

International Workshop on Flux Estimation over Diverse Terrestrial Ecosystems in Asia - AsiaFlux Workshop 2006 - の報告

小野圭介¹、平田竜一²

¹筑波大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻

²国立環境研究所地球環境研究センター

International Workshop on Flux Estimation over Diverse Terrestrial Ecosystems in Asia - AsiaFlux Workshop 2006 -

¹Keisuke ONO and ²Ryuichi HIRATA

¹Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

1. はじめに

標記の国際ワークショップが 2006 年 11 月 29 日から 12 月 1 日にかけてタイ国北部のチェンマイ市郊外で開催された。AsiaFlux は、生態系モニタリングを行うタワー観測ネットワークの 1 つである。各タワーで得られたデータを集積・統合し、大陸規模での生態系-大気間の物質やエネルギーの交換量を評価することを目標としている。AsiaFlux は、文字どおり北極域から熱帯に至るアジアの多様な陸域生態系を研究対象としているが、これまで 4 回行われた AsiaFlux ワークショップの開催地はいずれも日本、韓国、中国にとどまっていた。今回初めて東南アジア地域での開催が実現したことは、AsiaFlux が自身の方向性をこれまで以上に鮮明に打ち出す絶好の機会となった。ワークショップの参加者は 13 カ国 140 名を超え、この分野の関心の高さを反映している。

会場はチェンマイ市郊外のリゾートホテルであった。ホテルはチェンマイ市中心部から 20 km 以上も離れていたため、市街地に出かけることもなく 1 日中をホテルの敷地内で過ごすことになった。

研究発表は 1, 2 日目に行われ、3 日目はエクスカーションに充てられた。研究発表のほとんどの時間は口頭発表に割かれ、口頭発表には 7 つのセッションが設けられた。最初に“Activities of Flux Network”と題されたセッションがあり、ここでは世界各地域に展開しているフラックス観測ネットワークの現状と将来展望が示された。その後、“Flux Intercomparison”, “Tropical Ecosystem”, “Flux estimation and new approach”, “Biochemical processes”, “Modeling and Remote Sensing”の各セッションが続いた。“Tropical Ecosystem”セッションの存在が今回のワークショップを特徴づけている。それぞれのセッションでは、最初に招待研究者による 25 分間の基調講演、続いて関連する 15 分間の一般発表が行われた。2 日目の最後には“Summary and

Synthesizing Discussion”セッションが設けられ、各座長がそれぞれのセッションの内容を総括した。

ポスターセッションは1日目の16時から18時30分に行われた。著者（小野，平田）もこのポスターセッションで発表を行った。ポスターセッションが複数回に分けられていなかったため、ポスター発表者は他のポスターの説明をゆっくり聞くことができなかった。

以下では、研究発表の内容をセッション毎にまとめ、最後に懇親会とエクスカージョンの様子について簡単に紹介する。

2. 各セッションの講演内容

2. 1 “Activities of Flux Network”セッション

FLUXNET とそれを支える地域組織である AsiaFlux, CarboEurope, OzFlux の現状と将来展望についての発表があった。AsiaFlux は、昨年のワークショップ（安田・高木，2006）以降、各々3つのサブワークグループを配下に置いた2つのワークグループを準備して立ち上げた。Ohtani ら（森林総研）は、このような動きの中で、Short Training Course サブワークグループが本年8月に開催した AsiaFlux Training Course 2006 と、Database and Data policy サブワークグループが構築中の AsiaFlux データベースについてとくに詳細に説明した。加えて、AsiaFlux Training Course 2007 は韓国で行われる見通しであることも報告した。Falk（カリフォルニア大，アメリカ）からは、FLUXNET の活動と今後の方針が示された。Matteucci（Institute for Environment and Sustainability, イタリア）からは、現行のプロジェクトと前身の EUROFLUX も含めた CarboEurope の歴史が紹介された。現在進行中の 2004–2008 年プロジェクトではデータベースの構築や測定手法に関する未解決の問題に積極的に取り組んでいることが報告された。2007 年には hand-on data スタイルのワークショップも開かれることになっている。続いて、OzFlux で行われている研究について Leuning（CSIRO, オーストラリア）が説明した。OzFlux では、先進的な微気象学的研究の他にも、都市や砂漠を対象にした他のネットワークでは見られない独創的な研究が行われている。

2. 2 “Flux Intercomparison”セッション

まず、下層ジェットと夜間境界層内のCO₂収支について、Leclerc ら（ジョージア大，アメリカ）が実測をもとに構築した理論を発表した。下層ジェットが発達することによって鉛直混合が盛んになるが、同時にタワーから離れた地表面の影響がフラックス測定値に混入してくる。そこで、 u_1 のみをフラックス測定値のスクリーニング指標にはしない試みを開始したとのことであった。このセッションの他の発表では、AsiaFlux やAmeriFlux・CarboEurope 内の複数のサイトのデータを用いた統合解析の事例が示された。Yamamoto ら（岡山大）、Saigusa ら（産総研）、Ohtani ら（森林総研）は、AsiaFlux 内の複数の森林生態系を総光合成量（GPP）・生態系呼吸量・生態系純生産量（NEP）によって特徴づけ、その特徴と気候やフェノロジーとの関連を丁寧に調べ上げた。Ohta（名古屋大）は、ボーエン比に代表される陸面過程の特徴が、日単位では純放射量、3ヶ月程度では土壌水分にコントロールされることを重回帰分析を用いて明らかにした。

2. 3 “Tropical Ecosystem”スペシャルセッション

Malhi（オクスフォード大，イギリス）は、彼がこれまで行ってきたアマゾン熱帯雨林での観測の結果を総括した上で、アジアの熱帯雨林が研究対象として重要であることを強調した。理由として、アジアの熱帯雨林は、ENSO の影響をとくに強く受けていること、純一次生産量の植物体再配分が他の地域に比べて十分に理解されていないことを挙げた。

Kanae ら（地球研）は森林面積と降水量の関係を紹介した。彼らは、1951 年以降タイ全域で9月の降水量が減少傾向にあることを発見し、その原因やメカニズムを理解するために陸面過程モデルを用いた。森林面積の減少と降水量の減少には関係があることがわかったが、半乾燥地域

以外ではモデルの再現性はよくなかった。これには土壌水分の絶対量が影響しているのではないかと考えられている。

このほか、台湾山岳域の亜熱帯常緑針葉樹林、シンガポールの都市キャノピー、バングラデシュの 2 期作水田におけるフラックス測定結果、タイ国内の生態系計測サイトの歴史、インドネシアの生物圏保存地域、フィリピンにおける炭素管理の取り組みについての発表があった。

2. 4 “Flux estimation and new approach”セッション

このセッションでは、大気-生態系間のフラックスを測定する上で重要になる新たな知見や手法が提示された。Leuning は、夜間のCO₂ フラックスを推定する新たな手法を提案した。彼らが実測から見積もったユーカリ林内（樹高 14 m）の仮想体積（50 m×50 m×6 m）のCO₂ 収支においては、水平移流項は決して無視できない大きさであった。移流の発生時に生態系呼吸量を評価する際は仮想体積のCO₂ 収支式のすべての項を測定しなければならないという基本原則が実測から確認された。実際にその方法を用いて長期積算した生態系呼吸量はチャンバー法の測定値とよく一致した。一方、より簡便な方法として、移流が生じる前に測定したCO₂ フラックスと地温の関係を使って移流が生じている時間帯の呼吸量を推定するという方法が提示された。また、水平流と同時に下向きの鉛直移流が観測されたことも明らかになった。

Watanabe（森林総研）は、Large Eddy Simulation (LES) を用いて熱収支インバランスの解明を試みた。LES では、水平様な地表面でも対流構造が固定化される場所があり、そのスケールは設定した境界層の高さ（500 m）に匹敵するものであった。この構造は動きが非常に遅いため、通常の前平均化時間では十分に測定することができず、乱流フラックスの過小評価を招いていた。また、2 時間以上の平均化時間をとっても存在する構造があり、これらは空間的に関連性を持ち、平均流としてエネルギー輸送を行っていた。

Chen ら（メルボルン大、オーストラリア。発表者はO. T. Denmead）とSargent ら（Campbell Scientific, アメリカ。発表者はB. D. Tanner）からレーザーを用いた新しいフラックス測定手法が提案された。Chen らは、レーザーで測定した 100 m のパス中の平均アンモニア濃度から拡散方程式を逆算しアンモニアのソース強度を推定した。尿素施肥した耕作地のアンモニアフラックスは数 $\mu\text{g NH}_3\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ であった。Sargent らは波長可変レーザーを用いて¹³CO₂ とC¹⁸OO の乱流フラックスを 2006 年夏に測定した。この分析計には、安定同位対比を直接測定するため高周波減衰の補正の必要がない、5 分毎に標準ガスによる較正を 34 秒間行わなければならない、消費電力が 900 W と大きいため使用できるサイトが限られるという特徴がある。

Lan ら（国立中興大、台湾）は、船舶上で渦相関法を適用するため、ジャイロによる補正が妥当かどうかを検討した。2つの渦相関法測定システムを 10 m 離して地面に設置し、一方はプラットフォームを強制的に振動させジャイロにより補正した。もう一方は振動させずに測定を行い、両者でフラックスを比較した。慣行の座標回転操作よりもジャイロを用いた補正を用いることで両者はよく一致した。

チャンバー法や生態学的調査に基づくボトムアップアプローチで求めたNEP と渦相関法で求めた生態系CO₂ 純交換量（NEE）を比較した研究発表もあった。Liang ら（国立環境研究所）の結果では、北海道のカラマツ稚樹林では両手法はよく一致したが、マレーシアの熱帯林では大きな差が生じた。発表後の討議の中で、熱帯林での差異は渦相関法の測定誤差に起因する可能性が高いこと、現在新しい評価方法を開発中であることが報告された。

このセッションでは、以上のほかに、地表面の非一様性とフラックスの関係を衛星画像とフットプリントモデルを用いて解析した結果が示された。また、Hirano ら（北海道大）からは、AsiaFlux の Database and Data policy サブワークグループが構築中の AsiaFlux データベースの紹介があった。

2. 5 “Biochemical processes”セッション

このセッションでは、座長に Berry (Carnegie Institute of Washington, アメリカ) を迎え、

土壌や植物生理生態に関わる 7 題の発表が行われた。Jomura ら（神戸大学）は、農耕地土壌を対象に開発された土壌有機物動態モデル（RothC モデル）を森林土壌に適合するように改良し、直接の測定が困難な森林土壌有機物の分解過程と蓄積量を評価した。暖温帯二次林で実測された NEE などを用いてモデルをチューニングしたところ、その林分では幹や枝などの粗大有機物は投入後 10 年以上経過しても土壌呼吸に寄与していることがわかった。Thailer ら（Kasetsart 大、タイ）はタイ南部のゴムノキ林での蒸散量について報告した。彼らは、Granier 法で樹液流速を実測し、樹幹上の蒸発散量と比較した。樹冠上の蒸発散量のほとんどはゴムノキの蒸散によるもので、土壌面からの蒸発はわずかであった。また、ゴムプランテーションは温暖化を含む気候変動に対して頑強で、パームヤシプランテーションよりも競争力があるとの見解が示された。タイやマレーシアではゴムプランテーションは非常に盛んである。加えて、他の東南アジア地域でもクリーン開発メカニズム（CDM）に対応したゴムノキの植林が進んでいることから、ゴムノキ林の生態系レベルでの環境応答を継続して調査する必要があると感じた。

Khanmyong ら（チェンマイ大、タイ）はタイの森林土壌の特徴について述べた。地下 1 m までの土壌を 8 つの森林タイプから採取し分析した結果、炭素と窒素は山間部の土壌に多く含まれていた。土壌炭素量はサンプル全体で 12 から 371 t ha⁻¹ まで変化していた。

このセッションでは、以上のほかに、畑地と森林で採取した土壌の土壌呼吸速度の特徴を室内実験で確認した研究、稲わらを起源とする水田からのメタン放出速度と栽培管理との関係をまとめた研究、森林の樹種と林齢の特徴を NEP により定量的に評価した研究についての発表があった。

2. 6 “Modeling and Remote Sensing”セッション

衛星リモートセンシングや数値モデルによるフラックスの広域評価はタワーベースのフラックス長期連続観測とともに AsiaFlux の両輪を成すものである。このセッションでは、3 度の停電にもかかわらず、フラックスの広域評価に関わる議論が熱く交わされた。Berry は、気体濃度や安定同位対比を継続的に測定することが物質循環を理解する上で重要であることを強調した。フラスコサンプリングした気体濃度と輸送モデルの比較は 1 次元でも十分だが将来的には 3 次元で解析を行う必要があること、硫化カルボニル（COS）濃度の測定も CO₂ と同様に生態系プロセスの理解に役立つことが示された。

Huete ら（アリゾナ大、アメリカ）からは、アジアの熱帯林における衛星リモートセンシングの有用性が示唆された。MODIS の EVI は、地上タワーで測定された GPP とよい相関を持ち、GPP の季節変化の進行や背景にある要因を空間的に把握できる強力なツールであることが確認された。Ratana ら（アリゾナ大、アメリカ）は、Huete と同様の手法で、植生横断面毎にアマゾン地域の GPP と水・光環境の関係を示した。

Lee ら（Kyungpook National University, 韓国）と Mi ら（中国科学院, 中国）は、それぞれ異なるモデルを用いて、モデルのアウトプットと実測値された CO₂・エネルギーフラックスを比較した。Lee らは群落 2 層モデル (mSPA) を韓国の水田に、Mi らはプロセスモデル (EALCO) を中国南部の常緑針葉樹に適用した。前者は、イネ生育後期に NEP を過大評価した。原因は、その期間に光合成と気孔コンダクタンスの関係が変化してためであると考えられた。

また、モデルの感度実験の結果、GPP はカルボキシル化速度 (V_{cmax}) よりも葉面積指数 (LAI) に敏感であった。後者の結果では、2003 年に降水量が減少したことの影響をモデルでも再現できていた。

2. 7 “Summary and Synthesizing Discussion”セッション

このセッションでは、セッションの座長が各々のセッションを総括し、最後にワークショップ全体を通じての感想や意見を交換した。変化の途上にあるランドスケープにももっと目を向けるべきであるという意見のほか、伐採等の人為活動の影響を考慮した生長ステージの中で対象としている熱帯林がどこに位置し、長期的にどのような変化をするものなのか、幅広い時間スケール

のプロセスを組み込んで考える必要があるとの主張があった。後者は、熱帯の生態系に焦点を当てた今回のワークショップを締めくくるにふさわしいものであった。

2. 8 ポスターセッション

ポスターセッションには 87 題のエントリーがあった。AsiaFlux ワークグループも活動の様子をポスターで紹介した。そのうち、データベースや測定システム標準化に関わるものに大きな関心が寄せられていた。これまで AsiaFlux とあまり関わりのなかった国内外のグループによる発表も多数あり、AsiaFlux の裾野が広がりつつあるのを実感した。白熱した議論が各ポスターの前で行われ、エアコンのない会場は熱気に満ちていた。

3. 懇親会

懇親会はホテル内の庭園で 1 日目の夜に行われた。ホテルが準備した屋台が多数設けられ、様々な地元の料理が振る舞われた。舞台では民族音楽の生演奏と踊りが披露され参加者の目をひいていた。また、即席のタイ式マッサージ椅子が準備され、参加者は昼間の疲れを癒した。

4. エクスカーション

3 日目は現地実行委員会が計画したエクスカーションが催行された。2 つのグループに分かれ、それぞれが Huay Kog Ma 試験地 (Tanaka *et al.*, 2006) の観測タワーと花博 (Royal Flora Ratchaphruek 2006) の両方を見学した。Huay Kog Ma 試験地はチェンマイ市西方の山間地にあり、観測タワーまでは車の天井に頭を打ちつけながらのアクセスであった。タワー到着後は、観測プロジェクトの牽引役である鈴木雅一教授 (東京大) と Nipon 教授 (Kasetsart 大, タイ) に観測の概要を直接説明していただいた。花博では、壮大なスケールで再現された熱帯雨林やゴムノキ林を目の当たりにした。

5. あとがき

今回、AsiaFlux のワークショップが東アジア以外の地域において初めて開催された。先述したように、AsiaFlux が対象とする生態系は東アジアのみに存在しているのではない。とくにアジアの熱帯地域には、熱帯雨林、熱帯季節林、焼畑、プランテーションなどの魅力的であるがフラックス研究の知見の集積が十分でない生態系が存在している。100 名以上の研究者が参集し知恵を出し合うワークショップが実際にその地域で行われ、なおかつその地域の生態系に関するスペシャルセッションが設けられたことにより、アジアの熱帯生態系の重要性がこれまで以上に深く理解されたのではないだろうか。このような観点から、今回の開催は AsiaFlux にとって非常に意義深いものであったといえる。最後に、AsiaFlux 2006 ワークショップの開催に尽力していただいたワークショップ実行委員とチェンマイ大学大学院生諸氏に記して感謝したい。

謝辞

本論をまとめるにあたり犬飼孔氏と宮田明氏から有益なコメントを賜りました。著者 (小野) は、本ワークショップの渡航費用の一部を日本農業気象学会に助成していただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

References

Tanaka, N., Suzuki, M., Yoshifuji, N. and Tantasirin, C., 2006: Introduction to the research at

Kog-Ma Watershed, Northern Thailand. *AsiaFlux Newsletter*, **19**, 8-13.

安田幸生・高木健太郎, 2006 : AsiaFlux ワークショップ 2005 (4th AsiaFlux Workshop) の報告. 生物と気象, **6**, 11-14.



写真 1. 参加者集合写真 (提供 : AsiaFlux 事務局)



写真 2. 会場の様子 (提供 : AsiaFlux 事務局)