

畜産環境研究の最近の傾向

(独) 農業・生物系特定産業技術研究機構 畜産草地研究所
羽賀 清典

はじめに

平成16年11月1日の家畜排せつ物法の完全施行を契機に、畜産環境問題を取り巻く状況は激しく変化した。その中で、多くの研究論文が出され、また普及に向けての成書も多く刊行され、厳しい状況を技術面から支えている。ここでは、2000年～最近まで約5年間の畜産草地研究所畜産環境部の研究者が関与した論文をレビューし、近年の研究の傾向について探してみたい。

1. 排泄量

ふん尿の出ない家畜ならば、ふん尿問題もない。そうはいかないものの、ふん尿排泄量の低減は重要課題である。近年は、ふん尿中の汚濁成分である窒素やリンなどの排泄量に関する研究が多い。窒素 [広岡ら, 2001] やリン [小島ら, 2003] の排泄量については予測式が作られ、飼料摂取量から排泄量を容易に推算できる。また、澱粉のような易発酵性炭水化物を飼料に添加することによって窒素排泄量を低減させることができるので [大谷ら, 2001] 飼料給与の方法の改善が排泄量の低減に重要である。カリウムについては、牧草が贅沢吸収する元素であるために制御が難しいが、図1に示すように、低カリウムの飼料設計を行えば尿中のカリウム排泄量を半分以下に低減することが

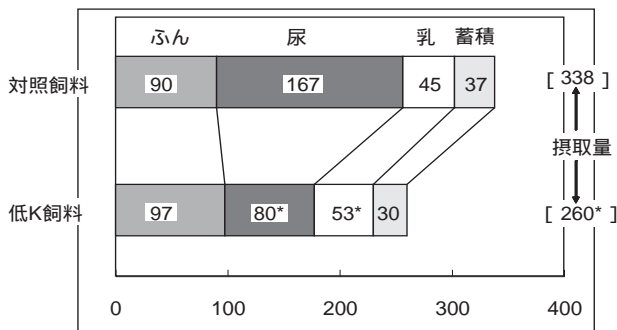


図1 対照及び低カリウム飼料給与時のカリウム出納 (単位: g/日) (大谷・田鎖)

できる [大谷ら, 2005]

2. 堆肥化

堆肥化の通気装置には、圧送式と吸引式があり、古くはアメリカ農務省の研究所とラトガース大学の論争がよく知られているが、現在では圧送式が圧倒的に多い。圧送式の問題点は、堆肥表面からのアンモニアの揮散が多いことである。そこで、通気を吸引式とし、アンモニアの揮散を最小限にしようとする実験が行われた (図2)。吸引式でも圧送式とほぼ同様の発酵が可能であり、堆肥の品質も同等であるが、吸引式の表面からのアンモニア揮散はごくわずかであった [阿部ら, 2003a] (図3)。ただし、吸引ドレインの中には高濃度のアンモニアが溶け込んでいるので、それを回

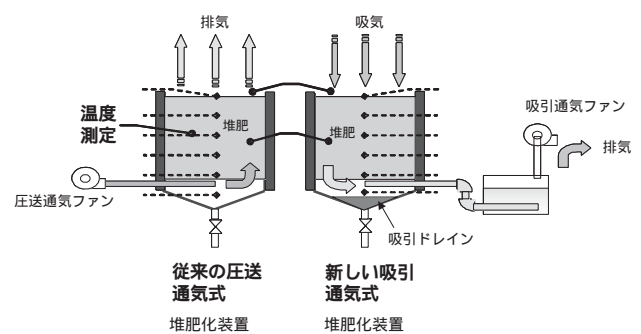


図2 圧送および吸引通気式堆肥化装置 (阿部ら)

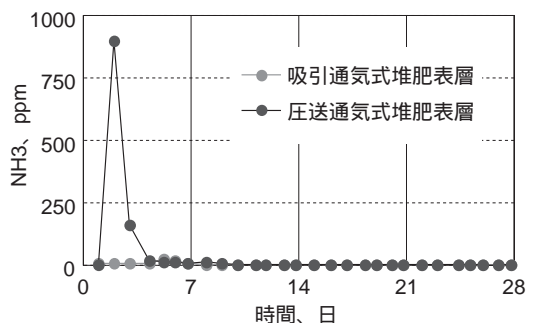


図3 吸引式と圧送式における堆肥表層からのアンモニアの揮散の比較 (阿部ら)

	最高温度 ()	55 到達時間 (h)	55 継続時間 (h)
無添加	65.9 ± 0.9a	38.7 ± 7.6a	55.3 ± 4.6a
6%添加	68.1 ± 1.7a	32.0 ± 4.0a,b	72.7 ± 8.3a,b
12%添加	68.6 ± 2.6a	26.0 ± 2.0b	89.3 ± 22.1b

表1 オカラ添加が牛ふん堆肥の温度上昇に及ぼす影響(花島ら)

収することができる[阿部ら, 2003b] また、リン酸を添加したモミガラによって効率よくアンモニアを吸着・回収することができた[福重ら, 2004]

衛生的な堆肥を作るためには、発酵温度を高めることが有効である。牛ふんは易分解性有機物含量が低いために、発酵温度が上がりにくい。そこで、牛ふんに豆腐カスを11%添加すると、高温域に上がるのに要する時間を短縮でき、55以上の持続時間を長くすることができた(表1)[Hanajima et al, 2001]

戻し堆肥を敷料として利用する場合、大腸菌などの衛生問題も重要である。発酵段階の異なる堆肥化物に大腸菌を接種し生育を調べたところ、高温期(7日目)直後の堆肥においてもっとも生育が盛んだが、13日目以降では熟した堆肥ととくに差はなかった。したがって、発酵段階初期の戻し堆肥を敷料に利用するときは注意が必要である[Hanajima et al, 2004]

3. 悪臭

豚舎において、ふんと尿を分離し、排泄後すぐに搬出すれば、アンモニアの発生を抑制することができる。図3に示すように、24時間後のヘッドスペースガスのアンモニア濃度は、ふんのみで1.1ppmに対し、尿等量混合で202.5ppm、尿2倍量混合で480ppmと高くなり、アンモニアとして揮散した窒素のほとんどは尿由来であった[坂井ら, 2003] 尿の混合割合が高いほど、ふん尿の豚舎内における放置時間が長くなるほどアンモニアの発生が多くなる。

アンモニアを低減する微生物を堆肥からスクリーニングした[黒田ら, 2002] スクリーニングのコンセプトは、高温細菌で、好気性で、アンモニウム態窒素に高い耐性を持ち、アンモニアを同化する能力の高い微生物の4点である。分離された菌は、

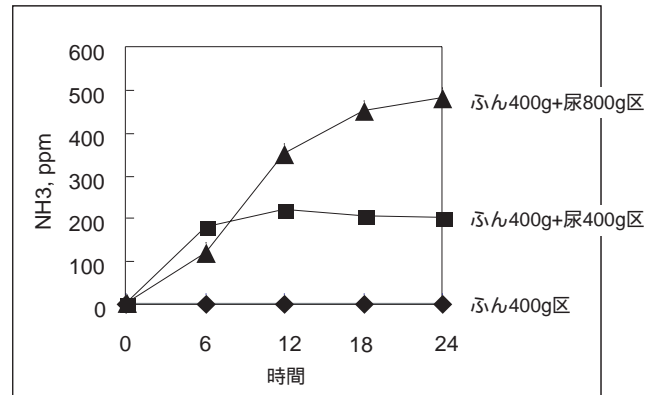


図4 ふん尿混合の有無がアンモニア発生に及ぼす影響(坂井ら)

*Bacillus thermophaericus*と*B. pallidus*に近縁の高温性の新規な*Bacillus*属細菌であり、TAT105と命名した。堆肥化過程にTAT105を添加したところ、アンモニアの揮散を約40%低減させることができた(図4)

4. ガス揮散(ガスエミッション)

堆肥化過程のガス揮散について、通気式堆肥化装置[Osada et al, 2000]や堆積式チャンバー[Osada et al, 2001](写真1)による実験装置の開発が行われ、再現性の良いデータを連続的に得ることができるようになった。堆積式堆肥化の場合、堆積物の層位(表層、中層、下層)によってガス組成が異なり、アンモニアの揮散と表層のアンモニア及びアンモニウム塩濃度、亜酸化窒素の揮散と表層の亜酸化窒素濃度に高い相関があった[Fukumoto et al, 2003b] また、堆積物の大きさによって内部の嫌気性部分の大きさが異なるため、メタンや亜酸化窒素の揮散パターンに顕著な違いがみられた[Fukumoto et al, 2003a] このように、ガ



写真1 チャンバーを用いた堆積式堆肥からの環境負荷ガス揮散測定システム(長田ら)

表2 畜舎内のアンモニア、メタン、および亜酸化窒素の濃度（長田ら）
（2000～2003年、春夏秋冬X単位：ppm）

	アンモニア	メタン	亜酸化窒素
搾乳牛舎（9棟）	0.8～1.6	6.0～26.8	0.331～0.375
肥育牛舎（4棟）	1.0～1.5	6.3～16.2	0.395～0.650
豚舎（8棟）	1.4～2.9	3.6～4.4	0.311～0.365
採卵鶏舎（5棟）	0.9～2.0	2.1～2.6	0.306～0.311

ス揮散のパターンは、環境条件や処理条件などによって繊細かつダイナミックに変化し、その全容を把握するには研究の深化が必要とされる。

地球環境を視野に入れた場合、畜産農家からのガス揮散を把握する必要がある、データ蓄積が望まれる分野である。搾乳牛舎9棟、肥育牛舎4棟、豚舎8棟、採卵鶏舎5棟について3年間にわたって年4回季節ごと調査結果がとりまとめられ、各種畜舎のアンモニア、メタン、亜酸化窒素濃度が提示されている〔長田ら，2004〕（表2）。

畜産全体からの温室効果ガスの発生と制御については、長年にわたる調査結果を踏まえ成書がまとめられている〔畜産技術協会，2002〕。地球温暖化や温室効果ガスの概説、家畜からのメタン、家畜排泄物からのメタンと亜酸化窒素、草地からのメタンと亜酸化窒素、用語解説などの内容となっている。

5. 汚水処理

(1) 嫌気・好気処理および硫黄脱窒処理法

畜舎汚水の中心的な処理法は活性汚泥法である。しかし、経費が嵩むことと、維持管理が素人には難しいことが課題である。そこで、省エネルギー的で維持管理費が安い上向流嫌気性汚泥床法（Upflow Anaerobic

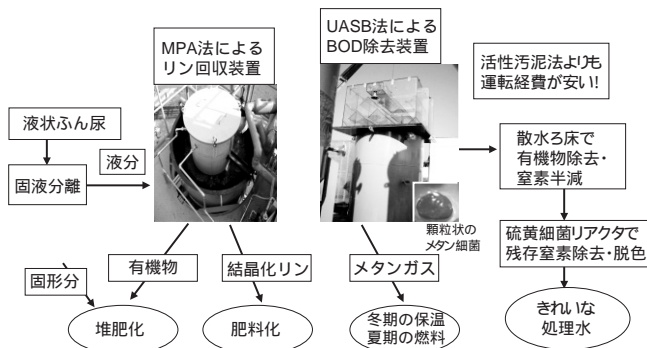


図6 MAP法、UASB法、散水ろ床法、硫黄脱窒法を組み合わせた豚舎汚水処理施設（田中、鈴木ら）

Sludge Blanket 法、UASB法）と散水ろ床法との組み合わせによる方法が研究された。パイロットプラントによる実験結果をもとに、低コストで効率が良く、性能が安定した汚水浄化技術として実証プラントを構築・運転し、設計・維持管理の暫定指針を刊行した〔田中ら，2004〕（図6）。嫌気性処理では窒素が除去できないため、脱窒処理が必須となる。従来のメタノールなどの代わりに、維持管理が容易な硫黄を利用する方法が研究され、窒素除去と脱色に効果を上げた〔陳ら，2001〕。

(2) メタン脱窒法

脱窒の炭素源としてUASB槽で生成したメタンを利用することができる〔Tanaka, 2003〕。ただし、メタンのみでは脱窒が進行せず、メタンに加えて酸素が必要なことが明らかとなった（図7）。高率に脱窒を起こさせるためのメタンと酸素の比率は1以上であり、そのときメタンの酸化活性値が最大となった〔Waki et al, 2004〕。

メタンで脱窒を行うときには酸素が必要であるため、脱窒装置では排気が問題となる。メタンと酸素が混合しているため、燃料として使用できないし、混合率によって爆発の危険性があり、大気中に放出されると温室効果を起こす。そこで、気相部分を完全に仕切り、液相部分を部分的に仕切った新しい脱窒反応槽を考案した〔Waki et al, 2005〕。この反応槽にメタンと酸素を別々に通気することによって、メタン側の排気は燃料に再利用できるし、酸素側の排気中のメタン濃度を低く抑えることができた。

(3) MAP法（MAP：リン酸マグネシウムアンモニウム）

豚舎汚水はリン含有量が高く、リン酸イオン、アンモニウムイオン、マグネシウムイオンのモル比が

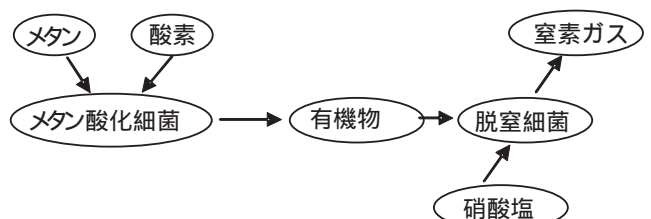


図7 メタン脱窒の原理（和木ら）

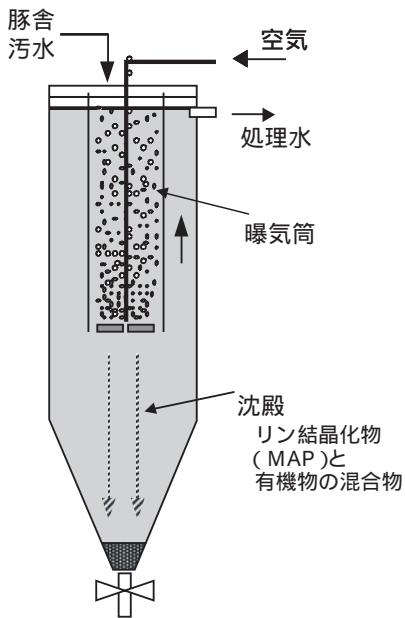


図8 MAP法によるリン回収装置(鈴木ら)

1.0 : 7.5 : 0.9であることから [Suzuki et al, 2001a] pHを調整することによって、汚水中のリンをMAPの結晶として回収し、汚水中も浄化することができる。ベトナムのメコンデルタ地帯にある豚ふん尿のメタン発酵の消化液について調査したところ、やはりMAPとしての回収が可能である

ことが示された [Suzuki et al, 2001b] pHの調整には水酸化ナトリウムなどが用いられるが、強アルカリ薬品の取扱性や、コスト問題からより簡易な技術が求められる。そこで、豚舎汚水を曝気して二酸化炭素を追い出してpHを約8まで上昇させ、MAPを回収することができた (図8) [Suzuki et al, 2002]

(4) イオン交換膜法

活性汚泥処理水中の窒素やリンのほとんどは、 NO_3^- や PO_4^{3-} などの陰イオンである。したがって、処理水の高度処理には陰イオンを除去する技術として、陰イオン交換膜を利用することが考えられる。従来のイオン交換膜は脆弱で高価なことが問題点であるので、ここでは、プロセス用の頑丈な管状イオン交換膜を用いた実験装置を製作し、200日間、約99%の除去率を達成できた [Fukumoto et al, 2004] また、色度の除去も58%可能であった。

6 . 環境影響評価

近年における家畜排泄物中の窒素量の変化と、国内休耕地への窒素施用量と、コストパフォーマンスについて試算した結果、大麦、小麦、米、大豆の4種類の穀物のうち、大麦を作付けするとコストパフォーマンス

スガもっとも良かった [Kaku et al, 2004]

肉牛の肥育システムをライフサイクルアセスメント (LCA) の手法で評価した [Ogino et al, 2004] 消化管からのメタンの揮散が地球温暖化 (CO_2 換算2,851kg相当) にもっとも高く寄与し、牛ふんからのアンモニア揮散が酸性化 (SO_4 換算35.1kg相当) と富栄養化 (PO_4 換算6.16kg相当) の主要因となっており、飼料生産はすべてに寄与している。したがって、飼養期間を短縮することは、環境影響を低減することにつながる。

現行の濃厚飼料供給システムと新しいシステムを、LCAの手法で環境影響評価した [Kaku et al, 2005] 休耕地に大麦を植えるシステムの試算と、排出権取引の可能性について言及している。

7 . これからのふん尿処理研究

これからのふん尿処理研究の主な項目を表3に整理した。

研究分野	内 容
1 . 排泄量	排泄量や成分量低減、水分低減、ふん尿分離
2 . 堆肥化	悪臭低減、利用面 (搬送・散布、品質)
3 . 悪 臭	良いふん尿処理、脱臭装置
4 . ガス揮散	実態把握、処理優先
5 . 汚水処理	活性汚泥法 + 簡易化、新規な方法のレベル向上
6 . 影響評価	各種成分の挙動、環境の中での畜産の位置づけ

(1) 排泄量

3Rの原則の第1にReductionとあるように、まず排泄量の低減そしてふん尿の中に含まれる窒素やリンなどの汚染物質の低減は重要である。家畜栄養学は非常に進歩しており、低減の実現性は高い。また、ふんの水分低減や尿量の低減を実現することも、ふん尿処理を容易にする重要な視点である。そして、家畜の生産性、環境、コストなど総合的なバランスを考慮しなければならない。さらに、畜舎構造や飼養形態の改善によるふん尿分離とふんの水分抑制 (低減) が重要である。

(2) 堆肥化

堆肥を作る技術はかなり進歩し、技術普及も進んできた。堆肥化技術がわからないなどという点、家畜ふ

ん尿業界では恥をかくことになるかもしれない。残された主要な問題点は、悪臭低減と利用面（搬送・散布、品質など）の諸問題である〔羽賀，2004〕。堆肥化技術はふん尿を積極的に分解して減量する技術であるから、ガス揮散の多い技術である。臭気を少なくすることはできても、無臭にすることは難しい。また、堆肥の利用面の課題も大きい。耕種農家の希望を聞くと、堆肥を搬送し散布する労力が欲しいことや、品質や成分の安定した臭気の少ない堆肥が好まれる。

（３）悪臭

悪臭を低減するには、ふん尿処理を良好に行うことが何よりも必要である。堆肥化や汚水の浄化処理がうまくいっている農家では臭気は少ない。一方、処理が疎かで、放置に近いような悪い状態だと臭気も強く、ハエも多い。臭気対策には、まずはふん尿処理技術の一層の向上が望まれる。さらに、周辺の状況を勘案し、規制が厳しいときには脱臭装置が必要となるであろう。脱臭装置の低コスト化は重要な課題である。

（４）ガス揮散

ガス揮散については、まだデータ不足のところもあり、実態把握が急務である。現場の環境条件は複雑であり、家畜やふん尿の置かれた条件も多岐にわたる。そのため、環境条件をもとに再現性良く揮散量を推定するには、まだデータ不足である。また、処理の良否と環境負荷ガス揮散量がトレードオフの場合もあるので、気をつけなければならない。例えば、高速通気型堆肥化で一生懸命に効率よく堆肥化すると、アンモニアの揮散が多い。

（５）汚水処理

放流が前提ならば活性汚泥法が主流となる。活性汚泥法は、素人には難しいと思われることが多い。あとは、活性汚泥法をいかに簡易に使いこなすかが課題であり、様々な工夫が成果をあげつつある。嫌気と好気処理方法（散水ろ床法）の組み合わせなど、新規な汚水処理方法もいくつか開発されつつある。さらに研究を進め、畜産に普及するよう、技術レベルの向上を図る必要がある。

（６）環境影響評価

影響評価については、LCAなど各種解析方法が進歩してきた。さらに新規の解析方法を導入し、環境の中での畜産の位置づけを多面的に解析していく必要がある。今後、解析結果の畜産現場へのフィードバックが望まれるところである。これからの畜産が環境に共存し、かつ環境の質を向上させるには、どのようにすればよいのか？ そのような答えを考えるために、環境影響評価は有効な武器となるであろう。

家畜ふん尿中に含まれる各種成分の挙動、環境への影響、安全性などをモニターすることが必要になる。肥料成分や重金属についてはかなり研究が進んでいるが、動物医薬品類などの化学物質の挙動についてはまだ未解明なことが多い。

おわりに

20年くらい前の話になるが、大先輩のAさんに言われた。「羽賀君、ふん尿の研究はあまり進んでないね。10年前と同じ堆肥化と汚水処理だね。」まだ30代の私にとっては先輩の言葉は重かった。取りあえず「頑張ります。」とは言ってみた。しかし、ここ5年くらいの研究をレビューしてみると、着実な進歩が見られる。堆肥化の発酵条件の科学的裏付け、各種堆肥化装置やマニュアルの充実、堆肥の品質評価、微生物資材の評価、汚水処理の簡易化とコスト低減、影響評価手法の客観化など価値ある技術要素が多い。しかも、本稿をはじめいくつかの総説を読むと、前面に出たそれら技術要素は膨大な科学的データと科学論文に裏付けられていることがわかる。加えて、公立試験場や民間企業の功績によって、実用化に向けて、農家の人に使いやすい技術が多く世に出ている。それには専門性に長けたスタッフの充実が大きく寄与している。各自治体、団体のスタッフ、畜産環境アドバイザーなどの努力の結晶として尊重したいと思う。

本稿は、第4回日本畜産環境学会（平成17年7月26日・宮城県）の特別講演の原稿をもとにして、本誌用に修正・加筆したものである。なお、引用文献名は省略したが、知りたい方は掲載誌の日本畜産環境学会誌第4号を参照していただきたい。