

家畜排せつ物の利活用と水質問題から考える有機物管理の次世代パラダイム

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	前田, 守弘 河野, 憲治 谷山, 一郎 上園, 一郎 脇門, 英美 加藤, 邦彦 井上, 京 中村, 真人 板橋, 直 矢部, 光保
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	83巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 203-209
発行年月	2012年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



2011年つくば大会
シンポジウムの概要

家畜排せつ物の利活用と水質問題から考える

有機物管理の次世代パラダイム*

前田守弘¹・河野憲治²・谷山一郎³・上蘭一郎⁴・脇門英美⁵・加藤邦彦⁶・
井上 京⁷・中村真人⁸・板橋 直³・矢部光保⁹

1. はじめに

農業地域で発生する家畜排せつ物を中心としたバイオマスは見方を変えれば、有効な資源であり、水質問題に繋がらないような利用方法を考える必要がある。2004年に家畜排せつ物法が完全施行されたため野積みや素掘り貯留が禁止されたが、一方で、余剰となった堆肥が畜舎の近隣農地に過剰施用される傾向が一部で認められる。農林水産省が2007年に公表した家畜排せつ物の利用の促進を図るための基本方針（農林水産省、2007）では、耕畜連携の強化とニーズに即した堆肥作りを促進するとともに、炭化、焼却、メタン発酵などによる家畜排せつ物のエネルギー利用を推進する必要があると記されている。

本シンポジウムでは、家畜排せつ物の利用促進を図るなか、水質問題を主とした環境負荷にどのように留意すべきかについて焦点を当てた。具体的には、家畜排せつ物の処理・利用方法、農地における環境負荷の発生、社会的要因

を考慮する必要性について5人の研究者から最近の研究成果を紹介していただき、家畜排せつ物の利活用と水質問題に関する今後のあり方を議論することを目的とする。

（前田守弘・河野憲治・谷山一郎）

2. 家畜ふん堆肥の窒素無機化特性と連用畑の窒素収支

家畜ふん堆肥を肥料として活用する場合、施用量の算出には窒素肥効率（化学肥料の窒素利用率に対する堆肥の窒素利用率の割合）を用いるのが一般的である。しかし、家畜ふん堆肥は、畜種や水分調整剤などの材料や製造法が多様であるため、畜種ごとに設定した窒素肥効率では、個々の堆肥からの窒素発現を正確に評価できない。さらに、連年施用する場合、余剰窒素による環境負荷の増大が懸念される。

そこで、家畜ふん堆肥の持続的な施用を図るため、窒素肥効率に基づいた長期連用試験における窒素収支を解析することによって問題点を把握し、解決方向として土壌可給態窒素の迅速・簡易な判定法および判定結果に基づく施肥窒素活用システムを開発したので紹介する。

1) 窒素肥効率を考慮した家畜ふん堆肥連用による窒素収支の解析

甘しょ+キャベツ栽培体系において、化学肥料を窒素成分でha当たり80kg+150kg施用した対照区に対して、窒素肥効率を勘案して施用量を決定した牛ふん堆肥区（窒素肥効率40%）、豚ふん堆肥区（同60・50%）、鶏ふん堆肥区（同70・60%）を設置して10年間、20作の窒素収支を求めた。

その結果、①家畜ふん堆肥を施用した区の窒素吸収量は、連用年数に伴って増加する傾向で、収量も概ね連用当初から対照区以上であった。②キャピラリーライシメータ浸透水の年間平均硝酸態窒素濃度は、鶏ふん堆肥区が連用2年目から、豚ふん堆肥区と牛ふん堆肥区が3年目以降、対照区を上回る傾向であった。特に、牛ふん堆肥区の硝酸態窒素濃度は連用年に伴い顕著に上昇した。③土壌残存窒素量および可給態窒素量は、家畜ふん堆肥を施用した区で多く、特に窒素肥効の低い牛ふん堆肥区で顕著に増加した。

これらの結果から、家畜ふん堆肥の連用では、土壌残存窒素の累積が作物吸収や窒素溶脱に影響を及ぼすため、家

Morihiro MAEDA, Kenji KOUNO, Ichiro TANIYAMA, Ichiro UEZONO, Hidemi WAKIKADO, Kunihiko KATO, Takashi INOUE, Masato NAKAMURA, Sunao ITAHASHI and Mitsuyasu YABE: Paradigm shifts for organic matter management in rural areas with consideration for animal waste utilization and sound water environments

* 本稿は、2011年8月10日の日本土壌肥科学会つくば大会シンポジウムの要旨および講演内容を要約したものである。

¹ 岡山大学（700-8530 岡山市北区津島中3-1-1）

² 広島大学（739-8528 東広島市鏡山1-4-4）

³ （独）農業環境技術研究所（305-8604 つくば市観音台3-1-3）

⁴ 鹿児島県農業開発総合センター（899-3401 南さつま市金峰町大野2200）

⁵ 鹿児島県農業開発総合センター大隅支場（893-1601 鹿屋市串良町細山田4938）

⁶ （独）農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター（062-8555 札幌市豊平区羊ヶ丘1番地）

⁷ 北海道大学（060-8589 札幌市北区北9条西9丁目）

⁸ （独）農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所（305-8609 つくば市観音台2-1-6）

⁹ 九州大学（812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1）

2011年12月7日受付・2011年12月28日受理

日本土壌肥科学雑誌 第83巻 第2号 p.203~209 (2012)

畜ふん堆肥からの窒素発現量の評価に加えて、その蓄積量を考慮した窒素肥効率の設定が必要である。しかし、家畜ふん堆肥からの窒素発現は、気象条件や栽培環境など、多くの因子の影響を受けるため、設定は困難である。

2) 新しい家畜ふん堆肥の窒素肥効評価法

上記の解決策として、家畜ふん堆肥からの窒素発現量を個々に評価するという新しい肥効評価法が提案された。このなかでは、家畜ふん堆肥に含まれる多様な形態の窒素を速効的窒素（概ね1ヶ月以内に無機化され、基肥に相当する窒素）、緩効的窒素（1~3ヶ月間に無機化され、追肥に相当する窒素）、に分けて評価し、短時間で測定可能な分析手法が併せて開発されている（石岡ら, 2009; 小柳, 2009）。

また、新しい肥効評価法では、家畜ふん堆肥の連用などによって土壌に蓄積した遅効的窒素は土壌の可給態窒素として評価する。可給態窒素は30℃、4週間の保温静置培養中に無機化される窒素量で表され、土壌の窒素肥沃度の指標値とされている。この迅速、簡便な推定法として、80℃16時間水抽出と化学的酸素消費量（COD）簡易測定キットによる判定法を開発した。この判定法は、黒ボク土を含む様々な種類や堆肥連用の土壌に適用が可能で、毒劇物薬品や分析機器を使用しないため、土壌分析機関は勿論のこと、農家自らでも手軽に測定可能である（上蘭ら, 2010a, 2010b）。

さらに、可給態窒素を窒素施肥量の加減に活用するためには、作物の栽培環境ごとに窒素無機化量として換算する必要がある。そこで、表計算ソフトを利用した算出シートを作成した（図1）。算出シートに必要な入力データは、栽培する作物の作型、窒素施肥基準量および平均地温である。まず、栽培作物の作型を選ぶと、基肥、追肥の施肥基準量が自動的に抽出される。次にCOD簡易測定キットによる色判定値を選択すると、可給態窒素推定値が自動表示されるとともに、反応速度論的手法に基づいて基肥~追肥時期、追肥~収穫期の窒素無機化量が算出される（古江・上沢, 2001）。そして、算出された窒素無機化量を基肥、追肥別に施肥基準量から加減することによって推奨窒素施肥量が自動的に表示される。このように、項目を選択するだけで誰でも簡単に操作できる計算シートになっている。

今回紹介した家畜ふん堆肥や土壌の蓄積窒素量を個々に評価する新しい肥効評価法を活用することによって、持続的な家畜ふん堆肥の利用が可能になると考えられる。

今後は、各種の作物・作型で堆肥の肥効評価法を検証しつつ、開発した土壌可給態窒素の簡易判定法を活用して、連用に伴う窒素蓄積に対応した適正な施肥を推進する必要がある。（上蘭一郎・脇門英美）

3. 伏流式人工湿地システムによる高濃度有機性排水の再生と循環

伏流式人工湿地システムとは、植物を植えた砂利などの資材で汚水をろ過して浄化する排水処理法で、近年になって世界中に広がりつつある比較的新しい技術である。資材にヨシを植栽してろ過することが多くヨシろ床とも呼ばれる。筆者らは、2005年以来、高濃度の有機性排水を北海道の厳しい寒さの中でも通年浄化できる世界的にも新しい伏流式人工湿地システムを、産学官の連携により開発してきた（加藤ら, 2010）。これまでの処理対象汚水は、酪農雑排水を始めとして、デンプン工場廃液、養豚場ふん尿などで、生活排水の10倍~100倍以上の高濃度の有機性排水である。開発したシステムの仕組みや浄化効率、浄化メカニズム、コスト、今後の可能性について紹介する。

1) 開発した伏流式人工湿地システムの仕組み

筆者らの採用した人工湿地システムは、段々畑のように配置した酸化的（好氣的）な垂直流（縦型）ろ床と還元的（嫌氣的）な水平流（横型）ろ床を組み合わせたハイブリッド方式で、窒素浄化機能に優れた方式である。寒地で高濃度の有機性排水を通年浄化するには、目詰まりによるろ床の閉塞の回避や窒素・リンの浄化効率の維持向上など、従来の伏流式人工湿地には問題があった。また、システムが安全・確実に稼働し続けることがユーザーの信頼を得る上で何よりも重要な課題であった。これらの課題を解決するため、主に以下の5つの仕組みを考案・採用した。5つの仕組みとは、①ろ床の目詰まりを回避できる安全バイパス構造、②目詰まりを軽減し冬季の断熱層となる軽量浮遊資材の表面敷設、③夏季の浄化効率を向上する交互乾燥と循環の併用、④汚水を効率的に分配する自動サイホンの改良、⑤リンを効率的に吸着リサイクルする構造、である。

① ファイル ② 編集 ③ 表示 ④ 挿入 ⑤ 書式 ⑥ ツール ⑦ データ ⑧ ウィンドウ ⑨ ヘルプ Adobe PDF ⑩

MS Excel 2003 標準テンプレート 100% 14 x 11 x 11

D2 黒ボク土

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	土壌の種類	黒ボク土																	
2	種類	窒素素類																	
3	作物	キャベツ																	
4	作型	晩夏まき																	
5	移植(は)期	9月上旬~9月下旬																	
6	収穫(終)期	12月~4月上旬																	
7	栽培期間(換算)	10月~1月																	
8	30℃変換月数	0.74																	
9	窒素施肥基準	基肥	8	kg															
10		追肥	7	kg															
11		合計	15	kg															
12					80℃16時間水抽出-バックテスト判定										可給態窒素量 (mg/100g)				
13					5 一抽出液の希釈倍率を入れてください。										6.2				
14					標準色 (COD)										推奨窒素施肥量				
15					0 5 10 15 20 30 40 50 60 70 80 90 100										基肥 7.2				
16					標準色板の色の○にチェックをつけてください。中間色の場合は、下段にチェックしてください。										追肥 5.2				
17															合計 12.5				
18															施肥基準量比 83%				
19															コメント				
20															可給態窒素量は高めです。窒素施肥量を減らしましょう。				

図1 可給態窒素簡易判定値から推奨窒素施肥量を算出する表計算シート

2) システムの浄化効率

当システムにおける有機物とアンモニア態窒素の面積あたりの浄化効率 OTR (Oxygen Transfer Rate = 流量 × {0.5 (COD_{in} - COD_{out}) + 4.3 (NH₄-N_{in} - NH₄-N_{out})} / 面積) (ただし, COD: ニクロム酸カリウム法による COD 濃度, NH₄-N: アンモニア態窒素濃度, in: 原水, out: 処理水) は, 世界的な標準値である 28 (Cooper, 2005) よりも大きく, 特に処理する汚水の濃度が高いほど OTR が大きくなる傾向があった。従って, 従来の伏流式人工湿地よりも狭い面積で多量の有機性排水を浄化できることが判った。

3) 浄化のメカニズム

汚水の浄化は, 物理的なろ過, 化学的な吸着, 生物的な分解の組合せで行われる。物理化学的なろ過や吸着は冬季に安定的に発揮され, 有機物はシステムに蓄積する。夏季には物理化学的な作用に加えて, 溜まった有機物をミミズや微生物の働きで分解する。冬に貯まった宿題を夏に片付けるという具合である。ヨシなどの植物の主な役割は, 有機物の膜状の閉塞を軽減し目詰まりを回避することである。ヨシは目詰まり回避以外にも冬季の断熱層や微生物の住処などとして働く。植物による養分吸収の浄化に占める割合は 10% 未満であり, 浄化のために植物を刈り取る必要はない。窒素の浄化は, 硝化と脱窒の組合せや嫌気性アンモニア酸化 (ANAMMOX) 反応 (NH₄⁺ + NO₂⁻ → N₂ ↑ + 2H₂O) などにより進むと考えられ, 窒素ガスとしてシステムから空中に消失する。システムに蓄積するリンは炭酸カルシウムなどの資材により吸着し農地還元することが可能である。

4) コスト

当システムのコストを従来の機械的な污水处理方法に比べると, 施工費用が約 2 分の 1, 電気使用量が約 20 分の 1, 保守点検費を含めたランニングコストが約 5 分の 1 である。

5) 今後の課題

今後の課題として, ①寒冷地から温暖な地域での実証と普及, ②異なる有機性排水への適用, ③エネルギー作物・飼料作物の栽培, ④花卉や果樹など活用可能な植物の探索, ⑤再生水の循環利用, ⑥バイオガスプラントの消化液の処理, ⑦更なる省面積化などがある。

6) おわりに

当システムは, 開発した民間企業の (株) たすくの社長 (家次氏) により SAIBON システムと名付けられた。盆栽 (BONSAI) のように手の込んだ人工的自然であるとのイメージからである。SAIBON システムは, さらに多くの人が関わることで改良が重ねられ, 豊かな自然環境の形成に寄与する技術として, 広く世界に普及することが期待される。

本システムの開発にあたり, 現地酪農家やデンブン工場, 養豚場などのユーザーの皆様大変お世話になった。また, 共同研究や普及を進める (株) たすく, 環境エンジニアリ

ング (株), (株) リードネットなどの民間企業, 北海道大学農学部土地改良学研究室, 日本大学文理学部 (故) 宮地直道教授の研究室, 道立根釧農業試験場, 遠別町役場の皆様など, 数多くの関係者にご協力いただいた。

(加藤邦彦・井上 京)

4. メタン発酵消化液の利用と問題点

1) メタン発酵消化液とは

メタン発酵は, 家畜排せつ物などから再生可能エネルギーであるメタンを取り出す技術である。メタン発酵からは, メタンとともにメタン発酵消化液 (以後, 「消化液」, メタンを取り出した後に残る液体) が生成し, その処理・利用が課題とされている。消化液は, 排水処理を行った上で河川などに放流する場合と液肥として利用する場合があるが, 排水処理では, 薬品に要するコストや処理に伴うエネルギー消費量が大いという指摘がある。そのため, 液肥利用を行うことにより, 速効性の肥料成分を含むという特長 (表 1) を活かすとともに, プラント運転コストの削減が期待されている。著者らは, 農林水産省の委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」において, 千葉県香取市に乳牛ふん尿を主原料とするメタン発酵プラント (山田バイオマスプラント) を試作・設置し, プラント運転と消化液の液肥利用の実証研究を行ってきた。山田バイオマスプラントでは, 消化液のほぼ全量が液肥利用されており, 年間約 1,500 t の消化液を約 50 ha の圃場に散布している。消化液はバキューム車 (タンク容量 3.7 m³) で圃場に運ばれ, 液肥散布車 (タンク容量 1.6 m³) で散布される。液肥散布車の輸送は 2 t トラックで行われる。本報では, 消化液の液肥利用に関して定量的評価を行った事例を報告し, 今後の課題について述べる。

2) 消化液を施用した圃場からのアンモニア揮散

消化液の畑地 (黒ボク土) への施用方法が土壌からのアンモニア揮散に及ぼす影響を把握するため, 室内試験を行った (中村ら, 2012)。その結果, 消化液を表面施用した場合, 施用後 3 時間以内におけるアンモニア揮散量が多く, 土壌との混和を行わなければ, 施用後 1 日間で施用したアンモニア態窒素の多くが揮散する。一方, 土壌との混和を行えば, その時点でアンモニア揮散量が抑制され, 揮散量はほぼ 0 まで低減した。つまり, 消化液散布作業と耕起作業の連携を高め, 施用直後に耕起することができれば, アンモニア揮散を抑制でき, 肥料成分の有効利用を図ることができる。畑地での消化液の液肥利用では, その後の作業体系を考慮した施肥設計が必要であることが示された。

3) 消化液を施用した畑地土壌における窒素の動態

消化液の畑地 (黒ボク土) への施用に伴う環境影響を

表1 消化液の成分 (pH 以外の単位は mg L⁻¹)

TS	pH	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	T-K	T-C
41,300	7.7	3,390	1,740	<0.3	536	3,210	9,790

TS: 全蒸発残留物

把握するため、ライシメータ試験を行った(中村, 2011)。その結果、①消化液施用後速やかに土壌と混和すれば、アンモニア揮散を抑制でき硫酸に近い速効性窒素肥料として利用できること、②その場合、消化液由来窒素は硫酸由来窒素と同様の溶脱特性を示すこと、③消化液を施用した時の亜酸化窒素発生量は硫酸を施用した場合よりやや多いこと、が明らかとなった。

4) 消化液の液肥利用に伴う温室効果ガス排出

山田バイオマスプラントの散布記録と周辺圃場での亜酸化窒素発生量の実測値をもとに、液肥利用に伴う温室効果ガス排出量を算定した(中村, 2011)。

液肥利用に伴う温室効果ガスの排出量のうち、バキューム車、2tトラック、液肥散布車の走行に伴う排出量、圃場からの亜酸化窒素発生に伴う発生量は、それぞれ、消化液1tあたり3.8, 1.2, 1.6, 1.5 kg-CO₂eq., 合計で8.1 kg-CO₂eq.であった。液肥利用に伴う温室効果ガスの排出の中では、輸送車両からの排出割合が高かった。一方、輸送車両からの排出量を削減するためには近傍圃場への散布量を増やし、輸送距離を短縮することが有効である。プラントからの圃場までの平均輸送距離を1 km 短縮するごとに、消化液1tあたり約0.42 kg-CO₂eq. 削減できることが示された。また、文献値との比較から、消化液を液肥利用するプロセスは、排水処理に比べて温室効果ガス排出量が少ないプロセスであることが示された。

5) まとめと今後の課題

これまでの研究により、消化液をメタン発酵プラントの近隣圃場で利用するなどにより効率的なシステムを構築できれば、消化液を環境保全的に液肥利用できることが示された。しかし、消化液は輸送・散布作業には特殊な車両が必要で労力も大きい。耕種農家単独で使用することは難しい。消化液の液肥利用を普及させるためには、液肥利用導入によりコスト削減や地域環境保全などのメリットを受けるメタン発酵プラントの運営主体、行政、畜産農家などが輸送・散布に関する費用や労力を負担するなどにより、耕種農家の負担が少ないシステムを構築する必要がある。

(中村真人)

5. 有機物施用畑における窒素循環と硝酸性窒素の溶脱

環境省の全国地下水調査によると、硝酸性窒素(NO₃-N)環境基準の超過率は依然として高いものの、ここ4年間ではやや改善傾向にある(環境省水・大気保全局, 2010)。これは、国や地方自治体がいくつかの施策や施肥基準の見直しを進めてきた効果ともいえる。一方、家畜ふん堆肥など有機質資材の施肥量を適正化する試みは遅れている。2004年に家畜排せつ物法が改正され、家畜ふん尿の素掘り貯留や野積みは完全に禁止された。しかし、流通ルートに乗らなかった堆肥は、畜産農家の自家圃場に過剰散布されることも少なくない。

ここでは、家畜ふん堆肥に含まれる窒素の遅効性と溶脱、畜産地帯における窒素の循環と流出、有機性廃棄物を

活用した窒素溶脱低減対策について著者らの研究事例を紹介し、有機質資材の利活用を考える材料としたい。

1) 堆肥を連用した畑地における窒素の無機化と溶脱
家畜ふん堆肥施肥量の目安として用いられる肥効率は、豚ふん堆肥で50%、牛ふん堆肥で30%、鶏ふん堆肥で70%程度の値が用いられるが、製造方法や副資材によって変動する。また、当該作のみを対象とした考え方であり、次作以降に堆肥から無機化する窒素は考慮されていない。

著者らは、淡色黒ボク土畑圃場に豚ふん堆肥区(肥効率を50%と仮定)、化学肥料区、無肥料区を設け、スイートコーン・ハクサイ(またはキャベツ)の栽培管理を継続した(前田, 2007)。堆肥の連用にとまって作土の全窒素含有量は増加し、6年後には無肥料区に比べて2.5 g kg⁻¹ 高く、施用窒素量の68%が作土に蓄積していた。8年後でも同様に施用窒素量の65%が残存していた。このように、堆肥からの窒素供給は緩慢であり、多くは作土に蓄積する。一方、堆肥区における深さ1 mの土壌溶液中NO₃-N濃度は、最初の3年は無肥料区と同じく低濃度であるが、4年目以後徐々に上昇して6年目には化学肥料と同じ20~60 mg L⁻¹に達した。これは、土壌中に蓄積してきた堆肥由来の有機態窒素の無機化量が増大してくるためと推察される。また、家畜ふん堆肥には銅や亜鉛などの重金属が高いことが知られている。実際、本試験においても、作土の銅、亜鉛濃度は堆肥施用で有意に上昇した(Zhao *et al.*, 2006)。

2) 笠岡湾干拓地における窒素の循環と流出

岡山県笠岡湾干拓地では畜産を中心に据えた循環型農業が推進されている。しかし一方で、干拓地内の遊水池ではアオコの発生がみられる。干拓地内では、畜産、飼料作物畑、園芸畑などが明確にエリア分けされている。畜産エリアで生産された堆肥(24,000 t y⁻¹)は飼料畑や園芸農家エリアなどで利用されるが、残りはすべて自家圃場に散布されている(推定散布量60 t ha⁻¹ y⁻¹, 竹内, 2010)。

各エリアを流下する支線排水路を2009~10年に調査したところ、畜産エリア>畜産・園芸エリア>飼料作物エリアの順に窒素、リン濃度が高く、全窒素で20 mg L⁻¹、全リンで2 mg L⁻¹を超えることも珍しくなかった(前田ら, 2011)。また、水路のδ¹⁵N値から、畜産エリアおよび畜産・園芸エリアにおける高濃度の窒素は堆肥由来であることが示唆された。さらに、これらのエリア内における堆肥施用後のアンモニア揮散や圃場あるいは水路内での脱窒の可能性が示唆された。牛舎近傍では土壌およびオーチャードグラスのδ¹⁵N値が非常に小さく、牛舎からのアンモニア揮散の影響と考えられる。

3) 硝酸態窒素吸着機能炭による窒素溶脱低減効果

横山ら(2008)は塩化カルシウムに浸漬したヒノキチップやコーヒーかすを炭化することによって、NO₃-N吸着能の高い資材(機能炭)を開発した。著者らは、チンゲンサイ栽培ポットの下層にコーヒーかす機能炭を埋設し、肥料(アンモニア肥料/鶏ふん堆肥)、灌水量の異なる条件

で $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱低減効果を調べた (Maeda *et al.*, 2011). その結果, 肥料や灌水量の違いによらず, 機能炭によって $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量が有意に低減した. また, 機能炭施用は作物の窒素吸収には影響しなかった.

4) おわりに

家畜ふんを筆頭に農業系有機質資材の環境保全的利活用を考えることは喫緊の課題である. 安易な堆肥施用は $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱や土壤中重金属濃度の上昇をもたらす恐れがある. また, 堆肥の流通が滞ると一部圃場での多量施用につながり, 水環境への流出が懸念される. 一方では, 炭化した有機性資材により畑地での $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱を低減できる可能性がある.

今後は, 地域レベルにおける有機性廃棄物の行方と水環境の関係を明確にし, 施策の意思決定支援に役立つ応用研究が求められる. また, 農業の近代化と同時に, 有機性廃棄物が急増している発展途上国では, わが国の経験と知識が必要とされており, 新たな研究の場として魅力的である.

(前田守弘)

6. 流域レベルの地下水硝酸汚染リスクからみた農地における有機物の適正利用

1) 「点」と「面」

農業による余剰窒素は, 地下水の硝酸性窒素による汚染源となる. こうした汚染は, 地下水の採水地点ごとに把握され, 「点」とそのごく周辺の問題として捉えられることが多い. しかし, 高濃度の窒素を含む地下水は, さらに河川など表流水に流出し, 湖沼・海域の水質汚濁にも寄与している. このことは, 流域, つまり「面」的な広がりを対象とした検討により明らかにされてきた (田淵ら, 1995; Hayakawa *et al.*, 2009 など).

流域を対象とした検討の結果は, 近年, 都市河川よりも窒素濃度の下がりにくい農業河川において, 流域内の農地面積率や窒素負荷量が適当であるかを判断できる点で重要である. しかし, たとえばそれらが過剰とされた場合, 流域内の個々の農地がどの程度の対策を行うべきかについて

示唆を与えることはない. これは, このアプローチが, 「面」をひとつの塊として扱うためであり, 「面」としての結果に対し, 「面」を構成する個々の「点」の寄与を関連づける仕組みが必要とされる背景となっている.

2) 「点」と「面」をつなぐ仕組み

農地由来の硝酸性窒素による地下水汚染リスク評価システム RealN (Risk evaluation for agricultural leached Nitrogen, 図2, 農業環境技術研究所, 2011a) は, 「点」と「面」を対象とする2つの数値モデルを組み合わせ, 流域内の個々の地点における地下水中硝酸性窒素濃度と汚染リスクを予測するシステムとして開発された. そして, その結果として「面」の出力である河川水中の窒素濃度が予測される. ここで「点」のモデルは, 鉛直一次元の水・窒素動態モデル LEACHM (Hutson, 2003) を日本の畑地に多い黒ボク土への適用などを目指して改良したもので (朝田ら, 2010; 朝田ら, 2011), 国内のさまざまな土壌, 作物の栽培を対象に, 有機物を含む窒素投入に対する作物吸収, 土壌有機物変化量, 窒素溶脱量などを計算する. 「面」のモデル MacT (Mixing areal chemical Transport, 農業環境技術研究所, 2011b) は, 流域を地質や土壌, 土地利用などの GIS データと, 統計資料に基づく農地の分布などで表現し, 「点」の計算結果を入力として, 地下水流動で生じる混合や, 地下水中の脱窒除去による濃度変化を計算する. 流域最下流点となる河川水中の窒素濃度は, 以上の計算の結果として出力される.

これらにより, 流域内の個々の農地での農法の変更が, 周辺地下水のみならず, 河川水質に及ぼす影響を予測可能となった. ここでは, RealN を関東地方の農業流域に適用した例を紹介する.

3) 実流域への適用例

K 水系への流入河川の一つ, H 川は近年水質汚濁が進行している. 同河川流域は面積およそ 46 km^2 で, その約4割が畑地として利用されている. 畑地の多くは, 平坦な洪積台地面を覆う火山灰ローム層および黒ボク土上にある. 同流域は果菜類の産地として知られ, 2000 年世界農

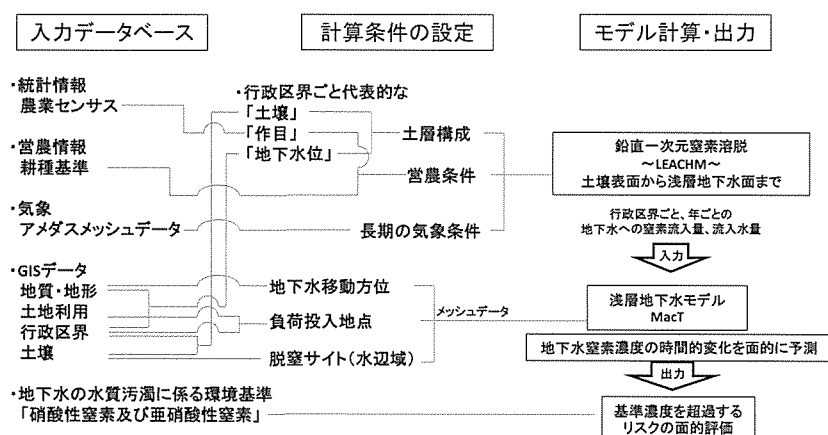


図2 硝酸性窒素による地下水汚染リスク評価システム RealN の構造 (農業環境技術研究所, 2011a)

林業センサス中の農業集落単位で見た場合、流域内の大半の集落で当該果菜の栽培が主体であり、これに類が続く。台地面の地表からの土壌浸透水は、火山灰ローム層と洪積面との境界部に浅層地下水として停滞し、近くの開析谷の壁面から湧出することで河川を涵養している。つまり、台地上の畑地からの土壌浸透水が、浅層の地下水系を通じて河川の汚濁源となっている。このことは逆に、土壌浸透水の窒素濃度の低下が、近年 10 mg-N L^{-1} に達する H 川の窒素濃度を低下させる可能性を示唆している。

そこで、まず、流域内畑地で代表的な作物を施肥基準に従って栽培する条件を検討したところ、畑地直下の地下水中窒素濃度（年間平均値）は、地下水環境基準（ 10 mg-N L^{-1} ）を下回ることではなく（基準値を超える確率、リスク 100 %）、流域最下流点での河川水中窒素濃度も 10 mg-N L^{-1} 程度と予測された。これらの結果は、自治体による地下水測定値や環境省のとりまとめる河川水中窒素濃度にはば一致した。

次に、産地を維持しつつ、施肥量や有機物施用量を削減する種々のシナリオを検討したところ、地力窒素の供給源となる土壌有機物量の維持には、作物残さ還元以上の有機物投入が必要であるが、土壌浸透水中窒素濃度および汚染リスク低下には、有機物を含めた土壌への総窒素投入量を浸透水量に見合う量にまで抑制する必要性が示唆された（朝田ら、2011）。これを実現する管理の一例が、化学肥料の半減と、削減分に相当する窒素量のみを供給する有機物施用への変更であり、地下水汚染リスクを効果的に低減し、同時に河川水窒素濃度を周辺の都市河川程度にまで低下させると予測された。

4) おわりに

以上は試験的な結果であり、現地試験による検証や、モデル改良が今後、なされていく必要がある。それでも、下流に閉鎖性水域を抱える農業流域にとって水質汚濁軽減は喫緊の課題であることから、個々の農地管理の変更が地下水や河川水の水質に及ぼす影響を簡易に予測するこうした手法が役立つ場面は多いと期待される。（板橋 直）

7. 農業経済学的視点から見た家畜ふん尿の循環利用—堆肥と液肥に対する社会技術開発と政策的課題

1) 資源ベースの食料自給率

我が国の食料自給率は、農林水産省によると平成 21 年度のカロリーベースで 40 %、生産額ベースで 70 %である。他方、生産要素の視点から眺めると、土地と水、労働力は国内供給が可能であるが、エネルギーについては、国産化石燃料がほとんどないため、その自給率は 4 %とされている。また、農業生産に不可欠の肥料についても、化学肥料の原料であるりん鉱石と加里鉱石、およびアンモニア生産に使われる天然ガス・原油は全量輸入し、尿素やりん安などの製品や中間製品も相当量輸入している。そのため、我が国固有の資源だけで生産可能な農産物の割合は、消費される全農産物の数%程度ではないだろうか。した

がって、海外肥料原料の安定確保とともに、資源ベースでの食料自給率を向上させるためには、有機性廃棄物、とりわけ畜産ふん尿の循環利用システムの構築が、極めて重要な意味を持つ。

2) 家畜ふん尿利用のための社会技術

畜産農家が経営外でふん尿の循環利用を図るとき、固形物で取り扱いが比較的容易な堆肥は、堆肥センターなどの仲介がなくても耕種農家と相対で移出や販売がされやすい。他方、液肥は、専用の貯留施設や搬出・散布用の特殊車両が必要であり、かつ、肥効の即効性が高いために化学肥料の代替など肥培管理の徹底がより重要になるため、畜産農家と耕種農家との調整を行う液肥センターの機能が不可欠となる。

特に、液肥を使う耕種農家の確保には、化学肥料よりも安価な価格設定、液肥成分の安定化と肥料登録、肥培管理の指導、圃場散布や流し込みサービスの充実が条件となる。また、十分な発酵による臭いの除去とともに、散布地域の住民への循環教育や広報活動は、液肥が社会的に受け入れられる条件となる。さらに、液肥は化学肥料に代替するため、地元農協は化学肥料の販売減収を液肥の生産・販売サービスの増収で埋め合わせるとともに、大量に貯留される液肥の地域全体への搬出・散布計画を担うなど、その協力体制の構築が必要となる。加えて、液肥を使った農産物を特別栽培農産物などとしてより有利な値段で販売する戦略もあった方がよい。したがって、堆肥でもそうであるが、液肥では、畜産廃棄物の個別処理技術を超えた、社会技術の策定がより重要と言える。液肥利用の先進事例としては、JA 全農山形「庄内ファームリサイクルセンター」、生ゴミも含む「山鹿市バイオマスセンター」、人間のし尿を利用した「築上町有機液肥製造施設」などが挙げられる。

ただし、このような成功事例は多くはなく、家畜ふん尿などを原料としたメタン発酵施設から排出される消化液の利用がうまくいかず、消化液を処理せざる得ない事例は、我が国でも散見される。

3) 有機性廃棄物循環のための窒素税の可能性

有機性廃棄物の循環利用が進まない要因の一つとして、コスト高が挙げられる。特に、輸入される食料や飼料は、その消費後の廃棄物処理費用を、我が国の消費者や畜産農家が全額負担している。他方、海外の食料や飼料の生産者は、最終的に処理費用が発生するにも拘わらず、処理費用を一切負担していない。それゆえ、我が国の消費者や畜産農家が負担する処理費用のある割合を、海外の生産者が負担することは理にかなうと言えよう。

このような問題への理念的アプローチとして、汚染者負担原則あるいは拡大生産者責任がある。汚染者負担原則とは、汚染物質の排出源者に発生した損害の費用を、第一に支払わせる、というものである。拡大生産者責任とは、生産者が製品の生産・使用段階だけでなく、廃棄・リサイクル段階まで責任を負うという考え方である。これらの考え方に立つならば、海外からの食料や食品加工原料、飼料な

どに由来した窒素・リンなどによる地下水汚染や富栄養化問題、処理費用の高額負担に対処する方策として、輸入食料・原材料中に含まれる汚染物質の処理費用に応じて、妥当な課徴金（例えば窒素税）を輸入時点で課してはどうだろうか（矢部，2007）。そして、この課徴金収入を原資とし、下水道処理施設への補助や下水道料金の減額により消費者への負担軽減、あるいは、有機性廃棄物の処理や循環利用を行う畜産農家への処理費用の支援を行うならば、国際的な資源利用の歪みを是正しつつ、我が国における一層の環境浄化や有機性廃棄物循環が可能となる。

ただし、輸入飼料の価格上昇は、輸入飼料に多くを依存した畜産農家の経営を圧迫する。そこで、畜産農家の賛同を得るためにも、窒素などに対して輸入課徴金を課すだけでなく、安価な国内飼料生産の供給や循環利用と組み合わせられた、総合的な政策が必要なことは言うまでもない。

（矢部光保）

文 献

- 朝田 景・江口定夫・浦川梨恵子・青木和博・板橋 直・中村 乾・加藤英孝 2010. 農業由来窒素の負荷軽減シナリオによる地下水汚染リスクの評価. 土肥要旨集, 57, 311.
- 朝田 景・江口定夫・浦川梨恵子・青木和博・板橋 直・中村 乾・加藤英孝 2011. 農業集水域を対象とした窒素負荷軽減シナリオによる地下水汚染リスク評価. 土肥要旨集, 57, 6.
- Cooper, P., 2005. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Science and Technology*, 51, 81-90.
- 古江広治・上沢正志 2001. 反応速度論的手法での土壌および有機質資材の有機態窒素の無機化特性値データ集—アンケート調査のとりまとめ—. 農研センター資料, 43, 1-50.
- Hayakawa, A., Woli, K. P., Shimizu, M., Nomaru, K., Kuramochi, K., and Hatano, R. 2009. Nitrogen budget and relationships with riverine nitrogen exports from a dairy cattle farming catchment in eastern Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 800-819.
- Hutson, J. L. 2003. LEACHM Ver. 4.1. Res. Ser. No. R03-1, Dep. of Crop and Soil Sciences, Cornell Univ., Ithaca, NY.
- 石岡 徹・棚橋寿彦・小柳 渉・村上圭一・平柳恵子・柴田正貴・加藤直人 2009. 新たな窒素肥効分析法に基づいた家畜ふん堆肥の施用支援ツール. 関東東海北陸農業研究成果情報, <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2008/narc08-05.html>
- 環境省水・大気環境局 2010. 平成21年度地下水質測定結果. <http://www.env.go.jp/water/report/h22-01/full.pdf>
- 加藤邦彦・井上 京・家次秀浩・木場稔信・富田邦彦 2010. 酪農・畜産排水処理のための人工湿地システム. 農家の友, 5月号, 104-106.
- 前田守弘 2007. 農業生産における有機性資源に関連した窒素負荷の現状と今後の課題. 水環境学会誌, 30, 337-342.
- 前田守弘・浅野裕一・兵藤不二夫・中島泰弘・藤原 拓・永禮英明・赤尾聡史 2011. 笠岡湾干拓地における水質汚濁の現状と安定同位体自然存在比を用いた汚濁機構解析. 土木学会論文集 G (環境), 48, 213-221.
- Maeda, M., Ishido, R., Fujiwara, T., Nagare, H., and Akao, S. 2011. Reduction of Nitrate Leaching from Upland Soil by placing Coffee Waste Biochar below the Root Zone, 8th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Izmir, Turkey, 22-24 June 2011.
- 中村真人 2011. メタン発酵消化液の液肥利用の環境影響評価. 農研機構発—農業新技術シリーズ第3巻, 184-187
- 中村真人・藤川智紀・柚山義人・山岡 賢・折立文子 2012. メタン発酵消化液の施用方法がアンモニア揮散および亜酸化窒素の発生に及ぼす影響. 土肥誌 (印刷中).
- 農業環境技術研究所 2011a. 農地由来の硝酸性窒素による地下水汚染リスク評価システム RealN の開発. http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result27/result27_66.html.
- 農業環境技術研究所 2011b. 浅層地下水を通じた環境負荷物質の混合・減衰と濃度分布を面的に予測するための GIS モデル MacT の開発. http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result27/result27_64.html.
- 農林水産省 2007. 家畜排せつ物の利用の促進を図るための基本方針. http://www.maff.go.jp/j/press/2007/pdf/20070330press_6c.pdf
- 小柳 渉 2009. 家畜ふん堆肥の特性の実用的評価方法の開発とその活用. 土肥誌, 80, 454-457.
- 田淵俊雄・吉野邦彦・志村もと子・黒田清一郎・石川雅也・山路永司 1995. 農林地からの流出水の硝酸態窒素の濃度と土地利用との関係. 農土論集, 178, 529-535
- 竹内重吉 2010. 大規模干拓地における涵養保全型畜産経営, p. 7-23. 農林統計出版, 東京.
- 上蘭一郎・森泉美穂子・加藤直人 2010a. 日本の畑土壌に対する80℃16時間水抽出法による可給態窒素簡易評価法の適用. 土肥誌, 81, 39-43.
- 上蘭一郎・加藤直人・森泉美穂子 2010b. 80℃16時間水抽出液のCOD簡易測定による畑土壌可給態窒素含量の迅速評価. 土肥誌, 81, 252-255.
- 矢部光保 2007. 輸入食料に由来する汚染物質削減のための経済的手段導入に関する研究. 課題番号 (17658100) 平成17年度～平成18年度科学研究費補助金 (萌芽研究) 研究成果報告書.
- 横山理英・林 聡・中西 真・高田 潤 2008. Caを導入した木質炭化物による硝酸性窒素吸着特性. 水環境学会誌, 31, 47-52.
- Zhao, B., Maeda, M., Zhang, J., Zhu, A., and Ozaki, Y. 2006. Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in Andisols after a different, 6-year fertilization management. *Environmental Science and Pollution Research*, 13, 90-97.