液状肥料利用促進のための品質安定・簡易分析技術に関する研究

志賀玲子・飯尾恒・須藤立

Research on quality Stabilization and Simple Analysis Technology for Promoting the Use of Liquid Fertilizers

Reiko SHIGA，Wataru IIO，Ryu SUTOU

要　約

液肥の利用促進のため、液肥品質のばらつき要因の探索と、肥料成分値を畜産現場で簡易に推測できる簡易分析技術の開発、飼料作物における液肥利用の効果検証を行った。県内養豚農家 65 戸から 122 件の液肥を採取するとともに、液肥製造に関するアンケート調査を行った結果、液肥の肥料成分は、凝集剤を適正添加しているかどうかにより数値が変動しやすくなることが示唆された。一方、無機態窒素は液肥製造の方法によるばらつきが少なく、畜産現場でも電気伝導度（EC）の測定値を用いて簡易的に濃度の推定ができ、無機態窒素ベースで液肥の施肥量が決定できる可能性が示された。凝集剤を添加していない液肥については、りん酸が屈折率、カリウムが EC の測定値を用いて濃度を推定できることが示唆された。飼料作物において、液肥を利用した場合も一番草、二番草共に化学肥料と同等の収量が得られ、液肥が化学肥料の代替として利用可能であることが示された。

キーワード　液状肥料、品質安定、簡易分析

緒　言

畜産経営で発生する家畜排せつ物は、「家畜排せつ物管理の適正化および利用の促進に関する法律（家畜排せつ物法）」が 1999 年に施行され、家畜排せつ物の適正な管理と堆肥等の利用促進が図られている。家畜排せつ物法は、目標年度の 2008 年度には管理基準をほぼ達成しており、家畜排せつ物は適正な管理方法で処理されている[1)]。全国の養豚業においては、2019 年時点で 76%がふん尿分離で家畜排せつ物を処理しており、そのうちの尿処理は、71%が浄化－放流にて処理を行っている[2)]。

本県の霞ケ浦流域は養豚業が盛んな地域であり、本県の豚飼養頭数の約 60％が飼養されているが、霞ケ浦流域においては「茨城県霞ケ浦水質保全条例」により厳しい排水基準が設けられている。豚舎からのふん尿由来の排水（豚舎排水）には窒素やリンが多く含まれており、養豚農家が本条例に則り豚舎排水を霞ケ浦流域に放流するには、多大な労力とコストが必要となる。このため、本県では 2023 年の戸数ベースで約 85％の養豚農家が浄化－放流以外の処理を行っているが、霞ケ浦流域では養豚農家の多くが豚舎排水を液状肥料（液肥）として農地で利用している。しかし、液肥は液状で扱いづらい上、生産農家毎に品質や成分のばらつきが大きいことから、耕種農家の積極的な利用は少ない状況である。

近年､浄化－放流している豚舎排水処理水を pH や電気伝導度（EC）から簡易に成分値を推測・把握する技術が開発されたが[3)]、液肥にはまだ応用されていない。また、液肥の利用方法や効果について、本県において農作物では試験が行われてきたが、飼料作物ではほとんど行われておらず、今後の液肥利用拡大に向けて検証する必要がある。

そこで本研究では、液肥の製造条件を収集し、分析した成分値から品質のばらつき要因を探索するとともに、畜産現場で簡易に測定可能な項目から液肥の成分値を簡易に推定できる技術の開発、および飼料作物における液肥利用効果の検証を目的とした。

材料および方法

1　液肥の製造方法調査

液肥品質の安定化を目指すため、アンケート調査を行い液肥製造に関する情報を収集した。

1）供試試料

2022 年 6 月から 2024 年 12 月にかけて、県内

養豚農家 65 戸、延べ 122 件の液肥を採取すると同時に、製造方法に関するアンケート調査を実施した。なお、豚舎排水の最終利用方法が、農地利用（液肥）や蒸発散、放流である農家を対象とした。通常は蒸発散、放流を行っている農家であっても、施設のトラブル等により液肥として利用する可能性があることから、これらの農家の処理水も対象として分析を行った。

２）方法

上述期間に各農林事務所の畜産振興課の協力を得て、液肥採取およびアンケート調査を実施した。

３）調査項目

アンケートの調査項目は、処理頭数、畜舎ふん尿分離の有無、固液分離の有無、凝集剤添加の有無（添加の場合は凝集剤名）、曝気槽容積、曝気方法（間欠曝気の場合は曝気時間）、曝気日数又は１日の流入量等とした。なお、処理頭数は豚舎排水を液肥として処理している頭数とし、飼育ステージの異なる豚については家畜汚水処理施設設計・維持管理マニュアル[4)]に基づき、全頭肥育豚に換算した。

２　ばらつき要因探索と成分値の簡易分析技術の開発

液肥品質のばらつき要因を解明するとともに、畜産現場で測定可能な pH、EC および屈折率（Brix 値）の測定値から、液肥の成分値を簡易に推定できる技術を開発するため、液肥の肥料成分等を分析し、各測定値との関係性を調査した。

１）供試試料

１の１）で採取した試料を用いた。（122 件）

２）方法

採取した液肥 122 件の成分値を分析し、同時に pH や EC、屈折率を測定した。成分の分析値と各測定値との関係性を調査し、ばらつき要因を探索するとともに、畜産現場で簡易に測定可能な pH、EC および屈折率から各肥料成分等の検量線を作成した。

３）液肥の分析項目

pH、EC および屈折率は、pH メーター（HORIBA、ｐH-22B）、電気伝導率計（HORIBA、EC-33B）、ポケット糖度・屈折計（アタゴ、PAL-BX/RI）を用いて測定した。水分率、灰分は肥料等試験法に準じ測定した。窒素全量はケルダール法（ACTAC、スーパーケル 1600）を用いて測定し、りん酸全量および加里全量、石灰全量、苦土全量、銅全量、亜鉛全量は乾式灰化法にて抽出し、モリブデン青吸光光度法、炎光法、フレーム原子吸光法（島津製作所、SPCA-6210）にて測定した。有機炭素は燃焼法（ジェイ・サイエンスラボ、JM1000CN）で測定し、C/N 比を算出した。発芽率（富士平工業、たねピタ！）および BOD（ACTAC、圧力式 BOD センサーシステム）を測定した[5、6)]。臭気は、臭気強度を定義する６段階の用語を利用し、０を「臭いを感知しない」、５を「非常に強く感じる」と定義し、試験担当者の感覚で採点を行った。

３　飼料作物における液肥利用効果の検証

飼料作物であるイタリアンライグラスへ液肥を施用した際の収量等への影響を検証するため、基肥と追肥に化学肥料を施肥する対照区と、基肥と追肥に液肥を施用する試験区を設け栽培試験を行った。

１）供試試料および資材

２倍体のイタリアンライグラスを用いて液肥の飼料作物への効果を検証した。栽培試験はポット試験および圃場試験にて実施した。ポット試験では 1/5000a（0.02 ㎡）ワグナルポットおよび黒ボク土（刀川平和農園、黒土）を用いて行った。圃場試験では茨城県畜産センター飼料作物試験圃場にて１㎡の区画で行った。なお、試験圃場の土質は細粒赤色土であり、本県で一般的な黒ボク土とは異なる[7)]。その他詳細は表１に示した。液肥は１の１）供試試料にて採取した液肥を用い（表２）、化学肥料は硫酸アンモニウム（窒素 21%）、過リン酸石灰（リン酸 17.5%）、塩化カリ（カリウム 60%）を用いた。

２）方法

施肥量および播種量、栽培方法は茨城県飼料作物栽培基準に則り行った[10)]。2022 年播種品種は令和５年度飼料作物等高能力新品種選定調査における早生標準品種である「はたあおば」を用いたが、2023 年試験準備時には種子の販売が中止となっていた。このため、令和６年度年度飼料作物等高能力新品種選定調査における早生標準品種である同じ２倍体の「ニオウダチ」を用いて試験を行った（表１）。

液肥の施用量は、液状コンポスト生産利用の手引き[11)]に基づき、10a あたり５t 相当を液肥

施用限度量とし、ポットおよび圃場の面積当たりの限度量を算出して施用した。試験区の肥料成分は、不足分を化学肥料で補い、対照区と施肥量を揃えて栽培試験を実施した。各年の施肥条件を表３、４に示した。

３）調査項目

一番草と二番草においてそれぞれ乾物収量と一般成分を分析した。乾物収量の検定については乱塊法、一般成分の分析は近赤外分光法（BRUKER、TANGO-R）を用いて行った。試験圃場の土壌成分は「土壌・作物栄養診断マニュアル」に基づき、硝酸態窒素濃度は「粗飼料の品質評価ガイドブック」に基づき分析した[12、13]。

表１　イタリアンライグラス栽培試験詳細

	2022年播種	2023年播種
品種	はたあおば	ニオウダチ
播種量	圃場 2g　　ポット 0.04g	圃場 2g　　ポット 0.04g
期間	2022年11月～2023年5月	2023年11月～2024年5月
播種日	2022年11月9日	2023年11月6日
一番草刈取り	2023年4月21日	2024年4月23日
二番草刈取り	2023年5月12日	2024年5月17日

表２　使用した液肥の情報

播種年	2022		2023	
施用時期	基肥	追肥	基肥	追肥
農家名	A農家	B農家	A農家	C農家
処理頭数	4000	3060	4000	1650
DM(%)	0.58	0.34	0.13	0.18
BOD(mg/L)	88	70	46	検出限界以下
アンモニア態窒素(mg/L)	350	250	291	1
亜硝酸態窒素(mg/L)	5	0	13	0
硝酸態窒素(mg/L)	0	410	9	132
曝気日数(日)	5	14	5	70

※　処理頭数は肥育豚頭数に換算したもの

※　曝気日数は肥育豚1頭が１日に出す汚水量を10Lとして計算した[8、9]

表３　2022 年栽培試験の施肥条件

(kg/10a)

施用時期	区画		窒素	リン酸	カリウム
基肥	対照区	化学肥料	12	12	12
	試験区	液肥	1.8	0.3	9.5
		化学肥料	10.2	11.7	2.5
3月追肥	対照区 試験区	化学肥料	5	0	5
4月追肥	対照区	化学肥料	5	0	5
	試験区	液肥	3.1	0.3	3.2
		化学肥料	1.9	0	1.8

※　窒素は無機態窒素、液肥の窒素は有機態窒素を除く

※　施肥日　基肥　11月2日（液肥）、11月9日（化学肥料）
3月追肥　3月10日、4月追肥　4月21日

表４　2023 年栽培試験の施肥条件

(kg/10a)

施用時期	区画		窒素	リン酸	カリウム
基肥	対照区	化学肥料	12	12	12
	試験区	液肥	1.5	0.1	2.8
		化学肥料	10.5	11.9	9.2
3月追肥	対照区 試験区	化学肥料	5	0	5
4月追肥	対照区	化学肥料	5	0	5
	試験区	液肥	0.7	1.2	1.3
		化学肥料	4.3	0	3.7

※　窒素は無機態窒素、液肥の窒素は有機態窒素を除く

※　施肥日　基肥　10月30日（液肥）、11月6日（化学肥料）
3月追肥　3月11日、4月追肥　4月23日

結果および考察

１　液肥の製造方法調査

県内養豚農家 65 戸にアンケート調査を行った結果を表５、６に示した。中央値については、処理頭数 1,200 頭、曝気槽容積 176 ㎥、曝気日数 13 日であった(表５)。平均値と標準偏差については、処理頭数 1,651±1,485 頭、曝気槽容積 337±477 ㎥、曝気日数 20±24 日と、液肥の製造条件は非常に大きなばらつきが認められた。各処理工程の有無について、畜舎ふん尿分離や固液分離を行っている農家は 80%を超えていたが、凝集剤添加の有無については半数に分かれた（表６）。凝集剤添加により生成される凝集物の除去には脱水機を用いた固液分離が一般的に用いられている。このため、本アンケートで固液分離を行っていると回答した

農家には、凝集剤を添加しない傾斜スクリーンや振動篩を使用している農家も約 30%含まれていると考えられた。曝気方法は、連続曝気が 56.9%、間欠曝気が 38.5%、無曝気が 4.6%であった。このことより 95.4%の農家が曝気処理を行っていることが分かった。

アンケート結果をもとに液肥を表６のとおり、ふん尿分離を行っている液肥･行っていない液肥、固液分離を行っている液肥・行っていない液肥、凝集剤を添加している液肥・添加していない液肥の６グループに分類した。

表５　各項目の最大値最小値と四分位数　(n=65)

	最小値	第1四分位数	中央値	第3四分位数	最大値
処理頭数(頭)	100	590	1,200	2,000	6,000
曝気槽容積(㎥)	0	91	176	424	2,669
曝気日数(日)	0	5	13	26	135

表６　各処理工程の有無の割合　(n=65)

	ふん尿分離	固液分離	凝集剤
有(%)	87.7	83.1	49.2
無(%)	12.3	16.9	50.8

２　ばらつき要因探索と成分値の簡易分析技術の開発

液肥 122 件の肥料成分等を分析し、pH、EC および屈折率との関係性を調査した結果、全ての液肥において、無機態窒素と EC との間に相関係数が 0.92 の強い相関が見られたが（図１）、窒素全量では相関係数が 0.53 と相関関係が弱くなった。同様に全ての液肥において、りん酸と屈折率およびカリウムと EC との間にそれぞれ相関係数 0.69 の相関があった（図２、３）。これらのことから、液肥の製造方法によらず無機態窒素濃度は EC から推定できる可能性があり、無機態窒素と比べて精度は低いものの、りん酸とカリウムの濃度についても屈折率と EC からそれぞれ推定可能であることが示された。

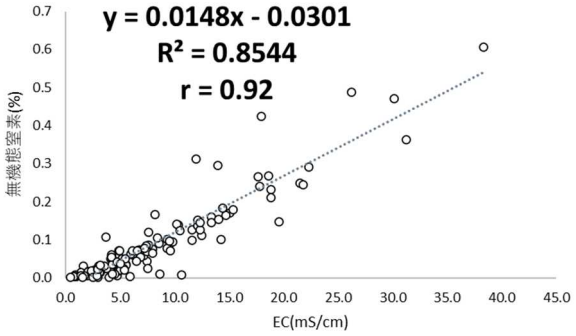

図１　無機態窒素と EC の相関（n=122）

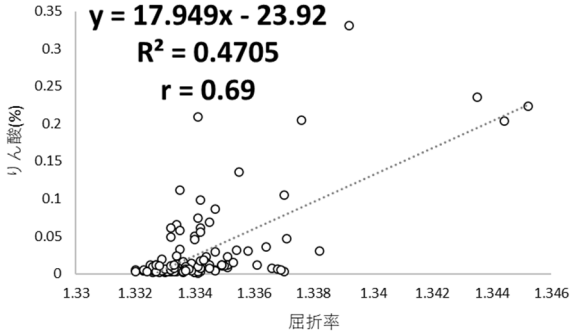

図２　りん酸と屈折率の相関（n=122）

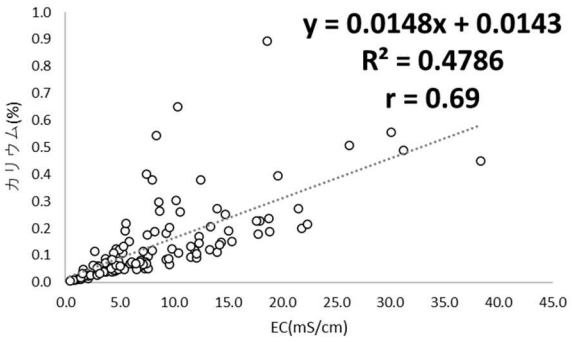

図３　カリウムとECの相関（n=122）

凝集剤を添加した液肥の肥料成分のばらつきを表７に示した。窒素全量と無機態窒素の変動係数に着目すると、窒素全量の変動係数の方が高く、有機態窒素が含まれた方が窒素成分のばらつきが大きかった（表７）。

表７　凝集剤添加液肥の肥料成分のばらつき　(n=76)

	窒素全量	無機態窒素	リン酸	カリ
平均	0.1572	0.0803	0.0070	0.1156
標準偏差	0.3990	0.0765	0.0061	0.1316
変動係数	2.5	1.0	0.9	1.1

畜舎排水の汚水処理においては、ふん尿分離の実施を前提にマニュアルが作成されている[4、14]。ふん尿分離を行った汚水には窒素全量で 21～27g/頭/日が含まれており、飼養状況によっては20%程度の誤差がある[4]。さらに凝集剤を添加することにより、有機態窒素を含む微細な懸濁物質まで除去することが可能であり、窒素全量の約 58%が除去できる[14]。凝集剤には適正な添加率があり、添加量が少ない場合は当然として、添加し過ぎた場合も懸濁物質の除去率は悪くなる[15]。しかし、凝集剤の適正な添加量は毎日の汚水中の懸濁物質濃度等により変化するため、除去率を一定に維持し続けることは難しい。このことから、凝集剤を添加した液肥では、除去される有機態窒素の量が変動するため、無機態窒素よりも有機態窒素を含む窒素全量のばらつきが大きくなったと考えられた。図１のように無機態窒素で相関が見られる理由として、無機態窒素は水溶性のため凝集剤を添加しても影響を受けにくいことが考えられた。

１で分類した条件のうち、凝集剤を添加している液肥と添加していない液肥でグループ分けした際、凝集剤を添加していない液肥 46 件で、りん酸と屈折率およびカリウムと EC の間に相関係数 0.76 と 0.85 の強い相関が見られた（図４、５）。このことから、凝集剤を添加していない液肥において、全ての液肥を対象にした場合（図２、３）と比較して高い精度の検量線であり、りん酸濃度は屈折率から、カリウム濃度は EC から推定できる可能性が示唆された。同一農家から異なる時期に採取した液肥について同様の相関を調べた場合でも、凝集剤を添加している農家の液肥では弱い相関だったが、添加していない農家の液肥では強い相関が見られた。

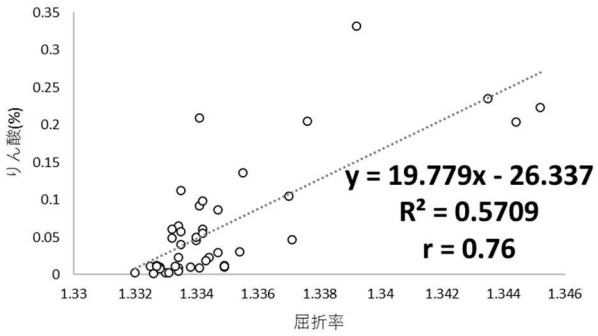

図４　凝集剤無添加液肥のりん酸と屈折率の相間（n=46）

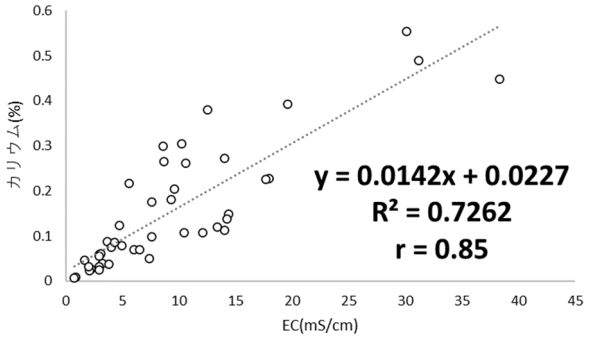

図５　凝集剤無添加液肥のカリウムとECの相関(n=46)

本研究では凝集剤添加の有無については調査したが、添加量および添加率は調査しなかった。上述のとおり、凝集剤の添加が適正でなければ凝集物の形成が悪くなり、懸濁物質が除去されなくなる。凝集剤を添加している液肥については、適正添加ができているものと適正添加ができていないものが混在していたため、液肥品質（窒素全量、りん酸およびカリウム）のばらつきにつながったと考えられた。また、同一農家であっても、凝集剤を添加している農家では成分の濃度にばらつきが出ることから、液肥品質の安定化のためには凝集剤の適正添加が重要であると考えられた。

１で分類した条件のうち、凝集剤を添加してい

る液肥と添加していない液肥に分類し、その曝気期間と臭気の関係を図６、７に示した。凝集剤を添加している液肥については、曝気期間が２週間を超えると臭気が０又は１に安定するのに対し（図６）、凝集剤を添加していない液肥では、曝気期間に関わらず臭気が高いものが見られた（図７）。このことから、凝集剤を添加していない液肥は、添加している液肥と比較して精度が高い検量線でりん酸とカリウムの濃度を推定できる一方で、農地へ施用した際に臭気問題が生じやすくなる可能性が示された。したがって、液肥品質の安定化だけでなく、臭気問題を発生させないためにも凝集剤の適正添加が重要であると考えられた。

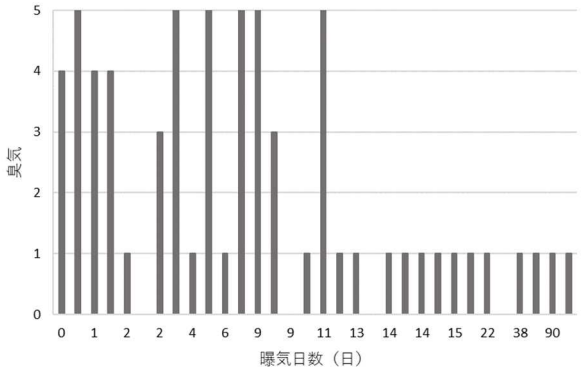

図６　凝集剤添加液肥の曝気期間と臭気（n=32）

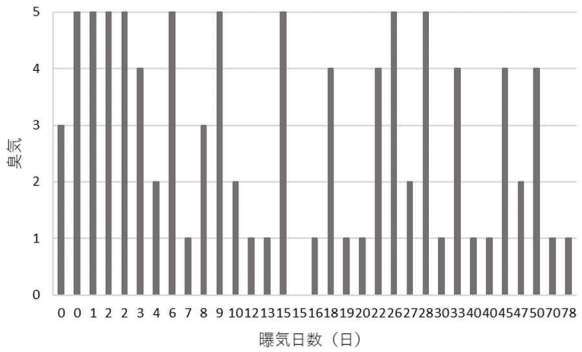

図７　凝集剤無添加液肥の曝気日数と臭気（n=33）

EC を濃度ごとに分類した際の各階級における発芽率平均を表８に示した。EC が７mS/cm を超えると、発芽率が著しく低下した。このことから、EC が発芽率の推測に活用できるとともに、液肥施用から播種までにどの程度期間を空けるか推測する指標になると考えられた。

表８　EC と発芽率平均

EC(mS/cm)	発芽率平均(%)	件数
0～0.9	99	6
1～1.9	86	8
2～2.9	72	11
3～3.9	86	7
4～4.9	76	16
5～5.9	84	10
6～6.9	67	8
7～7.9	33	11
8～8.9	25	4
9～	10	41

３　飼料作物における液肥利用検証

イタリアンライグラス乾物収量について、圃場試験では一番草・二番草ともに、対照区と試験区との間で有意な差は見られなかった(図８)。一方、ポット試験では、二番草の乾物収量が試験区で有意に高かった（図９）。

植物体、特に畑作物では窒素栄養素を硝酸態窒素の形で吸収する[16]。硝酸態窒素は窒素化合物の酸化反応によって生じる最終生成物であり[17]、畑作物においては極めて速効性を示す。しかし、土壌も硝酸態窒素もマイナスに帯電しているため、硝酸態窒素は土壌粒子に吸着せず溶脱しやすい[17]。液肥には硝酸態窒素が多く含まれているため、根が張った状態の植物では特に速効性が見込まれる。このことから、ポット試験では、一番草刈り取り後に追肥として施用した液肥は、溶脱する前に十分成長しているイタリアンライグラスの根から吸収されやすく、二番草の乾物収量が高まったと考えられる。

圃場試験では、一番草、二番草共に液肥を利用しても化学肥料と同等の収量が得られた。圃場試験はサンプルサイズが小さかったが、サンプルサイズが大きくなった場合においても、ポット試験と同様の結果が得られる可能性がある。今後、農家における現地実証試験を実施することで、液肥の施用による効果を追試していく。

対照区と試験区で、イタリアンライグラスの一般成分や試験圃場の土壌の残効性に差は見られなかった。作物中の硝酸態窒素濃度は、両区共に牛に給与しても安全な濃度[18]であった（表９）。

以上より、圃場試験・ポット試験それぞれ一番草、二番草共に化学肥料と同等の収量が得られ、一般成分や土壌の残効性、作物中の硝酸態窒素濃度に問題がないことから、飼料作物においても液肥は化学肥料の代替として利用可能であることが

示唆された。

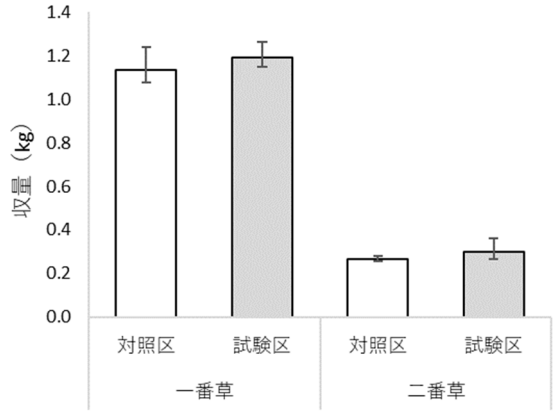

図８　圃場試験乾物収量（対照区 n=３、試験区 n=３）

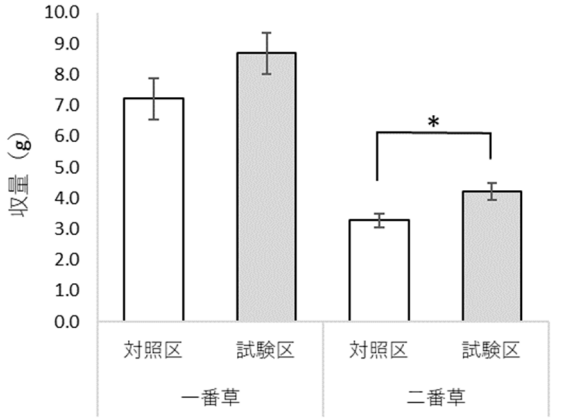

図９　ポット試験乾物収量(対照区 n=10､試験区 n=10)

表９　各区の硝酸態窒素濃度の最大値

最大値	一番草		二番草	
(mg/kg)	対照区	試験区	対照区	試験区
圃場	115	115	161	230
ポット	230	138	759	345

※　0-1,000mg/kgが全ての牛に給与して安全な濃度

県内の養豚農家 65 戸から 122 件の液肥を採取し成分分析を行うとともに、液肥製造に関するアンケート調査を実施した。アンケート調査と肥料成分分析の結果、窒素全量の変動係数は大きく、水溶性の無機態窒素の変動係数は小さいことから、液肥製造過程における凝集剤の添加が肥料成分の変動に影響を及ぼすことが示唆された。無機態窒素は液肥製造の方法による影響は少なく、液肥の EC を測定することにより、畜産現場でも無機態窒素濃度を決定係数 0.85 以上の精度を有する検量線を用いて推定できることが示唆された。また、無機態窒素と比較して精度は低いものの、りん酸は屈折率、カリウムは EC からそれぞれ濃度を推定できることが示唆された。発芽率が液肥の EC に影響されることが示され、EC の測定値が現場における液肥散布後の播種のタイミングの指標になると考えられた。飼料作物における液肥の利用については、一番草、二番草共に化学肥料と同等の収量が得られ、飼料作物において液肥が化学肥料の代替として利用可能であることが示された。

参考文献

１）新編畜産環境保全論、2012、第 1 版、p23-25、株式会社養賢堂
２）家畜排せつ物処理状況等調査結果（平成 31 年４月１日現在）、2021、p9、農林水産省
３）確実な養豚汚水処理を目指して、2021、第 1 版、6-18、一般財団法人畜産環境整備機構
４）家畜汚水処理施設設計・維持管理マニュアル、2022、p29-p36、一般財団法人畜産環境整備機構
５）肥料等試験法（2024)、2024、農林水産消費安全技術センター
６）飯尾恒・山下薫・島田理紗・荻野暁史・野中最子・長田隆、2021、産卵前期採卵鶏への低タンパク質飼料給与が生産性や堆肥化過程における環境負荷ガス排出に及ぼす影響、日本畜産学会報 92（4)、p485-p491
７）令和５年度飼料作物等高能力新品種選定調査成績概要集、2024、一般社団法人日本草地畜産種子協会
８）中村作二郎、2001、養豚汚水処理の解説、日豚会誌 38 巻３号、p143-150
９）和木美代子、農業・食料生産分野におけるバイオマス利用工学　循環型社会のための生物資源利用、2023、初版、p78-79、株式会社コロナ社
10）飼料作物栽培基準、2019、ｐ2、茨城県農業総合センター
11）液状コンポスト生産利用の手引き、2009、p15、茨城県農林水産部畜産課
12）改訂版　土壌・作物栄養診断マニュアル（2023)、2024、茨城県農業総合センター
13）三訂版　粗飼料の品質評価ガイドブック、2009、p32-33、社団法人日本草地畜産種子協会
14）田中康男、畜産汚水の処理技術マニュアルー処理の基本から高度処理までー、2018、p21、一般財団法人畜産環境整備機構
15）日本下水道事業団、2011、「シリーズ-下水道

関係者が持つ、ささやかなノウハウ-第６回【最終回】汚泥脱水の高分子凝集剤あれこれ」、JS 技術開発情報メール No.121、ｐ１-ｐ６、日本下水道事業団技術戦略部
16）大山卓爾、植物根における窒素の吸収と代謝、1995、４巻３号、p85、J-STAGE
17）洗幸夫、肥料中の窒素形態と植物吸収、2015、ｐ１、BSI 生物科学研究所
18）日本飼養標準・乳牛、2017、初版、p153-154、公益社団法人 中央畜産会