

アジア地域におけるチャンバー観測ネットワークの活用による
森林土壌CO₂フラックスの定量的評価
(所内公募型提案研究)

Evaluation of Soil CO₂ Efflux of Asian Forest Ecosystems
based on an Automated Chamber Network

平成27～29年度
FY2015～2017

NIES



国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第132号

NIES Research Project Report, No.132

SR-132-2018

アジア地域におけるチャンバー観測ネットワークの活用による
森林土壌CO₂フラックスの定量的評価
(所内公募型提案研究)

Evaluation of Soil CO₂ Efflux of Asian Forest Ecosystems
based on an Automated Chamber Network

平成27～29年度
FY2015～2017

所内公募型提案研究「アジア地域におけるチャンバー観測ネットワークの活用による
森林土壌 CO₂ フラックスの定量的評価」
(期間：平成 27 年～ 29 年度)

課題代表者：梁 乃申

執 筆 者：梁 乃申、寺本宗正、荒巻能史、仁科一哉、高橋善幸

編 者：梁 乃申

序

本報告書は、平成 27～29 年度の 3 年間で実施した、所内公募型提案研究 (A)「アジア地域におけるチャンバー観測ネットワークの活用による森林土壌 CO₂ フラックスの定量的評価」(課題代表者：梁乃申) の研究成果をとりまとめたものです。

陸域生態系、特に森林は、多量の二酸化炭素を光合成によって吸収しています。一方で、土壌中には落葉・落枝・枯死木・枯死根などに由来する有機物(有機炭素)が多く蓄積されています。特に、欧米に比べ、日本を中心としたアジアモンスーン地域は降水量が多く、植物の生育に適した湿潤な環境にあるため、陸域生態系は高い生産性を示し、土壌有機炭素の量が多い傾向が見られます。この有機炭素を土壌中の微生物が分解するため、土壌からは多量の二酸化炭素が排出されています(これを土壌微生物呼吸と呼びます)。世界全体の土壌が 1 年間に排出する二酸化炭素の量は、人間活動によって排出される年間二酸化炭素量の約 10 倍と推定されています。これまで光合成による二酸化炭素の吸収量が、微生物呼吸を含む排出量を上回っていたため、世界の多くの森林は二酸化炭素の吸収源として機能してきました。ところが、微生物呼吸は温度の上昇によって顕著に増加する性質があるため、地球温暖化に伴って今後増加し、森林生態系が炭素の吸収源から排出源に転換してしまう可能性があります。それを検証するには、土壌微生物呼吸に関する高精度な長期連続観測データが不可欠ですが、その様なデータは非常に限られており、とりわけ、今後の気候変動予測に重要な、アジアモンスーン地域における観測データが圧倒的に不足しています。気候変動の将来予測に関して精度向上を図るためには、温暖化や攪乱(自然攪乱および人為攪乱)が土壌微生物呼吸におよぼす影響を明らかにすることが鍵になります。

本研究では、国立環境研究所地球環境研究センターが開発した世界最大規模の大型自動開閉チャンバー式土壌呼吸観測ネットワーク(チャンバー観測ネットワーク)で集めた長期連続観測データを基に、温暖化を含む自然攪乱や人為攪乱が土壌微生物呼吸におよぼす影響を定量的に評価しました。本研究から得られた知見を、気候変動に関する将来予測の精緻化に活用していただければ幸いです。

また、本研究にご協力頂いた、研究所内外全ての方々に、厚くお礼申し上げます。

平成 30 年 10 月

国立研究開発法人 国立環境研究所

理事長 渡 辺 知 保

目 次

1	研究の概要	1
1.1	研究全体の目的、目標、構成等	1
1.2	研究の概要	1
2	研究の成果	2
2.1	サブテーマ1 チャンバーネットワークを活用した林床部炭素フラックスの長期観測	2
2.1.1	目的と経緯	2
2.1.2	方法	2
2.1.3	結果と考察	9
2.1.4	まとめ	32
2.2	サブテーマ2 土壌有機物の ¹⁴ Cに関する分析	34
2.2.1	目的と経緯	34
2.2.2	方法	34
2.2.3	結果と考察	35
2.2.4	まとめ	38
2.3	サブテーマ3 モデルによる広域推定	39
2.3.1	目的と経緯	39
2.3.2	方法	39
2.3.3	結果と考察	41
2.3.4	まとめ	44
[資 料]		
1	研究の組織と研究課題の構成	47
1.1	研究の組織	47
1.2	研究課題と担当者	47
2	研究成果発表一覧	48
2.1	誌上発表	48
2.2	口頭発表	50

1 研究の概要

1.1 研究全体の目的、目標、構成等

温暖化に伴って、森林生態系がCO₂の吸収源として機能し続けるのか、放出源に転換するのかという点に関する知見は、依然憶測の域を出ていない。そこで、本研究では、北海道の最北端から本州・九州・台湾・中国及び赤道付近のマレーシアに沿った広域トランセクトを設定し、代表的な冷温帯林・温帯林・亜熱帯林及び熱帯多雨林において、(1) 国立環境研究所地球環境研究センター (CGER) が開発・推進している世界最大規模の大型自動閉鎖チャンバー式土壌呼吸観測ネットワーク (チャンバー観測ネットワーク) を用いた土壌呼吸の連続測定を実施する。さらに、気候変動や台風・伐採・土地利用変化などの攪乱が陸域生態系炭素循環に与える影響を、異なる代表地域において定量的に把握する。(2) 一部のサイトにおいて赤外線ヒーターを用いた温暖化操作実験を行うとともに、土壌有機物の¹⁴C分析から、土壌の画分毎の有機炭素の蓄積歴及び分解のタイムスケールを検出する。それによって、異なる地域での土壌有機炭素の蓄積プロファイル及び長期的な温暖化環境下での分解メカニズムを解明する。(3) 陸域生態系モデル VISIT に多面的かつ整合性の高い土壌呼吸データを適用し、アジアを中心としたグローバルな陸域炭素循環の推定及び将来予測の高度化を図る。上記 (1) ~ (3) を、本研究の目的とする。

【達成目標】：

- (1) 北海道の最北端 (北緯 45°) から本州・九州・台湾・中国及び赤道付近のマレーシア (北緯 2°) までの広域トランセクトを網羅する多様な森林生態系において、代表的な冷温帯林・温帯林・亜熱帯林及び熱帯多雨林における土壌有機炭素動態を統一した手法から明らかにする。
- (2) 北海道の苫小牧と天塩の森林 CO₂ フラックス観測地において、これまで長期的に観測されている土壌呼吸量データから、自然的攪乱 (苫小牧：台風) と人為的攪乱 (天塩：皆伐、富士北麓：間伐) の影響を評価するとともに、土壌有機物分解速度に影響する環境因子の応答特性を検出する。また、台湾南部のサトウキビ畑から植林に転換したサイト及びマレーシア半島部における観測により、アジアモンスーン地域における土地利用変化が、CO₂/CH₄ 放出に与える影響の評価を行う。
- (3) 多面的な実観測データに基づいて、生態系や地域ごとに土壌炭素放出の温度・水分・植生応答メカニズムを解明する。さらに、温暖化に際して、アジアを中心としたグローバルな森林生態系が今まで以上に吸収源として機能するのか、逆に放出源に転換するのかという議論に関し、陸域生態系モデル VISIT を用いて定量的な評価を行う。
- (4) チャンバーネットワークによる海外における観測体制の維持にあたっては、現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、日本のアジア地域におけるイニシアティブを発揮する。
- (5) 上述した観測データやモデル結果に基づいて、今後の生態系および生物多様性の保全や気候変動緩和策、MRV、REDD++ などの環境政策を策定する上での基礎的なデータを提供する。

1.2 研究の概要

北海道の最北端 (北緯 45°) から本州・九州・台湾・中国及び赤道付近のマレーシア (北緯 2°) までの代表的な冷温帯林・温帯林・亜熱帯林及び熱帯多雨林において、これまで構築してきたチャンバー観測ネットワークを活用し、土壌呼吸の連続測定を行う。それによって、気候変動や台風・伐採・土地利用変化などの攪乱が、異なる地域の森林生態系炭素循環に与える影響を定量的に把握する。また、一部のサイトにおいて温暖化操作実験を行い、長期的な温暖化環境下での土壌有機炭素の分解特性を地域的に解明する。また、放射性炭素 (¹⁴C) の分析を実施することで、土壌有機炭素の蓄積歴及び温暖化環境下での分解タイムスケールを地域的に検出する。これらの観測結果に基づき、陸域生態系モデル VISIT を用いて、アジアを中心としたグローバルな陸域炭素循環の推定及び将来予測の高度化を図る。

2 研究の成果

2.1 サブテーマ1 チャンバーネットワークを活用した林床部炭素フラックスの長期観測

2.1.1 目的と経緯

温暖化条件下では、気温の上昇に伴い土壌有機物分解（微生物呼吸）が促進されるという「正のフィードバック効果」により、大気中の CO₂ 濃度が従来の予測値より更に増加する可能性が懸念されている。しかしながら、現状の将来予測は不確実性が極めて大きく、予測の信頼性向上が望まれている。長期的な温暖化の進行に伴う土壌有機物の分解を予測するには、土壌中に数十年から数百年の時間をかけて蓄積された膨大な量の難分解性有機物の集積・分解の温暖化に対する応答の評価が重要となるが、その将来予測の検証に資する実測データは現時点では極めて限られたものしか存在しない。

本研究では、北海道の北部から九州南部の5つの代表的な森林サイトと、中国亜高山帯に位置する2つの森林サイトにおいて、赤外線照射による人工的な温暖化操作実験を実施し、長期的な温暖化環境下での土壌 CO₂ フラックスに関するデータを取得する。それによって、アジアモンスーン地域で絶対的に不足している、将来予測モデルの検証に必要な情報を提供することを目標の一つに掲げた。これらとは別に、自然環境下で集積された土壌呼吸の長期連続観測データから、自然攪乱（台風）・人為攪乱（皆伐、間伐および土地利用変化）の影響を検出し、林床部炭素フラックスに対する短期的な気候変動の影響の抽出を行う。これら実測データを利用し、日本を含むアジアモンスーン域の森林生態系における土壌呼吸速度の時空間変動に対する温暖化や攪乱の影響を、統合的に検討する。

2.1.2 方法

2.1.2.1 観測および解析手法

国内外の温暖化操作実験サイトにおける既存の観測システムを維持、もしくは発展させて、連続的かつ5-10秒間隔の高解像度の観測データを得た。すべての観測サイトにおいて、CGERが開発した、大型（縦90×横90×高さ50cm）マルチ自動開閉チャンバーシステムおよび赤外線ヒーターによる土壌昇温システム¹⁾を用いて観測を行った。12-20個のチャンバーは3処理区（根非除去区（図1a）、対照区（図1b）、温暖化区（図1c））に分けられており、全てコントロールボックス（図1d）に接続された上で制御されている。コントロールボックスは、CO₂分析計（LI-820; Li-Cor, Lincoln, NE, USA）、データロガー（CR1000; Campbell Scientific, Logan, UT, USA）、電磁弁マニホールド、真空ポンプなどから構成されている。各チャンバーの蓋には圧縮空気伸縮するシリンダが取り付けられており、測定する際には蓋が自動で閉まるようにコントロール基盤によって制御される。密閉されたチャンバー内のCO₂濃度の変化は、データロガーに記録される。各チャンバーについて、5-10秒間隔で数分間（2.5-4.0分）チャンバー密閉後のCO₂濃度の増加速度を記録し、土壌呼吸速度の算出に用いた。根の呼吸の影響を排除した微生物呼吸速度を評価するチャンバー（対照区および温暖化区）については、チャンバーの外周土壌を深さ40cmまでチェーンソーで切断し（根切り）、切断面に塩ビ板を挿入することにより、外部からの根の侵入を防いだ（図1b）。すべてのチャンバー内の地上25cmの気温と地下5cmの地温を、熱電対温度計を用いて計測した。一部のチャンバーについて、土壌水分（CS616; Campbell Scientific）を測定した。一部の根切りしたチャンバー上1.6mの位置にカーボン製の赤外線ヒーター（800W）を取り付け、チャンバー内部地下5cmの地温を約2.5℃上昇させた（図1c）。また、「転倒防止スイッチ」の開発により、ヒーターの転倒や傾き（約60度）、落下、または落枝などによる微弱な振動を受けた場合、電源が自動的に落ちる機能が備わったため、安全に観測を行うことが可能となっている。

土壌呼吸速度 (R_s , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) や微生物呼吸速度 (R_h , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は、(1)式を用いて算出した。

$$R_s \text{ or } R_h = \frac{P_0 V}{RS(T + 273.15)} \text{slope}_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は大気圧 (Pa)、 V はチャンバー体積 (m^3)、 R は気体定数 ($8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、 S はチャンバー底面積 (m^2)、 T はチャンバー内気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 $\text{slope}_{\text{CO}_2}$ は測定時間内 (2.5-4.0分) における CO_2 上昇勾配である。すべてのサイト、チャンバーについて統一したプログラムで解析を行った。



図1 温暖化操作実験サイトに設置されたシステムの概要
 (a) 根非除去区、(b) 対照区、(c) 温暖化区、(d) コントロールボックス

また、温暖化操作実験を行っていない富士北麓カラマツ林サイトおよび苫小牧カラマツ林跡地サイトでは、高さ 50 cm のチャンバーを根非除去区、根切り区に設置して土壌呼吸および微生物呼吸の観測を行っている他、林床植生を含む植物チャンバーを設置し、林床部における CO_2 の交換量を観測している^{2,3)}。植物チャンバーの高さは、富士北麓カラマツ林サイトでは 100 cm (図 2a)、苫小牧カラマツ林跡地サイトでは 150 cm (図 2b) である。植物チャンバーによる観測から、(2) 式に基づいて、林床部呼吸量 (R_{u}) および林床部総生産量 (GPP_{u}) を算出することが可能である⁴⁾。

$$\text{GPP}_{\text{u}} = R_{\text{u}} - \text{NUE} \quad (2)$$

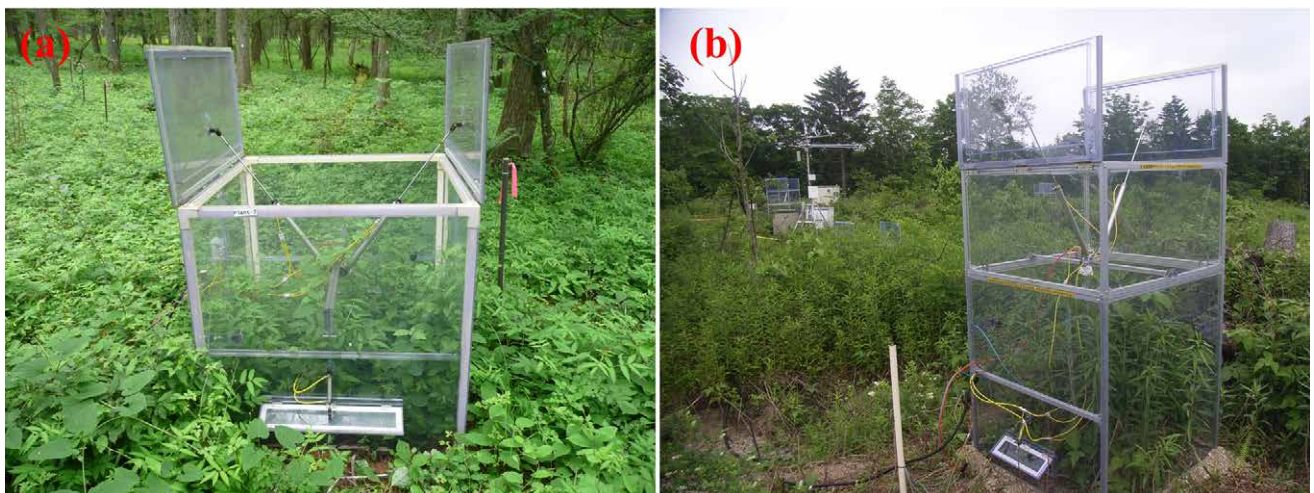


図2 富士北麓カラマツ林 (a) と苫小牧カラマツ林跡地 (b) サイトにおける、植生を含むチャンバー

2.1.2.2 観測サイトの概要

2.1.2.2.1 温暖化操作実験サイト

本プロジェクトでは、環境省地球環境研究総合推進費課題「B-073：土壌呼吸に及ぼす温暖化影響の実験的評価」において設置した、国内5サイトに加え、中国2サイト、計7サイトの温暖化操作実験サイトを本研究のプラットフォームとして利用した。国内5サイトは、日本の植生分布図と土壌有機炭素分布図を参考にし、地域ごとの典型的な森林生態系を基準にして選定したものである。最北端針広混交林サイト（北海道大学天塩研究林）、東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイト（弘前大学白神山地自然観察園内）、関東地方アカマツ林サイト（国立環境研究所構内）、西日本常緑カシ林サイト（広島大学構内）、および九州地方コジイ林サイト（宮崎大学田野フィールド）である。中国のサイトに関しては、中国西南部に位置する雲南省の亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトおよび亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトである。

1) 最北端針広混交林サイト

北海道大学天塩研究林における、約35年生の針広混交林（北海道天塩郡幌延町字問寒別、44°55'N、142°1'E、標高20m）を調査地とした（図3）。調査林分はミズナラ、シラカンバ、アカエゾマツ、イタヤカエデ、ナナカマド等によって構成されている。林床には、クマイザサが繁茂している。年平均気温は5.5℃であり、年平均降水量は1,115mmである。土壌は40cm以上にわたって有機物に富んだ泥炭土壌であり、明瞭な層位は認められずリター層は薄い。本サイトには2007年7月13日に土壌呼吸測定システムを設置し、温暖化処理と土壌呼吸速度の観測は積雪がない時期のみ行った。土壌呼吸区（根非除去区、5反復）、根切りを行って根の影響を排除した微生物呼吸区（対照区、5反復）、根切りを行った温暖化区（5反復）を設置し（他の温暖化操作実験サイトでも、これら3つの処理区を同様に設置した）、無雪期における連続観測を行った。



図3 最北端針広混交林サイトにおける温暖化操作実験の様子

2) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイト

青森県西津軽郡西目屋村の白神山地にある、約70年生のミズナラ林（40°31'N、140°13'E、標高245m）を調査地とした（図4）。調査林分は約70年生のミズナラの二次林であり、林床にはチシマザサ群落が分布している。白神山地は約8,000年前よりブナの林となり、その落葉や共存する動植物が有機物となり、岩石の風化と相まって土壌化が進んだ。調査地の土壌では、A層が10cm程度と薄く、その下45cmまで褐色のB層をもち、褐色森林土に分類される。A層の有機物の分解状態を示すC/N比は、20-22の範囲で良好な有機物分解環境を示している。白神山地は北東北の日本海側に位置し、夏季は晴天が多いが年間を通して降水量が多く、冬の積雪量も多いことが特徴である。年平均気温は8.4℃であり、年降水量は2,579mmである。2011年9月から土壌呼吸測定システムを設置し、温暖化処理および土壌呼吸速度の観測を開始した。各処理区5反復を設置し、無雪期における連続観測を行った。



図4 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける温暖化操作実験の様子

3) 関東地方アカマツ林サイト

茨城県つくば市の国立環境研究所敷地内のアカマツ林 (36°3'N、140°7'E、標高 23 m) を調査地とした (図 5)。調査林分は、約 55 年生のアカマツが優占していたが、2012 年以降ほぼ全てのアカマツがマツ枯れ病で枯れ、現在はシラカシが優占している。年平均気温は 13.8℃であり、年降水量は約 1,283 mm である。本調査地は他と異なり、まず 2006 年 2 月に対照区と温暖化区の 2 処理区を 6 反復設定し、測定を開始した。2009 年 7 月に根非除去区に 8 基のチャンパー追加を行い、以降通年連続観測を行っている。



図 5 関東地方アカマツ林サイトにおける温暖化操作実験の様子

4) 西日本常緑カシ林サイト

東広島市鏡山の山頂付近に分布する常緑カシ林 (34°24'N、132°43'E、標高 320 m) を調査地とした (図 6)。調査対象の林分は、1970 年代後半から 1980 年代にかけて衰退したアカマツ林の跡地であり、その後自然再生した 30 年前後のアラカシ優占林である。本サイトは瀬戸内海気候区に属し、温暖寡雨の気候を示す。年平均気温は 13.5℃であり、年降水量は約 1,446 mm である。土壌は風化花崗岩を母材とする適潤性褐色森林土 (偏乾亜型) に分類される。土壌の層位分化はあまり明瞭でなく、土壌有機炭素含有量は全国の平均的な値よりも相対的に低い。2007 年 9 月 23 日に土壌呼吸測定システムを設置して観測を開始後、2007 年 11 月 1 日より温暖化処理を行った。各処理区 5 反復を設置し、通年連続観測を行った。

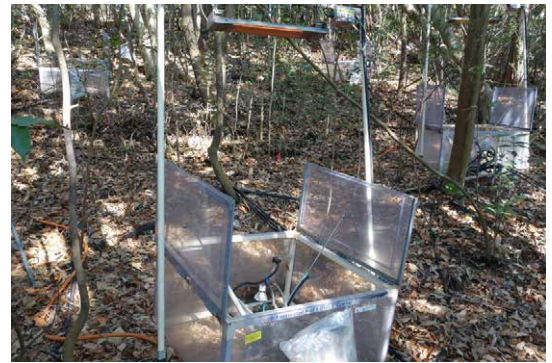


図 6 西日本常緑カシ林サイトにおける温暖化操作実験の様子

5) 九州地方コジイ林サイト

宮崎大学田野フィールドの約 55 年生常緑広葉樹二次林 (コジイ林、31°51'N、131°18'E、標高 130 m) を調査地とした (図 7)。本観測地は太平洋 (日向灘) より約 15 km 内陸側の宮崎平野西端の標高 130 m の里山に位置する。亜熱帯の北限気候に属し、高温多湿、積雪は無く、年日照時間は約 2,000 時間に達する。年平均気温は 17.4℃、年降水量は 2,509 mm である。土壌は火山灰を母材とする褐色森林土壌 (BD(d)) であり、基岩は新生代礫層である。シラスと呼ばれる火山灰土壌が約 60 cm 程度堆積している。A 層の厚さは 20 cm で C/N 比は 17、pH は 5.1、固相率は 0.15 であり、B 層ではそれぞれ 40 cm、19、5.7、0.17 である。2008 年 12 月中旬に土壌呼吸測定システムを設置し (各処理区 5 反復)、通年連続観測を開始した。



図 7 九州地方コジイ林サイトにおける温暖化操作実験の様子

6) 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイト

中国科学院昆明植物研究所が、玉龍雪山自然保護区 (中国雲南省麗江市) の天然針広混交林内に設置した、25 ha 長期モニタリングサイト (27°08'N、100°14'E、標高 3,188 m) を調査地とした (図 8)。本調査地は中国西南部雲南省に位置するが、亜高山帯に位置しているため、年平均気温は 9.1℃、年降水量は 1,587 mm となっている。優占樹種は *Abies forrestii* (胸高断面積 15.2 m⁻² ha⁻¹)、*Quercus guajavifolia* (胸高断面積 12.9 m⁻² ha⁻¹) 及び *Picea likiangensis* (胸高断

面積 $9.0 \text{ m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$) である。調査地の土壌は褐色森林土壌である。2014年8月上旬に土壌呼吸測定システムを設置し(各処理区4反復)、以降通年連続観測を行った。

7) 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイト

哀牢山自然保護区(中国雲南省景東県)内中国科学院哀牢山亜熱帯森林長期モニタリングサイト($24^{\circ}32' \text{N}$, $101^{\circ}01' \text{E}$, 標高 2,480 m)を調査地とした(図9)。本調査地は天然常緑広葉樹林であり、マテバシイ属(*Lithocarpus hancei* と *Lithocarpus xylocarpus*) が優占している。林床には、矢竹(*Sinarundinaria nitida*) が繁茂している。年平均気温は 11.0°C 、年降水量は 1,980 mm となっている。Ao層は 3-7 cm であり、A層が 10-15 cm 程度と薄く、その下 50 cm 以上まで褐色の B層をもち、褐色森林土壌に分類される。0-30 cm 表層の土壌有機物含有率は 5-9% (うち、炭素は 5.030%、窒素は 0.346%、燐素は 0.073%、カリウムは 0.370%) であり、pH 値は 4.2 である。A層の C/N 比は 20-22 の範囲で、良好な有機物分解環境を示している。2010年10月上旬に土壌呼吸測定システムを設置し(各処理区5反復)、2011年1月から温暖化操作実験を開始して通年連続観測を行った。



図8 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける温暖化操作実験の様子



図9 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける温暖化操作実験の様子

2.1.2.2.2 国内における森林フラックス観測サイト

国立環境研究所が展開する3カ所の森林フラックス観測地: 苫小牧(2000年から)、天塩(2003年から)および富士北麓(2006年から)を活用し、大型マルチ自動開閉チャンバーシステムを用いて森林土壌からの CO_2 フラックスの長期連続観測も行っている。これら3サイトは、自然的攪乱(苫小牧: 台風)、人為的攪乱(天塩: 皆伐、富士北麓: 間伐)を受けており、これらの攪乱後の植生回復過程における土壌呼吸の変化についても評価する。

1) 天塩カラマツ林造林地サイト

冷温帯針広混交林を2003年に皆伐した後に植林された若齢カラマツ植林地($45^{\circ}2' \text{N}$, $142^{\circ}5' \text{E}$, 標高 66 m)において、植林カラマツの成長に伴う土壌呼吸量の変化を明らかにすることを目的として、2003年より観測を開始した(図10)。植林カラマツに加えて、矮性竹である下層植生のササや天然更新した若齢シラカンバが優占している。年平均気温は 5.5°C であり、年降水量は 1,115 mm である。2015年以降は土壌呼吸量(根非除去区、5反復)に加え、根の影響を排除した微生物呼吸量(根切り区、5反復)について、無雪期における連続観測を開始した。



図10 天塩カラマツ林造林地サイトにおけるチャンパー観測の様子

2) 苫小牧カラマツ林跡地サイト

2004年の台風によって倒壊したカラマツ林($42^{\circ}44' \text{N}$, $141^{\circ}31' \text{E}$, 標高 125 m)において、倒木や表層土壌を除去した後に、自然の植生遷移に伴う土壌呼吸量と微生物呼吸量の変化を明らかにすることを目的として、倒壊前の2000年より観測を開始した(図11)。植生回復初期はオオアワダチソウやエゾイチゴ等の草本が優占していたが、近年は草本に

加えてシラカンバが優占している。年平均気温は7.5℃であり、年降水量は1,228 mmである。2010年以降は、土壌呼吸量（5反復）と微生物呼吸量（5反復）に加え、土壌と草本植生の正味CO₂交換量（5反復）について、無雪期における連続観測を開始した。

3) 富士北麓カラマツ林サイト

温帯カラマツ林（35°27'N、138°46'E、標高1,100 m）において、2006年より土壌呼吸量（8反復）、微生物呼吸量（8反復）、土壌と草本植生の正味CO₂交換量（8反復）について、無雪期における連続観測を開始した（図12）。林床にはオシダが優占している。年平均気温は8.6℃であり、年降水量は1,848 mmである。2014年から2015年にかけて、林分の1/3について間伐を行っている。



図11 苫小牧カラマツ林跡地サイトにおけるチャンパー観測の様子

2.1.2.2.3 海外における森林観測サイト

台湾亜熱帯スギ林、マレーシア低地熱帯天然林、周辺の二次林およびプランテーション（ゴム林、オイルパーム林）では、土壌呼吸の季節・経年変化に及ぼす環境要因の評価を行った。



図12 富士北麓カラマツ林サイトにおけるチャンパー観測の様子

1) 台湾亜熱帯スギ林サイト

台湾大学附属溪頭演習林における76年生（2016年）スギ林（23°39'N、120°47'E、標高1,250 m）を調査地とした（図13）。本調査地は亜熱帯に属しており、年平均気温は16.6℃であり、年降水量は2,635 mmである。2011年より土壌呼吸量（6反復）と微生物呼吸量（6反復）の通年連続観測を開始した。



図13 台湾亜熱帯スギ林サイトにおけるチャンパー観測の様子

2) マレーシア低地熱帯天然林サイト：

マレーシア国半島部ネグリセンビラン州にあるパソ保護林内の低地熱帯天然林（2°58'N、102°18'E、標高100 m）を調査地とした（図14、図15）。年平均気温は25.3℃であり、年降水量は1,865 mmである。2010年8月に、50 m × 60 mの土壌呼吸プロットを設置した。プロットの中において、5 mメッシュの間隔（6列 × 5行）で合計30個の土壌カラー（直径32 cm）を設置した。CGERが開発した携帯型自動開閉チャンパーシステムを用いて、土壌呼吸速度を定期的（2週間から1ヶ月）に測定した^{5,6)}。土壌呼吸の測定とともに、熱電対プローブ（Omega社のMHP-14G）とTDR型土壌水分センサー（Delta-T社のSM-150）を用いて深さ5 cmの土壌温度（℃）と深さ5-10 cmでの土壌水分（%）を測定した。

また、2010年12月に、同じプロットにおいて、16基の自動開閉チャンバー（縦65 cm × 横50 cm × 高さ50 cm）を設置した（図14、図15a）。土壌微生物呼吸のみを測定するため、2011年2月、16基のチャンバーのうち8基のチャンバーについては、底面1 m四方に沿って根切りを行った（図15b）。その後、プラスチック板で土壌を仕切ることによって、根呼吸の影響を排除した。したがって、根非除去区（総土壌呼吸）と根切り区（微生物呼吸）の2処理区をそれぞれ8反復設定した。1つのチャンバーの測定時間は225秒に設定し、16個のチャンバーの測定周期は1時間である。

3) 熱帯二次林サイト

2011年2月に、パソ保護林における上述の天然林及びその周辺の二次林において、それぞれに10 m × 150 mの土壌呼吸プロットを設定した（図16）。各プロットにおいて、5 m 間隔で2列（1列15個）、合計30個（列内の間隔は5 m）の土壌カラー（直径32 cm）を設置し、CGERが独自に開発した携帯型自動開閉チャンバーシステムを用いて土壌呼吸速度を定期的（2週間から1ヶ月）に測定した。土壌呼吸の測定とともに、熱電対プローブ（Omega社のMHP-14G）とTDR型土壌水分センサー（Delta-T社のSM150）を用い、深さ5 cmの土壌温度（℃）と深さ5-10 cmでの土壌水分（%）を測定した。この二次林では、伐採記録から、調査区は1957年頃に

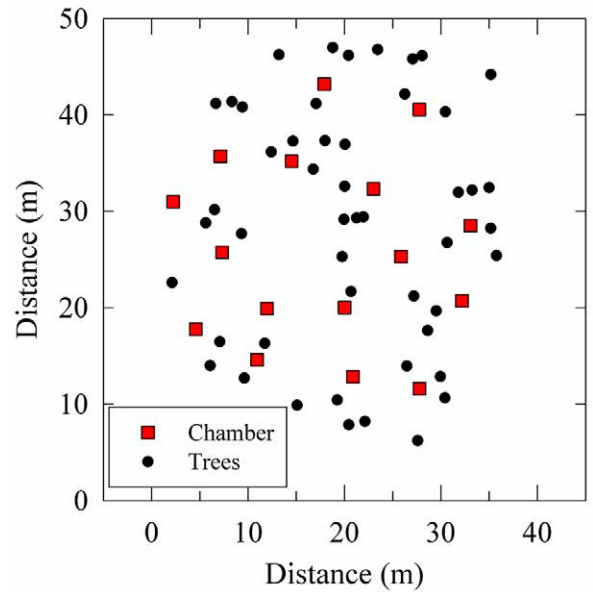


図14 マレーシア低地熱帯天然林サイトにおける自動開閉チャンバープロット内の樹木（Trees）とチャンバー（Chamber）の位置



図15 マレーシア低地熱帯天然林サイトにおけるチャンバー観測の様子（a）、チャンバー周辺の根切りの様子（b）



図16 熱帯二次林サイトにおける携帯型自動開閉チャンバーシステムを用いた測定の様子

Malayan Uniform System (MUS) という伐採方式で伐採された林分である事が分かっている。1948-1970 年代まで行われた MUS は、低地フタバガキ林を対象とし、非有用木の除伐（まき枯らし）と有用後継樹種の生長を積極的に促す施業であり、パソ保護林を含むパイロットサイトの多くの場所で実施されたものである。本サイトでは、2018 年まで定期的に土壌呼吸速度の測定を行っている。

4) 熱帯プランテーション（ゴム林・オイルパーム林）サイト

2010 年 12 月、パソ保護林周辺の輪作した 4 年生のゴムプランテーション及び 4 年生のオイルパームプランテーションにおいて、それぞれ上述と同様に 30 個の土壌カラーを設置し、携帯型自動開閉チャンバーシステムを用いて、土壌呼吸速度を 2 週間から 1 ヶ月の間隔で測定した。本サイトでは、2018 年まで定期的に土壌呼吸速度の測定を行っている（図 17）。



図 17 熱帯プランテーションサイトのゴム林 (a) とオイルパーム林 (b) における土壌呼吸プロットの配置図および測定の様子

2.1.3 結果と考察

2.1.3.1 温暖化操作実験

1) 最北端針広混交林

最北端針広混交林サイトにおける観測期間は、例年 4 月中旬から 11 月下旬であり、それ以外の積雪期間はシステムを回収した。2017 年で、10 年以上にわたる観測データが得られたことになる（図 18）。本サイトでは、5 月 13 日から 11 月 8 日を共通観測期間としている。共通観測期間における積算フラックスは、土壌呼吸が 7.75-11.07 tC ha⁻¹、微生物呼吸が 5.31-7.92 tC ha⁻¹、温暖化された微生物呼吸が 12.00-15.81 tC ha⁻¹ の範囲で変動していた。本サイトでは、地温がフラックスの決定因子として強く働いており、地温とフラックスの顕著な指数関数的相関が見られた（図 19）。その一方で、土壌水分とフラックスの相関は非常に弱く（図 20）、フラックスの決定因子は地温であることがうかがえた。地温が 10℃ 上昇した時のフラックスの上昇倍率 (Q_{10} 値) の変動範囲は、10 年間の観測期間において、土壌呼吸が 2.26-3.11、微生物呼吸が 2.40-2.89、温暖化区における微生物呼吸が 2.33-3.09 であった（図 21）。

1℃ 当たりの温暖化効果（温暖化による微生物呼吸速度の増加率）を年別に見ると、その変動範囲は、+21.0% から +46.1% であり（2007 年から 2011 年までの結果は、Aguilos *et al.*, 2013⁷⁾ にまとめられている）、日本国内の他の温暖化操作実験サイトと比較しても、非常に大きな値を示している（図 22）。本サイトでは観測から 10 年間の温暖化操作を経ても、温暖化による微生物呼吸の顕著な促進の効果は衰えを見せていない。また、温暖化効果が年々上昇の傾向を見

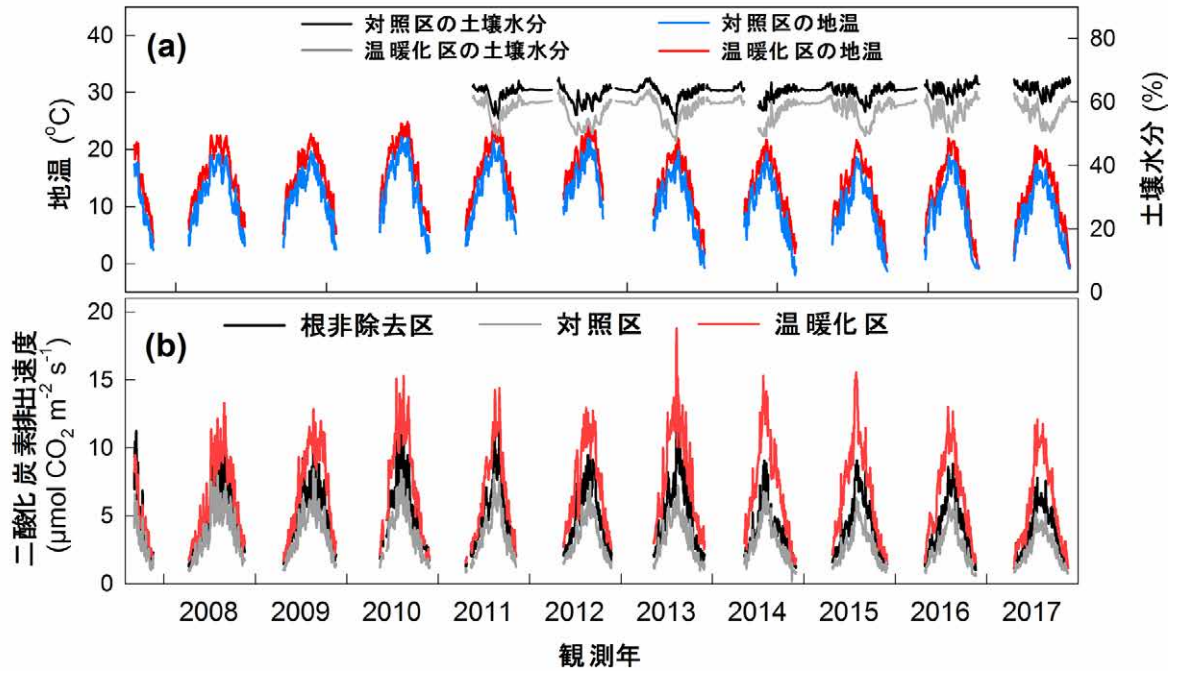


図 18 最北端針広混交林サイトにおける環境データ(地温と土壌水分、a)と、各処理区におけるフラックスデータ(b)

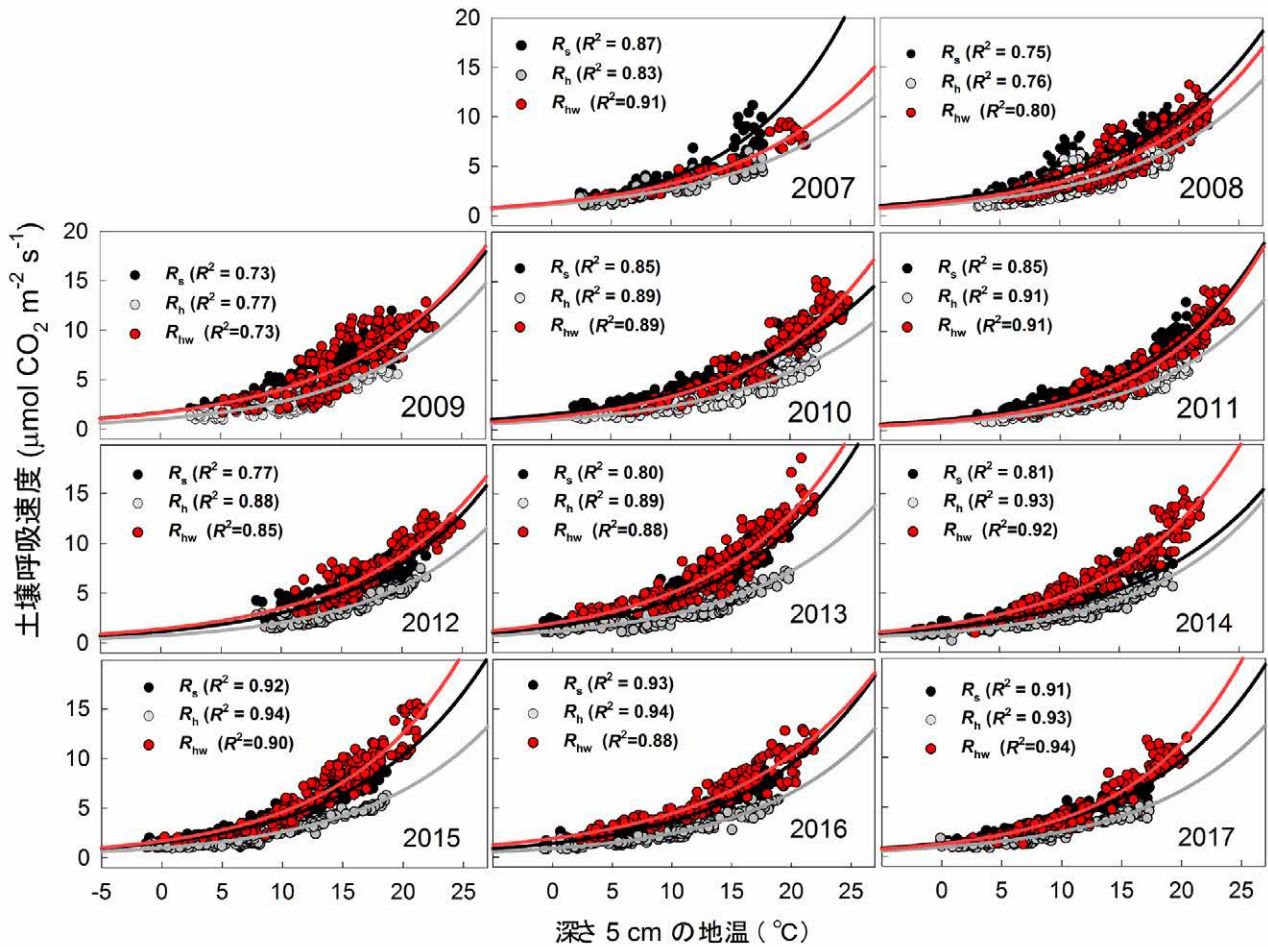


図 19 最北端針広混交林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸)

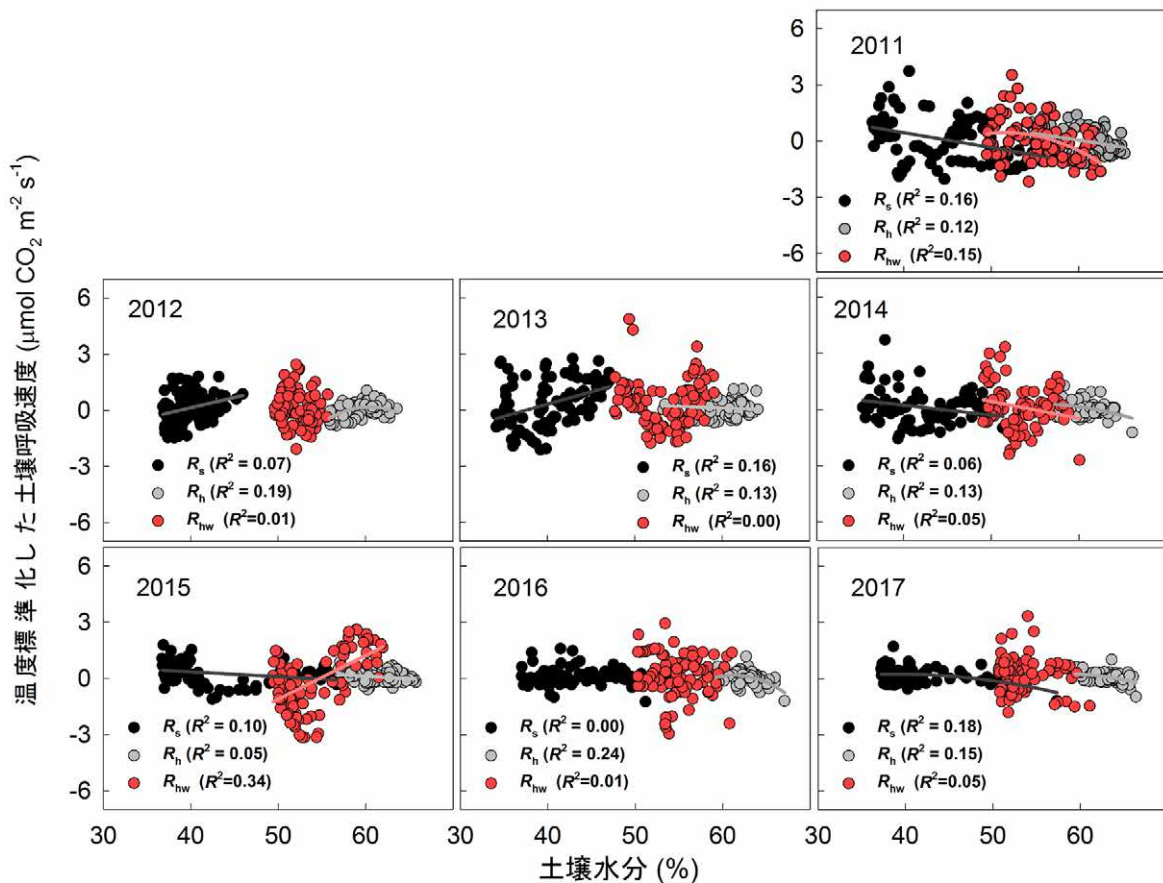


図20 夏季(7-9月)の最北端針広混交林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸)

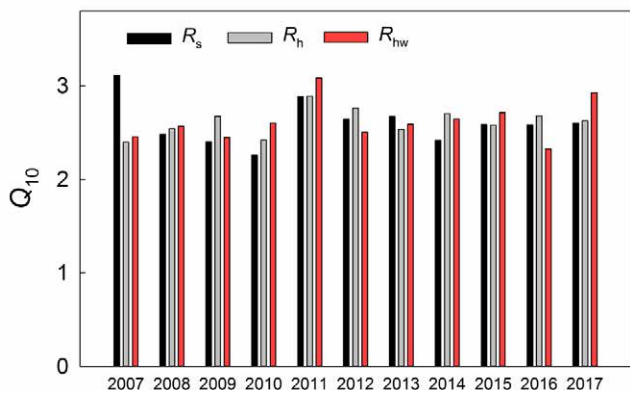


図21 最北端針広混交林サイトにおける年別 Q_{10}

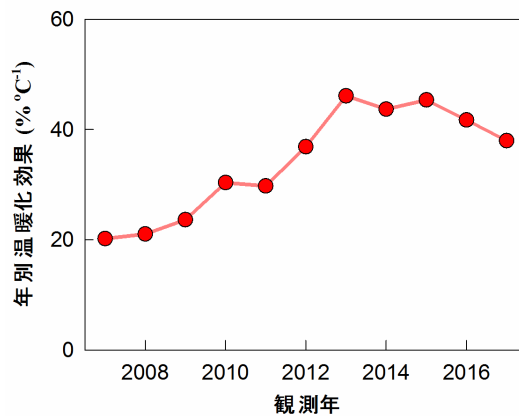


図22 最北端針広混交林サイトにおける年別温暖化効果

せている事は、非常に興味深い。本サイトにおける土壌は古い泥炭土壌であり、多量の有機炭素を含んでいる。土壌有機炭素が著しく豊富な環境が、非常に大きな温暖化効果およびその長期間にわたる維持に結びついているものと考えられる。

2) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林

東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトでは、例年5月中旬から11月下旬まで観測を行っており、それ以外の積雪期間はシステムを回収している。特に本サイトでは、6月3日から11月10日までを2012年以降の共通観測期間としている。2017年で6年以上の観測データが得られたことになる(図23)。2012年から2017年の共通観測期間における積算フラックスの変動範囲は、土壌呼吸が9.33-11.12 tC ha⁻¹、微生物呼吸が6.14-9.13 tC ha⁻¹、温暖化された微生物呼吸が7.02-11.91

tC ha⁻¹であった。本サイトでは、地温がフラックスの決定因子として強く働いており、毎年顕著な地温とフラックスの指数関数的相関が確認された(図24)。一方で、土壌水分とフラックスの関係性は温度と比して弱い、乾燥および過湿いずれの状況においても、フラックスは減少する傾向が見られた(図25)。Q₁₀値の変動幅は、土壌呼吸が2.24-2.78、微生物呼吸が2.40-2.85、温暖化区における微生物呼吸が2.03-2.81であった(図26)。

本サイトでは観測から6年間の温暖化操作を経ても、微生物呼吸に対する促進的な温暖化効果が観測されている。

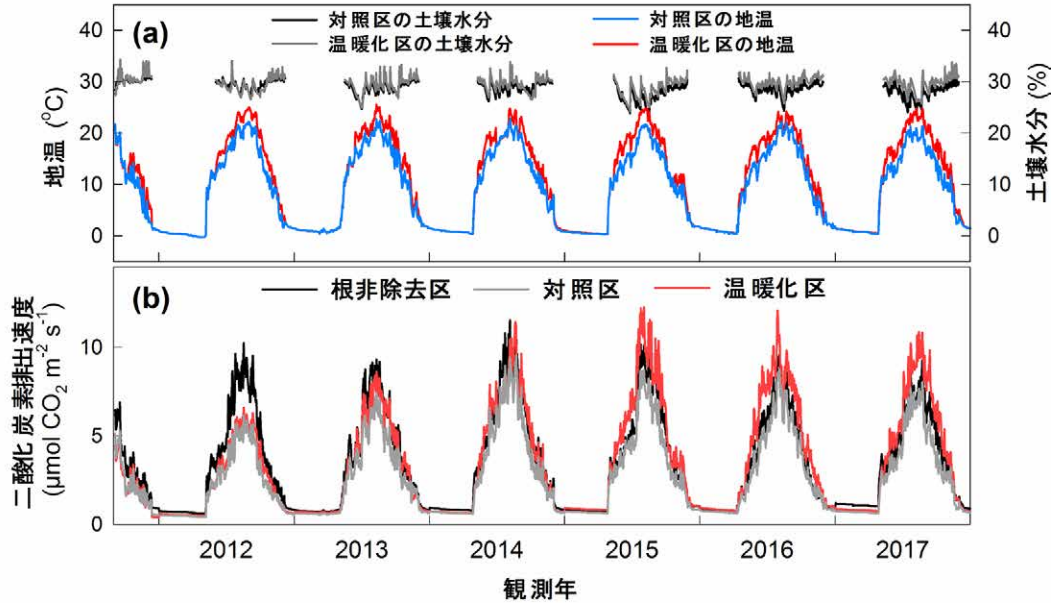


図23 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける環境データ(地温と土壌水分、a)と、各処理区におけるフラックスデータ(b)

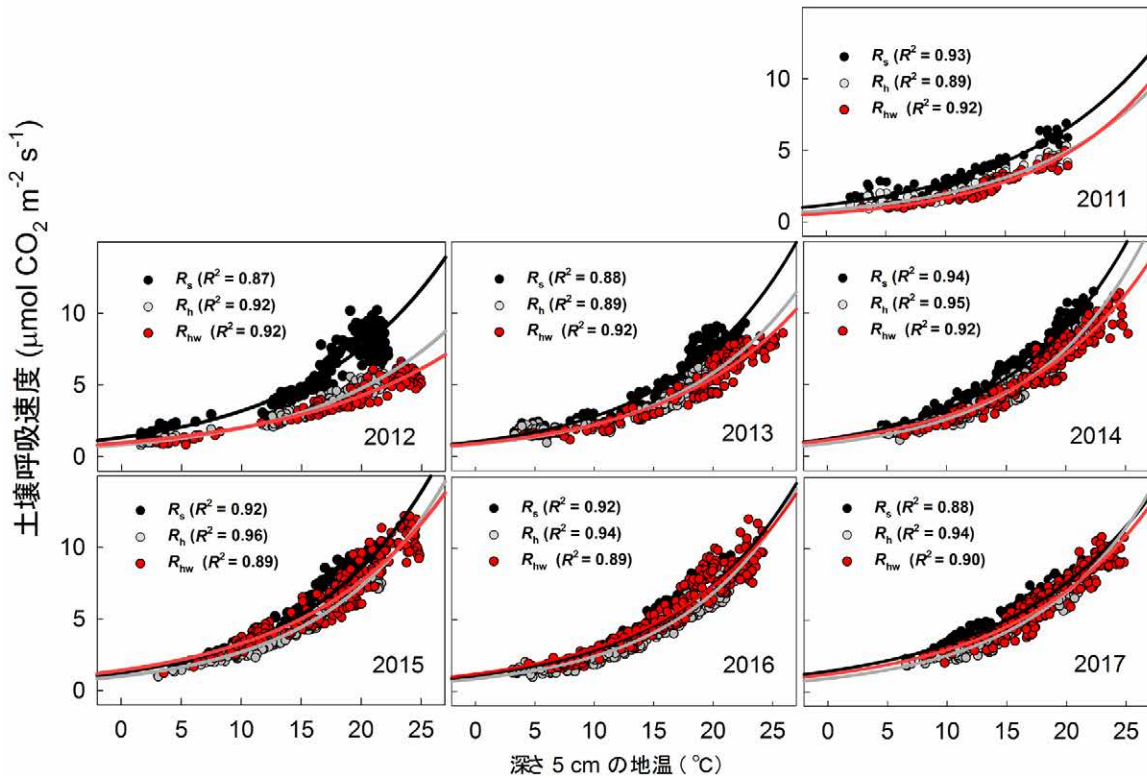


図24 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関(R_s:土壌呼吸、R_h:微生物呼吸、R_{hw}:温暖化区の微生物呼吸)

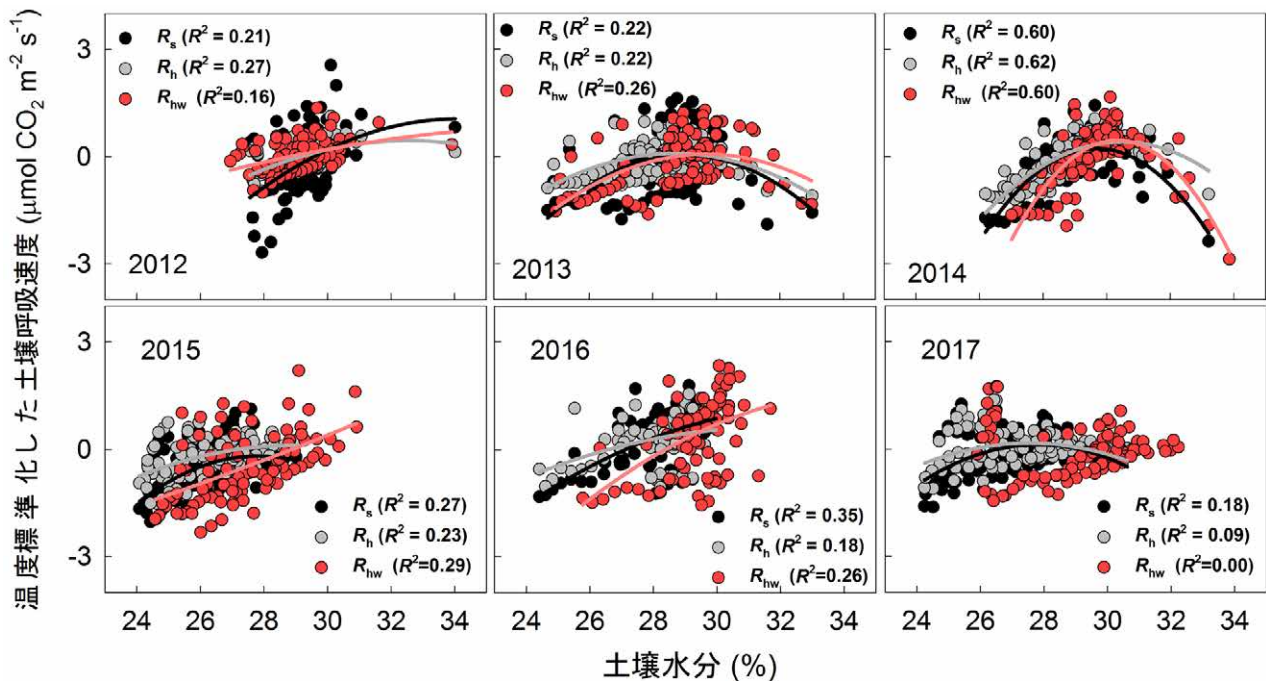


図 25 夏季 (6-8 月) の東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸)

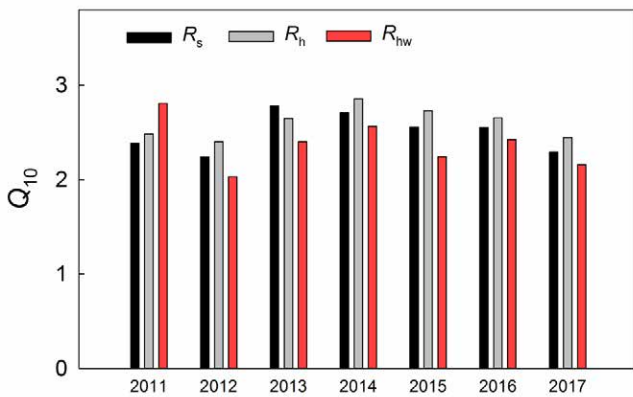


図 26 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける年別 Q_{10}

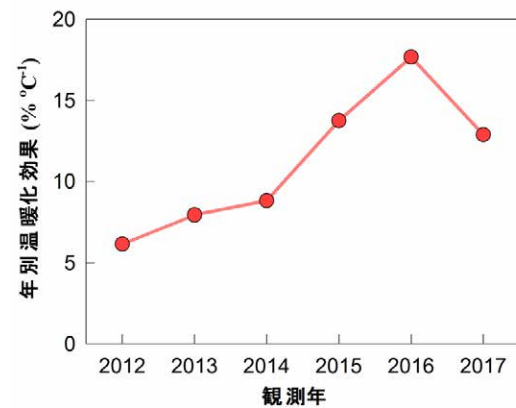


図 27 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける年別温暖化効果

1℃当たりの年別温暖化効果は、2012年以降+6.2%から+17.7%の間で変動していた(6年間平均11.2%、図27)。2012年から2016年のデータに基づいた解析結果から、本サイトにおける温暖化効果は、降雨の日数と正の相関を示す事が明らかになっており⁸⁾、温暖化効果に対する湿潤な環境の重要性を示唆している。

3) 関東地方アカマツ林

本サイトでは、2006年2月に対照区と温暖化区の2処理区を6反復設定し、2009年7月に根非除去区に8基のチャンパー追加を行っている。2017年で、約12年のデータが得られたことになる(図28)。対照区と温暖化区を設置した2006年は、対照区のフラックスが非常に大きくなっているが、これはチャンパー周辺の根切り(攪乱)を行った影響が強く出たためと考えられる。2007年以降は、微生物呼吸、温暖化された微生物呼吸の年積算フラックスは、それぞれ13.50-17.15 tC ha⁻¹ yr⁻¹、14.54-18.12 tC ha⁻¹ yr⁻¹の範囲で変動していた。また、2009年に追加した根非除去区における観測から、2009年以降における土壌呼吸の変動幅が16.03-21.18 tC ha⁻¹ yr⁻¹であることが明らかになった。本サイトでは、フラックスの決定因子としては地温の影響が強いが(図29)、夏季の降水量によっては土壌が乾燥し、土壌

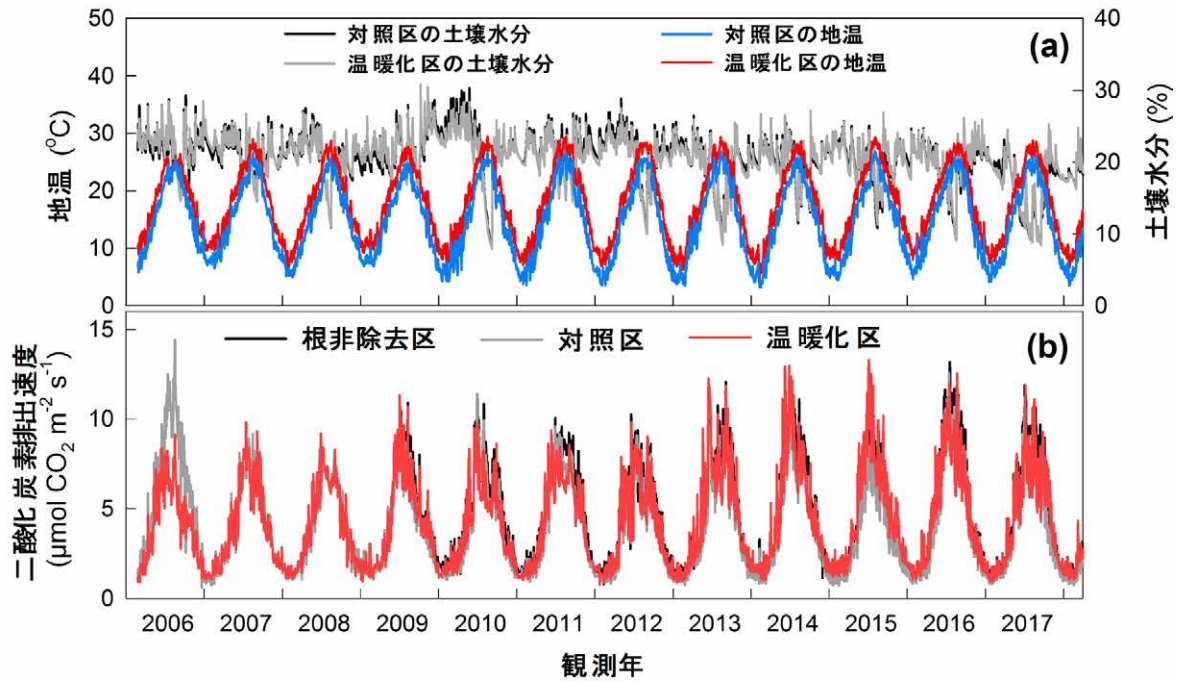


図 28 関東地方アカマツ林サイトにおける環境データ（地温と土壌水分、a）と、各処理区におけるフラックスデータ（b）

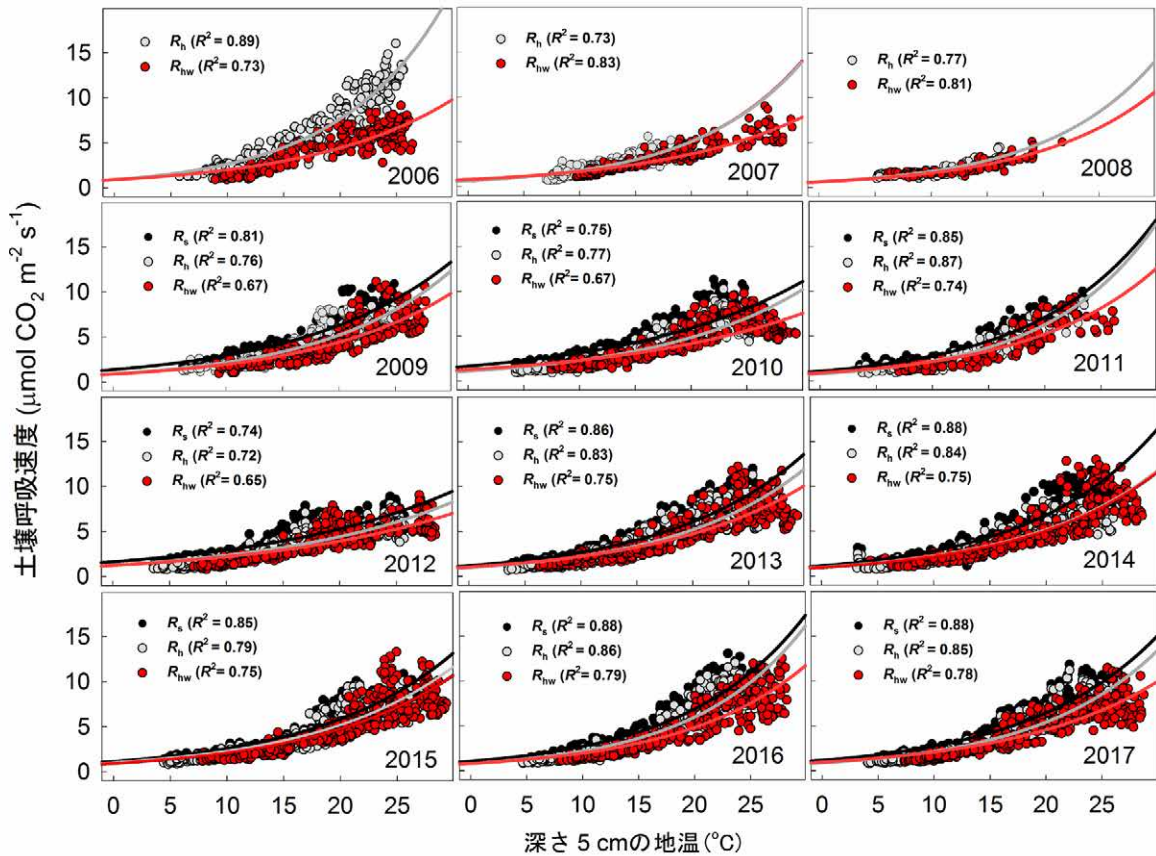


図 29 関東地方アカマツ林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{nw} : 温暖化区の微生物呼吸)

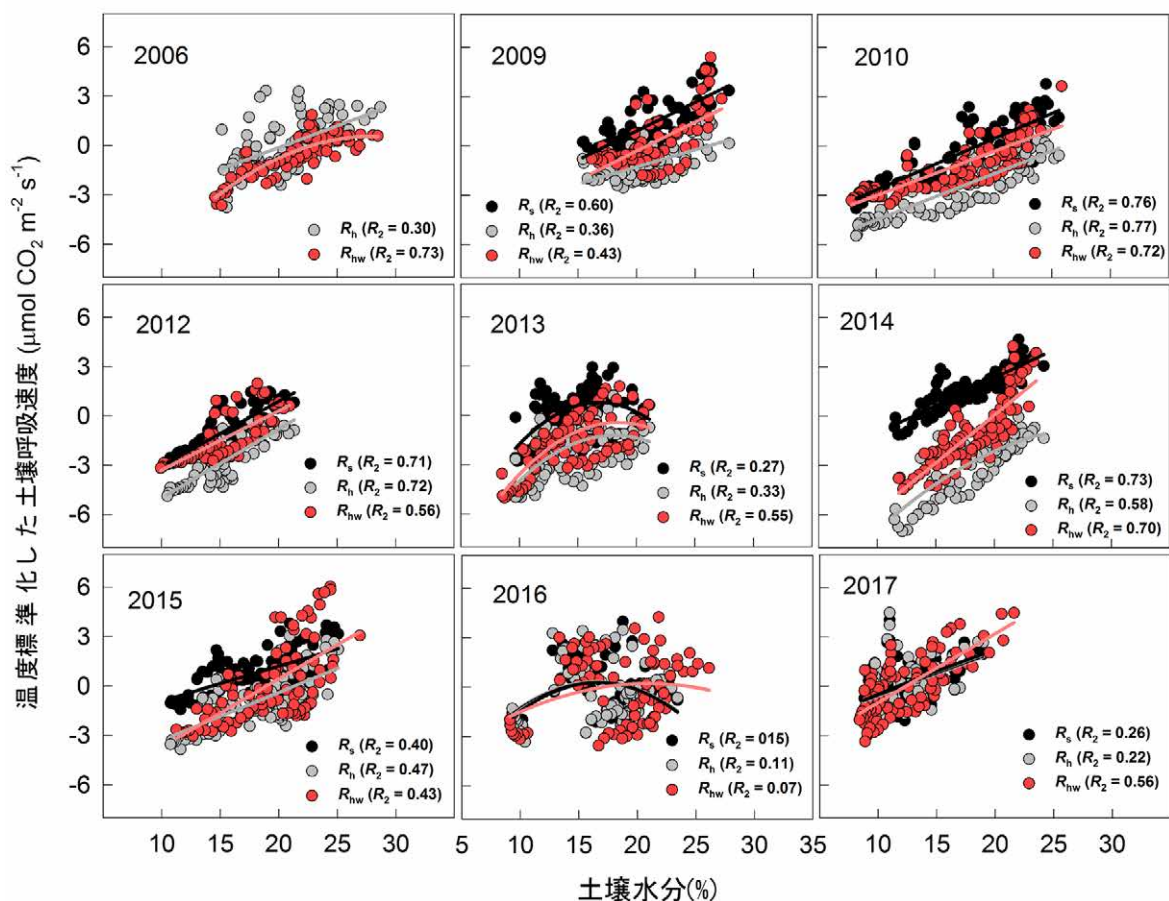


図 30 夏季(7-9月)の関東地方アカマツ林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関(R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸)

水分が強く影響することがある。例えば、直近の観測年である 2017 年は、5 月から 8 月にかけての積算降水量が 343.5 mm となり、2006 年以降は 2010 年 (301.5 mm) に次いで 2 番目に少なかった。その影響で、5 月から 8 月にかけて土壌水分が低下し、温暖化区ではフラックスが減少した。また、2010 年の様に夏季の降水量が著しく少ない場合 (2010 年は 8 月に 5 mm という少雨を記録している)、土壌水分とフラックスの間には、著しく高い相関が見られ、フラックスの決定因子として土壌水分が強く影響していたことがうかがえた (図 30)。 Q_{10} 値の変動範囲に関しては、土壌呼吸が 1.80-2.55、微生物呼吸が 1.88-2.89、温暖化区における微生物呼吸が 1.79-2.57 であった。本サイト以北のサイト (最北端針広混交林サイトおよび東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイト) と比較すると Q_{10} 値の最低値が低いが、これは観測年によっては夏季の少雨による土壌乾燥の影響を強く受けたためと考えられる。

1℃当たりの年別温暖化効果は、-13.7% から +10.3% と、観測年によって変動の幅が非常に大きかった。それには、2006 年の様に、チャンバー周辺の攪乱 (根切り) が強く影響したことや、夏季の少雨による土壌乾燥が関係しているものと考えられる。

4) 西日本常緑カンシ林

本サイトでは、2017 年で約 10 年のデータが得られている (図 31)。本サイトにおける各処理区の年積算フラックスは、土壌呼吸が 18.12-22.39 tC ha⁻¹ yr⁻¹、微生物呼吸が 12.91-16.42 tC ha⁻¹ yr⁻¹、温暖化された微生物呼吸が 15.67-19.46 tC ha⁻¹ yr⁻¹ の範囲で変動していた。本サイトにおける土壌有機炭素量は、日本国内における他サイトと比較しても相対的に低いが、フラックスは国内最大規模となっている。土壌有機炭素量とフラックスの関係性に関しては、今後土壌化学的な分析から検討を進めていく予定である。本サイトでは毎年地温とフラックスの顕著な指数関数的相関が見られ (図 32)、フラックスに対する地温の影響が概して強いことがうかがえた。一方で、本サイトでは夏季に降水量が少な

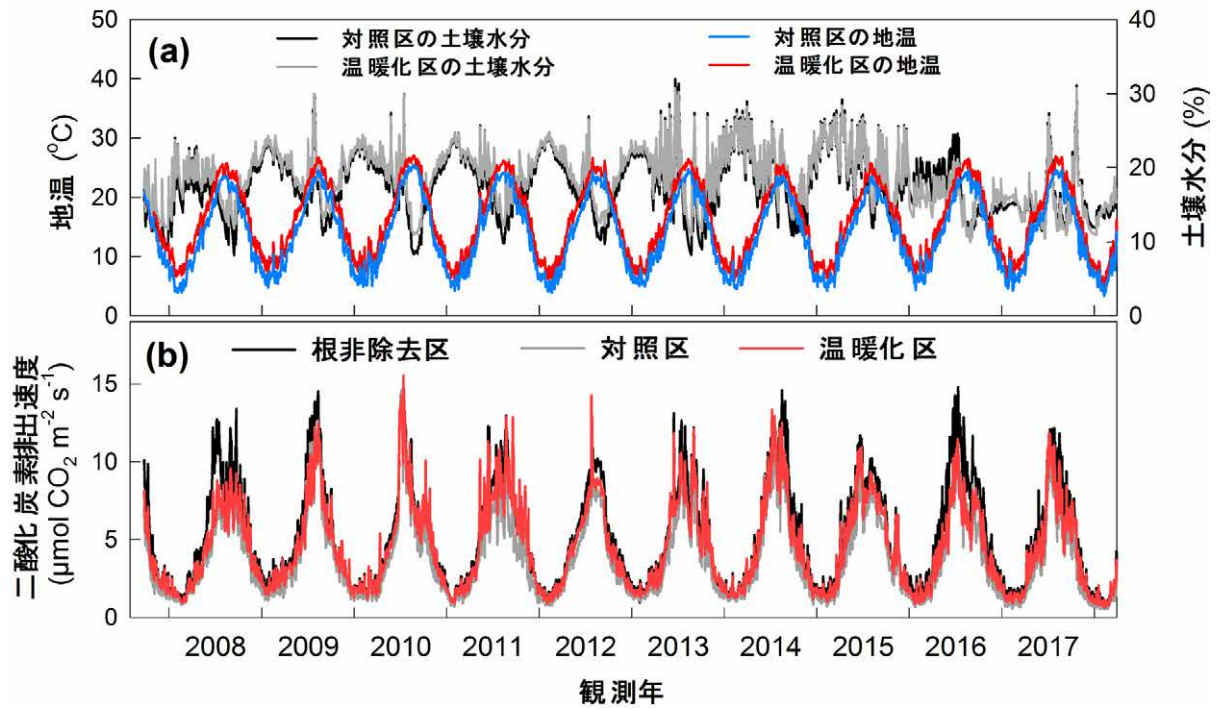


図 31 西日本常緑カシ林サイトにおける環境データ (地温と土壌水分、a) と、各処理区におけるフラックスデータ (b)

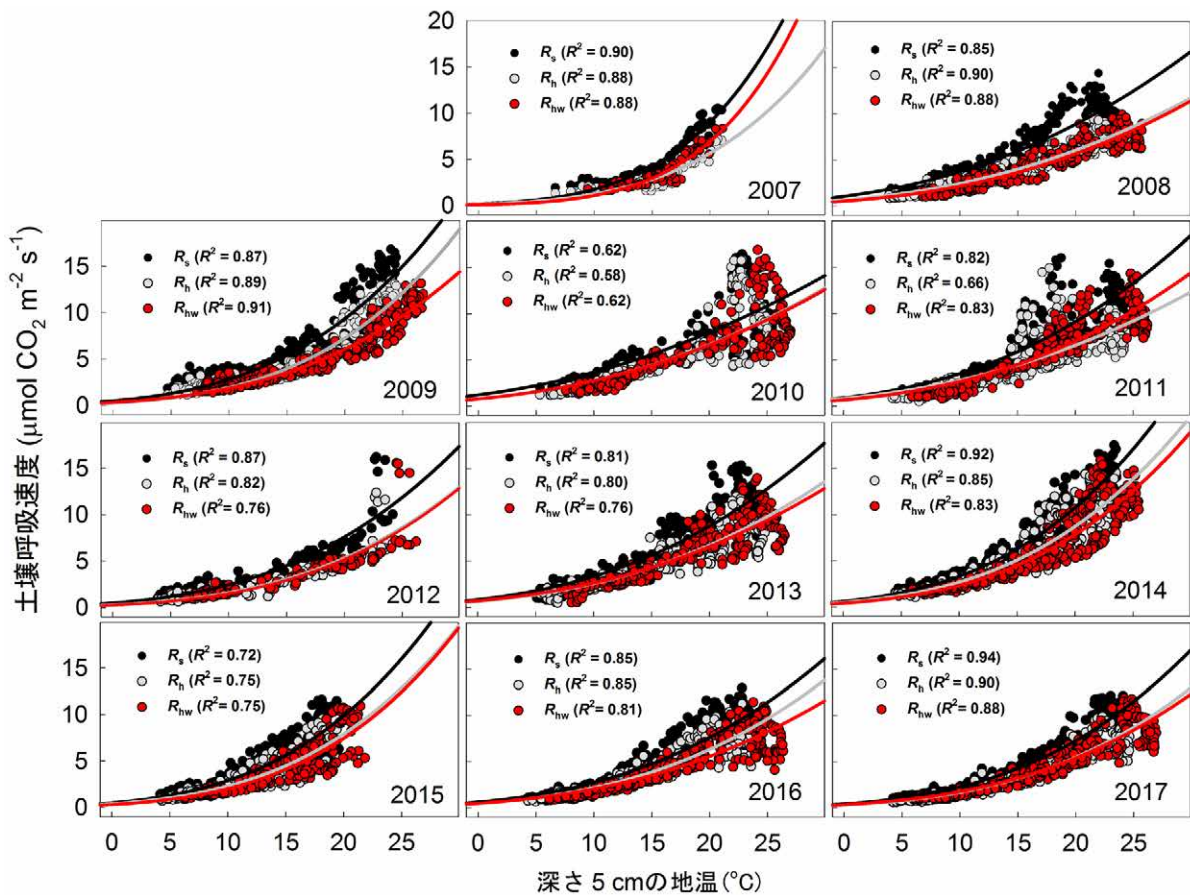


図 32 西日本常緑カシ林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{nw} : 温暖化区の微生物呼吸)

いため、7月から9月にかけては、土壌水分がフラックスの決定因子として強く働いていた（図33）。これには、本サイトにおける土壌の保水力が小さく、乾燥影響を受けやすいことも関係しているものと考えられる。 Q_{10} 値の変動範囲は、土壌呼吸が2.00-3.62、微生物呼吸が2.19-3.64、温暖化区における微生物呼吸が2.11-3.57であり、国内における他サイトと比較しても、変動範囲が大きかった（図34）。 Q_{10} 値の大きな年々変動にも、夏季の降水量と土壌の乾燥が影響しているものと考えられる。

1℃当たりの温暖化効果は、+4.2% から +13.5% の範囲で変動していた（図35）。一方で、観測から10年間の温暖化操作を経ても、本サイトでは温暖化による微生物呼吸の促進的効果は減少傾向を示していない。この温暖化応答メカニズムに関しては、上述の土壌化学的な分析に加え、土壌微生物の分析も加えて検討していく予定である。

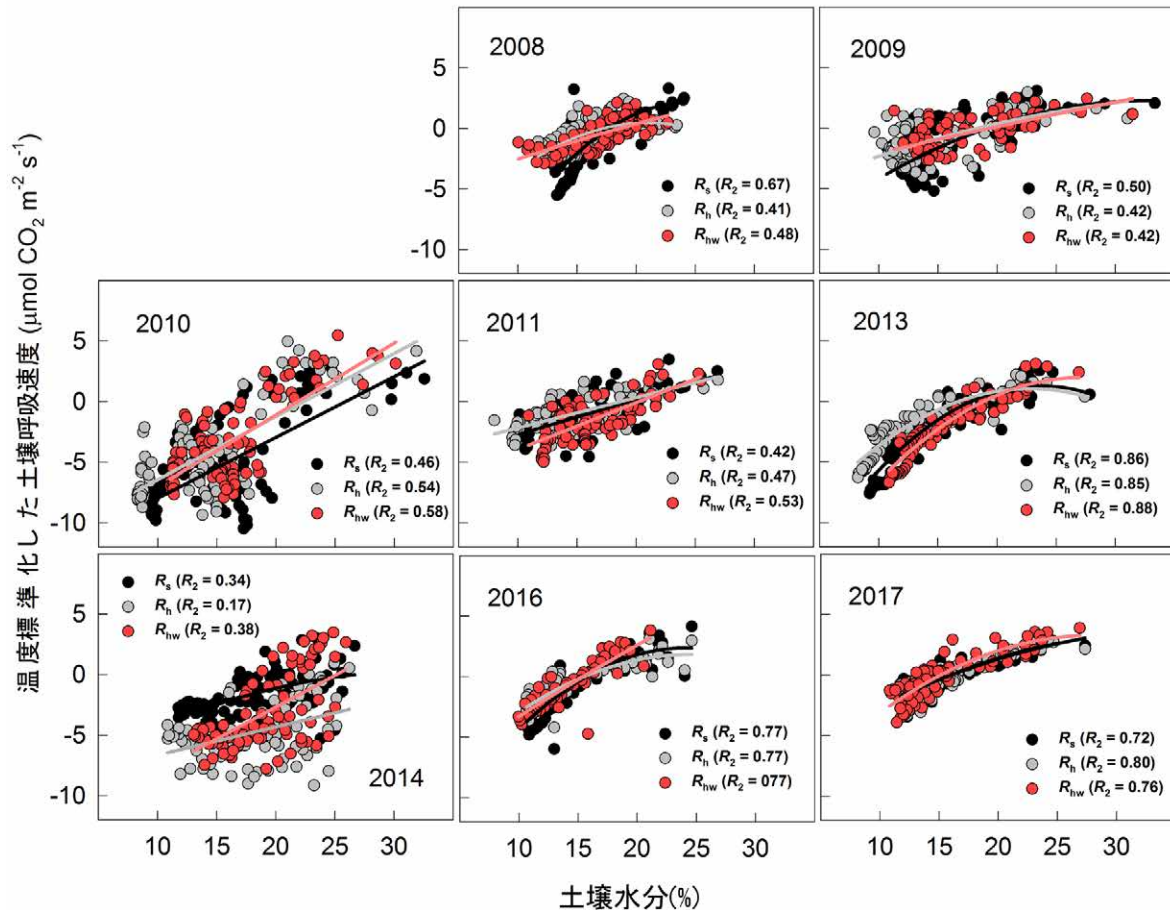


図33 夏季（7-9月）の西日本常緑カシ林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関（ R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸）

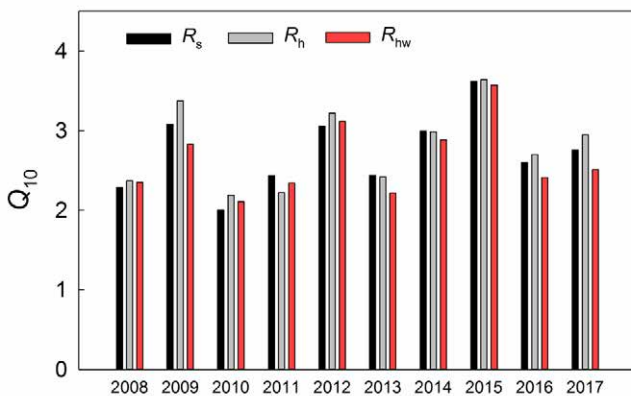


図34 西日本常緑カシ林サイトにおける年別 Q_{10}

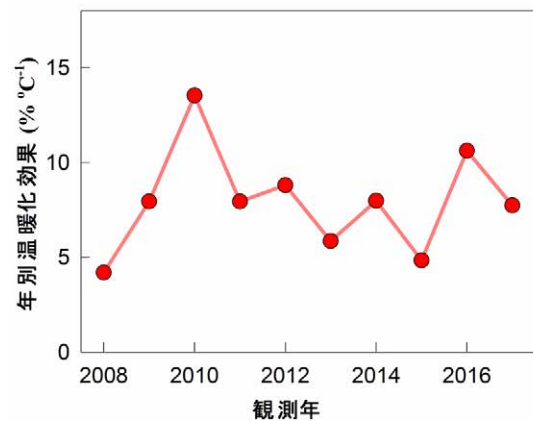


図35 西日本常緑カシ林サイトにおける年別温暖化効果

5) 九州地方コジイ林

本サイトでは、2009年以降約9年のデータが得られている（図36）。本サイトにおける各処理区の年積算フラックスは、土壌呼吸が12.64-18.41 tC ha⁻¹ yr⁻¹、微生物呼吸が9.91-13.33 tC ha⁻¹ yr⁻¹、温暖化された微生物呼吸が10.86-15.10 tC ha⁻¹ yr⁻¹の範囲で変動していた。本サイトでは、毎年顕著な地温とフラックスの指数関数的相関が見られ、フラックスの決定因子として地温の影響が強いことがうかがえた（図37）。その一方で、夏季（特に8月）の降水量が著しく

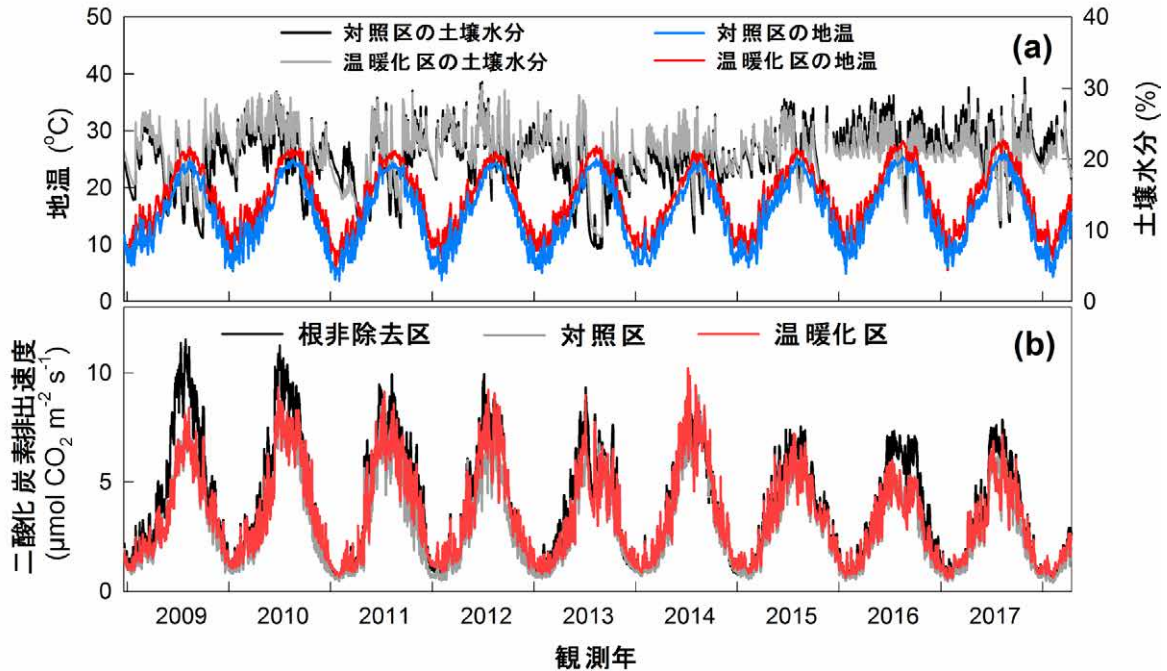


図36 九州地方コジイ林サイトにおける環境データ（地温と土壌水分、a）と、各処理区におけるフラックスデータ（b）

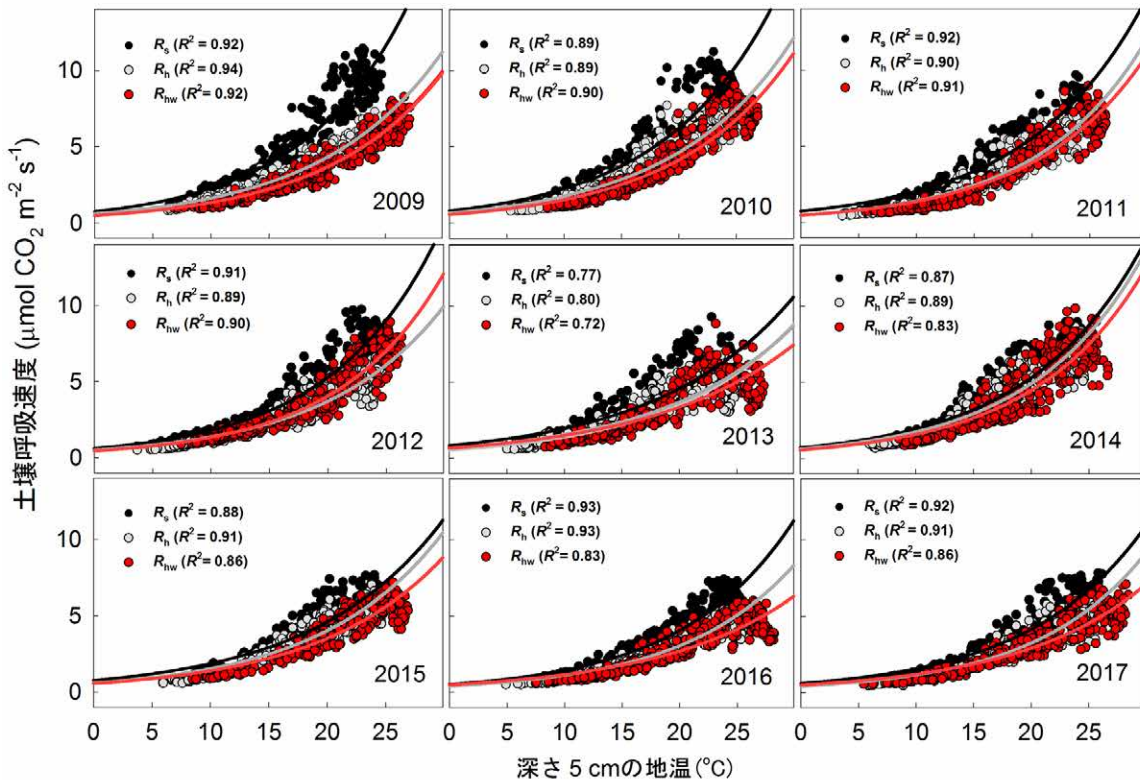


図37 九州地方コジイ林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関（ R_s ：土壌呼吸、 R_h ：微生物呼吸、 R_{nw} ：温暖化区の微生物呼吸）

少なかった 2013 年および 2016 年などは、土壌水分とフラックスの非常に強い相関が見られた (図 38)。これらのことから、湿潤な環境 (年降水量は約 2,500 mm) にある本サイトにおいては、フラックスの決定因子として温度の影響が大きいが、高温で乾燥しやすい夏季の降水量と土壌水分も、年によっては強く影響することがうかがえた。 Q_{10} 値の変動範囲は、土壌呼吸が 2.34-2.97、微生物呼吸が 2.36-2.94、温暖化区における微生物呼吸が 2.23-3.02 であった (図 39)。

1℃当たりの年別温暖化効果は +7.1% から +17.8% であり (図 40)、9 年間の温暖化操作後も、温暖化による微生物呼吸の促進的効果は減少傾向を示していない。本サイトでは、7 月から 9 月の降水量が、年別温暖化効果と正の相関を示すことが明らかになっている⁹⁾。そのため、微生物呼吸に対する促進的な温暖化効果が長期にわたって維持されているのには、年間降水量約 2,500 mm という湿潤な環境が影響しているものと考えられる。

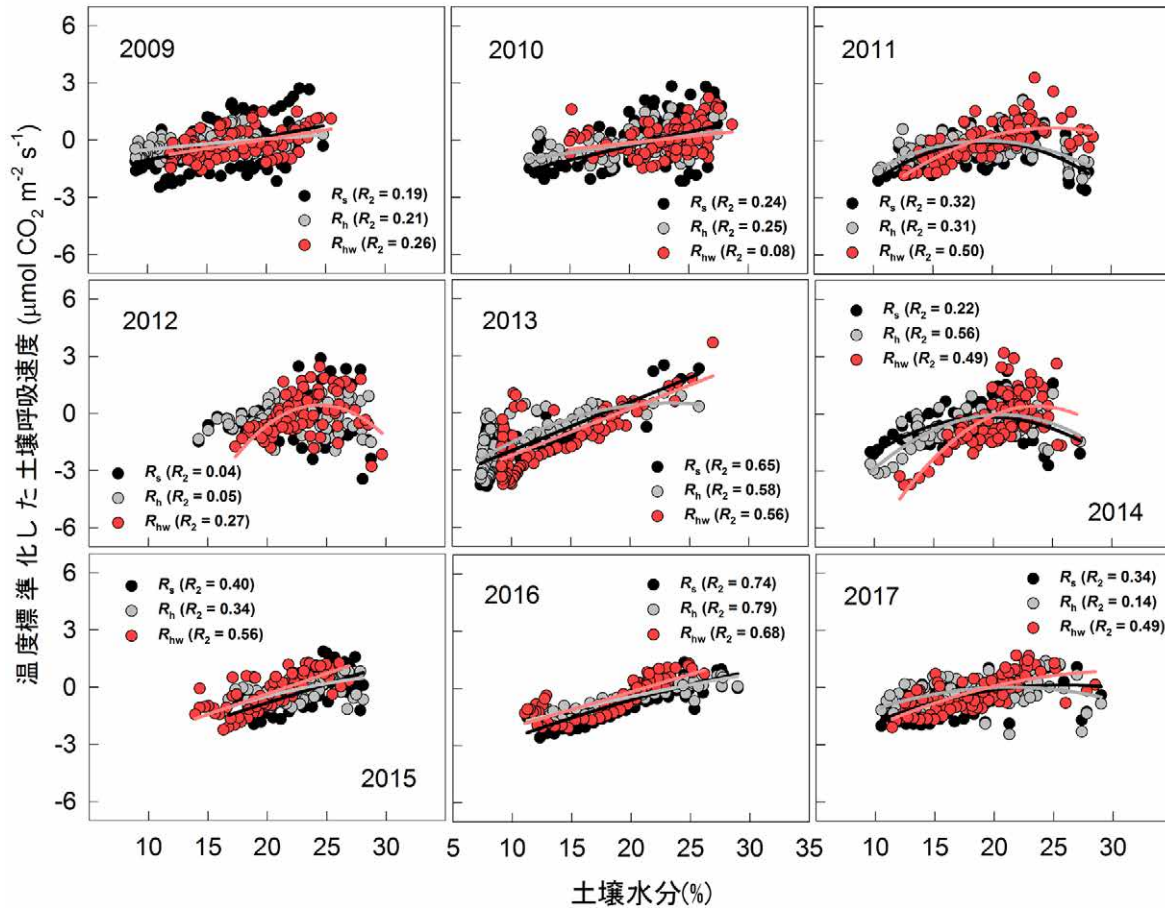


図 38 夏季 (7-9 月) の九州地方コジイ林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{nw} : 温暖化区の微生物呼吸)

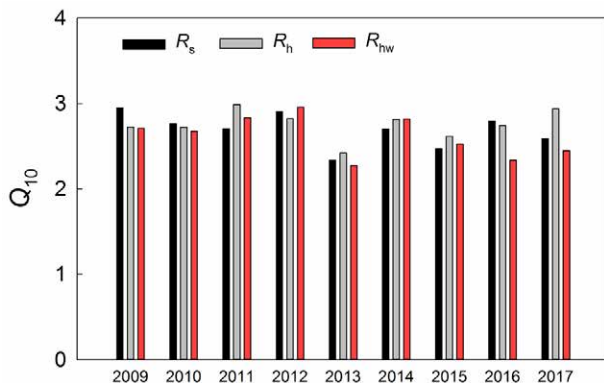


図 39 九州地方コジイ林サイトにおける年別 Q_{10}

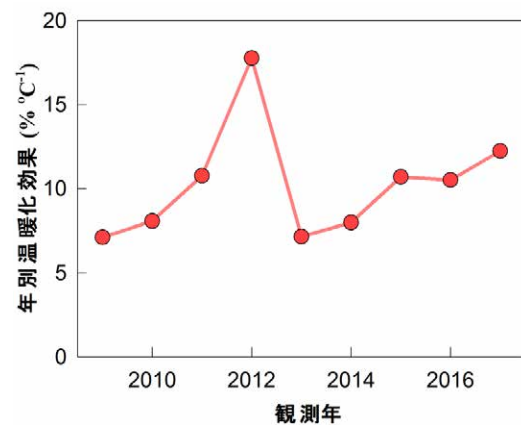


図 40 九州地方コジイ林サイトにおける年別温暖化効果

6) 亜熱帯亜高山帯天然針広混交林

本サイトでは、約3年半のデータが得られている(図41)。本サイトにおける各処理区の年積算フラックスは、土壌呼吸が6.43-6.70 tC ha⁻¹ yr⁻¹、微生物呼吸が5.44-5.57 tC ha⁻¹ yr⁻¹、温暖化された微生物呼吸が7.50-8.29 tC ha⁻¹ yr⁻¹の範囲で変動していた。本サイトは高標高で低温のため、フラックスに対する温度の影響が非常に強かった(図42)。一方で、フラックスに対する土壌水分の影響は、2015年を除いて非常に弱かった(図43)。しかし、2015年は4月から7月上旬にかけて、例外的に土壌水分が20%程度まで落ち込んだため、土壌水分とフラックスの間にある程度の相関が見られた。 Q_{10} 値の変動範囲は、土壌呼吸が3.19-4.65、微生物呼吸が3.44-5.41、温暖化区における微生物呼吸が2.83-4.57であり、他のサイトと比較しても高い温度感性を示した(図44)。

1℃当たりの年別温暖化効果の変動範囲は+13.2%から+17.4%であり(図45)、高い Q_{10} 値を反映して大きな温暖化効果を示した。本サイトは温暖化操作実験サイトの中でも最も新しいサイトのため、今後微生物呼吸に対する温暖化影響がどの様に変化するのか、その動向が注目される。

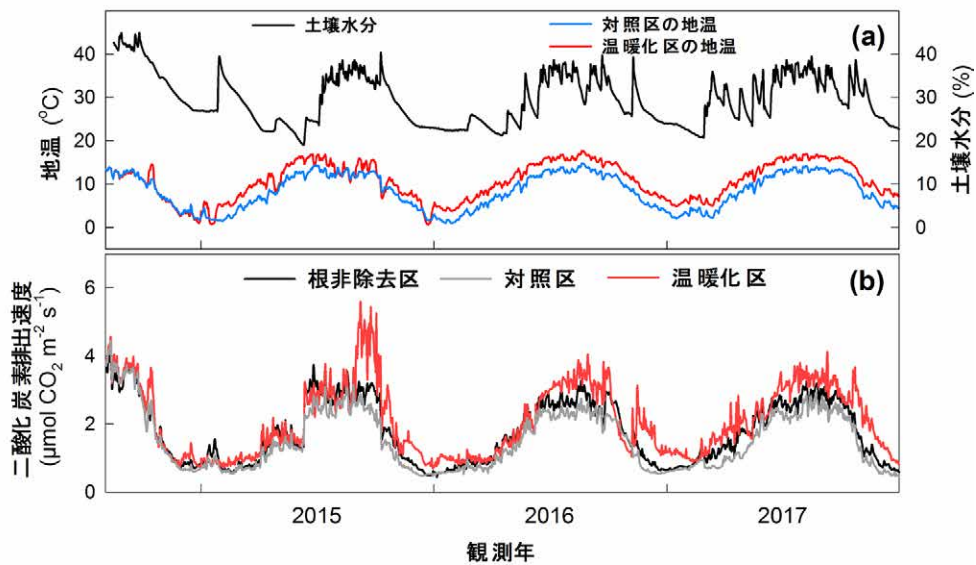


図41 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける環境データ(地温と土壌水分、a)と、各処理区におけるフラックスデータ(b)

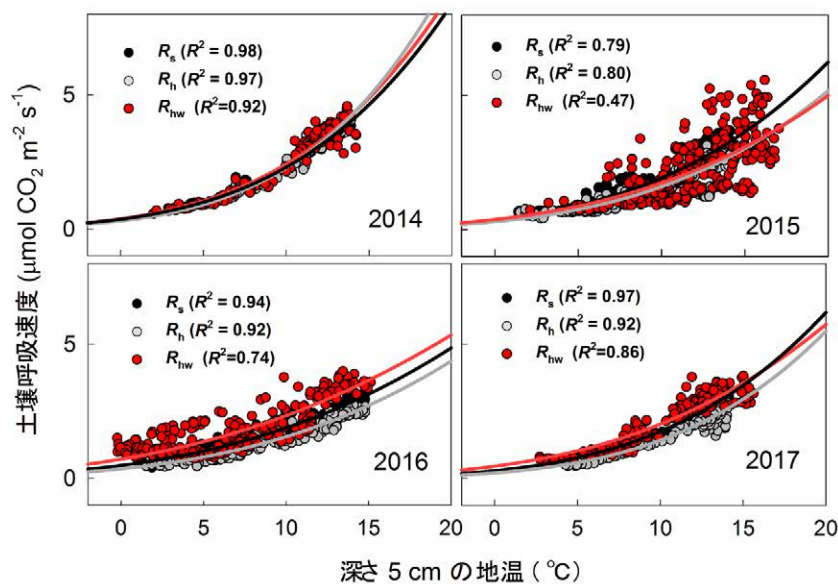


図42 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸、 R_{hw} : 温暖化区の微生物呼吸)

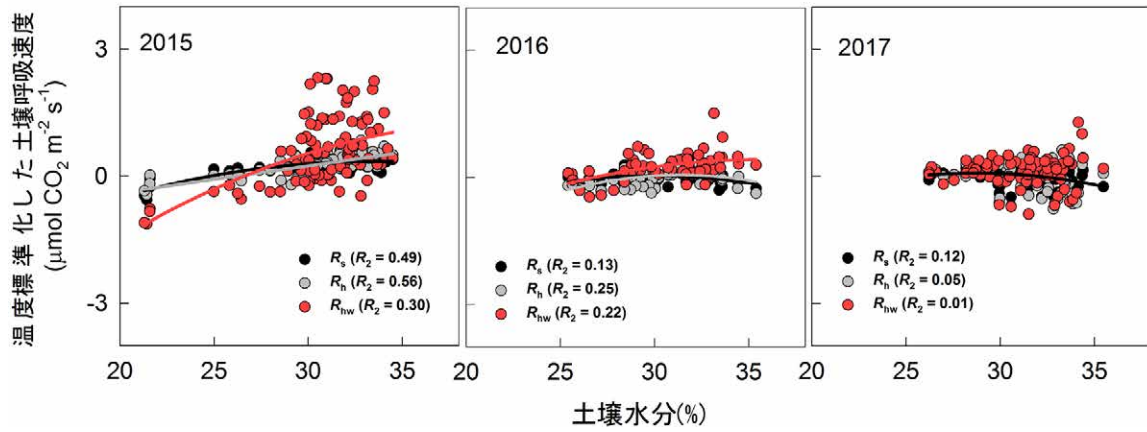


図 43 夏季 (7-9 月) の中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_n : 微生物呼吸、 R_{nw} : 温暖化区の微生物呼吸)

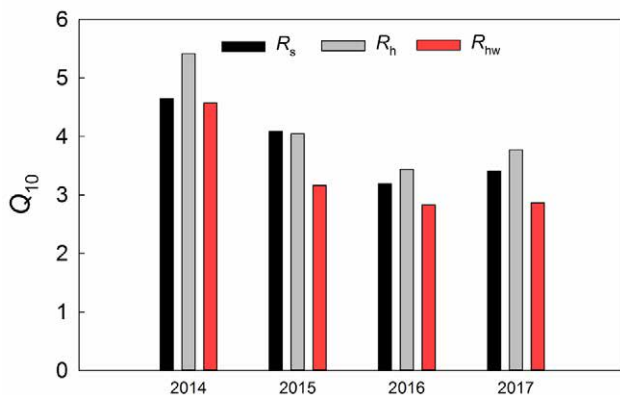


図 44 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける年別 Q_{10}

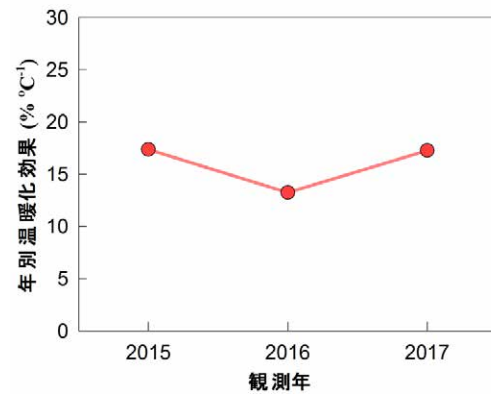


図 45 中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林サイトにおける年別温暖化効果

7) 亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林

本サイトでは、約7年間のデータが得られている (図 46)。本サイトにおける各処理区の年積算フラックスは、土壌呼吸が $10.97-13.17 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、微生物呼吸が $9.64-11.13 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、温暖化された微生物呼吸が $11.11-13.40$

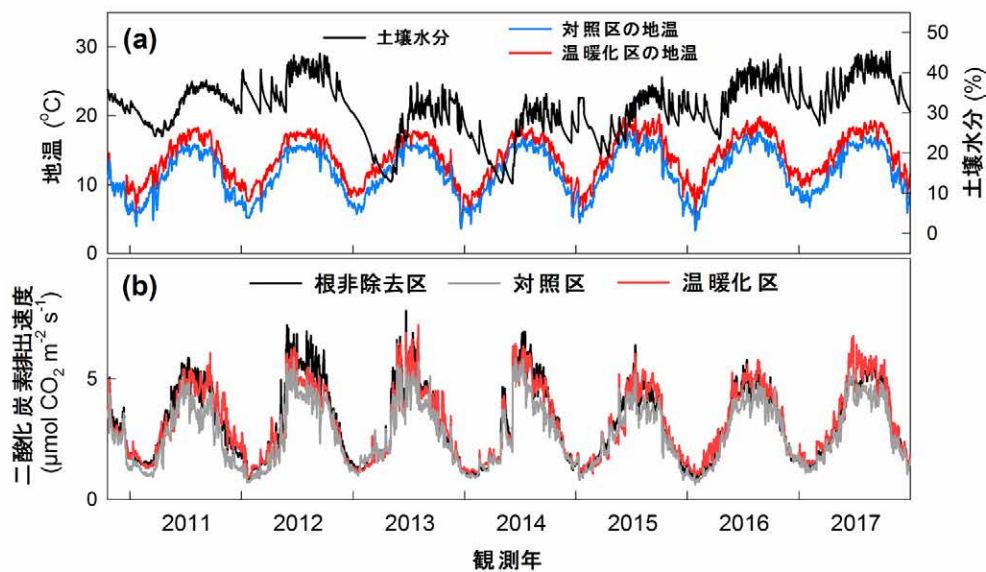


図 46 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける環境データ (地温と土壌水分、a) と、各処理区におけるフラックスデータ (b)

tC ha⁻¹ yr⁻¹の範囲で変動していた。Tan *et al.*, (2013)¹⁰⁾に報告されている様に、本サイトではフラックスに対する温度の影響が非常に強く、地温とフラックスの間には、毎年顕著な指数関数的相関が見られた(図47)。一方で、土壌水分とフラックスの相関は、地温とフラックスの相関と比して弱いものであった(図48)。Q₁₀値の変動範囲は、土壌呼吸が3.38-6.45、微生物呼吸が2.92-5.58、温暖化区における微生物呼吸が3.21-5.65であり、観測サイトの中で最も高い値を記録した(図49)。

1℃当たりの温暖化効果は+6.4%から+13.0%の範囲で変動していた(図50)。本サイトに置ける2014年までのデータに関しては、Wu *et al.*, (2016)¹¹⁾に報告されている。その報告によれば、4年間の平均温暖化効果は1℃当たり+10.9%であり、土壌水分と温暖化効果の間には、弱い正の相関が見られた。本サイトでは、7年間の温暖化処理の後

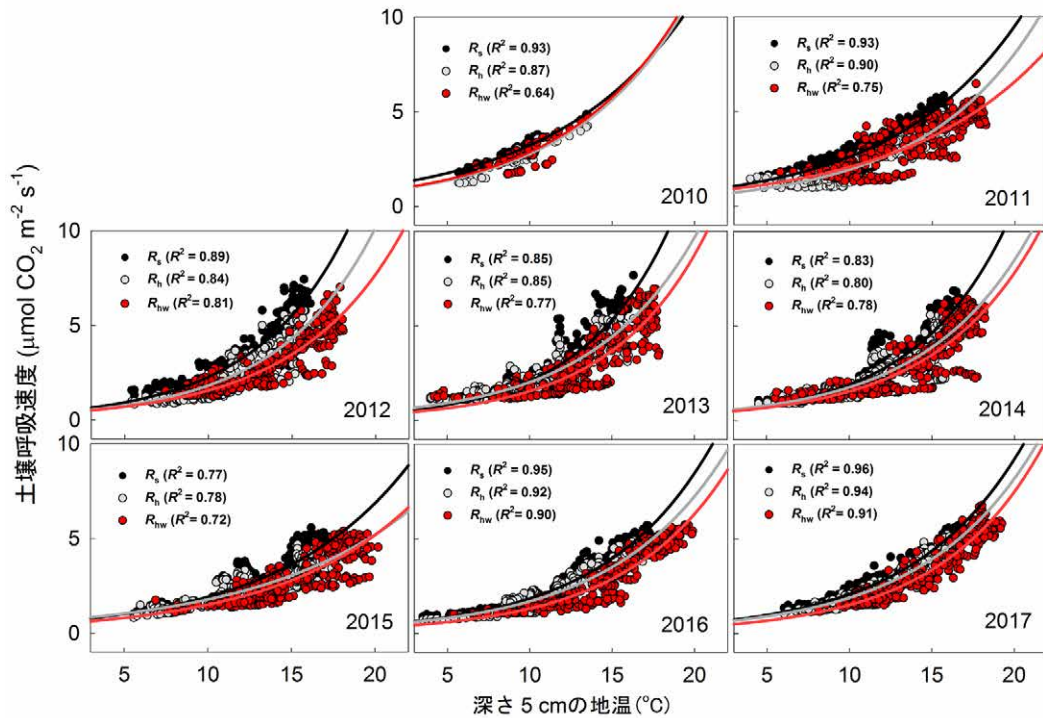


図47 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s: 土壌呼吸、R_h: 微生物呼吸、R_{hw}: 温暖化区の微生物呼吸)

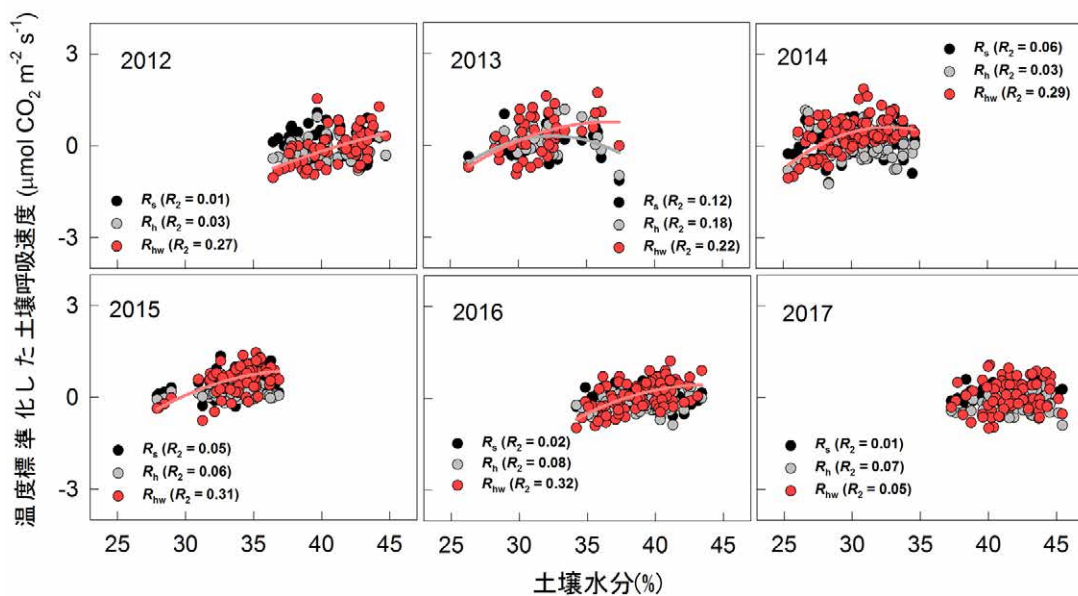


図48 夏季(7-9月)の中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s: 土壌呼吸、R_h: 微生物呼吸、R_{hw}: 温暖化区の微生物呼吸)

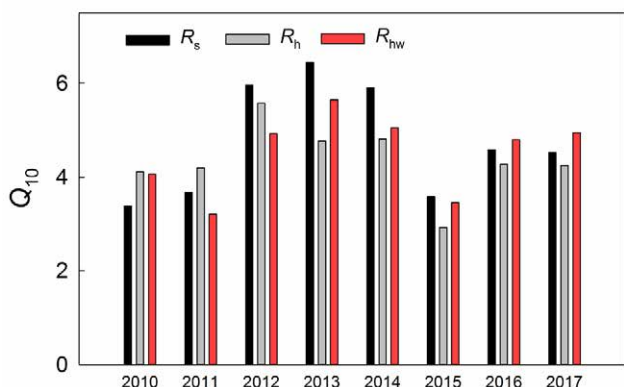


図 49 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける年別 Q_{10}

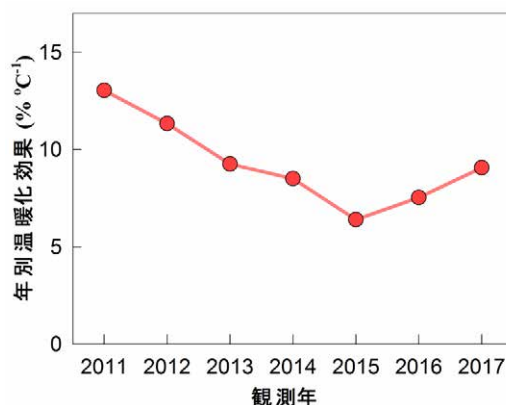


図 50 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林サイトにおける年別温暖化効果

も、温暖化効果は低減する傾向を見せていない。これには、本サイトの豊富な土壤有機炭素量と、湿潤な環境が関係しているものと考えられる。

2.1.3.2 国内の森林における土壤呼吸の長期変動

1) 天塩カラマツ林造林地

天塩カラマツ林造林地サイトでは、2003年から観測を行っているが、2010年から2012年はシステムの更新に伴い欠測となっている。2017年で、約12年分のデータが得られている（図51）。本サイトでは、6月から10月を共通観測期間とした。土壤呼吸共通観測期間における積算値は、8.18-12.38 tC ha⁻¹の範囲で変動していた。微生物呼吸は2015年以降観測を行っており、3.54-4.00 tC ha⁻¹の範囲で変動していた。本サイトの特徴として、土壤呼吸に占める微生物呼吸の割合が40%未満と少ない点が挙げられる。天塩カラマツ造林地サイトでは、ササが密に生育しているため、その根呼吸の割合がとても高いことが原因として考えられる。

土壤呼吸および微生物呼吸速度は地温の上昇に伴い指数関数的に増加しており（図52）、土壤呼吸および微生物呼吸の Q_{10} 値はそれぞれ、2.03-3.32、2.09-2.30の間で変動していた。一方で、土壤水分と土壤呼吸および微生物呼吸の関係性は概して弱かったが、年によっては土壤水分と土壤呼吸の間には負の相関が見られた（2004年、2006年、2007年など、図53）。これは、本サイトにおける土壤水分が他のサイトと比較しても高く、降雨が多い場合には過湿となって土

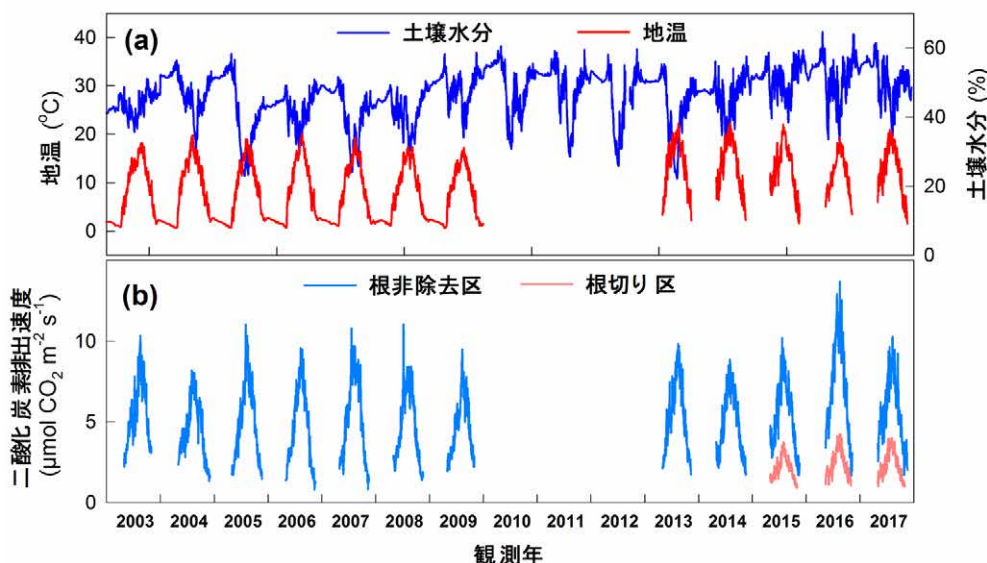


図 51 天塩カラマツ林造林地サイトにおける、地温および土壤水分 (a)、根非除去区における総土壤呼吸速度および根切り区における微生物呼吸速度 (b)

壤呼吸および微生物呼吸を阻害した可能性を示す。実際に、2004年から2014年にかけての共通観測期間と積算土壌呼吸の間には、有意な負の相関が確認されている。土壌水分の増加は、CO₂の分解や拡散を抑制する直接的な影響を与える他、降雨日や曇天日の増加により、その年のササのバイオマスを抑える効果も認められたため、根呼吸を抑制した影響も考えられた。

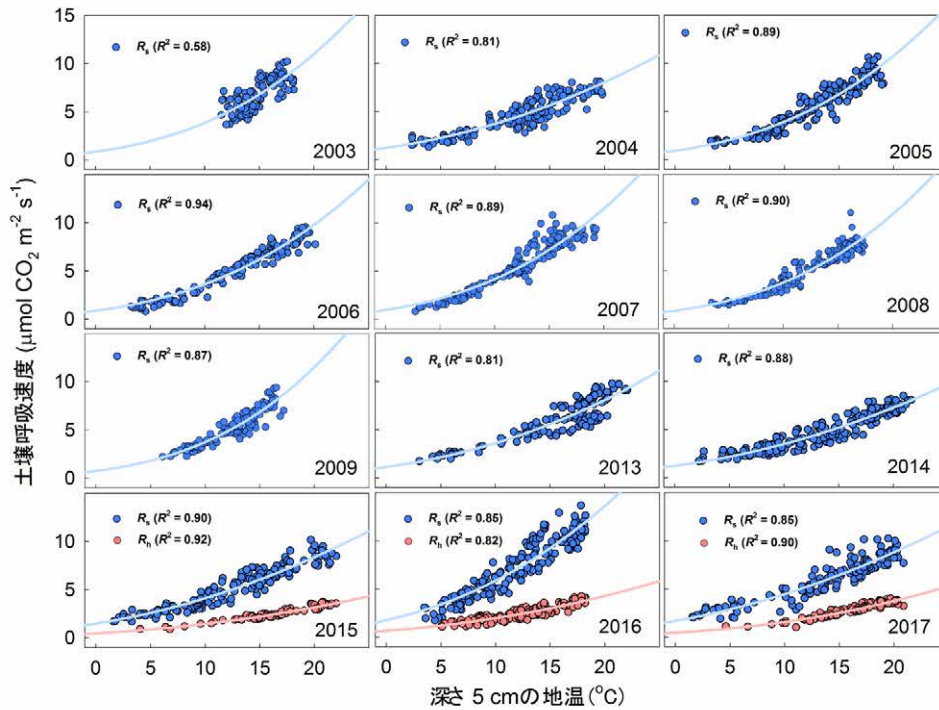


図 52 天塩カラマツ林造林地サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸)

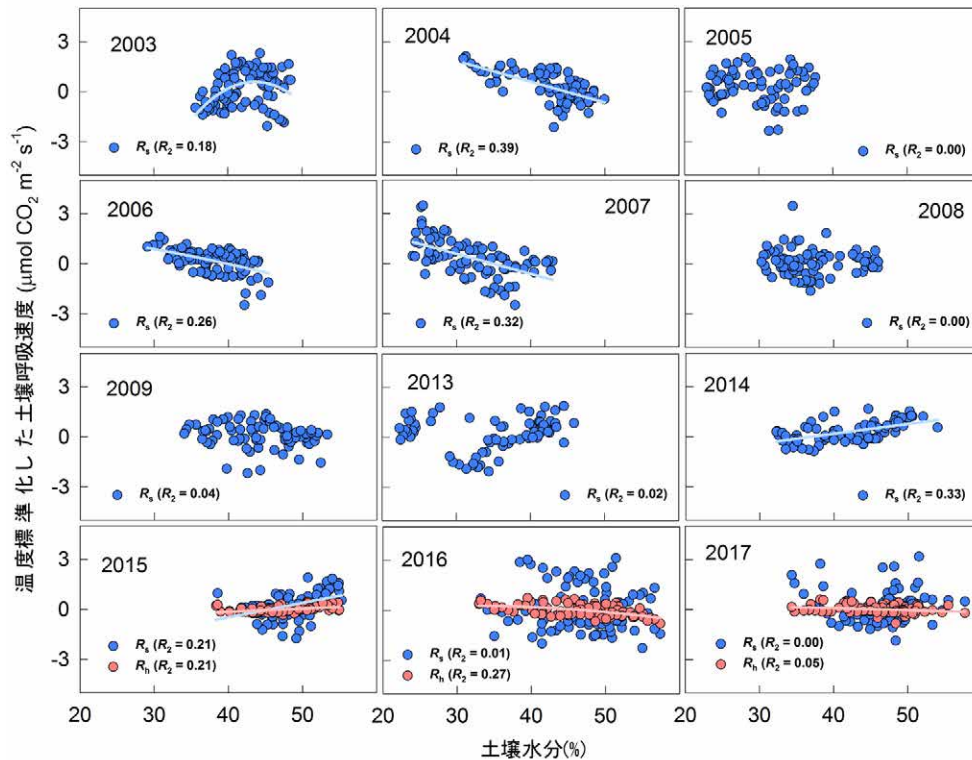


図 53 夏季 (7-9 月) の天塩カラマツ林造林地サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_h : 微生物呼吸)

2) 苫小牧カラマツ林跡地

本サイトにおける CO_2 フラックスの観測結果を図 54 に示す。2006 年以降 2010 年までは、各 CO_2 フラックス（土壌呼吸、微生物呼吸、林床部総生産： GPP_u 、林床部呼吸： R_u など）の規模は大きくなる傾向が見られたが、2011 年以降の各フラックスの変動幅は緩やかになってきている。本サイトでは、5 月 10 日から 11 月 6 日までを共通観測期間としている。2011 年から 2017 年の共通観測期間における、土壌呼吸速度および微生物呼吸速度の積算値は、土壌呼吸が $4.94\text{--}7.03 \text{ tC ha}^{-1}$ 、微生物呼吸が $4.53\text{--}6.01 \text{ tC ha}^{-1}$ の範囲で変動していた。

本サイトでは、地温と土壌呼吸速度および微生物呼吸速度の間に顕著な指数関数的相関が見られた（図 55）。一方で、土壌水分と土壌呼吸速度および微生物呼吸の相関は、地温との相関に比して、著しく弱いものであった（図 56）。このことから、本サイトにおける土壌呼吸、微生物呼吸の変動因子として、地温が強く働いていることがうかがえた。また、本サイトにおける 2011 年から 2017 年の Q_{10} 値の変動範囲は、土壌呼吸と微生物呼吸でそれぞれ、 $2.50\text{--}3.15$ 、 $2.54\text{--}3.08$ であった。

植生を含めた炭素フラックスに注目すると、2011 年以降は、 R_u が $10.93\text{--}13.90 \text{ tC ha}^{-1}$ 、 GPP_u が $8.73\text{--}16.89 \text{ tC ha}^{-1}$ 、 CO_2 交換（ NUE ）は -3.00 tC ha^{-1} から 2.62 tC ha^{-1} の範囲で変動していた（図 57）。 GPP_u に関しては、2012 年をピークとして、以降緩やかに減少してきている。これには、本サイトにおける植生の変化が関係しているものと考えられる。本サイトでは、台風攪乱後にエゾイチゴやオオアワダチソウなどの草本植生が更新したが、その後徐々にシラカンバなどの木本植物が成長してきている。チャンパー内の植物は多くが草本植生であるため、今後木本植物が林冠を形成するようになると、光が遮られ、一層林床植生による生産量は減少することが予想される。

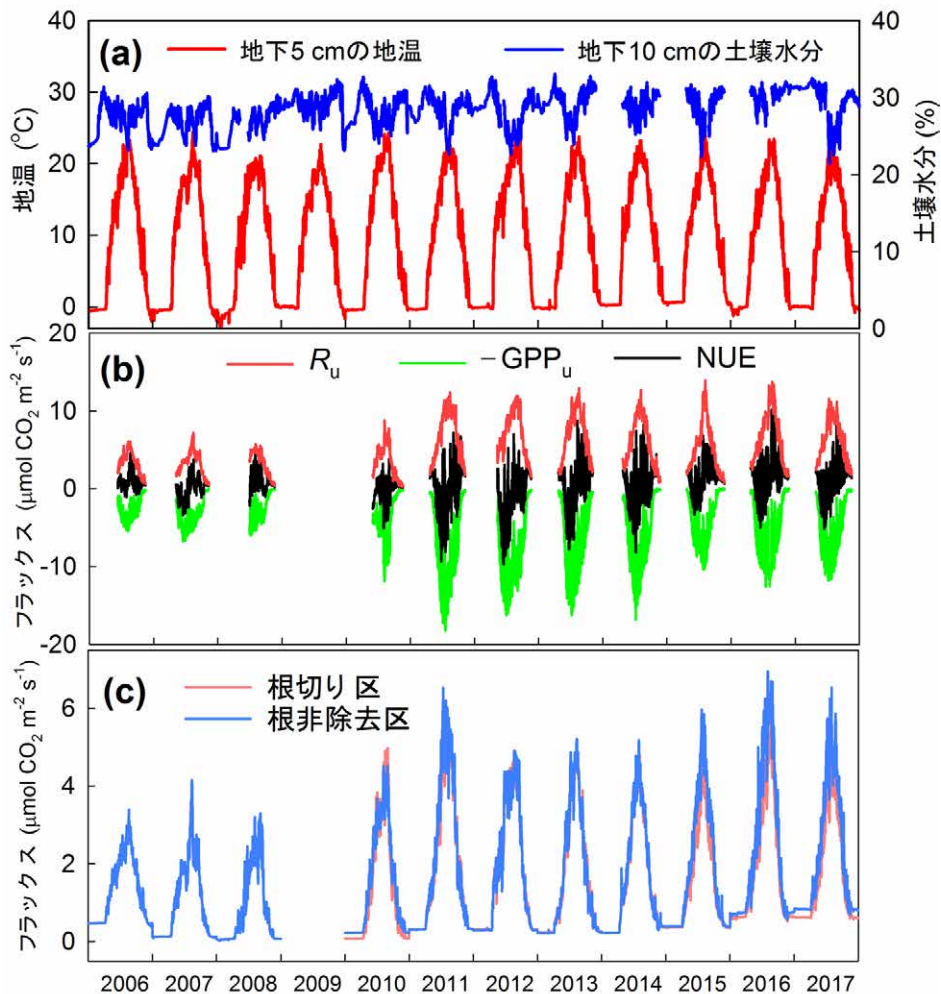


図 54 苫小牧カラマツ林跡地サイトにおける地温および土壌水分 (a)、生態系呼吸速度 (R_u)、総生産速度 (GPP_u) および CO_2 交換速度 (NUE)、(b)、根非除去区における総土壌呼吸速度および根切り区における微生物呼吸速度 (c)

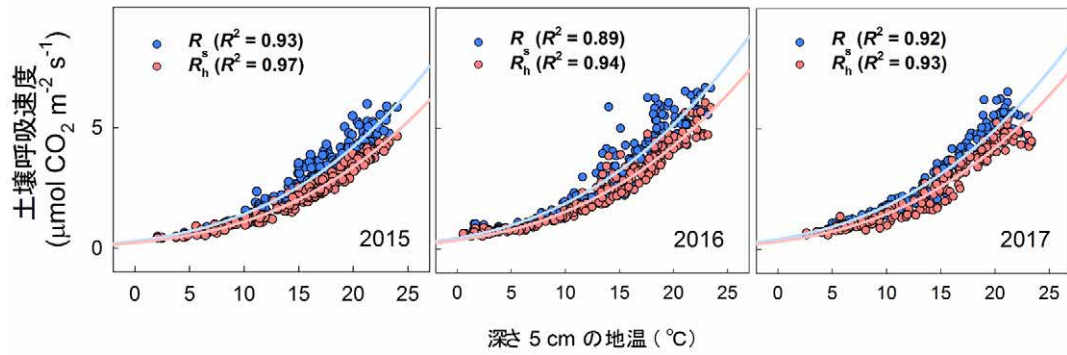


図 55 苫小牧カラマツ林跡地サイトにおける土壌呼吸および微生物呼吸の温度反応曲線

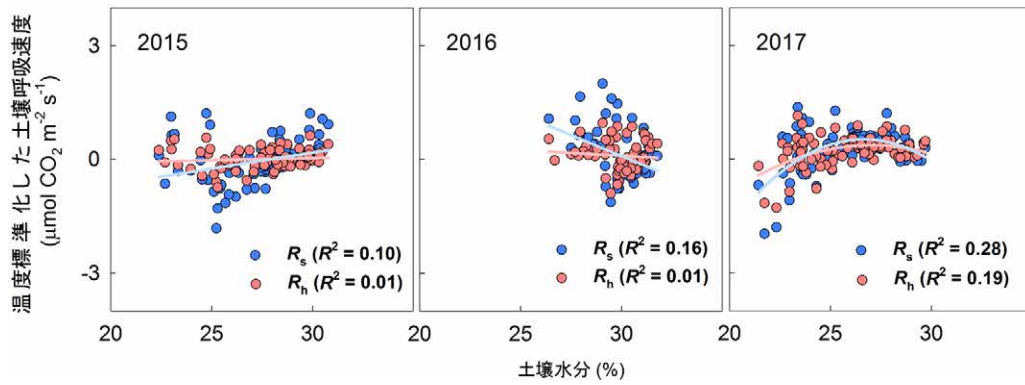


図 56 苫小牧カラマツ林跡地サイトにおける土壌呼吸および微生物呼吸の土壌水分反応

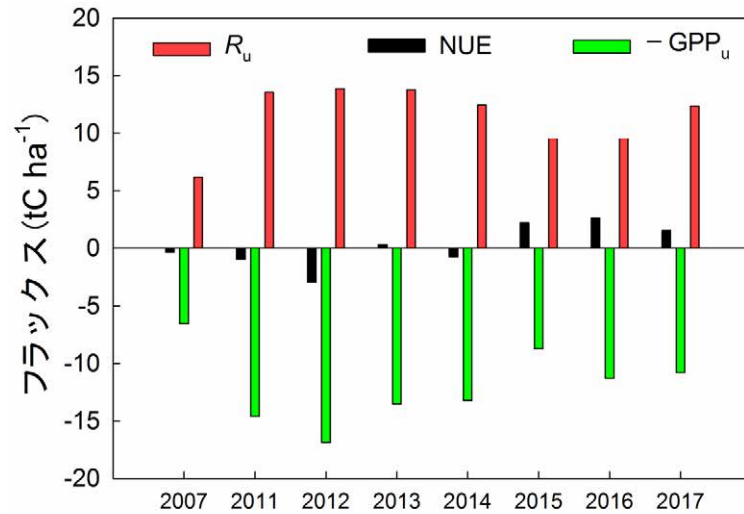


図 57 苫小牧カラマツ林跡地サイトにおける、2007 年および 2011 年から 2017 年の、共通観測期間 (5 月 10 日から 11 月 6 日) における、植生を含んだ各フラックスの積算値

3) 富士北麓カラマツ林

富士北麓サイトでは2006年から土壌呼吸、微生物呼吸および林床植生を含めた炭素収支を観測してきた(図58)。本サイトでは、2014年および2015年に段階的にカラマツの間伐を行い、最終的に約35%のカラマツが伐採された。間伐前の8年間(2006-2013)の観測結果に関しては、Teramoto *et al.*, (2017)⁴⁾にまとめられている。本サイトにおいては、毎年地温とフラックスの顕著な指数関数的相関が見られた(図59)。その一方で、土壌水分とフラックスの相関が地温よりも概して弱く(図60)、地温が林床部各炭素フラックスの決定因子として機能していることがうかがえた。間伐前の8年間における年積算フラックスに関しては、土壌呼吸は7.04-8.39 tC ha⁻¹yr⁻¹、微生物呼吸は5.74-6.84 tC ha⁻¹yr⁻¹、林床部呼吸(R_u)は9.27-10.72 tC ha⁻¹yr⁻¹、林床部総生産(GPP_u 、5月から10月の成長期間積算)は2.34-3.18 tC ha⁻¹、林床部CO₂交換量(NUE)は6.09-7.57 tC ha⁻¹yr⁻¹の間で変動していた。この年積算フラックスの年々変動には、放出因子(土壌呼吸、微生物呼吸、 R_u 、NUE)に関しては年平均地温(図61)、 GPP_u に関しては、林床部の光環境が強く影響する事が明らかになった(図62)。この年平均地温と年積算フラックスとの関係性から、1℃年平均地温が上昇した場合には、土壌呼吸と微生物呼吸は25.1%、 R_u は14.4%、NUEは23.9%上昇することが示唆された⁴⁾。

2014年以降は、間伐の影響で各フラックスが変化した。2014年から2017年における年積算フラックスは、土壌呼吸が7.26-8.83 tC ha⁻¹yr⁻¹、微生物呼吸は5.92-6.57 tC ha⁻¹yr⁻¹、林床部呼吸(R_u)は9.86-12.88 tC ha⁻¹yr⁻¹、林床部総生産(GPP_u 、5月から10月の成長期間積算)は3.47-4.72 tC ha⁻¹、林床部CO₂交換量(NUE)は6.16-7.87 tC ha⁻¹yr⁻¹の間で変動していた。間伐が完了した2015年以降と間伐前を比較すると、間伐後に GPP_u は約65%、 R_u は約25%増加していた。 GPP_u の増加には、間伐によって林床部の光環境が大きく改善された事が影響している。 R_u の増加には、間伐によって林床部への直達光が増加し、地温が上昇したこと、それに加えて林床植生のバイオマスが増加し、植物呼吸が増加したことが関係しているものと考えられる。12年の観測期間中、年別 Q_{10} 値の変動範囲は、土壌呼吸で2.01-2.94、微生物呼吸で2.15-2.99、 R_u で2.27-2.85であった。

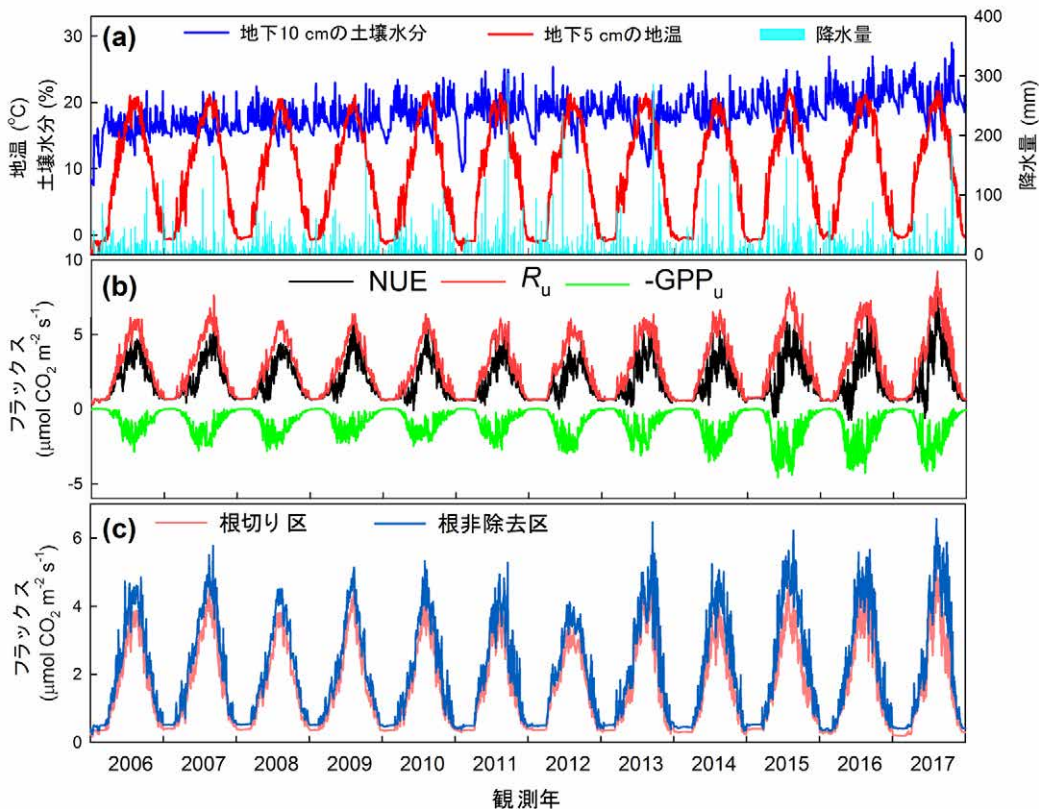


図58 富士北麓カラマツ林サイトにおける地温、降水量および土壌水分 (a)、生態系呼吸速度 (R_u)、林床部総生産速度 (GPP_u) および林床部CO₂交換速度 (NUE、b)、根非除去区における総土壌呼吸速度および根切り区における微生物呼吸速度 (c)

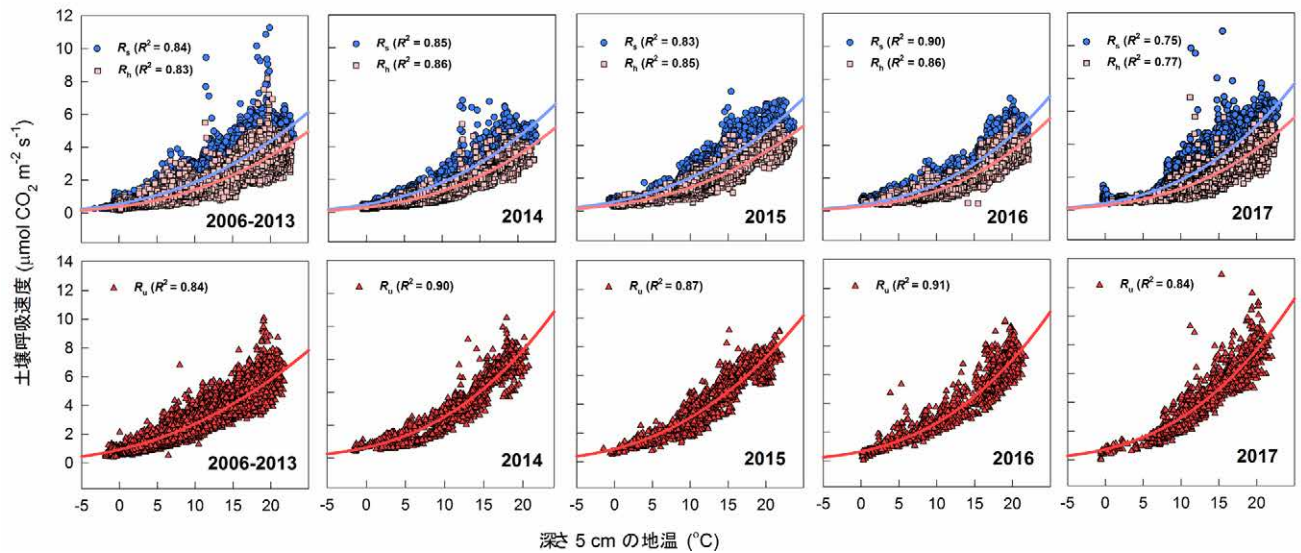


図 59 富士北麓カラムツ林サイトにおける地温と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_n : 微生物呼吸、 R_u : 林床部呼吸)

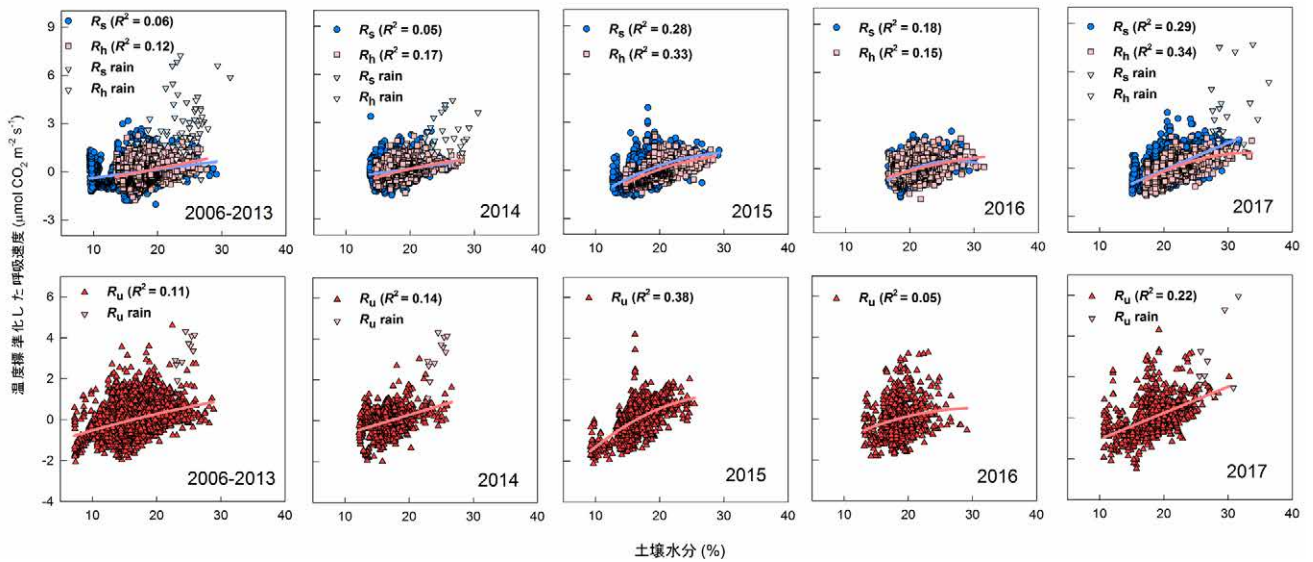


図 60 富士北麓カラムツ林サイトにおける土壌水分と、各処理区におけるフラックスデータの相関 (R_s : 土壌呼吸、 R_n : 微生物呼吸、 R_u : 林床部呼吸、 ∇ は降雨によってフラックスが大きく変動した際のデータを示し、回帰分析には含まれていない)

また、富士北麓カラムツ林サイトでは、2015 年以降林床部におけるメタンフラックスの観測を行っている (図 63)。富士北 2017 年における 5 月から 10 月までの成長期における積算メタンフラックスは、 $-6.25 \text{ kg C ha}^{-1}$ であり、本サイトはメタンの吸収源であることが分かる。二酸化炭素と比べると、吸収される炭素量の規模は小さいが、メタンの地球温暖化係数 (二酸化炭素の 28 倍) を考慮すると、土壌呼吸の約 2.5% を相殺していることになる。

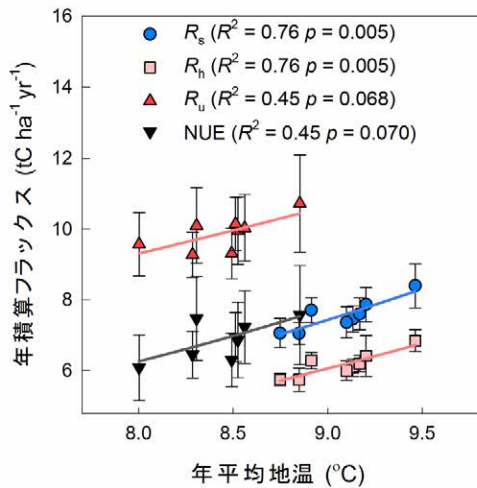


図 61 富士北麓カラマツ林サイトにおける年平均地温と年積算土壌呼吸量 (R_s)、微生物呼吸量 (R_h)、林床部呼吸量 (R_u)、林床部 CO_2 交換量 (NUE) の関係⁴⁾

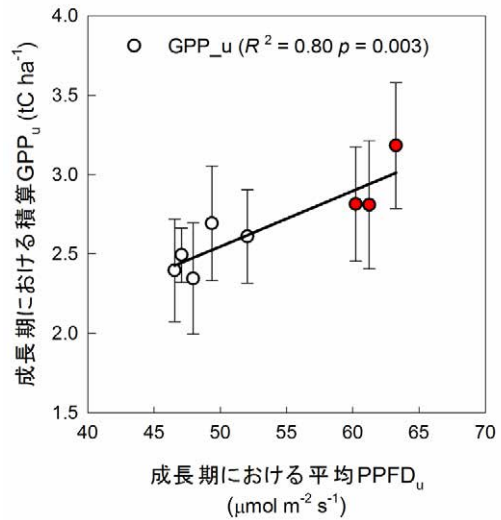


図 62 富士北麓カラマツ林サイトにおける成長期の光の強さ (PPFD_u) と林床部総生産量 (GPP_u) の関係⁴⁾

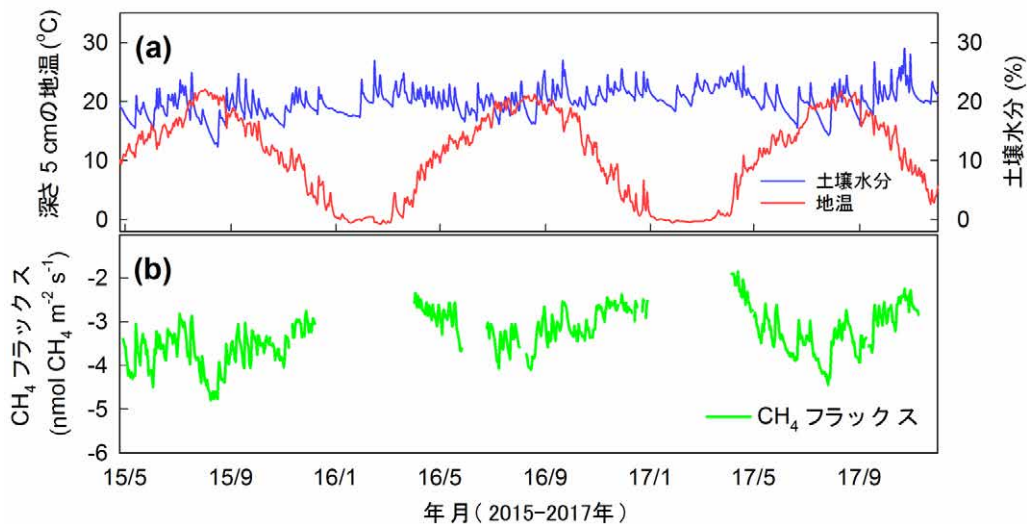


図 63 富士北麓カラマツ林サイトにおける 2015 年以降の地温および土壌水分 (a)、メタン (CH₄) フラックス (b)

2. 1. 3. 3 アジアの森林における土壌呼吸の変動特徴

1) 台湾亜熱帯スギ林

台湾亜熱帯スギ林サイトでは、約 6 年間のデータが得られている (図 64)。本サイトにおける土壌呼吸および微生物呼吸の年積算値は、それぞれ 10.59-11.96 tC ha⁻¹ yr⁻¹ および 9.72-10.68 tC ha⁻¹ yr⁻¹ であった。土壌呼吸に占める微生物呼吸の割合は、90.5% と非常に高かった。土壌呼吸および微生物呼吸の変動は、概ね地温の季節変動に応じていた。本サイトは年降水量が 2,635 mm と非常に湿潤な環境にあるため、土壌水分がフラックスの限定要因になりにくく、地温の影響が強くなることがうかがえた。

2) マレーシア低地熱帯天然林

マレーシア低地熱帯天然林サイトにおける 2016 年から 2017 年の土壌呼吸速度および微生物呼吸速度と、地温、土壌水分の季節変化を図 65a、図 65b に示す。年間を通じて地温の変動が少ないため、土壌呼吸および微生物呼吸の温度

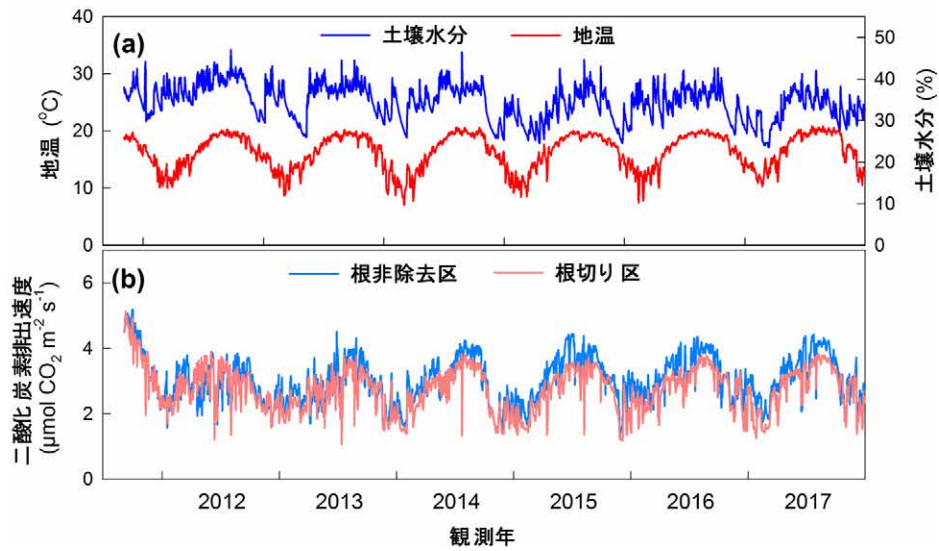


図 64 台湾亜熱帯スギ林サイトにおける、地温および土壌水分 (a)、根非除去区における総土壌呼吸速度および根切り区における微生物呼吸速度 (b)

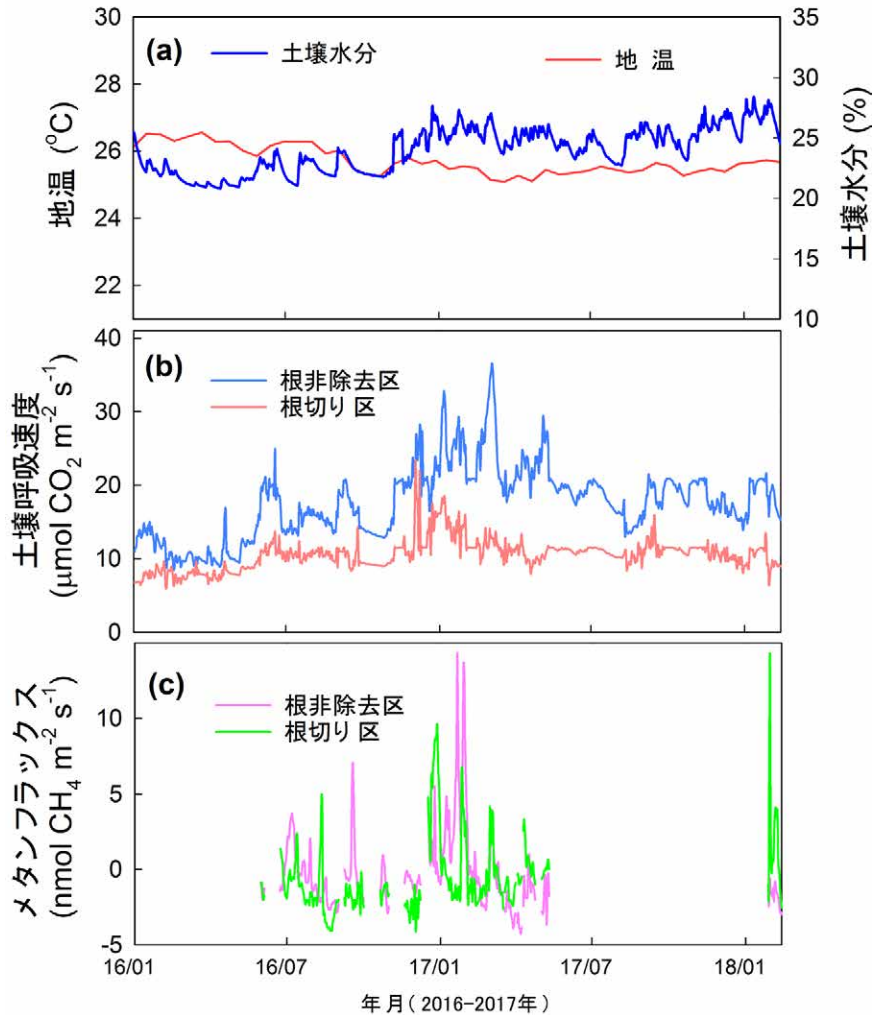


図 65 マレーシア低地熱帯天然林サイトにおける、地温および土壌水分 (a)、根非除去区における総土壌呼吸速度および根切り区における微生物呼吸速度 (b)、根非除去区および根切り区におけるメタンフラックス (c)

依存性は明瞭ではなかった。一方、土壌呼吸と微生物呼吸は土壌水分の上昇によって増加する傾向が見られ、根の影響が含まれる土壌呼吸の方が、増加傾向が高かった。この地域は雨季と乾季に気候が明瞭に二分され、雨季に樹木の呼吸活性や土壌分解が促進されているものと考えられた。マレーシア低地熱帯天然林サイトの総土壌呼吸に占める根呼吸の割合は34.44%であり、天塩カラマツ林造林地サイトよりは少ないものの、他のサイトと比較して高い値であった。この原因としては、東南アジア熱帯多雨林の地下部バイオマスが大きい ($\sim 232 \text{ t ha}^{-1}$) 事が考えられる。

本サイトでは2015年末からメタンフラックスの観測も行っている(図65c)。本サイトでも土壌のメタン吸収が観測されたが、雨季に降雨が集中した際には土壌からのメタンの排出が起こっていた。これは、土壌水分が上昇し、土壌が嫌氣的になることでメタンが排出されたものと考えられる。また、降雨が見られない時でも突発的に高いメタンの排出が観測されることがあるが、これにはシロアリによるメタン排出が関わっているものと考えられる。

3) 熱帯二次林

熱帯二次林の回復過程を評価するため、マレーシア低地熱帯天然林サイトおよびその周辺の二次林において、携帯型土壌呼吸観測システムを用いて土壌呼吸を約2週間の間隔で測定を行っている(図66a, b)。天然林における土壌呼吸速度は、常設型の観測システムから得られた結果に比べて、季節変動が小さかった。これは、手動の観測では、降雨イ

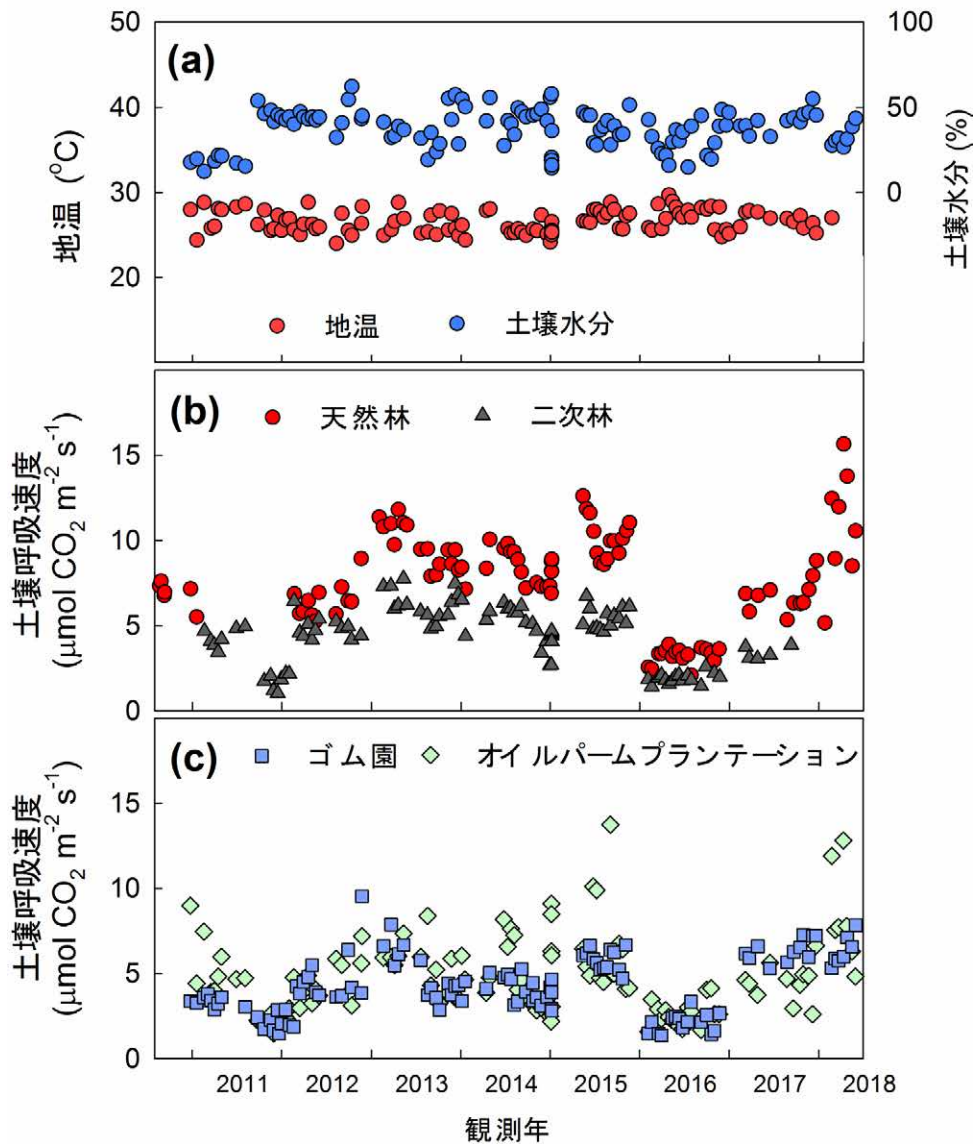


図66 マレーシア低地熱帯天然林サイトおよび周辺サイトの地温と土壌水分 (a)、天然林と二次林における土壌呼吸速度 (b)、オイルパーム園およびゴム園における土壌呼吸速度 (c)

ベントによる土壌呼吸の急激な変動をとらえることが出来なかったことが一因と考えられる。一方、観測期間内の土壌呼吸速度の平均値を比較すると、天然林 ($8.74 \pm 1.73 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) が最も大きく、二次林 ($5.25 \pm 1.15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は天然林より、約 39.9% 低い値を示した (図 66b)。本結果から、一度天然林を伐採した場合、60 年を経ても健全な天然林まで回復することが難しいことが示唆された。

4) 熱帯プランテーション

低地熱帯操作実験天然林サイトの周辺のゴム園とオイルパームプランテーションにおける測定結果から (図 66a, c)、観測期間内の土壌呼吸速度の平均値を比較すると、オイルパームプランテーション ($5.26 \pm 2.13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) とゴム園 ($4.59 \pm 1.40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は、天然林に比べてそれぞれ 39.8% および 47.5% 低い値を示した。これは、土地利用変化によって土壌有機物が減少したことに起因するものと考えられる。

2.1.4 まとめ

2.1.4.1 土壌有機炭素分解に対する温暖化および攪乱の影響

各温暖化操作実験サイトでは、最大 12 年にも及ぶ温暖化条件下における長期観測データが得られている。欧米における報告に反し、いずれの観測サイトでも、温暖化の微生物呼吸に対する促進的な効果は (温暖化効果)、長期的な温暖化を経た後も減少する傾向を示していない。これには、アジアモンスーン地域における豊富な土壌有機炭素量が影響しているものと考えられる^{7-9, 11)}。つまり、温暖化によって土壌有機炭素の分解量が増えても、基質が豊富に残存しているために、分解速度の減少が見られない可能性が高い。また、アジアモンスーン域の特徴である湿潤な環境も (夏季の降水量もしくは降水頻度)、温暖化効果の長期的な維持に関わっていることが明らかになった^{8, 9)}。加えて、その温暖化効果は、欧米における従来の報告よりも大きな値であり (例えば、Melillo *et al.*, 2002¹³⁾ によれば、+5.6% 以下)、アジアモンスーン域の森林土壌が温暖化に伴って、従来予測されていたよりも多くの CO_2 を排出する可能性を示唆するものである。

また、温暖化操作実験サイト以外のサイト (フラックスサイト) における観測では、林床部炭素フラックスの年々変動に関する制御因子が明らかになってきている。例えば、比較的冷涼湿潤な富士北麓カラマツ林における観測では、林床部の呼吸量は、年平均地温の上昇によって増加した。本結果は、富士北麓カラマツ林における、土壌 CO_2 フラックスに対する温度の強い影響を反映したもので、温暖化条件下における林床部呼吸量の増加を示唆する重要な知見である。一方で、土壌水分が高すぎる場合 (過湿) は、土壌 CO_2 フラックスに対して抑制的に作用した。天塩カラマツ林造林地サイトで観測された、土壌水分と土壌呼吸の年々変動の負の相関は、それを示す好例である。しかし、マレーシア低地熱帯天然林サイトの様に、温度変化に乏しい高温環境下では、土壌水分の増加は、土壌 CO_2 フラックスに対して促進的に働く事が示唆されている。この様に、各サイトの環境条件 (気温、降水量や土壌水分) によって、土壌 CO_2 フラックスの年々変動因子は変化した。

加えて、フラックスサイトにおける観測から、各林床部炭素フラックスに対する攪乱の影響を評価した。富士北麓カラマツ林サイトでは、人為的攪乱 (間伐) によって林床部の光合成量および呼吸量が共に増加した。苫小牧カラマツ林跡地サイトでは、自然的攪乱 (台風攪乱) 後の植生遷移の進行に伴って、林床部炭素フラックスが変動した。フラックスの規模は、攪乱後 6 年程度は増加の傾向を見せたが、その後木本植物の成長に伴い、林床植生の光合成量は減少傾向を示した。マレーシア低地熱帯天然林サイト周辺における観測では、土地利用変化に伴い、土壌呼吸量が変化した。本結果は、土壌呼吸の観測から、土地利用変化に関する環境影響評価を行うための重要な足がかりである。これら攪乱影響の評価は、さらに継続的な観測を行い、長期的な視点から検討する必要がある。

引用文献

- 1) Liang N, Teramoto M, Takagi M, Zeng J (2017) High-resolution data on the impact of warming on soil CO_2 efflux from an

Asian monsoon forest. *Scientific Data* 4:170026; doi: 10.1038/sdata.2017.26

- 2) Liang N, Nakadai T, Hirano T, Qu L, Koike T, Fujinuma Y, Inoue G (2004), In-situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 123: 97-114
- 3) Liang N, Hirano T, Zheng Z, Tang J, Fujinuma Y (2010) Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan. *Biogeosciences* 7: 3447-3457; doi:10.5194/bg-7-3447-2010
- 4) Teramoto M, Liang N, Zeng J, Saigusa N, and Takahashi Y (2017) Long-term chamber measurements reveal strong impacts of soil temperature on seasonal and inter-annual variation in understory CO₂ fluxes in a Japanese larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 247: 194-206, doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.024
- 5) Liang N (2006) A Portable Automated Soil CO₂ Efflux System. *AsiaFlux Newsletter* 17: 3-6
- 6) Takada M, Yamada T, Liang N, Ibrahim S, Okuda T (2015) Soil respiration change immediately after logging operations in an upper tropical hill forest, peninsular Malaysia. *Hikobia* 17: 3-9
- 7) Aguilos M, Takagi K, Liang N, Watanabe Y, Teramoto M, Goto S, Takahashi Y, Mukai H and Sasa K (2013) Sustained large stimulation of soil heterotrophic respiration rate and its temperature sensitivity by soil warming in a cool-temperate forested peatland. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 65: 20792, doi:10.3402/tellusb.v65i0.20792
- 8) Teramoto M, Liang N, Ishida S and Zeng J (2018) Long-term stimulatory warming effect on soil heterotrophic respiration in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest in northern Japan. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 123: 1161-1177, doi:10.1002/2018jg004432
- 9) Teramoto M, Liang N, Takagi M, Zeng J and Grace J (2016) Sustained acceleration of soil carbon decomposition observed in a 6-year warming experiment in a warm-temperate forest in southern Japan. *Scientific Reports* 6: 35563, doi:10.1038/srep35563
- 10) Tan Z, Zhang Y, Liang N, Song Q, Liu Y, You G, Li L, Yu L, Wu C, Lu Z, Wen H, Zhao J, Gao F, Yang L, Song L, Zhang Y, Teramoto M, Sha L (2013) Soil respiration in an old-growth subtropical forest: patterns, components, and controls. *Journal of Geophysical Research- Atmospheres* 118: 2981-2990; doi:10.1002/jgrd.50300
- 11) Wu C, Liang N, Sha L, Xu X, Zhang Y, Lu H, Song L, Song Q and Xie Y (2016) Heterotrophic respiration does not acclimate to continuous warming in a subtropical forest. *Scientific Reports* 6: 21561, doi:10.1038/srep21561
- 12) Niiyama K, Kajimoto T, Matsuura Y, Yamashita T, Matsuo N, Yashiro Y, Ripin A, Kassim AR and Noor NS (2010) Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 26: 271-284, doi:10.1017/s0266467410000040
- 13) Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, Newkirk K, Lux H, Bowles FP, Catricala C, Magill A, Ahrens T and Morrisseau S (2002) Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science* 298: 2173-2176, doi:10.1126/science.1074153

2.2 サブテーマ2 土壤有機物の¹⁴Cに関する分析

2.2.1 目的と経緯

自然界に存在する放射性炭素 (¹⁴C) は、宇宙線に由来する「天然起源¹⁴C」と1950年から1960年代前半の大気圏核実験に由来する「核実験起源¹⁴C」に大別できる。日本の森林土壌は火山灰を母材とする比較的若い（未熟な）土壌であり、蓄積された土壤有機物は数年から200年程度の滞留時間を持つ有機炭素が多いと考えられていることから、有機炭素に含まれる「核実験起源¹⁴C」の含有率を算出することで目的とする土壤炭素の蓄積年代を推定することが可能となる。したがって森林土壌の有機炭素に含まれる¹⁴Cを鉛直的に測定することによって、温暖化に伴う微生物による有機物分解・CO₂放出速度などの情報を引き出すことが可能になる。先行研究¹⁾では、冷温帯ブナ林の土壌コアを用いて微生物分解特性に応じた¹⁴C測定とモデル計算から、1年あたり0.05℃の温度上昇があった場合、21世紀末までに土壤炭素蓄積量の約12%が減少し、そのうち滞留時間が数十年から二百年程度の土壤有機物からの消失が50%以上を占めるとの結果が得られている。しかしながら一定点の測定データでは亜寒帯から亜熱帯の幅広い生態系を有する日本列島の森林土壌の炭素蓄積能を評価することはできない上、土壌の温暖化や微生物による有機物分解などに数多くの仮定を含む見積もりであるため、温暖化に対する土壌の応答の規模と時期を正確に予測するものではない。一方、本研究では異なる森林タイプを持つ北海道から九州までの国内5サイトにおいて温暖化操作実験を長年にわたって実施している。したがって、同サイトの温暖化区および非温暖化区の土壌コアを採取し、物理的処理ならびに化学分画をして¹⁴Cを測定、加えて各種化学分析を実施すれば、温暖化操作の有無による比較から、地域ごと、または生態系ごとに有機炭素の平均滞留時間および個別滞留時間などに関する情報や土壤有機物の分解特性を詳細に正確に解明することが可能となる。

そこで本サブテーマでは、温暖化操作実験を行っている国内5サイトのうち、土壌構造や植生が特徴的な3サイトを選別し、土壤有機物の¹⁴C分析を行う。それによって、土壌の画分毎の有機炭素の蓄積歴及び分解のタイムスケールを検出し、異なる地域での土壤有機炭素の蓄積プロファイル及び長期的な温暖化環境下での分解メカニズムを解明する。

2.2.2 方法

国立環境研究所が温暖化操作実験を実施している国内5ヶ所の森林サイトのうち、西日本常緑カシ林サイト（広島大学敷地内、東広島市）、最北端針広混交林サイト（北海道大学天塩演習林、北海道天塩郡幌延町）、関東地方アカマツ林サイト（国立環境研究所構内、茨城県つくば市）の合計3サイトにおいて、温暖化区および対照区の土壤呼吸測定チャンバー内からそれぞれ1本ずつの土壌コア（直径11 cm、深さ35 cm）を採取した（図67）。これらを実験室に持ち帰り、深さ方向に1 cm 間隔に切り出した土壌試料を得た。

土壌試料は炉乾した後、ハンマーで軽く粉碎したものを2 mm および1 mm メッシュのふるいにかけて、通過した分をメノウ乳鉢ですり潰して粉末状にした。なお、リターや細根などの粗大な有機物はできるだけ取り除いた。土壌粉末2-3 gを10 mLのガラス製スピッツ管に入れ、1N 塩酸を加えて激しく振とうして一昼夜放置することで含有する無機成分を除去した後、遠心分離機（1000-1500 rpm、10 min）を用いて水分を分離、除去した。その後、蒸留水を用いてこれら作業を数回繰り返すことで洗浄、これを炉乾して測定用試料とした。

測定用試料のうち数 mg を分取して、国立環境研究所が所有する元素分析計付き質量分析計（FlashEA 1112/DeltaPlus Advantage、サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社）を用いて、有機炭素（POC）、有機窒素（PON）、炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）および窒素同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）を測定した。一部サイトの試料については元素分析計（FlashEA 1112）で POC および PON の測定のみを実施した。

測定用試料のうち炭素量に換算して約3 mgに相当する試料を、酸化銅とともに真空中で燃焼して試料中に含まれる有機炭素を二酸化炭素ガス試料として抽出した。この一部は、質量分析計（MAT252、サーモフィッシャー社製）を用いて¹³C/¹²C比の精密測定を実施した。VPDB-CO₂のスケールを基準に作られた二次標準ガスを基にデュアルインレットシステムから導入して、試料および標準ガス中の¹³C/¹²C比を測定するとともに $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 値（以下、 $\delta^{13}\text{C}$ ）を精密に求めた。なお、 $\delta^{13}\text{C}$ の測定誤差は $\pm 0.005\%$ 以下である。一方、二酸化炭素ガス試料の多くは、真空ガラス実験装置中で



図 67 最北端針広混交林サイトにおける土壌サンプルの採集 (a)、実験室における土壌サンプルの切り出し (b)、土壌サンプル由来の二酸化炭素を濃縮するためのガラスライン (c)、加速器質量分析計 (AMS) による ^{14}C の測定 (d)

水素ガスを用いて還元して炭素（グラファイト）試料とした²⁾。グラファイト試料は、加速器質量分析装置（AMS）を用いて $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を計測した（図 67d）。測定データは同時に測定した標準試料の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比からのずれ分の千分率 ($\Delta^{14}\text{C}$) として表現した³⁾。なお、 $\Delta^{14}\text{C}$ の測定誤差は $\pm 4\%$ 以下であった。

2.2.3 結果と考察

1) 西日本常緑カシ林サイト

西日本常緑カシ林サイト（東広島市）において温暖化区および対照区の土壌呼吸測定チャンバー内から得られた土壌コアの POC、PON およびの $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布を図 68 に示す。POC、PON ともに温暖化区および対照区ともに表層 3 cm 程度までは高い濃度を示すが、その下層深さ 10 cm 程度までに急激に減少し、深さ 15 cm 以深では検出限界程度の低濃

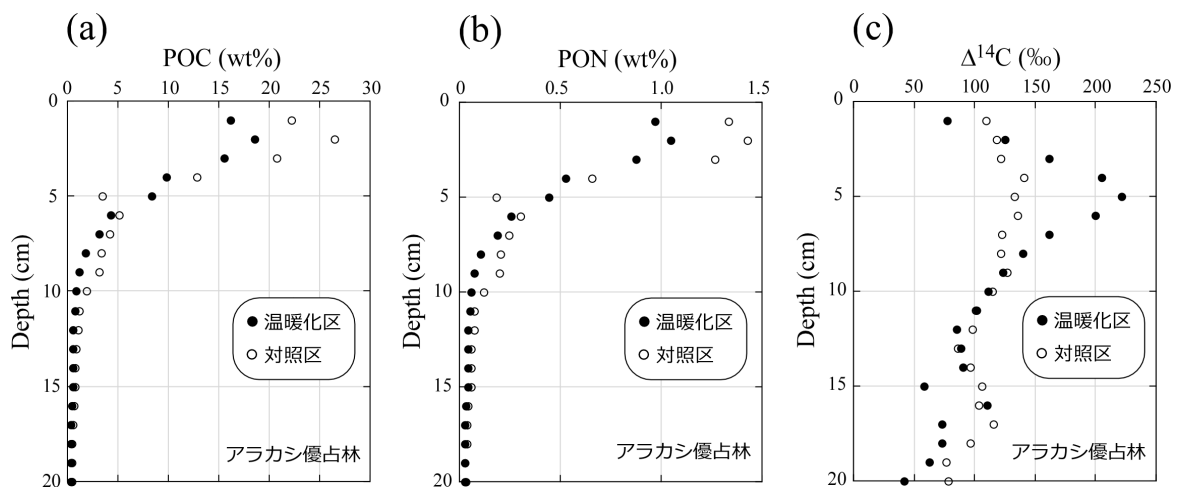


図 68 西日本常緑カシ林サイト（アラカシ優占林）の温暖化区（黒）と対照区（白）における表層 20 cm 土壌有機物中 POC (a)、PON (b) および $\Delta^{14}\text{C}$ (c) の鉛直分布

度となる傾向があった。深さ 15 cm 以浅では POC、PON ともに対照区土壤の方が相対的に高い傾向を示していたが、深さ 5 cm 付近では両区画に差が認められない層が存在していた。この層を除くと、温暖化区土壤の濃度は、POC、PON ともに深度に関わらず対照区のおおよそ 70-80% 程度であり、温暖化操作に伴う微生物による有機物分解および CO₂ 放出がおおよそ深さ 15 cm 程度まで及んでいることがうかがえる。一方、 $\Delta^{14}\text{C}$ の温暖化区と対照区との間には非常に特異的な差異が示された。対照区の $\Delta^{14}\text{C}$ が表層 10 cm 程度まで 110-130 ‰程度ではほぼ一様であるのに対して、温暖化区では深さ 5 cm を極大（約 220 ‰）にした特異的な鉛直分布を示している。深さ 10 cm 以下では多少のばらつきがあるものの、両者に差異は見られない。表層 10 cm 以浅の $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布に注目すると、3 cm 以浅の POC>15wt% では温暖化区の $\Delta^{14}\text{C}$ が対照区に比べて小さいか同等、それ以深では温暖化区の $\Delta^{14}\text{C}$ が明らかに大きい値をとる。対照区が本サイトにおける土壤有機物中の $\Delta^{14}\text{C}$ の一般的な鉛直分布であるならば、表層 3 cm 以浅では温暖化操作に伴って微生物が比較的「若い」、すなわちリターや細根などを由来とする有機炭素を分解した結果、見かけ上は温暖化区の $\Delta^{14}\text{C}$ が小さくなったと解釈することができる。この解釈に従えば、逆にそれ以深では「古い」、すなわち蓄積されてからの経過時間（滞留時間）の長い有機炭素を分解しているものと考えられる。特に深度 5 cm では温暖化区と対照区の $\Delta^{14}\text{C}$ に約 90 ‰もの差があり、POC の両者の差を考慮すると非常に古い炭素が選択的に分解されている可能性がある。

2) 最北端針広混交林サイト

最北端針広混交林サイト（幌延町）において温暖化区および対照区の土壤呼吸測定チャンバー内から得られた土壤コアの POC、PON およびの $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布を図 69 に示す。POC と PON はともに温暖化区および対照区ともに表層で高く、深さ 8 cm まで減少傾向を示した後は深さ 20 cm 程度まで増加傾向を示した。上述の西日本常緑カシ林サイトでは POC および PON ともに深度とともに急激に濃度を減少させて深さ 10 cm 以深では 1 wt% 以下となるのに対して、本サイトは泥炭地に当たるために特異的な鉛直分布が得られたものと推測され、極小を示した深さ 8 cm 程度までが最近の森林に由来する土壤、それ以深については泥炭の影響が大きいものと考えられる。温暖化区と対照区を比較すると、深さ 17 cm 程度以浅では POC、PON ともに温暖化区で低い値であることから、温暖化操作に伴う影響がおおよそ深さ 17 cm 程度まで及んでいる可能性がある。特に深さ 3-4 cm 以浅の表層では温暖化区の POC が対照区の 50% 以下まで低下していることから、温暖化操作による微生物による有機物分解が比較的浅い層で活発であることが示唆される。対照区の $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布によると、深さ 5 cm 以浅では +70 ‰程度ではほぼ一様な値を示すことから核実験が繰り返された西暦 1960 年代以降の最近 50-60 年間に堆積した比較的若い土壤であることが推察され、深さ 5 cm 以深では深度とともに $\Delta^{14}\text{C}$ が減少する傾向がある。そのことから、動植物による攪乱がなく比較的きれいな堆積環境であったことが理解できる。また両区画を比較すると、深さ 16 cm までは一貫して温暖化区が 10-30 ‰低く、それ以深ではほぼ同一の値となることから、温暖化操作に伴う影響が同深度まで及んでおり、深度に因らず温暖化操作によって比較的若い炭素を由来とする有機炭素が選択的に分解されたことが分かる。

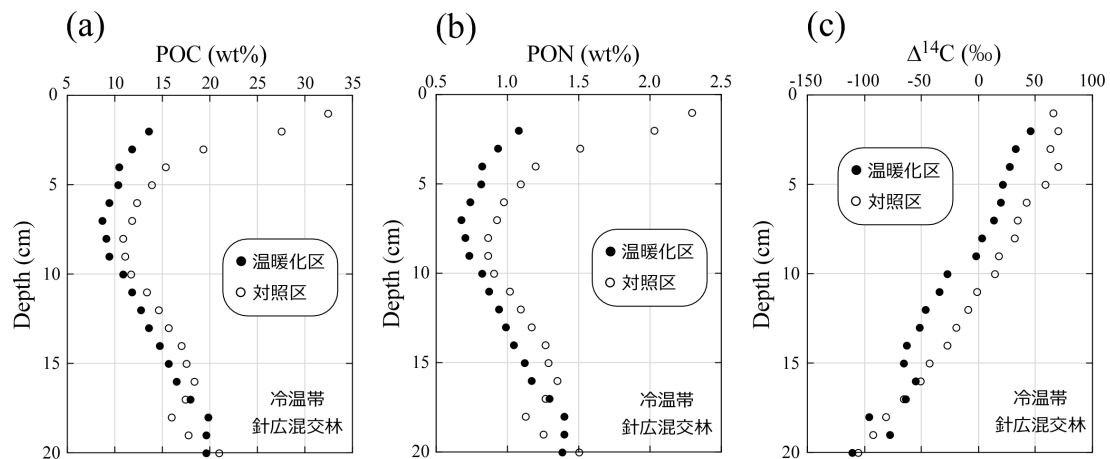


図 69 最北端針広混交林サイト（冷温帯針広混交林）の温暖化区（黒）と対照区（白）における表層 20 cm 土壤有機物中 POC (a)、PON (b) および $\Delta^{14}\text{C}$ (c) の鉛直分布

3) 関東地方アカマツ林サイト

関東地方アカマツ林サイト（つくば市）において温暖化区および対照区の土壤呼吸測定チャンバー内から得られた土壤コアのPOC、PON およびの $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布を図70に示す。POCとPONは、両区画ともに表層を極大に深さ15cm程度まで減少し、それ以深ではほぼ一定の値となった。なお、深さ20cmでも $\text{POC} > 5\text{wt}\%$ と比較的有機炭素含有量が高い土壤であった。両区画を比較すると、深さ5-15cm程度で温暖化区の方が対照区に対して明らかに高いPOC含有量を示した。この傾向は、同一の気候帯と想定される西日本常緑カシ林サイトで得られた結果と相反し、温暖化操作によって有機炭素が蓄積されることを示す結果となった。 $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布によると、表層5cmまで温暖化区が低く逆に5cm以深では一貫して温暖化区が高い傾向にあり、その差は最大で50%を超えている。上述の西日本常緑カシ林サイトおよび最北端針広混交林サイトにおける両区画のPOCと $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布の関係を考慮すると、関東地方アカマツ林サイトの $\Delta^{14}\text{C}$ 鉛直分布は解釈が難しい。しかしながら、「温暖化区では表層10cm、対照区では表層5cmまでほぼ一定の $\Delta^{14}\text{C}$ を示していること」に注目すると、今回採取した「対照区の表層5cm程度が何らかの影響によって欠落している」可能性が考えられる。そこで、図71に対照区の深さ1cmが温暖化区の6cmに相当するものと仮定してPOCおよび $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布を両区画で比較した。その結果、POCおよび $\Delta^{14}\text{C}$ ともに深さ10-12cm付近までの上層では対照区で濃度が高く、それ以深ではほぼ一致する。これは最北端針広混交林サイトの結果と同様の傾向であり、温暖化操作によ

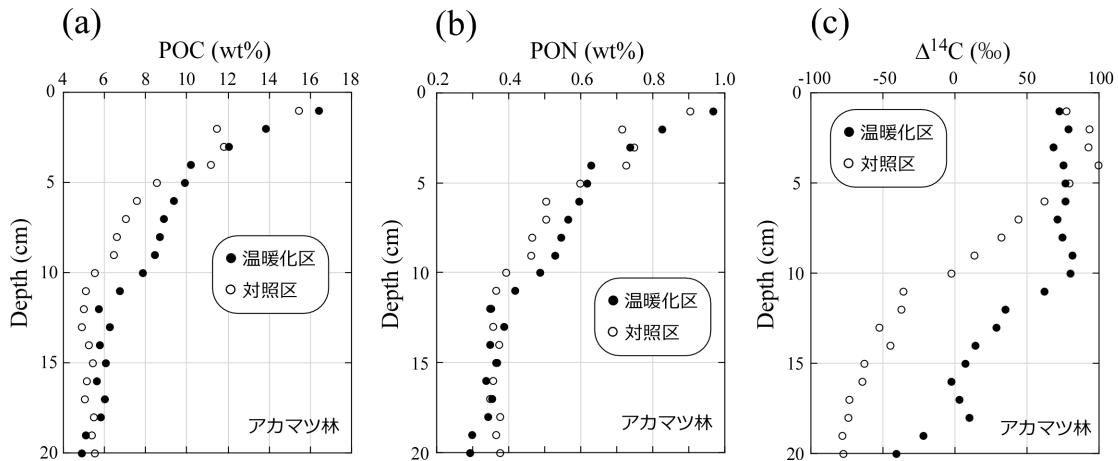


図70 関東地方アカマツ林サイトの温暖化区(黒)と対照区(白)における表層20cm土壤有機物中POC(a)、PON(b)および $\Delta^{14}\text{C}$ (c)の鉛直分布

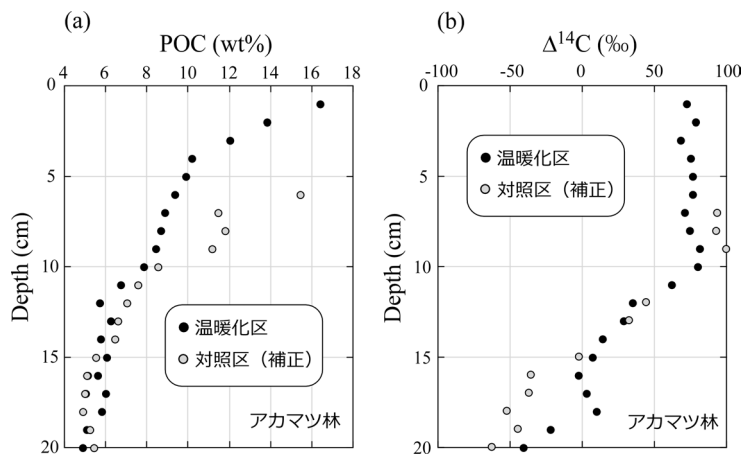


図71 関東地方アカマツ林サイトの温暖化区(黒)と、深度補正した対照区(灰)における表層20cm土壤有機物中POC(a)と $\Delta^{14}\text{C}$ (b)の鉛直分布(対照区土壤コアの表層5cmが欠落しているものと仮定して、図70の対照区の値を鉛直方向に5cmずつずらした値を対照区の補正值とした)

て比較的若い炭素を由来とする有機炭素が選択的に分解された可能性を強く示唆するものである。ただし、今回の観測では表層数 cm における温暖化操作の影響を評価することはできない。また、対照区土壌コアの表層数 cm が欠落していたとする仮定が正しいならば、両区画で POC および $\Delta^{14}\text{C}$ ともに温暖化操作の有無による相違が現れていることから欠落した時期は試料採取時である可能性が高い。いずれにせよ、対照区土壌コアの欠落や欠落が表層 5 cm 程度であることを科学的に証明する手段が他にはないため、関東地方アカマツ林サイトにおける温暖化に対する土壌有機物の応答を解析するには再調査が望ましい。

2.2.4 まとめ

西日本常緑カシ林サイト（東広島市）、最北端針広混交林サイト（天塩郡幌延町）、関東地方アカマツ林サイト（つくば市）において、温暖化区および対照区の土壌呼吸測定チャンバー内から 30 cm の土壌コアを採取して深さ方向 1 cm 間隔で POC、PON、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及び $\Delta^{14}\text{C}$ を測定し、温暖化区と対照区の各成分の鉛直分布を比較した。POC の比較から、3 つのサイトともに温暖化操作の影響が深さ 10-15 cm 程度にまで及んでいることが確認できた。 $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布の解析から、西日本常緑カシ林サイトでは温暖化の進行によって表層（3 cm 以浅）ではリターや細根などの比較的若い炭素を由来とする有機炭素を、それ以深では蓄積されてからの経過時間の長い有機炭素を分解するという特異的な現象を捉えた。一方、最北端針広混交林サイトと関東地方アカマツ林サイトは深度に因らず比較的若い炭素を由来とする有機炭素が選択的に分解されることが分かった。ただし、関東地方アカマツ林サイトについてはコア採取時あるいは温暖化操作以前に対照区土壌の表層数 cm が欠落していた可能性があり、再調査する必要がある。

引用文献

- 1) Koarashi J, Atarashi-Andoh M, Ishizuka S, Miura S, Saito T and Hirai K (2009) Quantitative aspects of heterogeneity in soil organic matter dynamics in a cool-temperate Japanese beech forest: a radiocarbon-based approach. *Global Change Biology* 15: 631-642
- 2) Kitagawa H, Masuzawa T, Nakamura T and Matsumoto E (1993) A batch preparation method of graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements. *Radiocarbon* 35: 295-300
- 3) Stuiver M and Polach HA (1977) Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* 19: 355-363

2.3 サブテーマ3 モデルによる広域推定

2.3.1 目的と経緯

大気-陸域間のガスフラックスを広域スケールで推定するには、プロセスベースのモデルを用いたシミュレーションと、観測データを横断的に俯瞰する経験モデルが有効な手法となる。プロセスモデルは炭素など物質の流れを逐次的にシミュレートすることで、土壤呼吸の時間・空間変動を再現する。一方、経験モデルからは、個別の観測サイトで測定されたフラックスや環境依存性などの情報を集約し、広域の平均的な描像を得ることができる。本テーマは、アジアスケールでの陸域生態系モデル (VISIT) や経験モデルによる土壤呼吸マッピング、観測データとの比較検証、データベースを用いた土壤呼吸および微生物呼吸の温度依存性に関する分析を実施することを目的とする。また、これとは別に、微生物呼吸における重要なコンポーネントである、リター分解に関する分解係数や温度、水分条件への応答条件を観測値から推定し、新たな経験モデルの提案を行う。

2.3.2 方法

2.3.2.1 モデルによるシミュレーション比較と土壤呼吸および微生物呼吸のマッピング

モデル相互比較プロジェクト (ISI-MIP) におけるモデルを用いて、シミュレーション結果を比較した。また、観測データの土壤呼吸データベース「SRDB」を用いて、新しい経験モデルによる土壤呼吸データを作成した。作成の詳細は、図 72 に示した。観測データと経験モデルに基づいた土壤呼吸量の作成の目的は、プロセスモデルのベンチマークに使われることを1つの目的としている。ここでは、 Q_{10} が温度域によって可変な Tuomi *et al.*, (2008)¹⁾ の関数 (図 72 参照) を用いて経験モデルを作成し、土壤呼吸データベースのデータに対して、ベイズ推定を用い、パラメータを求めた。さらに、経験モデルを用いて、全球の土壤呼吸マップを作成した。この経験マップを用いて、ISI-MIP2 の計算結果について微生物呼吸に対してベンチマークを行った (図 72)。次に、全球スケールにおける気候変動影響についての比較を行った。年間の全球土壤呼吸量について、8つの生態系モデルのデータと、経験微生物呼吸マップを比較した。

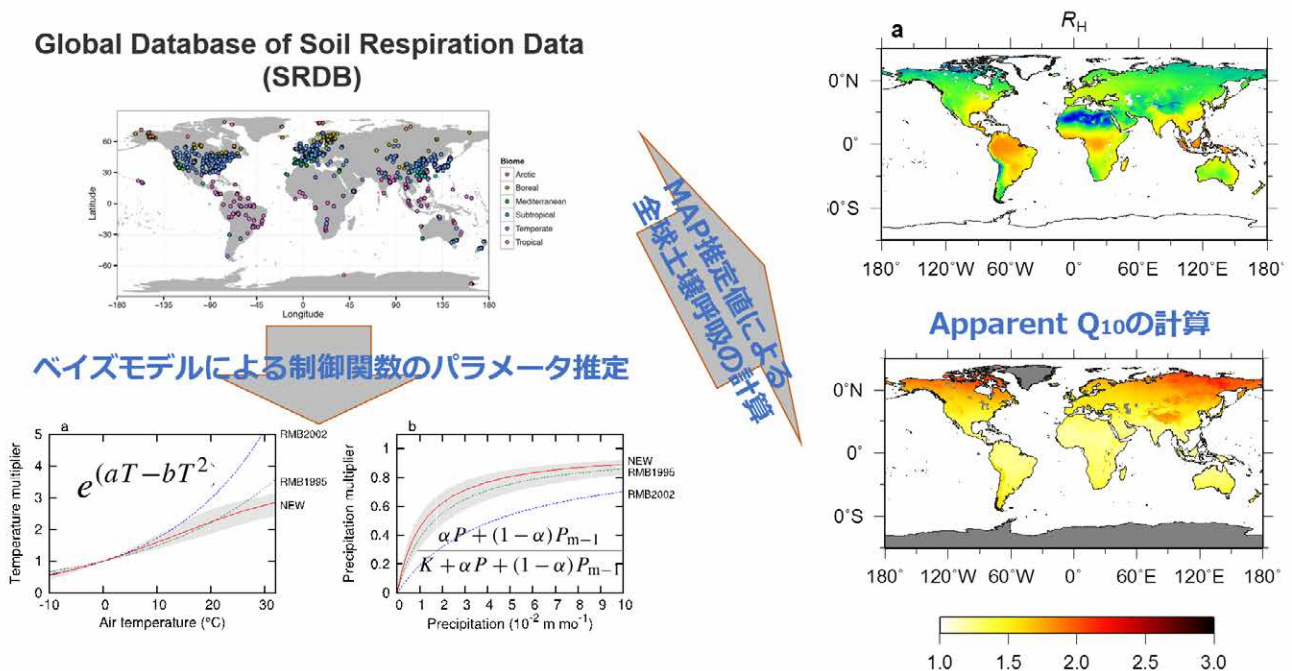


図 72 経験土壤呼吸マップ (Hashimoto *et al.*, 2015)²⁾ の作成プロトコル

2.3.2.2 リター分解に関する経験モデルの提案

LIDET と呼ばれる北アメリカを中心にして行われた複数サイトのリター分解実験の結果を用いて、リター分解速度定数およびその環境応答を推定する経験モデルの提案とパラメータ推定を行った。LIDET は用いたデータは 26 の異なるサイトから得られたものであり、各サイト内に繰り返し数が 4 つある時系列データである (図 73、74)。本研究では、リター分解の時系列データに対して多変量状態空間モデルを構築し、MCMC によるパラメータ推定を行った。特に落葉リターの分解の樹種特性を明らかにするため、落葉広葉樹のサトウカエデ (図 73) と、常緑針葉樹のアメリカネズコ (図 74) の観測結果に着目して、同じモデルを導入してパラメータ推定を行った。

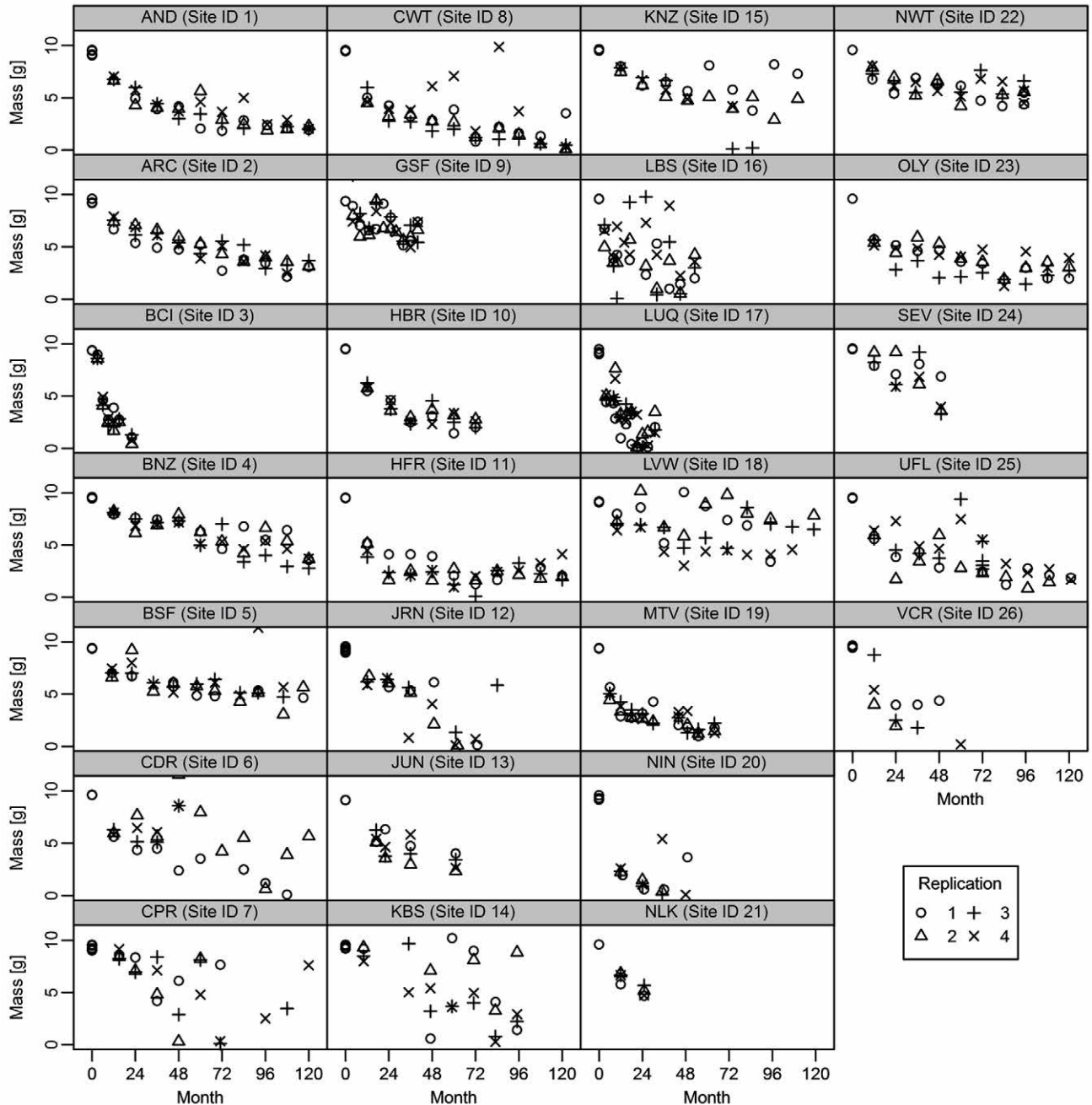


図 73 北米 26 サイトにおける サトウカエデ (ACSA) リターの残存重量の経時変化³⁾

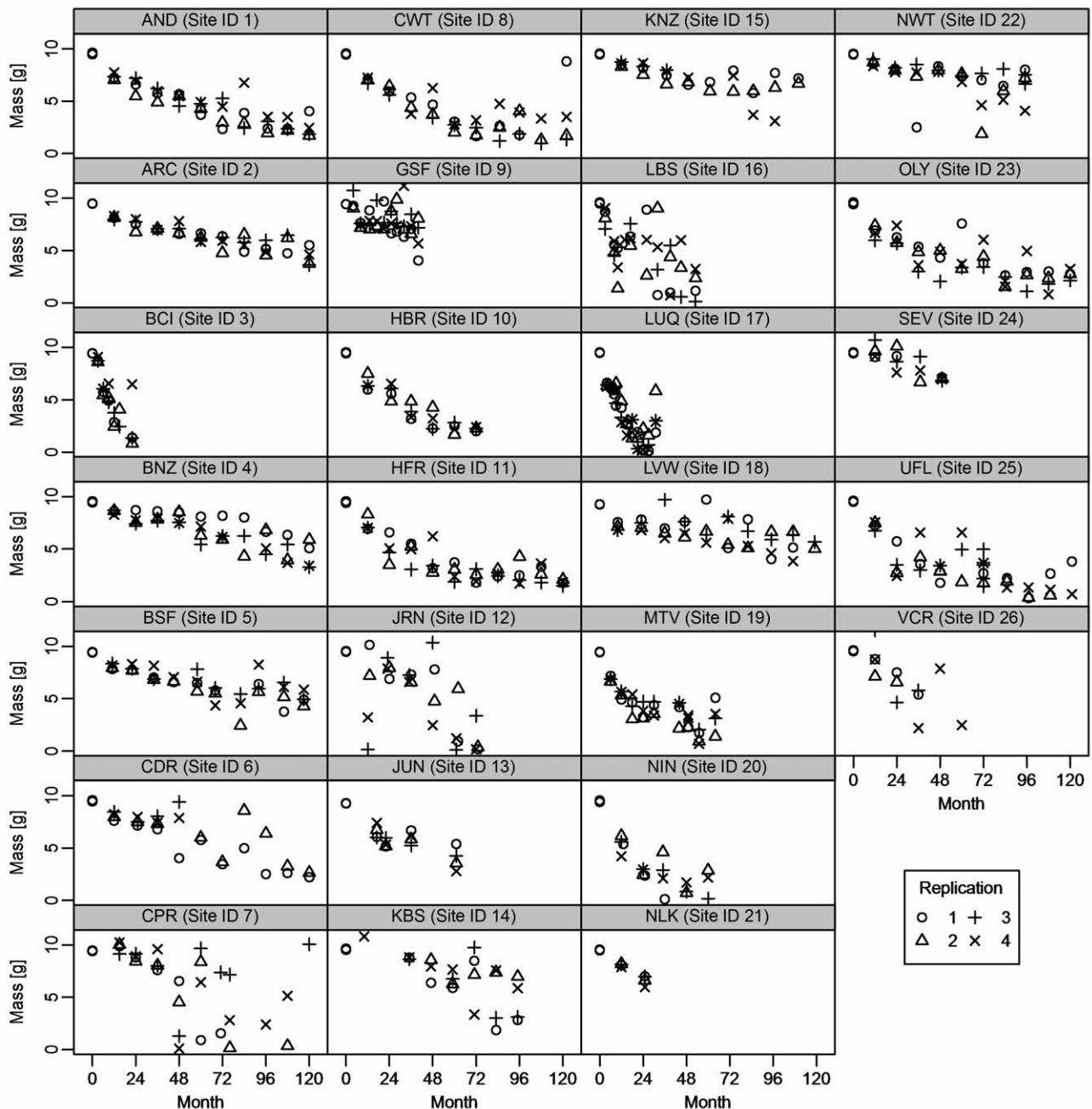


図 74 北米 26 サイトにおける アメリカネズコ (THLP) リターの残存重量の経時変化³⁾

2.3.3 結果と考察

2.3.3.1 モデルによるシミュレーション比較と土壌呼吸および微生物呼吸のマッピング

ISI-MIP の各モデルを用いたシミュレーション比較では、生態系モデルの炭素収支の将来予測において土壌炭素の動態が、最も不確実性が大きいことが明らかになった (図 75)。ISI-MIP では 4 つの RCP シナリオ、5 つの GCM、6 つの異なる生態系モデルの計算の組み合わせがなされており、それぞれについての将来予測期間における炭素収支のばらつきへの寄与、すなわち将来予測への不確実性への寄与を ANOVA によって算出することが可能であった。純一次生産 NPP では、北米やユーラシアの亜寒帯などでは RCP シナリオが優占しており、生態系モデル間で同じような計算結果を示している。一方で、土壌炭素については、いずれに地域についても RCP シナリオや GCM の違いよりも、生態系モデルの違いにより炭素収支の差異が決まってしまうっており、プロセス理解や土壌呼吸収支の観測データによる検証が不十分であった。

経験土壌呼吸マップと ISI-MIP2 におけるモデルのシミュレーション比較では、生態系モデルの方が地理的なコント

ラストが大きく、とくに熱帯地域の土壌呼吸については、生態系モデルで大きい傾向にあった（図 76）。VISIT についても、この傾向は顕著であった。また、経験微生物呼吸のマップとの比較では、全球微生物呼吸量は 1 つのモデルを除いて、同程度か、過大の傾向であった（図 77）。トレンドに着目すると、経験モデルの変化量は小さめであり、半数のモデルはかなり大きめに増加傾向にあった。これは温度依存性が地域によらず一定であることが原因であると考えられる。これらのことから、温度依存性の改善が、生態系モデルの土壌呼吸予測の改善に重要であることが示唆された。

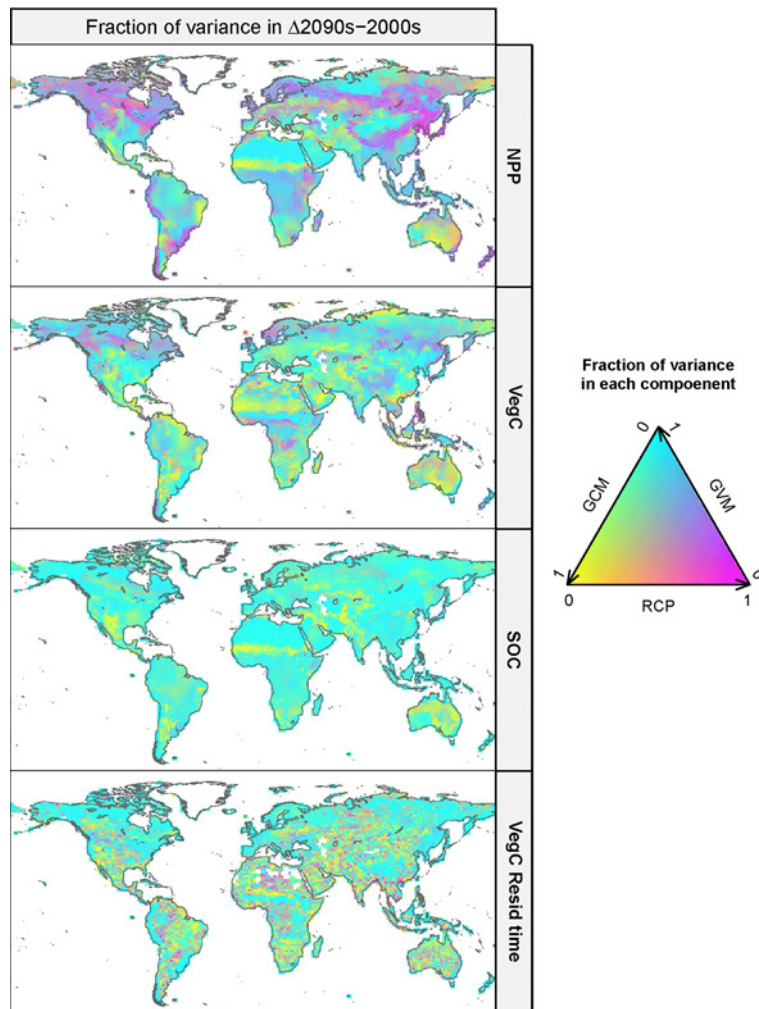


図 75 2090 年代における NPP、植物バイオマス C、土壌炭素の変動⁴⁾

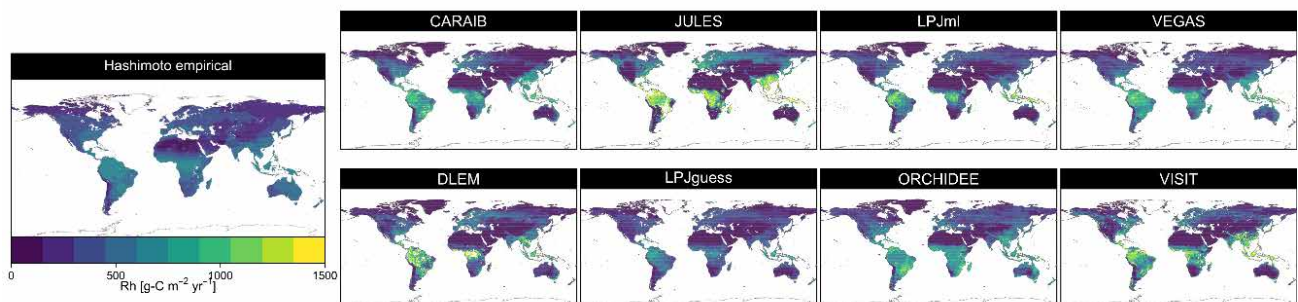


図 76 ISI-MIP2 の 8 つの生態系モデルの 2000 年次における年間微生物呼吸量の計算結果と経験微生物呼吸の比較

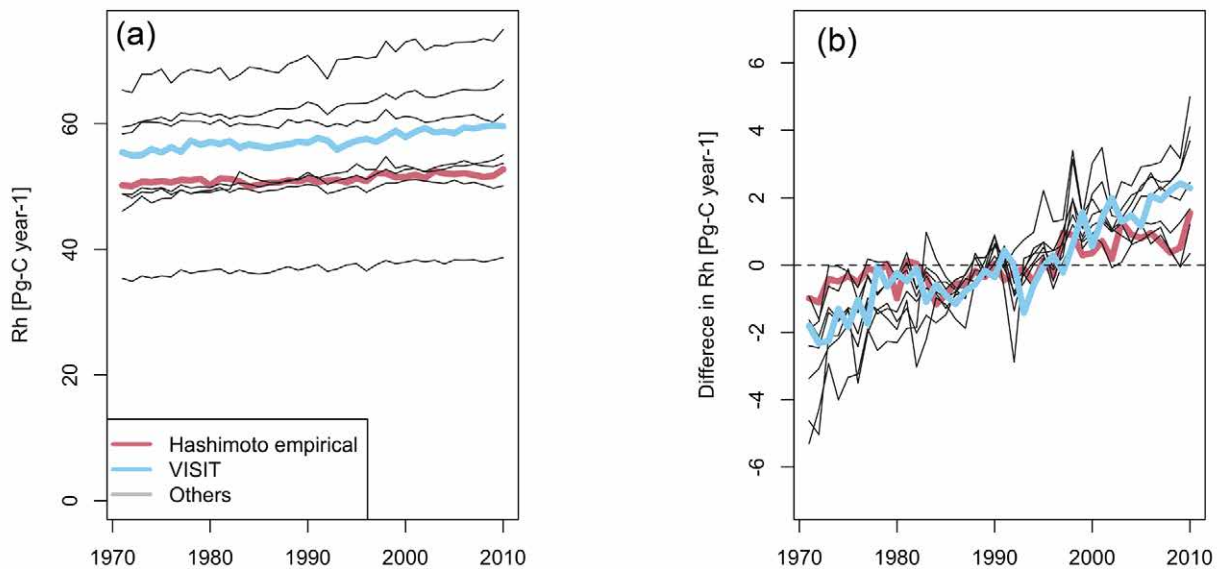


図 77 ISI-MIP2 の 1970 年から 2010 年次の全球年間微生物呼吸量の計算結果と経験微生物呼吸の比較 (a) と、1990 年を基準として差分を示した図 (b)

2.3.3.2 リター分解に関する経験モデルの提案

分解速度定数については、推定値のばらつきは大きいものの、サトウカエデの方が概して大きく、サトウカエデはアメリカネズコに比べて事後平均値が 2 倍程度であり、高い分解速度定数を示した (図 78)。気温応答の樹種間差異は殆ど見られなかったが、降雨応答に関してはアメリカネズコの方が少降雨時においても、高い分解活性を示す傾向にあった (図 79)。本研究の様に、観測データと経験モデルを用いることによって、より詳細な分解特性の把握が可能になった。また推定されたパラメータは生態系モデルの分解スキームにおいて利用可能であり、予測精度の改善に貢献することが期待される。

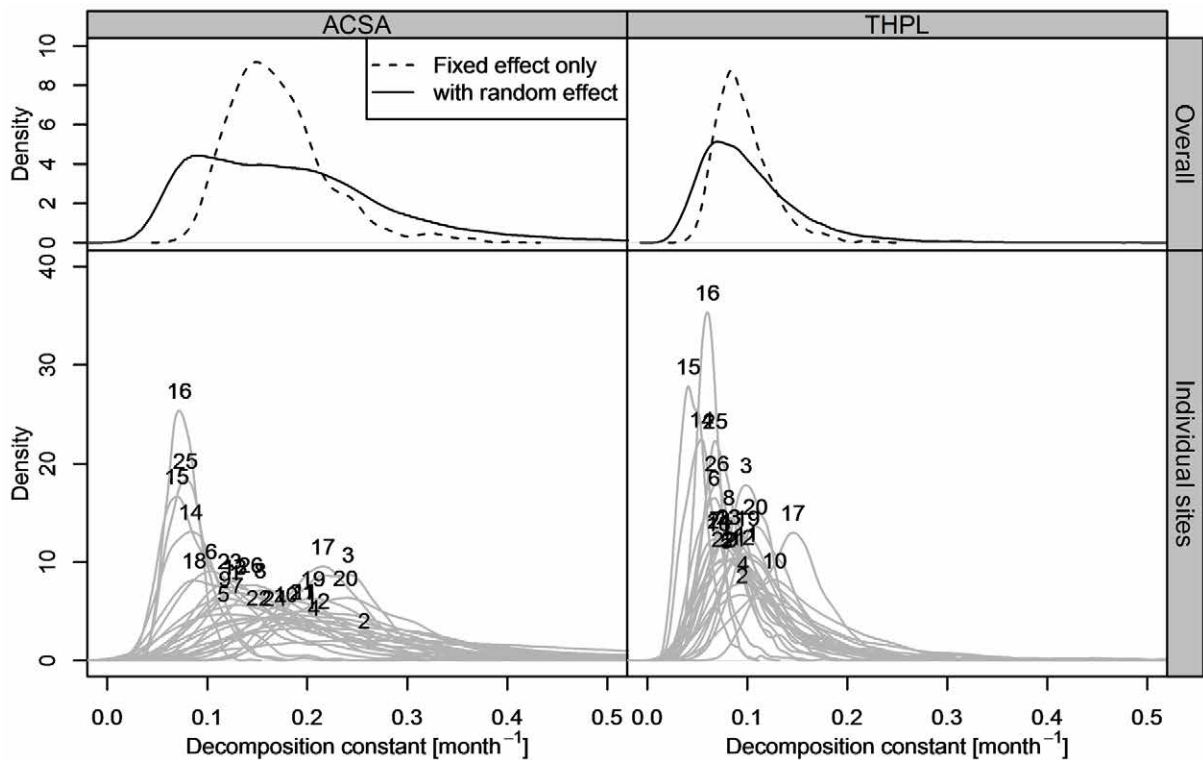


図 78 分解定数の事後分布³⁾

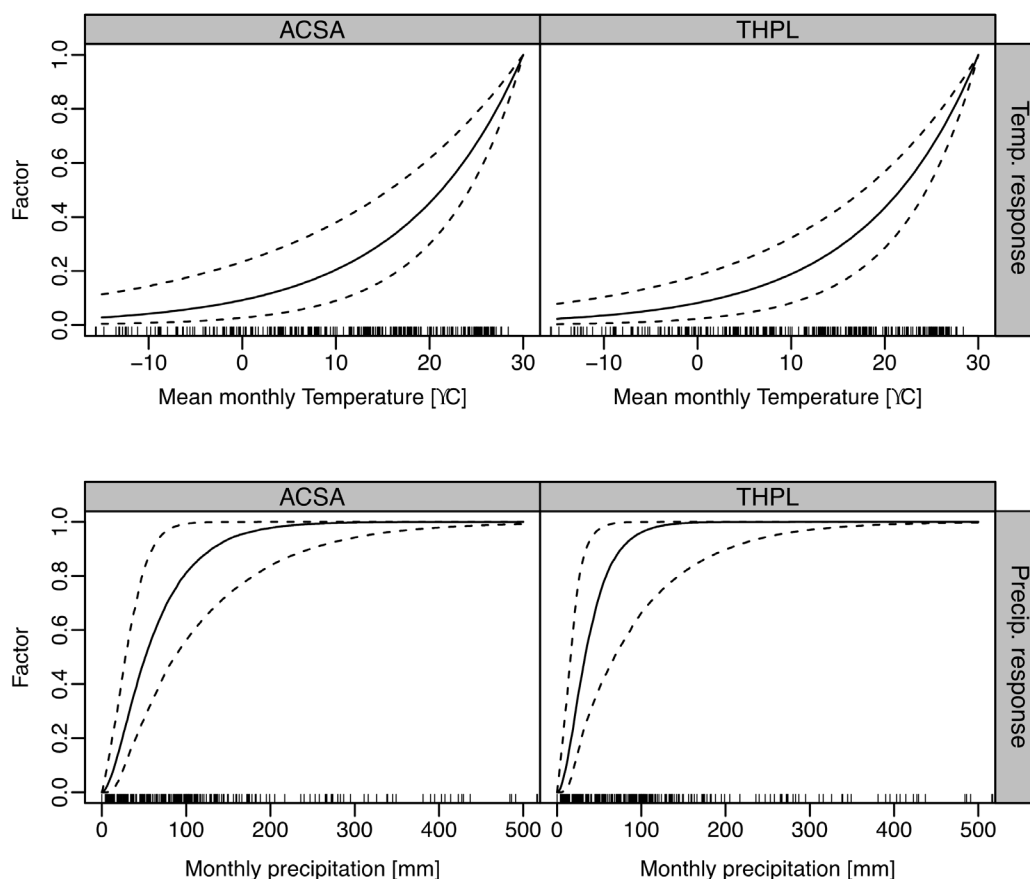


図79 事後平均値による温度応答（上）と降雨応答関数（下）。点線は95%信用区間³⁾

2.3.4 まとめ

各モデルのシミュレーション比較から、土壤炭素動態の不確実性が、将来予測の精緻化の壁になっていることが明らかになった。この解消のためには、土壤炭素動態に関するメカニズムの理解、観測精度の向上と観測データの一層の積み上げが必要である。また、現行の多くのモデルでは、土壤有機炭素分解に関する温度依存性は、地域によらず一定とされているが、実際の観測では地域によって大きく異なることが分かっている。この温度依存性の改善が、生態系モデルの土壤呼吸予測に関する精度向上、延いては気候変動の将来予測精緻化へとつながるものと考えられる。さらに本研究から、観測データと経験モデルを用いることで、微生物呼吸の重要なコンポーネントである、リター分解応答に関する予測精度が向上することが示唆された。

引用文献

- 1) Tuomi M, Vanhala P, Karhu K, Fritze H and Liski J (2008) Heterotrophic soil respiration - Comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling* 211: 182-190
- 2) Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, Migliavacca M, Nishina K and Reichstein M (2015) Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences* 12: 4121-4132
- 3) 仁科一哉 (2016) 多変量状態空間モデルを用いたリター分解実験のためのパラメータ推定. *統計数理* 64 (1) : 23-38
- 4) Nishina K, Ito A, Falloon P, Friend AD, Beerling DJ, Ciais P, Clark DB, Kahana R, Kato E, Lucht W, Lomas M, Pavlick R, Schaphoff S, Warszawski L, Yokohata T (2015) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result. *Earth System Dynamics* 6: 435-445; doi:10.5194/esd-6-435-2015

[資 料]

1 研究の組織と研究課題の構成

1.1 研究の組織

[A 研究担当者]

地球環境研究センター	梁 乃申 高橋善幸 荒巻能史 寺本宗正 曾 継業 井手玲子
地域環境研究センター	仁科一哉

[B 協力研究者]

高木健太郎	(北海道大学・准教授)	(平成 27 ～ 29 年度)
平野高司	(北海道大学・教授)	(平成 27 ～ 29 年度)
石田祐宣	(弘前大学・助教)	(平成 27 ～ 29 年度)
近藤俊明	(広島大学・特任准教授)	(平成 27 ～ 29 年度)
中根周歩	(広島大学・名誉教授)	(平成 27 ～ 29 年度)
高木正博	(宮崎大学・教授)	(平成 27 ～ 29 年度)
Ismail B. Harun	(マレーシア森林研究所 (FRIM)・副所長)	(平成 27 ～ 29 年度)
張 一平	(中国科学院西双版纳熱帯植物園・研究員)	(平成 27 ～ 29 年度)
許 昆	(中国科学院昆明植物研究所・研究員)	(平成 27 ～ 29 年度)
江 博能	(国立台湾大学・准教授)	(平成 27 ～ 29 年度)

(注) 所属は年度終了時点のもの。

1.2 研究課題と担当者

サブテーマ1 チャンバーネットワークを活用した林床部炭素フラックスの長期観測

梁 乃申、高橋善幸、寺本宗正

サブテーマ2 土壌有機物の ^{14}C に関する分析

荒巻能史

サブテーマ3 モデルによる広域推定

仁科一哉

2 研究成果発表一覧

2.1 誌上発表

<雑誌>

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

Fei X., Jin Y., Zhang Y., Sha L., Liu Y., Song Q., Zhou W., Liang N., Yu G., Zhang L., Zhou R., Li J., Zhang S., Li P. (2017) Eddy covariance and biometric measurements show that a savanna ecosystem in Southwest China is a carbon sink. *Scientific Reports*, 7, 41025. doi: 10.1038/srep41025.

Guo Q., Hu Z., Yu G., Sun X., Li L., Liang N., Bai W. (2016) Exogenous N addition enhances the responses of gross primary productivity to individual precipitation events in a temperate grassland. *Scientific Reports*, 6, 26901. doi: 10.1038/srep26901.

Guo Q., Li S., Hu Z., Zhao W., Yu G., Sun X., Li L., Liang N., Bai W. (2016) Responses of gross primary productivity to different sizes of precipitation events in a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Land*, 8 (1), 36-46. doi: 10.1007/s40333-015-0136-7. doi: 10.1007/s40333-015-0136-7.

Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M. (2015) Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences*, 12 (5), 4121-4132. doi: 10.5194/bg-12-4121-2015.

Liang N., Teramoto M., Takagi M., Zeng J. (2017) High-resolution data on the impact of warming on soil CO₂ efflux from an Asian monsoon forest. *Scientific Data*, 4 (170026). doi: 10.1038/sdata.2017.26.

Liu Y., Zhang Y., Wu C., Liang N., Sha L., Luo X., Liu Y. (2016) Simulation of the responses of soil temperature and soil heterotrophic respiration to climate warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Chinese Journal of Ecology*, 35 (7), 1799-1806 (*In Chinese with English abstract*). doi: 10.13292/j.1000-4890.201607.037.

Nishina K., Ito A., Falloon P., Friend A.D., Beerling D.J., Ciais P., Clark D.B., Kahana R., Kato E., Lucht W., Lomas M., Pavlick R., Schaphoff S., Warszawski L., Yokohata T. (2015) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenarios, climate projections, and ecosystem simulations using the ISI-MIP results. *Earth System Dynamics*, 6, 435-445. doi: 10.5194/esd-6-435-2015.

仁科一哉 (2016) 多変量状態空間モデルを用いたリター分解実験のためのパラメータ推定. *統計数理*, 64 (1), 23-38.

Sun L., Teramoto M., Liang N., Yazaki T., Hirano T. (2017) Comparison of litter-bag and chamber methods for measuring CO₂ emissions from leaf litter decomposition in a temperate forest. *Journal of Agricultural Meteorology*, 73 (2), 68-76. doi: 10.2480/agrmet.D-16-00012.

Takada M., Yamada T., Liang N., Ibrahim S., Okuda T. (2015) Soil respiration change immediately after logging operations in an upper tropical hill forest, peninsular Malaysia. *Hikobia*, 17, 3-9.

Takagi K., Yone Y., Takahashi H., Sakai R., Hojyo H., Kamiura T., Nomura M., Liang N., Miya H., Yoshida T., Sasa K., Fujinuma Y., Murayama T., Fukazawa T., Oguma H. (2015) Forest biomass and volume estimation using airborne LiDAR in a cool-temperate forest of northern Hokkaido, Japan. *Ecological Informatics*, 26, 54-60. doi: 10.1016/j.ecoinf.2015.01.005.

Takahashi Y., Saigusa N., Hirata R., Ide R., Fujinuma Y., Okano T., Arase T. (2015) Characteristics of temporal variations in ecosystem CO₂ exchange in a temperate deciduous needle-leaf forest in the foothills of a high mountain. *Journal of Agricultural Meteorology*, 71 (4), 302-317. doi: 10.2480/agrmet.D-14-00009.

Tang X., Zhang Y., Wu C., Luo K., Liang N. (2018) Responses of soil temperature and soil water content to extreme snow-damage in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan. *Chinese Journal of Ecology* 37(6): 1833-1840; doi: 10.13292/j.1000-4890.201806.016.

Teramoto M., Liang N., Takagi M., Zeng J., Grace J. (2016) Sustained acceleration of soil carbon decomposition observed in a 6-year warming experiment in a warm-temperate forest in southern Japan. *Scientific Reports*, 6, 35563. doi: 10.1038/srep35563.

Teramoto M., Liang N., Zeng J., Saigusa N., Takahashi Y. (2017) Long-term chamber measurements reveal strong impacts of soil temperature on seasonal and inter-annual variation in understory CO₂ fluxes in a Japanese larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 194-206. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.07.024.

Teramoto M., Liang N., Ishida S., Zeng J. (2018) Long-term stimulatory warming effect on soil heterotrophic respiration in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest in northern Japan. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123. doi: 10.1002/2018JG004432.

Wu C., Liang N., Sha L., Xu X., Zhang Y., Lu H., Song L., Song Q., Xie Y. (2016) Heterotrophic respiration does not acclimate to continuous warming in a subtropical forest. *Scientific Reports*, 6, 21561. doi: 10.1038/srep21561.

Zhang Y., Wu C., Liang N., Sha L., Luo X., Liu Y. (2015) Responses of soil temperature, moisture and respiration to experimental warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 35 (22), 7418-7425 (*In Chinese with English abstract*).

Zhang Y., Wu C., Liang N., Sha L.Q., Luo X., Liu Y. (2015) The response of soil temperature with soil warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan, SW China. *Chinese Journal of Ecology*, 34 (2), 347-351 (*In Chinese with English abstract*).

2.2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

阿部有希子, 丹下 健, 菅原 泉, 佐藤 明, 梁 乃申, 寺本宗正 (2015) スギ人工林伐採に伴う土壌呼吸速度の変化. 農業環境工学関連 5 学会 2015 年合同大会, 盛岡, 同予稿集

Koarashi J. (2018) Stability and degradability of organic carbon in Japanese forest soils revealed by radiocarbon analysis. 8th EAFES International Congress, Nagoya, Japan, Abstracts

Kondo T., Teramoto M., Nakane K., Takagi K., Takagi M., Ishida S., Liang N. (2018) Response and feedback of soil microbiota to global warming. 8th EAFES International Congress, Nagoya, Japan, Abstracts

Liang N., Teramoto M., Fletcher C.D. (2015) Control and response of soil carbon dynamic of Asian tropical forest ecosystems. Asia Flux Workshop 2015, Pune, India, Abstracts, 6

梁 乃申, 寺本宗正, 譚 正洪, Fletcher Christine D. (2015) 東南アジア熱帯生態系における土壌炭素動態のコントロール要因. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張, 同予稿集

Liang N., Teramoto M., Zhang Y., Takagi K., He J., Wang Y., Li S., Fang J., Piao S., Zeng J., Fletcher C.D. (2016) Potentialities of Chamber Network for Estimation of CO₂/CH₄ Sink/Source of Asian Terrestrial Ecosystems. 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Beijing, China, Abstracts

Liang N., Teramoto M., Fletcher C.D. (2017) Control and response of Soil CO₂/CH₄ fluxes of Asian tropical Forest Ecosystems. 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, Abstracts

Liang N., Aramaki T., Teramoto M. (2017) Radiocarbon (¹⁴C) as a powerful tool for studying on soil organic carbon decomposition under global warming. Asia Flux Workshop 2017, Beijing, China, Abstracts

Liang N. (2017) Potentialities of an Automated Chamber Network for Estimation of CO₂/CH₄ Sink/Source of Asian Terrestrial Ecosystems. International Workshop on Response and Feedback of Forest Ecosystem Carbon, Nitrogen and Water Cycles to Climate Change, Xishuangbanna, China, Abstracts

Liang N., Teramoto M., Zhang Y., Takagi K., He J., Wang Y., Li S., Fang J., Piao S., Zeng J., Fletcher C.D. (2017) Potentialities of an Automated Chamber Network for Estimation of CO₂/CH₄ Sink/Source of Asian Terrestrial Ecosystems. 12th International Congress of Ecology (INTECOL 2017), Beijing, China, Abstracts

Liang N., Takagi K., Zhang Y., Teramoto M., Zeng J. (2017) Response and Feedback of Soil Carbon Emission to Global Warming in East Asian Region. 12th International Congress of Ecology (INTECOL 2017), Beijing, China, Abstracts

Liang N. (2017) Patterns and Controls of Soil CO₂/CH₄ Fluxes of the Representative Asian Terrestrial Ecosystems based on an Automated Chamber Network. 14th U.S.-China Carbon Consortium (USCCC), Taiyuan, China, Abstracts

Liang N., Aramaki T., Teramoto M. (2017) Radiocarbon (¹⁴C) as a powerful tool for studying on soil organic carbon decomposition under global warming. Joint conference of Asia-Flux Workshop 2017 and the 15th anniversary celebration of China-FLUX, Beijing, China, Abstracts

梁 乃申, 寺本宗正, 高木健太郎, 平野高司, 石田祐宣, 高木正博, 近藤俊明 (2018) チャンバーネットワークを用いた地球規模の温暖化影響の解明. Japanflux10 周年記念集会, つくば, 同予稿集

Liang N. (2018) NIES leading research in Pasoh Forest Reserve (PFR). 3rd NIES International Forum, Kuala Lumpur, Malaysia, Abstracts

Liang N., Teramoto M., Takagi K., Kondo T., Zhang Y., He J., Wang Y., Li S., Fang J., Piao S., Lai Y., Takagi M., Ishida S., Chiang P., Zeng J., Harun I. (2018) An Automated Chamber Network for Estimation of CO₂/CH₄ Sink/Source of Asian Terrestrial Ecosystems. 8th EAFES International Congress, Nagoya, Japan, Abstracts

Sun L., Yazaki T., Hirano T., Teramoto M., Liang N. (2017) Fine-root dynamics and root respiration in cool-temperate forests. Asia Flux Workshop 2017, Beijing, China, Abstracts

孫 力飛, 高木健太郎, 梁 乃申, 寺本宗正, 平野高司, 矢崎友嗣, 崔 銳 (2018) 異なる施業・攪乱履歴のある三林分における土壌呼吸特性の比較. 日本農業気象学会 2018 年全国大会, 福岡, 同予稿集

高木健太郎, 梁 乃申, 寺本宗正, 三枝信子 (2015) 森林伐採やその後の植生の回復が土壌の炭素動態に与える影響. 農業環境工学関連 5 学会 2015 年合同大会, 盛岡, 同予稿集

Takagi K., Liang N., Ryhti K.M., Aguilos M. and Teramoto M. (2018) Soil warming effect on the heterotrophic respiration rate during a decadal experiment in a cool-temperate forested peatland. 8th EAFES International Congress, Nagoya, Japan, Abstracts

高木健太郎, 梁 乃申, 寺本宗正, 孫 力飛, K.M. Ryhti, M. Aguilos (2018) 10年間の土壌温暖化操作が北海道北部の植林泥炭地の微生物呼吸量に与えた影響. 日本農業気象学会 2018年全国大会, 福岡, 同予稿集

高橋善幸, 三枝信子, 平田竜一, 梁 乃申, 井手玲子, 高木健太郎, 平野高司 (2016) カラマツ林での CO₂ フラックス長期観測から見る攪乱影響. 日本地球惑星科学連合 2016年大会, 幕張, 同予稿集

寺本宗正, 梁 乃申, 石田祐宣, 曾 継業, 矢野沙季 (2015) 白神山地ミズナラ林における土壌呼吸に対する温暖化の影響. 農業気象学会 2015年全国大会, つくば, 同予稿集, 142

寺本宗正, 梁 乃申, 高木正博, 曾 継業 (2015) 九州暖温帯常緑広葉樹林における土壌呼吸に対する温暖化の影響. 第126回日本森林学会大会, 札幌, 同予稿集

寺本宗正, 梁 乃申, 高木正博, 曾 継業 (2015) 九州暖温帯常緑広葉樹林における土壌呼吸に対する長期的な温暖化効果. 日本地球惑星科学連合 2015年大会, 横浜, 同予稿集

寺本宗正, 梁 乃申, 高木正博, 曾 継業 (2015) 九州暖温帯常緑広葉樹林における土壌呼吸に対する人工的な温暖化の長期的影響. 農業環境工学関連5学会 2015年合同大会, 盛岡, 同予稿集

Teramoto M., Liang N., Takagi M., Zeng J. (2015) Long-term warming effect on soil respiration in warm-temperate evergreen broad-leaved forest in Kyushu. Asia Flux Workshop 2015, Pune, India, Abstracts, 25

寺本宗正, 梁 乃申, 曾 継業, 井手玲子, 三枝信子 (2016) 自動開閉チャンバーを用いた富士北麓カラマツ林における林床部炭素収支の長期観測. 第127回日本森林学会大会, 鹿児島, 同予稿集

Teramoto M., Liang N., Zeng J., Ide R., Saigusa N. (2016) Estimation of understory carbon budget and environmental factors influencing on the processes in a larch forest on the northern foot of Mount Fuji. 日本地球惑星科学連合 2016年大会, 幕張, 同予稿集

Teramoto M., Liang N., Zeng J., Ide R., Saigusa N. (2016) Long term monitoring of understory carbon budget and the influence of tree thinning in a larch forest in central Japan. 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Beijing, China, Abstracts

寺本宗正, 梁 乃申, 曾 継業, 井手玲子, 三枝信子 (2016) 富士北麓カラマツ林における林床部炭素収支の長期モニタリング. 日本農業気象学会 2016年全国大会, 岡山, 同予稿集, 106

寺本宗正, 梁 乃申, 石田祐宣, 曾 継業, 神園 佳 (2017) 白神山地ミズナラ林における微生物呼吸に対する長期的な温暖化の影響. 第128回日本森林学会大会, 鹿児島, 同予稿集, 216

寺本宗正, 梁 乃申, 曾 継業, 高橋善幸, 井手玲子, 三枝信子 (2017) 富士北麓カラマツ林の林床炭素収支に対する間伐の影響. 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 幕張, 同予稿集

Teramoto M., Liang N., Ishida S., Zeng J., Jin S. (2017) Long-term warming effect on heterotrophic respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in northern Japan. Joint conference of Asia-Flux Workshop 2017 and the 15th anniversary celebration of China-FLUX, Beijing, China, Abstracts

Teramoto M., Liang N., Takagi K., Kondo T., Takagi M., Ishida S., Zhang Y., Lai Y., Zeng J., Nakane K. (2018) Sustained stimulatory warming effect on soil organic carbon decomposition in Asian monsoon forests: long-term empirical validation using chamber network. 8th EAFES International Congress, Nagoya, Japan, Abstracts

寺本宗正, 梁 乃申, 近藤俊明, 曾 継業, 中根周歩 (2018) 東広島アラカシ林における微生物呼吸に対する長期的な温暖化の影響. 第129回日本森林学会大会, 高知, 同予稿集

矢崎友嗣, 鎌倉以直, 孫 力飛, 平野高司, 寺本宗正, 梁 乃申 (2017) 異なる攪乱履歴を有する森林における土壌呼吸量. 日本地球惑星科学連合 2017年大会, 幕張, 同予稿集

Yazaki T., Teramoto M., Hirano T., Liang N., Sun L., Kamakura I. (2017) Post-disturbance Changes in Understory Carbon Balances in a deciduous forest, northern Japan. International Symposium on Agricultural Meteorology, Towada, Japan, Abstracts

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 132 号
NIES Research Project Report, No.132

(SR - 132 - 2018)

アジア地域におけるチャンバー観測ネットワークの活用による
森林土壌 CO₂ フラックスの定量的評価
(所内公募型提案研究)
平成 27 ~ 29 年度
Evaluation of Soil CO₂ Efflux of Asian Forest Ecosystems
based on an Automated Chamber Network
FY2015 ~ 2017

平成 30 年 10 月 31 日発行

編 集 国立環境研究所 編集分科会

発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

E-mail: pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

October 2018

組 版 株式会社 イ セ プ

〒305-0005 茨城県つくば市天久保 2 丁目 11-20

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。
<http://www.nies.go.jp/kanko/index.html>