルギー強度  $q_r$  との関係をもとに  $Re$  数をパラメータとして，無次元放射熱エネルギー強度  $q_r^*$  と  $Fo Sc^{1/3} / (\rho^* (H_{fin}/l)^{0.769})$  との関係で示したものである。ここで，フーリエ数  $Fo$  と密度比  $\rho^*$  および無次元放射熱エネルギー強度  $q_r^*$  を以下のように定義する。

$$Fo = \frac{a t_{cs}}{l^2}, \quad \rho^* = \frac{\rho_i}{\rho_{ice}}$$

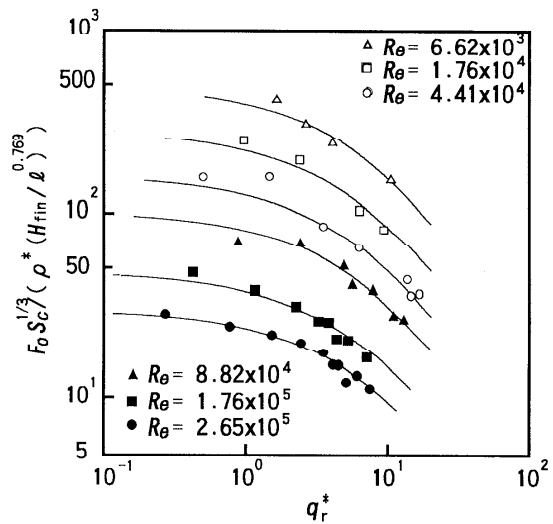


図7  $q_r^*$  と  $Fo Sc^{1/3} / (\rho^* (H_{fin}/l)^{0.769})$

$$q_r^* = \frac{q_r}{q_{cv}^*}, \quad q_{cv}^* = h(T_\infty - T_w)$$

ここで、 $h$ は既報<sup>15)</sup>で求めた霜層の熱通過率、 $T_w$ は着霜板表面温度である。霜層への放射熱エネルギーの照射による除霜促進効果は顕著で、 $q_r^*$ の増大に伴い $Fo$ 数が減少することとなる。その減少傾向は、小さな $q_r^*$ 値で $Fo$ 数の変化の少ない対流伝熱が支配的な領域から、 $q_r^*$ の増大に伴って、 $Fo$ 数の減少割合が大きくなる放射伝熱が支配的な領域へと変化する様相を呈する。除霜の促進は、放射熱エネルギーの照射による霜層への熱供給により、霜層表面の温度が上昇し、主流空気との水蒸気質量濃度差が増大するために生じると考えられる。 $q_r^*$ の小さな( $q_r^* < 1$ )対流伝熱が支配的な領域では、霜層表面温度が主流空気温度より低く、また、対流により主流空気からの入熱の割合が多く、放射熱エネルギーの効果が現れにくくなる。一方、放射熱が支配的な領域( $q_r^* > 1$ )では、霜層表面温度が主流空気温度より高く、対流による熱流出があるものの、水蒸気濃度差の増大により、昇華蒸発が促進されることになる。

#### 4. まとめ

熱交換器の除霜に関する最近の研究を紹介し、昇華蒸発を除霜に用いた場合について概説した。水平霜層を上面からの強制対流により昇華蒸発させ、さらに除霜を促進するために、霜層の上面から放射熱エネルギーを照射した場合の、昇華蒸発促進効果を検討し、種々の条件下での、除霜熱効率と除霜量を予測することが可能となった。

#### 参考文献

- (1)安立, 井上, 猪田, 冷凍協会論文集, 52-598(1977), 715.
- (2)桑原, 山崎, 河村, 冷凍協会論文集, 2-3(1985), 203.
- (3)青木, 服部, 千葉, 機械学会論文集B編, 51-471(1985), 3567.
- (4)勝田, 石原, 向井, 冷凍協会論文集, 58-665(1983), 229.
- (5)勝田, 石原, 向井, 冷凍協会論文集, 58-669(1983), 645.
- (6)石原, 樋上, 空気調和衛生工学会論文集, 48(1992), 83.
- (7)菅原, 他4名, 機械学会論文集B編, 55-510(1989), 504.
- (8)菅原, 他4名, 機械学会論文集B編, 56-531(1990), 3457.
- (9)稲葉, 大竹, 野津, 冷凍協会論文集, 9-3, (1992), 257.
- (10)稲葉, 大竹, 野津, 機械学会論文集B編, 58-555, (1992), 3373.
- (11)稲葉, 大竹, 野津, 機械学会論文集B編, 59-561, (1993), 3572.
- (12)H. Takeuchi, et al., Int. Symposium on Cold Regions Heat Transfer(1987), 171
- (13)相原, 他3名, 機械学会論文集B編, 54-503, (1988), 1744
- (14)稲葉, 今井, 機械学会論文集B編, 61-585, (1995), 1818.
- (15)稲葉, 今井, 機械学会論文集B編, 61-586, (1995), 2261.

# LNG冷熱を利用した排ガス中炭酸ガスの固化分離技術

竹内 善幸 (三菱重工) 広中 正吾 (三菱重工) 島田 裕 (中国電力)  
徳政 賢治 (中国電力)

## 1. 概要

私たちが住んでいるこのかけがえのない地球環境が今損なわれようとしている。地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、砂漠化、森林減少、海洋・河川汚染等がその主なものである。

地球温暖化について、アメリカ科学アカデミーの報告によると、炭酸ガスがこのまま増加すると2,030年に約1.5~4.5℃温度が上昇し、その結果自然環境が変化して、大陸では干ばつ、砂漠化、海岸付近では海面上昇等が発生すると予測している。

地球温暖化の要因としては、炭酸ガス、メタン、亜酸化窒素、フロン等の温室効果ガスの増加があり、その中でも炭酸ガスが最も影響が大きいと言われている(図1参照)。

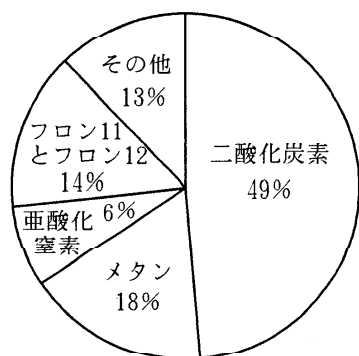


図1 温室効果ガスの影響度<sup>1)</sup>

この炭酸ガスの発生源としては、一般産業部門が最も大きく(40%)、次に電力部門(31%)、運輸部門(17%)、民生部門(12%)が続く。

そこで、大気中の炭酸ガス濃度抑制のための第1ステップとして、より一層の省エネルギーの推進や、高効率のエネルギーの利用、低炭素系燃料(LNG等)に転換する方法がある。

第2ステップとしては、排ガスから炭酸ガスを分離・回収し、一時貯留または燃料等へ再資源化する方法が考えられる。

各電力会社では、火力発電所からの炭酸ガス排出量を抑制するため、発電効率の一層向上を図りながら、炭酸ガスの分離・回収、さらに固定・資源化する技術の開発に取り組んでいる(表1参照)。

表1 炭酸ガスの処理技術<sup>2)</sup>

項目	開発技術
分離・回収	化学吸収法：MEA、炭酸カリウム 物理吸収法：Selexol他 物理吸着法：PSA, TSA, PTSA 冷却分離法：深冷法、固化法 膜分離法： 直接回収法：酸素燃焼
貯留技術	海洋貯留：深海<500m 地中貯留：油溝、帯水層、EOR 鉱物貯留：クラスラシル、砂鉄
再資源化	化学法：接触水素化、接触分解 高分子合成、有機合成 光化学、光電気化学 生物法：海洋生物、微細藻類 陸生生物

現在、超低温(約-160℃)の液化天然ガス(LNG)をガス燃料として利用する発電所では、必要なLNGの気化熱を大気あるいは海水から得ており、LNGの保有する冷熱を放出して、液化エネルギーの損失となっている。

そこで、著者らはLNG焼きコンバインドサイクル排ガス中の炭酸ガスをLNG冷熱を用いて、固化(ドライアイス)・回収するプロセスについて、技術開発を進めている。ここでは、前記プロセスの実用化に当



たり、装置設計に必要なデータ取得のために研究を実施したので、その概要を紹介する。

## 2 炭酸ガスの固化・回収システム

図2に炭酸ガスの状態図を示す。例えば吸着方式の炭酸ガス回収方法の場合、炭酸ガスを低圧で吸着・脱着し、さらに圧縮・冷却して液化炭酸とする。

一方、著者らの新方式では、炭酸ガスをLNGの冷熱を利用して冷却・固化するため、圧縮動力が不要であり、省エネ化が可能である。

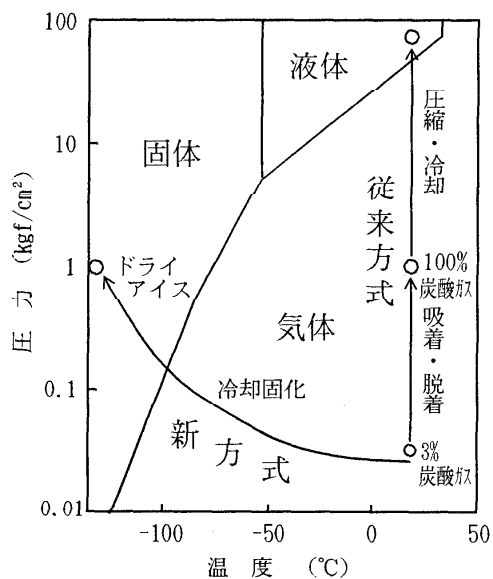


図2 炭酸ガスの状態図

図3に炭酸ガスの分子構造図を示す。図4に炭酸ガスが固化したドライアイスについて、計算ソフトMO Packageにより、分子動力学及び分子軌道法による最適安定構造をシミュレートした結果を示す。ドライアイスは、炭酸ガス分子同士がファンデルワールス力により結合しており非晶質構造となっていると考えられる。一般に市販されているドライアイスは、低温の液化炭酸ガスを容器内で断熱膨張させて微粒子を生成し、これをプレス成形して製品にしている。

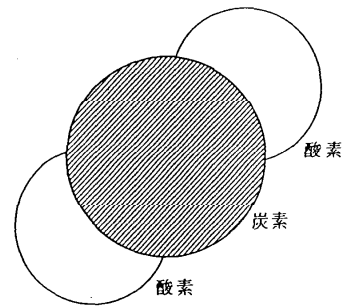


図3 CO<sub>2</sub>分子構造

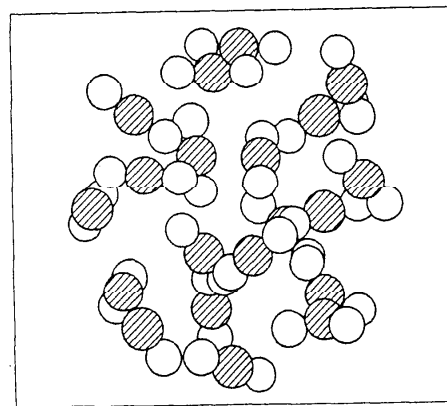


図4 ドライアイスの結晶構造

LNG 焼きコンバインドサイクルにおける炭酸ガスの固化・回収プロセスの概要を図5に示す。また、物質収支を表2に示す。

まず、排ガスを熱交換器により5℃まで冷却し、凝縮水を分離して除湿する。その後、残存する水分と炭酸ガスを含む排ガス（以下プロセスガスと呼ぶ）をドライアイスクリスタライザーに導き、LNG冷熱と熱交換された低温の再循環乾きガスと直接接触させ、炭酸ガスをドライアイスとして固化・分離する。

本プロセスの開発に当たり、プロセス条件におけるドライアイスの特性に関する以下の基礎研究を実施した。

### (1) 低濃度炭酸ガスの固化条件

冷却温度、ガス流量等の影響

### (2) ドライアイスの形態

粒径、凝結性等

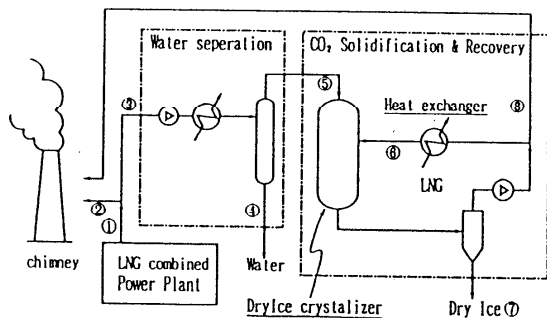


図5 炭酸ガスの固化・回収システム

表2 炭酸ガスの固化・回収システムにおける物質収支例

Item	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Flow (kgmol/h)								
CO <sub>2</sub>	194.3	183.4	10.9	0.0	10.9	26.2	9.8	1.1
O <sub>2</sub>	856.1	808.2	47.9	0.0	47.9	404.0	0.0	47.9
N <sub>2</sub>	4644.6	4384.5	260.1	0.0	260.1	2192.6	0.0	260.1
H <sub>2</sub> O	376.4	355.3	21.1	18.2	2.9	0.0	2.9	0.0
Total	6071.4	5731.4	340.0	18.2	321.8	2622.8	12.7	309.1
Composition (mol%)								
CO <sub>2</sub>	3.2	3.2	3.2	0.0	3.4	1.0	77.3	0.4
O <sub>2</sub>	14.1	14.1	14.1	0.0	14.9	15.4	0.0	15.5
N <sub>2</sub>	76.5	76.5	76.5	0.0	80.8	83.6	0.0	84.1
H <sub>2</sub> O	6.2	6.2	6.2	100.0	0.9	22.7	22.7	0.0
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Temperature (°C)	110	110	110	5	5	-150	-145	-127

### 3. 炭酸ガスの固化条件

炭酸ガスは、分圧が1.03kgf/cm<sup>2</sup>の場合に-78.5℃で固化する(図6参照)。ところが、分圧が低下するに従って、固化温度は低くなる。

図7に、1.03kgf/cm<sup>2</sup>における炭酸ガス濃度と固化温度の相関を示す。

LNG 焚きコンバインドサイクルにおける排ガス中の炭酸ガス濃度は約3mol%で非常にガス分圧が低い。この排ガスでは、図7に示すように理論上-115℃以下で固化することになる。

従って、排ガス中の炭酸ガスを冷却して固化するためには、ガス組成に応じて冷却温度を調整する必要がある。

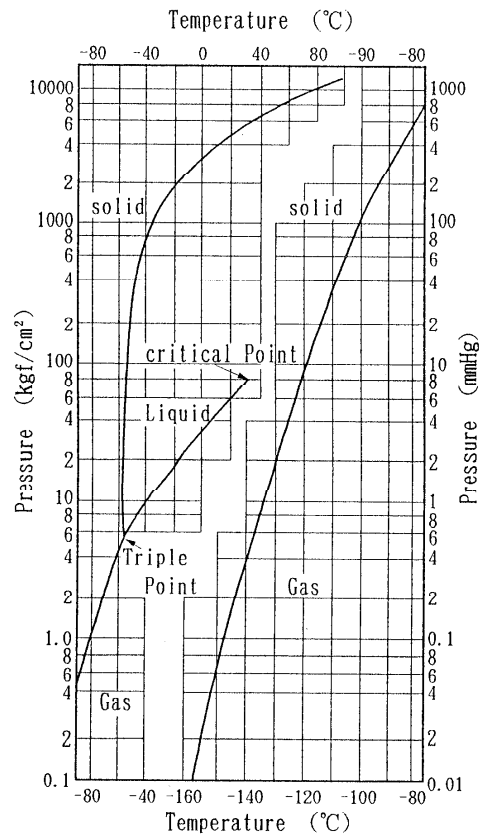


図6 炭酸ガスのP-T線図<sup>7)</sup>

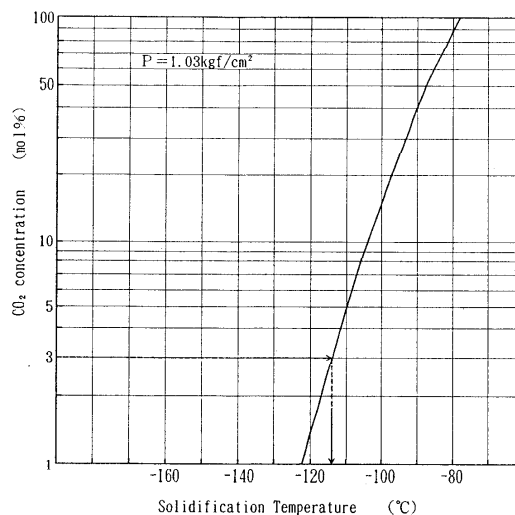


図7 炭酸ガス濃度と固化温度の相関

### 4. 炭酸ガスの固化試験

#### 4.1 実験装置及び方法

前述の固化条件を基礎実験により検討した。

図8に実験装置のフローを示す。

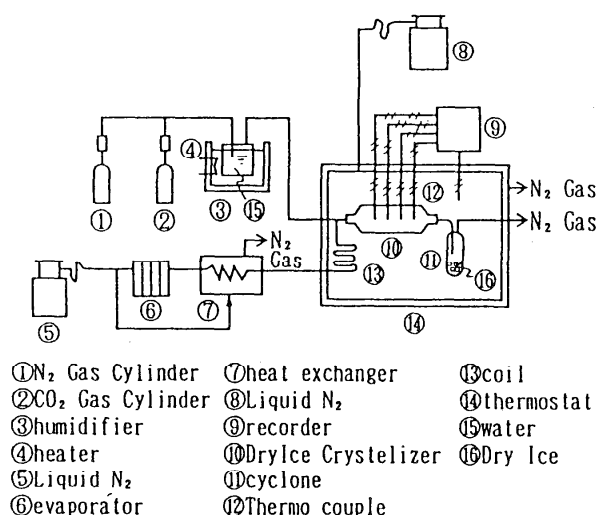


図8 実験装置のフローシート概要

- |                               |                        |             |
|-------------------------------|------------------------|-------------|
| ①N <sub>2</sub> Gas Cylinder  | ⑦heat exchanger        | ⑬coil       |
| ②CO <sub>2</sub> Gas Cylinder | ⑧Liquid N <sub>2</sub> | ⑭thermostat |
| ③humidifier                   | ⑨recorder              | ⑮water      |
| ④heater                       | ⑩Dry Ice Crystallizer  | ⑯Dry Ice    |
| ⑤Liquid N <sub>2</sub>        | ⑪cyclone               |             |
| ⑥evaporator                   | ⑫Thermo couple         |             |

プロセスガスに相当する模擬ガスとして、窒素ガスと炭酸ガスを混合した後、加湿槽で水分濃度を調整して、ドライアイスクリスタライザーに供給する。

一方、冷却用ガスとして、液体窒素を蒸発器で蒸発させ、熱交換器で温度調節したものを、ドライアイスクリスタライザーに供給する。

プロセスガスと冷却用ガスは、クリスタライザー入口のノズルから供給され、ここで混合された後クリスタライザー本体内に流入する。混合ガスは温度が低下し、混合ガス中の炭酸ガスが固化してドライアイス粒子になる。この粒子は、さらにガス搬送されてサイクロンで搬送ガスと分離され、サイクロン下部に捕集される。

ドライアイスクリスタライザーとサイクロンは、放熱を防止するために、液体窒素で温度を調節する極低温恒温槽内に設置されている。

炭酸ガスの固化率は、クリスタライザーの入口と出口のガス組成をガスクロマトグラフで分析し、組成変化量から算出する。

温度変化はCC熱電対で計算し、高速データログで記録する。

主要機器の仕様を以下に示す。

(1)クリスタライザー (図9参照)

材質：パイレックスガラス

寸法：外径100×肉厚6×長さ500(mm)

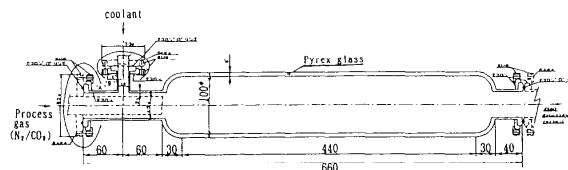


図9 ドライアイスクリスタライザー

(2)極低温恒温槽

寸法：幅1,000×長さ1,950×高さ750(mm)

最低保持温度：-170℃

(3)低温N<sub>2</sub>供給ユニット

冷却ガス量：最大6(Nm<sup>3</sup>/h)

冷却温度：-160℃

## 4.2 実験結果およびその考察

(1)固化率に及ぼす循環ガス量の影響

炭酸ガスの固化率が最大となる冷却用ガス量として、熱収支計算の結果、以下の条件が必要である。

$$R = (\text{冷却用ガス量}) / (\text{プロセスガス量}) = 8$$

そこで、炭酸ガス固化率とRの相関を基礎試験で求めた。

図10に実験結果を示す。その結果、目標の炭酸ガス固化率が90%以上を達成するためには、炭酸ガス濃度に関係なく、R>8の条件が適正であることを確認した。

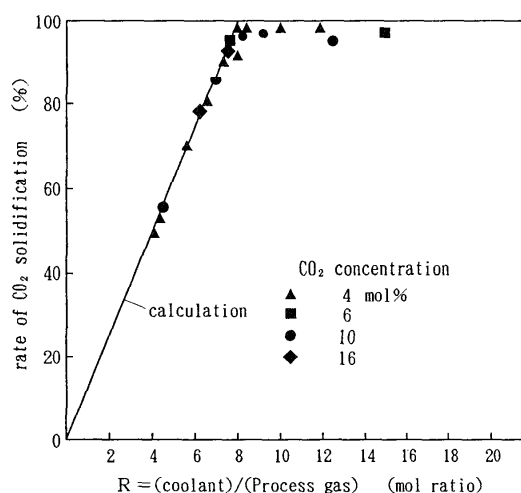


図10 炭酸ガス固化率に及ぼす(冷却ガス)/(プロセスガス)比

(2) 固化率に及ぼす温度の影響

前記図7に示すように、炭酸ガス濃度は固化温度に影響を及ぼす。そこで、炭酸ガス固化率が90%以上になるクリスタライザー入口温度を実験で求めた。

図11に実験結果を示す。その結果、目標の炭酸ガス固化率90%を達成するためには、 $-135^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却する必要がある。図7の計算値とのずれは、クリスタライザーの形状によるプロセスガスと冷却ガスとの混合状態の影響が考えられるが、原因について検討中である。

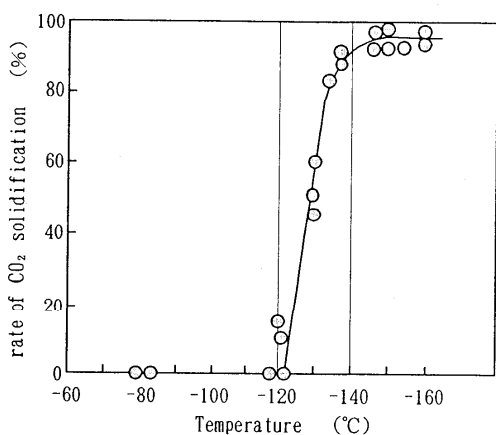


図11 炭酸ガス固化率と固化温度の実験結果

(3) 固化率に及ぼすH<sub>2</sub>O濃度の影響

青木ら<sup>3)</sup>の報告によると、冷却表面が存在すると炭酸ガスの飽和温度以下の超低温下では、冷却表面上に炭酸ガスが先に固化し、その上にH<sub>2</sub>Oが固化する(図13参照)。対象のプロセスガス中にはH<sub>2</sub>Oが1 mol%程度含まれている(表2参照)。そこでH<sub>2</sub>O濃度の影響につき検討した。図14に炭酸ガスの固化率に及ぼすH<sub>2</sub>O濃度の影響を示す。H<sub>2</sub>O濃度が0~9 mol%の範囲では、影響が現れていない。本実験は、冷却ガスと炭酸ガス及びH<sub>2</sub>Oの混合ガスを直接混合により冷却する方法を行っているため、生成した固化物は、炭酸ガスの固化物(ドライアイス)を核としてその表面にH<sub>2</sub>Oが固化しているものと推察される。

なお、生成した固化物は、 $-135^{\circ}\text{C}$ に調整した極低温の恒温槽外に取り出すと非常に短時間に昇華するため、固化物の電子顕微鏡撮影はできなかった。

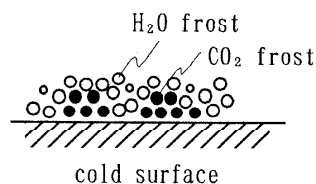


図13 炭酸ガス・水蒸気霜の複合成長イメージ<sup>3)</sup>

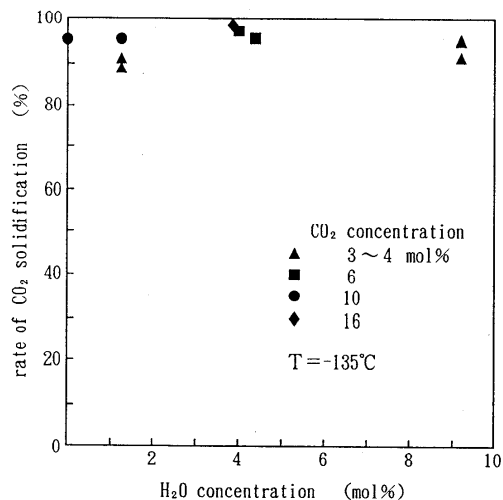


図14 炭酸ガス固化率に及ぼすH<sub>2</sub>O濃度の影響

(4) サイクロンによるドライアイスの捕集

図15に示す極低温恒温槽の覗窓から撮影したクリスタライザー出口部及びサイクロンによるドライアイスの捕集状況を図16に示す。

ドライアイス粒子は、約100 μm程度の粒径で、ガラス製のクリスタライザー表面への凝結性がなく、さらっとしており容易に気流搬送される。

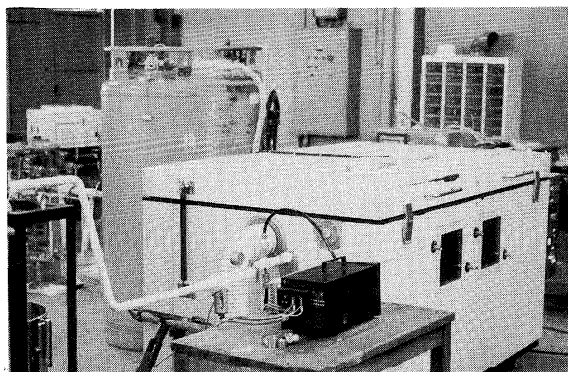


図15 極低温恒温槽



図16 ドライアイス生成実験状況

## 5. 結 論

超低温の液化天然ガス（LNG）をガス燃料として利用する際に、従来放出されていた冷熱の有効利用と、地球の温暖化に影響を及ぼすといわれている炭酸ガスの固化・回収を狙って、独自のLNG冷熱有効利用システムの開発を進めており、この一環として低温における排ガス中の炭酸ガスの挙動に関する基礎研究を実施し、以下の結果を得た。

- (1) LNG 燃きコンバインドサイクルの排ガスから炭酸ガスを分離・除去するプロセスを考案した。
- (2) 固化率に及ぼす温度の影響について検討し、炭酸ガス固化率が90%以上になるクリスタライザー入口温度は、 $-135^{\circ}\text{C}$ 以下であることを確認した。
- (3) 生成したドライアイスは、凝結性がなく、気流搬送によりサイクロンで捕集が可能である。

## 【参 考 文 献】

- 1) OECD/IEAレポート, (1990)
- 2) 炭酸ガス対策の新展開, 東レリサーチセンター, (1993) 36.
- 3) 青木和夫, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992) 613.
- 4) 液化炭酸(株), バンフレット
- 5) 川井利長, 炭酸ガス回収技術, (株)NTS
- 6) 藤各義, MOL, 5 (1990) 76
- 7) 小宮山, 地球温暖化問題ハンドブック, (株)アイピーシー (1990)

# 凍土と地盤凍結工法

生頼 孝博 (精研)

## 1. はじめに

土は土粒子、水、空気から成り、冷却作用により水の大部分が氷に変化して凍土となる。細粒土の場合、一部の水は土粒子表面に吸着された不凍水として残る。また、土中水に塩分などを含む場合にも、モル凝固点降下により溶液が不凍状態で残存する。

土が凍結する時、熱の流れに加えて未凍土側から凍結面に向かって水分移動が生じ、土粒間隔を押し広げるといふ、いわゆる凍結膨張現象が起る。

未凍土から凍土への相変化は、熱伝導率や強度にかんがりの変化をもたらす。

地球上に存在する凍土でその量が最も多いのは一年中凍結したままの状態である永久凍土<sup>1)</sup>と呼ばれるもので、アラスカ、カナダ、ロシア、中国などに広く分布し、世界の全陸地面積の14%を占めている。その厚みも地下数百メートルに及ぶ地域もある。永久凍土地域は天然資源も豊富であり、地球の熱バランスを維持するという地球環境面からも重要な存在である。冬期にのみ凍結する季節凍土を含めると地盤凍結が生じる地域は全陸地の70%にも達するといわれている。

永久凍土、季節凍土を人間生活との係わりで見ると、永久凍土層内に穴を掘り天然の食糧貯蔵庫として利用している反面、季節凍土の凍結膨張により建造物が持ち上がるという、いわゆる凍上被害が生じていることなど、両面を合せ持っている。

凍土は非常に固く、水を通さないという性質に着目して、これを土木工事の掘削時の土留壁に利用しようという発想が1850年代後半に生まれた。冷凍機により人工的に地盤を凍結させ、これを利用するという今日の地盤凍結工法である。1862年イギリスの鉱山用立坑建設工事で、帯水層の崩壊防止に人工凍土を造成したのが世界で初施工といわれている。我国では1962年大阪での河底横断水道管布設工事の防護が初施工である。以来、我国では上下水道、地下鉄、地下調整池、ガス、

電力、通信用など地下トンネル工事での施工件数は300件を越えている。

本稿では凍土中の不凍水の存在と、それに起因する熱伝導率、凍結膨張、凍土強度などの特性を概説し、地盤凍結工法の概要を示す。最後に、凍土利用の課題と若干の展望について触れる。

## 2. 凍土の特性

### 2-1. 凍土中の不凍水

水が圧力を受けたり、溶質を含んだりするとその氷点は降下する。土中水の氷点降下は土粒子間隙の毛管力によるもの、土粒子表面の吸着力によるもの、そして塩分などの溶質によるもので生じる。前者の氷点降下量はたかだか $-1^{\circ}\text{C}$ 程度迄であるが、後二者による降下量は大きい。

図1に $0^{\circ}\text{C}$ 以下の土、つまり凍土中の不凍水量と温度の測定例を示す。<sup>2)</sup>

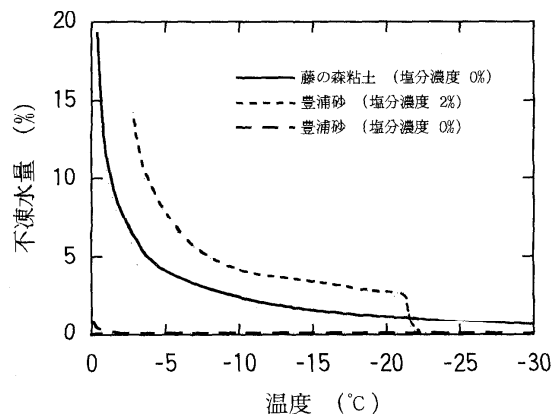


図1. 凍土中の不凍水量と温度の関係

塩分を含まない砂凍土、粘土凍土は土粒子表面の吸着力による氷点降下の結果存在する不凍水量である。 $-3^{\circ}\text{C}$ 程度までしか不凍水が存在しない砂凍土に比べて、多くの表面積を持ち吸着力も強い粘土凍土の方が不凍

水量が多く、しかも $-30^{\circ}\text{C}$ 以下でも不凍水が残っている。塩分(NaCl)を含む砂凍土も $-3^{\circ}\text{C}$ 以下の溶質による不凍水量は温度低下と共に減少し、塩分の共晶点( $-21.3^{\circ}\text{C}$ )以下で急減し不凍水は存在し得なくなる。

凍土が温度によって異なる不凍水量を持つことが、後述する熱伝導率、凍結膨張、強度に重要な影響を与えることになる。

### 2-2. 凍土の熱伝導率

凍土の構成物質である鉱物、氷、不凍水、空気の構成比率や組織状態によって熱伝導率の値は異なり、一般的表示は難しい。しかしながら、同じ土であるならば、氷の熱伝導率( $2.0\text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ )が水のそれ( $0.5\text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ )の約4倍になるため、凍土の熱伝導率は未凍土の場合のそれより1.5~2.0倍程度大きくなる。

不凍水を含む凍土では氷と水の体積割合は図1から分かる様に、温度によって異なる。つまり、温度低下に伴って不凍水量は減少し水量が増加する。従って、熱伝導率は温度低下に伴って大きくなる。図2に熱伝導率の温度依存性の測定例を示す。<sup>3)</sup>

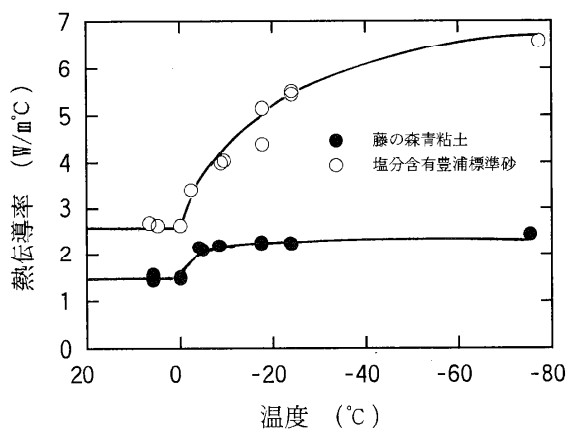


図2. 凍土の熱伝導率と温度の関係

温度拡散率を考える場合には、熱伝導率に加えて比熱を知らねばならないが、この値も不凍水の相変化が大きく影響する。つまり、潜熱だけ大きくなる。凍土では見掛け比熱と呼ばれている。見掛け比熱は熱伝導率曲線を反転したような形になり、 $0^{\circ}\text{C}$ に近づくにつれて急激に大きくなる。

### 2-3. 凍結膨張

その土が元々含んでいた水分が凍結膨張するだけな

らば、その土全体の体積膨張量は容易に知り得ることになる。しかしながら、実際の地盤が凍結すると水分子移動が生じる。図3に凍結面附近での含水比分布の実測値を示す。<sup>4)</sup>

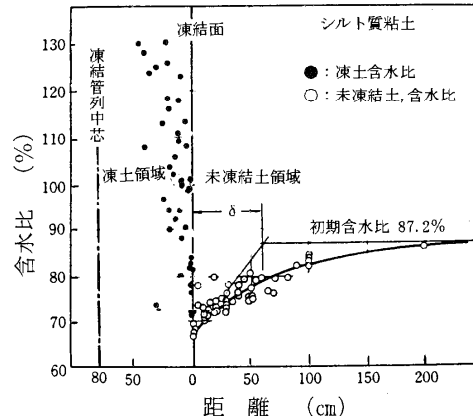


図3. 凍結面附近の含水比分布

この地盤での凍結前の初期含水比は87.2%であったが、凍結後には凍土領域ではその値を上廻り、逆に凍結面前方の未凍結領域では減少していることが分かる。

つまり、未凍結領域の水分が凍土内へ呼び込まれていることになる。凍土内へ入り込んだ水分は凍結前の土粒子と水の組織状態を変え、結果として土粒子間隙を押し広げることになる。これが地盤の凍結膨張現象である。凍土内へ入り込んだ水分は氷晶として析出するが、その形状からアイスレンズと呼ばれる。

土粒子間隙を押し広げアイスレンズとして存在する為の力を凍上力と呼び、その値は温度と土質によって決まることが実験的に明らかになっている。図4に凍上力と温度との測定例を示す。<sup>5)</sup>

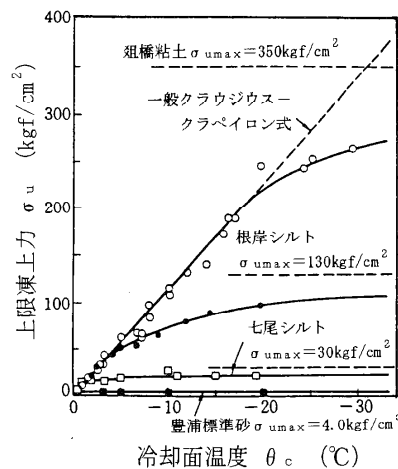


図4. 凍上力と温度の関係

温度が低い程凍上力は大きく、粘土の様に粒径の小さい土ほどそれは大きいことが分かる。このことは凍結膨張が細粒分の多い土ほど、また凍土内の温度の低い領域ほど生じ易いことを示している。しかしながら、温度の低い領域ほど図1に示したように不凍水量は少なくなることから、水分が移動し難くなるので、凍土内のある温度範囲の部分が最も凍結膨張し易いことが推察できる。凍土内の凍結面より後方のある部分で、時間と共にアイスレンズがその厚みを増していくことが実験的に確認されている<sup>6)</sup>ことから、上記の推察の正しいことが裏付けられる。

凍土内で不凍水膜を通じて水分移動が生じることはいくつかの実験で確認されているが、現在のところその吸水力については未解明である。

#### 2-4. 凍土の強度

土が凍結すると非常に固くなることは古くから知られており、寒冷地では軟弱な沼地も冬季に凍結して交通路として利用できる。水が粘弾性物質であることから凍土も同じ性質を有するが、ここでは軸圧縮強度を取り上げ、それに及ぼす水と不凍水の影響について述べる。

図5に二種類の凍土の一軸圧縮強度の温度依存性の例を示す。<sup>7)</sup>

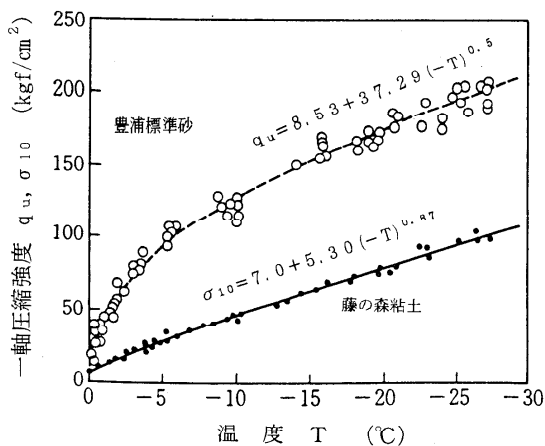


図5. 凍土の一軸圧縮強度と温度の関係

温度の低下に伴って強度が増加しているが、これは土粒子を結合している氷の強度が増加するのに加えて、不凍水量が減少するためである。逆にいえば、不凍水の存在は凍土の強度を弱めることになり、図中の砂凍

土での $-5^{\circ}\text{C}$ から $0^{\circ}\text{C}$ までの強度の急激な低下や、砂凍土より不凍水を多く含む粘土凍土の方が強度が小さいことがそれによって説明できる。藤の森粘土凍土の場合は $-30^{\circ}\text{C}$ でもまだなお不凍水が存在しているが、もはや不凍水が存在しなくなる $-80^{\circ}\text{C}$ での一軸圧縮強度は $750\text{kgf}/\text{cm}^2$ にもなり、<sup>8)</sup>図5の曲線と近似式から得られる $-80^{\circ}\text{C}$ での数値である $247\text{kgf}/\text{cm}^2$ の約3倍にもなることからそのことが確認できる。

溶質による不凍水の存在も凍土の強度を弱めることが実験で確認されている。例えば、図5の砂凍土が $-10^{\circ}\text{C}$ で土中水の僅か1%の塩分を含有した場合の強度は粘土凍土とほぼ同じ強度にまで低下する。<sup>7)</sup>

不凍水の存在しない土粒子と氷のみで構成される凍土では、氷の量が多くなる程強度は弱くなり、多結晶氷自体の強度に近づく。つまり、土粒子径が大きくなり、またその詰まり方が粗になるほど強度は弱くなる。

凍結膨張時に析出するアイスレンズは一般の多結晶氷と異なった強度を示す。<sup>9)</sup>成長方向に圧縮した場合は $-10^{\circ}\text{C}$ で $190\text{kgf}/\text{cm}^2$ を越える大きな値となり、成長方向に垂直に圧縮した場合には $40\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の市販の多結晶氷とほぼ同じ値となる。アイスレンズは幾何学的配列が非常に揃った角柱状多結晶氷であった。凍結膨張した凍土の圧縮強度にはこのアイスレンズの強度特性である方向性が現れる。

### 3. 地盤凍結工法

#### 3-1. 方法と特徴

凍結対象地盤中に埋設した凍結管と呼ばれる直径10cm前後の鋼管内に氷点以下の低温液を供給しつづけると、管の表面から周辺地盤が冷却され、同心円状に凍土が成長する。適当な間隔に凍結管を埋設しておけばそれぞれの管を中心にした年輪状に凍土柱が成長し、ついには隣接する凍土柱が互に合体して一連の凍土壁となる。掘削形状に応じた外側に凍土壁を造成して、土木工事中の一時的な遮水壁・耐力壁として利用するもので、構築工事完了後には解凍して元の地盤に戻る。

凍結管に供給する低温液の違いによってブライン(塩化カルシウム溶液、 $-25^{\circ}\text{C}$ ~ $-35^{\circ}\text{C}$ )方式と液体窒素(沸点 $-196^{\circ}\text{C}$ )方式とに分けられるが、本稿では圧倒的に施工数の多いブライン方式について述べる。



凍結工法には次のような特徴がある。最も大きな利点は凍土の力学的強度が大きいことである。遮水性も充分であり、鋼材やコンクリートなどの凍着力（接合力）も大きいので、これらの部材と連続した壁として利用できる。また、熱が高い所から低い所へ流れようとする性質のため、不均質な地盤でも一様な厚みの凍土壁ができる。さらに、地盤の汚染が無いことも利点として大きい。一方、欠点としては、土によっては凍結時に体積膨張し、解凍時に逆に収縮して附近の既設構造物に影響を与える場合があることや、ある流速以上の地下水流が存在する場合には凍土壁完成の為に流速緩和対策が必要となることなどが挙げられる。地盤の熱伝導を利用するため必要凍土壁造成にはある程度の期間が必要となることも、他工法との比較時には欠点となる場合もある。

### 3-2. 凍土成長と解凍

凍土成長計算には二つの理論解析<sup>10)</sup>結果を併用する。冷却開始後の年輪状凍土成長には単管理論、凍土柱結合後の壁厚みが増加する方向の凍土成長には平板理論を用いる。図6に凍結管埋設間隔を80cmにした場合の単管理論から平板理論に乗り換える方法による凍土成長曲線の計算例を示す。<sup>11)</sup>

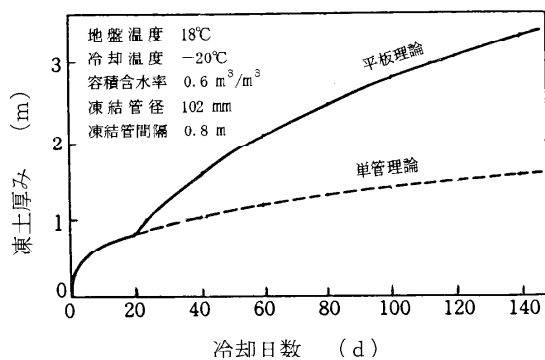


図6. 凍土成長曲線の計算例

冷却開始後約20日目に隣接する凍土柱が合体し、その後は凍結の進行が加速され、約2ヶ月後にほぼ2m厚みの凍土壁が造成できる。地盤温度及び冷却温度が低い程凍土成長は速くなり、地盤の含水率が大きい程遅くなる。

工事完了後の解凍には自然解凍と強制解凍がある。自然解凍時の一次元の解凍速度は地盤の熱定数や凍土

の温度拡散率などの他に冷却時間にも依存する解析結果が得られており、<sup>12)</sup>長期間冷却を続けた場合ほど停止後の解凍速度が小さくなる。目的の凍土壁完成後に停電や冷凍機の故障による不慮の冷却停止が生じて、1日目の解凍厚みは僅か1cm程度であり、工事中の安全性は確保できる。

その反面、工事完了後に速やかに元の地盤に戻す為には自然解凍だけでは難しく、強制解凍が必要となる場合が多い。強制解凍では凍結管を逆に温水管(+60°C程度)に転用するので、解析的には凍結の進行の逆現象として取り扱うことができる。

尚、凍結中の解凍で重要なものに、熱応力や凍結膨張力などによって凍結管が破損した場合の、漏洩ブラインによる侵食解凍<sup>13)</sup>があるので注意が必要である。

### 3-3. 地下水流の影響と対策

地下水流という加熱源は凍結工法の成否を決定する。地下水流が持ち込む熱の為に目的通りの凍土壁が完成しない場合<sup>14)</sup>と、一度でき上がった凍土壁でも新たな地下水流(工事中の湧水や揚水によって方向や流速が変化したもの)によって解凍する場合<sup>15)</sup>に分けられる。前者は凍結管列に直角方向に地下水流が存在する場合に、凍土柱の成長に伴って水流が抵抗を受けると共に凍土柱間の流速が増し、最終的にはダムのように塞ぎ止められた水流が1ヶ所に過大な流速として集中する場合である。我国でのブライン方式による標準的な施工条件下では、凍土壁が完成する為の限界流速は2m/day程度であり、透水係数が $10^{-3}$ cm/secより大きい砂層などでこの値を越える地下水流が存在する場合には何らかの対策が必要となる。この対策としては、冷却温度を下げたり凍結管埋設間隔を小さくすることなどがあるが、凍結管列数を増やすのが効果的である。後者で湧水が発生した場合に解凍が進行するかどうかの判定には、冷却温度とその時の凍土厚みが重要な因子となる。

上記のように地下水流が存在した場合の理論解析による判定式は得られてはいるが、実際には地中温度の観測により判断し、影響箇所への局所的なモルタル注入などによる流速低減によって解決できる。

### 3-4. 地盤変位の予測と対策

砂は凍上力が小さく、不凍水も殆ど存在しない。砂

地盤では凍結の進行と共に、土粒子間隙を満たす氷以外の余分な水分は未凍結土側に吐き出される。従って、土粒子間隔は変化せず凍結膨張は生じない。凍結膨張が生じるのはシルト、粘土などの細粒成分が含まれる地盤に於てである。

地盤中に凍土が造成されそこで体積膨張が発生すると、その膨張変位量は周囲の未凍結地盤をも変位させる。その結果、附近の建物基礎や橋脚、地下埋設管、地表面の道路などを押し上げ被害をもたらす場合がある。

地盤変位を予測する為には二段階に分けて考える。第一段階はその凍結対象地盤の持つ凍結膨張率を知ることである。凍結膨張率 $\xi$ （凍結前の体積に対する凍結膨張した体積の割合）は土粒子にかかる有効応力 $\sigma$ 、凍結速度 $U$ 、地盤の動水抵抗によって影響を受ける。前二者の影響度は室内凍結試験によって知ることができる。図7は $\xi$ と $\sigma$ 、 $U$ の関係を示した試験例であり、図中に実線で示した $\xi = \xi_0 + (\sigma_0/\sigma)(1 + \sqrt{U_0/U})$ なる式で近似できる。<sup>16)</sup>ここに $\xi_0$ 、 $\sigma_0$ 、 $U_0$ はその土によって決まる定数である。

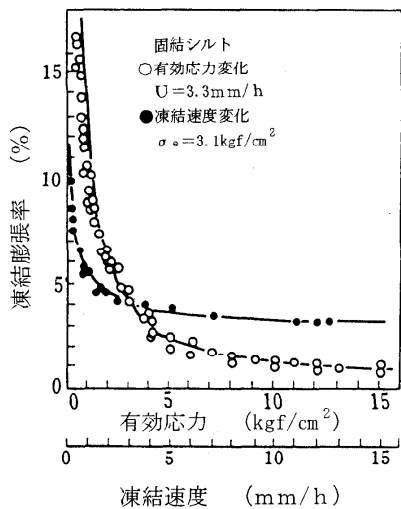


図7. 凍結膨張率と有効応力及び凍結速度の関係  
後者の動水抵抗の影響は理論解析によって予測され、<sup>17)</sup>その $\xi$ の値は室内試験で得られた値の1/2以下となり、最も凍結膨張性を有する粘土層でも5%前後が普通である。

第二段階は埋設物位置や地表面での変位を知ることである。図8に示すように、地盤中の微小部分が凍結した場合の膨張量がその対象位置でGaussの誤差曲線

の隆起とし表示できるという仮定のもとに計算する。<sup>18)</sup>

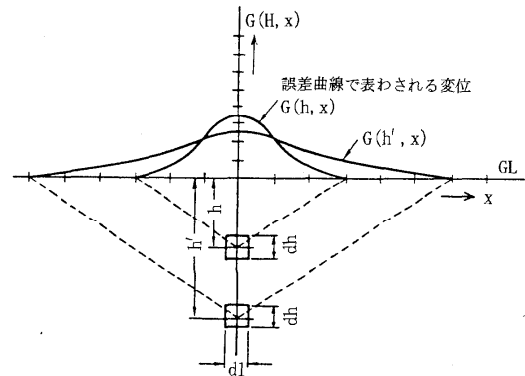


図8. 凍結膨張による地盤変位の計算モデル

室内試験で得た $\xi$ を元にして、動水抵抗や含水比低下領域に生じる脱水圧密、<sup>4)</sup>さらに膨張変位の三方向への分散などを考慮した凍結膨張率を用いて、上記の微小部分を造成凍土の形状に応じて積分することによって予測値を求める。最近では凍結膨張率分の歪みを微小部分に与えての数値解析法で予測することも多い。

対策としては、凍結範囲を必要最小限に留める、凍結管配列や凍結順序を検討して膨張変位を悪影響の出ない方向に分散させる、ボーリングによる地山の緩みとの相殺を利用するなどの方法があるが、最近では凍土近傍に変位吸収溝を設けるという積極的な方法も実施されつつある。

### 3-5. 設計施工概要

設計時の基本検討事項として、凍結管理設の為のボーリングの施工可能性、地下水の有無とその影響、凍土の強度、凍結膨張の影響の四つが挙げられる。凍結工法を必要とする場所は、他工法では施工が困難である場合が多く、それだけ施工条件が厳しい。凍結工法といえども上記四項目のうち一つでも問題が残る場合には採用不適となるので、対策を含めた十分な検討が必要である。地層でいえば砂レキ層、軟弱土層、不均質層、被圧水層、塩分含有土層、規模でいえば大口径、大深度と呼ばれる場合は上記事項の検討が重要である。

上記の基本検討事項をクリアしたならば詳細設計に入る。凍結管理設計面を具体化し、凍土壁パターン、必要凍土厚み、必要凍土造成日数を決める。次に冷凍機プラントと凍結管の間の配管設計を行い、凍結管及

び配管からの熱負荷を計算して冷凍機容量を決める。その他、凍土の成長状況の把握に重要な地中温度計測計画、附近に重要構造物がある場合には地盤変位などの観測計画、そして工事中の安全を維持する冷凍機の運転管理計画を立てなければならない。

ブライン方式の場合の標準的な施工では準備（プラント及び凍結管埋設）、凍結（必要凍土造成）、凍結維持（本体構築）、撤去（解凍）の四つの期間に分けられる。準備期間約1ヶ月、凍結期間1～2ヶ月が標準であり、維持期間は土木工事内容によって決まる。地下鉄工事の河底横断部工事などでは凍結土量3万<sup>3</sup>を越える凍結もあり、<sup>19)</sup>全凍結工事期間が2年にも及ぶ場合もある。トンネル直径14mという大口径、<sup>20)</sup>地下70mにも及ぶ大深度でも凍結工事の実績がある。

施工例を分類してみると、①河底部横断工事の為の凍結、②軌道下又は道路下の工事の為の凍結、③シールド機（茶筒型の大型トンネル掘削機）の発進・到達・急曲線・地中接合部などの防護<sup>21)</sup>の為の凍結、④立坑掘削などの連続土留壁としての凍結などがある。現在では殆ど③のシールド工事に係る凍結が多い。

#### 4. 凍土利用の課題と展望

凍土は大きな強度と潜熱を持ち、水を通さないという素材の良さを持っている。地盤凍結工法も都市土木から山岳・海洋土木へ、大規模・大深度へと適用範囲を拡げつつある。現在の課題である凍結膨張機構の解明、凍土の力学機構解明、必要以上の凍土を造らない熱管理技術の向上、凍結管埋設技術及び測定精度の向上などが進めば、いい換えれば凍結膨張の生じない凍土・より高強度の凍土の造成技術、凍土と未凍土の相変化制御が自由にできる技術などが開発されたならば、構造体としての利用がより安全になり、さらに大きな利用展望が開ける。

凍土の利用としては凍結工法の他に、調査の為の乱さない試料の凍結による採取法<sup>22)</sup>が実用化されている。現在開発段階にあるものとして、凍結管の最深部に球根状の凍土を造り引抜き抵抗を利用する凍結アンカー、ヒートパイプにより冬期の寒冷で造成する凍土を利用する地下食糧貯蔵庫がある。早い実用化を期待したい。汚泥の凍結融解脱水処理では既にも実績のある無機汚泥

から有機汚泥への展開が望まれる。凍結工法関連では、高水圧下での鋼管埋設を可能にする孔口止水技術や曲線状鋼管埋設を可能にするボーリング技術などの開発が進められており、大深度や輻輳化する都市土木での有効な技術として期待できる。

空調の熱源として地熱を利用する研究も進められており、潜熱つまり凍土まで出現させての有効性が検討されている。<sup>23)</sup>アメリカでは廃棄物による汚染地盤の拡散防止に凍土壁を利用しようとする実験が始められており、放射性廃棄物のような発熱する物の物質と熱のバリエーションとしての役割も可能性があるかもしれない。

最後に、凍土の持つ利点を生かせる市場を開発し、欠点を克服する技術を確立する為、多くの人々が関心を持たれ、発展に寄与されることを望みたい。

#### 参考文献

- 1) 木下, 永久凍土, (1980), 古今書院.
- 2) 伊豆田ら, 雪氷学会講演予稿集, (1991), 40.
- 3) 松岡ら, 土木学会講演概要集, (1984), 693.
- 4) 高志ら, 雪氷, 39-2 (1977), 1.
- 5) 高志ら, 雪氷, 43-4 (1981), 211.
- 6) 高志ら, 雪氷, 45-4 (1983), 189.
- 7) 高志ら, 土木学会論文集, 315 (1981), 85.
- 8) 生頼ら, 雪氷講演予稿集, (1984), 101.
- 9) 生頼ら, 雪氷, 43-2 (1981), 86.
- 10) 高志ら, 冷凍, 36-408 (1961), 889.
- 11) 戸部ら, 冷凍, 54-622 (1979), 8.
- 12) 高志ら, 冷凍, 39-439 (1964), 406.
- 13) 高志ら, 冷凍, 53-604 (1978), 1.
- 14) 高志, 土木学会論文集, 161 (1969), 51.
- 15) 戸部, 冷凍, 51 585 (1976), 19.
- 16) 高志ら, 雪氷, 36-2 (1974), 8.
- 17) 高志ら, 雪氷, 38-1 (1976), 1.
- 18) 高志ら, 土木学会講演概要集, (1970), 327.
- 19) 金安ら, トンネルと地下, 9-8 (1978), 23.
- 20) 坂ら, 土と基礎, 42-8 (1994), 37.
- 21) 赤井ら, トンネルと地下, 22-9 (1991), 25.
- 22) 十質工学会, 十の凍結, (1994), 268.
- 23) 長野ら, 空調衛生工学会論文集, 58 (1995), 1.

# 低温微細潜熱スラリーの蓄冷熱システム開発の動向

稲葉 英男(岡山大工)

## 1. まえがき

近年、原油価格の上昇傾向そして温暖化ガス濃度の増大や酸性雨の森林資源破壊など環境問題の解決の一方策として環境調和型の再生可能なエネルギー源の開発、未利用エネルギーの活用そして省エネルギーに関する試みが活発化しており、潜在化していたエネルギー資源の枯渇に対する根本的不安要素が顕在化し始めている。我が国の持続的経済成長を図るうえで、着実に増大するエネルギー需要への対応は、長期的立場での需要の見直し、環境や資源の制約的課題を克服する新技術、エネルギーセキュリティなどの実情を認識するところから始まる。特にエネルギー供給システムの確立は、各種の技術を駆使した多面的広がりを持つエネルギー循環ネットワークの完成が望まれる。熱エネルギー分野に着目すると、各種エネルギーの効率的熱変換技術のみならず、熱エネルギーの貯蔵、輸送技術そして利用技術が必要不可欠となる。すなわち空間的、時間的そして質的な熱エネルギーの有効利用の見地から熱エネルギーの高密度貯蔵技術や高効率長-中距離輸送技術が重要となる。また、熱エネルギーを効率的に貯蔵するには、氷蓄熱にみられるように安価でかつ蓄熱密度の大きな蓄熱材の安定供給が要求される。一方、熱エネルギーの効率的輸送には、熱輸送エネルギー密度を高めることと輸送動力を減少する必要がある。さらに、高密度エネルギーの貯蔵および輸送においては、当然、熱損失軽減のための有効な断熱材の利用そして利用側での最適な熱交換システムが必要となる。このような目的達成の一つには、相変化を利用し、かつ輸送性に富む新たな蓄熱物質の開発が重要となる。従来の冷房空調などの冷熱媒体として採用されてきた低温水に代わり、水等に分散質として固-液潜熱物質を混合した機能性流体<sup>(1), (2)</sup>と呼ばれる、輸送性に富む蓄熱物質が開発され、熱エネルギーの有効利用の新たな展開が可能となっている。ここでは、低温で作

動する固-液潜熱蓄冷熱材を混合した輸送性のある機能性流体についての紹介とその具体的利用法を概説し、冷房負荷に対応する熱エネルギー有効利用技術の新展開に役立てようとするものである。

## 2. 微細潜熱スラリーの種類とその特徴

ここでは、固-液相変化潜熱物質を微細化し、水または水溶液と混合した潜熱スラリーとして氷水スラリー、潜熱エマルジョン、潜熱マイクロカプセル、クラスレート水溶液および形状安定化処理潜熱スラリーを取り上げ、それらの製造法や特徴について概説する。

### 2.1 氷水スラリー

氷を微細化し、水と混合すると流動性に富む氷水スラリーとすることが出来る。氷水スラリーは、輸送性に富み冷水管輸送に比較し、10%の氷充填率で配管径を約40%の大きさに抑えることが可能であり、配管設備、施工費を大幅に低減できる。また、利用側では氷水スラリーと負荷側からの戻り高温水との直接接触熱交換では、微細氷粒子群による大きな総伝熱面積と0℃近傍の入さな温度差により、高効率の熱交換性能を得ることが出来る特徴を有する。粒径数mm以下の微細な氷粒子形成には、大きな氷板を機械的に粉碎する方法と氷製造法の一つであるダイナミック方式により、各種の流動性氷を製造する方法がある。後者による微細氷水スラリーの製造方法は、冷却速度を大きくし微細な氷片を作る場合とアルコール系などの氷結緩和剤を添加し、氷粒子の結合を防止する場合とがあり、いずれも流動性に富む氷充填率の高いシャーベット状の水を形成する。これらの氷製造法には、熱交換法により次の4種類に大別できる。

(a) 薄膜流下方式：垂直多管式熱交換器の管外側液冷媒の蒸発熱により、管内壁へ沿って流下する氷結緩和剤添加水溶液が冷却され微細な氷片(粒径30~50 $\mu\text{m}$ )を形成しながら管下部へ排出する。水溶液流れの淀む領域を形

成させないことと管内面を滑らかな鏡面仕上げをする工夫が、管内面への水の付着そして水塊による管閉塞の防止に必要である。

(b) 回転流動方式：液冷媒直膨ジャケットを外側に配置した円筒型熱交換器の内側に氷結緩和剤添加水溶液を高速で回転させると、遠心力で水溶液は熱交換器内側壁へ押しやられ、高速かつ高圧状態で薄い速度および温度境界層を形成する。この高速による大きな熱伝達により、冷却された水溶液は過冷却状態となり、さらに円筒形熱交換器の中心部の低圧部に向かうに従って過冷却状態の解放により微細な氷片(50~100 $\mu\text{m}$ )を生成し、外部の貯水槽へ氷片が排出される。

(c) 冷媒直接接触方式：氷結緩和剤添加水溶液中に冷媒液を噴射し、その蒸発熱で水溶液中に微細な氷片(30~100 $\mu\text{m}$ )を生成させ、水溶液表面に上浮するシャーベット状の氷片を蓄水槽に導くものである。また、水溶液と液冷媒をノズルにより製氷容器へ直接吹き込み、微細水溶液を液冷媒の蒸発熱により凍結させて微細氷片を生成する方法もある。これらの方法は、直接接触により氷生成を行うことより熱交換効率が大きいことから、冷媒温度を高くすることが出来、冷凍機の成績係数向上となる。

(d) 過冷却水製氷方式<sup>(3)</sup>：円筒式熱交換器の管外側の冷媒により、管内流動水を冷却し、流動過冷却状態で管外の蓄水槽に導き、物理的的刺激等により製氷するものでシャーベット状の氷を生成する。冷却面で氷を生成させないことにより、冷却の熱伝達効率は良いものとなるが、円管内で氷生成が起きた場合、氷による管閉塞となる。流動水の大きな過冷却度とその安定維持が本製氷方法の重要なポイントである。最近は、水に氷結緩和剤を添加した流動過冷却水溶液を用いて管内凍結が起きた場合、不凍水溶液の存在で管破壊を回避する試みがなされている。

## 2.2 潜熱エマルジョン

油と水のように混じり合わない二つの液体の一方の液が他方の液中に分散したものをエマルジョン(乳濁液)と呼んでいる。水の中に油を滴状に微細化して分散したものをO/W型エマルジョンまたはマイクロエマルジョンと

呼び、熱力学的に不安定な系である。この不安定性を解消するために油滴と水の界面に界面活性剤を吸着させ、その界面エネルギー(界面張力)を低下することにより油滴の微細化およびその表面積の増大を可能にする。さらに、界面活性剤の膜で油滴を保護し、油滴同志の凝集や合一を防止し、油滴の分散安定化を図ることができる。潜熱エマルジョンは、固-液相変化潜熱蓄熱材であるパラフィンなどを分散質とし、水を連続相としたO/W型エマルジョンである。使用する界面活性剤は、一般に非イオン系および陰イオン系界面活性剤が用いられ、潜熱蓄熱材としてのパラフィン油滴はホモジナイザー等で平均粒子径1~5 $\mu\text{m}$ 程度に微細化し、エマルジョンの安定維持が図られる<sup>(6)(7)</sup>。低温潜熱蓄熱材としては、テトラデカン( $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ , 融点5.8 $^{\circ}\text{C}$ , 潜熱229 kJ/kg), ペンタデカン( $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ , 融点9.8 $^{\circ}\text{C}$ , 潜熱158 kJ/kg), などがある。

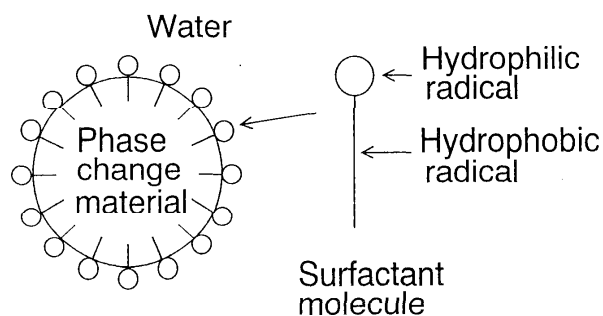


図1 O/W型潜熱エマルジョン中の界面活性剤ミセル構造

この種の潜熱エマルジョンには非イオン界面活性剤であるポリエチレングリコールやステアリルエーテルなどが使用されている。さらに、微細な潜熱蓄熱材の分散性向上のための分散剤として陰イオン活性剤であるアルキルベンゼンスルホン酸ナトリウムなど、そして発泡防止剤が潜熱エマルジョンに添加される。潜熱エマルジョン中の蓄熱材の凝集による肥大化現象からの分散状態の悪化は、ホモジナイザーによる物理的攪拌により、再エマルジョン化が可能である。図2は潜熱エマルジョンの外観写真で微細なパラフィン粒子による光の散乱により、白色に見える流動性に富むものである<sup>(3)</sup>。

## 2.3 潜熱マイクロカプセル

潜熱マイクロカプセルは、連続相としての水に分散相としての潜熱蓄熱材を高分子膜で被覆することにより、カプセル化したものである。マイクロカプセルの製造法は、大別すると界面堆積法と界面反応法がある。前者は、微細な波状潜熱蓄熱材界面に高分子微粒子が沈殿反応により付着し、高分子膜を形成し、カプセル化するものである。高分子溶液においては、温度やPH等を変化させることにより、濃厚な分散相と希薄な連続相に分離するコアセルベーションと呼ばれる現象をカプセル化に利用する相分離法、液中乾燥法や潜熱蓄熱材の凝固を利用する融解分散冷却法などがある。後者は、微細な液状潜熱蓄熱材界面での化学反応により高分子被覆を施す方法であり、生成された被覆は連続した高分子により形成されている。界面反応法には、(a) 油性モノマーを含む蓄熱材を水中に分散混合後、水溶性モノマーを加えて攪拌し重合反応により高分子膜を形成する界面重合法、(b) 蓄熱材を予め高分子溶液に分散し、高分子が硬化するように整形する液中硬化被覆法そして(c) 蓄熱材と連続相の水のどちらか一方にモノマーと触媒を加えることにより界面で反応を起こすin situ 重合法、がある。in situ 重合法は、蓄熱材が固相であってもマイクロカプセル化が可能である。

低温有機潜熱蓄熱材としては、前記の潜熱エマルジョンで述べたパラフィン系のテトラデカン、ペンタデカン

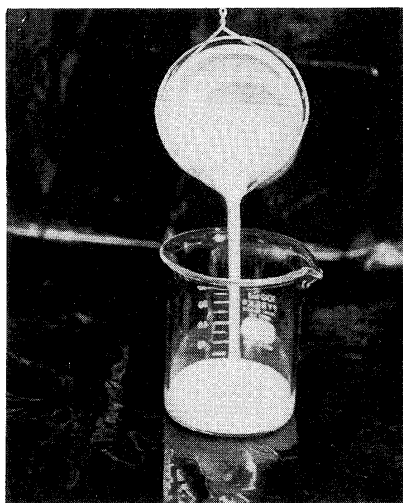


図2 O/W型エマルジョン(潜熱材濃度: 40.0 mass%)の外観

やマイクロヘキサンなどがあり、カプセル材としてメラミン樹脂被覆などの不溶性一層膜が採用されている。低温無機潜熱蓄熱材には、硫酸1水和塩( $H_2SO_4 \cdot H_2O$ , 融点  $8.5^\circ C$ , 潜熱  $162 \text{ kJ/kg}$ ), 塩酸リチウム3水和塩( $LiClO_3 \cdot 3H_2O$ , 融点  $8^\circ C$ , 潜熱  $252 \text{ kJ/kg}$ ) などがある。カプセル材は一般に図3に示すように、二層構造で外側の第一層は、親水性ポリマー(ポリスチレン、ポリアミドなど)で膜を形成し、内側の第二層は、疎水性ポリマー(フッ素系)で膜を形成する。

いずれのマイクロカプセルも平均粒子径を  $1 \sim 5 \mu m$  程度とし、連続相としての水の分散性を良くすると同時にマイクロカプセルの凝集を防止するために界面活性剤を添加し、安定分散を図っている。また、カプセルの膜厚さを変えてカプセル強度の調整を行う<sup>(8)~(10)</sup>。

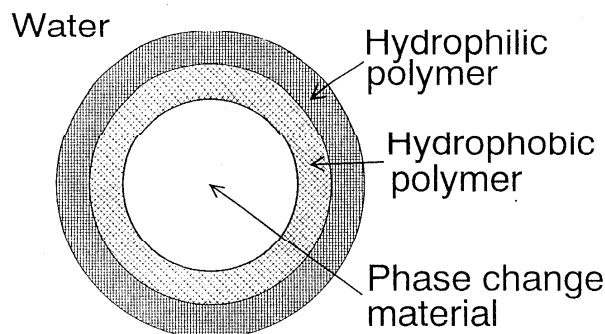


図3 2層膜構造マイクロカプセル

## 2.4 クラスレート(気体包接形水和物)水溶液

クラスレートは、ある種の気体を水と混合し、ある一定圧のもとで冷却(放熱)することにより、その気体を包接した形(籠型)で微細な水和物を生成させたものである。また、この包接水和物を加熱(吸熱)することにより、再び気体に分解する。従って、気体の種類とその圧力状態に応じて、氷点以上( $0^\circ C$ )での包接形水和物の生成および分解温度の制御が可能で、その生成分解熱も比較的大きく有望な低温蓄熱材である。低温クラスレート材としては、大気圧レベルで作動するフロン系のHCFC-1416( $CCl_2FCH_3$ , 生成温度  $8.5^\circ C$ , 生成熱  $285 \text{ kJ/kg}$ ), HCC-30( $CH_2Cl_2$ , 生成温度  $1.8^\circ C$ , 生成熱  $229 \text{ kJ/kg}$ ), HCFC-21( $CHCl_2F$ , 生成温度  $4.1^\circ C$ , 生成熱

270 kJ/kg) などがある。図4は、HCFC-141bと水から生成された粒径30~50 $\mu\text{m}$ 程度のクラスレート水溶液(クラスレート30%, 水70%)で、流動性に富む低温蓄熱材である。クラスレート同志の焼結防止に界面活性剤の添加が必要である。クラスレートの生成には、熱交換器を介して冷媒により冷却する間接冷却法と減圧下で気体と水の混合物中の水の蒸発熱により直接冷却する直接冷却法がある。現在は、対象とする気体として比較的低压条件でクラスレートを生成する代替フロン系冷媒が考えられているが、フロン系以外のプロパン、ブタンなどの気体の採用も検討されている。

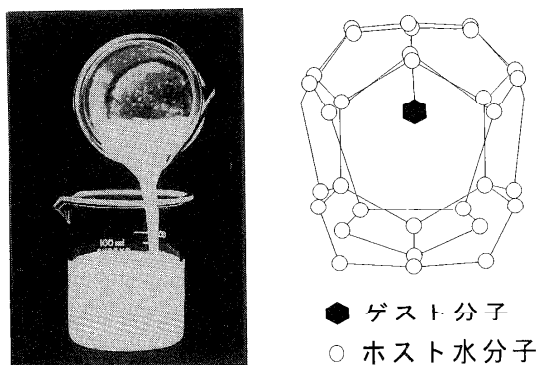


図4 クラスレート構造とその外観

### 2.5 形状安定化処理低温潜熱スラリー

前述の低炭素分子系のパラフィンが低融点となることにより、パラフィンの表面架橋や高融点物質との混合含浸などのように、低温パラフィン系潜熱蓄熱材が融解してもその形状が崩壊しない形状安定化潜熱蓄熱材が開発されつつある。このような形状安定化処理により、カプセル化に伴う熱抵抗が無く、熱媒体と蓄熱材の温度差が小さくても効率的蓄熱が行える特徴を有する。微細化した潜熱材への架橋法や安定な分散状態を得るための界面活性剤の選定などが克服すべき課題である。

### 3. 微細潜熱スラリーの蓄熱特性

ここでは、代表的微細潜熱スラリーとして前述の潜熱エマルジョンを取り上げ、その蓄冷熱(低温潜熱蓄熱材の凝固)方法とその伝熱特性を解説する<sup>(8)</sup>。この種の潜熱エマルジョン中に微細分散している潜熱蓄熱材の冷却による凝固は、比較的凝固分散粒子の凝集による管閉塞

および粘性の大きな潜熱エマルジョンの流動抵抗軽減の立場から、構造の簡単なコイル状2重管式熱交換器の外管側を流れる冷媒にて内管を流れる微細潜熱蓄熱材を凝固蓄冷する方法が採用されている。図5は、潜熱エマルジョンの蓄冷熱実験に用いた実験装置の全体を示したもので、直径 $D_i=20\text{ mm}$ のコイル状円管を潜熱エマルジョンが、チューブポンプを駆動源として循環し、外管と内管の環状部に冷熱源として低温のエチレングリコール水溶液が流れる構造となっている。コイル状2重管式熱交換器の長さは10.3 mであり、熱交換器全体は熱損失防止のために厚さ150 mmの発泡ウレタン断熱材で覆われている。エマルジョン中の分散相は、テトラデカン( $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ , 融点 $5.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 潜熱 $229\text{ kJ/kg}$ )であり非イオン系界面活性剤にて、その平均粒子径 $3.4\text{ }\mu\text{m}$ で連続相である水に分散混合されている。蓄冷熱実験は、冷媒であるエチレングリコール水溶液の温度、および潜熱エマルジョンの流速、初期温度や濃度 $C'$ を種々に変えて行われた。

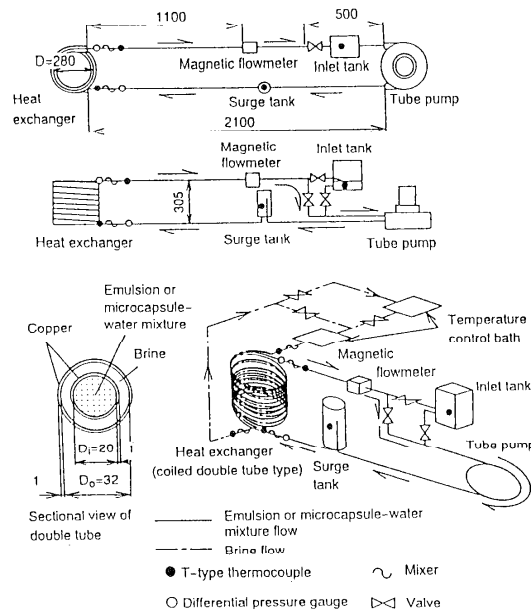


図5 潜熱蓄冷熱実験装置の概略図

図6は濃度 $C'=33.3\text{ mass\%}$ エマルジョン中の蓄冷熱物質の相変化割合 $P_{cr}(\%)$ の経時変化を示したものである。ここで $U_e$ はエマルジョンの管内平均流速、 $T_{b1}$ は冷却ブライン入口温度である。なお、図中の白丸印は、エマルジョンをサンプリングし、熱量計で相変化率を測定したもので、実線で示される冷媒の受熱量より算定した相変

相変率と良く一致する。図6より相変率  $P_{cr}$  は、エマルジョンと冷媒温度差の大きな蓄冷熱初期段階で急激に増加し、その後緩やかに完全凝固である  $P_{cr}=100\%$  に漸近する傾向にあることがわかる。

図7は、コイル状2重管式熱交換器を潜熱エマルジョンが流動した場合の圧力損失  $H_e$  と管内流速  $U_e$  の関係を示したもので、水の場合  $H_w$  よりも潜熱エマルジョンの圧力損失がかなり大きく、さらに低温潜熱蓄熱材が凝固した場合の方が液相状態よりも圧力損失が各エマルジョン濃度において大きいことが分かる。これは、分散質が液相の場合には分散液滴内循環により、固相の場合よりも分散液滴の抵抗係数が小さいことにより説明されている。

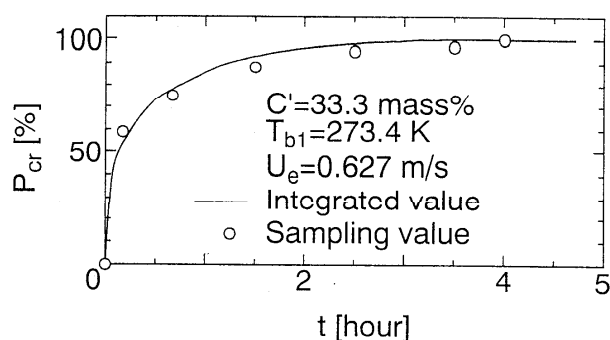


図6 O/W型エマルジョンの相変率  $P_{cr}$  の経時変化

図8は、熱伝達率の無次元量であるヌセルト数  $Nu$  とディーン数の関係で潜熱エマルジョンの濃度  $C'$  によるコイル状2重管内における熱伝達特性を示したものである。 $De'$  は、ディーン数を表わし、 $De' = Re'(D_i/D)^{1/2}$  で定義される。ここで、 $Re'$  : 修正レイノルズ数 ( $=UD_i/\nu'$ )、 $U$  : 平均流速、 $D_i$  : 管内直径、 $\nu'$  : 流体の非ニュートン性を加味した動粘性係数、 $D$  : コイル直径

水の場合の  $Nu_w$  よりも、潜熱エマルジョン中の分散質の拡散混合作用により、高濃度程ヌセルト数  $Nu_e$  の増加、すなわち、熱伝達率の向上効果があることがわかる。一方、潜熱蓄熱材が凝固状態ほど液相状態よりもその熱伝達率の上昇となる。これは、分散質が液相の場合、その内部に発生する循環流により、連続相である水流との界面速度が相対的に小さくなることと分散質が固相の場合には、周囲連続相である水流の乱れによる熱伝達促進などが原因とされている。

図9は、分散質である潜熱蓄熱材が液相より固相に変化した割合  $P_{cr}$  の経時変化の無次元数であるフォーリエ数  $Fo_{el} (= \alpha_t t_e / D_i^2)$ 、 $\alpha_t$  : エマルジョンの温度伝達率、 $t_e$  : 相変化開始後の時間) とディーン数  $De'$  の関係を示したものである。相変化割合  $P_{cr}=10\%$  の場合は、 $Fo_{el}$  値はほとんど  $De'$  数すなわち流速の影響は認められないが、 $P_{cr}$  の増大と共に、 $De'$  数の依存性が現れるようになる。

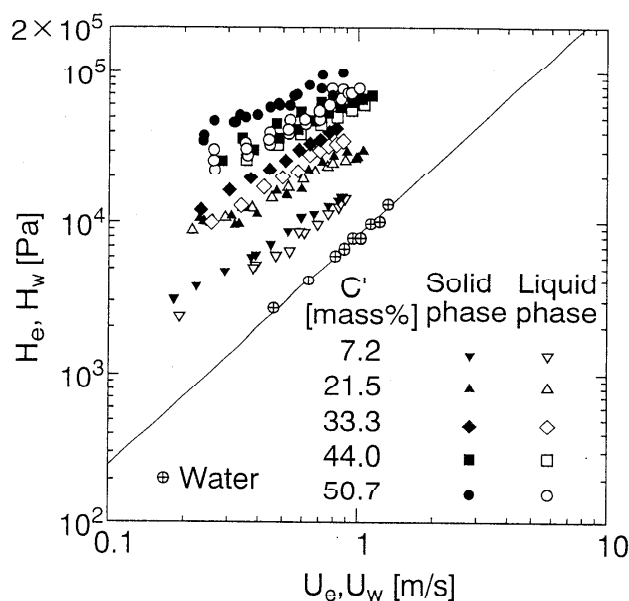


図7 O/W型エマルジョンの圧力損失  $H_e$  と管内平均流速  $U_e$  の関係

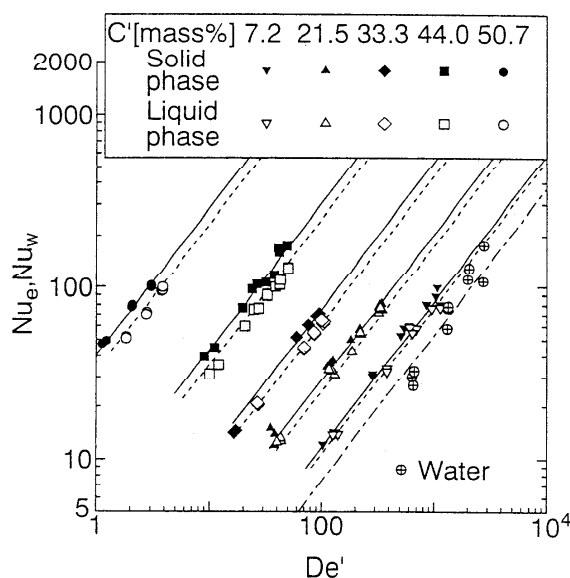


図8 O/W型エマルジョンのヌセルト数  $Nu_e$  とディーン数  $De'$  の関係



以上、微細潜熱スラリーとして低温潜熱エマルジョンの蓄冷熱特性に及ぼす諸因子の影響の概要を述べたが、分散質としての潜熱蓄熱材粒子と連続相である水流とが複雑に影響を及ぼし合っ、潜熱蓄冷熱が進行するようであり、今後、さらなる蓄冷法による研究が望まれるところである。

#### 4. 微細潜熱スラリーの管内輸送特性

最近の水蓄熱を始めとする潜熱蓄熱システムは、潜熱の高度な利用の立場から搬送性に富むスラリー状に加工した潜熱蓄熱材を活用する試みがなされている。例えば、微細な氷片を水に混合した氷水スラリーは、その典型的なもので、10%の水充填率で配管径を冷水の場合に比較し半分以下に出来、大幅な配管工事費の削減と輸送ポンプ動力の軽減となる。さらに、氷水スラリーを冷熱利用側の熱交換器へ直接流入させ、室内の暖かい空気を大温度差のもとで高效率熱交換を行う氷水利用システムの実証プラントも稼動し始めている。ここでは、氷水スラリーの管内輸送、パラフィン系潜熱スラリーの管内輸送特性について概説する。

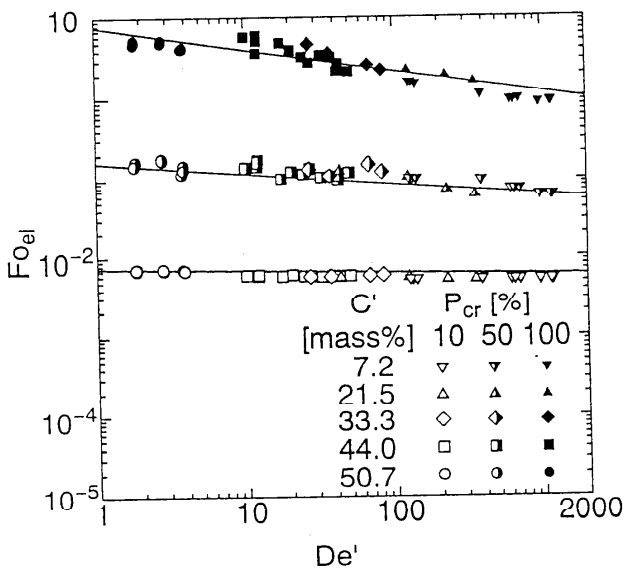


図9 各相変化率に到達するまでのフーリエ数  $F_{o,el}$  とディーン数  $De'$  の関係

#### 4.1 氷水スラリー

氷水スラリー<sup>(11)・(12)</sup>の生成は、氷塊を砕いて任意の粒径として水と混合したもの、そして過冷却水や水溶液より生成される微細な氷片(径50~100  $\mu\text{m}$ )などより行われる。過冷却水より生成された氷粒子は、比較的粒径も揃っており、さらに焼結による氷同志の結合も少なく、搬送に適していると言われている。図10は、氷水スラリーが管内を流れる場合の管内平均流速  $u$  と圧力勾配  $i(\Delta P/L, \Delta P: \text{圧力損失}, L: \text{管長さ})$  の関係を氷粒子の流れ状態と共に示したものである。まず、氷充填割合の小さなIPF(全氷水スラリー一体積に対する氷の体積割合) = 6~10%における氷水スラリーの流れ状態と圧力勾配の関係について述べる。管内平均流速  $u < 0.5 \text{ m/s}$  の領域では、密度の小さい氷粒子は浮力により管頂部に互いに集合し、堆積状態となり、氷粒子層と水層とは明確に分離した状態で流動するが、一部の氷粒子群は停留を伴いながら流動する。この場合には、氷粒子群が管壁面を摺動しながら流れるために、圧力勾配も大きなものとなる。なお、氷粒子層の領域は、管頂点からの氷粒子の周方向への広がり角度  $\theta$ 、そして圧力損失係数  $\Psi'$  ( $= (P_s - P_w) / (P_w \cdot \text{IPF})$ ,  $P_s, P_w$ : 氷水スラリー、水の圧力勾配) により、次のように表される。ここで、 $Fr$  はフリード数 ( $= u^2 / (gD)$ ) である。

$$\Psi' = 66(1 - \gamma_i)gD/u^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\gamma_i$  は水の比重である。

さらに、流速の増大と共に圧力勾配の減少となり、最小圧力勾配を示すことになる。管内平均流速  $u > 1 \text{ m/s}$  程度より、速度の増大と共に、水層流れと氷粒子流れの境界に近い粘性せん断応力および氷粒子の抗力により、少しずつ氷粒子が水層側に剥離拡散し、管内の広範囲にわたって氷粒子の濃度分布を形成した拡散剥離流れとなり、その結果流速の増加につれ、圧力勾配も水のみでの圧力勾配に近づくようになる。 $u > 1 \text{ m/s}$  での無次元圧力損失  $\Psi''$  は次のように整理できる。

$$\Psi'' = C \cdot Fr^{*1.04} Re^{-2.20} (\text{IPF}) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $Fr^* = u^2 / [gD(1 - \rho_s / \rho_w)]$ ,  $Re = \rho_s u D / \nu_w$  であり、 $\nu_w$  は水の粘性係数、添字  $s$  は氷水スラリーを意味する。

平均流速  $u > 2$  m/s の領域では、氷粒子全体に均質に分布した均質流れとなる。

一方、大きな氷充填率 (IPF > 10%) の場合には、氷粒子濃度の増加に伴う水流と氷粒子の相対速度の減少および氷粒子相互の衝突頻度の増加に伴う氷粒子の合体成長 (焼結) による氷柱 (氷プラグ) の形成などで、円管近傍では水膜流れ、そして管中央部では一様速度の氷柱によるプラグ流れとなる二層流れが形成される。この場合の流れはビンガム流体に近いものとなり、ビンガム流体モデルでの解析が可能となる。

また、図 10 に示されるように、均質流れにおいて、氷水スラリーの圧力勾配が水のものよりト回る領域が認められる。この現象は、氷粒子が管中央部に集まり、プラグ流となることによる。シグマ効果と氷粒子濃度の増大に伴って氷粒子自身による乱流エネルギーの吸収および乱流発達の抑制効果などにより起こることが予想され、今後の研究成果が待たれるところである。

#### 4.2 潜熱エマルジョンおよびマイクロカプセルの管内輸送特性

前述の潜熱エマルジョン (低温蓄熱材: テトラデカン) と潜熱マイクロカプセル (低温蓄熱材: ペンタデカン) を内直径 16 mm、長さ 1 m の直管に流動させて、その流動抵抗と管内平均流速の関係を比較検討することにする。潜熱蓄熱材は、液相および固相状態での比較検討も行っており、測定区間は十分に発達した管内流れ状態とした。

図 11 は、潜熱エマルジョンの流速  $U_e$  と圧力損失  $H_e$  の実測結果を示したもので、エマルジョン濃度  $C' = 7.2\%$  ではほぼ水と同じ圧力損失特性を示す。さらに高濃度  $C'$  となるに従って、水よりも圧力損失が増大し、また、エマルジョン中の分散質である潜熱蓄熱材が凝固した固相状態の方が、前述のコイル状 2 重管式熱交換器の流動特性で述べた原因により、その圧力損失は全体的に大きくなる傾向にある。

一方、潜熱マイクロカプセルの結果を図 12 に示してある。潜熱蓄熱材の濃度  $C_{mi}$  が 20.4% まで水と同じような圧力損失の値を示し、 $C_{mi} = 40.8\%$  で急激に圧力損失の増加が認められる。さらに、潜熱蓄熱材が固相および

液相状態でもほぼ同じ圧力損失となり、図 11 で観察された潜熱エマルジョンと異なる挙動を示す。これは、潜熱材をカプセル化することにより、連続相である水と直接潜熱蓄熱材が接触することが無いことによるものと思われ、カプセル被覆と水の特性に依存して圧力損失が変わることとなる。また、潜熱マイクロカプセルの場合

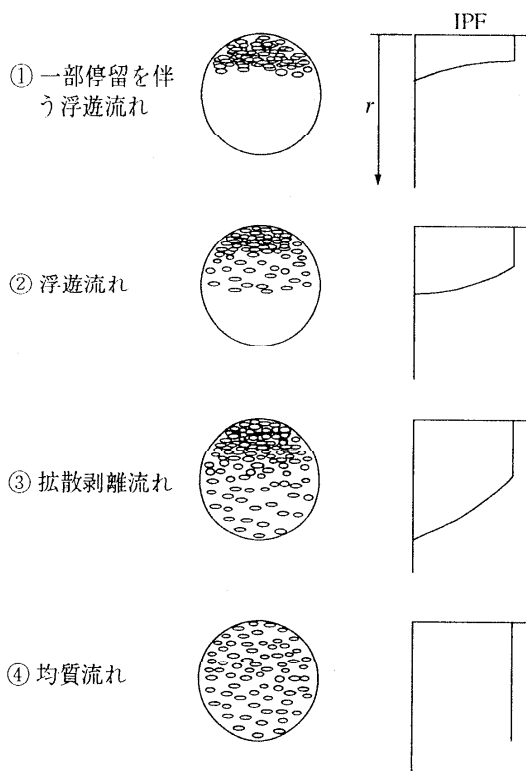
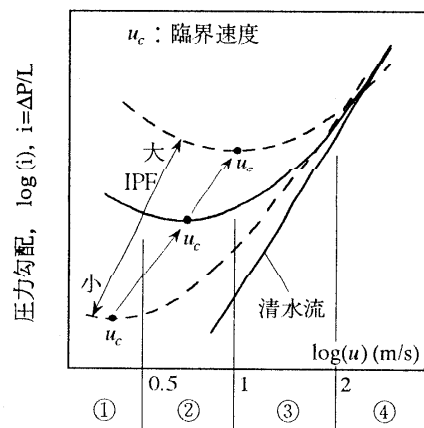


図 10 管内を流れる氷水スラリーの平均流速  $u$  と圧力勾配  $i(\Delta P/L)$  の関係

の方が潜熱エマルジョンに比較して、圧力損失の値も小さくなる事が理解できる。

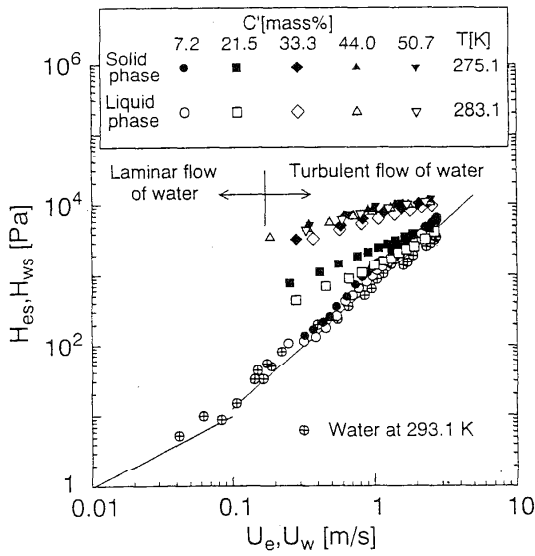


図 11 水およびエマルジョンの圧力損失  $H_{ws}$ ,  $H_{es}$  と管内平均流速  $U_w$ ,  $U_e$  の関係

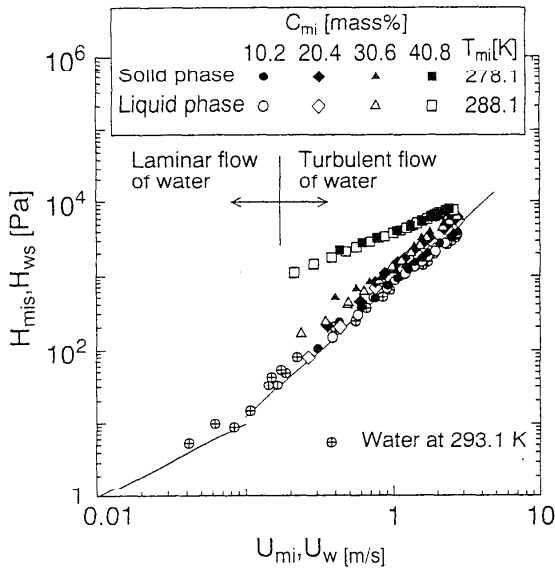


図 12 水およびマイクロカプセルの圧力損失  $H_{ws}$ ,  $H_{mis}$  と管内平均流速  $U_w$ ,  $U_{mi}$  の関係

図 13 は理論ポンプ動力  $P_{th}$  と輸送熱量  $Q_{tr}$  の関係を輸送管出入口の温度差を  $\Delta T=5$  K とした場合の水スラリー、潜熱エマルジョン、潜熱マイクロカプセルおよび  $\Delta T=5$  K の冷水顕熱輸送状態で比較したものである。

ここで、 $P_{th}=\frac{\pi}{4}D_i^2 \times u \times H_s$ ,  $D_i$ : 管内直径,  $U$ : 管内平均流速,  $H_s$ : 圧力損失,  $Q_{tr}=G(C_p\Delta T+L)$ ,  $G$ : 質量流量,  $C_p$ : 比熱,  $L$ : 潜熱量

潜熱エマルジョン、潜熱マイクロカプセル、氷水スラリーの順に同一理論ポンプ動力  $P_{th}$  に対して、輸送熱量  $Q_{tr}$  が大きくなる傾向にある。氷水スラリーの  $Q_{tr}$  の値が大きいのは主に氷の潜熱量の大きさに起因し、潜熱マイクロカプセルの  $Q_{tr}$  がエマルジョンより大きいのは、主としてマイクロカプセルと水の間の粘性抵抗(圧力損失)の小ささによるものと思われる。

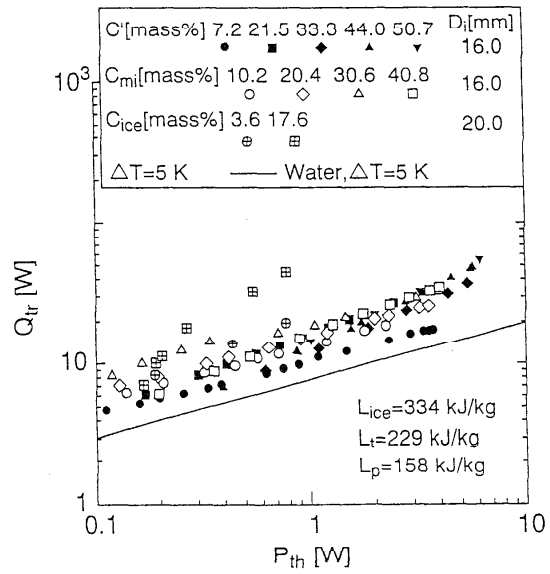


図 13 理論ポンプ動力  $P_{th}$  と輸送熱量  $Q_{tr}$  の関係

### 5. 低温潜熱スラリーの放冷熱特性

潜熱エマルジョンやマイクロカプセルは、前述のように比較的粘性が大きく、その搬送動力も水に比較して大きなものとなることにより、ここでは、冷房用冷熱を得る手段として、室内の暖かい空気を凝固潜熱エマルジョン中に直接吹き込んで固相状態にある微細蓄熱材の融解に伴う冷熱により、低温空気を得る方法を潜熱エマルジョンを例として概説する。

図 14 は、放冷実験装置の概略を示したもので、予め蓄冷した潜熱エマルジョンを試験部に充填しておき、下部より多数の微細な噴射ノズル(直径  $d_n=2$  mm)を介して暖かい空気をエマルジョン層中に微細空気泡群として流入させる。微細な空気泡は凝固した微細潜熱蓄熱材

粒子と直接接触熱交換のもとで冷却されて、低温空気となって実験装置より排出される<sup>(9)</sup>。

なお、潜熱エマルジョン中の分散質である低温潜熱蓄熱材には、テトラデカン(融点5.8°C)を使用してある。

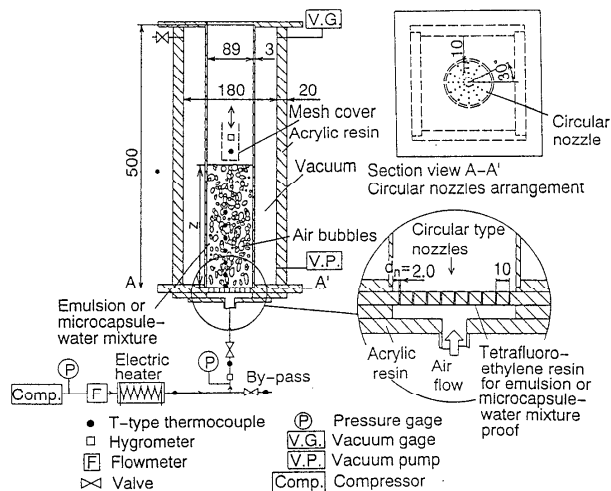


図 14 放冷熱実験装置概略図

図 15 は、蓄熱材濃度  $C_t=40$  ٪の凝固エマルジョン層深さ  $Z=161$  mm, 空気入口温度  $T_{ain}=318.1$  K, ノズル噴出空気速度  $U_n=5.9$  m/s におけるエマルジョン温度  $T_e$ , 空気出口温度  $T_{aout}$  の経時変化を示したもので、参考のため低温水の場合についての各温度の経時変化をも示してある。凝固エマルジョン充填の場合、最初急激な空気出口の温度降下が起こり、その後凝固蓄熱材の融解と共にほぼ一定温度状態で低温空気が排出される。また、凝固蓄熱材の融解完了と共に空気の出口温度は、上昇し始めることになる。凝固蓄熱材の融解による放冷熱の間の空気出口温度が、気泡と蓄熱材粒子の熱抵抗のために、蓄熱材の融解温度より高く推移する興味ある結果となる。

図 16 は、蓄熱材であるテトラデカン濃度  $C_t$  と凝固潜熱放冷完了時間  $t_{el}$  の関係をエマルジョン層深さ  $Z$  と空気噴射速度  $U_m$  をパラメータとして示したものである。当然のことながら、テトラデカン濃度  $C_t$  の増大と共に総放冷熱量の増大となり、放冷熱完了時間の増加となるが、空気速度の増加と共に流入空気量の増加と熱伝達率の増加により、テトラデカン濃度やエマルジョン層深さに依存せずほぼ一定の放熱完了時間となることが分かる。

参考までに、この種の凝固エマルジョンの潜熱完了時

間を表す無次元量であるフーリエ数  $Fo_e$  は、次のような無次元パラメータで実験整理式の形で表せる。

$$Fo_e = 2.28 \times 10^5 \times Z^{*0.822} Ste^{-0.747} Re^{-1.02} \dots (3)$$

ここで、 $Fo_e = \alpha_a T_e / d_n^2$ ,  $\alpha_a$ : 空気の温度伝導率,  $Z^* = Z/d_n$ ,  $Ste = \frac{C_{pe} \times (T_{ain} - T_f)}{(C_t/100) \times L}$ ,  $C_{pe}$ : エマルジョンの比熱,  $T_{ain}$ : 空気入口温度,  $L$ : 融解熱量,  $Re = \frac{U_n \times d_n}{\nu_a}$ ,  $\nu_a$ : 空気の動粘性係数

このように、潜熱エマルジョンにみられるように、比較的粘度の大きな潜熱スラリーからの冷熱の抽出には、空気等被冷却媒体を直接接触で熱抵抗の小さな条件および流動化による動力を伴わない方法で行うことも、今後検討すべき課題と言えよう。

## 6. あとがき

水等の熱媒体に微粒子化した固-液相変化潜熱物質を混合した各種の潜熱スラリーについての製造法とその特徴について解説し、この種の潜熱スラリーは、管内輸送可能なことにより、蓄冷熱システムの新たな展開が期待される。現状では、氷水スラリーによる水冷熱の輸送を加えた効率的な氷蓄熱システムが、地域冷房熱供給ネットワークの中心的役割を果たすように思える。一方、パラフィン系の低温蓄熱材を分散質とした潜熱スラ

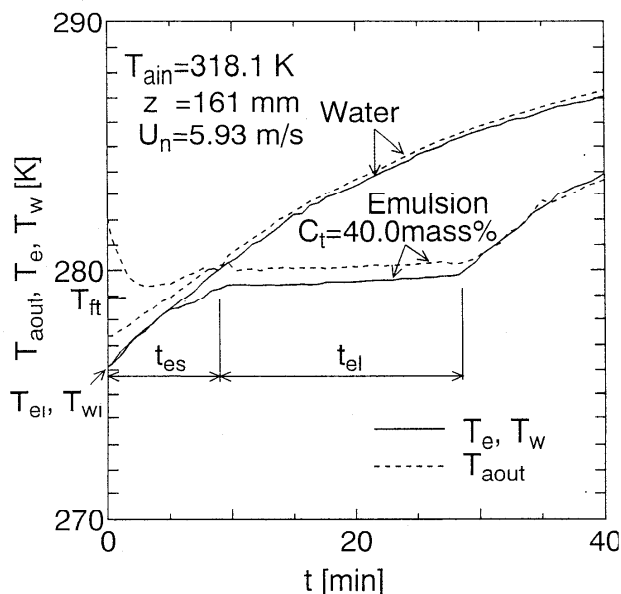


図 15 水の温度  $T_w$ , エマルジョン ( $C_t=40.0$  mass%) の温度および空気の出口温度  $T_{aout}$  の経時変化

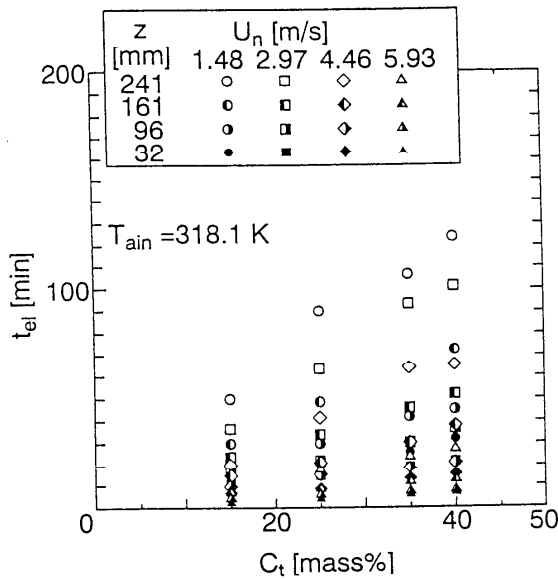


図 16 O/W 型エマルジョンの潜熱放冷完了時間  $t_{el}$  とテトラデカン濃度  $C_t$  の関係

リーは、住宅、交通機関そして各主産業機器の熱管理に重要な熱媒体の一つとなる可能性を秘めているように思われる。今後、この種の蓄熱材を用いた研究開発の更なる進展を熱望する次第である。

#### REFERENCES

- [1] 稲葉, 機械学会第72期総会講演会資料集(5), (1995-3), 34.
- [2] 稲葉, 二次エネルギー貯蔵・輸送技術に関する調査研究報告書, 新エネルギー産業技術総合開発機構, (1995), (29).
- [3] 稲葉・森田・野津, 技術学会論文集, 59-565(1993), 2882.
- [4] 吉田, 化学工学シンポジウムシリーズ23, (1990), 32.
- [5] 稲葉・森田, 機械学会論文集, 60-572(1994), 1422.
- [6] E.Choi, Y.I.Cho, G.Lorsch, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 18(1991), 759.
- [7] 稲葉・森田, 機械学会論文集, 61-583(1995), 1149.
- [8] P.Charunyakorn, S.Sen Gupta, S.K.Roy, Int. J. Heat Mass Transfer, 34-3(1991), 819.
- [9] 稲葉・森田, 熱物性, 9-1(1995), 24.
- [10] 山岸 他3名, 第32回日本伝熱シンポジウム論文集, C254(1995), 465.

[11] 稲葉・武谷, 機械学会論文集, 58-548(1992), 132.

[12] 六串・高橋, 化学工学論文集, 7-5(1989), 449.

# 氷雪冷房と雪発電の現状と展望

対馬 勝年 (富山大)

## 1. はじめに

北陸・東北・北海道など日本の国土の52%は積雪地帯である。特に、北陸地方や東北の一部および山間地域は豪雪地帯に指定され雪害に痛めつけられてきた。これらの地域では過去30年以上に渡って雪害を軽減するための対策が精力的に行われてきた。

昭和56年北陸地方を襲った豪雪では過去の大災害時(昭和38年の北陸豪雪)に匹敵する積雪となった<sup>1)</sup>にもかかわらず、社会活動には大した混乱もなく乗り切った。このことが力となって、雪の良い面を見出し積極的に雪を活用しようという機運が研究者と行政の双方に高まった。田口<sup>2)</sup>によると雪や氷は紀元前から利用されていたし、わが国でも古事記や日本書記以来夏に氷を活用していた記録が多い。明治時代にはアメリカから氷が輸入されていたし、大正時代に入ると、大きな雪室が各地に造られ、昭和35年頃まで雪山から切り出された雪が夏場にも利用された。長岡市に作られた雪山は1基で7000m<sup>3</sup>という大きなものであった。

雪は毎年冬になると降り、クリーンで再生可能な資源である。雪は融点が0℃と低く、潜熱は334kJ/kgと大変大きい。このため解け難く、0℃の環境を長く維持することが注目され雪室・氷室として活用されてきた。さらにこの潜熱を雪冷房<sup>3)</sup>や雪発電のエネルギー源にも積極的に活用しよう風潮が昭和56年の豪雪を契機に芽生えた<sup>4)</sup>。地下タンクを用いた貯雪冷房や温度差発電<sup>5,6)</sup>、熱サイホン発電<sup>7,8)</sup>等の雪発電の基礎および開発研究が行われるようになった。梅村ら<sup>9)</sup>は市街地を対象とした大規模な集雪冷房システムのフジビリティスタディも行っている。貯雪冷房は夜間の余剰電力の活用をねらった氷蓄熱式冷房方式の開始で弾みがついた。

わが国に降る雪の量を少ない見積の500億tと仮定しても、その潜熱は $1.68 \times 10^7 \text{TJ}$ (Tはテラで $10^{12}$ )、

これを1年間に均等に分けると、0.53TWとなり、100万kWの発電所530基分に相当莫大な量になる。

多くのスキー場ではスノーマシンを用いて人工降雪が行われている。水と十分な寒さがあれば雪を得ることが出来るわけで、その雪を氷雪冷房や雪発電の冷熱源に利用できる。

わが国は慢性的なエネルギー問題を抱えており、完璧にクリーンで再生可能な資源である雪のエネルギー利用が今後も推進されるべきであるし、環境保全の面からも推奨されることである。このような見地から雪冷房や雪発電の研究開発が行われている。

## 2. 氷雪冷房

氷雪冷房とは冬の氷や雪を夏まで保存し、建物冷房や倉庫の冷房に使うものである。アメリカのニュージャージー州にあるプリンストン大学では1978~1983年までアイスボンド空調システム(雪冷房)の研究開発を行い、最終的にはスノーマシンで7000m<sup>3</sup>の雪を作って床面積10000m<sup>2</sup>の事務所ビルの冷房が行われた<sup>10)</sup>。小規模のものはニューヨーク州バッファローのチーズ工場(貯水量650t)で熟成のための冷房に使われている。雪は簡易ノズルから水を噴射して作られた。雪冷房は電力節約に貢献するとの理由で州から建設費の一部について補助が出された。

アメリカ、カナダでは農業分野における穀物・野菜の貯蔵に水の冷熱を利用することも行われているようで、アルゴンヌ研究所で天然の冷熱利用に関するシンポジウムも行われた。このシンポジウムには米国・カナダにおける氷の冷熱を使った農産物貯蔵のための製氷技術が紹介されている。特に、会議で注目される製氷技術は、地下の断熱庫に冷たい天然の外気を吸い込み、同時に噴射した水を凍らせる方法である。この場合、雪や氷の運搬・移動の必要がない。雪が降らなくても寒さと水さえあれば、氷を得ることができるので

便利である。

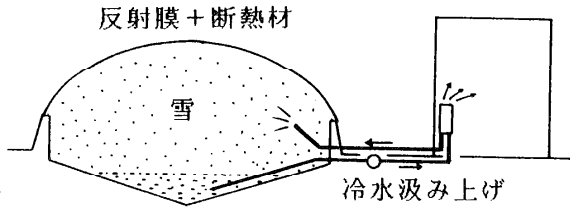


図1 氷雪冷房システム

わが国では堂腰ら<sup>11)</sup> がスケートリンクでの製氷のように氷の上に薄く水を撒きながら凍らせて2.5mの厚い氷を作り、小綿ら<sup>12)</sup> は北海道農業試験場に半地下のアイスボンドを設置し、2mの高さから水平に水滴を噴射させた。水滴が落下の途中で冷え、底に凍りつきながら氷の厚さを増していく方法で氷を作った。気温や凍結の完了を検知し、噴射時間をコンピュータで調節し、最適製氷を目指した。いずれの場合も一回の水を撒き過ぎないこと、雪が積もったら掃き捨てることが肝要であった。

スキー場で使われるファンタイプのスノーマシンでは雪を降らせる場合、表1のプリンス頓大のテスト結果<sup>13)</sup> に示されるように成績係数COPが温度の低いほど大きく、10~80となった。ヒートポンプ式クーラーのCOPが3程度であるのに比べると桁違いに大きな値である。この場合、氷は作れば作るほど有利とも言える。

表1 人工降雪による製氷の成績係数COP

気温, °C	増雪速度, t/h	COP
-18~-15	21	82
-15~-12	17	68
-12~-9	14	56
-9~-7	11	42
-7~-4	7	29
-4~-1	4	15

人口の密集地で2~3mもの積雪に埋まる豪雪都市は世界的に見ても、日本だけであると言われる。わが国の北陸および山陰では冬中0°C前後の高温で雪が降ること、夏の高湿多湿という点でも特異である。雪の処理のために莫大な経費が使われる。

米国では中規模の試験が目指されたのに、日本では小規模の試験に集中している。空調に使われる貯雪庫の容積は20~100m<sup>3</sup>のものが多く、貯蔵中に解ける雪の量を少なく抑えること、施設の償却費が課題であった。このような中で貯雪冷房の経済性を含めた将来性が議論されたのは性急過ぎたといえよう。

## 2.1 雪冷房の方式

雪冷房は冬に天然に降る雪を夏場まで保存し、冷房の冷熱源として使用するものである。冷房の方式としては①庫内に溜った冷水を汲み上げて室内のファンコイルに送って冷房し、水を再び庫内に戻す方式、②温度調整用の水を除き、残りを捨てる方式、あるいは③庫内に熱交換用銅パイプを配管し、冷媒(水または不凍液)を管内に循環させる方式などがある。山形県舟形町の雪冷房では雪の庫内から冷たい空気を取り出しダクトを通して室内に送風する試みが行われている。これらの場合、雪の潜熱が冷熱源として利用される。

配管やダクトへの結露防止は大事であるが、配管内の流量が少なくなるほど、冷水の滞留時間が長くなるので配管の断熱を高めることが重要になる。

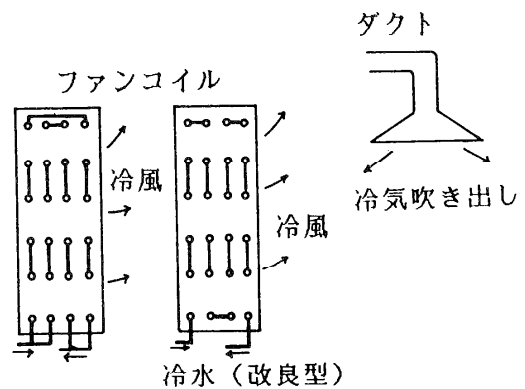


図2 雪冷房の方式

筆者ら<sup>14)</sup> は水温を変えたときのファンコイルの特性を調べ、冷水の水路が最大になるようにコイルを改造し冷水を使い捨てにする方法をテストした。この場合、雪の潜熱の他に水の顕熱も利用できる。ファンコイルからの出口温度が高くなるため、流量を節約することが出来た。冷水が25℃に加熱されて放出される場合、7℃の水まで使用する場合に比べ活用できる冷熱は20%も増大する。さらに、地下水の温度を14℃とすれば、これを汲み上げて雪と混合し0℃近くまで冷やしたうえ、使い捨て式空調器に通すことによって利用できる冷熱が13%増大する。

## 2.2 熱交換の方式と問題点

貯雪槽内の雪と還流水の熱交換効率が経過時間と共に変化することが問題とされている。プリンストン大学の試験では雪山の上から散水したところ、水の通り道に沿って雪粒が溶けて空洞が出来てしまったため、雪との熱交換が進まなくなった。そこで、雪の底の方から上に向けて水を噴射する方法が取られた。

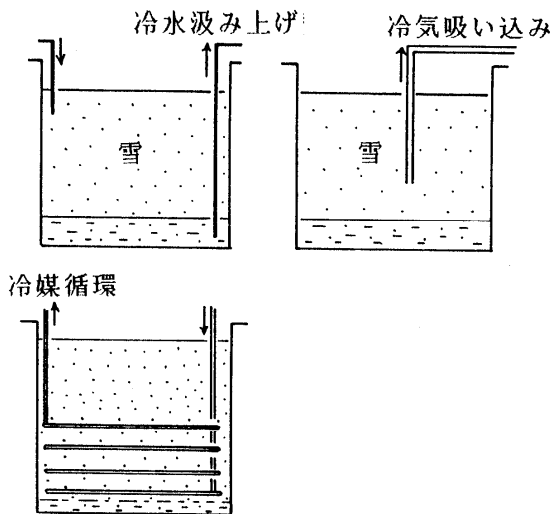


図3 雪との熱交換法

雪が焼結しやすいのも問題である。下から還流水を噴射しても下部の雪が溶けたあとに雪のブリッジが出来て、底の水と上部の雪との間が空洞で分離してしまうという問題である。

壁面に熱交換用コイルを巻く方法も行われる。この場合、水槽の中に雪が座礁したり浮く状態になるので

、雪と水の熱交換はよい。しかし、保存中に壁体から侵入する熱も増えるという難点がある。

冷水を汲み上げる方式では、スラリー輸送のように粉碎した雪と水の混合体をパイプ輸送すれば、高密度で冷熱を輸送できるという利点がある。集雪冷房システムで配管が長くなると、効果的となるであろう。

## 2.3 都市計画としての雪冷房の導入構想

これは長岡技術科学大学の梅村<sup>15)</sup> らのグループの構想によるものである。冬に都市内に降り除雪される雪を山麓の谷間などの一箇所に集め保存する。夏には雪解け水をパイプを通して都市内に送り、ビルや集合住宅の冷房を行うものである。

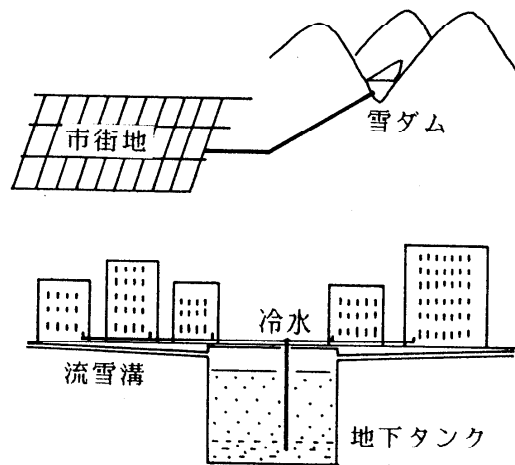


図4 集雪冷房システム（構想図）

このような都市計画の構想のもとに雪の水力輸送、パイプを用いた雪塊の輸送、粉体輸送（乾いた雪の場合）なども開発されている。

都市部や山麓の豪雪地では地形の勾配を利用して流雪溝を張り巡らし、流水に雪塊をのせて雪を排出処理をする方法が伝統的に行われている。平地では人工的に流水を作り末端からパイプで雪を排出する方法も行われてきた。このような雪の輸送技術は冷房のための雪を集める技術にも転用される。

## 3. 雪発電

雪発電は雪のもつ冷熱を温度差発電の冷熱源に利用したり、媒体をダムに汲み上げる際の冷熱源として利



用するものである。このほかに氷の熱電能が $3000 \mu\text{V}/\text{K}$ と異常に大きいことに注目した熱電発電も考えられる。

### 3.1 雪温度差発電

温度差発電は弘前大学の佐藤<sup>5)</sup>および秋田大学の能登<sup>6)</sup>らによって開発研究が進められたものである。発電原理は海洋温度差発電(例えば、本間ら<sup>16)</sup>)と同じなので詳しくは説明しない。冷熱源の雪と、高熱源の温泉熱・地熱・工場排熱などを組み合わせて温度差を作り、作動媒体を高圧のガス流に変えて、フロンタービンなどを回して発電するものである。タービンを通過したガスは凝縮器で液化されるが、もとの蒸発器へはポンプで押し込むことになるので、大きな動力が必要になる。

雪発電のもう一つの方式である熱サイホン発電<sup>7)</sup>はヒートパイプの応用である。ヒートパイプ内では $10^\circ\text{C}$ 程度の低い温度、小さな温度差で媒体が移動する点、および媒体の気化熱が $80\text{kJ}/\text{kg}$ 程度(水の気化熱の27分の1、氷の融解熱の4分の1)と小さいことが注目された。この場合、媒体は重力の作用で自然にもとの蒸発器に戻るためポンプ動力が不要になるという利点もある。

### 3.2 温度差発電

温度差発電は $500\text{W}$ から $1000\text{W}$ の実験発電を達成された。秋田大学の能登らのグループと秋田県工業試験場が共同して自然エネルギーの条件に近い状態で試験が進められた。秋田県では地熱開発も行われており、雪と地熱の組み合わせが注目されていた。雪温度差発電の問題点は低い温度、小さな温度差でガスタービンを回して発電する熱機関なので高い効率が望まれない点である。

例えば、 $10\text{万}^3$ の海洋温度差発電の試算では年間 $100$ 億 $^3$ の冷海水が汲み上げられる。このように大量の海水混合が行われるので、気づかぬうちに自然の気候が変化するようになり地表の7割を占める海洋の温度分布に変化が現れたときには、復元が手遅れになる危険もある。

雪の量が多いとはいっても、一箇所では活用できる雪

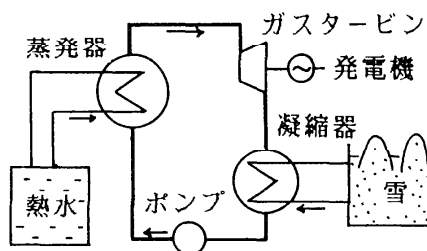


図5 温度差発電システム図

の量は数 $100$ 万 $^3$ であろう。

弘前大学の佐藤は上の欠点を除くために高温の温泉熱の利用を考えた。 $90^\circ\text{C}$ に加熱された蒸気による発電は出力と効率を高めた点で目的を達した。

しかし、排熱の温度も高くなり、地熱利用という観点からすると逆効果となった。物理学的な効率で議論するのはエネルギーの有効活用という観点で議論するのは一つのジレンマである。物理屋はしばしば効率を重視するあまり、自然エネルギーの有効利用にブレーキをかけるきらいがある。

今後の問題としては、資源の有効利用、将来の地球環境への影響を評価し、地球温暖化を抑制するようなシステムで発電する方法も探究課題となるであろう。

### 3.3 熱サイホン発電

熱サイホン発電は図6に示すように下端の揮発性の液体を蒸発させて、高い位置に導いて再び液化させダムに溜める。次いでダムから落下する液体の力で水車を回し、発電するものである。フッ素化合物の中には気化熱が $40\sim 80\text{kJ}/\text{kg}$ と小さいものがあり、しかも、 $20^\circ\text{C}$ 内外の低い温度で沸騰するものがある。したがって、夏には広く分布する $30^\circ\text{C}$ 程度の排熱、湖沼水のほか、地熱、温泉熱を高熱源とし、冷熱源の $0^\circ\text{C}$ の雪と組み合わせて利用できる。

気化熱 $80\text{kJ}/\text{kg}$ のPP1( $\text{C}_6\text{F}_{14}$ , フロリナート)を使用すると、 $1\text{kg}$ の氷で $4\text{kg}$ の媒体をダムに汲み上げることができることになるので、雪の溶け水で発電する水力発電に比べ4倍の発電が出来ることになる。

この場合、発電の大きさを決めるのは落差と気化熱の大きさ、および高熱源・冷熱源の量である。加熱部

したり、直接液滴を放出させる効果が期待される。

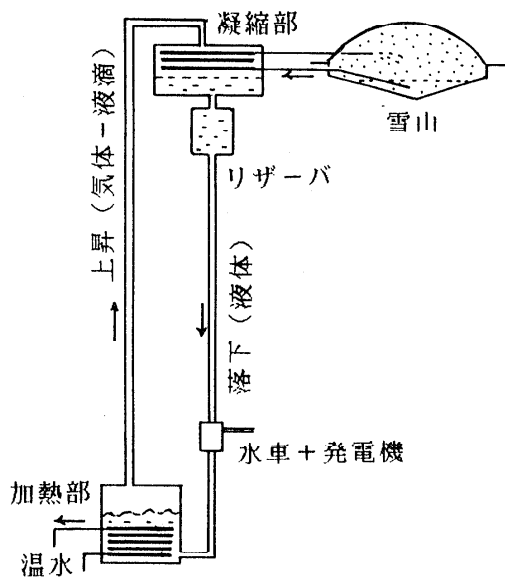


図6 熱サイホン発電システム図

で蒸気に与えられる気化熱の一部は上昇中の断熱膨張で気体の温度が下がることにより、過飽和を解消するために液滴となり、その際に気化熱を放出する。その発熱のため蒸気は湿潤断熱膨張をする。上端に達したところで、凝縮器による冷却によって液化し、液体としての位置エネルギーに変換される。下端での加熱のエネルギーと上端での冷却のエネルギーの差が外部に取り出せるエネルギーになる。

伝熱に関係するものでは加熱部の温水から作動媒体への熱伝達を促進するために図7のようにガラス壁に接近して筒を設置し、沸騰によって壁面と筒の間が激しく攪拌されるように工夫された。

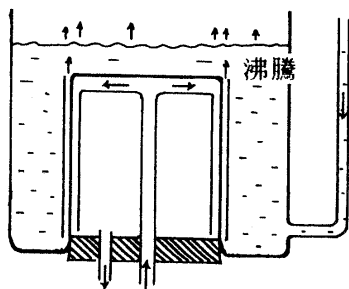


図7 熱伝達の促進

熱サイホンでは加熱部の作動媒体の内部に超音波発振機を設置すれば、発生させた微細水滴を沸騰の核に

#### 4. 貯雪技術、造雪技術

雪冷房、雪発電のためには、暑い夏場まで雪を保存する必要がある。保存法は早くから工夫され、昔は太陽放射、風、気温の影響を避けるために地下に貯蔵された。近年も小規模の貯雪には断熱効果の高い地下タンクへの貯蔵法が活用されている。大規模な貯蔵には経費の安上がりな雪を地上に積み上げ、表面を断熱する方法が取られる。断熱材としてはグラスウール、シルバーシート（アルミ蒸着シート）、布、シート状断熱材、発泡スチロール、泡、空気膜、「もみがら」や「わら」が使われる。

雪は解けると表面の位置や形を変える。このため表面の形状変化に順応した柔軟性のある断熱が効果的である。近年、簡易な断熱シートがよく使われる。問題はシートの継ぎ目から風が侵入し、窪み状に解けること、シート表面に鳥が穴を明け雨水の侵入原因となること、表面に窪みができると雨水が溜り、融雪を促進すること、雨水の侵入した所の雪は解け縦状の穴が雪に形成されることなどである。これらの窪みや穴のような不均一の融解が全体の融雪を促進するのが問題とされている。

空気膜による断熱も使われたが、ガラスなどの鳥が膜に穴を開け、補修に悩まされた。10m角程度の小さな雪山なら一枚のシルバーシートで覆うこともできるが、30m以上数100mになると、特殊な場合を除くと何枚ものシートをつなぎ合わせることになる。このつなぎ目がネックとなって融雪が促進する。小型の雪山には効果を挙げた断熱法も、大型化するだけで予想外の問題が発生し、断熱に困難な問題を提起している。

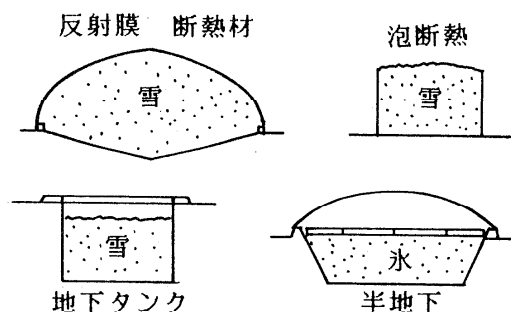


図7 貯雪技術

雪は厳冬の地を除けば保存中常に融解条件にさらされている。そして、解ければ役に立たない資源に変わるのが氷や雪である。雪や氷を冷房や発電に利用する場合、単位質量のもつエネルギー密度（融解熱が334kJ/kg）が小さい。このことが、保存施設に十分な投資を行うことを困難にしている。

筆者は雪より密度の小さい液体、例えば石油タンクの中に雪を保存する方法を提案している。この場合、底に解け水の層が温度成層して溜り、中間に雪の層、上には軽い灯油の層が温度成層して溜る。上下何れの層においても対流はおこらないので伝導による熱伝達となり、高い断熱効果が期待できる。その上、雪の表面形状が複雑でも、また保存の過程で変形しても効果的に断熱できる利点があると予想される。

貯雪施設を使う場合、断熱壁の内部に雪の解け水を通して、外部から侵入する熱を遮断する方法や、雪山の解け水で底の基盤を冷やし、地中から上がってくる熱を遮断する方法も提案されている。

#### 5. 環境問題としての雪氷の利用

雪は太陽エネルギーの産物である。地表の7割は水面であり、そこに放射する太陽エネルギーの大半が水の蒸発のエネルギーに変わり、上空に昇るにつれ冷やされて雲となる。雲の中に雪の結晶が出来て地表に落下してくる。年間400兆トンの雲が出来るときに蒸発の際に得たエネルギーが放出され、大気が暖められたり、宇宙空間に放出される。大気中に水滴を噴射して雪を降らせる人工降雪がスキー場を中心に盛んに行われているが、水滴が凍結するときに放出される潜熱は空気を暖め、冬の寒さを和らげるのに効果がある。一方、その雪を夏に使うので、夏の気温を下げるのに役立つ。このように、雪冷房、雪発電は環境にも優しいばかりでなく温暖化の負の部分の中和する効果も果すことが強調されるべきであろう。

#### 6. まとめ

雪冷房にはクリーンで再生可能な資源の利用である利点がある。しかし、一家庭がひと夏に使うクーラーの電気代は1～2万円程度で多くない。雪のもつ潜熱

もまたエネルギー密度から見れば小さなものである。

しかし、わが国の夏場の電力需要は増大を続けており、網渡り的な電力供給が行われてきた。雪冷房は国家的なエネルギー管理の面からも導入が図られるべきである。

雪冷房の経済性を高め、エネルギー問題に貢献していくことが課題である。

雪冷房が電力（化石燃料）節約であるのに対し、雪発電は電力の生産である。熱サイホン発電はまだ研究の緒の域を脱していないが、発電という大きな研究費を要する研究であることが障害の一つとなっている。

#### 参考文献

- 1) 対馬, 豪雪, 古今書院, (1982), 239.
- 2) 田口, 氷の文化史, 冷凍食品新聞社, (1994).
- 3) 対馬, エネルギー・資源, 12(1991)149.
- 4) 対馬ほか, 氷雪冷房の現状と将来展望. 日本システム開発研究所, (1990)1.
- 5) 佐藤, 寒地技術シンボ, 3(1987)1.
- 6) 能登, 秋田の自然エネルギー, 11(1987)32.
- 7) 対馬ほか, 雪氷, 49(1987)123.
- 8) 対馬, 電気管理技術, 13(1992)2.
- 9) 梅村ほか, 雪氷, 47(1985)63.
- 10) 対馬, 第1回国際博・ウインターショーケース等海外調査団報告書, (1988)69.
- 11) 堂腰ほか, 寒地技術シンボ, 3(1987)27.
- 12) 小綿ほか, 農業施設, 24(1993)133.
- 13) Kirkpatrick, D.L., et al, Princeton Univ. CEES Rept. 149(1982)1.
- 14) 対馬ら, 寒地技術シンボ, 3(1987)35.
- 15) 梅村, サイエンス, 17-3(1987)66.
- 16) 本間ほか, 海洋エネルギー読本, オーム社, (1980)173.

# 製氷機開発技術の現状

鳥光 廣志 三成 勝信 (ホシザキ電機)

## 1. はじめに

国産初の全自動製氷機が開発されたのは、東京オリンピックの年というから、1964年のことである。その頃、製氷機の先進国はアメリカであり、日本にもごくわずかに輸入されていたが、一般には、まだまだ氷は「夏の贅沢品」として、時々お目にかかるようなものであったらしい。

製氷機が、本格的に普及したのは、オイルショックを契機にしてからである。この頃、いろいろな方式の製氷機が開発され、氷のバリエーションが広がってきた。この背景としては、外食産業の発展を無視するわけにはいかない。用途や使用量に応じて、さまざまな氷が必要になり、時代のニーズに答えるように、いろいろな種類の製氷機が開発されていったのである。

現在、製氷機の国内年間出荷台数は5万5千台を越え、成熟期を迎えているが、一方では、氷のニーズはまだまだ広がる様相を呈している。例えば、これまで顕熱を利用して空調業界でも、深夜電力を利用した氷蓄熱技術の研究と実用化が急ピッチで進んでいる。氷蓄熱は、昨今のエネルギー問題の解決の旗手として、たくさんの大学や企業が注目している。

一方、日本の製氷機は、現在世界の最高水準になり、その高性能と高品質の故に、氷先進国であった米国にも生産拠点を構えるとともに、米国市場をも席卷し、さらには、ヨーロッパ進出を果たしている。

今回は、このような製氷機を支える技術を紹介するとともに、間近に迫った21世紀に向けての製氷機が解決しなければならない課題にも言及したいと考えている。

## 2. 製氷機の種類

### 2-1. クローズドセル方式

現在、日本でもっともポピュラーな製氷機は、クローズドセル方式と呼ばれる製氷機である。この方式は、図1に示すように、蒸発器内の冷媒によって冷却された銅製のセルに、噴水穴から水を吹き付け氷を成長させる方式である。

噴水した水はセルの表面から徐々に凍りはじめ、次第にセルを塞いでゆく。セルが氷でいっぱいになった時点で温度や圧力によって検知し、蒸発器にホットガスを流し、セルを暖めて氷の表面を融かし、氷をセルから脱却させる。

このように、水を流しながら徐々に氷を成長させていくので、できた氷は不純物をほとんど含まない透明でピュアなものになっている。

この方式で作られた氷は、一般的に約3cm角で中央に直径5mm程度の穴があいている形状になっているが、セルの大きさを変えることで、いろいろな用途にあった氷をつくることができる。たとえば、ハンバーガーショップなどでは、ハーフサイズ(14mm

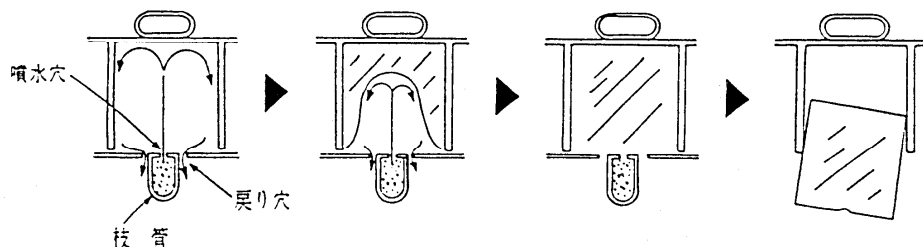


図1 クローズドセル方式の製氷過程

x 14 mm x 21 mmなど)の氷が好んで用いられている。

## 2-2、オーガ方式

クローズドセル方式の次に多く使われているのが、オーガ方式の製氷機である。図2は、オーガ方式の製氷機である。製氷機構部は、蒸発器を設けた製氷筒と製氷筒内部のオーガ、さらにオーガによって剥ぎとられた氷を押し固めるためのヘッダーからなっている。

製氷筒内部に溜められた水は、冷却された製氷筒の表面に薄い氷板を形成する。薄い氷板は、ギヤードモーターにより回転しているオーガによって剥ぎ取られ、ヘッダー内で圧縮され、雪状や小指の頭大の氷になって放出される。

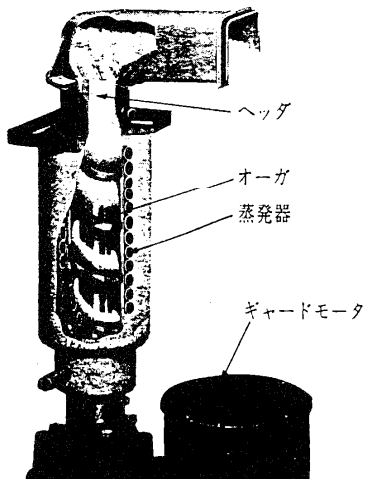


図2 オーガ式製氷機の製氷機構部

この方式で作られた氷は雪に近いので、柔らかくて融けやすい性質を備えている。このため、食品を傷つけることなく速やかに冷却するので、魚のアイスベッドなど、食品の冷却用に数多く用いられている。また、カップ飲料自動販売機の中にはこの製氷機が搭載されており、氷入りの冷たいジュースなどを供給している。

この製氷機の特徴は、製氷筒の表面にできた氷を機械的に剥ぎ取っているため、除氷サイクルがなく連続的に製氷を行っていることである。また、製氷の残水もないことから、製氷にかかるコストはセル方式の約1/2~2/3に押さえられている。

この他にも、その用途や氷の使用量によって、様々な種類や製氷能力の製氷機が現在使われている。<sup>(1)</sup>しかしながら、そのほとんどが業務用であるため、店舗などのバックヤードに設置されている場合が多いので、一般の人の目にあまり触れないことが多い。

## 3、製氷機を取り巻く課題

### 3-1、製氷効率のアップ

近年のエネルギー問題を背景として、製氷効率をアップすることは、我々エンジニアに与えられた永遠の課題といっても良いだろう。

ここ数年、エアコンの普及はめざましいものがあるが、それと共に、特に夏場の電力使用量はうなぎのぼりに増えている。氷の使用量も、当然ながら夏場に多くなるため、製氷機の運転率も夏場に高くなるのは自明の理である。

そこで、製氷機の効率を上げることが必要になってくるのであるが、それには大きく分けて2つの方法がある。ひとつは、製氷機を構成する機械部品(例えば圧縮機やモーターなど)の効率を上げる方法である。高効率で高性能の部品を使用することにより、製氷能力当りの電力量を下げるができる。

もう一つの方法は、最近研究が進んでいる新しい製氷方式である。現状の製氷機は、必ず、作った氷を刈り取る行為(ハーベスト:除氷)が必要である。例えば、クローズドセル方式では、ホットガスを流して作った氷の表面を一部融かして氷を回収する。オーガ方式では、モーターでオーガを動かして、表面から氷を剥ぎ取る。このハーベストの行為は、氷を作る行為とは全く逆の行為であり(必要であるが)、多大のエネルギーを必要とするため、製氷機の効率を下げる一因になっている。

新しい製氷方式は、製氷機という観点からすると、いかにハーベストサイクルを簡単にするかという見地に立ったものが多い。以下に何点かの方式を紹介する。

#### ・過冷却現象を利用した製氷

水の過冷却現象を利用して、蒸発器の表面では氷を成長させないようにする方法である。詳しくは、次項

の武谷氏が解説している。

この方法は、非常に画期的な方法である。過冷却を安定させることや水質の違いにどう対処するかなど、幾つかの解決しなければならない課題はあるものの、それが解決されれば、新しい製氷方法として脚光を浴びると思われる。

#### ・冷媒直接接触法による製氷

簡単に言えば、0℃以下でも凍らない媒体の中に水を噴出させ、氷の粒を作る方法である。使用する媒体は、フロンをはじめとしているいろいろなものが考えられるが、大きな課題は、作った氷がピュアではないため、食用としては利用しづらいことである。従って、氷の用途は蓄熱用が主になると考えられる。

### 3-2、特定フロンの全廃

ここ1～2年の間に、製氷機の冷凍サイクルは大きな変化を遂げた。これは、モントリオール議定書に基づき特定フロン(CFCフロン)の全廃が行われたからである。

従来は、冷凍サイクルの冷媒としてはR12(CFC冷媒)やR502(CFCを含む混合冷媒)が一般的であり、ほとんどの製氷機がR12やR502を冷媒として使用してきた。これは、R12が不燃性であり、安定で無害な化学物質だからである。

ところが、その安定さ故に、大気中に放出されても分解せず、上空のオゾン層まで達して、オゾン層を破壊する弊害が出てきたのである。

このような背景のもとに、CFCの全廃は代替冷媒探しから始まった。初期の頃は、ヨーロッパなどではプロパンガスの使用も検討されたが、日本では可燃性の為、採用が進まなかった。日本では、代替としてR134a、R22が検討された。

特に、R134aは未知の冷媒であったため、冷媒として採用するまでには、数え切れない技術者の研究と実験が繰り返された。

冷凍サイクルに使用する部品は、細心の注意をはらって検討が行われた。例えば、圧縮機の潤滑油には今までの鉱油に変わって合成油が使用されたし、他の構成部品の清浄度も1ケタ良くする製造技術が、開発されていった。

製氷機については100台を越える試作機をつくり、延べ何10万時間もの耐久試験が行われ、その耐久性や安全性が確認された上で、お客様のもとへ届けられたのである。

その陰には、冷凍サイクルの技術者のみならず、設計、試験、化学、試作、材料、機械、伝熱、製造スタッフなど、広い分野のエンジニアの協力があったことは、忘れられない事実である。

21世紀に向けては、R22(HCFCフロン)が規制の対象になる。すでに、この問題を解決すべく混合冷媒の使用が検討されはじめている。

### 3-3、水質の問題

水は、非常にピュアな物質である。これは水が凝固していく過程で水分子同士が規則正しく配列し、不純物を排除していく性質があるからである。製氷機で作られた氷の場合、その排除率は物質によって異なるが、おおざっぱに平均すると、水の中の不純物のうち約97%が除去されるというデータもある。

この時、排除された不純物が製氷機にとって悪影響を与えることが少なくない。例えば、水道水に含まれている塩素が上記の理由で排出されると、機械内の製氷室周囲の部品を錆びさせることになる。この影響はかなり大きく、ステンレスをも錆びさせるほどである。製氷機の開発は錆との戦いでもある。

またヨーロッパや日本の中でも、水道水中にカルシウム分が多く含まれている地域があるが、これらの地域では、カルシウム分が析出するため、製氷板を始め水系路を汚染し、機械の性能や耐久性に悪影響を及ぼすことがある。

そこで、実験により、製氷水の濃縮度を測定し、給水するタイミングや時間を算定するとともに、耐久試験を行なうなど地道な研究も行われている。

この他にも、製氷機にはいろいろな箇所に、いろいろなアイデアや技術が盛り込まれている。それは、製氷機を取り巻く課題を、エンジニアがひとつひとつ解決していった成果であると思う。今後も課題に対する挑戦は続いて行く。

#### 4、製氷機の周辺技術

製氷機を開発する際に必要となる技術がいろいろな分野で培われているが、この項では、その内のいくつかについて解説を試みる。

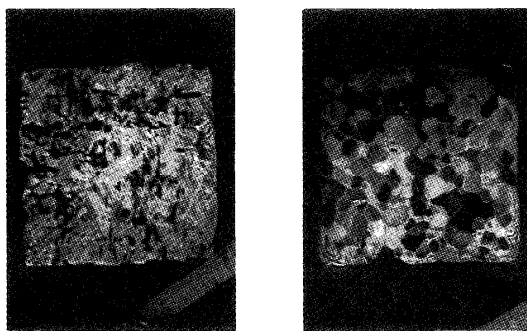
##### 4-1、結晶粒径の研究

従来から製氷研究一環として、質の良い氷を作るために、氷の透明度のみならず、結晶構造を制御するような研究がなされている。<sup>(2)</sup>

図3は、通常の水道水と蒸留水を静水の状態で凍結させた時の、結晶粒径の違いである。蒸留水の場合は、結晶の粒界が明瞭であるが、水道水の場合は結晶粒の形状が不明瞭になった。これは、不純物が氷の結晶成長過程に影響を与えているためであると考えられている。

この他にも、製氷板表面の表面粗さや材質と結晶粒径の相関性や、熱流の大きさによる結晶粒径の変化など研究がされている。

このような研究がなされているのは、金属と同じように、結晶構造によって氷の強度（いわゆる硬さ）が異なってくるからである。この分野は、まだまだ研究の余地が残されており、今後の進展が望まれるところである。



水道水

蒸留水

静水 (銅板上で製氷)

図3 氷の結晶 (偏光撮影)

##### 4-2、解析技術

最近のコンピューターの性能の進歩に歩調を合わせるように、コンピューターを用いた解析技術も格段に進歩してきている。特に有限要素法に関しては、線形問題だけでなく非線形問題を扱える解析ツールが登場している。

氷の解析を行なう場合は、そのほとんどが非線形解析である。氷の成長、融解などの伝熱解析を行なう場合は、相変化の問題を扱う必要がある。

図4は、氷の成長過程を有限要素法によって解析した結果である。伝熱面は、左部と下部であり、製氷が進んでいくに従って、伝熱面の温度が、下がるようにモデル化してある。この解析結果と実際の製氷機の製氷過程では、良い一致がみられている。

このような解析を行なうことにより、製氷機の開発の一助としている。

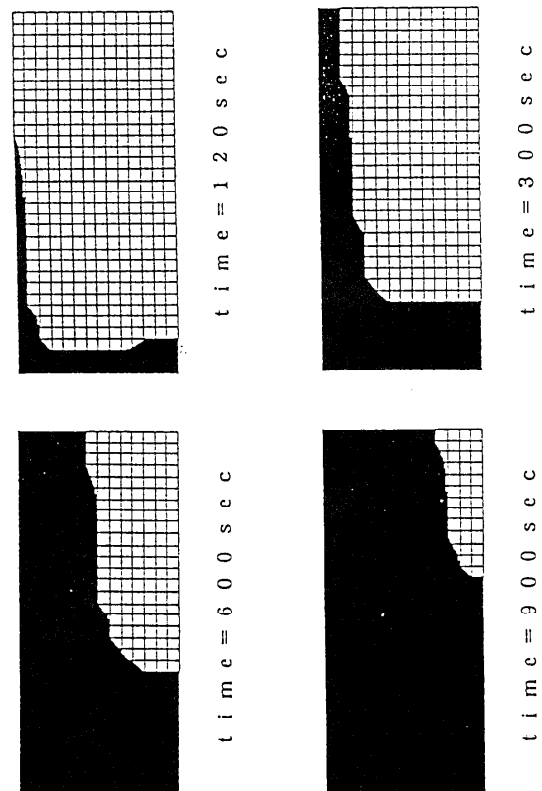


図4 氷の成長過程 (解析結果)

また、氷を固体として、構造解析や強度解析を行なう場合は、線形問題として扱える領域はごく限られた荷重条件であり、一般的には非線形解析を行わなければならない。現在では、氷を粘弾性体として扱う説が有力である（ただし、構造モデルとしては実験とよく合うモデルがなく、議論がされているところである）。この理由としては、氷の場合は他の構造体と違い、破壊までを一つのモデルとして扱う必要があることが、一因としてあげられる。

ところが、氷の変形や破壊に関与する要因は、非常に多種多様であるため（図5）、制約条件が多くなっているのが現状である。

ここ数年は、「分子動力学」の研究がめざましい。氷の成長についても、分子動力学を用いて、分子レベルで解析が行なう試みがなされている。しかしながら、コンピューターの能力の制約上、解析規模を大きくすることが出来ないため、製氷機の開発に応用できるのはもう少し時間がかかると考えられる。

このように、コンピューターと解析技術の進歩に支えられて、製氷機の開発もこれまでの手法に加えて新しい手法が用いられるようになってきた。21世紀に

はさらに新しい手法が研究されることを望んでやまない。

## 5、おわりに

「氷は文化のバロメーターである」という言葉があるが、まさしくその言葉のとおり、夏に子供たちが氷をほおぼって、「ああ冷たい！」と歓声をあげているのを見るとほほえましく豊かな気分になるのは、私だけではないだろう。

そして、子供たちの歓声を支えているのが、製氷機であることを再認識せざるを得ない。より安全で質が良い氷を提供し続けていくために、製氷機を取り巻く課題はたくさんあるが、これらを解決していくことが我々エンジニアに与えられた役割だと思う。

## 参考文献

- (1) 尾形：冷凍、65, 753, PP. 720-727 (1990)
- (2) 黒田ら：13th Japan Symposium on Thermophysical Properties PP. 165-168 (1992)

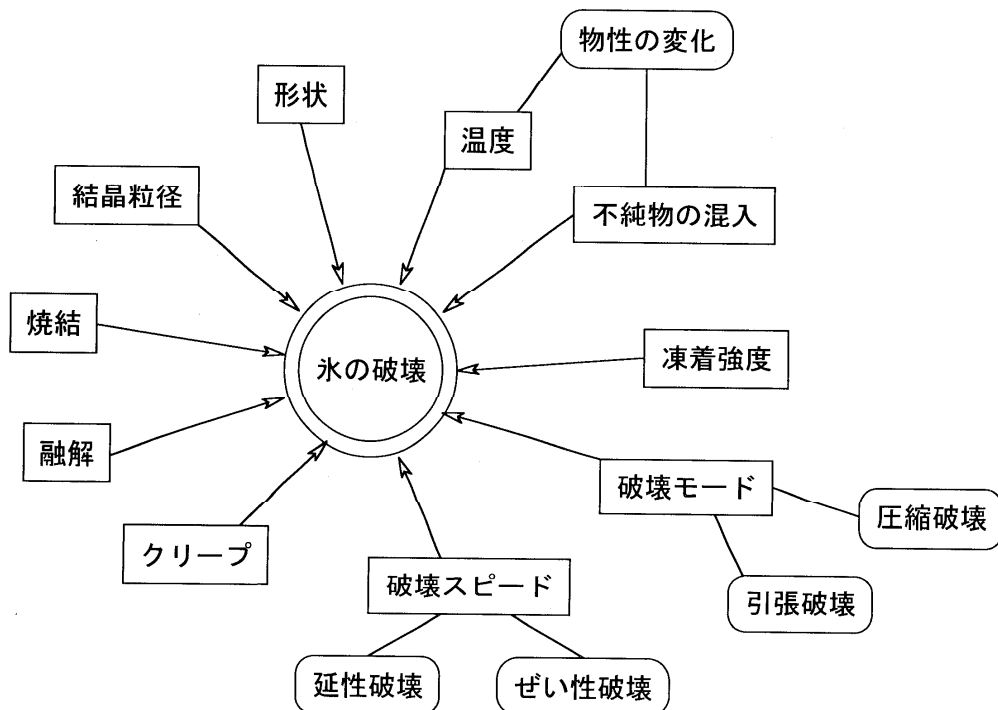


図5 氷の破壊要因



# 過冷却現象を利用した製氷技術

武谷 健吾(日本製鋼所)

## 1.はじめに

近年、夏期昼間における冷房用電力需要の急増に伴い、氷蓄熱システムへの関心が高まっている<sup>(1)</sup>。氷蓄熱における製氷システムとしては、多量の氷を短時間のうちに生成できることおよび伝熱特性に優れた氷を形成できること等が重要となり、多種多様な製氷システムの開発が行われている現状にある。その中で、水の過冷却状態を利用する方法は、流動状態にある水を外部冷却により凝固点温度以下の過冷却状態とし、冷却部以降の下流領域においてその過冷却状態を解消し製氷を行うものである。従って、製氷装置も比較的簡単なものとなり、また形成される氷が流動特性および伝熱特性に優れたスラリー状であることから将来有望な製氷方法となる可能性を秘めている。しかしながら、水の過冷却現象そのものの特性も未だ十分には知られていないことから、如何に大きな過冷却度（凝固点温度 $T_f$ と過冷却水温度 $T_c$ の差）を安定に得るかが技術的な課題となる。本稿では、水の過冷却現象に関して、著者が工学的観点から得た静止および流動状態における最大過冷却度の実測結果<sup>(3)~(5)</sup>からその基本的特性を探るとともに、二重管式熱交換器を利用した過冷却製氷システムの製氷挙動ならびに製氷量を紹介する。

## 2.水の過冷却現象

### 2-1.均質核生成と不均質核生成

水の過冷却現象については、気象学的な雲中の氷晶形成や寒冷地の自然界において、数多くの事例を見ることができる<sup>(2)</sup>。実験的には、到達しうる最大の過冷却度は、水の純度の増加および水体积の減少(微小液滴化)に従い増加することが知られている[図1の液滴直径 $d_w(\mu\text{m})$ と

最大過冷却度 $\Delta T(\text{K})$ の関係を参照]。このような現象は、水中に含まれる異質浮遊粒子や溶解分子あるいは過冷却水と接する容器壁等の不純物質が、過冷却水の凍結発生に何らかの影響を及ぼし、凍結発生温度を低下させていることを示唆している(不均質核生成)。しかしながら、厳密な精製過程を経てかつ非常に小さな液滴の場合でも凍結発生温度には限界があり、水の場合最低 $-40^\circ\text{C}$ 程度となる(均質核生成)。このような水の過冷却現象に関する従来の知見から、工学的に取り扱われる比較的体積の大きな過冷却水の凍結発生には、不純物質等の様々な二次的要因が強く影響することが予想される。

### 2-2.静止水の最大過冷却度

工学的立場から見た過冷却水の凍結発生には様々な二次的要因が影響を及ぼすことから、その最大過冷却度は一般に小さなものとなり、静止状態にある水道水で $5\sim 7\text{K}$ 、河川水で $3\sim 5\text{K}$ 程

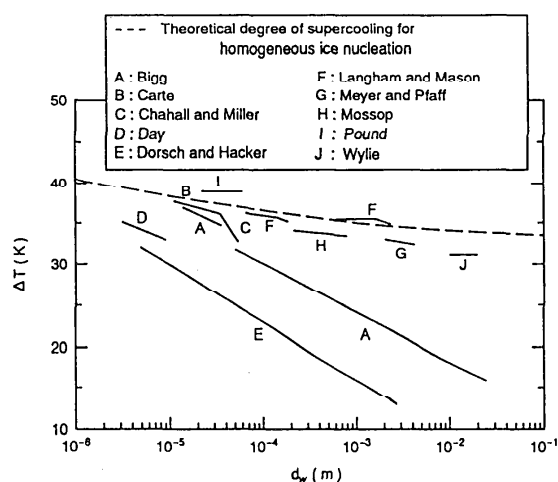


図1 微小液滴系の最大過冷却度

度となる。ここで言う二次的要因としては、過冷却水を支持する容器壁あるいは冷却伝熱面等の固体表面の材質および表面性状、過冷却水中に含まれる不特定で多量な異質浮遊粒子、過冷却水の対流の有無等であり、これらの要因が複雑に干渉し合う形で凍結が発生するものと予想される。従って、本節では、不均質核生成を助長するこれら二次的要因が水の最大過冷却度に及ぼす影響を検討する。なお、本節で取り扱う最大過冷却度は、試料水をガラス製あるいはステンレス製の円筒容器内に密閉した状態で一定の冷却条件(平均冷却速度  $u_m=0.4\text{K/min}$ )のもと多数回測定した結果の平均値であり、その詳細は文献<sup>(4)</sup>を参照されたい。

図2は、試料として純水(比抵抗 $R=5 \times 10^6 \Omega \text{cm}$ ,

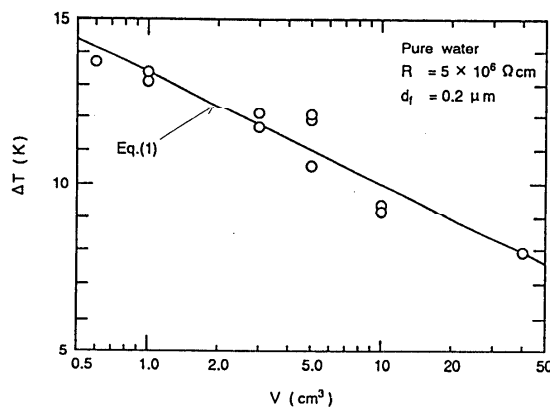


図2 試料水体積と最大過冷却度の関係

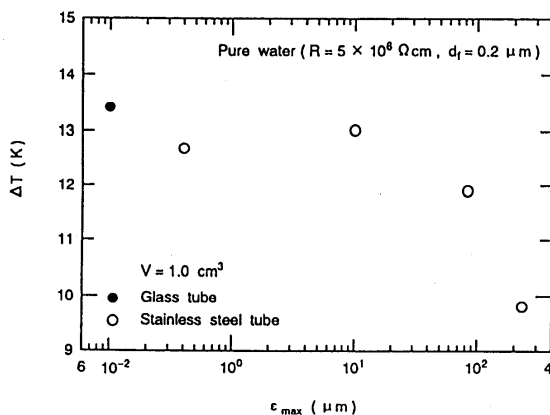


図3 最大過冷却度に及ぼす冷却面粗さの影響

$d_f=0.2 \mu\text{m}$ のフィルタにて濾過)を使用した場合の試料水体積 $V$ と最大過冷却度 $\Delta T$ の関係を示したものである。最大過冷却度 $\Delta T$ は、水体積 $V$ の増加と共に減少しており、その減少割合は微小液滴系の場合と同様、体積の対数値に対しほぼ一定となっている。なお、図中の実線は、実測結果を最小二乗法により整理した実験式を示している。

$$\Delta T = 13.4 - 1.48 \ln(V) \dots \dots \dots (1)$$

図3は、過冷却水を支持する容器として各種の表面性状を有するステンレス製円管を使用した場合の最大表面粗さ $\epsilon_{max}$ と最大過冷却度 $\Delta T$ の関係を示したものである。なお、試料水は純水(比抵抗 $R=5 \times 10^6 \Omega \text{cm}$ ,  $d_f=0.2 \mu\text{m}$ のフィルタにて濾過)を使用しており、その体積は $V=1.0 \text{cm}^3$ である。また、図中の●印は、ガラス製円管による実験結果を示している。最大過冷却度 $\Delta T$ は、 $\epsilon_{max} > 10 \mu\text{m}$ において $\epsilon_{max}$ の増加に従い急激に低下している。これに対し、 $\epsilon_{max} < 10 \mu\text{m}$ の領域では、 $\epsilon_{max}$ によらず $\Delta T$ はほぼ一定の値を示しており、 $10 \mu\text{m}$ 以下の表面粗さは純水の最大過冷却度に影響を及ぼさないことがわかる。

図4は、試料として各種の水を用いた場合の試

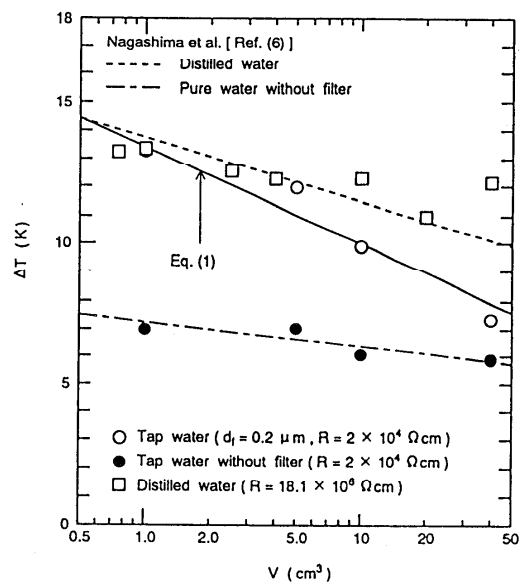


図4 各種試料水の最大過冷却度

料水体积 $V$ と最大過冷却度 $\Delta T$ の関係を示したものである。なお、実験に使用した水は、水道水(比抵抗 $R=2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ )、水道水をメッシュ径 $d_f=0.2 \mu\text{m}$ のフィルタを使用し濾過した濾過水( $R=2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ )および蒸留水( $R=18.1 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$ , フィルタ未使用)である。また、図中の一点鎖線および破線は、それぞれ長島ら<sup>(6)</sup>の純水( $R=5 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$ , フィルタ未使用)およびその蒸留水による実験結果を示しており、また実線は上述した純水の最大過冷却度 [式(1)]を示している。水道水および濾過水の最大過冷却度 $\Delta T$ は; 試料水体积 $V$ の増加と共に単調に減少しているが、その絶対値は濾過水の方が水道水よりも約1~5K程高くなっている。さらに、濾過水の $\Delta T$ は図中実線で示される純水(フィルタ使用)の実験結果と、また水道水の $\Delta T$ は図中一点鎖線で示される長島らの純水(フィルタ未使用)の実験結果と一致している。これより、粒径が $0.2 \mu\text{m}$ 以上の異質浮遊粒子の存在が、水の最大過冷却度を減少させることが理解される。

図5は、試料水体积 $V=1.0 \text{ cm}^3$ における純水( $R=5 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$ )および水道水( $R=2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ )の最大過冷却度 $\Delta T$ と異質浮遊粒子径 $r_s$ の関係を示したものである。ここで $r_s$ は、試料水内に含まれる最大の異質浮遊粒子径に対するものであり、その値はフィルタ径 $d_f$ より $r_s=d_f/2$ としている。また、図中の実線は、Fletcher<sup>(2)</sup>による半径 $r_s$ の固体粒子表面上に氷結晶核のもととなる水分

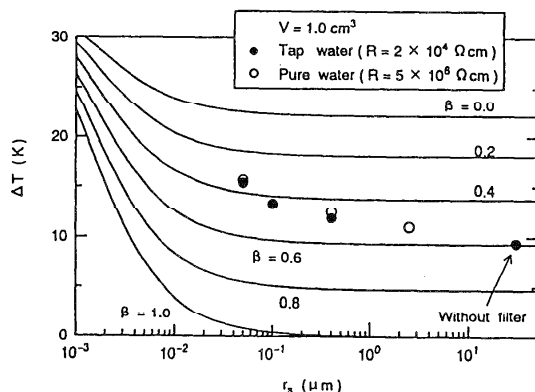


図5 異質浮遊粒子径の影響

子クラスタが球冠状に発生、成長するような不均質核生成モデルを仮定した場合に得られる最大過冷却度の計算値を示したものである。なお、それぞれの実線は、固体粒子の表面パラメータ $\beta$ を種々の値に変化させた時の計算結果を示している。最大過冷却度 $\Delta T$ は、異質浮遊粒子径 $r_s$ の低下と共に増加する傾向にあり、その増加割合は $r_s < 0.1 \mu\text{m}$ において急激なものとなっている。また、同一の $r_s$ においては、純水、水道水によらずほぼ同程度の $\Delta T$ となっている。実測値と計算値を比較すると、全体的な傾向は良く一致しているものの最大過冷却度の $r_s$ に対する依存性は実測結果の方が大きいことがわかる。以上の結果から、不均質核生成が支配的な条件下での静止水の最大過冷却度には、その比抵抗に影響を及ぼすイオン系の溶解分子等の存在は余り関与しておらず、電気的に中性な異質浮遊粒子の絶対量およびその大きさ等が主に影響を及ぼしていることがわかる。

### 2-3. 流動過冷却水の最大過冷却度

静止状態にある過冷却水の凍結は、前節で示したように様々な二次的要因が複合しておこる不均質核生成に支配されることになる。従って、本節では、前節までの結果を踏まえた上で、水の性状、冷却伝熱面粗さ等の過冷却解消に影響を及ぼす諸条件を明確にした実験条件の下での流動過冷却水の最大過冷却度を測定した結果を紹介する<sup>(5)</sup>。

図6は、流動過冷却水を利用した連続製氷システムの概略を示したものである。装置は、過冷却発生用二重円管式熱交換器(ステンレス製)を含む試料水循環系統、試料水冷却用ブライン循環系統および試料水の過冷却状態解消による製氷部より構成される。製氷槽②下部に貯留している試料水は、二重管式熱交換器の内管内へ流入し、環状部を流動する冷却ブラインにより過冷却状態にまで冷却された後、製氷槽内に設けられた金網上に放出、過冷却状態が解消され、金網上では微細な氷片が継続的に堆積すること

になる。一方、残存した試料水は、製氷槽下部に落下、再び循環し、過冷却状態の形成および製氷を伴う一連の連続製氷ループが完成する。なお、試料水は、水道水をイオン交換器にて処理した比抵抗 $R=5 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$ の純水を使用しており、また試料水循環系統にはフィルタ（メッシュ径 $d_f=1 \mu\text{m}$ ）を設置することにより試料水中に直径 $1 \mu\text{m}$ 以上の異質浮遊粒子が混入しないよう配慮した。二重管式熱交換器の内管内表面は平均表面粗さ $\epsilon_m=0.2 \mu\text{m}$ （最大粗さ $\epsilon_{max}=0.4 \mu\text{m}$ ）の滑らかな表面性状を有する冷却面とした。なお、二重管式熱交換器は、3種類の内管内直径（ $d_i=4.2, 10.5, 15.4 \text{ mm}$ ）および冷却部長さ（ $l=100, 2800, 3800$ ）のものを使用した。最大過冷却度の測定は、二重管式熱交換器に流入する試料水入口温度 $T_{i,0}$ を一定温度（ $0.2 \sim 0.4^\circ\text{C}$ ）に調節し、任意の一定流量（ $Q=0.002 \sim 0.14 \text{ kg/sec}$ ）で行った。二重管環状部を流れる冷却ラインは、初期温度約 $0^\circ\text{C}$ を維持した後、一定の冷却速度（ $0.2 \text{ K/min}$ ）で徐冷した。ラインによる冷却開始と同時に試料水の二重管式熱交換器出入口温度、内管外表面温度等の経時変化を測定し、管内凍結の発生した時点での各測定データをもってそ

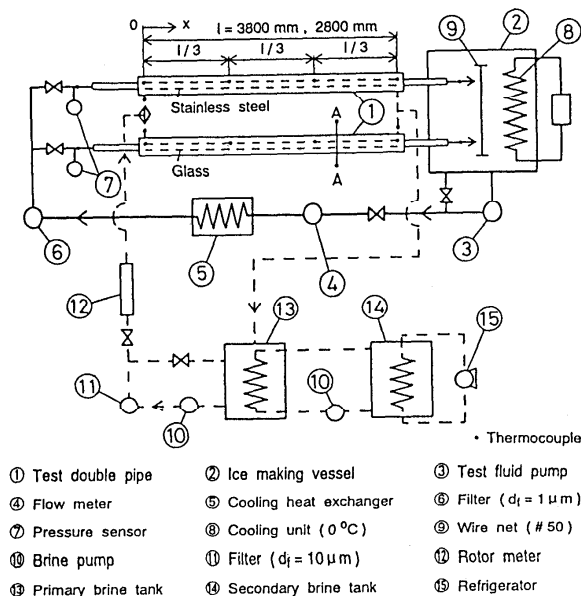


図6 流動過冷却水を利用した連続製氷システム

の実験条件における最大過冷却度とした。

図7は、試料水の管内平均流速 $u_m$ と内管内表面温度を基準とした最大過冷却度 $\Delta T_w$ の関係を各管寸法をパラメータとして示したものである。ここで、最大過冷却度 $\Delta T_w$ は、既在の熱伝達相関式を利用し冷却ラインと試料水の熱平衡式より算出される内管内表面温度の平均値 $T_w$ と凝固点温度 $T_f (=0^\circ\text{C})$ の差（ $\Delta T_w = T_f - T_w$ ）と定義してある。管寸法によらず最大過冷却度 $\Delta T_w$ は、管内平均流速 $u_m$ の増加と共に減少しており、高流速域ではほぼ一定の $\Delta T_w$ となっている。また、 $\Delta T_w$ の絶対値は、管内径 $d_i$ による顕著な影響は観察されないが、冷却部長さ $l$ が短いものほどより大きな値を示す傾向にある。これは、 $u_m$ が大きいほど管内を流れる過冷却水量が増加し、その結果不均質核生成の要因となる異質浮遊粒子等の不純物質が管内を通過する確率が増大することに起因するものと考えられる。さらに、管長さ $l$ が短いほど試料水が過冷却状態となって流動する距離が減少するために、このような不均質核生成の確率が減少し $\Delta T_w$ が増加しているものと予想される。

次に、試料水の流れ状態を表すRe数による管内流れ場の最大過冷却度に対する影響を考察する。図8は、管内表面温度を基準とした最大過冷却度 $\Delta T_w$ とRe数（ $=u_m \cdot d_i / \nu$ 、 $\nu$ :試料水の動粘性係数）の関係を示したものである。図中破線間で示される領域は、一般的に言われる静止

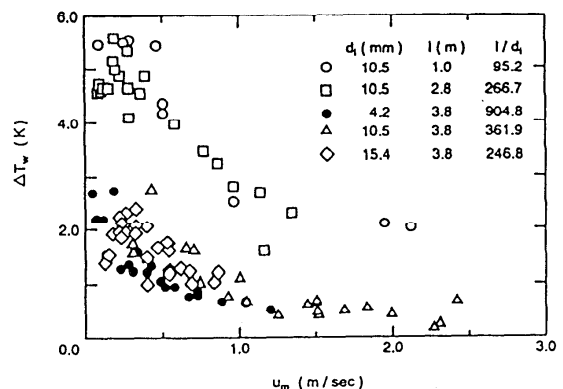


図7 管内平均流速と最大過冷却度の関係

状態にある水道水の最大過冷却度領域を示している。乱流域( $Re > 2300$ )においては $Re$ 数の増加に従い $\Delta T_w$ は低下しており、他方、層流域( $Re < 2300$ )においては $Re$ 数による $\Delta T_w$ の顕著な変化は観察されずほぼ一定の値を示している。これより、乱流域では最大過冷却度 $\Delta T_w$ に対する管内の流れ場、すなわち過冷却水の対流の影響が明確に存在するものと考えられるが、 $Re$ 数の小さな層流域ではそのような影響は比較的小さいものと考えられる。最大過冷却度 $\Delta T_w$ は、管内径 $d_i$ の増加および管長さ $l$ の低下に伴い増加する傾向にあり、管寸法の最大過冷却度に及ぼす影響が伺われる。しかしながら、管内凍結の発生が分子レベルの現象である氷結晶核の生成機構に依存することおよび可視観察の結果、凍結の発生が管壁近傍で起こること等から判断して、管内径および管長さ等の巨視的因子の影響が直接的に関与しているとは考えられず、壁面近傍に存在する管寸法と関連した温度境界層厚さあるいは壁面近傍の温度勾配等に影響されているものと考えられる。以上の結果から、流動状態における水の最大過冷却度は、静止状態のそれと比べ一般には小さなものとなり、その値は管内表面温度を基準とした最大過冷却度で $0.5 \sim 6$  Kの範囲にあるものと思われる。

### 3. 管内流動過冷却水を利用した連続製氷

本節では、前節で得られた管内流動過冷却水の最大過冷却条件に基づき、その最大過冷却条件下の過冷却安定領域において実際の製氷運転を行い、連続製氷の可能性、流動過冷却水の過冷却解消より得られる氷性状ならびに製氷効率に関して検討する。二重管式熱交換器より噴出落下する過冷却水は、製氷槽内の金網への衝突のエネルギーまたは予め金網上に置かれた氷片を結晶核として氷結晶の発生、成長が見られ、金網上に連続的に氷結晶の堆積が起こる。金網上での氷結晶生成状態が過冷却度に依存することを示したものが図9である。図9(a), (b)は、二重管式熱交換器より流出する過冷却水温度 $T_{out}$

を基準とした過冷却度 $\Delta T_{out} (= T_i - T_{out})$ がそれぞれ $\Delta T_{out} = 0.3, 2.1$  Kの場合に製氷槽内の金網上で観察された製氷状態を示したものである。過冷却度 $\Delta T_{out}$ が比較的小さな図9(a)の場合には、生成された板状の氷結晶が流下する氷結晶の上流方向へ順次成長し、重力方向と逆方向へ成長する氷柱を形成している。一方、過冷却度の大きな図9(b)の $\Delta T_{out} = 2.1$  Kの場合には、その大きな過冷却度による急速な氷結晶の成長を余儀なくされ、表面積の大きな微細な粒子状あるいは針状の氷結晶構造となり、金網上に比較的分散した形で氷結晶が生成されている。

図10(a), (b)は、図9(a), (b)と同様の条件下で生成された氷結晶の拡大写真を示したものである。過冷却度の小さな図10(a)の場合には、含水割合の小さい平板状氷結晶が順次成長成長したような氷結晶状態を示しており、一方過冷却度の大きな図10(b)では含水割合の大きな粒子結晶構造を有したいわゆるシャーベット状の氷組織となっているのが観察される。

次に、二重管式熱交換器より放出される過冷却水から生成される氷の製氷効率に関して検討する。製氷効率は、単位時間当たり生成される氷の正味質量と二重管式熱交換器より排出される過冷却水の質量流量の比、すなわち単位時間当たりの排出過冷却水量に対する生成氷質量割合として定義される。流動過冷却水による製氷量は、過冷却状態の解消を液相から固相への

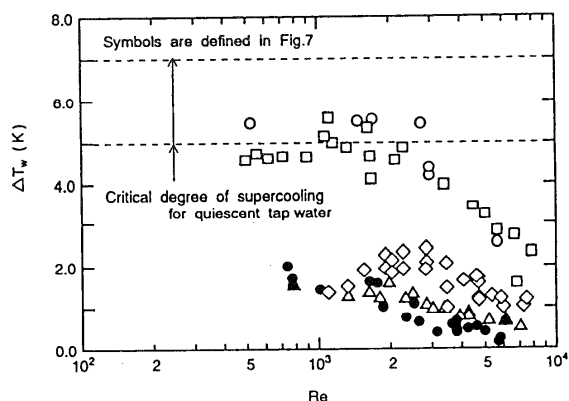


図8 試料水 $Re$ 数と最大過冷却度の関係

断熱的な相変化と仮定すれば、過冷却水が有する過冷却温度から凝固点温度までの顕熱量と生成される氷の潜熱量の関係から、理論製氷効率  $\eta_{th}$  が求められる。

$$\eta_{th} = m_i / Q = C_p \cdot \Delta T_{out} / L \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $m_i$ : 単位時間当たりの生成氷質量 (kg/sec),  $Q$ : 過冷却水質量流量 (kg/sec),  $C_p$ : 過冷却水の定圧比熱 (J/kgK),  $L$ : 水の凝固潜熱量 (J/kg) である。

図11は、製氷効率  $\eta$  (%) と過冷却度  $\Delta T_{out}$  の関係を示したものである。図中の実線は、式(2)より求められる理論製氷効率  $\eta_{th}$  を示したものである。なお、製氷効率の測定は、過冷却水より生成される氷が含水状態にあることから直接氷味質量を測定することは困難であるために、熱量計を利用し間接的に求めたものである。製氷効率の実測値は、過冷却度  $\Delta T_{out}$  の増加に従い単調に増加する傾向にある。また、製氷効率の実測値と理論値を比較するとその両者は良く

一致している。従って、流動過冷却水からの製氷量は、その理論式(2)より算出することが可能であることがわかる。

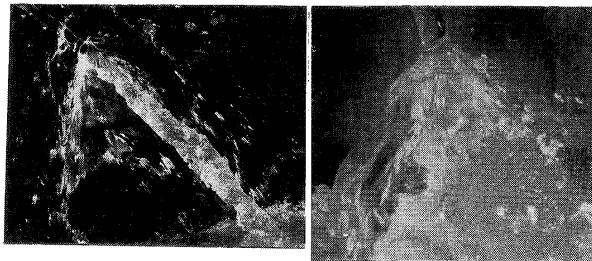
#### 4.まとめ

本稿は、過冷却現象を利用した製氷技術と題して、水の静止および流動状態における過冷却現象に関する基礎的知見および実際に二重管式熱交換器を利用した連続製氷システムの製氷状態ならびに製氷量等について述べた。そして、流動過冷却水を利用した連続製氷システムが今後有望な製氷方法となる可能性を示唆することができたのではないかと思う。

なお、過冷却現象に関しては、本稿は工学的視点から比較的マクロな因子の影響を中心として述べたが、氷結晶核の生成が水分子クラスタの発生、成長に基づく分子レベルの現象であることを考慮すれば、今後よりミクロな観点から検討されるべき現象であるように思われる。

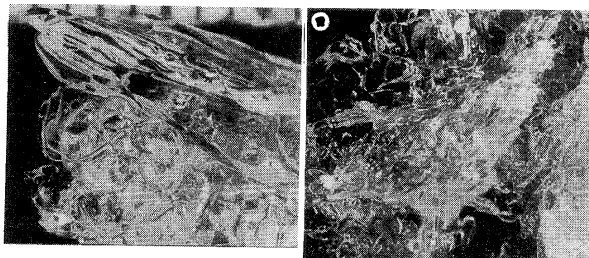
#### 参考文献

- (1) 稲葉, 福迫, 機械の研究, 41-6(1989), 741.
- (2) 木下, 雪と氷のはなし, (1988), 216., 技報堂出版
- (3) 稲葉, 他2名, 機論, 58-548(1992), 1321.
- (4) 稲葉, 武谷, 機論, 59-567(1993), 3557.
- (5) 稲葉, 武谷, 機論, 60-578(1994), 218.
- (6) 長島, 中村, 伝熱シンポ, A301(1977), 88.



(a)  $\Delta T_{out} = 0.3K$       (b)  $\Delta T_{out} = 2.1K$

図9 製氷状態



(a)  $\Delta T_{out} = 0.3K$       (b)  $\Delta T_{out} = 2.1K$

図10 流動過冷却水より生成された氷結晶

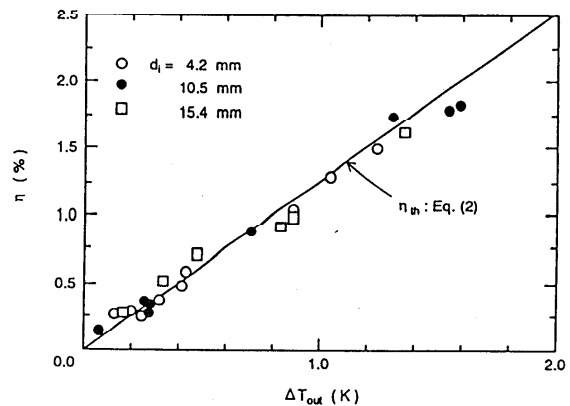


図11 過冷却度と製氷効率の関係

# 非水溶性不凍液によるフラジルアイス製造技術

渡辺 裕 (東芝)

## 1. はじめに

近年、工業的に氷を利用する試みは増大する傾向にあり、建設現場でのコンクリート混練装置、アイスブラストショット、海水淡水化装置など、氷の持つ高密度低温熱エネルギー以外に着眼した研究も散見される。

一方、氷の持つ0℃での蓄熱効果を電力負荷の平準化装置として利用する努力が電力各社にて成されている。これは電力消費の年間ピークが夏の昼間、特に午後1時から4時の間に発生し、その40%が冷房空調に消費されている事と、このピーク値に対し夜間電力消費は半分以下である事に関連する。

弊社でも、簡潔な構成で使い勝手の良い氷蓄熱装置を開発中であり、解氷性の良いシャーベット状の水製造を目指している。

工業的に氷を製造する手法の多くが、水を低温伝熱面から冷却し、伝熱面上に氷を成長させるものである。これに対し、筆者らの用いた手法は自然界でのフラジルアイス (Frazil Ice) 形成メカニズムと類似のものである。

フラジルアイスという氷をご存知の方はあまり多くはないと思う。自然界では、低温伝熱面が水中に存在する事は希で、低温源は(放射冷却を除けば)もっぱら大気である。

低温大気が水面を冷却し、水温が氷点下となった後に、何らかの原因で水中に多数の氷結晶が出現する。この時に発生する氷をフラジルアイスと呼ぶ。発生したフラジルアイスは微細な円盤状で、水中を浮遊する間に互いに接触し綿菓子状 (Floc Fracture) となる。

フラジルアイスに関する研究の多くは、寒冷地での水力発電所取水口や河などの水利確保から、凍結メカニズムの解明を目的になされている。(1) (2) (3)

筆者らの狙いは、フラジルアイス発生過程を工業的に成立させ、0℃のシャーベット状水を簡潔な構成で

製造する事にある。

本報告は、弊社での氷蓄熱装置の開発過程で得られたフラジルアイスに関する知見をまとめたものであり、今後、必要性が益々増加するであろう低温利用技術の研究一助となれば幸いである。

## 2. 非水溶性不凍液によるフラジルアイスの製造

氷は通常、水中の低温伝熱面に着氷した後に成長する。低温源が水と不溶の流体であった場合、水中へ冷熱は供給されるものの低温固体面が存在しない為、氷の発生核がなくマクロ的過冷却状態を容易かつ安定的に実現できる。筆者らの製氷手法はこの原理を用いたものである。図1に製氷装置の構成概念を示す。

水槽底部に貯溜される不凍液をポンプにて冷凍機へ送り、低温化の後、水槽内部に設置されたノズルから水中へ流出させ、直接接触にて水を冷却する。流出した不凍液は自重で落下し水槽底部の貯溜部に回収される。

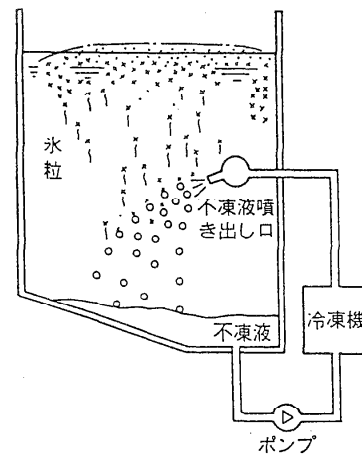


図1 製氷装置の構成概要

筆者らのこれまでの観察では、上述の製氷手法により製造される氷は外観的に次の3種に大別される。

この理由は定かではないが、発生過程に起因すると考えている。

- 1) 過冷却水中に無数に発生する微細で極めて薄い円盤状の水。
- 2) 水槽底部に低温の非水溶性不凍液を溜め、水を冷却する際に観察される薄い板状の水。  
界面が波打つ場合には、板状氷は細分化されたり表面にしわが発生する。
- 3) 浮遊する水が低温不凍液の落下流に取り込まれ、強い乱れに晒された際に発生する不定形な薄い板状氷。

これら3種の氷を全てフラジルアイスと呼ぶべきか否かは不明であるが、ここでは1)に紹介した極めて薄い円盤状の氷をフラジルアイスと称する事とする。

円盤状のフラジルアイスが形成されるメカニズムは不明であるが、マクロ的過冷却状態の水中へ何らかの理由で氷核が供給された場合、氷は周囲の過冷却水から方向性なく冷熱を奪いつつ成長する事ができる。この為最も成長の早い結晶面での自由成長の結果、真円に近い形状となると考えている。

自然界での氷核は雪などが挙げられるが、筆者らの方式では低温不凍液中に存在する微量な水分の結晶が氷核として作用すると考えられる。

### 3. 落下不凍液の挙動

図2は水中を落下する不凍液の状況である。

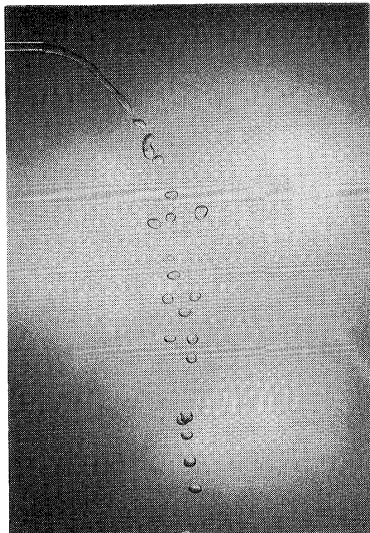


図2 水中を落下する不凍液

実際の装置では循環不凍液量は多量であり、激しく水と混合しつつ落下する状態となる。

水中を落下する不凍液は直径が数ミリ以下の液滴となり、水滴表面は揺動する。従って伝熱面積の増大と、直接接点の条件から良好な熱伝達が確保される。

図3は静水中を落下する不凍液(単独液滴)の速度と液滴径の関係である。実際には静水中の自由落下と言えども不凍液流が周囲の水を巻き込み、水槽中に対流を形成するので落下速度は加速される。

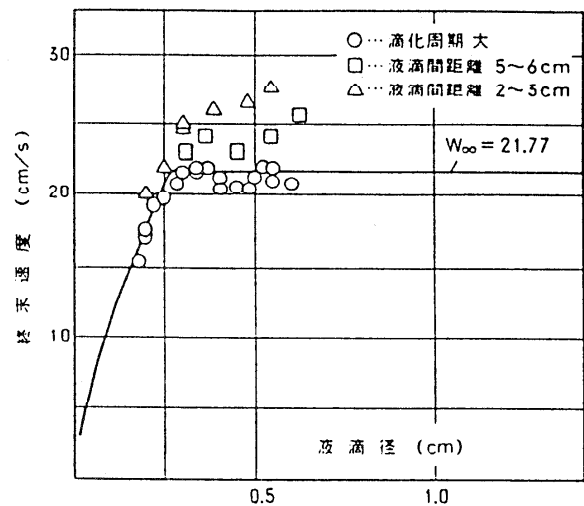


図3 水中を落下する不凍液(単独液滴)の液滴径と落下速度の関係

液中を落下あるいは浮上する液滴の伝熱問題は化学工業分野で扱われる事が多い。

図4は、筆者らが実施した水温一定(15°C)の水中に、-4°Cの不凍液を直径5mmのノズルから毎秒10cc鉛直下方へ落下させた際の液滴温度の計測結果である。

温度は直径0.03mmの銅・コンスタンタン熱電対を液滴が横切る際の最大起電圧から求めた。

図中の実線はConkieら<sup>(4)</sup>による内部循環を伴う単一液滴(液滴径5mm)の熱伝達解析からの算出結果である。この計測結果よりConkieらの単一液滴の等価熱貫流率を用いれば実際の熱交換状況を安全側に評価できることがわかる。

温度差が小さくなる下流領域で落下不凍液の温度がConkieらの解析結果より低めに計測されているのは、液滴が誘起する水流による影響と考えている。



液滴の集合体として、マクロな熱伝達を評価する場合には、熱交換部の単位容積あたりの交換熱量と両流体の対数平均温度差にて整理される容積熱伝達率を用いるべきであるが、熱交換容積の定義が困難である事から実施していない。

但し、傾向として製氷が開始されると、低温不凍液が氷を形成しつつ落下する熱交換過程となり、明確に熱交換性能が向上する。

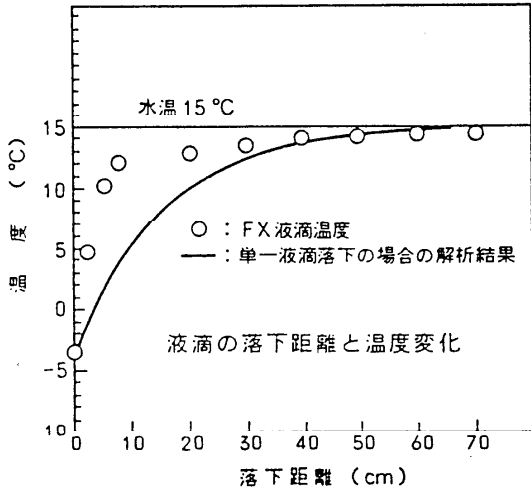


図4 不凍液の水中落下時温度変化

#### 4. フラジルアイスの形成

Ettema ら<sup>(15)</sup> はフラジルアイスを人工的に製造し、その際の水温変化やフラジルアイスの成長状況を観察し独自の観点から整理している。

Ettema らは、小型容器 (340mm×150mm×200mm) 内の水を容器側面に設置した冷却器により過冷却 (-0.9°C 程度) とした後、水中に設置したアジテータを回転させ、氷核投入後の水温上昇とアジテータ回転数との関係を中心に観察している。

これに対し、筆者らの方法は、水槽内の一部領域を常に過冷却状態とし、フラジルアイスを初生させた後、水槽全域で成長させるものである。実験では、水槽内は全域にわたり弱い過冷却状態である事が確認されている。

図5に使用した試験装置を示す。

不凍液のノズルは水槽壁面 (不凍液と水の界面上方 1 m) に設置し、水槽内部の約 1.2 トンの水を法定冷

凍能力 12.2 トンのチリングユニットにて冷却した。

使用した不凍液、冷凍機、ポンプなどを表 1 に記す。

使用冷凍機は市販の汎用チラーでありエチレングリコールの代わりに不凍液を流下・冷却して実験を行った。

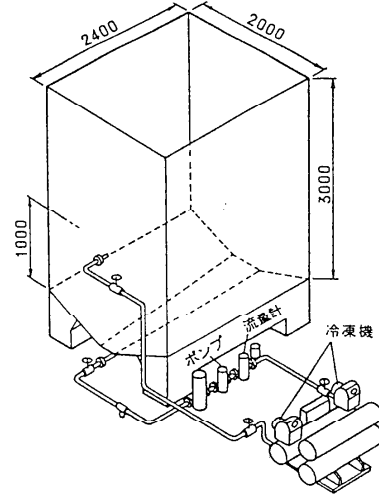


図5 水蓄熱装置を念頭に置いた試験装置

表1 使用不凍液、機器類の一覧

不凍液	$C_8F_{18}$ (パーフルオロカーボン) 密度 1800 kg/m <sup>3</sup> 凝固点 -65 °C 沸点 101 °C 動粘性係数 $0.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 熱伝導率 65 mW/m/K 比熱 1.1 kJ/kg/k
水槽	鉄板製上部開放型 簡易断熱 縦・横・高 2.4m・2.0m・3.5m
冷凍機	東芝チリングユニット RUW-302R 使用冷媒 R-22 法定冷凍能力 12.2トン モータ 200V-22.5kW
不凍液循環ポンプ	縦型サイロポンプ 能力 210 l/min (10m Aq) モータ 200V-0.75kW

図6は不凍液を毎分130リットル循環させた際の製氷開始前後の水槽内部の温度変化である。曲線Aはノズルから落下する不凍液が僅かに接触する領域に設置された温度計の変化であり、曲線Bは不凍液の落下領域から離れた箇所に設置された温度計の変化である。

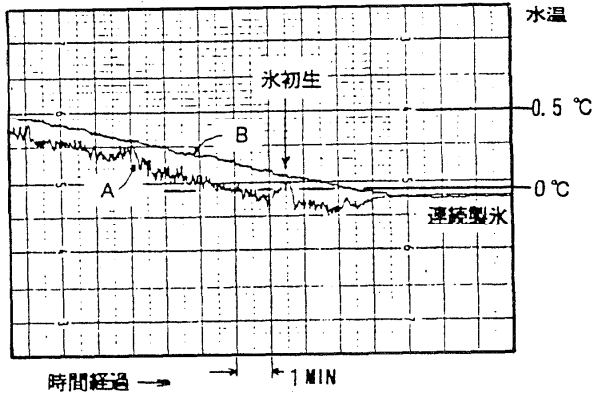


図6 製氷開始前後の水槽内部の温度変化例  
A：不凍液の落下領域の近傍箇所  
B：不凍液落下領域から離れた箇所

製氷開始直前に曲線Aの温度は約0°Cに上昇し再び-0.2°Cに低下する。その後、水槽内部の水温(弱い過冷却)に一致する。この一連の変化を考察すると、最初の0°C→-0.2°Cへの温度変化はセンサーへの氷付着と離脱である。次の温度上昇はセンサーへの氷付着であるが再離脱のない状況と考えられる。このことから、不凍液の落下領域では強い過冷却域であり、それ以外の水槽内部は弱い過冷却状態である事がわかる。

従って、不凍液の落下領域にて発生したフラジルアイスは水槽内部を浮遊する間に成長する事が可能である。

図7は水槽から採取されたフラジルアイスである。形状は薄い円盤であり、光のあたり具合で斜めの物は楕円形に見える。フラジルアイス発生直後は円盤直径が1~2mmの微細結晶であるが数分後には直径10mm程度まで成長するものが見られる。更に水槽内部で成長したフラジルアイスは円盤の真円度が低下し、図8に示す様に円盤周囲に小円盤(フレアー)をつけた様な形状となる。図9はフラジルアイスが互いに集まって形成された綿菓子状(Floc Fracture)のフラジルアイス

である。

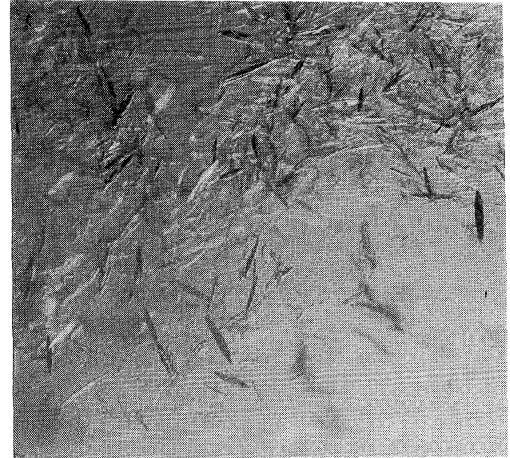


図7 代表的なフラジルアイス

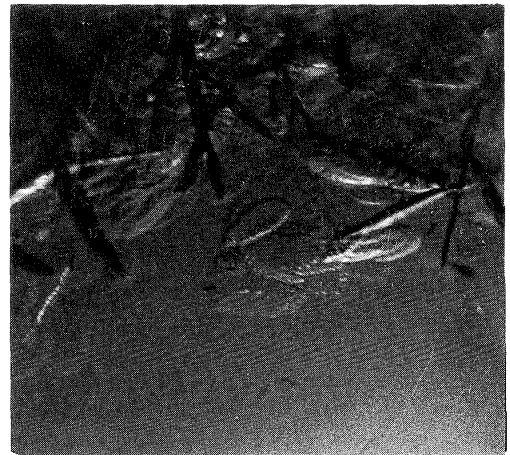


図8 十分に成長したフラジルアイス

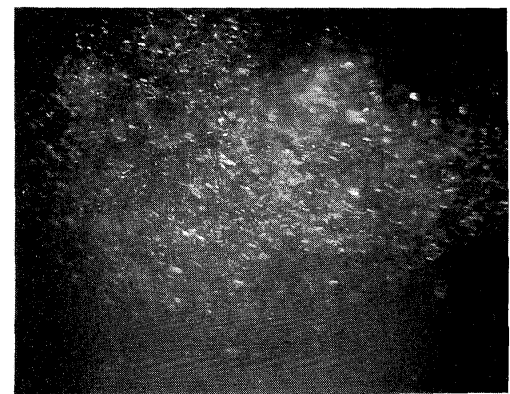


図9 綿菓子状に集合したフラジルアイス

このフラジルアイス水槽内に長期間(数日)放置すると浮力と重力により互いに焼結する。図10はこの状態の水である。板状となり一つ一つの寸法は増大するが巨大化はしておらずシャーベット状を保っている。

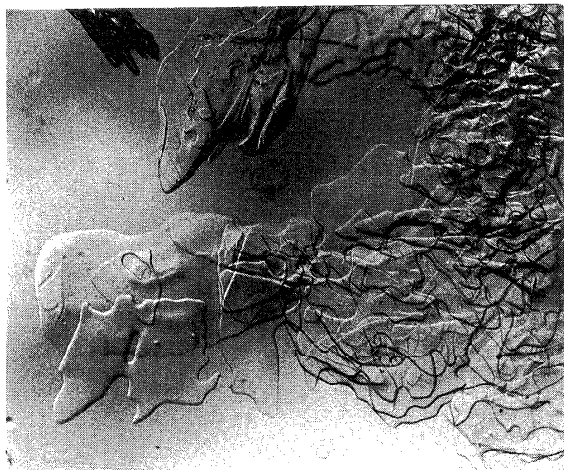


図10 3日間放置の後、水槽から採取された氷

## 5. おわりに

筆者らが開発中である氷蓄熱装置の原理と形成されるフラジルアイスの概要について紹介した。

物質が温度低下により液相から固相へ変化する事はマクロ的には容易に理解できる。しかしながら、その際の熱の移動方向が結晶成長、凝固形態にどのような影響を与えるかについては不明な点が多い。今後、水の結晶成長形態の一つとして是非、解明して頂ければと思う。

筆者らの研究(6)(7)(8)(9)(10)(11)以外に工業的なフラジルアイス製造の報告は知見しないが、非水溶性不凍液と水との直接接触熱交換を用いた手法は熱交換効率が高くシャーベット状の氷が形成される事から有望な氷蓄熱技術であると考えている。

フラジルアイスはわが国でも冬季日常的に観察されている水である。雪との区別がつきにくく明確な認識は薄いだが、地方によっては独特の名称を与えている所もある。

我々の最も身近な物質である水の凝固点(氷点 $0^{\circ}\text{C}$ )は低温利用技術の入口標識の様なものである。

筆者らが初めて水槽中に目撃したフラジルアイスは

冬山でのダイヤモンドダストの様に非常に印象的であった。

今後、多くの技術者、研究者が低温領域での、物質あるいは生体が示す様々な特性を明らかなものとし、新たな価値の創造を行う事と思う。筆者らも及ばずながら低温利用技術の確立に尽力する次第である。

終わりに、筆者らの手法による氷がフラジルアイスと類似である事など幅広い低温技術をご教示頂くと共に、発表の機会を与えて頂きました岡山大学、稲葉教授殿に感謝致します。

## 参考文献

- (1) Martin, S. (1981).  
[Frazil ice in rivers and oceans]  
Ann. Rev. Fluid Mech., 13:379-397
- (2) Muller, A. and Calkins, D. (1978).  
[Frazil ice formation in turbulent flow]  
Proc. Int. Assoc. of Hydr. Res., Sympo. on Ice, Lulea, Sweden
- (3) Osterkamp, T. E. (1978).  
[Frazil ice formation : a review]  
J. Hydraulics Div., ASCE, Sep. :1239-1255
- (4) Conkie, W. R. and Savic, U. P. (1953)  
[Calculation of the influence of internal circulation in a liquid drop on heat transfer and drag]  
Ottawa, National Research Council of Canada Div. Mech. Engng., Rep. MT-23
- (5) Ettema, R., Karim, M. F. and Kennedy, J. F. (1984)  
[Laboratory experiments on frazil ice growth in supercooled water]  
Cold Regions Science and Technology, 10:43-58
- (6) 渡辺他「非水溶性不凍液による氷蓄熱装置の開発Ⅰ」  
日本機械学会 第69期通常総会講演論文集 B(1992)
- (7) 野間他「非水溶性不凍液による氷蓄熱装置の開発Ⅱ」  
日本機械学会 第69期通常総会講演論文集 B(1992)
- (8) 渡辺他「フラジルアイス形成の実験的研究」  
第30回 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1993)
- (9) 渡辺他「非水溶性不凍液による氷蓄熱装置の開発Ⅲ」  
日本機械学会 第71期全国大会講演論文集 D(1993)
- (10) 渡辺他「非水溶性不凍液による氷蓄熱装置の開発Ⅳ」  
第31回 日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1994)
- (11) Watanabe, Y., Yamasita, K., Hachimonji, T. and Noma, T. (1995)  
[Experimental study on frazil ice formation and characteristics of direct heat transfer between two liquids]  
Pro. 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow, 3:EN-25

# 氷水搬送による冷房と熱交換器の性能

浜岡幸夫、富山靖司(前川製作所) 栗山知広(日建設計) 森川大和(関西電力)

## 1. はじめに

地域冷暖房は環境保全、省エネルギー化、各建物における熱源設備が不要など、多くの利点を備えている。しかし、経済性においては、各建物に熱源を設置する個別空調方式に比べて必ずしも勝っているとは言えない。経済性を圧迫する最も大きな要因として、各建物に熱を供給するための地域導管の建設費がある。中でも冷水導管の建設費は最も大きく、ビルのインテリジェント化に伴う冷房負荷の増大と相まってその費用は増加する傾向にある。

地域冷暖房導入の大きな弊害となっている冷水導管の建設費の削減や搬送動力の低減を図るため、「氷水搬送による地域冷房システム」の共同研究を進めてきた。<sup>1)~4)</sup>

氷水搬送方式では氷の潜熱(80kcal/kg)も利用するので、単位流量当たりの冷熱量が大きくできる。冷水搬送方式との比較を表1に示す。

表1 搬送方式による冷熱量の比較

冷水搬送方式		氷水搬送方式	
単位流量当たりの冷熱量 (単位: kcal/kg)			
顕熱量	13-6=7	13+2=15	
潜熱量	0	80×0.3=24	
合計	7	15+24=39	

即ち、冷房負荷が同じ場合、氷水搬送の供給流量は冷水搬送流量の約1/5になる。その結果、導管口径が1/2となり、また搬送動力も大幅に削減できる。

このような利点を備えた氷水搬送システム実用化の目処が得られたので、研究内容の概要と熱交換器に氷水を流した時の伝熱性能について紹介する。

## 2. 研究概要

### 2.1 研究の目的

地域冷房の冷熱搬送媒体として氷水を活用するシステムを開発し、

(1) 地域導管口径の1/2

(2) 搬送動力の大幅な削減

を図ることを目的とする。

### 2.2 システムの概要と構成要素

地域冷暖房プラント内に製氷機と貯水槽(蓄熱槽)を設置し、割安な夜間電力を活用して流動性の優れたシャーベットアイス(氷)を製氷する。その氷を地域冷暖房プラント建物の基礎梁空間部に蓄熱する。冷房負荷時、蓄熱した貯水槽から氷水を取り出し、氷水搬送ポンプで需要側の熱受入設備へ氷水搬送(氷充填率 IPF=20~30%)にて冷熱を供給するシステムである。構成要素を図1に示す。

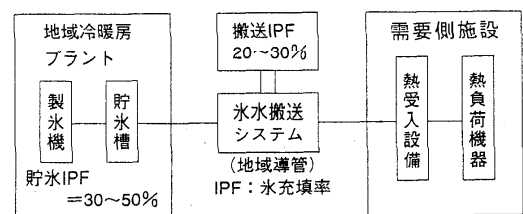


図1 氷水搬送による地域冷房システム

### 2.3 ダイナミックアイスのメリット

- 〔製氷〕 加熱剥離式製氷方式。(高圧液で伝熱部を加熱し、氷厚2~3mmで剥離させる製氷方式)
  - ① 蒸発温度(-5~-7℃)が高く、COPが良い。
- 〔貯氷〕 ② 高IPFとコイルのメンテナンス不要で、蓄熱スペース縮小。
  - ③ 氷のフリッジングがなく、残氷管理が不要。
- 〔搬送〕 ④ 導管口径が1/2、搬送動力は1/3に低減。
  - ⑤ シャーベットアイスで、急激な負荷増に対応可能。
  - ⑥ 低温空調など冷熱利用技術が拡大。
  - ⑦ 水量調整で、過小負荷にも対応可能。
  - ⑧ 将来の負荷増への対応もできる。

### 3. 技術課題とその成果

「氷水搬送による地域冷房システム」のイメージ図を図2に示す。本システムは、氷の潜熱を蓄熱のみならず冷熱搬送にも利用しているため、氷が残っている間はプラントから供給した低温を維持し続ける。冷水搬送の導管方式は往復2管式となるが、氷

水搬送では図2に示すようなループ1管式も可能となる。氷水搬送方式で得られるメリットは数多いが、このシステムを実現化するためには、製氷方式から始まり氷の持つ付着性にまつわる種々の課題を克服する必要がある。表2に、本システムを実現するための技術課題とその成果を示す。

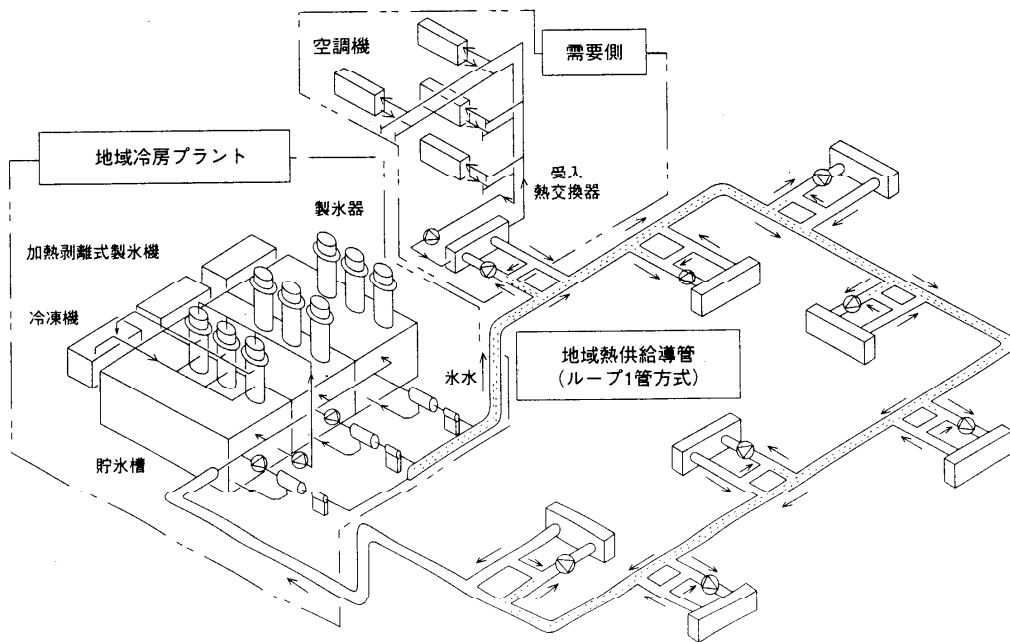


図2 氷水搬送による地域冷房システム

表2 本システムの技術課題とその成果

No.	技術課題	研究の成果
1	製氷方式	氷厚2~3mmで剥離させる加熱剥離方式の採用。蒸発温度-6℃でシャーベットアイスの生成。COP=3.6
2	冷熱媒体	ブライン氷は清水氷より付着力が弱く、流動性が良い。ブライン温度が室温でも腐敗は生じない。
3	貯氷IPF	氷取出しの場合、最大IPF=40%。氷点降下を利用したブライン温度の検出によるIPFの自動計測。
4	氷水取出し	貯水槽の取出し部などに水中ミキサーを設置し、攪拌による安定した氷水取出しが可能。
5	搬送ポンプ	通常の渦巻きポンプでも使用可能。ポンプの特性として、氷混入による動力増加はほとんどない。
6	搬送IPF	水溶液と氷の密度差を利用し、質量流量計で精度良くリアルタイムに計測が可能。
7	閉塞の防止	取出部に氷塊防止板の設置で無閉塞。防止板開口部の孔径は搬送系の最小隙間で設計。
8	圧力損失	氷混入による圧損の増加率は低速で高IPF程大きい。配管を選定する流速での増加率は10%以下。
9	氷水分岐	運転制御上において等IPF分岐の必要性は全くないが、主管とはほぼ同じIPFでの分岐は可能。
10	導管方式	往復2管式その他、ループ1管式も可能。また、冷水のみ熱受入施設に供給することも可能である。
11	氷水熱交	氷の潜熱で冷却能力の増加。従来のプレート熱交換器でも閉塞なく、氷水を流すことは可能。
12	冷熱制御	高負荷時は高IPF、低負荷時は低IPFを維持し、流量制御による冷熱供給方式。

#### 4. 氷水熱交換器の伝熱性能

##### 4. 1 実験装置と氷水熱交換器の仕様

実験装置の系統図と計測機器を図3、表3に示す。

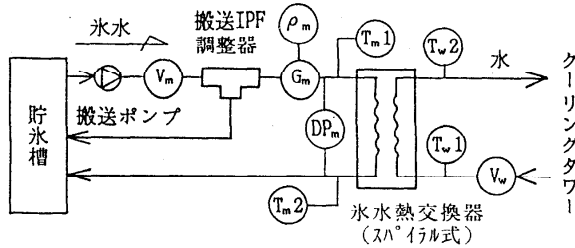


図3 氷水熱交換器・実験装置の系統図

表3 計測機器

記号	計測機器
$V_m$	電磁流量計
$G_m, \rho_m$	質量流量計
$T_{m1,2}, T_{w1,2}$	熱電対 (0.75級)
$DP_m$	差圧発信器
$V_w$	羽根車式流量計

氷水と冷水の熱交換器としてはスパイラル式を使用し、伝熱部の構造と熱交換器の仕様を、図4、表4に示す。スパイラル式熱交換器は、図4に示すような所定の伝熱面積を有する長いSUS板を渦巻き状に巻き上げ、2つの流路を構成させている。本実験では氷水を外周から中心部、負荷側冷水を中心から外周部へ流し、対向流にて熱交換を行った。

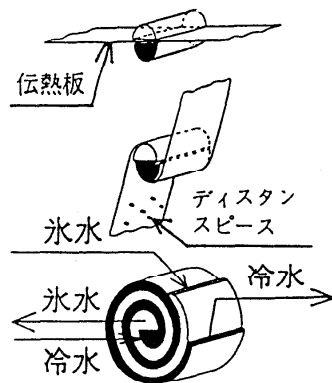


図4 伝熱部の構造

表4 スパイラル熱交換器の仕様

項目	仕様
伝熱面積	$A=1\text{m}^2$
流路断面積	$S=0.002\text{m}^2$ スキマ10mm、幅200mm (氷水側、冷水側ともに)
材質	SUS 316
設計圧力	$5\text{kg/cm}^2$ (両側ともに)
ノズルサイズ	40A (両側ともに)

##### 4. 2 氷水の圧力損失

実験条件としては、スパイラル式熱交換器の負荷側へ冷水を流さず、熱交換器内氷水流速を0.1~2.0 m/s、搬送IPFを0~30%にて、氷水側の圧力損失を差圧発信器にて計測した。なお、搬送IPF(氷充填率)は質量流量計の密度値から自動計測を行っている。

氷水搬送時における熱交換器内圧力損失の実験結果を図5に示す。図5から氷水圧力損失の特性としては、低速および高IPFではIPF=0%と比較して増加するが、高速になるに準じてIPF=0%に近づく。この特性は、水平直管における氷水の圧力損失と同様の傾向にある。実運転では熱負荷で氷が溶けるため、熱交換器入口IPFと熱負荷から出口IPFを算出し、出入口平均IPFによる圧力損失を図5から予測する。

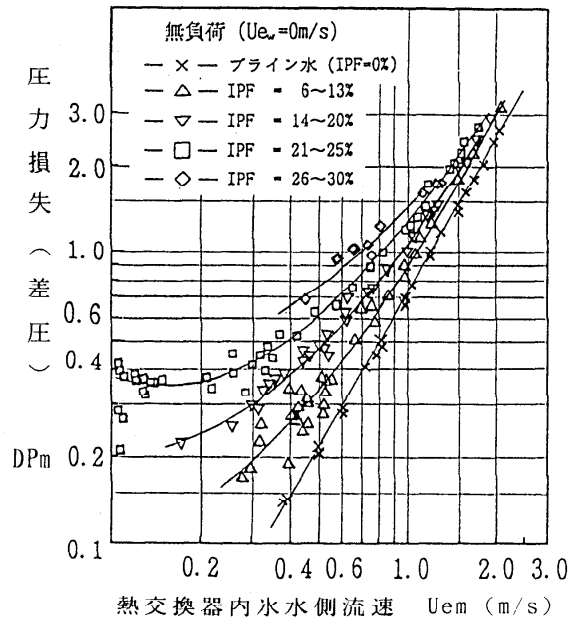
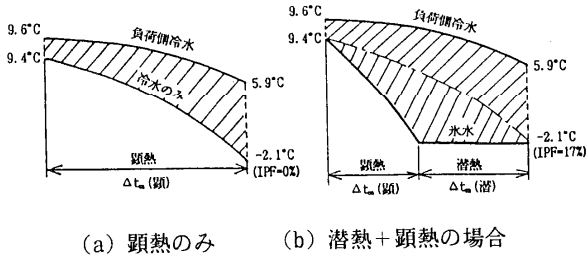


図5 熱交換器内の氷水圧力損失特性

### 4. 3 氷水-冷水の伝熱性能

氷水を熱交換器に流すと、氷の潜熱で伝熱壁温が低温に維持され、氷水と冷水の温度差が大となる。それに伴って冷却能力が増え、見かけ上の総括伝熱係数が増加する。熱交換器内における温度変化の状況を図6に示す。



(a) 顕熱のみ (b) 潜熱+顕熱の場合  
図6 氷水熱交換器内の温度変化

実験条件としては冷水側の流速 $U_{ew}$ を1.0m/sに固定し、氷潜熱による見かけの伝熱向上をカウントさせない為、熱交換器の出口から氷が流出する氷水流量を決めた。即ち、氷の潜熱のみで冷水と熱交換させ、氷混入による伝熱性能の変化を調べた。実験結果を図7に示す。

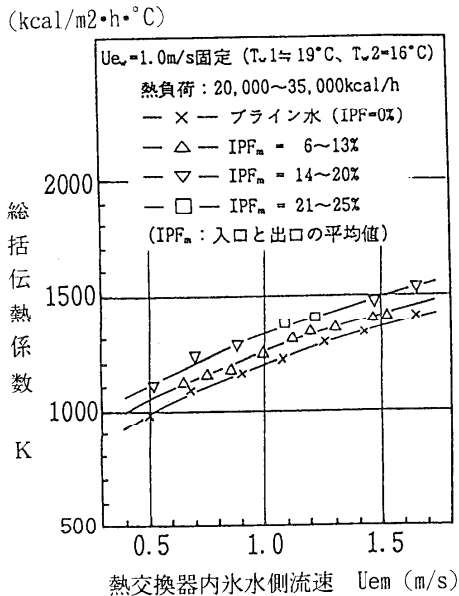


図7 氷水-冷水の伝熱性能特性

図7より、氷の混入した方が総括伝熱係数は向上し、熱交換器の出入口平均氷充填率 $IPF_m=14\sim 25\%$ で約10%、 $IPF_m=6\sim 13\%$ で約5%良くなった。

図7における総括伝熱係数 $K$ を算出する際の交換熱量は、図3に示す冷水側(ケリン'ター側)の流量 $V_w$ に温度差( $T_{w1}-T_{w2}$ )を乗じて求めた。

冷水側の熱交換器内流速 $U_{ew}=1.0\text{m/s}$ における境膜伝熱係数 $\alpha_w$ の値は、冷水と冷水との実験結果から $\alpha_w=2,600\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ となる。よって、氷水側の境膜伝熱係数 $\alpha_m$ は、総括伝熱係数 $K$ と冷水側の境膜伝熱係数 $\alpha_w$ から、次式(1)で算出することができる。

$$\alpha_m = \alpha_w \cdot K / (\alpha_w - K) \quad (1)$$

図7の氷水側・境膜伝熱係数 $\alpha_m$ の値を図8に示す。

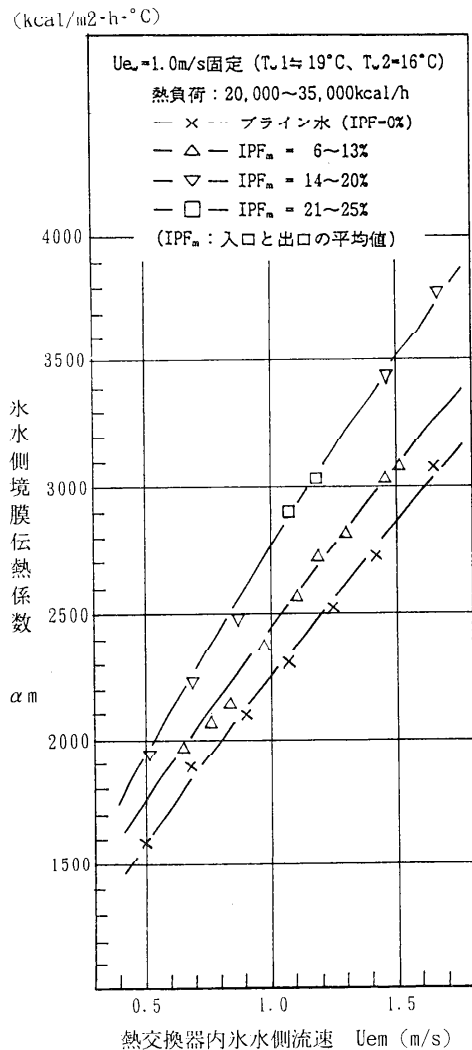


図8 氷混入による氷水側・境膜伝熱係数の特性変化

図8から、氷混入により氷水側の境膜伝熱係数 $\alpha_m$ は、熱交換器の出入口平均氷充填率 $IPF_m=14\sim 25\%$ で約20%、 $IPF_m=14\sim 25\%$ で約10%向上した。

## 5. 実証試験

### 5.1 試験装置の設計仕様

以上に述べた研究成果を基に、1992年7月～9月にかけて、関西電力(株)総合技術研究所構内の実建物を負荷とした氷水搬送による冷房試験を実施した。

試験装置の設計仕様を表5に示す。

表5 実証試験装置の設計仕様

建物	延床面積:1,200 [m <sup>2</sup> ]、冷房最大負荷:40 [RT]
システム	氷蓄熱および氷水搬送による冷房システム
製氷機	製氷能力:20 [RT]、圧縮機:レシプロ式4気筒電動機:30 [KW]、冷媒:R-22 冷熱媒体:プロピレングリコール水溶液(濃度6wt%) 製氷器:堅型シェルアンドチューブ式3基(管内製氷) 凝縮器:水冷・横型シェルアンドチューブ式
貯水槽	蓄熱容量:200 [RT・h]、貯氷IPF:40 [%] 保有水量:18.9 [m <sup>3</sup> ] 外径寸法:W2m×L7.5m×H1.85m
冷熱供給	搬送配管サイズ:氷水32 [A]、冷ライン水50 [A] 搬送距離:往復で約150 [m] 受入熱交:スパイラル式熱交×2基

### 5.2 試験装置の外観と冷房システムフロー

氷水搬送により冷房の実証試験を行った建物の外観を写真1に示す。製氷・貯氷および主搬送ポンプなどを収納したマシンケースを建物の脇に設置した。

屋上には、受入熱交換器と氷水流量を制御する副搬送ポンプを設置し、その間を搬送配管にて接続してある。その設置状況を写真2に示す。冷熱搬送距離は往復で150mあり、地上と屋上を結ぶ搬送配管には約8mの立上がり管がある。

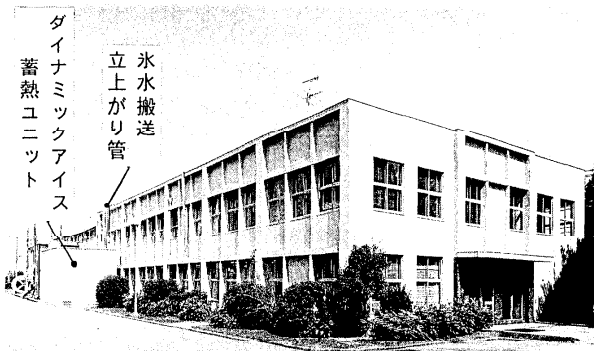


写真1 氷水搬送による冷房実証試験の建物

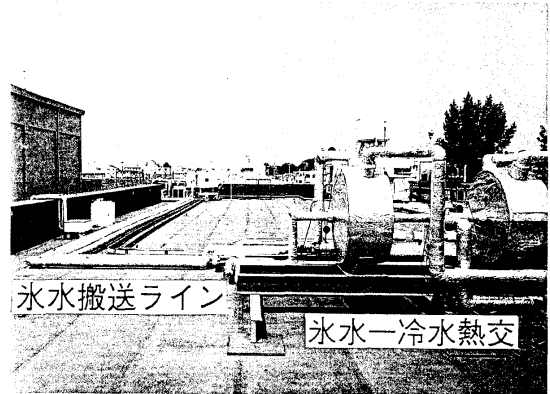


写真2 屋上に設置した受入熱交換器と搬送配管

冷房システムフローを図9に示す。貯水槽の上部に設置した加熱剥離式製氷器(3基)で造られる氷は、夜間電力を利用し、所定の貯氷IPFで貯水槽に蓄水される。なお、貯氷IPFは貯水槽内のブライン温度で検出し、製氷機は設定IPF値になると自動停止となる。冷房運転時には、攪拌機、主搬送ポンプ、搬送IPF調整器などにより、適切な搬送IPFで受入熱交換器へ氷水搬送される。

受入熱交換器では、氷水と空調機からの負荷側冷水が熱交換され、設定された冷水温度(6°C)で空調機に供給される。なお、冷水温度は受入熱交換器に供給する氷水量で調整される。氷水量の制御は副搬送ポンプの回転数により、空調機への冷水温度を一定に保持するようにした。

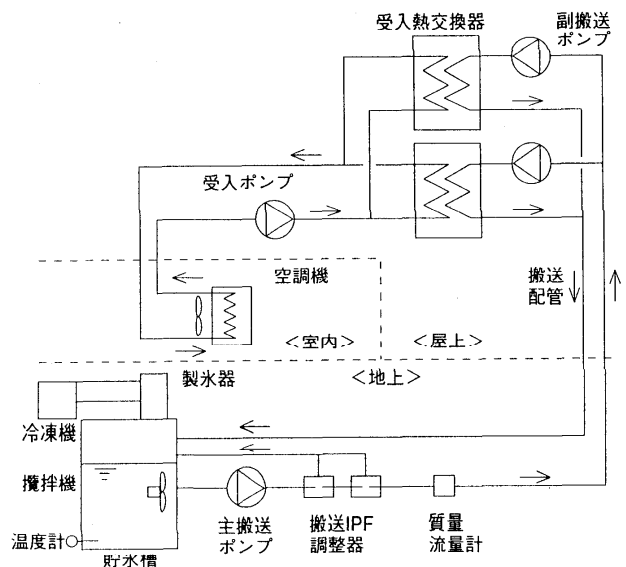


図9 氷水搬送による冷房システムフロー



### 5.3 蓄熱および冷房の運転状況

製氷蓄熱運転における特性経時変化例を図10に示す。8時間の蓄熱運転で貯氷IPF=35%、製氷中の蒸発温度は-6°C、冷凍機のCOP=3.6の結果が得られた。なお、凝縮温度=40°Cの保持は、節水弁により制御した。

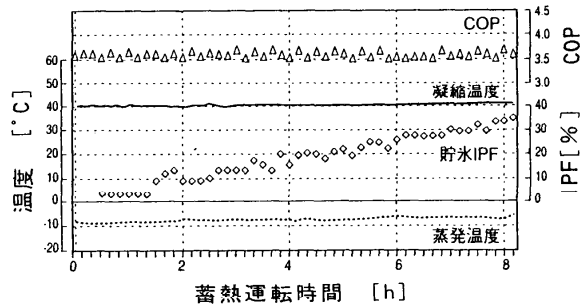


図10 製氷蓄熱運転時における特性経時変化(例)

氷水搬送による冷房運転状況の一例を図11に示す。冷房負荷は50~60kW(14~17RT)、貯氷IPF=40~5%、搬送IPF=25~30%で、負荷側空調機への冷水温度を6°C一定に保持している状況である。

冷房負荷が当初予想の1/2~1/3と小さく、配管32Aでの平均氷水流速が0.3~0.5m/sであった。また、受入熱交換器入口の配管サイズは50Aで、流速は0.1~0.2mm/sのかなり低速となったが、閉塞による問題もなく安定した冷房運転ができた。

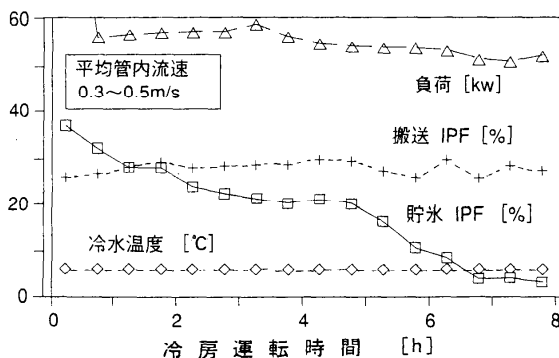


図11 氷水搬送による冷房の運転状況(例)

### 5.4 実証試験のまとめ

氷水を冷熱媒体とした冷房システムの実証試験を行い、次の知見が得られた。

- (1) 貯氷IPF=40%の高密度蓄熱および蓄熱後の安定した氷水取出しが可能である。
- (2) 搬送IPF=30%、氷水流速が0.1m/sであっても、閉塞なく負荷側冷水温度を6°C一定に保持し、安定した冷房運転ができる。
- (3) 高圧液を脱水熱源に使用し、製氷機をCOP=3.6(圧縮機軸出力基準)で運転できる。
- (4) 0.9m/sの低速でも、搬送IPF=15~20%、配管サイズ32Aの搬送冷熱当たりの搬送動力は、搬送IPF=0%、配管サイズ50Aの40%程度であった。<sup>5)</sup>
- (5) 負荷が過小で確認はできなかったが、氷水搬送をすることにより、配管サイズを1/2にし、搬送動力の大幅な低減(1/3~1/5)は充分可能な数値と考える。
- (6) 受入熱交換器に氷水を流すことにより、冷却能力の大幅な増加が得られ、急激な負荷増にも追従できる。(搬送IPF=15%で、IPF=0%の2.3倍)

### 6. あとがき

約5年間にわたって開発を進めてきた「氷水搬送による地域冷房システム」について、実建物を負荷とした冷房試験を実施し、高COP製氷、高密度蓄熱、高搬送IPFの目標を達成でき、実用化の目処が得られた。また、高搬送IPFの達成により、地域導管口径を1/2にし、且つ搬送動力も大幅に低減(1/3以下)できる見通しも得た。今後は、地域冷房のみならず、大型ビルにおける低温空調との組合せなど、用途拡大を図っていきたい。なお、本研究の継続として、環境問題および暖房運転条件に対応できるR-22の代替冷媒による「蓄熱ヒートポンプシステム」の研究を実施中である。最後に、夜間電力を最大限利用した氷蓄熱と氷水搬送システムが、地域冷暖房の普及促進に寄与し、昼夜電力の平準化や環境保全に貢献できれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 瀬島ほか, 空調学会・近畿講演論文集, (1990), 83
- 2) 森川ほか, 空調学会・講演論文集, (1992), 1313
- 3) 森川ほか, 機講論(D), No930-63(1993-10), 94
- 4) 森川ほか, 空調学会・講演論文集Ⅰ, (1993), 441
- 5) 森川ほか, 空調学会・講演論文集Ⅱ, (1994), 921

## リキッドアイススラリーよりの採冷熱研究の動向

山田雅彦・福迫尚一郎（北海道大学）

### 1. はじめに

微細な氷粒子が水溶液等の液体中に浮遊・混合したスラリー状のものを、スラッシュアイスやリキッドアイス等と称し、流動性を有することから (1)高負荷追従性, (2)配管による輸送が可能, (3)氷充填率がスタティック型より高い, (4)採冷（融解）時の伝熱促進・制御が可能であるなどの利点を有している。このため、氷蓄冷熱システムにおける蓄冷材として用いられている他、様々な目的に利用が可能である。

リキッドアイスは、液体の種類によって分類すると水、水溶液、およびその他の液体の3つに大別される。現在最も多く用いられ、研究されているのは水および水溶液系のものであるが、特に、水溶液系のリキッドアイスは、水溶液からの生成（凝固）時の過冷却が水の場合よりも維持され易いことや、凝固点効果によって0℃以下の温度でも流動状態を保持されることから最も広く扱われている。反面、水溶液系のリキッドアイスの融解においては、濃度拡散や濃度による凝固点の変化を伴うため、水系の場合と比較して現象が複雑になる。このように、様々な特徴を有するリキッドアイスを工業的実用に供するために、近年特に蓄冷熱の分野において、その連続生成、輸送、および採冷熱（融解）方法などの要素技術に関する基礎研究ならびに実機による試験研究が行われている。

本稿では、これらの研究の中から、リキッドアイスよりの採冷熱、すなわち融解に関する研究の動向について紹介する。

### 2. 静止リキッドアイス層の融解

静止状態、すなわち蓄冷槽に蓄えられた状態のリキッドアイス中に採冷熱管（熱交換器）を設置して採冷する場合の基礎研究は、採冷熱面の形状・状態によって1)垂直・水平伝熱面、2)水平円管、3)水平円管群などに関するものがなされている。

図1は、垂直加熱面を有する矩形容器内の融解挙動および流れ関数、温度、濃度に関する解析結果<sup>1)・2)</sup>を示している。図1aに見られるように、融解液層内には濃度成層が形成されている。この成層の数は、水溶液濃度および加熱面熱流束に影響され、成層によるセルの大きさ等が液層部の対流挙動に影響を及ぼし、その結果融解熱伝達に影響を及ぼす。図1b～dに示す解析結果は、この様な融解挙動、成層の形成、ならびに液層部の流動挙動を良く表している。

図2に加熱面における平均熱伝達率に及ぼす熱流束の効果を示す。熱流束の増加に伴い熱伝達率は増加している。これは、熱流束の増加に伴い図1に見られる成層の数が減少し、個々の成層が大きくなり成層内の対流が促進されるためである。

また、水平加熱面上における融解に関する研究<sup>4)</sup>もなされており、二重拡散成層の形成・成長が融解挙動に大きく影響を及ぼすことが明かにされている。図3に、水平加熱面上のリキッドアイス層の平均融解熱伝達挙動を示す。図より、融解熱伝達率は、時間の経過によらずほぼ一定の値を示し、加熱面熱流束の増加に伴い増加していることがわかる。

図4は、水平加熱円管（単管）周囲におけるリキッドアイスの融解挙動<sup>5)</sup>を、シャドウグラフ法により示したものである。図の右半分は、融解液相に見られる成層の観察結果のスケッチを示している。このような成層は、融解の初期に形成される安定な濃度分布（上部ほど低濃度）中に、加熱管下部近傍の液（濃度が高く密度が大きい）が加熱されて上昇し、周囲液体と密度が均衡する点で上昇が妨げられ横方向に流れることにより形成されるものである。通常の水や相変化物質の融解では融解形状が縦長のいわゆるピアシェイプ（洋梨形状）を示すのに対して、リキッドアイスの場合には図に見られるような横長の融解形状になる。これも、上記の横方向の流れによるものである。

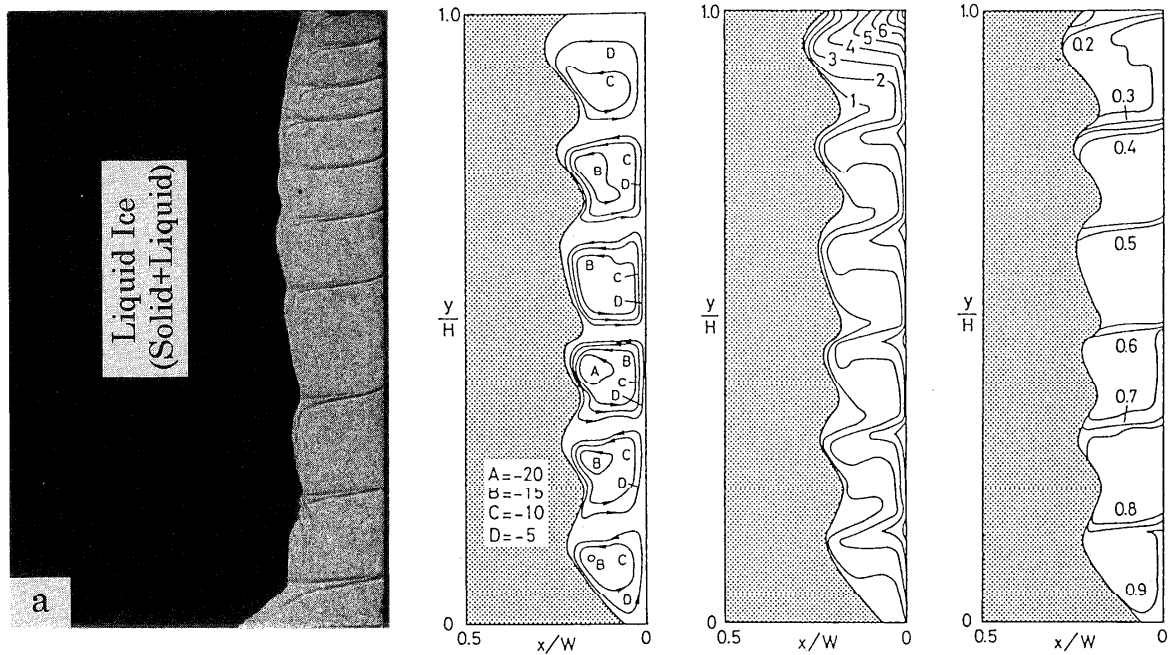


図1 垂直加熱面を有する矩形容器内の融解挙動

a:融解挙動, b:流線関数, c:温度分布, d:濃度分布,  $C_i=10\text{wt}\%$ ,  $q=800\text{W/m}^2$ ,  $t=100\text{min}$ .

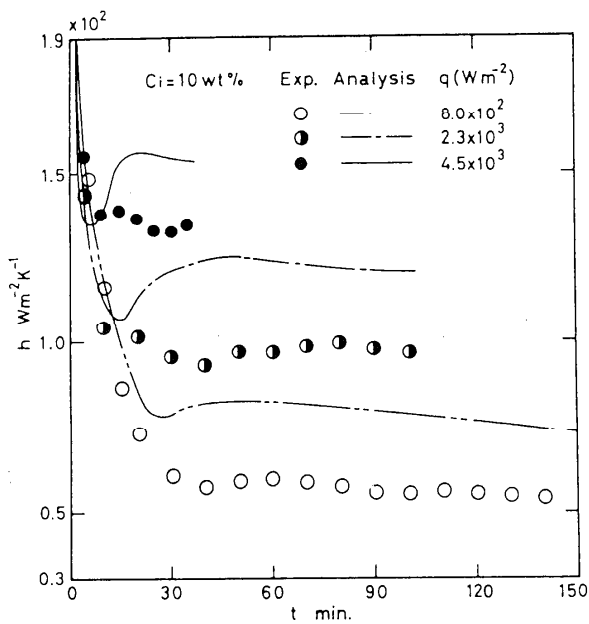


図2 平均熱伝達率に及ぼす熱流束の効果

水平円管群周りのリキッドアイスの融解挙動<sup>6)</sup>を 図5に示す。融解初期においては箇々の加熱管まわりの融解挙動は単管の場合と同様であり、それぞれの融解液領域に成層を形成する(図5 a参照)。時間の進

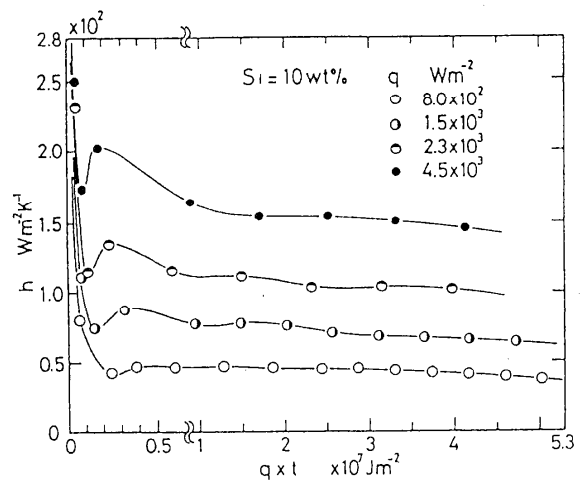


図3 平均熱伝達率挙動(水平加熱面上)

行に伴い、上下の融解領域が連結すると、上方の融解領域の低部にある低温高濃度の液と、下方の融解領域の上部にある低濃度の液が相互に流入し混合がなされ、その結果融解熱伝達率が上昇する。

また、リキッドアイスが輸送管路内において停滞した状態で周囲からの入熱により融解する場合など、管内におけるリキッドアイスの融解に関する研究もなさ

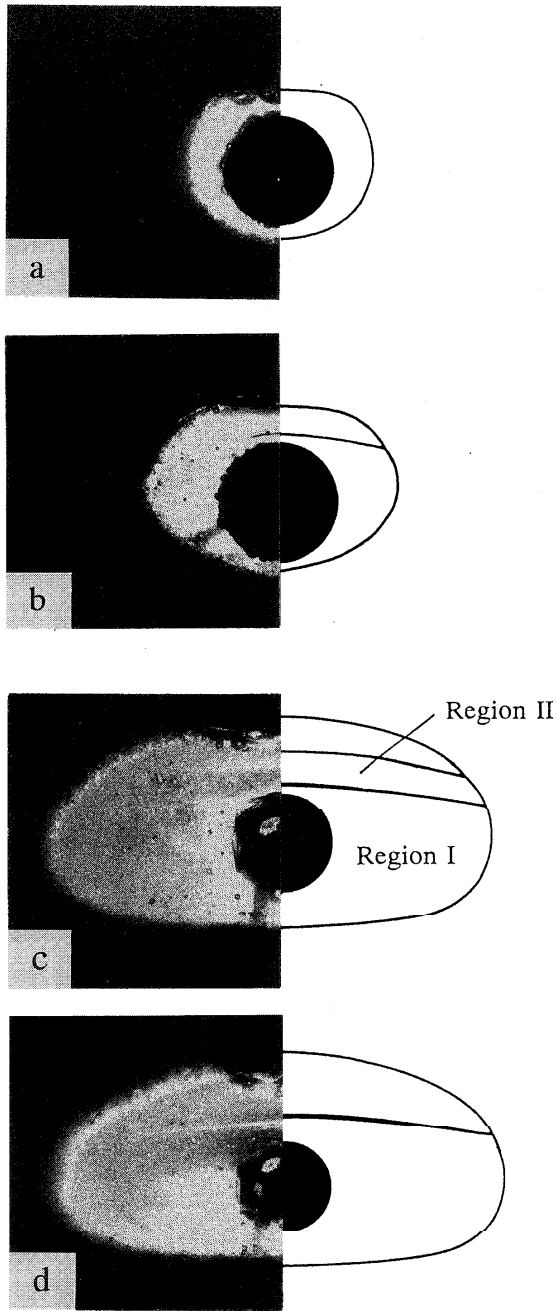


図4 水平加熱管周りの融解挙動；  
a: 10min, b: 60min, c: 130min, d: 145min

れている。水平円管内部における静止リキッドアイスの融解挙動<sup>7)</sup>を図6に示す。融解の進行に伴ってリキッドアイス(氷粒子)が上昇するため、常に管上部にリキッドアイス層が接触している状態になり、下部および側部に融解液層が形成される。融解液領域には

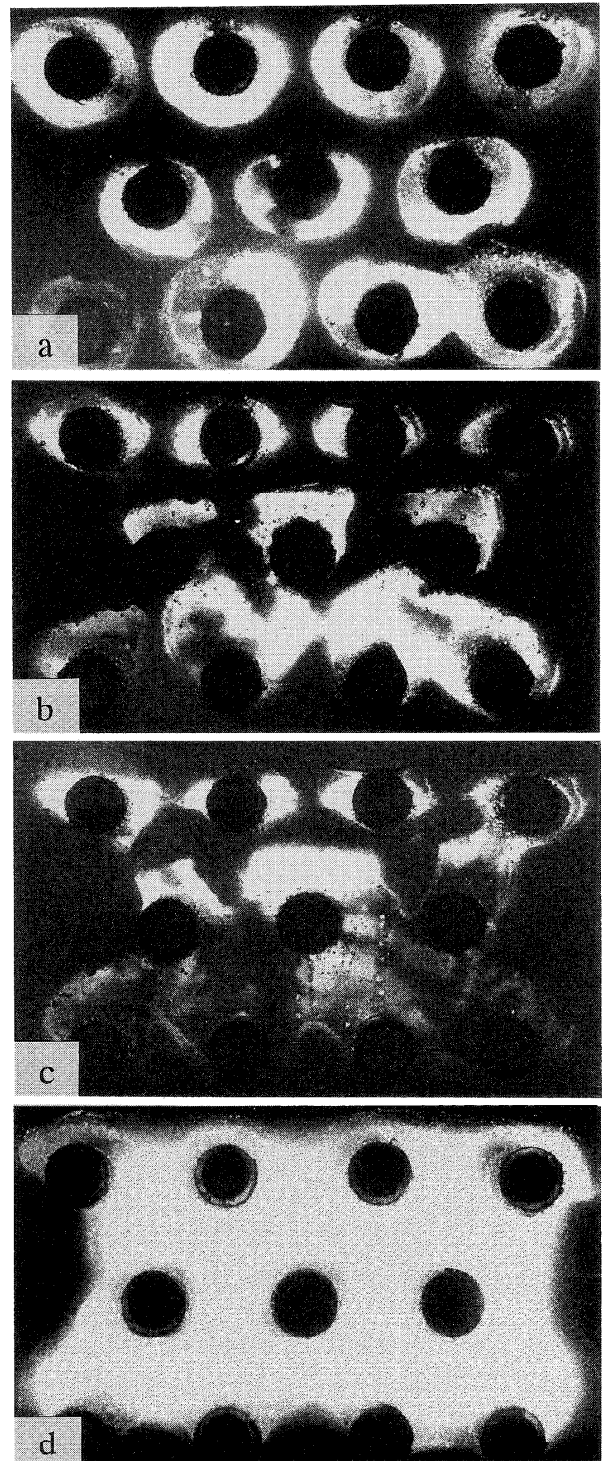


図5 水平加熱管群周りの融解挙動；  
a:30min, b:40min, c:50min, d:60min

同様に成層が形成され、成層内の対流により融解挙動が影響を受けて、成層の位置により融解層の形が異なる。

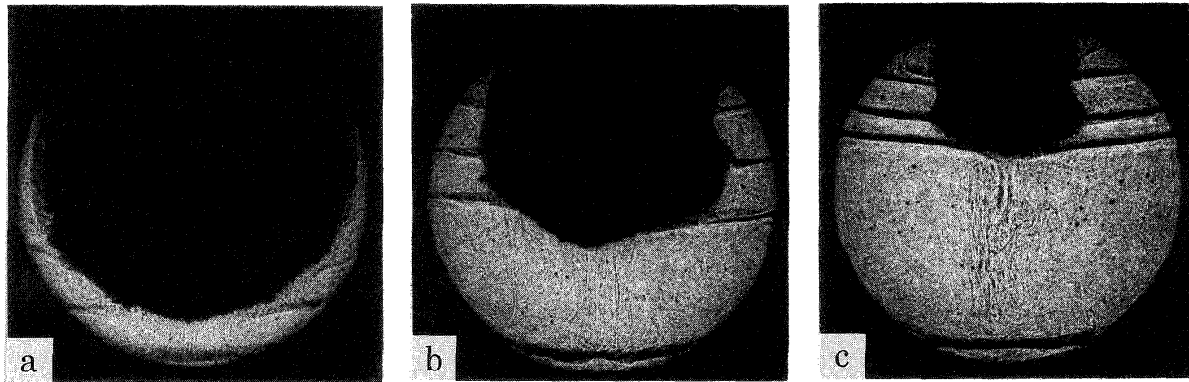


図6 水平円管内における融解挙動,  $q=1600 \text{ W/m}^2$ ,  $C_1=10\text{wt}\%$ , a:10min, b:25min, c:40min.

っているのがわかる。

### 3. 強制対流による融解

リキッドアイスよりの融解採冷熱方法の一つとして、リキッドアイスの循環流内に採冷熱管を設置する場合など、強制対流により採冷熱を行う場合が考えられる。

図7は、リキッドアイスの一様流中における上向き、および下向き水平加熱平面上の局所融解熱伝達率<sup>8)</sup>を示している。図に見られるように、上向き面の場合には下流ほど熱伝達率が低下しているのに対して、下向き面の方が熱伝達率が大きく、また、 $x=300\text{mm}$ の

位置より熱伝達率が増加している。これは、リキッドアイス中の氷粒子が浮力により上昇するため、上向き面と下向き面では氷粒子の接触状態が異なり、また下向き面の場合には下流部ほど氷粒子の良好な接触が得られるためである。

### 4. 流動層による融解促進

リキッドアイスの特徴の一つである流動性を利用して、採冷熱層を流動層とすることにより、採冷熱伝達を促進する研究がなされてる。

図8はリキッドアイス層を流動層とした場合の水平加熱単管周りの平均融解熱伝達率<sup>9)</sup>を示している。

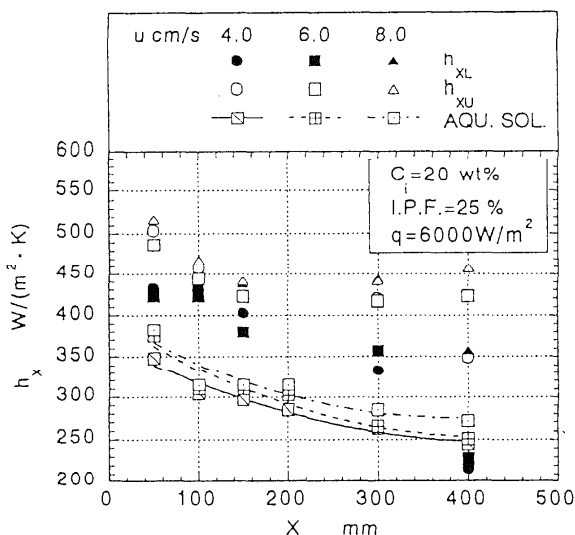


図7 局所熱伝達率 (水平加熱面強制対流)

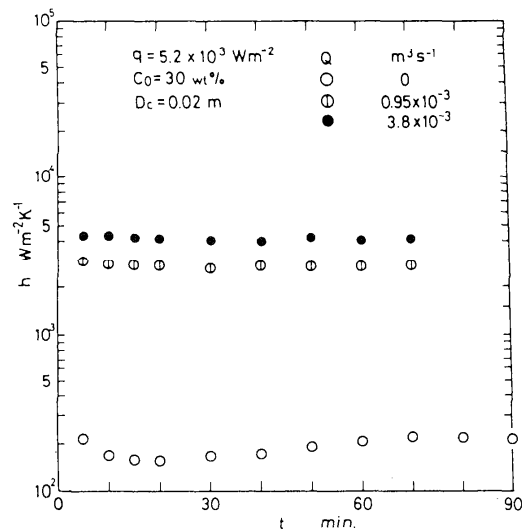


図8 平均熱伝達率 (流動層)

図に見られるように、流動層は静止層 ( $Q=0$ ) の場合と比較して、約20倍以上の熱伝達が得られることが明かにされている。

また、流動層内に置かれた管群よりの熱伝達<sup>6)</sup> に関しても研究がなされている。図9は管群よりの平均熱伝達率と流動層内温度の変化を示している。融解熱伝達率は層内の氷充填率が約25%になるまではほぼ一定値を示し、その後減少している。また、図10は管群の中央の管における平均熱伝達率  $h_m$  と静止層の融解熱伝達率  $h_{fb}$  の比を示している。図より、流動層の熱伝達率は管群の場合にも、空気流量ならびに加熱熱流束に依存して、静止層の約20倍程度の熱伝達率を示していることがわかる。

### 5. 直接接触による採冷熱

流動層を得るための流動空気を直接熱交換媒体として用いることにより、熱交換器における損失の低減を図るなどの目的から、リキッドアイスよりの直接接触採冷熱に関する研究<sup>10)</sup> も行われている。図11に、直接接触採冷熱時の、出口空気温度および層内温度を、また、図12には出口空気温度の変化をそれぞれ示す。これらの図より、層内温度は融解開始よりリキッドアイスの融解に伴って徐々に上昇し、氷の融解終了時に急激に上昇するが、一方、出口空気温度は融解終了時

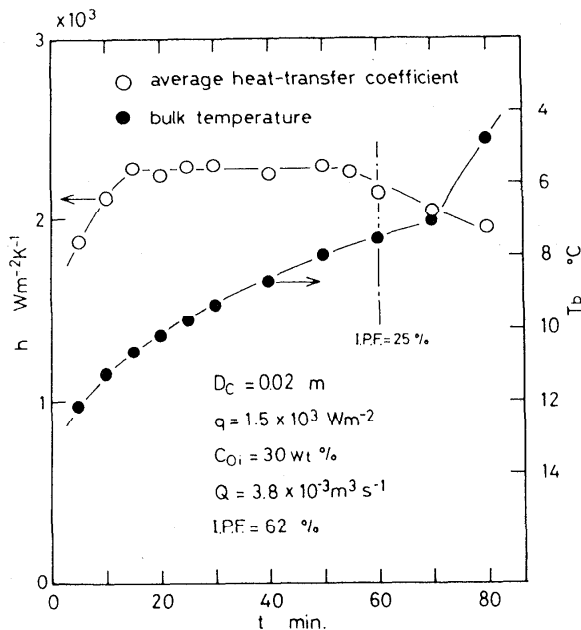


図9 平均熱伝達率および層内温度変化

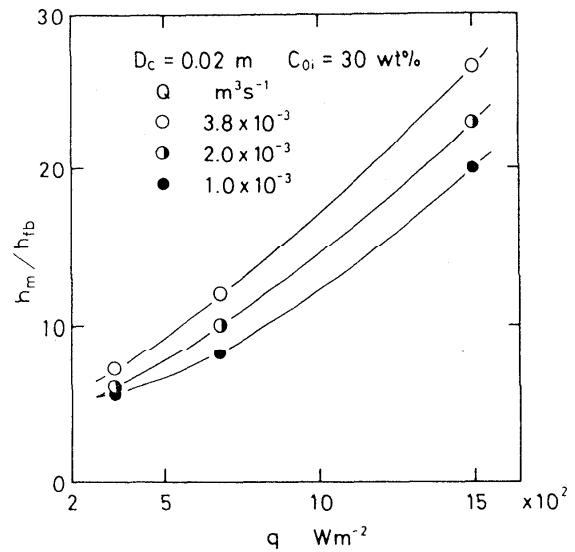


図10 固・気・液三相流動層熱伝達特性

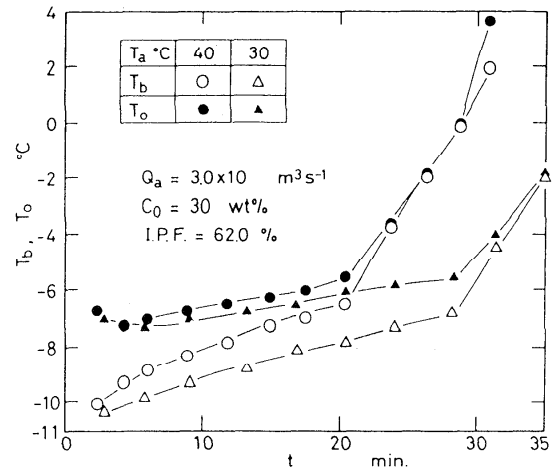


図11 層内温度および出口空気温度の変化

までほぼ一定であり、その値は、入り口空気温度によらず水溶液の濃度によってほぼ一定になることがわかる。

図13に、採冷熱量に及ぼす空気流量の効果を示す。空気流量の増加に伴い、図14に示すように層内の流動状態が大きく異なり、採冷熱量に大きな影響を及ぼすことが明かにされている。

このように、直接接触採冷熱システムにおける採冷熱量は、流動空気流量によって、また、採冷熱時の温度は、リキッドアイスの水溶液濃度によって、それぞれ能動的制御が可能であることが明かにされている。

## 6. 実用・実機規模の研究

実機における採冷熱に関する研究については、水系のリキッドアイスシステムに関して、蓄冷槽出口の水

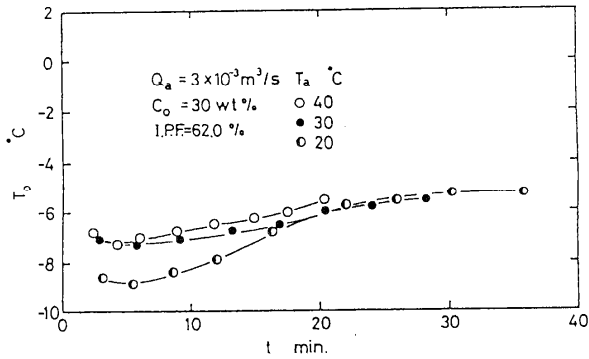


図12 出口空気温度に及ぼす入口空気温度の効果

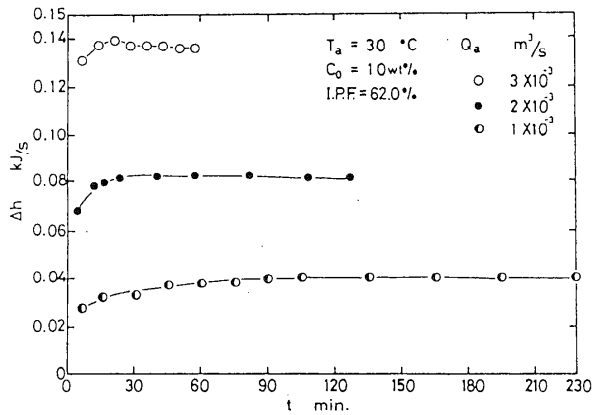


図13 採冷熱量に及ぼす空気流量の効果

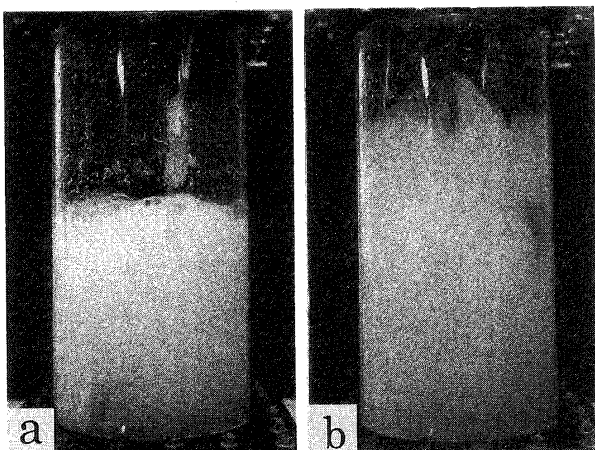


図14 リキッドアイス層流動挙動,

a:  $Q^a = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , b:  $Q^a = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

温の変化から融解時の熱伝達率を算出している例<sup>11)</sup>があるが、融解挙動や熱伝達特性に関する詳細な検討は、実機規模の研究ではほとんどなされていないようである。

## 7. まとめ

本稿では、主として水溶液系リキッドアイスよりの採冷熱（融解）に関して、現象に着目した基礎的研究の動向を紹介した。現在のところ、実機システムにおける採冷熱に関する研究の報告は少なく、また、実システムに関する研究においては、基礎的研究の成果があまり反映されていないのが現状のようである。

今後の研究においては、これまでの基礎研究における、リキッドアイスの製造、輸送、融解を含めたすべての成果を反映する実システムを構築し、その性能に関する総合的研究を行なう必要があると思われる。

## 参考文献

- 1) 福迫尚 一郎・山田雅彦・金 明煥, 機論, 58-552, B(1992), 2534.
- 2) S.Fukasako, M.Yamada, and M.H.Kim, Proc. 6th Int. Sympo. Trans. Pheno. Therm. Engng., 35.
- 3) S. Fukusako, M. Yamada, and M. H. Kim, Trans. JRS, 10-2(1993)
- 4) M.Yamada, S.Fukasako, and M.H. Kim, Proc. 4th. UK Nat. Conf. on Heat Transfer, (1995)
- 5) 山田雅彦・福迫尚一郎・守実 寿・金 明煥, 機論, 57-543, B(1991), 3904.
- 6) 山田雅彦・福迫尚一郎・守実 寿・金 明煥, 機論, 58-553, B(1992), 2805.
- 7) 山田雅彦・福迫尚一郎・伊藤健二, 機械学会北海道支部講論, (1995).
- 8) 山田雅彦・福迫尚一郎・川南 剛, 機械学会北海道支部講論, (1995).
- 9) 福迫尚一郎・山田雅彦・守実 寿・金 明煥, 機論, 57-541, B(1991), 3293.
- 10) M. Yamada, S. Fukusako, and A. Horibe, Proc. of 3rd World Experimental Heat Transfer. Fluid Mechanism, and Thermodynamics. (1993)
- 11) 谷野正幸他7名, 機講論, No.930-63, (1993) 76.

## 空気輸送による流動床燃焼ボイラーへの砕粒炭の吹き込み

(ロックホッパ式に代わる高差圧シールシステム)

中島忠昭 (三興空気装置 / 技術開発部)

### 1. はじめに

石炭利用技術開発の一貫として進められている流動床燃焼ボイラーへの給炭装置として、ロックホッパ式に代わりハイシールロータリーフィーダを使用した差圧シールシステムによる完全連続式の吹き込み装置の実用化が成功した。

現在、35万KW出力の商業プラントで、差圧シールが約7000mmAqの条件下で順調に稼働している。そこで、本技術の概要について紹介する。

### 2. 装置の概要

本差圧シールシステムは、二組のロータリーフィーダと抽気チャンバで構成されており、粉粒体の吹き上げ現象を解消した状態での上下差圧のシールにより、脈流のない定流量状態で高圧側の輸送系へ供給することができる。

輸送系は適正な風速と混合比を選択することにより、脈流のない定流量分散状態で流動媒体(BM)内へ吹き込み燃焼させる。

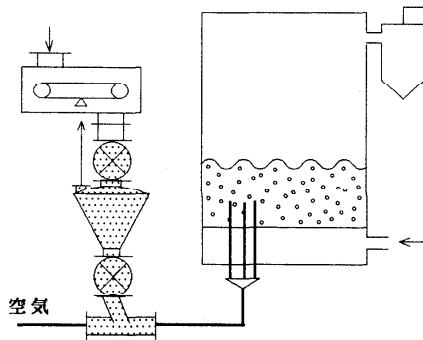


図1：本システム

### 3. 突破した開発課題

最大の開発課題は、高差圧シール下で、長期間の連続運転に対して安定した性能を維持するためのロータリーフィーダの摩耗対策であった。

摩耗対策の要点は差圧によって発生するリーク

エアに起因する気流摩耗であった。従って、クリアランスがゼロの構造化によるリークエア量の極小化と材質も含めた数々の摩耗対策を施す事により本課題を解決した。

### 4. 本システムの特長

本システムは、従来のロックホッパと比較して下記の主な特長を有している。

- 1) システムがシンプル (機器点数が約25%)
  - メンテナンスが簡単
  - 信頼性が高い
- 2) 設置スペースが少ない (約60%)
- 3) 設置高さが低い (約55%)
- 4) 設備費が安い

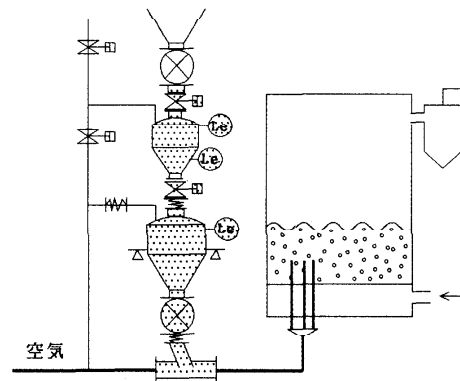


図2：ロックホッパシステム  
(従来方式)

### 5. おわりに

バッチ操作から連続操作化への移行は時代の要請であるため、今後も本システムの高差圧シール化および摩耗耐久度の向上へと改良を重ね、ニーズに応じてゆきたい。



## 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ

日本伝熱学会の内規に基づき、学術賞、技術賞、および奨励賞が設けられています。つきましては、下記の要項に沿って本年度の募集を行いますので、自薦、他薦を問わず応募下さいますようお願い申し上げます。

### 記

#### 1. 対象となる業績

- ・学術賞の対象は、原則として、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文とする。
- ・技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術とする。
- ・奨励賞の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準ずる者（大学卒業後5年以内の者）とする。
- ・学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限る。
- ・学術賞は2件程度、技術賞は1件程度、奨励賞は4件程度とする。

#### 2. 選考方法

- ・学術賞・技術賞・奨励賞の選考は、「表彰選考委員会」が「学術賞・技術賞・奨励賞に関する覚書」によって行う。
- ・表彰選考委員は、公募の他に学術賞・技術賞・奨励賞候補を推薦することができる。

#### 3. 提出書類

所定用紙「日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞 申請・推薦書」 1通  
論文抜刷または技術内容参考資料 6部  
日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部

#### 4. 提出先

〒920 金沢市小立野2丁目40-20  
金沢大学工学部機械システム工学科  
林 勇二郎 宛  
TEL 0762-34-4740 FAX 0762-34-4743

5. 提出期限： 平成8年1月12日（金） 必着

6. 問い合わせ先： 同

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞  
申請・推薦書

申請・推薦者氏名 \_\_\_\_\_ 印

論文題名または： \_\_\_\_\_

技術名 \_\_\_\_\_

刊行物名または： \_\_\_\_\_

技術内容 \_\_\_\_\_

(論文抜刷または技術内容参考資料6部添付)

受賞候補者 (氏名・勤務先・職名・代表者の連絡先住所, Tel.No, Fax.No, 本会会員資格の有無、氏名には振り仮名をお付け下さい)

代表研究者： \_\_\_\_\_

共同研究者： \_\_\_\_\_

関連研究の伝熱シンポジウム発表

論文題名： \_\_\_\_\_

講演発表：第 \_\_\_\_\_ 回シンポジウム講演論文集 \_\_\_\_\_ 頁 (抜刷6部添付)

申請・推薦理由： \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

注) 不要の文字を消して下さい。

## 第33回日本伝熱シンポジウム研究発表募集

- ・開 催 日 平成8年5月15日(水)～5月17日(金)
- ・会 場 新潟県民会館(新潟市1番堀通り町3-1)  
メルパルク新潟(新潟市川岸町2-1-7)  
新潟県土地改良会館(新潟市川岸町1-38-3)
- ・研究発表申込締切 平成8年1月22日(月)必着
- ・原稿締切 平成8年3月11日(月)必着(締切厳守)
- ・研究発表申込先 〒950-21 新潟市五ノ嵐2の町8050番地  
新潟大学工学部  
第33回日本伝熱シンポジウム準備委員会  
前川 博  
電話:025-262-6715 FAX:025-262-7260  
E-mail:sympo@tmtherm.eng.niigata-u.ac.jp

### 【研究発表形式および論文原稿】

本シンポジウムでは、一般申し込みによる通常のセッション形式を予定しています。講演時間は1題目につき約10分です。

講演論文集は原寸大のオフセット印刷で作製します。論文は1題目あたり2ページとし、1ページあたりの文字数が2段組み×片側26字×60行=3120字程度となるよう、A4判白紙上にワープロ等でご執筆願います。執筆要項は申し込み受付け後、研究発表申込者宛にお送りします。

### 【研究発表申し込み方法】

1. 次ページに印刷されている研究発表申込書(またはそのコピー)に必要な事項を記入し、申込整理費3千円を郵便振替でご送金のうえ、その払込票兼受領証のコピーを添えてお申し込みください。送金には、本号挟み込みの振替用紙をご利用ください。セッション振り分けの都合上、セッション分類表から発表内容が属する項目(大分類と小分類)を選んでご記入ください。オーガナイズドセッションをお申し込みの場合でも、その他の小分類(1)～(45)は必ずお書き下さい。
2. 講演発表申し込みは、講演者1名につき1題に限ります。
3. 発表の採否およびセッションへの振り分けは、準備委員会へご一任願います。

### 【ご注意】

1. 研究発表申し込み後の取り消しは、準備と運営に支障を来しますのでご遠慮下さい。
2. 論文原稿の題名と著者名が申込書と相違しないよう、研究発表申込書の控えを手元にお残し下さい。

### 第33回日本伝熱シンポジウム研究発表申込書

題 目	
和 文	
英 文	

著 者 名			
伝熱学会 会員資格	会員外の方は所属 学協会・会員資格	氏 名 (フルネーム) (講演者に*印)	所属・勤務先 (省略形)
		和文 英文	.....
		和文 英文	.....
		和文 英文	.....
		和文 英文	.....
		和文 英文	.....
		和文 英文	.....
I. 大分類 (A-0) : 1. ( ), 2. ( ), 3. ( ) * I-1 およびII-1, 2は II. 小分類 (1-50) : 1. ( ), 2. ( ), 3. ( ) 必ずご記入下さい。 III. キーワード (英語) : ( ), ( ) (4つ程度) ( ), ( )			

執筆要項等送付先 住 所: 〒  氏 名:  電 話: ( ) - (内) , FAX: ( ) - E-mail: [ ]		
準備委員会記入欄	受付番号	受付日 / /

本申込書はプログラム作成・諸連絡等に使用しますので、楷書でお書き下さい。

## 第 3 3 回日本伝熱シンポジウムセッション分類表

### 【大分類】

A 強制対流	B 自然対流	C 沸騰	D 凝縮	E 物質伝達・蒸発
F 融解・凝固	G 混相流	H ふく射	I 熱伝導	J 熱交換器
K 熱機器	L 熱物性	M 反応・燃焼	N 分子動力学	O その他

### 【小分類】

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 層流伝熱</li> <li>(2) 乱流構造と伝熱</li> <li>(3) はく離流における伝熱</li> <li>(4) 噴流・せん断層の流動と制御</li> <li>(5) 乱流モデル</li> <li>(6) 乱流数値シミュレーション</li> <li>(7) 密閉空間内の自然対流</li> <li>(8) 物体周りの自然対流</li> <li>(9) 複合対流伝熱</li> <li>(10) 対流熱伝達の促進・制御</li> <li>(11) 回転場の伝熱</li> <li>(12) 多孔質内の伝熱</li> <li>(13) 電子機器の冷却</li> <li>(14) 生産加工プロセスにおける流動と伝熱</li> <li>(15) 核沸騰</li> <li>(16) 限界熱流束</li> <li>(17) 遷移沸騰</li> <li>(18) 膜沸騰・極小熱流束</li> <li>(19) 凝縮のメカニズムとモデル化</li> <li>(20) 沸騰・凝縮における伝熱促進</li> <li>(21) 冷媒の沸騰・凝縮</li> <li>(22) 二相流のモデル化と数値解析</li> <li>(23) 二相流の可視化計測</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(24) 二相流の流動と伝熱</li> <li>(25) 直接接触伝熱</li> <li>(26) ミスト冷却</li> <li>(27) 蒸発伝熱</li> <li>(28) 凝縮伝熱</li> <li>(29) 沸騰凝縮利用機器</li> <li>(30) ヒートパイプ・熱サイフォン</li> <li>(31) 高性能コンパクト熱交換器</li> <li>(32) 蓄熱蓄冷</li> <li>(33) 粒子層における伝熱<br/>(充填層・流動層)</li> <li>(34) 熱物性値</li> <li>(35) 熱物性測定法</li> <li>(36) 燃焼における伝熱</li> <li>(37) ふく射物性</li> <li>(38) ふく射伝熱</li> <li>(39) 計測技術</li> <li>(40) 微小重力下の流動と伝熱</li> <li>(41) 生体と食品の伝熱</li> <li>(42) ヒートポンプ・冷凍・空調</li> <li>(43) 自然エネルギー利用</li> <li>(44) 都市・地球環境に関する熱物質伝達</li> <li>(45) その他</li> </ul> |
|---|---|

### オーガナイドセッション

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>(46) 電荷移動を伴う熱科学現象</li> <li>(47) 人間熱科学</li> <li>(48) 閉空間の伝熱環境</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(49) 融解・凝固利用工業プロセスの新展開</li> <li>(50) 分子スケールの伝熱</li> </ul> |
|--|--|

東海伝熱セミナー

“熱工学研究における実験的手法の実際と問題点”

日本伝熱学会東海支部では、標記のセミナーを下記のとおり開催いたします。奮ってご参加下さいますようご案内申し上げます。

1. 日時: 平成7年11月10日(金)~11(土)、一泊二日
2. 場所: 愛知レクリエーションセンター「三河ハイツ」(日本勤労福祉センター)  
〒444-01 愛知県額田郡幸田町大字荻字遠峰10(三河湾スカイライン沿い)  
TEL:0564-62-1751(代)  
交通:JR 蒲郡駅下車、北口よりタクシーにて15分。なお、三河ハイツの無料送迎バスあり(当日、AM12:00に蒲郡駅北口より出発)
3. 参加費: 一般13000円、学生・院生7000円  
(宿泊、食事、懇親会費を含みます。参加費は当日受付にて集めます。)
4. 定員: 60名(申し込み先着順により、満員になり次第締め切ります。)
5. 申込: 綴じ込みの申込用紙(コピーでも可)に必要な事項を記入の上、下記まで郵送またはファックスして下さい。  
〒468 名古屋市天白区久方2-12-1  
豊田工業大学 工学部 機械システム工学科  
海野 紘治  
TEL:052-809-1771、FAX:052-809-1721
6. 申込締切: 平成7年10月27日(金)
7. 日程: .  
《11月10日(金)》  
12:00 受付開始(会場では昼食は用意できません。他の場所で済ませてから、お出で下さい。)  
13:00~16:50  
1. 小型冷凍機による低温生成と極低温における計測・・・井上 龍夫(アイシン・コスモス研究所)  
2. ディスクブレーキにおける摩擦面温度の測定・・・清水 信吾(トヨタ自動車)  
3. 傾斜板による壁面伝熱促進の研究・・・畔柳 功(日本電装)  
4. 空調機用熱交換器に用いられる内面溝付銅管およびアルミニウムフィン材の高性能化の現状・・・佐々木 直栄(住友軽金属)  
5. 航空宇宙分野における伝熱研究・・・中川 博高(三菱重工)  
18:00~20:00 夕食および懇親会  
《11月11日(土)》  
9:00~12:00  
6. ガソリン機関の筒内ガス温度計測・・・秋濱 一弘(豊田中研)  
7. 希薄気体の熱流実験と計測・・・山本 昌弘(三重大学院)  
8. 熱流体実験における温度変動計測技術・・・辻 俊博(名古屋工業大学)  
9. 高温ガス温度の測定法の現状と問題点・・・若井 和憲(岐阜大学)  
12:10 昼食後解散

..... 切り取り線 .....

東海伝熱セミナー参加申込用紙

ふりがな  
氏 名: \_\_\_\_\_

所属(大学研究室): \_\_\_\_\_

役職等(学年): \_\_\_\_\_

連絡先住所: 〒 \_\_\_\_\_

TEL: \_\_\_\_\_ FAX: \_\_\_\_\_

## 日本伝熱学会関西支部講演討論会の御案内

日 時 : 平成7年12月7日(木) 14:00~17:00

場 所 : 京都工芸繊維大学 大学会館 3階会議室  
(京都市左京区松ヶ崎御所海道町、tel:075-724-7127、  
市バス14系統「松ヶ崎」行「工芸繊維大学前」下車、  
市営地下鉄「北山」行「北山」駅下車、東へ約2km)

講演題目・講演者 :

「垂直円柱からの強制対流膜沸騰熱伝達」

濱 勝彦 (京都大学原子エネルギー研究所)

「加速器の伝熱研究への応用(陽子イオンビームによる可視化)」

高橋 修 (京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻)

「分散性混相流の素過程解明にむけた1つのアプローチ」

萩原 良道 (京都工芸繊維大学機械システム工学科)

問い合わせ先 : 関西大学工学部機械システム工学科 小澤 守(tel,fax:06-368-0807)

### 第33回燃焼シンポジウム

主催 日本燃焼学会

共催 日本伝熱学会ほか

会期 1995年11月23日(木)~25日(土)

会場 東京都立科学技術大学 科学技術交流施設 [東京都日野市旭ヶ丘 6-6 TEL:0425-83-5111]

特別講演 11月23日(木)9:40~10:40 「固体ロケットの燃焼安定性」 宇宙科学研究所名誉教授 岩間 彬

一般講演 下記のセッションを開催、発表数 211件。

「層流炎」「乱流炎」「着火」「消炎」「火災安定性」「窒素酸化物」「化学反応」「数値解析」  
「超音速燃焼」「微小重力燃焼」「廃棄物燃焼」「液体燃焼」「すす」「石炭燃焼」「金属・固体燃焼」  
「推進薬」「燃焼合成」「燃焼器」「炉内燃焼」「エンジン燃焼」「騒音・振動」「デトネーション」  
「触媒燃焼」「火災」「計測」

ワークショップ 11月23日(木)18:30~20:30

「化学反応と大気環境」「家庭用燃焼器の課題と将来展望」「地震火災」「光学的燃焼診断法」

参加費 一般 5000円(当日申込 6000円) 学生 2000円

講演論文集 当日受取 4000円 事前郵送 5000円

懇親会 11月24日(金)18:30~20:30 科技大 交流施設内食堂 会費 4000円(当日申込 5000円)

申込方法 所定の参加登録申込用紙での事前申込みを原則とします。事前申込み締め切り 10月20日(金)。

日本燃焼学会会員は「燃焼研究」第101号をご覧ください。講演申込者の方は、論文用原稿用紙郵送時の同封書類をご覧ください。それ以外の方は、下記シンポジウム事務局へ参加登録申込用紙と郵便振替用紙をご請求下さい。折り返し所定の用紙類を送付いたします。

申込先 〒191 日野市旭ヶ丘 6-6 東京都立科学技術大学  
航空宇宙システム工学科内 第33回燃焼シンポジウム事務局  
電話 0425-83-5111 ext.3506(湯浅) FAX 0425-83-5119

**第3回KSME/J S M E 熱工学会議**  
(3rd KSME/JSME Thermal Engineering Conference)

主 催：日本機械学会，韓国機械学会  
開催日：1996年10月20日（日）～23日（水）  
開催地：慶州（韓国）

**Scope:**

Papers are solicited which deal with all aspects of thermal engineering including heat transfer, fluid mechanics, thermodynamics, thermal properties and combustion, both of fundamental science and applied technology. Modeling, theory, analysis, computation, design, experiments and numerical simulations are all appropriate.

**Organized sessions and JSME side organizers:**

- (1) Computational Approaches in Thermal Engineering  
河村 洋 (東京理科大)
- (2) Thermophysical and Thermal Radiative Properties/Characteristics of Materials  
牧野 俊郎 (京都大)
- (3) Recent Progress in Material Processing  
西尾 茂文 (東京大)
- (4) General and Mechanistic Aspects of Multiphase Flow and Boiling  
藤田 恭伸 (九州大)
- (5) Recent Development in Heat Exchangers  
鳥越 邦和 (ダイキン工業)
- (6) Thermal Engineering in Internal Combustion Engines  
神本 武征 (東京工大)
- (7) Thermal Problems in Turbomachinery  
鈴木 健二郎 (京都大)

**Deadlines:**

December 31, 1995	Four (4) copies of abstract due (英文約 500 語)
April 30, 1996	Three (3) copies of full-length paper due for review
July 15, 1996	Camera-ready mats due

**アブストラクト提出先：**

〒565 吹田市山田丘2-1 大阪大学工学部機械工学科  
香月正司 Tel: 06-879-7253, Fax: 06-876-4975  
(オーガナイズドセッションへお申し込みの場合はセッション名を記入)

**問い合わせ先：**

藤井丕夫 (九州大学機能物質科学研究所 Tel: 092-573-9611 Fax: 092-592-0211)  
高城敏美 (大阪大学工学部 Tel & Fax: 06-879-7311)



分子スケール／ミクロスケール伝熱の材料プロセス  
その他の分野への応用に関する国際シンポジウム

会期：1996年12月1日～5日

会場：横浜シンポジア（旧：横浜国際会議場）

共催団体：International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT)

日本伝熱学会（申請中），東京大学生産技術研究所

対象となるトピックスの例（これらに限定されるわけではありません。）

- \* 熱伝導・蒸発・凝縮・融解・凝固・光-界面干渉などへの分子動力学的手法の適用
- \* 薄膜・超微粒子の生成における熱・物質移動の分子機構
- \* 融液あるいは溶液からの液晶成長におけるミクロ熱・物質移動
- \* 凝固における結晶構造のモデリングと制御，核生成と成長
- \* ポリマー射出成形におけるミクロスケール計測と能動的制御
- \* 超急速冷却による材料製造時のミクロ熱・物質移動
- \* プラズマ・プロセッシングにおけるミクロ熱・物質移動
- \* 凝固における固・液界面近傍での熱物性値の異常挙動
- \* 原子あるいは分子スケール現象を利用した温度測定あるいは熱物性値測定
- \* 原子間力顕微鏡あるいは電子顕微鏡を用いたナノスケール・プロセッシング
- \* 電子ビーム・イオンビーム・レーザービームあるいは放電を用いた超精密加工における相変化伝熱

論文提出の方法：

最初のスクリーニングは英文アブストラク（500字程度）によって行います。英文アブストラクトには [1] 論文題目，[2] 3～5個のキーワード（重要度の順に配列），[3] 著者氏名，[4] 代表者（連絡担当者）の住所・電話番号・FAX番号を記載して下さい。アブストラクトには，研究目的・結果・結論などを記述し，研究の全容が理解できるようにして下さい。なお，論文の最終的な採否はフルペーパーによって決定します。

締切日：

英文アブストラクト（4部）提出	1996年 3月30日
アブストラクト採否通知	1996年 4月30日
査読用フルペーパー（4部）提出	1996年 6月31日
フルペーパー採否通知	1996年 8月15日
オフセット印刷用最終原稿提出	1996年 10月15日

提出先：

〒106 東京都港区六本木7-22-1  
東京大学生産技術研究所第2部  
西尾茂文教授宛

The 4th World Conference on Experimental Heat Transfer,  
Fluid Mechanics and Thermodynamics  
(第4回実験伝熱・流体工学・熱力学国際会議)

開催日時：1997年6月2日～6日

場所：ブリュッセルエグジビジョンセンター、ブリュッセル、ベルギー

主催：Assembly of World Conferences on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

- ・会議の目的は熱流体科学・工学の分野で活躍する産・学界の実験的研究者が一堂に会し研究成果を発表し、専門知識や経験について情報交換する事により、今後の研究活動の刺激とする事にあります。
  - ・論文投稿の他に新しい実験技術に関する基調講演や、基礎研究やその応用に関する現状についてのパネルディスカッション等、また、講習会、ビデオ/映画フォーラム、オープンフォーラム等も企画されています。
  - ・熱移動、流体力学、熱力学のすべての分野で、理論解析、コンピュータ解析も含む実験的研究の投稿論文を募集しています。計測技術、可視化技術、計測器や実験データと理論・数値解析結果の解析に関する論文も受け付けます。
- The Conference Scientific Committee が論文の採否と最終プログラムを決定します。

日 程

- |               |                        |
|---------------|------------------------|
| ・1996年 3月 4日  | 1000語以内のアブストラクト(3部)締切。 |
| ・1996年 4月 19日 | アブストラクト採択通知。           |
| ・1996年 7月 19日 | 正論文締切。                 |
| ・1996年 9月 27日 | 正論文採択通知。               |
| ・1996年 11月 8日 | 最終印刷原稿締切。              |

全ての採用論文は予稿集に掲載し、会議当日入手できます。

より詳しくは下記までお問い合わせ下さい。

**Professor Michel Giot**, 会議議長

UnitéTERM, Université Catholique de Louvain

2, place du Levant

B-1348-Louvain-La-Neuve, Belgium

Tel : (32) 10 - 47 22 00; Fax : (32) 10 - 45 26 92, E-mail : doyen@fsa.ucl.ac.be

**Dr. R.K. Shah**, 世界会議準備委員長

Harrison Division, General Motors Corporation

Lockport, NY 14094-1896, USA

Tel : 1 (716) 439 - 3020; Fax : 1 (716) 439 - 3648, E-mail : rkshah@acsu.buffalo.edu

日本側世話人

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学工学部

黒崎晏夫 Tel : (03) 5734 - 2540; Fax : (03) 5734 - 2945

アブストラクト送付先

伝熱・熱力学関係論文

〒060 札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学工学部機械工学第二学科

福迫尚一郎 Tel : (011) 706-6424 Fax : (011) 706-7889

流体関係論文

〒560 大阪府豊中市待兼山町1-3

大阪大学基礎工学部機械工学科

辻本良信 Tel : (06) 850-6165 Fax : (06) 850-6212

## First Announcement and Call for Papers

### 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT TRANSFER WITH EXHIBITION BEIJING, CHINA

October 7-11, 1996

To submit a paper, three copies of a one-page abstract should be submitted by December 15, 1995 :

Prof. X. F. Peng  
Secretary General, 4th ISHT, Beijing  
Thermal Engineering Department  
Tsinghua University  
Beijing 100084, China

Notification of Acceptance of Paper : February 10, 1996  
Deadline for Submission of Completed Manuscript : April 30, 1996

地域振興のための

#### 日本工学会 「公開講演会」

- 日 時：平成7年12月1日(金) 13:00~15:30  
会 場：秋田大学一般教育2号館  
秋田市手形学園町 (☎ 0188-33-5261)
- 主 催：日本工学会  
共 催：秋田大学鉱山学部・秋田高等工業専門学校・秋田県(予定)  
日本工学会加盟90学協会
- 後 援：国立高等専門学校協会・全国工業高等学校校長会・秋田商工会議所・魁新報社  
東北経済団体連合会・東北インテリジェントコスモス協議会(予定)
- 講 演：順不同・敬称略
1. わが国の産業構造変化に産・学・官はいかに対処すべきか  
日本学術会議第5部長, 帝人(株)顧問, 日本工学会理事 内田 盛也
  2. 大学改革, そして地域振興と工学  
東北大学工学部教授 阿部 博之
  3. 秋田県の理工学研究と教育の展望(仮題)  
秋田県副知事 池田竹二郎
- 聴講料：無料
- 参加申込：往復ハガキに氏名・勤務先・同住所・同電話番号(または自宅住所・同電話番号), 所属学協会を明記の上, 返信ハガキに連絡先郵便番号・住所等を正しく記入, 下記にお申込み下さい。
- 申 込 先：☎107 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
社団法人日本工学会「公開講演会」係
- 申込期限：平成7年11月20日(月)

# インターネットを利用した情報サービスのお知らせ

ネットワークシステム化委員会

伝熱学会では、インターネット上で情報を提供するサービスを試験的に開始いたします。現在準備を進めているサービスは、WWW (World Wide Web) による会告・行事等のお知らせ、電子メールによる最新情報の提供、電子メールによる事務局への連絡です。

● <http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>

WWW により最新の会告・行事の予定等を提供していきます。

学会誌「伝熱研究」および論文集「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の閲覧。

● [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に、電子メールアドレスの登録を受け付けます。

WWW および電子メールで公開したい情報や、一連のサービスに対するご意見・ご希望を受け付けます。

● [htsj@mes.titech.ac.jp](mailto:htsj@mes.titech.ac.jp)

これまで、ファックスでお願いしていた事務局への連絡を電子メールでも受け付けます。



学会誌・論文集に掲載された内容を WWW で公開するために、  
既に掲載された内容も含めて html 形式による投稿にご協力ください。

## トピックス記事情報ご提供のお願い

「伝熱研究」編集委員会

「伝熱研究」編集委員会では、本誌紙上に「トピックス欄」を設け、伝熱研究者あるいは技術者として見逃すことのできない伝熱各分野の新技术や周辺技術に関する情報、あるいは大学や企業の研究室における研究内容等の紹介を募集しております。会員各位におかれましては下記要項をご一読の上、ふるって記事をお寄せ下さいますようお願い申し上げます。また、お近くにトピックス記事としておさわしい話題などがございましたら、是非編集委員会宛てお知らせください。

### 1. 「トピックス欄」記事要領

#### 1. 記事の内容

(1) 伝熱研究者、技術者として見逃す事のできない新技术や周辺技術に関する国内外の情報、例えば、

a. 企業などにおいて開発・設計した新技术・新製品の紹介（とくに技術面での独創性や有効性についての紹介を中心とし、単なる製品の宣伝でないこと）。

b. 内外の伝熱関連雑誌の紹介、新刊専門書（特色のあるもの）の紹介、論評。

c. 伝熱に関連した各種プロジェクトの紹介など。

(2) 大学や企業の研究室紹介、例えば、

d. 研究テーマや研究内容の紹介など。

#### 2. 記事の体裁

本誌添付「伝熱研究原稿の書き方」に基づき、1ページ以内。（執筆にあたっては、読者の理解を深めるために極力、図、写真、または表を入れてください。）

#### 3. 記事の責任

記事はすべて署名記事とし、内容に関する責任は著者にあるものとする。

### 1. 記事提供にあたって

1. トピックス記事の直接投稿：上記の執筆要項に従って作成された原稿は、掲載を希望される号（1月、4月、7月、10月）の担当編集委員または編集委員長へ直接送付下さい（各号担当編集委員名は、「伝熱研究」95年10月号をご参照下さい。なお、掲載を希望される号（月）の2カ月前を投稿の目安として下さい）。

2. トピックス記事の推薦：トピックス記事として適当と思われるものがありましたら、i) テーマ名、ii) 執筆者名、iii) 勤務先、住所、iv) 原稿の概要をB5用紙に明記の上、掲載を希望される号の担当編集委員または編集委員長まで手紙またはファックスでお寄せ下さい（この場合、記事のご推薦から掲載まで少なくとも3カ月をお見積もり下さい）。

3. 原稿の採否は編集委員会にご一任下さい。なお推薦記事につきましては、編集委員会で検討の上委員会より直接執筆依頼をいたします。

以上



## 「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117mm以内横176mm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。

117mm

176mm

## 編集委員会だより

第34期編集委員会メンバーが下記の通りになりました。今期も宜しくお願い致します。

### 編集出版担当副会長

林 勇二郎 (金沢大)

Tel : 0762-34-4740, Fax : 0762-34-4743

### 編集委員会委員長

増岡 隆士 (九工大)

Tel : 093-884-3139, Fax : 093-883-2524

### 編集委員

山田 悦郎 (秋田大)

Tel : 0188-33-5261 (2354), Fax : 0188-37-0405

伊藤 正昭 (日立)

Tel : 0298-32-4111 (6531), Fax : 0298-32-2807

鈴木 祐二 (東工大)

Tel : 03-5734-2804, Fax : 03-3729-0628

門谷 暁一 (コマツ)

Tel : 0463-34-1111, Fax : 0463-34-7022

片岡 勲 (京大)

Tel : 075-753-5823, Fax : 075-753-5845

山田 明 (三菱重工)

Tel : 0958-34-2300, Fax : 0958-34-2505

Vol.34, No.135 (1995年10月号) 担当

稲葉 英男 (岡山大)

Tel : 086-251-8046, Fax : 086-255-9669

Vol.35, No.136 (1996年1月号) 担当

飛原 英治 (東大)

Tel : 03-3812-2111, Fax : 03-3815-8356

加藤 泰生 (山口大)

Tel : 0836-35-9902, Fax : 0836-35-9926

Vol.35, No.137 (1996年4月号) 担当

熊田 雅弥 (岐阜大)

Tel : 058-293-2530, Fax : 058-230-1892

Vol.35, No.138 (1996年7月号) 担当

青木 和夫 (長岡技科大)

Tel : 0258-46-6000, Fax : 0258-46-6972

長坂 雄次 (慶大)

Tel : 045-563-1141 (3167), Fax : 045-562-7625

Thermal Science & Engineering チーフエディター

小竹 進 (東大)

Tel : 03-3812-2111, Fax : 03-3812-0835

会告その他、「伝熱研究」についてのお問い合わせは各号担当委員または編集委員長までお寄せ下さい。「伝熱研究」に掲載希望の会告等の原稿は以下のようにお願いします。

#### ○一般の会告原稿：

原則として、縦117mm、横176mm以内に収まるようにお願い致します。また、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、鮮明な原稿をお送り下さい(可能であれば、下記同様フロッピーディスクも添付下さい)。

#### ○地方研究グループ(支部)活動報告：

できれば、MS-DOSテキストファイル形式の3.5インチのフロッピーディスクおよびプリントアウトしたものをお送りください。

なお前期編集委員会からの引継事項として、会誌「伝熱研究」の内容の幅を拓げるため、(1)最新の研究情報、技術情報、機器製品情報等に関する「トピックス」、(2)研究上の経験談あるいは工学の行方等についての「随想」、(3)種々分野の「研究レビュー」、(4)伝熱学および関連の熱力学等の「講義(講座)」、(5)会員交流等の「会員の声」欄、(6)「賛助会員紹介」等の記事を増やす方向を検討しています。会員の皆様からの積極的なご提案をお願い致します。

(増岡 記)



# 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。(但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は1月号から10月号までの一年間同じです)

### 【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	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

### 【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

1. 「伝熱研究、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

2. 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。

- ・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数
- (但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

### 【入会手続き】

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

(注 意)

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

## 2. 会員の方々へ

### 【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。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いたします。

### 【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(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、至急納入をお願いいたします。特に、平成6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）

- i) 入会届、変更届、退会届の受付
- ii) 会費納入の受付、会費徴収等
- iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- v) その他必要な業務

(所在地)

〒113 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9時～午後5時)

(注 意)

- 1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信覧やファックス等の書面にてお願いします。
- 2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 工学部

機械科学科 斎藤彬夫

TEL:03-5734-2167、3308 FAX:03-5734-2167、2893

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)  
 ・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	H		年		月		日
1	会員資格	正・学						
2	氏名							
3	ふりがな							
4	生年月日	M	.	T	.	S		日
5	名称							
6	〒							
7	勤務先							
8	所在地							
9	TEL							
10	FAX							
11	〒							
12	住所							
13	自宅							
14	TEL							
15	TEL							
16	通信先**	勤務先・自宅						
17	学位							
18	最終出身校							
19	卒業年次	T・S・H						
20	専門分野	← (下記の専門分野の番号)						
21	学生会員の場合: 指導教官名	*** 印						

- 専門分野  
 1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 液相流  
 7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層  
 13: 蓄熱 14: 冷媒・空調 15: 内燃機関 16: ガス-ビーン 17: 蒸気機関 18: 原子力  
 19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ( )
- 例: 電子機器の冷却、生体伝熱、分子動力学等
- \*) 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。

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	H		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いたします。

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

日本伝熱学会入会のご案内

- 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。
  - 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)
  - 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部無料で差しあげます。  
 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差しあげます。  
 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。
  - 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おります。簡単な書式の領収書はご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。  
 申込書送付先: 〒1113 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 大塚山支店 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

平成7年度の「伝熱研究」の出版には、平成7年度科学研究費補助金「研究成果公開促進費」の補助を受けています。

伝 熱 研 究	ISSN 0910-7851
(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)	
Vol.34, No.135	1995年10月発行
THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING	ISSN 0918-9963
Vol.3, No.4	October, 1995

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. 34, No. 135

## 〈第7回日本伝熱学会賞〉

第7回日本伝熱学会賞の報告

.....第33期日本伝熱学会表彰選考委員会主査 福迫尚一郎 (北大) ..... 1

## 〈小特集：21世紀を支える低温利用技術の現状と展望〉

小特集にあたって.....	第34期編集委員会	..... 3
生体組織の凍結保存技術.....	棚沢一郎 (東大)	..... 4
液材料の閉鎖系凍結乾燥技術.....	小林正和 (共和真空技術)	.....10
冷凍法による海水淡水化技術.....	長島義悟 (三井造船)	.....20
アイスプラスト (氷球) による洗浄技術.....	川口利明・多田益太 (大陽東洋酸素)	.....24
昇華現象を利用した除霜技術.....	今井誠士 (松下冷機)	.....28
LNG 冷熱を利用した排ガス中炭酸ガスの固化分離技術 .....	竹内善幸・広中正吾 (三菱重工業)・島田 裕・徳政賢治 (中国電力)	.....34
凍土と地盤凍結工法.....	生頼孝博 (精研)	.....40
低温微細潜熱スラリーの蓄冷熱システム開発の動向.....	稲葉英男 (岡山大)	.....46
氷雪冷房と雪発電の現状と展望.....	対馬勝年 (富山大)	.....56
製氷機開発技術の現状.....	鳥光廣志・三成勝信 (ホシザキ電機)	.....62
過冷却現象を利用した製氷技術.....	武谷健吾 (日本製鋼所)	.....67
非水溶性不凍液によるフラジライズ製造技術.....	渡辺 裕 (東芝)	.....73
氷水搬送による冷房と熱交換器の性能 .....	浜岡幸夫・富山靖司 (前川製作所)・栗山知広 (日建設計)・森川大和 (関西電力)	.....78
リキッドアイススラリーよりの採冷熱研究の動向.....	山田雅彦・福迫尚一郎 (北大)	.....84

## 〈研究トピックス〉

空気輸送による流動床燃焼ボイラーへの碎粒炭の吹き込み.....中島忠昭 (三興空気装置) .....90

## THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol. 3, No. 4

1. New Wine in New Bottles, Unexpected Findings in Heat Transfer ..... 1  
Part I. A Critique of Models for Transient Thermal Conduction  
Churchill S.W.
2. Quantum Molecular Dynamics Study of Energy Transfer of Diatomic Molecules to ..... 7  
Solid Surfaces  
Zolotoukhina T.N.
3. Analysis of Coupled Molecular Vibration and Dissociation using Quasiclassical ..... 17  
Collision Trajectory Calculations  
Mizobata K., Kubota H., and Wada Y.
4. Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow of an Impinging Round Jet of ..... 27  
Plasma into Confined Walls (in Japanese)  
Ezato K., Kunigi T., and Shimazu A.