

三枝 信子*

1. はじめに

このたびは日本気象学会より堀内賞をいただいたこ とを深く感謝いたします.過去十数年余りの間に,陸 上生態系の炭素循環に関する研究が日本および世界で 急速に進展しました.同時に,気象学と生態学の分野 で蓄積された知見や技術を融合させることによって, 現地観測,統合的なデータ解析,リモートセンシン グ,数値計算モデルなどの手法について新たな技術開 発や検証法の発展がありました.その一方で,これま であいまいにしか見えていなかった現時点での研究の 限界も,次第に明確になってきたように思います.そ れは観測精度の限界,解釈の限界,予測の限界などで すが,そのような限界を知ることは,私たちが今後ど のような問題を解決すべきかを教えてくれる新たな発 見でもありました.

私は、幸運にも14年前に森林生態系における炭素循 環の観測的研究に従事する機会を得ました.また、10 年ほど前から、国内外の数多くの研究者と共に、アジ アにおける観測ネットワークの整備を進めてきまし た.この解説では、私が経験させてもらいました気象 学と生態学の境界領域における最近の研究の進展と、 そこから得たれた新たな知見を中心に説明いたしま す.

2. 陸上生態系と大気の相互作用

地球表面の約30%を占める陸面には、樹木、草、地 衣類などの植物に覆われた土地が広がっています.陸

* 国立環境研究所地球環境研究センター.
 n.saigusa @nies.go.jp

 —2010年3月24日受領一

—2010年8月5日受理—

© 2010 日本気象学会

2010年11月

面を覆うこうした植物の集団(植生)は、土壌、動 物、微生物などを含む「生態系」を構成します.生態 系とは、ある一定の場所に生息する生物と、それをと りまく非生物的環境をまとめて一つの系ととらえる考 え方であり、陸面と大気の間で行われるエネルギーや 各種物質の循環を考える上で欠かすことのできない概 念です.

陸上の生態系の中では、太陽から届く光エネル ギー,降水や河川から供給される水や窒素,大気中の 二酸化炭素(CO₂)などを使って各種の物理・化学・ 生物学的な反応が起こります.例えば,植物の葉に吸 収された太陽光の一部は光合成に利用されます.光合 成は、波長400~700nmの光を利用して大気中のCO₂ と水から炭水化物などの有機物を合成する生化学反応 です.理論上では、CO₂を1分子固定するために8光 量子を必要とするとされています.また、CO₂固定反 応を触媒する酵素が窒素を必要とすることから,光合 成速度は葉の窒素濃度にも依存します.

植物の葉と大気の間で起こる CO₂や水蒸気の交換 は、葉の表皮にあるたくさんの小さな孔(気孔)を通 して行われます.植物は、太陽光を受ける日中に気孔 を開いて CO₂を吸収しますが、同時に気孔から水蒸 気が大気中へ放出(蒸散)されます.そこでもし土壌 や大気が乾燥することによって植物体内の水が欠乏す ると、植物は気孔を閉じて蒸散を抑えますが、同時に CO₂吸収速度も抑えられます.このように、植物によ る気孔開閉の制御が光合成と蒸散の速度に強い影響を 与えます.

植物はまた,生命の維持と成長に必要なエネルギー を呼吸によって得ます.呼吸は,酸素(O₂)を利用 してエネルギーを取り出し CO₂と水を放出する反応 です.また,土壌に棲む微生物は土壌中の有機物を分 解して CO₂を大気へ放出します.植物と土壌を含む 生態系全体から放出される CO₂を生態系呼吸とよび ます.

第1図から第3図に、生態系によるCO₂収支の日 変化、季節変化、経年変化の例を示します(図中の CO₂収支は、6.1節で定義する純生態系生産に等し い).最初に生態系のCO₂収支を1日の単位でみると (第1図)、夜の間は光合成を行わないため生態系は呼 吸によりCO₂を放出します.一方太陽光を受ける日 中、光合成量が呼吸量を上回ると生態系は正味で CO₂を吸収します.日中のCO₂吸収量は光の影響を強 く受けますが、その他に大気湿度や気温の影響も受け ます.

次に1年の単位でみると(第2図),例えば,夏の間のみ葉を着ける落葉樹林では,初夏の展葉と共に光 合成によるCO2吸収量が急激に増加します.夏の間 は日々の天候に依存してCO2収支は変動しますが, 森林はおおむねCO2を吸収します.秋に落葉する と,森林は次の春までCO2を弱く放出し続けます.

さらに、伐採や火災などの攪乱をうけた生態系の CO₂収支を数十年以上の時間スケールでみると(第3 図)、攪乱を受けた直後には枯死した植物や土壌有機 物の分解が活発に起こるため、生態系は CO₂を正味 で放出します.その後植生の回復が進み光合成量が呼



第1図 太陽光(光合成光量子束密度; PPFD) と森林生態系の CO₂収支の典型的な日 変化の例.観測場所は岐阜県高山市郊外 の落葉広葉樹林(産業技術総合研究所, 岐阜大学).観測期間は2002年7月6~ 8日.観測方法は渦相関法(Saigusa *et al.*2002).各点は30分平均値.PPFD は単位土地面積(水平面)の森林生態系 に入射する太陽光のうち,植物のクロロ フィルが吸収することのできる波長帯 (400~700nm)における光量子の密度を 表す. 吸量を上回ると、生態系は正味で CO₂を吸収するようになります.正味 CO₂吸収量は、攪乱後しばらくの間(森林では10~20年間程度)増加し、その後は徐々に低下すると推測されます.正味 CO₂吸収量が低下するようになると考える理由は、

- ①攪乱後しばらくの間は葉量が増加するが、その後は ほぼ一定となる.同時に光合成量も増加しなくな る.
- ②一方,植物や土壌微生物の呼吸量は,植物のバイオマス(現存量)や土壌有機物の増加に伴って,より長期間にわたって増加し続ける.

といった変化が予想されるためです. 攪乱を受けた生



 第2図 光合成光量子束密度(PPFD)と森林生 態系のCO₂収支の平均的な季節変化の
 例. 観測場所は第1図と同じ. 観測期間 は1994年1月~2003年12月. 観測方法は 傾度法と渦相関法の併用(Saigusa et al. 2005). 各データは日積算値を10年間 平均した値.



第3図 伐採や火災などの攪乱を受けた森林が再 生する過程における炭素収支の経年変化 を表す模式図.

態系の CO_2 収支が植物の再生に伴ってどのように経 年変化するかについて,攪乱の種類や攪乱後の年数の 異なる生態系で同時観測を行う(Amiro *et al.* 2006),伐採後の森林で CO_2 フラックス観測と生態学 的な調査を長期継続する(Takagi *et al.* 2009)など の方法で研究が進められています.しかし,現状では 観測による実証の数がまだ極めて限られています.

生態系の CO₂収支は、このように広い時間スケー ルで、さまざまな仕組みによって変動しています、次 の節では、森林生態系を例として、CO₂収支を実際に 観測する方法について説明します.

3. 森林生態系における CO₂収支の観測法

森林でCO₂収支を測定する方法には,第一に,古 くから用いられてきた生態学的方法があります.生態 学的方法は,積み上げ法,または毎木調査に基づく方 法とも言われます.毎木調査とは,森林の中に一定面 積(例えば1へクタール)の調査区を設け,その中に あるすべての樹木の直径を一定期間ごとに(例えば年 1回)測定する方法です.直径の増加量から樹木1本 あたりの炭素蓄積量の増分を算出します.ある生態系 の単位土地面積あたりの炭素収支を算出するには,樹 木に蓄積された炭素の量に,落葉や落枝として土壌に 供給された炭素量を加え,土壌微生物によって分解さ れた有機物の量を差し引くことにより求めます.生態 学的方法では通常1年から数年ごとに炭素収支を算出 します.

次に, 微気象学的な理論に基づいて生態系の上で単 位時間・単位土地面積あたりの鉛直方向の CO2輸送 量(フラックス)を測定することにより、CO₂収支を 求める方法があります. 微気象学的方法には, 傾度 法, 渦相関法, 簡易渦集積法などがあります, 傾度法 は、タワーなどを使って生態系の上の複数の高度で風 速や CO2濃度を測定し、それらの鉛直分布を接地境 界層の乱流拡散の理論にあてはめて鉛直フラックスを 求める方法です. 生態系上の2高度でCO₂濃度を測 定し、その濃度勾配と拡散係数から鉛直フラックスを 求める方法もここでは広い意味で傾度法とよびます. 渦相関法は、生態系の上の1高度で風速やCO2濃度 を毎秒10回程度の高頻度で測定し、風速と濃度の相関 関係を調べることにより, 鉛直方向のフラックスを算 出する方法です. CO₂は大気中の乱流渦によって鉛直 方向に輸送されるので、1高度における風速とCO2 濃度変動の測定から、CO2の鉛直輸送量を算定するこ

とができます. 渦相関法については次節以降で詳しく 説明します. 簡易渦集積法は, 生態系の上の1高度に おいて, 鉛直風速が上向きの時と下向きの時に分けて 空気をサンプリングし, 両者の空気の CO₂濃度の差 を求め, それに経験的に得られる係数を使って鉛直方 向のフラックスを算出する方法です. 微気象学的理論 に基づいて各種微量気体のフラックスを測定する方法 については, 塚本・文字 (2001), 三枝 (2002) など に解説されています.

微気象学的方法は CO₂収支を30分から60分程度の 短い時間単位で求めることができるため,日射,気 温,湿度などの環境要因が時々刻々変化した場合の CO₂収支の応答を解析することができます.また,日 変化,季節変化,経年変化がどのような環境要因と関 連があるかを解析することができます.すなわち,微 気象学的方法は CO₂収支の時間変動を求めるのに適 した方法です.一方,生態学的方法は1年から数年と いった長時間における炭素収支の積分値を求めるのに 適した方法です.さらに,これら二つの方法を併用す ることにより,生態系の炭素収支を広い時間スケール で把握できると同時に,観測精度の検証を行うことが 可能になると言うことができます.

4. 微気象学的方法による CO₂フラックス観測の 歴史

微気象学的な方法により生態系の上で CO_2 フラッ クスを測定しようとする研究は、1950年代後半から 1960年代にかけて始まりました(原菌ほか 2003).中 でも、旧農業技術研究所の井上栄一博士らが農耕地の 上で傾度法により CO_2 フラックスを観測した研究 (井上ほか 1958)は世界的にみても先駆的でした.

渦相関法に基づく CO_2 フラックス測定法の研究 は、野外で CO_2 や水蒸気の濃度を高速で測定できる オープンパス方式の赤外分析計が開発されたことによ り (Ohtaki 1984; Desjardins *et al.* 1984) 1980年代 に始まりました.しかし、当時は野外に設置する機器 の安定性や、膨大な乱流データを高速処理することの できる計算機の能力が十分でなかったため、渦相関法 は主に短期集中的な観測の手法として用いられまし た.

1990年を過ぎると,森林上の CO₂フラックスを渦 相関法で長期連続観測し,そのデータに基づいて森林 による年間炭素収支を算出しようとする研究が積極的 に行われるようになりました.特に米国ハーバード大 学の森林 (Harvard Forest) では,年間炭素収支の 評価を1991年に開始しています (Wofsy *et al.* 1993; Baldocchi *et al.* 2001).

日本で微気象学的方法による CO₂フラックスの連 続観測を最も早く開始し,現在でも続けているのは, 産業技術総合研究所(旧資源環境技術総合研究所)の グループです.1993年9月,当時資源環境技術総合研 究所グループのリーダーだった山本 晋博士(現在岡 山大学)らは,岐阜大学との共同研究として,岐阜県 高山市郊外の落葉広葉樹林(以下,高山サイト)で傾 度法により CO₂フラックスの長期観測を始めました (Yamamoto *et al.*1999).

1990年代後半になると、世界の陸上生態系において 熱・水・CO₂収支を微気象学的方法により長期連続観 測する観測ネットワークの構築が始まりました。1996 年にヨーロッパの観測ネットワークである EURO-FLUX が始動し、1997年に AmeriFlux (米国を中心 とした観測ネットワーク), 1998年にFLUXNET (世界の観測ネットワーク)が本格的に活動を開始し ました(山本 1999;原薗ほか 2003). 1997年12月に は、京都議定書(気候変動に関する国際連合枠組条約 の京都議定書)において、温室効果気体の削減目標達 成に森林の CO2吸収を勘案することになったことか ら、森林による CO₂の吸収量の計測手法を確立する ことが国際的な緊急課題となりました. こうした流れ を受けて観測サイトの建設が世界に広まり、1999年に は AsiaFlux (アジアにおける観測ネットワーク) が 活動を開始しました. AsiaFlux は、今では中国、日 本,韓国,タイ,台湾などの国や地域ごとに構築され たネットワーク (ChinaFlux, JapanFlux, Ko-Flux, ThaiFlux, TaiwanFlux), および単独で参加 するアジア諸国の観測サイトを束ねています.

渦相関法がネットワークの標準的な方法として採用 されたのは、この方法が既に完成された理想的な方法 だからではなく、多点観測を展開する上で有利となる 次のような性質をもつためです.

- ①傾度法や簡易渦集積法に比べると、渦相関法の測定 原理は基本的な理論に近く、経験的に与えなければ ならないパラメータの数が少ない。
- ②森林や草原といった異なるタイプの生態系において も、渦相関法ではほぼ同じ装置と計算式を用いて観 測を行うことができる.このため、装置や計算法の 違いによって生じる観測サイトごとの系統的な差を その他の方法に比べて小さく抑えることができる.

観測者が世界や地域の観測ネットワークをつくって 情報共有する主な目的は、さまざまな国や地域で観測 する人たちが、できる限り共通の方法で観測を行い (観測手法の標準化),異常値除去や欠測補完を同じ手 法で行い (データ品質管理の標準化), その結果得ら れるデータを共有することにより、ばらばらに観測し ていたのでは実現することのできない新たな研究や評 価を行うことです.しかし、FLUXNET が活動を始 めた1990年代には、CO₂フラックスの観測装置にはま だ不安定なものが多く、欠測時間も長く、測定手法や 解析手法もさまざまで、その結果 CO₂収支の結果は 人により、また測定手法により大きく異なるという状 態でした. そのため, 観測ネットワークの活動開始か ら数年以上の時間をかけて,世界中の数多くの研究者 が観測手法の改良と標準化に取り組みました.未解決 の問題はまだ残されていますが、一定の標準化を経た 現時点での測定方法と計算方法は、Aubinet et al. (2000), AsiaFlux 運営委員会 (2003), 森林総合研 究所(2008)などの解説やマニュアルに詳しく記さ れ、観測ネットワークの活動を通じて技術の普及に役 立てられています. 以下にその主要な部分を簡単に紹 介します.

渦相関法による CO₂フラックスの測定法と計 算法

5.1 測定法

渦相関法では, CO₂フラックス (F) の算出を次の 式に基づいて行います.

$$F = \overline{w'\rho'} + 補正項 \tag{1}$$

ここで w は鉛直風速, ρ は CO₂の密度, プライムは 平均値からの偏差を表します. 例えば平均化時間を30 分とした場合, w'や ρ' は鉛直風速や CO₂密度の瞬間 値からそれぞれの30分平均値を差し引いた値になりま す. 補正項については本節の最後に簡単に説明しま す.

式(1)の w は, 超音波風速温度計(以下, 超音波風 速計)によって測定します. 超音波風速計は, 水平お よび鉛直方向の 3 次元の風速と気温の変動を測定する ことのできる測器で, 音波のパルスが経路(パルス発 信点と受信点間:5~20cm程度)を順方向と逆方向 に進む速度をそれぞれ測定し, それらの速度差から風 速を計算します. 同時に, 音速の気温依存性を利用し て気温変動を測定します. 式(1)の ρ は、赤外分析計によって測定します、渦 相関法による CO_2 フラックス測定には、現在のとこ ろオープンパス型とクローズドパス型と呼ばれる二つ の型の赤外分析計が用いられます.どちらの分析計も CO_2 と水蒸気が赤外線領域に吸収帯を持つことを利用 して CO_2 密度を測定します(非分散赤外吸収法). オープンパス型の分析計は、赤外線の経路(10~20 cm 程度)を大気中に開放し、経路を通過する空気の CO_2 密度を高い応答速度で測定します.クローズドパ ス型の分析計は、密閉された測定用セルに赤外線を通 し、セルの中の空気中の CO_2 密度を測定します.

オープンパス型では,第4図aのように測定ヘッ ド部を超音波風速計と同高度に設置します.その際, ヘッド部が超音波風速計を通る風を乱すことのないよ



第4図 渦相関法の観測装置.(a)森林の上に設 置された超音波風速計と,オープンパス 型赤外分析計のヘッド部.(b)観測タ ワーの途中に設置されたクローズドパス 型の赤外分析計.観測場所は北海道苫小 牧市郊外のカラマツ林(国立環境研究所・ 苫小牧フラックスリサーチサイト). う注意するとともに,風速計の中心部とヘッド部の距 離をなるべく短くします(数十 cm 以内).

クローズドパス型では、空気取入口を超音波風速計 の近くに設置し、分析計はポンプなどの周辺装置とと もに収納箱の中などに設置します(第4図b).温度 制御できる場所に分析計を収納するため、天候の影響 を受けず動作を比較的安定に保つことができます.し かしチューブを使って空気を引くため、風速に比べて CO₂密度の測定に遅れが生じるうえ、チューブを通過 する際に変動の高周波成分が減衰することを避けるこ とができません.

チューブの中の流れは,層流状態より乱流状態であ る方が高周波成分の減衰を抑えることができます.そ こでレイノルズ数を上げるため、5~10L min⁻¹とい う大流量で空気を引くことが推奨されます.チューブ 内壁に汚れや水滴がつくと CO₂の変動が減衰するた め、汚れを防ぐフィルターをつけるほか,結露を防ぐ ためにチューブや収納箱を高温に保つことも推奨され ます.

赤外分析計で CO₂密度変動を正確に測定するた め, CO₂密度と赤外分析計の出力電圧との関係を定期 的に較正する必要があります.オープンパス型の場 合,赤外線の経路を覆う筒をかぶせ,濃度の異なる標 準ガスを順に流して出力を調べます.一方,クローズ ドパス型では,タイマーや電磁弁を使って複数の標準 ガスを定期的に流して感度の変化を調べます.

さて,式(1)の補正項には,

①現実の空気中で温度,水蒸気,CO₂が同時に変動す るために起こる空気の密度変動の補正(WPL補

正; Webb et al. 1980).

②現実の観測条件が理想的な測定理論と異なるために おこるさまざまな影響の補正。

が含まれます.①については理論的な研究が早い時期 に提案されていましたが,②については主に1990年代 に世界中で数多くの研究が進められました.例えば, 観測サイト周辺の地形が傾斜している場合には3次元 の風速成分をどのように座標変換し,どの方向のフ ラックスを求めるべきか,また,高周波成分の減衰が 避けられない場合にはそれをどのように補正すべきか などについてです.特に,クローズドパス型の分析計 を用いる場合には,高周波成分の測り落としをどのよ うに補正すべきかが大問題でした.そのため,チュー ブの内径・長さ・流量等に基づく理論的な研究 (Massman 1991)に始まり,現実的な補正方法とそ

2010年11月

の効果に関する知見がある程度まとまる(Massman 2000)までに10年近くかかりました.実際の観測現場 では,理論的な研究を参考にしつつ自分たちの装置の 周波数特性を調べて伝達関数を用意しておき,観測後 にその関数を使って補正する(Moncrieff *et al.* 1997;三枝 2001)などの方法が繰り返し試され,装 置や解析プログラムの改良が続けられました.

また,現実の観測サイト周辺が完全に水平一様では ないために起こる水平移流の影響(主に夜間や複雑地 形上で CO_2 が水平風により観測系外に運び去られる 問題など)をどう補正するかについても,理論的研究 (Lee 1998)をはじめとする研究が数多く行われ,議 論が続きました.その結果,条件の異なる複数のフ ラックス観測サイトで3次元の移流を観測し,その仕 組みを解明しようとする大規模な野外実験 (ADVEX)が行われるなど(Feigenwinter *et al.* 2008),この問題はフラックス観測手法の範疇を超え て,接地境界層の輸送過程の研究課題として現在も解 明に向けた取り組みが続けられています.

5.2 データの品質管理法

観測データには,機器の故障や天候の影響で生じる 異常値が含まれるのが普通です.そこで,解析に使う 前に一定の方法で異常値を除去し,正常な値だけを残 す作業が必要です.渦相関法では10Hz 程度の高速で 測定するためデータ数が多く,異常値を人の目で発見 して取り除く方法は現実的ではありません.また,異 常値の基準が人によって違うと,データセットの品質 が担当者ごとに異なってしまいます.そこで,観測手 法の標準化と同時にデータ品質管理法の標準化も同時 に進められました.現在推奨されている主な方法を簡 単に記します.

①生データに対するテスト:

超音波風速計や赤外分析計の生データに施すテス ト.一定時間中に正常範囲を越えるスパイク状のノ イズが数多く含まれる場合,その時間のデータを異 常値と判定する.このテストは,機器の不調や,激 しい雨雪などによって生じる異常値などを除去す る.

②変動の周波数特性や相関係数によるテスト:

生データの時系列から,物理量の周波数特性や相関 係数を求め,接地境界層の乱流理論から予想される 特性と比較するテスト.例えば,周波数特性や相関 係数が理論値と大きく異なる場合,機器の不調や電 気的ノイズ,装置の設置場所が適切でないといった 観測システム全体に係わる問題がある可能性があ る.

③各種フラックスの計算結果に対するテスト:

- フラックスの計算を行った後に施すテスト.例えば 各種フラックスの値に対してあらかじめ正常な値の 範囲を定めておき,その範囲をはずれた値を異常値 と判定する.観測サイトの状況によっては特定の風 向のデータを除去する場合もある.
- ④大気安定度によるテスト:
 - 大気が安定な時には乱流の発生が間欠的になること から,熱や物質の輸送は時間的にも空間的にも一様 ではなく,測定理論の基礎となる仮定が成り立たな いことがある.そこで,安定度を表す指標を使って 除去すべきデータを判別する.

5.3 欠測補完法

異常値を除去した後で,除去された時間帯のデータ を推定して埋める作業(欠測補完)が必要です.欠測 補完は,CO2収支の年間値を算出する場合に特に重要 です.なぜなら,多くの森林では1年あたり光合成に よる総吸収量と呼吸による総放出量のオーダーはほぼ 同じであり,両者の差(正味の吸収)はそれらのわず か10分の1程度の大きさしかありません.このため, 日中と夜間で欠測時間が異なる場合,欠測補完せずに 計算すると年間の収支に無視できない大きさのバイア スを生んでしまいます.そこで,欠測補完法をできる だけ統一して系統的な差を小さく抑えることが必要で す.現在推奨されている補完法は以下のとおりです. ①内挿法:

1~2時間程度の短時間の欠測は、欠測前のデータ と後のデータを使って直線的に内挿する.

②非線形回帰法:

入力放射量,気温,飽差といった環境要因とCO₂ フラックスの関係を調べ,環境要因からフラックス を推定する非線形回帰式をつくる方法.一般に CO₂フラックスは温度と日射量または光合成光量子 密度(PPFD)などを使って良好に推定できる.

③ Look-up Table 法:

入力放射量,気温,飽差といった環境要因とCO₂ フラックスの関係を表す表を作成し,その表を利用 してフラックスを推定する方法. Look-up Table 法は,非線形回帰法で推定を行うことが難しい場合 にも適用できる確実性の高い補完法である.

④平均日変化法:

10~20日の期間ごとに平均日変化(同一時刻のデー

"天気" 57. 11.

タを平均して求めた平均的な日変化のパターン)を 用意し、欠測時間のデータを同じ時刻の平均日変化 の値で埋める方法.ただし、欠測の少ない晴天日の データで作った平均日変化を用いて降雨日の欠測期 間を補完する場合があるなど、補完精度の悪いケー スがあることに注意が必要である.

6. CO₂フラックスから純生態系生産,総一次生産,生態系呼吸を求める方法

以上のような観測,補正,品質管理,欠測補完を行 うと,CO₂フラックスの長期連続的な時系列データを 得ることができます.これは森林による炭素収支の日 別,月別,年間値などを求めるための重要な基礎デー タです.しかし,森林の上でCO₂フラックスを観測 する目的は,単に森林と大気のCO₂交換量を正確に 算出するためだけではありません.微気象学的方法の もつ高い時間分解能を生かし,陸域の炭素循環にとっ て重要な生態系機能(例えば光合成や呼吸)がどのよ うに時間・空間的に変動しているか,そしてそれらが どのような環境要因に制御されているかを定量的に把 握することにより,炭素循環の広域評価や将来予測の 確度を高めていくことが重要な目的の一つです.

その際,生態学の分野で用いられる総一次生産(光 合成の総量),生態系呼吸(呼吸の総量)などの概念 に一致する量をCO₂フラックスの時系列データから 求め,その量の特性を理解することにより,生態学と 気象学の分野でそれぞれ蓄積されてきた知見を融合的 に活用することが可能になります.例えば,ある生産 量の時空間変動が観測された場合,その変動が生態系 にとってどのような意味を持ち,地球大気にとってど のような意味を持つかを同時に解釈することで,より 深い理解と予測が可能になると考えられます.こうし た分野融合研究を開拓することも重要な目的の一つで す.

そこで,以下では純生態系生産 (Net Ecosystem Production;以下, NEPと表す),生態系呼吸 (Ecosystem Respiration; RE),総一次生産 (Gross Primary Production; GPP) を CO₂フラックスの測 定結果から算出する方法を示します.

6.1 CO₂フラックスと純生態系生産の関係

生態系上の CO_2 フラックスを F (鉛直上向を正), フラックス測定高度より下の空気に含まれる CO_2 の 単位時間あたりの増加量を ΔC と表すと、単位時間・ 単位土地面積の生態系の上の大気が受け取る CO_2 の 量(純生態系 CO_2 交換量; Net Ecosystem CO_2 Exchange; NEE) は

$$NEE = F + \varDelta C \tag{2}$$

と表されます. *ΔC* の値は CO₂濃度の鉛直分布を観測 することにより求めます. ここで, 観測点付近で水平 移流(水平風によって運ばれる CO₂の量)に場所に よる違いがないと仮定できるなら, NEP との関係は

$$NEP = -NEE$$
 (3)

となります. NEP は単位土地面積の生態系が正味で 吸収した CO₂の量です.

6.2 夜間のデータから生態系呼吸を推定する方法 夜間は光合成がないため、生態系全体が放出する CO₂の量(生態系呼吸; RE)は NEE に等しいはず です.しかしこれまでの研究により夜間の NEE から RE を推定する際に次のような問題があることがわ かっています.

静穏で安定成層している夜間には、土壌や下層の植 生から放出される CO₂の一部は林内に留まり、地面 に沿って標高の低い方向へ流出してしまう傾向があり ます.そこで、大気安定度の指標(例えば摩擦速度 *u**)を用いて水平移流の影響が無視できない時の データを異常値として除去することが行われます.欠 測値は、条件がよいと判断された時の値を使って補完 します.現時点では、RE 過小評価の仕組みが完全に 解明されたわけではありませんが (5.1節参照)、こう した経験的な方法を適用するのが一般的です.

6.3 日中のデータから総一次生産を推定する方法
 光合成の総量である総一次生産(GPP)は、日中の NEE と RE を使って

$$GPP = -NEE + RE \tag{4}$$

と表されます. 日中の RE を求めるには, 夜間の RE と温度の関係を表す実験式を作成し, その式に日中の 温度を代入して求めます. ただし, 日中と夜間の RE の温度依存性が同一である保証はなく, この点が GPPを算出する際の不確実性の一つの要因になって います.

6.4 微気象学的方法と生態学的方法による森林炭 素収支の相互比較

CO₂フラックスの観測手法について一定の標準化が 進み,さらに生態学の分野で用いられる炭素循環各項 を算出することが可能になったことから,最近の数年 間で微気象学的方法と生態学的方法による炭素収支を 本格的に比較することができるようになりました.独 立した複数の方法で炭素収支を求め、相互に比較検証 できる段階に入ったことは、当研究分野における大き な前進であると思います.

6.4.1 さまざまな方法での相互比較

各地の観測サイトでは,観測精度を確認するために さまざまな方法で微気象学的方法と生態学的方法の比 較が行なわれました.例えば微気象学的方法による GPPと個葉光合成の積算を日単位で比較(Sakai et al. 2006),微気象学的方法による REと土壌呼吸や植 物呼吸の積算を日単位から年単位で比較(Mo et al. 2005;Ohkubo et al. 2007),微気象学的方法と生態 学的方法による NEPを年単位で比較(Curtis et al. 2002;Hirata et al. 2007;Kominami et al. 2008; Ohtsuka et al. 2009)などが挙げられます.これらの 検証を通して,観測上の問題点を抽出し,不確実性を 減らす取り組みが進展しました.

6.4.2 アジア各地の観測サイトでの相互比較

2002~2006年に環境省地球環境研究総合推進費の戦 略研究「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系 の統合的炭素収支研究(代表:及川武久博士)|(以 下、「21世紀の炭素管理」と表す)が行われ、アジア 各地のフラックス観測サイトにおいて微気象学的方法 と生態学的方法の相互比較が精力的に行われました. その結果、亜寒帯林、温帯林、熱帯林を含むアジア各 地の森林において、 微気象学的方法と生態学的方法に よる年間 NEP の差は、1 ヘクタールあたり年間1.5 トン(炭素換算)程度の幅に収まることがわかりまし た (Hirata et al. 2008). 過去の研究に比べれば, 両 者の差は格段に縮小しましたので、陸域の炭素収支広 域評価の検証用としてこれらのデータが高い価値を持 つことを示すことはできました.しかし、1ヘクター ルあたり年間1.5トンという数字は、森林によっては 年間の正味吸収量とほぼ同じ値に相当します.した がって, 微気象学的方法や生態学的方法によるデータ を陸域炭素収支の絶対値を検証するための確実なデー タと位置づけるには、不確実性の幅を少なくともあと 半分程度にまで減らす努力が求められているのではな いかと考えています.

6.4.3 炭素収支年々変動についての相互比較

微気象学的方法と生態学的方法による森林炭素収支 を数年以上の長期間にわたって比較した研究を紹介し ます. 岐阜県高山サイトでは、微気象学的方法(Yamamoto et al. 1999; Saigusa et al. 2005)と生態学的方 法(Ohtsuka et al. 2005)の観測を長期的に並行して 行っています.年間 NEPを両方法で比較した研究 (Ohtsuka et al. 2009)から、第5図のような結果が 得られました.これをみると、両方法による年間 NEPの絶対値の差は、1へクタールあたり1.2トン (炭素換算)以内でした.また、両方法による NEP の年々変動の傾向はよく一致しました.すなわち、微 気象学的方法と生態学的方法による NEP には若干の 差があるものの、両者とも年々変動の傾向をよく捉え ていることがわかります.さらに、毎本調査によって 求めた樹木成長量とも年々変動の傾向がよく一致しま した.

NEP は、通常 CO₂吸収過程と放出過程の両方の影響を受けるため、必ずしも樹木の直径成長量と良く同 期するとは限りません.それでは高山サイトではどう して年間 NEP と樹木成長量がこれほど同じように年 々変動するのでしょうか?

微気象学的方法で求めた NEP と GPP の年々変動 については, 1994~2002年の観測データから次のよう な結果が得られています (Saigusa *et al.* 2005).

- ① NEP の年々変動は GPP の変動と類似だった.つ まり NEP の変動は主に光合成の変動により形成さ れた.
- ②年間のGPPとNEPが特に高かったのは1998年と 2002年だった.両年とも春の気温が高く(特に1998 年はエルニーニョの影響で顕著に高温),展葉開始



第5図 微気象学的方法と生態学的方法で観測された炭素収支. 観測場所は岐阜県高山サイト.観測期間は1999年から2006年. ■ は微気象学的方法による NEP, ○は生 態学的方法による NEP, △は毎木調査 による樹木成長量. (Ohtsuka *et al.* 2009のデータを使用)

"天気" 57. 11.

に伴う GPP の上昇が早かった. その結果 6 ~ 7 月 の GPP と NEP が他の年に比べて顕著に高かっ た.

生態学的方法による知見を加えると,次のように解 釈されます.まず,春の早い年は,展葉開始が早く, 葉面積が他の年より早く最大値に達します(6月前 半).そこで,光量が大きく低下する梅雨期より前の 季節(主に6月)を有効利用して(第2図を参照)他 の年より光合成を多く行うことができます.樹木の年 輪は一般に生育期間前半に成長するため,6~7月の 光合成の年変動が年輪幅に直接反映されたと考えられ ます.

微気象学的方法と生態学的方法のデータを併用する ことで,炭素収支の変動要因を総合的に矛盾なく理解 することができます.今後は,生産量の年変動の影響 が分解過程や他の物質循環などを介して,翌年の生産 量やその他の生物プロセスにも影響するかといった問 題にも取り組むことができると考えています.

7. 大陸スケールでの生態系変動検出に向けて

7.1 アジア各地の森林炭素収支の空間分布

2000年代後半に入ると、フラックス観測ネットワー クのデータを用いた広域炭素収支の評価が世界各地で 行われるようになりました.アジアにおいても、前述 の「21世紀の炭素管理」プロジェクトの一環として、 亜寒帯から熱帯に至る各地の森林生態系の炭素収支に 関する比較研究を行いました.

各観測サイトで測定された CO₂フラックスのデー タを統合的に解析し,炭素収支各項の季節変化パター ンを求めた結果を第6図,第7図に示します.第6図 a~dの落葉針葉樹林(カラマツ林)の GPP をみる と,シベリア,モンゴル,中国,日本と気候が温暖に なるにつれて,光合成を行う期間が長くなり,GPP の最大値も高くなります.日本の森林(e~h)をみ ると,落葉性の樹木の多い森林(e,f)では,常緑性



第6図 アジア各地の森林で観測された総一次生産の季節変化の比較. 各サイトの国名と森林タイプは, (a)ロ シア・Tura (落葉針葉樹林), (b)モンゴル・Southern Khentei Taiga (落葉針葉樹林), (c)中国・老 山 (落葉針葉樹林), (d)日本・苫小牧 (落葉針葉樹林), (e)日本・天塩 (針広混交林), (f)日本・高山 (落葉広葉樹林), (g)日本・富士吉田 (常緑針葉樹林), (h)日本・桐生 (常緑針葉樹林), (i)タイ・メ クロン (熱帯季節林), (h)タイ・サケラート (熱帯季節林), (k)マレーシア・パソ (熱帯雨林). (Saigusa *et al.* 2008; Fig.2 を改変).

総一次生産

の森林 (g, h) に比べて生長期間が短いかわりに GPP の最大値が高いことがわかります. 熱帯 (i~ k) をみると, 乾季と雨季をもつ季節林 (i, j) では乾 季 (11~4 月頃) に比べ雨季 (5~10月頃) の GPP が高いこと, 熱帯雨林 (k) では季節変化の幅が小さ いことがわかります.

第7図のNEPの季節変化をみると,落葉性の森林 (a~f)では正味吸収(NEP>0)の生育期間と正味 放出(NEP<0)の非生育期間が明瞭に分かれるこ と,常緑性の森林(g~k)では季節変化の幅が小さ いことがわかります.特に熱帯林では,中高緯度の森 林に比べて一年を通して光合成速度は高い(第6図 i~k)にもかかわらず,正味の吸収は小さく(第7 図i~k),吸収と放出がほとんど釣り合っていると いう興味深い事実が明らかになりました.

このように、アジア各地の森林炭素収支は気候帯や 森林タイプの違い(常緑・落葉など)に応じて特徴的 な季節変化パターンを示すことが明瞭に示されまし た.こうした統合的なデータ解析によって得られた知 見は、観測手法の標準化、データ品質管理法の標準 化、データ流通促進といった時間のかかる困難な課題 に数多くの研究者が取り組んだことによって始めて得 ることのできたものです. 今後もこうした統合的な解 析をさらに進めることができるよう, 観測の継続と貴 重なデータの収集に努め, 価値ある知見が日本および アジアの研究者の手で数多く生み出されることを期待 して, 関係者のみなさんと共に取り組みたいと思いま す.

7.2 気象偏差に対する東アジアの森林の応答

最後に,最近取り組んでいる研究の内容を紹介しま す.これは,地上観測データ,衛星観測,陸域モデル を融合させて大陸スケールでの森林炭素収支の時空間 変動を把えることを目的とした研究です.

2003年の夏, ヨーロッパ中南部は記録的な猛暑とな り, 各地で農作物や健康上の深刻な被害が報告されま した (Levinson and Waple 2004; Ciais *et al.* 2005). 一方, 同じ時にヨーロッパに近いロシアで低 温多雨 (Levinson and Waple 2004), 西サハラで洪 水 (Kadomura 2005), 日本の本州で低温・寡照 (楠 2005), 中国 Huai 河で洪水 (Liu *et al.* 2004), そし て中国南東部で異常な高温乾燥 (Sun *et al.* 2006) と, 世界のあちこちで極端な気象が観測されました.



純生態系生産

第7図 アジア各地の森林で観測された純生態系生産の季節変化の比較. 各サイトの国名と森林タイプは第6図 と同じ. (Saigusa *et al.* 2008; Fig.4 を改変).

n ani Eluna Ani a E

そこで2003年夏に東アジアでどのような気象の偏差 があったかを調べ、その偏差に特徴的な空間パターン があったとしたら、生態系の炭素収支がそれにどのよ うに応答したかを明らかにしようと考えました.用い たデータと解析方法は以下のとおりです(詳細は Saigusa *et al.* 2010).

- ①フラックス観測サイトの地上観測データ:
- 2003年を含む複数年のGPPを良好に算出できた東 アジアの森林6サイト.モンゴル・Southern Khentei Taiga (亜寒帯カラマツ林),日本・苫小 牧フラックスリサーチサイト(冷温帯カラマツ 林),中国・長白山(冷温帯混交林),日本・高山 (冷温帯カンバミズナラ林),日本・瀬戸(暖温帯混 交林),中国・千煙州(亜熱帯マツ林).
- ②衛星データを用いて推定した PPFD の空間分布: MODIS (Terra & Aqua) と SeaWiFS (Sea star) を利用し、2001~2006年について日別の PPFD を 25km分解能で推定.計算手法はFrouin and Murakami (2007) に準拠. 検証を係留ブイ(海上),お よびフラックスサイト(モンゴル,日本)で実施.

③モデルを用いて推定した GPP の空間分布:

Support Vector Machine (Yang *et al.* 2007)を用 いて2001~2006年について8日平均のGPPを 8km分解能で算出.モデルの入力およびテスト データとして AmeriFlux, AsiaFlux のデータを使 用.計算手法の詳細は Ichii *et al.* (2010) を参照.

衛星データから推定された2003年夏の PPFD 偏差 の空間分布を第8図に示します.赤色は他の年に比べ て2003年夏に PPFD が高かった場所、青色は低かっ た場所を表します、これをみると、2003年夏に光を多 く受けた場所と少なく受けた場所が東西に縞のような 模様をつくって北から南に順に並んでいる様子がわか ります、特に日本の本州付近で光が少なかったのは、 活発な梅雨前線が長期間停滞したためでした。なお、 気温についても2003年夏における偏差の空間分布を調 べたところ、PPFD 偏差と概ね同様の空間分布を示 しました(PPFDの高い場所で気温も概ね高い).ま た、2001年から2006年まで各夏の気象要素の偏差を調 べたところ、2003年夏の PPFD の偏差の程度は他の 年に比べて特に顕著でした.すなわち、2003年の夏、 ユーラシア大陸東部でも, 高温多照・低温寡照の顕著 な偏差が、あるパターンをもって広域に分布し、しか もその偏差が夏の約2ヶ月間ほぼ同じ場所に滞在した ことがわかりました.

次に,地上観測データで検証されたモデルを用いて 2003年夏のGPPの偏差の空間分布を求めた結果を第 9図に示します.第8図と第9図を比べると,北緯30



(base period 2001-2006)

第8図 衛星データから求めた2003年夏の
 PPFDの偏差の空間分布.2003年7~
 8月の2ヶ月平均値と、2001~2006年における7~8月平均値の差を表す.赤は正の偏差,青は負の偏差を表す.
 (Saigusa et al. 2010; Fig.4を改変).



 第9図 陸域モデルから求めた2003年夏のGPP の偏差の空間分布.2003年7~8月の 2ヶ月平均値と,2001~2006年における 7~8月平均値の差を表す.赤は正の偏 差,青は負の偏差を表す.(Saigusa et al.2010;Fig.7を改変).

~40度より北では、PPFDの高い場所とGPPの高い 場所はほぼ一致することがわかります.すなわち,光 を多く受けた場所の光合成が多く,光を少なく受けた 場所の光合成が少なかったことになります.ところ が,北緯30度より南側,特に中国南東部では,光を多 く受けた場所でかえって光合成が少なかったことがわ かります.この結果は,地上観測サイトのデータから も裏づけられました.すなわち,中国南東部の森林サ イトでは,2003年7~8月に高温と乾燥のために水不 足となり,夏のみならず秋にかけても光合成速度が大 きく低下したことが確認されています.

以上の結果から,2003年夏にヨーロッパだけでなく ユーラシア大陸東部にも,ある空間パターンをもった 光や温度の偏差が2ヶ月間ほど同じ場所に滞在し,東 アジア各地の夏の光合成量を大陸スケールで変動させ た様子を捉えることができました.また,本州付近に 停滞した梅雨前線の北側と南側で,光量の多寡に対す る光合成量の反応が反転していたこともわかりまし た.これは一つの事例を調べた結果ですが,今後も森 林炭素収支の応答を広域で検出する研究を通して,よ り広域かつ長期の生態系変動の検出とそのメカニズム 解明をめざしたいと考えています.

8. おわりに

森林生態系の炭素循環の観測とそのアジアへの展開 に係る分野で,将来ぜひ実現したいと考えていること がありますので,今度の課題にかえて簡単に記したい と思います.

第一の点は、長期にわたって観測ネットワークの データ流通を促進するための何らかのしくみをつくる ことです. 例えば、FLUXNET や AsiaFlux が構築 されて10年以上たち、データの共有化が繰り返し呼び かけられてはいますが、現実には各サイトのデータを データベースに提供してもらうのは容易なことではあ りません. 私自身もそうですが, 各サイトの担当者の 多くは観測作業とサイト維持に係る膨大な作業に追わ れ、データ公開の重要性は理解しているものの、作業 スピードが追いつかないというケースが多いのではな いかと思います. 今のところ, 統合的な解析を共同研 究として行うことなどがデータ収集のモチベーション になってはいますが、それにも限界があります. 観測 サイト担当者の負担を軽減しつつ、ネットワークとし て長期的にデータ集積と品質管理を行うことができる しくみを何とかしてつくれないものかと思案していま す.

第二の点は、陸域炭素収支の観測サイトのうち、重 要な生態系に位置するいくつかのサイトを、炭素収支 のみならず水循環観測、大気化学・地球化学的観測、 生態系・生物多様性の観測、衛星観測や陸域モデルの 検証観測などに対応できる総合的な観測サイトとして 育てることです。今のところ、何からどう取り組んだ らよいかはわかりませんが、気候変動に対して陸域生 態系がどのように反応し、その結果気候にどのような 影響を与えるのかという生態系フィードバックを実測 し、その仕組みを明らかにするためには、生態系の物 理・化学・生物学的反応を長期的に確実に捉えること のできる観測点がぜひとも必要であると考えていま す.

最後に第三の点は、観測データをもっとわかりやす い形で、または使いやすい形で、それを必要とする人 へ届けることです.最近、森林による CO₂吸収量を はじめとする様々なことについて研究者およびいろい ろな立場の方から問い合わせを頂くのですが、多くの 場合、知りたいと思っておられることに対して満足に 答えることができていないという気がしています.学 術的に追求していることと一人一人の方が求める情報 との間に距離があるのですが、観測データそのものに は、うまく伝えることができさえすれば、その距離を 埋める力があるような気もしています.この点につい てはもうしばらく試行錯誤したいと思います.

謝 辞

私が森林炭素循環の研究を始めたのは、1996年に現 在の産業技術総合研究所(旧資源環境技術総合研究 所)に就職した時でした.当時の上司および先輩であ る山本 晋さん,近藤裕昭さん,村山昌平さんから は、研究を行う上で必要なあらゆるサポートと暖かい ご指導を頂きました. 今も続いている岐阜県高山サイ トでの研究では、岐阜大の皆様のご支援を常に頂いて います.各地のフラックスサイト立ち上げに参加した 時は, Eotvos Lorand 大学, ハンガリー気象局, Environment Canada, 国立環境研究所, 中国東北林 業大学の皆様から、特に観測現場で多大なサポートを 頂きました. AsiaFlux では,特にトレーニングコー スの活動を通して、森林総合研究所、農業環境技術研 究所、北海道大学、そしてアジア諸国の皆さんから惜 しみない協力を頂き、ネットワーク活動について多く のことを学びました.推進費「21世紀の炭素管理」で

"天気" 57. 11.

831

は、代表の及川武久先生をはじめ共同研究者の皆さん から最後に重要な部分で論文を書かせてもらい感謝し ています.現在は、国環研(特に陸域関係の皆さ ん)、JSPS A3 Foresight (CarboEastAsia)の皆さ んから日々刺激と励ましを頂いています.これまで支 えて下さった方々、特に地表に近い大気の研究に導い て下さった近藤純正先生と東北大の先輩方、最後に本 研究を推薦・選考して下さった方々、並びに学会員の 皆様に改めて厚くお礼申し上げます.

参考文献

- Amiro, B. D., A. G. Barr, T. A. Black, H. Iwashita, N. Kljun, J. H. McCaughey, K. Morgenstern, S. Murayama, Z. Nesic, A. L. Orchansky and N. Saigusa, 2006 : Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. Agric. For. Meteor., 136, 237-251.
- AsiaFlux 運営委員会(編), 2003:陸域生態系における二 酸化炭素等のフラックス観測の実際. CGER-REPORT, CGER-M015-2003, 国立環境研究所, 116pp.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini and T. Vesala, 2000 : Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests : The EUROFLUX methodology. Adv. Ecol. Res., 30, 113-175.
- Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw U, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson and S. Wofsy, 2001 : FLUX-NET : A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 2415-2434.
- Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. De Noblet, A. D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grünwald, B. Heinesch, P. Keronen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala and R. Valentini, 2005 : Europe-wide reduction in primary productivity

caused by the heat and drought in 2003. Nature, 437, 529-533.

- Curtis, P. S., P. J. Hanson, P. Bolstad, C. Barford, J. C. Randolph, H. P. Schmid and K. B. Wilson, 2002 : Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. Agric. For. Meteor., 113, 3-19.
- Desjardins, R. L., D. J. Buckley and G. St. Amour, 1984 : Eddy flux measurements of CO_2 above corn using a microcomputer system. Agric. For. Meteor., 32, 257-265.
- Feigenwinter, C., C. Bernhofer, U. Eichelmann, B. Heinesch, M. Hertel, D. Janous, O. Kolle, F. Lager gren, A. Lindroth, S. Minerbi, U. Moderow, M. Mölder, L. Montagnani, R. Queck, C. Rebmann, P. Vestin, M. Yernaux, M. Zeri, W. Ziegler and M. Aubinet, 2008 : Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. Agric. For. Meteor., 148, 12–24.
- Frouin, R. and H. Murakami, 2007 : Estimating photosynthetically available radiation at the ocean surface from ADEOS-II Global Imager data. J. Oceanogr., 63, 493-503.
- 原薗芳信,平野高司,三枝信子,大谷義一,宮田 明,大 滝英治,文字信貴,2003:地球環境研究におけるフラッ クス長期観測の役割と最近の動向.農業気象,59,69-80.
- Hirata, R., T. Hirano, N. Saigusa, Y. Fujinuma, K. Inukai, Y. Kitamori, Y. Takahashi and S. Yamamoto, 2007 : Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange of a temperate larch forest. Agric. For. Meteor., 147, 110-124.
- Hirata, R., N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S.-G. Li, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani and H. Wang, 2008 : Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. Agric. For. Meteor., 148, 761-775.
- Ichii, K, T. Suzuki, T. Kato, A. Ito, T. Hajima, M. Ueyama, T. Sasai, R. Hirata, N. Saigusa, Y. Ohtani and K. Takagi, 2010 : Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan : Limitations and implications of model calibration using eddy flux observations. Biogeosciences, 7, 2061–2080.
- 井上栄一,谷 信輝,今井和彦,礒部誠之,1958:苗代におけ る炭素同化作用の空気力学的測定.農業気象,14,45-53.
- Kadomura, H., 2005 : Climate anomalies and extreme events in Africa in 2003, including heavy rains and floods that occurred during Northern Hemisphere summer. Afr. Study Monogr., Suppl., 30, 165-181.

- Kominami, Y., M. Jomura, M. Dannoura, Y. Goto, K. Tamai, T. Miyama, Y. Kanazawa, S. Kaneko, M. Okumura, N. Misawa, S. Hamada, T. Sasaki, H. Kimura and Y. Ohtani, 2008 : Biometric and eddycovariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. Agric. For. Meteor., 148, 723-737.
- 楠 昌司(編), 2005:2003年日本の冷夏.気象研究ノート,(201), 199pp.
- Lee, X., 1998 : On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. Agric. For. Meteor., 91, 39-49.
- Levinson, D. H. and A. M. Waple, 2004 : State of the climate in 2003. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85, 881-881.
- Liu, J., L. Wang and J. Wang, 2004 : Huai River flood in 2003 and its forecasting, prediction and dispatching. Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, (211), 7-14.
- Massman, W. J., 1991: The attenuation of concentration fluctuations in turbulent flow through a tube. J. Geophys. Res., 96, 15269–15273.
- Massman, W. J., 2000 : A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. Agric. For. Meteor., **104**, 185–198.
- Mo, W., M.-S. Lee, M. Uchida, M. Inatomi, N. Saigusa, S. Mariko and H. Koizumi, 2005 Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. Agric. For. Meteor., 134, 81-94.
- Moncrieff, J. B., J. M. Massheder, H. de Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard and A. Verhoef, 1997 : A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. J. Hydrol., 189, 589-611.
- Ohkubo, S., Y. Kosugi, S. Takanashi, T. Mitani and M. Tani, 2007 : Comparison of the eddy covariance and automated closed chamber methods for evaluating nocturnal CO₂ exchange in a Japanese cypress forest. Agric. For. Meteor., 142, 50-65.
- Ohtaki, E., 1984: Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. Bound.-Layer Meteor., 29, 85-107.
- Ohtsuka, T., T. Akiyama, Y. Hashimoto, M. Inatomi, T. Sakai, S. Jia, W. Mo, S. Tsuda and H. Koizumi, 2005: Biometric based estimates of net primary production (NPP) in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower. Agric. For. Meteor., 134, 27-38.
- Ohtsuka, T., N. Saigusa and H. Koizumi, 2009: On linking multiyear biometric measurements of tree

growth with eddy covariance-based net ecosystem production. Global Change Biol., 15, 1015-1024.

- 三枝信子,2001:オープンパス型とクローズドパス型の赤 外分析計を用いたフラックス観測法の比較.気象研究 ノート,(199),124-129.
- 三枝信子, 2002:植物群落の水・熱・CO₂フラックス測定法.地球環境調査計測事典(第1巻陸域編),竹内均監修, フジテクノシステム, 792-803.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo and N. Nishimura, 2002 : Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. Agric. For. Meteor., 112, 203–215.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama and H. Kondo, 2005 : Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by longterm flux measurements. Agric. For. Meteor., 134, 4-16.
- Saigusa N, S. Yamamoto, R. Hirata, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S.-G. Li, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani and H. Wang, 2008 : Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. Agric. For. Meteor., 148, 700-713.
- Saigusa, N., K. Ichii, H. Murakami, R. Hirata, J. Asanuma, H. Den, S.-J. Han, R. Ide, S.-G. Li, T. Ohta, T. Sasai, S.-Q. Wang and G.-R. Yu, 2010 : Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on gross primary productivity in East Asia. Biogeosciences, 7, 641-655.
- Sakai, T, T. Akiyama, N. Saigusa, S. Yamamoto and Y. Yasuoka, 2006 : The contribution of gross primary production of understory dwarf bamboo, Sasa senanensis, in a cool-temperate deciduous broadleaved forest in central Japan. For. Ecol. Manag., 236, 259-267.
- 森林総合研究所, 2008:タワーフラックス観測マニュアル (ver. 1.0a). http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/ manual_j.html (2010.3.21閲覧).
- Sun, X., X. Wen, G. Yu, Y. Liu and Q. Liu, 2006: Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southeastern China. Sci. China Ser. D, 49, 110-118.
- Takagi, K., K. Fukuzawa, N. Liang, M. Kayama, M. Nomura, H. Hojyo, S. Sugata, H. Shibata, T. Fukazawa, Y. Takahashi, T. Nakaji, H. Oguma, M. Mano, Y. Akibayashi, T. Murayama, T. Koike, K. Sasa and Y. Fujinuma, 2009 : Change in CO₂ balance under a

series of forestry activities in a cool-temperate mixed forest with dense undergrowth. Global Change Biol., 15, 1275-1288.

- 塚本 修,文字信貴(編),2001:地表面フラックス測定 法.気象研究ノート,(199),242pp.
- Webb, E. K., G. I. Pearman and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 106, 85-100.
- Wofsy, S. C., M. L. Goulden, J. W. Munger, S. M. Fan, P. S. Bakwin, B. C. Daube, S. L. Bassow and F. A. Bazzaz, 1993 : Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. Science, **260**, 1314–1317.

- 山本 晋, 1999:森林と大気間 CO₂交換量のタワー観測 ネット.水文・水資源学会誌, 12, 361-362.
- Yamamoto, S., S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo, 1999 : Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. Tellus, **51B**, 402-413.
- Yang, F., K. Ichii, M. A. White, H. Hashimoto, A. R. Michaelis, P. Votava, A. X. Zhu, A. Huete, S. W. Running and R. R. Nemani, 2007 : Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. Remote Sens. Environ., 110, 109-122.

Carbon Cycle Studies in Forest Ecosystems Based on Field Experiments and Their Development in Asia

Nobuko SAIGUSA*

* Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan.

(Received 24 March 2010; Accepted 5 August 2010)