

遠赤外線を利用した薄層流式液体殺菌装置の開発

誌名	日本食品工学会誌 = Japan journal of food engineering
ISSN	13457942
著者	酒井, 昇 大島, 由子 山中, 庸子 福岡, 美香 今道, 純利
巻/号	9巻4号
掲載ページ	p. 271-276
発行年月	2008年12月

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

遠赤外線を利用した薄層流式液体殺菌装置の開発

酒井 昇^{1,†}, 大島由子¹, 山中庸子¹, 福岡美香¹, 今道純利²

¹ 東京海洋大学海洋科学部食品生産科学科, ² 食品サニタリ技術協会

Development of Liquid Food Pasteurization Equipment Using Far-infrared Radiation Heating

Noboru SAKAI^{1,†}, Yuko OSHIMA¹, Youko YAMANAKA¹,
Mika FUKUOKA¹, and Sumitoshi IMAMICHI²

¹*Tokyo University of Marine Science and Technology, Department of Food Science and Technology,
Konan 4-5-7, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

²*Food Sanitary Engineering Association, Konan 4-5-7, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

Since heating by infrared radiation can heat directly liquid food, the surface of the food becomes a high temperature, and stainless steel plate which has contacted the food would be maintained a low temperature. As a result it seems to be able to reduce the adhesion of the fouling in the stainless steel plate, which was an important problem in the conventional heat exchanger. In this study we developed the continuous heating equipment using far-infrared radiation, and verified that this system is practically available to pasteurization. In this developed equipment, the liquid food flows down as a thin liquid film, because the penetration of radiation energy to the water is low and the heating of the liquid inside is difficult. Using this equipment, increased temperature of the sample was measured by changing the heating conditions such as supplied electricity to the heater and the liquid flow conditions such as flow rate. The result showed that the increased temperature rises, as liquid film thickness thins, and that the sample temperature could be heated to about 80°C. Using lactic acid bacteria and yeast, the pasteurization experiments were performed. As the result, the death of the bacterium and the yeast could be confirmed, and the effectiveness of this equipment could be verified.

Keywords: Far-infrared radiation, Liquid food, Continuous pasteurization, Thin liquid film

1. 緒 言

牛乳をはじめとする液状食品の加熱殺菌には、プレート型やチューブ型の熱交換器を使用した殺菌装置が使用されることが多い。これらの熱交換器においては、蒸気や熱水などの熱源から薄いステンレスを介して液状食品に熱が伝えられる。その際、熱源と接しているステンレスは高温になり、高温になったステンレス面に液状食品が接触してタンパク汚れやスケールの原因となる。この伝熱面の汚れの洗浄が不十分であると、

微生物汚染の原因となったり、汚れの剥離による製品への混入など重大な危害を及ぼす。そのため、殺菌装置の洗浄には多くの時間と労力を要するとともに、大量の洗浄液と洗浄水を排出することになる。

このような問題を解決するための1つの方策として、本研究では遠赤外線を用いた液状食品用殺菌装置の開発を目的として検討を行った。遠赤外線による加熱は、輻射を利用するため、伝熱面を介さずに食品を直接加熱することができる。そのため、液状食品を流下させながら試料上面から加熱すると、食品の表面が最も高温となり、流路（ステンレス）面の温度を低く保つことができる。その結果、ステンレス面におけるタンパク汚れを低減でき、洗浄も容易になるため環境負荷も低減できると考えられる。

遠赤外線を利用した加熱技術は、食品の乾燥（野菜、

(受付 2008 年 7 月 7 日, 受理 2008 年 9 月 8 日)

1 〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7

2 〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7

† Fax: 03-5463-0622, E-mail: sakai@kaiyodai.ac.jp

魚など), 焙煎・焙焼 (お茶, コーヒーなど), 焼成 (クッキー, パン, かまぼこなど), 殺菌 (牡蠣や水産練り製品の表面殺菌) など食品加工の多くの分野で利用されている [1]. とくに殺菌についてみると, 実用的に利用されているのは, 固体物質の表面殺菌が中心であった [2].

固体表面の殺菌の研究としては, 濱中ら [3] は, 原料殺物を想定し, 懸濁液を介さず, 細菌に赤外線を直接照射したところ, 熱耐性の高低を問わず微生物の殺菌に利用できる可能性を示している. また, 濱中ら [4] は, コムギおよびダイズに対して赤外線照射を行い, 試料表面の一般生菌に対する殺菌効果を短時間で実現できることを示した.

液状食品の殺菌に関するこれまでの報告では, 白川 [5] は *Bacillus subtilis*, *B. cereus*, *Clostridium sporogenes* を濃口調味液中に懸濁させ, 循環させながら遠赤外線を 24 時間照射すると, ほとんど増殖しなくなることを示している. 橋本ら [6,7], Sawai ら [8] は, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* を生理的リン酸緩衝液に懸濁したものを遠赤外線殺菌した場合には, 細菌懸濁液の表面近傍における赤外線エネルギーの吸収が大きく, それが殺菌効果に影響していることを示している. また, Sawai ら [9] は, 遠赤外線照射は高い耐熱性を有する枯草菌芽胞に対しても, 伝導加熱では何の影響も認められない温度域において, 短時間で熱活性化を引き起こし, さらに死滅を引き起こすと示している.

これらの研究は, 液状食品の殺菌について, 遠赤外線の有効性を検証したもので, 実際の装置としては実用化されていない. そこで, 本研究では, 遠赤外線を利用した液状食品用殺菌装置の開発を目的として検討を行った.

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置は, タンク, ペリスタポンプ, テストセクション (加熱部), レシーバタンクから構成されている. 予めタンクに溜めておいた試料を, ペリスタポンプを用いてテストセクションに試料を送る. テストセクションで加熱された試料は, レシーバタンクに流れ落ち回収される.

Fig. 1 にテストセクションの概略図を示す. テストセクションは, 試料投入口 (①), 装置タンク (②), 試料加熱部 (③), 遠赤外線ヒータ (④), 角度調節器 (⑤) から構成されている. 試料加熱部は幅 50 mm, 長さ 855 mm, 高さ 30 mm の樋状の構造となっている. 遠赤外線ヒータは幅 120 mm 長さ 600 mm で, 流路と平行に設置されており, 遠赤外線ヒータと試料加熱部と

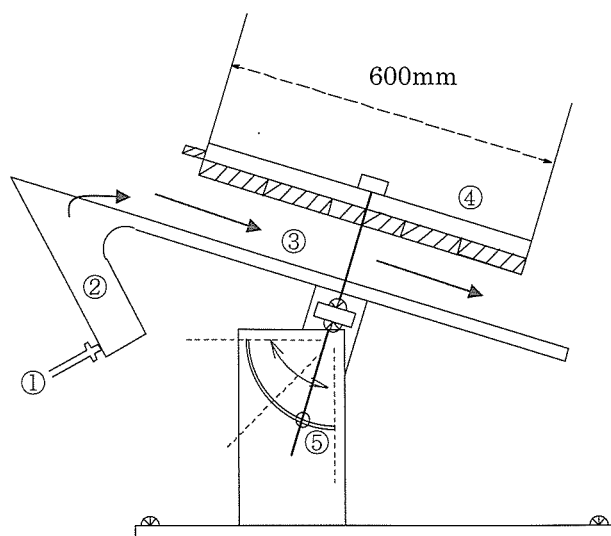


Fig. 1 Experimental apparatus. ① Inlet of sample ② Tank ③ Heating line ④ Far-infrared radiation heater ⑤ Angle regulator of heating line

の距離は 30~300 mm まで変化させることができる. また, 遠赤外線ヒータ温度の調節は電流を変化させることにより行った.

投入口から流入した試料は装置タンクから流出し, 樋状の試料加熱部を流下する. 流下する試料の流速と厚さは, 流量および流路の角度によって調整することができる.

2.2 試験菌

殺菌装置の殺菌能力を検証するにあたり, 殺菌の指標となる微生物が必要となる. 液状食品には種々のものがあるが, 本装置は大量に処理するものよりも多品種少量生産に向いていると考えられる. そこでまず, 醤油をベースとしたつゆやたれなどの調味液を対象食品として想定した. 対象食品において食品衛生法上問題となる微生物は生育しないため, 微生物規格や指導基準はなく, 耐塩性微生物が主な汚染対象菌となる. 対象食品中に存在する耐塩性微生物で一般的に知られているのは, 耐塩性乳酸菌の *Tetragenococcus halophilus* (以後 T 乳酸菌), 耐塩性酵母の *Zygosaccharomyces rouxii* (以後 Z 酵母), *Candida versatilis*, 耐塩性乳酸桿菌の *Lactobacillus plantarum* などである. 本研究では, T 乳酸菌と Z 酵母の 2 株について殺菌実験を行った.

使用した T 乳酸菌と Z 酵母は東京大学分子細胞生物学研究所 細胞機能情報研究センター IAM カルチャーコレクションより分譲してもらった菌株 (IAM No. 1676T (T 乳酸菌), IAM No. 12879 (Z 酵母)) を培養したものである.

3. 結果と考察

3.1 液体の加熱実験

液状食品の殺菌を考える上で最も重要な点は、殺菌に必要な温度に到達することである。そこで、液体の温度上昇に及ぼす種々の操作条件について検討した。なお、粘性の低い液体を想定しているため、この実験は液体試料として水を用いている。

3.1.1 ヒータ距離と供給電力を変えた時の上昇温度測定

流路角度を 15° (水平を 0° , 垂直を 90° としたときの角度) 一定として、試料流量, ヒータ距離, ヒータ供給電力を変えて、試料の上昇温度を測定した。試料の入口温度は装置タンクの中に、出口温度は流路出口付近に K 型熱電対を設置して測定し、その温度差を温度上昇とした。試料流量 1100 ml/min のときの結果を Fig. 2 に示す。ヒータ供給電力を大きくすると、当然であるが、温度上昇は大きくなる。また、ヒータと流路の距離を大きくすると、温度上昇は小さくなるのがわかる。ヒータを離すと、ヒータから照射されたエネルギーのうち試料に到達する割合が減り、周りへ散逸する割合が増えるためと考えられる。また、ヒータ温度は、供給電力 1 kW の時約 240°C , 3.2 kW の時約 430°C で、供給電力の増加に伴いほぼ直線的に上昇した。このヒータからの熱伝達によって流路上部の空気も暖められる。ヒータとの距離が短い場合は、空気による熱伝達も影響しているものと考えられる。

流路裏面にシート型熱電対を設置して、ステンレス温度を測定したところ、いずれの測定条件でも、ステ

ンレス温度の上昇は見られず、室温とほぼ同じ温度を保ったままであった。出口温度がさほど上がらなかったということもあるが、ステンレス板が試料よりも低いことが確認できる。

この条件下では、液膜の厚さ (測定方法は下記「3.1.3 液膜厚さ測定」に記載) は約 1.3 mm であった。この液膜厚さから流速および平均滞在時間を計算すると、それぞれ 0.28 m/s , 1.8 s となる。平均滞在時間が短すぎるため、液体の温度上昇は 20°C 以下であり、殺菌を考えた場合不十分であるといえる。そこで上昇温度を上げるために、以下の検討を行った。

まず、ヒータから照射されたエネルギーが周りへ散逸するのを防ぐため、ヒータと流路の間をアルミホイルで塞いで実験を行ったところ、温度上昇が大きくなった。次に、供給電力が限られているために、試料流量を下げる必要があるが、流量を下げると液膜は薄くなり、ついには膜を形成せずに蛇行して流れるようになる。そこで以下のように、試料流量を少流量にしても液膜ができる流路角度について検討し、そのときの温度上昇を測定した。

3.1.2 少流量時の上昇温度測定

供給電力を 3.2 kW として、試料流量および流路の角度を変えたときの試料上昇温度測定結果を Fig. 3 に示す。ヒータと流路の間をアルミホイルで塞いでいるため、ヒータ距離を大きくしても試料へ照射されるエネルギー量はほとんど変化しないので、ヒータ距離を 20 cm としている。また、このときのヒータ表面温度は約 650°C であった。Fig. 2 の実験におけるヒータ表面温度

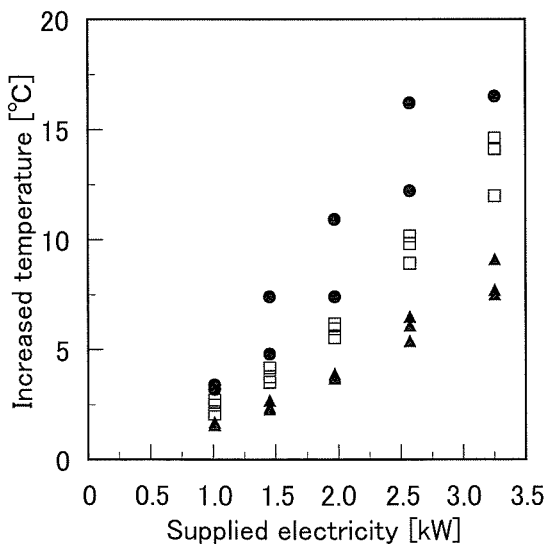


Fig. 2 Relationship between supplied electricity and increased temperature of liquid. Distance between heater and liquid (●: 50 mm, □: 90 mm, ▲: 130 mm). Initial liquid temperature: 22°C , Liquid flow rate: 1100 ml/min , Angle of the heating unit; 15° .

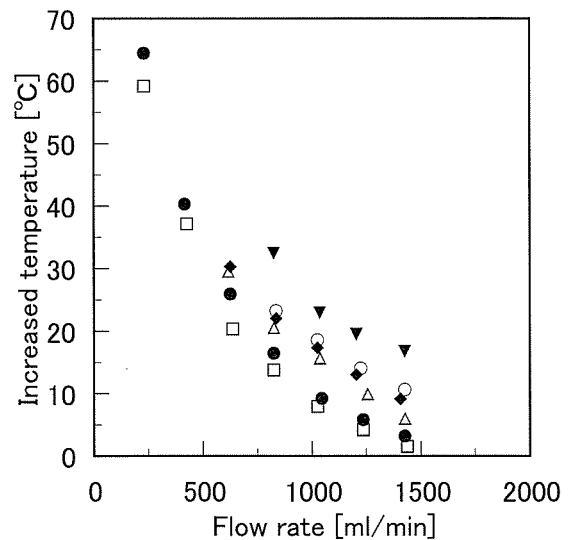


Fig. 3 Relationship between flow rate of liquid and its increased temperature. Angle of the heating unit (□: 0° , ●: 1° , △: 2° , ◆: 3° , ○: 4° , ▼: 5°). Initial liquid temperature: 18°C , Supplied electricity: 3.2 kW .

よりも高くなっているのは、ヒータと流路の間をアルミオイルで塞いでいるので空気の流れが悪いためである。図からどの角度においても試料流量が小さくなるにつれて上昇温度が高くなっていくことがわかる。また、ほぼ同流量のとき、流路角度が大きくなるほど、すなわち水平から傾斜がきつくなるほど、上昇温度が大きくなることがわかる。なお、上昇温度が大きい場合でも、流路裏面（ステンレス）の温度は液温よりも2~5℃低く、液温を超えることはなかった。Fig. 3において流量が少なく、角度が大きい場合にプロットされていない条件がある。これは、流量が少なく、角度が大きい場合に液膜が形成されなかった条件であり、流量によって液膜が形成される最大の角度があることがわかる。

流路角度が大きくなるほど、上昇温度が大きくなる理由は、角度を大きくすることによって、同流量でも試料流速が大きくなり、液膜が薄くなるためと考えられる。すなわち、1秒間に流れる体積が同じでも厚さが薄くなれば、エネルギーを受ける表面積が大きくなり、より温度が上昇するものと考えられる。

以上の結果から、流路の角度と液膜の厚さは重要なファクタであるといえる。そこで、試料流量と流路角度を変化させて液膜厚さの測定を行い、温度上昇との関係を検討した。

3.1.3 液膜厚さ測定

流路角度をパラメータとして、試料流量と液膜厚さの関係を Fig. 4 に示す。液膜厚さとしては、樋状になった流路の両側に板を這わせ、その板からステンレス面までの距離と液膜の表面までの距離を測定し、その差を液膜厚さとしている。同流量においては、角度が大き

くなると液膜厚さが薄くなることがわかる。しかし、同角度で試料流量を変化させた場合、流路角度によって傾向が異なる。すなわち、角度が大きい場合には流量の増加とともに液膜厚さは大きくなるが、角度が小さい場合は流量が増加しても液膜厚さは変わっていない。

水平線を0°としてそこから角度 ϕ [°]だけ傾斜した平面を液体が層流状態で流下するときの液膜厚さ δ [m]は次式で表される [10]。

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\mu G}{\rho g \cos(90-\phi)}} \quad (1)$$

ここで、 μ は試料の粘性係数 [Pa·s]、 G は試料流量 [m^3/s]、 ρ は試料密度 [kg/m^3]、 g は重力加速度 [m/s^2]である。

この式からは、同じ試料流量のときは、流路角度が大きくなるにつれて液膜厚さが薄くなり、同じ角度では、試料流量が大きくなるにつれて液膜厚さが厚くなる。しかし、実際には角度が小さいときは、流量にかかわらずほぼ一定であったことから、角度が小さい場合には層流状態で流れていないことが予想される。

3.1.4 平均滞在時間

次に、液膜厚さの結果をもとに、試料の平均滞在時間（試料がヒータからエネルギーを受けている区間に滞在する時間）を計算した。Fig. 5に流路角度をパラメータとして、試料流量を変えたときの滞在時間計算結果を示す。流路角度が小さいほど、また、試料流量が小さくなるほど滞在時間が長くなることがわかる。Fig. 5から、試料流量と流路角度が決まれば、試料の滞在時間が求まるので、Fig. 3に示した実験の液膜厚さを求めた。さらに、液膜の厚さごとにグループをつくりそのグループでの滞在時間と上昇温度の関係を Fig. 6に示

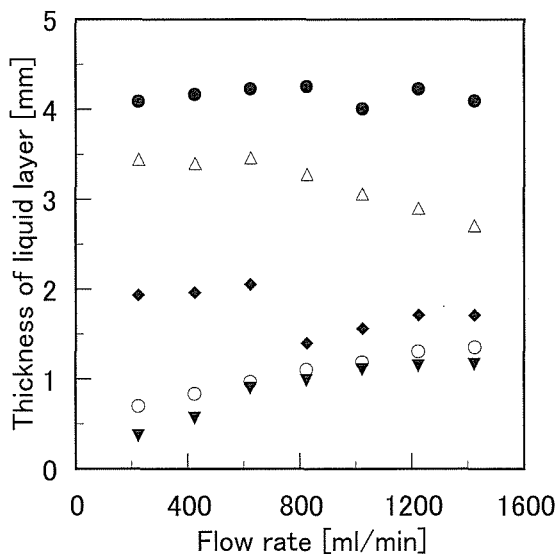


Fig. 4 Relationship between flow rate of liquid and its thickness. Angle of the heating unit (●: 1°, △: 2°, ◆: 3°, ○: 4°, ▼: 5°).

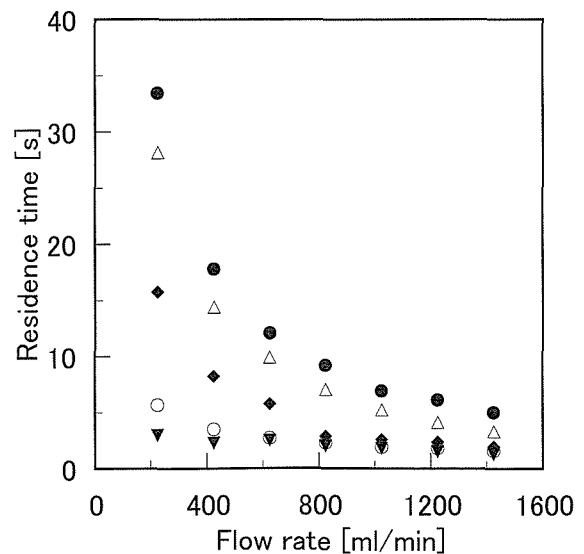


Fig. 5 Relationship between flow rate of liquid and its residence time in heating unit. Angle of the heating unit (●: 1°, △: 2°, ◆: 3°, ○: 4°, ▼: 5°).

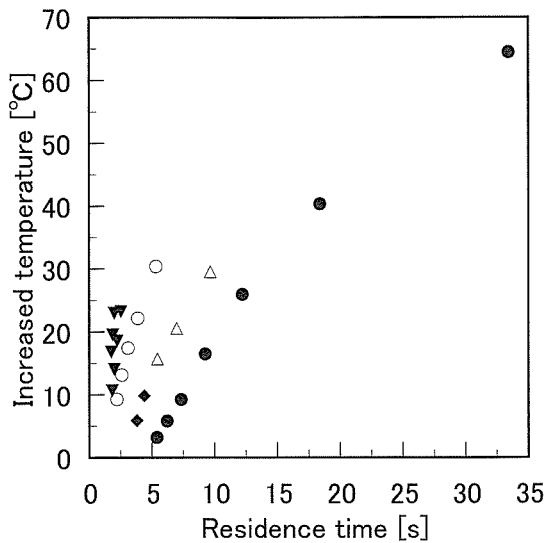


Fig. 6 Relationship between residence time in heating unit and increased temperature of liquid. Thickness of liquid layer (●: 4–4.5 mm, △: 3–3.5 mm, ◆: 2.5–3 mm, ○: 1.5–2 mm, ▼: 1–1.5 mm).

す。液膜厚さがほぼ同じときは、滞在時間に比例して上昇温度は高くなるが、これは、単純に加熱時間が長くなるためである。また、同じ滞在時間でも液膜が薄いほど上昇温度は大きくなることがわかる。

以上の結果から、目標の上昇温度に対して、平均滞在時間および液膜の厚さを概算することが可能であり、試料流量および流路角度の操作条件を決めることができる。

3.2 装置による殺菌試験

加熱中の菌の熱死滅挙動を調べるために、殺菌装置に予め菌を混入した試料を流して加熱し、加熱部上の生菌数変化を調べた。

殺菌した3%食塩水を試料とし、培養したT乳酸菌およびZ酵母をそれぞれ適量タンクに投入して初期菌体濃度を調節した。実際の食品工場において、醤油ベースのたれを殺菌する場合、殺菌到達温度を80℃前後に設定していることが多いので、出口温度が80℃程度に到達するように、試料流量は240 ml/min、流路角度は1°、ヒータ温度は約640℃とした。このときの液膜厚さは約4 mm、滞在時間は30 sである。

試料のサンプリング場所は、加熱前の試料（装置タンク中）と加熱後の試料（出口試料温度測定場所）に加え、加熱中の試料を120 mm間隔で4ヶ所とし、合わせて6ヶ所の試料を採取した。

T乳酸菌、Z酵母を試験菌としたときの生菌数測定結果と試料温度測定結果をそれぞれFig. 7 (T乳酸菌)、Fig. 8 (Z酵母)に示す。図の横軸は流れ方向の距離であり、試料の温度は下流になるにしたがい、ほぼ直線的に上昇している。加熱前の試料中の初期菌数は、T

乳酸菌の場合約 1×10^6 CFU/ml、Z酵母の場合約 2×10^5 CFU/mlであったが、最初のサンプル位置（120 mm）では菌の減少は少ない。しかし、40℃を越えた次のサンプル位置（240 mm）では菌数は1桁から2桁減少している。さらに、それ以降のサンプル位置においては、菌は検出されなかったことから、試料温度が約50℃以上に到達した時点で殺菌が一気に進行することがわかる。以上の結果から、醤油ベースのたれの殺菌を想定した場合、本装置で殺菌が可能であることが示された。

今回の実験ではフラットな流路に試料を流して殺菌を行ったが、遠赤外線の水に対する浸透性は低いため、

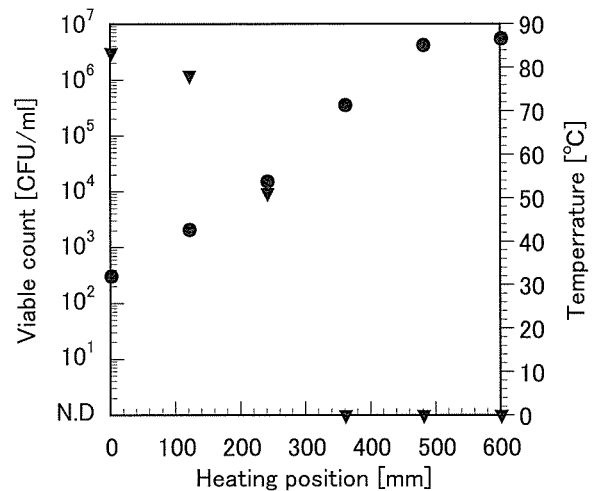


Fig. 7 Viable count and temperature change during heating process in the case of *Tetragenococcus halophilus*. (▼: Viable count, ●: Temperature) Angle of the heating unit: 1°, Heater temperature: 640°C, Sample flow rate: 240 ml/min.

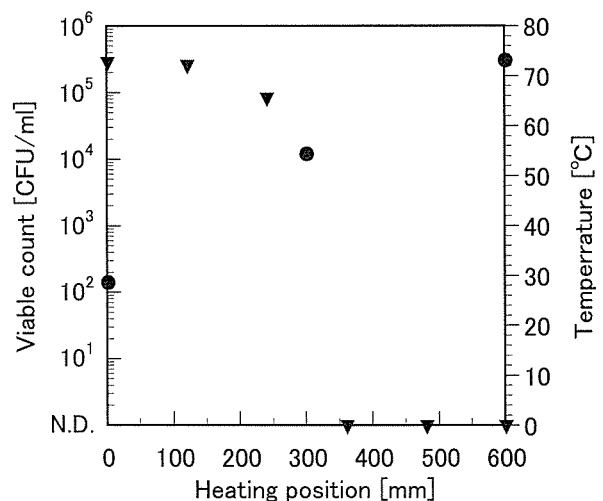


Fig. 8 Viable count and temperature change during heating process in the case of *Zygosaccharomyces rouxii*. (▼: Viable count, ●: Temperature) Angle of the heating unit: 1°, Heater temperature: 640°C, Sample flow rate: 240 ml/min.

液膜の流れの状態は殺菌に影響を及ぼすと考えられる。遠赤外線が食品内部へ浸透するときのエネルギー I [W/m^2] はランバートの法則から次式で表わされる。

$$I = I_0 \exp(-ax) \quad (2)$$

ここで I_0 は表面における入射エネルギー [W/m^2], a はランバートの吸収係数 [$1/m$], x は表面からの距離 [m] である。

遠赤外線のランバートの吸収係数は、波長領域が $2.5 \mu m$ から $25 \mu m$ において、 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ $1/m$ であり [11], 吸収係数の逆数、すなわち浸透深さは $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ m 程度である。そのため、液膜表面付近で遠赤外線エネルギーが吸収されるとともに温度が上昇し、殺菌が進行すると考えられる。したがって、流体表面の流れの状態、とくに切り返し頻度（乱流の程度）は重要な因子であり、今後、流路に凹凸をつけるなど流れの状態を変化させた検討も必要である。

4. 結 論

遠赤外線を熱源とした液状食品の加熱殺菌装置を製作し、その加熱特性および殺菌特性を検討したところ、以下の結果を得た。

- (1) 遠赤外線を試料上面から照射することにより、流路であるステンレス面の温度を液状食品よりも低温に維持できる。
- (2) 流量および流路角度を調節することにより出口温度を $80^\circ C$ 以上に昇温可能である。ただし、上昇温度を大きくするためには、液膜厚さを薄くする必要がある。
- (3) 醤油をベースとしたたれなどの殺菌を想定して、耐塩性の *T* 乳酸菌と *Z* 酵母の殺菌実験を行った結果、十分殺菌可能なことを検証した。

謝 辞

本研究を遂行するのにあたり、実験に使用した菌株の提供ならびに生菌数測定では、東京海洋大学大学院海洋生命科学専攻小林武準教授に甚大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

引 用 文 献

- [1] N. Sakai, W. Mao: Infrared Heating in "Thermal Food Processing" Edited by D. W. Sun, CRC Press, pp. 493-525 (2006).
- [2] 澤井 淳: 遠赤外線による殺菌とその応用の現状, JIRAREport, **11**(6), 1-8 (2000).
- [3] 濱中大介, 内野敏剛, 胡文忠, 安永円理子: *Bacillus subtilis* 孢子及び *Aspergillus niger* 孢子に対する赤外線照射の殺菌効果, 農業機械学会誌, **64**(6), 69-75 (2002).
- [4] 濱中大介, 内野敏剛, 胡文忠, 安永円理子, スロウラ .M. フセイン: 赤外線を利用したコムギおよびダイズの表面殺菌, 農業機械学会誌, **65**(2), 64-70 (2003).
- [5] 白川武志: 遠赤外線照射による醤油豆の殺菌効果, 香川県発酵食品試験場報告, **82**, 57-62 (1989).
- [6] 橋本篤, 清水賢, 五十嵐英夫: 生理的リン酸緩衝液中に浮遊する細菌の殺菌に及ぼす遠赤外線の影響, 化学工学, **17**(3), 627-633 (1991).
- [7] A. Hashimoto, H. Igarashi, M. Shimizu: Effect of Far-Infrared Irradiation of Pasteurization of Bacterial Suspended in Liquid Medium below Lethal Temperature, J. Chem. Eng. Japan, **25**, 275-281 (1992).
- [8] J. Sawai, K. Sagara, H. Igarashi, A. Hashimoto, T. Kokugan, M. Shimizu: Injury of *Escherichia coli* in Physiological Phosphate-Buffered Saline Induced by Far-Infrared Irradiation, J. Chem. Eng. Japan, **28**(3), 294-299, (1995).
- [9] J. Sawai, M. Fujisawa, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Igarashi, A. Hashimoto, H. Kojima: Pasteurization of Bacterial Spores in Liquid Medium by Far-Infrared Irradiation, J. Chem. Eng. Japan, **30**, 170-172 (1997).
- [10] 小林清志: 機械工学基礎シリーズ6 移動論, 朝倉書店, 1978, p.41.
- [11] 日本食品工学会編: 食品工学ハンドブック, 朝倉書店, 2005, p.20.