水田からのメタンフラックスと 水田土壌水中メタン濃度の季節変化

細野 達夫・野内 勇

(農業環境技術研究所)

Seasonal Changes of Methane Flux and Methane Concentration in Soil Water in Rice Paddies

Tatsuo HOSONO and Isamu NOUCHI

(National Institute of Agro-Environmental Sciences,)
(3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan)

Abstract

Methane flux from rice paddies and methane concentration in soil water at rice paddies were measured weekly through rice growing season of 4 years from 1991 through 1994. Methane flux and methane concentration in the soil water changed through each growing season as well documented by many researchers. In addition, the seasonal patterns of change, as well as total methane emission from rice paddy, varied year to year. The seasonal change and its difference among years were not completely explained with air temperature nor soil temperature. However, assuming that methane emission from rice paddy is driven by diffusion through rice plants, four year data showed that the conductance of rice plants for methane diffusion had wide ranges, and suggested that the conductance was highly dependent on air temperature or soil temperature.

Key words: Diffusion, Methane, Rice paddy, Seasonal change, Temperature.

キーワード: 温度, 拡散, 季節変化, 水田, メタン

はじめに

水田は、温室効果ガスであるメタンの主要な発生源の一つであり、IPCCによると全世界のメタン発生量のうち水田が寄与する割合は、約12%と評価されている(Watson *et al.*, 1992)。その数字のもとになったデータは、各国の数地点の水田でチャンパー法などにより測定されたものである(例えば、Yagi and Minami, 1990)。しかし、水田からのメタンフラックスは土壌の種類(Yagi and Minami, 1990)、水稲の生育、温度などの環境条件(Nouchi *et al.*, 1994)、あるいは施肥法(Yagi and Minami, 1990)、稲ワラ施用時期(犬伏ら, 1994)、水管理(Yagi and Minami, 1993)といった栽培管理的要因など種々の要因により異なることが知られている。そのため、メタンフラックスは場所によって異なるのみならず、季節変化や年変動がある。その季節変化や年変動

の要因について解明し、変動の程度を明らかにすることは、水田からのメタン放出量の正確な評価のために重要である。

そこで、4シーズンの水稲生育期間にわたり、ライシメータ水田においてメタンフラックスおよび土壌水中メタン濃度などを調査した。本研究では、4シーズンのメタンフラックスおよび土壌水中メタン濃度の季節変化とその年による相違を整理し、さらに、季節変化の原因について水稲の生長過程と温度の面から解析した。

1. 研究方法

1.1 水稲および試験区

水稲の栽培にはライシメータ水田(1区画: 2.5 m × 4 m)を用いた。1991年には、長年継続的に水田として利用されていた区画を用いた。1992年以降は、1991年まで畑であった区画を水田に転換したものである。ライシメータには、細粒質灰色低地土が2 mの深さで充填されている。1992年の湛水・施肥前のこの土壌の性質は

1992年7月4日 全国大会にて一部発表

1995年8月15日 受付, 1996年2月9日 受理

以下のものである。全炭素含有率：1.9%，全窒素含有率：0.15%，pH (H₂O)：6.0。

試験区は、肥料として化成肥料のみを投入した「化成肥料区」および化成肥料に加えて稲ワラをすきこんだ「稲ワラ区」とした。化成肥料(N, P₂O₅ および K₂O をそれぞれ14%含有)は、窒素で10 g m⁻² となるように71.4 g m⁻²を、また、稲ワラは700 g m⁻²を施用した。

なお、1991年には「中干し」を行い湛水状態を中断させ、さらに収穫1週間前に落水したが、それ以外の年では移植から収穫まで常時湛水状態を保った。本研究で用いた水稻品種は1991年～1993年は「日本晴」、1994年は「コシヒカリ」である。栽植密度は、1991年～1993年は23.1株 m⁻² (株間18 cm, 畦間24 cm)、1994年は22.7株 m⁻² (株間, 畦間とも21 cm)であった。

各年における湛水開始日、水稻移植日、出穂日等をTable 1に示す。

Table 1 Lot-management schedule till transplanting at lysimeter rice paddy and heading date of rice in each year.

year	rice straw incorporate date*	flooding date	transplanting date	heading date
1991	May 1	May 1	May 15	Aug. 6
1992	Apr. 16	Apr. 23	May 15	Aug. 10
1993	Apr. 26	Apr. 26	May 21	Aug. 16
1994	May 10	May 10	May 24	Jul. 31

* Rice straw input was done only at rice straw plot.

1.2 土壌水の採取

土中に、ポーラスカップ(直径8mm, 長さ10 cm)を埋設した。ポーラスカップには土壌水採取用のテフロンチューブ(内径1mm)が接続されており、ポーラスカップ埋設地点より低い位置までテフロンチューブの先端を垂らすことによってサイホンの原理で流れ出す土壌水をマイクロシリンジで2～10 μlを採取した(Nouchi *et al.*, 1990)。採取時以外は端をキャップで塞いでおいた。

土壌水は、各区とも土壌面から深さ5 cmの各3箇所から採取した。採取・測定頻度は1週間に1度である。採取時刻は、メタンフラックス測定時刻をはさんで前後1時間以内である。

1.3 メタンフラックスの測定

メタンフラックスは、30 cm×30 cm, 高さ100 cmの透明ポリカーボネート製チャンバーを用いてチャンバー法(閉鎖式)により測定した(Nouchi *et al.*, 1994)。水稻が2株入るようにチャンバーを被せた。チャンバー固定後、0分～20分(あるいは15分)まで5分おきにチャンバー内の空気をテドラーバックに採取しメタン濃度

を定量した。土壌面には、チャンバーを安定させるための鉄枠が設置してあり、チャンバーを被せる際に土壌面を攪乱しないようにした。しかし、チャンバーを被せた際に土壌表層に多少、圧力が加わるため、土壌中に気泡が存在する場合には土壌面からメタンを高濃度でふくむ気泡が放出され、チャンバー内のメタン濃度は非常に高くなる。その際には、その空気をエアーポンプにより十分に外気で換気した後、測定した。チャンバー内メタン濃度の増加速度からメタンフラックスを次式により計算した。

$$F = dC/dt \cdot 16/22.4 \cdot 273/(273+T) \cdot V \cdot A$$

ここで、 F ：メタンフラックス(mg m⁻² h⁻¹)、 dC/dt ：チャンバー内メタン濃度の増加速度(μl l⁻¹ h⁻¹)、16：メタン1モルの質量(g)、22.4：0℃, 1気圧における気体1モルの体積(l)、 T ：チャンバー内気温(℃)、 V ：チャンバー内の気相の体積(m³)、 A ：チャンバーの底面積(=0.09 m²)である。なお、テドラーバックで採取する空気量は1回あたり約0.2 lであった。チャンバー内には気圧調整用テドラーバッグが装備されており、チャンバー内の気圧は空気を採取しても常に外気圧と同じに保たれるようにした。チャンバー内の気相の体積は田面水面からチャンバー上端までの高さから算出し、植物体の体積および濃度測定のためにチャンバー内から採取する空気量は無視した。植物体の体積は、生重から判断して最大でも1 l以下であると判断された。水面下の部分を差し引いたチャンバーの体積は80～90 lであるので、植物体の体積と濃度測定のための採取空気量をチャンバー内気相の体積の計算に考慮するか否かによってフラックス計算値に若干影響があるが、チャンバー法のような問題点に起因するフラックス評価の不確実性を考慮すれば、フラックスの値の大勢に影響は無いと判断した。

メタンフラックスの測定は週に1度各処理区1か所のみ(1994年のみ2カ所)で行い、測定箇所は水稻生育期間中同じ場所とした。なお、測定は昼間(7:00～18:30, 80%以上は10:00～17:00)に行った。

1.4 メタン濃度の定量

採取した2～10 μlの土壌水はFIDガスクロマトグラフ(嶋津製GC9A)に直接打ち込み、注入口(Injection 温度, 140℃)で気化した土壌水中のメタン濃度を定量した。分離カラムとして、内径3 mm, 長さ2 mのガラスカラムに活性炭(80–100メッシュ)を充填して用いた。

テドラーバッグに採取したフラックス測定のための試料は、採取後直ちに、5 mlの計量管を通して前記ガスクロマトグラフに導入し、データ処理装置(嶋津製クロマトバック, CR6A)で定量を行った。ガスクロマトグ

ラフの測定条件は、インジェクション温度 140℃、カラム温度 100℃、窒素流量 50 ml min⁻¹、水素流量 50 ml min⁻¹、空気流量 5 l min⁻¹であった。分離カラムとして内径 3 mm、長さ 2 m のガラスカラムにモレキュラーシープ 5 A (60–80 メッシュ) を充填したものを用いた。

2. 結果と考察

2.1 土壌水中メタン濃度の季節変化

1991年～1994年におけるライシメータ水田での湛水期間中の土壌水中メタン濃度の季節変化を Fig. 1 に示す。また、図中の線は農業環境技術研究所構内の気象観測露場における日平均気温の変化である。なお、1993年および1994年においては、ライシメータ水田の地面から深さ 5 cm の地温を測定したのでそのデータも示した。

全ての年を通じた特徴は次のようである。稲ワラ区では湛水後 20～30 日頃から濃度が上昇するのに対し、化成肥料区では湛水後 80～100 日頃（水稻の出穂期頃）までは稲ワラ区に比較して極めて低濃度であった。しかし、出穂期以降は稲ワラ区と同程度まで濃度が上昇した。化成肥料区ではいずれの年も出穂期以降 10 日～20 日頃にメタン濃度は最大となった。1993 年は記録的な冷夏で生育が遅れ、1994 年では逆に気温が高く (Fig. 1), 日

射量が多かったために水稻の生育速度が速かった。1993 年における土壌水中メタン濃度が最大になる時季は、1994 年に比較して遅れたが、それは生育速度の違いによる生育ステージの差異にほぼ一致していた。Fig. 2 中に水稻移植日および出穂日を示した。なお、用いた水稻品種は 1993 年が「日本晴」、1994 年が「コシヒカリ」であったが、1993 年に試験区と隣接した区画で「コシヒカリ」を同時に栽培したところ、出穂日は「日本晴」と同じであり、生育ステージの進行は両品種ではほぼ同様であった。

1991 年は、「中干し」により土壌中の嫌気条件が破られた時期に、土壌水中メタン濃度はいったんゼロ付近まで低下したが、中干し後は再び徐々に濃度が上昇した。

1991 年以外は、同じ区画を用い、また水稻の生育全期間にわたって常に湛水状態を保ち、土壌中の嫌気条件が保たれていたが、年により土壌水中メタン濃度とその変動パターンは異なった。特に稲ワラ区では顕著であった。稲ワラ区について 1992～1994 年の年毎の特徴を記述すると、1992 年および 1993 年では、湛水開始から 40～50 日頃までにいったんピーク濃度にまで上昇した後、最大濃度の 50% 程度の大きさの振幅をもつ大きな周期で変動した。一方 1994 年は、湛水開始後 40 日頃から

Fig. 1. Seasonal changes in methane concentration in soil water (○ : rice straw plot, ● : mineral fertilizer plot), daily mean air temperature (solid line) and daily mean soil temperature (dotted line). Soil temperature at 5 cm below soil surface was measured in 1993 and 1994. Characters, T and H in the figure show transplanting date and heading date, respectively. In 1991, midsummer drainage and the drainage before harvest were done. The date of those are shown in the figure as character D.

イネが登熟に向かう 100 日過ぎまで濃度は比較的単調に増加し、その後徐々に減少した。

稲ワラを施用した水田では、稲ワラ施用・湛水開始後比較的短期間のうちに投入された稲ワラがメタン生成に用いられると考えられている(例えば, Watanabe *et al.*, 1993)。そのため、水稻生育初期(分げつ期)にメタンフラックスが第一のピークをもつという季節変化が数多く観測されている(例えば, Schütz *et al.*, 1989; Yagi and Minami, 1990)。その場合、土壌水中メタン濃度も湛水開始後 40~60 日頃にピークをとると考えられる。しかし、1994 年だけはこのパターンと異なっていた。理由は明らかではないが、メタン生成微生物の活性が年度間で異なっていたものと考えられる。

稲ワラ区における土壌水中のメタン濃度の値は 1993 年には最大 10.2 mg l^{-1} であり、他の年に比較して全期間にわたって高濃度で推移した。1991 年を含めた他の年では、最大濃度は $3\sim 7 \text{ mg l}^{-1}$ 程度であった。

化成肥料区で水稻の出穂期前後から土壌水中のメタン濃度が上昇し始めるのは、そのころから水稻根の一部が枯死し、土壌中でメタン生成の基質として利用されるようになるためと推察される(Schütz *et al.*, 1991)。

化成肥料区でも、1993 年は生育後半に最大 7.5 mg l^{-1} に達し、最大 $3\sim 5 \text{ mg l}^{-1}$ 程度であった他の年に比較し

て全体的に高濃度となった。

なお、1992 年以外の化成肥料区では湛水開始後 30~50 日頃に小さなピークがみられるが、これは前年度の刈り株がメタン生成の基質として用いられたためと考えられる。1992 年は畑から水田に転換した初年度であり、前年度の刈り株が鋤き混まれておらず水稻移植後しばらくの間は土壌中の有機物が非常に少なかったと推察される。

各年における湛水開始前の土壌条件が若干異なることが想像され、特に 1991 年は試験に用いた区画が異なるので、単純に 4 シーズンの結果を比較することはできないが、以上の結果から、土壌水中メタン濃度のレベルや季節変化パターンが年によってかなり異なる場合があると推察された。

2.2 水田からのメタンフラックスの季節変化

1991 年~1994 年におけるライシメータ水田からのメタンフラックスの季節変化を Fig.2 に示す。合わせて、日平均気温の変化とフラックス測定時の気温も図中に示した。全ての年を通じて、稲ワラ区では化成肥料区より非常に大きなフラックスとなった。これは、稲ワラ区と化成肥料区の土壌水中メタン濃度の差異と一致する。

前にも述べたように、稲ワラ区においては一般に水稻生育初期(分げつ期)にメタンフラックスが第一のピーク

Fig. 2. Seasonal changes in methane flux (○: rice straw plot, ●: mineral fertilizer plot) and daily mean air temperature (solid line) and air temperature at the time when methane flux was measured (▲). Characters, T and H in the figure show transplanting date and heading date, respectively. In 1991, midsummer drainage and the drainage before harvest were done. The date of those are shown in the figure as character D.

をもち、その後、出穂期を過ぎて第二のピークをとるという季節変化が数多く観測されている。本研究の4年間の稲ワラ区における測定では、それらに類似した典型的なメタンフラックスの季節変化パターンはみられず、かつ年によって季節変化パターンがかなり異なった。

化成肥料区では、4年間を通じて、土壌水中メタン濃度が高くなる水稻生育後半(出穂期以降)にフラックスも最大となり、その時期には稲ワラ区との差が小さくなった。そしてフラックスは、最大となった後、水稻の収穫に至るまで徐々に減少した。

稲ワラ区におけるメタンフラックスのピークは前述の土壌水中メタン濃度のピークとはあまり一致しなかった。

週一度のメタンフラックスの測定値から、各年における水稻生育全期間のメタン放出量を見積ったのがTable 2である。ここではメタンフラックスの日変化は無視して、毎週1度、昼間(80%以上は10時~17時の間)のある時刻に測定されたメタンフラックスがその週の平均的なメタンフラックスであると仮定してメタン放出量を求めた。年間のメタン放出量は1991年と1993年が多く、1992年と1994年では少なかった。稲ワラ区については、1991年は1994年の約1.6倍であった。1993年と1994年とでは、前述の通り生育速度が大きく異なり、1994年の方が水稻移植から出穂までの日数が19日早く、収穫までの日数も16日早かった。しかし、両年のメタン放出量の差はこの生育期間の差異によるものではなく、ピークメタンフラックスの差異(Fig. 2)によると考えられる。

化成肥料区で1992年の放出量が少ないのは、前述の土壌水中メタン濃度が水稻生育前半に著しく低かったのと同じ原因によると推察される。

なお、メタンフラックスは一般に日変動があることが示されている(Yagi and Minami, 1993; 八木ら, 1994; Neue *et al.*, 1994)。本研究におけるライシメータ水田では、メタンフラックスの日変化の測定は数回しか行わなかったが、日射が強い夏の晴天日には日最高値が日最低値の2倍程度になるような場合も観測した。通常、深夜から早朝にかけてフラックスの日最低値が観測されることが多い(例えば、八木ら, 1994)ので、Table 2に示された年間のメタン放出量は大きめに推定されて

いる可能性もあると考えられる。

また、メタンフラックスの測定は各区1点の値(1994年のみ2点の平均値)であるが、1994年に各区2点で測定した結果、化成肥料区では2点でほぼ同じ値を示した。一方、稲ワラ区では全期間を平均すると、大きい値を示した点は小さい方の約1.3倍であった。Watanabe *et al.* (1994)は稲ワラを施用したポット稲を用いて、水稻地上部から放出されるメタンの量は土壌中での稲ワラの存在する位置によって大きく異なることを示した。稲ワラ区では稲ワラの不均一分布のため、ライシメータ水田のようにかなり均一に管理された場所の中でもメタンフラックスにかなりの空間的ばらつきがあると推察される。

2.3 メタンフラックスおよび土壌水中メタン濃度の季節変化と環境条件

土壌水中のメタン濃度およびメタンフラックスの季節変化は、特に化成肥料区では、水稻の生育ステージと関連づけて説明されたが、5月初めの水稻移植から9月~10月の収穫まで、生育ステージの進行とともに環境条件も変化する。そこで、4シーズンのメタンフラックスおよび土壌水中メタン濃度の季節変化および年による変動が温度、日射等の環境条件と何等かの関係があるかどうか検討した。

土壌中でのメタン生成バクテリアの活性は高温ほど大きいことが知られている(Koyama, 1963, Lindau *et al.* 1993)。さらに、メタンフラックスと地温との間には正の相関があるという報告が数多くなされている(例えば、Schütz *et al.*, 1989)。従って、土壌水中メタン濃度およびメタンフラックスに温度が大いに影響すると推察される。各年において日平均気温の変化と土壌水中メタン濃度の変化とは一致していなかった(Fig. 1)が、フラックスと気温、特にフラックス測定時の気温とはおおまかには一致していた(Fig. 2)。年変動についてみると、記録的な冷夏であった1993年では他の年に比較して7月下旬から8月中の気温が著しく低かったにも関わらず、土壌水中メタン濃度は他の年に比較して高く、メタンフラックスも小さくないという結果であった(Fig. 1, Fig. 2およびTable 2)。

土壌水中メタン濃度の季節変化は、前述のように、土壌中でのメタン生成の基質となる有機物の量とバクテリアの活性の変化に大きく依存していると推察されるが、土壌水中のメタン濃度の年次間変動の原因については明らかにしなかった。

土壌水中のメタン濃度は土壌中でのメタン生成速度と生成されたメタンのCO₂への分解(酸化)速度、地下水への浸透溶脱量、さらに生成されたメタンが大気中へ放出される速度(フラックス)により決まると考えられる。土

Table 2 Annual emission of methane from each plot at lysimeter rice paddy in each year (g m⁻²).

	Mineral fertilizer	Rice straw
1991	11.4	51.9
1992	3.2	37.8
1993	8.5	45.1
1994	8.4	31.8

壤中でのメタン生成速度および分解速度は、メタン生成菌およびメタン酸化菌の菌数およびメタン生成の基質となる有機物量に大きく依存するため、現時点ではそれらを評価することはできていない。

一方、稲ワラ区におけるフラックスと気温、特にフラックス測定時の気温の季節変化はおおまかには一致していた (Fig. 2)。そこで、フラックスとフラックス測定時の気温の関係について検討した (Fig. 3)。

稲ワラ区では、単年度毎には比較的高い正の相関がある (指数関数をあてはめると相関係数は 0.63~0.78) が、4 年間のデータ全体でみると一つの曲線ではフィッティングできない。すなわち、1993 年と 1994 年では非常に温度が異なったにも関わらず、フラックスのレベルは同程度であった。その原因は前述の土壌水中のメタン濃度の差異である。

化成肥料区においては土壌水中のメタン濃度の季節変化が大きく、しかもその季節変化は温度の季節変化と一致しなかった。そのため、フラックスと温度との間にはあまり明確な相関は見られなかったと考えられる (Fig. 2 および Fig. 3; 相関係数は 0.12~0.47)。

なお、Schütz *et al.* (1989) の例などでは、フラックスと地温の相関をみているが、本研究では気温を用いて解析した。この理由は、1992 年まではライシメータ水田における地温を測定しなかったためである。しかし、

1993 年と 1994 年の日平均気温と日平均地温の季節変化をみると、その位相のずれはほとんどなかった (Fig. 1) ので日平均気温により解析しても問題がないと考えられた。また、1993 年と 1994 年について、フラックスとフラックス測定時の地温との関係の相関係数は Fig. 3 とほぼ同様であった。

以上の結果、温度の変化がメタンフラックスに影響を及ぼすという一般によく知られている事実は本研究によっても認められ、稲ワラ区においてはメタンフラックスの季節変化と温度とはある程度の一致が見られた。

2.4 水稻を介したメタン拡散におけるコンダクタンスおよびその温度依存性

水田から大気へのメタン放出過程については不明な点もあるが、特に水稻の生長が進んだ段階 (最大分げつ期頃) 以降では、水田からのメタン放出量のうち、90% 程度が水稻体を介した放出であるということが数多く報告されている (Cicerone, 1981; 伏伏ら, 1989; Schütz *et al.*, 1991; Neue *et al.*, 1994)。

Nouchi *et al.* (1994) は、水稻が土壌中メタンを大気へ放出する通導パイプであり、土壌中のメタンは水稻の通気組織系を通した拡散により輸送されると考え、拡散抵抗モデルを用いて解析した。それによると、メタンフラックスは次式で表される。

$$F = (C_s - (P_a/H)) D \quad (1)$$

ここで、 F : メタンフラックス、 C_s : 土壌水中メタン濃度、 P_a : 大気中のメタン濃度、 H : ヘンリー定数、 D : コンダクタンスである。大気中のメタン濃度 (ppm オーダー) は土壌水中のメタン濃度 (パーセントオーダー) に比較して非常に低いので、 $C_s - (P_a/H) \approx C_s$ となり、(1) 式は次式のようにになる。

$$F = C_s D \quad (2)$$

水稻体のコンダクタンスは、メタンが通過する根や茎の通気組織の断面積や移動距離あるいは根の表皮細胞膜の透過性など物理的要因により決まる。これらの実測は不可能であるが、(2) 式に F と C_s の実測値を代入するとコンダクタンス D が計算される。また、 D は水稻の生長に伴って変わると考えられる。水稻はメタンを茎 (葉梢) から大気中へ放出することが解っており (Nouchi *et al.*, 1990)、メタンの放出速度は水稻の茎数に比例すると考えると次式で表される。

$$F = C_s N D_1 \quad (3)$$

ここで、 N : 茎数、 D_1 : 一茎あたりのコンダクタンスである。

各年を通じて、(2) 式により計算されるコンダクタンス D の季節変化の全体的傾向は、水稻移植後から水稻の生長とともにコンダクタンスが高まり、逆に水稻生育末

Fig. 3. Relationship between air temperature and methane flux at the time of day measured.

Fig. 4. Seasonal changes in conductance for methane diffusion through rice plants, air temperature at the time of day measured and shoot number per plant in 1994.

期(登熟期以降)には非常に小さくなることである。Fig. 4に1994年の例を示す。水稻生育末期においては、土壌水中のメタン濃度は必ずしも低下していないにも関わらずメタンフラックスは著しく低下した (Fig. 1および Fig. 2)。Watanabe and Kimura (1995) も、ポット植えの水稻を用いて、水稻登熟期のメタンフラックスの低下が土壌中のメタン生成の低下には起因しないことを示している。これらの理由は、水稻体のコンダクタンスが低下したためと解釈でき、その原因としては、水稻根の表皮細胞におけるガス透過性の低下など生理的な特性が変化し、その特性変化には温度の低下が関係している可能性が唆されている (Nouchi *et al.*, 1994)。

年によるコンダクタンス D の差異についてみると、1992年で大きく、1993年で小さい傾向であった (次に説明する Fig. 5を参照)。

Nouchi *et al.* (1994) は、最大分けつ期以降のコンダクタンスと気温との間に直線的な関係を見いだした。そこで、1991年から1994年におけるコンダクタンス D および $D1$ とフラックス測定時の気温との関係を調べたのが Fig. 5および Fig. 6である。1991年と1992年は茎数を経時的に測定しなかったため、 $D1$ は計算できない。Fig. 5においては、1991年の中干し直後のデータおよび収穫前の落水時のデータは除いてある。また、1993年と1994年では灌水後60日頃を中心に D および $D1$ が大きなピークをとったが、その時期にはコンダクタンスが平均的な値より1オーダー以上大きく計算される場合があった。水稻が小さい時期には水田から大気へのメタン放出には気泡による割合が高いといわれており (Schütz *et al.*, 1991; Neue *et al.*, 1994), 測定されたメタンフラックスのうち水稻を通して放出された割合が小さかった可能性が考えられる。ここではそれらのデータを除

Fig. 5. Relationship between air temperature and conductance for methane diffusion through rice plant.

Fig. 6. Relationship between air temperature and conductance per shoot for methane diffusion through rice plant.

いて解析した。Fig.5およびFig.6によれば、稲ワラ区、化成肥料区いずれにおいても気温とコンダクタンスは正の相関があり、また、フラックスと気温の関係と異なり、1993年と1994年のデータが一つの曲線にのっている。このことは、1993年に土壌水中メタン濃度が1994年よりかなり高かったにも関わらずメタンフラックスは両年であまり異ならなかったことについて、以下のように説明することを可能にしている。すなわち、1993年では土壌水中メタン濃度は1994年より非常に高かったが、低温によりコンダクタンスが小さかったのでフラックスは1994年とそれほど差がなかった。1993年および1994年のデータをみると、株あたりのコンダクタンス D を用いたFig.5よりも、一茎あたりのコンダクタンス $D1$ を用いたFig.6の方がやや相関が高い。また、気温のかわりにフラックス測定時の地温を用いると曲線によりよくフィットする(Fig.7)。

稲ワラ区におけるコンダクタンスは化成肥料区のおよそ2倍程度であった(Fig.5～Fig.7)。この原因や、水稻の生育初期にコンダクタンスが大きく計算されることなどの理由は未だ明らかではない。今後、水稻を通したメタン放出と温度の関係などを含めたメタン放出機構のより一層の解明が必要である。

Fig. 7. Relationship between soil temperature at 5 cm depth and conductance per shoot for methane diffusion through rice plant.

ま と め

4シーズンの水稻生育期間について、ライシメータ水田における土壌水中メタン濃度および水稻株を含む田面からのメタンフラックスを測定し、季節変化と年次変動について検討し、以下の結果を得た。

1) 土壌水中メタン濃度、メタンフラックスの季節変化パターンは年によりやや異なった。

2) 水稻生育期間中の水田からの総メタン放出量は、稲ワラ区で $31.8 \sim 51.9 \text{ g m}^{-2}$ 、化成肥料区 $3.2 \sim 11.4 \text{ g m}^{-2}$ で、稲ワラ施用の有無により大きく異なり、またその放出量は年によりかなり差異があった。

3) 水田からのメタン放出が水稻の通気組織を通した拡散によるとした場合、そのコンダクタンスは温度と密接な関係があることが示唆された。

水田から大気へのメタン放出量を決定する要因としては、土壌中でメタン生成速度および酸化速度、そして土壌中で生成されたメタンを大気中に輸送する過程がある。後者の要因に関連して、水田からのメタン放出は水稻体を通した拡散によると仮定した場合、そのコンダクタンスと温度との関係は年によらず比較的高い正の相関があることが示されたので、今後さらに明らかにしたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、陽捷行博士(国際農林水産業研究センター)、青木一幸博士(東京都環境科学研究所)、農業環境技術研究所の鶴田治雄、小林和彦、八木一行の各博士に適切な指導、助言を頂いた。また、データ収集に当たっては農業環境技術研究所業務科の諸氏、福元知恵子氏、木村孝子氏および韓国電力公社の Cha Dong-wong 氏の協力を得た。ここに謝意を表する。

本研究は環境庁地球環境研究総合推進費「メタン・亜酸化窒素」により行われた。

引用文献

- Cicerone, R. J. and Shetter, J. D., 1981: Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion. *J. Geophys. Res.*, **86**, 7203-7209.
- 犬伏和之・堀 謙三・松本 聡・梅林正直・和田秀徳, 1989: 水稻体を経由したメタンの大気中への放出. 土肥誌, **60**, 318-324.
- 犬伏和之・村松康彦・梅林正直, 1994: わら施用時期が水田からのメタン放出に及ぼす影響. 土肥誌, **65**, 22-26.
- Koyama, T., 1963: Gaseous metabolism in lake sediments and paddy soils and the production of atmospheric methane and hydrogen. *J.*

- Geophys. Res.*, **68**, 3971–3973.
- Lindau, C. W., Patrick, W. H. Jr. and DeLaune, R. D., 1993: Factors affecting methane production in flooded rice soils. In *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*, ASA Special Publication no. 55, Am. Soc. Agro., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, 157–165.
- Neue, H. U., Wassmann, R., Lantin, R. S., Alberto, M. C. and Aduna, J. B., 1994: Diel and seasonal patterns of methane fluxes in ricefields. *IRRN*, **19**: 3, 33.
- Nouchi, I., Mariko, S. and Aoki K., 1990: Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiol.*, **94**, 59–66.
- Nouchi, I., Hosono, T., Aoki, K. and Minami, K., 1994: Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modeling. *Plant Soil*, **161**, 195–208.
- Schütz, H., Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R., Rennenberg, H. and Seiler, W., 1989: A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.*, **94**, 16405–16416.
- Schütz, H., Schröder, P. and Rennenberg, H., 1991: Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere. In *Trace gas emissions by plants*, ed. by Sharkey, T. D. et al., Academic Press, San Diego, 29–63.
- Watanabe, A., Katoh, K. and Kimura, M., 1993: Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields. II. Contribution of organic constituents in rice straw. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **39**, 707–712.
- Watanabe, A., Katoh, K. and Kimura, M., 1994: Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields. III. Effect of incorporation site of rice straw on CH₄ emission rates and their variation among shoots of a rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **40**, 497–504.
- Watanabe, A. and Kimura, M., 1995: Methane production and its fate in paddy fields: VIII. Seasonal variations in the amount of methane retained in soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **41**, 225–233.
- Watson, R. T., Meira Filho, L. G., Sanhueza, E. and Janetos, A., 1992: Green house gases: Sources and sinks. In *Climate Change 1992, The supplementary report to The IPCC scientific assessment*, ed. by Houghton et al., Cambridge Univ. Press, UK, 25–46.
- Yagi, K. and Minami, K., 1990: Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **36**, 599–610.
- Yagi, K. and Minami, K., 1993: Spatial and temporal variations of methane flux from a rice paddy field. In *Biogeochemistry of global change: radiatively active trace gases*, ed. by Oremland, R. S., Chapman & Hall, New York, 353–368.
- 八木一行・鶴田治雄・神田健一, 1994: 水管理が水田からのメタン発生に及ぼす影響. 資源・生態管理科学研究収録, **10**, 農業環境技術研究所, 61–70.