

植物生体表面における温室効果ガスフラックス

森山夏樹¹・藤巻玲路¹・山下多聞^{2,*}

Potential greenhouse gas fluxes at the surface of living plant bodies under field conditions

Natsuki MORIYAMA¹, Reiji FUJIMAKI¹, Tamon YAMASHITA^{2,*}

Abstract Global warming is one of the urgent environmental issues. Increasing concentration of greenhouse gasses in the atmosphere is thought to drive an excess greenhouse effect leading to global warming. Greenhouse gasses might be produced or consumed not only at the physical surface but also at the biological one. Here, we investigated the greenhouse gas flux of living plant bodies in forest ecosystems. Twelve species of forest plants in the Sambe Forest and Matsue Campus of Shimane University were incubated in the closed chamber under field conditions. Of several naturally produced greenhouse gasses, methane and nitrous oxide content of sampled gas phase of incubation chamber was determined in the laboratory. While nine out of twelve plants had potential to emit methane, only three plants emitted nitrous oxide and their production rate remained at a lower level. Nine other plants consumed substantial amount of nitrous oxide in the chamber. Our results showed that living plant had a certain level of potential to emit methane and to consume nitrous oxide in the chamber. Thus, existence of living plants could affect the greenhouse gas flux around forest ecosystems to some extent.

Keywords : Conifer plantation, Deciduous forest, Forest plant, Methane, Nitrous oxide, Plant leaves

はじめに

もっとも深刻な環境問題の一つに数えられる地球温暖化は1997年の京都議定書、2015年のパリ宣言を経て、全世界で危機感が共有されている。地球温暖化の人為的要因として、自然環境下でも発生する二酸化炭素 CO₂、メタン CH₄、亜酸化窒素 N₂O などの温室効果ガスの濃

度上昇による温室効果の促進が挙げられる。2014年時点で大気中のこれら温室効果ガスの全球平均濃度は、二酸化炭素が397.7 ppmv、メタンが1833 ppbv、亜酸化窒素が327.1 ppbvに達している (WMO 2015)。

大気中の二酸化炭素は温室効果ガスの中でもっとも影響が大きいと考えられている。化石燃料の消費及び森林破壊にともなう二酸化炭素放出量の削減が喫緊の課題となっている。

二酸化炭素濃度上昇の抑制に世界の注意が向く中、Keppler *et al.* (2006) によって植物体および切り離した葉がともに二酸化炭素の34倍の温室効果ポテンシャル (Global Warming Potential: GWP) を持つ (IPCC 2013) とされるメタンを放出することが報告された。Keppler *et al.* (2006) による推定の上限值に近ければ、植物が

¹ 生物資源科学部森林環境学講座 Laboratory of Forest Ecology, Faculty of Life and Environmental Science

² 生物資源科学部附属生物資源教育研究センター Education and Research Centre for Biological Resources, Faculty of Life and Environmental Science

* 責任著者 Corresponding author

放出するメタンは年間発生量全体の10~30%に相当する。一方、Kirschbaum *et al.* (2006) と石塚・高橋 (2006) は Keppler *et al.* (2006) の実験の妥当性を認めつつ、地球温暖化に及ぼす影響は推定値を大きく下回るとした。現在の気中では産業革命以前の気中メタン濃度と比較して2.5倍に上昇していることに加え、これまで考慮されてこなかったメタン発生源が発見されたことで、地球温暖化の将来予測に関する研究にも大きな影響を与えた (Schiermeier 2006)。

また、二酸化炭素の298倍のGWPを持つ (IPCC 2013) とされる亜酸化窒素は、海洋や土壌から、あるいは窒素肥料の乱用や工業活動に伴って放出され、気中での寿命は114年と長い。亜酸化窒素は温室効果だけでなく、成層圏におけるオゾン層の破壊にも大きく影響し、21世紀の主要なオゾン層破壊物質となると予想されている (Ravishankara *et al.* 2009)。

これらのことからメタンと亜酸化窒素の放出は地球温暖化に関する対策や研究に極めて大きな影響を与える。したがって、植物体と気中のメタン収支と亜酸化窒素収支を正確に評価し、二酸化炭素収支と合わせて、地球温暖化に対する森林の役割を総合評価する必要がある。しかしながら、その評価の基になる植物体からのメタン放出の実測値は極めて限られているのが現状であり、亜酸化窒素の場合アジア、アフリカまたはオーストラリアにおける陸上生態系での測定例はほとんどなく (石塚ら 2000)、湿地帯を除く森林植物に関しては21世紀に入っても稀である (Machacova *et al.* 2016)。

本研究では、生葉におけるメタンと亜酸化窒素のフラックスを調査し、森林植物が陸上生態系における温室効果ガス収支に及ぼす可能性を明らかにする。

材料と方法

1. 調査地

本研究は、島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター三瓶演習林獅子谷団地 (35°9'N, 132°29'E, 300–600 m ASL) および島根大学内圃場 (35°29'N, 133°4'E, 5 m ASL) にて行った。

三瓶演習林獅子谷団地は島根県中部に位置する国立公園三瓶山の北東部にある。三瓶演習林の年平均気温は13.3℃、年間降水量は1890 mmである。植生はコナラ *Quercus serrata* やクリ *Castanea crenata* などの落葉広葉樹二次林が多く、スギ *Cryptomeria japonica* など針葉樹人工林も造成されている。土壌は褐色森林土及び黒色土

がみられる。

島根大学松江キャンパスは松江市中央部に位置する。松江市の年平均気温は14.9℃、年間降水量は1750 mmである。松江キャンパス周辺の植生は常緑広葉樹林であり、スギ見本林を含む圃場内にはスダジイ *Castanopsis sieboldii* やタブノキ *Machilus thunbergii* の幼木がみられる。土壌はキャンパス造成時の客土や未熟土が多いと考えられる。

2. 野外実験

植物体から切り離さず着葉状態にある植物葉を、野外条件でクローズドチャンバーを用いた培養実験に供した。多回数穿孔後も再密封性を保つシリコンセプタムを付けた三方活栓を無色透明のポリエチレン製のチャンバー (450×600 mm) に装着し、植物体の上からチャンバーを被せた。チャンバー開口部をビニール紐とビニールテープで締め、チャンバー内の気相をシリンジで採取した後、外気温で培養した。その後、再びチャンバー内の気相を採取した。野外実験に供した植物と実験期間を表1に示した。8月に測定対象として植物体はチャンバー装着個所で切断し、実験室に持ち帰った後、乾燥重量を求めた。

初期値及び培養後の気相サンプルを実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフでそれぞれの温室効果ガスの濃度分析を行った。

3. ガス濃度の分析

メタン濃度は、ガスクロマトグラフ (GC-14B, 島津製作所製) で測定した。検出器は水素炎イオン化検出器 (FID)、カラムはパックドカラム (PorapakQ, SUS 2 m, 60-80 mesh)、キャリアガスは高純度ヘリウムを用いた。キャリアガスの流速は20 ml min⁻¹である。カラムの温度は70℃、試料気化室の温度は150℃、検出器の温度は150℃に設定した。ガスクロマトグラフに注入する量はどのサンプルも1 mlである。このときのシリンジはガスタイトシリンジを用いて注入した。キャリブレーションに用いたメタン標準ガスの濃度は2.01 ppmvである。

亜酸化窒素濃度は、ガスクロマトグラフ (GC-14A, 島津製作所製) で測定した。検出器は電子捕獲型検出器 (ECD)、カラムはUnibeadsを、キャリアガスは高純度窒素を用いた。カラムの温度は130℃、試料気化室の温度は200℃、検出器の温度は250℃に設定した。ガスクロマトグラフに注入する量はどのサンプルも1 ml

表 1 野外培養実験の概要

培養開始	培養条件	植物名
三瓶演習林 Sambe Forest		
2010年	晴天	クサギ ^a
5月15日	Clear	<i>Clerodendrum tricotomum</i>
15 May, 2010	2時間	ゴマギ ^a
	2 hours	<i>Viburnum sieboldii</i>
	9-21°C	チュウゴクザサ
		<i>Sasa veitchii</i> var. <i>hirsta</i>
		ニワトコ ^a
		<i>Sambucus racemosa</i> ssp. <i>sieboldiana</i>
		ヤブデマリ ^a
		<i>Viburnum plicatum</i> var. <i>tomentosum</i>
		リョウメンシダ
		<i>Arachniodes standishii</i>
		以上6種
学内圃場 Arboretum in Matsue Campus		
2010年	曇天	アカメガシワ ^a
6月22日	Cloudy	<i>Mallotus japonicus</i>
22 June, 2010	72時間	クスノキ ^b
	72 hours	<i>Cinnamomum camphora</i>
	16-29°C	クリ ^a
		<i>Castanea crenata</i>
		スギ ^c
		<i>Cryptomeria japonica</i>
		以上4種
2010年	晴天	クリ ^a
8月5日	Clear	<i>Castanea crenata</i>
5 August, 2010	24時間	コナラ ^a
	24 hours	<i>Quercus serrata</i>
	27-37°C	スギ ^c
		<i>Cryptomeria japonica</i>
		タブノキ ^b
		<i>Machilus thunbergii</i>
		以上4種

注：培養条件の中の天候は期間中優勢な天候を、時間は培養時間を、温度は培養日の最高気温と最低気温をそれぞれ示す。植物名は和名と学名を示す。和名の肩文字 a は落葉広葉樹を、b は常緑広葉樹、c は常緑針葉樹を示す。

である。このときのシリンジはガスタイトシリンジを用いて注入した。キャリブレーションに用いた亜酸化窒素標準ガスの濃度は 0 ppmv, 0.08 ppmv, 0.16 ppmv, 0.4 ppmv, 0.8 ppmv, 8 ppmv, 40 ppmv であり、これらのうち 3 点から回帰直線を求めた。

結 果

着葉状態にある植物生葉の単位時間あたりのメタンと亜酸化窒素のチャンバー内濃度変化を図 1 と図 2 にそれぞれ示す。

実験結果によれば、多くの植物生葉がメタン放出ポテンシャルを有することが明らかになった（図 1 の中の●）。とくに 5 月の 2 時間培養時に高い放出ポテンシャルを示した。しかし、チュウゴクザサ、クスノキ及びタブノキの生葉はメタン消費ポテンシャルを示して負のフ

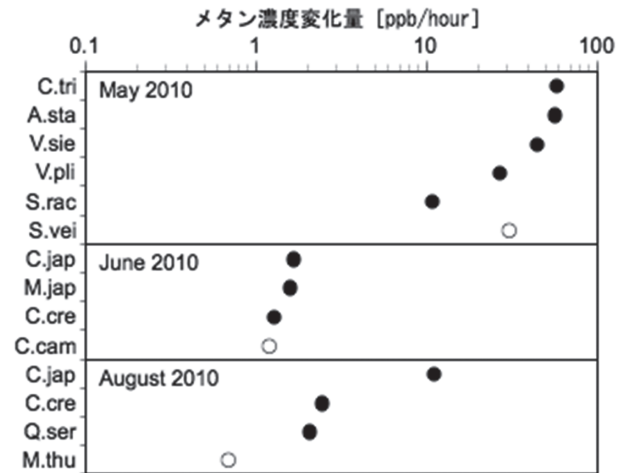


図 1. 植物生葉におけるメタンフラックスを単位時間あたり濃度変化量として示す。●は濃度の増加で葉からチャンバー内気相への放出ポテンシャルを、○は濃度の低下でチャンバー内気相から葉への消費ポテンシャルを示す。縦軸には測定対象の植物名を属名のイニシャルと種小名のはじめの 3 文字のコードで示している（植物名は表 1 参照）。

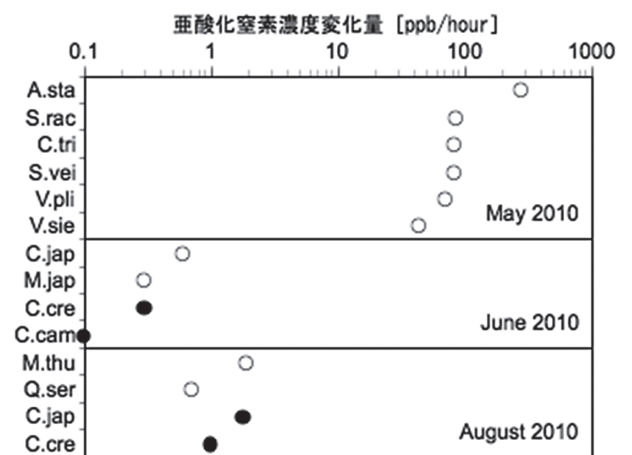


図 2. 植物生葉における亜酸化窒素フラックスを単位時間あたり濃度変化量として示す。縦軸及び記号の説明は図 1 に同じ。

ラックスが生じていた（図 1 の中の○）。チュウゴクザサの消費ポテンシャルは他の 2 種に比べ高い値を示した。

図 2 によれば、調査対象となった 12 種のうち 3 種で亜酸化窒素の放出ポテンシャルを確認した。また 10 種は亜酸化窒素の消費ポテンシャルを示した。クリとスギは時期を変えて 2 回測定した。クリは 6 月も 8 月もともに放出ポテンシャルを示したが、スギは 6 月には消費ポテンシャルを示したのに対し 8 月には放出ポテンシャルを示した。しかし、放出ポテンシャルはいずれの種もかなり低い値を示した。6 月と 8 月の測定時にえられた値

に対して、5月の測定でえられた亜酸化窒素の消費ポテンシャルは高い値を示した。

チャンパー容積と実験供試植物の乾燥重量を測定した8月の測定値から単位時間あたり単位重量あたりフラックスを算出した(表2)。

メタンフラックスは、タブノキが $-1.24 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ の消費フラックスを示したが、スギ、コナラ、クリは放出フラックスを示し、 $1.48-3.33 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ の範囲にあった。

亜酸化窒素フラックスは、タブノキとコナラが消費フラックスを示しとくにタブノキは $-3.31 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ と大きな値を示した。スギとクリは放出フラックスを示したがその値は比較的小さな値であった。

表2. 2010年8月に測定した植物生葉表面のメタン及び亜酸化窒素フラックス [$\text{ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$]

植物名	メタン CH_4	亜酸化窒素 N_2O
スギ <i>C. japonica</i>	3.33	0.63
コナラ <i>Q. serrata</i>	1.72	-0.94
クリ <i>C. crenata</i>	1.48	0.59
タブノキ <i>M. thunbergii</i>	-1.24	-3.31

注：スギとコナラは2反復で測定した値の平均値を示す。正の値は放出フラックスを、負の値は消費フラックスを示す。

考 察

1. メタンと亜酸化窒素の動態

植物体からのメタン及び亜酸化窒素放出は土壌中で産生されたものが植物の通気組織(aerenchyma system)を通してまたは本部経由の蒸散流によって茎や幹から放出されるものが主要経路であるとされている(Días-Pinés *et al.* 2016, Pihlatie *et al.* 2005, Terazawa *et al.* 2007)。これらに加え、メタンの場合、植物体内での生理学的及び光化学的過程で産生されるもの(Bloom *et al.* 2010, Keppler *et al.* 2006)及び共生するArchaeaなど微生物によって産生されるもの(Covey *et al.* 2012)が知られるようになった。一方、亜酸化窒素は土壌中では脱窒や硝化の過程で産生されることが知られているが(Smith *et al.* 2003)、植物体内での生成過程は明らかでない。また、いずれの場合も植物体から放出される可能性を説明するものであり、植物によって消費される可能性を説明するものではない。

今回の調査ではKeppler *et al.* (2006)が指摘したように着葉状態の植物体からメタンが放出される可能性が確認されたが、同時にチュウゴクザサとクスノキ科樹木

2種では消費ポテンシャルがみられた(図1)。さらに、亜酸化窒素ではMachacova *et al.* (2016)の報告にあるような顕著な放出ではなく消費される事例が多く観察された(図2)。メタンの消費は土壌中のメタン酸化菌によるメタン酸化によるものが知られ(Le Mer & Roger 2001)、亜酸化窒素の消費は成層圏における紫外線による分解(Stein & Yung 2003)と土壌中における酸素消費にともなう脱窒の進行つまり亜酸化窒素還元(Cavigelli & Robertson 2001)が知られている。本研究では土壌を含まない枝条を地表1m前後の高さでチャンパーに封入して培養しており、メタン消費も亜酸化窒素消費も土壌菌類の影響は考えにくい。メタンフラックスにおいて消費ポテンシャルがみられた要因としては植物の内生菌や葉面菌の中にメタン酸化能をもつものが存在した可能性がある。チュウゴクザサ及びタブノキのようにメタンフラックスと亜酸化窒素フラックスの両方で負のフラックスを示す場合、植物体への吸着の可能性もある。今回の事例でもっとも多い組合せはメタンフラックスが正で亜酸化窒素フラックスが負となるものであった。通気性の乏しいクロズドチャンパー法を長時間に渡って実施したことにより、チャンパー内が嫌氣的になりメタン生成と亜酸化窒素の還元が同時に生じた可能性がある。

本研究では、測定機会ごとに対象樹種や測定条件が異なり詳細な比較検討は困難であるが、培養時間とガス濃度の変化量は反比例しており、2時間>24時間>72時間と、培養時間が短いほど濃度変化量が大きかった(図1と図2)。2時間培養を行った時点でメタン放出が頭打ちになった、または、調査地の環境条件の違いやガスを採取する時間帯によって濃度に差が生じたのではないかと考えられる。今後、培養期間中のタイムコースが追跡可能となるよう連続サンプリングを実施しチャンパー内の経時的濃度変化を測定する必要がある。

2. フラックス

2010年8月の調査における着葉状態の植物体からのメタン放出は $1.48-3.33 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ であった(表2)。Keppler *et al.* (2006)は着葉状態の植物からのメタン放出は $12-370 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ でありさらに大きなメタン放出フラックスを示す植物もあるとしたが、Beerling *et al.* (2008)はトウモロコシ *Zea mays* とタバコ *Nicotiana tabacum* の着葉状態でのメタンフラックスはそれぞれ32と $49 \text{ ng g}^{-1} \text{ hour}^{-1}$ であり、Takahashi *et al.* (2012)は着葉状態のヒノキ *Chamaecyparis obtusa* の針葉でのメタンフラックスは $\pm 1.0 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($=\pm 57.6 \text{ } \mu\text{g m}^{-2}$

hour⁻¹) であり, Machacova *et al.* (2016) は着葉状態のスコツマツ *Pinus sylvestris* の針葉を含む枝条でのメタンフラックスは +50 ng m⁻² hour⁻¹ であるとした. このうち Beerling *et al.* (2008) と Takahashi *et al.* (2012) は, フラックスの方向が放出側と消費側に変動しておりゼロフラックスとの間の統計的有意差がえられず長期的には放出でも消費でもないとしている. 一方, Keppler *et al.* (2006) だけでなく Machacova *et al.* (2016) も北方林におけるスコツマツの幹と枝条において放出ポテンシャルは有意であるとしている.

結 論

森林生態系においては, 土壌圏だけでなく地上部の生物も大気中の温室効果ガス濃度の変動に一定の影響を及ぼす可能性をもつといえる. 本研究はササや広葉樹を含めた広範な植物種の枝条での測定事例として有用な情報を提供するであろう. また, 本研究のフラックス値(表2)は既報値に比べ小さく, かつ放出と消費の双方が観察されたが, オーダーとしては上記のフラックスとかけ離れた値ではなく必要な精度をともなった測定結果を提示できたと考える.

メタン及び亜酸化窒素は trace gas と表されるように, 大気中の濃度変化量は小さく植物体や土壌面でのフラックスは微量である. このため測定技術や機器の発達に依存するところが大きく, 大気中の濃度が高まっているにもかかわらず野外条件下における個別のプロセスの評価が困難なままである. 温室効果ガスと森林生態系の関連を明らかにする上で, 今後の研究の継続と発展が望まれる.

謝 辞

実験室を提供していただいた増永二之先生, ガスクロマトグラフィの指導をしていただいた巢山弘介先生, 貴重なご意見をいただいた片桐成夫先生と川口英之先生, そして野外調査や実験に協力していただいた森林環境学講座の学生院生諸氏にこの場をかりて感謝申し上げます.

引用文献

Beerling, D.J., T. Gardiner, G. Leggett, A. McLeod & W.P. Quick (2008) Missing methane emissions from leaves of terrestrial plants. *Global Change Biology* **14**:

1821–1826.

Bloom, A.A., J. Lee-Taylor, S. Madronich, D.J. Messenger, P.I. Palmer, D.S. Reay & A.R. MacLeod (2010) Global methane emission estimates from ultraviolet irradiation of terrestrial plant foliage. *New Phytologist* **187**: 417–425.

Cavigelli, M.A. & G.P. Robertson (2001) Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* **33**: 297–310.

Covey, K.R., S.A. Wood, R.J. Warren II, X. Lee & M.A. Bradford (2012) Elevated methane concentrations in trees of an upland forest. *Geophysical Research Letters* **39**: L15705, doi: 10.1029/2012GL052361

Díaz-Pinés, E., P. Heras, R. Gasche, A. Rubio, H. Rennenberg, K. Butterbach-Bahl & R. Kiese (2016) Nitrous oxide emissions from stems of ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl) and European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Plant and Soil* **398**: 35–45.

石塚成宏・高橋正通 (2006) 森林生態系は地球温暖化を促進するか? 抑制するか? 森林科学 **47**: 67–69.

石塚成宏・坂田匡司・谷川東子・石塚和裕 (2000) 落葉広葉樹林における N₂O 生成とその空間的異質性. 日本森林学会誌 **82**: 62–71.

IPCC (2013) Climate Change 2013 The Physical Science Basis (eds. T.F. Stocker *et al.*) Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Keppler, F., J.T.G. Hamilton, M. Braß & T. Röckmann (2006) Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* **439**: 187–191.

Kirschbaum, M.U.F., D. Bruhn, D.M. Etheridge, J.R. Evans, G.D. Farquhar, R.M. Gifford, K.I. Paul & A.J. Winters (2006) A comment on the quantitative significance of aerobic methane release by plants. *Functional Plant Biology* **33**: 521–530.

Le Mer, J. & P. Roger (2001) Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* **37**: 25–50.

Machacova, K., J. Bäck, A. Vanhatalo, E. Halmeenmäki, P. Kolari, I. Mammarella, J. Pumpanen, M. Acosta, O. Urban & M. Pihlatie (2016) *Pinus sylvestris* as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest. *Scientific Reports* **6**: 23410; doi: 10.1038/srep23410.

- Pihlatie, M., P. Ambus, J. Rinne, K. Pilegaard & T. Vesala (2005) Plant-mediated nitrous oxide emissions from beech (*Fagus sylvatica*) leaves. *New Phytologist* **168**: 93–98.
- Smith, K.A., T. Ball, F. Conen, K.E. Dobbie, J. Massheder & A. Rey (2003) Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* **54**: 779–791.
- Stein, L.Y. & Y.L. Yung (2003) Production, isotopic composition, and atmospheric fate of biologically produced nitrous oxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **31**: 329–356.
- Takahashi, K., Y. Kosugi, A. Kanazawa & A. Sakabe (2012) Automated closed-chamber measurements of methane fluxes from intact leaves and trunk of Japanese cypress. *Atmospheric Environment* **51**: 329–332.
- Terazawa, K., S. Ishizuka, T. Sakata, K. Yamada & M. Takahashi (2007) Methane emissions from stems of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* trees in a floodplain forest. *Soil Biology and Biochemistry* **39**: 2689–2692.
- WMO (2015) WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 11, 4p.