

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03576

研究課題名（和文）頻発する短時間強雨に対する湿地生態系の応答：突発的メタン放出の定量評価

研究課題名（英文）Estimation of sporadic CH₄ emissions from a riparian wetland in responding to heave rain events

研究代表者

高橋 けんし（Kenshi, Takahashi）

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：10303596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、湿地性樹木の一つであるハンノキからのメタン放出の季節性および日周変動特性を半導体レーザー分光法と自動開閉チャンバーを組み合わせたシステムで計測した。観測されたフラックスと樹液流速との比較、細根組織の顕微鏡観察を通して、樹体内部のメタン輸送メカニズムを明らかにした。さらに、CH₄フラックスの連続データを詳しく解析したところ、大雨によってハンノキからのCH₄放出量が過渡的に増大する現象を見出した。湿地生態系からのCH₄放出が年サイクルレベルでの気候値のみで決定されるのではなく、短時間強雨などの極端な気象現象にも大きく影響を受けることを定量的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタンガスは二酸化炭素に次ぐ放射強制力を持つ重要な温室効果気体である。最近見つかったメタン発生源としての湿地性樹木に着目し、放出量を定量化するレーザー計測技術を開発するとともに、放出量の季節変動や気象要素に対する応答を明らかにした。大気中のメタンガス収支の精緻化に貢献する重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：We explored the mechanism of CH₄ emission from the stem surfaces of *Alnus japonica* in a riparian wetland. CH₄ emission rates were estimated using a closed-chamber method. Sap flux was measured using Granier-type thermal dissipation probes. Root anatomy was studied using both optical and cryo-SEM. CH₄ emissions during the leafy season exhibited a diurnally changing component superimposed upon an underlying continuum in which the diurnal variation was in phase with sap flux. We propose a model in which stem CH₄ emission involves at least two processes: a sap flux-dependent component responsible for the diurnal changes, and a sap flux-independent component responsible for the background continuum. The background continuum possibly resulted from the diffusive transport of gaseous CH₄ from the roots to the upper trunk. Root anatomy analysis indicated that the intercellular space of the cortex and empty xylem cells in fine roots could serve as a passageway for transporting gaseous CH₄.

研究分野：大気環境学

キーワード：メタン 湿地生態系 フラックス 短時間強雨 レーザー計測

1. 研究開始当初の背景

メタン(CH₄)ガスは重要なエネルギー源である一方、二酸化炭素(CO₂)に次ぐ放射強制力を持つ温室効果気体である。2021年11月に開催された国連気候変動枠組み条約第26回締約国会議(COP26)では、日本を含む100か国以上が、2030年までにCH₄排出量を、2020年比で少なくとも30%削減することに合意している。大気中のCH₄濃度の収支を定量的に理解することは、自然科学のみならず社会的にも重要な課題となっている。大気中のCH₄の発生源は、人為起源と自然起源がある。湿地生態系は、自然のCH₄発生源としてはもっとも大きな寄与率を有している。湿地生態系におけるCH₄発生は、土壌中のメタン生成菌に由来しており、それゆえ嫌気的環境にある土壌からのCH₄発生プロセスの研究は非常に多い。一方で、近年、ある種の樹木からメタンが放出されているという研究論文の発表が注目されている。現象論的に新しい発見であるため、樹木からのCH₄発生の有無を規定する生育環境や樹種の依存性、発生量を制御する植物生理生態学的なメカニズムなど、解明されるべき問題は極めて多い。我々の研究グループでは、湿地性樹木の一つであるハンノキを研究対象に選び、野外観測と室内実験の両面からのアプローチにより、CH₄放出量の精密計測とメカニズム解明に取り組んでいる。

一方、気象統計情報によれば、わが国における50mm/h以上の短時間強雨の年間発生回数は増加傾向にある(統計期間1976~2019年)。この観測事実の原因を地球温暖化に直結させることは拙速に過ぎるものの、IPCC報告書に代表されるように、温暖化と短時間強雨を含む極端気象現象との関連を懸念する指摘は少なくない。実際、全球気候モデルによる研究では、将来的な温暖化が大雨や猛暑の発生頻度を上昇させる可能性を示唆している。極端気象現象の増加は、生態系による温室効果気体の発生・吸収プロセスにも大きな影響を与え、フィードバック的に気候変動に影響しうる。したがって、樹木を含む湿地生態系からのCH₄発生の季節性やメカニズム、それらに与える短時間強雨の影響を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、短時間強雨が湿地生態系からの突発的なCH₄放出を誘発する現象に注目し、そのメカニズム解明と発生量の定量的評価を行うことである。アジアモンスーンの影響を直接受ける団温帯林にある湿地生態系を実験サイトとして定め、気候変動下におけるCH₄放出量の精緻化とメカニズム解明に貢献する。

3. 研究の方法

ハンノキ(*Alnus japonica*)は日本国内では北海道から九州まで、国外では東アジア地域に分布する。水気を多く含む湿地のような土壌環境でも自生できるという特徴をもつ。本研究の野外調査地は、滋賀県大津市の国有林内にある京都大学桐生水文試験地(34.96°N, 135.99°E)である。試験地内にある溪畔湿地に、ハンノキが自生している。

本研究では、研究目的の達成のために、以下の2つのサブ課題を設けた。

サブ課題1：溪畔湿地の土壌表面および植生からのメタン発生量をリアルタイム計測し、発生量の精密な定量化を試みる。

サブ課題2：土壌試料の化学分析や培養実験、植生の樹液流計測などを通じて、メタン放出のメカニズムを解明する。

課題1では、溪畔湿地の土壌表面および植生に閉鎖循環方式のチャンバーを設置し、近赤外半

導体レーザー分光法を用いた CH₄ センサーと組み合わせて、CH₄ 放出量を自動計測するシステムを開発した(図1)。また、湿地生態系における CH₄ の起源が、土壤中に生息するメタン生成菌であることを踏まえ、生成菌の活性度の制御因子である地温や土壌水分量などの土壌環境パラメータを連続的に測定した。また、表層土壌の間隙水に含まれる溶存 CH₄ 濃度を分析した。

課題2では、気象要素に対するハンノキの生理的な応答を探索するため、Granier 法に基づく樹液流センサーをサイト内の代表的な樹木に設置し、樹液流速のリアルタイム計測を実施した。通常、樹液流は降雨時にはほぼ止まるものの、降雨後の直射日光の到達や大気飽差の上昇によって速やかに流束が回復する。樹液流が、短時間強雨を含む降水に対してどのような応答を示すかを Granier 法により追跡し、レーザー計測で得られるハンノキからの CH₄ 発生量との関連性を詳しく解析した。

本研究ではまた、根および幹を採取し、光学顕微鏡やクライオ走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた組織観察を行った。植生からの CH₄ 発生プロセスにはガス態と樹液流の2つの仮説があることを踏まえ、細胞間隙や導管に注目して観察した。サンプルの採取方法は、ハンノキの根元の土壌を浅く掘り、表層土壌数センチ程度のところに存在する細根の一部を採取した。また、クライオ SEM による観察実験用に、観測サイトにて細根を液体窒素で凍結した状態で採取し、実験室へ持ち帰った。その後、細根の凍結状態を“保持”したまま SEM 観察した。



図1 ハンノキの幹からメタンが発生する量を測定するために、チャンバーを取り付けた様子。

4. 研究成果

図2にハンノキの樹幹から放出される CH₄ フラックスの計測結果を示した。本研究の CH₄ センサーは、ガスクロマトグラフィーでは不可能であった野外環境での高精度計測が、リアルタイムかつ無人で可能である。連続計測の利点を活かし、CH₄ 発生量の季節変動から日変動までを精密に計測することに成功した。その結果、複数のハンノキ個体の幹からメタンが放出されていることが分かった。また、それらの CH₄ 放出量は、夏に多く、冬に少ないという季節変動を示すこと

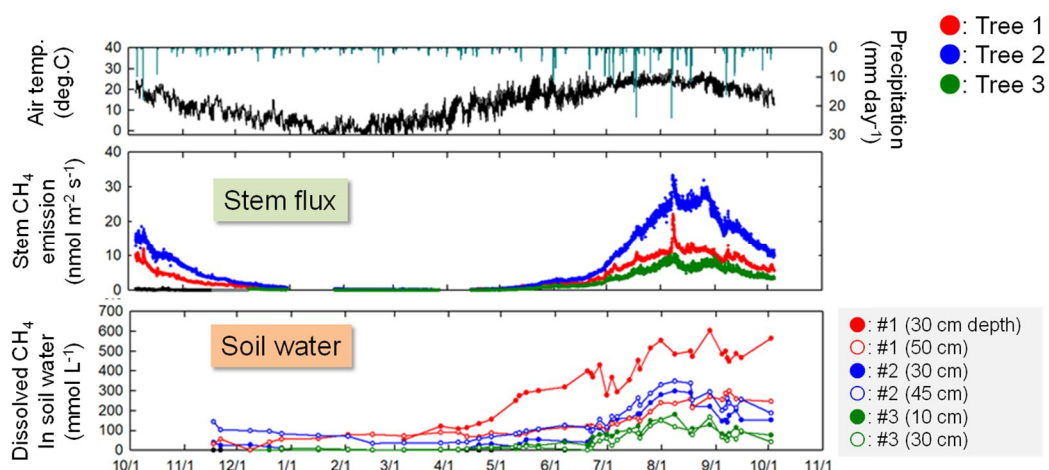


図2 ハンノキの樹幹から発生する CH₄ フラックス(中段)、および、根圏土壌の間隙水を化学分析して得られた溶存メタン濃度(下段)。上段は観測サイトで計測した気温および日降水量を示す。

も明らかとなった。さらに詳しい解析を行ったところ、春から秋にかけては、メタンの放出量が昼に多く、夜に少なくなるという、明瞭な日変化パターンが出現することを発見した(図3)。既往の研究では、樹幹からのCH₄放出の日周変動特性について詳しい考察を行っているものがなかった。本研究課題の遂行により、日周変動の位相が樹液流速の位相と同期していることを見出した。つまり、蒸散が活発な日中に樹幹からのCH₄放出が増強されていることが分かった。

図4に、光学顕微鏡とクライオSEMを用いて細根の細胞組織を観察した結果を示した。クライオSEMは組織中に水を含んだ状態でも試料の観察ができるという利点をもつ。本研究の結果、細根の細胞および細胞組織の間には多数の“隙間”が存在していることを

発見した。この細胞間隙とみられる特徴的な構造は、ガス態のCH₄が拡散輸送されるトンネルのような役割を果たしていると考えられる。クライオSEMの詳しい実験の結果、本研究で見いだされた細胞間隙は、道管のように養水分で満たされておらず、ガスの輸送に適した空洞の状態になっていることが判明した。細胞間隙の存在は、冬の落葉期でもCH₄フラックスがゼロにならない(図1)という観測事実とも整合的である。すなわち、落葉期であっても明瞭なCH₄放出が観測されたことは、樹液流ではなく、ガス態のCH₄が拡散輸送された結果であると解釈される。

一方で、図2に示したように、日変化パターンが出現した期間は、ハンノキの着葉期間に該当しており、特に夏季の日中の樹液流速は非常に大きくなる。以上の観測事実から、ハンノキの幹から放出されるメタンの輸送経路として、細胞間隙を介したガス態の拡散輸送のみならず、道管を運ばれる樹液流もまた、樹幹からのCH₄放出量の制御因子となっていることが示唆された。

さらに、本研究期間中の2023年8月15日、和歌山県から大阪府、兵庫県を台風第7号(国際名:ラン・LAN)が縦断した。和歌山県南部に上陸したときの中心気圧は975 hPaであり、気象庁のデータベースによれば、本研究の観測サイトに近い

大津市の観測点での2023年8月15日の降水量が107.5 mm、最大1時間降水量が27.0 mm、最大10分間降水量が13.0 mmであり、大雨となったことが分かる。本研究で計測したCH₄フラッ

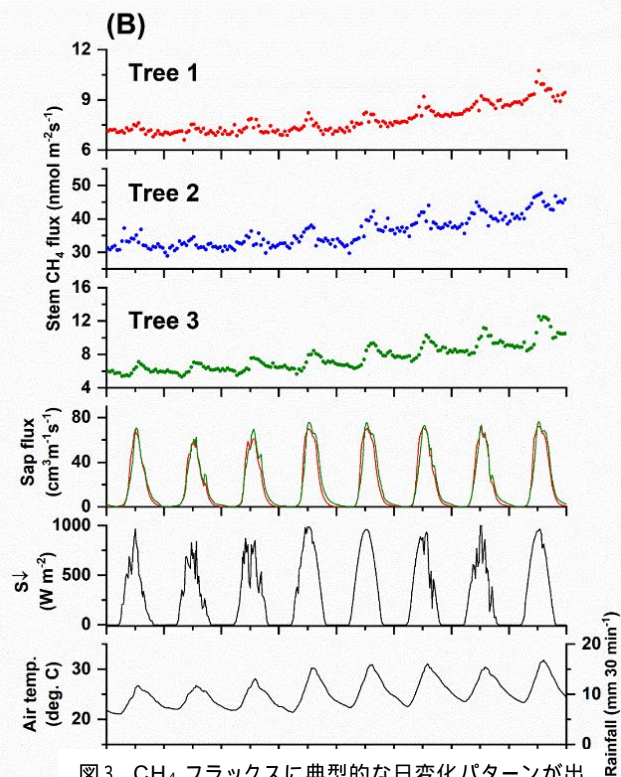


図3 CH₄フラックスに典型的な日変化パターンが出現した事例

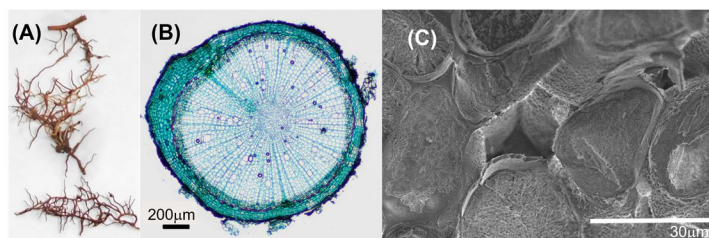


図4 ハンノキの細根を採取したサンプル(A)と、光学顕微鏡(B)とcryo-SEM(C)を用いてサンプルを観察した事例。

クスの連続データを詳しく解析したところ、大雨の始まりとともにハンノキからの CH₄ 放出量が急増し、前日比で3割も増大したことが明らかとなった。また、この大雨に伴う増大は、その後5日程度継続し、6日目になったところで、おおむね大雨の前のフラックスの大きさまで戻った。短時間強雨に対する CH₄ フラックスの増大は、どのような降水状況で発生するのか詳しい解析が必要であるものの、湿地生態系からの CH₄ 放出が年サイクルレベルでの気候値のみで決定されるのではなく、短時間強雨などの極端な気象現象にも大きく影響を受けることを定量的に示したものであり、既往の研究では見いだされていない新しい成果である。こうした過渡的な CH₄ 放出の増大のメカニズムについては議論の余地が残されており、現在も観測サイトにおいてフラックス計測および樹液流速などの要因解析を継続して行っているところである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahashi Kenshi, Sakabe Ayaka, Azuma Wakana A., Itoh Masayuki, Imai Tomoya, Matsumura Yasuki, Tateishi Makiko, Kosugi Yoshiko	4. 巻 235
2. 論文標題 Insights into the mechanism of diurnal variations in methane emission from the stem surfaces of <i>Alnus japonica</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 1757 ~ 1766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/nph.18283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takahashi Kenshi, Sakabe Ayaka, Kanazawa Akito, Kosugi Yoshiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Vertical profiles of methane concentration above and within the canopy of a temperate Japanese cypress forest	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment: X	6. 最初と最後の頁 100143 ~ 100143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aeaoa.2021.100143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fukuda Kyohei, Uefune Masayoshi, Fukaki Hidehiro, Yamauchi Yasuo, Hara-Nishimura Ikuko, Ozawa Rika, Matsui Kenji, Sugimoto Koichi, Okada Kazunori, Imai Ryoza, Takahashi Kenshi, Enami Shinichi, Wurst Rene, Takabayashi Junji	4. 巻 18
2. 論文標題 Aerial (+)-borneol modulates root morphology, auxin signalling and meristematic activity in <i>Arabidopsis</i> roots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biology Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsbl.2021.0629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakabe Ayaka, Takahashi Kenshi, Azuma Wakana, Itoh Masayuki, Tateishi Makiko, Kosugi Yoshiko	4. 巻 126
2. 論文標題 Controlling Factors of Seasonal Variation of Stem Methane Emissions From <i>Alnus japonica</i> in a Riparian Wetland of a Temperate Forest	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JG006326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kenshi Takahashi, Ayaka Sakabe, Wakana A. Azuma, Masayuki Itoh, Tomoya Imai, Yasuki Matsumura, Makiko Tateishi, Yoshiko Kosugi
2. 発表標題 Methane emission from the stem surfaces of <i>Alnus japonica</i>
3. 学会等名 iLEAPS Japan meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 けんし, 坂部 綾香, 東 若菜, 伊藤 雅之, 今井 友也, 松村 康生, 立石 麻紀子, 小杉 緑子
2. 発表標題 湿地性樹木の樹幹からのメタン放出について - 最近の動向および我々の研究 -
3. 学会等名 日本農業気象学会2023年大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Takahashi
2. 発表標題 Atmospheric chemistry studies in forest and urban environments by applying laser spectroscopy techniques
3. 学会等名 the 1st International Conference of Lignocellulose (ICON-LIG) in conjunction with the 10th International Symposium for Sustainable Humanosphere (ISSH) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	東 若菜 (Azuma A. Wakana) (20780761)	神戸大学・農学研究科・助教 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂部 綾香 (Sakabe Ayaka) (40757936)	京都大学・農学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	伊藤 雅之 (Itoh Masayuki) (70456820)	兵庫県立大学・環境人間学部・准教授 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関