

森林生態系における炭素循環観測

Carbon flux measurement in forest ecosystems

平野 高司*
Takashi HIRANO*

北海道大学 大学院農学研究院
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

摘 要

森林を中心とした陸域生態系は、総一次生産（Gross Primary Production: GPP）による吸収と生態系呼吸（Ecosystem Respiration: RE）による放出の差として、人為的に排出される二酸化炭素（CO₂）の約 30% に相当する量を固定している。GPP と RE の環境応答は異なり、また、森林のタイプによってもそれらの環境応答は異なる。そのため、環境変動に対する GPP と RE の変化を理解するとともに、将来における気候の変化を予測するには、様々な気候帯の異なる森林生態系における観測結果に基づいたモデル化や広域化が不可欠である。本稿では、まず陸域生態系と大気間の物質（CO₂、水蒸気、メタン（CH₄）などの気体）及び熱の交換速度（フラックス）を直接測定する方法である渦相関法について説明する。渦相関法で測定される CO₂ フラックスは正味の生態系 CO₂ 交換量（Net Ecosystem Exchange (NEE) = RE - GPP）であるが、経験的な方法により GPP と RE に分離することができる。さらに、全球的に展開されている渦相関法による観測ネットワーク（FLUXNET）について説明するとともに、データベースを利用して得られた成果などを概説する。また、RE の主要成分である土壌からの CO₂ 放出（土壌呼吸）に関するデータベースや観測ネットワークについても触れる。

キーワード：渦相関法、CO₂ フラックス、炭素収支、土壌呼吸、ネットワーク

Key words：eddy covariance technique, CO₂ flux, carbon balance, soil respiration, network

1. はじめに

2021 年 8 月に公表された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第 6 次評価報告書の第 1 作業部会報告書（Arias *et al.*, 2021）によると、人間活動が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことは疑う余地がない。また、世界平均気温は少なくとも今世紀半ばまで上昇を続け、今後数十年の間に二酸化炭素（CO₂）を中心とした温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、今世紀中に地球温暖化が 2℃ を超えることが予測されている。このような人為起源の温暖化は、平均気温を上昇させるだけでなく気候システムを変化させ、熱波や大雨、干ばつなどの極端現象を通じて人間社会や自然生態系に大きな影響を与える。温暖化を抑制し、産業革命以降の気温上昇を 1.5℃～2℃ 以下に抑えることを目標とした温室効果ガス排出削減のための国際枠組み（パリ協定）が合意され、全ての参加国が排出削減に取り組むことになっている。しかし、目標達成には、日本も含む主

要排出国における削減目標を大幅に拡大、強化することが不可欠である。

地球規模で CO₂ 収支を見積もると、化石燃料の消費や森林伐採といった土地利用変化などの人間活動によって排出される CO₂ の年間量は 38.9 Gt (=10⁹ トン、2011 年～2020 年の平均) に上り、そのうちの 29% が森林を中心とした陸域生態系によって吸収・固定される（Friedlingstein *et al.*, 2021）。さらに海洋によって 26% が吸収され、残りが大気中に留まり、大気 CO₂ 濃度の上昇をもたらす。大気 CO₂ 濃度が上昇すると海洋による CO₂ 吸収量も増加すると予測されるが、海洋酸性化などの問題が懸念されている。したがって、成層圏へのエアロゾル注入や化学工学的な大気 CO₂ 除去といった気候工学技術（杉山, 2017）を除けば、温暖化緩和のためには人為的排出量の削減と陸域生態系による吸収量の増加を目指す必要がある。植林などにより CO₂ 吸収量を増加させることはネガティブエミッション（負の排出）とよばれ、費用対効果の高い温暖化緩和策であると

受付：2021 年 9 月 17 日、受理：2021 年 12 月 22 日

* 〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目、E-mail: hirano@env.agr.hokudai.ac.jp

期待されている。例えば、Griscom *et al.* (2017) は Natural Climate Solutions (NCS; Nature-based Solutions (NbS) ともよばれる) として、放牧地などの再植林、森林の農地等への転換回避、植林地や農地の適切な管理、再湿原化などを含む 20 種類の CO₂ 排出削減・吸収増加策 (pathway) を提案し、食料安全保障や生物多様性と両立できる条件での最大ポテンシャルが CO₂ 換算で年間 23.8 Gt (現状の人為排出量の約 60%) であり、その半分については削減経費が 1 トンの CO₂ に対して 100 米ドル以下であると試算している。ただ、光合成の光利用効率が低い (最大で 2% 程度) ため、NCS には広大な面積の土地が必要になる (Baldocchi and Penuelas, 2019)。実際、最大ポテンシャルの 23.8 Gt を得るには日本の国土面積の 10 倍以上の面積で植林を行う必要があるようだ。

地球上の陸域生態系による正味の CO₂ 吸収量の年間値は、比較的高精度で推定できる人為排出量、海洋による吸収量、大気中での貯留量がわかれば CO₂ 収支の残差として求めることができる。しかし、生態系による正味の CO₂ 吸収量は、非常に大きな量である光合成による吸収量 (総一次生産: Gross Primary Production: GPP) と呼吸による排出量 (生態系呼吸: Ecosystem Respiration: RE) の小さな差であり、大きく季節変化する。また、光合成と呼吸の環境変動に対する応答は異なり、森林タイプによる応答特性の違いも考慮する必要がある。したがって、気候変動下における将来の CO₂ 吸収量を予測するには、様々な気候帯の異なる森林生態系 (植生) において CO₂ 収支・炭素循環に関する長期の連続観測と、高い時間分解能を持つ連続データに基づいた CO₂ 収支の広域化や生態系機能のモデル化が不可欠である (Ito and Ichii, 2021; Jung *et al.*, 2020)。例えば、気候変動に関しては、1) 気温上昇 (温暖化) に対して森林生態系の光合成と呼吸はどのように応答するのか、2) 温暖化によって変化する生物季節 (フェノロジー) は光合成と呼吸にどのように影響するのか、3) CO₂ 濃度の上昇にともなって光合成は促進されているのか、などを理解する必要がある。

本稿では、全球的に展開されている生態系スケールでの炭素循環 (大気-生態系間における CO₂・水・熱の交換速度) 観測ネットワークを中心に、森林生態系における炭素循環 (CO₂ 収支) 観測の現状、重要性、得られた成果などについて概説する。

2. 渦相関法を用いた生態系スケールのフラックス観測

2.1 渦相関法

渦相関法は、陸域生態系と大気との間のガス状物質やエネルギー (熱) の交換速度を連続観測する標準的な方法である。渦相関法では、観測タワー (図 1) を用いて、森林や草地などの生態系の上空 (群落か

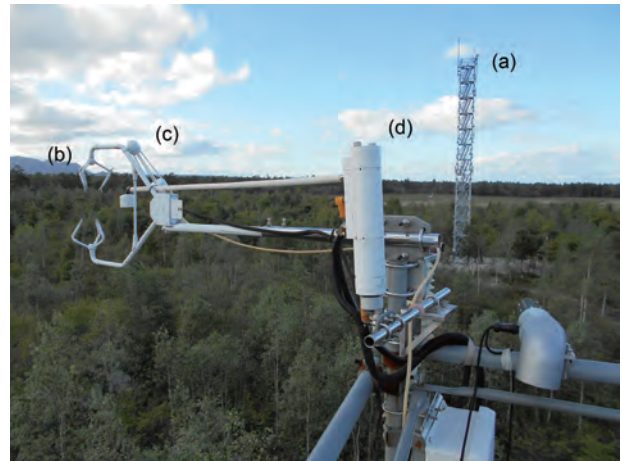


図 1 北海道苫小牧市の国有林内の観測サイト (台風による大規模風倒壊後の自然再生林) に建設された高さ 11 m の観測タワー上に設置されたセンサ類: 超音波風速温度計 (b)、オープンパス型赤外線 CO₂/H₂O 分析計 (c)、クローズドパス型赤外線 CO₂/H₂O 分析計 (d) と高さ 30 m の観測タワー (a) (地球環境研究センター, 2015)。

ら 2~20 m 程度の距離) で鉛直風速、気温、水蒸気密度、CO₂ 密度などを高速 (10~20 Hz) で連続測定し、鉛直風速と気温、鉛直風速と水蒸気密度、鉛直風速と CO₂ 密度の共分散を計算することで、それぞれ熱 (顕熱)、水蒸気 (潜熱)、CO₂ の単位水平面積当たりの鉛直輸送速度 (フラックス) を求める方法である。測器の高度や大気安定度などに依存するが、群落上の 1 高度での測定で、風上側の数百 m²~数 ha 程度の面積 (フットプリント) の空間平均値を得ることができる。通常は 30 分ごとに平均値を計算する。基本的な原理は非常に単純であるが、実際には様々な補正を行う必要がある。図 1 は、実際に観測に使われているセンサ類である。左側の 3 本指で上下に対向しているセンサ (b) は超音波風速温度計で、超音波を利用して 3 次元の風速成分と気温を測定する。その奥の白いセンサ (c) は赤外線ガス分析計で、先端の球状部と下側の筒状部の間の空間 (測定パス) の CO₂ と水蒸気の密度を赤外線の減衰を利用して測定する。測定空間が外部にあるため、オープンパス型とよばれる。また、右側の白い筒状の機器 (d) も赤外線ガス分析計であるが、ポンプで外気を引き込み、内部で CO₂ と水蒸気の密度の測定を行うため、クローズドパス型とよばれる。オープンパス型は、パスがむき出しになっているため、対象とする気体密度の変動を直接測定できる。また、ポンプが不要であるため消費電力が少なく、無電源の遠隔地においてもソーラーパネルを用いて比較的容易に使用することができる。しかし、光源や検出器の窓部が雨水によって濡れたり、冬季に積雪や氷に覆われたりすることも多く、測定値の信頼性が低くなる。一方、クローズドパス型では、空気を吸引する過程で変動成分が減衰したり、チューブ内壁で水蒸気の放出・吸着が生じたりする問題がある。さらに、ポン

プを使うために消費電力が多くなるが、雨水や降雪などに対して安定な測定が可能である。なお、顕熱フラックスに起因する気温変動が空気圧を変動させ、みかけの CO_2 密度の変動が生じる。超音波風速温度計で測定できる顕熱フラックスを用いて補正することが可能であるが、オープンパス型では分析計からの発熱などの影響によって密度補正が不十分となるため、特に寒冷期において CO_2 フラックスに系統的な誤差が生じることが指摘されている(Hirata *et al.*, 2005; Burba *et al.*, 2008)。クローズドパス型では、パス部の温度が一定に制御されているため CO_2 フラックスにおける密度補正は必要ないが、変動の減衰に対する補正が必要である。最近では、荒天時の安定性などの理由で、引き込み経路の短いタイプのクローズドパス(セミクローズドパス)型分析計が使われることが多くなってきた(図 1(d))。

このように得られる CO_2 フラックスは、測定高度における鉛直乱流輸送量であるため、対象とする生態系と大気との間の正味の CO_2 交換量(Net Ecosystem Exchange: NEE)を求めるには、測定高度以下の空間における CO_2 濃度の鉛直分布(プロファイル)を別途測定し、その時間変化から得られる CO_2 の貯留変化量を乱流フラックスに加える必要がある。森林では、静穏な夜間に林内に蓄積された CO_2 が日の出後に林上に掃き出されることが多い。そのため、草丈の低い草地などを除いて、 CO_2 の貯留変化を無視すると NEE の日変化を捉えることが難しい。NEE は、呼吸による CO_2 放出(RE)と光合成による CO_2 吸収(GPP)の差であるが、よく似た用語に正味生態系生産(Net Ecosystem Production: NEP)がある。NEE は大気を基準にしているのに対し、NEP は生態系を基準にしている。したがって、大気中の CO_2 (炭素)が増加する場合($\text{RE} > \text{GPP}$)に NEE は正であり、生態系の炭素が増加する場合($\text{RE} < \text{GPP}$)に NEP は正になる。NEP には溶存炭素の流亡(リーチング)なども含まれるが、内陸部の森林生態系ではそのような炭素損失が比較的小さいため、 $\text{NEP} \approx -\text{NEE}$ の関係が成り立つことが多い。

RE は植物による呼吸と微生物による有機物の分解(微生物呼吸)の合計である。一方、光合成は(1)式で表すことができる。 P_n は純(正味)光合成速度、 V_c はカルボキシル化反応速度、 V_o は酸素化反応速度、 R_{day} は明条件におけるミトコンドリアでの呼吸速度である。 V_c と V_o はルビスコでの酵素反応である。 V_c は真の光合成あるいは総光合成とよばれ、 $0.5 V_o$ は光呼吸である。真の光合成から光呼吸を引いたものは見かけの光合成とよばれる。 R_{day} は葉における呼吸速度を意味するが、RE に置き換え、また P_n を NEE とすると、GPP が見かけの光合成を意味していることがわかる(Wohlfahrt and Gu, 2015)。

$$P_n = V_c - 0.5 V_o - R_{\text{day}} \quad (1)$$

夜間は光合成が 0 のため NEE と RE は等しくなる。夜間の RE と気温あるいは地温との指数関数的な関係を利用して、昼間の RE を温度から外挿し、観測された NEE との差を GPP とするのが一般的である(Reichstein *et al.*, 2005)。しかし、 R_{day} が暗条件での呼吸(R_{dark})よりも小さくなるため、夜間の RE(R_{dark})を用いると昼間の RE が過大評価され、結果として GPP も過大評価になる(Wohlfahrt and Gu, 2015)。そのため、観測から求められる光強度と昼間の NEE の関係から得られる光強度がゼロのときの値(y 切片)を RE とする方法が提案された(Lasslop *et al.*, 2010)。この方法だと、風速が弱くて昼間よりも信頼性の低い夜間のデータを使う必要が無いが、夜間の RE が過小評価される傾向があるようだ。そのため、これら 2 つの方法を結合させた方法が提案された(Keenan *et al.*, 2019)。すなわち、昼間と夜間で基準となる RE を別々に用いる方法である。後述するデータセット(FLUXNET2015)を用いた解析によると、夜間のデータを利用した方法では GPP と RE の年間値がそれぞれ 7%、11.4% 過大評価され、昼間のデータを用いた方法では、GPP は正しく評価されるが RE の年間値が 7.9% 過小評価されると報告されている(Keenan *et al.*, 2019)。昼と夜の呼吸の比($R_{\text{day}}/R_{\text{dark}}$)の光強度依存性(Wohlfahrt and Gu, 2015)が考慮されていないなどの問題もあるが、昼間の NEE の分離方法について再考する必要があるように思われる。

渦相関法で得られるフラックスは風上側の比較的広い範囲の空間平均値であり、非破壊で生態系の環境応答を高時間分解能(30 分程度)で連続的に求めることが可能である。渦相関法によるフラックス観測は、GPP と RE という異なる生物反応の変動する気象条件への応答を群落スケールで検出できる唯一の方法であるといえる。しかし、本来、平坦な土地に広がる一様な植生を対象とした定常な気象条件での観測を想定したものであるため、傾斜地や凹凸地などの複雑地形や狭い土地への適用は難しく、また降雨時や無風時(乱流が弱い)、気象条件が大きく変動する条件(非定常)におけるデータの信頼性は低い。そのため、共分散の定常性や乱流強度(摩擦速度)を用いて観測データの品質チェックが行われ、基準を下回るデータは欠測として除外される。さらに、観測タワーによる気流の乱れも影響するため、センサの設置状況によっては(タワーの中間部への設置など)、風向がタワーに被る場合を欠測とすることも多い。欠測値として除外されるデータは、風速が小さい夜間に多くなる。また、電源トラブルや観測機器の不調などで欠測することも多いため、連続観測であってもかなりの数のデータが欠測になっているのが実情である。このような欠測値は、フラックスと気象条件(日射量、気温、湿度(大気飽差)など)との関係性を考慮し、参照表(look-up table や marginal

distribution sampling)や関係式(指数関数, 非直角双曲線など)を用いて, 気象データから補間される(Moffat *et al.*, 2007)。REでは気温, GPPでは日射量(光合成有効放射), 気温及び大気飽差を用いることが多い。最近では, 機械学習(人工ニューラルネットワーク, ランダムフォレストなど)による欠測補間も増えてきている(Irvin *et al.*, 2021; Ooba *et al.*, 2006)。なお, 渦相関法にはエネルギー・インバランスという問題が残っている。これは, (2)式で示す地表面のエネルギー収支が閉じない問題である。式中の R_n は純放射量, G は植物体と土壌における貯熱変化, P は光合成産物に変換されるエネルギー, H は顕熱フラックス, LE は潜熱フラックスであり, LE は水蒸気フラックス(蒸発散量)に水の気化潜熱を乗じたものである。左辺は有効エネルギーとよばれ, この量が顕熱と潜熱の乱流フラックスに分配されることを意味している。ほぼ全ての観測サイトで右辺の方が小さく, 世界の173の観測サイトでの平均は85%であった(Stoy *et al.*, 2013)。もしインバランスの原因が乱流計測にあるなら, CO_2 フラックスも過小評価されている可能性がある(Wilson *et al.*, 2002)。インバランスの原因として, 放射計の不具合や乱流観測の問題, 水平方向の移流, 純放射と乱流フラックスの観測対象エリア(フットプリント)の不一致などが25年以上にわたって議論されてきたが, 解決には至っていない(Mauder *et al.*, 2020)。しかし, 2021年3月に開催されたFLUXNET(後述)主催のウェビナーにおいて, オークリッジ国立研究所のGu博士が新説を発表した(<https://www.youtube.com/watch?v=hlhCICFpooo>, 2021年9月9日視聴)。それは, 植物葉における光合成の光化学的なエネルギー貯留がインバランスの主な原因であり, CO_2 を含む乱流フラックスの過小評価はないという仮説である。すなわち, (2)式の左辺に新たな項が加わるが, GPPから推定する方法や太陽光誘発クロロフィル蛍光(SIF)を利用した推定法が紹介された。Gu博士らの研究のさらなる進展を期待したい。

$$R_n - G - P = H + LE \quad (2)$$

渦相関法を用いたフラックス観測は1970年代後半に始まったが, 乱流成分を高速で安定して測定することが難しかったため, 当初は農地や草地を対象とした試験的なものであった。1990年代以降, 超音波風速温度計や赤外線ガス分析計, コンピュータ, データ収録装置の進歩・発展・低価格化が進んだこともあり, 地球規模での炭素循環に及ぼす陸域生態系の役割などの観点から, CO_2 フラックスに重点を置いた長期にわたる観測(モニタリング)研究が森林を中心とした様々な生態系において実施されるようになった。観測システムの省電力化も進み, ソー

ラーパネルを利用することで, 遠隔地においても長期自動観測が可能になっている。すでに20年以上の連続データが蓄積している観測サイトも多い。また, 最近ではレーザ分光ガス分析計の進歩にともない, メタン(CH_4) (Knox *et al.*, 2019)や一酸化二窒素(N_2O) (Cowan *et al.*, 2020), CO_2 の安定同位体($^{13}CO_2$) (Oikawa *et al.*, 2017)などの渦相関法によるフラックス観測も行われるようになった。特に CH_4 フラックスについては, 主要な放出源である淡水湿地を中心とした多くのサイトでモニタリングが行われている。

2.2 観測ネットワーク

観測サイトが増えるに従って渦相関法によるフラックス観測のネットワーク化が進み, 西欧では1996年にEuroFlux (CarboEuroFluxを経て, 現在はICOSが継承)が, また北米では1997年にAmeriFluxが発足した。渦相関法では, 使用されるセンサタイプなどが異なることはあっても, 基本的には統一的な手法で観測を行い, また標準的な方法でデータ解析を行うため, ネットワーク化により研究者のスキルアップやデータの統合化が一気に進んだ。その後, EuroFluxとAmeriFluxが母体となり, 1998年に世界規模のフラックス観測研究ネットワーク(FLUXNET; <https://fluxnet.org/>)が設立された。FLUXNETの設立に際しては, 地球観測システム(EOS)による衛星データの地上検証を目的とした米国航空宇宙局(NASA)からの資金援助があった(Baldocchi *et al.*, 2001)。アジアにおいても, 日本の研究者の主導により1999年にAsiaFlux(<https://www.asiaflux.net/>)が組織され, FLUXNETに加わった。AsiaFluxの傘下には, 中国(ChinaFLUX), 韓国(KoFlux), 日本(JapanFlux; <https://www.japanflux.org/>)などの国内ネットワークが加わっている。FLUXNETは, 2019年の時点で観測サイトの登録数が900を超え, 「生態系機能」に関する世界最大規模の研究ネットワークとなった(Baldocchi, 2020)。FLUXNETは設立当初からデータベースの整備を始め, 最新版は3代目にあたるFLUXNET2015 Dataset(2020年2月更新, 以下FLUXNET2015)である(Pastorello *et al.*, 2020)。このデータベースには, 統一的な手順で処理(計算, 品質管理, 欠測補間, GPPの分離など)された森林を中心とした212サイトの2014年までのデータ(1532サイト×年)が収録されている(図2)。収録データは, サイト情報の他に30分~60分平均のNEE, RE, GPP, H , LE , G , 気象要素(日射量, 気温, 大気飽差, 降水量など), 土壌環境(地温, 土壌水分など)などである。規約に従えば, データをダウンロードして研究に利用することが可能である。

全球をほぼカバーするFLUXNET2015は, 地球規模の CO_2 収支を評価する研究に活用されている。例えば, Jung *et al.* (2020)は, FLUXNET2015を基に衛

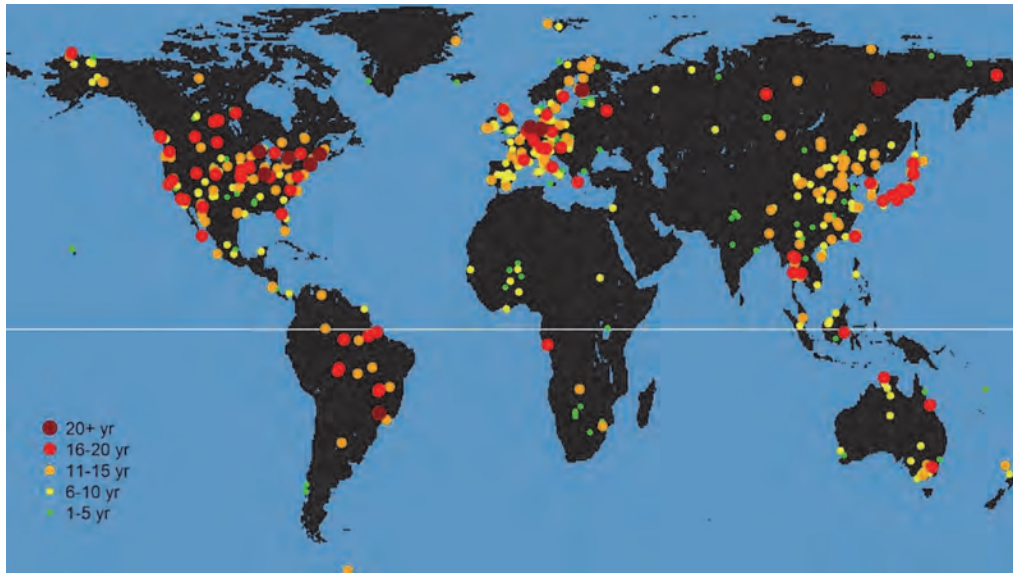


図2 FLUXNET2015 に収録されている観測サイトの分布 (FLUXNET, 2017).
丸の大きさと色はデータの年数を表している。

星リモセンのデータとグリッド気象データを用いた機械学習を行い、全球規模で GPP と NEE を推定する (FLUXCOM) とともに、大気 CO_2 濃度データからの逆解析 (インバース法)、SIF 及び様々な動的全球植生モデル (DGVM) による推定結果との比較を行い、FLUXCOM の精度検証を行った。同様の研究がアジア域でも行われ、南アジアや東南アジアにおける季節変化に手法間の違いが大きいことが示された (Ichii *et al.*, 2017)。

フラックス観測データを利用した統合解析も多数行われており、森林タイプごとの GPP や RE の違いや、年平均気温や年降水量との関係が明らかになった (Luyssaert *et al.*, 2007)。全球規模でみると年平均気温とともに年積算 GPP も上昇するが、年降水量が制限要因となる気候帯も多い。一方、RE と GPP の差である NEE と年平均気温との関係は明瞭ではない。なお、年降水量が比較的多い東アジアの森林では、GPP のサイト間差はほぼ年平均気温によって説明できるようだ (Hirata *et al.*, 2008)。

気候変動や気象の極端現象 (熱波や干ばつなど) への生態系の応答に関するフラックスデータの統合解析も多い。複数年のデータを解析した研究は、NEE の温度反応には最適温度が存在し、最適温度と年平均気温の間に正の相関があることや最適温度が高温側に移動する傾向があることを示し、GPP の高温への順化を示唆している (Niu *et al.*, 2012)。亜寒帯と温帯の観測サイトの温度反応を解析した結果によると、温度上昇に対する応答は RE よりも GPP で大きく、これらの気候帯では温暖化の程度によっては NEP が上昇する可能性がある (Zhang *et al.*, 2017)。また、温暖化は落葉樹の展葉期間を長くするため、光合成を促進すると期待できる。しかし、フェノロジーの変化が CO_2 収支に与える影響は単純ではな

く、春季の昇温の影響は $\text{GPP} > \text{RE}$ なので NEP が増加するが、秋季の昇温効果は $\text{GPP} < \text{RE}$ であり、NEP が減少するようだ (Piao *et al.*, 2008)。熱波については、2003 年夏季にヨーロッパを襲った異常高温に関する研究がある (Reichstein *et al.*, 2007)。前年に比べて、2003 年夏季にはヨーロッパの森林の NEP が減少したが、高温よりも乾燥 (干ばつ) による影響が強く、GPP だけでなく RE も減少した。干ばつに対する感受性は RE より GPP の方が大きいようだ (Schwalm *et al.*, 2010)。

長期のデータ蓄積が進んだことで、 CO_2 濃度の上昇に対する生態系の応答に関する研究も始まった。Keenan *et al.* (2013) は北半球の森林サイトの長期データを利用し、 CO_2 濃度の上昇によって気孔が部分的に閉鎖した結果、生態系の水利用効率 (= GPP / 群落コンダクタンス) が上昇傾向にあることを示した。また、Ueyama *et al.* (2020) は 104 サイトのデータを用いたモデル解析を行い、2000 年～2014 年の CO_2 濃度上昇が GPP と気孔コンダクタンス (気孔の開き具合) に与える影響を評価した。結果は、 CO_2 濃度の 1 ppm 上昇に対する GPP への施肥 (促進) 効果は 0.138%、気孔コンダクタンスに対しては -0.073% であり、水利用効率が上昇していることを示した。さらに、森林伐採や火災などの攪乱による CO_2 収支の変化についてもフラックスデータを用いた研究が行われている。この場合、植生の回復に伴う長期にわたる変化が予測されるため、同様の気象・土壌条件に存在する同じ森林タイプで、攪乱からの経過年数が異なる複数サイトのデータ (クロノシーケンス) を比較することが多い。北米の森林を対象とした解析では、樹木の地上部が全て失われるような厳しい攪乱 (火災や皆伐など) により、森林の NEE は一時的に正 (正味の CO_2 放出源) になるが、植生の回復に

ともなう GPP が上昇し、攪乱後 10 年が経過するとほとんどのサイトの NEE が 0 になり、20 年で全てのサイトの NEE が負(正味の CO_2 吸収源)になることが報告された(Amiret *et al.*, 2010)。クロノシーケンス解析は、観測時期や攪乱強度、樹種などがサイト間で一致しないという問題はあるが、長期の影響を検出するための有効な手法である。一方、攪乱の有無や程度が異なる近隣の複数サイトで同時観測を行ったり(Hirano *et al.*, 2012)、攪乱の前後(あるいは攪乱時も含めて)観測を継続し(Ohkubo *et al.*, 2021)、サイト間あるいは攪乱前後のデータを比較することも行われている。Ohkubo *et al.* (2021) は、熱帯泥炭林の火災跡地(植生回復中)で約 13 年間にわたる CO_2 フラックスの連続観測を行い、再び発生した火災の前後で NEE が正(放出)から負(吸収)に変化したことを報告した。これは通常の攪乱とは異なる予期せぬ変化であり、攪乱の影響が単純でないことを示している。

水蒸気を除くと、 CH_4 は CO_2 に次いで温暖化に強く寄与する温室効果気体であるが、生態系からの放出量に関する不確実性が大きい(Saunois *et al.*, 2020)。有機物が還元条件で嫌気分解され、最終的にメタン生成菌によって CH_4 が合成される。そのため、生態系における主な発生源は淡水湿地や水田である。2010 年代に入ってから湿地や水田を中心にフラックス観測サイトが増加を続け、サイト数は 200 以上になった(Knox *et al.*, 2019)。これには、電力消費量が少ないオープンパス型の CH_4 分析計が市販されたことが大きく貢献している(McDermitt *et al.*, 2010)。Global Carbon Project(GCP)が進める全球的な CH_4 収支の定量化(Global Methane Budget; Saunois *et al.*, 2020)に寄与するため、FLUXNET に CH_4 フラックスのデータベース(FLUXNET- CH_4)が加わった。FLUXNET- CH_4 (version 1.0)には、 CO_2 や水蒸気のフラックスとともに、統一的な手法で計算・処理(品質管理や欠測補間など)された世界中の 79 サイト(図 3)の 30 分平均の CH_4 フラックスが収録され

ている(Delwiche *et al.*, 2021)。欠測補間は機械学習によって行われている(Irvin *et al.*, 2021)。希望者は、定められた規則にしたがうことでデータを利用することができる。FLUXNET- CH_4 の水田を含む湿地のデータを利用した統合解析(Chang *et al.*, 2021; Knox *et al.*, 2021; Knox *et al.*, 2019)により、1) CH_4 フラックス(放出量)の空間分布の 65%は温度によって説明できる、2)温度の季節変化が小さい低緯度地域では地下水位の影響が大きくなる、3)温度と CH_4 フラックスの関係にはヒステリシスがあり、同じ温度でも成長季節の後半にフラックスが大きくなる(基質の量に関係)、などが明らかになった。

CH_4 の全球排出量の 65%が熱帯・亜熱帯起源であると報告されているが(Saunois *et al.*, 2020)、これらの地域から FLUXNET- CH_4 に参加している観測サイトの数は多くない。ここでは、収録サイトも含めた東南アジアの熱帯泥炭地の 6 サイトの結果について簡単に紹介したい。熱帯泥炭地は、赤道アジアの島嶼部(インドネシア、マレーシア、パプアニューギニア)、コンゴ盆地及びアマゾン川上流域を中心に分布する総面積 58 万 km^2 の泥炭湿地であり、泥炭として存在する土壌炭素量が 105 Gt と推定されている(Dargie *et al.*, 2017; Page *et al.*, 2011)。本来は湿地林(泥炭林)と共存して泥炭を蓄積してきたが、近年、森林伐採や排水をとまなう農地転換が進んでいる。図 4 はボルネオ島の 4 サイト(Sakabe *et al.*, 2018; Wong *et al.*, 2020)とスマトラ島の 2 サイト(Deshmukh *et al.*, 2020)の地下水位と CH_4 放出量の関係を示している。ボルネオ島の 1 サイト(インドネシア中部カリマンタン州、PUF)を除いて、攪乱の程度や地理的分布に関係なく、地下水位によって CH_4 放出量のサイト間差が説明できるようだ。PUF のみが外れているのは、生成履歴に起因する泥炭の質的特徴が違っているのかもしれない(Dommain *et al.*, 2011)。なお、渦相関法で測定された生態系スケールの CH_4 放出量は、土壌からの CH_4 放出量よりも大きいことが報告されている(Ishikura *et al.*, 2019)。これは、林床部

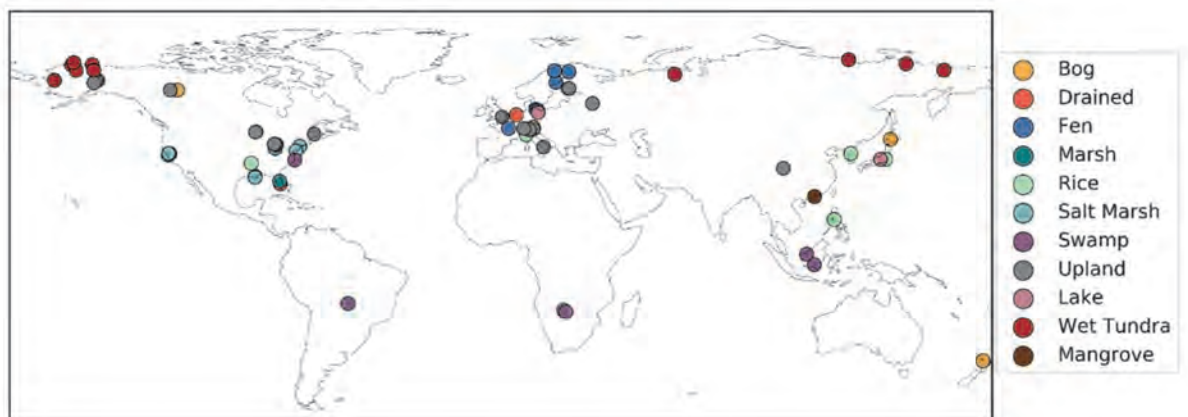


図 3 FLUXNET- CH_4 (version 1.0) (<https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>)に収録されている観測サイトの分布。

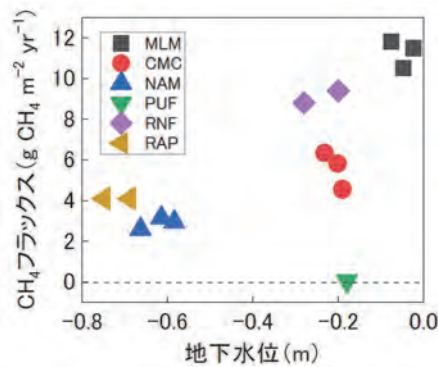


図4 東南アジアの熱帯泥炭地における年平均地下水位と年積算 CH_4 フラックス(放出量)の関係。

MLM: マレーシア・サラワク州(ボルネオ島)の未排水の泥炭林, CMC: サラワク州の泥炭林二次林, NAM: サラワク州のオイルパームプランテーション(Wong *et al.*, 2020), PUF: インドネシア・中部カリマンタン州(ボルネオ島)の未排水の泥炭林(Sakabe *et al.*, 2018), RNF: インドネシア・リアウ州(スマトラ島)の未排水の泥炭林, RAP: リアウ州のアカシア(パルプ材)プランテーション(Deshmukh *et al.*, 2020)。

に点在する水たまりやプランテーション内の水路からのホットスポット的な CH_4 フラックスを観測していることによると考えられる。また、泥炭林の樹木の幹から放出される CH_4 が寄与している可能性もある(Pangala *et al.*, 2013)。

3. チャンバー法による土壌フラックスの連続観測

植物根の呼吸(根呼吸)と有機物の土壌微生物による分解(微生物呼吸)によって CO_2 が放出されるため、土壌では大気よりも CO_2 濃度が高い。その結果、主に拡散によって CO_2 が土壌から大気へ放出される。この過程は土壌呼吸とよばれ、森林生態系における RE の主要成分である(Davidson *et al.*, 2006)。また、前述のように、土壌の還元層ではメタン生成菌によって CH_4 が生成されるが、好気条件ではメタン酸化菌によって CH_4 は CO_2 に酸化される。森林土壌は好氣的であるため CH_4 濃度が低下し、大気から CH_4 を吸収することが多い。日本の森林土壌による CH_4 吸収速度が $9.7\sim 10.9 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ という報告もある(Ishizuka *et al.*, 2009)。この吸収量は、未排水の熱帯泥炭林(MLM)からの放出量の 10% 程度に相当する(図4)。微量気体の土壌-大気間の交換速度(フラックス)の測定には、チャンバー法が用いられることが多い。

チャンバー法にもいくつかの方式があるが、密閉容器で土壌表面を覆い、容器内の微量気体の濃度変化からフラックスを計算する方法が一般的である。現在では、赤外線(CO_2)やレーザ分光方式(CH_4 , CO_2 , N_2O など)を利用した分析計を用いて、現場で濃度測定を行うことが多い。チャンバーの開口面積は $0.01\sim 1 \text{ m}^2$ 程度であり、渦相関法がカバーする面積(フットプリント)に比べてはるかに小さい。その

ため、フラックスの空間代表値を得るためには多点での測定が不可欠であり、多大な労力を要する。一方、狭い場所でも適用できるため、植物根を切除(根切り)して土壌呼吸を根呼吸と微生物呼吸に分離したり、様々な処理の効果を調べたり、フラックスの空間分布を調べるなど、数十年前から様々な用途でチャンバー法は用いられてきた。当初は、手動による非連続的な観測のみであったが、2000 年代に入ってから自動開閉チャンバーを用いた連続観測が普及してきた(Liang *et al.*, 2004)。しかし、渦相関法のような世界的なネットワークには発展していない。データベースに関しては、温帯を中心とした土壌呼吸の文献値(主に年間値)を収集したものがあり、利用することができる(SRDB; https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/SRDB_V5.html)。このデータベースに基づく機械学習によって、全球の陸域生態系における土壌呼吸の年間値が 93.3 Gt C (炭素換算)で、年率 0.04 Gt C で増加していると推定された(Zhao *et al.*, 2017)。また、温度上昇(1°C 当たり)と降水量増加(10 mm 当たり)に対する感受性が、それぞれ $0.16 \text{ Gt C } ^\circ\text{C}^{-1}$, $0.5 \text{ Gt C } 10 \text{ mm}^{-1}$ と計算された。

微量気体の土壌フラックスに関するデータの利活用を促進し、貴重なデータの散逸を防ぐため、2019 年に連続観測値のデータベース(COSORE)が構築された(Bond-Lamberty *et al.*, 2020)。このデータベースには高時間分解能(1 時間程度)の連続データが収録されており、GitHub 上(<https://github.com/bpbond/cosore>)で公開されている。最後に、国立環境研究所の梁乃申博士が主導して東アジアに広く展開しているチャンバーネットワーク(図5)について紹介したい。観測サイトは、日本を中心にシベリアからマレーシアまでの 40 地点に広がっている。観測システムは、透明な塩ビ板で製作された $12\sim 24$ 台の大型チャンバー(開口部面積 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$)から成り、空気圧でシリンダーを動かして、1 時間サイクルで各チャンバーの上蓋を順番に自動開閉させ、閉鎖時の濃度変化から CO_2 フラックスを計算する(図6)。標準的な構成は土壌呼吸区(植物の地上部を除去)と微生物呼吸区(根切りにより植物根を排除)であるが、赤外線ヒータを利用した温暖化処理区を設置しているサイトもある。なお、根切りとは、チャンバーが覆う地面の外周を掘り下げて植物根を切断するとともに、掘った部分にプラスチック板や透水防根シートなどを埋め込み、周囲から根が侵入しないようにする処置である。根切りにより根呼吸が排除されるため、測定される土壌呼吸は微生物呼吸のみになる。ネットワークの 12 の森林サイトでは CH_4 フラックスの観測も行っており(図5)、東アジアの森林土壌による CH_4 吸収量の評価に利用できる。また、観測データのサイト間比較における不確実性を軽減できるように、観測手順やデータの計算・処理の方法は全サイトで統一されている(Liang *et al.*,

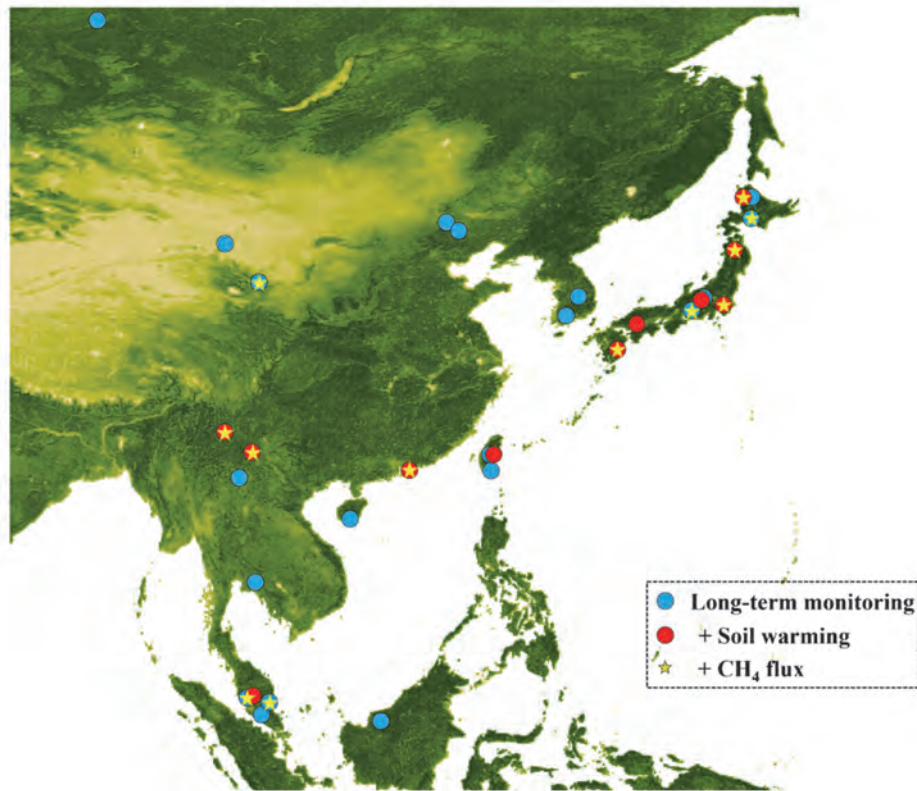


図5 梁乃申博士が主導するチャンバーネットワークの地図。



図6 自動開閉チャンバー(富士北麓サイト)。

2017)。データの一部は、COSORE やウェブ上のリポジトリで公開されている。Figshare (https://figshare.com/articles/journal_contribution/Soil_CO2_Efflux_Dataset/3808119)

4. おわりに

渦相関法を中心に、ネットワークやデータベースについて解説した。近年、機械学習が普及し、さらに深層学習を用いることでデータがもつ客観的情報を自動抽出し、プロセスモデルに活用することも期待されている(Reichstein *et al.*, 2019)。現在ではビッグデータの有効性が広く認識されており、30 分の時間分解能をもつフラックスデータの重要性は更に高くなるであろう。過去 20 年間で観測サイトの数は

増加したが、多くの観測サイトのデータは公開されず、散逸の危機が迫っている。また、観測サイトは北半球の温帯林に集中しており、膨大な量の炭素を蓄積するとともに多様性の高い熱帯林(Fu *et al.*, 2018)や急速に温暖化が進行している北極圏では観測サイトの密度が低い(図2)。さらに、気象条件の年次変動を考慮すると、各サイトの時間的な代表性を確保するには7年~10年程度のデータが必要であることも報告されている(Chu *et al.*, 2017)。観測データの早急な公開が望まれているが、熱帯や北極圏などの地域での長期の観測データは特に重要である。と言いながら、著者自身も熱帯泥炭林などの観測データをまだ公開していない。未公開の理由として、データ様式の変更などに時間がかかるなどがあるが、アジアからのデータ公開が少ない、影響力の強い研究者は積極的にデータを公開しているという解析結果もあり(Dai *et al.*, 2018)、早い時期に公開しようと準備している。なお、FLUXNETに関する文献の中で“flux everywhere and all the time”という標語が使われている(Baldocchi, 2020; Chu *et al.*, 2017)。直訳すると「いつでもどこでもフラックス」であろうか。そのためには安価で頑強な観測システム(例えば, Hill *et al.*, 2017)が不可欠であるが、実現すればNCS(Griscom *et al.*, 2017)のクレジット化に貢献できると考えられる。

AsiaFlux は 2019 年に創立 20 周年を迎えた。記念事業として、アジアを中心とした関連研究をまとめた総説を特集号として Journal of Agricultural

Meteorology 誌から出版した。2021 年 9 月の時点では、蒸発散・エネルギーフラックス、土壌呼吸、生態系プロセス、揮発性有機化合物及び陸域生態系モデルに関する 5 報が J-STAGE(https://www.jstage.jst.go.jp/browse/agrmet/spenum/77/1/_contents/-char/ja)から公開されているが、今後、CO₂ フラックスや衛星リモートセンシングに関する総説も追加で公開される予定である。また、FLUXNET は国際的な研究ネットワークの連携促進の枠組みで米国国立科学財団(NSF)の予算を獲得した(<https://fluxnet.org/2021/08/06/fluxnet-co-op-receives-funding-from-nsf/>)。このプロジェクト(FLUXNET Co-op)は、次世代の研究者の育成やデータベースの拡充、地域ネットワークとの連携強化(ワークショップの開催、研究者交流など)などを目的としたものである。FLUXNET 及び AsiaFlux の更なる発展を期待したい。

謝 辞

本稿を執筆する機会を与えていただいた国立環境研究所地球環境研究センターの三枝信子センター長に感謝いたします。また、本稿の執筆にあたっては、JSPS 科研費 19H05666 及び環境研究総合推進費 2-2006 による研究成果を利用した。

引用文献

- Amiro, B. D., Barr, A. G., Barr, J. G., et al. (2010) Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *Journal of Geophysical Research*, 115, GK00K02. <https://doi.org/10.1029/2010JG001390>
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., et al. (2021) Technical summary. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 15 I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. (in press)
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., et al. (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415–2434.
- Baldocchi, D. and Penuelas, J. (2019) The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems. *Global Change Biology*, 25, 1191–1197. <https://doi.org/10.1111/gcb.14559>
- Baldocchi, D. D. (2020) How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*, 26, 242–260. <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>
- Bond-Lamberty, B., Christianson, D. S., Malhotra, A., et al. (2020) COSORE: A community database for continuous soil respiration and other soil-atmosphere greenhouse gas flux data. *Global Change Biology*, 26, 7268–7283. <https://doi.org/10.1111/gcb.15353>
- Burba, G. G., McDermitt, D. K., Greille, A., Anderson, D. L., and Xu, L. (2008) Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology*, 14, 1854–1876. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01606.x>
- Chang, K. Y., Riley, W. J., Knox, S. H., et al. (2021) Substantial hysteresis in emergent temperature sensitivity of global wetland CH₄ emissions. *Nature Communications*, 12(1), 2266. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22452-1>
- 地球環境センター(2017) 地球環境データベース. https://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/flux/tomakomai_n.html
- Chu, H., Baldocchi, D. D., John, R., et al. (2017) Fluxes all of the time? A primer on the temporal representativeness of FLUXNET. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(2), 289–307. <https://doi.org/10.1002/2016JG003576>
- Cowan, N., Levy, P., Maire, J., et al. (2020) An evaluation of four years of nitrous oxide fluxes after application of ammonium nitrate and urea fertilisers measured using the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107812>
- Dai, S. Q., Li, H., Xiong, J., et al. (2018) Assessing the extent and impact of online data sharing in eddy covariance flux research. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(1), 129–137. <https://doi.org/10.1002/2017JG004277>
- Dargie, G. C., Lewis, S. L., Lawson, I. T., et al. (2017) Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542(7639), 86–90. <https://doi.org/10.1038/nature21048>
- Davidson, E. R., Richardson, A. D., Sacage, K. E., et al. (2006) A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest. *Global Change Biology*, 12, 230–239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01062.x>
- Delwiche, K. B., Knox, S. H., Malhotra, A., et al. (2021) FLUXNET-CH₄: a global, multi-ecosystem dataset and analysis of methane seasonality from freshwater wetlands. *Earth System Science Data*, 13, 3607–3689. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3607-2021>
- Deshmukh, C. S., Julius, D., Evans, C. D., et al. (2020) Impact of forest plantation on methane emissions

- from tropical peatland. *Global Change Biology*, 26, 2477–2495. <https://doi.org/10.1111/gcb.15019>
- Dommain, R., Couwenberg, J. and Joosten, H. (2011) Development and carbon sequestration of tropical peat domes in south-east Asia: links to post-glacial sea-level changes and Holocene climate variability. *Quaternary Science Reviews*, 30(7–8), 999–1010. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.018>
- FLUXNET (2017) Site Summary. <https://fluxnet.org/sites/site-summary/> (2021 年 12 月 22 日確認)
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., et al. (2021) Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data* (Preprint). <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>
- Fu, Z., Gerken, T., Bromley, G. et al. (2018) The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide in tropical rainforests: Sensitivity to environmental drivers and flux measurement methodology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.001>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., et al. (2017) Natural climate solutions. *PNAS*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Hill, T., Chocholek, M. and Clement, R. (2017) The case for increasing the statistical power of eddy covariance ecosystem studies: why, where and how? *Global Change Biology*, 23(6), 2154–2165. <https://doi.org/10.1111/gcb.13547>
- Hirano, T., Segah, H., Kusin, K., et al. (2012) Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat swamp forests. *Global Change Biology*, 18(11), 3410–3422. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02793.x>
- Hirata, R., Hirano, T., Mogami, J., et al. (2005) CO₂ flux measured by an open-path system over a larch forest during snow-covered season. *Phyton*, 45, 347–351.
- Hirata, R., Saigusa, N., Yamamoto, S., et al. (2008) Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(5), 761–775. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.016>
- Ichii, K., Ueyama, M., Kondo, M., et al. (2017) New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 122(4), 767–795. <https://doi.org/10.1002/2016jg003640>
- Irvin, J., Zhou, S., McNicol, G., et al. (2021) Gap-filling eddy covariance methane fluxes: Comparison of machine learning model predictions and uncertainties at FLUXNET-CH₄ wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308–309. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108528>
- Ishikura, K., Hirata, R., Hirano, T., et al. (2019) Carbon dioxide and methane emissions from peat soil in an undrained tropical peat swamp forest. *Ecosystems*, 22(8), 1852–1868. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00376-8>
- Ishizuka, S., Sakata, T., Sawata, S., et al. (2009) Methane uptake rates in Japanese forest soils depend on the oxidation ability of topsoil, with a new estimate for global methane uptake in temperate forest. *Biogeochemistry*, 92(3), 281–295. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9293-0>
- Ito, A. and Ichii, K. (2021) Terrestrial ecosystem model studies and their contributions to AsiaFlux. *Journal of Agricultural Meteorology*, 77(1), 81–95. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00024>
- Jung, M., Schwalm, C., Migliavacca, M., et al. (2020) Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, 17(5), 1343–1365. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1343-2020>
- Keenan, T. F., Hollinger, D. Y., Bohrer, G., et al. (2013) Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature*, 499(7458), 324–327. <https://doi.org/10.1038/nature12291>
- Keenan, T. F., Migliavacca, M., Papale, D., et al. (2019). Widespread inhibition of daytime ecosystem respiration. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 407–415. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0809-2>
- Knox, S. H., Bansal, S., McNicol, G., et al. (2021) Identifying dominant environmental predictors of freshwater wetland methane fluxes across diurnal to seasonal time scales. *Global Change Biology*, 27(15), 3582–3604. <https://doi.org/10.1111/gcb.15661>
- Knox, S. H., Jackson, R. B., Poulter, B., et al. (2019) FLUXNET-CH₄ synthesis activity: objectives, observations, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 2607–2632. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0268.1>
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., et al. (2010) Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16(1), 187–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>
- Liang, N., Nakadai, T., Hirano, T., et al. (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(1–2), 97–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.10.002>
- Liang, N., Teramoto, M., Takagi, M., et al. (2017) High-resolution data on the impact of warming on soil CO₂ efflux from an Asian monsoon forest. *Scientific Data*, 4, 170026. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.26>
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., et al. (2007) CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 13(12), 2509–2537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x>
- Mauder, M., Foken, T. and Cuxart, J. (2020) Surface-energy-balance closure over land: a review. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2–3), 395–426. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>
- McDermitt, D., Burba, G., Xu, L., et al. (2010) A new low-power, open-path instrument for measuring methane flux by eddy covariance. *Applied Physics B*, 102(2), 391–405. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4307-0>
- Moffat, A. M., Papale, D., Reichstein, M., et al. (2007) Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 147(3–4), 209–232. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.08.011>
- Niu, S., Luo, Y., Fei, S., et al. (2012) Thermal optimality of net ecosystem exchange of carbon dioxide and underlying mechanisms. *New Phytologist*, 194(3), 775–783. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04095.x>
- Ohkubo, S., Hirano, T. and Kusin, K. (2021) Assessing the carbon dioxide balance of a degraded tropical peat swamp forest following multiple fire events of different intensities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108448>
- Oikawa, P. Y., Sturtevant, C., Knox, S. H., et al. (2017) Revisiting the partitioning of net ecosystem exchange of CO₂ into photosynthesis and respiration with simultaneous flux measurements of ¹³CO₂ and CO₂, soil respiration and a biophysical model, CANVEG. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234–235, 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.016>
- Ooba, M., Hirano, T., Mogami, J., et al. (2006) Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: A combination of a genetic algorithm and an artificial neural network. *Ecological Modelling*, 198(3–4), 473–486. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.06.006>
- Page, S. E., Rieley, J. O. and Banks, C. J. (2011) Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17(2), 798–818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Pangala, S. R., Moore, S., Hornibrook, E. R., et al. (2013) Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist*, 197(2), 524–531. <https://doi.org/10.1111/nph.12031>
- Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E., et al. (2020) The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 7(1), 225. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
- Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., et al. (2008) Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451(7174), 49–52. <https://doi.org/10.1038/nature06444>
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., et al. (2019) Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743), 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., et al. (2007) Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology*, 13(3), 634–651. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01224.x>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., et al. (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Sakabe, A., Itoh, M., Hirano, T., et al. (2018) Ecosystem-scale methane flux in tropical peat swamp forest in Indonesia. *Global Change Biology*, 24(11), 5123–5136. <https://doi.org/10.1111/gcb.14410>
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., et al. (2020) The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Schwalm, C. R., Williams, C. A., Schaefer, K., et al. (2010) Assimilation exceeds respiration sensitivity to drought: A FLUXNET synthesis. *Global Change Biology*, 16(2), 657–670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01991.x>
- Stoy, P. C., Mauder, M., Foken, T., et al. (2013) A data-driven analysis of energy balance closure

- across FLUXNET research sites: The role of landscape scale heterogeneity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172, 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.004>
- 杉山昌広 (2017) 技術で地球は変えられるか？：気候工学(ジオエンジニアリング). 計測と制御, 56(5), 366–369.
- Ueyama, M., Ichii, K., Kobayashi, H., et al. (2020) Inferring CO₂ fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model. *Environmental Research Letters*, 15(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab79e5>
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., et al. (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243.
- Wohlfahrt, G. and Gu, L. (2015) The many meanings of gross photosynthesis and their implication for photosynthesis research from leaf to globe. *Plant, Cell and Environment*, 38(12), 2500–2507. <https://doi.org/10.1111/pce.12569>
- Wong, G. X., Hirata, R., Hirano, T., et al. (2020) How do land use practices affect methane emissions from tropical peat ecosystems? *Agricultural and Forest Meteorology*, 282–283. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107869>
- Zhang, Z. Y., Zhang, R. D., Cescatti, A., et al. (2017) Effect of climate warming on the annual terrestrial net ecosystem CO₂ exchange globally in the boreal and temperate regions. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03386-5>
- Zhao, Z., Peng, C., Yang, Q., et al. (2017) Model prediction of biome-specific global soil respiration from 1960 to 2012. *Earth's Future*, 5(7), 715–729. <https://doi.org/10.1002/2016ef000480>



平野 高司／Takashi HIRANO

専門は農業気象学。北海道大学大学院農学研究科で修士課程修了後、日本気象協会技師、大阪府立大学農学部助教授、北海道大学大学院農学研究院助教授を経て2006年より北海道大学大学院農学研究院教授。2017年までJapanFlux委員長、2021年までAsiaFlux副委員長を務めた。2019年から日本農業気象学会会長を務めている。