

B-51 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 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

(6) 農耕地における CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O の発生・吸収量の評価とその発生抑制技術の確立に関する研究

①アジアの農耕地における CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O の発生量の評価とその発生抑制技術の確立に関する研究

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

八木一行・鶴田治雄・澤本卓治・須藤重人・  
秋山博子・西村誠一

化学環境部 栄養塩類研究グループ

中島泰弘

地球環境部 気象研究グループ

川島茂人・米村正一郎

独立行政法人農業技術研究機構 野菜茶業研究所

果菜研究部 生育特性研究室

細野達夫・細井徳夫

北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター

波多野隆介・森下智陽・片柳薫子

千葉大学 園芸学部

犬伏和之・久原基秀・李 新慧

北海道立根釧農業試験場 草地環境科

甲田裕幸・三枝俊哉

岡山県農業総合センター 農業試験場

石橋英二

<研究協力者>

中国科学院南京土壤研究所

Cai, Zucong

中国科学院瀋陽応用生態研究所

Chen, Guanxiong

インド国立物理学実験所

A.P. Mitra, P. Guputa

平成 12～14 年度合計予算額 32,722 千円

(うち、平成 14 年度予算額 10,868 千円)

[要旨] アジアの農耕地からの亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)やメタン(CH<sub>4</sub>)発生に関するインベントリーを精緻化するため、日本と中国において N<sub>2</sub>O と CH<sub>4</sub> の発生・吸収量の測定を実施し、その広域評価手法を検討した。また、不耕起栽培による水田からの CH<sub>4</sub> 発生量軽減技術を検討した。さらに、バイオマス燃焼に関するインドとの共同研究を実施した。その結果、以下の成果を得た：(1) 北海道のタマネギ畑からの N<sub>2</sub>O 直接発生の排出係数(施肥窒素量に対する発生割合)は 2.7～7.8% と比較的高い値であった。一方、間接発生量は IPCC デフォルト値よりも著しく低かった。(2) 北海道東部の草地からの N<sub>2</sub>O 直接発生の特性と排出係数(0.05～0.23%) および施肥による CH<sub>4</sub> 吸収フラックスの低下を明らかにした。(3) 黄色土のトマト施設栽培における N<sub>2</sub>O 直接排出係数は 0.1% 以下であり、農耕地の排出係数としては極めて低い値であった。(4) 土壌中での N<sub>2</sub>O 発生や微生物活性の特性と、アンモニア態窒素添加による CH<sub>4</sub> 酸化活性や CH<sub>4</sub> 吸収速度の抑制を見出した。(5) DNDC モデルに全炭素に占める微生物炭素の比を組み込むことにより、わが国の畑土壌に広く分布する黒ボク土からの N<sub>2</sub>O 発生予測に適用可能であることを示した。(6) 既存の実測および統計データから、平成 10 年における日本の農耕地からの N<sub>2</sub>O 発生量は 7.89 Gg N yr<sup>-1</sup> と推定し、その不確実性と今後の課題を示した。(7) 水田の不耕起直播栽培は開始当初は CH<sub>4</sub> 発

生抑制効果を示すが、数年以上継続すると CH<sub>4</sub> 発生が多くなった。(8) 中国長江以南の水田地帯において、CH<sub>4</sub> 発生量の削減に冬期の排水が重要であること、畑地からの N<sub>2</sub>O 排出係数は 0.13～0.40%と小さかった。(9) 中国東北部の草地と湿地における CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O 発生量の変動には土壌水分と温度の変化など環境要因が強く影響していること、また、両者のあいだにトレードオフ関係のあることを明らかにした。(10) インドにおけるバイオマス燃焼実験から、各種ガスの排出係数を求めた結果、多くのガスについて IPCC で使用されている値よりも大きかった。

[キーワード] メタン発生吸収、亜酸化窒素発生、発生モデル、畑草地、水田

## 1. はじめに

地球規模でのメタン(CH<sub>4</sub>)および亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O) 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<sup>1-3)</sup>。これらの発生源は、水田面積の拡大、家畜頭数の増加、窒素肥料使用量の増加など、食糧生産の増大と密接に関係し、19 世紀以降の大気中でのこれらの温室効果ガス(GHG)濃度増加に大きく影響してきたと考えられている。

この問題に対して、農耕地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生に関しては、1990 年代当初から研究が蓄積されてきた。地球環境研究総合推進費課題においても、B-2「メタン・亜酸化窒素の放出源及び放出量の解明に関する研究」(平成 2～6 年)、B-16「地球温暖化抑制のためのメタン・亜酸化窒素の対策技術開発と評価に関する研究」(平成 7～11 年)のなかで実施されてきた。しかし、これまで課題では、主に、水田からの CH<sub>4</sub> 放出を中心に多くの研究がなされて来ており、畑地や草地からの N<sub>2</sub>O の発生に関する調査研究はまだ少ない。世界的にも同様の状況であり、その結果、IPCC での農耕土壌からの N<sub>2</sub>O 推定発生量 4.2 Tg yr<sup>-1</sup>が 0.6-14.8 Tg yr<sup>-1</sup>の誤差範囲とともに示されているように、その不確実性はきわめて大きい。気候変動枠組条約に定められているわが国の温室効果ガス排出・吸収目録を検討する、環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会の議論においても、わが国の農耕土壌からの N<sub>2</sub>O 発生量インベントリーに関する不確実性の大きいことが指摘されている<sup>4)</sup>。

特に、アジア諸国においては、爆発的な人口増加と経済発展に伴い、窒素肥料使用量の増加など農業の集約化が飛躍的に高まっており、N<sub>2</sub>O 発生源としてきわめて重要な地域となっている。しかし、この地域における農耕地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生の調査研究や実測例はまだ少なく、インベントリーとしては不十分である。

本研究では、アジア諸国に展開する各種の農耕地からの GHG 発生に関するインベントリーの精緻化を主な目的として、N<sub>2</sub>O 発生を中心に、畑地、草地、水田、および湿地からの GHG 発生・吸収、およびその要因に関する調査を日本と中国で実施する。また、広域での N<sub>2</sub>O 発生量推定手法を開発するために、既存のモデルが日本の畑地へ適用可能かどうかを明らかにする。さらに、インドにおけるバイオマス燃焼によって発生する温室効果ガスなどの排出係数を求める。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、N<sub>2</sub>O 発生を中心に、アジア諸国に展開する各種の農耕地からの GHG 発生要因を明らかにするとともに、その発生量推定手法を開発し、インベントリーの精緻化を進めることである。そのために、以下の研究を実施する。

(1) わが国の農地からの  $\text{N}_2\text{O}$  年間発生量推定と要因解析

- ① 北海道畑土壌からの  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$  の直接および間接放出：北海道の畑地では、投入窒素量に対する  $\text{N}_2\text{O}$  の直接発生割合は、日本のその他の地域よりも多いことが、全国調査で推測された。そこで、北海道の畑地からの  $\text{N}_2\text{O}$  などの直接および間接発生要因を明らかにする。
- ② 北海道東部の草地での  $\text{N}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  の発生吸収：わが国のなかで広大な草地が存在する北海道では、これまで草地における温室効果ガスの測定がなされていなかった。そこで、北海道の草地で  $\text{N}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  の発生吸収量を、野外調査を実施し、インベントリーの基礎資料とする。
- ③ 施設栽培からの  $\text{N}_2\text{O}$  発生：施設栽培は、肥培管理や物理環境の面で露地栽培とは質的に異なり（多施肥、塩類集積、無降雨、定期的灌水、高温等）、多量の  $\text{N}_2\text{O}$  が発生する可能性が指摘されている。一方、施設栽培は労働集約的な農業であり、適切な栽培管理法を確立することにより  $\text{N}_2\text{O}$  の放出量を抑制できる可能性が大きいと考えられる。そこで、実態が十分に把握されていない施設栽培からの  $\text{N}_2\text{O}$  発生について明らかにし、その放出を少なくする栽培技術を開発する。
- ④ 圃場からの  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  の発生・吸収に及ぼす土壤微生物の機能や活性の影響：日本の農耕地土壌を対象として  $\text{CH}_4$  と  $\text{N}_2\text{O}$  の生成と吸収に関わる土壤微生物の機能や活性と土壌中でのガス代謝との関係を明らかにし、温室効果ガス発生量の評価と発生制御技術に関する検討を行なう。

(2) わが国の農耕地からの  $\text{N}_2\text{O}$  発生量の推定手法の開発

- ① プロセスモデルの適用の検討：日本の農地からの  $\text{N}_2\text{O}$  発生量推定手法を開発するために、既存の DNDC モデルが日本の畑地へ適用可能かどうかを、日本での  $\text{N}_2\text{O}$  フラックスの実測値と比較することにより明らかにする。また、適用のための問題点および必要な DNDC モデルの改良、ならびに今後の研究方向を検討する。
- ② 既存の実測および統計データからの推定：既存の農耕地における発生量測定結果と種々の統計データから、わが国の農耕地からの  $\text{N}_2\text{O}$  発生量の推定を行い、この手法の課題を明らかにする。

(3) 不耕起直播栽培水田からの  $\text{CH}_4$  と  $\text{N}_2\text{O}$  の発生：水田における不耕起直播栽培は、開始後数年間は耕起移植栽培よりも  $\text{CH}_4$  発生量が少ないので、発生量軽減の技術の一つであるが、稲わらを毎年散布し続けて不耕起直播栽培を長期継続した場合の  $\text{CH}_4$  発生量に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、 $\text{CH}_4$  だけでなく  $\text{N}_2\text{O}$  についても、これらの異なる栽培様式における発生量を明らかにする。

(4) 中国の畑地、草地、水田、および湿地からの  $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  の発生・吸収量の解明：アジアだけでなく世界のなかで広大な農耕地をもつ中国で、農耕地からの  $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  の発生量を推定することは、地球全体からのこれらの温室効果ガス発生量推定の不確実性を少なくするために、非常に重要である。そこで、中国科学院南京土壤研究所および同瀋陽応用生態研究所と共同で、中国の畑地、草地、水田、および湿地からの  $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  の発生に関する研究を実施する。

- ① 畑地および水田からの  $\text{CH}_4$  および  $\text{N}_2\text{O}$  発生量の解明：中国各地の畑地および水田で  $\text{CH}_4$

および N<sub>2</sub>O 発生量を測定し、各種輪作体系における発生量の違いと制御要因を明らかにし、発生制御方策を検討する。

- ② 草地および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の解明：中国北東部の草地および湿地からの CH<sub>4</sub> 発生量を測定するとともに、湿地が農耕地に変化することにより CH<sub>4</sub> 吸収要因がどのように変化するかを明らかにする。

- (5) インドにおけるバイオマス燃焼による温室効果ガス排出の解明：アジアでは、バイオマス燃焼は多いにもかかわらず、その野外での実測はほとんどないので、IPCC による温室効果ガスや WMO による臭化メチル(CH<sub>3</sub>Br)の発生量推定には、不確実性が大きい。そこで、インドの国立物理学実験所 (NPL) と共同で、焼き畑農業から排出するこれらの微量ガスの発生に関する共同研究を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) わが国の農地からの N<sub>2</sub>O 年間発生量推定と要因解析

- (1)-① 北海道畑土壌からの N<sub>2</sub>O、NO の直接および間接放出

ア. 北海道の畑地における N<sub>2</sub>O 発生

北海道三笠市灰色低地土タマネギ畑(2.05 ha、暗渠管が深さ 80~100 cm に 12 m 間隔で埋設)で、土壌表面からの N<sub>2</sub>O および NO フラックス (クローズドチャンバー法で 4 反復)、暗渠水中溶存 N<sub>2</sub>O (多段階ヘッドスペース置換法<sup>5)</sup>) および硝酸濃度、暗渠流量を測定した。なお、本圃場では、溶存 N<sub>2</sub>O を除く項目の測定を 1996 年以降、毎年、融雪後の 4 月中旬から積雪前の 11 月下旬まで行なっている。測定は、施肥後 2 週間は 2 日おきに、それ以外は通常 1 週間毎に行なった。また 2001 年から 2002 年にかけては冬期間も測定し 3 月下旬から 4 月上旬の融雪期には 2 日おきに測定した。通常 4 月下旬に化学肥料が施与され(1996 年以降 2002 年までの窒素施与量は 314, 286, 325, 325, 242, 236, 236 kg N ha<sup>-1</sup>)、5 月初旬にタマネギの苗が定植 (29 本 m<sup>-2</sup>) され、8 月下旬から 9 月上旬にかけて収穫された。

イ. 北海道の畑草地における温室効果ガス発生 of 精密測定

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター耕地圏ステーション静内研究牧場 (黒ボク土) 内の、林間放牧地、放牧地、採草地、デントコーン畑を含む 2 km のライントランセクト (全長約 2 km) 上の 100 箇所、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O とともに CO<sub>2</sub>、NO のフラックスを測定した。測定は施肥後の硝化、植物生育とも旺盛な 6 月下旬と生育終期の 8 月下旬に行なった。得られたデータから基本統計量を求め、母平均の±20%以内に 95%の確率で測定値の平均値を得るためのサンプリング数(n)を求めた。すなわち標本平均(M)を用いて、次式を満たすように繰り返し計算を行い、標準誤差(σ<sub>e</sub>)を決定した。

$$95(\%) = \text{Normdist}(-0.2M/\sigma_e) - \text{Normdist}(0.2M/\sigma_e)$$

ここで、Normdist は累積正規分布関数。ついで、標準偏差(σ)を用いて、 $n = (\sigma/\sigma_e)^2$  の関係から n 値を求めた。セミバリオグラムにより各ガスフラックスの空間依存性を調べた<sup>6)</sup>。さらに土壌の理化学性とこれらガスフラックスの関係を得ることも試みた。土壌の理化学性は一般に空間依存性が認められることから<sup>7,8)</sup>、時空間を通してガスフラックスと土壌の理化学性の関係が得られれば、ガスフラックス値の精度を上げることが可能である。

(1)-② 北海道東部の草地での  $N_2O$  と  $CH_4$  の発生吸収

北海道立根釧農業試験場内のチモシー・シロクローバ混播草地（普通黒ボク土）において、2000/5/1～10/20（173日間）、2001/4/5～10/18（195日間）および2002/4/12～10/5（177日間）にかけて亜酸化窒素発生フラックスおよびメタンガス吸収フラックスを、クローズドチャンパー法（2反復）で測定した。また、土壌化学性（深さ0～5, 5～15 cm）、牧草収量および草種構成も測定した。施肥処理は、無窒素（年間施用量  $N\cdot P_2O_5\cdot K_2O=0\cdot 100\cdot 220\text{ kg ha}^{-1}$ ）および標準施肥（ $N\cdot P_2O_5\cdot K_2O=60\cdot 100\cdot 220\text{ kg ha}^{-1}$ ）とし、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰および硫酸カリウムで、年間施用量の2/3を早春に、1/3を1番草収穫後に施用した。肥培管理は、早春施肥5月上旬、1番草収穫6月下旬、追肥7月上旬、2番草収穫8月下旬であった。

(1)-③ 施設栽培からの  $N_2O$  発生

施設栽培からの  $N_2O$  放出量およびその制御要因を解明するためには、 $N_2O$  放出量を連続的に測定して、施肥や灌水等の管理の影響や温度・土壌水分等の環境要因の影響について詳細に解析する必要がある。そこでまず、ガス分析計にガス相関法式のNDIRを用いる通気式チャンパー法による連続測定システムについて検討した。(2)ガラス温室（総床面積50  $m^2$ ）でトマトの長期栽培を行い、2回の栽培期間を通して連続的に  $N_2O$  放出量を計測した。栽培は細粒黄色土を充填したグラスファイバー製のベッド（縦横8  $m\times 0.8\text{ m}$ 、深さ0.4  $m$ ）で行った。ベッドは埋設されており、排水口が1箇所ある。(3)第1栽培期間は2001年2月から2001年8月までで、品種はラークナファーストを用いた。基肥として粒状化成肥料を施肥(3.6  $g N/m^2$ )し、追肥は液肥（大塚OKF-1：尿素、 $NH_4$ および硝酸態窒素を含む、または大塚2号：硝酸カルシウム）を灌水に混ぜて施肥した。堆肥は施用しなかった。(4)第2栽培期間は2002年3月から2002年9月までで、慣行施肥栽培（基肥区）と養液土耕栽培（養液土耕区）における  $N_2O$  放出量をトマトの生育期間を通して計測し、比較した。基肥区は、基肥として粒状化成肥料を施肥(10.7  $g N/m^2$ )し、追肥は第1栽培期間と同様に液肥を灌水に混ぜて施肥した。養液土耕区の肥料は大塚OKF-5を用いたが、短期間、大塚2号も用いた。両区とも堆肥（稲わら堆肥）を施用（約28  $g N/m^2$ ）した。

(1)-④ 圃場からの  $N_2O$ 、 $CH_4$  の発生・吸収に及ぼす土壌微生物の機能や活性の影響

ア. 化学肥料（硫安）および牛ふん堆肥を圃場へ施用し、その土壌中の  $N_2O$  放出量を深さ別(10, 20, 40, 60, 80, 100  $cm$ )に経時的に測定した。また土壌中の無機態窒素量を測定した。さらに土壌中の硝化菌、脱窒菌数とその活性を土壌断面に沿って測定した。

イ. 5種の土壌（暗赤色土、表層腐植質黒ボク土、淡色黒ボク土、褐色森林土、砂丘未熟土）および肥料形態（無機肥料、有機質肥料、無施肥）の異なる淡色黒ボク土壌に $(NH_4)_2SO_4$ 、 $NaNO_3$ をそれぞれ200  $mg N/kg\text{ D.S.}$ となるように添加しさらに、 $(NH_4)_2SO_4$ 添加区には硝化抑制剤としてDCDを添加した区を設けた。処理した土壌を25°C暗所で培養しメタン酸化活性を測定した。また、 $(NH_4)_2SO_4$ 添加区、無添加区については4週間培養し無機態窒素量、バイオマス窒素、 $N_2O$ 生成量を測定し、無機態窒素量の変化から硝化活性を算出した。

ウ. 上記5種類の土壌および3処理区を充填したコンクリート枠試験地で  $N_2O$  放出量と  $CH_4$  吸収量とを1年間継続測定し、両ガスの積算フラックスについて相互関係を検討した。

## (2) わが国の農耕地からの N<sub>2</sub>O 発生量の推定手法の開発

### (2)・① プロセスモデルの適用の検討

DNDC モデル (De-Nitrification and De-Composition model) は土壌炭素・窒素の生物地球化学を扱うプロセスモデルであり、土壌からの温室効果ガス発生を予測するために、Li らによって 1990 年頃から開発と改良が行われ、北米・欧州などにおいてその有用性が確認されている<sup>9,10)</sup>。本モデルは、土壌からの温室効果ガスである CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、および CH<sub>4</sub> を同時に予測することができる唯一のプロセスモデルである。

本研究では、日本で測定された畑土壌からの N<sub>2</sub>O 発生量の長期測定 2 事例において、モデル予測値と実測値を比較した。それらの地点は、

地点 1) 灰色低地土タマネギ畑 (北海道三笠市、土壌炭素 3.7%、土壌 pH (H<sub>2</sub>O) 5.8、毎年 4 月末に基肥約 300 kg N ha<sup>-1</sup>、月 2 回以上測定、測定期間 1995~2000 年)

地点 2) 黒ボク土野菜 (ニンジン・チンゲンサイ) 畑 (茨城県つくば市 農業環境技術研究所 温室効果ガス発生制御施設、土壌炭素 3.1%、土壌 pH (H<sub>2</sub>O) 5.9、4 時間間隔で自動測定、測定期間 1996~1998 年)

である。それぞれの地点において、N<sub>2</sub>O の発生量は、3.5~15.6 kg N ha<sup>-1</sup> (約 6 ヶ月間) および 0.17~0.43 kg N ha<sup>-1</sup> (3~10 ヶ月間) であった。以上の 2 地点について、DNDC モデル予測値と実測値を比較した。

なお、タマネギ、ニンジン、チンゲンサイについては、それらの作物生育パラメータが DNDC モデルに備わっていないために、新規に作成した。その際、窒素吸収量ならびに炭素同化量のモデル予測値が実測値とほぼ一致するようにチューニングした。

### (2)・② 既存の実測および統計データからの推定

畑地からの N<sub>2</sub>O 発生要因は、これまでの各種の調査結果から、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、栽培地域や施肥などの肥培管理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<sup>11)</sup>と、作目別の栽培面積<sup>12)</sup>、および作目別の N<sub>2</sub>O 排出係数を用いて、N<sub>2</sub>O 発生量推定手法を(1)式のように開発した<sup>13)</sup>。なお、畑地における N<sub>2</sub>O 排出係数は全国調査結果<sup>14,15)</sup>を主に用いており、有機質資材による排出係数は、実測によるデータ<sup>16)</sup>は非常に少ないので、化学窒素肥料と等しいと仮定した。水田からの N<sub>2</sub>O 発生量では、既存の 2 つの年間発生量調査結果から得られた排出係数<sup>17,18)</sup>の平均値を用いた。

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

F(N<sub>2</sub>O) : 日本全体の農耕地からの亜酸化窒素発生量 (Gg N<sub>2</sub>O yr<sup>-1</sup>)

A : 作目別の栽培面積 (m<sup>2</sup>)

N : 作目別の農地への投入窒素量 (g N m<sup>-2</sup>)

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<sub>2</sub>O-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: 水稲、麦、馬鈴薯、かんしょ、雑穀、豆類、野菜、果樹、茶、葉たばこ、  
工芸農作物 (桑と工芸作物を含む)、飼料作物)

### (3) 不耕起直播栽培水田からの CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の発生

ア. CH<sub>4</sub> 及び N<sub>2</sub>O フラックスは、1998 年～2003 年にかけて、7～14 日間隔でクローズドチャンパー法<sup>19)</sup>で通年測定した。不耕起直播栽培から耕起移植栽培への転換が CH<sub>4</sub> 発生に及ぼす影響を明らかにするため、不耕起直播継続区 (9 年目、稲わら全量圃場還元) と耕起移植転換区 (不耕起直播 8 年継続後、耕起移植 1 年目) で比較した。

イ. 不耕起直播継続年数と田面表層の有機物層の厚さとの関係を明らかにするとともに、不耕起直播 11 年継続後の田面表層 0～5cm に集積した有機物を水中篩別 (0.5 mm 篩) した後、T-N 及び C 含有率を測定し、C/N 率及び炭素、窒素の集積量を求めた。

### (4) 中国の畑地、草地、水田、および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O の発生・吸収量の解明

#### (4)-① 畑地および水田からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の解明

中国の水田からの CH<sub>4</sub> 発生量の推定を目的として、1993 年から 8 地点の水田で CH<sub>4</sub> フラックス測定を開始し、そのうち 7 地点では 1997 年までに終了し、発生量を報告した。なお、冬期の休閑期も圃場が湛水状態である南西部の重慶では、1995 年から 2000 年まで年間を通して CH<sub>4</sub> フラックスを測定した。設定した 4 処理区の概要を表 1 に示した。

表 1 重慶で設定した水田の処理区の特徴 (\*1998-2000 年は菜の花を栽培)

処理区	年間栽培作物	耕起の有無	移植形態	水管理
A(Ch-FF)	水稲—休閑	慣行耕起	水平	常時湛水 (年間)
B(Ch-FFR)	水稲—休閑	無耕起	畝間	常時湛水 (畝間だけ年間)
C(Ch-Wheat)	水稲—冬小麦*	慣行耕起	水平	湛水 (水稲)—排水 (冬小麦)
D(Ch-RW)	水稲—冬小麦*	無耕起	畝間	湛水 (水稲)—排水 (冬小麦)

また、中国の畑地および水田からの N<sub>2</sub>O 発生量の測定を、中国江西省鷹潭の紅土壌生態実験場で 1998 年から開始した。畑地では、休閑—陸稲、菜の花—南京豆、そらまめ—大豆の 3 つの年間栽培区に、それぞれ窒素施肥区と無窒素区を設定し、N<sub>2</sub>O のフラックスを年間を通して測定した。水田では、休閑—水稲—水稲、レンゲ草—水稲—水稲の年間栽培区に、それぞれ窒素施肥区と無窒素区を設定し、N<sub>2</sub>O のフラックスを年間を通して測定した。

#### (4)-② 草地および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の解明

中国東北部の草地 2 地点 (吉林省松嫩: Songnen および内蒙古自治区科爾沁: Kerqin) における N<sub>2</sub>O と CH<sub>4</sub> フラックスの測定を 2000 年から 3 年間にわたり実施した。これらの地点は、中国西南部から東北部にかけて帯状に広がる草原地帯の東端部に当たり、meadow steppe と分類される。これらのガスフラックスは、クローズドチャンパー法を用いて約週に 1 回、4 連で測定した。また、土壌温度 (深さ 0,5,10cm)、土壌水分量と土壌中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度を、同時に測定した。

さらに、黒竜江とアムール川の合流地点以南に存在する三江平原の湿地および農耕地に開発された地域で、 $\text{CH}_4$  発生・吸収とその要因に関する調査研究を、2001 年から暖候期に実施した。三江平原（面積は 108,900  $\text{km}^2$ ）は、1893 年は 90% 以上が湿地であったが、1994 年にはその多くが農耕地に変化し、湿地はわずか 9.56% に減少した。

#### (5) インドにおけるバイオマス燃焼による温室効果ガス排出の解明

インド南東部の熱帯地域の東ゴダバリ郡内で行われている焼き畑農業において、2000 年 4 月に 3 地域で 2 次林の燃焼に伴って発生したガスを、内面研磨した金属製容器に採取し、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{Br}$ 、 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 、 $\text{CH}_3\text{I}$  などの濃度を、開発した超微量気体分析装置により測定した。

### 4. 結果・考察

#### (1) わが国の農地からの $\text{N}_2\text{O}$ 年間発生量推定と要因解析

##### (1)-① 北海道畑土壌からの $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ の直接および間接放出 ア. 北海道の畑地における $\text{N}_2\text{O}$ 発生

無積雪期間中の土壌表面からの  $\text{N}_2\text{O}$  直接放出フラックスおよび暗渠排水中溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度の季節変化は、各年度とも、施肥直後の 5 月初旬に上昇した後低下し、7 月以降の降雨後に上昇し、その後降雨ごとに放出を繰り返し、溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度は 7 月の降雨以降に上昇していた(図 1)。積雪

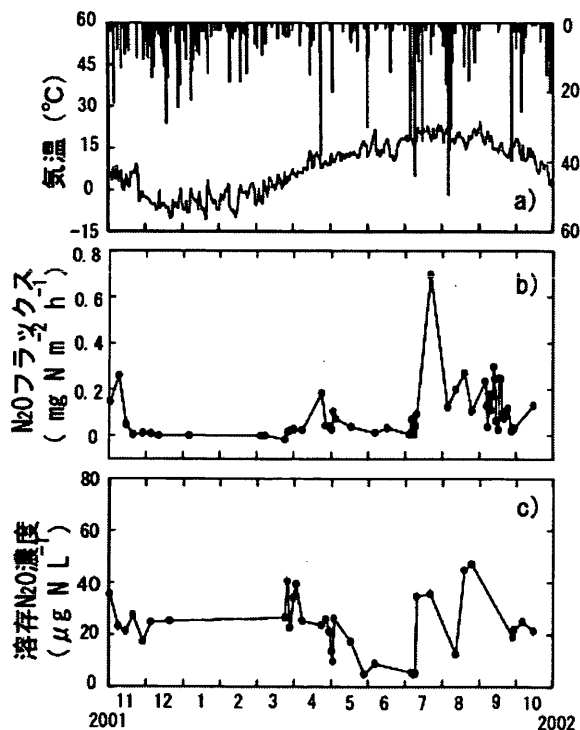


図 1 北海道三笠市タマネギ畑における  $\text{N}_2\text{O}$  直接放出フラックス、暗渠排水中溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度の経時変化：a) 気温・降水量、b)  $\text{N}_2\text{O}$  フラックス、c) 溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度

期には  $\text{N}_2\text{O}$  直接放出フラックスは認められず、融雪期にはわずかに上昇した程度であった。しかし溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度は融雪期に高まった。

無積雪期間の  $\text{N}_2\text{O}$  直接放出量は大きな年次間差が認められ、2000 年、2001 年は 15.6、18.5  $\text{kg N ha}^{-1}$  と他年度の 2 倍から 3 倍を示し、施肥量の 1.1% から 7.8% と大きなばらつきを示した(表 2)。とくに 9 月の  $\text{N}_2\text{O}$  の直接放出量に大きな違いがあり、2000 年、2001 年には年間放出量の 50% 以上を示したが、その他の年度は 20% 程度でしかなかった。2000 年、2001 年度の 9 月の降水量は 220 mm 以上と他年度の 2 倍から 4 倍であり、この降雨量の違いが  $\text{N}_2\text{O}$  直接放出の違いに深く関わっている可能性が指摘される。溶存  $\text{N}_2\text{O}$  濃度と暗渠流量から求めた  $\text{N}_2\text{O}$  間接放出量も 2002 年度は 2000、2001 年に比べ少なかった。ただし、2002 年の間接放出量/直接放出量比は 3.5 % であり、2000 年は 4.6%、2001 年は 1.7 % と傾向は見られなかった。ただしこれらの値は Mosier ら<sup>20)</sup>による地球規模での間接放出量/直接放出量比の 76% に比べ著しく低かった。



土壌表面からの  $N_2O$ -N/ $NO$ -N フラックス比は、施肥直後の5月から乾燥している7月までは1前後であり硝化が優勢であることを示していたが、7月以降は100以上となり脱窒が優勢となった(硝化菌では0.2-1、脱窒では100程度<sup>21)</sup>)。この傾向は各年度とも変わらなかった。しかし積雪期間中は10以下に低下し、3月後半から4月前半にかけての融雪期には100以上となり脱窒が優勢であることを示していた。暗渠排水中の  $N_2O$ -N/ $NO_3$ -N 比は  $N_2O$ -N/ $NO$ -N 比と同様の傾向を示し、融雪期と降雨のあった7月以降に上昇し、施肥直後には低く推移した。このことは暗渠排水中の  $N_2O$  が硝酸の溶脱過程においてのみに生成しているのではなく、表層で生成された  $N_2O$  が浸透水に溶存し流出する可能性を示唆している。 $N_2O$ -N/ $NO_3$ -N 比は2000年から2002年で0.23~0.55%の範囲にあり、降雨の少なかった2002年は、降雨の多かった2000年、2001年に比べて低く、Mosierら<sup>20)</sup>による1.5%より低かった(表2)。

表2  $N_2O$  放出量の年次変化

年	$N_2O$ 直接放出量 ( $kgN\ ha^{-1}$ )	$N_2O$ 直接 /施肥N (%)	$N_2O$ 間接放出量 ( $kgN\ ha^{-1}$ )	$N_2O$ 間接 /直接 (%)	$N_2O$ 間接 / $NO_3$ 溶脱量 (%)
1996	3.5	1.1			
1997	5.3	1.9			
1998	4.7	1.4			
1999	9.9	3.0			
2000	15.6	6.4	0.74	4.6	0.55
2001	18.5	7.8	0.31	1.7	0.39
2002	6.3(7.1)	2.7	0.22	3.5	0.23

調査期間 4/1~11/30

括弧内は2001/11/1から2002/10/31における放出量

#### イ. 北海道の畑草地における温室効果ガス発生量の精密測定

$CO_2$ は6月草地で高く森林で低かったが、8月には土地利用間差は小さくなった。両時期とも全体で正規性を保ち、2kmあたり31点(6月)、13点(8月)以上の試料数が必要と判断された。 $CH_4$ は時期に関係なく放牧草地で放出された以外は吸収か0であり、ばらつきが大きく正規分布・対数正規分布を示さず、空間依存性もなく、16000点(6月)、2400点(8月)以上の試料数が要求された。 $N_2O$ 放出は、時期に関係なく、トウモロコシ畑で高く、次いで草地、森林では0であり、480点(6月)、710点(8月)以上の試料数が要求されたが、距離依存性を示し、補間可能であることを示していた。 $NO$ 放出はトウモロコシ畑のみ6月に大きく、1200点(6月)、3100点(8月)以上の試料数が必要であった。

土壌の物理性・化学性とガスフラックスの関係は、 $CO_2$ は6月は温度のみに相関が認められたが、8月には温度と水分に相関が認められた。この傾向は北海道での畑、草地における結果と類似していた<sup>22,23)</sup>。 $CH_4$ は6月8月ともに水分のみに相関があり、土壌中のガス拡散が深く関わっていることを示していた<sup>23)</sup>。 $N_2O$ は6月はEC、pH、 $NO_3$ 濃度に、8月はpH、 $NO_3$ 濃度に相関が認められ、Ballら<sup>24)</sup>の結果と類似していた。 $NO$ は6月のみEC、pH、 $NO_3$ 濃度と相関が認められ、施肥後の硝化に関わる要因と関係していた<sup>25)</sup>。

以上から信頼できるガスフラックス値を直接測定することは膨大な点数を必要とし、土壌理化

学性との関係を介して見積もることも、その経験式が時期により異なるものになり、やはり毎回膨大な作業を行なわなければならない。したがって、精密な見積もりと将来予測のためには、種々のガスフラックスに影響を与える要因すべて網羅し、生物地球化学的炭素窒素動態を記述するモデルの開発あるいは既存のDNDCモデル等の適用性の検討を行なうことが急務であると思われる。

(1)-② 北海道東部の草地での  $N_2O$  と  $CH_4$  の発生吸収

ア. 亜酸化窒素発生フラックスは、両処理区とも追肥および2番草収穫直後に高まった。また、標準施肥区では、無窒素区に比べ、早春および2番草収穫後に高い値を示した(図2)。調査期間中の亜酸化窒素発生量は、無窒素区に比べ標準施肥区で多い傾向にあったが(表2)、これらの値は、栃木県の無施肥草地における年間亜酸化窒素発生量とほぼ同等であった<sup>26)</sup>。また、標準施肥区では、施肥窒素に由来する亜酸化窒素発生量は施肥窒素量の0.05~0.23%に相当した(表3)。

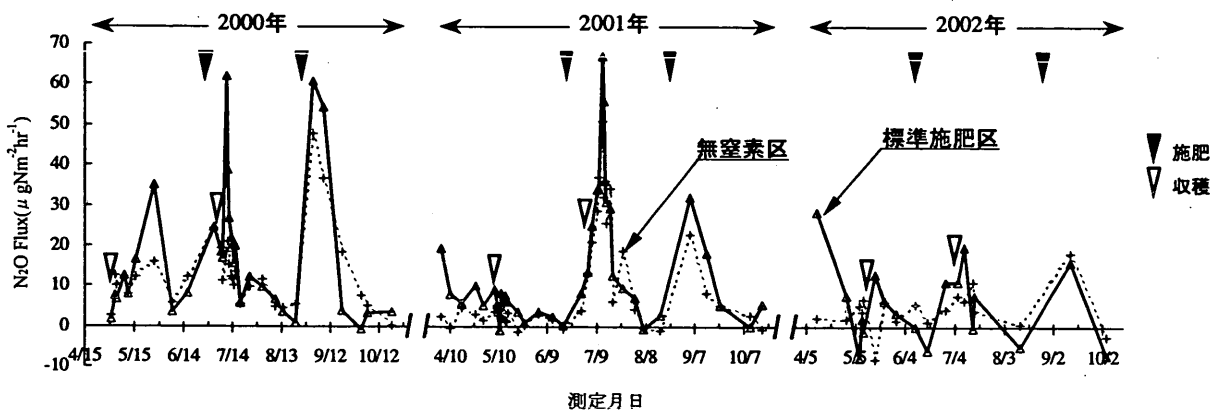


図2 北海道東部の草地における  $N_2O$  フラックスの推移 (2000~2002年)

表3 北海道東部の草地における  $N_2O$  発生量 (2000~2002年)

年度	処理区	施肥量(A) ( $kgN\ ha^{-1}$ )	$N_2O$ 発生量( $kgN\ ha^{-1}$ )		B/A (%)
			全体	施肥由来(B)	
2000	無窒素区	0	0.57	-	-
	標準施肥区	60	0.64	0.07	0.12
2001	無窒素区	0	0.31	-	-
	標準施肥区	60	0.45	0.14	0.23
2002	無窒素区	0	0.20	-	-
	標準施肥区	60	0.23	0.03	0.05

イ. メタン吸収フラックスは標準施肥区に比べ、無窒素区で高い傾向にあった(図3)。また、各年度におけるメタン吸収フラックス ( $ig\ CH_4-C\ m^{-2}\ h^{-1}$ ) の平均値は、無窒素区で22~25、標準施肥区で17~22であった。なお、調査期間中のメタン吸収量は、栃木県の無施肥草地における年間メタン吸収量とほぼ同等であった<sup>1)</sup>。

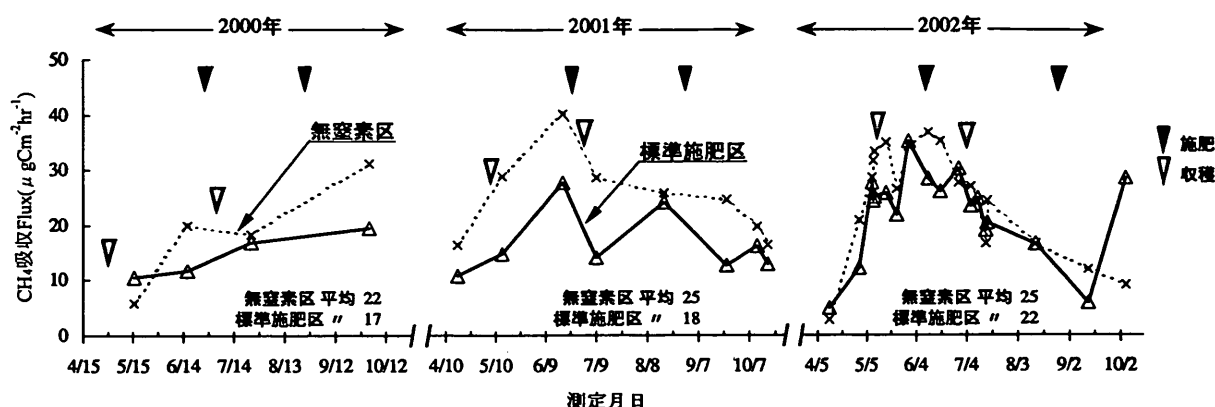


図3 北海道東部の草地におけるCH<sub>4</sub>吸収フラックスの推移（2000～2002年）

ウ. 亜酸化窒素およびメタンの発生量を二酸化炭素発生量に換算すると、その合計はいずれの処理区・年度でも正の値を示した（表4）。これは、メタンの吸収よりも亜酸化窒素の発生の影響が大きいためであった。また、標準施肥区では、無窒素区に比べ高い傾向にあった。

(1)-③ 施設栽培からのN<sub>2</sub>O発生

通気式チャンパー法による連続計測システムを用いて計測した、長段トマト第1栽培期間における日N<sub>2</sub>O放出速度の変化を図4に示す。基肥施肥後のN<sub>2</sub>O放出速度は、第1栽培期間においては、20～30日まで徐々に増加してピークをとり、その後顕著に減少した。第2栽培期間（図省略）の基肥区においては、基肥施肥後30日くらいにピークをとり、その後減少したものの、60日以降はふたたび増加し、100日目付近までは大きな変化が無く推移した。この期間のN<sub>2</sub>O放出速度の増減は土壌水分の変化と対応している傾向がみられた。100日目以降は徐々に減少したが、これは土壌中の窒素が減少したためと推察された。いずれの栽培期間とも、液肥を追肥後は速やかにN<sub>2</sub>O放出速度が増加した。尿素を含む液肥を施肥した場合は硝酸態窒素のみを含む液肥を施用した場合よりも即座にN<sub>2</sub>O放出速度が増加した。養液土耕区においては、栽培開始から60日

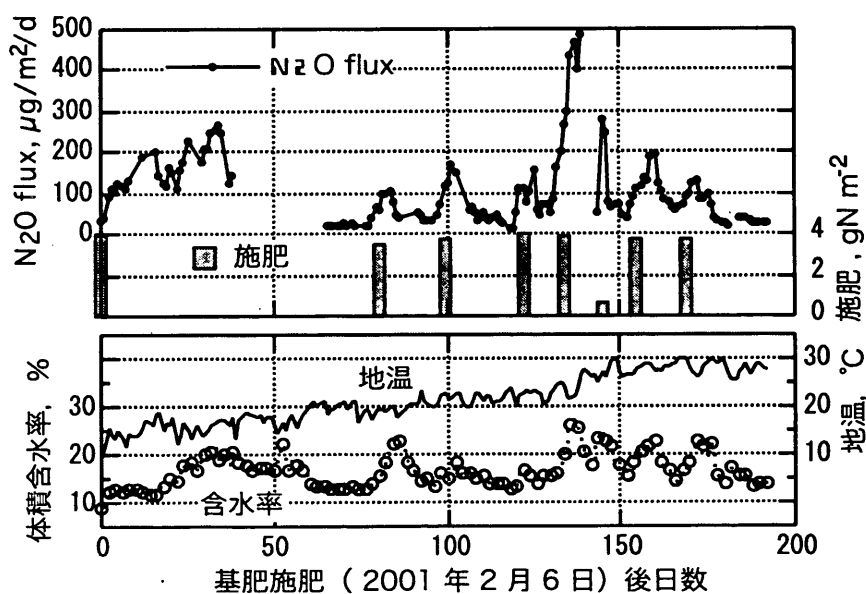


図4 長段トマト施設栽培からのN<sub>2</sub>O放出速度の変化

頃までは N<sub>2</sub>O 放出速度は非常に低く推移した。これは、苗が小さい間は液肥を灌水に混ぜないためと考えられる。栽培開始から 20 日あたりまではやや増加傾向が見えるが、前作の残肥や残存植物に由来する窒素が存在していたためと推察される。養液土耕区では窒素施肥量の増加とともに N<sub>2</sub>O 放出速度は増加し、基肥区と同等以上になった。

基肥施肥後一定期間（土壌中に多量の窒素が残存している間）は、N<sub>2</sub>O 放出速度の日変化は地温の変化に一致していた。一般的に、畑地からの N<sub>2</sub>O フラックスのモニタリングは、閉鎖チャンバー法で1日のうちのある時刻に単発的に行われることが多い。その場合、1日の平均的なフラックスを測定するためには、日平均地温出現時刻付近でフラックスを測定することが望ましいと考えられる。

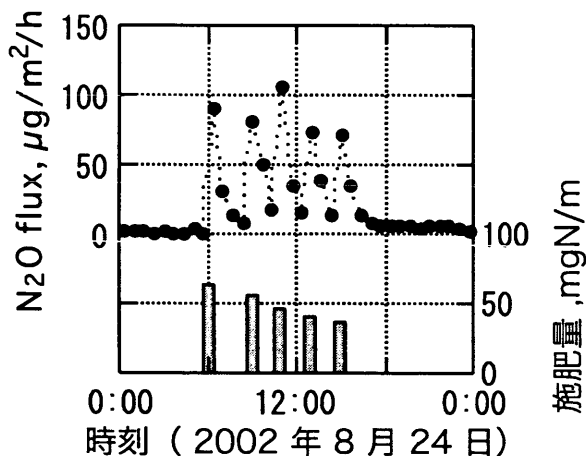


図5 養液土耕区における N<sub>2</sub>O 放出速度の日変化の例

養液土耕区では、施肥（かん水同時施肥）後1時間以内に N<sub>2</sub>O 放出量はピークをとり、2~3 時間後には非常に低いレベルに低下した（図5）。養液土耕区での1日毎の施肥窒素量に対する N<sub>2</sub>O-N 放出量の割合は、肥料が OKF-5 の場合おおよそ 0.1% から 0.5% の範囲であった。一方、大塚2号の場合は 0.03% 以下であった。

栽培期間全体では、N<sub>2</sub>O の排出係数（施肥窒素に対する N<sub>2</sub>O-N の放出量の割合）はいずれも約 0.1% 以下であった（表4）。施設栽培は露地畑土壌に比べて一般に塩類が集積しており<sup>27)</sup>、そのような場所で多量の灌水が行われると多量の N<sub>2</sub>O が放出される可能性も指摘されていた<sup>28)</sup>。しかし、この排出係数の値はこれまでの露地栽培における調査結果

<sup>29)</sup> と比較して最低レベルに近く、本研究の結果からは施設栽培が露地栽培と比べて N<sub>2</sub>O 放出量が多いという傾向は見られなかった。この小さい排出係数の原因は、土壌が黄色土であること、比較的土壌水分が小さく推移したこと、施肥窒素がほとんど植物に吸収されて土壌中への残留が少なかったことなどが考えられる。今後は、より多施肥が行われる傾向のある作物や黄色土以外

表4 施設長段トマト栽培期間を通しての N<sub>2</sub>O 放出量

期間 (区)	N <sub>2</sub> O-N 放出量 g/m <sup>2</sup> (a)	施肥量 g/m <sup>2</sup> (b)	排出係数, % (a/b×100)
第1期間*	2.02×10 <sup>-2</sup>	27.6	0.073
第2期間** (基肥区)	6.07×10 <sup>-2</sup>	60.4	0.100
第2期間** (養液土耕区)	5.62×10 <sup>-2</sup>	66.5	0.085

\*第1期間：2001年2月6日～2001年8月17日

\*\*第2期間：2002年3月6日～2002年10月3日

の施設土壌でのモニタリングも必要であろう。養液土耕区の排出係数は、基肥区に比べて15%程度の減少にとどまった。施肥窒素を硝酸態窒素のみにすると $N_2O$ 放出が抑制されることは知られている<sup>30)</sup>が、養液土耕区では窒素肥料が硝酸カルシウム(大塚2号)の場合は1日毎の施肥窒素量に対する $N_2O$ -N放出量の割合は0.03%以下であったことから、養液土耕で施肥窒素を硝酸態窒素のみにすれば、劇的に $N_2O$ 放出量を小さくできる可能性がある。今後、養液土耕法における施肥管理法についてのさらなる検討のほか、例えばマルチの使用法<sup>31)</sup>のような物理的な抑制技術等も含めて、施設栽培からの $N_2O$ 放出抑制技術の確立(放出抑制量の定量的評価を含む)が必要である。

(1)・④ 圃場からの $N_2O$ 、 $CH_4$ の発生・吸収に及ぼす土壌微生物の機能や活性の影響

ア. 化学肥料施肥土壌の表層から下層にかけて施肥後2週間程度、 $N_2O$ が一様に発生していることが見出された(図6)。また他の区でも同様に $N_2O$ 発生が認められた。硝化菌、脱窒菌数とその活性は下層土壌(60-100 cm)でも高い場合が認められた。

イ. 培養試験では暗赤色土を除く土壌で無添加区が他の処理区と比較してメタン酸化活性が高い傾向を示した(図7)。(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>添加区および(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+DCD添加区では活性が低かったことから、アンモニア態窒素添加が土壌中でのメタン酸化を抑制していることが推察された。施肥形態別では牛ふん堆肥区で無添加条件でのメタン酸化活性が最大で、化学肥料区が最小であった。土壌タイプ別では淡色黒ボク土=腐植質黒ボク土>暗赤色土>褐色森林土>砂丘未熟土の順であった。褐色森林土および砂丘未熟土を除く6土壌では(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>添加区でアンモニア態窒素が速やかに減少し、硝酸態窒素が増加したことから硝化作用が活発であることが示唆された。

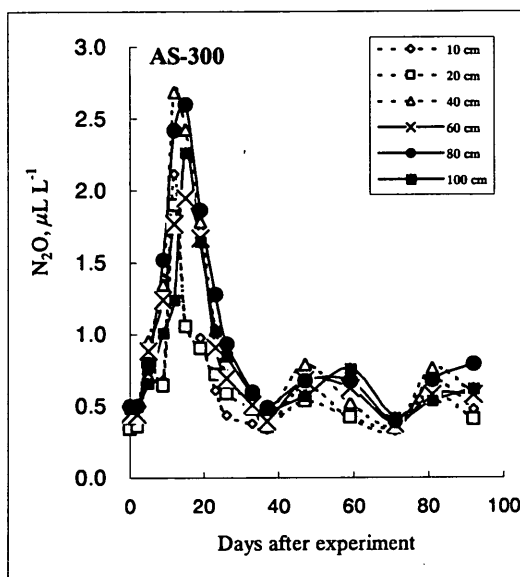


図6 黒ボク土壌深さ別部位における $N_2O$ 生成量の施肥後の経時的変化(硫安区)

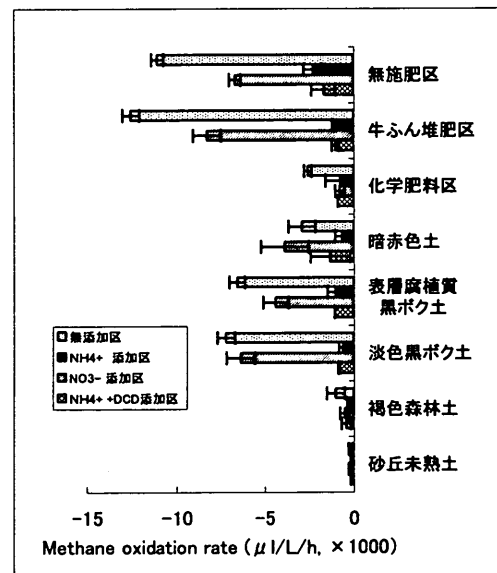


図7 無機態窒素とDCDを添加した5種類の土壌および3処理区の $CH_4$ 酸化活性

ウ. 平均メタン吸収速度は窒素肥料施用の影響が認められ、肥料形態別では無施肥区、牛ふん堆肥区、化学肥料区でそれぞれ-0.77、-0.64、-0.5 mg C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であり化学肥料区、牛ふん堆肥区は

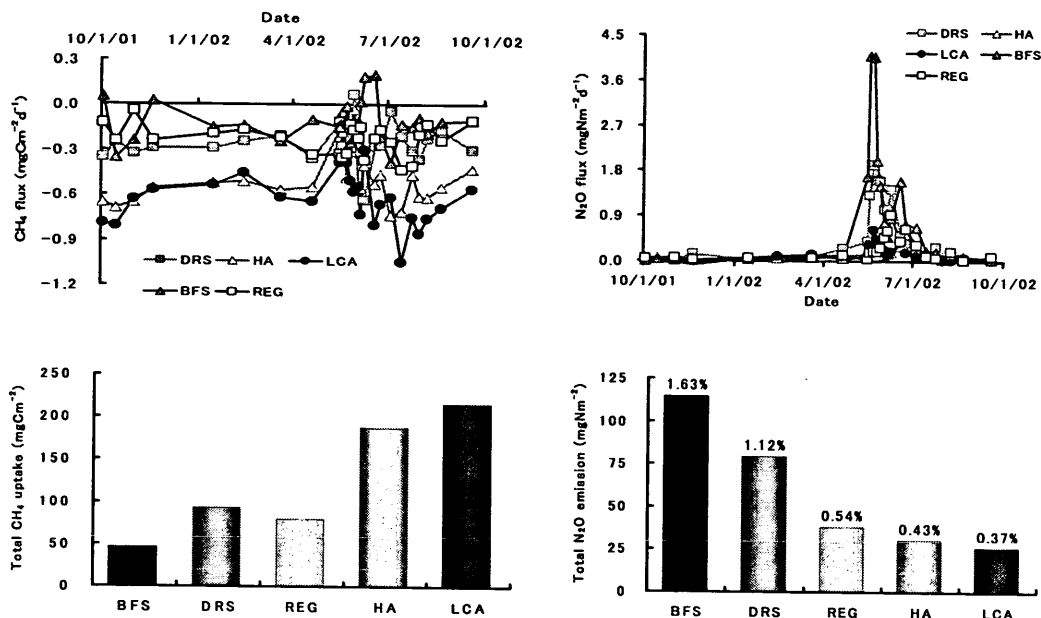


図8 5種類の土壌へのメタン吸収速度の季節変化(左上)と年間吸収量(左下)、および亜酸化窒素放出速度の季節変化(右上)と年間吸収量(右下): BFS, 褐色森林土; DRS, 暗赤色土; REG, 砂丘未熟土; HA, 表層腐植質黒ボク土; LCA, 淡色黒ボク土

無施肥区の65、83%の吸収速度であった。土性別では表層腐植質黒ボク土、淡色黒ボク土、暗赤色土、褐色森林土、砂丘未熟土でそれぞれ-0.5、-0.61、-0.25、-0.23、-0.12 mg C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった(図8)。4月下旬の施肥後、約3週間にわたりメタン吸収速度はその前と比較して減少し、N<sub>2</sub>O放出量は施肥直後から増加した。これは土壌中のアンモニア態窒素量の減少速度からみた硝化の期間とほぼ一致していた。その後は土壌水分および気温、気相率といった土壌物理性の変化と対応していた。また、11月~2月にかけてのメタン吸収速度の減少は地温や気温の低下による微生物活性の低下が原因であると推察された。積算N<sub>2</sub>O発生量は肥料形態別では化学肥料区、牛ふん堆肥区、無施肥区でそれぞれ93.58、80.17、34.92 mg N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であり、化学肥料区、牛ふん堆肥区は施肥窒素量の0.62、0.53%に相当した。土性別では暗赤色土、表層腐植質黒ボク土、淡色黒ボク土、褐色森林土、砂丘未熟土でそれぞれ78.7、30.1、25.9、114.2、37.6 mg N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であり、施肥窒素量の1.12、0.43、0.37、1.63、0.54%であった(図8)。これらの結果から亜酸化窒素放出量が多いほどメタン吸収量は少ない関係が見出された。施肥形態別にも同様な関係が見出され、亜酸化窒素放出を抑制する技術は同時にメタン吸収を促進させることが示唆された。

## (2) わが国の農耕地からのN<sub>2</sub>O発生量の推定手法の開発

### (2)-① プロセスモデルの適用の検討

図9は、灰色低地土における実測とDNDCモデル予測値の推移の例を示す。地温、土壌水分、土壌硝酸態窒素、作物の炭素同化・窒素吸収量、N<sub>2</sub>O発生、および土壌呼吸はその季節的推移と大きさについて、実測値と予測値は比較的良く一致した。図10は、黒ボク土における実測とDNDCモデル予測値の推移を示す。灰色低地土と同様に、地温、土壌水分、土壌硝酸態窒素、作物の炭素同化・窒素吸収量は季節的推移と大きさについて比較的良い一致が認められた。しかしながら、N<sub>2</sub>O発生については、積算放出量の予測値は実測値と比較して10倍以上大きく、

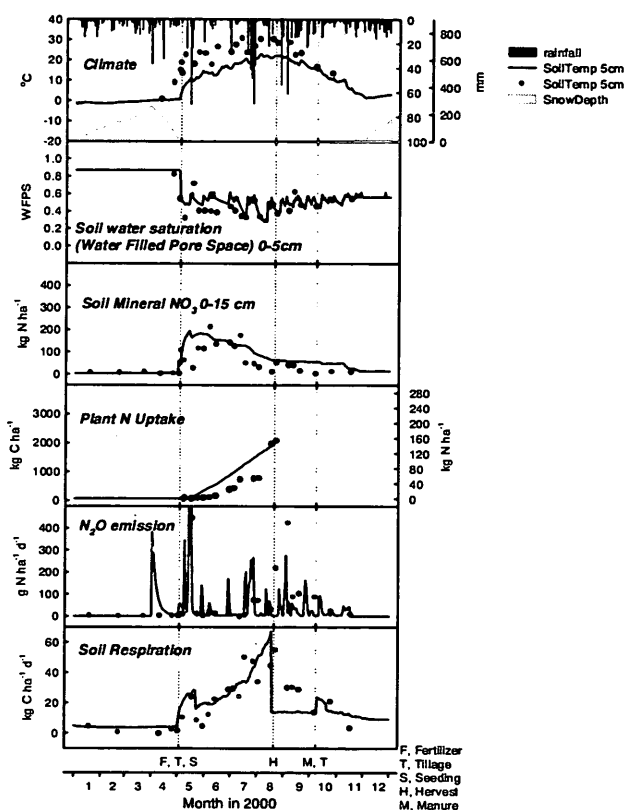


図9 灰色低地土タマネギ畑における実測とDNDCモデルによる予測：上段から、気象（降水、地温（予測値と実測値）、積雪深さ（予測値））、土壌水分、土壌硝酸性窒素、タマネギの窒素吸収、 $N_2O$ 発生、土壌呼吸の推移。点が実測値であり、線がモデルによる予測値である。

F値の初期設定を0.02としている。図11の結果から、この値をそのまま非黒ボク土に適用するには問題があると思われる。

そこで、モデル開発者であるLi教授の協力を得て、DNDCモデル内のF値の初期値を任意に変更できるようにモデルを試験的に変更した。その上で上記の黒ボク土について、再度モデルによって予測を行った。その結果のまとめを図12に示す。F値を変化させることで、実測値とモデル値の $N_2O$ 発生量の乖離は著しく小さくなった。また、図には示さないが、フラックスの季節変化も良く一致するようになった。なお、土壌水分、土壌中硝酸性窒素、作物の窒素吸収・炭素同化量はF値を変化させてもほとんど影響されなかった。以上の結果から、本モデルを黒ボク土に適用するための改良には、黒ボク土固有の特性（ここでは、全炭素に占める微生物炭素の比）を組み込む必要が示された。なお、上記の結果から、DNDCモデルの最新バージョンでは、上記のF値が任意に変更できるように改良された。

季節的推移も一致しなかった。

黒ボク土は日本の畑地面積の半分以上を占めるため、上記の不一致は看過できない。黒ボク土は特有な理化学的性質を持つことが知られており、このことが何らかの原因である可能性がある。上の結果において、土壌水分について実測値と予測値は比較的良い一致を示したこと、また土壌の化学性（土壌有機炭素含量やpH）についてはモデルに入力済みであることから、上記の不一致の原因として土壌の物理性ならびに化学性は主要因ではないように見える。

そこで、黒ボク土における土壌微生物バイオマスに着目した。土壌微生物バイオマスは、有機物分解サブモデル内で重要な位置を占めること、さらに土壌微生物バイオマスの一部が硝化菌・脱窒菌を構成することが、着目した理由である。

図11は、土壌炭素含量(SOC)と土壌微生物バイオマス炭素含量(MBC)について、既往の文献をレビューした結果を示す。土壌有機炭素に対する土壌バイオマス炭素の比(F値

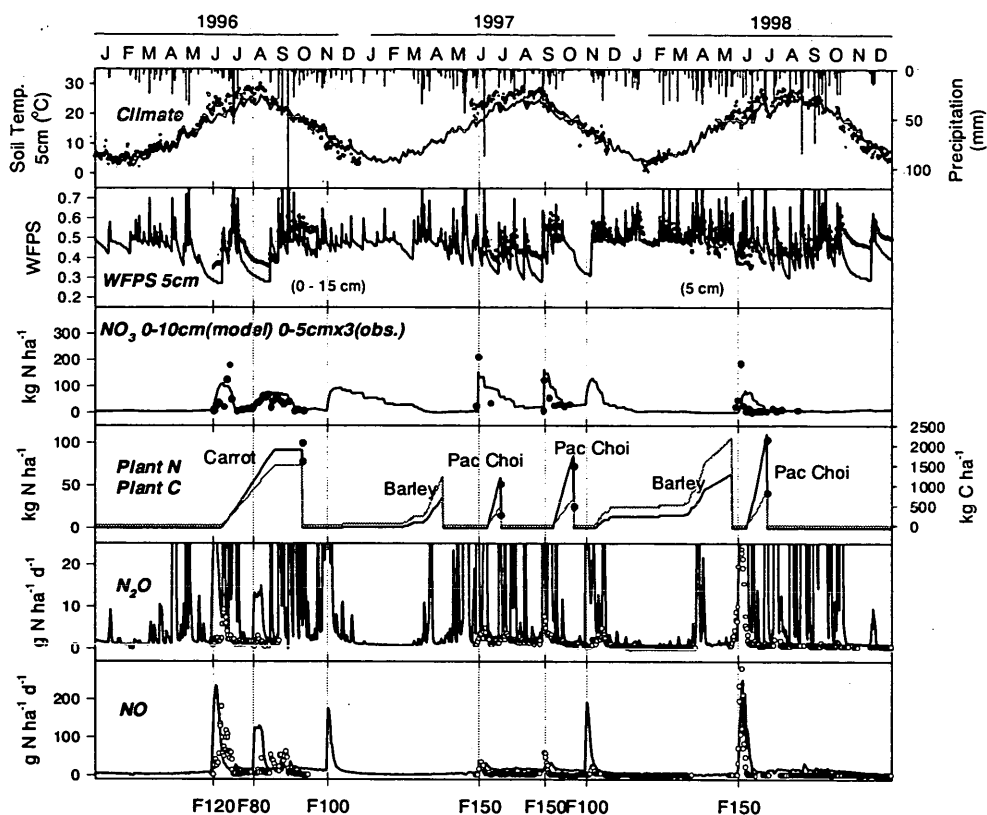


図 10 黒ボク土野菜畑における実測と DNDC モデルによる予測：上段から、気象（降水量，地温（予測値と実測値）），土壌水分，土壌中硝酸性窒素，作物（ニンジン，コムギ，チンゲンサイ）の窒素吸収・炭素同化量， $N_2O$  発生量，および  $NO$  発生量である。横軸下の数値は，窒素肥料の施与とその量 ( $kg N ha^{-1}$ ) を示す。

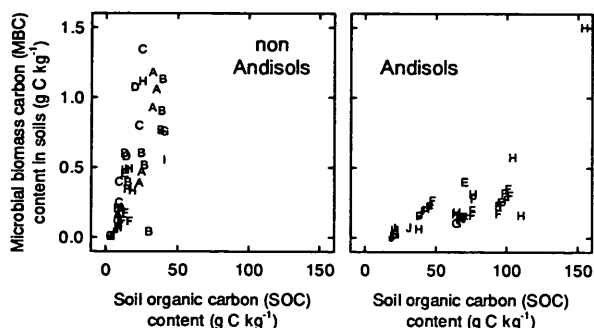


図 11 土壌有機体炭素含量 (SOC) と土壌微生物バイオマス炭素含量 (MBC) の関係。左図が非黒ボク土，右図が黒ボク土。図中の記号はそれぞれ以下の参考文献のデータである：A<sup>32)</sup>，B<sup>33)</sup>，C<sup>34)</sup>，D<sup>35)</sup>，E<sup>36)</sup>，F<sup>37)</sup>，G<sup>38)</sup>，H<sup>39)</sup>，I<sup>40)</sup>，J<sup>41)</sup>。

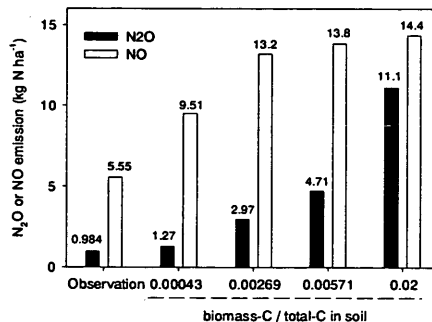


図 12 黒ボク土野菜畑における（1996～1998 年のうち実測期間）の積算  $N_2O$ ・ $NO$  発生量（左端），および土壌有機炭素含量に占める土壌微生物バイオマス炭素含量の比 ( $F = MBC/SOC$ ) を変化させて DNDC モデルを行った結果。



今後、日本において DNDC モデルを用いて畑地土壌からの温室効果ガス発生広域予測を行うために必要と思われる点を以下に挙げる。

#### モデル適用の妥当性検証の積み重ね

本研究では、上記 2 地点についてのみの検証であった。それら以外の地点において、さらに実測とモデル予測を比較し、モデル適用の妥当性検証を積み重ねる必要がある。

##### 1) 黒ボク土の土壌物理性をモデルに組込むこと

上述したように、土壌水分の実測値と予測値に比較的良い一致が認められたことから、土壌の物理性が黒ボク土の不一致の主要因ではないとした。しかしながら、一般的に黒ボク土の物理性、とくに透水係数ならびに水分保持特性は、非黒ボク土と異なっていることは一般的に良く知られている。今回は、たまたま土壌水分に大きな不一致が認められなかっただけかもしれない。よって、黒ボク土の物理性をモデルに組み込む必要性は高いと思われる。そのために、既存の耕地土壌物理性のデータを収集・整理し、DNDC に入力する物理性の項目（土性、容積重など）から、透水係数ならびに水分保持特性を予測できるようにすることが必要であろう。

##### 2) 黒ボク土における生物化学性の情報収集

上記の結果では、土壌有機炭素に対する土壌バイオマス炭素の比（F 値）が重要であった。しかし、広域予測を実際に行う場合、F 値の設定をどの程度にすべきか現時点では明らかでない。この点を検討する必要がある。さらに、土壌有機物画分の分解特性やイオン等の吸着特性についても、検討する必要があるかもしれない。

##### 3) 作物生育パラメータの整備

これまで各地域で蓄積された作物の標準的な生育パターンならびに窒素吸収量を、モデルで正確に再現できるように作物生育パラメータを整備する必要がある。もし、窒素吸収について実測とモデル予測で大きな不一致があれば、それは土壌中の無機態窒素動態予測の大きな不一致となり、ひいては $N_2O$ などの温室効果ガス発生予測の大きな不一致となるため、この点は重要である。

#### (2)・② 既存の実測および統計データからの推定

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の年間総量は、各 535、393 Gg N と推定された。また、畑地に投入された化学窒素肥料による  $N_2O$  発生量は、各 3.87、2.78 Gg N yr<sup>-1</sup> と推定され（表 5）、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 0.88、0.36 Gg N yr<sup>-1</sup> と推定された。これらから、日本全体での農地（畑地と水田）からの  $N_2O$  発生量は、7.89 Gg N yr<sup>-1</sup> (12.4 Gg  $N_2O$  yr<sup>-1</sup>) と推定された。

この手法には多くの仮定が含まれており、それらを、今後の調査研究で改善し、さらによりよい推定手法を開発する必要がある。そこで、今後の主な研究課題を、次に示した。

(a) 畑地および水田へ投入された化学窒素肥料と有機質資材の総量を的確に把握すること。上記の推定手法で得られたこれらの総投入量は、既存の資料とは異なっているので、さらに、農家での使用実態を反映した投入量を推定する必要がある。

(b) 有機質資材の投入により発生する  $N_2O$  の発生割合とその要因を明らかにすること。この調査は非常に少ないので、さらに、土壌タイプ、作物別に調査研究が必要である。

(c) 水田からの  $N_2O$  の発生割合とその要因を明らかにすること。水田における年間発生量に関する調査例が非常に少ないので、化学窒素肥料および有機質資材を投入した水田において、年間に

表5 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 N<sub>2</sub>O 発生量

作物	面積 ha	N施肥量 kgN/10a	N総投入量 kgN	排出係数 N <sub>2</sub> O-N/N	総発生量 kgN <sub>2</sub> 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
花き	24,100	20.90	5,036,900	0.00730	36,769
合計	2,769,850		395,282,450		3,873,609
畑排出係数					0.0098
水稲	1,793,000	7.79	139,674,700	0.00627	875,760
畑+水稲					0.0089

わたる調査研究が必要である。

(d) 作物残さの投入、および作物の窒素固定による N<sub>2</sub>O の発生量を推定すること。これらについての調査研究は非常に少ないが、その数少ない調査例によれば、作物残さの投入による N<sub>2</sub>O の発生量は無視できないと思われるので、今後、さらに研究を行う必要がある。

(e) 農耕地からの N<sub>2</sub>O 発生量だけでなく、CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> 発生量も測定し、地球温暖化ポテンシャルを用いて CO<sub>2</sub> 換算した温室効果ガス総発生量を推定すること。

(f) これらの結果と、DNDC モデルなどの結果とを比較検討し、よりよい発生量推定モデルを構築すること。

(g) 以上の発生量推定と発生要因の研究を通して、これまで行われてきた発生量削減技術をさらに開発し、圃場レベルでその可能性を検証すること。

### (3) 不耕起直播栽培水田からの CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の発生

不耕起直播栽培水田と耕起移植栽培水田の通年調査では、1998 年（不耕起直播 7 年目）には耕起移植栽培水田の CH<sub>4</sub> 発生量が多かったが、その後は不耕起直播栽培水田の発生量が多くなった。N<sub>2</sub>O はいずれの年も不耕起直播栽培水田が多かった。なお、CO<sub>2</sub> 等価発生量に換算した CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の合計発生量に占める CH<sub>4</sub> の割合は、不耕起直播栽培水田では 80~91% であるのに対して、耕起移植栽培水田では 95~98% であり、不耕起直播栽培水田の方が耕起移植栽培水田よりも N<sub>2</sub>O の発生割合が大きかった。耕起直播栽培水田の CO<sub>2</sub> 等価発生量は、1998 年と 1999 年の 2 力年の調査結果によると、ちょうど不耕起直播栽培水田と耕起移植栽培水田の中間の値であった（図 13）。

このように、不耕起直播栽培では、不耕起直播継続期間が数年以内は CH<sub>4</sub> の発生が少なかったが、それよりも継続すると耕起移植栽培よりも多くなることがわかった。N<sub>2</sub>O は入水前に施肥するため不耕起直播開始当初から N<sub>2</sub>O の発生が多くなると考えられた。

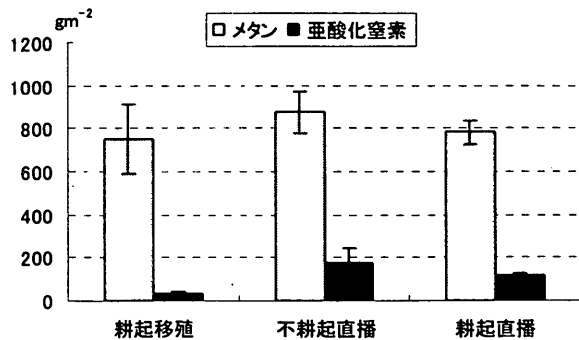


図 1.3 栽培様式別 CO<sub>2</sub> 等価発生量

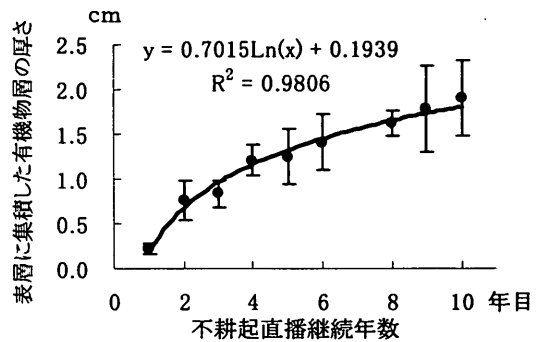


図 1.4 表層有機物層の厚さに及ぼす不耕起直播の継続の影響

稲わらを田面表層に還元する不耕起直播を継続すると、田面表層に有機物が集積し、10年継続で約 20 mm の厚さになった (図 1.4)。不耕起直播 11 年継続後の田面表層 0~5 cm に集積した有機物中の炭素量は  $90 \text{ g C m}^{-2}$  で、耕起移植栽培水田の約 3 倍であり、また、不耕起直播栽培田面表層に集積した有機物中の T-N 量は  $6 \text{ g m}^{-2}$  で、耕起移植栽培水田の数倍が蓄積されていた。田面表層に集積した有機物の C/N 率は不耕起直播栽培水田が約 15、耕起移植栽培水田では約 18 であった。このように、不耕起直播栽培水田は、田面表層に C/N 率が低く窒素含有率が高い有機物が多く集積していた。このことは、これらの集積した有機物は分解されやすく、無機態窒素の供給能が高いことを示していた。

このため、不耕起直播栽培水田の田面表層は CH<sub>4</sub> の基質となる有機物に富み、比較的分解されやすいと考えられることから、入水後は有機物の分解に伴う土壌還元のすみやかな進行とその継続により CH<sub>4</sub> の生成が多くなると考えられた。また、入水初期には、耕起移植栽培では活着期であるのに対して、不耕起直播栽培の水稻では出芽後 20 日以上経過しており、すでに分けつ盛期になろうとしていた。このため水稻の土壌中から大気中への CH<sub>4</sub> の輸送<sup>42)</sup>能力に差があるため、水稻体の大きい不耕起直播栽培水田の CH<sub>4</sub> 発生量が多くなると推察された。一方、N<sub>2</sub>O は水稻播種時の施肥の影響を受け、入水期までの約 30 日間の乾田期間中に N<sub>2</sub>O が発生することと、秋の落水後 10~1 月にかけて、易分解性有機物の分解により無機化してきたアンモニウム態窒素の硝化過程、あるいは、降水後田面表層の有機物層で酸化状態と還元状態が同時に形成されることによる脱窒の影響を受け、N<sub>2</sub>O が発生すると考えられた。

以上論議したように、不耕起直播栽培の開始当初は CH<sub>4</sub> の発生は耕起移植栽培水田より少ないが、不耕起直播を数年以上継続すると、反対に CH<sub>4</sub> の発生が多くなることが明らかとなった。このため、不耕起直播栽培を数年継続すると一旦耕起移植栽培に戻す必要がある。その際、表層に集積した稲わら由来の有機物を鋤込むことになるため、CO<sub>2</sub> 等価発生量が多くなることが懸念された。そこで、不耕起直播栽培を耕起移植栽培に転換したときの CH<sub>4</sub> 発生量は稲わらの入水直前鋤込みでは耕起移植転換水田の CH<sub>4</sub> 発生量が 2 割程度多くなったが、1 月鋤込みでは反対に 2 割程度少なくなった。1 月鋤込みでは入水までに稲わらの分解が進んだためと考えられた (表 6)。

表 6 不耕起直播から耕起移植栽培に転換したときの CH<sub>4</sub> 発生量

処理	稲わら用量及び 鋤込み時期	メタン 発生量 gCH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> 期間 <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> 等価 発生量 gCm <sup>-2</sup> 期間 <sup>-1</sup>
不耕起直播継続*	770gm <sup>-2</sup>	46.3	972
耕起移植転換*	同上 2001/1/13 鋤込み	37.1	778
不耕起直播継続**	600gm <sup>-2</sup>	45.7	960
耕起移植転換**	同上 2001/6/27 鋤込み	54	1134

注: \* 精密圃場 \*\* 枠圃場(3×3m)

期間: 上段2区 2001.5~2002.1、下段2区 水稻作付け期間

(4) 中国の畑地、草地、水田、および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O の発生・吸収量の解明

(4)-① 畑地および水田からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の解明

年間を通して常時湛水した圃場では、冬期の休閑期も CH<sub>4</sub> が発生し、また、その後の水稻栽培期間中の CH<sub>4</sub> 発生量は、冬期に作物を栽培して排水させた圃場よりも多かった (図 15)。一方、水平栽培圃場での年間 CH<sub>4</sub> 発生量は、冬期に排水させた処理区では冬期も湛水していた区よりも 67% も減少し、また、年間常時湛水している圃場でも、水平栽培から畝間栽培では水平栽培よりも 33% 減少した。これらから、冬期も排水条件が悪い長江以南の水田地帯で、冬期に排水することができれば年間 CH<sub>4</sub> 発生量を大巾に削減できることが示唆された。

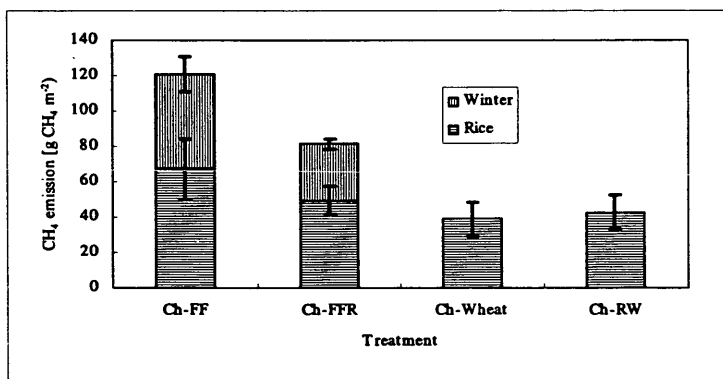


図 15 中国南西部の重慶における 4 処理区 (表 1 参照) の水田からの年間 CH<sub>4</sub> 発生量 (1995-2000 年の平均値: Winter は冬期、Rice は水稻栽培期間中の CH<sub>4</sub> 発生量)

鷹潭における畑地からの N<sub>2</sub>O 発生に関する調査によれば、年間の投入窒素量に対する N<sub>2</sub>O の発生割合は、休閑陸稻、菜の花 南京豆、そらまめ一大豆の 3 処理区で、それぞれ 0.13、0.22、0.40% と小さかった。このおもな原因は、土壌が酸性 (pH4.8) なので硝化等の微生物活動が抑制されたためと推測された。また、施肥窒素による N<sub>2</sub>O 発生割合は、夏期の豆科作物のほうが非豆科作物よりも大きく、さらに年間に栽培する豆科作物の数が増えると増加した。これらから、畑地からの N<sub>2</sub>O 発生要因として、窒素肥料の投入だけ

でなく、窒素固定を行う豆科作物も考慮する必要があることが明らかになった。

(4)-② 草地および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の解明

中国東北部の草地の 2 地点、松嫩 (Songnen) および科爾沁 (Kerqin) での 3 年間の調査結果から、それぞれの調査地点における年間 N<sub>2</sub>O 発生量は 0.45~1.18、および 0.17~0.26 kg N ha<sup>-1</sup> と見積もられた。N<sub>2</sub>O 発生量の変動には、松嫩試験地における初夏の急激な土壌水分と温度の変

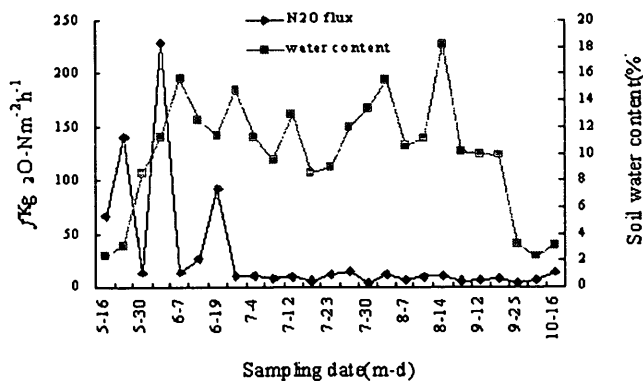


図16 中国吉林省松嫩調査地における2002年のN<sub>2</sub>Oフラックス調査結果。調査期間(5-10月)におけるフラックスと土壌水分の季節変動を示す

表7. 中国東北部の2地点の草地におけるN<sub>2</sub>OとCH<sub>4</sub>フラックス調査結果

Site	Year	N <sub>2</sub> O flux			Annual flux* (kg N ha <sup>-1</sup> )	Measurement period (days)
		Range (μg N m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Average			
Songnen	2000	4.6 - 258.3	41.1	1.18	120	
	2001	-4.1 - 40.7	11.0	0.45	130	
	2002	4.1 - 228.8	29.6	1.06	133	
Kerqin	2000	1.6 - 18.3	7.9	0.26	141	
	2001	-0.8 - 21.5	4.7	0.17	136	
	2002	-0.1 - 12.0	4.4	0.21	150	

Site	Year	CH <sub>4</sub> flux			Annual flux* (kg C ha <sup>-1</sup> )	Measurement period (days)
		Range (μg C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Average			
Songnen	2001	-41 - 149	31.9	1.48	130	
	2002	-165 - 1146	-20.0	-1.03	133	
Kerqin	2001	-3 - 200	85.0	3.48	136	
	2002	-98 - 159	136.8	5.69	150	

\* Assuming the ratio of wintertime fluxes to the fluxes measured as 20%.

化など、環境要因が強く影響していることが示された(図16)。また、それぞれの調査地点における年間CH<sub>4</sub>発生量は-1.03~1.48、および3.48~5.69 kg C ha<sup>-1</sup>と見積もられ、N<sub>2</sub>O発生とCH<sub>4</sub>発生あいだにトレードオフ関係が認められた(表7)。

三江平原の湿地からの暖候期のCH<sub>4</sub>発生量は、2年間平均で64.4 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup>であり、世界の自然湿地や水田からの平均発生量より多かった。この湿地でのCH<sub>4</sub>発生を制御している主な要因は、常に湛水している土壌表面からの水位と推測された。一方、湿地が畑地に変化すると、もはやCH<sub>4</sub>は発生しなくなり、逆に大気中のCH<sub>4</sub>が畑土壌表面に吸収されるが、そのCH<sub>4</sub>吸収速度は、農耕地としての経年数および肥料として投入される窒素量の増加とともに、減少した。

#### (5) インドにおけるバイオマス燃焼による温室効果ガス排出の解明

3地域で測定したCO<sub>2</sub>濃度に対する各ガス濃度の比(モル比)の平均値は、8.75x10<sup>-2</sup>(CO)、8.00x10<sup>-3</sup>(CH<sub>4</sub>)、2.52x10<sup>-4</sup>(N<sub>2</sub>O)、1.15x10<sup>-5</sup>(CH<sub>3</sub>Cl)、1.17x10<sup>-6</sup>(CH<sub>3</sub>Br)、1.73x10<sup>-7</sup>(CH<sub>3</sub>I)であった。これらの値は、IPCCの排出係数で使用されている熱帯アフリカや熱帯アメリカのブラジルでの値よりも、CH<sub>3</sub>ClとCH<sub>3</sub>Iを除いて、大きかった。この原因は、他の熱帯地域にくらべて不完全燃焼の度合いが大きいこと、また、植物の種類が異なることによる、などと推測された。これらから、熱帯アジアの主要なバイオマス燃焼による温室効果ガスの排出係数を求め、総発生量を推定する必要があることが明らかになった。

#### 5. 本研究により得られた成果

本研究の目的は、N<sub>2</sub>O発生を中心に、アジア諸国に展開する各種の農耕地からのGHG発生要因を明らかにするとともに、その発生量推定手法を開発し、インベントリーの精緻化を進めることであった。

これに対し、北海道の灰色低地土と草地、および施設栽培での測定からは、わが国の農耕地からのN<sub>2</sub>O直接発生のインベントリーにおいて、データが欠けていたり、発生量が大きく重要であると考えられていた発生源についての基礎データを得ることができ、わが国のGHG発生インベントリーの精緻化に寄与した。同様に、中国の農耕地やインドでのバイオマス燃焼など、世界の

GHG 発生インベントリーの精緻化に大きく貢献するデータを得ることができた。

さらに、GHG 発生の広域評価に有効なプロセスモデル (DNDC モデル) をわが国の農耕地への適用のために改良すると同時に、既存のデータを用いた経験モデルによるわが国の農耕地からの N<sub>2</sub>O 発生量の推定を試みるなど、発生量の広域評価と推定の手法を改良・開発した。

一方、土壌中での N<sub>2</sub>O 発生と CH<sub>4</sub>酸化など、微生物活性の関係するプロセスに対する新たな知見を与えた。また、水田からのメタン発生抑制技術の一つであると考えられていた不耕起栽培の有効性と制御技術としての限界を定量的に明らかにした。

## 6. 引用文献

- 1) IPCC: Climate change 1994, radiative forcing of climate change, Cambridge University Press (1995).
- 2) IPCC: Climate change 2001, the scientific basis, Cambridge university press (2001a).
- 3) IPCC: Climate change 2001, mitigation, Cambridge University Press (2001b).
- 4) 環境省: 温室効果ガス排出量算定方法検討会: 温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果 (2002).
- 5) McAuliffe C: GC determination of solutes by multiple phase equilibration. *Chem. Technol.*, **1**, 46-51 (1971)
- 6) Webster, R.: Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, **3**, 1-70 (1985)
- 7) Boyer, D. G., Wright, R. J., Feldhake C.M. and Bligh, D.P.: Soil spatial variability relationships in a steeply sloping acid soil environment. *Soil Sci.*, **161**, 278-287 (1996)
- 8) Mallants, D., Mohanty, B.P., Jacques, D. and Feyenm J.: Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.*, **161**, 167-181 (1996)
- 9) Li, C.: Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutr. Cycling Agroecosys.*, **58**, 259-276 (2000)
- 10) Li, C. et al.: Comparing a process-based agro-ecosystem model to the IPCC methodology for developing a national inventory of N<sub>2</sub>O emissions from arable lands in China. *Nutr. Cycling Agroecosys.*, **60**, 159-175 (2001)
- 11) 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)
- 12) 農林水産省統計情報部: 平成 11 年—耕地および作付面積統計(A) (2002)
- 13) 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 13 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 (2002)
- 14) (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)
- 15) 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)
- 16) Akiyama, H. and H. Tsuruta: N<sub>2</sub>O, NO, and NO<sub>2</sub> fluxes from soils after the application of different kinds of manure and urea, *J. Environ. Qual.*, **32**, 423-431 (2003)
- 17) Tsuruta, H., K. Kanda and T. Hirose: Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan, *Nutr. Cycling Agroecosys.*, **49**, 51-58 (1997)

- 18) 鶴田治雄：CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 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)
- 19) 八木一行・鶴田治雄・陽捷行：CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O フラックス測定マニュアル、農業環境技術研究所資料・生態管理科研究集録、6、105-112 (1990)
- 20) Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., Cleemput, O.: Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **52**, 225-248 (1998)
- 21) Lipschultz, F, Zafirou, O.C., Wofsy, S.C., McElroy, M., Valois, F.W., and Watson, S.: Production of NO and N<sub>2</sub>O by soil nitrifying bacteria. *Nature*, **294**, 641-643 (1981)
- 22) 阪田匡司・波多野隆介・佐久間敏雄：粘土質コムギ畑の土壤呼吸における根と微生物呼吸の寄与、*土肥誌*, **67**, 133-138 (1996)
- 23) Hu, R., Kusa, K., and Hatano, R.: Soil respiration and methane flux in adjacent forest grassland and cornfield soils in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **47**, 621-628 (2001)
- 24) Ball, B.B., Horgan, G.W., Clayton, H., and Parker, J.P.: Spatial variability of nitrous oxide fluxes and controlling soil and topographic properties. *J. Environ. Qual.*, **26**, 1399-1409 (1997)
- 25) Remde, A. and Conrad, R.: Role of nitrification and denitrification for no metabolism in soil. *Biogeochem.*, **12**, 189-205 (1991)
- 26) 渋谷岳・木村武・山本克巳・野中邦彦：草地における温室効果微量ガスの排出係数、*草地飼料作研究成果最新情報*、**10**, 41-42 (1995)
- 27) 中野明正：野菜の施設生産における土壤ストレス緩和技術に関する研究。野菜茶研研報, **1**, 181-240 (2002)
- 28) Inubushi, K., Barahoma, M.A., and Yamakawa, K.: Effects of salts and moisture content on N<sub>2</sub>O emission and nitrogen dynamics in Yellow soil and Andosol in model experiments. *Biol. Fertil. Soils*, **29**, 401-407 (1999)
- 29) 鶴田治雄：地球温暖化ガスの土壤生態系との関わり。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。土肥誌, **71**, 554-564 (2000)
- 30) Akiyama, H. and Tsuruta, H.: Effect of chemical fertilizer form on N<sub>2</sub>O, NO and NO<sub>2</sub> fluxes from Andisol field. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **63**, 219-230 (2002)
- 31) 林哲央・日笠裕治：施設栽培における亜酸化窒素発生抑制指針。平成 11 年度北海道農業研究成果情報 (2000)
- 32) Jenkinson, D.S. and Powlson, D.S.: The effect of microbial treatments on metabolism in soil - V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, **8**, 209-213 (1976)
- 33) Jenkinson, D.S., Davidson, S.A., and Powlson, D.S.: Adenosine triphosphate and microbial biomass in soil. *Soil Biol. Biochem.*, **11**, 521-527 (1979)
- 34) Marumoto, T., Anderson, J.P.E., and Domsch, K.H.: Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, **14**, 469-475 (1982)
- 35) Marumoto, T.: Mineralization of C and N from microbial biomass in paddy soil. *Plant and Soil*, **76**, 165-173 (1984)

- 36) Marumoto, T.: Turnover of microbial nitrogen in rhizosphere soil of upland crops. *In* 17th ICSS Transaction, Vol. III, 49–54, Kyoto, Japan (1990)
- 37) Sakamoto, K. and Oba, Y.: Relationship between the amount of organic material applied and soil biomass content. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **37**, 387–397 (1991)
- 38) Guan, G., Sakamoto, K., and Yoshida, T.: The relationship between the amount of microbial biomass-N/C and physicochemical properties of soil. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **67**, 1–6 [in Japanese with English abstract] (1996)
- 39) Guan, G., Marumoto T., Shindo, H., and Nishiyama, M.: Relationship between the amount of microbial biomass and physicochemical properties of soil – Comparison between volcanic and non-volcanic ash soils –. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **68**, 614–621 [in Japanese with English abstract] (1997)
- 40) Sakamoto, K. and Hodono, N.: Turnover time of microbial biomass carbon in Japanese upland soils with different texture. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **46**, 483–490 (2000)
- 41) Goyal, S., Sakamoto, K., and Inubuhi, K.: Microbial biomass and activities along and Andosol profile in relation to soil organic matter level. *Microbes and Environments*, **15**, 143–150 (2000)
- 42) 犬伏和之・堀謙三・松本聡・梅林正直・和田秀徳：水稲体を経由したメタンの大気中への放出、*土肥誌*、**60**, 318-324 (1989)

## 7. 国際共同研究等の状況

本課題「(4) 中国の畑地、草地、水田、および湿地からの CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O の発生・吸収量の解明」において、中国科学院の南京土壤研究所(Prof. Cai, Zucong)および同瀋陽応用生態研究所(Prof. Chen, Guanxiong)のグループと共同で現地試験やデータ解析を行った。また、「(5) インドにおけるバイオマス燃焼による温室効果ガス排出の解明」において、インド国立物理学実験所(Prof. A.P. Mitra, Dr. P.Gupta)のグループと燃焼実験やデータ解析を行った。これらの共同研究は、IGBP のコアプロジェクトの一つである IGAC の一環として、各種国際会議で成果を発表したり、世界のほかの研究機関や関連する研究者との連携を持ちつつ実施した。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- 1) H. Akiyama, H. Tsuruta, and T. Watanabe: *Chemosphere-Glob. Change Sci.*, **2**, 313-320 (2000)  
“N<sub>2</sub>O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers”
- 2) A. Hou, H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo, and H. Tsuruta: *Chemosphere-Glob. Change Sci.*, **2**, 321-327 (2000)  
“Effects of urea form and soil moisture on N<sub>2</sub>O and NO emissions from Japanese Andosols”
- 3) Y. Hosen, H. Tsuruta, and K. Minami: *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **57**, 83-98 (2000)  
“Effects of the depth of NO and N<sub>2</sub>O production in soil on their emission rates to the atmosphere: Analysis by a simulation model”
- 4) 鶴田治雄：*土肥誌*、**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」

- 5) Z.C. Cai, H. Tsuruta, and K. Minami: *J. Geophys. Res.*, 105, 17231-17242 (2000)  
“Methane emission from rice paddy fields in China: I. Measurements and influencing factors”
- 6) H. Xu, Z.C. Cai, Z.J. Jia, and H. Tsuruta: *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 58, 327-332 (2000)  
“Effects of land management in winter crop season on CH<sub>4</sub> emission during the following and rice-growing period”
- 7) H. Xu, Z.C. Cai, X.P. Li, and H. Tsuruta: *Aust. J. Soil Res.*, 38, 1-12 (2000)  
“Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH<sub>4</sub> emission from rice cultivation”
- 8) R. Hu, K. Kusa, and R. Hatano: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47, 621-628 (2001).  
“Soil respiration and methane flux in adjacent forest grassland and cornfield soils in Hokkaido, Japan”
- 9) 石橋英二、赤井直彦、大家理哉、沖和生：土肥誌，72, 535-541 (2001)  
「水稻の不耕起乾田直播栽培が温室効果ガス発生に及ぼす影響，第1報 不耕起乾田直播栽培の継続と酸化還元電位の関係」
- 10) 石橋英二、赤井直彦、大家理哉、石井俊雄、鶴田治雄：土肥誌，72, 542-549 (2001)  
「水稻の不耕起乾田直播栽培が温室効果ガス発生に及ぼす影響，第2報 不耕起乾田直播栽培の継続とメタン発生量の関係」
- 11) 石橋英二、赤井直彦、山本章吾、石井俊雄、沖和生：土肥誌，72(6), 807-811 (2001)  
「不耕起乾田直播水田土壌の特徴と生産力」
- 12) Z.C. Cai, H. Tsuruta, X. Rong, H. Xu, and Z.P. Yuan: *Biogeochem.*, 56, 75-91 (2001)  
“CH<sub>4</sub> emission from rice paddies managed according to farmer’s practice in Hunan, China”
- 13) V.K. Prasad, K.V.S. Badrinath, P.K. Gupta, C. Sharma, A.P. Mitra, S. Sudo, S. Yonemura, and H. Tsuruta: *Asian J. Energy Environ.*, 2, 273-303 (2001)  
“Methyl halide emissions from Biomass Burning of Tropical Secondary Mixed Deciduous Forests of Eastern Ghats of India”
- 14) X. Li, K. Inubushi, and K. Sakamoto: *Biol. Fertil. Soils*, 35, 108-113 (2002)  
“Nitrous oxide concentrations in an Andisol profile and emissions to the atmosphere as influenced by the application of nitrogen fertilizers and manure”
- 15) K. Kusa, T. Sawamoto, and R. Hatano: *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 63, 239-247 (2002)  
“Nitrous oxide emissions for six years from a gray lowland soil cultivated with onions in Hokkaido, Japan”
- 16) T. Sawamoto, K. Kusa, R. Hu, and R. Hatano: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 48, 433-440 (2002)  
“Dissolved N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in pipe drainage, seepage and stream water in a livestock farm in Hokkaido, Japan”
- 17) R. Hu, R. Hatano, K. Kusa, and T. Sawamoto.: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 48, 797-804 (2002)  
“Effect of nitrogen fertilizer on methane flux in a structured clay soil cultivated with onion in central Hokkaido, Japan”
- 18) I.P. McTaggart, H. Akiyama, H. Tsuruta, and B.C. Ball: *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 63, 207-217 (2002)

- “Influence of soil physical properties and fertiliser type on N<sub>2</sub>O and NO emissions from nearly saturated Japanese upland soils”
- 19) H. Akiyama and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys., 63, 219-230 (2002)  
“Effect of chemical fertilizer form on N<sub>2</sub>O, NO and NO<sub>2</sub> fluxes from Andisol field”
  - 20) W. Cheng, Y. Nakajima, S. Sudo, H. Akiyama, and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys., 63, 231-238 (2002)  
“N<sub>2</sub>O and NO emissions from a field of Chinese cabbage as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers”
  - 21) Y. Hosen, K. Paisancharoen, and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys., 63, 197-206 (2002)  
“Effects of deep application of urea on N<sub>2</sub>O and NO emissions from an Andisol”
  - 22) Z.Q. Xiong, G.X. Xing, H. Tsuruta, G.Y. Shen, S.L. Shi, and L.J. Du: Soil Sci. Plant Nutr., 48, 539-546 (2002)  
“Field study on nitrous oxide emissions from upland cropping systems in China”
  - 23) W.X. Ding, Z.C. Cai, H. Tsuruta, and X.P. Li: Atmos. Environ., 36, 5149-5157 (2002)  
“Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in Northeast China”
  - 24) T. Sawamoto, K. Kusa, R. Hu, and R. Hatano: Soil Sci. Plant Nutr., 49, 31-38 (2003)  
“Dissolved N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from subsurface-drainage in a structured clay soil cultivated with onion in Central Hokkaido, Japan”
  - 25) Z.C. Cai, H. Tsuruta, M. Gao, H. Xu, and C. Wei: Glob. Change Biol., 9, 1-9 (2003)  
“Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field”
  - 26) H. Akiyama and H. Tsuruta: J. Environ. Qual., 32, 423-431 (2003)  
“N<sub>2</sub>O, NO, and NO<sub>2</sub> fluxes from soils after the application of different kinds of manure and urea”
  - 27) A.X. Hou and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys., 65, 191-200 (2003)  
“Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: effect of urea type, placement, and crop residues”
  - 28) W.X. Ding, Z.C. Cai, H. Tsuruta, and X.P. Li: Chemosphere, 51, 167-173 (2003)  
“Key factors affecting spatial variation of methane emissions from freshwater marshes”
  - 29) W.X. Ding, Z.C. Cai, H. Tsuruta, and X.P. Li: Atmos. Environ. (in press)  
“Diel variation in methane emissions from the stands of *Carex lasiocarpa* and *Deyeuxia angustifolia* in a cool temperate freshwater marsh”
  - 30) I.P. McTaggart and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys. (in press)  
“The influence of controlled-release fertilisers and the form of applied fertiliser nitrogen on nitrous oxide emissions from a Japanese andisol under arable cultivation”
  - 31) Z.Q. Xiong, G.X. Xing, H. Tsuruta, G.Y. Shen, and S.L. Shi: Nutr. Cycl. Agroecosys. (in press)  
“Nitrous oxide emissions under milk vetch/fallow-double rice cropping system”
  - 32) B. Huang, G. Chen, G. Huang, and H. Tsuruta: Nutr. Cycl. Agroecosys. (in press)  
“Nitrous oxide emission from temperate grassland of China”
  - 33) W.X. Ding, Z.C. Cai, and H. Tsuruta: Glob. Biogeochem. Cycle (accepted)  
“Cultivation, nitrogen fertilization and set-aside effects on methane uptake in a drained marsh soil in Northeast China”

<学術誌（査読なし）>

- 1) H. Tsuruta, and H. Akiyama: in Proceedings of Second International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation, Noordwijkerhout, The Netherlands, 8-10 Sep. 1999, 277-282 (2000)  
“NO and N<sub>2</sub>O emissions from upland soils with the application of different types of nitrogen fertilizer”
- 2) 犬伏和之：再生と利用、92、(2001)  
「下水汚泥コンポストの施用と亜酸化窒素ガスの消長」
- 3) H. Tsuruta: a paper for 17<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand, [in CD-R] (2002)  
“Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields”
- 4) S. Otake, Y. Furukawa, K. Inubushi, M. Ali, A.M. Itang, and H. Tsuruta: in Researches related to the UNESCO’s Man and the Biosphere Programme in Japan 2001-2002, Japanese Coordinating Committee for MAB, 32-37 (2002)  
“Factors influencing methane emission from wetland peat soils”

<書籍>

- 1) 鶴田治雄：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)  
「窒素揮散と施肥管理」
- 2) 鶴田治雄：先端化学シリーズ II「電気化学・光化学・無機固体・環境ケミカルサイエンス」（日本化学会編）、丸善（株）、243-249 (2003)  
「陸域生態系における微量ガスの放出と窒素循環」、

<報告書類等>

- 1) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：農業環境研究成果情報、第 18 集、36-37 (2002)  
「北海道東部の採草地における亜酸化窒素の発生時期および発生量」
- 2) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：平成 13 年度共通基盤研究成果情報 (2002)  
「北海道東部の採草地における亜酸化窒素の発生時期および発生量」
- 3) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：平成 13 年度畜産草地研究成果情報、No.1、253-254 (2002)  
「北海道東部の採草地における亜酸化窒素の発生時期および発生量」
- 4) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：平成 13 年度北海道農業研究成果情報、268-269 (2002)  
「北海道東部の採草地における亜酸化窒素の発生時期および発生量」
- 5) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：平成 13 年度指定試験主要成果情報 (2002)  
「北海道東部の採草地における亜酸化窒素の発生時期および発生量」

(2) 口頭発表

- 1) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫：2000 年度日本土壤肥料学会北海道支部秋季大会（2000）  
「根釧地方のチモシー単播およびチモシー・シロクローバ混播採草地における亜酸化窒素ガスフラックスの推移」
- 2) 細野達夫、細井徳夫：農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会, p. 197 (2001)  
「通気式チャンバー法による施設土壌からの亜酸化窒素フラックスの測定」
- 3) T. Sawamoto, H. Tsuruta, and C. Li: Symposium on Atmospheric Composition Change – Toward the Integration of Observation and Modeling – November 19–20 (2001)  
“Application of DNDC model to simulate of N<sub>2</sub>O and NO emissions from Japanese agricultural soils. –A preliminary result–“
- 4) 甲田裕幸、宝示戸雅之、三木直倫、三枝俊哉：2001 年度日本土壤肥料学会北海道支部秋季大会（2001）  
「根釧地方のチモシー採草地における亜酸化窒素ガスフラックスの年次変化」
- 5) X. Li, K. Inubushi, and K. Sakamoto：日本土壤肥料学会 2002 年 4 月、p. 162 (2002)  
“N<sub>2</sub>O emission and production in relation to microbial and enzyme activities in soil profile“
- 6) 澤本卓治、Li Chansheng、秋山博子、鶴田治雄：日本土壤肥料学会 (2002)  
「日本の農耕地土壌からの N<sub>2</sub>O・NO 発生予測－DNDC モデル適用の検討－」
- 7) 森下智陽、式守修平、波多野隆介：日本土壤肥料学会 (2002)  
「北海道灰色低地土タマネギ畑からの N<sub>2</sub>O フラックス－夏から秋にかけてみられる N<sub>2</sub>O 放出量増大に注目して－」
- 8) 片柳薫子、森下智陽、富岡輝男、秦寛、波多野 隆介：日本土壤肥料学会 (2002)  
「土地利用型牧場における CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>O・NO フラックス－代表値の決定方法が放出量見積もりに及ぼす影響」
- 9) 久原基秀、犬伏和之：日本土壤肥料学会 2002 年 4 月、p 163 (2002)  
「土壌タイプおよび肥料形態の異なる土壌における窒素循環がメタン酸化に及ぼす影響」
- 10) 細野達夫、細井徳夫：第 43 回大気環境学会年会 (2002)  
「トマト施設栽培からの亜酸化窒素発生量」
- 11) 細野達夫、細井徳夫：日本農業気象学会東海支部平成 14 年度研究発表会 (2002)  
「長段トマト養液土耕栽培からの N<sub>2</sub>O 放出量」
- 12) T. Sawamoto, H. Tsuruta, and C. Li: The 3rd APN Project Workshop Land Use/Management Change and Trace Gas Emissions in East Asia, 7–11 Jan (2002)  
“Application of the DNDC model for prediction of N<sub>2</sub>O and NO emissions from Japanese agricultural soils”
- 13) K. Inubushi, M. Kuhara, and Y. Furukawa: 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference, Beijing (2003)  
“CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux from Andosol with different forms of applied fertilizer and characteristic of methanotrophic bacteria“
- 14) 澤本卓治：第 19 回気象環境研究会、農業環境技術研究所 (2003)  
「日本の農耕地土壌からの温室効果ガス発生予測－DNDC モデル適用の検討－」
- 15) 澤本卓治、Li C、鶴田治雄、八木一行：日本土壤肥料学会 2003 年度大会（発表予定）

「日本の農耕地土壌からの N<sub>2</sub>O 発生予測-DNDC モデル適用の検討 (その 2) -」

16) 澤本卓治：日本土壌肥料学会 2003 年度大会シンポジウム (発表予定)

「日本の畑土壌からの N<sub>2</sub>O 発生-DNDC モデルの適用-」

(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 (2001)

「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」

(5) 一般への公表・報道等

なし

## 9. 成果の政策的な寄与・貢献について

本研究における成果は、アジア各国における GHG ガス排出量インベントリーを精緻化すると同時に、削減効果の定量的評価を可能とし、地球温暖化防止条約や京都議定書に対する、わが国とアジア各国の政策オプションの策定に寄与するものである。

具体的には、環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会における検討に農耕地から CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 発生に関する実測データや広域評価結果を提供し、「温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 (平成 14 年 8 月)」の「総括報告書」および「農業分科会報告書」における排出係数、排出量、不確実性評価に貢献した。また、農林水産省委託事業「温室効果ガス排出削減定量化法調査委員会」に同様のデータを提供し、同委員会報告書 (平成 13 年 3 月) p. 25-42 に検討結果がまとめられている。さらに、現在活動中の IPCC 土地利用、土地利用変化、および森林に関するグッドプラクティスガイダンス (Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry) タスクフォースに同様のデータを提供し、議論に参加している。