J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 151 p.49 ～ 55 (2022)

森林における水文循環がメタンガス交換に与える影響

坂部綾香 [1]

Influence of hydrological cycle on methane gas exchanges in forest ecosystems

Ayaka SAKABE[1]

Abstract: Methane is an important greenhouse gas. Aerated forest soils are assumed to be an atmospheric methane sink. However, methane emission from small riparian wetlands and/or tree-mediated methane emission have the potential to offset the soil methane sink and may convert the forest from a net sink to a net source. In this paper, I focus on the methane emission from the stem and the ecosystem-scale methane flux in tropical peat swamp forest. These topics are particularly uncertain in forest methane dynamics. The soil water condition was an important controlling factor of methane fluxes in forests in all cases. Finally, how integrated analysis using an international database of ground-based observation data can be used for understanding global methane dynamics is discussed.

Key Words : global warming, groundwater level, methane, stem methane emission, tropical peat swamp forest

1. はじめに

2021 年 10 月 31 日からイギリス・グラスゴーにて第 26 回気候変動枠組条約締約国会議（COP26）が開催されており，強力な温室効果ガスであるメタンの排出削減目標に 100 以上の国と地域が合意した．メタンは全温室効果ガスによる地球温暖化の約 23% に寄与すると推定されており（Etminan et al., 2016），メタン放出量の削減は無視できない課題となっている．しかし，各メタン放出源・吸収源の規模や時間変化には，いまだ大きな不確実性がある（Saunois et al., 2020）．これらの不確実性を減らすことはより効果的なメタン排出量の削減につながる．

筆者らは，野外観測に基づいてメタンガス交換量（フラックス）の定量化と変動メカニズムの解明に取り組んできた．本稿では，いまだ未解明な点が多い幹からのメタン放出現象と熱帯泥炭湿地林におけるメタン動態に焦点を当てて，土壌の水分条件がいかにメタンフラックスの制御要因として重要であるか解説する．そして，シンポジウムのテーマであるモデル化に向けて地上観測データがどのように貢献しうるか，渦相関法によるメタンフラックスについての国際的なデータベースを活用した統合解析の動きについて紹介したい．

[1]The Hakubi center, Kyoto University, 606-8501, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan. Corresponding Author: 坂部綾香, 京都大学白眉センター.
2021 年 11 月 28 日受稿　2022 年 4 月 1 日受理

2. 森林におけるメタン動態

森林は世界の陸地面積の約 3 割を占めるため，森林が全球のメタン収支に果たす役割を評価することは重要である．地下水位はメタンの生成と酸化を制御する酸化還元状態に影響を与えるため，土壌におけるメタン動態を考える上で重要な環境要因である（Turetsky et al., 2014）．浸水した嫌気的な環境下で有機物が分解される過程でメタンが生成される．生成されたメタンは土壌中を上方へと拡散する際に，一部は好気的な土壌でメタン酸化菌によって酸化される（Fig. 1）．メタンの生成も酸化も微生物活動によって制御されており，両者のバランスによって土壌表面がメタン吸収源となるか放出源となるかが決まる（Topp and Pattry, 1997）．

好気的な林床土壌ではメタン吸収が起こると考えられるが，吸収量は土壌水分量，孔隙率といった土壌の物

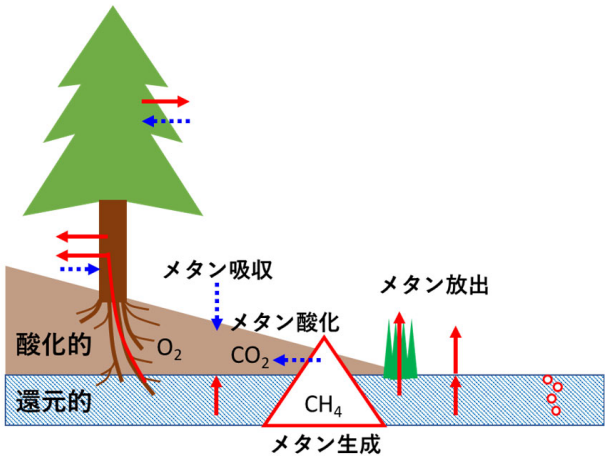


Fig. 1　森林，湿地生態系におけるメタンの放出源と吸収源．実線の矢印はメタンの生成・放出を，点線の矢印はメタンの酸化・吸収を表す．
CH_4 sources and sinks in upland and wetland. Solid arrows show CH_4 sources and emissions. Dotted arrows show CH_4 sinks and uptake.

理性，地温等の環境条件によって変化する（Dutaur and Verchot, 2007）．そして，土壌の水分条件は地形によって空間的に不均一であるため，林内の土壌メタンフラックスも空間的不均一性が高いと考えられる．そのため，森林は必ずしもメタンの吸収源となるわけではない．森林流域内で小さな面積を占める湿地からのメタン放出が好気的土壌でのメタン吸収を上回ることで，流域スケールでメタン収支を評価した場合に，メタン放出に転じる場合がある（伊藤ら, 2005; Sundqvist et al., 2015; Sakabe et al., 2016; Ueyama et al., 2018）．また，降雨や乾燥による土壌含水率の変化に応じて，土壌でのメタン吸収速度が変化することが報告されており（Sakabe et al., 2015），正確なメタン収支を把握するには時間的な不均一性も考慮する必要がある．

さらに，森林におけるメタン動態を理解するには土壌だけでなく，葉（Keppler et al., 2006），幹（Pangala et al., 2013; Sakabe and Takahashi et al., 2021）におけるメタン放出 · 吸収プロセスも考慮しなければならない．第 4 章では，近年特に注目されている幹からのメタン放出現象について述べる．とりわけ熱帯泥炭湿地林では樹木を介したメタン放出が生態系全体のメタン放出の 62 ～ 87 % を占めるという報告があり（Pangala et al., 2013），幹からのメタン放出を無視できない可能性がある．このように，空間的にも時間的にも不均一である森林におけるメタン収支を評価するには微気象学的な手法による森林生態系スケールのメタン収支の評価が有効である．一方で，林内のメタン放出 · 吸収プロセスの理解には，コンポーネントごとといった小さいスケールを対象とするチャンバー法が有効である．筆者らはこれらの手法を組み合わせることで，メタン動態の理解に取り組んできた．第 3 章ではこれらのガス交換の測定手法について解説する．

3. 目的に応じたフラックス測定の方法

フラックスの測定方法によって対象とする空間スケールが異なるので，目的に応じたフラックス測定の方法を選択する必要がある．ここでは，土壌表面，葉群，幹表面といったコンポーネントを対象とするチャンバー法と，大気乱流理論に基づいて生態系スケールのフラックスを測定する微気象学的手法について解説する．メタンフラックス研究についてはメタン分析計の制約により，チャンバー法による研究例が多い．チャンバー法によって土壌表面におけるフラックスを測定する場合は，地表面にチャンバーを被せて密閉空間をつくりそのチャンバー内で起こる濃度変化速度を測定し，フラックスを算出する．葉群や幹表面のフラックスを測定する場合は，それらの測定対象にチャンバーを被せて密閉空間をつくることで測定を行う．チャンバー法の利点は，林内のどういった場所でメタン吸収 · 放出が生じているのかメタンフラックスの詳細な変動プロセスを理解するのに役立つという点である．近年は，半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計によって，現場でのリアルタイムのメタン濃度測定が可能となった．こうしたメタン濃度分析計と自動開閉する閉鎖型循環式チャンバー法を組み合わせることで，土壌メタンフラックスの連続観測が行われている（Savage et al., 2014; Sakabe et al., 2015）．メタンフラックスの変動は降雨の影響を強く受けるため，メタンフラックスを連続観測することは，メタン動態のプロセス理解と，より正確なメタン収支の把握に役立つ．筆者らが滋賀県のヒノキ林土壌で，メタンフラックスを通年連続観測した結果，好気的土壌でのメタン吸収は，春先に気温が上昇し始めるにつれて増加するが梅雨によって著しく吸収は減少し，降雨後土壌が乾燥するにつれて吸収が回復する様子が明らかになった（Fig. 2, Sakabe et al., 2015）．降雨時は雨滴によって土壌表面の空隙がふさがれるためにメタン吸収速度が低下すると考えられた．降雨後はメタン吸収が回復するのに数日かかっていたことから，雨滴によるガス拡散性の影響だけでなく，土壌含水率の増加に伴って形成された嫌気的な土壌環境により，メタン生成菌の活動が促進される一方でメタン資化性菌の活動が抑制された結果，メタン生成が増加し酸化が減少したと考えられた．冬季には気温が低下するにつれて吸収量が減少した．一年を通じて連続観測を行うことによって，メタン動態のモデル改善に向けたプロセス理解を進めることができる．一方でチャンバー法の欠点は空間代表性に欠けるという点である．特に森林におけるメタンフラックスは空間的不均一性が高いため，森林におけるメタン収支をチャンバー法のみで評価するには，空間代表性の問題がより重要になる．また，チャンバーが存在することによって，その場の風速や気温といった環境が撹乱されてしまうという問題もある（Denmead, 1994）．

微気象学的手法は土壌表面の微環境にかく乱を与えることなく，測定点から風上の地形を代表した生態系スケールのフラックスが得られるという利点がある．中でも渦相関法は用いる仮定が少なく，最も直接的な手法であると考えられている．渦相関法ではフラックスに寄与するすべての周期の変動を捉える必要があるので，センサーには 0.1 秒ごとの変動をとらえる応答性が必要とされる．半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の登場により，現場での高速かつ，高精度なメタン濃度測定が可能となり，渦相関法によるメタンフラックスの測定が行われるようになった（Shashi et al., 1992; Hendriks et al., 2008）．Los Gatos Research 社や，Piccaro 社によって販売されている測定部が閉鎖系になっているクローズドパス型や，Li-Cor 社によって販売されている測定部が大気に開放されているオープンパス型のメタン濃度分析計がある．オープンパス型とクローズドパス型のメタン濃度分析計によるメタンフラックスの比較観測の結果，両者が一致したことから，ある程度のメタン放出があるサイトでは信頼できるメタンフラックスの観測が可能に

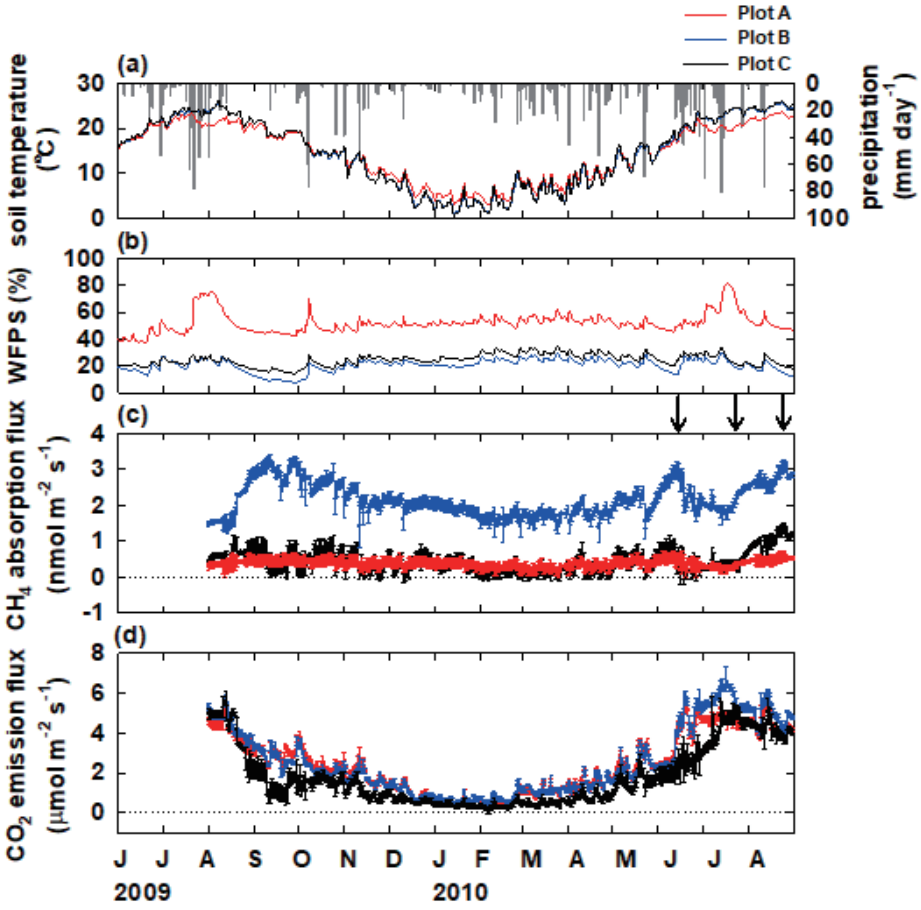


Fig. 2 滋賀県南部に位置するヒノキ林における（a）地温と降水量，土壌 3 地点における（b）土壌含水率（WFPS），（c）メタン吸収速度，（d）二酸化炭素放出速度の変動.
Annual variations in daily averaged (a) soil temperature and precipitation, (b) WFPS, (c) CH_4 absorption, and (d) CO_2 emission in three plots (Sakabe et al., 2015).

なったといえる（Iwata et al., 2014）．しかし，森林生態系ではメタン放出と吸収が混在しメタン濃度の変動が微量であるため，渦相関法を適用するにはメタン濃度分析計の精度が不足する場合がある．傾度法（Sundqvist et al., 2015），簡易渦集積法（Ueyama et al., 2012; Sakabe et al., 2012），双曲線簡易渦集積法（Ueyama et al, 2018）によって，森林生態系スケールのメタンフラックスが観測された結果，林内のホットスポットからのメタン放出により，森林が生態系スケールで時期的にメタン放出源となることが示された（Sakabe et al., 2012; Sundqvist et al., 2015; Ueyama et al., 2018）．

4. 樹幹からのメタン放出現象

近年，幹からのメタン放出現象が無視できない可能性が指摘されており（Rice et al., 2010; Pangala et al., 2013; Wang et al., 2016），幹からのメタン放出が全球のメタン放出の約 10 % を占めるという推定がある（Rice et al., 2010）．好気的な土壌からなる森林で，幹からのメタン放出を考慮に入れることで，森林がメタン吸収源からメタン放出源に転じた例も報告されている（Wang et al., 2016）．

根圏でのメタン濃度，あるいは地温や地下水位といった土壌でのメタン生成速度に影響を与えると考えられる環境要因と幹表面からのメタン放出速度に相関がみられることから，嫌気的な土壌で生成されたメタンが根から樹木に入り，幹表面から大気に放出されると示唆する研究がある（Pangala et al., 2013; Barba et al., 2019）．あるいは，地下水に溶存したメタンが樹液流によって樹木内を輸送されると示唆する研究もある（Machacova et al., 2016; Barba et al., 2019）．樹木の内部でメタン生成が起こっているという報告もある（Covey et al., 2012; Wang et al., 2016）．メタンがどこを起源としているのか，樹木の中をどのようにメタンは輸送されるのか，環境，樹種，個体によってどのように異なるのかなどは明らかになっていない．

筆者らは滋賀県南部の桐生水文試験地の湿地に生育しているハンノキの幹にチャンバーを取り付けて，幹からのメタンフラックスを連続観測した．ハンノキ幹からのメタン放出量は，夏に大きく冬に小さくなる季節変化を示した（Sakabe and Takahashi et al., 2021）．幹からのメタン放出速度は地下水の溶存メタン濃度と強い相関があったことから，土壌で生成されたメタンが幹から放出

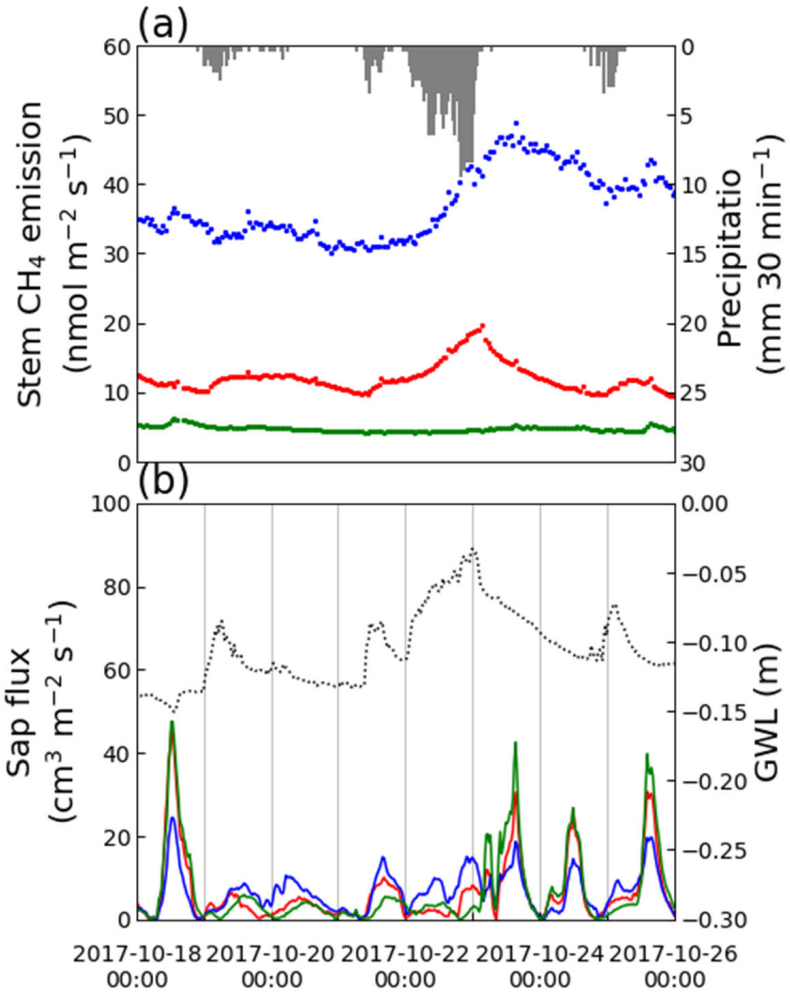


Fig. 3　降雨時の（a）3 個体のハンノキ幹からのメタン放出速度，（b）3 個体のハンノキの樹液流速（実線），地下水位（点線）の変動．
Variations in (a) CH_4 emission rates from stems of three Alnus trees, and (b) sap flux of three Alnus trees (solid lines), and groundwater level (dotted line) during and after rainfall.

されていると考えられた．樹液流速も夏に大きく冬に小さい季節変化を示すが，樹液流速がほぼゼロとなる落葉期にも幹からのメタン放出が観測されたことから，ガス態でのメタン輸送の存在が示唆された．

連続観測だからこそ分かった興味深い現象として，降雨時即座に幹メタン放出が増加する様子が観測された（Fig. 3）．土壌を嫌気的に培養した実験の結果から，地下水位の上昇からメタン生成の増加まで数日のラグがあることが報告されており（Moore and Delva, 1993），メタン生成菌の活動がこれほど即座に変化するとは考えにくいため，降雨に伴う土壌水，地下水の流れの変化が幹メタン放出量に影響した可能性が考えられた．地下深くの高濃度メタンを含む地下水が上昇することで，根圏のメタン濃度が上昇あるいは雨水によって土壌表層でのガス拡散が妨げられ，幹から放出されるメタンの割合が増加した可能性が考えられた．3 個体の中でも水位が地表面近くにあり，降雨時に水位の変化が見られない個体では，降雨時のメタン放出増加は見られなかった．浸水に対する即座の幹メタン放出の増加は他の論文でも報告されている（Schindler et al., 2020; Terazawa et al., 2021）．いずれの論文でも水位と根の位置関係の変化が幹メタン放出の変化に重要であろうと推測されている．降雨時の幹メタン放出は，森林からのメタン放出を増加させる重要な現象であるためメカニズムの解明が必要である．

5. 熱帯泥炭湿地林における生態系スケールのメタンフラックス

熱帯泥炭湿地林の膨大な炭素の蓄積と高い水位，年間を通じて高い地温という環境は，メタン生成に適しているため，熱帯泥炭湿地林ではメタン生成が起こると考えられる．しかし，熱帯泥炭湿地林における生態系スケールのメタンフラックスの観測例は数例しかなく，熱帯泥炭湿地林がメタン収支に果たす役割の理解は特に不足している．土壌チャンバーや土壌培養実験の結果からは，熱帯泥炭の土壌は温帯や亜寒帯の泥炭の土壌に比べて，メタン放出が小さいと報告されている（Inubushi et al., 2005; Couwenberg et al., 2010）．熱帯泥炭の木質由来の

有機物が草本由来の有機物に比べて難分解であり，メタン生成に利用しにくい点や，酸性の土壌がメタン生成に適さない点が要因であると考えられる（Inubushi et al., 2005）．一方で，泥炭湿地林では樹木を介したメタン放出が生態系のメタン放出の 62 ～ 87 % を占めるという報告があり，土壌の測定のみではメタン収支を見誤る可能性もある．

筆者らはインドネシアの中カリマンタンに位置する泥炭湿地林で，渦相関法による生態系スケールのメタンフラックスの観測を行った．このサイトは比較的かく乱されていない，ほぼ未排水の二次林といえる．観測の結果，メタンフラックスは地下水位の変化に応じて，乾季にはメタン吸収，雨季にはメタン放出に切り替わる様子が明らかになった（Sakabe et al., 2018）．年間のメタン収支は 0.17 g C m^{-2} $year^{-1}$ であり，北方や温帯の泥炭で報告されている値よりもはるかに小さかった．地下水位がメタンフラックスに重要な変動要因であった．地下水位の変化は泥炭表層に存在する易分解有機物が好気的に分解されるか，嫌気的に分解されるかにおいて重要であると考えられた．易分解有機物はメタン生成のよい基質になると考えられる．乾季にはこの易分解有機物は好気的に分解されるので二酸化炭素になり，深い泥炭層の難分解有機物がメタン生成に用いられることになり，メタン生成量は小さくなると考えられる．雨季には水位が上昇することで表層の易分解有機物もメタン生成に利用できるようになり，メタン生成が増すのではないかと考えられた．

渦相関法によるメタンフラックスの観測結果からは，未排水の泥炭湿地林では地下水位が上昇するほどメタン放出は増加するため，泥炭林を未かく乱のまま水位を高く保つことはメタン放出を促進すると言える．しかし，未排水の泥炭湿地林における年間のメタン収支は，メタンの放射強制力を考慮に入れても二酸化炭素収支のわずか数パーセントしかない．さらに，地下水位を下げることは泥炭の好気的な分解を促し二酸化炭素放出を著しく増加させる（Hirano et al., 2012）．また，排水路から強いメタン放出があることが報告されている（Jauhiainen and Silvennoinen, 2012）．そのため，トータルで見ると泥炭湿地林を未かく乱のまま高い水位で保つことは，泥炭の炭素蓄積を保護し温室効果ガスの放出を抑制することになると言える．

マレーシアの泥炭湿地林において，渦相関法によりメタンフラックスを観測した研究によると，年間のメタン収支は 7.5 ～ 10.8 g C m^{-2} $year^{-1}$ と（Wong et al., 2018），筆者らが観測したインドネシアの泥炭湿地林における年間のメタン収支よりも大きかった．マレーシアの泥炭湿地林では樹木からのメタン放出の寄与が示唆されている（Wong et al., 2018）．熱帯泥炭湿地林の中でも樹木からのメタン放出の有無が，生態系スケールのメタンフラックスに影響する可能性がある．今後さらなる観測の継続が必要である．

6. 国際的なデータベースを利用した統合解析によって分かること

近年は渦相関法によるメタンフラックスの観測データを国際的なデータベースに提供し，統合解析する取り組みが行われている（Knox et al., 2021; Delwiche et al., 2021）．fluxnet-CH4 というプロジェクトでは（https://fluxnet.org/data/fluxnet-CH4-community-product/），統一的な方法で処理された渦相関法によるフラックスデータがデータベース化されている．そこから生態系ごとのメタンフラックスの規模，制御要因が明らかになってきた．季節変化の制御要因だけでなく，渦相関法によるフラックスの連続データから日変化の制御要因や，温度や水位の変化に対するフラックスのラグが検討されている（Knox et al., 2021）．統合解析によって，地上観測データからメタンフラックスのモデル改善に向けてよりよいパラメータを提供し，新しい仮説を提供できると期待される．

fluxnet-CH4 Version 1.0 では，世界中の 81 サイトが登録されている．データを提供しているサイトは北米やヨーロッパに集中していており，南米，アフリカ，東南アジアのデータが少ない．メタン動態の空間的不均一性を考えると依然観測サイトは不足している．また，長期的に継続してデータを取得しているサイトはさらに限られる．今後の課題として，熱帯地域でデータを取得すること，さらに熱帯泥炭湿地林では乾燥した年，湿潤な年が存在するため，長期的に観測を継続することは重要である．

7. おわりに

メタン濃度分析計の技術革新に伴い，陸域生態系におけるメタンフラックスの研究は発展してきた．渦相関法によるメタンフラックスの観測結果は，国際的なデータベースによるデータ共有が進んでおり，各生態系の位置付けやモデルに重要なパラメータを地上観測から検討できるようになった．渦相関法によるフラックスは長期的かつ連続的なフラックスが得られるので，メタンの放出規模だけでなく，制御要因，変化のタイミングの解析からプロセス理解を進め，モデルの改善に役立つと考えられる．一方で，タワーフラックスだけでは詳細なプロセスを明らかにすることができない．森林におけるメタンフラックス研究は，幹からのメタン放出を考慮に入れる重要性が認識され，パラダイムシフトが起こっている．チャンバー法によるパーツごとの観測や培養実験を組み合わせたプロセス理解を進めていきたい．地上観測者として今後も現場でデータを取得し，地上観測からしか知りえない情報を提供することを目指したいと考えている．

謝辞

本解析に関する筆者の研究業績は，多くの共同研究者と協力して実施されたものである．全ての共同研究者に謝意を表します．本研究の一部は JSPS 科研費（2525740, 17J03478, 18H02238, 18H03356, 21H03576），白眉プロジェクト，環境研究総合推進費（2-1504）の支援により実施しました．

引用文献

Barba, J., Poyatos, R. and Vargas, R. (2019): Automated measurements of greenhouse gases fluxes from tree stems and soils: magnitudes, patterns and drivers. Scientific Reports, 9: 4005, doi:10.1038/s41598-019-39663-8.

Couwenberg, J., Dommain, R. and Joosten, H. (2010): Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. Global Change Biology, 16: 1715–1732. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02016.x.

Covey, K.R., Wood, S.A., Warren II, R.J., Lee, X. and Bradford, M. (2012): Elevated methane concentrations in trees of an upland forest. Geophysical Research Letters, 39: LI15705, doi:10.1029/2012GL052361.

Delwiche, K.B., Knox, S.H., Malhotra, A., Fluet-Chouinard, E.F., McNicol, G., Feron, S., Ouyang, Z., Papale, D., Trotta, C., Canfora, E. et al. (2021): fluxnet-CH4: A global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands. Earth System Science Data, 13: 7, doi:10.5194/essd-2020-307.

Denmead, O.T. (1994): Measuring fluxes of CH_4 and N_2O between agricultural systems and the atmosphere. In: Peng, S., Ingram, K.T., Neue, H-U and Ziska, L.H. (eds), pp. 209–234. Climate change and rice. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Dutaur, L. and Verchot, L.V. (2007): A global inventory of the soil CH_4 sink. Global Biogeochem. Cycles, 21: 4, doi:10.1029/2006GB002734.

Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E.J. and Shine, K.P. (2016): Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. Geophysical Research Letters, 43: 24, doi:10.1002/2016GL071930.

Hendriks, D.M.D., Dolman, A.J., van der Molen, M.K. and van Huissteden, J. (2008): A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy. Atmos. Chem. Phys., 8: 431–443, doi:10.5194/acp-8-431-2008.

Hirano, T., Segah, H., Kusin, K., Limin, S., Takahashi, H. and Osaki, M. (2012): Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat swamp forests. Global Change Biology. 18(11): 3410–3422, doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02793.x.

Inubushi, K., Otake, S., Furukawa, Y., Shibasaki, N., Ali, M., Itang, A.M. and Tsuruta, H. (2005): Factors influencing methane emission from peat soils: Comparison of tropical and temperate wetlands. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 71: 93–99, doi:10.1007/s10705-004-5283-8.

伊藤雅之, 大手信人, 勝山正則, 木庭啓介, 川崎雅俊, 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(3): 244–256.

Iwata, H., Kosugi, Y., Ono, K., Mano, M., Sakabe, A., Miyata, A. and Takahashi, K. (2014): Cross-validation of open-path and closed-path eddy-covariance techniques for observing methane fluxes. Boundary-Layer Meteorol., 151: 95–118.

Jauhiainen, J. and Silvennoinen, H. (2012): Diffusion GHG fluxes at tropical peatland drainage canal water surfaces. Suoseura, 63(3–4): 93–105.

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

Knox, S.H., Bansal, S., McNicol, G., Schafer, K., Sturtevant, C., Ueyama, M., Valach, A.C., Baldocchi, D., Delwiche, K., Desai, A.R. et al. (2021): Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales. Global Change Biology, doi:10.1111/gcb.15661.

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

Moore, T.R. and Delva, M. (1993): The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. European Journal of Soil Science, 44: 651–664.

Pangala, S.R., Moore, S., Hornibrook, E.R.C. and Gauci, V. (2013): Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. New Phytologist, 197: 524–531.

Rice, A.L., Butenhoff, C.L., Shearer, M.J., Teama, D., Rosenstiel, T.N. and Khalil, M.A.K. (2010): Emissions of anaerobically produced methane by trees. Geophysical Research Letters, 37: L03807, doi:10.1029/2009GL041565.

Sakabe, A., Hamotani, K., Kosugi, Y., Ueyama, M., Takahashi, K., Kanazawa, A. and Itoh, M. (2012): Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tunable diode laser spectroscopy detection. Theoretical and Applied Climatology, 109: 39–49.

Sakabe, A., Itoh, M., Hirano, T. and Kusin, K. (2018): Ecosystem-scale methane flux in tropical peat swamp forest in Indonesia. Global Change Biology, 24(11): 5123–5136, doi:10.1111/gcb.14410.

Sakabe, A., Kosugi, Y., Okumi, C., Itoh, M. and Takahashi, K. (2016): Impacts of riparian wetlands on the seasonal variations of watershed-scale methane budget in a temperate monsoonal forest. J. Geophys. Res. Biogeosci., 121(7): 1717–1732, doi:10.1002/2015JG003292.

Sakabe, A., Kosugi, Y., Takahshi, K., Itoh, M., Kanazawa, A., Makita, N. and Ataka, M. (2015): One year of continuous measurements of soil CH_4 and CO_2 fluxes in a Japanese cypress forest: Temporal and spatial variations associated with Asian monsoon rainfall. J. Geophys. Res. Biogeosci., 120: 585–599, doi:10.1002/2014JG002851.

Sakabe, A.*, Takahashi, K.*, Azuma, W. Itoh, M., Tateishi, M. and Kosugi, Y. (2021): Controlling factors of seasonal variation of stem methane emissions from Alnus japonica in a riparian wetland of a temperate forest. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 126(10): e2021JG006326, doi:10.1029/2021JG006326.

* Sakabe, A. and Takahashi, K. contributed equally to this study and share first authorship.

Saunois, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K. et al. (2020): The global methane budget 2000–2017. Earth System Science Data, 12: 1561–1623, doi:10.5194/essd-12-1561-2020.

Savage, K., Phillips, R. and Davidson, E. (2014): High temporal frequency measurements of greenhouse gas emissions from soils. Biogeosciences, 11: 2709–2729, doi:10.5194/bg-11-2709-2014.

Schindler, T., Mander, Ü., Machacova, K., Espenberg, M., Krasnov, D., Escuer-Gatius, J., Veber, G., Pärn, J. and Soosaar, K. (2020): Short-term flooding increases CH_4 and N_2O emissions from trees in a riparian forest soil-stem continuum. Scientific Reports, 10: 3204, doi:10.1038/s41598-020-60058-7.

Shashi, B., Ullman, F.G., Billesbach, D., Clement, R.J. and Kim, J. (1992): Eddy correlation measurements of methane flux in a northern peatland ecosystem. Boundary-Layer Meteorol., 58, 289–304.

Sundqvist, E., Mölder, M., Crill, P., Kljun, N. and Lindroth, A. (2015): Methane exchange in a borel forest estimated by gradient method. Tellus B. 67: 26688, doi:10.3402/tellusb.v67.26688.

Topp, E. and Pattey, E. (1997): Soils as sources and sinks for atmospheric methane. Can. J. Soil Sci., 77, 167–178.

Turetsky, M.R., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N.B., Crill, P., Hornibrook, E.R.C., Minkkinen, K., Moore, T.E., Myers-Smith, I.H., Nykanen, H. et al. (2014): A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. Global Change Biology, 20: 2183–2197, doi:10.1111/gcb.12580.

Terazawa, K., Tokida, T., Sakata, T., Yamada, K. and Ishizuka, S. (2021): Seasonal and weather-related controls on methane emissions from the stems of mature trees in a cool-temperate forested wetland. Biogeochemistry, 156: 211–230, doi:10.1007/s10533-021-00841-4.

Ueyama, M., Hamotani, K., Nishimura, W., Takahashi, Y., Saigusa, N. and Ide, R. (2012): Continuous measurement of methane flux over a larch forest using a relaxed eddy accumulation method. Theoretical and Applied Climatology, 109: 461–472.

Ueyama, M., Yoshikawa, K. and Takagi, K. (2018): A cool-temperate young larch plantation as a net methane source — A 4-year continuous hyperbolic relaxed eddy accumulation and chamber measurements. Atmospheric Environment, 184: 110–120.

Wang, Z., Gu, Q., Deng, F., Huang, J., Megonigal, P.M., Yu, Q., Lu, X., Li, L., Chang, S., Zhang, Y. et al. (2016): Methane emissions from the trunks of living trees on upland soils. New Phytologist, 211: 429–439, doi:10.1111/nph.13909.

Wong, G.X., Hirata, R., Hirano, T., Kiew, F., Aeries, E.B., Musin, K.K., Waili, J.W., Lo, K.S. and Melling, L. (2018): Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical peat swamp forest. Agricultural and Forest Meteorology, 256–257: 353–361, doi:10.1016/j.agrformet.2018.03.025.

要　　旨

メタンは重要な温室効果ガスである．好気的な土壌ではメタン吸収が起こると考えられているが，流域内の湿地土壌や樹木の幹表面からのメタン放出は，好気的土壌でのメタン吸収を相殺し，森林がメタン吸収源から放出源に転じる可能性がある．本稿では，森林におけるメタン動態の中でも特に理解が不足している幹からのメタン放出現象と，熱帯泥炭湿地林におけるメタン動態に焦点を当てて，現場でのフラックス観測結果をもとに，土壌の水分条件がいかにメタンフラックスの制御要因として重要であるか解説する．モデル化に向けては現場観測による現象の理解が欠かせない．最後にモデル化に向けて，渦相関法によるメタンフラックスの国際的なデータベースを活用した統合解析が，全球のメタン動態の理解に向けてどのように役立てられているのか解説する．

キーワード：地球温暖化，地下水位，メタン，幹メタン放出，熱帯泥炭湿地林