

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19249

研究課題名（和文）ナノ表面制御による乳タンパク質汚れの定置洗浄(CIP)における環境負荷削減

研究課題名（英文）Reduction of Environmental Impact in Cleaning in Place (CIP) of Milk Protein Deposits by Nano-Surface Control

研究代表者

井原 一高 (IHARA, IKKO)

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：50396256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：牛乳のような液体食品の加工において、ステンレスパイプ内表面に汚れが付着しやすいことから、定置洗浄（Cleaning-in-place, CIP）が用いられる。本研究では、ステンレスパイプの内表面の平滑化が、乳タンパク質の洗浄性や洗浄プロセスに消費されるエネルギーに与える影響について調べた。表面を0.01 μm Raに平滑化したステンレスパイプを用いた場合、洗浄開始直後から汚れ脱離量が増加し最終脱離率が向上した。洗浄液が35 °Cの場合、表面平滑化によるエネルギー低減が観察された。牛乳汚れの脱離率が0.8に達した時、サニタリーパイプと比べ消費エネルギーは37.1%削減された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、ナノスケールの精密加工技術が食の安全性確保や食品加工における環境負荷低減に寄与できることを示すものである。食の安全と環境負荷との関係は学術分野が異なることもあり、両者がトレードオフの関係になりやすいことすらあまり知られていない。得られた知見は、精密加工技術が食品加工プロセスの持続可能性向上に資することを明確に示すものであり、社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Cleaning-in-place (CIP) is used in the processing of liquid food products such as milk, due to the tendency for contamination to adhere to the inner surface of stainless steel pipes. In this study, the effect of smoothing the inner surface of stainless steel pipes on the cleanability of milk proteins and the energy consumed in the cleaning process was investigated. When stainless steel pipes with a surface smoothed to 0.01 micro-meter Ra were used, the amount of adhered deposits removed increased immediately after the start of cleaning and the final desorption rate was improved. When the cleaning solution was 35 °C, energy reduction due to surface smoothing was observed. When the detached deposit of milk adhered deposit reached 0.8, the energy consumption was reduced by 37.1% compared to the sanitary pipe.

研究分野：農業環境・情報工学

キーワード：牛乳汚れ 洗浄 表面粗さ CIP 環境負荷

1. 研究開始当初の背景

牛乳は全世界で毎年 6,000 億 L を超える量が生産されており、その製造工程にはステンレスパイプが多く使用されている。酪農や乳製品加工プロセスにおいて、牛乳汚れはステンレス表面に付着しやすく、洗浄プロセスは品質確保と密接に関連する。食の安全性確保という社会的要請もあり、食品機械洗浄の重要性は増大している。しかし、乳製品製造において洗浄コストの負担は大きく、新規洗浄技術に対する社会的要望は大きい。とりわけ、生物難分解性物質である界面活性剤を含む洗浄廃液排出と、洗浄時のエネルギー消費由来の環境負荷は酪農業や牛乳製造業にとって無視できない状況である。磁気力を使った研磨技術は、パイプ内部のような手が届かない部分も超平滑化が可能である。申請者らは搾乳施設排水処理の共同で研究を行っていた経緯があり、乳製品加工プロセスへの応用可能性に着目した。2012 年に上記 3 大学による共同研究を開始し、4 年を超える長期の試行錯誤の末、超平滑平面が特定条件下で牛乳汚れの洗浄性向上に寄与することを明らかにした。さらにこの研究を展開するにあたり、社会的に特に求められているのは、洗浄由来の環境負荷低減、とりわけエネルギー消費削減であることに気がついた。ステンレスパイプ内表面には汚れが付着しやすく、放置すると微生物により汚染され、製品の品質低下や食中毒のリスクが高まる。したがって頻繁な洗浄が必要となる。しかし洗浄において、多量のエネルギーが消費され、洗剤の使用や廃水排出による環境負荷が懸念されている。そのため、洗浄性を確保した上で、洗剤に頼らず、エネルギー消費の少ない洗浄プロセスが求められている。本研究では、洗剤やエネルギーに依存しない洗浄要素としてパイプ内表面粗さに着目し、表面粗さが洗浄動態に与える影響について検討した。特に、洗浄で消費されたエネルギーを試算した。

2. 研究の目的

牛乳のような液体食品の加工において、ステンレスパイプ内表面には汚れが付着しやすいことから、食品の品質と安全性確保のために定置洗浄 (Cleaning-in-place, CIP) と呼ばれる内部を分解せずに洗剤や温水で自動的に洗浄を行う方法が採用されている。しかしながら、定置洗浄法は温水製造のためのエネルギー消費や界面活性剤を含む洗浄廃液排出といった環境負荷が大きく、製造コストを押し上げる要因となっている。本研究では、内部表面粗さを国際規格の 1/40 以下のナノレベルに低減させた超平滑平面を持つサニタリーステンレスパイプを用いて、牛乳の主たる汚れ成分である乳タンパク質の定置洗浄における環境負荷削減を試みる。新規サニタリーパイプを用いた界面活性剤に頼らない洗浄法が、乳タンパク質洗浄におけるエネルギー消費を大幅に削減できることを明らかにする。

3. 研究の方法

1. 実験方法

実験には超平滑化パイプ(以下 MAF パイプ[1])、サニタリーパイプの表面粗さが異なる 2 種類のパイプを用いた。

(1) 牛乳汚れの付着

予め清浄な状態にした上で十分に乾燥させたパイプの片端から、牛乳 200 μL をピペットで注入し、ゆっくりと時計回りに 3 回転させた。これを両端から実施し、計 400 μL の牛乳を注入した。注入後、水平を保ち 45°C のインキュベータ内で 6 時間乾燥させた。

(2) 水洗浄試験

Fig. 1 に示す実験装置を用いて、20°C もしくは 35°C の脱イオン水をポンプによって一定流量 (7.0 L/min) で移送させ、排出液を 10 秒置きにサンプリングした。洗浄試験終了後のステンレスパイプは室温で乾燥させた。

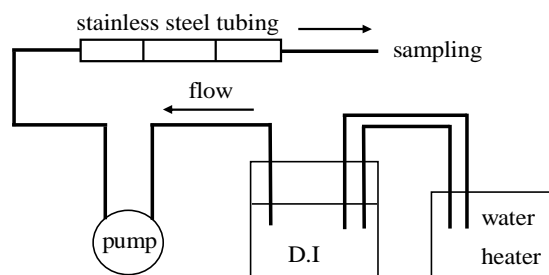


Fig. 1 Experimental apparatus for cleaning of milk deposits

(3) 水洗浄後の汚れ残留量

水洗浄試験後のステンレスパイプを NaOH(0.01 mol/L) 溶液に浸漬させ超音波処理を行い、残留物を溶出させた。

2. 汚れの評価方法

(1) 汚れの評価指標

牛乳汚れの評価指標として、TOC (Total Organic Carbon)を用いた。また、乳タンパク質の指標として TN (Total Nitrogen)を使用した。両者は TOC/TN analyzer (SHIMADZU) を用いて測定した。また、これら指標から洗浄曲線[2]を作成し、評価に用いた。

(2) 水洗浄における汚れ脱離量の評価

水洗浄時に採取した洗浄液サンプルの TOC, TN 濃度からそれぞれ、牛乳汚れ脱離量、乳タンパク質汚れ脱離量を算出した。

(3) 汚れ残留量の評価

残留物溶出液の TOC, TN 濃度からそれぞれ、牛乳汚れ残留量、乳タンパク質汚れ量を算出した。

(4) 汚れ脱離率の算出

以下の式(1)にて汚れ脱離率 R (-)を算出した

$$R = DM_t \cdot (TDM + TRM)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 DM_t は任意の洗浄時間 t までの汚れ脱離量(mg)、 TDM は水洗浄による汚れの総脱離量(mg)、 TRM は水洗浄後の汚れ総残留量(mg)である。

3. 消費エネルギーの算出

洗浄プロセスにおける消費エネルギー E_c を以下の式で計算した。

$$E_c = E_h + E_p \quad (2)$$

ここで E_h は洗浄液の加温に必要なエネルギー(kJ)、 E_p は洗浄液の移送に必要なエネルギー(kJ)

である。 E_h と E_p はそれぞれ式(3)、(4)を用いて計算した。

$$E_h = C_w \cdot f_l \cdot t \cdot \Delta T_{emp} \quad (3)$$

$$E_p = P \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

ここで、 C_w は水の比熱(kJ/kg·K)、 f_l は洗浄液流量 (L/min)、 ΔT_{emp} は洗浄液上昇温度(K)、 P は移送ポンプの定格消費電力(J/sec)、 t は洗浄時間(sec)である。洗浄液体積は洗浄時間と流量から計算し、洗浄液加温に必要なエネルギーは、神戸市の平均水道水温度である 16.6°C を基準として計算した。

4. 研究成果

1. 汚れ脱離量の時間変化

Fig. 2 および Fig. 3 に、各洗浄試験における洗浄時間と排出液の成分濃度との関係を示す。TOC は牛乳汚れ、TN は乳タンパク質汚れを示す。いずれの洗浄試験においても、洗浄開始直後に多くの汚れが脱離され、洗浄時間 100 秒以降では脱離速度は緩やかになった。また TOC、TN いずれ

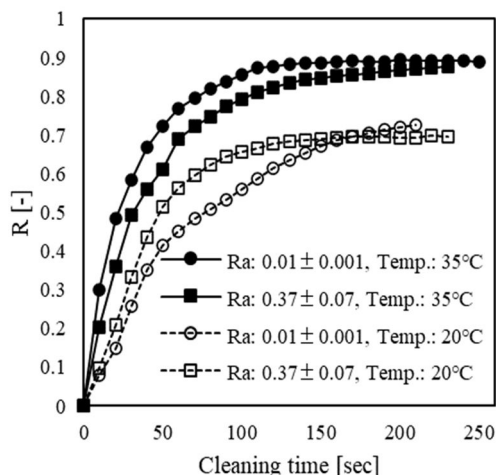


Fig. 2 Time course of TOC removal by water rinsing

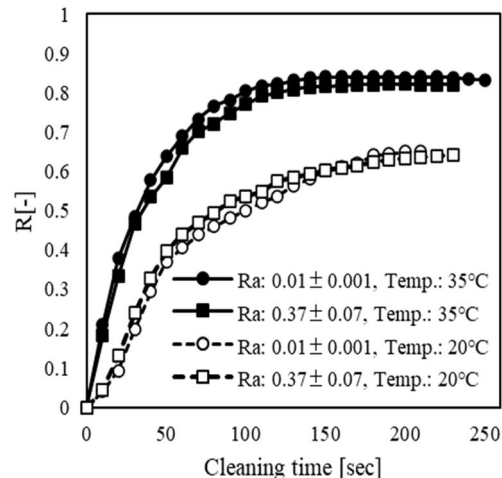


Fig. 3 Time course of TN removal by water rinsing

れにおいても洗浄液が 35°C の場合に汚れ脱離率が増加し、約 90%に達した。洗浄液が 20°C の場合と比較すると 35°C の場合、表面を平滑化させた MAF パイプの最終脱離率がサニタリーパイプよりも高くなった。このことから表面粗さを 0.01 μm まで平滑化させると洗浄性向上に寄与したと考えられる。一方、洗浄液が 20°C の場合、MAF パイプよりもサニタリーパイプの方が成分濃度は高く、最終脱離率は約 70%と低い水準であった。すなわち、表面平滑化が洗浄性向上に殆ど寄与しなかったことが示唆された。

2. 消費エネルギーの試算

水洗浄試験において消費エネルギーの試算を行った。汚れ脱離率 R と消費エネルギー E_c の関係を Fig.4 に示す。洗浄液が 20°C での実験では、Fig. 2 および Fig. 3 に示すとおり実験間の差は観察されず、最終消費エネルギーは約 500 kJ であった。洗浄液が 35°C の場合、脱離率が 80%を超えると、消費エネルギーが急激に増大した。また、脱離率が 0.8 に達するまでの消費エネルギーを比較すると、サニタリーパイプよりも超平滑化パイプの方がエネルギーは約 37.1%削減された。このことから、洗浄液が 35°C の条件では、表面平滑化がエネルギー消費削減に寄与することが示唆された。

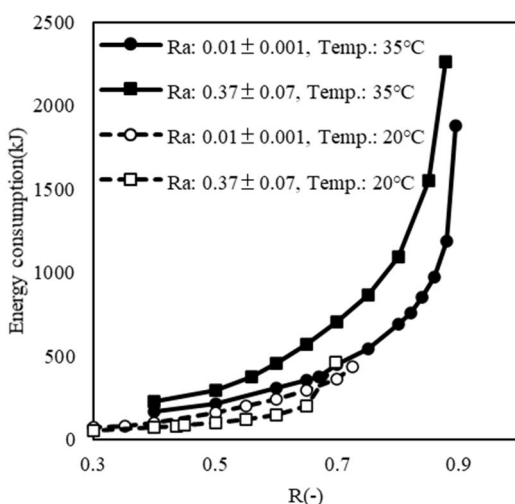


Fig.4 Relationship between TOC removal and energy consumption during cleaning process

3. まとめ

本研究では、パイプ内表面粗さが洗浄性や洗浄に消費されるエネルギーに与える影響について調べた。洗浄液が 35°C の条件で表面平滑化によるエネルギー低減が観察され、牛乳汚れの脱離率が 0.8 に達するまでの洗浄プロセスを比較すると 37.1%と大幅に削減された。今回の水洗浄の条件では、パイプからの最終汚れ脱離率が 90%程度であった。今後はより高い脱離率を達成できる条件で、パイプ内表面粗さが洗浄性と消費エネルギーに与える影響を評価する必要がある。

参考文献

- [1] Ikko Ihara, Erina Nakano, Eric McLamore, John K. Schueller, Kiyohiko Toyoda, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi (2017): Cleanability of milk deposits on inner stainless steel tubing surfaces prepared by magnetic abrasive finishing, Engineering in Agriculture, Environment and Food, 10(1), 63-68.
- [2] Xin, H., Chen, X.D., Özkan, N. (2002): Whey Protein-Based Gel as a Model Material for Studying Initial Cleaning Mechanisms of Milk Fouling, Journal of Food Science, 67, 2708.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小松篤弥, 井原一高, 吉田弦, John Schueller, 梅津一孝, 山口ひとみ	4. 巻 129
2. 論文標題 ステンレスパイプからの牛乳汚れの脱離における表面平滑化が消費エネルギーに与える影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 関西農業食料工学会支部報	6. 最初と最後の頁 37-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 小松 篤弥, 井原 一高, 吉田 弦, John Schueller, 梅津 一孝, 山口 ひとみ	4. 巻 126
2. 論文標題 ステンレスパイプに付着した乳タンパク質洗浄における表面平滑化が消費エネルギーに与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業食料工学会関西支部報	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 井原一高, 吉田弦, 梅津一孝, 小松篤弥, John Schueller, 山口ひとみ
2. 発表標題 ステンレスパイプからの牛乳汚れの脱離における表面平滑化が消費エネルギーに与える影響
3. 学会等名 関西農業食料工学会第144回例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高島佐代子, 井原一高, 吉田弦, John Schueller, 梅津一孝, 山口ひとみ
2. 発表標題 表面平滑化ステンレスパイプを用いた乳成分の洗浄における消費エネルギーの低減
3. 学会等名 2021年農業施設学会学生・若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠井英里佳, 井原一高, 吉田弦, John Schueller, 梅津一孝, 山口ひとみ
2. 発表標題 ステンレスパイプの表面平滑化が牛乳汚れの脱離と洗浄エネルギー消費に与える影響
3. 学会等名 関西農業食料工学会第145回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikko Ihara, Homi Takato, John Schueller, Gen Yoshida, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi
2. 発表標題 Cleanability of Semi-Dried Milk Deposition on a Highly-Smooth Internal Surface of Stainless Tubing by Magnetic Abrasive Finishing
3. 学会等名 The 10th International Forum on Magnetic Force Control in Nara (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松 篤弥, 井原 一高, 吉田 弦, John Schueller, 梅津 一孝, 山口 ひとみ
2. 発表標題 ステンレスパイプに付着した牛乳汚れ洗浄における表面平滑化が消費エネルギーに与える影響
3. 学会等名 2019年農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同国際大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ikko Ihara, Homi Takato, John K Schueller, Gen Yoshida, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi
2. 発表標題 Improvement of the Cleanability of Milk Soil on a Highly Smooth Surface of Stainless Steel Tubing
3. 学会等名 International Joint Conference on JSAM and SASJ, and CIGR VI Technical Symposium joining FWFNWG and FSWG Workshops (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuya Komatsu, Ikko Ihara, Gen Yoshida, Fetra J. Andriamanohiarisoamanana, John Schueller, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi
2. 発表標題 Influence of surface smoothing of stainless steel tubing on the energy consumption of cleaning milk protein deposit
3. 学会等名 The 2019 International Postgraduate Academic Forum (China University of Geosciences in Beijing) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹原昂亜, 井原一高, John Schueller, 吉田弦, 梅津一孝, Hitomi Yamaguchi
2. 発表標題 ステンレスパイプに付着した乳タンパク質汚れの洗浄プロセスにおける表面超平滑化の影響
3. 学会等名 第142回農業食料工学会関西支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松篤弥, 井原一高, 吉田弦, 梅津一孝, John Schueller, 山口ひとみ
2. 発表標題 超平滑化ステンレスパイプを用いた牛乳汚れの洗浄プロセスにおけるエネルギー評価
3. 学会等名 2020年農業施設学会学生・若手研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹原昂亜, 井原一高, John Schueller, 吉田弦, 梅津一孝, Hitomi Yamaguchi
2. 発表標題 ステンレスパイプ内表面に付着した乳タンパク質の脱離における表面平滑化の影響
3. 学会等名 農業環境工学関連学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松篤弥, 井原一高, 吉田弦, John Schueller, 梅津一孝, 山口ひとみ
2. 発表標題 ステンレスパイプに付着した乳タンパク質洗浄における表面平滑化が消費エネルギーに与える影響
3. 学会等名 農業食料工学会関西支部 第141回例会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梅津 一孝 (Umetsu Kazutaka) (20203581)	帯広畜産大学・畜産学部・教授 (10105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of Florida		