

3：農林業生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価

(3 a) 農業生態系におけるCH₄、N₂Oソース抑制技術の開発と評価

(2) わが国とアジア諸国の畜産業に由来するCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と広域評価

2) アジア諸国において有効な畜産廃棄物由来CH₄、N₂O抑制技術の開発とソースデータベースの構築および削減効果の評価

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所

畜産温暖化研究チーム（前北海道農業研究センター

資源化システム研究北海道サブチーム）

長田 隆

<研究協力者>

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所

機能性飼料研究チーム

高田良三

浄化システム研究チーム

福本泰之

富山県農業技術センター 畜産試験場 養豚課

廣瀬富雄・小嶋裕子・水上暁美・中村真貴

群馬県畜産試験場 中小家畜研究グループ

小林幸雄・櫛淵隆之・湊 和之

三重県科学技術振興センター 農業研究部 循環機能開発研究課

竹内雅己・地主昭博

平成15～19年度合計予算額

31,940千円

（うち、平成19年度予算額

6,098千円）

上記の合計予算額には、間接経費

7,371千円を含む

〔要旨〕 わが国とアジア諸国の畜産業における実効的なCH₄、N₂O発生制御技術の開発とその削減効果の広域評価を目的とし、畜産業からの温室効果ガス発生量と削減技術に係わるデータの蓄積を行い、GHG削減技術体系構築に必要な試験を行った。養豚農家等の調査からアジアで増加の顕著な養豚の標準的飼料体系（米ぬか主体飼料と穀物主体飼料）を明らかにし、この結果に基づき作成されたGHG削減飼料の給与試験を行った。GHG削減飼料は、通常飼料より低蛋白であるがアミノ酸（リジン、トレオニン、メチオニン、バリンなど）を添加することで窒素の利用性を改善して、強力なGHGである亜酸化窒素発生の元となる排泄窒素量低減するものである。米ぬか主体飼料では、アミノ酸を利用したGHG削減飼料でふん尿中への窒素排泄量を17%削減可能であることを飼養試験によって確認した。穀物主体の飼料では、飼料原料の粒度に考慮した実験でも低蛋白アミノ酸添加飼料で豚の増体量が低下したことから、既存の報告とは異なる結果を確認した。豚の消化器官において添加アミノ酸の吸収機序は、ペプチド状態の飼料原料由来のアミノ酸とは異なる

る可能性が示唆された。しかし、穀物主体の飼料でも不断給餌による飼養試験で、生産性を低下させることなく窒素排泄量を低減できる飼料の開発の目処が立ち、窒素の利用性を改善することでGHG削減が可能であることを確認した。家畜排泄物の堆肥化処理においては、堆肥化堆積物中での増殖の遅い亜硝酸酸化細菌が、結果として堆積物中の亜硝酸態窒素の蓄積と亜酸化窒素ガスの放出を引き起こすことが明らかとなった。すなわち、堆肥化過程で発生する N_2O を抑制するためには、亜硝酸態窒素の蓄積をできるだけ早く解消することが重要であり、またそれは完熟堆肥（亜硝酸酸化細菌を含有する）の添加という比較的容易な方法で成し遂げられることがこの試験で実証された。また、鶏ふんペレット堆肥施用時の N_2O 放出は、粉状の鶏ふん堆肥施用時に比べ多く、豚ふん堆肥で報告されたような N_2O 放出の抑制効果は認められなかった。

[キーワード] メタン、亜酸化窒素、家畜排せつ物、排出削減、広域評価

1. はじめに

強力な温室効果ガスであり、京都議定書で削減対象となっているメタン(CH_4)および亜酸化窒素(N_2O)の地球規模での増加に要因として、農業、すなわち農耕地と畜産業等、農業生態系が重大であることが最新のIPCC第4次評価報告書にも指摘されている¹⁾。これらのソースは、水田面積の拡大、家畜頭数の増加、窒素肥料使用量の増加など、食糧生産の増大と密接に関係し、19世紀以降の大気中でのこれらの温室効果ガス(GHG)濃度増加に大きく影響してきた。畜産業からの地球規模の環境負荷に関しては、FAOからも、現在、陸上の30%、農業用地の約70%が家畜生産のために使用されており、活動全体からの温室効果ガス発生は、二酸化炭素等量で18%に達すると算定されている²⁾。一方、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第三作業部会報告書に記載のあるように、これらのソースは、反芻動物の飼育方法、畜産廃棄物の処理方法などの技術開発により、地球温暖化の緩和へ大きな貢献の出来る可能性がある^{2,3,4,5)}。実際、これまでの研究から、数多くの効果的な制御技術が提案されており、国内外の関連学会や地球圏生物圏国際共同研究(IGBP)等の場において活発な議論がなされている。

しかし、これら検討の主体は先進国中心であり、アジア等の開発途上国における家畜を対象とした温室効果ガスに関する研究は極めて少ない。また、これまでの検討では、家畜の飼料等が各地域で異なるため、点データから広域評価を可能とするためのデータベースの構築とソース制御技術の定量的評価が十分に行われていないとの指摘がある⁶⁾。

2. 研究目的

上記の問題に対し、本研究では、わが国とアジア諸国の畜産業の、特にふん尿処理における実効的な CH_4 、 N_2O 発生制御技術の定量的総合評価とその広域削減予察評価を目標としている。具体的には、わが国の畜産業における、実効的な CH_4 、 N_2O ソース制御技術の開発試験を協力研究者の所在する各地で行い、それらの定量的評価を行う。同時に、わが国で開発されたこれらのGHGソース制御技術について、タイ、ベトナム等、アジア諸国での有効性を評価する。一方、わが国とアジア地域における農業生態系からの CH_4 、 N_2O 発生に関するデータベースを構築する。さらに、

構築したデータベースとGHGソース制御技術の定量結果から、わが国とアジア地域における農業生態系からのCH₄、N₂O発生制御技術の削減効果に対する広域評価を行う。これらの成果をサブテーマ(2)として総合し、サブテーマ(1)における農耕地課題の成果とあわせて、わが国とアジア諸国の農業生態系におけるCH₄、N₂Oソース制御技術を確立するとともに、それらのソースインベントリーを精緻化し、削減効果の定量的評価を可能とすることを目的とする⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

3. 研究方法

家畜排泄物起源の温室効果ガス抑制のために具体的には3つの研究、すなわち、(1) 発生する単位家畜あたり排出窒素・有機物を減少(飼養改善)、(2) 処理過程における酸化・還元条件の制御による削減(処理制御)、および、(3) 土壌施用時の発生量削減(加工制御)を実施する。最終年度は、(1) 昨年度までに低蛋白質アミノ酸添加飼料給与によって尿中窒素排泄量が著しく低減されることを示したが、今年度は養豚現場の実態に即した不断給餌条件下かつ群飼条件下で飼養試験を行い、低蛋白質アミノ酸添加飼料の栄養価について検討した(飼養改善)。また、(2) 亜硝酸酸化細菌数の添加により、亜硝酸態窒素の蓄積解消の可能性を堆肥化試験で検証した(処理制御)。さらに、(3) 堆肥のペレット化によるN₂Oの放出抑制効果を春キャベツ栽培の圃場で検討した(加工制御)。

3種類のGHG削減研究は、15-19年度の試験期間中、下記の試験設計で実施された。

(1) 発生する単位家畜あたり排出窒素・有機物を減少(飼養改善)

家畜排せつ物起源の温室効果ガス発生量削減には、まず、飼養する家畜あたりの排せつ窒素の削減が必要である。このため、対象地域である東南アジアの家畜飼養と飼料成分の精査を行い、この結果に基づき、2種の代表的な飼料に関してGHG削減を目途とした利用性を改善した飼料を調整、排せつ窒素削減効果と生産に対する影響を検討した。

1) 東南アジアにおける養豚飼料の調査(平成15年度実施) :

東南アジアで拡大の著しい養豚地帯の実態を調査し、標準的な飼料組成を解析して排泄窒素・有機物削減策を策定する。アジアで中国につき豚飼養頭数の多いベトナムの養豚飼養実態調査を行った。またカントー大学農学部において豚関係研究者との面談および統計数値の収集を行った。

2) 米ぬか主体飼料のアミノ酸利用性改善による養豚からのGHG削減(平成15-16年度実施) :

ベトナム等東南アジア諸国の家畜飼養条件の調査からGHG削減に養豚で屑米と米ヌカ主体飼料のアミノ酸の利用性を改善すること、また飼養羽数が急増する鶏由来の窒素排出量の検討の必要性が明らかとなった。追加的な現地の飼料成分の調査と、この結果に基づきベトナムの飼料組成を模倣した標準的飼料と標準的飼料から購入濃厚飼料部分を取り除き、不足するアミノ酸(結晶)と繊維分解酵素を添加したGHG削減飼料を調製して窒素出納試験を行い、GHGの基質となる窒素の削減効果を検討した。

3) 穀物主体飼料のアミノ酸利用性改善による養豚からのGHG削減(平成17-19年度実施) :

日本およびアジアの大規模養豚場で標準的なトウモロコシと大豆粕を主体とした対照飼料(通

常飼料)と、粗蛋白質(CP)含量を下げ、不足する6種類のアミノ酸を添加した低CP飼料、両者の中間で不足する4種類のアミノ酸を添加した中CP飼料を調製して、豚に給与し糞尿を採取して窒素排泄量の削減効果を検討した。

(2) 堆肥化過程からの N_2O 揮散抑制技術の開発(処理制御)

家畜排泄物の堆肥化処理は、有機性肥料のリサイクルの点で非常に重要な技術である。その処理過程から発生する温室効果ガスで、特に環境へのインパクトが大きい N_2O の発生抑制への要求は大きい。この発生の抑制に必要な基本的な知見を収集するための試験装置を試作した。この装置を使って、亜酸化窒素の制御方法として堆積物からの NH_3 拡散を抑制し、それによって硝化時期を遅延する方法、および亜硝酸酸化細菌の添加について検討した。

1) NH_3 拡散抑制と亜酸化窒素ガス発生因子の抽出(平成15-17年度実施) :

小型堆積型堆肥化リアクター(試作、容量:60L)を用い、堆肥原料には生豚ふん+オガクズの混合物(13kg)を用いた。一定流量で装置内の連続換気を行い、排出空気中の N_2O 濃度をガスモニター(IPD multigas monitor type 1312, INNOVA, DK)で連続測定した。ヘッドスペース中の NH_3 濃度を上昇させ、堆積物からの NH_3 拡散を抑制し、それによって硝化時期を遅延させた場合の N_2O 発生量に及ぼす影響について試験を行った。

2) 亜硝酸酸化細菌の添加による亜酸化窒素ガス抑制試験(平成18、19年度実施) :

試験は、小型堆肥化試験装置(容量:60L)を用いて行い、堆肥原料には生豚ふん+オガクズの混合物(13kg)を用いた。一定流量で装置内の連続換気を行い、排出空気中の N_2O 濃度をガスモニター(IPD multigas monitor type 1312, INNOVA, DK)で連続測定した。豚ふん完熟堆肥(含有亜硝酸酸化細菌数: 1.7×10^6 MPN g^{-1} WM)を堆肥化の高温発酵が終了した直後(第3週目)に現物量に対して10%(w/w)添加し、無添加区との間で N_2O 発生パターン、亜硝酸態窒素濃度、および硝化細菌数の比較を行った。

(3) 土壌施用時の発生量削減(加工制御)

堆肥利用時、すなわち土壌施用の際に発生する温室効果ガスは畜産区分の排出とは算定されていないが、農業を起因とする温室効果ガス抑制には重要である。堆肥のペレット化による発生抑制効果を検証するため、室内型の試験装置の試作と圃場試験を行った。

1) 堆肥施用時に発生する亜酸化窒素の室内実験系の試作(平成15-17年実施)

温室効果ガスの放出を検討するために従来行われてきた瓶培養試験法よりも経時的で量的な分析の可能な室内実験系を試作した。一般的な培養器に収まり、培養器内でサンプリング可能な大きさとする事とした。試作した実験系を用い、堆肥施用後の降雨の影響や堆肥のペレット化による N_2O の放出抑制効果を検討した。試験に用いた土壌は、未耕地の黒ボク土で仮比重が0.6となるように容器に充填し、土壌水分を最大容水量の50%とした。降雨の影響を検討するために、土壌水分は、7日間の好気状態(最大容水量の50%)の後、嫌気状態(最大容水量の60%)とする処理を行った。堆肥は、採卵鶏ウインドウレス鶏舎より排出される鶏ふんを密閉縦型発酵槽で10日程度堆肥化した鶏ふん堆肥とそれをローラー圧縮方式でペレット化した鶏ふんペレット堆肥を20gN m^{-2} 供試し、ペレット化による N_2O の放出抑制効果を検討した。

2) 圃場における発生抑制効果の検討 (平成18-19年実施)

鶏ふん堆肥、およびそのペレット堆肥を三重県松阪市の黒ボク土圃場に施用し、N₂Oの放出を0.6m×0.6m×0.6mの亚克力製チャンバーによるクローズドチャンバー法でサンプリングした。栽培は、冬キャベツ (品種: 松波) を9月5日 (定植) から12月1日 (収穫) まで行い、その後、春キャベツ (品種: SE) を3月5日 (定植)、6月1日 (収穫) で行った。堆肥の施用量は、25gN m⁻²とした。

4. 結果・考察

(1) 単位家畜あたり排出窒素・有機物を減らすことによる削減 (飼養改善)

1) 東南アジアにおける養豚飼料の調査 (平成15年度実施) :

ベトナムの豚は大部分が、母豚1~2頭から10頭程度までの中小規模養豚場 (養豚農家) で飼育されており、この階層が国全体の飼養頭数増加を支えている。これらの養豚場では飼料組成の50~70%以上が屑米と米ヌカからなる自らが配合した飼料を給与しており、排出される糞尿は水洗により直接養魚池に投入されていることが明らかになった (General Statistical Office Department of Agriculture, Forestry and Fishery, Vietnam, 2000)。

ベトナムから持ち帰った屑米と米ヌカのアミノ酸分析を行った結果、屑米は日本の食用精白米と同様のアミノ酸組成 (現物中%) であり、ベトナムの米ヌカは日本の米ヌカと比較して蛋白質含量が低い (10.4%対14.8%) が蛋白質中のアミノ酸組成は同様であった。また、屑米と米ヌカのみからなる飼料では、4種類の必須アミノ酸が欠乏し、欠乏しやすい順にリジン、トレオニン、メチオニン+シスチン (含硫アミノ酸)、イソロイシンであることが明らかとなった。したがって、これらのアミノ酸を欠乏の割合に応じて結晶アミノ酸として添加することにより豚は正常に発育し、ベトナムで標準的な屑米と米ヌカに大豆粕と魚粉を加えた飼料に対して、大幅な窒素排泄量の削減が可能であると予想された。

ベトナム南部メコンデルタ地域のタン・プー・タン村とハオ・アン村での計25戸の肥育豚 (30~70kg) で給与されていた標準的飼料 (平均値) は、生米ヌカ (68.4%) と破碎米 (15.2%) に購入濃厚飼料 (魚粉、大豆粕、トウモロコシ、ビタミン、ミネラル等の混合物: 11.1%) を配合したもので、近隣の川で採れた生魚、ホテイアオイ等の野草を含めた葉菜類が補足的に給与されていた (表6)。調査農家で最も多く利用されていた購入濃厚飼料 (HI-GRO151)

表1 ベトナム・メコンデルタ地帯の標準的飼料組成

飼料原料名	(%)	試験飼料での代替原料
生米ヌカ	68.36	脱脂米ヌカ+植物油脂
破碎米	15.17	精白米
粃米	0.06	精白米
購入濃厚飼料	11.11	※
貝の粉	0.04	ミネラル
地魚	2.30	魚粉
葉菜類	2.96	アルファアルファミール
合計	100.00	

注1) 組成 (%) は乾物ベース

注2) 数値は、タン・プー・タン村とハオ・アン村での調査のうち体重 30~70kg の豚に給与されていた飼料組成の平均値 (n=25)

注3) 利用戸数が最も多い購入濃厚飼料は「HI-GRO151」

※購入濃厚飼料の代替原料として、分析した HI-GRO151 のアミノ酸組成と同一になるように、乾物ベースで魚粉 (CP65%) 55、大豆粕 12、トウモロコシ 5、精白米 28 の割合の混合飼料を調製

のアミノ酸組成を分析して試験飼料調製のための代替原料を決定した（表1）。

2) 米ぬか主体飼料のアミノ酸利用性改善による養豚からのGHG削減（平成15-16年度実施）：

ベトナムの飼料組成を模倣した標準的飼料と標準的飼料から購入濃厚飼料部分を取り除き、不足するアミノ酸（結晶）と繊維分解酵素を添加したGHG削減飼料を調製した。なお、消化率を測定するために、試験飼料に指標物質として酸化クロムを添加した。各区に6頭のLWD交雑種雌豚（平均体重45kg）を割り当て、調査農家での平均飼料給与量（1日に体重の0.75乗（＝代謝体重）kgあたり108g）を3等分して9、13、17時に7日間給与した。試験期の後半4日間の糞尿を採取して、乾物、有機物、窒素含量を分析して、それぞれの出納および消化率を算出し、GHGの基質となる窒素および有機物の排泄量削減効果を検討した。

窒素出納では、摂取量はGHG削減飼料区で標準的飼料区より少なかったが、蓄積量に差は認められなかったことから、蛋白質の蓄積（肉の生産性）に対する悪影響はないものと判断された。また、糞中への窒素排泄量に差は認められなかった。一方、尿中への窒素排泄量は、標準的飼料区に比べてGHG削減飼料区で有意に少なかった（ $P < 0.05$ ）（表2）。

以上の結果から、イソロイシンを含めたアミノ酸の利用によって、米ヌカと破碎米を主体とした飼料でも、尿中窒素排泄量を25%、糞尿への総窒素排泄量を17%程度削減が可能であることが示された。

表2 標準的飼料およびGHG削減飼料を給与した豚の出納成績の比較

	標準的飼料区 (n = 6)	GHG削減飼料区 (n = 6)	P値	相対値
試験開始体重, kg	45.1 ± 5.2	44.7 ± 3.5		
終了体重, kg	50.4 ± 4.2	50.9 ± 2.6		
飼料摂取量, g/BW ^{0.75} kg/d	107.5 ± 6.4	109.0 ± 1.8		
乾物出納, g/BW ^{0.75} kg/d				
摂取量	94.0 ± 5.6	95.0 ± 1.6		
糞中排泄量	27.1 ± 2.0	28.6 ± 0.7		
消化率%	71.1 ± 0.9	69.9 ± 0.6	$P < 0.05$	98.3
有機物出納, g/BW ^{0.75} kg/d				
摂取量	83.1 ± 5.0	83.7 ± 1.4		
糞中排泄量	18.6 ± 1.5	19.6 ± 0.6		
消化率%	77.7 ± 0.9	76.5 ± 0.6	$P < 0.05$	98.5
窒素出納, g/BW ^{0.75} kg/d				
摂取量	3.02 ± 0.18	2.63 ± 0.04	$P < 0.01$	86.9
蓄積量	1.07 ± 0.11	1.01 ± 0.13		
糞中排泄量	0.71 ± 0.09	0.70 ± 0.05		
窒素消化率%	75.83 ± 2.03	73.70 ± 1.78	$P = 0.08$	97.2
尿中排泄量	1.22 ± 0.19	0.92 ± 0.14	$P < 0.05$	74.7
糞尿への総排泄量	1.94 ± 0.23	1.61 ± 0.15	$P < 0.05$	83.1

注) 数値は平均値±標準偏差、BWは体重。

相対値は標準的飼料区の数値（100）に対するGHG削減飼料区の割合。

豚の飼養試験と並行して、鶏ふん中の窒素削減を目的として、ポリフェノールを多く含み、抗酸化力が高いといわれているサトウキビエキスを飼料へ添加し、鶏から排泄される糞尿中の窒素低減効果について検討を行った。飼養成績の結果、サトウキビエキスの0.25%、0.5%

いずれの添加区においても飼料摂取量、増体量および飼料効率に影響は認められなかった。排泄窒素に関しては、いずれもサトウキビエキス添加区で低くなる傾向が見られ、特に排泄物中窒素含量では対照区に対して0.5%キビエキス区で有意(P<0.05)に低下した。これらの結果は、家禽飼料にサトウキビエキスを添加することによって、飼養成績に悪影響を与えることなく家禽から排泄される窒素量を低減できる可能性を示している。

しかし、サトウキビエキスはサトウキビから種々の操作を経て製造されるものであることからその価格が高く、東南アジアで応用される可能性は低いと考えられた。

そこで、サトウキビエキスの原料である糖蜜を4%飼料に添加し、窒素排泄率低減効果について検討を行った。1週齢のブロイラーヒナ15羽を対照区に8羽、糖蜜区に7羽割り付けた。試験飼料は対照飼料(市販幼すう用)およびそれに糖蜜を4%添加した糖蜜飼料とし、試験期間は3週間とした。測定項目は飼養成績、乾物蓄積率、窒素排泄率とした。表3に結果を示した。糖蜜区は対照区に対して飼料摂取量は有意に高く、増体量も高くなる傾向が見られた。また、乾物の蓄積率も高くなる傾向が認められたが、窒素排泄率は両試験区間で差は認められなかった。乾物の蓄積率が高くなれば通常では窒素の蓄積率も高くなり、その結果窒素の排泄率は減少するはずである。今回の結果からでは窒素排泄率の低下は確認できなかった。その原因は不明であるが、1つ考えられるのは糖蜜の添加量(4%)が多すぎた可能性がある。当研究室の別の実験で、サトウキビエキスの添加量が多いと逆に消化率が低下することを肥育豚で確認している。また、糖蜜は製糖工場ごとにその製品の品質(糖含量、ミネラル等の種類と含量)が異なっていることも知られており、今回用いた糖蜜そのものに原因があったかもしれない。

以上のことより、この課題の中では鶏に関する検討を中止し、豚の窒素削減に集中することとした。

表3 糖蜜添加がブロイラーヒナの飼養成績、乾物蓄積率および窒素排泄率に及ぼす影響

	対照区	糖蜜区
飼料摂取量(g)	1536 ± 160	1724 ± 125*
増体量(g)	987 ± 138	1122 ± 117 †
飼料効率	0.641 ± 0.026	0.650 ± 0.025
乾物蓄積率	0.772 ± 0.022	0.796 ± 0.028 †
窒素排泄率 (排泄N/摂取N)	0.274 ± 0.053	0.265 ± 0.071

*:P<0.05, †:P<0.10

3) 穀物主体飼料のアミノ酸利用性改善による養豚からのGHG削減(平成17-19年度実施) :

日本およびアジアの大規模養豚場で標準的なトウモロコシと大豆粕を主体とした対照飼料(通常飼料)と、粗蛋白質(CP)含量を下げ不足する6種類のアミノ酸を添加した低CP飼料、両者の中間で不足する4種類のアミノ酸を添加した中CP飼料を調製して、豚に給与し糞尿を採取して窒素排泄量の削減効果を検討した。

体重45kgの豚で実施した窒素出納試験の結果を表4に示した。通常飼料区に対して、現在飼料添加物として製造され利用可能な4種類のアミノ酸を添加した飼料を給与した中CP飼料区では、尿中および糞中への窒素排泄量がいずれも16%削減された。飼料中のCPをさらに低下させ不足するイソロイシンおよびバリンを添加した飼料を給与した低CP飼料区では、尿中および糞中への窒素排泄量が、それぞれさらに18%および6%削減された。このことは、すでに飼料添加物として製造されているバリンに加えて、イソロイシンも利用可能となれば、現状で可能な4種類のアミノ酸を利用した飼料による窒素削減量を上回る削減が可能であることを示している。しかし、生産性の指標となる窒素蓄積量（赤肉生産量）は、低および中CP飼料区とも通常飼料区より16~17%劣った結果となった。窒素蓄積量が低下する原因として通常必須アミノ酸の不足が考えられる。低CP飼料のように通常飼料より3%以上CP含量を低下させた場合、全体的な窒素量の不足の可能性もある。窒素蓄積量が低CP飼料で劣った原因を確認するために、添加するアミノ酸の種類や量を再検討する必要がある。

表4 通常飼料と2種類の窒素排泄量削減飼料（中CP、低CP飼料）を給与した豚の窒素出納結果（N、g/ BW^{0.75}kg/d）

	通常飼料区	中CP飼料区	低CP飼料区	√MSE	P 値
N摂取量	2.163 (100)	1.799 (83)	1.652 (76)	-	-
尿中N量 b, y	0.822 (100)	0.689 (84)	0.541 (66)	0.115	< 0.05
糞中N量 a, b	0.265 (100)	0.222 (84)	0.208 (78)	0.020	< 0.01
糞尿中N量 b, x,	1.087 (100)	0.911 (84)	0.748 (69)	0.115	< 0.01
N蓄積量 b, x	1.075 (100)	0.888 (83)	0.904 (84)	0.105	< 0.05

窒素出納は代謝体重（体重の0.75乗）kg当たりの1日量（g）で表示
通常飼料区（n=4）、中CP飼料区（n=5）、低CP飼料区（n=5）

MSE：誤差分散、標準誤差（SEM）は $\sqrt{\text{MSE}/n}$

（ ）内の数値は、対照区を100とした場合の相対値

a: 通常飼料区と中CP飼料区間に差（P<0.05）

b: 通常飼料区と低CP飼料区間に差（P<0.05）

x: 通常飼料区と中CP飼料区間に差（P<0.10）

y: 中CP飼料区と低CP飼料区間に差（P<0.10）

以上の結果をまとめると、低蛋白質（CP）アミノ酸添加飼料の給与により、肥育豚からの窒素排泄量は明らかに低減できることが分かったものの、生産性の指標となる窒素蓄積量も同時に低下することが明らかとなった。このことは増体量の低下を意味しており、生産性に悪影響が出る可能性が考えられた。また、従来からのアミノ酸栄養学的な知見ともやや異なる結果であり、再確認する必要がある。そこで、前回とは異なる場所（富山県畜試）、および異なる豚（SPF豚、特定の病気がなく成長が極めて優れる豚）を用いて前回とほぼ同様な試験を行った。また、各飼料原料中のアミノ酸有効率は原料の粒度に大きく影響される（粒度が大きいとアミノ酸有効率は低下する）ことから、2mm以下に粉碎した飼料原料を用いた。

体重42kgの肥育去勢豚6頭を代謝ケージに収容し、1週間に渡る試験を3回繰り返した。飼料は標準的な増体(0.78kg/d)を示す量を1日3回(午前9時、午後1時、5時)に分けて与えた。ふん尿は1週間の試験期間中の最終3日間分を分離採取し、窒素排泄量を測定した。

対照飼料は必須アミノ酸の添加を行わず、穀物飼料原料のみで各アミノ酸要求量を満たす飼料であり、CP含量は17.3%である。CP13.1%飼料は、現在飼料添加物として認められているリジン、トレオニン、メチオニン、およびトリプトファンの4種を最大限に添加してCP含量をできるだけ低下させた低CPアミノ酸添加飼料である。CP11.2%飼料はCP13.1%飼料からさらにバリン、ロイシンを添加することによってCP含量をそれ以上に低下させた超低CPアミノ酸添加飼料である。

これらの飼料を用いた窒素出納試験の結果を表5. に示す。

対照区の尿中窒素排泄量に比べてCP13.1区およびCP11.2区のそれは明らかに低下した。同様に糞中窒素排泄量および尿中と糞中を加えた糞尿中窒素排泄量も低CP飼料区が明らかに低かった。一方、生産性の指標となる窒素蓄積量は、1日1頭当たりおよび1日1頭代謝体重当たりの蓄積量のいずれの表示方法においても対照区が優れ、2つの低CP飼料区が低い値を

表5. 低蛋白質アミノ酸添加飼料を肥育豚に給与したときの窒素出納試験結果

	対照区 (CP17.3)	CP13.1	CP11.2	P
摂取窒素量 (g/d)	48.2±3.9	36.4±3.0	30.6±3.4	<0.01
尿中窒素量 (g/d)	21.0±3.1	13.3±3.0	9.6±1.7	<0.01
糞中窒素量 (g/d)	6.3±1.4	5.4±0.6	3.9±0.8	<0.01
糞尿中窒素量 (g/d)	27.3±4.7	18.7±3.6	13.5±2.3	<0.01
窒素蓄積量 (g/d)	20.9±2.8	17.7±1.1	17.1±2.1	<0.05
窒素蓄積量 (g/d・kg ^{0.75})	1.54±0.21	1.20±0.09	0.99±	<0.01
			0.13	

各試験区n=6、開始体重42kg

窒素蓄積量は1日1頭当たりの蓄積量(g/d)および1日1頭代謝体重当たりの蓄積量(g/d・kg^{0.75})で示した

示した。これらの結果は前回に得られた結果と同様であった。実験動物、飼料原料の粒度に考慮した今回の実験でも窒素蓄積量が低下したことから、これまで一般的に言われていた現

象とは若干異なる事実が存在する可能性が考えられる。第1に、不断給餌と比較して今回のような1日3回に飼料を分与する方法は添加アミノ酸と原料由来の蛋白態アミノ酸との間に吸収の時間的な差が生じ、アミノ酸の利用性に影響を及ぼすかもしれない。第2に、今回は標準的な発育を示すように飼料を給与しているものの、飼料摂取の絶対量は不断給餌と比べると低くなっている。すなわち今回の豚は最大成長よりも幾分低い状態で実験を行っている可能性があり、そのような状態では添加アミノ酸の有効性が低下する可能性もある。第3に、添加アミノ酸は飼料中にすでに1個の遊離な形で存在しており、これら遊離のアミノ酸は腸管の絨毛細胞を通過する時に多くは分解されてしまうことが最近指摘されている。これに対して飼料原料由来のアミノ酸は通常、2つおよび3つのアミノ酸が結合したジペプチド、トリペプチドの形態で絨毛細胞に吸収、膜消化を受け、個々の遊離アミノ酸となって血中に入る。このペプチド態で吸収されるアミノ酸は遊離アミノ酸と比べて絨毛細胞で分解される割合が低い可能性が高く、より多くのアミノ酸が血中に進入できるのかもしれない。

以上のことがもし事実であれば、添加アミノ酸の有効率は試料原料中のアミノ酸と比べて低いと考えられる。すなわち、飼料中のアミノ酸含量が同じであってもアミノ酸を添加した場合にはその有効アミノ酸含量が低下していることとなり、アミノ酸の要求量を十分には満たしていない危険性が考えられる。

これらのことを検証するためには添加アミノ酸を要求量よりも幾分多めにした飼料を調製し、さらに不断給餌による飼養試験を行う必要がある。これによって生産性を低下させることなく窒素排泄量を低減できる飼料の開発に繋げることができる。

そこで、養豚現場の実態に即した飼養形態および添加アミノ酸がより有効に使われる可能性が高い不断給餌条件下かつ群飼条件下で飼養試験を行い、低蛋白質アミノ酸添加飼料の栄養価について検討した。

平均体重約 67kg の肥育後期豚 24 頭を各区 8 頭ずつ 3 試験区に分けた。慣行飼料 (A) 区 (対照)、低蛋白質アミノ酸添加 (B) 区 (アミノ酸は要求量の 100%)、低蛋白質アミノ酸強化 (C) 区 (アミノ酸は要求量の 120%) の 3 試験区とし、不断給餌、4 頭群飼による 5 週間の飼養試験を行った。

表 6 に飼養試験の結果を示す。日増体量において 3 試験区間に統計的な差は認められず、また、飼料摂取量、飼料効率においても数値的にはほぼ同じであったことから、いずれの飼料も栄養価はほぼ同等と思われた。また、3 試験区すべての日増体量が 1000g/d を超えており、標準的な発育 (850 g/d、日本飼養標準 2005 年版) よりも優れることから、低蛋白質アミノ酸添加飼料は、不断給餌条件下においては慣行飼料と比べて統計的に有意差が見られる程の差はないものと思われた。しかしながら、数値的には低蛋白質区の日増体量は低くなる傾向が認められることから、低蛋白質飼料ではただ単に不足する必須アミノ酸を添加するだけでは不十分であることが窺われた。一方、血漿尿素態窒素濃度は慣行飼料区と比べて明らかに低蛋白質区で低くなった。血漿尿素態窒素濃度と尿中窒素排泄量は相関が高いことが知られて

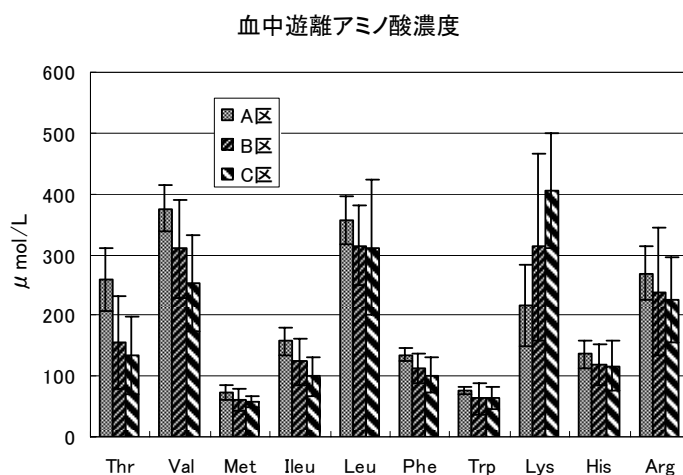
いることから、本実験において、低蛋白質区では尿中窒素排泄量が明らかに低減していることが推察できる。血漿中遊離アミノ酸濃度（必須アミノ酸のみ）の結果を図1に示す。慣行飼料区と比べて低蛋白質区ではリジンのみ高くなっているがトレオニン、バリン、イソロイシン等では逆に低くなっている。このことはリジン以外の必須アミノ酸がやや不足していた可能性がある。これが原因で低蛋白質区の飼料摂取量が数値的に低くなったのかもしれない。リジンとは異なってトレオニンは結晶アミノ酸として添加する場合にはその利用効率がやや劣り、要求量よりも多くの量を必要とするのかもしれない。

表6. 飼養成績の結果

	慣行飼料 (A) 区	低蛋白質 (B) 区	低蛋白質 (C) 区
飼料中 CP 含量	12.7	10.4	10.4
日増体量(g/d)	1166±94	1096±128	1073±108
日飼料摂取量(g/d)	3976	3737	3616
飼料効率(増体/摂取量)	0.293	0.293	0.297
血漿中尿素態窒素(mg/100ml)	17.5±2.2b	12.3±2.4a	11.3±2.1a

日増体量はn=8、日飼料摂取量と飼料効率はn=2、 a, b間に1%レベルで有意差あり。

A区：慣行飼料、B区：低蛋白質飼料（アミノ酸含量は要求量の100%）、C区：低蛋白質飼料（アミノ酸含量は要求量の120%）



質飼料（アミノ酸含量は要求量の120%）

図1 血漿中遊離アミノ酸濃度(μmol/L)

Thr A:B、A:C、Val A:C、Ileu A:C、Phe A:C、Lys A:C ;5%レベルで有意差あり。

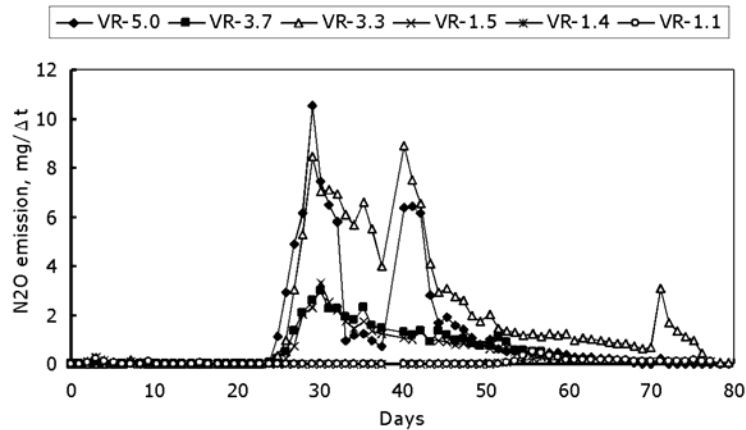
(2) 堆肥化過程からのN₂O揮散抑制技術の開発（処理制御）

1) NH₃拡散抑制と亜酸化窒素ガス発生因子の抽出（平成15-17年度実施）：

堆積物中に高濃度にアンモニアを保持することにより、アンモニアの硝化細菌への阻害

作用を利用して硝化活動の抑制を試みた。小型堆積型堆肥化リアクター（試作）を用い、リアクターのヘッドスペース（頭隙）空気の換気量を制限することによりヘッドスペース中の NH_3 濃度を上昇させ、堆積物からの NH_3 拡散を抑制し、それによって硝化時期を遅延させた場合の N_2O 発生量に及ぼす影響について試験を行った。設定換気量は1時間・堆積物表面積 1m^2 あたりの通気量（ m^3 ）で表し、 $1.1\sim 5.0$ （ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ）の間とした。

図2に各設定換気量における N_2O 揮散率のパターンを示す。尚、 N_2O 揮散率（ $\text{mg}/\Delta t$ ）は単位時間あたり（測定間隔、約12分間）に揮散した N_2O 量（ mg ）で表してある。高換気量の場合（VR-5.0、3.7、3.3）、 N_2O の発生開始は30日前後と早く、また揮散量も多くなった。低換気量の場合（VR-1.4、1.1）、 N_2O 発生時期は遅延され、揮散量も減少した。 N_2O 揮散量（N換算）は、初発時の総窒素量あたりそれぞれ、4.2、2.0、6.6、1.8、0.5、0.6%（VR-5.0、



3.7、3.3、1.5、1.4、1.1) となった。

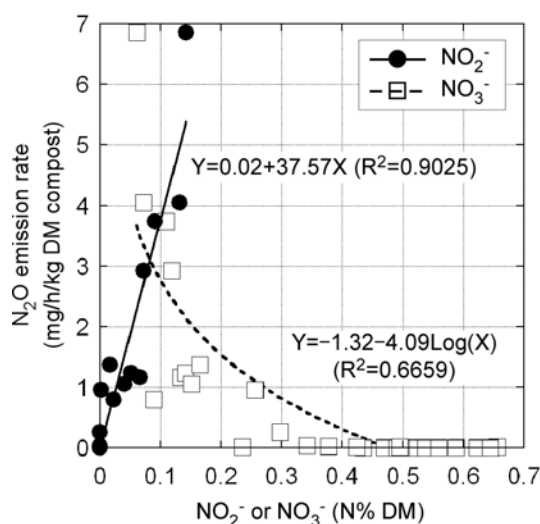
VR-1.5（ $1.5\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ 区：堆肥単位表面積（ m^2 ）、1時間の換気量（ m^3 ）が 1.5m^3 と低めの設定）では低換気量にも関わらず、 N_2O 発生時期は遅延されなかった。従って頭隙空気の換気量を調整して硝化時期を制御する方法は安定性に欠くと考えられた。

N_2O は堆肥化一次発酵以降に発生するピークが来るため、堆積物の温度はすでに低下しており、堆積物内部に存在する N_2O を外部へ押し出す動力が存在していない（熱対流の不在）。そのため、外部への揮散量は堆積物周辺の環境条件（気温等）の影響を受け易く、これが N_2O 揮散率の変動幅を大きくしている原因となっている。従って、 N_2O 発生時期が遅延した場合、有意に発生量が減少しているかについては、今後データ数の増加によって確認する

図2 各換気条件下での N_2O 揮散率のパターンの違い（豚ふん堆肥： $1.1\sim 5.0$ （ $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ）

堆肥化では、初期に温度の非常に高い状態が生じるため、この間硝化細菌の活動は制限されてしまう。硝化細菌の本格的な増殖が始まるのが堆肥化の一次発酵後であるが、豚ふん堆肥

化処理ではこのとき硝化細菌種のうちアンモニアから亜硝酸までの酸化を行うアンモニア酸化細菌が先に増殖を開始し、亜硝酸から硝酸までの酸化を行う亜硝酸酸化細菌の増殖が著しく遅延するという現象が再現性良く確認された。これは、一次発酵終了直後の堆肥中には硝化細菌種の基質としてアンモニアしかないため、亜硝酸酸化細菌が増殖するためにはアンモニア酸化細菌が先に増殖して基質となる亜硝酸が生成される必要があるためだと考えられる。アンモニア酸化細菌と亜硝酸酸化細菌との間に生じる増殖のタイムラグにより、堆肥中には亜硝酸態窒素が蓄積する。亜酸化窒素ガスの発生速度と堆肥中の亜硝酸態窒素濃度を比較すると両者の間には高い正の相関関係が認められた(図3)。一方、硝酸態窒素濃度の上昇は亜酸化窒素ガスの発生を促進しなかったため、堆肥化から発生する亜酸化窒素ガスを低減化するためには亜硝酸態窒素を速やかに硝酸態窒素まで酸化分解することが有効ではないかと考えられた。



2) 亜硝酸酸化細菌の添加による亜酸化窒素ガス抑制試験 (平成18、19年度実施) :

堆肥化からの亜酸化窒素ガスの発生は、堆肥中の亜硝酸態窒素量と高い相関性があり、そのため、亜硝酸態窒素の蓄積を解消すれば亜酸化窒素ガスの発生を抑制できる可能性が考えられた。しかし、亜硝酸態窒素を酸化分解する亜硝酸酸化細菌は、堆肥化ではアンモニア酸化細菌に比べて著しく遅延するため、そのままでは蓄積を解消することはできない。

そこで、不足する亜硝酸酸化細菌数を人為的に補充することにより、亜硝酸態窒素の蓄積が解消可能か、また、亜酸化窒素ガス発生にどのような影響を及ぼすかを堆肥化試験によって検証した。堆肥化試験は、試験区間での微生物のコンタミを防ぐために、方法に示した小型堆肥化試験装置を用いて行った。亜硝酸酸化細菌の供給源は、実際の現場で入手が容易で

図3 豚ふん堆肥化処理における亜硝酸また硝酸態窒素濃度と亜酸化窒素発生速度との関係

試験区は、完熟堆肥添加区と、何も添加しない無添加区を設定した。新鮮豚ふんにオガクズを混合して水分調整を行い、13 kgを試験装置内に充填した。充填時の堆積物容積は26 Lであったため、かさ密度は0.5と堆肥化発酵に適したものになった。用意した完熟堆肥堆肥中には、アンモニア酸化細菌が 10^7 cell g⁻¹ DM、亜硝酸酸化細菌が 10^6 cell g⁻¹ DM含まれており、アンモニアを硝酸まで滞りなく酸化できる硝化細菌群構造が形成されていた。しかし、堆肥化の高温発酵期に添加すると、含まれている硝化細菌が熱によって減少するため、完熟堆肥を添加する時期は堆肥化の一次発酵終了直後とし、原料重量に対して10%添加した。実際の堆肥化試験では、一次発酵が3週間継続したため、完熟堆肥の添加は第3週目の切り返し時に行った。堆肥化試験では、亜酸化窒素ガスのモニタリング、堆肥中の無機態窒素成分濃度測定、硝化細菌数の計測を経時的に行い、完熟堆肥の添加効果を見た。

① 硝化細菌数推移 (図4)

堆肥の温度は、開始から最初の3週間は50℃以上の高温状態が持続し、そのため、硝化細菌は検出されないか、検出されても低い菌数レベルであった。開始から3週目に 10^5 ~ 10^6 cell g⁻¹レベルのアンモニア酸化細菌の増殖が認められた。無添加区では、その後アンモニア酸化細菌の増殖が進んだが、亜硝酸酸化細菌の増殖は認められず、最初に亜硝酸酸化細菌が約 10^3 cell g⁻¹レベルで検出されたのが第8週目であった。しかしその後も亜硝酸酸化細菌の増殖速度は緩やかであり、最初の検出から約100倍の菌数に増加するまで、4週程度の時間を要した。この遅い亜硝酸酸化細菌の増殖は、結果として深刻な亜硝酸態窒素の蓄積と亜酸化窒素ガスの放出を引き起こすこととなった。

一方、第3週目に完熟堆肥を添加した場合は、添加時には既に亜硝酸酸化細菌が約 10^5 cell g⁻¹レベルで存在しており、その後も同等以上の菌数レベルを維持したことから、添加した亜硝酸酸化細菌が原料中に定着できたと考えられた。

② 無機態窒素成分推移 (図5)

一次発酵期間中は、原料中の無機態窒素成分のほとんどがアンモニウム態窒素によって占められた。その後、アンモニア酸化細菌の増殖が本格化した第3週目辺りからアンモニウム態窒素濃度は急激に下降し、代わりに硝酸(亜硝酸や硝酸)濃度の上昇が起こった。亜硝酸態窒素濃度は、無添加区で著しく高く、また検出される期間も長くなった。これは、亜硝酸酸化細菌数がアンモニア酸化細菌数に比べて少ない状態が長期化したためだと考えられた。

完熟堆肥添加区では、添加時に若干検出された後、亜硝酸態窒素はほとんど検出されなくなった。また、硝酸態窒素濃度が急激に上昇し、最終産物中の濃度は無添加区に比べて著しく高くなった。このことから、完熟堆肥添加区では添加された亜硝酸酸化細菌の働きによって硝化作用が滞りなく進行したと考えられた。

③ 亜酸化窒素ガス発生 (図6)

亜酸化窒素ガスの発生パターンは亜硝酸態窒素濃度のパターンと非常に類似したものになった。すなわち、無添加区では長期間発生が持続し、完熟堆肥添加区では速やかに発生が終息した。総亜酸化窒素発生量は、無添加区が 88.5 g N₂O-N kg⁻¹ T-N_{initial}、完熟堆肥添加区

で $17.5 \text{ g N}_2\text{O-N kg}^{-1} \text{ T-N}_{\text{initial}}$ となり、約80%の低減効果が得られた。したがって、堆肥化処理においては、亜硝酸態窒素の蓄積を速やかに解消することにより、亜酸化窒素ガスの発生量を大きく抑制できることが明らかとなった。

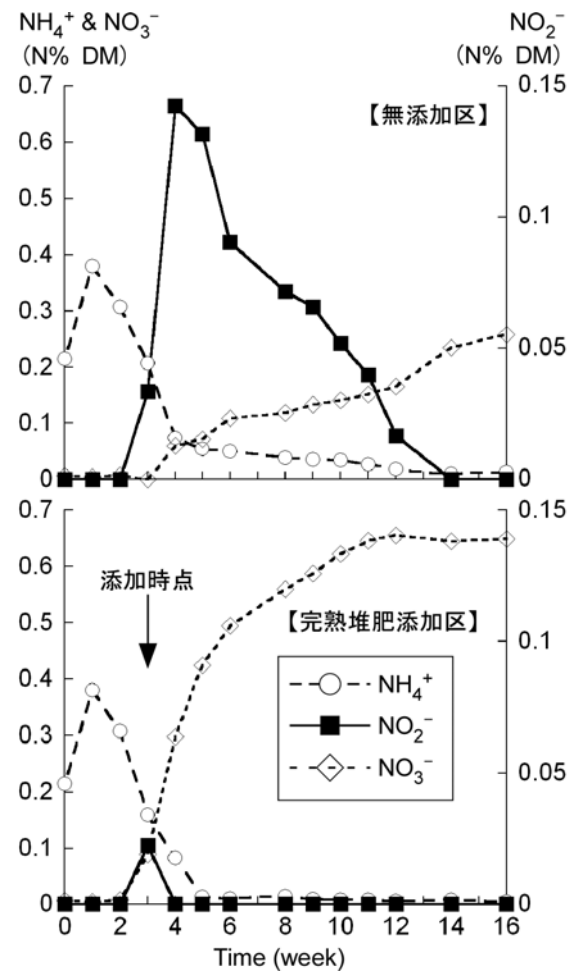
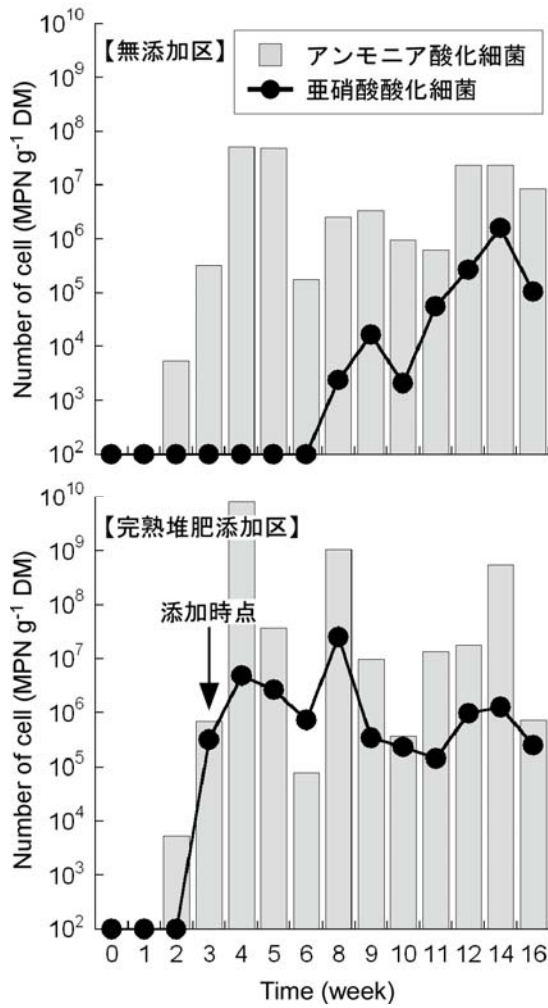


図4 堆肥化処理における硝化細菌数の推移

図5 無機態窒素成分濃度の推移

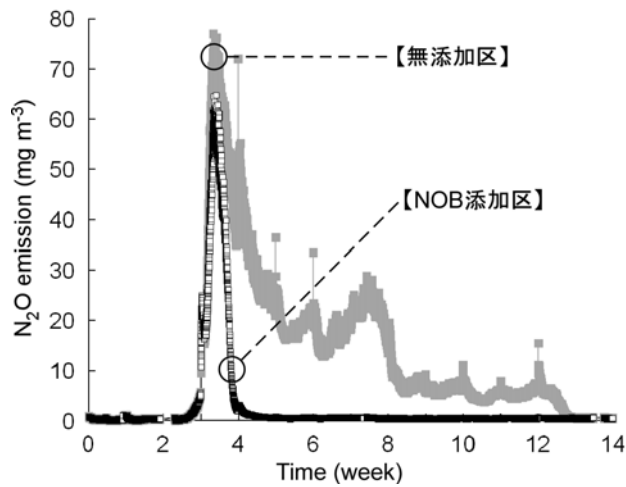


図6 亜酸化窒素ガスの発生推移

(3) 土壌施用時の発生量削減 (加工制御)

1) 堆肥施用時に発生する亜酸化窒素の室内実験系の試作 (平成15-17年実施)

試作した室内実験系は、ガスチャンバー部の高さを12 cm、土壌層厚を約5cmとすることで、既報のフラックスと同様な測定値 (1~7mg/m²/hr) を得ることができた。この実験系を用いて、降雨の影響を検討した。堆肥施用後の降雨によって、N₂Oフラックスが増加するとの知見は多く、考案した実験系においても同様の結果が得られるかどうかを検討した。

結果を図7に示す。考案した実験系においても降雨後にN₂Oフラックスの増加は確認され、それは、降雨からかなり早い段階で生じていた。緩行性肥料の使用によってN₂Oの発生が抑制できるとの知見から、ペレット化によるN₂Oの発生の抑制が期待されたが、混和直後の発生ピークはペレット化することで小さくなるものの、培養期間を通じた発生量は、ペレット堆肥が粉状堆肥を上回ることを確認した。また、エキストラダガー方式のペレット堆肥を供試した場合においても、ローラー圧縮方式のペレット堆肥と同様、培養期間を通じた発生量は、ペレット堆肥が粉状堆肥を大きく上回り、亜酸化窒素放出の抑制効果についての確認はできなかった。これらの点から、鶏ふん堆肥では、豚ふん堆肥で報告されたような成形によるN₂O放出の抑制効果は認められない可能性が示唆された。

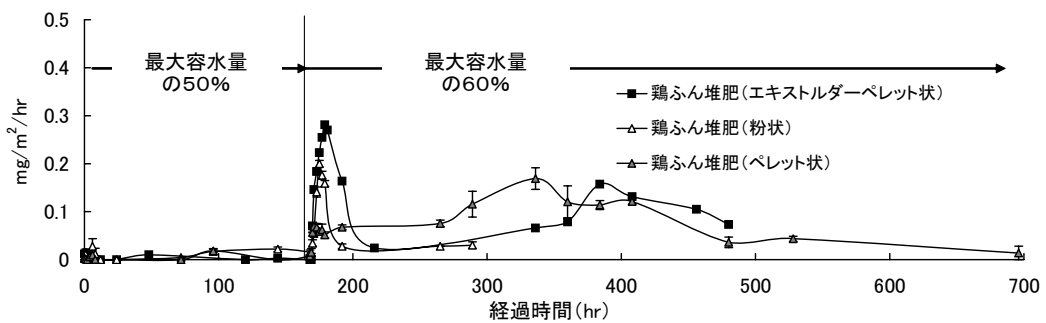


図7 試作した試験系からの模擬降雨時 (縦線) 前後の亜酸化窒素放出パターン

しかしながら、この実験系では、植物の窒素利用を考慮していないため、実際の農業場面からの放出と異なる可能性が考えられた。

2) 圃場における発生抑制効果の検討 (平成18-19年実施)

緩行性肥料の使用によって N_2O の発生が抑制できるとの知見から、ペレット化による N_2O の発生の抑制が期待されたが、混和直後の発生ピークはペレット化することで小さくなるものの、培養期間を通じた発生量は、ペレット堆肥が粉状堆肥を上回ることを確認した。また、エキストルダ方式のペレット堆肥を供試した場合においても、ローラー圧縮方式のペレット堆肥と同様、培養期間を通じた発生量は、ペレット堆肥が粉状堆肥を大きく上回り、亜酸化窒素放出の抑制効果についての確認はできなかった。これらの点から、鶏ふん堆肥では、豚ふん堆肥で報告されたような成形による N_2O 放出の抑制効果は認められない可能性が示唆された。しかしながら、この実験系では、植物の窒素利用を考慮していないため、実際の農業場面からの放出と異なる可能性が考えられた。

そこで、室内実験系に供試した鶏ふん堆肥と鶏ふんペレット堆肥を三重県松阪市の黒ボク土圃場に施用し、鶏ふん堆肥の成形による N_2O の放出抑制効果を圃場レベルで検討した。

その結果、冬キャベツ作において粉状鶏ふん堆肥施用区から放出される N_2O フラックスは、最大で $0.14\text{ mg m}^{-1}\text{ hr}^{-1}$ であり、無窒素区と同程度であった。一方、鶏ふんペレット堆肥施用区から放出される N_2O フラックスは、最大 $0.27\text{ mg m}^{-1}\text{ hr}^{-1}$ と粉状堆肥施用区の2倍程度であった。また、 N_2O の総発生量は、粉状鶏ふん堆肥施用区で 0.12 g m^{-1} 、鶏ふんペレット堆肥施用区で 0.13 g m^{-1} となり、総発生量からみても成形による N_2O の放出抑制効果はみられなかった (図8)。

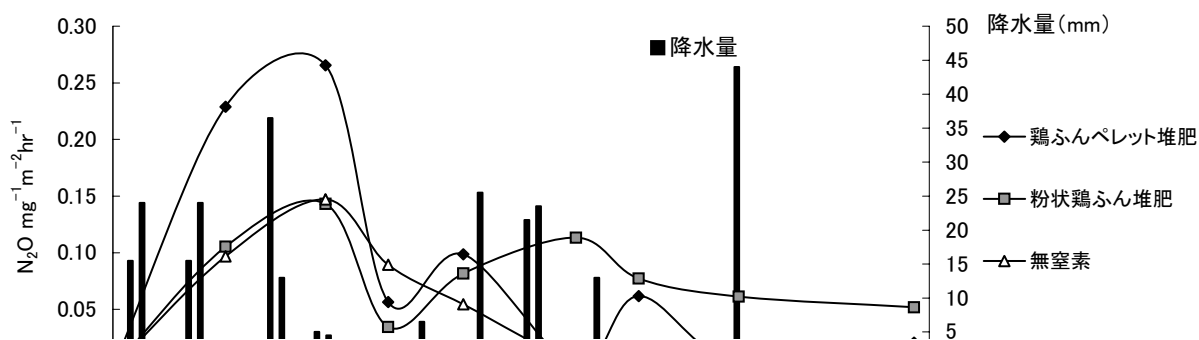


図8 冬キャベツにおける施用堆肥の形状の違いが検出亜酸化窒素フラックスに及ぼす影響

* 耕種概要 圃場：三重県松阪市嬉野川北町 (黒ボク土)

品種：松波 (2条植 定植日 9/5 収穫日 12/1)

堆肥：鶏ふん堆肥 (T-N: 5%) およびそれをディスクペレッター方式成型ペレット堆肥を 500 g m^{-2} を9/5に施用

春キャベツ作においては、鶏ふんペレット堆肥施用区から最大 $0.11\text{mg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ の N_2O フラックスが確認された。これは、粉状鶏ふん堆肥施用区の最大値の $0.04\text{mg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ の3倍程度であった。しかしながら、 N_2O フラックス自体は、冬キャベツ作の1/3程度と低いものであった。これは、堆肥施用時の気温が低いことに起因していると考えられる。 N_2O の総発生量は、粉状鶏ふん堆肥施用区で 0.10g m^{-2} 、鶏ふんペレット堆肥施用区で 0.08g m^{-2} となり、成形による N_2O の放出抑制効果はみられなかった（図9）。

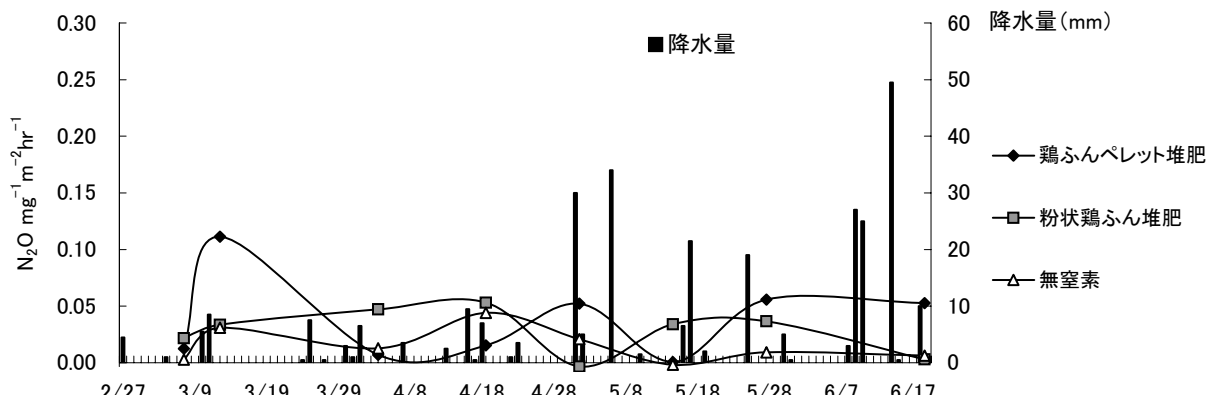


図9 春キャベツにおける施用堆肥の形状の違いが検出亜酸化窒素フラックスに及ぼす影響

* 耕種概要 圃場：三重県松阪市嬉野川北町（黒ボク土）/品種：SE（2条植 定植日 2/27 収穫日 6/6）

堆肥：鶏ふん堆肥（T-N：5%）およびそれをディスクペレッター方式成型ペレット/堆肥を 500g m^{-2} を3/4に施用

鶏ふん堆肥の成形化は、圃場レベルでも N_2O の放出の抑制に効果は認められなかった。

緩効性肥料や豚ふん堆肥の知見から、堆肥の成形化は、 N_2O の放出の抑制に最も有効と考えられてきたが、今回の試験から、全ての堆肥に当てはまるわけではないといわざるをえない。今回、室内実験系の結果から、混和する土壌量を増やすことで N_2O 放出のピークが減少する傾向が確認されている。鶏ふんペレット堆肥は、土壌と比較して比重が軽いいため、耕起によって土壌表層に現れやすい。このことが、 N_2O の放出が低下しなかった原因と推察される。鶏ふんペレット堆肥によって N_2O の放出を抑制する方法としては、圃場レベルでの検討が未検討であるが、施用時にできるだけ深耕することが有効と考えられる（図10）。

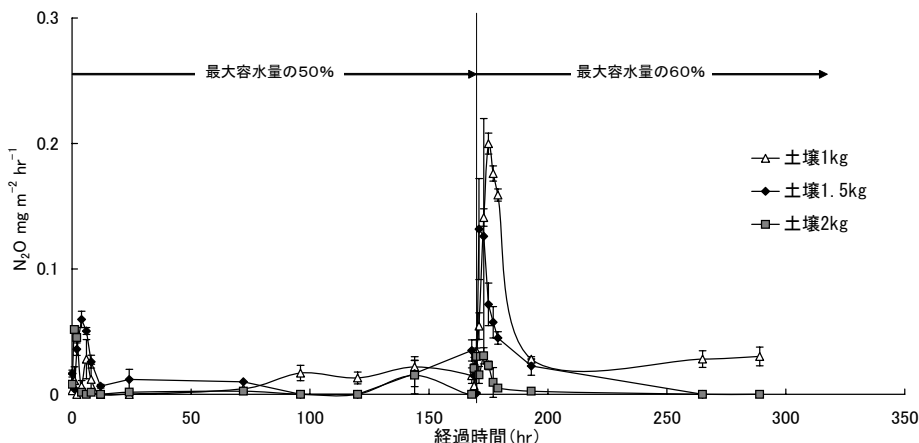




図10 試作実験系における土壌量の違いが検出亜酸化窒素フラックスに及ぼす影響

*黒ボク土（生土）に鶏ふん堆肥（T-N：5%）4gを混和し、仮比重が0.6になるよう容器に充填した温度条件25℃、土壌水分を最大容水量の50%に調整し7日間培養後、土壌水分を最大容水量の60%にし続けて7日間培養した

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

豚のGHG削減飼料給与試験ではアジアの大規模養豚場で標準的な穀物主体飼料に対して、実験動物、飼料原料の粒度に考慮した今回の実験でも窒素蓄積量が低下したことから、これまでアミノ酸の利用性に関して既存の報告とは異なる結果が再確認された。血漿中遊離アミノ酸濃度（必須アミノ酸のみ）の結果を見ると、慣行飼料区と比べて低蛋白質（GHG削減）区ではリジンの

写真1 冬キャベツ圃場におけるサンプリング

に *撮影 2006年12月5日（三重県松阪市嬉野川北町圃場）
 摂取量が数値的に低くなったのかもしれない。リジンとは異なってトレオニンは結晶アミノ酸として添加する場合にはその利用効率がやや劣り、要求量よりも多くの量を必要とするのかもしれない。豚の消化器官において添加アミノ酸の吸収機序は、ペプチド状態の飼料原料由来のアミノ酸とは異なる可能性が示唆された。

家畜排泄物の堆肥化处理においては、堆肥化堆積物中での増殖の遅い亜硝酸酸化細菌が、結果として堆積物中の亜硝酸態窒素の蓄積と亜酸化窒素ガスの放出を引き起こすことが明らかとなった。すなわち、堆肥化過程で発生する N_2O を抑制するためには、亜硝酸態窒素の蓄積をできるだけ早く解消することが重要であり、またそれは完熟堆肥（亜硝酸酸化細菌を含有する）の添加という比較的容易な方法で成し遂げられることがこの試験で実証された。また、鶏ふんペレット堆肥施用時の N_2O 放出は、粉状の鶏ふん堆肥施用時に比べ多く、豚ふん堆肥で報告されたような

N₂O放出の抑制効果は認められなかった。

(2) 地球環境政策への貢献

最終年度に行った不断給餌による飼養試験で、生産性を低下させることなく窒素排泄量を低減できる飼料の開発の目処が立ち、窒素の利用性を改善することでGHG削減が可能であることを確認できた。すなわち、養豚現場の実態に即した不断給餌条件下かつ群飼条件下での飼養試験で、慣行飼料区（対照）と2水準の低蛋白質アミノ酸添加区は日増体量、飼料摂取量、飼料効率においても数値的にほぼ同じで栄養価はほぼ同等と考えられた。また、3試験区すべての日増体量が1000g/dを超えており、標準的な発育(850 g/d、日本飼養標準2005年版)よりも優れることから、低蛋白質アミノ酸添加飼料は、不断給餌条件下においては慣行飼料と比べて統計的に有意差が見られる程の差はないものと思われた。このことは、今回考案したGHG削減目的の低蛋白質アミノ酸添加飼料が豚の増体、すなわち生産性を低下させることなく窒素排泄量を低減できる事を示している。

また、家畜排泄物の堆肥化处理から発生するN₂Oを抑制するためには、完熟堆肥（亜硝酸酸化細菌を含有する）の添加が有効と判明した。家畜ふん尿堆積物中の亜硝酸酸化細菌は、堆肥化過程でアンモニア酸化細菌に比べて増殖が遅延するため、そのままでは亜硝酸態窒素の蓄積が起これ、結果として多量の亜酸化窒素生成と揮散がおきる。この亜酸化窒素揮散防止のため、不足する亜硝酸酸化細菌数を、一次発酵終了時期に堆肥化混合物に補充することにより、亜硝酸態窒素の蓄積が解消可能と判明した。

これら両技術はコスト的に安価で、農家への導入に技術的問題が見あたらないため、今後関連行政機関や飼料メーカー等と連携して普及に努める。

6. 引用文献

- (1) IPCC: Climate change 2007, Synthesis report, Cambridge University Press (2007).
- (2) FAO/LEAD: Livestock's long shadow -environmental issues and options- (2006)
<http://www.fao.org/ag/magazine/0612spl.htm>
http://www.virtualcentre.org/en/library/key_pub/longshad/A0701E00.pdf
- (3) IPCC: Climate change 2007, Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2007).
- (4) 環境省：温室効果ガス排出量算定方法検討会：温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果 (2002).
- (5) IPCC: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (2000).
- (6) General Statistical Office Department of Agriculture, Forestry and Fishery, Vietnam: Statistical Data of Vietnam Agriculture, Forestry and Fishery 1975-2000, General Statistical Office Department of Agriculture, Forestry and Fishery, Statistical

Publishing House (1975-2000).

- (7) 羽賀清典：IV. 家畜排せつ物からのメタン及び亜酸化窒素の発生と制御，畜産における温室効果ガスの発生制御（総集編）84-110，（社）畜産技術協会（2002）.
- (8) 農林水産省生産局畜産部畜産振興課，消費・安全局畜水産安全管理課：飼料をめぐる情勢（平成18年3月），<http://www.maff.go.jp/lin/pdf/05-01megurusiryoku.pdf>
- (9) 農林水産省：世界の穀物等の需給動向（平成17年8月）
http://www.maff.go.jp/www/press/cont2/20050831press_8b.pdf

7. 国際共同研究等の状況

研究所間協定覚え書きに基づく共同研究を、ベトナム国カントー大学（代表：L. H. Mahn）との間で引き続き行っている。また、タイでは、コンケンで現地の改良普及員2名、バンコクでは主に現地政府機関であるDepartment of Livestock DevelopmentのMs. Nuttanart Khotprom, Dr. Sommai Chatsanguthai, Dr. Adisorn Chanprapalartの3名と面会、タイ国政府研究機関との協力研究体制を確認した。さらに東南アジアの大規模飼料会社の1つである長勝(TOP FEED)飼料有限公司（タイ）を訪問し、飼料へのアミノ酸添加についての意識調査を行った。Mr. Paitoon Paspinasuとの対話により、現地飼料会社が低蛋白質アミノ酸添加飼料へ高い関心と導入意欲を感じた。アミノ酸添加飼料が経済的優位性を持つ可能性に大きな関心を示しており、積極導入により、今後温室効果ガスの効果的な削減が期待できる。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 長田隆，猫本健司，白石誠，石橋誠，原正之，干場信司，鈴木一好，羽賀清典，代永道裕：
におい・かおり環境学会誌，35(1)，21-27（2004）「畜舎内のアンモニア，メタン及び亜酸化窒素の濃度と舎内環境」
- 2) Y. Fukumoto, T. Osada, D. Hanajima and K. Haga: Bioresource Technology, 89, 109-114 (2003) “Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale”
- 3) Y. Fukumoto, K. Suzuki, T. Osada, K. Kuroda, D. Hanajima, T. Yasuda and K. Haga: Environ. Sci. Technol., 40(21), 6787-6791 (2006) “Reduction of nitrous oxide emission from pig manure composting by addition of nitrite-oxidizing bacteria”

<査読付論文に準ずる成果発表>（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) T. Osada: Greenhouse Gas Control Technologies, Elsevier Sci. Ltd., 1299-1304 (2003)
“Nitrous Oxide Emission from the Wastewater Purification for Liquid Part of Swine Waste”
- 2) 白石誠, 長田隆, 滝本英二, 脇本進行, 北村直起, 奥田宏健: 岡山総畜セ研報, 15, 70-75 (2004) 「亜酸化窒素・メタンの発生抑制方法の検討—肥育牛ふんの堆肥化から発生するアンモニア・亜酸化窒素・メタン濃度」
- 3) 石橋誠, 石原健, 富森健助: 平成15年度畜産研究所試験成績書, 149-154 (2004) 「畜産業における温室効果ガス排出削減技術の開発 (第二報)」
- 4) 長田隆: 北海道家畜管理研究会報, 40, 6-10 (2004) 「環境への影響をどのように評価するのか」
- 5) 長田隆: 続・環境負荷を予測する, 波多野隆介, 犬伏和之編, 博友社, ISBN4-8268-0202-1, 205-220 (2005) 「畜糞尿処理に伴う温室効果ガス発生測定」
- 6) T. Osada, Y. Fukumoto, T. Tamura, M. Shiratori and M. Ishibashi: Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG-4), coordinated by A. van Amstel, Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 043 9, p 105-111 (2005) “Greenhouse gas generation from livestock waste composting”
- 7) 白石誠, 滝本英二, 脇本進行, 小林宙, 長田隆: 岡山総畜セ研報, 16, 70-75 (2005)
- 8) 長田隆: 畜産技術5月号, 2-5 (2005) 「畜舎内環境負荷ガス濃度調査と畜舎環境の評価」
- 9) 梶 雄次: 環境保全型農業辞典, 丸善, 842-846 (2005) 「11.2 家畜から排せつされる環境負荷物質 (窒素・リン) 低減と飼料設計」
- 10) T. Osada: In ‘Greenhouse Gas Inventory Development in Asia: Experiences from Workshops on Greenhouse Gas Inventories in Asia’, ISSN 1341-4356, CGER-I067-2006, National Institute for Environmental Studies, p78-82 (2006): “Better evaluation system for N₂O and CH₄ emission from composting and wastewater purification of Livestock waste”
- 11) 長田隆: 畜産技術, 6月号, 6-10 (2006) 「家畜ふん尿堆肥化時におけるアンモニア, メタンおよび亜酸化窒素の環境への放出」
- 12) 長田隆: 畜産における環境影響評価とその利活用 (平成18年度家畜ふん尿処理利用研究会講演資料), p55-62 (2006) 「畜産における環境影響評価のための原単位の把握」
- 13) T. Osada: In ‘Global perspective on greenhouse gas emission from agricultural sector’, Edited by The organizing committee of OASERD-APEID, Elsevier Science, p91-98 (2007) “Evaluation procedure of greenhouse gas emission from livestock waste management systems in Japan”
- 14) 長田隆: 酪農ジャーナル, 5月号, p62-64 (2007) 「家畜ふん尿処理からの温室効果ガスをどう抑えていくか」
- 15) 長田隆: デーリイマン5月号, p78-79 (2007) 「温暖化防止の観点から見た家畜ふん尿処理」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 長田隆, 田村忠, 白石誠, 石橋誠, 福本泰之: 日本土壤肥料学会 (2003) 「家畜排せつ物の処理過程からの環境負荷ガスの測定 (堆積型堆肥化処理からの環境負荷ガス発生パターン)」
- 2) T. Osada, Y. Fukumoto, M. Shiraishi, K. Uchida, N. Wakimoto, T. Tamura and M. Ishibashi: CIGR International Conference 2004, Beijing, China (2004) “Methane and Nitrous Oxide Emission from Composting of Pig Manure”
- 3) K. Nekomoto, K. Suzuki, T. Osada, S. Hoshiba1, H. Kawakami, N. Okawa, T. Uchida, S. Morital and K. Matsumoto: CIGR International Conference 2004, Beijing, China (2004) “Evaluation of the nitrogen surplus from manure handling and feed production in daily farm”
- 4) 荻野暁史, 長田隆, 小阪幸子, 原正之, 村上圭一, 竹内雅己, 石橋誠, 福本泰之, 鈴木一好, 羽賀清典, 田中康男, 花島大, 和木美代子, 島田和宏, 賀来康一, 代永道裕: 日本畜産学会第103回大会 (2004) 「採卵鶏農場における環境影響評価へのライフサイクルアセスメント手法適用の検討」
- 5) 長田隆, 荻野暁史, 石橋誠, 原正之, 小阪幸子: 第18回においおき環境学会 (2005) 「採卵鶏農家から発生するアンモニア」
- 6) T. Osada, Y. Fukumoto, M. Shiraishi, K. Uchida and N. Wakimoto: The 2nd Symposium on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, Zurich (2005) “Regulation of methane and nitrous oxide emission from composting of pig manure”
- 7) T. Tamura and T. Osada: The 2nd Symposium on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, Zurich (2005) “Effect of moisture control by mixing of wheat straw on GHG emission from pile-type composting of dairy manure”
- 8) M. Shiraishi, N. Wakimoto, E. Takimoto, H. Kobayashi and T. Osada: The 2nd Symposium on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, Zurich (2005) “Effect of moisture control by mixing of wheat straw on GHG emission from pile-type composting of dairy manure”
- 9) M. Ishibashi, M. Koga and T. Osada: The 2nd Symposium on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, Zurich (2005) “Greenhouse gas and ammonia emission from a drying house and deodorization system for poultry manure”
- 10) 梶 雄次, 山崎正史, Le Thi Men, 松本光史, 村上斉: 日本畜産学会第105回大会 (2005) 「ベトナム・メコンデルタ地域における標準的な肥育豚用飼料の原料組成と窒素排泄量の削減に有効な飼料の設計および効果」
- 11) 梶 雄次, 井上寛暁, 松本光史, 村上斉: 日本畜産学会第106回大会 (2006) 「イソロイシンとバリンを利用した低C P トウモロコシー大豆粕飼料給与豚における窒素排泄量削減効

果」

- 12) 竹内雅己, 原正之, 長田隆: 日本土壤肥料学会2005年度島根大会 (2005) 「室内実験系による有機物施用に伴う亜酸化窒素放出の評価」
 - 13) Y. Kaji, S. Yamasaki, M. Matsumoto, H. Murakami and H. Inoue: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “A possibility to reduce nitrous oxide emission from pig production in the rice-producing area of Southeast Asia by improving dietary amino acid composition “
 - 14) M. Takeuchi, M. Hara and T. Osada: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Estimation of Nitrous Oxide Emission from Agricultural soil Using the Laboratory Measurement System Eliminating the Influence of Environmental Factors”
 - 15) T. Osada, Y. Fukumoto, T. Tamura, M. Shiraishi and M. Ishibashi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Greenhouse gas evaluation for the compost of piled livestock manure”
 - 16) 福本泰之, 鈴木一好, 黒田和孝, 花島大, 安田知子: 日本畜産学会第106回大会 (2006) 「豚ふん堆肥化において亜硝酸酸化細菌の添加が N_2O 発生に及ぼす影響」
 - 17) 長田隆, 前田高輝, 森岡理紀, 細川弘史: 廃棄物学会講演論文集, p400-402 (2006) 「家畜ふんの堆積型堆肥化過程からの環境負荷ガス発生」
 - 18) 長田隆, 前田高輝, 森岡理紀, 細川弘史: 日本土壤肥料学会講演要旨集 p198 (2006) 「搾乳牛ふんの実規模堆積から発生する温室効果ガス」
 - 19) 長田隆, 田村忠, 白石誠, 石橋誠, 前田高輝, 森岡理紀: 農業環境工学関連7学会2006年合同大会講演要旨集(CD-R), S021201 (2006) 「家畜排せつ物起源のアンモニア, メタン, 亜酸化窒素」
 - 20) 高田良三, 井筒温子, 大塚 誠, 石田藍子, 中島一喜, 勝俣昌也: 第87回日本養豚学会大会講演要旨 p36 (2007) 「アミノ酸強化飼料が暑熱環境下における肥育豚の飼養成績および血漿中遊離アミノ酸濃度に及ぼす影響」
 - 21) 長田隆, 竹内雅己, 原田泰弘, 前田高輝, 森岡理紀, 細川弘史: 日本畜産学会第107回大会講演要旨 p161 (2007) 「採卵鶏ふんの密閉・縦型堆肥化施設から発生する NH_3 , CH_4 , N_2O 」
 - 22) T. Osada, M. Takeuchi, Y. Harada, K. Maeda and R. Morioka: Proceeding of Greenhouse Gas and Animal Agriculture GGAA2007, p224-228 (2007) “Greenhouse Gas Emissions Produced By A Poultry Manure Treatment Facility Using Forced Aeration Composting”
 - 23) 福本泰之, 鈴木一好, 黒田和孝, 花島大, 安田知子, 犬伏和之: 日本土壤肥料学会 (2007) 「亜硝酸酸化細菌の接種による肥育豚ふん堆肥化過程での亜酸化窒素発生制御」
- (3) 出願特許

なし

- (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

平成18年3月7～9日に、国際ワークショップ「東アジア農業生態系における温室効果ガス発生」を農業環境技術研究所と共催

- (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

- (6) その他

なし