

## 【2-2006】中間報告

# メタン吸収能を含めたアジア域の森林における土壌炭素動態の統括的観測に基づいた気候変動影響の将来予測

体系番号: JPMEERF20202006  
実施期間: 令和2年度～令和4年度

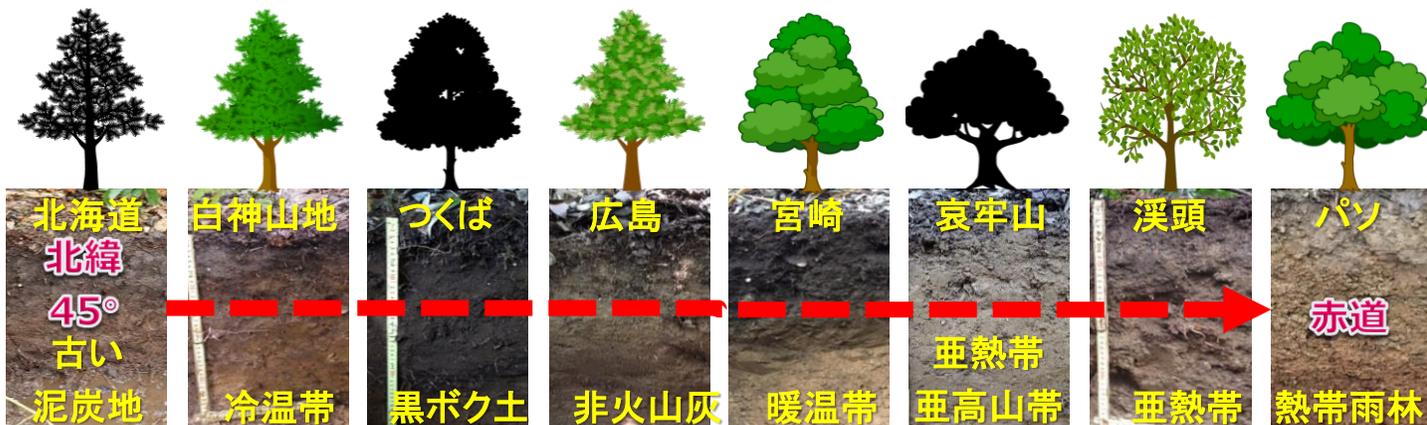
重点課題 主:【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価  
副:【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ(行政ニーズ)  
(2-3)メタンの排出削減による統合的な温暖化抑制効果の評価と対策オプションの検討

代表機関: 国立環境研究所(梁 乃申)

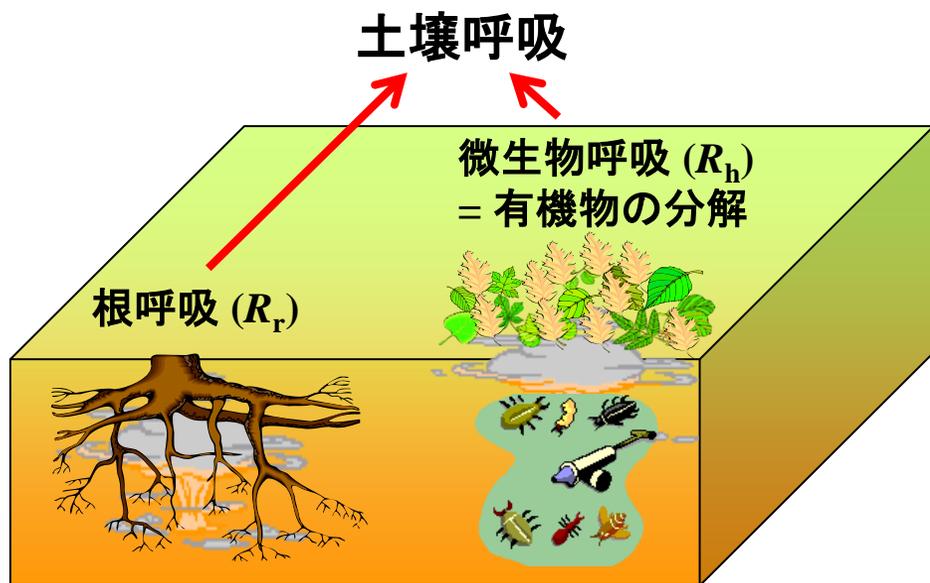
国立環境研究所(サブテーマ1のリーダー)、北海道大学、弘前大学、宮崎大学、鳥取大学  
千葉大学(サブテーマ2のリーダー)、国際農林水産業研究センター、日本原子力研究開発機構  
海外連携研究機関: 国立台湾大学、香港中文大学、中国科学院、マレーシア森林研究所

# 全球規模の土壤有機炭素動態



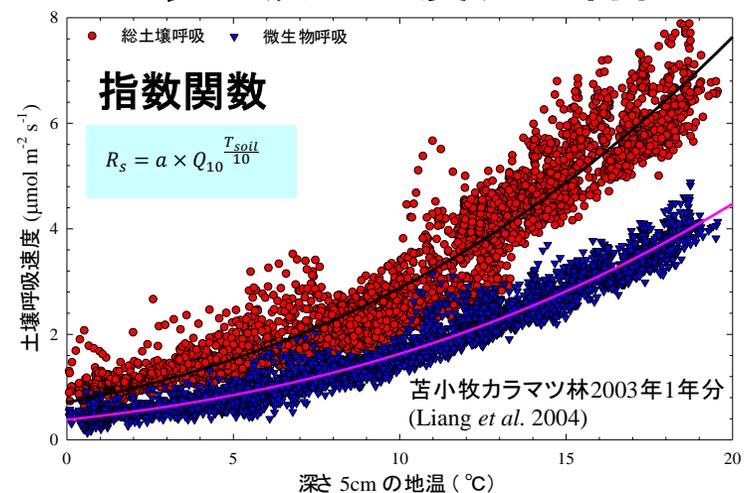
全陸域に蓄積された土壤有機炭素 (C) = **3000 Gt C** (Köchyら、2015)

大気中炭素の**4倍**、  
陸域植物バイオマス炭素の約**6倍**



2010年時点: 全球年間土壤呼吸量 = 94~98 Gt C  
うち、微生物呼吸が約7割の67~70 Gt C  
(Bond-Lambertyら、2010、Nature)

## 土壤呼吸の温度反応特性

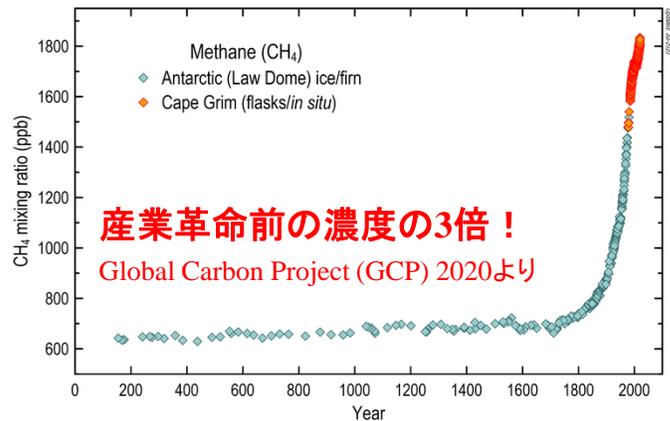


$Q_{10}$  = 温度が10度上昇した場合に呼吸速度が何倍になるかを表す数値

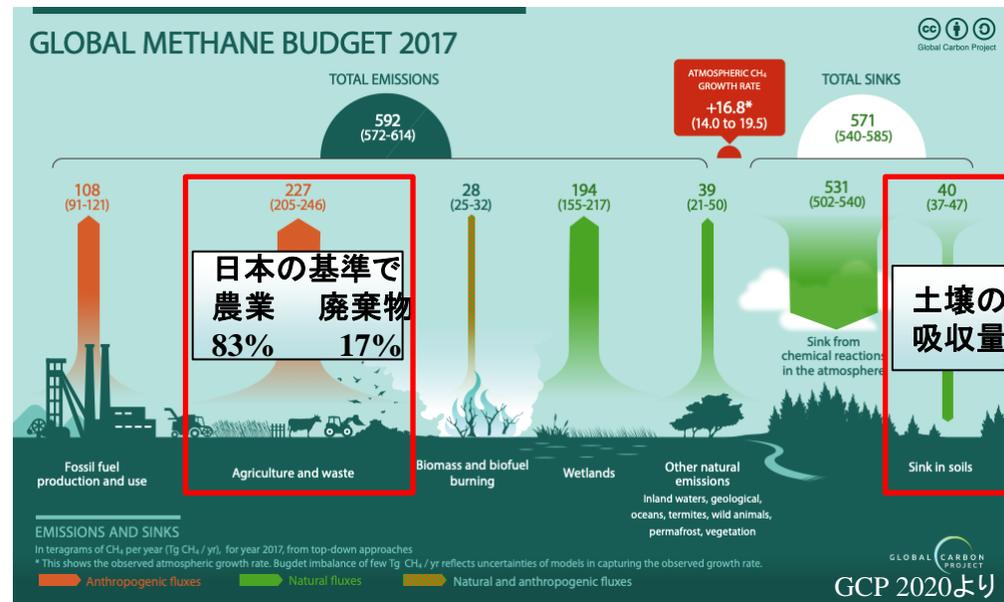
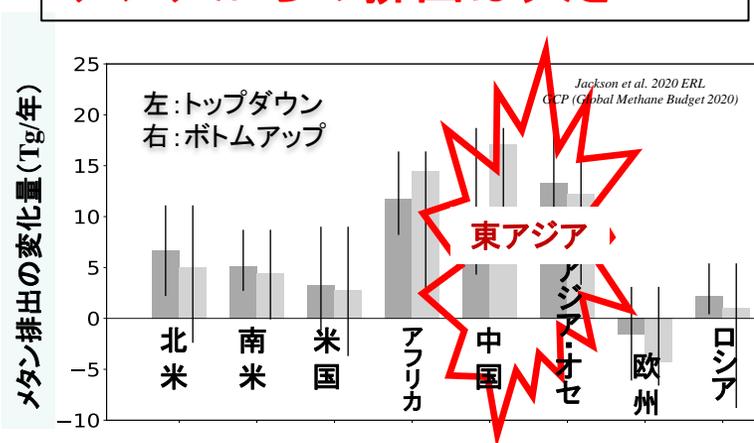
土壤呼吸が僅かでも変動すれば、地球上のCO<sub>2</sub>収支は著しく影響される

# グローバルなメタン収支

## グローバルのメタン濃度上昇



## アジアからの排出は大きい！



## グローバル土壌メタン吸収量の算出根拠

### A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink

Laure Dutoit<sup>1</sup> and Louis V. Verchot<sup>1</sup>

Received 6 April 2006; revised 16 February 2007; accepted 8 March 2007; published 15 November 2007.

[1] Methane uptake by soils is a small but important flux in the global budget of atmospheric methane, and could be susceptible to changes in land use and climate. Estimates of this sink vary between 20 and 45 Tg yr<sup>-1</sup>. We propose to develop a better constrained estimate using a mechanistic understanding of the biogeochemical controls of soil CH<sub>4</sub> uptake. We reviewed over 120 published papers reporting field measurements

Global Biogeochem Cycles 21: GB4013, 2007

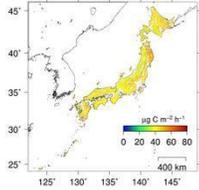
**Table 2.** Estimates of CH<sub>4</sub> Uptake by Soils With Different Stratification Schemes<sup>a</sup>

Stratification Level	Number of Measures	Mean, kgCH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Variance	Area, × 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Total Flux, Tg yr <sup>-1</sup>	SE of Total Flux
None	318	3.3	14.8	108.20	35.6	23.3
Climatic zone						
Boreal	65	2.4	7.5	20.83	5.0	7.1
Temperate	163	4.0	22.6	50.07	19.8	18.6
Tropical	90	2.7	4.4	37.30	10.2	8.3
<b>Total</b>					<b>35.0</b>	<b>21.6</b>
Ecosystem						
Forest	205	4.2	19.3	42.01	17.7	12.9
Other	113	1.6	2.2	66.19	10.6	9.3
<b>Total</b>					<b>28.3</b>	<b>15.9</b>
Soil texture						
Organic	54	3.1	9.2	2.14	0.7	0.9
Coarse	85	4.2	21.1	22.73	9.5	11.3
Medium	121	3.3	18.0	63.94	21.1	24.6
Fine	46	2.0	1.8	19.39	3.8	3.9
<b>Total</b>					<b>35.2</b>	<b>27.4</b>
Climatic zone + ecosystem						
Boreal Forest	51	2.6	8.0	16.87	4.5	4.5
Other	14	1.4	4.3	3.96	0.6	0.6
Subtotal (zone)					5.1	5.1
Temperate Forest	92	5.7	31.5	5.82	3.3	3.4
Other	71	1.7	2.3	44.25	7.6	7.9
Subtotal (zone)					10.9	10.9
Tropical Forest	62	3.3	4.8	19.32	6.4	6.4
Other	28	1.4	1.2	17.98	2.6	2.6
Subtotal (zone)					9.0	9.0
<b>Total</b>					<b>25.0</b>	<b>12.9</b>

温帯林の吸収速度最も大きい、平均:  
5.7 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>

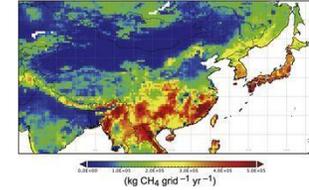
- 土壌は陸域における唯一のメタン吸収源として地球温暖化を緩和している。
- 日本の基準で、土壌のメタン吸収量は農業活動によるメタン排出量の約**21%**を相殺する。
- 土壌メタン吸収量の算出根拠は、左の一つのメタ分析論文である。
- その論文によれば、世界の温帯林における土壌の平均メタン吸収速度は年間ヘクタールあたり**5.7 kg**であった。

# 日本の森林土壌におけるメタン吸収に関する研究の現状



Hashimotoら、2011  
Sci. Rep.

モデル vs. モデル



Itoら、2019  
Sci. Total Environ.

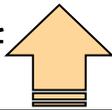
プロセスモデルによる全国森林土壌の  
推定メタン吸収速度: **5.2 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>**

**4.8 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>**をパラメータとしてVISITモデルで  
日本と東アジアの森林土壌メタン吸収速度を推定

上記の二つのモデル研究によれば、日本の森林土壌におけるメタン吸収速度は世界の温帯林 (**5.7 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>**; Dutaur & Verchot, 2007) より小さかった。

**1.6~1.7倍**

Hashimotoら 2011と  
Itoら 2019の



**8.2 ± 4.4 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>**  
日本の森林土壌メタン吸収速度

Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types

Tomoaki MORISHITA<sup>1</sup>, Tadashi SAKATA<sup>1</sup>, Masamichi TAKAHASHI<sup>1</sup>, Shigehiro ISHIZUKA<sup>1</sup>, Takeo MIZOGUCHI<sup>1</sup>, Yoshivuki INAGAKI<sup>1</sup>, Kazuhiko TERAZAWA<sup>1</sup>, Satoshi SAWATA<sup>1</sup>, Masanori IGARASHI<sup>1</sup>, Hiroshi YASUDA<sup>1</sup>, Yasuhiro KOYAMA<sup>1</sup>, Yoshitomo SUZUKI<sup>1</sup>, Nobuyuki TOYOTA<sup>1</sup>, Masamichi MURO<sup>1</sup>, Masaru KINJO<sup>1</sup>, Hirokazu YAMAMOTO<sup>1</sup>, Dataro ASHIYA<sup>1</sup>, Yoichi KANAZAWA<sup>1</sup>, Tetsu HASHIMOTO<sup>2</sup> and Hideraka UMATA<sup>1</sup>

Morishitaら、2007: 全  
国26ヶ所の森林土壌  
(2003~2004年)

1995~2004にかけて全国規模の測定例

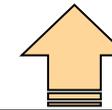


5~10分間の間隔で、注射器でチャンバーから採集したガスをバイアル瓶に注入し、実験室内で分析する



**2.2~2.4倍**

Hashimotoら 2011と  
Itoら 2019の



**11.4 ± 5.0 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>**  
日本の森林土壌メタン吸収速度

Methane uptake rates in Japanese forest soils depend on the oxidation ability of topsoil, with a new estimate for global methane uptake in temperate forest

Shigehiro Ishizuka · Tadashi Sakata · Satoshi Sawata · Shigeto Ikeda · Hisao Sakai · Chiato Takenaka · Nobuaki Tamai · Shin-ichi Onodera · Takanori Shimizu · Kensaku Kan-no · Nagaharu Tanaka · Masamichi Takahashi

Ishizukaら、2009: 全  
国27ヶ所の森林土壌  
(1995~2003年)

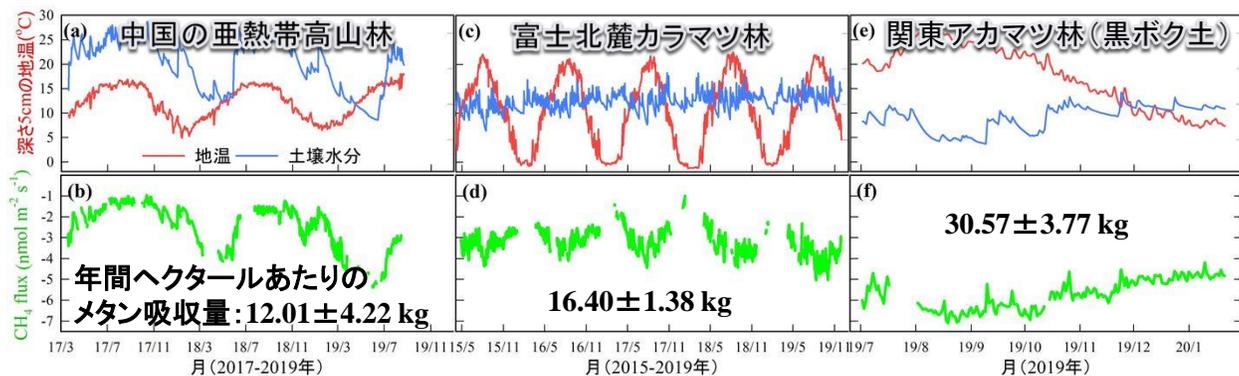
- 日本の森林土壌におけるメタン吸収速度は世界の平均の**2~3倍**
- 黒ボク土**におけるメタン吸収速度がほかの土壌タイプより大きい傾向

# 2000年以降、森林における土壌メタン吸収の観測は激減

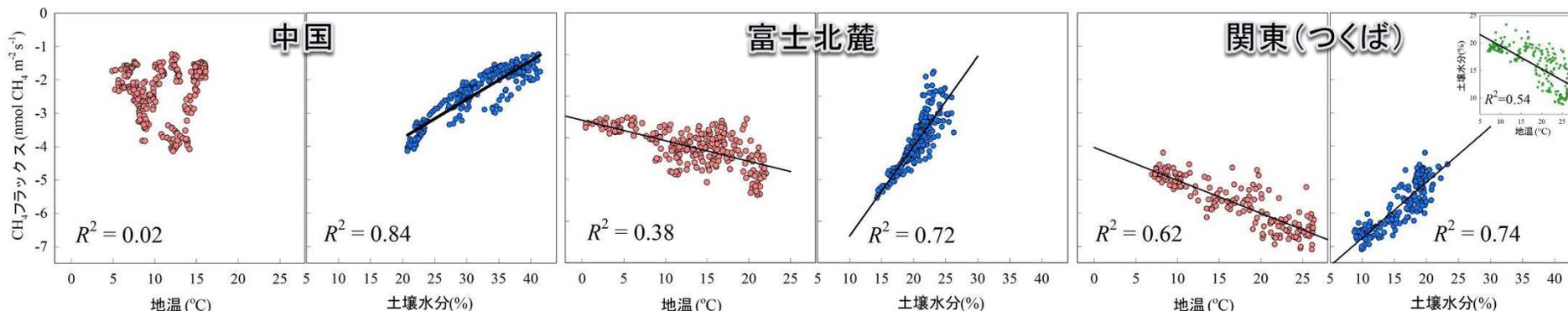


CO<sub>2</sub>分析計の小型化及び土壌呼吸(CO<sub>2</sub>)測定装置が市販されたため、マンパワーが必要な土壌メタン吸収に関するフィールド観測は急激に減った。

## 【2-1705】観測プラットフォームを活用した予備研究結果



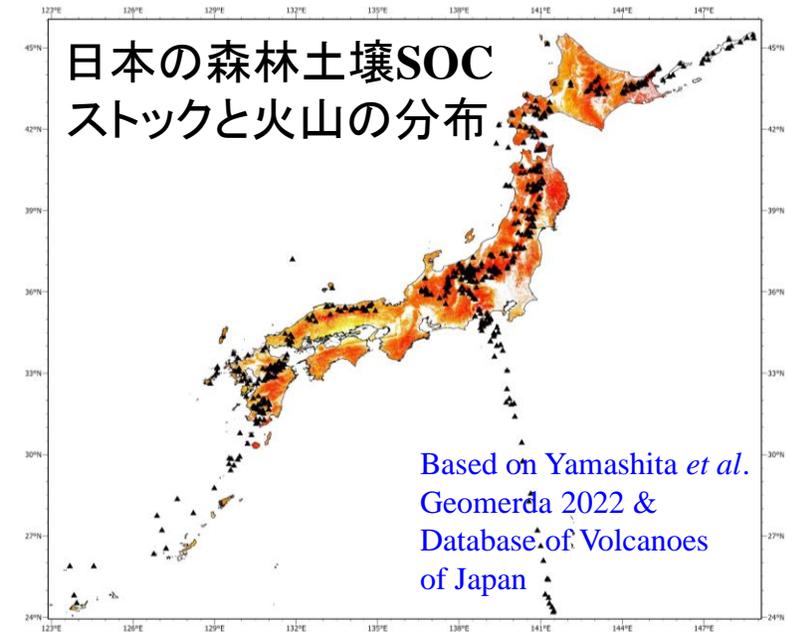
- 日本の森林土壌における、単位面積あたりのメタン吸収速度が大きい: 欧米などの**3倍以上**。
- 概算した**全国の森林土壌**における年間メタン吸収量は、農業活動によるメタン排出量の**50%**に匹敵し、人為的なCO<sub>2</sub>排出量の約**1%**を相殺する。



- メタン吸収を規定する環境要因は、土壌呼吸(CO<sub>2</sub>放出)のそれとは異なる: 温度との関連は弱く、土壌水分と強い**負の相関**。

## 我々の仮説

- 火山灰由来の日本の森林土壌は、有機物が豊富であるため、**孔隙率が高いこと**で**好気的な環境**になりやすく、アジアや世界の土壌に比べて、メタンが酸化されやすい。
- メタン吸収速度は土壌の**水分状態に敏感**であるため、気候変動による乾燥や豪雨から大きな影響を受けやすい。



日本の森林土壌のSOCストックは、  
世界の平均値の約50%が多い！

## 本研究の目的

- 日本を中心に、アジアモンスーン域の**十数ヶ所**の森林における土壌メタンフラックス観測を同時展開することで、土壌炭素( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ )動態とその気候変動による影響を総合的に評価する。
- 得られた観測データに基づき、**機械学習**などのモデルを用いてアジア域の森林土壌 $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ フラックスの広域推定と将来予測の精緻化を行う。

# 日本を中心としたアジア域の森林における土壌CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>フラックスの統括的観測、及び観測データに基づいた気候変動影響の将来予測

### サブテーマ2: モデル開発と将来予測

従来の土壌呼吸モデル  
 $R_s = R_{10} \times Q_{10}^{\frac{T_{soil}-10}{10}}$  関数: 温度だけ

機械学習などのモデルで  
 広域推定と将来予測

関数: 温度・土壌水分  
 $R_s = R_{10} \times \exp^{a(T_{soil}-10)} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{water}{b} \right)^2 \right]$

アジアの土壌呼吸モデル  
 の改良・開発: 土壌炭素・  
 微生物・<sup>14</sup>Cの取り込み

例: 機械学習で  
 推定したアジアモ  
 ンスーン域のGPP

$$R_s = R_{10} \times \exp^{a(T_{soil}-10)} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{water}{b} \right)^2 \right] \times f(\text{microbial, SOC, } ^{14}\text{C})$$

プラットフォーム共用  
 パラメータ提供と検証

気候変動影響  
 の見える化

### 環境政策への貢献

気候変動適応法  
 国立研究開発法人 国立環境研究所  
 気候変動適応センター  
 Center for Climate Change Adaptation

SDGs  
 13 気候変動に  
 具体的な対策を  
 15 陸の豊かさも  
 守ろう

IPCC  
 INTERGOVERNMENTAL PANEL ON  
 climate change  
 報告書など

AP-PLAT  
 Asia-Pacific Climate Change Adaptation Information Platform

情報提供:  
 ・アジア諸国の実施状況  
 ・国際誌論文  
 ・報道などによる外部発信

### 長期連続観測



10-20年間の連続データ:  
 ・短期的な気候変動(高温・乾燥)  
 ・台風(豪雨)・エルニーニョ(長期乾燥)  
 ・森林施業(間伐・皆伐)  
 ・攪乱後の回復(再植林・自然回復)  
 ・土地利用変化  
 などに関する影響評価

サブテーマ1:  
 統括的観測

長期連続  
 観測サイト



温暖化操作  
 実験サイト  
 ● 既存7サイト  
 ● 新規3サイト

### 温暖化操作実験



~16年間の連続データ:  
 ・微生物呼吸の変化  
 ・温暖化による微生物呼吸増進効果の長期維持  
 ・温暖化前後の炭素貯留量の変化  
 ・アジアモンスーン域の特性  
 などのメカニズム解明

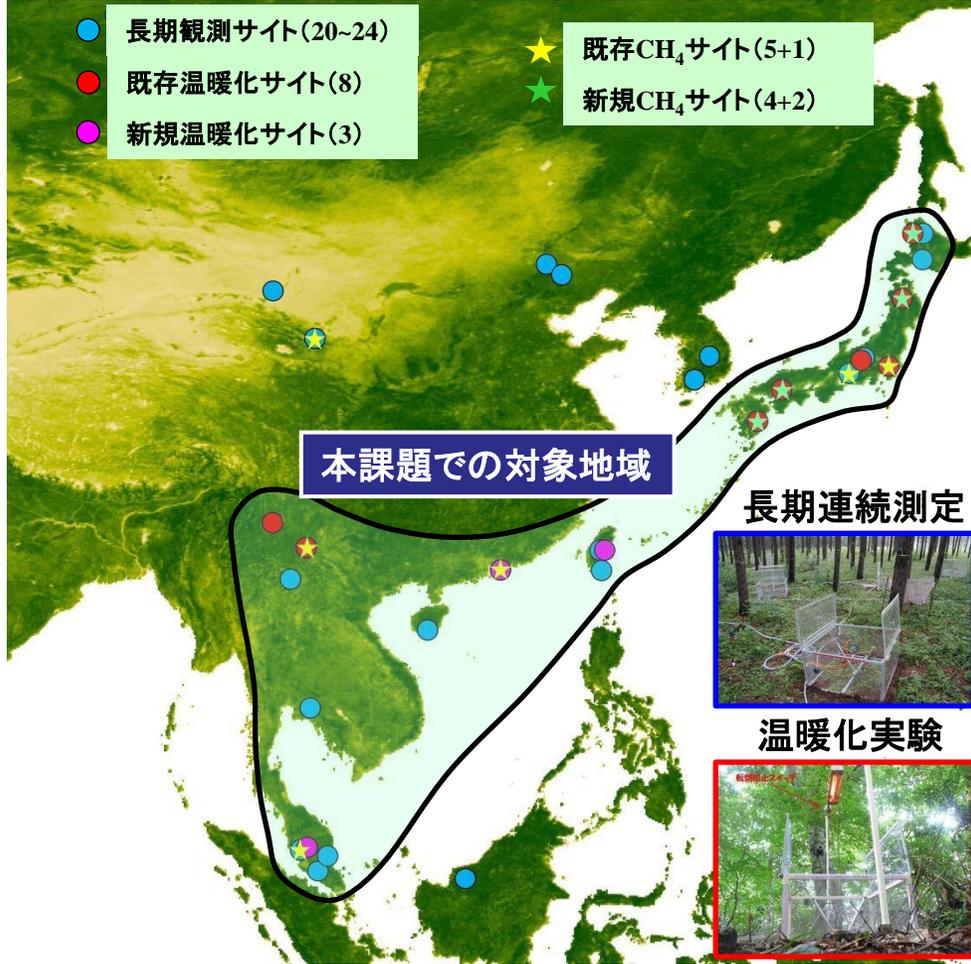
### CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 同時観測

CH<sub>4</sub>フラックス観測多地点展開:  
 ・CH<sub>4</sub>吸収の地域差(土壌)  
 ・CH<sub>4</sub>吸収の生態系差(植生)  
 アジア土壌CH<sub>4</sub>吸収の定量化

★ 実装5サイト ☆ 新規候補5~7サイト

新たな展開

# Sub-1: 長期的な温暖化操作実験及びCH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの同時連続観測による土壤炭素動態に対する気候変動影響の定量化



## 目標

世界最大規模のチャンバー観測ネットワークを拡大しつつ、アジアモンスーン地域において、土壤CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの地域差および生態系による差を明らかにし、気候変動や攪乱の影響評価を行う。

- ・ 温暖化操作実験をアジア熱帯林まで拡大する。
- ・ 温暖化操作実験サイトを中心に、CH<sub>4</sub>分析計を導入することで、世界的に前例のない、生態系毎または地域毎の土壤CH<sub>4</sub>吸収能を化する。
- ・ 得られた長期観測データを統一的なプロトコルで解析し、温暖化や気候変動に伴った極端現象(高温・乾燥)、台風(豪雨)、エルニーニョ現象、また森林施業(間伐・皆伐)や土地利用変化(天然林からプランテーションへの転換)などの人為的な活動が各生態系の土壤呼吸に与える影響を評価する。
- ・ 統一されたプロトコルから得られた長期観測データセットをサブテーマ2に提供し、モデルによる広域推定及び将来予測の精緻化に貢献する。

新規温暖化サイト



新規CH<sub>4</sub>フラックスサイト



老朽化システム更新



土壤水分計などの増設



# 熱帯林における新規温暖化操作実験の設置



台湾

2021年1月



マレーシア

2022年9月 (課題代表者らが参画するSATREPS課題が整備を進める観測サイトにおいて、技術支援を行うとともに、新たにチャンバーを増設した)

# 世界初の森林土壌温暖化およびCO<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub>フラックス同時連続観測ネットワーク



- 土壌呼吸長期連続観測
- + 温暖化操作実験
- ★+ CH<sub>4</sub> flux連続観測



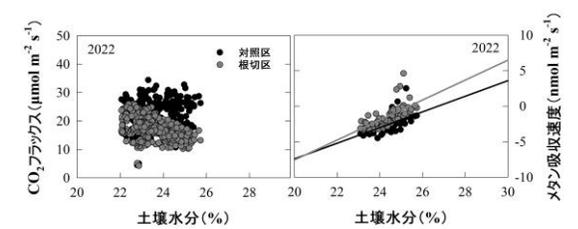
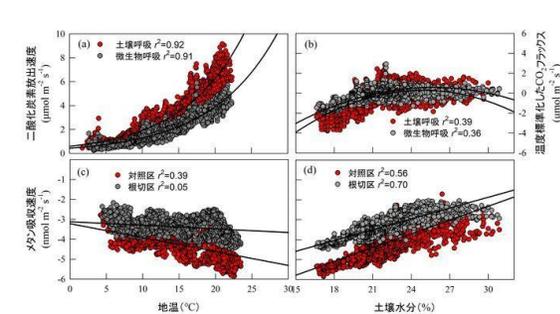
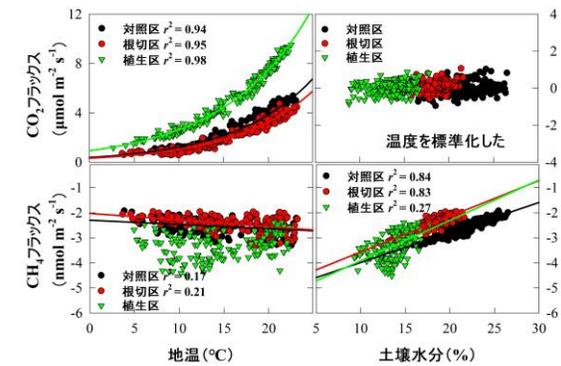
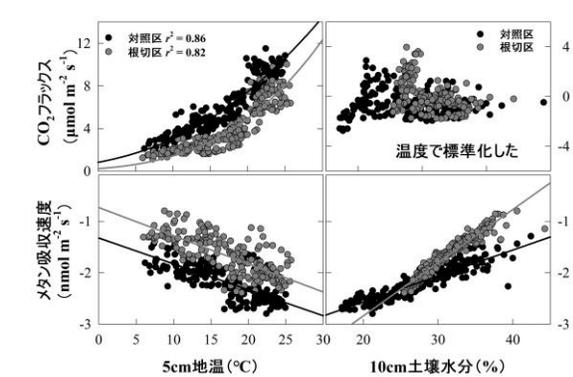
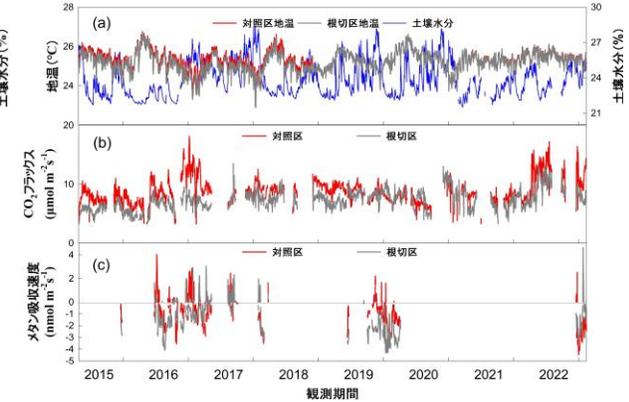
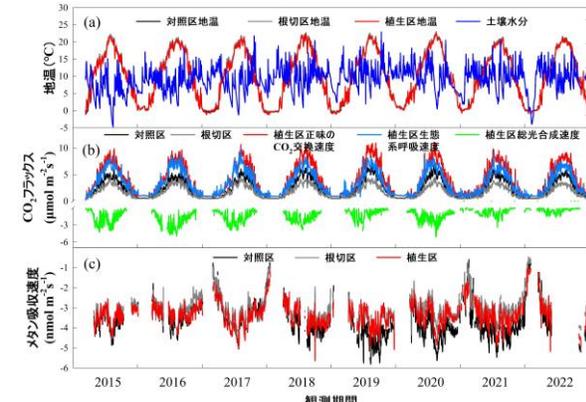
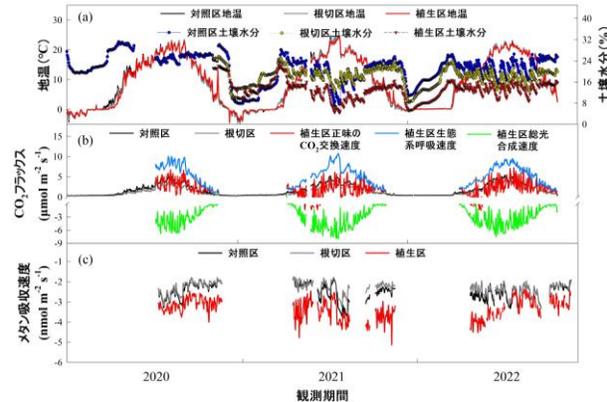
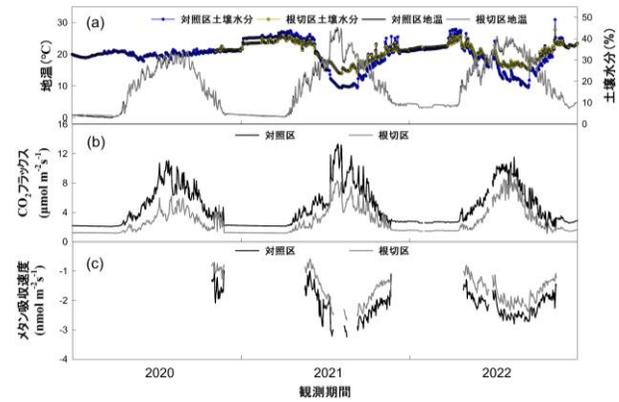
# Sub-1: 日本とアジアの森林土壌におけるCO<sub>2</sub>放出とCH<sub>4</sub>吸収の変化特性

天塩カラマツ植林

苫小牧カラマツ台風跡地

富士北麓カラマツ林

マレーシア天然林



- 個別サイトのメタン吸収速度は、温度との関連は弱く、土壌水分と強い負の相関。また、樹木根の存在は、メタン吸収を増加させる。
- 日本の森林土壌メタン吸収は、海外サイトより強かった; また、北海道から九州まで、上昇傾向を示したが、長期検証データが必要。

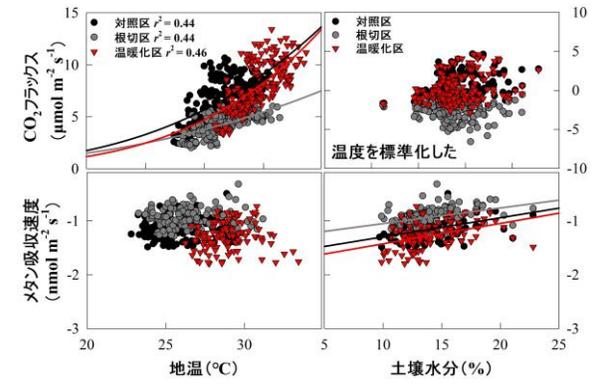
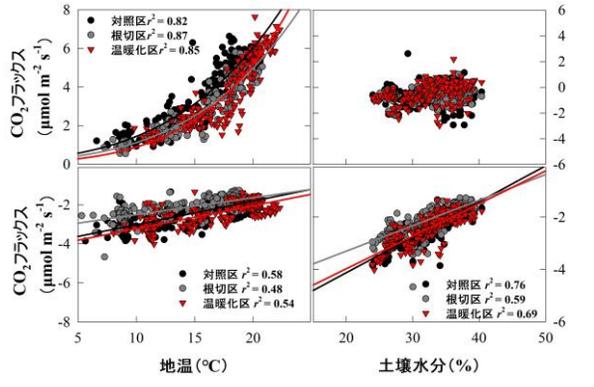
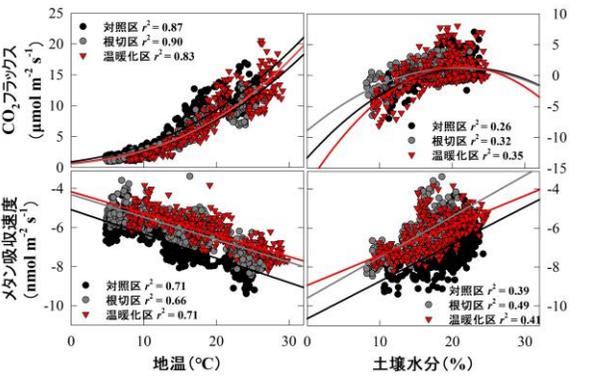
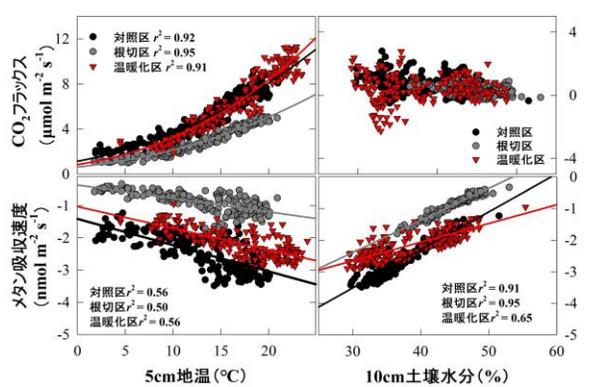
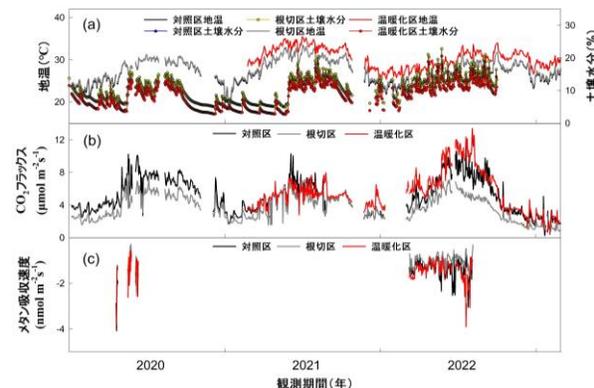
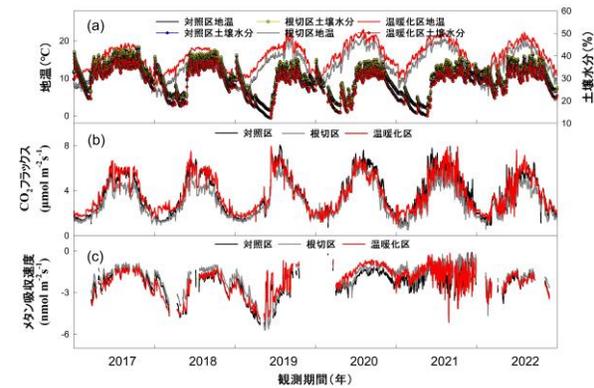
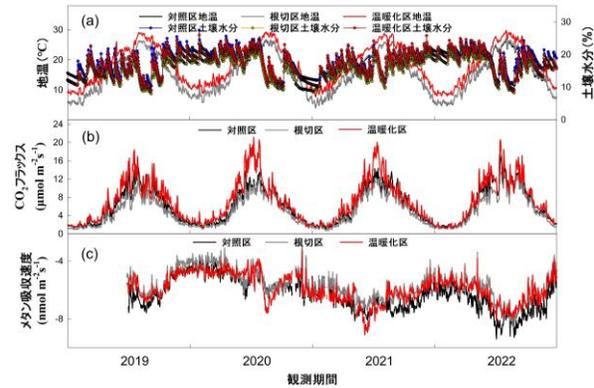
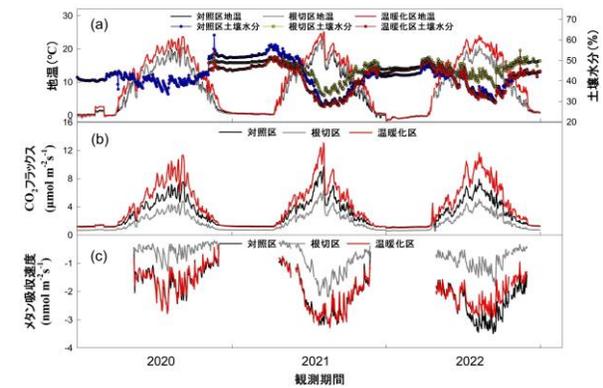
# Sub-1: 日本とアジアの森林土壌CO<sub>2</sub>放出とCH<sub>4</sub>吸収に及ぼす温暖化の影響

最北端針広混交林(天塩温暖化)

関東地方衰退したアカマツ林(つくば)

中国の亜熱帯高山林(哀牢山)

台湾の熱帯林



● 温暖化は土壌の乾燥化を介してメタン吸収を促進させる。

● 土壌メタン吸収の温暖化効果地域(生態系)差は、観測期間が短いため、現状では単一要因で説明できない。

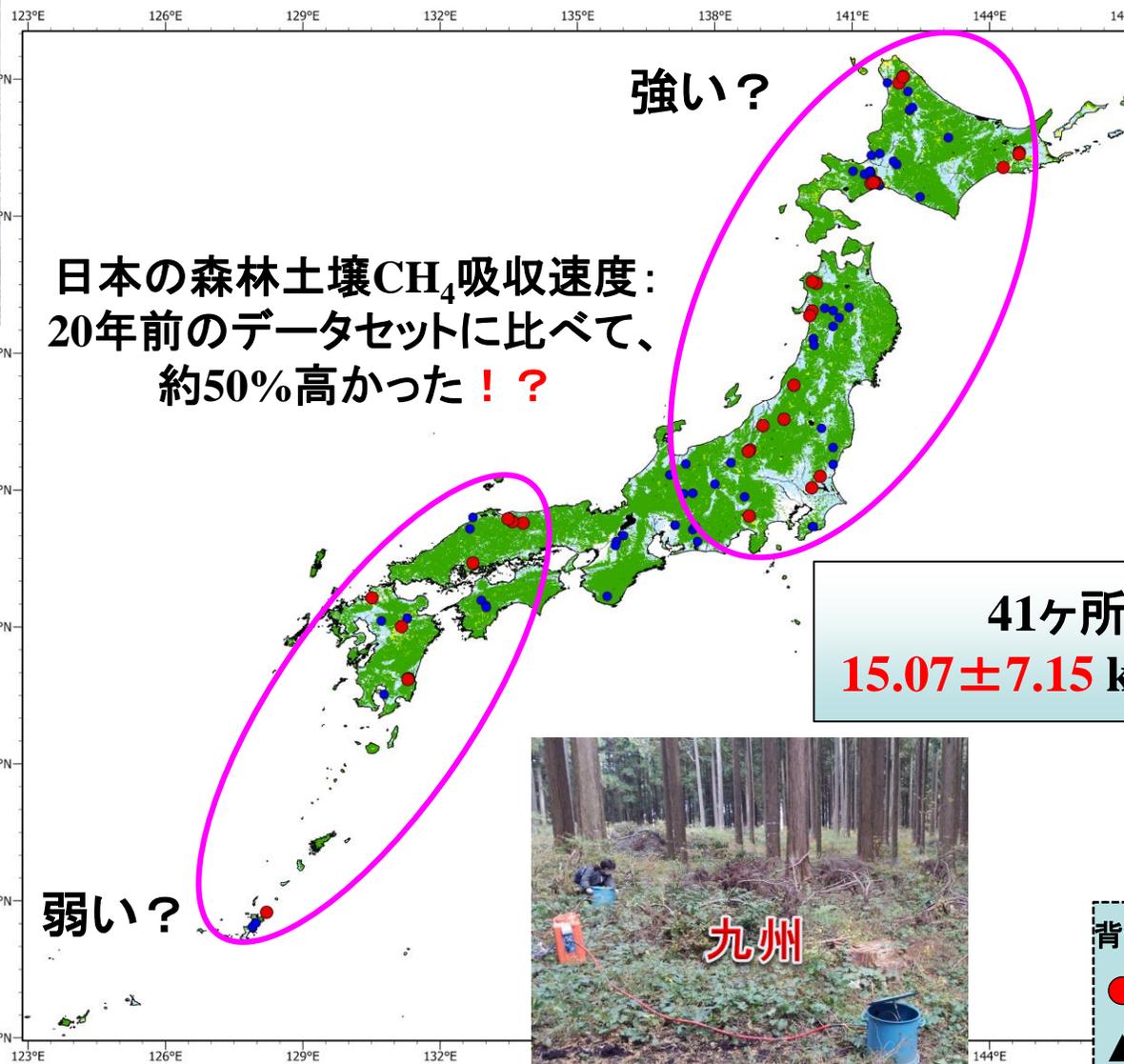
# 開発した可搬型CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>フラックス測定システムを用いた国内における41ヶ所の森林で定期的な観測を実施 (Sub1とSub2の合同で)



北陸・中国



沖縄



北海道

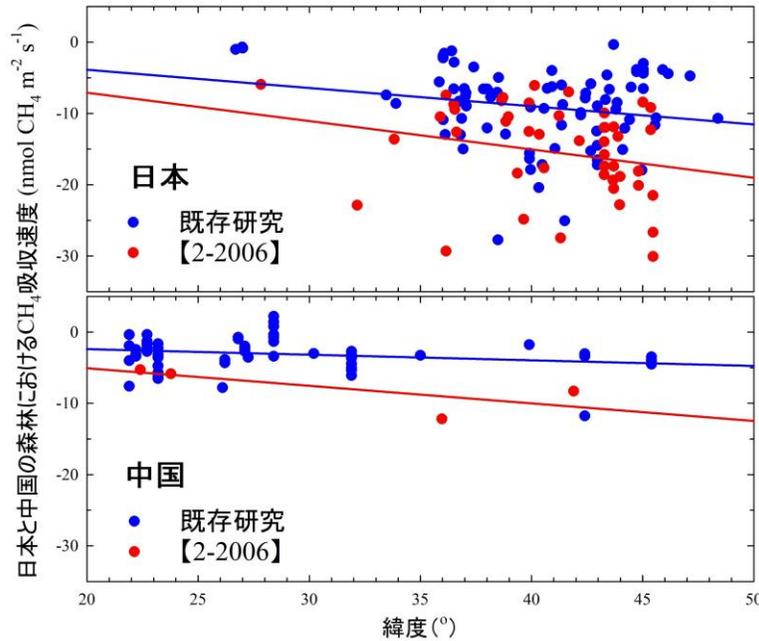


東北・関東

41ヶ所の森林  
15.07 ± 7.15 kg-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>

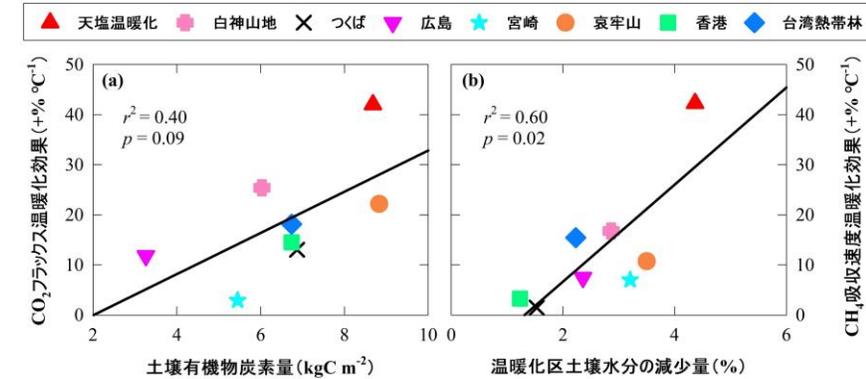
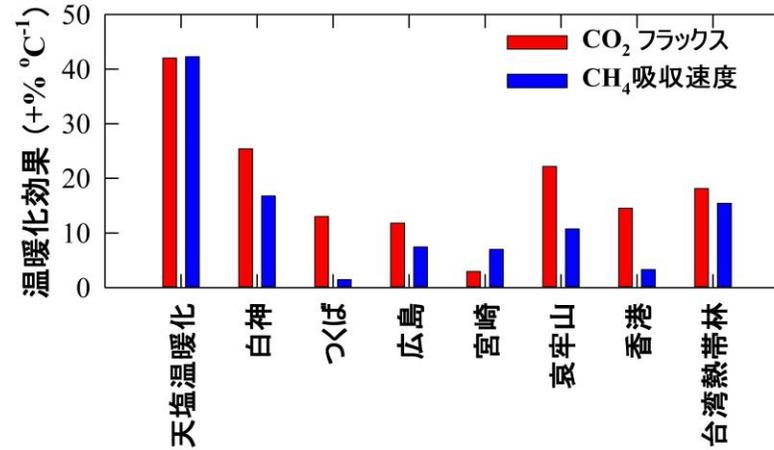
- 背景: 日本の森林図
- CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> flux観測地点
- ▲ 日本の火山分布図

# 日本およびアジアの森林土壌CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>フラックスの抜粋



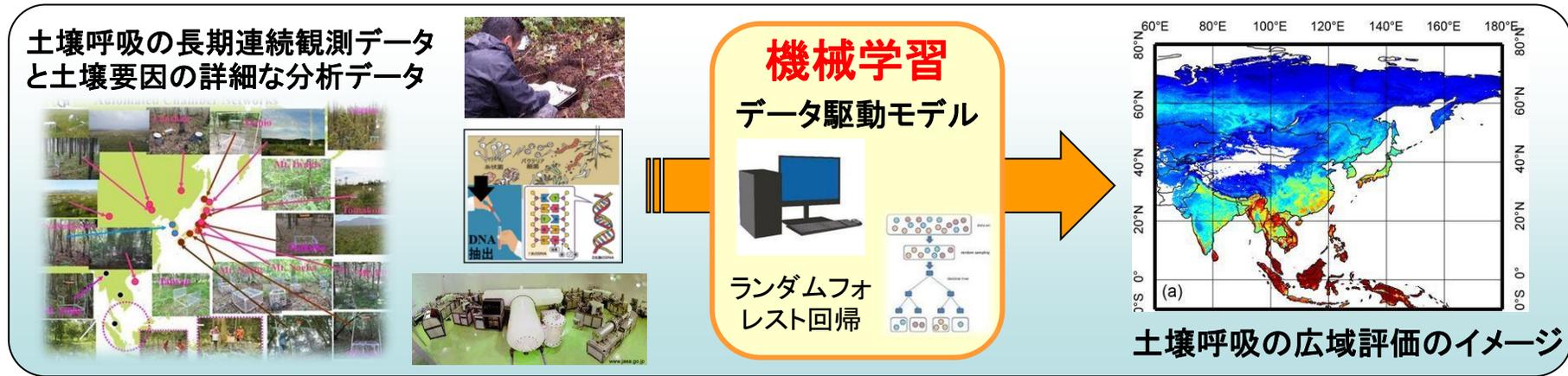
本研究で求めた森林土壌のメタン吸収能力 vs. 先行研究のデータセット:

- 日本の1.7倍
- 中国の2.5倍
- IPCC(北方林6.4倍、温帯林2.2倍、熱帯林1.9倍)
- アジア諸国の森林土壌に比べ、主に火山灰由来の日本の森林土壌のメタン吸収能は極めて高い



- 土壤有機炭素蓄積量が多く、湿潤なモンスーンアジア域の森林では、温暖化に伴うCO<sub>2</sub>放出量の増加率(土壤有機炭素分解に対する温暖化効果)が大きく、かつ長期間に渡って維持される。
- その温暖化効果は熱帯林から暖温帯林、冷温帯林に沿って、土壤炭素貯留量の増加に伴って増加する傾向を示した。
- 温暖化処理で土壌が乾燥することで、土壌のメタン吸収能力が増進した。

## Sub-2: 長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの広域推定と将来予測



**目標:** サブテーマ1のプラットフォームを活用し、アジアモンスーン地域の森林を対象に、土壌微生物特性や土壌有機物分解特性を考慮した「気候変動に対する土壌CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの長期的な応答メカニズム」の解明と、それに基づく広域推定および将来予測を行う。

- 土壌微生物特性と土壌呼吸<sup>14</sup>Cを分析: 土壌呼吸量及びその温暖化影響と、微生物特性(バイオマス・種組成)や有機炭素分解特性(分解された有機炭素の年代等)との関係性を明らかにする。
- 温暖化処理前後の微生物と土壌呼吸<sup>14</sup>Cの変化量: 温暖化によって有機炭素分解が増進し、その増進効果が長期的に維持されるメカニズムを解明する。
- 土壌CH<sub>4</sub>フラックスに関わるCH<sub>4</sub>分解菌・生成菌の分析: CH<sub>4</sub>フラックスと土壌構造(孔隙率や有機炭素含有率)や環境要因(特に土壌水分)、生物要因(優占樹種)などとの関係性を解明する。
- サブテーマ1に関する研究成果を取り込むことで、機械学習に基づき、アジア域における森林土壌CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの広域推定および将来予測を行う。

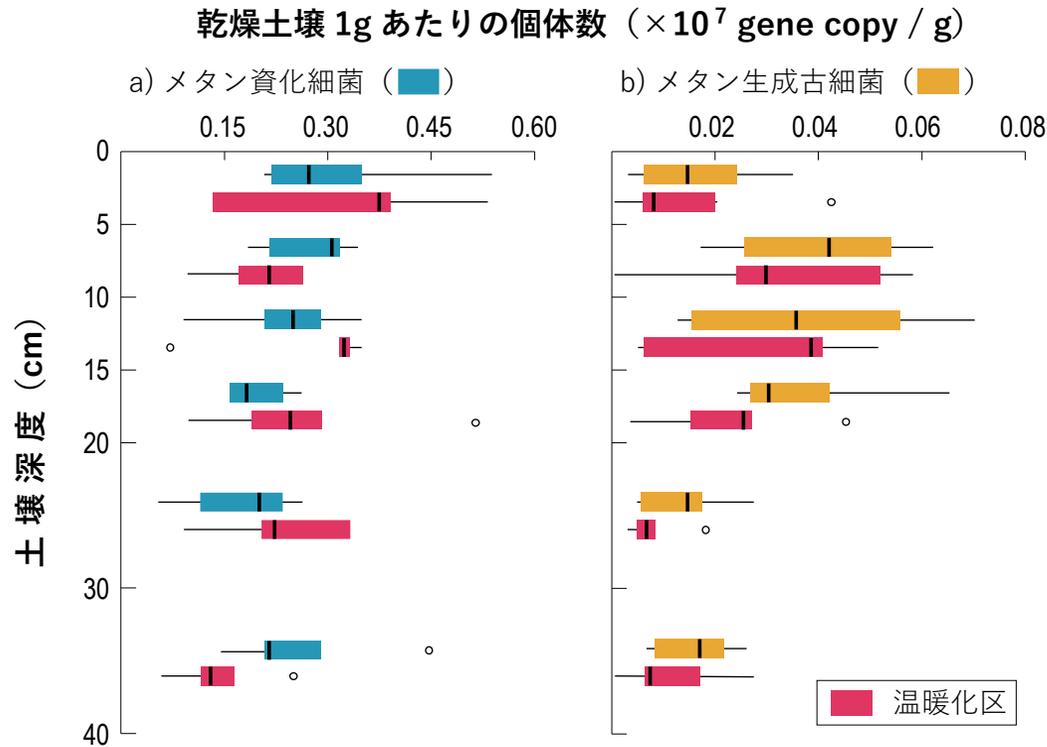


# Sub2【長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの広域推定と将来予測】

## ① 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

### 微生物評価によるCH<sub>4</sub>フラックスの応答メカニズム

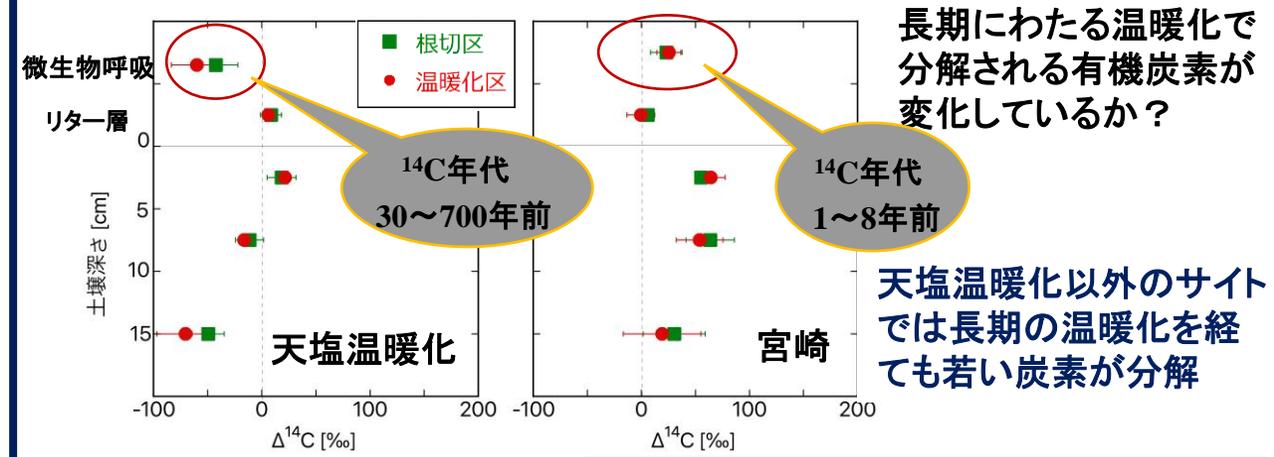
遺伝解析を用いて温暖化がメタン資化細菌量およびメタン生成古細菌量に及ぼす影響を評価 (例:天塩温暖化サイト)



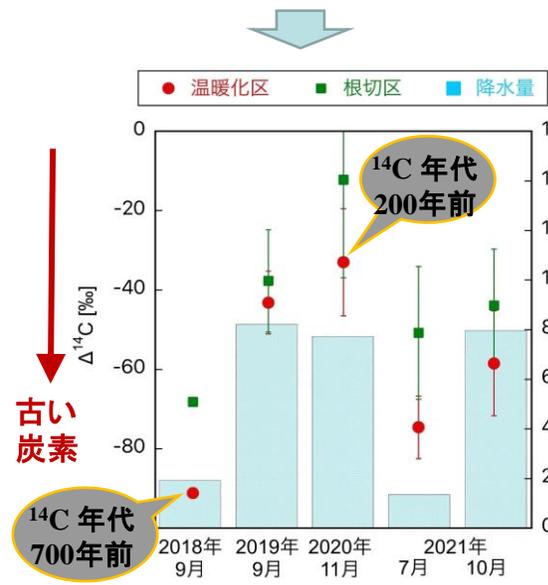
温暖化に伴う土壌の乾燥 → 好気性のメタン資化細菌量の増加  
 & 嫌気性のメタン生成古細菌量の減少 → 土壌メタン吸収能の増加

### <sup>14</sup>C分析によるCO<sub>2</sub>フラックスの応答メカニズム

微生物呼吸の<sup>14</sup>C分析により、分解される有機物の年代を推定



分解性の高い有機物が豊富に蓄積 → 今後も温暖化によるCO<sub>2</sub>放出が持続



天塩温暖化サイト(泥炭土壌)では、温暖化に伴う乾燥により土壌が長期間蓄えてきた古い炭素の放出が促進

他のサイトに比べて3-15倍高い温暖化効果が生じるメカニズムを解明

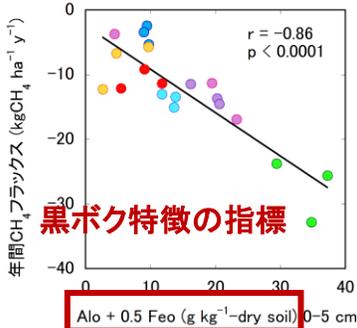
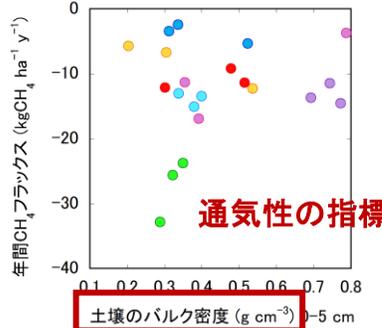
温暖化応答の長期持続要因を解明

# Sub2【長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの広域推定と将来予測】

## ② 土壌炭素フラックスの空間変動規定要因の解明と推定・予測モデルの構築

### CH<sub>4</sub>フラックス

Sub1の観測結果に基づく仮説  
「黒ボク土はCH<sub>4</sub>吸収能が高い」を検証



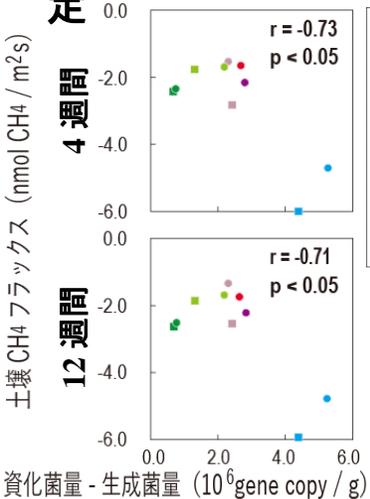
● 天塩温暖化  
● 白神山地  
● つくば  
● 富士北麓  
● 広島  
● 宮崎  
● 袁牢山

**非晶質鉱物含有量に基づき、メタン吸収量を推定**

火山灰の影響を受けた土壌(黒ボク土)は、好気的な環境になりやすく、ガス拡散や微生物活性が大きくなり、メタンが酸化(吸収)されやすい。

**年間メタン吸収量** [kgCH<sub>4</sub>/ha/y] = -2.46 - 0.67 × (Al<sub>0</sub>+0.5Fe<sub>0</sub>) [g/kg]

### メタン資化細菌・メタン生成古細菌量を用いたCH<sub>4</sub>フラックス推定



外部環境要因により土壌微生物量は大きく変動するため、長期(年間)のCH<sub>4</sub>フラックス推定には不向き

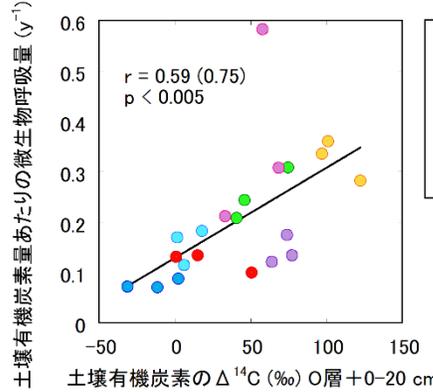
1~3ヶ月の短期のCH<sub>4</sub>フラックスとは比較的強い相関

**森林伐採や台風による攪乱等によるCH<sub>4</sub>フラックスへの影響予測への適用**

### CO<sub>2</sub>フラックス

土壌<sup>14</sup>C分析を用いたCO<sub>2</sub>フラックス推定

#### (1) Sub1の観測結果 × 土壌有機炭素・<sup>14</sup>C分析

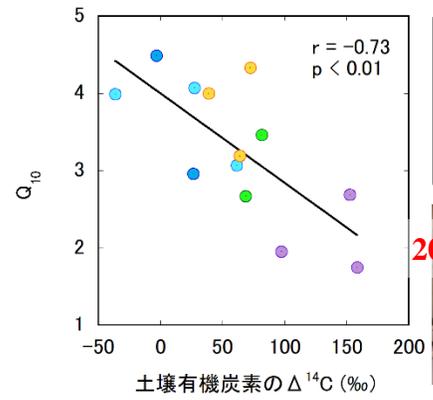


土壌有機炭素の<sup>14</sup>C同位体比は、「見かけの代謝回転速度」の有力な指標となることに着眼

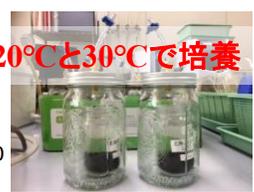
土壌有機炭素の<sup>14</sup>Cは、微生物呼吸の地域差(空間変動)を説明するキーパラメータ

**年間微生物呼吸量を、土壌有機炭素の蓄積量と<sup>14</sup>Cに基づいて推定可能に!**

#### (2) 土壌培養実験結果 × 土壌<sup>14</sup>C分析



温度応答パラメータ(Q<sub>10</sub>)と土壌有機炭素の<sup>14</sup>Cの間に相関を発見



**Q<sub>10</sub>を土壌有機炭素の<sup>14</sup>Cに基づいて推定可能に!**

**年間微生物呼吸量と温暖化応答を推定・予測するモデルを構築**

**年間微生物吸収量** [kgC/m<sup>2</sup>/y]

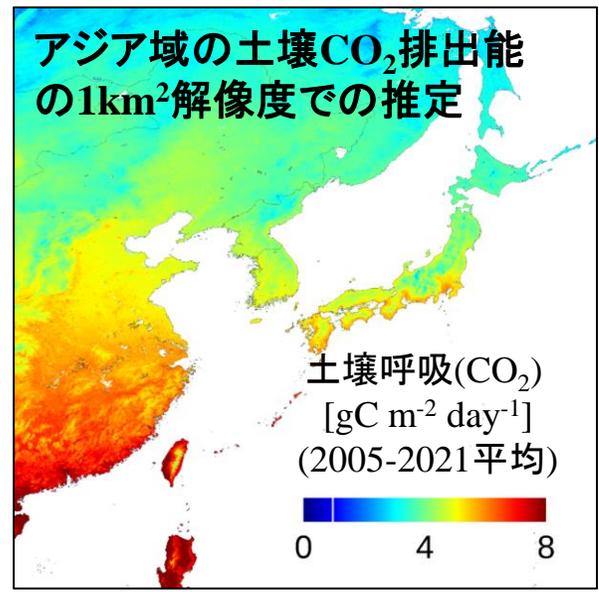
$$= (0.129 + 0.002 \times \Delta^{14}\text{C}) \times \text{SOC} \times (4.00 - 0.01 \times \Delta^{14}\text{C})^{\text{AT}/10}$$

# Sub2【長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの広域推定と将来予測】

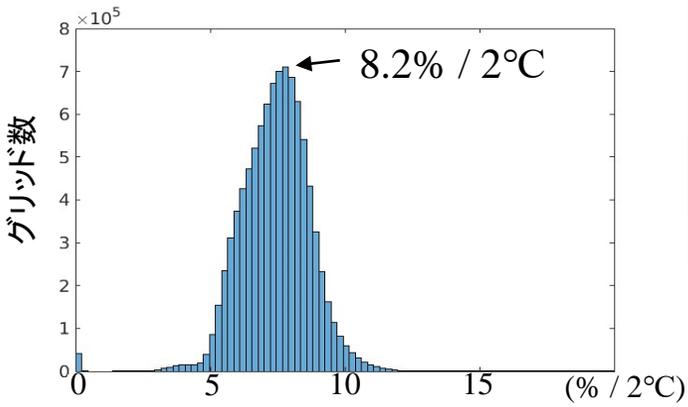
## ③ 土壌炭素フラックスのアジア域における広域推定と将来予測

本観測網・気象観測・衛星観測データなどを用いて機械学習(ランダムフォレスト回帰)を適用した「データ駆動型推定」  
 → モンスーンアジア域の土壌のCH<sub>4</sub>吸収能・CO<sub>2</sub>排出能を1km分解能で可能にした

### CO<sub>2</sub>フラックス

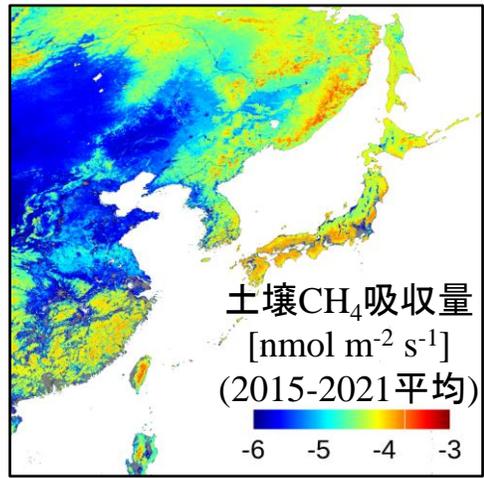


将来予測(温度2°C上昇)の土壌呼吸量の変化を広域で把握



※比較: 現地観測9.6~42% / °C

### CH<sub>4</sub>フラックス



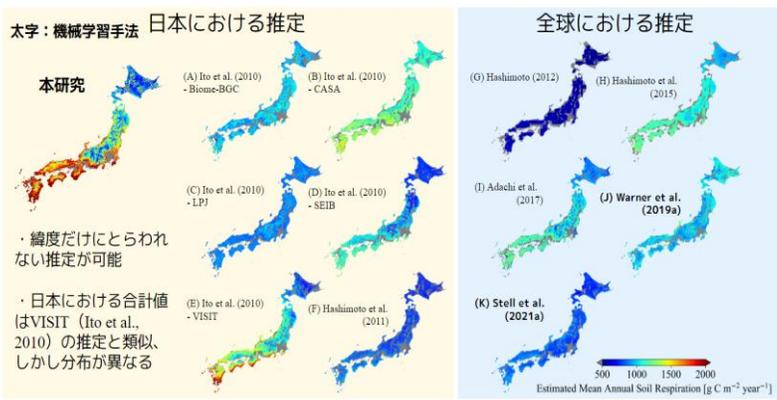
アジア域土壌CH<sub>4</sub>吸収能の1km<sup>2</sup>解像度で推定(精度向上は必要)

観測の充実が必要  
 観測サイトや観測年数、観測項目などの増加による改善が望まれる

日本域での相互比較:

- ・プロセスモデル
- ・半経験モデル
- ・経験モデル

本研究:細かい分解能と妥当な空間分布



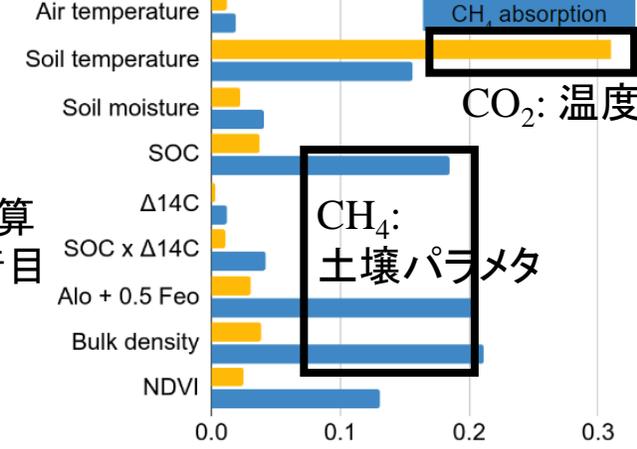
### CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>比較解析

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>の同時観測あり  
 6サイト(日本)でモデル構築

ランダムフォレスト回帰で計算できるパラメータ重要度に着目

本研究:CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>で異なるパラメータ重要度

### パラメータ重要度の解析



# 環境政策への貢献

## ① 世界最大規模の土壌CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックス観測ネットワークを確立

最新のメタン分析計を土壌CO<sub>2</sub>フラックス観測プラットフォームに組み込むことで、北海道最北端から赤道付近のマレーシアまでの様々な生態系を網羅する観測体制を確立

→ **アジアモンスーン域の多様な森林におけるメタン吸収能を高精度に評価**



## ② 日本の森林土壌が有する極めて高いメタン吸収能を発見

森林土壌のメタン吸収能は従来考えられていたよりもずっと高く、アジアモンスーン域、特に火山灰土壌に特徴づけられる日本の土壌は吸収能が極めて高い → **従来値の1.7~2.5倍. モデル値の約3倍**

土壌の物理・化学・生物学特性から簡便に推定する方法も確立 → **森林管理指針の策定に新たなツールを提供**

## ③ 将来生じうる気候変動が森林土壌が有するメタン吸収能に及ぼす影響を解明

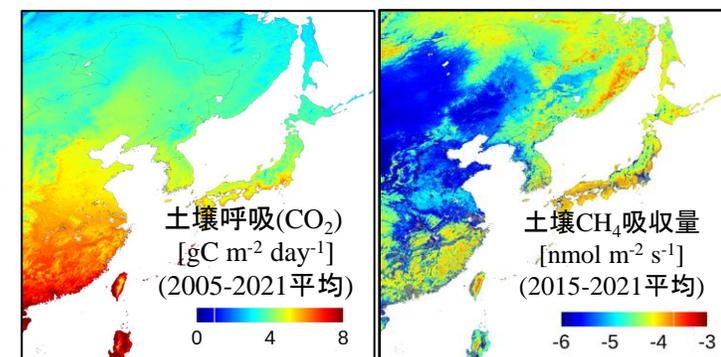
温暖化操作実験から、気候変動により森林土壌のメタン吸収能が●~●倍に増加. そのメカニズムも解明

→ **気候変動影響の将来予測の高精度化**

## ④ アジア域の森林土壌CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスの高精度の広域推定

機械学習を用いて、モンスーンアジア域の森林土壌CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>フラックスを地図化

→ **様々な気候変動対策、環境政策の立案に貢献**



# 研究目標の達成状況

**全体目標:** 北海道最北端から赤道付近のマレーシアまでの広域トランゼクトに沿って、①代表的な森林生態系で土壤温暖化操作実験を行うとともに、②土壤 $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ フラックスやそれに関する土壤微生物、 $^{14}\text{C}$ に関する包括的な観測・分析を行う。機械学習など複数のモデルを用いて、③アジア域の森林土壤 $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ フラックスに関する1 kmメッシュの超高解像な広域推定を行うとともに、④土壤有機炭素貯留量や $\text{CH}_4$ 吸収能に対する気候変動影響の将来予測を行う。

## 達成状況: サブテーマ1・サブテーマ2ともに『計画以上の進捗』

- ① 当初の計画に加え、国内2ヶ所・海外1ヶ所で新たに $\text{CH}_4$ 観測を開始
- ② 当初の計画にはなかった可搬型の土壤 $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ フラックス測定システムを開発し、定点サイトに加え、国内における41ヶ所の森林で定期的な観測を実施
- ③ 国内外のサイトで $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ フラックスへの温暖化影響を評価. 土壤物理・化学・生物特性の分析に基づき温暖化応答メカニズムを解明
- ④ 土壤 $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ フラックスの規定要因を解明し、再現性の高いモデルを構築
- ⑤ 日本を含むアジアモンスーン地域における $\text{CO}_2$ 排出能及びメタン吸収能を $1\text{km}^2$ , 8日毎の高い解像度でマップ化
- ⑥ アジアモンスーン地域における $\text{CO}_2$ 排出能及びメタン吸収能の将来(温度 $2^\circ\text{C}$ 上昇)予測

# 研究成果の発表状況

## (1) 誌上发表<論文(査読あり)>(9件掲載)

1. X. ZHAO, N. LIANG, J. ZENG, A. MOHTI: Soil Biol. Biochem, 152, 108067 (2021).
2. L. SHA, M. TERAMOTO, N. NOH, S. HASHIMOTO, M YANG, M. SANWANGSRI, N. LIANG: J. Agric. Meteorol., 77, 24-51 (2021).
3. R. CUI, T. HIRANO, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG : J. Agric. Meteorol., D-20-00049 (2021).
4. 平野高司(2021), 地球環境, 26, 57-68「森林生態系における炭素循環観測」(総説)
5. M. TERAMOTO, T. HAMAMOTO, N. LIANG, T. TANIGUCHI, T.Y. ITO, R. HU, N. YAMANAKA: SCI. REP. 12, 14320 (2022),
6. T. HIRANO, R. CUI, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG: PLANT SOIL (2023) 482:57-72. (2023)
7. J. ZHANG, L. KUANG, Z. MOU, T. KONDO, J. KOARASHI, M. ATARASHI-ANDOH, Y. LI, X. TANG, ..., H. LAMBERS, W. WU, J. KAAL, J. LI, N. LIANG AND Z. LIU: PLANT SOIL, 1573-5036 (2022)
8. T. LI, H. F. CHENG, Y. LI, Z. MOU, X. ZHU, W. WU, J. ZHANG, L. KUANG, J. WANG, D. HUI, ..., A. B. MOHTI, N. LIANG, Z. LIU: SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 881 (2023) 163204. (2023)
9. HU R., HIRANO T., SAKAGUCHI K., YAMASHITA S., CUI C., SUN L., LIANG N. SOIL BIOLOGY AND BIOCHEMISTRY 184 (2023) 109094. (2023) (報告書の提出後)

## (2) 学会発表(総67件、うち口頭61件(国際20件、国内41件)、ポスター6件)

1. K. TAKAGI, L. SUN, M. TERAMOTO, T. KONDO, J. KOARASHI, N. LIANG.....: International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan, Online, (2021)
2. 近藤 俊明、寺本 宗正、高木 健太郎、小嵐 淳、安藤 麻里子、市井 和仁、高木 正博、石田 祐宣、山貫 緋称、梁 乃申: 第68回日本生態学会大会、オンライン(2021)
3. 寺本 宗正、近藤 俊明、梁 乃申、小嵐 淳、安藤 麻里子、曾 継業、孫 力飛、中根 周歩、荒巻 能史: 第68回日本生態学会大会、オンライン(2021)
4. 平野高司、坂口香帆、山下隼平、崔鋭、胡睿、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、高木健太郎、石田祐宣.....: 第69回日本生態学会全国大会シンポジウム(2022)
5. 市井和仁、山貫緋称、山本雄平、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、永野博彦、平野高司、高木健太郎、石田祐宣.....: 第69回日本生態学会全国大会シンポジウム(2022)
6. N. Liang: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022(基調講演)
7. 高木正博、寺本宗正、近藤俊明、梁乃申、小嵐淳、安藤麻里子、孫力飛、高木健太郎、石田祐宣: 第70回日本生態学会全国大会シンポジウム(2023)
8. 石田祐宣、石川輝、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、市井和仁、高橋善幸: 日本農業気象学会2023年全国大会(2023)
9. 高木 正博、孫 力飛、梁 乃申: 第70回日本生態学会大会、オンライン(2022)
10. 小嵐淳、安藤麻里子、梁乃申、近藤俊明、高木健太郎、平野高司、高木正博、石田祐宣、寺本宗正、永野博彦、市井和仁.....: 第70回日本生態学会全国大会シンポジウム(2023)
11. L. SUN, N. LIANG, Y. TAKAHASHI, T. HIRANO, S. ISHIDA, M. TAKAGI, K. TAKAGI, M. TERAMOTO, T. KONDO.....: Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022
12. H. YAMANUKI, K. ICHII, Y. YAMAMOTO, M. TERAMOTO, L. SUN, J. KOARASHI, N. LIANG : JpGU Meeting 2023

## (3) シンポジウム主催(4件)

1. 国際シンポジウム:「COVID-19後の地球環境研究」(企画者: 梁 乃申、高橋 善幸). 第6回NIES国際フォーラム. 2021年1月19日。アジアの7カ国から8名のパネリストを招待し、オンラインで発表を行った (<https://www.nies.go.jp/i-forum/#session1>)。
2. 国内シンポジウム(S2):「土壌からの二酸化炭素放出およびメタン吸収が今後の温暖化の鍵を握る」(企画者: 寺本宗正、高橋 善幸、梁 乃申). 第68回日本生態学会大会講演要旨集、2021年3月17-21日、オンライン。
3. 国内シンポジウム(S21):「土壌におけるメタン吸収と温暖化の影響」(企画者: 近藤俊明、梁 乃申、高橋 善幸). 第69回日本生態学会大会講演要旨集、2021年3月19日、オンライン。
4. 国内シンポジウム(S3):「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」(企画者: 寺本宗正、梁 乃申、石田祐宣). 第70回日本生態学会大会講演要旨集、2021年3月19日、オンライン。

## (4) 「国民との科学・技術対話」の実施(3件)

1. 2-2006公開シンポジウム「白神・青森の大地から見えてくる温暖化の将来 ～研究の最前線からの報告～」(主催: 独立行政法人環境再生保全機構/環境研究総合推進費課題【2-2006】、2021年3月19日、オンライン、入室者約80名)にて講演
2. 天塩温暖化操作実験サイトからのYouTubeライブ: 国立環境研究所2022年夏の大公開の「つくば×観測サイト 生中継ラボツアー」YouTubeチャンネルを活用した
3. NPO法人青森県環境パートナーシップセンター(石田祐宣 監修)、(一般向け温暖化防止活動講座の前座用)DVD動画作成、2022年、「地球温暖化 白神山地からのメッセージ・SDGs for AOMORI」