

森林生態系におけるメタンフラックス観測の発展

坂部 綾香^{1*}

Progress of the methane flux measurements in forest ecosystems

Ayaka Sakabe^{1*}

概要

メタンは二酸化炭素に次ぐ温室効果ガスであるが、陸域生態系におけるその放出源、吸収源についての理解が進んでいない。その一因に、現場でのメタン放出・吸収速度（フラックス）観測の難しさゆえに、観測データの蓄積が不足しているという点が挙げられる。とりわけ森林におけるメタン収支は、観測データが非常に限られている。森林生態系は、一般にはメタンの吸収源と認識されているが、林内では局所的にメタン放出も起こっていることが明らかになっている。林内の空間不均一なメタン動態を加味した森林におけるメタン収支の定量評価や、林内のメタン放出源、吸収源のプロセス理解が必要である。メタンフラックスの観測は、メタン濃度分析計の技術革新に依存するところが大きく、近年の半導体レーザー分光法を用いた高応答性かつ、高精度なメタン濃度分析計の普及に伴ってメタンフラックス観測例が増加している。本総説では、森林生態系におけるメタンフラックス観測の発展の経緯と現状について解説する。

1. はじめに

温室効果ガス濃度の上昇が地球温暖化の主要因とされており、気温上昇への寄与率は、二酸化炭素が56%、次いでメタンが32%となっている¹⁾。二酸化炭素の大気中濃度が400 ppm程度であるのに比べて、メタンは、1.8 ppm程度と微量であるが、メタンは二酸化炭素の約30倍という高い温室効果を持つため、気温上昇への寄与率が高くなっている。

大気中メタン濃度は、産業革命以降（1750年頃）、2.5倍以上に上昇した。1990年代には濃度上昇が停滞し、1999年から2006年は濃度が安定化し、2007年以降再び濃度が上昇している。20世紀の終わりにメタン濃度が安定化した理由について、水田における施肥の増加と水利用の減少に伴って、水田からのメタン放出量が減少したことが主要因であるとする研究や²⁾、化石燃料の生産によるメタン放出の減少が原因であるとする研究もあり³⁾、統一的な結論は得られていない。また、濃度上昇の再開についても、異常に高い温度や降水量の増加に起因した北方や熱帯の湿地からの放出の増加と、熱帯でのバイオマス燃焼の増加が原因であるとする研究や⁴⁾、OHラジカルとの大気化学反応が主要因であるとする研究⁵⁾など諸説ある。メタンは二酸化炭素に次ぐ温室効果ガスであるにも関わらず、大気中メタン濃度に影響を与える明確な原因は明らかになっていない。今後の気候変動に対して、大気中メタン濃度がどのような応答を示すのか予測するために、さらに、科学的根拠に基づいてメタン削減計画を設定するためには、まずメタン放出源、吸収源を正確に把握することが重要である。

メタンの生成源については、大気中のメタンは主に生物起源である。湛水した土壌のような嫌氣的

2016年8月8日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。

* E-mail: sakabe.ayaka.6n@kyoto-u.ac.jp

な環境下で、有機物の嫌氣的な分解の間にメタン生成菌によって生成される。一方でメタンの吸収源については、ほとんどのメタンが対流圏での化学反応によって消失する。また、水分不飽和な好氣的な土壌では、メタン資化性菌によってメタンは二酸化炭素へと酸化される。土壌はメタン生成にもメタン酸化にも重要な役割を果たしており、両者のバランスによって、メタン放出源となるかメタン吸収源となるかが決まる。

全球のメタン収支の推定には、大きく分けてトップダウン法とボトムアップ法というアプローチがある。トップダウン法では、陸上の観測ステーション、海上を航行する船舶、航空機、人工衛星などを使って観測された大気中メタン濃度と、地球上の空気の流れを数値計算で再現できる大気輸送モデルを用いて、観測された大気中メタン濃度の時間・空間分布を再現するには地表面のどこでどれだけのメタンが放出・吸収されていたか逆推定する計算を行う。ボトムアップ法は、ローカルレベルで世界各地の主要な生態系におけるメタン収支を直接測定し、得られたプロセスの経験的知識を使ってパラメータ化し、全球の気象データセットや、衛星観測で得られたデータを併用して、ローカルレベルから大陸、全球スケールへと拡大してメタン収支を推定する。トップダウン法、ボトムアップ法によって推定された各メタン放出源、吸収源の推定値を表1に示す。各項目の推定幅が大きく、ボトムアップ法から得られた推定値は、概してトップダウン法から得られた推定値よりも大きいという問題がある⁶⁾。トップダウン法とボトムアップ法それぞれの不確実性を減らす努力と、比較検証を続けることによって、全球のメタン動態を正確に捉えることができるようになると思われる。

表1：トップダウン法およびボトムダウン法によって推定された2000年代におけるメタン放出量と吸収量⁶⁾。括弧内の数値は推定幅を表す。

	メタン収支 (Tg CH ₄ year ⁻¹)	
	トップダウン法	ボトムアップ法
放出源	548 (526-569)	678 (542-852)
自然起源	218 (179-273)	347 (238-484)
湿地	175 (142-208)	217 (177-284)
その他	43 (37-65)	130 (61-200)
人為起源	335 (273-409)	331 (304-368)
農業と廃棄物	209 (180-241)	200 (187-224)
バイオマス燃焼	30 (24-45)	35 (32-39)
化石燃料	96 (77-123)	96 (85-105)
吸収源	540 (514-560)	632 (592-785)
土壌	32 (26-42)	28 (9-47)
大気化学反応による損失	518 (510-538)	604 (483-738)

ボトムアップ法についていえば、地上観測データの更なる蓄積によって、精度を向上させる必要がある。現在は、全球をカバーするには非常に限られた観測データに基づいて推定が行われている。中でも、森林生態系におけるメタン動態は、観測に基づいた理解が進んでいない。森林の大部分は、好氣的土壌から成り、他の生態系に比べて効率的にメタンを吸収することから、森林は一般にメタンの吸収源と認識されている⁷⁾。しかし近年、微地形に起因して林内に局所的に存在する湛水した土壌、湿地、渓流域からのメタン放出量を無視できない可能性が指摘されている⁹⁻¹¹⁾。森林はメタン吸収源として期待されている一方で、森林現場での観測が困難なことから、林内の空間不均一なメタン動態を加味した森林メタン収支の定量評価や、林内のメタン放出源、吸収源のプロセス理解が進んでいない。森林は陸域に占める面積が大きいと、正確なメタン収支の定量化が重要となる。メタンフラックス観測の発展は、メタン濃度分析計の技術革新によるところが大きい。以前は、水素炎イオン化検

出器 (Flame Ionization Detector, FID) 付きのガスクロマトグラフによる実験室でのメタン濃度測定が主流であった。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の登場により、現場での高精度なメタン濃度の連続測定が可能となった。こうした新しいメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測によって、森林のメタン動態について多くの新たな事実が明らかとなってきている。

2. ガスクロマトグラフを用いたチャンバー法による土壌メタンフラックス観測

メタンフラックスを測定する手法は、大別すると二つに分けられる。一つはチャンバー法、もう一つは微気象学的手法である。チャンバー法は、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手法である。微気象学的手法は、大気乱流理論に基づいて、地表面の熱エネルギー、物質の生態系スケールのフラックスを直接測定する手法である。本章では、これまでメタンフラックス観測に最も長く用いられてきた静的閉鎖型チャンバー法とガスクロマトグラフによるメタン濃度分析を組み合わせた手法について概説する。

閉鎖型チャンバー法では、地表面にチャンバーを被せ、チャンバー内の空気を外界から隔離する。シリンジと真空バイアル瓶等を用いて、ある時間間隔でチャンバー内のヘッドスペースから空気を採取する。他にも開放型チャンバー法というものがあり、開放型ではチャンバー内の空気が外気と通じている。開放型チャンバー法では、チャンバー内に一定流量で外気を導入し、その入口と出口の濃度差を計測する。採取したサンプルガスを実験室に持ち帰り、メタン濃度の分析を行う。ガスクロマトグラフのサンプル注入部にサンプルガスを注入すると、ガスの流れに乗せられてカラムと呼ばれる分離管に運ばれる。カラムの中ではサンプル中の各気体成分が分離され、検出器でその量が測定される。そして、濃度の増加、減少速度からフラックスが求まる。

この手法を用いて、世界中の森林で土壌メタンフラックスの観測が行われている。蓄積された観測データを統合して、全球的な温帯林 ($14.9 \text{ Tg C year}^{-1}$)、熱帯林 ($7.7 \text{ Tg C year}^{-1}$)、北方林 ($3.8 \text{ Tg C year}^{-1}$) といった森林タイプごとのメタン吸収量が推定されている¹¹⁾。全球的な陸域生態系における光合成による炭素吸収量は $123 \text{ Pg C year}^{-1}$ であることから¹⁾、メタンフラックスのオーダーが小さいことが分かる。また、メタンフラックスと環境要因の関係が明らかになっており、土壌含水率が増加するにつれてメタン吸収が減少すると報告されている¹²⁾。土壌が浸水して好氣的なエリアが減少するにつれて、メタン資化性菌の活動できるエリアが減少する一方で、メタン生成菌の活動が促進されるためと考えられる。また、温度について、温度が上昇するにつれてメタン吸収が増加するという報告や¹³⁾、温度との関係は見られないという報告がある¹⁴⁾。メタン生成菌もメタン資化性菌の活動も、 $20\text{--}30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で最も活発になることが土壌の培養実験から報告されているので¹⁵⁾、土壌の水分状態による両者のバランスによって温度との関係が決まると考えられる。こうした森林土壌におけるメタン吸収量、環境応答性についての知見は、大部分が北アメリカやヨーロッパで得られた観測結果に基づいており、乾燥した夏を迎えるサイトでは、夏にメタン吸収が最大となる季節変化が報告されている^{16,17)}。

対照的に、アジアモンスーン気候のような夏から秋にかけて、梅雨と台風によって多量の降雨がある地域では異なるメタンフラックスの季節変化が観測されている。森下らによって、日本中の広葉樹林、針葉樹林を含めた 26 サイトで、月に 1 回、2 年間にわたって森林土壌におけるメタンフラックスが観測された結果、すべてのサイトで常にメタン吸収が観測された¹⁸⁾。そして、ほとんどのサイトでメタン吸収の季節変化は見られなかった。夏の温度上昇によってメタン吸収が促進される一方で、アジアモンスーン気候下で夏に降雨量が多く、メタン吸収が抑制されるために、メタンフラックスの明確な季節変化は見られなかったと考えられる。また、観測された植生、土壌タイプごとのメタン吸収量と、日本の森林の植生、土壌のエリアの統計値を用いて、日本の森林におけるメタン吸収量が推定された。その結果、日本の森林におけるメタン吸収量は、アメリカやヨーロッパの森林に比べて大きいことが明らかになっている。様々な気候帯下でメタンフラックスの観測例が増加することによって、森林タイプごとのメタン吸収量、環境応答性、季節変化の様子が明らかになってきている。

これまで森林の好氣的土壤におけるメタン吸収能に重点を置いて、メタンフラックスが観測されてきたが、伊藤らは林内でのメタン放出源に着目した観測を行った⁸⁾。滋賀県南部に位置する温帯ヒノキ林(桐生水文試験地)において、土壤メタンフラックスの時空間変動性を把握するために、森林土壤の斜面上部から下部、林内の湿地も含めて土壤メタンフラックスが観測された結果、斜面下部の溪畔域に近いところでは、降雨の多い夏にメタン放出が観測された。土壤表面が水分不飽和であっても、地中の嫌氣的なマイクロサイトでメタン生成が生じているためと考えられる。また、湿地ではほぼ年間を通じてメタンが放出されており、林床での吸収に比べて3オーダーほど大きなメタン放出があることが明らかになった。林内のメタン放出源を考慮すると、森林流域全体としてメタン放出源として機能する可能性が示された。

チャンバー法の利点は、地点ごとの詳細なメタンフラックスの変動プロセスを理解するのに役立つという点である。チャンバー法によって、土壤メタンフラックスの地点ごとの環境応答性、林内のこういった場所でメタン吸収・放出が生じているのか明らかとなった。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。他には、採取や分析の際の人為ミスが懸念されるほか、採取と分析に掛かる手間のせいで、測定データ数が限られてしまうという欠点がある。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攪乱されてしまうという問題もある¹⁹⁾。

3. レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測

近年、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計の開発が進み、メタン濃度の現場でのリアルタイム計測が可能となった。複数の会社から、測定方式の異なるレーザー分光法を用いたメタン濃度分析計が販売されている。例えば、Los Gatos Research 社から販売されている off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy 法を用いたメタン濃度分析計は、メタンに強く吸収される狭い波長帯 (1.65 μm) に調整されたレーザーが、サンプルガスの入った測定セル内に照射される。測定セル内では、レーザーが非常に反射性の高い2つの凹面鏡を何度も反射し、その透過光が検出される。メタンによる透過光強度の変化を用いて吸光度が決定され、吸収スペクトルを積分することでメタン濃度が求まる²⁰⁾。こうしたメタン濃度分析計では、微量なメタンを検出するために、測定セル内での実効光路長を伸ばす工夫がされている。微気象学的手法によってメタンフラックスを評価する場合は、多量の空気を連続的に分析する必要があるため、ガスクロマトグラフの使用は適さない。この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って、微気象学的手法によるメタンフラックスの観測が可能となった。本章では、半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を活用したメタンフラックス観測について概説する。

3.1 微気象学的手法

微気象学的手法は、土壤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、鉛直風速と気体濃度の0.1秒ごとの共分散を30分間程で平均する。フラックス (F) は次のように表される。

$$F = \overline{w'c'}$$

ここで w は風速の鉛直成分を、 c は対象とする気体の空気中での密度を示す。上付きのバー ($\overline{\quad}$) は時間平均を、プライム ($'$) は平均からの偏差を示す。この方法では、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ため、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。風速の鉛直成分の測定にはこの条件を満たす超音波風速計が一般に使われる。

二酸化炭素フラックス観測については、1990年代後半から650サイトを越える世界中の様々な生態系で観測が展開されている。ヨーロッパの国々を中心としたFLUXNETや、アジアの国々を中心としたAsiaFluxという国際研究ネットワークが存在し、データ共有を目的としたデータベース整備が進んでいる²¹⁾。渦相関法によるメタンフラックス観測については、大気中濃度が微量なメタンに対して、渦相関法を適用できる応答速度、精度を持つメタン濃度分析計が得られなかったために、観測は困難であった。しかし、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った。1992年に北方の泥炭地において、試作型の半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を用いて、初めて渦相関法によるメタンフラックスの観測が行われた²²⁾。当時、メタン濃度分析計をフィールドで用いることは、高価で大掛かりなセットアップを必要とし、頻繁な較正、温度制御のためかなりの労力を必要とした。そのため、実質的には無人連続観測を行うには限界があった。2008年頃から、フィールドでの操作性に優れた、安定性の高いメタン濃度分析計が得られるようになった²³⁾。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。これらのメタン濃度分析計を活用して、湿地²³⁾や水田²⁴⁾といった大きなメタン放出源で、渦相関法によるメタンフラックス観測が行われている。湿地や水田では、オープンパス型とクロ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が行われており、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なったといえる^{25,26)}。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。そのため、森林で渦相関法によってメタンフラックスが観測された例は数件しかない^{27,28)}。

森林における微量なメタンフラックスを観測するために、簡易渦集積 (REA) 法に半導体レーザー分光法を用いたメタン濃度分析計を組み合わせた手法が用いられている²⁹⁾。REA法は、測定原理は渦相関法に準じているが、応答性の速い分析計が得られない場合に利用できる³⁰⁾。REA法では、超音波風速計の風速データに基づいて、鉛直風速が上向きの時と下向きの時の空気が、それぞれ分けてリザーバーにサンプルされる。30分程サンプルされた後、各リザーバー内のガス濃度が分析され、リザーバー間の濃度差からフラックスが求まる。フラックス (F) は次のように表される。

$$F = b\sigma_w(C^+ - C^-)$$

ここで σ_w は鉛直風速の30分程の標準偏差、 C^+ 、 C^- は鉛直風速が上向きの時と下向きの時の平均濃度、 b は実験によって求まる係数である。例えば、鉛直風速が上向きの際にメタン濃度が高く、下向きの時にメタン濃度が低いと、リザーバー間の濃度差は正の値となりメタン放出となる。鉛直風速の測定には超音波風速計など高速の測器が必要であるが、ガス濃度については平均値が得られればよいので、濃度の分析に時間をかけることができる。メタン濃度分析計の精度は応答速度とトレードオフの関係にあるので、最適なシグナル積算時間を選択することで、ランダムノイズが低減され、精度良くメタン濃度の分析を行うことができる³¹⁾。

桐生水文試験地において、REA法による生態系スケールのメタンフラックス観測を行った。本試験地は、アジアモンスーン気候下の影響で、夏に多量の降雨があり、流域の溪畔域に湿地が散在する。観測の結果、温帯ヒノキ林は生態系スケールで、季節的にメタン放出源、吸収源として切り替わる様子が明らかになった。また、夏から秋にかけて、降雨後にメタン放出源となる傾向があった (図1)。夏に湿地や嫌氣的土壌からのメタン放出が増加した結果、生態系スケールでメタン放出源となったと考えられた。

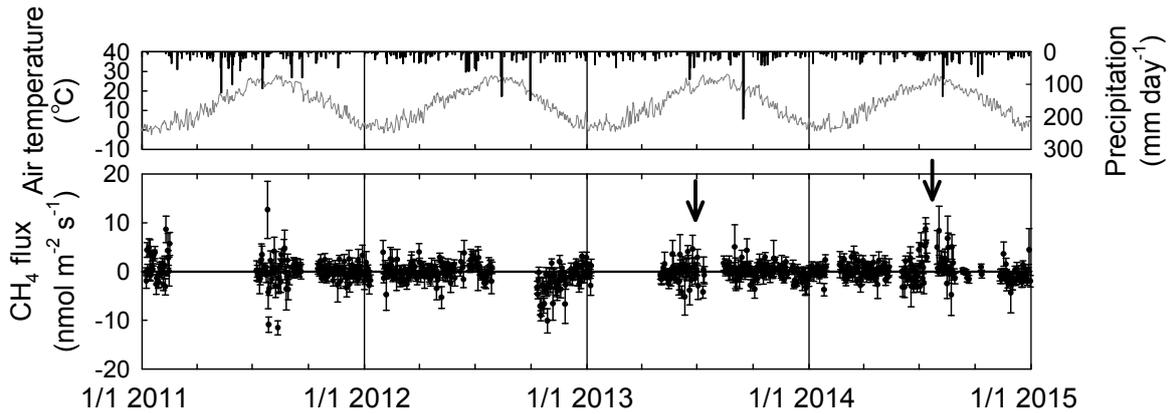


図 1: 桐生水文試験地における REA 法による生態系スケールメタンフラックスの観測結果。観測期間は 2011 年 1 月から 2014 年の 12 月まで。矢印で示した夏にメタン放出源となる傾向がみられた。

3.2 チャンバー法

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とから、自動開閉する閉鎖型循環式チャンバー法と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えるようになった³²⁻³⁴⁾。アジアモンスーン気候下では、メタンフラックスの変動は降雨の影響を強く受ける。そのような場所でメタンフラックスを連続観測することにより、リアルタイムでの降雨応答性を捉えることは重要である。自動連続観測によって、詳細な季節変化の様子、降雨応答性が明らかになり、より正確なメタン年収支を推定できるようになった。

桐生水文試験地において観測を行った結果、好氣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即座に吸収が回復する様子が明らかになった。梅雨後の夏から秋にかけても、降雨によって吸収が減少し、降雨後に回復するという降雨に応じた変化を示した。冬季には気温が低下するにつれて吸収量が減少した。降雨応答性を考慮しない場合では、年間のメタン吸収量は最大で 20% 過大評価される可能性があることが分かった³⁴⁾。

また、連続的に得られるメタンフラックスデータから、降雨中にメタン吸収速度が著しく減少する様子が捉えられた(図 2)。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時間がかかっていた。そのため、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氣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することで、このような降雨応答性が観測されたと考えられた。

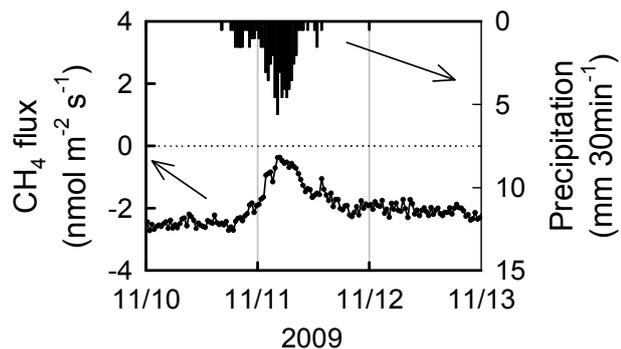


図 2: 桐生水文試験地におけるチャンバー法による土壌メタンフラックスの降雨応答性。観測期間は 2009 年 11 月 10 日から 2009 年 11 月 13 日まで。降雨時にメタンフラックスの増加すなわちメタン吸収が減少している。

4. まとめ

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観測データは着実に増加している。森林における微量なメタンフラックスを観測する手法も確立されてきたので、今後も森林を含む様々な生態系でメタンフラックス観測データを蓄積していく必要がある。そして二酸化炭素フラックスのように、データベースを強化することで、モデル研究者らと協力する基盤が整備され、ボトムアップ推定の精度向上につながり、全球のメタン収支の把握に役立つことが期待される。一方で、微気象学的手法によるフラックス観測は、空間を代表したフラックスが得られるが、場所ごとの詳細なメタンフラックスと環境要因の関係を決定するのが難しいという欠点がある。そのため、微気象学的手法とチャンバー法をうまく組み合わせて、広域の収支評価と同時にプロセス理解を進めることが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., and New York.
- 2) Kai, F.M., Tyler, S.C., Randerson, J.T., Blake, D.R., Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources, *Nature*, **476**, 194-197, 2011.
- 3) Aydin, M., Verhulst, K.R., Saltzman, E.S., Battle, M.O., Montzka, S.A., Blake, D.R., Tang, Q., Prather, M.J., Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firm air, *Nature*, **476**, 198-201, 2011.
- 4) Dlugokencky, E.J., Nisbet, E.G., Fisher, R., Lowry, D., Global atmospheric methane: budget, changes and dangers, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 2058-2072, 2011.
- 5) Rigby, M., Prinn, R.G., Fraser, P.J., Simmonds, P.G., Langenfelds, R.L., Huang, J., Cunnold, D.M., Steele, L.P., Krummel, P.B., Weiss, R.F., O'Doherty, S., Salameh, P.K., Wang, H.J., Harth, C.M., Mühle, J., Porter, L.W., Renewed growth of atmospheric methane, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22805, 2008.
- 6) Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunio, M., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D.R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E.L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P.J., Krummel, P.B., Lamarque, J., Langenfelds, R.L., Quéré, C.L., Naik, V., O'Doherty, S., Palmer, P.I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R.G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D.T., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, L.P., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., van der Werf, G.R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R.F., Williams, J.E., Zeng, G., Three decades of global methane sources and sinks, *Nat. Geosci.*, **6**, 813-823, 2013.
- 7) Le Mer, J., Roger, P., Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review, *Eur. J. Soil Biol.*, **37**, 25-50, 2011.
- 8) Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Methane flux characteristics in forest soils under an East Asian monsoon climate, *Soil Biol. Biochem.*, **41**, 388-395, 2009.
- 9) Dinsmore, K.J., Skiba, U.M., Billett, M.F., Rees, R.M., Drewer, J., Spatial and temporal variability in CH₄ and N₂O fluxes from a Scottish ombrotrophic peatland: Implications for modeling and up-scaling, *Soil Biol. Biochem.* **41**, 1315-1323, 2009.
- 10) Sakabe, A., Kosugi, Y., Okumi, C., Itoh, M., Takahashi, K., Impacts of riparian wetlands on the seasonal variations of watershed-scale methane budget in a temperate monsoonal forest, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, published online, 2016.
- 11) Dutaur, L., Verchot, L.V., A global inventory of the soil CH₄ sink, *Global Biogeochem. Cycles*, **21**, GB4013, 2007.
- 12) Steudler, P.A., Bowden, R.D., Melillo, J.M., Aber, J.D., Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils, *Nature*, **341**, 314-316, 1989.
- 13) Whalen, S.C., Reeburgh, W.S., Sandbeck, K.A., Rapid methane oxidation in a landfill cover soil, *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 3405-3411, 1991.

- 14) Castro, M.S., Steudler, P.A., Melillo, J.M., Aber, J.D., Millham, S., Exchange of N₂O and CH₄ between the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the northeastern United States, *Biogeochemistry*, **18**, 119-135, 1993.
- 15) Dunfield, P.F., Topp, E., Archambault, C., Knowles, R., Effect of nitrogen fertilizers and moisture content on CH₄ and N₂O fluxes in a humisol: Measurements in the field and intact soil cores, *Biogeochemistry*, **29**, 199-222, 1993.
- 16) Whalen, S.C., Reeburgh, S.C., Interannual variations in tundra methane emission: A 4-year time series at fixed sites, *Global Biogeochem. Cycle*, **6**, 139-159, 1992.
- 17) Dobbie, K.E., Smith, K.A., Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable and set aside soils, *Soil Biol. Biochem.*, **28**, 1357-1365, 1996.
- 18) Morishita, T., Sakata, T., Takahashi, M., Ishizuka, S., Mizoguchi, T., Inagaki, Y., Terazawa, K., Sawata, S., Igarashi, M., Yasuda, H., Koyama, Y., Suzuki, Y., Toyota, N., Muro, M., Kinjo, M., Yamamoto, H., Ashiya, D., Kanazawa, Y., Hashimoto, T., Umata, H., Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 678-691, 2007.
- 19) Denmead, O.T., Measuring fluxes of CH₄ and N₂O between agricultural systems and the atmosphere. In: Peng, S., K.T. Ingram, H-U, Neue, L.H. Ziska (eds), Climate change and rice. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1994, pp. 209-234.
- 20) 高橋けんし, レーザーで森林のメタンをはかる, “森林科学”, 森林科学編集委員会編, 日本森林学会出版, 2012, pp. 47-48.
- 21) Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U., K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415-2434, 2001.
- 22) Shashi, B., Ullman, F.G., Billesbach, D., Clement, R.J., Kim, J., Eddy correlation measurements of methane flux in a northern peatland ecosystem, *Boundary-Layer Meteorol.*, **58**, 289-304, 1992.
- 23) Hendriks, D.M.D., Dolman, A.J., van der Molen, M.K., van Huissteden, J., A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 431-443, 2008.
- 24) Knox, S.H., Matthes, J.H., Sturtevant, C., Oikawa, P.Y., Verfaillie, J., Baldocchi, D., Biophysical controls on interannual variability in ecosystem-scale CO₂ and CH₄ exchange in a California rice paddy, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **121**, 978-1001, 2016.
- 25) Detto, M., Verfaillie, J., Anderson, F., Xu, L.D., Baldocchi, D., Comparing laser-based open- and closed-path gas analyzers to measure methane fluxes using the eddy covariance method, *Agric. For. Meteorol.*, **151**, 1312-1324, 2011.
- 26) Iwata, H., Kosugi, Y., Ono, K., Mano, M., Sakabe, A., Miyata, A., Takahashi, K., Cross-validation of open-path and closed-path eddy-covariance techniques for observing methane fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, **151**, 95-118, 2014.
- 27) Smeets, C.J.P.P., Holzinger, R., Vigano, I., Goldstein, A.H., Röckmann, T., Eddy covariance methane measurements at a Ponderosa pine plantation in California, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8365-8375, 2009.
- 28) Shoemaker, J.K., Keenan, T.F., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Forest ecosystem changes from annual methane source to sink depending on late summer water balance, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 673-679, 2014.
- 29) Sakabe, A., Hamotani, K., Kosugi, Y., Ueyama, M., Takahashi, K., Kanazawa, A., Itoh, M., Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tunable diode laser spectroscopy detection, *Theor. Appl. Climatol.*, **109**, 39-49, 2012.
- 30) Businger, J.A., and Oncley, S.P., Flux measurement with conditional sampling, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 349-352, 1990.
- 31) Ueyama, M., Hamotani, K., Nishimura, W., A technique for high-accuracy flux measurement using a relaxed eddy accumulation system with an appropriate averaging strategy, *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 315-325, 2009.
- 32) Savage, K., Moore, T.R., Crill P.M., Methane and carbon dioxide exchanges between the atmosphere and northern boreal forest soils, *J. Geophys. Res.*, **102**, 29279-29288, 1997.

- 33) Lai, D.Y.F., Moore, T.R., Roulet, N.T., Spatial and temporal variations of methane flux measured by autochambers in a temperate ombrotrophic peatland, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **119**, 864-880, 2014.
- 34) Sakabe, A., Kosugi, Y., Takahshi, K., Itoh, M., Kanazawa, A., Makita, N., Ataka, M., One year of continuous measurements of soil CH₄ and CO₂ fluxes in a Japanese cypress forest: Temporal and spatial variations associated with Asian monsoon rainfall, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **120**, 585-599, 2015.

著者プロフィール



坂部 綾香 (Ayaka Sakabe)

<略歴>2010年京都大学農学部生森林科学科卒業／2015年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(農学博士)／同年同大学大学院農学研究科ポストク／2016年京大生存圏研究所学際萌芽研究センターミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負>森林生態系がガス交換を介して気候に与える影響とそのフィードバックの解明。<趣味>バレーボール観戦。