

資源循環型食料生産技術は温室効果ガス発生抑制にどう繋がるか？

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター¹⁾

新潟県農業総合研究所²⁾

加藤 直人¹⁾、南雲 芳文²⁾

1. はじめに

2008年に高騰した肥料価格は、最近になって落ち着きを見せているが、世界の人口増加に伴う食料需要の増大などにより、今後も肥料需要は増加すると考えられる。我が国で使用されている化学肥料の多くは、石油、天然ガス、リン・カリ鉱石などの海外資源に依存しており、一方、こうした資源の産出国での資源保護政策も目立つようになってきた。つまり、レアアースと同様、化学肥料は戦略物質になりつつある。そこで、将来にわたって、持続的な作物生産をおこなうためには、肥料原料の安定確保とともに、国内有機性資源の活用による資源循環型農業の推進が重要となる。

国内で年間9千万トン弱発生する家畜排せつ物は、堆肥化後、主に土壌への有機物補給や物理性改善を目的とした土作り資材として作物生産現場で利用されてきた。しかし、近年、雨よけで堆肥が製造されるようになり、また副資材の高騰・使用量の減少によって、堆肥中の肥料成分含量は増加しており、肥料的効果が高まっている。国内で生産されている家畜ふん堆肥の肥料成分含量の平均値に目安の肥効率(化学肥料中成分の肥効に対する堆肥中成分が示す肥効の百分率)を乗じて試算した有効成分量は、化学肥料内需に対して、窒素で約1/4、リン酸で1/3、加里では2/3に相当する。このため、これらの有効成分を効率的に利用できれば、化学肥料使用量を大幅に削減でき、肥料自給率を向上させることが可能となる。また、化学肥料の製造過程で発生する温室効果ガスの削減にも繋がると期待される。

2. 家畜ふん堆肥の肥料的利用を推進するためには

家畜ふん堆肥を作物の養分供給源として有効に利用するためには、いくつか解決すべき課題がある(加藤ら, 2012)。第一に、堆肥ごとに肥料成分含量やその肥効率は大きく異なるため、耕種農家にとっては肥効が分かりにくい。また、有効な窒素に比べてリン酸や加里を多く含むので、窒素肥効を主体に考えた施用量ではリン酸や加里が過剰施用になりやすい。また従来の土壌物理性改善を目的とした利用においては、農閑期に施用されることが多く、栽培開始までに肥料成分が溶脱等により失われてしまう可能性がある。さらに、散布労力や均一施用の難しさに加え、偏在する堆肥の広域流通を促す必要もある。

そこで、本プロジェクト研究の「循環型農業のための有機資材とその利用技術の開発(B1系)」では、①窒素肥効を増強し、②有効な肥料成分を明示し、③堆肥形状を改善して、耕種農家が保有する施肥機での施用を可能とすることを目標としている。これにより、施用量と施用時期の適正化や散布労力、均一施用などの課題を解決できる。また、施肥機で施用することにより、堆肥は土壌改良材ではなく、肥料としても利用可能であることを耕種

農家に実感して頂けるのではないかと期待している。

本稿では、こうした研究開発のうち、高窒素鶏ふん堆肥の利用による水稻の化学肥料全量代替栽培と水田からのメタン発生に及ぼす影響について紹介する。

3. 高窒素鶏ふん堆肥の水田利用

1) 水稻の化学肥料全量代替栽培

鶏ふん堆肥を用いて良食味米であるコシヒカリを栽培する事例はあるが広く普及するまでには至っていない。これは前述したように肥効の見積もり（窒素代替量、分解速度）や散布方法が農家段階において容易ではないことが原因の一つと考えられる。また、一般に鶏ふん堆肥はリン酸含量が高いので、連用するとリン酸が土壌に過剰蓄積しやすいという問題もある。

そこで、通常の鶏ふん堆肥よりも窒素肥効の高い堆肥（以下、高窒素鶏ふん堆肥と略記）を用いて、コシヒカリの化学肥料全量代替栽培試験を新潟県で行った。この高窒素鶏ふん堆肥は、ふん乾燥装置によるふん含水率の早期低下、ふんの早期搬出、発酵温度が早期に70℃以上となる密閉縦型発酵装置によって、ウリカーゼによるふん中の尿酸分解を抑制し、窒素含有率を高めたものである。全窒素含量は6%弱、施用当作期間中に有効な窒素含量は3~4%、であり、リン酸(約3%)、加里(約2%)よりも多いのが特徴である。なお、窒素肥効は既報の研究結果に基づいて評価した（村上ら 2007、実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会 2010）。

この高窒素鶏ふん堆肥をペレット状に成形したものを使用し、基肥と追肥の化学肥料を全量代替したコシヒカリ栽培を3年間継続した。なお、リン酸、加里の施肥量は新潟県栽培指針と比較すると少ないが、他の資材での追加は行わなかった。その結果、出穂期以降の葉色が淡くなり、統計的に有意ではないが玄米収量が少なくなった年度もあるが、概ね慣行の化学肥料栽培と大差ない収量、品質が確保できた。今後、高窒素鶏ふん堆肥の施用量や施用時期の調整によって、より安定した生産が可能になると考えている。

さらに、この高窒素鶏ふん堆肥は、窒素、リン酸、加里の養分バランスがコシヒカリ栽培に合致していることが明らかになりつつある。全国の農耕地土壌の変化を総合的に把握するために1979年から開始された土壌環境基礎調査（定点調査）の結果によると、水田土壌において交換性カリウム、可給態リン酸の値は増加傾向にある。そこで、省資源の観点から、リン酸、加里の施用量を収穫に伴う圃場からの持ち出し相当量とする「補給型施肥」が検討されている。本試験において、稲わらは全量鋤込み、粃を持ち出すことを前提とし、穂の窒素、リン酸、加里量を測定した結果、これらは高窒素鶏ふん堆肥の施用による投入量とほぼ等しいことがわかった。一方、開放攪拌発酵装置などで製造された一般的な窒素含量の鶏ふん堆肥で化学肥料全量代替栽培を行うと、リン酸や加里がかなり過剰に投入されることになる。今後、継続的な検討は必要であるが、高窒素鶏ふん堆肥による水稻での補給型施肥は実現可能と思われる。

2) 水田からのメタン発生量

有機物の水田への多量投与はメタンガス発生増大につながる可能性が高く（八木, 1994）、有機物の組成によりメタン発生量は異なる可能性があることが報告されている（Watanabe *et*

al., 1993)。また、堆肥に含まれる有効な窒素を水稻作で活用するためには、硝化・脱窒による損失を防ぐ必要があり、このため堆肥施用から湛水までの期間を短くすることが肝要である。しかし、このような施用法により、酸化土壌条件下での施用有機物の分解が十分に進行せず、湛水後のメタンガス発生リスクは増大すると考えられる。

以上のことから、水稻作において堆肥を肥料代替資材として利用する際には、個別の堆肥ごとに一定の条件下でのメタン発生量（以下、メタン発生ポテンシャルという）を把握し、環境保全的な利用法を構築する必要がある。そこで、牛ふん堆肥に比べて肥料成分含量が高い豚ふん堆肥および鶏ふん堆肥を対象とし、比較的広く普及している開放攪拌発酵方式（攪拌することにより空気が供給され、有機物の分解が促進される）と近年導入が増加してきている密閉縦型発酵方式により製造された堆肥について、メタン発生ポテンシャルと堆肥中の易分解性有機物量との関係を室内実験及び前述の圃場栽培試験で検討した。なお、堆肥中の易分解性有機物量の指標として、酸性デタージェント可溶有機物（以下、AD 可溶有機物と略記）を用いた。AD 可溶有機物は、小柳ら（2007）の方法に従い、堆肥を臭化セチルトリメチルアンモニウムの硫酸酸性溶液で1時間煮沸分解して測定した。

① 試験管培養試験

検討した鶏ふん堆肥（密閉縦型発酵1点、開放攪拌発酵1点）、豚ふん堆肥（密閉縦型発酵2点、開放攪拌発酵1点）を表1に示した。「トリA」は、1）で述べたコシヒカリ栽培試験で用いた堆肥であり、単位重量当たりのAD可溶有機物が多い。

表1. 使用した鶏ふん堆肥，豚ふん堆肥

番号	資材名	生産地	蓄種	製造方法	堆肥副資材	T-N (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	AD可溶 有機物 (g kg ⁻¹)
1	トリA	三重県	採卵鶏	密閉縦型発酵	なし	54	327	501
2	トリB	三重県	採卵鶏	開放攪拌発酵	なし	29	291	373
3	ブタA	三重県	豚	密閉縦型発酵	なし	42	386	397
4	ブタB	岐阜県	豚	密閉縦型発酵	なし	42	292	260
5	ブタC	山形県	豚	開放攪拌発酵	粃殻	16	289	93

成分量は乾物あたりで表示

試験管培養試験は土壌からのメタン生成活性を測定した Furukawa ら（2008）の方法に準じた。すなわち、水田土壌乾土 5g 相当分を詰めた加圧培養試験管に 1mm 程度に粉碎した堆肥サンプルをそれぞれ現物 100mg、200mg 加え、脱気した蒸留水 7mL を加えた。密栓後、気相部分を高純度窒素ガスで置換し、激しく攪拌後、4 週間 30℃ の定温器内で培養した。この試験管の気相を 1 週間毎にサンプリングし、メタンガス濃度を測定した。

4 週間までの培養結果を図 1 に示した。メタン発生量は 3 週目までは各堆肥施用区で増加したが、4 週目になると AD 可溶有機物を多く投入した区においては増加の停滞もしくは減少が認められた。この結果を踏まえ、3 週目までのメタン発生量と土壌に投入した全炭素量及び AD 可溶有機物の関係を図 2 に示した。これによると投入した全炭素量及び AD 可溶有機物量とメタン発生量の間にはいずれも有意な正の相関が認められたが、全炭素量との相関 ($r=0.603$) に比べ AD 可溶有機物との相関 ($r=0.960$) は極めて高かった。

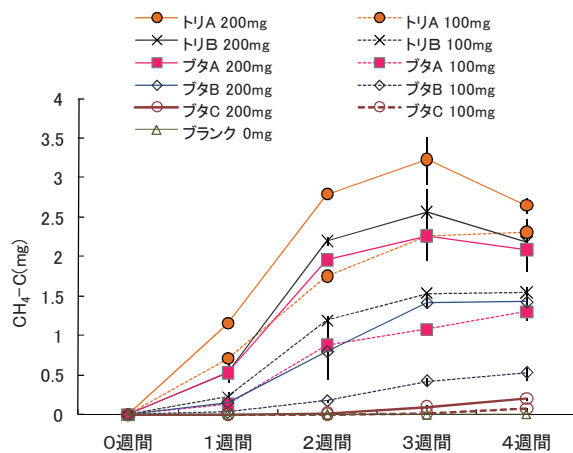


図 1. 試験管培養法でのメタン発生

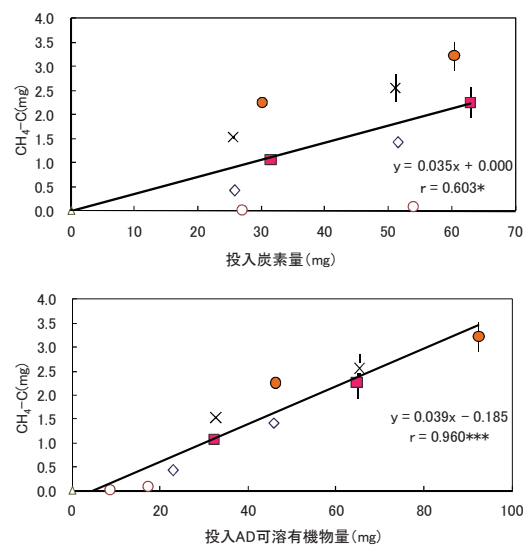


図 2. 全炭素, AD 可溶有機物投入量とメタン発生の関係

② 圃場におけるメタン発生量の測定

表 1 に示した鶏ふん堆肥サンプル 2 点 (トリ A、トリ B) を用いて、水稻 (コシヒカリ B L) を栽培した。鶏ふん堆肥の窒素肥効を村上ら (2007, 2009) の方法により評価し、有効窒素の施用量が慣行化学肥料区の窒素施用量 (6g m^{-2}) と同じになるように、堆肥を基肥と穂肥に施用した。堆肥施用に伴う AD 可溶有機物投入量は、トリ A 施用区で 69g m^{-2} であったのに対し、トリ B 施用区では 219g m^{-2} と 3.2 倍となった。慣行化学肥料区では基肥として硫安、磷安、塩化加里、穂肥として硫安、塩化加里を施用した。クローズドチャン

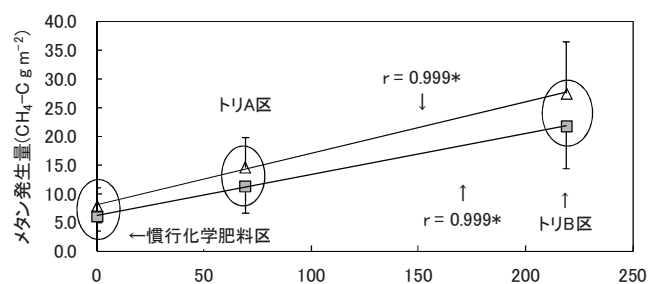


図 3. 圃場試験におけるメタン発生量

■ 測定開始から穂肥までのメタン発生量、
△ 測定開始から成熟期までのメタン発生量

バー法により水稻 (6 株) および田面を通じて大気中に放出されるメタンガスを捕集し、測定した。

圃場でのメタン発生量を図 3 に示した。測定開始時から穂肥前までのメタン発生量は、トリ A 施用区で $11.3\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ 、トリ B 施用区では $21.7\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ 、鶏ふんを施用しない慣行化学肥料区が $6.1\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ であった。慣行区からのメタン発生量を引いた量を比べると、トリ B ではトリ A の 3.0 倍であった。また、測定開始から成熟期前までのメタン発生量は、トリ A 施用区が $14.6\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ 、トリ B 施用区は $27.4\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ 、慣行化学肥料区が $7.8\text{ CH}_4\text{-C g m}^{-2}$ であり、それぞれ慣行区からの発生量を引いた量を比べると、トリ B での発生量はトリ A の 2.9 倍となり、両期間とも AD 可溶有機物投入量の比とほぼ同じであった。

以上の結果から、鶏ふん堆肥を用いて水稻の化学肥料全量代替栽培を行う場合、高窒素

鶏ふん堆肥（トリ A）では単位重量当たりの AD 可溶有機物量は多いが、窒素肥効が高いため単位面積当たりの現物施用量が少なく、このため単位面積当たりに投入される AD 可溶有機物量が少なくなり、メタン発生量も窒素肥効の低い鶏ふん堆肥に比べて減少することが明らかとなった。また、堆肥を水田へ施用した場合のメタン発生は、堆肥の全炭素よりも AD 可溶有機物でより正確に評価できることが示された。AD 可溶有機物を指標とすることによって、メタン発生を考慮した投入有機物量の管理が可能になると考えられる。

堆肥の AD 可溶有機物画分の詳細については未解明であるが、非繊維性有機物とヘミセルロースを含んでいると考えられており（自給飼料品質評価研究会 2001）、好氣的条件（畑水分状態）の土壌中における各種有機質資材の分解率と高い正相関を示すことが報告されている（小柳ら，2007, 2010）。また、AD 可溶有機物は、近年開発された家畜ふん堆肥の施用当季期間中の窒素肥効評価法（実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会，2010）においても、窒素肥効パターンを決定する重要な指標として用いられている。今回、嫌氣的（水田状態）条件下においても AD 可溶有機物量と 30℃ 3 週間培養後の有機物分解生成物であるメタン発生量との間に高い相関があったことは、堆肥中の易分解性有機物が還元状態で速やかに分解され、メタンに変換されたことによるものと考えられる。これまで、AD 可溶有機物の分析には専用機が必要であったが、比較的簡易な化学分析法（実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会，2010）や近赤外分析法（Fujiwara *et al.*, 2009）が報告されており、将来的には堆肥の作物生産のための窒素肥効と地球温暖化防止のためのメタン発生量の簡易で迅速な評価システムが確立されることが期待される。

4. 今後の研究方向

「循環型農業のための有機資材とその利用技術の開発（B1 系）」では、施肥機での施用を可能とするため、普通肥料登録済みの鶏ふん堆肥に尿素を添加して窒素肥効をさらに増強しつつ、ペレットの微小化技術や固結防止法を開発した（窒素付加微小鶏ふん堆肥ペレット）。現在、施肥田植機や畝内施肥機での適合性を圃場で検証しているところである。また、豚ふん堆肥についても、密閉縦型発酵装置から発生するアンモニアを回収して堆肥に戻すことにより、窒素肥効の高いペレット堆肥の製造に取り組んでいる。

高窒素鶏ふん堆肥の製造と利用過程における LCA 評価により、暫定的な結果ではあるが、キャベツ生産では高窒素鶏ふん堆肥の利用により、従来の堆肥に比べ温室効果ガス排出量を 25%程度削減可能なことが示されている。また、窒素付加微小鶏ふん堆肥ペレットの場合、製造段階では単位重量当たりの負荷は大きくなるものの、キャベツ生産の段階では、高窒素鶏ふん堆肥を利用する場合と同程度の温室効果ガス削減効果が見込まれる。つまり、家畜ふん堆肥の養分バランスを改善し、耕種農家が利用しやすい資材に変換することによって資源循環型農業を推進すれば、温室効果ガスの削減にもつながる可能性がある。

有効な肥料成分の明確化については、堆肥のリン酸肥効評価に取り組んでいる。また、堆肥の連用に伴う地力窒素の増加に対応するため、畑土壌可給態窒素の簡易・迅速評価法を開発し（上藺ら，2010a, b）、現在、水田土壌向けの評価法を検討中である。

平成 24 年 8 月に普通肥料の公定規格が改正され、「混合堆肥複合肥料」が新設されたことにより、牛ふん堆肥や豚ふん堆肥も肥料原料としての利用が可能となった。今後、特に堆肥中のリン酸・加里を活用した新たな資材開発が加速化されると期待される。

引用文献

- Fujiwara, T., Murakami, K., Tanahashi, T. and Oyanagi, W. (2009) Application of near infrared spectroscopy as an alternative to acid detergent analysis for cattle and swine manure compost. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **55**, 170-178.
- Furukawa, Y., Shiratori, Y. and Inubushi, K. (2008) Depression of methane production potential in paddy soils by subsurface drainage systems. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 950-959.
- 自給飼料品質評価研究会編 (2001) 改訂粗飼料の品質評価ガイドブック, p.7-13. (社) 日本草地畜産種子協会, 東京.
- 実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会 (2010) 家畜ふん堆肥の肥料成分・窒素肥効評価マニュアル, p168-170, 中央農業総合研究センター.
- 加藤直人, 他 12 名 (2012) 家畜ふん堆肥を活用した新たな地域ブランド技術の創出, 土肥誌, 83, 338-343.
- 村上圭一・小坂幸子・原 正之 (2007) 鶏ふん堆肥の尿酸測定による可給態窒素量の評価、土肥誌, **78**, 85-87.
- 村上圭一・小坂幸子・藤原孝之・原 正之 (2009) 三重県内で生産された鶏ふん堆肥の成分特性、土肥誌, **80**, 165-167.
- 小柳 渉・安藤義昭・棚橋寿彦 (2007) 有機質資材の分解特性とその指標、土肥誌, **78**, 407-410.
- 小柳 渉・棚橋寿彦・村松克之・小橋有理 (2010) 易分解性有機質の指標としての AD 可溶有機物の有用性、土肥誌, **81**, 383-386.
- 上 藺 一郎・加藤 直人・森泉 美穂子 (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性, 日本土壌肥料学雑誌, 81, 39-43.
- 上 藺 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, 日本土壌肥料学雑誌, 81, 252-255.
- Watanabe, A., Katoh, K., and Kimura, M. (1993) Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields II. Contribution of organic constitution in rice straw. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **39**, 707-712.
- 八木一行 (1994) メタン. 陽 捷行編 土壌圏と大気圏, p.55-84, 朝倉書店, 東京.