

B-16 地球温暖化抑制のための CH_4 、 N_2O の対策技術開発と評価に関する研究

(7) 農耕地から発生するメタンと亜酸化窒素の発生抑制技術の開発に関する研究

① アジアの農耕地からのメタンと亜酸化窒素の発生及び抑制技術に関する研究

研究代表者 農業環境技術研究所 環境管理部 影響調査研究室 鶴田治雄

農林水産省農業環境技術研究所

環境管理部 影響調査研究室

鶴田治雄・秋山博子・中島泰弘・須藤重人

中国科学院南京土壤科学研究所

物質循環研究室

蔡 祖聰

(委託先) 北海道大学大学院農学研究科 波多野隆介

(委託先) 東京農工大学 農学部

楊 宗興

平成 11 年度予算額 15,551 千円

[要旨] (1) 世界の水田面積の約 25% を占める中国において、主要な水田地帯の 4 地域 8 地点で 1993～1997 年の間、クロードチャンバー法により水稻栽培期間中メタンフラックスを測定した。その結果、水稻栽培期間中のメタン年間発生量は地点及び年によって異なり、その範囲は $1.6 \sim 148 \text{gCH}_4 \text{m}^{-2} \text{y}^{-1}$ であった。また、重慶では、排水状態が悪く湛水していた非栽培期間中のメタン発生量は最大 $36.2 \text{gCH}_4 \text{m}^{-2}$ と大きかった。非栽培期間中も排水の悪い地域からの栽培期間中及び非栽培期間中のメタン発生量が、中国全体の水田からのメタン総発生量に大きく寄与していると推測された。

(2) 北海道三笠市の灰色低地土のタマネギ畑において、1995 年～1999 年の 5 年間にわたり、無積雪期(4～10 月)にクロードチャンバー法で亜酸化窒素フラックスを測定した結果によれば、調査期間中の亜酸化窒素総発生量は $3.5 \sim 9.9 \text{ kg N ha}^{-1}$ の範囲にあり、施肥量に対する亜酸化窒素発生量の割合はどの年次も 1% を超え、最高値は 3.1% で、日本の他の地域の畑地からの発生量よりも大きかった。また亜酸化窒素は、春の施肥後の硝酸化成に伴うものよりも、夏から秋にかけての発生量が調査期間中の総発生量の約 70% と大きかった。これは作物が吸収し残した硝酸が脱窒されて放出した可能性が高いと推察された。

(3) モンスーンアジアの森林からの亜酸化窒素フラックスの調査研究を、東京八王子市の落葉広葉樹林地域で実施し、尾根部、斜面部、谷底部の各面積割合を勘案して見積もった年間放出速度はこれまでの温帯林の多くの結果より大きい $0.62 \sim 0.42 \text{ kg N ha}^{-1}$ であった。フラックスの季節変化は地温変化によく同調しており、両者は欧米のこれまでの研究と比較してはるかに強い相関関係を示した。おそらく水分が制限要因とならないことにより温度が微生物活性の主因子となったためであり、多雨であるモンスーンアジアでの特徴が明らかとなった。また、亜酸化窒素フラックスは渓流水中の NO_3^- の高濃度地域ほど高く、低濃度地域ほど低いという関係が見出された。

[キーワード] 水田、中国、メタン発生量、北海道、タマネギ畑、亜酸化窒素発生、森林土壌、

1. はじめに

アジアには広大な農耕地が存在し、水田からメタン及び畑地から亜酸化窒素が大気中に大量に放出されると推定されているが、これまで実測データが少なく、IPCC の発生量推定値の不確実性は大きい。そこで、1990 年度（平成 2 年度）から環境庁地球環境研究総合推進費で、日本だけでなく、アジア諸国との共同研究で、これらの温室効果ガスのフラックス測定を現地圃場で実施している。中国は世界の水田面積の約 25% を占めており、水田からの温室効果ガス発生量を正確に把握することは非常に重要である。そこで、中国と共同で水田からのメタン発生に関する調査研究を 1992 年度から実施してきたので、水田からのメタン発生量に関する調査結果をとりまとめた。

また、1992～1994 年の 3 年間にわたり実施された日本全体の畑地からの亜酸化窒素の発生に関する調査結果によれば、北海道の畑地からの亜酸化窒素の発生量は他の地域よりも多かったもので、北海道の畑土壌において亜酸化窒素の生成機構および発生要因を解明する必要がある、これまでに実施された過去 5 年間の調査結果を取りまとめた。

さらに、温帯地域における森林土壌からの温室効果ガスの発生・吸収に関する研究は、欧米では多くの結果があるが、アジア、とくにモンスーンの卓越するアジアではこれまで調査研究がなされておらず、IPCC の発生量推定は不確実性が大きい。そこで、日本の森林土壌からの亜酸化窒素の発生量とその発生要因を解明する必要がある、過去 2 年間の調査結果をとりまとめた。なお近年、森林の環境変化として窒素飽和——従来窒素欠乏とされてきた陸域生態系が降水、ドライデポジションなど大気からの窒素負荷の結果として窒素過剰化する——という現象が起こり、森林から流出する渓流水中にしばしば高濃度の硝酸イオンを含んでいる。窒素飽和の進行とともに森林土壌からの亜酸化窒素の発生量が増大する可能性があるので、両者の関係も検討する。

2. 研究目的

（1）中国の主要な水田からのメタン発生量

中国の稲作の栽培体系は、気候・土壌などから表 1 に示すように 6 地域に分類されており、またその作付面積は、IV、V および VI の地域に 90% 以上が集中している。そこで、中国全体からのメタン発生量推定の基礎資料を得るために、これらの地域において、水稻栽培期間中にメタンフラックスを測定し、各地点での発生量を求め、主要な水田からの発生量の特徴を把握することを目的とした。

（2）北海道の灰色低地土タマネギ畑における亜酸化窒素の発生

日本全体の畑地からの亜酸化窒素の発生量を推定するうえで、北海道の畑地での調査研究が重要である。そこで、畑地に野菜を栽培し、栽培期間中の亜酸化窒素のフラックスの季節変化と発生量を求め、亜酸化窒素発生量の施肥窒素量に対する割合を求めることを目的とした。さらに、亜酸化窒素の生成機構を考察し、日本の他の地域のそれと比較検討する。

（3）日本の森林土壌における亜酸化窒素の発生

日本の森林土壌からの亜酸化窒素フラックスの詳細な調査研究を実施し、アジアとして初めて信頼性の高い亜酸化窒素発生量を求め、欧米と異なるモンスーン気候下における森林土壌からの亜酸化窒素発生の特徴を明らかにする。また、亜酸化窒素発生に対する窒素飽和の影響を解明する

ために、森林土壌からの亜酸化窒素発生と渓流水中の硝酸イオン濃度との関係を明らかにする。

3. 研究方法

(1) 中国の主要な水田からのメタン発生量

中国の主要な水稻栽培地帯の4地域8地点で、1993 から 1997 年までの5年間、メタンフラックス測定を実施した(図1)。なお地域 I でも測定したが、データ不良のため、欠測とした。各地点では、クロードチャンバーを用いて同一手法により採取及び分析を行った。フラックス測定は、原則として2連で1週間毎に1~3年間継続し、地温や酸化還元電位なども同時に測定した。また慣行栽培圃場だけでなく、地形、土壌の性質、有機物施用、肥料の種類や施用量、栽培体系などの違う圃場でもメタンフラックスを、鷹潭、長沙、南京と句容、広州、封丘で調査し、メタン発生量を比較した。一方重慶では、収穫後も圃場の排水が悪いので、非栽培期間中もメタンフラックスを測定し、栽培及び非栽培期間中のメタン発生量を比較検討した。

(2) 北海道の灰色低地土タマネギ畑における亜酸化窒素の発生

1995 年~1999 年の5年間にわたり、北海道三笠市の灰色低地土のタマネギ畑 (*Allium cepa* L.) において、無積雪期(4~10 月)にクロードチャンバー法による亜酸化窒素フラックスと作土層の土壌水分、地温、無機態窒素の測定をおこなった。降雨、蒸発散量は岩見沢気象台報告を用いて推定した。タマネギは毎年4月下旬に定植され、9月上旬に収穫された。施肥量は270~322 kgN ha⁻¹ (平均 300 kgN ha⁻¹) であり、タマネギの窒素吸収量は96~168 kgN ha⁻¹ (平均 129kgN ha⁻¹) であった。収穫後も土壌中に硝酸イオンが多く残存していた。

(3) 日本の森林土壌における亜酸化窒素の発生

東京農工大学農学部附属波丘地実験施設(東京都八王子市)内の落葉広葉樹林を主な調査地とした。当地は、渓流水中の硝酸イオン(NO₃⁻)濃度は高く(下記Cゾーンに属する)、これまでの検討結果から、典型的な窒素飽和状況に至っていると判断される地点である。森林斜面を調査単位とし、その尾根部、斜面部、谷底部のそれぞれに3つのステンレス製チャンバーを固定し、1998 年5月から1999 年12 月まで亜酸化窒素(N₂O)フラックスを測定した。また、各位置にポラスカップを埋設し、土壌水分張力も同時に測定した。多摩川水系での渓流水中NO₃⁻濃度は、西より、20μM のAゾーン、20~30μM のA-Bゾーン、30~70 μM のBゾーン、70μM 以上のCゾーンの4つに明確に区分けされ、それらは森林の窒素過剰の程度との関連性が考えられる。そこで、Bゾーンの森林(奥多摩町大檜峠、標高600m)、Aゾーンの森林(山梨県塩山市一ノ瀬高原、標高1400m)でN₂Oフラックスの比較調査を行った。木平ら(未発表)によれば、琵琶湖集水域では、NO₃⁻濃度が高くDOC濃度が低い溪流(硝酸型)、DOC濃度が高くNO₃⁻濃度が低い溪流(DOC型)が存在するので、ほぼ同じ標高の高硝酸型2溪流、低硝酸型(DOC型)2溪流の集水域森林について、1999 年7月、9月、10月の3回、N₂Oフラックス調査を行った。各渓流水のNO₃⁻濃度は1998 年7月~1999 年6月の6回の調査の平均値を使用した。

4. 結果と考察

(1) 中国の主要な水田からのメタン発生量

1. 水稻栽培期間中のメタン年間発生量は地点及び年によって異なり、その範囲は1.6~148gCH₄m⁻²y⁻¹であった。封丘、句容、南京及び蘇州では10gCH₄ m⁻²y⁻¹以下と少なく、重慶、

長沙では $36\sim 87\text{gCH}_4\text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ と大きく、丘陵地帯の鷹潭では $148\text{gCH}_4\text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ (1993 年) と全地点中で最大であった (表 2)。

2. 最南部の広州の水田圃場では、一年中で畑作期間の長い圃場 (水稻—野菜—野菜) のほうが短い圃場 (表 2 の圃場) よりも、翌年前期の水稻栽培期間中のメタン発生量は少なかった (表 2)。

3. 重慶では、排水状態が悪く湛水していた非栽培期間中 (冬期) のメタン発生量は最大 $36.2\text{gCH}_4\text{ m}^{-2}$ と大きかった。また、栽培期間中のメタン年間発生量が多かった鷹潭の底部では、非栽培期間中でも排水されにくく湛水している期間が長かった。

4. 中国の水田圃場で非栽培期間中 (おもに冬期) の排水が悪い地域は長江以南に多く、その面積は中国の全水稻栽培面積の 10% 強であった。その地域からの栽培期間中及び非栽培期間中のメタン発生量が中国全体の水田からのメタン総発生量に大きく寄与していると推測された。

(2) 北海道の灰色低地土タマネギ畑における亜酸化窒素の発生

土壌から大気への亜酸化窒素フラックスは $0\sim 1.57\text{ mgN m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ の範囲にあった。亜酸化窒素フラックスの大きさには大きな年次変動が認められた。しかし施肥後よりも、施肥をおこなわない 7 月下旬から 10 月の間にフラックスは高まる傾向が 5 年間共通に見られた (図 2)。

亜酸化窒素フラックス (y) は深さ 10cm の地温 (x) と $y=0.0062e^{0.1281x}$ で 1% 水準で有意な相関関係が認められたが相関係数は 0.50 と低く大きなバラツキがあった。水分率との相関関係は認められなかった。水分率が高まるほどフラックスが上昇する場合と、全く逆の場合が認められた。ただし、月別の亜酸化窒素放出量 (y) は、降雨—パンマン蒸発散量 (x) とは相関係数は 0.44 と低いものの、 $y=0.8357x+94.534$ の 5% 水準で有意な関係が認められた。これらのことから亜酸化窒素フラックスの増減には単に土壌水分量だけではなく、土壌の乾湿の過程が深く関わっていると推察された。

無積雪期の亜酸化窒素放出量は $3.5\sim 9.9\text{ kg N ha}^{-1}$ の範囲にあった。施肥量に対する亜酸化窒素放出量の割合はどの年次も 1% を超え、最高値は 3.1% であった。本州で報告されてきた値より大きかった。各年の全放出量にはバラツキが見られたにもかかわらず、いずれの年も 8 月以降の放出量は全体の 70% 程度を占めていた。

これらのことから、本圃場における亜酸化窒素放出は、春の施肥後の硝酸化成に伴うものよりも、夏から秋にかけての放出が大きく、これは作物が吸収し残した硝酸が脱窒されて放出した可能性が高いと推察された。

(3) 日本の森林土壌における亜酸化窒素の発生

東京八王子における調査の結果、 N_2O フラックスは、2 年間とも明確な季節変化を示したが、1999 年は 1998 年よりも全般的にやや低いレベルで推移した (この正確な理由は不明) (図 3)。フラックスは地温に対して強い依存性を示し、土壌温度が N_2O フラックスの季節変化を支配する主要因子であることが確認された (図 4)。森林土壌中の水分は、谷底部と斜面部では常に $\text{pF}1.5$ 以下、尾根部でもほとんどの期間 $\text{pF}2.5$ 以下と比較的に湿潤であり、また時として高 pF を示した乾燥時にもフラックス低下はほとんど見られなかった。これより、欧米と比較して降水量の多いわが国では水分が微生物活性の制限要因になることがほとんどなく、このため温度に対して良好な依存性を示したと推測される。このように、モンスーンアジアでの N_2O 放出の特徴が明らか

となった。

多摩川の溪流の B、A ゾーンと C ゾーンとでの調査結果によれば、 N_2O フラックスの大小が溪流の NO_3^- 濃度に関係している可能性が示された。しかし、これらの地点の標高が違うので、ほぼ同じ標高に存在する琵琶湖に流入する硝酸型 2 カ所、DOC 型 2 カ所の溪流集水域で N_2O フラックス調査を複数回実施した結果、いずれの時期においても硝酸型溪流の森林で高く、DOC 型溪流の森林で低い N_2O フラックスが測定された (図 5)。森林からの N_2O 発生は、温度の影響だけではなく、集水域溪流の NO_3^- 濃度への対応性を示すことが判明した。それぞれ調査時期ごとの NO_3^- 濃度とフラックスとの間には明確な比例関係が見出された (図 6)。 N_2O フラックスは地点間で $10 \sim 400 \mu g N m^{-2} day^{-1}$ と著しい空間変動を示すが、この変動性は溪流 NO_3^- 濃度により非常によく説明されることがわかった。さらに、大気からの窒素沈着量の増加が指摘されているので、今後窒素飽和現象の拡大が予想され、森林からの N_2O 発生量の増大する可能性が明らかとなった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 中国の主要な水田地帯の 4 地域 8 地点で 1993-1997 年の間、クローズドチャンバー法により水稻栽培期間中メタンフラックスを測定した。その結果、水稻栽培期間中のメタン年間発生量は地点及び年によって異なり、その範囲は $1.6 \sim 148 g CH_4 m^{-2} y^{-1}$ であった。また、重慶では、排水状態が悪く湛水していた非栽培期間中のメタン発生量は最大 $36.2 g CH_4 m^{-2}$ と大きかった。非栽培期間中も排水の悪い地域からの栽培期間中及び非栽培期間中のメタン発生量が、中国全体の水田からのメタン総発生量に大きく寄与していると推測された。

(2) 1995 年～1999 年の 5 年間にわたり、北海道三笠市の灰色低地土のタマネギ畑において、無積雪期 (4～10 月) にクローズドチャンバー法で測定した亜酸化窒素フラックスによれば、春の施肥後の硝酸化成に伴うものよりも、夏から秋にかけての放出が大きく (調査期間中の総発生量の約 70%)、これは作物が吸収し残した硝酸が脱窒されて放出した可能性が高いと推察された。調査期間中の亜酸化窒素総発生量は $3.5 \sim 9.9 kg N ha^{-1}$ の範囲にあり、施肥量に対する亜酸化窒素発生量の割合はどの年次も 1% を超え、最高値は 3.1% であった。

(3) これまで系統的データが皆無であるモンスーンアジアの森林からの N_2O 放出フラックスの調査研究を、東京八王子市の落葉広葉樹林地帯で実施し、尾根部、斜面部、谷底部の各面積割合を勘案して見積もった結果、年間放出速度はこれまでの温帯林の多くの結果より高い $0.62 \sim 0.42 kg N ha^{-1}$ であった。フラックスの季節変化は地温変化によく同調しており、両者は欧米のこれまでの研究と比較してはるかに高い相関性を示した。おそらく水分が制限要因とならないことにより温度が微生物活性の主因子となったためであり、多雨であるモンスーンアジアならではの特徴が明らかとなった。さらに、 N_2O フラックスは溪流水中の NO_3^- の高濃度地域ほど高く、低濃度地域ほど低いという関係が見出された。

〔国際共同研究等の状況〕

中国科学院の南京土壤科学研究所と沈陽応用生態研究所、およびインドの国立物理学実験所 (NPL) と共同研究を実施中であり、これらは、IGBP のコアプロジェクトの一つである IGAC (国際地球大気化学研究計画) の研究の一環として実施中である。

〔研究成果の発表状況〕

口頭発表

- 木平英一・吉岡崇仁・楊 宗興・増澤敏行・田上英一郎・大田啓一 (1999): 琵琶湖流入河川の山地源流における NO_3^- 濃度と DOC 濃度の関係, 陸水学会講演要旨集
- 木平英一・吉岡崇仁・楊 宗興・増澤敏行・田上英一郎・大田啓一・福嶋義宏 (1999): 琵琶湖集水域溪流水中の NO_3^- と溶存有機炭素濃度の関係, 日本林学会講演要旨集
- 武重祐史・碓井敏宏・楊 宗興・土器屋由紀子(1999) 温帯落葉広葉樹の森林土壌における N_2O フラックス, 日本化学会講演要旨集
- 碓井敏宏・武重祐史・西尾友宏・楊 宗興(2000): 降雨に伴う谷底部森林土壌における N_2O の挙動の変化, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 46, 204.
- 山田佳那子・澤本卓治・波多野隆介(2000): 北海道の2つの畑(灰色低地土、黒ボク土)からの NO 、 N_2O のフラックス、日本土壌肥料学会講演要旨集, 46, 204

論文発表

- Cai, Z.C., G. Xing, X.Y. Yan, H. Xu, H. Tsuruta, K. Yagi and K. Minami (1997): Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management, *Plant and Soil*, 196, 7-14.
- Cai, Z.C., H. Tsuruta, K. Minami: Methane emission from rice paddy fields in China: I. Measurements and influencing factors, *Journal of Geophysical Research* (印刷中)
- Hatano, R. and T. Sawamoto (1997): Emission on N_2O from a Clayey aquic soil cultivated with Onion plants, in *Plant nutrition---for sustainable food production and environment*, Kluwer Academic Publishers, 555-556.
- 澤本卓治(2000): 土壌生態系における温室効果ガスの発生に関する研究、北海道大学大学院農学研究科博士論文.
- 鶴田治雄(1999): わ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、31-6、31-38.
- Tsuruta, H. and H. Akiyama (2000): NO and N_2O emissions from upland soils with the application of different types of nitrogen fertilizer, in *Proceedings on Non- CO_2 Greenhouse Gases: Scientific understanding, Control and Implementation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 277-282.
- Yoh, M. and Y. Takeshige (1999): N_2O emission and nitrogen saturation in Japanese forest. *International Workshop on the Atmospheric N_2O budget: An analysis of the state of our understanding of sources and sinks of atmospheric N_2O .*
- 楊 宗興 (2000): 森林の窒素飽和現象? 今、わが国の森林に生じつつある環境変化。「信州からの生態複雑系 -21世紀への生物多様性の創出と保全-」佐藤利幸・加藤憲二(編)、10-13.

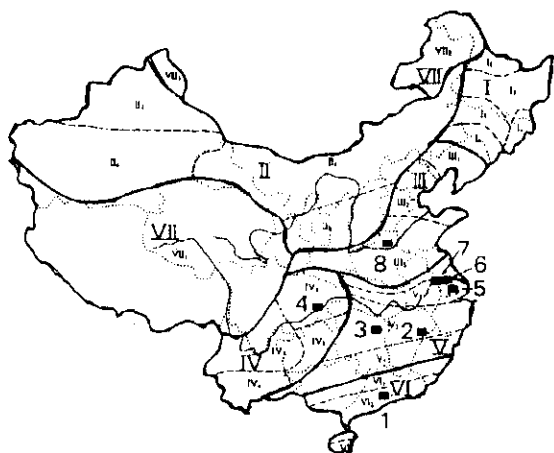


表1 中国の栽培体系と収穫面積

地域	栽培体系	収穫面積 (1993年:Mha)
I	一期作	1.647
II	一期作	0.372
III	一期作	0.755
IV	一・二期作	4.690
V	一・二期作	16.608
VI	二期作	6.822
VII	無栽培	----
合計		30.894

図1 中国の栽培体系別稲作地域と調査地点

(調査地点: 1.広州、2.鷹潭、3.長沙、4.重慶、5.蘇州、6.句容、7.南京、8.封丘)

表2 中国の8地点における水稻慣行栽培圃場でのCH₄年間発生量(1993-97年の栽培期間中)

地点名(地域)	慣行栽培体系	有機物施用	CH ₄ 年間発生量(gCH ₄ m ⁻² y ⁻¹)					年平均
			1993	1994	1995	1996	1997	
1. 広州(VI)	水稻—水稻—野菜	無		7.5	24.1			15.8
2. 鷹潭(V)	水稻—水稻—休閑	稲藁(後期作前)	148	78.3				113
3. 長沙(V)	水稻—水稻—休閑	雑草			48.6	58.8	83.8	63.7
4. 重慶(IV)	水稻—休閑	人糞(除 1995)			36.3	87.1	43.5	55.6
5. 蘇州(V)	小麦—水稻	無	9.8					9.8
6. 句容(V)	小麦—水稻	稲藁			1.9	6.6		4.3
7. 南京(V)	水稻—休閑	無		7.7				7.7
8. 封丘(III)	小麦—水稻	豚糞	1.9	1.6				1.8

注1: 水管理は中干し後間断灌漑(常時湛水の重慶を除く)を行なった。

注2: 窒素肥料は、尿素や硫酸等を一栽培期間中に26.3~36.5g m⁻²(但し長沙は約8.6gN m⁻²、蘇州は約20gN m⁻²)を施用した。

注3: 広州では、さらに水稻—野菜—野菜、野菜—野菜—水稻という圃場でも測定し、2年間の平均値はそれぞれ1.1、0.6gCH₄ m⁻²であった。鷹潭では、丘陵地帯の上部、中部及び底部の圃場で測定した年間発生量の平均値を示した。なお2年間の平均値は上部、中部及び底部でそれぞれ84.9、95.9、159 gCH₄ m⁻² y⁻¹であった。封丘では、3種類の土性(Loam sand(S), Clay loam(L: 表1の栽培圃場), Silty clay(C))の圃場で測定し、2年間の平均値はそれぞれ3.0(S)、0.8(C) gCH₄ m⁻² y⁻¹であった。

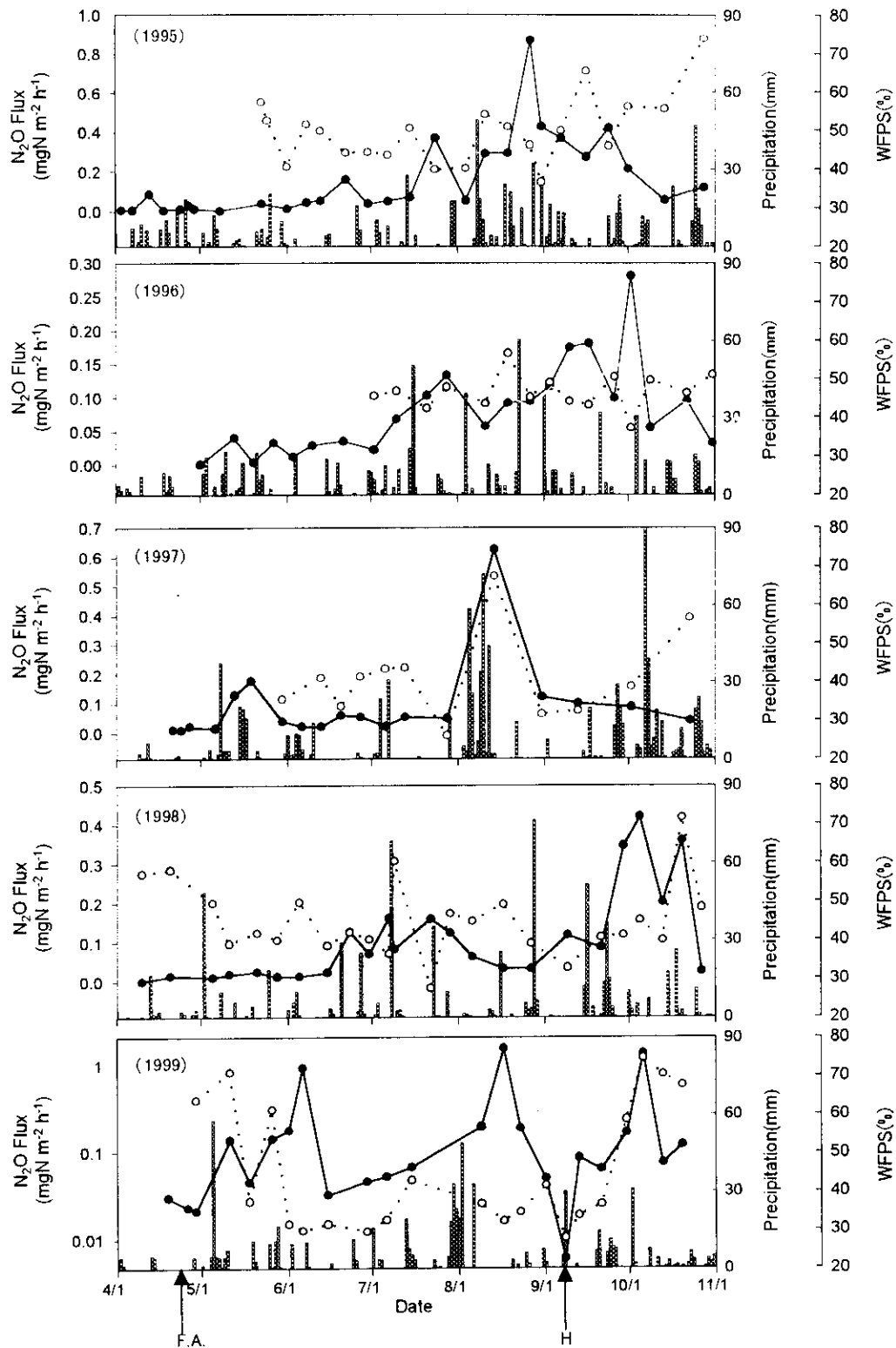


図2 1995年から1999年の亜酸化窒素、降水量および土壌水分の季節推移
 ●亜酸化窒素フラックス (mgN m⁻² h⁻¹) F.A.: 施肥、H: 収穫
 ○土壌水分 WFPS (%)
 降水量 (mm)

図3 N₂Oフラックスの季節変化
(東京八王子落葉広葉樹)

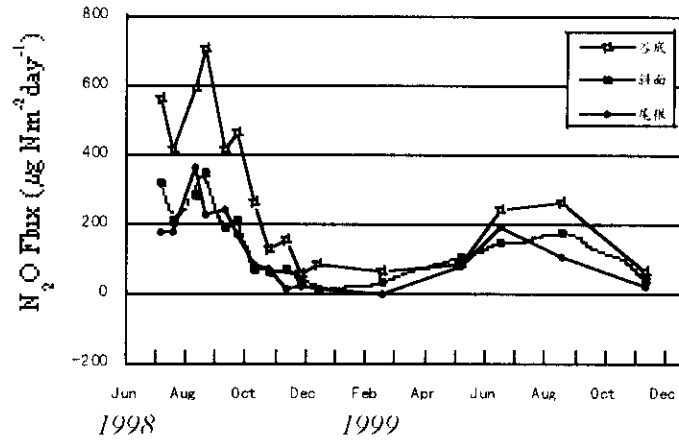


図4 地温と N₂O フラックスの関係 (東京八王子)

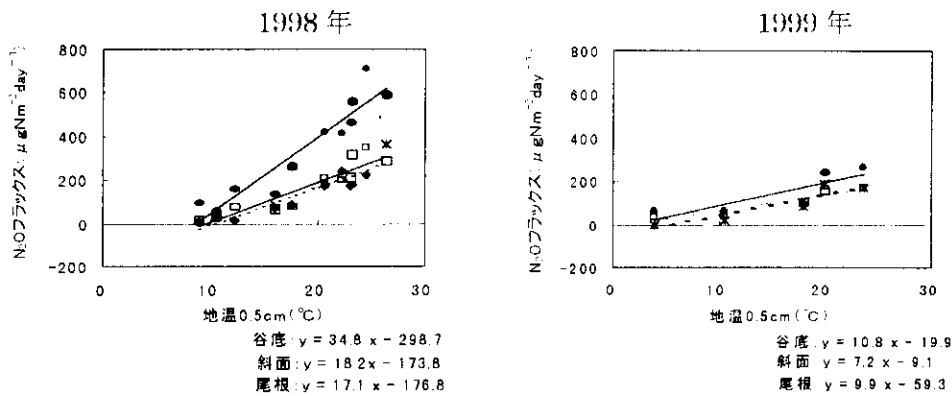


図5 渓流水 NO₃濃度が高い流域と低い流域での N₂O フラックス (琵琶湖集水域)

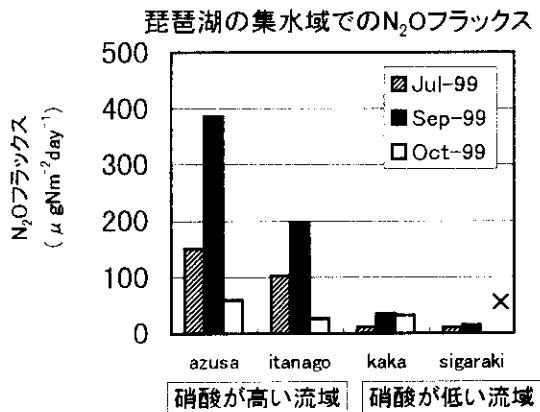


図6 琵琶湖集水域における渓流水 NO₃濃度と N₂O フラックスの関係

渓流水の硝酸濃度と N₂O フラックス
(琵琶湖集水域)

