

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

不均一食品を対象とした通電加熱の利用に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-06-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中井, 利雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1759

博士学位論文

不均一食品を対象とした通電加熱の
利用に関する研究

平成 30 年度
(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用生命科学専攻

中井 利雄

博士学位論文

不均一食品を対象とした通電加熱の
利用に関する研究

平成 30 年度
(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用生命科学専攻

中井 利雄

不均一食品を対象とした通電加熱の利用に関する研究 目次

第1章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 均一食品（魚肉ねり製品）への通電加熱利用	2
1.3 食品の通電加熱と電気物性	5
1.4 食品産業界における通電加熱の応用例	14
1.5 本論文の構成	20
1.6 本章の引用文献	22

第2章 ムロアジをモデルにした通電加熱による常温保存可能な殺菌方法の研究

2.1 はじめに	24
2.2 ローソクをモデルにした高温短時間加熱	26
2.3 結果および考察	31
2.4 結論と今後の課題	34
2.5 本章の引用文献	35

第3章 ホール卵をモデルにした通電加熱と電気物性

3.1 はじめに	36
3.2 試料および実験方法	38
3.3 結果と考察	40
3.4 結論	48
3.5 本章の引用文献	49

第4章 ホール卵をモデルにした通電加熱と理論解析

4.1 はじめに	52
4.2 3D モデルの作成手順	52
4.3 計算方法	55
4.4 結果	60
4.5 考察	69
4.6 本章の引用文献	70

第5章 総括および今後の展望	71
----------------	----

第1章 序論

1.1 はじめに

通電加熱（Ohmic heating）は、食品に直接電圧を印加し、電流が流れることにより発生するジュール熱を利用して加熱する内部加熱方法である。外部から対流や輻射によって表面温度が上昇し、内部を伝導で熱が伝わる外部加熱方法に比べ、①食品の形状が大きく、伝熱に時間を要するものでも比較的均一に加熱できる、②食品を直接加熱するため、熱効率が高い、③高い導電率の食品について、短時間で加熱できる、④表面での焦げ付きの発生が少なく、高品質を保てるなどの特徴を持っている。

以上の特徴から、食品産業において注目され、液卵[1]、[2]、モズク[3]・わかめ、魚肉ねり製品[4]、食肉製品、味噌[5]、ドレッシング、豆腐、調味料、焼鳥・焼魚[6][7]等の生産性向上のための予備加熱手段、殺菌などを目的として、通電加熱システムが導入されている。その導入事例は後段で紹介する。

通電加熱は電気抵抗体である食品を金属電極間に配置して直接電流を流すことにより発熱させる加熱方法である。従って、食品の形状、組成、栄養成分などが不均一な食品（ここでは、以降「不均一食品」と表記する）を通電加熱した場合は、温度ばらつきが生じる。

そのため食品産業においては、一定の条件で通電加熱できる食品群であること、「温度ばらつき」を考慮しなくてよいこと、連続して通電加熱ができることなどから、液状食品およびペースト状食品（以下、「均一食品」と表記し、不均一食品を小さくして液状に加工した食品を含む）の利用にとどまっているのが現状である。

一般的に食品素材となる畜肉類・魚類・鶏卵においては、個体差、品種や部位の水分含有量、時期による栄養成分、骨の有無や位置、肉質、筋肉組成、筋基質の方向性などが変動し、また野菜・果実・種実類においては、根茎、葉物、栄養成分、種皮・殻、繊維の方向、水分含有量など、不均一な要素で構成されている。

今後、通電加熱が食品産業において広く採用されるためには、均一食品に限らず、固形状食品、ホール卵（割卵後の未攪拌液卵）などの不均一食品を通電加熱した場合に生じる温度ばらつきを許容範囲まで低減できることが必要となる。そのためには不均一食品の電気物性を知ること、温度ばらつきを予測できることが重要となる。

不均一食品を加熱して殺菌目的などを達成するためには、熱媒体（熱水、蒸気、熱風など）で、食品全体を取り囲むようにして全体的に熱を伝達していくことが必要となる。その結果、加熱食品は外部からの熱伝達で内部の温度を上昇させるため、外部と内部の熱伝達時間によっては、加熱時間が過剰となり、風味、食感、褐変など品質の低下を生じさせることがある。一方、レトルトパウチ食品、缶詰は、食品衛生法における容器包装詰加圧加熱殺菌食品の製造基準となる 120℃

以上で 4 分間以上の商業的無菌条件（ここでは、以降「F4」と表記する）をクリアする必要があるため、高温で長時間の殺菌がレトルト内で行われるため、いわゆるレトルト臭が生じる。

なお、不均一食品を 120℃より高い温度で加熱殺菌すると、F4 が飛躍的に時間短縮されることは、F 値（F0=121.1℃）換算で容易に算出できる。

1.2 均一食品（魚肉ねり製品）への通電加熱利用

1.2.1 温度ばらつきへの対策

均一食品を開放条件で通電加熱を行うと放熱により中心部と外周部とに温度のばらつきが生じる。その加熱ばらつきを防止するため、図 1-1 に示した 2 分割電極を試作して加熱実験を実施した。温度のばらつきを小さくすることへの可能性はあったが、中心部と外周部の位置を常に同じにすることは難しく、さらに印加電圧の調整はプログラム上、困難であり実用化に向けての検討には至らなかった。また、アルミニウム電極にコーティングした導電性炭素樹脂は、アルミニウム電極の電解腐食防止の効果はあったが、耐久性がなく、はがれやすく異物混入の可能性もあり採用しなかった。

通電加熱装置に採用した電極は、図 1-3 に示した金属チタンに導電性セラミックスをコーティングしたものであり、耐久性は十分であった。この導電性セラミックスはポーラス構造で保水性に優れていたため、通電加熱前に電極表面に水スプレーすることで、通電加熱後におけるタンパク変性した魚肉すり身と電極との離型が容易となった。この離型性の効果は、連続式通電加熱装置の導入実現に大きく貢献した。



① 食品接触面（黒色は導電性炭素樹脂コート） ② 電極裏面

図 1-1 2 分割電極



図 1-2 電解腐食防止電極

1.2.2 通電加熱に関する関連報告

表 1-1 には通電加熱に関する畜肉、魚、野菜、卵について、本研究に関連する研究報告を列挙した。

表 1-1 本研究に関連する通電加熱の主な既往の研究報告

分類	試料	研究の概要	文献
均一	牛乳	牛乳成分である脂肪、カゼインナトリウムが導電率に影響することを示した。	Mabrook et al, J. Food Eng. (2003) [8]
不均一	牛肉	従来牛肉と和牛の電気物性は、通電加熱の電流方向に影響され、脂肪は導電率を減少させるため、不均一な加熱となることを示した。	Llave et al, J.Food Eng. (2018) [9]
不均一	マグロ	冷凍マグロの部位の違いによる通電加熱の解凍時における導電率への影響および筋膜が及ぼす導電率への影響を示した。	Liu, Journal of Food Engineering (2017) [10]
不均一	ブリ	切身の普通肉（白筋）、血合肉（赤筋）の導電率は、通電加熱の電流方向、水分量、脂肪量および筋膜が影響することを示した [8-4]。	Yinzhe Jin /Food Bioprocess Technology (2015) [11]
均一	魚肉すり身・でんぷん	魚肉すり身に添加した馬鈴薯でんぷん量（0・3・9％）の導電率は、通電加熱により異なる周波数で80℃まで加熱した場合、馬鈴薯でんぷんの糊化が導電率に影響したことを示した。	P.Pongviratchai/ Journal of Food Science(2007) [12]

均一	魚肉 すり身	食塩濃度 1 % 含有で調製した魚肉すり身を周波数 50Hz・100・1k・2k・10kHz で通電加熱した場合、昇温速度は周波数が高いほど速くなる周波数依存性はあるが、ゲル強度に相関はないことを示した。	朴ら,食科工誌(1995) [13]
均一	野菜	ブランチングされ 2cm ダイスカットのニンジン、ジャガイモ、ダイコンを液体食品に浸漬させた混合物の導電率を予測した。	Zhu et al, Food Research International (2010) [14]

表 1-2 通電加熱による水産食品の加熱と殺菌の事例[15]

分類	試料	研究タイトル・概要	研究者,章,頁
均一	魚肉 すり身	通電加熱による魚肉すり身のゲル化・保形性向上、だれ防止、坐り効果に関する利用事例	福島英登・福田裕,3章,p31-40
不均一	イカ肉	イカ肉の加熱ゲル形成を可能にする通電加熱によるプロテアーゼ失活・ゲル化特性	今野久仁彦,4章,p41-56
不均一	イカ肉	イカ肉の通電特性と加工品の品質向上・裂きいか、松前漬の殺菌、	菅原智明,吉岡武也,5章,p57-70
均一	ナマコ・サケ	通電加熱を用いた乾燥ナマコおよびサケ塩干品の製造技術開発・ナマコの通電加熱による煮熟後乾燥、サケ塩干品のソフト化	小向貴志,松原久,長根幸人,6章,p71-88
均一	イクラ・ウニ	通電加熱によるイクラ/ウニの品質向上・イクラ殺菌効果、ウニ長期冷凍保存効果	上田智広,7章,p89-97
均一	カツオ	通電加熱によるカツオ煮熟時間の短縮・過熱制御	高木毅,山崎資之,8章,p98-112
均一	シラス	ちりめん/シラス加工における通電加熱の効果的な利用・エキス成分の残存、タンパク分解酵素失活	保聖子,9章,p113-123

通電加熱では、食品を均一または不均一に分類した場合、一般的に畜肉ブロック、魚の切身、野菜などの食品素材は不均一食品に分類でき、ミンチ肉（牛、豚、鶏など）、小さくカットして液体混合された野菜、魚肉すり身、もずくやカットわかめなどの液体状海藻類は、均一食品に分類できる。従って、均一食品は、通電加熱による加熱処理に適しており、不均一食品は、成分の違

いがあること、不定形な形態から均等に電極接触させることが困難なため、通電加熱した場合には、温度のばらつきが生じやすい。そのため、不均一な食品を食塩水など液体と同時に通電加熱する応用事例が多い。水産加工における通電加熱の利用に関する研究事例を表 1-2 に挙げた。

通電加熱に関する既往の研究では、均一食品としての液全卵（割卵後に攪拌された液卵）に関する報告はあるが、ホール卵（割卵後の未攪拌液卵）に関する研究報告はなかった。

通電加熱は、加熱スピードの速さ、加熱効率の良さから均一の食品を加熱することに適していることが食品産業界においても周知になっている。得られた温度履歴から導電率の温度依存性や周波数依存性が食品産業にフィードバックすることが期待されている。しかし、不均一な食品を通電加熱した場合に生じる温度ばらつきこそが肉眼では見えない電気の流れを知ることができることになる。

本研究は、不均一な食品の通電加熱に関する研究報告が少ない点に着目し、不均一な食品として、第 2 章ではアジ切身、および第 3 章ではホール卵（割卵後の未攪拌液卵）を研究対象とした。

1.3 食品の通電加熱と電気物性

1.3.1 通電加熱の原理

通電加熱は、食品自体に電流を流したときに発生するジュール熱を利用して加熱するもので、ジュール加熱とも称される。平行板電極の間に、電気抵抗体である食品を挿入し、直流電圧 $V[V]$ を印加した場合、その等価回路は Fig.1-3 のように表される。このときの消費電力、すなわち発熱量 $Q[W]$ は、ジュールの法則およびオームの法則により、次式で表される。

$$Q = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R} = \sigma \frac{S}{d} V^2 \quad (1)$$

ここで、 $I[A]$ は電流、 $R[\Omega]$ は食品の抵抗、 $\sigma[S/m]$ は導電率、 $S[m^2]$ は電極面積、 $d[m]$ は電極間距離である。

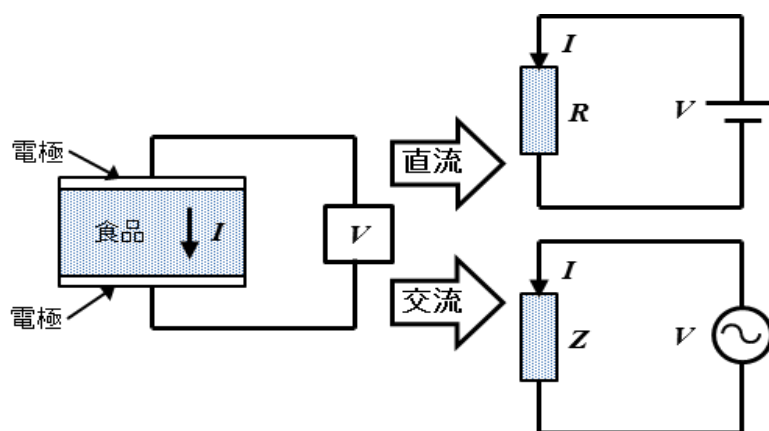


Fig. 1-3 Schematic diagram of electrical circuit

一般に直流電源を用いた場合、電極の腐食等の問題が生じるため、多くの場合交流電源が使われる。食品が純粋な抵抗体と仮定できる場合、交流電圧を印可したときの発熱量 Q は直流の場合と同様に(1)式で表される。ただし、電流及び電圧は実効値を用いる。

(1) 式は、食品を純粋な抵抗体と仮定したときの発熱量であるが、食品は誘電体としての性質も持ち、周波数によっては容量成分を無視できない。このとき、電圧と電流の関係は

$$V = IZ \quad (2)$$

で表され、交流における抵抗はインピーダンス Z (Ω) で表す。

$$Z = R + jX_c \quad (3)$$

ここで、 R はインピーダンスの純抵抗成分を、 X_c は容量性成分（容量性リアクタンス）を表す。さらに、 X_c は、

$$X_c = \frac{-1}{2\pi fC} \quad (4)$$

で表され、ここに f (1/s) は電源周波数、 C (μ F) は食品の容量である。

(3)式より、 $X_c=0$ ならば、 Z は純粋な抵抗となり、 $X_c \neq 0$ ならば、 Z は複素数となる。

容量性リアクタンスにおいては、電荷の蓄積と放出が交互に行われ、電流位相が電圧より 90° 進むが、電気エネルギーの消費はともなわない。

したがって、容量成分が無視できる場合は、発熱量（消費電力）は(1)式の R を Z に変えた(5)式から求められるが、容量成分が無視できない場合は、(5)式から求められないので注意を要する。

$$Q = IV = I^2 Z = \frac{V^2}{Z} = \sigma_z \frac{S}{d} V^2 \quad (5)$$

ここで、 σ_z ($=d/SZ$) はインピーダンスから求めた導電率である。

また、食品を誘電体と考えた場合、周波数によっては誘電体損により発熱する。このときの発熱量 Q_c は次式で表される[9]。

$$Q_c = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon' \tan \delta \frac{S}{d} V^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \frac{S}{d} V^2 \quad (6)$$

ここで f は周波数、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 ϵ' は食品の誘電率、 ϵ'' は誘電損率、 δ は誘電体損角である。電子レンジで利用されているマイクロ波加熱のように、周波数が 2.45GHz と高い場合には、誘電体損による発熱が主となるが、通電加熱で用いられる周波数は低く、誘電損率も小さいことから多くの食品では誘電体損を考える必要はない。しかし、魚肉すり身などタンパク質を含む食品では、架橋構造を形成し分極するが、この分極が交流電界に追従できないため誘電体損が発生する[8-5]と考えられている。

1.3.2 通電加熱の理論解析

通電加熱において、食品の被加熱性を決めるのは電気物性であり、特に導電率が重要となる。Table 1-2[10]に液状食品の導電率、Table1-3[11]に固体食品の導電率を示す。Table1-2 には塩水の導電率も示したが、塩分濃度が高いほど導電率は大きくなる。また、導電率が異なる素材で食品が構成される場合、加熱温度ばらつきの原因となるので注意を要する。固体食品（Table 1-3）については異なる温度における導電率を示したが、温度が高いほど導電率は大きくなる。液体中に固体が混在している食品においては、外部加熱では液体は対流を起こし先に加熱されるが、通電加熱では液体と固体の導電率に大きな違いがなければ均一な加熱が可能である。

Table 1-3 Electric conductivity of liquid food [16]

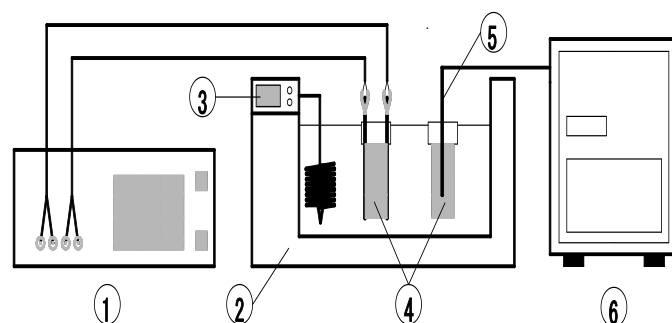
食品名	導電率 S/m (25°C)
食塩水 0.5%	0.1
食塩水 3%	0.5
おかゆ	0.031
牛乳	0.37
生クリーム	0.2
ポタージュスープ	1.1
ニンジンペースト	0.2
日本酒	0.05
ビール	0.12
ピーチジュース	0.27
グレープジュース	0.21
青汁	0.85
めんつゆ(ストレート)	3.5
めんつゆ(2 倍濃縮)	4.5
ソース類	3～4

Table1-4 Electric conductivity of solid food[17]

食品名	導電率 (S/m)		
	20°C	70°C	100°C
牛肉 (赤身)	0.6	1.2	1.6
豚肉(赤身)	0.5	0.13	0.17
ベーコン(赤身)	2.2	6	6
ニシン	0.4	1	1.4
ジャガイモ(生)	0.6	1.1	1.4
リンゴ	0.13	0.28	0.4

1.3.3 食品導電率の周波数および温度依存性[18]

食品の導電率は種々の条件によって変化する。例として、楊[19]によって報告された、モデル食品にマッシュポテトを使用した導電率の測定実験を以下に示す。導電率測定装置の概略は Fig.1-4 に示した通りである。試料は乾燥マッシュポテトに所定量の水と NaCl を混ぜたものを使用し、幅 1.0cm×厚さ 0.45cm×高さ 3cm のプラスチック製容器に充填した。この容器の内面にはチタン電極 (0.45cm×3cm) が取り付けられている。同じサイズの容器に試料を充填し、熱電対を設置して温度測定用としている。これら 2 つの試料を恒温槽に設置し、所定温度に保持した後、LCR メータ (日置製、3532-50) を用いて試料のインピーダンス (抵抗) を測定したものである。



① LCR Meter, ② Water bath, ③ Heating equipment, ④ Sample, ⑤ Thermocouple, ⑥ Thermometer

Fig. 1-4 Schematic diagram of measurement system for electric properties [12]

含水率 67% のマッシュポテト試料を用いて、NaCl 濃度を 1 ～ 4 % に変えたときの、20℃ における導電率と電源周波数の関係を Fig.1-5 に示した。なお、図に示された導電率は LCR メータで測定したインピーダンスより求めたものである。各塩分濃度において、電源周波数が 1kHz ～ 5kHz の範囲で試料の導電率が急激に増加するのに対し、10kHz 以上では導電率の増加が緩やかとなる。その結果、全体的な周波数－導電率曲線は対数関数的に変化することがわかる。また、食塩含量の増加とともに試料の導電率も大きくなり、導電率は塩分濃度に大きく依存することがわかる。

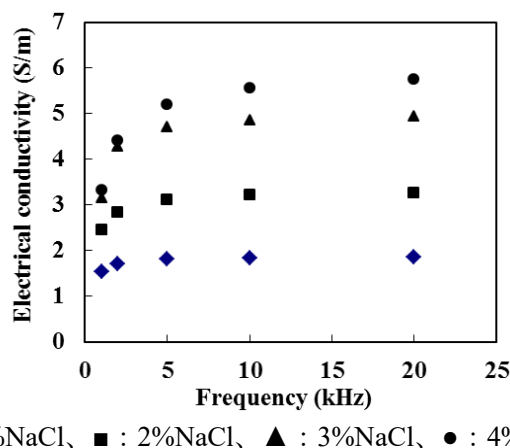


Fig. 1-5 Electrical conductivity as function of NaCl content and frequency [12]

電源周波数 50Hz、1kHz、20kHz における含水率 80%、1%NaCl 添加試料の導電率の温度依存性を Fig.1-6 に示す。Fig.1-6 から、各周波数において温度の上昇とともに導電率は増大することがわかる。また、周波数が高いほど温度依存性が大きいため、温度が高くなると 50Hz と 20kHz でその差は大きくなる。Fig.1-6 には、LCR メータで測定した抵抗 R から求めた導電率と、インピーダンス Z から求めた導電率を示した。20kHz と周波数が高い場合、両者は一致するが、50Hz ではインピーダンスから求めた値が抵抗から求めた値の約 1/2 となっている。このことは、20kHz では純粋な抵抗体とみなせるが、50Hz では純粋な抵抗体とみなせず、容量成分の影響が出ることを表す。したがって、50Hz においては、通電加熱時に測定した電圧と電流からは消費電力（発熱量）を計算できないことになる。また、1kHz の場合、抵抗 R およびインピーダンス Z から求めた導電率は、約 50°C までは一致するが、高温になると一致せず、高温では純粋な抵抗体とみなせなくなる。

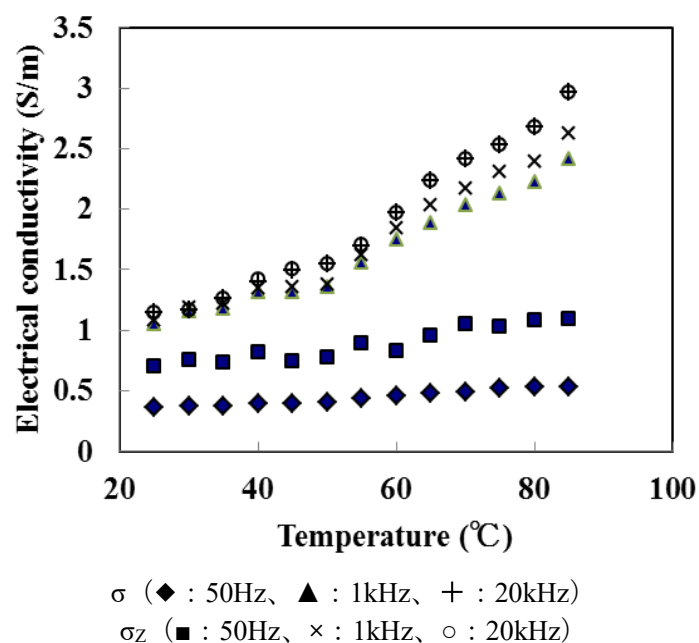


Fig.1-6 Electrical conductivity of mashed potato with 1%NaCl as function of temperature and frequency [12]

Fig.1-7 に、NaCl 無添加マッシュポテト試料の導電率の温度依存性を示す。1%NaCl 添加試料と比べて、その値は 1/3 程度となるが、温度が高くなると導電率が大きくなる温度依存性は変わらない。また、抵抗 R およびインピーダンス Z から求めた導電率の差は、1%NaCl 添加試料よりも小さく、1kHz においてもほぼ純粋な抵抗体とみなすことができる。

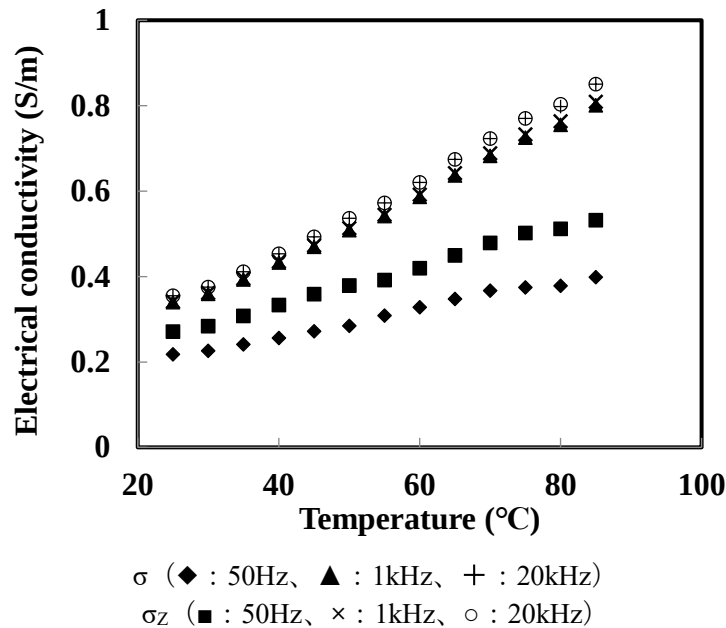
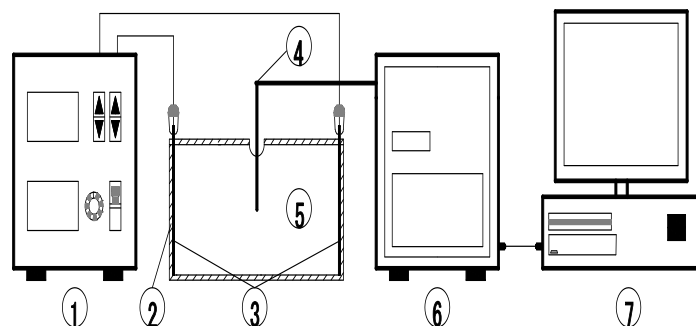


Fig.1-7 Electrical conductivity of mashed potato with no salt as function of temperature and frequency

1.3.4 食品の通電加熱特性[12]

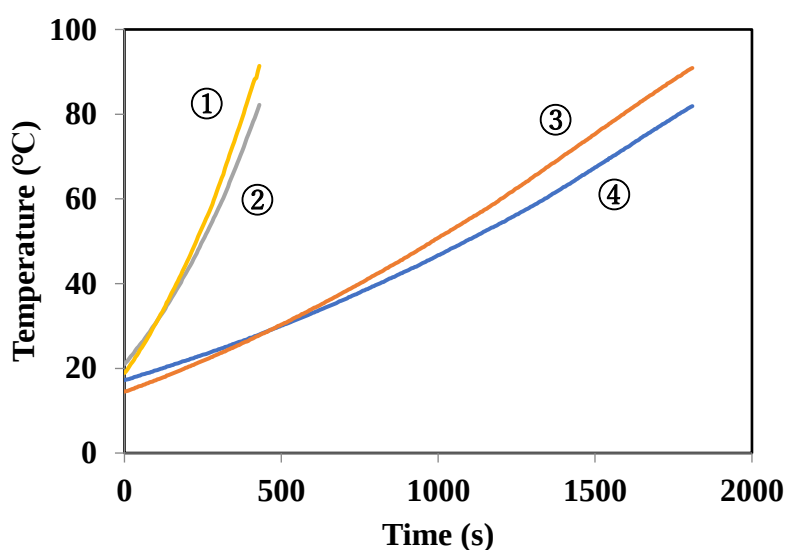
1.3.3 で示した導電率に応じて、通電加熱時にどのように加熱されるかを以下に示す。実験で使用する通電加熱実験装置の概略を Fig.1-8 に示した。本加熱装置は、パワー供給装置、加熱容器、チタン電極、温度測定装置から構成される。電源装置の周波数は 20kHz で、電源電圧及び電流はそれぞれ 0~100V、0~10A の範囲で連続調節可能である。ただし、電圧と電流の上限値を設定するので、上限値に達したほうがコントロール値となる。加熱容器には 10 cm×8 cm×5cm のアクリル製直方体容器（厚さ 0.5cm）を使用した。1%NaCl 添加および無添加のマッシュポテトを容器に充填し、加熱時の温度変化を測定した。試料内温度は容器中心および容器内電極近傍に設置したシーチ K 型熱電対により測定した。なお、熱電対を絶縁するため、パラフィルムで熱電対を被覆した。

1%NaCl 添加および無添加のマッシュポテトを単独に容器に充填し、電源周波数 20kHz、電圧 50V で加熱したときの温度変化を Fig.1-9 に示した。1%NaCl 添加試料は NaCl 無添加の試料に比べて、1/4 程度の時間で 90°C に到達する。1%NaCl を添加することにより、導電率が大きくなり、電流がより流れ発熱量が増加するためである。また、両試料とも温度上昇速度は一定ではなく、温度の上昇とともに大きくなる。さらに、中心部と周辺部を比較すると中心部のほうが、温度が先に上昇し、時間とともにその差は開いていくことがわかる。これは、容器自体は発熱せず伝導により熱が伝わり、中心部の温度が周辺部より高くなると導電率が大きくなり発熱量が大きくなるためである。このことは温度差が一旦できると、より温度差が大きくなるように加熱され、均一な食品でも均一加熱が難しいことを意味し、被加熱物の電気物性に由来する通電加熱問題の一つである。



① Voltage regulator, ② Container, ③ Titanium plate, ④ Thermocouple, ⑤ Sample, ⑥ Thermometer ⑦ PC

Fig.1-8 Schematic diagram of ohmic heating system



① center (1%NaCl), ② side (1%NaCl), ③ center (0%NaCl), ④ side (0%NaCl)

Fig.1-9 Temperature histories during ohmic heating [12]

次に、導電率の違う食品が不均一に混在している場合を考える。10cm×8cm×5cm の容器に、1%NaCl 添加マッシュポテト（試料 A）および NaCl 無添加のマッシュポテト（試料 B）を Fig.1-10(a)のように充填する。図中の矢印の面に電極を設置してあり、矢印の方向に電流が流れることを表す。電源周波数 20kHz、電圧 50V で加熱し、加熱 300s 後に赤外線放射カメラで断面温度分布を撮影した。配置(a)の温度分布撮影結果を Fig.1-11(a)に示したが、温度分布は電流の流れる方向に層状となり、導電率の高い試料 A の領域の温度が高くなった。配置(a)の場合、試料 A と試料 B は並列に並んでいると考えられ、各試料に 50V 一定の電圧が印加される。したがって、完全に並列と考えたときの各試料の発熱量は、

$$Q_A = I_A V = V^2 / R_A = \frac{S}{L} \sigma_A V^2 \quad (7)$$

$$Q_B = I_B V = V^2 / R_B = \frac{S}{L} \sigma_B V^2 \quad (8)$$

ここで、 V は印加電圧、 I は電流、 R は抵抗、 S は電流が流れる方向の面積、 L は電極間距離である。したがって、発熱量は導電率に比例し、導電率の大きい試料 A のほうが温度上昇は大きくなったと考えられる。

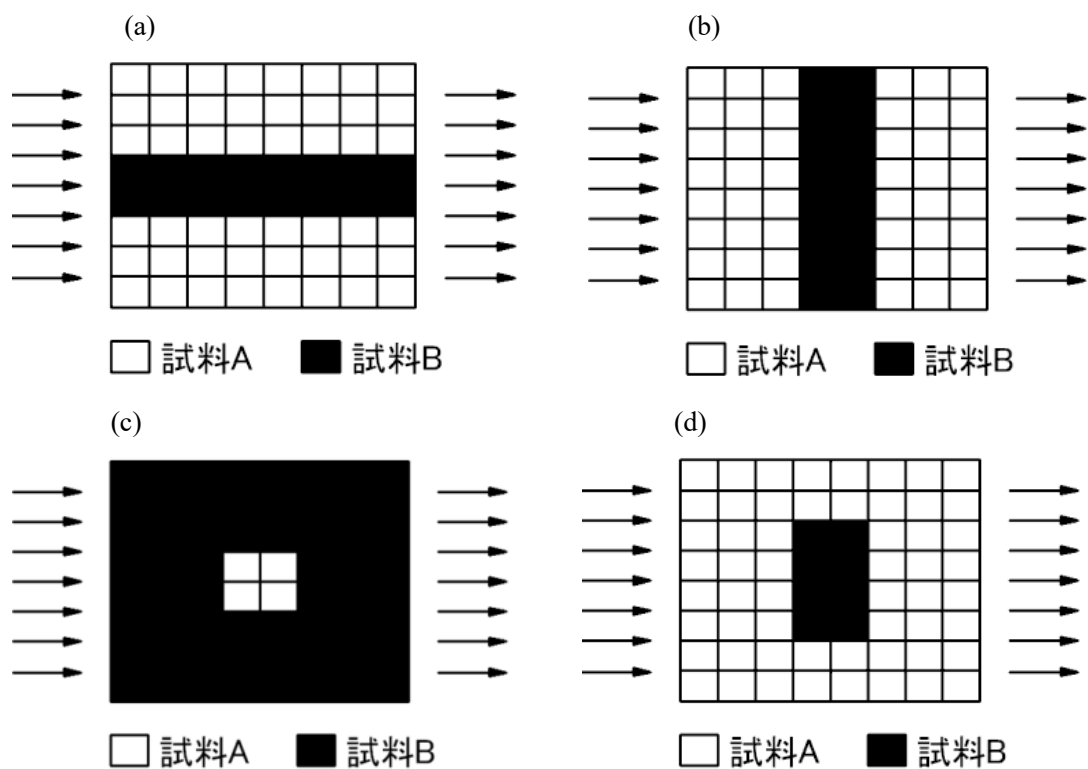
Fig.1-10 配置(b)の温度分布撮影結果を Fig.1-11(b)に示した。配置(a)と異なり、導電率の低い試料 B の領域の温度が高くなっている。配置(b)の場合、試料 A と試料 B は直列に並んでいると考えられ、各層を流れる電流は一定となる。したがって、完全に直列と考えたときの各試料の発熱量は

$$Q_A = IV_A = I^2 R_A = \frac{L}{S} \frac{1}{\sigma_A} I^2 \quad (9)$$

$$Q_B = IV_B = I^2 R_B = \frac{L}{S} \frac{1}{\sigma_B} I^2 \quad (10)$$

発熱量は導電率に反比例し、導電率の小さい試料 B のほうが温度上昇は大きくなったと考えられる。試料 A と試料 B は 90°C 回転したものであり、構成としては同じと考えられる。このように構成は同じでも、電流の流れる方向、換言すれば電極の位置によって発熱分布は逆転することがわかる。

食品の構成が層状になっていない場合の例として、Fig.1-10(c)、10(d)のように、試料を充填する。電圧 50V で加熱し、加熱 300s 後の温度分布撮影結果を Fig.1-11(c)おとび(d)に示した。導電率の高い成分が中心にある場合 (Fig.1-11(c))、導電率の高い領域の温度が最も高くなる訳ではなく、その前後の導電率が低い領域で最高温度となる。これは、電流が中心部に集中し、中心付近では配置(b)のように直列に並んでいると考えられ、導電率の低い領域の温度が高くなったものと思われる。また、導電率の高い領域に上下部分が最も電流が流れにくくなるため、最も温度が低くなる。中心部に導電率が低い成分がある場合 (Fig.1-11(d)) は、Fig.1-11(c)とその傾向は逆になる。すなわち、最も温度の高くなる領域は、導電率の低い領域の上下、最も温度の低くなる領域は、導電率の低い領域の前後となる。したがって、導電率が高い成分あるいは低い成分が食品内部に存在する場合、その領域の温度が単純に最高温度あるいは最低温度にならず、その温度分布は複雑に変化するといえる。また、この温度分布は電流方向（電極位置）によっても変化する。



導電率の大小は、試料A>試料Bに設定している。

Fig.1-10 The ingredient configuration within the sample [12]

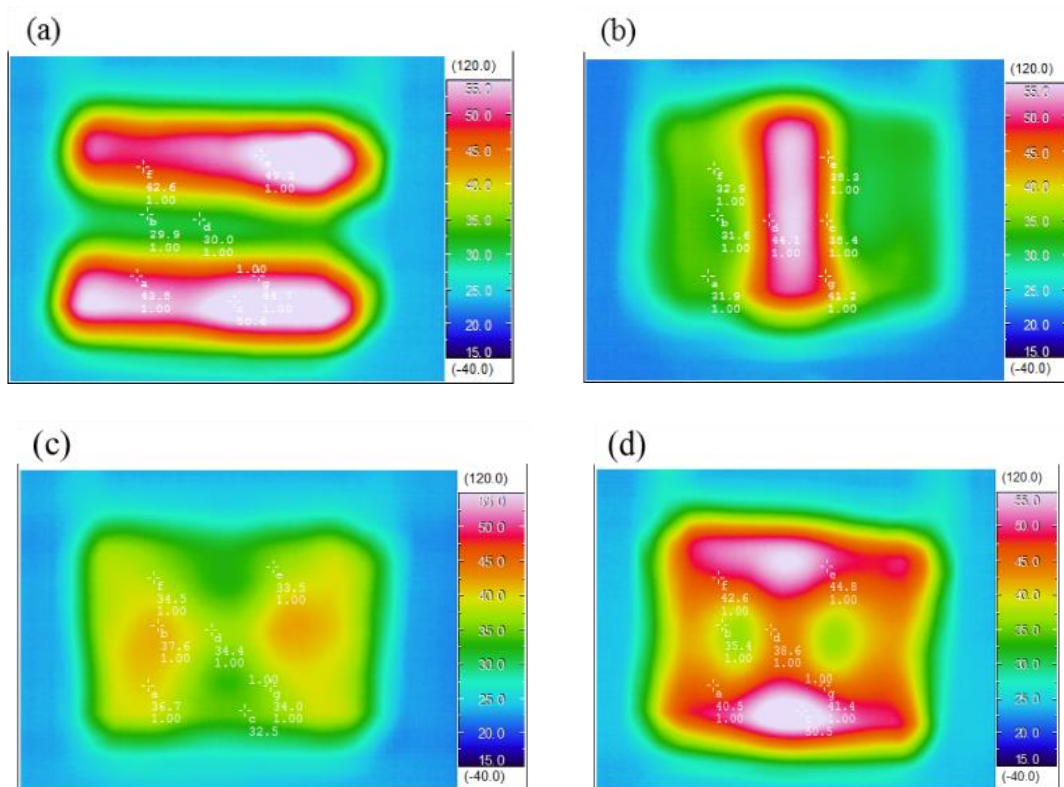


Fig.1-11 Temperature observation by the infrared thermometer [12]

1.4 食品産業における通電加熱の応用例

1.4.1 均一食品の通電加熱

(1) 通電加熱利用を利用したもずくの殺菌

もずくやアラメ等は、生のまま又は塩蔵や冷凍で保管後加工される。一般的なもずく加工工程 (Fig.1-12) における殺菌工程は、大量の加熱水を使用するため省エネルギーが検討課題であった。通電加熱の利用により、加熱消費エネルギーが熱水方式と比較して 80%削減となり、また通電加熱処理によるもずくの品質において殺菌効果、色や食感風味など官能結果も良好であった[3]。

もずくの通電加熱装置としては、バッチ式と連続式 (Fig.1-13) があり、特に連続式通電加熱装置はパイプ式であるためコンパクト設計であり省スペースが実現でき、さらにインライン冷却工程も組込むことができる。

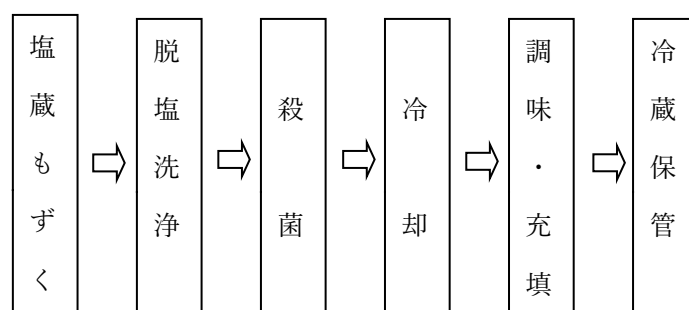


Fig.1-12 The example of a manufacturing process of a seasoning mozuku seaweed

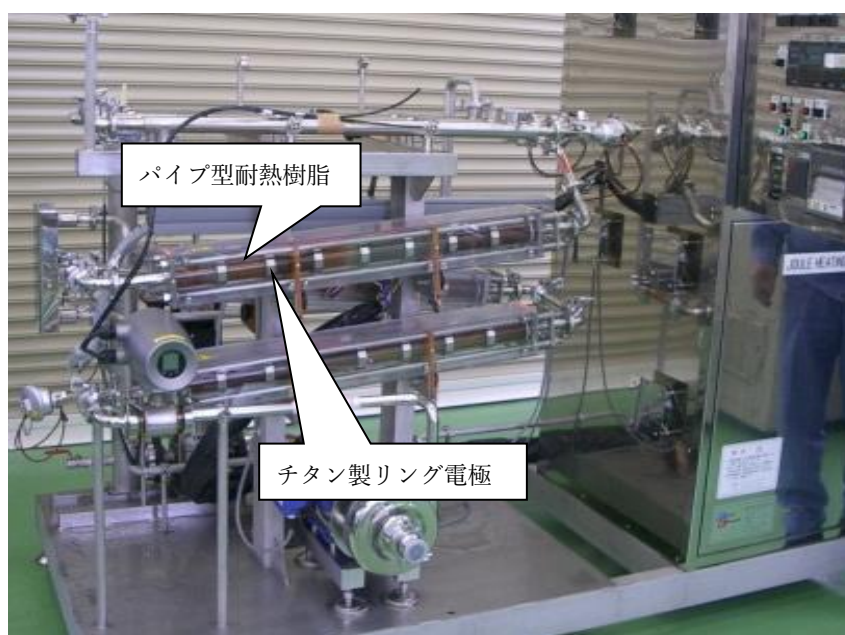


Fig.1-13 Continuous ohmic heating equipment of a mozuku seaweed

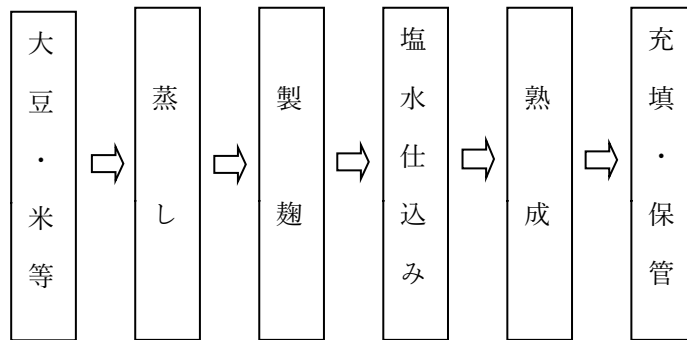


Fig.1-14 The example of a manufacturing process of bean paste

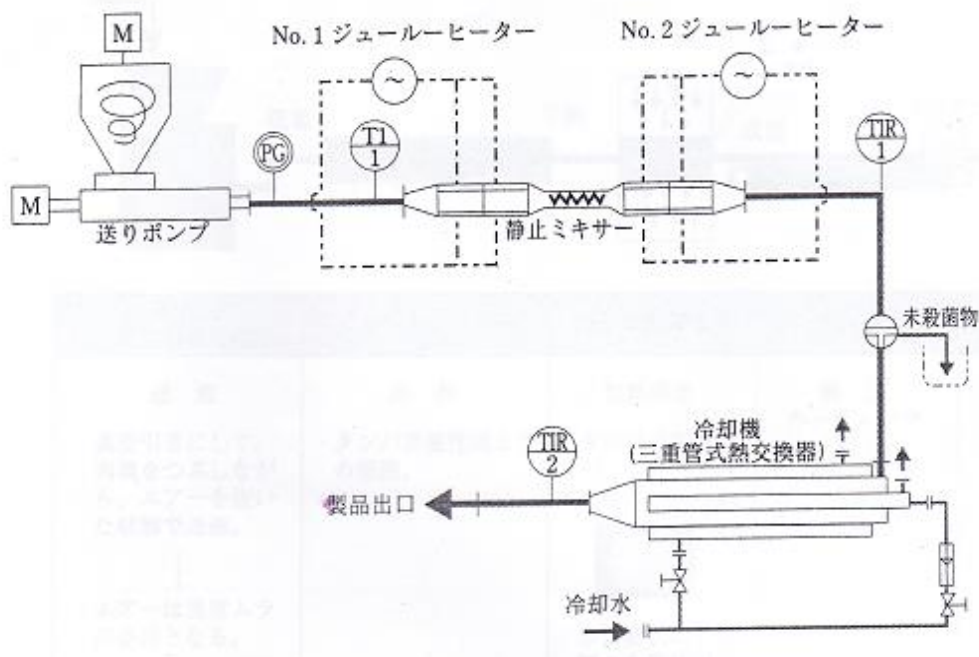
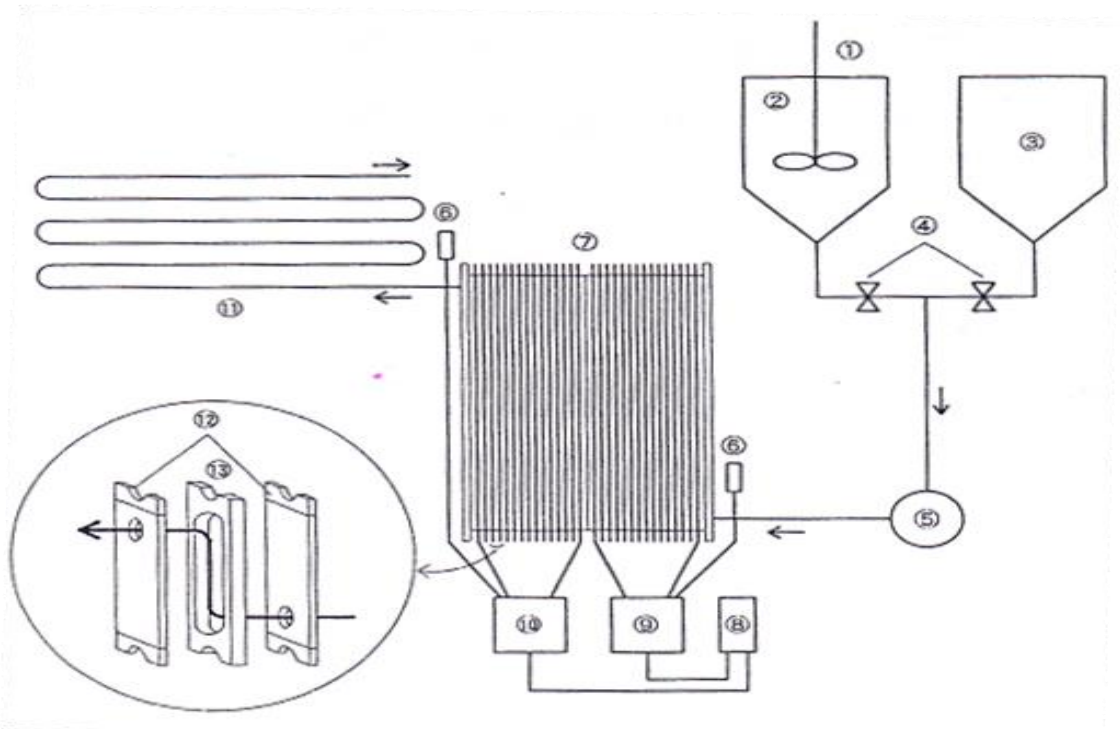


Fig.1-15 Bean paste sterilization and cooling system[5]

(2) 味噌製造の通電加熱

味噌やしょうゆは、その製造工程において Fig.1-14 に示すように蒸した大豆、米等に糀菌を均一に分散混合させる製麴工程があり、その糀菌酵素を利用して熟成発酵させる伝統食品である。密封容器に充填した味噌は、保管温度によっては酵素の働きによりガスを発生するため、ガス抜き弁付きプラスチック容器を使用している。しかし、ガス抜き弁はコストアップになるため、熟成発酵後に味噌を通電加熱することで酵素失活させる方法が考案された。また、近年カツオだし入り味噌等も商品化されており、旨み消失防止としても通電加熱が利用されている。通電加熱は、味噌の色や風味を損なわず、高粘性の味噌を連続的に加熱できるメリットがある。Fig.1-15 に、味噌の加熱殺菌冷却システムフローを導入例として示した[5]。



①攪拌槽 ②原料タンク ③温水タンク ④コック ⑤移送ポンプ ⑥熱電対 ⑦電極ボックス⑧レコーダー ⑨コントローラー1 ⑩コントローラー2 ⑪ホールディングチューブ
⑫電極 ⑬セラミック板

Fig.1-16 Plate type continuous ohmic heating system

(3) 液卵の通電加熱

鶏の液卵は、食中毒の原因となるサルモネラ菌汚染の可能性や腐敗速度が速いため、食品衛生法の規定に基づき食品の規格基準に定める殺菌条件により殺菌されている。しかし液卵は、加熱により液体から半凝固をへて固体に変化するデリケートな性質を有するため、液卵の殺菌は非常に困難となる。特に連続式熱交換式による加熱殺菌の場合は、食品衛生法上の殺菌条件が 60℃で 3 分 30 秒であり、熱交換式では液卵の昇温スピードが遅くなり、その結果加熱ダメージが大きくなる。従って、液卵のねばりが低く、鶏卵加工おける半熟オムレツ、とじ卵、卵スープなどの製造は品質上困難となっている。そのため行政等の工業試験所や液卵メーカー等は、加熱温度コントロールが容易で、昇温スピードが速い通電加熱を利用した液卵の加熱殺菌に関する研究を行っている[1]。

現在、通電加熱装置メーカーと液卵メーカーとの共同開発により、連続式通電加熱装置の操業時に発生する加熱変性液卵の電極付着問題が解決され、Fig.1-16 に示すようなパイプ式連続通電加熱装置が殺菌液卵メーカーに導入稼働されている。

(4) 魚肉ねり製品の通電加熱

魚肉ねり製品は、魚肉に食塩を添加してすり潰し、調味料等を添加してペースト状になった調味すり身を成型して、加熱することにより製品となる。製品の分類は、成型と加熱手段によって決定する。蒸気で蒸された製品は蒸しかまぼこに、フライヤーで揚げられた製品は揚げかまぼこ(てんぷら)に、高温の熱風で焼成された製品は機ちくわに、熱湯でゆでられた製品は茹でかまぼこ(はんぺん)などに分類される日本の伝統食品である。一例として、揚げかまぼこの製造工程図を Fig.1-20 に示した。

一般的に調味すり身は、最終製品の品質を考慮して、10℃以下の低温ですり上げられる。しかし、その温度では成型工程後に変形(だれ)が生じることがあり、その結果不良品が発生する場合がある。そのため成型後は速やかにすり身の温度を上昇させて、変形防止と坐り効果を発揮させ品質を向上させることが課題となる。その課題解決のため、通電加熱を成型後の予備加熱に利用する方法が考案された。

また、パイプ式連続通電装置により成型前の調味すり身の温度を上昇させて、その成型後の変形(だれ)を防止すること、さらにその後の坐りや本加熱のエネルギー負荷を低減させる目的での利用や、成型後の板付きかまぼこを電極間にはさんで、変形(だれ)を防止しながら通電加熱を行い、坐り温度まで短時間に温度上昇させて一定時間保持し、その後本加熱の温度まで上昇させる通電加熱の導入事例がある。

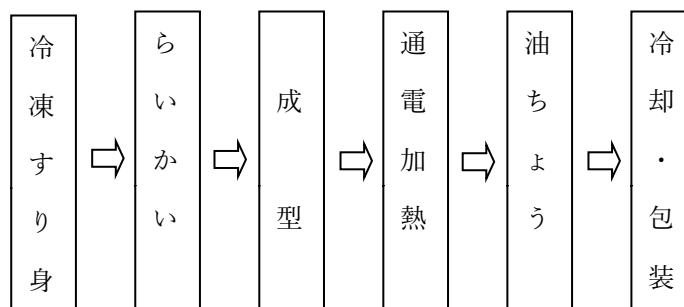


Fig.1-20 The example of a manufacturing process of a deep-fried Kamaboko

揚げかまぼこ用通電加熱装置は、成型機で成型された調味すり身を上部と下部のチタンベルト電極間ではさまれ、電流が成型すり身に流れて目的の温度まで通電加熱され、その後フライヤーに落とされ、油ちょうされて揚げかまぼことなる (Fig.1-21)。

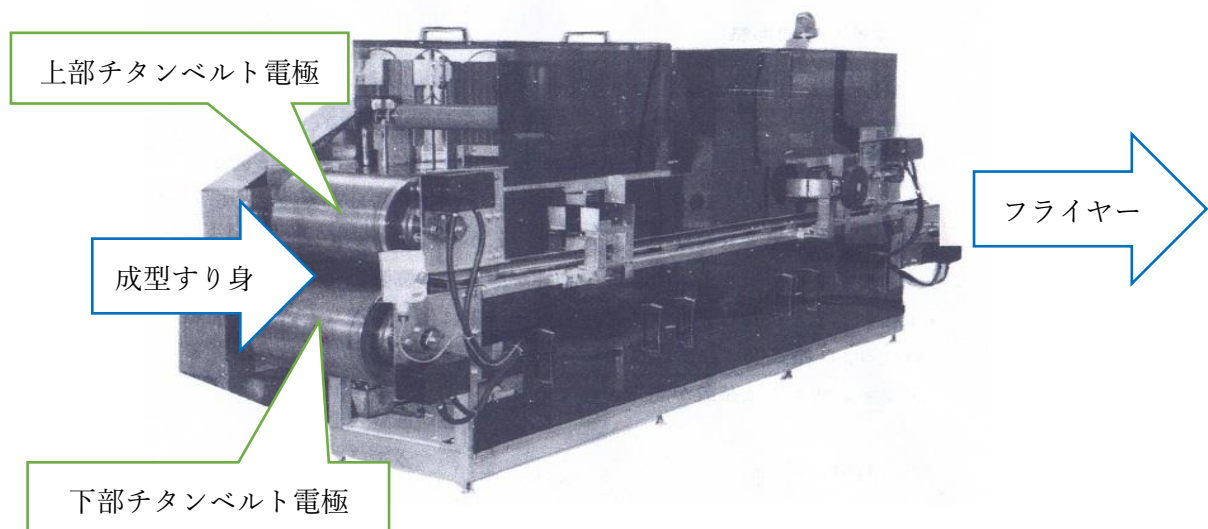


Fig.1-21 The Ohmic heating equipment for preheating of deep-fried Kamaboko

1.4.2 不均一食品の通電加熱

(1) 焼魚・焼とり製造工程における通電加熱の利用

焼魚や焼とりなどは、中心部の温度を上昇させるために表面部分が焼き過ぎとなり焦げたり、全体的にかたくなったり、品質低下を起こす場合がある。その課題を解消するため、食品メーカーと通電加熱装置メーカーが共同開発を行い、Fig.1-22 に示す通電加熱を組み込んだ製造工程が考案され、連続式の不均一食品用通電加熱装置 (Fig.1-23) が開発された。

しかし、食品衛生法や JAS 法における食品表示枠内の名称の欄に「焼魚」または「焼とり」と分類できるためには、当該通電加熱装置の前または後にガスや炭などのよる直火による加熱か、熱風によるオープン加熱が必要となる (Fig.1-24)。

この不均一食品用の連続式通電加熱装置は、上部と下部の電極形状が異なっていることが特徴になっている。具体的には下部電極はチタン網であり、上部電極はチタン棒にぶらさがってスイングするのれん型の 10 ミリ幅のチタン電極となる。通電加熱方式は、そのチタン網の上に魚の切身や鶏肉などの不定形な固形物 (不均一食品) を整列させておき、コンベアでチタン網を搬送しながら、スイングするのれん型のチタン電極に接触するときに電流が流れる仕組みである。また、上部ののれん型チタン電極に魚の切身や鶏肉などが接触するときのスパーク防止と放熱防止のため、加温した食塩水滴下水槽 (等間隔に小さな穴があけてある) と食塩水の均一滴下のために、のれん型チタン電極の全部に吸水不織布がセットされている。この連続式不均一食品用通電加熱装置により焦げやすい味噌漬魚や粕漬魚、また加熱に長時間要する鶏むね肉ハーブ焼などは、短時間に加熱されることで生産性が向上し、加熱後の歩留率向上は、ジューシーな仕上がりが実現する。

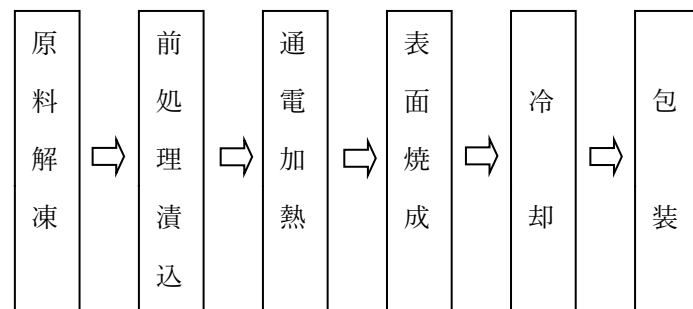


Fig.1-22 The example of a manufacturing process of broiled fish



(1) 連続式不均一食品用通電加熱ライン



(2) 連続式不均一食品用通電加熱装置（通電部）



(1) ギンダラ粕漬焼き



(2) 鶏むね肉ハーブ焼き

Fig.1-24 Ohmic heating process of fish preserved in sake lees (1) and chicken (2)

1.5 本論文の構成

食品の通電加熱は食品自体に直接電流を流すため、電極間における食品のはさみ方および食品の水分、骨皮、殻、調味料などの導電率の違いが温度のばらつき原因の一つになる。これは通電加熱装置を殺菌工程に利用する場合に大きな問題となっている。

また本論で述べたように、導電率には温度依存性があり食品は加熱による温度上昇とともに導電率が大きくなるため、温度差は大きくなっていく。通電加熱装置の通電部の電極接触部位や開放部分からの放熱は、当該食品部分の加熱温度ばらつきに大きく影響する。その加熱温度のばらつきは、通電時間が長くなるほど、導電率の差により大きくなる。

特に不均一食品用通電加熱装置の開発においては、食品と電極との接触面や通電部の放熱のコントロールが重要となる。

さらに不均一食品を通電加熱したときに生じる加熱温度のばらつきについては、食品産業界に通電加熱システムが普及しない大きな理由になっている。

本研究では、不均一食品を通電加熱した場合の温度のばらつきの原因を解明して、理論解析を行い、その結果から通電加熱の温度のばらつきを予測し、不均一な食品への通電加熱の利用可能性を示すことにした。

具体的には、第2章において、不均一食品の代表として、アジのフィレ（3枚おろし）およびチャンク（ぶつ切り）の異なる形状2種をモデルにして、通電加熱を利用した容器包装詰加圧加熱殺菌食品を新たな無菌充填方法で試作し、さらに包装後の無菌状態を確認することで、通電加熱の利用可能性および無菌充填方法の妥当性を示した。

この成果は、発明者：中井利雄、濱田奈保子、発明の名称：「食品の無菌充填方法および無菌充填食品」として、特許出願日：2009年4月13日、出願公開日：2010年11月4日に公知となり、特許登録日：2012年8月24日として登録証が発行された。

第3章では、不均一食品のモデルとしてホール卵（割卵後の未攪拌全卵）を用いて、通電加熱した場合に一部の卵白部分だけが常に加熱されることに着目して、それぞれ卵白、卵黄、全卵、卵黄膜有無について電気物性を測定した結果、ホール卵の加熱温度のばらつきは卵黄膜の存在が大きいことが示された。

第4章では、第3章のホール卵を通電加熱した場合の電気物性から得られたデータをもとに、ホール卵を通電加熱した場合に生じるホール卵全体における加熱の温度ばらつきの予測を熱伝導解析により確認した。その結果、ホール卵の通電加熱の実測値では、卵黄膜自体の導電率が非常に小さいため、電気抵抗が大きくなり、特にホール卵の通電加熱の配列が、電極・卵白・卵黄・卵白・電極と見かけ上、一直線に配置された場合は、中心部に配置されている卵黄は導電率の大きい卵白より昇温スピードが速いことが確認された。

しかし、ホール卵全体における加熱の温度ばらつきの熱伝導解析では、実測値とは異なり、ホール卵の通電加熱の配列が、電極・卵白・卵黄・卵白・電極と見かけ上、一直線に配置された場合においても、中心部の卵黄より卵白の温度が高いことが示された。

このことは、ホール卵の通電加熱の配列が、電極・卵白・卵黄・卵白・電極と見かけ上、一直線に配置された場合においても、熱伝導解析においては卵白・卵黄・卵黄膜の各導電率の影響を大きく受けるためだと考えられた。

第5章では、総括として、本研究のまとめおよび通電加熱の今後の展望について言及した。

1.6 本章の引用文献

- [1] 宮崎県食品加工研究開発センター,鶏卵の殺菌・加工への通電加熱応用研究,平成 7 年度 技術開発研究費補助事業成果普及(1996)
- [2] Filiz Icier、 Hayriye Bozkurt,: Ohmic Heating of Liquid Whole Egg : Rheological Behaviour and Fluid Dynamics,Food and Bioprocess Technology, Vol 4, Issue 7, pp 1253–1263 (2011)
- [3] 社団法人海洋水産システム協会,平成 21 年度 水産技術実用化事業 技術開発報告書,「ジュール加熱によるモズク連続ラインの開発」 (2009)
- [4] 岡田 稔,かまぼこの科学,成山堂,p166-167 (2000)
- [5] 多田宗儀,新開発の機械・装置II ジュールヒーターシステム,食品工業,45(22),p23-33 (2002)
- [6] 中井利雄,ジュール加熱による食品加工技術,月刊技術士,論文特集号,p60-63 (2005)
- [7] 中井利雄,食品加工へのジュール加熱の応用,水産界,1518 号,p23-25 (2011)
- [8] M.F.Mabrook,M.C.Petty,Effect of composition on the electrical conductance of milk, Journal of Food Engineering,Vol.60 p321-325(2003)
- [9] Yvan Llave,Toshifumi Udo,Mika Fukuoka,Noboru Sakai,Ohmic heating of beef at 20kHz and analysis of electrical conductivity at low and high frequencies, Journal of Food Engineering,228,p91-101 (2018)
- [10] Lei Liu, Yvan Llave, Yinzhe Jin, Da-yu Zheng, Mika Fukuoka, Noboru Sakai, Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies, Journal of Food Engineering, 197, 68-77(2017)
- [11] Yinzhe Jin, Yu-dong Cheng, Mika Fukuoka, Noboru Sakai, Electrical Conductivity of Yellowtail(*Seriola quinqueradiata*) Fillets During Ohmic Heating, Food Bioprocess Technol DOI 10.1007/s11947-015-1546-4 (2015)
- [12] P.Pongviratchai,J.W.Park, Electrical Conductivity and Physical Properties of Surimi–Potato Starch under Ohmic Heating, Journal of Food Science,Vol72,Issue9,p503-507(2007]
- [13] 朴聖暎,金道彦,植村邦彦,野口明德,魚肉ゲルの通電加熱における周波数帯の影響,日本食品科学工学会誌,42(8),569-574 (1995)
- [14] S.M.Zhua,M.R.Zareifarda,C.R.Chena,M.Marcottea,S.Grabowskia, Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation, Food Research International Vol43, p1666–1672 (2010)
- [15] 福田裕,今野久仁彦,岡崎恵美子 編,通電加熱による水産食品の加熱と殺菌,日本水産学会監修,水産学シリーズ[178],恒星社厚生閣 (2013)
- [16] 電気学会通信教育会,電気学会大学講座電熱工学,第二次改訂版,p.83 (1984)
- [17] 船本泰介,ジュール加熱 (通電加熱) による液状食品の劣化を抑えた連続殺菌装置,月刊フードケミカル,6 月号,pp.70-74 (1998)

[18] 林弘道,食品物理学,養賢堂,p.127 (1989)

[19] 楊文川,東京海洋大学修士論文「固体食品通電加熱における熱移動解析」(2011)

第2章 ムロアジをモデルにした通電加熱による常温保存可能な殺菌方法の研究

2.1 はじめに

水産業界における夏期のアジ漁は、200g 以下のマサバ未成魚・ゴマサバ未成魚・ムロアジ類未成魚（ローソクと呼称される対象魚で、ここでは「ローソク」と以下、表記する）の漁獲割合が大きく 20%前後をしめている。ローソクは、脂質含有量が低く、サイズも小さく、小骨が多いため、養殖用・漁業用の餌料向けや缶詰など、低コストが求められる原料魚となっている。従って、漁業者にとっては、漁労費や漁船燃料などの経費負担を賄うだけの収益が確保されないことは、深刻な問題となっている。従って、ローソクに付加価値をつけた商品開発は、資源の有効活用の観点からも重要課題となっている。

近年、食品安全が重要視されており、国策から 2020 年の東京オリンピック開催に向けて、食品衛生法が 2018 年 6 月に改正された。その結果、食品製造業者等には国際的な食品安全管理である HACCP に沿った食品衛生管理が求められる。これが HACCP 制度化である。

しかしながら、食品の安全性確保は当然であるが、販売・運搬・保管などにおける温度帯についても、エネルギー消費問題、保管温度によるコスト、環境負荷についても考慮しなければならない時代になっている。さらに、製品開発においては、賞味期間の設定・根拠、フードロスの低減、自然災害に備える非常時用食品なども考慮しておく必要がある。そのため常温で長期保存が可能で、喫食時に加工、調理、再加熱などを必要としない、開封してそのまま食べることができることも、市場においては現在求められている。

そこで本研究は、食品業界がかかえる課題を解決する有効な加熱加工手段となりうる通電加熱をテーマとした。また、水産業界の課題である低利用魚の有効利用のため、実験試料としてローソクを対象とした。

常温で長期保存が可能で、さらに非常時食になりうる容器包装詰加圧加熱殺菌食品（缶詰・レトルトパウチ食品、瓶詰食品）は、今後ますます需要が見込まれる加工食品である。ここで容器包装詰加圧加熱殺菌食品とは、食品衛生法上において食品を気密性のある容器包装に入れ、密封した後、加圧加熱殺菌したものと定義されており、その殺菌条件は容器包装詰加圧加熱殺菌食品の製造基準において、中心部の温度（以下「中心温度」という）を 120℃で 4 分間加熱する方法又はこれと同等以上の効力を有する方法によると規定されている[1]。

通常レトルト装置を使用してレトルトパウチ食品を製造する場合の殺菌条件は、120℃で 15 分から 20 分で殺菌され、缶詰・瓶詰製品の場合は 110℃～115℃で 90 分～80 分であり、その加熱媒体には熱水または蒸気が使われている。代表的なレトルトパウチ食品はカレーであり、缶詰には素材缶詰が多くツナ、サケ、サバ、サンマ、カニ、ホタテ、ミカン、モモ、パイナップル、コンビ

ーフ、また焼鳥、コーヒー飲料などがあり、瓶詰製品には、サケフレーク、ヤングコーン、ウズラ卵、つくだ煮、ジャムなどがある。

レトルトパウチ食品や缶詰は、いわゆる包装後に加熱殺菌される食品であるため、食品衛生法の製造基準を満たすために殺菌時間は長くなる。それに対し通電加熱は、食品に直接電圧を印加し、電流が流れることにより発生するジュール熱を利用して加熱する内部加熱方法であり、熱水や水蒸気を加熱媒体とする従来のレトルト加熱処理と比較して、不均一食品であっても 120℃以上の高温加熱が可能であり、かつ短時間処理のため、品質面、生産性の観点から効率的といえる。

しかしながら、通電加熱は、機構的に平行電極間に電気抵抗体である食品を挟み電流を通すことによる加熱であるため、食品が平行電極に均一に接触できる形状でなければ加熱効率や温度上昇が不均一になる。さらに、食品原料は、品種による成分・性状の違いや、貯蔵方法・期間、季節による成分の変動や、生育過程における形状の変化が大きく、また 1 個体の中で物性値の異なる成分が局在する多成分、不均一構造である場合が多く、温度上昇にばらつきが生じることが予測される。

以上の背景を踏まえ、本研究では、通電加熱による資源の有効活用の可能性および不均一食品の新しい容器包装詰加圧加熱殺菌方法の開発を目的とし、不均一食品としてローソクを試料とし、容器包装詰加圧加熱殺菌食品の製造基準としては 120℃で 4 分と同等以上の加熱処理をして無菌充填を行った。また、食品衛生法に基づく無菌試験で、無菌充填の妥当性を確認した。ローソクは、魚体が小さく、脂質含有量も少ないため、鮮魚としての市場性がなく、水産加工用（節・缶詰）として、一部利用されている。近年、マグロなど大型魚種養殖の発展が著しいため養殖用生餌としての冷凍ローソクの需要は増えている一方、養殖用生餌はコストが安いため、漁業者にとっては収入源になりにくい。本研究は、高級品であるオイルサーディン缶詰と類似したローソクオイル漬けを完成品とした付加価値加工方法の確立を目的とした。

食品業界における通電加熱の利用としては、かまぼこ、焼豚[2]、ハム・ソーセージなど水畜産製品の前加熱、めかぶ[3]、味噌など流動状食品の殺菌などであり、また新しい茶飲料の殺菌方法として加圧交流高電界殺菌処理がある[4]。

なお、不均一食品の通電加熱による無菌充填方法および無菌充填食品に関する研究報告は、通電加熱を利用した鶏肉[5]およびキハダマグロ[6]の無菌充填包装食品の開発があるが、いずれも本研究の成果である特許[7]に基づくものである。

そこで本研究は、ローソクを研究対象として、常温で保管・流通でき、かつ長期保存が可能となる

2.2 試料および実験方法

2.2.1 試料の調製

試料に用いたローソクは、個別急速凍結（IQF）したムロアジ幼魚で、平均体長 150 mm で平均重量は 30 g であった（図 2-1）。

(1) 試験区 1

ローソクを自然解凍後、フィレ（3 枚手開き）処理して、フィレ重量に対して 2 倍量の水道水で調製した 5%食塩水に 10 分間塩漬し、塩水切り後のローソクフィレを試料とした。

(2) 試験区 2

ローソクを自然解凍後、20 mm～25 mm（ぶつ切/ドレス）処理してチャンクとし、チャンク重量に対して水道水で調製した 2 倍量の 5%食塩水に 10 分間塩漬し、塩水切り後のローソクチャンクを試料とした。



断頭後、内臓除去して



- (1) フィレ : 手開き 3 枚おろし
- (2) チャンク : ぶつ切り(赤線)

図 2-1 ムロアジ幼魚(ローソク)の処理

2.2.2 通電加熱装置および実験方法

(1) 実験装置

通電加熱用電源は、(株)羽野製作所で製造され、周波数；20kHz、電気容量；3kW、印加電圧；0～100V、電流 30A の仕様である。

本実験は、通電用電源(HJU3000；(株)羽野製作所)と耐圧耐熱ポリフェニールサルフォンチューブ（PPSU 製：内径 30mm×全長 100mm）の通電容器に試料を投入し、端子部を設けたチタン電極（チタン箔 30μm）を配置して、熱収縮チューブ（ポリオレフィン樹脂製）で絶縁した熱電対を挿入し、内圧に耐えられるように、O リング、シリコン製マットに金属板をセットして万力で固定した。のち、通電を開始した。表 2-1 に示したように、通電中の電流、電圧、温度変化は P C 端末にリアルタイムにデータ送信された。

なお、Fig.2-2 は実験装置の概略となる。

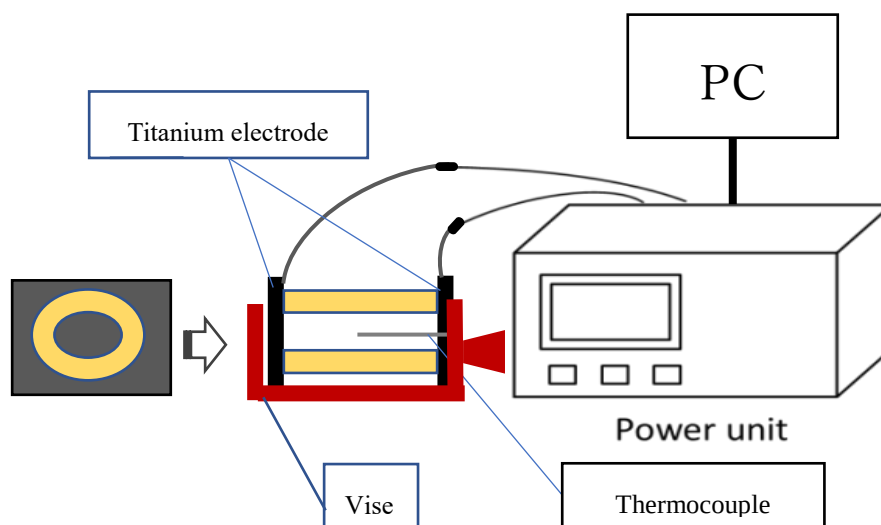


Fig.2-2 Schematic drawings of ohmic heating system

表 2-1 PC 端末に送信された通電加熱時の条件

DTA	ON	SEC	StV	StA	MsV	MsA	Tmp	W	Wh	YEN
DTA	1	186	100	30	100	6	123	594.3	9.3	0.1
DTA	1	187	100	30	100	5.9	125	596.2	9.5	0.1
DTA	1	188	100	30	100	5.9	126	596.5	9.7	0.1
DTA	1	189	100	30	100	5.9	129	596.2	9.8	0.1
DTA	0	190	100	30	0	0	131	0	10	0.2

<記号の説明>

DTA：各データ、ON：1 入・0 切、SEC：通電時間（秒）、StV：設定電圧、StA：設定電流、
MsV：実行電圧、MsA：実行電流、Tmp：中心温度、W：電力、Wh: 電気量、YEN：電力料金

2.2.3 通電加熱および無菌充填方法

(1) 通電加熱方法

①試験区 1（ローソクフィレ）：通電部容器にローソクフィレ 70g 程度を隙間のないように充填した後、印加電圧 100V で通電した（Fig.2-3）。

②試験区 2（ローソクチャック）：通電部容器にローソクチャック 70g 程度を隙間のないように充填した後、印加電圧 100V で通電した。



Fig.2-3 Ohmic heating of fillet

初発温度 20℃から 130℃までは電源スイッチは ON 状態を維持し、130℃に到達した地点で電源スイッチを OFF にした。その後、そのまま放冷で自然冷却して中心温度が 95℃まで下がるのを待って（内圧がなくなるまで）、通電部を開封した。一連の通電加熱のスイッチコントロールを Table2-2 に示した。

Table2-2 Control for ohmic heating

	20℃→130℃	130℃→95℃
試験区 1（ローソクフィレ）	通電 ON	通電 OFF
試験区 2（ローソクチャック）	通電 ON	通電 OFF

(2) 無菌充填方法

手順 1：試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）とも、中心温度 130℃で通電をストップして、そのまま放冷により 95℃まで自然冷却を行い、内圧がなくなっ

た地点で、ローソクフィレおよびローソクチャンクをそれぞれ PPSU 容器からラミネートパウチ 150mm×220mm (ONy/PP) ¹に充填した。

手順 2：125℃～130℃に加温した食用植物性油脂をローソク重量の 1.5 倍相当を直接、ローソクが充填されているラミネートパウチ内を注入した。

手順 3：すぐに、脱気するようインパルスシーラーのシール部分まで、加温した食用植物性油脂を両手の指でラミネートパウチの両端を引っ張るようにして、全体的に広げた。

手順 4：ラミネートパウチ全体に加温した食用植物油脂を広げて、卓上インパルスシーラーで融着シールした。

(3) 食用植物性油脂を 125℃～130℃に加熱した理由

食用植物性油脂の加温温度は、125℃～130℃とした。食用植物性油脂を 125℃～130℃とすることで、ラミネートパウチに無菌状態のローソクフィレおよびローソクチャンクを充填した際の作業手法による微生物汚染は、加温した食用植物性油脂で殺菌され解消できる。

さらに、食用植物性油脂を微生物汚染による殺菌に採用したのは、油脂としての旨みの強化と水分がないため、常圧下の直接加熱で容易に 100℃以上となるからである。また、当該油脂温度の 120℃～130℃であれば、ラミネートパウチはプラスチック製ではあるが、熱による融解が生じない。

(4) 無菌包装状態の外観

①試験区 1 (ローソクフィレ) は、Fig.2-4 に示した。

②試験区 2 (ローソクチャンク)は、Fig.2-5 に示した。



Fig.2-5 Test 1 : fillet



Fig.2-6 Test 2 : chunk

¹ 延伸ポリアミド (ナイロン) /無延伸ポリプロピレン

2.2.4. 無菌充填の妥当性確認

- (1) 無菌充填方法で調製した試験区 1（ローソクフィレ）Fig.2-5 および試験区 2（ローソクチャック）Fig.2-6 について、食品衛生法に基づく無菌試験を実施した。無菌試験とは、検体を $35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ で 14 日間の保存による恒温試験を実施して陰性を示した検体（ガスの発生やドリップの濁りなどない状態）は、引き続き無菌試験用培地で細菌試験を行う 2 段階検査をいう。

(2) 無菌試験の実施方法

① 恒温試験

試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）を包装された状態で $35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ のインキュベーター内で 14 日間保持した。この間において容器包装の膨張の有無又は内容物の漏えいの有無を観察し、容器包装の膨張又は漏えいがあるものは陽性とした。恒温試験で陰性の検体について、細菌試験を行った。

② 細菌試験

手順 1：クリーンブース内での作業で、陰性検体のパウチ外部をアルコール噴霧で殺菌して、滅菌はさみで開封し、滅菌メスで試料をカットしてスケールで 25g 計量した。

手順 2：スケール上の滅菌バッグ内（株式会社エルメックス、PYXON-30）に、カットした試料 25g を投入して、滅菌蒸留水 225ml を加えて、60 秒間ホモジナイズ（オルガノストマッカー 400-T）にかける。

手順 3：この 10 倍希釈液 2ml に 18ml の滅菌蒸留水を入れて、計 100 倍希釈液を作製する。

手順 4：この 1ml を滅菌ピペットで滅菌試験管に挿入して、滅菌蒸留水 9ml で混和し、 35°C のインキュベーターで 48 時間培養した。

③ 試験方法

手順 1：加温溶解させたチオグリコール酸塩培養基（栄研化学株式会社：Table2-3）を試験管に 10ml ずつ分注する。

手順 2：分注した試験管をオートクレーブ 121°C で 15 分間煮沸滅菌する。(Fig.2-6)。

手順 3：滅菌チオグリコール酸塩培養基（培地）3 本に試料 1 ml を接種して、 $35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ のインキュベーター内で 48 時間培養する。

手順 4：48 時間培養後、目視により培地に菌の増殖を認めたもの（濁り）は陽性とした。

Table2-3 Thio glycollate medium

L-シスチン	0.5g
ブドウ糖	5g
酵母エキス	5g
ペプトン	15g
チオグリコール酸塩	0.5g
食塩	2.5 g
レサズリン	0.001g
粉末寒天	0.8 g
精製水	1000ml



Fig.2-7 Sterilization thioglycollate medium

2.3. 結果および考察

2.3.1 通電加熱結果

試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）における通電時間は、初発温度 20°C から 130°C まで 2 分 30 秒後であり、 130°C 確認後に通電加熱は OFF にした。 130°C 達温後は、スイッチ OFF のまま中心温度をキープして、 95°C まで冷却した。

閉鎖型の通電加熱においては、不均一食品であっても中心温度 130°C まで短時間で加熱昇温ができることを確認できた（Fig.2-8）。

また F 値計算は、 120°C 以上の中心温度（Fig.2-9）で行った結果、試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）の試験区とも、F 値 60 以上であった（Fig.2-10）。

ここで、F 値 60 以上となったことについて、着目すべきは、Fig.2-9 で示したグラフ中の赤丸で囲んだ温度は、 130°C で電源を OFF した地点から 140°C まで温度が上昇したことを意味している。

さらに、自然放冷で 120℃まで温度が下がっていく時間を含め、電源 OFF してからの方が、殺菌価が高い結果となっている。すなわち、120℃におけるホールド時間が必要なく、自然放冷の時間が殺菌時間にカウントされることを示している。従って、通電加熱は、不均一食品を短時間で 140℃以上まで昇温させることができ（約 2 分 30 秒）、電源を切った地点からの自然放冷の時間も殺菌価としてカウントできることになり、エネルギーの省力化に大きく期待できる加熱であることが分かった。

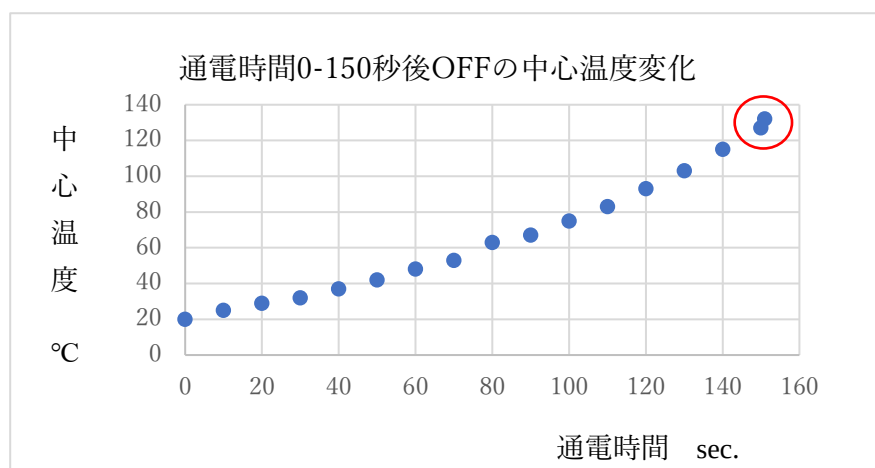


Fig.2-8 Temperature rise test of ohmic heating(0-150sec.)

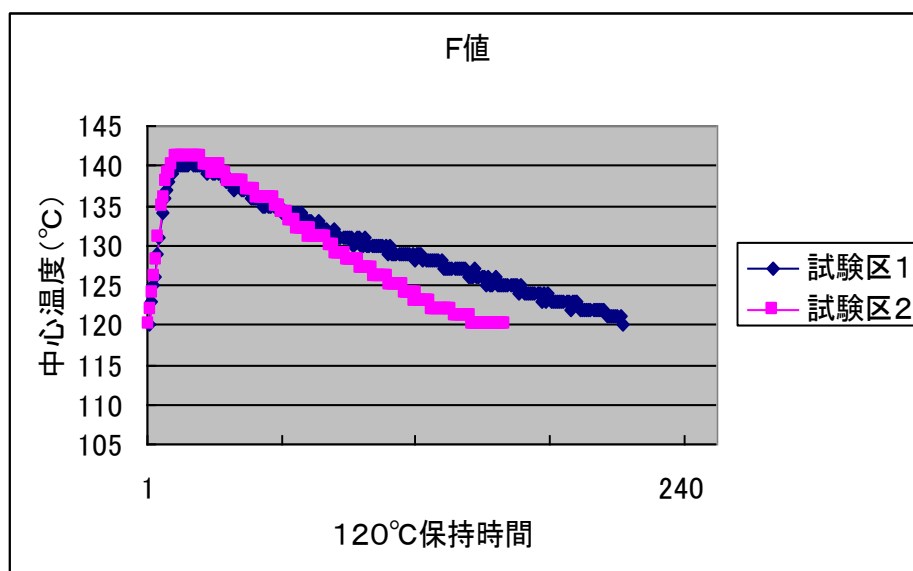


Fig.2-9 Central temperature change of ohmic heating

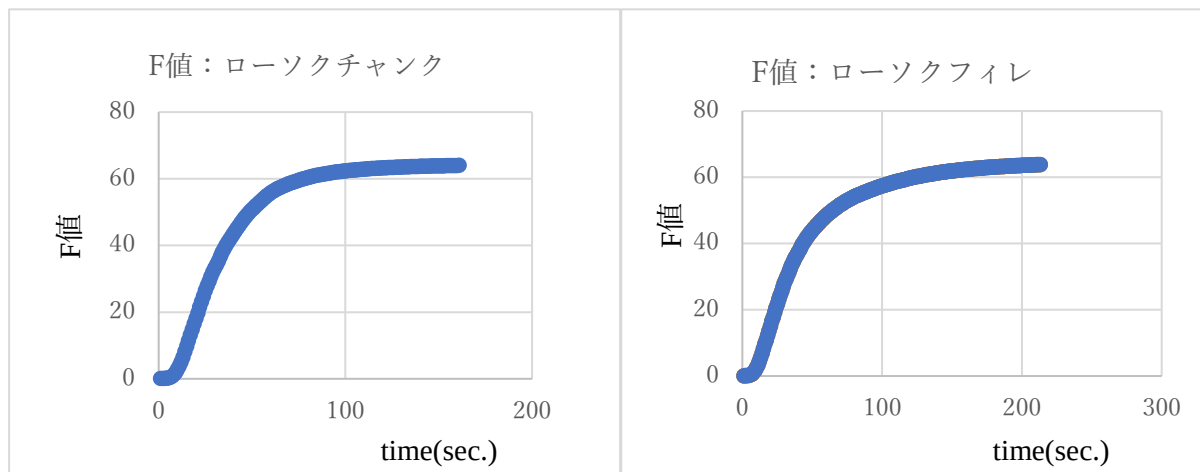


Fig.2-10 F Value (120°C or more) of ohmic heating

2.3.2. 通電加熱による無菌充填方法の妥当性

無菌充填の妥当性を評価するため、試験区 1（ローソクフィレ）Fig.2-5 および試験区 2（ローソクチャック）Fig.2-6 について、食品衛生法に基づく無菌試験を実施した。

試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）とも通電加熱により中心温度 130°C で 75 秒間の殺菌条件において、いずれかのチオグリコール酸塩培養基についても嫌気性菌の増殖を認めなかったため、試験区 1（ローソクフィレ）および試験区 2（ローソクチャック）においては、無菌状態であることが確認できた（Fig.2-11）。このことにより、食品衛生法上の容器包装詰加圧加熱殺菌食品の製造基準である中心温度 120°C で 4 分間加熱と同等以上の効力を有する方法であることが示された。

なお、培地の上部に菌の発育がある場合（濁り）は好気性菌が増殖していることを示し、Fig.2-12 の左 2 本の試験管が示すように、下部に菌の発育がある場合（濁り）は嫌気性菌が増殖したものと判断する。



図 2-11 無菌試験陰性



図 2-12 陽性（嫌気性菌の存在：左の 2 本）

2.4. 結論と今後の課題

本研究では、不均一食品として、ローソクを対象魚として選定し、通電加熱による殺菌方法および無菌充填方法を確立できた。通電加熱は、均一食品においても導電率や食品の組成等により温度のばらつきが生じることは、第 1 章において報告した。しかし、本研究において、閉鎖型通電加熱の場合は、不均一食品であっても、食品内部から発生した高温蒸気で容器内が 120℃以上の温度となり、加熱カテゴリは蒸し物となり、かつ閉鎖型容器内は商業的無菌状態であることが示された。

通電加熱は食品に直接電圧を印加し、電流が流れることにより発生するジュール熱を利用して加熱する内部加熱方法であるため、レトルトパウチ食品のように包装後は通電加熱による加熱ができない。そのため、殺菌後に包装することが要求される。

本研究は、その点に着目して加熱殺菌後、無菌的に包装できるかを研究課題として実験を繰り返した結果、無菌試験陰性の結果を得たことにより、不均一食品の無菌充填方法の可能性が示唆された。

本研究の無菌充填方法およびその製品は、特許出願により特許登録された(特許第 5067764 号)。

なお、本研究で確認された無菌充填方法でのプラスチックパウチ（容器）は、加温された食用植物油脂でパウチ内を殺菌するため、従来の無菌充填方法のように前もってパウチ内を紫外線や過酸化水素水などにより殺菌にする必要がなく、無菌充填プラントの設計上、簡易的な無菌充填ラインとなり、かつ低コストのプラスチックパウチが使用できる。

さらに、常温保存可能なオイル漬け製品として、食用植物性油脂の加熱は短時間であるため、熱にデリケートな食用植物油脂も利用可能となり、例えばオリーブオイルなども利用できる。

2.5. 本章の引用文献

- [1] 食品,添加物等の規格基準第1食品D各条 容器包装詰加圧加熱殺菌食品
- [2] 食肉類加工原料の成形方法及びその装置,公開特許公報,特開 2002-45110 (2002)
- [3] 海藻類の加工方法,公開特許公報,特開 2004-201544 (2004)
- [4] 茶飲料の殺菌方法,公開特許公報,特開 2007-29012 (2007)
- [5] 伊藤るり,通電加熱を用いた鶏肉の無菌充填包装食品の開発,東京海洋大学大学院 修士学位論文 (2013)
- [6] 濱田(佐藤)奈保子・久保田宙幸・横田大樹、,ジュール熱を利用した固形状食品に対する新規加工技術の開発,美味技術学会誌,13(1),p13-19 (2014)
- [7] 中井利雄,濱田奈保子,食品の無菌充填方法および無菌充填食品, 特許登録日:2012年8月24日,特許第5067764号

第3章 ホール卵をモデルにした通電加熱と電気物性

3.1. はじめに

食品業界における鶏卵は、殻付き卵、ホール卵(割卵後の未攪拌全卵)、液全卵(攪拌した液全卵、ここでは、以降「液卵」と表記する)、卵黄(その多くは、加糖された冷凍卵黄)、卵白(その多くは冷凍)などが広く利用されているが、鶏卵のうち割卵後で液卵等供給する場合は、食品衛生法の適用を受け、その規格基準では、原料卵の取扱いおよび殺菌条件について厳密に規定している[i]。

一方、鶏卵を利用した製品加工では、殻付き卵を割卵して使用することで、起泡性、凝固性、乳化性と言った卵の主要な性質を最大限に活かした高品質な製品が得られるとされており、加熱を全く行わない液卵や食品衛生法における食品の規格基準に規定する加熱温度に到達していない液卵(未殺菌液卵)は、品質面において殻付き卵に劣る。すなわち先に述べた卵本来の性質を活かした製品品質は次の関係性にある。

殻付き卵>割卵ホール卵>未殺菌液卵>殺菌液卵

殻付き卵は、上述したように食中毒のリスクがある。卵殻には食中毒菌であるサルモネラ汚染の可能性があるため食品工場、量販店惣菜売場バックヤード、ファミリーレストラン等では、自社基準としてその使用を禁止している場合が多く、また未殺菌液卵も食の安全性や賞味期限等の取扱いの観点から市場での受入れは難しい。食品衛生法に基づく鶏卵の表示基準によると、食品工場において殻付き卵を原材料として使用する場合は、正常卵の卵殻表面を次亜塩素酸ソーダ等により洗浄殺菌することとされる[ii]。さらに国内においても、HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) の制度化により、食の安全性は強化され、鶏卵原料においては生物学的ハザードである病原菌(サルモネラ菌)が潜在的ハザードとして特定される。また、殻付き卵は割卵後の卵殻ごみとして廃棄物動線やアレルギー交差接触を考慮した製造工程フローの策定が重要となる。

上述の理由から、現在、食品業界の多くは、殺菌液卵を利用しているが、殺菌液卵は殺菌温度による加熱のダメージに加えて、例えばカラザや卵殻等の異物除去のためポンプによる圧送によってメッシュフィルターを通過する時、機械力学的なダメージを受けることが想定される。よって、これを加熱利用する際、分散性や凝固性に違いが生じ、その結果、未殺菌のホール卵や液卵を使用した場合の品質とは異なる製品となる場合が多い。また、殺菌液卵は卵白と卵黄が均一に混合されているため、マーブル様の玉子焼きが製造できず、あえて後入れで冷凍卵白を添加使用して手作り感を表現した製品も販売されている。

これら問題を解決するために、液卵の殺菌技術・品質改善が報告されている例はあるものの[1-5]、未だ、鶏卵原料として十分な殺菌手段が確立されているとは言い難い。よって、割卵後のホ

ール卵での殺菌手段の構築により、卵製品の品質向上と安全性が両立できることになり、その製品化の市場性は非常に大きいものであることが期待される。

一方、前述の殺菌技術として期待される手法の一つに通電加熱がある。通電加熱は、電気抵抗体である食品に直接電圧を印加し、電流が流れることにより発生するジュール熱を利用して加熱する内部加熱方法である。その加熱効率の良さと温度制御の正確さから国内外の食品業界において注目されている技術と言える[6-10]。多くの場合、交流電源が用いられるが、商用周波数(50Hzまたは60Hz)から、最近では20kHzといった高周波数での電源を使用することで、食品と電極との接触面に発生する腐食問題を低減できること、また導電率(電気伝導率)の小さい材料への適用が可能となり、その応用が広がっている。これまで、日本の食品産業においては、食肉加工[11、12]、魚肉練り製品[13-15]、海藻加工[16]等の品質及び生産性向上、食品加工工程の簡素化および消費エネルギー低減を目的として実用化されており、液卵の殺菌においても採用されている[3-5]。しかしながら、導電率の異なる成分からなる固体様の混在食品(例えば、魚のフィレの場合は皮・脂肪・血合い肉・白身・骨、豚肉の場合は脂身・筋・赤身が該当する)を通電加熱した場合は、部位による温度のばらつきが大きくなるが、その解決に向けた技術報告は少ない[17-19]。

一方、ホール卵も、導電率が異なる卵黄と卵白からなる半固体様食品であり、通電加熱では部位によって温度上昇が異なることが予想されるが、実際に適用した報告例はこれまでにない。これに対して、導電率の異なる成分を組み合わせたモデル系での通電加熱における伝熱解析が報告されており[20]、固体様かつ不均一多相系の食品素材に対して最適な通電加熱効果を実現するための有効な手段となることが期待される。通電加熱における伝熱解析では、熱伝導解析とともに、食品を構成する各部位の導電率に基づいて、通電時の発熱分布を予測することが不可欠となるが、鶏卵を構成する各部位である卵黄、卵白の導電率に関しては、Icier と Bozkurt [21]による液卵、Darvishi ら[22]による液卵、卵白、卵黄を対象とした報告があるが、いずれも通電加熱時の電流、電圧値から算出した値であり、電源周波数は50Hz、または60Hzに限定されている。これに対して、今井らは[23]、卵白アルブミン水溶液を対象とした通電実験を行い、周波数10Hz-10kHzにおいて、交流における電気抵抗であるインピーダンスが変化することを報告している。これより、通電加熱によるホール卵の殺菌条件の確立にむけて伝熱解析を行うためには、鶏卵構成要素の導電率と、その温度依存性の取得が必要と言える。

上述の背景から、本研究では、鶏卵を①液卵、②卵白、③卵黄、④ホール卵黄(卵黄膜有り)の4つに分画したものを試料としてLCRメータを用いてインピーダンスを測定し、得られた値から導電率を求めることを目的とした。また、別途、ホール卵の通電加熱実験を行い、得られた各卵構成要素の導電率の観点から、ホール卵の通電加熱特性を検討した。

3.2. 試料および実験方法

3.2.1. ホール卵の通電加熱実験

(1) 試料

通電加熱実験では、割卵後のホール卵をそのまま使用した。市販の白色レグホン種 52g (MS) 以上 76g (LL) 未満、産卵日から 1 週間以内の鶏卵すなわち賞味期限 7 日以上ある鶏卵を試料として使用した。

(2) 装置および方法

通電加熱システムは、周波数 20kHz の電源 (HJU3000、(株)羽野製作所) と通電部、データ通信 PC からなる。通電部は、Fig.1 に示したように、テフロン製容器 (L50mm × W48mm × D63mm) の両側面部にチタン箔電極 (T 1mm) を配して、試料となるホール卵 1 個を挿入した。さらに、パラフィルムで薄く覆った極細 K 型熱電対 (0.5mm ϕ) を容器内へ挿入し、各部位の温度を計測しながら通電電圧 50V で加熱した。

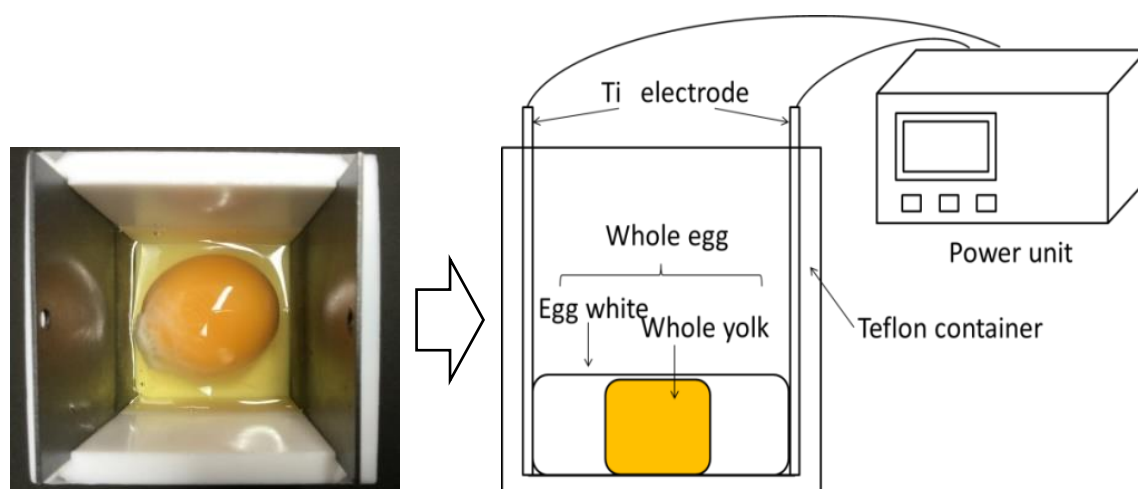


Fig.3-1 Schematic of the experimental setup for ohmic heating

3.2.2 LCR メータによるインピーダンス測定

(1) 試料

市販の白色レグホン鶏卵を用いて、液卵の測定では、6 個を割卵後、ホモジナイザー (PT10-35GT、Kinematica) を使用し、5000rpm で 60 秒間攪拌して試料とした。卵黄、卵白に関しては、鶏卵 6 個を割卵後、エッグセパレーターを用いて、両者を分離し、液卵と同様の条件で攪拌し、測定試料とした。

ホール卵黄のインピーダンスへ及ぼす卵黄膜の影響を調べる実験では、鶏卵 6 個を割卵後、エッグセパレーターで卵白と分離した卵黄について、卵黄膜を爪楊枝で刺し、メッシュを通過した卵液を回収して、上述と同様の条件で攪拌し、膜無し卵黄試料とした。膜有り卵黄は、卵白と分離後、卵黄 1 個分をセルに入れ測定に供した。

(2) 装置及び方法

本実験では LCR メータによるインピーダンス測定において、温度制御に通電加熱を利用した。内壁にチタン箔電極 (T 30 μ m) を配置したポリプロピレン製の立方体の容器 (液卵および卵黄では 1 辺 30mm、卵白は 1 辺 40mm、膜付き卵黄は 1 辺 26mm) に試料を投入し、さらに、試料から容器への伝熱を軽減し系内の温度分布が均一となることを目的として容器外壁を発泡スチロール(PSP)製の断熱材で覆った。通電加熱実験と同様の電源 (HJU3000、(株)羽野製作所) を用いて目的温度まで加熱した後、通電を停止させ、直ちに自動平衡ブリッジ回路を採用した LCR メータ (LCR HIGHTESTER 3532-50LCR、日置電気(株)) でインピーダンスを測定した。この時パラフィルムで薄く覆った極細 K 型熱電対 (0.5mm ϕ) を試料中心付近となるように、試料容器の横、幅の寸法から面中心位置を決め、深さに関しては、試料が占める高さの二分の一の位置に挿入し、10~90 $^{\circ}$ C の範囲を 10 $^{\circ}$ C 間隔で温度を確認しながら加熱し、インピーダンス測定を行った。装置の概略図を Fig.3-2 に示した。

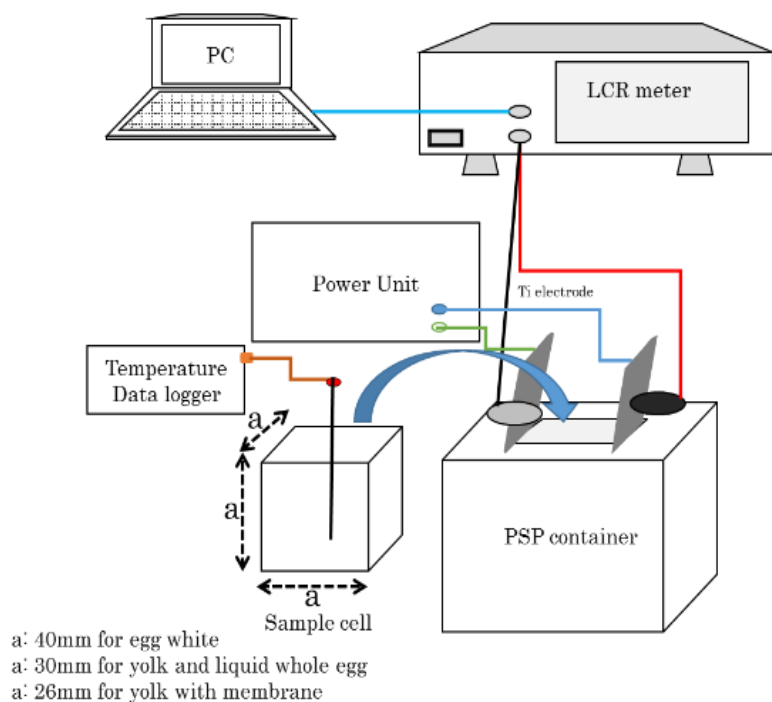


Fig.3-2 Schematic drawings of electric property measurement system

3.3. 結果と考察

3.3.1. ホール卵の通電加熱特性

卵黄、卵白はいずれも通電加熱開始とともに温度が上昇するが、温度上昇の様子は場所によって異なった。卵白のうち、卵黄によって遮られることがなく、直線的に電極に接触している卵白部 (Fig.3-3 ①) では、温度上昇が最も速かったのに対して、間に卵黄が占める電極近傍の卵白部 (Fig.3-3 ②) で、通電初期では、ほとんど温度上昇せずに、最も昇温が遅かった。卵黄は、温度上昇の速い卵白部 (Fig.3-3 ①) に比べて緩やかに温度上昇し、通電時間が長くなるに従い、卵白と卵黄の温度差が大きくなっていることが示された。写真から、卵白部 (Fig.3-3 ①) では、白濁している様子が明らかであり、この部分で卵白が加熱変性していることが示された。卵白の加熱による白濁は、約 60°C から開始するオボアルブミンの加熱変性に伴って進行することが示されており [24]、昇温速度が遅い電極近傍の卵白部 (Fig.3-3 ②) では、オボアルブミンの変性開始温度に到達していないことから白濁しなかったと考えられる。一方、卵黄に関しては、最終到達温度が 60°C を下回っており、熱分析の結果から [24]、今回の加熱実験においてタンパク質の加熱変性は生じていないと言える。

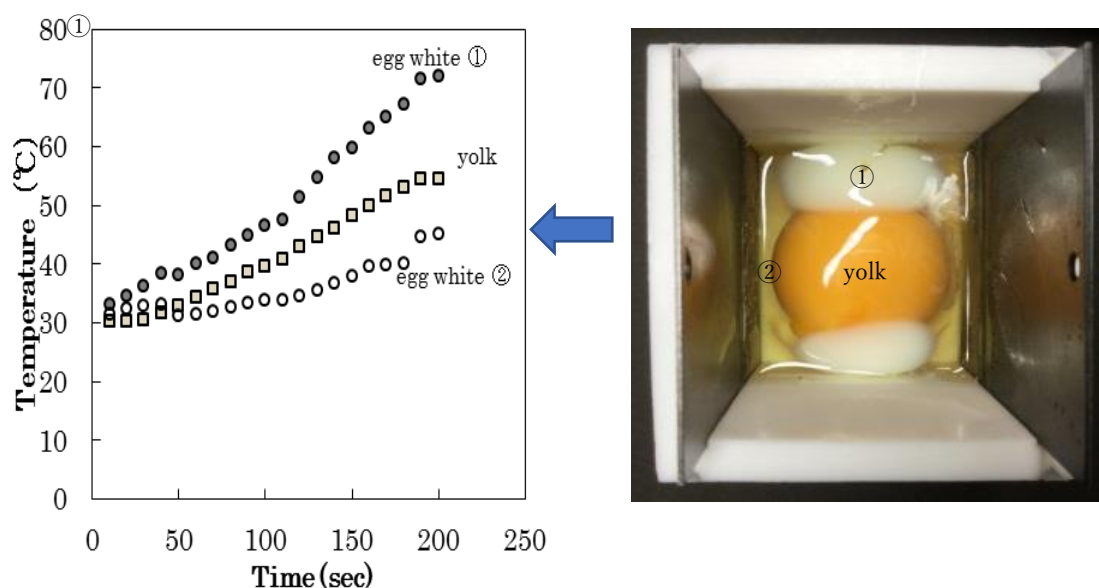


Fig.3-3 Temperature history of whole egg during ohmic heating

さらに、卵 2 個分を通電加熱した場合の様子を Fig.3-4 に示したが、卵 1 個と同様に卵白部において加熱変性していない卵白部と加熱変性が進行して白濁した部位とが観察された。特に Fig.3-4(a)で白濁している卵白部は、二つの卵黄間および卵黄と容器に挟まれた狭い領域であり、直線的に電流が流れる部位であると共に卵白量が少ないことから、加熱が進行したと考えられる。



(a) Parallel

(b) Series

Fig.3-4 Arrangement of yolk egg for ohmic heating

以上より、ホール卵の通電加熱では、構成成分である卵黄、ならびに卵白において加熱速度が異なること、さらに卵黄と卵白の電極間での配置が、それぞれの発熱に大きく影響することが明らかになった。モデル食品を用いた既往の研究において、導電率が異なる2種類の固体成分の配置が電流の流れる方向に対して直列または並列かで、異なる発熱パターンを示すことが報告されており[8][20]、ホール卵の通電加熱に見られた卵白と卵黄との加熱速度の違いは、両者の導電率の違いに起因すると考えられた。また、通電時間が長くなると、卵白と卵黄の温度差が大きくなることから、両者の導電率における温度依存性が異なることが予想された。

3.3.2. インピーダンス測定による導電率の算出

(1) 卵白、卵黄、液卵の電気特性

LCRメータは交流における抵抗すなわち次式に示したインピーダンス Z (Ω) を求めるものである。

$$Z = R + jX_C \quad (1)$$

ここで、 R はインピーダンスの純抵抗成分を、 X_C は容量性成分（容量性リアクタンス）を表す。さらに、 X_C は次のように表される。

$$X_C = \frac{-1}{2\pi fC} \quad (2)$$

ここで、 f (1/s) は電源周波数、 C (μ F) はキャパシタンス（静電容量）である。

(1)式より、 $X_C=0$ ならば、 Z は純粋な抵抗となり、 $X_C \neq 0$ ならば、 Z は複素数となる。LCR メータでは、インピーダンスとともに、Fig.5 で示したようにキャパシタンスと純抵抗成分の両者が等価回路において並列または直列の関係にあると仮定して純抵抗成分を見積ることができる。各値の定義は以下のとおりである。

$Z(\Omega)$ ：インピーダンス

$R_p(\Omega)$ ：並列回路とみなした時の抵抗 (Fig.3-5 (a))

$R_s(\Omega)$ ：直列回路とみなした時の抵抗 (Fig.3-5 (b))

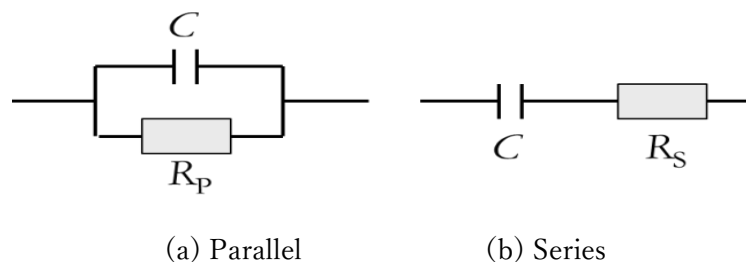


Fig.3-5 Equivalent circuit models: (a) Parallel or (b) Series model

20°Cにおける卵黄、卵白、液卵のインピーダンス (Z) ならびに抵抗 (R_p 、 R_s) 値について、測定周波数に対してプロットしたものを Fig.3-6 に示した。卵黄 (Fig.3-6(a))、卵白 (Fig.3-6(b))、液卵 (Fig.3-6(c)) のいずれにおいても周波数の増加に伴ってインピーダンス (Z) ならびに抵抗 (R_p 、 R_s) 値は減少した。このことから、導電率の小さい食品素材等を通電加熱する場合には、50Hz、60Hz の商用周波数領域での加熱では、高周波数域に比べて発熱量が低く、温度上昇時間も長くなることが予測された。

さらに 1kHz 以上の高周波領域では、インピーダンス (Z) と抵抗 (R_p 、 R_s) 値は、ほぼ一致することが確認できたが、低周波領域では値が異なった。(2)式から周波数が大きくなると容量リアクタンスが小さくなり、インピーダンスは抵抗に漸近すると予想されるが、Fig.3-6 を見ると、卵白および液卵の場合には、1kHz 以上では容量リアクタンス成分は無視できるものの、50Hz、60Hz の商用周波数領域では無視できないことがわかる。一方、卵黄は、すべての周波数域でインピーダンス (Z) と抵抗 (R_p 、 R_s) の差が小さいことから、容量リアクタンス成分が卵白および液卵の場合に比べて無視できると考えられる。

インピーダンス (Z) と抵抗 (R_p 、 R_s) の値を比べると、卵黄、卵白、液卵のいずれにおいても $R_p > Z > R_s$ となった。Fig.3-5(a)に示したように、等価回路を並列回路とみなした場合、キャパシタンスと抵抗に印加される電圧 V は等しく、それぞれに流れる電流の合計がその素材に流れる電流 I となる。したがって、 V と I の積は次式で表され、 R_p は Z よりも大きくなる。

$$VI = \frac{V^2}{Z} \geq \frac{V^2}{R_p} \quad (3)$$

一方、Fig.3-5(b)のように等価回路を直列回路とみなした場合、キャパシタンスと抵抗に流れる電流 I は等しく、それぞれの降下電圧の合計がその素材に印加される電圧 V となる。したがって、 V と I の積は次式で表され、 R_s は Z よりも小さくなる。

$$VI = I^2 Z \geq I^2 R_s \quad (4)$$

以上の関係が、卵黄、卵白、液卵のすべての測定温度において確認された。

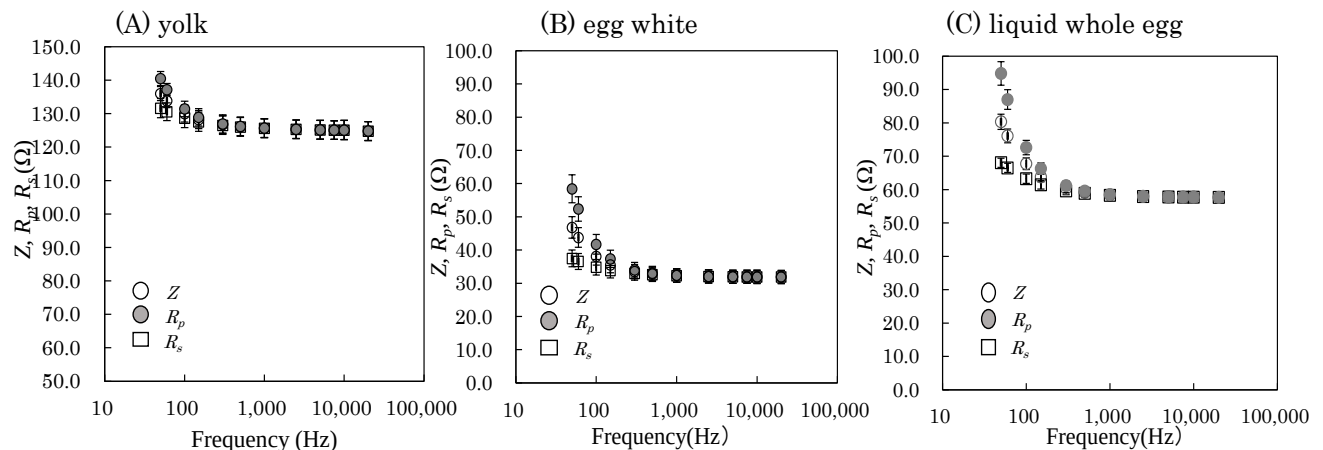


Fig.3-6 Electrical characteristics (Z , R_p , and R_s) of yolk (A)、egg white (B)、and liquid whole egg (C)、at 20°C.(n=3)

物体の抵抗はその大きさに依存するため、発熱量の計算に必要となる物性値は、次の式 (5) で定義される導電率 σ ($S \cdot m^{-1}$) が使用される。

$$\sigma = \frac{d}{S} \frac{1}{R} \quad (5)$$

ここで、 $d(m)$ は抵抗を測定したときの電極間距離、 $S(m^2)$ は電極面積である。

この導電率から次式を用いて通電加熱における発熱量 $Q(W)$ が計算されることになる。

$$Q = IV = \frac{V^2}{R} = \sigma \frac{S}{d} V^2 \quad \text{あるいは} \quad Q = IV = I^2 R = \frac{1}{\sigma} \frac{d}{S} I^2 \quad (6)$$

しかし、容量性リアクタンスにおいては、電荷の蓄積と放出が交互に行われ、電流位相が電圧より 90° 進むが、電気エネルギーの消費はともなわない。よって、(6)式から計算した発熱量は消費電力よりも大きくなり、実際とは異なる発熱量を見積もることになるため、注意が必要である。容量成分が無視できる場合は、発熱量 (消費電力) は(5)式ならびに(6)式の R を Z に変えた式から求められる。

本研究では、周波数 20kHz における通電加熱実験を行ったこと、また Fig.3-6 よりインピーダンス (Z) と抵抗 (R_p , R_s) 値が 20kHz においては一致していることから、容量成分が無視できると考え、各温度で測定した卵黄、卵白、液卵のインピーダンス (Z) の値を用いて、(7) 式に従って導電率を求め、その温度依存性について Fig.3-7 に表した。比較として 50Hz のインピーダンスから求めた導電率の値も示した。

$$\sigma_z = \frac{d}{S} \frac{1}{Z} \quad (7)$$

Fig.3-7 に示したように、温度上昇に伴って卵黄、卵白、液卵の導電率はいずれも増加した。周波数 20kHz における値は、50Hz に比べて大きく、卵白 70°C の場合では、導電率は周波数 50Hz で $0.65 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 、周波数 20kHz では $1.14 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ であった。

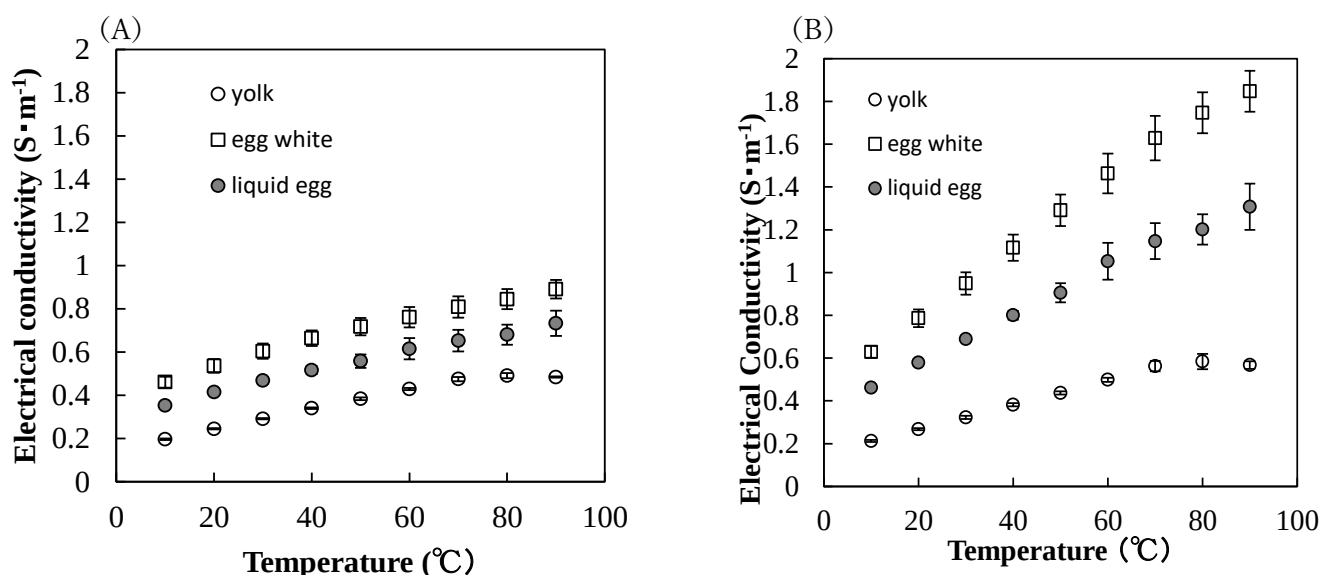


Fig.3-7 Comparison of EC (σ_z) values of egg yolk, egg white, and liquid whole egg for (A) 50 Hz and (B) 20kHz. (n=3)

このことから、高周波数の方が、発熱量が大きく、通電加熱における昇温速度も大きいことがわかる。

従って、卵黄、卵白、液卵の通電加熱は、温度上昇に伴って導電率が増加することから、加熱の進行とともに、さらに発熱し、加熱されやすくなるといえる。よって、食品産業における通電加熱の利用が低い温度からの予備加熱が主流であるのに対して、病原菌殺菌条件例えば鶏卵では 55°C 以上の利用において、品質を損なわずに短時間で加熱できることから安全面に対しても好ましいことがわかった。

Fig.3-7 の結果から、卵黄の導電率は、卵白のそれに比べて著しく低く、両者が混合した液卵が、その中間の導電率を示すことがわかる。この結果は、既往の電源周波数が 50Hz、または 60Hz における液卵の導電率測定結果[22、23]と一致しており、高周波の 20kHz においても、インピーダンスの大きい脂質を多く含む卵黄が最も低い導電率を示すことが明らかになった。

3.3.3. 卵黄膜の電気特性

Fig.3-5 ならびに Fig.3-7 に示したように、卵黄のインピーダンスは卵白、液全卵に比べて著しく大きく、導電率が低いという結果が得られたことから、Fig.3-3 に示したホール卵の通電加熱において、電流の方向に対して卵黄と卵白が並列に位置するとみなせる部分で、卵黄の昇温が遅れた要因が導電率の違いによるものである事が示された。しかしながら、ホール卵の通電加熱実験では、卵黄はその表面に膜がある状態である。よって、卵黄の電気特性に加えて、卵黄の表面を覆う、卵黄膜による影響の程度を調べるため、卵黄膜の有無での電気特性の測定を行った。インピーダンスの測定結果を Fig.3-8 に示した。

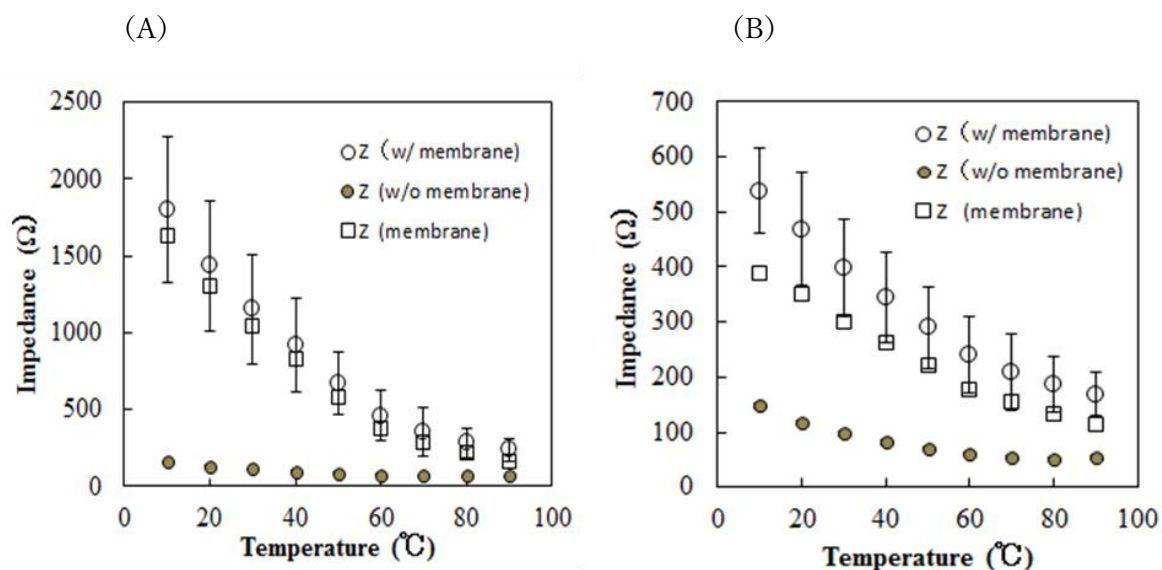


Fig.3-8 Temperature dependence of impedance of egg yolk measured with LCR meter; (A) 50Hz and (B) 20kHz.

Fig.3-8 は各測定温度における卵黄のインピーダンスの測定結果をプロットしたものであり、周波数 20kHz とともに比較として 50Hz の結果を示した。卵黄膜の有無で、インピーダンスの値は大きく異なった。膜有り卵黄(w/ membrane)でのインピーダンスは、膜無し卵黄(w/o membrane)に比べて、著しく大きな値を示した。膜の有無によるインピーダンスの差は低温において大きく、温度が上昇するとともに小さくなった。また、インピーダンスの測定において、膜有り卵黄では

標準偏差が大きく、バラつきが大きい結果となった。これより、膜の厚みや構造など卵黄膜自体の性質は個体差が大きいことが予想されるものの、いずれの温度帯においても膜の存在によって、電気が流れにくくなるということが明らかになった。

以上の結果から、膜有りならびに膜無し卵黄のそれぞれのインピーダンスを用いて、卵黄膜のインピーダンスを推算することとした。すなわち、膜有り卵黄のインピーダンス測定では、電流の流れる方向に対して、卵黄膜と卵黄とが直列に並んだ系と見なせることから、次の (8) 式に従って、膜のインピーダンスを求めることが出来る。

$$Z_w = Z_y + Z_m \quad (8)$$

ただし、 Z_w は膜有り卵黄、 Z_y は膜無し卵黄、 Z_m は卵黄膜についてのそれぞれのインピーダンスである。

(8) 式を用いて推算した卵黄膜のインピーダンスを Fig.3-8 に示した。Fig.3-8 より卵黄膜のみのインピーダンスは大きく、膜が大きな抵抗となっていることがわかる。また温度上昇とともに膜のインピーダンスは減少し、膜無し卵黄のインピーダンス値に近づく様子が見られた。

Fig.3-8 の値のうち、膜有り卵黄ならびに膜無し卵黄の導電率を (7) 式に従って求め、Fig.3-9 に示した。膜を取り除いた場合、卵黄の導電率は 50Hz、20kHz とともに温度上昇に伴って、ほぼ直線的に急激に増加するが、膜があることで、急激な導電率の上昇を抑制していることがわかる。周波数 20kHz においても、温度が 60℃に達しても低い導電率のままであることから、膜が存在する卵黄の発熱は高周波においても低いと考えられる。

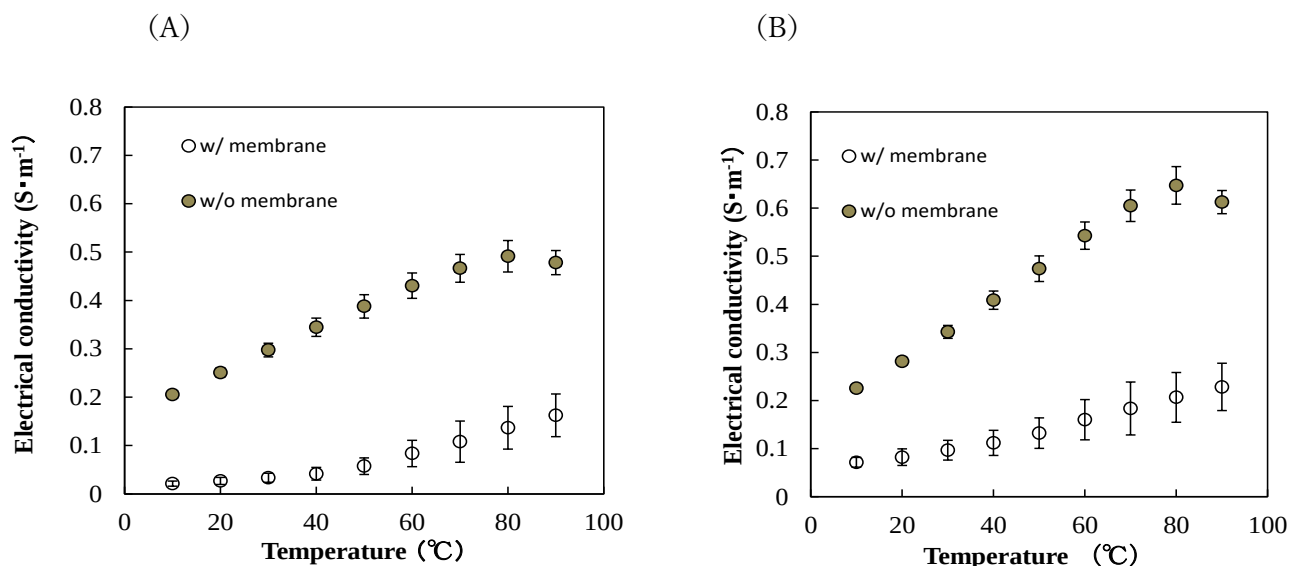


Fig.3-9 Temperature dependence of electrical conductivity of egg yolk with、and without membrane ; 50 Hz (A) and 20 kHz (B). (n=3)

一方、卵黄膜は、形態および成分の異なる二層すなわち内層と外層からなり、厚みは、それぞれ、おおよそ 4μm と報告されている[25]。しかしながら、この値は、品種や個体差によって

も大きく異なることが考えられるため、膜厚を決めることが難しく、卵黄膜自体の導電率を決めることは容易ではない。よって、卵黄膜単位厚みあたりの見かけ導電率(apparent electrical conductivity)； $\left(\frac{H_m}{\sigma_m}\right)^{-1}$ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}/\text{m unit membrane}$) を新たに定義し、(9) 式の直列モデルにおける関係から算出して膜部分の導電率として Fig.10 に示した。

$$\frac{H_w}{\sigma_w} = \frac{H_y}{\sigma_y} + \frac{2H_m}{\sigma_m} \quad (9)$$

ただし、膜の厚みと導電率を H_m 、 σ_m 、膜付き卵黄の厚み（電極間距離）と膜付き卵黄の導電率 H_w 、 σ_w 、膜を取り除いた卵黄の厚み（電極間距離）と膜を取り除いた卵黄の導電率 H_y 、 σ_y とした。

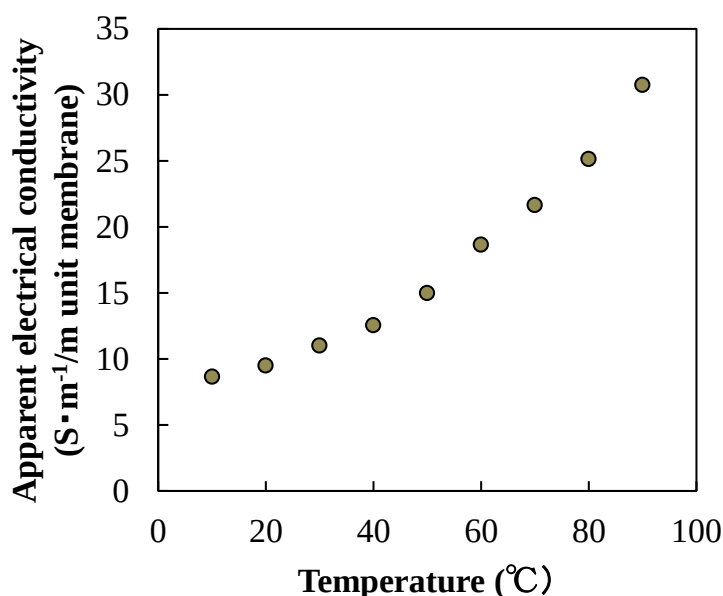


Fig.3-10 Temperature dependence of electrical conductivity per unit membrane for 20kHz.

Fig.3-10 は、卵黄膜の単位厚みあたりの見かけ導電率の温度変化を示している。温度上昇に伴い、見かけ導電率は、指数関数的に上昇することが示された。ここで、50°Cにおける見かけ導電率 $15 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$ を、先に報告されている卵黄膜の内層、外層のそれぞれの厚み $4\mu\text{m}$ を用いて、膜全体の導電率として換算すると、 $1.2 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ という結果が得られた。Jin ら[26]は、同様な方法で、魚肉（ブリ）の筋鞘膜の導電率を測定したが、15°Cから 80°Cで、 $0.1 \sim 0.3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ であったと報告している。両者の値を単純に比較することは出来ないが、いずれも膜タンパク質が低い導電率を示すという点で一致しており、多成分多層構造を有する試料の通電加熱では、導電率の低い部位が

電流の向き対してどのように配置されるかによって、昇温速度に大きな影響を及ぼすことから、この点を考慮に入れた加熱操作の設計が必要であると言える。

3.4. 結論

電源周波数 20kHz の通電加熱装置を用いてホール卵の加熱実験を行ったところ、構成成分である卵黄、ならびに卵白において加熱速度が異なること、さらに卵黄と卵白の電極間での配置が、それぞれの発熱に大きく影響することが明らかになった。

ホール卵から分画した卵白、卵黄、ならびに、これらを混合した液卵について LCR メータによるインピーダンスの測定を行い、導電率を求めた。その結果、温度上昇に伴って卵黄、卵白、液卵の導電率はいずれも増加すること、50Hz の商用周波数に比べ 20kHz の高周波において卵白、液卵の導電率の温度依存性が大きくなることが示された。

卵黄膜の有無で、インピーダンスの値は大きく異なり、膜有り卵黄でのインピーダンスは、膜無し卵黄に比べて、著しく大きな値となった。

卵黄膜の単位厚み当たりの見かけ導電率は、温度上昇に伴って指数関数的に上昇した。50°C における単位厚み当たりの見かけ導電率 $15 \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$ と卵黄膜の厚みから換算した膜全体の導電率は $1.2 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ となり、著しく小さいことが明らかになった。

3.5. 本章の引用文献

- [1] Y. Tamaki, M. Atobe, A. Kawaguchi; “Frozen food with half-boiled egg drop soup (半熟状卵とじ冷凍食品)”. Patent Publication JP1996 -116941.
- [2] H. Touen; “Production method of sterilized eggs which gave white color (白色の色を出した殺菌液卵の製造方法)”. Patent Publication JP2012-143224.
- [3] K. Matsuoka; “Method for producing sterilizing whole liquid egg (殺菌液卵の製造方法)”. Patent Publication JP2011-125225.
- [4] H. Hoshino; “Heat treatment method and apparatus of liquid egg (液卵の加熱処理方法および加熱処理装置)”. Patent Publication JP2012-110233.
- [5] T. Yukisaki, M.Kouno; “Application study of ohmic heating on sterilization of hen egg” (in Japanese). Report of Miyazaki Prefectural Industrial Technology Center & Miyazaki Prefectural Food R&D Center, 42, 115-119 (1997).
- [6] M. Sakr, S. Liu; A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). [Renewable and Sustainable Energy Reviews](#), 39, 262–269 (2014).
- [7] M.C. Knirsch, C.A. Santos, A.A. Vicente, T.C.V. Penna; Ohmic heating-a review, Trends in Food Sci. Technol., 21, 436-441 (2010).
- [8] T. Nakai, N.Sakai; “Electrical properties of food and ohmic heating” (in Japanese). Jpn. J. Thermophys. Prop., 25(4), 200-208 (2011).
- [9] K. Uemura; “Basic theory of joule heating (ジュール加熱の基礎理論)” (in Japanese). Jpn. Food Sci., 41(6), 55-60 (2002).
- [10] Y. Akiyama; ”Joule heating technology -Characteristic and applications- (ジュール加熱技術–その特徴とその応用)” (in Japanese). Jpn. フードサイエンス, 41, 47-49 (2002).
- [11] H. Momoi, M. Shimazu, Y. Kodama, M. Nakane, S. Yoshikawa, K. Mishima; “Forming method and apparatus of raw material for processed meat products (食肉類加工原料の成形方法およびその装置)”. Patent Publication JP2002-45110.
- [12] M. Sugiyama, M.Maeda, M. Nakane, T. Sakikubo, S. Kojima; “Producing method and apparatus for processed meat products (食肉類加工品の製造方法および製造装置)”. Patent Publication JP2011-39.
- [13] K. Terada, T. Takahashi; “Method for manufacturing aerated food (気泡入食品の製造方法)”. Patent Publication JP2002-330730.
- [14] K. Terada, T. Takahashi; “Method and apparatus for thawing frozen food products (凍結物の解凍方法および装置)”. Patent Publication JP2002-186415.

- [15] A. Takai, S. Ito, H. Ito, N. Shimazaki; “Method for manufacturing fish meadow product (魚肉ねり製品の製造方法)”. Patent Publication JP1999-299460.
- [16] Boat and System Engineering Association of Japan; “Development of continuous line of Mosuk for Joule heating (ジュール加熱によるもずく連続ラインの開発)” (in Japanese). Heisei 21-neodo, Practical technology development project promoting new fisheries policy. Technical Development Report (水産技術実用化事業、技術開発報告書), (2009).
- [17] B. Yoshitomi, K. Hashidate, T. Mizuki; “Producing method of protein-based food using continuous internal heating method (内部加熱による連続加熱方法を用いるたんぱく質含有食品の製造方法)”. Patent Publication JP2013-39132.
- [18] K. Tani; “Cooking heating apparatus (加熱調理装置)”. Patent Publication JP2008-125792.
- [19] K. Tani, N. Kanazawa; “Cooking heating apparatus (加熱調理装置)”. Patent Publication JP2008-188277.
- [20] W. Guo, Y. Llave, Y. Jin, M. Fukuoka, N. Sakai; Mathematical modelling of ohmic heating of two-component foods with non-uniform electric properties at high frequencies. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 39, 63–78 (2017).
- [21] F. Icier, H. Bozkurt; Ohmic heating of liquid whole egg: Rheological behaviour and fluid dynamics. *Food Bioprocess Technol.*, 4, 11253-1263 (2011).
- [22] H. Darvishi, M.H. Khoshtaghaza, M. Zarein, M. Azadbakht; Ohmic processing of liquid whole egg, white egg and yolk. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 14, 224-230 (2012).
- [23] T. Imai, K. Uemura, S. Yoshizaki, A. Noguchi; “Changes in heating rate of egg albumin solution during ohmic heating” (in Japanese). *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 43(12), 1249-1255 (1996).
- [24] Y. Llave, S. Fukuda, M. Fukuoka, N. Shibata-Ishiwatari, N. Sakai; Analysis of color changes in chicken egg yolks and whites based on degree of thermal protein denaturation during ohmic heating and water bath treatment. *J. Food Eng.*, 222, 151-161(2018).
- [25] S. Kido, Y. Doi; Separation and properties of the inner and outer layers of the vitelline membrane of hen’s eggs. *Poultry Sci.*, 67, 476-486 (1988).
- [26] Y. Jin, Y. Cheng, M. Fukuoka, N. Sakai; Electrical conductivity of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fillets during ohmic heating. *Food Bioprocess Technol*, 8, 1904–1913 (2015).

引用 URL

[i]食鳥卵の成分規格：厚生労働省

<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11130500-Shokuhinanzendu/0000094499.pdf>

(Nov. 1, 2018)

[ii]高病原性鳥インフルエンザに関して：農林水産省

<http://219.113.19.74/hourei/2.pdf> (Nov. 1, 2018)

第4章 ホール卵をモデルにした通電加熱の理論解析

4.1 はじめに

通電加熱は、スピードの速さや効率の良さから、食品の加熱手段として高く評価されているが、食品産業における導入実績は、液状食品やペースト食品、塩水浸漬された固形食品に限られている。

通電加熱は電極間に直接食品をはさんで、電圧を印加して流れる電流により発熱するものであるため、食品の成分、水分含有量、導電率、配置、配列などにより、電流の流れが均一でなく、また電極から上に飛び出た食品の部分や電極に接触しない部分などは、温度のばらつきが生じるからである。

従って、食品業界に通電加熱が加熱手段として導入されるためには、温度のばらつきが生じる中で最も低い部分（ここでは、以降「冷点」と表記する）が、特定でき、この冷点の温度を中心部の温度としてモニタリングし、その温度が目的の温度に到達したとき、食品全体が目的の温度に到達したとみなされ、加熱が終了する。

食品業界においては、食品安全の観点から、この冷点のモニタリングシステムが構築されたとき、通電加熱は食品の加熱手段として受入られることになる。

本研究では、ホール卵（割卵後の未攪拌液卵）を通電加熱した場合、どのように温度のばらつきを可視化して、冷点を特定できるかを目的とした。

4.2 3D モデル（可視化）の作成手順

実際にホール卵を通電加熱する状況は、常に容器内の中心にくるものではないため、妥当性を考慮して、卵黄と卵白の距離を7ミリおよび8ミリとした。

テフロン容器内のホール卵の概略図（図 4-1）から、3D モデルを作成した。

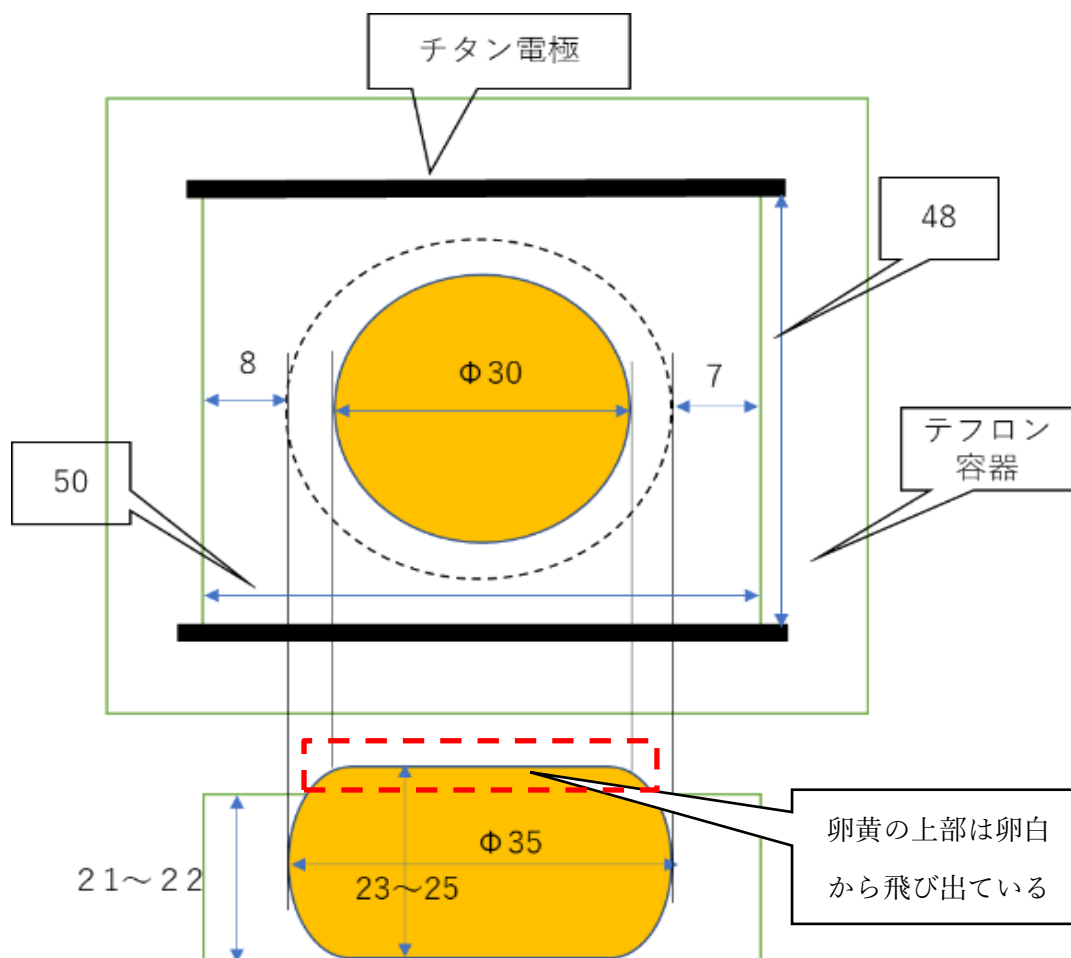


図 4-1 ホール卵の通電概略図

3D モデル作成の構成要素は、以下の 4 つとなる。

- ① 卵黄(卵黄膜ありと卵黄膜なし)
- ② 卵白
- ③ テフロン容器 (厚み 10mm)
- ④ 空気層

表 4-1 3D モデル識別

3D モデル部	色別カラー
卵黄	黄色
卵白	白色
テフロン容器	灰色
空気層	青色

図 4-1 をもとにして、モデル作成ソフトである FEMAP(Siemens PLM Software)を利用して、ホール卵の通電加熱 3D モデルを表 4-1 に示した色別により、ホール卵の通電加熱システムを作成した。

なお、開放型通電加熱であるため、解析の都合上、卵黄と卵白の上部に厚さ約 7.3 mm の空気層を挿入した 3D モデルを作成した。その全体イメージのモデルを図 4-2 に示した。

卵黄は導電率が非常に小さい卵黄膜と呼ばれる厚さ $4\mu\text{m}$ ほどの薄い 2 層の膜で覆われているが、この厚みを 3D モデルでは表現できないため、厚さを 0.1 mm ($100\mu\text{ m}$) と仮定して卵黄膜を作成した(図 4-3)。なお、卵黄膜の導電率は、第 3 章の結果から $1.2\times 10^{-4}\text{ S/m}$ を使用した。

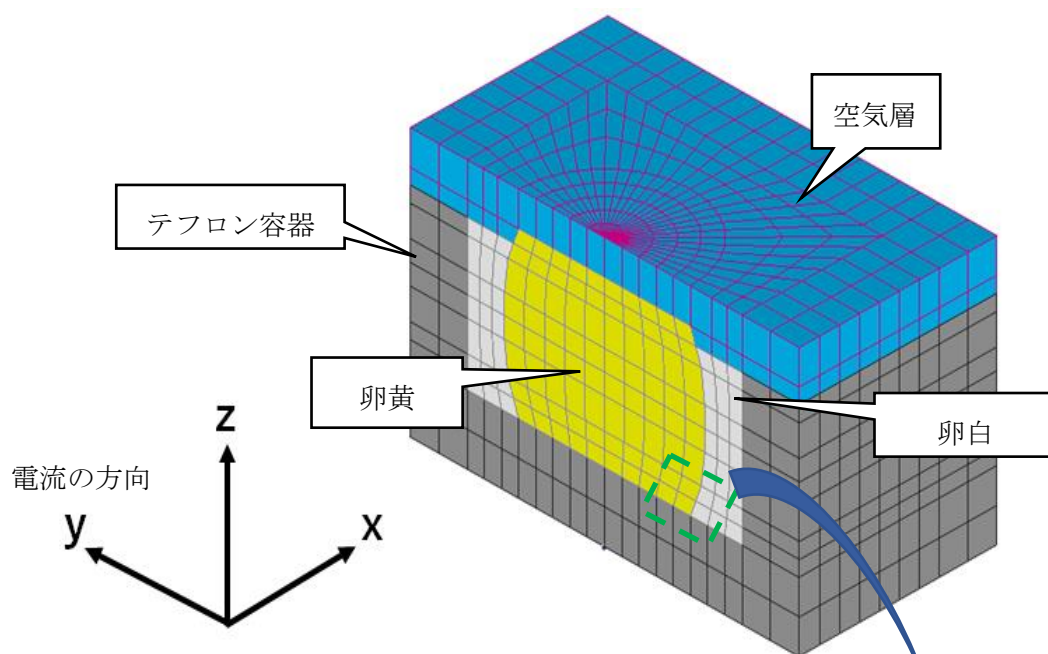


図 4-2 3D モデルの全体イメージ

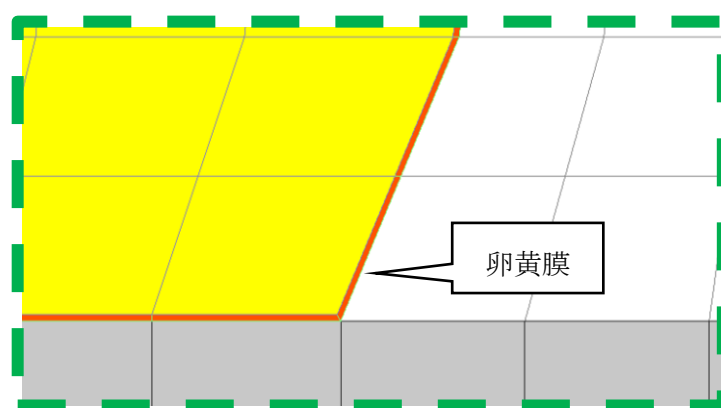


図 4-3 卵黄膜(赤色の部分)

4.3 計算方法

4.3.1 電磁界解析

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot \mu \vec{H} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \bar{\rho}_m \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} = \frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\sigma = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad (5)$$

空間および時間における電磁場分布は、マクスウェルの方程式から算出する。

また、マクスウェルの方程式の微分形式は電界および磁場強度で表現できる。式(1)から(5)において、 $\vec{B}$ は磁束密度[Wb·m⁻²]、 $\vec{D}$ は電束密度[C·m⁻²]、 $\vec{H}$ は磁場強度[A·m⁻¹]、 $\vec{E}$ は電場強度[V·m⁻¹]、 $\bar{\rho}_m$ は電荷密度[A·s·m⁻³]、 $\vec{J}$ は電流密度 [A·m⁻²]、 ϵ は複素誘電率($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 、 $j^2 = -1$)、 μ は透磁率 自由空間の透磁率 μ_0 は $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] で表わす。

導電率 σ [S/m]は、試料の誘電損率 ϵ'' 、周波数 ω [rad/s]、自由空間の誘電率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m] Marshall[3]より、試料内部の発熱密度 Q [J·s⁻¹·m⁻³]は、Eq.(6)で、電界強度の二乗、誘電損率と角周波数に比例する。ここで、周波数は $\omega = 2\pi f$ 、 E_{rms} は電界強度の平方根となる。

$$Q(x, y, z, t) = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E_{rms}^2 = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad (6)$$

4.3.2 対称境界条件[4]

対称境界条件と反対称境界条件は、境界上の電場を指定することによる。対称境界条件はこの境界面上の辺のベクトルポテンシャルを全て拘束することで実現することになる。例えば、X-Y面が対称境界となっている場合、X方向とY方向のベクトルポテンシャルの成分はなく、Z方向のベクトルポテンシャルの成分のみが存在することになる。電場はベクトルポテンシャルと同じ方向をもっているので、この境界条件での電場は境界に対して垂直方向となる。このような境界を電気壁とよぶ。例えば、完全導体の壁面は対称境界面となるが、金属面も近似的に対称境界条件として扱うことができる。

一方、拘束をかけない境界面には、有限要素法では自動的に反対称境界条件が適用される。この境界条件は対称境界条件とは逆の性質を持ち、X-Y面が反対称面となっている時は、X方向とY方向の磁場成分が存在せず、磁場がZ方向を向く。このような境界を磁気壁とよぶ。

4.3.3 節点電場

山下[5]によると、電場とは電荷が力を感じる場所のことであり、電場は大きさと向きを持ち、単位は V/m(ボルト毎メートル)で表す。ここで節点電場とは、モデルの節点に強制的に x、y、z ベクトル方向にかけられる力を表すことになる。今回はホール卵を通電する際に、印可電圧を試料の電極間距離で割り、交流で電圧を印可していることから $\sqrt{2}$ をかけた、以下の式で算出した値を電場として任意のベクトル方向にかけた。

ここで E は電場[V/m]、 V は電圧[V]、 m は電極間距離[m]として表す。

$$E = \frac{V}{m} \sqrt{2} \quad (7)$$

4.3.4 熱伝導解析

Whitaker[6]は、食品の温度分布が(8)式に示すように、通電加熱による内部発熱を含むフーリエの 3 次元熱伝導方程式に基づいて解析を行うことで算出すると報告している。

ここで、 ρ は密度[kg・m⁻³]、 C_p は比熱[J・kg⁻¹・K⁻¹]、 k は熱伝導率[W・m⁻¹・K⁻¹]、 Q_{em} は通電加熱による内部発熱量[J・s⁻¹・m⁻³]として表す。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q_{em} \quad (8)$$

4.3.5 計算入力

3D モデル作成後、電磁界解析ソフト Wavejω(株式会社フォトン)と熱伝導解析ソフト Thermo(株式会社フォトン)で作成したモデルを読み込んだ。

電磁界解析では周波数(20 kHz)、誘電物性、試料の電極部分に対称境界条件、その周囲に電場を設定した。対称境界条件は図 4-1 に示した電極に相当する箇所に、電場は式(1-7)より印可電圧を 25V としたときの値を設定した。なお、誘電物性は誘電率を 1 とし、誘電損率は式(9)を用いて試料の 50℃のときの電気伝導度から算出した。ここで、 ε'' : 誘電損率、 ε_0 : 真空の誘電率(8.854 187 817... $\times 10^{-12}$ F・m⁻¹)、 f : 周波数(20kHz)、 σ : 導電率 [S・m⁻¹]とした。なお、卵黄膜の実際の厚み 8 μ m に相当する導電率は、第 3 章の結果から 1.2×10^{-4} S・m⁻¹として、誘電損率が算出された。

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot 2\pi f} \quad (9)$$

熱伝導解析は、試料の物性値として熱伝導度[W/(m・K)]、比熱[J/(kg・K)]、密度[kg/m³]を入力した。

熱伝導度は、Sweat [7]による式 (10) を、比熱は、Heldman [8]らの式 (11) を用いて算出し、表 4-3 ならびに表 4-4 にまとめた。

$$k = 0.25X_h + 0.155X_p + 0.16X_f + 0.135X_a + 0.58X_w \quad (10)$$

$$C_p = 1.423X_h + 1.549X_p + 1.675X_f + 0.837X_a + 4.187X_w \quad (11)$$

ここで X_h は炭水化物、 X_p はタンパク質、 X_f は脂質、 X_a は灰分、 X_w は水分の質量分率、 C_p は比熱[kJ/(kg・K)]、 k は熱伝導度[W/(m・K)]を表している。

なお、卵黄、卵白のタンパク質、脂質、炭水化物、灰分、水分は、日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）を用いた（表 4-2）。

表 4-2 ホール卵の構成要素の成分表

日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）12 卵類

食品群	食品名	一般成分 g	一般成分 g	一般成分 g	一般成分 g	一般成分 g
		水分	たんぱく質	脂 質	炭水化物	灰 分
12	鶏卵 全卵 生	76.1	12.3	10.3	0.3	1.0
12	鶏卵 卵黄 生	48.2	16.5	33.5	0.1	1.7
12	鶏卵 卵白 生	88.4	10.5	Tr	0.4	0.7

表 4-3 ホール卵組成の熱伝導度計算表

	卵黄・熱伝導度 [W/(m・K)]			卵白・熱伝導度 [W/(m・K)]		
	係数	質量分率	熱伝導度	係数	質量分率	熱伝導度
炭水化物	0.25	0.001	0.00025	0.25	0.004	0.001
たんぱく質	0.155	0.165	0.025575	0.155	0.105	0.016275
脂質	0.16	0.335	0.0536	0.16	0	0
灰分	0.135	0.017	0.002295	0.135	0.07	0.00945
水分	0.58	0.482	0.27956	0.58	0.884	0.51272
		$k=$	0.36128		$k=$	0.539445

表 4-4 ホール卵組成の比熱計算表

	卵黄・比熱 [J/(kg・K)]			卵白・比熱 [J/(kg・K)]		
	係数	資料分率	比熱	係数	資料分率	比熱
炭水化物	1.423	0.001	0.001423	1.423	0.004	0.005692
たんぱく質	1.549	0.165	0.255585	1.549	0.105	0.162645
脂質	1.675	0.335	0.561125	1.675	0	0
灰分	0.837	0.017	0.014229	0.837	0.07	0.05859
水分	4.187	0.482	2.018134	4.187	0.884	3.701308
		$C_p =$	2.850496		$C_p =$	3.928235

表 4-5 通電容器の解析用データ

物性値	テフロン通電容器
熱伝導度 W/(mK)	0.23
密度 kg/cm ³	2.13
比熱 J/(m ³ K)	1

さらに、テフロン通電容器の熱伝導度、密度、比熱について、株式会社パッキンランド WEB[i]から引用した各データを表 4-5 に示した。

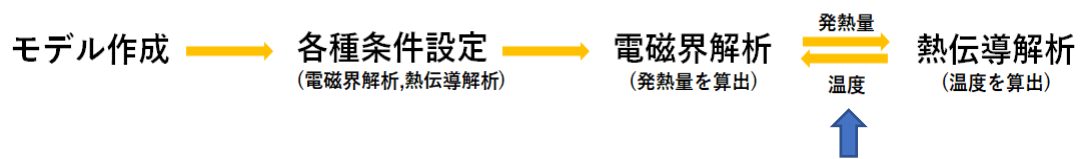
これらから得たデータに基づき、解析モデルで条件を設定入力した後、強連成解析を行った。

強連成解析フローは、図 4-6 に示した通り、電磁界解析で得られる発熱量が熱伝導解析へ渡され、その値を用いて温度を計算する。次に得られた温度は、電磁界解析にフィードバックされる。これら一連の電磁界解析と熱伝導解析を交互に行うのである。これを指定したステップ数まで行い、終温が算出されることになる。

今回の計算条件は、表 4-6 に示したように反復回数は 100,000 回、収束トレランスを 1.0×10^{-30} 、初期温度を 30℃、時間刻みを 1 秒とし、180 秒の加熱を想定した。また、電磁界解析と熱伝導解析を繰り返し交互に行うため、180 回計算が行われる。ここでは、電磁界解析で算出される発熱量を受け、熱伝導解析で算出された温度は、ホール卵の通電加熱の入力温度として、30℃を初発温度（スタート）に設定した。強連成解析は、図 4-6 に示した計算フローの通り行った。

表 4-6 熱伝導解析の解析条件

反復回数	100,000	100,000
収束トレランス	1.00E-30	1.00E-30
初発温度 (°C)	30	30
時間刻み (秒)	1	1
加熱時間 (秒)	180	180
解析温度 2 点 (°C)	<u>50</u>	<u>30</u>
卵黄膜導電率 ($S \cdot m^{-1}$)	0.00012	0.00012



反復回数 100,000 回で算出した温度のフィードバックは、通電時間 180 秒間なので、10 秒ごとの 18 回で解析時間は約 5 時間程度を行った (図 4-6*1)。

図 4-6 強連成解析のフロー図

4.4 結果

4.4.1 ホール卵の通電加熱結果および加熱特性

ホール卵を通電加熱（ここでは、50V-180 秒処理）した場合、卵黄を取り巻く卵白の部分で電極と直線的に接触している卵白部分が昇温して、タンパク変性しており、温度のばらつきが生じた。従って、ホール卵を通電加熱した場合の中心部の温度（一番温度が昇温していない部分）は、チタン電極と卵黄にはさまれた卵白部分であり、冷点として示した（図 4-7）。

<実測値の冷点↓>

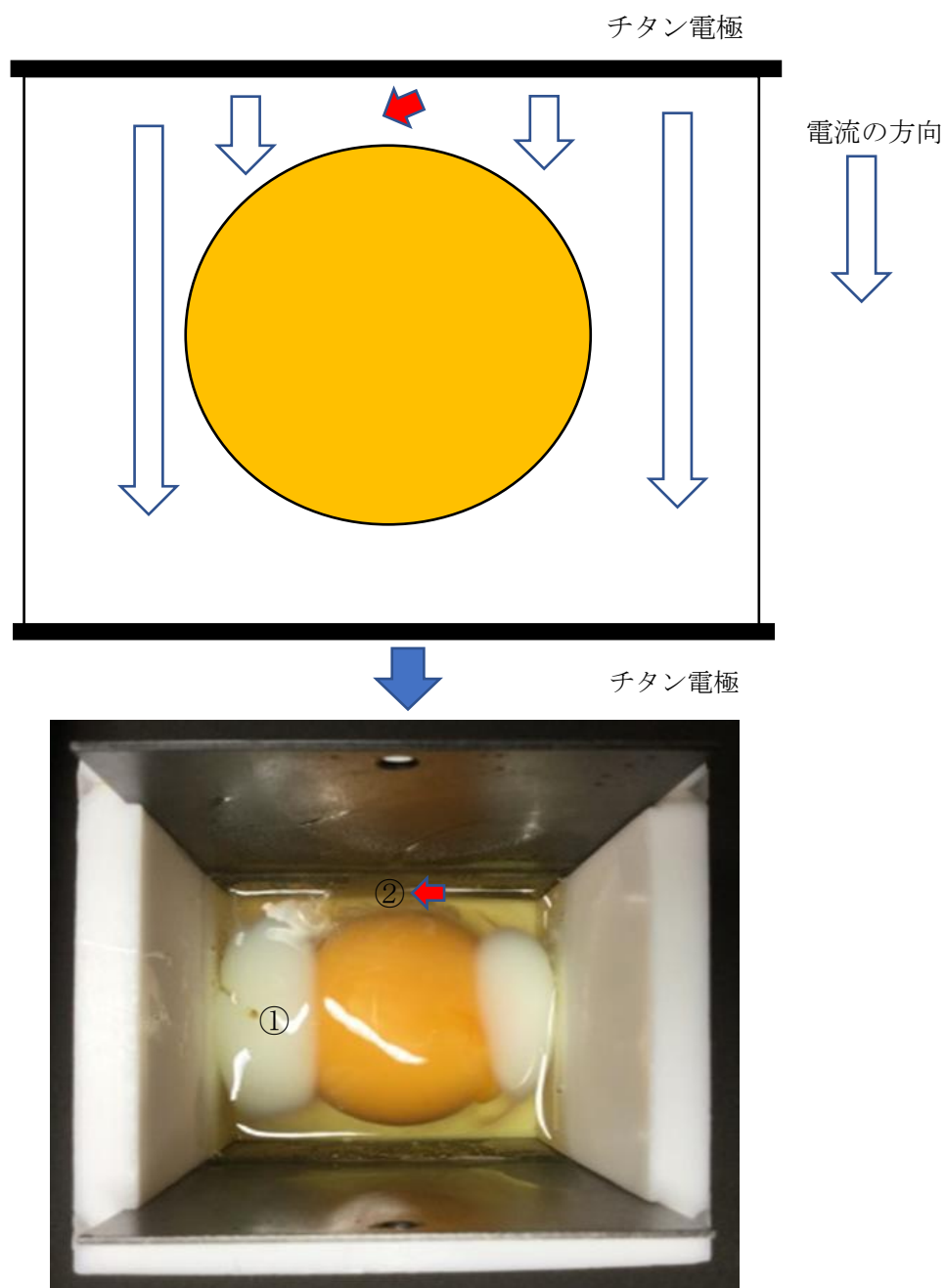


図 4-7 ホール卵の通電加熱した場合の温度ばらつき

また、ホール卵を通電加熱した場合の卵白、卵黄の各パーツ部分①～③の温度の実測値は、熱電対を各パーツ部分の中心部に挿入して、加熱温度を測定した結果は egg white①、egg white②、yolk③となり、図 4-8 に示した。なお、通電加熱条件 50V で 150 秒後の温度比較を赤色でマークした各パーツ部分の温度は、それぞれ egg white①59.7℃、egg white②38℃、yolk③48.3℃であり、表 4-7 に記載した。

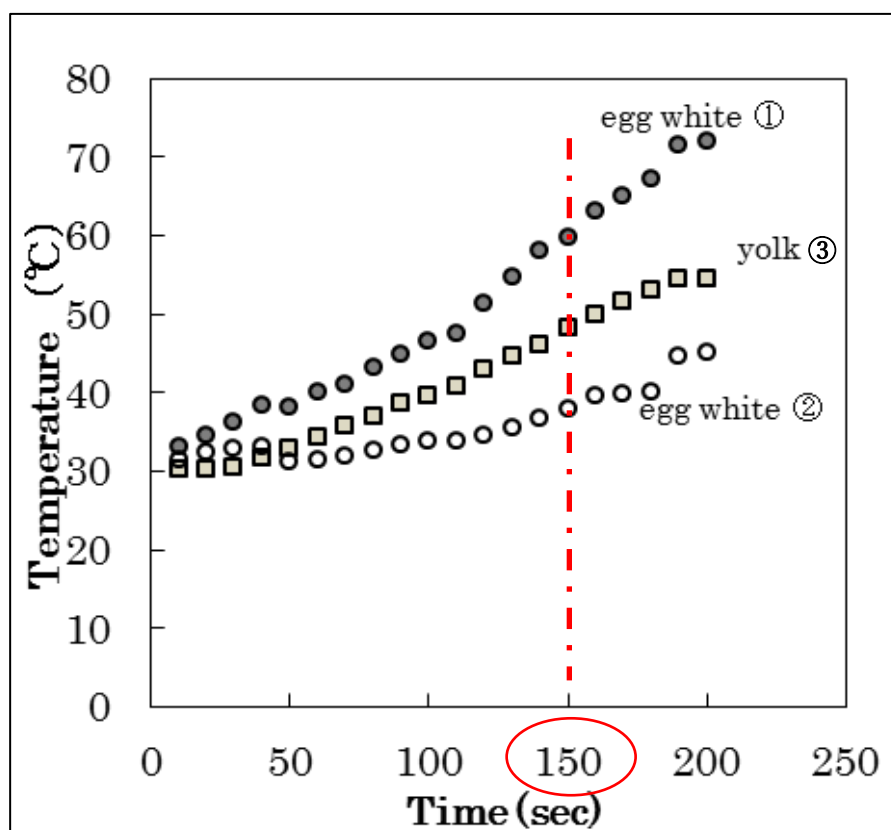


図 4-8 ホール卵の各パーツにおける通電加熱の実測値

4.4.2 卵黄膜の有・無を考慮した強連成解析

強連成解析を行うために、最初に 30℃と 50℃における卵白、卵黄（卵黄膜無）の物性値（比熱、密度、熱伝導率）を入力し、さらに表 4-6 の解析条件を入力して、1 回のみで得られた発熱量で熱伝導解析を行った。その結果、熱伝導解析による温度上昇については、50℃の結果を図 4-9 に、30℃の結果を図 4-10 に示したが、各パーツを通電加熱した実測値より、非常に高い温度が示された。

そのため、次に導電率の温度依存性を考慮して、同様に卵白、卵黄（卵黄膜無）、卵黄膜（卵黄膜有）の物性値（比熱、密度、熱伝導率）を入力し、さらに表 4-6 の熱伝導解析の条件を入力して、図 4-6 に示した強連成解析を行った（図 4-6*¹）。

<温度依存性を考慮しない2点（30℃・50℃）における熱伝導解析の比較>

30℃が50℃より、全体的に低い温度を示したのは、ホール卵全体は温度が上がるほど、各部位の導電率が高くなり、電流が流れやすくなるからである。温度依存性に関しては、1点の比較においても50℃の方が30℃よりスタート時における導電率の大きさが影響していたことが示された（表4-7）。

表 4-7 ホール卵の各パーツにおける通電加熱の実測値と熱伝導解析値（HA）1点との比較

	ホール卵の種類	egg white ①	egg white ②	yolk ③
50V-150 秒	卵黄膜あり実測値	59.7	38	48.3
HA-150 秒	50℃卵黄膜なし	84.6	60.3	58.7
HA-150 秒	30℃卵黄膜なし	69.2	51.8	50.6

4.4.3 強連成解析の結果

卵黄膜は非常に導電率が小さいため、卵黄膜有の内部温度は卵黄膜無より、温度が低いことが示された。このことは、導電率の小さい卵黄膜が電気抵抗になり、電流が卵黄膜に沿って流れたものと考えられた。さらに通電加熱においては、温度ばらつきから生じる温度差が導電率の温度依存性の影響を受けて、高い温度の部分の導電率はより大きくなるため、低い温度の部分の導電率との差がますます大きくなり、その結果各パーツの温度ばらつきが生じることになったことが示された。

図 4-8 に示したホール卵の各パーツにおける通電加熱の条件は、印加電圧 50V で、150 秒通電したときの実測値との熱伝導解析の結果との比較を表 4-8 に示した。この卵黄膜あり・なしに関係なく、egg white①は昇温しやすく、さらに egg white②と yolk③は電流が卵黄に沿って流れることと、導電率の温度依存性から温度が高くなるほど、電流が流れやすいことが示されている。

さらに、卵黄膜の非常に小さい導電性の影響から、卵黄膜なしは卵黄膜ありと比較すると egg white①の温度が低いことが分かる。このことは、電流が導電性の非常に小さい卵黄膜に沿って、流れなかったことを示唆していた。

表 4-8 ホール卵の温度依存性を考慮した熱伝導解析値と通電加熱実測値との比較（150 秒後）

	egg white ①	egg white ②	yolk ③
ホール卵膜あり実測値	59.7	38	48.3
卵黄膜あり	86.0	49.3	35.6
卵黄膜なし	69.3	50.8	53.0

実測値の温度は、egg white①>yolk③>egg white②の順序を示した。また、全体的に実測値が熱伝導解析より低いのは、実測値は通電時間とのタイムラグが影響したことが考えられた。

なお、熱伝導解析における卵黄膜ありの 150 秒後の温度は、egg white①>egg white②>yolk③であったが、熱伝導解析における卵黄膜なしの 150 秒後の温度は、egg white①>yolk③>egg white②であり、実測値と同様の傾向を示した。これは、熱伝導解析においては、一直線上の卵白と卵黄との直列の位置関係が考慮されていないからであると考えられた。

(1) 熱伝導解析：卵黄膜あり

- ・卵黄膜の導電率が非常に小さいため、電流は卵黄膜に沿って流れたため、egg white①の温度がより高くなるが、傾向としては、予測計算も同じ結果を示した。

- ・egg white②については、電流は卵黄膜を避け、egg white②に回り込む事が考えられる。また、予測計算もその結果となっていた。

- ・yolk③卵黄膜ありの中心温度は、卵黄膜の非常に小さい導電率から、電流が流れていないことが考えられ、予測計算もそれを示した。

(2) 卵黄膜なし

卵黄膜がない場合は、導電率の大きい①卵白（通電方向）の温度がより高くなり、②卵白（電極近傍）は、導電率の小さい卵黄と直列の位置関係で配置されているため、yolk③卵黄膜なしの中心温度が高くなることが予測計算からも示され、実測値の温度、egg white①>yolk③>egg white②と同じ傾向を示した。

4.4.4 冷点を見つけるための 3D モデルを利用した熱伝導解析

通電加熱においてホール卵の温度依存性を考慮した場合の卵黄膜ありは、電流の流れの影響から実測値より予測計算の温度が高めに示された。卵黄膜なしは、実測値と予測計算も同じ傾向を示した。ホール卵の初発温度 30°C、印加電圧 50V における 150 秒後の卵黄膜あり、卵黄膜なしの 3D モデルシミュレーションの温度分布一覧を表 4-9 に示した。

なお、熱伝導解析から冷点となるポイントを予測した。

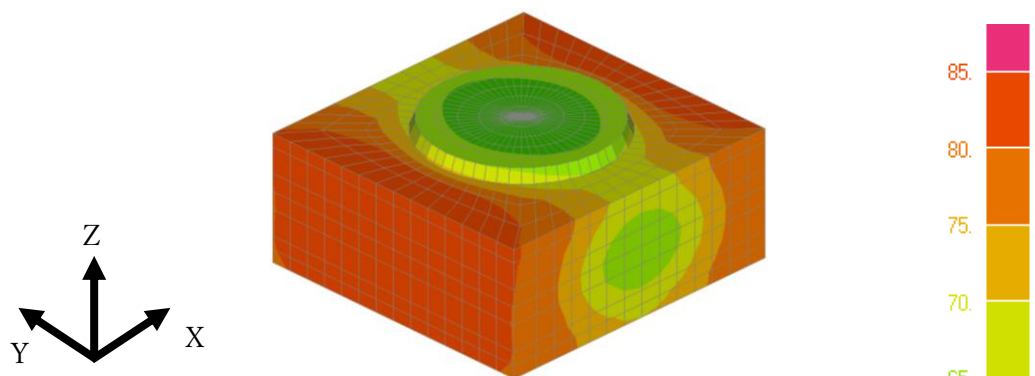
表 4-9 温度依存性を考慮した卵黄膜あり／なしおよび卵黄膜なしの 30°C・50°Cの温度分布

熱伝導解析の種類	卵黄膜なし	卵黄膜あり
温度依存性	図 4-11	図 4-12
50°C	図 4-9	
30°C	図 4-10	

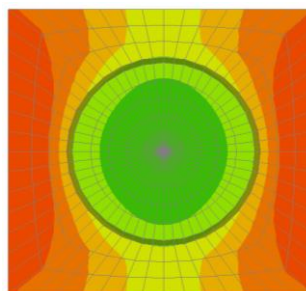
熱伝導解析の結果、通電加熱における不均一食品の温度依存性は、実測値より高く示したものの、昇温傾向妥当の妥当性確認できた。この熱伝導解析により、あらゆる食品についての物性値を入力することでの、加熱予測ができることが確認できた。さらに、不均一食品の冷点特定の可能性が示唆された。なお、温度依存性を考慮した 3D モデルシミュレーション結果の温度分布を図 4-11、図 4-12 に示した。

4.4.4 3D モデルシミュレーション結果と冷点

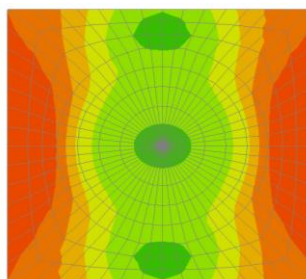
冷点は赤の矢印で示した。



全体図：電流の流れ方向は Y 方向

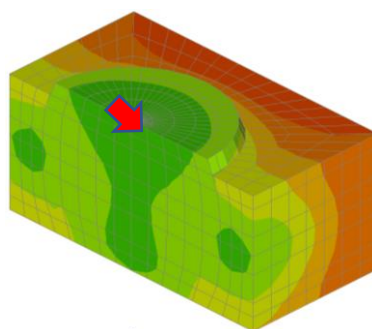


真上から



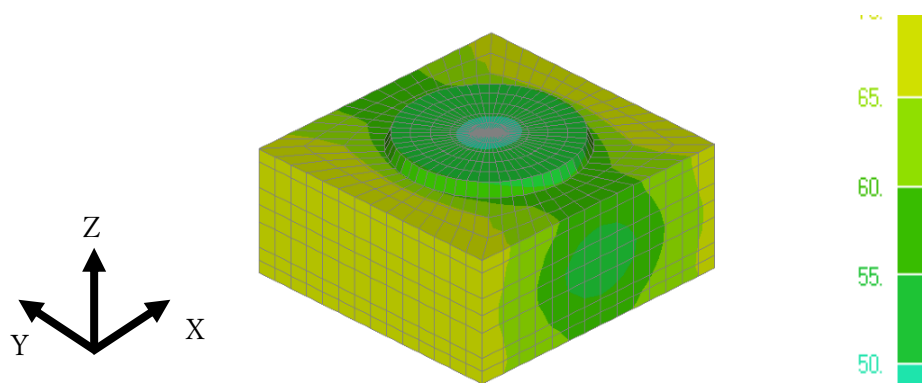
水平 1 / 2 カット面

<冷点の予測>

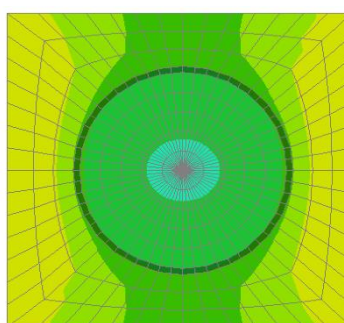


垂直 1 / 2 カット面

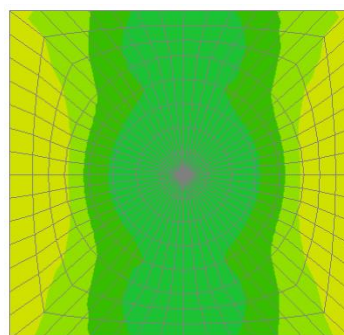
図 4-9 卵黄膜なし：熱伝導解析 50°C-150 秒後の温度分布



全体図：電流の流れ方向は Y 方向

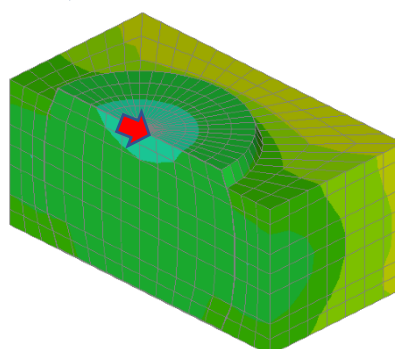


真上から



水平 1 / 2 カット面

<冷点 ↓ の予測>



垂直 1 / 2 カット面

Fig.4-10 卵黄膜なし：熱伝導解析 30°C-150 秒後の温度分布

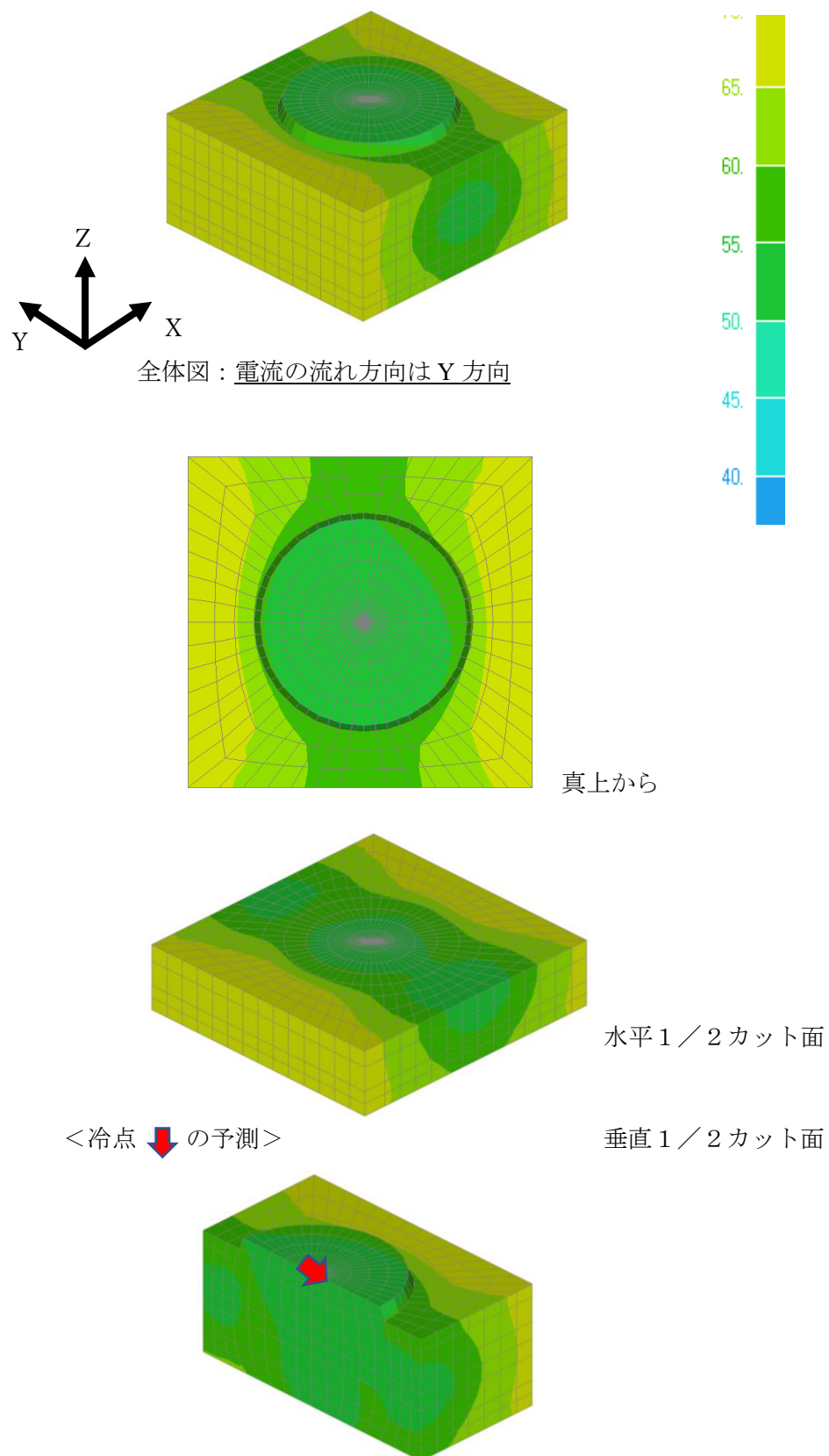
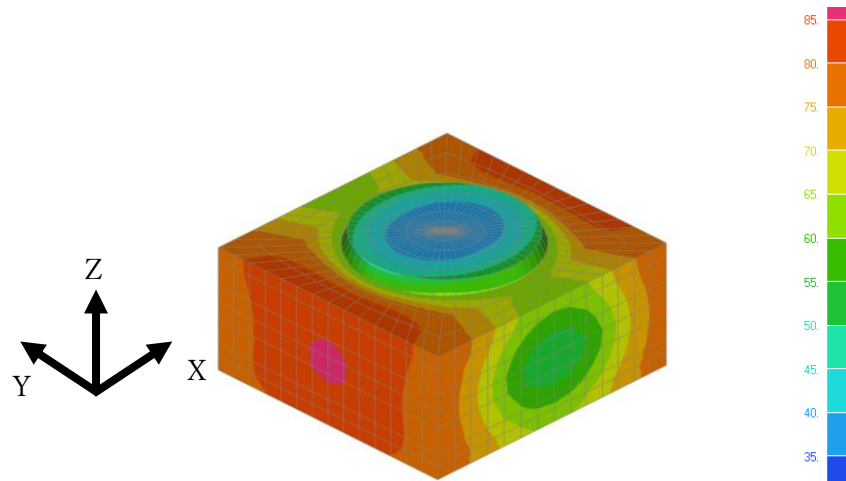
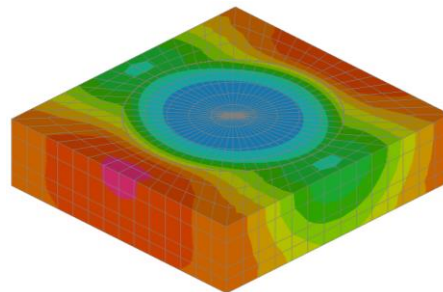
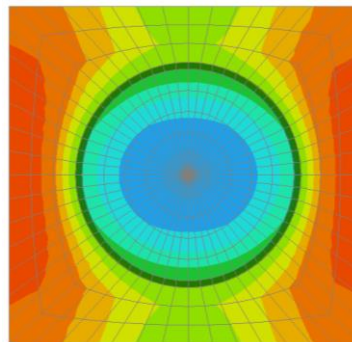


Fig.4-11 卵黄膜なし：温度依存性考慮・物性値 30°C-150 秒後の温度分布

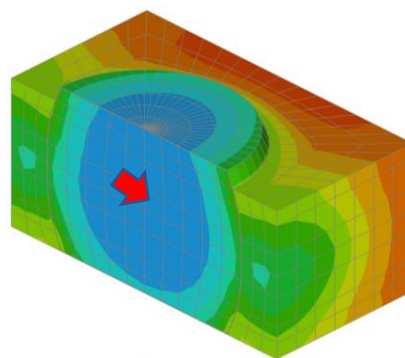


全体図：電流の流れ方向は Y 方向



水平 1 / 2 カット面

<冷点 ↓ の予測>



垂直 1 / 2 カット面

Fig.4-12 卵黄膜あり：温度依存性・物性値 30℃-50 秒後の温度分布

4.5 考察

ホール卵の通電加熱において、初発温度である 30℃で熱伝導解析による予測計算を行った結果、実測値の温度分布より高い温度を示した。次に、初発温度と最終温度の中間点である 50℃で熱伝導解析による予測計算を行った結果、30℃と同様の傾向を示した。そこで、導電率の温度依存性を考慮した熱伝導解析を行い、実測値の温度に近い結果が得られた。

一方、外部加熱による熱伝達では、冷点は中心部にあり他の部分はその温度より高い。従って、中心部の温度により、加熱の目的は達成できる。しかし、不均一食品を通電加熱した場合、どこが冷点であるのか特定できない。

本研究により、不均一食品を通電加熱した場合における実測値の温度と導電率の温度依存性を考慮した熱伝導解析による予測計算と傾向が確認できた。そこで、不均一食品を通電加熱した場合の 3D モデルシミュレーションによる温度分布の可視化により、冷点を特定できることが示唆された。

今後の研究により、不均一食品を通電加熱した場合における精度の高い冷点が特定され、通電加熱が高温短時間殺菌を目的とした加熱手段として、食品産業に広く利用されることを期待する。

さらに、ホール卵の通電加熱を通して、卵黄膜の存在の大きさがより確認された。

卵黄膜は、膜厚は数ミクロンと非常に薄いですが、膜のもつ機能は生命体を維持管理するものであり、その存在価値は大きい。ホール卵においては、卵白と卵黄を区画する重要な役割がある。卵白水分 90%と卵黄水分 50%（日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）12 卵類）との水分調整や調理現象として「ゆでたまご」をつくった時の卵黄のほくほく感、卵黄の球状など卵黄膜が大きく関与していると予測される。

通電加熱においては、卵黄膜は卵白や卵黄に比較して、導伝率が小さいため、ホール卵を通電加熱した場合、電流が卵黄膜に沿って流れる結果、通電方向の卵白部分の温度速度が大きいことが示された（図 4-7）。

卵黄膜自体の物性に関する研究は少なく、今後、研究すべき課題と考える。

4.6 本章の引用文献

- [1] Knoerzer K. ,. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications. 2008. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 9, 374–384..
- [2] Liu S. Sakai N. Fukuoka M.,. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. 2013. J. Food Eng., 115, 49–62.
- [3] Marshall M.G.A.C. Metaxas. Modeling of the radio frequency electric field strength developed during the RF assisted heat pump drying of particulates. 1998. J. Microw. power Electromagn. energy, 33, 167–177.
- [4] 八木香里,通電加熱を利用した炊飯の理化学的解析,東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科,修士学位論文,2018
- [5] 山下明, 文系でもわかる電気回路 第2版 “中学校の知識”ですいすい読める. 无出版地: 翔泳社, 2017.
- [6] Whitaker S. Fundamental principles of heat transfer. 1977. Krieger Publ. Co..
- [7] Sweat V.E. Thermal properties of foods in engineering properties of foods . New York : Marcel Dekker Inc., 1986. M.A.Rao and S.S.H.Rizvi, eds.,49-87.
- [8] Heldman Singh, R.P.D.R. and. Food Process Engineering, 2nd ed. Westport, Connecticut : AVI Publ. Co.,, 1981.

引用 URL

- [i] 株式会社パッキンランド HP : https://www.packing.co.jp/PTFE/ptfe_ippantokusei1.htm

第5章 総括および今後の展望

本研究は、通電加熱（食品産業では、ジュール加熱ともいわれている。）に関するものである。通電加熱は、食品に直接電流を流して内部発熱させる加熱方法で効率の良い加熱手段ではあるが、次に示すような、大別して2つの課題がある。まずひとつめに、食品の形状、組成、栄養成分などが不均一な食品（以下、「不均一食品」と表記する）をハードな金属からなる電極（食品業界では、チタニウム）に直接接触させる必要があるため、金属電極との接触方法または配置、通電中における食品のタンパク変性などに伴う変形や収縮、放熱、食品の温度上昇などで、電極との接触が不十分になりスパーク発生、食品全体が目標温度に到達しない現象などが生じることである。次に、食品成分の違いによる「温度ばらつき」ができることである。二つの課題について、均一食品（液状食品およびペースト状食品およびこれらの状態に加工した食品を含む）の通電加熱では、閉鎖型の連続式通電加熱における送液、通電時の攪拌などの手段によりほぼ解決されており、食品産業への導入実績については、序論において紹介した。しかし、不均一食品については両課題とも研究報告は少なく、食品産業に導入できるまでの課題解決には至っていないのが現状である。

従って本研究の構成は、序論に続き、第2章では、不均一食品における課題解決の一つとして、密封型の通電加熱を対象手段とした研究成果を報告した。第3章では、開放型の通電加熱を対象手段とした不均一食品における課題である食品成分に起因する「温度ばらつき」の要因分析に関する研究成果を報告し、さらに熱伝導解析ソフトを用いて、その「温度ばらつき」について予測計算の可能性を第4章で報告した。以下、各章の概略を説明する。

第2章の目的は、不均一食品（ここでは、ムロアジ幼魚を試料とした）を通電加熱の利用により加熱した場合に生じる「温度ばらつき」の解決である。閉鎖型（ここでは、対圧耐熱容器内を意味する。）で通電加熱した場合、食品自体の温度上昇により水蒸気が発生する。その水蒸気により閉鎖内の圧力が高くなり、中心温度 121.1℃以上で4分間以上の加熱が実現できた。このことは、閉鎖型で不均一食品が商業的無菌状態となるため、この後、無菌的に気密性容器で密封すれば、容器包装詰加圧加熱殺菌食品（例えば、レトルトパウチ食品・缶詰が該当する。）となる。しかし、不均一食品は「温度ばらつき」が生じるため、閉鎖型の不均一食品全体が商業的無菌になるように、通電加熱は中心温度 130℃に達温した地点（2分30秒通電）で、通電を停止した。

次に、商業的無菌になった不均一食品を無菌的に気密性容器に密封することを実現するため、気密性容器に商業的無菌になった不均一食品を充填（殺菌後密封）した後に 125～130℃にまで加温した食用植物性油脂を気密性容器内全体に注入して微生物汚染の対策とした。この殺菌後密封した不均一食品を無菌試験により検査した結果、培地が陰性を示し商業的無菌が確認できた。

不均一食品を閉鎖型で通電加熱して生じる温度ばらつきは、閉鎖型容器内で発生する蒸気により殺菌されることになる。さらに、蒸し物としての加熱カテゴリへの可能性が示された。またどこが一番低い温度であるかは、不均一食品の種類などによっても異なるが、目的温度より高い温度まで昇温させることで、殺菌目的を達成できることが示された。

第3章の目的は、不均一食品であるホール卵（割卵後の未攪拌液卵）を開放型の条件で通電加熱した場合に生じる温度ばらつきの電気物性を示すことである。ホール卵を開放型の条件で通電加熱した場合には、一部の卵白部分だけが常に最初に加熱によるタンパク変性を起こすことに着目した。

そこで、ホール卵の構成要素である卵白、卵黄、全卵、卵黄膜について電気物性を測定した結果、ホール卵の温度ばらつきは、卵黄膜の影響が大きいことが確認された。

第4章の目的は、不均一食品を通電加熱した場合に生じる温度ばらつきを熱伝導解析により予測計算することで、ひいては通電加熱の温度ばらつきの中で最も温度が低い部分（ここでは、以降「冷点」と表記する）を特定することができるかである。不均一食品を通電加熱した場合の冷点を特定できることは、通電加熱をすべての食品に殺菌目的で利用することが可能となる。

そこで第3章のホール卵を通電加熱した場合に得られた電気特性をもとに、ホール卵を通電加熱した場合に生じるホール卵全体の加熱温度ばらつきの実測値と3Dモデルで熱伝導解析のシミュレーションを行った結果、導電率の非常に小さい卵黄膜の影響が大きいことが確認できた。

本研究により、不均一食品を通電加熱した場合における実測値の温度と導電率の温度依存性を考慮した熱伝導解析による予測計算と傾向が確認できた。そこで、不均一食品を通電加熱した場合の3Dモデルシミュレーションによる温度分布の可視化により、冷点を特定できることが示唆された。

今後の研究により、不均一食品を通電加熱した場合における精度の高い冷点が特定され、通電加熱が高温短時間殺菌を目的とした加熱手段として、食品産業に広く利用されることが期待できる。

謝 辞

本研究に関して、多大なるご指導ご校閲を賜った国立大学法人 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 食品生産科学部門 准教授 福岡美香 博士、教授 酒井 昇 博士に、深甚なる感謝の意を表する。

また、本論文の審査にあたり、多大なるご指導およびご校閲を賜った国立大学法人 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 食品生産科学部門 教授 岡崎恵美子 博士、東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 食品生産技術科学部門 教授 濱田奈保子 博士に、深く感謝の意を表する。

さらに、本研究の遂行にあたり、国立大学法人 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 食品生産科学部門 食品熱操作工学研究室 大学院生 田口靖晃氏、研究室の皆様のご指導ご協力に、深く感謝を申し上げます。

本研究の遂行にあたり、不均一食品の通電加熱装置に関するご協力ご尽力を賜った西部ガスグループ日本鮮食株式会社 代表取締役 安藤孝一氏、取締役 廣渡栄一氏、顧問 重石弘士氏に、深く感謝を申し上げます。

最後に、社会人として大学院に通い、本研究に専念できたのは、妻律子の支えと協力あったからであり、心より厚く感謝する。