

乳牛ふん尿を主原料とするバイオガスプラント消化液の チモシー採草地に対する肥効と効果的分施肥*1

三枝 俊哉*2 渡部 敢*3

乳牛スラリーを主原料とするバイオガスプラント消化液を、チモシー基幹の採草地に表面施用する場合、北海道で定めるスラリーの評価法によって化学肥料に換算できる。すなわち、事前に消化液の化学性を分析の上、各養分含量にスラリーの基準肥効率（窒素0.4、リン酸0.4およびカリウム0.8kg kg⁻¹）を乗ずる。さらに、窒素は品質と施用時期の補正係数を乗じて肥料に換算する。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。化学肥料の減肥は、消化液の施用された番草のみを対象とする。また、年間40t ha⁻¹程度の消化液施用量では、前年秋と当年春の等量分施肥が、越冬前後における窒素の損失を低減し、年間収量の主体を占める1番草で高収を確保する効果的な施用法である。

緒 言

家畜ふん尿のメタン発酵処理は、カーボンニュートラルなバイオマスエネルギーを生産するので、炭酸ガス排出量削減の面で環境負荷の少ないふん尿処理法として注目されている⁵⁾。北海道では2000年以降、乳牛ふん尿を主体としたメタン発酵処理施設（バイオガスプラント）の建設が進み、現在約40基のプラントが稼働中と推定される^{2,5)}。

バイオガスプラントからは、メタン発酵後のふん尿処理物であるバイオガスプラント消化液（以下、消化液）が産出される。消化液は原料のスラリーよりも水分含量やアンモニウム態窒素含量が高まり、有機質肥料としての高い有効性を示すことが知られている^{9,12)}。広大な草地を保有する北海道の酪農地帯では、消化液を適切に草地に還元することが、バイオガスプラントを普及する際の必要条件となる。そのためには、消化液の肥効を適切に評価する手法の確立が不可欠である。

現在、北海道では、一般的な家畜ふん尿処理物である乳牛堆肥、スラリーおよび尿の肥効を把握する方法として、事前に肥料養分含量を分析し⁶⁾、得られた分析値に

肥効率と称する係数を乗じて肥料に換算する方法が設定されている^{7,15,16,17,18)}。一方、消化液については、松中ら⁹⁾によって窒素の肥効評価がなされているが、窒素、リン酸、カリウムの全般について生産現場の施肥設計に利用できる係数の設定には至っていない。また、スラリーでは秋や早春の年間1回施用よりも、秋春分施肥の方が効率的であることが知られている¹¹⁾が、消化液についてこのような施用法の検討は行われていない。

そこで、本試験では道内の主要な酪農地帯である根釧地方と十勝地方において、草地の代表的な基幹草種であるチモシー (*Phleum pratense* L.) を対象とし、消化液の肥効評価法を確立するとともに、その効果的な施用法について検討した。

試験方法

1. 供試草地

供試草地は表1に示すとおり、北海道立畜産試験場（以下、畜試）と北海道立根釧農業試験場（以下、根釧農試）のいずれも黒色火山性土に立地したA～G合計7つのチモシー「ノサップ」単播草地である。畜試の試験期間は2000～2003年、根釧農試では2002～2004年であり、毎年異なる草地を供試した。

2. 供試消化液およびスラリーの肥料養分含量

供試した消化液とスラリーの肥料養分含量を表1に示した。畜試では、農家に設置された個別型バイオガスプラントから消化液を、また、プラントと無関係の農家からスラリーをそれぞれ採取した。一方、根釧農試では、毎年同じ共同利用型バイオガスプラントの貯留槽と原料槽から、消化液とスラリーをそれぞれ同じ日に採取し

2006年7月27日受理

*1 本報の一部は、独立行政法人北海道開発土木研究所からの受託試験「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（2001～2004年度）」で実施し、2004年度日本土壌肥料学会北海道支部会で発表した。

*2 北海道立根釧農業試験場（086-1135 標津郡中標津町）
saigusa @agri.pref.hokkaido.jp

*3 北海道立畜産試験場（081-0038 上川郡新得町）

た。同プラントにおけるメタン発酵槽の滞留日数は約30日間であるので、同じ日に採取された消化液とスラリーは、厳密には生成物と原料の関係にない。

消化液における現物中の肥料養分含量は、全窒素(N) 1.3~3.7g kg⁻¹、リン酸(P₂O₅) 0.6~2.5g kg⁻¹、カリウム(K₂O) 2.0~4.7g kg⁻¹、カルシウム(CaO) 0.8~3.2g kg⁻¹、マグネシウム(MgO) 0.4~1.1g kg⁻¹の範囲で大きく変動した。スラリーとの比較では、根釧農試における消化液の各養分含量はスラリーよりも低かった。しかし、畜試では両者の違いが明瞭でなかった。また、いずれの試験場においても、消化液の水分含量と乾物あたりのアンモニウム態窒素(NH₄⁺-N)含量はスラリーを上回った。一方、根釧農試の供試した消化液の全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合はいずれも50%以上であったが、畜試の供試した消化液に50%を超えるものはなかった。

3. 試験処理

試験1. 消化液とスラリーの肥効

表1に示す7草地において、消化液とスラリーの肥効を比較した。消化液とスラリーの年間施用量は、スラリーの肥料換算¹⁾により、いずれの肥料養分も北海道施肥標準³⁾を超過しない40~80t ha⁻¹の範囲とした。これらの施用量を秋(前年の10月中旬)、春(当年5月中

旬)および夏(1番草収穫後)のいずれかに年間1回全量を表面施用した。A, B, FおよびG草地には秋施用区と春施用区を、CおよびD草地には春施用区と夏施用区を、E草地には秋施用区のみを設けた。

化学肥料は畜試の場合、いずれの処理区でもリン酸のみ過リン酸石灰でP₂O₅として年間80kg ha⁻¹を施用した。根釧農試では、2002年は無施肥、2003年と2004年は硫酸アンモニウム、過リン酸石灰および硫酸カリウムを用い、N, P₂O₅, K₂Oとしてそれぞれ年間80kg ha⁻¹, 60kg ha⁻¹, 20kg ha⁻¹を共通に施用した。これらの年間施用量を、いずれの試験場でも、早春(5月上旬)に2/3, 1番草収穫後(7月上旬)に1/3の割合で2回に分施した。

なお、後述する肥効解析のため、各草地にふん尿無施用区を設け、ふん尿無施用区の中に化学肥料による標準³⁾区(N, P₂O₅およびK₂Oの順に年間160kg ha⁻¹, 80kg ha⁻¹および180 kg ha⁻¹)と化学肥料無施用区を配置した。

試験2. 施用時期と施用配分

化学肥料併用条件の根釧農試F, G草地において表1の消化液を年間40t ha⁻¹施用した。施用時期と施用配分の試験処理を以下の6処理、すなわち、①秋全量、②秋重点、③秋春均等分施、④春重点、⑤春全量および⑥

表1 供試草地における消化液とスラリーの施用量および肥料養分含量

場所	供試草地 (調査年次)	試験	種類	施用量 t ha ⁻¹	施用 ³⁾ 時期	水分 含量	肥料養分含量						
							窒素		リン酸 P ₂ O ₅	カリウム K ₂ O	カルシウム CaO	マグネシウム MgO	
							全窒素 T-N	アンモニウム態窒素 NH ₄ ⁺ -N					
							現物中		乾物中		現物中		
g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹									
畜試	A (2000)	試験1	消化液	80	秋	—	3.0	1.4	—	2.0	2.9	2.6	1.1
		試験1	消化液	63	春	949	3.7	1.7	32.8	2.1	3.7	2.6	1.1
		試験1	スラリー ¹⁾	50	秋,春	880	4.3	1.5	12.6	2.0	5.0	1.7	1.1
	B (2001)	試験1	消化液	50	秋,春	956	3.0	0.9	19.9	1.5	3.8	2.0	1.0
		試験1	スラリー ¹⁾	50	秋,春	930	2.9	1.1	16.0	1.0	3.1	1.9	1.1
		試験1	消化液	50	春,夏	955	3.3	1.1	24.6	2.5	4.2	2.1	0.9
C (2002)	試験1	スラリー ¹⁾	50	春,夏	897	3.5	1.3	13.0	1.5	3.9	2.7	1.3	
	試験1	消化液	50	春,夏	957	2.9	1.4	32.1	1.6	4.7	3.2	1.9	
	試験1	スラリー ¹⁾	50	春,夏	948	2.6	1.2	23.4	1.1	2.6	3.2	2.3	
E (2002)	試験1	消化液	40	秋	978	1.3	1.0	44.9	0.6	2.0	0.8	0.4	
	試験1	スラリー ²⁾	40	秋	948	2.7	1.2 ³⁾	22.9	1.3	3.6	1.3	0.7	
	試験1,2	消化液	40	秋,春,夏,分施 ³⁾	968	2.5	1.4	45.1	0.7	4.1	1.0	0.5	
根釧 農試	F (2003)	試験1	スラリー ²⁾	40	秋,春	930	3.0	1.6	22.7	1.4	4.6	2.3	0.9
		試験1,2	消化液	40	秋,春,夏,分施 ³⁾	954	2.3	1.8	40.1	1.0	4.6	2.1	0.8
	G (2004)	試験1	スラリー ²⁾	40	秋,春	922	3.7	1.9	24.9	1.6	4.9	2.7	0.9

1) プラントとは無関係の農家から採取したスラリー

2) 共同利用型バイオガスプラントの原料槽から採取した原料スラリー

3) 秋は前年10月中旬, 春は当年5月中旬, 夏は1番草収穫後

4) 電気伝導度と乾物率による簡易推定

5) 試験2では秋・春等量分施を含む6処理を設定

夏全量とした。試験1と同様、施用時期は秋が前年の10月中旬、春が当年5月中旬、夏が1番草収穫後の7月である。施用量 (kg ha⁻¹) は秋-春-夏の順にそれぞれ①40-0-0, ②30-10-0, ③20-20-0, ④10-30-0, ⑤0-40-0, ⑥0-0-40とした。化学肥料の併用法は試験1と同様である。

試験1と試験2のいずれも、1区6~6.25m², 3~4反復の乱塊法で実施した。

4. 調査

試験1と試験2のいずれも、収穫は1番草を6月下旬、2番草を8月下旬の年2回実施した。圃場で一定面積を刈り高約5cmで刈り取り、生草収量を測定した。その後、一部を持ち帰り、70℃で通風乾燥して得られた乾物率から乾物収量を算出した。風乾試料は粉碎して硫酸-過酸化水素水で湿式分解¹³⁾、窒素はフローインジェクション法¹⁴⁾、リン酸はバナドモリブデン酸法¹⁾、カリウムは原子吸光法¹⁾によって測定した。

また、試験2では、G草地において2004年5月7日、17日および6月3日の地上部窒素吸収量を調査した。さらに、1番草収穫時には、採取した試料の一部を有穂茎と伸長茎に区分し、各茎数と1茎重を調査した。

5. 肥効評価

松中ら^{9,12)}によれば、消化液のpH、水分含量、アンモニウム態窒素含量などは、メタン発酵によって原料のスラリーよりも高まるが¹²⁾、窒素からみた肥効はスラリーと本質的に違いがない⁹⁾と言われている。そこで本試験では、消化液の施用によって期待される地上部養分吸収量の増加程度を、既に北海道で設定されているスラリーの肥効評価法^{15,17)}(以下、スラリー評価)を用いて次のように予測し、実測値との適合性を検討した。

北海道でスラリーを肥料に換算するには、事前に分析して得たスラリー中の養分含量に肥効率 R (kg kg⁻¹) を乗じる。このとき、窒素の R はスラリーの品質と施用時期に応じて変化する。すなわち、

$$R = R_s \times Q \times T \dots\dots\dots \text{式①}$$

ここで、 R_s は基準肥効率 (kg kg⁻¹)、 Q は品質による窒素の補正係数、 T は施用時期による窒素の補正係数である。

Q と T はいずれも窒素の係数なので、リン酸とカリウムの肥効評価に際しては、 $R = R_s$ である。

R_s は $Q = 1$ かつ $T = 1$ の条件、すなわち、標準的な品質のスラリーを4月下旬~5月上旬に施用し、得られた圃場試験の結果から式②によって求める。

$$R_s = (U_M - U_{M0}) / N_M \cdot Y \cdot a \dots\dots\dots \text{式②}$$

ここで、 $(U_M - U_{M0}) / N_M$ の項をスラリーにおけるみかけの養分利用割合と称す。 U_M はスラリー施用区の地上部養分吸収量 (kg ha⁻¹)、 U_{M0} はスラリー無施用区の地

上部養分吸収量 (kg ha⁻¹)、 N_M はスラリーによる養分施用量 (kg ha⁻¹) である。一方、 a は化学肥料におけるみかけの養分利用割合 (kg kg⁻¹) であり、式③により求める。

$$a = (U_F - U_{F0}) / N_F \dots\dots\dots \text{式③}$$

ここで、 U_F は化学肥料施用区の地上部養分吸収量 (kg ha⁻¹)、 U_{F0} は化学肥料無施用区の地上部養分吸収量 (kg ha⁻¹)、 N_F は化学肥料による養分施用量 (kg ha⁻¹) である。

こうして得られた各肥料養分の R_s は、道内の気象、土壌等の土地条件によらず、施用されたスラリーの肥効特性を良好に反映するので、複数の年次と試験地で得た値に基づき表2が設定されている¹⁵⁾。さらに、品質の異なるスラリーを供試し、施用時期を変化させて得た試験結果から、表3と表4の補正係数が設定されている¹⁷⁾。

表2 スラリーの基準肥効率 R_s (kg kg⁻¹)

窒素	リン酸	カリウム
0.4	0.4	0.8

表3 スラリー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 g kg ⁻¹	補正係数
肥効大	35~	1.2
中	15~35	1.0
小	~15	0.8

表4 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

今、本試験の消化液による養分施用量と、各草地で得られる a 値 (化学肥料におけるみかけの養分利用割合) を用いれば、式①と式②から導かれる式④-1と式④-2および表2~4の数値によって、地上部の養分吸収増加量 ($U_M - U_{M0}$, kg ha⁻¹) 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評価で良好に説明し得ると言える。そこで、各草地のふん尿無施用区に配置された化学肥料の標準区と無施用区の調査結果から、式③によって各養分の a 値を求め、以下の予測を行った。

〈スラリー評価による予測法〉

(窒素)

$$U_M - U_{M0} = N_M \times R_s \times Q \times T \times a \dots\dots\dots \text{式④-1}$$

(リン酸およびカリウム)

$$U_M - U_{M0} = N_M \times R_S \times a \quad \dots\dots\dots \text{式④-2}$$

次に、松中ら⁹⁾によれば、消化液における窒素の肥効は施用時のアンモニア揮散を考慮した正味のアンモニウム態窒素量によって良く評価できると言われている。しかし、本試験ではアンモニア揮散量を測定していない。そこで、ここでは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見なす評価法(以下、アンモニウム態窒素評価)を採用し、式⑤の予測方法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〉

$$U_M - U_{M0} = N_{AM} \times T \times a \quad \dots\dots\dots \text{式⑤}$$

ここで、 N_{AM} ：スラリーによるアンモニウム態窒素施用量 (kg ha^{-1}) である。

結 果

1. 消化液とスラリーの肥効

(1) 乾物収量

各区の年間乾物収量を図1に示した。年間乾物収量の水準は3.6~10.1 t ha^{-1} の範囲にあった。このうち、無窒素肥料条件の畜試A~D草地および無化学肥料条件の根釧農試E草地は低収であったが、化学肥料を併用した根釧農試F、G草地では8.0~10.0 t ha^{-1} の目標収量水準に達した。畜試では消化液区がスラリー区よりも多収となる例が多かった。これに対し根釧農試では、消化液の現物中養分含量がスラリーよりも低かったこと(表1)に対応し、消化液区の収量はスラリー区と同等かやや劣っていた。

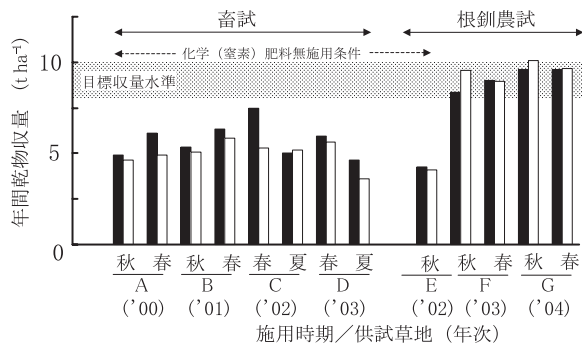


図1 各試験地の年間収量

■, 消化液; □, スラリー
 施用時期：秋は前年10月, 春は当年5月中旬, 夏は1番草収穫後

(2) 養分の利用割合

1) 年間の利用割合

消化液とスラリーの年間におけるみかけの養分利用割合の実測値を、式②の $(U_M - U_{M0})/N_M$ によって求め、図2に示した。みかけの利用割合には、いずれの養分

も、大きな変動が認められた。みかけの窒素利用割合の範囲(最小値~最大値)は消化液およびスラリーの順にそれぞれ0.16~0.56 kg kg^{-1} および0.13~0.46 kg kg^{-1} 、平均値±標準偏差は0.34±0.11 kg kg^{-1} および0.25±0.10 kg kg^{-1} であり、消化液におけるみかけの窒素利用割合はスラリーと同等かこれを上回る傾向にあった。一方、みかけのカリウム利用割合の範囲は、消化液およびスラリーの順にそれぞれ0.25~0.73 kg kg^{-1} および0.26~0.81 kg kg^{-1} 、平均値±標準偏差はそれぞれ0.53±0.17 kg kg^{-1} および0.47±0.17 kg kg^{-1} であり、両者の差異は小さかった。リン酸利用割合における差異はさらに小さく、平均値±標準偏差はそれぞれ0.24±0.10および0.23±0.11 kg kg^{-1} であった。

試験場別にみると、根釧農試ではいずれの養分の利用割合も消化液がスラリーを上回る場合が多かった。これに対し、畜試では、窒素は根釧農試と同様であったが、リン酸は逆の傾向にあり、カリウムの場合には消化液とスラリーの大小関係が一定でなかった。

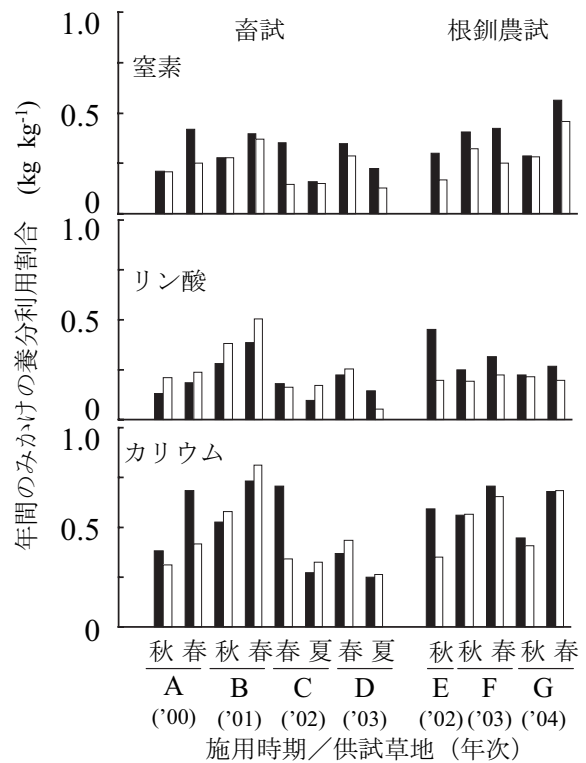


図2 消化液とスラリーにおけるみかけの養分利用割合

■, 消化液; □, スラリー
 施用時期：秋は前年10月, 春は当年5月中旬, 夏は1番草収穫後

2) 番草別利用割合

化学肥料併用条件のFおよびG草地において、1番草と2番草におけるみかけの養分利用割合をそれぞれ実測し、式⑥によって両者の比の値を求めて図3に示した。

$$\left\{ \frac{U_{M2} - U_{M02}}{N_M} \right\} \left\{ \frac{U_{M1} - U_{M01}}{N_M} \right\} \\ = (U_{M2} - U_{M02})(U_{M1} - U_{M01}) \dots \dots \dots \text{式⑥}$$

ここで、 U_{M1} および U_{M2} はスラリー施用区における1番草および2番草の地上部養分吸収量 (kg ha^{-1})、 U_{M01} および U_{M02} はスラリー無施用区における1番草および2番草の地上部養分吸収量 (kg ha^{-1})、 N_M はスラリーによる養分施肥量 (kg ha^{-1})である。

式⑥で得られる比の値が1.0の場合、消化液またはスラリーの施用に伴って、牧草による養分吸収量の増大が1番草と2番草に等しい量で認められたことになるので、ふん尿の窒素肥効が1番草と2番草に1:1の割合で発現したと見なす。同様に、値が0.5の時には2:1の割合で発現したと見なす。

既往の知見¹⁸⁾では、化学肥料併用条件のスラリーにおける比の値は、窒素、リン酸およびカリウムともに0.5前後となっている。しかし、本試験で供試したスラリーにおける比の値は0.30~0.52の範囲に分布し、リン酸とカリウムでやや低い傾向が認められた。消化液における比の値は、それよりもさらに低い0.17~0.46の範囲にあり、秋施用で0.2前後、春施用ではリン酸を除けば0.25前後の値が得られた。この場合、施用された消化液の肥料養分はみかけ上1番草と2番草に4:1~5:1程度の割合で吸収利用されたことになり、年間の80%以上の肥効は1番草に発現したと見積もられた。

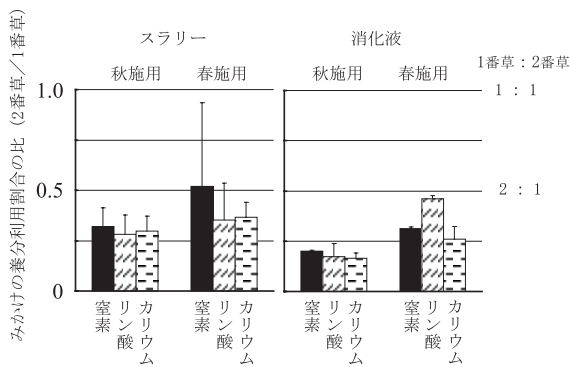


図3 消化液施用時のみかけの養分利用割合における1番草と2番草の比(化学肥料併用条件のF, G草地における平均値)

(3) 肥効評価の適合性

消化液またはスラリーの施用に伴う年間の窒素吸収増加量の予測値を、スラリー評価(式④-1)とアンモニウム態窒素評価(式⑤)から求めた。

それぞれの評価法による予測値と実測値の関係を図4に示す。いずれの評価法でも予測値と実測値は概ね良好に対応した。そこで、両評価法について予測精度の尺度となる二乗平均平方根誤差(Root Mean Square

Error, 以下, RMSE)を式⑦によって求め、図5に示した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{pi})^2}{n}} \dots \dots \dots \text{式⑦}$$

ここで、 x_i は*i*組目の実測値、 x_{pi} は*i*組目の推定値、 n は標本の組数である。

消化液について見ると、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が0.5未満の場合には、スラリー評価のRMSE値がアンモニウム態窒素評価の値よりもやや小さかった。これに対し、0.5以上の場合にはアンモニウム態窒素評価のRMSE値が小さく、予測精度が勝った。この傾向は、スラリーについてもほぼ同様であった。また、消化液とスラリーのRMSE値を比較すると、前者は12~17 kg ha^{-1} 、後者は11~20 kg ha^{-1} の範囲にあり、ほぼ同水準であった。

リン酸とカリウムの吸収増加量をスラリー評価で予測

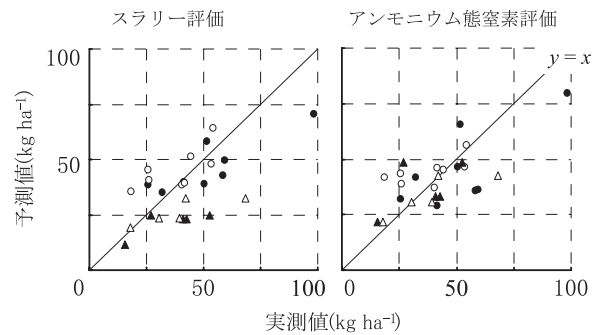


図4 窒素吸収増加量の実測値と予測値の比較
●, 畜試消化液; ▲, 根釦農試消化液; ○, 畜試スラリー; △, 根釦農試スラリー

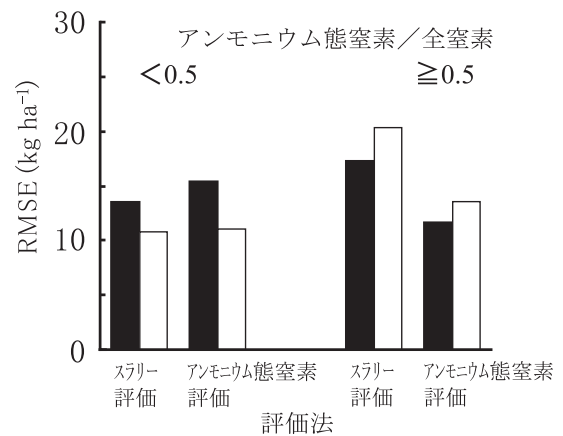


図5 窒素肥料への換算方法と予測精度

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{実測値} - \text{予測値})^2}{\text{標本数}}}$$

■, 消化液; □, スラリー

し、実測値と比較して図6に示した。いずれの養分とも、両者は概ね良好に対応した。ただし、リン酸については消化液、スラリーともに実測値が予測値をやや上回った。消化液のRMSE値は、リン酸ではスラリーよりもやや大きかったが、カリウムでは逆に小さかった。

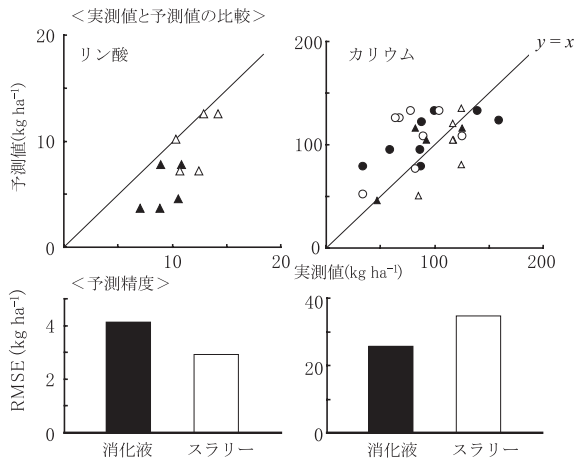


図6 リン酸およびカリウム吸収増加量に対する適合性

畜試では無リン酸区を設置しなかったため、リン酸の適合性検討から除外した。

●, 畜試消化液; ▲, 根釧農試消化液; ○, 畜試スラリー; △, 根釧農試スラリー

2. 施用時期と施用配分

(1) 乾物収量

消化液の施用時期と施用配分を変えた6処理の乾物収量を図7に示した。年間乾物収量の処理間差は、収量の主体を占める1番草と良く対応していた。

いずれの草地でも、年間乾物収量は秋春等量分施肥区で最も高い傾向が認められ、特にF草地で明瞭であった。

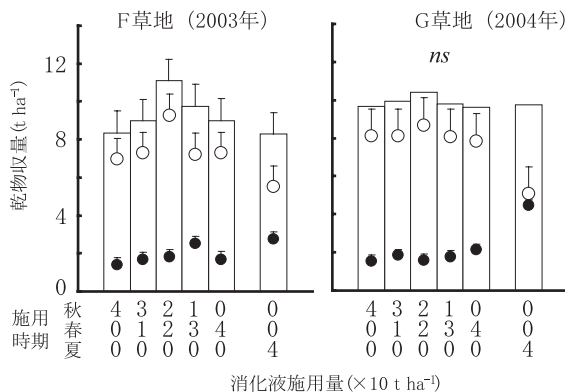


図7 消化液の施用配分がチモシー単播草地の乾物収量に及ぼす影響

○, 1番草; ●, 2番草; □, 年間合計; I, LSD(P<0.05)

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(当年7月中旬)

夏全量施用区では、早春の養分不足によって1番草収量が両草地とも有意に低下した。また、G草地の2番草収量は顕著に高まった。

(2) 1番草の収量構成要素

G草地における1番草の茎数と一茎重の関係を図8に示した。1番草の有穂茎数は、各区とも900本m²前後の高い水準を得た。いずれの収量構成要素にも有意な処理間差は認められなかったが、秋施肥量の多い区の有穂茎数は他区よりも多く、また、秋春等量分施肥区における有穂茎の一茎重は他区よりも重い傾向が窺われた。

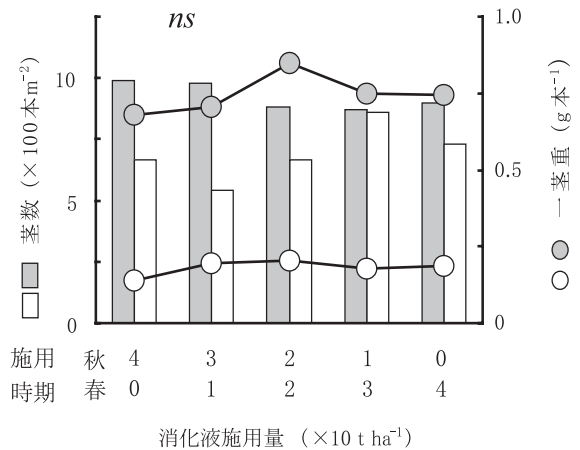


図8 消化液の秋と春の施用配分がチモシー1番草の収量構成要素に及ぼす影響(G草地, 2004年)

■●, 有穂茎; □○, 伸長茎

(3) 1番草の窒素吸収経過

G草地の1番草における地上部窒素吸収量の推移を図

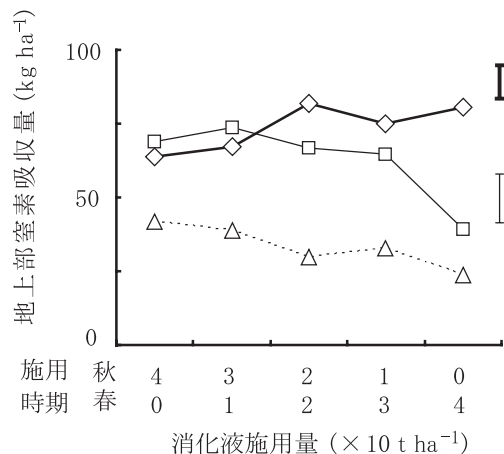


図9 消化液の施用配分とチモシー1番草における窒素吸収量の推移(G草地, 2004年)

△, 5月7日¹⁾; □, 5月17日²⁾; ◇, 6月3日; I, 5月17日調査時のLSD(P<0.05); I, 6月3日調査時のLSD(P<0.05)

1) 化学肥料の施肥直前
2) 消化液の施用直前

9に示した。5月7日（早春施肥直前）と5月17日（春の消化液施用直前）の地上部窒素吸収量は、秋の消化液施用量の多い区ほど高い傾向が認められた。消化液が5月17日に施用されると、地上部窒素吸収量はその後急激に増大し、6月3日には春の消化液施用量の多い区ほど高くなった。この時の地上部窒素吸収量は、いずれの区でも、1番草有穂茎数の確保に必要とされる⁸⁾50 kg ha⁻¹を越えていた。

(4) 年間のみかけの窒素利用割合

年間のみかけの窒素利用割合を図10に示した。みかけの窒素利用割合には、統計的に有意な処理間差は得られなかったが、いずれの年次も秋施用量の多い区で低い傾向であった。

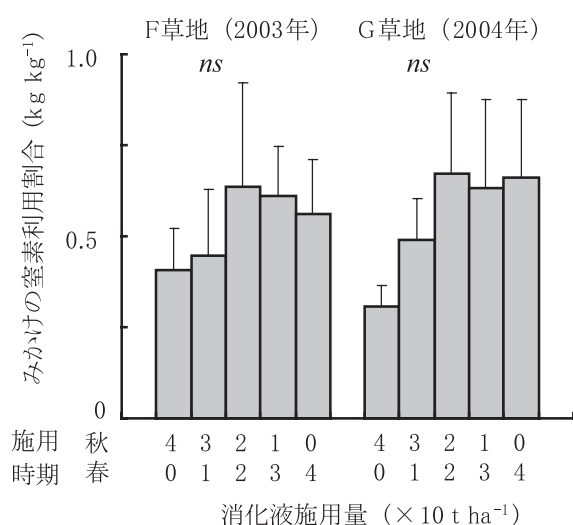


図10 消化液の秋と春の施用配分がみかけの年間窒素利用割合に及ぼす影響

I, 標準偏差

考 察

1. 消化液の肥料養分含量

根釧農試の供試した消化液の水分含量や全窒素中のアンモニウム態窒素割合は、同一プラントの原料槽から採取したスラリーよりも高く、既往の知見¹²⁾に符合した。しかし、消化液の各養分含量はスラリーよりも低い傾向にあった。この理由は、消化液貯留中における沈殿が原因¹⁾と考えられる。一方、畜試の消化液では、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が根釧農試よりも低かった。この原因の一つとして、畜試が供試したバイオガスプラントでは、メタン発酵の前処理にばっ気処理が採用されていたため、アンモニア揮散量の多かったことが考えられる。このように、バイオガスプラント消化液の養分含量には、メタン発酵に伴う共通の変化が一部に見られるものの、表1に示したように、原料となるスラリーの養分含量や処理～貯留過程の管理法などにより大

きく変動していた。現在、堆肥、スラリー、尿などの一般的なふん尿施用に際しては、事前に肥料養分含量を測定し、分析値に基づいた肥効評価を行うことが推奨されている^{7,15,16,17,18)}。消化液の養分含量も変動が大きいため、スラリーと同様に、事前の分析が必要である。

2. 消化液の肥効

消化液の施用に伴う地上部の窒素吸収増加量は、式④-1によってほぼ良好に予測できた。このことは、消化液の肥料換算に際し、現行のスラリーの係数を使用しても大きな支障のないことを示している。松中ら⁹⁾は消化液の窒素肥効がスラリーと本質的に違いのないことを指摘した。本試験の結果は、これを定量的に支持したと言える。

さらに、本試験では、消化液中のアンモニウム態窒素含量を用いて地上部の窒素吸収増加量を予測し、この方法でも良好な結果を得た。松中ら⁹⁾により、消化液の肥料の効果を発現程度は、アンモニア揮散による窒素の損失を考慮した正味のアンモニウム態窒素施用量に依存することが明らかにされている。しかし、本試験では揮散を考慮しないアンモニウム態窒素の全量を有効と見なすことによって良好に窒素吸収増加量を予測できた。スラリーや消化液などの施用に伴ってアンモニア揮散が生じることは既に良く知られており^{1,9)}、本試験で供試したプラントの消化液を草地に施用した場合でも、アンモニア揮散によってアンモニウム態窒素の10~20%が損失したという観測例がある¹⁾。したがって、本試験でのみアンモニア揮散が生じなかったとは考えにくい。それにもかかわらず、揮散を考慮しない計算方法が牧草の窒素吸収量を良く説明できた理由の一つとしては、消化液中における有機態窒素の分解による肥効発現が考えられる。図3では、前年秋や早春に消化液を施用した場合、2番草には年間の20%弱の窒素が利用されると見積もられた。2番草に対して緩効的に発現したこれら窒素は、有機態窒素に由来した可能性がある。

スラリー評価とアンモニウム態窒素評価の予測精度をRMSEによって比較した結果、消化液の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より良好な適合性を示した。

これには以下の理由が考えられる。スラリー評価で消化液を窒素肥料に換算する場合、消化液中の全窒素含量に基準肥効率0.4(表2)を乗じ、アンモニウム態窒素含量が多い場合にはさらに品質による補正係数1.2(表3)を乗じる。すなわち、スラリー評価では0.4に1.2を乗じた0.48が全窒素含量に乘じる最大の係数となる。したがって、アンモニウム態窒素が全窒素の48%以上を占める消化液に対しては、0.48以上の係数を与えることの

できない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を用いた方が予測精度が高まる。これに対し、全窒素含量に占めるアンモニウム態窒素の割合が低い場合には、肥効に占める有機態窒素の寄与が相対的に高まり、アンモニウム態窒素よりも全窒素に基づく評価が良好に適合したものと推察される。

上記のことから、消化液の窒素肥効はスラリー評価でほぼ良好に把握可能である。ただし、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が0.5以上の消化液に対しては、予測精度の面からアンモニウム態窒素評価の適用が望ましいと判断した。

消化液の施用に伴うリン酸吸収増加量の実測値は、予測値をやや上回った。この傾向はスラリーでも同様であったので、消化液のリン酸の肥効が特に高かったとは考えにくい。今回は事例数も少ないので、消化液のリン酸については、詳細な検討はできない。ここでは、消化液のRMSE値がスラリーよりわずかに高かったものの(図6)、消化液のリン酸含量は少なく肥効自体も小さいことを考慮し、消化液におけるリン酸肥効評価にスラリー評価を適用しても実用上支障ないと考える。

消化液の施用に伴うカリウム吸収増加量の実測値と予測値は概ね良好に対応した。また、消化液のRMSE値はスラリーよりも小さかった。これらのことから、消化液におけるカリウムの肥効評価にはスラリー評価が適用できると判断する。

このように、消化液の肥効については、スラリーとほぼ同じ評価法を適用できた。これに対し、消化液における番草別の肥効発現割合は、スラリーと異なった。スラリーに関する既往の知見¹⁸⁾によれば、秋または早春に施用されたスラリーの窒素は1番草と2番草に2:1の割合で発現すると見積もられている。これと比較すると、消化液の窒素は1番草と2番草に4:1~5:1の割合で発現し(図3)、尿¹⁸⁾に近い速効性を示した。これは、メタン発酵によって水分含量とアンモニウム態窒素の割合が高まる消化液の性状と良く符合する。尿における比の値は本試験の消化液よりも低い¹⁸⁾ので、消化液は尿よりもやや緩効性を有すると考えられる。しかし、施肥設計の実用上、消化液の施用に伴う化学肥料の併用に際しては、現行の尿に対する施肥対応と同様に、施用した番草のみに対して減肥を行って差し支えないと判断する。

なお、当試験におけるスラリーの肥効は、既往の知見¹⁸⁾よりもやや速効的であった。これは、根釧農試の供試したバイオガスプラントが堆肥とスラリーの搬入される共同利用型であり、原料槽にはスラリーとともに堆肥の固液分離液が混合されるため、表1からも分かるように、一般的なスラリーよりもアンモニウム態窒素含量の

多い性状となっていたことが一因と思われる。

3. 消化液の効果的分施肥法

北海道の酪農家が採草地に消化液を施用できる時期は、前年秋、早春および1番草収穫後の3時期である。このうち、1番草収穫後の年1回施用では、チモシー採草地における年間収量の主体を占める1番草に消化液が施用されず、生産性が発揮されない。本試験の夏全量施用区でも、G草地(2004年)では2番草でかなり回復したものの、F草地(2003年)では年間収量が最低の水準となった(図7)。年間1回施用で安定生産を前提とする場合には、既往のスラリーの結果¹⁰⁾と同様に、1番草に対して養分を供給できる秋または春の施用が望ましい。もちろん、2番草に対する施用効果は本試験でも確認されたので、分施の一環として1番草収穫後に消化液を施用する場合には、スラリーと同様に施用時期の補正係数¹⁷⁾を用いて肥料換算をする。

チモシー1番草に養分を補給する場合、消化液の秋と春の施用配分では、秋春均等分施肥区が最も高い収量を示した。この傾向も、松中ら¹¹⁾によるスラリーの施用試験で得られた知見と一致する。

みかけの窒素利用割合は、秋施用量の多い秋全量区と秋重点区で低く(図10)、越冬前後における流亡等の損失が示唆された。スラリーや尿を秋に施用すると、みかけの窒素利用割合が低下することは既に知られており^{10,17)}、消化液も同様と考えられる。

これに対し、秋春均等分施肥区では、秋施用量が少ないので、越冬前後の窒素損失量が秋全量区および秋重点区よりも少ない。秋春均等分施肥区が両区より高収であった主な理由は、窒素の損失が少なく、その利用が高まったことによると考えられる。

一方、春全量区と春重点区におけるみかけの窒素利用割合も、秋春均等分施肥区と同様に高かった(図10)。それにもかかわらず、両区の収量が秋春均等分施肥区に劣った理由は、春の消化液施用時期にあると考えられる。

チモシー1番草で高収を得るには、早春の幼穂形成期までに十分な窒素を供給し、有穂茎数を確保する必要がある⁸⁾。本試験における春施用の時期は5月中旬であり、最も効率的な施用時期である5月上旬^{8,15,17)}よりもやや遅い。この時期に消化液を施用すると、春全量区の窒素吸収量は急激に増大して、幼穂形成期の終わる6月上旬には他区と同程度になり(図9)、その結果、有穂茎数が不足することは無かった(図8)。しかし、この場合、有穂茎数の増加は消化液施用後に、1茎重の増大はさらにその後には旺盛になったと考えられるので、有穂茎の1茎重が増大する期間は他区よりも短かったと言える。それゆえ、春全量区の1番草では小さな有穂茎が多くなり、有穂茎の平均一茎重がやや低くなったものと思

われる。

秋春均等分施肥区のチモシーは、前年秋に半量の消化液が施用されているので、翌春萌芽後直ちに窒素を吸収し、有穂茎数を速やかに増大できる。その結果、5月中旬における消化液の施用が一茎重の増大に有効に働き、統計的に有意ではなかったが、当区の一茎重が最大となって、高収を得たと推察される。

なお、上記の収量構成要素と窒素吸収経過は、収量の処理間差が小さかったG草地で調査されたものであるもので、処理間差が統計的に有意であったF草地では、各現象がより明瞭に現れていた可能性が高い。

以上の結果、年間40t ha⁻¹程度の消化液施用量では、秋春均等分施肥が、越冬前後における窒素の損失を少なくし、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結論する。

4. まとめ

バイオガスプラント消化液の肥効評価法を表5にまとめた。消化液の肥料換算には、スラリーと同じ基準肥効率と補正係数を利用する。ただし、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が50%以上の消化液では、アンモニウム態窒素含量に1.0を乗じて窒素肥料に換算する方が適合性は高い。化学肥料の減肥は、消化液を施用する番草のみを対象とする。また、年間40t ha⁻¹程度の消化液施用量では、前年秋と当年春の等量分施肥が、高収を確保する効果的な施用方法である。

表5 バイオガスプラント消化液の基準肥効率¹⁾
(kg kg⁻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) 肥効評価は消化液を施用する番草のみを対象とする。

2) $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{T}-\text{N} < 0.5$ 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) $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{T}-\text{N} \geq 0.5$ 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。

謝 辞 本稿のとりまとめに際し、三木直倫北海道立根釧農業試験場研究部長および石渡輝夫寒地土木研究所寒地農業基盤研究グループ資源保全チーム上席研究員に御校閲を頂いた。記して謝意を表します。

引用文献

1) 独立行政法人北海道開発土木研究所, 北海道立根釧農業試験場, 北海道立北見農業試験場, 北海道立畜産試験場. “乳牛ふん尿を主原料とするバイオガスプラント消化液の特性と草地・畑地への施用方法”. 平成17年普及奨励並びに指導参考事項, 北海道農政部, 札

幌, 2005. p109-111.

- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 北海道支部. “北海道新エネルギーマップ2006”. 2006. p 1.
- 3) 北海道農政部. “北海道施肥ガイド”, 北海道, 札幌, 2002. p202-229.
- 4) 北海道立中央農業試験場, 北海道農務部農業改良課編. “土壌および作物栄養診断基準—分析法(改訂版)—”, 北海道, 札幌, 1992. p1-199.
- 5) 松田從三. “経済的視点からみた酪農バイオガスシステムの歴史的意義”. 酪農バイオガスシステムの社会的・経済的評価. 市川治・中原准一・干場信司. 酪農学園大学エクステンションセンター, 2006. p.14-23.
- 6) 松本武彦, 田村忠, 中辻敏朗, 木曾誠二, 三木直倫, 寶示戸雅之. “乳牛糞尿処理物の肥料成分含量の簡易な推定法”. 日土肥誌, 73, 169-173 (2002).
- 7) 松本武彦, 寶示戸雅之. “チモシー単播草地に施用した乳牛スラリーの化学成分変動に対応した窒素肥効の評価”. 日土肥誌, 76, 253-259 (2005).
- 8) 松中照夫. “寒冷・寡照地域のチモシー草地に対する窒素施肥法に関する研究”. 北海道立農業試験場報告, 62, 1-72 (1987).
- 9) 松中照夫, 熊井美鈴, 千徳あす香. “バイオガスプラント消化液由来窒素のオーチャードグラスに対する肥料的効果”. 日土肥誌, 74, 31-38 (2003).
- 10) 松中照夫, 小関純一, 近藤熙. “根釧地方の混播草地に対する液状きゅう肥の効率的な施用時期”, 北農, 55, 17-30 (1988).
- 11) 松中照夫, 小関純一, 近藤熙. “根釧地方の混播草地に対する液状きゅう肥の効率的施用方法”, 北農, 55, 30-44 (1988).
- 12) 松中照夫, 成瀬往代, 熊井美鈴. “乳牛ふん尿のメタン発酵処理に伴う性状変化”. 日土肥誌, 73, 279-300 (2002).
- 13) 水野直治, 南松雄. “硫酸・過酸化水素による農作物中 N, K, Mg, Ca, Fe, Mn 定量のための迅速処理法”, 日土肥誌, 51, 418-420 (1980).
- 14) 中島秀治. “フローインジェクション分析法による耕地土壌及び畑作物体ケルダール分解液中の全窒素定量”. 東北農試研究資料, 7, 37-44 (1987).
- 15) 三枝俊哉, 松本武彦, 三木直倫, 寶示戸雅之, 大塚省吾, 岡元英樹, 二門世, 奥村正敏, 木曾誠二, 渡部敢, 田村忠, 阿部英則, 前田善夫. “チモシー草地におけるふん尿主体施肥設計法. 1. 乳牛スラリーの基準肥効率”. 北農, 72, 3-10 (2005).
- 16) 三枝俊哉, 松本武彦, 三木直倫, 寶示戸雅之, 大塚

- 省吾, 岡元英樹, 二門世, 奥村正敏, 木曾誠二, 渡部敢, 田村忠, 阿部英則, 前田善夫. “チモシー草地におけるふん尿主体施肥設計法. 2. 乳牛堆肥の基準肥効率”. 北農, 72, 214-223 (2005).
- 17) 三枝俊哉, 松本武彦, 三木直倫, 寶示戸雅之, 大塚省吾, 岡元英樹, 二門世, 奥村正敏, 木曾誠二, 渡部敢, 田村忠, 阿部英則, 前田善夫. “チモシー草地におけるふん尿主体施肥設計法. 3. 窒素の基準肥効率に対する施用時期と品質の補正係数”. 北農, 72, 341-350 (2005).
- 18) 三枝俊哉, 松本武彦, 三木直倫, 寶示戸雅之, 大塚省吾, 岡元英樹, 二門世, 奥村正敏, 木曾誠二, 渡部敢, 田村忠, 阿部英則, 前田善夫. “チモシー草地におけるふん尿主体施肥設計法. 4. 化学肥料の併用方法”. 北農, 73, 35-41 (2006).

Fertilizer Efficiency and Effective Split Application of Anaerobically Digested Dairy Slurry to Timothy (*Phleum pratense* L.) Meadow

Toshiya SAIGUSA^{*1} and Kan WATANOBE^{*2}

Summary

Surface application effects of anaerobically digested dairy slurries on the performance of timothy (*Phleum pratense* L.) pure meadow were investigated in the Konsen and Tokachi districts of eastern Hokkaido. Moreover, these investigations led to the establishment of effective split application for anaerobically digested dairy slurry.

The estimated effects of anaerobically digested dairy slurry were sufficient when based on the method presently used for slurry in Hokkaido. With this method, nitrogen, phosphorus and potassium contents in anaerobically digested dairy slurry are multiplied by the coefficients (0.4, 0.4 and 0.8, respectively). The phosphorus and potassium values are equivalent to the amounts in chemical phosphorus and potassium fertilizers. The nitrogen value is corrected according to the quality of slurry and application time.

Furthermore, this paper indicated that ammonium nitrogen content in anaerobically digested dairy slurry was also equivalent to the amount in chemical nitrogen fertilizer. As a result of this study, it was found that this method was more sufficient than the former, when ammonium nitrogen content was more than 50% of the total nitrogen content in the slurry.

When anaerobically digested dairy slurry was applied to timothy meadow in autumn or following spring, more than 80% of its annual effects appeared in the first cut. Consequently, in this case, it was recommended that the amount of chemical fertilizer for the first cut could be decreased.

It was found that splitting 40t ha⁻¹ year⁻¹ of anaerobically digested dairy slurry into the same quantity in both of autumn and spring was the most effective on dry matter yield in timothy meadow.

*1 Hokkaido Konsen Agricultural Experiment Station (Nakashibetsu, Hokkaido, 086-1135 Japan)
saigusa@agri.pref.hokkaido.jp

*2 Hokkaido Animal Research Center (Shintoku, Hokkaido, 081-0038 Japan)