

日本農業気象学会 2024 年全国大会オーガナイズドセッション OS-B「陸域生態系の二酸化炭素交換研究の現在地 —今後の発展を見据えて—」の報告

岩田拓記*・植山雅仁**・平田竜一***

*信州大学理学部理学科物質循環学コース

**大阪公立大学農学研究科

***国立環境研究所地球システム領域

1. セッションの情報

2024 年 3 月 14–17 日に宮城県仙台市において日本農業気象学会 2024 年全国大会が開催された。著者らはオーガナイズドセッション (以下, OS) 「陸域生態系の二酸化炭素交換研究の現在地—今後の発展を見据えて—」を企画し, 全国大会 1 日目の午後に本 OS が行われた。本 OS では学生 2 名を含む 7 名による研究発表が行われ, フラックス研究者を中心に約 50 名の参加があった。本稿ではその内容について報告する。

まず, 本 OS の情報を以下に記す。

日時: 2024 年 3 月 14 日 (木) 15:00–17:00

場所: 東北工業大学 八木山キャンパス C 会場

オーガナイザー: 岩田拓記 (信州大学), 植山雅仁 (大阪公立大学), 平田竜一 (国立環境研究所)

講演:

- カンボジア国乾燥常緑林の樹冠上で測定した $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 収支とその植物季節との関係性 (清水貴範, 伊藤江利子, 壁谷直記, 飯田真一, 田中憲蔵, 植山雅仁, 玉井幸治, 大貫靖浩, 清水晃)
- 説明可能な AI を用いたボルネオ熱帯雨林域のフラックス駆動因子の解明 (羽田泰彬, 熊谷朝臣)
- 10 年のタワーフラックス観測による年々変動～北東ユーラシア落葉針葉樹林の気候応答について地上観測で得られること (小谷亜由美)
- 豪雪による自然攪乱を受けたスギ林の植生動態と炭素循環 (斎藤琢, 永井信, 玉川一郎, 村岡裕由)
- 東アジア域の生態系における二酸化炭素収支の地理的分布を決定する要因 (高尾勇太, 植山雅仁, JapanFlux PIs)
- 土壌観測データの統合解析による土壌 CO_2 収支の解明 (山貫緋称, 市井和仁, 山本雄平, 寺本宗正, 孫力飛, 小嵐淳, 安藤麻里子, 永野博彦, 平野高司, 高木健太郎, 石田祐宣, 高木正博, 近藤俊明, 高橋善幸, 梁乃申)
- 森林・農地における太陽光誘起クロロフィル蛍光 (SIF) 観測とモデリングの進展 (両角友喜, 野田響, 小林秀樹, 加藤知道)

2. セッションの趣旨

大気と陸域生態系間の二酸化炭素 (CO_2) 交換の研究は, 大気中 CO_2 収支や気候変動を始めとする環境変化への陸域生態系の応答などを明らかにするうえで重要である。これまでに国内研究者によってアジアの様々な生態系での研究が実施されてきており, 現在, JapanFlux のデータベース整備も進められている。それとともに, 陸域生態系モデルや衛星データと融合した研究も進められている。本セッションでは, 国内外の陸域生態系を対象とした様々なアプローチによる CO_2 交換の研究結果を共有し, 改めて CO_2 交換研究の今後の発展を考える機会とする。

3. 講演内容

講演を始める前にオーガナイザーのひとりである岩田 (信州大学) から本 OS の趣旨説明がされた。また, 最後に行う総合討論では「アジア域における CO_2 交換研究の今後の発展の方向性」, 「JapanFlux データベースの利用戦略」をテーマに議論する予定であることが提示された。その際にオーガナイザーより, データベースを構築することが最終的な目的ではなく, データベースを用いて新しい研究を創生することが重要であることを強調した後に, 講演を開始した。

最初の 4 つの講演では単一もしくは少数のサイトでの CO_2 交換の研究結果が報告された。まず, 清水氏 (森林総合研究所) から, カンボジア国内に位置する観測事例が極めて少ない乾燥常緑林での CO_2 と H_2O フラックスについての報告がされた。フラックスの変動をリター量の季節変動とあわせて解釈することで, 乾季序盤に生じる一部の葉の落葉と新葉の展葉の際に生態系水利用効率が高くなること, その時期の落葉によって生態系呼吸量 (R_e) が増加することで生態系が一時的に正味 CO_2 放出源になることが示された。今後の展望として, 対象の森林では伐採や風倒木などによる森林の劣化が見られ, それによる CO_2 収支の変化をモニタリングしていく予定であることが述べられた。

続いて, 羽田氏 (東京大学) はボルネオ熱帯雨林域で測定された CO_2 フラックスに説明可能な AI を適用することで, 複雑な交絡因子を含む説明変数の中からフラックスの駆動因子を明らかにする試みについて報告した。構築した勾配ブースティングモデルにおける入力変数の重要度を SHAP (Shapley Additive exPlanations) 値を用いて解釈することで, 天然林では光合成能

力に次いで全日日射量が重要であること、オイルパーム農園では全日日射量に次いで土壌含水率が重要であることが示された。これらの違いは、オイルパーム農園は窒素飽和状態にあり光合成能力の変動が抑制されたこと、またエルニーニョ発生時の土壌乾燥に伴う地温上昇によって土壌呼吸量の増加がオイルパーム農園で大きいことにより生じていると解釈された。このように天然林からオイルパーム農園への転換により、CO₂ フラックスがより非生物的要因によって駆動されるようになることが明らかにされた。

小谷氏(名古屋大学)は、温暖化がより急速に進んでいる北東ユーラシア落葉針葉樹林帯における 10 年のフラックス観測から、CO₂ フラックスの年々変動の要因について報告した。地温の高い冬の後の成長期には最大 CO₂ 吸収量が大きく、総一次生産量(GPP)が大きくなることで純生態系生産量が大きくなることが示された。これは年輪解析や積雪操作実験の結果と矛盾しないことも説明された。また、春季の気温が高い、もしくは秋季の土壌凍結前の土壌水分が高いと、展葉が早いことが示された。秋季の土壌水分量の増加は翌年の融解水の供給増加と冬季地温の低下抑制により翌年の成長開始を早めると解釈された。

斎藤氏(岐阜大学)は、豪雪によるかく乱を受けたスギ林の CO₂ 収支について 16 年間の測定データを基に報告した。この豪雪は約 40%のスギ個体へ倒木や樹冠欠損などの影響を与えたものであった。陸域生態系モデルにより推定されたかく乱を受けていない状態のフラックスと比較すると、かく乱後に GPP は緩やかに低下したのに対し、R_e は明瞭に低下したことが示された。かく乱後には落葉低木が侵入したことで GPP の低下は緩やかだったのに対し、スギがダメージを受けたことで地上部呼吸量が大きく減少したと解釈された。また、倒木後のスギの粗大有機物の分解呼吸量が比較的小さいという観測結果も示された。最後に、雪害前後を含むデータを用いることで、木材生産や山菜収穫を含む生態系サービスの変化の評価が可能であるという興味深い展望が紹介された。

後半の 3 件は多数サイトのデータの統合解析や衛星データを用いた広域評価につながる融合研究についての報告がされた。高尾氏(大阪府立大学)は、新しい JapanFlux データベース構築のために収集された東アジア域の生態系の CO₂ フラックスの統合解析結果を報告した。これまでに 53 サイト(439 地点年)のデータが揃っており、そのうち高密度の日本のサイト(32 サイト)における GPP と R_e の地理的分布は両者とも気温との関係が強いことが示された。一方で、正味 CO₂ 交換量の地理的分布は気温などの気候因子では説明できないばらつきが大きく、また既往研究で示されているような植生や土壌の特性との関連は低いことが示された。

続いて、山貫氏(千葉大学)は日本の 6 サイトで統一した手法で測定された土壌呼吸量データを使用し、その時間変動およびサイト間の違いを説明する要因について報告した。ランダムフォレスト回帰を用いて入力変数の重要度を評価することで、地温が土壌呼吸量の時間変動をよく説明することを示した。さらには土壌有機炭素量や表層土壌の放射性炭素同位体比を用いると、土壌呼吸量のサイト間の違いを精度高く推定できることが明らかとされた。一方で、モデリングの方法によっては土壌特性データが不要と判断される場合もあり、土壌特性の地理的分布データを用いた土壌呼吸の広域評価にはまだ課題が残され

ていることが述べられた。

最後に、両角氏(国立環境研究所)からは森林や農地での太陽光誘起クロロフィル蛍光(SIF)観測とSIFの変動要因を明らかにする試みについての報告がされた。最初に SIF は光合成における光の吸収率と光化学系のエネルギー分配を反映し、同化反応に利用されなかった余剰エネルギーの一部として系外に放出された蛍光放射の量として表され、日中の光合成の変化成分を捉えることができることが説明された。畑地における観測から SIF が光合成有効放射量とは正の相関、気温や大気飽差とは負の相関をもつことが示された。また、畑地の場合には作物の畝列と太陽の方位の関係も SIF に影響することを明らかにした。森林内外における複数高度での観測では、SIF を層ごとに検出する新しい手法を開発し、鉛直方向に葉が分布する森林の層ごとの光合成を推定できる可能性を示した。最後に、毎木調査と個葉蛍光観測から地上の近接リモートセンシングや衛星リモートセンシングにスケールアップするための放射伝達モデルが紹介され、モデルにより推定される近接観測と衛星観測により得られる SIF の関係が、十分なサンプリングが行われたサイトでの関係と矛盾していないことが示された。

4. 総合討論

総合討論では、まずオーガナイザーが講演者の発表内容を基に重要と考える論点がそれぞれのテーマに対して示された。「アジア域における CO₂ 交換研究の今後の発展の方向性」

- 気候変動影響の抽出と将来予測に必要なフィードバックプロセスの同定
 - 重要かつ研究が進んでいない地表面タイプの把握とそこでの観測
 - 新たな解析手法の適用によるフラックスの駆動因子の把握と技法の共有
 - 長期データの蓄積と他手法との比較
 - かく乱の種類やそれを受ける生態系によるかく乱の影響の相違
 - 植生機能タイプの再分類の検討
 - 広域評価に必要な地上データ整備
 - 衛星ベースモデルの多点検証
- 「JapanFlux データベースの利用戦略」
- CO₂ 収支の統合解析
 - フラックスアップスケールアップの更新、静止気象衛星を用いた解析の検証
 - 群落レベルでの植生生理特性の広域推定
 - 蒸発散分離のサイト間比較
 - プロセスモデルの検証

その後の討論の内容を以下でいくつか紹介する。

- 各研究者が管理サイト独自の論文を書くことがモチベーション維持のために必要である。同気候帯での複数サイトの観測により大規模操作実験も可能であり、そこから得られる成果は大きいはずである。
- モデラーとの共同研究が発展のための鍵になると考えられる。モデリングに必要なパラメータがデータベースを基にした研究から提供されるのは魅力的である。
- カーボンニュートラルの実現にとって実は森林は重要である。

フラックス観測コミュニティへの期待は大きい。

- データベース公開後の戦略として、データ提供コミュニティが予め研究内容を検討しておくことが世界の研究者と競争する上で必要である。

データベースの利用戦略を立てるためには、今後継続して話し合いをすることが必要であると考え。そのためのワークショップなどを開催することを改めて検討したい。ワークショップの企画が進めば JapanFlux メーリングリスト等で周知する予定である。なお、上述した利用戦略の研究アイデアはすでに実施が決まっているものと今後検討していく予定のものがある。データベース利用に興味のある研究者はデータベースの国内窓口となる植山(大阪公立大学)に連絡されたい。

5. 所感

近年、フラックス観測コミュニティ内では微量ガス交換の研究へと注目が移っている局面もあるが、依然として CO₂ 交換研究の重要性も高い。本 OS 以外の一般セッションにおいても多くの CO₂ 交換研究に関する発表が行われていたことも言及しておきたい。JapanFlux 内には比較的長期間の測定が実施されている観測サイトが多く、本 OS でも 10 年以上の観測データを用いた研究発表が複数見られた。そのようなデータを含む新しい JapanFlux データベースは気候変動への生態系 CO₂ 交換の応答を研究するのに役に立つ可能性がある。

最後になるが、発表者および参加者にこの場を借りて深く感謝したい。今後も OS を開催することで、それが研究アイデアの発想のきっかけになればオーガナイザーとして嬉しく思う。また、研究者間の親交を深めることも重要であると考え。