

1 課題名

Ⅲ 有機性廃棄物の農地還元技術と環境保全に関する研究

1 原料・生成物の品質・安全性に関する検討

1) 処理による微生物性(大腸菌群)の変化

2 担当場所研究室科室名

北海道立畜産試験場 環境草地部 畜産環境科

3 はじめに

家畜ふんは稀に人や家畜に対して病原性を示す微生物を含むことがある。複数の農家のふん尿を1ヶ所で処理する共同利用型のプラントでは、ふん尿の移動により農家間や畜産経営外へ病原性微生物が拡散する危険性が懸念され、衛生面に対する安全性が強く求められる。

家畜ふん中に含まれる病原菌は堆肥化や液肥化(曝気、メタン発酵)処理により不活性化されていくが、その不活性化効果は、病原菌の減少の指標となる微生物数の調査によって示される。指標微生物としては、生のふん中に高い確率で存在し、一般環境中には存在せず、かつ、多くの病原菌と同等かそれ以上の耐熱性を持つことが求められる。デンマークでは、メタン発酵過程においてふん便性連鎖球菌(腸球菌)がそれらの条件を満たすものとして、指標微生物としての利用が推奨されている。一方、堆肥化過程での有効な指標微生物に関する詳細な検討例はみられないが、一般環境中のふん便汚染の指標菌とされ、人に対しても病原性を有する株が存在する大腸菌が利用されている。

本試験では、メタン発酵と堆肥化施設を併せ持つ、2箇所の共同利用型プラント(別海プラント:大規模共同利用型、湧別プラント:小規模共同利用型)において、ふん尿処理過程における大腸菌および腸球菌数のモニタリングを実施し、処理過程での病原菌の低減効果を調査した。

4 調査・試験方法

1) バイオガスプラントにおける衛生指標菌のモニタリング

乳牛ふん尿を主原料とする2箇所の共同利用型バイオガスプラント(別海および湧別資源循環試験施設,表1、図1)において、メタン発酵および堆肥化過程における衛生指標菌の消長を約1ヶ月間隔でモニタリングした。

表 1 施設の概要

	メタン発酵(37°C) ^{※1}			堆肥化施設	
	規模	滞留日数	殺菌槽	堆肥化方式	処理日数
湧別プラント	乳牛200頭	約30日	70°C1時間 ^{※3}	ロータリー攪拌 2m(幅)×68m(長)×0.9m(高)	約30日
別海プラント	乳牛1000頭			堆積・切返し(15日毎に切返し)	約90日

※1 別海プラントでは2005/1/10～3/6の間高温発酵(53°C)試験を実施。

※2 別海プラントでは2003/1/27より55°C・7.5hrに変更

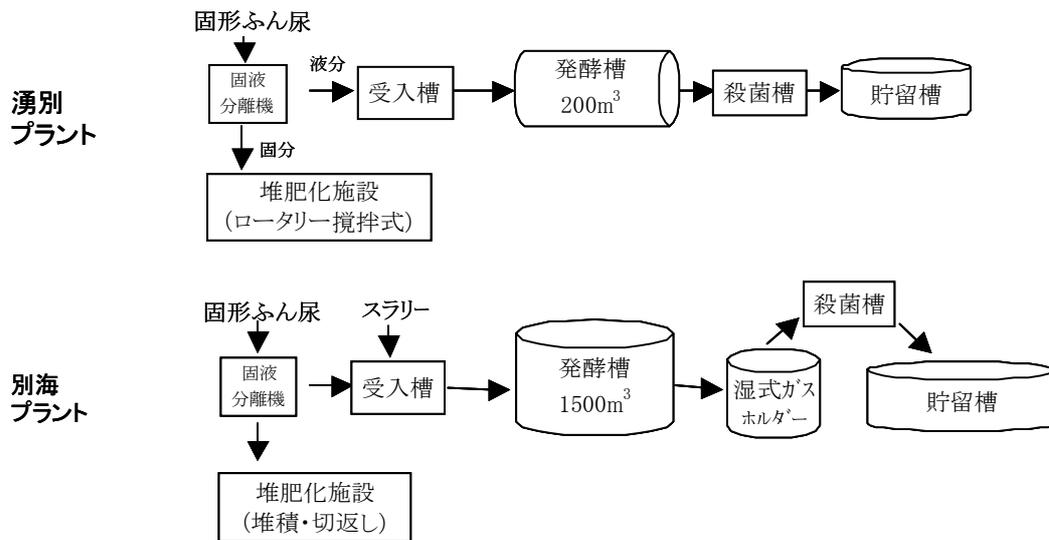


図 1 別海・湧別プラントにおける乳牛ふん尿の処理フロー

(1) 試料採取箇所

メタン発酵施設；受入槽、発酵槽、殺菌槽および貯留槽（各図 1 参照）。

堆肥化施設；別海プラント（堆積・切返し）では固液分離後の固形物（生堆肥）および完成堆肥（約 90 日後）、湧別プラント（ロータリー攪拌方式；全長 68m）では、入口、中間（32m 付近）および出口（68m 付近）部分。

(2) 調査項目：大腸菌（クロモカルト寒天培地・塗末法）および腸球菌数（アザイドクエン酸培地・MPN 法）。スラリーおよび消化液サンプルは大腸菌と腸球菌数、堆肥サンプルは大腸菌数を調査した。

(3) 調査期間：2001 年 7 月～2005 年 3 月

2) 殺菌温度の検討

メタン発酵過程での病原菌減少の指標微生物としての有用性が報告されている腸球菌を対象に、温度と不活化の関係を検討した。別海プラントより採取した消化液を 55、60 および 65°C の恒温水槽内で静置培養し、継時的に EF 寒天培地を用いた希釈平板法により腸球菌数を計数した。

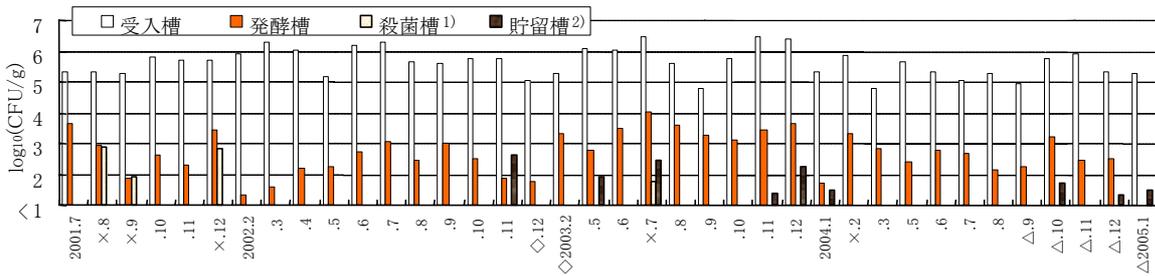
5 調査結果および考察

1) バイオガスプラントにおける衛生指標菌のモニタリング

(1) メタン発酵施設

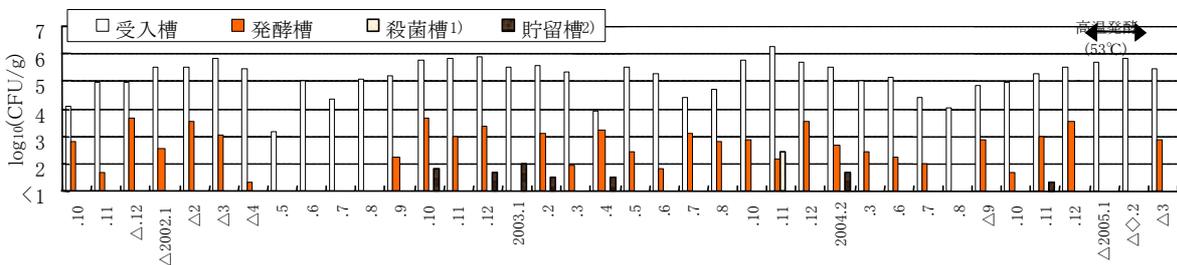
i) 大腸菌の消長(図 2,3,表 2)

- i) 大腸菌数は受入槽の原料スラリーからは平均 5~6log₁₀CFU/g、発酵槽の消化液からは平均 2~3log₁₀CFU/g 検出され、メタン発酵過程(中温発酵:37℃,平均滞留日数:30 日)を経ることで約 3.0オーダー減少した。両プラントともにほぼ同様の傾向を示した。別海プラントでは、発酵槽の消化液から大腸菌が検出されない期間(図 3,2002 年 5 月~8 月)があったが原因は不明である。また、別海プラントにおいて 2005 年 1~3 月に実施した高温発酵(発酵温度:53℃,平均滞留日数 30 日)試験時においては、消化液から大腸菌は検出されなかった。
- ii) 両プラントともに、大腸菌は殺菌槽での加熱処理後の消化液からは概ね検出されなかったが、一部殺菌槽での加熱が十分に行われていない期間(湧別プラントでは図 2 の×印)があり、発酵槽と同程度の菌数が検出された。湧別プラントでは殺菌槽の稼働が不安定で、図 2 の×印以外の非サンプリング時でも、設定値である 70℃に達していない期間が多かった。
- iii) 貯留槽の消化液からは、両プラントともに大腸菌は低密度ながら数回検出された。これは殺菌槽での加熱が不十分な消化液の混入によるものと考えられる。



1) 70℃・1hr 2) '02/8月より調査開始 ×殺菌槽稼働不良 △殺菌槽・採取不可 ◇貯留槽・採取不可

図2 湧別プラントにおける原料スラリーおよび消化液中の大腸菌数の変化



1) 70℃・1hr(~'03/1/27), 55℃・7.5hr('03/1/27~), 2)'02/5月より調査開始 △殺菌槽・採取不可 ◇貯留槽・採取不可

図3 別海プラントにおける原料スラリーおよび消化液中の大腸菌の変化

表2 バイオガスプラント(37°C・滞留日数30日)における原料スラリーおよび消化液中の中の大腸菌および腸球菌数の変化

プラント名	サンプリング	大腸菌数			腸球菌数			
		n	log ₁₀ cfu/g ± sd		n	log ₁₀ MPN/g ± sd		PRE ^{※4}
湧別	受入槽	34	5.7	± 0.5	25	5.9	± 0.7	
	発酵槽	34	2.7	± 0.7	25	3.9	± 0.5	2.0
	殺菌槽 ¹⁾	33	ND ³⁾ (n=29), 2.3 ± 1.0(n=4)		24	ND(n=14), 1.6 ± 0.3 (n=10)		>4.3
	貯留槽	20	ND (n=12), 1.9 ± 1.2(n=8)		19	ND(n=1), 2.3 ± 1.0(n=18)		>3.6
別海	受入槽	39	5.2	± 0.6	31	5.6	± 0.6	
	発酵槽	37	2.3	± 1.0	31	3.7	± 0.6	1.8
	殺菌槽 ²⁾	30	ND(n=28), 1.7 ± 0.5(n=2)		23	ND(n=10), 1.8 ± 1.0(n=13)		>3.8
	貯留槽	30	ND(n=24), 1.7 ± 0.8 (n=6)		29	ND(n=9), 1.6 ± 0.8(n=20)		>4.0

1)70°C・1hr

2)70°C・1hr(〜'03/1/27)、55°C・7.5hr('03/1/27〜)

3)ND:不検出(=検出限界以下;<1.0)

4)PRE=Pathogen reduction effect of overall process in log10 units. (病原体減少効果) ある過程の前後における腸球菌数の対数の差

ii 腸球菌の消長(図 4,5,表 2)

- i) 腸球菌数は受入槽の原料スラリーから平均 5~7log₁₀MPN/g、発酵槽の消化液から平均 3~5 log₁₀MPN/g 検出され、メタン発酵過程(中温発酵:37°C,平均滞留日数:30日)で約 2.0 オーダー減少した(PRE^{*}=2.0)であった。両プラントともにはほぼ同様の傾向を示し、Larsen ら(1994)によるドイツでの調査事例と同程度であった。また、別海プラントでの高温発酵試験(53°C)時においては、発酵槽の消化液中の腸球菌数は 2.0 log₁₀MPN/g であり、メタン発酵過程での低減効果は 3.4~4.0 オーダー(PRE=3.4~4.0)であった。
- ii) 両プラントともに、殺菌槽の消化液からは腸球菌は不検出、もしくは 1~2 log₁₀MPN/g と低密度であった。しかし、一部殺菌槽での加熱が十分に行われていない時にサンプリングをおこなった場合は 2log₁₀MPN/g 以上の比較的高い菌数が検出された。
- iii) 貯留槽の消化液中の腸球菌数は、別海プラントでは概ね 2log₁₀MPN/g 以下と低密度であったが、湧別プラントでは 2log₁₀MPN/g を上回る場合が多かった。前述のように、湧別プラントでは殺菌槽の稼働が不安定であり、加熱不十分な消化液の流入による影響と考えられた。
- iv) 腸球菌は各種病原菌に比べ耐熱性があり、かつメタン発酵過程での生存期間も長いことから、指標菌としての有用性が報告されている。Larsen ら(1994)は、メタン発酵過程で病原菌数を十分に減らすには、腸球菌数を 3~4 オーダー低下させ(PRE=3~4)、消化液中の菌数を 2log₁₀/g 以下とすることが必要であるとしている。調査プラントにおける、メタン発酵過程での腸球菌の低減効果は平均 1.8~2.0 オーダー(PRE=1.8~2.0)と低かったが、殺菌槽での加熱により消化液中の菌数は概ね 2 log₁₀MPN/g 以下に減少した(PRE=3.8~4.3<)。殺菌槽の稼働を安定させることで、十分な病原微生物の低減効果を持つプラントとして稼働するものと考えられた。

※PRE=Pathogen Reduction Effect (=病原体減少効果)、ある過程の前後における腸球菌数の対数の差。

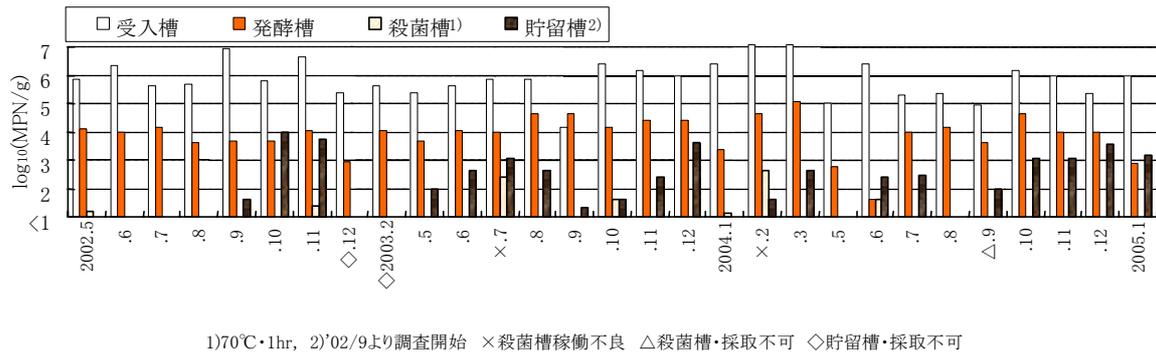


図4 湧別プラントにおける原料スラリーおよび消化液中の腸球菌数の変化

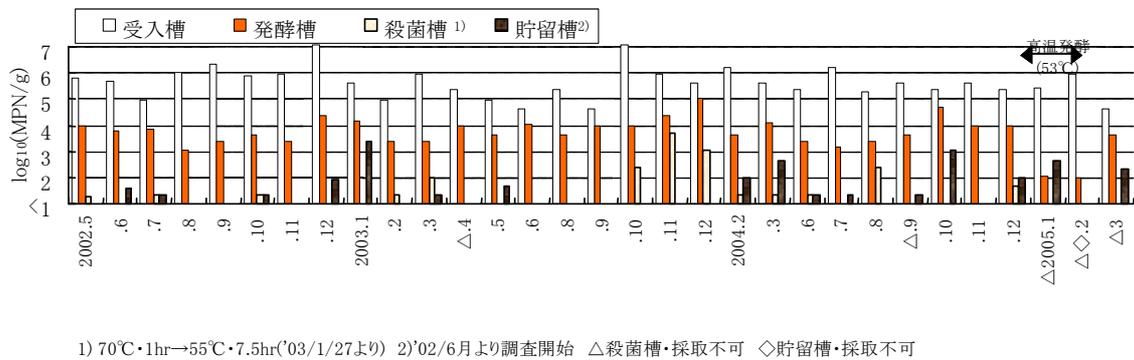


図5 別海プラントにおける原料スラリーおよび消化液中の腸球菌数の変化

iii まとめ

- i) メタン発酵(中温発酵:37°C, 平均滞留日数:30日)過程での衛生指標菌の低減効果は、大腸菌で平均3オーダー、腸球菌で平均2オーダー(PRE=2.0)であった。また高温発酵(53°C、平均滞留日数:30日)試験時の消化液中の指標菌数は、大腸菌は不検出、腸球菌は2 log₁₀MPN/gであった(PRE=3.4~4.0)。
- ii) メタン発酵後の殺菌槽での加熱処理(70°C・1時間ないし55°C・7.5時間)により、消化液中の大腸菌は不検出となり、腸球菌も概ね2 log₁₀MPN/g以下に減少し、十分な病原微生物の低減効果が得られていた。
- iii) しかし、プラントにおける熱量不足や殺菌槽の配管閉塞等のトラブルにより加熱処理が十分に行われなかった場合、上記目標値を達成できない場合も生じることから、殺菌槽の安定的な運転・管理が重要であるものと考えられた。

(2) 堆肥化施設

i 湧別プラント(開放型ロータリー攪拌方式)

- i) 大腸菌は堆肥原料となる分離固分(入口)から4~6 log₁₀CFU/g検出され、中間、出口と進むにつれて菌数は顕著に減少した(図6)。出口部分の堆肥からは、大腸菌は37回の調査のうち20回は検出されなかったが、その他では2~3 log₁₀CFU/g検出された。
- ii) 発酵温度は概ね60°C以上に達していたが、1~2月の厳寒期では、分離固分の水分含

量が 80%前後と高く、60℃以上に上昇していない時も見られた。冬期間に生産された堆肥から大腸菌が検出されたのは発酵温度上昇の不足によるものと考えられる。

iii) 一方、厳寒期以外でも大腸菌が出口の堆肥から検出されることがあった。特に 2003 年の 2 月～12 月の間は 2～3 log₁₀CFU/g の大腸菌が検出され続けた。この間はふん尿の搬入量が多く、攪拌回数が増加して堆肥化日数が短縮されていた。大腸菌の生存は堆肥化日数の短縮による高温暴露時間の減少が要因として考えられた。

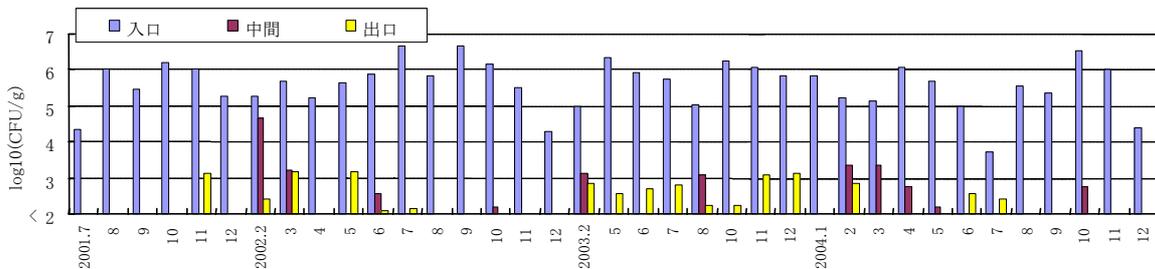


図 6 堆肥化過程における大腸菌数の変化（湧別堆肥化施設）

ii 別海プラント(通気型堆肥舎)

i) 大腸菌は分離固分(原料)から 5～7 log₁₀CFU/g 検出された。完成堆肥からは 33 回の調査のうち 16 回は検出されなかったが、その他では 2～4log₁₀CFU/g の菌数で検出された(図 7)。

ii) 発酵温度は温暖期では概ね 60℃以上、夏期間では 70℃を越えることもあったが、厳寒期（1～3 月）では 40～50℃程度にしか上昇していない場合が多かった。また、堆肥原料および完成堆肥の水分含量は冬季間に上昇し 80%を越えていたことが多かったことから、完成堆肥中での大腸菌の生存は、堆肥原料の水分含量の増加による温度上昇不足や、発酵温度ムラ等の影響が主要因として考えられた。副資材の混合や堆肥化期間の延長などによる対応が必要であると考えられる。

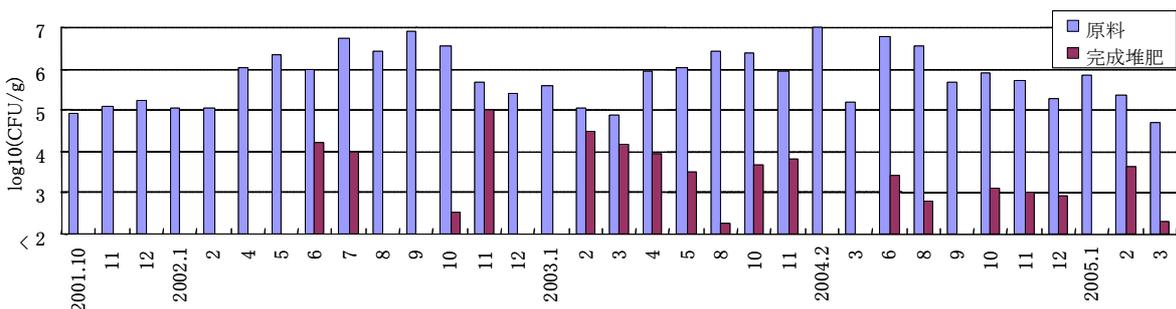


図 7 堆肥化過程における大腸菌数の変化（別海堆肥化施設）

2) 殺菌温度の検討

- (1) 腸球菌は各種病原菌に比べ耐熱性が強く、かつメタン発酵過程での生存期間も長いことから、指標菌としての有用性が報告されている。メタン発酵過程で腸球菌が4オーダー減少する条件下では、多くの一般的な病原微生物は不活化されるという。
- (2) 開始時4~5 log₁₀CFU/g 検出された消化液中の腸球菌は、55℃では8hr、60℃では1.5hr、65℃では10分で不検出となった(図8)。
- (3) 腸球菌を4オーダー減少させるために必要とする加熱時間は、本結果においては55℃・6~7時間、60℃・30分、65℃・10分程度となる。また、中温メタン発酵と併用する場合は、発酵過程での低減効果を考慮すると、より短時間での殺菌が可能となるものと考えられる。
- (4) しかしながら、バイオガスプラントの先進地であるデンマークやドイツでは下水汚泥等の汚染の危険性が高い廃棄物は70℃・1時間の加熱殺菌が義務づけられている。また、ドイツでは、汚染の危険性の高い廃棄物以外のものに対して70℃・1hrに相当する加熱殺菌時間として55℃・7.5h、60℃・3.5、65℃・1.5hrという高い基準が定められている。
- (5) 今後、メタン消化液に由来する微生物が人や家畜に再感染する危険性(二次感染リスク)を定量的に評価し、それらを踏まえて、メタン発酵プラントに要求される病原微生物の除去率を評価していくことが必要であろう。

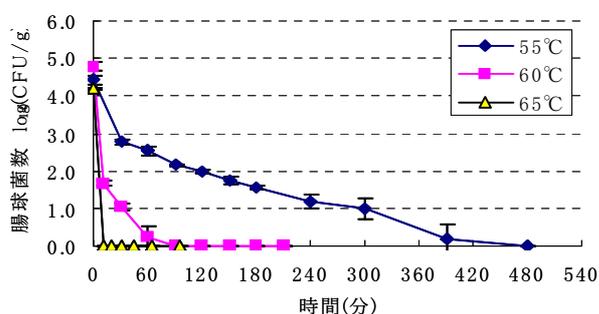


図8 加熱処理による消化液中の腸球菌数の変化

6 残された課題

共同利用型プラントにおいて衛生的に安全な生産物を作成するには、定期的なモニタリングとそれを反映した改善措置をシステム化することが重要である。そのためには、現場で簡易に実施可能な指標微生物の検出法の開発が必要であると考えられる。また、メタン発酵プラントに要求される病原微生物の除去率については、二次感染リスク(メタン消化液に由来する微生物が人や家畜に再感染する危険性)を定量的に示した上で、それらを踏まえた評価をおこなう必要がある。

7 おわりに

バイオガスプラントのみならず、複数の農家のふん尿を処理する共同利用型のプラント

は、ふん尿の移動に伴い病原菌を拡散させるリスクを持っている。プラント内で発酵熱や殺菌槽での加熱により病原菌を不活化し、衛生的に安全な生産物を産み出すことが重要であることはもちろんであるが、それ以前に、新鮮ふん尿の運搬に伴うルール作りが重要である。特に、プラント利用農家において法定伝染病等が発生した場合の対策マニュアルを用意しておくことも必要であろう。また、今後、家畜ふん尿以外の有機性廃棄物が投入される可能性も想定し、総合的な衛生管理対策が求められるものと考えられる。

1 課題名

2) 処理による肥料成分や雑草種子発芽率の変化と重金属含量

2 担当場所研究科室名

(独) 北海道開発土木研究所 農業開発部 土壌保全研究室

3 はじめに

バイオガスプラントによる家畜ふん尿の嫌気発酵処理システムは、①発酵処理中のアンモニア揮散が少ない、②発酵残滓液（以下、消化液）の肥料成分が豊富で農地還元の効果大きい、③発生したメタンガスをエネルギー源として利用できるなどの利点を有する。このため、デンマーク、ドイツ、中国などでバイオガスプラントによる家畜ふん尿処理システムが普及しており、北海道においても導入事例が増加しつつある。

本システムで発生する消化液を河川放流可能なレベルまで浄化処理するには多大なコストを要するため、消化液を圃場に液肥として還元できることが本システム成立の要件となる。また、肥料取締法の一部改正に伴い、家畜ふん尿処理物中の肥料成分や重金属の含有量の表示が義務付けられ、圃場還元するための消化液の成分の把握と品質保持が求められている。

本課題では、原料ふん尿および生成物（消化液、堆肥）の肥料成分、重金属含量を調査するとともに、原料ふん尿の嫌気発酵処理および殺菌処理にともなう雑草種子の死滅効果を検討し、品質、安全性の高い消化液および堆肥を生成するための処理条件の検討に資する。

4 調査・試験方法

1) 一般性状および肥料成分

江別市の町村牧場のバイオガスプラントおよび独立行政法人北海道開発土木研究所が別海町および湧別町において試験運営する2基のバイオガスプラント（別海プラント、湧別プラント）の受入槽から採取した原料スラリーを採取し、室内フェーマンターによって37℃で30日間嫌気発酵させ、発酵前後の一般性状および肥料成分を分析調査した。

また、別海プラントおよび湧別プラントにおいて、メタン発酵施設の受入槽（原料投入槽）、発酵槽、殺菌槽、消化液貯留槽および堆肥発酵施設の固液分離固分および完成堆肥から試料採取を行った。別海および湧別プラントの施設概要を表1に、メタン発酵施設における乳牛ふん尿の処理フローを図1に示す。原料スラリーは受入槽に投入され、1日につき、発酵槽容量の1/30に当たる原料スラリーが発酵槽へ移送される。こうして発酵槽に投入された原料スラリーは、35～37℃の中温発酵条件で30日間滞留した後、消化液として発酵槽外へ移送される。この消化液は別海プラントでは湿式ガスホルダーに流入し、約10日間滞留した後、殺菌槽へと移送される。湿式ガスホルダー内には微量の空気が通気され、この空気中の酸素により消化液中の硫酸化細菌が繁殖し、バイオガス中の硫化水素を酸化し、これを除去する。一方、湧別プラントでは発酵槽より流出した消化液6.3m³/日のうち、0.03m³/日が生物脱硫装置を経て殺菌槽へ、残りの6.27m³/日が直接殺菌槽へと送り込まれるため、消化液が生物脱硫装置を通過する影響は無視できるほど小さい。殺菌槽へ流

表1 施設の概要

	別海プラント	湧別プラント
営農形態と参加農家	酪農専業、10戸	酪農畑作混合、5戸
対象頭数	乳牛1,000頭	乳牛200頭
規模(投入量)	メタン発酵投入量45.4m ³ /日	メタン発酵投入量6.3m ³ /日
	堆肥化投入量3.4m ³ /日	堆肥化投入量3.8m ³ /日
メタン発酵槽	縦置円筒型発酵槽	水平円筒型発酵槽
	施設容量1,500m ³	施設容量200m ³
メタン発酵方式	中温発酵(35~37°Cで30日)	中温発酵(35~37°Cで30日)
ガスホルダー	乾式250m ³ 、湿式200m ³	乾式250m ³ 、25m ³
消化液貯留槽	2,500m ³ × 3基	1,000m ³ × 1基
	1,000m ³ × 2基(場外)	
堆肥化の攪拌方式	ホイローダー切返し	ロータリー攪拌
脱硫方式	生物脱硫+酸化鉄脱硫	生物脱硫+活性炭脱硫
バイオガス発電機	65kw × 3台	25kw × 1台
ボイラー	コジェネの補助熱源	コジェネの補助熱源

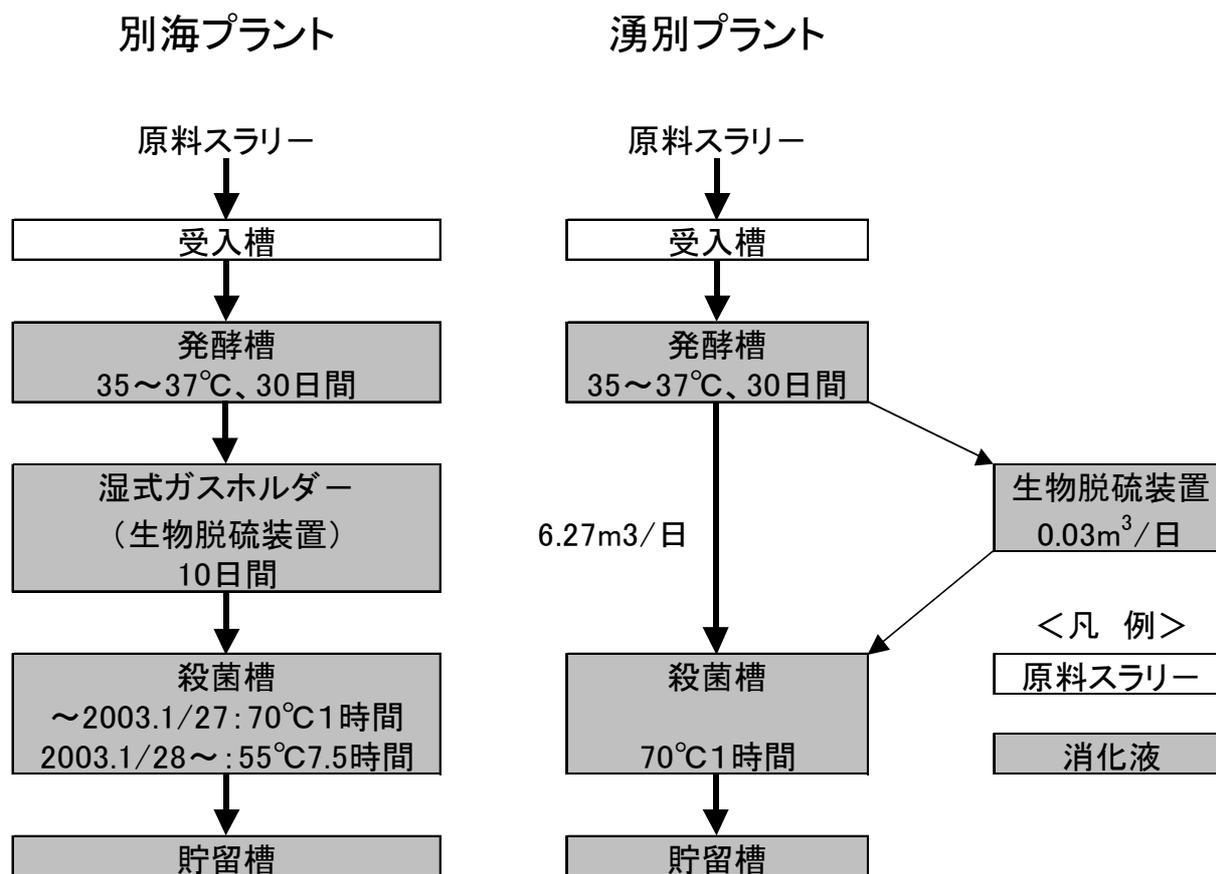


図1. 別海・湧別プラントにおける乳牛ふん尿の処理フロー

入した消化液は70℃ 1時間ないし、55℃7.5時間の加熱処理を受け、その後、無蓋型の貯留槽へと移送され、液肥として圃場施用されるまで貯留される。

週1回の割合で受入槽から原料スラリー試料を、発酵槽、殺菌槽および貯留槽から発酵処理後、殺菌処理後および貯留中の消化液試料を採取し、メタン発酵に伴う液状乳牛ふん尿の性状変化を分析するために供試した。また、堆肥発酵施設からも月1回の割合で分離固分および完成堆肥を採取し、堆肥発酵に伴う乳牛ふん尿分離固分の性状変化を分析するために供試した。調査期間は2001年5月～2005年3月までである。

試料について、併記した分析法に基づいて下記の分析項目を分析した。

①乾物含量(DM)：乾熱法(105℃、24時間)、②有機物含量(OM)：乾式燃焼法(550℃、5時間)、③灰分：同、④pH：ガラス電極法(試料：蒸留水=1：1)、⑤電気伝導度(EC)：電極法(試料：蒸留水=1：1)、⑥比重：比重計法(試料：蒸留水=1：1)、⑦全窒素(T-N)：ケルダール分解法+水蒸気蒸留・滴定法、⑧アンモニウム態窒素(NH₄-N)：水蒸気蒸留・滴定法、⑨リン酸(P₂O₅)：硝酸-過塩素酸混合液分解法+バナドモリブデン法、⑩カリウム・カルシウム・マグネシウム(K、Ca、Mg)：硝酸-過塩素酸混合液分解法+原子吸光法。

①～④、⑧については、採取した全試料について分析を行った。その他は三ヶ月に一回程度の分析間隔になるように、分析試料を選択して分析を行った。ただし、凍結による採取不可能等の理由により、採取カ所によっては試料採取できなかった場合があったので、供試試料数は分析試料により異なる。

2) 重金属含量(Zn、Cu、Cd、Pb、As、Hg、Cr、Ni)

独立行政法人北海道開発土木研究所が試験運営する前述の別海プラント、湧別プラント(表1、図1)において、受入槽から原料スラリー試料を、発酵槽、殺菌槽および貯留槽から発酵処理後、殺菌処理後および貯留中の消化液試料を、堆肥発酵施設から固液分離固分、完成堆肥を3ヶ月に1回程度採取・分析した。調査期間は2001年5月～2005年3月までである。

採取した試料について、併記した分析法に基づいて下記の分析項目を分析した。

①Cu、Zn、Cd、Pb、Ni：硝酸-過塩素酸混合液分解法+原子吸光法、②As：硝酸-過塩素酸混合液分解法+還元気化・原子吸光法、③Cr：硝酸-過塩素酸-硫酸混合液分解法+原子吸光法、④Hg：湿式分解・還元気化・無炎原子吸光法。

3) 雑草種子生存率

2003年9月に札幌市内で採取し、冷蔵保存して一次休眠状態においたエゾノギシギシ種子を2004年10月に取り出し、別海プラントから採取した発酵槽液を37℃に加温し、その中に30日間投じた(中温発酵処理)。なお、培養中は毎日、培養液量の1/30に当たる原料スラリーを投入し、培養液から同量の培養液を取り出した。培養終了後、投じた種子を液ごと所定温度で所定時間(55℃4時間、55℃7.5時間、55℃15時間、70℃1時間、70℃5時間)保持した。その後、種子を取り出して蒸留水および70%エタノールで洗浄し、無処理種子を対照として、発芽試験を行った後、非発芽種子についてテトラゾリウムテストによる種子の生死を判定した。なお、一部は中温発酵処理後、ただちに洗浄、発芽試験、テトラゾリウム試験を行った。また、同様の手法で毎日原料スラリーの投入と培養液の取り出しを繰り返しながら、エゾノギシギシ種子を培養液中に55℃で20～30日間投じ、同様に洗

浄後、発芽試験とテトラゾリウム試験を行った（高温発酵処理）。

5 調査結果および考察

1) 原料スラリーと消化液との差異

室内発酵試験によって、消化液では原料スラリーに比べて、pHが上昇した。また、アンモニウム態窒素含量、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が増加し、全窒素含量は変化しなかった。一方、乾物含量(DM)が顕著に減少し、燐酸含量、カリウム含量も減少した。なお、発酵処理終了後に供試液をファーメンターから取り出した際、スラッジ様の固形分がファーメンター内に沈殿・付着しているのが観察された。燐酸、カリウムの減少は発酵そのものの影響というより、供試したファーメンターの構造上の問題から槽内での均一な攪拌がなされず、固形分が沈殿したことによるものと推察された（表2）。

表2. 室内発酵試験による性状変化

原料採取場所	原料採取年月	供試液	pH	乾物 (%)	T-N (%)	NH ₄ -N (%)	NH ₄ -N/T-N×100 (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
町村牧場	2000年12月	原料スラリー	6.57	10.10	0.39	0.14	35.9	—	—
		消化液	7.78	8.74	0.39	0.25	64.1	—	—
	2002年3月	原料スラリー	6.96	8.56	0.44	0.25	56.8	0.15	0.57
		消化液	7.78	4.39	0.40	0.30	75.0	0.06	0.39
	2003年3月	原料スラリー	7.06	6.99	0.43	0.23	53.5	0.17	0.61
		消化液	8.68	4.64	0.40	0.29	72.5	0.11	0.48
別海施設	2004年3月	原料スラリー	7.33	7.16	0.44	0.23	52.3	0.21	0.57
		消化液	7.39	4.70	0.41	0.27	65.9	0.12	0.49
	2004年5月	原料スラリー	6.89	5.51	0.37	0.21	56.8	0.16	0.49
		消化液	7.10	4.41	0.40	0.26	65.0	0.12	0.47
湧別施設	2002年7月	原料スラリー	7.95	6.41	0.38	0.23	61.1	0.17	0.55
		消化液	8.16	4.14	0.38	0.26	67.9	0.11	0.50
変化傾向			上昇	減少	無変化	増加	上昇	減少	減少

別海および湧別のバイオガスプラントにおいても、受入槽中の原料スラリーと発酵槽中の消化液との間で、燐酸およびカリウム以外は室内発酵試験と同様の変化が認められた。プラントレベルにおいても、嫌気性細菌による有機物の分解によって乾物含量の減少と窒素の無機化が生じ、窒素の無機化によって増加したアンモニウム態窒素によりpHが上昇するという傾向に変わりはなかった。なお、発酵処理では燐酸とカリウムの減少は認められなかったが、これは発酵槽内の攪拌が均一になされ、槽内で沈殿が発生していないことを示唆している（表3、4）。

これらの結果から、消化液はスラリーに比べて、乾物含量が少ないために流動性が高く、即効性窒素としてのアンモニウム態窒素に富む液肥として評価できる。

2) 発酵以外の各種処理が消化液の肥料成分におよぼす影響

嫌気発酵処理によって生じたバイオガスプラントの消化液は、即座に農地へ施用されることは稀で、通常は施用まで貯留槽に貯留される。また、プラントによっては貯留槽へ送られる前に、生物脱硫槽に貯留されることや殺菌処理を施される場合もある。今回調査対象とした別海、湧別プラントは殺菌槽が設置され、貯留槽へ送られる前に消化液の殺菌処理が行われる。また、別海プラントでは発酵槽と殺菌槽の間に生物脱硫槽が設置され、発生した消化液はここで約10日ほど貯留される。

両プラントとも、無蓋型の貯留槽における全窒素およびアンモニウム態窒素の減少が顕著である。これらの減少は灰分のそれを大きく上回っているため、雨水による希釈の影響

ではなく、アンモニアの空中揮散による窒素成分の損失によるものと考えられる。

また、両プラントともに、発酵槽と殺菌槽の間での燐酸およびマグネシウムの減少が認められる。両プラントともに、これらの成分の減少が認められる部分で、灰分も減少しているため、発酵槽から殺菌槽までの間のいずれかの箇所で攪拌不良等により固形分の沈殿が生じ、これに伴って固形分での分布が多いとされる燐酸およびマグネシウムの損失が生じたと考えられる（表3、4）。

以上の結果から、バイオガスプラントでは発酵処理の他にも消化液の肥料成分に影響を与える行程が存在し、これらの行程による肥料成分の損失を防ぐには、①プラント購入時には有蓋型の貯留槽を持ち、各処理槽での攪拌不良のないものを選択する、②各処理槽での攪拌機の運転は、沈殿が発生しないよう細心の注意を払うという点に注意する必要がある。また、消化液の肥料成分分析を行うときは、貯留槽から、液を十分に攪拌した後に試料採取を行って分析に供することが肝要である。

表3. バイオガスプラントにおける原料スラリーおよび消化液の一般性状

施設	採取槽	試料数	pH		EC(mS/cm)		揮発性脂肪酸		乾物(FM%)		灰分(FM%)		有機物(FM%)							
			平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD						
別海 プラント	受入槽	125(19)	7.05	±0.43	d	9.9	±1.4	b	0.66	±0.20	a	6.86	±1.13	a	1.53	±0.29	a	5.37	±0.97	a
	発酵槽	136(9)	7.49	±0.46	c	11.1	±1.1	a	0.36	±0.34	b	4.99	±1.16	b	1.50	±0.42	a	3.51	±1.09	b
	殺菌槽	87(13)	8.39	±0.34	a	11.1	±2.7	ab	0.24	±0.13	c	3.52	±1.27	c	1.22	±0.36	b	2.31	±0.96	c
	貯留槽	72(13)	7.95	±0.28	b	9.5	±1.7	b	0.31	±0.09	b	3.48	±1.30	c	1.18	±0.33	b	2.31	±0.98	c
湧別 プラント	受入槽	157(37)	6.95	±0.31	d	11.1	±1.6	a	0.72	±0.20	a	7.65	±1.51	a	2.25	±0.72	a	5.41	±1.11	a
	発酵槽	160(37)	7.91	±0.23	c	11.7	±1.7	a	0.25	±0.14	b	5.69	±1.11	b	2.20	±0.50	a	3.46	±0.68	b
	殺菌槽	22(35)	8.48	±0.45	a	10.9	±1.5	b	0.46	±0.31	c	4.97	±0.97	c	1.79	±0.22	b	3.19	±0.56	b
	貯留槽	31(42)	8.16	±0.24	b	10.2	±1.6	b	0.29	±0.09	bc	4.00	±1.39	d	1.65	±0.47	b	2.34	±0.66	c

注：試料数の括弧内の数字はECの分析試料数

表4. バイオガスプラントにおける原料スラリーおよび消化液の肥料成分

施設	採取槽	試料数	T-N(FM%)		NH ₄ -N(FM%)		NH ₄ -N/T-N×100(%)		P ₂ O ₅ (FM%)		K ₂ O(FM%)		CaO(FM%)		MgO(FM%)								
			平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD							
別海 プラント	受入槽	24(130)	0.39	±0.07	a	0.21	±0.04	b	52.0	±8.0	b	0.16	±0.05	a	0.43	±0.05	a	0.15	±0.04	ab	0.08	±0.02	a
	発酵槽	24(144)	0.38	±0.04	a	0.27	±0.05	a	64.1	±5.2	a	0.15	±0.05	a	0.44	±0.07	a	0.16	±0.04	a	0.08	±0.02	a
	殺菌槽	21(89)	0.37	±0.04	a	0.26	±0.05	a	68.6	±9.9	a	0.11	±0.04	b	0.43	±0.09	ab	0.13	±0.05	bc	0.06	±0.02	b
	貯留槽	19(71)	0.28	±0.06	b	0.19	±0.05	b	64.1	±10.3	a	0.10	±0.04	b	0.39	±0.07	b	0.10	±0.04	c	0.05	±0.02	b
湧別 プラント	受入槽	24(155)	0.41	±0.04	a	0.18	±0.04	c	41.5	±10.2	b	0.18	±0.04	a	0.57	±0.09	a	0.14	±0.04	b	0.09	±0.02	ab
	発酵槽	24(160)	0.37	±0.05	a	0.23	±0.04	a	61.0	±13.4	a	0.19	±0.06	a	0.56	±0.06	ab	0.23	±0.13	a	0.10	±0.03	a
	殺菌槽	13(20)	0.38	±0.04	a	0.22	±0.05	a	60.3	±6.8	a	0.16	±0.03	b	0.57	±0.05	a	0.15	±0.05	ab	0.08	±0.02	b
	貯留槽	17(28)	0.31	±0.07	b	0.20	±0.05	b	61.6	±10.4	a	0.13	±0.07	b	0.52	±0.09	b	0.16	±0.16	ab	0.07	±0.04	b

注：試料数の括弧内の数字はNH₄-Nの分析試料数

表5. バイオガスプラントにおける分離固分および完成堆肥の一般性状

施設	試料	試料数	pH		水分(FM%)		乾物(FM%)		灰分(FM%)		有機物(FM%)		C/N							
			平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD						
別海 プラント	分離固分	20	7.53	±0.58	b	75.3	±4.17	a	24.67	±4.17	a	3.73	±0.93	b	21.33	±3.67	a	22.3	±5.2	a
	完成堆肥	20	8.21	±0.34	a	76.9	±4.59	a	23.10	±4.59	a	6.33	±2.64	a	16.83	±2.71	b	15.0	±3.9	b
湧別 プラント	分離固分	24	8.29	±0.58	a	72.5	±5.93	a	27.50	±5.93	b	4.90	±2.08	b	22.43	±4.93	a	22.3	±4.41	a
	完成堆肥	24	8.47	±0.44	a	64.0	±10.79	b	35.97	±10.79	a	10.17	±4.83	a	25.96	±7.43	a	17.7	±4.33	b

表6. バイオガスプラントにおける分離固分および完成堆肥の肥料成分

施設	試料	試料数	T-N(FM%)		NH ₄ -N(FM%)		NH ₄ -N/T-N×100(%)		P ₂ O ₅ (FM%)		K ₂ O(FM%)		CaO(FM%)		MgO(FM%)								
			平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD	平均	±SD							
別海 プラント	分離固分	20	0.56	±0.09	b	0.14	±0.04	a	15.1	±8.1	a	0.34	±0.27	a	0.53	±0.10	b	0.39	±0.32	a	0.14	±0.03	b
	完成堆肥	20	0.68	±0.164	a	0.10	±0.03	a	8.2	±5.1	b	0.42	±0.19	a	0.79	±0.17	a	0.67	±0.67	a	0.21	±0.09	a
湧別 プラント	分離固分	24	0.59	±0.13	b	0.04	±0.04	a	7.1	±7.1	a	0.30	±0.13	b	0.65	±0.15	b	0.28	±0.30	b	0.14	±0.04	b
	完成堆肥	24	0.86	±0.21	a	0.01	±0.01	b	1.3	±1.2	b	0.53	±0.21	a	1.07	±0.38	a	0.55	±0.51	a	0.25	±0.09	a

3) 堆肥化に伴う性状の変化

一般に、堆肥の腐熟化に伴って、水分含量、アンモニウム態窒素含量が減少し、全窒素含量が増加し、C/N比が低下するとされる。表5、6に示すとおり、両プラントともに、有意な全窒素含量の増加、C/N比の低下が求められた。一方、水分含量およびアンモニウム態窒素含量については、湧別プラントについては有意に減少していたが、別海プラントでは、原料である分離固分と完成堆肥の間で有意差が認められなかった。

このことから、湧別プラントの堆肥は十分に腐熟が進んでいるといえる。一方、別海プラントの堆肥は、腐熟が進行しているのは間違いないが、湧別プラントに比べると、腐熟の進み具合がやや悪いようである。

4) 消化液および堆肥の肥料成分の変動

別海、湧別のプラント間では、原料スラリーの段階でアンモニウム態窒素、磷酸、カリウム含量に有意な差があり、前述したプラントの各行程が肥料成分へおよぼす影響の差異も相まって、各プラントで生成する消化液の肥料成分はそれぞれ固有で異なったものとなっていた。また、同一プラントであっても消化液の肥料成分には原料スラリーと同程度の成分変動があった（表4）。したがって、消化液を液肥として利用する場合、事前に肥料成分を分析しておく必要がある。

また、堆肥についても同じことがいえる。

5) 消化液肥料成分の簡易推定法

消化液を液肥として有効利用するには、農地への施用前に肥料成分含量を事前に把握する必要がある。前述のように、消化液は肥料成分の変動が大きく、また、プラントによっても異なる。したがって、これを液肥として利用する場合、プラント毎に施用の都度肥料成分含有量を分析する必要がある。しかしながら、各種肥料成分の分析は時間を要することから、メタン発酵消化液のための簡便な肥料成分の推定法の確立が必要である。しかしながら、肥料成分の簡便な推定法は、スラリーや堆肥については既に確立されているが、消化液についてはまだである。

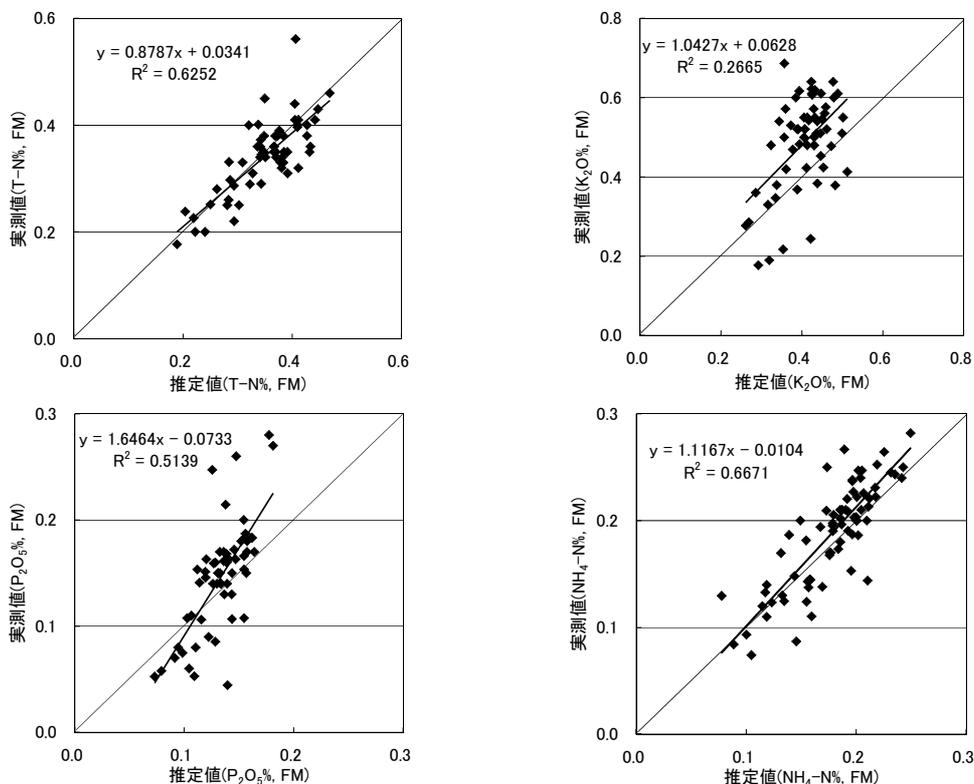


図2. 消化液肥料成分の実測値と「スラリーの肥料成分の推定式」による推定値との関係

スラリー中の肥料成分の推定式は北海道立農業・畜産試験場家畜ふん尿プロジェクト研究チームによる「家畜ふん尿処理・利用の手引き2004」に記載されており、全窒素、アン

モニウム態窒素、リン酸、カリウムともに電気伝導度と乾物含量(DM)により推定可能となっている。また、乾物含量はスラリーを2倍以上希釈したときの比重により推定可能である。

そこで、消化液中の肥料成分の推定にこれらの推定式が適用可能かどうかを検証した。なお、推定式の適合性の検証に際して、別海・湧別プラントにおける実測データの他に、平成12(2000)年度北海道農業試験場(成績会議)資料「個別型バイオガスプラントによる乳牛糞尿処理・利用システムの提示」所収のバイオガスプラント7基の消化液の分析データと本成績書Ⅲ章の1.「草地に対する効果的施用法」で畜産試験場での試験に用いた田中牧場のバイオガスプラントの消化液4試料の分析データもあわせて用いた。その結果、全窒素およびアンモニア態窒素の推定式は適合した。しかし、アンモニウム態窒素はpHとECにより、更に精度の高い推定が可能であった。その他の肥料成分の推定には独自の推定式を適用する必要があると明らかとなった(図2)。また、前述の別海・湧別プラント以外のプラントの消化液の値は、図2上で特異的な分布はしなかったことから、今回観察された傾向は消化液一般にいえる傾向と推察される。乾物含量の推定式は別海・湧別プラントの試料のみによる検証だが、やはり独自の式を適用する必要がある(図3)。

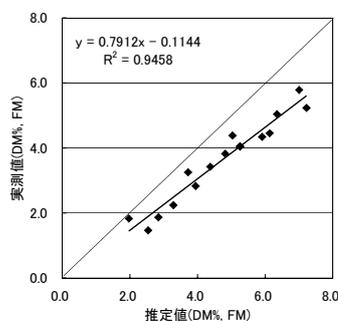


図3. 消化液の乾物含量の実測値と「スラリーの推定式」による推定値との関係

各推定式は表7のとおりとなった。乾物含量以外の推定式は前述の別海・湧別プラント以外のプラントの消化液分析値についても本式がよく適合したことから、これらの推定式は消化液一般に適用可能と考えられる。これらの推定式を活用することにより、消化液の2倍希釈液の比重ないし乾物率およびpH、電気伝導度を測定することにより、簡易かつ短時間で各種肥料成分の推定が可能である。乾物含量の推定式も、前述のように、性状の異なる別海プラントと湧別プラントのデータが混在しているにも関わらず、高い推定精度を保っていることから、他のプラントの消化液にも適用可能と考えられる。なお、比重の測定は、消化液の比重の測定値が1.03以下になるように希釈して行うこととする。

表7. 消化液の肥料成分含量および乾物含量の推定式

推定項目	回帰式	決定係数	n	備考
T-N (FM%)	$0.0314EC + 0.0172DM - 0.0553$	$R^2 = 0.6252$	61	スラリーの式と同一
NH ₄ -N (FM%)	$0.0299pH + 0.0282EC - 0.3518$	$R^2 = 0.7579$	49	
P ₂ O ₅ (FM%)	$0.0230DM + 0.0140$	$R^2 = 0.6312$	55	
K ₂ O (FM%)	$0.1017pH + 0.0175EC$ $+ 0.0494DM - 0.7595$	$R^2 = 0.4956$	55	
DM (FM%)	$(173.24 \times \text{比重} - 173.29) \times a$	$R^2 = 0.9458$	16	a=比重測定時の希釈倍率

注) 比重は比重が1.03以下になるように適宜消化液を希釈して測定する。

推定式による推定で生ずる推定誤差 (RMSE= $\sqrt{(\text{実測値}-\text{推定値})^2/\text{標本数}}$) は表8のとおりであった。

表8. 消化液の肥料成分含量の推定式の推定誤差

	T-N(FM%)	NH ₄ -N(FM%)	P ₂ O ₅ (FM%)	K ₂ O(FM%)
RMSE	0.05	0.03	0.03	0.08

5) 重金属 (Zn, Cu, Cd, Pb, As, Hg, Cr, Ni)

基本的には、メタン発酵施設における発酵処理、殺菌処理、貯留による重金属含量の変化も、堆肥発酵処理における重金属含量の変化も生じなかったが (表9、10)、別海プラントにおいて、亜鉛と銅に限り、原料スラリーより発酵槽ないし殺菌槽中の消化液で有意に高い傾向が求められた。別海プラントではし尿汚泥脱水ケーキの副資材としての受入を行っており、原因ははっきりしないが、恐らくはこれの影響と思われる。しかしながら、乳牛ふん尿を主原料にしており、し尿汚泥脱水ケーキの受入量は乳牛ふん尿の1%にも満たないため、消化液中の重金属含量は非常に少なく、肥料取締法上の基準値を大幅に下回った (表9)。豚ふん尿を主原料とする場合や、重金属が多いとされる下水汚泥や水産廃棄物等を多量に副原料として使用する場合は注意が必要である。

表9. 原料スラリーおよび消化液の重金属含量 (新鮮物当たり)

試験施設	採取槽	試料数	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)
別海 プラント	受入槽	平均値±SD n=15	11.3±3.2 b	2.4±1.2 bc	0.04±0.04 a	0.46±0.83 a	0.09±0.11 a	0.01±0.02 a	0.43±0.27 a	0.77±0.87 a
	発酵槽	平均値±SD n=15	14.3±3.4 a	6.6±5.1 ab	0.04±0.03 a	0.55±0.88 a	0.08±0.08 a	0.01±0.01 a	0.38±0.20 a	0.86±1.14 a
	殺菌槽	平均値±SD n=12	15.5±7.1 ab	12.1±11.9 a	0.03±0.03 a	1.09±1.10 a	0.07±0.07 a	0.01±0.02 a	0.35±0.20 a	0.86±0.95 a
	貯留槽	平均値±SD n=10	11.8±8.7 ab	1.8±1.1 c	0.05±0.06 a	0.53±0.89 a	0.08±0.09 a	0.01±0.01 a	0.36±0.30 a	0.80±0.95 a
湧別 プラント	受入槽	平均値±SD n=15	16.3±5.8 a	2.8±1.4 a	0.05±0.05 a	0.19±0.34 a	0.09±0.04 a	0.01±0.01 a	1.00±0.50 a	1.27±1.07 a
	発酵槽	平均値±SD n=15	14.3±1.9 a	2.7±1.0 a	0.05±0.06 a	0.10±0.13 a	0.08±0.03 a	0.01±0.01 a	0.87±0.41 a	1.18±1.15 a
	殺菌槽	平均値±SD n=8	14.2±2.1 a	2.4±0.8 a	0.04±0.05 a	0.16±0.24 a	0.06±0.03 a	0.01±0.02 a	0.98±0.45 a	1.38±1.16 a
	貯留槽	平均値±SD n=9	12.7±3.3 a	2.3±1.0 a	0.06±0.07 a	0.07±0.13 a	0.12±0.11 a	0.01±0.02 a	0.76±0.37 a	1.49±1.20 a
肥料取締法で 表示義務が生じる基準 許容値(汚泥肥料等)			300以上	900以上	—	—	—	—	—	—
			—	—	5.00	100.00	50.00	2.00	500.00	300.00

表10. 分離固分および完成堆肥の重金属含量 (新鮮物当たり)

試験施設	試料	試料数	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)
別海 プラント	分離固分	平均値±SD n=11	21.5±12.3 a	3.4±1.8 a	0.07±0.06 a	0.66±0.81 a	0.10±0.08 a	0.01±0.01 a	0.85±0.51 a	1.46±1.19 a
	完成堆肥	平均値±SD n=13	30.8±17.7 a	5.4±2.9 a	0.08±0.07 a	0.66±0.95 a	0.13±0.06 a	0.01±0.01 a	1.51±0.99 a	2.30±2.34 a
湧別 プラント	分離固分	平均値±SD n=11	36.7±47.9 a	4.4±1.9 a	0.07±0.07 a	0.10±0.20 a	0.14±0.10 a	0.01±0.01 a	1.69±1.25 a	2.27±1.06 a
	完成堆肥	平均値±SD n=14	34.7±19.1 a	6.9±4.0 a	0.09±0.08 a	0.14±0.18 a	0.19±0.10 a	0.01±0.01 a	2.46±1.36 a	3.31±2.55 a
肥料取締法で 表示義務が生じる基準 許容値(汚泥肥料等)			300以上	900以上	—	—	—	—	—	—
			—	—	5.00	100.00	50.00	2.00	500.00	300.00

6) 発酵処理による雑草種子発芽率の変化

中温発酵処理、高温発酵処理によりエゾノギシギシの無休眠種子は全く認められなくなった。しかし、中温発酵処理30日間で36%、高温発酵処理20日間で14%、同30日間で9%の二次休眠種子が残存し、完全死滅には至らなかった。中温発酵処理後の加熱処理により、二次休眠種子率は4~11%に低下した。しかし、中温発酵後の加熱温度および加温時間の違いの影響は判然としなかった。いずれにしても、中温発酵と加熱処理の組み合わせないし高温発酵処理により、エゾノギシギシ種子の約9割を死滅させ、二次休眠種子を1割前後に抑えることが可能であり、これらの処理により原料スラリー中に混入したエゾノギシギシ種子の生存率を効果的に低下させることが明らかとなった (表8)。

表11. 発酵および加温処理がエゾノギシギシ種子の発芽におよぼす影響

処理	供試種子数 (個)	無休眠種子率 (%)	二次休眠種子率 (%)	死滅種子率 (%)
対照区	100	94.0	0.0	6.0
中温発酵30日(MF)	100	0.0	36.0	64.0
MF+70°C1時間	100	0.0	11.0	89.0
MF+70°C5時間	100	0.0	5.0	95.0
MF+55°C4時間	100	0.0	4.0	96.0
MF+55°C7.5時間	100	0.0	10.0	90.0
MF+55°C15時間	100	0.0	11.0	89.0
高温発酵20日	100	0.0	14.0	86.0
高温発酵30日	100	0.0	9.0	91.0

6 まとめ

- ①消化液はスラリーに比べて、乾物含量が少ないために流動性が高く、即効性窒素としてのアンモニウム態窒素に富む液肥として評価できる。
- ②無蓋型の消化液貯留槽を用いると、貯留中にアンモニア揮散が生じ、消化液中の窒素成分の損失を招くので、有蓋型の消化液貯留槽を用いることが望ましい。
- ③プラントの原料－消化液の処理フロー内において、固形分の沈殿が発生する箇所が存在すると、肥料成分（特に、リン酸、マグネシウム）の損失が発生するので、このような現象が発生しないように、設計時・運転時に留意すべきである。
- ④各プラントで生成する消化液および堆肥の肥料成分はそれぞれで固有であり、同一プラントであっても肥料成分は変動するので、これらを肥料として利用する場合、事前に肥料成分を分析する必要がある。
- ⑤消化液の肥料成分は表7に示す推定式により、迅速・簡易な分析が可能な電気伝導度(EC)、乾物率(DM)、pH、比重の各種分析値により、推定可能であった。
- ⑥乳牛ふん尿を原料とする限り、メタン発酵消化液中の重金属含量は非常に少なく、メタン発酵消化液の液肥利用に伴う重金属害の問題は発生しないと推察される。
- ⑦中温発酵処理と加熱処理の組合せないし高温発酵処理により、エゾノギシギシ種子の約9割を死滅させ、生存率を効果的に低下させることができた。

1 課題名 2 生成物の効果的換言技術と環境負荷に関する検討

1) 草地に対する消化液の効果的施用法の確立

2 担当場所研究科室名 北海道立根釧農業試験場 研究部 草地環境科
北海道立畜産試験場 環境草地部 畜産環境科

3 はじめに

メタン発酵による家畜ふん尿処理システムで生成されたメタン発酵消化液（以下、消化液）を適切に農地に還元し、有機性資源の循環利用を図るため、草地に対する消化液の肥効特性を明らかにし、効果的な施用量と施用時期について検討する。

4 調査・試験方法

1) 消化液の肥効特性

(1) 目的

消化液とふん尿スラリー（以下、スラリー）の草地に対する肥効特性を比較する。

(2) 方法

試験は表1に示す北海道立根釧農業試験場（以下、根釧農試）と北海道立畜産試験場（以下、畜試）の2カ所で実施した。供試資材の化学性を表2に示す。畜試で供試した消化液は、発酵前に原料を曝気したので、根釧農試で供試したものに比較してアンモニウム態窒素含量が低い傾向を有していた。これら消化液の肥効特性を、表1の条件でスラリーと比較した。

表1. 試験設計の概要（処理の詳細はP.15の附表1参照）

試験場所	根釧農試	畜試
年次	2002-2004年	2000-2003年
供試土壌	黒色火山性土	
供試草地	チモシー「ノサップ」単播草地 (毎年異なる草地を供試)	
供試資材(消化液)	集中型プラント消化液 (中温発酵、30日滞留)	個別型プラント消化液 (高温発酵、14日滞留) 発酵前に原料を曝気
対照資材(スラリー)	同プラント原料受入槽のスラリー	プラントと無関係な農家のスラリー
消化液とスラリーの施用量と時期	4 t/10a (秋または春に全量施用) 無施用区併置	5-8 t/10a (秋、春、夏のいずれかに全量施用) 無施用区併置
化学肥料 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	年間8-6-2 kg/10a (早春：1番後=2:1) 無施用区併置 (2002年は無施用のみ)	年間0-8-0 kg/10a (早春：1番後=2:1)

表2. 供試資材一覧

場所	施用年	種類	施用量 t/10a	水分 含量	肥料養分含量							
					窒素				リン酸 カリウム カルシウムマグネシウム			
					T-N	NH ₄ ⁺ -N	窒素 乾物当たり NH ₄ ⁺ -N	NH ₄ ⁺ -N/T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
----- 現物中% -----				----- 現物中% -----								
根釧農試	2001-2002	消化液	4.0	97.8	0.13	0.10	4.5	76	0.06	0.20	0.08	0.04
	2001-2002	スラリー ¹⁾	4.0	94.8	0.27	0.12 ³⁾	2.3	45	0.13	0.36	0.13	0.07
	2002-2003	消化液	4.0	96.8	0.25	0.14	4.5	57	0.07	0.41	0.10	0.05
	2002-2003	スラリー ¹⁾	4.0	93.0	0.30	0.16	2.3	52	0.14	0.46	0.23	0.09
	2003-2004	消化液	4.0	95.4	0.23	0.18	4.0	79	0.10	0.46	0.21	0.08
	2003-2004	スラリー ¹⁾	4.0	92.2	0.37	0.19	2.5	52	0.16	0.49	0.27	0.09
畜試	1999	消化液	8.0	—	0.30	0.14	—	45	0.20	0.29	0.06	0.07
	2000	消化液	6.3	94.9	0.37	0.17	3.3	45	0.21	0.37	0.26	0.11
	1999-2000	スラリー ²⁾	5.0	88.0	0.43	0.15	1.3	35	0.20	0.50	0.17	0.11
	2000-2001	消化液	5.0	95.6	0.30	0.09	2.0	29	0.15	0.38	0.20	0.10
	2000-2001	スラリー ²⁾	5.0	93.0	0.29	0.11	1.6	39	0.10	0.31	0.19	0.11
	2002	消化液	5.0	95.5	0.33	0.11	2.5	33	0.25	0.42	0.21	0.09
	2002	スラリー ²⁾	5.0	89.7	0.35	0.13	1.3	38	0.15	0.39	0.27	0.13
	2003	消化液	5.0	95.7	0.29	0.14	3.2	48	0.16	0.47	0.32	0.19
2003	スラリー ²⁾	5.0	92.8	0.29	0.11	1.5	37	0.13	0.38	0.12	0.14	

- 1) バイオガスプラントの原料受入槽から採取した原料スラリー
 2) プラントとは無関係の農家から採取したスラリー
 3) EC(電気伝導度)、DM(乾物率)による簡易推定

< 肥効評価の方針 >

消化液の肥効特性を明らかにするため、その施用によって期待される牧草の養分吸収増加量を、既に北海道で設定されているスラリーの肥効評価法によって予測し、実測値との適合性を調査する。なお、スラリーの肥効は単年度で評価されている。消化液についても参考試験(P.14)により、翌年の残効が十分に小さいことが確認されたので、単年度で肥効評価を実施する。

ア. スラリーを肥料に換算する現行の方法

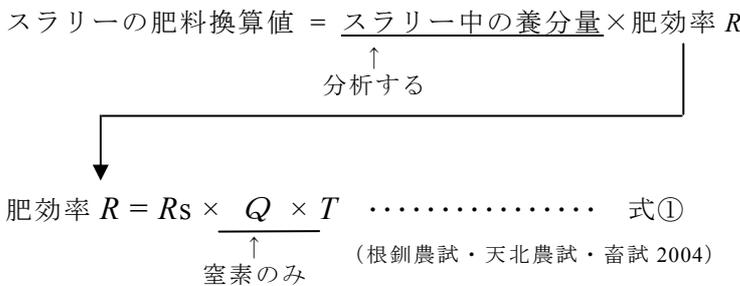


表3-1. スラリーの基準肥効率 R_s

窒素	リン酸	カリウム
0.4	0.4	0.8

表3-2. 品質の違いによる窒素の補正係数 Q

区分	乾物当たり NH ₄ ⁺ -N%	補正係数
肥効大	3.5~	1.2
中	1.5~3.5	1.0
小	~1.5	0.8

イ. R を圃場試験の結果から求める方法

(根釧農試・天北農試・畜試 2004)

$R = \frac{(U_M - U_{M0})}{N_M} \div a$ 式②

↑
みかけの養分利用割合

ここで、

- U_M : スラリー施用区の養分吸収量 (kg/10a)
- U_{M0} : スラリー無施用区の養分吸収量 (kg/10a)
- N_M : スラリーによる養分施用量 (kg/10a)
- U_F : 化学肥料施用区の養分吸収量 (kg/10a)
- U_{F0} : 化学肥料無施用区の養分吸収量 (kg/10a)
- N_F : 化学肥料による養分施用量 (kg/10a)
- a : 化学肥料の利用割合 (kg/kg) a = (U_F-U_{F0})/N_F

表3-3. 施用時期の違いによる窒素の補正係数 T

施用時期	補正係数
9月上旬~10月下旬	0.8
4月~5月上旬	1.0
5月中旬	0.8
1番草収穫後	0.9

(根釧農試・天北農試・畜試 2004)

ウ. 消化液の施用によって期待される養分吸収量の増加量（養分吸収増加量）

を予測する方法

式①と式②から、消化液施用に伴う試験区への養分施用量と化学肥料の利用割合が得られていれば、式③により地上部の養分吸収増加量を予測できる。この予測値と消化液施用区における実測値が等しければ、消化液の肥効はスラリーの肥効評価法で良好に説明し得ると判断できる。

スラリー評価による予測法 A

$$\begin{aligned}U_M - U_{M0} &= N_M \times R \times a \\ &= N_M \times R_s \times \underbrace{Q \times T}_{\substack{\uparrow \\ \text{窒素のみ}}} \times a \quad \dots\dots\dots\text{式③}\end{aligned}$$

なお、消化液における窒素の肥効はアンモニウム態窒素によってよく評価できることが知られているので、含まれるアンモニウム態窒素の全てが化学肥料と同様に利用されると考え、式④による予測方法 B による検証も試みた。

アンモニウム態窒素評価による予測法 B

$$U_M - U_{M0} = AN_M \times T \times a \quad \dots\dots\dots\text{式④}$$

ここで、 AN_M ：スラリーによるアンモニウム態窒素施用量 (kg/10a)

2) 消化液の効果的施用時期・施用配分

(1) 目的

前節では、消化液の肥効評価に対し、スラリーを対象とする現行の評価法が利用可能であることを明らかにした。これにより、消化液とスラリーにおける肥効の類似性が示された。スラリーではすでに施用時期による肥効の変化、春秋分施の有効性などが指摘されている。そこで、消化液についても効果的な施用時期と配分に関する検証を行う。

(2) 方法

- ① 供試草地：チモシー「ナップ」単播草地(根釧農試験内、黒色火山性土)、毎年異なる草地を供試
- ② 試験処理：供試消化液の化学性 表 1 に同じ
施用量 4t/10a、
施用時期 秋（前年 10 月）、春（5 月中旬）、夏（1 番草収穫後の 7 月）
施用配分 6 処理 ①秋全量、②秋重点=秋 3t：春 1t、③秋春等量、
④春重点=秋 1t：春 3t、⑤春全量、⑥夏全量）
化学肥料 2002 年無施用、2003・2004 年併用、併用量は試験 1 に同じ

3) 現地実証試験

(1) 目的

これまでに設定した消化液の肥効評価法を用い、化学肥料を併用した施肥設計の妥当性を実証する。

(2) 方法

① 供試草地

別海試験地

チモシー単播草地（北海道開発土木研究所別海プラント内、黒色火山性土、2000年造成）

湧別試験地

チモシー・アカローハ¹⁾・シロローハ¹⁾混播草地（同湧別プラント内、擬似グライ土、2000年造成）

② 供試資材および施用量

ア. 供試資材

別海試験地：北海道開発土木研究所 別海プラントの消化液

湧別試験地： 同 湧別プラントの消化液

それぞれの化学性を表4に示す。

消化液中の全窒素含量に占めるアンモニウム態窒素含量はいずれも50%以上であることから、アンモニウム態窒素に基づく肥効評価がより正確と考えられる。この場合、全供試資材の平均値では、消化液1t当たり窒素2.0kg、リン酸0.5kg、カリウム3.5kgの肥料価値を有すると算定され、現行の一般的なスラリーの目安に近かった。

表4. 供試資材の化学性

試験地	年次	施用 ¹⁾ 時期	水分 含量	肥料養分含量						消化液1t当たりの化学肥料換算値				
				窒素(N)			リン酸 (P ₂ O ₅)	カリウム (K ₂ O)	窒素(N)					
				T-N (a)	NH ₄ ⁺ -N (b)	比 (b/a)			乾物当たり NH ₄ ⁺ -N % ²⁾	スラリー 評価 kg/t	NH ₄ ⁺ -N 評価 kg/t	リン酸 (P ₂ O ₅) kg/t	カリウム (K ₂ O) kg/t	
			---	現物中%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
別海	2002	秋	98	0.13	0.10	0.77	6.1	1.2	0.05	0.19	0.6	1.0	0.2	1.5
		春	97	0.30	0.21	0.71	7.2	1.2	0.09	0.34	1.5	2.1	0.4	2.7
	2003	秋	97	0.25	0.17	0.66	5.2	1.2	0.14	0.36	1.2	1.7	0.6	2.8
		春	97	0.26	0.15	0.58	5.0	1.2	0.09	0.39	1.2	1.5	0.4	3.1
	2004	秋	95	0.23	0.18	0.79	4.0	1.2	0.10	0.46	1.1	1.8	0.4	3.7
		春	95	0.39	0.25	0.63	5.0	1.2	0.14	0.50	1.9	2.5	0.6	4.0
湧別	2002	春	—	0.41	0.25	0.62	—	1.2	0.16	0.57	1.9	2.5	0.6	4.5
	2003	春	95	0.35	0.21	0.60	3.9	1.2	0.17	0.60	1.7	2.1	0.7	4.8
	2004	春	97	0.28	0.25	0.89	7.3	1.2	0.11	0.48	1.3	2.5	0.4	3.8
										平均	1.4	2.0	0.5	3.5

1) 秋施用は前年10月、春施用は当年5月中旬までに実施

2) スラリーの品質の違いによる補正係数

イ. 消化液と化学肥料の施用量

消化液は秋または早春に全量施用した。化学肥料は早春に年間の2/3、1番草収穫後に残りの1/3の割合で分施した。消化液はほぼ計画どおりの量を施用できた。これにより、肥料養分量もおおむね設定に近く、実証試験は精度良く実施できた。ア. ではアンモニウム態窒素に基づく肥効評価が妥当と判定したが、スラリー評価でも年間合計の窒素施肥量が大きく変わることはなかった。なお、本試験は同一草地における連用条件で実施された（表5）。

表5. 現地試験の施肥設計

試験地	年次	処理 ¹⁾	消化液t/10a		化学肥料 kg/10a			肥料養分合計 kg/10a			
			目標	実績	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N ²⁾		P ₂ O ₅	K ₂ O
								A	B		
別海	2002	消化液秋施用(2001年秋)	4	4.1	14	7	9	16	17	8	15
		同 春施用(2002年春)	2	2.1	14	7	9	16	17	8	15
		対照区	0	0	16	7	16	16	16	7	16
	2003	消化液秋施用(2002年秋)	4	4.3	12	6	8	16	18	9	20
		同 春施用(2003年春)	4	4.3	12	6	8	16	17	8	21
		対照区	0	0	16	9	20	16	16	9	20
	2004	消化液秋施用(2003年秋)	4	4.3	12	6	2	16	19	8	18
		同 春施用(2004年春)	3	2.6	12	7	8	16	17	8	18
		対照区	0	0	15	7	21	15	15	7	21
湧別	2002	消化液区(春施用)	4	3.7	0	8	0	6	7	11	17
		対照区	0	0	6	10	18	6	6	10	18
	2003	消化液区(春施用)	4	4.2	0	8	0	6	7	11	20
		対照区	0	0	6	10	23	6	6	10	23
	2004	消化液区(春施用)	5	4.7	0	6	0	5	9	8	18
		対照区	0	0	5	8	18	5	5	8	18

1) 秋施用は前年10月、春施用は当年5月中旬までに実施

2) A：スラリー評価、B：アンモニウム態窒素評価

③ 試験規模

試験地の規模を図1に示す。施肥・収穫等の管理作業は、別海試験地では協力農家またはコントラクターの慣行機械体系により、また、湧別試験地では人手によって実施された。なお、収量調査時には研究員が1m² 枠による坪刈り調査を行った。

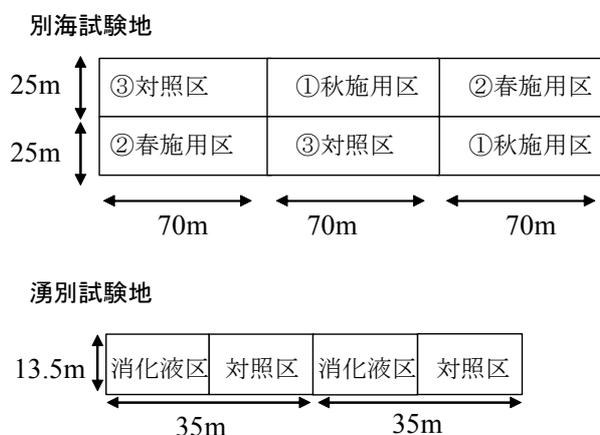


図1. 実証試験の規模

5 調査結果および考察

1) 消化液の肥効特性

(1) 収量水準

- ① 年間乾物収量は 360-1010kg/10a の範囲にあった。このうち、化学(窒素)肥料無施用条件で実施された畜試および根釧農試 2002 年の区で少なかったが、化学肥料を併用した根釧農試 2003-2004 年では 800-1000kg/10a の目標収量水準を得た (図 2)。
- ② 畜試では消化液区がスラリー区よりも多収となった例が多かったが、根釧農試では明瞭でなかった。これは、根釧農試で供試された消化液の窒素含量が全窒素、アンモニウム態窒素ともにスラリーよりも低い傾向にあったためと考えられる (図 2、表 2)。

(2) 窒素の肥効評価

- ① 消化液の見かけの利用割合はスラリーよりも高かった。しかし、その程度は年次と場所によって大きく異なった (図 3)。

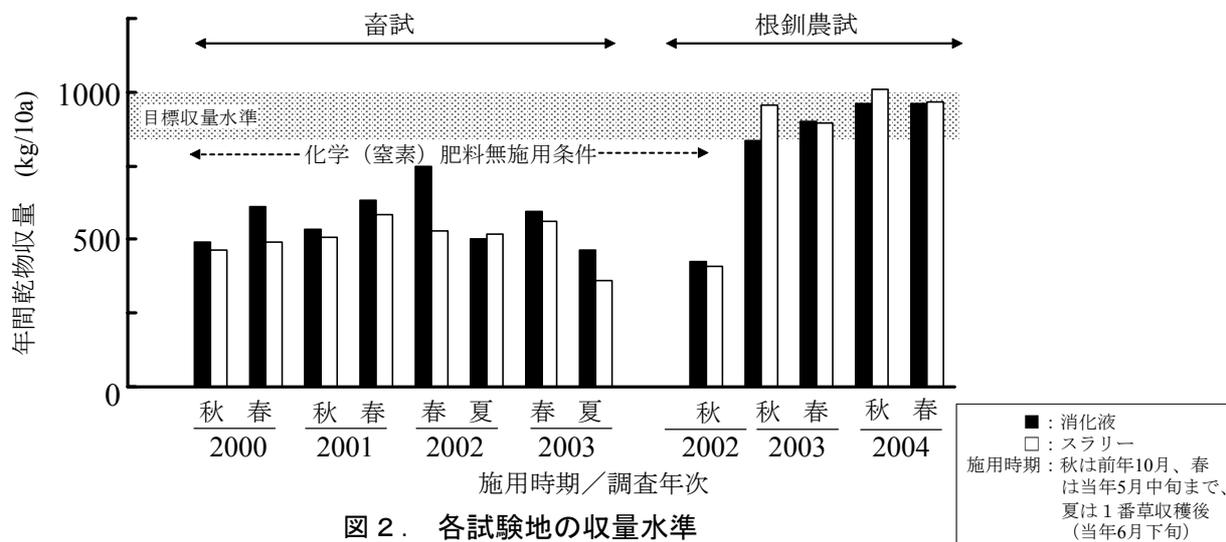


図 2. 各試験地の収量水準

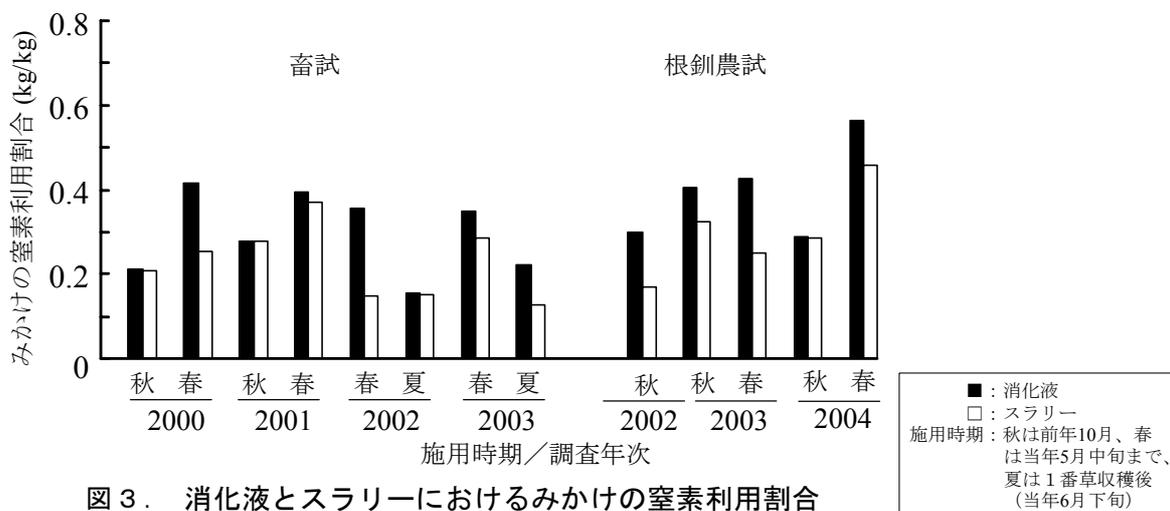


図 3. 消化液とスラリーにおけるみかけの窒素利用割合

- ② ①における肥効の変動について、A.スラリー評価（式③）とB.アンモニウム態窒素評価（式④）による説明を試みた。
- ③ いずれの評価法でも予測値と実測値はおおむね良好に対応した（図4）。このことから、消化液の肥効は、スラリー評価とアンモニウム態窒素評価のいずれによっても評価可能と判断された。

<適合度の比較>

- ④ スラリー評価では、品質の補正によって $0.4 \times 1.2 \approx 0.5$ が最大の肥効率となる（図5）。これは、全窒素量の半分をアンモニウム態窒素が占める消化液の肥効をアンモニウム態窒素評価で見積もった場合の評価値に等しい。
- ⑤ このため、アンモニウム態窒素が全窒素の半分以上を占める消化液では、スラリー評価では対応しきれず、アンモニウム態窒素評価による対応が良好になると予想できる。
- ⑥ 以上の仮説に基づき、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合を0.5以上および0.5未満の2群に区分し、双方の適合性を比較した。
- ⑦ その結果、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が0.5未満の消化液に対してはスラリー評価が、また0.5以上の消化液に対してはアンモニウム態窒素評価が良好な適合性を示し（RMSE値が小さく）、上記の仮説が支持された（図5）。

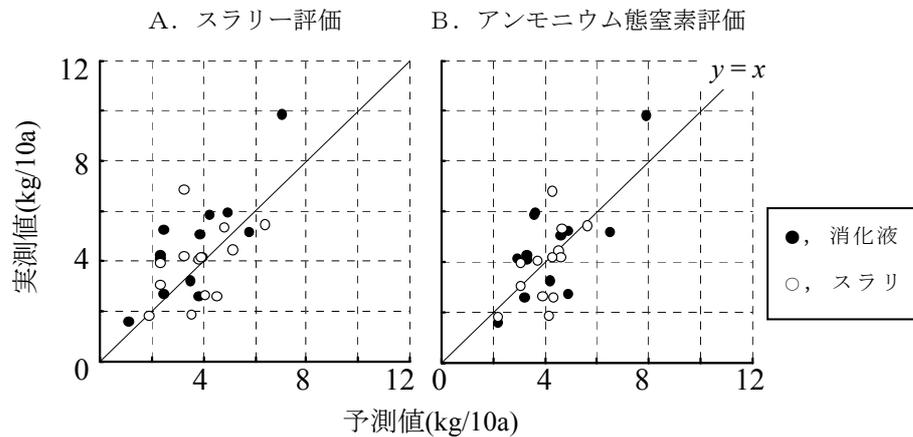


図4. 窒素吸収増加量に対する適合性

●, 消化液 ; ○, スラリー

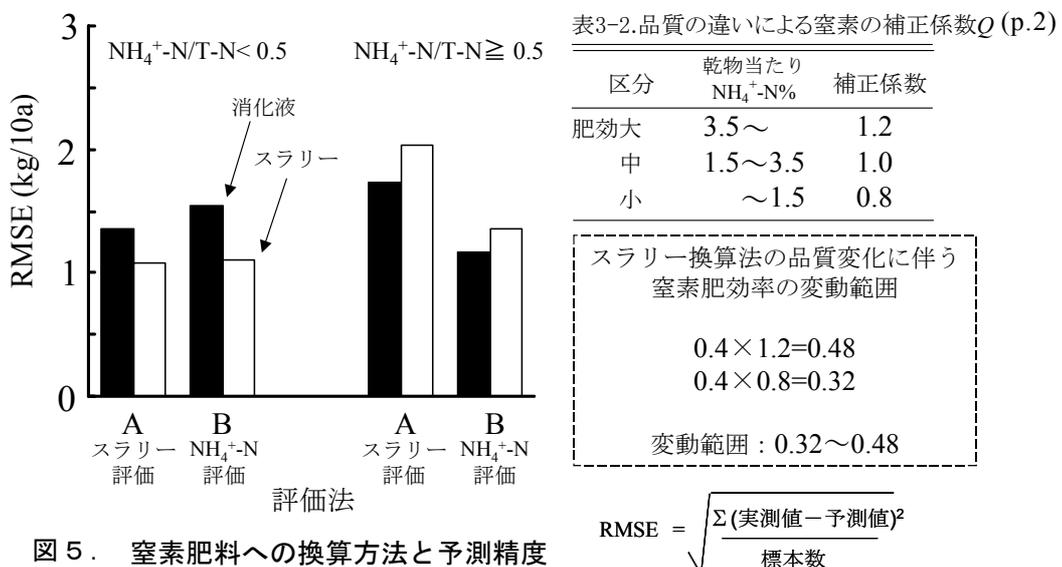


図5. 窒素肥料への換算方法と予測精度

(3)リン酸とカリウムの肥効評価

- ① 根釧農試で供試した消化液におけるみかけのリン酸利用割合は、スラリーよりも平均で約3割高い傾向にあったが、畜試では明瞭でなかった（図6）。
- ② そこで、根釧農試で供試した消化液におけるリン酸の基準肥効率も、スラリーより約3割高いとすると、その値は $0.4 \times 1.3 \approx 0.5$ 程度と見積もられる。しかし、消化液中のリン酸含量は低いので、消化液の施用が牧草のリン酸吸収量に及ぼす影響はきわめて小さい（図7）。
- ③ そこで、厳密には、根釧農試と畜試で施肥反応の異なる可能性を否定できないが、消化液とスラリーのみかけのリン酸利用割合には、場所によらず大差ないと見なすことにした。
- ④ 消化液におけるみかけのカリウム利用割合は、根釧農試、畜試のいずれにおいてもスラリーと同程度と認められた。
- ⑤ 窒素の場合と同様に、リン酸とカリウムの吸収増加量をスラリー評価で予測し、実測値と比較した。いずれの試験地でも、両者は良好に対応し、消化液のリン酸とカリウムの肥効はスラリー評価で見積もることが可能と判断した（図7）。

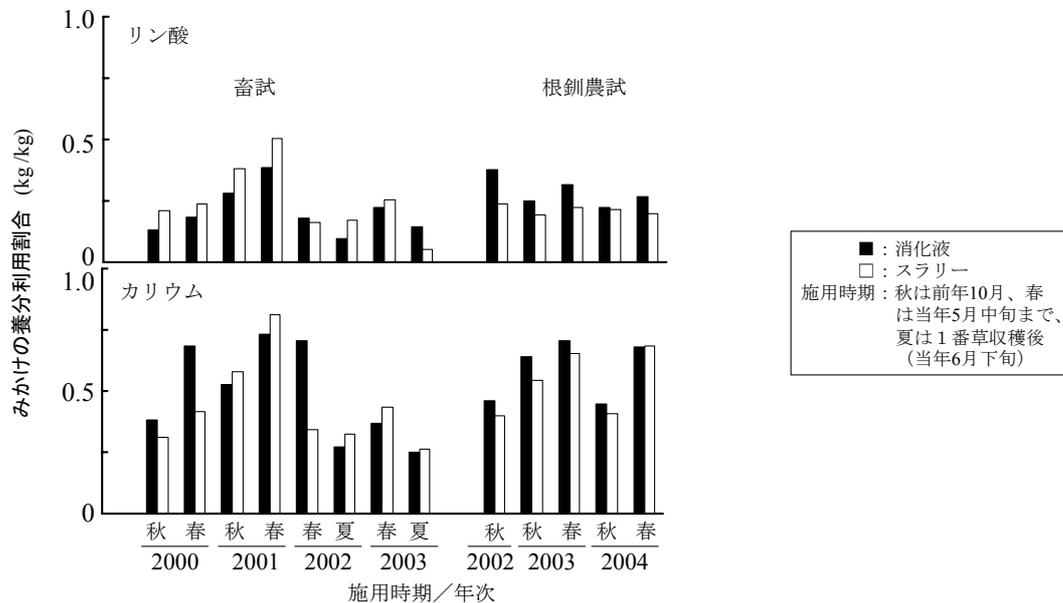


図6. 消化液とスラリーにおけるみかけのリン酸およびカリウム利用割合

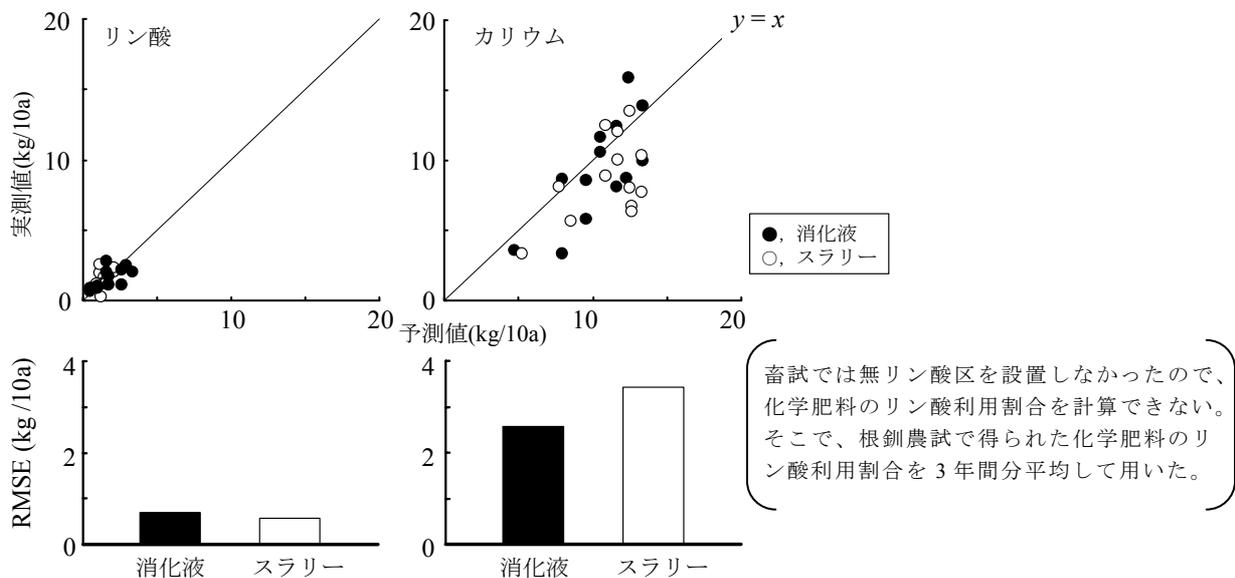
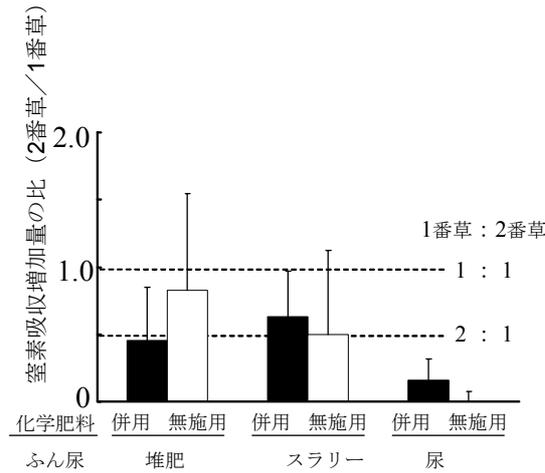


図7. リン酸およびカリウム吸収増加量に対する適合性

(4)化学肥料併用時の施肥配分

- ① 消化液の秋施用区と春施用区を対象に、1番草と2番草に発現する肥効を比較するため、養分吸収増加量について、1番草に対する2番草の比の値を算出した(図8)。
- ② 1番草に対する2番草の比の値は、化学肥料併用の有無によらず、0.5を下回った。参考図と比較すると、消化液の肥効はスラリーよりも尿に近い配分を示すと思われた(図8、参考図)。
- ③ したがって、消化液施用時に化学肥料を補填する場合には、尿と同様に、当該番草に対して補填量を計算することが合理的であると結論した。



参考図. 堆肥、スラリー、尿施用時の1番草と2番草における窒素吸収増加量の割合(根釧・天北・畜試 2004)

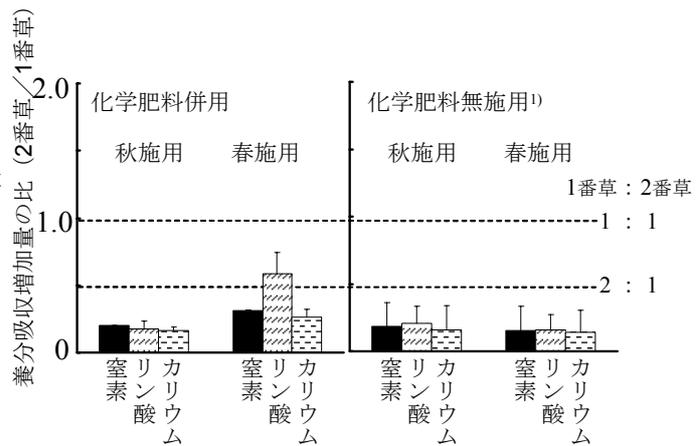


図8. 消化液施用時の1番草と2番草における養分吸収増加量の割合

1) 畜試はいずれの区でもリン酸8kg/10aを施用しているが、窒素とカリウムが無施用であり、収量水準も根釧農試の化学肥料無施用条件に近いので(図1)、化学肥料無施用条件に含めて計算した。

(5)まとめ

- ① 消化液は、窒素、リン酸およびカリウムともに、現行のスラリーを対象とする換算方法によって肥料に換算できる(表3-1~3、表6)。
- ② このうち、窒素の肥効については、含まれるアンモニウム態窒素の全部が化学肥料と同様に利用されると見なす評価法でも良好な評価が可能であった。この評価法は、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が50%以上を占めるとき、特に良好な対応を示した(図4、図5、表6)。
- ③ 消化液施用時に化学肥料を補填する場合は、当該番草に対して補填量を計算する(表6)。

表6. バイオガスプラント消化液の基準肥効率¹⁾

窒素		リン酸	カリウム
全窒素 ²⁾	アンモニウム態窒素 ³⁾		
0.4	1.0	0.4	0.8

1) 肥効評価は当該番草を対象とする。
 2) $\text{NH}_4^+\text{-N} / \text{T-N} < 0.5$ のとき適合性が高い。スラリーの補正係数を用いて品質と施用時期により補正する。
 3) $\text{NH}_4^+\text{-N} / \text{T-N} \geq 0.5$ のとき適合性が高い。スラリーの補正係数で施用時期についてのみ補正する。

2) 消化液の効果的施用時期・施用配分

(1) 収量とみかけの利用割合

- ① 化学肥料無施用条件で実施した 2002 年では、収量水準が低く、処理間差が明瞭でなかった。そこで、化学肥料を併用し、目標収量水準で比較すると、消化液の施用効果は秋春等量分施肥区で高い傾向が認められた。1 番草に効果を期待できない夏全量区では、いずれの年次でも高収を得られなかった (図 9)。
- ② みかけの窒素利用割合は、2003 年度の春全量区を除き、秋施用量の多い区ほど低く、越冬前後における窒素の損失が示唆された (図 10)。
- ③ これはすでに知られているスラリーの傾向と同様である。このような結論に至った理由について、早春の地上部窒素吸収量の推移と収量構成要素の面から確認を行った。

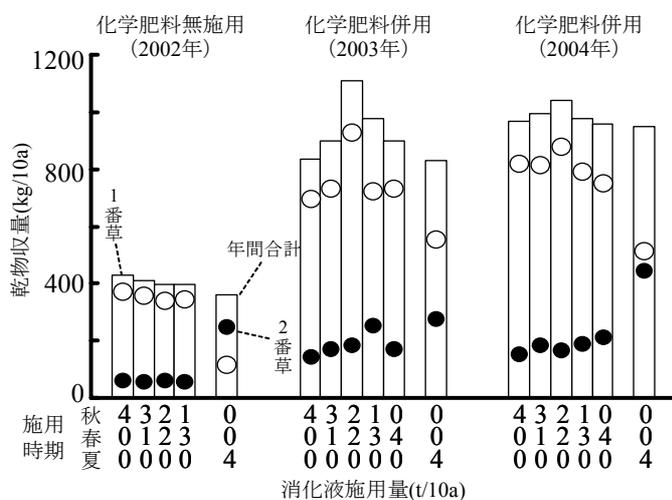


図 9. 消化液の施用配分がチモシー単播草地の乾物収量に及ぼす影響 (根釧農試)

施用時期：秋は前年 10 月、春は当年 5 月中旬まで、夏は 1 番草収穫後 (7 月中旬)

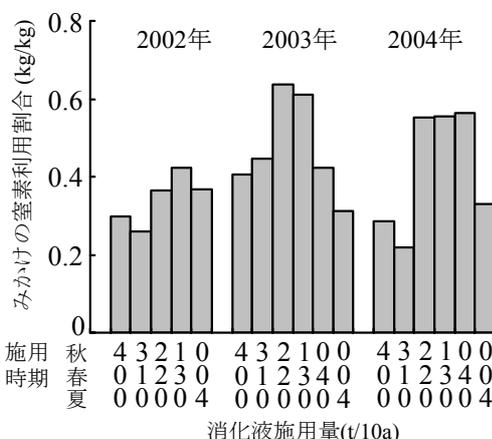


図 10. 消化液の施用時期と配分がみかけの窒素利用割合に及ぼす影響 (根釧農試)

(2) チモシーの収量構成要素

- ① 早春、萌芽後におけるチモシーの生育は、秋の消化液施用量が多い区ほど旺盛であった。このため、萌芽日から消化液を施用するまでの期間の地上部における窒素吸収量も、秋の施用量が多い区ほど多かった (図 11)。
- ② 春(5 月 17 日)に消化液を施用された区では、その後、急激に窒素吸収量が増大したため、6 月 3 日の地上部における窒素吸収量は春の施用量の多い区ほど多くなった (図 11)。秋施用量の多い区における地上部の窒素吸収量は、越冬前後の窒素の損失により、春施用量の多い区に及ばなかったものと考えられた。
- ③ ただし、6 月 3 日の地上部における窒素吸収量は、いずれの区でも、1 番草有穂茎数の確保に必要とされる 5 kg/10a (松中 1987) を越えていた(図 11)。
- ④ これに対応し、いずれの区の 1 番草でも 900 本/m²前後の十分な有穂茎数を得た(図 12)。
- ⑤ 一方、1 番草有穂茎の一茎重は秋春等量分施肥(2:2)区で最も大きな値を得た (図 12)。
- ⑥ 秋全量および秋重点区では、越冬前後における窒素の損失が相対的に大きく、翌春の消化液施用量が少ないので、一茎重が秋春等量区に及ばなかった。また、春重点および春全量区では、茎数の増加する時期が遅く、小さな有穂茎が多くなったため、一茎重が相対的に小さくなったと推察された。

⑦ 以上により、年間 4t/10a 程度の消化液施用量では、秋春等量分施が、越冬前後における窒素の損失を相対的に少なくし、1 番草有穂茎数と一茎重の確保によって高収を維持する効果的な施用方法と考えられた。

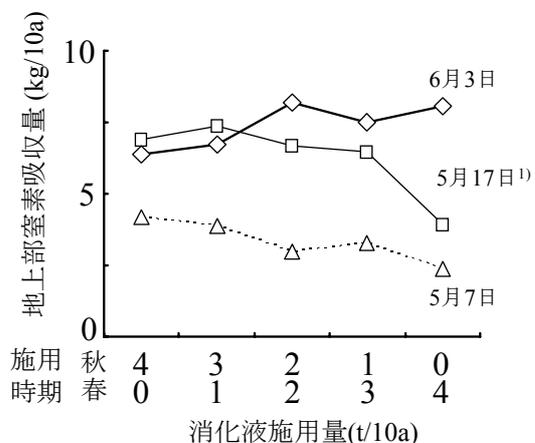


図 11. 消化液の施用配分がチモシー単播草地における地上部窒素吸収量の推移に及ぼす影響(根釧農試 2004年)

1) 春の消化液施用は5月17日の調査直後に実施

施用時期：秋は前年 10 月、春は当年 5 月中旬

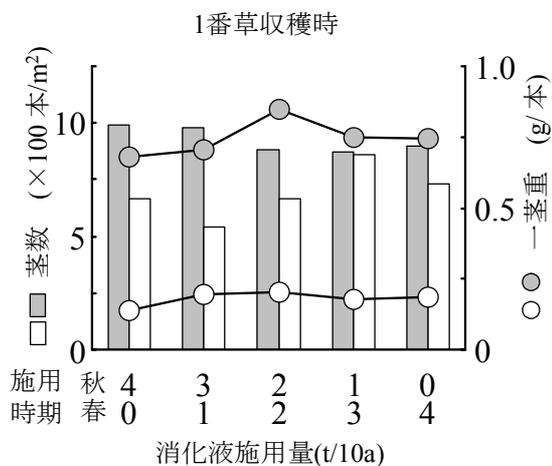


図 12. 消化液の施用配分が収穫時におけるチモシー 1 番草の収量構成要素に及ぼす影響(根釧農試 2004年)

■, ●, 有穂茎; □, ○, 伸長茎

(3) まとめ

年間 4t/10a 程度の消化液施用量では、秋春等量分施が、越冬前後における窒素の損失を相対的に少なくし、1 番草有穂茎数と一茎重の確保によって高収を維持する効果的な施用方法である。

3) 現地実証試験

- ① 消化液のアンモニウム態窒素含量に基づいた施肥設計を適用することにより、いずれの試験地でも、化学肥料で施肥標準並みに管理された対照区と同等の乾物収量を得た(図13)。
- ② 別海試験地における消化液施用区の1番草カリウム含量は、2年間対照区を上回った(表7)。これは、本来、1番草に対して行うべきであった化学肥料の減肥を(表6)、早春と1番草後に配分したため、早春の減肥が不十分になった結果と考えられた。
- ③ 以上を除けば、消化液施用区の牧草体養分含量は対照区と概ね同程度であった(表7)。
- ④ これにより、表6に提示した肥効評価と分施方法の妥当性が確認されたと判断する。
- ⑤ 本試験は、連用条件で実施されたが、牧草体養分含量は経年的に増大しなかった。消化液の肥効は、施用当年に顕著に発現し、翌年以降の残効はきわめて少ないことがあらためて確認された(表7)。
- ⑥ まとめ

2カ所3年間で実施された現地試験により、牧草収量および牧草体養分含量の面から、本試験で提起した消化液に対する肥効評価の妥当性を実証した。

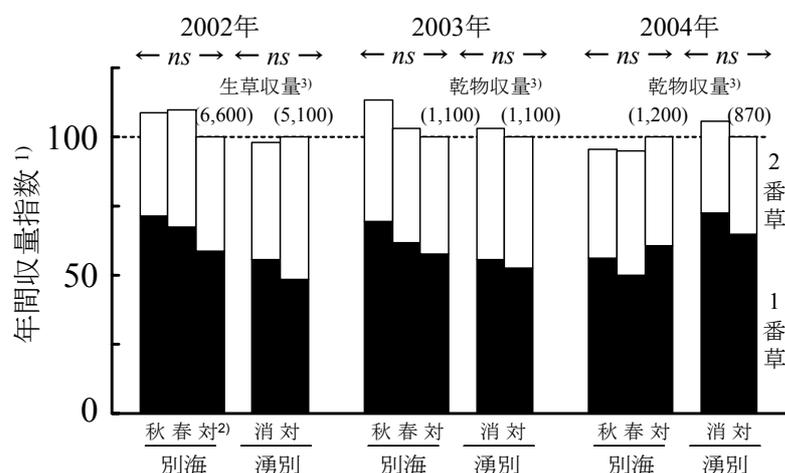


図13. 消化液と化学肥料の併用が牧草収量に及ぼす影響

- 1) 対照区の年間収量を100とした指数, ()内の数値は実数(kg/10a)
- 2) 秋, 消化液を前年10月に施用; 春, 消化液を当年5月中旬に施用;
消, 消化液を5月中旬に施用; 対, 化学肥料のみ施用
- 3) 2002年は根釧農試草地環境科における臨時職員雇用体制の激変に伴って、研究作業能率が著しく低下した結果、牧草試料が腐敗し、乾物収量を求められなかった。

表7. 各試験地における牧草体養分含有率

年次	試験地	処理	1番草					2番草				
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
2003	別海	対照	1.7	0.6	2.7 ^a	0.3	0.2	2.2	0.7	3.0	0.5	0.3
		春施用	2.1	0.7	3.5 ^b	0.4	0.3	2.2	0.7	2.7	0.5	0.4
		秋施用	2.1	0.6	3.4 ^b	0.3	0.3	2.3	0.7	2.4	0.5	0.4
湧別	対照	1.3	0.7	2.5	0.4	0.3	2.0	1.0	2.9	0.7	0.5	
	消化液	1.6	0.7	2.4	0.6	0.4	2.2	1.1	3.0	0.8	0.5	
2004	別海	対照	2.1	0.5 ^a	2.5 ^a	0.3	0.2	2.0	0.5 ^a	2.6	0.3	0.2 ^a
		春施用	2.6	0.7 ^b	3.4 ^b	0.3	0.2	2.2	0.6 ^b	2.6	0.3	0.3 ^b
		秋施用	2.2	0.6 ^a	2.4 ^a	0.3	0.3	2.4	0.6 ^b	2.0	0.4	0.4 ^b
湧別	対照	1.6	0.7	2.3	0.4	0.3	1.8	1.0	2.2	0.5	0.4	
	消化液	1.9	0.7	3.0	0.6	0.3	1.8	1.1	2.0	0.5	0.4	

秋施用は前年10月、春施用は当年5月中旬までに施用した。

異種文字間に危険率5%水準(太字は危険率1%水準)で処理間差あり。

なお、2002年は、根釧農試草地環境科における臨時職員雇用体制の激変に伴って、研究作業能率が著しく低下した結果、牧草試料が腐敗し、養分含有率を測定できなかった。

4) 総括

- ① 消化液は、窒素、リン酸およびカリウムともに、現行のスラリーを対象とする換算方法によって肥料に換算できる。
- ② ただし、消化液のアンモニウム態窒素が全窒素の 50%以上を占める場合には、アンモニウム態窒素が化学肥料と同等に利用されると見なす評価法がより適切である。
- ③ また、化学肥料の減肥は、尿の場合と同様に、当該番草のみを対象とすることが合理的である。
- ④ 年間 4t/10a 程度の消化液施用量では、前年秋(10月まで)と当年春(5月中旬まで)の等量分施が、越冬前後における窒素の損失を相対的に少なくし、1番草有穂茎数と一茎重の確保によって高収を維持する効果的な施用法である。
- ⑤ 2カ所3年間で実施された現地試験により、牧草収量および牧草体養分含量の面から、本試験で提起した消化液に対する肥効評価の妥当性を実証した。

6 残された課題

アンモニア揮散を低減する施用法における肥効評価

7 おわりに

本調査の結果、①草地に対する消化液の肥効は、当該番草を対象にスラリーと同じ基準肥効率で評価できる、②アンモニウム態窒素の多い消化液における窒素の肥効評価に対しては、アンモニウム態窒素が化学肥料と同等に利用されると見なす評価法がより適切になる、③消化液の施用法は秋と春の等量分施が効果的であると結論する。

今後、インジェクタやバンドスプレッダなどアンモニア揮散を低減する施用方法の導入が可能になれば、草地において、さらに環境負荷の少ない消化液の有効利用が期待できる。

参考試験

草地における消化液の残効調査

1. 目的

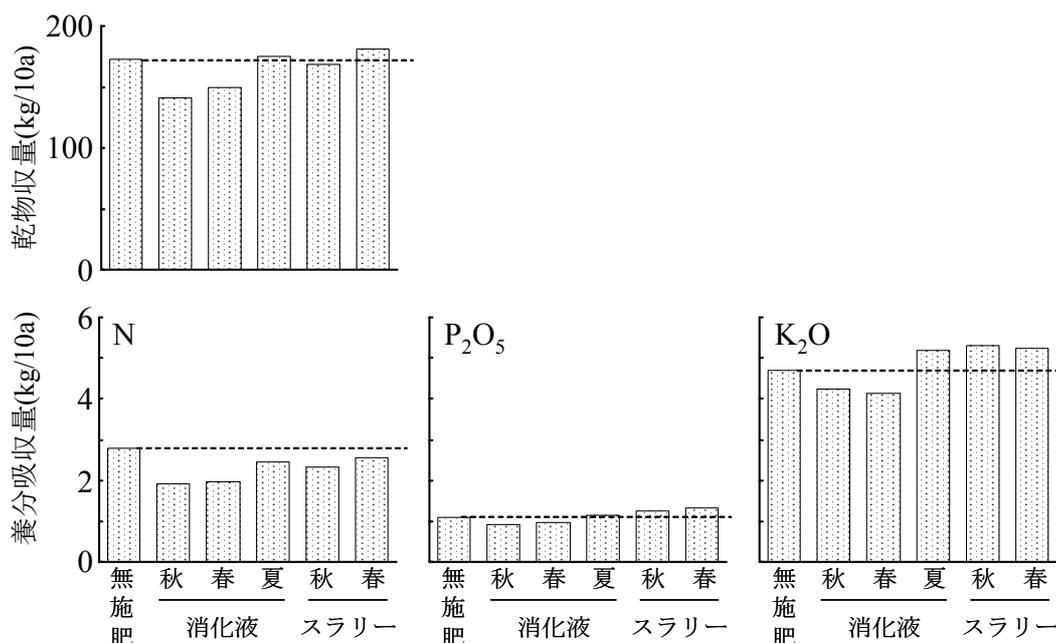
現在、スラリーの肥効は、翌年の残効がきわめて少ないのでこれを無視し、単年度評価で見積もられている。したがって、スラリーを原料とする消化液でも、翌年の残効は小さいと想定される。そこで、消化液施用翌年の残効を調査し、肥効評価において残効を考慮する必要性について検討する。

2. 方法

本試験Ⅲ-1. 草地に対する効果的施用法 1) 消化液の肥効特性において、2002年に化学肥料無施用条件で実施された試験区を、翌年同様に化学肥料無施用条件で管理し、収量および地上部の養分吸収量を調査した。

3. 結果

- 1) 乾物収量、養分吸収量ともに、消化液秋施用区 ≒ 同春施用区 ≒ 同夏施用区 = スラリー秋・春施用区の傾向が窺われたが、統計的な有意差は検出されなかった。
- 2) また、その水準は無施肥区ともおおむね等しかった。
- 3) 以上のことから、消化液の窒素、リン酸、カリウムのいずれについても、施用翌年の残効はほとんど無視できると考えられた。



付図1. 消化液・スラリー施用翌年におけるチモシー単播草地の乾物収量および養分吸収量

春、夏施用区は2002年5月および7月施用、秋施用区は2001年10月施用、調査は2003年 (根釧農試)
2002年および2003年はいずれも化学肥料無施用条件

付表 1. 試験処理詳細

場所	年次	処理 番号	処理	消化液またはスラリー		化学肥料年間施用量kg/10a		
				施用日	施用量 (t/10a)	窒素 (N)	リン酸 (P ₂ O ₅)	カリウム (K ₂ O)
根釧農試	2002	1	消化液 秋施用	01/10/22	4.0	0	0	0
		2	消化液 春施用	02/05/13	4.0	0	0	0
		3	スラリー秋施用	01/10/22	4.0	0	0	0
		4	スラリー春施用	02/05/13	4.0	0	0	0
		5	無施用	—	0	0	0	0
	2003	1	消化液 秋施用	02/10/23	4.0	8	6	2
		2	消化液 春施用	03/05/12	4.0	8	6	2
		3	スラリー秋施用	02/10/23	4.0	8	6	2
		4	スラリー春施用	03/05/12	4.0	8	6	2
		5	化学肥料のみ	—	0.0	8	6	2
		6	無施用	—	0.0	0	0	0
	2004	1	消化液 秋施用	03/10/21	4.0	8	6	2
		2	消化液 春施用	04/05/17	4.0	8	6	2
		3	スラリー秋施用	03/10/21	4.0	8	6	2
		4	スラリー春施用	04/05/17	4.0	8	6	2
		5	化学肥料のみ	—	0	8	6	2
		6	無施用	—	0	0	0	0
	畜試	2000	1	消化液 秋施用	99/10/15	8.0	0	8
2			消化液 春施用	00/04/29	6.3	0	8	0
3			スラリー秋施用	99/10/15	5.0	0	8	0
4			スラリー春施用	00/04/29	5.0	0	8	0
5			無施用	—	0	0	8	0
2001		1	消化液 秋施用	00/10/18	5.0	0	8	0
		2	消化液 春施用	01/04/27	5.0	0	8	0
		3	スラリー秋施用	00/10/18	5.0	0	8	0
		4	スラリー春施用	01/04/27	5.0	0	8	0
		5	無施用	—	0	0	8	0
2002		1	消化液 春施用	02/04/25	5.0	0	8	0
		2	消化液 夏施用	02/06/24	5.0	0	8	0
		3	スラリー春施用	02/04/25	5.0	0	8	0
		4	スラリー夏施用	02/06/24	5.0	0	8	0
		5	無施用	—	0	0	8	0
2003	1	消化液 春施用	03/04/23	5.0	0	8	0	
	2	消化液 夏施用	03/06/24	5.0	0	8	0	
	3	スラリー春施用	03/04/23	5.0	0	8	0	
	4	スラリー夏施用	03/06/24	5.0	0	8	0	
	5	無施用	—	0	0	8	0	

化学肥料は年間の 2/3 を早春に、残りの 1/3 を 1 番草収穫後に分施

1 課題名

2) 畑作物に対する消化液施用法の確立

2 担当場所研究科室名

北海道立北見農業試験場 生産研究部 栽培環境科

3 はじめに

各種畑作物に対する施用効果を検討し、適切な施用方法を明らかにする。

4 調査・試験方法

1) 試験年次：2001年～2004年

2) 試験場所：湧別町（灰色低地土）

訓子府町(表層多腐植質湿性黒ボク土)

3) 検討事項：4)に示す作物を対象に、消化液の施用適量、望ましい施用方法を検討した。

具体的には、施用方法として土壌混和(移植、播種前に施用しロータで深さ15cm程度に混和)と表面施用(移植、播種後に表面に施用)を検討した。さらに、施用後に土壌混和するまでの時間について、当日混和と翌日混和とで比較検討した。

4) 供試作物及び耕種概要等：表1に供試作物、耕種概要、試験区制、供試肥料を示した。

表1 供試作物と耕種概要等

収穫年	圃場	播種・移植期	収穫期	隙込み日	栽植密度	1区面積等	反復数	品種	供試肥料	B施用
てんさい										
2001		5月9日	10月17日		66×21cm	210m ²	1	スコーネ	S182	無
2003	湧別	5月15日	9月4日		75×33cm	70～210m ²	1	スコーネ	S182	有
2004		5月10日	10月20日		75×33cm	70～210m ²	1	スコーネ	S182	有

2002		5月9日	10月22日		60×23cm	18.9m ²	2	アーベント	S182	無
2003	訓子府	5月12日	10月27日		60×23cm	15m ²	4	アーベント	S182	無
2004		5月13日	10月26日		60×23cm	15m ²	3	アーベント	S182	有

ばれいしよ										
2001		5月9日	8月8日		72×30cm	210m ²	1	ワセシロ	S053	—
2002	湧別	5月10日	8月28日		72×30cm	210m ²	1	男しゃく	S053	—
2004		5月6日	8月2日		72×30cm	70～140m ²	1	男しゃく	S053	—
2003	訓子府	5月15日	9月4日		72×30cm	11.2m ²	3	ワセしろ	S804	—

秋まき小麦										
2002	湧別	9月27日	7月22日		畦幅14cm、播種量12kg	70～210m ²	1	ホクシン	S042	—
2003		9月24日	7月22日		畦幅14cm、播種量13kg	70～210m ²	1	ホクシン	S807	—
2003	訓子府	9月20日	7月22日		畦幅30cm、播種量9kg	12m ²	3	ホクシン	S807	—
2004		9月19日	7月23日		畦幅30cm、播種量9kg	12m ²	3	ホクシン	S807	—

えんぱく										
2001	訓子府	8月9日	10月23日	10月29日	播種量15kg	18～27m ²	1	—	S053	—

シロカラシ										
2001	訓子府	8月9日	10月23日	10月29日	播種量2kg	18～27m ²	1	—	S053	—

ひまわり										
2001	訓子府	8月9日	10月22日	10月29日	播種量2.5kg	18～27m ²	1	—	S004	—

注)消化液施用区では硫安、過石、硫加を用い施肥量を調節した。

B施用は、消化液施用区に対するホウ素入り肥料の施用の有無を示す。

5) 供試消化液：成分、施用日ならびに施用日の平均気温を表2に示した。

表2 供試消化液の成分と施用日ならびに施用日の平均気温

年次	試験圃場	施用作物	施用位置	水分 (%)	pH	EC (mS/cm)	現物重量%						施用日	施用日平均気温
							T-N	NH ₄ -N	T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O	T-CaO	T-MgO		
2001	訓子府	てんさい・ばれいしょ	混和	—	7.9	—	0.17	0.09	0.06	0.56	0.07	0.09	5月9日	4.0
		秋まき小麦	混和	—	7.9	—	0.40	0.14	0.18	0.55	0.25	0.09	9月27日	13.6
		緑肥	混和	—	7.8	18.0	0.38	0.21	0.18	0.49	0.16	0.08	8月8日	14.2
		表面	—	8.0	21.8	0.39	0.21	0.17	0.52	0.16	0.08	9月10日	18.6	
2002	訓子府	ばれいしょ	混和・表面	95.7	8.5	21.0	0.38	0.18	0.15	0.55	0.15	0.07	5月10日	10.6
		秋まき小麦	表面	95.4	8.4	19.9	0.36	0.17	0.17	0.52	0.17	0.09	4月22日	14.1
		秋まき小麦	混和	96.6	8.7	17.7	0.25	0.20	0.08	0.54	0.13	0.04	9月24日	17.0
		てん菜	混和	95.1	8.4	19.9	0.36	0.17	0.17	0.52	0.16	0.09	5月9日	12.2
2003	訓子府	秋まき小麦	表面	95.9	8.2	21.2	0.35	0.21	0.15	0.52	—	—	4月23日	10.6
		てんさい	混和	96.1	8.3	21.6	0.34	0.21	0.14	0.48	—	—	5月15日	7.5
		てんさい	表面	96.3	8.0	21.2	0.34	0.21	0.14	0.50	—	—	5月15日	7.5
		ばれいしょ	混和	96.1	8.1	22.6	0.36	0.20	0.14	0.48	—	—	5月15日	9.4
		てんさい	混和	95.9	8.2	21.2	0.35	0.21	0.15	0.52	—	—	5月12日	11.5
		てんさい	表面	96.1	8.2	22.6	0.35	0.20	0.14	0.50	—	—	6月5日	11.3
2004	訓子府	秋まき小麦	表面	97.0	8.2	14.4	0.20	0.12	0.08	0.36	—	—	4月25日	9.8
		ばれいしょ(枠試験)	混和・表面	96.1	8.1	22.6	0.36	0.20	0.14	0.48	—	—	5月15日	9.4
		秋まき小麦	表面	96.3	8.3	—	0.31	0.18	0.14	0.50	—	—	4月27日	4.6
		てんさい	混和・表面	96.1	8.3	—	0.31	0.18	0.14	0.53	—	—	5月6日	8.3

(6) 肥効評価方法

ふん尿スラリーの肥効評価法(平成11年指導参考事項:北海道農政部)に準じて、消化液に含まれる成分の肥効は肥効率で評価した。

すなわち、消化液施用時の減肥可能量は

$$\text{減肥可能量 (kg/10a)} = \text{消化液施用量 (kg/10a)} \times \text{成分濃度 (\%)} \times \text{肥効率} / 100$$

で求められるとした。

肥効率は以下により求めた。

ア. 消化液の全窒素およびアンモニウム態窒素の肥効率は以下の式で求めた。

$$\text{肥効率} = \{ (U_M - U_{N0}) / N_M \} / a$$

U_M : 消化液施用区の窒素吸収量 (kg/10a)

ただし、化学肥料併用区では、 $\{ U_M - (N_F \times a) \}$ を U_M として用いた。

N_F : 併用した化学肥料窒素量

U_{N0} : 無窒素区の窒素吸収量 (kg/10a)

N_M : 施用した消化液中の窒素量 (kg/10a)

a : 化学肥料窒素の利用割合 (kg/kg)

イ. 消化液のカリウムの肥効率は以下の式で求めた。

$$\text{肥効率} = \{ (U_M - U_{N0}) / N_M \} / a$$

U_M : 消化液施用区のカリウム吸収量 (kg/10a)

U_{N0} : 無窒素区のカリウム吸収量 (kg/10a)

N_M : 施用した消化液中のカリウム量 (kg/10a)

a : 化学肥料カリウムの利用割合 (kg/kg) = $(U_F - U_{N0}) / N_F$

U_F : 化学肥料区(対照区)のカリウム吸収量 (kg/10a)

N_F : 併用した化学肥料カリウム量 (kg/10a)

5 調査結果(及び考察)

(1) てんさいに対する施用法

湧別圃場2001年、訓子府圃場2002年・2003年の各消化液施用区ではホウ素を施用しなかったためホウ素欠乏が発生した。さらに、湧別圃場2003年・2004年の消化液施用区でそう根病が発生した。このため、消化液のてんさいに対する影響は、訓子府圃場(2004年)のみで評価した。ただし、そう根病は訓子府では発生しておらず、消化液は病害発生原因ではなかった。

まず、てんさいの収量、窒素・リン酸吸収量および窒素の肥効率を表3に、カリウムの吸収量と肥効率を表4に示した。

対照区(化学肥料N施肥量15kg/10a)と消化液3t—化学肥料N施肥量11kg区は、無機態窒素施用量、収量および修正糖量が同程度であった。また、この区で消化液の窒素およびカリウムの肥効率は、全窒素で0.3、アンモニウム態窒素で0.5、カリウムで1.0であった。

次に、てんさいに対する消化液の施用方法について、てんさいの窒素吸収量と土壌内での施用窒素の分布を元に検討した。具体的には、表面施用した区と土壌混和した区を設け、施用後3週目にそれぞれの土壌深さ別の無機態窒素増減量を無施用区との差し引き法で求めた。まず、てんさいの窒素吸収量は消化液を表面施用した場合で土壌混和した場合に比べて、1t当たり約1kg少なく(図1)、肥効率も低かった(表3)。続いて、土壌内での消化液窒素の分布を検討した(図2)。その結果、土壌混和された消化液の窒素は硝酸態窒素に変化して5cm以深に存在した。一方、表面施用された消化液の窒素はアンモニウム態窒素として作土の極表層に存在し、土層中の無機態窒素総量は混和した場合より消化液1t当たり0.9kg少なかった。なお、大気中への揮散がないカリウムでは吸収量、肥効率に施用方法の影響は認められなかった(表4)。ゆえに、消化液を表面施用すると、消化液1t当たり約1kgの窒素が揮散し肥効率が低下すると考えられた。以上のことから、消化液の肥効率を高めるには施用後土壌と混和することが望ましいと判断した。

続いて、てんさいに対する消化液の施用適量を、栽培跡地土壌の化学性、施用後の散布ムラ、てんさいの道施肥標準量から検討した。まず、消化液を施用しててんさいを栽培した跡地土壌で、消化液に多く含まれる窒素、カリウムの濃度を測定した。その結果、消化液を5t/10a施用しても、熱水抽出性窒素および交換性カリウムは増加しなかった(表5)。ただし、消化液を5t/10aも施用すると、排水性が良好な訓子府町の圃場でも消化液が表面に停滞し低みに流去して散布ムラが生じた(写真1、2)。さらに、カリウムの道施肥標準量(15kg/10a前後)を供給する消化液施用量は、消化液の平均的なカリウム濃度を0.5%、カリウムの肥効率を1として計算すると、3t/10aであった。以上から、てんさいに対する消化液の施用適量は3t/10aと判断された。

表3 てんさいの収量、窒素・リン酸吸収量および窒素の肥効率調査結果

収穫年	化学肥料N施肥量(kg/10a)	消化液施用量(t/10a)	施用消化液中の量(kg/10a)		施用量計(kg/10a)		茎葉重(kg/10a)	根重(kg/10a)	T/R比	修正糖量(kg/10a)	吸収量(kg/10a)		肥効率	
			N	NH ₄ -N	N	無機N					N	P ₂ O ₅	N	NH ₄ -N
— 訓子府 —														
	0	0	-	-	0.0	0.0	1.4	3.7	0.39	521	7.2	3.3	-	-
	15	0	-	-	15.0	15.0	4.7	6.7	0.70	1149	20.2	6.9	-	-
2004	8	3(混和)	9.3	5.4	17.3	13.3	3.8	6.5	0.58	1140	15.6	4.5	0.2	0.3
	11	3(混和)	9.3	5.4	20.3	16.4	4.7	6.7	0.70	1187	19.1	7.0	0.3	0.5
	14	3(混和)	9.3	5.4	23.3	19.3	4.7	6.7	0.71	1153	20.4	7.0	0.1	0.2
	11	3(表面)	9.3	5.4	20.3	16.4	3.9	6.7	0.58	1181	16.7	5.4	0.0	0.0
	14	3(表面)	9.3	5.4	23.3	19.3	4.4	6.5	0.69	1126	18.5	5.1	0.0	0.0

表4 消化液に含まれるカリウムのでんさいに対する肥効調査結果

収穫年	化学肥料N施肥量(kg/10a)	消化液施用量(t/10a)	カリウム施用量(kg/10a)			吸収量K ₂ O(kg/10a)	肥効率
			化学肥料	消化液	計		
	0	0	17.5	0.0	17.5	19.0	
	15	0	17.5	0.0	17.5	38.6	
2004	8	3(混和)	0.0	15.0	15	33.1	0.9
	11	3(混和)	0.0	15.0	15	38.4	1.0
	14	3(混和)	0.0	15.0	15	36.9	1.0
	11	3(表面)	0.0	15.0	15	36.0	0.9
	14	3(表面)	0.0	15.0	15	38.3	1.0

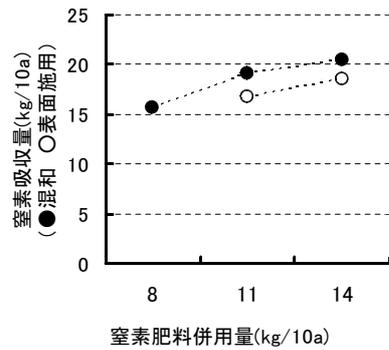


図1 消化液の施用方法がてんさいによる窒素吸収量に及ぼす影響 (消化液施用量3t/10a、2004年、訓子府)

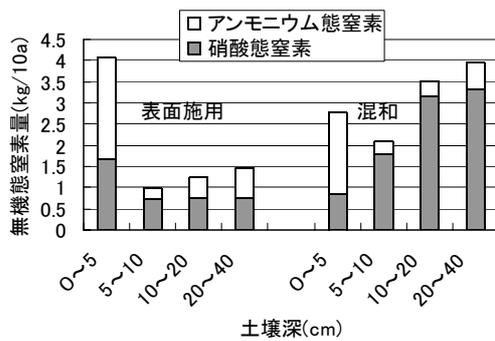


図2 消化液施用方法が異なる圃場での土壌無機態窒素量の土壌深別比較 (施用3週目 2004年、訓子府)

表5 栽培跡地土壌の化学性

消化液施用量	pH	熱抽N (mg/100g)	交換性K ₂ O (mg/100g)
0t	5.6	4.2	49.1
3t	5.2	4.0	37.8
5t	5.3	3.8	40.6

(2003年、訓子府)



写真1 消化液施用時の散布状況



写真2 消化液5t施用時の散布ムラの状況

(図中円内の低みに消化液が集まり停滞した) (消化液が表面に停滞し、低み(円内)に集中した)

(2) ばれいしょに対する施用法

ばれいしょに対する消化液の施用効果と肥効率の調査結果を年度別に表6に示した。

まず、ばれいしょに対する消化液の肥効率を検討した(表6)。なお、湧別町圃場は草地からの転換畑であった。このため、栽培跡地土壌の熱水抽出性窒素は転換初年目の2001年は7.3mg/100g、転換2年目の2002年は7.5mg/100gと高かった。さらに、両年の消化液の窒素の肥効率は他年よりも明らかに低かった。そこで、これらの区は肥効率の評価する際に除外した。これら区を除いて、対照区(窒素施肥量8kg区)と無機態窒素施用量、窒素吸収量および収量が同程度であった処理区は2004年の湧別町圃場の2.5t-4kg区(反当たり消化液施用量-化学肥料N施肥量:以下同じ)と5t-0kg区、ならびに、2003年の訓子府町圃場の3t-3kg区と5t-0kg区であった(表6)。これらの区の消化液の肥効率を平均した結果、全窒素0.3、アンモニウム態窒素0.5、カリウム0.7であった。

次に、ばれいしょに対する消化液の施用方法について、窒素の吸収量から検討した(表6、図4)。ばれいしょによる窒素吸収量は表面施用で土壌混和より消化液1t当たり0.1~0.8kg少なく、かつ、肥効率は低下した(図3)。さらに、消化液を土壌に混和する場合も、施用翌日混和した場合は当日混和した場合より窒素吸収量が少なく、肥効率は低下した(図3)。また、土壌の無機態窒素の分布は測定していないが、てんさいの試験結果と同様に、表面施用した場合は極表層にアンモニウム態窒素で存在すると考えられた。一方、大気に揮散しないカリウムの吸収量は施用方法の影響を受けなかった(表6)。以上のことから、消化液を表面施用すると消化液の窒素は揮散し、肥効率は低下する考えられた。ゆえに、消化液の肥効率を高めるには施用して早期に土壌と混和することが望ましいと判断された。

続いて、ばれいしょに対する消化液の施用適量について、栽培跡地土壌の化学性、ばれいしょの道施肥標準量から検討した。まず、消化液を施用し、ばれいしょを栽培した跡地土壌の化学性を測定した結果を表7に示した。消化液施用跡地で熱水抽出性窒素、有効態リン酸、交換性カリウムが富化されていた。具体的には消化液5t/10a施用ではそれぞれ0.7mg/100g、3.6mg/100g、5.7mg/100g増加した。このように、ばれいしょに消化液を施用した跡地では交換性カリウムが明らかに増加していた。しかし、消化液3t/10a施用では交換性カリウムの増加は約1mg/100gであり、消化液の土壌化学性への影響は小さかった。続いて、カリウムの道施肥標準量(15kg/10a前後)を供給する消化液施用量は、消化液の平均的なカリウム濃度を0.5%、カリウムの肥効率を1として計算すると約3t/10aであった。さらに、てんさいの結果と同様に、消化液を5t/10a施用すると施用ムラが生じることが懸念された。以上のことから、ばれいしょに対する消化液の施用適量は3t/10aと判断された。

表6 ばれいしょに対する消化液の施用効果と肥効率

年度	化学肥料施肥量 (kg/10a)		消化液 施用量 (t/10a)	施用消化液中の量 (kg/10a)			施用量計 (kg/10a)			上いも重(kg/10a)		吸収量(kg/10a)			肥効率		
	N	K ₂ O		N	NH ₄ -N	K ₂ O	N	無機N	K ₂ O	kg/10a	相対値	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	NH ₄ -N	K ₂ O
	— 湧別 —																
2001	8	10.4	0				8	8	10.4	2642	100	12.5	4.7	13.4			
	0	0	4混和	6.8	3.6	22.4	6.8	3.6	22.4	2849	108	11.9	4.6	10.2			
	8	10.4	0				8	8	10.4	3982	100	12.3	5.0	14.6			
2002	4	0	2.5混和	14.4	7.2	13.3	18.4	11.2	13.3	2692	68	7.6	2.9	11.3	0.0	0.0	0.1
	0	0	5混和	28.8	14.4	27.5	28.8	14.4	27.5	3588	90	10.6	3.8	14.4	0.1	0.3	0.4
	0	0	5表面	28.8	14.4	27.5	28.8	14.4	27.5	2318	58	6.5	2.7	7.8	0.0	0.0	-
2004	8	10.4	0				8	8	10.4	3463	100	8.7	9.1	14.2			
	0	0	0				0	0	0	2427	70	6.1	6.5	9.7			
	4	5.2	2.5混和	7.8	4.5	12.0	12.5	8.5	17.2	3274	95	9.4	9.5	14.9	0.3	0.4	0.7
訓子府	0	0	5混和	15.5	9.0	24.0	15.5	9	24.0	3793	110	10.0	9.8	15.7	0.3	0.4	0.6
	0	0	5表面	15.5	9.0	24.0	15.5	9	24.0	3787	109	9.5	9.7	15.7	0.2	0.4	0.6
	8	14.0	0				8	8	14.0	3843	100	8.4	2.6	21.4			
2003	0	14.0	0				0	0	14.0	1832	48	3.4	1.9	11.9			
	0	0	3混和	10.8	6.0	14.4	10.8	6	14.4	3333	87	6.1	2.5	18.4	0.3	0.5	0.7
	3	0	3混和	10.8	6.0	14.4	13.8	9	14.4	3924	102	8.2	2.8	22.0	0.3	0.5	1.0
2003	6	0	3混和	10.8	6.0	14.4	16.8	12	14.4	4802	125	10.3	3.5	26.4	0.2	0.4	1.5
	0	0	5混和	18.0	10.0	24.0	18.0	10	24.0	4060	106	9.3	2.9	22.3	0.3	0.6	0.6
	7	12.3	0				7	7	12.3	4775	100	7.6	7.6	28.3			
2003	0	12.3	0				0	0	12.3	4238	89	6.2	6.2	24.1			
	0	0	4混和a	14.4	8.0	19.2	14.4	8	19.2	6305	132	9.1	9.1	34.0	0.2	0.4	1.5
	0	0	4混和b	14.4	8.0	19.2	14.4	8	19.2	5023	105	7.8	7.8	28.2	0.1	0.2	0.6

注)4混和aは施用当日混和し、4混和bは施用翌日混和した。何れも6m²の枠試験結果である。消化液の肥効率は対照区と下線を伏した処理区で平均して求めた。

表7 消化液施用量が異なるばれいしょ栽培跡地の土壌化学性(2003年、訓子府)

消化液 施用量	pH	熱水抽出 性窒素	有効態 リン酸	交換性塩基		
				K ₂ O	MgO	CaO
				(mg/100g)		
0t/10a	6.4	4.1	10.0	36.1	38.1	265
3	6.3	4.6	12.6	37.5	36.9	238
5	6.4	4.8	13.6	41.8	38.8	249

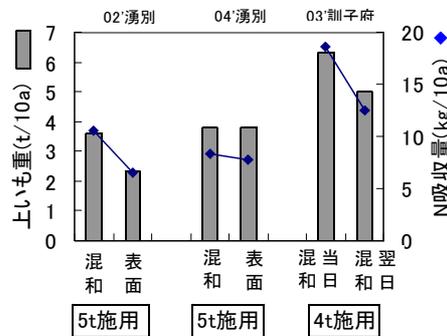


図3 消化液の施用方法および施用から混和までの時間を異にした場合の上いも重の比較

(3) 秋まき小麦に対する施用法

秋まき小麦に対する消化液の施用効果と肥効率を年度別に表8に示した。

まず、秋まき小麦に対する消化液の肥効率を求めた(表8)。なお、湧別町圃場は草地からの転換畑であった。このため、転換初年目の2002年の収穫跡地土壌の熱水抽出性窒素は12.0mg/100gと極めて多かった。そこで湧別町圃場の2002年結果は消化液の肥効率評価から除外した。対照区(化学肥料12~14kgN/10a施用区)と2003年訓子府町圃場の消化液6.3t追肥区と2004年訓子府町圃場の消化液2.5t追肥区と消化液4.5t追肥区は、無機態窒素施用量、収量および窒素吸収量が同程度であった。これらの区の消化液の肥効率を平均した結果、全窒素0.7、アンモニ

ウム態窒素1.0、カリウム0.8であった(表8)。ただし、これらの区のカリウム施用量は化学肥料と合わせて21~33kg/10aであり、平均吸収量の17kg/10aより過剰な量が施用されていた。このため、消化液の施用量が少ない場合、消化液に含まれるカリウムの肥効率は0.8以上となると考えられた。

次に、秋まき小麦に対する消化液の施用方法について、生育・収量と窒素の肥効率から検討した(表8)。ただし、同一年度で基肥として土壌混和した区と追肥として表面施用した区が無かった。このため、2003年の湧別町圃場と、2003年度、2004年度の訓子府圃場について、生育・収量は対象区との相対値で、また窒素の肥効率は相互に比較した。その結果、秋まき小麦では消化液を追肥として表面施用したほうが生育・収量、窒素の肥効率は高かった(表8)。このように、秋まき小麦ではてんさい及びばれいしょと消化液の適施用方法が異なった。この原因は、第一に表面施用する4月のほうが土壌混和する9月よりも気温が低く窒素揮散が抑えられたと考えられること(表2)、第二に土壌混和では越冬前の生育と窒素吸収に限られるため吸収されなかった窒素が根域外に流亡してしまうためと考えられる。以上から、消化液の窒素肥効率を高め、環境への影響を抑えるためにも、秋まき小麦に対して消化液は起生期追肥として利用すべきと判断された。

続いて、秋まき小麦に対する消化液の施用適量について、栽培跡地土壌の化学性、秋まき小麦の道施肥標準量から検討した。まず、消化液を施用し、秋まき小麦を栽培した跡地土壌の化学性を測定し、結果を図4に示した。消化液施用で交換性カリウムは明らかに増加した。具体的には、2.5t施用で約4mg、4.5t施用で約8mg増加した。ただし、熱水抽出性窒素は変化しなかった。続いて、カリウムの道施肥標準量(10kg/10a前後)を供給する消化液の施用量は、消化液の平均的なカリウム濃度を0.5%、カリウムの肥効率を1として計算すると約2t/10aであった。さらに、てんさいの結果と同様に、消化液を5t/10a施用すると施用ムラが懸念された。以上のことから、秋まき小麦に対する消化液の施用適量は約2t/10aと判断された。

表8 秋小麦に対する消化液の施用効果と肥効率

年度	化学肥料施肥量 (kg/10a)			消化液施用量 (t/10a)		施用消化液中の量 (kg/10a)			施用量計 (kg/10a)			乾物重			吸収量(kg/10a)			肥効率			
	N(基肥)	N(追肥)	K ₂ O	基肥	追肥	N	NH ₄ -N	K ₂ O	N	無機N	K ₂ O	稈重 (kg/10a)	子実重		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	NH ₄ -N	K ₂ O	
													稈重	子実重							相対値
2002	0	0	0						0	0	0	334	360	64	8.0	4.2	5.8				
	7	7	8.4						14.0	14.0	8.4	493	560	100	10.8	6.0	12.4				
	0	0	0	2.5	4.5	26.2	11.2	37.2	26.2	11.2	37.2	470	470	84	10.0	5.4	10.1	0.4	0.9	0.1	
	0	0	0	4	3	26.8	10.7	37.6	26.8	10.7	37.6	471	506	90	10.3	5.4	9.8	0.4	1.1	0.1	
2003	0	0	0						0	0	0	330	281	51	5.5	2.7	5.3				
	5.6	7	12						12.7	12.7	11.9	506	551	100	9.3	4.4	9.5				
	0	0	0	2.5	4.5	22.0	12.7	36.9	22.0	12.7	36.9	526	489	89	8.3	4.5	9.8	0.4	0.7	0.3	
	0	0	0	4	3	20.5	11.5	37.2	20.5	11.5	37.2	495	449	81	7.7	4.1	8.9	0.4	0.6	0.3	
2003	- 湧別 -																				
	0	0	8.5						0	0	8.5	496	491	71	7.7	-	-				
	4	8	8.5						12.0	12.0	8.5	610	687	100	12.4	-	-				
	4	0	8.5	0	6.3	15.8	7.6	22.7	19.8	11.6	31.2	628	689	100	11.9	-	-	0.5	0.9	-	
2004	- 訓子府 -																				
	0	0	8.5						0	0	8.5	437	366	62	6.7	3.8	10.5				
	4	8	8.5						12.0	12.0	8.5	588	588	100	12.5	4.2	13.1				
	4	4	8.5	0	2.5	7.8	4.5	12.0	15.8	12.5	20.5	639	603	103	14.0	5.0	15.2	0.9	1.6	0.7	
	4	0	8.5	0	4.5(畝間)	14.0	8.1	24.0	18.0	12.1	32.5	634	568	97	12.7	4.7	18.5	0.6	1.0	0.8	
	4	0	8.5	0	4.5(株上)	14.0	8.1	24.0	18.0	12.1	32.5	666	631	107	14.5	5.7	19.4	0.9	1.5	0.9	

注)2003年湧別で基肥として施用された無機態窒素量は5kg/10a(2.5t区)、8kg/10a(4t区)であった。

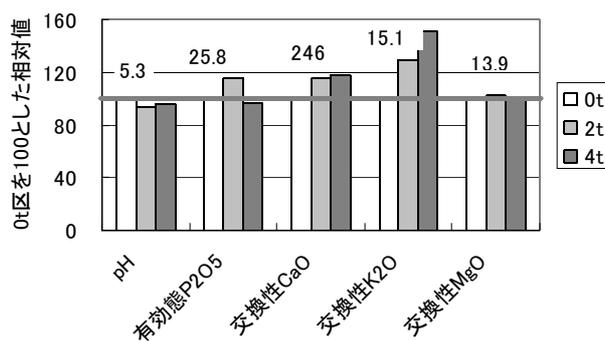


図4 土壤化学性に及ぼす消化液施用の影響(栽培跡地)

注) 図中数字は0t区の実数

(4) 緑肥作物に対する施用法

緑肥作物(えん麦、シロカラシ、ひまわり)に対する消化液の施用効果と肥効率を作物別に表9に示した。

まず、これら作物に対する肥効率を求めた(表9)。

えん麦では、対照区(化学肥料N施肥量が4kg/10a、8kg/10a)と消化液2t/10 a 区、4t/10a区は収量、窒素吸収量および施用無機態窒素量がほぼ同量であった(表9)。これらの区の消化液の肥効率の平均値は、全窒素0.5、アンモニウム態窒素1.0、カリウム0.5であった。ただし、えん麦栽培跡地土壤の交換性カリウム濃度は47.1mg/100gと極めて高かった。このため、カリウムの肥効率は低く求められていたと考えられる。

シロカラシ・ひまわりは、対照区と施用無機態窒素量および乾物収量が同等となった区の肥効率は、全窒素で0.3、0.3(シロカラシ、ひまわりの順)、アンモニウム態窒素で0.6、0.5(同順)、カリウムで0.8、0.4(同順)であった。

このように、えん麦、ひまわりはカリウムの肥効率がシロカラシよりも低かった。しかし、これら作物へのカリウムの総施用量は15~31kg/10aと吸収量(平均11~16kg/10a)より明らかに多かった。このため、カリウムの肥効率が低かったと考えられた。

なお、えん麦、シロカラシ、ひまわりの肥効率を平均すると、全窒素0.4、アンモニウム態窒素0.8であった。

次に、緑肥作物(えん麦、シロカラシ)に対する消化液の施用方法について、生育量、窒素吸収量から検討した。まず、これら作物に消化液を追肥として表面施用した結果、消化液が付着した部分は枯死して、その後の生育と窒素吸収が抑制された(表9、図5)。ゆえに、これら緑肥は消化液を施用する場合、基肥として施用する必要があると判断された。

続いて、緑肥作物(えん麦、シロカラシ、ひまわり)に対する消化液の施用適量について、栽培跡地土壤の化学性から検討した。まず、えん麦栽培圃場で10月末に栽培跡地の化学性を調査した(図6)。その結果、消化液を6t/10a施用するとpH、熱水抽出性窒素に影響はなかったが、交換性カリウムが明らかに増加した。具体的には、消化液6t中にはカリウムが31kg/10a程度含まれており、交換性カリウムは10mg/100g増加した。ただし、消化液を4t/10a施用では、消化

液にはカリウムが約20kg含まれるが栽培跡地土壌の交換性カリウムは無施用区と大差がなかった。続いて、カリウムの道施肥標準量(えん麦：最大5kg/10a、ひまわり：最大10kg/10a、シロカラシ：最大7kg/10a)を供給する消化液の施用量は、消化液の平均的なカリウム濃度を0.5%、カリウムの肥効を1として計算すると最大約2t/10aであった。なお、試験区のカリウム吸収量は8.2~16.9kg/10aを供給する消化液の施用量は、同様に計算して1.7~3.4t/10aであった。以上のことから、緑肥に対する消化液の施用適量は約3t/10aと判断された。

最後に、消化液の残効性を評価した。具体的には、消化液を施用して栽培したえん麦を土壌に鋤込み、翌年度にてんさいを栽培して窒素吸収量を調査し(表10)、さらに、てんさい栽培跡地土壌の熱水抽出性窒素濃度を測定した(表11)。なお、後作てんさいへの窒素施肥量は16kg/10aに揃えた。また、鋤込まれたえん麦は乾物重で500~600kg/10aであった。先ず、後作物であるてんさいの窒素吸収量は、緑肥えん麦に施用した消化液1t当たり約1.5kg程度増加していた。ゆえに、消化液を施用して栽培した緑肥を鋤込んだ場合、次作物への施肥量は北海道緑肥作物栽培利用指針(平成16年3月 北海道農政部)に従い減肥対応が必要である。ただし、てんさい収穫跡地の熱水抽出性窒素に消化液施用の影響はなかった。ゆえに、消化液中の窒素の次作への残効は小さいと考えられた。

表9 緑肥作物に対する消化液の施用効果と肥効率

作物	化学肥料施肥量 (kg/10a)		消化液施用量 (t/10a)	施用消化液中の量 (kg/10a)			施用量計 (kg/10a)			乾物重		吸収量(kg/10a)			肥効率		
	N	K ₂ O		N	NH ₄ -N	K ₂ O	N	無機N	K ₂ O	kg/10a	相対値	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	NH ₄ -N	K ₂ O
えん麦	0	0	0				0	0	0	236	40	2.4	1.4	4.7			
	4	5.6	0				4	4	5.6	531	90	4.4					
	8	10.4	0				8	8	10.4	593	100	7.1	3.2	15.8			
	0	0	2	7.6	4.2	9.8	7.6	4.2	9.8	532	90	4.9	2.7	10.1	0.6	1.1	0.5
	0	0	4	15.2	8.4	17.6	15.2	8.4	17.6	587	99	6.0	3.1	12.1	0.4	0.8	0.4
	0	0	2+2	15.4	8.4	20.2	15.4	8.4	20.2	443	75	5.5			0.5	0.7	
	0	2+4	23.2	12.6	30.6	23.2	12.6	30.6	507	85	5.5			0.3	0.5		
シロカラシ	0	0	0				0	0	0	81	14	0.9	0.5	2.2			
	8	10.4	0				8	8	10.4	560	100	11.3	3.8	12.6			
	0	0	4	15.2	8.4	17.6	15.2	8.4	17.6	537	96	6.8	3.6	16.9	0.3	0.5	0.8
	0	0	2+2	15.4	8.4	20.2	15.4	8.4	20.2	442	79	7.2	2.9	16.3	0.3	0.6	-
ひまわり	0	0	0				0	0	0	112	28	1.4	0.6	3.3			
	6	8.4	0				6	6	8.4	403	100	4.8	1.9	11.4			
	0	0	3	11.4	6.3	14.7	11.4	6.3	14.7	305	76	3.3	1.4	8.2	0.3	0.5	0.4

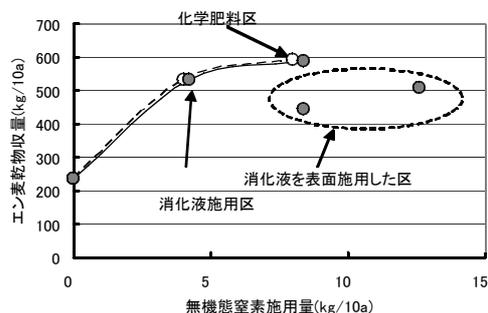


図5 無機態窒素施用量とえん麦の乾物収量の関係

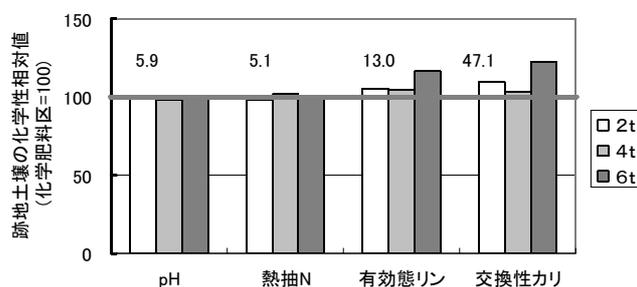


図6 土壌化学性に及ぼす消化液施用の影響 (えん麦跡地で2001年10月29日に調査した)

表10 緑肥鋤込み跡地で栽培したてんさいの窒素吸収量

緑肥(前作)への施肥・消化液施用量	N吸収量(kg/10a)			消化液1t当たり窒素吸収増加
	緑肥(前作)	てんさい(次作)吸収量	無窒素区との差	
無窒素	2.4	19.2	-	-
N4kg	4.4	16.0	0.0	-
N8kg	7.1	23.8	4.6	-
消化液2t	4.9	24.1	4.9	2.5
消化液4t	6.0	22.2	3.0	0.8

(2002年 訓子府)

表11 緑肥の次作物栽培跡地の熱水抽出性窒素濃度 (2002年秋)

消化液施用量	0t	2t	4t
熱抽窒素	5.6	5.5	5.8

注) 消化液は2001年にえん麦に施用し
えん麦は鋤込み、2002年てんさいを栽培した。値は2002年秋、てんさい栽培跡地土壌の分析値

(5) 畑作物に対する施用効果のまとめ

① 消化液の肥効率について

消化液には窒素、カリウムが高濃度に含まれるが、リン酸濃度はこれら養分の1/2~1/5と低い。リン酸の過剰蓄積はそうか病発生を助長する報告もあるが(後藤, 2003)、道内の普通畑の可給態リン酸濃度は平均21mg/100gでほぼ適正水準にある(平成8年、北海道農政部)。加えて、春の低温の北海道では生育停滞を回避するため施肥標準量が多く設定されている。以上から、有機質資材施用に伴うリン酸減肥量は畑作物、水稻、野菜では設定されてこなかった。一方、窒素やカリウムは作物の収量・品質、環境保全への影響が大きく、かつ、有機物に含まれるこれらの肥効率はリン酸に比べて高い。そのため、有機質資材施用に伴い減肥が指導されてきた。そこで、消化液についても窒素とカリウムのみ肥効率を設定した。

てんさい、ばれいしょ、秋まき小麦、緑肥とも、消化液の窒素肥効は全窒素またはアンモニウム態窒素量で評価できた。これら作物に対する消化液の窒素、カリウムの肥効率は表12のとおりであり、ふん尿スラリーの施用指針(表13)とほぼ同じであった。ただし、消化液の窒素の肥効率は消化液の施用方法で変化した。まず、てんさい、ばれいしょ、緑肥では、消化液を表面施用した場合は土壌混和した場合より肥効率が低下した。さらに、施用翌日に混和した場合は当日に混和した場合より肥効率は低下した。このように、消化液を表面施用した場合に肥効率が低下するのは、消化液のpHは8以上と高く、かつ、アンモニウム態窒素が多いことから、窒素揮散が原因と考えられた。さらに、えん麦やシロカラシで追肥として表面施用した場合に肥効率が低下するのは、消化液が付着した部分が枯死することが原因であった。ただし、秋まき小麦では秋期に基肥施用として土壌と混和するよりも、起生期に表面施用したほうが窒素の肥効率は高かった。このように、秋まき小麦で表面施用しても窒素の肥効率が低下しない原因は、施用時の気温が起生期のほうが低いため、窒素揮散が抑えられることと、基肥施用した場合は越冬前までの窒素吸収量が少なく残りは流亡するためと考えられた。

以上のように、消化液の窒素の肥効率は、施用方法で変化する。いずれにせよ、作物に吸収されず土壌に残存した窒素は翌年に吸収されていないことから、周辺環境への影響を軽減するためにも窒素の肥効率を高めることは重要と考えられる。

表12 消化液の窒素およびカリウムの肥効率と施用適量 表13 ふん尿スラリーの畑作物への施用指針

施用法	対象作物	成分肥効率			施用適量(10a)
		T-N	NH ₄ -N	K ₂ O	
表面施用	秋まき小麦 (起生期追肥)	0.7	1.0	1.0	約2t
表面施用 後混和	てんさい、ばれいしょ、緑肥 (基肥)	0.4	0.7	1.0	約3t

注)・緑肥はえん麦、シロカラシ、ひまわりを供試した。

施用法	対象作物	成分肥効率	
		NH ₄ -N (T-N)	K ₂ O
表面施用	小麦(起生期追肥) てんさいなど(追肥)	0.5~0.7 (0.25~0.35)	1
表面施用 後混和	すべての畑作物 (播種直前)	0.7 0.35	1

② 消化液の施用適量について

消化液の施用が栽培跡地土壌の化学性に及ぼす影響、各種作物の道施肥標準量を満たす消化液の施用量、施用時の散布ムラについて調査し、てんさい、ばれいしょ、秋まき小麦、緑肥に対する施用適量を検討した。

まず、消化液の施用が土壌の化学性に及ぼす影響を調査した。消化液には窒素とカリウムが高濃度で含まれている。ゆえに、消化液の施用が土壌の化学性に及ぼす影響は熱水抽出性窒素と交換性カリウムで他の項目より大きいと考えられる。そこで、施用試験跡地土壌でこれら成分を調査した。その結果、特に、交換性カリウムへの影響が大きく、平均して6t施用で約10mg、5t施用で約7mgと明らかに高まったが、3t施用では3mg程度しか増加しなかった。一方、交換性カリウムの増加を抑えるためにはカリウムの施肥標準量以内で消化液を施用するべきである。このような消化液の施用量を、平均的な消化液のカリウム濃度を0.5%、カリウムの肥効率を1として計算した。その結果、消化液の施用適量はてんさい、ばれいしょ、緑肥は3t程度、秋まき小麦は2t程度であった。

なお、この施用量は消化液の散布ムラを防ぐためにも有効と考えられた。なぜなら、消化液より水分が低いふん尿スラリーでも表面流去が発生しないように畑地への施用量は4~5t/10a以内と指導されており(平成11年、指導参考、十勝農試)、ふん尿スラリーよりも高水分である消化液では表面流去による散布ムラを防ぐためには施用量がふん尿スラリーより少ないことが望ましいためである。実際に、本試験で消化液を5t/10aすると消化液が表面流去して散布ムラが生じた。

以上のことから、消化液の各種畑作物への施用適量は表12のようにまとめられた。

(6)小括

- ① 消化液の窒素肥効は全窒素またはアンモニウム態窒素量で評価でき、消化液の肥効率は全窒素0.5、アンモニウム態窒素で0.8、カリウムは1.0で計算する。
- ② 消化液の窒素肥効率は表面施用、施用翌日の混和で低下する。ゆえに、窒素の肥効率を高めるには、消化液は施用後速やかに土壌と混和することが望ましい。ただし、小麦では起生期に施用するほうが基肥として施用するより肥効率は高い。
- ③ えん麦、シロカラシは消化液が付くと枯死するため基肥として使用する。
- ④ カリウムの施肥標準量から算出した消化液施用適量は、てんさい、ばれいしょ、緑肥は3t/10a程度、秋まき小麦は2t/10a程度である。

6 残された課題

畑地に対する施用法の試験結果は、地表面近くからの全面施用条件で得られたものである。ゆえに、アンモニウム揮散を低減する施用法における肥効評価は今後の残された課題である。

7 おわりに

試験実施に当たっては、湧別農業協同組合、遠軽町、ホクレン北見支所に多大の御協力を頂いた。記して感謝申し上げます。

1 課題名

3) 施用法の窒素動態に及ぼす影響

2 担当場所研究科室名

(独) 北海道開発土木研究所 農業開発部 土壤保全研究室

3 はじめに

最近、北海道において家畜糞尿を原料とした嫌気発酵（メタン発酵）プラントがいくつか稼働するようになり、家畜糞尿の嫌気発酵消化液（以下、消化液）が液肥として草地に還元されるようになってきた。北海道においては、家畜糞尿を発酵処理しない新鮮なスラリー（以下、原料スラリー）の形で草地還元している例も多い。このため、北海道において合理的な家畜糞尿の資源循環利用体系を確立するためには、原料スラリーと消化液の性状差を明らかにし、それぞれの最適な圃場施用法を確立することが重要となる。しかし、これらの成分と施用による環境負荷の比較検討はほとんどなされていない。そこで、同一の原料スラリーから室内フェーマンターにより消化液を作成し、その成分を比較するとともに、これらを両資源循環試験施設の草地圃場および畑地圃場に散布したときのアンモニア揮散および土壤中窒素成分の変化を比較検討した。

4 調査・試験方法

1) 供試液の作成

(1) 室内試験用供試液

札幌近郊の町村牧場で運営されているバイオガスプラントのスラリー受入槽から原料スラリーを採取し、その一部を室内フェーマンターで嫌気発酵（発酵条件：36℃、30日間）させて消化液を作成した。残りは原料スラリーの供試液とした。なお、プラントからの原料スラリーの採取は室内試験開始の2ヶ月前に行った。

(2) 圃場試験用供試液

供試した消化液は別海プラントの受入槽から採取した原料スラリーの一部を室内フェーマンターにより36℃で30日間嫌気発酵させて作成した。残りは原料スラリーの供試液とした。なお、プラントからの原料スラリーの採取は圃場試験開始の2ヶ月前に行った。

(3) 供試液の分析

室内試験、圃場試験とも、最初の試験の実施5日前に各供試液について下記の分析を行った。

①pH(H₂O)：ガラス電極法（試料：蒸留水=1:1）、②乾物含量：炉乾燥法(105℃)、③全窒素：ケルダール法・水蒸気蒸留法、④アンモニウム態窒素：10%塩化カリウム溶液抽出法・水蒸気蒸留法。

供試液の性状を表1に示す。

表1. 供試液の性状

試験区分	供試液	pH	DM (FM%)	T-N (FM%)	NH ₄ -N (FM%)	NH ₄ -N/T-N×100 (%)
室内試験	原料スラリー	7.95	6.41	0.38	0.23	60.5
	消化液	8.16	4.14	0.38	0.26	68.4
別海5月	原料スラリー	7.33	7.16	0.44	0.23	52.3
	消化液	7.39	4.70	0.41	0.27	65.9
別海7月 湧別9月	原料スラリー	6.89	5.51	0.37	0.21	56.8
	消化液	7.10	4.41	0.40	0.26	65.0

2) チャンバー法によるアンモニア揮散測定における測定値の補正手法

アンモニア揮散量を測定する方法としてはいくつかの方法が知られているが、それぞれ一長一短がある。本試験ではチャンバー法を採用したが、本法では、狭いチャンバー内における揮散アンモニアを捕集し、測定するため、気候条件によってはチャンバー内に結露が生じ、結露中に揮散したアンモニアが吸着され、アンモニア揮散量が過小評価されるという欠点がある。したがって、チャンバー法での測定精度を上げるためには、アンモニア揮散を測定する毎に、ブランク値として、同一気候条件下で、チャンバー自体が揮散アンモニアの何%を回収できるのか（アンモニア回収率）を調べる必要がある。そこで、上述の各試験を行う毎に同時並行で次の手法でチャンバー自体のアンモニア回収率を求め、各試験で得られたアンモニア揮散量にこのアンモニア回収率の逆数を乗じて、チャンバーに生じた結露による揮散アンモニアの再吸着の影響を補正した。

アンモニア回収率の算出は、チャンバー内の中空に浮かせたステンレスバット内に濃度既知の硫酸アンモニウム溶液の一定量を入れ、そこに水酸化ナトリウム溶液を混合して液中のアンモニウム態窒素の全てを強制的にアンモニアとして揮散させてこれをチャンバー法で捕集し、硫酸アンモニウム溶液中のアンモニウム態窒素含量に対する捕集液中アンモニウム態窒素含量の割合(%)を求め、この値を用いた。

3) 室内試験の概要

(1) 土壌薄層上施用試験

供試土壌として、別海プラントの試験圃場造成前の草地の表土(Ap1層、黒色火山性土)を用いた。供試土700gを564cm²のステンレスバットに厚さ約1cmで敷きつめ、-155kPaの水分ポテンシャルになるよう水分調整して一昼夜放置した後、揮散アンモニア捕集用チャンバー内に静置した。これに56.4g(1t/10aの施用量に相当)の供試液を一定量の蒸留水で希釈して施用し、チャンバー法による揮散アンモニアの捕集を行った。なお、希釈水の量は散布後の土壌水分ポテンシャルが-20kPaになるように決定した。揮散アンモニアは吸引ポンプにより10L/minで吸引し、150mLの0.5M H₂SO₄水溶液に導いて捕集した。捕集液は試験開始後10時間経過後までは1時間毎に、その後は24時間後、48時間後に捕集ビンごと交換した。採取した捕集液の一定量を取り、水蒸気蒸留・滴定法により捕集液中のアンモニア含量を求め、アンモニア揮散量を算出した。試験は2001年2月1～4日に行った。

(2) ステンレスバット上施用試験

前述の試験と同サイズのステンレスバットに、前述の試験の土壌水分調整に使用した蒸留水と同量の蒸留水を注ぎ入れ、チャンバー内に静置した。これに、56.4gの供試液を前

述の試験と同量の蒸留水で希釈して注ぎ入れ、ただちに試験を開始した。アンモニア揮散量の測定法は前述の試験と同様である。試験は2001年2月5～7日に行った。

4) 圃場試験の概要

(1) 試験区の設定

別海プラントおよび湧別プラントの草地試験圃場に下記の試験区（各1m²）を設けた。なお、前者の試験圃場の土壌は黒色火山性土、後者のそれは疑似グライ土である。

<別海・湧別共通の試験区>

- ①原料スラリー1t/10a施用区、②同3t/10a施用区、③同5t/10a施用区
- ④消化液1t/10a施用区、⑤同3t/10a施用区、⑥同5t/10a施用区

いずれの試験区も所定量の供試液を散水栓を取ったじょうろで均等に施用した。

<湧別プラントのみの試験区>

- ①表面散布区：消化液3L（3t/10aに相当）を散水栓付きのじょうろで均等に散布した。
- ②帯状散布区：消化液3L（3t/10aに相当）を試験区の中央に、散水栓を取ったじょうろで、幅5cm、長さ1mの帯状に施用した。
- ③溝切散布区：消化液3L（3t/10aに相当）を試験区の中央に溝切りした幅3cm、深さ4cm、長さ1mの溝に、散水栓を取ったじょうろで溢れないように流し込んだ。

- (2) 試験時期 別海：2004年5月26～30日（春施用時）
2004年7月28～8月1日（一番刈後）
湧別：2004年8月30日～9月4日（二番刈後）

(3) 試験方法

アンモニア揮散試験開始の前日に、施用前の土壌試料の採取を行った。試料の採取は0～2.5、2.5～5、5～10、10～15、15～20cmの5層に分けて行った。

試験当日は、まず、各試験区の右隅に設置したチャンバー枠内（0.25m²）に供試液を施用した。ただちにチャンバー法により揮散アンモニアの捕集を行い、後日、捕集液を水蒸気蒸留・滴定法により分析し、アンモニア揮散量を算出した。揮散試験は1日間行い、捕集液の交換は開始直後は1、2、3、5、7、10時間後、1日後に行った。チャンバー枠外への施用はチャンバー法による揮散アンモニアの捕集開始後ただちに行った。

試験開始1日後に各試験区において、施用後の土壌試料の採取を前述の手法と同様に行った。

土壌試料の分析は、採取した土壌試料の風乾細土を用いて、無機態窒素（硝酸態窒素＋アンモニウム態窒素）の分析を10%塩化カリウム溶液抽出法・還元水蒸気蒸留法で行った。

5 調査結果および考察

1) 室内試験

表1に示すように、消化液は原料スラリーに比べて、pH、アンモニア態窒素含量ともに高く、アンモニア態窒素の揮散が生じやすい性状を有しているといえる。この性状を反映して、ステンレスバット上への施用、液の下方浸透が許されない土壌

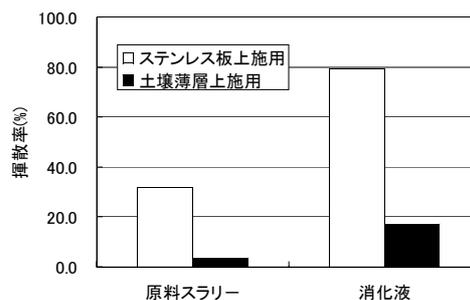


図1. 室内試験でのアンモニア揮散率

薄層への施用とともに、消化液の方が原料スラリーより、施用したアンモニウム態窒素量に対する揮散したアンモニア態窒素量の割合（以下、アンモニア揮散率）が高かった。しかし、ステンレスバット上への施用と土壌薄層上への施用ではアンモニア揮散率が大きく異なり、後者で大幅に抑制された（図1）。

このことから、消化液を液肥として施用する場合、液と大気との接触を極力抑え、土壌との接触を図ることが、アンモニア揮散による窒素損失を防ぐ上で、原料スラリーを施用する場合以上に、重要であることがわかった。

2) 圃場試験

(1) 原料スラリーと消化液とのアンモニア揮散の差異

前述のように、液そのものの性質としては原料スラリーより消化液の方がアンモニア揮散がしやすい性状を有しており、下方浸透を抑制した状態で土壌薄層へ施用した場合も消化液の方がアンモニア揮散が多いという結果となった。

しかしながら、圃場へ施用した場合、結果は全く逆となり、消化液で原料スラリーよりアンモニア揮散率が小さいという結果となった（図2、3、4）。圃場施用の場合、施用された供試液は下方へ浸透することが可能であることから、実際の圃場での施用の場合、液の浸透性がアンモニア揮散を決定する主要因であり、消化液の方が乾物含量が低いため、原料スラリーより浸透しやすく、アンモニア揮散率が低くなると結論できる。

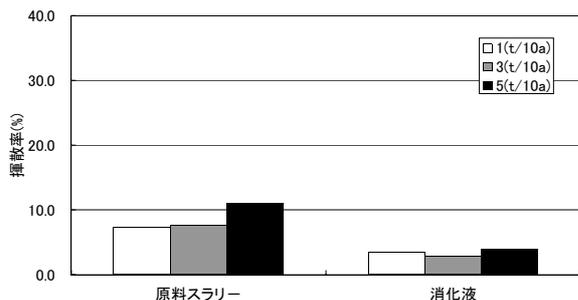


図2. 別海圃場での5月のアンモニア揮散率

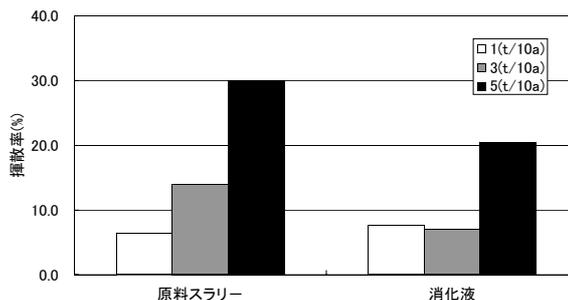


図3. 別海圃場での7月のアンモニア揮散率

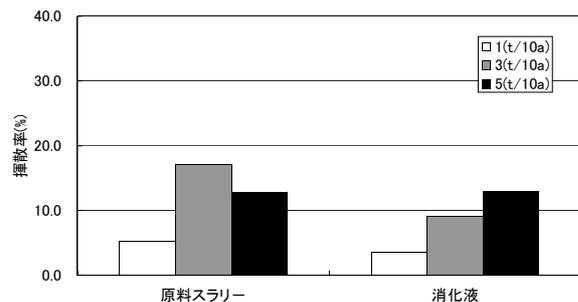


図4. 湧別圃場での9月のアンモニア揮散率

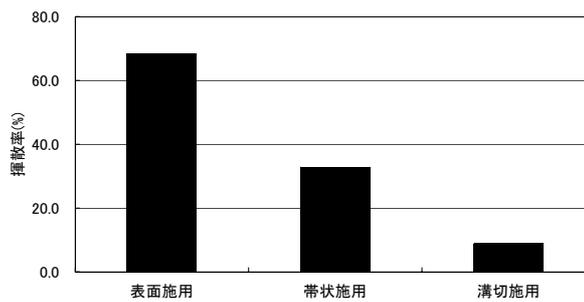


図5. 異なる施用法でのアンモニア揮散率

(2) 気温とアンモニア揮散の関係

別海プラントの同一試験圃場での同一施用量での5月（春施用、試験期間中の日平均気温の平均：13.4℃）と7月（1番刈後施用、同：23.5℃）でのアンモニア揮散率を比較すると、原料スラリー、消化液ともに、気温の高い7月での施用の方がアンモニア揮散率は高かった。消化液の場合、施用量3t/10aまでの場合、春夏問わずアンモニア揮散率は10%を下回ったが、7月の5t/10aの施用量では20%にもおよんだ（図2、3）。

したがって、気温の高い時期での大量施用は控えるべきである。

(3) 土壌とアンモニア揮散の関係

湧別プラントの試験圃場の土壌は別海プラントに比べて重力水孔隙量および飽和透水係数の値がともに小さく、透水性の低い土壌といえる（表2）。気温条件が同程度の湧別プラントでの試験結果（図4、試験期間中の日平均気温の平均：21.8℃）と別海プラントでの7月の試験結果（図3、試験期間中の日平均気温の平均：23.5℃）を比較しても、3t/10a施用区以外は別海プラントが上回っており、土壌の影響は明瞭ではなかった。

表2. 試験圃場の土壌物理性

試験圃場	層	容積重 (g/cm ³)	重力水孔隙 (Vol.%)	易有効水分孔隙 (Vol.%)	難有効水分孔隙 (Vol.%)	非有効水分孔隙 (Vol.%)	飽和透水係数 (cm/s)
別海	Ap1	0.80	4.6	15.5	22.3	26.8	1.08E-04
	Ap2	0.76	4.2	16.9	21.0	27.3	2.17E-03
	Ap3、A	0.50	8.0	20.0	18.1	29.1	2.96E-03
	C1	0.50	11.0	17.4	20.6	24.1	2.45E-02
湧別	Ap	1.21	2.0	5.1	11.1	34.7	4.03E-05
	Cg1	1.35	1.7	3.9	10.6	34.3	6.53E-04
	Cg2	1.50	0.8	2.6	7.3	34.2	1.57E-06

(4) 施用量とアンモニア揮散の関係

両プラントでのいずれの圃場試験においても、施用量が増えるほどアンモニア揮散率が上昇する傾向を示した。高温となる夏期に施用時期となる、一番刈り後における施用を除き、5t/10aの施用でもアンモニア揮散率が10%前後となった（図2、3、4）。

(5) 施用法とアンモニア揮散の関係

室内試験により、液と大気との接触ができるだけ少なく、液と土壌との接触ができるだけ多い程、アンモニア揮散が抑えられることが明らかとなったが、圃場試験の結果も、溝切施用<帯状施用<表面施用の順にアンモニア揮散率が小さく、溝切施用は表面施用の約1/7にまでアンモニア揮散率を抑えることができた（図5）。

f) 施用後の無機態窒素の土中分布

別海試験圃場における5月の施用試験において、施用1日後の無機態窒素は施用量に関係なく深さ5cm以内に留まっており、施用量の増大が施用後直後の無機態窒素の分布域を下げることはならなかった（図6）。

湧別試験圃場の施用法を変えた試験においては、溝切施用において深さ2.5~5cmでの無機態窒素が他の施用法より多いものの、無機態窒素の分布域は深さ5cm以内に留まっており、消化液がより深くにまで浸透している形跡は認められなかった（図7）。

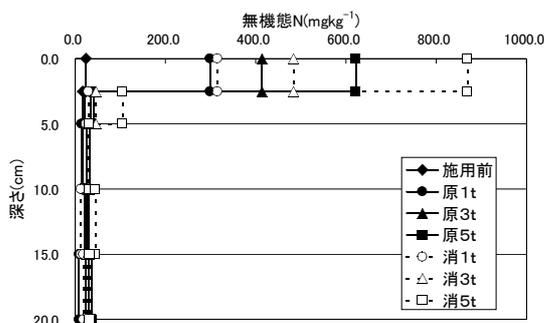


図6. 試験後の無機態窒素の土中分布（別海5月）

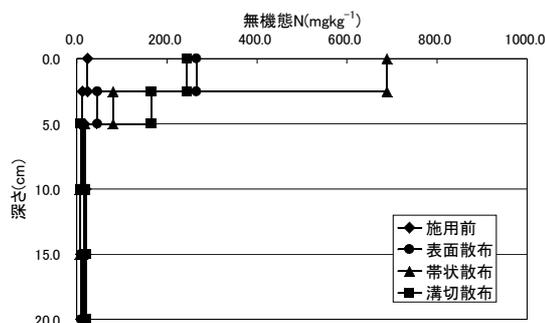


図7. 異なる施用法での試験後の無機態窒素の土中分布

6 まとめ

- ①アンモニア揮散は液と大気が直接接触するような条件で促進され、液と土壌との接触により抑制された。このため、アンモニア揮散率は溝切散布<帯状散布<表面散布の順に小さかった。
- ②液面からのアンモニア揮散はpHが高く、アンモニウム態窒素含量が多い消化液の方が原料スラリーより多かった。
- ③しかし、実際に圃場に散布した場合、消化液は原料スラリーに比べて、施用時には速やかに土中に浸透し、アンモニア揮散が少なかった。
- ④気温が高い夏期を除けば、圃場施用時のアンモニア揮散は5t/10aの施用量でも施用アンモニウム態窒素量の10%前後であった。
- ⑤5t/10aの施用量においても、散布1日後の無機態窒素の土中分布は深さ5cm以内に留まっていた。

