

施与量と施与時期からみた乳牛メタン発酵消化液の 畑地施与における問題点

松 中 照 夫*・三 浦 諭 美*・平 井 志 保*・石 村 博 之*

Practical problems in application time
and rate of anaerobically digested cattle slurry to arable land

Teruo MATSUNAKA*, Satomi MIURA*, Shiho HIRAI* and Hiroyuki ISHIMURA*
(Accepted 22 July 2013)

はじめに

酪農場における土-飼料-乳牛を巡る養分循環は乳牛のふん尿を通じて成立する。このふん尿を草地や飼料用トウモロコシなどの飼料畑へ適切に還元することは、循環型酪農の成立要件である。乳牛の多頭飼養化が進展し、その飼養形態はつなぎ飼いからフリーストールへ移行する例が多い。フリーストール牛舎では、乳牛のふん尿がふん尿混合物（以下、単にスラリーという）の状態に取り扱われる。この乳牛のスラリーを原料に、嫌気的条件下でメタン発酵処理したものがメタン発酵消化液（以下、単に消化液と略）である。メタン発酵処理の過程で発生したメタンは、今後有望な再生可能エネルギーである。それだけでなく消化液には悪臭がほとんどないことも、ふん尿のメタン発酵の利点である（Pain et al., 1990）。これはメタン発酵の過程で、ふん尿の悪臭源である揮発性脂肪酸類がメタン生成に消費されるためである（永井・西尾, 1983）。ふん尿の耕地利用で最も重大な問題は悪臭対策であり（羽賀, 2012）、それを解決できるのは畜産農家にとっても有意義であろう。また、メタン発酵処理はこの処理をおこなわないふん尿処理物より病原性細菌を減少させる（Sahlström, 2003）。この効果にはメタン発酵処理時の数多くの要因が関与し、中でも温度条件が重要で、高温処理ほど病原性細菌を短時間で減少させる効果の大きいことが明らかにされている（Sahlström, 2003）。

ふん尿のメタン発酵には上述した数々の利点があるほか、肥料としての効果も確認されている。すなわち、筆者らはメタン発酵過程におけるふん尿の性

状や肥料成分などの変化や（松中ら, 2002）、消化液の牧草に対する肥効について報告した（松中ら, 2003）。その結果によると（松中ら, 2002）、消化液は原料のふん尿より含水率が高まって流動性が大きくなる。また原料スラリーに比較してpHが高まり、同時にアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）含有率も高まる。全窒素（T-N）含有率は原料のふん尿と消化液との間に変化がなく、消化液の全炭素（T-C）含有率は原料より減少するため、消化液のC/N比は原料より小さくなる。こうした変化は消化液の肥料的効果、とくに窒素（N）の肥効が原料のふん尿よりやや速効的になることを示している。

そこで牧草に対する消化液の肥料的効果、とくに窒素（N）の肥効を検討したところ、スラリーや化学肥料のそれと本質的な違いがないことが明らかになった（松中ら, 2003）。また、消化液が施与されたチモシー草地において、1番草はもとより、その2番草に対しても緩効的なN肥効が認められていることから、消化液に含まれる有機態Nの肥効も考慮する必要がある（三枝・渡部, 2006）。この他、草地表面に施与した消化液の肥効や環境への影響をライシメータ試験で定量的に評価された（Matsunaka et al., 2006）。その結果、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）としての溶脱率は施与時期が春よりも秋で、また、施与量が多いほど高く、施与されたT-Nに対して6~12%が溶脱していた。T-Nに対するアンモニア揮散率や亜酸化窒素（ $\text{N}_2\text{O-N}$ ）の排出係数は施与時期と施与量に関わらず、それぞれ13%および0.0から0.1%の範囲であった。さらに、消化液と化学肥料を表面施与した草地からの $\text{N}_2\text{O-N}$ やメタン（ CH_4 ）の排出係数が調査された（Sawamoto et al., 2010）。その

* 酪農学園大学酪農学部酪農学科土壌植物栄養学研究室

Soil Fertility and Plant Nutrition, Department of Dairy Science, Faculty of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

結果、いずれも消化液と化学肥料といった施与資材の間で N_2O-N や CH_4 の排出係数に有意な違いはなく、 N_2O-N は施与されたT-Nの0.2%程度が排出され、 CH_4 は逆に草地に吸収された。 CH_4 の草地による吸収はha当たり2.3-3.3kg程度で、これは施与後の降水量に影響された結果であることが明らかにされた。

このように、草地に対する消化液の肥効や環境への影響は検討が進んでいる。一方、酪農場での消化液の利用は、草地だけではなくトウモロコシなどの飼料畑にも施与される。しかし、消化液の畑地利用におけるその肥効や環境への影響を検討した報告は少ない。そこで、飼料用トウモロコシ畑への消化液の効率的な利用法を明らかにすることを目的に本試験を実施した。あわせて、本試験中に認めた畑地への消化液施与に関わる問題点も指摘したい。

材料と方法

1. 供試畑地

本試験は実規模の圃場試験である。供試した飼料用トウモロコシ畑は、前年もトウモロコシを栽培した連作2年目の畑地で、酪農学園大学附属農場No.7圃場である。供試圃場の土壌は灰色台地土(地表下50cm以内に斑紋確認)で、下層土(B, C層)が高密度で容積重が大きい(表1)。表層土(A層)の透水性は土壌診断基準値(北海農政部, 2010)の範囲である。しかし、下層土の透水性は悪い。表層土の土壌pHは診断基準値よりやや高く、有効態リン(P)含量や交換性カリウム(K)は、いずれも土壌診断基準値を上回っている(表2)。可給態窒素(N)の土

壌診断基準値は設定されてない。しかし、無機態窒素(N)や易分解性Nの含量は低い(藤原ら, 1996)。

2. 試験処理

試験区は、上記の圃場内に1つの処理区当たり幅8m、長さ125m(1,000m²)の短冊状に設置した。これは、スラリスプレッダ(カナダ・Houle社製, 14m³積載, 散布幅8m)を用いて消化液を実規模で施与することを考慮したためである。この試験圃場の地形は、全体として上記の短冊状の試験区の長辺中央部が窪む凹型である。試験の処理は表3に示した6処理である。

消化液の処理は、施与時期処理として前年秋(2001年10月31日、トウモロコシ収穫後の裸地状態)と当年春(2002年5月7日)の2水準に、施与量処理としてスラリスプレッダの1回走行(標準量)と1回走行の上にもう一度走行して計2回走行した多量区の2水準を組み合わせた計4処理である。この時の消化液の施与量は以下の方法で測定した。すなわち、対象となる試験区に塩化ビニル製容器を試験区の幅の中央部に長辺に沿って二列に6個ずつ、合計12個をならべ、その容器をトラクタとスラリスプレッダが跨ぐように走行して消化液を散布した(写真1)。走行後にその容器に入っていた消化液の重量を実測した。消化液施与に並行して消化液施与後の畑地表層をプラウ反転耕起した(写真2)。このため、本試験ではアンモニア揮散を無視することとした。消化液の前年秋施与の2つの処理区は、消化液施与後に畑地表層をプラウ反転した状態で越冬させた。

この他に、無処理区と化学肥料区を設けた。化学

表1 試験開始時における供試圃場の土壌の物理的性質

層位	深さ (cm)	土色	斑紋	粒径組成 (%)			土性	飽和透水係数 (cm s ⁻¹)	ち密度*1 (mm)	容積重 (g cm ⁻³)
				粘土	シルト	砂				
A	0-29	10YR3/3	なし	33.1	30.3	36.6	LiC	3.1×10 ⁻⁴	24	1.36
B	29-46	10YR5/8	頗富	21.4	32.1	46.5	CL	2.7×10 ⁻⁶	25	1.49
C	46-	10YR4/6	富	21.6	28.7	49.7	CL	4.9×10 ⁻⁵	33	1.53

*1 山中式硬度計測定値。

表2 試験開始時における供試圃場の土壌の化学的性質

層位	pH(H ₂ O)	T-C g kg ⁻¹	T-N g kg ⁻¹	可給態N (g kg ⁻¹)		有効態P *3 g kg ⁻¹	リン酸 吸収係数	CEC cmol _c kg ⁻¹	交換性陽イオン (g kg ⁻¹)		
				無機態N*1	易分解性N*2				K	Ca	Mg
A	6.8	27.0	2.3	0.008	0.035	0.24	970	20.9	0.56	3.75	0.17
B	5.8	1.8	0.3	0.008	0.019	0.01	630	17.0	0.11	1.19	0.40
C	6.8	1.4	0.3	0.011	0.005	0.02	460	18.0	0.05	1.37	0.80

*1 100 g L⁻¹ KCl 溶液で抽出されたNH₄-NとNO₃-Nの合計量。

*2 最大容水量の60%水分、30℃で4週間培養後に測定した無機態Nから培養前の無機態Nを減じて求めた。

*3 トルオーグ法。

表3 試験処理とその概要

処理区名	処理の概要
無処理	無処理
秋標準	前年秋, スラリスプレッダ1回走行
秋多量	前年秋, スラリスプレッダ2回走行
春標準	当年春, スラリスプレッダ1回走行
春多量	当年春, スラリスプレッダ2回走行
化学肥料	当年春に高度化成肥料 S380 を 108 g m^{-2} ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O-MgO}$ として $14\text{-}19\text{-}11\text{-}4 \text{ g m}^{-2}$) 施与

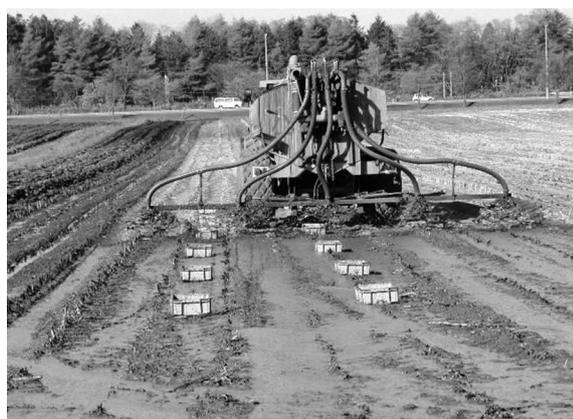


写真1 消化液施与量の測定方法



写真3 化学肥料の施与方法

プラウ反転耕起した後、ディスクハロで碎土してから、化学肥料区には人手で高度化成肥料 S380 を表面に施与した。この作業の後、全ての処理区をロータリハロで整地した。



写真2 消化液施与後のプラウ反転耕起

前方奥にスラリスプレッダが走行しており、その走行の後ろに続いてこの作業をおこなった。

肥料区は高度化成肥料 S 380 (保証成分含有率は $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O-MgO}=13\text{-}18\text{-}10\text{-}4\%$) を用いて播種当年春におこなった。具体的には S380 肥料を N として飼料用トウモロコシの施肥標準量 14 g m^{-2} となるように、あらかじめプラウ反転し、ディスクハロで碎土した処理区の土壌表面に人手で散布した(写真3)。その結果、 P_2O_5 、 K_2O 、 MgO は、それぞれ 19 、 11 、 4 g m^{-2} が施与されたことになる。結果的に、 P_2O_5 と K_2O は試験地である道央地区の施肥標準量

をそれぞれ3および 1 g m^{-2} 上回った(北海道農政部, 2010)。したがって、化学肥料区の施肥は、通常の施肥播種機利用の場合と異なり、肥料を条播していない。

このようにしてプラウ反転の後、ディスクハロで碎土した状態のすべての試験区を2002年5月9日にロータリハロで整地した後、飼料用トウモロコシ(品種:ニューデント100日)を機械播種した。栽植密度は附属農場慣行の $75 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ である。収穫期の調査は2002年10月11日におこなった。いずれの処理も3反復で実施した。

3. 調査分析方法

供試した消化液の分析方法は、既往の報告(松中ら, 2002)に準じた。トウモロコシは、地際で刈り取った後、地上部は稈(茎および葉鞘)、葉身、雌穂(包皮と穂柄を含む)に分けた。その後、各部位(葉身は枯死部を含む)を 70°C で48時間以上通風乾燥して乾物重を計測した。飼料用トウモロコシの可消化養分総量(TDN)収量は新得方式(石栗, 1972)により、次式から求めた。

$$\text{TDN 収量} = \text{茎葉乾物重} \times 0.582 + \text{雌穂乾物重} \times 0.850$$

TDN 含有率は、上式から求めた TDN 収量を全乾物重で除して求めた。

植物体の窒素(N)は、乾物重を測定したサンプルを粉砕した後、硫酸と過酸化水素水を用いた湿式分解によって分解し、水蒸気蒸留法で定量した。

4. データ解析

データの統計的な解析は、対応のある一元配置分散分析でおこなった。有意な処理間差を認めた場合、その処理間の有意性は Tukey の方法で検定した。用いた統計解析ソフトウェアは SigmaPlot 11 (Systat Software, 2008) である。

結 果

1. 供試消化液の性状, 施与量

前年秋の処理に供試した消化液は、当年春のそれに比較して pH が高かった(表4)。しかし、春処理に供試した消化液は、前年秋処理に供試した消化液よりも乾物率が高く、このため炭素(C)含有率も高かった。供試した消化液の含水比は前年秋施与で16.7, 春施与で11.1といずれも大きかった。このことから、消化液そのものは流動性に富むといえる。肥料成分の含有率のいずれも、春処理に供試した消化液のほうが秋処理に供試した消化液よりも高かった。いずれの消化液中にも NO₃-N は検出されなかった。

圃場における施与量は、スラリスプレッドの走行回数で設定し、オペレータに作業の速度やスプレッドからの消化液排出量を一定に維持するように依頼した。圃場に並べた容器12個の測定結果によると、施与量が少ない標準区では施与時期にかかわらず容器ごとの測定値で変動係数が40%程度と、大きなバラツキを認めた(図1)。しかし、多量施与となる2回走行ではその変動係数は減少して変動幅が小さくなった。12個の容器の実測データから実際に圃場に施与された消化液の量と成分含有率(表4)から求

めた成分施与量は、各理区で大きく異なった(表5)。

化学肥料区の T-N 施与量は、4つの消化液施与処理区のそれより大きく下回り、無機態Nとしての施与量でも、秋標準区のそれより多かっただけで、その他の3処理区に比べると少なかった(表5)。K施与量についても、化学肥料区のそれは消化液を施与した各処理区のうち最も少ない秋標準区のK施与量の1/2以下であった。同様に、化学肥料区におけるP施与量は消化液多量区のそれより少なかった。

2. 試験当年の気象条件

試験当年(2002年)は、播種後6月上旬まで、気温が平年よりやや高めに推移した。しかし、それ以降8月の下旬まで、平年よりやや低い気温で推移した。それ以降の気温はほぼ平年並みだった。降水量は、播種後から5月末まで平年より大きく下回り乾燥が続いた。それ以降は、一部の時期を除いて8月上旬まで概ね平年並みかそれ以上の降水量があった。8月中旬以降1ヵ月間は乾燥が続き、9月下旬から収穫期の10月上旬は平年以上の降水量があっ

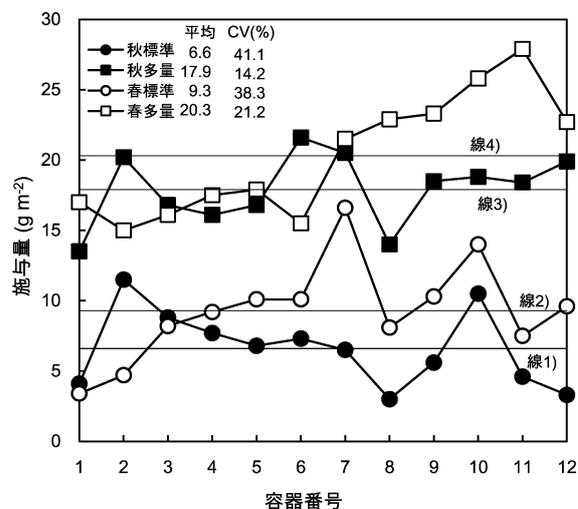


図1 スラリスプレッドから施与された消化液量の変動
図中の線1, 2, 3, 4)は、それぞれ秋標準区, 春標準区, 秋多量区, 春多量区における12個の容器で測定した値の平均値(g m⁻²)である。凡例の平均も同じ意味で、CVは12個の容器の値の変動係数を意味する。

表4 供試消化液の性状

試料	pH	EC S m ⁻¹	RE* ¹ g kg ⁻¹	含水比* ¹	C g kg ⁻¹	N (g kg ⁻¹)				C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹
						NH ₄ -N	NO ₃ -N	有機態N* ²	全N					
秋施与	8.0	1.67	56.6	16.7	21.7	1.4	ND* ³	1.7	3.1	7.0	0.6	3.1	1.4	0.4
春施与	7.1	1.94	82.5	11.1	32.0	1.9	ND	1.9	3.8	8.4	0.9	3.3	1.9	0.4

*¹ 蒸発残留物(乾物率とみなせる)。含水比=水分重量/乾物重量。ここで乾物重量はREを用いた。

*² 全N=(NH₄-N+NO₃-N)で求めた。

*³ ND, 検出されなかったことを意味する。

表5 各処理区への養分施与量

処理区名	原物施与量 kg m ⁻²	N (g m ⁻²)		P g m ⁻²	K g m ⁻²
		T-N	無機態N* ¹		
無処理	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
秋標準	6.6	20.5	9.2	4.0	20.5
秋多量	17.9	55.5	25.1	10.7	55.5
春標準	9.3	35.3	17.7	8.4	30.7
春多量	20.3	77.1	38.6	18.3	67.0
化学肥料* ²	0.108	14.0	14.0	8.5	9.0

*¹ 消化液を施与した処理区では、施与された NH₄-N の量である。化学肥料区は供試した高度化成肥料 S380 号の N 保証成分の全量を無機態 N とした。

*² 高度化成 S380 号を用いた。P と K は酸化物表示から元素表示に換算した。

た。このような気象条件はトウモロコシの生育を大きく阻害するほどではなかった。

3. トウモロコシの乾物重と雌穂重割合

分散分析の結果によると、秋標準区には消化液が施与されたにもかかわらず、収穫期のトウモロコシ地上部乾物重（稈+葉身+雌穂）は、無処理区のそれと有意な差異がなかった（図2）。秋多量区の地上部乾物重は無処理区や秋標準区のそれより有意に多取となった。一方、春標準区の地上部乾物重は、無処理区、秋標準区および秋多量区のそれより有意に増加した。しかし、春多量区や化学肥料区の地上部乾物重に対しては有意な差異がなかった。このことは、見かけ上、春の消化液施与は増収効果が大きく、施与量を増してもその効果に大きな違いがないことを示している。秋多量区、春多量区および化学肥料区の間では、施与された養分量が大きく異なるにも

かわらず（表5）、各処理区の地上部乾物重には有意差がなかった。

雌穂重割合は処理間で大きな差異がなく、いずれの処理区でも、ほぼ60%程度であった（図2）。この値の反復間における変動は非常に小さく、図示できないほどであった。なお、トウモロコシの黄熟期は処理間で大差がなく、収穫期の雌穂の熟度にも差異を認められなかった。

4. トウモロコシの TDN 含有率および TDN 収量

トウモロコシの TDN 含有率は処理間に有意な差異がなかった。いずれの処理区でも TDN 含有率は、およそ74%程度であった（図3）。前年秋に消化液を施与してもその施与量にかかわらず、トウモロコシの TDN 収量は無処理区と比較して統計的な有意差が認められなかった。春の消化液の施与は、無処理よりも TDN 収量を増加させた。しかし、春の消化液

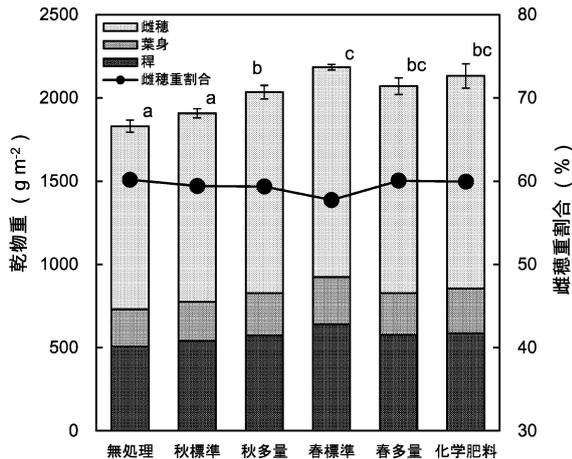


図2 収穫期の部位別乾物重および地上部乾物重（稈+葉身+雌穂）に対する雌穂の乾物重割合（雌穂重割合）

図中の異なる英文字の間には地上部乾物重について有意な処理間差 ($P < 0.05$) があることを意味する。誤差棒は、地上部乾物重としての標準偏差を示す ($n=3$)。雌穂重割合には有意な処理間差がなかった。

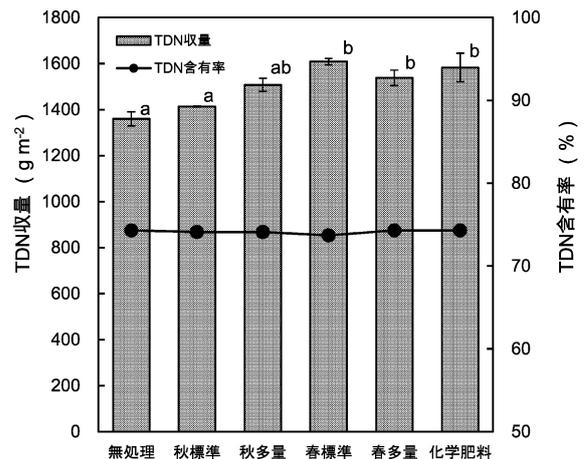


図3 収穫期における TDN 収量と TDN 含有率

TDN 収量を新得方式で求め、その値を地上部乾物重で除して、地上部 TDN 含有率を求めた。図中の異なる英文字の間には TDN 収量について有意な処理間差 ($P < 0.05$) があることを意味する。誤差棒は標準偏差を示す ($n=3$)。TDN 含有率には有意な処理間差がなかった。

施与量の違いは TDN 収量に影響を与えなかった。化学肥料区の TDN 収量は、秋多量区、春標準量区、春多量区に比較し、与えられた養分量が極めて少ないにもかかわらず、これらの処理区の TDN 収量との間に有意な差異がなかった。

5. トウモロコシの N 吸収

いずれの処理区においても、収穫期における雌穂の N 含有量は地上部 N 含有量（稈、葉身、雌穂の N 含有量の合計値）のほぼ 70% を占めた（図 4）。秋標準量区の地上部 N 含有量は無処理区のそれと有意差がなかった。秋多量区の地上部 N 含有量は無処理区のそれに比べると有意に多く、春に消化液が施与された各区や化学肥料区の地上部 N 含有量に比較すると有意に少なかった。春標準量区と春多量区、さらに化学肥料区の地上部 N 含有量の間には統計的な有意差が認められなかった。

地上部 N 含有量を地上部乾物重で除して求めた地上部 N 含有率も、ほぼ地上部 N 含有量の処理間差と同様の傾向を示した。秋多量区の地上部 N 含有率は無処理区のそれよりは有意に高く、春標準量区と化学肥料区の地上部 N 含有率とは有意差がなかった。春に消化液が施与された各処理区における地上部 N 含有率と化学肥料区のそれとの間には、統計的に有意な差異はなかった。

上述したトウモロコシ地上部の N 含有量や N 含有

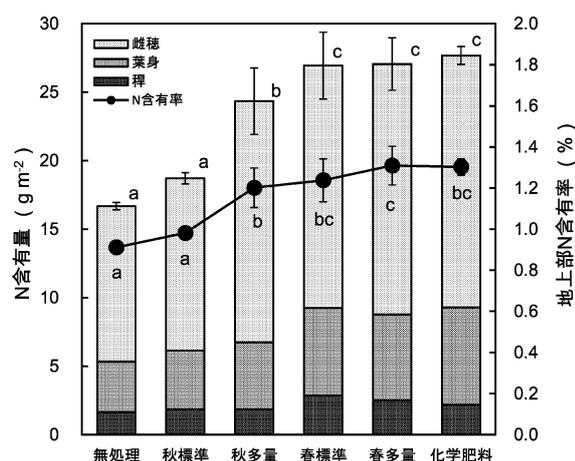


図 4 収穫期における各部位の N 含有量と地上部 N 含有率

地上部 N 含有率は、各部位の N 含有量を合計して地上部 N 含有量を求め、それを各部位の乾物重合計量（地上部乾物重）で除して求めた。図中の異なる英文字の間には地上部の N 含有量および N 含有率について、有意な処理間差 ($P < 0.05$) があることを意味する。誤差棒は地上部 N 含有量および地上部 N 含有率についての標準偏差を示している ($n=3$)。

率は、消化液あるいは化学肥料からの N 施与量との対応関係が全くなかった。

考 察

消化液を含む家畜ふん尿処理物の養分含有率は、化学肥料のように常に一定ではない（松中ら, 2002）。したがって、本試験のように施与時期を異にして処理をおこなうと、処理する施与時期によって養分含有率が異なる消化液を供試せざるを得ない。仮に施与量を厳密に一定量としても、それぞれの施与時期で消化液の養分含有率が異なるため、消化液由来の養分施与量が異なる。本試験の場合、春に供試した消化液は前年秋に施与した消化液に比較し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 T-N 、 P および K 含有率でそれぞれ 1.4, 1.2, 1.5, 1.1 倍も高い含有率であった（表 4）。さらに、実規模試験としておこなった本試験では、消化液の施与を機械散布で実施したため、散布走行条件に留意したとしても消化液の施与量が大きく変動した（表 5）。したがって、処理による養分施与量が大きく異なってしまった（表 5）。結果的に、消化液の施与時期と施与量の処理が作物生産におよぼす影響を検討しようとしても、各処理区から得た結果が、処理の影響なのか養分施与量の違いに基づく影響なのかを分離できない。そのため、飼料用トウモロコシ畑に施与した消化液の施与時期と施与量が乾物生産におよぼす効果を論じることは難しい。

このような試験条件の中で処理の影響を検討するための手段として、単位施与養分量当たりで増収効果を比較する養分施与効率の概念が提案されている（松中ら, 1988）。この概念については後述する。養分施与効率の考え方を導入すると、施与時期や施与量の処理によって養分施与量が異なっても、単位量当たりの増収効果で処理間差が比較できる。問題は養分の施与効率の比較をするのに、どの養分をその解析対象とするかである。供試圃場の土壌の養分含量からみると（表 2）、この圃場でトウモロコシの生育に制限因子となる養分は N であると考えられる。したがって、本試験では単位施与養分量当たりの増収効果を N で検討することにした。その手順は以下のとおりである。

単位施与 N 量当たりの増収効果を N 施与効率 (N_e) とすると、 N_e は式(1)として定義できる。

$$N_e = (Y_t - Y_0) / N_s \quad \text{式(1)}$$

ここで Y_t , Y_0 は、消化液や化学肥料由来の N が施与された処理区（以下、N 施与区と略）と無処理区のトウモロコシ地上部乾物重 (g m^{-2}) である。 N_s は

施用された T-N 量 ($g\ m^{-2}$) である。また、 N_t 、 N_0 を N 施用区と無処理区におけるトウモロコシの地上部 N 含有量 ($g\ m^{-2}$) とすると、施用された N のトウモロコシによる見かけの N 吸収利用率 (N_{ab}) は式(2)で与えられる。

$$N_{ab} = (N_t - N_0) / N_s \quad \text{式(2)}$$

さらに、見かけ上、施用 N 由来で吸収された N の単位量当たりの増収効果を吸収 N の乾物生産効率 (N_{dm}) とすると、これは式(3)で求められる。

$$N_{dm} = (Y_t - Y_0) / (N_t - N_0) \quad \text{式(3)}$$

このように定義し、式(1)を次のように変形すると、

$$N_e = \{(N_t - N_0) / N_s\} \times \{(Y_t - Y_0) / (N_t - N_0)\} \\ = N_{ab} \times N_{dm}$$

となる。つまり、 N_e は N_{ab} と N_{dm} の積で与えられるため、 N_e を N_{ab} と N_{dm} の 2 要因に分けて考えることができる。このようにして求めた N_e 、 N_{ab} 、 N_{dm} を図 5 に示した。

化学肥料区の N_e は消化液が施用された各区のそれより有意に高かった。消化液が施用された各区では、春標準区の N_e が他の 3 つの処理区のそれより有意に高く、秋標準区、秋多量区、春多量区の N_e はともに有意な処理間差がなく、春標準量区の N_e の 40% にも達しなかった。 N_{ab} の処理間差は N_e のそれとよく対応していた。これに対して、 N_{dm} は秋標準区と春標準区で他の処理区よりやや高かった。しかし、その処理間差は統計的に有意ではなかった。

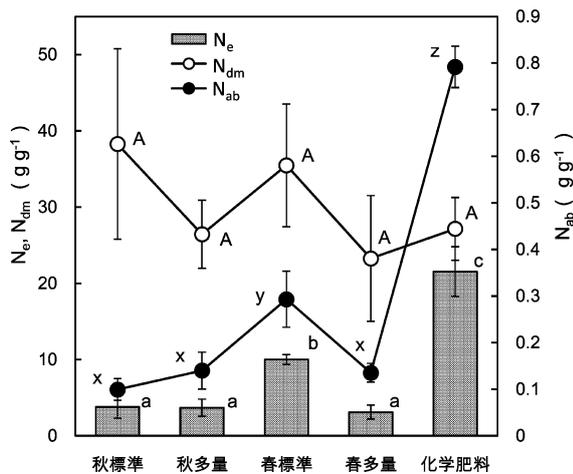


図 5 N 施用効率 (N_e)、施用された N の吸収利用率 (N_{ab})、および吸収された N の乾物生産効率 (N_{dm})
異なる英文字の間には統計的に有意な処理間差があることを示す ($P < 0.05$)。 N_{dm} には有意な処理間差がなかった。誤差棒は標準偏差を示す ($n = 3$)。

したがって、 N_e の処理間差は N_{ab} の処理間差によってもたらされたと理解できる。

北海道施肥ガイド 2010 (北海道農政部, 2010) では、裸地状態となった飼料用トウモロコシ畑への前年秋にスラリーの施用を禁止している。これはスラリーに含まれる NH_4-N が硝化作用を受け、越冬期間中に NO_3-N として地下水に流亡し環境に悪影響を与えることを懸念しての措置である。消化液を供試した本試験でも秋標準区の N_{ab} は春標準区のその 1/2 以下で、施用 N 当たりの吸収利用率の低いこと、すなわち、越冬期間中に N が損失していることが強く示唆される。

化学肥料区の N_{ab} に対して消化液が施用された各区で N_{ab} が大きく低下し、それが N_e の低下につながった主な要因は、消化液から施用される N には作物が利用しにくい有機態 N が含まれるためと考えられる。牧草に対しても上記とほぼ同様の結果が報告されている (松中ら, 2003)。牧草の場合、アンモニア揮散で損失した量を差し引いた正味の NH_4-N 施用量当たりの N 施用効率 (N_{en})、N 吸収利用率 (N_{abn})、吸収 N の乾物生産効率 (N_{dmn}) を計算すると、消化液と化学肥料の N_{en} や N_{abn} には大差がなく、正味の施用 NH_4-N 当たりで見ると、消化液の肥効と化学肥料のそれとの間に本質的な差がなかった (松中ら, 2003)。本試験では消化液散布と並行して消化液の反転耕起をおこなったので、アンモニア揮散による損失は無視している。それを前提として、消化液と化学肥料のいずれに対しても、トウモロコシが吸収利用できる N 形態としての無機態 N をとりあげ、その単位施用量当たりで N 施用効率 (N_{e-min})、N 吸収利用率 (N_{ab-min})、吸収 N の乾物生産効率 (N_{dm-min}) を求めた (表 6)。その結果、春標準区の N_{e-min} は化学肥料のそれとの間に有意差がなく、その他の消化液が施用された各区の N_{e-min} は化学肥料区のそれより有意に低かった。 N_{dm-min} には統計

表 6 施用 N を無機態 N* に限定して求めた N 施用効率 (N_{e-min})、N 吸収利用率 (N_{ab-min}) および吸収 N の乾物生産効率 (N_{dm-min})

処理区	N_{e-min}	N_{ab-min}	N_{dm-min}
秋標準	8.4 ^a	0.220 ^a	38.3 ^a
秋多量	8.2 ^a	0.310 ^a	26.4 ^a
春標準	20.0 ^b	0.586 ^b	35.5 ^a
春多量	6.2 ^a	0.270 ^a	23.3 ^a
化学肥料	21.5 ^b	0.792 ^b	27.1 ^a

* 消化液を施用した処理区では NH_4-N の量、化学肥料区では施用 N の全量を無機態とした。
表中の異なる英文字間には有意な処理間差があることを示す ($P < 0.05$)。

的に有意な処理間差がなかった。つまり、 N_{e-min} の処理間差は N_{ab-min} の処理間差によってもたらされた」と指摘できる。したがって、春標準区だけで見ると限り施与した無機態Nで消化液の肥効を評価すれば、牧草の場合と同様に、化学肥料と本質的な違いはないと指摘できる。また、この春標準区の TDN 含有率および TDN 収量は化学肥料区のそれと有意な処理間差はなかった。したがって、飼料用トウモロコシ畑への消化液の施与法として、この播種当年の春にスラリスプレッダの1回走行で消化液を施与することを推奨したい。

ところで、消化液施与の各区の N_e を低下させた要因である N_{ab} の低さについて、前年秋施与では越冬中のN損失で理解できた。しかし、春多量区の低い N_e とそれをもたらした N_{ab} の低さは越冬中のN損失で説明することができない。これには以下に述べるように、消化液の含水比が極めて大きく(表4)流動性に富んでいることが関与したと思う。すなわち、秋多量区や春多量区のように、スラリスプレッダを1回走行した上に、さらにもう1回走行して消化液を施与した場合、2回目に施与された消化液は、1回目に施与された消化液の上を滑るように処理区中央部の凹部へ移動して流れ去り、この圃場中央部にある低みに滞留した(写真4)。施与量の調査は、プラスチック容器で消化液を受け止めて、その容器内の量を測定して施与量とした。しかし、消化液が圃場の地形にそって低みへ流動したことから、測定した分量の消化液が処理区に均一に施与されなかったことは明らかである。2回走行で施与した秋多量区および春多量区の N_e が春標準区のそれより低かったのは、おそらく、計算上は施与されたことになっている消化液が、実際には別の場所に移動し、試験区内で調査のために試料を採取した場所にとどまらなかったことに起因すると考えられる。

この問題を再確認するために、供試圃場に隣接し、平坦でかつ黒ボク土が主体となって比較的透水性の良い圃場で消化液の散布処理をおこなった。その結果、1回走行で消化液を散布した上に、さらにもう1度散布する多量区のような場合、平坦な圃場では、トラクタやスラリスプレッダによって圃場表面に作られた車輪の轍といったわずかな低み部分に向かって流動して滞留する現象を再確認した(写真5)。

上記のことから、流動性の高い消化液を裸地状態の畑地に施与する場合、施与された消化液が畑地の特定の凹地点や微地形的な窪みなどへ移動して滞留するため、消化液に多量に含まれるNやKが、圃場内で不均一に分布して蓄積する可能性がある。この



写真4 秋多量施与区での消化液の表面移動現象(2001年10月31日、前年秋施与時)

写真上) 圃場中央の凹部となった場所に向かって、2回目走行の時に施与された消化液が移動し滞留している。写真下) その凹部のところで、プラウ耕起すると、その部分にさらに消化液が流れ込み、滞留していく。



写真5 平坦に見える畑地に施与された消化液の移動状況(2002年10月28日)

写真4と同様、この写真も2回目走行時に施与された消化液が流動している状況を示す。1回目に施与された消化液の上を、2回目に施与された消化液が上滑りし、トラクタやスラリスプレッダによって生じた轍の跡や畑地のわずかな窪みに流動し、滞留している。

ことは、消化液を畑地で有効に、かつ均一に利用するには消化液の流動性を考慮しなければならないという重要な問題点を含んでいる。少なくとも、裸地状態の畑地への消化液の施用は、1回の走行で実施すべきであることを強調したい。

以上の結果から、飼料用トウモロコシ畑地へは、前年秋の消化液施用は避けるべきで、播種当年の春にスラリスプレッドの1回走行で施用するのが最も効果的な施用法であると結論づけられる。また、消化液の畑地利用で最も大きな問題点は、消化液が流動性に富むため圃場に均一に施用しにくいということである。

要 約

乳牛ふん尿のメタン発酵消化液を前年秋と播種当年の春に施用量を異にして機械散布し、その増収効果を実規模の圃場試験で検討した。その結果、播種当年の春にスラリスプレッドの1回走行で消化液を施用するのが、飼料用トウモロコシ畑地での乾物生産や飼料価値からみた最も効果的な施用法であると結論できた。この施用法で消化液を施用した場合、施用された無機態N量当たりの増収効果は、化学肥料のそれと同等であった。消化液を裸地状態の畑地へ施用する上での問題点も検討した。その問題点を解消するには以下の2点に留意すべきである。1) 裸地状態の畑地へ消化液を前年秋に散布してはならない。施用Nが越冬期間中に溶脱して消化液の肥効を低下させるだけでなく、地下水汚濁をもたらす可能性がある。2) 施用時期にかかわらず、消化液を多量施用するために、スラリスプレッドを裸地状態の畑地で2回走行によって施用することは避けるべきである。消化液が流動して圃場内の凹地やわずかな窪みに滞留するため、圃場内での土壌養分を不均一にすると考えられるからである。

謝 辞

本試験は本学附属農場の絶大なるご支援がなければ実施できなかった。とくに同農場職員の上野秀樹氏および尾形 仁氏には、圃場への消化液散布やトウモロコシの機械播種などを実施していただいた。また、土壌植物栄養学研究室に所属する学生諸氏と、同研究室に内蒙古民族大学農学院（中国・通遼市）から留学されていた張淑艶教授には、試験遂行に多大なご協力を賜った。Dr. Ken Smith (ADAS of Wolverhampton, UK) には英文要旨を校閲していただいた。これらの皆様に対して、心からなるお礼を申し上げます。

文 献

- 藤原俊六郎・安西徹郎・加藤哲郎 1996. 土壌診断の方法と活用, p. 94-98. 農山漁村文化協会, 東京.
- 羽賀清典 2012. 畜産に関する環境問題, 押田敏雄・柿市徳英・羽賀清典共編, 新編畜産環境保全論, p. 31-33. 養賢堂, 東京.
- 北海道農政部 2010. 北海道施肥ガイド2010, p. 215-221.
- 石栗敏機 1972. 粗飼料の飼料価値査定に関する研究. 第3報, 青刈りトウモロコシサイレージの品質改善と資料価値査定に関する試験. 道立新得畜試研報, **3**, 1-12.
- 松中照夫・小関純一・近藤 熙 1988. 北海道根釧地方の採草地に対する液状きゅう肥の効率的施用方法, 土肥誌, **59**, 419-422.
- 松中照夫・成瀬往代・熊井実鈴 2002. 乳牛ふん尿のメタン発酵処理に伴う性状変化, 土肥誌, **73**, 297-300.
- 松中照夫・熊井実鈴・千徳あす香 2003. 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の効果, 土肥誌, **74**, 31-38.
- Matsunaka T., Sawamoto T., Ishimura H., Takakura K., and Takekawa A. 2006. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland, *Greenhouse Gases and Animal Agriculture: An Update*, eds. C.R. Soliva, J. Takahashi and M. Kreuzer, Elsevier International Congress Series **1293**, 242-253.
- 永井史郎・西尾道尚 1983. メタン生産. 鈴木周一編, バイオマスエネルギー変換, p. 99-132. 講談社, 東京.
- Pain B.F., Misselbrook, T.H., Clarkson, C.R., and Rees, Y.J. 1990. Odour and ammonia emissions following the spreading of anaerobically-digested pig slurry on grassland. *Biological Wastes*, **34**, 259-267.
- Sahlström, L. 2003. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource Technology*, **87**, 161-166.
- 三枝俊哉・渡部 敢 2006. 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法. 道立農試集報, **90**, 29-39.
- Sawamoto T., Yoshida R., Abe K., and Matsunaka T. 2010. No significant difference in N₂O emis-

sion, fertilizer-induced N₂O emission factor and CH₄ absorption between anaerobically digested cattle slurry and chemical fertilizers applied to timothy (*Phleum pratense* L.) sward in central

Hokkaido, Japan, *Soil Sci. Plant Nutri.*, **56**, 492-502.

Systat Software 2008. SigmaPlot® 11.0 User's Guide, San Jose, CA USA.

Summary

We carried out a practical field experiment to examine effect of application time and rate of anaerobically digested cattle slurry (ADCS) to arable land covered with no crop after harvest (bare arable land) on dry matter production and feeding value of forage corn (*Zea mays* L.; the variety, New Dent 100days). The recommended application of ADCS to the bare arable land was as follows; better application time is spring just before seeding; better application rate depends on the rate that is applied by single spreading with slurry vacuum tanker. We found out two practical problems that were involved in the application of ADCS to the bare arable land. The first was low level of nitrogen (N) uptake by the corn from soil where the ADCS was applied in late autumn. The result suggested that loss of N derived from the applied ADCS in the late autumn occurred at the bare arable land during wintering. It appeared that the loss of N resulted in pollution of a watercourse. The second was due to fluidity of the ADCS. When the ADCS was applied again after first spreading onto the bare arable land, the second applied ADCS slipped on the first applied ADCS and moved rapidly to lower parts of the land and to a wheel track of the tractor and the vacuum tanker. The moved ADCS accumulated there. This caused probably uneven distribution of nutrients derived from the applied ADCS in the arable land. To solve these problems we pointed out to avoid both the autumn application of the ADCS and the second application onto the first application of the ADCS on the bare arable land.