

# 豚尿排水の耕畜連携循環利用

秋田県立大学 システム科学技術学部

金澤 伸浩

## 1. はじめに

畜産経営は、経済効率化や農業技術の改善が進んだことで、安価で安全な食料を食卓に提供し、豊かな食生活を支えている。一方で、家畜排せつ物による悪臭や水質汚濁といった従来から存在する環境問題は、環境対策技術が確立された現在においても完全に解決されたわけではない。畜産農家では水質汚濁防止法の基準を満たす排水処理を行って水環境保全に努めている。しかし、排水処理にかかるコスト負担は大きく、資本力の弱い中小規模農家における排水処理は、なお改善努力が必要な状況にあるところが多い。水質汚濁防止法では硝酸性窒素類（硝酸性窒素＋亜硝酸性窒素＋アンモニア性窒素×0.4）を100 mg/L以下にするように排水基準値を定めているが、畜産農業に対しては暫定基準値700 mg/Lを適用している。これは、排水処理能力が不十分な畜産施設が存在しているための対応で、畜産排水の適切な処理が課題となっている。

一方で、家畜排せつ物には窒素、リン酸、カリウムといった作物生産には欠かせない栄養塩が含まれており、排水として処理し、捨ててしまうことは大変もったいない。豚肉は1 kgを生産するには約4 kgの穀物を必要とし、牛肉は1 kgを生産するのに約10 kgの穀物を必要とすると言われる。世界的な人口増加が続き、食料不足が懸念される状況において食肉は贅沢な食料とも言えるが、贅沢を無駄にしないためには、生産された肉を余すところなく頂くだけでなく、生産時の排せつ物でさえも廃棄物ではなくバイオマスとして活用するような取り組みができることが望ましい。

バイオマスの利活用は、地域における循環利用が基本である。バイオマスの質量あたりの資源価値は小さいため、輸送によるエネルギー消費を抑えなければ、エネルギーやコストの面で利活用のメリットがなくなってしまうことが多くあるからである。その点において秋田県は、畜産施設の周辺は農地であることが多く、また他のバイオマスの利活用も進められており、地域内でのバイオマスの循環利用やバイオマスの複合的な利活用が実

施しやすい環境にある。

本稿では、養豚場から排出されるし尿排水（豚尿排水）に関係するバイオマスの循環利用方法について、二例を紹介する。一例は大仙市において、豚尿排水を曝気処理によって液肥に変えて、その液肥で生産した米を豚の肥育に利用する循環体系の確立を検討した結果である。もう一例は、廃食用油からバイオディーゼル燃料（BDF）を製造する際に発生する副生成物の粗製グリセリンを豚尿排水の窒素浄化に利用するための実験検討結果である。これらは地域で問題となっている廃棄物がバイオマスとして有効に循環利用できることを示す例である。

## 2. 豚尿排水の耕畜連携循環

### 1) 背景

豚尿排水は、水質汚濁防止法や家畜排せつ物法により、汚染物質濃度の規制や管理施設の基準が定められている。しかし、養豚農家にとって排水処理施設の建設費やランニングコストの負担は大きい。また国内の飼料自給率は25%と低く、飼料価格が長期的に上昇傾向にあることも経営上の不安材料になっている。一方で、耕種農家においても肥料価格が中長期的に上昇状況傾向にあること、米価の低迷、就業者の高齢化や未耕作地の増加など、問題は山積している。そのため、農林水産省は飼料自給率向上と高付加価値化を目的とした飼料用米の生産と利活用を呼びかけているが、耕種農家にとっては飼料用米の売価は安く、生産費の削減が課題となっている。

これらの問題の改善策として、豚尿排水を液肥化して有機質肥料として水稻栽培や野菜の水耕栽培等に用い、食料や飼料を生産する循環システムの構築を検討した。図1に示したように、豚舎から出る豚尿排水を排水処理施設において液肥化し、一部を水稻圃場に施肥して米を栽培して食用とするほか、飼料用米を栽培して豚の飼料として循環させる体系である。水稻栽培のみでは、一年中排出される豚尿排水を全て利用することはできないため、液肥を水耕栽培に利用して一年中生産

が可能な植物工場を作ることも想定している。このような循環体系を確立するためには、液肥生産施設の特性、液肥による作物の生育性、生産米の価値などを明らかにする必要があるため、循環体系の確立の中核となる農家、秋田県畜産試験場と協働で実証研究を行った。

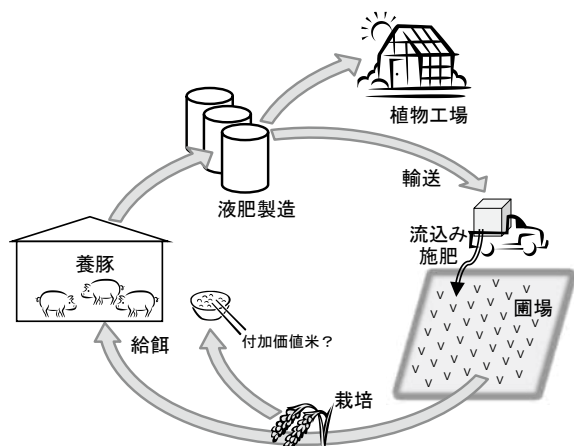


図1 豚尿液肥の循環利用体系図

## 2) 豚尿液肥の製造

豚尿排水の処理方法は、大きく分けてメタン発酵による嫌気性処理と曝気などによる好気性処理がある。嫌気性処理は、動力費がほとんど不要なことや発生するメタンを燃料として利用できるメリットがある。しかし、メタンを利用するには貯留タンクや発電機などの施設が必要であり、またメタン発酵を効率よく行うには一般に30℃以上の温度が必要である。そのため、冬期においては反応槽の加温にエネルギーが必要となる。

一方、好気性処理は、曝気にかかる動力費が大

きな経済的負担となるが、処理速度が大きいので、比較的短期間で有機物量を低減させることができる。また液肥を水稻に用いる場合、窒素はアンモニア態が望ましいが、葉物野菜などに用いる場合は硝酸態にする必要がある。好気性処理では、嫌気性処理では生じないアンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌による硝化反応が生じ、アンモニアを硝酸に変えることができる。また、処理水を液肥として利用できずに廃棄する場合においても、窒素が硝酸態になっていれば、脱窒処理を加えることで窒素の低減が可能となる。そのため、豚尿排水の処理としては、なるべくコストをかけない形で好気性処理を行う方が、応用範囲を広くできると考えられる。

調査検討を行った大仙市の養豚農家では、日本酒製造に使われていたホーロー製の酒樽（10m<sup>3</sup>）を6個直列に並べ、ブローで空気を吹き込む簡易曝気処理施設を自作して使用している（図2）。排水の施設内の滞留時間は2週間から4週間程度である。処理水質は季節によっても変動するが、有機物の分解は図3に示したように概ね第3槽までに完了する。窒素に関しては、第1槽から第2槽まではアンモニアが多いが第3槽以降では硝化が進んで亜硝酸や硝酸が増加する。

そのため、アンモニアを窒素源とする水稻では、第2槽を中心に液肥として利用すると効率が良い。葉物野菜等の水耕栽培には硝酸濃度が高い第6槽の利用が適している。曝気式の排水処理を一つの大きな槽で行っている施設もあるが、このような小型の槽を直列する方式は、液肥の成分を

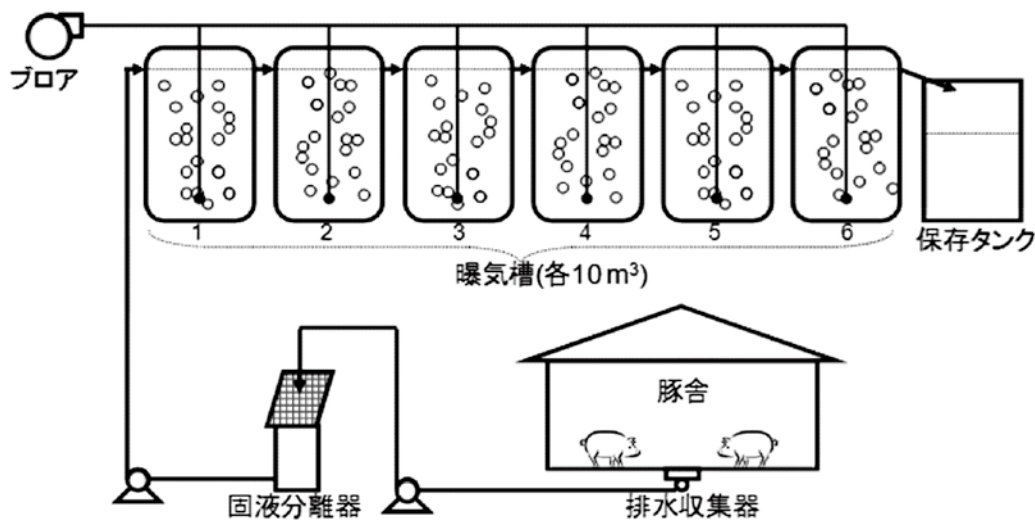


図2 豚尿排水の簡易曝気処理施設

選ぶことができるという面で有用である。

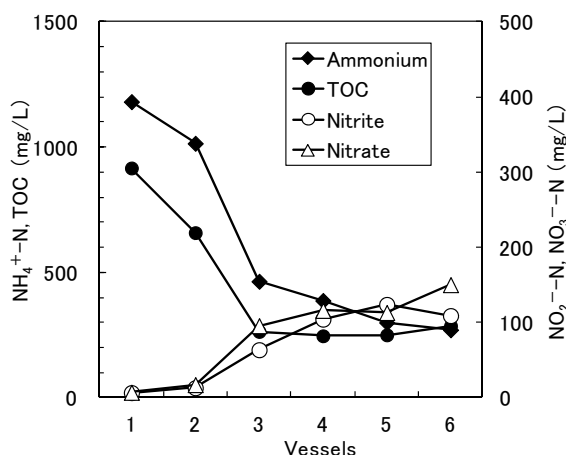


図3 各曝気槽の水質変化の例

### 3) 豚尿液肥による水稻栽培試験

豚尿排水を水稻栽培に利用する取り組みとしては、豚尿排水にリン酸や木酢などの酸を添加して、水稻栽培に用いた例がある（安西、1988；北田、島田、2008；須藤ら、2003）。酸添加は、pHを低下させることによりアンモニアの揮発を防ぎ、悪臭を低減することが主目的である。施肥の結果、化学肥料と同等以上の収量が得られる結果が報告されており（安西、1988；上野、1980）、豚尿排水が水稻栽培に利用できることが示されている。しかし、酸添加でpHを低下させるだけでは、アンモニアの揮発は抑制できても、低級脂肪酸やその他揮発性有機物の悪臭は軽減できず、施肥時においては配慮が必要である。また、pHを低下させると排水中の溶存炭酸がガスとなって発泡し、問題となるため、対策として消泡剤を添加する対応も検討されている（中村、佐藤、2002）。また、酸添加のみの排水を利用した場合、有機物が多く含まれるため、有機物分解に伴う土壌の還元により稲の生育不良が生じることが報告されている（安西、1988）。そのため、排水を好気処理して有機物量と悪臭を低減した処理水を液肥として用いれば、これら問題は改善されると考えられる。

そこで、大仙市において上述の曝気処理した豚尿液肥を用いて水稻（あきたこまち）への施用試験を行った。豚尿液肥は、簡易曝気処理施設から運搬用1 m<sup>3</sup>コンテナにポンプで移液し、トラックで圃場まで運搬した。液肥はトラック上からホースで圃場の水口付近に重力流下させ、水路から圃

場に流入する水の勢いで圃場内に拡散させた。試験は、基肥の半分と追肥全量を豚尿液肥に代えた場合（液肥米）と化学肥料を用いた場合（慣行米）について生育性の比較を行った。生育性の試験結果のうち、2012年の収量の結果を図4に示したが、豚尿液肥を用いた場合の収量は、化学肥料を用いた場合と大きく変わらなかった。施肥量は、全窒素量またはアンモニウム量を基準に決定したが、全窒素量で合わせた場合は肥切れが生じ、収量が落ちることがあったため、アンモニウム量で合わせると良いことが明らかになった。また、豚尿液肥は肥効が発現する早さが化学肥料とは異なるため、施肥のタイミングを化学肥料と変える必要が生じる場合もある。特に追肥においては葉色を観察しながら、早めに施肥するなどの対策が必要な場合もある。しかし、豚尿液肥の肥料としての効果は十分に確認され、豚尿排水の利用方法の一つになり得ることが明らかになった。

また、豚尿液肥を用いた水稻栽培についての経済的評価を行った結果、豚尿液肥の価格を無料とすれば、液肥の輸送費は化学肥料の削減費用を下回るため、耕種農家にとって米の生産費削減にも寄与することが明らかになっている。

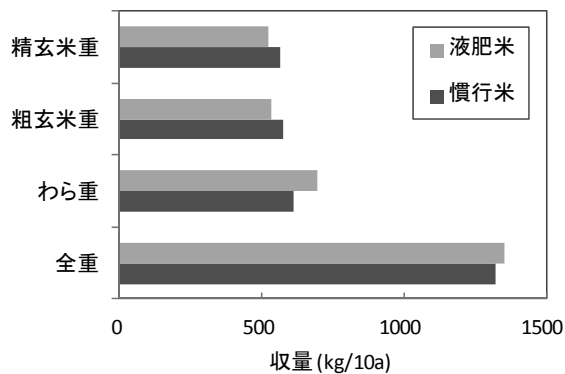


図4 豚尿液肥による水稻栽培試験結果

### 4) 豚への米の給餌試験

豚尿液肥で栽培した米を粉碎し、通常の配合飼料に15%混ぜて、出荷前3週間の豚に給餌する試験を行った。豚の成長は通常の配合飼料の場合と同等であった。また、秋田県畜産試験場におけるその後の試験では、米を質量比最大70%まで配合して肥育した結果、飼料をよく食べるために発育が優れ、肉質も通常の配合飼料を給餌した場合と遜色がないことが確認されている（鈴木、佐々木、

2013)。また官能検査結果も米を給餌した豚肉の方がおいしいとする回答が多いなど、食味面でも同等以上であることが明らかになった。米の給餌により、豚肉を高付加価値化する取り組みは実際に県内外で行われている。したがって、豚尿液肥で飼料用米を生産して、豚に給餌することについて、技術的な問題はない。ただし、米を豚に給餌するには米を粉砕して配合飼料を作る必要があるが、大手飼料メーカーは東北では主に太平洋側に立地しているため、米配合飼料の製造を依頼する飼料メーカーとの距離によっては、コストや環境負荷の低減という観点での検討が必要になる。場合によっては、農家の近隣で粉砕と配合を行うシステムを確立することが望ましくなるであろう。

### 5) 豚尿液肥による水耕栽培

通年排出される豚尿排水を利用するためには、水耕栽培で葉物野菜などを生産することが選択肢になる。そこで、豚尿液肥を水耕栽培用の窒素量とほぼ同じになるように希釈して、サンチュの栽培を試みた。その結果、硝酸態窒素が少ない状態では市販の培養液と比べて生育性は劣ったが、曝気に伴い培養槽内で硝化が生じると、順調に育つことが明らかになった。ただし、ホウレンソウなど野菜の種類によって育たないものがあり、その原因を究明する必要がある。収穫後の液肥の成分は、窒素、リン、カリウムのいずれの成分も減少しており、水耕栽培は水質浄化の観点からも有効な方法と言える。今後、豚尿液肥の用途として水耕栽培を実用化するためには、栽培条件についての詳細な検討を積み重ねる必要がある。

## 3. BDF廃液を用いた豚尿排水の浄化

### 1) 背景

廃食用油を集め、バイオ燃料であるBDFを製造・利用する取り組みは全国で見られ、秋田県内でも各地にBDFプラントが作られている。BDFは、廃食用油を原料に、植物油をメチルアルコールでエステル化して得られた粗製BDF（脂肪酸メチルエステル+不純物）をイオン交換樹脂による吸着または水による洗浄で精製して製造するが、エステル化の際に副生成物として粗製グリセリンが発生する（図5）。この粗製グリセリンは、助燃剤や発酵促進剤として利用されることもあるが、近隣で需要先を確保して循環利用を行っている事業者

は多くない。需要がない場合は、産業廃棄物として処分することになり、BDF製造事業者の経済的負担は大きくなる。そのため、粗製グリセリンの用途開発は一つの課題になっている。

一方、畜産排水の処理にあたって、水質上で問題が大きいのは窒素類である。前述のように、排水を液肥化して全量を作物栽培に用いることができれば良いが、液肥の生産速度と液肥の需要が一致するとは限らず、処理水を環境中に排出するためには硝酸性窒素類の水質基準を達成できる方法も担保しておく必要がある。硝酸性窒素類の処理方法で、よく用いられるのが硝化脱窒法である。好気性環境下でアンモニウム（ $\text{NH}_4^+$ ）を硝化して亜硝酸（ $\text{NO}_2^-$ ）や硝酸（ $\text{NO}_3^-$ ）に変えた後、嫌気条件で脱窒を行う。脱窒は、硝酸や亜硝酸が電子を受け取って、一酸化二窒素（ $\text{N}_2\text{O}$ ）や窒素（ $\text{N}_2$ ）に還元される反応であるが、脱窒には電子の供給源となる電子供与体が必要である。一般に電子供与体にはメタノールなどの有機物が用いられるが、排水の処理のためにメタノールなどの薬剤を購入して利用するのは経済的ではない。そこで、この電子供与体として粗製グリセリンの利用を試みた。

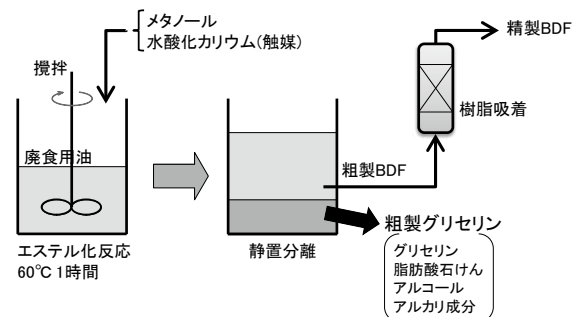


図5 BDFの製造プロセス

### 2) 豚尿排水硝化液の脱窒実験

豚尿排水を曝気して硝化を行った処理液（硝化液）について、脱窒における粗製グリセリンの電子供与体として機能を評価するため、フラスコスケールでの実験を行った。豚尿排水の硝化液は、由利本荘市内の養豚場にある豚尿排水処理槽のものを使用した。この処理槽では400 $\text{m}^3$ のタンクに豚尿排水を入れ、間欠曝気による排水処理を行っている。曝気処理によってアンモニウム濃度は約

1/10に減少する一方で、亜硝酸濃度が高くなっている。

実験は、図6のように硝化液と電子供与体となる物質を入れゴム栓をした三角フラスコを恒温槽で30℃に保ち、一定時間ごとにサンプリングポートからサンプルを吸い出して成分濃度の経時変化を測定した。電子供与体は、粗製グリセリンを濃度を変えて加えたほか、無添加の場合と、脱窒によく使われるメタノールを添加した場合について比較対照として試験した。脱窒に伴って発生する気体は空気が逆流しないようにしたガス抜きから逃し、フラスコ内の嫌気条件が保たれるようにした。

その結果、図7に示したように電子供与体を加えない場合は、脱窒が起こらず全窒素濃度は減少しなかったが、メタノールと粗製グリセリンを加えた場合では脱窒が生じた。特に粗製グリセリンは、メタノールよりも全窒素濃度の減少が早く、脱窒が効率よく生じることが明らかになった。最終的な硝酸性窒素濃度は100mg/Lを下回り、一般基準を達成できることが明らかになった。実験範囲の結果においては、粗製グリセリン100gで少なくとも1m<sup>3</sup>の排水が処理できることになる。

### 3) 粗製グリセリンの電子供与体としての活用法

以上のように、粗製グリセリンは豚尿排水の脱窒に用いる電子供与体として優れた性能を持つことが実験から明らかになった。現地での実証試験はまだ実施できていないが、18L灯油タンクに入る量の粗製グリセリンがあれば、約200m<sup>3</sup>の排水処理が可能と考えられるので、1日あたり数m<sup>3</sup>の排水しか出ない中小規模の養豚場で必要となる粗製グリセリンの量は少なく、BDF製造施設から排水処理施設までの輸送は容易である。脱窒処理方法は、曝気により硝化が進んだ状態の槽において、曝気を止めて粗製グリセリンを添加し、5日程度放置するだけで脱窒は完了するものと考えられる。ただし、粗製グリセリンには有機物が多く含まれることから、過剰に加えると有機物が残存するので、脱窒後にもう一度曝気を行うと有機汚濁の懸念が減少する。

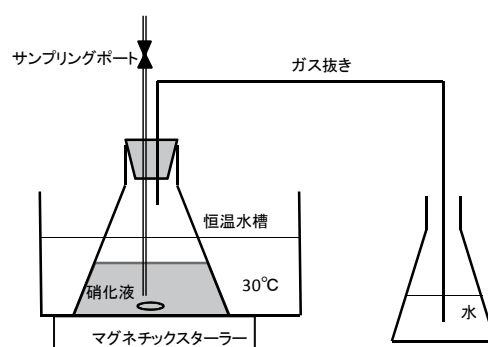


図6 脱窒実験装置図

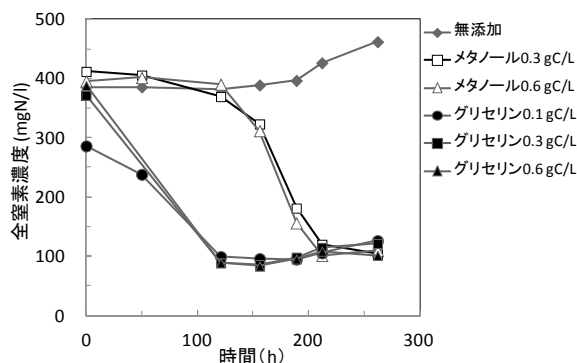


図7 脱窒における電子供与体の比較

## 4. まとめ

以上、豚尿排水を曝気処理して製造した豚尿液肥が水稻栽培や水耕栽培に利用できること、またBDF製造時の副産物を畜産排水の浄化処理に利用する複合的なバイオマス利用が実現可能なことを紹介した。八郎湖流域においても上述のような畜産排水の循環利用を推進すれば、八郎湖の水質改善に寄与する可能性はあるが、実際のところ、八郎湖流域における畜産農家件数は多くなく、畜産排水が八郎湖の水質に及ぼす影響の有無は明らかではない。したがって、このようなバイオマスの循環利用が水質浄化の面からは意義があるかどうか分からないが、八郎湖流域における環境意識の向上や地域に住む方々の連帯の強化には寄与するものと考えられる。八郎湖対策の究極的な目標は、八郎湖の水質改善を図ることのみならず、八郎湖流域で暮らす人々や訪れる人々に満足を提供する環境を実現することである。環境意識の共有や人のつながりの強化は、工学的な対策と共に重要な課題であり、バイオマスの循環利用という活動を通して、これらの強化を目指すことも八郎湖流域の環境問題の改善には有意義なものになると考えている。

## 謝 辞

本稿の内容は、以下の方々のご協力で得られた結果に基づいている。豚尿液肥の製造や施肥試験を中心となって実施された農家の伊藤基氏、調査や実施にご協力頂いた農家の齋藤均氏、鈴木耕悦氏、板垣功氏、施肥や水耕栽培、経済評価に関して技術的指導を下された秋田県立大学の金田吉弘氏、小川敦史氏、嶋崎善章氏、水稲栽培や豚の肥育の調査や調整にご尽力頂いた秋田県職員の佐々木浩一氏、鈴木人志氏、佐藤寛子氏、石井清一氏、相澤はるか氏、由利奈美江氏、BDF事業でご協力頂いたあきた菜の花ネットワークの鈴木秀雄氏、実験を行った研究室卒業生の金村静香氏、佐々木由美氏、有馬淳樹氏にこの場を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 安西徹郎 (1988) 水稲に対する豚尿の施用法に関する研究, 千葉県農試特報, 16, 1-50.
- 上野正夫 (1980) 水稲に対する家畜糞尿の施用効果, 山形農試研報, 14, 69-81.
- 北田敬宇, 島田義明 (2008) 作物に対する家畜ふん尿処理液の肥料としての有効利用法, 石川県農業総合研究センター研究報告, 28, 19-29.
- 鈴木人志, 佐々木浩一 (2013) 飼料用米及び穀殻炭給与が肥育豚に与える影響 (第1報) ~飼料用米給与試験~, 秋田畜試研報, 27, 17~22.
- 須藤和久, 新井一博, 茂木浩徳, 福田博文 (2003) 飼料稲栽培における家畜尿液肥の利用, 群馬畜試研報, 10, 55-64.
- 中村修, 佐藤剛史 (2002) 佐賀県杵島地域における家畜尿有効利用の取り組みと課題—環境コストから資源循環型農業へ—, 長崎大学総合環境研究, 4 (2), 1-9.