

家畜ふん尿中リンのリサイクルと 豚舎汚水中リンの除去回収へのMAP結晶化反応の適用

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
畜産研究部門
畜産環境研究領域長

鈴木 一好

1. リン資源をとりまく状況

リンは石油などと同様、枯渇が懸念される有限資源である。リンは肥料三要素(窒素、リン酸、カリウム)の一つや工業原料などとして世の中で広く利用されているが、わが国には採掘が可能なリン鉱石は存在しないため、必要とするリンのほぼ全量を輸入に依存している。

しかし、1990年代はじめ頃にはわが国へのリン鉱石の最大の輸出国であった米国が1990年代半ばに自国のリン鉱石の輸出を禁止したことに加え、米国に替わる形でわが国への輸出量が増大していた中国もリン鉱石の輸出規制を強めている。化学肥料や食料・飼料などリン鉱石以外の形態で輸入されるリンもあるため直ちにリン不足が深刻化するとは思われないが、急速な経済発展を遂げる新興国における食料増産、およびバイオエタノール生産に絡む穀物増産に伴うリン消費量の増大などにより、リン鉱石の国際価格は近年高騰傾向にあり、これらに連動する形でリン酸肥料の価格も高騰し耕種農家経営に重大な影響を与えたことは周知のとおりである。

リン資源を持たないわが国では、従来からリンを高濃度で含有する廃棄物や汚水からのリン回収に関する研究開発が精力的に行われているが、最近のこれらの

事情により、このリン回収の動きは今後さらに強まるものと思われる^{1,2)}。

2. 家畜ふん尿中のリン

農林水産省の畜産統計によると、2017年2月現在、日本国内では乳用牛132万頭、肉用牛250万頭、豚935万頭、採卵鶏1.76億羽、ブロイラー1.35億羽が飼養されている。家畜に与えられる飼料にはリンが含まれているが、リンはカルシウムとあいまって骨や歯の主成分として重要であることに加え、細胞の分裂や成長、血液凝固、筋収縮、エネルギー代謝などさまざまな生体機能にも関与している。

わが国の標準的な家畜の飼養方法を畜種別にとりまとめたものが日本飼養標準であり、家畜の飼料は基本的にはこの日本飼養標準に基づき設計されるが、飼料中のリンのレベルについてもこの中で規定されている。しかし、家畜によって摂取された飼料中のリンが全て畜体に吸収されるわけではなく、吸収されなかったリンはふん尿として排せつされる。日本飼養標準に準拠して家畜を飼養した場合のふん尿量およびふん尿中リン量などの原単位が提唱されている³⁾が、これら原単位と前述の国内飼養頭羽数に基づき年間の発生量を推定すると、ふん尿量の総計は8047万トン(ふんは5529万トン、尿

表1 家畜ふん尿および家畜ふん尿中リンの年間発生量

畜種	飼養頭羽数 (万頭羽) H29年2月現在	家畜ふん尿量 (万t/年)			家畜ふん尿中リン量 (万t P/年)		
		ふん	尿	合計	ふん	尿	合計
乳用牛	132	1,682	499	2,182	1.48	0.08	1.56
肉用牛	250	1,690	620	2,309	1.32	0.06	1.38
豚	935	755	1,399	2,154	2.33	0.86	3.19
採卵鶏	17,637	762	-	762	3.19	-	3.19
ブロイラー	13,492	640	-	640	1.43	-	1.43
合計	-	5,529	2,518	8,047	9.75	1.00	10.75

は2518万トン)となり、ふん尿中リン(P)量の総計は10.8万トン(ふん中は9.8万トン、尿中は1.0万トン、 P_2O_5 の形態では総計24.6万トン)と算出される(表1)。わが国では多くの場合、排出されたふん尿は固形分(ふんの大部分)と畜舎汚水(ふんの一部、尿、畜舎洗浄水などが混じりあったもの)に分けられたのち、固形分は堆肥化処理のち堆肥として農地にてリサイクル利用され、畜舎汚水は水質汚濁防止法等の法令に則り浄化処理されたのちに河川等に放流される。

3. 堆肥中のリン

わが国においてもっとも代表的な家畜ふんの処理方法は堆肥化である⁴⁾。堆肥化処理の目的は、家畜ふん中の有機物を微生物の働きによって好氣的に分解・変化することで、悪臭が少なく雑草の種子や病原菌を死滅させた良質有機質肥料を生産し、有機性資源リサイクルに貢献することとされている。家畜ふんを堆肥化する技術の基本部分は既に確立され、広く用いられている⁵⁾。

堆肥中のリン(P_2O_5)濃度は畜種ごとに異なるが、全国の堆肥センターの家畜ふん堆肥1502点の成分分析結果の平均値

±標準偏差として報告された乳用牛 $1.8 \pm 1.1\%$ 、肉用牛 $2.6 \pm 1.2\%$ 、豚 $5.6 \pm 2.8\%$ 、採卵鶏 $6.2 \pm 2.5\%$ 、ブロイラー $4.2 \pm 1.8\%$ といったデータにもあるとおり、特に豚と鶏の堆肥で高い傾向にある^{6,7)}。家畜ふん堆肥を作物栽培に用いる場合は、栽培に用いる土壌を分析することで把握した土壌中養分量等に基づき、リン(リン酸)はもちろんそれ以外の窒素やカリウムなどの肥料成分の不足分について考慮し、堆肥および化学肥料のバランスを適正化することで、施用量を決めることが求められている⁸⁾。

4. 畜舎汚水中のリン

畜舎汚水が発生するのは主に養豚経営と酪農経営であり、特に養豚経営で発生する豚舎汚水は高濃度の水質汚濁物質を含んでいる。豚舎汚水中におよそ100~400mg/L程度含まれているリンもそれら物質の一つで、豚舎におけるふんの汚水への混入率を一律30%と仮定した場合、国内で豚舎汚水中に排出される総リン量は年間約1万トンと試算されている⁹⁾。

このように養豚経営をはじめとする畜産業では大量のリンが畜舎汚水中へ排出されるが、リンは水質汚濁物質であるた

め、畜舎汚水を放流する場合には水質汚濁防止法および各都道府県の条例等により規制値以下にまで低減化させることが義務付けられている¹⁰⁾。

しかし、畜舎汚水中のリンは、汚水中に存在する限り除去すべき水質汚濁物質であるが、汚水中から取り出し回収することができれば資源となりうるポテンシャルを持っている。畜舎汚水中のリンを除去するために現在広く用いられているのが凝集沈殿法であるが、この方法ではリンは脱水しにくい汚泥のかたちで回収され、そのリサイクル利用にはいくつもの工程とコスト負担が必要となる。そのため、凝集沈殿法に替わる、除去回収したリンのリサイクル利用が容易で畜産経営でも実施可能な技術として、ジルコニウムフェライト樹脂吸着法、非晶質ケイ酸カルシウム水和物(CSH)吸着法、およびMAP(リン酸マグネシウムアンモニウム)法などが開発されている。

5. ジルコニウムフェライト樹脂吸着法

ジルコニウムフェライトを主成分とする粒状の担体を吸着資材として用いる。この資材はリン酸を優先的に吸着し、機械的強度と耐薬品性に優れ、再生して繰り返し利用できる。この資材を充填したカラムに畜舎汚水を流して汚水中のリン酸を吸着させる。リン酸が飽和になった資材は約7%の苛性ソーダ溶液内でリン酸を脱離させ、この溶液を再結晶法で精製するとリン酸ナトリウム($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)の結晶が回収できる。この結晶は

肥料としての利用は困難であるが、工業原料としての利用が期待されている¹¹⁾。

6. 非晶質ケイ酸カルシウム水和物(CSH)吸着法

吸着資材として用いるのは非晶質ケイ酸カルシウム水和物(CSH)で、金属表面処理剤などに用いられるフッ化物を生産する過程で副産物として発生する非晶質シリカと消石灰を原料に合成されたものである。この資材は多孔質で比表面積が大きく、リン酸とカルシウムの不溶性化合物であるヒドロキシアパタイトとしてリンを吸着する能力に優れた資材で、高アルカリ性を示す。畜舎汚水用に改良されたものは、リンの除去・回収のみならず、排水の脱色および消毒の効果を同時に発揮することが明らかにされている。

具体的には、活性汚泥処理した污水にCSHを添加し反応槽に下部から流入させたのち、反応槽でCSHの粉末を沈殿させ、処理水は反応槽上部から流出させる。処理水はアルカリ性を示すため炭酸ガスを吹き込んで中和する。沈殿したCSHはポンプで引き抜き、専用の布袋に入れると水分が抜けて回収できる。回収CSHは肥料効果のある可溶性リン酸を約20%含んでおり普通肥料の一種である副産リン酸肥料の公定規格である15%を超えることに加え、回収CSHには有害成分はほぼ含まれておらず植害試験でも有害性は見られなかったことから、肥料利用に問題のないことが確認されている。現在、実規模プラントによる農家実証試験が進行中であるが、早期の実用化が期待される^{12,13)}。

7. MAP 法

7-1. 豚舎汚水の成分特性

日本飼養標準・豚¹⁴⁾に準拠して配合した飼料を豚に与えると、リンと同様マグネシウムも畜体によって吸収しきれず、吸収されなかったマグネシウムはふん尿中に排せつされ、一部は豚舎汚水中に移行する。そのため、豚舎汚水はリンと同様マグネシウムも高濃度で含有することになるが、これら成分の多くが豚舎汚水中では水溶性の形で存在する。また、窒素もふん尿中に大量に排出されるが、豚舎汚

水中ではその大部分が水溶性アンモニウムの形で存在する^{15, 16)}。日本国内の養豚事業所(16戸)の汚水処理施設にて採取した豚舎汚水原水の分析結果を表2に示す。養豚事業所ごとにばらつきはあるものの、汚水のpHが低いほど汚水中の水溶性リン酸や水溶性マグネシウムの濃度が高い傾向がある。

表2 日本国内の養豚事業所(16戸)にて採取した豚舎汚水原水の分析値

養豚事業所	pH	各成分濃度 (mg/L)			
		浮遊物質	水溶性リン酸態リン	水溶性マグネシウム	水溶性アンモニウム態窒素
NO. 1	5.7	-	217	83	3,780
NO. 2	6.2	-	121	68	373
NO. 3	6.2	27,000	360	182	1,700
NO. 4	6.5	13,000	210	167	566
NO. 5	6.7	4,800	161	119	543
NO. 6	7.0	4,400	103	57	1,700
NO. 7	7.0	-	68	63	779
NO. 8	7.4	4,100	72	46	532
NO. 9	7.5	14,000	74	19	730
NO. 10	7.7	-	158	12	2,722
NO. 11	7.9	20,000	28	15	1,900
NO. 12	7.9	2,700	50	17	880
NO. 13	8.1	4,900	125	7	1,100
NO. 14	8.3	8,400	170	5	3,300
NO. 15	8.4	13,000	21	13	1,800
NO. 16	8.4	4,100	16	23	1,800

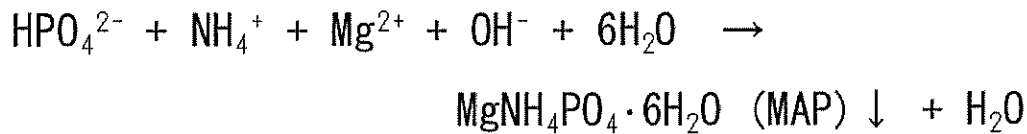


図1 MAP 反応

豚舎汚水の処理施設などではその配管や設備などにスケールと呼ばれる結晶状の物質が付着し、配管の閉塞などのスケールトラブルが発生することが古くから知られている¹⁷⁾。また、豚ふん尿を主な投入原料とするメタン発酵施設においてもメタン発酵槽内や配管系に結晶状物質が付着するトラブルが報告されている¹⁸⁾。これはMAP反応(図1)により豚舎汚水中に含まれる水溶性のリン酸、マグネシウム、アンモニウムが勝手に結晶化し、MAPが生成されることなどが原因と考えられる。

しかし、これらの水溶性成分を高濃度で含んでいるという豚舎汚水の成分特性を利用し、MAP反応などの結晶化反応を人工的に誘導することができれば、豚舎汚水中の水溶性リン酸を不溶化させて除去回収することができる。化学反応としてのMAP反応はpHが8~9付近で最大となることが知られており^{19, 20)}、豚舎汚水でも何らかの手段で汚水のpHを8以上に上昇させることでMAP反応を誘導することが可能である^{21, 22)}。

なお、養豚事業所によっては豚舎汚水のpHがはじめから8を超えている場合もある。高pH環境下ではMAP反応が進行し大部分の水溶性リン酸は既に結晶化していることから、水溶性リン酸濃度がかなり低くなっているケース(表2のNo.15やN0.16)が見受けられる。しかし、高pH環境下においても水溶性リン酸がかなり残っているケース(表2のN0.13やN0.14)もある。これは、高pH環境下でMAP反応が進行した結果、もともと汚

水中にあった水溶性マグネシウムをほぼ使い切ってしまったことで、これ以上MAP反応が進まない状態となっていると考えられるため、汚水に不足成分である水溶性マグネシウムを添加することにより、更なるMAP反応の誘導が可能と考えられる。

7-2. MAPリアクターによる汚水中リン酸の結晶化

豚舎汚水のpHを8以上の弱アルカリ性に上昇させる手段としては、一般的には苛性ソーダなどのアルカリ剤の添加が考えられる。しかし、多くの養豚事業所では専任の汚水処理技術者はおらず農家の方が豚の世話の合間に豚舎汚水処理設備の運転管理をしていることもあり、劇物であるアルカリ剤の使用はなるべく避けたい。アルカリ剤を用いないpHの上昇手段として曝気法がある。これは汚水を曝気(エアレーション。空気を吹き込む操作)することで汚水中に溶存している炭酸ガスを追い出してpHを上昇させる方法^{23, 24)}で、豚舎汚水でも曝気によりpHを8.5程度にまで上昇させることが可能である²⁵⁾。

MAPの比重は1.71と大きいことが知られており、容易に沈殿分離することができる。そこで、曝気により汚水のpHを上昇させてMAP反応を誘導する「曝気部」と、生成されたMAPや汚水中の有機固形物を沈殿分離する「沈殿部」を併せ有する装置として、MAPリアクターを考案した(図2)²⁵⁾。実証用MAPリアクター

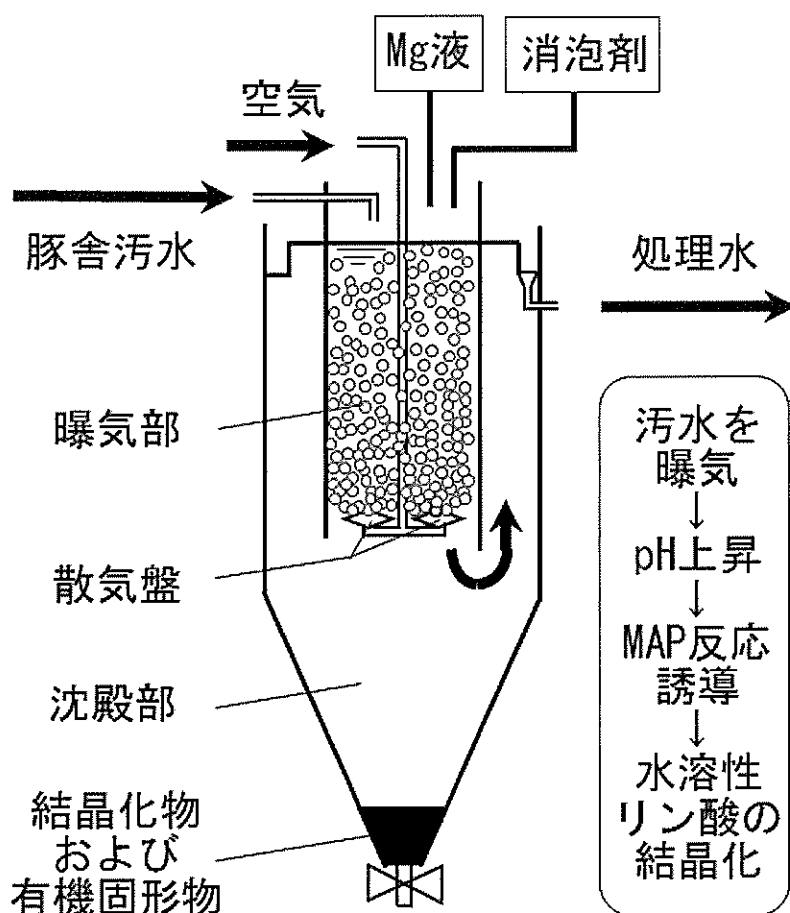


図2 MAPリアクターの概略図

(処理量は約 $4\text{m}^3/\text{日}$ 、曝気部での滞留時間は 3.6 時間) による実証試験の結果、供給した豚舎汚水原水の pH は 7.4 ± 0.1 (平均値 \pm 標準偏差) なのに対し、曝気の効果により曝気部内では約 8.0 ± 0.2 にまで上昇した。豚舎汚水原水中の全リン濃度は $138 \pm 33\text{mg/L}$ (水溶性リン酸濃度は $70 \pm 16\text{mg/L}$) と高くしかも大きく変動していたが、曝気筒内において良好に MAP 反応が進行して水溶性リン酸が結晶化し沈殿分離されたため、処理水中では全リン濃度は $29 \pm 5\text{mg/L}$ (水溶性リン酸濃度は $19 \pm 5\text{mg/L}$) と低く保たれていた²⁶⁾。また、汚水中のアンモニア性窒素濃度も MAP 結晶への取り込みや曝気部での曝気によ

るストリッピング(追い出し)作用などにより、 $3 \sim 4$ 割低減化されていた。さらに、汚水中の不溶性有機物や結晶化物などの指標である浮遊物質(SS)濃度も当該リアクターの沈殿機能により大幅に低減化されていた²⁷⁾。

この技術は豚舎汚水中に元来含まれている成分をそのまま利用するため、原則として薬剤の添加は不要である。しかし、曝気に際して発泡が激しい場合は消泡用油などの添加が有効で、汚水処理用のシリコンオイルはもちろん、市販の食用油でも十分な消泡効果が得られる。

豚舎汚水中リンの除去効率をさらに向上させたい場合は、MAP リアクターの曝

気部内へマグネシウム液を添加することが有効である。マグネシウム液として、例えばフレーク状の工業用塩化マグネシウム(純度98%程度)を攪拌機などにて水に溶解して利用すること²⁸⁾はもちろん、海水から食塩を製造する工程で得られる副生成物のニガリ(約30%塩化マグネシウムの液状のものが市販されている)を利用することもできる。また、海水の入手が容易な場合には、海水そのもの(約0.12%の水溶性マグネシウムを含んでいる)を利用しても、必要添加量は多くなるものの同様の効果を得ることができる^{29, 30)}。さらに、酸化マグネシウムなどのアルカリ性マグネシウム資材を污水に添加し、マグネシウム供給とpH調整を同時に実施して結晶化反応を促進させる方法も提唱されている³¹⁾。

このMAPリアクターは、污水中リンの除去回収はもちろんスケールトラブルの防止も目的に加え、豚舎污水处理システムの最初の段階(活性汚泥処理の前段階)への設置を想定している。そのため、研究開発の当初は、MAP等の結晶化物を豚舎污水中の微細な有機固形物と一緒にMAPリアクター底部へ沈殿させることで回収し、回収後に脱水、堆肥化および濃度分析を経てリサイクル利用することを想定していた。

7-3. 付着回収法による豚舎污水中リンの回収

実証用MAPリアクターを用いた試験において、曝気部の内壁や送気管の水没部に大量の結晶状物質の付着が見られた。分析の結果、これらは比較的純度の高いMAPであると考えられた。このことから、MAPの付着しやすい材料をリアクターの曝気部内に浸漬させることにより、比較的純度の高いMAPを付着・成長させて

回収できるのではないかと考え、付着回収法を考案した。

付着回収用部材(MAPを付着回収するための支持体)について検討するため、6種(ステンレス、アルミニウム、銅、塩化ビニル、アクリル、ゴム)の板状材料(粗面および滑面)を実証用MAPリアクターの曝気部内に約1月間浸漬した。その結果、程度の差こそあれ、粗面であればいずれの材料でも良好にMAPが付着・成長することが示された。これらいずれのケースにおいても、付着したMAPは風乾後に軽くブラッシングすることで容易に剥ぎ落とすことができた³²⁾。

付着回収用部材を設計するに当たり、構造体の強度保持を考慮するとともに軽量化させるため、ステンレスワイヤーメッシュを採用した。高さ80cm、半径10cm、20cm、30cmの3層カラムのワイヤーメッシュ(表面はヤスリで粗面に加工)にて構築した付着回収用部材(図3)をMAPリアクターの曝気部内へ浸漬させることで実施した実証試験(図4)では、70日間の浸漬により純度がおおよそ95%のMAPを65kg回収できたケースもあった。浸漬期間など試験条件を変えて実証試験を繰り返した結果、投入污水中の水溶性リン酸濃度などがばらついたこともあるが、1m³の豚舎污水から回収できたMAP量は32~171gと結構幅があった²⁶⁾。付着回収用部材から剥落させたMAPは、ビニールシートなどの上に薄く広げて天日にさらすことで、夏季は2~3日、冬季は3~7日程度で乾燥させることができた。

リアクター底部へ沈殿分離させることにより得られるMAPは、大量の有機固形物と混じる形で回収されるため、農地でのリサイクル利用に先立ち脱水や堆肥化などの手順を経ることが必要であった。しかし、付着回収法により得られるMAP



図3 実証用の付着回収用部材



図4 付着回収用部材表面に付着したMAP
(付着MAPを一部剥落させてある)

は純度がおおよそ95%（残りの5%は微細な有機固形物）であるためこれらの操作を必要とせず、乾燥させるだけで直ちにリサイクル利用することができる。このようにMAP結晶化反応を利用した豚舎汚水からのリン除去回収技術の核心部分についてはほぼ確立することができた³³⁾。

7-4. 導入コスト低減化などの試み

この技術は専任の汚水処理技術者のいない養豚事業所においても豚の飼養管理の合間に運転管理できる程度に簡易であることを目標に開発され、その点については一定の成果を得ることができたと思われる。しかし、この技術を養豚現場に普及させるためには設備コストの低減化が必要である。そこで、MAPリアクターをゼロから新設するのではなく養豚事業所の汚水処理設備に設置されている既設の流量調整槽や最初沈澱槽などに曝気部（ブロワも含む）などを付加するかたちへの改造や、安価な材料や廃物材料でリアクターを製造することなどで設備の低コスト化を試みるとともに、養豚事業所において実証試験を実施した³⁴⁾。

既設の流量調整槽に曝気設備などを付加して簡易リアクター（付着回収用部材は陶器材料）を構築した事例³⁵⁾、既設の最初沈澱槽に仕切りと曝気設備などを付加して簡易リアクター（付着回収用部材はエキスパンドメタル）を構築した事例³⁰⁾、市販の塩ビ材料を加工して簡易リアクター（付着回収用部材は金カゴ）を構築した事例^{28, 36)}、飼料タンクを転用することで簡易リアクター（付着回収用部材は金カゴ）を構築した事例³⁷⁾いずれも、若干の程度の差はあるものの、MAPリアクターとほぼ同等の機能を発揮できることが明らかとなった。

簡易リアクターを構築するために必要なコストは、母豚100頭規模（肥育豚1000頭規模）の一貫経営養豚農家（1日あたり約10m³の豚舎汚水が発生）を想定した場合、リン除去のみを目的とした場合（リアクターのみ）は85～100万円、除去と回収の双方を目的とした場合（付着回収用部材込み）は100～150万円とすることができた（いずれも原価ベース）。なお、運転コストには電気代で5～9万円/年、薬剤（ニガリ液）代は3～9万円/年程度であった。

技術のブラシアップや適用拡大に向けた試みも実施されており、凝集剤添加および脱水処理により固形分濃度を低下させた豚舎汚水を用いることでMAPリアクターでの反応効率を向上させることが可能であること^{37, 38)}、活性汚泥処理を経た処理水でも水溶性リン濃度が高ければMAP反応の適用は可能だが、この場合水溶性マグネシウムに加え水溶性アンモニウムも不足する場合があるので、これら成分の添加を考慮する必要があること³⁹⁾、などが報告されている。

7-5. 得られたMAPの利用

付着回収法により得られるMAPの純度はおおよそ95%であるが、乾燥させる前にちょうど米を研ぐような要領で水により洗浄することにより、純度を99%程度にまで高めることができる⁴⁰⁾。いずれであっても、天日乾燥させた後、肥料会社等における加工を経ることなく、直ちに圃場にてリン酸肥料として利用できることが明らかにされている。

過リン酸石灰や重焼リンなどの市販のリン酸肥料よりもゆっくりと溶出すること、土壌のpHによりMAP中リン酸の溶出のパターンが異なりpHが低いほど早く溶出すること^{41, 42)}、市販のリン酸肥料

に比べタマネギ栽培に MAP が優れており、それ以外の作物(ニンジン、スイートコーン、キャベツ、レタスなど)でも MAP は市販のリン酸肥料と遜色ない肥効を示すこと、なども明らかにされている⁴³⁾。なお、MAP を 60°C以上の温度で加熱処理すると、MAP 結晶中の H₂O や NH₃ が揮散し肥料成分としての窒素分を失う⁴⁴⁾ ことに加え、MAP の結晶構造がくずれることで化学的性質(水難溶性、クエン酸溶解性)が変化し、市販のリン酸肥料よりもゆっくりと溶出する性質などを失う⁴⁵⁾ ので、注意が必要である。

また、釉薬などの陶磁器原料としても利用でき、特に鉄を発色剤とした茶系の釉薬として MAP を添加することで独特の発色効果が得られることや、ユズ肌様の仕上がりが可能となることなどが明らかにされている⁴⁶⁾。

今後、この回収された MAP をどのように流通させるかが課題となるが、1つの養豚事業所にて回収できる MAP 量はそう多くはないことが見込まれることから、まとまった量を必要とする肥料会社への販売は難しいものと思われる。一方、養豚事業所は多くの場合、自家製造した豚ふん堆肥の耕種農家への流通経路を既に持っているケースが多いため、この流通経路を活用することにより、必要な手続きを経た上で、養豚事業所から耕種農家へといった具合に地産地消的に MAP を流通させることが望ましいのではないかと考えている。

8. おわりに

家畜ふん尿のうち固形分(ふん)中のリンの大部分は堆肥化プロセスを経て農地などにて既にリサイクル利用されている。しかし、この堆肥の流通システムから外れている畜舎汚水中のリンは水質汚濁物

質などとして扱われているのが現状である。本稿にて紹介した畜舎汚水中リンの除去回収技術は、そのリサイクル利用を可能にするものと考えられるため、流通経路の構築を含め、早期の実用化が期待される。

なお、今回紹介した MAP 結晶化反応を利用した豚舎汚水からのリン除去回収技術は、その基本部分は農林水産省の委託プロジェクト研究「農林水産バイオリサイクル研究」(2002~2005 年度)等により農研機構畜産草地研究所にて構築され、さらには技術の簡易化・低コスト化や回収 MAP の利用手段について農林水産省の競争的研究資金である「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」(2006~2008 年度)により、佐賀県畜産試験場、神奈川県畜産技術センター(現：神奈川県農業技術センター畜産技術所)、沖縄県畜産研究センター、神奈川県農業技術センター、沖縄県農業研究センター、佐賀県畜産技術センターの6研究機関と連携することで、その研究開発を行ったものである。

参考文献

- 1) 原田靖生, 2009, リン資源の動向と代替資材活用の可能性, 農林水産技術研究ジャーナル, 32(6), 5-10.
- 2) 大竹久夫, 2010, リン資源のリサイクルをめぐる状況と課題, 資源環境対策, 46(5), 14-23.
- 3) 畜産環境整備機構, 1998, 家畜ふん尿処理・利用の手引き, 畜産環境整備機構, 3-5.
- 4) 羽賀清典, 2000, ふん尿処理と堆肥製造の現段階と展望, 畜産の研

- 究, 54(1), 132-137.
- 5) 中央畜産会, 2001, 堆肥化施設設計マニュアル, 中央畜産会, 1-246.
 - 6) 古谷 修, 2007, 肥料成分供給家畜としての豚と鶏, 畜産の研究, 61(2), 354-258.
 - 7) 畜産環境整備機構, 2007, 家畜ふん堆肥の肥効を取り入れた堆肥成分表と利用法, 畜産環境整備機構, 36-37.
 - 8) 畜産環境整備機構, 2010, たい肥と土壤養分分析に基づく調整施肥設計の手引き, 畜産環境整備機構, 1-58.
 - 9) 鈴木一好, 2004, 豚舎污水からのリン回収技術, 関東畜産学会報, 54(1), 11-19.
 - 10) 金澤正尚, 2011, 家畜排せつ物法とその後の畜産環境, 続マニユア・マネージメント, 羽賀清典監修, デーリィマン社, 12-17.
 - 11) 道宗直昭, 原田泰弘, 根津昌樹, 福森功, 古山隆司, 名川 稔, 共和化工, 2003, 畜舎排水浄化処理水のリン除去装置, 畜産草地研究成果情報, 2, 257-258.
 - 12) 長谷川輝明, 2013, 非晶質ケイ酸カルシウム水和物(CSH)を利用した畜舎污水の高度処理技術, 平成25年度家畜ふん尿処理利用研究会資料, 農研機構 畜産草地研究所, 59-65.
 - 13) 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 (非結晶ケイ酸カルシウム水和物から合成した担体を用いた排水の脱色、リン除去、消毒の同時処理), *Environmental Technology*, 34, 1017-1025.
 - 14) 中央畜産会, 2013, 日本飼養標準・豚2013年版, 農業・食品産業技術総合研究機構編, 中央畜産会, 1-144.
 - 15) 鈴木一好, 2002, 結晶化法による豚舎污水中リンの除去および回収, 日本養豚学会誌, 39(2), 101-111.
 - 16) 川村英輔, 田邊 眞, 鈴木一好, 2011, リン結晶化法を用いた豚舎污水からのリン回収の可能性, 日本養豚学会誌, 48(1), 1-9.
 - 17) Booram CV, Smith RJ, Hazen TE, 1975, Crystalline phosphate precipitation from Anaerobic animal waste treatment lagoon liquors (家畜ふん尿の嫌気性ラグーン処理液から生成したリン酸塩沈殿物), *Transactions of the ASAE*, 18, 340-343.
 - 18) 白石 誠, 2012, 岡山県畜産バイオマス利活用実証施設の稼動状況について, 平成24年度家畜ふん尿処理利用研究会資料, 農研機構 畜産草地研究所, 79-83.
 - 19) Borgerding J, 1972, Phosphate deposits in digestion systems (嫌気性硝化システムにおけるリン酸塩沈殿物), *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 44(5), 813 - 819.
 - 20) Doyle DJ, Parsons AS, 2002, Struvite formation, control and recovery (ストルバイトの生成、制御、回収), *Water Research*, 36(16), 3925-3940.
 - 21) Suzuki K, Tanaka Y, Osada T, Waki M, 2001, Concentrations of phosphorous, Mg and Ca in swine wastewater and possibility of removing these components through crystallization (豚舎污水のリン、

- マグネシウム、カルシウム濃度および結晶化法による回収の可能性), *Animal Science Journal*, 72(1), 72-79.
- 22) Suzuki K, Watanabe T, Lam V, 2001, Concentrations and crystallization of phosphate, ammonium and minerals in the effluent of bio-gas digesters in the Mekong Delta, Vietnam (ベトナムのメコンデルタ地方におけるメタン発酵消化液中のリン酸塩、アンモニウム塩、無機塩類の濃度および結晶化), *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)*, 35(4), 271-276.
- 23) 脇 信利, 近藤久幸, 西田政司, 1987, エアレーションによる消化槽脱離液からのリン除去の検討, 用水と廃水, 29, 636-640.
- 24) Battistoni P, Fava G, Pavan P, Musacco A, Cecchi F, 1997, Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallization without addition of chemical: preliminary results (化学薬品無添加の結晶化による嫌気性液状物からのリンの回収; 予備試験結果), *Water Research*, 31(11), 2925-2929.
- 25) Suzuki K, Tanaka Y, Osada T, Waki M, 2002, Removal of phosphate, magnesium and calcium from swine wastewater through crystallization enhanced by aeration (曝気によって結晶化を促進した豚舎汚水からのリン酸塩、カルシウム、マグネシウムの回収), *Water Research*, 36(12), 2991-2998.
- 26) Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y, Yasuda T, Waki M, 2007, Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device (実証用結晶化反応槽とストルバイト集積装置による豚舎汚水からのリンの除去および回収), *Bioresource Technology*, 98(8), 1573-1578.
- 27) 鈴木一好, 脇屋裕一郎, 古田祥知子, 川村英輔, 竹本 稔, 安里直和, 眞境名元次, 2008, 汚水からのMAP回収, 家畜ふん焼却灰からのリン回収の研究, 平成20年度家畜ふん尿処理利用研究会資料, 農研機構 畜産草地研究所, 51-61.
- 28) 川村英輔, 田邊 眞, 竹本 稔, 上山紀代美, 鈴木一好, 2011, 簡易型リン回収装置の回分式活性汚泥浄化槽への適用, 日本養豚学会誌, 48(2), 58-67.
- 29) 鈴木直人, 稲嶺 修, 宮城正男, 鈴木一好, 2008, 結晶化法による豚舎汚水中リン除去回収技術の高濃度汚水貯留槽への適用方法の確立 (1)リン結晶化促進マグネシウム剤としての海水利用の検討, 沖縄県畜産研究センター試験研究報告, 45, 49-52.
- 30) 稲嶺 修, 鈴木直人, 安里直和, 2009, 沖縄県における結晶化法による豚舎排水からのリン除去回収の研究 ~高濃度汚水の既存浄化処理施設への適用技術と結晶化促進剤としての海水利用, 養豚の友(日本畜産振興会), 487, 48-53.
- 31) 日置雅之, 榊原幹男, 2012, アルカリ性マグネシウム資材を用いた畜産排水中リン低減化技術, 愛知県農業総合試験場研究報告, 44, 109-114.
- 32) Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y, 2005, Recovery of phosphorous from swine wastewater through crystallization (結晶化法による豚舎汚水からのリンの回収),

- Bioresource Technology*, 96(14), 1544-1550.
- 33) 鈴木一好, 2005, MAP 付着回収法による豚舎汚水からのリン回収技術, 畜産の研究, 59(1), 98-104.
- 34) 鈴木一好, 2007, MAP 結晶化法による有限資源であるリンの豚舎汚水からの除去回収技術, 畜産の研究, 61(2), 275-280.
- 35) 脇屋裕一郎, 坂井隆宏, 古田祥知子, 関戸正信, 河原弘文, 鈴木一好, 2009, 陶器部材を用いた豚舎汚水からのリン除去・回収技術, 日本養豚学会誌, 46(3), 159-170.
- 36) 川村英輔, 田邊 眞, 竹本 稔, 上山紀代美, 鈴木一好, 2011, 塩ビ管を用いた簡易型 MAP 回収装置によるふん尿分離豚舎汚水中のリン回収技術の検討, 日本養豚学会誌, 48(1), 10-19.
- 37) Kawamura E, Tanabe M, Takada H, Murota Y, Shiroisi A, Takayanagi N, Turuhashi T, Suzuki K, Nishimura O, 2012, Recovery of phosphorus from feces-and-urine-separated swine Wastewater with struvite accumulation device (ふん尿分離した豚舎汚水からストルバイト集積装置によるリンの回収), *The Japanese Journal of Swine Science*, 49(3), 117-127.
- 38) 脇屋裕一郎, 石田 稔, 内田敏博, 古田祥知子, 関戸正信, 河原弘文, 下平秀丸, 川村英輔, 鈴木一好, 2010, ふん尿汚水を凝集剤添加および機械分離した脱水濾過液を利用した MAP 法によるリン除去・回収技術, 日本養豚学会誌, 47(4), 187-197.
- 39) 脇屋裕一郎, 鶴橋 亨, 高柳典弘, 卜部大輔, 河原弘文, 永瀨成樹, 2013, 畜産排水の活性汚泥処理水を対象とした MAP 法によるリン除去・回収技術, 日本養豚学会誌, 50(3), 128-136.
- 40) Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y, Yasuda T, 2006, The technology of phosphorous removal and recovery from swine wastewater by struvite crystallization reaction (ストルバイト結晶反応による豚舎汚水からのリンの除去および回収技術), *Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)*, 40(4), 341-349.
- 41) 真境名元次, 比嘉明美, 亀谷 茂, 鈴木直人, 鈴木一好, 2007, 豚ふん尿から回収されたリン酸結晶の肥料評価: ガラス繊維ろ紙埋設法による溶出特性, 日本土壤肥料学会講演要旨集, 53, 148.
- 42) 上山紀代美, 竹本 稔, 田邊 眞, 川村英輔, 鈴木一好, 2008, 豚ふん尿から回収されたリン酸結晶 (MAP) の肥料評価: 第3報 黒ボク土における肥効特性, 日本土壤肥料学会講演要旨集, 54, 144.
- 43) 竹本 稔, 上山紀代美, 真境名元次, 2009, 豚舎汚水由来 MAP のリン酸資材としての特性, 最新農業技術 畜産 vol.2, 農山漁村文化協会, 311-315.
- 44) 鈴木一好, 黒田和孝, 花島 大, 福本泰之, 安田知子, 2006, MAP の加熱乾燥処理条件, 日本畜産環境学会誌, 5(1), 37.
- 45) 竹本 稔, 上山紀代美, 真境名元次, 鈴木一好, 2008, 豚舎汚水由来 MAP のリン酸資材としての特性 平成20年度家畜ふん尿処理利用研究会資料, 農研機構 畜産草地研究所, 63-71.

46) 古田祥知子, 関戸正信, 脇屋裕一郎,
河原弘文, 鈴木一好, 2009, 結晶
化法によるリン除去・回収技術の
標準活性汚泥処理設備への適用
～陶磁器系材料を利用した低コ

スト・高効率MAP付着回収用部
材の開発と特性評価～, 佐賀県
窯業技術センター平成20年度研
究報告書, 1-6.