

ジュール加熱技術を応用した清酒殺菌システムの PID 制御

PID Control of Sake Sterilization System Using Joule-heating Technique

関 健史*, 長縄 明大*, 秋山 美展**,
安田 基樹***, 佐々木 善幸***, 渡辺 健吾***

Takeshi Seki*, Akihiro Naganawa*, Yoshinobu Akiyama**,
Motoki Yasuda***, Yoshiyuki Sasaki*** and Kengo Watanabe***

*秋田大学, **秋田県総合食品研究所, ***日本精機株式会社

*Akita University, **Akita Research Institute of Food and Brewing(ARIF),
***Nihon Seiki Co.,Ltd.

キーワード : ジュール加熱 (Joule Heating), 清酒殺菌システム (Sake Sterilization System),
PID 制御 (PID 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 明大, Tel.: (018)889-2726, E-mail: naganawa@control.mech.akita-u.ac.jp

1. はじめに

清酒は、その製造工程において、一部の凍結清酒を除いて出荷前に全て加熱処理される。清酒の加熱は、火入れとも呼ばれ、残存する酵素活性の失活と火落ち菌（濁りや風味低下の原因となる）の殺菌がその主な目的である。普通酒の加熱殺菌では、一般にプレート式や蛇管式の熱交換器を用いて加熱殺菌されているが、吟醸酒等の高級酒では、その香気成分の変化を最小限に抑えるため、ピン火入れと呼ばれる殺菌法が用いられている。しかし、ピン火入れ法は、製品の官能検査（香気成分の保持）を最優先させた加熱殺菌法であるが、清酒を殺菌温度まで温度上昇させるには、湯煎する湯の温度を殺菌温度以上に上げなければならず、ピン内壁面と中心部では温度むらが生じる。また、その作業には熟練度、時間、労力などを必要とする問題点もある。

そこで、少量でも精度よく加熱ができること、焦げや加熱ムラのない殺菌が容易に行えること、加熱に伴う風味変化がないことなどを目的とし、ジュール加熱技術を応用した清酒殺菌システムについて検討を行っている^{1),2)}。ジュール加熱は、清酒自体に電流を流すことにより発生するジュール熱を利用した直接加熱法である。ジュール加熱

法の特徴として、温度制御精度が良い、燃焼を伴わないため環境がクリーンであるなどが挙げられる。これまでこのシステムを用いた清酒の殺菌試験が行なわれ、残存酵素活性分析と官能検査などの結果により、ジュール加熱殺菌の有効性が確認されている。

本研究では、高精度かつ安定した温度制御を実現するための基礎研究を行なったので、その結果について報告する。本稿では、まず装置の概要について述べた後、装置の基礎特性について述べる。次に、制御方式として PID 制御により、加熱制御を行なった場合の実験結果について述べる。

2. 殺菌システムの概要

Fig.1 は殺菌システムの概略図を示している。Fig.1 において、供給タンク中の未加熱液はポンプにより 1 次熱交換器へ送られる。1 次熱交換器では、未加熱液はジュール加熱器・温度保持部を経て流れてくる高温の加熱液と熱交換面を介して熱交換を行う。1 次熱交換器により予備加熱された液は、ジュール加熱器に入り、殺菌温度まで加熱される。その後、温度保持部を出て、1 次熱交換器で未加熱液と熱交換をし、さらに 2 次熱交換器、3 次熱交換器で冷却され、受入タンクへ送

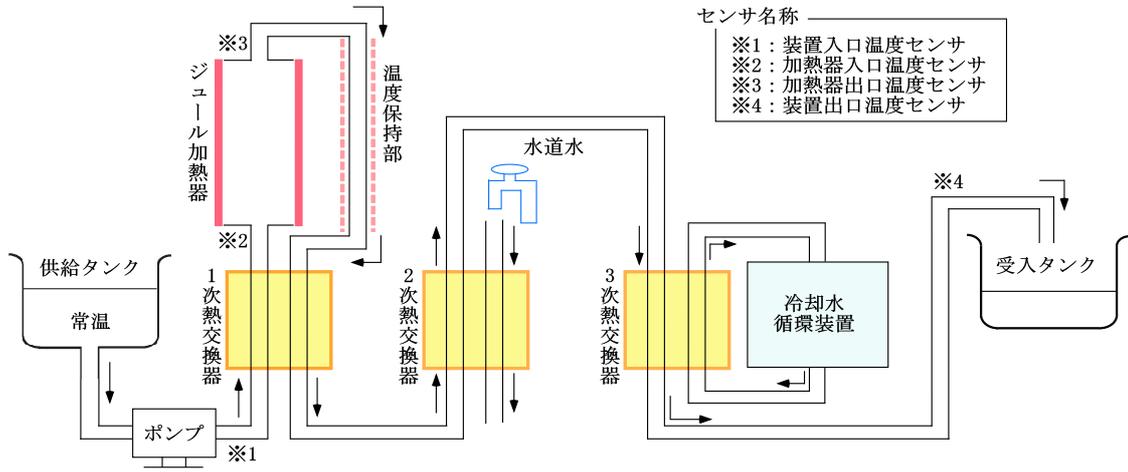


Fig. 1: Sterilization system using Joule-heating technique

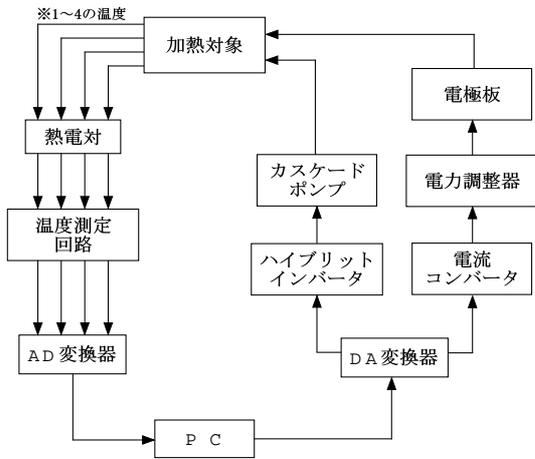


Fig. 2: Composition of control system

られる．本システムには，1次熱交換器の前後，ジュール加熱器の後，受け入れタンク前の計4箇所に熱電対が取り付けられており，装置の前面に温度表示することができる．

Fig.2は制御系の構成図を示している．本研究の目的は，ジュール加熱器出口温度 3を目標温度になるように制御を行なうことである．コントローラはPCを用い，センサの情報は，Fig.1に示す4箇所の熱電対の情報を，温度測定回路，AD変換器を介してデータを取り込む．本研究では，サンプリング周期を5秒とした．

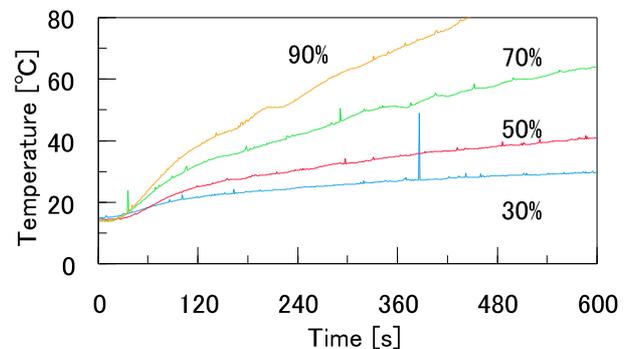
一方，本システムでは，未加熱液を一定の流量で送り，ジュール加熱器の電力制御により温度制御を行なっている．また，流量調節のため，電力を供給するジュール加熱器へ未加熱液をフィードするポンプの指令周波数は調整可能である．

流量調節は，ポンプへの最大指令周波数に対する印加指令周波数の割合で表示するものとし，この値が100%のとき，最大指令周波数でポンプを駆動する．このとき，流量が最大となる．加熱

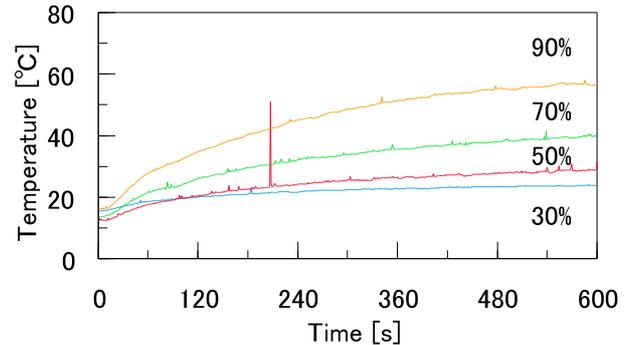
調節は，ジュール部へ印加できる最大電力に対する印加電力の割合で表示するものとし，この値が100%のとき，ジュール部に最大電力が供給され，加熱対象の温度が上がる方向に調整される．

3. 殺菌システムの特性

本研究では，加熱対象は0.02%の食塩水10lを使用して，装置の特性を求める．Fig.3は加熱電力に対する温度上昇の特性を示し，(a)が指令周波数27%の場合，(b)が45%の場合の実験結果である．(a)と(b)を比較すると，指令周波数が低い



(a) Drive frequency of pump: 27%



(b) Drive frequency of pump: 45%

Fig. 3: Characteristic of system

場合、すなわち、フィードされる液体の流速が遅くなるため、温度上昇が速くなることがわかる。また、いずれの周波数に対しても、加熱電力を大きくした方が、温度上昇が速いことがわかる。

4. 制御実験の結果

殺菌システムにおける制御実験は、目標温度を 60 に設定した場合の目標値応答と、加熱対象のインピーダンスを変えた場合の目標値応答について検討し、最後に、目標温度に整定した後、加熱対象の特性が変動した場合について検討した。

本研究では、加熱対象を 1 次遅れ系としてモデル化を行い、制御系設計を行った。コントローラ $C(z)$ は、次の PID コントローラとし、試行錯誤によりゲインを調整した。

$$C(z) = K_p + \frac{K_i z^{-1}}{1 - z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1}) \quad (1)$$

実験は、受け入れタンクへ放水される食塩水を、ホースにより供給タンク側へフィードバックし、循環して行なうものとする。

(1) 目標値応答特性

Fig.4 は、0.02% の食塩水に対して、流量を 36% に固定し、電力制御を行った場合の結果である。(a) はジュール加熱器の出口温度、(b) は加熱電力量、(c) は目標温度整定後で、実験開始から 1800 秒後以降の拡大図を示している。(a) より、初期温度 20 から目標温度 60 まで、速やかに温度上昇している様子がわかる。また、(b) より昇温開始時に操作量が 100% を超えているものの、大きく振動することなく変化している様子がわかる。さらに、(c) より、目標温度到達後は、 ± 0.7 前後の精度で温度保持が実現できていることがわかる。

(2) 加熱対象のインピーダンス変化実験

本研究では、インピーダンスが異なる清酒を殺菌することを想定し、塩分濃度の異なる食塩水の加熱実験を行った。塩分濃度は、0.02%、0.03%、0.05% の 3 種類とし、いずれも 10ℓ を作成した。いずれの場合も、PID ゲインは (1) 目標値応答実験の場合と同じ値を使用した。Fig.5 は目標温度を 60 に設定した場合の実験結果を示している。(a) は 3 種類の食塩水を個々に温度制御した場合のジュール加熱器出口温度、(b) ~ (d) は実験開始から 1800 秒後以降の拡大図を各食塩水ごとに示している。(a) の図より、塩分濃度が高くなるほど、昇温特性が速くなる様子がわかる。しか

し、いずれの結果においてもオーバーシュートは見られず、良好な結果が得られた。また、(b) ~ (d) の図より、3 種類の異なる塩分濃度の食塩水において、同じ PID ゲインによる加熱制御により、 ± 0.7 以内の温度制御精度が実現できた。

(3) 特性変動

特性変動実験は、目標温度 60 に整定後、供給タンク内に 0.03% の食塩水 5ℓ を追加することにより行った。食塩水追加後は、0.0233% の食塩水 15ℓ となっている。

Fig.6 は実験結果を示しており、0.03% の食塩水は 2400s 後に供給タンクに追加した。食塩水追加後、温度が変動しているが、約 64 秒で目標値に戻すことができた。

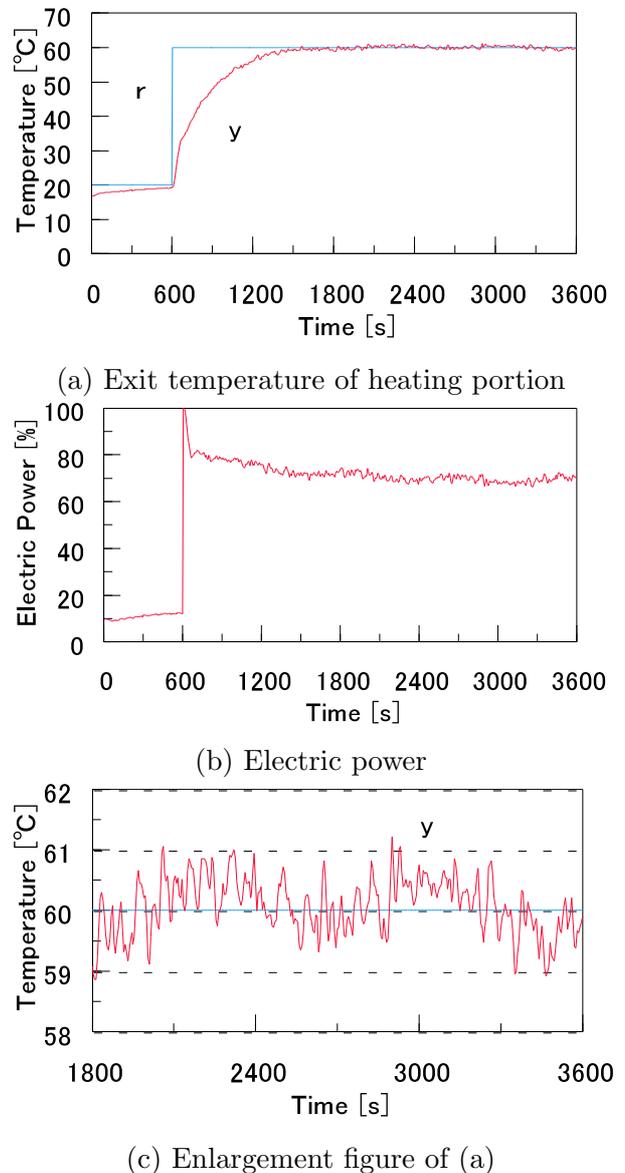
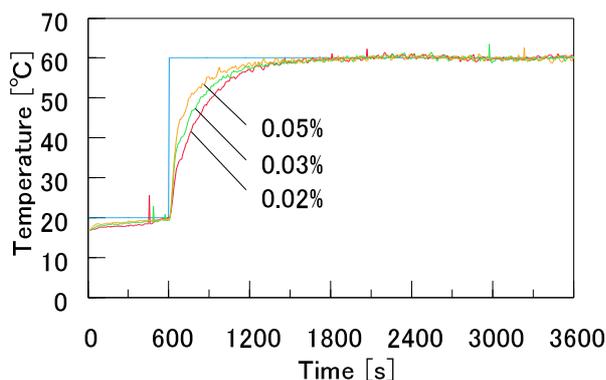
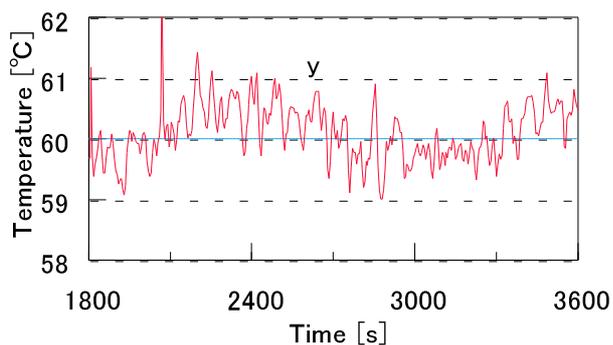


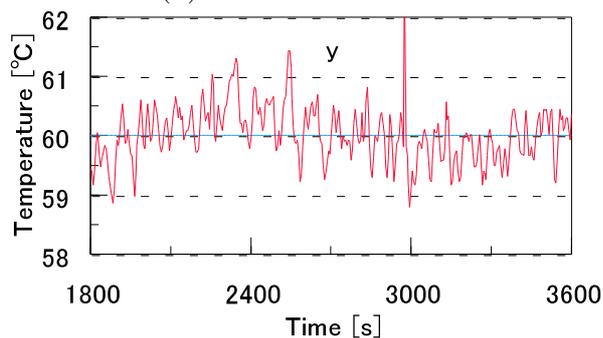
Fig. 4: Experimental result (salt solution 0.02%)



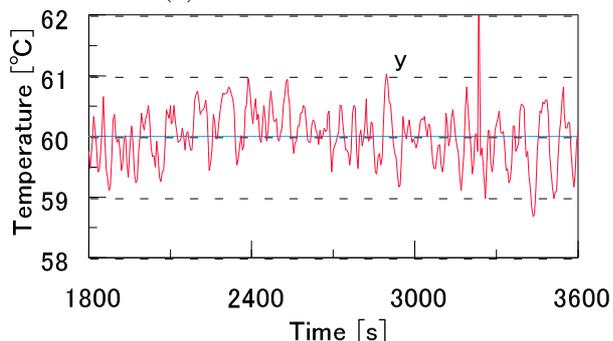
(a) Reference responses



(b) Salt solution 0.02%



(c) Salt solution 0.03%



(d) Salt solution 0.05%

Fig. 5: Experimental results for change of impedance

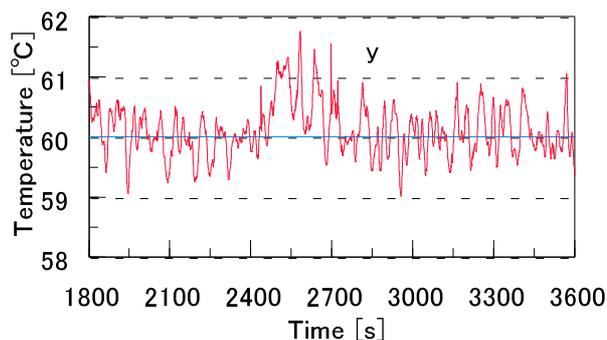


Fig. 6: Experimental result of perturbation

5. おわりに

本研究では、清酒殺菌システムの制御性能について検証した。試行錯誤により調整されたPIDコントローラにより精度を検証したところ、 ± 0.7 以内に定常応答を収めることができ、良好な結果が得られた。また、インピーダンスの異なる3種類の食塩水を用いて加熱制御を行ったところ、

全ての食塩水において、 ± 0.7 以内の定常応答に収めることができた。

今後の課題は、以下のとおりである。清酒の殺菌では、殺菌温度をある時間以上保持しなければ効果的な殺菌が行えないことが知られている¹⁾。このため、殺菌対象の液体がジュール加熱出口から温度保持部を経て、1次熱交換器にいたるまでの滞留時間をある時間以上に保つ必要がある。よって今後は、滞留時間を保つための流量制御を行いながら、加熱制御を行う手法について検証する必要がある。また、清酒によって殺菌時間は異なるので、加熱温度を変えた場合の温度制御精度の検証も必要である。

参考文献

- 1) 秋山：ジュール加熱技術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*，No. 8，pp. 85-89，2002
- 2) 渡辺：ジュール加熱を応用した高精度液体殺菌システム，*ジャパンフードサイエンス*，No. 7，pp. 91-94，2002
- 3) 伊藤，三保，長縄，秋山，足立：ジュール加熱におけるプログラム昇温の最小分散制御，第4回適応学習制御シンポジウム，pp. 43-46，2004