

## 森林流域におけるメタンの吸収・放出機構に関する研究

伊藤 雅之

京都大学大学院 農学研究科 地域環境科学専攻

### 1. はじめに

メタン( $\text{CH}_4$ )は二酸化炭素に次ぐ重要な温室効果ガスであり、温室効果に対する寄与を示す質量基準の地球温暖化係数(GWP; global warming potential)は 20 年という期間で積算した場合、二酸化炭素の約 62 倍に及ぶため、全球のメタン収支のより正確な推定が求められている。

現在、さまざまな土壌表面におけるメタンフラックス観測の結果をもとに、全球のメタンの収支が推測されており、その大気中の濃度は年間約 1%の割合で増加していると考えられている(Torn and Harte, 1996)。しかし、それらメタンフラックスは時空間的に非常に多様であるために、地域的にも未だ正確な収支が把握されるには至っていない。そのため、更なる観測データの蓄積が必要とされている。

メタンは一般に、酸素が十分に存在する土壌においてはメタン酸化菌により酸化され、一方で、水で飽和した土壌では還元的環境下でメタン生成菌により生成される。

このような認識のもと、大部分が水で飽和していない土壌で構成される森林の地表面は一般にメタンの最も有効な吸収源となると推測されている(Le Mer and Roger, 2001)。そのため、森林土壌では主に不飽和条件下における吸収能に重点をおいてメタンフラックス観測が行われており、メタンのシンクとしての機能が評価されている。しかし、温帯湿潤地域における森林流域では谷底部や溪流・湖沼周辺に湿地状地形が見られる場合が多い。このような湿地では還元条件下の土壌においてメタンの生成・放出が卓越している可能性がある。したがって、森林流域におけるメタンの収支を考える上で、これらの湿地を含めたメタン放出・吸収の空間分布とその生成・酸化機構を把握する必要がある。

本研究では、流域内に湿地が存在する森林流域を対象に湿地域と斜面域でのメタンフラックスを観測するとともに、流域内の種々の地点において、メタンフラックスに影響を及ぼしうる水文観測や土壌の性質の調査を行った。さらに、その結果をもとに湿地域が流域全体のメタン収支にどれほどの影響を及ぼすかについて検討を行った。

### 2. 方法

#### 1. 観測地の概要

滋賀県南部田上山地に位置する草津川上流の桐生水文試験地(北緯34度58分, 東経136度00分)において観測を行った。流域の植生は1960年ごろに植林されたヒノキが主なものである。また、観測を行った湿地内には溪畔域特有のハンノキが多く存在するが、草本植物の被覆

面積は小さく、湿地の大部分の表土は露出している。湿地内には常に一定の流路で表流水が認められ、降雨中や降雨後、一時的に水溜りが生じる部位がある。桐生水文試験地における1993年から2002年の年平均降水量、年平均流出量はそれぞれ1568.7mm、762.4mmで、1999年から2002年における年平均気温は13.7°Cである。また、本観測を行った2001年、2002年、2003年の年平均気温、年降水量、年流出量を表-1に示す。2001年は平年並みの降水量、2002年は少雨、2003年は多雨であった。

メタン濃度測定用のガス試料は流域(5.99ha)内の湿地(0.03ha)とその周辺ヒノキ林床において採取した。対象とした湿地は大きく上流側の湿地と下流の湿地に分けられる。前者をKW1、後者をKW2と呼ぶ。KW1, KW2の面積はそれぞれ70.4m<sup>2</sup>, 265.8m<sup>2</sup>であり、最大土層厚はそれぞれ約2m, 1.7mである。深さ5cmまでの土壌は、KW1では砂質、KW2では泥質である。ヒノキ林内における観測は、KW1から斜面上部側に2m高い地点に位置するDry-A, KW2の湿地との境界地点であるDry-B, KW2から斜面上部側に5m高いDry-Cの3地点において行った。また、Dry-A, B, Cの地点における土層厚はそれぞれ約70cm, 20cm, 10cmであった。Dry-A, Bは表土がリターに覆われているが、Dry-Cは表土が露出している。

	2001	2002	2003
Mean annual air temperature (°C)	13.2	13.4	12.9
Annual precipitation (mm year <sup>-1</sup> )	1437.6	1179.4	1946.8
Annual discharge (mm year <sup>-1</sup> )	698.2	405.3	1097.9

Unpublished data by Laboratory of Forest Hydrology, Kyoto University.

表-1 観測流域における2001年～2003年の年平均気温、年降水量、年流出量

## 2. 採気・原位置測定

各観測地点においてメタンフラックスの測定を2～3週間の間隔で行った。各回、各地点において3個のチャンバーを用いて繰り返しとした。

ガス試料は、クローズドチャンバー法で採取し、あらかじめ真空にしたガラスバイアルに加圧封入した。クローズドチャンバー法はチャンバーによって形成された土壌面を含む閉鎖系の内部における気体の濃度上昇速度からフラックスを測定する方法である。

チャンバーは湿地では底面直径300mmのポリエチレン製チャンバーを、地上高270mm、体積17000mlとなるように設置し、ヒノキ林では底面直径162mmのポリプロピレン製チャンバーを、地上高80mm、体積1325mlとなるように設置した。どちらも上蓋が開閉可能であり、採気時以外は蓋はされていない。湿地・林床ともに測定は1時間以内に行い、上蓋を閉じた直後の採気を0分とした。

採気と同時にチャンバー近傍において深度0～12cmの平均体積含水率をTDR体積含水率計で測定した。湿地では同じくチャンバー近傍において土壌中の深度5cmにおける酸化還元電位(Eh)を白金電極式ORP計で、溶存酸素濃度(DO)を隔膜式ガルバニ電池法DO計によって測定した。また、Dry-A, KW1, KW2の各地点において土壌表面と深度10cmの地温を自記式の温度計(RT-11, エスペックミック)で連続測定した。湿地内の観測点では井戸を埋設し、採気時に地下水位を測定した。

### 3. メタンフラックス測定

ガラスバイアルに加圧封入して実験室に持ち帰った試料は48時間以内にFID(flame ionization detector)付きガスクロマトグラフ (GC-14B, Shimadzu) を用いてメタン濃度を測定した。メタンフラックスはチャンバーのヘッドスペース中のメタン濃度変化の傾きから求めた。メタンフラックス $F_M$ は以下の計算式を用いて計算した。

$$F_M = \frac{dC_{CH_4}}{dt} \times M_{CH_4} \times \frac{PV}{ART} \quad (1)$$

ここで $dC_{CH_4}/dt$ はチャンバー内のメタン濃度の変化量、 $M_{CH_4}$ はメタンの分子量、 $P$ は大気圧、 $V$ はチャンバー内のヘッドスペースの体積、 $A$ はチャンバーで被覆された土壌の面積、 $R$ は気体定数、 $T$ は気温 (K) である。

### 3. 結果

#### 1) ヒノキ林床

図-1に降水量とヒノキ林内の各地点Dry-A, B, Cの体積含水率、地温 (Dry-A)、メタンフラックスの季節変化を示す。メタンフラックスは正の値が放出、負の値が吸収を示す。体積含水率は観測期間を通じてDry-C地点が最も低く、次いでDry-Aが高く、Dry-Bが最も湿潤であった。平均値ではDry-BとDry-Aの体積含水率に大差はないが、Dry-Aではチャンパー周辺の体積含水率がほぼ等しいのに対して、Dry-Bでは体積含水率はチャンパーの湿地側で高く、斜面上方側で低い傾向が見られた。

KW2より5m斜面上部にあり含水率の最も低いDry-C地点では、2003年1月から2004年8月までの間の全ての観測回において3地点の中でもっとも大きな吸収を示し、平均は $-0.54 \text{ mg-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。KW1より2m斜面上部のDry-Aにおけるメタンフラックスは、2001年10月から2004年8月までの平均値で $-0.20 \text{ mg-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、観測期間を通じてメタンは吸収されていたが、その季節変動は小さかった。湿地との境界付近で最も含水率の高いDry-Bにおける2003年1月から2004年8月までの平均フラックスは $0.29 \text{ mg-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。Dry-Bにおけるメタンフラックスの変動はDry-Cや

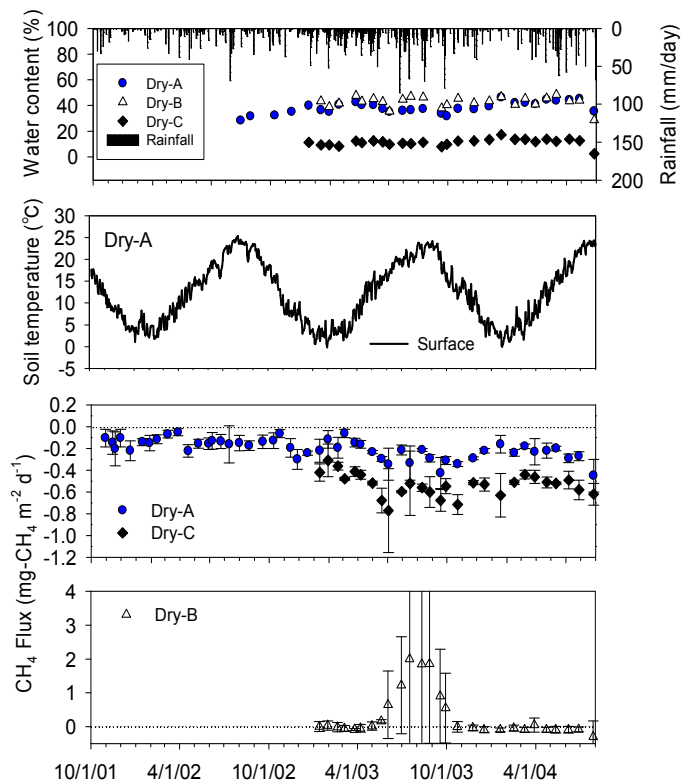


図-1. ヒノキ林(Dry-A, B, C)の各地点の体積含水率、Dry-Aの表層地温、メタンフラックスの季節変化 (メタンフラックスは3個のチャンパーの測定値の平均値と標準誤差を示し、正が放出・負が吸収を示す。)

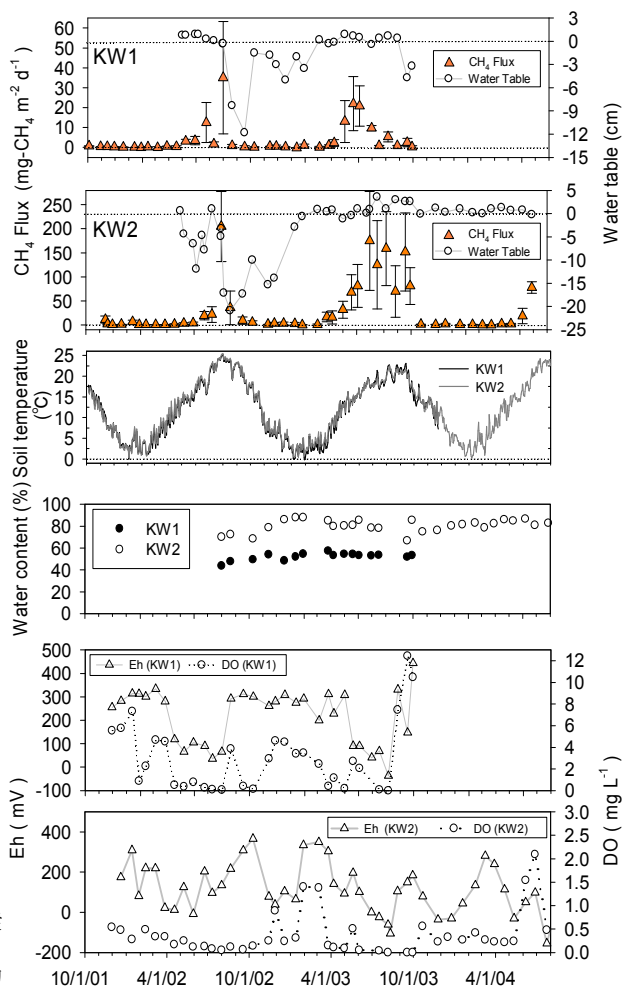
Dry-Aと比較して大きく、低温期にはメタン吸収が見られたものの、春から夏にかけてはメタン放出が増大し、低温期のメタン吸収に比べて非常に大きいメタン放出が観測された。

## 2) 湿地表面

上流の湿地(KW1), 下流の湿地(KW2)の各採気地点のメタンフラックス, 体積含水率, 地下水位, Eh, DO, 地温の季節変動を図-2に示す。KW1, KW2ともにメタンは冬期には吸収に転じることがあるもののほぼ年間を通じて放出されていた。KW1, KW2におけるメタンフラックスは大きな季節変動を示すが, 両地点において夏期に最も大きな放出が見られた。また, KW1とKW2のフラックスを比較すると, 夏期における放出量の最大値はKW2の方が大きかった。

KW1, KW2における観測期間平均の体積含水率はそれぞれ52.1%, 77.6%であり, ヒノキ林の3地点に比べて常に高い値を示した。

(右)図-2. KW1, KW2の各地点におけるメタンフラックス, 地下水位, 表層地温, 体積含水率, 酸化還元電位(Eh), 溶存酸素濃度(DO)の季節変動 (メタンフラックスは3個のチャンバーの測定値の平均値と標準誤差を示し, 正が放出・負が吸収を示す。)



## 4. 考察

### 1. メタンフラックスの時間的変動の制御要因

KW1, KW2における地温とメタンフラックスの関係を図-3に示す。KW1, KW2の両地点において, メタンの大きな放出は地温が10°Cを超えると起こっていること, 高温時にはそれに比べて大きなフラックスを示していることがわかる。また, ヒノキ林床-湿地境界にあたるDry-B地点においても夏期の温度上昇に伴って放出量が増加している(図-2)。メタン生成菌は好中温菌が多くを占め, 20°C~40°Cの範囲で活発にメタン生成が起こる(Topp and Pattey, 1997)。本研究において図-2と図-3から, KW1, KW2の両地点で2003年の夏期のように高水位が維持された場合, 既往研究と同様に, 放出量が地温の上昇に伴って増加することが示された。しかしながら, 図-3で高地温時においてもメタンの放出がそれほど大き

くならない観測日も見られ、地温がメタンの放出に及ぼす影響は既往の培養実験による報告などと比較すると複雑であった。この要因としてメタンの放出に地温に加えて地下水位等のほかの条件が影響することが推測される。

高温期に見られる DO 値と Eh 値の低下 (図-2: KW1 の 2002 年夏期前半, 2003 年夏期, KW2 の 2003 年夏期) は地温の上昇による影響と考えられ、このような強還元的环境下でメタン生成が活発化し、放出量の増大につながったものと考えられる。

図-3 に示した地下水位とメタン放出速度の関係を見ると、KW1, KW2 の両地点において、

地下水位が表層付近に存在するときにメタンの放出量が大きく、地下水位が地表面下にあるときはそれに比べ放出が小さいことがわかる。これは先に述べたように地下水位の低下が土壌の表層から深部へ向かって酸化環境を拡大させることで、表層土壌がメタンの生成に不適な状態に変化することに起因していると考えられる。

地温の変化はメタンの酸化にも影響を及ぼすと考えられており、森林土壌においてメタン酸化速度と地温が正の相関を示すことが報告されている。本研究では Dry-A, Dry-C において 2003 年夏期に吸収量の微増が見られたが、その季節変動は小さく、低温期にも吸収を示した。また、湿地近傍の Dry-B において低温期に吸収と放出が均衡していたにもかかわらず高温期には放出が卓越した状態になった(図-1)。これらのことから、地温の増加はメタンの酸化を促進させるものの、生成を促進させる影響に比べるとその影響が小さいといえることができる。

ヒノキ林の各地点における体積含水率とメタンフラックスの関係について、斜面上部の地点 Dry-C においては、体積含水率が他の 2 地点に比べ非常に低く、吸収が大きかった。地表面でのメタン吸収速度の決定要因について、Born et al. (1990)は、土壌の間隙率、水分条件、間隙の屈曲などによって決定される土壌空気中でのメタン通気性が主に影響すると指摘している。このことを考慮すると、本研究の Dry-C 地点では、Dry-A や Dry-B 地点に比べて土壌の通気性が高く、大気からメタンの供給がなされやすいために、メタン酸化が起こりやすい状態にあったことが推測される。Dry-A は体積含水率・メタンフラックスとも

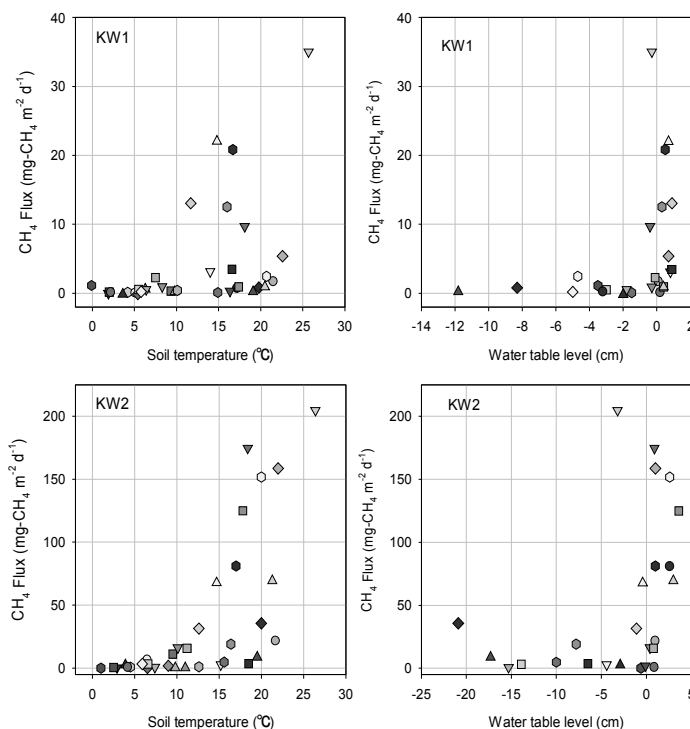


図-1. KW1(上段),KW2(下段)における(a)表層地温, (b)地下水位とメタンフラックスの関係。(各地点の左右の図で同じマークは同じ観測日のデータであることを示す)

に Dry-C と Dry-B の間にあるという傾向が見られ、年間を通じてメタンを吸収していたが、メタンフラックスの変動が小さく、体積含水率の変動に対するメタンフラックスの変動に明瞭な傾向は見られなかった。湿地境界の Dry-B では夏期に放出が卓越していたが、これは Dry-B が湿地表面(地下水面)から近く、チャンバー内部の特に斜面下部の湿地側に体積含水率の高い地点を常に含む状態にあったことが影響していると考えられる。つまり、Dry-A, Dry-C などと比較して体積含水率が高かったため、高温期には湿地に近い湿潤な部位や土壌深部など部位によって嫌気的狀態が生じ、メタン吸収を上回るメタン生成が起こったと考えられる。

これら各地点 (Dry-A, B, C) における吸収速度、体積含水率と湿地表面からの距離を考慮に入れると、土壌水分条件が各地点の好気・嫌気条件を規定する一因となり、地点ごとのメタン吸収速度の違いに影響していると推測される。また、ヒノキ林床ではメタン吸収が年間を通じて起こる Dry-C や Dry-A のような地点に加えて、吸収と放出が拮抗し、季節によって入れ替わる Dry-B のような地点が存在することが明らかになった。

## 5. 結論

森林流域の各部位においておこるメタンの酸化・生成や吸収・放出の時間的変動は、地下水面や体積含水率の変動といった物理的な要因と温度の変化が酸化還元状態を変化させることにより制御されていることが明らかになった。空間的には、体積含水率の低い不飽和条件下の斜面土壌においては、酸化的環境でメタンの酸化(吸収)が起こっており、メタンのシンクとして機能していることが明らかになった。一方で、森林の河道に沿った湿地域においては還元的な環境のもとメタンの生成(放出)が卓越しており、メタンのソースとして機能していることが明らかになった。メタンフラックスと地温との関係からメタンの生成(放出)は酸化(吸収)に比べ温度の変化の影響を受けやすいことが明らかになり、このため、夏期の温度上昇に伴う生成量の増加が流域全体としてのメタン収支に大きく影響することが推測された。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたりエスベック地球環境研究・技術基金は資金面で大きな助力となりました。ここに謝意を表します。

### 引用文献

- Born, M., Dorr, H. and Levin, I. (1990) : Methane consumption in aerated soils of the temperate zone, *Tells*, **42B**, pp. 2-8.
- Le Mer, J. and Roger, P. (2001) : Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review, *Eur. J. Soil Biol.*, **37**, pp. 25-50.
- Topp, E. and Pattey, E. (1997) : Soils as sources and sinks for atmospheric methane, *Can. J. Soil Sci.*, **77**, pp. 167-178.
- Torn, M. S. and Harte, J. (1996) : Methane consumption by montane soils: implications for positive and negative feedback with climatic change, *Biogeochemistry*, **32**, pp. 53-67.