

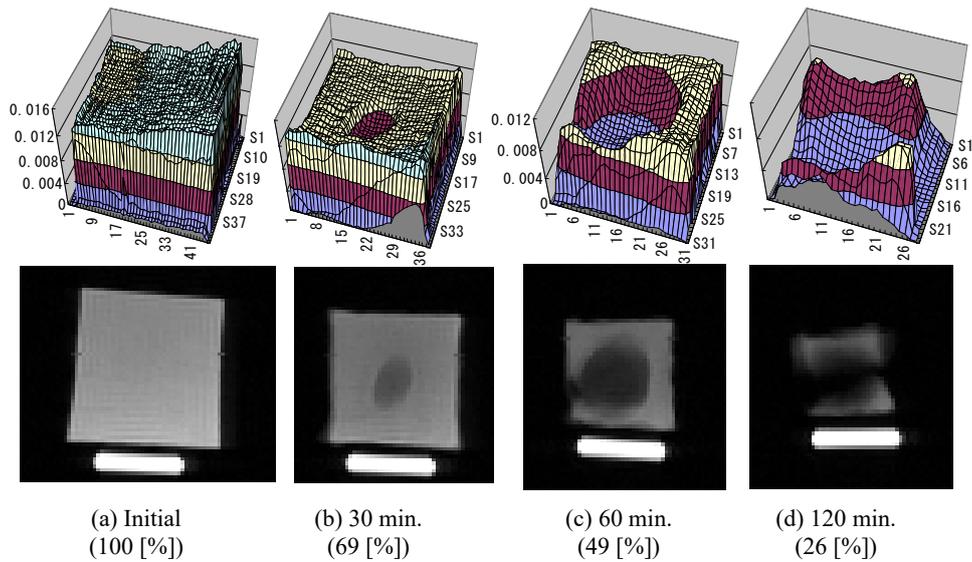
# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 56, No. 234  
2017. 1

*HSTJ*

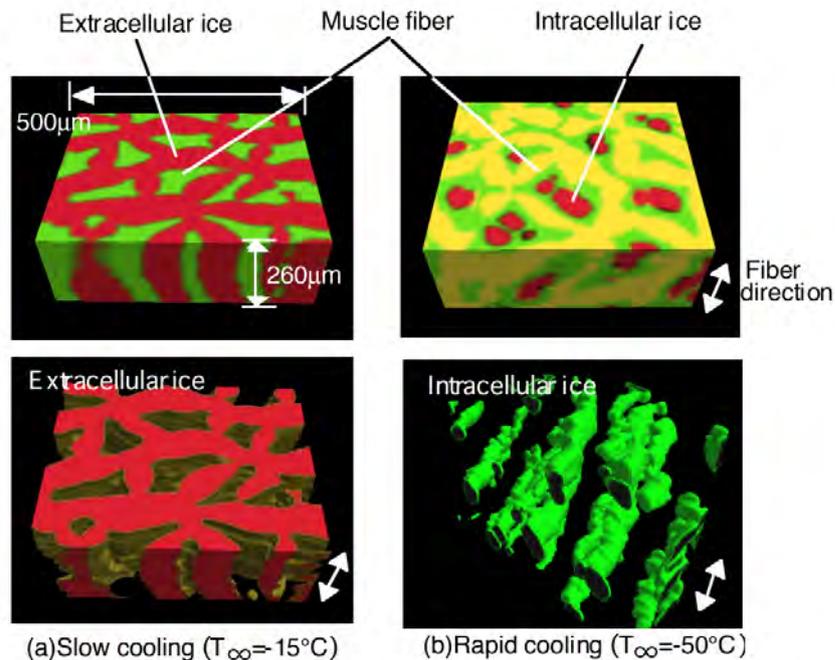
◆特集：バイオ伝熱の進展



ダイコンのマイクロ波常温乾燥における水分変化のMRI観察

3cm角のダイコンをマイクロ波常温乾燥（5kPa, 25°C）し、水分分布の経時変化をコンパクトMRIで観察したもの。下の画像は、二次元スライス計測によるMRI信号を奥行方向に積分平均し、相対的な水分分布として白黒の濃淡により示す。白い部分が水分の多いところで、上の図ではこれらの結果を三次元的に表現している。乾燥とともに中央部分から水分が減少しており、通常の外部加熱による乾燥法と全く異なる水分挙動となることがわかる。

（特集記事「マイクロ波を用いた多孔質体内の水分輸送促進と食品乾燥への応用（鶴田隆治）」より）



キハダマグロの凍結状態の3次元観察

キハダマグロの試料片を低温雰囲気下（温度  $T_{\infty}$ ）で凍結させた様子を、蛍光観察とマルチスライシングによる3次元画像構築を組み合わせる方法で観察した結果を示す。緩速冷却（ $T_{\infty} = -15^{\circ}\text{C}$ ）の場合には筋繊維（緑色）内の水分がその外側に移動・凍結し、筋繊維外に大きな氷結晶（赤色）が形成される。他方、急速冷却（ $T_{\infty} = -50^{\circ}\text{C}$ ）の場合には筋繊維内に細長い氷結晶（上段：赤色，下段：緑色）が複数形成されている。

（特集記事「食品の凍結・解凍における伝熱と損傷機序（多田幸生）」より）

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

- ダイコンのマイクロ波常温乾燥における水分変化の MRI 観察  
 ..... 鶴田 隆治 (九州工業大学)
- キハダマグロの凍結状態の 3 次元観察  
 ..... 多田 幸生 (金沢大学) ..... 表紙裏

### 〈特集：バイオ伝熱の進展〉

- 微生物挙動解析を導入したごみ固形燃料火災のメカニズム解明  
 小西 忠司 (大分工業高等専門学校)  
 ..... 鳴海 明 (神奈川工科大学) ..... 1
- 電場・温度場制御による細胞・組織の不可逆エレクトロポレーション  
 ..... 藏田 耕作, 高松 洋 (九州大学) ..... 7
- マイクロ波を用いた多孔質体内の水分輸送促進と食品乾燥への応用  
 ..... 鶴田 隆治 (九州工業大学) ..... 17
- 食品の凍結・解凍における伝熱と損傷機序 ..... 多田 幸生 (金沢大学) ..... 25
- 野菜の調理過程および最適加熱時間の予測法について  
 ..... 香西 みどり (お茶の水女子大学) ..... 31

### 〈行事カレンダー〉 ..... 37

### 〈お知らせ〉

- 第 54 回日本伝熱シンポジウムのご案内 ..... 38
- 優秀プレゼンテーション賞 (第 54 回日本伝熱シンポジウム) について ..... 42
- 事務局からの連絡
- ・編集出版部会からのお知らせ ..... 43
  - ・新入会員一覧 ..... 44

### 〈編集出版部会ノート〉 ..... 47

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology)	
Yukio TADA (Kanazawa University) .....	Opening Page

< Special Issue: Advances in Bio-Heat Transfer >

Application of Bacterial Behavior Analysis to Investigate the Mechanism of Refuse-derived Fuel Fire	
Tadashi KONISHI (National Institute of Technology, Oita College)	
Akira NARUMI (Kanagawa Institute of Technology) .....	1
Irreversible Electroporation of Cells and Tissues under the Control of the Electric Field and Temperature	
Kosaku KURATA, Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University) .....	7
Enhancement of Moisture Transport Inside Porous Material Using Microwave Irradiation and Its Application to Food Drying	
Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology) .....	17
Heat Transfer and Damage during Freezing and Thawing of Food	
Yukio TADA (Kanazawa University) .....	25
Prediction of Process and Optimum Cooking Time of Vegetables during Cooking	
Midori KASAI (Ochanomizu University) .....	31

< Calendar > .....	37
--------------------	----

< Announcements > .....	38
-------------------------	----

< Note from the JHTSJ Editorial Board > .....	47
---	----

## 微生物挙動解析を導入した ごみ固形燃料火災のメカニズム解明

*Application of Bacterial Behavior Analysis to Investigate  
the Mechanism of Refuse-derived Fuel Fire*

小西 忠司 (大分工業高等専門学校) \*1

鳴海 明 (神奈川工科大学) \*2

\*1 Tadashi KONISHI (National Institute of Technology, Oita College)

\*2 Akira NARUMI (Kanagawa Institute of Technology)

### 1. はじめに

「オートファジーの仕組みの解明」に寄与したとして2016年10月3日にノーベル生理学・医学賞を受賞された東京工業大学の岡田典栄教授が、米国留学時代に酵母細胞実験で核を取り除いた残りのキラキラした液を何時間見続けても飽きなかったと逸話を語られていた。著者らは、2000年頃から熱工学と医学との接点を探し、温度勾配下におけるレジオネラ菌のバイオフィーム形成機構<sup>1)</sup>、電流負荷による植物凍結防止<sup>2)</sup>、メタゲノム解析によるごみ固形燃料の微生物分布解明<sup>3)</sup>、ヒト細胞による火災ガス毒性評価<sup>4)</sup>など、熱工学を軸足とした生物学に関わる研究課題を実施してきた。著者らは、ノーベル賞には縁もないが、動物細胞や植物細胞の美しい姿に魅了されていることは大隅教授と同じである (Fig.1)。

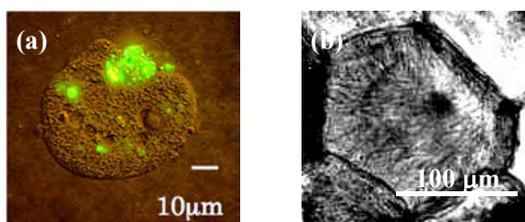


Fig.1 (a) *A.culbertsoni* 食胞内の *L. pneumophila*(蛍光染色)<sup>1)</sup>, (b) 凍結過程のキクイモ細胞<sup>2)</sup>

著者らは、生物学と熱工学の複合領域として2006年よりごみ固形燃料火災事故に関して、微生物の発酵熱や水素生成が火災や爆発に与える機構の研究に取り組んでいる。バイオマス燃料は従来の化石燃料とは異なり微生物が息している生きた燃料であり、従来の自然発火や爆発等の熱工学的的手法に加えて、生物学的なアプローチが不可欠な学際的研究領域でもある。本論文では、ヒト腸内フローラの解明に使用される最先端技術のメタゲノム解析を初めて熱工学の研究に適用した例を紹介する。

### 2. ごみ固形燃料施設の火災・爆発事故

ごみ固形燃料 (Refused derived fuel, 以下 RDF) は、1972年にアメリカのセントルイス市により始まった。日本では1980年代後半に、ゴミ焼却場から発生する有害物質のダイオキシンが社会問題としてクローズアップされ、多くの自治体が焼却炉の改修を迫られていた。その過程でエネルギー資源に加工して活用する RDF が注目され、全国で次々に RDF の製造プラントが建設された。

しかし、2003年8月に三重県桑名市で RDF 発電所の RDF 貯蔵サイロ内部において火災爆発事故が、同年9月に福岡県大牟田市の RDF 発電所の発熱火災事故、10月に石川県羽咋郡の RDF 発電所の異常発熱事故が発生した。この中でも三重県桑名市の RDF 発電所で発生した RDF 貯蔵サイロ内部における火災爆発事故は、2名が死亡、5名が負傷する大惨事となった (Fig.2(a))。

2016年現在、日本全国で52箇所の RDF 製造施設があるが、三重県桑名市の事故以降に建設された施設は、僅か2箇所である。しかし、焼却炉より総合的な費用が安価であると、2016年3月北海道倶知安町で新たな RDF 製造設備が稼働し、1日6~7トンの RDF を製造しており、復活の兆しも僅かながら見られる (Fig.2(b))。



Fig.2 (a) RDF 貯蔵槽事故 (三重県多度町,2003)<sup>5)</sup>

(b)ごみ固形燃料施設 (北海道倶知安町,2016)<sup>6)</sup>

### 3. RDF に潜む微生物の解析

#### 3.1 RDF に生存する微生物

RDF の原料は、家庭から排出された一般廃棄物であり、プラスチック、紙、繊維、食物残渣、草木などである。Table 1<sup>7)</sup> に RDF 性状を示す。RDF には草木に付着した土壌に生息する微生物、食物に生息する微生物、台所シンク周りの水系の微生物が混入している。

一部の細菌は、芽胞という耐久型、休眠型の状態で生存しているが、その細菌の増殖に適した環境に置かれると、芽胞は発芽して、通常の増殖・代謝能を有する栄養型、増殖型と呼ぶ菌体を作る。

三重県では全ての RDF は RMJ 方式で製造されており、一般廃棄物を 230~280℃の熱風で乾燥し、圧縮成形機により 90~100℃に達した後に室温で風冷している。芽胞形成菌は、230~280℃の熱風に耐性を有して生き残り、加湿による培養で発芽する。

Table 1 Proximate Analysis of Kuwana RDF<sup>3)</sup> [%]

Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed carbon	HHV MJ/kg
26.8	12.9	72.6	14.5	22.84

#### 3.2 メタゲノム解析

環境中の微生物のほとんどは人為的な培養が難しい、生きているが培養できない細菌 Viable But Non Culturable と言われている。例えば土壌試料では、培養できる微生物の割合は 0.3%程度、海洋の微生物では 0.001~0.1 %程度であるとされている。

メタゲノム解析は、単一菌種の分離・培養過程を経ずに、環境中の微生物集団から直接そのゲノム DNA を抽出し、これらの塩基配列を調べる。微生物の数千種類の遺伝子の中で分類に利用可能

な何種類かの遺伝子があるが、最も広く利用されているのがリボソーム RNA (rRNA) である。rRNA はあらゆる生物に必要なタンパク質の合成器官であるリボソームに含有される RNA である。rRNA の遺伝子の塩基配列は、比較的保存性が高く、その基本的な構造が保存されており、生物によって相違がある。この塩基配列の違いを比較することにより種の同定が可能となる。

メタゲノム解析は、16SrRNA 遺伝子によるクローンライブラリー法<sup>8)</sup>により行った。Fig.3 にクローンライブラリー法を説明する。最初に、ごみ固形燃料に存在する種々の微生物の全 DNA を抽出する。全 DNA から 16SrRNA 遺伝子のみを PCR 法でランダムに増幅する。増幅した 16SrRNA 遺伝子を複製・増幅するためにプラスミドベクターという特殊な核外遺伝子を利用する。このプラスミドベクターに 16SrRNA 遺伝子を結合させ(ライゲーション, ligation), これに細胞壁に処理を施した大腸菌 (competent *E.coli* cell) と混合してプラスミドベクターを取り込ませる (形質転換, transformation). 大腸菌の細胞内で大腸菌と共にプラスミドベクターを増殖した後、プラスミドベクターを取り出して大量の 16SrRNA 遺伝子を得ることができる。

この大腸菌のプラスミドベクターに組み込まれた 16SrRNA 遺伝子を PCR で増幅して得た PCR 産物の塩基配列を解析 (シーケンス解析) する。シーケンス解析は、タカラバイオ(株)およびリバネス(株)へ外部委託した。この解読された塩基配列は NCBI-BLAST や 2014 年 9 月 5 日現在 2,929,433 種類の 16S rRNA 配列がデータベース化されている The Ribosomal Database Project で菌を同定した。Fig.4 は、解読された塩基配列の一例である。

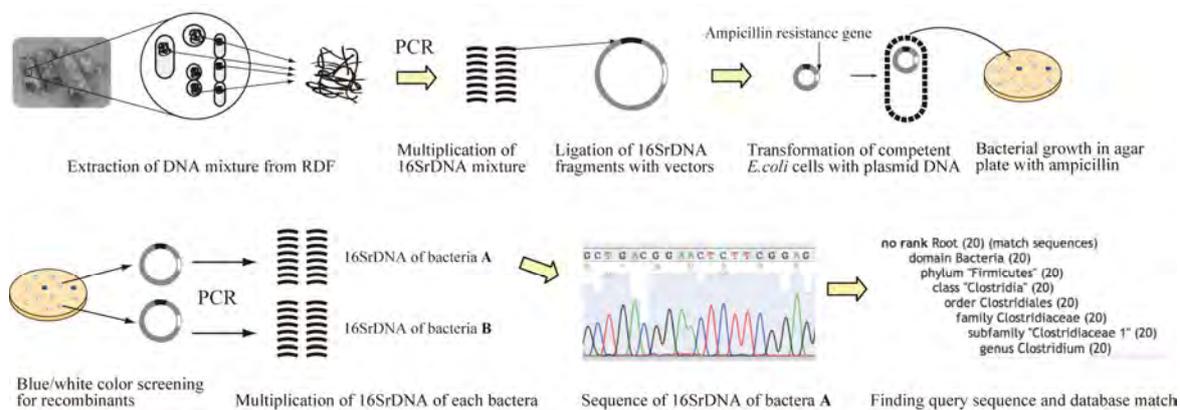


Fig.3 Cloning library method

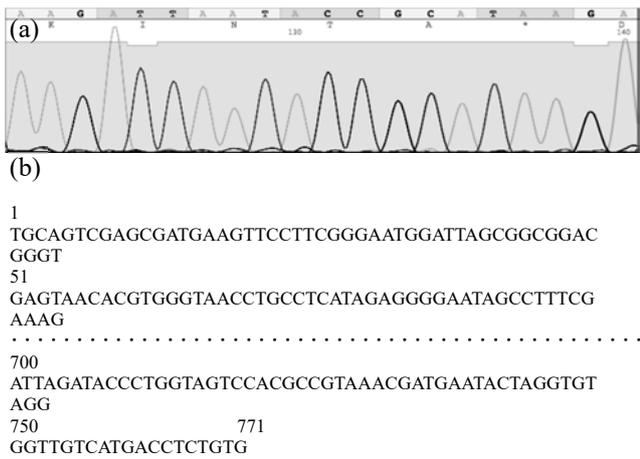


Fig. 4 (a) Automated DNA sequencing appeared on computer screen, (b) nucleotide sequence of 16SrRNA

4. 断熱容器によるスケールモデル実験

4.1 実験装置および方法

Fig.5に実験装置の模式図を示す。デュワーフラスコは内径 260mm、深さ 480mm であり、半球状底面から 50mm 上部に多孔を有するアクリル製円盤を置いて平底面とした。デュワーフラスコ内部には、サンプリングプローブとして、K 型熱電対と内径 1.45mm のステンレス管を各 7 本まとめてデュワーフラスコ中央に挿入した。

RDF から産生したガスは、ボリュームコントロールアスピレーター（ハーバードアパレイタス・Model 687）により 3.5mL の定量サンプリングを行いオートガスサンプラー（ジーエルサイエンス・GS5100M）に吸引され、1mL のみガスクロマトグラフ（島津 GC-2014）に送られる。オートガスサン

プラーの外気吸引防止のためオートガスサンプラーの周囲は窒素ガスで置換している。オートガスサンプラーは、RDF 産生ガス分析に 7 ポート、標準ガス（水素 1%、メタン 1%、酸素 1%、二酸化炭素 2%、窒素 95%）として 1 ポートを使用している。

デュワーフラスコへの注水は、3L のタンクより空気ポンプ加圧により行い、手動又はフラスコ内部温度に反応してシーケンサー（オムロン・SP01）から一定時間注水されるようにプログラムされている。注水は、フラスコ上部に設置したホースに開けた多孔から行っている。注水用には塩酸で pH5~6 に調整した蒸留水を使用した。

外気温度とフラスコ内部温度はおんどり（T&D Corporation・TR-701）を用いてインターネットによる温度監視および異常検知の場合は携帯にメール送信する。フラスコ半球状底面に溜まった水を排水するためサンプリングプローブを固定したステンレス中空管の支柱を挿入した。また、実験装置は高断熱板（ダウ化工・スタイロフォーム）で製作した恒温室内に設置して、サーキュレートヒーター（総和工業・SF-1008A）で暖房した。

実験は、室温 30℃ に調節した恒温室に、10 kg の桑名広域清掃事業組合（以下、桑名）で製造した RDF を入れたデュワーフラスコを設置する。2 日温度上昇しないことを確認して、容器上部より水を注入し、サンプリングプローブにより温度測定およびガス濃度測定を行う。温度上昇とガス産生が停止した場合、水を追加注入する。容器底部に溜まった水はポンプで排水する。

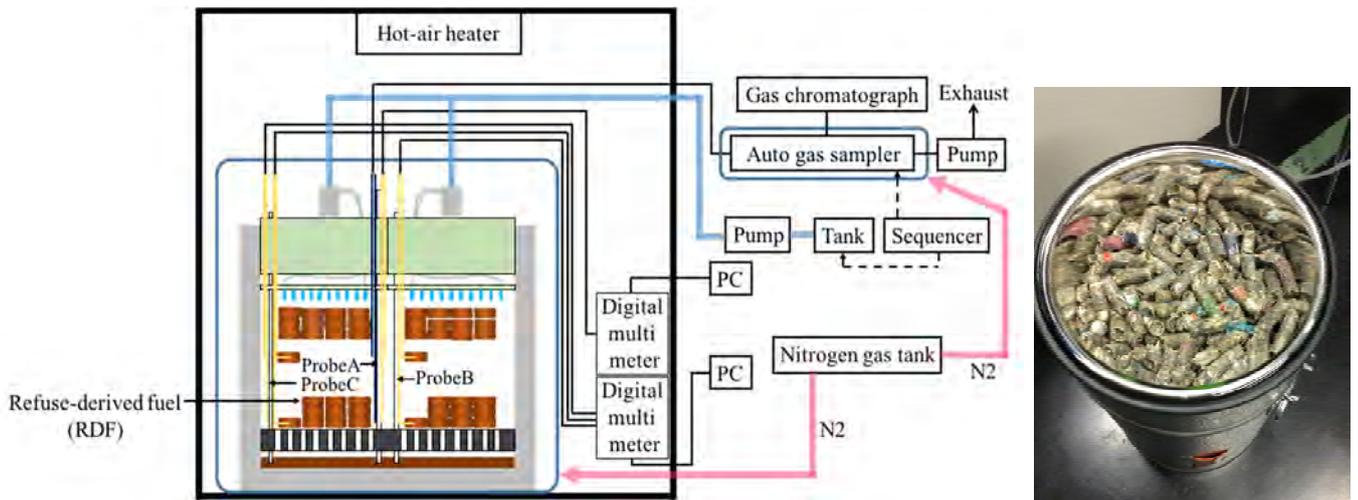


Fig.5 The schematics of the experimental equipment.

## 5. 実験結果

### 5.1 メタゲノム解析結果

Table 2 は The Ribosomal Database Project (RDP) により同定した全菌種名を列記している。全解析数 343 個でシーケンス精度の低い 162 個を除いた 181 個 (52.7%) の菌種を同定した。菌種名, グラム陽性/陰性, 生育温度, 芽胞形成の有無, 水素産生の有無を示している。

芽胞は, 極めて耐久性の高い細胞構造であり, 通常の細菌が死滅する状況に陥っても生き残ることが可能である。しかし, 芽胞の状態では細菌は新たに分裂することはできず, その代謝も限られている。生き残った芽胞が, 再びその細菌の増殖に適した環境に置かれると, 芽胞は発芽して, 通常の増殖・代謝能を有する栄養型, 増殖型と呼ぶ菌体を作る。

*Bacillus sp.* の 6 菌種および *Clostridium sp.* の 7 菌種, その他 17 菌種が芽胞を有している。水素産生する菌種は, *Bacillus sp.* 及び *Clostridium sp.* である。*Bacillus licheniformis* (バチルス・リケニフォ

ルミス)と *Bacillus coagulans* (バチルス・コアグランス) の生育温度は 50℃以上であり, 耐熱性を有している。*Clostridium acetobutylicum* (クロストリジウム・アセトブチリウム) の生育温度は 10~65℃であり, 耐熱性を有している。

### 5.2 スケールモデル実験結果

Fig.6 は, 好気性環境における容器底部から高さ 0, 3, 6, 14, 26cm での(a)水素濃度と酸素濃度, (b) RDF 内の温度変化と発熱量の経時変化を示す。容器上部からの水注入点はアスタリスク(\*)で表し, 計 6 回の水注入を行った。

Fig.6(a)の A 領域では, 容器上部からの水注入直後に酸素濃度が著しく低下する。高さ 6cm 以下では酸素 0%の嫌気状態が形成され, 一方, 高さ 14cm 以上では酸素が残存する好気状態であり, 容器鉛直上に酸素濃度勾配が形成する。好気性細菌と通性嫌気性細菌の活性が観察される。Fig.6(b)は, 水平方向を断熱と仮定して鉛直方向の温度分布のみを考慮して計算した発熱量を示す。容器上部の発熱量は小さく, 容器底部ほど大きくなる。水素濃度は Fig.6(a) に示すように, ほぼ 0%である。

Fig.6(a)の B 領域では, 高さ 6cm 以下の容器底部では嫌気性発酵, 高さ 14cm 以上の容器上部では好気性発酵が約 2.5 日間行われる。容器底部は, 通性嫌気性細菌と偏性嫌気性細菌, 容器上部は好気性細菌と通性嫌気性細菌が観察される。通性嫌気性細菌は容器全体に渡って活発に活動する。Fig.6(b)に示すように高さ 6cm 以下の容器底部では, 初期発熱量および温度上昇率が大きく, その後減少して発熱量は一定値になり温度は直線的に上昇する。一方, 高さ 19cm では発熱量は一定値になり温度は直線的に上昇する。この要因は, 好気性発酵による発熱は, 通性嫌気性細菌と偏性嫌気性細菌よりも大きいと考えられる。Fig.6(a)に示す水素濃度は, 通性嫌気性細菌と偏性嫌気性細菌により容器底部で増加する。容器上部では, 好気性環境のため水素産生菌が存在しないが, 容器下部から拡散した水素が測定されたと考えられる。Fig.6(b)の C 領域では, 容器上部から再度水注入により RDF 温度は低下しており, 注目に値することは, 容器全体で酸素濃度が回復していることである。これは水流入に伴流されて容器上部の空気が

Table 2 Bacteria identified by metagenome analysis

Strain	Aerobe	Growth temp.	Spore	Hydrogen
	Anaerobe			
<i>Bacillus licheniformis</i>	Anaerobe	15-55	+	+
<i>Bacillus coagulans</i>	Anaerobe	30-55	+	+
<i>Clostridium sp.</i>	Anaerobe		+	+
<i>C.puniceum</i>	Anaerobe	7-39	+	+
<i>C.beijerinckii</i>	Anaerobe	25-45	+	+
<i>C.acetobutylicum</i>	Anaerobe	10-65	+	+
<i>C.roseum</i>	Anaerobe	20-47	+	+
<i>C.sartagoforme</i>	Anaerobe	25-45	+	+
<i>C.perfringens</i>	Anaerobe	20-50	+	+
<i>C.intestinale</i>	Anaerobe		+	+
<i>C.paraputrificum</i>	Anaerobe	25-45	+	+
<i>Pasteuriaceae bacterium</i>	Aerobe		-	-
<i>Bacillus benzoovorans</i>	Anaerobe	39-45	+	-
<i>Bacillus circulans</i>	Anaerobe	5-50	+	-
<i>Bacillus thermoamylovorans</i>	Anaerobe	45-65	-	-
<i>Brevibacillus thermoruber</i>	Aerobe	59	+	-
<i>Janthinobacterium sp.</i>	Aerobe	3-32		+
<i>Bacillus subtilis</i>	Aerobe	40-50	+	-
<i>Bacillus nealsonii</i>	Anaerobe	30-45	+	-
<i>Bacillus cereus</i>	Aerobe		+	-
<i>Massilia sp.</i>	Aerobe	10-45	-	-
<i>Paenibacillus</i>	Anaerobe		+	-
<i>Bacillus sp.</i>	Aerobe			-
<i>Sphingomonas sp.</i>	Aerobe	40-50	+	-
<i>Soli bacillus silvestris</i>	Aerobe		+	-
<i>Oxalobacter sp.</i>	Anaerobe			-
<i>Aquabacterium sp.</i>	Anaerobe		-	-
<i>Lysobacter sp.</i>	Aerobe	20-40	-	-
<i>Methylobacterium radiotolerans</i>	Aerobe		-	-
<i>Novosphingobium sp.</i>	Aerobe		-	-
<i>Alpha proteobacterium</i>	Aerobe	37-65	-	-
<i>Helicobacter mustelae</i>	Anaerobe		-	-
<i>Naxibacter sp.</i>	Aerobe	4-55	-	-
<i>Ureibacillus sp.</i>	Aerobe	50-55	+	-
<i>Bacillus pumilus</i>	Aerobe		+	-
<i>Blastococcus aggregatus</i>	Aerobe		-	-
<i>Bacillus megaterium</i>	Aerobe	10-75	+	-

容器内に流入して容器底部にまで達したと考えられる。そこで、容器全体は再び好気状態となり、好気性および通性嫌気性細菌が活動するため RDF 内温度が急上昇する。その後、一時的に容器全体が酸素濃度 0% の嫌気状態に陥り、水素濃度が急上昇する。また、容器上部からの水注入がなくても、RDF 内部の酸素濃度が 0.5~1 日の周期変動が観察される。これは、好気性および通性嫌気性細菌による酸素消費で形成された酸素濃度勾配と容器上部からの酸素拡散による周期性と考えられる。

Fig. 6(c), (d) は、嫌気性環境における実験結果である。容器上部からの水注入は、当初、温度上昇が緩慢なため、好気性環境より多い計 10 回の水注入を行った。

Fig.6(c)の A 領域では、容器上部から水注入後に酸素濃度は緩慢に低下する。これは、好気性環境と異なる傾向である。高さ 6cm 以上では、約 3 日目で酸素が 0%の嫌気状態が形成される。一方、高さ 3cm では、約 5 日目に酸素が 0%に達し、高さ 0cm では酸素濃度の変動が観察されるが、約 3 日目に嫌気状態が形成する。好気性環境では、第 1 回目の水投入後に RDF 温度が 30°C 以上を維持するが、嫌気性環境では、水投入前の RDF 温度は 30°C であるが、水投入により温度降下し、温度上昇できずに 20°C を維持する。既報より、RDF に存在する細菌の至適温度は 37°C 付近であるから、20°C では細菌増殖速度が遅く温度上昇が緩慢と考えられる。

Fig.6(c)の B 領域において、通性嫌気性細菌との偏性嫌気性細菌の活性が観察される。Fig.6(d)に示すように容器中心部の高さ 6cm で発熱量が大きく、容器底部と容器上部では同程度の発熱量である。また、Fig.6(c)に示すように水素濃度も、高さ 6cm 以上が最も多く、10.5 日目に最高濃度 58 vol% に達する。高さ 3cm で水素濃度が低い要因は、Fig.6(c)に示すように酸素濃度が僅かに高いため嫌気性細菌の増殖阻害のためである。容器底部で酸素濃度が高い要因は水注入によると考えられるが不明な点である。

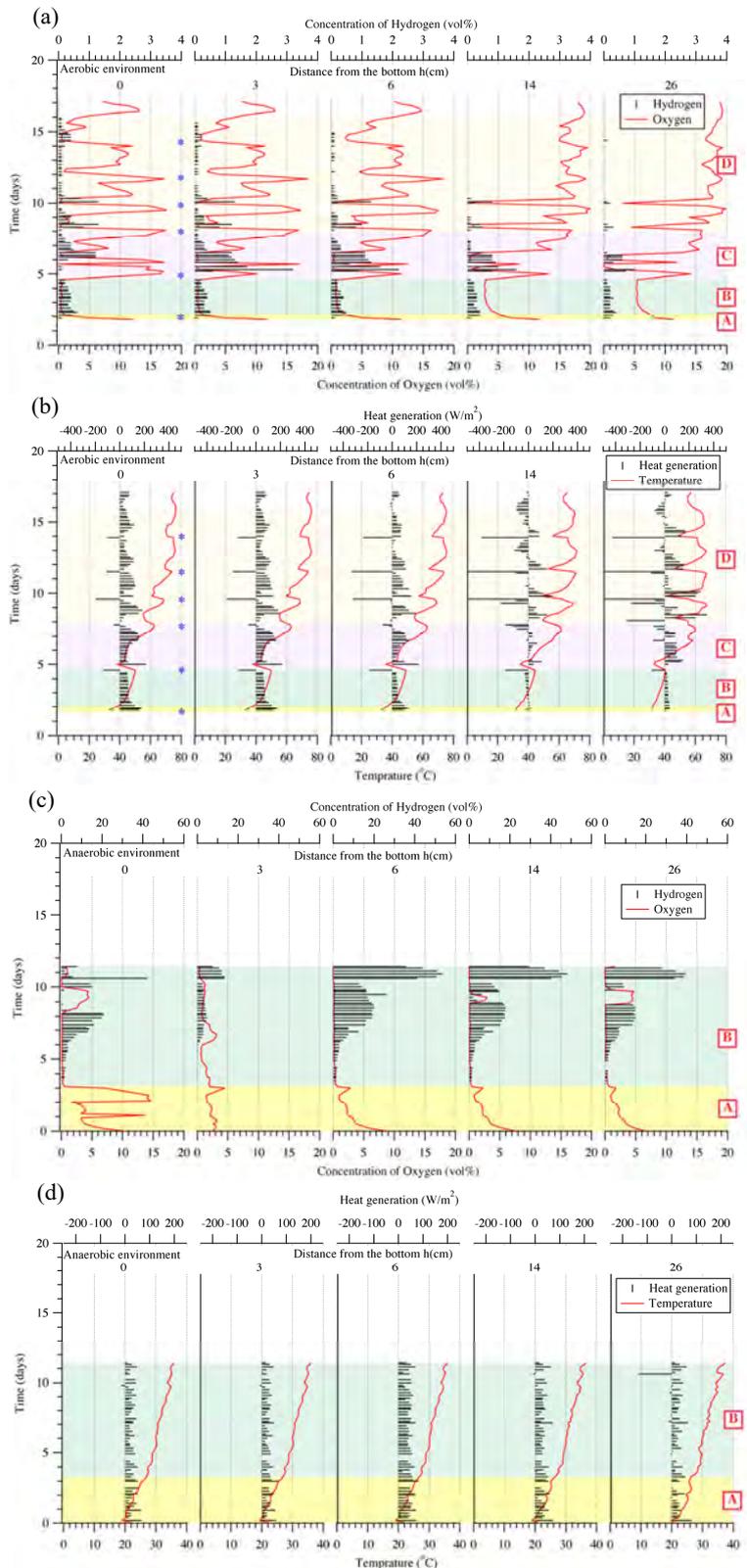


Fig. 6. Changes of (a) temperature and oxygen concentration and (b) temperature and heat release with time under aerobic condition, changes of (c) temperature and oxygen concentration and (d) temperature and heat release with time under anaerobic condition

以上の20L断熱容器に10kgのRDFを蓄積した状態で、容器上部より水を注入した結果、好気性環境と嫌気性環境では全く異なった結果が得られた。好気性環境では、初期の水注入で好気性発酵により容器内部の急激な発熱に伴う温度上昇が確認される。その後、好気性細菌により酸素が消費されて容器内部では嫌気性環境が形成される。嫌気性細菌により水素が発生するが、容器内温度が40°C以上に達しているため、水素産生菌の増殖は緩慢である。再度、容器上部からの水注入により伴流された容器上部の空気が容器内に流入して容器底部にまで達するため、容器内に再び好気性環境が形成される。この繰り返しにより、容器内部の温度は上昇し、耐熱性の好気性細菌しか生存できない状態が形成されて温度上昇は停止する。

嫌気性環境では、容器上部より水を注入した結果、水による冷却効果により容器内部のRDF温度は低下するため、好気性細菌の活動は弱く、温度上昇は緩慢になる。好気性細菌による発熱により容器内温度は上昇して好気性細菌の増殖は活性化するため、酸素濃度が徐々に低下して約3日目で嫌気環境が形成される。嫌気性環境が形成されてから約6日目で二酸化炭素濃度が急上昇するが、水素は発生しない。その後、徐々に水素濃度が増加して10.5日目に最高濃度に達する。しかし、高さ3cmの容器底部では酸素濃度が0 vol%でないため水素濃度は、他の場所よりも低くなっている。

## 6. 結論

(1) 三重県桑名広域清掃事業組合(以下、Kuwana)で製造したRDFのメタゲノム解析を行った。微生物種数は、水素産生好気性菌1、水素産生嫌気性菌10、非水素産生嫌気性菌9、非水素産生好気性菌5である。水素は10種の嫌気性菌と1種の好気性菌により生成される。その培養温度範囲は、それぞれ20~65°Cであり、pH範囲は、4~9である。14種の非水素産生菌は、好気性環境下で増殖する9種と嫌気性環境で増殖する5種に分類される。

(2) 10kgのKuwana RDFを貯蔵した20L小型断熱容器を用いて、好気性環境および嫌気性環境で実験を行った。好気性環境実験では、好気性発酵と嫌気性発酵を繰り返すため、実験を通じて、全種類の好気性細菌、通性嫌気性細菌、偏性嫌気性細菌が活動する。実験全時間で、好気性環境が占

める時間は嫌気性環境が占める時間より長く好気性発酵が優位になるため、内部最高温度は77°Cに達するが、最高水素濃度は3.3vol%と低い。

(3) 嫌気性環境実験では、第1回目の水投下直後に好気性環境になるが、その後は嫌気性環境が継続される。実験全時間で、嫌気性環境が占める時間が長く、通性嫌気性細菌、偏性嫌気性細菌が長期に活動するため、最高水素濃度は58vol%に達するが、最高温度は37°Cと低い。

最後に、本研究は熱工学と生物の学際的研究であるが、さらに別分野、例えば、機械学習ディープラーニング手法を加えると、今とは少し違った景色を眺められるかも知れない。ふと、そんな気がしてくるほど、生物の学際的研究は魅力的である。

## 謝辞

本研究の一部は平成23~27年度学術研究助成基金助成金(基盤研究(C),課題番号23510211及び26350465)の研究助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Konishi T, Yamashiro T, Koide M, Nishizono A. : "Influence of temperature on growth of *Legionella pneumophila* biofilm determined by precise temperature gradient incubator," J Biosci Bioeng. Vol.101, No.6, p.p. 478-84, 2006.
- [2] Ninagawa.T., Kawamura,Y., Konishi,T., Narumi,A., Effects of micro electric current load during cooling of plant tissues on intracellular ice crystal formation behavior and pH.Cryobiology. 2016 Aug;73(1):30-9. doi:, 10.1016/j.cryobiol.2016.06.002. Epub 2016 Jun 21.
- [3] 小西忠司, 小原裕治, 鳴海明, 河村佑太. 齊藤洋徳, 山田健太郎, メタゲノム解析と培養方法を組み合わせたごみ固形燃料の安全性評価, 日本火災学会論文集 65(1), 1-9, 2015-06
- [4] T. Konishi, K. Kwang-il, K. Nam, P. Jeong, A. Narumi, Development of in vitro toxicity methods for fire combustion products by using human A549 lung cells, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, CD-ROM 4 pages. 2013.
- [5] 日本経済新聞 電子版 (2015年5月26日)
- [6] 朝日新聞 電子版 (2003年8月22日)
- [7] ごみ固形燃料発電所事故調査最終報告, 三重県, 平成15年11月
- [8] 中村和憲, 関口勇地: 微生物相解析技術, pp.59-77, 米田出版, 2009.

## 電場・温度場制御による細胞・組織の不可逆エレクトロポレーション *Irreversible Electroporation of Cells and Tissues under the Control of the Electric Field and Temperature*

藏田 耕作, 高松 洋 (九州大学)

*Kosaku KURATA, Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University)*

*e-mail: kurata@mech.kyushu-u.ac.jp*

### 1. はじめに

エレクトロポレーションは電気パルスの印加によって細胞膜の透過性を一時的に上げ、細胞内に外来物質を導入する方法である。膜不透過な遺伝子、タンパク質、抗体、オルガネラなどを導入して細胞の性質を改変するために用いられており、生物学やバイオテクノロジー分野では不可欠な技術である。電気パルスが適切な条件内であれば細胞膜は自己修復するが、ある閾値を超えると不可逆的な損傷を被って修復できなくなる。したがって、この電気パルスの上限值を見出し、細胞へ与える損傷を最小にしながら導入効率を最大化する努力が行われてきた。

ところが、この避けるべき不可逆エレクトロポレーション (Irreversible electroporation; IRE) を積極的に利用して悪性腫瘍の除去治療に使うというアイデアが、2004年に Davalos と Rubinsky によって特許申請された[1]。この IRE は、標的組織に対して数本の針電極を穿刺し、電圧が数 kV、パルス幅が数十～数百マイクロ秒の電気パルスを 100 マイクロ秒～1 秒おきに数十回印加するだけの低侵襲治療である。閾値以上の電場に曝された電極周囲の細胞は、不可逆的な細胞膜穿孔を被って壊死する。

電気パルスを用いた悪性腫瘍の治療法には、それまでも電気化学療法 (Electrochemotherapy) があった[2]。これは、電気パルスによって細胞膜の透過性を上げ、細胞膜不透過な抗腫瘍薬剤を細胞内へ導入する治療法である。薬剤の抗ガン作用の増強を図る方法であり、IRE とは治療メカニズムが異なる。

IRE の最大の利点は、非熱的に細胞を壊死させられることである。電気パルス条件を最適化してジュール発熱を抑えれば、細胞を取り囲むコラーゲン線維などの細胞外基質に熱的損傷を与えることなく、細胞だけを除去できる。細胞外基質が健

全に保たれていれば、正常な細胞が治療後すぐに遊走してくることができるので、組織再生に必要な治療期間の短縮が期待できる。また、非熱的作用に基づく IRE では、治療部位の近くに大きな血管があっても治療効果が損なわれない。血流はヒートシンクとして作用するので、熱を利用して組織を焼灼するハイパーサーミア、高密度焦点式超音波治療 (High intensity focused ultrasound; HIFU)、ラジオ波焼灼術 (Radiofrequency ablation; RFA) などは、大血管近傍での治療に不向きである。一方、IRE ではこのような血流によるヒートシンク効果を懸念する必要がない。

IRE を腫瘍の低侵襲治療に応用するには、電場と温度場を制御して組織の温度上昇を抑えながら標的組織の細胞をすべて除去できるような電気パルスの印加条件を見出す必要があり、そのための解析や実験が行われている。そこで本稿では、IRE の原理や研究動向について概説するとともに、我々の研究室で行っている数値解析や細胞実験を紹介する。

### 2. 不可逆エレクトロポレーションの原理

#### 2.1 細胞膜の構造と性質

細胞膜の主要な構成成分は脂質とタンパク質である。脂質の中で最も多いのは分子量 1000 未満のリン脂質であり、親水性部分 (極性頭部) と疎水性部分 (炭化水素鎖で構成される脂肪酸) の両方を有する両親媒性分子である。炭化水素鎖の疎水性相互作用により水中で自発的に会合し、極性頭部を外側に向けた熱力学的に安定な二重層構造 (厚さ 5~10 nm) を形成する。そこに、静電的相互作用で吸着型の膜タンパク質が、また疎水的相互作用で係留型と貫通型の膜タンパク質が挿入され、細胞膜を形作っている。膜成分は流動性を有しており、側方拡散および回転拡散の運動を行っている。細胞膜の構成成分や構造は細胞によって

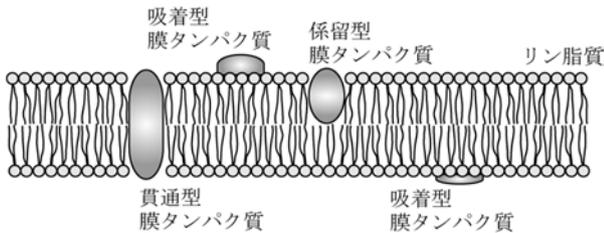


図1 細胞膜の基本的構造

異なるが、このような脂質二重層にタンパク質が浮かんでいるという基本的構造の概念(図1)は、Singer と Nicolson によって「流動モザイクモデル」として初めて提唱された[3].

脂質二重層は、脂溶性の物質を容易に透過させるが、水分子のような小さな極性分子はわずかしか通さない。また、イオンのような電荷を有する分子はほとんど通さない。しかし、細胞膜上には受動輸送(濃度勾配による拡散輸送)を担うチャネルや能動輸送(ATPのエネルギーを利用した物質輸送)を担うポンプがあるので、膜を隔てた分子輸送は大きく促進される。これらのチャネルとポンプの働きによって、細胞膜で隔てられた細胞内外の各種イオン濃度( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ など)は厳密に維持されている。そして、細胞内外でイオン分布が異なるので、細胞膜内外には電位差が生じている。一般に、細胞内電位は細胞外に比べて60~90 mVほど低い(膜電位: -60~-90 mV)。

脂質二重層の外側の極性頭部(親水性部分)は電気をよく通す。一方、内側にある脂肪酸(疎水性部分)はほとんど電気を通さず、コンダクタンスは0.1~2 mS/cm<sup>2</sup>程度である。そのため、細胞膜は2枚の電極が絶縁体を挟み込んだコンデンサの構造と見なすことができる。細胞膜の厚さは極めて小さい(5~10 nm)ので静電容量は大きくなり、1 μF/cm<sup>2</sup>から10 μF/cm<sup>2</sup>(筋細胞)と言われている。

## 2.2 膜破壊のメカニズム

電気パルスの印加による不可逆的な細胞膜破壊のメカニズムは未だよく理解されていない。電気パルス印加後の細胞膜を電子顕微鏡で観察して認められるクラックや小孔[4]は、試料作成過程で形成された人為的なものである可能性が高い。なぜなら、試料の固定や凍結にはミリ秒から秒オーダーの時間を要するからである。一方、膜破壊は、一旦臨界電圧に達するとナノ秒オーダーの極短時

間で生じる現象なので[5]、その直前や最中における反応過程の解明には、高い時間的、空間的分解能を有する計測が必要である。

今までのところ、膜破壊の過程を実験的に明らかにした研究報告はないが、膜破壊が機械的あるいは電氣的な力で引き起こされるのは明白であり、いくつかの膜破壊モデルが提案されている。第一のモデルは、強い電場によって誘電体である細胞膜が分極したり電氣的に不均一な膜中の分子が移動したりして、細胞膜が局所的に張力を増して不安定になるというものである[6]。脂質やタンパク質には大きな双極子モーメントを持つものがあり[7]、これらに1 μs以上の長さの電気パルスを与えると配向が変化することが知られている。このような不安定性が膜破壊の原因となる。

第二のモデルは、電場によって細胞膜の両面に誘電荷電が生じ、これが引き合っただけで膜厚が薄くなるというものである[8]。この電氣的な圧縮力は膜の弾性的な復元力と釣り合っているが、印加電圧の増加によって復元力を上回る圧縮力が生じると膜破壊が起こる。

電場が非常に大きいときは、Born エネルギーの効果が無視できない。Born エネルギーは、イオンを高誘電率の液体から低誘電率の脂質二重層内部へ動かすのに必要なエネルギーであり、細胞膜や水の比誘電率、イオン半径などから計算される[9]。電位差1V中を移動している一価のイオンのエネルギーは1 eV ( $9.6 \times 10^4$  J/mol)である。この電場中でイオンが獲得するエネルギーが Born エネルギーに達すると、イオンは水中から細胞膜内に移動する。つまり、絶縁破壊を起こして膜透過性が上昇することになる。

## 2.3 膜破壊閾値

図2のような半径  $r$  の球状の細胞に一樣な電場  $E_{\text{ext}}$  を印加する場合を考える。細胞膜の電気伝導率は細胞内液や外液のそれに比べて十分に小さく、また、細胞膜の厚さは細胞直径に比べて十分に薄

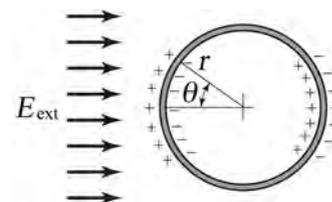


図2 電場中の球状細胞の膜破壊モデル

い。電場を与えてから十分に時間が経過した平衡状態において、細胞膜上のある場所での膜電位  $V_m$  は

$$V_m = 1.5E_{\text{ext}}r\cos\theta \quad (1)$$

で表すことができる[10]。ここに、 $\theta$ は注目する場所と細胞中心とを結ぶ線分が電場の方向に対してなす角度である。

細胞膜破壊を引き起こす臨界電圧値については、細胞懸濁液や人工脂質膜を対象として非常に多くの研究がなされている。これらの研究では、パッチクランプ法で計測される膜コンダクタンスの変化や顕微鏡で観察できる膜の物質透過によって膜破壊を確認している。膜破壊閾値は、印加する電気パルスの条件（パルス数、幅、間隔）、周囲温度、そして細胞膜破壊の同定に用いる方法（膜コンダクタンス変化、細胞内液の放出、細胞融解の観察など）に依存して変化するが、 $V_m$ が0.2–1 Vになると膜破壊が生じるとしている報告が多い[11–19]。

### 3. 腫瘍の除去治療を目指した研究動向

#### 3.1 数値解析

IRE を腫瘍治療に用いる可能性については、考案者である *Davalos* と *Rubinsky* の研究グループによって、まず数値解析で示された。等方均質な生体組織（肝臓）に針状電極を穿刺することを想定した二次元有限要素モデルにおいて、電界分布をラプラス方程式によって、またジュール発熱に起因する温度上昇を *Pennes* の生体熱伝導方程式によって計算した[20]。そして、電極の配置と印加電圧に依存する電界分布の違い、パルス長さに依存する温度上昇量を明らかにし、これらのパラメータをうまく選べば、生体組織に熱的損傷を与えることなしに IRE を達成できることを初めて示した。その後、球電極や平板電極[21]、クランプ型電極[22, 23]、カテーテル型電極[23]を用いた場合の電場や温度上昇について、同グループによる報告が続いた。

電極の導電/絶縁部の境界やエッジ部分では電流密度の集中が生じるので、その周囲の電界分布や温度上昇を見積もるためには三次元解析が欠かせない。針状電極[24–26]、同軸電極[27]などについて三次元有限要素モデルを用いた報告がなされている。また、解析結果を一般化するために無次

元モデルを用いた解析も行われている[28–30]。

ほとんどの数値解析は巨視的に見て等方均質な組織を対象にしているが、実際の生体では標的とする腫瘍組織の内部や周囲に神経、血管、リンパ管が存在する。そこで、電気的特性や熱物性の異なるこれらの構造を考慮した数値解析も行われている。その結果、標的組織（前立腺、乳房組織）を壊死させるのに十分な高電圧を印加しても、神経、血管、リンパ管に生じる電場は非常に小さいことが明らかにされた[31]。これは、IRE 治療によって標的組織の細胞が壊死した後でも、神経や血管組織は温存されることを意味している。

細胞に IRE が生じると、電気抵抗の高い細胞膜を迂回して流れていた電流が細胞内を通過できるようになるので、組織の電気伝導率は大きくなる。例えば、ブタ腎臓を用いた実験では、印加するパルスの電圧やパルス長さに依存して電気伝導率が約 5 倍にまで大きくなることが報告されている[32]。電極周囲の細胞が壊死して電気伝導率が大きくなれば、電場の高い領域は電極から遠くに向かって広がるので、細胞壊死範囲はさらに大きくなると予想される。このような効果を考慮した電場解析では、時間ステップを刻んで計算を行い、電場の大きさに応じて有限要素の物性値を逐次変更するなどの方法が用いられている [32, 33]。

#### 3.2 動物実験

臨床研究に先立ち、マウス、ラット、イヌ、ブタなどを用いた多くの動物実験が行われ、細胞壊死や組織修復の過程、壊死領域の拡がり、熱的損傷の有無などが検証された。IRE の動物実験を初めて報告したのは、やはり考案者の *Davalos* と *Rubinsky* の研究グループである。ラットの正常肝臓に対して施術を行い、熱的損傷が起きないような電気パルス条件で IRE による細胞壊死を達成できることを示した[34]。マウスやラットは腫瘍細胞の接種が容易なので、実際に担癌モデルを作成して経時観察をすることができる。この担癌マウスを用いて、電気パルス条件の違いが腫瘍の治療結果に与える影響について調べられている。肉腫を接種したマウスに対して IRE 施術を行い腫瘍組織の変化を経時観察した結果、短いパルスを多数回印加する方が治療効果は高く、熱的損傷も抑えられることが明らかにされた[35]。また、ヒト乳

ガン細胞を移植したマウスでは、腫瘍組織は IRE 施術後 1 週間で退縮し、3~4 週間で消失することが示された[27].

IRE が神経や血管等に与える影響については、マウスよりも大きな実験動物を用いて研究されてきた。イヌの前立腺に対する施術では、治療部位周辺の神経、血管、尿道、直腸に対して IRE は何ら影響を与えないことが確認された[36]. また、ブタの坐骨神経の近傍で IRE 施術した実験では、運動能力の経時観察と坐骨神経部分の組織観察が行われ、施術後 2 か月には神経機能が正常に回復していることが示された[37]. これらの実験は、数値解析で示されたのと同様に、腫瘍が重要な神経や血管の周辺に浸潤して通常の外科的手術が困難な場合でも、IRE による治療が適用可能であることを示している。

### 3.3 臨床研究

IRE の有効性を動物実験で検証することを経て、人のガン治療を対象とした臨床研究が行われている。これらの研究には、2006 年 11 月にアメリカ食品医薬局 (FDA) から軟部組織の外科的除去装置として許可を受け、さらに 2008 年に市販前届 (510k) の許可 (クリアランス) を受けた NanoKnife と呼ばれる IRE 施術装置 (AngioDynamics 社) が用いられている。この装置は使い捨て電極を 6 本まで装着して電気パルスを与えられるだけでなく、電気パルスによる心室頻拍の発生を防止するために心電図波形と同期を取りながら印加ができるシンクロナイザーを取り付けることができる。

この NanoKnife を初めて人に用いた臨床研究の結果が 2010 年に報告された[38]. 21 人の患者、28 の悪性腫瘍 (腎臓: 8, 肝臓: 17, 肺: 3) に対して実施されたもので、電気パルス印加によって筋収縮が発生するために全身麻酔下で施術された。この研究では治療効果よりも施術手技に関する検討がなされており、施術によって部分的な神経麻痺、気胸、不整脈が発生したと報告された。

その翌年には、腎細胞ガンの外科的切除術を受ける予定の 6 人の患者に対する施術[39]や他の方法では治療できなかった 38 人の患者、69 の悪性腫瘍 (腎臓, 肝臓, 肺, リンパ節) に対して行われた本格的な臨床試験の報告がなされた[40]. 後

者では尿管閉塞、副腎の障害が 1 例ずつ、一時的な神経麻痺が 2 例発生したのみで他に副作用はなく、69 の腫瘍のうち 46 例において腫瘍が完全に消失したと報告された。この臨床研究で治療効果が高かったのは肝臓に対する施術であり、一方、肺ガンでは全例で進行を止めることはできなかった。

その後、腎臓, 肝臓, 肺, リンパ節だけでなく、人の膵臓[41, 42], 前立腺[43, 44], 骨[45, 46], 甲状腺[47], メラノーマ[48]等に対する施術が試みられている。

日本でも臨床研究が開始されており、2014 年 2 月 13 日に東京医科大学病院消化器科内科において、60 代女性の肝ガン (肝障害度 A, 直径 30 mm の腫瘍 1 つ) に対して NanoKnife を用いた国内初の施術が行われた[49]. また、2015 年 4 月 6 日に 70 代男性の膵ガン (ステージ 4A) に対して国内初の施術が行われ[50], 臨床研究のために合計 8 名の膵ガン患者が治療を受けた。さらに、山王病院がん局所治療センター (東京都港区) でも膵ガン患者への施術が始まり、2016 年 6 月 6 日までに 14 例の治療が行われている[51].

このように国内外で NanoKnife による臨床研究が開始されており、その症例数は欧米だけで 3500 例を越えると言われている。しかし、今のところ FDA は、NanoKnife を「外科的電気切断および凝固装置」として分類しており、特定の疾患の「治療」に用いることに対して許可を出していない。

### 3.4 IRE 効果の術中モニタリング

IRE の施術は、電極を標的組織に対して経皮的に穿刺し、電気パルスを印加して行われる。そのため、施術中や施術後に治療効果をモニタリングすることが重要である。

3.1 節で述べたように、IRE が達成されると組織の電気伝導率は大きくなるので、施術中の印加電圧と電流を計測してコンダクタンスの変化をモニターする方法が最も簡便である[52, 53]. しかし、この方法は組織の電気的特性の変化を知るだけのものなので、IRE の効果が標的腫瘍組織の全領域に及んだかどうかを確かめるには、画像診断的方法が必要である。

電極の穿刺は超音波画像診断装置 (US), X 線コンピュータ断層撮影装置 (CT), あるいは磁気

共鳴画像装置 (MRI) のガイド下で行われるので、そのままこれらの装置を用いて治療効果の確認を行う方法が研究されている。US とブタ肺を用いた研究では、IRE 施術直後に患部の細胞内外液が増して低エコー信号領域が観察されることが示された[54]。また、ラット肝臓に対する施術を MRI で計測した実験では、壊死領域は T1 強調画像における低信号領域、T2 強調画像における高信号領域として確認されることが明らかになった[55]。一方、CT に関しては、ブタ肺を用いた実験において壊死領域を描出することの難しさが指摘されている[56]。

#### 4. 不可逆エレクトロポレーションの 生体ファントム実験と数値解析

##### 4.1 生体ファントム実験

前章のように悪性腫瘍の除去治療を目指して動物実験や臨床研究が進められているが、電気パルス印加に対する腫瘍の反応は細胞の種類や由来によって異なる。また、生体組織の構造は不均一なので、動物実験や臨床研究の結果を比較して電気パルス条件とその効果の関係を一般化したり、IRE のメカニズムを調べたりするのは難しい。そこで我々は、アガロースゲルに細胞を分散培養した生体ファントム実験系を確立し、電気パルス条件の違いが細胞壊死領域や温度上昇に与える影響を調べるために利用してきた。生体ファントム実験のセットアップを図 3 に示す。細胞を所望の密度でアガロースゾルに懸濁し、プラスチック円筒容器に注いだ後に自作の電極を穿刺し、直ちに低温下でゲル化させて作製する。

アガロースゲルによる生体ファントムを用いる



図 3 生体ファントム実験のセットアップ

利点の 1 つは、作製直後は細胞が球形を保っているため、図 2 で示したような理想的な細胞モデルを仮定して膜破壊閾値の検討ができることである。ゲルの電気的特性や熱物性値は既知、あるいは計測することができるので、数値解析との比較を行うのに都合良い。また、薄くスライスしても、この生体ファントムはハンドリングしやすい。そのため、任意の断面を切り出して、簡単に細胞の生死判定染色に供することができる。

図 4 は、生体ファントムの横断面スライスをカルセイン AM とヨウ化プロピジウムで二重染色し、蛍光顕微鏡で観察した画像である。市販の電気パルス発生装置 (エレクトロポレーター) を用いて、電圧 1 kV (2 kV/cm)、パルス幅 10  $\mu$ s、パルス間隔 100 ms の電気パルスを印加した後、電極と垂直な断面で生体ファントムをスライスした。ヨウ化プロピジウム陽性 (赤色蛍光) の死細胞領域は、印加回数 30 回では電極周囲に限定されるが、印加回数が増すにつれて外に拡がり、120 回印加後には 2 本の電極をきれいに取り囲むまでになった。しかし、印加回数を 150 回に増やしても、細胞壊死領域はこれ以上拡がらなかった。電気パルス条件を変えて同様の実験を行うと、電圧、パルス幅、印加回数が増すほど細胞壊死領域は拡がるという関係を得ることができる。これらの結果は、2.3 節で述べた静的な膜破壊閾値で細胞壊死領域を見積もるのは困難であり、動的な膜破壊プロセスを考慮する必要のあることを示唆している。

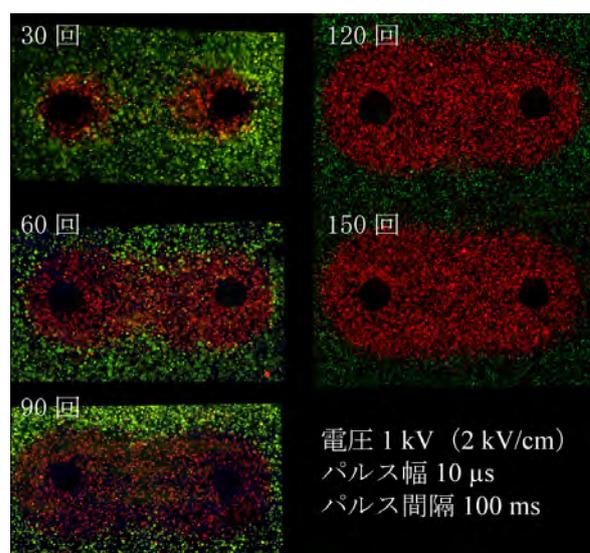


図 4 生体ファントム実験の結果  
(赤：死細胞，緑：生細胞)

#### 4.2 数値解析

電気パルスの印加条件には、電圧（電位勾配）、パルス幅、パルス間隔、印加回数があるが、細胞壊死領域の広さに最も大きな影響を与えるのは電圧である。そこで、細胞壊死領域の見積もりには静電場解析を用いている[29, 30].

図5は、4.1節で述べた生体ファントム実験を模擬した解析モデルである。直径 $d$ 、導電部長さ $h$ の電極2本を中心間距離 $l$ で生体ファントム（導電率 $\sigma$ ）に穿刺し、電極間に電位差 $V$ を印加するとき、電位 $\phi$ の分布は次のラプラス方程式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = 0 \quad (2)$$

また、生体ファントムの熱伝導率 $\lambda$ 、密度 $\rho$ 、比熱 $c$ 、時刻 $t$ とすると、温度 $T$ は次の非定常熱伝導方程式から計算できる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + i^2 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、 $i$ は

$$i = \sigma \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

によって計算される電流密度である。

電極先端が平らなモデルと NanoKnife のように針状になったモデルを用いて電位分布を解析した結果を図6に示す。等電位線は電極を中心として周囲に広がるが、電極で挟まれた領域ではその間隔が密であった。電位分布から計算される電位勾配分布を図7に示す。等電位勾配面は対称面で凹んだ空豆状の分布をしており、電極で挟まれた領域、特に電極の導電/絶縁部の境界やエッジ部分で

は電位勾配が大きかった。

いま、2.3節の式(1)において膜破壊閾値を1V、細胞半径を8 $\mu\text{m}$ （生体ファントム中に分散した線維芽細胞の半径の実測値）とすると、膜破壊に必要な最低の電位勾配は、 $\nabla\phi_{cr} = V_m / (1.5 \times r \cos\theta)$  より0.83 kV/cmになる。すなわち、図7において破線の内側の細胞が壊死すると予想される。先端が針状の NanoKnife を想定したモデルでは、対称面でのくびれが大きいために明らかとなり、電極先端が平らな簡易モデルでは細胞壊死領域を広く見積もってしまうことが示された。

式(3)から計算される温度分布を図8に示す。電気パルスを90回印加した直後の温度を示しており、電極先端のエッジ部分の温度が最も高くなることが明らかになった。この最高温度点における温度履歴を図9に示す。パルス印加とともに温度が瞬間的に上昇するが、パルスを切ると熱拡散して温度が下がる。これを繰り返して徐々に温度が上昇していく。先端が平らな電極では最高温度が62°Cであるのに対して、針状電極では97°Cにも達した。このように計算された温度の妥当性については、感温性インクを使った実験によって確かめることができる[57].

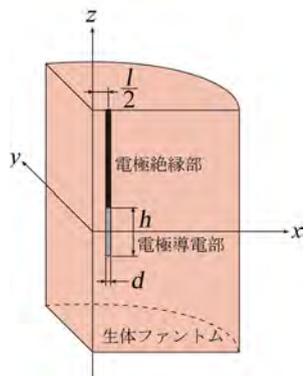


図5 実験を模擬した解析モデル

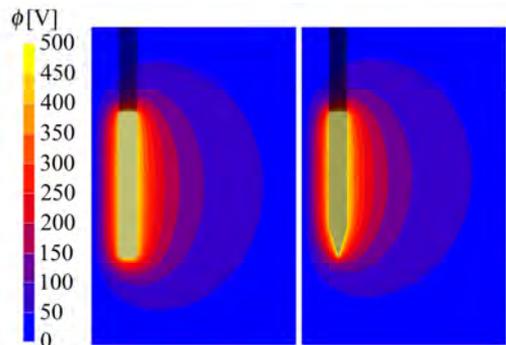


図6 電位分布の解析結果

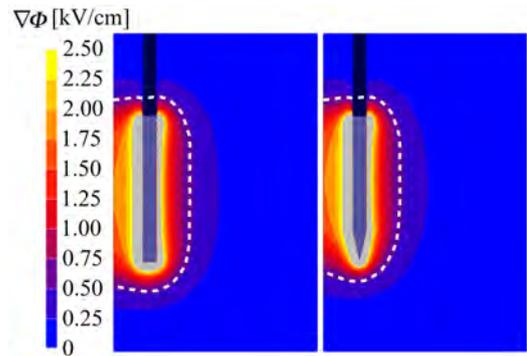


図7 電位勾配分布の解析結果

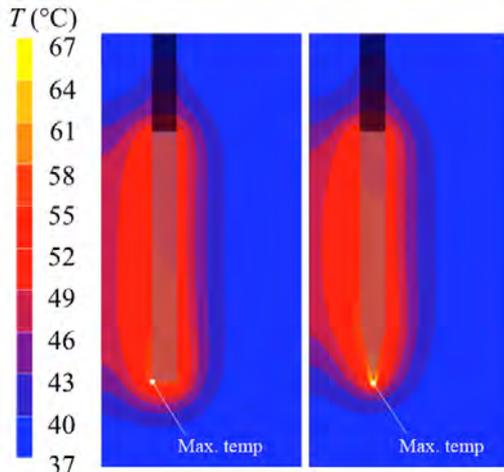


図8 電気パルス90回印加直後の温度分布

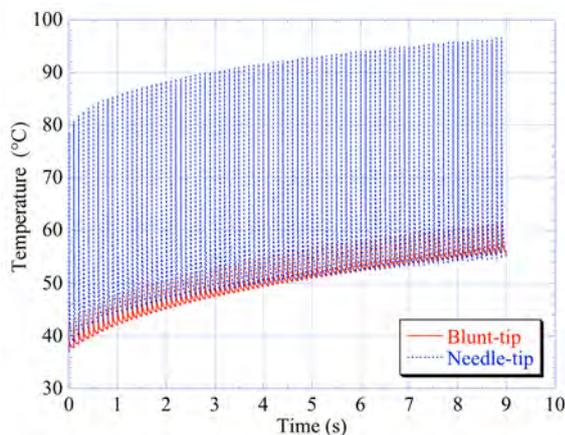


図9 最高温度点における温度履歴

#### 4.3 低電圧化への取り組み

IRE は標的組織に対して経皮的に電極を穿刺するだけで施術できる低侵襲治療であるが、高電圧を用いるために施術中に強い筋収縮が生じる。そのため、今のところ全身麻酔下で施術せざるを得ない。そこで我々は、IRE 治療の低電圧化を目指した研究を行っている。

第一の方法は、薬剤を補助的に使って膜破壊閾値を下げる試みである。細胞膜の穿孔は、脂質やタンパク質の流動性など細胞膜の性質に大きく依存する。そこで、細胞膜の透過性を高める薬剤を補助的に用いて膜破壊に必要な電圧を下げる試みを行っている。

第二の方法は、微小電極の利用である。電位勾配を一定に保ったまま印加電圧を小さくするには、電極間隙を小さくする他ない。電極間隙を数百ミクロンにまで小さくすれば、数十Vの電圧印加で

IRE を達成できる。しかし、このような微小電極は、これまでのように標的組織に穿刺して大きな領域を壊死させるのには不向きである。そこで基板表面をエッチングして電極パターンを形成することで表面電極を作製し、これを体表面や胃腸管表面に押し当てて表層の病変を治療する「接触式IRE」を考案している。

#### 5. おわりに

新しい技術は成長と停滞を繰り返しながら普及すると言われている。IRE を悪性腫瘍の除去治療に用いるというアイデアが12年前に初めて提案され、それ以降、数値解析や動物実験が盛んに行われてIREの有効性が示されてきた。その波は過ぎ去り、一見すると進歩が停滞しているようである。しかし、今も水面下では地道な臨床研究が進められており、長い年月をかけて症例を増やし、やがて治療法としての認可が得られると思われる。これが認可される将来のことを見据えて、電場と温度場を考慮しながら最適なパルス条件を見積もる手法やIRE治療の効果をモニタリングする手術支援法、さらに基礎となる膜破壊メカニズムについて、工学的見地から地道な研究を継続していかなければならない。

#### 謝辞

第4章で述べた研究は、JSPS 科研費 22656053, 25670887, 26249021 の助成を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] Davalos, R. V. and Rubinsky, B., Tissue Ablation with Irreversible Electroporation, US 2007/0043345 A1, USPTO, ed. The Regents of the University of California, USA (2004).
- [2] Mir, L. M. et al., Electrochemotherapy Potentiation of Antitumour Effect of Bleomycin by Local Electric Pulses, *Eur. J. Cancer*, **27** (1991) 68-72.
- [3] Singer, S. J. and Nicolson, G. L., The Fluid Mosaic Model of the Structure of Cell Membranes, *Science*, **175-4023** (1972) 720-731.
- [4] Chang, D.C. and Reese, T. S., Changes in Membrane- Structure Induced by Electroporation as Revealed by Rapid-Freezing Electron-

- Microscopy, *Biophys. J.*, **58** (1990) 1-12.
- [5] Benz, R. and Zimmermann, U., Pulse-length dependence of the electrical breakdown in lipid bilayer membranes, *Biochim. Biophys. Acta*, **597** (1980) 637-642.
- [6] Neumann, E., Principles of Electric Field Effects in Chemical and Biological Systems, *Topics Bioelectrochem. Bioenerg.*, **4** (1981) 113-160.
- [7] Pethig, R., *Dielectric and Electronic Properties of Biological Materials*, John Wiley & Sons, Chichester, (1979).
- [8] Crowley, J. M., Electrical breakdown of bimolecular lipid membranes as an electromechanical instability, *Biophys. J.*, **13-7** (1973) 711-724.
- [9] Benz, R. and Conti, F., Reversible electrical breakdown of squid giant axon membrane, *Biochim. Biophys. Acta.*, **645-1** (1981) 115-123.
- [10] Zimmermann, U., Electric Field-Mediated Fusion and Related Electrical Phenomena, *Biochim. Biophys. Acta*, **694** (1982) 227-277.
- [11] Abidor, I. G. et al., Electric Breakdown of Bilayer Lipid Membranes I. The Main Experimental Facts and Their Qualitative Discussion, *J. Electroanal. Chem.*, **104** (1979) 37-52.
- [12] Glaser, R.W. et al., Reversible Electrical Breakdown of Lipid Bilayers: Formation and Evolution of Pores, *Biochim. Biophys. Acta.*, **940** (1988) 275-287.
- [13] Kinosita, K. et al., Electroporation of Cell Membrane Visualized under a Pulsed-Laser Fluorescence Microscope, *Biophys. J.*, **53** (1988) 1015-1019.
- [14] Melikov, K. C. et al., Voltage-Induced Nonconductive Pre-Pores and Metastable Single Pores in Unmodified Planar Lipid Bilayer, *Biophys. J.*, **80** (2001) 1829-1836.
- [15] Hibino, M. et al., Membrane Conductance of an Electroporated Cell Analyzed by Submicrosecond Imaging of Transmembrane Potential, *Biophys. J.*, **59-1** (1991) 209-220.
- [16] Riemann, F. et al., Release and Uptake of Haemoglobin and Ions in Red Blood Cells Induced by Dielectric Breakdown, *Biochim. Biophys. Acta.*, **394** (1975) 449-462.
- [17] Sale, A.J. and Hamilton, W. A., Effects of High Electric Fields on Micro-Organisms. 3. Lysis of Erythrocytes and Protoplasts. *Biochim. Biophys. Acta.*, **163** (1968) 37-43.
- [18] Teissie, J. and Rols, M.P., An Experimental Evaluation of The Critical Potential Difference Inducing Cell Membrane Electroporation, *Biophys. J.*, **65** (1993) 409-413.
- [19] Zimmermann, U. et al., Dielectric Breakdown of Cell Membranes, *Biophys. J.*, **14** (1974) 881-899.
- [20] Davalos, R.V., Tissue Ablation with Irreversible Electroporation, *Ann. Biomed. Eng.*, **33** (2005) 223-231.
- [21] Davalos, R.V. and Rubinsky, B., Temperature Considerations during Irreversible Electroporation. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **51** (2008) 5617-5622.
- [22] Ivorra, A. et al., Use of Conductive Gels for Electric Field Homogenization Increases the Antitumor Efficacy of Electroporation Therapies, *Phys. Med. Biol.*, **53** (2008) 6605-6618.
- [23] Phillips, M., Principles of Tissue Engineering with Nonthermal Irreversible Electroporation, *J. Heat Trans.*, **133** (2011) 011004.
- [24] Sel, D. et al., Feasibility of Employing Model-Based Optimization of Pulse Amplitude and Electrode Distance for Effective Tumor Electroporation, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **54-5** (2007) 773-781.
- [25] Garcia, P. A. et al., Intracranial Nonthermal Irreversible Electroporation: In Vivo Analysis, *J. Membr. Biol.*, **236-1** (2010) 127-136.
- [26] Garcia, P. A. et al., A Parametric Study Delineating Irreversible Electroporation from Thermal Damage Based on a Minimally Invasive Intracranial Procedure, *Biomed. Eng. Online*, **10-34** (2011).
- [27] Neal, R. E. et al., Treatment of Breast Cancer through the Application of Irreversible Electroporation Using a Novel Minimally Invasive Single Needle Electrode, *Breast Cancer Res. Treat.*, **123-1** (2010) 295-301.
- [28] Edd, J. F. and Davalos, R. V., Mathematical Modeling of Irreversible Electroporation for

- Treatment Planning, *Technol. Cancer Res. Treat.*, **6-4** (2007) 275-286.
- [29]Nomura, S. et al., Effect of Three-Dimensional Electric Field and Heat Conduction to Electrodes on the Temperature Rise During Irreversible Electroporation, *Proc. of AJTEC2011*, (2011) 44214.
- [30]Kurata, K. et al., Three-Dimensional Analysis of Irreversible Electroporation Estimation of Thermal and Non-Thermal Damage, *Int. J. Heat Mass Trans.*, **72** (2014) 66-74.
- [31]Daniels, C. and Rubinsky, B., Electrical Field and Temperature Model of Nonthermal Irreversible Electroporation in Heterogeneous Tissues, *J. Biomech. Eng.*, **131-7** (2009) 071006.
- [32]Neal, R. E. et al., Experimental Characterization and Numerical Modeling of Tissue Electrical Conductivity during Pulsed Electric Fields for Irreversible Electroporation Treatment Planning, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **59-4** (2012) 1076-1085.
- [33]Sel, D. et al., Sequential Finite Element Model of Tissue Electroporabilization, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **52-5** (2005) 816-827.
- [34]Edd, J.F. et al., In Vivo Results of a New Focal Tissue Ablation Technique: Irreversible Electroporation. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **53-7** (2006) 1409-1415.
- [35]Al-Sakere, B. et al., Tumor Ablation with Irreversible Electroporation. *PLoS One*, **2-11** (2007) e1135.
- [36]Onik, G. et al., Irreversible Electroporation: Implications for Prostate Ablation. *Technol. Cancer Res. Treat.*, **6-9** (2007) 295-300.
- [37]Schoellnast, H. et al., The Delayed Effects of Irreversible Electroporation Ablation on Nerves. *Eur. Radiol.*, **23-2** (2013) 375-380.
- [38]Ball, C. et al., Irreversible Electroporation: A New Challenge in "Out of Operating Theater" Anesthesia, *Anesthesia & Analgesia*, **110-5** (2010) 1305-1309.
- [39]Pech, M. et al., Irreversible Electroporation of Renal Cell Carcinoma: A First-in-Man Phase I Clinical Study, *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*, **34-1** (2011) 132-138.
- [40]Thomson, K.R. et al., Investigation of the Safety of Irreversible Electroporation in Humans. *J. Vasc. Interv. Radiol.*, **22-5** (2011) 611-621.
- [41]Martin, R.C. et al., Irreversible Electroporation Therapy in the Management of Locally Advanced Pancreatic Adenocarcinoma. *J. Am. Coll. Surg.*, **215-3** (2012) 361-369.
- [42]Narayanan, G. et al., Percutaneous Irreversible Electroporation for Downstaging and Control of Unresectable Pancreatic Adenocarcinoma, *J. Vasc. Interv. Radiol.*, **23-12** (2012) 1613-1621.
- [43]Onik, G. and Rubinsky, B., Irreversible Electroporation: First Patient Experience Focal Therapy of Prostate Cancer, in *Irreversible Electroporation* (Series in Biomedical Engineering), Springer (2009) 235-247.
- [44]Dickinson, C.L. et al., 584 Early Clinical Experience of Focal Therapy for Localised Prostate Cancer Using Irreversible Electroporation, *Eur. Urol. Suppl.*, **12-1** (2013) e584.
- [45]Nielsen, K. et al., Anaesthetic Management during Open and Percutaneous Irreversible Electroporation. *Br. J. Anaesth.*, **113-6** (2014) 985-992.
- [46]Steinbrecher, K. et al., Irreversible Electroporation in the Curative Treatment of Ewing's Sarcoma. *BMJ Case Rep.*, (2016)
- [47]Meijerink, M.R. et al., Percutaneous Irreversible Electroporation for Recurrent Thyroid Cancer - A Case Report, *J. Vasc. Interv. Radiol.*, **26-8** (2015) 1180-1182.
- [48]Mandel, Y. et al., Irreversible Electroporation of Human Primary Uveal Melanoma in Enucleated Eyes, *PLoS One*, **8-9** (2013) e71789.
- [49]Sugimoto, K. et al., Irreversible Electroporation for Nonthermal Tumor Ablation in Patients with Hepatocellular Carcinoma: Initial Clinical Experience in Japan. *Jpn. J. Radiol.*, **33-7** (2015) 424-432.
- [50]東京医科大学病院ニュースリリース, 「国内初, ナノナイフによる膵がん治療」, <http://hospinfo.tokyo-med.ac.jp/news/release/20150724.html>

- [51]山王病院がん局所療法センター, 「膵がんのナノナイフ治療」, <http://www.sannoclc.or.jp/hospital/info/detail/pdf/20160401.pdf>
- [52]Ivorra, A. and Rubinsky, B, In Vivo Electrical Impedance Measurements during and after Electroporation of Rat Liver, *Bioelectrochemistry*, **70-2** (2007) 287-295.
- [53]Ivorra, A. et al., In Vivo Electrical Conductivity Measurements during and after Tumor Electroporation: Conductivity Changes Reflect the Treatment Outcome, *Phys. Med. Biol.*, **54-19** (2009) 5949-5963.
- [54]Lee, E.W. et al., Imaging Guided Percutaneous Irreversible Electroporation: Ultrasound and Immunohistological Correlation, *Technol. Cancer. Res. Treat.*, **6-4** (2007) 287-294.
- [55]Zhang, Y. et al., MR Imaging to Assess Immediate Response to Irreversible Electroporation for Targeted Ablation of Liver Tissues: Preclinical Feasibility Studies in a Rodent Model, *Radiology*, **256-2** (2010). 424-432.
- [56]Deodhar, A. et al., Percutaneous Irreversible Electroporation Lung Ablation: Preliminary Results in a Porcine Model. *Cardiovas. Intervent. Radiol.*, **34-6** (2011) 1278-1287.
- [57]Kurata, K. et al., Visualization of Electroporation-Induced Temperature Rise Using Temperature-Sensitive Ink, *Int. J. Heat Mass Trans.*, **55** (2012) 7207-7212.
-

## マイクロ波を用いた多孔質体内の水分輸送促進と食品乾燥への応用

*Enhancement of Moisture Transport Inside Porous Material Using Microwave Irradiation and Its Application to Food Drying*

鶴田 隆治 (九州工業大学)

Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology)

e-mail: tsuruta@mech.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

著者は、主として食品を対象に乾燥の高品位化と省エネルギー化を目的とし、マイクロ波による蒸発潜熱供給のみを行うことを重視した研究開発を行ってきた。一般に多用されている温風乾燥や凍結乾燥では、蒸発あるいは昇華潜熱以外に、その熱伝導輸送のための加熱昇温や冷却のエネルギーが必要である。そのため乾燥速度を高めようとすると、乾燥した表面層への熱エネルギー供給が余儀なくされ、過乾燥による収縮変形や割れ、温度上昇による変性などが生じる。このエネルギーを供給することなく、常温で蒸発潜熱のみを与えることができれば、高品位で高効率な乾燥を実現できると考え、その方法としてマイクロ波真空乾燥に着目した。すなわち、蒸発乾燥に必要なエネルギーのみを低沸点下において供給することにより、過剰エネルギーによる品質劣化を抑え、高効率・高品位乾燥とすることである。水はマイクロ波の吸収率が高く、内部に存在する水分に優先的にエネルギー供給できる。

本稿では、マイクロ波によるエネルギー供給が乾燥過程において特異な水分分布を形成し、高速乾燥につながることを示すとともに、その利点を活かした応用技術について簡単に紹介したい。

### 2. マイクロ波常温乾燥法について

#### 2.1 方法概要

まず、著者らがマイクロ波常温乾燥法と称している乾燥法の概略を図1に示す。乾燥室となる減圧容器と真空ポンプ、そしてマイクロ波照射設備の三点が基本である。減圧すると水分は蒸発し、潜熱が奪われて乾燥対象物の温度は低下し、やがて凍結する。凍結乾燥の一プロセスであるが、本法では凍結しないように蒸発潜熱のみをマイクロ波で供給する。無駄な温度上昇を抑えて室温程度の常温で乾燥を行うものである。そのために、マ

イクロ波の照射制御による温度コントロールを重視しており、ON/OFF 制御や低出力の照射により常温乾燥を実現する。この際、外部より真空容器内に微量（毎分数リットル程度）の気体を導入することを一つの特徴としており、これにより蒸発乾燥を促進させている[1]。気体としては外気である空気でもよいが、食品の場合には非酸化雰囲気とするために窒素ガスを導入することが好ましい。なお、マイクロ波の周波数は、広く一般に用いられている 2.45GHz を使用した。

温度管理の一例として、マイクロ波の間欠照射によってイチゴを乾燥した際の温度と容器内圧力の過渡変化を図2に示す。圧力は 5kPa にほぼ保たれているが、イチゴの温度は中心、表面とも 15°C から 25°C の範囲内で変動している。マイクロ波の照射によって温度は急上昇するものの、照射を止めると蒸発潜熱が奪われて温度は降下する。この繰返しにより温度が一定の範囲内に収められ、乾燥がほぼ常温で進行している。注目したいのは、表面温度が中心温度よりも常に低くなっている点である。すなわち、マイクロ波はイチゴの内部にまで到達でき、内部に存在する水分に吸収されて発熱するが、表面では蒸発が生じているために潜

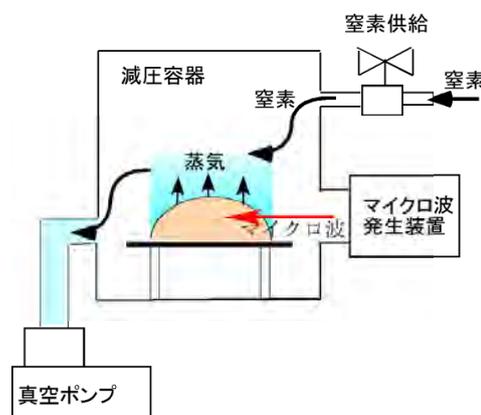


図1 マイクロ波常温乾燥法の概要

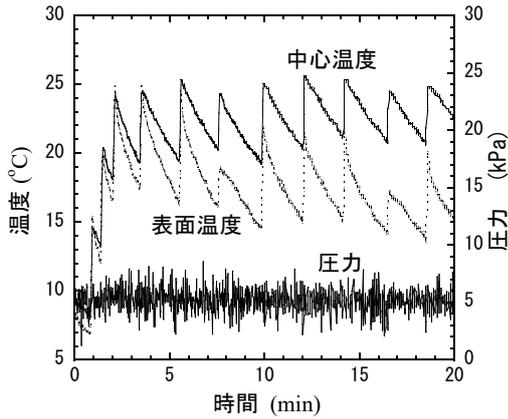


図2 間欠照射時のイチゴ内の温度挙動

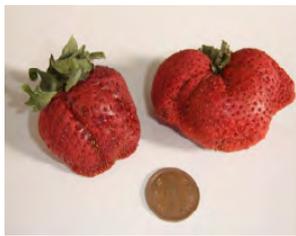


図3 乾燥後のイチゴ (博多あまおう)

熱輸送によって内部よりも低い温度となっている。水分の移動方向と熱移動の方向とが同じ向きに揃っており、乾燥には効果的な熱供給法と言える。温風乾燥のような外部加熱方式ではこのような温度分布を実現することは難しく、先に述べたように表面が乾燥している場合にあっても温度を上げた熱伝導場を形成せざるを得ない。図3には、大粒のイチゴ品種である“博多あまおう”のマイクロ波常温乾燥後の様子を示すが、収縮の少ない、いわゆる膨化乾燥が行われており、常温がゆえに色や香りも含め、食品由来の成分も残る。

## 2.2 乾燥特性と特異な水分分布

マイクロ波常温乾燥法の乾燥特性について、ホタテの貝柱を用いて調べた結果を温風乾燥と比較して紹介する[2, 3]。図4に含水率と乾燥速度との関係である乾燥特性曲線を示すが、温風乾燥(40°C, 3m/s)よりも乾燥速度が極めて大きく、温風乾燥では到達できない低含水率にまで乾燥している。また、乾燥速度の大きい恒率(定率)乾燥期間が広く、乾燥速度が低下する減率乾燥期間に移行する時の含水率である限界含水率が小さくなっている。すなわち、表面層近傍における蒸発乾燥が支配的な恒率乾燥期間が低含水率領域に拡大してい

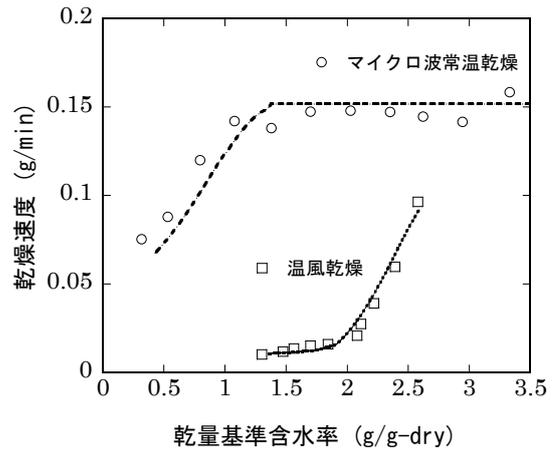
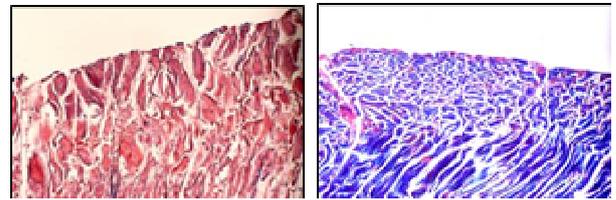
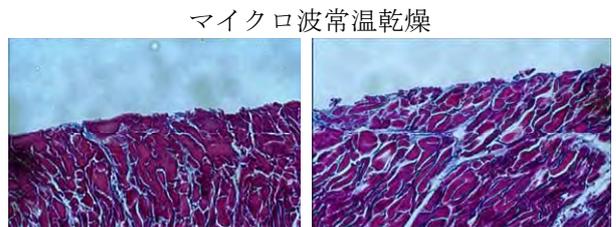


図4 ホタテ貝柱の乾燥特性の比較



(a) 乾燥前 (b) 温風乾燥2時間後



(c) 10分後 (d) 50分後 100µm

図5 ホタテ貝柱の組織変化

ることがわかる。図5は、ホタテ貝柱の組織観察を行ったものであるが、温風乾燥では表面組織に収縮が見られるのに対し、マイクロ波常温乾燥では収縮はなく、ホタテ筋繊維間の結合組織部が保持されている。この結合組織部が内部からの水分流路として作用するため、マイクロ波常温乾燥においては水分流路が確保され、表面層に水分が存在する恒率乾燥期間が持続するものと考えられる。

このことを証明する水分分布が観察されている。図6は、小型MRI装置を用いて3cm角の立方体状に切り出したダイコンをマイクロ波常温乾燥させた際の内部水分分布を計測したものである。下の映像において白く写っている部分が水分の多いところであり、水分の減少とともに映像は暗くな

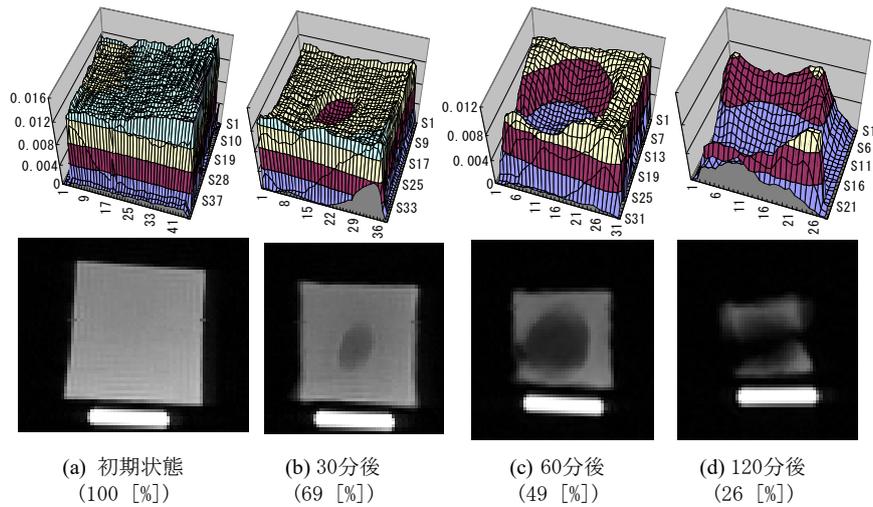


図6 ダイコン内の水分のMRI観察

る。この水分分布を定量化し、三次元的に表現したのが上部に示すものである。これらからわかるように、乾燥とともに中心部から水分が減少し、初期水分量の約半分になった時点においても、表面層には水分が多く存在している。また、内部の低水分領域が成長し、表面に達して噴出孔が形成されているようにも見受けられる。内部温度が高いという温度計測結果からも、内部の蒸気圧が高く、内部から表面に水分が滲み出し、表面で蒸発していると理解できる。つまり、常に表面がぬれた状態で乾燥が進行することから、恒率乾燥期間が長くなり、そのために高速乾燥となっていると考えられる。表面から水分が減少する他の乾燥法との相違がここにあり、マイクロ波常温乾燥法の大きな特徴である。

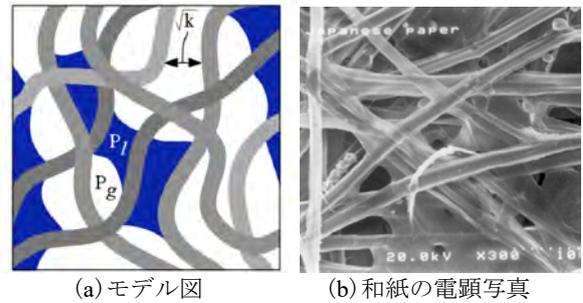


図7 多孔質内の水分モデル

### 3. 熱および水分輸送モデルと収縮変形解析

#### 3.1 熱と水分の輸送モデル

食品をはじめとした生体組織は、輸送問題においては多孔質構造とみなすことができる。図7にセルロース繊維からなる和紙の構造とともにモデル図を示すが、内部流動現象については複雑な流路構造の影響を透過率  $k$  であらわすダルシー則が適用される。さらに相変化をともなう気液二相の不飽和状態に対しては、空隙内に存在する液相の割合を示す飽和度  $s$  によって二相それぞれの流れを表現する相対透過率  $k_r$  を用いたモデルが利用される[4]。すなわち、

$$\dot{m}_l = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p_l}{\partial x} \quad (1)$$

$$\dot{m}_g = -\rho_g \frac{kk_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 $k_{rl}$  と  $k_{rg}$  が液相と気相の相対透過率であり、飽和度  $s$  によって 0~1 の間の値をとる。さらに、不飽和状態では空隙部での気液の圧力間に毛細管力の効果が加わる。その効果を水分拡散係数  $D$  によって表現する方法がとられる。

以下に2次元問題としての基礎式を示す。  
質量保存の式

$$\rho_l \varepsilon \frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{m}_{lx}}{\partial x} - \frac{\partial \dot{m}_{ly}}{\partial y} \quad (3)$$

運動量式

$$\dot{m}_{l,x} = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial \hat{p}_g}{\partial x} - \rho_l D \frac{\partial \hat{c}}{\partial x} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{l,y} = -\rho_l \frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial \hat{p}_g}{\partial y} - \rho_l D \frac{\partial \hat{c}}{\partial y} \quad (5)$$

エネルギー式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{(\rho c_p)_T T\} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &- \frac{\partial}{\partial x} (\dot{m}_{l,x} c_{pl} T) - \frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_{l,y} c_{pl} T) + q \cdot s \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $q$ はマイクロ波による加熱量であり、単位体積・単位時間あたりの発熱として与えるが、マイクロ波が水に優先的に吸収されることから、その発熱量が含水率に比例するものとした。厳密には、誘電損失率によってエネルギーの浸透深さも変化するため複雑となるが、含水率にのみ依存するとして簡略化している[5, 6]。なお、熱容量と熱伝導率はその場の水分率に依存するため、液相割合と固相とによる加重平均を考える。前述の相対透過率と水分拡散係数については、ともに飽和度  $s$  の3乗に比例するモデルを採用している。

$$k_{rl} = s^3, \quad D = D_{eff} \cdot s^3 \quad (7)$$

透過率  $k$  と有効拡散係数  $D_{eff}$  については、次に紹介する収縮変形解析と連動して変化する。

外表面における境界条件としては、単位面積あたりの蒸発速度  $\dot{m}_e$  を物質伝達率  $h_D$  を用いて次式で近似した。

$$\dot{m}_e = \rho_g h_D (\omega_s - \omega_\infty) \approx \rho_g h_D \left( \frac{p_s}{p} - \frac{p_{s\infty}}{p} \right) \quad (8)$$

物質伝達率の値は、容器に入れた水を用いて実際に評価し、 $h_D = 0.02 \text{ m/s}$  と推定した。エネルギーの境界条件としては、この蒸発による潜熱  $L$  が奪われることを考え、次式を適用する。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\text{surface}} = -\varepsilon \dot{m}_e L \quad (9)$$

### 3.2 収縮変形モデル

乾燥が進めば収縮する。多孔質構造としての空隙部にあった水分の減少とともに収縮が進行し、細胞組織からの脱水による収縮がこれに続く。そこで収縮解析では、水分変化によりひずみが生じると考え、以下の関係式を用いる[7]。

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_m\} + \{d\varepsilon_s\} = \{d\varepsilon_m\} + \alpha \cdot ds \quad (10)$$

全ひずみテンソル  $\{d\varepsilon\}$  が、機械的ひずみ  $\{d\varepsilon_m\}$  と乾燥によるひずみ  $\{d\varepsilon_s\}$  からなり、後者は含水率  $s$  の変化に比例すると考え、弾性変形を仮定する。熱変形解析と類似した考え方であり、比例係数  $\alpha$  は収縮係数と呼ばれる。

図8にダイコンをマイクロ波常温乾燥したときの含水率と体積変化の三乗根との関係を示す。この図を見れば明らかなように収縮挙動は二つの異なる特性を示している。すなわち、すなわち、含水率の大きな恒率乾燥期間と小さい減率乾燥期間では含水率への依存性が異なっている。これまでの食品乾燥の分野においては、体積変化そのものを含水率変化に関連づけることが多く、その場合に二つの乾燥期間ごとの差が現れにくく、見落とされていたようである。これらのことから、以下の関係式によって含水率と体積の三乗根、すなわち長さ変化とを表すことにした。

$$\alpha = \frac{d(\sqrt[3]{V/V_0})}{ds} = \frac{d(L/L_0)}{ds} \quad (11)$$

### 3.3 解析結果

熱と水分輸送については有限差分法 (FDM) を、収縮変形については有限差分法 (FEM) を用いて二次元解析を行った。ただし、厳密な連成解析は

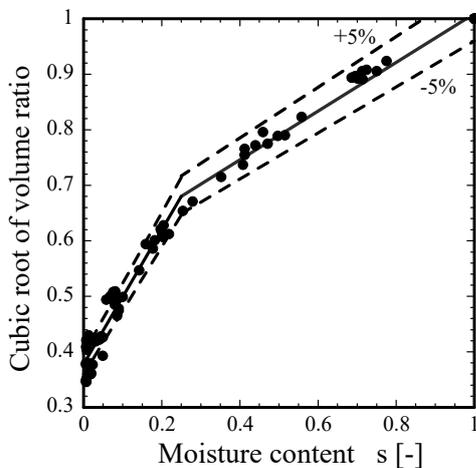


図8 ダイコンの収縮特性

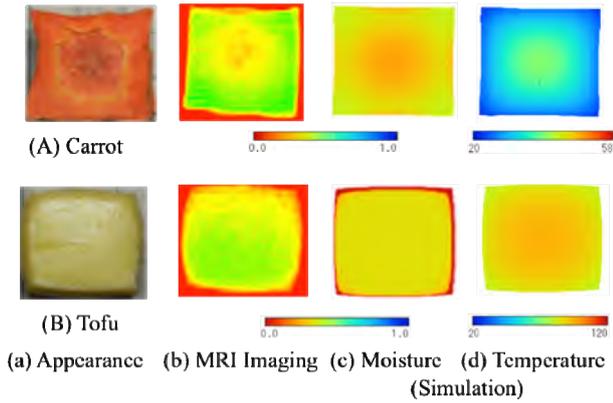
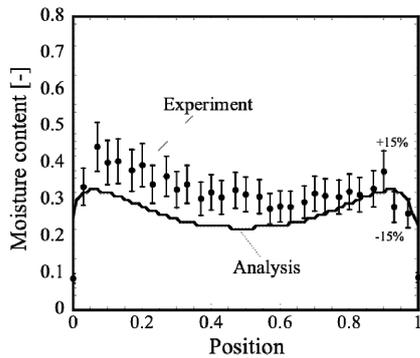
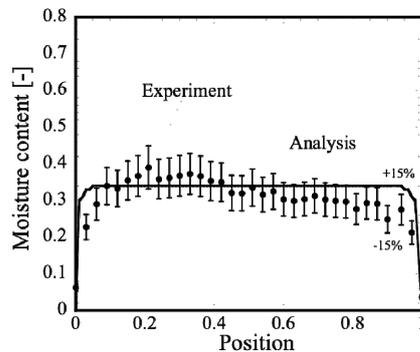


図9 実験と解析との比較



(a) 人参



(b) 豆腐

図10 水分分布の計算と実験との比較

行っておらず、FDMの矩形要素とFEMの三角要素を近似的に関連づけ、透過率は収縮率の2乗、水分拡散係数は3乗に比例して減少するとした。

解析対象は、一辺30mmのダイコン、ニンジン、そして透過率の小さい豆腐とした。初期温度は20°C、初期含水率は1であり、加熱条件はマイクロ波の連続照射を想定し、 $q=300\text{kW/m}^3$ とした。計算に必要な物性等は表1に示す。

ニンジンと豆腐の計算結果を例として図9と図10に示す。いずれも限界含水率近傍で、無次元含水率が0.31の時のもので、図9では左から順に、



図11 1m<sup>3</sup>大型マイクロ波常温乾燥器

外観、MRI計測、そして計算による水分と温度分布である。まず外観形状を比較すると、ニンジンでは角部が尖って辺中央部が凹んだ形状になっているが、豆腐ではその逆で、中央部が膨らんでいる。MRI画像を見ると、ニンジンでは中心部に水分が少なく、外周部に多くなっているが、豆腐では内部に水分が留まっている。これらの傾向は、数値解析による水分・温度分布にも再現されている。先にも述べたように、マイクロ波は内部加熱が可能のため、中央部の温度が高くなり、水分が圧力差によって外部に輸送されることが確認できる。特に、豆腐の透過率がかなり小さいことが、全体として膨らんだ形状になることもその理解に役立つ。豆腐では、内圧上昇によって破裂することも経験しており、同様に通気性の無い薄皮で覆われている材料もマイクロ波常温乾燥には適さないことを付記しておきたい。

計算結果と実験（MRI計測）との詳細な比較を図10の水分分布に見れば、ニンジンにおいても外

表1 ダイコン、ニンジン、豆腐の物性等

材料	大根	人参	豆腐
密度, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1460.9	1481.9	2083.3
比熱, $c_p$ (J/(kgK))	1008	1730	1577
空隙率, $\epsilon$	0.95	0.90	0.90
熱伝導率, $\lambda$ (W/(mK))	0.00492	0.0361	0.0900
ヤング率, $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.0	5.08/4.50 *	0.01
ポアソン比, $\nu$ (-)	0.394	0.300	0.300
透過率, $k$ ( $\mu\text{m}^2$ )	0.05	0.01	0.001
初期含水率, g/g-dry	23.27	10.39	7.29
限界含水率, g/g-dry	5.82	3.12	2.55
無次元含水率	0.25	0.30	0.35
収縮係数 (恒率期間)	0.44	0.49/0.50 *	0.43
収縮係数 (減率期間)	1.21	1.02/0.89 *	0.79

\* 人参については (中央部) / (周辺部) を示す

表面そのものには水分が減少しており、表面収縮が進行していることが伺える。限界含水率を下回る更なる含水率の低下は、収縮による乾燥速度の減少を加速すると予想できる。なお、計算と実験とは比較的良く一致しており、その差は物性や収縮特性の正確さによるものと思われるが、含水率がさらに小さくなって変形が大きくなる領域に対しては、モデルの改良が必要である。

#### 4. マイクロ波常温乾燥の実用化

マイクロ波常温乾燥法は、真空に近い減圧環境下で実施されるため、連続式は難しく、バッチ式にせざるを得ない。そのため、実用化のためには処理量の大型化が必要である。幸いにも、九州経済産業局による平成 18・19 年度の地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択され、1 日 1 トンを目標に、1 バッチあたり約 85kg を 2 時間で処理する取組みを行った。九州指月株式会社、クロレラ工業株式会社、福岡県工業技術センター機械電子研究所、そして財団法人九州産業技術センターの協力を得た。試作した大型乾燥装置を図 11 に示す。

乾燥室の内容積は 1 m<sup>3</sup> の水平型であり、マイクロ波の電磁場解析や導入気流の流動解析を行って内部構造を決定し、出力 3kW のマグネトロンを上部に 16 基設置した。真空ポンプは多量の水分を排除するため水封式とし、そのための冷却設備が新たに必要となった。しかし、この真空システムが消費する電力は、総電力量の 25% 程度である。マイクロ波は蒸発潜熱の供給に利用することが重要であるが、もやし 85kg (含水率約 17kg/kg-dry) を 35°C 以下の温度に保ちながら、2 時間で含水率 0.9 kg/kg-dry まで乾燥させた場合、マイクロ波の利用効率は 88.3% と高いものであった。もやしは乾燥させやすいということもあるが、マイクロ波による水へのエネルギー供給が有効であることが示された。なお、この技術の商品化については、静岡

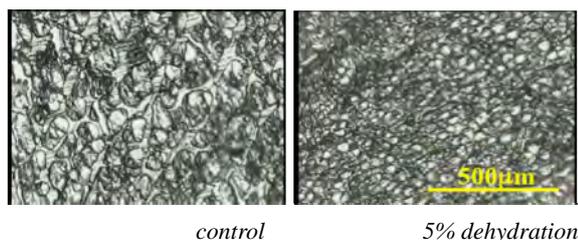


図 12 マグロ内の氷晶サイズの変化

県藤沢市にある西光エンジニアリング株式会社において行われており、現在は大型機の開発も完了している。

### 5. 常温乾燥技術の新たな応用

#### 5.1 冷凍技術への展開

マイクロ波常温乾燥がもたらす特異な水分分布は、高品位な冷凍保存にも活用することができる。冷凍保存における課題は、いかに氷結晶による細胞や組織の損傷を抑制するかである。通常は氷結晶が大きく成長する温度域（最大氷晶生成帯）を短時間に通過させる急速冷却が施されるが、大きな冷凍能力が必要となる。そこで、冷凍操作の前に若干の水分を常温乾燥によって取り除くことにより氷晶成長を抑えることを考えた[8, 9]。脱水冷凍（デハイドロフリージング）と呼ばれる方法になるが、その脱水操作によって品質や風味が変わらないことが望ましい。常温下において内部の水分を外表面部に移動させることができるマイクロ波常温乾燥は、予備乾燥法として最適と考えられる。つまり、表面層の水分は急速冷却が可能であり、伝導抵抗によって冷却速度が遅くなる内部では凍結に関与する水分が減っているため、氷晶成長を抑えることができ、全体として氷晶による損傷を軽減することができる。図 12 に、4×5×8 cm<sup>3</sup> (約 195g) のマグロを冷凍した際の組織内の氷晶写真を示すが、5% 程度の予備乾燥によって氷晶サイズがかなりの程度に小さくなっているのが確認できる。この氷晶の微細化が組織への機械的損傷を低減し、解凍後のドリップ量が減ることを確認しており、本手法をマイクロ波デハイドロフリージングと呼ぶことにした。詳細は、論文[9]や他の解説記事[10]を参照されたい。

#### 5.2 タンパク質製剤のガラス化保存への応用

近年、タンパク質などの生体高分子を用いた医薬品が増えているが、溶液状態での安定性が乏しいため、その多くは凍結乾燥 (FD) によりガラス化され、粉末状態で保存されている。しかし、FD は水の昇華を伴う乾燥のため長時間 (約 1~3 日) を要するとともに大きなエネルギーが必要である。また凍結濃縮による水和状態の変化や氷晶からの物理的な損傷、失活や凝集等が生じるため、防御法として糖類などの添加剤が用いられている。図

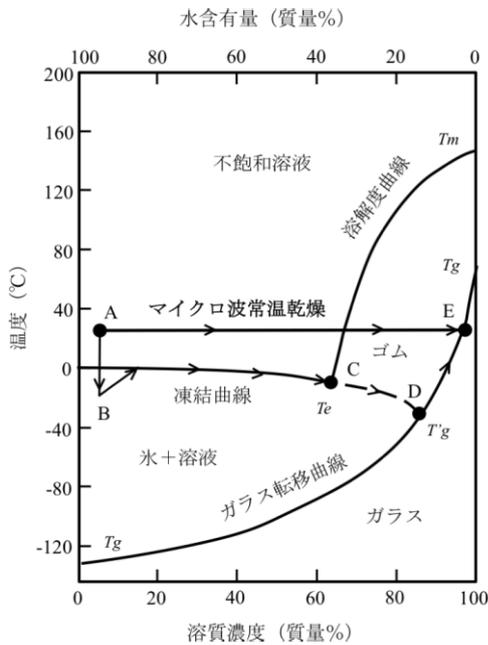


図 13 スクロース水溶液の状態図 (概略) [11]

13 は、凍結乾燥によるガラス化のプロセスをスクロース・水系を想定して描かれた状態図であり、凍結乾燥以外に常温乾燥によるガラス化の有効性が示されている[11].

通常用いられる凍結乾燥は、過冷却と凍結濃縮による凝固点降下をたどり、図上で A→B→C→D→E と状態変化する. C 点は凍結曲線が溶解度曲線と交わる共晶点であり、D 点がガラス転移点である. ガラス転移曲線より下側のガラス領域では、高粘度のために拡散が極度に抑えられ、物理化学的・生物学的変化が生じにくく安定した状態が保たれる. 凍結では D 点を越えて濃縮できないため、常温領域でのガラス状態による保存を行うには、昇華によって D→E としなければならない.

これに対し、常温のままでの水分蒸発によって A→E の状態変化がなされれば、氷相を経ることなくガラス化に到達できる. この常温乾燥にマイクロ波常温乾燥法を用い、急速乾燥を行えば効率的なガラス化が実現できる可能性がある. そこで、実際にタンパク質として卵白とリゾチームの水溶液の乾燥試験に着手したので、紹介したい[12].

図 14 は、卵白の乾燥前と乾燥後の外観写真で、(a)乾燥前の卵白、(b)マイクロ波常温乾燥後、そして(c)FD 後を示している. FD ではスポンジケーキの様な多孔質状態になったが、マイクロ波常温乾燥では一部に発砲痕のような箇所があるものの、

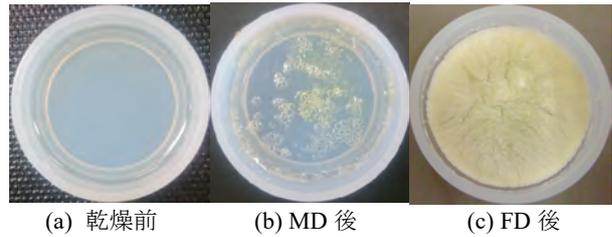


図 14 卵白の乾燥前後の外観

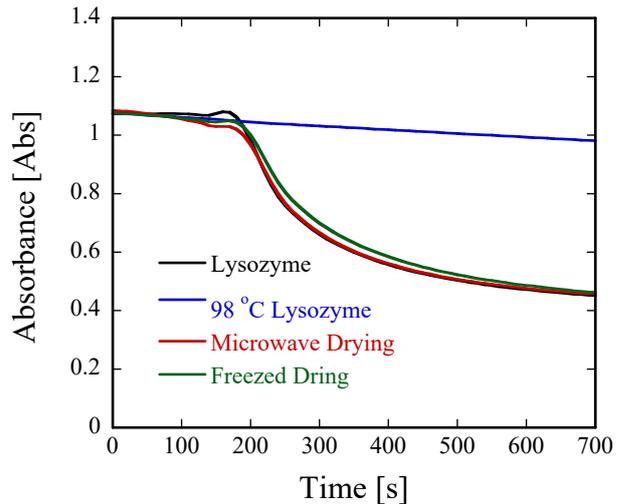


図 15 リゾチームの残存活性評価

乾燥前とほとんど変わらず透明のままであった.

次に、乾燥後に生理活性が残っているかを確認するため、10%リゾチーム水溶液を乾燥し、紫外可視分光光度計を用いた UV 測定を行った. リゾチームは細菌細胞壁を加水分解する酵素であるため、細菌細胞壁マイクロコッカスルテウスの細胞壁の分解活性を測定することによって生理活性を評価できる[13]. 具体的には、リン酸緩衝液 50mM にマイクロコッカスルテウスを 1cm ガラスセル中で 600nm での吸光度が 1.0Abs になるように加えて基質溶液とし、これに乾燥後の試料を 1mg/ml の水溶液にしたものを滴下し、リゾチームの基質分解による吸光度の時間変化を測定した. その結果が図 15 である. 乾燥処理を施さないリゾチーム水溶液では、滴下した約 150 秒から吸光度が低下し、細胞壁分解が進行していることがわかる. これに対し、98°C に加熱したリゾチーム水溶液では吸光度は変化していない. リゾチームが失活して分解できなかったためである. FD およびマイクロ波常温乾燥を行った試料では、リゾチーム水溶液と同様に吸光度が減少しており、乾燥処理後も活性

を維持したまま保存できることが確認できる。

## 6. おわりに

マイクロ波を使って常温のまま乾燥させる“マイクロ波常温乾燥法”について紹介し、その水分分布が他の乾燥方法と異なり、内部に少なく、外表面に多い分布となることを示した。また、冷凍の前に予備乾燥を行うマイクロ波デハイドロフリージングが冷凍保存の改善につながることを、および常温乾燥によってタンパク質製剤をガラス化することの可能性について紹介した。ここで紹介した主たる対象は食品素材であるが、他のバイオ材料においても同様のことが起こりうると考えている。

## 参考文献

- [1] 鶴田隆治, 林伊久, マイクロ波を用いた減圧乾燥方法およびその装置, 特許第 4474506, (2010).
- [2] 鶴田隆治, 林伊久, 間欠照射と外気導入によるマイクロ波減圧乾燥の乾燥促進, 日本機械学会論文集 B 編, **72-723** (2006) 2761.
- [3] 林伊久, 鶴田隆治, 海産物の乾燥過程における内部輸送抵抗の評価 (マイクロ波減圧乾燥と温風乾燥との比較), 日本機械学会論文集 B 編, **72-721** (2006) 2249.
- [4] Scheidegger, A. E., *The Physics of Flow Through Porous Media*, 3rd ed., 245, University of Toronto Press (1974).
- [5] Ni, H., Datta, A. K. and Torrance, K. E., Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: A multiphase porous media model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42** (1999) 1501.
- [6] Tsuruta, T., Tanigawa, H., Sashi, H., Study on shrinkage deformation of food in microwave-vacuum drying, *Drying Technology*, **33** (2015) 1830.
- [7] Yang, H., Sakai, N., Watanabe, M., Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer, *Drying Technology*, **19-7** (2001) 1441.
- [8] 鶴田隆治, 細胞又は組織の凍結保存法, 特許第 5039972, (2012).
- [9] 鶴田隆治, スルホリス ハミディ, マイクロ波による常温予備乾燥を行う新規冷凍法, 日本冷凍空調学会論文集, **25-3** (2008) 291.
- [10] 鶴田隆治, マイクロ波デハイドロフリージングの可能性, 食品工業, **55-7** (2009) 47.
- [11] Franks, F., 寺島公信, 生物製剤の長期常温安定化への道, 蛋白質 核酸 酵素, **41-6** (1996) 810.
- [12] 安部亮祐, 他 3 名, マイクロ波を用いたタンパク質製剤の乾燥保存に関する研究, 第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H234 (2016)
- [13] 松岡常吉, 他 2 名, タンパク質熱凝集を抑制する化合物, 蛋白質科学会アーカイブ, **1-e041** (2008)

## 食品の凍結・解凍における伝熱と損傷機序

### Heat Transfer and Damage during Freezing and Thawing of Food

多田 幸生 (金沢大学)

Yukio TADA (Kanazawa University)

e-mail: tada@se.kanazawa.ac.jp

#### 1. はじめに

冷凍食品の出荷量は年々増加傾向にあり、2015年度の国内生産は約152万トンに達し、日常生活に欠かせない産業となっている。冷凍食品の内訳をみると、調理食品と比較して生鮮食品の割合は低い。これは、凍結・解凍に伴って食品の品質劣化を招くため、冷凍保存が難しいことが要因の一つである。現在でも野菜・果実、魚介類などは冷凍保存が難しく、冷凍技術のさらなる進展が求められている。

食品の冷凍保存は低温化と活性水分の低減により、腐敗や鮮度低下の抑制を目的とする。しかし、凍結・解凍の過程で細胞（食肉では筋繊維が単位）レベルでのマイクロ現象が生じ、これが各種の機械的・膠質的損傷をもたらす。その結果、解凍後に栄養分や旨み成分の喪失につながる液汁の流出（ドリップ）が生じ、品質劣化が生ずる。

食品凍結における損傷機序の解明には、(1)冷却・昇温操作により温度や凍結率が変化するマクロな移動現象、(2)細胞レベルでのマイクロ挙動や状態の変化、(3)それに伴う細胞膜の破壊やタンパク質の変性・不溶化などの組織・組成の物理・化学的变化、最終的にそれらを(4)食品の官能性につなげる階層的な取り扱いが必要となる。従来、食品冷凍学の分野では、凍結に伴う食品の品質劣化と関係する(3)について、魚肉タンパク質の凍結変性[1]や各種の水産物を供試した実験的検討が数多くなされている。しかしながら、実際の応用にあたっては、より大きな試料寸法への適用や最適冷却・昇温操作等の技術が必要であり、それには相変態を冷却・昇温操作と関連づけて記述する伝熱学の寄与が重要となる。また、凍結・解凍後の品質変化の定量的予測は凍結食品の高品質化や省エネルギー冷凍技術の開発の基礎として重要である。

本稿では、細胞レベルの挙動を組込んだ食品のマイクロ速度論と、それをういたマグロ魚肉の凍結・

解凍損傷度の定量的な予測について紹介する。

#### 2. 食品凍結におけるマイクロ挙動

キハダマグロの凍結の様相を観察した一例を図1および図2に示す[2]。冷却は低温の窒素ガス（温度 $T_{\infty}$ ）を吹き付ける方法とし、組織と氷結晶構造の観察には蛍光観察とマルチスライシングによる3次元画像構築を組み合わせる方法[3]を用いている。筋繊維に垂直な断面における凍結状態の観察例を図1に示す。凍結前の組織を観察した図1(a)から、魚肉組織は筋繊維（細胞に相当）が結合組織により固定化された集合体であることがわかる。

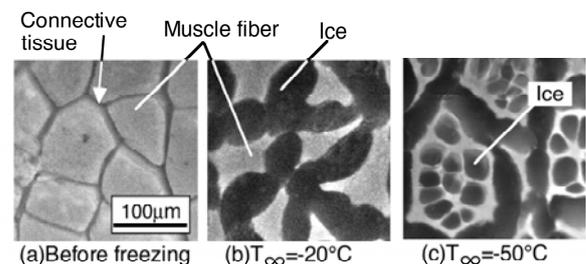


図1 キハダマグロの凍結状態の2次元観察

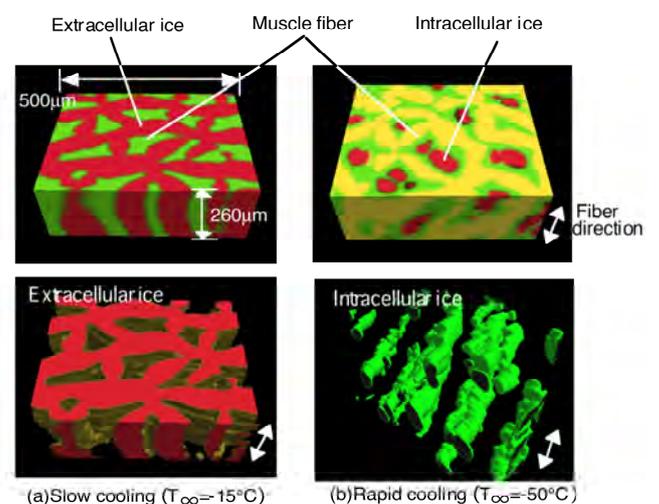


図2 キハダマグロの凍結状態の3次元観察

次に、気流温度 $-20^{\circ}\text{C}$ で凍結すると、筋繊維（白い部分）の間隙領域で氷結晶（黒い部分）が発達・成長する様子が捉えられる。すなわち、筋繊維内の水が細胞膜と通して筋繊維外へ移動し、そこで凍結することを示している。これに対して、気流温度が $-50^{\circ}\text{C}$ になると（図 1(c)）、すなわち冷却速度がより大きな条件では筋繊維内部にも断面が円形に近い氷結晶が生成されることがわかる。このように、半透性の細胞膜で仕切られた構造を持つ食品組織では、細胞レベルでの熱・物質移動が生じる結果、凍結状態は冷却速度依存性を示す点が重要である。

凍結状態を三次元観察した結果を図 2 に示す。緩速冷却の条件（図 2(a)）では筋繊維外の氷結晶は筋繊維を取り巻くように発達し、かつ筋繊維方向に連続している。この氷結晶は筋繊維同士を引き裂く方向に作用すると考えられ、機械的損傷につながる。冷却速度が増加すると（図 2(b)）、筋繊維内に繊維方向に細長く伸びた構造の氷結晶が形成され、機械的損傷は小さくなると予想される。なお、氷晶成長の時間的な様子については、石黒らによる共焦点レーザ顕微鏡を用いた鳥肉の凍結挙動の観察[4]、鶴田らによるオニオンセルの凍結挙動の観察[5]などが報告されているので、参照されたい。また、食品中の氷結晶の観察法については上野[6]の解説がある。

### 3. 食品の凍結・解凍モデル

#### 3.1 食品の凍結・解凍モデルの研究

食品の凍結・解凍過程における損傷機序を予測するために様々な凍結・解凍モデルが構築されている。初期の段階では、均一な多孔体モデルによる凍結過程の解析が主流であった[7]。その後、凍結過程と損傷を関連づける研究が行われている。Bevilacquaらは牛肉の凍結実験を行い、 $-1^{\circ}\text{C}$ ～ $-7^{\circ}\text{C}$ の温度帯を通過する特性時間と筋繊維内外の氷晶径との関係を調べ、氷結晶と筋繊維の接触面積が解凍後に流出するドリップ（液汁）量を表す有効な指標となることを示している[8]。BombenとKingはリンゴ組織の凍結状態をCryo SEMで観察し、デンドライト氷結晶の1次アーム間隔と冷却速度の関係を追究している[9]。また、Woinetらは結晶成長理論を用いて、ゲル組織に形成される氷結晶のサイズを予測するモデルを提案してい

る[10]。また、解凍過程については、魚肉の褐色化（メト化率）を指標に速度論モデルによる損傷の予測法が御木[11]、渡辺[12]によって提示されている。

#### 3.2 セル要素集合体モデル

代表的な食品として魚肉の筋組織を対象に、凍結・解凍におけるマイクロ挙動を記述できる解像度のもとで簡素化した凍結・解凍モデルとして、著者らが取り組んでいるセル要素集合体モデル[13]を以下に紹介する。魚肉組織は図 3(a)に示されるように体軸方向に走る筋繊維が、結合組織によって固定化された組織体である。そこで、図 3(b)に示されるように、筋原繊維の集合体が膠質溶液とともに半透性の膜で閉じこめられたものを筋繊維（セル B）とし、それを取り囲む筋繊維外領域（セル A）からなるセル要素を基本ユニットとする。

セル要素の凍結・解凍過程を図 4(c)の状態図上に示す。冷却により、まずセル A の凍結が優先的に開始する。他方、セル B（筋繊維）は平衡温度に達しても凍結せず、過冷却状態を維持しながら温度が低下する(b)。この間、浸透圧差によるセル A への水分流出によりセル B は濃縮・収縮する。臨界値に達すると過冷却が解消し(c)、瞬時にセル B 内に氷晶が出現し始め、これ以降は凍結曲線に沿った平衡凝固が進行する。共晶点温度でセル A が完全固相となり、水分移動は停止する。セル B が共晶点温度に達すると凍結は完了する(e)。

次に、解凍過程では、セル B 内の氷結晶の融解が開始する(f)。ついでセル A の融解が開始し(g)、自由水の出現により水分移動が可能となり、セル B は脱水する。内部氷晶が完全に融解した後もセル B は脱水し(h)、セル A-B 間の浸透圧差が逆転すると(i)、セル B は吸水し、体積が回復していく。セル A が完全に融解した後も浸透圧差は解消せず(j)、水分流入が継続し、最終的にセル B は等張状態へ戻る(k)。

魚肉組織を上述のセル要素の集合体で近似する。解析は、 $2N$  個のセル要素からなる組織体（長さ  $2L$ ）が雰囲気温度  $T_{\text{cool}}$  のもとで両端冷却した後、雰囲気温度  $T_{\text{heat}}$  で解凍する場合について行った。セル要素の番号を表面から順に  $j=1\sim N$  とする。凍結過程はセル要素内外の凍結の有無により 5 つの stage に区分される。各 stage の凍結固相率  $f$  は

溶質保存式 (式(1),(2)) と各セル内の溶液の凍結曲線 ( $C_A=g_A(T)$ ,  $C_B=g_B(T)$ ) を用いると温度の関数として導出される. 各セルの体積率 $\phi$ は, 式(3)で示される浸透圧差を駆動力とする水分移動により決定される. ここで,  $S$  は表面積,  $\Pi$ は浸透圧,  $V_{cell}$ はセル要素の体積,  $K_B$ は膜透過係数である. 熱伝導方程式は各 stage での固相率 $f_n$ の時間変化を発熱項として組み込んだ式(4)となる.  $\rho$ は密度,  $C$ は比熱,  $L_H$ は凝固潜熱,  $\lambda$ は熱伝導率である.

[溶質保存]

$$[\text{セル A}] \quad C_A^j \phi_A^j (1 - f_A^j) = C_{A,i} \phi_{A,i} \quad (j=1 \sim N) \quad (1)$$

$$[\text{セル B}] \quad C_B^j \phi_B^j (1 - f_B^j) = C_{B,i} \phi_{B,i} \quad (j=1 \sim N) \quad (2)$$

[細胞膜を通じた水分移動]

$$\dot{m}_B = - \left( \frac{d\phi_B}{dt} \right) = K_B S_B (\Pi_A - \Pi_B) / V_{cell} \quad (3)$$

[熱伝導方程式]

$$\left\{ (\rho C)_n - \rho_{ice} L_H \frac{df_n}{dT} \right\} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_{ice} L_H \dot{m}_B \quad (4)$$

(n=1~5)

### 3.3 解析結果

厚さ 5mm のキハダマグロの試料片を $-10^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ の気流で両端冷却した場合について, 試料中心部の温度の経時変化を図5に示す. 冷却曲線は3つの期間からなる. すなわち, 冷却により常

温から食品に含まれる水溶液の凝固点温度まで温度が低下する期間 (I), 水分の凍結が開始し, 凝固潜熱の放出に伴う熱的平坦部が現れる期間 (II), 大部分の水分が凍結し, 顕熱除去により再び温度低下する期間 (III) からなる. 解凍過程では, 顕熱による温度上昇の期間 (IV), 主に氷晶の融解に伴う熱的平坦部 (V), および氷晶が完全融解し, 顕熱により再び温度上昇する期間 (VI) が現れる. 気流温度が低いほど, すなわち冷却速度が速いほど熱的平坦部は短くなり, 最大氷結晶生成帯の通過時間が短くなる. 図中の実線は凍結・解凍モデルによる計算結果であり, 実験値と概ね一致しており, モデルの有効性が確認される.

細胞レベルでの凍結状態の経時変化の計算結果の一例を図6に示す. 図中の筋繊維の体積率 $\phi$ と凍結固相率 $f$ は組織体全体についての平均値を表示している. 緩速に冷却した図6(a)の場合には, セルB(筋繊維)の水分の大部分はセルA(筋織

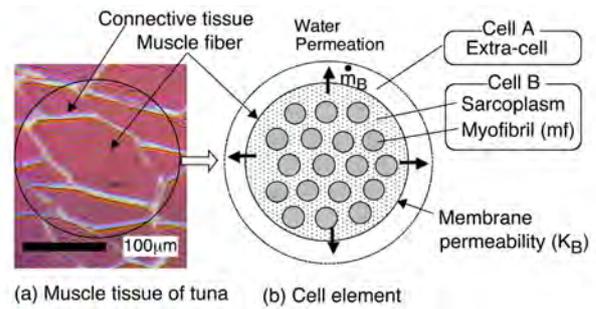


図3 筋繊維のセル要素モデル

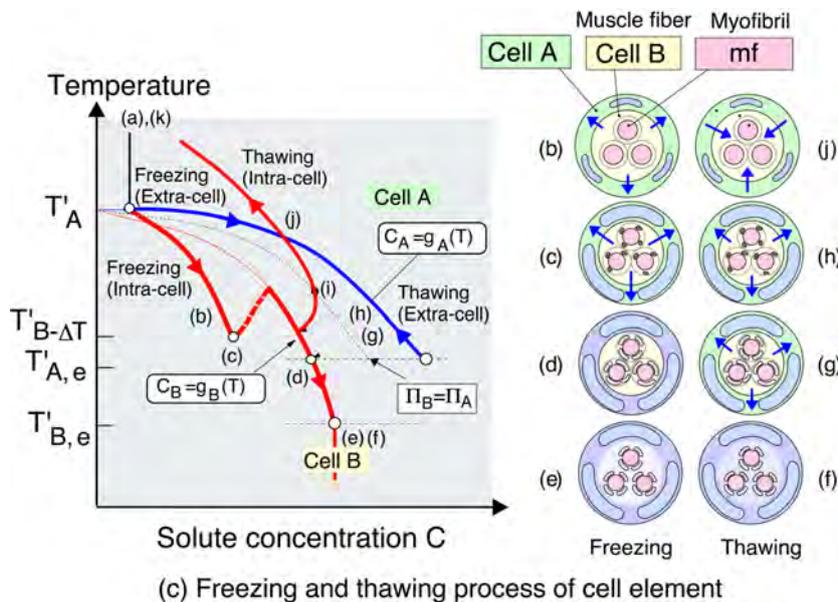


図4 セル要素の凍結・解凍過程

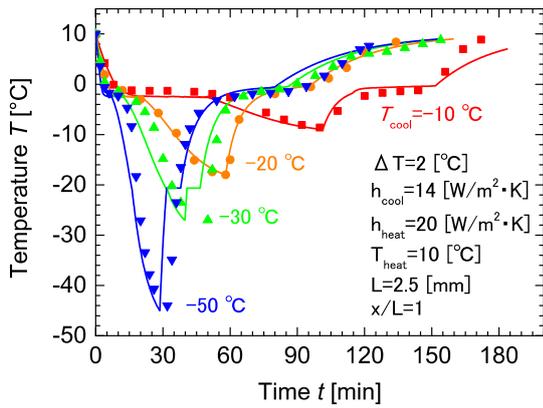


図5 マグロ魚肉の凍結・解凍過程における冷却・昇温曲線

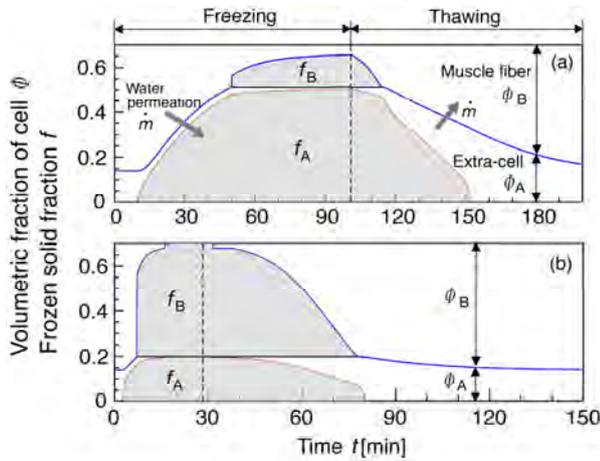


図6 マグロ魚肉の凍結・解凍過程における筋繊維内外の体積率の凍結固相率の経時変化 [(a) $T_{cool}=-10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{heat}=10^{\circ}\text{C}$ . (b) $T_{cool}=-50^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{heat}=10^{\circ}\text{C}$ .]

筋繊維外領域)へ流出し、そこで凍結する。すなわち、筋繊維外の優先凍結型となる。これは、水分移動の時間が十分に長く、その結果、セルBが脱水に伴う凝固点降下により核生成に必要な過冷却度に達せず、氷晶形成を回避するためである。これに対して急速冷却した図6(b)の場合、表層部では水分移動の時間が短いためセルAの優先凍結が継続せず、セルAの凍結固相率が小さい段階でセルBの凍結が開始する。すなわち、筋繊維内外の並列凍結型となる。次に、解凍過程では、緩速凍結した図6(a)の場合にはセルB内の氷晶の融解が先に完了し、浸透圧差による水分流入によりセルBは徐々に体積を回復する。すなわち、筋繊維

内の優先融解型となる。これに対して、急速冷却した図6(b)の場合、筋繊維内外の並列融解型となる。

#### 4. 食品の凍結・解凍における損傷機序

##### 4.1 ドリップ

凍結した食品を解凍すると、食品内の旨み成分や栄養素を含んだ水分が流出する。ドリップの発生は、凍結に形成された氷晶による細胞膜や組織構造の機械的損傷やタンパク質の変性による保水力の低下などの現象が複合して生じると考えられる。そこで、凍結による食品の品質劣化を表す指標として解凍後のドリップ量に着目し、冷凍・昇温操作との関係についての結果を紹介する。

キハダマグロを凍結・解凍後、試料から流出するドリップ量を解凍直後および5°Cで24時間冷蔵保存後の2通りについて測定した結果を図7に示す[14]。いずれの場合にも、気流温度が高くなるにつれて、すなわち冷却速度が遅くなるにつれてドリップ量が増加する傾向が見られる。また、24時間保存すると、未凍結、凍結のいずれの試料も保存前よりもドリップ量は増加する。これは、保存期間中にタンパク質の変性が進行することを示唆しており、タンパク質の保水力の低下がドリップ量の増加を引き起こしたと考えられる。

キハダマグロを種々の冷却速度および昇温速度のもとで凍結・解凍した後のドリップ量を圧出法

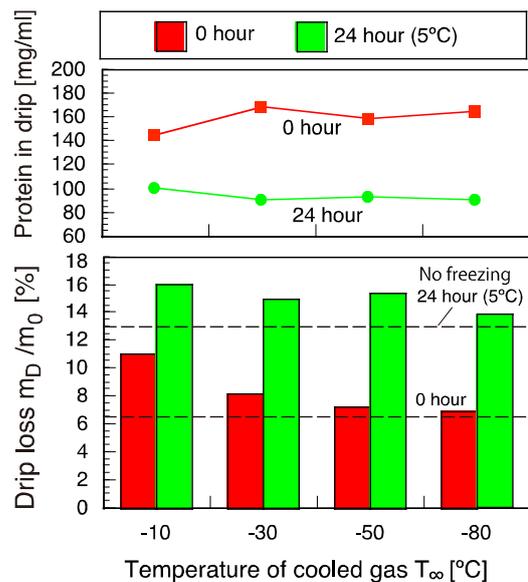


図7 解凍後のドリップ量と冷却気流温度の関係

で測定した結果を図8に示す。ここでドリップ量  $m_{D12}$  は試料質量で規格化して表示している。冷却気流温度 ( $T_{cool}$ ) が低くなるにつれてドリップ量が減少し、凍結損傷が軽減されることがわかる。これは冷却速度の増加に伴って筋繊維の脱水量が減少し、また筋繊維内外で形成される氷晶径が小さくなることで機械的・膠質的損傷が軽減されるためと考えられる。一方、解凍条件の影響については、解凍気流温度 ( $T_{heat}$ ) が高くなるとドリップ量の増大を招くことがわかる。したがって、急速凍結・低温解凍が望ましいと言える。また、冷却条件の影響は解凍条件によらずほぼ同一の傾向を示していることから、凍結過程の損傷と解凍過程の損傷がほぼ独立したものとして取り扱えるとの結果が得られた。

#### 4.2 凍結・解凍による損傷度の推定

ドリップ量と筋繊維脱水率の関係を調べた結果、凍結・解凍条件にかかわらず、両者の間には相関関係が成り立つことが見出された。これは筋繊維の脱水量は膜の変形量や筋繊維外の氷結晶の大きさを表し、筋繊維膜の機械的損傷の程度を間接的に表すためと理解される。そこで、4.2で述べたセル要素集合体モデルを用いて凍結・解凍損傷度の推定を行っている[13]。具体的には、各種の冷却条件に対するマグロの筋繊維の凍結状態を数値計算し、筋繊維の脱水率と温度履歴を求める。次に、ドリップ量と筋繊維脱水率の相関式を適用して凍結損傷に起因するドリップ量  $m_{D1}$  が算出される。また、解凍過程における  $0^{\circ}\text{C}$ ～終温までの区間での温度履歴をもとに高温気流に起因するドリップ量  $m_{D2}$  をアレニウス型の一次反応式から算出し、解凍過程の損傷度とした。両者の合計により損傷度を推算した結果を図8に実線で示す。冷却気温度が高くなるにつれて筋繊維の脱水量が増加し、 $m_{D1}$  の損傷度が増大する。実線の数値計算結果は実験値を概ね推定できており、本手法の妥当性が裏付けられる。また、計算結果から凍結過程と解凍過程で受ける損傷度の内訳を知ることが可能となり、凍結・解凍操作の最適化の指標として有用である。

#### 5. 高品質冷凍技術の開発にむけて

食品組織を高品質で凍結する手段として、過冷

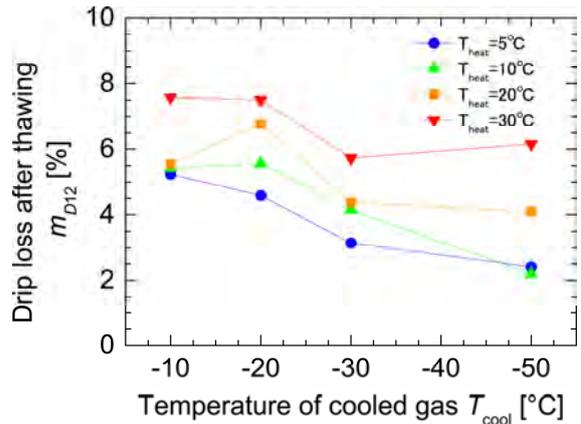


図8 解凍後の圧出ドリップ量と冷却・昇温操作の関係

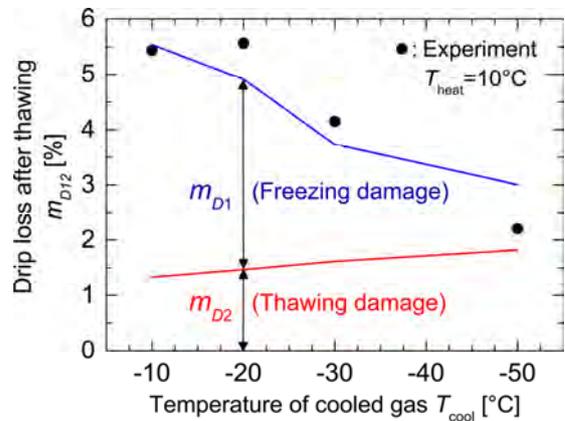


図9 凍結・解凍損傷によるドリップ量の推定

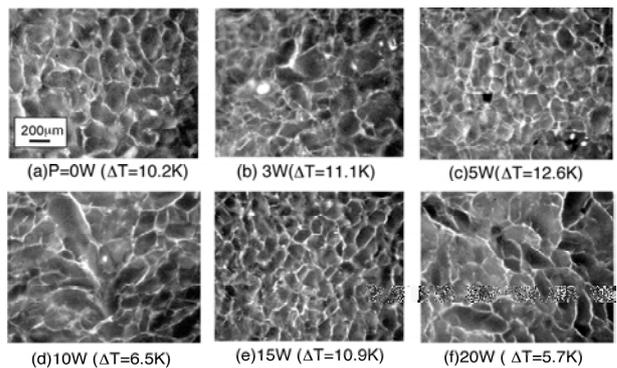


図10 超音波振動を付与した寒天ゲルの凍結状態

却状態の利用は有望である。著者らはその方策として、超音波振動の利用について検討している。図10は28kHzの超音波振動を付与しながら寒天ゲルを過冷却状態(過冷却度  $\Delta T$ )から凍結させた場合の氷結晶構造を観察した結果である[15]。5W

の超音波出力の照射下では氷結晶が微細化している。一方、大きな出力の超音波照射下では、超音波照射による過冷却解除の作用と音波吸収に伴う発熱作用等により氷結晶の肥大化を招くこともわかり、適切な超音波出力の選定が重要である。この他に、2 段冷却法を用いた過冷却凍結法が小山内・大河らによって検討されている[16]。

## 6. おわりに

食品凍結における損傷度を定量的に予測するため、筋繊維組織を対象に、マクロスコピックな伝熱、ミクロスコピックな細胞の挙動、さらには分子レベルで生ずる品質変化に起因するドリップの発生を連成した現象論の展開を示した。しかし、ここでの輸送現象論の解像度は細胞レベルであり、分子レベルの挙動は細胞レベルの挙動を媒介として、実験情報が組み込まれたに過ぎない。食味や食感などの変化を知る解像度に到達するには、食品内で生ずる高分子タンパク質等の状態変化を記述する反応モデルを組み込むことが必須であり、食品工学の分野との連携が益々重要となると考えられる。また、先行する生物学・医学分野での研究成果を積極的に取り入れ、安心・安全かつ省エネルギーな冷凍技術の開発が進展することが望まれる。

## 参考文献

- [1] 土屋隆英, 魚肉タンパク質の冷凍変性, 伝熱研究, **37-145** (1998) 43-51.
- [2] 多田幸生, 中谷博行, 瀧本昭, 林勇二郎, 食品凍結における3次元ミクロ構造と損傷機序, 第41回日本伝熱シンポジウム講演論文集, paper No.I324 (2004).
- [3] 都甲株, 相良康行, 田畑みずほ, 工藤謙一, 樋口俊郎, 生牛肉試料内3次元氷結晶構造計測システムの開発, 日本冷凍空調学会論文集, **19-4**(2002) 375-380.
- [4] Ishiguro, H. and Horimizu, T., Three-dimensional microscopic freezing and thawing behavior of biological tissues revealed by real-time imaging using confocal laser scanning microscopy, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **51**(2008) 5642-5649.
- [5] 鶴田隆治, 川水努, 野中功, 増岡隆士, 玉ねぎの表皮組織の凍結機構に関する実験的研究, 日本機械学会論文集, **62-598**(1996) 2446-2451.
- [6] 上野茂昭, 誘電分光を用いた氷結晶特性の推定, 伝熱, **55-232**(2016) 36-41.
- [7] Pham, Q. T., Modeling heat and mass transfer in frozen food: a review, *International Journal of Refrigeration*, **29**(2006) 879-888.
- [8] Bevilacqua, A., Zaritzky, N. E. and Calvelo, A., Histological measurements of ice in frozen beef, *Journal of Food Technology*, **14**(1979) 237-251.
- [9] Bomben, J.L. and King, C.J., Heat and mass transport in the freezing of apple tissue, *Journal of Food Technology*, **17**(1982) 615-632.
- [10] Woinet, B., Andrieu, J., Laurent, M. and Min, S.G., Experimental and theoretical study of model food freezing, part II. Characterization and modelling of the ice crystal size, *Journal of Food Engineering*, **35**(1998) 395-407.
- [11] 御木英昌, 鹿児島大学水産学部紀要, **33-2** (1987) 155-226.
- [12] 渡辺学, 最新の食品解凍技術, 伝熱, **55-232** (2016) 29-35.
- [13] Tada, Y., Naka, N. and Onishi, H., Quantitative prediction of freeze-thaw damage in food by microscale heat and mass transfer model, *Proceeding of The 27th International Symposium on Transport Phenomena*, (2016), paper No. ISTP27-137.
- [14] 多田幸生, 吉田勇太, 瀧本昭, 大西元, 食品凍結におけるミクロ挙動と損傷の連関(ドリップの発生機構の検討), 2007年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2007) 383-386.
- [15] Tada, Y., Satou Y., Kurokaw. M., Takimoto, A. and Onishi, H., Effects of ultrasonic irradiation on ice formation in biological tissue, *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference*, **1**(2014) 75-81.
- [16] 小山内泰亮, 森義樹, 牧内俊樹, 大河誠司, 宝積勉, 数値計算モデルによる食品凍結時の過冷却解消予測および過冷却状態維持のための冷却条件の検討, 日本冷凍空調学会論文集, **32-1**(2015) 81-93.

## 野菜の調理過程および最適加熱時間の予測法について Prediction of Process and Optimum Cooking Time of Vegetables during Cooking

香西 みどり (お茶の水女子大学)  
Midori KASAI (Ochanomizu University)  
e-mail: kasai.midori@ocha.ac.jp

### 1. はじめに

加熱調理の目的は食品を加熱して適度な状態にすることにある。そのために必要な加熱時間、すなわち最適加熱時間は食品によって異なる。このため加熱操作の最適条件は調理のコツやカンと呼ばれて経験的に知られている。しかし、食品の調理加工において大量の食品を連続的に処理したり、一定の品質を得るためには理論的に加熱時間を予測する方法が必要であり、消費エネルギーの点からも有用である。

一般に植物性食品を加熱すると程度の差はあれ沸騰までの温度上昇期に硬化が起こり、その後に軟化が起こる。加熱による軟化が顕著なため通常は硬化に気が付かないが、加熱した植物性食品の組織強度保持には加熱初期に起こる硬化が関わっている。野菜も加熱によって軟化と同時に硬化が起こり、軟化は主に 80℃以上で、硬化は主に 50~80℃で起こる。このように野菜の硬さの変化は複雑であり、また調理中の加熱温度も一定ではなく野菜内部の温度や硬さの予測も複雑となる。実際の調理では何℃で何分加熱するか、またどのような条件で加熱すれば硬さをコントロールできるかという情報が必要である。

本稿ではこのような観点から野菜の最適加熱条件を予測することを目的として現象を数量的に把握するためにまず扱い易い軟化解析に着目し、次に硬さの予測の精度をあげるため硬化も考慮した軟化・硬化解析を行った研究の流れを述べたい。

### 2. 高温域における軟化の予測

#### 2.1 一次反応速度式の適用[1]

小さいサイズの野菜を沸騰水で加熱する場合は、試料内部の温度上昇が速やかなので 50~80℃で起こる硬化の影響が少ない。そこで、まず 80℃以上の高温域での軟化について解析を行った。1cm 角のジャガイモを 85~99.5℃で加熱すると、いずれの温度も加熱初期にいったん生よりも硬くなるが、温度が高いほどその影響が小さく、見かけ上軟化が進行す

る。そこで近似的にこの温度域では主に軟化が起こるとみなし、軟化に一次反応速度式を適用した。多くの自然現象にみられる一次反応は変化の速度がそのときの物質の濃度に比例する。ここで濃度を硬さに置き換え、式(1)の無次元化した硬さを軟化率として、軟化を式(2)の一次反応速度式で近似した。一定温度で加熱したときの一次反応プロットをとって直線性が得られれば一次反応速度式を適用できる。この直線回帰式の傾きがその温度における軟化の速度定数である。

$$x = \frac{y_0 - y}{y_0 - y_e} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

$x$  は軟化率、 $y_0$  は硬さの初期値 (N)、 $y$  は時間  $t$  における硬さ (N)、 $y_e$  は硬さの平衡値 (N) を表す。

$$\frac{dx}{dt} = k_s(1 - x) \quad (2)$$

$x$  は軟化率、 $t$  は時間 (min)、 $k_s$  は軟化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ) を表す。

#### 2.2 種々の野菜の軟化の速度定数[2]

11種類の野菜の薄片試料 ( $1 \times 1 \times 0.5$ )  $\text{cm}^3$  を 85~99.5℃の各一定温度で加熱したときの硬さの変化から各温度における軟化の速度定数  $k$  を求め、 $k$  の対数を絶対温度の逆数に対してプロットし、その一次回帰式の傾きから軟化に対するみかけの活性化エネルギー  $E$  とさらに式(3)のアレニウスの式における頻度因子  $A$  が算出できる。軟化の速度定数の温度依存性をアレニウスの式で表すことで、4.1 で予測される加熱中の試料温度に対応する軟化の速度定数が算出され、式(4)により軟化過程を予測できる。

$$k = A \exp(-E/RT) \quad (3)$$

$k$  は速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ )、 $A$  は頻度因子、 $E$  はみかけの活性化エネルギー (J/mol)、 $R$  は気体定数 8.314

[J/(mol·K)],  $T$ は絶対温度 (K) を表す.

$$x=1-\exp(-kt) \quad (4)$$

$x$ は軟化率, $k$ は速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ), $t$ は加熱時間 (min) を表す.

11種の野菜のうち、ナスは空隙率が高いため軟化を一次反応に近似できなかつたが、他の野菜は適用でき、99.5°Cにおける軟化の速度定数 $k_{99.5}$ は大きい順に次のようになった。単位は $\text{min}^{-1}$ である。  
カブ(1.053)>西洋カボチャ(0.958)>サツマイモ(0.912)>日本カボチャ(0.606)>サトイモ(0.452)>アスパラガス(0.305)>ジャガイモ(0.300)>ニンジン(0.275)>ダイコン(0.204)>ゴボウ(0.023)

### 2.3 調理の目標としての適度な硬さの数値化[2]

最適加熱時間を予測するためには、調理のゴールとなる適度な可食状態を数値化する必要がある。そこで99.5°Cで加熱した試料の硬さの経時変化の機器測定による硬さの値と官能評価による評点を対応させ、適度な煮熟度に対応する硬さの値を求めた。この最適軟化率に至るまでの小片試料の最適加熱時間は式(2)を変形させた式(5)より計算できる。

$$\theta = -(1/k_{99.5})\ln(1-X) \quad (5)$$

$\theta$ は最適加熱時間(min),  $k_{99.5}$ は99.5°Cにおける軟化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $X$ は最適軟化率を表す。

2.2で述べたカブは4.3分、ゴボウは10.5分となり、他の野菜の最適加熱時間はこの範囲にある。いわゆる野菜の煮えやすさは、大きさが同じであれば2.2で示した軟化の速度定数と各試料の最適軟化率から決定され、さらに形状が異なれば試料の温度上昇速度も関わってくる。

### 2.4 軟化率 $x$ による軟化過程の予測

軟化率の経時変化から野菜の軟化過程が予測でき、速度定数は2.2に示した方法で求められる。ダイコンおよびニンジンを20°C、湿度60%で3~7日間貯蔵すると重量が約20%減少し、軟化速度は約75%に低下して最適加熱時間は2~3分間長くなることがわかった[3]。また根菜類のゆでもので消火後の水温変化がわかれば下降の間の軟化が予測でき、消火時には軟化不足で硬くても、100°Cから70°Cまでの間に適度な硬さになるような最短沸騰継続時間を計算により設定できる[4]。さらに平板状は加熱時間が短いだけでなく体積が大きくても加熱時間がさほど変わらない形[5]、内蓋は余熱利用を効果的にするなど

の省エネルギー的条件の検討[6]も示した。

## 3. 低~高温域における硬化・軟化の予測[7]

### 3.1 硬化と軟化の機構

1. はじめに で述べたように野菜は加熱によって軟化と同時に硬化が起こるため、水から加熱したり、試料サイズが大きい場合のように試料の温度上昇が緩慢なときは硬化も考慮した硬さの解析が必要となる。ここでは軟化のみの解析で適用した経験的な一次反応速度式では対応できず、硬化と軟化の機構に基づいた物理モデルが必要なる。硬化は細胞間隙のペクチンが組織強度を高めることで起こり、50°C以上の加熱で細胞膜の半透性が消失し、細胞内のKイオンなどが細胞壁付近に移動し、ペクチンメチルエステラーゼを活性化させてペクチンの脱エステル反応とそれに続くカルシウムイオンとの架橋結合の生成が主な原因[8]とされている。一般に酵素反応は80°C以上では熱失活する。一方、80°C以上ではペクチンの $\beta$ 脱離反応[9]が起こり、このため細胞分離が起こりやすく軟化の原因とされている。

### 3.2 硬化と軟化の物理モデル

硬化・軟化の機構にいずれもペクチンが関わっており、硬化は酵素反応、軟化は非酵素反応によるとしてこれに基づいたペクチンのモデルをたてた。このモデルではペクチンが加熱によって異なる形になる、ペクチンという物質が硬さを決定するという2つの仮定を行った。前者は加熱によってその野菜のペクチンが硬化ペクチン、軟化ペクチン、未変化ペクチンに変化し、3つのペクチンモデルの総和は常に一定の値とする式(6)のペクチンの保存式である。後者は硬化ペクチン、軟化ペクチン、未変化ペクチンという物質が試料の硬さに対してそれぞれある割合で影響し、その和が全体の硬さを決定するという式(7)のペクチンの硬さへの変換式である。

$$P_0 = P + P_h + P_s \quad (6)$$

$$y = aP + bP_h + cP_s \quad (7)$$

$P_0$ は初期ペクチン(g/g),  $P$ は未変化ペクチン(g/g),  $P_h$ は硬化ペクチン(g/g),  $P_s$ は軟化ペクチン(g/g),  $y$ は硬さ(N),  $a, b, c$ はそれぞれ $P, P_h, P_s$ の硬さの係数 [N/(g/g)] を表す。

これらの式は複雑な現象を簡単に扱うために硬化

と軟化は独立に起こるとしている。後述するように厳密には独立ではないが近似的扱いが適用される範囲を明らかにすることで適用できると考えた。各ペクチンモデルの生成速度式を以下に示す。

$$\frac{dP_s}{dt} = k_s P \quad (8)$$

$$\frac{dP_h}{dt} = k_h EP \quad (9)$$

$$\left( \frac{dE}{dt} = -k_E E \quad E = E_0 \exp(-k_E t) \right)$$

$$\frac{dP_h}{dt} = k_h E_0 \exp(-k_E t) P \quad (10)$$

$t$  は時間 (min),  $k_s, k_h$  は軟化, 硬化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $E_0$  は  $t=0$  における酵素濃度 (g/g),  $k_E$  は酵素失活の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ) を表す。

式(6)~(10)を連立させて数学的に変換すると式(11)に示す硬さの予測式が得られ, 右辺の各項を別々に計算して  $Y$  で表される硬さを算出できる。

$$Y = a \left( \frac{P}{P_0} \right) + b \left( \frac{P_h}{P_0} \right) + c \left( \frac{P_s}{P_0} \right) \quad (11)$$

各項のペクチンモデルの濃度変化を予測する式の詳細は紙面の都合で省略するが, 本稿の内容をまとめた拙著(10)を参考にされたい。

### 3.3 硬さの予測式の実験的検証

硬化や軟化が起こる温度範囲で実際に試料を加熱して硬さの経時変化から速度定数を測定し, 硬化および軟化の速度定数の温度依存性を式(3)のアレニウスの式で表しておく。また最終的にペクチン濃度を硬さに変換するときに必要なペクチンモデルの硬さ係数  $a, b, c$  については  $a$  は試料の硬さの初期値,  $b$  は硬化の平衡値,  $c$  は軟化の平衡値に相当するので対応する温度範囲で測定する。

図1に示すようにジャガイモを例にとると式(11)を用いて  $60 \sim 99.5^\circ\text{C}$  で加熱した  $1\text{cm}$  試料の硬さの予測値とテクスチュロメーターで測定した硬さの実測値はおおむね一致した。特に高温域と低温域ではよく一致したが,  $80 \sim 90^\circ\text{C}$  の中間域では適度な硬さを過ぎると一致度が低くなった。これは物理モデルが

軟化と硬化を独立に扱ったためと考えられたが, ジャガイモの適度な硬さである  $8\text{N}$  付近[2]を通過する範囲で本予測式が適用できるとみなした。

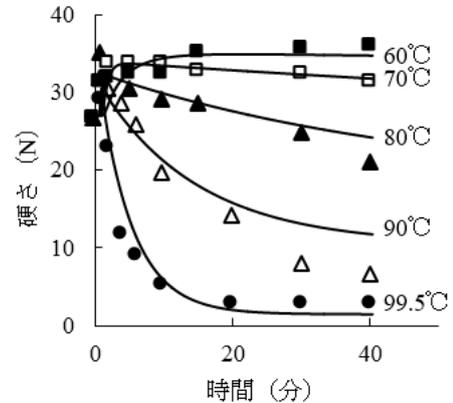


図1 硬さの予測式による小片ジャガイモの硬さの予測値と実測値の比較

●, △, ▲, □, ■ 実測値 — 予測値

## 4. 試料温度の予測

### 4.1 一定温度加熱における予測[1]

一定形状の試料を一定温度で加熱するときは熱伝導微分方程式の解析解を使うことで, 加熱中の試料の温度変化や温度分布を算出することができる。直方体の場合は式(12)が3次元熱伝導微分方程式, 式(13)がその解析解である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (12)$$

$t$  は時間(s),  $T$  は温度 (K),  $\alpha$  は熱拡散率( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $X, Y, Z$  は中心からの距離 (cm) を表す。

$$\begin{aligned} \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} = & 8 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n+p}}{\left( m + \frac{1}{2} \right) \left( n + \frac{1}{2} \right) \left( p + \frac{1}{2} \right)} \\ & \times \exp \left[ - \left( \frac{\left( m + \frac{1}{2} \right)^2}{X_1^2} + \frac{\left( n + \frac{1}{2} \right)^2}{Y_1^2} + \frac{\left( p + \frac{1}{2} \right)^2}{Z_1^2} \right) \pi^2 \alpha t \right] \\ & \times \cos \left( m + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi X}{X_1} \cos \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi Y}{Y_1} \cos \left( p + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi Z}{Z_1} \end{aligned} \quad (13)$$

$t$  は時間(s),  $T$  は温度 (K),  $X_1, Y_1, Z_1$  は1辺の長さの  $1/2$  (cm),  $m, n, p$  はそれぞれ  $x, y, z$  座標,  $X,$

$Y, Z$  は中心からの距離 (cm),  $\alpha$  は熱拡散率 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) を表す. 根菜類の  $\alpha$  は  $0.0015\text{cm}^2/\text{s}$ [11]を用いた.

熱伝導微分方程式は固体内部を熱が移動するとき、場所とともに、また時間とともにどのように熱が伝わっていくかを表現しているの、解析解を用いて試料内の任意の場所の温度の経時変化が予測できる. コンピューターのプログラム計算では 10 回繰り返した場合は 100 回のそれとほとんど変わらないことを確認し、予測値と実測値がほぼ一致した[1]. 式(13)の右辺の指数部分にあるように、大きさが  $n$  倍になると同じ温度になるのに  $n$  の二乗倍かかるという関係がある. 図 2 に沸騰水加熱時の 1~3cm 角ジャガイモの中心温度の経時変化を示した. 図の帯は  $50^\circ\text{C}$  から  $80^\circ\text{C}$  を通過する時間帯であり、この時間も大きさが  $n$  倍になると  $n^2$  倍となる. すなわち試料が大きくなるほど硬化の影響を受ける時間が二乗で長くなることになる. 調理で切り方をそろえるというのはこのように温度履歴への影響が大きいためである.

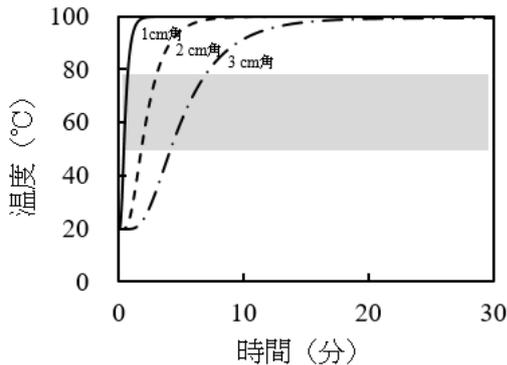


図 2 ジャガイモ中心温度変化のシミュレーション  
 図中の帯は硬化が起こる温度帯 ( $50\sim 80^\circ\text{C}$ )  
 —, 1 cm 角 ; - - - 2 cm 角 ; - · - · -, 3 cm 角

#### 4.2 水温が変化する加熱における予測[4][12]

一般に根菜類は水から加熱するとよいといわれ、沸騰水加熱より均一になるためとされている. また、消火後、蓋を取らずに放置することで鍋内の水温が下がりにくく  $100^\circ\text{C}$  から軟化に関わる温度を過ぎるまでの間の余熱が利用できる. このように沸騰までや消火後も含む調理中の水温変化に対応した試料内部温度の予測を行うために差分法を用いることとし、3次元熱伝導微分方程式を近似する差分方程式(14)を用いて数値解析を行った.

$$T_{m,n,p}^{j+1} = a\Delta t \left( \frac{T_{m+1,n,p}^j + T_{m-1,n,p}^j}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1,p}^j + T_{m,n-1,p}^j}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{m,n,p+1}^j + T_{m,n,p-1}^j}{(\Delta z)^2} \right) + \left[ 1 - \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right) 2a\Delta t \right] T_{m,n,p}^j \quad (14)$$

$T$  は温度 (K),  $m, n, p$  はそれぞれ  $x, y, z$  座標,  $j$  はある特定の時刻,  $X, Y, Z$  は中心からの距離 (cm),  $\alpha$  は熱拡散率 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) を表す. ここで試料の表面温度は水温の実測値を用いることとし、試料の組織構造や成分は均一とみなした.

直方体試料を 1mm 間隔で縦横に区切り、外側から順々に各節点ごとにある時間における温度を計算で出していき、時間間隔を 1 秒として、試料温度の時間変化を予測した. 実際にジャガイモを水から加熱する場合と沸騰水で加熱する場合について差分法による試料中心温度の予測値と実測値を比較するとよく一致した[6]ことから、いずれの加熱の場合も差分法で試料温度を予測することとした.

### 5. シミュレーションによる野菜の硬さと最適加熱時間の予測

#### 5.1 水温上昇速度が異なるジャガイモの加熱における軟化解析と軟化・硬化解析[12]

1cm 角のジャガイモを水温上昇速度  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  と  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  で加熱したときの試料中心部の硬さの予測を 2 の軟化解析と 3 の軟化・硬化解析で比較し図 3(a)(b)に示した.  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  は沸騰まで約 4 分間であり、中心温度上昇も速く、硬化の影響が小さいので図 3a では点線で示した軟化解析と実線で示した軟化・硬化解析の結果はほとんど差がなく、実測値とほぼ一致している. これに対して図 3b の  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  は沸騰まで約 40 分と長く硬化の影響をより強く受けているため加熱初期にいったん硬くなってから軟化している. このとき軟化解析と軟化・硬化解析による硬さの計算値の差が大きく、実測値は軟化・硬化解析のほうがよく一致している. 適度な硬さは 8N 付近であるから 50 分が最適加熱時間である. このことから試料サイズが同じでも水温上昇速度が小さい場合は軟化解析では対応できず、硬化も考慮する必

要があることがわかる。また水温上昇速度が速くても試料サイズが大きい場合は中心温度上昇が遅くなるのでやはり軟化・硬化解析が必要である。

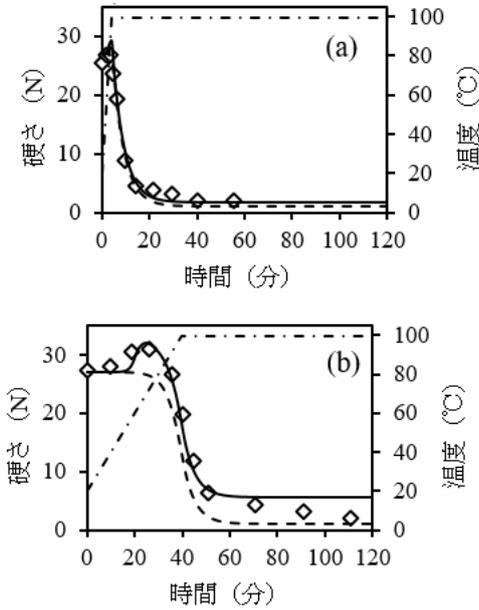


図3 水温上昇速度が20°C/min (a) と2°C/min (b) のときのジャガイモの硬さの予測値と実測値  
 - - - - , 水温 ; - · - · - , 軟化解析による硬さの予測値 ; ——— , 軟化・硬化解析による硬さの予測値

5.2 消火後の余熱利用有無の比較[13]

3cm 角ジャガイモを計算モデルとして差分法による中心部の温度と硬さの予測式を用いた硬さの計算値、さらに中心を通る試料断面の硬さの分布図を図4(a)(b)に示した。水から加熱して余熱を利用する場合(a)と利用しない場合(b)の沸騰継続時間を計算により求めた結果、それぞれ4.5分、20.0分となり、(a)は余熱を利用することで沸騰継続時間が大幅に短縮され、試料内部の硬さも均一に仕上がることが視覚的にも示された。沸騰継続のみの場合も同様にシミュレーションすると、加熱時間は22.2分であり、試料断面の硬さ分布は水から加熱して余熱なしとほぼ同様であったことから、試料投入時の温度よりも余熱利用の有無の影響が大きいことが示された。図4(a)では消火時は生より硬い状態で、余熱利用53.7分間で適度な硬さとなり、この間の軟化は沸騰継続にすると17.7分間加熱に相当することになる。

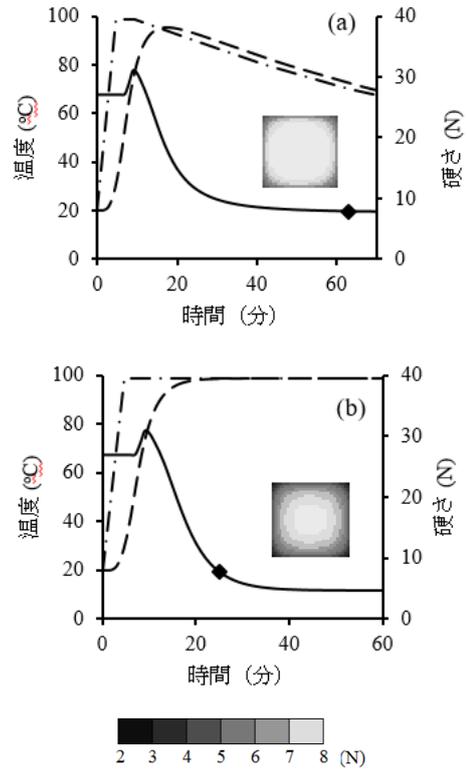


図4 消火後の余熱を利用した場合 (a) と余熱なし (b) のジャガイモの中心温度と硬さの経時変化  
 - - - - , 水温 ; - · - · - , ジャガイモ中心温度の予測値 ; ——— , ジャガイモ中心部の硬さの予測値

5.3 硬さと塩味の同時シミュレーション[14]

3次元の熱伝導微分方程式は拡散の方程式と類似した形をとっており、調味液中で加熱したときの調味料成分の拡散についても差分法を適用できる。食塩水加熱における食塩濃度の変化について2cm角ダイコンを計算モデルとして予測した結果と硬さの予測値を図5に示した。硬さは中心部、食塩濃度の予測は試料を体積要素に分割して各要素の食塩濃度を予測した値を用いて、全体の平均濃度を求めた。

水温変化をもとに予測した試料内部温度は共通して使用できるので、まず試料温度の経時変化を予測し、次に対応する硬さと食塩の拡散の予測を行い、硬さと食塩濃度の適度なところを調理条件として設定する。余熱を利用することで水温が下がったときの硬さの変化はほとんどなくなるので、食塩の拡散に必要な時間を延長すればよい。官能評価による適度な塩分濃度を0.7%とすると図5では水温80°C付近で取り出すと硬さ、塩味ともに適度と予測される。

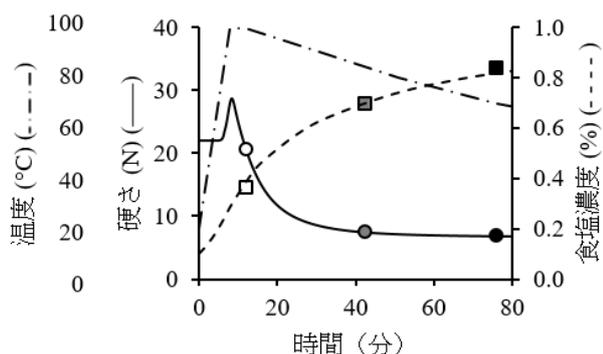


図 5 2cm 角ダイコンを水から加熱し余熱利用したときの中心部の硬さと試料全体平均食塩濃度の変化

---○---, 水温; —●—, 中心部の硬さ;  
---□---, 全体平均食塩濃度

## 6. おわりに

本研究は理論的にジャガイモの加熱時間を予測することに始まり、野菜の調理には調味も必要であることから加熱中の野菜内部の温度と対応する軟化・硬化の速度定数および試料中の食塩の拡散係数、さらに官能評価と機器測定による硬さと塩味の適度な状態を組み合わせ、最適調理条件の予測を行うに至っている。この原点に試料の温度を予測するための熱伝導解析があり、試料表面の実測値があれば水からでも沸騰からでも、また消火後も試料内の温度分布が予測でき、対応した硬さや塩分濃度の分布も予測できる。温度を制御することは仕上がり状態を制御することでもあり、省エネルギー的にも有効である。加熱中の温度分布が視覚的に把握できる調理機器が将来登場することを期待している。

最後に、これまで野菜の最適加熱時間の予測的研究と一緒に取り組んできたお茶の水女子大学調理学研究室の皆様、並びに直接間接にご協力いただいた皆様に心より謝意を表します。

## 参考文献

[1] 香西みどり, 島田淳子, 煮熟によるジャガイモの軟化度と最適加熱時間の予測, 日本食品工業学会誌, 32(1985), 360-364.  
[2] 松裏容子, 香西みどり, 畑江敬子, 島田淳子, 野菜の最適加熱時間の予測, 日本食品工業学会誌, 36, 97-102 (1989).

[3] 香西みどり, 中川弥子, 谷澤容子, 畑江敬子, 島田淳子, 根菜類の収穫月, 鮮度および部位が最適加熱時間の予測に及ぼす影響, 日本食品工業学会誌, 39, 41-48 (1992).  
[4] 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子, 非等温加熱における最適加熱時間の予測, 日本家政学会誌, 49, 373-381 (1998).  
[5] 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子, シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響, 日本調理科学会誌, 32, 296-303 (1999).  
[6] 香西みどり, 長尾慶子, 松裏容子, 平野悦子, 島田淳子, 加熱調理における省エネルギー的調理条件の検討, 家政学雑誌, 37, 533-539 (1986).  
[7] Kasai, M., Hatae, K., Shimada, A. and Iibuchi, S., A Kinetic Study of Hardening and Softening Processes in Vegetable during Cooking, Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, 41, 1994, 933-941.  
[8] Bartolome, L. G., Johan, E. H., Firming of Potatoes, Biochemical Effects of Preheating., J. Agric. Food Chem., 20, 266-270(1972).  
[9] Albersheim, P., Neukom, H., Deuel, H., Splitting of Pectin Chain Molecules in Neutral Solution, Arc. Biochem. Biophys., 90, 46-51 (1960)  
[10] 香西みどり, 加熱調理のシミュレーション, 光生館 (2013).  
[11] 久保田清, 藤本真紀子, 鈴木寛一, 高崎かほる, 保坂秀明, 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究, 日本食品工業学会誌, 28, 68-73 (1981).  
[12] 遠藤瑤子, 今泉有喜, 香西みどり, シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす水温上昇速度の影響の解析, 日本調理科学会誌, 45, 2012, 403-412.  
[13] 遠藤瑤子, 香西みどり, 温度制御型 IH 調理システムを用いた根菜類の最適調理条件の予測, 日本家政学会誌, 64, 125-135 (2013).  
[14] 遠藤瑤子, 藤井東奈, 香西みどり, 硬さと塩味を考慮したシミュレーションによる根菜類の最適加熱条件の設定, 日本調理科学会誌, 46, 31-38 (2013).

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
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))	2016.9.21 (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 24(水) ～ 26(金)	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)	2017.1.13	2017.3.10	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 Fax: 04-7136-4647 E-mail: symp2017@htsj-conf.org	2016年 10月号

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
2017年					
1月 26(木) ～ 27(金)	第45回ガスタービンセミナー:「ガスタービンおよび航空エンジンの最新技術動向」 (開催場所: 本田技研工業株式会社和光本社ビル)			公益社団法人 日本ガスタービン学会 http://www.gtsj.org/	
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))	2016.10.27	2016.12.14	実行委員長 高橋厚史 (九大) Tel: 092-802-3015 E-mail: takahashi@aero.kyushu-u.ac.jp	
7月 10(日) ～ 2019年 12月 末日	EU Green Gateway to Japan (開催場所: 東京)			日本能率協会 産業振興センター Tel: (03)3434-0998, Fax:(03)3434-8076 E-mail: noriyasu_kamioki@jma.or.jp	
8月 21(月) ～ 24(木)	4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control (FSSIC2017) (開催場所: 日本大学理工学部 (駿河台校舎))	2017.1.15	2017.4.1	実行委員長 木村 元昭 (日大) Tel: (03)3259-0750, Fax:(03)3293-8254 E-mail: kimura@mech.cst.nihon-u.ac.jp	

## 第 54 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 54 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 飛原英治  
幹事 党 超鋺

開催日：平成 29 年 5 月 24 日（水）～5 月 26 日（金）  
会場：大宮ソニックシティ (<https://www.sonic-city.or.jp/>)  
所在地 〒330-8669 埼玉県さいたま市大宮区桜木町 1-7-5 電話 048-647-4558  
アクセス JR・東武野田線大宮駅より徒歩約 3 分

講演申込締切：平成 29 年 1 月 13 日（金）  
講演論文原稿提出締切：平成 29 年 3 月 10 日（金）  
早期参加申込締切：平成 29 年 4 月 7 日（金）

ホームページ URL：<http://htsj-conf.org/symp2017/>

### 【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
  - a) 一般セッション（口頭発表）
  - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 54 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

### 【参加費等】

- 参加費の申込時期  
早期申込：4 月 7 日まで  
通常申込：4 月 8 日～5 月 10 日、会期中（5 月 11 日から会期前日までは申込を受け付けません）
- シンポジウム参加費

会員一般	早期申込：10,000 円	通常申込：12,000 円
非会員一般	早期申込：14,000 円	通常申込：16,000 円
会員学生	早期申込：5,000 円	通常申込：6,000 円
非会員学生	早期申込：6,000 円	通常申込：7,000 円
本会会員でない学生 で登壇者	早期申込：7,000 円	（3 月 10 日までに申し込んでください）

※講演者（登壇者）は日本伝熱学会会員（学生会員、賛助会員、特別賛助会員を含む）に限ります。  
※講演をするために日本伝熱学会学生会員（H29 年度）になる場合、参加費は 7,000 円の割引価格となります。

※特別賛助会員は 1 口につき 3 名、賛助会員は 1 口につき 1 名、参加費が無料になります。

※会員とは、日本伝熱学会会員のほか、協賛学協会の会員を含みます。

※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。

- 講演論文集電子版  
講演論文集電子版のみの販売：5,000 円（シンポジウム終了後の販売となります。）

### 【懇親会】

- 開催日：平成 29 年 5 月 25 日（木）
- 会場：大宮ソニックシティ

- 参加費：  
一般 早期申込：8,000 円，通常申込：10,000 円，同伴配偶者無料  
学生 早期申込：4,000 円，通常申込：5,000 円

#### 【参加費等の支払い方法】

- **会場以外での参加費支払いは、シンポジウムのホームページからのクレジットカード決済のみになります。5月10日までに参加登録された方には事前に参加者キット（講演論文集電子版、講演プログラム、参加票、領収書など）をお送りします。**

シンポジウムのホームページから参加登録と参加費の支払いを行ってください。支払いはホームページからクレジットカード決済のみを受け付けます。参加費等の支払いをもって「申込完了」とします。

- 講演者（登壇者）が日本伝熱学会会員（学生会員，賛助会員，特別賛助会員を含む）でない場合，同サイトで入会申し込みと会費納付を行ってください。
- 4月7日以降5月10日までは，通常申込扱いでウェブからの参加登録および支払いを受け付けます。
- 5月10日までに参加登録を行うと，当日受付に寄る必要がありませんので，できるかぎりウェブからの登録および支払いを行ってください。
- 例年のように，シンポジウム当日の参加申し込みもできます。

#### 講演申込方法，講演論文集，執筆要綱

##### 【研究発表申込方法】

- 講演者（登壇者）は日本伝熱学会会員（学生会員，賛助会員，特別賛助会員を含む）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は，論文原稿提出までに，会員申し込みと会費納付を行ってください。
- 原則としてウェブによる申込に限らせていただきます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力してください。ウェブによる申込ができない場合には，実行委員会事務局にお問い合わせください。
- 申込の際に，一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択してください。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞セッション（第54回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。
- 発表申込時に，論文要旨（日本語で200～250字）を入力してください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- 講演発表申込は，講演者1名につき1題目とさせていただきます。
- 講演の採否およびセッションへの振り分けは，実行委員会にご一任ください。

##### 【講演論文集電子版】

- 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお，講演論文集電子版は参加できなかった本会会員にも希望があれば配布しますので，シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込みください。
- 講演論文の長さは1題目当たりA4サイズで4～6ページです。講演論文の作成様式は，1段組み×50字×46行です。カラーの使用が可能で，ファイル容量は最大で2MBまでとし，動画は含まないものとします。
- 講演論文原稿は，PDFファイルで本シンポジウムのホームページから提出してください。
- 講演論文締切日までに提出されなかった講演論文は，講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。十分にご注意ください。

##### 【執筆要綱】

##### 講演論文原稿の書き方

- 講演論文は以下に従って作成してください。また，書式の詳細ならびにテンプレート用の電子ファイルは，シンポジウムのホームページをご参照ください。

**表題部分の書式：**原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、幅 150mm に収まるようにレイアウトしてください。連名者がある場合には、講演者の前に\*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください。

論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。

**本文の書式：**本文は表題部分に続けて、10 ポイント明朝体の 1 段組み（1 行 50 字程度）、1 ページ当たり 46 行を目安として作成してください。

**図表：**図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください。カラー表示が可能です。

**参考文献：**参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号<sup>(1)</sup>で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記してください。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例: (1) 伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

**PDF ファイルへの変換：**PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」よう設定してください。提出前に必ず、変換後の PDF 原稿を印刷して確認してください。

150 mm

### 第 54 回日本伝熱シンポジウム原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

Guide for the manuscripts（英文表題：Times New Roman 12pt）

The case of MS-Word（英文副題：Times New Roman 12pt）

（1 行あける）

伝正 \*伝熱 太郎（伝熱大）（会員資格 著者名[講演者には\*印]（所属略称）：明朝体 12pt）

（1 行あける）

Taro DENNETSU（英文著者名：Times New Roman 10pt）

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563

（1 行あける）

（文頭に半角スペース 5 つを挿入する）English abstract .....（英文アブストラクト：Times New Roman 10pt, 100 語程度）

（1 行あける）

Key Words: Heat Transfer（英文キーワード：Times New Roman 10pt, 3~5 個程度）

（1 行あける）

#### 1. 大見出し

1.1 中見出し 講演論文原稿は電子版原稿のみです。講演論文の長さは 1 題目あたり A4 サイズで原則 4~6 ページです。原稿の作成には、本ファイルをテンプレートとしてお使い下さい。

講演論文の作成様式は、1 段組×50 字×46 行とし、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で 2MB までとし、アニメーションは含まないものとします。

冒頭部分（表題部分および本文書き出し部分）の書式

#### 【講演論文の公開日】

- 講演論文は会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の 1 週間程前からウェブ上で公開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意ください。
- 会員が当該講演論文を後日原著論文として学術論文誌等に投稿される場合に配慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にすべく、シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文の公開を終了します。

**【ご注意】**

- 講演申込の取消および講演論文原稿の差し替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- 論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- 参加費、懇親会費等は参加取消の場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- その他、ご不明の点がありましたら、実行委員会事務局まで e-mail または FAX でお問い合わせください。

**【お問い合わせ先】**

第 54 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局  
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  
Email: symp2017@htsj-conf.org      FAX: 04-7136-4647

## 優秀プレゼンテーション賞（第54回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会  
委員長 桃木 悟

第54回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成29年5月24日（水） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり、発表内容をまとめた1枚のアピールスライド提出とポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。アピールスライドは冊子体として配布されると共にスライドショーとして会場にて案内される予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成29年3月31日現在で28歳以下の方、または、申込当日に学生である方（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、講演論文原稿提出までに、会員申し込みを行ってください。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第54回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。



## 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 <a href="http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf</a> 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:fushinobu@htsj.or.jp)
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子：[office@htsj.or.jp](mailto: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

---

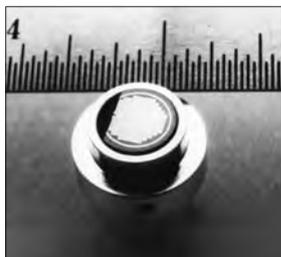
55 期入会 (2016.9.8~2016.12.7) 正 4 名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	飯田 康博	株式会社デンソー	正	源 勇気	東京工業大学
正	井戸本 博樹	東亜電機工業株式会社	正	武田 真明	(株)本田技術研究所 四輪 R&D センター

# 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



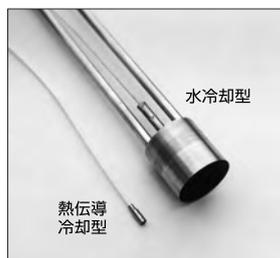
### 特徴

- 最高速の応答 (約  $6\mu$ 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バース実験
- 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

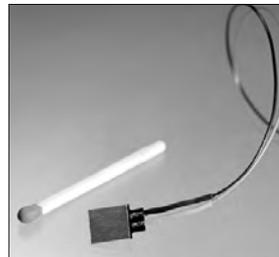


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 使用例

- 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](http://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](mailto: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/ft<sup>2</sup>sec(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/cm<sup>2</sup>

#### 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「バイオ伝熱の進展」をテーマに、生体・食品・微生物と関連する伝熱技術についての最新の研究動向について取り上げました。熱の移動現象そのものを扱うのが伝熱学ですが、バイオ伝熱では熱・物質が移動した結果、何が起こるのかが主題となります。また、対象のスケールがマクロスケールからマイクロスケール、さらにはナノスケールにわたり、これらをマクロな伝熱過程と関連づけて理解することが求められます。その結果、熱・物質移動の制御が新しい現象や技術の創出に繋がるのが、この分野の研究の魅力の一つではないかと思えます。

本号では、微生物挙動解析を導入したゴミ固形燃料火災のメカニズム解明、電場・温度場の制御による細胞・組織の不可逆エレクトロポレーション、マイクロ波を利用した食品乾燥技術の高度化と実用化例、野菜の調理過程の伝熱解析、さらには食品の凍結・解凍の損傷機序の推定について、第一線で活躍されている研究者の方々に執筆をして頂きました。伝熱研究に従事されている読者の方々に、生物や食品と関連した伝熱研究のおもしろさと、医学・生物学・農学の学際領域における伝熱制御の重要性について現状を知って頂き、この分野での研究の活性化に繋がれば幸いです。

最後に、本特集の内容に賛同頂き、多忙な時期にもかかわらず、ご寄稿頂きました執筆者の皆様  
に厚く御礼申し上げます。

多田 幸生 (金沢大学)

*Yukio Tada (Kanazawa University)*

*e-mail: tada@se.kanazawa-u.ac.jp*

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)), 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), 村上 陽一 (東京工業大学),

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