

市販ドロマイト石灰を用いた養豚排水の色度低減、リン除去技術および処理後の回収資材の有効利用手法の検討

長谷川輝明・塚本崇志*¹・松本崇志*¹・長田隆*²・田中康男*³

Effect of Commercially Available Ca and Mg Containing Powder Material “Dolomite-Lime” on Color and Phosphorus Removal of Swine Wastewater, and Applicability of Used Dolomite-Lime as Fertilizer

HASEGAWA Teruaki, TSUKAMOTO Takashi *¹, MATSUMOTO Takashi *¹, OSADA Takashi *²
and TANAKA Yasuo *³

要 約

畜舎消毒用途で市販されているドロマイト石灰を排水処理用資材に用いて、養豚排水の色度低減、リン除去および処理後の回収資材の有効利用手法について検討した。試験用処理装置には土砂沈殿分離用として市販されているノッチタンク（有効容積0.5 m³）を用いて、活性汚泥処理後の排水（試験の原水）を4.3～5.8 m³/日で連続流入させ、そこに資材を6%濃度以下のスラリー状に調整して0.021～0.153 DW/V%の添加率で連続流入した。処理装置の有効容積当たりの水理学的滞留時間は2.1～2.7時間であり、資材の影響でアルカリ化した処理水は放流前に炭酸ガスを通気することで中和処理を行った。この結果、資材添加率0.1 DW/V%程度で色度低減率は75%程度、リンは100%近い除去が可能であった。また、この添加率では処理水のpHは11程度まで高まり、アルカリ性に弱い病原性微生物の消毒に有効と推測された。一方、処理後に回収した資材には高濃度のリン酸含有（30%）が認められた。この回収資材と原料堆肥を市販のモルタルミキサーで攪拌混合することで堆肥の造粒成型化が図れた。この成型堆肥を施用してコマツナおよびチンゲンサイを栽培したところ、それぞれのリン酸利用率は18.2%および13.6%であり、原料堆肥を施用した場合に比べて高かった。回収資材はリン酸肥料として利用できる可能性があり、また造粒成型化することでリン酸の肥効向上に効果があることが示唆された。

緒 言

畜舎排水を河川などの公共用水域に放流する場合、水質汚濁防止法による排水基準値を遵守する必要がある。畜産に係る項目では、水素イオン濃度（pH）、生物化学的酸素要求量（BOD）、化学的酸素要求量（COD）、浮遊物質（SS）、大腸菌群数、窒素、リン、銅、亜鉛、硝酸性窒素等がある。通常、污水处理施設の運転管理によりこれらは適切に処理されるが、項目によっては施設管理だけでは十分に処理できない場合がある。また、水質汚濁防止法の規制対象ではないが、排水の着色（色度）が問題となる場合がある。

養豚污水处理施設からの排水は茶褐色を呈することが

多く、未処理と誤解を受けやすいことから地域住民の苦情を招くおそれがある。地域との調和を図るためには見かけ上の汚濁感についても極力減少させることが重要である。排水の色度を低減させる技術はいくつかあるが、一般的な方法として活性炭吸着法やオゾン分解法が確立されている。しかし、いずれも設置費やランニングコストが高いことから畜産での事例は少ない。そのため、畜産向けの低コストな技術として黒ボク土吸着法が開発された（Moriら1997）。この方法は、黒ボク土が排水中の色度を吸着する性質に着目したもので、色度低減と同時にBODやCODの除去効果も確認されている。ただし、污水处理施設で常時安定した処理ができない場合は汚泥やSSなどの流出により土壌が目詰まりし、頻繁な土層交換が生ずる。

養豚排水にはリンが豊富に含まれているため、湖沼などに富栄養化を招かないよう適切に処理する必要がある。水質汚濁防止法では閉鎖性水域に排出する畜産事業場にリンの排水基準値が定められている。現状では一般

令和4年8月31日受付

* 1 千葉県農林総合研究センター

* 2 国立研究開発法人農研機構畜産研究部門

* 3 一般財団法人畜産環境整備機構畜産環境技術研究所

排水基準値 (16 mg/L) への対応が技術的に困難であるため、暫定排水基準値 (22 mg/L) が適用されている (2023年9月末日まで)。一方、近年ではリン鉱石価格が高騰しており、資源確保の観点からも回収・再利用技術に注目が集まっている。排水からのリン除去技術では、無機系凝集剤を使用した凝集沈殿法が一般的であるが、凝集汚泥はアルミニウム塩や鉄塩などの金属イオンを含むため肥料への再利用には適さない。そのため、回収リンの肥料利用も視野に入れた技術として、リン結晶化法の一つであるMAP (リン酸マグネシウムアンモニウム六水和物) 法が開発された (Suzukiら2006)。この技術は、排水中のリン酸イオンとマグネシウムイオン、アンモニウムイオンを弱アルカリ性の条件下でMAPの結晶として回収する。下水道分野での導入は進んでいるものの、畜産においてはコスト面やリン回収効率などに課題がある。

養豚排水からの色度低減、リン除去および回収利用についてはいずれも重要な課題であるが、既存の污水处理施設ではこれらすべてに対応することは難しい。また、既に確立されている技術を組み合わせて適用する選択肢もあるが、維持管理やコスト面から現実的ではない。そこで、複数の処理効果を同時に発揮できる簡易技術として、長谷川ら (2014 a) は物質の吸着に優れた多孔質構造をもつ非晶質ケイ酸カルシウム水和物 (CSH) を利用して、養豚排水からの色度低減、リン除去・回収技術を開発した。CSHとは非晶質シリカと消石灰を原料に合成した高アルカリ性の資材であり、排水量に対してCSHを0.15 DW/V程度添加することで、色度は約76%の低減、リンは100%近い除去率が得られている。また処理後のCSHはリン酸を約20%含有しており、リン資源としての再利用も可能である。ただし、CSHは特殊な製造工程を要するため生産に係るコストが大きく、資材価格が高いことが課題である。そのため、CSHと同様の効果が期待できる安価な資材として、畜舎消毒の用途で市販されているドロマイト石灰に着目した。この資材を利用して、養豚排水の色度低減、リン除去および処理後の回収資材の有効利用手法について検討した。

材料および方法

1. 実施場所

県内養豚農家が保有する污水处理施設で実施した。この施設に流入する汚水量は37 m³/日で、膜分離活性汚泥法により処理している。この施設の膜分離槽から流出する排水の一部を試験の原水として、処理装置に流入させた。

2. 資材

供試資材には、市販のドロマイト石灰 (水酸化ドロマイトDP、田政砒業株式会社、図1) を用いた。この資材は微粉末 (粒径10~100 μm) のため水に馴染みやすく、アルカリによる強い抗菌、消毒効果を有することが特徴である。また、主成分は水酸化カルシウムと水酸化マグネシウムであり、凝集による色度低減、リンの吸着が期待できる。さらに取り扱いに当たっては安全性が高く、安定的に入手可能である。試験では資材を6%濃度以下のスラリー状に調整して利用した。



図1 ドロマイト石灰

3. 処理装置

処理装置の概要を図2に示した。処理装置には、土木工事分野で土砂沈殿分離用として市販されているノッチタンク (有効容積0.5 m³) を使用した。この装置の内部は、上部または下部に流路を有する隔壁板により3つに分かれており (それぞれ第1区画~第3区画と称する)、流入水は上下交互に通水する仕組みとなっている。この装置の第1区画に原水と資材を連続的に流入させることで、原水は第1区画から第2区画にかけて資材と接触し、第3区画から処理水として流出する。なお、処理水は資材の影響でアルカリ性に傾くことから、放流前に炭酸ガスを吹き込むことで中和した。炭酸ガスは注入量が過剰になっても極端なpH低下が起こらないため管理は容易である。一方、原水と接触後の資材は第1区画および第2区画の下部に沈積するため、チュービングポンプで定期的に引き抜き、フレコンバッグに投入して回収した。

試験では、資材添加率ごとの処理効果を検討するとともに、フレコンバッグに回収した資材 (以後、回収資材と称す) の成分評価と資源としての利用手法について検討した。

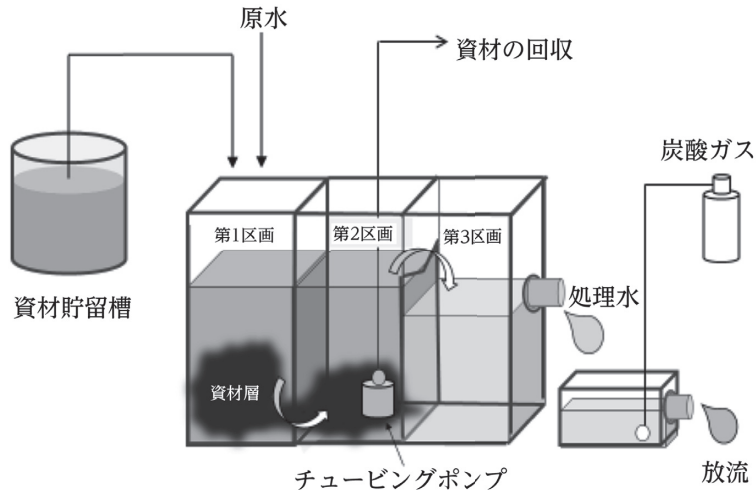


図2 処理装置の概要

4. 実験方法

(1) 資材の性能評価

原水量3.02～4.01 L/分に対して、3.7～5.9%濃度のスラリー状に調整した資材を12.5～93.8 mL/分で処理装置に連続的に流入させた。1日当たりの原水量は4.3～5.8 m³で、原水と資材の混合液は処理装置内を水理的滞留時間2.1～2.7時間で通過した。原水量に対する資材添加率（乾物換算）は0.021～0.153 DW/V%であった。原水と処理水のpH、色度、リン酸イオン態リン（PO₄-P）を測定して、資材添加率ごとの性能評価を行った。

試験は2017年4月25日から2017年6月7日までの44日間行った。

(2) 回収資材の成分評価

フレコンバッグに回収した資材は、その状態で3日間置いて水分を抜いてペースト状にした後、水分、全窒素（T-N）、全リン酸（T-P₂O₅）、全酸化カリウム（T-K₂O）、全酸化マグネシウム（T-MgO）、全酸化カルシウム（T-CaO）の肥料成分と、カドミウム（Cd）、クロム（Cr）、ヒ素（As）の有害成分（重金属類）を測定した。

(3) 回収資材を利用した成型堆肥製造手法

回収資材の利用用途の一つとして、堆肥成型用の結着材としての利用を検討した。堆肥の造粒成型化に取り組む利点は次のとおりである。

- ①リン酸を主要肥料成分とした成分調整堆肥の製造が可能となる。
- ②粘性を有し、乾燥後に硬化する特徴をもつ回収資材は、結着材として堆肥の造粒成型化に利用できる可能性がある。造粒成型化した堆肥は、化学肥料用散布機で施肥できるため堆肥の需要喚起につながる。

原料となる堆肥には市販の豚ふん堆肥（豚ふん、オガクズ）を用いた。また、回収資材はフレコンバッグで3日間水抜きしたものを用いた。成型機には市

販のモルタルミキサー（KMM3.5 GT、100 L容量、光洋機械産業株式会社）を用い、成型機内で原料堆肥と回収資材を攪拌混合させることで堆肥の造粒成型化を図った。試験では、原料堆肥12 kg（水分38.0%）に対して回収資材2.8 kg（水分95.0%）を投入し、成型機で30分間攪拌した。なお試験条件については、長谷川ら（2014b）を参考に、原料堆肥の乾物重量当たりの回収資材添加割合が約2.0%（乾物換算）となるように調整した。

製造した成型堆肥は3週間程度自然乾燥した後、JIS標準篩を用いて粒度分布を調査した。また原料堆肥と成型堆肥の肥料成分として、水分、T-N、T-P₂O₅、T-K₂O、T-MgO、T-CaOを測定した。

試験は2017年7月28日から2017年8月22日までの26日間行った。

(4) 成型堆肥の肥効性調査

成型堆肥に含まれるリン酸の肥効性を調査するため、コマツナ「きよすみ」とチンゲンサイ「武帝」を用いて生育試験を行った。試験土壌は千葉県農林総合研究センターの露地圃場（腐植質普通黒ボク土）で実施した。試験区には無施肥区、原料堆肥区、成型堆肥区の3試験区を設定して、リン酸は無施肥、窒素およびカリウムは標準施肥量で栽培し、それぞれについて3反復行った。原料堆肥と成型堆肥の施肥量は、堆肥に含まれるリン酸量から施肥に必要な量を算出し乾物重量で統一した。コマツナの生育試験では、原料堆肥区で290 kg/10 a、成型堆肥区で217 kg/10 aを施用した（表1）。チンゲンサイの生育試験では、原料堆肥区で240 kg/10 a、成型堆肥区で180 kg/10 aを施用した（表2）。2017年9月25日に各試験区に堆肥を施用し、10月4日に窒素およびカリウムを標準量（コマツナ：12 kg/10 a、チンゲンサイ：8 kg/10 a）施肥した。10月5日にコマツナ（株間5 cm、条間15 cm）およびチンゲンサイ（株間12 cm、条間15 cm）を播種し、

12月1日に各試験区から収穫を行い、新鮮重量、乾物重量、葉丈、リン酸吸収量およびリン酸利用率について調査した。なお収穫は、極端に成長が早い、または

遅い株を除いて各試験区とも平均的な株を20株収穫した。

表1 コマツナ生育試験の施用量

	施用量	施用量 (kg/10 a)			肥効率換算施用量 ^{※2, 3} (kg/10 a)		
	(kg/10 a)	T-N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O	T-N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O
原料堆肥	290 kg (178 kg ^{※1})	5.9	13.2	4.8	1.8	10.5	4.3
成型堆肥	217 kg (178 kg ^{※1})	5.5	15.1	5.2	1.7	12.1	4.6

- ※1 乾物重量
- ※2 施肥基準：N-P-K=12-12-12/10 a
- ※3 肥効率はN30%、P80%、K90%として換算（千葉県農作物等施肥基準）

表2 チンゲンサイ生育試験の施用量

	施用量	施用量 (kg/10 a)			肥効率換算施用量 ^{※2, 3} (kg/10 a)		
	(kg/10 a)	T-N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O	T-N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O
原料堆肥	240 kg (147 kg ^{※1})	4.9	10.9	4.0	1.5	8.7	3.6
成型堆肥	180 kg (147 kg ^{※1})	4.6	12.5	4.3	1.4	10.0	3.8

- ※1 乾物重量
- ※2 施肥基準：N-P-K=8-10-8/10 a
- ※3 肥効率はN30%、P80%、K90%として換算（千葉県農作物等施肥基準）

5. 分析方法

水質測定について、pHはガラス電極法、PO₄-Pは陰イオンクロマトグラフ (IC-2010、東ソー株式会社) により測定した。色度は下水試験方法 (日本下水道協会1997) に準じて、孔径0.45 μmのフィルターでろ過した後に分光光度計 (UVmini-1240、株式会社島津製作所) を用いて測定した。なお、色度は公定の標準液を用いた検量線により吸光度 (λ=390 nm) から求めた。

回収資材、原料堆肥および成型堆肥の成分について、水分は105℃加熱乾燥法で測定した。T-N、T-P₂O₅、T-K₂O、T-MgO、T-CaO、Cd、Cr、Asは農林水産省が定めた肥料分析法 (農林水産省農業環境研究所1992) により測定した。また、成型堆肥はJIS標準篩 (篩目は1 mm未満、1~2 mm、2~4 mm、4~8 mm、8~16 mm、16 mm以上の6段階) を用いて10分間篩別し、各篩に残留した成型堆肥の乾燥重量を測定して粒度分布を調査した。

生育試験については、収穫したコマツナおよびチンゲンサイの株の根を除いて新鮮重量を測定し、最も大きい葉丈を測定した。その後、70℃で3日間以上乾燥した植物体の乾物重量を測定して粉碎した。リン酸含

量は、粉碎した植物体をマイクロウェーブサンプルプロセッサ (ETHOS-900、マイルストーンゼネラル株式会社) で硝酸分解後にICP発光分光分析装置 (710-ES、VARIAN Inc.) により測定した。また、リン酸吸収量は植物体の乾物重量にリン酸含量を乗じて求めた。リン酸利用率は、各堆肥区のリン酸吸収量から無施用区のリン酸吸収量を差し引き、各堆肥区のリン酸施用量で除した値に100を乗じて算出した。

結果および考察

1. 色度低減効果

原水の色度は389.9~484.0の範囲であったが、資材添加により処理後の色度は78.4~349.3まで低減した (表3)。資材添加率の増加に伴い色度低減率は高くなる傾向がみられ、添加率0.1 DW/V% (原水1 m³当たり資材を乾物重量で1 kg添加) 程度で色度低減率は75%程度まで高まった (図3)。この色度低減率では、茶褐色の原水はほぼ透明色になった (図4)。資材を添加することで、色度の原因となるフミン質などの生物難分解性物質が吸着および凝集によって除去されたと推察された。

表3 処理装置の原水および処理水の性状

	pH	色度	PO ₄ -P (mg/L)
原水	6.5~7.4	389.9~484.0 (418.3±32.0)	97.4~120.6 (110.9±8.9)
処理水	7.7~11.9	78.4~349.3 (217.7±106.0)	0~74.2 (16.4±24.8)

括弧内は平均±標準偏差を示す

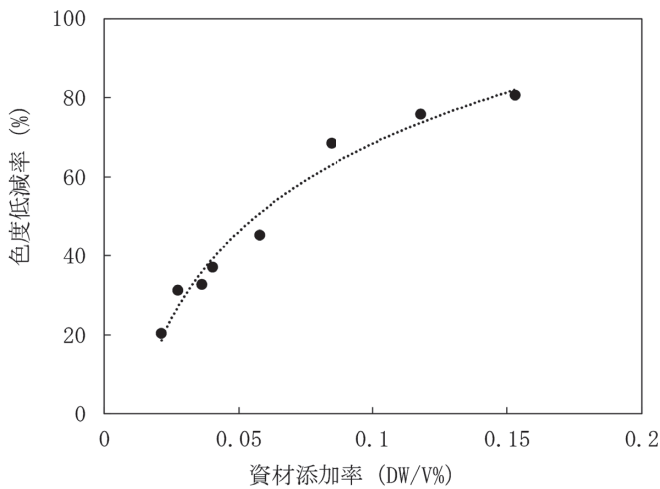


図3 色度低減率と資材添加率の関係

2. リン除去効果

原水の PO_4 -Pは、資材添加により97.4~120.6 mg/Lが74.2 mg/L以下まで低減した(表3)。色度低減効果と同様、資材添加率が高くなるほど PO_4 -P除去率も上昇する傾向を示し、添加率0.1 DW/V%程度で PO_4 -Pは100%近い除去が可能であった(図5)。これは資材によるリン吸着能力と、溶出したカルシウムに

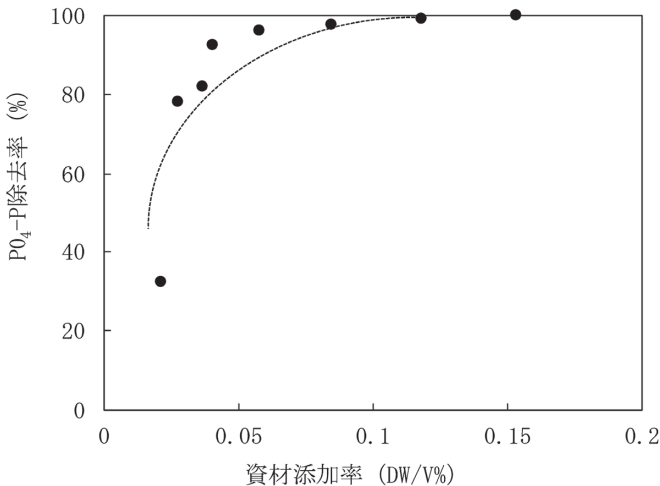


図5 PO_4 -P 除去率と資材添加率の関係

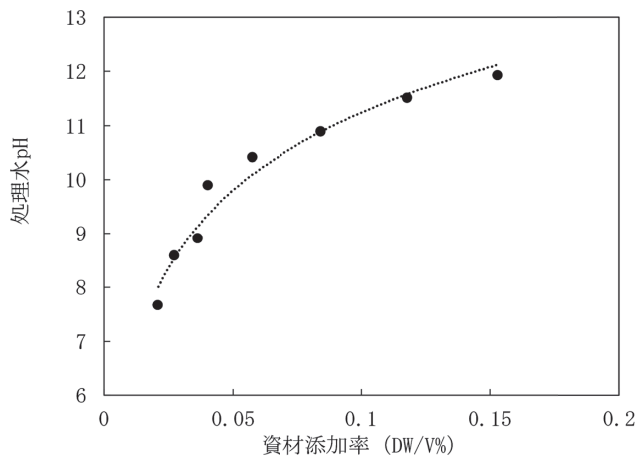


図6 処理水 pH と資材添加率の関係

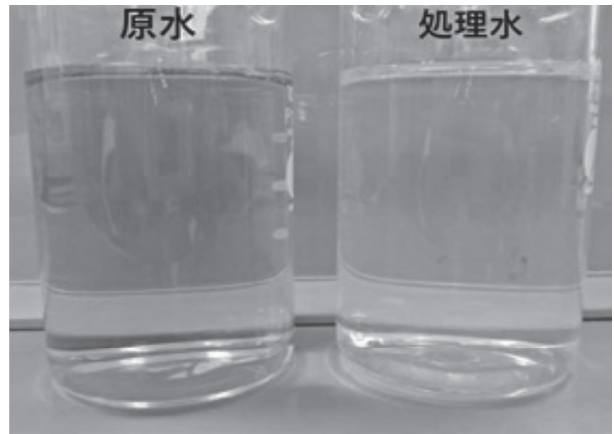


図4 処理前後の外観

よる凝集反応により生じたと考えられる。なお、CSHを利用したYamashitaら(2013)、長谷川ら(2014a)の試験ではpH 11付近で PO_4 -Pの除去効果は高くなることを報告している。本試験においても、資材添加率が高くなるほど処理水のpHはアルカリ性に傾き、添加率0.1 DW/V%程度でpHは11程度にまで上昇した(図6)。高pH域でのリンとカルシウムの不溶性化合物(ヒドロキシアパタイト)の形成が示唆された。一方、長谷川ら(2014a)の試験ではpH 10以上で大腸菌群の除去にも有効であることが報告されている。ドロマイト石灰においてもアルカリ性に弱い病原性微生物の消毒に有効であると推測された。

処理水の色度低減率と PO_4 -P除去率の関係を図7に示した。この結果、色度低減率50%以上で PO_4 -Pはほぼ完全に除去されることが示された。処理水が無色に近い状態であれば PO_4 -Pも除去されていることになり、目視でも水質状態を容易に確認できる可能性がある。

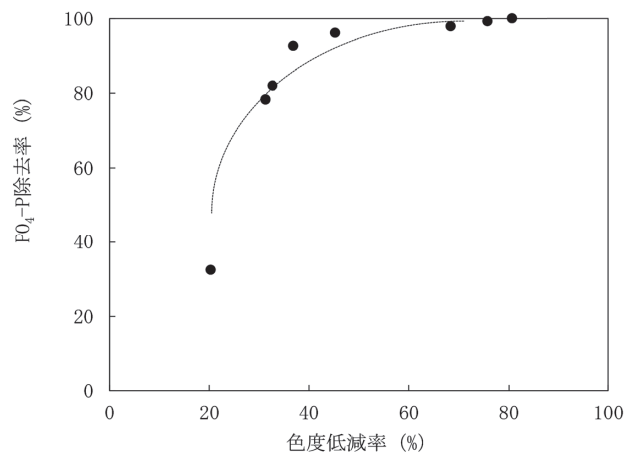


図7 色度低減率と PO_4 -P 除去率の関係

3. 回収資材の成分評価

回収資材の含有成分を表4に示した。主要肥料成分の一つであるT-P₂O₅含有量は30.0%で、普通肥料の一種である副産リン酸肥料の公定規格（リン酸含有量15%以上）を十分に満たすことが示された。よって回収資材はリン酸肥料として利用できる可能性がある。また、T-P₂O₅以外にもT-K₂O、T-MgO、T-CaO

などの肥料成分が含まれていることから、これらの利用手法を確立することで、循環資源として回収資材の付加価値を高めることも可能である。なお、重金属類としてCd、Cr、Asがそれぞれ0.4 ppm、3.0 ppm、3.8 ppm検出されたが、いずれも規制値以下（Cd<5 ppm、Cr<500 ppm、As<50 ppm）であるため、使用に当たって問題ないことが確認された。

表4 回収資材の含有成分

	水分 (%)	T-N (%)	T-P ₂ O ₅ (%)	T-K ₂ O (%)	T-MgO (%)	T-CaO (%)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	As (ppm)
回収資材	95.0	0.8	30.0	2.1	10.0	22.0	0.4	3.0	3.8

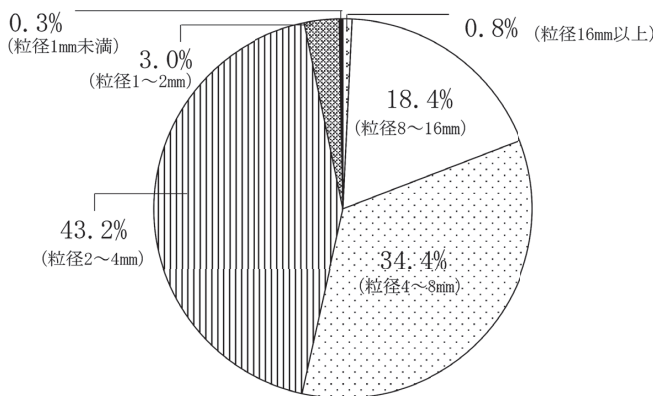
水分以外は乾物換算

4. 成型堆肥の物理特性

成型堆肥の粒度分布を図8に示した。粒径2～4 mmが43.2%、粒径4～8 mmが34.4%、粒径8～16 mmが18.4%、粒径1～2 mmが3.0%、粒径16 mm以上が0.8%、粒径1 mm未満が0.3%であった。本試験で製造した成型堆肥の多くは2～8 mmの粒径であり（図9）、市販されているペレット堆肥の主要な粒径3 mm、5 mm、8 mm（薬師堂2007）と比べても大きな隔たりはなかった。また、堆肥の施用では均一な散布性が求められることから、粒径の揃った堆肥を製造する必要がある。通常、堆肥散布では化学肥料散布機であるブロードキャスターやライムソーワが用いられる。長谷川ら（2014b）は粒径2～8 mmの成型堆肥はブロードキャスターでほぼ左右均一に散布できることを報告している。宮崎と大村（1997）も粒径4～8 mmおよび8～16 mmの成型堆肥は

ブロードキャスターで均一に散布できるとし、散布時の崩壊も生じないことを報告している。なお、この崩壊性について、長谷川と田中（2014）は回収CSHを利用して製造した成型堆肥（堆肥強度0.40～0.78 kg/cm²）は機械散布による崩壊が少ないと推測している。ドロマイト石灰はCSH同様、水酸化カルシウムが主要成分であることから、同等の強度が望めると推察された。

原料堆肥および成型堆肥の含有成分を表5に示した。回収資材に多く含有しているT-P₂O₅、T-K₂O、T-MgO、T-CaOは、造粒成型化により堆肥中の含有量を高める傾向が示された。特に、T-P₂O₅は成型堆肥に8.5%含まれており、原料堆肥よりも1.1%多かった。回収資材を堆肥に添加することで、リン酸含有量の多い堆肥が製造できることが明らかとなった。



□ 16mm以上 □ 8～16mm □ 4～8mm □ 2～4mm □ 1～2mm ■ 1mm未満

図8 成型堆肥の粒度分布

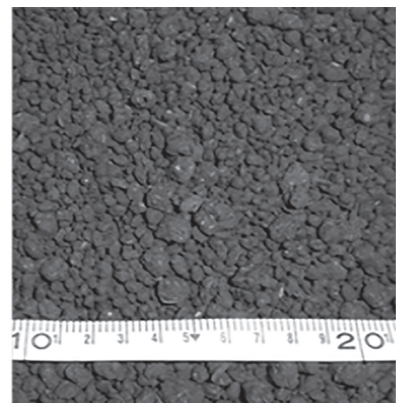


図9 成型堆肥の外観

表5 原料堆肥および成型堆肥の含有成分

	水分 (%)	T-N (%)	T-P ₂ O ₅ (%)	T-K ₂ O (%)	T-MgO (%)	T-CaO (%)
原料堆肥	38.0	3.3	7.4	2.7	3.6	4.3
成型堆肥	35.9	3.1	8.5	2.9	4.4	4.8

水分以外は乾物換算

5. 成型堆肥の肥効性評価

コマツナとチンゲンサイを用いた生育試験について、収穫時の葉丈を調査したところ、コマツナでは無施用区で平均19.7 cm、原料堆肥区で平均26.2 cm、成型堆肥区では平均26.1 cmであり、試験区間に有意差はなかった（表6）。一方、チンゲンサイでは無施用区で平均18.4 cm、原料堆肥区で平均20.4 cm、成型堆肥区では平均22.7 cmであり、成型堆肥区で高い結果となったが、成型堆肥区と原料堆肥区間に有意な差はなかった。収穫時の新鮮重量を調査したところ、コマツナでは無施用区で平均22.9 g、原料堆肥区で平均43.7 g、成型堆肥区では平均44.3 gであり、成型堆肥区と原料堆肥区は同等程度であった（表7）。一方、チンゲンサイでは無施用区で平均29.1 g、原料堆肥区で平均46.2 g、成型堆肥区では平均77.2 gであり、成型堆肥区で有意に高い結果となった。

各試験区におけるリン酸吸収量、リン酸利用率について表8に示した。リン酸吸収量は、コマツナ、チンゲンサイともに無施用区に比べて原料堆肥区、成型堆肥区で有意に高かった。成型堆肥区のリン酸吸収量はコマツナで4.7 kg/10 aであり、原料堆肥区の3.7 kg/10 aに比べて高い結果となったが有意差はなかった。一方、チンゲンサイでは成型堆肥区で2.4 kg/10 aであり、原料堆肥区の1.3 kg/10 aに比べて有意に高い結果となった。成型堆肥区でリン酸吸収量が高くなったのは回収資材に含まれる高濃度のリン酸が影響

した可能性がある。また、無施用区のリン酸吸収量は土壌のみからのリン酸供給であることから、原料堆肥区と成型堆肥区で投入されたリン酸量との割合からリン酸利用率を算出したところ、成型堆肥区ではコマツナで18.2%、チンゲンサイで13.6%であり、原料堆肥区に比べてそれぞれ1.4倍、2.7倍高い結果となった。原料堆肥区に比べて成型堆肥区でリン酸利用率が高くなった要因として、荒川（2012）は（1）成型堆肥は土壌中で崩壊せずそのままの形態で保持されるため、土壌中へのリン酸溶出が長く継続すること、（2）堆肥の分解過程で生じる低分子有機酸や腐植酸は土壌のリン酸吸着能を減じる効果があり、それにより堆肥中リン酸の土壌への吸着が抑制され、作物への可給性が担保されたことを報告している。本試験で製造した成型堆肥は高濃度のリン酸を含有していることから、作物がリン酸を長期的かつ十分に利用することができた可能性がある。また、多くの作物は根の可塑性によって局所的なリン酸の吸収を行うことが知られており、特にコマツナでは「リン獲得根伸長」と呼ばれる積極的なリン酸吸収を行うことが報告されている（Nanzyoら2002、2004）。荒川（2012）の試験においてもコマツナの根が成型堆肥に絡みついているのが観察されている。成型堆肥から直接リン酸を吸収できたこともリン酸利用率が高くなった要因と考えられた。以上の結果から、成型堆肥のリン酸肥効は高いことが示唆された。

表6 コマツナおよびチンゲンサイの収穫時葉丈

	無施用区	原料堆肥区 (20株3反復の平均値：cm)	成型堆肥区
コマツナ	19.7 ^{n.s.}	26.2 ^{n.s.}	26.1 ^{n.s.}
チンゲンサイ	18.4 ^a	20.4 ^{ab}	22.7 ^b

異符号間に有意差有り $p < 0.05$ （多重比較Tukey法）
n.s.は有意差が無いことを示す

表7 コマツナおよびチンゲンサイの収穫時新鮮重

	無施用区	原料堆肥区 (20株3反復の平均値：g/1株当たり)	成型堆肥区
コマツナ	22.9 ^a	43.7 ^{bc}	44.3 ^c
チンゲンサイ	29.1 ^a	46.2 ^b	77.2 ^c

異符号間に有意差有り $p < 0.05$ （多重比較Tukey法）

表8 コマツナおよびチンゲンサイのリン酸吸収量および利用率

	リン酸含量 (mg/g)		リン酸吸収量 (kg/10 a)		リン酸利用率 (%)	
	コマツナ	チンゲンサイ	コマツナ	チンゲンサイ	コマツナ	チンゲンサイ
成型堆肥区	14.0	12.7	4.7 ^c	2.4 ^c	18.2	13.6
原料堆肥区	10.8	8.9	3.7 ^{bc}	1.3 ^b	12.8	5.0
無施用区	9.6	7.6	2.0 ^a	0.7 ^a	-	-

異符号間に有意差有り $p < 0.05$ （多重比較Tukey法）

ま と め

養豚排水処理用に検討したドロマイト石灰は、添加率0.1 DW/V%程度で排水中の色度低減、リン除去に有効であることが示された。また、処理後に回収したドロマイト石灰（回収資材）はリン酸を高濃度に含有することから、リン酸肥料として利用できる可能性がある。さらに回収資材は堆肥の結着材として利用することも可能であり、モルタルミキサーなど市販の攪拌機を用いることで容易に造粒成型化が図れる。高濃度のリン酸を含有する成型堆肥は、コマツナおよびチンゲンサイの施用においてリン酸の肥効向上に効果があることが示された。ドロマイト石灰は循環資源としても利用価値が高いものと推察された。

ドロマイト石灰の販売価格は20 kg袋当たり2240円（2022年9月時点）である。資材の有効添加率を0.1 DW/V%とした場合、排水量1 m³処理当たりの必要資材量は1 kgであり、処理コストは112円となる。なお、活性炭吸着法では色度を75%程度低減するのに必要な活性炭添加率は1%であり、排水量1 m³処理当たりの必要資材量は10 kg、単価600円/kgとした場合の処理コストは6000円となる（鈴木ら2006）。CSHに関しては資材単価が明らかになっていないものの、ドロマイト石灰と同等の効果に必要な有効添加率は0.15 DW/V%程度であり、ドロマイト石灰に比べて多くの資材が必要である。処理装置の導入コストやメンテナンス性を考慮していないため一概に比較できないが、ドロマイト石灰は処理に伴う所要添加量が少ないことから、ランニングコスト面で有利となる可能性がある。

処理装置から回収したドロマイト石灰を肥料として販売できれば、処理コストへの負担軽減につながる可能性がある。リン酸肥料である重焼りん肥46%の2022年8月の全国平均価格は20 kg袋当たり4105円である（農林水産省大臣官房統計部2022）。コマツナを対象とした場合、リン酸の施肥基準は10 a当たり12 kgであり、リン酸肥料の消費量は約26 kg（5340円相当）/10 aと試算される。一方、回収したドロマイト石灰をリン酸肥料として利用できた場合、排水処理の副産物であるため資材コストは無償である。肥料価格が高騰している現在、減肥による肥料コストの削減は重要な課題である。また、堆肥の造粒成型化に利用することで作物の肥効向上が期待できることから、堆肥の需要喚起や耕畜連携の促進にもつながる可能性がある。

文 献

荒川祐介、2012、堆肥のペレット成型がそのリン酸肥効に及ぼす影響、日本土壤肥科学雑誌83 (3) : 249-255

- 長谷川輝明・杉本清美・明戸剛・三浦啓一・美濃和信孝・山下恭広・田中康男、2014a、畜舎排水の高度処理に適した非晶質ケイ酸カルシウム水和物（CSH）の開発、日本畜産学会報85 (3) : 329-336
- 長谷川輝明・杉本清美・細谷肇、2014b、モルタルミキサーを利用した牛ふん堆肥の造粒技術の検討、日本畜産環境学会誌13: 36-43
- 長谷川輝明・田中康男、2014、畜産排水高度処理からの回収資材を活用した堆肥造粒技術、日本畜産学会報85 (3) : 351-355
- 宮崎成生・大村裕顕、1997、生石灰処理による豚ふんの粒状肥料化（第1報）製造方法及び製品の性質、栃木県農業試験場研究報告46: 19-28
- Mori T, Sakimoto M, Mori T, Sakai T, 1997、Decolorization of wastewater from a livestock barn using andosols, *Animal Science Technology* 68(10) : 940-947
- Nanzyo M, Shibata Y, Wada N, 2002、Complete contact of brassica roots with phosphorus fertilizer in a phosphorus-deficient soil, *Soil Science and Plant Nutrition* 48(6) : 847-853
- Nanzyo M, Wada N, Kanno H, 2004、Phosphorus foraging root development of Brassica rapa nothovar, grown in a phosphorus-deficient nonallophanic Andisool, *Plant Soil* 265: 325-333
- 日本下水道協会、1997、下水試験方法、日本下水道協会、東京
- 農林水産省大臣官房統計部、2022、農業物価指数（令和4年8月）、農業物価統計調査 13
- 農林水産省農業環境研究所、1992、肥料分析法、日本肥糧検定協会、東京
- Suzuki k, Tanaka Y, Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y, Yasuda T, 2006、The technology of phosphorus removal and recovery from swine wastewater by struvite crystallization reaction, *JARQ* 40: 341-349
- 鈴木良地・増田達明・中谷洋・勝野伸吾・近藤一、2006、畜産浄化槽処理水に対する各種資材の吸着能力調査、愛知県農業総合試験場研究報告38 : 181-185
- 薬師堂謙一、2007、広域流通を可能にする成分調整成型たい肥の生産利用技術、畜産コンサルタント513 : 16-20
- Yamashita T, Aketo T, Minowa N, Sugimoto K, Yokoyama H, Ogino A, Tanaka Y, 2013、Simultaneous removal of colour, phosphorus and disinfection from treated wastewater using an agent synthesized from amorphous silica and hydrated lime, *Environmental Technology* 34: 1017-1025