

原 著

酪農における廃用乳の凝集剤を用いた浄化処理に関する検討 一無機系凝集剤の違いや乳成分が高分子凝集剤を用いた凝集反応におよぼす影響一

猫本健司¹・杉崎允康¹・石原美紅¹・石川志保¹・近藤健一²・有吉忠広³・小林次雄⁴

¹ 酪農学園大学 農食環境学群, 北海道江別市, 069-8501

² 有限会社バイオ, 埼玉県さいたま市, 339-0045

³ オリオン機械株式会社 千歳工場, 北海道千歳市, 066-0077

⁴ 中央オリオン株式会社, 埼玉県熊谷市, 360-0811

要 約 酪農場において廃棄する牛乳（以下、廃用乳）の処理負荷は著しく高く、浄化槽での処理は現実的ではない。先に浄化槽処理の代替方法として無機系凝集剤と高分子凝集剤を組み合わせた2段階処理が酪農現場で実用化可能な有望処理法であることを報告した。今回は高分子凝集剤の反応に影響する諸条件の実験的な解明とその結果を踏まえた酪農現場での実践結果の獲得を目的とした。第一段階に無機系凝集剤であるPACを投入してpHを5.0に調整した後に、第二段階に高分子凝集剤であるタイポリマーを利用して凝集・透明化に要した投入量と個体乳（n=68）の乳成分との間に有意な相関が認められたのは乳脂率（r=0.377**）、体細胞数（リニアスコア）（r=0.432**）であった。第一段階にポリ鉄を用いた場合における、タイポリマーの必要投入量と個体乳（n=72）の乳成分との間に有意な相関が認められたのは乳脂率（r=0.401**）、乳蛋白（r=0.736**）、無脂乳固形分（r=0.549**）、体細胞数（リニアスコア）（r=0.391**）であった。したがって、一般項目（乳蛋白や乳脂肪）だけでなく、体細胞数も凝集剤の投入量と関係することが示唆された。栃木県（廃用乳は日3,000L発生）および長野県の酪農場（同・1,200L）に設置した処理装置において、廃用乳を凝集・透明化した際の分離固形分の含水率は77.4～79.1%で、堆肥化を妨げないレベルであった。一方、廃用乳の体細胞数はそれぞれ219,9,107[千個/mL]と著しい差があり、現場によって廃用乳の品質に大きな違いがあると想定された。乳蛋白や乳脂肪などの一般成分が日によって大きく変動する可能性は低いが、体細胞数は乳房炎の頭数や炎症の程度によって著しく変動する可能性が高いので、現場で凝集処理をする上で重要な留意事項になると判断された。

キーワード：凝集反応、無機系凝集剤、高分子凝集剤、廃用乳、酪農場

受領日: 08.09.2025. 受理日: 05.11.2025.

日本畜産環境学会会誌

緒 言

酪農場では、初乳や乳房炎による低品質で出

荷できない生乳（以下、廃用乳）が日々生じて
いる。乳房炎の治療に抗生物質を用いた場合、

薬剤によって72～108時間の出荷制限期間が設けられ[1]、生乳に抗生物質が残留しないこと（陰性）を確認する期間も含めて、少なくとも数日間は出荷せずに廃棄しなければならない。乳房炎による損失乳量は2024年の北海道平均で1頭あたり0.4Lと算出され[5]、100頭規模の経営では毎日数十リットルの廃用乳が発生している。その上、生乳1Lに含まれるBODは103,000mgとされ、廃用乳1LあたりBODは牛1～3頭分のふん尿に含まれるBODに相当し[3]処理負荷が著しく高いことから、廃用乳の浄化槽による処理はコスト的に見合わないとされる[10]。薬剤の混入する廃用乳を土中に不法投棄し罰則を受ける事案も発生しており[6]、廃用乳を適切に処理・利用する方法の開発が急務である。

草地酪農地域に多く見られる液状でふん尿処理を行う事例では、廃用乳をスラリーなどに混ぜて圃場還元できる。しかし、堆肥処理が主な地域では、廃用乳の圃場還元は困難であり、廃用乳処理は生産者を悩ます問題となっている。廃用乳を酸で凝固させ堆肥化する技術[4, 9]や、廃用乳を直接堆肥と混ぜて処理する方法[2, 8]などが提案されているが、いずれも水分調整が必要で、副資材などのコストがかかることが課題となる。

そこで、従来の堆肥化に代わる新たな方法として、筆者らは無機系凝集剤を第一段階の凝結反応に、高分子凝集剤を第二段階の凝集反応に用いて、廃用乳を凝集・透明化する方法を検討している。検討を進める中で、酪農現場で生じる廃用乳の成分が日々変動するため、薬剤の投入量などの細かな調整が必要であった。低コストで管理するためには、生産者が自ら処理でき、安定した反応が進む条件を検討する必要がある。

以前、第一段階の凝結反応に用いる無機性凝集剤において、乳蛋白や乳脂肪などの乳成分やpHが反応におよぼす影響を報告した[7]。本研

究では、第二段階である高分子凝集剤を用いる凝集反応と、第一段階に用いる無機系凝集剤の違いや乳蛋白、体細胞数などの乳成分との関係について調べ、どの成分に着目して凝集剤の投入量を調整するかを検討した。その結果を受けて、実際の酪農現場において実証試験を行い、本処理方式の有効性について検証した。

材料および方法

1. 廃用乳の凝集処理と凝集剤

本研究では廃用乳に対して、最初に第一段階として水処理用凝集剤である無機系凝集剤を投入・搅拌して凝結反応させ、一定のpHに達した後に、第二段階として高分子凝集剤を投入・搅拌することで、廃用乳の白濁成分が完全に凝集して分離し、透明化した際に反応が完了したと判断した。本研究で使用した凝集剤は、第一段階に用いる無機系凝集剤として市販のポリ塩化アルミニウム（以下PACと称する）であるタイフロックSR（大明化学工業株）およびポリ硫酸第二鉄（以下ポリ鉄と称する）であるポリテツ（日鉄鉱業株）とし、第二段階に用いる高分子凝集剤にはタイポリマー（TA-905、大明化学工業株）を用いた。

2. 供試生乳

室内試験に用いた生乳は、北海道釧路地方の放牧酪農地帯の酪農場において、2023年10月9日および2024年8月5日に実施した牛群検定時に採取した、それぞれ68および72検体の、成分が異なる計140検体の個体乳である（図1）。この中には、乳房炎の治療などで出荷せずに廃棄した廃用乳も含まれている。



図1. 牛群検定で採取した個体乳

廃用乳の凝集処理

3. 牛群成績や乳成分と凝集反応との関係

成分が異なる68検体の個体乳（5倍希釀で50mLとしたもの）に対して、デジタルリビュレットを用いて無機系凝集剤である5%PACを徐々に投入してpHを5.0に調整した後、高分子凝集剤のタイポリマー（0.01g/L）を搅拌しながら徐々に投入し、完全に透明な上清が得られた際の投入量を測定した。また、72検体の個体乳（5倍希釀で50mLとしたもの）に対して、同様に無機系凝集剤である5%ポリ鉄を徐々に投入してpHを4.0に調整した後、高分子凝集剤のタイポリマー（0.01g/L）を搅拌しながら徐々に投入し、完全に透明な上清が得られた際の投入量を測定した（図2）。なお、PACでpH5.0、ポリ鉄でpH4.0としたのは、完全に凝集・透明化できるpHの範囲の中央値であることを以前確認したためである[7]。また、5倍に希釀した生乳を実験に用いた理由は、試験管内で凝集物が自然沈降し、透明化を確認しやすいためであり、希釀自体が反応に影響しないことを予備実験で確認している。

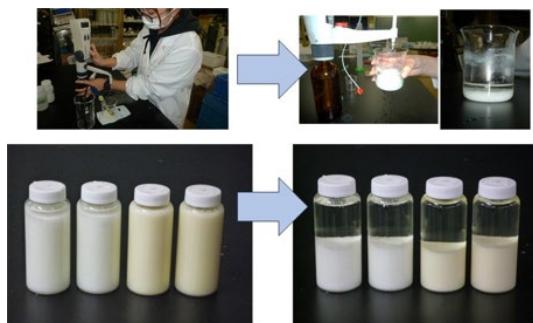


図2. 室内における凝集・透明化実験の様子

高分子凝集剤の投入量に関する成分として検討した項目は、乳脂率、乳蛋白、無脂固形分、体細胞数（リニアスコア）とした。

4. 酪農場における凝集処理条件の検討

栃木県および長野県でそれぞれ搾乳ロボットを備えた酪農場に設置した処理装置（図3）において、2024年9月18～19日に廃用乳、希釀乳



図3. 現地に設置した処理装置
(左：処理液、右：濾布による分離)

（原料：廃用乳に搾乳ロボットからの洗浄排水が混入し希釀されたもので、実際に凝集処理に用いられたもの）、透明化された分離液ならびに分離固形分を採取して化学分析を行い、酪農場における凝集処理条件の検討を実施した。両酪農場とも第一段階の凝集剤にはPACを用いている。分析項目と方法は、含水率（JIS K 0102 14）、水素イオン濃度（pH）（JIS K 0102 12）、生物化学的酸素要求量（BOD）（JIS K 0102 17）、化学的酸素要求量（COD）（JIS K 0102 45）、全窒素（T-P）（JIS K 0102 45）および全リン（T-P）（JIS K 0102 46）とした。廃用乳については上記に加えて乳脂肪、乳蛋白質および体細胞数を十勝農業協同組合連合会に依頼して分析した。

結 果

1. 高分子凝集剤の平均投入量

5倍希釀個体乳各50mLに対して、透明化のために要した高分子凝集剤（タイポリマー、0.01g/L）投入量の平均は、第一段階にPACを用いた場合は $3.0 \pm 1.2\text{mL}$ ($n=68$)、同じくポリ鉄を用いた場合は $3.4 \pm 1.3\text{mL}$ ($n=72$)であった、したがって、本研究で用いた2種類の無機系凝集剤による反応に対して、高分子凝集剤（タイポリマー）の必要投入量に大きな違いは認められなかった。

2. 牛群成績や乳成分と凝集反応との関係

(1) 個体の牛群成績や乳成分

本実験で使用した計140検体の個体乳の乳成

廃用乳の凝集処理

表1 5倍希釈個体乳50mLに対するタイポリマーの投入量と牛群成績ならびに乳成分との関係

平均±標準偏差	乳脂率 $3.99 \pm 0.58 [\%]$	乳蛋白 $3.59 \pm 0.36 [\%]$	無脂固形分 $8.83 \pm 0.46 [\%]$	体細胞数（リニアスコア） 3.28 ± 2.6
PACを用いた際のタイポリマー投入量	-1.0 ~ 5.8 [mL]	(注)	(注)	0.6 ~ 7.1 [mL]
相関係数	$r = 0.377^{**}$	$r = 0.150$	$r = -0.070$	$r = 0.432^{**}$
ポリ鉄を用いた際のタイポリマー投入量	0.9 ~ 7.3 [mL]	2.9 ~ 6.2 [mL]	2.0 ~ 7.7 [mL]	-0.5 ~ 6.1 [mL]
相関係数	$r = 0.401^{**}$	$r = 0.736^{**}$	$r = 0.549^{**}$	$r = 0.391^{**}$

注：項目間に有意な相関が認められないため、投入量の計算が不可能。

分（平均±標準偏差）はそれぞれ、乳脂率が $3.99 \pm 0.58 [\%]$ 、乳蛋白が $3.59 \pm 0.36 [\%]$ 、無脂乳固形分が $8.83 \pm 0.46 [\%]$ 、体細胞数（リニアスコア）が 3.28 ± 2.6 であった（表1）。

(2) 第一段階にPACを用いた場合における、タイポリマーの必要投入量と牛群成績や各乳成分との関係

68検体の5倍希釈個体乳各50mLにおいて、第一段階にPACを投入してpHを5.0に調整した後に、第二段階として透明化に要したタイポリマー(0.01g/L)投入量と乳成分（5倍希釈ではなく実質濃度で示す）の相関係数を表1に示した。

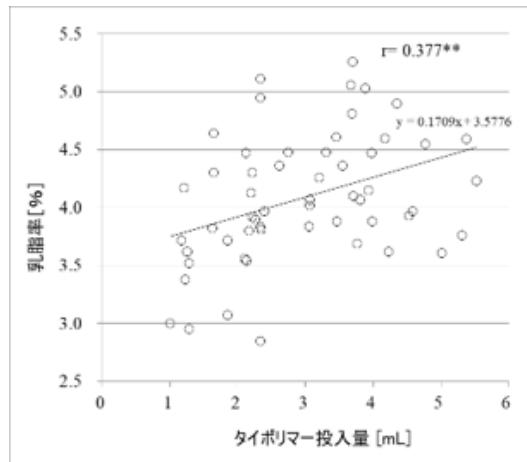


図4. PAC利用におけるタイポリマー投入量と乳脂率との関係

タイポリマー投入量との間に有意な相関が認められたのは、乳脂率 ($r=0.377^{**}$) (図4)、体細胞数（リニアスコア） ($r=0.432^{**}$) (図5) であった。

最小二乗法による直線近似式で算出した、各成分の標準偏差に対するタイポリマー(0.01g/L)の必要投入量は、それぞれ5倍希釈個体乳50mLに対して、乳脂率の場合が-1.0~5.8mL、体細胞数（リニアスコア）の場合が0.6~7.1mLと算定された（表1）。

(3) 第一段階にポリ鉄を用いた場合における、タイポリマーの必要投入量と牛群成績や各乳成分との関係

72検体の5倍希釈個体乳各50mLにおいて、第一段階にポリ鉄を投入してpHを4.0に調整した後に、第二段階として透明化に要したタイポリマー(0.01g/L)投入量と乳成分（5倍希釈ではなく実質濃度で示す）の相関係数を表1に示した。タイポリマー投入量との間に有意な相関が認められたのは、乳脂率 ($r=0.401^{**}$)、乳蛋白 ($r=0.736^{**}$)、無脂乳固形分 ($r=0.549^{**}$)、

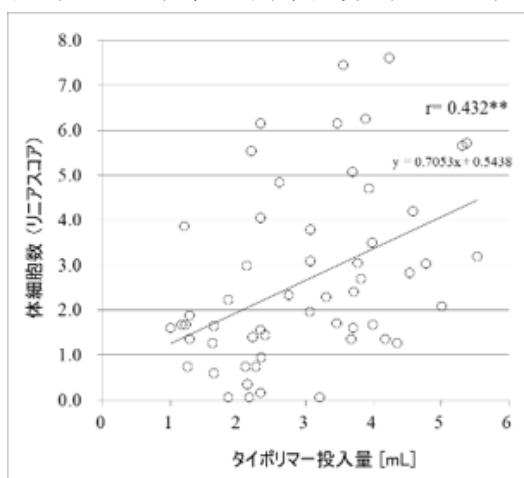


図5. PAC利用におけるタイポリマー投入量と体細胞数（リニアスコア）との関係

廃用乳の凝集処理

た(図6~9に示した)。

最小二乗法による直線近似式で算出した、各成分の標準偏差に対するタイポリマー(0.01g/L)の必要投入量は、それぞれ5倍希釈個体乳50mLに対して、乳脂率の場合が0.9~7.3mL、乳蛋白の場合が2.9~6.2mL、無脂乳固形分の場合が2.0~7.7mL、体細胞数(リニアスコア)の場合が-0.5~6.1mLと算定された(表1)。

3. 酪農場における凝集処理条件の検討

栃木県および長野県の酪農場で採取した廃用乳、希釈乳(原料)および処理装置により透明化された分離液ならびに分離固形分(図10)の分析結果を表2に示した。

乳房炎などで出荷できずに廃棄する生乳と、搾乳ロボットから排出される前搾りならびに乳頭洗浄水が含まれる希釈乳(原料)の日発生量は、聞き取りによると栃木県の酪農場では約3,000L、長野県の酪農場では1,200L程度であった。廃用乳と希釈乳(原料)における全窒素(T-N)の結果から算定すると、希釈乳(原料)は廃用乳が搾乳ロボットからの排水によって3倍程度に希釈されたものであると判断される。廃用乳の体細胞数は、栃木県および長野県の酪農場の順にそれぞれ219, 9, 107[千個/mL]であり、栃木県の酪農場では一般的に出荷停止の目安とされる300[千個/mL]以下であったが、長野県の酪農場の体細胞数は著しく高い値であった。分離固形分の含水率は、77.4~79.1%でいずれも80%以下であり、堆肥化を妨げないレベルの含水率であったため、他の堆肥原料と混合して堆肥化処理をしていた。分離液に関しては透明化されていたが、BODやCODが日排水基準(160mg/L)を著しく上回っており、全リンも同基準(16mg/L)を超えていた。

考 察

第一段階に無機系凝集剤を、第二段階に高分子凝集剤を用いて処理することにより、廃用乳

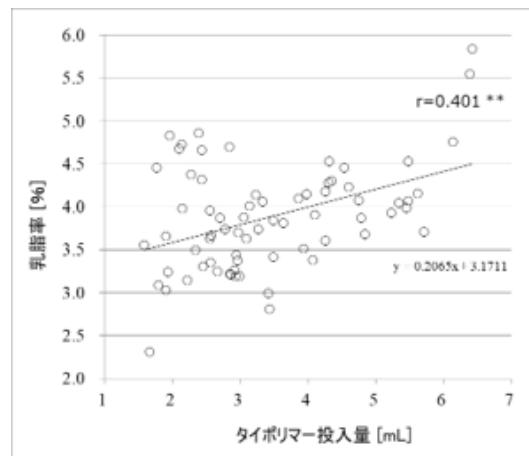


図6. ポリ鉄利用におけるタイポリマー投入量と乳脂率との関係

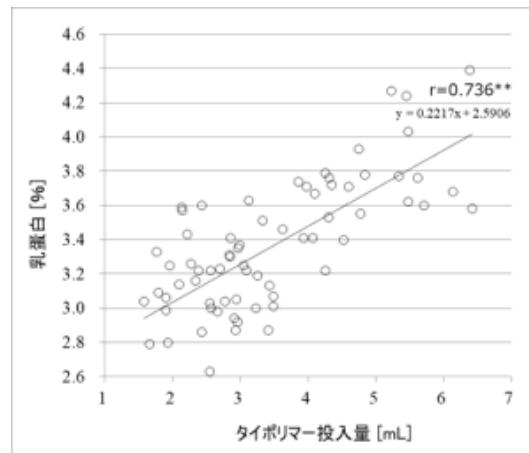


図7. ポリ鉄利用におけるタイポリマー投入量と乳蛋白との関係

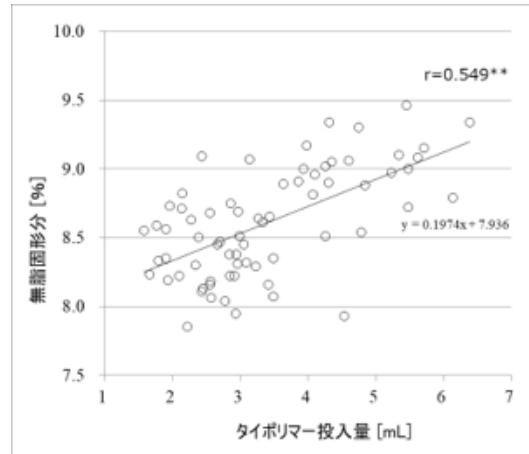


図8. ポリ鉄利用におけるタイポリマー投入量と無脂乳固形分との関係

廃用乳の凝集処理

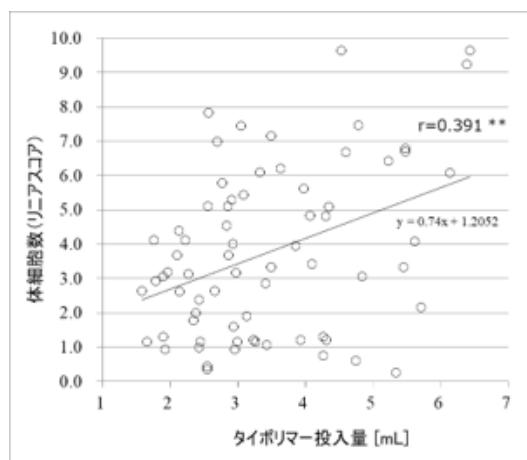


図9. ポリ鉄利用におけるタイポリマー投入量と体細胞数（リニアスコア）との関係



図10. 現地にて採取した各試料

を凝集・分離し透明化することが可能であり、酪農現場で実用化できる有望な処理方法であると考えられる。

第一段階における2種類の無機系凝集剤（PACとポリ鉄）には、それぞれ凝結反応が可能なpHの範囲があり、無機系凝集剤の投入量は、凝集可能範囲のpHに留意しながら、体細胞数には配慮せず、乳脂率や乳蛋白などの一般項目に合わせて調整が必要であることを以前報告した[7]。

その一方、第二段階における高分子凝集剤（ポリマー）による凝集処理では、乳脂肪率や乳蛋白などの一般項目に加えて、体細胞数に関係することが明らかになった。第二段階では高分子凝集剤の投入量が少ないと透明化はできないが、逆に投入量が少々過剰となつても結果には影響しないため、乳房炎の頭数が多い場合は、高分子凝集剤の投入量を増やすことで対応できると考えられる。また、本試験に用いた個体乳（n=140）における乳脂肪率の最小値は2.31%、最大値は5.84%と大きな幅があるため、廃用乳の原因となった個体の乳脂肪率によって凝集剤の投入量を調整することが望ましい。

栃木県と長野県の実際の現場における廃用乳の体細胞数はそれぞれ219[千個/mL]（リニアスコアで4.1）、9,107[千個/mL]（同、9.5）と著しい差があり、現場によって発生する廃用乳の品質に大きな違いがあることが想定された。生乳の出荷を制限した個体群由来の廃用乳における乳蛋白や乳脂肪などの一般成分が日によって大きく変動する可能性は低いが、体細胞

表2 各試料の成分分析結果

試験項目	単位	栃木県の酪農場(9/18)				長野県の酪農場(9/19)			
		廃用乳	希釀乳(原料)	分離液	分離固体分	廃用乳	希釀乳(原料)	分離液	分離固体分
含水率	g/100g	90.7	97.4	-	79.1	86.9	96.4	-	77.4
水素イオン濃度(pH)		6.8	6.1	5.3	4.5	6.9	6.7	5.3	4.3
生物化学的酸素要求量(BOD)	mg/L	100,000	31,000	4,600	-	120,000	42,000	4,400	-
化学的酸素要求量(COD)	mg/L	36,000	9,800	3,400	-	51,000	16,000	4,100	-
全窒素(T-N)	mg/L	4,000	1,300	64	13,000	6,300	1,900	120	15,000
全リン(T-P)	mg/L	2,000	690	70	980	2,700	930	110	1,200
乳脂肪	%	3.13	-	-	-	3.78	-	-	-
乳蛋白質	%	2.65	-	-	-	3.82	-	-	-
体細胞数	千個/mL	219	-	-	-	9,107	-	-	-

数は乳房炎の頭数や炎症の程度によって著しく変動する可能性が高いので、現場で処理する上での留意事項になると考えられる。

このように室内で実施した各成分と凝集剤投入量の相関を検討した結果、過去の生産現場における試験で不安定な結果であった原因が明瞭になり、成分に応じて凝集剤の調整が可能となった。また、第一段階にPACを用いた場合の高分子凝集剤（タイポリマー）の投入量と、各乳成分との間にはばらつきが大きかったが、PACではなくポリ鉄を用いた場合には各乳成分との間に相関関係が認められ、乳成分に応じて精密に投入量を調整できる可能性が示唆された。

現地における検討から、廃用乳の凝集分離処理が可能であり有効な処理手段となることが立証された。しかし、透明化された分離液については排水基準を超えており、そのままでは放流が不可能であるため、分離液の簡易な浄化方法については今後の検討課題として残される。

謝 辞

本研究の実施にあたり、浜中町農業協同組合ならびに十勝農業協同組合連合会に多大なご協力を頂いたことに深謝いたします。

文 献

- [1] 中央酪農会議、2025、良質乳生産ガイド、1-65
- [2] 福島正人、阿久津充、木下強、小池則義、田澤倫子、神辺佳弘、2012、廃棄乳の堆肥化技術の確立、栃木畜酪研研報、1号, p. 34-44(2012-03)
- [3] 一般社団法人畜産環境整備機構、2022、3畜産汚水処理施設設計・維持管理マニュアル、1-264
- [4] 小島陽一郎、室井浩一、永瀬圭一、岡本政続、越井清美、天羽弘一、的場和弘、2017. 廃棄乳の酸凝固処理技術の開発. 農業施設. 48(1). 38-44.
- [5] 公益社団法人北海道酪農検定検査協会、2025、2024年度年間検定成績、<https://www.hmr.t.or.jp/report>
- [6] 村谷晃司、2022. 産業廃棄物の不法投棄等の現状－不法投棄撲滅へ向けた取り組みと課題. 環境管理, 58(12): 72-78.
- [7] Kenji Nekomoto, Mitsuyasu Sugizaki, Miku Ishihara, Ken-ichi Kondo, Tadahiro, Ariyoshi and Tsugio Kobayashi, 2025, Coagulation-flocculation treatment of waste milk on dairy farm - Effect of milk composition on coagulation by polymeric flocculant - Journal of Animal Production Environment Science, https://www.apesj.org/DL/Vol25/Nekomoto_20250511_Inpress.pdf
- [8] 佐藤義人、2018、廃棄乳を混合した堆肥化原料の通気抵抗と堆肥化特性、東北農業研究、71, 45-46.
- [9] 鈴木良地、榎原幹男、増田達明、中谷洋、平山鉄夫、2005. 酪農における廃棄乳の堆肥化処理の検討. 愛知農総試報告、37:185-192
- [10] 吉田周司、2007、ミルキングパーラー排水の原単位設定と活性汚泥法による浄化処理について、畜産環境情報、37, 15-18.

Original Paper

**Purification treatment of waste milk using flocculants in dairy farming
- Effects of inorganic coagulants and milk components on the flocculation
reaction with polymer flocculants -**

Kenji Nekomoto¹, Mitsuyasu Sugizaki¹, Miku Ishihara¹, Shiho Ishikawa¹, Ken-ichi Kondo²,
Tadahiro Ariyoshi³ and Tsugio Kobayashi⁴

¹ College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu,
Hokkaido, 069-8501

² Vertical Integration Office Co., Ltd., Saitama, Saitama, 339-0045

³ Chitose Factory, Orion Machinery Co., Ltd., Chitose Hokkaido, 066-0077

⁴ Chuo-Orion Co., Ltd., Kumagaya, Saitama, 360-0811

Waste milk discarded at dairy farms requires an extremely high treatment load and therefore is impractical to process in septic tanks. As an alternative to septic tank treatment, we previously reported a promising, practical treatment method for use on dairy farms that involves coagulation and clarification of waste milk, using coagulation with an inorganic coagulant in the first stage followed by flocculation with a polymer flocculant in the second stage. In the present study, we performed laboratory experiments to examine the various conditions affecting the second-stage reaction, and, based on results obtained in actual dairy farm settings, summarized the conditions necessary to achieve stable treatment. When polyaluminum chloride, an inorganic coagulant, was added in the first stage to adjust the pH to 5.0, and Tai polymer, a polymer flocculant, was used in the second stage for flocculation and clarification, the required dosage of Tai polymer was significantly correlated with milk component parameters of individual cows ($n=68$), namely, milk fat percentage ($r=0.377^{**}$), and somatic cell count (linear score) ($r=0.432^{**}$). When polyferric sulfate was used in the first stage, milk component parameters of individual cows ($n=72$) that showed significant correlations with the required dosage of Tai polymer were milk fat percentage ($r=0.401^{**}$), milk protein ($r=0.736^{**}$), non-fat milk solids ($r=0.549^{**}$), and somatic cell count (linear score) ($r=0.391^{**}$). These results suggest that not only general milk parameters such as milk protein and milk fat, but also somatic cell counts are related to the required dosage of coagulant. In treatment facilities installed on dairy farms in Tochigi Prefecture (where 3,000 L/day of waste milk is generated) and Nagano Prefecture (1,200 L/day), the moisture content of separated solids obtained from coagulated and clarified waste milk ranged from 77.4% to 79.1%, which was within a level not impeding composting. On the other hand, the somatic cell counts of waste milk at these dairy farms were 219,000 and 9,107,000 cells/ml, respectively, indicating substantial differences in the quality of waste milk among farms. While it is unlikely that general components such as milk protein and milk fat vary greatly on a daily basis, somatic cell counts are highly likely to fluctuate

廃用乳の凝集処理

significantly depending on the number of mastitis cases and the severity of inflammation, and thus can be regarded as an important factor in on-site coagulation treatment.

Key words : coagulation treatment, inorganic coagulant, polymer flocculant, waste milk, dairy farm

Corresponding: nekomoto@rakuno.ac.jp

Receipt of Ms: 08.09.2025. Accepted: 05.11.2025.
Journal of Animal Production Environment Science