

長期観測による森林生態系の炭素収支と炭素固定プロセスの解明を目指して  
産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 元研究員 山本 晋  
(旧所属 資源環境技術総合研究所 大気環境研究室)

目 次

要 旨	(1)
1. はじめに	(1)
2. 岐阜県高山での炭素収支の観測	(3)
2.1 森林での CO <sub>2</sub> フラックス、気象観測の開始	
2.2 森林での植物生理・生態学的な炭素収支調査	
3. 高山における炭素固定プロセスの多分野の観測と解析の更なる展開	(9)
4. 東アジアにおけるフラックス野外観測ネットへの発展と世界の観測との連携	(11)
5. おわりに	(12)
謝 辞	(13)
参考文献	(13)
著者略歴	(16)

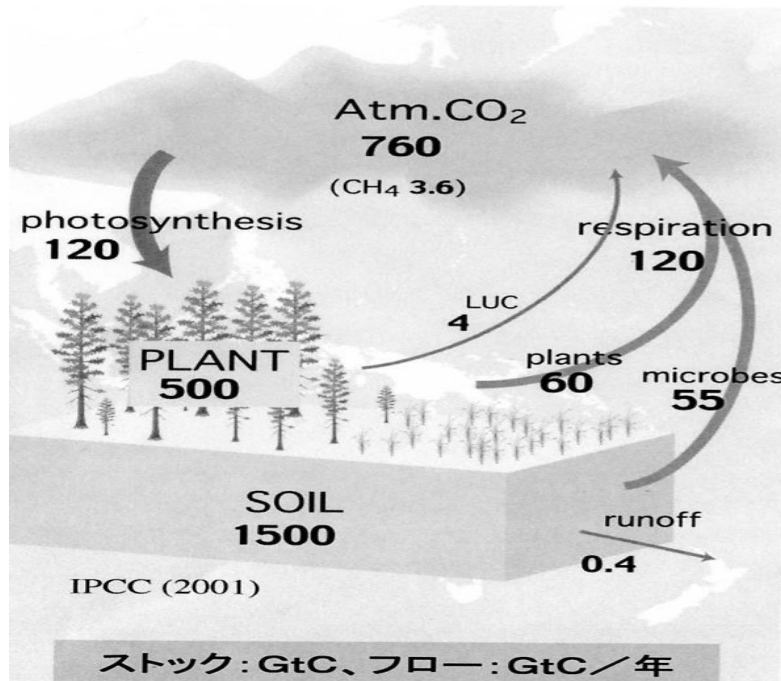
要 旨

地球上の炭素は大気圏、海洋、陸上植生、地圏という貯蔵庫に蓄積・存在している。また、炭素はこれらの貯蔵庫の間で気体、無機炭素、有機炭素と形を変えながら、出入り・循環している。化石燃料消費とセメント生産に伴う放出量、大気への残存量はかなり正確であるが、その他の交換量については±50%程度の誤差があるといわれていた。さらに、COP7で採択された京都議定書では森林に関して各締約国が温室効果ガス排出抑制・削減のために取るべき政策措置の一つとして、「持続可能な森林経営の推進」を位置づけた。2005年にこの京都議定書が発効したことを受けて、炭素吸収・固定における森林生態系の役割を定量的に計測・評価する手法の確立が緊要の課題となってきた。ここでは、森林生態系の炭素吸収量推定手法、吸収量の推定精度などの研究の到達点を踏まえて、植物圏、土壌圏を含む森林生態系の炭素固定量の野外調査による評価研究の流れを紹介する。

1. はじめに

地球上の炭素は大気圏、海洋、陸上植生、地圏という貯蔵庫に蓄積・存在している。また、炭素はこれらの貯蔵庫の間で気体、無機炭素、有機炭素と形を変えながら、出入り・循環している。1990年代においてこれらの圏間での正味の交換量(収支)は化石燃料消費とセメント生産で、炭素換算64億トンC、土地利用の変化で16億トンCの両者の合計80億トンCが年々大気に放出され、陸上植物生態系に26億トンC、海洋に22億トンCで合計48億トンCが年々大気から吸収されて、差し引き32億トンC(=80-48)が年々大気中に残留していることになっている。これらの数値は国連のIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)が調

査研究成果をまとめて、相互に矛盾の無いように調整したもので、化石燃料消費とセメント生産に伴う放出量、大気への残存量はかなり正確であるが、その他の交換量については±50%程度の誤差があるといわれていた。図一1に全球の陸域生態系での炭素循環プロセス、炭素移動量と大気・植生・土壌圏の炭素貯蔵量を示している。



図一1 陸域生態系での炭素循環プロセス、炭素移動量と大気・植生・土壌圏の炭素貯蔵量

さらに、COP7で1997年に採択された京都議定書では森林に関して各締約国が温室効果ガス排出抑制・削減のために取るべき政策措置の一つとして、「持続可能な森林経営の推進」を位置づけた。そして、削減目標達成の判定に当たって、1990年以降の新規植林（過去50年来森林でなかった土地への植林）・再植林（1990年以来一度も森林でなかった土地への植林）によって造成された森林が削減目標約束期間（2008-2012年）にCO<sub>2</sub>を吸収する分から森林減少（森林を他の用途に転換）による放出分を差し引いた値を削減目標に加味することが規定された。日本政府は2002年に策定した「地球温暖化対策大綱」で、日本の森林による炭素吸収量に関して、COP7で合意された森林吸収源利用の上限である1300万トンC（3.9%）の確保を目標とした。2005年2月にこの京都議定書がロシアの調印により発効したことを受けて、炭素吸収・固定における森林生態系の役割を定量的に計測・評価する手法の確立が緊要の課題となってきた。ここでは、森林生態系の炭素吸収量推定手法、吸収量の推定精度などの研究の到達点を踏まえて、樹木地上部・地下部、林床植生、土壌圏を含む森林生態系としてのCO<sub>2</sub>吸収量（固定量）の野外調査による評価研究の流れを紹介する。

岐阜県高山市での観測の20年間では、研究の成果を観測グループで共有し、さらに公開するために適時ワークショップを開催している。2003年10月に観測開始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 CO<sub>2</sub> 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, Koizumi : 2005、Yu 他 : 2006、Kim 他 : 2006 を参照)。また、高山サイトの観測の特徴は当初から森林生態系の研究者と大気研究者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。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, Issues1-4, 2005) の特集号に掲載された (近藤裕昭 : 2003、三枝信子他 : 2006 参照)。

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氷の縮退などが今日の問題となっている。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も問われてきた。とりわけ、気候変動の中での陸域植物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計算モデルの開発が必要であるが、計算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。2013 年での高山観測 20 周年記念のワークショップ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、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 20 年間 (1993 年—2012 年) の調査研究の成果の概要が紹介された。

ここでは、高山での観測、共同調査の進展と成果を軸にしなが、森林生態系での炭素動態の多方面からの解明のとりくみを紹介する。

## 2. 岐阜県高山での炭素収支の観測

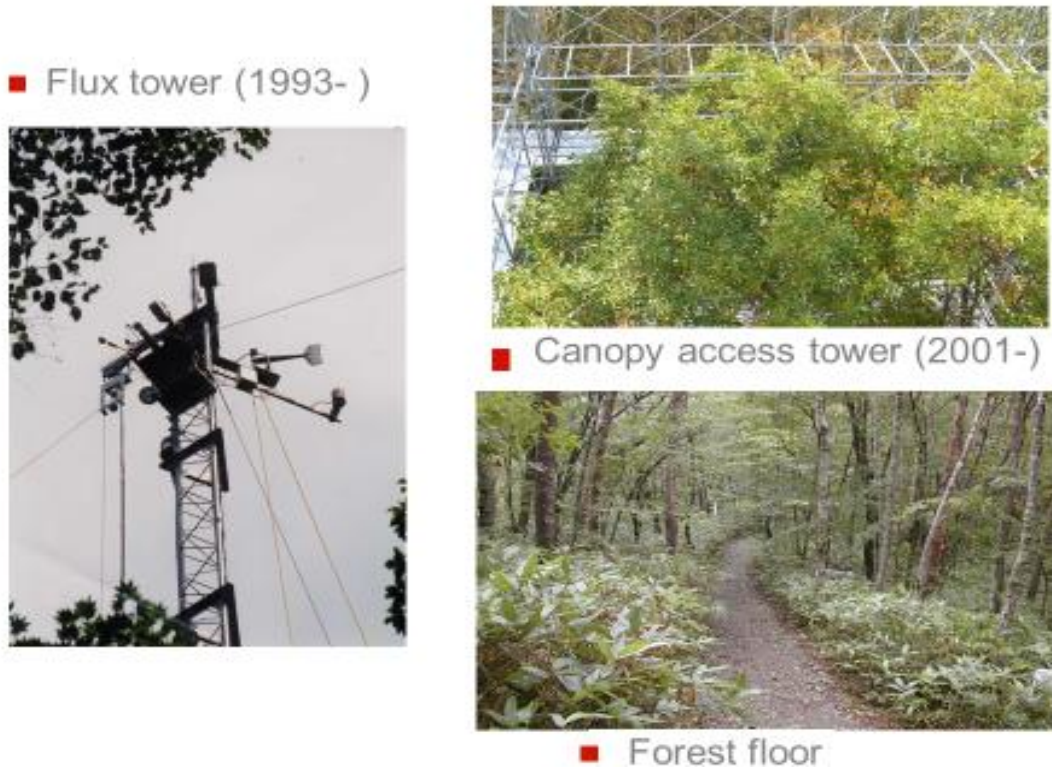
### 2.1 森林での CO<sub>2</sub> フラックス、気象観測の開始

将来の予測濃度が確定しない理由として二酸化炭素の大気と陸上植物圏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 他 : 1994、及川武久 : 2002、山田和久他 : 2003 など参照)。当時は大気中 CO<sub>2</sub> 濃度、CO<sub>2</sub> の炭素同位体の測定にもとづき、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 0.5—1.9 GtC/年 (1 GtC/年 = 10 億トン/年) といわれていたが未確定であった。そこで森林生態系の炭素循環における役割を、タワーを利用して直接的に解明する試みが世界的に開始されつつあった (山本晋他 : 1998、Yamamoto 他 : 1999、Valentini 他 : 2000、Baldocchi 他 : 2001、Curtis 他 : 2002、藤沼康実他 : 2003 など参照)。

このような状況に先駆けて、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 CO<sub>2</sub> 観測タワーが建設され、日射量、気温、風速などの気象条件、CO<sub>2</sub> 濃度、CO<sub>2</sub> 交換量、CO<sub>2</sub> 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 (図—2、図—3) (山本 晋他 : 1996 参照)。この観測サイトは日本の代表的樹木であるミズナラ・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。



図一2 観測サイト (東経 137 度 25 分、北緯 38 度 08 分、岐阜県高山市)の眺望  
 (海拔高度 : 1420m、冷温帯落葉広葉樹林 : カンバ類、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 2400mm、冬季 1-2m の積雪)。



図一3 フラックス観測タワー(高さ : 25 m)と樹冠部へのアクセスタワー(ジャングルジム)の外観



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、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>O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）、観測期間は限定的であった。高山サイトでの超音波風速温度計、赤外線二酸化炭素・水蒸気測定計を設置しての渦相関法によるフラックス長期観測は森林生態系に適用した先駆的な事例である(図-4参照)。

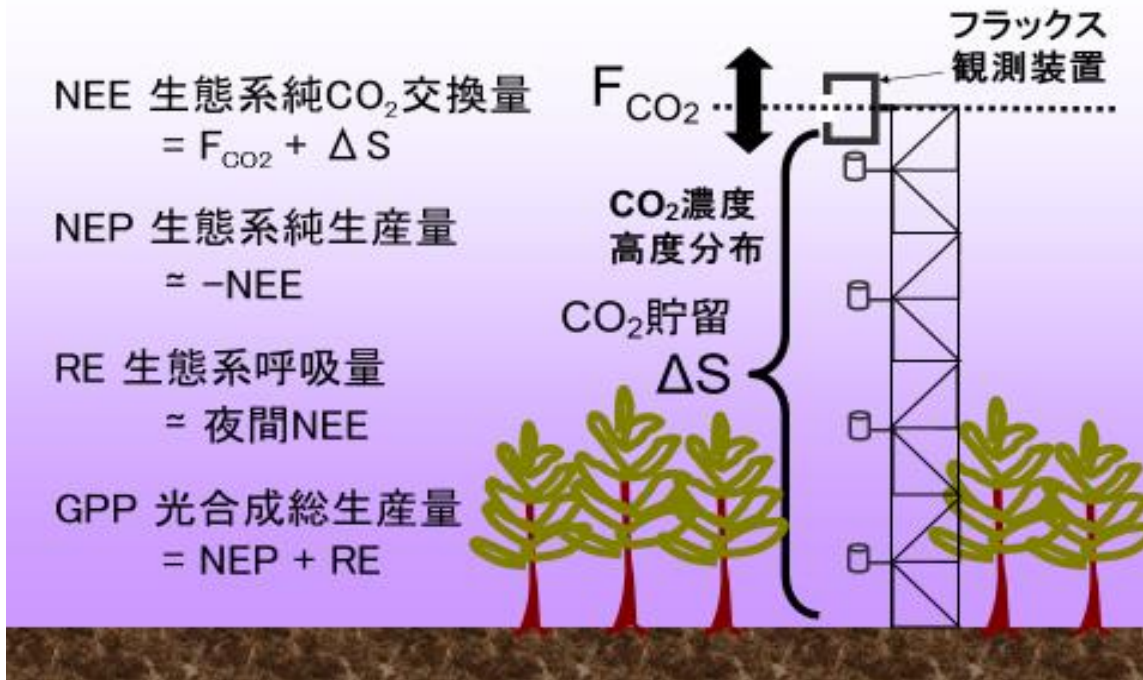
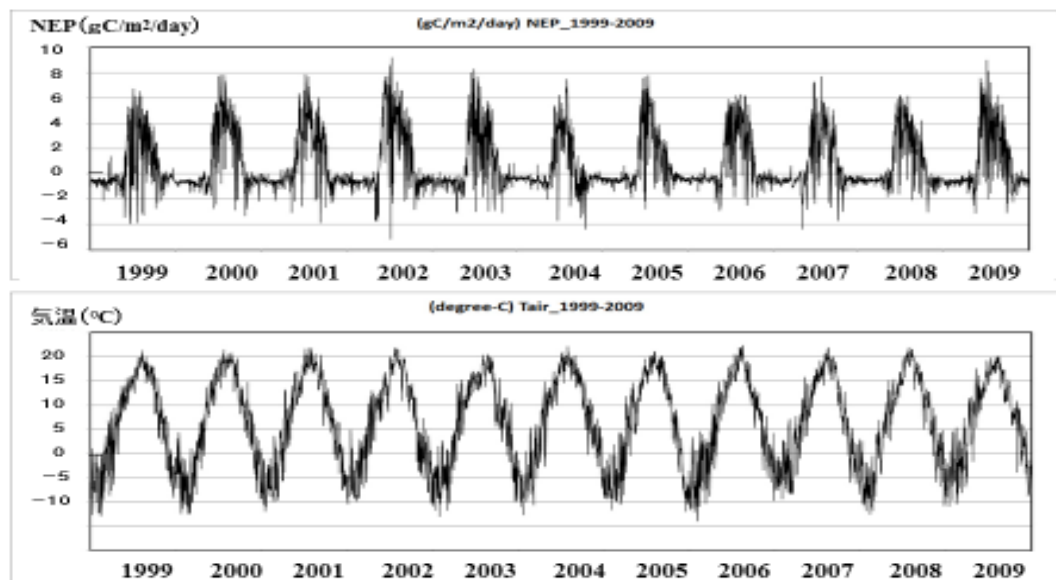


図-4 渦相関法によるCO<sub>2</sub>フラックスの観測とCO<sub>2</sub>濃度分布の調査

(環境省、2006；山本他、2013など参照)。

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、特性の評価が必要であった。そこでCO<sub>2</sub>濃度高度分布の時間変動、風向・風速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 他、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不適切で、タワーの高度より低い下層での高濃度CO<sub>2</sub>気塊の地形に沿っての流出量の検討が必要であるが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年間積算値で数10%程度過大評価になると考えられる。図-5にこのようにして求めた1999—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年より空気のプラスチックサンプリングを継続して行っており、高山におけるCO<sub>2</sub>濃度、CO<sub>2</sub>炭素と酸素の同位体、それらの日内、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(Murayama 他:2005、Murayama 他:2010)。



図一五 高山における NEP (生態系純生産量)、気温の長期年々変動 (1999 年—2009 年)  
(Murayama 他、2005；山本他、2013 参照)。

これらの諸量の変動は外洋のデータに比べて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  $\text{CO}_2$  放出を反映して、 $\text{CO}_2$  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、経年的に増加している。なお、ここでは  $\text{CO}_2$  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<sup>-1</sup> 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、 $\text{CO}_2$  の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の変動は、光合成時に  $^{12}\text{CO}_2$  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、 $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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、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、1998、2002-2003 年に  $\text{CO}_2$  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。高山では、このような大気側での測定の見積もり、解析結果とその評価などが森林生態系の調査グループとの共同で行われて、樹木の成長などの調査を行うバイオマス調査、土壌中炭素の調査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た (Ohtsuka 他、2005)。

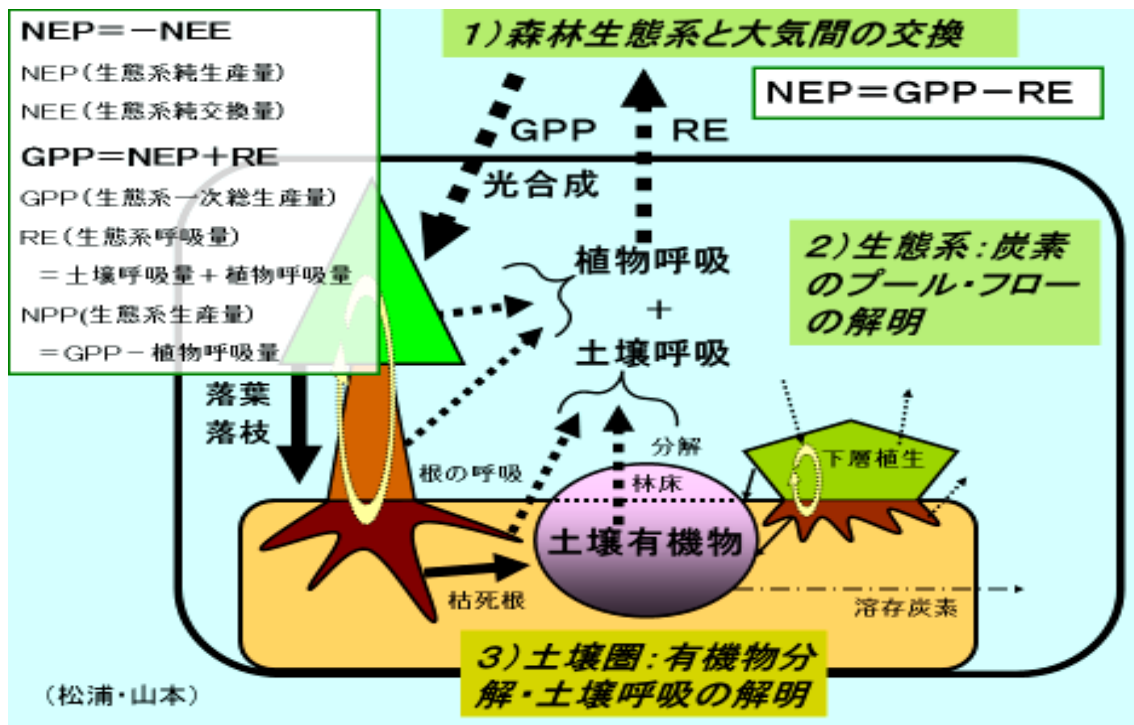
## 2.2 森林での植物生理・生態学的な炭素収支調査

前述のように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。この方法では平坦一様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二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の鉛直方向の交換量すなわち  $\text{CO}_2$  フラックス ( $\text{FCO}_2$ ) を詳細に連続観測できる。しかし、日本では森林は山岳地帯に広がっており、地形が平坦一様である

との仮定には疑問があり、フラックス観測とは異なる方法で炭素収支を推定して両者を比較し、それぞれの誤差要因、欠点をおぎなう必要がある。

そこで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、土壌呼吸量の調査が行われている。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二酸化炭素と水の交換モデルが開発されている。これらの調査・観測結果を比較することにより、森林生態系レベルでの土壌微生物活動を含めた CO<sub>2</sub> 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（図—4 および図—6 参照）。

ここで図—6 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 CO<sub>2</sub> の大気への放出がある。また、土壌面からは植物根からの呼吸および土壌有機物の分解による CO<sub>2</sub> 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正味の炭素量となるが、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<sub>2</sub> 量を生態系純交換量（NEE）と呼び、CO<sub>2</sub> フラックス観測から求められるが、NEE は -NEP に概略等しいことが期待される。



図—6 森林生態系の炭素収支諸パラメータの関係（環境省、2006 参照）

1) 森林生態系（樹木地上部・地下部、林床植生、土壌圏）の全体としてのCO<sub>2</sub>吸収（放出）量の評価

森林生態系（森林植物部と土壌を含む系）での炭素循環において、土壌圏はとりわけ重要な役割を果たしており、世界の森林生態系植物部の5000億トンCに対して、土壌にはその3倍の

15000億トンCの炭素が貯蔵されているといわれている（IPCC第3次レポート,2001）。現状は植林において、炭素固定能（バイオマスの増加）の評価に重点が置かれており、地上・土壌圏の有機物（枯れ枝、粗大枯死木などを含む）の分解・蓄積が十分に考慮されていない。従来からのバイオマス調査の結果と併せて、次の2）に述べる森林生態系での炭素収支の地上観測の結果に組み込み、土壌圏を含む生態系全体の正味としての炭素吸収量評価が必要である。

## 2) 森林生態系でのCO<sub>2</sub>吸収（放出）量の地上調査による評価

森林生態系への炭素固定量は光合成によるCO<sub>2</sub>吸収量（総生産量）から植物の呼吸、有機物の分解によるCO<sub>2</sub>放出量を差し引いた量（純生産量）となるが、一般的には林齢の増大とともに呼吸量が増え、一方総生産量は一定林齢でピークを迎え、その後は減少するために純生産量はしだいに小さくなる。一方、土壌に貯蔵される炭素量は落葉・落枝量と土壌有機物分解（土壌呼吸）の速度に依存しているが、その収支（土壌中への蓄積量）はまだ定量的に解明されていない。土壌を含む森林生態系への大気からのCO<sub>2</sub>吸収量は純生産量からさらに土壌呼吸量・枯死木の分解量を差し引いた値である。高山ではこの視点から土壌圏を含む各種森林生態系での炭素収支の各構成要素の季節変化、年々変化と気象・環境条件との関係を解明する地上調査が行われている。

### ① 生態学的方法による調査

樹木など活着している植物体の現存量、現存量の増加分と枯死した植物体の量を長期的に計測することによって植物体への一定期間における炭素固定量（あるいは放出量）を推定する方法である。この方法では森林に調査区を設けて、その中にある樹木の種類・直径・樹高等を一定の期間間隔で測定（毎木調査）して現存量とその増加分を推定する。この植物体現存量の変動（一定期間での固定量）から土壌微生物の働きによる分解量（土壌呼吸量）、枯死木の分解量を差し引いたものがその土壌も含めた森林生態系の炭素正味の吸収あるいは放出量ということになる。

### 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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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 他：2005）。これらの測定結果と環境要因の測定と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、森林生態系の各部位の炭素収支のプールとフロー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。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（シーケストレーション）に大きな影響を与える。そのため、高山においては土壌から植生内大気へ放出されるCO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>フラックスと比較する上で、炭素収支の時間・日内変化などの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、環境改変が軽微な多点同時測定手法の開発が進められてきた (Mariko 他：2000、木部剛、鞠子茂：2004 参照)。これらの測定から植物呼吸量、土壌呼吸量が、フラックスと合わせて調べられている (Mo, M.他, 2005 参照)。

この様にして、生態学的な手法によって、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、時間分解能が時間単位で可能であるが、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、相互検証をする。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。大塚俊之 (2012) によると、生態学的な調査による NEP は 2.1 tC/ (ha・年) であるが、タワー観測による NEP (= -NEE) は 2.8 tC/ (ha・年) となり、概略一致する結果が得られた。

### 3. 高山における炭素固定プロセスの観測と多分野の手法による評価解析のさらなる展開

#### (1) 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、土壌圏の炭素収支測定、生態学的な調査に加えてリモートセンシング (リモセン) グループの参入が必要となった。そこで 2001 年の冬にジャングルジム (櫓タワー) 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 (西田顕郎, 村岡裕由：2006, Sasai 他：2005)。衛星リモートセンシング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、衛星リモセンデータの広域性 (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。

(2) 陸域生態系モデルと地上観測／衛星観測との連携

長期的な視野に立って、科学的な炭素管理を行う上では野外調査、森林統計データを基礎に多様な森林生態系でのCO<sub>2</sub>循環過程を解明し、気候、CO<sub>2</sub>濃度等の環境変化に対する森林生態系の応答を含むプロセスモデルの構築が不可欠な課題である。さらにプロセスモデルと人工衛星データ、森林統計資料等を組み合わせて、森林生態系モデルのスケールアップを図り、グローバル/リージョナルスケールの物質循環モデルと統合して、世界の森林生態系の炭素収支・植物生産における役割を解明する多分野連携が必要となった。

将来における炭素収支、森林生態系の生産能力推定値の変動を考えるには、グローバルな炭素動態のシミュレーションによる将来炭素収支予測、CO<sub>2</sub>高濃度条件下での施肥効果による植物生産量、気温上昇に伴う有機堆積物の分解速度・植物呼吸量の変化による植物生産量の変化等の解明が不可欠である。植林事業においても、このような10-100年のスケールでの長期的な炭素吸収量の変動を予測する必要がある。

陸上生態系の炭素収支モデル (Sim-CYCLE) によるグローバルな炭素動態のシミュレーション (及川武久、2002) の計算結果を図-7に示す。これによると現状と70年後の植生、土壌 (大気濃度が70年間で350から700ppmに2倍化の条件、植生分布の変化は考慮しない) それぞれの炭素プールが現状の642.3GtC、1495.1GtCから835.1、1559.0へと増大して、植物総生産量 (GPP)、純一次生産量 (NPP)、植物呼吸 (AR)、土壌有機物分解 (HR)、植物生態系の炭素固定量 (NEP) も現状から気温の上昇、CO<sub>2</sub>濃度の上昇により増大している。

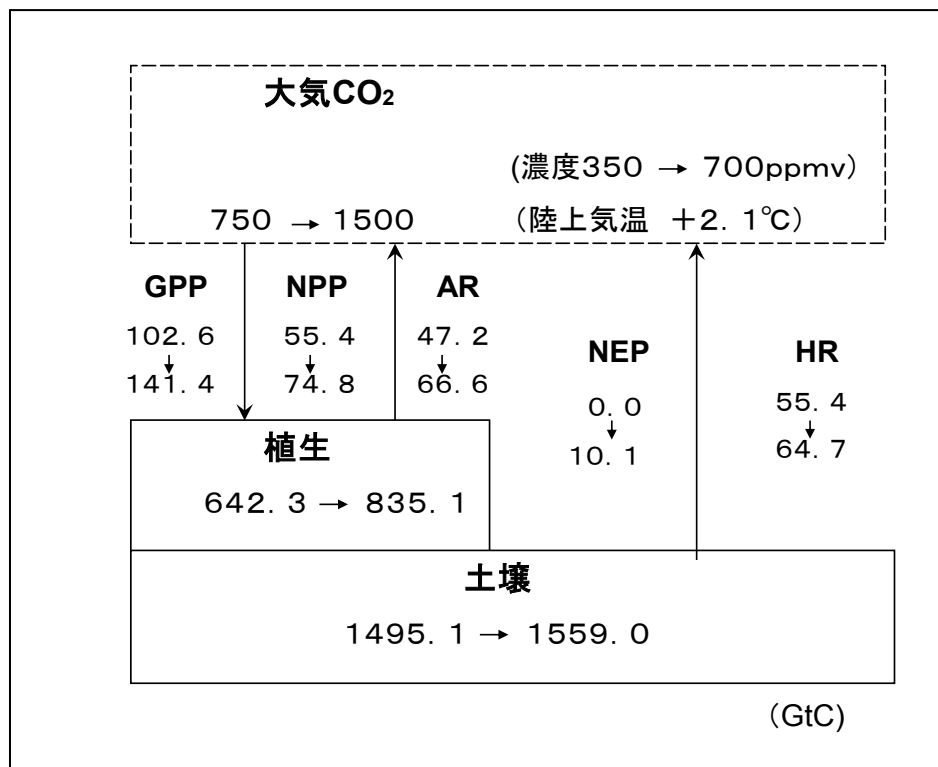


図-7 Sim-CYCLE によって推定された現在と CO<sub>2</sub>倍増後 (現在から70年後) の各貯蔵庫の炭素貯蔵量の変化 (及川、2002)

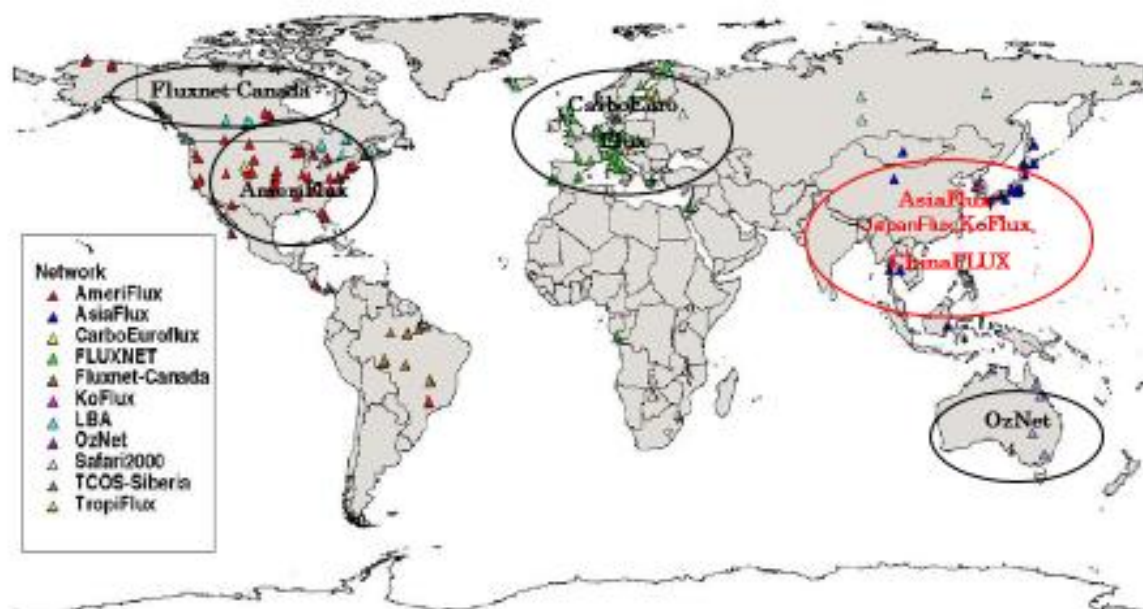
長期観測データ（地上観測と衛星観測）の集積を基礎に炭素プールのストック、フローを定量的に解析し、陸域生態系モデルとその素過程モデルのパラメータを選定し、数値モデルによる陸上生態系の炭素収支の時間変化（70年間の漸増）を考える（伊藤昭彦：2002、Ito 他：2005 など参照）。具体的には、地上観測からは観測サイト情報・データ（タワー観測、生態系調査、土壌圏調査）の供給、炭素収支と環境要因の相関解析によるパラメータモデルの情報が与えられる。また、衛星観測からはモデルの面的計算に必要な植生・環境要因の面情報を取り込むことが出来る。

このように、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リモセン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、数値モデルを時間・空間的に拡張適用することにより、地域スケールの炭素収支の面的評価を行う。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、炭素収支の過去の再現と将来の予測を行うことが可能となる。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」を高山サイトでの経験にもとづき提案した。

#### 4. 東アジアにおけるフラックス野外観測ネットへの発展と世界の観測との連携

今までに述べたように、世界の諸研究機関・諸大学により、1990年代に入り、二酸化炭素フラックスと気象などの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他：2001）。アジアでは高山でのフラックス観測の経験などを活かして、日本各地でフラックス観測サイトを立ち上げ、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 他：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、開催地域を変えて毎年行っており、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行われてきた。

現在、図一8に示すように世界の諸研究機関・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（Valentini et al., 2000、Falge 他：2002、Baldocchi 他：2005、Hirata 他：2008、Saigusa 他：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、生態学的な手法によって推定した炭素収支推定値（炭素ストックとフロー）と渦相関法による二酸化炭素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。



図—8 FLUXNET、地域フラックス観測ネットワークとの連携

## 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、これまで約二十年間余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全球の陸域生態系の機能を定量的に解明する研究を進展させることである。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。

観測ネットワークとしての意義をより高めるためには、各サイトの目的と役割を再度明確に認識し直すことが必要な時期に来ていると考えられる。例えば、各サイトの役割としては以下のようなものがあるだろう。(1) 気象学、生物学、水文学、モデル、リモートセンシングなどの多分野の観測研究を統合的かつ超長期的（数十年以上）に展開していくための総合的なモニタリングサイト、(2) サイト間比較研究の完成を目的として、例えば森林の樹種ごと、火災や植林による攪乱からの経過時間ごとに系統立てて調査地を設定し同時進行で研究を行うための比較サイトグループ、(3) 地球観測の視点から重要と考えられるにもかかわらずこれまでアクセスの問題などから観測困難とされてきた生態系で必要最小限のデータ取得を可能にするための遠隔地のサイト（リモートサイト）などである。

アジア各国で長期的な観測サイトを維持するためには、日本と相手国の研究機関との相互協力、さらにはヨーロッパ、アメリカなどとの連携のもとに、AsiaFlux 参加各国の間で技術移転や協力基盤の育成を継続して行うことが必要である。以上のような方向で研究を推進することにより、フラックス観測と生態学的観測を連携させた地球規模での陸上生態系炭素収支観測ネットワーク体制の確立が可能になると考えられる。

人工衛星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CO<sub>2</sub>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「全球地球観測システム（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、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人工衛星データ解析の連携、計算モデルの精度の評価がとりわけ重要になっている。さらに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。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確立がさらに重要となってくる。

高山での二十年間の経験は、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て、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、三枝信子、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、近藤裕昭・村山昌平様はじめ産総研の皆様、及川武久先生、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方々、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。

## 参 考 文 献

- 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.
- 伊藤昭彦他、2004：地球システムモデルで用いられる陸域モデル：研究の現状と課題、天気 51, 227-239.
- 及川武久、2002：地球温暖化に対する陸上生態系に応答、数理科学 No.470, 78-83.
- 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、分かったこと、日本生態学会誌 62, 31-44.
- 環境省主催：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、2006：21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.
- 小池勲夫 編、2006：地球温暖化はどこまで解明されたか：日本の科学者の貢献と今後の展



- 望、2.3 陸上生態系への吸収と放出pp21-27（三枝信子）、丸善株式会社。
- 近藤裕昭、2003：Synthesis Workshop on the Carbon Budget in Asian Monitoring Network-The Decennial Anniversary of the Observation at Takayama-Site：報告、AsiaFlux Newsletter, 2003年12月号(通巻No.8)。
- 三枝信子、山本 晋、村岡裕由、小泉 博、2006：Special Issue on the Long-Term Carbon Exchange at Takayama Forest Site, Japan, AsiaFlux Newsletter, 2006年3月号(通巻No.17)。
- 総務省統計局、2000：森林・林業白書（平成22年）
- 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。
- 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号、48-57。
- 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号、17-25。
- 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号、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号、73-80。
- 山本 晋、2005. 森林生態系の炭素固定のしくみと炭素固定量の評価、環境管理、41、594-601。
- 山本 晋、村山昌平、近藤裕昭、三枝信子、2013：森林生態系炭素循環の解明を目指して、天気、60、5、3-14。
- AsiaFlux (booklet),2006：A regional network for coordinating the tower-based carbon flux research with the atmospheric, oceanic, soil, and terrestrial water researches.
- Baldocchi, Dennis et al. 2001: FLUXNET: A new tool to study temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, **82**, 2415-2434.
- Baldocchi, Dennis et al., 2005: Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data, Int. J. Biometeorol., **49**, 377-387.
- Curtis, P.S. et al., 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 et al.,1994：Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science **263**,185-190.
- Falge, E. et al. 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.
- Hirata, R. et al. 2008: Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. Agric. For. Meteorol. **148**, 761-775.

- Ito, A., Saigusa, N., Murayama, S. and Yamamoto, S., 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.
- Kim, J., Lee, D., Hong, J.Y., Kang, S.Y., Kim, S.J., Moon, S.K., Lim, J.H., Son, Y., Lee, J., Kim, S., Woo, N., Kim, K., Lee, B., Lee, B.L., and Kim, S., 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.
- Kosugi, et al. 2005: Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest, *Agricultural Forest Meteorol.* **132**, 329-343. 15.
- Mariko, S., Nishimura, N., Mo, W., Matsui, Y., Kibe, T., Koizumi, H., 2000 : Winter CO<sub>2</sub> flux from soil and snow surface in a cool-temperate deciduous forest, Japan, *Ecological Research* **15**, 363-372.
- Mo, W., Lee, M., Uchida, M., Inatomi, M., Saigusa, N., Mariko, S., Koizumi, H., 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 Koizumi, H., 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., C. Takamura, S. Yamamoto, N. Saigusa, S. Morimoto, H. Kondo, T. Nakazawa, S. Aoki, Usami, T. and M. Kondo, 2010 : Seasonal variations of atmospheric CO<sub>2</sub>, δ<sup>13</sup>C, and δ<sup>18</sup>O at a cool temperate deciduous forest in Japan :Influence of Asian monsoon, *J. Geophys. Res.*, **115**, D17304, doi : 10.1029/2009JD013626.
- Murayama, S., Yamamoto, S., Saigusa, N., Kondo, H. And Takamura, C., 2005: Statistical analyses of inter-annual variations in the vertical profile of atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratio and carbon budget in a cool-temperate deciduous forest in Japan, *Agric. For. Meteorol.* **134**, 17-26.
- Ohtaki, E., 1985: On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Meteorol.*, **32**, 25-37.
- Ohtsuka, T. et al., 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.
- Owen, K.E. et al., 2007. Linking flux network measurements to continental scale simulations: ecosystem CO<sub>2</sub> exchange capacity under non-water-stressed conditions, *Global Change Biol.* **13**, 734-760.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S. and Kondo, H., 2005: Inter-annual variability of carbon budget components in an AsisFlux forest site estimated by long-term flux measurements, *Agric. For. Meteorol.* **134**, 4-16.

- Saigusa, N., et al. 2008: Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO<sub>2</sub> flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia, *Agric. For. Meteorol.* **148**, 700–713.
- Sasai, T. K. Ichii, Y. Yamaguchi, R. R. Nemani, 2005 : Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model BEAMS: Biosphere model integrating Eco-physiological And Mechanistic approaches using Satellite data, *J. Geophys. Res.*, **110**, G02014, doi : 10.1029/2005JG000045, 2005.12.
- Valentini, R., et al., 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests, *Nature*, **404**, 861-865.
- Yamamoto, S., Murayama S., Saigusa, N. and Kondo, H., 1999: Seasonal and inter-annual variation of CO<sub>2</sub> flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus* **51B**, 402-413.
- Yamamoto, S. and Koizumi, H. 2005: Foreword: Long-term carbon exchange at Takayama site, a cool-temperate deciduous forest in Japan. *Agric. For. Meteorol.* **134**, 1-4.
- Yamamoto, S. et al., 2005: Synthetic analysis of the CO<sub>2</sub> fluxes at various forests in East Asia, In: Omasa, K., Nouchi, I., and DeKok, L.J. (Eds.), *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*, Springer-Verlag Tokyo, 215–225 pp.
- Yu G.-R., Wen X.-F., Sun X.-M., Tanner B.D., Lee X.H., and Chen J.-Y., 2006: Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement, *Agric. For. Meteorol.*, **137**, 125-137.

### 著 者 略 歴

氏 名： 山本 晋 (Susumu YAMAMOTO)

生年月日： 1945年8月14日

現住所： 〒300-1254 茨城県 つくば市 宝陽台 3番地1

最終学歴： 東北大学 大学院 理学研究科 修士課程修了 (1970年3月31日)

東北大学 大学院 理学研究科 博士課程中退 (1970年9月30日)

学 位： 理学博士 (東北大学：1981年11月)

職 歴：

1970年10月 工業技術院 公害資源研究所 入所

1991年3月 公害資源研究所 大気環境研究室長

1999年4月 資源環境技術総合研究所 首席研究官

2001年4月 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門副部門長

2005年3月 産業技術総合研究所 辞職

2005年4月 国立大学法人岡山大学大学院環境学研究科 教授

2011年3月 同 上 定年退職

2011年6月 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門客員研究員

2016年3月 同 上 辞職

学会活動：

日本気象学会：会員、気象集誌編集委員等歴任

環境アセスメント学会：会員、評議員歴任

日本農業気象学会：会員

専門分野：大気環境学（気象）

- （１）大気汚染と気象の関係を観測に基づき調べ、大気汚染の予測に役立てる。
- （２）二酸化炭素濃度上昇が地球温暖化におよぼす影響を調べる。特に大気と植物生態系間の二酸化炭素の交換過程を解明する。

（ 1 7 ）

受理日：2017年1月5日