

報 文

水田土壌中における CO₂ と CH₄ の動態
— 大気へのフラックス —

木村 眞人・村瀬 潤

Dynamics of CO₂ and CH₄ in Paddy Soils and Their Fluxes to the Atmosphere

Makoto KIMURA and Jun MURASE
School of Agriculture, Nagoya University

Summary

The earth warming is now one of the most serious environmental problems. Of all the greenhouse gases, carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) are deeply related to agriculture. Methane is emitted from paddy fields, and nitrous oxide from upland fields according to fertilizer application, respectively. As is well known, paddy fields are one of the most important sources of methane fluxes. Hitherto, studies on methane fluxes from paddy fields have mainly focused on their quantitative estimation, while production and movement of methane in paddy soils have not been major concern among researchers.

Paddy soils are microbially dynamic environment, in which carbon dioxide and methane are produced and emitted through various processes. In this paper, the processes involved in the production and movement of carbon dioxide and methane in paddy soils were reviewed with special consideration to chemical properties of these two gases and the role of percolation water on their fates in paddy soils.

Key words : Paddy soil, Methane, Carbon dioxide, Soil microorganisms, Rice plant, Water management, Midsummer drainage

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 65, 11-20, 1992)

1. はじめに

現在地球温暖化が深刻な社会問題を引き起こしているが、その温室効果ガスのうち農業との係わりの深いのは、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) の3つである。水田では特にメタンが、また畑では施肥に伴う N₂O が問題とされている。メタンの大気中の濃度は現在約1.65ppm と一見低いが、温室効果への寄与率は約15~20%と二酸化炭素に次いで大きい^{1,2)}。しかもその濃度上昇率が毎年約1%と他の温室効果ガスに比較して高いことが注目される。³⁻⁸⁾ このメタンの発生源としては、水田が最も大きく、全発生量の約15~20%と見積られている (表1) ⁹⁻²²⁾。

ところで、これまで水田からのメタンフラックスに関

する研究は、その量的把握に重点が置かれ、水田土壌中の生成とその後の動態に関しては余り関心が払われてこなかったように思われる。しかし、水田は、以下に述べるように微生物環境としてダイナミックな環境であり、メタンが生成されてから大気へ放出されるまでに、さまざまな過程を経由する。

以下、二酸化炭素とメタンを対比させつつ、水田土壌各部位の特徴に考慮を払い、その生成とその後の動態につき概説する。

2. CO₂, CH₄の生成・移行によって水田土壌とはどのような環境か?

水田土壌から大気へのCO₂, CH₄のフラックスを考える場合、3つの点を考慮することが重要である。要約するならば、

① 土壌中の炭素は大部分が有機物の形態で存在し、微生物の分解にともなってCO₂, CH₄が生成する。水田

名古屋大学農学部 〒464-01 名古屋市千種区不老町

キーワード: 水田土壌, メタン, 二酸化炭素, 土壌微生物, 水稲, フラックス, 水管理, 中干し

における CO₂, CH₄の動態を考える場合、まず土壌微生物による有機物の分解を考慮することが肝要である。

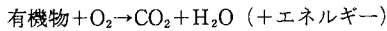
② この微生物分解は主に作土還元層で進行し、この層の上には作土酸化層、田面水が、下には心土層が位置し、いずれも酸化的環境である。また、水稻はこの作土還元層に根を張っており、これら気体の大気へのフラックスに大きな影響を及ぼしている。

③ 水稻は、作土還元層に根を伸長させている。根は単に養分を吸収するばかりでなく、同時に CO₂, 各種有機物を根圏土壌に供給している。

その結果、水田土壌中における CO₂, CH₄の生成とその後の動態、大気へのフラックスは、極めてダイナミックな挙動を示す。

3. CO₂, CH₄の生成

水田土壌が畑や草地の土壌と異なる特徴は、土壌が還元状態を呈することである。この還元状態は土壌中に生息する微生物の活動によりもたらされる。



この式は通常の有機物分解を示したもので、微生物は有機物を酸化分解し、この過程で生成したエネルギーを利用し増殖する。酸素は有機物の酸化剤であり、酸素自身は電子 (e⁻) を受け取り CO₂, H₂O に還元される。しかし作土還元層は有機物量に比べ溶存酸素の量が極めて少なく、湛水後速やかに酸素は消失する。そこで微生物は酸素の代わりに、別の物質を酸化剤として利用する。酸素の消失後、O₂ → NO₃⁻ → MnO₂ → Fe(OH)₃ → SO₄²⁻ → CO₂の順に逐次的にこれらの物質を利用・還元し、還元生成物である N₂, Mn²⁺, Fe²⁺, S²⁻, CH₄が集積する。この一連の逐次還元反応にともなって酸化還元電位 (E_h) は低下する。メタンが最も還元した環境で生成するのに

対し、炭酸ガスは微生物の活動にともなって絶えず生成している²³⁾。

なお微生物は種類により利用する酸化剤を異にする。表 2 に示すように、硝酸の消失、窒素ガスの生成は脱窒菌と呼ばれる一群の微生物によって、Mn²⁺, Fe²⁺の生成は微生物の代謝生産物による間接的または直接的還元により行われる。ここまでの還元は第 1 段階の好氣的・半嫌氣的分解過程であり、主に好気性菌や条件的嫌気性菌により行われる。ついで、絶対嫌気性菌による第 2 段階の硫酸還元、メタン生成が進行し、酸化還元電位は -200 mV 以下の低い値に達する。有機物の分解にともなって、硫酸還元の前段階までは、絶えず CO₂ が生成し、最後のメタン生成の前段階ではじめて CH₄ が生成する²³⁾。

従って、土壌が“肥沃”で有機物に富む土壌ほど、また有機質肥料を施用した場合、メタン生成量が増加する。特に、稲ワラや刈株・残根は堆肥に比べメタン発生を著しく増加させることが明らかにされている^{16,18,24)}。また、

表 1 各種発生源からのメタン発生量 (10⁶トン炭素/年: Bouwman, 1990)

水田	60-140
低湿地	60-160
埋立地	30-70
海洋、湖沼その他(生物起源)	15-35
反うす動物腸内	66-90
シロアリ	2-42
天然ガス採掘	30-40
石炭採掘	35
木材の燃焼	55-100
その他(非生物起源)	1-2
合計	337-714

表 2 湛水土壌中の還元過程と微生物代謝

湛水後の経過日数	物質変化	反応の起る土壌E _h , V.	CO ₂ 生成	微生物の代謝形式	有機物の分解形式
初期	分子状酸素の消失	+0.6 ~ +0.3	活発に進行する	酸素呼吸	好氣的半嫌氣的分解過程
	硝酸の消失	+0.4 ~ +0.1		亜硝酸型および脱窒型の硝酸還元	
	Mn(II)の生成	+0.4 ~ -0.1		Mn(IV, III)の還元	
	Fe(II)の生成	+0.2 ~ -0.2		Fe(III)の還元	
	S(II)の生成	0 ~ -0.2		硫酸還元	
後期	CH ₄ の生成	-0.2 ~ -0.3	緩慢に生成するか、停滞ないし減少する	メタン発酵	嫌氣的分解過程

水田土壌からのメタン発生においては、水稻根の枯死体、根からの分泌物が重要なメタンの起源であることは、以下に述べる通りである¹⁷⁾。

ところで、酸化剤は NO₃⁻を除き、大気に曝されると、再度酸化状態となり、再生が可能である。他方、有機物は分解に伴い減少する。そこで、この酸化剤の再生能力を利用し、水田土壌の Eh を高く維持しようとする技術が、中干しであり、間断灌漑である。

4. 各種有機物のメタン生成への寄与率とその時期

表3はこれまで世界各地で観測された1作期間に水田から発生するメタン量の推定値を示したものである¹⁹⁾。ところで、水田土壌における有機物の起源としては、土壌有機物、稲ワラなどの植物遺体、堆肥などの施用有機物、さらに水稻根から供給される各種有機物が挙げられる。そこで上記4者のいずれが主要なメタンの給源であるかを考えてみる。

1) 土壌有機物由来メタンの生成量推定

土壌有機物の分解に伴うメタン生成量を直接測定したデータはほとんどない。他方、土壌有機物の分解にともなって生成するアンモニア量に関する研究は膨大である。そこで、アンモニア生成量からメタン生成量を推定した(表4)。推定方法の詳細は省略するが以下の順序で求め

表-3 1作期間に水田土壌より発生するメタン量 (Bouwman, 1990)

発生速度 g(CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)	年間発生量 (gm ⁻² y ⁻¹)	施肥量
	210	
0.15-0.18	42	140kg硫安
0.22-0.28	25	元肥220kgリン安+硫安(16-20-0) 追肥113kg尿素
0.1	12	160kgN(元肥)+ 40kgN(追肥)硫安
0.2-0.58	54	各種処理/無肥料含む
0.15-0.42	36.3	記載無し
8×10 ⁻³ -8×10 ⁻⁴	7	
0.16-0.38	17-42	無肥料, 4年間
0.47-0.60	53-68	6-12トン稲ワラ+200kgN尿素/硫安
0.1-0.3	35	石灰窒素
0.12-0.15	14-16	200kgN硫安
0.18-0.21	19-22	100/50kgN硫安
0.19-0.38	21-42	100-200kgN尿素
0.23-0.68	24-77	3-12トン稲ワラ

たものである。

a) 土壌の化学性(全窒素含量, 遊離鉄含量など)から窒素無機化量を推定²⁵⁾

b) 各地の温度, 稲作期間を考慮し現地窒素無機化量を計算²⁵⁻²⁷⁾

c) 無機化窒素量に係数を掛け無機化炭素量を推定²⁸⁾

d) 無機化炭素中にしめるメタンの割合を算出²⁹⁾

e) 各土壌につき同一の土壌統分布面積を積算²⁹⁾

f) 各地より発生するメタン生成量推定

表4の推計には、全国地力基本調査事業の総合成績書に記載されている全国3343地点の水田土壌の性質、同一土壌統の分布面積を利用した。なお、本推定値は土壌が湛水状態で維持され、外部から空気の更新のない場合の結果であり、メタン生成量の最大値を示すものである³⁰⁾。

全国の水田から土壌有機物の分解にともなって1.1×10⁴トンのメタンが生成し、単位面積あたりのメタン生成量は南の地方ほど多くなると推察された。また、表4に示したメタン生成量は表3に示した値の1/5以下であり、メタンの主要な起源が他の形態の有機物に由来すると判断された。

2) 稲ワラ施用にともなうメタンフラックス

表5は水田土壌に稲ワラを施用し、稲作期間に土壌から大気中へ放出される炭酸ガス、メタンさらに田面水中

表-4 日本各地水田より発生するメタン量

地 方	メタン発生量	
	gCm ⁻² y ⁻¹	10 ³ トン炭素
東 北	2.4~2.7	1.3~1.5
関 東	3.4~3.7	1.7~1.8
北 陸	3.0~3.1	0.73~0.75
東 海	3.7~3.8	0.69~0.72
近 畿	4.0~4.4	0.77~0.83
中国・四国	5.2~5.4	1.7~1.8
九 州	4.6~4.8	1.4~1.5
	(平均) 3.7~3.8	(合計) 8.5~8.7

北海道はデータ不足のため推定より除外した。

表-5 施用稲ワラ炭素の分解

(伊藤・飯村, 1989)

処理区	施用C量	CO ₂ -C	CH ₄ -C	溶液中C
小量区*	6.07g	2.79g	0.59g	0.76g
中量区	12.18	5.03	1.70	1.32
多量区	20.28	6.73	3.79	1.44

*10 a 当たり稲ワラ300kg, 600kg, 1000kg施用に相当

に溶存する炭酸ガス量を測定したものである。水稻体は含まれず、無作付土壌からの放出量である³¹⁾。施用した稲ワラ炭素の10~19%がメタンとなって大気に放出されその割合は施用量の増加にともない増大していた。この量は10アール当たり10~69kgのメタン (CH₄-C) に相当し、表3に示すメタンフラックスの範囲内に入る。植物遺体の寄与の大きいことが推察される。なお、この実験において稲ワラ無添加区ではメタンの生成がほとんど見られず、先の土壌有機物の寄与の少ないとする推定を支持するものであった。

3) 堆肥施用にともなうメタンフラックス

図1は施肥の種類を異にする4つの処理区を設けて水稻をポット栽培し、経時的に水稻体を通して大気に放出されるメタンフラックスを測定したものである²⁴⁾。本図では出穂期を境として、その前後のメタンフラックス総量を示した。測定期間は出穂期前後の約40日間である。

前期におけるメタンフラックスは、稲ワラ添加区で著しく多く、堆肥区を含む他の区間ではいずれもわずかで処理区間で顕著な相違が認められなかった。他方後期には無肥料区を除くいずれの区からも多量のメタンフラックスが観察され、大局的には稲ワラ添加区を含む各区間のフラックスは類似したものであった。

本実験の結果から、生育前期(出穂期前)のメタンフラックスは一般に少なく、出穂期以降にその大半が発生すると言える。また、施肥の種類や土壌の種類とその来歴(化学肥料、稲ワラ連用)の影響は、生育前期に主に反映し、特に稲ワラの直接還元は水田からのメタンフラックスを著しく増大させた。しかし、堆肥を施用した場合には化学肥料区よりやや多い程度で大差の無い値であった。ところで、堆肥として土壌に投入される有機物量は、土壌に本来存在する有機物量の10%以下であり、その分解が緩慢であることから、施用にともなうメタン生成量の増加はそれほど多くないと推論された³²⁾。

4) 水稻根の供給する有機物に由来するメタンフラックス

図1において、生育後期の多量のメタンフラックスが、化学肥料区と他の有機物施用区との間で互いに類似していたことより、水稻根に由来する有機物を基質とするメタンフラックスと推察された。本実験において、水稻体の発達の悪い無肥料区でのみ、生育後期のメタンフラックスが低い値に留まっていたこと、Texasの水田においてメタンフラックスと水稻根量の高い相関関係のあることが観察されたこと¹⁷⁾も、この推察を支持していると考えられる。

水田に直接ワラを施用することは希であり、本結果から水稻根に由来する有機物がもっとも大きなメタンフラ

ックスの起源と言えるであろう。

ところで、農業研究センター旧鴻巣試験地の水田圃場で行なった試算によると、水稻根から供給される有機物量は、当圃場に供給される全有機物量の約11~13%に相当していた³²⁾。この値は、一見それ程大きな値とはいえないが、その供給部位が根周辺であり、しかも水稻生育時期に相当することから、上述のようなメタンフラックスの起源として大きな意義を有していたのであろう。

5. CO₂, CH₄の大気, 心土へのフラックス

水稻根圏において生成したCO₂, CH₄のその後の移動は、これら気体の土壌への溶解度の違いから異なった挙動を示す。

1) CO₂の大気中へのフラックス

根圏土壌中のCO₂は一部水稻により経根的に吸収され速やかに地上部へと移行する。その際一部は大気中に排出されるが、残りは体内を移行中に光合成の基質として利用される。

和田らが、長野土壌を用いて水稻をポット栽培し、移植後40日目の根圏土壌に¹⁴CでラベルしたNaHCO₃を注入しその後の¹⁴Cの分布を調べたところ、地上部へ移行した¹⁴Cのうち、明条件下では約70%が地上部に取り込まれ

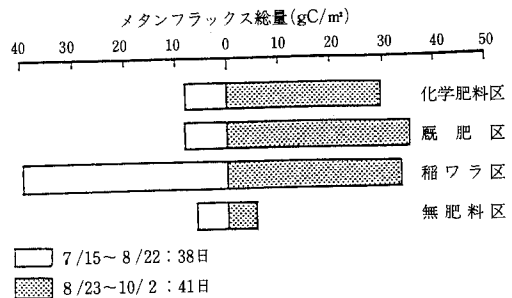


図-1 メタンフラックス総量の比較

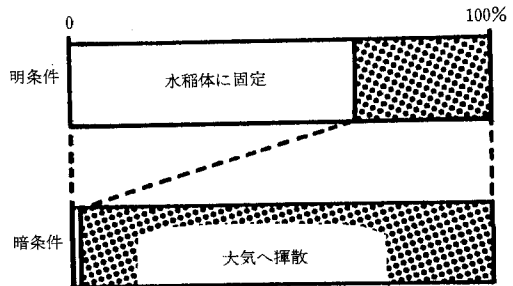


図-2 水稻根圏に注入したNaH¹⁴CO₃の水稻による根上部への移行に対する光の影響

暗条件下ではほぼ全量が大気中に排出されていた(図2)³³⁾。

また、水耕栽培した登熟期の水稻を用いて調べられたこの CO₂ の移行速度は³H (³H₂O) を用いて測定した水分吸収速度にほぼ等しいこと、導管内の溶液の pH が 5.7 程度であることから、H₂CO₃ の形態で蒸散流に伴い地上部へと移行したものと推察された³⁴⁾。また、同様に水耕栽培した最高分けつ期の水稻の場合には CO₂ 吸収速度の方が水吸収速度よりも早い結果が得られており、CO₂ の積極的吸収が推察されている³⁵⁾。

一方樋口らは、¹⁴CO₂ で飽和した水耕液で生育させた水稻を図3のように水中において根の節近くで切断し、根から発生してきた気泡を採取し分析したところ、¹⁴CO₂ が検出された。さらに、水中で節の根元から空気を注入すると葉鞘の向軸側から気泡が漏れてくる現象を認め、これらの結果をもとに CO₂ が細胞間隙、破生間隙をガス状で移行すると推察した^{36,37)}。

2) CO₂ の下方へのフラックス

他方、土壤中に残った CO₂ は主に HCO₃⁻ として浸透水の下降に伴い下層へと運ばれる。水稻根は作土からの CO₂ の溶脱量を変化させることが知られている。

図4は異なる量の乾燥稲わらを添加した長野土壤に水稻を作付した区と、無作付の区を設け、25℃ または 30℃ でポット栽培し、ポットの下部から採取した浸透水中に

含まれる炭酸量を経時的に測定したものである。

無作付区では稲わら添加量の増加や温度が高くなるにつれて、浸透水中の炭酸量 (Σ CO₂, HCO₃⁻) が増加したのに対し、水稻作付区ではそのような傾向は明らかでなかった。水稻の栽培は、水稻生育初期や有機物含量が少なく還元状態の発達しにくい土壤では Σ CO₂ (HCO₃⁻) の溶脱を促進させ、同時に対イオンとして Fe²⁺ や各種陽イオンの溶脱も促進していた。他方還元状態が発達しや

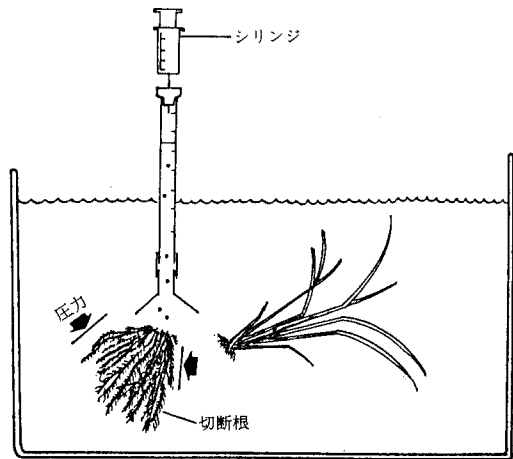


図-3 植物根からのガス採取法

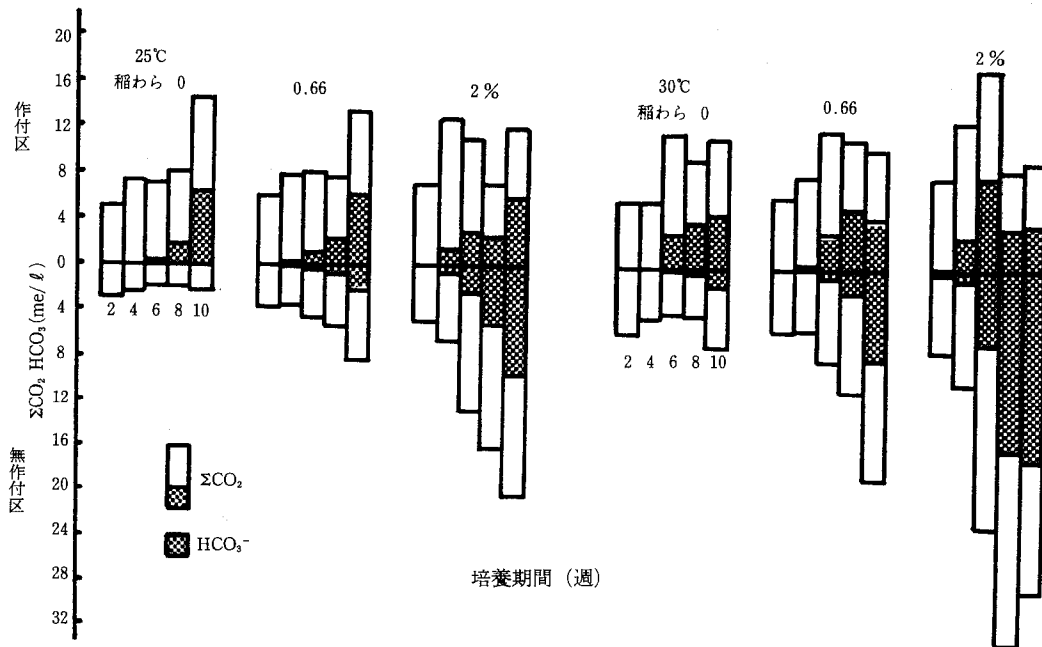


図-4 CO₂ および HCO₃⁻ の溶脱におよぼす温度および稲わら添加の影響

すい土壤では、 ΣCO_2 (HCO_3^-) の溶脱を湛水前期には促進したが、湛水後期には抑制する傾向を示した³⁸⁻⁴⁰⁾。このように、水稻根はその根圏環境を“一定環境”に維持する緩衝能力を有しており、土壤の有機物含量、温度の相違に関わらず、ほぼ一定の ΣCO_2 を土壤水中に溶存させていると考えられた。

3) メタンの大気へのフラックス

近年、メタンの発生源である水田圃場からの発生量推定・季節変動が活発に研究され、その主要な経路が水稻体であることを Cicerone and Shetter が初めて見出した^{11,41)}。これに対し土壤中から直接大気へと気泡や拡散で運ばれるメタン量はフラックス全量の1割にも満たないものと考えられている^{12,16,41-44)}。

Seiler ら (図5)¹²⁾は、水稻地上部を田面水下で切除すると (△のプロットC) メタン発生量が切除しない場合 (■のプロットA) に比べて著しく低下し、無作付区 (●のプロットD) とほぼ等しい低い値になるのに対し、水面より上で切除した場合 (○のプロットB) には、切除しない場合とメタンフラックスに差異が認められなくなるのを見いだした。このようにメタンの土壤からのフラックスが、茎葉の有無によらずほぼ同量であったことより、メタンの水稻体内の移行が蒸散流に乗っての移行ではなく、破生間隙を通しての拡散による移行であると推察されている。

そこで、分けつ期水稻根が、若く破生間隙の発達も未熟な根と、成熟し十分破生間隙の発達した根から構成されていることに注目し、この時期の2つの水稻作付ポットを実験に供試した⁵⁰⁾。まず、地上部を水面上で切除した水稻体からの CH_4 発生量を測定し、ついで葉鞘の半数

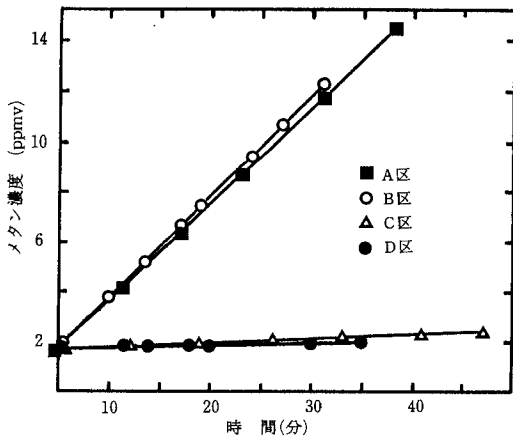


図-5 水田からのメタンの移行経路
A区：作付 B区：水面上5cmで切断
C区：水田下5cmで切断 D区：無作付

を若いものから順に水面下でさらに切除し古い葉鞘のみを水面上に残したポットと、反対に葉鞘の半数を古いものから順に水面下でさらに切除したポットからのメタンフラックスを測定した(図6)。その結果、若い葉鞘だけを水面上に残したポットでは初めのメタンフラックスの半量以下にまで低下したのに対し、古い葉鞘を残したポットでは初めのフラックスと差異が認められなかった。従って、根圏で生成したメタンの地上部への主要な移行経路は破生間隙の発達した成熟根とそれにつながる葉鞘であると判断された。

4) 透水によるメタンの心土への移行

Yagi らは透水によりメタンの大気へのフラックスが顕著な減少を示すことを見だし、この原因が透水に伴う土壤 Eh の上昇の結果と推察している⁴⁹⁾。

透水は溶存酸素を土壤中に運び込むとともに、土壤中の水溶性物質—微生物の基質となる易分解性有機物と微生物の生育を阻害する代謝生産物より構成—を溶脱する。従って、易分解性有機物が多量に供給されている条件下では、透水によって除かれる基質の量は土壤からの供給量に比べて比較的少なく、むしろ生育阻害因子の除去作用が効いて、透水により有機物の分解が促進され、土壤 Eh が低下する。一方、易分解性有機物の供給が乏しい条件下では、溶存酸素の侵入と基質の溶脱除去の作

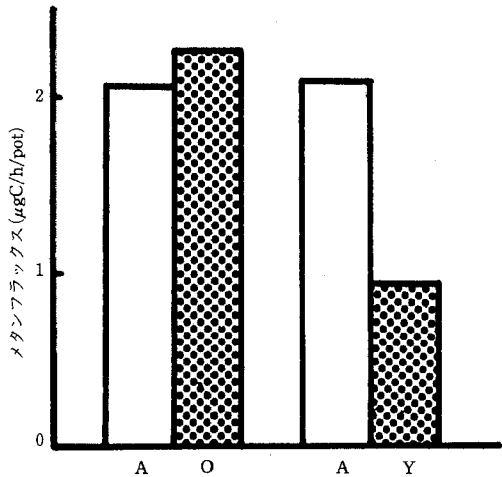


図-6 水稻茎の主要メタン発生経路 (2つのポットを供試)
A：全ての水稻茎は水面上 (第1回測定)
O：若い茎をさらに水面下で切除 (第2回測定：左ポット)
Y：古い茎をさらに水面下で切除 (第2回測定：右ポット)

用が強く効いて、逆に土壌 Eh の上昇を招く⁴⁶⁾。

我々が稲ワラを添加した土壌に水稻を作付し、浸透速度を0, 5, 15mm/日とする3区を設け、水稻体を通してのメタンフラックスを測定したところ、図7にすやうに区間で差異が認められなかった⁴⁹⁾。このように、土壌の種類(主に土壌有機物含量)の違いにより、メタンフラックスに対する透水の影響は異なる。

ところで、浸透に伴う土壌水の流下は、溶存したメタンを心土へと運搬する。図7に、浸透水中の溶存メタン量の測定結果も合わせ示した。大気へのメタンフラックスの結果とは異なり、浸透速度の上昇にともない心土へ運ばれるメタンの量は増加した。

この心土へのメタンの移行は生育時期に伴って変化し、水稻移植直後は、水根の発達が不十分であること、添加稲ワラの分解が活発なため、浸透水中に飽和量のメタンが観察された(土壌中に気泡が生成していることが観察されており、この気泡のメタン分圧を約0.9気圧と推察)。その後、水稻の生育にともない、土壌中のメタンは主に水稻体を通して大気へと運ばれ、浸透水中のメタン量は減少した。特に、根の供給する有機物がメタンの主要な給源となる生育後期には、心土へ移行するメタンはごく少量であった。しかし、9月に入り根の老化・枯死が顕著となり、また気温も低下すると、大気へのメタンフラックスが減少し、反対に心土へのフラックスが再び増大した。また、生育全期間を通してのメタンフラックスのうち、大気へのフラックスは浸透速度0, 5, 15mm/日の区においてそれぞれポット当たり2730, 2500, 2650mg炭素と区間でほとんど差が認められなかったのに対し、心土への移行量は0, 71, 251mg炭素/ポット(0, 3.5, 12.5g/m²)と浸透速度の増加にともなって増大した。その結果、浸透速度が0, 5, 15mm/日の区における心土へのメタンの移行は、大気へのそれぞれのそれぞれ0, 2.8, 9.5%

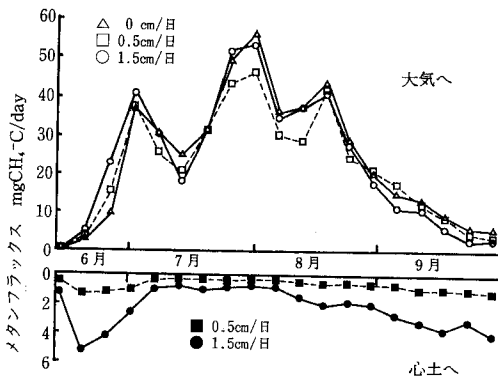


図-7 透水がメタンの大気および心土層への移行におよぼす影響

に相当していた。

CH₄は土壌水への溶解度がCO₂に比べ1/100以下(pH=7.0)と少なく、湛水土壌中では気泡状態で存在し、下層への浸透はほとんど無いものとこれまで推察されてきた。しかし、浸透速度が10mm/日の条件下では、100日間に心土へと運ばれるメタンの総量はメタン分圧が1気圧の場合、飽和条件下では約16g/m²(25℃)に達する。この量は、表3に示した水田からのメタンフラックスの数割に相当し、浸透にともない心土へのメタンフラックスの重要性が再認識されるであろう。

なお、メタン生成の抑制のための水管理としては、中干しがもっとも効果的である²⁴⁾。また、中干し以降になされる間断灌漑もメタン生成を顕著に抑制しているものと考えられる。

6. 大気へのCH₄フラックスに及ぼす各種肥培管理の影響

CH₄の大気へのフラックスは、土壌中でのCH₄生成量と、その後の移行の結果と言える。3.で述べたように、メタンの作土中での生成量は有機物量と酸化剤の量により決まり、①施肥^{11,13,16,18,24,41)}、②土壌の種類^{17,18,24,44)}、③土壌のこれまでの来歴²⁴⁾、④生育温度^{13,16-18,44,47)}、などがその生成に影響を及ぼすことがこれまでの研究で明らかにされている。施肥は、水稻体を増加させ、根からの有機物供給量を増大させる結果、大気へのCH₄フラックスを増加させた¹⁷⁾。

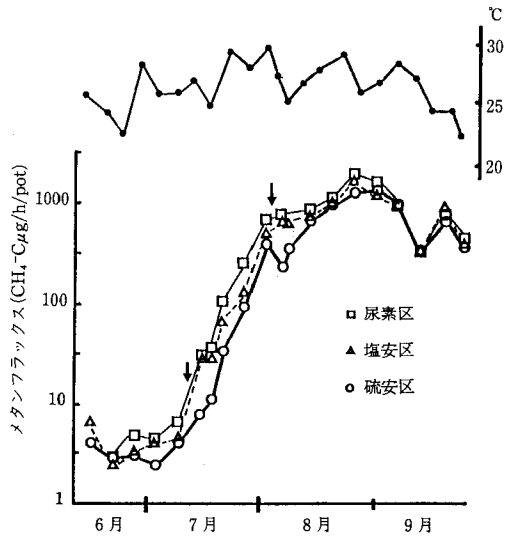


図-8 メタンフラックスにおよぼす施肥窒素の種類の影響 (矢印は追肥時期を示す)

表一六 異なる窒素肥料を追肥した水田土壌から発生したメタン総量

	(mgCH ₄ -C/pot)		
	硫安区	塩安区	尿素区
土壌表面散布	1,103(100*)	1,136(112)	1,320(130)
葉面散布	557(55)	451(45)	1,056(104)

測定期間：1991年6月8日(移植日)～9月25日(収穫日), 109日間

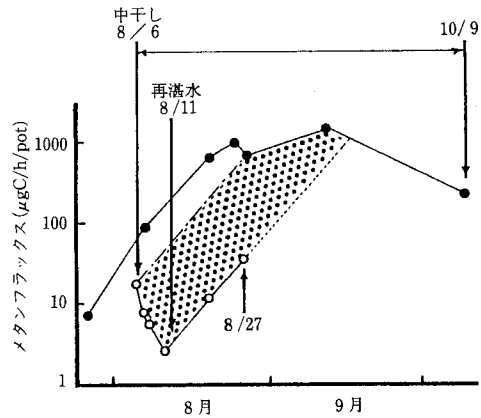
*：硫安土壌表面散布区に対する相対値

ここでは、施肥の種類と施肥法、中干しの影響を取り上げ、営農行為がメタンフラックスにいかに関連しているか、その一端を示すことにする。

1) 施肥と施肥法の影響

農業現場ではさまざまな窒素質肥料が使用されており、その中でも硫安、塩安、尿素は最もポピュラーな肥料である。そこで、これら肥料を用いて水稻をポット栽培し、メタンフラックスに及ぼす施肥窒素の種類の影響を検討した(図8)⁴⁸⁾。生育期間中基肥と2回の追肥を行ったが、1回目の追肥までは3区でほとんど差異がなく低い発生量であった。しかし、2回の追肥の結果、移植期から刈取り期までに測定されたメタンフラックスの総量は硫安、塩安、尿素区でそれぞれ1010, 1140, 1320mg炭素であり、尿素区は硫安区に比べ30%多くメタンが発生していた(表6)。尿素に比べて硫安施肥によるメタンフラックスの減少はイタリアの水田においても同様に観察されている¹⁶⁾。なお、追肥によるメタンフラックスの減少は追肥直後に特に顕著であり、追肥直前の1/10以下にまで低下する場合も観察されているほどである¹⁶⁾。

メタンの発生量は、施肥法によっても大きく相違する。同じ日に土壌表面ではなく、葉面に散布した場合、表6に示すように、メタンフラックスは著しく抑制され、その効果は硫安で顕著であった。塩安の場合も抑制効果が顕著であったが、葉面散布により葉身に'肥料焼け'の症状が観察され、生育が阻害されたこともメタンフラックスが低下した一因と判断された。生育期間中のメタンフラックス総量は硫安、塩安、尿素区でそれぞれ560, 450, 1060mg炭素を記録し、硫安を土壌表面に散布した場合に比べ、硫安葉面散布区では45%抑制されていた。基肥の施用方法の影響に関し、施用する肥料をそれぞれ表面施用、表層土壌に混和して施用、深層へ施用し、メタンフラックスを比較したところ、深層施用>表層土壌へ施用>表面施用、の順にメタンフラックスは抑制されることが見いだされている¹⁶⁾。



図一九 メタン発生におよぼす中干しの影響
○ 中干し区 ● 対照区 (常時湛水)
図中斜線部分は中干しによるメタンフラックス量の減少を示す

2) 中干しの影響

図9は、湛水状態でポット栽培した水稻を8月6日から5日間中干しし、その後湛水状態に戻した場合、常時湛水状態で栽培した場合に比べ大気へのメタンフラックスがどの程度減少するかを調査したものである。図から明らかなように、常時湛水区ではメタンフラックスが8月から上昇し、10月にかけて高い値を維持したのに対し、中干し区では8月27日まで低い値に留まっていた。その結果、図中斜線で示した領域を中干しによるメタンフラックスの減少量と仮定し(中干し区の測定は8月27日で中止)、8月6日から10月9日までのメタンフラックスを求めたところ、中干しによる減少量は約50%と計算された²⁴⁾。従って、3. で述べたように、わずか5日間の中干しによる'酸化剤の再生'は、土壌のEhを上昇させ、その結果顕著なメタンフラックスの減少をもたらすことが明らかとなった。

以上、水田土壌中におけるCO₂、CH₄の動態を述べた。水田土壌から大気へのこれら気体のフラックスは決して単純ではなく、極めて多くの過程がその背後で進行している。このことは、CH₄フラックスを制御することが容易でないことを示唆するものであるが、他方制御に際してさまざまな方策が考えられることを暗示するものといえるであろう。

引用文献

- 1) Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., and Russell, G. : Climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. *J. Geophys. Res.*, **93**, 9341—9364 (1988)
- 2) Bouwman, A. F. : Introduction. In "Soils and The Greenhouse Effect" Ed. by Bouwman, A. F., 25—32, John Wiley and Sons, Chichester (1990)
- 3) Khalil, M. A. K. and Rasmussen, R. A. : Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane. *J. Geophys. Res.*, **88**, 5131—5144 (1983)
- 4) Ehhalt, D. H., Zander, R. J. and Lamontagne, R. A. : On the temporal increase of tropospheric CH₄. *J. Geophys. Res.*, **88**, 8442—8446 (1983)
- 5) Rinsland, C. P., Levine, J. S. and Miles, T. : Concentration of methane in the troposphere deduced from 1951 infrared solar spectra. *Nature*, **318**, 245—249 (1985)
- 6) Rasmussen, R. A. and Khalil, M. A. K. : Atmospheric trace gases : trends and distributions over the last decade. *Science*, **232**, 1623—1624 (1986)
- 7) Steele, L. P., Fraser, P. J., Rasmussen, R. A., Khalil, M. A. K., Conway, T. J., Crawford, A. J., Gammon, R. H., Masarie, K. A. and Thoning, K. W. : The global distribution of methane in the troposphere. *J. Atmos. Chem.*, **5**, 125—171 (1987)
- 8) Blake, D. R. and Rowland, F. S. : Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. *Science*, **239**, 1129—1131 (1988)
- 9) Ehhalt, D. H. and Schmidt, U. 1978 : Sources and sinks of atmospheric methane. *Pageoph.*, **116**, 452—464
- 10) Sheppard, J. C., Westberg, H., Hopper, J. F., Ganesan, K. and Zimmerman, P. : Inventory of global methane sources and their production rates. *J. Geophys. Res.*, **87**, 1305—1312 (1982)
- 11) Cicerone, R. J., Shetter, J. D. and Delwiche, C. C. : Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. *J. Geophys. Res.*, **88** (C), 7203—7209 (1983)
- 12) Seiler, W., Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R. and Scharffe, D. : Methane emission from rice paddies. *J. Atmos. Chem.*, **1**, 241—268 (1984)
- 13) Holzapfel-Pschorn, A. and Seiler, W. : Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.*, **91** (D), 11803—11814 (1986)
- 14) Cicerone, R. J. and Oremland, R. S. : Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles*, **2**, 299—327 (1988)
- 15) Aselmann, I. and Crutzen, P. J. : Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net productivity, seasonality and possible methane emissions. *J. Atmos. Chem.*, **8**, 307—358 (1989)
- 16) Schütz, H., Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R., Rennenberg, H. and Seiler, W. : A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *Geophys. Res.*, **94** (D), 16405—16416 (1989)
- 17) Sass, R. L., Fisher, F. M., Harcombe, P. A. and Turner, F. T. : Methane production and emission in a Texas rice field. *Global Biogeochem. Cycles*, **4**, 47—68 (1990)
- 18) Yagi, K. and Minami, K. : Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **36**, 599—610 (1990)
- 19) Bouwman, A. F. : Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In "Soils and The Greenhouse Effect" Ed. by Bouwman, A. F., 61—128 John Wiley and Sons, Chichester (1990)
- 20) Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., Ming-Xing Wang and Lixin Ren : Methane emissions from rice fields in China. *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 979—981 (1991)
- 21) Matthews, E., Fung, I. and Lerner, J. : Methane emission from rice cultivation : geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions. *Global Biogeochem. Cycles*, **5**, 3—24 (1991)
- 22) 八木一行：土壌生態系のガス代謝と地球環境2。—水田からのメタン発生—。日土肥誌, **62**, 556—562 (1991)
- 23) 高井康雄：水田土壌の動態に関する微生物学的研究 I, 肥料科学, **3**, 17—55 (1980)
- 24) Kimura, M., Miura, Y., Watanabe, A., Katoh, T. and Haraguchi, H. : Methane emission from paddy field (Part 1) Effect of fertilization, growth stage and midsummer drainage : Pot experiment. *Environ. Sci.*, **4**, 265—271 (1991)
- 25) 鬼鞍 豊・吉野 喬・前田乾一：稲作期における土壌

- 窒素の有効化過程, 日土肥誌, **46**, 255—259 (1975)
- 26) 作物統計 No.19: 農林水産省経済局統計情報部編, 東京農林統計協会 (1977)
- 27) 日本気象総覧: 東洋経済新報社編, 東洋経済新報社 (1983)
- 28) Inubushi, K. and Wada, H.: Mineralization of carbon and nitrogen in chloroform-fumigated paddy soil under submerged conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **34**, 287—291 (1988)
- 29) 織田健次郎・三輪睿太郎・岩元明久: 地力保全基本調査代表断面データのコンパクトデータベース, 日土肥誌, **58**, 112—131 (1987)
- 30) Kimura, M., Ando, H. and Haraguchi, H.: Estimation of potential CO₂ and CH₄ production in Japanese paddy fields. *Environ. Sci.*, **4**, 15—25 (1991)
- 31) 伊藤滋吉・飯村康二: 北陸地方の細粒質強グライ土水田における有機物の分解とガス発生量について, 土肥誌, **60**, 290—297 (1989)
- 32) 木村真人・高井康雄: 水田における有機物の供給と分解, 「微生物の生態12—有機物負荷と環境浄化」, pp. 42—60, 学会出版センター (1984)
- 33) 和田秀徳・横山 正・高井康雄: 水稲根圏から地上部・大気への CO₂ の移行, 土肥誌, **54**, 217—222 (1983)
- 34) 横山 正・和田秀徳・高井康雄: 水稲の経根的炭酸吸収と吸収炭酸の輸送過程, 土肥誌, **54**, 223—227 (1983)
- 35) 横山 正・和田秀徳・高井康雄: 水稲の経根的炭酸吸収に影響を与える因子, 土肥誌, **55**, 361—366 (1984)
- 36) Higuchi, T.: Gaseous CO₂ transport through the aerenchyma and intercellular spaces in relation to the uptake of CO₂ in rice roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **28**, 491—497 (1982)
- 37) Higuchi, T., Yoda, K. and Tensho, K. Further evidence for gaseous CO₂ transport in relation to root uptake of CO₂ in rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **30**, 125—136 (1984)
- 38) 和田秀徳・土屋一成・高井康雄: 水田土壌からの物質の溶脱に関する研究 (第1報), 水田土壌からの主要無機成分の溶脱過程, 土肥誌, **50**, 511—516 (1979)
- 39) 土屋一成・和田秀徳・高井康雄: 水稲栽培が主要無機成分の溶脱に及ぼす影響と温度因子, 土肥誌, **52**, 27—30 (1981)
- 40) 土屋一成・和田秀徳・高井康雄: 水稲栽培が主要無機成分の溶脱に及ぼす影響と環境因子, 土肥誌, **55**, 213—219 (1984)
- 41) Cicerone, R. J. and Shetter, J. D.: Sources of atmospheric methane, Measures in rice paddies and a discussion. *J. Geophys. Res.*, **86** C8, 7203—7209 (1981)
- 42) Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R. and Seiler, W.: Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. *Plant Soil*, **92**, 223—233 (1986)
- 43) 犬伏和之・堀 謙三・松本 聰・梅林正直・和田秀徳: 水稲体を経由したメタンの大気への放出, 土肥誌, **60**, 318—324 (1989)
- 44) Sass, R. L., Fisher, F. M. and Harcombe, P. A.: Mitigation of methane emissions from rice fields: Possible adverse effects of incorporated rice straw. *Global Biogeochem. Cycles*, **5**, 275—287 (1991)
- 45) Yagi, K., Minami, K. and Ogawa, Y.: Effects of water percolation on methane emission from paddy fields. 農業環境技術研究所資源・生態管理科研究収録, **6**, 105—112 (1990)
- 46) Takai, Y., Wada, H., Kagawa, H. and Kobo, K.: Microbial mechanism of effects of water percolation on Eh, iron, and nitrogen transformation in the submerged paddy soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **20**, 33—45 (1974)
- 47) Schütz, H., Seiler, W. and Conrad, R.: Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry*, **11**, 77—95 (1990)
- 48) Kimura, M., Asai, K., Watanabe, A., Murase, J. and Kuwatsuka, S. 投稿中: Suppression of methane fluxes from flooded rice-grown paddy soil by foliar spray of nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Plant Nutr.*
- 49) Murase? J., Kimura, M., and Kuwatsuka, S. 投稿中: Methane production and its fate in rice paddies (Part 3) Effects of percolation in paddy field on methane flux distribution to the atmosphere and to subsoil. *Soil Sci. Plant Nutr.*
- 50) Miura, Y., Watanabe, A., Kimura, M. and Kuwatsuka, S. (印刷中): Methane emission from paddy field (Part 2) Main route of methane transfer through rice plant, and temperature and light effects on diurnal variation of methane emission. *Environ. Sci.* **5** (1992)

(受稿年月日1991年12月15日)