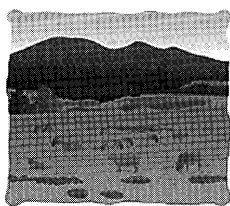


講座



家畜ふん尿の新処理・利用技術と課題

3. 酪農場における乳牛ふん尿の環境に配慮した高度利用技術

松中照夫
酪農学園大学

キーワード ふん尿, メタン発酵, 消化液, 環境, 土壌診断

1. はじめに

酪農場で飼養されている乳牛のふん尿排泄量は、北海道での実測例によると、搾乳牛（2産以上）の場合、ふん尿として 64.3 kg d^{-1} 、これに含まれる窒素（N）は 289 g d^{-1} である（扇ら, 1999）。したがって、搾乳牛1頭当たりの年間ふん尿排出量は 23.5 Mg y^{-1} 、同じくNは 105 kg y^{-1} と見積もられる。このふん尿を通じて、酪農場における土-飼料-乳牛を巡る養分循環が成立している。ふん尿は、作物の養分源であるだけでなく、耕地の土壌肥沃度維持にも欠かすことができない。それゆえ、ふん尿を適正に利用することは、酪農場にとって重要な技術である。ところが、飼養規模が拡大した近年の酪農場では、ふん尿が莫大な量となり、有効な資源というよりも廃棄物としての扱いを受けることが多い（原田, 1998）。

もともと、ふん尿処理は酪農場において非生産部門であり、これに係わる費用は収益につながりにくい。このため、ふん尿を環境に悪影響を与えないよう適正に処理することへの投資意欲は小さい（吉野, 2000）。このことが排泄されたふん尿を廃棄物扱いにする大きな要因である。しかし、酪農場における乳牛ふん尿は極めて有効な資源であり、それらを環境に配慮しつつ高度に利用していくことが今後求められている。

そこで本稿では、酪農場においてふん尿処理物を有効な資源として位置づけ、それらを環境に配慮しつつ高度に利用するための技術を述べる。

2. ふん尿の高度処理としてのメタン発酵技術

1) ふん尿のメタン発酵過程

乳牛のふん尿は、敷料などとともに堆肥化されるか、フリーストール牛舎などで産出されるふん尿混合物の液状

きゅう肥（以下、スラリーという）、さらにふんから分離された尿液肥（尿貯留槽に貯留されている液肥で、排泄された尿だけでなく、ふんの一部も混入している）として利用されるのが一般的である。これに対し、乳牛ふん尿のより高度な利用技術としてのメタン発酵処理が最近注目されている。これは、嫌気的条件下においたふん尿から再生可能エネルギーとしてのメタンを生産し、その上、発酵後のふん尿をメタン発酵消化液（以下、消化液と略）として液肥利用する処理である（松中, 2009a）。

メタン発酵過程では、始めに乳牛ふん尿に含まれる脂質、タンパク質、リグニン、炭水化物などが、多種類の通性または偏性嫌気性細菌の生産する加水分解酵素により加水分解を受けて低分子化された後、酪酸、プロピオン酸、酢酸、ギ酸などの低級脂肪酸にまで分解され、同時にアミノ酸の分解もすすんでアンモニアや硫化水素が生成される（永井・西尾, 1983）。最終的に、偏性嫌気性菌がこの発酵過程で産生した酢酸やギ酸からメタンを生成する。したがって、ふん尿中の悪臭成分である低級脂肪酸がメタン生成に消費されるため、消化液からの悪臭が軽減される（Pain, *et al.*, 1990）。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する。その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大きい（Sahlström, 2003）。

2) 原料ふん尿と消化液の性状比較

実規模で稼働中の乳牛ふん尿メタン発酵処理施設（バイオガスプラント）において、13ヵ月間にわたり原料ふん尿（バイオガスプラントの原料ふん尿受入槽に貯留されているスラリー）とメタン発酵過程を経た消化液の性状を比較した結果によると（松中ら, 2002a）、消化液の乾物率や全炭素（C）含有率は原料ふん尿より明らかに低下する（表1）。原料ふん尿に含まれる有機物が、メタン発酵過程で微生物の栄養基質として利用され分解されるためである。

全窒素（T-N）含有率は消化液と原料ふん尿との間に大差がない。しかし、上述したとおり消化液のC含有率は原料ふん尿のそれより有意に低下するため、消化液のC/N比も原料より有意に低下する。Nを形態別にみると、消化

Teruo MATSUNAKA: Modern technologies in animal manure utilization 3. Highly advanced practical use of dairy cattle manure with less environmental impacts
069-8501 江別市文京台緑町 582
2009年10月27日受付・2009年11月20日受理
日本土壌肥科学雑誌 第81巻 第5号 p.523~529 (2010)

表1 メタン発酵処理の原料ふん尿とその消化液の性状比較 (松中ら, 2002a)

	単位	原料	消化液	有意性
乾物率	g kg ⁻¹	81.9	56.3	**
pH		6.75	7.79	**
EC	S m ⁻¹	1.51	1.63	ns
C	g kg ⁻¹	34.1	21.9	**
T-N	g kg ⁻¹	3.1	3.1	ns
NH ₄ -N	g kg ⁻¹	1.1	1.4	*
有機態N ^a	g kg ⁻¹	2.0	1.7	*
C/N比		11.1	7.0	**
P	g kg ⁻¹	0.7	0.7	ns
K	g kg ⁻¹	3.2	3.2	ns
Ca	g kg ⁻¹	1.1	1.1	ns
Mg	g kg ⁻¹	0.4	0.4	ns

^a: 有機態N = (T-N) - (NH₄-N)

NO₃-Nは検出されなかった。データは13ヵ月間の平均値。

** : 1%水準で有意, * : 5%水準で有意, ns : 有意差なし。

液の有機態N含有率は原料ふん尿より減少し、逆に無機態のアンモニア態窒素(NH₄-N)が原料ふん尿より高まる。原料ふん尿に含まれるタンパク質などの有機態Nの一部が、メタン発酵過程で無機化されるためである。硝酸態N(NO₃-N)は消化液中に検出されない。消化液のpHも原料より高まる。これはメタン生成の過程で低級脂肪酸が消費されるためであろう (Field *et al.*, 1984; Umetsu *et al.*, 2000)。また、N以外のリン(P)、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)などの含有率は、原料ふん尿と消化液に有意な差異がない。

したがって、消化液は原料ふん尿に比較して悪臭や病原性微生物が低減する上に、肥料成分が完全に温存され、Nでは無機態の割合が高まるという特徴を持つ。また、消化液の乾物率が低下して含水率が上昇するため、消化液の流動性が原料ふん尿よりも大きくなり、いわば液肥の様相を呈する (松中, 2009a)。

3. 消化液の肥料的効果

酪農場での消化液は、草地や飼料畑へ施与されて利用されるのが一般的である。消化液には様々な肥料養分が含有されている。しかし、一般的に言えば、作物生育にとくに大きな影響を与えるのはNである。そこで、以下ではNを中心とした消化液の肥効を考える。

1) 消化液のN肥効発現要因

消化液のN肥効を牧草の乾物生産の面から化学肥料や従来から利用されているスラリーと比較すると、牧草の刈取り部(収穫部位)乾物重はT-N施与量とは全く関係なく、また確実に肥効が期待できるNH₄-N施与量が同じであっても、消化液の肥効は化学肥料のそれより明らかに劣る(図1)。ただし、消化液とスラリーを比較すると、T-N施与量が異なってもNH₄-N施与量が同じなら、この両者はほぼ同等の肥効を示す。したがって、消化液やスラリーに含まれる有機態NはもちろんのことNH₄-Nでさえ、化学肥料のNH₄-Nより、みかけ上、肥効が劣っていることになる。

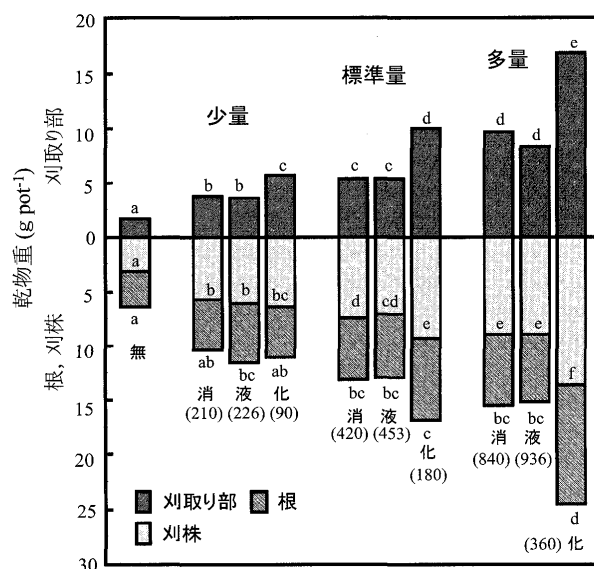


図1 NH₄-N施与量が同一条件での消化液、液状きゅう肥および化学肥料施与後50日目の牧草の部位別乾物重 (松中ら, 2003)

供試牧草: オーチャードグラス. 供試ポット: 0.02 m² ワグネルポット. 無: 無施与, 消: 消化液, 液: 液状きゅう肥 (スラリー), 化: 化学肥料. 少量, 標準量, 多量: 各資材由来のNH₄-N施与量を示し, それぞれ90, 180, 360 mg pot⁻¹. ()内の数字: 全窒素(T-N)としての各資材からのN施与量. 図中の異なる英文字間に5%水準で有意差あり。

消化液やスラリー、化学肥料などは、通常、草地表面に散布施与される。施与された消化液やスラリーなど家畜ふん尿由来NH₄-Nは、アンモニアガス(NH₃)となって揮散損失し、このNH₃揮散は数日間ではほぼ終了する (Matsunaka *et al.*, 2008)。したがって、揮散損失したふん尿由来NH₄-Nは牧草に利用されない。一方、化学肥料の場合、特別なアルカリ土壌を除き、NH₃揮散が発生しないか、発生したとしてもきわめてわずかである (Matsunaka *et al.*, 2008)。

このように考えると、消化液やスラリーなどから施与されたNH₄-NからNH₃として揮散損失したNを差し引いた「正味の施与NH₄-N」が、消化液などのN肥効を実質的に支えるとみなせる。事実、この正味のNH₄-N施与量が牧草にN欠乏を与えない程度であるなら、消化液、スラリー、そして化学肥料のいずれであっても、正味のNH₄-N施与量当たり増収効果(N施与効率)は同等だった (松中ら, 2003)。したがって、消化液Nの肥効は含有されるNH₄-Nで説明でき、その肥効は化学肥料と本質的な違いがない。消化液やスラリーのN肥効が化学肥料よりみかけ劣るのは、NH₃-N揮散によって実質的な肥効を示すNH₄-Nが揮散損失するためである。

2) 消化液の有機態Nの肥効評価

消化液やスラリーにはNH₄-Nのほか有機態Nが含まれている。ポット試験のような短期的な結果では、消化液由来Nのうち有機態Nの肥効は期待しにくい (松中ら, 2003)。しかし、土壌表面に施与された消化液やスラリー

由来の有機態Nの無機化過程を、常法（土壌水分を最大含水量の60%とし、温度30℃で保温静置）による長期培養実験で検討したところ、その無機化率は16週間で22～33%に達した（松中ら、2005）。また、圃場試験で長期的にN肥効を検討した結果によると、消化液を前年秋や早春に施用した場合、チモシーの2番草に対して緩効的なN肥効が認められている（三枝・渡部、2006）。したがって、実際の草地における消化液のN肥効については、消化液に含有されるNH₄-Nだけでなく、有機態Nの無機化を考慮する必要があるかもしれない。草地表面に施用された消化液やスラリーの有機態Nの肥効評価は今後の検討課題である。

3) 消化液の化学肥料への換算

こうした圃場条件での消化液の肥効検討から、消化液に含まれるNを化学肥料に換算するための係数（基準肥効率という。この係数の算出方法は後述）が提案されている（表2）。さらに、後述するスラリーの場合と同様、消化液の品質（乾物中のNH₄-Nの割合）や消化液の施用時期によって補正すると化学肥料への換算がより適正にできる。

同時に消化液のPおよびKの基準肥効率も検討され、後述するスラリーの基準肥効率を消化液に適用して実用上の問題がないことから、消化液のPとKについても基準肥効率が提示されている（表2）。

4. 乳牛ふん尿処理物の化学肥料としての適正な利用技術

酪農場の乳牛ふん尿処理物としては、これまで述べてきた消化液の他に、スラリー、堆肥、尿液肥として利用されることが多い。これらのふん尿処理物についてもその肥効を化学肥料として適正に評価できれば、これらの処理物を施用した草地や飼料畑では、化学肥料施用量を確実に削減でき、乳牛ふん尿の高度利用につながる。こうしたことを具体的に実施している北海道の例を以下に紹介する。

1) ふん尿処理物を肥料養分として利用する手順

松本（2008）は、乳牛ふん尿処理物の肥効を化学肥料として適正に評価し、ふん尿処理物を主体とする草地の施肥管理を実施するために、以下のような手順を提案した。

まず初めに対象圃場の作物に必要な養分施用量を明確にする。北海道ではこの作物に必要な養分量が「施肥標準」

としてすでに定められている（北海道農政部、2002）。すなわち、「施肥標準」は対象圃場の土壌養分の状態が土壌診断基準値の範囲にあり、堆肥等の有機物が無施用条件の時、北海道内の各地帯区分における各作物の目標収量を得るために施用する必要がある化学肥料としてのN、P₂O₅、K₂Oそれぞれの量を示したものである。したがって、例えば対象となる草地やトウモロコシ畑の土壌診断の結果が土壌診断基準値に満たない場合、施肥標準より増肥しなければならず、逆に、土壌診断基準値を超えている場合、施肥標準より減肥する必要がある。こうした土壌診断結果に基づく施肥標準に対する増減比率は、数多くの試験結果から定式化されており、それを「土壌診断に基づく施肥対応」と呼んでいる。その一例をカリウムについて示す（表3）。

こうして必要な養分量が決まると、その養分量をまずふん尿処理物で満たすことを考える。すなわち、施用するふん尿処理物中の養分を化学肥料として換算し、ふん尿処理物の施用によって必要養分量より過剰とならないように、ふん尿処理物の施用量を決定する。この場合、ふん尿処理物由来養分量だけでは不足する養分がでてくる。その不足分は化学肥料で補う。

この手順で最も重要なことは、ふん尿処理物中の養分の化学肥料としての適正な換算方法である。その方法は以下のとおりである。

2) ふん尿処理物の養分含有率の推定

ふん尿処理物を化学肥料の養分として利用するには、まず、施用されるふん尿処理物中の養分量を把握する必要がある。そのためには、ふん尿処理物中の養分含有率のデータが必要となる。ふん尿処理物由来の養分量が、養分含有率に施用量を乗じて求められるからである。この養分含有率を求めるには、定量的に分析する方法と簡易分析で推定

表2 メタン発酵消化液の基準肥効率¹⁾ (kg kg⁻¹)
(三枝・渡部、2006)

N		P	K
T-N ²⁾	NH ₄ -N 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にのみ対象とする。

²⁾ NH₄-N/T-N<0.5のとき適合性が高い。液状きゅう肥の補正係数を用いて品質と施用時期により補正する。

³⁾ NH₄-N/T-N≥0.5のとき適合性が高い。液状きゅう肥の補正係数で施用時期についてのみ補正する。

表3 土壌診断に基づく施肥対応の例ーカリウムについて（北海道農政部、2002）

土壌区分		基準値未満	基準値	基準値以上**		
交換性 カリウム含量 (mg K ₂ O/100 g)	火山性土*	未熟	～ 7	7～9	9～30	30～
		黒色	～ 9	9～12	12～40	40～
		厚層	～10	10～13	13～45	45～
		低地土・台地土	～15	15～20	20～50	50～
施肥標準量 に対する	泥炭土	～30	30～50	50～70	70～	
	火山性土		125	100	75	50
施肥率 (%)	低地土・台地土		110	100	50	0
	泥炭土	無客土	125	100	75	50
		客土	110	100	75	0

* 火山性土の土壌区分は「北海道農牧地土壌分類・第2次案」による。

** 基準値以上では、施肥率の区分によって2つに細分されている。

する方法がある。簡易分析による養分含有率の推定にはふん尿処理物の乾物率と導電率 (EC) を用いる方法がすでに報告されている (松本ら, 2002)。とくにスラリーの乾物率は比重計で測定する比重によって極めて簡単に推定できる (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, 2004)。

3) ふん尿処理物の化学肥料への換算係数

ふん尿処理物の施与量と養分含有率がわかると、それによってふん尿処理物由来養分施与量が算出できる。しかし、すでに述べたように、この養分量のすべてが化学肥料としての肥効を発現することはない。したがって、ふん尿処理物由来養分量のうち化学肥料として換算できる養分量がどの程度であるか、いいかえると、ふん尿処理物由来養分量を化学肥料に換算する係数が必要となる。三枝ら (2005a, b) はこの化学肥料への換算係数を基準肥効率 (R) と定義し、同じ係数を松本 (2008) は化学肥料換算係数として以下の方法で求めた。

すなわち、化学肥料およびふん尿処理物に由来する肥料養分施与量 (単位: kg ha^{-1}) をそれぞれ A_F , A_M とし、化学肥料、ふん尿処理物および無施与の各処理区における牧草の養分吸収量 (ここでは、牧草の刈取り部に含有された養分量を意味する。単位: kg ha^{-1}) をそれぞれ U_F , U_M および U_0 、さらに化学肥料およびふん尿処理物から施与された肥料養分の牧草によるみかけの吸収利用割合 (単位: kg kg^{-1}) をそれぞれ F_{ab} , M_{ab} をとすると、以下の関係式が成り立つ。

$$F_{ab} = (U_F - U_0) / A_F \quad (1)$$

$$M_{ab} = (U_M - U_0) / A_M \quad (2)$$

また、ふん尿処理物の肥料養分のうち化学肥料と見なせる割合、すなわち基準肥効率 (肥料換算係数) を R と定義していることから、式3が成立する。

$$M_{ab} = R \times F_{ab} \quad (3)$$

ただし R は直接測定できない。そこで北海道内の異なる試験地において、ふん尿処理物に化学肥料の併用の有無など数多くの圃場試験を実施し、そこで得た F_{ab} と M_{ab} を、式3から導かれる式4

$$R = M_{ab} / F_{ab} \quad (4)$$

に代入して R が求められた (表4) (三枝ら, 2005a, b; 松本, 2008)。

表4 草地に表面施与されたふん尿処理物の基準肥効率* (R) (松本, 2008)

	堆肥	スラリー	尿液肥
N	0.2	0.4	0.8
P	0.2	0.4	—
K	0.7	0.8	0.8

*松本 (2008) は肥料換算係数と記載している。表示した値は、施与当年のみ適用する。堆肥は、施与後2年目、3年目の R 値が別に提案されている。

4) ふん尿処理物の N 肥効の施与時期による補正

上記の R は、ふん尿処理物はその肥効の最も高い時期に施与された試験結果から求められている。しかし、ふん尿処理物の施与時期は様々であり、施与時期の違いは肥効、とりわけ N の肥効に大きな影響を与える (松中ら, 1988)。そこでふん尿処理物を様々な時期に施与し、その肥効の違いを補正するための係数 (T) が求められた (表5) (三枝ら, 2005c; 松本, 2008)。

5) ふん尿処理物の品質による N 肥効の補正

ふん尿処理物の N 肥効には直接的にはその $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有量で評価できる (松中ら, 2003)。しかし、実際に生産されているふん尿処理物の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有率は多様であり、とくにふん尿処理方法によって大きく変化する (松本ら, 2002)。先に表4で提案された R は、こうした多様なふん尿処理物の結果を反映していない。そのため、ふん尿処理物の R 、とくに N にかかわる R をより適正にするために、ふん尿処理物の品質から見た補正が検討された。

その結果、堆肥では水分含有率が、スラリーでは乾物中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有率で評価するのが妥当であった (三枝ら, 2005c)。それに基づいて補正係数 (Q) が提示された (表6)。松本 (2008) はこの補正係数を再検討し、とくにスラリーについては、スラリー中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有率と乾物率の比のほうがよりよく補正できることを明らかにした。

6) 施与したふん尿処理物に由来する肥料養分量

これまでの論議から、ふん尿処理物 1 Mg 当たりに含まれる N, P_2O_5 , K_2O の養分量 (単位: kg Mg^{-1}) をそれぞれ C_N , C_P , C_K とし、各養分の化学肥料への換算率を R_N , R_P , R_K とすれば、ふん尿処理物 1 Mg 当たりのふん尿処理物由来肥料 N, P_2O_5 , K_2O 量である S_N , S_P , S_K (単位: kg Mg^{-1}) は次の式で与えられる。

表5 採草地への施与時期を異にするふん尿処理物の窒素肥効に関する補正係数 (T) *

(北海道立農畜試験家畜ふん尿プロジェクト研究チーム, 2004)

施与時期	堆肥		スラリー・尿液肥
	TY**	OG**	TY
9月上旬~10月下旬	1.0	1.0	0.8
4~5月上旬	1.0	1.0	1.0
5月中旬	0.8	1.0	0.8
1番草収穫後	0.5	0.7	0.9
2番草収穫後	—	0.5	—

* 三枝ら (2005c) や松本 (2008) は TY 草地に対する T を示した。
** TY, チモシー; OG, オーチャードグラス

表6 ふん尿処理物の品質による窒素肥効に関する補正係数 (Q) * (三枝ら, 2005c)

肥効区分	堆肥		スラリー	
	含水率 (%)	Q	乾物当たりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有率 (%)	Q
大	80~	1.4	3.5~	1.2
中	65~80	1.0	1.5~3.5	1.0
小	~65	0.7	~1.5	0.8

*施与当年のみを補正対象とする。

$$S_N = C_N \times R_N \times T \times Q \quad (5)$$

$$S_P = C_P \times R_P \quad (6)$$

$$S_K = C_K \times R_K \quad (7)$$

7) ふん尿処理物の適正な施与量

ふん尿処理物を施与しようと考えている圃場，例えば草地であるなら，その草地の草種構成割合や土壌診断結果等に基づき，「施肥標準」や「土壌診断に基づく施肥対応」からその圃場での必要な N, P₂O₅, K₂O 施肥量 (単位: kg ha⁻¹) を求める。求めた N, P₂O₅, K₂O の施肥量をそれぞれ F_N, F_P, F_K とすると，ふん尿処理物由来肥料養分量である S_N, S_P, S_K との間には，

$$F_N / S_N \geq 1 \quad (8)$$

$$F_P / S_P \geq 1 \quad (9)$$

$$F_K / S_K \geq 1 \quad (10)$$

の関係を維持しなければならない。ふん尿処理物由来肥料養分量が必要施肥量を超えると過剰施肥になるからである。この時，F_N/S_N, F_P/S_P および F_K/S_K のうちの最小値が，対象となる草地のふん尿処理物施与上限量 (W, 単位: Mg ha⁻¹) である。例えば，F_N/S_N が最小値 W を与えたとすれば，この W が対象草地でのふん尿処理物の適正施与量である。これによって N はふん尿処理物由来 N 量で必要施肥量を満たすことができる。しかし，この施与量 W の条件では，ふん尿処理物からの P₂O₅ と K₂O 施与量 S_P および S_K が，F_P や F_K より不足する。この不足養分量は化学肥料で補う。

ふん尿処理物を適正に利用するためには，上述した複雑な手続きによって施与量を決定し (図 2)，その時に不足する養分は適切な化学肥料を選択して，対象草地へ施与する必要がある。

5. ふん尿処理物の施与が周辺環境に与える悪影響

ふん尿処理物を圃場に施与した後の周辺環境におよぼす悪影響のうち，最も懸念されるのは悪臭である (原田, 1998)。堆肥，スラリー，尿液肥などは悪臭対策を十分に

考慮して施与しなければ，悪臭によって周辺住民に大きな被害を与える。一方，消化液は先に述べたように，施与後の悪臭が軽減されている。

悪臭問題を除くと，ふん尿処理物の施与が周辺環境に与える悪影響としては，NH₃-N 揮散，硝酸態窒素 (NO₃-N) や P の溶脱による地下水汚染とそれに伴う水環境の富栄養化，さらに温室効果ガスである亜酸化窒素 (N₂O) の排出などである。

わが国において草地に施与したふん尿処理物由来 N の牧草や土壌，大気，地下水などへの動きすべてを定量的に調査した例は極めて少なく，チモシー草地に消化液や化学肥料を施与して 3 年間にわたって実施されたライシメータ試験 (Matsunaka *et al.*, 2006a) がある程度である。

その結果によると，消化液由来 T-N 施与量のうち，前年秋施与の場合は 18% 程度が，また当年春施与では 25~30% 程度が牧草によってみかけ上吸収された (表 7)。一方，環境へ流出する N のうち，量的に最多であったのは NH₃-N としての揮散損失で，施与量や施与時期にかかわらず施与 T-N の 13% 程度だった。次に多い流出は地下浸透水への溶脱 (形態は大部分が NO₃-N) で，施与 T-N の 6~12% の範囲にあった。N₂O-N としての排出は施与 T-N に対して 0.0~0.1% と，施与量や施与時期にかかわらずわずかであった。この排出係数は，茶園や畑地などで認められている排出係数 1~5% に比較すると極めて小さい (鶴田, 2000)。しかし，N₂O の地球温暖化指数は二酸化炭素 (CO₂) の 296 倍にも達し，温室効果が極めて大きい (IPCC, 2001)。それゆえ，家畜ふん尿や化学肥料などが施与された草地からの N₂O 排出を無視できない。

6. 酪農場全体としての環境に配慮したふん尿処理物利用計画

これまで述べてきたことは，個別の草地を想定したものであった。しかし，実際の酪農場では多数の草地を全体として管理しているため，ふん尿処理物を環境に配慮しつつ適正に利用するには，個別草地の対策だけでなく所有する全草地にわたって実施しなければならない。そのためには，

表 7 消化液および化学肥料由来全窒素 (T-N) 施与量に対するみかけの牧草による N 吸収割合と環境への流出割合 - 3 年間のライシメータ試験結果 (Matsunaka *et al.*, 2006a)

	消化液				化学肥料区 ³⁾
	秋標準量区	秋多量区	春標準量区	春多量区	
T-N 施与量 ¹⁾ (g-N m ⁻² 3年 ⁻¹)	68	138	62	123	48
NH ₄ -N 施与量 (g-N m ⁻² 3年 ⁻¹)	32	64	32	64	48
T-N 施与量に対する割合 ²⁾ (%)					
a) 牧草による N 吸収	18.1	17.5	29.7	24.8	63.8
b) 地下浸透水へ溶脱	7.9	10.1	6.0	12.3	11.5
c) NH ₃ -N として揮散	13.1	13.6	13.2	12.7	ND
d) N ₂ O-N として排出	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
環境へ流出 (b+c+d)	21.2	23.8	19.2	25.0	11.6

¹⁾ N 施与量はいずれも 3 年間の合計量。NH₄-N 施与量は T-N 施与量の内数。

²⁾ 各処理区の測定値から無処理区の測定値を差し引くことで処理効果のみかけの値とし，その値の T-N 施与量に対する割合。牧草 (チモシー) による N 吸収は刈取りによって持ち出された N 量。ND: 化学肥料区では NH₃ 揮散が発生しなかった。

³⁾ チモシー草地に対する北海道施肥標準に基づく N 量 (16 g-N m⁻² 年⁻¹) を化学肥料で施与した。

各草地において図2の手順に従って、ふん尿処理物の適正な施与量と、それでもなお不足する養分の化学肥料による補てん量を算定した上で、1) それらを酪農場の全草地についてまとめ、さらに2) 全草地からの環境への影響も評価しながら、3) 酪農場としての年間のふん尿利用計画を立てるという非常に複雑で面倒な作業が必要となる。多くの草地を管理する酪農家にとって、このような作業は事実上、不可能に近い。

しかし、上述の煩雑な計算を簡易にできるようにしたパーソナルコンピュータ(PC)用のソフトウェア「AMAFE」が開発された(松中ら, 2009b)。このソフトウェアには上述した図2の手順が組み込まれている。さらに、ふん尿処理物の施与でも不足する養分の補てんに適切な化学肥料の銘柄とその施与量や、環境へ流出するN量の予測値なども提示される。なお、AMAFEのファイル構成、演算の流れ、演算方法、ふん尿処理物施与後における環境負荷量の算出方法などはすでに詳述されている(松中ら, 2009b)。また、AMAFEのPC上での具体的な取り扱い方法や出力結果なども多くの報告で解説されている(松中ら, 2006b, c, d, 2007a, b)。

本ソフトウェアの利用者はソフトが提示する情報に基づき、酪農場全体としてのふん尿処理物から環境へ流出するN量が最小となるように、PC上で試行錯誤しつつ酪農場全体のふん尿利用計画を策定する。それゆえ、本ソフトはふん尿利用計画の意志決定を支援するものであり、その計画を最終的に決定するのは利用者自身である。

7. おわりに

乳牛ふん尿を環境に配慮して高度利用するには、これまで述べたような数多くの要因を考慮して実施されなければならない。それによって土-飼料-乳牛を巡る養分循環に基づいた酪農も実践できる。

しかし、環境に配慮して家畜ふん尿を高度利用する上で忘れてはならないことがある。それは、酪農場で産出されるふん尿を施与できる草地や飼料畑の土地が確保されているということである(松中, 2002b)。いかに養分循環に基づきたいと考えても、また、環境に配慮しようとしても、単位面積あたりの飼養乳牛頭数(飼養密度)が極めて多く、排泄されるふん尿由来養分が土壌の環境容量を超えている酪農場では、どのような配慮があっても、ふん尿中の養分が酪農場の土-飼料-乳牛を巡る養分循環系外にあふれ出て行かざるを得ない。そしてそれは確実に環境汚染源になる。

適正な飼養密度を守ること、それが酪農場においてふん尿を環境に配慮しつつ高度利用するための大前提である。

文 献

Field, J. A., Caldwell, J. S., Jeyanayagam, S., Reneau, R., B. Jr., Kroontje, W., and Collins, E. R. Jr. 1984. Fertilizer recovery from anaerobic digesters. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27, 1871-1876.
 原田靖生 1998. 畜産廃棄物による環境負荷. 農業・農村村と環境, p. 35-40. 養賢堂, 東京.
 北海道農政部 2002. 北海道施肥ガイド(施肥標準, 診断基準, 施肥対応). V 牧草・飼料作物, p. 202-229. 北海道, 札幌.
 北海道立農畜試験家畜ふん尿プロジェクト研究チーム 2004. 家畜ふん尿処理・利用の手引き2004, p. 55-67. 道立畜産試験場, 新得.
 IPCC 2001. Climate Change 2001. The scientific Basis, p. 388, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
 松本武彦, 田村 忠・中辻敏朗・木曾誠二・三木直倫・寶示戸雅之 2002. 乳牛糞尿処理物の肥料成分含量の簡易な推定法. 土肥誌, 73, 169-173.
 松本武彦 2008. 乳牛ふん尿処理物の肥効評価に基づくチモシー草地の施肥法に関する研究. 道立農試報告, 121, 1-61.
 松中照夫・小関純一・近藤 照 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法. 土肥誌, 59, 419-422.
 松中照夫・成瀬往代・熊井実鈴 2002a. 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 2002b. 北海道の草地の歴史と持続的発展へのシナリオ. 北海道草地研究会報, 36, 16-19.
 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.
 松中照夫・赤田繁尚・澤本卓治 2005. 草地表面に施与された家畜ふん尿に由来する有機態窒素の無機化過程. 土肥要旨集, 第51集,

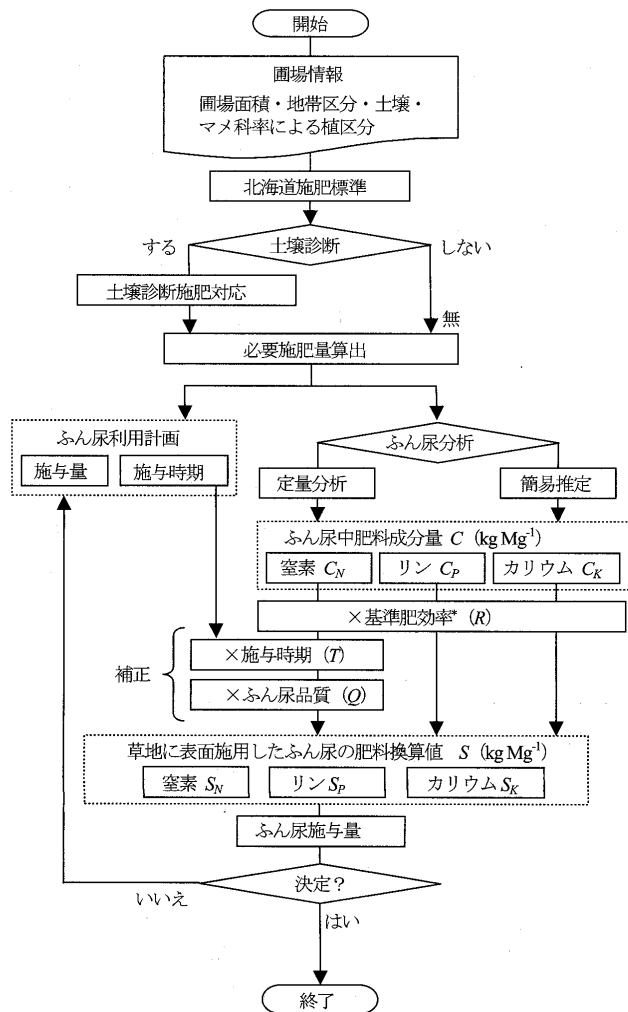


図2 ふん尿処理物の肥効評価に基づいた採草地に対する施肥法の手順(松本, 2008)

*原著では肥料換算係数と記載されている。

- 134.
- Matsunaka, T., Sawamoto, T., Ishimura, H., Takakura, K., and Takekawa, A. 2006a. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland. In C. R. Soliva, J. Takahashi, and M. Kreuzer (ed), *Greenhouse Gases and Animal Agriculture: An Update*, p. 242–252. International Congress Series 1293, Elsevier B. V., Amsterdam.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2006b. ふん尿利用計画支援ソフト「AMAFE2006」の概要. *農業および園芸*, **81**, 909–917.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2006c. パソコンで楽々ふん尿利用計画—環境に配慮した酪農のためのふん尿利用計画支援ソフト「AMAFE2006」—. *酪農ジャーナル*, **59**(6), 23–25.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2006d. 環境に配慮したふん尿利用計画をパソコンで一意決定支援ソフト「AMAFE2006」の概要—. *牧草と園芸*, **54**(4), 1–6.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2007a. 循環型酪農をめざしたふん尿利用計画支援ソフト. *農家の友*, **59**(2), 74–76.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2007b. 酪農場のふん尿利用を支援するソフト「AMAFE2006」. *畜産技術*, **2007**(8), 2–5.
- Matsunaka, T., Sentoku, A., Mori, K., and Satoh S. 2008. Ammonia volatilization factors following the surface application of dairy cattle slurry to grassland in Japan: Results from pot and field experiments. *Soil Sci. Plant Nutri.*, **54**, 627–637.
- 松中照夫 2009a. メタン発酵消化液の液肥としての利用法. *研究ジャーナル*, **32**(6), 36–41.
- 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2009b. 環境に配慮した酪農のためのふん尿利用計画支援ソフトウェア「AMAFE」. *土肥誌*, **80**, 177–182.
- 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.
- 扇 勉・峰崎康裕・西村和行・糟谷広高 1999. 乳牛の糞尿量および窒素排泄量の低減. *北海道草地研究会報*, **33**, 16–21.
- 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・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 2005a. チモシー草地におけるふん尿主体施肥設計法, 1. 乳牛スラリーおよび尿の基準肥効率. *北農*, **72**, 3–10.
- 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 2005b. 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.
- 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 2005c. 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.
- 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.
- 鶴田治雄 2000. 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり, 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生. *土肥誌*, **71**, 554–564.
- Umetsu, K., Takahata, H., and Takeuchi, Y. 2000. Farm scale anaerobic digester of dairy manure slurry in a cold region. *J. Soc. Agric. Structures, Jpn.*, **31**, 179–185.
- 吉野宣彦 2000. 酪農専業地帯における経営改善とふん尿問題. 市川ら編著 *21世紀へのマニユア・テクノロジー*, p. 180–188. 酪農学園大学エクステンションセンター, 江別.