

温室効果ガス排出のインベントリーと排出抑制技術

(独)農業環境技術研究所
地球環境部 温室効果ガスチーム長

八木一行

1. はじめに

急激な人間活動の拡大は、地球規模での物質循環に影響を与え、大気組成を変化させている。その結果、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O: 一酸化二窒素) などの大気中温室効果ガス濃度は、人類のこれまで経験したことのない急激な割合で増加し、地球温暖化を進行させつつある。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 3 次評価報告書によると、過去 100 年間に地球の平均気温は 0.6 ± 0.2 上昇したことが明らかにされている。さらに、平均気温は 1990 年から 2100 年までの間に 1.4 ~ 5.8 上昇し、降水量の変動がもたらされる可能性もかなり高いと予測されている。地球温暖化に対するそれぞれの温室効果ガスの効果は、大気中の濃度と地表から放射される赤外線吸収効率から求められる。産業革命以降における地球温暖化への寄与率は、CO₂ が全体の約 64% と最大であるが、CH₄ と N₂O もそれぞれ全体の約 20 および 6% を占めている¹⁾。

農耕地と農業活動は、場合によっては、上記の温室効果ガスを吸収するが、全体としては発生源となっている。CO₂ については、作物の光合成による大気中 CO₂ の吸収と、作物の呼吸および土壌有機物や作物残渣の分解による放出のバランスから、吸収源となるか発生源となるか決定される。加えて、農業機械等からの排出も考慮する必要がある。CH₄ と N₂O に関して、農耕地と農業活動は重要な発生源となっている。CH₄ については、水田、反すう動物の消化活動、畜産廃棄物、焼き畑や作物残渣などのバイオマス燃焼が農業に係る発生源であり、地球全体の発生量の約 40% を占めている。N₂O についても、農耕地土壌、バイオマス燃焼、畜産で全体の約 40% となっている¹⁾。近年の世界的な農業活動の発展と土地利用の変化は、このような農業が関与する発生源からの CH₄ と N₂O の発生量を増加させ、地球温暖化に寄与してきたことが明らかである。

このような背景のもと、地球温暖化と気候変動に関係する各分野において、温室効果ガス排出を削減する努力が求められている。本講義では、これらの問題に対する国際的枠組みとわが国農業分野の取り組みについて、その概要を報告する。排出抑制技術の取り組みとして、作物生産にかかわる水田からの CH₄ 発生と施肥窒素からの N₂O 発生について解説するが、畜産分野での取り組みについては別の資料を参考されたい^{2,3)}。

2. 地球温暖化問題に対する国際的枠組み

気候変動に関する国際的課題が増大するにつれ、各国政府が効果的な政策を講じられるよう、気候変動に関する科学的情報を包括的に提供する必要性が高まった。これらを背景に、人為的な気候変動のリスクに関する最新の知見のとりまとめと評価を目的として、各国が政府の資格で参加し議論を行う場である IPCC が 1988 年に設立された。一方、1992

年にブラジル・リオデジャネイロで開催された地球サミットにおいて 155 ヶ国が「気候変動に関する国際連合枠組条約(UNFCCC)」に署名し、1994 年には同条約が発効した。IPCC では、各国政府から推薦された科学者が、最新の知見をまとめ、評価報告書を定期的に出版(2001 年に第三次報告書¹⁾、2007 年に第四次報告書の予定)するほか、さまざまな報告書作成やその他の活動が行われており、UNFCCC とその締約国会議(COP)での交渉の基礎を与えている。

1997 年京都で開催された UNFCCC 第 3 回締約国会議(COP3)において、2008 年～2012 年における温室効果ガス排出量を 1990 年比で欧州 - 8%、米国 - 7%、日本 - 6%に削減する数値目標を課す「京都議定書」が採択された。2001 年には、米国が京都議定書には発展途上国に対する義務付けがないこと、米国の経済に悪影響を及ぼすことなどを理由に議定書を離脱したものの、締約国会議等においては議定書の運用ルールが決められるなど、国際的な調整が進められた。そして、各国の働きかけなどもあり、2004 年 11 月にはロシアが京都議定書を批准し国連に批准書を寄託したことにより、2005 年 2 月 16 日京都議定書は発効することとなった。

IPCC には、気候変動の評価活動とは別に、UNFCCC における検討を補助するため、温室効果ガス排出・吸収量を各国が計算し報告するための手法を開発する国別温室効果ガスインベントリープログラム(NGGIP)が設置されている。NGGIP では、各国が温室効果ガスの排出・吸収量目録(インベントリー)の推計を行うための「国別温室効果ガスインベントリーガイドライン(ガイドライン)」を作成している⁴⁻⁷⁾。最初のガイドラインは 1994 年に出版され、それを改訂した 1996 年版ガイドラインにしたがって、UNFCCC 締約国の付属書 国(京都議定書での削減義務のある、いわゆる先進国)は国別インベントリーを毎年作成し、事務局に報告することが義務づけられている。その他の締約国も、適切にかつ可能な限り適用することが奨励されている。1996 年版ガイドラインでは、エネルギー、工業プロセス、溶剤とその他の製品の利用、農業、土地利用変化および林業、廃棄物の各分野について、各排出・吸収源のインベントリー推計方法が示されている。このうち、農業分野においては、家畜の消化管内発酵と排泄物、稲作、農作物とサバンナの燃焼、農用地土壌が排出源としてあげられている。インベントリーは、同時に、京都議定書の削減目標の達成度に関する報告を行うための重要なデータベースとなる。ガイドラインは、その後、部分的改訂と不確実性評価の指針が加えられ、2006 年に新たな改訂ガイドラインが出版される予定である。

3. 温室効果ガス排出削減に関するわが国の対応

わが国においては、京都議定書による温室効果ガス削減約束である“マイナス 6%”の達成に向けて、COP3 議長国として、世界に先がけて 1998 年 10 月に「地球温暖化対策推進法」が制定された。2002 年には、同法を改正し、京都議定書目標達成計画の策定、計画の実施の推進に必要な体制の整備を進めるとともに、京都議定書締結が国会で承認された。さらに、2005 年 2 月の京都議定書の発効を受け、同年 4 月に削減約束を確実に達成するために必要な措置を定める「京都議定書目標達成計画」が策定された⁸⁾。この「計画」においては、「環境と経済の両立」という基本的考え方に立って、第一約束期間における温室効果ガス排出量の分野ごとの目標が提示されている。すなわち、エネルギー起源 CO₂(+0.6%)、非エネルギー起源 CO₂(-0.3%)、CH₄(-0.4%)、N₂O(-0.5%)、代替フロン等

3 ガス (+0.1%) である。これらに加え、京都メカニズム関連事業 (-1.6%程度) と森林の CO₂ 吸収増加 (-3.9%程度) に大きな期待が寄せられている。現時点で、農業分野での具体的な排出削減策について「計画」には示されていないが、第 1 約束期間の前年である 2007 年度に見直しが予定されており、「計画」の対策・施策が強化される可能性がある。

わが国の温室効果ガス排出・吸収量については、環境省が「温室効果ガス排出量算定方法検討会」を開催し、最新の知見を踏まえたインベントリー算定方法等の評価・検討等を行っている。ここでは、IPCC ガイドラインに示された方法に従って、わが国独自のより精度の高い算定方法が検討されている。その結果を踏まえ、1996 年以降、毎年インベントリー報告書を UNFCCC 事務局に提出している⁹⁾。提出されたインベントリー報告書については、条約事務局担当者と専門家からなるレビューチームが各国の温室効果ガスインベントリーを书面審査と訪問審査によるレビューすることとされており、わが国は 2003 年に訪問審査を受け、いくつかの問題点が指摘された。第一約束期間が近づき、2006 年 9 月 1 日までに、京都議定書の基準年インベントリーを確定し、割当量報告書を提出する必要があるため、現在、インベントリー精緻化の作業が急がれている。

4. わが国の農業分野における温室効果ガス排出量インベントリー

日本国温室効果ガスインベントリー報告書の最新版⁹⁾ (2005 年 5 月) によると、2003 年度の温室効果ガスの総排出量は、13 億 3,900 万トン (CO₂ 換算) で、京都議定書の規定による基準年 (原則 1990 年) の総排出量と比べ、8.3%上回っている。分野毎の排出量の内訳では、エネルギー分野が 89.5%、工業プロセス分野が 5.6%、溶剤およびその他製品使用分野が 0.02%、農業分野が 2.5%、廃棄物分野が 2.4%となっている。

農業分野の排出量は漸減傾向を示し、2003 年度の排出量は 3,320 万トン (CO₂ 換算) で、1990 年度比 14.8%の減少となった。その内訳をみると、家畜排せつ物の管理にともなう N₂O 排出が約 36%と最も多く、窒素肥料の施肥にともなう N₂O 排出等の農用地の土壌からの N₂O 排出 (約 24%)、家畜の消化管内発酵にともなう CH₄ 排出 (約 20%)、水田からの CH₄ 排出 (約 17%) がこれに続いた。農耕地および畜産からの排出は、それぞれ、42% および 58%となっている (図 1)。インベントリーのなかでは、キーカテゴリー (主要排出源) すなわち、その国で排出量の割合または変化量の大きな排出源から足しあげて全体

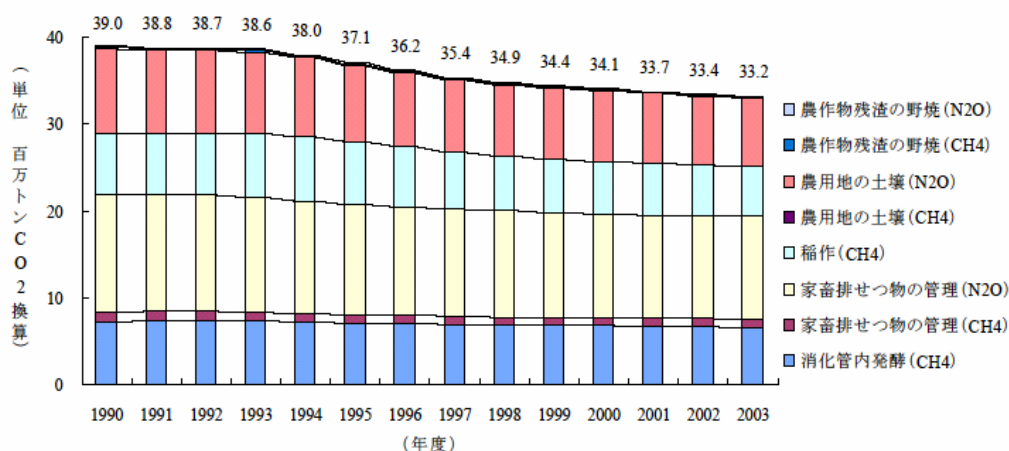


図 1. わが国のインベントリーにおける農業分野からの温室効果ガス排出量の推移⁹⁾.

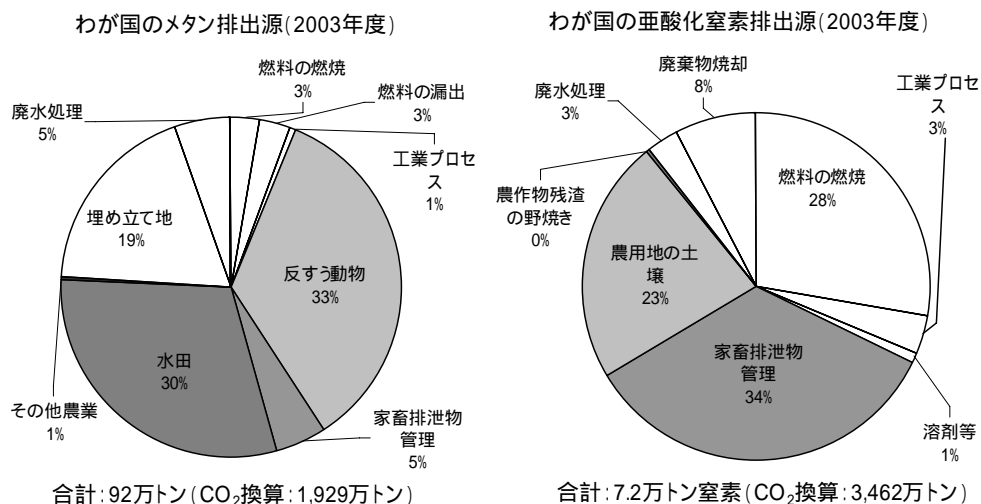


図2. わが国のインベントリーにおけるCH₄とN₂Oの排出源の内訳. 農業分野の排出源は影付きで表されている.⁹⁾

の95%に達するまでの排出源についてはより精度の高い推計が求められている。農業分野では、家畜排せつ物の管理にともなうN₂O排出、家畜の消化管内発酵にともなうCH₄排出、および水田からのCH₄排出が2003年度のインベントリーにおいてキーカテゴリーとされている。

現在、農業分野の排出として計上されている温室効果ガスはCH₄とN₂Oのみであるが、温室効果ガス毎の排出源内訳で見ると、農業分野はこれらの温室効果ガスについて重要な排出源となる。CH₄については、家畜の消化管内発酵が約34%、水田からのCH₄排出が約30%と、農業分野だけで全体の2/3を占めている。N₂Oについては、家畜排せつ物管理が約34%、農用地の土壌が約23%と、全体の半分以上を超えている(図2)。

農業からの温室効果ガス排出として、CH₄とN₂O以外に、農業機械の運転や温室・畜舎の空調など設備や管理にともなう化石燃料の燃焼も考慮すべきであるが、これらによるCO₂の排出はエネルギー分野において計上されていることを注意すべきである。また、耕地土壌の炭素収支にともなうCO₂の排出と吸収については、現在、報告義務がないので計上されていないが、第二約束期間以降はその義務が生ずる見込みである。

5. 農耕地からの温室効果ガス排出量評価と削減技術の開発

1) 水田からのメタン発生

発生メカニズム 水田土壌では、湛水後、土壌中の酸化物質が徐々に還元され、酸化還元電位(Eh)が-200mV近くに低下した後、メタン生成菌と呼ばれる一群の絶対嫌気性古細菌の活動によりCH₄が生成される。土壌中で生成されたCH₄は、気泡として、田面水中を拡散して、または水稻を通過して、のいずれかの経路で大気へと放出される。このうち、量的にもっとも重要なのは、水稻の通気組織を通過して放出される経路である。一方、水田土壌中にはCH₄を酸化分解する別の一群の細菌(メタン酸化菌)が存在し、一部のCH₄はこれにより消費される。

水田からのCH₄発生にはいくつかの特徴的な変動パターンがみられる。一日のうちで

は、発生量は午後から夕方に高く、早朝に低いといった日変動が観察される。水稻栽培期間では、一般的には栽培の後期に高い発生がみられる場合が多いが、初期や中期にみられる場合もある。図3の茨城県での測定例では、土壌を湛水し水稻を移植後、多少の変動はあるものの時間の経過とともに発生量は少しずつ増加している。そして、9月上旬の落水にとともに、土壌中に蓄積されていた多量のCH₄が放出された後、ほぼ終了している。

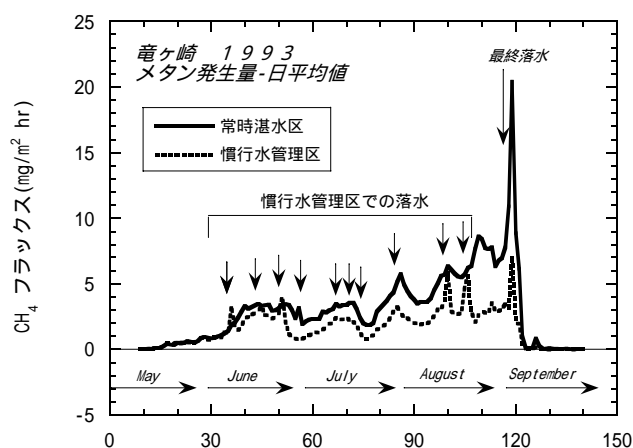


図3 水田からのCH₄発生量変動と水管理の影響。

このような発生量の変動にはいくつかの要因が関わっているが、主なものは、地温、新鮮有機物の分解量、土壌のEhの変動である。栽培初期にCH₄が多く発生するのは、刈り株や雑草、有機質肥料が急激に分解するためである。また、水田の湛水にとともなう土壌Ehの低下は、メタン生成菌の活動を左右する。栽培中期および後期に見られるCH₄放出量のピークは、土壌Ehが低下し温度が上昇した結果であることが多い。さらに、中干しなどの水管理により、発生量が急激に減少する。そのほかに、水稻植物体量の増大も発生量の増加と相関を示すことから、有機物の供給や大気への輸送に関する植物生長の役割が示唆されている¹⁰⁾。

発生量評価 1980年代以降、世界の各地で水田からのCH₄発生の測定が行われ、発生量と気候や処理によるその変動が報告されている。これらの測定結果をまとめると、水稻栽培期間の1時間平均のCH₄フラックスは多くの場合1m²あたり数mg~数十mg、栽培期間全体のCH₄発生量は1m²あたり1g~100gの範囲にあり、測定地点や処理によりCH₄発生量が大きく異なる。特に、有機物を多く施用した場合、大きなCH₄発生が観察されている。このような世界各地における実測データをもとに、発生制御要因の効果を考慮した単位面積あたりのCH₄排出係数と水稻栽培期間・栽培面積の統計値を掛け合わせる方法により、広域でのCH₄発生量が評価される。IPCC評価報告書では地球規模での水田からの年間CH₄発生量を約60Tg(6千万トン)、その誤差範囲を20~100Tgと見積もっている¹⁾。近年、実測データベースの整備とその解析やプロセスモデルの適用など、広域での発生量を推定する手法が開発され、発生量推定値の大きな誤差範囲を改善する試みがなされている¹¹⁾。

わが国においては、1992~1994年にかけて行われた、農耕地からの温室効果ガス発生に関する全国的なモニタリングデータをもとに発生量評価が行われた¹²⁾。この全国調査の結果は、水稻一作あたりのCH₄フラックスの平均値は、稲わらを秋に土壌還元した処理区で19.0±12.5g m⁻²であったことが報告している。さらに、このデータを土壌タイプごとに集計し、有機物無施用や堆肥などの有機物施用実態とそれによる発生量の変化を考慮すると、わが国の水田からの年間CH₄発生量は330Gg(33万トン)と推定される。

削減技術 水田からのCH₄発生量を少なくする方策の基本は、前述したCH₄の生成・酸化・発生いずれかのプロセスを制御するような水田管理を行うことである。このような観

点から、制御技術の候補が数多く提案されているが、そのなかには、現行の水田耕作技術として、実際、行われているものもある。これらの技術には、水管理を用いるもの、肥料または資材を用いるもの、有機物管理を用いるもの、土壌改良を用いるもの、その他の技術がある。表1にそれらをまとめて示すが、それぞれの技術によるCH₄排出抑制効果は圃場レベル、あるいは実験室レベルで定性的には検証されているものが多く、いくつかは定量的な分析も行われている。特に、水稲収穫後に稲わらをそのまま土壌にすき込むのではなく、堆肥化してから施用するような有機物管理や、中干しや間断灌水を利用した水管理の改善(図3)が、水田からのCH₄発生制御技術として有効であることが実証されている¹⁰⁾。

表1は、同時に、技術の適用範囲、技術を行う場合の費用と労力、水稲収量や地力への長期的な影響、トレードオフ効果によりもたらされる他の環境問題、および技術の開発時間といった技術の適用に関わるさまざまな問題点も示している。このような問題点を考慮すると、実際の水田耕作に適用可能で比較的效果の大きい技術として、わが国や他の温帯地域の水田については、排水期間を長くするような間断灌水や暗きよなどによる排水促進などの水管理技術と、稲わらの堆肥化、持ち出し、酸化分解促進などの有機物管理技術、および輪作等があげられる。また、熱帯アジアについては、灌漑設備の整備にともなう水管理技術、稲わらの堆肥化と酸化分解促進などの有機物管理技術、およびCH₄発生の低い水稲品種の選抜が考えられる。

表1. 水田からのCH₄発生制御技術の評価¹⁰⁾

抑制技術	メタン発生抑制効果	適用範囲		経済性		適用時の問題点		他のトレードオフ効果
		灌漑水田	天水田	費用	労力	収量への影響	地力への影響	
水管理								
間断灌水				~		+	~	N ₂ O発生の可能性有り
短期湛水				~	~	-	-	N ₂ O発生の可能性有り
排水促進						+	~	硝酸溶脱の可能性有り
肥料・資材								
硫酸肥料						~		硫化水素障害の可能性有り
含鉄資材							-	
客土							-	
有機物管理								
堆肥化						+	+	
酸化分解促進				~		~	~	
燃焼				~		~	~	大気汚染
その他								
深耕						-	-	
不耕起	?			~		-	~	
輪作				~		-	-	
品種選抜				~	~	~	~	

凡例:

きわめて効果的	増加
効果的、問題なし	現象
場合による	~ 同程度
問題有り	+ プラス効果
? 不明	- マイナス効果

2) 施肥窒素からの亜酸化窒素の排出

発生メカニズム N₂Oは土壌中の無機態窒素が硝化または脱窒を受ける過程で、副生成物として生成される。その生成プロセスは、図4で示されるような「穴あきパイプモデル

(hole-in-the-pipe model)」により概念的に表すことができる¹³⁾。すなわち、硝化・脱窒のそれぞれの過程で、変換される窒素の一部がパイプの穴から漏れ N_2O や一酸化窒素 (NO) になるが、パイプの穴の大きさ、すなわちこれらの微量ガスの生成割合はさまざまな要因によって制御される¹⁴⁾。

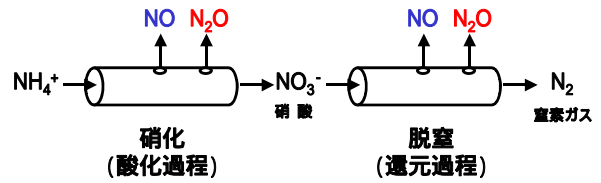


図4 微生物(硝化細菌,脱窒細菌)による一酸化窒素(NO)と亜酸化窒素(N_2O)の生成の「穴あきパイプモデル」¹³⁾。

畑地や草地などの農耕地土壌では、窒素施肥にともなった特徴的な N_2O 発生パターンを示す。図5は、茨城県の淡色黒ボク土圃場にてニンジン栽培しながら調査を行った結果であるが、 N_2O 発生量はそれぞれの基肥の直後にピークを示している。この時期には活発な硝化が進んでいたため、硝化過程による N_2O の生成と発生が示唆される。一方、8月はじめの追肥後、 N_2O 発生量はごくわずかしか増加していないが、この時期は降雨がほとんどなく土壌がきわめて乾燥した状態にあったために、 N_2O 発生が抑制されたと考えられる。しかし、8月中旬の降雨により土壌水分含量が高まるとふたたびピークが現れている。ここで示されるように、畑地からの N_2O 発生には窒素施肥にともなう土壌中の無機態窒素濃度の増加とそれらの変換速度が決定的な制御要因となっている。これに加えて、土壌の水分や温度による反応の制御もきわめて重要である。

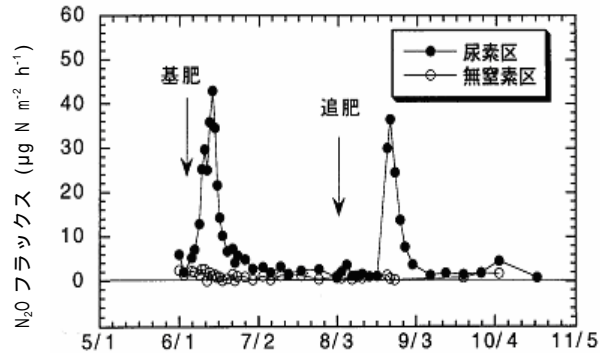


図5 畑土壌からの亜酸化窒素発生量変動。

一方、8月はじめの追肥後、 N_2O 発生量はごくわずかしか増加していないが、この時期は降雨がほとんどなく土壌がきわめて乾燥した状態にあったために、 N_2O 発生が抑制されたと考えられる。しかし、8月中旬の降雨により土壌水分含量が高まるとふたたびピークが現れている。ここで示されるように、畑地からの N_2O 発生には窒素施肥にともなう土壌中の無機態窒素濃度の増加とそれらの変換速度が決定的な制御要因となっている。これに加えて、土壌の水分や温度による反応の制御もきわめて重要である。

一方、土壌や気候条件によっては、脱窒過程からの N_2O 発生が重要である場合がある。この場合には、土壌中の硝酸態窒素の蓄積と降雨や雪解けなど土壌水分量の変化に伴って脱窒活性が高まり、その結果、 N_2O ピークの現れる場合が多い。

N_2O 生成のための窒素源として、化学肥料だけでなく、堆きゅう肥等の有機物と、わらや野菜の外葉など作物残渣の投入も重要であることが明らかになっている。特に、多量の易分解性有機物と無機態窒素が同時に存在するような、C/N 比の低い鶏ふんおよび豚ふんの施用やキャベツおよび白菜残渣のすき込み後には多量の N_2O 発生が見られる。

水田における湛水期間中の N_2O 発生は無視できる程度のものであるが、収穫前の落水処理後とその後の非湛水期間にはある程度の N_2O 発生が見られる。一方、水稻耕作期間であっても、窒素施肥量が多かったり、強い中干しなどの比較的長期にわたる落水処理を行った場合には、大きな N_2O 発生が報告されており、水田からの N_2O 発生には、施肥のタイミングとともに湛水 - 落水サイクルといった水管理が重要な要因となる。

農耕地土壌から直接大気へ発生する以外に、施肥窒素由来の N_2O 発生プロセスとして、農業地帯の地下水や河川水からの脱ガスによる N_2O の間接発生が指摘されている。このプロセスにおける N_2O の生成過程や発生量については、十分明らかにはされていないが、IPCC の報告書では、その地球規模の発生量は土壌からの直接発生量に匹敵する可能性が指摘され、重要な未解明の発生源とされている¹⁾。

発生量評価 上記のように、農耕地からの N₂O 発生にはさまざまな起源とプロセスが存在するが、いずれの場合も、その発生量は投入窒素量の関数である。したがって、発生量評価には、投入窒素量あたりの発生率（または排出係数）が用いられる。発生率は式 6 により求められる。

$$R = (E - E_0) / N_{\text{appl}} \times 100 \quad (\text{式 1})$$

ここで、R は投入窒素由来の N₂O 発生率 (%)、E は窒素投入区からの N₂O 発生量 (kg N ha⁻¹)、E₀ は窒素無施用区からの N₂O 発生量 (kg N ha⁻¹)、N_{appl} は窒素投入量 (kg N ha⁻¹) をそれぞれ表す。Bouwman (1996)¹⁵⁾は、世界の各地での実測結果をまとめ、データベースを構築・解析し、農耕地からの N₂O 発生量が式 7 に表される単純な式により回帰されることを示した。

$$E = 1 + 0.0125 \times N_{\text{appl}} \quad (\text{式 2})$$

ここで、E は N₂O 発生量 (kg N ha⁻¹)、N_{appl} は窒素投入量 (kg N ha⁻¹) をそれぞれ表す。この式と、1990 年における世界の窒素使用量（窒素換算で 8 千万トン）と耕地面積（14.4 億ヘクタール）から、バックグラウンドおよび投入窒素由来の農耕地からの N₂O 発生量は、それぞれ、1.4 および 1.0 Tg N（窒素換算でそれぞれ 140 万トンおよび 100 万トン）と推定される。

わが国においては、1992～1994 年にかけて行われた、農耕地からの温室効果ガス発生に関する全国的なモニタリングデータをもとに N₂O 発生量の評価が行われた。その結果、作物、施用窒素形態、および有機物管理の異なる試験結果のほとんどで、施肥窒素量に対する N₂O 発生率（R）が 0.1～5% の範囲内であるが、多くの場合、Bouwman により求められた 1.25% より低いこと、一方、茶園土壌できわめて高い発生が見られることなどが明らかになった¹²⁾。また、わが国の農耕地土壌からの化学肥料施用による N₂O 総排出量（4.42 Gg N yr⁻¹、窒素換算で年間 4,420 トン）が推定され、わが国の排出目録（インベントリー）の基礎として使用されている。

削減技術 農耕地土壌から発生する N₂O を制御するためには、まず、施肥窒素量を削減するなど、土壌中のアンモニウム態および硝酸態窒素プールをできるだけ小さくし、硝化や脱窒により変換される無機態窒素量を少なくすることが考えられる。しかし、このことは同時に、作物が吸収できる窒素量を制限することになる。したがって、より現実的には、作物による無機態窒素吸収効率を高め、無駄に環境中へ放出される窒素の流れを制御することである。このことは、N₂O 発生だけでなく、施肥窒素由来の別の重要な環境問題である地下水の硝酸汚染軽減にもつながるものである。

作物による施肥窒素の吸収効率を高め、環境への窒素のロスを少なくするためには、作物が必要なときに必要なだけ窒素を施用する必要がある。そのための技術としては、i) 窒素肥料の施用時期の改善、ii) 窒素肥料のより頻繁な分施の実行、iii) 局所施肥など作物にとってより効率的な位置への窒素肥料の施用、などが考えられる。また、一般に、窒素肥料投入量の増加に対して、作物収量はあるところまでは直線的に増加するが、一定量以上では頭打ちになる一方、環境負荷はどこまでも増加を続ける。作物の収量や品質と窒素肥料の投入量との関係を作物や土壌タイプごとに検討し、土壌の環境容量を超えず、かつ高い収量が維持されるような食糧生産と環境保全とを調和させるための適正な窒素肥料投入量を示し、広く普及させる努力も必要であろう。

別の方策として、肥料の種類を選択することによる N₂O 発生の制御も可能であろう。

N₂O 発生率は窒素肥料の形態により異なるが、N₂O 発生率の高い無水アンモニアの使用や硝酸態窒素を水分含量の高い土壌に施用することを避け、発生率の低い形態の肥料を使用することが勧められる。一方、緩効性肥料や硝化抑制剤・ウレアーゼ阻害剤など新しいタイプの肥料の使用も N₂O 発生の抑制に効果的である。さまざまな被覆型、あるいは化学結合型緩効性肥料は無機態窒素の土壌中への放出を制御し、作物による窒素吸収効率を高めるものである。その結果、窒素のロスを減少させ N₂O 発生や硝酸の溶脱を軽減することが期待される¹⁴⁾。

6. おわりに - 今後の課題など

農業は温室効果ガスの排出源であると同時に、気候変動の最も深刻な影響を受ける可能性があるため、農業分野における地球温暖化関連研究の重要性は明確である。そして、その研究と技術開発は、農業と地球環境との双方向の相互作用、すなわち、温室効果ガス排出の削減と地球温暖化が食料生産へ及ぼす影響の予測が必要である。

排出削減については、これまでの研究により効果のある削減策は数多く提案されていることから、今後、実際の農業の場で適用可能な技術の選択と普及が課題となる。その場合、農家の生産性や収益性、インセンティブを与える施策の検討など、社会経済評価を加えた検討が不可欠である。また、削減技術には、しばしば、温室効果ガス間や他の環境問題とのトレードオフやフィードバックが見られること、農業には農業機械や施設の運転、資材の生産など、付随する温室効果ガス発生もあることから、農業生産活動全体を評価するライフサイクルアセスメント(LCA)の導入が必要とされる。さらに、わが国における京都議定書の目標達成において京都メカニズム関連事業に大きな期待が寄せられているように、わが国で開発された削減技術が他国で適用された場合はきわめて大きな削減効果が見積もられることから、海外への技術移転や研究上の連携が期待される。

京都議定書の定める 2012 年以降の第二約束期間における国際的枠組みや温室効果ガス排出削減目標などについては、2005 年末までに国際交渉が開始されることになっているが、その見通しは不明確である。しかし、大気中の温室効果ガス濃度を安定化させるためには、現状では、少なくとも 100 年以上をかけて人類が取り組まなければならない課題である。一方で、対策が早ければ早いほど、深刻な問題を回避できる可能性は飛躍的に高まるものと予想される。このことから、地球温暖化問題には、長期的な戦略と短期的な研究開発や対応策の策定を含めた両視点が必要とされる。

わが国において、現時点では、農業分野における温室効果ガス排出に対する削減目標が定められるかどうかは不明である。しかし、農業活動は、CH₄と N₂O の重要な発生源であり、温室効果ガス排出は多くの先進国で環境影響評価指標のひとつとして定着しつつあることから、将来に向けて、その着実な排出削減を求められることは避けられないものと思われる。農業活動にともなう温室効果ガス排出の削減は、現在取り組みが進められている環境保全型農業における評価指標のひとつとして、国レベルでの施策立案や地域レベルでの技術普及に取り込まれるべき課題となった。

引用文献

- 1) IPCC: IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001, Cambridge University Press (2001)

- [<http://www.ipcc.ch/>、または <http://www.gispri.or.jp/kankyo/ipcc/ipccreport.html> にてダウンロード可]
- 2) (社)畜産技術協会：平成 13 年度畜産関係温室効果ガス抑制技術等調査検討事業報告書
[http://jlta.lin.go.jp/chikusan/jigyoku/13_4.htm にてダウンロード可]
 - 3) 長田隆：家畜ふん尿処理に伴う温室効果ガス発生の測定，波多野隆介・犬伏和之 編
「続・環境負荷を予測する」，博友社，205-220 (2005)
 - 4) IPCC: Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (1997)
[<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm> にてダウンロード可]
 - 5) IPCC: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (2000)
[<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>にてダウンロード可]
 - 6) IPCC: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (2003)
[<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/landuse/gp/landuse.htm> にてダウンロード可]
 - 7) 八木一行：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，波多野隆介・犬伏和之 編「続・環境負荷を予測する」，博友社，323-342 (2005)
 - 8) 日本国政府：京都議定書目標達成計画 (2005)
[<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kakugi/050428keikaku.pdf> にてダウンロード可]
 - 9) 環境省：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，(独)国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) (2005)
[<http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html> にてダウンロード可]
 - 10) 八木一行：大気メタンの動態と水田からのメタン発生，農業環境研究叢書，(独)農業環境技術研究所，15, 23-50 (2004)
 - 11) 波多野隆介・犬伏和之編：「続・環境負荷を予測する」，博友社，pp. 348 (2005)
 - 12) 日本土壌協会：土壌生成温室効果等ガス動態調査報告書 (概要編) (1996)
 - 13) Firestone, M. K. and Davidson, E. A.: In Exchange of trace gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere, p. 7-21, John Wiley & Sons Ltd. (1989)
 - 14) 八木一行：温室効果ガスの発生とその評価，但野利秋ら編「肥料と施肥の事典」，朝倉書店，印刷中(2005)
 - 15) Bouwman, A.F.: Nutr. Cycle. Agroecosys., 46, 53-70 (1996)