

セルフチューニング手法を用いたジュール加熱制御

Joule Heating Control Using Self-Tuning Control

○伊藤 博基*, 関 健史*, 長縄 明大*,
秋山 美展**, 足立 高弘*

○Hiroki Ito*, Takeshi Seki*, Akihiro Naganawa*,
Yoshinobu Akiyama**, Takahiro Adachi*

*秋田大学, **秋田県総合食品研究所

*Akita University, **Akita Research Institute of Food and Brewing (ARIF)

キーワード : ジュール加熱 (Joule Heating), セルフチューニング制御 (Self-Tuning Control)

〒010-8502 秋田市手形学園町 1 番 1 号 秋田大学工学資源学部機械工学科長縄研究室 伊藤 博基
Tel.: (018)889-2971, E-mail:ito@control.mech.akita-u.ac.jp

1 はじめに

現代では消費者嗜好が非常に多様化, 複雑化するとともに, 相次ぐ食品関連の事件・事故によって食品に対するニーズは一層厳しさを増している. 食品加工を行う際には, こうした状況をふまえた上で嗜好面, 栄養面, 安全面における十分な配慮が必要とされる. 加熱技術は食品加工の中でも最も基本的な操作の一つであり, 殺菌, 溶解, 濃縮, 凝固など様々な目的で利用されている.

従来から最も一般的に利用されている伝熱加熱法は, 加熱対象である食品に対し, 容器などを媒体として, 熱伝導によって外部から加熱する方法である. しかしこの方法は, 加熱ムラ, あるいは過加熱を引き起こす要因となり, それによる殺菌不良, 焦げなど様々な問題が生じる場合がある.

一方, 伝熱加熱法以外に, ジュール加熱法 (通電加熱法) がある. ジュール加熱法は, 加熱対象である食品に直接電気を流すことにより, 食品自身を電気抵抗体として発生するジュール熱を利用した加熱方法である [1]. 食品加工において一般的に使用されている伝熱加熱とは加熱原理が異なるため, 様々な特徴を有する. これを Table 1 にまとめて示す. ジュール加熱技術は歴史的には古く, 20 世紀初頭にすでに開発され, 日本においても戦後に電気パンを加工するために

利用された. しかし, その後はパン粉製造, 豆腐製造以外では実用化にはほとんど至っておらず, 現在でも清酒の殺菌システムなど一部の商品化しか行われていない [2]. そのためジュール加熱手法を用いた食品加工技術は, まだまだ研究開発途上であるといえる.

そこで, 本研究グループでは, 伝達加熱法の問題点を解決することが期待されるジュール加熱法について検討し, 実用化を目指した次の様な基礎的な研究を行っている [3].

- (1) 温度制御精度の高さ, 温度変更応答の速さを最大限に活かし, 食品成分, 温度などにより変化する加熱対象の特性変動に対して, 目的温度到達時の

Table 1 Characteristics of Joule heating method

長所	温度制御精度が高い 温度変更応答が速い 過加熱の恐れがない 材料が焦げ付かない エネルギー変換効率が高い
短所	油脂, 低水分材料は加熱できない 材料の電気抵抗率の影響が大きい 包装後の加熱ができない 加熱容器の断熱性が要求される

オーバーシュートの抑制, および定常ロバスト性を実現する制御手法について検討する [4].

- (2) (1) の制御手法を用いて, 加熱による食品加工に関する基礎的な実験を行い, ジュール加熱法が食品へ与える影響を, 理化学的特性, 微生物品質, 食感などの特性により評価する. 加熱操作は, 本研究グループが提唱するプログラム昇温加熱法により行い, その有効性を検証する [5].
- (3) 不均一多成分系である食品の電気化学的特性やジュール発熱の特性を明らかにするため, 3次元で連続的に再現しうるモデル (3次元非定常発熱モデル) を構築し, 発熱モデルの完成と各種食品の電気化学的データベースを作成する [6].

これらの研究を進めていくことにより, 加熱する食品に最適な加熱指標が得られると考えられるため, 食品に高品質, 高付加価値を与えることが期待できる.

本稿では, (1) の制御手法として, 最小分散制御法を用いた結果について述べる [7].

2 ジュール加熱装置

Fig. 1 は, ジュール加熱装置の概略図を示している. 加熱容器は, 縦 8cm, 横 5cm, 高さ 8cm の直方体のもを使用しており, 材質は耐熱性, 電気絶縁性がよく, 薬品に侵されにくいテフロン樹脂を用いている. また, 電極板は, 厚さ 1mm のチタン材に 0.2mm のセラミックコーティングを施したものである. 加熱容器へ電気を供給する図中のスイッチングレギュレータは, スwitchング式交流電源であり, PC (Personal Computer) からの指令電圧 (電圧範囲: 0~4.096V) に応じて, 電圧調整 (電圧範囲: 0~100V) された正弦波を出力する. センサは, K 型熱電対を使用し, 温度測定器を介して, PC と接続されている.

3 プログラム昇温装置

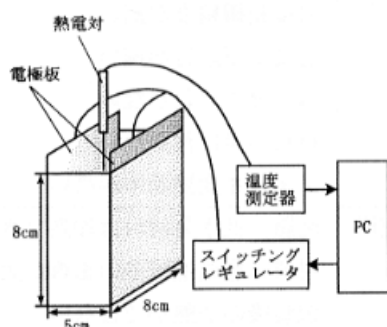


Fig. 1 Joule heating method

本研究グループが提唱するプログラム昇温加熱法を, Fig. 2 を用いて説明する. 通常, 食品を加熱する場合は, 目標温度 T_2 K まで段階を経ないで昇温するのが一般的である. しかし, 製作したジュール加熱装置では, PC を用いて温度制御を行うため, 最終的な目標温度 T_2 K に達するまでに, ある温度 T_1 K で任意の保持時間 t_1 sec を設け, 最終的な目標温度 T_2 K まで加熱するというような段階的な加熱も可能となる. 本研究では, この手法をプログラム加熱昇温と呼び, 段階を経ない昇温を, プログラム昇温と区別するため, 単純加熱昇温と呼ぶことにする.

ジュール加熱におけるプログラム加熱昇温は, 昇温工程にある食品材料を一定温度で保持することによって, 加熱による食品内の現象, 反応の進行をある程度個別にコントロールできる可能性がある. 例えば, 豆腐, 卵加工品へ応用すれば, ゲル強度の増加, 新食感, また, 発酵製品へ応用すれば, 加工工程の短縮, 酸度変化の抑制などの可能性が期待できる. これまでに行った基礎実験結果は, 文献 [8],[9] などで発表を行った.

4 最小分散制御

ジュール加熱装置は冷却機能を有していないため, 過渡応答時, および定常状態における目標温度との誤差を, 冷却により温度制御することはできない. また, 食品加工における加熱操作では, 加熱対象の食材や, 昇温過程に加熱対象の抵抗値が変わるため, 固定ゲインの PID 制御では, 良い制御性能を得ることは困難である. このため, 本稿では, セルフチューニング制御の一手法である最小分散制御法を用いて, ジュール加熱におけるプログラム昇温を行う.

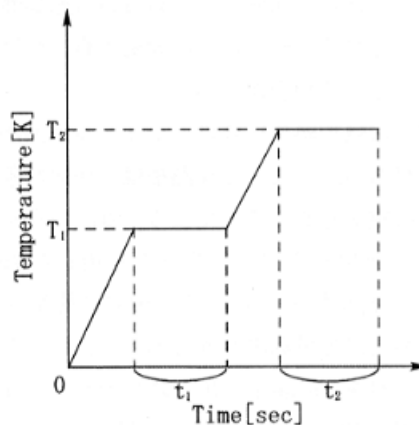


Fig. 2 Program heating method

加熱対象を、つぎのような不規則雑音が付加された離散時間モデルとして考える。

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})\xi(t) \quad (1)$$

ここで、 $y(t)$ は出力 (温度), $u(t)$ は入力 (指令電圧), $\xi(t)$ は外乱, k はむだ時間であり, $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $C(z^{-1})$ は、次式で与えられる多項式である。

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} \quad (3)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_lz^{-l} \quad (4)$$

制御則導出のための評価関数を、次式のように与える。

$$J = E[\{y(t+k) - w(t)\}^2] \quad (5)$$

ここで、 $w(t)$ は目標値, $E[\cdot]$ は期待値を表す。 $y(t+k)$ は時刻 t において得られないので、この予測値を導出するため、つぎの Diophantine 方程式を導入する。

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-k}F(z^{-1}) \quad (6)$$

ただし、

$$E(z^{-1}) = 1 + e_1z^{-1} + \dots + e_{k-1}z^{-(k-1)} \quad (7)$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + \dots + f_{n_1}z^{-n_1} \quad (8)$$

であり、 n_1 は、

$$n_1 = \max\{n-1, l-k\} \quad (9)$$

とする。このとき、式 (5) を最小にする制御則は、

$$u(t) = \frac{1}{E(z^{-1})B(z^{-1})} \{C(z^{-1})w(t) - F(z^{-1})y(t)\} \quad (10)$$

で与えられ、制御系は Fig. 3 のように表すことができる。また、この制御系の目標値 $w(t)$ から出力 $y(t)$ への伝達関数は、

$$y(t) = z^{-k}w(t) + E(z^{-1})\xi(t) \quad (11)$$

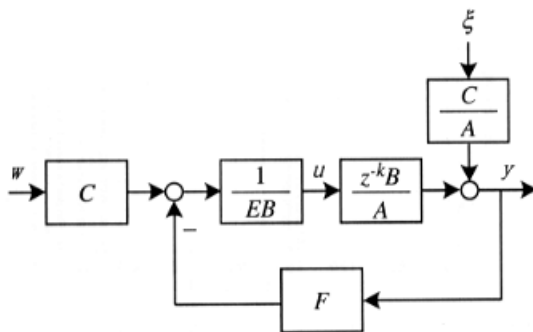


Fig. 3 Minimum variance control system

となる。しかし、式 (2),(3) のパラメータは加熱対象の食材や電気抵抗値により変化するので、式 (10) のコントローラのパラメータを決定することができない。そこで、加熱対象のパラメータを同定し、その推定値を用いて制御を行うことが必要である。このため、式 (1) を次のように書き直す。

$$y(t) = \theta^T \zeta(t) + C(z^{-1})\xi(t) \quad (12)$$

ただし、

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m]^T \quad (13)$$

$$\zeta(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n),$$

$$u(t-k), \dots, u(t-k-m)]^T \quad (14)$$

式 (12) に対し、同定する加熱対象を次のように表す。

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}^T(t)\zeta(t) \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\theta}(t)$ は式 (12) に対応する加熱対象の推定値を表す。同定誤差を $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{\theta}^T(t)\zeta(t)$ と定義し、 $\varepsilon(t)$ が漸近的に 0 になるように $\hat{\theta}(t)$ を求めていく。これを実現するため、 $\hat{\theta}(t)$ は次の逐次最小二乗法を用いて推定する。

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\Gamma(t-1)\zeta(t)\varepsilon(t)}{1 + \zeta^T(t)\Gamma(t-1)\zeta(t)} \quad (16)$$

$$\Gamma(t) = \Gamma(t-1) - \frac{\Gamma(t-1)\zeta(t)\zeta^T(t)\Gamma(t-1)}{1 + \zeta^T(t)\Gamma(t-1)\zeta(t)} \quad (17)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \zeta^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad (18)$$

5 加熱実験

本稿では、加熱対象を塩化ナトリウム水溶液 (濃度 0.1%) とした場合の結果について述べる。食品には塩化ナトリウムのような電解質が含まれているため、本稿の検証は、今後様々な食品に対して加熱実験を行う際の基礎検証となる。また、最小分散制御の性能を

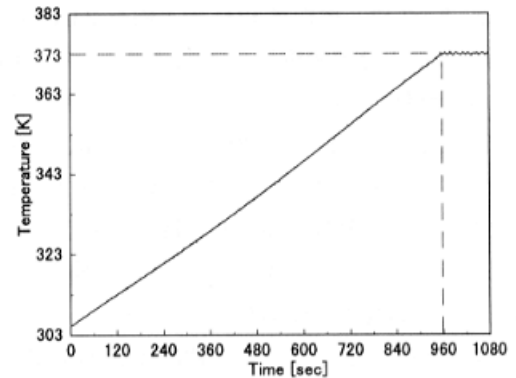


Fig. 4 Step response of plant

検証するため、固定ゲインのPID制御と結果の比較も行った。

Fig. 4は、PCから指令電圧2.048V（容器内に50Vの電圧を印加）を与えた場合の昇温特性を示している。今回行った塩化ナトリウム水溶液のステップ応答は、時間の経過と共に温度が上昇して行き、305.5Kから373Kまで約960secで到達している。また、ジュール加熱の特徴である温度変更応答の高さにより、ステップ応答はむだ時間がほとんど見られない。このため、本稿ではむだ時間をゼロとし、加熱対象のモデルを1次遅れ系とした。

$$P(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (19)$$

ここで、式(1)に対して $k=1$ である。外乱モデルを $C(z^{-1})=1$ として、最小分散制御系を設計した結果、

$$E(z^{-1}) = 1 \quad (20)$$

$$F(z^{-1}) = -a_1 \quad (21)$$

を得た。

しかし、モデルの係数 a_1, b_0 は未知パラメータであるため、式(12)~(18)に基づいて、パラメータを同定しながら制御を行った。なお、係数 \hat{a}_1, \hat{b}_0 の初期値は任意に設定し、 $\Gamma(t)$ の初期値は次の値とした。

$$\Gamma(z) = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix} \quad (22)$$

また、PIDコントローラのゲインは試行錯誤により、次のように決定した。

$$C(z) = K_P + \frac{K_I z^{-1}}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \quad (23)$$

$$K_P = 3 \quad (24)$$

$$K_I = 0.253 \quad (25)$$

$$K_D = 0.296 \quad (26)$$

Fig. 5~7は、操作量 $u(t)$ の上限を2.048[V]とした場合の最小分散制御法の実験結果を示す。Fig. 5は、目標温度 $w(t)$ と出力 $y(t)$ の比較を表している。目標温度 $w(t)$ は $T_1 = 313\text{K}$ 、 $T_2 = 325\text{K}$ と設定し、出力 $y(t)$ が目標温度 $w(t)$ に到達後は、それぞれの温度において120秒間、温度を保持するように与えた。また、Fig. 6は、この場合のPCからの操作量（指令電圧） $u(t)$ の変化の様子を示している。

Fig. 5から、出力 $y(t)$ は目標温度 $w(t)$ に速やかに到達し、定常状態においても良好な追従性を示している。また、Fig. 6から、昇温時においては上限に設

定した操作量 $u(t)$ を有効に用いて加熱しており、また定常状態の変動がやや大きいものの、目標温度を保持するように変化している様子がわかる。この変動の原因は、今回の実験では加熱容器に断熱処理を施してないため、容器外部に熱が放熱され、この影響を小さくするように操作量 $u(t)$ が印加されたと考えられる。Fig. 7は、式(19)パラメータ a_1, b_0 の推定値を示しており、実験開始後、すぐに収束している様子がわかる。

Fig. 8,9は最小分散制御法と同様の条件での、PID制御法の実験結果を示す。Fig. 8から、出力 $y(t)$ は目標温度 $w(t)$ に速やかに到達しているが、定常状態において多少乱れていることが分かる。また、Fig. 9から、昇温時においては上限に設定した操作量 $u(t)$ を有効に用いて加熱している。しかし、定常状態での操作量 $u(t)$ は不要な操作量 $u(t)$ を与えてしまうため、出力 $y(t)$ の上昇が大きく、誤差が大きくなったと考えられる。

6 豆腐の製造実験

本稿では、最小分散制御法の有効性を検証するため、豆腐の製造実験を行った。Fig. 10は、目標温度

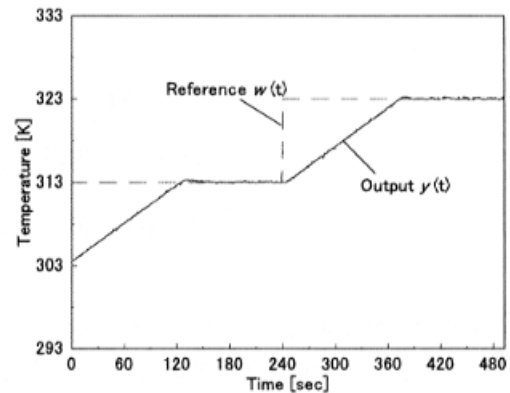


Fig. 5 Output $y(t)$ of Minimum Variance Control

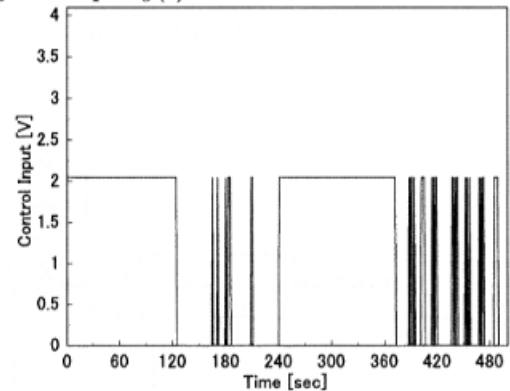


Fig. 6 Control input $u(t)$ of Minimum Variance Control

を 358[K] として 900[sec] 間の温度保持を行った実験結果である。Fig. 10 から、実験開始後、約 340[K] において温度の上がり方が変化していることがわかる。この原因として、豆乳の凝固による粘性の変化，電気伝導率の変化などが上げられる。また、目標温度に対する約 1.2[%] のオーバーシュートが見られた。

7 むすび

本稿では、食品加工におけるジュール加熱技術の実用化を目指した研究の一環として、プログラム昇温における最小分散制御手法について検討した。塩化ナトリウム水溶液を加熱対象とした PID 制御との比較

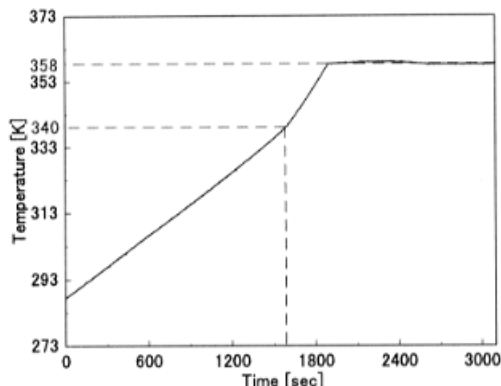


Fig. 10 Temperature change of bean card

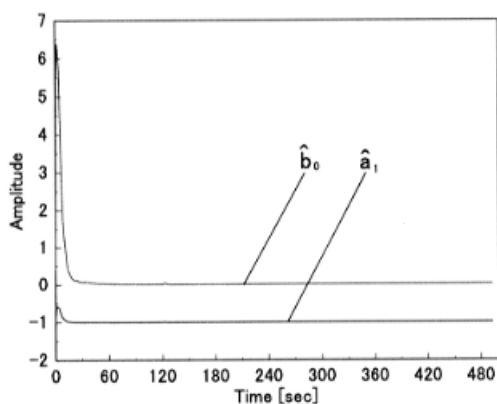


Fig. 7 Plant parameter \hat{a}_1 and \hat{b}_0

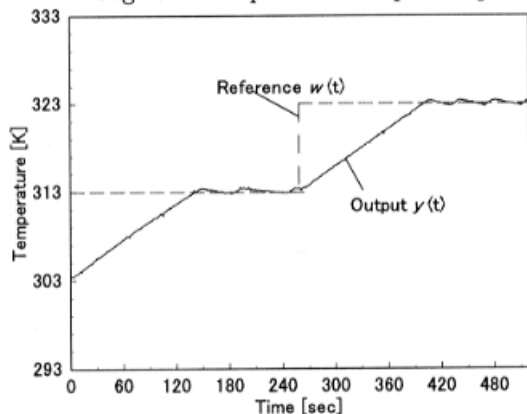


Fig. 8 Output $y(t)$ of PID control

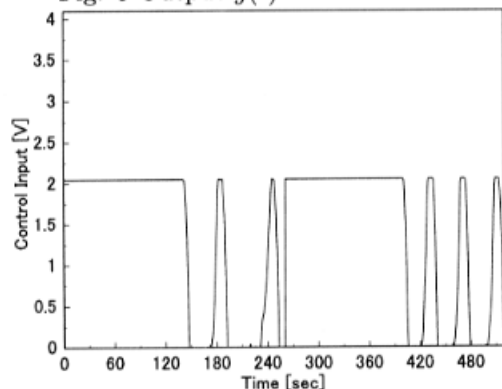


Fig. 9 Control input $u(t)$ of PID Control

実験実験を行った結果、PID 制御法よりも良好な制御性能が得られた。また、豆腐の製造実験を行った結果、粘性の変化による電気伝導率の変化が分かった。

今後は、ヨーグルトや卵白などといった、物性の異なる様々な対象へ実験を行う予定である。

最後に、本研究は、(社)日本食品機械工業会 FOOMA 研究助成制度による支援対象研究の一部として行われたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] 秋山：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, 47-54, 2002
- [2] 秋山：ジュール加熱による清酒の高品位殺菌システムの開発, ジャパンフードサイエンス, 41 巻, 8 号, 85-89, 2002
- [3] 三保, 秋山, 長縄, 足立, 和田：ジュール加熱の実用化に関する研究, 国際食品工業展 FOOMA JAPAN アカデミックプラザ研究発表要旨集, Vol. 10, 154-157, 2003
- [4] 三保, 秋山, 長縄, 足立：ジュール加熱装置におけるプログラム昇温制御, 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 412-415, 2003
- [5] 秋山：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, 79-81, 2002
- [6] 三保, 伊藤, 秋山, 長縄, 足立：ジュール加熱食品加工における発熱および熱移動解析, 国際食品工業展 FOOMA JAPAN アカデミックプラザ研究発表要旨集, Vol. 10, 154-157, 2004
- [7] 大松, 山本 (編著)：セルフチューニングコントロール, コロナ社, 1996
- [8] 秋山, 大久, 三保, 長縄：プログラム加熱法による加熱工程中の反応および状態変化の個別制御, 日本食品工学会 2002 年大会, 2002
- [9] 秋山, 三保, 長縄, 和田, 大久, 森：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