

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14829

研究課題名(和文) ステンレスパイプの表面ナノ制御による牛乳汚れの高品位洗浄

研究課題名(英文) Higher cleaning of milk deposits by controlling the surface roughness of stainless steel tubing

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ステンレスパイプは酪農業や乳製品加工業において広く使用されている。牛乳の汚れはパイプ表面に付着しやすく、品質低下や食中毒の原因となる。汚れを取り除くためには洗浄が不可欠であるが、エネルギー消費や廃水由来の環境負荷が問題となっている。本研究では、表面を表面粗さを $0.01\mu\text{m Ra}$ まで超平滑化させたステンレスパイプを用いて、牛乳汚れの洗浄性向上を試みた。牛乳温度が 40°C の場合、表面を平滑化することによって牛乳汚れおよび特定成分の洗浄性が向上した、また、牛乳温度や洗浄液流量が影響することを明らかにした。

これらの知見は、牛乳汚れの洗浄における環境負荷低減に資するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Stainless steel tubing is widely used in dairy industries. The deposits of milk components to internal surface of stainless steel tubing may cause deterioration in quality and food poisoning. Surface roughness is a factor affecting the attachment and removal of food soils. In this work, we studied cleanability of milk components on a highly-smooth internal surface with $0.01\text{ micro meter Ra}$ of stainless tubing. Three different levels of surface roughness of stainless steel tubings were tested to evaluate the cleanability. On the deposition test, whole milk was circulated in a tested loops connected with the tubings. After the deposition process, deionized water was flushed into the loops to remove milk deposition on the internal surface. At 40°C , the data showed that the smoother surface had a tendency to improve the cleanability of milk deposits. The results indicated that the highly-smooth internal surface has a potential to improve the cleanability of the milk deposits.

研究分野：畜産衛生工学

キーワード：牛乳汚れ ステンレスパイプ 洗浄 表面粗さ

1. 研究開始当初の背景

牛乳はインド、アメリカ、ニュージーランドをはじめとした国々において、毎年十億リットル以上製造されており、酪農業および乳製品製造業の工場ではステンレスパイプ(サニタリーパイプ)が広く使用されている。

食品工場での乳製品加工プロセスにおいて、生乳もしくは加工乳が流れるステンレスパイプ内面やバルブ内面には牛乳汚れが付着しやすい。牛乳汚れの残留は製品の生産効率や品質を低下させるだけでなく、微生物増殖の原因となり製品の安全を脅かす可能性がある。そのため、頻繁に牛乳汚れを取り除く洗浄作業が必須とされている。しかし、安全を重視した洗浄条件は、廃水排出量や消費エネルギー増大につながり、環境負荷を増大させることになる。

そこで洗浄作業の効率化が非常に重要な課題となり、可能性限り短時間、少ない洗剤使用量で要求された洗浄度を達成することが望ましい。洗浄に影響を及ぼす要素は表面特性などの物理的洗浄要素と洗剤などの化学的洗浄要素に大別されるが、洗剤使用による環境負荷やコストの観点から、物理的要素による洗浄の効率化が求められている。物理的洗浄要素として主に、洗浄液温度、洗浄液速度、被洗浄面の表面粗さなどが挙げられるが、本研究では洗剤に頼らずに牛乳汚れの洗浄性を向上させるために、表面粗さに着目した。表面粗さと洗浄性の関係に関する知見は乏しく、先行研究によっては見解に相違も見られる。特に、ナノスケール(算術平均粗さ $0.01\ \mu\text{m Ra}$ 以下)表面での知見は、研究開始時点では殆ど見当たらなかった。

2. 研究の目的

牛乳汚れの洗浄性を向上させることを目的に、宇宙工学等で活用されている精密磁気研磨法を応用し、パイプ内部表面の粗さを国際規格の $1/10$ 以下のナノレベルに低減させた超円滑平面を持つサニタリーステンレスパイプを開発する。新規サニタリーパイプによる牛乳汚れの高品位洗浄は、乳製品の品質向上、食中毒のリスク削減、洗浄排水由来の環境負荷低減、そして製造コスト低減と大きな波及効果が期待できる。特に、本研究では汚れ付着の際の牛乳温度と洗浄液流量を変化させ、ナノスケール表面における牛乳汚れの洗浄効果について検討を行った。

3. 研究の方法

供試ステンレスパイプ

乳成分洗浄性における表面粗さの影響を調べるため、表面粗さの異なる3種類のステンレスパイプを用意した。内部表面の粗さが異なる2種類($0.37\ \mu\text{m Ra}$, $3.7\ \mu\text{m Ra}$)のSUS304ステンレスパイプ($\varnothing 12.7 \times \varnothing 10.9\ \text{mm}$)をMcMaster-Carr Supply Company (Atlanta, USA)から入手した。 $0.37\ \mu\text{m Ra}$ のパイプは食

品製造業で使用されるサニタリー規格を想定し、 $3.7\ \mu\text{m Ra}$ のパイプは精密さが求められない一般的な工場でのパイプを想定して用意した。加えて、磁気研磨によって $0.01\ \mu\text{m Ra}$ に研磨したステンレスパイプ($\varnothing 12.7 \times \varnothing 10.9\ \text{mm}$)を用意した。これら3種類のパイプをそれぞれ3本、計9本のパイプを用意した。

実験装置

図1は本研究で使われた実験装置の模式図を示している。牛乳を入れたガラス容器、ポンプおよびステンレスパイプをプラスチックチューブで繋ぎ、EHEDGの規定を参考にしたループ実験装置を構築した。3種類の表面粗さの異なるステンレスパイプ3本ずつに加え、2つのラインを揃えるためにダミーパイプを1本用意し、合計10本のステンレスパイプを使用した。配置位置による影響をなくすため、試験ごとに、各パイプはランダムに2ラインに5本ずつ配置した。また、実験装置全体をインキュベータ (Fukushima, FMU_204I) 内に設置し、外部気温の制御も行った。

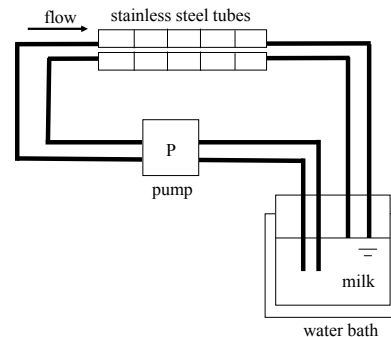


図1 実験装置

実験方法

ステンレスパイプの前洗浄

10本のステンレスパイプを、以下の手順で洗浄し、パイプ内面を清潔な状態にした。

- (1) 2%の中性洗剤 (RBS 35, Sigma-Aldrich) にパイプを浸し、超音波洗浄器 (BRANSON 3510) によって60分間超音波洗浄を行った。
- (2) リサイクルイソプロパノールにパイプを浸し、15分間超音波洗浄を行った。
- (3) イソプロパノールにパイプを浸し、15分間超音波洗浄を行った。その後、全てのパイプを空気乾燥させた。汚れ付着試験パイプ内部に牛乳の汚れを付着させるために、汚れ付着試験を行った。コンビニエンスストアで市販されている全乳を実験装置で循環させ、パイプ内部に汚れを付着させた。実験条件は、搾乳ロボットの稼働条件を参考に設定した。

ウォーターバスで一定温度 (40°C , 60°C) に保った牛乳を $0.4\ \text{L/min}$ の一定流量で循環させた。温度設定について、 40°C は正常体温 $38\text{--}39^\circ\text{C}$ である乳牛からバルククーラーまでのパイプラインを想定し、 60°C は $62\text{--}65^\circ\text{C}$ で行われる低温殺菌直後のパイプラインを想定して設定した。循環の際、7分送液、3分

停止を1サイクルとした。8時間循環させた後、ポンプを停止し、各ラインに15 mL ずつ牛乳を残した。その状態でステンレスパイプを48時間静置した。実験中は室温を想定して、インキュベータを23°Cに設定した。

洗浄試験

48時間静置後、パイプ内面に付着させた牛乳汚れを除去するため、洗浄試験を行った。20°Cに保った脱イオン水を一定流量(0.4, 0.8 L/min)で5分間、各ラインに流した。送液後、ステンレスパイプを実験装置から取り外し、23°Cに設定したインキュベータ内で24時間静置し、空気乾燥させた。

残留濃度測定による洗浄性

評価クリーニング試験後に、ステンレスパイプ内面に残留した牛乳汚れを評価するため、NaOH溶液(0.01 mol/L)にパイプを浸漬させ、20分間超音波洗浄を行った。同一の作業を計6回繰り返し、パイプに残留していた汚れを完全に溶出させた。この溶出液を用いて、牛乳、タンパク質、カルシウムの残留濃度を以下の方法で測定した。

残留牛乳濃度：超音波処理後の溶出液をよく攪拌し、溶出液内の固形物を均一に拡散させた。分光光度計(Hitachi, U-5100)で溶出液の吸光度(660 nm)を測定した。

残留タンパク質濃度：残留物の溶出によって得られた1回目の超音波処理による溶出液と2回目の処理による溶出液、同様に3回目と4回目溶出液、5回目と6回目の溶出液を1:1でそれぞれ混和した。その後、ブラッドフォード試薬(SIGMA)と1:9の割合でそれぞれ混和した。混和後10分後に、ブラッドフォード試薬との混和液の吸光度(595 nm)を測定した。

残留カルシウム濃度：溶出液とアセトニトリルを3:1で混合した。混合液を5677 gで10分間の遠心分離を行った後、上澄みを採取した。上澄みをシリンジフィルタ(0.20 μm)に通してサンプルを作成した。移動相2 mM HNO₃, 送液流量0.8 mL/min, サンプル注入量50 μmの条件においてサンプルをHPLCで測定した。

4. 研究成果

同一の条件でも実験ごとに残留濃度のレベルが大きく異なる場合があったため、3.7 μm Raのパイプを1とし、相対残留濃度で洗浄性を評価した。

図2は表面粗さの異なるパイプを用いて、洗浄液流量が洗浄性に与える影響を示したグラフである。いずれの流量でも磁気研磨パイプでの残留濃度が最も低く、平滑化によって牛乳汚れ、乳タンパク質の洗浄性が改善する傾向にあった。0.4 L/minの条件において、異なる表面粗さ間で有意差は見られなかった。0.8 L/minの条件において、表面平滑化によって残留濃度が減少し、洗浄性が向上す

る傾向が見られた。また、0.01 μm Raパイプと3.7 μm Raパイプの間で有意差が見られた。洗浄液流量変化による有意差の有無の主な理由として、一般パイプと比較して磁気研磨パイプが流量増加の影響をより大きく受け、表面平滑化による洗浄性向上の効果が増大したことが考えられる。

図3は表面粗さの異なるパイプを用いて、牛乳温度が洗浄性に与える影響を示したグラフである。カルシウム濃度は牛乳温度60°Cの条件でのみ検出された。残留タンパク質濃度の値は残留カルシウム濃度の170倍以上と非常に大きかったことから、60°Cの牛乳汚れにおいてもタンパク質汚れが支配的であったことが示唆された。残留牛乳濃度において、60°Cの場合は異なる表面粗さで有意差はみられなかった。この主な原因として牛乳の温度上昇による汚れ形態の変化が考えられる。乳タンパク質のβ-ラクトグロブリンは、40-55°Cにおいて三次元構造が変化することにより凝集しやすい状態になることが知られている。そのため60°Cでは牛乳汚れの付着力が増加し、いずれのパイプでも汚れが殆ど脱離しなかったため、有意差がなかったと考えられる。40°Cの場合は有意差があったことから、牛乳温度が低い場合では表面平滑化によって洗浄性向上したことが示された。

これらの研究成果は、ステンレスパイプのナノスケールレベルへの表面平滑化は、牛乳汚れの洗浄性を向上させるとともに洗浄由来の環境負荷低減を示唆する知見であると考えられる。

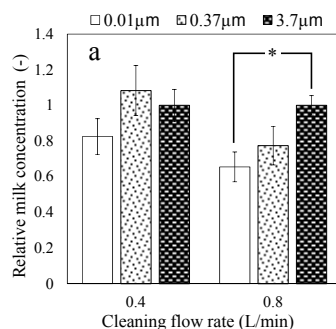


図2 洗浄液流量が牛乳汚れの洗浄性に与える影響

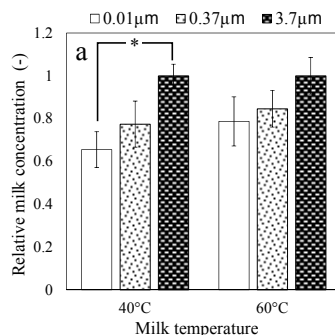


図3 牛乳温度が牛乳汚れの洗浄性に与える影響

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. 徳田博紀, 井原一高, Eric McLamore, John Schueller, 豊田浄彦, 梅津一孝, Hitomi Yamaguchi (2015): 精密研磨ステンレスパイプを用いた乳成分洗浄性の検討, 農業食料工学会関西支部報, 118, 55. (査読無)
2. Ikko Ihara, Erina Nakano, Eric McLamore, John K. Schueller, Kiyohiko Toyoda, Kazutaka Umetsu and 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. doi:10.1016/j.eaef.2016.10.001. (査読有)
3. 高藤穂里, 井原一高, John Schueller, 豊田浄彦, 梅津一孝, Hitomi Yamaguchi (2016): ナノレベル平滑表面のステンレスパイプに付着した牛乳汚れの洗浄特性, 農業食料工学会関西支部報, 120, 19. (査読無)

[学会発表](計 6 件)

1. 徳田博紀, 井原一高, 坂本佑士, Eric McLamore, John Schueller, 豊田浄彦, 梅津一孝, 山口ひとみ (2015): ナノ平滑面を持つステンレスパイプにおける乳成分の洗浄性評価, 農業環境工学関連 5 学会 2015 年合同大会, 2015.9.16, 岩手大学(岩手県)
2. Hiroki Tokuda, Ikko Ihara, John Schueller, Kiyohiko Toyoda, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi (2016): Cleanability of Milk Deposition on a Highly-Smooth Internal Surface of Stainless Tubing, International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystems Engineering 2016, May 23 to 25, TOKI MESSE Niigata Convention Center (新潟県)
3. 徳田博紀, 井原一高, John Schueller, 豊田浄彦, 梅津一孝, 山口ひとみ, 磁気研磨法で作製したナノスケール表面における乳成分の洗浄特性, 第 75 回農業食料工学会年次大会, 2016.5.29, 京都大学(京都府)
4. 高藤穂里, 井原一高, John Schueller, 豊田浄彦, 梅津一孝, Hitomi Yamaguchi (2016): 磁気研磨ステンレスパイプに付着した牛乳汚れ除去における洗浄条件の影響, 2016 年度農業施設学会大会, 2016.8.30, 高知大学(高知県)
5. 徳田博紀, 井原一高, 豊田浄彦, John Schueller, Hitomi Yamaguchi, 梅津一孝

(2016): 磁気研磨法で作製したナノスケール平滑面における乳成分の洗浄性向上, 第 11 回日本磁気科学学会年会, 2016.11.15, 国立研究開発法人物質・材料研究機構(茨城県)

6. Hiroki Tokuda, Ikko Ihara, John Schueller, Kiyohiko Toyoda, Kazutaka Umetsu, Hitomi Yamaguchi (2016): Cleanability of Milk Components on a Highly-Smooth Internal Surface of Stainless Tubing of Magnetic Abrasive Finishing (MAF), The 7th International Forum on Magnetic Force Control in Kanazawa, November 11, 2016, Kanazawa Chamber of Commerce & Industry (石川県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

井原一高 (IHARA, Ikko)
神戸大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 50396256

(2)研究分担者

梅津一孝 (UMETSU, Kazutaka)
帯広畜産大学・畜産学部・教授
研究者番号: 20203581