

課題名	S-2 陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発 - 大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策- 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 (3a) 農業生態系におけるCH ₄ 、N ₂ Oソース抑制技術の開発と評価		
課題代表者名	八木一行 (独立行政法人 農業環境技術研究所物質循環研究領域)		
研究期間	平成15-19年度	合計予算額	278,949千円 (うち19年度 53,350千円) ※上記の合計予算額には、間接経費64,544千円を含む
研究体制	<p>(1) わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と広域評価</p> <p>1) わが国とアジア諸国の農耕地からの実効的CH₄、N₂Oソース制御技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 中国におけるCH₄、N₂O発生制御 (独立行政法人農業環境技術研究所) 施設栽培からのN₂O発生制御 (独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構中央農業総合研究センター 北陸研究センター) 関東地方の露地野菜畑からのN₂O発生制御 (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構野菜茶業研究所) インドネシアとタイにおけるCH₄、N₂O発生制御 (千葉大学) 有機物管理技術による水田からのCH₄発生制御 (山形県立農業総合研究センター) 水管理と無代かき栽培による水田からのCH₄発生制御 (福島県農業総合センター) 基盤整備による水田からのCH₄発生制御 (新潟県農業総合研究所) 草地からのN₂O発生制御 (北海道立根釧農業試験場) 九州地方の露地野菜畑からのN₂O発生制御 (熊本県農業研究センター生産環境研究所) <p>2) わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソースデータベースの構築と削減効果の広域評価</p> <ul style="list-style-type: none"> CH₄、N₂Oソースデータベースの構築と統計モデルによる解析 (独立行政法人農業環境技術研究所、独立行政法人海洋研究開発機構) 水田からのCH₄発生評価に対するプロセスモデルの適用 (独立行政法人農業環境技術研究所、北海道立上川農業試験場) 流域複合生態系解析によるCH₄、N₂O削減効果の定量的評価 (北海道大学) <p>3) 水田からのメタン発生量広域評価を目指した水田土壌化学性のパラメーター化 (国際交流研究：独立行政法人農業環境技術研究所)</p> <p>4) アジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂O発生量のモデリング (国際交流研究：独立行政法人農業環境技術研究所)</p> <p>(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</p> <p>1) アジア諸国において有効な反すう家畜由来CH₄発生制御技術の開発とソースデータベースの構築及び削減効果の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> わが国、中国およびインドネシアにおける反すう家畜からのCH₄発生量に関する研究 (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) タイにおける反すう家畜からのCH₄発生量に関する研究 (独立行政法人国際農林水産業研究センター) <p>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北海道農業研究センター)</p>		
I. テーマ3aの全体構成	<p>テーマ3aは、農耕地を対象としたサブテーマ(1)「わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と広域評価」、および畜産業を対象としたサブテーマ(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」で構成される。</p> <p>サブテーマ(1)は、さらに、現地圃場試験から各種温室効果ガス(GHG)の削減効果を定量評価することを目的としたサブサブテーマ(1)-①「わが国とアジア諸国の農耕地からの実効的CH₄、N₂Oソース制御技術の開発」、およびGHGソースデータベースの構築・解析と発生制御技術の削減効果に対する広域評価を目的としたサブサブテーマ(1)-②「わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソースデータベースの構築と削減効果の広域評価」が含まれる。さらに、サブサブテーマ(1)-②を補助するために、プロセスモデルの開発とそのアジア地域での適用を目的とした国際交流研究として、サブサブテーマ(1)-③「水田からのメタン発生量広域評価を目指した水田土壌化学性のパラメーター化」およびサブサブテーマ(1)-④「アジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂O発生量のモデリング」を行った。サブサブテーマ(1)-①で有効かつ実効的であることが明らかになったソ</p>		

ース制御技術について、その知見をサブサブテーマ（1）－②における広域評価で活用した。

サブテーマ（2）は、反すう家畜由来CH₄発生を対象としたサブサブテーマ（2）－①「アジア諸国において有効な反すう家畜由来CH₄発生制御技術の開発とソースデータベースの構築及び削減効果の評価」、および畜産廃棄物由来CH₄、N₂O発生を対象としたサブサブテーマ（2）－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」で構成されている。両サブサブテーマとも、現地定量試験およびデータベースの構築と削減効果の広域評価を行った。

全体の課題構成を図1に示す。



図1. 本研究の課題構成

II. 本研究により得られた科学的成果

農業生態系におけるCH₄、N₂Oソース抑制技術については、これまでの研究から、1) それぞれのソース制御技術についての定量的評価の精緻化、2) 経済性や生産効率も配慮した実効的な技術開発、3) データベースの構築と広域評価手法の開発、の必要性が指摘されていた。

本テーマにおける農耕地と畜産業における実証試験では、水田管理技術、施肥技術、家畜飼養技術、および畜産廃棄物処理技術について、わが国とアジアの農業の現場で適用可能性の高いものを選択し、それぞれの削減ポテンシャルを定量評価した。また、水田からのCH₄に対する水管理と有機物管理、化学肥料からのN₂Oに対する緩効性肥料、反すう家畜からのCH₄に対する飼養改善、および畜産廃棄物からのN₂Oに対する飼養改善と堆肥化改善等の技術については、テーマ4と共同でコスト評価も進めた。これらのことから、農業分野において不足していたGHG発生制御技術の総合評価を可能とするとともに、アジア地域におけるGHGソース削減に大きな貢献の出来る可能性があると考えられる。

また、GHGソースデータベースの構築とその解析から、排出係数や各種制御要因の寄与が定量された。これらの値は、IPCCガイドライン等、数少ないデータからエキスパートジャッジメントを加えて求められていた、地域や地球規模でのGHG排出量の見積もりを精緻化するものである。なお、これら構築したデータベースは、一部、参画機関のweb siteにて公開している。さらに、流域複合生態系解析やプロセスモデルの開発はGHGソース削減効果の広域評価に必要であるが、アジアの環境条件において利用可能なものは開発されていない。本研究において、北海道内の広域評価を行うことから、それらの有効性が示された。

III. 成果の地球環境政策への貢献

本研究の成果は、わが国、アジア各国および世界の農業セクターにおけるGHG排出削減技術の適用に資するものであることから、CDMの活用を含めた、わが国の地球環境政策推進に寄与するものである。本研究で実証・評価された農耕地からのGHGソース制御技術の多くは環境保全型農業による地球温暖化緩和策として「農林水産省地球温暖化対策総合戦略（平成19年7月）」に成果が盛り込まれるとともに、平成20年3月に改訂された「京都議定書目標達成計画」において、有機物管理と水

管理による水田からのCH₄発生削減策、および施肥管理による農耕地からのN₂O発生削減策として明示され、削減目標（16万7千トンCO₂）が提示された。さらに、水管理による水田からのCH₄発生削減策については、平成20年度からの農林水産省全国実証事業として予算化され、全国各地での実証試験と普及を進め、京都議定書第一約束期間内での実用化と削減達成が目標として提示された。

一方、本研究の成果は、わが国、アジア各国および世界におけるGHGガス排出量インベントリーを精緻化するものである。GHGソースデータベースの構築とその解析から求められた排出係数や拡大係数はIPCCガイドライン執筆者会合において提示・検討され、2006年に出版された改訂IPCCガイドラインにおいて水田からのCH₄およびN₂O排出係数デフォルト値として採用された。また、わが国の農耕地からのN₂O、反すう家畜からのCH₄、および家畜排泄物からのCH₄、N₂Oについては、本研究で得られた排出係数と算定手法が、環境省温室効果ガス算定委員会（環境省地球環境局）の農業分科会で検討され、2006年にわが国がUNFCCC事務局に提出した「割当量報告書」と最新の「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」に盛り込まれた。また、国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）の要請で、参画者が第3回および第4回「温室効果ガス算定に関する国際ワークショップ」に出席し、アジア各国におけるGHGインベントリー改善に対して貢献した。

IV. 研究概要

1. 序（研究背景等）

地球規模でのメタン（CH₄）および亜酸化窒素（一酸化二窒素：N₂O）発生量のそれぞれ約40%は、農耕地と畜産業等、農業生態系が起源となっている。これらのソースは、水田面積の拡大、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。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でも指摘されているように、これらのソースは、農耕地の栽培管理、施肥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（IPCC、2007）。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。

このような議論における現在の問題点として、1) 気候や土壌など農業生態系の多様性のため、それぞれのソース制御技術について十分な定量的評価が得られていないこと、2) これまでに提案されている制御技術の多くは、GHG制御効果だけに着目したため、経済性や生産効率に対する配慮が欠けており、第一約束期間以降（ポスト京都）にはこれらの問題を含んだ実効的な技術開発が必要とされること、3) 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広域評価手法の開発が必要であること、が指摘されている。

2. 研究目的

わが国とアジア諸国の農耕地と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予察評価を目的とする。具体的には、わが国の農耕地と畜産業における、現場で実用可能なCH₄、N₂Oソース制御技術の開発試験を各地で行い、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温室効果ガス（GHG）ソース制御技術について、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CH₄、N₂O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。

本研究の成果は、アジア各国におけるGHG排出量インベントリーを精緻化すると同時に、削減効果の定量的評価を可能とする。そのために、農耕地と畜産業について、それぞれのサブテーマおよびサブサブテーマを設定し、わが国とアジア諸国での実効的なソース制御技術の定量的評価とデータベース構築および削減効果に対する広域評価を行う（図1）。

3. 研究の方法と結果

（1）わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソース制御技術の開発と広域評価

1）わが国とアジア諸国の農耕地からの実効的CH₄、N₂Oソース制御技術の開発

水田からのCH₄およびN₂O発生制御に有効と考えられる各種管理技術、および主要な栽培体系におけるN₂O発生制御技術としての施肥栽培管理について、その削減効果を定量評価するための現地試験をわが国とアジアの農耕地で行った。試験地点の位置と試験対象を図2に示す。ガス発生量計測法はいずれもクローズドチャンバー法を用いて数日～約10日毎に計測を行い、作物栽培期間または年間のガス発生量を求めた。また、試験に用いた圃場と作物品種は現地の典型に近いもので、慣行的な栽培管理を標準（対照）とした。さらに、各技術について、現地圃場試験より定量された削減効果をもとに、技術を適用した場合の広域（地域、日本全体、アジア地域）におけるCH₄ およびN₂O発生削減ポテンシャルとコスト評価を行った。

わが国の水田における試験から、稲わら春すき込みを家畜ふん堆肥に置き換える有機物管理、中干し期間の長期化や栽培後期の水管理改善、無代かき栽培、および基盤整備による土壌浸透能改善の各技術が、 CH_4 発生を大きく削減する有効な技術であることが示された。完熟した牛ふん堆肥、豚ふん堆肥を稲わら春すき込みに代えて適量施用することにより、水田からの CH_4 発生量をそれぞれ約50%、約30%削減できた。ただし、腐熟程度が十分でない堆肥は CH_4 発生量を増加させ、削減技術として適さないことも明らかになった。中干し時期の前進・延長試験において、水稻生育期間中の CH_4 発生量は慣行中干し処理に比べて2週間前進および1週間前進で、それぞれ、53-72%および26-51%削減できた。中干し期間の違いにより N_2O 発生量には有意な差が見られず、 CO_2 に換算値では水田から発生する N_2O の温室効果に対する寄与度は CH_4 の約2%程度であり、温室効果へ寄与する影響は少ないものと考えられる。水稻の収量は1週間前進区では慣行と同等であったのに対し、2週間前進区では4~12%程度減少した。品質は各区とも差がみられなかった。以上の結果から、1週間程度の中干し時期の前進・延長は有効なGHG抑制技術であることが明らかになった。また、水稻生育後期の水管理を間断灌漑に改善することにより、 CH_4 発生量は20-29%削減できた。無代かき栽培においても、 CH_4 発生量は6~20%程度削減できたが、無代かき区での収量は4~5%減少し、品質も低下した。基盤整備（大区画化と排水改善のための暗渠設置）の行われている農家水田と行われていないものとの比較では、暗渠施工を伴う基盤整備による CH_4 発生量の削減率は平均54.1%（35~84%）であった。

CH_4 発生制御に対する有機物管理と水管理の有効性は、中国、インドネシア、およびタイの水田における試験でも確認された。中国江蘇省太湖地域の水稲-小麦二毛作圃場では、麦わら管理による水田からのGHG発生削減試験を行い、麦わらを水田の畝間の作土層の一部（7~8列に1列）に溝状に施用し、圃場分解処理を行うことにより、慣行すき込みに比べ、32%の削減効果が示された。インドネシア・ボゴール（ジャワ島）での試験地では、間断灌漑区と飽和水分区では常時湛水区に比べて CH_4 発生量が12-80%減少したが、 N_2O 発生量は飽和水分区で倍増した。同様の CH_4 発生量の削減傾向は南カリマンタンと南スラベシでも認められ、この場合、 N_2O ・ CO_2 発生量および収量には影響は見られなかった。またコンケン（タイ）水田では、有機物施用による CH_4 発生量増加より移植を直播に変更するほうが1株当たりの CH_4 発生量増加が顕著であった。

施肥土壌からの N_2O 発生に関しては、わが国での試験から、草地における季節的な施肥配分の改善と硝化抑制剤の使用および露地野菜（キャベツ）畑における堆肥と緩効性（肥効調節型）肥料の使用による N_2O 発生量低減が認められた。北海道根釧の草地における試験では、年間窒素施肥量の5/6量を早春に、1/6量を一番草収穫後に施肥する春重点施肥と硝酸化成抑制剤が含まれた肥料施用により、おける N_2O 発生量を低減できることが示された。露地野菜（キャベツ）畑における試験では、夏作の収穫後に残渣をすき込むことにより大きな N_2O 発生が認められたが、この発生は堆肥と緩効性（肥効調節型）肥料の使用により低減できることが示された。その栽培期間全体での削減率は、熊本県の試験では緩効性肥料が24~54%、ブレンド堆肥施用が52%、茨城県では肥効調節型肥料の深層施肥栽培で24%であった。また、キャベツ残渣すき込みにより発生する N_2O の排出係数は慣行施肥栽培で0.31%、肥効調節型肥料の深層施肥栽培で0.24%であった。黄色土施設畑でのトマト栽培では、栽培期間中の総窒素施肥量がほぼ同じ場合、 N_2O 発生量は、慣行施肥と養液土耕で有意な差のないことが示された。

硝化抑制剤等の資材による N_2O 発生削減効果は中国東部のトウモロコシ畑でも確認された。硝化抑制剤入り尿素（urea+DCD）の使用により、尿素（慣行）施用に比べ、 N_2O 発生削減効果が確認された。ウレア-ゼ阻害剤入り尿素（urea+HQ）の効果は2005年には認められたが、2006年は、逆に、発生量が増加した。3年間平均すると、urea+DCD およびurea+HQ の慣行施用に対する N_2O 発生削減率は、それぞれ、54%および44%であった。これらの処理におけるトウモロコシ収量への影響は見られなかった。同様の傾向はインドネシア、南カリマンタンと南スラベシでも認められた。

以上の現地試験より得られた削減データから、水田における有機物管理と水管理、および畑・草地における硝化抑制剤等の使用と被覆肥料+残渣管理について、技術を適用した場合の広域（日本全体およびアジア地域）における CH_4 および N_2O 発生削減ポテンシャルを試算した（表1）。その結果、有機物管理と水管理による水田からの CH_4 発生削減ポテンシャル（0.25および0.67 Mt yr⁻¹）は、京都議定書による6%削減目標量に対し、それぞれ、1.1%および3.0%に相当することが示された。また、こ

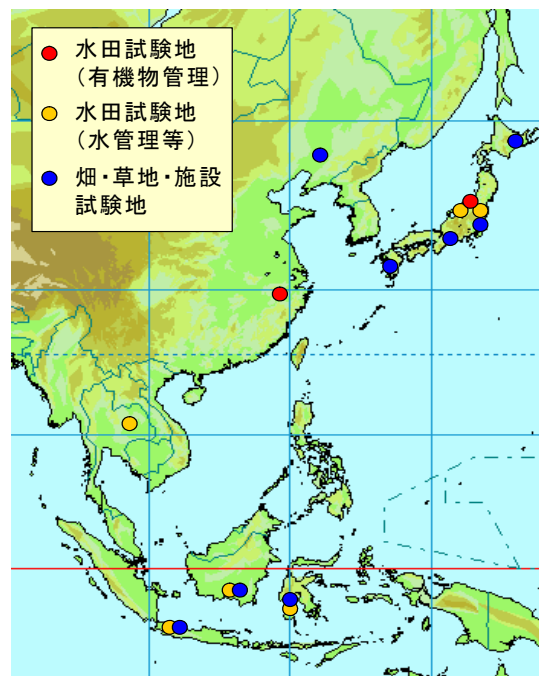


図2. 現地試験地点の位置

これらの技術をアジア全体に拡大した場合、大きなGHG排出削減ポテンシャルを期待できることが示唆された。一方、硝化抑制剤等による畑・草地からのN₂O発生削減はわが国におけるポテンシャルは小さいが、アジア地域に拡大した場合には大きなものが期待できることが示唆された。

さらに、有望であると思われる技術について、各地域で適用した場合のコスト評価を行った(表2)。その結果、水田有機物管理については山形県での試算において比較的大きなコスト増加が示された。一方、水田水管理と中国製資材による施肥管理についてはコスト増加がきわめて小さく、有利なGHG発生制御技術であることが明らかにされた。水田水管理については、インドネシアでのケーススタディから小規模CDM事業の可能性が示された。

表1. 技術によるCH₄およびN₂O発生削減ポテンシャルのまとめ

対象ソース	水田からのCH ₄		畑・草地からのN ₂ O	
	有機物管理	水管理	硝化抑制剤等	被覆肥料と残渣管理
削減技術				
対象面積等	アジアの水田	アジアの灌漑水田	アジアの化学肥料	わが国のキャベツ、ハクサイ等
削減率	30~50%	35~45%	30%	24%
削減ポテンシャル (Mt C/yr)	日本:0.25 アジア:12.8 ^{*1}	日本:0.67 アジア:27.3	日本:0.02 ^{*2} アジア:16	日本:0.0006 アジア:ー
リーケージ	作業機械からのCO ₂ 排出等	N ₂ O発生世界:2.7	無	無
コスト	中~大 (管理コスト)	少~中 (インフラ整備)	少~大 (肥料コスト)	大 (作業コスト)

*1: 水田の10%に適用した場合
*2: 草地のみ

表2. 技術を各地域で適用した場合のコスト評価

対象ソース	水田からのCH ₄			畑・草地からのN ₂ O	
	有機物管理	水管理		緩効性肥料	
削減技術	稲わらの春すき込みを堆肥に代替	中干し期間の1週間延長等	コンクリート水門設置による中干し	硝化抑制剤資材の添加	被覆肥料の深層施肥
対象面積	山形県の水田 57,360 ha	日本全国の慣行水管理水田 1,730,000 ha	インドネシアの対象水田 13,000 ha	中国遼寧省トウモロコシ畑 1,900,000 ha	わが国のキャベツ等栽培 65,000 ha
削減率	30~50%	39%	40%	40%	24%
削減ポテンシャル (10 ³ t C/yr)	94	630	14	800	0.55
リーケージ (10 ³ t C/yr)	0	60	1	0	ND
コスト (円/t C)	67,000	0	66	3,000	5,900
	稲わら回収と堆肥使用価格 (110,000円/ha)	灌漑水代金は年間契約のため増減無し。労働力の増加も無し	コンクリート水門設置費用(6,200円/30ha)、および水管理の労働力(1,600円/30ha/yr)	資材代金(390円/ha)必要だが、追肥を省けることにより、労働力(300円/ha)節約	肥料コスト(48,000円/ha)、燃料コスト(3,580円/ha)、労働コスト(-1,120円/ha)

*1: ここでは作業によるCO₂排出は考慮せず
*2: CDM事業としての評価は、本文を参照

2) わが国とアジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂Oソースデータベースの構築と削減効果の広域評価
わが国とアジア地域の農耕地からのCH₄、N₂O発生実測値に関する既往文献の収集からデータベースを構築し、統計モデルによる解析から排出係数とその変動要因を評価した。CH₄発生実測データ(8カ国、103地点、868栽培期間データ)については、栽培期間の平均CH₄フラックスと各発生制御要因の関係を線形混合モデルにより解析した。その結果、ベースライン管理(水稻耕作のための湛水前に180日以内の排水期間があり、水稻栽培期間中は常時湛水、有機物無施用条件)でのCH₄排出係数は130(誤差範囲: 80-220) mg m⁻² day⁻¹と算出され、そのほか水管理と有機物管理の影響に関する係数(拡大係数)を定量した。この算定手法は2006年IPCCガイドラインにおけるデフォルト値(Tier 1手法)として採用された。この手法を用いた算定から、世界の水田からのCH₄発生量は25.1 Tg yr⁻¹(誤差範囲: 14.8~45.1 Tg yr⁻¹)であり(図3)、水管理と有機物管理により、それぞれ4.1 Tg yr⁻¹が削減可能であると推定された。また、わが国の農耕地からのN₂Oソースデータベースを整理し、合成肥料および有機肥料からのN₂O排出係数は、茶を除く畑、茶、および水田について、それぞれ0.62%±0.48%、2.9%±1.8%、および0.31%±0.31%を用いることが適切であることを示した。

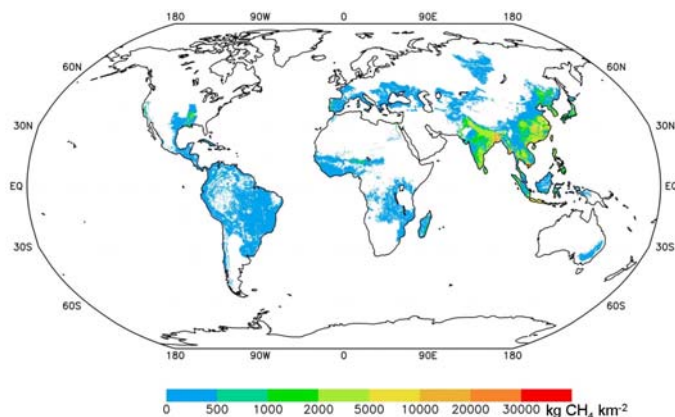


図3. 世界の水田からのCH₄発生量の推定結果(世界全体: 25.1 Tg yr⁻¹)

北海道中央部の集水域を対象に、農耕地からのGHG発生量を流域レベルで推定するため、モニタリングによる測定結果を土壌環境因子と肥培管理因子によってパラメタリゼーションして推定する手法(流域複合生態系解析手法)を開発した。その際、N₂OおよびCO₂発生量については気象要因との関係を、CH₄発生量については稲わら施用量との関係を解析することにより、流域レベルで土地利用および気象条件の変化に伴う農耕地からの温室効果ガス発生量の変化を見積もることが有効であると考えられた。その解析の結果、水田、たまねぎ、穀類の土地利用種がGHG発生量に寄与の大きいことが示され、これらの生産性により環境負荷が増加して

いることが明らかになった。さらに、エコバランスのシナリオ解析により、各年の値よりGWPを6%削減、生産量を維持、かつ余剰窒素を $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以下にした場合の土地利用の組み合わせを、2002年、2005年、2007年について抽出した結果、2002年では57個、2005年では44個、2007年では37個の組み合わせが抽出され、GWP、生産性および余剰窒素の取りうる範囲が大きくなるに従い、設定した削減シナリオに該当する土地利用の組み合わせが減少した。組み合わせを解析した結果からは、特に、豆類を増加、水田を減少させる傾向の土地利用の組み合わせが望ましいとされ、土地利用種間のトレードオフ関係が解析できた。今後の課題として、水田での稲わら回収による CH_4 発生の抑制と、畑草地における緑肥、堆肥、残渣の有機物投入による土壌炭素固定の促進、といった流域全体での有機物管理があげられる。

GHGソース削減効果のTier 3手法による広域評価を可能とするため、わが国各地の水田からの CH_4 発生実測データを用いてプロセスモデル（DNDCモデル）の検証と改良を行った。モデルの検証には北海道および本州の9地点で水管理またはわら施用法を変えて CH_4 発生量を実測したデータを用いた。改良モデルを北海道の水田に適用すると、土壌型やわら施用による CH_4 発生量の季節変化をほぼ推定できた。さらに、本州の水田についても、わら施用や水管理による CH_4 発生量の季節変化をほぼ推定できた。北海道と本州での実測データを合わせて、改良モデルによる年間 CH_4 発生量の推定値は実測値と高い相関（決定係数0.93）があることから、広域評価のために有効であると考えられた（図4）。さらに、改良したDNDCモデルを適用して、北海道の水田の CH_4 発生量について広域評価を試みた。そのために、北海道の水田の土壌と栽培管理について既存のデータベース（DB）を調査し、DNDCモデルの入力データを収集して新たなDBを作成した。このDBをDNDCに入力し、2000年における各3次メッシュの水田からの CH_4 発生量を推定した結果、全道の水田からの平均年間 CH_4 発生量（ CO_2 換算）は $4.2 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と算定された。また、水田の水管理による CH_4 発生削減効果の評価するため、中干しの回数や長さを変えた場合の CH_4 発生量を計算した結果、水管理の改善により発生量を約40%削減できると推定された。

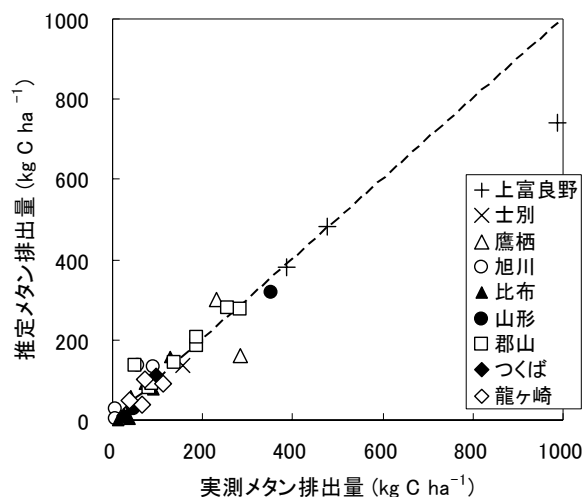


図4. 各地の水田からの年間 CH_4 発生量の実測値と推定値の比較

3) 水田からのメタン発生量広域評価を目指した水田土壌化学性のパラメーター化(国際交流研究)
水田からの CH_4 発生量広域評価において、水田からの CH_4 発生量を制御する土壌の化学性をパラメーター化することが必要である。そこで、日本全国の7府県から、圃場試験を行っている10種類の水田土壌を収集し、同一条件での室内培養実験を行なった。土壌は風乾処理後、WFPS 40%に調整し、2週間前培養した。その後、16週間の嫌気培養実験を行ない、 CO_2 、 CH_4 、被還元性鉄（二価鉄）量および可給態窒素量を測定した。

収集した10種類の水田土壌の理化学性は大きく異なり、また、それらの CH_4 生成量(P_{CH_4})も異なった。 CH_4 生成量を制御する最も重要な要因は易分解性炭素量（二酸化炭素と CH_4 の生成量）と被還元性鉄量であることが明らかになった。また、易分解性炭素量と可給態窒素量(N_{ava})との間には強い正の相互関係が認められたほか、土壌全鉄量(Fe_{total})と被還元性鉄量との間にも有意な相互関係が認められた。これらのことから、 CH_4 生成量と可給態窒素量および全鉄量のあいだに、以下の数式の成立することが示された。

$$P_{\text{CH}_4} = 1.916N_{\text{ava}} - 2.395Fe_{\text{total}}/1000$$

4) アジア諸国の農耕地における CH_4 、 N_2O 発生量のモデリング（国際交流研究）

水稻耕作からの CH_4 発生削減技術は数多くの圃場試験が行われ、それらの削減ポテンシャルについて利用可能な情報として定量されているが、圃場試験の結果を広域評価し、地域における CH_4 発生量やその削減ポテンシャルを見積もるためには、モデルを用いた予測が有効な手法となる。本研究では、タイ各地の水田からの CH_4 、 N_2O 発生に対し、サブサブテーマ(1)-2)において改良されたDNDCモデルを適用し、その予測精度を検証するとともに、削減技術の効果を予測した。圃場試験データを用いた改良DNDCモデルの検証結果は CH_4 発生については良好であり、削減効果の予測に利用可能と判断された。しかし、 N_2O 発生については実測値を大きく過小評価し、さらにモデルを改良する必要性が指摘され

た。

CH₄発生に対する予測とその解析から、圃場への稲わらのすき込みは、有機炭素の増加、土壌Eh（酸化還元電位）の低下など、土壌中でのCH₄生成に適した環境をもたらすことから、CH₄発生に重要な役割を果たすことが示された。化学肥料のうち、硫酸アンモニウムの施用はCH₄発生量を低下させたが、水稻収量は変わらなかった。さらに、水管理が湛水水田からのCH₄発生量を削減する実用可能な方策のひとつであることが示された。以上の結果から、以下の削減方策が推奨された：1) 土壌にすき込む稲わらの量を少なくすること、2) 期間と水稻生育ステージを考慮した排水を行うこと、3) CH₄生成に適した還元状態を軽減すると同時に水稻収量を維持するために適当な化学肥料を選択すること。

(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

1) アジア諸国において有効な反すう家畜由来CH₄発生制御技術の開発とソースデータベースの構築及び削減効果の評価

① 反すう家畜からのCH₄発生量に及ぼす要因を解析するために、ホルスタイン種泌乳牛を用いて飼料成分組成、オンゴール交雑種を用いて給与方法についてそれぞれ検討した。その中で、高温時(30℃)におけるホルスタイン種泌乳牛のCH₄発生量は、飼料構成により増加するが、可能な限り飼料中のME（代謝エネルギー）、CP（粗蛋白質）およびEE（粗脂肪）の含量を高め、NDF（中性デタージェント繊維）およびADF（酸性デタージェント繊維）の含量を低減することにより、乳生産に影響することなく最大で40%（FCM 1 kg当たり8.5 g）低減できることが示された。また、オンゴール交雑種を用いた実験では、給与回数を1日1回から2回に増やすことにより、増体を約15%高め、MCRを約15%低減できることが示された。

② 反すう家畜のCH₄発生量の簡易評価法の開発

反すう家畜からのCH₄発生量の簡易測定法の開発に向け、同一試料（D1-D6）を用いてSF₆（六フッ化イオウ）法、ルシテック法、インビトロガス培養試験法（図5）によるCH₄発生量を比較検討した結果、全ての試料においてルシテック法はSF₆法に比べてCH₄発生量が低く評価され、相関係数も低かった。また、インビトロガス培養法で測定した培養24時間のD4とD5試料のCH₄発生量はSF法とほぼ同じであったが、D1とD2試料では高く、逆にD3試料は低く評価された。SF₆法と比較して、インビトロガス培養法で測定した培養48時間のCH₄発生量は全ての試料で高く測定されたものの、相関係数は高かった。



図5. インビトロガス培養試験法

表3. タイおよびインドネシアにおける反すう家畜からのCH₄発生量

	ブラーマン種	在来種	ホルスタイン交雑種	水牛	オンゴール	リムジン
体重kg	411	166	375	430	78	91
乾物摂取量g/代謝 体重・日	71.8	56.7	65	68	80.4	101.5
乾物消化率(%)	58.8	57.1	55.3	54.2	-	-
メタン発生量						
g/日	121	40.8	110.3	88.1	46.9	66.2
g/乾物kg	18.4	15.5	20	13.6	22.8	22
%/総エネルギー(%)	5.7	4.8	6.2	4.2	9.2	8.7

③ 東南アジアで飼養されている、ブラーマン種牛、ホルスタイン交雑種、タイ在来種、水牛（以上タイ）、オンゴール交雑種およびリムジン交雑種（以上インドネシア）からのCH₄発生量（MCR）は約5~9であり、給与飼料等に影響された（表3）。さらに、オンゴール交雑種を用いた実験では、給与回数を1日1回から2回に増やすことにより、増体を約15%高め、MCRを約15%低減できることが示された。タイの交雑種泌乳牛からの配合飼料多給時におけるCH₄発生量は、開発途上国の泌乳牛に対するIPCC報告の推奨値（CH₄変換率6.0±0.5）とほぼ同じであった。

④ 反すう家畜のCH₄発生抑制技術

実用性が高いCH₄発生抑制技術として製造副産物である糖蜜・尿素、醤油製造副産物、ビール粕、トウモロコシ粕、およびポラードを粗飼料に添加することで、反すう家畜からのCH₄発生量が減少（乾物摂取1 kg当たり7.9~22.6%）するとともに、増体日量も増えることから、生産性の向上とともにCH₄発生量の抑制が可能であることが示された。一方、モネンシン、フマル酸を飼料に添加することでCH₄発生

量は10～30%減少する。そのほかのCH₄抑制物質としてタンニンについて検討した結果、加水分解型より縮合型タンニンでCH₄発生抑制効果が高く、飼料中に縮合型タンニンを2.5%添加することで日本在来種山羊からのCH₄産生量を約1割低減できた。

⑤ インビトロガス培養法を用いたカシミヤ山羊およびフタコブラクダのCH₄発生量の精緻化
山羊のルーメン液を用いてインビトロガス培養法と開放式呼吸試験によるCH₄発生量を比較検討し、インビトロガス培養法は化学分析値で推定したCH₄発生量よりも開放式呼吸試験装置で求めたメタン発生量との相関が高かった。

山羊からのCH₄発生量 (g/kgDM) = 0.9311X + 13.966、R²=0.8977

X=インビトロガス培養法で測定したCH₄発生量 (g/kgDM)

インビトロガス培養法で測定した36種類の試料からのCH₄発生量はLeguminousが14.0から28.2 g/kgDM、Chicoが17.6から34.8 g/kgDM、Feverfewが16.4から25.1 g/kgDM、Gramineousが19.4から26.6 g/kgDMであった。さらに内モンゴル放牧草地を草種構成や嗜好性をパラメータとして5区分 (Excellent、Good、Medium、Poor、Inferior) に分け、それぞれの草地からのCH₄発生量を以下の式により推定した (表4)。

$CH_4 = 100 \times DMI \times \sum (A_i \times B_i \times C_i) / \sum (B_i \times C_i)$ ただし、i=1から5

(CH₄: メタン発生量、 g/kgDM、 DMI: 乾物摂取量、 kg/日、 A: それぞれの草地区分での平均CH₄発生量、 g/kgDM、 B: 各草地区分の平均草種構成、 %、 C: 各草地区分の嗜好性、 35、 25、 20、 15、 5、 %は草地区分)

それぞれの区分でのCH₄発生量は順に Excellent、24.3 g/kgDM、 Good、24.7 g/kgDM、 Medium、22.3 g/kgDM、 Poor、22.5 g/kgDM、 Inferior、20.6 g/kgDMと推定された (表4)。以上の結果より内モンゴル地域で飼育されている山羊からのCH₄発生量を推定すると、成山羊の採食量は1.2～1.8 kg/日であることから、38.2～42.2 g/kgDM、子山羊の採食量は0.5～0.8 kg/日であることから、10.48～19.7 g/kgDMとなる。統計より2005年6月30日では内モンゴル地域に成山羊が17366.7千頭、子山羊が10720.4千頭飼育されていることから、内モンゴル地域での山羊からのCH₄発生量は成山羊が159.4～267.4千トン/年、子山羊が41.0～77.1千トン/年で、山羊全体では200.4～344.7千トン/年のCH₄が発生すると推察された。

一方、フタコブラクダのCH₄発生量 (g/kgDM) は以下の式で表された。

$CH_4 = 54.421X + 12.154$ 、R²=0.99

X=インビトロガス培養法で測定したメタン発生量 (g/kgDM)

放牧草を採食している各生育期のフタコブラクダのCH₄発生量を表5に示した。成長期のCH₄発生量は339.0 g/日、成熟過程が515.1 g/日、成熟期が277.0 g/日である。1日当たりのCH₄発生量に各期の日数を乗じて各期でのCH₄発生量を計算し、さらに全生育期でのCH₄発生量を求めると137.7kgとなった。

表5. フタコブラクダの各生育期でのCH₄発生量

	中性データー ジエント繊維	酸性データー ジエント繊維	酸性データー ジエントリグ	可溶無窒 物 (%)	乾物摂取 量 (kg)	メタン発生量	
						g/日	各期 (kg)
成長期 (122日)	51.4	33.3	7.26	16.7	11.6	399.0b	48.7
成熟過程 (152日)	42.9	27.7	5.38	20.9	17.5	515.1b	46.9
成熟期 (152日)	61.9	37	11.3	11.2	9.94	277.0a	42.1

ab, P<0.05

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

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) を実施した。

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。

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。

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。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6）。

表6. 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。

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。

豚の飼養試験と並行して、鶏ふん中の窒素削減を目途として、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。

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。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67 kg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7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1000 g/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。

表7. 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%）

② 堆肥化過程からのN₂O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N₂O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NH₃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。堆肥化過程で低換気量条件を意図的に設定してNH₃拡散を抑制したが、N₂O発生時期は遅延されないケースも観測され、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。

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。亜硝酸酸化細菌の供給源は、実際の現場で入手が容易であるということと、菌叢が適しているという理由から、完熟堆肥を用いることとした。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、N₂O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。

N₂O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N₂O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 g N₂O-N kg⁻¹ T-N_{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、N₂Oの発生量を大きく抑制できることが明らかとなった。

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。試作した室内実験系は、ガスチャンバ一部の高さを12 cm、土壌層厚を約5 cmとすることで、既報のフラックスと同様な測定値（1〜7 mg/m²/hr）を得ることができた。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 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。

小型の実験系では、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(図6)。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} でとなり、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。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、GHG削減に繋がる使用条件をさらに精査する必要性が示された。

以上の試験より得られた削減データから、反芻家畜の CH_4 では製造添加物とタンニン、また畜産廃棄物からの亜酸化窒素の削減技術を適用した場合のアジア地域における CH_4 および N_2O 発生削減ポテンシャルを試算した(表8)。その結果、技術によるコストに違いはあるものの、どの技術も経済的には導入に問題はなく、特にアミノ酸の使用による亜酸化窒素削減は穀物相場の急騰もあり、導入コストがマイナス、つまりより経済的な選択肢として導入が進むものと考えられた。また、反芻家畜での製造副産物は生産性の向上も期待できる。

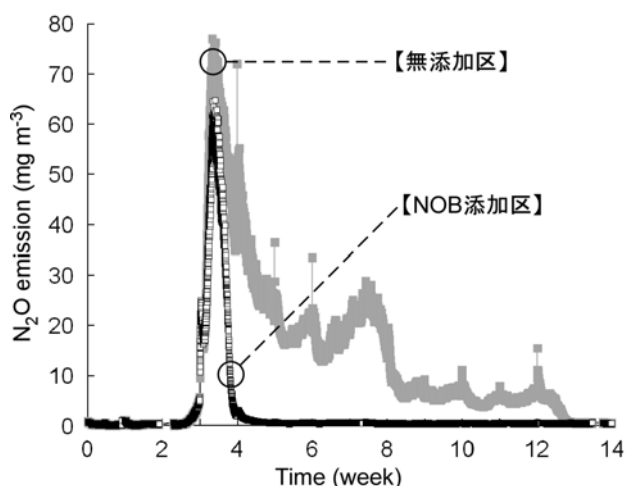


図6. 冬キャベツにおける施用堆肥の形状の違いが検出亜酸化窒素フラックスに及ぼす影響。

[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ト方式成型ペレット堆肥を 500 g m^{-2} を9/5に施用

表8. 畜産系対策技術を各地域で適用した場合のコスト評価

対象ソース	反芻家畜からの CH_4	畜産廃棄物からの N_2O
削減技術	飼養改善 食品副産物(糖蜜)添加:稲わらの1割を糖蜜に代替	飼養改善 必須アミノ酸(3種類)を必要量添加
	タンニン添加:稲わらの5%量のタンニンを添加	
対象面積等	タイの肉用牛の10%	タイの肉用牛の10% 東南アジアの養豚の7.5%
削減率	15%	10% 17%
削減ポテンシャル (10^3 t G yr^{-1})	6	4 21
リーケージ	~無(検討中)	~無(検討中)
コスト (円 t C ⁻¹)	0	43,100 -410
	糖蜜は栄養価が高く、飼料総量を削減出来るので、コスト変化無し。	1頭あたり、タンニンのコスト(8円)が必要。

4. 考察

農耕地からのGHGソース制御技術について、水田からの CH_4 発生に対し、稲わら春すき込みを家畜ふん堆肥に置き換える有機物管理、中干し期間の長期化や栽培後期の水管理改善、無代かき栽培、および基盤整備による土壌浸透能改善の各技術が、また、施肥土壌からの N_2O 発生に対し、草地における季節的な施肥配分の改善と硝化抑制剤の使用および露地野菜(キャベツ)畑における堆肥と緩効性(肥効調節型)肥料の使用が大きな削減効果を示すことが定量的に実証された。また、その他の技術についてもデータが蓄積された。これらの技術はいずれも現場で実用可能であるとともに、作物生産を低下させることのないことが示されるなど、トレードオフについても検討された。特に、水田における水管理と有機物管理および畑における緩効性肥料の使用については、アジア地域の農耕地でもその有効性が確認されるとともにコストや労力の面からも実用可能であり、広域でのGHGソース削減が期待される。水田水管理と基盤整備技術については、農業インフラ整備が必

要であるものの、わが国で進められているインフラ整備と土地改良技術を導入することによりアジア地域の農耕地におけるGHGソース削減に大きな貢献の出来る可能性があると考えられる。

現地試験より得られた削減データから、水田の有機物管理と水管理による削減ポテンシャルとして、わが国については、それぞれ年間0.25および0.67 Mt Cと見積もられた。また、これらの技術をアジア全体に拡大した場合、大きなGHG排出削減ポテンシャルを期待できることが示唆されるとともに、インドネシアでのケーススタディから小規模CDM事業の可能性が示された。各技術のコスト評価から、水田有機物管理や施肥管理については比較的大きなコスト増加が示された。一方、水田水管理と中国製資材による施肥管理についてはコスト増加がきわめて小さく、有利なGHG発生制御技術であることが明らかにされた。

農耕地からのGHGソース広域評価について、ソースデータベースの構築と統計モデル解析によるわが国と世界の農耕地からのCH₄、N₂O発生量評価、北海道中央部の集水域を対象とした流域複合生態系解析モデルの精緻化、およびプロセスモデルによる水田からのCH₄発生量の広域的予測について、それぞれ成果を得た。ソースデータベースの構築とその統計モデルによる解析から、排出係数や各種制御要因の寄与が定量された。これらの値は、IPCCガイドライン等、数少ないデータからエキスパートジャッジメントを加えて求められていた地域や地球規模でのGHG排出量の見積もりを精緻化するものである。なお、これら構築したデータベースは、一部、参画機関のweb siteにて公開している。統計モデルによるわが国の農耕地からのN₂O発生量評価は、日本国温室効果ガスインベントリ報告書において改善が求められていた、UNFCCC事務局の訪問審査における指摘事項に対応するもので、日本の農耕地からのN₂O排出を網羅した新しい排出係数を提案した。これらの結果は、2006年にわが国がUNFCCC事務局に提出した「割当量報告書」と最新のインベントリ報告書に盛り込まれた。流域複合生態系解析やプロセスモデルの開発はGHGソース削減効果のTier 2および3による広域評価に必要であるが、アジアの環境条件において利用可能なものは開発されていない。本研究において、北海道内の広域評価を行うことから、それらの有効性が示された。流域複合生態系解析は流域単位のモニタリングとエコバランスモデルに基づいたものであり、各種削減技術の普及以外にも、本研究により開発された手法による土地利用計画によりGHGソース削減方策が可能であることを示した。本手法では、GHGソース削減と同時に、生産量の維持と余剰窒素量の削減が同時に提言可能である。GHG発生を予測するプロセスモデルの開発はGHGソース削減効果の広域評価に必要であるが、水田やアジアの環境条件において利用可能なものは開発されていなかった。本研究では、開発された改良DNDCモデルを用いて、水管理による北海道全道の水田からの年間CH₄発生削減量が推定できた。また、タイの水田における削減方策についても評価を行った。今後、モデルのチューニングと活動量データベースの整備を進め、より広域での評価を目指す。

反すう家畜由来CH₄発生に関して、東南アジアでの各種の牛と水牛、中国内モンゴルの山羊（カシミヤ種）に加え、中国のフタコブラクダ、インドネシア在来種羊、タイ国ブラーマン種去勢牛に関する知見が得られた。摂取エネルギーに占めるCH₄として失われるエネルギーの割合は5～9%であり、IPCCの6%の精緻化に向け有用なデータになると考えられる。本研究で開発したインビトロガス培養試験法は反すう家畜からのCH₄発生量の推定法として簡易かつ迅速であり、海外研究サイトに技術移転して多数の飼料からのCH₄発生量の推定に寄与している。一方、CH₄発生抑制技術では、安価で入手が容易な天然物質であるタンニンに着目してCH₄抑制効果を調べた。その結果、加水分解型より縮合型タンニンでCH₄抑制効果が高いことが明らかになった。さらに、縮合型タンニンを飼料に2.5%添加することで生産性を低下させることなく日本在来種去勢山羊のCH₄発生量を1割程度抑制できることが示された。また、東南アジアで安価で入手可能な米ヌカ、ココナツ粕およびパーム核粕等の製造産物を給与飼料に添加することで、家畜の生産性（増体日量）向上とCH₄産生抑制効果（7.9～22.6%）が実現できることを示した。製造副産物の給与は価格といったコスト面の問題はあるものの、安価であることや生産性向上が図れることから、技術導入に向けた実用上の大きな課題はないと判断できる。また、山羊（カシミヤ種）やフタコブラクダについては、SF₆法とインビトロガス培養法でのメタン発生量の検量線を作成して、品質が異なる放牧草を採食した場合でのCH₄発生量のデータ蓄積を行い、内モンゴル地域での山羊全体では200.4～344.7千トン/年のCH₄が発生することやフタコブラクダでの全生育期でのCH₄発生量は137.7kgであることを明らかにした。これらの推定値は、広域評価を念頭に牧草の品質や家畜の生育ステージなどの要素を組み入れ総合化した世界的にも新たな知見である。

家畜排泄物起源のN₂O発生抑制のためには飼養改善、処理制御、および加工制御が考えられるが、本研究ではそれぞれの方策について検討を行った。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。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削減を目的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。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。この手法は、経済的に導入に関する問題が無く穀物飼料の高騰を追い風にしてアミノ酸飼料の増産と共に広く普及していく可能性がある。また家畜排泄物の堆肥化処理においては完熟堆肥（亜硝酸酸化細菌を含有する）の時期を限定した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。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。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。

5. 研究者略歴

テーマ代表者：八木一行

1959年生まれ、名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程修了、博士（農学）、現在、（独）農業環境技術研究所 物質循環研究領域 上席研究員

主要参画研究者

(1) -①：犬伏和之

1956年生まれ、東京大学大学院農学系研究科博士課程修了、農学博士、現在、千葉大学大学院園芸学研究科 生物資源科学コース 土壌学研究室 教授

(1) -②：八木一行（同上）

(1) -③：八木一行（同上）

(1) -④：八木一行（同上）

(2) -①：永西 修

1960年生まれ、京都大学大学院農学研究科修了、博士（学術）、現在、（独）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 チーム長

(2) -②：長田隆

1960年生まれ、筑波大学第二学群生物学類卒業、博士（農学）、現在、（独）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 上席研究員（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 サブチーム長）

6. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) O. Jumadi, Y. Hala and K. Inubushi: Soil Sci. Plant Nutr., 51 (5) (PSILPH Special Issue), 693-696 (2005) "Production and emission of nitrous oxide and responsible microorganisms in upland acid soil in Indonesia"
- 2) T. Hosono, N. Hosoi, H. Akiyama, H. and Tsuruta: Nutr. Cycling Agroecos., 75(1-3), 115-134 (2006) "Measurements of N_2O and NO emissions during tomato cultivation using a flow-through chamber system in a glasshouse"
- 3) M. L. Khalil and K. Inubushi: Soil Biol. Biochem., 39, 2675-2681 (2007) "Possibilities to reduce rice straw-induced global warming potential of a sandy paddy soil by combining hydrological manipulations and urea-N fertilizations"
- 4) J. Ma, H. Xu, Z. C. Cai, Y. Han and K. Yagi: Soil Sci. Plant Nutr. (in press) "Influences of N-fertilization and wheat straw returning mode on CH_4 emissions from rice fields"
- 5) A. Hadi, O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi: Soil Sci. Plant Nutr., 54 (in press) "Mitigation options for N_2O emission from a corn field in Kalimantan, Indonesia: A case study"
- 6) H. Akiyama, K. Yagi and Yan, X.: Global Biogeochem. Cycle, 19, GB1005, doi:10.1029/2004GB002378 (2005) "Direct N_2O emissions from rice paddy fields: summary of available data"
- 7) X. Yan, K. Yagi, H. Akiyama and H. Akimoto: Global Change Biol., 11(7), 1311-1141 (2005) "Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields"
- 8) S. D. Kimura, Z. Mu, Y. Toma and R. Hatano: R.: Soil Sci. Plant Nutr., 53, 373-386 (2007) "An Eco-Balance Analysis of Six Agricultural Land Uses in the Ikushunbetsu Watershed"

- 9) Y. Toma, S.D. Kimura, Y. Hirose, K. Fujiwara, K. Kusa and R. Hatano: R. : Soil Sci. Plant Nutr., 53, 692-703 (2007) "Variation in the emission factor of N₂O derived from chemical nitrogen fertilizer and organic matter: A case study of onion fields in Mikasa, Hokkaido, Japan"
- 10) T. Fumoto, K. Kobayashi, C. Li, K. Yagi and T. Hasegawa: Global Change Biol., 14, 382-402 (2008) "Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes"
- 11) W. Cheng, K. Yagi, H. Akiyama, S. Nishimura, S. Sudo, T. Fumoto, T. Hasegawa, A.E. Hartley and J.P. Megoniga: J. Environ. Qual., 36, 1920-1925 (2007) "An empirical model of soil chemical properties that regulate methane production in Japanese rice paddy soils"
- 12) R. Bhatta, K. Tajima, N. Takusari, K. Higuchi, O. Enishi and M. Kurihara: Greenhouse gases and animal agriculture: An update. International Congress, Elsevier 1293C, 58-61 (2006) "Comparison of sulfur hexafluoride tracer technique, rumen simulation technique and in vitro gas production techniques for methane production from ruminant feeds"
- 13) R. Bhatta, K. Tajima and M. Kurihara: Asian-Aust. J. Anim. Sci., 19, 376-380 (2006) "Influence of temperature and pH on fermentation pattern and methane production in the rumen simulating fermenter (RUSITEC)"
- 14) R. Bhatta, K. Tajima, N. Takusari, K. Higuchi, O. Enishi and M. Kurihara: Asian-Aust. J. Anim. Sci., 20, 1049-1056 (2007) "Comparison of In vivo and In vitro techniques for methane production from ruminant diets"
- 15) S. Xue, H. Jin, X. Guo, O. Enishi and Bayasihuliang: Chinese J. Grassland, 29, 22-27 (2007) "Evaluation of nutrition value of predominant pastures from desert grassland of Inner Mongolian" (in Chinese)
- 16) R. Bhatta and O. Enishi: Asian-Aust. J. Anim. Sci., 20, 1305-1318 (2007) "Measurement of Methane Production from Ruminants"
- 17) Enishi, N. Takusari, K. Higuchi, I. Nonaka, M. Kurihara and F. Terada: Energy Protein Metabolism Nutr., 619-620 (2007) "Enteric methane emission of Japanese native goats"
- 18) Purnomoadi, F.Y. Devi, R. Adiwani, E. Rianto, O. Enishi and M. Kurihara : Energy Protein Metabolism Nutr., 611-612 (2007) "Energy utilisation and methane conversion rate in Indonesian indigenous sheep fed Napier grass supplemented with pollard. Energy and protein metabolism and nutrition"
- 19) 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」
- 20) 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"
- 21) 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"
全査読付き論文 (51報) うち、主要な論文 (21報) のみを掲載。全査読付き論文のリストは、詳細版S-2-3aの21-23頁及び44-45頁を参照。

(2) 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