陸域生態系の CO₂ 吸収と地球環境

及 川 武 久*

CO₂ Absorption in Terrestrial Ecosystems and Global Environment

Takehisa OIKAWA*

Abstract

A five-year strategic project (S-1 project), which was organized to clarify the carbon dynamics of terrestrial ecosystems in East Asia was conducted from April 2002 to March 2007 with financial support from the Ministry of Environment, Japan. It had four themes. The first was a bottom-up approach using micrometeorological and ecological techniques to measure carbon dioxide fluxes at sixteen tower sites in Japan and East Asia. The second was a top-down approach using an inverse model based on atmospheric CO₂ concentration data finely measured at six western Siberian sites. The third was a modeling approach driven by data-based quality-controlled data from the first theme and artificial satellite data. The fourth and final theme synthesized the results of the three themes mentioned above following a systems approach, which led to a comprehensive conclusion.

The main results obtained by the many principal investigators of the S-1 project are summarized below.

1. Characteristic seasonal changes of Net Ecosystem Production (*NEP*) were obtained from ten tower flux sites including forest and grassland sites.

2. Annual *NEP* values obtained by micrometeorological and ecological techniques showed almost satisfactory agreement at the six forest sites, although those obtained by the micrometeorological technique were usually higher than ones obtained by the ecological technique.

3. A satisfactory agreement was obtained for seasonal changes of biomass at a paddy field site between results obtained by micrometeorological and ecological harvesting techniques.

4. Seasonal changes of *NEP* in western Siberia estimated by an inverse model showed a similar pattern to those of an ecological process-based model, Sim-CYCLE, but there was a fairly large difference between the estimated annual values of the two models.

5. Gross Primary Production (*GPP*) and Net Primary Production (*NPP*) maps of a spatially high resolution drawn by Sim-CYCLE revealed a characteristic pattern reflecting the diverse vegetation types in East Asia. This region was estimated to be a net carbon sink, with 57 Tg carbon on an annual average during the six years from 2000 to 2005, although annual values fluctuated greatly due to weather conditions.

Key words : S-1 project, Kyoto protocol, East Asia, Net Ecosystem Production (*NEP*), Gross Primary Production (*GPP*), Net Primary Production (*NPP*)

キーワード : S-1 プロジェクト, 京都議定書, 東アジア, 生態系純生産, 総一次生産, 純一次生産

* 筑波大学名誉教授

* Professor Emeritus, University of Tsukuba

I. はじめに

環境省地球環境研究総合推進費の中に新たに設けられた戦略的研究開発領域の最初の課題、「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」(S-1 プロジェクトと略称)は2002年度から5年計画で始まった。このプロジェクトには国内の大学や研究所に所属する数十名に及ぶ中心的な研究者が参画し、日本を中心としながらも、東アジアやシベリア地域も対象として陸域生態系の炭素動態の研究を進めてきた。そして、今年2007年3月で研究を終了したので、陸域生態系の二酸化炭素吸収に関するこれまでの5年間にわたるこの統合的なプロジェクトで得られた研究成果の概要を紹介する。

周知のように、1997年12月に批准された京都議定書はようやく2005年3月に発効し、第一約束期間である2008～2012年に先進各国(米国は途中で離脱)は人為起源のCO₂の放出を削減することが義務づけられた。先進各国ごとに定められた削減率(日本は1990年を基準として6%削減)を実現することは非常に厳しく困難なことであるが、たとえ定められた削減率をすべての先進各国が達成できたとしても、地球温暖化防止のためには今後、さらなる削減を進めなければならない。すなわち、第二約束期間以降に向けた合理的な削減目標を国際的な合意の元に定めて実行に移していく必要がある。

また、京都議定書ではCO₂の直接的な排出削減だけではなく、1990年以降に植林、再植林して森林生態系を適切に管理することによって、生態系に保持される有機炭素量を増加させれば、それも削減量と見なす、いわゆる柔軟措置も取り入れられている。このような観点から、森林を中心とした陸域生態系の炭素動態に世界的に大きな関心が集まってきている。本プロジェクトは日本を中心とした東アジア陸域生態系の炭素動態に焦点を絞った研究であるが、ここで得られた基礎的で科学的な知見や、取り入れられた研究手法は、単に東アジア地域だけでなく、世界の陸域生態系の炭素動態を明らかにする上で、重要な手がかりを

与えるものであり、京都議定書の第二約束期間以降の合理的な政策を立案する上でも、大きな指針を与えることになるだろう。

II. 陸域生態系の炭素収支

陸域生態系では植物が光合成活動で、大気中のCO₂を固定すると同時に、呼吸も行っているので、CO₂を逆に大気に放出もしている。さらに土壤中に保持されている腐植が菌類やバクテリアなどの土壤微生物によって分解されて、やはりCO₂を大気に放出している。この一連の過程を式で表すと

$$NEP = GPP - R - D \quad (1)$$

となる。ここでNEPは生態系純生産量、GPPは総生産量、Rは植物の呼吸量、Dは土壤有機物の分解量である。(1)式で1年間以上の長期の値として、NEP > 0であれば、その生態系は炭素のシンク(吸収源)であり、逆にNEP < 0であれば、炭素のソース(放出源)であると評価される。そして京都議定書では管理の行われている森林でNEP > 0であれば、その値が人為起源のCO₂の削減量と見なされる。従って、任意の生態系でNEPがはたして幾らなのか、という問題が重要な研究テーマになってきた。このS-1プロジェクトでも、東アジア地域を対象として、それぞれの地域のNEPを算定するとともに、その値を決定している気象学および生態学的メカニズムを明らかにすることを最大の目標としている。

ある地域のNEPの値を求める手法は大きく分けて二つある。その一つは渦相関法と呼ばれる微気象学的手法である。もう一つは積み上げ法と呼ばれる森林(植物)バイオマスのある期間における増分に基づいた生態学的手法である。前者は超音波風速計とCO₂濃度変動計を用いて時々刻々(一般的に30分ごと)の値が求まり、その生態系のCO₂収支の日変化、季節変化といった重要な特性が得られる。しかし、測定を通年、さらには数年にわたって欠測なく行うのは、技術的進展が著しい今日にあっても至難の業であり、欠測を補完する手法も色々と考案されている。一

図 1 東アジア陸域生態系の植生分布図。

Fig. 1 Vegetation map of terrestrial ecosystems in East Asia.

方、後者の森林の場合にはせいぜい 2, 3 年の平均値しか求まらないが、長期間の積算値が求まる点が最大の利点である。測定原理が全く異なる二つの手法で求めた *NEP* の値は必ずしも一致しない。どちらの値が正しいのか、あるいは違いが出る要因は何か、といったことが測定法上の大きな研究課題になっている。

III. 研究対象地域の特徴

我々の研究対象地域はほぼ $20 \sim 60^\circ\text{N}$, $100 \sim 150^\circ\text{E}$ の範囲にある。図 1 に示した植生分布図からもわかるように、湿潤地から乾燥地に至るまで、非常に多様な植生に覆われている。なかでも面積がもっとも広いのは主に熱帯・亜熱帯地域に分布している水田であり、二番目に広いのは中緯度の半乾燥地帯のステップ草原であり、三番目に広いのは亜寒帯地域の落葉性の針葉樹林、すなわちカラマツ林である。シベリアではカラマツ林が地中 200 m を超える永久凍土上に広く分布し

ている。

多様な植生が分布しているこの地域の気象・気候条件を概観したときに第一に挙げられる大きな特徴は、南アジア、東南アジア、中国、日本を含む東アジアは季節風が地球上でもっとも顕著に表れるモンスーン気候の支配下にあることである。この中で南アジアは熱帯季節風帯にある。冬には非常に寒冷なシベリア高気圧が発達するので、強く冷たい季節風が吹く。

次に日本列島の気候を概観してみる。日本列島は中緯度季節風帯にあり、夏には北太平洋の亜熱帯高気圧西縁部を吹く高温湿潤な南東風が卓越し、冬には大陸から寒気の吹き出しによって厳しい寒さとなる。

日本列島に降水をもたらす主要な気象要因は 3 つある。梅雨（+秋雨）、台風、それに日本海側の降雪である。いずれも風水害など大きな災害をもたらすと同時に、飲用水や農業用水の給源としても、日本人の生活に欠かすことができない。

表 1 大陸別の面積と人口・人口密度 (2005 年).

Table 1 Area, human population and human population density on each continent of the world (2005).

	面積 [100 万 km ²]	[%]	人口 [100 万人]	[%]	人口密度 [人 /km ²]
アジア	31.9	23.6	3905	60.4	122.5
アフリカ	30.3	22.4	906	14.0	30.0
ヨーロッパ	22.1	16.3	728	11.3	33.0
アメリカ	42.3	31.3	892	13.8	21.1
北米	21.8	16.1	331	5.1	15.2
中南米	20.5	15.2	561	8.7	27.3
オセアニア	8.6	6.3	33	0.5	3.9
世界全体	135.1	100.0	6465	100.0	47.9

梅雨は極気団（オホーツク海高気圧）と亜熱帯気団（太平洋高気圧）との境目の前線が日本付近で停滞し、日本列島に雨をもたらす。梅雨から秋雨までを盛夏の小乾季を挟む一連の雨季と考えることができる。

熱帯海域は暖かいので水蒸気が活発に蒸発して多数の積乱雲が発生し、特に発達したものが台風となる。台風は 8 月から 9 月に日本列島には多くが襲来し、秋雨前線を刺激して豪雨をもたらす場合も少なくない。2004 年には日本列島に上陸した台風が 10 を数え、従来の最大値 6 を大きく超えた。

日本海には黒潮の分流である対馬海流が北上している。冬には大陸から吹き出した冷たく乾燥した空気に暖かい海面から蒸発した大量の水蒸気が雪雲に変わり、日本列島の日本海側は世界でも有数の多雪地帯になっている。雪害が頻発すると同時に、春に解けた雪は農業用水としても重要な役割を果たしている。1962 年以降、最大積雪深が減少しており、地球温暖化の影響とみられている。

IV. アジア地域の人口

地球環境問題の根本を考えれば、世界の人口問題・食糧問題にたどり着く。東アジアを含むアジア地域は人口密度が際だって高いことが大きな特徴である。表 1 に大陸別の面積と人口・人口密度を示した。2005 年時点でアジア地域の人口は

39 億人を超過しており、世界の全人口 64 億人の 60 % に達している。一方、面積は 3200 [万 km²] で、世界の陸地面積の 24 % 弱に過ぎない。従って、人口密度は 123 [人 /km²] に達しており、世界の平均人口密度 48 [人 /km²] の 2.6 倍にもなっている。しかも、2 番目に人口密度が高い大陸はヨーロッパであるが、世界平均以下の 33 [人 /km²] に過ぎない。本プロジェクトは、世界でも類をみないこのように人口稠密な地域を対象にした研究であり、これらの多くの人々が図 1 に示した植生地域を背景として暮らしている。当然、森林伐採などの人間活動の影響が陸域生態系に強く現れることが予想されるし、地球温暖化の進行に伴って、人々の生活にも大きな影響が現れることが危惧される。

ここで食糧問題を考える基礎的事項を簡潔にまとめておく。(1) 式に示された生態系の炭素収支式から、 R を差し引くと生態系を支えるもっとも基本的な生産量である純一次生産量、 NPP となる。

$$NPP = GPP - R \quad (2-1)$$

この式は (2-2) 式に書き換えられる。

$$NPP = \Delta W + L + G \quad (2-2)$$

ここで、 ΔW はある期間、 t 間のバイオマスの増分、 L はその間に落ちてくる枯葉枯枝の量、 G は動物に食われた部分、すなわち被食量となる。こ

図2 マウナロア山（ハワイ島）と綾里（岩手県三陸海岸）における大気 CO_2 濃度の経年変動。

Fig. 2 Annual variations of atmospheric CO_2 concentrations at Mauna Loa (Hawaii) and Ryori (Iwate Pref.).

の式から求められる NPP が生態学的手法に基づく測定原理を示している。そしてこの式の中の G が、我々人類の食糧も含んでいる。従って、人類に供給可能な食糧の上限も NPP で規定されることになる。東アジア地域では、図1に示したように、水田面積がもっとも広いが、水田で収穫された米が食糧源として、日本はもとよりアジア地域の人々の暮らしを支えている。このようにモンスーンによる雨の恩恵は計り知れない。アジア地域の高い人口密度も生産された米に大きく依存している。また、最近、石油値段の高騰のあおりを受けて、バイオエタノールに対する関心が高まってきたが、供給可能なバイオエタノール量も NPP に依存している。すなわち食料と燃料との配分を巡って国際的にも大きな問題が起こりつつあるが、その根本は NPP 量に依存しているのである。

V. 大気中の CO_2 濃度の経年変化

図2は我々の主要な観測年である2000～2005年のハワイのマウナロア山と岩手県三陸海岸の綾里での月別の CO_2 濃度を示している。観

測点が赤道に近く、標高も3,400 mと高いマウナロア山では年間の CO_2 濃度の振幅は中緯度帯にある綾里に比べれば遙かに小さい。しかし、両地点とも年平均の CO_2 濃度は人間活動の結果として、毎年確実に上昇を続けてきているし（最近では年平均で2 ppm 近い）、今後も増加し続けるであろう。

図2を詳細に検討すると、 CO_2 濃度が両地点で必ずしも同一速度で上昇しているわけではないことがわかる。特に綾里では2001年と2005年の上昇速度が1 ppm 前後で、マウナロア山とも、あるいは世界全体の平均値よりも遙かに小さい。それぞれの地点での大気 CO_2 濃度は人為起源で放出された CO_2 が一部は陸域生態系に、一部は海洋に吸収された結果として残った部分を反映している。またエルニーニョやラニーニャが発生したために、気温や海水温が変化して、森林などの陸域生態系の活動や海洋の吸収量に影響を与えることも、それぞれの地点での大気 CO_2 濃度上昇速度に違いをもたらす。どのような要因がどのように関与しているのか、東アジアの陸域生態系を対象として、4つの研究テーマを設けて数十名に

及ぶ研究者が研究に取り組んだ。そして多岐にわたる研究成果から全体像を明らかにするために、図3に示すようなシステムアプローチ手法を確立して、とりまとめを進めた。この図に基づいて、研究成果の概要を紹介する。

VI. 地上観測による炭素動態の時空間変動解析

1) フラックスタワー観測からみた炭素動態

図4の地図は本プロジェクトで展開したCO₂フラックス観測用タワーの設定地を示したものである。全体で15サイトあり、日本を中心としながらも北の亜寒帯域から南のマレー半島パソの熱帯多雨林にまで広がっている。その中で、森林生態系としては亜寒帯のカラマツ林から熱帯多雨林までの8サイトあり、一方、非森林サイトも中国青海の標高3,000 mを超える高山草原や、モンスーン地域に特有の水田など、7つのサイトが入っている。

各サイトで得られた観測値をデータベース化し、各フラックスタワーの観測データとタワーサイトにおける土壌・植物生態学的観測データを集約して総合的な解析を行った。特に、(1) 各種生態系または気候帯ごとに炭素収支の観測データに基づくサイト間比較解析、(2) 高山、富士吉田、苫小牧、パソなどの森林サイトにおいて微気象学的方法と生態学的方法による炭素フラックスと貯留量の相互比較を実施した。

本研究テーマでは森林8サイト（北海道苫小牧・中国東北部・中央シベリアのカラマツ林3サイトと、日本温帯森林である高山・富士吉田・桐生の3サイト、さらに熱帯地域の半島マレーシアの熱帯降雨林・タイの熱帯常緑季節林などの2サイト）と、草原2サイト（中国高山草原・筑波大学草地）に、水田2サイト（茨城県真瀬・岡山県八浜）を解析対象とした。さらに、同一サイトで植物体現存量調査、土壌圏調査などを行い、生態学的手法によって推定した炭素収支推定値（炭素蓄積量とフラックス）と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を行った。

まず、森林生態系サイトで渦相関法によって得

られたNEP（生態系純生産量）の年間値測定結果をまとめてみると、NEPは気象条件と生態系の差異を反映して0～6 [ton Carbon yr⁻¹]と広範囲にわたっていた。年平均の気温・降水量とNEPおよび総生産量（GPP）の関係を調べてみると、GPPは気温とともに直線的に増加し、NEPは低温域では気温とともに増加するが、20℃前後で極大となり、それより高温になると気温とともに減少する傾向が認められた。高温域でNEPが減少する原因は、気温が高くなるにつれて土壌有機物などの分解速度Dが上昇するためと考えられる。さらに非森林サイトも含めた各種生態系における渦相関法によるNEPの季節変化のサイト間比較を行った。図5に森林8サイト、中国高山草原、真瀬水田のNEPの季節変化を示す。これからNEPは植生の違い、気温や降水量の季節変化の差異を反映してサイトごとに特色ある季節変化パターンを示していた。

本研究では、数多くのサイトにおいて微気象学的方法（渦相関法）による正味の炭素吸収量（NEP_M）と生態学的方法（植物体現存量調査）による吸収量（NEP_B）の両者の結果を相互比較して、手法の信頼性を検証した。表2にまとめたように、日本の温帯林観測サイトでは本研究を通して、両手法の検証と改良が進み、かなり高い一致度を示した。しかし、一般的にNEP_MがNEP_Bよりも大きい傾向が認められ、特にパソの熱帯林ではこの傾向が著しかった。両手法の検証と改良を進めてきた結果、両手法に含まれる未解決の問題としては、NEP_Mにおける夜間の測定誤差が挙げられ、一方、NEP_Bにおいては、根系の炭素収支の見積もり誤差や、枯死木の分解の不確定性などが指摘されている。今後これら誤差要因に焦点を当てて、さらに検討していく必要がある。

2) 生態学的調査に基づく森林の炭素蓄積量と炭素フラックス

生態系の炭素蓄積量については、地上部と地下部の炭素集積量、下層植生の炭素集積量、林床有機物層・鉍質土層の炭素集積量を集計し、炭素フラックスについては、地上部リターフォール（落

図 3 多岐にわたるアジア陸域生態系の炭素動態研究の成果をとりまとめるために確立されたシステムアプローチ手法の概念図。

Fig. 3 Conceptual framework of systems approach to synthesize carbon dynamics results of Asian terrestrial ecosystems obtained by diverse techniques.

図 4 S-1 プロジェクトで展開した CO_2 フラックス観測用タワーの設定地。

Fig. 4 Map of tower flux measurement sites selected by the S-1 Project.

単位 [$\text{tC ha}^{-1} \text{月}^{-1}$]

図 5 森林 8 サイトと中国のチベット高山草原、真瀬水田にみられた NEP の季節変化 (Saigusa *et al.*, accepted).

Fig. 5 Seasonal variations of NEP obtained at eight forest sites and Tibetan highland and paddy field sites in Mase (Saiegusa *et al.*, accepted).

表 2 フラックス観測サイトにおける渦相関法と生態学的方法によって得られた NEP の比較 (Hirata *et al.*, accepted).

Table 2 Comparison of NEP values obtained by eddy covariance technique and those obtained by ecological sampling technique at six forest measurement sites (Hirata *et al.*, accepted).

サイト名	トゥラ	苫小牧	高山	富士吉田	サケラート	パソ
国名	ロシア	日本	日本	日本	タイ	マレーシア
緯度 [$^{\circ}\text{N}$]	64	43	36	35	14	3
年平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]	-9	6	7	10	24	26
NEP_M [$\text{tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$]	0.8	1.6 ~ 1.9	3.0 ~ 3.8	3.5 ~ 6.3	2.4 ~ 5.2	-0.3 ~ 1.6
NEP_B [$\text{tC ha}^{-1} \text{y}^{-1}$]	-0.5	2.1	2.1	4.2	-3.0 ~ 1.3	-0.5

NEP_M 渦相関法で得られた NEP.

NEP_B 生態学的手法で得られた NEP.

葉落枝), 細根枯死量, 現存量増加分, 土壌呼吸, 溶存態有機炭素 (DOC) 流失量のうちで測定されている項目の数値から推定した。地上部と地下部に集積した炭素量については, 現存量の 50 %

が炭素と仮定しているが, 地上部と地下部の現存量比率 (T/R) は, 緯度に対して南から北に小さくなっている。これは, 植物の生育にとって環境条件が厳しくなるにつれて地下部への分配比率が

高まることを示しており、地下部の炭素集積量の推定を広域に行う際に過大評価／過小評価の鍵となる重要な知見である。4つの観測サイト、すなわちシベリアの永久凍土地帯（トゥラ）のカラマツ林、中国東北部（老山）のカラマツ林、日本（飛騨高山）の冷温帯落葉広葉樹林、マレー半島（パソ）の熱帯多雨林で推定した炭素蓄積量と炭素フラックスの結果からわかるように、気象条件も樹種も異なる4観測サイトの炭素蓄積の大きさの違いとフラックスの差異が確認された。

3) 非森林サイトにおける炭素収支の定量的評価に関する研究

3-1) 青海・チベット高地草原生態系

青海・チベット高原は、北のコンロン山脈などと南のヒマラヤ山脈との間に広がる平均標高が4,000 mを超え、面積が250 [万 km²] 以上にも及ぶ世界最大の高原地帯であり、その約60%は草原地帯となっている。この草原の7つの典型的な草原を選び、草原環境に適したNEEチャンパー（生態系純交換量）を開発して、地上部バイオマス（葉と茎）がもっとも高い時期（7～8月）に、光合成と呼吸速度を測定した。その結果、生態系の正味炭素吸収速度も、生態系の呼吸速度も、草原ごとに大きく異なっていた。すなわちヒツジ、ヤギなどの過放牧で退化した草原でもっとも低く、高山湿地草原でもっとも高く、前者の光合成速度は後者の約1/6に過ぎなかった。植物バイオマスは根、特に土壤中10 cmまでの根の乾燥重量と非常に高い相関が示された。さらに、同時に行った土壤炭素調査結果に、衛星データや気象データを含めて、草原土壤の炭素蓄積量と蓄積速度を推定したところ、チベット高原全体の土壤炭素の蓄積密度は平均4.25 [kg m⁻²] で、1980年代からの20年間の土壤炭素の蓄積速度は平均で23.2～32.6 [g m⁻² yr⁻¹] という、予想外に大きな値が得られた。この推定値の信頼性を今後さらに確認していく必要がある。

3-2) 農耕地生態系における炭素収支の定量的評価

東アジアは耕作強度が高い地域である。20～60°N、100～170°Eの範囲に含まれる陸地面積の

うち、24.7%は耕作地であり（森林は31.7%）、なかでも、モンスーンアジアを代表する農耕地生態系である水田は106 [万 km²]（10.2%）と最大の面積を占める。また、農林水産省の統計によれば、2005年時点で、日本国内の水田面積は25,560 km²（国土面積の12.4%）を占め、畑地（合計で21,360 km²）のなかでは牧草地在約30%を占める。IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）で検討されているフルカーボン・アカウンティング（森林のみならず、草原や農地も含めた炭素収支）に対応するためには、このようにモンスーンアジアを代表する農耕地生態系の炭素収支を定量化する必要がある。

農耕地の炭素収支上の特徴は、収穫や施肥等の農作業に伴う炭素の流出・流入があること、植物量（葉面積や乾物重）の季節変化が大きいことが挙げられる。このような農耕地の炭素収支の特徴に留意しながら、水田と牧草地に設置したフラックス観測サイトで、炭素フラックスと関連する要素のデータを長期的に蓄積し、炭素収支構成要素の季節変化や年々変動を明らかにする。また、平坦で均一性が高く、草高が低いという、森林に比べればフラックスの計測にも生態学的調査にもはるかに好適な農耕地サイトの特徴を活かして、炭素収支の評価精度の検証が可能である。

茨城県つくば市真瀬の水田（MSE）、岡山県玉野市八浜の水田（HCH）、熊本県合志市の牧草地（KON）で観測を実施した。フラックスの計測には、各サイトとも、オープンパス型の測器を使用した。一般的に採用されている光合成・呼吸の分離法、すなわち夜間の生態系純交換量（NEE）と温度との関係から日中の生態系呼吸量（RE）を推定する方法を用いて、生育期間のNEEを総生産量（GPP）とREに分離した。MSEでは、チャンパー法（イネの根の侵入を排除した通気式チャンパー）を用いて、微生物による土壤有機物の分解量（RH）を測定した。収穫物の搬出に伴う炭素の流出量は、イネの最終生育調査時の籾重や、農家からの聞き取りによる収量（精玄米重）から、稲体の炭素含有量を50%と仮定して推定した。

図 6 渦相関法で測定した水田の NPP の積算値と乾物重から求めた NPP の経時変化の比較 (2004 年).

Fig. 6 Comparison of seasonal changes of accumulated NPP obtained by eddy covariance technique and those obtained by periodical sampling of rice plants (2004).

上記 3 つのサイトで長期フラックス観測を実施し、気象条件や管理方法が異なる環境での炭素収支を定量化した。イネ単作田の生態系純生産量 (NEP) は $100 \sim 300$ [$\text{g Carbon m}^{-2} \text{yr}^{-1}$] の範囲で年次変動がみられ、収穫物の搬出量やメタン放出量も加えた年間の炭素収支は $+30$ (水田への流入) ~ -90 [$\text{g Carbon m}^{-2} \text{yr}^{-1}$] (水田からの流出) であった。 NEP にチャンパー法による土壌有機物の分解量を加えて求めた純一次生産量は、図 6 に示したように、イネの定期的なサンプリングで得た稲体への炭素蓄積量とが非常に良く一致し、フラックス測定に基づく炭素収支の推定精度が検証された。このように水田では、森林とは異なり、渦相関法 (鉛直方向の CO_2 フラックスを鉛直風速の変動値と CO_2 濃度の変動値の積を 30 分平均して求める微気象学的手法) で得られた CO_2 フラックスから推定したバイオマス生産量と、サンプリングで直接求められた稲体への炭素蓄積量とを容易に比較検証が可能である。ここで得られた知見は、測定原理が大きく異なる二つの手法の精度を検討していく上で、重要

な手がかりを与えるものであろう。

水田はイネの生育期間に湛水状態となるため、純一次生産量 NPP に対する分解量 D の割合は 18% と極めて低い値を示した。これは水田生態系の一つの大きな特徴と思われる。さらに、農耕地サイトに二つの草原サイトを加えた計 5 サイトのフラックスデータに統一的な補完処理を施し、炭素収支のサイト間比較解析を行った。その結果、生育期間の日射量が総生産量 GPP や NEP の年次間差・サイト間差に大きな影響を及ぼしていることや、刈り取った植物体を搬出しない草原サイトでは、 GPP に対する生態系呼吸量の割合が高いことが明らかになった。

4) 土壌圈における炭素収支の定量的評価に関する研究

世界の陸上生態系に貯留されている土壌有機炭素 (SOC) の総量は、全球における大気中の二酸化炭素 (CO_2) の約 2 倍、植生バイオマスの約 3 倍に相当する約 1500 [Pg C (1 Pg は 10^{15} 乗グラムを意味する)] と推計されている。すなわち、SOC は地球の炭素循環における非常に大

きなりザーバーになっている。SOC は土地利用や環境変化によって変動するが、その膨大な貯留量から、局所的な環境応答は小さくても、炭素フローの広域変化は莫大であると予想される。これらから、温暖化問題に関連して、土地利用変化や環境変動が広域スケールの SOC の動態に及ぼす影響を解析し評価する研究が注目されている。ここでは、環境条件と有機炭素の分解過程を記述する数理モデルが利用され、土地利用、環境変化による影響の解明、評価、その対策あるいは緩和策などの検討が行われている。

土壌圏を含む森林生態系の炭素固定および炭素収支は気候の違いや植生や遷移段階、土壌動物、攪乱（皆伐、森林火災）、攪乱後の経過年数などの違いに影響される。特に、森林伐採や森林の再生および植林による炭素貯留量の変化は炭素循環に重要な役割を果たしている。このような視点から、(1) ミズナラの優占していた冷温帯落葉広葉樹林を伐採した直後の生態系（飛騨高山）、(2) 草本期の代表的な植生であるススキ草原（長野県菅平）、(3) 草本期の後に出現する 40 年生のアカマツ林（菅平）、その後に出現する (4) ミズナラを中心とした 60 年生の落葉広葉樹林（飛騨高山）、そして (5) ミズナラを中心とした 110 年生の極相に近づいた落葉広葉樹林（長野県荘川村）の 5 サイトを対象として、(1) 生態系の時間変化（遷移）を草本期から木本期、続いて、木本期の中でも陽樹林から極相林における遷移に伴う土壌炭素収支の経年変化を計測して遷移の時間変動をパラメータ化するとともに、(2) 森林伐採が土壌炭素フラックスの時空間変動に与えるインパクトを解析して人為活動の影響を定量的に評価した結果、次のような成果が得られた。

土壌中に保持される有機炭素量は地上部植生から土壌へと供給される枯死・脱落量（リター量）と、土壌有機物の分解速度との収支で決まる。それぞれの生態系において植物の現存量（炭素蓄積量）と成長量（炭素固定量）を測定した。

二次遷移の各段階の植生で実測された SOC と炭素フラックスの変動を時系列的に比較してみると、土壌中の有機炭素量は遷移に伴う明瞭な増加

傾向は認められなかった。強調すべき点として、特に草本から木本のステージへの移行期において、土壌炭素量が逆に減少することが明らかとなった。これは草本植物と木本植物の生活形の違いが原因と考えられた。つまり、草本植物は地上部を毎年作り替え、枯れた地上部を土壌にすべて供給しているが、木本植物は毎年地上部を幹枝に蓄積していくので、木本のステージでは土壌への炭素供給量が減少する。一方で、C4 植物（光合成の CO_2 を固定する主なやり方に 2 種類あり、最初に炭素 4 つの有機酸を作るタイプの植物群）であるススキ草原の段階に土壌炭素は増加したが、陽樹林であるアカマツ林に遷移した直後はやや減少した。しかし、陰樹林に移行するのに伴って、再び増加に転じた。

VII. 西シベリアにおける CO_2 濃度の観測とインバースモデル解析

1) CO_2 濃度の観測値の変動

図 7 は 2002 年以來、2007 年 3 月までに観測が行われたシベリアの 6 地点の全データ（1 時間値）を示している。低濃度の値の季節変化に着目すると、5 月初旬から顕著な低下が始まり、夏季の 7～8 月に濃度がもっとも低くなり、その後濃度が増加に転じた。これらは、西シベリアすべての観測サイトに共通にみられる。この結果から、陸域生態系による光合成活動の季節変化を、正確に捉えていることが確かめられる。日変化は冬季になると極めて小さくなったが、それでも有意な幅であった。これはシベリアのような極寒の地でも冬季に CO_2 フラックスが、小さいながらも、存在していることを表している。

西シベリアで測定された CO_2 濃度の日変化を解析した結果から、現地時刻 13 時から 17 時のデータが大気境界層を代表する値として取り扱うことが可能であると判断された。

日中濃度に 7 日移動平均を施して、 CO_2 濃度の季節変化の中でも、冬季のサイト間の変化に着目すると、隣接する Berezhovka と Karasevov では、両者が非常に良く一致していた。一方、Igrim はこの 2 地点とは異なる変動を示したが、

図 7 シベリア 6 地点で 2002 年から 2007 年 3 月までに得られた CO_2 濃度の全観測データ。上から順に、Berezorechka (BRZ), Karasevoe (KRS), Igrim (IGR), Noyabrsk (NOY), Demyanskoe (DEM), Yakutsk (YAK) の 1 時間観測値を示す。

Fig. 7 Atmospheric CO_2 concentration obtained at six measurement sites in Siberia from 2002 to March 2007. One-hour averaged values of CO_2 at Berezorechka (BRZ), Karasevoe (KRS), Igrim (IGR), Noyabrsk (NOY), Demyanskoe (DEM), and Yakutsk (YAK).

詳しくみると、その濃度変動が先行して生じていることがわかる。これは Igrim で観測された大気塊が、時間を経て輸送され、Berezorechka, Karasevoe においてもほぼ同様に観測されたものである。この結果は、本観測が、数 100km スケールの空間を代表する濃度データとその変動を、正確に捉えていることを示唆するものである。一方、夏季の Igrim における CO_2 濃度は全体的に Berezorechka や Karasevoe よりも高かった。これは、Igrim が西シベリア地域の高緯度側に存在するため、西シベリア南部の Berezorechka や Karasevoe よりも、植生の光合成活動による CO_2 吸収量が低いことを示唆している。

2) インバースモデルを用いた CO_2 収支の推定

本研究ではこれまでの 64 領域インバースモデルを基に、西シベリアをさらに 2 分割した領域を採用し、より詳細な CO_2 収支を推定した。

インバースモデルから推定された CO_2 フラックスは 9 月から 4 月にかけてほぼ 0 か、わずかに放出の傾向を示したが、5 月より吸収に転じ、6 月に最大の吸収量 $0.75 [\text{tC/ha/month}]$ を示した。このフラックスをインバース解析の初期値に使った CASA モデルの CO_2 フラックスと比較すると、季節変動の傾向は類似しているものの、インバース解析の結果は全体的に夏季の吸収量が大きくなっており、上記の観測結果がこの領域の CO_2 フラックスを吸収方向に導いたことがわか

図 8 インバースモデルによって推定された西シベリア南部における 2005 年の CO₂ フラックスの季節変化と Sim-CYCLE による推定値との比較。

Fig. 8 Seasonal changes of CO₂ flux in western Siberia estimated by an inverse model and by Sim-CYCLE.

る。西シベリア南部における 2005 年を通した CO₂ の総吸収量は 1.17 [tC/ha] であった。

後述の Sim-CYCLE から推定された西シベリア南部における CO₂ フラックスはインバース解析の結果と季節性が、図 8 に示したように、非常に良く似ていたが、夏季における吸収量の絶対値はやや小さくなっていた。これは Sim-CYCLE が、この領域の生態系のフェノロジーを正しく表現できていることを示していると考えられる。2005 年 1 年間の西シベリア南部における CO₂ の総吸収量は、インバース解析の推定結果が 1.17 [tC/ha] であるのに対して、Sim-CYCLE は 0.32 [tC/ha] である。この領域がネットで CO₂ を吸収しているということはお互いに一致しているが、その積算値には 3 倍以上の差が存在している。

以上のように、タワー観測ネットワークとインバースモデルを組み合わせたフラックス推定手法の確立を達成することができた。今後は CO₂ フラックスの年々変化に科学的な関心を向けることができる。

VIII. 近未来予測モデル開発による東アジア陸域生態系の炭素動態のシミュレーション

これまでに示してきた実測研究で得られた多くの観測データを用いて、アジア地域を対象とした陸域生態系の信頼性の高い炭素循環モデルを開発し、この領域の炭素収支をシミュレートした。S-1 プロジェクトには、日本で開発された 3 つのモデル、すなわち大気-陸面相互作用に重点を置いた BAIM、生物地球化学的過程に重点を置いた Sim-CYCLE、数理生態学に重点を置いた TsuBiMo が参加している。

BAIM は気候モデルに組込んで使用することを前提にしており、大気-陸面の相互作用、特に物理的過程に重点を置いている。このモデルは気候-炭素循環の相互作用をシミュレートすることができ、例えば大気 CO₂ 濃度の時空間分布を推定して観測値と比較することも可能である。一方、Sim-CYCLE（その改良版）は生理生態および生物地球化学的過程に重点を置いたモデルであり、大気との CO₂ 交換だけでなく生態系内の炭素動態を詳細にシミュレートすることが

図 9 陸域生態系の超高分解能炭素循環モデルで推定された2000～2005年の東アジア地域の(a)総生産(GPP)および(b)純一次生産(NPP)(伊藤, 準備中)による。

Fig. 9 Map of carbon fluxes in East Asia from 2000 to 2005 estimated by ultra-high resolution carbon dynamics model (Ito, in preparation). (a) GPP, (b) NPP.

できる。さらに、TsuBiMoは数理生態的な手法で地点レベルの観測データに基づいてパラメータを調節し、広域的な炭素収支の評価につなげている。それぞれのモデルを用いて、日本周辺を中心とする東アジア地域について2000～2005年(TsuBiMoは2002年まで)の陸域炭素収支をシミュレートしたところ、各モデルでは使用した入力データや空間分解能は異なっているにもかかわらず、総生産(GPP)の空間パターン(図9は改良版Sim-CYCLEによる)はよく類似していた。正味炭素収支は、生産力だけでなく土壌有機物分解の環境応答の影響も受けるが、多くの期間・地域においてモデル間で共通する変動傾向がみられた。このように異なるモデルで共通した傾向を示したことは、ここで開発された3つのモデルが不確実性の幅を超えた信頼性のある結果を与えていることを意味している。一方、モデル間にみられた相違点については、モデル間の応答感度などに関するより詳細な検討をする必要がある。

京都議定書の第二約束期間以降の炭素管理に向けた基礎データに用いるために、陸域生態系モデルを用いた超高分解能な炭素収支マッピングを行った。対象としたのは30～50°N, 125～150°E

の日本を含めた地域である。先行研究(伊藤, 2003)で示唆された、地形・土地利用・土壌・気象条件に起因する不確実性を排除するために、1 kmメッシュという超高空間分解能でマッピングを実施した。従来の数十 kmメッシュの推定では県単位の推定値を得ることすら難しかったが、今回の高分解能化により、日本国内の市町村単位でさえ集計が可能になり、国内の炭素管理を実施する際にも寄与することが可能となった。

マッピングに使用したモデルは、S-プロジェクトを通じてフィールド観測を最大限に取り入れて開発・改良が行われてきた詳細な炭素循環モデルである。例えば、森林の高木層と下層植生の2層化、土壌有機物の画分などを行うことで生態系内部の炭素動態を詳細に再現することが可能になった。また後述するように、フラックス観測によって検証が重ねられている。このモデルを用いた1 kmメッシュのマッピングでは、相当する高分解能な気象・土地被覆・土壌・地形データを使用した。特に、土地被覆データは、国立環境研究所において3種類の衛星観測データから新たに作成された、現場情報で検証を経た高精度のものを使用した。なお、モデルの高度化と高空間分解能化によって計算量は大幅に増加したが、海洋研究

開発機構の計算機資源を利用することができ、プロジェクト期間内での計算実行が可能になった。

図9に示したように、2000～2005年の東アジア地域における、植生生産力（*NPP*）および正味の炭素収支（*NEP*）に関するマッピングが完成した。対象地域全体としては、年間0.057 Pgの炭素を正味吸収していたものと推定された。地域的には、生産力が高い南部でより高い*NEP*を示していた。さらに気象条件の年々の変動を反映して、*NPP*や*NEP*に6年間で相当の経年変動があることも再現された。モデルによる推定結果を、別グループで行われた大気観測とインバースモデルによる推定結果と比較したところ、年平均の吸収規模は同等であったが、経年変動のパターンには若干の違いがみられた。既存データによると、この地域の工業活動によるCO₂放出量は約0.53 Pgなので、この地域の陸域生態系は人間活動による放出の10.8%相当を吸収していることになる。同緯度帯にあるヨーロッパ地域でも、類似研究により同程度の吸収が推定されており、本研究の妥当性が支持されている。ただし、本研究では陸域生態系の攪乱（火災や伐採）履歴や人為的な森林管理は今の段階では考慮されていないため、全体的には*NEP*を過小評価している可能性がある。この点は今後の検討課題である。

謝 辞

初めにも述べたように、ここに紹介した内容は2002年から始まった環境省の戦略的プロジェクトで5年間にわたる研究資金の助成を受けて、田中正之先生を委員長とするアドバイザーボードの先生方のご助言を頂きながら行った研究の成果の概要である。本プロジェクトに参加された多くの方々研究成果を使わせていただいた。記して感謝する。また、本誌への寄稿の機会を与えてくださった山川修治氏にも深謝する。

文 献

- Hirata, R., Saigusa, N., Yamamoto, S., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H. (accepted): Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. *Agric. For. Meteorol.*
- 伊藤昭彦 (2003): 東アジア陸域生態系の純一次生産力に関するプロセスモデルを用いた高分解能マッピング. *農業気象*, **59**, 23-34.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Hirata, R., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Li, S.-G., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H. (accepted): Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. *Agric. For. Meteorol.*

(2007年9月20日受付, 2007年11月26日受理)