

IR-2 温室効果ガスインベントリースystem構築の方法論に関する研究

(4) 陸域生態系における CH₄、N₂O 等のインベントリースystem構築手法の高度化

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 温室効果ガスチーム

鶴田治雄

平成 11~13 年度合計予算額 14,706 千円
(うち、平成 13 年度予算額 4,650 千円)

[要旨] 温室効果ガスのインベントリースystem構築手法の高度化を目的として、日本およびアジアで実施されてきた調査研究をもとに、農耕地を中心とした陸域生態系からの CH₄、N₂O の発生量推定と発生要因を検討し、あらたに、つぎのことが明らかになった。(1) 日本の農耕地からの N₂O と NO のおもな発生要因は、土壌タイプ、投入窒素の質と量、投入方法、土壌水分量であることがわかった。(2) 日本の農耕地からの N₂O 発生量推定について、作目別に栽培面積、投入窒素量、N₂O 発生割合から求める手法を開発し、それから、畑地と水田からの発生量は 7.83GgN/年と推定された。しかし、その不確実性は大きいので、今後も圃場での調査研究が必要である。(3) 水田からの水稻栽培期間中の CH₄ 発生は、これまでに明らかにされた有機物管理、水管理、品種などだけでなく、土壌タイプ、栽培様式、水稻非栽培期間中の圃場管理……麦などの栽培の有無や土壌水分量など……によって、大きく影響を受けることが明らかになった。(4) 水田からは、CH₄ だけでなく N₂O も発生すること、その原因は、投入窒素肥料だけでなく、冬期の水稻非栽培期間中の圃場管理などであること、また、N₂O と CH₄ の発生はトレードオフの関係にあることが、明らかになったので、水田からのインベントリーでは、CH₄ と N₂O を同時に考慮する必要がある。(5) 日本の森林土壌による CH₄ 吸収量は、水田からの発生量の最大 85%であることが推定され、森林土壌からの N₂O 発生量も、少なくとも一部の地域で農耕地からの発生量に匹敵することが明らかになった。これらから、森林土壌からの CH₄、N₂O の発生に関する調査研究の重要性が明らかになり、今後、さらに研究を強く進める必要がある。(6) インドネシアの泥炭湿地からの CH₄ 発生量は、他の熱帯地域よりも非常に少ないことがわかった。これから、熱帯アジアの泥炭湿地からの温室効果ガスの発生要因に関する研究をさらに進める必要がある。(7) 日本の稲わらや麦わらなどのバイオマス燃焼で発生する温室効果ガスに関する調査研究によれば、IPCC の排出係数と大きく異なると推測され、これらの結果をもとに、アジアに適用できる排出係数を作成する必要がある。(8) 日本で実施してきた N₂O の間接発生量の調査によれば、IPCC の排出係数は大きすぎると推測されたが、さらに詳細な調査研究が必要である。

[キーワード] 農耕地、森林、メタン、亜酸化窒素、排出量推定手法

1. はじめに

本サブ課題では、農耕地を中心とした陸域生態系……森林土壌、泥炭湿地、バイオマス燃焼、間接発生など……における CH₄、N₂O のインベントリー手法について、おもにアジアの農耕地を中心にデータを収集し、現在の IPCC の発生量推定手法の精度向上に関する検討を行う。

2. 研究の目的

(1) 農耕地からのメタンと亜酸化窒素の発生量推定手法の高度化

IPCC の国別温室効果ガス排出量算定手法では、農地からの N_2O の発生量は、次の 4 つの窒素源……化学窒素肥料、家畜糞尿などの有機物、窒素固定作物、農作物残さ……を対象としている。そして、その活動量と N_2O 排出係数を用いて、総発生量を計算するが、その際、 N_2O の発生要因を明らかにすることが必要である。また農地の作物には多くの種類があり、それらの栽培方法は異なるので、その排出係数も違いがあると考えられる。これらを考慮して、より不確実性を少なくする N_2O の発生量推定手法を開発する必要がある。一方、 CH_4 については、IPCC で詳細な推計手法を提示しているため、その後の新たな研究結果に基づいて、インベントリーシステムの高度化に向けた総合的な検討を行う。

(2) 森林や湿地などからのメタンと亜酸化窒素の発生

IPCC が実施している陸域生態系からの温室効果ガス発生量の推定では、対象とする生態系と温室効果ガスは、農耕地（家畜、草地とバイオマス燃焼を含む）からの CH_4 と N_2O 、森林からの CO_2 である。しかし、陸域生態系は、自然湿地や森林土壌を含んでおり、これらは世界的には広大な面積を占めており、また、人間活動の影響を大きく受けており、その影響は今後もますます大きくなる、と推測されている。さらに、人間生活により排出される廃棄物からの N_2O の発生も無視できない。そこで、本研究では、農耕地に中心をおきつつ、日本では最大の生態系である森林などの生態系も研究対象として、その発生・吸収要因と発生量推定を行う。また、農作物残さなどのバイオマス燃焼からの温室効果ガスの発生に関しても、検討を行う。

(3) アジアにおけるインベントリー

アジアの陸域生態系における温室効果ガスの発生に関する調査研究は、水田からの CH_4 を除くと、非常に少なく、IPCC の発生量推定の不確実性の大きな原因の一つとなっている。そこで、本研究では、資料の収集と他のプロジェクトでこれまでに実施してきた共同研究の成果を、それぞれの部分で述べ、独立したまとめは次の機会に行う。

3. 研究の方法

(1) 畑地からの亜酸化窒素の発生

農耕地からは亜酸化窒素(N_2O)だけでなく一酸化窒素 (NO) も発生する。大気中の NO は、温室効果ガスのオゾンの前駆物質であり、また酸性雨の原因物質である硝酸ガスの生成に寄与する。さらに IPCC では、農耕地からの N_2O 発生量を求めるにあたり、施肥窒素による土壌からの NO と NH_3 の揮散量を 10% と仮定して、それを差し引いた投入窒素量を用いるように指導している。しかし、これらのガスの揮散量は変動が多いので、各地域での実測値を使用する必要があるが、 NO と NH_3 のフラックスの実測例は非常に少ない。また、IPCC では、投入窒素量に対して発生する N_2O の排出係数を、実測がない場合は、投入窒素量の 1.25% を規定値として用いるように指導している。しかし、農耕地からの N_2O の発生を制御する要因を明らかにすることにより、IPCC で作成されている N_2O の直接発生量の推定手法を向上させる必要がある。そこで、これまでに日本などで実施された畑地での投入窒素に対する N_2O と NO の発生に関する研究結果¹⁾²⁾をまとめるとともに、日本の農耕地からの N_2O 発生量を作目別に推定し、これらをもとにインベントリー手法の向上を検討した。

(2) 水田からのメタンと亜酸化窒素の発生

水田からのメタン発生に関しては、これまで多くの研究がなされ、メタン発生要因として、有機物管理、水管理、品種などが報告され、また、IPCC のガイドラインで詳しく推定手法が提示されている。そこで、本研究ではアジアの研究者との共同研究で、その後に明らかになった新しい重要な研究成果を報告し、インベントリーシステムの向上に資する。また、水田からは N_2O も発生することがわかったので、その発生量を推定するとともに、これらのガスを含めた総合的な考察を行う。

(3) 森林からのメタンと亜酸化窒素の発生

森林土壌は、 N_2O の発生源であるとともに、 CH_4 の消失源でもある。IPCC によれば、熱帯林土壌からの N_2O 発生量は、地球全体の約 25% を占めると推定されている。しかし、これまでの森林と温室効果ガスに関する研究は、 CO_2 が中心であり、これらのガスの発生・吸収要因についてのアジアでの研究はほとんどなかった。そこで、日本およびインドネシアでの森林での研究成果を報告し、インベントリーシステムの向上に資する。

(4) 湿地、バイオマス燃焼などからの温室効果ガスの発生

日本は自然湿地は少ないが、熱帯アジアでは広域な面積を占めているにもかかわらず、その研究がこれまでなされていなかった。そこで、本研究では、日本の尾瀬ヶ原での調査、およびインドネシア泥炭湿地の研究成果を報告し、インベントリーシステムの向上に資する。さらに、バイオマス燃焼からの温室効果ガスの発生や N_2O の間接発生などに関しても、これまでに他のプロジェクトなどで実施されてきた研究成果を含めて、まとめて報告する。

4. 結果と考察

(1) 日本の陸域生態系からの CH_4 と N_2O の発生・吸収量の推定

日本の CH_4 発生量は、水田と家畜腸内発酵および廃棄物処理の 3 大発生源から、全体の約 3/4 が発生している、と推定されている。一方、 CH_4 は湛水されていない土壌では吸収を示し、今回の推計では、森林土壌の吸収量の絶対値は、水田からの発生量の約 85% にも達した。また、農業

表 1 日本の陸域生態系における CH_4 , N_2O の発生・吸収量の推定 (単位: $GgCH_4y^{-1}$, $GgNy^{-1}$)

発生源分類	面積 x10 ⁴ ha	発生・吸収量		測定数	
		CH_4	N_2O	CH_4	N_2O
水田	179	266	(1.22)	約 50	2
畑地	275	(-6.5)	6.59	1	約 50
家畜腸内発酵		345	(0)	1	1
家畜糞尿処理		32.4	8.79	数例	数例
自然草地	55	—	—	—	—
森林	2,500	(-228)	(≤ 13.5)	数例	3
泥炭湿地	18	(~ 10)	?	数例	1
バイオマス燃焼		(5)	(0.5)	1	1
間接発生		?	?	—	—

注: マイナスの値は吸収量。家畜からの発生は文献 3) から引用。対象年は 1998 年。

からの N_2O 発生量では、家畜糞尿処理と畑地が2大発生源であるが、森林土壌も畑地に匹敵する発生源となり得ることが推定された。その他の湿地やバイオマス燃焼は、これらの主要な発生源と比較すると、発生量は少なかった。この理由は、日本では面積や農作物残さの燃焼量が少ないためであり、アジアを対象とした場合は、これらは重要な発生源となる。そこで、つぎに、おもに、農地と森林土壌からの発生について、これまでの推定結果を表1に示す(1998年を対象)。

(2) 農耕地における N_2O と NO の発生要因

① 土壌タイプ

北海道の灰色低地土(タマネギ畑)での N_2O フラックスは、栽培初期よりも栽培後半で降水量が多くなる夏期後半から秋に大きくなり、 N_2O が NO より大きかった⁴⁻⁵⁾。一方つくばの黒ボク土(野菜畑)では、施肥直後のフラックスが最大で、また NO が N_2O より大きかった⁶⁻⁷⁾。これらの関係は、灰色低地土と黒ボク土を用いた培養実験でも確認された⁸⁾ (図1)。北海道での栽培後半の発生は脱窒、つくばでの栽培初期の発生は主に硝化によると推測された。これらから、土壌タイプは、 N_2O と NO の発生を制御する要因の一つであることが明らかになった。

② 投入窒素の質と量

つくばの黒ボク土の畑圃場で全面全層施肥した畑圃場でのフラックス測定によれば、化学窒素肥料では NO の発生量が N_2O より多く有機質資材では N_2O の発生量が NO より多かった⁹⁾ (表2, 図2)。また、 N_2O-N と $NO-N$ とを合計した総窒素発生量は 0.06-1.46%であった。これらから、つくばの黒ボク土からの化学窒素肥料の投入に対する N_2O の発生割合は約 0.3%であり、IPCCの規定値より非常に少ないことが明らかになった。

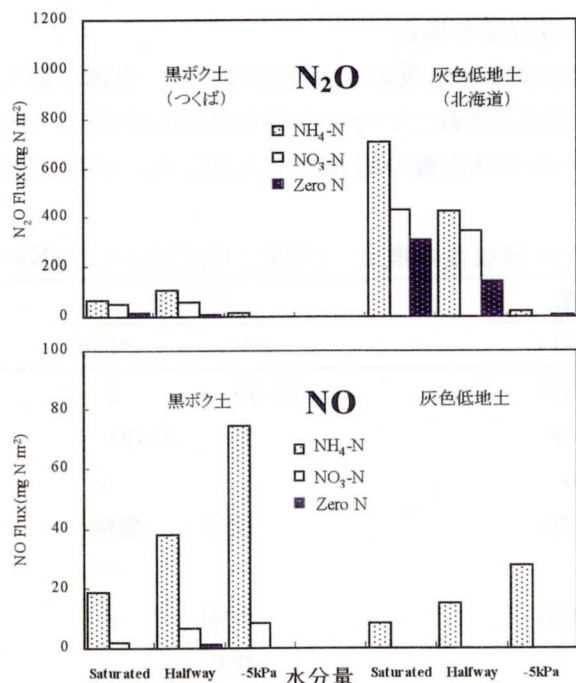


図1 黒ボク土と灰色低地土の培養実験における N_2O と NO

の総発生量⁸⁾。窒素添加は、 NH_4-N 、 NO_3-N 及び無窒素の3処理で、横軸は3種類の土壌水分量(左から右にいって水分量が少なくなる)

表2 施肥した畑地(黒ボク土)からの N_2O と NO 発生量の施肥窒素量に対する割合(%)

	化学窒素肥料区	有機質資材区
N_2O-N	0.06 ~ 0.32	0.03 ~ 0.91
$NO-N$	0.22 ~ 1.38	0.02 ~ 0.20
$NO-N+N_2O-N$	0.33 ~ 1.46	0.06 ~ 0.99
$NO-N/N_2O-N$	2.0 ~ 18.3	0.09 ~ 0.80

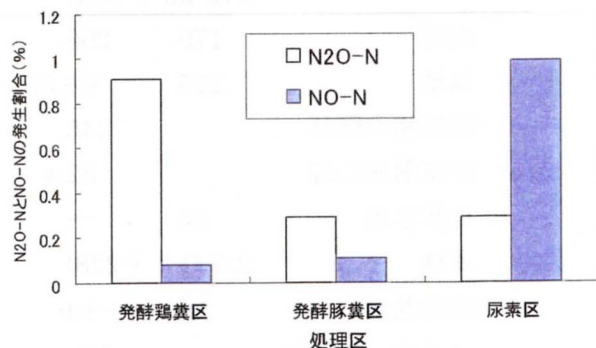


図2 野菜を栽培したライシメータ畑圃場(黒ボク土)に投入した各種窒素肥料(15gNm⁻²)に対する N_2O と NO の発生割合⁹⁾

③投入方法

全面全層に一様に施肥した場合と局所的にある深さに溝状に施肥した場合では、 N_2O と NO の発生量は異なった¹⁰⁻¹²⁾。特に NO は局所深層施肥のほうが全面全層施肥よりも、常に発生量は非常に少なかった。これは、土壌中で生成した NO が大気中へ放出される前に土壌に吸着されるためである。一方、土壌中での消失が少ない N_2O の発生量は、局所施肥で減少する事例だけでなく増加する事例も見られた。これは調査時の土壌水分などの影響を強く受けたためと推測される。

④土壌水分量

土壌水分量が多くなると相対的に N_2O の発生が NO より大きくなり、少なくなると NO の発生が N_2O より大きくなった⁵⁻⁶⁾。この関係は、つくばの黒ボク土でも北海道の灰色低地土でも共通にみられた (図1 参照)。これは、ガス生成機構が、前者ではおもに脱窒により、後者ではおもに硝化によるためである。

⑤栽培作物

作物が異なれば、栽培管理や栽培時期、また栽培地域などが異なるので、ガスの発生パターンや発生量も、それに対応して異なることが推測される。

⑥作物残さ

野菜などの収穫物残さは、土壌にすきこまれることが多く、ハクサイを栽培した畑圃場での測定によれば、その残さ中に含まれる窒素化合物の分解により、 N_2O が発生するが、 NO はほとんど発生しないことがわかった。また、作物残さに由来する発生量は、栽培期間中に投入された窒素肥料から発生する総量とほぼ等しい量に達する場合もあった¹¹⁾。

(2) 日本の農耕地からの N_2O 直接発生量の推定手法の開発

畑地からの N_2O 発生要因は前述したように、投入される窒素の種類と量、農地の土壌タイプ、土壌水分、地温、栽培作物などである。日本の農耕地では、作目別に投入窒素量が把握されており、栽培や施肥状況は作目別に異なる場合が多い。そこで本研究では、作目別に求められた化学窒素肥料と有機質資材の窒素投入量に関する既存資料¹³⁾と、作目別の栽培面積¹⁴⁾、および作目別の N_2O 排出係数を用いて、 N_2O 発生量推定手法を(1)式のように開発した。なお、畑地における N_2O 排出係数は全国調査結果¹⁵⁻¹⁶⁾を主に用いており、有機質資材による排出係数は化学窒素肥料と等しいと仮定した。水田からの N_2O 発生量では、後述する排出係数を用いた。なおこの手法は、IPCC が示している推計手法を作目別に行ったものであるが、今回は、IPCC が要求している窒素固定作物、作物残さからの発生量は、対象外とした。

$$F(N_2O) = (44/28) * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_i * N_{ij} * E_{ij}) / 10^9 \quad (1)$$

$F(N_2O)$: 日本全体の農耕地からの亜酸化窒素発生量($GgN_2O y^{-1}$)

A : 作目別の栽培面積(m^2)

N : 作目別の農地への投入窒素量($gN m^{-2}$)

E : 作目別の投入窒素量に対する亜酸化窒素の発生割合($N_2O \cdot N/N$)

i : 投入窒素の種類 ($m=2$: 化学窒素肥料、有機質資材 (有機質肥料、堆肥化資材))

j: 作目の種類 (n=13: 水稻、麦、馬鈴薯、かんしょ、雑穀、豆類、野菜、果樹、茶、桑、葉たばこ、工芸作物、飼料作物)

これから、平成 10 年における日本の畑地と水田へ投入された化学窒素肥料と有機質資材による N_2O 発生量は、各 3.84、2.75、0.88、0.36 $GgNy^{-1}$ と推定された (表 3)¹⁷⁾。これらから、日本全体での農地からの N_2O 発生量は、7.83 $GgNy^{-1}$ と推定された。しかし、この推定には多くの仮定があるので、さらに農地からの N_2O 発生に関する調査研究を実施して、その不確実性を小さくする必要がある。

表 3 日本の農耕地における作目別の化学窒素肥料の投入量と亜酸化窒素の発生量

	面積 ha	N施肥量 kgN/10a	N総投入量 kgN	排出係数 N ₂ O-N/N	総発生量 kgN ₂ O-N
野菜	539,800	21.30	114,977,400	0.00773	888,775
果樹	295,300	14.70	43,409,100	0.00690	299,523
茶	51,200	48.50	24,832,000	0.04740	1,177,037
馬鈴薯	99,950	12.70	12,693,650	0.02010	255,142
豆類	183,200	4.40	8,060,800	0.00730	58,844
飼料作物	1,038,000	10.00	103,800,000	0.00600	622,800
かんしょ	45,600	6.20	2,827,200	0.00727	20,554
麦	275,600	10.00	27,560,000	0.00486	133,942
雑穀類	35,500	4.10	1,455,500	0.00730	10,625
工芸農作物	156,300	29.90	46,733,700	0.00730	341,156
たばこ	25,300	15.40	3,896,200	0.00730	28,442
合計	2,745,750		390,245,550		3,836,840
畑排出係数					0.0098
水稻	1,793,000	7.79	139,674,700	0.00627	875,760

(3) 水田からのメタンと亜酸化窒素の発生

① 土壌タイプがメタン発生に及ぼす影響

日本の水田土壌の種類は、黒ボク土、黄色土、低地土、グライ土、泥炭土の 5 つに大別される。1992~1994 年の 3 年間実施された日本全国の水田からの CH_4 発生に関する全国調査結果¹⁵⁻¹⁶⁾によれば、土壌タイプ別のメタン発生量は、表 4 に示すように、8.50~26.8 gCH_4m^{-2} であり、土壌タイプによって大きく異なった。これは、土壌の物理化学的性質の違いが、メタン発生に大きく影響を及ぼしていることを示しており、水田からのメタン発生要因として、土壌タイプをまず考慮すべきであることを、強く示唆している。また、インドなどでの調査研究で、土壌中の有機炭素量がメタン発生の要因の一つであることが、明らかになりつつある。

表 4 日本の水田土壌種類別のメタン発生量 (gCH_4m^{-2})¹⁵⁻¹⁶⁾

年度	黒ボク土	黄色土	低地土	グライ土	泥炭土	平均値
(面積割合)	11.9%	9.4%	41.5%	30.8%	6.4%	
1992	9.98(2)	17.8(3)	19.9(21)	16.3(4)	16.3(2)	18.4(32)
1993	5.93(2)	29.5(4)	19.3(17)	20.4(6)	22.6(2)	20.2(31)
1994	9.60(2)	15.9(4)	18.0(20)	15.5(4)	41.5(2)	18.3(32)
3ヶ年平均	8.50(6)	21.4(11)	19.1(58)	17.8(14)	26.8(6)	19.0(95)

注: () 内の数値は用いたデータ数を示す。

表5 冬期の異なる圃場管理による次期の水稻栽培期間中のメタン平均フラックス¹⁸⁾

処理区	冬期の栽培	稲わらすき込み時期	CH ₄ フラックス (mgCH ₄ m ⁻² h ⁻¹)	
			1996	1997
ALE	アルファルファ	冬期栽培直前	28.60±5.60a	38.17±14.39a
FFE	湛水休閑	同上	24.59±2.96a	16.21±1.05b
DFL	排水休閑	水稻移植直前	19.73±0.83a	35.20±12.18ac
WWE	小麦	冬期栽培直前	4.73±1.37b	5.62±1.88bd
DFE	排水休閑	同上	4.06±0.62b	3.15±0.74d

②水稻非栽培期間中の作物栽培および土壌水分状態がメタン発生に及ぼす影響

水田圃場は、水稻を栽培しない期間は、麦などの作物を栽培する場合と、休閑にして何も栽培しない場合とに大別される。中国の水田（温室圃場）で、冬期にアルファルファと小麦を栽培した処理区と、休閑で湛水あるいは排水して乾いた状態にした処理区とで測定した、次期の水稻栽培期間中の CH₄ 発生量は、湛水休閑区とアルファルファ区で最大で、小麦栽培区と排水休閑区は、湛水休閑区の 15～30%の発生量であった¹⁸⁾（表5）。同時に測定された土壌の酸化還元電位(Eh)は、前者の処理区では、湛水開始後にすぐに CH₄ 生成に好都合な Eh まで減少したのに対して、後者では、約 60 日間も減少しなかった。これは、冬期に土壌を湛水させないあるいは麦を栽培することにより、その後に湛水してもすぐには土壌が還元状態に戻りにくくなったことを示している。

冬期も排水の非常に悪い中国南西部の重慶で数年間実施した年間を通した CH₄ 発生量の調査によれば、排水状態が悪く湛水していた水田では非栽培期間中の CH₄ 発生量は最大 36.2gCH₄m⁻²と大きかった¹⁹⁾。湛水区での水田からの年間 CH₄ 発生量に占める冬期湛水期の CH₄ 発生量は、約 40%にも達した。また、冬期に湛水した処理区では、排水させた処理区よりも、次期の水稻栽培期間中の CH₄ 発生量は非常に多かった。さらに、冬期に小麦を栽培した処理区では、次期水稻栽培期間の前期の CH₄ 発生量は、湛水区の 24-32%と非常に少なかった。このように、冬期に水田が何も栽培されないで乾燥していたり、あるいは麦を栽培したりすると、次期の水稻栽培期間中の CH₄ 発生量は、湛水している場合よりも、非常に CH₄ 発生量が減少した。中国の長江以南では、冬期に排水が非常に悪い水田は、中国の全水田面積の 10%以上も存在するので、このような水田からの CH₄ 発生量は、中国全体の CH₄ 発生量に対して、大きく寄与していると推測される²⁰⁾。したがって、中国の排水の悪い水田で排水条件を良くする技術を開発することは、CH₄ 発生を削減する上からも非常に重要である。

③暗渠整備による排水条件改善のメタン発生への影響

日本では、排水条件の悪い圃場に暗渠施設を導入して整備する土壌改良事業が数十年にわたって実施され、多くの圃場の排水条件が良くなった。この改良は、結果として水田からの CH₄ 発生量を削減したのではないかと、という仮定を検証するための調査が、平成 11～13 年度に全国 4ヶ所で実施された。その結果、暗渠を導入した整備済み圃場では、導入していない未整備圃場に比べて、他の条件が同じであれば CH₄ 発生量は減少することがわかったが、年毎の水管理や有機物管理の影響をより強く受ける場合があることが明らかになった²¹⁾。

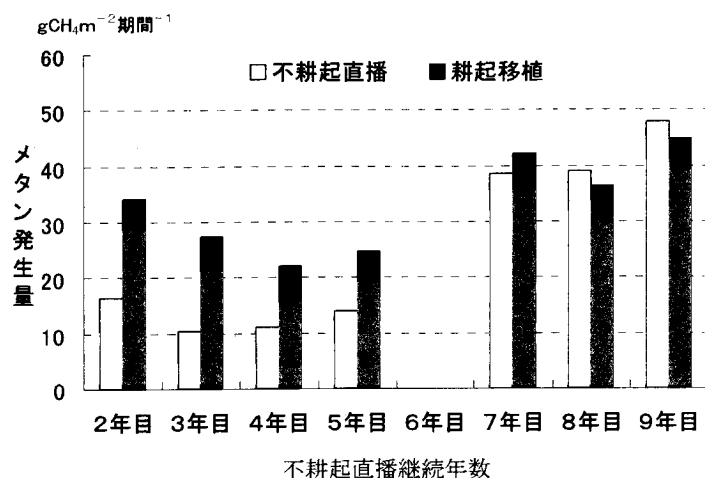


図3 不耕起直播栽培と耕起移植栽培の継続とCH₄発生量の関係。岡山県の水門と山陽の水田圃場での測定による²³⁾。

④不耕起栽培がメタン発生に及ぼす影響

不耕起直播栽培は、耕起移植栽培に比べて一般的に土壌の透水性が良くなるので、その圃場からのCH₄発生量は少なくなると推測されており、不耕起直播栽培はCH₄の発生を抑制する技術の一つと考えられている。不耕起栽培は、西日本で比較的多いものの、日本全体では非常に少ないが、労働エネルギーの節減という面から、最近再び注目を集めつつある。岡山県内で不耕起直播栽培を1992年から開始した水田圃場からのCH₄発生量は、耕起移植栽培と比較すると、初期は半分程度で削減効果が大きかったが、継続すると次第に多くなり、7~8年後には移植栽培とほぼ同程度となった²²⁻²³⁾ (図3)。これは、不耕起栽培を継続すると、不耕起栽培区でもCH₄発生量が増加していくことを示しており、毎年土壌表面に散布される稲わらの一部が分解せずに堆積し、表層の有機物層の厚さが増加していくことに起因するためであることがわかった。これらから、温室効果ガスの発生軽減方法の一つと考えられる不耕起栽培圃場でも、7~8年後に耕起移植栽培に戻すことが必要と考えられるが、実際に圃場で検証をする必要があり、その実験を実施中である。

⑤水田からの亜酸化窒素の発生

水田からは、CH₄だけでなく、N₂Oも発生し、投入した窒素肥料、灌漑水中の無機態窒素、降水中の無機態窒素、土壌有機物などの分解過程で、硝化や脱窒により、生成される。投入窒素量や灌漑水中の無機態窒素量が多ければ、湛水期間中でもN₂Oは発生する。そうでない場合は、最終落水後、土壌が還元状態から酸化状態に質的に変化するとともに硝化で発生する。日本の水田でのN₂O発生量の年間測定例は、わずか次の2つだけである。茨城県の竜ヶ崎水田圃場での年間測定(1992-1993)によれば、N₂O発生量は60.6mgNm⁻²h⁻¹であり、施肥窒素量の0.673%であった²⁴⁾。また、前述した岡山県内の水田では、CH₄とともにN₂Oも途中から測定を実施しており、不耕起栽培開始7年後の水田圃場からのN₂O発生量は、耕起移植栽培の約2倍であった²⁵⁾ (表6)。これは、不耕起栽培では、施肥・播種後約1ヶ月は乾田状態なので、この期間にN₂Oがおもに発生したためである。しかし、その後入水してから栽培期間中はほとんど発生しなかった。

表6 栽培様式の異なる水田での施肥窒素量に対する亜酸化窒素の発生割合

調査年度	不耕起直播	耕起直播	耕起移植
1998-1999 (施肥量: gNm^{-2})	9	9	7
(発生量: mgN m^{-2})	207	119	36.7
(発生割合:%)	2.30	1.32	0.52
1999-2000 (施肥量: gNm^{-2})	10	7.5	7.5
(発生量: mgN m^{-2})	136	82.5	48.0
(発生割合:%)	1.36	1.10	0.64

表7 各栽培様式でのメタンと亜酸化窒素の年間発生量

ガスの種類	不耕起直播	耕起直播	耕起移植
CH_4 ($\text{gCH}_4 \text{m}^{-2}$)	37.0 (777)	37.4 (785)	42.0 (882)
N_2O (mgN m^{-2})	207 (100)	119 (58.0)	36.7 (17.9)
$\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ ($\text{gCO}_2 \text{m}^{-2}$)	(877)	(843)	(900)

注: (括弧内は CO_2 等価発生量: $\text{gCO}_2 \text{m}^{-2}$) (1998年5月~1999年5月)

これらから、不耕起栽培開始後数年間は、耕起移植栽培に比べて、 CH_4 発生量は少ないが、 N_2O 発生量は多いと推測される。これらのガスの発生量を温暖化ポテンシャル ($\text{CO}_2:\text{CH}_4:\text{N}_2\text{O}=1:21:310$)を用いて CO_2 等価発生量に換算して定量的に比較すると、不耕起直播栽培を開始して7~8年目の圃場からの発生量は、耕起移植栽培とほぼ同じであった(表7)。

なお、耕起移植栽培圃場での2年間の測定によれば、 N_2O の発生割合は施肥窒素量の平均0.58%であった(表6)。そこで、前述した日本の水田からの N_2O 発生量推定では、これら2地点(竜ヶ崎と岡山)での平均値を N_2O の排出係数として用いた。

⑥水田からのメタンと亜酸化窒素発生のトレードオフ

水田では、田面水が落水すれば CH_4 は生成しなくなるが、土壌が酸化状態になるので N_2O が生成され大気中に放出されるので、両者はトレードオフの関係にある。中国の3地点(およびつくば)における水稻栽培期間中の CH_4 と N_2O の発生量は、 CH_4 が多いと N_2O が少なく、またその逆の関係が見られ、両者はトレードオフの関係にあることが確認された²⁶⁾(図4)。そこで、温暖化ポテンシャルを用いて CO_2 に等価な発生量に変換して定量的に比較すると、封丘では N_2O の発生量が CH_4 より多いことがわかる。

⑦水稻非栽培期間中の作物栽培および土壌水分状態が亜酸化窒素発生に及ぼす影響

中国で冬期に、何も栽培せずに湛水及び排水状態の処理区とレンゲ草を栽培した処理区で、次期の水稻栽培期間中の CH_4 発生量は、レンゲ草を栽培した処理区が最小で、湛水した処理区が最大であった²⁷⁾(図5)。この関係は、ライシメータやポット実験でも確認された。一方、 N_2O については、地点も時期も異なるが、水田の冬期に何も栽培せずに排水した処理区とレンゲ草を栽培した処理区での冬期の N_2O 発生量は、レンゲ草栽培区のほうが少なかった²⁸⁾(図6)。これは、植物が窒素を吸収したためと推定される。しかし、次期の水稻栽培期間中の N_2O 発生量は、

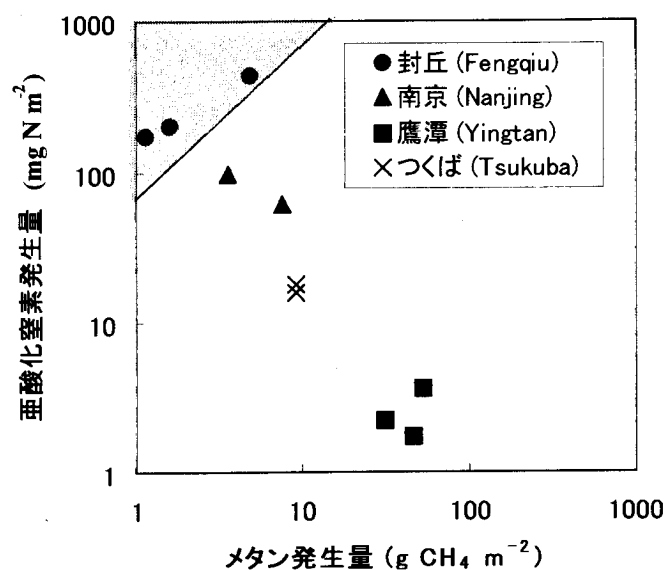


図4 中国3地域における水田からのメタンと亜酸化窒素の発生量の関係(左上の灰色の範囲は、温暖化ポテンシャルを用いて二酸化炭素の発生量に換算すると、亜酸化窒素の発生量がメタンより多い部分である。

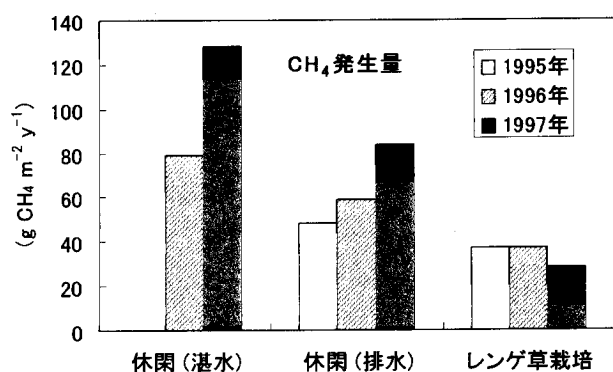


図5 冬期の水田圃場処理が水稻栽培期間中のメタン発生量に及ぼす影響 (湖南, 1995-1997)

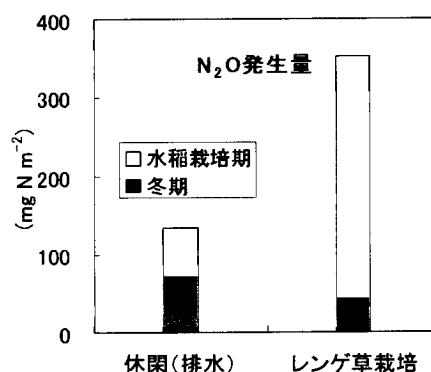


図6 冬期の水田圃場処理が水稻栽培期間中の亜酸化窒素発生量に及ぼす影響 (江西, 1999-2000)

レンゲ草栽培区のほうが約5倍であった(すき込まれた緑肥の影響)。これらの2つの実験から、冬期に緑肥を栽培すると次期の水稻栽培期間中のCH₄発生量は少なくなるが、N₂Oは逆に多くなることがわかった。

⑧総合考察

これらの中国における一連の研究で重要なことは、水稻非栽培期間中……おもに秋の収穫後から翌年の水稻栽培開始までの間……の圃場管理、具体的には麦や緑肥の栽培や土壌水分状態が、次期の水稻栽培期間中のCH₄とN₂Oの発生量に大きな影響を及ぼすことである。日本では、一部の地域では水稻収穫後、麦などを栽培するが、麦を栽培した処理区と何も栽培しない処理区で次期

のCH₄発生量を比較した調査例はない。なお、前述した全国調査では、麦を冬期に栽培した場合、次期の水稻栽培期間中のCH₄発生量は、多くの場合、日本全体の平均CH₄発生量より少なかった。また、日本では収穫後に何も栽培しないで土壌が乾燥している地域が多いが、日本海側で冬期に積雪が多い地域では、雪解け後に乾燥が不十分なまま、水稻の栽培を開始する可能性もある。

これらから、IPCCのCH₄発生量推定手法は、有機物管理および水管理だけでなく、土壌タイプおよび水稻非栽培期間中の圃場管理（栽培や土壌水分状態）を考慮した推計手法を取り入れていく必要がある。また、アジアの水田からのN₂O発生量の実測データが非常に少ないので、今後は年間を通してCH₄とN₂Oのフラックスを同時に測定する必要がある。そして、水田からの温室効果ガスの発生量推定は、CH₄とN₂Oを同時に考慮して、温暖化ポテンシャルを用いて、CO₂等価発生量を求める方向に改訂すべきである。

(4) 日本の森林土壌からのCH₄吸収とN₂O発生

日本の森林総面積は約2,500万haで国土の66.6%である。森林土壌は、メタンを吸収し亜酸化窒素を放出することが知られているが、日本ではこれらに関する全国的な調査研究は最近始まったばかりであり、実測例はまだ少ない。

①メタン吸収

日本の森林土壌におけるCH₄フラックスの測定例を表8に示す。茨城県内の4地域7地点の森林土壌で1～2年間にわたり実測されたCH₄吸収フラックスは-1.8～-7.6（平均値-3.8）mgCH₄m⁻²d⁻¹であり²⁹⁾、欧米の温帯地域より吸収量は大きかった。その多くの地点ではCH₄吸収フラックスは夏に大きく冬に小さい季節変化を示し、気温との間に正の相関があった。また、つくばの農環研内の林地における1年間のCH₄フラックス平均値は、-2.5～-4.5 mgCH₄m⁻²d⁻¹であった³⁰⁾。さらに、栃木の草地試験場内の森林土壌におけるCH₄吸収フラックスの年間平均値は-1.64mgCH₄m⁻²d⁻¹であった³¹⁾。しかし、西日本の滋賀県内の4地点での森林土壌での2年間のフラックス測定によれば、-0.72～-1.94（平均値-1.20）mgCH₄m⁻²d⁻¹で、茨城県内の測定値よりも小さく、その季節変化も小さかった³²⁾。1999/2000年から全国約30地点（山岳地帯を含む）の森林土壌で、長期的なCH₄フラックスの測定が開始され、その平均値は2.43±1.13 mg C

表8 日本(及び外国)の森林土壌でのメタン吸収フラックスの測定結果(マイナス記号を省略)

測定場所	地点数	測定年数	平均フラックス
茨城県内	7 (4地域)	1-2	3.8(1.8～7.6) mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
つくば	1	1	2.5-4.5 mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
栃木	1	1	1.64 mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
滋賀県	4	2	1.20(0.72-1.94) mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
全国	29	1	2.43±1.13 mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
ヨーロッパ			1.0 mg C m ⁻² d ⁻¹
アメリカ			2.5 mg C m ⁻² d ⁻¹
インドネシア	1 (湿潤熱帯林)	4	0.66 mgCH ₄ m ⁻² d ⁻¹
中国	4 (長白山の高度別)	1	0.52-1.36 kgC ha y ⁻¹

$\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であった³³⁾。このように、森林土壌からの CH_4 吸収量は地域によって大きく異なった。これらの平均値を用いて日本全体の森林土壌での年間 CH_4 総吸収量を推定すると約 $228 \text{GgCH}_4\text{y}^{-1}$ となり、その絶対値は日本の水田からの CH_4 発生量の約 85%に相当した。 CH_4 吸収要因としては、土壌の孔隙率や水分量などが主なものといわれているが、今後、その要因解明に向けた研究が必要である。なお全国調査網は、北海道と関東に多く存在するので、今後は土壌タイプや植生タイプの異なる地域を含めた全国的な調査網の展開が期待される。

②亜酸化窒素の発生

一方、森林土壌からの N_2O の発生量は、八王子近郊でのフラックス測定によれば、 N_2O フラックスは地温と同じ季節変化を示し、年間発生量は $56 \text{mgNm}^{-2}\text{y}^{-1}$ であり、欧米の温帯地帯よりも多かった^{33,34)}。その原因の一つとして大気からの窒素化合物の乾性及び湿性沈着の影響が考えられる。また、 N_2O フラックスと渓流水中の NO_3^- 濃度とは比例関係にあることが明らかになった。なお測定地点は東京に近いので、山岳地帯の森林では発生量はもっと少ない可能性がある。しかし、前述した草地試験場の林地での測定によれば、 N_2O の年間発生量は $45.9 \text{mgNm}^{-2}\text{y}^{-1}$ で、八王子近郊での値とほぼ同じであった³¹⁾。また、茨城県内の林地（標高 610~660m）での測定によれば、尾根部、谷頭斜面上部、溪流沿いの斜面最下部での年間発生量は、それぞれ 0.4, 0.9, 0.5 $\text{kgNha}^{-1}\text{y}^{-1}$ であり³⁵⁾、前述した2地点での発生量と同程度であった。そこで、これら3地点の平均値を用いて日本の年間発生量を推定すると、約 13.5GgNy^{-1} となり、農耕地からの発生量よりも多い値となった。これらの測定地点はすべて関東地方であり、また山岳地帯の測定がないので、この推計値を日本全体に適用するには時期尚早であるが、仮にこの半分としても農耕地に対して無視できるものではない。なお、これらの N_2O の生成機構については、渓流域では脱窒が重要であるが、斜面全体としては硝化が主であると、推測されている³³⁻³⁵⁾。

以上のように、日本の森林全体からの亜酸化窒素発生・メタン吸収量を推定するためには、実測データはまだ不十分であり、また、その発生・吸収要因を明らかにすることが重要である。さらに、これまで森林については、二酸化炭素の吸収源としての役割ばかりが強調されているが、亜酸化窒素やメタンなどの温室効果ガスについても今後は注目すべきであり、少なくともこれら3つの温室効果ガスを対象とした総合研究を実施することが望まれる。

(5) 泥炭湿地

ラムサール条約での湿地の定義は、水深 6m 未満のものを指しているが、メタンを多く発生する湿地は泥炭地（日本では湿原と呼ぶ）である。本州の代表的な高層湿原（高位泥炭地）である尾瀬ヶ原では、群馬・福島・新潟の3県が、1994年から1997年の4年間、尾瀬総合学術調査団を組織して、各種の調査が実施された。尾瀬ヶ原からのメタン発生に関する3年間の総合調査結果によれば、メタンフラックスの季節変化は地温と正の相関があり、空間分布は地下水位および植生の草丈と強い負の相関があった。メタンフラックスは、指紋状パターン地域（植生の草丈が 20cm 以下でミズゴケが優先している）が最大で、夏期の最大値は $10.8 \text{mgCH}_4\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であった。これらをもとに、湿原全体からのメタン発生量推定手法が開発され、メタン年間発生量は $0.03 \text{GgCH}_4\text{y}^{-1}$ と推定された³⁶⁾。なお、指紋状パターン地域は、湿原全面積の 5.6%と少なかったが、その地域の年間メタン発生量は湿原全体の 43%と大きかった。

一方、日本の湿原の 60%を占めると推定される北海道の釧路湿原は、主に低層湿原(低位泥炭地)であり、ヨシ、スゲ、ハンノキが主な植生なので、ヨシ・スゲの地域のメタンフラックスは尾瀬ヶ原より多いと推定される。釧路湿原でのメタンフラックスの年間を通した唯一の測定結果によれば、ヨシ・スゲとミズゴケの植生地点では、夏に大きく冬に小さい季節変化を示し、メタンの夏期フラックスはそれぞれ、31.2, 4.71mgCH₄m⁻²h⁻¹であった³⁷⁾。また、上述の測定地点とは異なる地点での 5 年間にわたる夏期数日間だけのフラックス測定によれば、ヨシ、ミズゴケ、ハンノキ林での平均フラックスは、それぞれ 17.8, 6.76, 6.68 mgCH₄m⁻²h⁻¹であった³⁸⁾。これらの測定はすべてクロードチャンバー法であったが、微気象的な方法での測定によれば、夏期 5~7 日間の 2 年間の平均フラックスは、ヨシ・スゲ地点で 7.81 mgCH₄m⁻²h⁻¹であり³⁹⁾、チャンバー法よりも小さかった。これらのフラックスの差が、地点による違いなのか、測定法によるものかどうかは、今後の研究課題である。一方、釧路湿原での代表的な植生が分布している面積は、現地での地上調査と人工衛星画像解析から、詳細に推定されている⁴⁰⁾。これらの結果をもとに釧路湿原からのメタン年間発生量を推定し、さらに、尾瀬ヶ原や釧路湿原の結果を用いて、日本全体の湿原⁴¹⁾からのメタン年間発生量は約 10GgCH₄y⁻¹と推定された。しかし、その不確実性は非常に大きく、今後とも北海道等の低層湿原における年間測定が必要である。

一方、熱帯アジアのインドネシアやマレーシアの沿岸地域には、世界の熱帯泥炭地(2900 万 ha)の約 8 割を占める大規模な湿地(2240 万 ha)が存在している⁴²⁾にもかかわらず、その地域からのメタンや亜酸化窒素の放出に関する研究はほとんどなく、発生量の不確実性を大きくしている原因となっている。最近、この泥炭湿地地域も、土地利用変化が急速に進行しつつあり、それによる温室効果ガスの発生も大きく変化していると推測される。1998 年から、インドネシアの泥炭湿地での温室効果ガスの発生に関する調査⁴³⁻⁴⁴⁾によれば、メタンフラックスは最大 2mgCm⁻²h⁻¹と非常に小さく、他の熱帯地域のアマゾンや日本の尾瀬ヶ原よりも小さかった。この原因は、インドネシアの泥炭湿地は難分解性の有機物が多いことと、硫酸塩濃度が高いためと推測されているが、さらに詳細な研究が必要である。この結果は、現在の IPCC の湿地からの発生量推定は過大評価されている可能性が大きいことを示唆している。

一方、湿原からの亜酸化窒素は、尾瀬ヶ原では拋水林の土壌からのフラックスは大きかったが、窒素分の少ない泥炭土壌からはほとんど排出されなかった³⁶⁾。しかし、直接・間接的に人間活動の影響を受けて窒素分が流入する湿地では、亜酸化窒素のフラックス測定が必要である。なお、インドネシアの泥炭湿地が土地利用変化した地域では、亜酸化窒素の発生が見られている⁴³⁻⁴⁴⁾。

(6) バイオマス燃焼

農作物残さの焼却、森林火災、野焼きや山焼きなどが日本の主な発生源である。しかし、IPCC での農作物残さからのメタンと亜酸化窒素の発生量推定は、非常に不十分であり、しかもアジアでの実測値は使用されていない。現在、日本やインドネシアの実際の圃場でバイオマス燃焼ガス成分の分析がなされつつあり⁴⁵⁾、アジアではこれらのガスの排出係数は IPCC のそれと大きく異なることが明らかになりつつある⁴⁶⁾(図 7)。そこで、今後は、それらをもとにして発生量を推定し、また圃場実験だけでなく、発生を制御する水分量などと発生量との関係などを明らかにする室内燃焼実験などを総合的に実施して、排出係数を求める必要がある。

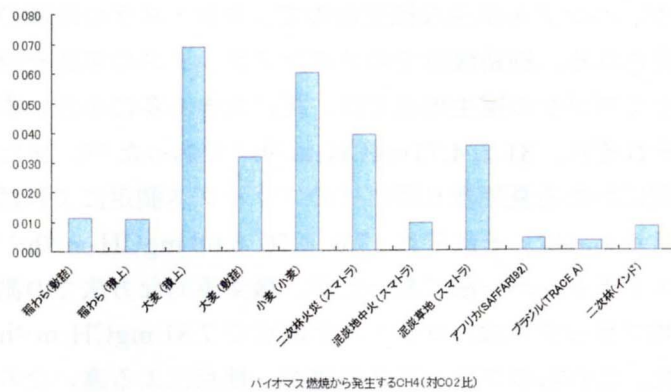


図7 稲わらや麦わらなどのバイオマスの燃焼から発生するCH₄のCO₂に対する発生比。右側の3つは、それらと比較としたアフリカ、ブラジルのサバンナとインドの焼き畑農業での測定結果⁴⁶⁾

(7) 間接発生源

以上は直接の発生源からの排出量推定であるが、間接発生源（IPCCではindirect emissionと定義している）からの亜酸化窒素の排出量について、最近関心が集まっている。これは、農耕地に投入された窒素肥料や家畜糞尿の処理過程で、一旦地下水に溶け込んだ窒素分が再び河川などに流入する過程や河川・沿岸域中で大気中に放出される亜酸化窒素を意味している。また、最終的に河口域で堆積した底泥中の有機物の分解過程で放出される亜酸化窒素の推定も必要である。これらを明らかにするには、窒素の収支および循環過程で大気中に放出される亜酸化窒素の量を推定する必要があり、大気由来の窒素を含めて、大気－（森林などの植物）－土壌－水（河川・沿岸域・海洋）の系での窒素循環を総合的に研究することが、これからの重要な課題である。

現在、日本の茶園台地下の湧水中の溶存N₂OとNO₃⁻濃度の定期調査が実施されており、これまでの調査結果⁴⁷⁾によれば、IPCCの間接発生源からのN₂O排出係数の既定値は過大評価されている可能性があり、さらに詳細な調査研究が必要である。

5. 本研究により得られた成果

- (1) 日本の農耕地からのN₂OとNOのおもな発生要因は、土壌タイプ、投入窒素の質と量、投入方法、土壌水分量であることがわかった。
- (2) 日本の農耕地からのN₂O発生量推定について、作目別に栽培面積、投入窒素量、N₂O発生割合から求める手法を開発し、それを用いて化学窒素肥料と有機質資材を投入した畑地と水田からの年間N₂O発生量は、7.83GgN/年と推定された。
- (3) 水田からの水稲栽培期間中のCH₄発生は、これまでに明らかにされた有機物管理、水管理、品種などだけでなく、土壌タイプ、栽培様式、水稲非栽培期間中の圃場管理……麦などの栽培の有無や土壌水分量など……によって、大きく影響を受けることが明らかになった。
- (4) 水田からは、CH₄だけでなくN₂Oも発生すること、その原因は、投入窒素肥料だけでなく、冬期の水稲非栽培期間中の圃場管理などであることが明らかになり、また、N₂OとCH₄の発生はトレードオフの関係にあることが、明らかになった。

(5) 日本の森林土壌による CH₄ 吸収量は、水田からの発生量の絶対値の最大 85%であることが推定され、森林土壌からの N₂O 発生量も、少なくとも一部の地域では農耕地からの発生量に匹敵することがわかった。これらから、森林での調査研究の重要性が明らかになり、今後、さらに研究を強く進める必要がある。

(6) インドネシアの泥炭湿地からの CH₄ 発生量は、他の熱帯地域よりも非常に少ないことがわかった。これから、熱帯アジアの泥炭湿地からの温室効果ガスの発生要因と炭素収支に関する研究をさらに進める必要がある。

(7) 日本の稲わらや麦わらなどのバイオマス燃焼で発生する温室効果ガスは、IPCC と大きく異なると推測され、これらの結果をもとに、アジアに適用できる排出係数を作成する必要がある。

(8) 日本でこれまでに実施された間接発生源からの N₂O 発生量の調査によれば、IPCC の排出係数は大きすぎると推測されたが、さらに詳細な調査研究が必要である。

6. 引用文献

- 1) 鶴田治雄：地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり：3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生、日本土壌肥科学雑誌、71、554-564 (2000)
- 2) 鶴田治雄：窒素肥料を投入した畑地からの亜酸化窒素 (N₂O) と一酸化窒素 (NO) の発生とその発生抑制対策、農業環境技術研究所年報、平成 11 年度、43-51 (2000).
- 3) (社)畜産技術協会編：畜産における温室効果ガスの発生制御、第 5 集 (2000).
- 4) Hatano R & Sawamoto T: Emission of N₂O from a clayey aquic soil cultivated with onion plants. In Ando, T et al. (Eds) Plant nutrition – for sustainable food production and the environment. Kluwer Academic Publishers, Japan, 555-556 (1997).
- 5) 山田佳那子：北海道の灰色低地土と黒ボク土の農地からの N₂O と NO の放出、北海道大学大学院農学研究科修士論文 (2001)
- 6) Akiyama, H., H. Tsuruta and T. Watanabe: N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers, Chemosphere-Global Change Science, 2, 313-320 (2000)
- 7) Tsuruta, H. and H. Akiyama: NO and N₂O emissions from upland soils with the application of different types of nitrogen fertilizer, in Proceedings of Second International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation, Noordwijkerhout, The Netherlands, 8-10 Sep. 1999, 277-282 (2000)
- 8) McTaggart, I.P., H. Akiyama, H. Tsuruta and B.C. Ball: Influence of soil physical properties and fertiliser type on N₂O and NO emissions from nearly saturated Japanese upland soils, Nutr. Cycl. Agroecosys (in press).
- 9) Akiyama, H. and H. Tsuruta: N₂O, NO, and NO₂ fluxes from soils after the application of manures and urea (submitted to J. Environ. Quality)
- 10) Sharma, C., H. Tsuruta, H. Akiyama, M. Uwasawa and K. Furue: Development of techniques for the reduction of nitrous oxide emissions from nitrogen fertilized upland soils (2), in Annual Report of Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997, Environment Agency, Japan, 149-161 (1998).
- 11) Hou, A., H. Tsuruta, H. Akiyama, Y. Nakajima and S. Sudo: Development of mitigation options of nitrogen oxides emission from agro-ecosystems in Asia, in Annual Report of Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1999, Environment Agency, Japan, 75-86 (2000).

- 12) Cheng, W.G., and H. Tsuruta: N₂O and NO emissions from Chinese cabbage field as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers, in Annual Report of Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 2000, Environment Agency, Japan, (2001).
- 13) 農林水産省統計情報部：農業生産環境調査報告書、農林水産統計報告 12-15 (地域-1) (2000)
- 14) 農林水産省統計情報部：平成 11 年一耕地および作付面積統計(A) (2002)
- 15) (財)日本土壌協会編：平成 7 年度環境保全型土壌管理対策推進事業・土壌生成温室効果等ガス動態調査報告書 (概要編) (1996).
- 16) 鶴田治雄：我が国の農耕地におけるメタンと亜酸化窒素の発生の実態、圃場と土壌、31, 31-38 (1999).
- 17) 鶴田治雄：温室効果ガス削減農法モデルの構築—亜酸化窒素について—、平成 12 年度温室効果ガス排出削減定量化法調査報告書、(財)農業技術協会、37-42 (2001).
- 18) Xu, H., Z.C. Cai, Z.J. Jia and H. Tsuruta: Effects of land management in winter crop season on CH₄ emission during the following and rice-growing period, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 58, 327-332 (2000).
- 19) Cai, Z.C., H. Tsuruta, M. Gao, H. Xu and C. Wei: Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field, Global Change Biology (in press)
- 20) Cai, Z.C., H. Tsuruta, K. Minami: Methane emission from rice paddy fields in China: I. Measurements and influencing factors, J. Geophys. Res., 105, 17231-17242 (2000)
- 21) 農林水産省農村振興局：温室効果ガス発生抑制対策基礎調査報告書 (印刷中)
- 22) 石橋英二・赤井直彦・大家理哉・沖 和生：不耕起乾田直播栽培の継続と酸化還元電位の関係、日本土壌肥料学雑誌, 72, 535-541 (2001)
- 23) 石橋英二・赤井直彦・大家理哉・石井俊雄・鶴田治雄：不耕起乾田直播栽培の継続とメタン発生量の関係、日本土壌肥料学雑誌、72, 542-549 (2001)
- 24) Tsuruta, H., K. Kanda and T. Hirose: Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 49, 51-58 (1997).
- 25) 鶴田治雄：CH₄, N₂O の吸収・発生等による環境影響の評価—耕起移植栽培と不耕起直播栽培の発生量比較—、環境研究「環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発」中間とりまとめ報告書、農林水産省農林水産技術会議事務局・農業環境技術研究所編、42-48 (2001)
- 26) Tsuruta, H.: Mitigation of Greenhouse Gases from Rice Paddy Fields, 3) Improvement of Cropping System for Effective Reduction of Greenhouse Gas Emission, (1) Effect of the Difference in Cultivation Method on Greenhouse Gas, in the final report of Korea-Japan Collaborative Research program, NIAES (in press)
- 27) Cai, Z.C., H. Tsuruta, X. Rong, H. Xu, Z. Yuan: The effect of growing green manure in the winter season on CH₄ emissions from rice fields, Biogeochemistry, 56, 75-91 (2001)
- 28) Xiong, Z. Q., G. X. Xing, H. Tsuruta, G. Y. Shen and S. L. Shi: Nitrous oxide emissions under milk vetch/fallow-double rice cropping system, Nutrient Cycling in Agroecosystems (in press)
- 29) Ishizuka, S., T. Sakata and K. Ishizuka: Methane oxidation in Japanese forest soils, Soil Biology and Biochemistry, 32, 769-777 (2000).
- 30) Yonemura, S., S. Kawashima and H. Tsuruta: Carbon monoxide, hydrogen, and methane uptake by

soils in an arable and a forest soil, *J. Geophys. Res.*, (in press).

- 31) 渋谷 岳・木村 武・山本克巳・野中邦彦：草地における温室効果ガス放出量の解明に関する研究、地球環境研究総合推進費・平成6年度終了研究成果報告集、環境庁企画調整局地球環境部、99-113(1995).
- 32) Kagotani, Y., M. Kanzaki, and K. Yoda: Seasonal variation of methane absorption rates of temperate forest soil in central Japan, *Environ. Sci.*, 9-16 (1999).
- 33) 石塚成宏・高橋正通・阪田匡司・波多野隆介・楊 宗興・竹中千里：CH₄、N₂O のインベントリーの精緻化と開発中核技術の内外への普及、②東アジアの森林土壌におけるの CH₄、N₂O 収支の評価に関する研究、環境庁地球環境研究総合推進費報告書 B-51 (平成13年度) (印刷中) .
- 34) Yoh, M. and Y. Takeshige: N₂O emission and nitrogen saturation in Japanese forest, abstract in International Workshop on the atmospheric N₂O budget, March 23-25, 1999, Tsukuba, Japan, 35 (1999).
- 35) 石塚成宏・阪田匡司・谷川東子・石塚和裕：落葉広葉樹林における N₂O 生成とその空間的異質性、日林誌、82, 62-71 (2000)
- 36) 鶴田治雄・米村祥央・養毛康太郎・楊 宗興・赤木 右・和田幸絵・犬伏和之・Abdul Hadi・杉井穂高・木平英一：尾瀬ヶ原におけるメタン発生、尾瀬の総合研究(尾瀬総合学術調査団編)、192-216 (1998).
- 37) 國吉俊一：自然湿地におけるメタン発生量とそれに関与する環境要因、1996年度修士論文、(1997).
- 38) 寺井久慈：釧路湿原における温暖化ガスの挙動に関する研究、希少野生生物種とその生息地としての湿地生態系の保全に関する研究報告書、(財)日本鳥類保護連盟編、337-362 (1999).
- 39) Miyata, A., Y. Harazono, M. Yoshimoto and H. Terai: The influence of temperature on CO₂ and methane fluxes at a flooded boreal wetland in Hokkaido, Japan, *J. Agri. Meteorol.*, 52, 807-810 (1997).
- 40) 小熊宏之・山形与志樹：多時期二周波 S A R データによる湿原植生分類、写真測量とリモートセンシング、36, 4-12 (1997).
- 41) 環境庁自然保護局：第4回自然環境保全基礎調査 総合解析報告書 解析編(1995)
- 42) Takai, Y.: Environmental characteristic and management in peat/acid sulfate soils of Southeast Asia, MAB Report, UNESCO Japan, 1996-1997, 31-49 (1997)
- 43) Hadi, A., K. Inubushi, E. Purnomo, F. Razie, K. Yama kawa and H. Tsuruta: Effect of land-use changes on nitrous oxide (N₂O) emission from tropical peatlands, *Chemoshpere – Global changes Sciences*, 2, 347-358 (2000)
- 44) Hadi, A., K. Inubushi, E. Purnomo, Y. Furukawa and H. Tsuruta : Emission of CH₄ and CO₂ from tropical peatlands as affected by hydrological zone and land-use management, *Researches Related to the UNESCO's Man and Biosphere Programme in Japan 2000-2001*, p. 21-28. (2001)
- 45) Yonemura, S., H. Tsuruta, S. Sudo, Leong Chow Peng, Lim Sze Fook, Zubaidi Bin Johar, M. Hayashi: Tropospheric ozone climatology over Peninsular Malaysia from 1992 to 1999, 文部省科学研究費報告書(課題番号 11691118)「インドネシア域における生物マス燃焼が及ぼす気候学的影響に関する調査的研究：Indonesian Forest Fire studies-1999 (INFOS99)」, 83-102 (2001)
- 46) Sudo, S., S. Yonemura, H. Tsuruta, S. Kawashima: A Workshop on trace gas emissions and IPCC

Good Practice, Nov. 2001, at NPL, India.

“Greenhouse gas emissions from biomass burning in Asia”

47) 中島泰弘・松尾喜義・野中邦宏・鶴田治雄：日本土壤肥料学会講演要旨集 47, 228 (2001)

“茶園台地下の湧水中の溶存亜酸化窒素のモニタリング”

[国際共同研究等の状況]

IGBP のコアプロジェクトの一つである IGAC の一環として実施し、また、APN のプロジェクトとも共同で実施している。さらに、スコットランド農業大学(SAC)の Dr. I.P. McTaggart と共同研究を実施した。

[研究成果の発表状況]

誌上発表 (学術雑誌)

① Tsuruta, H. and H. Akiyama: Non-CO₂ greenhouse gases: Scientific understanding, control and implementation, Kluwer Academic Publishers, 277-282 (2000)

“NO and N₂O emissions from upland soils with the application of different types of nitrogen fertiliser”

② Xu, H., Z.C. Cai, X.P. Li and H. Tsuruta: Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH₄ emission from rice cultivation, Aust. J. Soil Res., 38, 1-12 (2000)

鶴田治雄：日本土壤肥料学雑誌、71、554-564 (2000)

「地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり：3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生」

③ 鶴田治雄：「窒素揮散と施肥管理」、環境保全と新しい施肥技術 (安田 環・越野正義共編)、養賢堂、316-333 (2001)

④ McTaggart, I.P., H. Akiyama, H. Tsuruta and B.C. Ball: Nutrient Cycling in Agro-ecosystems. “Influence of soil physical properties and fertiliser type on N₂O and NO emissions from nearly saturated Japanese upland soils” (in press)

⑤ Xiong, Z. Q., Xing, G. X., Tsuruta, H., Shen, G. Y., Shi, S/ L., Du, L. J.: Field study on nitrous oxide emissions from upland cropping systems in China, Soil Sci. Plant Nutr. (in press)

⑥ Cai, Z.C., H. Tsuruta, M. Gao, H. Xu and C. Wei: , Global Change Biology
“Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field” (in press)

⑦ Xiong, Z. Q., G. X. Xing, H. Tsuruta, G. Y. Shen and S. L. Shi: Nutrient Cycling in Agroecosystems.
“Nitrous oxide emissions under milk vetch/fallow-double rice cropping system” (in press)

(2) 口頭発表

① Tsuruta, H., M. Yoh, K. Inubushi and T. Akagi: Abstracts of 6th International Wetland Symposium, INTECOL, August 6-12, 2000, Quebec, Canada, 293 (2000)

“Emission of methane, carbon dioxide and nitrous oxide from Ozegahara wetlands during an intensive three-year field program”

② 鶴田治雄・蔡祖聰*：大気環境学会年会講演要旨集, 367 (2000)

“中国の主要な水田からのメタン発生量”

- ③ 須藤重人・米村正一郎・鶴田治雄・川島茂人：日本土壤肥料学会講演要旨集、46、P.215 (2001).
” バイオマス燃焼による大気中微量物質の放出”
- ④ 中島泰弘・松尾喜義・野中邦宏・鶴田治雄：日本土壤肥料学会講演要旨集 47, 228 (2001)
“茶園台地下の湧水中の溶存亜酸化窒素のモニタリング”
- ⑤ Tsuruta, H. : The 3rd Workshop on Land management and trace gas emissions in east Asia, IRRI, Philippines, 6-11 Jan. 2002
“CH₄ and N₂O emissions from agricultural ecosystems”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

①鶴田治雄：農林水産大臣賞受賞「農耕地における温室効果ガスの排出削減技術の確立および技術指導」（平成 13 年 4 月 7 日）

(5) 一般への公表・報道等

平成 13 年 12 月 5 日の環境省主催の地球環境研究総合推進費シンポジウム「地球温暖化の研究最前線」で、「アジアの農耕地および土地利用変化における温室効果ガスの発生量について」（鶴田治雄）という演題で発表した。

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

日本国政府：「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく第 2 回日本国報告書 (1997) の中で、水田からのメタンと農地からの亜酸化窒素発生量の推定で用いられ、その後も現在まで、継続して、利用されている。