

スギ人工林土壌における環境要因の変化とメタン吸収との関係

豆谷龍治¹・藤巻玲路²・山下多聞³

Relationships between soil environmental factors and methane uptake by soil in a Japanese cedar plantation

Ryuji MAMETANI¹, Reiji FUJIMAKI² and Tamon YAMASHITA³

Abstract It is known that the forest soil under an aerobic condition is a biological sink for methane in the atmosphere. Two-thirds of Japanese land are occupied by natural and artificial plantation forest. In a plantation forest, thinning is commonly performed to control tree density dependent upon market demands. Thinning and other forest operation disturb the forest canopy and floor and may alter such environmental factors as soil temperature, soil moisture content, soil gas phase and litter supply. Thinning usually raises the soil temperature and soil moisture, and lowers the soil gas phase and litter supply. In order to clarify the effects of the changes in those factors following forest thinning on the methane uptake rate, we conducted the manipulation experiments in our laboratory. Soil samples taken from a Japanese cedar plantation in the Sambe Forest were incubated at three levels each of temperature, moisture content, soil gas phase and litter materials to determine their effects on methane uptake rate of the soil. As results, the methane uptake rate correlated negatively with soil moisture content and positively with soil gas phase and soil temperature. On the other hand, the mass of litter materials made no significant difference in the rate. When the rate of methane uptake decreased after thinning as reported before, it could be attributable to higher soil moisture and/or lesser soil gas phase. The positive effects of elevated soil temperature on the enhancement of methane uptake by the soils in the thinned forests might be limited.

Keywords: andic soils, forest thinning, manipulation experiments, soil compaction, soil moisture

1. はじめに

太陽からの放射エネルギーは地表面に吸収され熱に変わる。地表面から放射される熱を大気中の温室効果ガスが吸収し再放射して地表が暖まる。これを温室効果とい

う。現在の地球の表面における全世界平均気温は15℃であり、温室効果ガスが無いとすると-18℃となる(犬伏1999)。温室効果ガスは現在の地球の豊かな自然環境、生物多様性を構成する要因ともなっている。しかし、産業革命以降、温室効果ガスの大気中濃度が急激に上昇している。温室効果の加速による異常気象や生態系の破壊が懸念されている。

温室効果ガスには二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)等が挙げられる。産業革命以降2000年までのメタン増加による放射強制力は0.48 W/m²であり、温室効果ガスにおいて、二酸化炭素の1.6 W/m²に次いで大きな値を示している(IPCC, 2007)。大気中のメタン濃度は現在、約1.7 ppmvであり、二酸化炭素に比べれ

¹ 大学院生物資源科学研究科農林生産科学専攻

² 生物資源科学部農林生産学科

³ 生物資源科学部附属生物資源教育研究センター

¹ Graduate School of Life and Environmental Science, Shimane University

² Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University

³ Education and Research Center for Biological Resources, Shimane University

ば 200 分の 1 であるが、1 分子あたり二酸化炭素の約 23 倍の温室効果がある。また年間濃度上昇速度が温室効果ガス中で最も大きいと注目されている。

メタンは水田や湿地、反芻動物のルーメン等において生成・放出され、乾燥土壌や大気において酸化・吸収される。これらはメタン生成菌やメタン酸化菌による微生物反応により生成、吸収が行われており、メタン生成菌は嫌気的条件、メタン酸化菌は好気的条件が活性条件とされている。よって、温帯湿潤地域の森林には流域の谷底部や溪流周辺の溪畔域に湿地状地形が見られ、このような条件下ではメタンが放出されている（伊藤ら、2005）が、大部分の森林土壌は水分の不飽和な条件下の土壌であるため、森林は一般にメタンの主要な吸収源として捉えられている（Stuedler et al. 1989）。

しかし、間伐を行ったスギ人工林においてメタン吸収速度の低下が報告されている（橋本・古賀 2004, 田中ら 2010）。既往の研究においてメタン吸収速度は土壌温度や土壌水分量との関係について議論されていることが多く、石塚（2002）は地温変化がメタン吸収速度に影響を与えているとしている。また橋本・古賀（2004）は土壌水分量がメタン吸収速度に影響を与えていることから、間伐による土壌温度や土壌水分量の変化がメタン吸収速度の低下に寄与していると推測される。しかし板（2010）は地温、含水率ともメタン動態に影響していないと報告した。メタン動態のメカニズムについてまだ不明な点も多く、これらがメタン吸収速度の低下要因であるという実証的なデータは取られていない。また間伐施業による森林土壌への影響は地温の上昇（齋藤 2008）や含水率の上昇（篠宮 2006）だけでなく気相率の低下（篠宮ら 2011）やリター供給量の減少（倉本 2004）も起こるとされていることから、気相率やリター供給もメタン吸収速度に寄与していると推測されるが、メタン吸収速度との関係について研究例が少なくデータの蓄積が必要である。

そこで本研究では、間伐にともなうさまざまな土壌環境の変化によって生じることが予測されるメタン吸収速度の変化を、スギ人工林土壌を対象とし、温度、水分条件、気相率、リター供給の 4 種類の環境要因の影響について操作実験により評価することを目的とする。

2. 材料と方法

2-1. 土壌試料

島根大学三瓶演習林の 37 年生スギ人工林において土壌試料を採取した。土壌型は適潤性黒色土であり、厚さ 50

cm 以上の A 層を持つが、有機物層を取り除いた表層 10 cm 程度の土壌を採取し、2 mm 目の篩にかけた細土を 100 ml 採土円筒（断面積 20 cm²×高さ 5 cm）に詰めたものを実験に供した。濾紙を乗せた漏斗に細土 5 g を入れたところへ蒸留水を注ぎ、自然濾過をした後に土壌の保持する水分量を最大容水量とした。

2-2. 操作実験

実験 1（温度） 土壌の水分条件を最大容水量の 60% となるように蒸留水で水分量を調整した細土を詰めた 100 ml 採土円筒の上端と下端に蓋をしたものをそれぞれ 5 個ずつ、10℃、20℃、30℃ に設定した恒温器に入れて 30 時間の前培養をした（表 1）。前培養の後、上端の蓋を外した採土円筒をセパラブルフラスコに静置し、ヘッドスペースのメタン濃度が約 12 ppmv となるように 1000 ppmv のメタンガスを 5 ml 注入した。メタン雰囲気下でそれぞれの温度条件で 125 分にわたって引き続き培養した。密閉後 5 分と 125 分にセパラブルフラスコ内の気相をシリンジで 1 ml 採取しメタン濃度を測定した。メタン濃度測定後に土壌実容積の測定と気相率の算出、含水率の測定をそれぞれ実施した。

実験 2（土壌水分） 土壌の水分条件を最大容水量の 60%、同 70%、同 80% となるようにそれぞれ蒸留水で水分量を調整した細土を詰めた 100 ml 採土円筒の上端と下端に蓋をしたものをそれぞれ 5 個ずつ 20℃ に設定した恒温器に入れ 30 時間の前培養をした（表 1）。前培養の後、実験 1 と同様にメタン濃度を測定した。

実験 3（気相率 1） 土壌の重量を変えることで気相率を変化させた 100 ml 採土円筒を 3 種類 5 個ずつ用意した。土壌水分を最大容水量の 60% となるように蒸留水で水分量を調整した後、20℃ に設定した恒温器に入れ 30 時間の前培養をした（表 1）。前培養の後、実験 1 と同様にメタン濃度を測定した。

実験 4（気相率 2） 圧密により気相率を変化させるために、一定重量の土壌を詰めた採土円筒の上端から下に向かって 0 cm 押しつぶしたもの（土壌の見かけの容積 100 ml）、1 cm 押しつぶしたもの（土壌の見かけの容積 80 ml）、2 cm 押しつぶしたもの（土壌の見かけの容積 60 ml）をそれぞれ 5 個ずつ用意した。土壌水分を最大容水量の 60% となるように蒸留水で調整し、20℃ に設定した恒温器に入れ 30 時間の前培養をした（表 1）。前培養の後、

表 1. 操作実験に用いた採土円筒に詰められた土壌の諸条件

実験番号	リター	培養温度	絶乾重 (g)	気相率 (%v/v)	圧密	含水率 (%)	最大含水量比 (%)
1	土壌のみ	10℃	44.25	46.30	普通	46.88	60
	土壌のみ	20℃	44.27	47.01	普通	46.89	60
	土壌のみ	30℃	44.19	46.98	普通	46.86	60
2	土壌のみ	20℃	41.17	48.35	普通	47.01	60
	土壌のみ	20℃	41.16	42.87	普通	50.86	70
	土壌のみ	20℃	41.16	37.95	普通	54.18	80
3	土壌のみ	20℃	41.89	47.50	普通	46.99	60
	土壌のみ	20℃	45.53	43.89	密	46.91	60
	土壌のみ	20℃	49.24	38.82	さらに密	47.01	60
4	土壌のみ	20℃	47.38	40.25	普通	46.98	60
	土壌のみ	20℃	47.43	20.71	密	47.10	60
	土壌のみ	20℃	47.44	1.13	さらに密	46.89	60
5	土壌のみ	20℃	32.51	40.66	普通	47.10	60
	土壌+リター	20℃	33.44	39.50	普通	47.02	60
	リターのみ	20℃	1.07	NA	NA	44.12	NA

実験 1 と同様にメタン濃度を測定した。

実験 5 (リター) リターを載せても採土円筒の蓋が閉じられるように土壌を 8 割程度詰めた採土円筒を 10 個と空の採土円筒 5 個を用意した。土壌試料を採取したスギ人工林の林床で採取した有機物層のうち L 層を選別した。[土壌のみ], [土壌+L 層 1 g], [L 層 1 g のみ] の 3 種類 5 個ずつ作成し、土壌試料は最大含水量の 60% となるように蒸留水で調整の後、20℃ に設定した恒温器に入れ 30 時間の前培養をした (表 1)。その後、同じリター供給条件でメタン吸収速度を測定した。リターのみの実験区は三相計測ができなかったため、欠損値 NA とした。

2-3. メタン濃度の測定と吸収速度の推定

メタン濃度の測定には、Porapak Q カラムを装着した FID ガスクロマトグラフ (島津 GC-14B) を用いた。測定時の設定は、N₂ ガスをキャリアガスとし流速は 40 ml/sec, カラムの温度は 70℃, インジェクションポートの温度は 150℃, デテクターの温度は 150℃ とした。

測定したメタン濃度から以下の式 1 を用いて 1 時間当たりのメタン吸収速度を算出した。

$$Y = \frac{k(C_{125} - C_5) \cdot 10^{-6} \cdot V_H}{M_o \cdot \frac{(125 - 5)}{60}} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここで Y はメタン吸収速度 (ng-CH₄/hour/g), M_o

は試料乾燥重量 (g), C₅ と C₁₂₅ は密閉後 5 分と 125 分のメタン濃度 (ppmv), V_H はヘッドスペースの体積 (フラスコ体積から試料の固相と液相の体積を差し引いた値: ml), k は理想気体の状態方程式から計算した換算係数 (ng-CH₄/ml) である。予備実験の結果、注入したメタンガスの拡散が十分に行われるまで 5 分必要であることが明らかになり初期状態のメタン濃度測定を密閉後 5 分とした。

2-4. 統計解析

環境要因である土壌の温度、水分量、圧密、リター供給の効果をみるため、メタン吸収速度について分散分析による解析を行った。有意な関係が認められたものについてはホルムの方法による多重比較検定を行った。また、上記環境要因とメタン吸収速度の間の相関係数をもとめた。

3. 結 果

培養温度 10℃ の実験区、同 20℃ の実験区、同 30℃ の実験区の全てにおいて有意差が認められた (図 1A)。培養温度が高いほどメタン吸収速度は増加し、温度に対して正の相関を示した (r=0.844)。その温度依存性は Q₁₀ 値で示すと、10℃~20℃ では 1.25, 20℃~30℃ では 1.03 であった。20℃~30℃ における Q₁₀ 値よりも 10℃~20℃ に

における Q_{10} 値の方が大きい傾向にあった。

最大容水量の60% (含水率47%)の実験区, 同70% (含水率51%)の実験区, 同80% (含水率54%)の実験区の全てにおいて有意差が認められた (図1B). 土壌水分が増加するほどメタン吸収速度は低下し, 土壌水分に対し負の相関を示した ($r=-0.969$).

土壌の重量を変更することで気相率を調整した実験では, 圧密が普通 (土壌乾重42 g / 100 ml) の実験区, 圧密が密 (土壌乾重45 g / 100 ml) の実験区, 圧密がさらに密 (土壌乾重49 g / 100 ml) の実験区の全てにおいて有意差が認められた (図1C). 土壌の重量を変えない実験でも, 圧密が普通 (土壌乾重47 g / 100 ml) の実験区,

密 (土壌乾重47 g / 80 ml) の実験区, さらに密 (土壌乾重47 g / 60 ml) の実験区の全てにおいて有意差が認められた (図1D). 気相率が低下するほどメタン吸収速度は低下傾向を示し, 気相率に対し正の相関を示した (実験3: $r=0.994$, 実験4: $r=1.000$).

リターの影響についての実験では, リターのみの実験区でもメタン吸収が認められた. 土壌のみの実験区と土壌+リターの実験区の間には有意差は認められなかった (図1E). リターの有無はメタン吸収速度に大きく寄与していないことが示唆された.

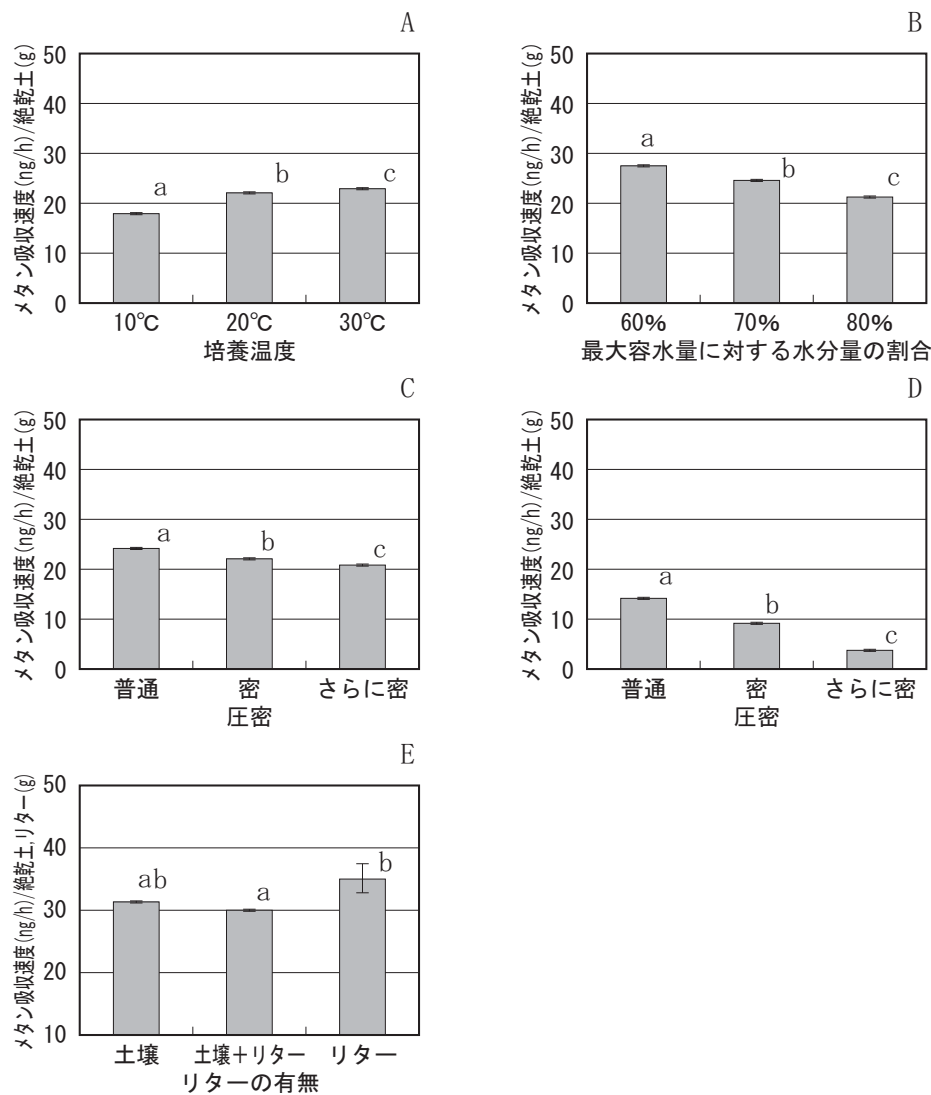


図1 土壌またはリター1g当たりのメタン吸収速度. エラーバーは標準誤差を示し, 異なるアルファベット小文字は5%水準で有意差があることを示す (ホルムの検定).
A: 実験1 (温度の影響), B: 実験2 (含水率の影響), C: 実験3 (気相率の影響1),
D: 実験4 (気相率2の影響), E: 実験5 (リターの影響).

4. 考 察

土壤中でのメタン生成と分解は微生物反応であり、メタン生成菌は嫌気的条件、メタン酸化菌によるメタン分解は好気的条件が活性条件とされている。またメタン生成とメタン分解は同時に起こり、メタン動態のバランスをとっている (von Fischer and Hedin 2007)。つまり土壤状態の変化によるメタン吸収速度の低下はメタン生成速度の上昇およびメタン分解速度の低下の両方またはどちらかが起こったためであると推測される。

地温の操作実験において、今回の培養温度10℃から30℃間のメタン吸収速度の Q_{10} 値は、日本各地で得られたデータの平均値 1.43 ± 0.29 (石塚 2002) に近い値であった。より高温域への温度上昇による Q_{10} 値の減少は、石塚 (2002) も報告している。いずれにしても Q_{10} 値は1を超えており高温でメタン吸収速度は上昇する。その原因として、メタン生成菌の最適温度がより低温側にあること、もしくはメタン酸化菌の活性の増大幅 (正味のメタン分解の Q_{10} 値) がメタン生成菌の活性の増大幅 (正味のメタン生成の Q_{10} 値) よりも大きいことなどが考えられる。この結果は間伐による地温上昇 (齋藤 2008) とメタン吸収速度の低下 (橋本・古賀 2004) の対応とは逆の傾向を示している。つまり、間伐による地温の上昇はむしろメタン吸収速度を速めているにもかかわらず全体としてはメタン吸収速度が低下しており、地温ではない別の要因がより強力にメタン吸収速度を低下させていると結論付けることが出来る。

本研究では当初、含水率の上昇により嫌気的環境が増加し、好気的環境が減少するためメタン吸収速度は低下すると予測した。実際に、含水率の上昇にともないメタン吸収速度は低下した。このことから、間伐による土壤含水率の上昇とメタン吸収速度の低下が関連している可能性を考えることが出来る。

また気相率の操作実験についても、圧密によって気相率が低下するほどメタン吸収速度は低下傾向を示した。これも、嫌気的環境の増加と好気的環境の減少によりメタン吸収速度の低下が起こったと推測された。さらに、気相率の低下によって土壤中のガス拡散速度の低下が生じたとも推測される。嫌気的環境の増加によりメタン分解能が低下し、ガス拡散の鈍化により土壤中より高濃度のメタンを含んでいるであろう地表の大気も土壤中に十分に供給されないこと、などからメタン吸収速度が低下したと考えられる。今回の実験から間伐による土壤気相

率の低下とメタン吸収速度の低下が関連している可能性を考えることが出来る。

リターの操作実験では、リター自体にメタン吸収能があることが認められた。しかし、土壤のみの実験区と土壤+リターの実験区の間に有意差は認められなかった。培養実験に供したリターの量が少ないことと比較的新しく微生物活性の低いL層を添加したことから顕著な差が見られなかったとも考えられるが、土壤とリターのメタン吸収反応は単純な相加関係ではないと推察される。今回の実験の結果、間伐によるリター量の減少はメタン吸収速度の低下に強く寄与するものではないと結論した。

間伐による土壤状態の変化と今回の実験とでメタン吸収速度の低下の要因として一致したものは、含水率の上昇と気相率の低下の二つの要因であった。間伐によって、通常は好気的な環境にある森林土壤が部分的に嫌気的な環境を持つようになると考えられる。間伐による立木密度の低下にともなう樹冠における蒸散量の減少に起因する土壤水分の上昇さらに間伐作業のため林内に入り込む作業員の踏圧による土壤の圧密化による気相率の減少がスギ人工林土壤におけるメタン吸収速度の低下に大きく影響を及ぼしていることが示唆された。

5. 謝 辞

本研究に当たりご指導いただいた片桐成夫教授、川口英之准教授、橋本哲准教授には数々の助言をいただきました。土壤の三相分布の測定の際には島根大学生態環境工学講座の増永二之教授と学生諸氏にご指導、ご協力をいただきました。皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。

引用文献

- 橋本 哲・古賀教代 (2004) スギ人工林と落葉広葉樹林での林床面メタン吸収速度の観測。島根大学生物資源研究報告。9: 41-49。
- 石塚成宏 (2002) 森林土壤におけるメタン及び N_2O フラックスに関する研究。東京大学博士学位論文。東京大学。
- 板 寛子 (2010) 森林土壤における温室効果ガスの濃度について。島根大学生物資源科学部生態環境科学科森林環境学講座論文集 Ecology 編。
- 犬伏和之 (1999) 地球温暖化と土壤微生物。「新・土の微生物 (4) 環境問題と微生物」所収。日本土壤微生物

- 学会編, 博友社. 117.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report.
- 伊藤雅之・大手信人・勝山正則・木庭啓介・川崎雅敏・谷 誠 (2005) 温帯森林流域におけるメタンフラックスの時空間変動. 水文・水資源学会誌 18: 244-256.
- 倉本恵生 (2004) 間伐がヒノキ林の落葉量と季節性に及ぼす影響. 森林応用研究 13(2): 97-101.
- 齋藤武史 (2008) スギ人工林の間伐前後における林内気温, 地温の変化. 東北森林科学大会講演要旨集 13: 81.
- 篠宮佳樹 (2006) 間伐・小面積皆伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響. 森林応用研究 15(2): 93-99.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・深田英久・豊田信行 (2011) 四国地方のヒノキ人工林における間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響. 森林応用研究 20(1): 19-25.
- Stuedler, P.A., Bowden, R.D., Melillo, J.M. and Aber, J.D. (1989) Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature* 341: 314-316.
- 田中弘毅・山下多聞・橋本 哲・森下智陽・橋本 徹・三浦 覚 (2010) スギ林土壌における温室効果ガスフラックスの変動. 第60回日本森林学会関西支部日本森林技術協会関西・四国支部連合会合同大会研究発表要旨集 33.
- von Fischer J.C. and Hedin, L.O. (2007) Controls on soil methane fluxes: Tests of biophysical mechanisms using stable isotope tracers. *Global Biogeochemical Cycles*. 21: GB2007, doi: 10.1029 / 2006 GB002687.