

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 55, No. 232
2016. 7

HSTJ

◆特集：食品の冷蔵・冷凍・解凍技術

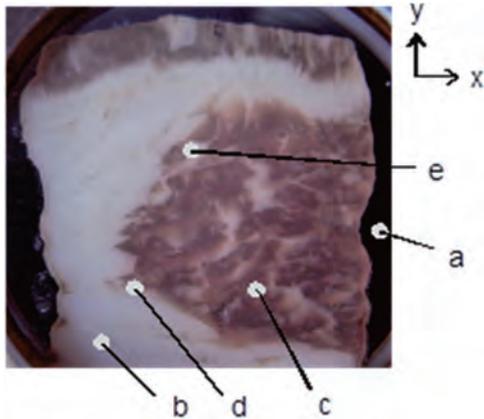


図1 生豚肉試の写真

a: 測定用石英セル, b: 脂肪組織, c: 筋肉組織 (赤身),
dおよびe: 脂肪組織および筋肉組織の境界領域

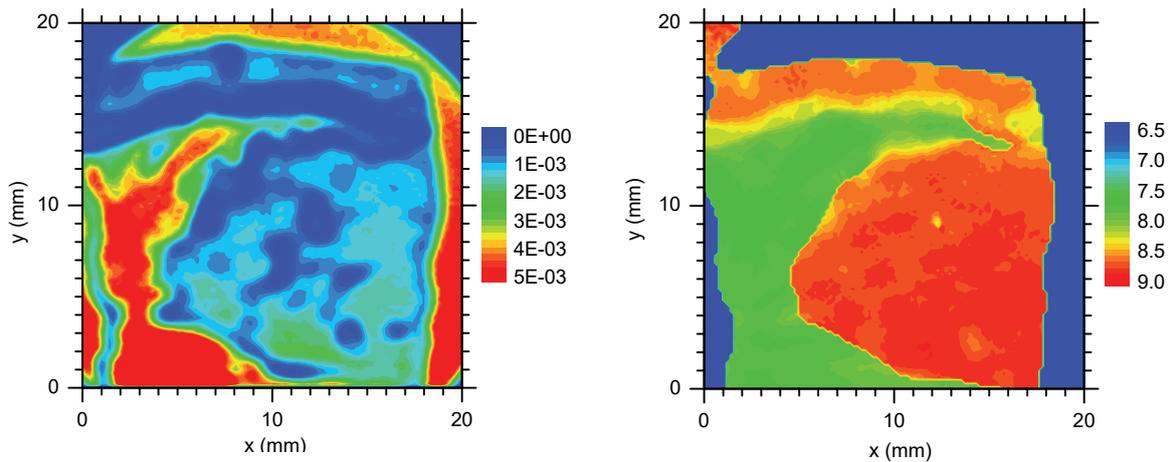


図2 凍結豚肉試料のテラヘルツ光 (1.0 THz) 透過画像²⁾

テラヘルツ時間領域分光法による凍結生体試料の分光イメージング

テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いた凍結生体組織の分光イメージ測定をおこなった. テラヘルツ領域で氷は水よりも一桁~二桁ほど透過率が良いため, 数 mm 以上の厚みのサンプルでも透過分光測定が可能である (凍結前後における水の光学特性の差異を利用したモニタリングは, 古くより行われている). さらに, THz-TDS は通常の分光手法よりもダイナミックレンジが広く, 減衰の強い試料の測定に適している¹⁾.

生豚肉試料 (図1) を雰囲気温度 -33°C で凍結し, 凍結豚肉試料のテラヘルツ測定に供した. テラヘルツ時間波形を得て, その情報を二次元画像へ変換した結果をフーリエ変換し, スポットサイズ約 1 mm の周波数 1.0 THz における透過テラヘルツ光強度をプロットした (図2 左). 組織間のテラヘルツ光の吸収の差が色の差として明瞭に識別できる一方, 境界領域付近でテラヘルツ光の強度が減少し, 図1c に対応する筋肉組織において細かな構造が青色のスポットとして強調されていることが分かる.

一方, 図2 右では時間波形のメインピークの位置をパラメーターとして2次元イメージを作成した. ピークシフト量は組織の屈折率を反映しているが, 二つの組織の境界において中間値を取るため, イメージ上では連続的に変化する. その結果, 作成したイメージは図1の光学画像のように, 組織の空間分布を正確に反映することがわかった.

本イメージング手法は, ある程度の厚さを持つ食品試料に対し, 非破壊, 非接触で水分子の運動性をも推測可能であるため, 食品品質制御の検査技術としての応用が期待される.

1) 保科宏道, 林朱, 大谷知行, 上野茂昭, 小川雄一, 冷凍, **90 (1052)**, 419-426 (2015).

2) Hoshina H, Hayashi A, Miyoshi N, Miyamaru F, Otani C, Appl. Phys. Lett., **94**, 123901 (2009).

上野 茂昭 (埼玉大学)
Shigeaki UENO (Saitama University)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

テラヘルツ時間領域分光法による凍結生体試料の分光イメージング

..... 上野 茂昭 (埼玉大学) 表紙裏

〈新旧会長挨拶〉

第 55 期会長就任にあたって 藤岡 恵子 (ファンクショナル・フルイッド) 1

第 54 期を振り返って 小澤 守 (関西大学) 2

〈第 28 回日本伝熱学会賞〉

平成 27 年度日本伝熱学会賞選考の報告

..... 表彰選考委員会委員長 功刀 資彰 (京都大学) 3

日本伝熱学会学術賞を受賞して 塩見 淳一郎, 志賀 拓磨, 堀 琢磨,
小宅 教文, 三浦 飛鳥 (東京大学) 5

日本伝熱学会学術賞を受賞して 後藤田 浩 (東京理科大学) 6

日本伝熱学会技術賞を受賞して 堀内 敬介, 西原 淳夫, 杉村 和之 (日立製作所),
松下 晃 (日立オートモティブシステムズ),
川瀬 大助 (日立パワーデバイス) 7

日本伝熱学会奨励賞を受賞して 江目 宏樹 (芝浦工業大学) 8

日本伝熱学会奨励賞を受賞して 馬淵 拓哉 (東北大学) 9

日本伝熱学会奨励賞を受賞して 山田 寛 (岡山大学) 10

優秀プレゼンテーション賞 受賞者 - 第 53 回日本伝熱シンポジウム -

..... 学生会委員会幹事 小宮 敦樹 (東北大学) 11

〈第 53 回日本伝熱シンポジウム〉

第 53 回日本伝熱シンポジウムの報告

..... 吉田 篤正, 木下 進一, 金田 昌之 (大阪府立大学), 芝原 正彦 (大阪大学)

松本 亮介 (関西大学), 藤野 宏和 (ダイキン工業), 小宮 敦樹 (東北大学)

加藤 之貴 (東京工業大学) 12

〈特集 : 食品の冷蔵・冷凍・解凍技術〉

凍結濃縮による食品のガラス転移と浸透圧脱水 川井 清司 (広島大学) 18

食品冷凍技術の考え方 君塚 道史 (宮城大学) 24

最新の食品解凍技術 渡辺 学 (東京海洋大学) 29

誘電分光を用いた氷結晶特性の推定 上野 茂昭 (埼玉大学) 36

オープンショーケースにおける冷蔵・冷凍技術

..... 中島 正登, 浅田 規 (富士電機株式会社) 42

不凍タンパク質による食品の凍結劣化抑制 萩原 知明 (東京海洋大学) 46

〈国際活動〉

アジア熱科学工学連盟 (AUTSE) 高田 保之 (九州大学) 52

〈ヒストリーQ〉

アポロ計画をふりかえる 吉田 英生 (京都大学) 55

〈行事カレンダー〉 61

〈お知らせ〉

公益社団法人 日本伝熱学会第 54 期 (平成 27 年度) 総会議事録 63

日本伝熱学会主催講習会「計測技術」 65

The First Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017) 66

日本伝熱学会東海支部主催 第 27 回東海伝熱セミナー

「エネルギー有効利用のための熱工学的アプローチ」 67

事務局からの連絡

・編集出版部会からのお知らせ 68

・新入会員一覧 69

〈編集出版部会ノート〉 73

Vol.55, No. 232, July 2016

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Shigeaki UENO (Saitama University)	Opening Page
--	--------------

< New and Former President's Addresses >

Inauguration Address as the 55th President

Keiko FUJIOKA (Functional Fluid)	1
--	---

The 54th Term in Retrospect

Mamoru OZAWA (Kansai University)	2
--	---

< The 28th Heat Transfer Society Awards >

On Selection of Award of the Heat Transfer Society of Japan, 2015

Tomoaki KUNUGI (Kyoto University)	3
---	---

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

Junichiro SHIOMI, Takuma SHIGA, Takuma HORI, Takafumi OYAKE, Asuka MIURA (The University of Tokyo)	5
---	---

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

Hiroshi GOTODA (Tokyo University of Science)	6
--	---

On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

Keisuke HORIUCHI, Atsuo NISHIHARA, Kazuyuki SUGIMURA (Hitachi, Ltd.), Akira MATSUSHITA (Hitachi Automotive Systems), Daisuke KAWASE (Hitachi Power Semiconductor)	7
---	---

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Hiroki GONOME (Shibaura Institute of Technology)	8
--	---

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Takuya MABUCHI (Tohoku University)	9
--	---

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

Yutaka YAMADA (Okayama University)	10
--	----

Best Presentation Award

Atsuki KOMIYA (Tohoku University)	11
---	----

< The 53rd National Heat Transfer Symposium of Japan >

Report on the 53rd National Heat Transfer Symposium of Japan

Atsumasa YOSHIDA, Shinichi KINOSHITA, Masayuki KANEDA (Osaka Prefecture University) Masahiko SHIBAHARA (Osaka University), Ryouzuke MATSUMOTO (Kansai University) Hirokazu FUJINO (Daikin Industries, Ltd.), Atsuki KOMIYA (Tohoku University) Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology)	12
--	----

<Special Issue: Refrigeration, Freezing and Thawing Technologies for Foods>

Glass Transition and Osmotic Dehydration in Freeze-Concentrated Food Kiyoshi KAWAI (Hiroshima University)	18
The Concept of Food Refrigeration Technology Norihito KIMIZUKA (Miyagi University)	24
Latest Technics for Thawing of Food Manabu WATANABE (Tokyo University of Marine Science and Technology)	29
Estimation of Ice Crystal Morphology by Dielectric Spectroscopy Shigeaki UENO (Saitama University)	36
Chilling and Freezing Technologies of Refrigerated Display Masato NAKAJIMA, Tadashi ASADA (Fuji Electric)	42
Suppression of Deterioration of Frozen Foods by Antifreeze Proteins Tomoaki HAGIWARA (Tokyo University of Marine Science and Technology)	46

<International Activity>

Asian Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE) Yasuyuki TAKATA (Kyushu University)	52
---	----

<History Q>

'Apollo Program' Revisited Hideo YOSHIDA (Kyoto University)	55
--	----

<Calendar>	61
------------------	----

<Announcements>	63
-----------------------	----

<Note from the JHTSJ Editorial Board>	73
---	----

第 55 期会長就任にあたって
Inauguration Address as the 55th President



藤岡 恵子 (ファンクショナル・フルイッド)
Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.)

5月25日に伝熱シンポジウム会場で開かれた本年度総会の半ばに開催された臨時理事会において選出され、小澤会長のあとを受けて第55期会長を務めることになりました。

学会創立50周年から5年目にあたる55期の始めにあたり、あらためてこの5年を振り返ると、将来検討委員会答申を受けて発足した特定推進研究課題をはじめとして、産学連携、異分野との連携、会員増強、財政健全化の分野で様々な新しい取組が着手され、やや慌ただしいながら次の時代に向けて着実に歩み始めた期間であったと感じております。

伝熱学会は伝熱研究会として創立された当初から、機械、化学工学、土木、建築、航空宇宙、原子力など伝熱に係りの深い学問分野の研究者・技術者がその発展を支えてきました。しかし、この20年間、機械系以外の会員数もシンポジウムでの発表数も減少し、ミニ機械学会と言われる状況になっています。伝熱学の魅力の一つが、多方面に応用対象を持ち、多くの学問分野を横断する点にあることを考えるなら大変残念な状況です。

また、工学系の学会であるにもかかわらず企業所属の会員が少ないことも伝熱学会の会員構成における際立った特徴です。個人会員に占める企業所属者の比率は、機械学会では約50%、化学工学学会では約60%であるのに対し、伝熱学会では30%以下で7割以上が大学や研究機関の研究者です。私達をとりまく社会が早いテンポで変化している今日、学術の課題も時代や社会の要請を受けて進化して行く必要があります。社会、特に伝熱学においては産業界との相互連携なしに健全な発展は望めないと考えます。

このような現状をふまえて、伝熱に関わる学術や技術を発展させるという学会の基本的な目的、

国際的な伝熱コミュニティにおいて日本を代表する組織としての役割、人的交流の場としての学会機能の活性化に加えて、次の3点を目標としたいと考えています。第一に多くの学問分野からの参集、第二に産業界との連携強化で、その理由はすでに申し上げた通りです。第三に、一般市民との開かれた知識共有の方法を探ってゆきたいと思えます。公益社団法人として、伝熱研究から得た知見を社会に還元することは使命の一つです。5年前の福島原子力発電所事故を契機として私たちに強く自覚されるようになった、科学者、技術者が社会的な問題に対して何ができるか、という課題に対する回答の一つとなるよう育てて行きたいと思えます。

2011年、50周年の節目に次の50年に向けての将来構想として発表された将来検討委員会答申に端的に表れているように、伝熱学会ほど自らの存在意義と責任を問い続けてきた学会は稀有と言えるでしょう。学問に対する妥協しない真摯な姿勢は伝熱学会が培ってきた大切な伝統で、伝熱シンポジウムにおける本質をついた、時に厳しい議論の背骨をなすものです。時代とともに変わってゆくべき要素、改めたい現状も多々ありますが、この妥協しない真摯な姿勢と率直な議論は次の世代に守り伝えて行きたい何よりの宝です。

企業所属で応用的な伝熱工学を専門とする私が会長を務めますのは、多彩な領域からの結集と産学連携の強化という目標を鮮明に提示する旗幟としての役割もあると捉え、これからの1年、一歩前に進めることができればと望んでおります。副会長、理事、協議員の方々と力を合わせて上記の事業を遂行して行く所存ですので、会員の皆様の温かいご理解とご協力、積極的な参画を賜りますようお願い申し上げます。

第 54 期を振り返って
The 54th Term in Retrospect



小澤 守 (関西大学)
Mamoru OZAWA (Kansai University)
e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

昨年日本伝熱学会総会において、岡崎前会長の後を受けて第 54 期会長を拝命してからはや 1 年がたちました。

会長就任の挨拶の中で任期中の目標として、伝熱科学・技術に係る専門家集団として相応しい、国際展開を図ること、産学連携や異分野との連携、さらには会員増強にも連動する財政の安定化などを挙げました。いずれも基本的には第 52 期の宇高会長、そして 53 期の岡崎会長からの引継ぎ事項であるとともに、本会だけでなく、いずれの学会であっても基本となる重要事項であったと思います。

国際展開につきましては九州大学の高田教授を中心とした国際活動部会のご尽力で、日中韓の連携のもと、東アジアの伝熱研究拠点組織として Asian Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE) が設立され、2017 年 3 月には第 1 回目の会合として Asian Conference on Thermal Science (ACTS) 2017 が開催される運びになっています。また本年 11 月には仙台で本会主催の The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT 2016) が開催されます。将来的には上記の ACTS とこの IFHT の関係をどうするのか、議論が必要ですが、いずれにしても東アジアにおける伝熱の国際的な枠組みが構築されました。会員各位の積極的な参画をお願いする次第です。

日本伝熱学会は会員数でいえば 1270 名 (2015 年度末) の、機械学会や化学工学会などと比較して小規模ではありますが、伝熱という専門家集団であることから、本来的には伝熱あるいは冷却という観点から技術全体が容易に見渡せるようにも思います。しかし実際のところは伝熱シンポジウムなどでは却って個別要素な議論が大勢を占め、分野横断的な広範な議論が十分には行われていなかったように感じていました。従って上記引継ぎ事項中の産学連携や異分野連携にはそれなりに注意を払ってきたつもりです。その典型が、先の大

阪における伝熱シンポジウムである程度実現できたと思っています。このシンポジウムは大阪府立大学の吉田教授を実行委員長として関西の多くの先生方、企業の方々によって企画運営がなされましたが、中でも企業の技術発表を企画していただき、また特定推進企画委員会には、従来の研究プロジェクトの進捗状況報告ではなく、それぞれのプロジェクトによるオーガナイズドセッションとして、産学連携に立ち位置をおいた全体を見通した多くの講演をいただきました。いずれも多くの聴衆を集め、活発な議論が展開されたことは誠に喜ばしいことと思います。このような試みが今後さらに展開することを期待しています。一昨年より、企業の技術者を対象とした講習会「伝熱工学の基礎」が東北大学の円山教授のご尽力で継続的に開催されています。このような講習会は財政の安定化に寄与するのは当然としても、学会として非常に重要な社会貢献活動であり、産学連携に大きく寄与するものと思います。このような事業の積み重ねが結果的に伝熱学会の社会的地位向上につながるものであると信じています。更なる展開は企業出身である第 55 期会長の藤岡恵子氏を中心とした新理事会に期待したいと思います。

さて、2015 年 6 月には元会長であります長野靖尚先生、そして 7 月には元会長であり、先の京都における国際伝熱会議の議長であった笠木伸英先生、2016 年 5 月には元理事の戸田三朗先生が逝去されました。いずれの方もまだまだご活躍いただける年齢でした。この場を借りましてご冥福をお祈りいたします。

最後になりましたが、緻密さに欠け、どちらかと言えばいい加減な会長であったと思います。花村、功刀、芹澤の 3 副会長、そして理事の方々のご支援がなければ勤まらなかったのは間違いもありません。ここに心より感謝申し上げ、会長退任の挨拶といたします。

平成 27 年度日本伝熱学会賞選考の報告
On Selection of Award of the Heat Transfer Society of Japan, 2015

表彰選考委員会委員長
功刀 資彰 (京都大学)
Tomoaki KUNUGI (Kyoto University)
e-mail: kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp

平成 27 年度日本伝熱学会賞学術賞, 技術賞, 奨励賞および貢献賞について公募を行い, 所定の手続きにより慎重に審査した結果, 各賞の授賞対象者を以下のように決定した (授賞対象の記載は順不同). 表彰式は, 平成 28 年 5 月 25 日に大阪市(グランキューブ大阪: 大阪府立国際会議場) で開催された学会総会において行われた.

1. 学術賞

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 代表研究者: 塩見 淳一郎 (東京大学)
共同研究者: 志賀 拓磨 (東京大学)
堀 琢磨 (東京大学)
小宅 教文 (東京大学)
三浦 飛鳥 (東京大学)
「ナノ・界面・合金構造のフォノン輸送物性にもとづく熱伝導制御」
第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F231, 2014 年
- 2) 代表研究者: 後藤田 浩 (東京理科大学)
「複雑系数理学によるガスタービン燃焼不安定の非線形ダイナミックスの解明と工学的応用」
第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, J122, 2015 年

2. 技術賞

Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 代表研究者: 堀内 敬介 (㈱日立製作所)
共同研究者: 西原 淳夫 (㈱日立製作所)
杉村 和之 (㈱日立製作所)

松下 晃 (日立オートモティブシステムズ(株))
川瀬 大助 (㈱日立パワーデバイス)

「水冷ピンフィンヒートシンク冷却設計技術」

3. 奨励賞

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 研究者: 江目 宏樹 (芝浦工業大学)
「ナノ粒子コーティングによるふく射制御に関する研究」
第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H332, 2014 年
- 2) 研究者: 馬淵 拓哉 (東北大学)
「高分子電解質膜ナノ・メゾ構造内におけるプロトン輸送メカニズムの量子・分子論的解析」
第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C133, 2014 年
- 3) 研究者: 山田 寛 (九州大学)
「濡れ性を制御した面におけるサブミクロンスケールの液滴凝縮メカニズムに関する研究」
第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I221, 2015 年

4. 貢献賞

Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 受賞者: 岩井 裕 (京都大学)
受賞理由: 第 15 回国際伝熱会議の運営への顕著な貢献

- 2) 受賞者：巽 和也（京都大学）
受賞理由：第 15 回国際伝熱会議の運営への
顕著な貢献

5. 文部科学大臣表彰の受賞

平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰
については、本学会からの推薦者はいなかった。

6. 謝 辞

日本伝熱学会賞ならびに文部科学大臣表彰の選考には、本会第 54 期表彰選考委員会幹事と委員の皆様のご多大な協力があった。また、これらの賞の募集に対して本会会員の多くの方々の推薦があった。この場をお借りして、賞の推薦ならびに選考に携わられた方々に深く御礼申し上げる。

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

塩見 淳一郎, 志賀 拓磨, 堀 琢磨,
小宅 教文, 三浦 飛鳥 (東京大学)

*Junichiro Shiomi, Takuma Shiga, Takuma Hori,
Takafumi Oyake, Asuka Miura (The University of Tokyo)*
e-mail: shiomi@photon.t.u-tokyo.ac.jp

先の第 54 回日本伝熱シンポジウムにおきまして、日本伝熱学会学術賞をいただきました。ご推薦いただきました方々、ご審査いただきました方々を始めとし伝熱学会関係者の皆様に心より感謝申し上げます。本受賞を励みとし、伝熱の学理と応用のさらなる発展に貢献できるよう一層の精進に努める所存です。

受賞の対象となりました研究「ナノ・界面・合金構造のフォノン輸送物性にもとづく熱伝導制御」は、絶縁体や半導体における熱伝導の支配的なキャリアであるフォノンの輸送をナノ・マイクロスケールの構造操作によって制御することを目的としたものです。熱輸送の制御を通じて優れた熱伝導/断熱・蓄熱・変換性能を有する材料を開発することは、廃熱利用、環境発電、電子や光デバイスの熱マネジメントなど、多岐にわたる伝熱分野において重要です。

本研究では、原理原則にもとづく熱伝導制御を実現するために、理論・数値計算、物性計測、構造作製の 3 つを一体とした基盤技術を構築しました。その際、巨視的な物性だけでなく、フォノン輸送の科学にもとづいて微視的な物性を評価することに力を入れました。例えば、計算と解析の両方において、熱伝導率だけでなく、フォノンのモードに依存した熱伝導能（熱伝導スペクトル）を評価しました。また、構造作製においては、ナノ構造の界面と内部の効果を分離できるモデル試料を作製し、TEM 観察と併せて、界面原子構造による熱伝導の制御性を評価しました。

さらに、これらを統合することで得られた知見を活かして、実際の材料開発にも取り組みました。熱電変換に関する研究では、シリコンからなるナノ構造化バルク材料を作製し、スケーラブルなシリコン熱電変換材料としてはトップレベルの高い性能を得ることに成功しました。

ここで開発した基盤技術はいずれも発展性に富

んだものです。計算技術においては、密度汎関数法にもとづいて原子間力定数を計算し、単結晶に対しては格子動力学法を、合金などの不均一系に対しては分子動力学法を実施し、様々な結晶材料の熱伝導スペクトルを計算しました。さらに、第一原理熱伝導計算から得られるフォノン輸送物性を入力としてフォノンボルツマン輸送方程式をモンテカルロ法によって解くことで、複雑なナノ構造体や界面を含んだメソスケール系の熱伝導解析や、ナノ・界面・合金構造による熱輸送の制御性の評価が行えるようになりました。

また、計測技術においては、熱伝導率のサイズ効果の計測から平均自由行程を見積もる手法を発展させました。過渡的な熱伝導計測法において、加熱領域をフォノンの平均自由行程より小さくすることで、熱伝導率のサイズ効果を誘起し、それから熱伝導スペクトルを計測する手法が発展していますが、熱伝導率の低い材料に適用するには、加熱領域を非常に小さくする必要があることが課題となっていました。それに対して、我々は試料表面に配置した金ナノアイランドのプラズモン吸収を利用して、加熱領域を数十 nm まで低減する手法を開発し、シリカなどの低熱伝導率材料の計測を実現しました。

これらの基盤技術によって、熱輸送のマルチスケール性（フォノン輸送が周波数や波長によって大きく異なること）が明らかになり、ナノ構造や界面を用いた制御性の自由度が向上しました。熱輸送を周波数や波長領域で考えることは熱放射などでは一般的ですが、熱伝導ではフォノンの強い拡散性のために、工学的にはあまり議論されてきませんでした。しかしナノスケールではフォノンが弾道的に移流するため、熱伝導スペクトルを考える意義が大いにあります。今後も、このようなアプローチをさらに進めて、伝熱工学のさらなる発展に貢献していきたいと考えています。

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



後藤田 浩 (東京理科大学)

Hiroshi Gotoda (Tokyo University of Science)

e-mail: gotoda@rs.tus.ac.jp

このたび、大阪で開催された日本伝熱学会第 54 期総会において、日本伝熱学会学術賞を頂きました。選考委員の先生方をはじめ、関係の皆様方に心より感謝申し上げますとともに、大変光栄に存じております。

受賞対象となりました「複雑系数学によるガスタービン燃焼不安定の非線形ダイナミックスの解明と工学的応用」は、私が立命館大学理工学部機械工学科で勤務していたときから取り組んできた研究課題です。複雑な非線形現象のダイナミックスを数理モデルとして記述し、その解の分岐構造や位相空間内のカオス・フラクタル構造を解き明かす力学系理論は、応用数学分野で体系化が進んでいます。私が専門とする燃焼分野においても、力学系理論を用いた研究が活発化し、工学的・工業的に重要なガスタービン燃焼不安定を対象に、その非線形ダイナミックスの解明が世界的に進んでいます (K. Kashinath et al, *J. Fluid Mech.*, vol. 761, 2014; V. R. Unni and R. I. Sujith, *J. Fluid Mech.*, vol. 784, 2015)。特に、ファイゲンバームの周期倍分岐構造やマルチフラクタル構造が、燃焼不安定に存在することが明らかにされつつあります。

力学系理論がガスタービン燃焼不安定へ適用されるようになったのは、ごく最近のこととなりますが、約 10 年前からも、力学系理論は、ルイス数効果による熱物質拡散と回転運動による遠心力の影響を受けた火炎面挙動 (H. Gotoda and T. Ueda, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 29, 2003) にも、伝熱科学分野における沸騰現象 (R. Mosdorf et al, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, 2005) にも適用されてきました。これらの研究は、1980 年代前半に提案された位相空間内の軌道不安定性と自己相似性を定量化する非線形特性量、いわゆるリャプノフ指数と相関次元が適用されたものでした。その後、2000 年代に入り、従来までの非線形特性量に加えて、記号力学に基づく順列エントロピーや時系列の粗雑化を配慮したマルチスケールエントロピーが提案され、グラフ理論に基づいた複雑ネットワ

ークの体系化など、現在、複雑系科学は著しく進展しています。

このような背景の中、私は、力学系理論のみならず、人工知能に基づくニューラルネットワーク、記号力学や複雑ネットワークを基とした複雑系科学の基礎理論とその数理技術をガスタービン燃焼不安定の新しい研究手法の開発に応用することが重要であると考えました。本受賞内容は、位相空間内の隣接する軌道群の距離の非線形発展に着目した局所的予測法と、動径基底関数ネットワークによる大域的予測法の両方を用いて、決定論的現象と確率的現象の新しい分離方法を提案し、燃焼不安定の非線形ダイナミックスの解明に適用したものです (林ら, 第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 J122, 2015; H. Gotoda et al, *Phys. Rev. E*, vol. 92, 2015)。また、複雑ネットワークとして、サイクルネットワークにも着目し、燃焼振動の圧力変動から構築されるネットワーク構造の強度分布にべき則、いわゆる、スケールフリー性が存在すること、クラスター係数と平均頂点間距離の関係からスモールワールド性が存在することも本受賞内容に関連した研究 (Y. Okuno et al, *Chaos*, vol. 25, 2015) として発表することができました。これらの研究成果は、燃焼研究における非線形問題では、おそらく、世界で初めてのものであると考えております。本研究で導入している方法論がこれまでの伝熱科学分野における非線形問題にも寄与し、新しい展開が期待できると考えております。

最後に、今回の受賞は、共同研究者である宇宙航空研究開発機構航空技術部門推進技術研究ユニット燃焼技術セクション 立花繁 (非会員) セクションリーダーの多大なるお力添えによるものであり、私だけの力ではここまで研究を進めることはできませんでした。共同研究者として本受賞を大変喜んでくださったことも含め、厚く御礼を申し上げます。また、本研究に携わった立命館大学理工学部機械工学科 後藤田研究室 卒業生にも心から感謝する次第です。

日本伝熱学会技術賞を受賞して

On Receiving Technical Achievement Award of the
Heat Transfer Society of Japan



堀内敬介, 西原淳夫, 杉村和之 (日立製作所),

松下晃 (日立オートモティブシステムズ), 川瀬大助 (日立パワーデバイス)

Keisuke HORIUCHI, Atsuo NISHIHARA, Kazuyuki SUGIMURA (Hitachi, Ltd.)

Akira MATSUSHITA (Hitachi Automotive Systems), Daisuke KAWASE (Hitachi Power Semiconductor)

e-mail: keisuke.horiuchi.oa@hitachi.com

このたびは技術賞にご選考くださり誠にありがとうございました。表彰委員の方々、我々を指導していただき導いてくださった電子機器冷却関連の諸先生方、ならびに日本伝熱学会の皆さまに心よりお礼申し上げます。

さて、今回受賞した内容は、「水冷ピンフィンヒートシンク冷却設計技術」です。我々は、主にハイブリッド自動車向けや風力発電向けの直流交流電力変換装置用に、上記ピンフィンヒートシンクを応用し、さらに放熱グリースを用いない直接水冷方式のピンフィンヒートシンク付きパワーモジュール (図 1 に示すような電力変換装置の主要部品) を量産しています。電力変換装置は小型高出力化の技術トレンドがあるため、同様の技術は我々以外の研究者や技術者も社内外で検討しています。

つまり、今回の受賞は、多くの社内外の協力者に支えられていることを強調しなければなりません。特に、今この瞬間も昼夜問わず製造し続け、品質を維持して下さっている現場の一人ひとりには、今回の受賞の感謝と喜びの気持ちを伝えたく思います。

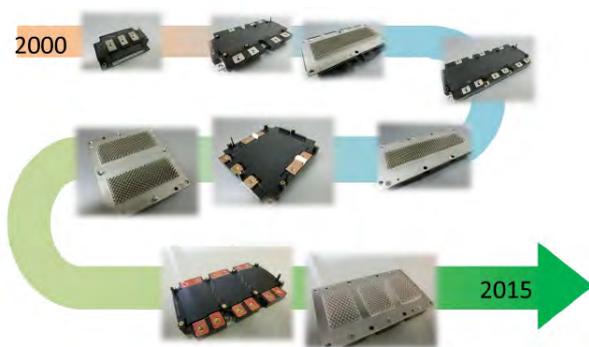


図 1 : 量産実績を残し市場で稼働中の
ピンフィンヒートシンク付きパワーモジュール

さて、ピンフィンには先人の功績のお陰で、研究的には成熟した管群の性能予測の式を応用している方々が殆どだと思います。産業界ではタービン翼冷却や熱交換器や電子機器向けヒートシンクとして空冷では長年の実績があります。しかし、我々が水冷用の高性能ヒートシンクとして使いこなすために、以下 2 点の課題に直面しました。

<従来の課題>

- ① 熱伝達率の予測のために無限長管群の式がよく用いられるが、ピン高さの低いヒートシンクに対しては底面の影響が大きく、精度の良い予測式がなかった。
- ② 数値解析に関しては、ピンフィン周りのバイパス流も考慮して計算すると非定常な大規模渦を含むため定常解析での扱いは難しく、複雑な流れ場を模擬した非定常解析は規模が大きくなりすぎる。

そこで、上記課題を解決するための手段として、我々は今回、以下に示す技術を構築しました。

<提案技術>

- ① 実験計画法を用いて広く設計に活用できる多数の形状のピンフィンヒートシンクやピン部のみ断熱材とした特殊なヒートシンクを準備し、実験的に求めた熱伝達率の予測式を提案した。更に、実用性を考慮してピン先端と冷却水路壁面との間にバイパス流が発生する場合にも対応して予測式を拡張した。
- ② この経験式を用い、遺伝的アルゴリズムによる自動計算ツール (多目的最適化技術) を適用することによって熱抵抗と圧力損失の両方の性能目標領域に入る形状を早期に見出すことができるようにした。

今後は、パワーエレクトロニクスの他のアプリケーションや異分野に上記技術を水平展開し社会に貢献できれば望外の喜びです。(堀内記)

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

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



江目 宏樹 (芝浦工業大学)

Hiroki GONOME (Shibaura Institute of Technology)

e-mail: gonome@sic.shibaura-it.ac.jp

このたび、大阪府立国際会議場にて開催された日本伝熱学会第 54 期総会にて名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと、誠に光栄に存じます。この場をお借りしまして、これまでご指導いただきました諸先生、諸先輩方、ご推薦頂きました先生、ご選考くださいました先生方、ならびに関係者の方々、これまで伝熱シンポジウム等の学会の場を通じて議論させていただいた皆様に深く感謝の意を表します。

受賞対象となりました、「ナノ粒子コーティングによるふく射制御に関する研究」は私が学生時代に東北大学流体科学研究所の円山重直教授のもとで行った研究であり、Mie 散乱理論で知られるナノマイクロ粒子のふく射特性を制御することで、遮熱塗料等に応用可能なコーティングのふく射物性を制御するものです。

具体的には、本技術を可視・近赤外領域に応用し、熱くなりにくい黒色塗料を実現しました。自動車や住宅などの建築物外壁は普段、太陽光に曝されています。これらには美的観点から、黒などの暗い色調が多用されておりますが、これらの色を有する表面は太陽光に対する可視・近赤外領域の吸収率が大きいいため、夏期の室内温度が上昇しやすく、冷房負荷を増大させる原因となっております。このため、可視光の反射を小さくして、太陽光エネルギーの約 52% を持つ近赤外光の反射を大きくするという波長選択性を有するコーティングの実現が望まれておりました。そこでコーティング内のふく射伝播を光線放射モデルによるふく射要素法 (REM²) を用いて計算し、コーティングの分光半球反射率を導出しました。この解析により、粒子材料、粒子径、体積分率や膜厚を最適化し、使用する粒子を選定しました。その粒子を使用してコーティングを作製し、分光半球反射率を測定

しました。解析結果が示唆したとおり、低い可視光反射率を維持しながら、高い近赤外反射率を持つコーティングが実現できました。実際に太陽光下で温度測定実験を行うと、一般的な黒色塗料と比べて 10℃ 以上も表面温度が下がっていることが確認されました。

また、本技術を紫外・可視領域に応用することで、紫外線遮蔽膜を実現しました。紫外線は物質に吸収された際、その物質の構造を変化させる作用があります。特に、工業製品における高分子材料はその影響が大きく、劣化が早いです。そのため、多くの工業製品ではその外観を変えることなく紫外線劣化を防ぐことが重要となります。そこで、今度は先述しました解析によりコーティングの分光半球透過率を導出し、同様の最適化を行いました。その結果、高い可視光透過率を維持しながら、低い紫外線透過率を持つコーティングを実現しました。

散乱性媒体によるふく射制御を特に波長選択性の制御に応用しました。しかし、散乱性媒体の制御はまだ多くの対象に応用することができると考えています。この技術をより精緻に汎用性高く確立させ、ナノスケール現象をマクロ現象に展開させるような技術確立を今後も進めていきたいと考えています。

昨年十月より、芝浦工業大学工学部機械工学科の特任講師に着任し、散乱性媒体によるふく射伝播の制御に関する研究を継続して行っております。また、山田純教授のご指導のもと、生体のふく射物性計測や光学の植物工場への応用等の新たな研究にも挑戦させていただいております。今後も微力ながら伝熱工学の発展に貢献したいと考えております。今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

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



馬渕 拓哉 (東北大学)

Takuya MABUCHI (Tohoku University)

e-mail: mabuchi@nanoint.ifs.tohoku.ac.jp

この度は、日本伝熱学会奨励賞という栄誉ある賞をいただきまして誠にありがとうございます。ご推薦、ご選考下さいました諸先生方ならびに選考委員の皆様には厚く御礼申し上げます。

本受賞対象となりました「高分子電解質膜ナノ・メゾ構造内におけるプロトン輸送メカニズムの量子・分子論的解析」は、固体高分子形燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) システム内部で用いられている高分子電解質膜内におけるプロトン輸送特性を、分子動力学 (MD) シミュレーションを用いて明らかにしたものです。

燃料電池は CO₂ などの有害な物質を排出せず、エネルギー効率にも優れているため、環境問題やエネルギー問題を解決するものとして注目されています。種々の燃料電池の中でも、小型・軽量化が可能であり、低温で動作する特徴をもつ PEFC は次世代の家庭用電源や自動車の電源として開発が進められています。PEFC の本格普及に際しては、小型化やコスト低減、耐久性の確保などの課題を解決することが不可欠とされています。特にシステムの小型化やコスト低減には、低加湿で高電流密度の運転が有効ですが、同条件では電解質膜内におけるプロトン伝導性が著しく低下してしまい、発電性能に多大な影響を及ぼします。従って、広い運転条件でのプロトン輸送現象を解明し、高効率化を達成することが PEFC の更なる普及に向けて非常に重要となります。

電解質膜内では、親水基によって不均一に形成された数 nm から数百 nm オーダーのナノ・メゾスケールの水クラスター内をプロトンが移動します。このように、プロトン輸送は電解質膜材料や加湿条件によって大きく変化する分子スケールの構造や輸送機構に大きく起因するため、CFD 等の連続体理論を用いたマクロスケール解析では、実

験で得られている特性量を十分に説明できていないのが現状です。そこで、分子スケールの構造内における流動現象という観点から、MD 法を用いた現象解析の研究がこれまで数多く行われてきました。しかしながら、水クラスター内においてプロトンは周囲の水分子状態により「H₂O 分子と結合し H₃O⁺として移動 (ビーグル機構)」するものと「H₂O 分子を媒介として移動 (ホッピング機構)」するものの 2 種類に分類され、実験的に両機構の重要性は示されているにも関わらず、ホッピング機構は化学変化を伴う複雑な機構であることから、従来の研究では専ら古典的な MD 法を用いた (ビーグル機構のみを考慮した) 解析が行われてきました。

上記問題に対して本研究では、上述のホッピング機構を考慮したプロトン輸送シミュレータを構築し、従来の古典的な手法では困難とされてきた両機構およびナノスケール水クラスター構造の双方を考慮したプロトン輸送現象を再現することで、電解質膜内プロトン輸送現象の本質的な理解を可能としました。水クラスターの大きさや連結性を定量的に評価し、これら構造特性とプロトン輸送特性の関係性から、プロトン伝導特性と水クラスターの連結性 (水チャンネル構造) に強い相関があることをパーコレーション理論に基づいた解析により明らかにしました。現在はこれら分子論的知見を基に、高機能の輸送特性を有する新規材料開発に向けた電解質膜の理論的設計指針の構築を進めています。

今後も燃料電池に関する研究を通じ、微力ながら伝熱工学の発展に貢献できるよう一層の精進を重ねて行く所存でございますので、引き続き皆様方のご指導ご鞭撻をいただきますよう、よろしくお願い申し上げます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

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

山田 寛 (岡山大学)

Yutaka YAMADA (Okayama University)

e-mail: y.yamada@okayama-u.ac.jp

このたび、大阪にて開催された日本伝熱学会第 54 期総会において荣誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りました。ご推薦、ご選考くださいました先生方ならびに関係者の方々、また、シンポジウムにおいてご議論させていただきました先生方に厚く御礼申し上げます。

さて、今回受賞いたしました「濡れ性を制御した面におけるサブミクロンスケールの液滴凝縮メカニズムに関する研究」は、私が九州大学大学院在学時に高橋厚史教授のもとで行った研究であり、数十 nm 幅の親水部分を有する撥水面上での凝縮初期過程のメカニズムについて調査したものです。この研究を行うにあたり、九州大学の高田保之教授には実験装置を多数使用させていただきました。ここで改めて深く感謝申し上げます。

本研究の対象である凝縮は、日常生活の中でも窓ガラスへの結露として見られるとともに、工業的には空調設備などに幅広く用いられている現象です。この時の熱輸送性能はその凝縮形態に依存しており、撥水面上で起こる滴状凝縮では親水面上で起こる膜状凝縮と比較して数倍から 10 倍程度高くなるのが 1930 年ごろの研究で明らかにされています。しかし、後者がより凝縮の開始が早くその状態を維持しやすいため、現在においても多くの場面で用いられています。

一方近年では省エネルギー化の観点から、滴状凝縮を利用したさらなる性能向上が求められており、例えば 100 μm 以下の凝縮液滴同士が合体した際に起きる **jumping** が有効であることが示されています。また、濡れ性の異なる面を組み合わせた複合面とすることで両者の長所を併せ持った表面を作る試みがなされており、熱輸送性能の向上という一定の成果が得られています。次に目指す目標は上に示した 2 つの思想の融合ですが、これにはミクロンスケール以下の親水部分における液滴凝縮の知見が不可欠であり、この部分を明らか

にすることを目的として研究を進めました。

ここまですが表向きの研究方針ですが、実際の始まりは大きく異なるものでした。ある日先生に呼ばれて部屋を訪ねると、「今度、環境制御型走査電子顕微鏡 (ESEM) が入るから何か面白いことやってよ。」と言われたことを今でも覚えております。この装置は通常高真空下でしか観察できない SEM を数千 Pa までの低圧環境下でも使用できるようにしたものであり、冷却ステージを併用することで水の凝縮を調査できるものです。研究開始当初は小さな液滴が成長していく様子を眺め、「面白いことって何だろう」と考える日々でした。そのような状況のある日、グラフアイト上で凝縮を観察したところ、液滴が表面のステップに沿って発生し、テラス面上では発生しないことを見つけました。これはそれぞれの濡れ性が異なることに起因していますが、今思えばこれが研究を行う上でのターニングポイントだったのだらうと思います。この現象に興味を抱いた私は詳細に観察するため、撥水性単分子膜で覆われた面に集束イオンビームを照射することで数十 nm のスケールで撥水剤を除去した濡れの複合面を作製し、実験を始めました。電子線による試料の損傷などを乗り越えて何度も実験を重ね、液滴が一定の間隔をあけて現れることを観察するとともに、古典核生成理論を拡張することで現象を説明いたしました。この知見は、凝縮位置の制御を通して、周期的に **jumping** による液滴離脱を実現する面の設計などに役立つのではないかと期待しております。

最後になりましたが、私は本年 4 月より岡山大学の助教に着任し、相変化現象を引き続き研究するとともに、三相界線移動の制御といった異なる研究にも挑戦していきたいと思っております。今後も伝熱工学の発展に微力ながら貢献できるよう精進して参りますので、これからもご指導、ご鞭撻のほどよろしく申し上げます。

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
— 第 53 回日本伝熱シンポジウム —
Best Presentation Award

学生会委員会幹事
小宮 敦樹 (東北大学)
Atsuki KOMIYA (Tohoku University)
e-mail: komiya@tohoku.ac.jp

平成 28 年 5 月 25 日に大阪市 (大阪国際会議場 グランキューブ大阪) で開催されました日本伝熱学会総会において、第 53 回日本伝熱シンポジウム (大阪) 優秀プレゼンテーション賞セッションで発表を行い、優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

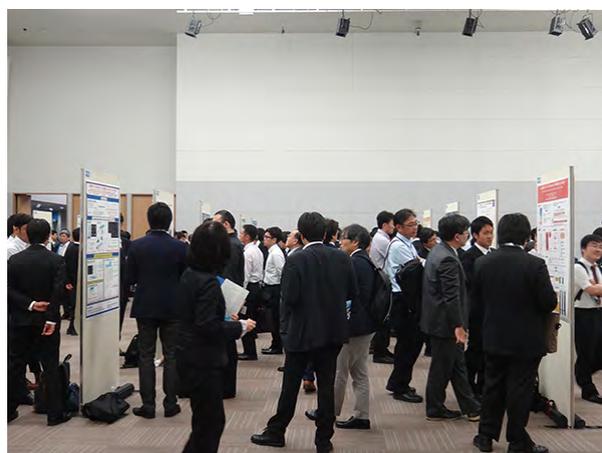
2016 年度 受賞者

- ◆ 氷室 佑樹 (東京工業大学)
「透明・不燃な光アップコンバージョンイオノゲルの開発と分子輸送特性の解明」
- ◆ 山田 将之 (九州大学)
「減圧下における撥水斑点加工面上の沸騰伝熱および気泡挙動」
- ◆ 鎌田 慎 (慶應義塾大学)
「レーザー誘起誘電泳動を用いた光 MEMS 拡散センサーの開発」
- ◆ 長澤 剛 (東京工業大学)
「in-situ ラマン分光による SZY 添加 SOFC 燃料極の炭素析出抑制メカニズムの解析」
- ◆ 古川 琢磨 (東北大学)
「常温大気中におけるふく射場が乱流自然対流伝熱特性に及ぼす影響」

(順不同)

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションはこれまでの 3 分間ショートプレゼンテーションとポスターでの発表というスタイルから、1 ページのアピールスライドによる研究内容アピール、およびポスターセッションでの研究発表というスタイルに変わり、ポスターセッションでの質疑応答までを含めた研究発表が審査評価対象となりまし

た。これまでとは違った多くの発表技術が問われることとなりましたが、参加された学生の皆様は独自の工夫を凝らし、セッションに臨まれました。



優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景



優秀プレゼンテーション賞受賞者との記念撮影

第 53 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 53rd National Heat Transfer Symposium of Japan

吉田 篤正 (大阪府立大学), 木下 進一 (大阪府立大学)
金田 昌之 (大阪府立大学), 芝原 正彦 (大阪大学), 松本 亮介 (関西大学)
藤野 宏和 (ダイキン工業), 小宮 敦樹 (東北大学), 加藤 之貴 (東京工業大学)
Atsumasa YOSHIDA, Shinichi KINOSHITA, Masayuki KANEDA (Osaka Prefecture University)
Masahiko SHIBAHARA (Osaka University), Ryousuke MATSUMOTO (Kansai University)
Hirokazu FUJINO (Daikin Industries, Ltd.), Atsuki KOMIYA (Tohoku University)
Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology)

1. シンポジウム概要

第 53 回日本伝熱シンポジウムが、平成 28 年 5 月 24 日 (火) から 5 月 26 日 (木) にかけて、大阪市 (会場: 大阪府立国際会議場および大阪市中央公会堂, 図 1 参照) で開催されました。関西地区での開催は今回で 8 回目となりますが、大阪で開催されるのは平成 4 年以来、実に 24 年ぶりです。本シンポジウムの開催にあたっては、日本学術会議による後援のほか、24 学協会の共催・協賛による協力を受けることができました。

今回の講演会場ならびに懇親会会場は、いずれも「水都・大阪」を代表する堂島川・土佐堀川に挟まれた中之島に位置し、近隣には北新地、梅田といった、いわゆるキタの繁華街にもほど近いことから、シンポジウム後に場所を移して親交を深めるには便利だったのではないかと思います。

シンポジウムには 346 件の講演論文が寄せられ、参加者の総数は事前・当日登録を合わせて 836 名となりました。曜日が例年と異なる火・水・木の開催で、また最近のアジアからの観光客の増加により、宿泊先不足の影響を心配しておりましたが、ここ数年のシンポジウムに匹敵する盛会ぶりとなりました。このように大勢の方々にご参加いた

けましたことに対し、改めてお礼申し上げます。

初日の午後には、企画部会学生会委員会の先生方のご協力のもと、恒例の優秀プレゼンテーション賞セッションが行われました。今回は従来行われていたショートプレゼンテーションを取りやめ、討論時間を 120 分と長く取らせていただきましたが、大きな混乱なく、例年通り活発な討論がなされたように思います。また、今回のシンポジウムにおいても、これと並行して特定推進研究特別セッションを開催いたしました。基調講演および特定推進研究の 11 課題について報告と議論が行われました。

2 日目の午後は、大阪歴史博物館の企画広報課長 大澤研一氏による特別講演「歴史の転換点：大坂の陣」が開催されました (図 2)。大河ドラマ「真田丸」主人公・真田幸村に関わる興味深い話をしていただきました。

特別講演・総会の後、会場を大阪市中央公会堂に移して恒例の懇親会が開催され、337 名の方々にご参加いただきました。会場の公会堂は重要文化財ではありますが、開演までのしばらくの間、その特別室の壁画・天井画をご覧いただきながら歓談いただくことができました。昨年同様、参加者



図 1 大阪府立国際会議場と大阪市中央公会堂



図 2 大澤研一氏 (大阪歴史博物館) の特別講演

の皆様のご協力のもと、集合写真を撮影してからの開宴となりました(図 3)。食い倒れのまち大阪で、開演早々に食事がなくなる恒例の事態にならないよう、名物たこ焼きを含めて十分な量を準備いたしました。また実行委員会の方では大阪近辺の地酒を 10 種揃えました。

今回の新たな取り組みとして、企業からの参加を促すこと、ならびに産学交流のさらなる活性化につなげることを意図して、開催地・大阪近辺の企業にご協力いただき、「関西企業からの製品開発・技術開発事例の紹介」、「大阪近郊の地元企業による技術紹介」の二つの企業向け企画を実施いたしました。初めての企画でどれだけの方に来ていただけるか心配しておりましたが、お陰様で予想以上の盛況でありました。

例年と同様、今回のシンポジウムでも多くの企業から機器展示(14社)、広告(19社)のお申し込みをいただきました。ご協力いただきました企業の皆様には心からお礼申し上げます。

以上、本シンポジウムの概要を簡単にまとめました。シンポジウムの運営状況や各行事の様子につきましては、担当者による以下の記事をご覧ください。

(実行委員長 吉田篤正, 総務幹事 木下進一)

2. ホームページ・参加登録

本シンポジウムに関する情報は、学会誌の会告とホームページ(<http://htsj-conf.org/symp2016/>)上で公開しました。ホームページの運用については、前回のシステムを構築された桃木悟先生(長崎大学)にご助言をいただきながら引き継ぎました。

今回のシンポジウムでも、講演申し込みから参加登録までをホームページから受け付け、印刷用プログラムや講演論文集(CD-ROM版, ウェブ版)を自動生成できるシステムを用い、これを改良し



図 3 懇親会集合写真

つつ進めました。内容や動作確認は松本亮介委員、芝原正彦委員、植木祥高委員をはじめとして委員全員の皆様にご協力いただきました。ここに御礼申し上げます。

私の不慣れゆえご迷惑をおかけした部分もありましたが、今回得られたフィードバックを生かして今後のシンポジウム等に生かしていただければ幸いです。

(金田昌之)

3. プログラム

今回のシンポジウムの発表件数の総数は 346 件でした。第 52 回の福岡(388 件)、第 51 回の浜松(384 件)に 40 件ほど及ばなかったものの、各セッションでは例年通りの活発な討論がなされました。特にオーガナイズド・セッションにおいては昨年に続く 5 件のセッション(「燃焼研究の最前線」、「熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進」、「水素・燃料電池・二次電池」、「非線形熱流体現象と伝熱」、「ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望」)に、新たに 3 件のセッション「伝熱工学が作る医工学と医療機器の新展開」「化学プロセスにおける熱工学」「外部空間の環境設計のための熱環境解析」が加わり、合計 136 件の講演が寄せられました。また優秀プレゼンテーション賞セッション(40 件)へも多く講演が寄せられました。ご尽力いただきましたオーガナイザーおよび学生会委員会の皆様には感謝申し上げます。

講演者の皆様には申し込み時に希望セッションとキーワードを選んでいただき、それを尊重しながらプログラム編成をいたしました。発表件数が多いため、初日から最終日のお昼まで、11 室で講演が並行するプログラムとなりました。

プログラム編成と座長の選出に関しては、関西大学の松本亮介委員、小田豊委員、網健行委員、論文集担当の大阪大学・芝原正彦委員、植木祥高委員、Web 担当の大阪府立大学・金田昌之委員、にご尽力をいただきました。最後に、ご多用のところ座長を快くお引き受け下さいました皆様に厚くお礼申し上げます。

(木下進一)

4. 講演論文集 CD-ROM 版・プログラム冊子

一昨年より冊子体の講演論文集を発行しないことになっておりますので、本年も CD-ROM 版およびプログラム冊子のみを制作いたしました。表紙には「水の都大阪」を象徴する淡青色を基調とした大阪城天守閣のデザインが採用されています。講演論文集 CD-ROM 版はシンポジウムの 1 週間前から会員向けに公開された講演論文集ウェブ版と同一の構成となっています。プログラム冊子は、タイムテーブル、概要、プログラム、索引の後に、企業広告（19 社）と機器展示マップ（14 社）を掲載する構成となっています。表紙のデザイン、講演論文集 CD-ROM 版の編集、プログラム冊子の編集は、金田昌之委員と植木祥高委員が中心となってお力をいただき、校正には実行委員各位にご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

（芝原正彦）

5. 会場・受付

グランキューブ大阪（大阪府立国際会議場）の 8～11 階の会議室を借り切って開催いたしました。メインフロアである 10 階には、エレベータホール正面に機器展示と受付を設け、わかり易い配置を心がけました。特に、シンポジウム概要、タイムテーブル、会場案内を一覧できる大型の案内パネルを設置し、附帯会議や Wi-Fi の情報、懇親会の案内なども全て案内パネルに集約させました。このメインパネルは多くの方々にご覧・ご利用いただけたものと思います。

名札と領収書は、全てミシン目入りの名刺カード印刷用紙を用いました（図 4）。事前登録いただいた皆さまに関しては、名刺サイズ 4 枚の領収書一体の名札を 50 音順に並べてお迎えしました。受付窓口への案内も印字することで、混雑することなくスムーズな受付業務となりました。名札の裏面も有効活用とのことで、懇親会会場への案内図を印刷いたしました。

今回の伝熱シンポジウムでは、共催・協賛学会員の方々の参加費は会員価格といたしましたが、そのご連絡が遅れたため、会期中に返金の手続き対応を致しました。ご迷惑をおかけいたしましたこと、お詫び申し上げます。

講演論文集が CD-ROM となって久しいです。論文集をお渡ししないことから、実行委員会ではコ

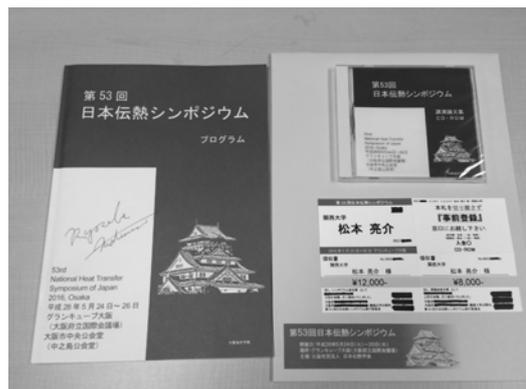


図 4 配布物と名札・領収書，封筒。

ングレスバッグの必要性について議論しました。参加者ご自身のカバンを持参されている場合には封筒の方が便利だろうとのことで、伝熱シンポジウムのワンポイント印刷をした角 2 封筒を準備いたしました。賛否あるかと存じますが、簡素化の一つとしてご理解のほどお願いいたします。

（松本亮介）

6. 機器展示・広告

従来のシンポジウムと同様に、機器展示・プログラム冊子広告掲載に多くの企業からお申し込みをいただきました。以下に、ご協力企業を紹介させていただきます。（敬称略・順不同）

【機器展示・広告掲載】

- Hitz 日立造船株式会社
- 計測エンジニアリングシステム株式会社
- 株式会社フォトロン
- 日鉄住金テクノロジー株式会社
- 株式会社フジキン
- 株式会社デンソー
- 株式会社 TFF フルーク社
- 株式会社ノビテック
- マイクロ・イクイップメント株式会社
- 株式会社菱化システム
- 株式会社ナックイメージングテクノロジー
- 日本カノマックス株式会社
- 京都電子株式会社
- 西華デジタルイメージ株式会社

【広告掲載】

- 株式会社ファンクショナル・フルイッド
- 新日鐵住金株式会社
- 長谷川鉄工株式会社
- 住友精密工業株式会社

・大阪ガス株式会社

機器展示は会場の 10 階ホワイエで行っていただきました。講演室のほとんどがこの 10 階に集まっていたこともあり、多くの方に利用いただけたかと思えます。

機器展示や広告の取りまとめおよび設営手配は、大阪市立大学・西村伸也委員、伊與田浩志委員を中心に関西大学・松本亮介委員、大阪府立大学・瀬川大資委員にご尽力を頂きました。

(木下進一)

7. 日本伝熱学会特定推進研究特別セッション「エネルギー・環境戦略と特定推進研究による伝熱研究の展開」

本学会はエネルギー利用に関する基幹学会として、社会的に重要な研究課題を成立させ、伝熱研究による社会への貢献を目的に特定推進研究を推進しています。本特別セッションでは以下の 3 件の特定推進研究について、産業・社会への進展状況について企業委員を中心に 11 件の講演を頂きました。(以下、敬称略)

1. 「波長選択ふく射輸送とエネルギー変換」 花村 克悟 (東工大)

2. 「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」 高田保之 (九大)・門出政則 (九大)

3. 「ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望」 塩見淳一郎 (東大)

報告に先立ち、推進研究の活動報告、新規研究の紹介があり、進展報告が行われ、最後に総合討論が行われました。提供された話題は以下の通りです。

特定推進研究の活動報告

「伝熱工学が作る医療機器の新展開」, 谷下一夫 (早大), 円山重直 (東北大)

「気候モデルにおける重要要素に関する基礎的検討と非専門家への翻訳, さらにその予測精度の評価に向けた検討会」 吉田英生 (京大)

新規特定推進研究の紹介

「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」 加藤之貴 (東工大)

特定推進研究の進展報告

- 選択波長赤外線を用いた新規熱処理プロセス 近藤 良夫 (日本ガイシ)
- 熱輻射制御と白熱電球の復活 高原 淳一

(大阪大学)

- 表面バーナを用いた TPV 発電の原理検証 若林 努 (大阪ガス)
- 熱ふく射の波長特性・方向・熱量の制御 伊藤 晃太 (豊田中研)
- 鉄鋼業における水冷技術 芹澤 良洋 (新日鉄住金)
- 高温鋼板のスプレー沸騰冷却特性に及ぼす表面酸化膜の影響 永井 二郎 (福井大学)
- 可視化実験と数値計算による鋼板上冷却水の熱流動解析 藤本 仁 (京都大学)
- ナノスケール伝熱機能発現とその応用への展望 塩見 淳一郎 (東京大学)
- 半導体パッケージにおけるナノ熱伝導の意義 松本 圭司 (IBM 基礎研究所)
- 有機-無機ハイブリッド材料によりシート型熱電変換モジュールの開発 加藤 邦久 (リントック)
- デバイス革新に向けたナノスケール熱制御技術/フォノンエンジニアリング 馬場 寿夫 (JST・CRDS)

実社会の応用展開に関わる話題のため関心が高く、用意した 200 余部の資料は全て配布しきる盛況でした。各講演また最後の総合討論で、参加者と講演者の間で伝熱研究の将来展開について活発かつ有益な意見交換が行われました。本企画セッションを企画した特定推進研究委員会としてご参加頂いた皆様に御礼を申し上げます。文末となりましたがシンポジウム実行委員会 委員長 吉田篤正先生、総務幹事 木下進一先生、委員 松本亮介先生はじめ委員の皆様、並びに本企画にご賛同頂きご登壇頂きました関係各位に心より感謝申し上げます。

(特定研究推進委員会 幹事 加藤之貴)

8. 優秀プレゼンテーション賞セッション

本セッションは、本学会の学生会員や 28 歳以下の若手研究者会員の研究を広く紹介し、研究意欲を高めるとともに発表技術を磨き上げる場として、毎年シンポジウムの初日に学生会委員会が企画・運営しているものです。今回の講演申込みは 41 件であり、最終的には 39 件の発表がありました。ここ数年の申込件数が 30~40 件で推移していることを考えますと、今回もこれまでと同規模の活

発なセッションを開催できたといえます。

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションからは、これまで行ってきたショートプレゼンテーション（各講演3分）を取り止め、ポスターセッションによる討論の時間をより長く設け、120分間行うことにしました。また、昨年度のシンポジウムで試行的に行いました「アピールスライド」を今回も導入し、多くのシンポジウム参加者にセッションに来ていただくようにいたしました。これは、各発表の内容を1枚のスライドに纏め、それを会場のいたるところで広告的に流すものであり、限られた条件で如何に自身の研究をアピールできるかの力量が問われることとなります。合わせましてアピールスライドの冊子体も制作し、シンポジウム参加者に配布いたしました。セッションの会場であるA室には多くのシンポジウム参加者が集まり、多くのポスターの前で活発な議論がなされていました（図5）。120分間を通して多くの方に参加いただき、発表者も参加者も納得のいくまで深い議論ができたのではないかと思います。

審査についてですが、今回はアピールスライドも審査対象といたしました。またポスターセッションでは、ポスターの内容、質疑応答の内容、理解度といった多くの観点から審査を行い、各ポスターにつき5名の審査員で審査を行いました。またポスター会場では参加者による優秀ポスターの投票も行い、審査員による審査結果を学生会委員会にて慎重かつ厳正に集計いたしました。その結果、氷室佑樹（東京工業大学）、山田将之（九州大学）、鎌田慎（慶應義塾大学）、長澤剛（東京工業大学）、古川琢磨（東北大学）（敬称略/講演番号順）の5名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました。惜しくも受賞に至らなかった発表者におかれ

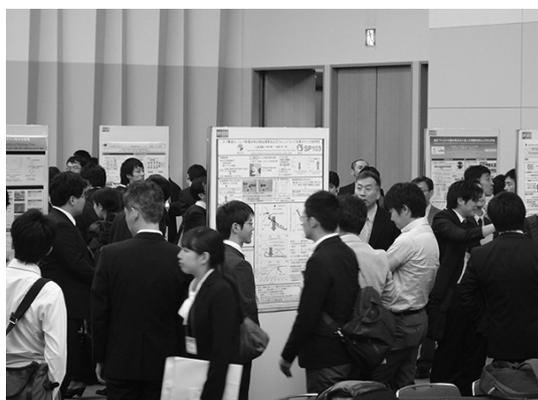


図5 ポスターセッション

ましても、非常にレベルの高い発表ばかりであったとの感想をいただいております。

末筆ながら、限られた時間内で多くの審査項目を懇篤ご丁寧に行っていただいた審査員の皆様、また多大なご協力をいただいたシンポジウム実行委員会に、この場を借りて篤く御礼申し上げます。

（学生会委員会 小宮敦樹）

9. 企業向け企画

年に一度の伝熱学会最大の催しである本シンポジウムに、企業の参加を促してさらに活発なものとするための企画として、今回の開催地である大阪に縁のある企業に協力いただき、「関西企業からの製品開発・技術開発事例の紹介」、「大阪近郊の地元企業による技術紹介」の二つの企業向け企画を実施しました。

「関西企業からの製品開発・技術開発事例の紹介」は、シンポジウム初日の午前中、大阪ガス、川崎重工、神戸製鋼、ダイキン、パナソニック、Hitz 日立造船、三菱電機（敬称略）の7社に協力いただき実施しました。参加企業の負担を少なくして話題提供を行いやすくするため、企業名のみを事前に公表し、内容は講演論文集には掲載せず発表資料のスライドのみとしました。事前に内容が分からないということでどれくらいの参加者が来場するか心配されましたが、実際は立ち見が出るほどの盛況ぶりで、企業の開発担当者の間や大学の研究者との間で非常に活発な意見交換が行われました。

「大阪近郊の地元企業による技術紹介」では、省エネ・効率化につながる環境技術を取り扱っている地元企業として、小段金属株式会社、株式会社新日本テック、中外商工株式会社、株式会社ビクター特販（敬称略）の4社に技術紹介と機器の



図6 製品開発・技術開発事例の紹介

展示をいただきました。シンポジウム二日目の午後一般講演セッションと並行して実施したにもかかわらず、多くの方に来室いただき、展示物やパンフレットを見ながら活発な意見交換が行われました。終了後、出展企業にヒアリングしたところ、「見学者からすぐにでも試したいと引き合いがあった」、「別の出展企業と今後の連携が約束できた」などの意見があり有意義な企画になったと感じています。

どちらの企画も盛況のうちに終了することができ、開催に協力いただいた企業や担当の方々に深く感謝するとともに、今後もこのような企画が継続されることを期待しながら、報告とさせていただきます。

(藤野宏和)

10. あとがき

今回、24年ぶりに大阪にて伝熱シンポジウムを開催するにあたり、在阪の大学を中心に京都、神戸の先生方、ならびに多くの企業の方を交えて実行委員会を組織し、吉田篤正実行委員長のもと、準備を進めてまいりました。第52回福岡・幹事の藏田先生ならびに多方面の先生方からご指導、ご助言を賜り、ご参加くださりました多数の方々のご協力により、5月26日16時20分をもって無事シンポジウムを終えることができました。厚く御礼申し上げます。

実行委員の関西地区の皆様には、幹事の不手際にも関わらず、論文集編集、プログラム編成、講演会ならびに懇親会会場準備、受付対応、会計、展示・広告の勧誘など、数多くの仕事をお引き受けくださり、迅速かつ丁寧に対応くださりましたことに、心より感謝いたしております。また、前日準備からアルバイトとして働いていただいた学生諸君も、短い準備時間にもかかわらず、遺漏なく仕事をしてくださり、大変感謝しております。

現在もシンポジウムの後処理が続いておりますが、本実行委員からの引き継ぎ事項を整理し、第54回開催地の関東地区の実行委員会へお渡ししたいと思っております。次回シンポジウムの盛会を、また本学会のさらなる発展を祈念いたします。

(木下進一)

第53回日本伝熱シンポジウム実行委員会

顧問	千田 衛 竹中 信幸 牧野 俊郎 小澤 守 武石 賢一郎	同志社大学 神戸大学 近畿職業能力開発大学校 関西大学 大阪大学
委員長	吉田 篤正	大阪府立大学
副委員長	須賀 一彦	大阪府立大学
総務幹事	木下 進一	大阪府立大学
監査	中部 主敬 鈴木 洋	京都大学 神戸大学
委員	赤松 史光 浅野 等 網 健行 伊藤 大介 伊與田 浩志 岩本 直樹 植木 祥高 梅川 尚嗣 岡野 泰則 小田 豊 加賀 邦彦 饒 雅英 加治 隆平 梶川 悟 鎌田 俊光 片岡 秀文 加藤 健次 金田 昌之 木戸 長生 齊藤 泰司 芝原 正彦 鈴木 崇弘 瀬川 大資 津島 将司 西村 真 西村 伸也 林 潤 日出間 るり 平山 美緒 深川 雅幸 藤岡 恵子 藤田 泰広 藤野 宏和 松本 亮介 村川 英樹 安田 俊彦 若林 努	大阪大学 神戸大学 関西大学 京都大学原子炉実験所 大阪市立大学 三菱電機 大阪大学 関西大学 大阪大学 関西大学 三菱電機 川崎重工業 ダイキン工業 新明和工業 ダイキン工業 大阪府立大学 三菱電機 大阪府立大学 パナソニック 京都大学原子炉実験所 大阪大学 大阪大学 大阪府立大学 大阪大学 神戸製鋼所 大阪市立大学 大阪大学 パナソニック 三菱重工業 ファンクショナル・フルイッド 住友精密工業 ダイキン工業 関西大学 神戸大学 日立造船 大阪ガス

凍結濃縮による食品のガラス転移と浸透圧脱水 Glass Transition and Osmotic Dehydration in Freeze-Concentrated Food

川井 清司 (広島大学)
Kiyoshi KAWAI (Hiroshima University)
e-mail: kawai@hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

食品の保存性は冷却によって向上する。温度の低下によって各種成分の分子運動性が低下した結果、劣化要因となる化学反応、物理変化、微生物生育などの速度が停滞するためである。この観点においては、食品の保存温度は低いほど望ましいといえる。しかし、氷点下では食品中の水が結晶化（凍結）する。このとき、食品並びにその成分は氷界面に押し込められることで物理的損傷を被る。また、他の成分と共に凍結濃縮されることで、反応速度の増加や pH 変化が起こり、化学的にも不安定な状態に陥る。更に食品中の水が細胞膜によって隔てられている場合、凍結濃縮によって両側に浸透圧差が発生した結果、水分移動が起こる。この水分移動が物理的強度の低い細胞膜にとっては大きなストレスとなる。したがって、凍結条件下では分子運動低下に伴う保存性の向上と引き換えに、凍結による一定の品質低下を受け入れる必要がある。

凍結保存においても、温度はやはり低いことが望ましい。一般に、冷凍食品の保存温度は -18°C 以下に設定されている。この温度は微生物の生育を無視するには十分である。しかし、劣化を招く化学反応や物理変化を抑え込むには不十分であり、数カ月単位での長期保存過程においては様々な劣化が進行する。保存温度を下げれば多くの問題は解決するが、現実的には低温維持に伴うコスト上昇が問題となる。凍結下にある食品の温度を更に低下させていくと、凍結濃縮相はガラス状態に陥る。ガラス状態において、構成成分の分子運動は見かけ上停止するため、高い貯蔵安定性が期待される。したがって、食品の長期凍結保存において、凍結濃縮ガラス転移が起こる温度 (T_g') は一つの目標温度となり得る。

この様に、食品の凍結は様々な物理現象を伴う。本稿では、食品中の水の結晶化（凍結）挙動と凍

結濃縮による食品の物理変化（凍結濃縮ガラス転移および浸透圧脱水）を取り上げる。

2. 食品中の水とその結晶化挙動

食品を冷却すると、食品中の水は過冷却を経て結晶化する。しかし、一部の水分子は食品成分と水素結合やイオン結合などによって強く相互作用した状態にあり、それらは低温まで冷却しても結晶化しない“不凍水”として振舞う。例えば、水溶性タンパク質は $0.3\sim 0.4\text{g-water/g-dm}$ 程度の不凍水を含んでいる[1, 2]。これはタンパク質と直接相互作用した水（いわゆる結合水）に相当する。水分含量が $0.4\sim 0.7\text{g-water/g-dm}$ 程度の範囲において、緩く束縛された水の存在が明らかとなる。この水は急速冷却すると不凍水として振舞うが、緩慢冷却すると結晶化する[1, 3, 4]。また、急速冷却によって不凍水となった場合でも、昇温過程で結晶化する。昇温過程で発生する氷の結晶型は準安定型（キュービック型）であり、更なる昇温過程においてヘキサゴナル型（通常の氷）へと転移する[1, 4]。水分含量 0.7g-water/g-dm 以上になると[5]、急激に水の性質が変化し（パーコレーション転移）、バルク水（通常の水）としての挙動が現れる。その他の成分、例えば DNA[6]やリン脂質[7]などにおいても、タンパク質と同様の傾向が認められている。それらの複合材料である食品についてもおおそ同じ傾向を示す。

3. 凍結濃縮によるガラス転移

3.1 状態図

食品中の水が結晶化すると、系は氷結晶相と凍結濃縮相とに相分離した状態になる。その後、温度の低下に伴い氷結率は増加し、凍結濃縮が進行する。凍結濃縮に伴う食品の物性変化は溶質（固形分）-水系状態図（図 1）を通じて理解される。ここでは代表例として、糖溶液の凍結濃縮過程に

ついて説明する．ある溶質濃度の糖溶液を室温から冷却していくと，一定の過冷却を経た後に水が結晶化（凍結）する．凍結濃縮相の固形分率は凝固点降下曲線にしたがって温度の低下と共に高くなる．やがて共晶点（eutectic temperature: T_e ）に達したとき，凍結濃縮相（糖）も結晶化する．ここで凍結濃縮は終了し，以後は単に温度が低下する（図1の実線）．しかし糖溶液は粘性が高く，冷却過程での結晶析出は困難なため，通常は共晶を待たずに凍結濃縮が進行する（図1の点線）．この過程において凍結濃縮相の粘度は著しく増加し，やがて流動性を失って固化する．この状態がガラス状態である．凍結濃縮ガラス転移が起こる温度は T_g' と呼ばれ，通常の（凍結濃縮を伴わない）ガラス転移温度（ T_g ）と区別して扱われる．材料が T_g' 以下にあるとき，氷結晶相と凍結濃縮相とは共に固体であり，凍結粉碎などの加工特性が向上する．また，氷結晶はガラス状態のマトリクスに覆われた状態にあるため，氷の再結晶化（肥大化）が停滞する．実在する食品のような多成分系において共晶が起こることは殆ど無く，大抵は凍結濃縮によってガラス化する経路を辿る（図1の点線）．

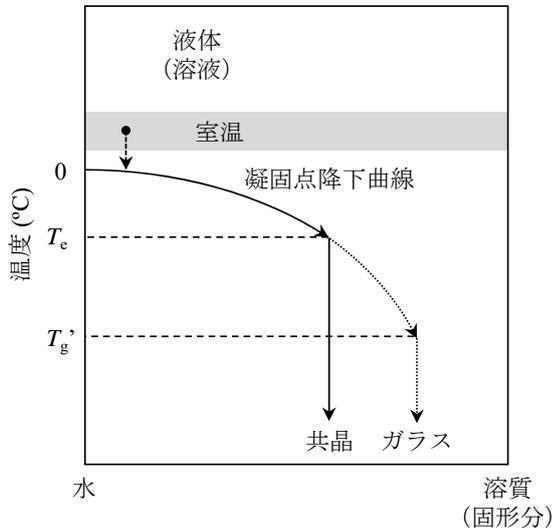


図1 溶質（固形分）-水系の状態図

3.2 示差走査熱量測定（DSC）

食品並びに食品成分の T_g' は示差走査熱量測定（DSC）によって決定することができる．一例としてスクロース溶液のDSC昇温曲線を図2に示す．約-35°C に吸熱シフトが確認できる．これは凍結濃縮によってガラス化したスクロース相が温度上

昇時にラバー状態へと変化（ガラス転移）したことを意味するものであり，一般にその開始点を T_g' とする．更なる昇温において，系の氷は凝固点降下曲線にしたがって徐々に融解するため， T_g' 後はブロードな吸熱ピークを示す．温度上昇と共に氷結率が低下し，やがて凍結濃縮相の溶質濃度が凍結前の濃度まで希釈されたとき，氷の融解が完了し，吸熱はピーク値を迎える．このピークトップが氷の融点（平衡凝固点）に相当する．凝固点降下曲線を得るには，様々な濃度に調節した水溶液について同様に氷の融点を調べればよい．但し，ピークトップは昇温速度や試料量によって変化し得ることに注意を要する．

糖溶液のDSC昇温曲線では，更に低温で小さな吸熱シフト（スクロースの場合約-43°C）が確認されることがあり，これが最大凍結濃縮ガラス転移温度に相当するとの見方もある．二つの吸熱シフトの帰属に関する議論はこれまで活発に行われてきたが[8-13]，研究者の間で必ずしも見解が一致していない．詳細は文献[14, 15]に委ねるが，高温で観測される吸熱シフトを境に様々な物理現象が急激に変化する事実などを踏まえて，筆者らは図2に示す高温の吸熱シフトを T_g' として扱うことを支持している．本稿もこの解釈にしたがうものとする．

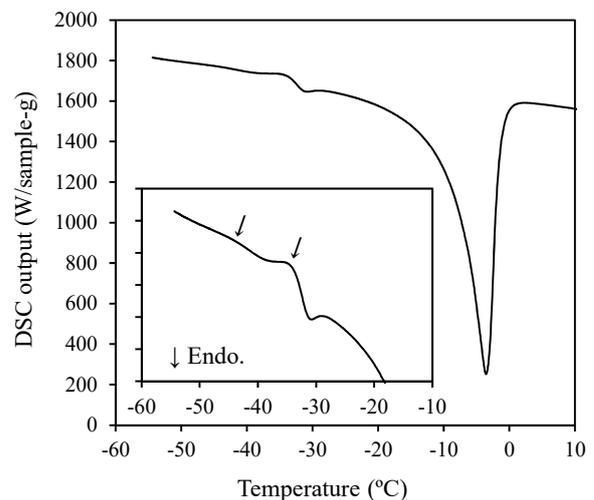


図2 スクロース水溶液のDSC昇温曲線

3.3 食品成分の凍結濃縮ガラス転移温度

食品の三大成分はタンパク質，脂質，炭水化物（糖質）である．このうち，食品の凍結濃縮ガラ

ス転移に支配的影響を及ぼす成分は、親水性が高いタンパク質と糖質である。一般に、親水性成分の T_g ' は分子量と共に高くなる。

糖質での事例として、グルカン (α -1,4 結合によるグルコース分子の直鎖) およびイヌリン型フラクタン (還元末端にグルコースを有した β -2,1 結合によるフルクトース分子の直鎖) の T_g ' と分子量との関係[16]を図 3 に示す。いずれの糖質も分子量の増加と共に T_g ' が高くなり、やがてプラトーに達する。この傾向から確認されるグルカンの最大 T_g ' はアミロペククチン (α -1,4 結合及び α -1,6 結合によるグルコースの巨大房状高分子) のそれとほぼ一致する。グルカンとイヌリン型フラクタンとを比較すると、グルカンの T_g ' は 10°C 程度高いことが分かる。これは、モノマー及び結合様式の相違によるものと理解される。

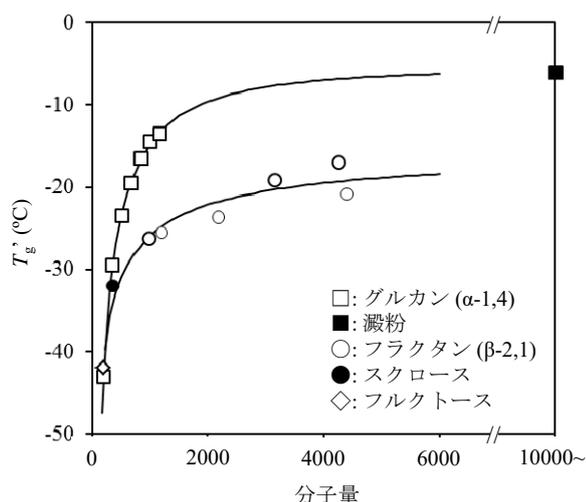


図 3 糖質における分子量と T_g ' との関係

タンパク質は半結晶性高分子 (ヘリックスやシートなどの秩序構造領域とランダムコイルと呼ばれる無秩序構造領域とが混在した高分子) であり、無秩序構造領域は凍結濃縮によってガラス転移する。その T_g ' は $-9 \sim -15^\circ\text{C}$ 程度の範囲にあり[17], 分子量が同程度の多糖と比較しても合理的な値といえる。しかし、これよりも遥かに低温 ($-67 \sim -87^\circ\text{C}$ 程度) で、小さな吸熱シフトが確認される[17]。高温での T_g ' との温度差が非常に高いことから、先述の糖溶液が示す二つのガラス転移とは異なる解釈が与えられている。代表的な解釈として、タンパク質と強く相互作用した水分子 (不凍水)

のガラス転移, タンパク質 (アミノ酸) 側鎖のガラス転移, 或はその両者の共同的なガラス転移, などが挙げられる[18-20]。

3.4 食品の凍結濃縮ガラス転移

糖質系食品における凍結濃縮ガラス転移の一例として、アイスクリームおよび氷菓の DSC 昇温曲線を図 4 に示す。ガラス転移を反映した吸熱シフトがアイスクリームでは約 -34°C で、氷菓では約 -44°C でそれぞれ認められる。前者はスクロースの T_g ' (約 -35°C) と、後者はグルコースおよびフルクトースの T_g ' ($-42 \sim -43^\circ\text{C}$) とほぼ一致する。アイスクリームや氷菓のように氷結晶を含んだ食品の場合、保存性だけでなく、スプーンの入り易さや食感といった硬さに係わる性質も重要視される。これらの T_g ' が高ければ保存性は高まるが、硬すぎて食べ難い。食品開発においては T_g ' の高い多糖や T_g ' の低い糖アルコールなどを混ぜ合わせることで、 T_g ' を任意に制御することが重要である。

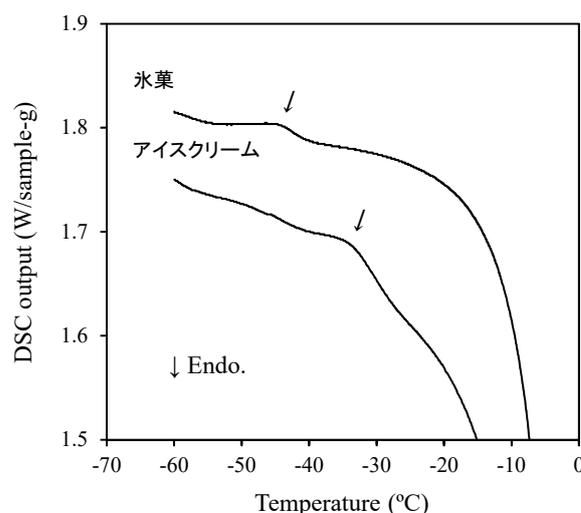


図 4 アイスクリームおよび氷菓の DSC 昇温曲線

タンパク質系食品における凍結濃縮ガラス転移の一例として、冷凍すり身の DSC 昇温曲線を図 5 に示す。開始点 -69°C に小さな吸熱シフトが、 -28°C にショルダーを伴う大きな吸熱ピークがそれぞれ観測される[21]。高温で認められる熱応答はすり身のガラス転移と氷の融解とが連続的に起こった結果と解釈される。同様に、魚肉は $-7 \sim -14^\circ\text{C}$ と $-63 \sim -87^\circ\text{C}$ とに[22, 23], 牛肉は -12°C と $-73 \sim -103^\circ\text{C}$ とに[24, 25]それぞれ T_g ' が認められる。タンパク

質における2つの T_g 'の解釈は先述の通りである。

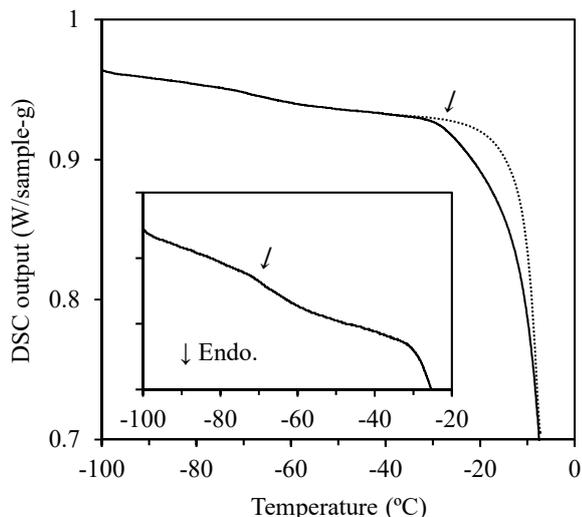


図5 冷凍すり身のDSC昇温曲線(点線は仮想線)

4. 凍結濃縮による浸透圧脱水

4.1 モデル細胞における凍結と浸透圧脱水

ラメラリン脂質に超音波処理を行うと、リポソーム(リン脂質二重膜によるベシクル)になる。リポソームはリン脂質二重膜によって隔離された内水相に溶質成分を保持したモデル細胞として捉えることができる。リポソームは外相凍結によって内水相の浸透圧脱水や凍結濃縮による融合などの物理傷害を被った結果、内包機能(リポソーム内水相における溶質保持率)が低下する。

リポソームの内包機能は凍結速度や凍結保存温度によって変化する。例えば、粒子サイズ $0.1\mu\text{m}$ 程度のリポソームを $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ および $10^\circ\text{C}/\text{min}$ で凍結すると、内包率は前者の方が低くなる[26]。また、粒子サイズ $0.14\sim 0.21\mu\text{m}$ 程度のリポソームを様々な氷点下温度で一定時間保持すると、温度が高い程、内包率が低下する[27]。これらの結果は、外水相凍結に伴う内水相の浸透圧脱水の度合いと関連付けられる。

凍結保存中におけるリポソームの変質(融合及び内包機能の低下)は共存溶質の T_g 'によって制御できる。例えば、リポソームにトレハロース (T_g '=約 -30°C) およびデキストラン (T_g '=約 -10°C) を加えて急速凍結し、様々な温度で一定時間保持すると、共存溶質の T_g '以上の保存ではリポソームが著しく変質すること、 T_g 'の高いデキストランの方がトレハロースより高温までリポソームを安定化

することなどが明らかにされている[28]。

4.2 食品における凍結と浸透圧脱水

一般に、凍結は細胞外から起こる。細胞内には様々な溶質成分が存在するためである。細胞外凍結が発生すると、細胞外での凍結濃縮によって細胞内外に浸透圧差が生じた結果、細胞内水が細胞外へと脱水される。これにより細胞は急激に収縮する。動物細胞の細胞膜は水分透過性が高く、この浸透圧脱水に対する応答に優れるため、細胞膜が被る凍結損傷は低い。一方、植物細胞では細胞膜の水分透過性が低く、急激な浸透圧脱水に応答できず、崩壊する。このことが要因となり、野菜や果物では凍結-解凍後に著しい組織軟化が起こる[29, 30]。この品質低下を軽減するため、例えば野菜などでは、凍結前にブランチング処理(熱水中に短時間浸す)が施されている。この処理によって組織が若干軟化し、凍結ストレスに対してある程度柔軟に応答できるようになるためである。しかし、これらの食材は加熱調理用としての利用に限定される。

野菜および果物の凍結耐性を高めるための前処理として、糖溶液を用いた浸透圧脱水が検討されている[31, 32]。予め浸透圧の高い糖溶液に浸すことで、細胞外の水が糖溶液に置き換わると共に、細胞内の水が脱水される。これにより、不凍水が増加(氷結率が低下)すると共に、細胞内水相の急激な浸透圧脱水が緩和するため、凍結損傷を抑えることができると期待される。例えば、50%スクロース水溶液を用いて浸透圧脱水処理を施したニンジンでは凍結-解凍後の組織軟化が低減することの報告がある[31]。このアプローチは非加熱処理であるため、解凍-復水後は生鮮品としての利用も期待される。しかし、浸透圧脱水もまた組織軟化の要因となるため、細胞膜が弱い果物などでは、浸透圧脱水条件の最適化が求められている。

果物における浸透圧脱水凍結の一例として、リンゴの破断特性を調べた結果を図6に示す。未処理(0.9%NaCl水溶液に浸しておいたリンゴキューブ)試料は弾性変形後に破断し、その後は組織破壊に由来する多数の微小ピークが確認できる。これは、リンゴ特有の硬さ(歯ごたえ)やシャリシャリとした食感を反映した結果である。一方、凍結-解凍試料は大きく圧縮変形した後に破断し、そ

の後の微小ピークは皆無であった。これは凍結-解凍によって試料が不可逆的に組織軟化したためである。しかし、糖溶液によって浸透圧脱水を施した後に凍結-解凍-復水した試料では、生鮮品に比較的近い破断特性を示した。浸透圧脱水によって、凍結-解凍後の食感が改善されたことが伺える。

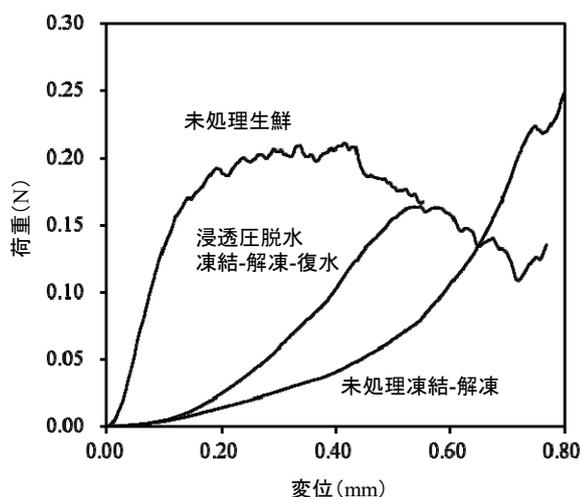


図6 各種リンゴキューブの破断特性

5. おわりに

我々は日常的に凍結-解凍した食材、並びに食品を利用しているが、そのことに気が付かない消費者は多い。食品の凍結-解凍技術が優れていることを意味するといえる。しかし、野菜や果物など冷凍に不向きな食材に対するアプローチなど、産業レベルでの課題は多く残されている。こうした課題の克服には、凍結下において食品が示す複雑な物理変化の理解は必要不可欠であり、この研究分野の今後の進展が望まれる。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金事業・若手研究B(課題番号21780126)および基盤研究C(課題番号15K07453)の助成によって実施されたものであり、感謝の意を表す。

参考文献

[1] Sartor, G. et al., *J. Phys. Chem.*, **96** (1992) 5133-5138.
 [2] Sartor, G. et al., *Biophys. J.*, **66** (1994) 249-258.
 [3] Sartor, G. and Mayer, E., *Biophys. J.*, **67** (1994)

1724-1732.
 [4] Sartor, G. et al., *Biophys. J.*, **69** (1995) 2679-2694.
 [5] Kotitschke, K. et al., *Progr. Colloid Polym. Sci.*, **83** (1990) 211-215.
 [6] Mrevlishvili, G. M., *Sov. Phys. Usp.*, **22** (1979) 433-455.
 [7] Crowe, J. H. et al., *Cryobiol.*, **27** (1990) 219-231.
 [8] Ablett, S. et al., *J. Chem. Soc. Fara. Trans.*, **88** (1992) 789-794.
 [9] Shalaev, E. Y. and Franks F., *J. Chem. Soc. Fara. Trans.*, **91** (1995) 1551-1517.
 [10] Levine, H. and Slade, L., *Cryolett.*, **9** (1988) 21-63.
 [11] Pyne, A. et al., *Thermochim. Acta*, **405** (2003) 225-234.
 [12] Blond, G., *Cryolett.*, **10** (1989) 299-308.
 [13] Blond, G. and Simatos, D., *Food Hydrocol.*, **12** (1998) 133-139.
 [14] Kawai, K. and Suzuki, T., *Cryo-Lett.*, **27** (2006) 107-114.
 [15] Harnkarnsujarit, N. et al., *Food Biophys.*, **9**, (2014) 213-2181.
 [16] Kawai, K. et al., *Carbohydr. Polym.*, **83** (2011) 934-939.
 [17] Chang, B. S. and Randall, C. S., *Cryobiol.*, **29** (1992) 632-656.
 [18] Kawai, K. et al., *Biophys. J.*, **90** (2006) 3732-3738.
 [19] Inoue, C. and Ishikawa, M., *J. Food Sci.*, **65**, (2000) 1187-1193.
 [20] Green, J. L. et al., *J. Phys. Chem.*, **98** (1994) 13780-13790.
 [21] Ohkuma, C. et al., *Food Hydrocol.*, **22** (2008) 255-262.
 [22] Inoue, C. and Ishikawa, M. *J. Food Sci.*, **62** (1997) 496-499.
 [23] Agustini, T. W. et al., *Fish. Sci.*, **67** (2001) 306-313.
 [24] Brake, N. C. and Fennema, O. R. *J. Food Sci.*, **64** (1999) 10-15.
 [25] Sartor, G. and Johari, G. P., *J. Phys. Chem.*, **100** (1996) 10450-10463.
 [26] Koster, K. L. et al., *Biophys. J.*, **78** (2000) 1932-1946.

- [27] Grabielle-Madelmont, C. and Perron, R. J. Colloid interface Sci., **95** (1983) 483-493.
- [28] Crowe, J. H. et al., Cryobiol., **31** (1994) 355-366.
- [29] Miyawaki, O. 低温生物工学会誌, **55** (2009) 23-27.
- [30] Andho, H. 冷凍, **87** (2012) 481-487.
- [31] Ohnishi, S. and Miyawaki, O. 温生物工学会誌, **51** (2005) 69-73.
- [32] Talens, P. et al., Food Res. Int., **36** (2003) 635-642.
-

食品冷凍技術の考え方

The Concept of Food Refrigeration Technology

君塚 道史 (宮城大学)

Norihito KIMIZUKA (Miyagi University)

e-mail: kimizuka@myu.ac.jp

1. はじめに

食品産業にとって冷凍は最も重要な技術の一つであると言っても過言ではない。保存目的のみならず、凍結濃縮、凍結乾燥、凍結粉砕などの操作に至るまで、構成成分の殆どが水分である食品の加工は水の相変化を上手に操った上で実現する事ができる。そこには凍結操作に対する食品独自の考え方が多数存在している。

2. 冷凍食品中の氷

2.1 氷結晶と品質

冷凍と聞いて、はじめに連想するのは氷であろう。例えば、茹で卵（白身）やジャガイモ、こんにゃくなどの食品は凍結して解凍すると元の状態には復元しない。これは冷却時に生じた氷結晶が要因である。一方で保存時の氷も品質に影響を与えている。例えば、長期間保存して大きな氷が出来てしまったアイスクリーム。衣やパン粉が湿気てしまい、クリスピー感が失われた調理済みの冷凍食品。逆に乾燥してしまい、白く変色してしまった魚や肉。これらは全て保存時に氷が変化した証である。食品の冷凍とは、冷却時から解凍時に至るまでの氷の状態を制御し、凍結前の品質を維持する技術と言える。

2.2 冷却時における氷の制御

解凍時の復元を考慮すると食品中に生じる氷は少なく、小さい方が好ましい。しかしながら食品の大部分は水であり、多量の氷を生じる事になる。通常、冷却時に生じる氷結晶の大きさと数は温度に因る。即ち、氷の種が生成する速度（核生成速度）や、その種が成長する速度（結晶成長速度）は食品内に氷が生じ始めた温度に因るのである。この関係を図1に示す。低い温度で氷が生じると多数の氷核が生成するが、その成長速度は遅い為、小さな氷結晶となる。一方、高い温度（殆どの食品の融点は0~-5℃付近。純水は0℃）で氷が生じ

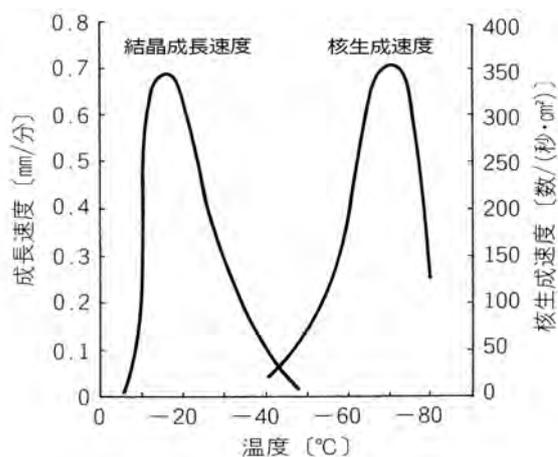


図1 核生成速度と結晶成長速度

た場合では、少数の氷核が生成し、その成長速度は速い為、大きな氷結晶となる。食品を凍結する際、温度は低い方がよいとする考え方はこの様な理論にもとづいている。また、図2では温度分布と生じる氷の形状を示しているが、氷結晶サイズは冷却面からの距離、即ち温度分布に従っており、冷却面に近いほど微細となる。この事からも、凍結時の温度が氷結晶のサイズを制御する上で重要である事が分かる。

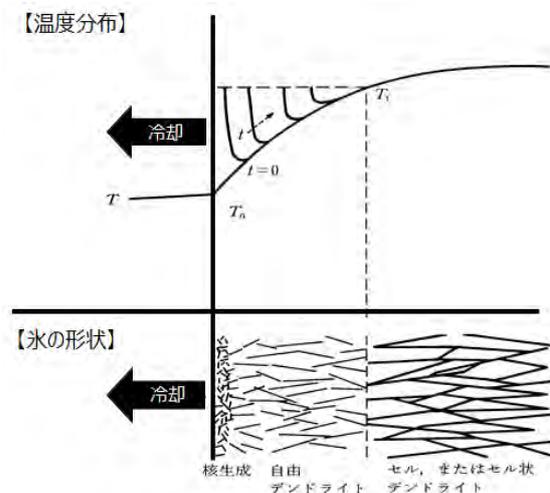


図2 温度分布と氷の形状

一方、高野豆腐（凍豆腐）の様に氷による変質を積極的に活用する食品も稀に存在する。豆腐に生じた氷結晶によりタンパク質のゲルが濃縮され、変性や分子間反応が生じ、食感の全く異なる食品となる。（こんにゃく等のゲル状食品の食感が解凍後に変化する要因も、おおよそこれにあたる。）凍結前とは異なる品質である為、保存としては失敗であるが、見方を変えれば氷の生成を上手く加工に利用した、数少ない事例と言える。

2.3 保存時における氷の挙動

それでは、保存時に氷は如何なる変化を遂げるのであろうか。食品中の氷は融点以下であっても消滅と成長を繰り返している。その結果、食品内の氷は保存中に再結晶化し、粗大化する事になる。再結晶化のパターンとしては、小さな氷はより小さく、大きな氷はより大きく成長する場合や、隣接する氷が凝集して成長する場合などが示されている[1]。氷が再結晶化するメカニズムは冶金分野などで知られるオストワルド熟成と同じである。即ち、小さな氷は大きな氷と比べ融点が高い為、保存中に消滅してしまう。消滅した小粒子の水は隣接する大きな粒子へ移行し、粗大化して行く事になる。一方、凝集は焼結と同じであり、隣接する結晶粒の接点が大きくなる事で粗大化する。図3にスクロース水溶液に生じた氷の再結晶化過程を示す。これを見ると比較的短時間の間でも粗大化が進行している事が分かる。

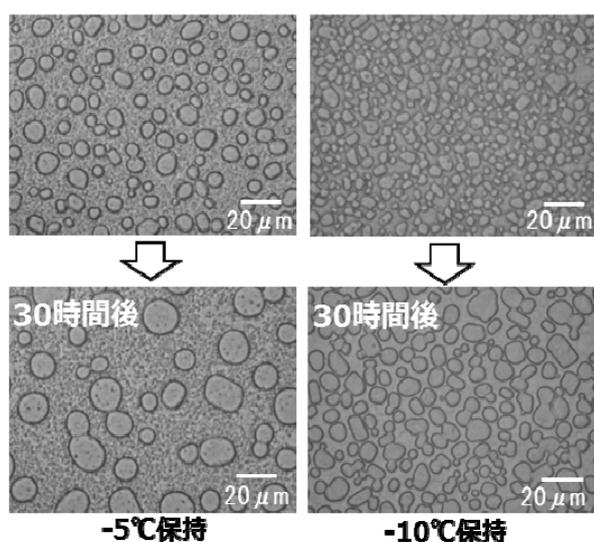


図3 氷結晶の再結晶化

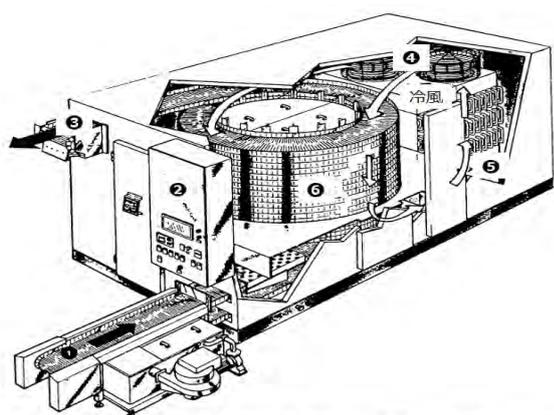
何れの場合であっても再結晶化は氷が局所的に融解する事で進行しており、よって保存温度が高くなれば粗大化速度は速くなる。滑らかな舌触りが重要となるアイスクリームなどの保存温度が低い理由はこの為である。一方、冷凍した食品が保存時に乾燥する現象は氷の昇華が要因である。これは冷凍庫の温度上昇が主な要因とされている。具体的には扉の開閉およびデフロスト等により温度が上昇すると、食品表面温度が空気温度よりも先に上昇し、表面から氷が昇華する。昇華した氷は再び食品に戻る事はない。この現象は袋で密封された冷凍食品であっても、食品と袋の間に空間が存在すれば同様に生じる。この場合、昇華した水分は袋の隅や食品の表面で霜となり、やがて氷の塊へと成長して行く。このような乾燥は凍結保存の間、際限なく継続され続ける。以上の現象から氷の制御は、冷却時のみならず保存時も重要である事が分かる。

3. 食品の冷凍技術とは

ここまでの話をまとめると、食品冷凍の基本的な考え方としては、冷却時に生じる氷は微細とし、保存時にはこれを粗大化または昇華させずに維持する技術である事が分かる。したがって、冷却時はその速度を速める事が必要であるし、保存時は温度変動を少なくして、低い温度を維持する事が基本となる。

3.1 現状の凍結法

現状に至るまで凍結装置の開発は、より微細な氷結晶を生成させる事を目的として食品の表面熱伝達率の改善に主眼が置かれてきた。現在、調理冷凍食品の現場では内部に設けられたファンにより、庫内に冷風を循環させるエアブラスト凍結機（図4）が最も汎用されている。これ以外にもエタノールや塩化カルシウム水溶液などの不凍液にパックした食品を浸漬して凍結させるブライン凍結機やパウダー状のドライアイスまたは液体窒素を直に食品に噴霧する方法など、様々な凍結機が稼働している。しかしながら、何れの凍結装置であっても表面から熱伝導で冷却する限り、冷却速度の改善には限界がある。よって最近では、これらの方法以外で凍結する技術も検討されつつある。



1.製品入口 2.制御盤 3.製品出口 4.ファン 5.蒸発器 6.スパイラルベルト

図4 エアブラスト凍結機

3.2 過冷却凍結法

過冷却は温度などの諸条件が整えば、水に限らず生じる現象である。よく、過冷却状態にある水溶液に衝撃等を与えると、急に凍りだす映像が紹介されている。過冷却を生じると融点より低い温度で氷が生成する為、2.2の説明と同様の理由により微細な氷が生成する事になる。これを食品に応用すれば高品位な凍結が期待できる。更にこの凍結法の魅力的な点は氷のサイズのみならず、表面および中心部を問わず、均一な結晶を生じる点にある。この様な凍結は表面から熱伝導で冷却した場合では再現する事はできない。最近、筆者らは過冷却を経て食品を凍結させた場合について研究を行い、過冷却度に応じて氷結晶は微細となり、その分布は試料内の位置によらず均一となること。また、過冷却後に生じた氷結晶はその後の冷却速度には因らず、凍結完了まで緩慢に冷却した場合も著しい成長は見られないこと。さらには、保存時における氷結晶の再結晶化についても抑制傾向にあるなど、これまでに確認されてはいない知見を明らかにした [2]。

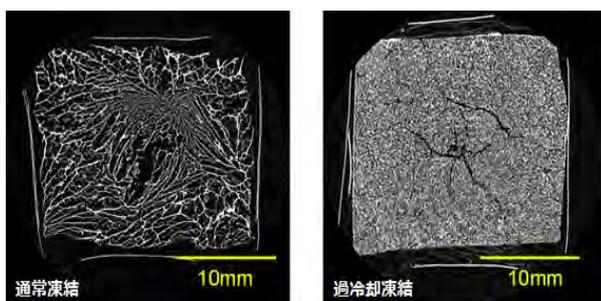


図5 過冷却凍結した豆腐のX線CT画像

図5は-8℃まで過冷却後、凍結した豆腐の断面であるが、過冷却を生じない通常の凍結に比べ、微細な氷が均一に生じている事がわかる。よって氷結晶のみを見れば、過冷却凍結法は理想的な方法ではある。しかしながら、低温まで再現性よく過冷却状態を維持することは難しい。よって、過冷却の制御方法を明らかにする事が実用化に向けての最も重要な技術課題といえる。

3.3 圧力移動凍結法

圧力によっても水の凝固点や融点は変動する。例えば、水を200MPaまで加圧すると融点は-20℃付近まで降下する。この原理を食品の凍結に応用すれば、圧力を移動させるだけで、氷が生じる温度を自由に制御出来る事になる。具体的な方法としては耐圧容器に食品を入れ、昇圧後これを維持して冷却を行う。その後、低温を維持したまま急激に常圧に戻すと、その直後から微細な氷が部位を問わず生成する事になる。要は先に紹介した過冷却凍結と同様の現象が圧力操作のみで確実に再現される。未だ研究段階の凍結方法ではあるが、解凍時に復元が困難な豆腐、ゆで卵、寒天などに圧力移動凍結を行うと、内部に生成する氷は微細となり、品質低下を抑制する事が確認されている [3]。しかしながら、この凍結法が普及しない要因としては圧力装置が大掛かりである事以外に、この方法のみでは食品を完全に凍結出来ない点が挙げられる。これは、例えば0℃から-20℃までの温度降下により水に蓄積された顕熱(84J/g)では凍結に必要な潜熱(335 J/g)の1/4程度であり、結局残りは表面伝熱により冷却する必要があるためである。

3.4 不凍タンパク質(AFP)の利用

氷の生成や成長に対する制御は溶質の添加でも可能となる。例えば、塩や糖類などを溶解すれば、融点と共に凝固点も低下する。また、水溶性高分子を添加すれば結晶成長速度の低下も可能となる。一方、最近ではppmオーダーの添加で氷の粗大化抑制が可能な特殊なタンパク質(不凍タンパク質; Antifreeze protein, AFP)が注目を集めている。当初は極地に生存する魚など、限られた生物のみに存在すると考えられていたが、麦やニンジン、魚類のヒラメなど植物、動物を問わず様々な生物からも発見されている。また、最近では国内メーカーからも不凍タンパクが販売されており、様々

な食品に少しずつ応用され始めている。海外では原材料表示に (ice structuring proteins, ISPs) と明示して、このタンパク質が添加されたアイスクリームが発売されている [4]。尚、再結晶化を抑制するメカニズムとしてはこのタンパク質が氷表面に吸着する事が要因とされているが不明な点も多く、現在も研究の対象となっている。

4. 氷よりも重要な事

4.1 凍結濃縮相とガラス状態

冷凍された食品を見る限り、そこに凍らない部分が存在する事をイメージするのは難しい。しかしながら、冷凍庫でアイスキャンディーを作った経験があればお分かりになると思うが、味の薄い氷の部分と氷が存在していない甘い濃縮液（未凍結部分）に分離していた事はないだろうか。実はこれと同じ現象が食品の内部でも微視的に起きている（図6）。食品を冷却すれば内部に氷結晶が生成するが、氷は溶質を排除して生成する為、成長するに従い未凍結部分の溶液濃度は徐々に高くなる（凍結濃縮）。稀に温度低下と濃度上昇により、溶質が溶けきれなくなってしまう、未凍結部分から析出（共晶）して濃縮が止まる場合もあるが、殆どの食品では析出せず更に濃縮が進み、やがて粘性の高い固体様の液体となる。実はこの時、濃縮液部分はガラスと呼ばれる新たな状態に相変化しているのである。ここでのガラス状態とは、いわゆるマテリアルサイエンス等で用いられているガラス（非晶質・アモルファス）と同義である。食品であっても、低温に保持した食品の一部や鯉節・パスタ等の乾燥された食品ではガラス状態にある事が示されている[5]。冷却する事で食品がガラスに至るまでの経路を図7の状態図を使って更に詳細に見てみる。

まず、常温の食品（A点）は冷却と共に過冷却を生じ、0℃以下の何処かで氷結晶が生じる（B点）、氷結晶が生じた後は、濃縮を伴う為、凝固点降下曲線にほぼ沿いながら食品の温度は降下し、やがて溶解度曲線との交点である共晶点（C点）

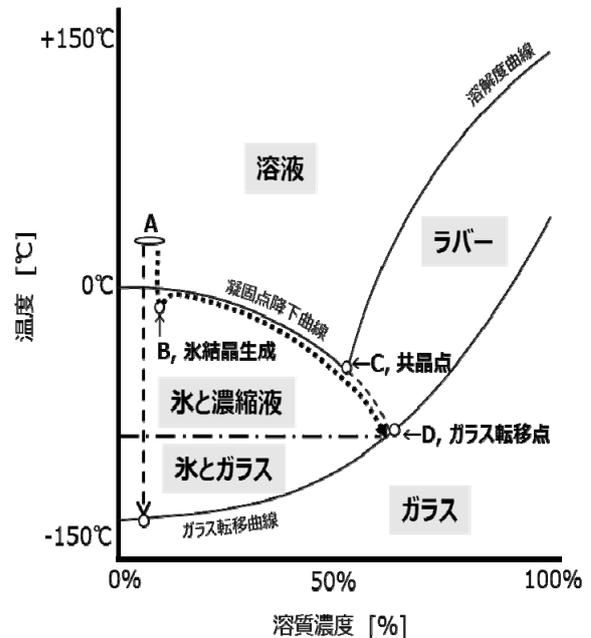


図7 モデル食品の状態図

に達する。しかしながら、糖などは水溶液から析出し辛い為、そのまま凝固点降下曲線の延長線上に沿って濃縮が進み、最終的にはガラス転移曲線と交わる（D点）。D点の温度は最大凍結濃縮相のガラス転移温度（ T_g' ）と呼ばれる。この点に達しても、完全に濃縮された訳では無いので、濃縮液中の水分は、いわゆる不凍水として残存する事になる。冷凍された食品の T_g' は食品によって異なり、例えば冷凍マグロでは-60~-70℃付近、アイスクリームでは-30~-35℃付近にある事が示され

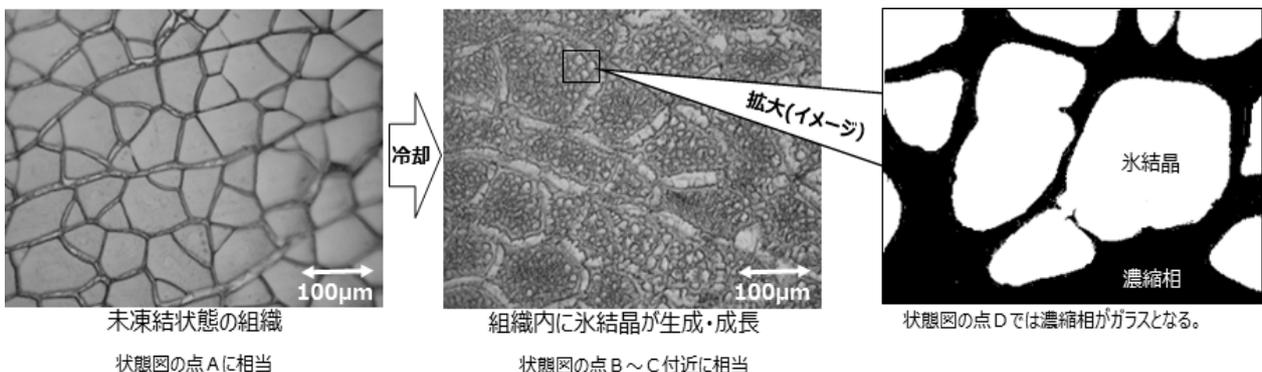


図6 氷結晶と濃縮相

ている[5]。したがって、家庭用冷凍庫 (-18℃付近) で保存された食品の内部では、氷と濃縮液が混在している事になるが、極低温（ガラス転移点温度以下）で保存された食品であれば、氷とガラス状態で混在している事になる。何れにせよ、冷凍された食品の中には、凍る部分と凍れない部分が斑に存在している事になる。

4.2 ガラス状態と品質

それでは、共に凍れない状態にあるガラスと濃縮液では一体何が異なるのだろうか。濃縮液からガラスに転移する事にどんなメリットがあるのだろうか。通常、食品をマイナス温度域で保存すれば微生物などの増殖は無く、長期間品質は安定していると思われがちである。しかしながら、マイナス温度域であっても濃縮液部分の分子運動は依然活発であり、化学変化に起因する劣化は進行する。しかしながら、ガラス状態になると分子の運動は著しく抑制され、劣化の反応は遅くなる。したがって、濃縮相をガラス状態で保持する事が出来れば、保存期間の延長が期待される。この様な観点から、これまで様々な食品に対して保存試験が成され、冷凍魚肉のタンパク変性はガラス転移温度以下で保存すれば抑制できる事[6]。また、化学的な変化のみならず、糖水溶液ではガラス化された濃縮液に囲まれた氷結晶は粗大化し辛い事が明らかにされた[7]。これらの点から、ガラス転移温度は食品を低温で保存する為の温度指標に成る事が分かる。冷凍でありながら、実は凍らない部分の状態が品質に対して大きく影響していると言える。

4.3 食品の凍結保存と生体の凍結保存

ここまで読むと、最近ではヒト受精卵も凍結保存が実用化されているのに、なぜ食品の凍結は回りくどい方法を模索しているのだろうか。と疑問に持たれた方も多いのではないだろうか。実は受精卵の凍結もガラス化と深い関わりがある。細胞をガラスに導く為の冷却パターンは種々あるが、ヒト受精卵の場合は液体窒素による急速冷却で氷結晶を生成させずに（凍結濃縮なしで）、細胞内の水分を一様にガラス化させている。（図7の長破線の経路）この場合、氷は生成していないので細胞は機械的な損傷を受けることなく、解凍後も生存する事になる。したがって究極の凍結保存方法と

いえるが、例えば純水をガラス化させる為には半径 30 μ m の微細な水滴であっても、10⁶℃/s 程度の冷却速度が必要である[8]。したがって表面から熱伝導で冷却する限り、この方法を直接食品に応用する事は出来ない。同様に、生体であっても細胞以外の組織や器官であれば生存状態を維持したまま凍結保存する事は出来ない。

5. おわりに

食品冷凍の考え方について述べさせていただいた。食品をテーマとした解説であるが、その原理は何れも食品とは馴染みの少ない分野が基礎となっている事に気付かれたと思う。例えば氷の生成、成長や再結晶化であれば冶金学、不凍タンパクをはじめとする生物の低温耐性であれば生物学、ガラスであればマテリアルサイエンスなどであり、これらの土台が伝熱などの分野となる。より良い食品の冷凍は広範囲な学問領域を融合する事により、初めて実現される技術と言える。

参考文献

- [1] 萩原知明, 凍結貯蔵および凍結流通過程における凍結食品中の再結晶化, 冷凍, **85-996** (2010) 37.
- [2] Rika KOBAYASHI, Norihito KIMIZUKA, Toru SUZUKI, Manabu WATANABE, Effect of supercooled freezing methods on ice structure observed by X-ray CT, Int. J. Refrigeration., **60** (2015) 270.
- [3] 淵上倫子, 寺本あい, 冶部祐理, 圧力移動凍結した食品の物性と微細構造, 高圧力の科学と技術, **18-2** (2008), 133.
- [4] 例えば, <https://www.giant eagle.com>
- [5] 鈴木徹, 食品のガラス状態とその利用, 食品と技術, **12** (2006), 1.
- [6] 井上千春, 石川雅紀, 低温貯蔵食品のガラス化, 食品と容器, **39-6** (1998), 320.
- [7] Tomoaki HAGIWARA, Ice Recrystallization in Sucrose Solutions Stored in a Temperature Range of -21°C to -50°C, Food Sci. Technol. Res., **11** (2005) 407.
- [8] F. Franks, 低温の生物物理と生化学, 北大図書刊行会, (1989).

最新の食品解凍技術

Latest Technics for Thawing of Food

渡辺 学 (東京海洋大学)

Manabu WATANABE (Tokyo University of Marine Science and Technology)

e-mail: mwat@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

凍結状態で流通する食品（以下、冷凍品と称する）は数多くある。「冷凍食品」と言うと、一般消費者向けの「調理冷凍食品」を指すことが多いが、これは冷凍品のほんの一部に過ぎない。ファーストフードやファミリーレストランなどのチェーン店では、セントラルキッチンで大部分の調理を済ませてから凍結して各店舗に配送することで、店舗での調理時間短縮、キッチンスタッフの人数削減、安定した美味しさなどのメリットを得ている。さらに、魚類、畜肉類などでは、凍結することで長い場合は数年にも及ぶ期間、品質の劣化を抑制し、安定した原料供給を可能としている。実際、加工食品の原料は、多くが冷凍品である。

しかし、冷凍品はいわゆる凍結ダメージの問題があり、未凍結品に比べると原理的に品質の低下が避けられない。この問題を解決するために、古くから多くの先達が研究・開発を重ねてきており、今や我が国の冷凍品の品質はかなり高いレベルに到達している。しかし、未だに冷凍品の品質低下が問題になるケースはしばしばみられる。この原因は、多くの場合解凍工程にあるのではないかと我々は考えている。その理由は、解凍という現象がそもそも非常に複雑で難しいことに加えて、研究例があまり多くないためである。本稿では、なぜ解凍は難しいのか、について説明し、これを解決するための最新技術について解説する。

2. 冷凍品の品質低下と解凍

冷凍品の品質が低下するメカニズムは様々である。冷凍品は、唯一の例外であるアイスクリーム・氷菓類を除き、凍結、保存、解凍という3つの過程を経なければ喫食できない。そして、これら3つの過程において、それぞれ食品の品質を著しく劣化させる反応が起こり得る。我が国では、食品の冷凍流通は主に魚類を対象として行われてきた

が、その黎明期である1950年代において、最も重要だった課題は凍結速度の増大である。当時は冷凍機の性能が低く、凍結装置であっても -30°C 程度までしか温度を低下させることができず[1]、凍結速度はどうしても緩慢だった。そして緩慢凍結では氷結晶サイズが粗大になりやすく、大きな氷が生成することによって細胞組織がダメージを受けていた。また保存工程も、当初は「氷が融解しなければ大丈夫」という程度の認識が一般的であったと思われる。このため、保存温度も今ほど低い温度は実用されず、保存中の乾燥や、それに起因する肉質のスポンジ化、酸化臭の発生や変色などの劣化反応が進行していたものと考えられる。戦後の食糧難の時代には、このような低い技術レベルで製造された粗悪な冷凍魚が出回ったというが、「冷凍品など不味くて食べられたものではない」という印象を抱いておられる方が、特に年配の方に散見されるというのも仕方のないことかも知れない。しかしその後は、缶詰原料としての凍結マグロが、我が国の重要な輸出品とみなされ、その品質を向上させるために冷凍機メーカーでの技術開発が急速に進み、その後10年余りで冷蔵倉庫の温度が -40°C に、凍結温度は -45°C に到達した[1]。このように、凍結工程、保存工程は企業が大規模に工業的に行うものであるため、古くから研究も盛んに行われ、その結果、現在では凍結、保存技術はかなり高いレベルに到達している。しかし解凍だけは、店舗や家庭など、流通の末端で小規模に行われるため、研究例が少なく技術レベルはまだ低いと言わざるを得ない。

それに加えて解凍工程は、凍結と比べて原理的に遥かに難しい現象である。解凍を上手く行うためにはどうすればよいか、というのは実は完全には解明されていないが、大まかに言えば、できるだけ短時間に、なおかつ温度が上がり過ぎないように、ということになる。この時点で既に、2つ

の要求はトレードオフの関係にあるため、解凍条件には原理的に最適値が存在する。この点、凍結は、極論すれば冷却媒体の温度を下げれば下げるほど良い凍結ができるため、品質だけを考えるならば単純である。

以上のように、解凍は元々複雑な現象であることに加えて研究例が少ないため、汎用的な技術というレベルには到達していない。例えば、刺身用マグロの解凍を上手に行う方法として、インターネット上で「プロの解凍」と呼ばれる有名な方法[2]がある。色々なところで紹介されているが、簡単に言えば、しばらく温水に浸漬した後に冷蔵庫に移す、という方法である。しかしなぜこれで良い解凍ができるのかという理由は説明されておらず、しかも実は被解凍物のサイズや温水の温度に応じて、浸漬時間を適当に調整しなければ失敗する可能性が高い。結局のところノウハウ頼みであり、科学技術としては未成熟であると言わざるを得ない。

以上より、解凍の技術レベルの向上は非常に重要であると考えられ、冷凍品の喫食時の品質が悪いという問題の多くは解凍工程の改善によって解決されるのではないかと期待される。以降では、最近我々が取り組んでいる解凍過程の数値計算[3],[4]を中心に、最新の解凍技術について解説する。

3. 解凍過程の数値計算

先に述べた通り、解凍工程は原理的に最適条件を持つため、計算による予測が有効である。しかし、氷から水への相変化が起こるため支配方程式は複雑であり、数値計算を用いた方が簡単である。実際これまでも、数値計算によって解凍所要時間や解凍温度履歴を予測した研究例は存在したが、それで家庭や店舗における解凍の失敗が無くなったか、と言えば答は否である。理由は明らかで、従来の研究例はあくまで温度履歴の予測を目的としており、そのときに解凍後の魚肉の品質がどうなるかについては何の情報も与えられず、結局のところ解凍終了点の判断はユーザのノウハウ頼みだったためである。食品の解凍において伝熱が非常に重要であることは疑い無いが、しかし伝熱だけでは役に立たないというのもまた事実であり、これは食品科学に共通する大きな特徴であると言える。喫食時の品質まで含めて数値計算によって

予測することができれば、誰でも失敗なく解凍を行うことができるはずだが、筆者の知る限りそのような研究例は1件しかない。しかもそれは有限要素法による3次元の数値計算[5]であり、実用性という面で十分ではなかったかと思える。数値計算を、家庭や店舗で誰もが簡単に使えるツールとすることが、誰もが失敗なく解凍を行える、という目的を達成するためには有効と思われる。

3.1 解凍計算モデル

そこで我々は、エクセル上で動作する簡便な解凍シミュレーションツールを開発することにした。対象とした食品は刺身用の凍結マグロで、計算を簡単にするために、伝熱を一次元に限定した。家庭や飲食店でのサク状に切り出された刺身用マグロの解凍を想定しているため、一次元でもそこそこ実用的なツールとなり得る。また、解凍を計算で再現する場合、氷から水への相変化の界面で物性値が不連続になるため、この界面の取扱いが非常に複雑になる。本研究では、これを避けるために、凍結とともに放出される潜熱を見かけ上の比熱変化とする見かけ比熱モデル[6]を用いた。実際の熱物性値の推算には御木[5]の方法を用いた。食品を凍結点以下に冷却すると、水分の一部は氷結晶を生成する。食品内の全水分に対する氷結晶の割合を凍結率 r とすると、凍結率 r は凍結開始点温度 T_f と試料温度 T により近似的に Eq. (1) で表される。

$$\begin{aligned} T > T_f &\Rightarrow r = 0 \\ T \leq T_f &\Rightarrow r(T) = 1 - \frac{T_f}{T} \end{aligned} \quad (1)$$

相変化中の食品の比熱 c 、密度 ρ 及び熱伝導率 λ は温度の関数として以下の式で表される。

$$c = c_b + (c_a - c_b) \cdot \frac{T_f}{T} - L_f \cdot \frac{T_f}{(T)^2} \quad (2)$$

$$\rho = (1 - r) \cdot \rho_a + r \cdot \rho_b \quad (3)$$

$$\lambda = (1 - r) \cdot \lambda_a + r \cdot \lambda_b \quad (4)$$

マグロ肉の熱物性値は小野[7]の値を用いた。それを Table 1 に示す。

Table 1 Thermo-physical properties of big-eye tuna

Specific heat [kcal/(kg·°C)]	c_a	0.82
	c_b	0.46
Density [kg/m ³]	ρ_a	1080
	ρ_b	1020
Thermal conductivity [kcal/(m·h·°C)]	λ_a	0.73
	λ_b	1.27
Latent heat of ice melting [kcal/kg]	L_f	56.80
Freezing temperature [°C]	T_f	-1.5

3.2 メト化予測モデル

食品の品質劣化をどのように評価すればよいか、というのは実は大変に難しい問題である。食品の品質を定量するということが自体が、まだほとんど研究されていない。とはいえ鮮魚で言えば、鮮度によく対応すると言われる K 値、細胞組織の健全性に関連すると考えられているドリップ量、テクスチャー、匂い、色などが品質に大きく影響する因子であると言われており、これらの指標それぞれは決して定量化できないわけではない。しかし、これらの指標がどのような割合で消費者が感じる「品質」に影響を及ぼしているのか、が全く判っていないのである。このため、最も品質に影響しそうな評価指標をケースバイケースで選択し、その指標によって品質を定量評価する、というのが一般的なやり方である。

今回の計算では生食用マグロを対象としているが、生マグロの場合最も品質に影響を及ぼす劣化反応は肉色の褐変である。先に、冷凍マグロは我が国の重要な輸出品であったことを述べたが、缶詰原料でも肉色の褐変は問題であり、外貨獲得のために冷凍マグロの褐変抑制の研究が盛んに行われた。1954年にはマグロ鮮魚肉の鮮やかな赤色の原因物質が筋肉細胞中のミオグロビンであることが確認された[8]。ミオグロビンの性質については、牛肉の肉色の原因物質でもあることから、海外で既に研究が進んでおり、ミオグロビンのメト化が褐変の原因であることが判っていた。マグロの褐変も同様の機構で起こると考えられたため、1958年にはマグロの冷凍貯蔵中のメト化に関する研究が行われた[9]。その結果、メト化の進行は、一般の化学反応と同様に温度が低下すれば遅くはなるが、-30°C程度まで低下してもまだ無視し得ない程度に進行することが判った。このため、マグロ

とカツオだけは、-50°C以下の極低温冷蔵庫に保存されることが一般的となった。

以上のことから本計算では、品質指標としてメト化による肉色の褐変を用いた。ミオグロビン関連化合物の内、メトミオグロビンが占める割合をメト化率と呼び、これが50%以上になると肉色は明らかな褐変を示すと言われている。数値計算により求められた解凍時の温度履歴からメト化率を計算する方法を説明する。メト化率の変化を一次反応とみなすと、温度が変動する場合、メト化率増加は Arrhenius の式と一次反応式の組み合わせで表される[10]。初期メト化率を $metMb_0$ 、 t 時間後のメト化率を $metMb_t$ 、頻度因子(定数)を A 、活性化エネルギーを E_a 、気体定数を R とし、絶対温度 $T(t)$ [K] を時間の関数とするとメト化率の一次反応式は Eq.(5) で表される。Eq.(5) の右辺は数値積分によって求める。

$$2.303 \cdot \log \left(\frac{100 - metMb_0}{100 - metMb_t} \right) = \int_0^t A \cdot \exp \left[\frac{E_a}{RT(t)} \right] dt \quad (5)$$

上式によってメト化率を推算するためには、メト化反応速度に関するパラメータ E_a および A の凍結前後におけるデータが必要となるが、マグロに関するデータが整備されていないため、本研究ではカツオ肉について御木が求めた値[5]を用いた(Table 2)。上記の計算を実行するため Visual Basic 上でプログラムを作成し、サイズ、初期条件等必要なパラメータを入力することで解凍後のメト化率分布を算出した。

Table 2 Apparent activation energy (E_a) and frequency factor (A) for the rate of discoloration in the muscle of skipjack (*Katsuwonus pelamis*)

Temperature range [°C]	E_a [cal/mol]	A [hour ⁻¹]
Above -2.0	2.521×10^4	2.239×10^{18}
-20 to -5.0	9.054×10^4	1.321×10^{71}
Below -5.0	1.829×10^4	1.836×10^{12}

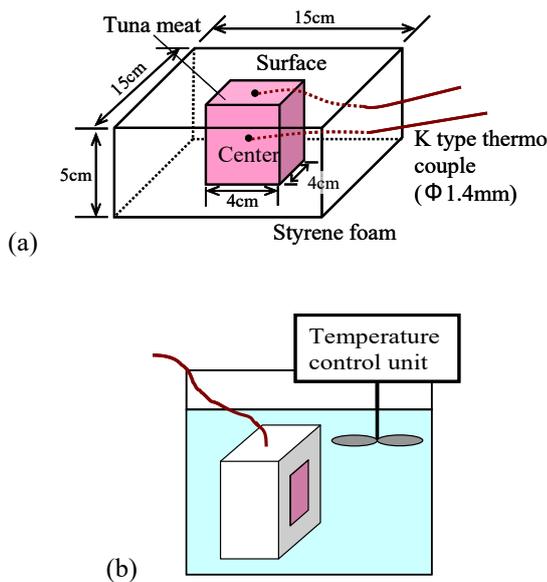


Fig. 1 Method of water thawing at 35°C[3].

4. 解凍実験による検証

前述の計算法の妥当性を検証するため、実際の凍結マグロの解凍実験を行い、解凍前後のメト化率を測定し、計算値と比較した。

4.1 試料

築地市場で購入した未凍結メバチマグロの赤身部分を、厚さ:5 cm, 縦:4cm, 横:4 cm に切り出し Fig.1(a)のように、四方を発泡スチロールで断熱した。これにより、計算と同じ次元伝熱の実験を実現した。温度測定用の熱電対は試料表面から 1 mm (表面温度), 25 mm (中心温度) の二点に取り付けた。これを厚さ 0.01 mm のポリエチレン製の袋に入れ、-40 °C の冷凍庫内で凍結し、以下に述べる解凍実験に供した。

4.2 解凍条件

解凍は、現在最も一般的に用いられている流水解凍と冷蔵庫解凍を想定した二つの条件で行った。いずれの場合も解凍終温は中心温度で 0 °C とした。以下に解凍方法の詳細を示す。

- (a) 温水解凍(急速解凍) Fig.1(b)に示すように、恒温槽を攪拌して温水を 35±1.0 °C に保持した中に試料を浸漬して解凍した。
- (b) 空気解凍(緩慢解凍) 5 °C (-4.0~+1.0 °C) に設定された冷蔵庫内に試料を静置して解凍した。

4.3 メト化率の測定方法

初期メト化率は凍結前の試料の値とした。その際、表面部と中心部において色調に若干の差があるため、肉塊全体を混ぜて平均値を測定した。一方、解凍後のメト化率は前述した二つの解凍方法で解凍した後に、以下の部位ごとに測定した。すなわち、表面部(試料の外側から 5 mm の厚さの肉)と中心部(試料の外側から 20 mm~25 mm の肉)の二ヶ所のメト化率を測定した。また、メト化率の測定方法は尾藤の方法[11]に従い、503 nm および 540 nm の吸光度を測定し、それらの比からメト化率を求めた。

4.4 シミュレーション

温水解凍と空気解凍の熱伝達率は、予備実験を行ってそれぞれ 170 kcal/(m²・h・°C), 10 kcal/(m²・h・°C) と求められた。また、実験値と比較するため、実験に用いた試料のサイズや初期温度等の条件を、Table 3 に示す通り上記プログラムに入力した。

Table 3 Initial condition for simulation [3]

Thickness	X	$5 \times 10^{-2}[\text{m}]$
Surface area and cross sectional area	S	$16 \times 10^{-4}[\text{m}^2]$
Initial temperature	T_{ini}	-40[°C]
Thaw media temperature in case of water	T_{water}	35[°C]
Thaw media temperature in case of air	T_{air}	5[°C]
Thawing final temperature	T_L	0[°C]
Numbers of cell	N	50

4.5 解凍温度履歴の検証

温水解凍の実験で得られた解凍曲線と計算による解凍曲線を Fig.2 に、また空気解凍曲線の実験値と計算値を Fig.3 にそれぞれに示す。また解凍所要時間、すなわち中心品温が 0 °C に到達するまでの時間を Table 4 に示す。Fig.2, Fig.3 より表面部、中心部共に実験と数値計算結果は良く一致していることが分かる。このことから、次元での解凍中の食品の任意の部分において、経時的温度変化を計算で予測するモデルがほぼ妥当であると考えられた。

4.6 メト化率の検証

メト化率の実験値および計算値を Table 5 に示す。初期メト化率の測定結果は 8.6 %であった。

Table 5 の結果を見ると、温水解凍では表面部のメト化率が実験値、計算値共に 30 %以上と高い値を示したのに対し、中心部では 10 %前後と表面部との大きな差を示す結果が得られた。一方、空気解凍では表面部と中心部のメト化率に大きな差はなく、それぞれの部位の値は 10 %台であった。いずれの条件部位においても実験値と計算値は最大 3 %前後の誤差を示した。しかしメト化率の実測では経験的に 5 %程度の誤差を生じることは通常であり、3 %程度の誤差はシミュレーションとして十分な精度であると考えられる。よって実験値と計算値は一致し、本モデルを用いたメト化率の予測の妥当性が示されたといえる。

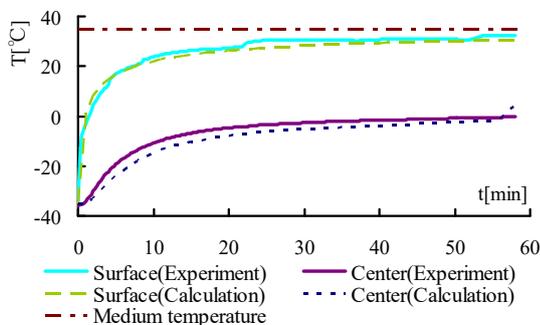


Fig. 2 Time-temperature curves of tuna meat during water thawing at 35°C [3].

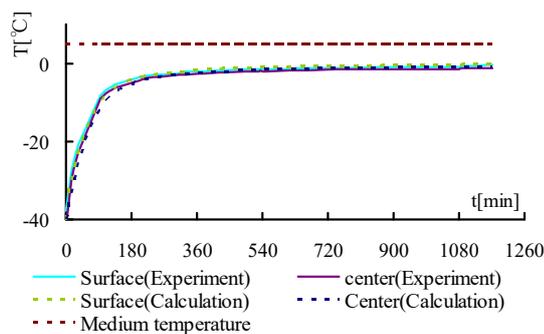


Fig. 3 Time-temperature curves of tuna meat during air thawing at 5°C [3].

Table 4 Experimental and calculated results of thawing time of tuna meat [3]

Thawing time	Water, at 35°C [min]	Air, at 5°C [hour]
Calculation	63	19
Experiment	61	19.5

Table 5 Experimental and calculated results of metMb% of tuna meat after thawing [3]

metMb % [%]	Water, at 35°C		Air, at 5°C	
	Surface	Center	Surface	Center
Calculation	32.3	8.8	15.8	14.9
Experiment	35.7	11.2	18.5	11.1

Surface: 5mm depth, Center: 20mm depth

Initial metMb% Surface: 8.6%, Center: 8.6%

5. 「プロの解凍法」の数値計算による検証

前出の「プロの解凍法」は、なぜ高品質の解凍ができるのか、具体的に温水への浸漬時間はどれほどにすればよいのか、またどれほど解凍所要時間が短縮されるのか、等についてほとんど科学的な解明が成されていない。前章で、流水解凍と冷蔵庫解凍について、数値計算と実験との良好な一致が確認されたため、この数値計算を用いて、プロの解凍法の検証とその最適化を行った。なお、以下ではこの解凍方法を均温解凍と称する。

5.1 1回浸漬による均温解凍

想定した解凍条件は以下の通りである。35 °Cの温水中に 5 分間浸漬、その後 5 °Cの冷蔵庫内に静置、サンプルサイズは厚さ 50 mm。

この条件での解凍温度履歴を数値計算で予測した結果は Fig. 4 に示す通りで、解凍開始から 5 分間の 35 °C温水浸漬で表面温度が急速に上昇し、10 °C付近まで達した。その後、5 °Cの空気中に移すとそれに伴い表面温度は低下した。その間、中心温度は常に上昇しており、結果として 30 分経過した辺りで全体が均一な温度になり、後はそのまま均等に温度が上昇して解凍が終了した。これより本解凍方法は、温水に浸漬して表面の温度をある程度まで上げてから冷蔵庫に移すことで、表面に蓄えられた熱を中心部まで浸透させて、表面の温度上昇を避けながら中心への浸透熱量を増大させるという、伝熱学的に妥当な方法であることが解った。

食品は一般に生体物質由来であり、多くの場合 60 %以上は水分である。このため食品内部の熱拡散率は一般に低く、食品の加熱・冷却においては食品内部の伝熱が律速となる場合が多い。しかも解凍の場合、初期は氷であった水分が液体の水に変化して熱拡散率がおおよそ 1/8 に低減するため、食品中心部への伝熱はいよいよ悪化する。このような状況を考えると、Fig. 4 の初期段階にみられ

る均温化過程が伝熱促進に大きく貢献していることが解る。この均温化こそが、一般にプロの解凍法と呼ばれている方法の原理的な特長であると考え、我々はこの方法を「均温解凍」と名付けた。

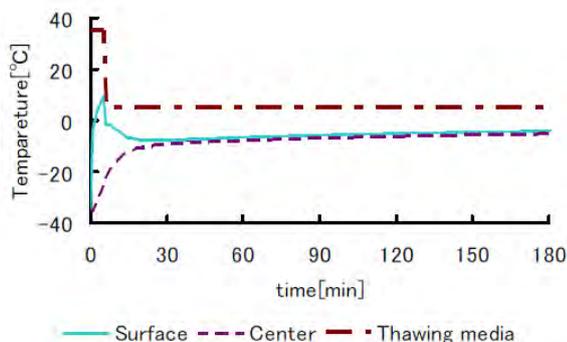


Fig. 4 Time-temperature curves of tuna meat during ③ thermal equalize thawing. [4]

Table 6 は、1回浸漬による均温解凍③と、同じサンプルを用いた場合の、流水解凍①と冷蔵庫解凍②の解凍所要時間をまとめたものである。また Fig. 6 は解凍終了時の表面部と中心部のメト化率の計算値である。

③と②では最終的な解凍時間は約 2.2 時間の差があるが、解凍後のメト化率にはほとんど差がない。そのため③は、①や②よりも解凍所要時間と品質の二つの点で優れた解凍方法であることが検証できた。

5.2 3回浸漬による均温解凍

前節の考察から、初期段階の均温化過程こそがこの解凍法の特長であることが解った。となれば、これを繰り返すことで更に解凍所要時間が短縮できる可能性がある。そこで温水への浸漬を3回行う方法④について計算をしてみた。結果は Fig.5 に示す通りで、温水に浸漬して表面温度が上昇するのに伴い中心温度も上昇していることが分かる。Table 6 より、温水に3回浸漬する④ことで③よりも解凍所要時間が 7.5 時間短縮されることが解る。表面温度は一時的に 10 ~ 20 °Cまで上昇するが、表面のメト化率は③よりも低くなっている (Fig. 6)。これより、浸漬回数を増やすことは解凍所要時間の短縮、メト化率の減少につながる事が明らかとなった。

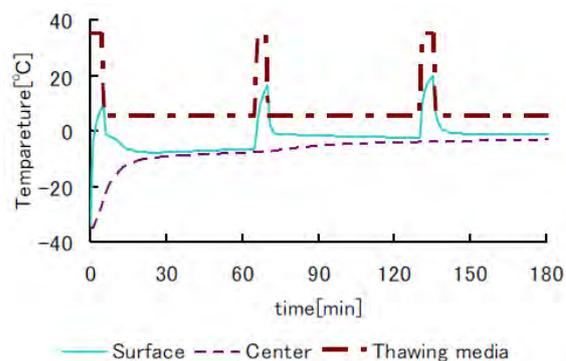


Fig. 5 Time-temperature curves of tuna meat during ④ improved thermal equalize thawing. [4]

Table 6 Calculation results of thawing time of tuna meat [4]

Method	Thawing time [hour]
① Water thawing at 35°C	1
② Air thawing at 5°C	22.6
③ Thermal equalize thawing	20.4
④ Improved thermal equalize thawing	12.9

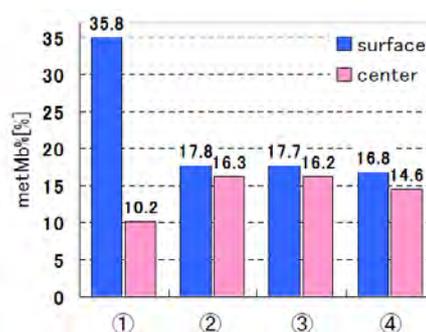


Fig. 6 Calculation results of *metMb* of tuna meat after thawing. [4]

6. 今後の展望

これまで、冷凍品の解凍について、現象論的考察からその原理的な困難さを論じ、問題解決のために数値計算を利用するという試みについて紹介してきた。この結果、伝熱の側面から見れば、温水に繰り返し浸漬する方法が優位であることが明らかとなったが、実用面から考えるとこれは手間のかかる方法であり、自動化されない限り採用され難い方法であると思われる。

本稿で述べてきたことをまとめると、良い解凍を行うためには、温度をあまり上げずに迅速な加熱を行うという二律背反問題をまず解決しなくてはならない。また食品の熱拡散率が小さいことが律速となり、さらに解凍の進行に伴って氷が水に変わることですます伝熱が阻害されるということも大きな問題である。このため試料中心部の解凍に必要な熱量を熱伝導によって迅速に供給しようとするならば、試料内部での温度勾配を大きくする必要があり、そうすると表面の温度が高くなるため品質の劣化が避けられない。しかし熱伝導ではなくワークの自己発熱により加熱を行えば、原理的にはワーク内部を均一かつ急速に加熱できるため、表面の過加熱による品質劣化を避けながら飛躍的な解凍時間短縮の可能性もある。自己発熱を起こさせる方法としては、誘電加熱とジュール加熱が挙げられるが、中でも誘電加熱は実際に多く用いられている。誘電加熱とはマイクロ波やHF波など高周波の電磁波を照射することによりワーク内部の水分子を振動させて発熱させるものである。しかしこれを解凍に用いる場合、氷よりも水の方が発熱しやすいという性質があるため、加熱ムラが起りやすくなる[12]、これが実用面での障害となっている。特にマイクロ波加熱の場合、Run-away heating と呼ばれる顕著な不均等加熱現象が大きな問題である。とはいえ原理的には優れた方法であるため、今後の技術開発が待たれる。

解凍において最も重要なことは、全ては対象となる食品の劣化反応に依存するという点である。食品の劣化反応は、化学反応の一般的性質として温度が高くなるほど反応速度が大きい。経験上、0℃近辺であれば多くの反応は緩慢に進行する。これより、0℃付近の低温を保ちながら良好な伝熱を実現しうる解凍媒体として、氷水を使うことが有効であると考えられる。これならば実用化も比較的容易である。実際に、船上凍結されたマグロを解凍する際のメト化およびチヂレの問題に関しては、氷水解凍の有効性が実証されており、日本かつお・まぐろ漁業協同組合は氷水解凍を推奨している[13]。またこれを発展させて、氷スラリーを用いることでさらなる高品位解凍が実現される可能性が提案されている[14]。

7. 結論

冷凍品の解凍は、原理的に困難な現象であることに加えて研究が遅れており、技術レベルが低く、いまや冷凍品の品質劣化の最大の要因であると考えられる。これを解決するための取り組みとして本稿では、解凍中の品質劣化まで予測可能でかつ誰でも使える簡便な数値計算手法の開発について紹介した。また誘電等による自己発熱の利用や、氷を利用した解凍などの新規な方法についても概説した。しかし、筆者が最も重要と考えていることは、解凍に関する問題を解決するためには、解凍中の伝熱現象の解明はもちろん必要であるが、それだけではなく食品の品質劣化反応の解明が不可欠、ということである。本稿が、解凍工程の重要性を広くご理解頂くための一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 小川豊, 冷凍, **75-878** (2000) 1058.
- [2] http://www.maruiri.co.jp/c_cat_maguro.html, 2016.5.1 確認.
- [3] 村上菜摘, 渡辺学, 鈴木徹, 日本冷凍空調学会論文集, **26-2** (2009) 185.
- [4] 上野翔世, 村上菜摘, 渡辺学, 鈴木徹, 日本冷凍空調学会論文集, **29-2** (2012) 299.
- [5] 御木英昌, 鹿児島大学水産学部紀要, **33-2** (1984) 155.
- [6] 岡崎守男, 渡辺尚彦, 赤尾剛, 食品工学基礎講座⑤加熱と冷却, 光琳 (1991) 133.
- [7] 小野征一郎, マグロの科学—その生産から消費まで—, 成山堂書店 (2004) 260.
- [8] 松浦文雄, 橋本周久, 日本水産学会誌, **20** (1954) 308.
- [9] 佐野吉彦, 橋本周久, 日本水産学会誌, **24** (1958) 519.
- [10] 西元諄一, 青木信實, 鹿児島大学水産学部紀要, **20-1** (1971) 163.
- [11] 尾藤方通, 日本水産学会誌, **31-7** (1965) 534.
- [12] 渡辺学, 冷凍空調便覧 IV 巻 食品・生物編 新版・第6版, 日本冷凍空調学会編, (2013) 76-78.
- [13] 日本かつお・まぐろ漁業協同組合 Website, <http://www.japantuna.net/press66> (2016.4.28 確認)
- [14] 渡辺学, 冷凍, **90-1050** (2015) 251.

誘電分光を用いた氷結晶特性の推定 Estimation of Ice Crystal Morphology by Dielectric Spectroscopy

上野 茂昭 (埼玉大学)
Shigeaki UENO (Saitama University)
e-mail: shigeakiu@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

食品凍結と品質に関する問題点として、氷結晶生成により引き起こされるドリップ発生や品質低下が挙げられる。食品内部に形成される氷結晶は、食品の物理化学的性質や構造を変化させることにより、食品に含まれるたんぱく質、アミノ酸、塩類およびビタミン類等の水溶性成分の流出を引き起こす。

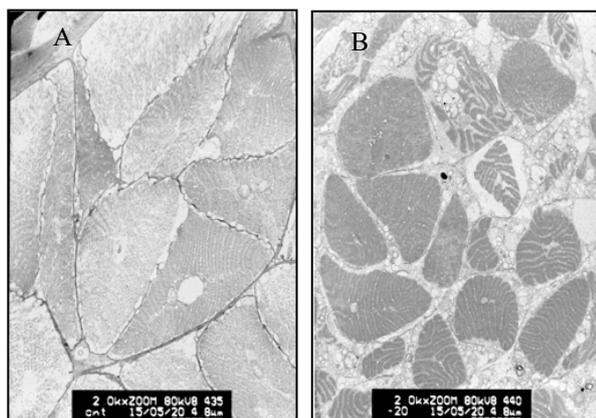


図1 生鮮タコ (A) および凍結解凍タコ (B) の透過型電子顕微鏡による組織断面画像。

生鮮タコおよび -20°C で緩慢凍結後に氷水で解凍したタコの組織を透過型電子顕微鏡で観察した。その結果、凍結により形成された氷結晶が筋原繊維を破壊した様子が認められた (図1)。この凍結解凍タコは、生鮮タコに比べて顕著に柔らかく食べやすいものの、タコに特徴的な栄養成分であるタウリンは15%程度減少した。

このことは食品の量的な損失ばかりでなく、風味、食味および栄養等の質的な劣化をもたらすことを意味している。そのため食品内の氷結晶を小さくするための技術開発がなされるとともに、氷結晶の定量的な測定技術が必要となった。

本稿では凍結食品内の氷結晶を観察する手法を概説する。

2. 氷結晶観察法

2.1 氷結晶の直接観察法

氷結晶観察法は観察時の氷結晶の状態により直接観察法と間接観察法とに大別される (表1)。

表1 凍結食品内氷結晶観察法

方法	
直接法	低温走査型電子顕微鏡, 冷凍顕微鏡, 共焦点レーザー顕微鏡, 3次元内部構造顕微鏡 (マイクロスライサ画像処理システム), X線CT, 核磁気共鳴画像装置
間接法	凍結置換法, 凍結固定法, 凍結乾燥法, 水銀ポロシメータ法等

直接観察法には、低温走査型電子顕微鏡 (Cryo-Scanning Electron Microscopy, Cryo-SEM)[1], 冷凍顕微鏡[2], 共焦点レーザー顕微鏡 (Confocal Laser Scanning Microscopy, CLSM) [3], 3次元内部構造顕微鏡であるマイクロスライサ画像処理システム (Micro Slicer Image Processing System: MSIPS) [4], 核磁気共鳴画像装置 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) [5], X線CT[6, 7] などを用いる方法がある。近年ではテラヘルツ分光イメージングを用いた凍結食品内氷結晶の観察技術[8]も開発されている。

低温走査型電子顕微鏡を用いた氷結晶観察では、前処理の試料固定を含む試料調製に比較的時間を要するのみならず、熟練を要する。樹脂包埋工程では8時間以上の硬化が必要であり、超薄切片化工程においてトリミングに数時間要する。より簡便かつ試料の構造を維持可能な方法として、試料凍結時に200 MPa程度の圧力処理を施すことで、氷の融点を -20°C 程度まで降下させ、除圧することにより組織内に極微細な非結晶性の氷を形成させる加圧凍結法が提案され、実用化されている[9]。

共焦点レーザー顕微鏡法は、対象試料を蛍光試薬で染色することにより、蛍光試薬によって染色される組織と、染色されない氷結晶とを識別することにより氷結晶を観察可能である[3]。蛍光観察時、蛍光色素で染色されない氷結晶は黒く示される。本法は非接触かつ非破壊で氷結晶性状をマイクロメートルのオーダーで計測可能な技術であるものの、染色に伴う試料の含水率変化、励起光照射に伴う試料透明度など、技術的に困難な点がある。

核磁気共鳴画像法（MRI）は、対象試料に含まれる水に磁場を印加し、水分子中の水素原子核のスピンを励起した後放出される核磁気共鳴信号を受信することで、水分子の状態を画像化する方法である[5]。本法は水と氷の核磁気共鳴信号強度の違いを用いて識別する。MRIは医療分野においてヒトの断面画像を撮像することにより、診断を行う手法として広く認知されている。しかし、食品の微細内部構造を対象とする場合、空間分解能および時間分解能が他の手法と比較して劣る。

マイクロスライサ画像処理システムは、試料を連続的に切削し、試料露出断面を撮像後に3次元に再構築する内部構造顕微鏡である[10]（図2）。本システムは、凍結試料をステップモータを用いてマイクロメートル単位で押し上げるとともに、回転刃が押し上げられた試料表面を切削し、その露出断面を光学系でイメージングする。収録された連続した2次元断面画像をもとに、画像処理ソフトを用いて3次元画像を構築可能である。MRI等と異なり試料を実際に切削することによ

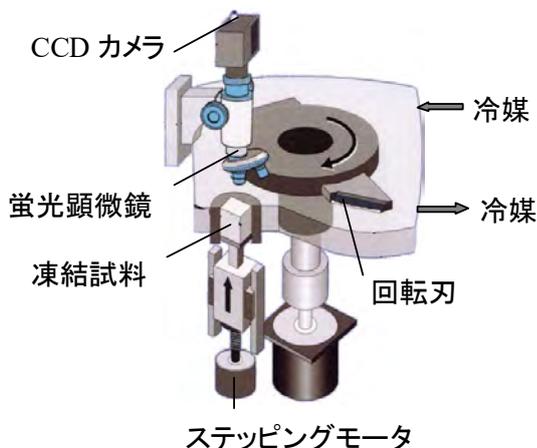


図2 3次元内部構造顕微鏡の観察部およびスライス部

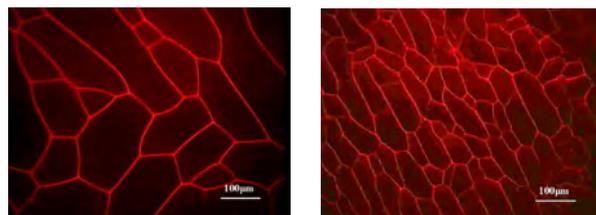


図3 凍結ゼラチンゲル（10 wt%、Rhodamine B 0.1 wt%添加）の緩慢凍結（左）および急速凍結（右）における氷結晶断面画像

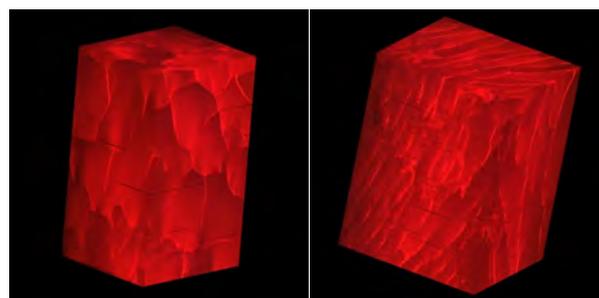


図4 凍結ゼラチンゲルの緩慢凍結（左）および急速凍結（右）における2次元断面画像を基にした氷柱の3次元再構築画像

り、食品内部の微細構造を色情報とともに忠実に再現可能な技術である。

開発当初の用途は、生体3次元デジタル図鑑用データ収集および、それを用いた生物形態学および医学分野における教材開発であった[11, 12]。

著者らは本システムを凍結食品に応用し、凍結食品内氷結晶性状について2次元および3次元的に定量解析を行った[13-15]。本装置における氷結晶観察例として、蛍光試薬であるRhodamine B 0.1 wt%を添加したゼラチンゲル 10 wt%を緩慢または急速凍結した観察結果を示す。マイクロスライサ画像処理システムにより、凍結ゼラチン内の氷結晶（暗部）および凍結濃縮したRhodamine Bを含むゼラチンネットワーク（明部）が明瞭に識別された（図3）。

得られた2次元断面画像を元に再構築した凍結ゼラチンゲル中の氷柱画像を示す（図4）。3次元再構築画像は530 x 700 x 1000 μmであり、例えば厚さ5 μmで切削を行った場合の3次元再構築画像に用いた断面画像総数は200枚、試料全体では12 mmの高さであるため2400枚の断面画像が得られたことになる。本システムは試料切削および断面画像撮像は同期されており、一度凍結試料を

セットすれば、自動的に切削断面画像を取得可能である。12 mm 分の断面画像取得に要した時間は、切削厚さおよび切削回転数に依存するものの、2 時間弱程度であった。

X 線 CT は、材料の密度に依存する X 線の透過率の違いを利用して試料内部の性状を識別する手法である。氷と氷以外の食品成分の密度差が小さいことから、従来は X 線 CT を用いた氷結晶観察は不可能であった。そのため、試料の前処理として後述する凍結乾燥を施し、その空隙を X 線で観察することにより、氷結晶痕サイズを定量的に評価してきた。近年、高輝度 X 線 CT が開発され、高輝度の単線 X 線を用いた食品内部構造観察が報告されつつある。日本国内においては、公益財団法人高輝度光科学研究センター (SPring-8) のビームライン BL19B2 の X 線 CT を利用した、凍結食品 (豆腐, マグロ) 内の氷結晶性状の非破壊 3 次元観察事例が報告されている[7]。

庫内温度 -30°C の家庭用冷凍庫で凍結した豆腐およびマグロについて、画像取得直前に試料観察用に切断調製し、液体窒素を噴霧することにより -30°C を維持した状態で X 線 CT による観察を行った。いずれの試料においても、氷結晶部位が明るく、その他の組織部位が暗く識別された。

本節で取り上げた氷結晶の直接観察法は、主に低温下で高価かつ大型装置を用いて試料内の氷結晶を直接的に観察する。より安価で特別な装置を使用することの少ない間接観察法について後節で説明する。

3. 新規な氷結晶直接観察法

著者らの研究グループはテラヘルツ (THz) 光と呼ばれる周波数 10^{12} Hz 付近の電磁波であり、従来は遠赤外光もしくはサブミリ波と呼ばれていた周波数領域の電磁波を用いて、凍結食品内の氷結晶の計測を試みた[8]。

THz 光は光と電波の中間領域に相当し、その両方の性質を併せ持つため紙や布、プラスチックに対する透過性を電波のように有するとともに、光と同様にレンズやミラーを使った光学系の構築が可能である。そのため X 線のように透視イメージングの手法として、病理診断はもとより、郵便物の非開封検査および文化財の鑑定等の分野における利用が期待されている[8]。また THz 周波数領域

の分光情報には、赤外や近赤外領域と同様、物質に特徴的な吸収構造が現れる。特に THz 周波数帯には結晶構造や高分子の高次構造などが観測されることが知られている[8]。

テラヘルツイメージング装置は、THz 光発生部および検出部である光伝導素子、THz パルスを伝播するための楕円鏡、ビームスプリッター、光学遅延ステージおよび試料部より構成される (図 5)。

試料としてマイクロスライサ画像処理システムに用いた凍結ゼラチン (10 wt%, 蛍光試薬 Rhodamine B 添加) を選択し、急速または緩慢に凍結した試料について (図 6) テラヘルツ時間領域分光装置を用いて検討した。その結果、得られたテラヘルツスペクトルは光の吸収、生体分子の吸収ならびに結合水の吸収などが統合されたものであると考えられた。また得られたコントラストは結合水のダイナミクスの変化によるものであると考察でき、凍結ゼラチンのスペクトルに氷の散乱は全く寄与していないことが明らかとなった。

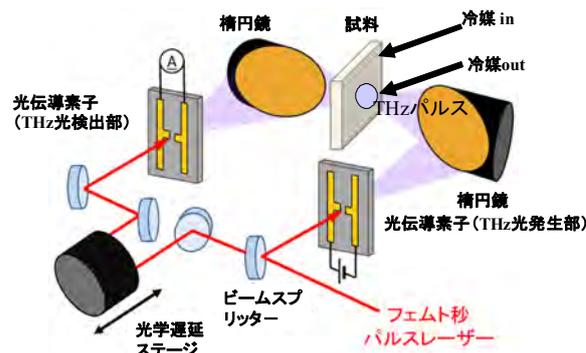


図 5 テラヘルツ時間領域分光装置

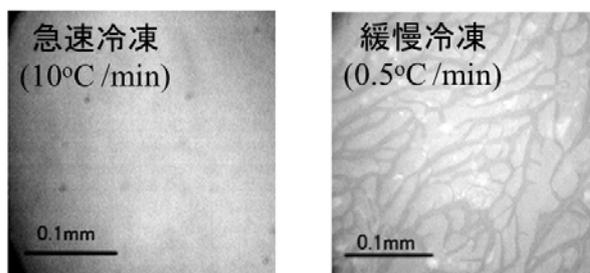


図 6 テラヘルツ分光イメージングに用いた寒天ゲル内氷結晶の顕微鏡画像

4. 氷結晶の間接観察法

間接観察法には凍結置換法 (凍結固定法) [16], 凍結乾燥法, 水銀ポロシメータ法[17]などがある。凍結置換法 (凍結固定法) においては、食品組織

内に形成された氷結晶を観察するために、氷を有機溶媒等で置換してパラフィン包埋で固定後、超薄切片を作成して観察する。凍結置換法については、東京海洋大鈴木教授が東京水産大学時代から食品冷凍学研究室に伝わる秘伝の技・ノウハウの詳細を公開しており参照されたい[16].

5. 新規な氷結晶構造推定法

著者らはマイクロサラス画像処理システムにより得られた2次元断面画像に基づく定量的な氷結晶情報および、同条件で凍結した試料の誘電特性の相互関連性を見出すことにより、氷結晶性状を推定する手法を検討している。

誘電特性はエマルションや氷の分散層に見られるように、測定対象の化学組成のみならず幾何的構造に敏感なので、食品のバルク特性を調べるための非破壊計測法として注目されている。本方法は、食品分野においては、果実の熟度判定、細胞性生物素材への静水圧高圧処理の評価、凍結解凍による細胞損傷判定など多岐に渡り利用されている[18-20]。また農産物のみならず、構成成分の複雑な加工食品および凍結食品の新規品質評価法としての研究が報告されている。さらに諸外国の研究者によって氷結晶構造と誘電特性に相関関係があることを示唆されている[21].

そこで著者らの研究グループは、誘電分光スペクトルと氷結晶性状の関係を実験的に明らかにするとともに、両者の関係を理論的にも裏付けることで、凍結試料内に形成される氷結晶性状を非破

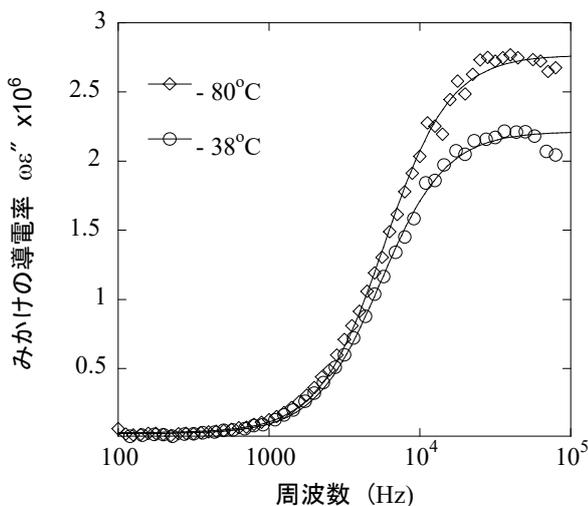


図7 最終到達温度の異なる凍結ゼラチンゲル（氷結晶サイズが異なる）のみかけの導電率の周波数依存性

壊的に計測する方法の確立を目指している[22, 23].

凍結ゼラチンゲルの誘電特性について、インピーダンスメータを用いて周波数 100 Hz から 5 MHz（測定温度 -40°C ）で測定した（図7）。測定に用いた電極は、腐食しにくいステンレス製であり、簡便かつ安価な氷結晶計測を目指した。

種々の冷却速度（最終到達温度＝凍結装置の雰囲気温度）で凍結した試料は、氷結晶サイズ、凍結濃縮相における溶質濃度などの内部の構造特性および物理化学特性が異なる。そのような試料を用いて誘電特性解析を行ったところ、粒界線密度

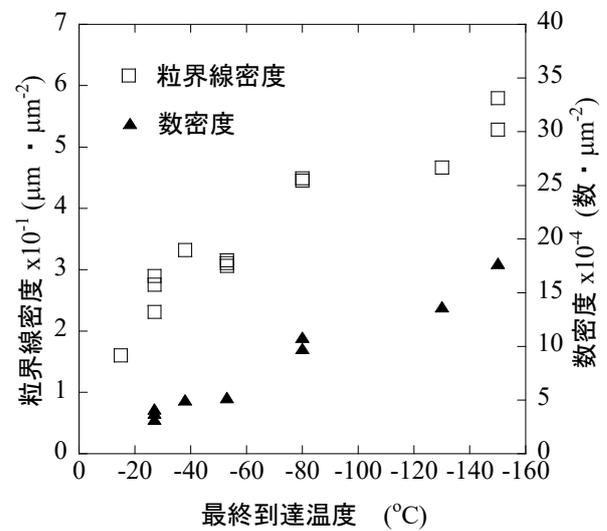


図8 凍結ゼラチンゲルの最終到達温度（氷結晶サイズが異なる）と氷結晶の粒界線密度および数密度

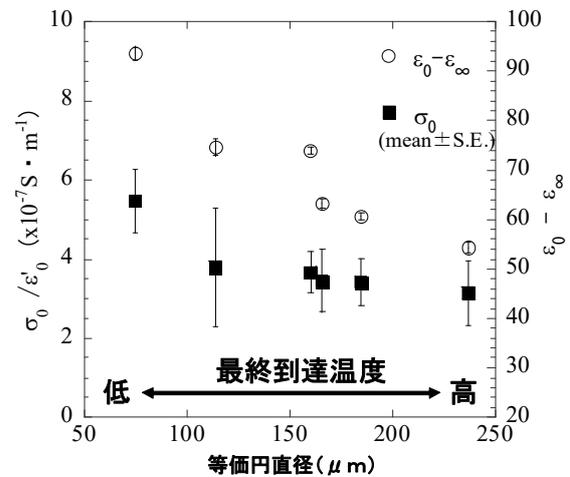


図9 凍結ゼラチンゲルの氷結晶等価円直径および導電率、極限誘電率差（100 Hz～5 MHz における誘電率差）

および数密度がとりわけ構造特性との一対一の正の相関があることが分かった (図 8)。また、氷結晶の等価円直径の異なる試料について、導電率および極限誘電率差 (図 7 の 100 Hz および 5 MHz における縦軸値の差) が、構造特性を反映していることが示唆された (図 9)。以上のように 2 次元氷結晶観察で得られる定量的な氷結晶の形態と比較することにより、氷結晶サイズを推測可能であることが分かった。このことは、氷結晶サイズの非破壊モニタリング手法の基礎的知見として期待される。

また著者らはマイクロスライサ画像処理システムにより得られた 2 次元断面画像を用いた静電場の数値解析により、凍結濃縮ゼラチンゲルの誘電特性に及ぼす氷結晶構造の影響を検討した。

まず氷結晶断面に対して境界条件を設定し、隣接する節点間において近似距離を定義することにより有限要素メッシュを作成した。その後凍結ゼラチンの連続相および連続相に分散する氷結晶を含む静電場を計算し、静電容量および比有効誘電率を算出した (図 10)。

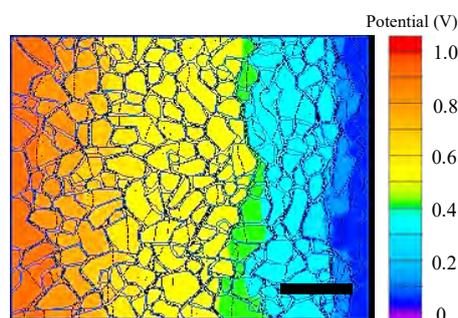


図 10 凍結ゼラチンゲルの静電ポテンシャルの等高線図 (スケールバー 100 μm)

その結果、氷結晶形態が有効誘電率に影響を及ぼすことが示された。また、凍結ゼラチンゲル相の誘電率が推算できることが示された。

本手法を食品などの多成分系に適用することにより、従来困難であった凍結濃縮相の特性評価でき、最終的には凍結食品内氷結晶の特性を非破壊的に計測可能となることが期待される。

6. おわりに

本稿では、凍結食品内氷結晶の観察方法を主として、テラヘルツイメージングおよび誘電分光に

よる凍結食品の諸性状についてモニタリングする手法を概説した。食品は糖質、たんぱく質、脂質、ビタミン、ミネラルをはじめとした栄養成分の複合体であり、多くの場合は水が重量比で最大の構成要素である。食品の保存は水の質的・量的な制御が最重要課題である。高品質な凍結食品を提供するための氷晶制御技術の開発は続く。

参考文献

- [1] 寺元あい, 治部裕里, 淵上倫子, 圧力移動凍結した液卵ゲルの組織及び物性に及ぼすグルコース, トレハロース, スクロースの影響: 日本調理科学会誌, vol.39, No.2 (2006) 194-202.
- [2] 上村松生, 植物細胞の冷凍過程の解析, 冷凍, vol.79, No.915 (2004) 18-23.
- [3] 石黒博, 生体・食品内に形成される氷結晶の時系列性状, 冷凍, vol.79, No.915 (2004) 9-13.
- [4] 上野茂昭, 溶液系モデル食品の氷結晶性状 3 次元計測, 冷凍, vol.79, No.915 (2004) 14-17.
- [5] 小川邦康, 氷晶成長過程の MRI 観察, 冷凍, vol.83, No.965 (2008) 149-155.
- [6] Rika KOBAYASHI, Norihito KIMIZUKA, Toru SUZUKI, Manabu WATANABE, Effect of supercooled freezing methods on ice structure observed by X-ray CT, Int. J. Refrigeration, 60 (2015) 270.
- [7] 佐藤真直, 放射線光を用いた X 線 CT による冷凍食品中の氷結晶非破壊観察, 2015 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2015) B321-1-2.
- [8] 保科宏道, 林朱, 大谷知行, 上野茂昭, 小川雄一, テラヘルツイメージング・分光による凍結食品計測の可能性, 冷凍, vol.90, No.1052(2015) 419-426.
- [9] 金子康子, 植物試料作製におけるトラブルシューティング, 顕微鏡, 42(2007) 23-25.
- [10] 小林賢知, 樋口俊郎, 青木勇, 工藤謙一, 三次元内部構造顕微鏡の開発, 精密工学誌, vol.61, No.1 (1995) 100.
- [11] 理化学研究所「なかみが見える! 3D 生物図鑑」 <http://www.riken.jp/pr/fun/3d/> (2016 年 5

- 月)
- [12] 東京大学工学系研究科精密機械専攻先端メカトロニクス研究室 WEB ページ「バーチャルリアリティを用いた生体 3 次元情報の観察」http://www.aml.t.u-tokyo.ac.jp/research/bio_vrml/bio_vrml.html (2016 年 5 月)
- [13] 都甲洙, 相良泰行, 工藤謙一, 横田秀夫, 樋口俊郎, マイクロスライサ画像処理システムによるブロッコリーの表面積及び体積の計測, 農業施設, vol.28, No.1(1997) 21-29.
- [14] 上野茂昭, 都甲洙, 相良泰行, 工藤謙一, 樋口俊郎, 希薄溶液系材料内氷結晶の 3 次元計測法に関する研究, 日本冷凍空調学会論文誌, vol.19, No.4(2002)381-387.
- [15] Shigeaki Ueno, Gab-Soo Do, Yasuyuki Sagara, Ken-ichi Kudoh, Toshiro Higuchi, Nicolas Chapleau, Alain Le Bail, Developpement d'une methode de mesure en trios dimensions des cristaux de glace dans aliments, Revue Generale du Froid, Vol.11, No.1 (2004), 35-40.
- [16] 鈴木徹, 凍結食品内氷結晶観察のための凍結置換法, 冷凍, vol.83, No.965 (2008) 143-148.
- [17] SK Bae, Osato Miyawaki, Toshiro Yano, Ice structure size in frozen agar gels analyzed by mercury porosimetry, Biosci. Biotech. Biochem., 57 (1993) 1624.
- [18] 加藤宏郎, 高周波インピーダンスによる農産物の非破壊鮮度判定 (第一報), 農業機械学会誌, vol.50, No.6 (1988) 107.
- [19] 上野茂昭, 重松亨, 陸賢太郎, 斉藤恵, 林真由美, 藤井智幸, 高圧処理によるタマネギの改質に関する研究, 日本食品工学会誌, vol.10, No.1 (2009) 37-43.
- [20] Shigehiko Ohnishi, Osato Miyawaki, Osmotic dehydrofreezing for protection of rheological properties of agricultural products from freezing-injury, Food Science and Technology Research, vol.11, No.1 (2005) 52-58.
- [21] DQM Craig, SA Barker, D Banning, SW Booth, An investigation into mechanisms of self-emulsification using particle size analysis and low frequency dielectric spectroscopy, Int. J. Pharmaceutics, 114 (1995) 103.
- [22] Shigeaki Ueno, Rryo Shirakashi, Kenichi Kudoh, Toshiro Higuchi, GabSoo Do, Tetsuya Araki, Yasuyuki Sagara, Effect of Grain Boundary of Ice Crystals in a Frozen Gelatin Solution on the Dielectric Properties at a Subzero Temperature, Biosci. Biotechnol. Biochem., 73 (2009) 2478.
- 上野茂昭, 白樫了, 都甲洙, 工藤謙一, 荒木徹也, 相良泰行, 凍結高分子ゲルの氷結晶断面画像を用いた凍結濃縮相の誘電特性評価, 日本冷凍空調学会論文誌, vol.29, No.3, 365-371 (2012).

オープンショーケースにおける冷蔵・冷凍技術 Chilling and Freezing Technologies of Refrigerated Display

中島 正登, 浅田 規 (富士電機株式会社)
Masato NAKAJIMA, Tadashi ASADA (Fuji electric Co.,Ltd.)

1. はじめに

スーパーマーケットやコンビニエンスストアなどの店舗では、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」(省エネ法)の改正・施行に伴い省エネルギー化が求められている。エネルギー使用効率を毎年1%以上改善する努力義務が定められ、より効果的な省エネルギーへの取組みが求められている。

店舗の消費電力は、図1に示すようにショーケースと冷凍機で構成される冷凍冷蔵機器が全体の半分以上を占めている。特に前面が開放されたオープンショーケースは、消費者が商品に手を伸ばしやすい利点がある一方で、冷気が外部に流出してしまうという欠点がある。そのため食品や飲料を保冷するためにより多くのエネルギーが必要となっている。

これを解決する技術がエアカーテンの気流制御技術である。オープンショーケースの熱負荷は、エアカーテンからの侵入熱で約80%を占める[1]。従って、オープンショーケースの省エネルギー化には、このエアカーテンの性能の向上が重要である。本稿では当社で取り組んでいるこのエアカーテン技術について紹介する。

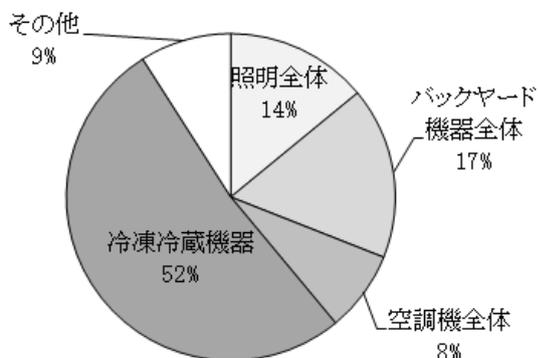


図1 店舗の年間電力割合

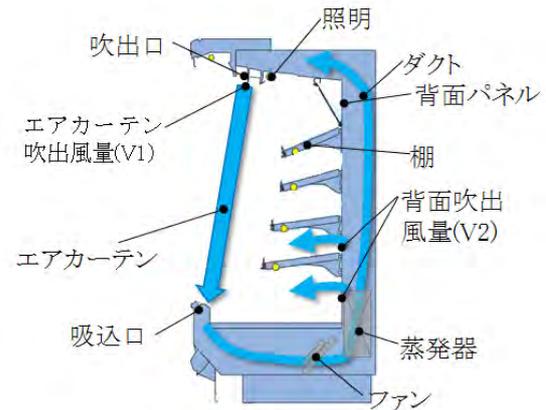


図2 オープンショーケースの庫内冷却原理

2. オープンショーケースのエアカーテンの原理

オープンショーケース内における気流を図2に示す。ダクト内に設置された蒸発器で冷却された冷気は、エアカーテン吹出口(風量V1)とショーケース庫内の背面パネルに設けた背面吹出口(風量V2)から吹出され、吸込口から吸込むことによりショーケース庫内を冷却する。オープンショーケースの前面に形成されたエアカーテンは、庫内を冷却するとともに外気侵入を抑制する役割も併せ持つ。

吹出風の風量比(全風量V1+V2は固定)は、図3に示すように冷凍機能力を最小化する最適なポイントが存在する[2][3]。その理由を以下に述べる。

①背面吹出風量V2が少ない場合には、エアカーテン吹出風量が多くなり、エアカーテンからの外気巻き込みにより庫内下側の温度が高くなる。よって庫内下側の温度を所定の温度まで冷やす必要があり、冷凍機能力が高くなる。

②背面吹出風量V2が多い場合には、相対的にエアカーテン吹出風量V1が減少してエアカーテンによる外気遮断性能が低下する。さらに、背面から吹出された冷気とエアカーテンによる冷気が棚先端で衝突し、気流が乱れて更なる外気遮断性

能の低下を助長し、冷凍機能力が高くなる。

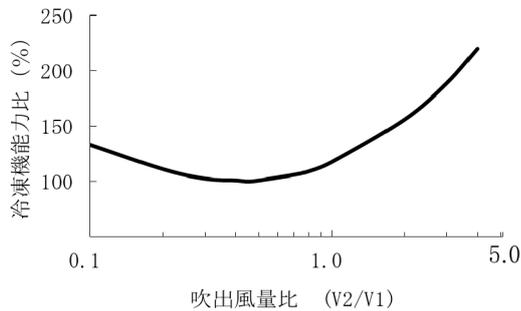


図3 吹出風量比と冷凍機能力比[1]

3. 細分化エアカーテン方式

上記のように、エアカーテン風量と背面吹出風量にはバランス点が存在しておりそれ以上の所要冷凍能力低下が難しい。そこで、外気巻き込みを低減するために前面エアカーテンの風速を小さくしても吸込口までエアカーテンが形成され外気遮断性能を維持し、かつ背面吹出冷気とエアカーテンとの衝突を抑制する構造を考案した。図4に考案した細分化エアカーテン方式の構造を示す。細分化エアカーテン方式は棚先端スリット、棚下ダクトと風向板により形成された気流の組合せで棚毎に気流を整流する方式である。棚下ダクトから各棚に冷気を供給して庫内を冷やすと共に、その気流をスリットに通した上部からの前面エアカーテンと合流させることにより、各棚で細分化したエアカーテンを形成し、外気を遮断する。これまでのエアカーテンは、エアカーテン吹出口から吸込口まで外気遮断性能を維持するためにエアカーテン吹出近傍は高い風速で吹出しており、外気巻き込み量も増えていた。一方、細分化エアカーテン方式では、エアカーテン吹出口からの冷気に加え、各棚の背面から吹出された冷気を風向板により風向を変化させ、前面エアカーテンとの衝突を抑制しながら徐々に前面エアカーテンに合流させることで吸込口までの外気遮断性能を維持させている。そのため、エアカーテン上部の風量は相対的に少なく済み、従来よりも外気巻き込み量が減少し省エネルギーとなる。

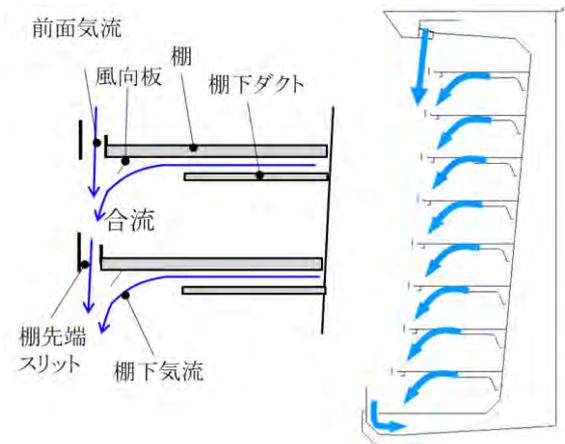


図4 細分化エアカーテン方式

A	B	C	D	E
ファン風速	棚下長さ	棚下幅	背面幅1	背面幅2
F	G	H	I	J
背面幅3	風向板位置	フェンス高さ	吹出口幅	吹出口角度

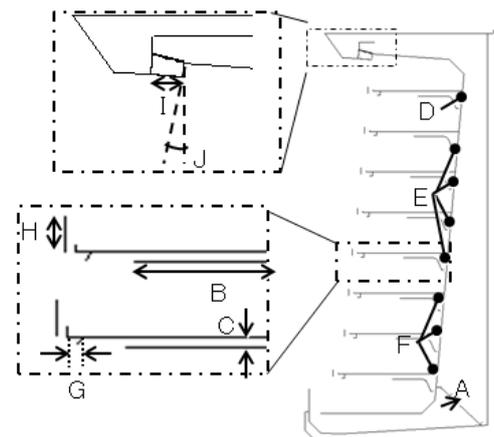


図5 オープンショーケースのエアカーテン気流制御に関わる因子

4. シミュレーション検討

図5にオープンショーケースのエアカーテン気流制御に関わる因子を示す。図5のように気流制御に関わる因子は多数あり、かつこれらの因子同士が相互に影響するためバランス設計が難しい。そこで、熱流体シミュレーションと最適化手法[4]を用いて、ショーケースの庫内温度が所定の温度になる条件において所要冷凍能力が最小になるような設計を実施した。図6に設計フローを示す。ショーケースの複雑な構造に柔軟に対応するため、因子数を自由に決定できるラテン超方格法(LHD : Latin Hypercube Design)に基づき計算サ

ンプルのパラメータを決定した。次に、配置した計算サンプルに基づき、熱流体シミュレーション技術を用いたショーケース設計ツール[5]で解析モデルの作成と解析を実行する。そして、解析結果（特性値）を用いて放射基底関数（RBF：Radical Basis Function）ネットワークを用いた応答曲面近似を実施し、粒子群最適化法（PSO：Particle Swarm Optimization）により最適解を求めた。熱流体シミュレーションのためのソフトウェアはCD-Adapco社のSTAR-CCM+を用いた。

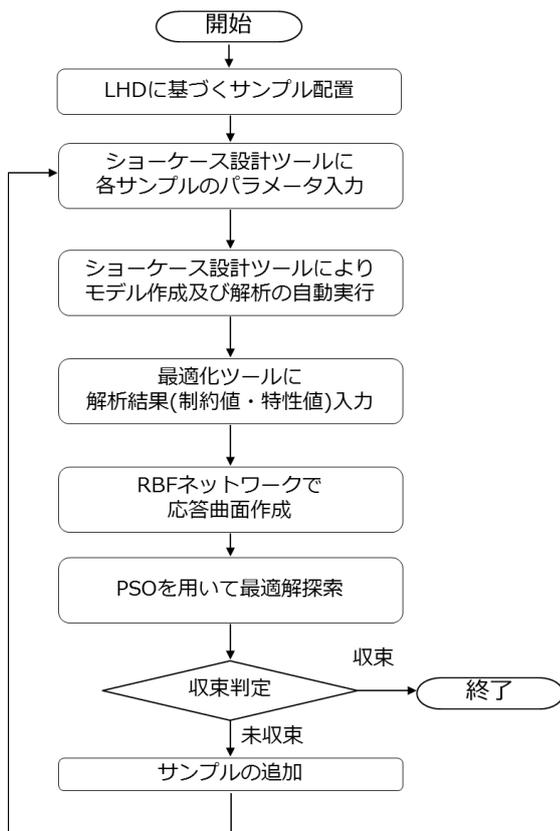
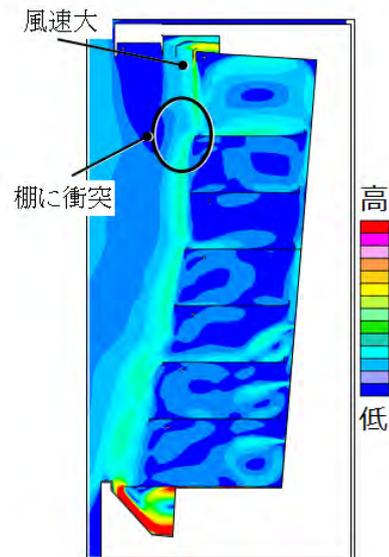


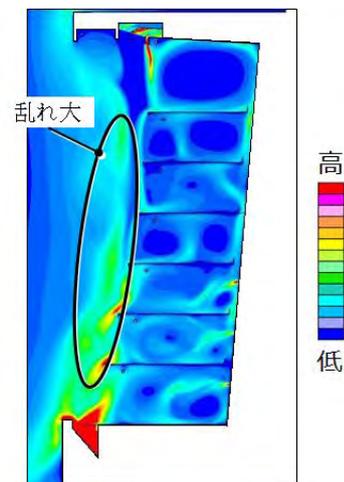
図6 最適化設計技術による設計フロー

図7と図8に、従来方式と最適化手法により設計した細分化エアカーテン方式の風速分布および乱流エネルギーのシミュレーション結果を示す。従来方式はエアカーテン吹出口から吸込口まで外気遮断性能を維持するために風速が高く、それに伴い乱流エネルギーも高くなり外気巻き込み量が多くなっている。一方、細分化エアカーテン方式では、エアカーテンに背面からの冷気を前面気流に徐々に合流させている。このためエアカーテン

吹出口の風量が少なくてもエアカーテンを形成することができるため、エアカーテンによる外気巻き込みを抑制する。これに加え、背面から吹出された流れと前面エアカーテンの合流部分の乱流エネルギーが小さい。これはスリットと風向板による方向制御により、異方向の流れが滑らかに合流しているためであり、外気巻き込み量が減少していることが判る。

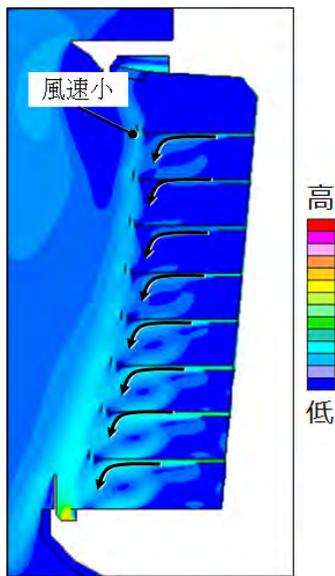


(a)風速分布

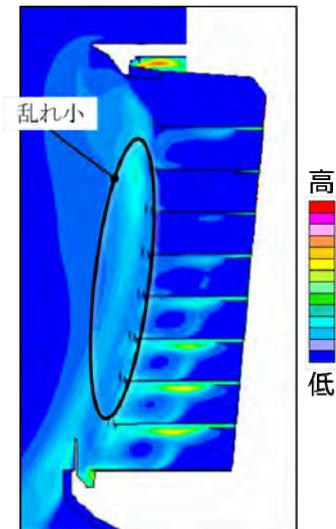


(b)乱流エネルギー分布

図7 従来方式



(a)風速分布



(b)乱流エネルギー分布

図8 細分化エアカーテン方式

5. 実験結果

細分化エアカーテン方式の実証は図9に示す多段式オープンショーケース (Non-Leak ショーケース) を用いた。Non-Leak ショーケースは冷凍機ユニットを本体に組み込んだ冷凍機内蔵型ショーケースである。従来、冷凍機ユニットは本体の下部に格納していたが、その分本体下部の高さが増えてしまい、商品を陳列する容量が減っていた。当社ではショーケースの構造を見直し、高効率の小型冷凍機ユニットを開発し上部に格納する構造とした。この Non-Leak ショーケースにおいて、27°C 70%RH の周囲環境条件下で各方式の所要冷凍能

力を測定した。その結果、従来方式と比較して庫内温度分布のバラツキが抑制され、従来の冷凍機内蔵型ショーケースよりも30%の省エネルギー効果が得られた。



図9 Non-Leak ショーケース

6. まとめ

本稿では、オープンショーケースにおける気流制御技術について紹介した。Non-Leak ショーケースでは、今回紹介した細分化エアカーテン方式を搭載したほか、低 GWP 冷媒を用いた冷凍機ユニットを搭載しており、省エネルギー効果と併せて環境保全対応も行っている。今後とも、エアカーテンや冷凍機ユニットなどの開発をさらに進め、よりいっそう地球環境にやさしい省エネルギー対応のオープンショーケースを提供していく所存である。

参考文献

- [1] 浅田規, オープンショーケースにおけるエアカーテンの熱流体解析, 冷凍. 2009, 4 (981), 43-48.
- [2] 松居明他, 富士多段形オープンショーケース, 富士時報, 54(2), 109-126(1981)
- [3] I. Gray, P. Luscombe, L. McLean, C.S.P. Sarathy, P. Sheahan, K. Srinivasan., Improvement of air distribution in refrigerated vertical open front remote supermarket display cases, Int. J. Refrigeration 31, 902-910(2008)
- [4] 北山哲士ほか. BF ネットワークによる逐次近似最適化 (サンプル関数の基礎的検討). 日本機械学会論文集 C 編. 2010, vol.76, no.768, 1978-1987.
- [5] 中島正登ほか, オープンショーケースの省エネルギーを実現する熱流体シミュレーション技術, 富士電機技報, 2016, vol.89, no.1, 50-53.

不凍タンパク質による食品の凍結劣化抑制

Suppression of Deterioration of Frozen Foods by Antifreeze Proteins

萩原 知明 (東京海洋大学)

Tomoaki HAGIWARA (Tokyo University of Marine Science and Technology)

e-mail: tomoaki@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

現在、我々の身の周りには凍結を利用した食品があふれている。スーパーマーケットでは、多種多様な「冷凍食品」が売られている。寿司屋でおいしいマグロの寿司が食べられるのも、日本から遠く離れた海で漁獲されたマグロを冷凍により品質を保持することができるためである。また、ファミリーレストランなど外食産業で提供される食事にも冷凍食品が多数使用されている。冷凍技術は、食品の本来の性質を保持したまま長期間保存可能である点で、他の保存方法より優れている。かつて、冷凍装置の性能があまり良くなかった時代には、凍結の際に生成し大きく成長した氷結晶により、食品の構造に物理的な損傷が生じていた。しかしながら、冷凍装置の技術革新がすすみ、急速凍結などの手法が開発され、微細な氷結晶を生成させることができるようになり、現代では凍結時の氷結晶生成による食品の損傷の問題は克服されつつある。

このように優れた保存方法である冷凍技術であるが、完璧なものではなく、未解決の問題が存在する。その一つが、氷結晶の再結晶化である。凍結食品中の氷結晶は、貯蔵および流通過程において、平均サイズの増大、数の減少、形状の平滑化が起こる。この現象を氷結晶の再結晶化と呼ぶ。図1に凍結貯蔵したマグロ中の氷結晶の再結晶化の例を示す[1]。氷結晶の再結晶化が起こると、大きく成長した氷結晶が食品の組織を破壊する。その結果、凍結食品の品質が劣化する。氷結晶の再結晶化は、凍結食品の貯蔵および流通時における品質劣化の主な原因である。そのため、高品質な凍結食品を実現するためには、氷結晶の再結晶化を抑制することが必要である。

極地に生息する一部の魚類は、温度がマイナス2℃程度まで下がっても体液全体が凍結せずに生き延びることができることが知られている。これ

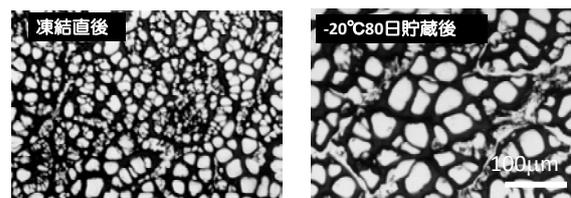


図1 凍結マグロ魚肉中の氷結晶の再結晶化。白い部分が氷結晶に相当。

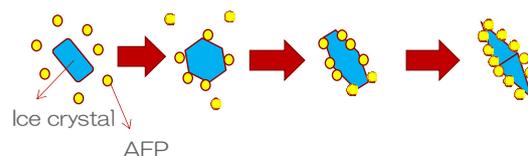


図2 不凍タンパク質 (AFP) は氷結晶表面に吸着する (模式図)

は、これらの魚類が自ら生産する不凍タンパク質 (Antifreeze protein; AFP) に起因するものであることが明らかとなっている[2,3]。氷結晶は理想的な条件では、無制限な成長が可能である。一方、AFPが存在している水溶液中では、AFPが氷結晶表面に吸着することにより、氷結晶の成長が抑制される。(図2)。AFPを自ら生産する魚類の体内で生じた氷結晶の成長は抑制される。その結果、組織の損傷も抑えられるため、通常魚類なら凍って死んでしまうような低温でも、生き延びることができる。

AFPの発見以来、その氷結晶の成長を抑制する機能を利用した凍結食品中の氷結晶の再結晶化抑制技術の実現が期待されてきた[4,5]。しかしながら、極地の生物は大量捕獲が困難であることから、AFPの大量生産は実現していなかった。実際、極地の魚から抽出したAFPの価格は1gあたり50～100万円もする。そのため、AFPを実際に食品に添加して使用する際の適切な条件も不明のまま

であった。近年になり、不凍タンパク質を生産する生物の探索が進むにつれ、極地以外に生息する多数の身近な生物から AFP の発見が相次ぎ[6-9]、費用についての問題の解決の目途が立ち、AFP の食品産業への利用が本格的に始まりつつある。

本報では、AFP について概説し、近年の AFP の食品産業での利用に向けての種々の試みを、筆者の研究例も交えながら述べる。

2. 不凍タンパク質と再結晶化

2.1 再結晶化の定義およびそのメカニズム

再結晶化の正確な定義は、「結晶固化完了後の結晶の数、大きさ、形状、方向性、周期性の度合いの変化」[10]である。凍結完了後の貯蔵および流通の過程において、①氷結晶の平均サイズの増大、②氷結晶の数の減少、③氷結晶の平滑化という形態で表出する。再結晶化は結晶の表面自由エネルギーが自発的に減少する結果として進行する。氷結晶の表面に存在する水分子は、結晶内部の水分子と比較して、周りを水分子に囲まれていないため、より不安定な状態(=高エネルギー状態)にある。このような水分子の数を減らす結果として、氷の表面積を減らす過程が自発的に進行する。すなわち、小さな多数の氷結晶から大きな少数の氷結晶への変化、(①、②)および氷結晶の表面の平滑化(③)が進行する。

これらの他に、温度の上下変動がある場合にも、再結晶化も進行する。温度が上昇した際に、氷の一部が融解する。その際、比較的小さな氷結晶は消失し、水となるが、大きい氷結晶は残存する。次に温度が降下した際、相平衡に従って、残存した氷結晶が成長する。以上のような融解と結晶成長を繰り返すと小さな氷結晶は次第に消失し、大きな氷結晶がますます大きくなる。

2.2 AFP が氷結晶の再結晶化に及ぼす影響

AFP は氷結晶表面に吸着することで、氷結晶の成長を抑える[2]。AFP が吸着した氷結晶表面が成長する際には、図3のように凸状の曲率を持つように成長せざるを得ない。しかしながら、凸状の曲率を有する表面は Gibbs-Thomson の式により、氷の融点が下がる。つまり、温度をさらに下げないと氷結晶の成長はおこらないため、一定の温度に保っている限りは氷結晶の成長は抑制され、再

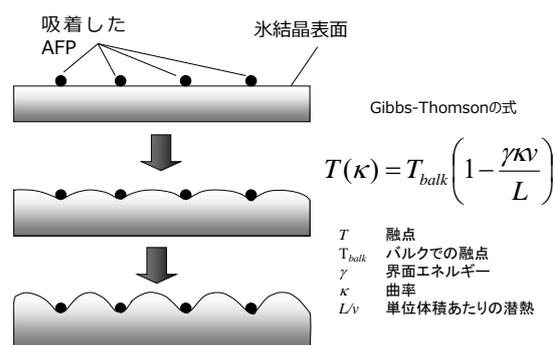


図3 AFPによる氷結晶成長抑制機構。

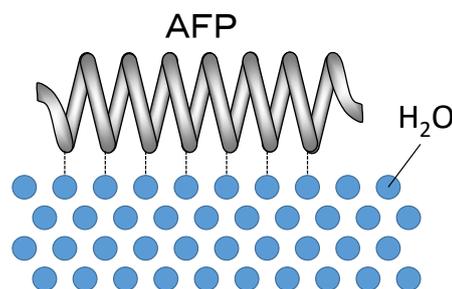


図4 AFPの構造と氷結晶表面との関連

結晶化の進行も抑えられる。

2.3 AFPを含む生物ならびにAFPの種類

AFPが最初に発見された生物は、北極に生息するノトセニア科の魚であった[11]。1969年のことである。その後近、植物や昆虫等の様々な生物からAFPが発見された[6,7]。さらに、近年、小麦[8]や一般市場に出回っている魚[9]から大量かつ安価にAFPが抽出できるとの報告がなされるに至り、今では、AFPは地球上に生息する多数の生物が有しているありふれたタンパク質であると認識されている。AFPはその構造や分子量によって、不凍糖タンパク質(AFGP)、I型~IV型の型に分類されている。いずれのAFPも氷の結晶表面と親和性の高い構造を有している。たとえば、ある種のAFPはらせん状の構造を有しているが、らせんのピッチと氷表面の水分子の間隔がほぼ一致している(図4)[12]。

3. 不凍タンパク質の食品産業での応用に向けての試み

3.1 アイスクリームへの応用

AFPの食品への応用が極めて早い時期に検討さ

れた食品が、アイスクリームである。アイスクリーム中に含まれる水は、大部分が凍結状態あるものの、氷結晶の大きさが極めて小さくなるような製法上の工夫がなされており、氷結晶の大きさを口腔が感じることはない。これが冷たくて滑らかな食感を生み出している。しかしながら、貯蔵ならびに流通が適切に行われないと、再結晶化により、氷結晶が大きく成長し、滑らかな食感は失われる。アイスクリームに AFP を添加することで、氷結晶を小さく保つ技術は欧米の大手総合家庭用品メーカーが開発し、実際に AFP を添加したアイスクリームが欧米で市販されている[13]。ここで使用されている AFP は、極地の魚由来のものを遺伝子組み換え技術により、微生物を用いて生産されたものである。

3.2 AFP の大量生産

食品産業で AFP を使用するためには、AFP を大量に生産することが不可欠である。現在では、遺伝子組み換え技術を用いることで、原理的には様々な AFP を安価かつ大量に生産することが可能である。しかしながら、遺伝子組み換え産物の安全性に不安を抱く人が少なくないこと、資源の有効活用を目指したいという観点から、生物から AFP を抽出する試みも継続して行われている。Goff らは、低温下で馴化させた小麦の葉の抽出液に AFP が含まれていることを実験的に確認し、アイスクリームへの応用を考察している。[8]小麦は世界的に多量に栽培されていることから、AFP 原料としての適性を有しているといえる。

津田らは、北海道の市場で一般的に売られている多種多様な魚が AFP を有していることを確認した[9,14]。そして、AFP が比較的高濃度含まれている粉末を簡易に調製する方法を提案した[9,14]。AFP の含有が確認された魚種の多くは、マダラや各種カレイなど我々にとってなじみのあるものであり、中には市場価値がそれほど高くなく、利用度がそれほど高くないものも存在する。原料が安価であることに加え、資源の有効利用にも繋がる点が注目される。

河原らは、カイワレ大根の抽出物に AFP が含まれていることを明らかにし、製品化に成功した[15-17]。製品化した企業で公開されているホームページによれば、麺類の冷凍焼けや卵加工品の凍

結貯蔵に伴う食感劣化の抑制に効果があるとされている[17]。

3.3 AFP の再結晶化抑制能の定量的評価の試み

費用対効果に応じて AFP の種類や効率的な使用条件を取捨選択する段階が近づいている。その際、重要となるのが、AFP の再結晶化抑制能を適切に評価することである。評価方法として一般的なものは、実際に食品を所定の貯蔵条件（温度、時間）で貯蔵し、経時的に氷結晶の大きさを調べ、AFP 添加の有無の影響を確認するというものである。我々はスクロース溶液をモデル食品として用い AFP の氷結晶化の再結晶化抑制能の評価を以下のように行った[18]。

AFP は I 型 AFP を用いた。I 型 AFP は、北極海のカレイ科またはカジカ科の魚から発見され、代表的な AFP として、AFP 研究の初期から今日に至るまで広く用いられている。また、スクロース溶液はアイスクリームのモデル食品として、再結晶化に関する既往の研究でしばしば用いられている実績がある 33%スクロース溶液に AFP を 1 μ g/ml になるよう添加したものを実験試料として用いた。

この試料溶液 2 μ l を 2 枚のカバーガラス（直径 16mm）の間に挟み込み、温度制御が可能な顕微鏡観察ステージ上に置いた。図 4 に顕微鏡観察ステージの模式図を示す。液体窒素とヒーターでステージ上の試料を温度制御しながら、リアルタイムで顕微鏡観察ができる。

はじめに試料温度を 30 $^{\circ}$ C から -30 $^{\circ}$ C まで毎分 90 $^{\circ}$ C/min の割合で冷却し、微細な氷結晶を多数生成させた。そして、10 分後に毎分 10 $^{\circ}$ C/min の割合で -10 $^{\circ}$ C まで升温し、その後 -10 $^{\circ}$ C に保持し、貯蔵実験を開始した。このように、初めに急速に冷却したのち、目的とする温度まで升温することにより、比較的大きさが揃った粒子状の氷結晶を生成できる。そして、この氷結晶の大きさの変化を

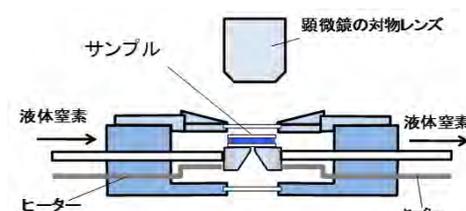


図 4 顕微鏡観察ステージ（模式図）。

調べることで、再結晶化の進行の程度を評価可能である。-10℃に到達した時を時間 $t=0$ とし、それから一定の時間ごとに、氷結晶の顕微鏡観察画像を撮影した。そして、得られた氷結晶の画像を画像解析ソフトで解析することにより、個々の氷結晶の等価面積円半径を算出し、その平均半径を求めた。こうして得られた氷結晶の平均半径の時間変化を Ostwalds ripening に基づく以下の式[19]で解析することにより、氷結晶の再結晶化の進行速度を反映した再結晶化速度定数 k を求めた。

$$r^3 = r_0^3 + k t$$

t : 貯蔵時間

r : 氷結晶の平均半径

r_0 : $t=0$ の時の氷結晶の平均半径

k : 再結晶化速度定数

k の値が大きいほど、再結晶化の進行速度が速いことを意味しており、AFP の氷結晶再結晶化抑制能は、 k の値の変化を調べることで、定量的に評価することができる。

図 5 は貯蔵中における氷結晶画像の典型例である。上段は AFP 無添加、下段は AFP 濃度 1 $\mu\text{g/ml}$ である。AFP 添加により氷結晶の再結晶化が抑制

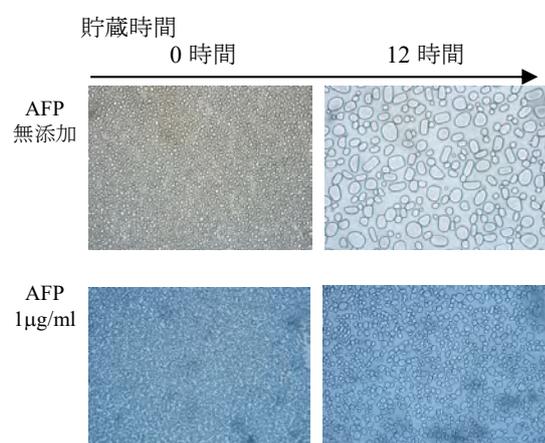


図 5 33%スクロース溶液中の氷結晶の観察例。

表 1 各 AFP 濃度における再結晶化速度定数。

	0 $\mu\text{g/ml}$	0.01 $\mu\text{g/ml}$	0.1 $\mu\text{g/ml}$	1 $\mu\text{g/ml}$
再結晶化速度定数 k ($\mu\text{m}^3/\text{h}$)	186 \pm 54	200 \pm 58	173 \pm 25	24 \pm 8

されていることが分かる。

表 1 に観察画像から、上式に基づいて得られた再結晶化速度定数 k を示す。AFP 濃度 1 $\mu\text{g/ml}$ の結果の他、0.1 $\mu\text{g/ml}$, 0.01 $\mu\text{g/ml}$ の結果も示してある。0.01 $\mu\text{g/ml}$, 0.1 $\mu\text{g/ml}$ では、AFP 無添加の場合と有意な差は認められなかった一方、1 $\mu\text{g/ml}$ では再結晶化速度定数の値は、無添加と比較して約 87% 小さくなった。これらの結果から、I 型 AFP は 1 $\mu\text{g/ml}$ で有意な再結晶化抑制能を示すことが明らかとなった。

このように、氷結晶観察と画像解析ならびに再結晶化速度定数を算出することで、AFP の再結晶化抑制能を定量的に評価することができる。

3.4 AFP 原料の選択肢増加の試み

AFP が製品として実用化されつつあるものの、現在市場に出回っている冷凍食品の量は膨大であり、これらに AFP を添加して利用するためには、生産規模の拡大に加え、原料の選択肢を増やすことも必要である。前述したように、津田ら[9,14]は北海道の市場に売られているマダラや複数種のカレイ等の種々の魚に AFP が含まれていることを明らかにした。さらに、彼らは北海道と同等の気候の水域で漁獲された魚類にも、AFP が含まれている可能性が高いことを述べている[14]。しかしながら、実際に北海道以外の水域で漁獲された魚類を用いて AFP の存在の有無を確かめた報告例は、ほとんど見当たらない。そこで、我々は北日本に属する東北地方で漁獲された水産物にも AFP が含まれている例があるかを確認するため、複数の東北産水産物について、その水抽出液の氷結晶再結晶化抑制活性を調べた[20]。用いた水産物は、2012 年 3 月中旬に塩釜仲卸市場にて購入した 21 種類である。(魚類 12 種；アイナメ、アジ、ウミタナゴ、エゾイソアイナメ、カナガシラ、キチジ、サヨリ、スケトウダラ、ノドクロ、マコガレイ、マダラ、コオナゴ；海藻類 2 種；乾燥ひじき、ワカメ；貝類 4 種；赤貝、ツブ貝、ホタテ貝、ホッキ貝；その他 3 種；パファンウニ、乾燥小エビ、ホヤ)。なお、これらの試料のうち、アジ、スケトウダラ、マダラ、コオナゴは、北海道で漁獲されたものから AFP の存在が既往の文献[14]により確認されている。また、同文献[14]では、マコガレイについての AFP の存在の有無に関する記載は見当

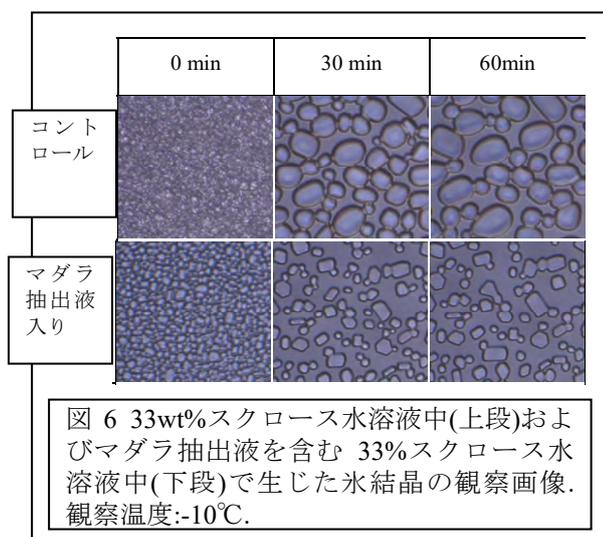
たらないものの、北海道産の種々のカレイから AFP の存在が確認できたことが述べられている。

これらの試料を蒸留水と混合し、すり潰した後遠心分離と濾過により不溶物を除去して得られた上澄みを 60wt%スクロース水溶液と混合し、最終スクロース濃度が 33wt%としたものを氷結晶観察用試料溶液とした。

この試料溶液 1 μ L を直径 16mm のカバーガラス 2 枚の間に挟み込み、図 4 の温度制御が可能な顕微鏡観察ステージを用いて、3.3 と同様の手順で凍結し、-10 $^{\circ}$ C 条件下で、0, 30, 60 分後の氷結晶の画像を得た。

図 6 はコントロール (33wt%スクロース水溶液) 及びマダラ抽出液を含む 33%スクロース水溶液の -10 $^{\circ}$ C 到達直後、30 分後、60 分後の氷結晶観察画像である。マダラの抽出液を含む試料は、コントロール試料と比較すると、30 分後ならびに、60 分後の氷結晶サイズの増大が抑えられていることから、今回東北地方で漁獲されたマダラには再結晶化抑制効果を有する物質が含まれており、東北産のマダラにも AFP が含まれている可能性が高いことが示唆された。このほか、マコガレイ抽出液もマダラほど明確ではないが、氷結晶増大を抑える効果が確認された。マダラおよびマコガレイ以外の水産物 19 種では、今回の実験では明確な再結晶化抑制効果は観察されなかった。

前述したように、北海道産のマダラおよび各種カレイに AFP が含まれていることが知られている[14]。今回の実験で得られた結果は、北海道より南の東北地方で漁獲されたマダラ及びカレイにも AFP が含まれている可能性が高いことを示す



ものであると考えられた。

マダラについては、水抽出液中に含まれていると想定される AFP を効率的に濃縮ならびに分離精製することを目的として、マダラ水抽出液が示す不凍活性の季節変動、加熱処理がマダラ水抽出液の不凍活性に及ぼす影響を調べた[21]。2013 年の 11, 12, 3, 5 月に岩手県宮古で漁獲された試料の不凍活性を調べたところ、11 月及び 12 月に漁獲された試料に明確な不凍活性が確認できた一方で、5 月に漁獲された試料は不凍活性が著しく弱かった。60 $^{\circ}$ C, 70 $^{\circ}$ C, 80 $^{\circ}$ C で 15 分間加熱処理を施した水抽出液は、未加熱試料と同様の不凍活性を有していた。食品の製造加工においては調理、殺菌などの加熱過程がしばしば行われるが、上記の結果は、加熱過程を含む食品においても、マダラ由来の AFP は使用可能であることを示唆している。

4. おわりに

以上、AFP の概説ならびに、近年の AFP の食品産業での利用に向けての種々の試みを述べた。AFP の作用の原理の理解と AFP の効果の合理的な評価を基に、AFP の食品への応用が進展することを期待する。本報がその一助となれば幸いです。

なお、本報記載の結果の一部は、財団法人岩谷直治研究財団ならびに、文部科学省東北マリンサイエンス拠点形成事業「高度冷凍技術を用いた東北地区水産資源の高付加価値化推進」の助成により得られたものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] Hagiwara, T. et al., Fractal Analysis of Ice Crystals in Frozen Fish Meat, *Jpn. J. Food Eng.*, **11-16** (2003) 4.
- [2] Raymond, J. A. and DeVries, A. L., Adsorption inhibition as a mechanism of freezing resistance in polar fishes, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2589-2593** (1977) 74.
- [3] 田中正太郎ら, 不凍タンパク質, *生物物理*, **130-135** (2003) 43.
- [4] Feeney, R. E. and Yeh, Y., Antifreeze proteins; Current status and possible food uses, *Trends in Food Sci. Technol.*, **102-106** (1998) 9.

- [5] Griffith, M. and Ewart, K. V., Antifreeze proteins and their potential use in frozen foods, *Biotechnology Advances*, **375-402** (1995) 13.
- [6] Griffith, M and Yaish, M. W. F., Antifreeze proteins in overwintering plants: a tale of two activities, *Trends in Plant Sci.*, **399-405** (2004) 9.
- [7] Graether, S. P. et al., β -Helix structure and ice-binding properties of a hyperactive antifreeze protein from an insect, *Nature*, **325-328** (2000) 406.
- [8] Regand, A. and Goff, D., Freezing and ice recrystallization properties of sucrose solutions containing ice structuring proteins from cold-acclimated winter wheat grass extract, *J. Food Sci.*, **552-556** (2005) 70.
- [9] 西宮佳志ら, 不凍タンパク質の大量精製と新たな応用開拓, *Synthesiology*, **7-14** (2008) 1.
- [10] Fennema, O. R. and Powrie, W. D. (eds.), *Low-Temperature Preservation of Foods and Living Matter*, Marcel Dekker (1973).
- [11] DeVries, A. L. and Wohlschlag, D.E., Freezing resistance in some Antarctic fishes, *Science*, **1073-1075** (1969) 163.
- [12] Yih-Cherng Liou, Y.-C. et al., Mimicry of ice structure by surface hydroxyls and water of a β -helix antifreeze protein, *Nature*, **322-324** (2000) 406.
- [13] Moskin, J., Creamy, healthier ice cream? What's the catch?, *New York Times*, July 26 (2006).
- [14] Tsuda, S. and Miura, A., Antifreeze proteins from fishes, Japanese patent, 2004, P2004-83546A.
- [15] Takaragawa, A. and Araki, N., Application of antifreeze protein from Japanese radish sprout in food preservation under frozen conditions, *Refrigeration*, **712-715** (2012) 87.
- [16] Obata, H., Kawahara, H., and Fukuoka, J., Extract having antifreeze activity from Japanese radish sprout and its methods for production and utilization, Japanese patent, 2007, P2007-153834A.
- [17] <http://www.kaneka-finefood.com/result/index.html>
- [18] 萩原知明, 不凍タンパク質の再結晶化抑制の実際, *冷凍*, **562-568** (2011) 86.
- [19] Lifshitz, I. M. and Slyozov, V. V., The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions, *J. Phys. Chem. Solids*, **35-50** (1961) 19.
- [20] 高橋幸幹ら, 東北産水産物からの不凍タンパク質(AFP)の探索, *日本冷凍空調学会論文集*, **183-187** (2015) 32.
- [21] 田口堯麻呂ら 東北産マダラ由来不凍タンパク質(AFP)の特性解析と中間精製, *日本冷凍空調学会論文集*, **189-193** (2015) 32.

アジア熱科学工学連盟 (AUTSE)

Asian Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE)

高田 保之 (九州大学)

Yasuyuki TAKATA (Kyushu University)

e-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

2015年11月13日、韓国済州島において、日本伝熱学会、中国工程熱物理学会伝熱伝質分会および韓国機械学会熱工学部門は、アジア地区における熱工学分野のネットワークを広げる目的で、「アジア熱科学工学連盟 (Asian Union of Thermal Science and Engineering, 略称 AUTSE) を設立しました。本稿では、設立の経緯、概要および今後の活動内容について概略をご紹介します。

2. AUTSE 設立の経緯

2015年5月に福岡で開催された日本伝熱学会総会において岡崎健第53期会長は、退任の挨拶の中で「日中韓を核とするアジア地区の連携を強化し日本のリーダーシップとプレゼンスを発揮することが重要である」と述べられました。筆者は国際活動部会長として、これを実行する組織作りを担当することになりました。伝熱ネットワークの国際的な組織である ICHMT が、いまだに超ベテランの大御所の強い影響下で運営されていると聞きかじっておりましたので、アジア地区においてはもっと若い現役世代を中心とした欧州における Eurotherm Committee のような組織を立ち上げるべきだという主張には大いに賛同できるものでありました。

そこで、2015年7月下旬、岡崎先生と同様な意見をお持ちの清華大学の張興先生（中国伝熱伝質学会会長）と相談を開始しました。張先生がちょうど小生の研究室に滞在中だったので、組織をどうするか、どういう活動を行うかなど、いろいろと突っ込んだ意見交換を行いました。韓国側の窓口は KAIST の Sung Jin Kim 先生が適任ということで、3者でスカイプミーティングを8月3日に実施し、概要の検討を行いました。そして、会議の名称、組織、主催の国際会議、さらに AUTSE の初代 President として KAIST の Sang Yong Lee 先生にお

願いしようということなど、基本的な合意に至りました。その後、本会国際活動部会での議論や理事会の了承を経て、AUTSE の骨格が固まり、冒頭に述べたように済州島に日中韓の代表が集まって AUTSE が設立されました。図1は最初の Executive Board Meeting を開催した時の写真です。日本からは花村克悟副会長、小原拓企画部会長および小生の3名が出席しました。



Fig.1 The First Executive Board Meeting, ICC-Jeju, Jeju, Korea, Nov. 13, 2015

3. AUTSE の概要

済州島での設立会議で合意された設立の目的や組織の概要を紹介します。

3.1 目的

- (1) アジア地区の伝熱コミュニティのネットワークを形成し、参加国間の情報交換を行うこと。
- (2) 国際会議やセミナーを主催・後援を行うこと。
- (3) アジア地区の伝熱研究者の情報をデータベース化し、情報提供に活用すること。
- (4) 各国の伝熱コミュニティ間の協力関係を構築すること。
- (5) シニアや若手研究者への贈賞。

目的(3)については、AUTSE が主催・後援する会議の参加者名簿（メールアドレス）を蓄積し、これから開催する会議やイベントなどの情報発信に利用する予定です。ICHMT が有する膨大なメー

リングリストが会議情報の配信に大きな効果を発揮していますが、アジア地区でも同様なメーリングリストを構築しようと考えています。

3.2 加盟国/地域

AUTSEは“連盟”であり、各国の国内組織をメンバーとします。

- Lead-member country (LMC) : 日本, 中国, 韓国
- Member country (MC) : 日中韓以外のアジア諸国

現時点での構成メンバーは日中韓3か国のみですが、順次参加国を増やしていく予定です。日中韓3か国はLMCとしてAUTSEの運営の中心的役割を担います。図2に将来のAUTSEのMCのイメージを示します。

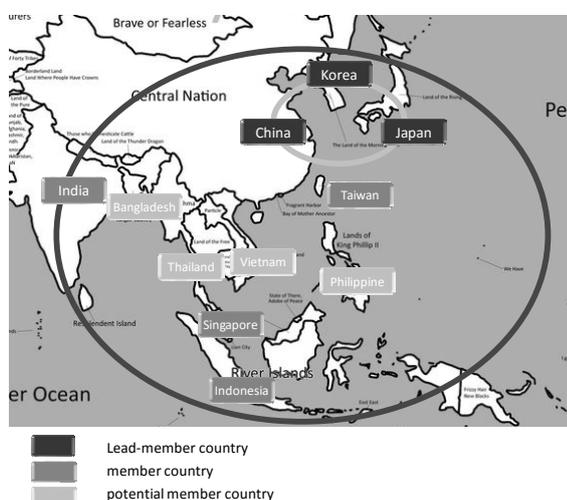


Fig.2 AUTSE member countries (to become member)

3.3 運営組織

AUTSEには、Executive Board (EB), Scientific Council (SC), Honorary Advisory Board (HAB)の3つの委員会を設けました。立ち上げ時の各委員会のメンバーを表1に示します。

Executive BoardはAUTSEの最高意思決定機関であり、LMCからはとりあえず3名ずつ代表を出すことになりました。AUTSEのPresidentを1名、Vice Presidentを2名選出することになり、本稿冒頭で述べたように、11月13日の初のEBミーティングにおいて、初代のPresidentとして韓国KAISTのSang Yong Lee教授を選出いたしました。2名のVice Presidentは中国から清華大学の張興教授、日本からは小生が選出されました。また、EBメンバーには70歳を超えてメンバーになることはで

きないという定年制を設けることにしました。これは既存の世界的な組織における弊(老)害を強く意識して規則化したものです。

初代EBメンバーの任期は2017年3月までとし、済州島で実施する国際会議(ACTS2017、後ほど説明)の際に新たな任期4年のEBメンバーを選出することとしています。ただし、3カ国の申し合わせにより、当面はACTSを主催した国からPresident(任期4年)を選出することとしていますので、第2代Presidentも韓国から選出される予定です。

Scientific Council (SC)は、会議やセミナーの開催に際して科学的な助言を行う委員会です。SCのChairは国際的に活躍しておられる大阪府立大学の須賀一彦先生にお願いしました。

Honorary Advisory Board (HAB)は経験豊富なシニアの先生方で構成されており、大所高所からの助言を期待しています。

3.4 AUTSE Award

AUTSEでは、次の2種類の賞を設定することになりました。

AUTSE Outstanding Scientist Award (OSA)

AUTSE Young Scientist Award (YSA)

前者は、熱工学分野に関する長年の貢献に対する賞で、後者は学位取得後の若い研究者への賞です。これらの賞の贈呈は2017年3月に開催予定の第1回ACTSで行う予定です。近々に募集が始まりますので、該当する方は積極的な応募をお願いいたします。

4. Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS)

AUTSEでは、アジア地区の熱工学会議として、表題の国際会議を開催することにいたしました。第1回は、2017年3月26日～30日に韓国済州島の国際会議場で開催されます(Fig. 3)。IHTC, Eurotherm, PRTECなどの大きな国際会議の開催時期を考慮して、4年毎に開催することにいたしました。この会議の詳細な情報は、WEBサイト

<http://acts2017.org/>

に掲載されています。日本からはプレナリー1名、キーノート4名を推薦しました。アジア以外からも著名な研究者の講演が予定されています。日本から多数の参加者が期待されておりますので、よろしくご参加のほどお願いいたします。

Table 1: Executive Board, Scientific Council and Honorary Advisory Board

List of Executive Board(EB)	
Korea	Sang Yong LEE (President, KAIST) Sung Jin KIM (Secretary General, KAIST) Jin Taek CHUNG (Korea Univ.)
Japan	Yasuyuki TAKATA (Vice President, Kyushu Univ.) Katsunori HANAMURA (Tokyo Tech.) Taku OHARA (Tohoku Univ.)
China	Xing ZHANG (Vice President, Tsinghua Univ.) Chang-Ying ZHAO (Shanghai Jiao Tong Univ.) Bing-Yang CAO (Tsinghua Univ.)
List of Scientific Council(SC)	
Korea	Byung Ha KANG (Kookmin Univ.) Man Yeong HA (Pusan National Univ.) Hyung Hee CHO (Yonsei Univ.) Yong Jin KIM (Korea Inst. of Machinery & Mat.) Minsoo KIM (Seoul National Univ.)
Japan	Kazuhiko SUGA (Chair, Osaka Pref. Univ.) Kazuyoshi NAKABE (Kyoto Univ.) Koji TAKAHASHI (Kyushu Univ.) Naoki SHIKAZONO (The Univ. of Tokyo) Mamoru TANAHASHI (Tokyo Tech.)
China	Wei LIU (Huazhong Univ. of Sci. and Tech.) Peixue JIANG (Tsinghua University) Ruzhu WANG (Shanghai Jiao Tong Univ.) Qiuwang WANG (Xi'an Jiaotong Univ.) Qiang LIAO (Chongqing Univ.)
List of Honorary Advisory Board(HAB)	
Korea	Hyun Dong SHIN (KAIST) Hoyoung KIM (Korea University) Jin Ho LEE (Yonsei University) Kwan-Soo LEE (Hanyang University) Joon Sik LEE (Seoul National University)
Japan	Toshiro MAKINO (Kyoto University) Masanori MONDE (Saga University) Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology) Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefecture University) Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)
China	Zengyuan GUO (Chair, Tsinghua University) Ping CHENG (Shanghai Jiao Tong University) Wenquan TAO (Xi'an Jiaotong University) Yimin XUAN (Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics) Heping TAN (Harbin Institute of Technology)

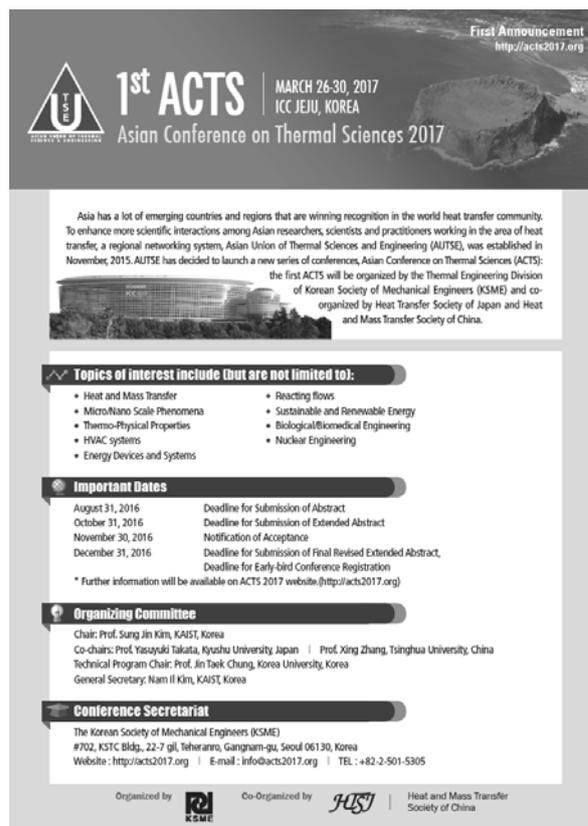


Fig. 3 First announcement of ACTS2017

5. 終わりに

岡崎元会長から宿題を頂戴した当初は、正直なところ、このような組織を作るには相当時間がかかると思っていました。いざ取り掛かってみると、あっという間に AUTSE が立ち上がったような気がします。実際に中国と韓国に相談を開始したのが7月中旬で、設立が11月13日でしたからわずか4ヶ月弱でできてしまったこととなります。これは Sung Jin Kim 先生、張興先生という信頼できるパートナーと一緒に仕事ができたからに他なりません。また、初代 President の Sang Yong Lee 先生の強力なリーダーシップのお陰で EB, SC, HAB などの組織作りが早期に実現できました。この間、本会理事および国際活動部会メンバーには多大なご協力と的確なご助言を頂戴しました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。AUTSE はできたての組織ですが、今後継続的に肉付けをして充実させ、アジア地域のネットワーク作りに活用していきたいと考えています。会員の皆様の積極的なご参加とご支援をお願い申し上げます。

アポロ計画をふりかえる 'Apollo Program' Revisited

吉田 英生 (京都大学)

Hideo YOSHIDA (Kyoto University)

e-mail: sakura@hideoyoshida.com

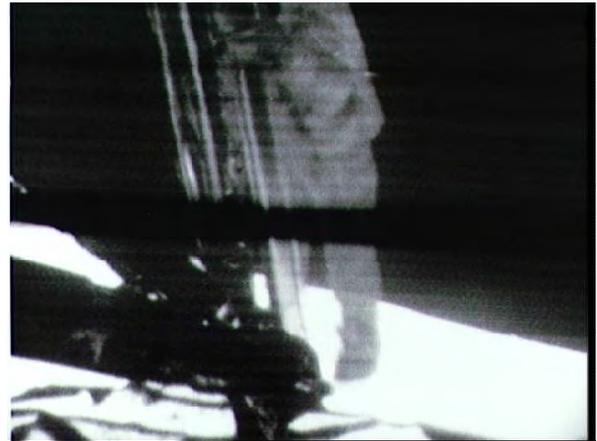
1. はじめに

京都大学工学研究科では“現代科学技術の巨人セミナー「知のひらめき」”という、大学院生400名以上が受講する何とも大仰なタイトルの講義がある。筆者など、申すまでもなくこのような講義講師の任にあらずなのだが、順番なので逃げるわけにもいかない。そこで、取り上げる内容を「巨人」とすることで少しでも講義タイトルに沿うようにと準備したのが、本稿の題材となっている。

20世紀における科学技術発展の頂点の一つは、1969年の米国Apollo 11号による人類初の月着陸であることに異論はないであろう。Apollo計画

(Apollo Project) は、3年後の2019年には月面初着陸から50周年になるので再び脚光を浴びることは間違いないが、今の若い人たちの大部分にとっては過去の一出来事としての受け止め方をされていないだろうか。一方、筆者は当時中学2年生で、世界中の人々が人類月面第1歩の衛星中継(図1)に見入ったことや、翌年大阪で開催された万国博覧会の米国館では「月の石(Apollo 12号による)」がいちばんの目玉だったことを鮮烈に覚えている。

世紀のプロジェクトであるApollo計画については、もちろん膨大な文献(たとえば[1~15])やNASAのウェブサイト(https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/index.html)などにも詳細な記録がある。和書ではとりわけ的川[9]や佐藤[13]による労作で全体像が理解できることもあり、本件について専門でもない筆者が屋上屋を架すまでもないのだが、中学生から大学生にかけて同時代を生きたものとして、少々個人的な思い出話に加え現在のインターネット検索では容易に探し出せないと思われる当時の記事も含めて、若い人たちの関心を少しでも喚起できればと願う。なお、実際の講義では、30周年にあたる1999年7月20日にNHKで放映された特別番組「月着陸に命をかけた男たち」の録画が手元にあったので、最初に30分ほど視聴した。



Astronaut Neil A. Armstrong, Apollo 11 commander, descends the ladder of the Apollo 11 Lunar Module prior to making the first step by man on the moon. This view is a black and white reproduction taken from a telecast by the Apollo 11 lunar surface camera during extravehicular activity. The black bar running through the center of the picture is an anomaly in the television ground data system at the Goldstone Tracking Station.

図1 Telecast of Astronaut Neil Armstrong descending ladder to surface of the moon (JSC Digital Image Collection, Photo ID: S69-42583 <http://images.jsc.nasa.gov/index.html> より)

2. Apollo計画のトリガー

よく知られているように、米国による月着陸が1970年を前に実現したのは、1961年5月25日 Kennedy大統領が上下両院合同議会で行った次の演説が発端となっている(太字部分は筆者)：

*First, I believe that this nation should commit itself to achieving the goal, **before this decade is out**, of landing a man on the moon and returning him safely to the earth. No single space project in this period will be more impressive to mankind, or more important for the long-range exploration of space; and none will be so difficult or expensive to accomplish.*

https://en.wikisource.org/wiki/Special_Message_to_the_Congress_on_Urgent_National_Needs

米国とKennedyをこれまでに熱くしたトリガーは他にもない、米国—ソ連の冷戦下の1957年10月4日にソ連が世界初の人工衛星Sputnik (直径58cmの球体) を打ち上げたいわゆるスプートニク・ショックである。当時のEisenhower米国大統領はただちに有人宇宙飛行を目標とするMercury計画 (Project Mercury) を立ち上げた。その結果、1958年1月にはExplorer 1号でソ連に追いついたものの、ソ連は1961年4月にはYuri Gagarinが乗ったVostok 1号で再び有人宇宙 (地球周回) 飛行に先んじる。その3ヶ月前に米国大統領に選出されたKennedyによる前述の演説は、Vostok 1号の翌月であり、米国がJohn Glennの乗ったFriendship 7号でソ連に追いつくのは1962年2月である。Gemini計画 (Project Gemini) とApollo計画はここに始まった。

3. Gemini・Apollo計画の概要—驚異の8年間

前述のように米国のGemini・Apollo計画はソ連あつての結果であるので、ソ連のZond計画 (Zond Program)・Soyuz計画 (Soyuz Program) も対等に扱わないと方手落ちである。この意味でも、的川の書[9]や、Alexei Leonov (Voskhod 2号で1965年に世界初の宇宙遊泳)・David Scott (Gemini 8号, Apollo 8号・15号に乗船) 共著による書[2]は貴重である。表1に、スプートニク・ショックからApollo計画終了までの約15年間を、Excelで時間軸が正しく見えるようにして年表を作成してみた。●と右側の各項目が対応しているが、とりわけ1965~1969年の間はあまりにもたくさんの展開があるため収まり切れず、赤の補助線を挿入したように幅を広げて見ていただきたい。なお、赤字はソ連の項目、青字は月着陸したフライトを表している。

後述するようにApollo計画の主役であったSaturnロケットの先端には、司令船・機械船・宇宙船・月着陸船の4つの船が搭載される。表2には有人飛行後のApollo 7号から11号への発展を少し詳しく整理してみた。間隔日数とあるのは前号の打ち上げからの経過日数を表す。7号以後は70日前後という超ハイペースで打ち上げが繰り返されていることに驚く。そればかりか、無人の月周回飛行の段階がなく、いきなりApollo 8号で有人の月周回飛行 (月面着陸船の開発が遅れたため指令船と機械船のみの構成) に出るのである。これは一重にソ連との競争による不自然な選択であった。

表1 米ソ宇宙開発競争に関する年表



表2 Apollo 7号 (有人飛行) 以後の段階的發展

号	間隔日数	飛行			船の構成		備考
		地球周回	月周回	月着陸	司令・機械	宇宙・着陸	
11	59			●	●	●	最終目標達成
10	76		●		●	●	高度15kmまで降下
9	72	●			●	●	完全な船構成
8	71		●		●		以後は全てSaturn V
7	190	●			●		Saturn IB

それにしても米国は、Kennedy演説の1961年5月を起点にすると、わずか9か月後には有人で地球周回飛行を行い、5年後には月を目指すための無人飛行に着手し、7年後には有人の月周回飛行、そして8年後には人類を月に送り込むという、驚異的なペースで目標を達成する。巨大プロジェクトという点では日本の東海道新幹線も敗戦後わずか19年という短時間で開業したことも特筆に値するが、未知の問題をクリアするという科学技術的困難さという点

ではApollo計画は桁違いであったと思う。もちろん予算も桁違いで、1966年のNASAの予算は連邦政府予算額の約4.4%、GDPの約0.8%に達した[13]。

4. Sergei KorolevとWernher von Braun

偉大なプロジェクトには必ず偉大なリーダーが存在する¹。ソ連と米国の月到達競争は、それぞれSergei Korolev (1907-1966) とWernher von Braun (1912-1977) の巨人により牽引された(図2)。KorolevはKyiv工科大学と流体力学で有名なZhukovskyがいたMoscow高等技術大学で学び、ロケット研究に打ち込んだ。一方、ドイツ(現ポーランド)生まれのvon BraunはBerlin工科大学で学び、バルト海に面したPeenemündeの陸軍兵器実験場²でやはりロケット研究に打ち込んだが、第二次世界大戦で敗戦国となったドイツから、いわゆるペーパークリップ作戦(Operation Paperclip)で米国に連れて行かれた(図3)。この二人を中心として、的川[9]は息を呑むようなソ連と米国の宇宙開発競争を詳細に描いている。

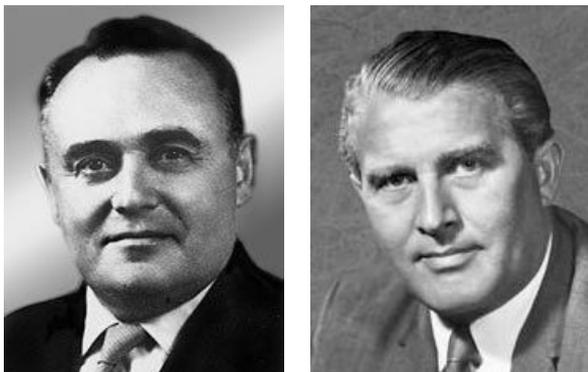


図2 Sergei KorolevとWernher von Braun



図3 米国TexasのFort Blissに連れていかれた元Peenemündeの技術者たち(前列右から7番目がvon Braun)

¹ 前述の東海道新幹線では島秀雄。1969年にJames Watt International Medal受賞。

² 現在は、The Peenemünde Historical Technical Museumとなっている。http://www.peenemuende.de/en/

年長のKorolevは1966年に競争結果を見届けることなく亡くなるが、von BraunはApollo計画が終わり、Space Shuttle計画(Space Shuttle Program)が立ち上がる1977年まで生きた。1977年当時、筆者は東京工業大学工学部4年生で、読書とサッカーで気ままに過ごした過去3年間を反省し、大学最後の1年間だけはせめてしっかり勉強しようと、指導が厳しくて学生たちから敬遠されがちだった森康夫先生の研究室に所属した直後だった。そのような状況だったので、以下の毎日新聞余録でvon Braunを知って感銘し、大切に切り抜いたのだと思う：

余録(1977年6月19日)(毎日新聞社の転載許諾済み)
 「父の日」のきょう、十六日に死去したロケットの父、ウェルナー・フォン・ブラウン博士をしのぶことにしよう。八年前、アポロ11号で、初めて人間に月を踏みしめさせた技術者がブラウン博士である。人類の歴史に特筆大書される出来事であった▲ドイツ生まれで、ナチスのためにV2号を完成した博士は、敗戦と共に米国に連れてゆかれた。当時の米国は戦略爆撃機を重視していた時代である。だから博士の腕を活用するためよりも、ぶっそうなヤツだから隔離しておけ、という気持の方が強かった。冷や飯を食っていた博士に脚光を当てたのは、一九五七年の初の人工衛星、ソ連のスプートニクである▲あわてた米国は、だれかいないかと首をひねり、この「捕虜だった男」を思い出した。期待にたがわず、博士はエクスポローラー1号を軌道に乗せた。それから五年の後、宇宙計画の立役者となっていた博士は、「夢は何か」という質問にこう答えている▲「子供のときからの夢である月への飛行の準備が進んでいる。いまや忙しくて夢みる暇もない」。部下として仕えた米人技術者で、博士をほめない者はいないという。統率力にもすぐれていたが、何よりも政治的発想とハツタリがいささかもない、純粋の技術者であったことが皆をひきつけた▲ヒトラーの命令で働いたが軍国主義者ではなかった。ケネディの要請にこたえたが反ソ主義者でもなかった。念願にあったのはただ、いかにして大きなロケットを作り、うまく飛ばすかだけであった。国際政治の波にもあそばされた。逆にそれを利用することは考えもしなかった。運命はその彼にやりたいことをすべてやらせた。技術者として、たぐいまれな幸福な生涯であった▲技術は何のためにあるか、を論じる時間があつたら計算用紙に取り組んだ。こうした態度に疑問を投げる人もいる。だが画期的技術は、ブラウン博士のような人物こそが開発するのは確かである。

その11年後の1988年7月、Houstonで開催されたthe ASME Heat Transfer Divisionの50th Anniversaryに参加したついでに、NASAのJohnson Space Centerに立ち寄った。あいにくの休日で外から見ただけであるが、横たわっている巨大なSaturn Vロケット(全高110.6m、直径10.1m)を見たとき、度肝を抜かれた(筆者が見た範囲では、明石海峡大橋とともに最も威圧される人工物である)。このロケットを作り人類を月まで(384,400km:地球の直径の約30倍)往復させたのがvon Braunであり米国なのだと思うと感極まった。図4にSaturn Vの構造を理解しやすいサイトを紹介する。

Saturn V Major Components



Saturn V Stages

The Saturn V rocket consisted of three propulsive [instrument unit](#), located above the S-IVB, providing

Mouse over listed items to see their location

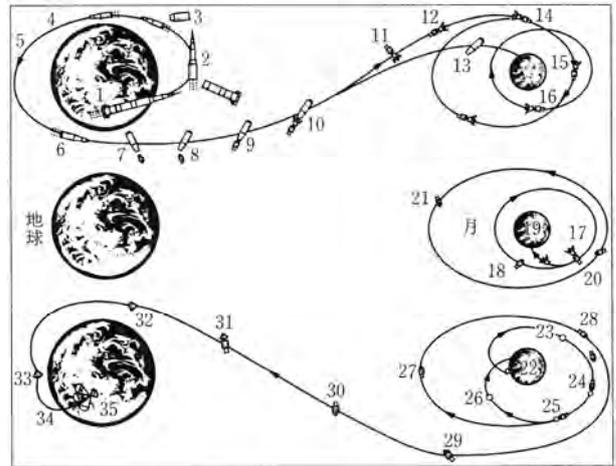
- [Boost Protective Cover and Launch Escape](#)
- [Apollo Spacecraft](#)
- [Spacecraft Lunar Module Adaptor](#)
- [Instrument Unit](#)
- [S-IVB Stage](#)
 - S-IVB Forward Skirt Assembly
 - S-IVB Liquid Hydrogen Tank
 - S-IVB Liquid Oxygen Tank
 - S-IVB Aft Skirt Assembly
 - S-IVB Thrust Structure Assembly
 - S-IVB J-2 Engine (1)
- [S-IVB Aft Interstage](#)
- [S-II Stage](#)
 - S-II Forward Skirt Assembly
 - S-II Liquid Hydrogen Tank
 - S-II Liquid Oxygen Tank
 - S-II Aft Skirt Assembly
 - S-II Thrust Structure Assembly
 - S-II J-2 Engines (5)
- [S-IC / S-II Interstage](#)
- [S-IC Stage](#)
 - S-IC Forward Skirt Assembly
 - S-IC Liquid Oxygen Tank
 - S-IC Intertank
 - S-IC Fuel Tank
 - S-IC Thrust Structure Assembly
 - S-IC F-1 Engines (5)

図4 Saturn Vの構造

http://historicspacecraft.com/Rockets_Saturn_5.html

Apollo計画では大きなことから小さなことまで無数といっても過言ではない選択肢があった。その中でも飛行軌道の選択は最も重要な事項の一つであった。これには3案が拮抗したが、1962年1月、von Braunが1960年代中に月着陸という時間的制約から自説を譲って月軌道ランデブー方式 (Lunar Orbit Rendezvous, LOR) に賭けたことが重要なターニングポイントとなった。なお、LOR自体はNASAオリジナルのアイデアではなく、今からちょうど100年前の1916年、ウクライナのYuri Kondratyukによって提唱されたものである。

これを受けて、ランデブー・ドッキングの技術を確認する必要がある。1人乗りのMercury計画から2人乗りのGemini計画に至った (Apollo計画は3人乗り)。ただし、von Braun自身はSaturnロケットに集中するためGemini計画には参加しなかった。図5に最終的に実施された飛行計画概要を示す。なお、Apollo 11号の詳細な飛行計画は https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/a11fltplan_final_reformat.pdf に記録されている。



- 1 三人の宇宙飛行士が乗り込みサターンV/Apollo発射
- 2 第一段分離、第二段のエンジン点火
- 3 第二段分離。第三段のエンジンを点火し、アポロを地球周回軌道に乗せる
- 4・5 待機軌道
- 6 第三段エンジンに二度目の点火を行い、アポロを月への軌道に乗せる
- 7 第三段からアポロを分離
- 8 円錐形アダプタの投下、ならびにアポロの方向転換
- 9 第三段の上部に位置している機械・司令船に月着陸船をドッキング
- 10 第三段からアポロを分離
- 11 最初の軌道修正
- 12 二度目の軌道修正
- 13 第三段を月面衝突軌道に移動
- 14 最後の軌道修正
- 15 月周回軌道に乗せる
- 16 軌道高度を下げる。また、宇宙飛行士二人が内部通路を通じて月着陸船に移動
- 17 月着陸船が機械・司令船から離れる
- 18 月面着陸での制動のため月着陸船のエンジン点火
- 19 月着陸船の月面着陸操作。宇宙飛行士二人月面に出る
- 20 機械・司令船は月の軌道上にとどまっている
- 21 ドッキングに向け機械・司令船の軌道を最適化
- 22 月着陸船の上部が月面から離陸
- 23 月着陸船の上部が機械・司令船に接近
- 24 ドッキング
- 25 二人の宇宙飛行士が機械・司令船に乗り移った後、月着陸船の上部を分離
- 26 月着陸船の上部を月面に投下
- 27 機械・司令船は月周回軌道に乗っている
- 28 地球への帰還軌道に乗せる
- 29 最初の軌道修正
- 30 必要があれば、二度目の軌道修正
- 31 司令船と機械船を分離
- 32 大気の濃密な層への突入前に司令船へ地上から誘導指令
- 33 司令船は制御されながら地球大気圏を降下
- 34 大気圏突入時に電波信号消滅
- 35 パラシュートによるブレーキ・システムを作動。三人の宇宙飛行士が乗ったカプセルは太平洋の予定海域に着水

図5 サターンV/Apollo計画の軌道

(的川[9]©中央公論社より)

5. 命をかけた宇宙飛行士たち

いうまでもなく、有人の宇宙飛行は科学技術の問題であると同時に、宇宙飛行士にとっては命が

けの冒険でもある。実際、Apollo計画でもSoyuz計画でも、さらに2011年まで続けられたSpace Shuttle計画でも、残念ながら少なからぬ死亡者が出ている（一方、Apollo 13号は奇跡の生還[4]）。

たとえ月に無事着陸できたとしても再び無事離陸して地球に帰れるのか—経験もない飛行計画に伴う緊張と覚悟はいかばかりかと誰しも考える。

“*That’s one small step for a man, one giant leap for mankind.*”の名句を残した Neil Armstrong船長の言葉が重く響くのは決死の覚悟で地球外に出かけた人から出たものだからでもあろう。そのArmstrong船長も4年前の2012年8月25日に亡くなった。以下は当時の朝日新聞天声人語からである：

天声人語（2012年8月28日）（朝日新聞社の転載許諾済み）
 「静かの海」と聞けば、天文小僧だった12歳の夏に引き戻され、胸が熱くなる。月に浮かぶ「餅つきウサギ」の顔あたり、1969（昭和44）年、ここにアポロ11号が着陸した。人類初の一步は日本時間の7月21日、月曜日の正午前だった▼左の靴底でそれを刻んだニール・アームストロング船長が、82歳で亡くなった。名言「これは一人の人間にとっては小さな一歩だが、人類にとっては大きな飛躍だ」は、月面に着陸してから考えたそうだ▼19分後、着陸船のバズ・オルドリン操縦士が続く。眼前に広がる景色を眺め、両者が交わした言葉もいい。「これ、すごいだろう」「壮大にして荒涼の極みだね」。人類初の月上会話である▼残るマイケル・コリンズ飛行士は司令船から見守り、はるか地球には米航空宇宙局（NASA）のスタッフたち。幾多の脇役と裏方に支えられ、「人類」を背負う重圧はいかばかりか。着陸時、船長の脈拍は156を数えたという▼以後、17号までのアポロ計画で、事故で引き返した13号以外の6回が成功、計12人が月面を踏んだ。しかし一番は永遠に一番だ。栄光を独り占めしたという罪悪感もあってか、物静かな船長は英雄視を嫌い、華やかな席や政界への誘いを拒み続けた▼静かの海の足跡は、人類史に刻まれただけではない。少年少女を宇宙へといざない、たくさんのお後輩を育てることになる。東西冷戦、ソ連との競争の産物ではあるが、ここまで世界を沸かせ、夢を見させた一歩を知らない。

さらに、Armstrong船長が2004年、参考文献[2]のFOREWORDに寄せている文章から抜粋で紹介しよう（太字部分は筆者）：

It is commonly believed that the space age began because of the Cold War between the West, led by the United States, and the Communist Bloc, led by the Soviet Union. That belief is not quite right. The space age actually began because of a scientific event known as the “International Geophysical Year.” Sixty-six countries joined together to analyze the planet Earth and its environs: oceanography, meteorology, solar activity, the Earth’s magnetic fields, the upper atmosphere, cosmic rays and meteors. The International Geophysical Year was planned for the period 1 July 1957 to 31 December 1958. It was, in fact, the International Geophysical Year and a Half. That particular time was selected because it was the time of maximum sunspot activity. All sorts of unexplained electrical, magnetic and weather phenomena seemed to be somehow related to sunspots.

Soviet and American scientists recognized that if it would be possible to place a manmade object into orbit around the Earth, it would be the perfect platform for sensors and recording instruments to measure many of the characteristics of the natural world for which the International Geophysical Year was created.

They did not realize it at the time but they had started a new competition which would become known as “the space

race.” The Soviets took an early lead with the successful launch of the first Earth-orbiting satellite, Sputnik. They increased their lead with a series of firsts: first to put a living creature—a dog—into orbit; first to put a man into space; first to have a person exit a spacecraft; first to put a woman in orbit; first to launch a multi-crew spaceship and first to fly unmanned probes to the Moon, Venus and Mars.

The American program was substantially behind but not moribund. The Americans were embarrassed but eager to be a part of the race and determined to succeed. United States President John F. Kennedy asked the National Aeronautics and Space Administration to report on our ability to successfully compete with the Soviets. The NASA officials told the President that the United States could not provide the first space laboratory and had only a slim chance of flying around the Moon first but would have a chance, with a concerted national effort, to land a man on the Moon first.

Although this was an arena in which he knew little, Kennedy concluded that the United States must be in the race and must perform well. He received the support of the Congress and of the American people. The race was underway.

6. Bertrand Russellの記事

今回は主に若い人たちに語りかけたいこともあり、私事を何度か話題にして恐縮であるが、1975年、筆者が学部2年生のとき、当時居候していた祖父宅の物置に、Apollo 11号が月着陸した前後の朝日新聞が何日分か残されているのを発見した。その中に英国の哲学者Bertrand RussellがTimesに寄稿した記事の和訳もあった。1872年生まれのRussellは、翌年2月に亡くなる半年前で97歳であった。その和訳を読むや、あまりの感動で原文を読みたくなり、Asahi Evening Newsの方には掲載されているはずだと推察し、築地にあった同社の倉庫から原文の英語をコピーさせていただいた。

和訳の方は、幸いにも朝日新聞社のご好意で http://wattandedison.com/Moon_Bertrand_Russell.pdf にアップロードさせていただいている。原文の方は著作権の関係でアップロードできずにいるが、その冒頭の文章を以下に抜粋する（Times版とAsahi Evening News版はタイトルが異なるが内容は基本的に同一）：

Why man should keep away from the moon

The Times, July 15, 1969

From Earth to Moon

Asahi Evening News, July 22 and 23, 1969

In boyhood, my generation was familiarized with the idea of travelling to the moon by Jules Verne, who wrote admirable science fiction and stimulated the imagination of adventurous youth. I still remember vividly the thrill with which I read his story From the Earth to the Moon. But I hardly thought, and I suppose that other young readers hardly thought, that an actual journey to the moon might become possible during the lifetime of those who were enjoying Jules Verne’s fantasies.

Yet this is what has been happening. The thought of such an adventure is exciting, especially to those who are still young. But those who are no longer young are troubled by doubts and hesitations as to whether the conquest of the moon will really do

anything to ameliorate our human lot. I see arguments on both sides, and I shall try to set them forth impartially, without any attempt to reach a dogmatic conclusion.

筆者にはこの上なく感動的だった内容に加えて、Russell自身が“I wished to say everything in the smallest number of words in which it could be said clearly. (How I write)”と語った、明晰で美しい英文に魅せられ、われながら一つ覚えの単純そのものだが、当時はちょっとした時間の隙間があればお経のように何千回も読み返した。当然の結果、自然に暗記もしてしまい、40年あまり経過した今でも結構覚えている。押しつけるつもりはないが、“現代科学技術の巨人セミナー「知のひらめき」”の機会に若い人たち、そして日本伝熱学会の若い人たちにも47年前の名文をぜひ紹介したいと願った次第である。

参考文献

- [1] Andrew Chaikin, *A Man on the Moon: The Voyages of the Apollo Astronauts*, Michael Joseph (1994). (アンドルー・チェイキン, 人類, 月に立つ 上・下, 日本放送出版協会 (1999).)
- [2] Alexei Leonov, David Scott, *Two Sides of the Moon: Our Story of the Cold War Space Race*, St. Martin's Griffin (2004). (デイヴィッド・スコット, アレクセイ・レオノフ, アポロとソユーズ—米ソ宇宙飛行士が明かした開発レースの真実, ソニー・マガジズ (2005).)
- [3] Piers Bizony, *One Giant Leap: Apollo 11 Remembered*, Zenith-Press (2009). (ピアーズ・ビゾニー, アポロ11号—月面着陸から現代へ, 河出書房新社 (2009).)
- [4] Henry S. F. Cooper, *Thirteen: The Apollo Flight That Failed*, TBS The Book Service (1973). (ヘンリー・クーパー・Jr., アポロ13号奇跡の生還, 新潮社 (1994). Tom Hanks主演のDVDも参照)
- [5] 武谷三男, 河合武, アポロ計画をどう考えるべきか, *エコノミスト* (1969.8.5), 76.
- [6] 特集: アポロ計画の成功とその意義 (グラビア 31ページ, 本文46ページ: 小尾信弥, 佐伯ひさし, 竹内均, 村山定男, 渡辺格, 杉本正雄, 西山千, 宮本正太郎, 井戸剛, 湯浅光朝, 岡本哲史, 長谷寛悦, 原田三夫, 森谷正規), *科学朝日* (1969-10).
- [7] 近藤次郎, アポロ計画とシステム工学, *品質管理*, **20-12** (1969) 43.
- [8] 近藤次郎, アポロ計画のシステム工学への波及効果, *計装*, **13-12** (1970) 5.
- [9] 的川泰宣, 月をめざした二人の科学者—アポロとスプートニクの軌跡, 中公新書 (2000).
- [10] 佐藤靖, NASA有人宇宙船センターにおけるアポロ宇宙船の開発にみる技術システムと人,

- 1960-1969, 年報科学・技術・社会, **13** (2004) 24.
- [11] 佐藤靖, NASAを築いた人と技術—巨大システム開発の技術文化, 東京大学出版会 (2007),
 - [12] 佐藤靖, 科学史入門: NASAとアポロ計画, *科学史研究*, **49-253** (2010) 22.
 - [13] 佐藤靖, NASA—宇宙開発の60年, 中公新書 (2014).
 - [14] 鈴木真二, 「ルッサーの法則」を乗り越えたアポロ計画, *航空情報*, **63-4** (2013) 90.
 - [15] David Meerman Scott, Richard Jurek, *Marketing the Moon: The Selling of the Apollo Lunar Program*, MIT Press (2014). (デイヴィッド・ミアマン・スコット, リチャード・ジュレック, 月をマーケティングする—アポロ計画と史上最大の広報作戦, 日経BP社 (2014).)

付記 1

筆者が京都大学大学院で機械・航空宇宙系修士1年生（標準的には1993年生まれ）を対象に行っている講義「熱物理工学」で、2016年5月にやはりアポロ計画を話題にしたついでに、簡単なアンケートを行った。その結果、表3のような興味深い結果が得られた。von Braunの名前はともかく Korolev の名前を16%の学生が知っていたことには感心した。もう少し細かく見てみると、Korolevの名前を知っていた18人中3人はvon Braunの名前を知らなかった。また、von Braunの名前を知っていた28人中1人はArmstrong船長の言葉を知らなかった。

表3 京大機械・航空宇宙系M1学生へのアンケート

	知っている	知らない
Armstrong船長の言葉	103 (93%)	8 (7%)
von Braunの名前	28 (25%)	83 (75%)
Korolevの名前	18 (16%)	93 (84%)

付記 2

参考文献[5]の対談（月面着陸の3日前に行われた）を、辛口の武谷は以下のように「重力波」の話題で結んでいるのを発見したので付記する。

武谷 次になにに投資をするか。

河合 月に天文台をおくなら、まだ少し意味があるかな。

武谷 それはあるが、なんといっても学問の問題ですからね。重力波というのがほんとうなら、月と地球で重力波を測定すると、どちらの方角から重力波がやってきたかなんていうことがわかるというような問題はあるでしょうけれども。

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2016年					
7月	22(金) 第3回「伝熱工学の基礎」講習会 -熱プロセスを習得したい人のための 初級入門- (開催場所:関西大学 東京センター サピアタワー9階)	2016.6.25		日本伝熱学会(担当 大澤) Tel: 03-3259-7919 Fax: 03-5280-1616 E-mail: office@htsj.or.jp	
11月	2(水) ~ 4(金) The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT2016) (開催場所:Sendai International Center)	2016.5.30 (延期後の 最終締切)	2016.7.29	Organizing Committee Chair Taku Ohara URL:http://ifht2016.org/index.html	2016年 4月号
12月	2(金) 講習会「計測技術」 (開催場所:東京八重洲ホール 701 会 議室)	2016.11.18		日本伝熱学会(担当 大澤) Tel: 03-3259-7919 Fax: 03-5280-1616 E-mail: office@htsj.or.jp	2016年 7月号
2017年					
3月	26(日) ~ 30(木) The First Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017) (開催場所:ICC Jeju, Korea (韓国済州 島国際会議場))	2016.8.31 (Abstract 提出締切)	2016.12.31	Conference Secretariat Ms. Han Lee (KSME) TEL: +82-2-501-5305, FAX: +82-2-501-3649 E-mail: info@acts2017.org http://acts2017.org/ Conference Co-chair (日本語での問合せ) 高田 保之(九州大学) TEL: 092-802-3100, FAX: 092-802-3098 E-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp	2016年 7月号
5月	23(火) ~ 25(木) 第54回日本伝熱シンポジウム (開催場所:大宮ソニックシティ)			実行委員会委員長 飛原 英治 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 内 Tel: 04-7136-4661 E-mail: hihara@k.u-tokyo.ac.jp	

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2016年					
7月	19(火) ~ 20(水) 第44回可視化情報シンポジウム (開催場所:工学院大学新宿キャンパ ス)	2016.3.11	2016.5.13	実行委員会幹事 内田竜朗(東芝) Tel: 045-510-5925 E-mail: tatsu.uchida@toshiba.co.jp	
7月	21(木) 第23回可視化フロンティア「PSP /TSP講習会2016(東京) ~蛍光燐 光による定量可視化」 (開催場所:LMJ 東京研修センター 第3大会議室)	2016.7.10		産業技術総合研究所 染矢聡 E-mail: s.someya@aist.go.jp	
8月	4(木) ~ 6(土) 流体若手夏の学校2016 (開催場所:ホテル・ヘリテージ(埼 玉県熊谷市))			流体若手夏の学校2016 実行委員会 (幹事・代表者)原峻平 Tel: 04-7124-1501 Fax: 04-7123-9814 E-mail: nagare.wakate2016@gmail.com	
8月	7(日) ~ 10(水) 第20回国際乾燥シンポジウム (IDS2016) (開催場所:岐阜市長良川国際会議場)	2015.11.30	2016.3.10	実行委員長 板谷義紀 Tel: 058-293-2532 E-mail: yitaya@gifu-u.ac.jp	
8月	8(月) ~ 10(水) 日本混相流学会混相流シンポジウム 2016 (開催場所:同志社大学今出川キャン パス)	2016.3.18	2016.6.10	混相流シンポジウム2016 実行委員会事務局 土屋活美 Tel: 0774-65-6625 E-mail: konsosymp@jsmf.gr.jp	
9月	1(木) ~ 3(土) 日本実験力学会2016年度年次講演会 (開催場所:近畿大学東大阪キャンパ ス)	2016.5.6	2016.6.30	問合せ先 澤井徹、山本衛(近畿大学) Tel: 0736-77-3888 E-mail: sawai@mech.kindai.ac.jp, ei@waka.kindai.ac.jp	
9月	2(金) 「スターリングエンジン先端技術者に よる」模型スターリングエンジンの作 り方と実用化への活用方法 (開催場所:日本機械学会会議室)			日本機械学会 エンジンシステム部門担当 総務G 曾根原 Tel: 03-5360-3500 Fax: 03-5360-3508 E-mail: sonehara@jsme.or.jp	
9月	2(金) 講演会「『熱マネジメント』に関わる 化学技術 (開催場所:日本化学会7階ホール)			公益社団法人日本化学会 関東支部 講演会 係 Tel: 03-3292-6163 Fax: 03-3292-6318 E-mail: kanto@chemistry.or.jp	
9月	2(金) 「市民と科学者で考えるこれからのエ ネルギー」 (開催場所:日本学術会議講堂)			問合せ先 化学工学会事務局 citizen_sec@scej.org	
9月	6(火) ~ 9(金) 2016年度 日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所:神戸大学六甲台キャンパ ス)	2016.5.31	2016.7.25	年次大会実行委員会 委員長 浅野 等 https://nenji.jsrae.or.jp/nenji2016/inquiry.html	

行事カレンダー

9月	16(金)	第77回応用物理学会秋季学術講演会 分科企画シンポジウム「熱電変換の現在と未来：ZT はどこまで上がるのか？」 (開催場所：朱鷺メッセ(新潟県新潟市))			世話人 林慶(東北大) E-mail: hayashik@crystal.apph.tohoku.ac.jp	
9月	20(火) ～ 23(金)	The 27th International Symposium on Transport Phenomena(ISTP-27) (開催場所：Hawaii Convention Center(Honolulu, USA))	2016.4.1	2016.7.1	代表者 富村寿夫(熊本大) Tel: 096-342-3752 E-mail: tomi@mech.kumamoto-u.ac.jp	
9月	26(月) ～ 28(水)	日本流体力学会年会2016 (開催場所：名古屋工業大学)	2016.6.14	2016.7.25	日本流体力学会年会2016 実行委員会 E-mail: nenkai16@lab-ml.web.nitech.ac.jp	
10月	2(日) ～ 6(木)	11th Asian Thermophysical Properties Conference(ATPC2016) (開催場所：パシフィコ横浜アネックスホール)	2016.3.2		問合せ先 田口良広(慶応大学) Tel. 045-566-1809 E-mail: tag@sd.keio.ac.jp	
10月	8(土) ～ 9(日)	可視化情報全国講演会(日立2016) (開催場所：茨城大学日立キャンパス)	2016.6.3	2016.7.29	実行委員長 稲垣照美(茨城大学) Tel: 0294-38-5044 E-mail: terumi.inagaki.mech@vc.ibaraki.ac.jp	
10月	13(木) ～ 14(金)	修善寺ワークショップ2016 (開催場所：ラフォーレ修善寺 研修センター(静岡県伊豆市))			エレクトロニクス実装学会 乃万こずえ TEL : 03-5310-2010 FAX : 03-5310-2011 e-mail : noma@jiep.or.jp	
10月	26(水) ～ 27(木)	第44回日本ガスタービン学会定期講演会 (ホテルリッチ&ガーデン酒田)	2016.6.24	2016.9.1	公益社団法人日本ガスタービン学会 事務局 TEL : 03-3365-0095, FAX : 03-3365-0387 E-mail : gtsj-office@gtsj.org	
10月 11月	29(土) ～ 2(水)	The 5th International Conference on Human-Environment System(ICHES2016 Nagoya) (開催場所：名古屋大学)			ICHES2016 Nagoya 事務局 E-mail: iches2016office@davinci.nuac.nagoya-u.ac.jp	
11月	1(火) ～ 4(金)	The 11th International Symposium on Advance Science and Technology in Experimental Mechanics(11th ISEM'16-Ho Chi Minh, Vietnam) (開催場所：Saigon Vissai Hotel)			日本実験力学学会事務局 小林 Tel: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
11月	23(水) ～ 25(金)	第54回燃焼シンポジウム (開催場所：仙台国際センター)	2016.7.15	2016.9.9	東北大学 流体科学研究所 小林研究室 Tel: 022-217-5273 Fax: 022-217-5323 E-mail: sympo54@combustionsociety.jp	
11月	28(月) ～ 30(水)	第37回日本熱物性シンポジウム (開催場所：岡山国際交流センター)	2016.7.8	2016.8.19	日本熱物性学会事務局 (東北大学流体科学研究所分子熱流動研究分野内) TEL・FAX : 022-217-5277 E-mail: jstp@microheat.ifs.tohoku.ac.jp	
12月	3(土)	第19回回スターリングサイクルシンポジウム (開催場所：宇都宮大学峰キャンパス)	2016.7.1	2016.10.21	実行委員長 戸田富士夫(宇都宮大学) Tel: 028-649-5330 Fax: 028-649-5330 E-mail: toda@cc.utsunomiya-u.ac.jp	
12月	8(木) ～ 9(金)	第6回潜熱工学シンポジウム (開催場所：京都工芸繊維大学センターホール)	2016.9.16	2016.10.21	問合せ先 日出間るり(神戸大学) Tel: 078-803-6657 E-mail: hidema@port.kobe-u.ac.jp	
12月	19(月) ～ 20(火)	第25回微粒化シンポジウム (富山国際会議場 大手町フォーラム)	2016.9.2	2016.10.24	講演論文担当事務局 榎本啓士(金沢大学) TEL : 076-234-4370 E-mail : eno@t.kanazawa-u.ac.jp 参加担当事務局 小橋好充(北海道大学) TEL : 011-706-6384 E-mail : kobashi@eng.hokudai.ac.jp	
2017年						
3月	19(日) ～ 22(水)	The 6th International Symposium on Micro and Nano Technology in Experimental Mechanics(ISMNT-6) (開催場所：Fukuoka (Japan))			実行委員長 高橋厚史(九大) Tel: 092-802-3015 E-mail: takahashi@acro.kyushu-u.ac.jp	

公益社団法人日本伝熱学会第54期（平成27年度）総会議事録

1. 日 時 平成28年5月25日（水）16時10分～16時40分
2. 場 所 大阪府立国際会議場 10階 会議室 1003（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島5-3）
3. 正会員数 1,042名
4. 出席者 560名（うち委任状出席455名）. 定款第29条の定めるところにより、これは定足数である正会員数の過半数（522名）を上回り、総会は成立した.

5. 議事経過

定款第27条により小澤守会長が議長となり、以下の議案について逐次審議した.

第1号議案 第54期（平成27年度）事業報告の件

議長より、公益社団法人日本伝熱学会第54期（平成27年度）総会議案（以下、「総会議案」と呼ぶ。）の第1号議案第54期（平成27年度）事業報告について諮り、満場一致でこれを可決した.

第2号議案 第54期（平成27年度）会務報告の件

議長より、総会議案の第2号議案第54期（平成27年度）会務報告について諮り、満場一致でこれを可決した.

第3号議案 第54期（平成27年度）収支決算の件

議長より、総会議案の第3号議案第54期（平成27年度）収支決算について諮り、満場一致でこれを可決した.

第4号議案 第55期（平成28年度）役員・協議員選出の件

議長より、総会議案の第4号議案第55期（平成28年度）役員・協議員の選出について以下のとおり次期役員・協議員の提案がなされ、満場一致でこれを可決した.

定款第17条第1項により退任する役員

理事	山田 雅彦	理事	塚田 隆夫
理事	小野 直樹	理事	鈴木 洋
理事	野村 信福	理事	岩城 智香子
理事	佐藤 英明	監事	富村 寿夫

定款第17条第1項ただし書きにより退任する役員

代表理事（会長）	小澤 守	理事（副会長）	功刀 資彰
理事（副会長）	芹澤 良洋	理事	吉田 篤正

第55期に新たに選任される役員

定款第17条第1項により選任される役員

理事	大島 伸行	理事	星 朗
理事	大竹 浩靖	理事	梅川 尚嗣
理事	松村 幸彦	理事	上堀 徹
理事	鈴木 裕	監事	加藤 泰生

定款第17条第1項ただし書きにより選任される役員

理事	藤岡 恵子	理事	長坂 雄次
理事	安田 俊彦	理事	飛原 英治

第5号議案 議事録署名人選任の件

議長より、本日の議事の経過を議事録にまとめるにあたり、議長に加えて議事録署名人2名を選任したい旨の提案があり、協議の結果、功刀資彰氏、花村克悟氏の2名を選任した。

第6号議案 第55期（平成28年度）事業計画の件

議長より、総会議案の第6号議案第55期（平成28年度）事業計画について報告を行った。

第7号議案 第55期（平成28年度）収支予算の件

議長より、総会議案の第7号議案第55期（平成28年度）収支予算について報告を行った。

以上により、本日の議事を終了した。

平成28年5月25日

公益社団法人日本伝熱学会第54期（平成27年度）総会

議長 小澤 守 _____ 印

議事録署名人 功刀 資彰 _____ 印

議事録署名人 花村 克悟 _____ 印

日本伝熱学会主催講習会「計測技術」

開催日 2016年12月2日(金) 13.00～17.00

会場 東京八重洲ホール 701 会議室

地図 (<http://yaesuhall.co.jp/accessmap/>)

要旨 今後センサ社会が益々発展されると言われているため、これを機に『温度計測』を基礎から学ぶ必要がある方々、計測分野で著名な専門家の方々とディスカッションをすることでより広い知見を得たい方々を対象に講習会を開催する運びとなりました。計測の基礎知識(原理や不確かさ)を習得せずに、実測結果を見誤ってしまうことで設計検証に時間を要することはありませんか? 計測ばらつきを小さくするために、どのような工夫をしていますか? 本講習会では、講演者と参加者が一体となった参加型イベントにするため、設計業務や研究で悩んでいることを共有するディスカッションの時間も長く設けております。

題目・講師

13.00 ～ 13.10 / 開催の挨拶

日本伝熱学会/産学交流委員長 近藤 義広 ((株) 日立製作所)

13.10 ～ 14.00 / 熱電対の正しい使い方 (測定誤差の要因と精度向上への鍵)

田川 正人 教授 (名古屋工業大学)

14.10 ～ 15.00 / 放射温度計の正しい使い方

中村 元 教授 (防衛大学校)

15.10 ～ 16.00 / 有効熱伝導率の測定手法

大串 哲朗 技術顧問 ((株) アドバンスドナレッジ研究所)

16.20 ～ 17.00 / パネルディスカッション

パネラー: 講演講師, 司会: 近藤 義広

17.30 ～ 19.00 / 講師との技術交流会

定員 先着 70 名

参加費 (資料集 1 冊, 技術交流会参加費込み)

学会員 25,000 円, 非会員 35,000 円, 特別賛助会員企業の方 20,000 円, 学生 15,000 円

資料集 本セミナー参加者 1 名につき 1 冊準備します。

資料集のみの販売はいたしません。

申込方法 伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください。(現在準備中)

また、参加費は申し込みフォームに記載の口座に事前にお振り込みください。

申し込み期限 2016 年 11 月 18 日

問合せ先 (公社) 日本伝熱学会 (担当 大澤) / 電話 (03) 3259-7919 / FAX (03) 5280-1616

/ E-mail : office@htsj.or.jp

The First Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017)

趣 旨

アジアは急速に発展する国々を有しており、世界の伝熱コミュニティにおいてもその認知度は向上しつつあります。このような発展するアジア地域の研究者間の活動を促進するために、2015年11月にアジア熱科学工学連盟 (Asian Union of Thermal Science and Engineering, AUTSE) が設立されました。AUTSEは新しい国際会議として、Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS) をたち上げることにいたしました。第1回アジア熱科学会議 ACTS2017 を韓国機械学会熱工学部門主催、日本伝熱学会および中国伝熱伝質学会共催で下記の通り開催します。

開催日時 2017年3月26日(日)~30日(木)

会 場 ICC Jeju, Korea (韓国済州島国際会議場)

プレナリー講演

Srinivas Garimella	Georgia Institute of Technology, USA
Nae-Hyun Kim	Incheon National University, Korea
Kazuhiko Suga	Osaka Prefecture University, Japan
John Thome	Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)
Ruzhu Wang	Shanghai Jiao Tong University, China
Zhuomin Zhang	Georgia Institute of Technology, USA
他	

会議の構成

- ・プレナリー講演, キーノート講演, 一般講演

スケジュール

2016年8月31日	Abstract 提出締め切り
10月31日	Extended Abstract 提出締め切り
11月30日	受理通知
12月31日	Extended Abstract 最終原稿提出締め切り 事前参加 (Early-bird) 申込み締め切り

Web ページ <http://acts2017.org/>

問い合わせ先 Conference Secretariat
Ms. Han Lee
The Korean Society of Mechanical Engineers (KSME)
#702, KSTC New Bldg., 22, 7 gil, Teheran-ro, Gangnam-gu, Seoul 06130, Korea
TEL: +82-2-501-5305, FAX: +82-2-501-3649
E-mail: info@acts2017.org

Conference Co-chair (日本語での問合せ)
高田 保之 (九州大学)
TEL: 092-802-3100, FAX: 092-802-3098
E-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

日本伝熱学会 東海支部 主催
第 27 回 東海伝熱セミナー
「エネルギー有効利用のための熱工学的アプローチ」

日本伝熱学会 東海支部では毎年宿泊付の「東海伝熱セミナー」を開催しております。今年は第 27 回目となり、G7 サミットが開催された伊勢志摩を舞台に、『エネルギー有効利用のための熱工学的アプローチ』というテーマで情報共有、議論するセミナーを企画いたしました。講師には熱工学、エネルギー分野に造詣の深い専門家をお招きし、エネルギー有効利用における熱工学の役割や最先端研究について様々な視点から話題提供していただきます。参加者の皆様とともに、楽しく討論できれば幸いです。全国から多数の方々のご参加をお待ちしております。

【日時】2016 年 9 月 16 日（金）13:00～17 日（土）12:00

【場所】鳥羽シーサイドホテル（三重県鳥羽市安楽島町 1084）<http://www.tobaseasidehotel.co.jp/>

【参加費】（予定）

一般：会員 15,000 円，非会員 20,000 円（宿泊費，意見交換会，資料代等を含む）

学生：会員 8,000 円，非会員 10,000 円（宿泊費，意見交換会，資料代等を含む）

※セミナーのみ（意見交換会を除く）参加は，一般会員：4,000 円，非会員：9,000 円，学生：無料

【定員】80 名程度

【講演】

題目：『エネルギー有効利用のための熱工学的アプローチ』

講演者（敬称略）：

- ・花村克悟（東京工業大学）【特別講演】革新的エネルギー変換技術へのパラダイムシフトの可能性
- ・鮎川ゆりか（千葉商科大学）これからの環境エネルギーは，地域熱供給を中心とした小規模分散型（仮題）
- ・竹内恒博（豊田工大）異常電子熱伝導度と異常格子熱伝導度を利用した革新的熱利用材料
- ・戸谷剛（北海道大学）放射波長制御技術を用いた省エネルギー乾燥
- ・大村高弘（和歌山高専）先進超断熱材の研究開発動向と断熱性能評価
- ・渡橋学英（トヨタ自動車）次世代自動車の熱エネルギーマネジメントに向けた廃熱駆動エアコン
- ・鈴木彩加（パナソニックエコシステムズ）ジェット流発生機構を有する自然循環型冷却ループの開発研究
- ・渡邊激雄（中部電力）電力供給における CO₂ 排出削減に関する取り組みと伝熱工学への期待
- ・その他打診中

【プログラム】

（9 月 16 日）

13:20～ 支部長挨拶

13:30～17:00 講演会（5 件程度を予定）

18:00～20:00 意見交換会

（9 月 17 日）

9:00～12:00 講演会（4 件程度を予定）

随時更新していきますので詳細は東海支部 HP をご覧ください。（http://www.cc.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/）

【申込・問合せ】

〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻
長野方星
Tel:052-789-4470
nagano@mech.nagoya-u.ac.jp



編集出版部会からのお知らせ ー各種行事・広告などの掲載についてー



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対象	対応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌と HP に掲載、ML でも配信	申込者は、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML 担当）、広報委員会委員長（HP 担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載してリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP 担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP 担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載（バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HP バナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：大竹浩靖（工学院大学）：ohtake@cc.kogakuin.ac.jp
- ・編集出版部会長：廣田真史（三重大学）：hirota@mach.mie-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：元祐昌廣（東京理科大学）：mot@rs.tus.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：伏信一慶（東京工業大学）：fushinobu@htsj.or.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルをお願いします。
- ・HP はメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・ML では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

事務局からの連絡

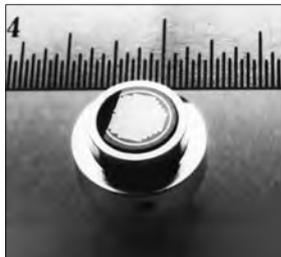
54～55期入会（2016.3.1～2016.6.8）正 26名、学生 44名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
---	----	----	---	----	----

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束 マイクロセンサー



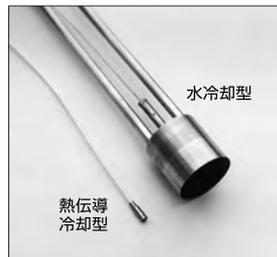
特徴

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

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ



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

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

gSKIN® 熱流束センサー



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

使用例

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

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL www.senstech.jp

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

E-mail info@senstech.jp



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

CAPTEC 社(フランス)

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

熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)
温度範囲: -200～200°C
応答速度: 約 200ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm
厚み: 0.25mm
温度範囲: -200～250°C
応答速度: 約 50ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
波長領域: 赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下*
再現性: ±0.5%
較正精度: ±2%
オプション: 輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等
【最小プローブ径】
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

高温用熱流板



最高温度: 980°C
応答速度: 0.1s
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522
URL: <http://www.techno-office.com>

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

今月号の特集は食品の冷蔵・冷凍・解凍技術の研究動向について取り上げました。食品の冷蔵・冷凍・解凍というと、冷凍ピザなど一般消費者向けに捉えられがちであるが、これは全体の中では、ほんの一部である。ファミリーレストランなどのチェーン店などでは、品質劣化の防止、調理時間短縮、安定した美味しいメニューの提供などを目的に、センターで一括料理したものを冷凍し、各店舗へ配送する。各店舗ではお客から注文をうけ、解凍・調理を行うシステムとなっている。食材を美味しく提供するためには、冷凍時は食材内部の氷結晶成長の抑制、保存中では凍結劣化の抑制、さらに最適な条件での解凍が必要となる。本号では、食品の冷凍技術の概要、氷結晶などの食品の内部の評価技術、さらに冷凍・保存・解凍の核技術内容を各分野の、第一線で活躍されている大学および企業の研究者の方に執筆を頂きました。伝熱で活躍される読者の方々に少し慣れない感じがあるかもしれませんが、幅広い分野で伝熱の技術が活躍していることを知って頂ければ幸いです。最後に、本特集の内容に賛同頂き、快くご寄稿頂きました読者の皆様に熱く御礼申し上げます。

土屋 敏章 (富士電機株式会社)

Toshiaki, Tsuchiya (Fuji Electric Co., Ltd)

e-mail: tsuchiya-toshiaki@fujielectric.com

副会長 長坂 雄次 (編集出版担当, 慶應義塾大学)

部会長 廣田 真史 (三重大学)

委員

(理事) 梅川 尚嗣 (関西大学), 桑原 不二郎 (静岡大学), 星 朗 (東北学院大学)

(協議員) 須賀 一彦 (大阪府立大学), 多田 幸生 (金沢大学), 土屋 敏章 (富士電機 (株))

中山 浩 (中部電力 (株)), 村上 陽一 (東京工業大学), 西村 顕 (三重大学)

西村 伸也 (大阪市立大学), 服部 博文 (名古屋工業大学)

TSE チーフエディター 花村克悟 (東京工業大学)

編集幹事 伏信一慶 (東京工業大学)

編集出版部会 連絡先: 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

廣田 真史

Phone & Fax: 059-231-9385 / E-mail: hirota@mach.mie-u.ac.jp