

環境研究総合推進費 令和元年度終了課題事後評価

2-1705: アジアの森林土壤有機炭素放出の温暖化影響とフィードバック効果に関する包括的研究

* 国立環境研究所 (* 梁 乃申・高橋 善行・寺本 宗正)
北海道大学 (高木 健太郎・平野 高司)
国際農林水産業研究センター (近藤 俊明)
日本原子力研究開発機構 (小嵐 淳・安藤 麻里子)

1

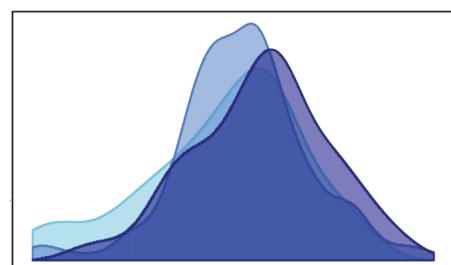
地球規模の土壤呼吸速度は1990年以降継続的に増大

NEWS & VIEWS **nature** Ogle. 2018.08.01

CARBON CYCLE
微生物は土壤の炭素シンク能を弱める
Microbes weaken soil carbon sink

The rate at which carbon dioxide is lost from soil has risen faster than the rate at which it is used by land plants, because soil microbes have become more active – possibly weakening the land surface's ability to act as a carbon sink. SEE LETTER p.80

土壤微生物は異常に活発な状態になっているため、土壤炭素の損失速度は既に植物の吸収能を超えていている。

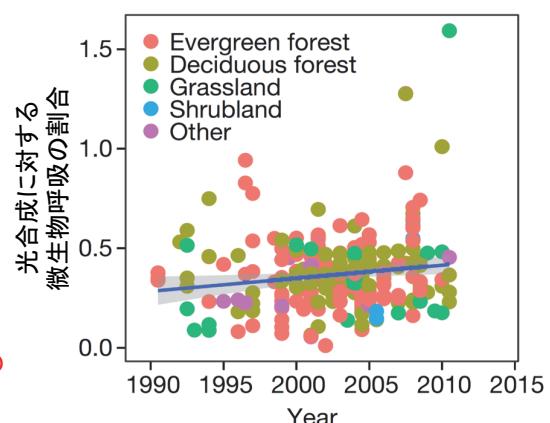


LETTER **nature** Bond-Lamberty et al. 2018.08.01
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x>

地球規模の微生物呼吸速度は1990年以降継続的に増大
Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades

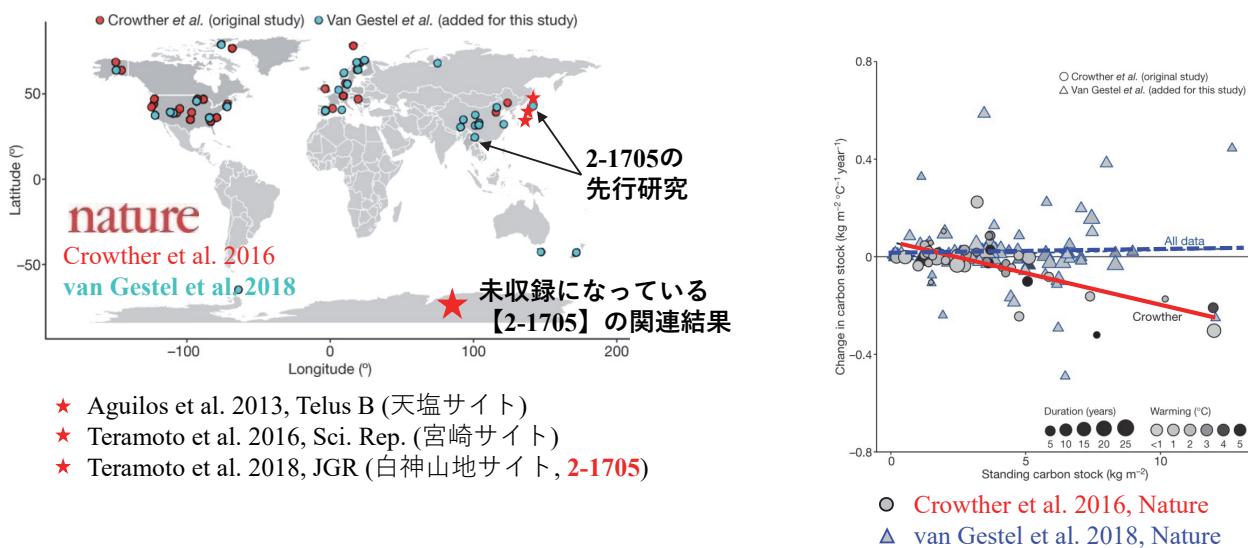
Ben Bond-Lamberty^{1*}, Vanessa L. Bailey², Min Chen¹, Christopher M. Gough³ & Rodrigo Vargas⁴

- 1990年から2014年の間に、全球の土壤呼吸量に占める微生物呼吸量の割合は、54%から63%に增加了。
- 光合成量に対する微生物呼吸量の割合も、1990年から2014年にかけて增加傾向を示している。
- 今後微生物呼吸量の増加が、陸域の炭素シンク能を弱める可能性がある。



2

世界各地で行った温暖化操作実験の結果



- 既存の土壤温暖化操作実験は欧米の草地で多く行われており、アジア域の森林における観測の不足等、観測の偏りが大きい。
- 土壤を加温する手法が標準化されておらず、互換性の不足が既存の観測データの間の比較を困難にしている。
- 研究者によって、導き出された結論は異なっている。
- 一方で、日本を中心とした、アジアモンスーン地域(湿潤で土壤有機炭素が豊富な地域)における我々の先行研究(Aguilosら、2013; Wuら、2016; Teramotoら、2016; Liangら、2017; Teramotoら、2018)では、一貫した手法を用いることで異なる生態系間で詳細な比較解析を可能としている。

3

本研究の目的

地球温暖化に伴い、アジアの森林の土壤有機炭素(SOC)の分解速度(土壤微生物呼吸)や温度反応特性がどのように変化するのか？

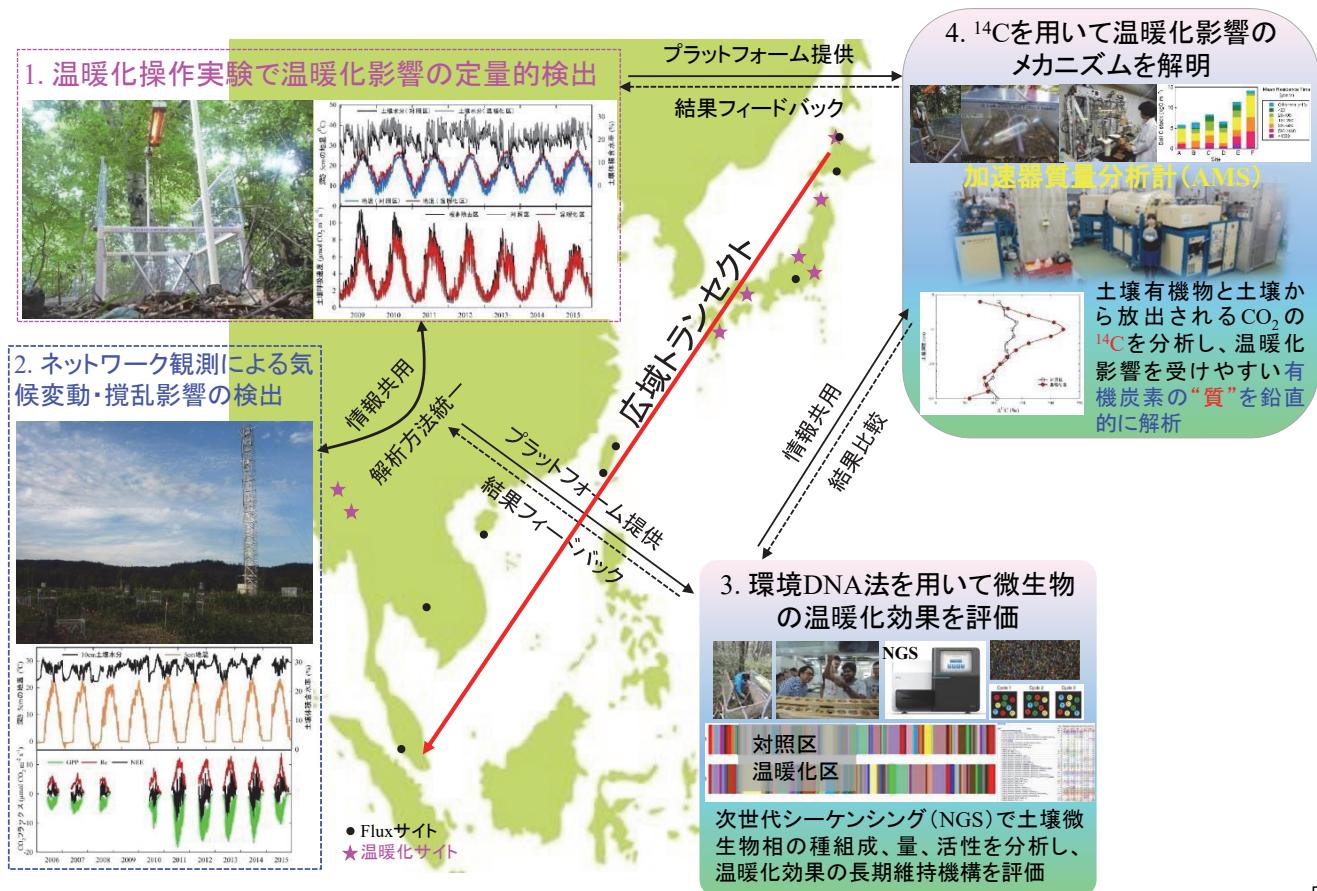
また、

その変化はどのようなメカニズムによって引き起こされるのか？

を明らかにすることを目的とする。

4

世界的に最大規模のチャンバー観測ネットワークの活用



5

研究体制

Sub	機関・リーダー	役割分担
①	国立環境研究所 *梁 乃申 高橋 善幸 寺本 宗正	温暖化操作実験による土壤有機炭素放出の温暖化影響及びフィードバック効果の定量評価: 温暖化実験解析・ネットワーク維持管理・プロジェクト取り纏め
②	北海道大学 *高木 健太郎 平野 高司	土壤呼吸に及ぼす気候変動および搅乱の影響の検出: ネットワーク解析
③	国際農林水産業研究センター 近藤 俊明	環境DNA法を用いた温暖化前後の土壤微生物相評価: 土壤微生物
④	日本原子力研究開発機構 *小嵐 淳 安藤 麻里子	放射性炭素(¹⁴ C)を用いた各森林生態系における有機炭素の蓄積及び分解のタイムスケールの評価: 放射性炭素(¹⁴ C)解析

6

国内外サイトにおける合同調査：データの整合性のため 海外サイトの担当者を含め、各サブテーマの主要メンバーの同時参加



サブ1：土壤有機炭素放出の温暖化影響及びフィードバック効果の定量評価

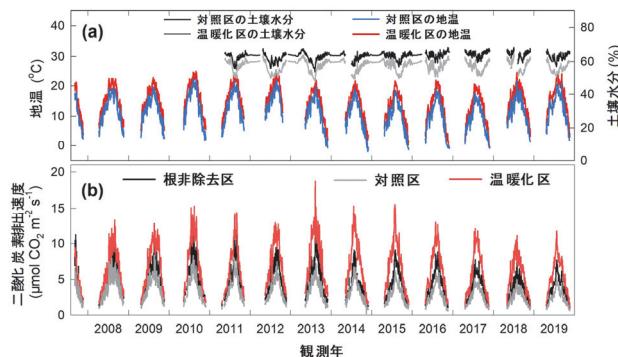
H29年度	H30年度	H31(令和元)年度
<ol style="list-style-type: none">国内5つの代表的な森林生態系及び中国南部の2つの代表的な亜熱帯林に設置された温暖化操作実験システムを改良・整備し、統一されたプロトコルによる初年度の測定データを既存関連データと合わせて解析する事で、土壤有機炭素放出における温暖化に対する反応の地域特性を把握する。解析結果を、各サブテーマと共有した上で、プロジェクト全体の進捗状況を把握し、サブテーマ間の連携機能を発揮する。初年度及び先行測定データを解析し、学会・一般公開・論文公表などを通して、研究成果を社会に発信する。	<ol style="list-style-type: none">チャンバーネットワークを維持しながら、温暖化操作実験の測定データと他のサブテーマで得られたデータを合わせて解析し、モンスーンアジアの森林生態系における、土壤有機炭素放出の温暖化に対する反応の地域特性を解釈する。解析結果を、各サブテーマと共有する。また、世界各地で行った類似研究の情報の収集・分析を行い、学会発表・一般公開・論文公表などを通じて、研究成果を世界に発信する。プロジェクト全体の進捗状況を把握した上で、サブテーマ間の連携機能を発揮する。	<ol style="list-style-type: none">温暖化操作実験サイトに設置されている測定システムを維持しながら、測定データと他のサブテーマで得られたデータを合わせて解析する。他のサブテーマの知見を組み込んで、複数の既存土壤呼吸モデルを検証・改良し、アジアモンスーン地域に最適な土壤呼吸モデルを開発する。そして、開発されたモデルを用いて土壤有機物分解の温暖化応答とフィードバック効果を高精度化する。国際セミナーの主催を通して、世界の類似研究の動向を把握した上で、研究体制を再組織し、発展的なプロジェクトの申請を準備する。

目的：アジアの代表的な森林生態系において温暖化操作実験を行い、森林土壤有機炭素分解の温暖化に対する反応の地域特性と変動要因の定量評価を行う。

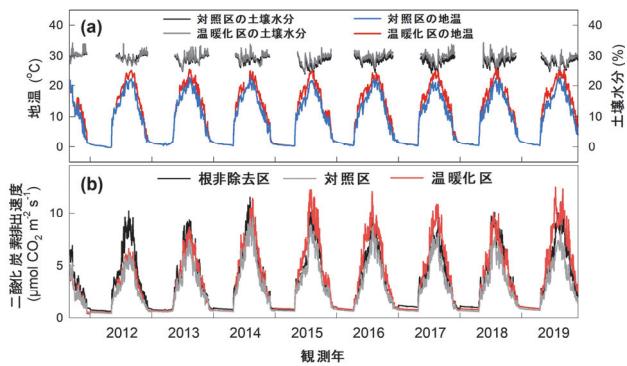


9

観測結果①:2019年まで観測(冷温帯林:天塩温暖化・白神山地)



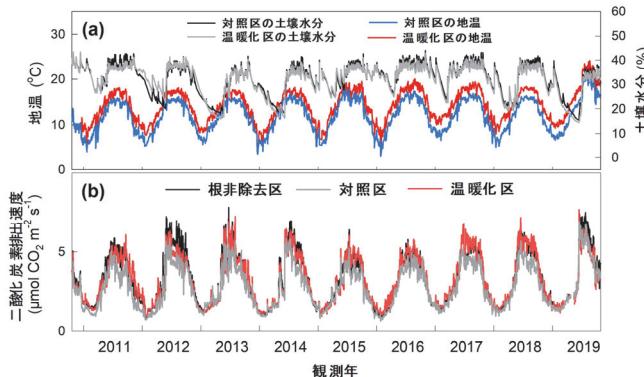
古い泥炭地で土壤有機炭素量が非常に多く、**温暖化効果が著しく高い** (1°C当たり+21.0から+46.1%)。



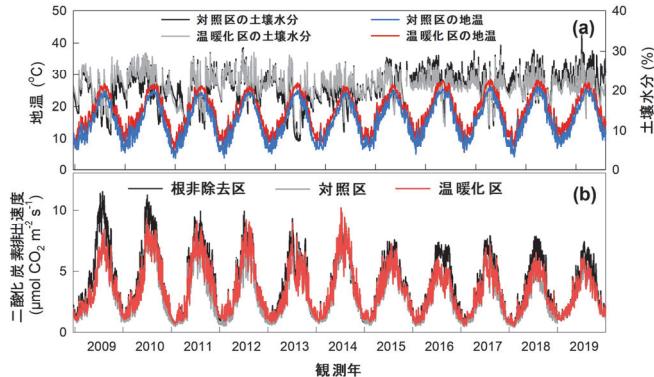
冷温帯に属しているため温度が低く、土壤有機炭素が多い。温暖化効果が高く (1°C当たり+6.2から+18.5%) 、降雨日数と正の相関を示す。

10

観測結果②:2019年まで観測(暖温帯林および亜熱帯林)



亜熱帯亜高山帯で土壤有機炭素が多く、温暖化影響が大きい。

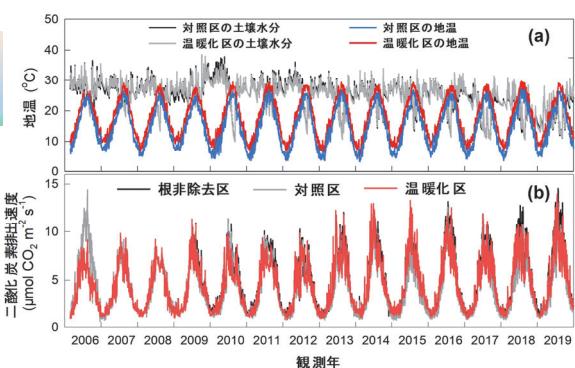


暖温帯林に属し、土壤有機炭素および降水量が多く、長期的に温暖化効果が維持された。

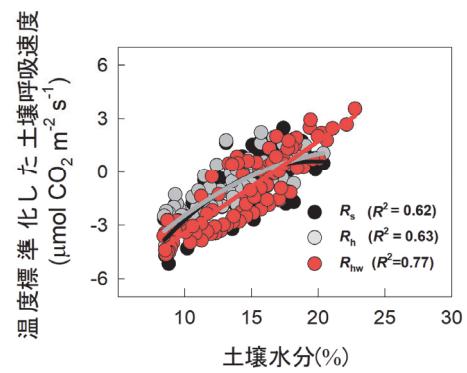
11

観測結果③:2019年まで観測(乾燥影響を受けるサイト)

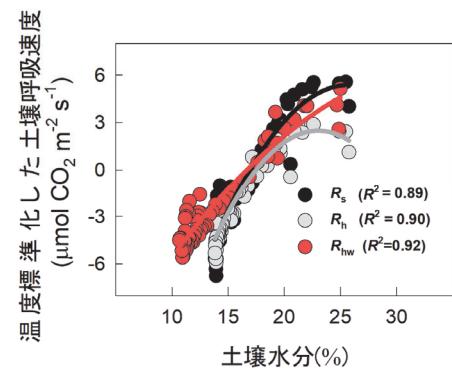
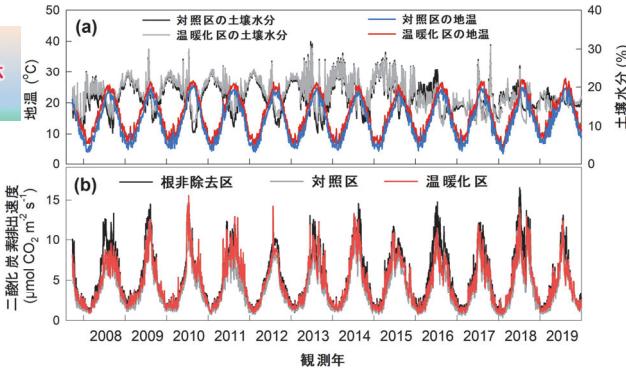
関東地方
カシ林
:つくば



(古い) 黒ボク土であり、土壤有機炭素量が天塩に次いで二番目に多いが、夏の乾燥の影響を受けるため、温暖化効果が相対的に小さい。



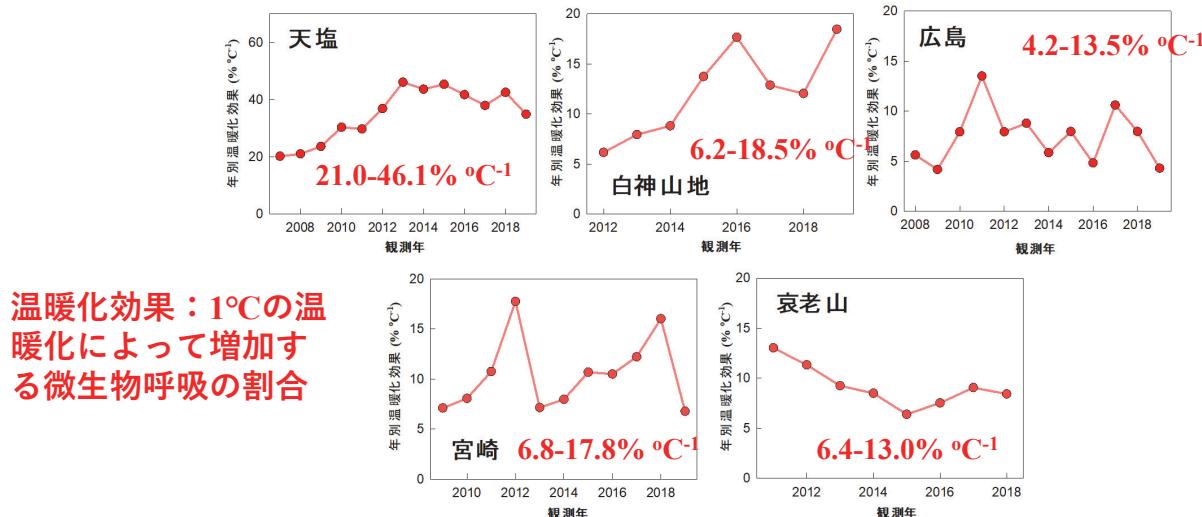
西日本
常緑カシ林
: 広島



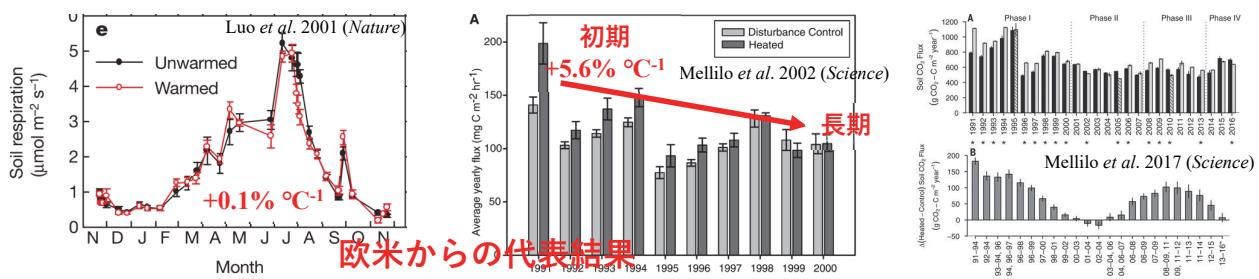
すべてのサイトの中で、最も夏の乾燥影響を受ける（瀬戸内海気候）ため、温暖化効果が相対的に小さい。
7-9月における土壤呼吸と水分の相関が非常に高い。

12

アジアの森林土壤は既往の欧米研究サイトと異なる応答を示す



アジアモンスーン地域は温暖化効果が大きく、かつ長期的に維持され、温暖化に対するフィードバック効果が大きいことが示唆される。



13

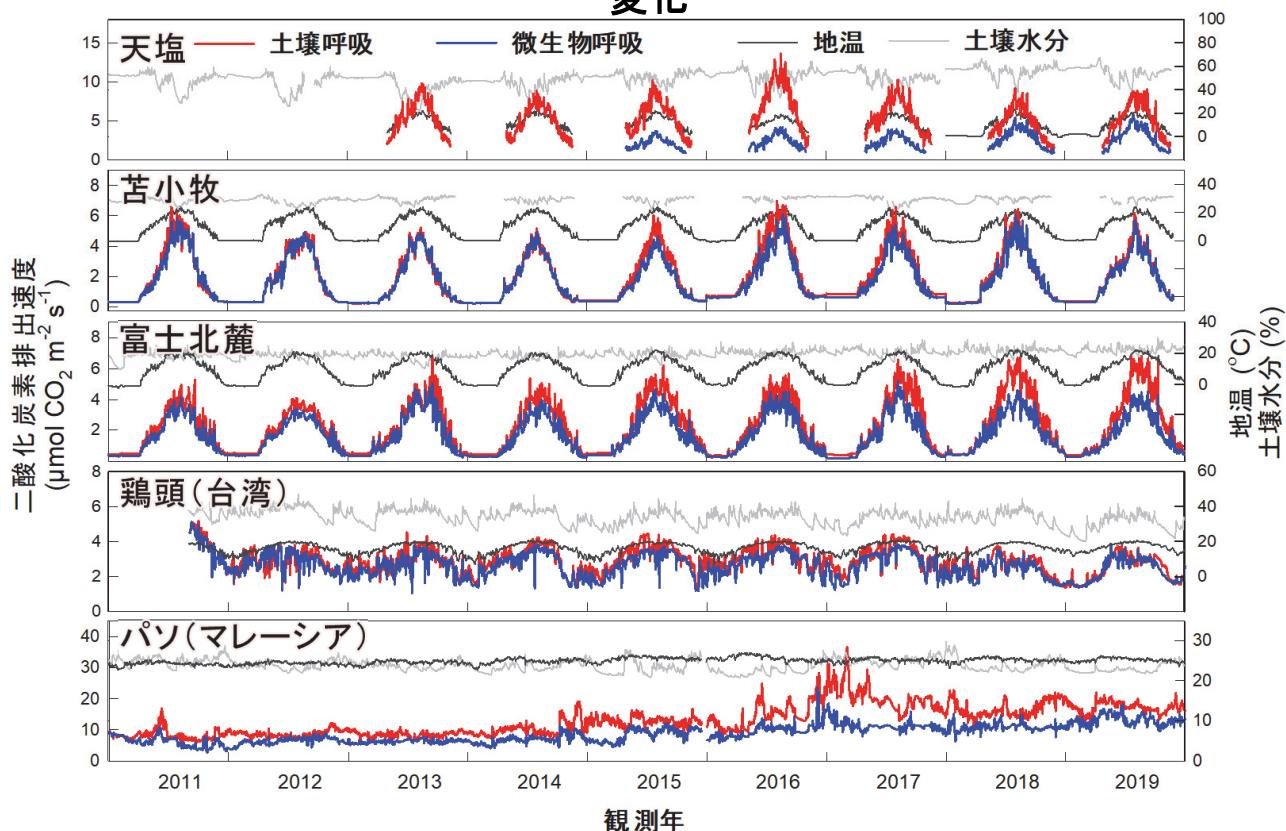
サブ2：土壤呼吸に及ぼす気候変動および搅乱の影響の検出

H29年度	H30年度	H31(令和元)年度
<ol style="list-style-type: none"> サブテーマ1との連携をしながら、国内及び海外の森林CO₂フラックス観測サイトに設置された土壤呼吸連続測定装置を改良・整備し、チャンバー観測ネットワークによる土壤呼吸を中心とした森林炭素循環観測の体制を確立する。 測定データを既存関連データと合わせて解析する事で、土壤呼吸の各地域における特性を把握する。 解析結果を、各サブテーマに提供する。 	<ol style="list-style-type: none"> サブテーマ1と連携をしながら、チャンバー観測ネットワークを維持し、モンスーンアジア域における土壤呼吸を中心とした森林炭素循環の広域評価を開始する。 解析結果を、各サブテーマに提供する。 世界各地で行った類似研究の情報を収集・分析を行い、学会発表・論文公表などを通して、研究成果を世界に発信する。 	<ol style="list-style-type: none"> サブテーマ1との連携をしながら、チャンバー観測ネットワークを維持し、本サブテーマの研究成果をまとめ、モンスーンアジアにおける信頼性の高い土壤呼吸データベースを構築する。 土壤呼吸の年々変動に対する短期的な気候変動及び搅乱の影響を解明する。 サブテーマ1の支援をしながら、複数の既存土壤呼吸モデルを検証・改良し、土壤有機物分解の温暖化応答とフィードバック効果を高精度に再現する。

目的：国内及び海外の森林フラックス観測サイトにおける土壤呼吸を解析する事で、生態系炭素循環に対する搅乱やエルニーニョ、土地利用変化の影響評価を行う。

14

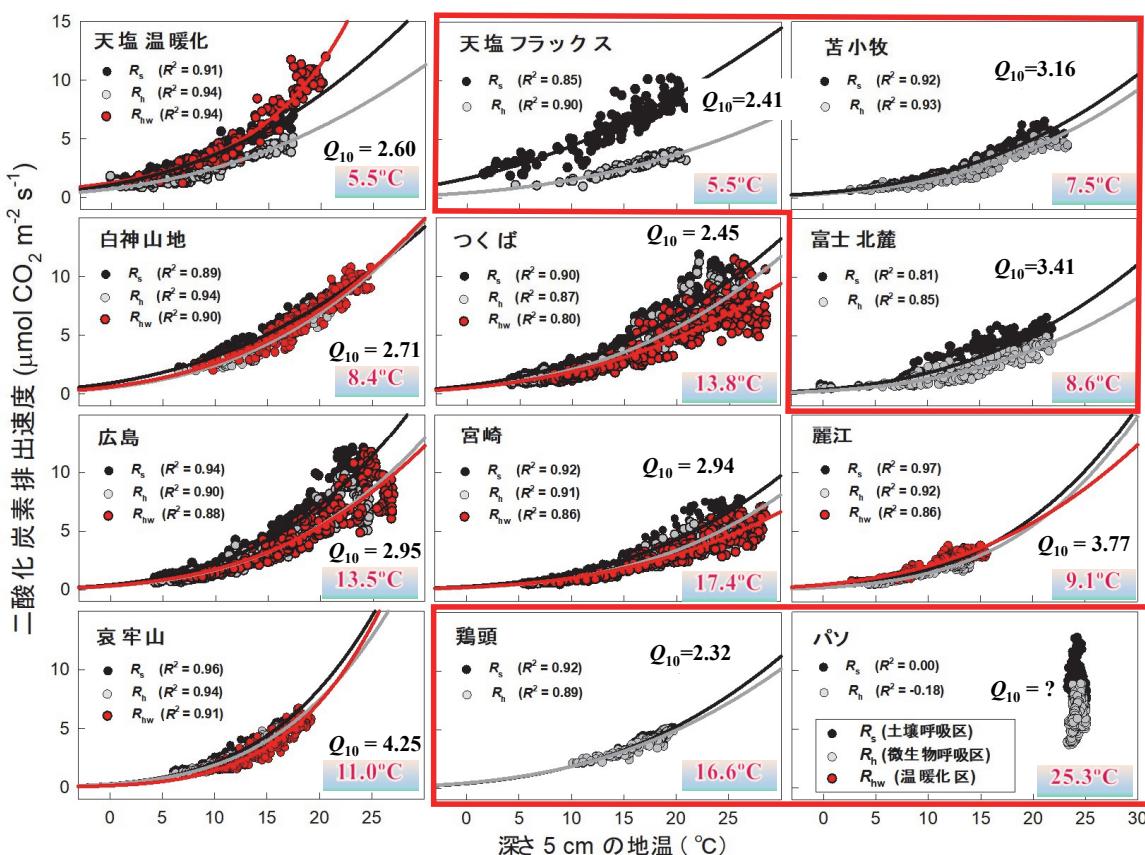
結果①: 対象5サイトの土壤・微生物呼吸および地温、土壤水分の経年変化



土壤呼吸、微生物呼吸、根呼吸の解析から、各サイトにおける季節変化・経年変化の傾向やその要因に違いがあることが明らかになった。

15

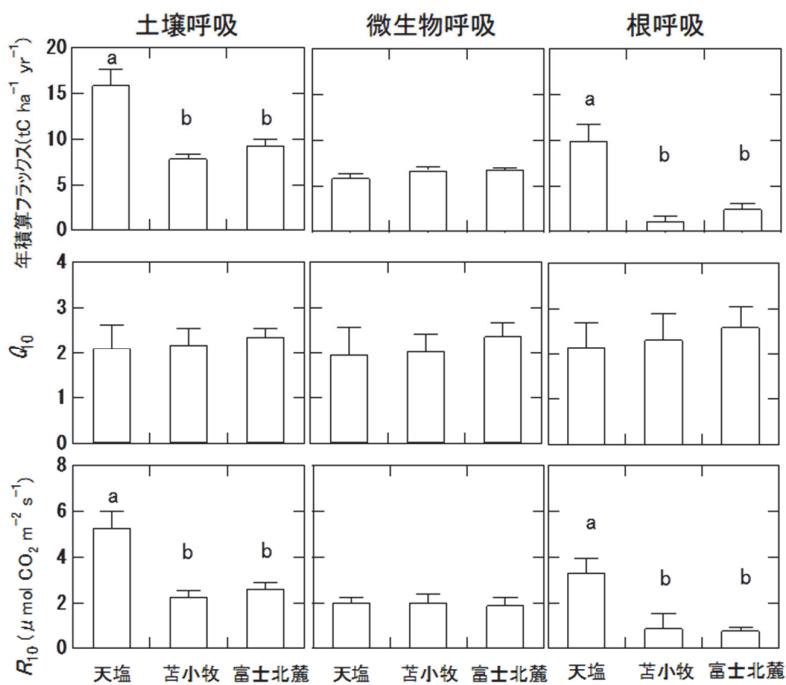
結果②: 異なるサイトにおける土壤呼吸の温度反応(サブ1と2の合同解析)



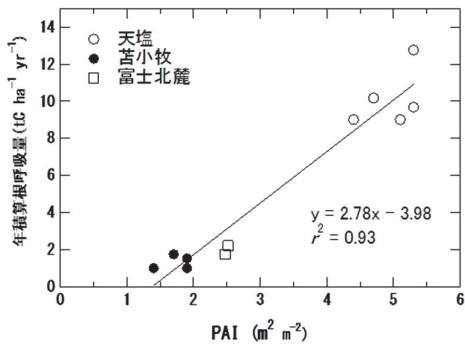
☞ マレーシア熱帯雨林を除く、すべてのサイトにおいて温度の影響が顕著である。

16

結果③：国内3サイトフラックス積算値のサイト間比較



国内3サイトの根呼吸量と林床植物の葉面積(PAI)との関係

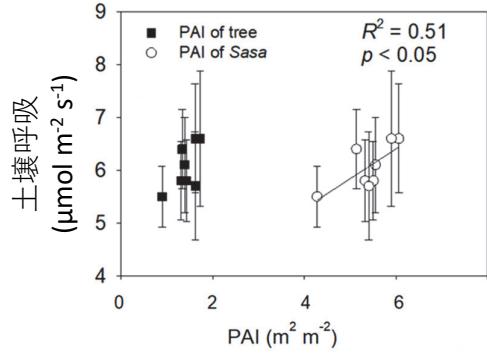
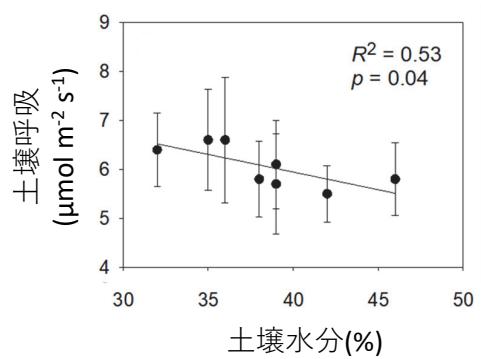


☞ 3サイトの根呼吸量は林床植物の葉面積(PAI)で説明できる。

- ☞ 土壤呼吸量のサイト間差は根呼吸量の違いに起因する。
下層植生根呼吸の基底呼吸(R_{10})の違いによって土壤呼吸にサイト間差が生じた。

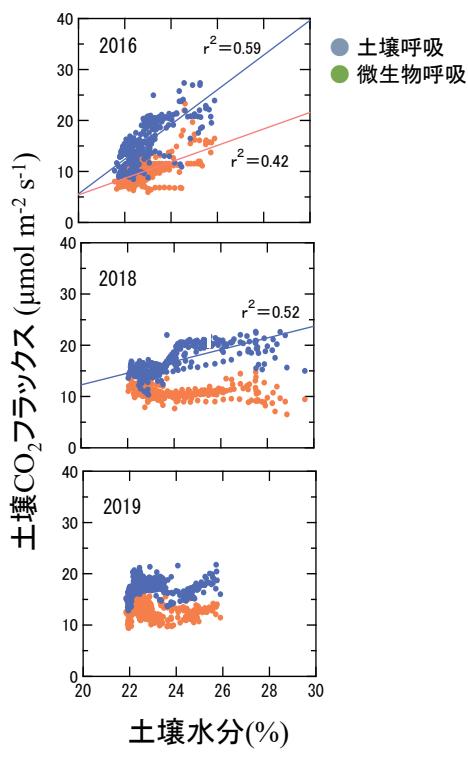
17

天塩サイトの土壤呼吸の経年変化と土壤水分・葉面積指数(PAI)との関係



マレーシア低地熱帯天然林サイトにおける各年の土壤呼吸・微生物呼吸と土壤水分との関係

結果④



- ☞ 土壤呼吸の経年変化は土壤水分や林床植物の葉面積(Sasa PAI)の影響を受ける

- ☞ 土壤呼吸・微生物呼吸は土壤水分の上昇に伴い上昇する。エルニーニョの影響を強く受けた2016年で顕著

18

サブ3: 環境DNA法を用いた温暖化前後の土壤微生物相評価

H29年度	H30年度	H31(令和元)年度
<p>1. サブテーマ1および2と連携をしながら、チャンバー観測ネットワークにおける国内の代表的な生態系において土壤サンプリングを開始し、環境DNA法を用いて土壤有機物の分解に強く寄与する土壤微生物の多様性やバイオマスの地域特性を把握する。</p> <p>2. 解析結果を、各サブテーマ、特にサブテーマ1と2に提供し、温暖化効果の長期維持メカニズムおよび土壤呼吸の地域特性の解明に貢献する。</p>	<p>1. サブテーマ1および2と連携をしながら、DNA解析による土壤微生物の多様性やバイオマスの定量評価を海外サイトで展開するとともに、RNA解析から温暖化が土壤微生物活性に及ぼす影響を評価する。</p> <p>2. 学会発表・論文公表などを通して、研究成果を世界に発信する。また、解析結果を、各サブテーマに提供し、温暖化効果の長期維持メカニズムおよび土壤呼吸の地域特性の解明に貢献する。</p>	<p>1. サブテーマ1および2と連携をしながら、温暖化が土壤微生物の量、多様性、活性に及ぼす影響をまとめる。</p> <p>2. 「遺伝子解析による土壤微生物動態の評価」をチャンバーネットワークにおける各サイトに適用することで、北緯45°の北方生態系から赤道付近の熱帯生態系までの広域トランセクトにおける土壤微生物相(多様性とバイオマス)の広域分布パターンを解明する。</p> <p>3. サブテーマ1と2のモデル評価にパラメータなどの情報を積極的に提供する。</p>

目的: 土壤有機物の分解に強く寄与する土壤微生物相に着目し、最新の遺伝解析手法を用いてその動態(量・組成・活性)を把握することで、土壤有機炭素分解における温暖化効果の長期維持メカニズムの解明を行う。

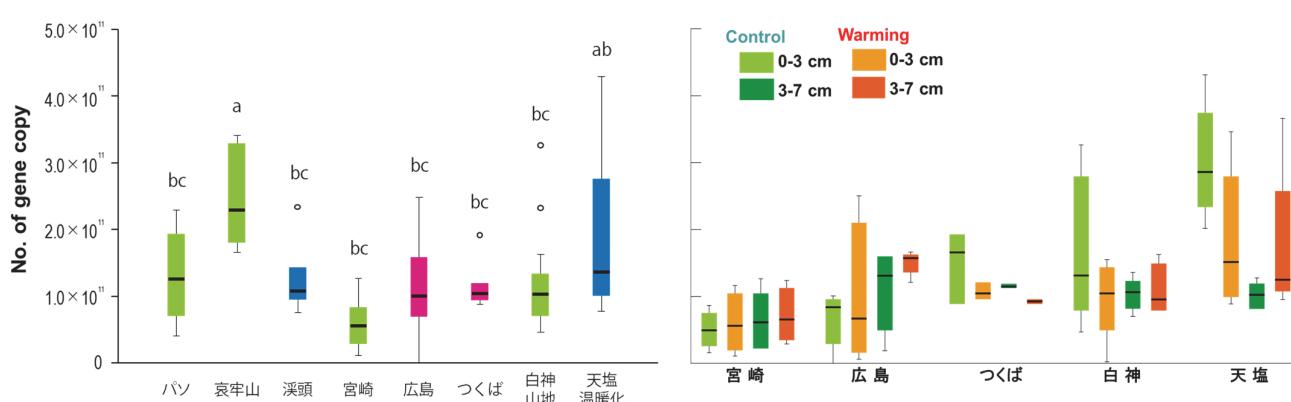
19

結果①: 土壤微生物量の地域間比較(国内外8サイト)



シングルコピーの*tuf* geneを対象としたqPCR法により、土壤微生物量の地域間比較を行った。

また、各地域内において、温暖化区と非温暖化区で土壤微生物量を比較。



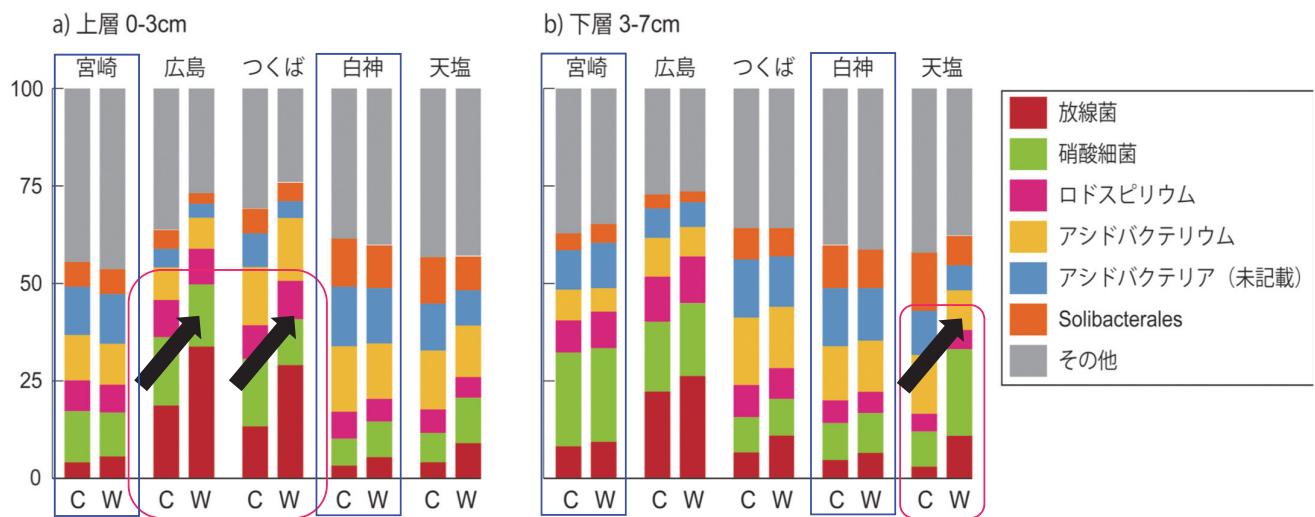
すべてのサイトにおいて温暖化区と非温暖化区で土壤微生物量に有意差はなし。

日本の森林生態系においては、他地域の森林生態系で報告されるような温暖化に伴う微生物量の減少は生じていない。

20

結果②: 土壤微生物グループ(目レベル)の出現頻度の比較

各サイトにおいて、土壤層ごとに温暖化区と非温暖化区における土壤微生物グループ(目レベル)の出現頻度を比較



自然林(宮崎および白神山地)では温暖化に対応した特定の土壤微生物グループの増加・減少はなし。

二次林(広島&つくば)および人工林(天塩温暖化)では、特定の土壤層において温暖化に対応した放線菌・硝酸細菌の有意な増加。

21

結果③: 土壤微生物活性の比較

温暖化が土壤微生物活性に及ぼす影響を明らかにするため、RNAseqを用いて、温暖化区および非温暖化区で土壤微生物群集における遺伝子発現量を比較。

遺伝子機能	非温暖化区			温暖化区			遺伝子発現量 (リード数)
	ChC03	ChC08	ChC09	ChW10	ChW11	ChW12	
cell division protease FtsH	1101.3	1676.0	197.0	13237.9	11070.0	41946.7	25,000 <
ATP-dependent helicase HrpB	318.3	4214.8	6605.0	24409.2	16790.5	76034.6	20,000 ~ 25,000
GMP synthase (glutamine-hydrolysing)	323.3	141.6	52.1	12601.2	6.7	14216.5	15,000 ~ 20,000
acyl-CoA thioesterase	10.1	3.3	0.0	1895.0	8.9	16309.9	10,000 ~ 15,000
4-oxalomesaconate hydratase	20.2	668.4	2410.2	30145.6	14041.4	9910.4	5,000 ~ 10,000
collagen, type I, alpha	2051.1	1876.9	2311.7	4929.3	17499.5	37202.9	< 5,000
eukaryotic-like serine/threonine-protein kinase	5451.0	2216.1	13980.5	2066.7	889.0	20803.6	
adenylosuccinate synthase	50.5	11314.2	1657.0	282.1	11.1	15214.1	
two-component system, OmpR family, response regulator	33761.8	64157.4	72034.9	78472.5	198317.4	125646.4	
multiple sugar system permease protein	2935.1	9601.9	40655.4	23331.2	4638.2	4743.8	
anaerobic nitric oxide reductase transcription regulator	39652.3	11001.3	49230.3	19491.0	462.3	25249.6	
homoserine dehydrogenase	3470.6	19994.0	28256.6	4010.5	268.9	10762.1	
elongation factor Tu	11897.2	55790.4	7943.4	7607.6	4442.7	61457.8	
carbamoyltransferase	14155.4	1389.6	29757.2	30634.4	7507.4	5443.6	
exodeoxyribonuclease VII large subunit	16858.2	5449.6	12004.8	8317.0	2146.9	74000.7	
cold shock protein	2692.7	7392.4	33459.4	265.3	31.1	1304.3	
DNA-directed RNA polymerase subunit beta	11730.5	5890.9	4785.7	100.5	80.0	375.2	
lysyl-tRNA synthetase, class II	80.8	533.4	10220.3	69.8	160.0	104.2	
galactonate dehydratase	13054.1	8999.3	53720.5	25.1	6.7	181.7	
glutathione-specific gamma-glutamylcyclotransferase	2899.8	30817.6	10052.3	58.6	35.6	303.7	
tRNA Pro	14342.3	3197.3	19334.1	829.5	57.8	1566.4	
cold shock protein	30361.8	11373.4	16599.4	8.4	2.2	53.6	

温暖化サイトにおいては、特定の土壤微生物の運動やセルロースの分解に係る遺伝子発現が増加。一方、非温暖化サイトにおいては、低温下における生存に必須な低温ショック蛋白に係る遺伝子発現。

温暖化サイトにおいては、微生物による有機物の分解が促進

22

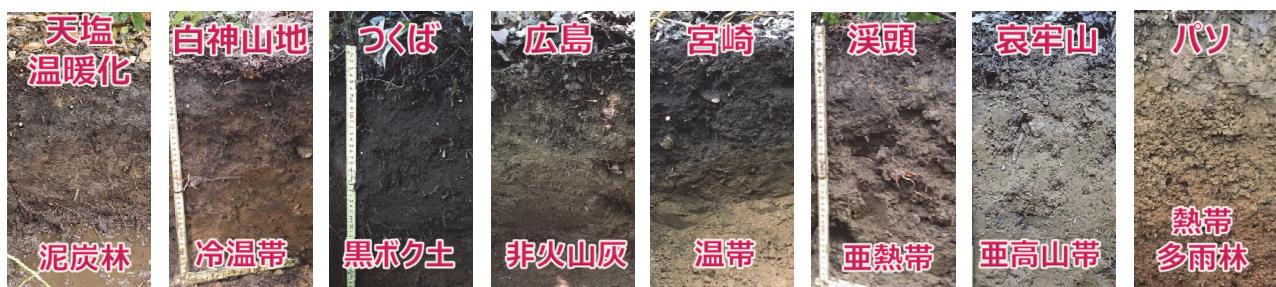
サブ4: 放射性炭素(¹⁴C)を用いた各森林生態系における有機炭素の蓄積及び分解のタイムスケールの評価

H29年度	H30年度	H31(令和元)年度
<p>1. サブテーマ1と2と連携をしながら、チャンバーネットワークにおける国内の代表的な生態系における土壤や土壤呼吸ガスのサンプリングを早急に開始し、土壤有機炭素の分画と¹⁴C同位体比分析を組み合わせた手法により、有機炭素の分解性や蓄積プロファイルの地域特性を把握する。</p> <p>2. 得られた解析結果を、各サブテーマ、特にサブテーマ1と2に提供し、温暖化効果の長期持続メカニズム(サブテーマ1)および土壤呼吸の地域特性(サブテーマ2)の解明に貢献する。</p>	<p>1. サブテーマ1と2と連携をしながら、放射性炭素(¹⁴C)のトレーサー利用法を用いた土壤有機炭素の蓄積プロファイルの定量評価を海外サイトで展開する。特に、温暖化処理の有無による¹⁴C動態の変化に注目し、温暖化の有機炭素分解への影響を把握する。</p> <p>2. 学会発表・論文公表などを通して、研究成果を世界に発信する。</p> <p>3. 解析結果を、各サブテーマに提供し、温暖化効果の長期持続メカニズムおよび土壤呼吸の地域特性の解明に貢献する。</p>	<p>1. サブテーマ1および2と連携をしながら、放射性炭素(¹⁴C)トレーサー法を用いて、生態系特性の異なるサイトごとに土壤有機炭素の蓄積プロファイルを解明する。</p> <p>2. 温暖化処理の有無による¹⁴C動態の違いから、温暖化が有機炭素分解のタイムスケールにどのように影響を及ぼすかなどのメカニズムや、それに関連するパラメータ情報を提供することで、サブテーマ1と2のモデル評価に貢献する。</p>

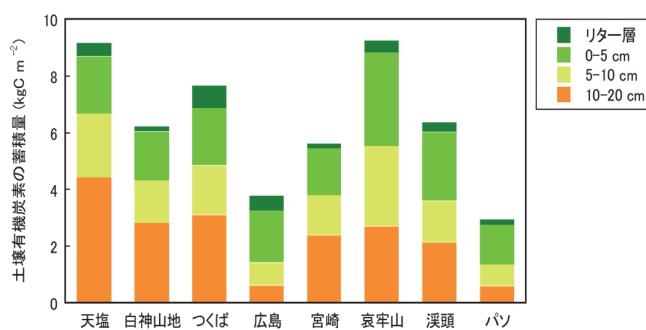
目的: 土壤有機物の¹⁴Cを分析することで、異なる地域での土壤有機炭素の分解特性や蓄積プロファイル、特に土壤有機炭素分解に対する温暖化効果の長期持続メカニズムの解明を行う。

23

結果①: 土壤有機炭素の蓄積及び代謝回転の地域差を定量解明

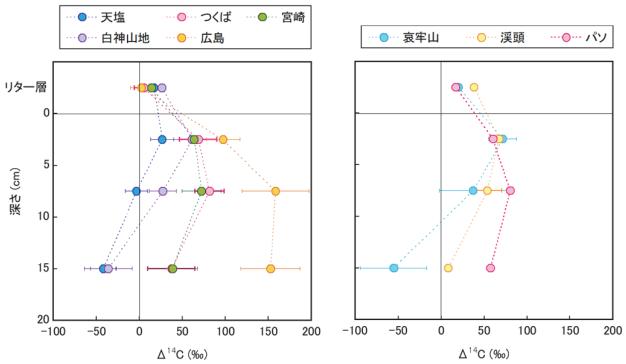


① 土壤有機炭素の蓄積量や深さ分布がサイトによって大きく異なる



蓄積量は泥炭林、黒ボク土、亜高山帯で大きく、非火山灰土、熱帯多雨林で少ない。

② 土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値(代謝回転の指標)もサイトによって大きく異なる

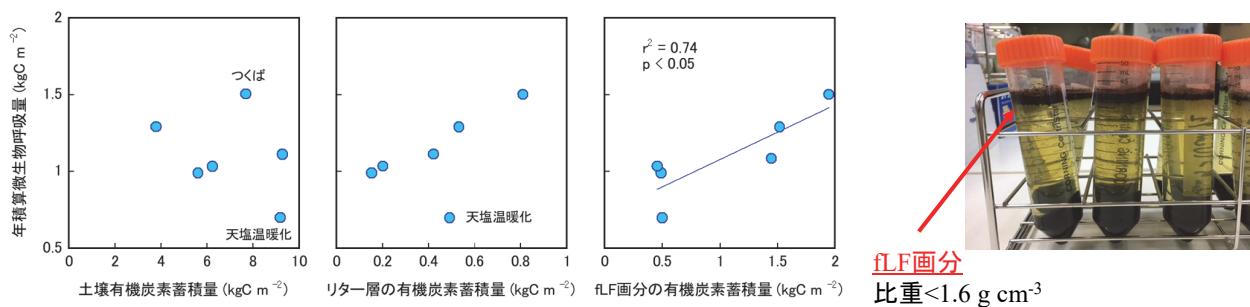


泥炭林、冷温帯、亜高山帯で代謝回転が遅く、非火山灰土で代謝回転が速い。

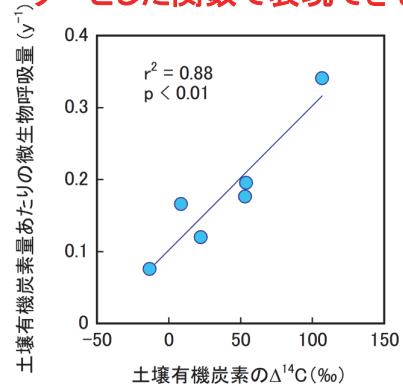
24

結果②: 微生物呼吸量を規定する土壤有機炭素特性の抽出に成功

- ① 微生物呼吸量は、土壤有機炭素の全蓄積量では説明できず、土壤有機炭素のうち分解しやすい成分(リター、粒子状有機炭素(fLF画分))の蓄積量と正の相関



- ② 微生物呼吸量は、土壤有機炭素の蓄積量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値(代謝回転の指標)をパラメータとした関数で表現できることを初めて発見



左図の明瞭な相関関係に基づいて、微生物呼吸量の推定式を導出することに成功:

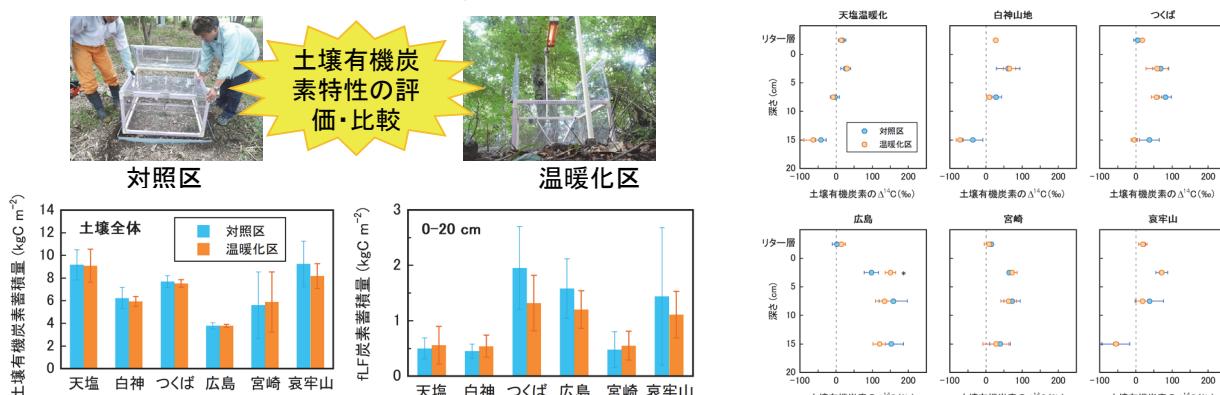
$$R_h = (0.106 + 0.00151 \times \Delta^{14}\text{C}) \times \text{SOC}$$

この推定式を用いることで、任意のサイトに対して、年間を通じた土壤呼吸量の連続観測を行うことなく、微生物呼吸量を推定することが可能となり、土壤呼吸予測モデルの高度化と広域評価への道が拓かれた。

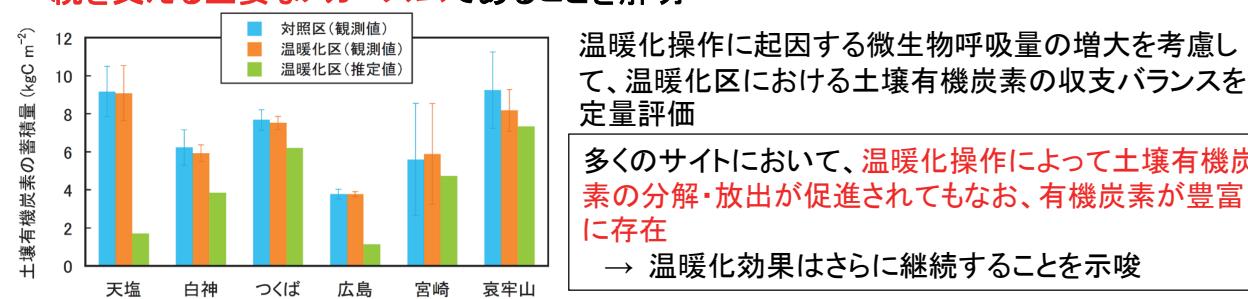
25

結果③: 温暖化効果が長期に持続するメカニズムを解明

- ① 長期温暖化操作(6~12年間)は土壤有機炭素特性(蓄積量、 ^{14}C を指標とした代謝回転のタイムスケールなど)に変化をもたらしていないことを初めて解明



- ② アジアモンステン域における豊富な土壤有機炭素の蓄積が、温暖化効果の長期持続を支える主要なメカニズムであることを解明

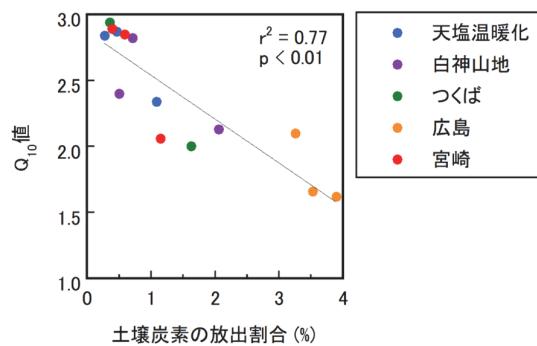


26

結果④: 土壤有機炭素分解の温度応答特性(Q_{10})を評価

① 土壤の培養実験を駆使して、土壤有機炭素分解の温度応答特性を評価

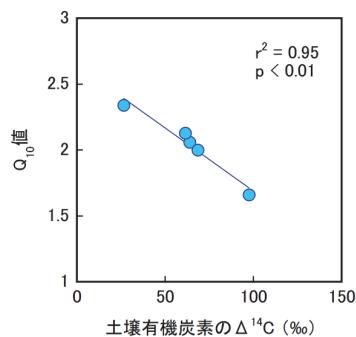
20°Cと30°Cで100日間培養し、CO₂放出量を測定



$$Q_{10} = (\text{CO}_2 \text{放出量}@30^\circ\text{C}) / (\text{CO}_2 \text{放出量}@20^\circ\text{C})$$

Q_{10} 値は、土壤炭素の放出割合が低い(易分解性有機炭素の存在量が少ない)ほど高い。

② 温暖化に対する土壤有機炭素の応答を予測する上でキーパラメーターとなる Q_{10} 値を、土壤有機炭素特性(¹⁴C)に基づいて推定できる可能性を見出した



Q_{10} 値は、土壤炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値が低い(代謝回転が遅い)ほど高い。

→ 酵素反応速度理論(Davidson and Janssens, Nature 2006)と定性的に整合

Q_{10} 値を土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値をパラメーターとして表現:

$$Q_{10} = 2.64 - 0.0095 \times \Delta^{14}\text{C}$$

妥当性・有効性のさらなる検証が必要であるが、**土壤呼吸の温暖化応答の将来予測と広域評価の高精度化につながる新知見**

27

プロジェクト共通データベース (サブテーマ間の連携)

サブテーマ1

サブテーマ3

サブテーマ4

温暖化サイト: Site	サイト年平均気温(°C) ()内は 2017年値		サイト年降水量(mm) ()内は 2017年値		R_{10} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Q_{10} (亜高山帯で高い)	温暖化効果 (長期間維持)	微生物バイオマス ($\times 10^{11}$ gene copy/g soil)	出現頻度に有意差が見 られた微生物種 (属レベル) 放線菌の増加	微生物種数 (属数)	$\Delta^{14}\text{C}(\%)$ サイト毎に散差が大きくなる		有機炭素の平均滞留 時間(年)	有機炭素貯留量(20 cmまで) kgC m ⁻² (原 研)			
	対照区	温暖化区	対照区	温暖化区							対照区	温暖化区	対照区	温暖化区			
北海道天塩	5.5 (5.6)	1115 (1132)	2.49	3.86	2.60	2.93	38.0	2.42	1.35	硝酸菌(増)	207.5	194.1	28.0 13.8 -15.3 -51.9	9.8 28.9 -5.3 -70.6	1 266 399 632	0.5 1.8 348 774	0.6 2.0 2.2 5.6
白神山地	8.4	2579 (2649.5)	2.61	3.02	2.71	2.28	12.9	1.34	1.04	—	206.9	219.9	26.4 33.7 44.6 -5.7	24.9 47.0 6.4 -61.3	5 7 9 or 172 350	5 9 or 166 295 702	0.3 1.7 1.6 3.1
関東	13.8 (14.3)	1283 (1201)	2.20	2.11	2.45	2.16	5.1	1.19	1.08	放線菌(増)	217.7	223.4	16.3 69.0 84.9 10.7	13.3 23.8 44.4 -14.3	3 12 5 -14.3	2 5 1.9 2.8	1.0 1.9 1.7 2.7
西日本	13.5 (13.4)	1446 (1348.5)	1.79	1.99	2.95	2.51	10.6	0.81	1.31	放線菌(増)	199.7	178.0	14.9 84.2 202.8 192.2	23.8 167.6 146.6 116.5	NA NA NA NA	NA NA NA NA	NA NA NA NA
九州宮崎	17.4 (16.2)	2509 (2721.5)	1.17	1.27	2.76	2.34	12.2	0.55	0.67	—	217.3	224.4	17.6 69.4 97.1 52.7	-24.0 78.1 71.9 18.5	3 12 14 or 107 17 or 81 117 153 249	NA NA NA NA 1.7 3.0	NA NA NA NA 2.2 3.6
雲南麗江	9.1 (7.1)	1160 (26.5%)	1.41	2.08	3.77	2.86	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
雲南袁牢山	11.0 (11.2)	1980 (36.5%)	1.99	1.51	4.37	5.45	8.4	1.94	3.16	/	/	/	/	/	/	/	/

サブテーマ2

通常観測サイト: Site	サイト年平均気温(°C)		サイト年降水量(mm)		R_{10} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	根呼吸の寄与	Q_{10}	温暖化効果	微生物バイオマス	優占していた微生物種	微生物種数		$\Delta^{14}\text{C}(\%)$	有機炭素の平均滞留 時間(年)	有機炭素貯留量(20 cmまで) kgC m ⁻² (原 研)	
	根切り区	無処理区	根切り区	無処理区							根切り区	無処理区	根切り区	無処理区	サイト内	サイト内
天塩Flux	5.5 (5.7)	1115 (951)	1.65	4.50	2.13	1.94	/			/	/	/	/	/	/	/
苦小牧	7.5 (6.8)	1228 (1484.5)	1.53	1.84	2.21	2.19	/			/	/	/	/	/	/	/
富士北麓	8.6 (8.3)	1848 (1735.1)	1.91	1.40	2.70	2.64	/			/	/	/	/	/	/	/
台湾	15.9 (15.3)	2538 (2799.5)	1.97	1.98	2.56	2.70	/		1.24	/	/	/	/	/	/	/
マレーシア	25.3		/	/	/	/			1.30							

28

土壤呼吸を広域評価するためのモデルの検討

従来の土壤呼吸モデル(サイトベースの半経験式)：広域評価する際、地温(T_{soil})の代わりにMODIS衛星によって求めた地球表面温度や、土壤水分の代わりに月平均降水量をパラメーターとした関数を用いることが一般的。

$$R_s = R_{10} \times e^{a(T_{soil}-10)} \quad \text{関数: 温度だけ}$$

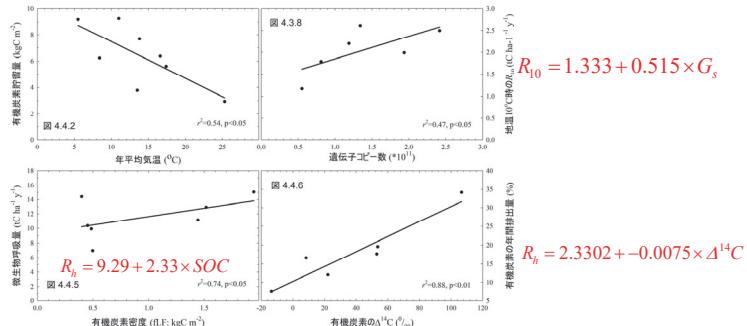
$$R_s = R_{10} \times e^{a(T_{soil}-10)} \left[1 - \left(1 - \frac{\text{water}}{b} \right)^2 \right] \quad \text{関数: 温度・土壤水分}$$

【課題】モデルの様々な土壤に対する適用可能性は不明であり、広域評価を高精度で行うことが困難

本研究のサブテーマ1と2における観測によれば、以下の土壤水分を考慮したアレニウス式がアジアモンスーン域の森林土壤呼吸に最も適合することが分かった。

$$R_s = R_{10} \times e^{\frac{E_0}{283.13-T_0} \left(\frac{1}{T-T_0} \right)} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\theta}{b} \right)^2 \right]$$

また、**サブテーマ3と4**は、以下のような土壤呼吸と土壤(粒子状)有機炭素(SOC(fLF))、土壤微生物バイオマス(遺伝子コピー数)及び土壤有機炭素 ^{14}C との関係を明らかにした。



【本研究の成果】アジアの様々な森林土壤に適用可能な新しい土壤呼吸モデルを提案

$$R_s = R_{10} (SOC, G_s, A^{14}\text{C}) \times e^{\frac{E_0}{283.13-T_0} \left(\frac{1}{T-T_0} \right)} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\theta}{b} \right)^2 \right] \Rightarrow \ln R_s = \ln R_{10} + E_0 \left(\frac{1}{56} - \frac{1}{T-T_0} \right) + \ln \left[1 - \left(1 - \frac{\theta}{b} \right)^2 \right] + \ln SOC + \ln G_s + \ln A^{14}\text{C}$$

29

研究業績

(1) 誌上発表<論文(査読あり)>(5件掲載、1件印刷中)

- L. SUN, K. TAKAGI, M. TERAMOTO, S. HAYAKASHI and N. LIANG: J. Agric. Meteorol., (in press).
- L. SUN, T. HIRANO, T. YAZAKI, M. TERAMOTO and N. LIANG: Plant and Soil, 446, 471-486 (2020).
- M. TERAMOTO, N. LIANG, Y. TAKAHASHI, J. ZENG, N. SAIGUSA, R. IDE and X. ZHAO: Agric. For. Meteorol., 274, 106-117 (2019).
- H. NAGANO, M. ATARASHI-ANDOH and J. KOARASHI: Soil Sci. Plant Nutr., 65, 525-533 (2019).
- M. TERAMOTO, N. LIANG, M. S. ISHIDA and J. ZENG: J. Geophys. Res. Biogeosci., 123, 1161-1177 (2018).
- M. TERAMOTO, N. LIANG, J. ZENG, N. SAIGUSA and Y. TAKAHASHI: Agric. For. Meteorol., 247, 194-206 (2017).

(2) 国際学会口頭発表(22件)

- N. LIANG, et al. The 2nd International Workshop on Response and Adaptation of Terrestrial Ecosystem Carbon, Nitrogen and Water Cycles to Climate Change. Yunnan, China, 2019
- J. KOARASHI, et al. The 2nd International Workshop on Response and Adaptation of Terrestrial Ecosystem Carbon, Nitrogen and Water Cycles to Climate Change. Xishuangbana, China, 2019
- M. TERAMOTO, et al. AsiaFlux Workshop 2019, Takayama, Japan, 2019
- K. TAKAGI, et al. The 2nd International Workshop on Response and Adaptation of Terrestrial Ecosystem Carbon, Nitrogen and Water Cycles to Climate Change. Yunnan, China, 2019
- X. ZHAO, et al. OzFlux-AsiaFlux Conference 2018, Darwin, Australia, 2018
- N. LIANG, et al. The 8th East Asian Federation of Ecological Societies (EAFES) International Congress, Nagoya, Japan, 2018
- K. TAKAGI, et al. The 8th East Asian Federation of Ecological Societies (EAFES) International Congress, Nagoya, Japan, 2018
- M. TERAMOTO, et al. Japan Geoscience Union Meeting 2018, Chiba, Japan, 2018
- N. LIANG, et al. 2018 International Long-Term Ecological Research Network (ILTER) & 12th International Long-Term Ecological Research - East Asia-Pacific Regional Network (ILTER-EAP) Joint Conference, Taichung, Taiwan, 2018
- K. TAKAGI, et al. 2018 International Long-Term Ecological Research Network (ILTER) & 12th International Long-Term Ecological Research - East Asia-Pacific Regional Network (ILTER-EAP) Joint Conference, Taichung, Taiwan, 2018
- T. KONDO, et al. 2018 International Long-Term Ecological Research Network (ILTER) & 12th International Long-Term Ecological Research - East Asia-Pacific Regional Network (ILTER-EAP) Joint Conference, Taichung, Taiwan, 2018

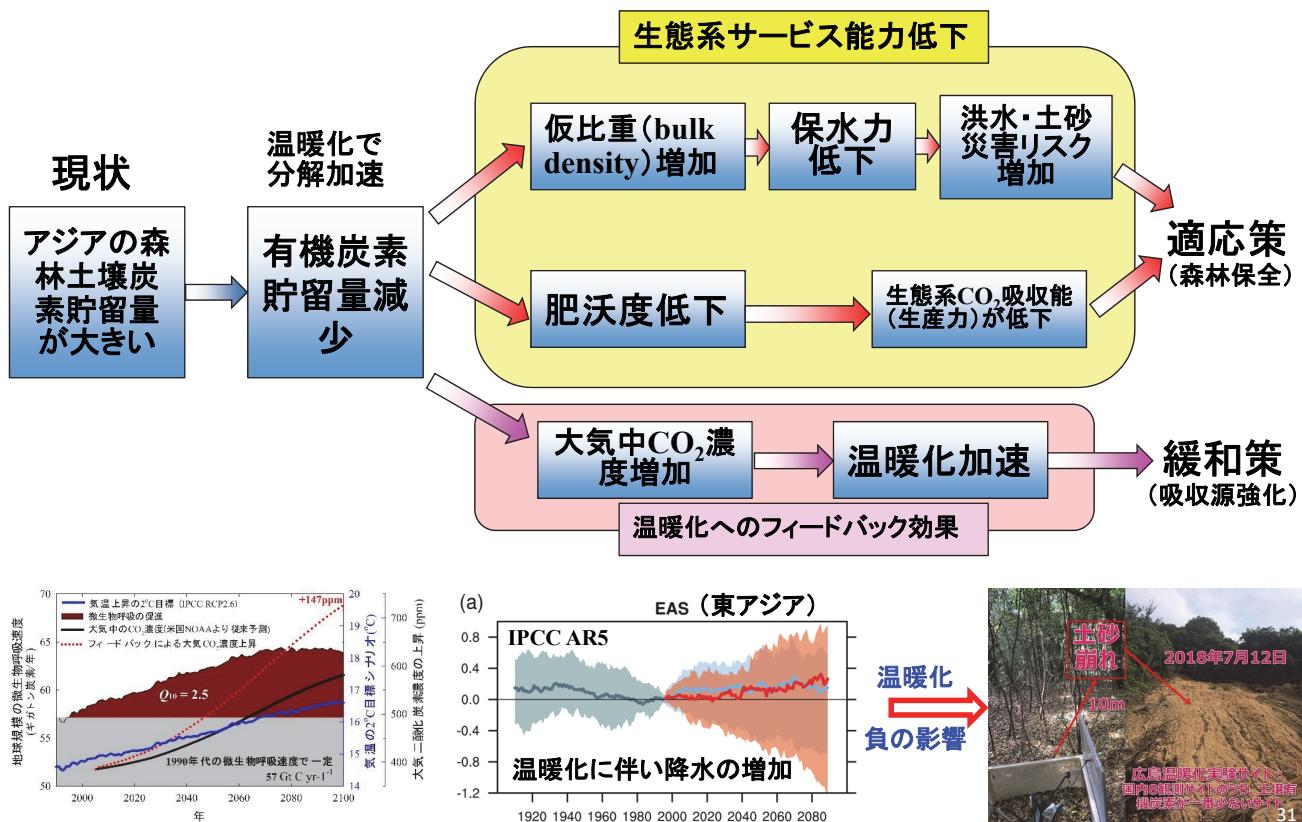
(3) 国内学会口頭発表(19件)

- 高木健太郎、梁乃申、M. AGUILOS、K. RYHTI、寺本宗正、孫力孫、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子: 第67回日本生態学会大会 (2020)
- 小嵐淳、安藤麻里子、高木健太郎、近藤俊明、寺本宗正、永野博彦、國分陽子、高木正博、石田祐宣、平館俊太郎、梁乃申: 第67回日本生態学会大会 (2020)
- 近藤俊明、寺本宗正、高木健太郎、小嵐淳、安藤麻里子、高木正博、石田祐宣、梁乃申: 第67回日本生態学会大会 (2020)
- 寺本宗正、近藤俊明、梁乃申、曾繼業、中根周歩、小嵐淳、安藤麻里子、荒巻能史、富松元、趙忻: 第67回日本生態学会大会 (2020)
- 高木健太郎、小池孝良、笛賀一郎、M. AGUILOS、梁乃申、高橋幸善、三枝信子、藤沼康実: 日本農業気象学会2020年全国大会 (2020)
- 富松元、梁乃申: 第66回日本生態学会 (2019)
- 寺本宗正、梁乃申、曾繼業、X. ZHAO、富松元: 第130回日本森林学会大会 (2019)
- 梁乃申、高橋幸善、寺本宗正、趙忻、富松元、高木健太郎、平野高司、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、石田祐宣、高木正博: 第130回日本森林学会大会 (2019)
- 近藤俊明、寺本宗正、高木健太郎、小嵐淳、安藤麻里子、高木正博、石田祐宣、梁乃申: 第130回日本森林学会全国大会 (2019)
- 小嵐淳、安藤麻里子、高木健太郎、近藤俊明、寺本宗正、永野博彦、國分陽子、高木正博、石田祐宣、平館俊太郎、梁乃申: 第130回日本森林学会全国大会 (2019)
- 孫力孫、高木健太郎、梁乃申、寺本宗正、平野高司、矢崎友嗣、崔銳: 日本農業気象学会2018年全国大会 (2018)

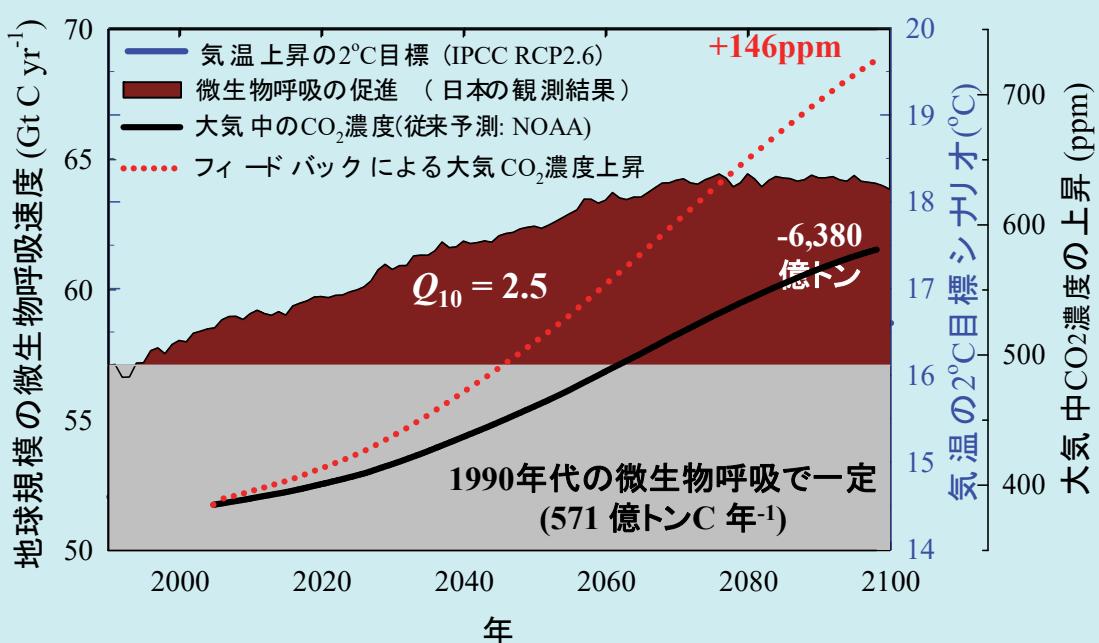
30

見込まれる環境政策への貢献

特徴：アジアモンスーン地域の森林は、生産性が高く、土壤有機炭素が豊富である。



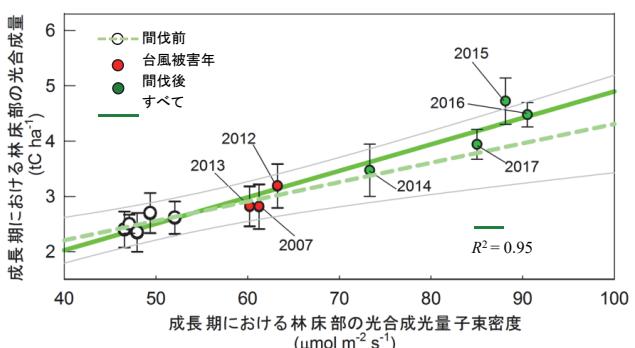
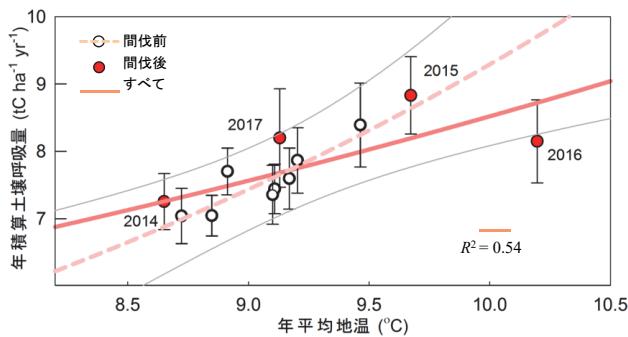
微生物呼吸促進のフィードバック効果による大気中CO₂の上昇
 Q_{10} の平均値：世界=2.0；日本(東アジア)=2.5～3.5



国内人工林の適応策への提言(成果の例)



富士北麓カラマツ林における15年間のチャンバー観測



・左図—土壤呼吸や微生物呼吸の年積算値は、地温が高い年に増加： 地温上昇に伴う年積算微生物呼吸量の増加率は $9.6\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

・右図—間伐による林床部で増加した光合成量は、林冠部で減少した光合成量の一部を補填した。



・過熟の人工林の適切な間伐は、森林生態系の正味のCO₂交換量に大きな影響を与えることなく、残存木の成長や自然林への転換に有効な手段であることが示唆された。

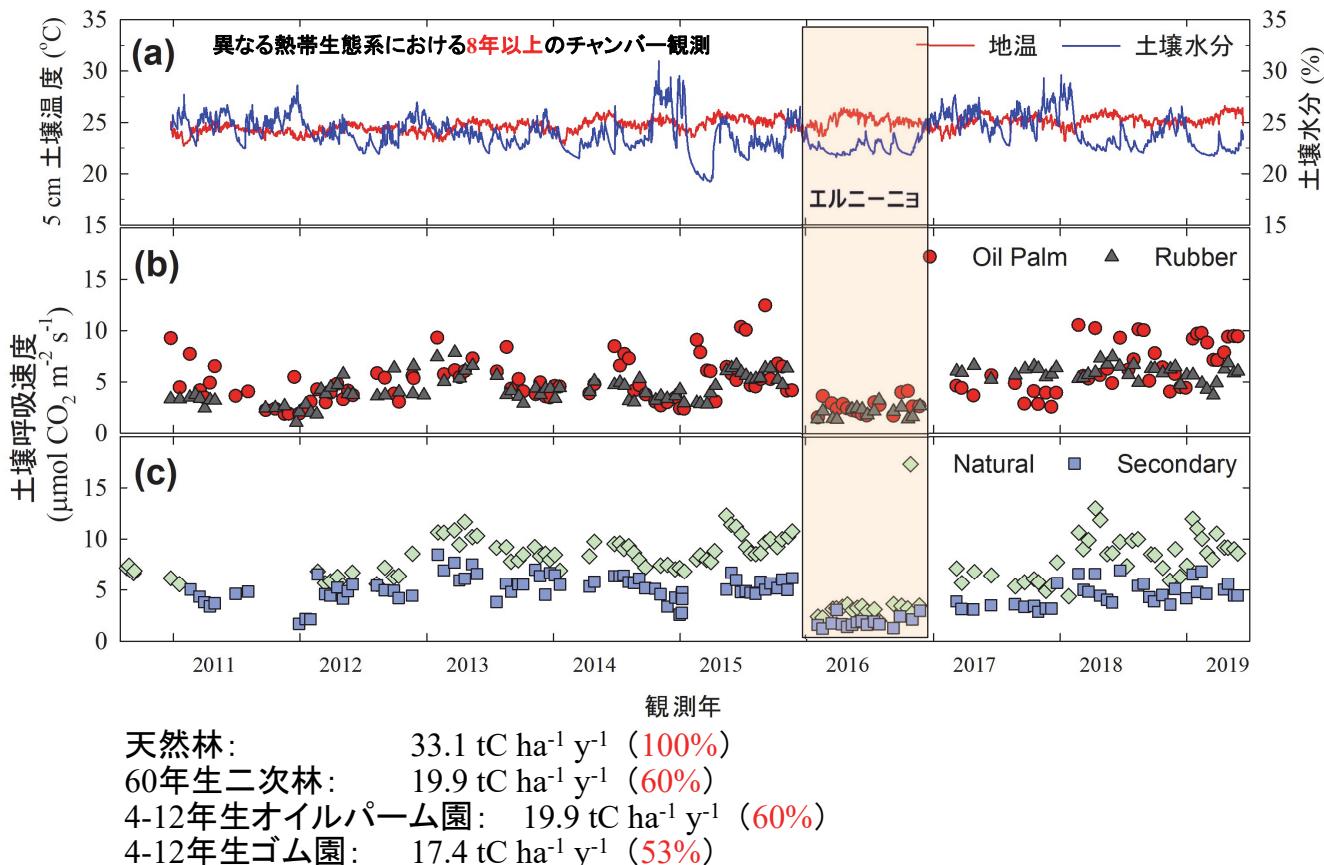
33

東南アジアの土地利用変化への警告 ～土壤呼吸の長期観測データから～



34

東南アジアにおける土地利用変化への警告



35

国際シンポジウム主催と国際連携



8th EAFES(名古屋、2018.4)
S1とS3二つのシンポジウム同時主催



2018 ILTER WS(台湾台中市、2018.10)で特別セッション主催



雲南サイトの担当者(中国科学院)と二回の国際WS共催(中国雲南省、2017.10と2019.5)



気候変動の緩和策と適応策に向けた熱帯生態系の持続管理に関する国際WS主催(2019.3、つくば)



NIES – FRIM MoU締結
(国立環境研究所とマレーシア森林研究所)

36

国内の学会におけるシンポジウムの主催



第130回日本森林学会(2019年3月、新潟)
シンポジウム:
「森林土壤は温暖化を加速するのか？」



3/5 (木、Thu) 17:00-20:00 Room I

S13 土壌有機炭素動態が今後の温暖化の鍵を握る

Dynamics of Soil Organic Carbon as a Key Process for Future Global Warming

企画者：梁乃申（国立環境研究所）・高木健太郎（北海道大学）・近藤俊明（国際農林水産業研究センター）
・寺本宗正（国立環境研究所）

Naishen LIANG (NIES) · Kentaro TAKAGI (Hokkaido Univ.) · Toshiaki KONDO (JIRCAS) ·
Munemasa TERAMOTO (NIES)

第67回日本生態学会 (2020年3月、名城大学) シンポジウム

土壤中には多くの有機炭素が含まれている。その有機炭素は微生物によって分解され、大気中に二酸化炭素として排出される（微生物呼吸）。植物根の呼吸も含めると、全陸域の土壤から1年間に排出される二酸化炭素（土壤呼吸）の量は、人為起源の排出量の10倍にも相当するとされる。微生物呼吸は温度の上昇に対して指数関数的に増加する性質を示すため、地球温暖化によって土壤呼吸が増加し、さらに温暖化を加速するという悪循環が懸念されている。しかしながら、温暖化に対する微生物呼吸の長期的な応答や、温暖化が土壤有機炭素の動態におよぼす影響に関してはまだ解明されていない部分が多く、温暖化の将来予測における大きな不確実性の原因となっている。これを明らかにし、将来予測に関する不確実性を低減するためには、様々な生態系における土壤呼吸や微生物呼吸の長期観測をはじめ、土壤有機炭素の分解特性に関する化学的

37



年一度の公開シンポジウム (市民講座)

公開シンポジウムin問寒別
問寒別
2017年10月30日



公開シンポジウムin東海村
2018年7月25日



広島市民講座(北広島町)
2019年12月7日



一般公開:つくば(2019年7月20日)

38

マスコミ等への公表・報道等



北大天塩研究林

土壤は温暖化を
加速するのか?
アシカの活動が影響
膨大な炭素の排出

発信・
観測

人と樹木の関係探る

天塩でのフラックス
観測

森林床部の「炭素収支」観測法を確立
世界に広げる視野、温暖化の予測に貢献

富士北麓カラマツ林における間伐影響に関する国際誌論文(Teramoto et al. 2019)の波及効果



トータル・プロジェクト・パートナー：新潟県環境・農林省農業・白神山地でも温暖化によって土壤から放出される二酸化炭素が確認される

発表ページ English
National Institute for Environmental Studies
弘前大学
温暖化で二酸化炭素増
5年分データ比較

白神山地
北大天塩
土壤で温暖化によって土壤から排出される二酸化炭素
酸化炭素が増加・長期の疑似温暖化実験で土壤有機物の分解が促進される
【お知らせ】

(気候研究会開催記者会、環境記者クラブ、福島記者会、弘前記者会同時配付)

2018年4月16日
環境研と弘前大学から共同でプレスリリース

白神山地における温暖化操作実験に関する国際誌論文
(Teramoto et al. 2018)の波及効果

陸奥新報・日刊・3面
(2018/04/17)

2018年(平成30年)4月17日 火曜日

白神山地
弘大石田助教ら検証
降雨日数も関係

白神山地の木々から秋より暖かい「温暖化」による土壤から
排出される二酸化炭素量が増加した。白神山地ほどの量が世界
で初めて確認された。石田助教（左）と白神山地の木々から秋より
暖かい「温暖化」による土壤から排出される二酸化炭素量が増加した。
白神山地の木々から秋より暖かい「温暖化」による土壤から排出される二酸化炭素量が増加した。白神山地ほどの量が世界で初めて確認された。石田助教（左）と白神山地の木々から秋より暖かい「温暖化」による土壤から排出される二酸化炭素量が増加した。
白神山地の木々から秋より暖かい「温暖化」による土壤から排出される二酸化炭素量が増加した。白神山地ほどの量が世界で初めて確認された。石田助教（左）と白神山地の木々から秋より暖かい「温暖化」による土壤から排出される二酸化炭素量が増加した。

東奥日報・日刊・19面 (2018/04/17)

国際貢献: アジア地域におけるリーダーシップの発揮

