

# ジュール加熱食品加工における温度推定法

## Estimation of Temperature for Joule Heating Food System

加川 拓磨\*, 長縄 明大\*, 小松 和三\*

Takuma Kagawa\*, Akihiro Naganawa\* and Kazumi Komatu\*

\*秋田大学

\*Akita University

キーワード： ジュール加熱 (Joule heating), 温度推定 (Temperature estimation),  
電流値 (Current value), 発熱量 (Calorific value)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1, 秋田大学大学院工学資源学研究科機械工学専攻  
長縄明大, Tel.: (018)889-2726, Fax.: (018)889-2726, E-mail: naganawa@ipc.akita-u.ac.jp

### 1. 緒言

近年, 国際化による食文化の融合に伴って消費者嗜好が非常に複雑化し多様化している. また, 食品関連の事件・事故, また健康ブームの影響により, 食品への関心はますます高まってきた. このような社会的背景のもとで, 食品工学や食品科学など食品に関する様々な研究がなされてきた. 特に, 食品やその原材料中の様々な化学成分が, ガンや生活習慣病の予防改善に有効であることが明らかになって以来, 食の三次機能性に対する社会の要求や期待は大きく, 科学的な裏づけの確立と同時に, これらの生理機能成分を効率的に最終製品の中に移行発現させうる加工技術の開発が急務となっている.

食品加工法で従来から最も一般的に使われているのは, 伝熱加熱法である. この方法は, 容器などの媒介を介し, 外部の熱源から熱伝導を利用して, 食品を加熱する方法である. しかし, 伝熱加熱法では加熱むらや過加熱を引き起こすなどの欠点がある. 一方, 容器の中に 2 枚の電

極板と食材を入れ, 交流電圧を印加することにより, 食材の持つ電気抵抗を利用して発熱させるジュール加熱法が注目されている<sup>1)</sup>. その特徴として, 速応性が良いこと, 温度制御性が良いことなどに加えて, 加熱むらを抑えることができる, エネルギー変換効率が高いなどが挙げられる. このジュール加熱法に関しても, 生理機能性の保持<sup>2, 3)</sup> や発熱現象の可視化<sup>4, 5)</sup> など, 様々な研究が行われてきたが, 加熱温度を制御する研究についてはほとんど行われていない.

そこで本研究では, ジュール加熱法における容器内部の加熱温度を制御するのに必要な温度推定に関する検討を行った. 通常, 食品加工においては, 容器内に温度センサを配置することができないため, ジュール加熱法のエネルギー変換効率の高さに注目し, 容器内に流れる電流値から発熱量を求め, 温度を推定することとした. その有効性は, 実験により確認することができ, また容器内の物質の電気抵抗が変化した場合や容器の体積が異なる場合についても検証した.

## 2. ジュール加熱装置

Fig. 1 に本研究で用いたジュール加熱装置の概略図を示す．実験装置は，ジュール加熱のための交流電源，加熱に用いる容器，2枚の電極板からなり，PCは容器への印加電圧を調整するため，また容器内の温度および容器へ流れる電流値を計測するために用いた．容器は，耐熱性，電気絶縁性が良く，薬品に浸食されにくいテフロン樹脂（厚さ5 mm）を用いており，大きさは縦が  $y=80$  mm，高さが  $z=80$  mm であり，横幅  $x$  は4.3節で異なる容器サイズに対する検証を行うため， $x=20, 40, 80$  mm の3つの容器を準備し，それぞれ，容器小，容器中，容器大と呼ぶことにする．また，電極板は厚さ1 mm のチタン材に0.2 mm のセラミックコーティングをしたものを用いた．容器に印加する交流は，商用の50 Hz とし，熱電対はK型を用いた．

## 3. 発熱量による温度推定

### 3.1 発熱量について

本研究では，ジュール加熱において容器内に電圧を印加すると，食品の持つ電気抵抗値に応じて流れる電流値が変化することに着目し，電流値をセンサで検出して発熱量を算出し，加熱温度を推定する方法について検討した．発熱量は，次式で表わされる，

$$Q = VIt \quad (1)$$

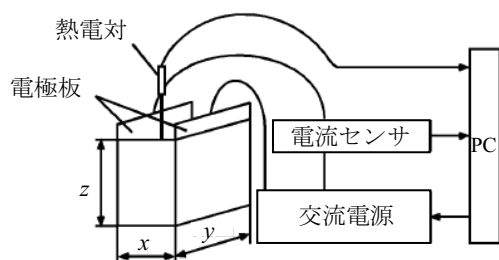


Fig. 1 ジュール加熱装置の構成

ここで， $Q$  は発熱量 J， $t$  は時間 s， $I$  は電流 A， $V$  は印加電圧 V である．

### 3.2 装置の加熱特性

本装置の加熱性能として，通電時間，昇温特性および電流値を確認するための実験を行った．実験は，容器中（横幅  $x = 40$  mm）を用い，試料は濃度0.12%の食塩水250ccとし，容器への印加電圧は30 Vとした．なお，本研究における全ての実験における初期温度は30 となるように予備加熱を行い，30 から80 になるまで加熱温度の推定を行った．

Fig. 2 に時間に対する昇温の様子を示す．図より，実験開始前は容器内温度が約25 であったので，通電を行うことにより，約80 sで初期温度に到達した．その後，約245 sまで30 を保持した後，目標温度が80 となるための加熱を行った様子が見える．

Fig. 3 に Fig. 2 の加熱を行った際の容器に印加された電流値を示す．図より，初期温度30 を保持している際には，容器内に流れる電流値はわずかであったが，約245 s以降に行った通電の結果，約1 A以上の電流が流れていることがわかる．しかし，その電流値は時間の変化に対して脈動しており，本測定結果のままでは式(1)を用いた温度推定は困難である．この原

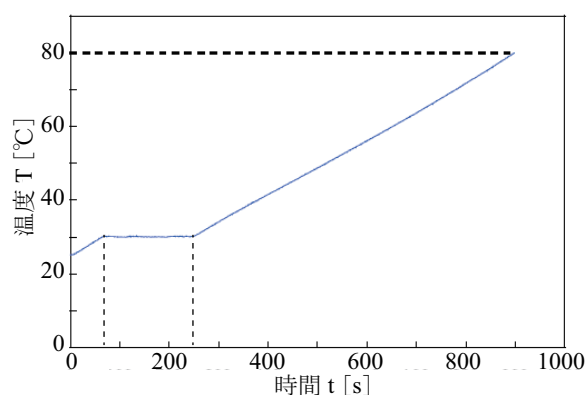


Fig. 2 時間に対する昇温特性（容器中，濃度0.12%）

因として考えられるのは、実験に用いた交流電源の特性によるものと考えられる。

そこで、計測した電流値からその値を補正し、直線的に近似できないかの検討を行った。Fig. 4にFig. 3で示した電流値の時刻400～450sの拡大図を示した。図より、大きく脈動をしている値を除くと、おおよそ上下2本の破線で示した範囲内に収まっていることが分かった。このため本研究では、この2本の直線の範囲にある電流値についてはその値を用い、また2本の直線の範囲を超えた場合にはこれらの平均値を電流の補正值として温度推定に用いることとした。なお、Fig. 3にも電流の補正值を示した。

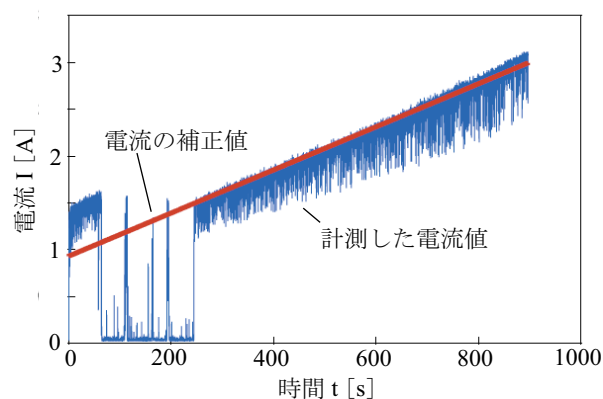


Fig. 3 電流変化の様子（容器中，濃度0.12%）

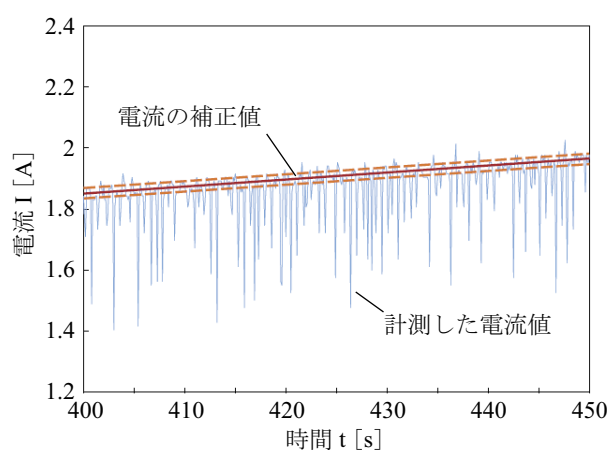


Fig. 4 電流変化の拡大図（容器中，濃度0.12%）

### 3.3 発熱量と温度の関係

本研究では、発熱量  $Q$  より加熱温度  $T$  を推定する方法について検討を行うため、容器への印加電圧を変えた場合の加熱実験を行い、その際の電流値を測定し、式(1)より計算した発熱量  $Q$  と加熱温度  $T$  の関係を求めた。

Fig. 5に結果を示す。実験は、容器中を用い、試料は0.12%の食塩水とした。図より、印加電圧が30V～50Vの場合では、高温時を除いてほぼ一致していることがわかる。また、印加電圧が20Vのときは、他の結果に比べて差が大きいこともわかる。このように、高温時や印加電圧が低い場合に差が出た原因として、印加電圧が低くなると加熱時間が長くなり、放熱の影響が出ているものと考えられる。

上記より、発熱量  $Q$  に対する温度  $T$  の結果がほぼ一致していたことから、印加電圧が50Vのときの結果に対して、次式のように近似曲線の式を求め、これを温度の推定式とした。

$$T = -0.9 \times 10^{-9} Q^2 + 1.7 \times 10^{-3} Q + 30 \quad (2)$$

## 4. 発熱量による温度推定

前章の結果より、印加電圧に依存することなく、発熱量に対する温度の推定式を求めることができたので、本章では式(2)の有効性に関する検証を行った。4.1では印加電圧が異なる場

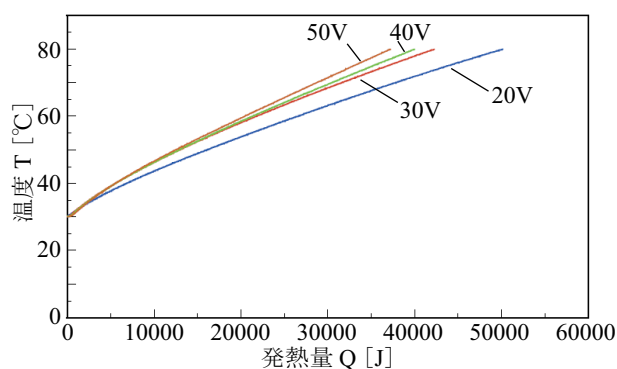


Fig. 5 発熱量と温度の関係（容器中，濃度0.12%）

合の温度推定の結果について、4.2 では加熱試料の抵抗値が異なる場合の結果について、4.3 では加熱試料の抵抗値は等しいが容器の大きさが異なる場合の結果について述べる。

#### 4.1 印加電圧が異なる場合

本研究では、印加電圧を 30 V と 50 V とした場合の加熱実験を行い、式 (2) の有効性を検証した。実験は、容器中を用い、試料は 0.12% の食塩水とした。Fig. 6, 7 に実験結果を示し、Fig. 6 が印加電圧が 30 V の場合、Fig. 7 が印加電圧が 50 V の場合である。いずれの図においても、推定値には電流の脈動と考えられる変動が見られるが、熱電対により測定した実測値とほぼ一致した結果が得られており、発熱量より温度が

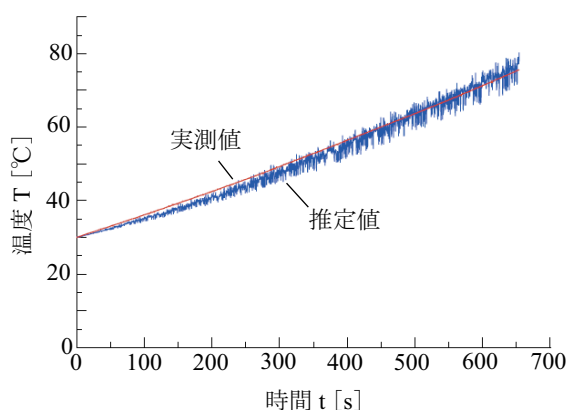


Fig. 6 温度推定の結果 (印加電圧 30 V, 容器中, 濃度 0.12%)

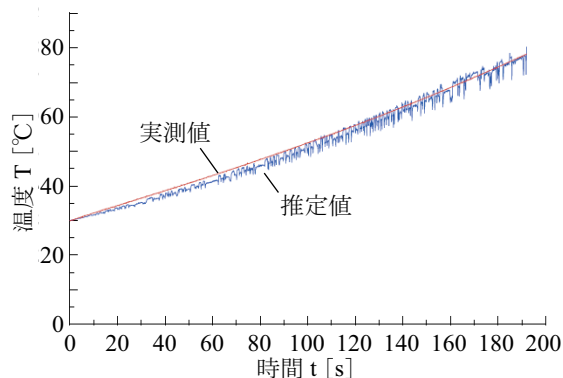


Fig. 7 温度推定の結果 (印加電圧 50 V, 容器中, 濃度 0.12%)

推定できているといえる。

#### 4.2 試料の抵抗値が異なる場合

つぎに、試料の抵抗値が異なる場合における温度推定を行った。本研究では、加熱対象の食塩水の塩分濃度を変えることにより、試料の抵抗値を変えた。実験は、容器中を用い、濃度が 0.12%, 0.24%, 0.36% の食塩水に対しては印加電圧を 30 V とし、濃度が 1.0% の食塩水に対しては電流値が装置の上限値より飽和しないように印加電圧を 10 V とした。

Fig. 8 に試料の濃度が異なる場合の発熱量に対する温度の関係を示す。図より、全ての曲線がほぼ一致していることから、塩分濃度が異なったとしても、発熱量より温度が推定できることを示しており、その推定式は先に求めた式

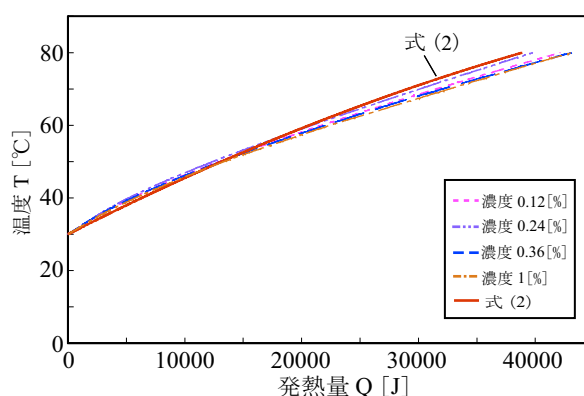


Fig. 8 発熱量と温度の関係 (抵抗値が異なる場合)

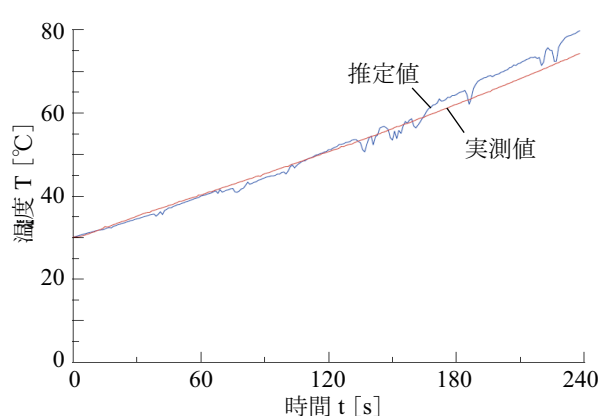


Fig. 9 温度推定の結果 (印加電圧 30 V, 容器中, 濃度 0.24%)

(2) で可能であることもわかる。

Fig. 9 に濃度が 0.24% の食塩水に対して行った温度推定の結果を示す。図より、温度の推定値は実測値にほぼ一致しており、温度推定が可能であることが確認できた。

#### 4.3 容器の大きさが異なる場合

最後に、容器の大きさが異なる場合における検証を行った。容器の大きさは、Fig. 1 に示す横幅  $x$ ，すなわち電極間の長さが異なる場合であり、容器小では 100g，容器中では 250g，容器大では 500g の試料を用いた。

Fig. 10 に印加電圧を 50 V，試料を 0.12% の食塩水とした場合における発熱量と温度の関係を示す。図より、容器の大きさが異なると、発

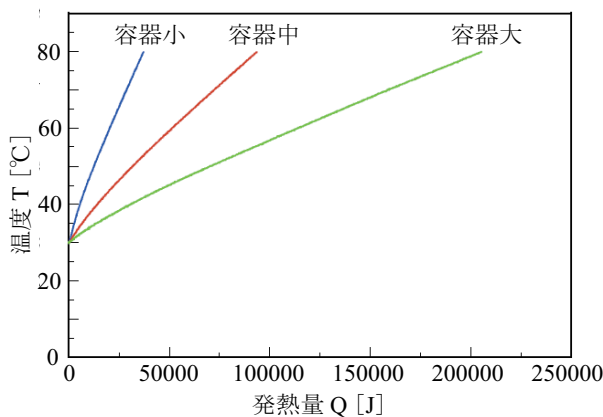


Fig. 10 容器の大きさが異なる場合の発熱量に対する温度の関係 (印加電圧 50 V，濃度 0.12%)

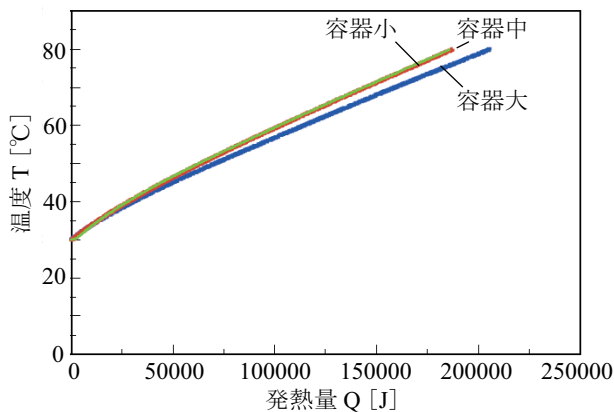


Fig. 11 仮想的に水の質量を同じにした場合の発熱量に対する温度の関係

熱量に対する温度も変わることがわかる。また、容器の大きさが大きくなると目標温度である 80 に到達させるため、大きな発熱量が必要であることもわかる。

このため、式 (2) のままでは温度を推定することができないため、この式を加熱試料の体積に対して補正する方法について検討した。一般に質量  $m$  g の水を  $T_m$  上昇させるために必要な熱量  $Q_m$  J は、次式で表される。

$$Q_m = 4.17 \times m \times T_m \quad (3)$$

このため、加熱対象の水が  $m$  倍になると、温度上昇に必要な熱量  $Q_m$  も  $m$  倍となることがわかる。そこで、Fig. 10 の結果において、容器小および容器中の質量を容器大の質量に合わせるため、容器小の発熱量を 5 倍に、容器中の発熱量を 2 倍した結果のグラフを Fig. 11 に示す。図より、質量による補正を行うことにより、発熱量に対する温度の関係がほぼ一致したといえる。

以上のことから、式 (2) の発熱量に対する温度の推定式において、発熱量を体積比  $V_h$  で割ることにより、仮想的に質量を同じにし、推定式の補正を行った。

$$T = -0.9 \times 10^{-9} \left( \frac{Q}{V_h} \right)^2 + 1.7 \times 10^{-3} \left( \frac{Q}{V_h} \right) + 30 \quad (4)$$

Fig. 12, 13 に、容器の大きさが異なる場合の温度の推定結果を示し、Fig. 12 が容器中に対する結果、Fig. 13 が容器大に対する結果である。なお、試料の濃度は 0.12% とした。図より、いずれの容器に対しても、実測値と推定値が一致しており、式 (2) の発熱量に対する温度の推定式を質量で補正することにより、温度推定が可能であることが確認できた。

## 5. 結言

本研究では、ジュール加熱食品加工における容器内部の加熱温度を推定する方法について検

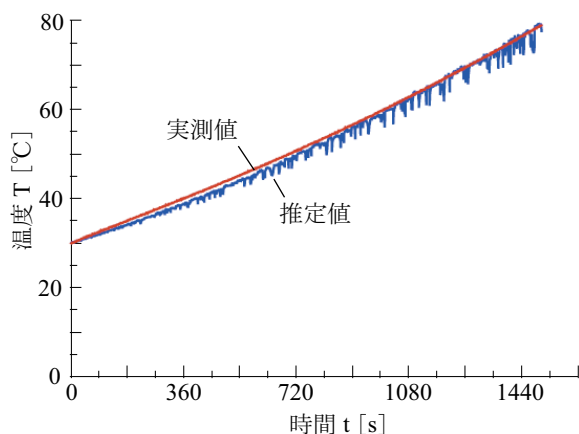


Fig. 12 容器中の場合の温度推定

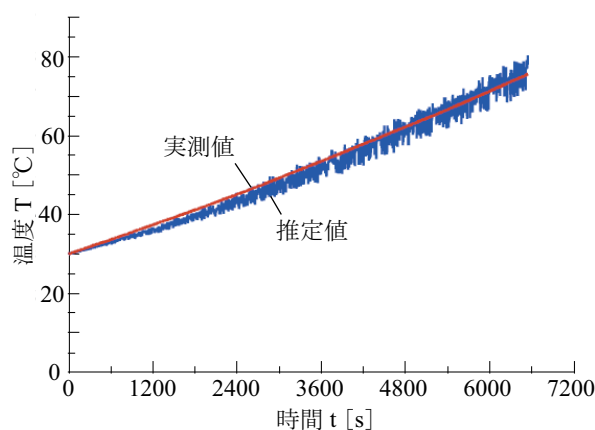


Fig. 13 容器大の場合の温度推定

討した。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 本研究では、実験により測定した電流値を用いて発熱量を求め、さらに発熱量に対する温度の推定式を近似曲線により求めた。
- (2) (1) で求めた式により、印加電圧が異なる場合の検証をした結果、推定値と実測値がほぼ一致していた。
- (3) (1) で求めた式により、加熱試料の塩分濃度が異なる場合の検証をした結果、推定値と実測値がほぼ一致していた。
- (4) (1) で求めた式を体積で補正することにより、加熱試料の体積が異なっても、推定値と実測値がほぼ一致していた。

以上の結果より、発熱量に対する温度の推定式を求めることにより、加熱温度を推定することが可能であると考えられる。

今後の課題は、電流の脈動を抑える装置に関して検討を行い、さらに容器内に固体物質が混在する場合においても検証を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 秋山美展：ジュール加熱技術 - その特徴と応用 - ，ジャパンフードサイエンス，41巻，6号，pp.47-54，2002.
- 2) 秋山美展：ジュール加熱技術の応用展開 - プログラム加熱法の可能性 - ，ジャパンフードサイエンス，41巻，9号，pp.79-81，2002.
- 3) 秋山美展，三保茂之，長縄明大，和田祐子，大久長範，森勝美：プログラム加熱による豆腐ゲル強度の改善，日本食品工学会 2003 年大会，2003.
- 4) 植村邦彦，五十部誠一郎，今井哲哉，野口明德：有限要素法による通電加熱における温度分布の解析，日本食品科学工学会誌，43巻，5号，pp.510-519，1996.
- 5) 長縄明大，三保茂之，秋山美展，足立高弘：ジュール加熱現象の可視化と有限要素解析，日本食品工学会誌，7巻，2号，pp.105-111，2006.