

## 乳牛ふん尿メタン発酵消化液の特性

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 資源保全チーム 上席研究員 横濱充宏

### 1. はじめに

近年、温室効果ガスの発生抑制の観点から、再生可能エネルギーが注目されるようになる一方で、乳牛ふん尿に由来する環境汚染が問題視されるようになってきた。これらの問題を同時に解決する手段として、乳牛ふん尿をメタン発酵させてバイオガスを発生させ、エネルギーを得るとともに、同時に発生する乳牛ふん尿のメタン発酵処理液（以下、消化液）を液肥として利用するバイオガスプラントがドイツ、デンマーク、スウェーデンなどで実用化されるようになった。

バイオガスプラントにおいては、原料となる乳牛の液状ふん尿（以下、原料スラリー）をメタン発酵することにより、バイオガスだけでなく、原料スラリーとほぼ同量の消化液が発生する。この消化液は液肥としての利用が可能であり、バイオガスプラントの導入は乳牛ふん尿のエネルギー・肥料としての複合的な有効活用と、化学肥料の節減を通して化石燃料使用量の削減に寄与することが可能である。このような背景から、近年、乳牛ふん尿を主原料とし、消化液を液肥として圃場還元するバイオガスプラントの建設が進んでいる。

バイオガスプラントがエネルギー・環境問題の解決に貢献するには、その主原料となっている乳牛ふん尿から生成した消化液の液肥利用の推進が重要であるが、一度メタン発酵処理を受けることから、その特性が通常の乳牛ふん尿とは異なる可能性がある。

そこで、筆者らの研究で明らかとなった、乳牛ふん尿をメタン発酵させた消化液の特性について紹介する。

### 2. 消化液の一般性状と肥料成分

筆者の所属する寒地土木研究所は、北海道東部の別海町および湧別町に実験用バイオガスプラントを保有している（以下、別海町のバイオガスプラントを別海プラント、湧別町のそれを湧別プラントと称

する。）。別海プラントは成牛換算で1,000頭の、湧別プラントは同200頭の乳牛ふん尿の処理が可能である。

両プラントにおける原料スラリーと消化液の一般性状および肥料成分の分析結果を表1、2に示す。表中のSDは標準偏差を表す。受入槽は原料スラリーを投入する槽、発酵槽は原料スラリーをメタン発酵させ消化液を生成させる槽、殺菌槽は生成した消化液を加熱殺菌処理する槽、貯留槽は加熱殺菌後の消化液を液肥として圃場散布するまで一時的に貯留しておく槽である。受入槽から原料スラリーを、発酵槽～貯留槽から各槽中の消化液を採取し、各項目の分析を行った。各槽の各項目の分析値は危険率5%でt検定により有意差検定を行った。いずれのプラントとも、各槽からの採取液の分析試料数は33検体である。各槽からの採取液の分析値の右にアルファベットが表示されているが、これらが各槽からの採取液なる槽の間で、分析値に有意差があることを示している。

受入槽から採取した原料スラリーと発酵槽から採取した消化液の性状比較により、両液の性状差を検証できる。比較の結果、固形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が生じていることが判明した。これらの結果から、消化液は原料スラリーに比べて、乾物含量が少ないために流動性が高く散布作業性に優れ、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。

メタン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。両プラントとも貯留槽は無蓋型であるが、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。アンモニアの空中揮散は消化液の窒素肥料成分の損失をもたらすだけでなく、酸性雨の原因ともなるので、今後、バイ

表1 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	pH		EC(mS/cm)		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					
別海 プラント	受入槽	7.13	±0.40	d	9.9	±1.4	b	6.73	±1.11	a	1.52	±0.30	a	5.25	±0.94	a
	発酵槽	7.46	±0.47	c	11.1	±1.1	a	4.96	±1.23	b	1.48	±0.44	a	3.50	±1.00	b
	殺菌槽	8.33	±0.35	a	11.1	±2.7	ab	3.31	±1.26	c	1.17	±0.36	b	2.15	±0.95	c
	貯留槽	7.92	±0.30	b	9.5	±1.7	b	3.36	±1.15	c	1.15	±0.29	b	2.22	±0.87	c
湧別 プラント	受入槽	6.91	±0.28	d	11.1	±1.6	a	7.84	±1.47	a	2.31	±0.76	a	5.54	±1.04	a
	発酵槽	7.88	±0.20	c	11.7	±1.7	a	5.69	±1.04	b	2.21	±0.49	b	3.48	±0.63	b
	殺菌槽	8.69	±0.27	a	10.9	±1.5	b	5.15	±0.79	b	1.93	±0.26	c	3.26	±0.69	b
	貯留槽	8.27	±0.20	b	10.2	±1.6	b	3.85	±0.99	c	1.58	±0.43	d	2.24	±0.61	c

表2 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	T-N(FM%)		NH <sub>4</sub> -N(FM%)		NH <sub>4</sub> -N/T-N × 100(%)		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (FM%)		K <sub>2</sub> 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	0.39	±0.07	a	0.21	±0.04	c	53.6	±7.4	b	0.14	±0.03	a	0.44	±0.05	a	0.14	±0.05	ab	0.08	±0.02	a
	発酵槽	0.38	±0.05	a	0.27	±0.05	a	64.6	±5.7	a	0.14	±0.05	a	0.43	±0.08	ab	0.15	±0.04	a	0.08	±0.02	a
	殺菌槽	0.37	±0.05	a	0.25	±0.05	b	68.6	±11.2	a	0.09	±0.04	b	0.42	±0.11	ab	0.11	±0.04	bc	0.05	±0.02	b
	貯留槽	0.29	±0.07	b	0.19	±0.04	d	64.7	±11.4	a	0.09	±0.05	b	0.39	±0.07	b	0.09	±0.04	c	0.05	±0.03	b
湧別 プラント	受入槽	0.41	±0.05	a	0.17	±0.04	b	41.4	±8.1	b	0.18	±0.05	a	0.55	±0.10	a	0.15	±0.05	a	0.09	±0.02	a
	発酵槽	0.38	±0.06	a	0.23	±0.04	a	57.2	±6.0	a	0.18	±0.06	a	0.55	±0.06	a	0.19	±0.11	a	0.09	±0.01	a
	殺菌槽	0.38	±0.04	a	0.22	±0.02	a	57.3	±6.1	a	0.16	±0.04	a	0.57	±0.05	a	0.17	±0.06	a	0.08	±0.02	ab
	貯留槽	0.29	±0.05	b	0.18	±0.04	b	60.8	±4.4	a	0.12	±0.04	b	0.53	±0.09	a	0.14	±0.05	a	0.06	±0.02	b

表3 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		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=13	11.5±3.4	2.5±1.3	0.04±0.04	0.49±0.90	0.11±0.12	0.01±0.02	0.47±0.27	0.86±0.90
	発酵槽	平均値±SD n=13	13.7±3.7	3.4±2.0	0.04±0.04	0.57±0.95	0.09±0.07	0.01±0.02	0.40±0.20	0.95±1.21
	殺菌槽	平均値±SD n=10	14.3±6.8	4.2±3.0	0.04±0.04	1.04±1.13	0.08±0.06	0.02±0.03	0.37±0.21	0.95±1.01
	貯留槽	平均値±SD n=8	12.6±9.2	2.3±1.1	0.06±0.07	0.63±0.61	0.10±0.10	0.01±0.01	0.42±0.31	0.95±1.00
湧別 プラント	受入槽	平均値±SD n=10	15.7±5.8	3.1±1.7	0.08±0.05	0.31±0.43	0.11±0.04	0.01±0.02	0.95±0.34	1.51±1.43
	発酵槽	平均値±SD n=12	14.6±1.7	3.2±0.9	0.08±0.06	0.16±0.15	0.11±0.02	0.01±0.01	1.09±0.41	0.16±1.44
	殺菌槽	平均値±SD n=7	15.3±2.3	3.1±0.8	0.10±0.05	0.33±0.31	0.09±0.01	0.03±0.01	1.45±0.25	2.67±0.83
	貯留槽	平均値±SD n=6	12.0±2.0	3.5±0.6	0.14±0.07	0.13±0.23	0.11±0.02	0.04±0.00	1.17±0.10	2.87±0.76
肥料取締法で 表示義務が生じる基準		300以上*	900以上 <sup>a,b</sup>	—	—	—	—	—	—	—
許容値(汚泥肥料等)		—	—	5.00	100.00	50.00	2.00	500.00	300.00	—

バイオガスプラントの建設を考えている諸氏には有蓋型貯留槽の導入を推奨する。

### 3. 消化液中の重金属含量

発酵処理、殺菌処理、貯留による重金属含量の変化は生じなかった。乳牛ふん尿を原料としている限り、重金属含量は非常に少なく、肥料取締法上の許容上限値を大幅に下回った(表3)。しかし、重金属が多いとされる下水汚泥や水産廃棄異物等を副原料として使用する場合は事前にこれらの副原料候補の重金属含量分析を行い、副原料としての採用の可否を検討する必要がある。

### 4. 消化液中の雑草種子の発芽率

メタン発酵の方式として、低温発酵(発酵温度20℃前後)、中温発酵(同37℃前後)、高温発酵(同55℃前後)が知られている。著者らは中温・高温発

酵処理および殺菌槽における加熱処理が原料スラリー中の雑草種子の発芽率におよぼす影響を検討するため、北海道の牧草地における代表的な雑草であるエゾノギシギシの種子を用いた室内試験を行った。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できることが明らかとなった(表4)。

表4 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	93.7	0.0	6.3
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

## 5. 消化液の圃場散布に伴うアンモニア揮散特性

表1、2に示すように、消化液は原料スラリーに比べて、pH、全窒素に占めるアンモニウム態窒素含量の割合ともに高く、アンモニア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薄層への施用ともに、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ウム態窒素量の割合（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）。

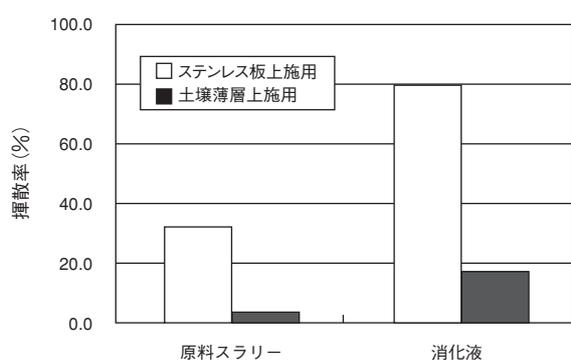


図1 室内試験でのアンモニア揮散率

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。

前述のように、下方浸透を抑制した状態で土壌薄層へ施用した場合、消化液の方が原料スラリーより

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）。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（表1）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推察される。

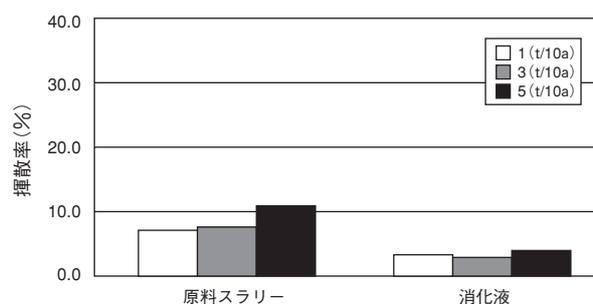


図2 圃場試験でのアンモニア揮散率（5月）

## 6. 消化液の草地圃場散布による土壌改善効果

消化液を散布している圃場および散布していない圃場を4圃場ずつ、各圃場6箇所から土壌試料を採取・分析し、危険率5%でt検定により消化液施用圃場と非施用圃場の各分析値の層差（層差=1層目：深さ0～5cmの分析値-2層目：深さ5～10cmの分析値）での有意差を検証した。

### (1) 腐植の集積

腐植物質の増加は土壌の団粒化を介して保肥力の増加、土壌の膨軟化、孔隙特性の改善に関与するとされている。

別海プラントで生成した消化液の非散布圃場では、腐植含量は1層目が2層目より平均で2.56%多い程度であったが、散布圃場では、1層目で2層目より平均で4.14%多くなっており、消化液散布により、表層の深さ0～5cmで腐植含量の増加が統計的に有意に生じていた(図3)。このように、今回の調査により消化液の散布が、表層の深さ0～5cmの領域において、腐植物質の増加を生じさせることが明らかとなった。

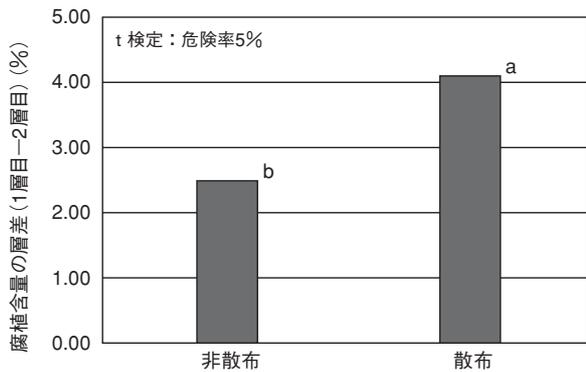


図3 消化液の散布が土壤表層の腐植集積におよぼす影響

## (2) 膨軟化

図4に示すように、消化液散布がなされていない圃場の容積重は深さ0～5cmで5～10cmに比べて殆ど変わらず、深さ0～5cmで $-0.16$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 程小さい程度であったが、消化液散布圃場では表層での容積重の低下が顕著で深さ0～5cmの容積重が5～10cmの容積重に比べて、 $0.27$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 程度小さくなっていった。このように、消化液散布圃場では非散布圃場に比べて表層での容積重の低下つまり、土壤の膨軟化が顕著に進行していた。

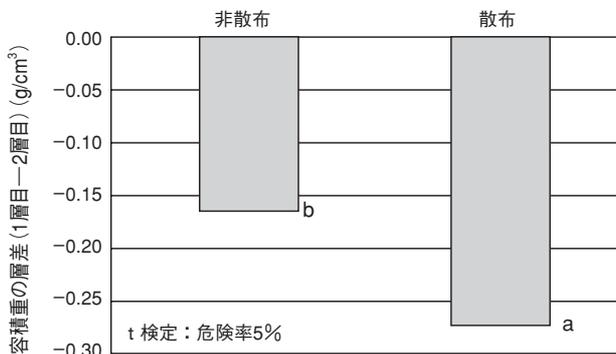


図4 消化液の散布が土壤表層の容積重低下におよぼす影響

消化液の長期的な散布は営農機械の走行による土壤表層の堅密化を防ぐだけでなく、膨軟化をもたらす、牧草の根の伸長にとって良好な土壤環境の形成に役立っているといえる。

## (3) 排水性の改善

粗孔隙は土壤の排水性を改善し、余剰水を迅速に排除する働きがあり、この孔隙が増加すると圃場内の余剰水が迅速に排除され、植物の根に十分な空気を供給することが可能となる。消化液非散布圃場では、1層目が2層目より平均で8.7 (Vol.%) 多い程度であったが、散布圃場では、1層目で2層目より平均で14.1%多くなっており、消化液散布により表層の深さ0～5cmで粗孔隙の増加が統計的に有意に生じていた(図5)。今回の調査により、消化液の散布が、表層の深さ0～5cmの領域において、土壤の排水性の改善をもたらしていることがわかった。

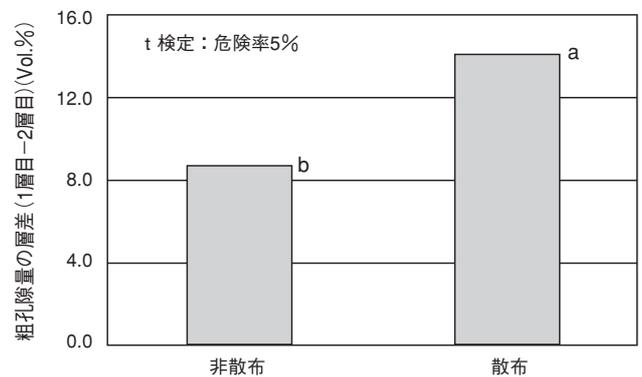


図5 消化液の散布が土壤表層の粗孔隙増加におよぼす影響

## 7. まとめ

乳牛ふん尿をメタン発酵処理した消化液は、以下のような特性を有すると考えられる。

①消化液は原料スラリーに比べて、乾物含量が少ないために流動性が高く散布作業性に優れ、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原料が乳牛ふん尿である限り、消化液の重金属含量は極めて微量で、肥料取締法上の許容上限値を大幅に下回っている。

③加熱処理をせずとも、メタン発酵処理のみにより、消化液中の雑草種子発芽率は大幅に低下する。

④消化液は原料スラリーに比べ、圃場施用に伴うアンモニア揮散が少なく、窒素肥料成分の損失が小さい。

⑤消化液の施用は、草地圃場の表層の腐植を増加させ、表層の膨軟化と排水性の改善をもたらす。

## 乳牛ふん尿メタン発酵消化液の草地への効果的施用法

北海道立根釧農業試験場 主任研究員 三枝俊哉

### 1. はじめに

家畜ふん尿のメタン発酵処理は、再生可能エネルギーを産出するふん尿処理法として注目され、北海道でも2000年以降、乳牛ふん尿を主体としたメタン発酵処理施設の建設が進んでいる。

メタン発酵処理施設では、発酵後のふん尿処理物であるメタン発酵消化液（以下、消化液）が生成される。消化液は、原料のスラリーよりもアンモニウム態窒素含量が高まるなど、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。広大な草地を保有する北海道の酪農地帯にメタン発酵処理施設を導入する際には、消化液を適切に草地に還元し、利用することが不可欠である。そのためには、消化液の肥効を正確に把握する必要がある。

そこで、本稿では、北海道の代表的な草種であるチモシーを基幹とする採草地を対象とし、乳牛ふん尿を主原料とする消化液の肥効評価法と効果的な施用法について紹介する。

### 2. 北海道におけるスラリーの肥効評価法

消化液の肥効評価法について述べる前に、消化液の原料である乳牛スラリー（以下、スラリー）の肥効評価法について、北海道で推奨されている方法を紹介する。消化液の肥効は、以下に述べるスラリーの肥効評価法を基本とし、消化液の化学的特性をふまえて評価される。

スラリーの養分含量は、乳牛の飼養体系やふん尿の管理体系等の条件によって、酪農家ごとに大きく異なる。そこで、事前に分析を行って養分含量を測定し、この値に肥効率と呼ばれる係数を乗じて化学肥料に換算する。

表1. スラリーの基準肥効率  
(kg kg<sup>-1</sup>)

窒素	リン酸	カリウム
0.4	0.4	0.8

表1は、スラリーの基準肥効率である。スラリーの養分含量にこの係数を乗じることにより、化学肥料に換算する。たとえば、現物1tにカリウムが5kg含まれるスラリーの場合、表1のカリウムの値0.8を掛け算し、5kg×0.8kg kg<sup>-1</sup>=4kgの値を得る。この時、このスラリー1tは化学肥料のカリウム4kg分に相当すると評価される。リン酸の肥効も同様に評価されるが、窒素については、スラリーの品質と施用時期によって肥効が異なるため、基準肥効率に対し、さらに、補正係数を乗じる仕組みになっている（表2、3）。

表2. スラリー品質の違いによる窒素の補正係数

区分	乾物当たり アンモニウム態窒素 g kg <sup>-1</sup>	補正係数
肥効大	35 ~	1.2
中	15 ~ 35	1.0
小	~ 15	0.8

表3. 施用時期の違いによる窒素の補正係数

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

表2のように、スラリーの品質は乾物当たりのアンモニウム態窒素含量で評価される。アンモニウム態窒素の多いスラリーの肥効は、高く見積もられる。また、表3の施用時期では、早春の雪解けまたは土壤凍結の融解直後に相当する4月~5月上旬の施用が最も効果的であり、前年秋と当年の5月中旬では、2割ほど肥効が低下する。チモシーを基幹とする採草地で5月の窒素吸収量が不十分な場合、1番草で穂を出す茎の数が十分に確保されず、穂を持たない軽い茎の数が相対的に増えるので、乾物収量が低下する。秋施用の場合、養分吸収は翌春の萌芽直後から可能となるが、越冬前後の流亡等で窒素が失われるので、5月の窒素吸収量が抑制される。また、5月中旬の施用では、6月以降

に吸収される窒素の割合が相対的に高まり、やはり5月の窒素吸収量が抑制されることになる。このため、本来は、4月～5月上旬にスラリーを施用したいところであるが、慣行のスラリー散布機は重いので、融雪や融凍直後の地盤のゆるい時期には牽引できない。このように、現在の機械体系では、早春のスラリー施用が5月中旬以降になりやすいので、前年の秋施用とほぼ同等の施用効果を得ることが多い。

### 3. 消化液の肥効評価法

消化液の基準肥効率を表4に示す。全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が半分未満の場合、その消化液の基準肥効率はスラリーの評価法(表1)に従う(表4脚注2)。この時、窒素については、表2を参照し、アンモニウム態窒素含量を指標とする補正を確実に行う。これに対し、全窒素に占めるアンモニウム態窒素の割合が半分以上の場合には、表2の品質による補正は行わず、含まれるアンモニウム態窒素の全量を化学肥料の窒素と当価と見なす基準肥効率(表4脚注3)を採用する方が正確である。なお、いずれの場合にも、施用時期の違いによる窒素肥効の補正はスラリーと同様に行う。

表4. 消化液の基準肥効率<sup>1)</sup>

(kg kg <sup>-1</sup> )			
窒素		リン酸	カリウム
全窒素 <sup>2)</sup>	アンモニウム態窒素 <sup>3)</sup>		
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) アンモニウム態窒素含量/全窒素含量 < 0.5の消化液に適合性が高い。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) アンモニウム態窒素含量/全窒素含量 ≥ 0.5の消化液に適合性が高い。スラリーの補正係数で施用時期についてのみ補正する。

表4のように、消化液の肥効評価にスラリーの肥効評価法がおおむね適用できたことは、消化液の原料がスラリーであることを考えれば理解しやすい。さらに、消化液の場合には、アンモニウム態窒素含量が一般的なスラリーよりも高いことが多いので、そのような場合に適合性の高い評価法として、アンモニウム態窒素を直接評価する基準肥効率が追加されている。

このように、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一般的に高いので、その肥効は、スラリーよりも速効的になることが多い。図1では、前年秋または当年春に施用した消化液の1番草と2番草に対する窒素の肥効を、スラリーや堆肥などと比較した。堆肥、スラリー、尿液肥(尿溜の尿)、消化液を

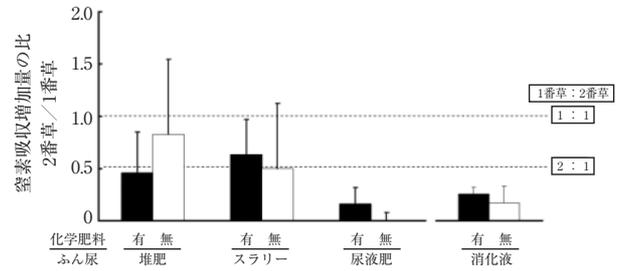


図1. 異なる有機物施用時の1番草と2番草における窒素吸収増加の割合  
堆肥、スラリー、尿液肥：根釧農試、天北農試、畜試、2000～2003年平均、  
消化液：根釧農試2003～2004年平均  
化学肥料 有：施肥標準の半量を化学肥料で施肥  
1：標準偏差  
いずれも前年秋または早春に27～66t/ha全量施用

施用すると、いずれも年間の窒素吸収量が増加する。それらを1番草における増加量と2番草における増加量に分け、両者の比を縦軸に示した。1番草と2番草で窒素吸収量が同じ量だけ増加すると、この値は1となる。0.5では、1番草と2番草で2:1の割合で窒素吸収量が増加したことになる。結果を見ると、堆肥とスラリーの肥効は、1番草と2番草に2対1の割合で発現し、尿液肥の肥効は、ほとんど1番草でしか確認できなかった。これに対し、消化液は、スラリーと尿液肥の中間的な性質を示し、その肥効は1番草と2番草に5対1程度の割合で発現した。このことから、消化液を前年秋や早春に施用した場合、2番草までの持続効果はかなり小さく、実用上、消化液の肥効評価に基づく化学肥料施肥量の調節は、1番草までを対象とすれば良いと判定した。この知見に基づき、消化液の施用に伴う施肥対応は、消化液を施用する番草のみを対象とすることが推奨されている。

### 4. 消化液の効果的分施肥

これまで、消化液を前年秋または当年の早春に年1回施用した場合の肥効について述べてきた。一方、スラリーでは、前年秋と早春に分施することによって、肥効の高まることがすでに知られている。そこで、図2では、消化液における前年秋と早春の分施肥効果を検討した。年間40t ha<sup>-1</sup>程度の消化液施用量では、前年秋と当年春の等量分施肥区で最も高い収量が得られた。施用量が前年秋に偏ると、越冬前後の養分損失量が多くなり、早春に偏ると吸収の遅れる養分量が多くなるものと思われる。このため、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、高収を維持する効果的な施用方法と結論された。厳密には、前述した肥効率や施用時期の補正係数など

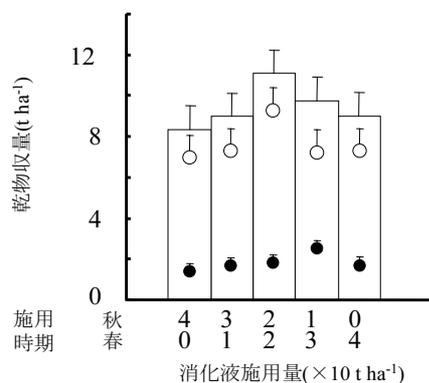


図2. 消化液の施用配分がチモシー単播草地の乾物収量に及ぼす影響 (2003年)

○, 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

について、秋春分施の場合の係数を設けることが可能もあるが、施肥設計の論理を簡素にするため、係数の設定は行われていない。

## 5. 化学肥料との併用方法

最後に、実際に消化液を用いて施肥設計を行う方法について説明する。これは消化液だけでなく、堆肥、スラリー、尿液肥など酪農家の有機物管理に共通して推奨されている北海道の考え方である。

まず、北海道施肥標準と土壌診断の情報に基づいて、各草地に必要な窒素、リン酸、カリウムの施肥量を把握する。こうして得られた必要施肥量の内、どれくらいを消化液で賄うかを定める。前述した方法によって消化液の肥効を正確に評価した上で、窒素、リン酸、カリウムのいずれの養分も、必要な施肥量を越えないように、消化液の施用量を設定する。図3の例では、必要なリン酸量を消化液で施用しようとするとして8t、カリウムでは5tの施用量が算出されるが、3t以上の消化液を施用すると窒素が必要以上に投入されることになる。この場合、この草地への消化液施用量は3t以内とし、不足する養分は購入肥料で補填する。また、上限量の3tをこの草地に施用したとしても、リン酸とカリウムは足りなくなるので、購入

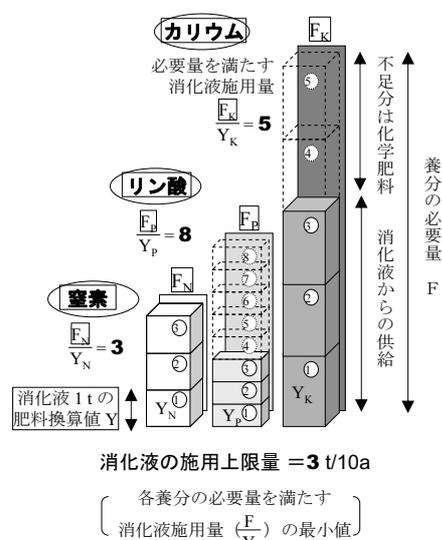


図3. 消化液を用いた施肥設計の考え方

肥料の併用が必要である。このように、消化液の肥効を正確に評価し、不必要な養分を施用しないことが、余剰な養分が環境汚染の原因になることを防ぎ、高品質な自給飼料を生産する施肥設計の基本である。

## 6. まとめ

以上のことから、消化液の施用法は次のようにまとめられる。

事前に消化液の養分含量を分析、定量した上で、スラリーと同じ基準肥効率と補正係数を用いて化学肥料に換算する。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正確である。消化液の施用量は、窒素、リン酸、カリウムのいずれの養分も、草地に必要な養分量を超過しないように設定し、不足する養分は購入肥料で補填する。その計算は、消化液を施用する番草のみを対象とする。また、年間40t ha<sup>-1</sup>程度の消化液施用量では、前年秋と当年春の等量分施が、高収を確保する効果的な施用法である。

## 牛ふん尿メタン発酵消化液の畑地への効果的施用法

北海道立北見農業試験場 生産研究部栽培環境科長 中村隆一

### 1. はじめに

家畜ふん尿のメタン発酵処理は施設建設費は高いが、悪臭の原因となるアンモニアガスの揮散を抑制でき、エネルギーとして利用可能なメタンガスや、肥料成分を高濃度に含む発酵残渣液（消化液）を液肥として利用できる利点があり普及されつつある。消化液は、原料であるふん尿に比べて窒素濃度は変わらず、炭素率が低く、発酵中に有機物が分解されるので乾物率は低く散布作業性に優れ<sup>1)</sup>、特に、本試験で供試した密閉式の貯留槽に貯留されたものはアンモニウム態窒素濃度が高い特性を有するので、窒素肥効が速効的な液肥として圃場への還元と、これによる化学肥料費の節減が期待される。しかし、消化液はpHが高いため土壤に浸透または土壤に被覆されるまでの間にアンモニア態窒素が揮散するおそれがある<sup>2)</sup>。

北海道立北見農業試験場では畑作物を対象に消化液の施用試験を行い、望ましい利用法と施用適量を検討したので、試験結果を報告する。なお、本試験は2001年から4年間にわたり北海道開発土木研究所を中心に北海道内の6研究機関が共同で実施した「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト研究」<sup>3)</sup>の一環として実施した。

### 2. 試験方法

供試した消化液は、2001年に北海道湧別町に建設された共同型嫌気性発酵施設のもので、乳牛の敷料混合ふん尿を固液分離した分離液に尿汚水を2:1の体積比で混合し、30日間中温発酵後殺菌したものである。作物に対する施用試験は2001年から4年間、施用方法（表面施用、施用翌日土壤混和、施用当日土壤混和）、施用量（0～6t/10a）および化学肥料併用量を変えて実施した。供試作物は、ばれいしょ、秋まき小麦、てんさいと緑肥作物（えん麦やシロカラシなど）であり、生育収量、品質、養分吸収量への影響を調査するとともに、無窒素区と化学肥料単

用区の窒素吸収量も調査して、消化液に含まれる窒素の肥効率を求めた。ここでいう肥効率は、消化液中の肥料成分の肥効が化学肥料の肥効の何割に相当するかを作物の養分吸収に基づいて算出した係数（0～1、1は化学肥料の肥効が同等を示す）である。これら結果と、土壤化学性に及ぼす影響や施用時における土壤表面への滞留状況をあわせて消化液の施用適量を求めた。供試土壤は灰色台地土（湧別町）および黒ボク土（訓子府町）である。

### 3. 試験結果および考察

#### (1) 消化液の肥料養分濃度と肥効率

供試した消化液の肥料養分平均濃度は、カリウムはK<sub>2</sub>Oとして約0.51%、窒素は約0.33%、リン酸はP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>として約0.14%であった（表1）。全窒素の約55%がアンモニア態窒素で、消化液のpHは8以上と高かった。この消化液を緑肥作物の上から追肥施用すると、液が付着した部分が枯れて生育と窒素吸収が抑制された。また、消化液を表面施用した土壤では、施用3週目でも極表層にアンモニウム態窒素が集積しており、作土中の無機態窒素量は土壤混和した場合より消化液1t当たり0.9kg少なかった（図1）。消化液を土壤に表面施用すると窒素が揮散するとの報告も多い<sup>2) 4)</sup>。以上から、畑作物に対して消化液を

表1 供試した消化液の肥料成分平均濃度

水分 (%)	pH	EC (mS/cm)	T-N	NH <sub>4</sub> -N	T-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	T-K <sub>2</sub> O	T-CaO	T-MgO
現物重量%								
96.05	8.19	20.4	0.33	0.18	0.14	0.51	0.16	0.08

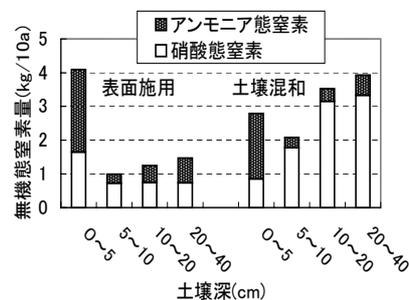


図1 消化液施用後の土壤混和処理の有無が深さ別無機態窒素量に及ぼす影響  
注) 無機態窒素量は消化液施用後3週目に測定した。  
消化液は10a当たり5t施用した。

施用する場合、作物体への付着を避け、表面施用よりは土壌混和または土壌かん注が望ましいと考えられた。

消化液を土壌表面に施用してから土壌混和するまでの日数が養分吸収量に及ぼす影響をばれいしょで検討した結果、当日混和したほうが翌日混和した場合より窒素吸収量が多い傾向にあった(表2)。消化液からのアンモニア態窒素揮散は、施用後4時間目に最大となるとの報告があることから<sup>5)</sup>、土壌混和する場合も施用後すみやかに混和した方が望ましいと考えられた。土壌混和したときの肥効率をてんさいやばれいしょなどで求めた結果、全窒素で0.4、アンモニウム態窒素で0.7でふん尿スラリーの肥効率(全窒素で0.25~0.35、アンモニウム態窒素で0.5~0.7)<sup>6)</sup>と同程度であり、供試土壌で肥効率に明らかな差はなかった。

表2 消化液を土壌混和するまでの日数がばれいしょの収量、でん粉価、養分吸収量に及ぼす影響

消化液を土壌に混和した日	上いも収量(kg/10a)	でん粉価(%)	吸収量(kg/10a)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
施用当日a)	6444	17.4	18.6	9.07	35.4
施用翌日b)	5098	16.2	12.5	7.80	28.2
化学肥料区	4775	17.8	15.1	7.63	28.3
b/a(%)	-	-	67	86	80

注) 消化液は5t/10a(T-Nとして14.4kg/10a)を全面施用し、15cm深に混和した。

なお、秋まき小麦では起生期追肥として消化液を作物体上から表面施用しても生育障害は生じず、成分肥効率は全窒素で0.7、アンモニウム態窒素で1.0と高かった。肥効率が高い原因は、施用時期が早春で気温が低く土壌表面が作物体で被覆されているため窒素揮散が抑えられること<sup>2)6)</sup>、消化液が根が多い表層部に施用されるためと考えられる。消化液を基肥として秋まき小麦に施用すると肥効率は低かった。越冬前の窒素吸収量が少なく、吸収されなかった窒素は硝酸態に変化して翌春までに下層へ流亡してしまうためと考えられる。したがって、秋まき小麦に対しては消化液は起生期に追肥施用することが望ましかった。

本試験では、消化液を土壌へかん注したり(写真1)、地表面近くからじょうろで試験区全面に施用した。窒素揮散が生じやすいリールマシンやスプラッシュプレートで消化液を施用すると、肥効率はスラリーの場合と同様に低下するものと考えられる。

本試験では消化液のカリウムの肥効率を求められなかったが、ふん尿中のカリウムの形態は水溶性であり、畑作物にカリウムを過剰施用すると澱粉価が



写真1 かん注施用に用いたスラリータンクプレッダーと付属のフローティングインジェクター

低下するなどの悪影響が生じることから、その成分肥効率はスラリー同様に1.0と設定した。

## (2) 消化液の施用限界量

消化液を収量や品質および環境に悪影響を与えずに施用するには、その肥効率に基づいて併用する化学肥料を減肥するとともに施用上限量を設定する必要がある。

消化液のみで標準施肥量を満たすための施用量は、最も多く含まれる肥料成分であるカリウム(現物当たり約0.5%)で規定され、てんさい、ばれいしょ、緑肥作物は約3t/10a、秋まき小麦は約2t/10aであった。消化液施用跡地土壌の交換性カリウム含量は10a当たり3t施用で約3mg/100g、5t施用で約7mg/100g、6t施用で約10mg/100gそれぞれ増加した(図2)。北海道の普通畑の交換性カリウム含量は全体としては減少傾向にあるが依然として過剰な圃場が見られるので、消化液の施用量はカリウムで施肥標準量以内とするとともに、消化液施用時には含有するカリウム相当の化学肥料を減肥すべきである。

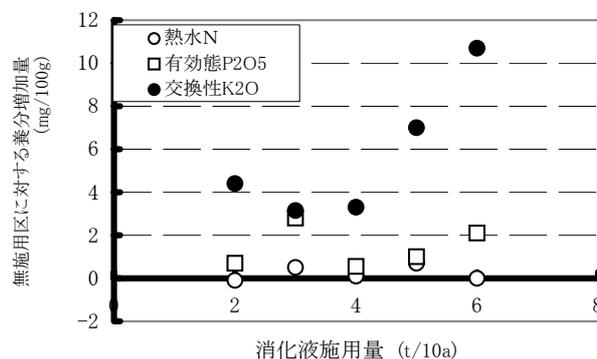


図2 消化液施用が跡地土壌の養分増加に及ぼす影響

消化液の施用が生育および品質に与える影響を調査した結果、緑肥表面に施用した場合を除くと約

6 t/10aまでは減収しなかった。しかし、ばれいしょでは、4t/10a以上の施用では無化学肥料でも窒素吸収量が対照区を上回りでん粉価が低下した。なお、てんさいでは標準窒素施肥量に対して消化液の施用量が少ないこともあり、品質に対する消化液施用の影響は判然としなかった。

消化液は高水分で流動性に富むため施用時に表面流去しやすく、排水性の優れる黒ボク土でも5t/10a施用すると表面流去が生じ凹地へ消化液が集積して散布ムラを生じた（写真2）。一方、3t/10aでは表面流去が認められなかった。消化液の原料となるふん尿スラリーでも表面流去が生じないように畑地への施用量は4～5t/10a以内と指導されていることも参考になると、消化液を均一散布するための施用上限量は3t/10aと判断された。

以上から総合的に判断して、消化液の施用上限量はてんさい、ばれいしょ、緑肥作物は10a当たり約3t、秋まき小麦は10a当たり約2tとした。

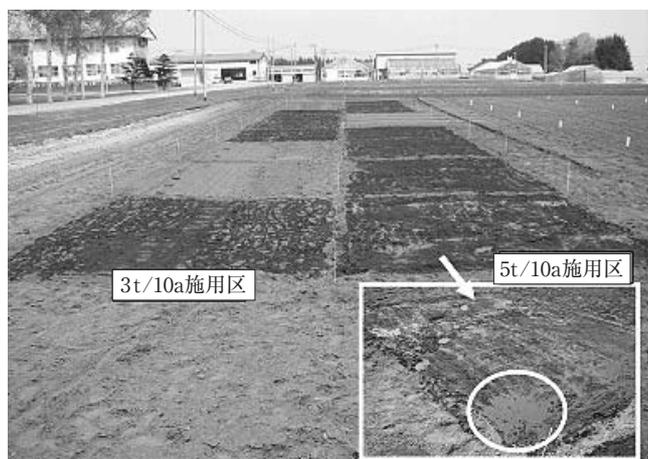


写真2 消化液施用量が表面流去による施用ムラの発生に及ぼす影響  
注) 5t/10aの施用では凹地(写真円内)に消化液が集積した。

## 4. まとめと課題

以上の結果を、畑作物に対する乳牛ふん尿を原料とした消化液の望ましい施用法と成分肥効率として表3にまとめた。なお、消化液中の肥料成分含有率はその原料や発酵条件、貯留条件によって異なるの

で、施用にあたっては分析を行うか、電気伝導度と乾物率を元に成分を推定<sup>8)</sup>することが望ましい。

本試験で供試した消化液中の重金属含量は環境基準値を大幅に下回り、衛生指標菌である大腸菌や腸球菌、原料であるふん尿スラリーに混入する雑草種子はメタン発酵処理や加熱処理で著しく減少していた。ただし、水産廃棄物や下水汚泥等、重金属含量の高い資材を混入するときは、消化液の重金属含量を十分に監視する必要がある。

表3 畑作物に対する消化液の望ましい施用法と肥効率

施用法	対象作物	肥 効 率			施用適量 (10a当たり)
		T-N	NH <sub>4</sub> -N	K <sub>2</sub> 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) 肥効率は0.0～1.0で表し、1.0は化学肥料と肥効が同等であることを示す。

## 【引用文献】

- 1) 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. 土肥誌. 73. 259-267 (2002)
- 2) 松中照夫, 佐藤創一: 乳牛由来液状きゅう肥から環境へ流出する窒素の牧草栽植による抑制効果. 酪農学園大学紀要, 25, 83-94 (2000)
- 3) 石渡輝男, 横浜充宏, 小野学, 栗田啓太郎, 中川靖起, 大日向裕, 中村和正, 大深正徳, 中川博敬, 鶴川洋樹, 日向貴久, 岡田直樹, 高橋圭二, 吉田邦彦, 木村義彰, 三枝俊哉, 湊啓子, 渡辺敢, 今野一男, 志賀弘行, 古館明洋, 中村隆一, 中久保亮, 松田従三: 共同利用型バイオガスプラントの利用技術. 新しい研究成果 北海道地域vol.2004: 6-12 (2005)
- 4) 徳田進一, 田中康男, 東尾久雄, 村上健二, 相澤証子, 浦上敦子: メタン発酵消化液由来無機態窒素のキャベツ畑土壌における動態. 野菜茶業研究成果情報.vol2007. 37-38 (2008)
- 5) 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. 土肥誌. 74. 31-38 (2003)
- 6) 北海道立新得畜産試験場: 家畜ふん尿処理利用の手引き2004. 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. pp93. (2004)
- 7) 横濱充宏, 中川靖起: 北海道開発局土木研究所月報. 267: 29-41 (2005)
- 8) 北海道施肥ガイド. pp.76. 北海道農政部. (2000)