

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：32658

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23380090

研究課題名(和文) 湿地生態系における樹木を介した土壌メタンの放出機構の解明

研究課題名(英文) Biogeochemical and anatomical studies on the mechanisms of tree-mediated methane emissions in forested wetland ecosystems

研究代表者

寺澤 和彦 (TERAZAWA, Kazuhiko)

東京農業大学・生物産業学部・教授

研究者番号：30414262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：湿地土壌中のメタンが樹木を経由して大気へ放出される機構について、主に北海道のヤチダモ湿地林におけるメタン放出量の観測と木材組織の解剖学的観察から、以下のことを明らかにした。ヤチダモの幹からのメタン放出量とその季節的変動パターンは、比較的狭い調査地(0.12ha)内でも個体間で異なった。これらの変動には、地下水位とその季節的な変化が関与することが示唆された。幹からのメタン放出は昼夜を通してみとめられ、周日変動は小さかった。ヤチダモの根系には明瞭な通気組織や細胞間隙の拡大がみとめられ、メタンはこれらの木材組織を通してガス態で移動することが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We performed field measurements of CH₄ fluxes at tree stems to clarify the major controlling factors of stem CH₄ emission rates in cool-temperate forested wetlands. We also conducted anatomical observations of wood structure of tree roots in relation to the possible transport pathway of soil-borne CH₄ in a tree body.

CH₄ emission rates from stems of mature *Fraxinus mandshurica* trees varied greatly among individuals within a study site (0.12ha), and showed a spatial gradient apparently corresponding to the difference in water table depth in the site. Large inter-individual differences were also observed in the magnitude of seasonal changes in stem CH₄ emission rate. CH₄ emission rates were quite stable throughout a 24 h period for foliated trees and similarly for defoliated trees. Well-developed lysigenous intercellular spaces, i.e., aerenchyma tissues, were observed at the cortex of fine roots of mature *Fraxinus mandshurica* trees.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学、森林科学

キーワード：温室効果ガス メタンフラックス 冷温帯湿地林 地下水位 通気組織 ヤチダモ ハンノキ

1. 研究開始当初の背景

陸域の約 4%を占める自然湿地は、大気メタンの主要な発生源のひとつであり、その嫌氣的土壌からのメタン放出量は 55~150 Tg/年と推定されている。しかし、ごく最近、メタンの発生・放出への植物の関与に関する 2つの新たな知見がきっかけとなり、湿地生態系からのメタンの発生機構や発生量を再評価する動きが起きている。その新知見とは、1) 好氣的条件下での植物自身によるメタン生成の可能性(Keppler et al. 2006, Nature 439)と、2) 湿地林の林冠木を介した土壌メタンの大気への放出(Terazawa et al. 2007, Soil Biol. Biochem. 39)である。

本研究は、このうちの 2 つめの事象、すなわち樹木を介した土壌メタンの放出に焦点をあて、その放出機構の解明に取り組んだものである。湿地生態系からのメタン放出機構については、1980年代から世界各地で研究が行われ、嫌氣的な土壌中で生成されたメタンは 3 つの経路で大気へ放出されることが明らかにされてきた。すなわち、植物の根や茎の内部の通気組織、土壌/水/大気の世界での拡散、水中の気泡、である。

これらのメタン放出経路のうち、の植物体の通気組織は、水生植物、湿地性草本、イネなど湛水環境に適應した植物体内に発達する細胞間隙で、嫌氣的環境にある地下部への酸素輸送に寄与する組織構造である。草本性湿地や湛水した水田では、季節や植生構造によっては植物の通気組織経由の放出量がメタン総放出量の 90%以上に及ぶ。

一方、ごく最近まで、湿地生態系のメタンフラックス研究においては、樹木の存在や機能はほとんど考慮されず、生態系からのメタン放出量のボトムアップ推定も、樹木を含まない地表近くでのフラックス観測にのみ基づいて行われてきた。樹体を介した土壌メタンの放出の可能性は、室内での苗木実験ではグルチノーザハンノキなどで示唆されていたが、野外の林冠木を対象とした研究は最近まで行われてこなかった。そのような状況の中、本研究の研究代表者ら(寺澤・石塚・阪田)は、湿地林における樹木を介したメタン放出の可能性を探るため、北海道の溪畔湿地に生育するヤチダモの林冠木(樹高約 30 m)を対象として、樹幹表面でのメタンフラックスを測定し、土壌中で生成されたと考えられるメタンの樹幹からの放出を世界で初めて野外の成木において確認した(Terazawa et al. 2007)。

その後、イギリスの泥炭湿地のハンノキの樹幹においても、我々のグループが測定したヤチダモと同程度(約 $100 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)のメタン放出が観測され、この現象が追認された(Gauci et al. 2010: Atmos. Environ. 44)。さらに、北米の溪畔林樹種 3 種で測定された樹体経由のメタン放出量を基に、世界中の湛水森林域からのメタン発生量を $60 \pm 20 \text{ Tg/年}$ (全球のメタン総発生量の約 10%)と推定す

る論文も発表された(Rice et al. 2010: Geophys. Res. Lett. 37)。この Rice らの論文を受け Nature 誌も "Trees spit out gas from soil microbes" と題するニュース記事を掲載(2010年2月16日:電子版)した。

このように、湿地林の樹木を介した土壌メタンの放出現象とその全球メタン収支への影響は、関連する専門分野のみならず広く科学界の関心を集めているが、野外での観測事例は上記の 2 例にとどまっており、その放出機構や変動要因は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究では、湿地土壌中で生成されるメタンが樹木の内部を経由して大気へ放出される機構を、湿地林の林冠木を対象としたメタンフラックス観測および解剖学的観察、安定同位体分析など多角的な視点から明らかにし、冷温帯湿地林における樹木を介した土壌メタン放出量のボトムアップ推定に必要な知見とデータを得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 樹幹からのメタン放出量の季節的変動
北海道中央部(樺戸郡月形町)のヤチダモ林に 2011年5月に方形調査区(60m x 20m)を設定した。調査区は山地小渓流沿いの平坦な氾濫源に位置し、土壌は埴土~壤土質のグライ土である。夏季には林床にオニシモツケ、アキタブキ、ヨシなどが繁茂する。

2011年7月から2013年10月までの期間(冬季を除く)、ヤチダモ林冠木 3 個体(樹高 26~30m)を対象として、樹幹表面でのメタンフラックス観測を計 13 回実施した。フラックスは、幹の地上 15cm の位置にステンレス製チャンバー(容積 756mL、アクリル製の蓋により密閉)を取り付け、非通気型密閉法によって測定した。チャンバーの密閉後、0、10、20分後にチャンバー内の空気をシリンジを用いて採取し、ガスクロマトグラフ(島津 GC-14BPTF)によってメタン濃度を測定した。

メタンの生成・輸送に関係すると考えられる環境要因(地下水水位、地下水溶存メタン濃度、地温、気温)の観測もあわせて行った。

(2) 樹幹からのメタン放出量の周日変動

上記(1)の調査地において、ヤチダモ 3 個体を対象として、2011年8月(着葉期)と11月(落葉期)に、樹幹表面でのメタンフラックスをそれぞれ 24 時間(14時から4時間おきに 7 回)観測した。測定方法は上記と同様である。

(3) メタン放出量に及ぼす環境要因の検討

上記(1)の調査地において、2011年7月20~22日にヤチダモ 10 個体を対象として樹幹表面でのメタンフラックスを観測した。測定方法は上記と同じである。

上記(1)の調査地のメタンフラックスと比較するため、2012年10月に鳥取大学蒜山

演習林（岡山県真庭市）の溪畔過湿地のヤチダモ 6 個体、ならびに 2013 年 9～11 月に北海道東部（網走市）の泥炭湿地のハンノキ 5 個体において、同じ方法によって樹幹表面でのメタンフラックスを測定した。

（４）メタン輸送への蒸散流の関与の検討

上記（１）（２）のメタンフラックス観測結果から、ヤチダモ樹体内のメタン輸送への蒸散流の関与について検討した。

（５）樹体内部のガス輸送に関わる解剖学的特徴

上記（１）の調査地において、2013 年 8 月にヤチダモの根系を深さ 1m まで 10cm 間隔で採取し、実験室において横断切片を作成し、サフランとファストグリーンによる二重染色の後、顕微鏡下で組織構造を観察した。

鳥取大学蒜山演習林の溪畔過湿地においても 2012 年 10 月にヤチダモの根系試料を採取し、同様の方法により解剖学的観察を行った。

（６）炭素安定同位体比による樹体内のメタン輸送様式の検討

（独）森林総合研究所において、大気レベルの低濃度メタンの炭素安定同位体比を安定して測定できるガスクロマトグラフ-質量分析計の前処理装置の開発を行った。

上記（１）の調査地において、ヤチダモ 3 個体を対象として、2012 年の 7 月と 10 月に樹幹の 5 つの高さ（地上 15cm～235cm：55cm 間隔）から安定同位体分析用のガス試料を採取した。

（７）地表面におけるメタンフラックスと変動要因

上記（１）の調査地内の林床植生の異なる 2 か所（オニシモツケ群落とヨシ群落）において、2013 年 5 月～10 月に、地表面でのメタンフラックスを非通気型密閉法により約 1 か月間隔で観測した。

（８）樹幹からのメタン放出量の鉛直方向の変動

上記（１）の調査地において、ヤチダモ 3 個体を対象として、2012 年の 7 月と 10 月に樹幹の 5 つの高さ（15cm～235cm：55cm 間隔）でメタン放出量を測定した。

4. 研究成果

（１）樹幹からのメタン放出量の季節的変動

樹幹からのメタン放出量及びその季節的変動は個体による違いが大きかった（図 1）。短期間に 10 倍以上の放出量の変動を示す個体（No.8）がある一方で、季節的にほとんど変動しない個体（No.2）もみられた。大きな変動を示した個体は、地下水位が相対的に高く地下水溶存メタン濃度が常に過飽和の状態にある場所に位置していた。この個体にお

けるメタン放出量の急激な増加は、2012 年、2013 年とも地下水位が上昇する 8 月にみられた。これらのことから、樹幹からのメタン放出量の大きな変動には、地下水位ならびにその変化が関与することが示唆された。また、後述するように、この調査地ではヤチダモの細根の多くが 60cm より深い層では壊死していることが観察されたことから、地下水位の上昇にともなうメタン放出量の急激な増加には、土壌中のメタンが樹体へ入る際の入口となる根系の垂直分布の不連続性が関係している可能性が示唆された。

（２）樹幹からのメタン放出量の周日変動
着葉期（8 月）、落葉期（11 月）とも、24 時間の観測において 84～494 $\mu\text{gCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ の

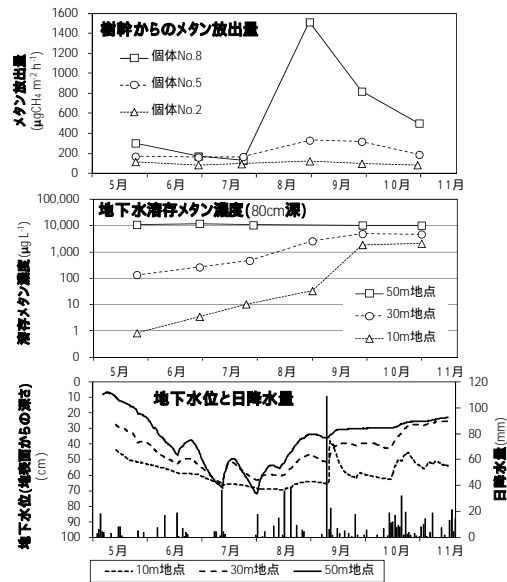


図 1. ヤチダモ樹幹からのメタン放出量および関連する環境要因の季節変化(2012 年)

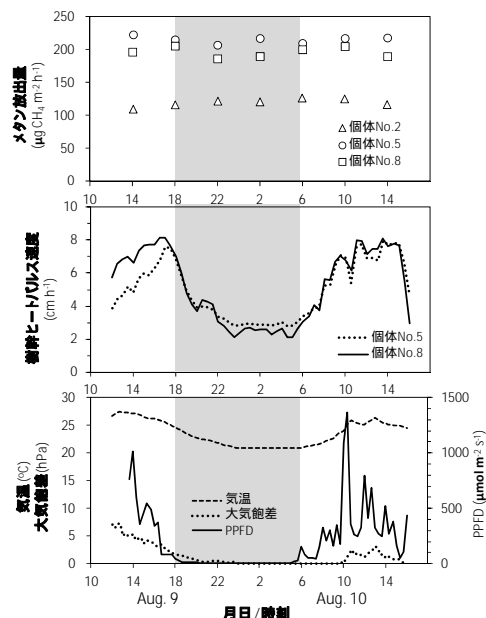


図 2. ヤチダモ樹幹からのメタン放出量および関連する環境要因の周日変化(2011 年 8 月)

メタン放出が夜間を含めてみとめられたが、放出量の周日変動は小さかった(図2)。メタン放出量に明瞭な日内変動パターンはみられず、PPFD(光合成有効光量子束密度)や大気飽差、樹液流速との関係はみとめられなかった。ただし、気温が氷点下まで低下した11月の観測では、夜間にメタン放出量が緩やかに低下する傾向を示す個体がみられ、温度要因がメタン放出になんらかの影響を及ぼす可能性が示唆された。

(3) メタン放出量に及ぼす環境要因の検討

北海道中央部のヤチダモ 10 個体の樹幹からのメタン放出量(2011年7月の瞬間値)は $81 \sim 1,305 \mu\text{gCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であり、個体間で 10 倍を超える大きな違いがみられた(図3)。メタン放出量には調査地内の地下水位の傾度との関係がみられ、とくに放出量の大きい 2 個体は、地下水位が地表面下数 cm にある場所に生育していた。

地下水位が地表面下 50~60cm と比較的低い位置にある鳥取大学蒜山演習林のヤチダモでは、樹幹からのメタン放出量は検出限界以下 $\sim 21 \mu\text{gCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と小さかった。一方、地下水位がほぼ地表面にある北海道東部のハンノキでは、メタン放出量は最大 $3,827 \mu\text{gCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ に達した。

このようなメタン放出量の個体間変動や国内 3 調査地での比較から、樹幹からのメタン放出量に関わる環境要因として地下水位が重要であることが強く示唆された。

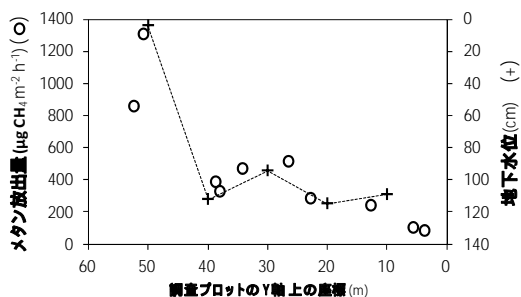


図3. ヤチダモ樹幹からのメタン放出量と地下水位の関係(2011年7月20~22日)

(4) メタン輸送への蒸散流の関与の検討

植物体内のメタン輸送様式としては、細胞間隙(通気組織)を通したガス態での輸送(拡散またはマスフロー)と、蒸散流による溶存態での輸送とが考えられる。

本研究における樹幹からのメタンフラックス観測((1)季節的変動、(2)周日変動)の結果において、樹幹内に蒸散流が発生していないか、きわめて小さいと考えられる落葉期(図1の5月と10月)や夜間(図2の18~6時)においても、蒸散流が生じている着葉期(図1の6~8月)や昼間(図2の10時と14時)と同程度のメタン放出がみとめられた。

これらのことから、樹幹から放出されるメタンの樹体内での輸送に関して、蒸散流によ

る溶存態での輸送はないか、あったとしてもその輸送量はきわめて小さいと考えられた。したがって、メタンがガス態として移動する経路、すなわち上下方向に連続した細胞間隙が樹体内に存在することが示唆された。

(5) 樹体内部のガス輸送に関わる解剖学的特徴

北海道中央部のヤチダモにおいて、深さ 20~60cm に分布する細根の皮層に明瞭な破生型の通気組織がみとめられた(図4)。深さ約 20~40cm に分布する中根や太根では、明瞭な通気組織は観察されなかったが、師部の細胞間隙の拡大がみとめられた。一方、60cm 深より深い層では細根の多くが壊死していることがみとめられた。

樹幹からのメタン放出量が北海道のヤチダモに比べて著しく小さかった鳥取大学蒜山演習林のヤチダモでは、根系に明瞭な通気組織は観察されなかった。

これらのことから、土壌から樹体内を經由して大気に放出されるメタンは、樹木の根系(とくに細根)に形成される破生型の通気組織や拡大した細胞間隙をガス態で移動していることが示唆され、通気組織の発達程度がメタン放出量に関係している可能性が考えられた。

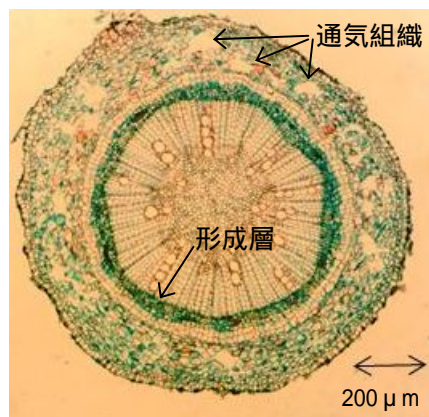


図4. ヤチダモの細根(20~30cm 深)の横断面に観察された破生型の通気組織

(6) 炭素安定同位体比による樹体内のメタン輸送様式の検討

大気濃度レベルの低濃度メタンの安定同位体比の測定は技術的に難しく、(独)農業環境技術研究所の研究者から測定手法に関する情報を収集した。基本的には、Rice et al.(2001)の方法に準じ、オンラインでメタンを濃縮した後、メタンを CO_2 に変換し、安定同位体質量分析計に導入する方法を採用することにした(図5)。プレコンをサンプラーとして使用し、液体窒素で固相-液相の平衡状態にした n-ペンタン(約マイナス 130)で水と CO_2 をトラップした後、HayesepD カラムで窒素と酸素を除去する。さらに次のクライオフォーカスでメタンを精

製する。その後、燃焼管によって 1000 でメタンを CO_2 に変換し、ガスクロマトグラフ - 質量分析計に導入する。

これらの作業を自動で行うプログラムを作成し、分析システムの動作試験を行った。これらを組み上げた直後から、本分析に必要なヘリウムガスの世界的な供給不足が発生し、マシンタイムが取れなくなったため、ガス試料の実測までは至らなかった。

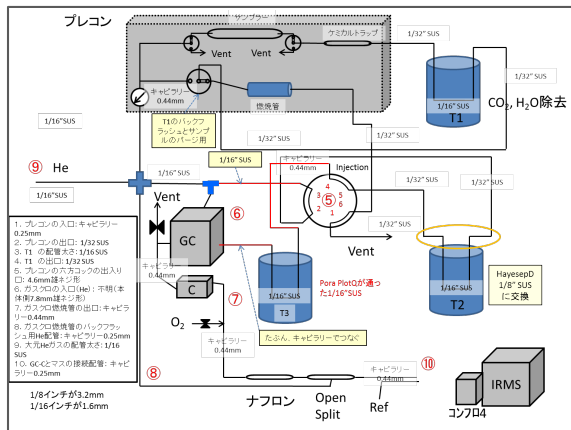


図5. 低濃度メタンの炭素安定同位体比測定のための前処理装置の回路図

(7) 地表面におけるメタンフラックスと変動要因

北海道中央部のヤチダモ林では、オニシモツケ群落、ヨシ群落ともに、調査期間を通じてメタンは大気から土壤にわずかに吸収されていた。吸収量は7月に最大となり、春と秋に低下する明瞭な季節変化を示し、群落間ではオニシモツケ群落でやや小さかった。メタン吸収量に關与する要因について GLMM(一般化線形混合モデル)による統計解析を行った結果、植生タイプと地温が選択された。地下水位が 16cm 深まで上昇した時点でも地表面でのメタンフラックスは負の値(土壤に吸収)であり、土壤表層の酸化層をバイパスする樹木を介したメタン放出経路の重要性が示唆された。

(8) 樹幹からのメタン放出量の高さによる変動

北海道中央部のヤチダモ林では、樹幹からのメタン放出量は幹基部に近い位置で大きい傾向がみられた。しかし、幹の高さとメタン放出量の関係は個体によって異なり、地上 15cm ~ 235cm の範囲では高さに応じた放出量の変化が必ずしも明瞭ではなかった(図6)。今後、樹幹表面でのメタンフラックスの測定位置をさらに上部まで拡張し、高さ方向のメタン放出量の変化を明らかにすることにより、樹木個体あたりの放出量推定が可能になるとともに、土壤以外のメタン発生源(たとえば樹幹内での微生物によるメタン生成(Covey et al. 2012)の可能性についても検討できると考えられる。

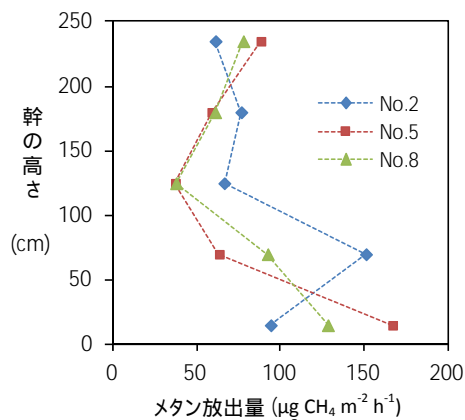


図6. ヤチダモ樹幹からのメタン放出量の幹の高さによる変動(2012年7月)

(9) まとめ

本研究の結果、土壤中のメタンが樹木の内部を經由して大気へ放出される機構について、以下のことが明らかになった。

土壤中のメタンは、主に樹木(ヤチダモ)の根系の皮層に形成された破生型の通気組織もしくは拡大した師部細胞間隙をガス態で移動し、樹幹から放出される。蒸散流による溶存態での移動はないか、あったとしてもその量はきわめてわずかと考えられる。

メタン輸送への蒸散量の関与がないか、きわめてわずかであるため、樹幹からのメタン放出量の周日変動は小さく、夜間にも昼間と同程度のメタン放出がみとめられる。また、メタン放出は落葉樹の樹冠の着葉状態に関わらずみとめられ、着葉期と落葉期という区分での季節的変動はみられない。

樹幹からのメタン放出量に關わる環境要因としては、地下水位が重要である。メタン放出量は、樹木個体の近傍の地下水位の影響を受けると考えられるため、比較的狭い空間範囲で地下水位が変化するような湿地環境では、メタン放出量の個体間差が大きくなる。フラックスチャンバーによる個体レベルでのメタン放出量の観測結果から、林分レベルのメタンフラックスを推定する場合には、個体間差が大きい可能性を考慮する必要がある。

樹幹からのメタン放出量の季節的な変動には、地下水位の変動が關与すると考えられる。地下水位の上昇/下降にともなうメタン放出量の変化は非線形的であり、過湿環境での樹木根系の垂直分布の不連続性が関係している可能性が示唆される。

樹幹からメタン放出がみとめられる場所においても、地表面ではメタンは大気から土壤に吸収されている場合がある。生態系全体のメタンフラックスを推定する場合には、樹幹、地表面、下層植生の各フラックス要素の推定が必要である。

樹幹からのメタン放出量の幹の高さによる変化は、少なくとも地上 2m 程度までの範囲では、高さにとまって単純に減少するパターンを示さない。樹木個体全体からのメタ

ン放出量の推定には、さらに幹の上部までのメタン放出量測定を行って高さで放出量の関係を明らかにする必要がある。

以上のように、本研究における樹幹からのメタン放出量の観測結果は、冷温帯湿地林における樹木を介した土壌メタン放出量のボトムアップ推定を進める上できわめて重要なデータとなる。また、本研究で明らかになったメタン放出量の変動要因とそれに対する放出量の反応は、今後プロセススペースによってメタンフラックス推定を行う場合にきわめて有効であろう。

これらのデータと知見は、湿地林の林冠木でのメタンフラックス観測・調査に基づいて得られたものであるが、今回の観測結果は、初めに述べた樹幹からのメタン放出に関する野外観測の先行事例2例(Terazawa et al. 2007, Gauci et al. 201)およびその後に表示された1例(Pangala et al. 2013)に次ぎ、世界的にもまだ少ない野外観測結果のひとつである。とくに、樹幹からのメタン放出量の周日変動と季節変動についてはこれまでに報告はなく、冷温帯のみならず他の気候帯の湿地林における類似の研究に与えるインパクトは大きい。さらに、樹体内のメタン輸送に関わると考えられる明瞭な通気組織の確認も、野外の成木の根系では初めてのものと思われる。

今後は、樹幹からのメタン放出量の時間的、空間的な変動およびそれに関与する要因についてさらに検討を進めるとともに、樹幹からのメタン放出が湿地林全体のメタンフラックスに及ぼす影響、さらには全球メタン収支に及ぼす影響の評価に発展させる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 5 件)

1. 寺澤和彦・山田健四・阪田匡司・石塚成宏．湿地林におけるヤチダモ樹幹からのメタン放出量の季節的変動．第 125 回日本森林学会大会．平成 26 年 3 月 29 日．大宮ソニックシティ(さいたま市)

2. 山田健四・寺澤和彦・阪田匡司・石塚成宏．湿地林における地表面メタンフラックスに林床植生と地下水位変動が与える影響．第 125 回日本森林学会大会．平成 26 年 3 月 29 日．大宮ソニックシティ(さいたま市)

3. 山本福壽・沖田総一郎・半澤綾菜・阪田匡司・石塚成宏・山田健四・寺澤和彦．湿地林におけるヤチダモ根系および樹皮の組織構造．第 125 回日本森林学会大会．平成 26 年 3 月 29 日．大宮ソニックシティ(さいたま市)

4. 山本福壽・赤松遼平・沖田総一郎・阪田匡司・石塚成宏・寺澤和彦．過湿環境に植栽したヤチダモ、ハンノキのメタン放出と樹皮の組織構造．第 124 回日本森林学会大会．平成 25 年 3 月 26 日．岩手大学(盛岡市)

5. 寺澤和彦・石塚成宏・阪田匡司・大野泰之・山田健四．湿地林におけるヤチダモ樹幹からのメタン放出の律速要因．第 123 回日本森林学会大会．平成 24 年 3 月 27 日．宇都宮大学(宇都宮市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

寺澤 和彦(TERAZAWA, Kazuhiko)
東京農業大学・生物産業学部 教授
研究者番号: 3 0 4 1 4 2 6 2

(2)研究分担者

石塚 成宏(ISHIZUKA, Shigehiro)
独立行政法人森林総合研究所・その他部局等・研究員
研究者番号: 3 0 3 5 3 5 7 7

阪田 匡司(SAKATA, Tadashi)
独立行政法人森林総合研究所・その他部局等・研究員
研究者番号: 5 0 3 5 3 7 0 1

山本 福壽(YAMAMOTO, Fukuju)
鳥取大学・農学部・教授
研究者番号: 6 0 1 1 2 3 2 2

山田 健四(YAMADA, Kenji)
地方独立行政法人北海道立総合研究機構・その他部局等・研究員
研究者番号: 0 0 4 1 4 2 7 7

(3)連携研究者

大野 泰之(OHNO, Yasuyuki)
地方独立行政法人北海道立総合研究機構・研究員
研究者番号: 3 0 4 1 4 2 4 6