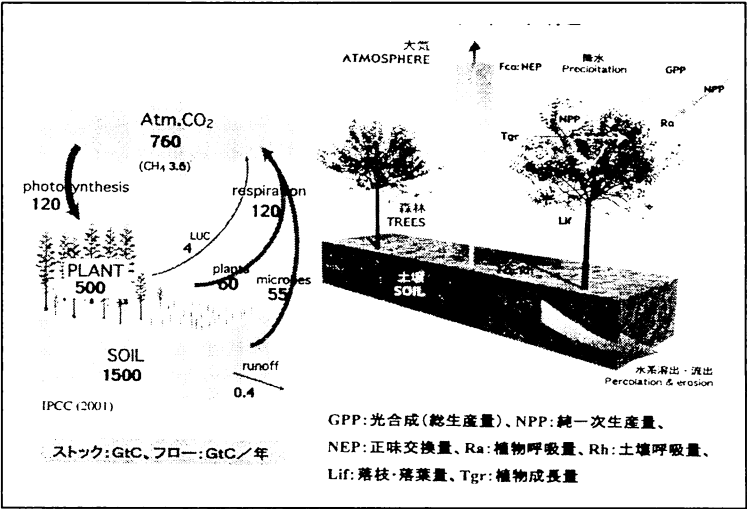


2. 森林生態系の炭素固定プロセスと炭素固定量の評価

岡山大学大学院 環境学研究科 山本 晋

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。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第4次レポート（2007）によると、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IPCCが調査研究成果をまとめて、現時点で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る。図－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。

さらに、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」を位置づけるとともに、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CO₂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、COP 7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%）の確保を目標としている。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も受けて、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いる。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CO₂吸収量（固定量）の野外調査による評価研究の現状を紹介する。



図－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

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CO₂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を組み込み、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CO₂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CO₂吸収量（総生産量）から植物の呼吸、有機物の分解によるCO₂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CO₂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。最近、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盛んに行われている。これらの研究・調査の成果を各種樹齢・環境条件下での植林の炭素吸収量推定精度の定量的評価、植林後の経過年数による炭素吸収量変化の検討に活用することが重要である。

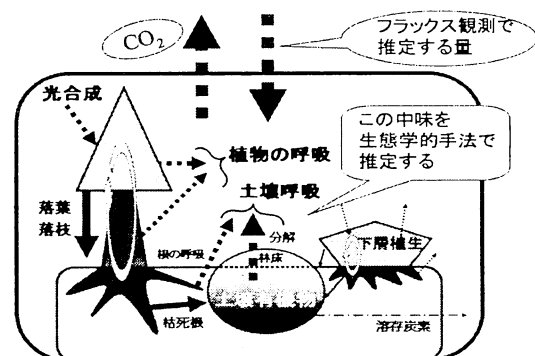
①生態学的方法による調査

樹木など生き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）する事によっ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微気象学的方法による調査

微気象学的手法は森林に立てた観測タワーを利用して、森林上でCO₂のフラックス（単位面積当たりのCO₂鉛直輸送量）をCO₂濃度高度分布・CO₂濃度変動観測、風速高度分布・乱流変動などの観測データから計算する方法で、特にCO₂濃度変動と乱流変動を高周期で観測して両者の相関からフラックスを求める渦相関法は近年広く用いられるようになった。この方法によりフラックスの日内変動、季節変動など短時間での炭素収支の変化の測定が可能になり、大気と森林生態系間のCO₂フラックスと気象条件の関係、炭素収支の季節変化、年々変化を詳細に調べることが出来る。図一2に各種陸域生態系での炭素フラックス観測と生態系調査による炭素蓄積量とフローを示す。

しかし、微気象学的方法にも炭素



図一2 各種陸域生態系での炭素フラックス観測と生態系調査による炭素蓄積量とフロー

収支推定値に20～30%の誤差があるといわれており、特に年間などの長期的な積算値の誤差は大きく、その検討が課題として残されている。

③生態学的な手法と渦相関法によって推定した炭素収支推定結果のクロスチェック

同一サイトで植物体現存量調査、土壌炭素調査などを行い、生態学的な手法によって推定した炭素収支推定値（炭素蓄積量とフロー）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を行ない、両手法の炭素収支誤差の要因の定量的な解析が行われている。

世界の諸研究機関・諸大学により、現在世界の200カ所を超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、CO₂収支が調べられている。これらのデータは、FLUXNET、AsiaFluxなどの相互に利用出来るネットワークを構築して共有し、地域からグローバルな陸域生態系の炭素収支の定量的把握を目指している。

3) 森林生態系の炭素動態モデルの検証とモデルによる広域（グローバル）の炭素収支の将来予測

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CO₂循環過程を解明し、気候、CO₂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試みが今始まっている。

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、CO₂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、大気中の窒素降下物の土壌富栄養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-3に示す。これによると現状と70年後の土壌、植生（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、CO₂濃度の上昇により増大している。

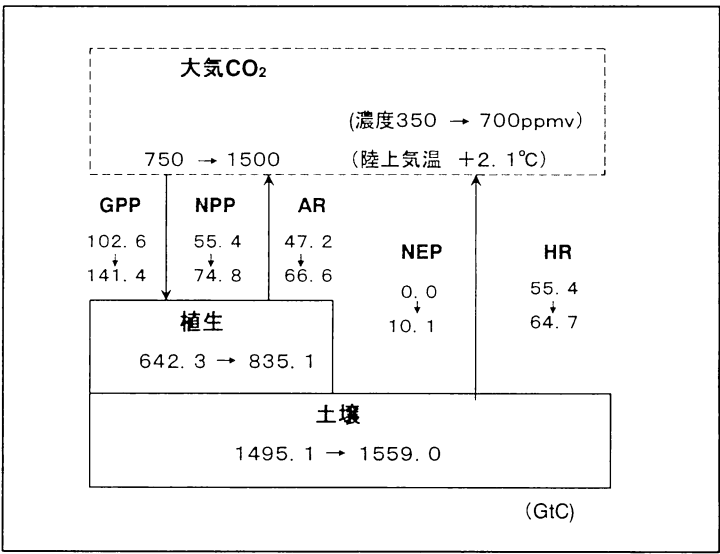


図-3 Sim-CYCLE によって推定された現在とCO₂倍増時（70年間の漸増）の陸上生態系の炭素収支の変化（現在から70年後）（及川、2002）

[参 考 文 献]

1. Owen, K.E. et al., 2007. Linking flux network measurements to continental scale simulations: ecosystem CO₂ exchange capacity under non-water-stressed conditions. *Global Change Biol.* 13, 734–760.
2. 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.
3. AsiaFlux (booklet): A regional network for coordinating the tower-based carbon flux research with the atmospheric, oceanic, soil, and terrestrial water researches.
4. 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.
5. 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.
6. Yamamoto, S. et al. 2005. Synthetic analysis of the CO₂ 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.
7. Kosugi, et al. 2005. Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest, *Agricultural Forest Meteorol.* 132, 329-343. 15. Fang, Jingyun et al. 2005. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947 to 1995. *Global Biogeochemical Cycle.* 19, GB2004 (10 pages).
8. Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., and Kondo, H., 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.
9. Ohtuka, 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.
10. 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 interannual change. *Agric. For. Meteorol.* 134, 122–134.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Falge, E. et al. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agric. For. Meteorol.* 113, 53–74.
16. 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.

謝辞：本発表は環境省地球環境総合研究推進費『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』（平成14-18年度）により行った研究成果の一部です。本研究の課題代表者及川武久筑波大学教授はじめ、関係の皆様深く感謝いたします。