

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

(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

独立行政法人農業環境技術研究所

物質循環研究領域

八木一行・秋山博子

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

中央農業総合研究センター 北陸研究センター

北陸水田輪作研究チーム

細野達夫

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 業務用野菜研究チーム

徳田進一

千葉大学 園芸学部

犬伏和之

北海道立根釧農業試験場 研究部 草地環境科

甲田裕幸・有田敬俊・三枝俊哉

山形県立農業総合研究センター 農業環境研究部

熊谷勝巳・塩野宏之

福島県農業総合センター 生産環境部

齋藤 隆・菅野忠教・中山秀貴・三浦吉則

新潟県農業総合研究所 基盤研究部

白鳥 豊

熊本県農業研究センター 生産環境研究所

土壌肥料研究室

郡司掛則昭・水上浩之

<研究協力者>

千葉大学 園芸学部

松島未和・Osian J・Suphachai A・

Khalil I・Xu X・Lou Y・村松康彦・村

上未央・

大久保亜希恵・水野崇行・下西 翼

中国科学院南京土壤研究所

蔡 祖聰・徐 華

中国科学院瀋陽応用生態研究所

陳 冠雄・徐 慧

インドネシア国ボゴール農科大学

Iswandi Anas・Suprihati

インドネシア国ランブンマンクラット大学

Abdul Hadi

インドネシア国マカサル大学

Yusminah Hala・Alimuddin A・Muis A

タイ国コンケン大学

Patcharee Lawongsa

平成15～19年度合計予算額

127,436千円

(うち、平成19年度予算額

21,105千円)

上記の合計予算額には、間接経費

29,579千円を含む

[要旨] 水田からの CH_4 および N_2O 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 N_2O 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。

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(10%~>50%)削減する有効な技術であることが示された。これらの技術の多くは水稲生産性低下や N_2O 発生増大等のトレードオフ無しに適用可能であることから、農家への普及に対する障害は小さいものと考えられる。 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。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。硝化抑制剤等の資材による N_2O 発生削減効果は中国東北部のトウモロコシ畑でも確認された。

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。

[キーワード] メタン、亜酸化窒素、農耕地、排出削減、削減技術

1. はじめに

地球規模でのメタン(CH_4)および亜酸化窒素(N_2O)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(IPCC、2007)。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

上記の問題に対し、本研究では、わが国とアジア諸国の農耕地における実効的な 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。そのため、本サブサブテーマでは、わが国の農耕地における、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、中国、インドネシア等、アジア諸国での有効性を評価する。これらの成果を総合し、サブサブテーマ(1)－②における広域評価およびサブテーマ(2)における畜産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 CH_4 、 N_2O 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。

3. 研究方法

水田からの CH_4 および N_2O 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 N_2O 発生制御技術としての施肥管理について、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1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 CH_4 および N_2O 発生削減ポテンシャルとコスト評価を行った。

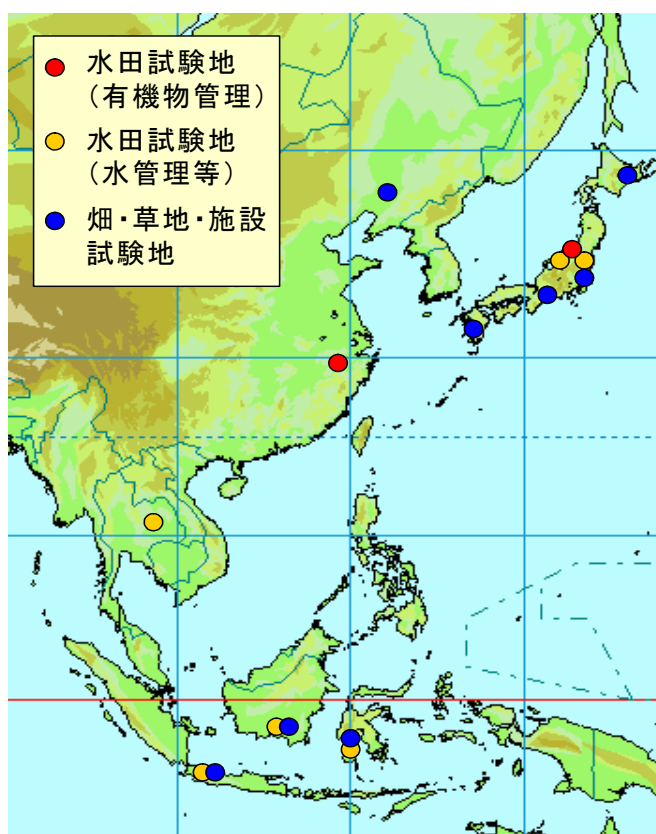


図1. 現地試験地点の位置

(1) 圃場管理技術によるわが国の水田からの CH_4 および N_2O 発生制御

山形市、郡山市、および長岡市の試験水田において、有機物管理技術(山形市)、水管理技術と無代かき栽培技術(郡山市)、および基盤整備技術(長岡市)に関する試験を行った。

山形市では、2003～2005年に、山形県立農業試験場の細粒灰色低地土水田において、稲わらを

回収した水田に牛ふん、豚ふんを主原料とする堆肥を各1.0、0.8 kg m⁻²施用し、稲わら春施用水田を対象に測定を行った。また、もみがら堆肥に着目し、牛ふん、豚ふん、鶏ふんの効果を検証するポット試験を行った。東北地方日本海側は、水稲収穫後の多雨、積雪により、稲わらを春にすき込む水田が多いためCH₄発生量が極めて多く、その解決方策の一つとして堆肥化技術が有効であると考えられる。

郡山市では、中干し期間の前進・延長化（2003～2004年）、水稲生育後期の水管理（2007年）、および無代かき栽培（2005～2006年）に関する試験を、旧福島県農業試験場、大槻町の現地ほ場および福島県農業総合センターの水田（土壌：細粒質普通灰色低地土）において行った。中干し試験では慣行区、1週間前進区、2週間前進区、常時湛水区の4区、後期水管理試験では慣行区、後期間断灌漑区、総合改善区の3区、無代かき試験では慣行区および無代かき区の2区設定し、水管理と代かきの有無以外は同様の栽培管理を行った。

長岡市では同一地域において基盤整備（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を行った。2003～2005年には各1圃場で、2006～2007年には各3圃場を対象を拡大して調査を行った。

いずれの試験においても、CH₄およびN₂O発生量計測は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、試験に用いた圃場は当該地域を代表する土壌であり、水稲品種や対照区での栽培管理は当該地域の慣行的な方法に準じた。

（2）施肥管理技術によるわが国の農耕地からのN₂O発生制御

草地についての試験は、北海道立根釧農業試験場（中標津町）の普通黒ボク土チモシー単播採草地において行った。各年度の観測は、2003年は3種類の窒素肥料（硫酸アンモニウム（以下、硫酸）、尿素、硝酸カルシウム、いずれも160 kg N ha⁻¹）、2004～2005年は一番草収穫後の窒素追肥量の低減（半量、硫酸を使用、早春の窒素施肥量は標準施肥と同等）、2005～2007年は160 kg N ha⁻¹の硫酸の施肥配分を早春：一番草収穫後で2：1とする標肥区と、5：1とする春重点区の試験設計でそれぞれ行った。また、平成18年～19年度には硝酸化成抑制剤の使用によるN₂O発生量削減の可能性を検討した。

露地野菜畑については、熊本県農業研究センター（合志町）の黒ボク土圃場でキャベツを栽培し、慣行施肥体系、有機物や緩効性肥料等を用いる環境保全型施肥法がN₂O発生消長に及ぼす影響を明らかにするための試験を継続した。2003～2005年には、慣行化学肥料、有機物施用、緩効性肥料、およびマルチ使用によるN₂O発生削減効果について調査した。2006～2007年には、春作、夏作の2作とも、前年と同様の慣行化学肥料（240 kg N ha⁻¹）、有機物施用（牛ふんおよび発酵豚ふんのブレンド）、緩効性肥料（ハイパーCDU；240 kg N ha⁻¹）を設け、さらに緩効性肥料の減肥（20%減肥、40%減肥）による削減効果について調査を行った。加えて、キャベツ収穫後のほ場内への残渣すき込みによって、N₂O発生が非常に顕著な春作キャベツ収穫後において、残渣の処理方法によるN₂O発生について調査した。

さらに、秋冬作と春夏作キャベツ栽培における残渣からの N_2O 発生制御について、野菜茶業研究所（茨城県つくば市）の黒ボク土圃場において、肥効調節型肥料の深層施肥技術の有効性を調査した。2003年には、キャベツ収穫後の残渣すき込みにもなう N_2O 発生について、室内培養試験でその特徴を明らかにし、得られた情報をもとに、残渣からの N_2O 発生を抑制する栽培体系を構築した。その発生抑制技術の有効性について、畜産草地研究所（茨城県つくば市）の圃場（淡色黒ボク土）において、2004年から3年間4作のキャベツ栽培において調査した。

施設栽培については、野菜茶業研究所（愛知県武豊町）において、トマトの生育期間にわたって通気式チャンバー法により N_2O および NO フラックスを計測した。試験1では、慣行施肥栽培をする区（慣行施肥区）と養液土耕栽培をする区（養液土耕区）で栽培期間中の N_2O および NO 発生量を比較した。試験2では、いずれも養液土耕栽培だが、施肥窒素を硝酸態窒素のみにした区（CN区）と硝酸態窒素および尿素を施用する区（対照区）を設け N_2O および NO 発生量を比較した。

施設栽培試験を除き、いずれの試験においても、 N_2O 発生量計測は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。施設栽培については、通気式チャンバー法により N_2O および NO フラックスを計測した。また、試験に用いた圃場は当該地域を代表する土壌であり、作物品種や対照区での栽培管理は当該地域の慣行的な方法に準じた。

（3）アジア諸国の農耕地における CH_4 、 N_2O 発生制御

国際共同研究により、中国、インドネシアおよびタイでの CH_4 、 N_2O 発生制御試験を行った。

中国江蘇省太湖地域の水稲－小麦二毛作圃場における、麦わら管理による水田からの温室効果ガス発生削減技術に関する現地試験を行った。この地域では、小麦収穫直後に水稲栽培が開始されるため、麦わらによる CH_4 発生の増加が懸念されている。そこで、麦わらを水田の一部に溝状に埋設し（乾物量で 3750 kg ha^{-1} ）、水稲耕作期間中に圃場分解を行った場合の CH_4 発生抑制効果を検討した。2003～2005年には宜興市の圃場で試験を行ったが、2006年は句容市にて行った。麦わらを全量持ち出した対照区、全量を全面にすき込んだすき込み区のほか、麦わらの設置位置を3通り変えて（土壌面下に埋設し土をかぶせる（ditch）；半分土壌面下に埋設し土をかぶせる（half-ditch）；土壌面上に埋設し土をかぶせる（mound））試験を行い、 N_2O 発生量も計測した。

遼寧省瀋陽市においては、2004～2006年にかけて、緩効性肥料使用によるトウモロコシ畑からの N_2O 発生量削減に関する試験を行った。緩効性肥料として、硝化抑制剤入り尿素（urea+DCD）、ウレアーゼ阻害剤入り尿素（urea+HQ）、および硝化抑制剤＋ウレアーゼ阻害剤入り尿素（urea+DCD+HQ）を使用し、無窒素および尿素処理区との比較を行った。各窒素施用区での窒素施用量は120または 150 kg N ha^{-1} である。

インドネシアではボゴール（西ジャワ）、バンジャルマシン（南カリマンタン）、マロス（南スラベシ）周辺の水田とブンチャック（西ジャワ）とマリノ（南スラベシ）の茶園畑およびペライハリ（南カリマンタン）周辺のダイズ・トウモロコシ畑で圃場調査試験を実施した。水田では慣行の常時湛水区と飽和水分区・間断灌漑区（西ジャワ、南カリマンタン）あるいは慣行湛水区

と浅水湛水区（南スラベシ）を、またタイ（コンケン）では有機物管理と移植方法の影響を見るための試験を設定した。バンジャルマシン近郊（南カリマンタン）とマカッサール（南カリマンタン）の畑地では緩効性肥料および硝化抑制剤の試験を実施した。加えて、インドネシアおよびタイ水田土壌のCH₄生成活性を測定するため、土壌を嫌気湛水培養し、CH₄生成量を測定した。また畑土壌を用いてN₂O生成活性を測定した。

4. 結果・考察

(1) 圃場管理技術によるわが国の水田からのCH₄およびN₂O発生制御

1) 有機物管理技術による発生制御

2003年と2004年の圃場試験において、CH₄発生量は稲わら>牛ふん籾殻堆肥>牛ふん堆肥の順に多く、ほとんどは栽培期間に発生した。牛ふん籾殻堆肥区におけるCH₄フラックス（田植え～落水前）は5.2～14.6および2.1～21.8 mg m⁻² h⁻¹、牛ふん堆肥区は3.6～12.3 mg m⁻² h⁻¹であり、稲わら施用区は10.8～41.9および5.3～38.0 mg m⁻² h⁻¹であった。牛ふん籾殻区では湛水30～40日後にCH₄フラックスが増加せず、稲わら施用区で湛水30～40日後と湛水80～100日後にCH₄フラックスが高まったフラックスパターンと異なった。測定期間のCH₄発生量は牛ふん籾殻堆肥区が26.8±1.4および24.4±2.9 g m⁻²、牛ふん堆肥区が19.4±1.3 g m⁻²であり、稲わら施用した場合に比較し、牛ふん籾殻堆肥区ではそれぞれ49%、50%、牛ふん堆肥区では63%のCH₄が減少した。2005年の試験において、豚ふん籾殻堆肥区のCH₄フラックス（田植え～落水前）は0.6～31.5 mg m⁻² h⁻¹、稲わら施用区は0.4～43.6 mg m⁻² h⁻¹であった。豚ふん籾殻堆肥区では、稲わら施用区と同様に湛水30～40日後と湛水80～100日後のCH₄フラックスが高まり、中干し期前からの活発なメタン発生がみられた。測定期間における豚ふん籾殻堆肥区からのCH₄発生量は39.4±6.5 g m⁻²であり、稲わら施用した場合に比較し、28%のCH₄が減少した（表1）。

また、異なった畜種の籾殻堆肥を用いたポット試験からも、圃場試験と類似した牛ふん籾殻堆肥の効果が確認された（表2）。鶏ふん籾殻堆肥区のCH₄発生量は牛ふん籾殻堆肥区と同程度であったが、豚ふん籾殻堆肥では多かった。豚ふん籾殻堆肥区では施用直後の湛水初期にCH₄ピークが見られたほか、栽培期間を通して高いフラックスが継続し、稲わら区よりも発生量は多くなった。このことは、豚ふん堆肥を慣行施用した場合の施用炭素量が、牛ふん堆

表1. 原料畜種の異なる堆肥を水田に施用した場合のCH₄発生量の違い（山形市）

年次	区	メタン発生量 (gCH ₄ m ⁻²)			メタン減少率 (%)
		栽培期間	栽培後	測定全期間	
2005	豚ふん籾殻堆肥	39.27±6.43	0.09±0.08	39.36±6.51	28
	稲わら	54.60±9.90	0.06±0.05	54.66±9.95	
2004	牛ふん籾殻堆肥	24.41±2.89	-0.02±0.01	24.39±2.90	50
	稲わら	48.82±5.77	-0.01±0.01	48.81±5.78	
2003	牛ふん籾殻堆肥	24.78±1.40	2.03±0.00	26.81±1.40	49
	牛ふん堆肥	17.01±1.27	2.39±0.00	19.40±1.27	
	稲わら	51.22±8.35	0.96±0.02	52.18±8.37	

メタン減少率=(稲わら区-堆肥区)/稲わら区×100
発生量は平均値±標準誤差

表2. 原料畜種の異なる籾殻堆肥を施用した場合のCH₄発生量の違い（山形市）

区	堆肥施用量 同左炭素量		メタン発生量 (gCH ₄ pot ⁻¹)	メタン減少率 (%)
	(gm ⁻²)	(gpot ⁻¹)		
牛堆肥	1000	2.14	1.16±0.17	29
豚堆肥	800	4.05	3.01±0.78	-84
鶏堆肥	500	0.77	1.18±0.23	28
稲わら	600	3.73	1.64±0.34	100
無施用	0	0.00	0.86±0.15	48

メタン減少率=(稲わら区-堆肥区)/稲わら区×100
発生量は平均値±標準誤差

肥および鶏ふん堆肥を用いた場合より多くなったことが影響したと考えられた。

これらのことから、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CH₄発生量をそれぞれ約50%、約30%削減できることが明らかになった。また、平成16年度（2004年）の室内培養試験では二次発酵中の堆肥は完熟した堆肥よりもCH₄生成能が大きく、二次発酵中の豚ふん堆肥を用いた圃場試験ではCH₄発生量が稲わら区より20%増加しており、腐熟程度が十分でない堆肥はCH₄発生量を増加させ、削減技術として適さないことが明らかになった。

2) 中干し期間の水管理技術による発生制御

中干し時期の前進、延長化試験において、水稻生育期間中のCH₄発生量は2004年では2週間前進、1週間前進、慣行、常時湛水で7.0、12.0、24.6、63.7 g CH₄ m⁻²であり、2週間前進、1週間前進、常時湛水はそれぞれ慣行比28、49、259%であった（図2、3）。2005年では2週間前進、1週間前進、慣行、常時湛水で12.8、20.0、27.2、37.4 g CH₄ m⁻²であり、2週間前進、1週間前進、常時湛水はそれぞれ慣行比47、74、138%であった（図3）。水稻生育期間中のN₂O発生量は2週間前進、1週間前進、慣行、常時湛水でそれぞれ30.5、28.2、37.2、22.8 mg N₂O-N m⁻²であった。N₂O発生量は落水期間のある各処理区が常時湛水より発生量が多い傾向がみられた。CH₄およびN₂O発生量

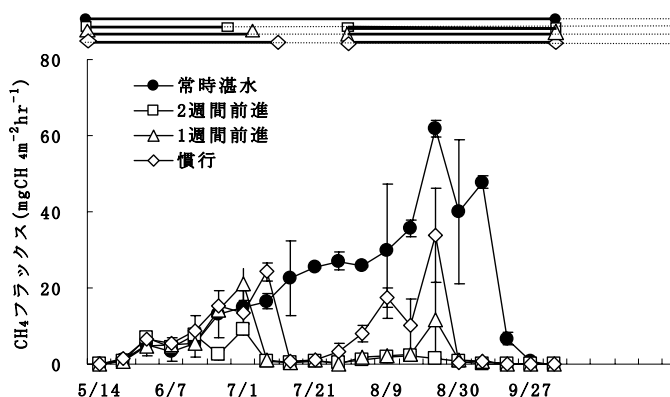


図2. 中干し時期の前進、延長化が水田からCH₄フラックス季節変化に及ぼす影響（郡山市）

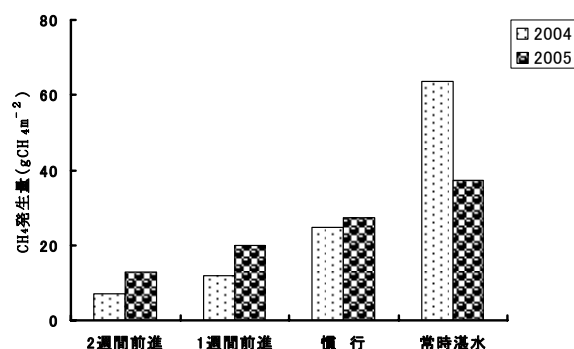


図3. 中干し時期の前進、延長化試験における栽培期間あたりのCH₄発生量（CO₂換算値）（郡山市）

をCO₂に換算した結果、水田から発生するN₂Oの温室効

果に対する寄与度はCH₄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、中干し時期の前進、延長化は再入水後のCH₄フラックスを抑制し、有効なGHG抑制技術であることが明らかになった。

3) 水稻生育後期の水管理による発生制御

水稻生育後期の水管理試験において、CH₄発生量は後期間断灌漑区、総合改善区、慣行区で37.0、32.6、46.0 g CH₄ m⁻²であり、後期間断灌漑区、総合改善区でそれぞれ慣行比80.4、70.9%であっ

た。N₂O発生量は後期間断灌漑区、総合改善区でそれぞれ11.0、2.1、6.4 mg N₂O-N m⁻²あった。CH₄およびN₂O発生量をCO₂に換算した結果、水田から発生するN₂Oの温室効果に対する寄与度は極めて少なく、水田から発生するガスによる温室効果はCH₄に依存することが分かった。収量、品質は後期間断灌漑区および総合改善区とも慣行区並であった。以上の結果から、水稻生育後期の水管理も中干し時期の場合と同様、CH₄フラックスを抑制し、有効なGHG抑制技術であることが明らかになった。

4) 無代かき栽培による発生制御

CH₄発生はEh値の低く推移した無代かき区が慣行より少なく推移した。生育期間中のCH₄発生量は2005年は無代かき区、慣行区で25.6、27.2 g CH₄ m⁻²、2006年は無代かき区、慣行区でそれぞれ31.9、40.1 g CH₄ m⁻²であり、無代かき区が慣行区比6~20%程度減少した。N₂Oは入水および代かき時に多く発生した。特に代かき時に高まる傾向がみられた。生育期間中のN₂O発生量は2005年が無代かき区、慣行区でそれぞれ18.6、37.2 mg N₂O-N m⁻²、2006年が無代かき区、慣行区でそれぞれ、61.8、96.4 mg N₂O-N m⁻²であり、無代かき区が慣行区比36~50%程度減少した。CH₄およびN₂O発生量をCO₂に換算した結果、水田から発生するN₂Oの温室効果に対する寄与度は両区ともCH₄の約2~6%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。無代かき区は慣行と比べ、移植後の苗の活着が悪いため、生育期間中の茎数が少なく、成熟期の穂数がやや少なかった。さらに登熟歩合が低かったことから収量は4~5%程度減少した。品質は慣行並からやや低かった。

5) 基盤整備による土壌浸透能改善

土壌調査の結果、整備ほ場は細粒グライ土、未整備ほ場は細粒強グライ土に分類された。整備ほ場は基盤整備前の1981年には未整備ほ場と同様に細粒強グライ土であったが、1989年に行われた暗渠の設置により地下水位およびグライ層の出現位置が暗渠の深さ(60~80cm)まで低下していた。調査期間中の水稻栽培期間中におけるCH₄発生量は、整備ほ場で2.0~4.5 g CH₄ m⁻²、未整備ほ場では6.6~23.3 g CH₄ m⁻²となり、暗渠施工を伴う基盤整備によるCH₄発生量の削減率は平均62.6%であった。整備ほ場におけるCH₄発生量の年次間変動は小さく、いずれの年次においても未整備ほ場より少なく安定していたが、未整備ほ場では春の雪解けから湛水までの期間に雨の降らなかった日数(無降雨日数)が多い年ほどCH₄発生量が少なくなる傾向が見られた(図4)。

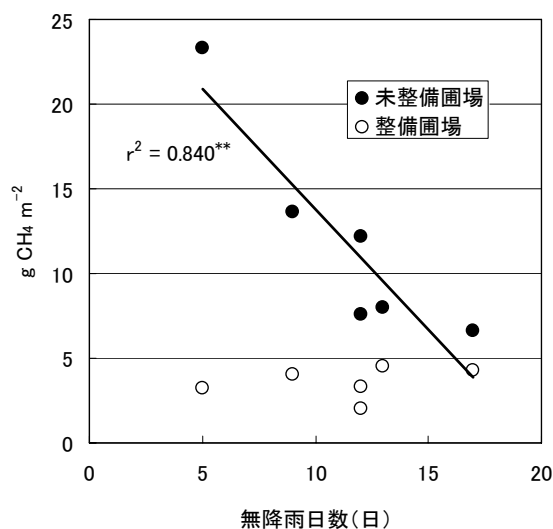


図4. 春の雪解けから湛水までの期間に表3. 水稻栽培期間中のCH₄発生量 (長岡市)

ほ場	未整備ほ場 ($P < 0.05$) 2006年 2007年 g CH ₄ m ⁻²		整備ほ場 2006年 2007年 g CH ₄ m ⁻²	
	A	21.6	14.8	10.1
B	14.2	4.5	(99.3)*	10.1
C	20.4	12.3	7.8	7.9
平均	18.7	10.5	9.0	9.4
SD	4.0	5.4	1.6	1.3

*: 2006年整備ほ場Bは泥炭質土壌であったため計算から除外した。

2006～2007年度は基盤整備によるCH₄発生量の削減効果を面的に評価するため、調査規模を整備地区、未整備地区ともそれぞれ3ほ場に拡大して調査を行った。2006年は大雪により春の雪解けが遅くなり、水稻の移植が例年よりも2週間程度遅れたため、移植から中干しまでの気温が例年より高く推移した。2007年は逆に例年になく少雪であり、冬期間中、ほとんど積雪がなかった。2006年の水稻栽培期間中におけるCH₄発生量は、整備ほ場で7.8～99.3 g CH₄ m⁻²となり、特に泥炭質土壌であった整備ほ場Bは非常に多かった。未整備ほ場では15.2～21.9 g CH₄ m⁻²であった。2007年は整備地区の調査ほ場を細粒グライ土のほ場に変更し、未整備地区は2006年と同じほ場で調査を続けた。2007年の水稻栽培期間中におけるCH₄発生量は、整備ほ場で7.9～10.2 g CH₄ m⁻²で2006年のA、Cほ場と同程度であったが、未整備ほ場は4.9～14.8 g CH₄ m⁻²となり、3ほ場とも2006年よりも減少した(表3)。整備ほ場における湛水前の湿潤土のCH₄生成量は2006、2007年とも未整備ほ場よりも非常に小さく、さらに未整備ほ場では2007年の方が2006年よりも少なかった。また、2006年には湛水前の土壌水分と水稻栽培期間中のCH₄発生量には高い正の相関が見られたが、2007年には相関が見られなかった。

(2) 施肥管理技術によるわが国の農耕地からのN₂O発生制御

1) 草地

窒素肥料の種類によるN₂O発生量への影響は認められなかった(2003年)。追肥窒素量の低減により追肥後のN₂OフラックスおよびN₂O発生量は低下した。しかし、収量性は有意ではないが低下する傾向があった(2004～2005年)。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区におけるN₂Oフラックスは、標肥区(早春に2/3量、一番草収穫後に1/3量を施肥)に比べ、追肥前は同等、追肥後には低い値を示し、N₂O発生量でも同様の傾向が認められた(2005～2007年、図5)。収量性は春重点区において一番草が倒伏する場合には標肥区より劣り、それ以外では同等であった。

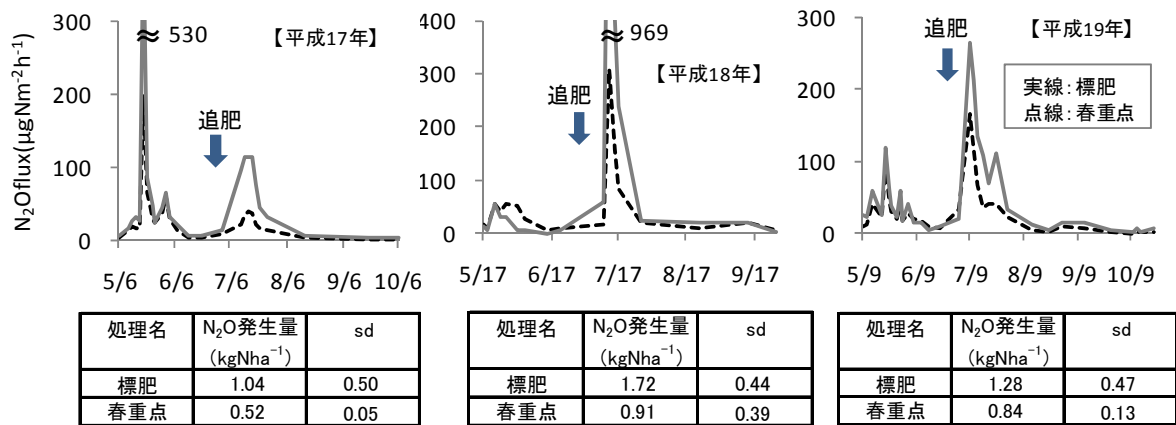


図5. 施肥配分変更（春重点施肥）によるN₂O発生量に及ぼす影響（中標津町）

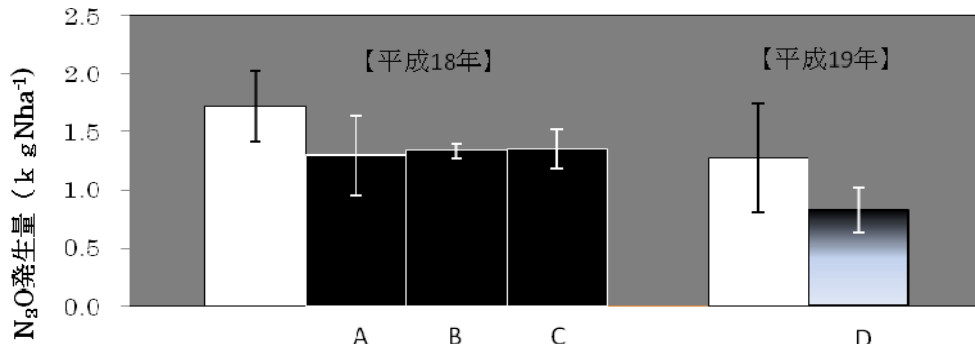


図6. 施肥配分変更（春重点施肥）がN₂O発生量に及ぼす影響（中標津町）

1) 白色：標準施肥。黒色：硝酸化成抑制剤入り市販肥料A～C銘柄。DはAと同成分の硝酸化成抑制剤をNの5%量混合処理。全処理においてN160kg/ha。施肥配分は春：追肥=2:1。

硝酸化成抑制剤が含まれた肥料施用によるN₂O発生量は標肥区より小さくなる傾向にあった（2006～2007年、図6）。また、収量性への影響は認められなかった。一方、各年度ともに、処理によるCH₄発生量への影響は認められなかった。

以上、施肥配分変更および硝化抑制剤の使用による牧草生産およびCH₄発生量への影響は認められずN₂O発生量削減の可能性が示唆された。

2) 露地野菜畑（熊本県）

2003～2005年の試験において、春作キャベツでは、N₂O発生は生育期間中に低く、残渣鋤込後に高いことが、一方、秋作キャベツでは、施肥後に高く、残渣鋤込後に低いことが明らかになった。また、N₂O発生抑制の効果がみられた施肥技術は、牛ふん堆肥と豚ふん堆肥を混合したブレンド堆肥施用が化学肥料施用に比べ削減率5～57%、緩効性肥料（ハイパーCDU）を施用した場合が11～40%、LP肥料で15%、ロング424で54%といずれの試験区でも抑制が可能であった。

2006年から2007年にかけての N_2O 発生量の推移は図7aに示したとおりで、前年までと同様、春作キャベツは栽培期間中の発生は非常に少なく、収穫後キャベツ残渣等鋤込み後に非常に高い発生ピークが認められた。2006年で高かったのは緩効性肥料施用区と化学肥料区で、次いで緩効性肥料2割減肥、4割減肥区はほぼ等しかった。ブレンド堆肥施用区は最も低いピークを示した。また、緩効性肥料施用区、堆肥施用区では8月10日にも $100 \sim 150 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ の N_2O 発生を示した。この発生は前日の降雨のためと考えられた。一方、秋作キャベツ栽培では基肥施用後、化学肥料区で高い発生ピークが認められ、また緩効性肥料区、堆肥施用区でその後やや高い発生量を示した。その後、栽培期間中、収穫後の期間を通して N_2O 発生はほとんど認められず、低く推移した。

また、2007年春作キャベツの生育期間中（3月31日～6月21日）では、基肥施用後および化学肥料追肥後の亜酸化窒素の発生はほとんど認められず、いずれの試験区も低く推移した。収穫後、キャベツ残渣鋤込み直後の6月26日から7月7日にかけて多量の亜酸化窒素フラックスが確認された。最も高い発生を示したのが緩効性肥料区と化学肥料区で、次いで、緩効性肥料2割減肥区、緩効性肥料4割減肥区であった。ブレンド堆肥区においても発生は認められたものの、化学肥料区の半分以下であった。また、緩効性窒素肥料施用区、ブレンド堆肥施用区では8月10日にも $100 \sim 150 \mu g m^{-2} hr^{-1}$ の亜酸化窒素の発生を示した。この発生は前日の降雨のためと考えられた。一方、秋作キャベツ栽培では基肥施用直後、化学肥料区で非常に高い亜酸化窒素のピークが認められ、また緩効性窒素肥料、ブレンド堆肥区でもやや高い発生を示した。その後は、栽培期間、収穫後の無作付期間を通して亜酸化窒素の発生は低く推移した。

2006年春作から2007年秋作まで4作を通して発生した総発生量は、図7-bに示すように化学肥料区が $700 mg m^{-2}$ と最も多かった。それに比較して、緩効性肥料施用（24%減）、緩効性肥料2割減肥（35%減）、緩効性肥料4割減肥（54%減）、ブレンド堆肥施用（52%減）における発生量は少なく、緩効性肥料4割減肥、ブレンド堆肥施用区における N_2O 発生量抑制効果は高いと考えら

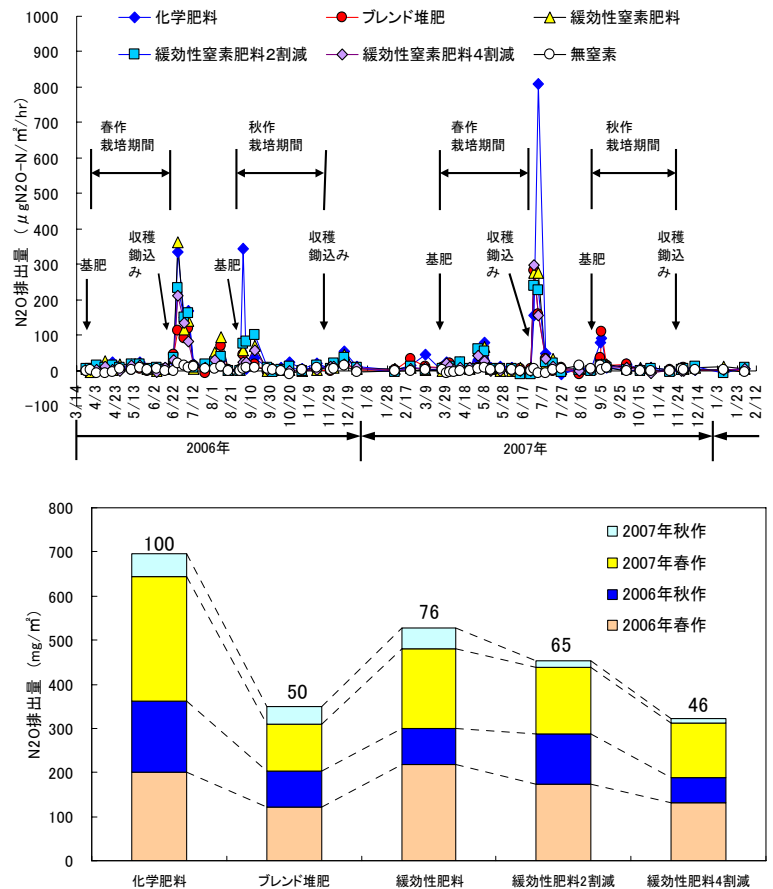


図7. (上図：a) 2006～2007年におけるキャベツ栽培時の各処理区からの N_2O フラックスの推移. (下図：b) 年間の N_2O 発生量（合志町）

れた。全期間を通して N_2O の排出が最も高かった化学肥料施用の排出係数は0.207%と試験区の中でも高い値を示した。排出係数はブレンド堆肥区が0.085%と最も低く、最も高かったのは緩効性肥料2割減肥で0.215%であったが、キャベツ栽培では施肥体系が変わっても低かった。

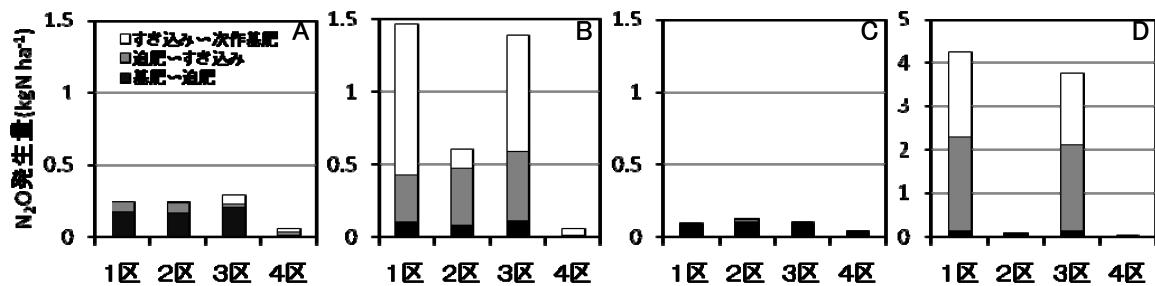
収穫後キャベツ残渣鋤き込みの影響を見るため、試験方法の試験区の構成に従い処理を行って、 N_2O フラックスを調査した。ほ場は化学肥料区を用いた。 N_2O の顕著な発生が認められた区は、キャベツ残渣を鋤き込んだ処理1とキャベツ残渣を鋤き込まず放置しておいた処理2の試験区であった。処理2のように残渣を放置した場合、処理1と同時期の発生ピークとは別なピークも数回認められた。この処理2のピークは降雨後に多く見られたことから、土壤中での脱窒というよりも腐敗の進行によって発生した N_2O のピークであると考えられた。一方、キャベツ残渣をほ場外へ持ち出した処理3、4では処理1、2で見られたピークは認められず、発生量は低く推移した。処理1と処理2を比べると、総発生量では処理2の方が高くなり、鋤込みというキャベツ残渣処理法は、放置して降雨に打たれた場合より発生低減に効果があると考えられた。

以上の結果から、キャベツほ場における N_2O 発生は、施肥法やキャベツの作型によって異なるが、 N_2O 発生低減のための施肥法としては堆肥のブレンド施用と緩効性肥料を利用することが有効であると結論された。

3) 露地野菜畑 (茨城県)

キャベツ畑土壤にアンモニア態窒素や残さを加えると、 N_2O 生成速度がすみやかに増大した。残さと無機態窒素を同時に加えた時の生成速度が最も高く、次いでアンモニア態窒素添加、残さ添加、無添加の順になった。このことから、キャベツ残さの混合により土壤からの N_2O 生成量は増加するが、無機態窒素が同時に存在すると N_2O 生成量の増加が大きいことが明らかとなった。すなわち、残さすき込みによる N_2O 発生を抑制するには、すき込み時の土壤中に存在する施肥窒素由来の残存無機態窒素を可能な限り少なくすることが重要であると考えられた。

そこで、被覆肥料を作土の下層に施肥することによって、残さすき込みに伴う N_2O 発生を抑制する施肥体系を構築した。すき込み時の肥料由来の残存無機態窒素量を減らすために追肥を省略して全量基肥とするが、施肥窒素の50%を肥効調節型肥料とすることで基肥から収穫までの間の肥効の持続を確保した。さらに、残さがすき込まれる表層15 cm程度までの作土層の下層に肥効調節型肥料を施用することにより、残さと施肥窒素を隔離することを試みた。その結果、残さすき込み後の N_2O 発生量は年内どりではわずかであったが、初夏どりにおいては基肥の化成肥料施用後の発生量よりも多くなった(図8)。初夏どりにおいては、高温多湿となる収穫期のキャベツの腐敗により多量の N_2O が発生した。また、基肥施肥後の N_2O 発生量は初夏どりよりも年内どりで多く、追肥後の N_2O 発生量はいずれの作付けにおいてもわずかであった。残さからの N_2O 排出係数は表4に示す通りとなり、年2作の栽培体系における年平均値は、慣行施肥栽培で0.312%、肥効調節型肥料の深層施肥栽培で0.238%と計算され、削減効果は23.7%となった。また、試験区間でキャベツ収量に有意差は認められなかった。以上の結果から、窒素施肥量の半分に相当する被覆肥料を作土層下に基肥と同時に施肥して追肥を省略することにより、キャベツの生産性に影響す



ることなく、残さからのN₂O発生量を削減することが可能であると考えられた。

図8. キャベツ畑の時期別N₂O発生量。

1区：慣行栽培（残さすきこみ）、2区：慣行栽培（残さ持ち出し）、3区：被覆肥料の深層施肥（残さすきこみ）、4区：無窒素（残さ持ち出し）。A:1作目（年内どり）、B:2作目（初夏どり）、C:3作目（年内どり）、D:4作目（初夏どり）。図Dの縦軸の目盛りが図A～Cとは異なることに注意（つくば市）

表4. キャベツ収穫後に圃場にすき込んだ残さからのN₂O排出係数（%：平均値±標準偏差、n=3）（つくば市）

試験区	1作目 (秋冬作)	2作目 (春夏作)	3作目 (秋冬作)	4作目 (春夏作)
慣行栽培	-0.022 ±0.073	0.755 ±0.403	-0.016 ±0.024	0.529 ±0.908
肥効調節型肥料 の深層施肥栽培	0.065 ±0.067	0.655 ±0.252	0.004 ±0.012	0.227 ±0.349

4) 施設栽培

養液土耕区における栽培期間を通じた窒素投入量に対する積算N₂O発生量の比は栽培時期により異なったが、慣行施肥区の約0.8倍～1.4倍であった（表5）。NOについては養液土耕区の方が小さかった（慣行施肥区の0.3～0.4倍）。養液土耕栽培で、施肥窒素を硝酸態窒素のみにした区（CN区）と硝酸態窒素および尿素を施用する区（対照区）とで、生育期間にわたっての総窒素施肥量に対するN₂OおよびNOの総発生量の比率を比較すると、N₂O-N/施肥N比はCN区の方が対照区より大きく（約1.3倍）、NO-N/施肥N比はCN区の方が対照区よりも小さかった（約0.3倍）。

以上の結果から、黄色土施設畑でのトマト栽培で、栽培期間中の総窒素施肥量がほぼ同じ場合、施肥窒素量に対するN₂O発生量の割合は、慣行施肥と比較して、養液土耕によりあまり低下しないこと、施肥窒素量に対するNO発生量の割合は、養液土耕、特に施用窒素の形態を硝酸態窒素のみにすることで大きく低下することが明らかとなった。

表5. 施設トマト栽培期間の積算N₂OおよびNO発生量

作期・区	施肥 窒素量, g N m ⁻²	総発生量 (mg N m ⁻²) 平均±標準誤差 ^a		発生量/施肥窒素量 %		
		N ₂ O-N	NO-N	N ₂ O-N	NO-N	
作期1	慣行施肥区	60.4 ^b	64.7±1.8	269.9±19.7	0.11	0.45
	養液土耕区	68.9 ^b	55.8±4.0	99.8±1.6	0.08	0.14

作期2	慣行施肥区	23.2	39.7±5.3	69.7±2.8	0.17	0.30
	養液土耕区	24.5	58.3±1.5	31.6±0.6	0.24	0.13
作期3	養液土耕CN区	21.2	48.6±0.6	13.1±0.1	0.23	0.06
	養液土耕対照区	20.6	35.7±5.6	45.3±2.7	0.17	0.22

^a 各区2箇所の測定点のデータを別々に積算した（平均±標準誤差）。

^b 作期1の施肥窒素量は、堆肥由来の施用量27.8 g N m⁻²を含む。

(3) アジア諸国の農耕地におけるCH₄、N₂O発生制御

1) 中国における水田での麦わら圃場分解促進によるCH₄発生抑制

2003年の予備試験から、麦わら施用により、水稻栽培初期にCH₄発生量が著しく増加することが明らかとなり、CH₄発生削減に対する麦わら管理の重要性が示された。2004～2005年の試験では、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、圃場分解処理を行った場合のCH₄発生特性を調査し、土壤中に深く埋設した場合には発生抑制効果は見られないが、マウンド状にし、より酸化的な条件での埋設により、慣行すき込みに比べ、32%の削減効果が示された。

2006年の試験において水稻栽培期間を通して計測した結果、ditch区ではCH₄およびN₂O発生量の削減効果は見られなかったが、麦わらの設置位置が高くなるにしたがって発生量は少なくなり、mound区では、麦わら燃焼処理（straw burned）と同等のCH₄およびN₂O発生量であった（図9、10）。また、水稻収量に処理による有意な違いはなかった。これらの結果は、過去2年間における宜興市での試験結果と同様であり、本技術による温室効果ガス発生削減効果が確認された。



図9. 中国句容水田における麦わらすき込み試験設計（断面図）。

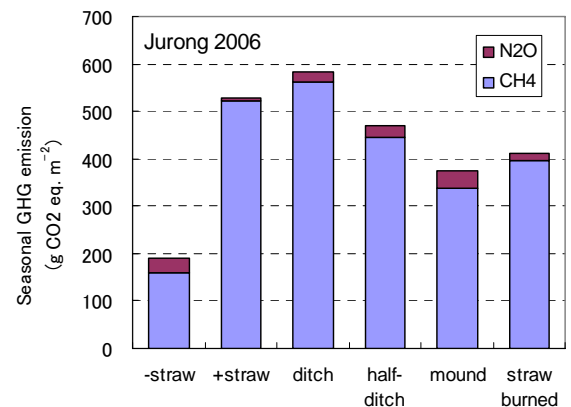


図10. 中国句容水田における麦わらすき込み処理の違いによるCH₄およびN₂O発生量（CO₂等価発生量で表す）。

2) 中国における緩効性肥料使用によるトウモロコシ畑からのN₂O発生抑制

図11に遼寧省瀋陽市のトウモロコシ畑における3年間の栽培試験で計測されたN₂O発生量を示

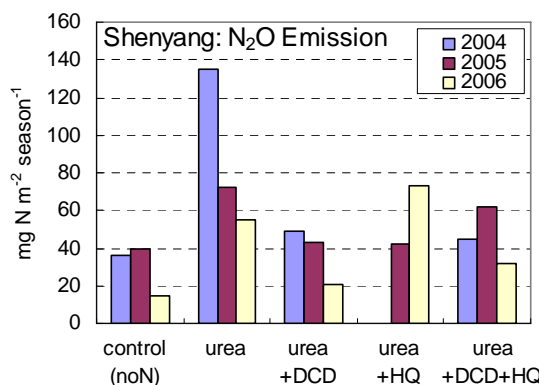


図11. 中国瀋陽のトウモロコシ畑における各種緩効性肥料使用による栽培期間のN₂O発生量（3年間の計測結果）。2004年はurea+HQでは計測を行わなかった。

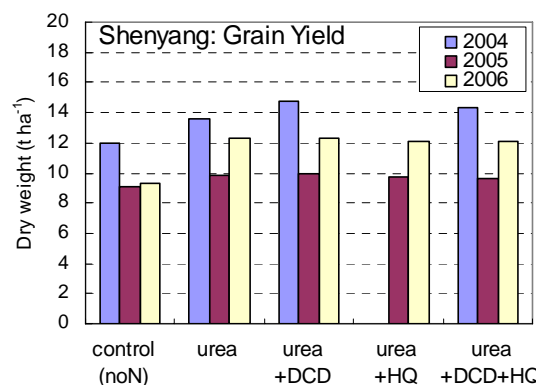


図12. 中国瀋陽のトウモロコシ畑における各種緩効性肥料使用によるトウモロコシ収量（3年間の計測結果）。2004年はurea+HQでは計測を行わなかった。

す。いずれの年においても、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。ウレアーゼ阻害剤入り尿素 (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。2006年には、夏期の追肥前、降雨にともなうウレアーゼ阻害剤入り尿素区からの大きな N_2O 発生が見られ、栽培期間発生量を増加した。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。緩効性肥料使用によるトウモロコシ収量への影響は見られなかった (図12)。以上の結果から、トウモロコシ栽培における N_2O 発生削減技術として、DCDを主成分とする硝化抑制剤入り尿素を使用することの有効性が明らかになった。

3) インドネシアおよびタイの農耕地における CH_4 、 N_2O 発生制御

嫌気培養による水田土壌中の CH_4 生成活性はバンジャルマシんで培養後期に増大しボゴールのI地点を上回った。ボゴールII、IIIとマロスでは CH_4 生成活性が終始低かった。この結果をもとにボゴールではI地点に田面水を制御する試験地を設定した。圃場試験の結果、間断灌漑区と飽和水分区では常時湛水区 (10cm) に較べて 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。同様の傾向は南カリマンタンと南スラベシでも認められ、 N_2O ・二酸化炭素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。

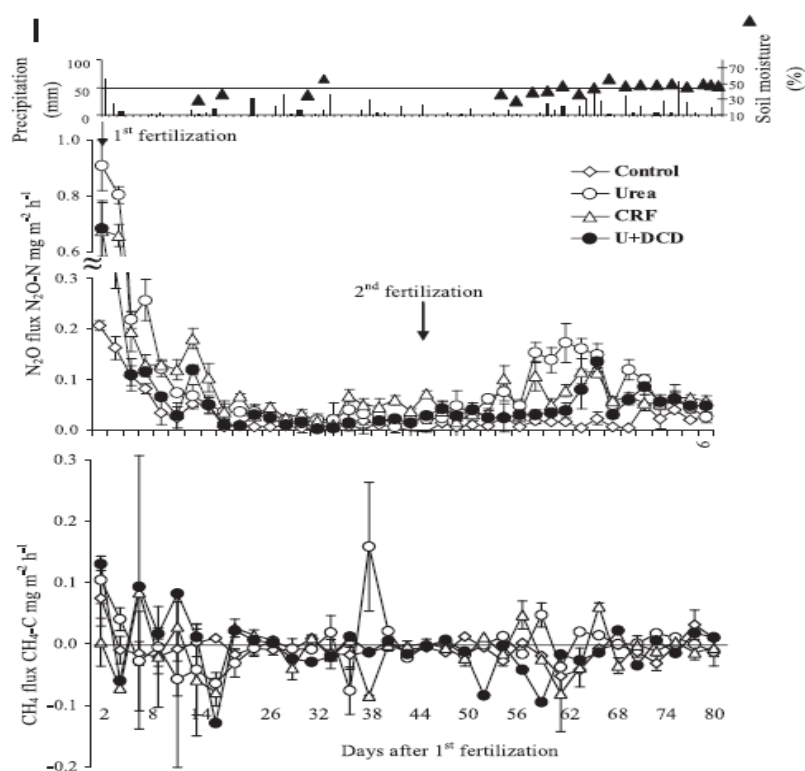


図13. 南スラベシ州マカサールのトウモロコシ畑において計測された降水量、 N_2O および CH_4 フラックスの季節変化. Control: 無窒素区、Urea: 尿素区、CRF: 肥効調節型肥料区、U+DCD: 硝化抑制剤添加尿素区

好気培養による茶園土壌中の N_2O 生成活性は隣接する松林およびジャガイモ畑土壌より約2桁高く、硫酸や尿素添加の影響は小さかった。松林およびジャガイモ畑土壌では硫酸や尿素添加により N_2O 生成活性が3~6倍増加した。これは茶園土壌が多量の窒素施肥を受けているためと考察した。インドネシアの農耕地からの N_2O 発生量のデータ、特に肥効調節型肥料CRFと硝化抑制剤DCDの効果を取りまとめ、南スラベシ州マカサールのトウモロコシ畑において、前者で12%、後者で56%の N_2O 削減率を達成できた (図13)。同様の傾向は南カリマンタンでも認められ、 CH_4 吸収量

および収量には影響は見られなかった。

(4) 各技術による削減ポテンシャルとコスト評価

1) 水田有機物管理技術

わが国では、昭和50年代に入り自脱型コンバインの普及が拡大し、水稻の刈り取り収穫作業の機械化が進んだ。その結果、山形県の場合、昭和40年代はじめに水田の約8割を占めていた堆肥施用面積は急激に減少し、昭和56年には22%、平成16年には14%に低下した。一方、稲わら施用面積は昭和40年当初にはほとんど見られなかったが、昭和56年は71%、平成16年は83%（春すき込み80%、秋すき込み3%）に達した。したがって、水稻作付け水田（H17:71,700ha）の80%（57,360ha）を上限に当該技術を導入することが可能である。稲わらを代替する堆肥の畜種の比率に県内の牛、豚堆肥の生産量の比率を用い、本試験によるCH₄削減量を当てはめると削減ポテンシャルは344 Gg CO₂eである。さらに、全国の場合、稲わらのすき込み率は61.5%でありすき込み時期は明確でないが、積雪寒冷地では春すき込みの水田が多いことを見込み、稲わら施用水田の50%が春すき込みであると仮定した試算では、933 Gg CO₂e（0.254 Mt C）の削減量が見込まれる（表6）。この値は稲わら秋すき込み水田からのCH₄発生量（全国平均18.1 g m⁻²；八木、2005）に対する削

表6. 堆肥施用を地域及び全国に拡大した場合の削減ポテンシャル

	山形県			全国		
	堆肥施用による削減効果		合計	堆肥施用による削減効果		合計
	牛ふん堆肥 (A)	豚ふん堆肥 (B)		牛ふん堆肥 (A)	豚ふん堆肥 (B)	
CH ₄ 削減量(MgCO ₂ ha ⁻¹)	6.33	3.52		2.08 (50%削減)	1.09 (30%削減)	
堆肥生産量(t)	349,428 (88%)	48,588 (12%)	398,016	2,972,000 (70%)	1,295,000 (30%)	4,267,000
適用面積(ha)	50,477	6,883	57,360	366,380	157,020	523,400
削減ポテンシャル(GgCO ₂)	320	24	344	763	171	933

稲わら春すき込み面積：山形県=57,360ha、全国=523,400ha

稲わら施用水田のメタン発生量：18.1gCH₄m⁻²yr⁻¹

減割合から算出したものであり、春すき込み水田からの削減量はより大きいことが予想される。

10ha規模の稲作経営において、稲わらに代えて堆肥を施用するためには、一度稲わらを回収し、その後堆肥を散布する。収穫時に自脱型コンバインで刈り取り、切断後、圃場に散布された稲わらはロールベア等で回収し、堆肥の散布はマニュアルスプレッダー等を用いるのが一般的である。この2種類の機械作業の概算経費（年間減価償却額+労働費）は69,538円/haであった。また、堆肥を購入する場合、山形県で製造される主要な堆肥の平均販売価格は4,069円/tであった。一方、稲わら春すき込みを堆肥に代えることにより減少するCH₄量は本試験の場合牛ふん堆肥、豚ふん堆肥がそれぞれ27.5、15.3 g m⁻²であった。CO₂ベースの炭素価格を2,000~10,000円/tとした場合、CH₄削減効果から経費を差し引くと牛ふん堆肥の場合は46,924~97,567円の赤字であり、豚ふん堆肥を用いた場合は赤字額がさらに大きかった（表7）。

近年における環境保全型農業の広がりとともに、農林水産省の表示ガイドラインに基づく特別

表7. 稲わらの代えて堆肥を用いた場合の経済的効果（ha当たり）

	堆肥施用による削減効果		炭素価格 CO ₂ ベース	稲わら回収・ 堆肥散布経費 (C)	堆肥価格 (D)	効果の収支	
	牛ふん堆肥 (A)	豚ふん堆肥 (B)				(A-C-D)	(B-C-D)
	CH ₄ 削減量(MgCO ₂ ha ⁻¹)	6.33				3.52	
ケース1	¥12,661	¥7,038	20 ^{ドル} /t	¥69,538	¥40,690	¥-97,567	¥-103,190
ケース2	¥31,652	¥17,595	50 ^{ドル} /t	¥69,538	¥40,690	¥-78,576	¥-92,633
ケース3	¥63,304	¥35,190	100 ^{ドル} /t	¥69,538	¥40,690	¥-46,924	¥-75,038

1^{ドル}=100円で計算；炭素価格はAR4より；堆肥価格は山形県主要堆肥販売価格の平均

栽培米の生産や持続性の高い農業生産方式の導入に際しては、堆肥利用を増やすことが技術の一つとなっており、生産物を販売する上で有利な条件となっている。水稻の平均収量は532 kg/10a（平成17年）であることから、販売金額が1俵（60kg）当たり1,000円上乗せされたとすれば、ha当たり約88,670円の増収になる。必要経費に対するCH₄削減効果が赤字であることを前述したが、産米の販売価格等への上乗せ額が見込まれれば、CH₄削減効果がプラスに転じるだけでなく、経営全体としての利益増につながる可能性が高い。農林水産省の調査(H8)によれば全国における稲わらの畜産利用は15.6%、堆肥利用は10.1%である。水田から回収した稲わらを敷料や飼料とする畜産利用および堆肥の副資材としての利用をさらに増加させ、堆肥生産に結びつける必要がある。農家経営にとってメリットのある仕組みができれば、堆肥を生産・利用する集団や個人が増加し、結果的に温室効果ガス排出量の低下につながると考えられる。

世界の水田の有機物施用に関する情報はきわめて限られている。東南アジアおよび南アジアでは、稲わらは燃料や家畜の飼料として使用されているので、日本のように土壌に施用する割合は多くないと考えられる。仮に、アジアの10%の水田で、上記の削減技術が適用可能であり、その削減率は山形県と中国江蘇省での試験結果を参考に40%であると仮定し、アジアの水田からのCH₄発生量：55 Tg yr⁻¹（IPCC、2005）の1/10に対して削減が適用されたと考えたとすると、削減量は2.2 Tg CH₄ y⁻¹（12.8 Mt Ceq. y⁻¹）となる。

2) 水田水管理技術

福島県における現地試験から、水管理を強化することにより大きなCH₄発生削減効果の得られることが示されている。常時湛水水田からのCH₄発生は、水稻の収量を低下させない範囲での中干し等の水管理を行うことにより21～63%削減できることが示された。また、すでに中干し等の間断灌漑水管理（慣行水管理）を行っている水田においても、中干しの開始を7日間早めたり、栽培後期の水管理を強化するなど、さらに酸化的な管理を行うことにより、水稻の収量を低下させたり、N₂Oの発生を有意に増加させずに通常の中干しの場合よりもさらに22～51%削減できることが示された。この結果は、世界の実測データベース解析より求められた結果とおおむね一致する（サブテーマ(1)-(2)）。

これらの結果をもとに、わが国全国の水田1.77 Mha（2000年）において上記の改良水管理によるCH₄発生削減ポテンシャルを以下のように見積もった。まず水田を慣行水管理水田（全体の98%）と常時湛水水田（全体の2%）に区分し、慣行水管理水田では中干しの開始を7日間早めた場合のデータを直接もちい、常時湛水水田では中干しを行った場合の削減率に、7日間早い中干しを行った場合の削減率を加味して計算した。

① 常時湛水水田での計算は以下のとおり：

常時湛水水田からのCH₄排出係数：36.0 g CH₄ m⁻² y⁻¹（GIO, 2007）

排出削減割合：45.9%（2004～2005年度試験結果の平均値）

CH₄のGWP：21（IPCC, 2001）

削減ポテンシャル：1.77×10⁶×0.02×36×10⁴×0.459×21×10⁻⁹=123 Gg CO₂eq

② 慣行水管理水田での計算は以下のとおり：

わが国の水田からのCH₄排出係数：16.0 g CH₄ m⁻² y⁻¹ (GIO, 2007)

排出削減割合：38.9% (2004～2005年度試験結果の平均値)

CH₄のGWP：21 (IPCC, 2001)

削減ポテンシャル：1.77×10⁶×16×10⁴×0.389×21×10⁻⁹=2313 Gg CO₂eq

上記の合計でCH₄発生削減量は全体で2.44 Tg CO₂ eq. y⁻¹ (0.67 Mt C y⁻¹)となる。

なお、わが国の水田では、灌漑用水の使用量は年間契約であることから、費用の増減は発生しない。また、追加の作業もないことから、人件費も発生しない。したがって、コストの増減はないと考えられる。

上記の改良水管理をアジア地域に適用した場合の削減ポテンシャルについて、まず、常時湛水水田において上記の試験結果と同等のCH₄発生削減が期待できると仮定すると、その削減ポテンシャルは以下のように計算される。

アジアの常時湛水水田からのCH₄発生量：8,553 Gg y⁻¹ = 180 Tg CO₂ eq. y⁻¹

削減割合40%の場合の削減ポテンシャル：180 x 0.40 = 72 Tg CO₂ eq. y⁻¹

また、間断灌漑水管理を行っている水田において、さらに酸化的な水管理を行った場合の削減ポテンシャルは以下のように計算した。

アジアの間断灌漑水管理水田からのCH₄発生量：7,534 Gg y⁻¹ = 158 Tg CO₂ eq. y⁻¹

このうち、半分の水田で水管理が可能と仮定：158 Tg CO₂ eq. y⁻¹ / 2 = 79 Tg CO₂ eq. y⁻¹

削減割合35%の場合の削減ポテンシャル：79 x 0.35 = 28 Tg CO₂ eq. y⁻¹

以上、合計で100 Tg CO₂ eq. y⁻¹ (27.3 Mt C eq. .y⁻¹)となる。

3) 水田水管理技術 (インドネシアにおけるケーススタディ)

水田からのCH₄発生を間断灌漑により制御するCDM事業をインドネシアで実施するためのモデルを案出し、その実行可能性を評価した。

まず南カリマンタンおよび南スラウェシで、作付体系および水利組合WUA (Water Use Association) を調査し、間断灌漑の適用評価を行ったところ、用排水分離が進められている南カリマンタンの沿岸部に位置するリアムカナン灌漑地域では、灌漑水の管理は個人単位で行われているため、水利組合が機能していないことが確認された。CDM事業を実施するためには、ある程度の規模を確保しスケールメリットを発揮することが必要で

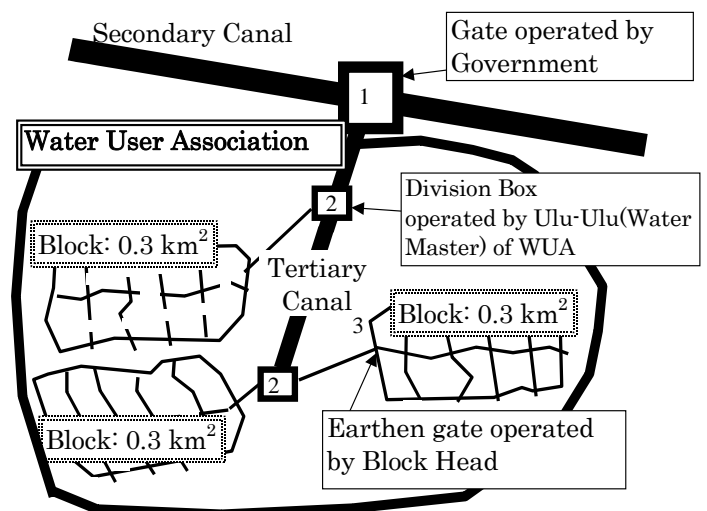


図14. WUAの概念図

あり、そのためには、用排水が未分離でも水利組合が機能している地域において事業を実施することが適切と判断された。また南スラウェシ及び南カリマンタンの内陸部では、水利組合は、多くの場合0.3 km²程度の灌漑ブロック3つからなり、全体で0.9 km²程度の規模であることが確認された。

CDMのモデル事業は、間断灌漑の実施を容易にするため、上述の灌漑ブロックごとに、コンクリート製の小規模ゲート（30 x 50 x 15 cm程度）を設置し、栽培期間中に、一定期間、灌漑水の導入を停止するために、このゲートを閉めることを想定した。

上述の調査を元に一つの灌漑ブロックから事業を開始する極小プロジェクトとWUAから事業を開始する小規模プロジェクトの2つのシナリオを策定し、いずれも事業期間を20年とし、小面積から3段階で次第に拡大していくことにより、事業実施者の経験蓄積が可能となるよう配慮した。さらに炭素クレジットの推定価格として10.5 USD/tCO₂eを採用し、南スラウェシにおける実測値に基づき、年間1,661 tCO₂e/km²相当のメタン発生が削減できるという仮定をおき、財務分析を行った。その結果、小規模プロジェクトの内部収益率は16%となり財務的に実行可能と判断された。しかし、極小プロジェクトの内部収益率は1.7%となり財務的に実行が困難と判断された。なお、上述の3段階で参加農家の10%、15%および20%が間断灌漑を実施できない等の理由によりプロジェクトから脱退するという仮定をおいて、控えめな見積りとしている。水田からのCH₄発生を間断灌漑により制御するためのモデル分析から、水田におけるCH₄発生制御を目的としたCDMプロジェクトは、「1つの水利組合から始めて次第に拡大」というアプローチが適切なものと判断された。

インドネシアの統計上、Semi Technical Irrigation と区別されている地域の5割において事業が実施できると仮定すると、インドネシア全体で3,700km²程度の水田で本事業が適用できる可能性がある。

4) 施肥管理技術

根鋤の草地と中国遼寧省のトウモロコシ畑における試験から、季節的な施肥配分を変更することや硝酸化成抑制等を肥料に添加することからN₂O発生量を削減できることが示された。

本結果を根鋤地方の採草地(約104,000ha)に適用した場合のN₂O発生量削減ポテンシャルは、施肥配分変更(春重点施肥)において49 Mg N y⁻¹ (23 kt Ceq. yr⁻¹)、硝酸化成抑制剤の使用では33 Mg N y⁻¹ (16 kt Ceq. yr⁻¹)と試算された。しかし、施肥配分変更(春重点施肥)によるコスト収支は標準施肥と変わらないが、硝酸化成抑制剤の使用ではコスト収支が標準施肥の3~4倍高まると試算された。わが国での硝酸化成抑制剤の価格の高いことが制限要因としてあげられる。

一方、中国遼寧省の試験で使用した硝化抑制剤+ウレアーゼ阻害剤入り尿素(urea+DCD+HQ)はすでに中国において、比較的安価で市販されている。この肥料の尿素肥料との価格差は100 RMB ton⁻¹ (= ¥1,500 ton⁻¹)である。この金額をhaあたりの肥料使用量に換算すると、12 RMB (= ¥180)である。このコストは、この肥料を使用し、追肥を省略することによる労働力の削減コスト(1 Man-day ha⁻¹=20 RMB (= ¥300)よりも小さいことから、普及の可能性は高いと考えられる。

アジアの全域で中国遼寧省で試験された肥料が普及された場合、アジアでの窒素肥料消費量 (40 Mt N)、IPCCガイドラインでの N_2O 排出係数 (0.010)、削減率 (30%と仮定) から、削減ポテンシャルは以下のように58 Tg $CO_2eq. yr^{-1}$ (16 Mt Ceq. yr^{-1})と計算される。

$$\text{削減ポテンシャル} : 40 \times 10^{12} \times 0.010 \times 0.30 = 120 \text{ Gg } N_2O-N. yr^{-1} = 58 \text{ Tg } CO_2 eq. yr^{-1}$$

5) 野菜残渣管理技術

キャベツ、ハクサイ、ブロッコリ、カリフラワーなどは、一般的に、結球部や花蕾のみを収穫し、それ以外の部分は残さとなる。日本では残さは圃場にすき込まれることが一般的で、日本以外のアジア諸国では家畜などのエサとして利用されることが多い。そのため、残さの圃場へのすき込みに伴う N_2O 発生は、主に日本国内における問題と考えてよい。本試験ではキャベツを対象作物としたが、これら野菜の栽培に対しても、本試験の排出係数、抑制技術は適用可能と考えられる。それは、これらの4種類の葉菜類の窒素施肥量を含む施肥体系はほぼ同一であり、いずれもアブラナ科に属するため、残さの性状もよく似ているためである。

国内の栽培面積と収穫量は、キャベツが33,300 ha、1,279,000トン、ハクサイが20,200 ha、888,000トン、ブロッコリが10,000 ha、94,000トン、カリフラワーが1,500 ha、24,000トンとなっている (農林水産省、平成16年度)。それぞれの野菜の収穫量に対する残さの比率 (野茶研における試験結果) を、キャベツが0.68、ハクサイが0.38、ブロッコリが1.97、カリフラワーが1.37とすると、残さ発生量はそれぞれ870,000トン、337,000トン、185,000トン、32,900トンと推定される。それぞれの野菜の水分含量を、84.1%、94.6%、87.8%、90.6%、全窒素含量を、2.78%、3.77%、4.23%、3.59%とすると (野茶研における試験結果)、圃場にすき込まれる残さに含まれる窒素量は3845トンN、686トンN、955トンN、111トンNとなる。いずれの野菜も秋冬野菜なので年内取りが主な作付体系であるが、周年供給のためにさまざまな作付体系がとられている。そのため、残さすき込み時期も様々であり、 N_2O 排出係数としては本研究で得られた年平均値の適用がふさわしいと思われる。

以上の条件を元に、日本全体における4種類の野菜栽培に被覆肥料の深層施肥技術を導入した場合の N_2O 削減ポテンシャルを試算してみる。4種類の野菜の総栽培面積は65,000 ha、すき込まれる残さに含まれる総窒素量は5597トンNとなり、本研究で得られた排出係数を用いて計算すると、 N_2O 発生量は慣行栽培で17.46トンN、被覆肥料の深層施肥栽培を導入した場合13.32トンNとなった。この削減量4.14トン $N_2O-N yr^{-1}$ は、2,000トン $CO_2eq. yr^{-1}$ (550 tC eq. yr^{-1})に相当する。

この時の、 N_2O 発生抑制のコストを評価する。被覆肥料の深層施肥技術を導入した場合、追肥における肥料代と労働時間が削減される。その一方で、被覆肥料という一般の化成肥料よりも高価な肥料を使用するため、肥料代が上昇する。また、被覆肥料を作土層下に施肥する機械を利用するため、基肥施肥時の労働時間が延長されるとともに、エネルギー消費量が増加する。以下、項目ごとにコストを計算する。

・労働コスト：追肥に要する時間が0.7h/10a、深層施肥に要する時間が0.56h/10aなので、労

働時間の差が-0.14時間/10aとなる。労働単価が800円とした場合、労働コストは112円/10a削減される。

- ・燃料コスト：追肥は人力で行うため、省略しても燃料コスト削減にはならない。深層施肥機の稼働時間が0.56時間/10a、軽油消費量が8.0L/時間、燃料単価が80円/Lとした場合、燃料コストが358円/10a増加する。
- ・肥料コスト：本技術では被覆肥料（ロング424）を10kgN/10a施肥し、それに相当する化成肥料（化成8号）の施肥量を削減する。化成8号が75円/kg、ロングが200円/kgとした場合、化成肥料施肥量削減により9,375円/10aが削減され、ロング施肥により14,200円増加し、肥料コストは4,800円/10aの増加となる。
- ・総合評価：本技術の導入によって、国内65,000 haからのN₂O発生量は4.14トンN（CO₂-C換算550トン）削減されるが、生産コストは5,000円/10a増加する。すなわち、CO₂-C1トン当たりの削減コストは、5,909千円となる。

6) 削減ポテンシャルとコスト評価のまとめ

以上の検討より得られた、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CH₄およびN₂O発生削減ポテンシャルと各地域での適用について試算されたコスト評価結果を、それぞれ、表8および9に示す。有機物管理と水管理による水田からのCH₄発生削減ポテンシャル（それぞれ0.25および0.67 Mt yr⁻¹）は、京都議定書による6%削減目標量の、それぞれ、1.1%および3.0%に相当する。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た。硝化抑制剤等による畑・草地からのN₂O発生削減についても、アジア地域でのポテンシャルは大きい。

地域ケーススタディの結果は、山形県での水田有機物管理については比較的大きなコスト増加が示された。表9には示していないが、わが国での施肥管理ではさらに大きなコストの必要性が示された。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。

表8. 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9. 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)が必要だが、追肥を省けることにより、労働力(300円/ha)節約	肥料コスト(43,000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

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

農耕地からのGHGソース制御技術について、水田からのCH₄発生に対し、稲わらの堆肥化、落水と中干し期間の延長、無代かき栽培、および基盤整備の技術が、また、施肥土壌からのN₂O発生に対し、堆肥と緩効性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。これらの技術による削減量の定量値は、気候や土壌など農業生態系の多様性のため、十分な定量的評価が得られていなかったそれぞれの技術の有効性を評価する際、基礎データとして活用される。また、わが国とアジア地域における削減ポテンシャルとともに、作物生産性等のトレードオフとコスト評価に関する検討は、これまでの研究で欠けていた技術開発に必須の情報を提供するものである。特に、水田水管理と中国製資材による施肥管理について技術としての利点が示されたことから、今後、わが国とアジア地域の農耕地で、広域でのGHGソース削減技術としての実用化が期待される。

(2) 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。

6. 引用文献

- (1) IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report (AR4): Climate Change 2007, Cambridge University Press
- (2) IPCC(1995): Climate change 1994, Radiative forcing of climate change, Cambridge University Press
- (3) 八木一行: 続・環境負荷を予測する, 323-342 (2005), 博友社「6-IV農耕地土壌からの温室効果ガス排出量評価に対する国際的取り組み」
- (4) GIO (国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス) (2007) : 日本国温室効果ガスインベントリ報告書

7. 国際共同研究等の状況

アジア地域の農耕地における実効的なCH₄、N₂O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効率的に推進するために、以下の研究機関との間に研究協定書を結び、連携に努めている。いずれの場合も、共同して研究計画を企画立案するとともに、日本側から研究者が訪問し、必要な指導と支援を行っている。

- (1) 研究所間協定覚え書きに基づく共同研究：中国科学院南京土壤研究所（代表：蔡祖聰）
- (2) 大学間協定覚え書きに基づく共同研究：インドネシア国ボゴール農科大学（代表：Iswandi Anas）、ランブンマンクラット大学（代表：Abdul Hadi）、マカサール大学（代表：Yusminah Hala）、タイ国コンケン大学（代表：Patcharee Lawongsa）

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 八木一行：土壤の物理性, 94, 21-31 (2003) 「土壤生態系からの微量ガス発生と大気環境」
- 2) K. Inubushi, Y. Furukawa, A. Hadi, E. Purnomo and H. Tsuruta: Chemosphere, 52, 603-608 (2003) “Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of south Kalimantan”
- 3) J. Yanai, T. Sawamoto, T. Oe, K. Kusa, K. Yamakawa, K. Sakamoto, T. Naganawa, K. Inubushi, R. Hatano and T. Kosaki: J. Environ. Qual., 32(6), 1965-1977 (2003) “Spatial variability of N₂O emissions and their soil-related determining factors in an agricultural field”
- 4) S. Tokuda and M. Hayatsu: Soil Sci. Plant Nutr., 50, 365-374 (2004) “Nitrous oxide flux from a tea field applied with a large amount of nitrogen fertilizer and soil environmental factors controlling the flux”
- 5) X. Xu and K. Inubushi: Biol. Fertil. Soils, 40, 215-221 (2004) “Effects of N sources and methane concentration on methane uptake potential of a typical coniferous forest and its adjacent orchard soil”
- 6) K. Inubushi, A. Okubo, O. Jumadi, Y. Murata, K. Noda and K. Yagi: 3rd International Nitrogen Conference, Contributed papers, Science Press and Science Press USA Inc., Ed. Z. Zhu, K. Minami and G. Xing, 701-706 (2005) “Impact of fertilizer management on nitrous oxide emission from Japanese pear orchard field”
- 7) Y. Furukawa, K. Inubushi, M. Ali, A.M. Itang and H. Tsuruta: Nutr. Cycling Agroecosys., 71, 81-91 (2005) “Effect of changing groundwater levels caused by land-use changes on greenhouse gas emissions from tropical peatlands”
- 8) K. Inubushi, S. Otake, Y. Furukawa, N. Shibasaki, M. Ali, A.M. Itang and H. Tsuruta:

- Nutr. Cycling Agroecosys., 71, 93-99 (2005) "Factors influencing methane emission from peat soils: Comparison of tropical and temperate wetlands"
- 9) X. Xu, P. Boeckx, O. van Cleemput and K. Inubushi: Agri. Ecosys. Environ., 109(1-2), 107-117 (2005) "Mineral nitrogen in a rhizosphere soil and in standing water during rice (*Oryza sativa* L.) growth: effect of hydroquinone and dicyandiamide"
 - 10) K. Inubushi, K. Sakamoto and T. Sawamoto: Soil Sci. Plant Nutr., 51 (5) (PSILPH Special Issue), 605-608 (2005) "Properties of microbial biomass in acid soils and their turnover"
 - 11) X. Xu and K. Inubushi: Soil Sci. Plant Nutr., 51 (5) (PSILPH Special Issue), 683-688 (2005) "Mineralization of nitrogen and N₂O production potentials in acid forest soils under controlled aerobic conditions"
 - 12) 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"
 - 13) M. Murakami, Y. Furukawa, and K. Inubushi: Soil Sci. Plant Nutr., 51 (5) (PSILPH Special Issue), 697-699 (2005) "Methane production after liming to tropical acid peat soil"
 - 14) K. Priyadi, A. Hadi, T.H. Siagian, C. Nisa, A. Azizah, N. Raihani and K. Inubushi: Soil Sci. Plant Nutr., 51 (5) (PSILPH Special Issue), 689-691 (2005) "Effect of chicken manure and microbial inoculation on microbial properties of two acidic wetland soils and sweet corn performance in Indonesia"
 - 15) T. Hosono, N. Hosoi, H. Akiyama, H. Tsuruta : Nutr. Cycling Agroecos., 75(1-3), 115-134 (2006) "Measurements of N₂O and NO emissions during tomato cultivation using a flow-through chamber system in a glasshouse"
 - 16) M. Ali, D. Taylor and K. Inubushi : Wetlands, 26, 2, 612-618 (2006) "Effect of environmental variations on CO₂ efflux from tropical peatland in eastern Sumatra"
 - 17) K. Minamikawa, N. Sakai and K. Yagi: Microbes Environ., 21(3), 135-147 (2006) "Methane emission from paddy fields and its mitigation options on a field scale"
 - 18) J. Ma, X.L. Li, H. Xu, Y. Han, Z.C. Cai and K. Yagi: Aust. J. Soil Res., 45, 359-367 (2007) "Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field"
 - 19) 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"
 - 20) A. Suphachai, K. Inubushi and M. Takagaki: Jpn. J. Tropical Agric., 51(4), 152-159 (2007) "Effects of controlled-release nitrogen fertilizer application on nitrogen

uptake of a leafy vegetable (*Brassica campestris* L.), nitrate leaching and N₂O emission”

- 21) Y. Lou, L. Ren, Z. Li, T. Zhang and K. Inubushi; *Water Air Soil Pollution*, 178, 157-167 (2007) “Effect of rice residues on carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a paddy soil of subtropical China”
- 22) 細野達夫, 細井徳夫: 野菜茶業研究所研究報告, 7, 9-25 (2008) 「トマト養液土耕栽培からのN₂OおよびNO放出特性の解明」
- 23) O. Jumadi, Y. Hala, Abd. Muis, A. Ali, M. Palennari, K. Yagi, and K. Inubushi: *Microbes Environ.*, 23(1), 29-34 (2008) “Influences of chemical fertilizers and a nitrification inhibitor on greenhouse gas fluxes in a corn (*Zea mays* L.) field in Indonesia”
- 24) J. Ma, Y. Han, H. Xu, K. Yagi and Z.C. Cai: *Aust. J. Soil Res.* (in press) “Short-term effects of wheat straw incorporation into paddy field as affected by rice transplanting time”
- 25) 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 CH₄ emissions from rice fields”
- 26) A. Hadi, O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54 (in press) “Mitigation options for N₂O emission from a corn field in Kalimantan, Indonesia: A case study”

<査読付論文に準ずる発表> (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) 八木一行: 農業生態系における炭素と窒素の循環, 農業環境研究叢書 第15号, 農業環境技術研究所, 23-50 (2004) 「大気メタンの動態と水田からのメタン発生」
- 2) 齋藤隆, 中山秀貴, 横井直人: 東北農業研究成果情報, 300-301 (2004) 「中干し期間の長期落水処理によるメタン発生の低減」
- 3) 熊谷勝巳, 塩野宏之: 平成16年度研究成果情報(東北農業), 東北農業試験研究推進会議, 東北農業研究センター, 298-299 (2005) 「完熟牛ふん堆肥を稲わら春施用に代えて施用した場合のメタン削減率」
- 4) 秋山博子, 八木一行, 須藤重人, 西村誠一: 農業環境技術研究所平成15年度成果情報(第20集) (2005) 「農耕地への有機物施用は亜酸化窒素の重要な発生源のひとつである」
- 5) 熊谷勝巳, 塩野宏之: 平成16年度研究成果情報(東北農業), 東北農行試験研究推進会議, 東北農業研究センター(2005) 「完熟牛ふん堆肥を稲わら春施用に代えて施用した場合のメ

タン削減率」

- 6) 犬伏和之, 坂本一憲, 岡崎正規, 豊田剛己, 徐 星凱, 荻山慎一, 奥山 新, 柴田良隆, 洲脇康史, 山岡順子, 牛渡シルビオ良治, オスランジュマディ, 小田順子, 見富健志, 米田理津子, 北原克也, 円谷恭子, 野原滋久, 濱脇康介, 水野崇行, 鈴木創三, 田中治夫, 隅田裕明, 竹迫 紘: 千葉大園芸学報, 59, 1-7 (2005) 「千葉大学森林環境園芸 (利根高冷地) 農場の土壌の諸性質について (第1報) - 土壌の微生物性, ガス生成と微量元素分析」
- 7) 八木一行: 肥料の事典, 朝倉書店, 358-365 (2006) 「温室効果ガスの発生とその評価」
- 8) 犬伏和之, 八木一行: 実験化学講座第5版, 20-2環境化学, 日本化学会編, 丸善, 東京, 40-41, 142-153 (2007). 「地球温暖化, 土壌起源の温室効果ガス」
- 9) 熊谷勝巳: 圃場と土壌, 39-10, 11, 13-18 (2007) 「稲わら施用を家畜ふん堆肥施用に代えた水田のメタン発生抑制効果」
- 10) 有田敬俊, 三枝俊哉: 研究成果情報 北海道農業 (北海道農業試験研究推進会議) (2008, 印刷中) 「道東採草地の温室効果ガス発生量評価と堆肥等肥培管理による低減の可能性」
- 11) 齋藤隆: 東北農林水産ハイテク情報, No. 47 (2008) 「メタン発生を抑制する水田の水管理技術」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 細野達夫, 細井徳夫: 農業環境工学関連5学会2003年合同大会 (2003) 「施設長段トマト栽培からの N_2O および NO_x 放出量」
- 2) K. Inubushi, M. Kuhara and Y. Furukawa: the 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference, Beijing, China (2003) “ CH_4 and N_2O flux from Andosol with different forms of applied fertilizer and characteristics of methanotrophic bacteria”
- 3) H. Akiyama, H. Tsuruta and K. Yagi: 3rd Nitrogen Conference, Nanjing, China (2004) “Effect of Organic Fertilizer Application to Japanese Andisol on N_2O and NO Emissions”
- 4) K. Yagi and K. Minami: 3rd Nitrogen Conference, Nanjing, China (2004) “Challenges of reducing excess nitrogen in Japanese agroecosystems”
- 5) 村上未央, O. Jumadi, A. Hadi, Y. Hala, P. Saenjan, 犬伏和之, 八木一行: 日本土壌肥料学会(2004) 「インドネシア及びタイ水田からのメタン放出と水管理の影響」
- 6) O. Jumadi, Y. Hala and K. Inubushi: the 6th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Sendai (2004) “Nitrous oxide production and responsible microorganisms from upland acid soil of Indonesia”
- 7) M. Murakami, Y. Furukawa and K. Inubushi: the 6th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Sendai (2004) “Methane emission after liming to

tropical acid peat soil and its mechanisms”

- 8) 白鳥 豊, 志賀智和: 日本土壤肥料学会関東支部会 (2004) 「排水性の違いが水田からのメタン発生に及ぼす影響」
- 9) 甲田裕幸, 三枝俊哉: 日本土壤肥料学会北海道支部秋季大会 (2004) 「一番草収穫後の窒素施肥量がチモシー採草地の亜酸化窒素発生量に与える影響」
- 10) 熊谷勝巳, 塩野宏之, 中川文彦, 森岡幹夫: 日本土壤肥料学会 (2005) 「牛ふん堆肥を稲わら春すき込みに代えて施用した場合のメタン削減効果」
- 11) 白鳥 豊, 志賀智和, 犬伏和之: 日本土壤肥料学会 (2005) 「排水改良による水田土壌の物理的, 化学的変化がメタン発生と水稻生育に及ぼす影響」
- 12) Y. Shiratori, H. Watanabe, T. Shiga, Y. Furukawa, K. Inubushi and H. Tsuruta: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2005) “Mitigation effects of drainage on methane emission from poorly-drained paddy field”
- 13) 細野達夫, 細井徳夫, 八木一行: 日本土壤肥料学会 (2005) 「施肥窒素の形態が異なるトマトの灌水同時施肥栽培からのN₂O放出量」
- 14) 細野達夫, 片山勝之, 鈴木克己: 日本農業気象学会北陸支部大会 (2005) 「通気式チャンバー法による土壌からのNOフラックス測定値に及ぼす通気流量の影響」
- 15) A. Hadi, K. Inubushi and K. Yagi: International Rice Conference, Bali, Indonesia (2005) “Greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia as influenced by water management”
- 16) K. Inubushi, T. Mizuno, T. Funabiki and K. Yagi: In Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection (Proceedings of 15th IPNC), Ed. C. J. Li et al., p.1120, Tsinghua University Press, Beijing. (2005) “Monitoring of methanotrophs in paddy soil and plant”
- 17) M. Murakami, A. Hadi, A. Ali, A. Iswandi, T. Shimonishi, K. Yagi, and K. Inubushi: International Workshop on Ecological Analysis and Control of Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Asia (2005) “Greenhouse gases production from paddy fields in Indonesia”
- 18) J. Oslan, A. Muis, A. Ali, A. Hadi, K. Inubushi and K. Yagi: Annual Meeting of Jpn Soc Soil Sci. Plant Nutr. (2005) “Effect of fertilizer types on greenhouse gases emission from corn crop in Indonesia”
- 19) J. Oslan, A. Hadi, A. Ali, A. Iswandi, K. Yagi, A. Suphachai and K. Inubushi: International Workshop on Ecological Analysis and Control of Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Asia (2005) “Emission of N₂O from upland soil of Indonesia affected by fertilizer management”
- 20) K. Inubushi: Application of the Emerging Soil Researches to the Conservation of

Agricultural Ecosystems (2005) “Interactions between soil microbial biomass and dynamics of C and N in soil ecosystem”

- 21) 齋藤 隆, 中山秀貴, 横井直人: 日本土壤肥料学会 (2005) 「水管理による水田からのメタン発生と水稻生育への影響」
- 22) 熊谷勝巳, 塩野宏之, 中川文彦, 森岡幹夫: 日本土壤肥料学会 (2005) 「牛ふん堆肥を稲わら春すき込みに代えて施用した場合のメタン削減効果」
- 23) 八木一行, 犬伏和之, 波多野隆介, 栗原光規, 長田 隆: 日本土壤肥料学会 (2005) 「農業生態系における CH_4 , N_2O 発生研究の現状と課題」
- 24) 白鳥 豊, 志賀智和, 犬伏和之: 日本土壤肥料学会 (2005) 「排水改良による水田土壌の物理的・化学的変化がメタン発生と水稻生育に及ぼす影響」
- 25) Y. Shiratori, A. Kadokura, T. Nagai and K. Inubushi: International Conference, East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies, Quezon city, Philippines, (2005) “Effects of base-saturation on nitrogen mineralization patterns in paddy soil”
- 26) 八木一行, 秋山博子, 犬伏和之, 波多野隆介, 栗原光規, 長田隆: 2006年度日本地球惑星科学連合大会「モンスーンアジア農業生態系における CH_4 , N_2O 発生量の評価と削減技術の開発」
- 27) 水上浩之, 郡司掛則昭: 第69回九州農業研究発表会 (2006) 「キャベツ連作畑における亜酸化窒素発生削減に有効な施肥および残渣管理技術」
- 28) M. I. Khalil, U. Schmidhalter and K. Inubushi: 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, USA (2006) “Fertilizer N movement and recovery by spring wheat with urea super granules point-placed at different soil depths”
- 29) M. I. Khalil, K. Inubushi and U. Schmidhalter: 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, USA (2006) “Indexing organic material quality: a novel approach to sustain soil and crop productivity”
- 30) 犬伏和之, 村上未央, 八木一行: 日本土壤微生物学会 (2006) 「熱帯水田におけるメタン生成活性と基質添加の影響」
- 31) 村松康彦, 犬伏和之, 村上未央, Hadi Abdul, 八木一行: 日本土壤肥料学会 (2006) 「水田土壌からのメタンガス放出抑制技術の発展途上国における適応可能性ーインドネシアにおけるケーススタディー」
- 32) Y. Lou, 水野崇行, 犬伏和之: 日本土壤肥料学会 (2006) “Dynamics of dissolved CH_4 , N_2O and CO_2 in rhizospheric and non-rhizospheric soils as affected by N supply and water management”
- 33) S. Amkha, 犬伏和之, 坂本 淳, 橘 正躬: 日本土壤肥料学会 (2006) “Nitrogen dynamics and growth of a green vegetable (*Brassica campestris* L.) as affected by controlled-release nitrogen fertilizer”
- 34) 八木一行: 日本土壤肥料学会 (2006) 「地球環境研究の国際ネットワークにおける土壌肥

料研究」

- 35) 下西 翼, 村上未央, 犬伏和之: 日本微生物生態学会 (2006) 「東南アジア水田土壌中のメタン生成とメタン生成菌群集構造解析」
- 36) O. Jimadi, K. Inubushi, Y. Hala, Abd. Muis, A. Ali, M. Paalennari, and K. Yagi: 日本微生物生態学会 (2006) ” Dynamics of greenhouse gases emission and bacteria communities in a corn field applied with different fertilizers in South Sulawesi, Indonesia”
- 37) 犬伏和之, 村上未央, 八木一行: 日本微生物生態学会 (2006) 「熱帯水田におけるメタン生成活性と基質添加の影響」
- 38) K. Inubushi and K. Yagi: NIAES International Symposium (2006) ” Research activities on greenhouse gas emissions from agricultural fields in Japan”
- 39) K. Kumagai, H. Siono, F. Nakagawa and M. Morioka: MAGE-Workshop, Tsukuba, Japan (2006) “Effect of livestock dung compost application on methane emission by comparison with rice straw application in paddy field”
- 40) 熊谷勝巳, 塩野宏之, 中川文彦, 森岡幹夫: 日本土壌肥料学会 (2006) 「畜種の異なる家畜ふん堆肥施用が水田からのメタン発生に及ぼす影響」
- 41) 齋藤隆, 三浦吉則, 横井直人: 日本土壌肥料学会 (2006) 「中干し期間の水管理の違いによるメタン・亜酸化窒素発生と水稻生育」
- 42) Y. Lou, T. Mizuno and K. Inubushi: 2nd International Earth System Science Partnership Open Science Conference, Beijing (2006) “CH₄ and N₂O emissions as influenced by nitrogen supply and water management in a Japanese paddy soil”
- 43) S. Amkha and K. Inubushi: Annual Meeting of Jpn. Soc. Soil Sci. Plant Nutr. (2006) “Effects of nitrogen fertilizer on plant growth and N₂O flux”
- 44) S. Amkha and K. Inubushi: 14th World Fertilizer Congress, Chaing Mai, Thailand (2006) “N₂O emission and growth of a leafy vegetable (*Brassica campestris* L.) as affected by urea forms”
- 45) K. Inubushi, Y. Muramatsu, M. Murakami, A. Hadi and K. Yagi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Potential and applicability of mitigation options for methane emissions from paddy fields in South Kalimantan, Indonesia - A case study”
- 46) 犬伏和之: 農芸化学会シンポジウム (2006) 「土壌圏を作った微生物たち」
- 47) K. Inubushi, Y. Furukawa, A.M. Itang, H. Tsuruta and K. Yagi: International Workshop on Vulnerability of Carbon Pools of Tropical Peatlands in Asia, Pekanbaru, Indonesia (2006) “Greenhouse gas exchange in rice paddies in tropical peatlands”
- 48) M. I. Khalil, U. Schmidhalter, R. Gutser and K. Inubushi: International Workshop for Management of Agroecosystem and Greenhouse Gas Emissions (2006) “Comparative study

- of urea granule sizes and placements with or without urease/nitrification inhibitors on N₂O emissions from a loess silt loam”
- 49) M. Murakami, O. Jumadi, A. Ali, K. Yagi and K. Inubushi: International Workshop for Management of Agroecosystem and Greenhouse Gas Emissions (2006) “Emission and mitigation of the various greenhouse gases from paddy fields in the Southeast Asia (Field and Laboratory experiment)”
 - 50) A. Hadi, O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Mitigation Option for N Lost from Corn Field in the Tropics”
 - 51) Y. Hala, A. Ali, A. Muis, O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Dynamics of Nitrous Oxide from a Corn Field Applied with Fertilizers in South Sulawesi, Indonesia”
 - 52) O. Jumadi, A. Muis, A. Hadi, A. Ali, K. Inubushi and K. Yagi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “A Feasible Option to Reduce N₂O Emission from Corn Field in Tropical Indonesia”
 - 53) Y. Lou, L. Ren, T. Mizuno and K. Inubushi: International Workshop on Monsoon Asia Agricultural Greenhouse Gas Emissions (2006) “Effects of Water Management and N supply on CH₄ and N₂O emissions in a Japanese Paddy Soil”
 - 54) 犬伏和之, 村上未央, 八木一行: 日本土壤微生物学会 (2006) 「熱帯水田におけるメタン生成活性と基質添加の影響」
 - 55) A. Hadi, O. Jumadi, K. Inubushi and K. Yagi: 日本土壤微生物学会 (2007) “Long-term effect of urea application on nitrous oxide emission and soil microbes in the tropics”
 - 56) O. Jumadi, M. Saigusa and K. Inubushi: 日本土壤微生物学会 (2007) “Nitrous oxide production and community structure of ammonium oxidizer bacteria in Shizuoka tea soil”
 - 57) A. Iswandi, Suprihati, A. Hadi, O. Jumadi, P. Setyanto, K. Yagi and K. Inubushi: International Symposium on Sustainable Bioproduction under Changing Global Environment (千葉大学国際研究集会) (2007) “GHG emission from tropical agroecosystem and their mitigations”
 - 58) K. Inubushi and A. Hadi: 9th International Sago Symposium, Ormoc, Philippines (2007) “Effect of land-use management on greenhouse gas emissions from tropical peatlands”
 - 59) 松島未和, 犬伏和之: 日本土壤肥料学会 (2007) 「層位別火山灰土壌の窒素代謝 窒素肥料・硝化抑制剤が与える影響」
 - 60) A. Suphachai, K. Inubushi, A. Sakamoto and M. Tachibana: 日本土壤肥料学会 (2007) “Effects of Controlled-release Nitrogen fertilizer with Manure on Plant Growth and

Soil Microbial Properties in a Leafy Vegetable (*Brassica campestris* L.)”

- 61) 齋藤隆, 三浦吉則: 日本土壌肥料学会 (2007) 「無代かき栽培による温室効果ガス発生抑制技術の確立」
- 62) 齋藤隆, 三浦吉則: 日本土壌肥料学会 (2007) 「重窒素標識肥料の施用による水田からの亜酸化窒素発生」
- 63) K. Inubushi, S. Amkha, A. Sakamoto and M. Tachibana: Nitrogen 4th Conference, Bahia, Brazil (2007) “Effect of different controlled mineralization of acetaldehyde condensation urea (CM-CDU) compared with urea fertilizer on plant growth (*Brassica campestris* L.), drainage water quality and N₂O emission”
- 64) M. I. Khalil, K. Inubushi and G. Richardsk: Nitrogen 4th Conference, Bahia, Brasil (2007) “Strategic management of Urea-N and straw-C in reducing N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from a sandy paddy soil”
- 65) K. Inubushi: The 4th International Conference on Ion Exchange ICIE’07, Chiba, Japan (2007) “Greenhouse gas emission from tropical peatlands and the effect on global carbon cycle, Keynote Lecture”
- 66) Y. Muramatsu, K. Inubushi, M. Murakami, A. Hadi, O. Jumadi, Y. Hala and K. Yagi: ESAFS 8, Tsukuba (2007) “Designing a community-based model water management project for mitigation of methane emissions from paddy field in Indonesia”
- 67) S. Amkha, K. Inubushi, A. Sakamoto and M. Tachibana: ESAFS 8, Tsukuba (2007) “Effects of different controlled-release nitrogen fertilizer types with manure on plant growth (*Brassica campestris* L.) and soil microbial properties”
- 68) O. Jumadi, Y. Hala, A. Ali, A. Muis, M. Murakami, K. Yagi and K. Inubushi: ESAFS 8, Tsukuba (2007) “Methane and nitrous oxide fluxes from Indonesian rice field as affected by water management”
- 69) M. Matsushima and K. Inubushi: ESAFS 8, Tsukuba (2007) “Potential N transformations and nitrous oxide productions of Andosol profile in an orchard land”
- 70) O. Jumadi, I. Anas, K. Yagi and K. Inubushi: ISEB2007, Taupo, New Zealand (2007) “Comparative diversity of ammonia-oxidizing bacteria and N₂O production under tea plantation in acid soils of temperate and tropical regions”

(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)

- 1) 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」を開催 (エポカルつくば、参加者約100名)
- 2) 平成18年12月13-14日に、国際ワークショップ「モンスーンアジアの農業生態系からの温

室効果ガス：放出量と削減策の評価」を開催（エポカルつくば，参加者約50名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 福島民友社：2008年3月31日「水管理による水田からのメタン発生抑制」
- 2) 朝日新聞社(予定)：2008年5月「中干しの前倒しによる水田からのメタン発生抑制」

(6) その他

- 1) 平成17年度日本土壌肥料学会賞（本研究の成果を含む受賞）：犬伏和之「土壌中の微生物バイオマスと窒素・炭素代謝の相互作用に関する研究」