

森林生態系炭素循環の解明を目指して

—20年間の高山 (TAKAYAMA) 観測と AsiaFlux への展開—

山本 晋^{*1}・村山 昌平^{*2}・近藤 裕昭^{*2}・三枝 信子^{*3}

1. はじめに

筆者らが岐阜県高山市でフラックス観測を開始した1990年代のことを振り返ってみると、当時は大気中の二酸化炭素濃度 (CO₂) の将来推移について、産業革命以前の濃度の2倍 (550 ppm) になる時期を2040年代とする予測から、将来にわたって2倍化にいたらないという予測までであり不確定な状況であった。なお、この状況はその後の地道な努力により改善されつつある。さて、このように将来の予測濃度が確定しない理由としてCO₂の大気と陸域生態系との交換過程とその量が解明されていないということがあった (Dixon *et al.* 1994; 及川 2002; 山田・邊見 2003など)。大まかに言えば、地球の陸地の約31%が森林であり、草原は約40%を占めているが (FAO 2010)、この陸上植生の炭素収支における役割が特に不明であることが大きかった。なお、日本の森林は国土面積の66%程度である (林野庁 2011)。

当時は大気中CO₂濃度、CO₂の炭素同位体の測定のもとで、中高緯度の陸上植生が吸収源として作用しており、その強さは0.7–2.1GtC yr⁻¹といわれていた (IPCC 2001)。しかし、大きな推定幅があり不確定な状況であった。このことから、中高緯度の陸上植生特に森林生態系の炭素貯蔵におけるプロセスの定量的解明が必要となった。そこで森林生態系の炭素循環における役割の解明を目的として、大気と森林生態系間のCO₂交換量を、タワーを利用して直接的に求める試み

が世界的に開始されつつあった (山本ほか 1998; Yamamoto *et al.* 1999; Valentini *et al.* 2000; Baldocchi *et al.* 2001; Curtis *et al.* 2002; 藤沼ほか 2003など)。

このような背景のもとに、環境省地球環境研究総合推進費により、岐阜県高山市の落葉広葉樹林帯に1993年9月にCO₂観測タワーが建設され、日射量、気温、風速などの気象条件、CO₂濃度、CO₂交換量、CO₂安定同位体の測定、炭素収支の調査が産業技術総合研究所 (当時資源環境技術総合研究所) と岐阜大学の共同で開始された (第1図, 第2図参照) (山本ほか 1996)。この観測サイトはミズナラ・ダケカンバ・シラカンバが優占する落葉広葉樹二次林で、林床はクマイザサに広く覆われている。本報告ではその後20年間 (1993年–2012年) の調査研究の概要を紹介する。さて、この20年間で大きく区分すると次の3期に概略分けられる。

1期 (1993–1997年): 1993年タワー建設と気象、CO₂濃度・安定同位体測定の開始、フラックス観測の開始と観測手法の確立、生態系・土壌呼吸調査手法の確立と調査の開始

2期 (1998–2002年): 渦相関法によるフラックス連続観測の開始・継続、生態学的炭素固定量測定の永久コドラート (測定方形区画) 設置、継続調査の開始

<2003年: 高山ワークショップ (2003年10月, 高山) の開催と研究成果の取りまとめ>

3期 (2002–2012年): リモートセンシング観測との共同で炭素収支の広域観測の開始、エコサイト (樹冠部アクセスタワー (檜タワー) の設営) の共同調査・観測、炭素収支生態系モデルによる炭素収支評価推定との連携、CO₂濃度・フラックス観測、森林

*1 (連絡責任著者) 産業技術総合研究所。

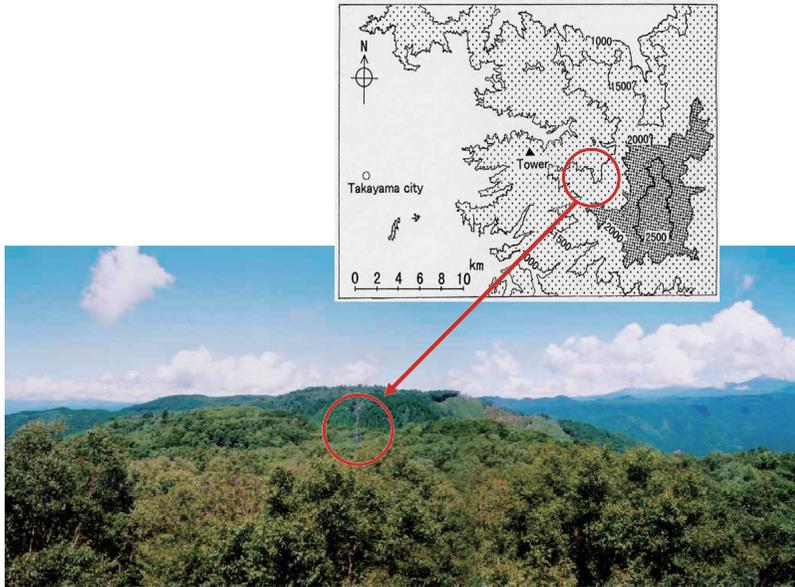
E-mail: yamastk@yahoo.co.jp

*2 産業技術総合研究所。

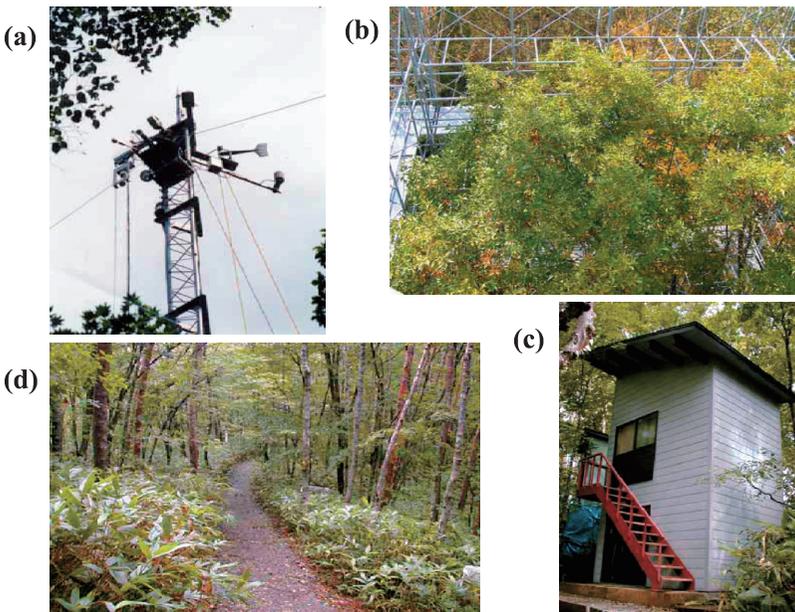
*3 国立環境研究所。

—2012年11月6日受領—

—2013年2月15日受理—



第1図 観測サイト、高山の位置（東経137度25分，北緯38度08分，岐阜県高山市）とその眺望。（海拔高度：1420 m，冷温帯落葉広葉樹林：カンパ類，ミズナラが卓越，林床にササ。気象条件：冬季の多雪／夏季の高温多湿，年平均気温7°C，年降水量2400 mm，冬季1-2 mの積雪）



第2図 (a)フラックス観測タワー（高さ：25m），(b)樹冠部へのアクセスタワー（檜タワー），(c)観測キャビンの外観，(d)林床の様子。

生態学的調査の継続

これらの期別の観測の展開を念頭に置きながら，次節以降で高山観測の20年間を紹介する。なお，2003年10月に10周年記念のワークショップが産業技術総合研究所と岐阜大学流域圏科学研究センターの共同で行われた。このワークショップでは高山観測サイトでの10年の観測結果を報告するとともに，日本から中国，韓国に広がり始めた森林でのCO₂フラックス観測サイトのグループをゲストとして迎え，各国のフラックス観測の概要，各サイトでのデータの紹介とその成果をアジア全体の炭素収支の解析にどのように役立てるかについて検討を行った（Yamamoto and Koizumi 2005；Yu *et al.* 2006；Kim *et al.* 2006）。このワークショップで発表された内容は13の論文にまとめられ，*Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 134, Issues 1-4, 2005)の特集号に掲載された（Kondo 2003；Saigusa *et al.* 2006）。また，高山サイトの観測の特徴は当初から陸域生態系の研究者と大気の研究が共同して観測サイトを立ち上げ，連携して長期にわたる調査・研究を進めることにあったが，本ワークショップでは参加グループの共同観測の継続と10年後の2013年に20周年記念のワークショップの開催

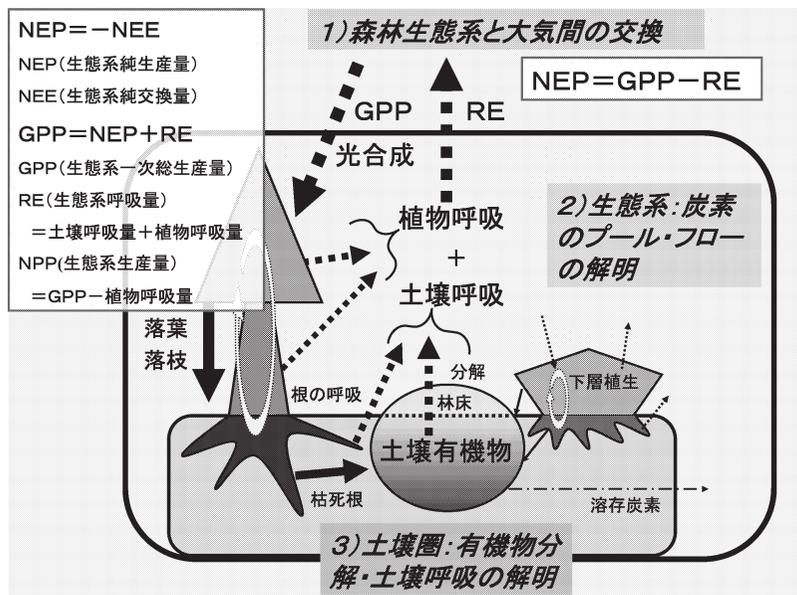
を確認している。このように、異なる分野の研究者が同一サイトで観測し、ワークショップを継続的に開催してゆくことは異なる視点からの研究、新しい連携の構築に役立っている。

2003年のワークショップ以降、地球温暖化の進行の中で世界各地での異常気象の多発、冬季の温暖化、高緯度地域での氷河や海水の縮退などが今日的問題となっている。さらに気候変動が陸域植生環境、海洋植生環境にどのような影響を与え、それが炭素循環にどのように関係しているかが問われている。とりわけ、気候変動の中での陸域生態系での炭素循環の長期的変動の予測・評価技術の確立が要請されている。そのため

には炭素循環を精確に記述する数値モデルの開発が必要であるが、数値モデルの精度を客観的に確認することが出来る長期の炭素収支観測データが不可欠である。ここでは、日本の代表的な落葉広葉樹林である高山での地上観測長期データの解析とその意義を中心に述べるが、来るべき20周年記念のワークショップにおいては、さらにリモートセンシング、陸域生態系モデルの解析結果も含めた総合的討論を期待したい。

2. 森林生態系での気象、CO₂濃度、フラックス観測と植物生理学的な調査との共同

渦相関法は植物群落を含む地表と大気間の物質のやり取りを直接測定する手法として開発された。植物群落を十分に超える高さをもつ気象観測用のタワーを建て、その上で風速、気温、CO₂やH₂Oなどの気体の濃度を毎秒10回程度の高頻度で測定し、風速の変動と気体濃度や気温の変動の相関関係を調べることにより、単位時間・単位面積あたりの気体や熱の移動量(フラックス)を算出する。この方法では平坦様な地表面の仮定の下にタワー上の測定高度における森林生態系と大気の間で交換されるCO₂の鉛直方向の交



第3図 森林生態系をめぐるCO₂の大気との出入りと生態系内部での炭素のフロー、調査の3つの項目：1) フラックス観測（森林生態系と大気間のCO₂交換）、2) 生態学的調査（生態系での炭素のプールとフローの解明）、3) 土壌圏調査（土壌圏有機物分解と土壌呼吸の解明）。（環境省2006）

換量すなわちCO₂フラックス (FCO₂) を詳細に30分から1時間間隔の高時間分解能で連続観測できる。

フラックス連続観測の開始と合わせて森林生態系での植物生理学的な調査、土壌呼吸量の調査も行われている。個々の葉や樹木の光合成・呼吸については植物生理学的な面から詳細に調べられ、個葉や樹木の個体レベルでのCO₂と水の交換モデルが開発されている。これらの調査・観測結果を合わせることにより、森林生態系レベルでの土壌微生物活動を含めたCO₂交換過程、交換量の日変化、季節変化の要因が総合的に解明される（第3図参照）。ここで第3図に示す森林生態系の炭素収支諸パラメータの関係についてまとめて説明をしておく。まず森林生態系の光合成による生態系一次総生産量 (GPP) は植物に取り込まれ植物生体 (炭素) の増加となり、生態系からは植物地上部の呼吸としてのCO₂の大気への放出がある。また、土壌面からは植物根の呼吸および土壌有機物の分解によるCO₂の大気への放出がある。これら植物呼吸と土壌呼吸の和が生態系呼吸量 (RE) となる。このGPPとREの差が森林生態系の取り込む炭素の正味量となるが、これを生態系純生産量 (NEP = GPP - RE) と

いう。また、大気側から見て生態系からネットとして取り込む CO_2 量を生態系純交換量 (NEE) と呼び、雨水による系外流出などが小さいとして無視すると NEE は $-NEP$ に概略等しい。なお、GPP から植物呼吸量を差し引くと生態系生産量 (NPP) が得られる。

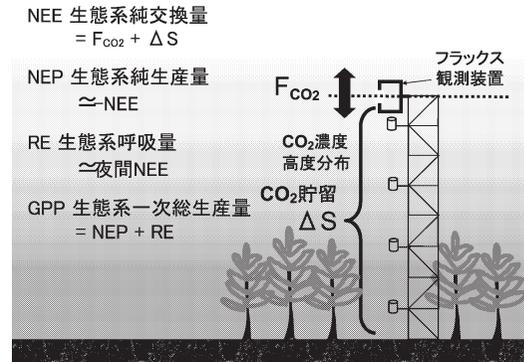
2.1 タワーフラックス観測による二酸化炭素、水蒸気、熱フラックスの検証と評価

渦相関法による各種物質のフラックス (交換量) 観測は裸地面や草地、農耕地などにすでに適用されており、有効な手段であることがすでに確認されているが (Ohtaki 1985)、観測期間が初期は限定的であった。なお、平坦地での渦相関法による CO_2 フラックス (F_{CO_2}) の測定値の誤差は10%程度であるといわれている (宮田 2005, 参照)。高山サイトでは1993年10月に超音波風速温度計、赤外線二酸化炭素・水蒸気測定計を設置して、渦相関法によるフラックス観測を森林生態系に適用した先駆的な事例であった (第4図)。

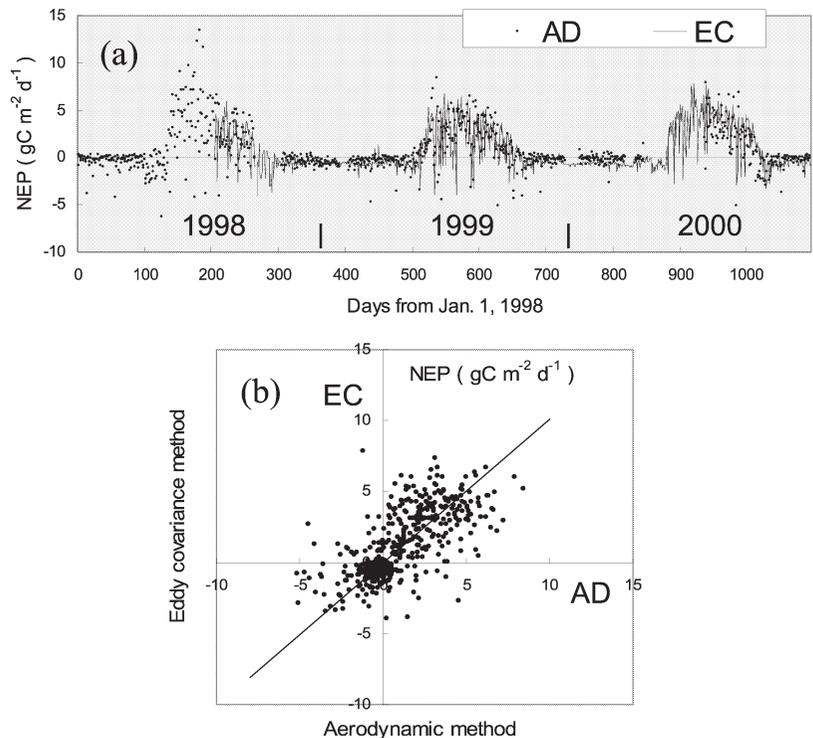
第4図に示すように、 CO_2 フラックスは頂部に取りつけた超音波風速温度計と赤外線分析計による風の乱れと CO_2 濃度変動を用いて渦相関法により求める。さらに、タワー数高度において CO_2 濃度、気温を測っている。なお、生態系純交換量 NEE はタワー頂部の CO_2 フラックスと CO_2 濃度高度分布から求めた CO_2 貯留量の時間変化 (ΔS) の和として計算される。

フラックス観測は当初から長期連続観測を行うことを目指していたが、測定機器の作動が安定的でなく、チェック、修理が欠かせず、観測は断続的になった。そこで、タワー諸高度での CO_2 濃度の観測値を用いて、従来の CO_2 平均濃度の高度分布と拡散係数から求める傾度法によるフ

ラックスの解析も行った。両者の観測は並行して補完的に行われ、渦相関法による結果は傾度法の結果と比較された (第5図)。その後、 CO_2 、水蒸気変動などの赤外線による高速の計測技術、測器の改良が進み、



第4図 渦相関法による CO_2 フラックスの観測と CO_2 濃度分布の調査、なお測定方法などの詳細については本文に記載されている。



第5図 CO_2 フラックスの測定方法の比較: (a)傾度法 (AD) と渦相関法 (EC) の測定結果の季節変化, (b)傾度法と渦相関法の相関関係 (傾き=1.01, 切片=-0.01, $r^2=0.51$). (Saigusa *et al.* 2005)

渦相関法による安定的な CO₂、水蒸気、熱フラックスの連続観測が可能となった。

しかしながら、複雑地形上の森林生態系での渦相関法による測定の事例は少なく、誤差の大きさ、特性の評価が不可欠であった。そこで従来方法である傾度法によるフラックス、CO₂濃度高度分布の時間変動、風向による結果の差異などを合わせて解析して、高山での渦相関法観測の問題点、誤差の検討を行っている (Saigusa *et al.* 2005)。また、夜間の弱風時に出現する安定大気条件下ではタワーのトップでの渦相関法によるフラックス観測は森林と大気間のフラックスを代表していない可能性が高いので不適切である。これを明らかにするためには、タワーの高度より低い下層での高濃度 CO₂気塊の地形に沿っての流出量の検討が必要であるがその定量的評価は難しい。そこで、このような弱風安定大気での観測結果は土壌中の有機物分解に作用する気温などの条件が同一な有風時の測定値で置換する方法などが取られている。このような適切な誤差処理を行わないと、高山のような複雑地形の炭素吸収量は年間積算値で数十%程度過大評価になると考えられる。第6図にこのようにして求めた1999年–2009年間の日積算のNEPと日平均気温の連続観測の結果を示す。

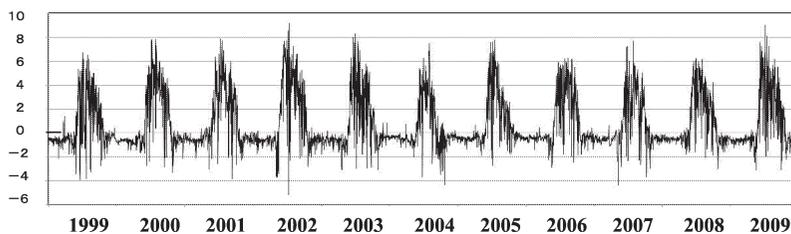
また、1994年より空気のプロスカンプリングを継続して行っており、高山における CO₂濃度、CO₂の炭

素と酸素同位体の日内、季節変動、さらに長期トレンドと経年増加率の変動分析が行われている (Mura-yama *et al.* 2005, 2010)。第7図にその解析の結果を示す。洋上などのバックグラウンド大気と比べてデータにばらつきが見られるものの、生物活動の季節変化と人為起源の CO₂放出を反映して、CO₂濃度は初春に最高、晩夏に最低濃度を示す顕著な季節変化を伴いながら、経年増加している。ここで CO₂濃度は濃度が比較的安定し広範囲の値を代表する、森林上の日中の観測データを用いた日平均値から求めた。この期間の平均的な季節変化の振幅は16 ppm、年増加率は1.9 ppm yr⁻¹であり、同緯度帯のバックグラウンド大気と比べて、生物活動の影響を強く受けるため振幅は5 ppm程度大きい。年増加率は近年の全球平均値とほぼ一致していた。一方、CO₂の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) の変動は、光合成時に¹²CO₂が優先的に取り込まれること、化石燃料は生物起源であることを反映し、CO₂濃度と逆相関になっている。年々変動について見てみると、例えば長梅雨であった2003年は、夏季の CO₂濃度減少、 $\delta^{13}\text{C}$ 増加が抑えられて季節変化の振幅が他の年より小さくなっている。また ENSO イベントに伴う全球規模の気候変動による炭素収支の不均衡を反映して、エル・ニーニョが起きた直後の1998、2002–2003年に CO₂濃度の経年増加、 $\delta^{13}\text{C}$ の経年減少が顕著になっている。これまでの長期観測を

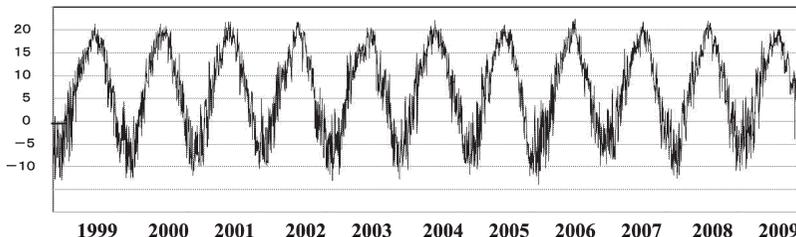
通して以上のような結果が得られつつあるが、気候変動に伴うアジアモンスーン域の陸域生態系への影響を明らかにするためには、アジア地域における観測網の展開とさらなるデータの蓄積が必要である。

高山では、このような大気側での測定の誤差の見積もり、解析結果とその評価などが森林生態系の観測グループとの共同で行われており、樹木の成長などの調査を行うバイオマス調査、土壌中炭素の観測などから算出される森林生態系の炭素収支との比較検討を実施してきた (Ohtsuka *et al.*

(a) NEP (gC/m²/day)



(b) 気温 (°C)



第6図 (a)高山におけるNEP (生態系純生産量)、(b)気温の長期年々変動 (1999年–2009年)。

2005). その結果の詳細は文献を参照して欲しいが、高山の結果では渦相関法による生態系純生産量 NEP はやや過大評価であることが確かめられている。

2.2 林内での植物光合成の調査, 土壌フラックスの日内変化, 季節変化の測定

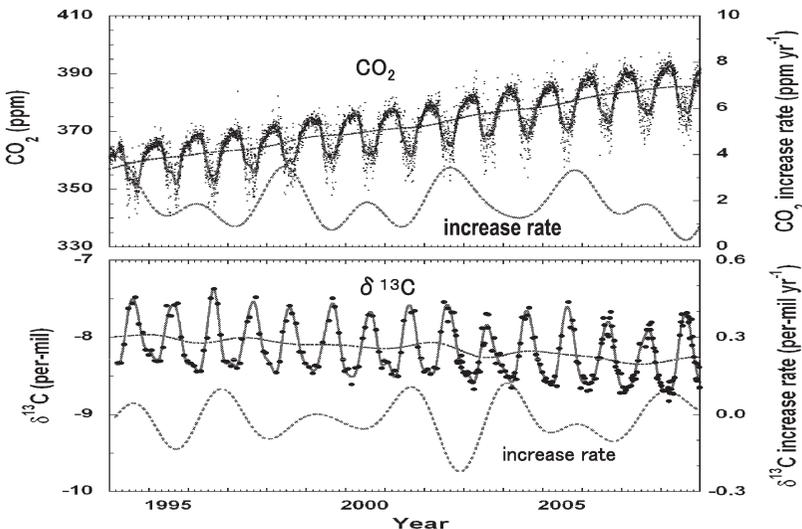
高山では CO_2 フラックスや森林生態系の生産量, 呼吸量などの環境要因との関連を知り, また炭素収支のモデリングを行うため, 主要樹種ならびに林床植生の光合成速度の光合成有効放射量, 温度, CO_2 濃度などに対する依存性, ならびに呼吸速度の温度依存性を野外環境で調べている (Muraoka and Koizumi 2005). これらの野外測定は携帯型のガス交換測定システムにより可能であり, 同時に蒸散速度と気孔コンダクタンスの測定もできる. これらの測定結果と環境要因の測定とを合わせて解析することにより, 個葉や小枝レベルでの光合成活動が分かり, 森林生態系の炭素収支のプール (炭素貯留量) とフロー (炭素の流れ) を記述するコンパートメントモデルとの連携, フラックス観測結果との比較が可能となる (第3図参照).

また, 土壌中の有機物の分解, 植生の根呼吸による土壌炭素フラックスは森林生態系のコンパートメントモデルの下層境界条件と土壌の炭素収支を規定する重

要なコンポーネントであり, その時空間変動は土壌炭素固定 (sequestration) に大きな影響を与える. そのため, 高山においても土壌から植生内大気へ放出される CO_2 量の時空間変動を測定し, それを規定する環境要因との関係の解明が進められてきた. 長期間の土壌炭素フラックスは温度や土壌水分などの環境要因との関係式から推定されるが, 渦相関法によって取得される CO_2 フラックスと比較する上で, 炭素収支の日内変化を表すことが出来る時間分解能の高いデータを得る必要がある. その要求に応えるために, 高山では土壌炭素フラックスの測定において, 長期連続測定が可能で, 環境変化が軽微な多点同時測定手法の開発が進められてきた (Mariko *et al.* 2000; 木部・鞠子 2004). これらの測定から植物呼吸量, 土壌呼吸量が渦相関法によるフラックスと合わせて調べられている (Mo *et al.* 2005).

さらに, 後節で紹介する生態学的手法によって, 炭素プールの基本となる植生現存量や光合成による総生産量が調べられる. 生態学的手法による調査データの時間分解能は季節あるいは年単位より長く, 地上部植生量, 地下部植生量, 落枝・落葉量, 地上枯死量, 土壌炭素量などを季節 (数ヶ月) から年単位で解析することが可能である. それに対して渦相関法は前述のように, 時間単位の分解能での解析が可能であるが,

夜間等の安定大気状態での測定誤差, 複雑地形に起因する誤差などのために, 長期積算値においては積算誤差が問題となる. このような両者の特性を考慮しつつ, 渦相関法と生態学的方法による生態系純生産量 (NEP) の相互比較を実施し, 両手法による炭素収支を年単位で比較し, 相互検証をしている. この検証により, 渦相関法において問題となる上記の誤差が年単位の積算でどの程度であるかの評価などが可能となる.



第7図 高山における日中森林上における CO_2 濃度 (上図), CO_2 の炭素同位体 (下図) の観測結果: 図には各データへのベストフィットカーブ (実線), それぞれの長期変動および年増加率の変動 (破線) も示されている (Murayama *et al.* 2010).

3. 高山における炭素収支の多分野の観測と解析の更なる展開

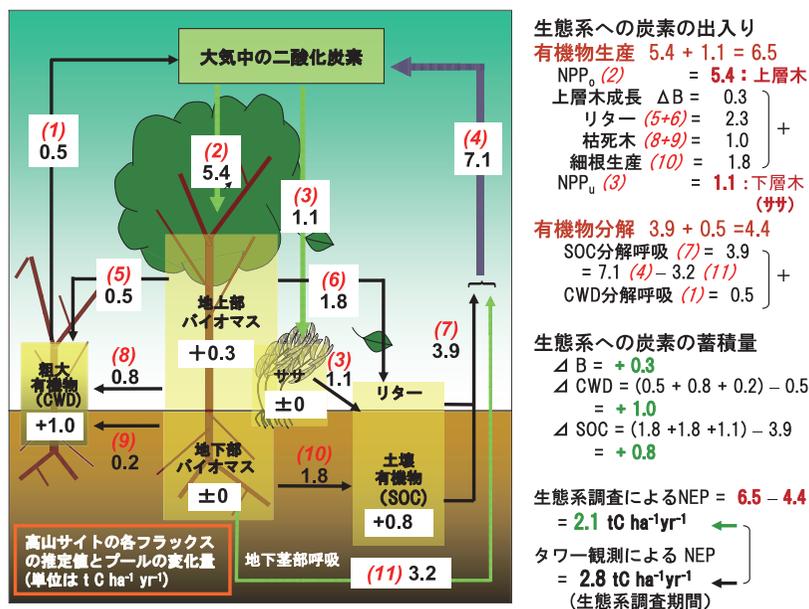
3.1 大気/生態系/土壤圏間の炭素フローの解明

前述したように同一観測サイトにおいて、大気/生態系/土壤圏間の炭素フローの解析をこれらに関連する研究分野の研究者が連携して長期的に行い、生態学的手法による炭素収支、植生現存量変動の解析と合わせて、陸域生態系を構成する炭素プールの貯蔵量とプール間のフローの長期的変化を把握することが可能となる。高山サイトでは他分野との更なる共同調査を目指して、1998年にタワーを含む1 haの永久コドラートを設置し、現在まで生態学的調査を岐阜大学のグループが中心となり継続している。本調査から高山サイトでの生産量(NPP)は樹木生産量(NPP_o)とササ生産量(NPP_u)に分けられる。NPP_oは植生現存量の増加量(ΔB_o)とリター(落枝・落葉)量、枯死木量、細根生産量の合計から算出した。有機物分解速度に対応する土壤呼吸量(SR)はOpen-flow IRGA法によって毎月1度測定し、チャンパー付近の地温の連続測定からSRと地温の相関関係を用いて年間量を推定した。なお、土壤呼吸の測定に際しては根呼吸の影響を木の根切りなどの処置を施して行い、除去する。高山サイトでの炭素の出入り：大気、樹木、土壤各プール間の炭素のフローの関係を第8図に示す(Ohtsuka *et al.* 2005; 大塚 2012)。本サイトにおける植生現存量調査による炭素取り込み量：樹木5.4 tC ha⁻¹ yr⁻¹ (以下同じ単位)とクマイザサ1.1の総計6.5、炭素放出量：土壤有機物分解3.9と枯死木分解0.5の総計4.4となっており、正味の炭素吸収量は2.1 (=6.5-4.4) tC ha⁻¹ yr⁻¹となっている。一方渦相関法による生態系純交換量(NEE)から求めた炭素吸収量NEP (= -NEE)は年々の変動はあるが、

2.8 tC ha⁻¹ yr⁻¹ (生態学的調査の5年間の平均)となっており、比較的良好な一致が得られている。また、NPP_oとSRの年変動とNEEの年変動を比較すると、SRは変動があまり無いが、NPP_oとNEEは変動が相似で非常に相関が高かった。これは高山サイトでは有機物分解速度ではなく、NPP_oがNEEの変動を決定していることを意味している。

3.2 炭素収支の点から面への広域評価

さらに高山サイトでは炭素収支広域評価を目指して、渦相関法によるフラックス測定、土壤圏の炭素収支測定、生態学的な調査に加えてリモートセンシンググループの参入が必要となった。そこで2001年の冬に樹冠アクセスタワーが建設され、筑波大学、国立環境研究所などのリモートセンシング調査グループを加えた森林生態系バイオマス/炭素収支の多分野観測の更なる強化が図られ、炭素収支の衛星観測による面的評価と地上観測/モデルとの連携解析が開始された(西田・村岡 2006; Sasai *et al.* 2005)。衛星観測を広域の陸域植生変動や炭素循環研究に活用するにあたって



第8図 高山：落葉広葉樹林における生態学的手法による炭素のフローとストックの解析結果を示し、矢印は年間のフラックス (tC ha⁻¹ yr⁻¹)、各プール中の数値はフラックスの収支から計算したプールの年間変化量 (tC ha⁻¹ yr⁻¹) (大塚 (2012) より改変引用)。この事例では生態学な調査でのNEP (生態系純生産量)は2.1 tC ha⁻¹ yr⁻¹であるが、タワー観測によるNEPは2.8 tC ha⁻¹ yr⁻¹ (生態学的調査期間1999年から2003年の5年間の平均)となっている。

は、その植生活動の広域把握という利点を最大限に活かし、定量的でないという欠点は他の手法で補完するという戦略が重要である。たとえば、衛星観測データによる植生活動の広域変動解析と地上観測による長期炭素収支変動データ解析の関係を調べて結果を面的に広げる。解析の手順としては、地上の観測サイト毎にその周辺での炭素収支と環境要因の“点”の調査により、炭素収支と環境要因の関係をパラメータモデル化する。次に、衛星観測データの広域性（広域の情報が面的に得られること）の特性を生かして、炭素収支に関係する環境要因、具体的には植生活動開始・展葉時期、葉面積指数（LAI）、光合成有効放射（PAR）などを“面”的に解明する。この広域調査結果と地上観測によるパラメータモデルとを連携解析し、広域の炭素収支を評価する。さらに、過去の衛星観測データを用いて、過去の炭素収支の推量ができる。このように空間的、時間的に広げた総合的解析をすることにより、点の炭素収支と面の炭素収支の連携、広域炭素収支の変遷の解明が可能となる。

3.3 陸域生態系モデルと地上観測／衛星観測との連携

長期観測データ（地上観測と衛星観測）の集積を基礎に炭素プールのストック、フローを定量的に解析し、陸域生態系モデルとその素過程モデルのパラメータを選定し、数値を決める（伊藤 2002；Ito *et al.* 2005）。具体的には、地上観測からは観測サイト情報・データ（タワー観測、生態系調査、土壌圏調査）の供給、炭素収支と環境要因の相関解析によるパラメータモデルの情報が与えられる。また、衛星観測からはモデルの面的計算に必要な植生・環境要因の面情報を取り込むことが出来る。これらの情報から陸域生態系モデルの炭素収支の素過程の構成、素過程モデルのパラメータの検討を経て、炭素収支の時空間変動モデルが構築される。

陸域生態系モデルはフィールド観測や衛星観測で得られたデータを統合し、炭素循環の全体的描像を示す有力な手立てである。また、直接観測が困難なプロセスについて、全体のバランスの中で矛盾しない一貫性のある定量的推定値を与える。一方、モデルのパラメータを地上観測と衛星観測によって得られた炭素収支の現地測定結果に基づき検証し、確認されたモデルを時間・空間的に拡張適用することにより、100 km程度の地域スケールの炭素収支の面的評価が可能とな

る。さらに、検証済みの高度化されたモデルによって環境変動や人為活動に対する生態系と炭素収支の応答を評価し、また、炭素収支の過去の再現と将来の予測を行うことが出来る。

3.4 統合的なシステムアプローチの提案

地上のフラックス観測、生態学的調査、土壌圏調査を組み合わせた炭素収支の総合的解析とリモートセンシング手法、陸域生態系モデルの解析を統合する「システムアプローチ手法」を高山サイトでの著者らの経験、環境省ワークショップ（環境省 2006）での議論にもとづき提案したい。

システムアプローチでは、地上・リモートセンシング観測研究とモデル研究が相互に有機的に連携して、広域炭素動態の時空間変動の把握が行われる。しかし、アジア地域では多分野の共同観測が行われているシステムアプローチの可能な観測サイトはまだ限定されている。今後、アジアの代表的な陸域生態系タイプ毎に強化観測サイトを選定し、それらの各種陸域生態系へのシステムアプローチ実施の拡大により、アジア地域における広域炭素収支の推定精度の向上がもたらされる。また、このような多分野の共同研究の観測サイトは若手研究者の観測ノウハウ習得の場として、またモデル研究者との連携の場として重要な役割を果たしてきている。

4. 東アジアにおけるフラックス野外観測ネットワークへの発展

前述の様に1990年代に入り、CO₂フラックスと気象など関連環境条件の地上長期観測が世界各地で開始・継続されている。その観測のネットワーク化が欧州（1996年；EUROFLUX）、米国（1997年；AmeriFlux）で進められ、地域のネットワークを束ねる世界規模のネットワーク（1998年；FLUXNET）が設立された（Baldocchi *et al.* 2001）。アジアでは高山での観測の経験などを活かして、日本国内でのフラックス観測サイトの立ち上げ、さらに日本との連携により、韓国、中国でフラックス観測が開始された。1999年にはAsiaFluxが組織され、韓国や中国、日本の国内ネットワーク（KoFlux, ChinaFLUX, JapanFlux）と協力してアジアの観測サイトのネットワーク化が進められている（Yamamoto *et al.* 2005；AsiaFlux (booklet) 2006）。さらにAsiaFluxではワークショップを2000年に開始して以来、2012年まで

に11回行っており、AsiaFlux グループの観測手法の検討と観測結果の報告と議論が活発にされている。さらに、AsiaFlux の活動などを基盤として、炭素収支に関連した、環境省地球環境総合推進費による各種の研究プロジェクト、日本学術振興会による日中韓フォーサイト事業によるネットワーク形成・強化のプロジェクトなどが行われてきている。

現在、世界の諸研究機関・諸大学により、500サイトを越える森林を含む陸域生態系でフラックスの長期モニタリングを行っており、炭素収支が調べられている (Falge *et al.* 2002; Yamamoto *et al.* 2005; Baldocchi *et al.* 2005; Hirata *et al.* 2008; Saigusa *et al.* 2008など)。また、多くの観測サイトで前述の植物体現存量調査、土壌圏調査などを同時に行い、生態学的手法によって推定した炭素収支 (炭素プールとフロー) と渦相関法による CO₂ フラックス連続観測の結果とのクロスチェックがされて、炭素収支推定誤差の定量的な解析が行われている。これらのデータとその解析結果を、FLUXNET, AsiaFlux などの相互に利用出来るネットワークを通して共有し、世界の関連分野の研究者が地域からグローバルスケールでの陸域生態系炭素収支のより正確な定量的把握を目指している。

5. おわりに

世界の陸域生態系炭素収支研究ネットワークを通して、その成果を共有する中で、炭素収支観測研究で重点を置くべき課題、これからめざす方向を考えてみよう。

まず、これまで約20年間にわたり整備してきたアジアでのフラックス観測ネットワークの機能を強化し、観測データの集積と共有、品質管理の向上をさらに図る。同時に、世界とアジアの炭素収支データを総合的に利用して陸域生態系の機能を解明するための研究を進展させることが重要である。そのためには、アジアの陸域炭素収支に関する長期データの集積と品質管理を統合的に行うことを可能にするしくみ (データセンター) の強化が必要となる。

さらに、衛星観測や地上観測に基づく全地球観測データの集積により地球規模の CO₂ 収支、濃度変動の定量的評価が一層重要となる。全地球的視点から地球規模の観測データの流通促進を図る取り組みに「全地球観測システム (GEOSS)」がある。国内では、地球観測に係わる各分野の観測データを収集、蓄積、

統合、解析するために「データ統合・解析システム (DIAS)」が組織されており、現在は各種観測データのメタデータの共有を推進している。

このような GEOSS, DIAS の取り組みにおいて、全球規模での地上観測と衛星観測データ解析の連携、数値モデルの精度の評価がとりわけ重要になっている。全球炭素収支の総合的解析において、長期観測データの蓄積の中で、プロセスの解明—数値モデルの確立—炭素収支の予測評価を系統的に進めることが必要である。また、過去の炭素収支の観測データにより計算精度が確認された数値モデルによる、将来予測と対策技術の評価が不可欠である。森林生態系についても、その炭素固定能力の見積もりと対策技術としての森林の利用が定量的に評価される必要がある。すなわち、気候変動の中で森林生態系の炭素固定能力がどのように変化するかを見積もり、これらの結果を踏まえた森林生態系の炭素固定能力の維持管理、森林機能の利用計画の検討が重要である。

高山での20年間の経験は、上述の GEOSS の枠組みに連携させて、全地球規模での多分野共同の観測が炭素収支の総合的解明のために不可欠であることを示している。さらに、高山は日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER) の中核的サイトであり、森林生態系での長期的研究・教育の実践の場としての重要性も持っている。これらのことを最後に確認し、高山の長期共同観測の更なる発展を願いたい。

謝 辞

高山での炭素収支の調査・観測は西村 格・元岐阜大学教授、村岡裕由・大塚俊之・車戸憲二様はじめ岐阜大学流域圏科学研究センターの皆様、平田竜一・国環研、松浦陽次郎・森林総研、奈佐原 (西田) 顕郎・筑波大学、小泉 博・早稲田大学、鞠子 茂・法政大学の皆様、及川武久・筑波大学名誉教授はじめ環境省地球環境研究総合推進費高山プロジェクトの関係者の皆様、これら多くの人々の協力を得て、開始・推進したものです。ここに記して感謝の意を表したいと思います。

略語一覧

DIAS : Data Integration and Analysis System

ENSO : El Niño - Southern Oscillation

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEOSS : Global Earth Observation System of Systems
 GPP : Gross Primary Production
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
 JaLTER : Japan Long Term Ecological Research Network
 LAI : Leaf Area Index
 NEE : Net Ecosystem Exchange
 NEP : Net Ecosystem Production
 NPP : Net Primary Production
 PAR : Photosynthetic Active Radiation
 RE : Ecosystem Respiration
 SR : Soil Respiration

参考文献

- AsiaFlux (booklet), 2006: A regional network for coordinating the tower-based carbon flux research with the atmospheric, oceanic, soil, and terrestrial water researches.
- 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: FLUXNET: 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.
- Baldocchi, D.D., T.A. Black, P.S. Curtis, E. Falge, J.D. Fuentes, A. Granier, L. Gu, A. Knohl, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, K. Wilson, S. Wofsy, L. Xu and S. Yamamoto, 2005: Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *Int. J. Biometeor.*, **49**, 377-387.
- 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. Meteorol.*, **113**, 3-19.
- Dixon, R.K., A.M. Solomon, S. Brown, R.A. Houghton, M.C. Trexler and J. Wisniewski, 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**, 185-190.
- Falge, E., D. Baldocchi, J. Tenhunen, M. Aubinet, P. Bakwin, P. Berbigier, C. Bernhofer, G. Burba, R. Clement and K.J. Davis, J.A. Elbers, A.H. Goldstein, A. Grelle, A. Granier, J. Gudmundsson, D. Hollinger, A.S. Kowalski, G. Katul, B.E. Law, Y. Malhi, T. Meyers, R.K. Monson, J.W. Munger, W. Oechel, K.T. Paw U, K. Pilegaard, Ü. Rannik, C. Rebmann, A. Suyker, R. Valentini, K. Wilson, S. Wofsy, 2002: Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agric. For. Meteorol.*, **113**, 53-74.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010: Global Forest Resources Assessment 2010. 340pp.
- 藤沼康実, 三枝信子, 平野高司, 2003: 温室効果ガスのモニタリングと森林フラックスの測定. *生物の科学遺伝別冊*, (17), 48-57.
- 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. Meteorol.*, **148**, 761-775.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 pp.
- 伊藤昭彦, 2002: 陸上生態系機能としての土壌有機炭素貯留とグローバル炭素循環. *日本生態学会誌*, **52**, 189-227.
- Ito, A., N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto, 2005: Modeling of gross and net carbon dioxide exchange over a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan: Analysis of seasonal and inter-annual change. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 122-134.
- 環境省, 2006: 環境省地球環境研究総合推進費戦略プロジェクトワークショップ「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」: システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態講演要旨集.
- 木部 剛, 鞠子 茂, 2004: 土壌呼吸の測定と炭素循環. *地球環境*, **9**, 203-212.
- Kim, J., D. Lee, J.Y. Hong, S.Y. Kang, S.J. Kim, S.K. Moon, J.H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.L. Lee and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecol. Res.*, **21**, 881-889.
- Kondo, H., 2003: Synthesis Workshop on the Carbon Budget in Asian Monitoring Network - The decennial anniversary of the observation at Takayama Site-. *AsiaFlux Newsl.*, (8), 3-4.

- Mariko, S., N. Nishimura, W. Mo, Y. Matsui, T. Kibe and H. Koizumi, 2000: Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool-temperate deciduous forest, Japan. *Ecol. Res.*, **15**, 363-372.
- 宮田 明, 2005: 水田の二酸化炭素とメタンのフラックスのモニタリング. 波多野隆介・犬伏和之編, 続・環境負荷を予測する, 博友社, 115-133.
- Mo, W., M. 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. Meteorol.*, **134**, 81-94.
- Muraoka, H. and H. Koizumi, 2005: Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest: Implication to the ecosystem carbon gain. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 39-59.
- Murayama, S., S. Yamamoto, N. Saigusa, H. Kondo and C. Takamura, 2005: Statistical analyses of inter-annual variations in the vertical profile of atmospheric CO₂ mixing ratio and carbon budget in a cool-temperate deciduous forest in Japan. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 17-26.
- Murayama, S., C. Takamura, S. Yamamoto, N. Saigusa, S. Morimoto, H. Kondo, T. Nakazawa, S. Aoki, T. Usami and M. Kondo, 2010: Seasonal variations of atmospheric CO₂, δ¹³C, and δ¹⁸O at a cool temperate deciduous forest in Japan: Influence of Asian monsoon. *J. Geophys. Res.*, **115**, D17304, doi: 10.1029/2009JD013626.
- 西田顕郎, 村岡裕由, 2006: 森林の葉面積指数 (LAI) の時系列観測と, それによる衛星推定 LAI の検証. 日本写真測量学会平成18年度年次学術講演会, 2006年7月, 横浜.
- Ohtaki, E., 1985: On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Bound.-Layer Meteorol.*, **32**, 25-37.
- 大塚俊之, 2012: 森林生態系の炭素循環: Takayama Forest での10年間で分かったことと, 分からなかったこと. *日本生態学会誌*, **62**, 31-44.
- 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. Meteorol.*, **134**, 27-38.
- 及川武久, 2002: 地球温暖化に対する陸上生態系の応答. *数理科学*, (470), 78-83.
- 林野庁, 2011: 森林・林業白書 (平成22年度), 162pp.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama and H. Kondo, 2005: Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 4-16.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, H. Muraoka and H. Koizumi, 2006: Special issue on the long-term carbon exchange at Takayama forest site, Japan. *AsiaFlux Newsl.*, (17), 14-15.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, R. Hirata, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, H. 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. Meteorol.*, **148**, 700-713.
- Sasai, T., K. Ichii, Y. Yamaguchi and R. Nemani, 2005: Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model "Biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data" (BEAMS). *J. Geophys. Res.*, **110**, G02014, doi:10.1029/2005JG000045.
- Valentini, R., G. Matteucci, A.J. Dolman, E.-D. Schulze, C. Rebmann, E.J. Moors, A. Granier, P. Gross, N.O. Jensen, K. Pilegaard, A. Lindroth, A. Grelle, C. Bernhofer, T. Grünwald, M. Aubinet, R. Ceulemans, A.S. Kowalski, T. Vesala, Ü. Rannik, P. Berbigier, D. Loustau, J. Guömundsson, H. Thorgeirsson, A. Ibrom, K. Morgenstern, R. Clement, J. Moncrieff, L. Montagnani, S. Minerbi and P.G. Jarvis, 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, **404**, 861-865.
- 山田和人, 邊見達志, 2003: 京都議定書と森林吸収源の問題. *生物の科学遺伝別冊*, (17), 17-25.
- Yamamoto, S. and H. Koizumi, 2005: Foreword: Long-term carbon exchange at Takayama site, a cool-temperate deciduous forest in Japan. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 1-4.
- 山本 晋, 村山昌平, 近藤裕昭, 1996: 森林と大気間の二酸化炭素フラックスの観測. *資源と環境*, **5**, 261-271.
- 山本 晋, 村山昌平, 三枝信子, 近藤裕昭, 西村 格, 1998: 森林生態系の二酸化炭素吸収・交換量についての一考察. *資源と環境*, **7**, 73-80.
- 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.
- Yamamoto, S., N. Saigusa, S. Murayama, M. Gamo, Y. Ohtani, Y. Kosugi and M. Tani, 2005: Synthetic analy-

sis of the CO₂ fluxes at various forests in East Asia. In: Omasa, K., I. Nouchi and L.J. DeKok (Eds.), *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*, Springer-Verlag, 215-225.

Yu, G.-R., X.-F. Wen, X.-M. Sun, B.D. Tanner, X. Lee and J.-Y. Chen, 2006: Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agric. For. Meteorol.*, 137, 125-137.

Research on the Carbon Cycle in the Forest Ecosystems
- Twenty Years Observation of the Carbon Exchange at Takayama Site
and Its Extension to the AsiaFlux Network -

Susumu YAMAMOTO*¹, Shouhei MURAYAMA*², Hiroaki KONDO*²,
and Nobuko SAIGUSA*³

*¹ (*Corresponding author*) *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan.*

E-mail: yamastk@yahoo.co.jp

*² *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.*

*³ *National Institute for Environmental Studies.*

(Received 6 November 2012; Accepted 15 February 2013)
