

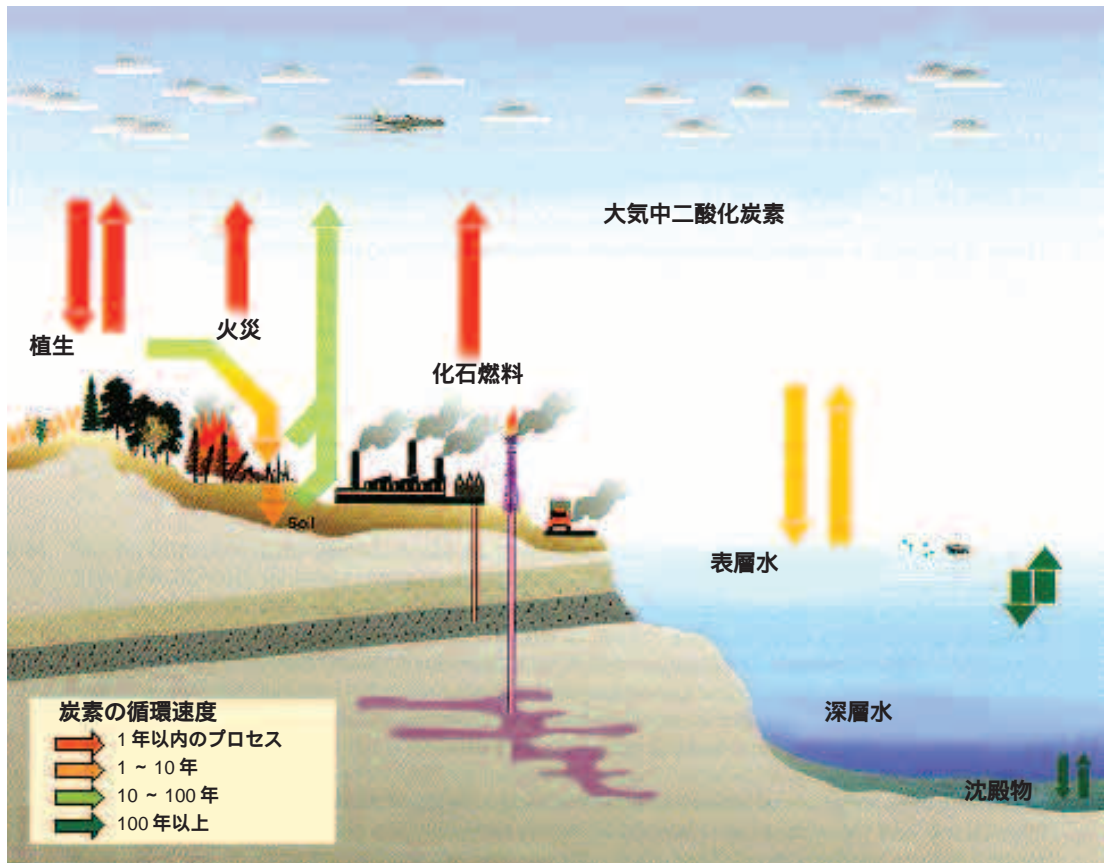
1 4 主な温室効果ガスの陸域と海域での生成源および吸収源

1 | 4 | 1 陸域と海洋の二酸化炭素吸収はどのような割合になっているか？

大気中の二酸化炭素の濃度が今後どの様に変化するかを予測するには、ここまで述べてきた大気中の炭素濃度の観測だけではなく、炭素が化石燃料 - 大気 - 森林 - 海洋の間を様々なメカニズムと時間スケールで循環していること【図13】をよく理解することが必要である。

二酸化炭素の比較的早い循環・蓄積は、陸域の森林や土壌への蓄積と、海洋表層水への溶け込みである。この総量は、10年規模で見ると化石燃料消費量の40%であるが、その割合は年により大きく異なり年間炭素吸収量にして0.5Pg【10】から4.5Pgである。この変動はエルニーニョなどと連動する気温変動によるもので、炭素循環のモデルからは、気温が上がると土壌からの放出量が増えるためと考えられて

【10】Pg
ペタグラム。重さの単位で、 10^{12} gのこと。

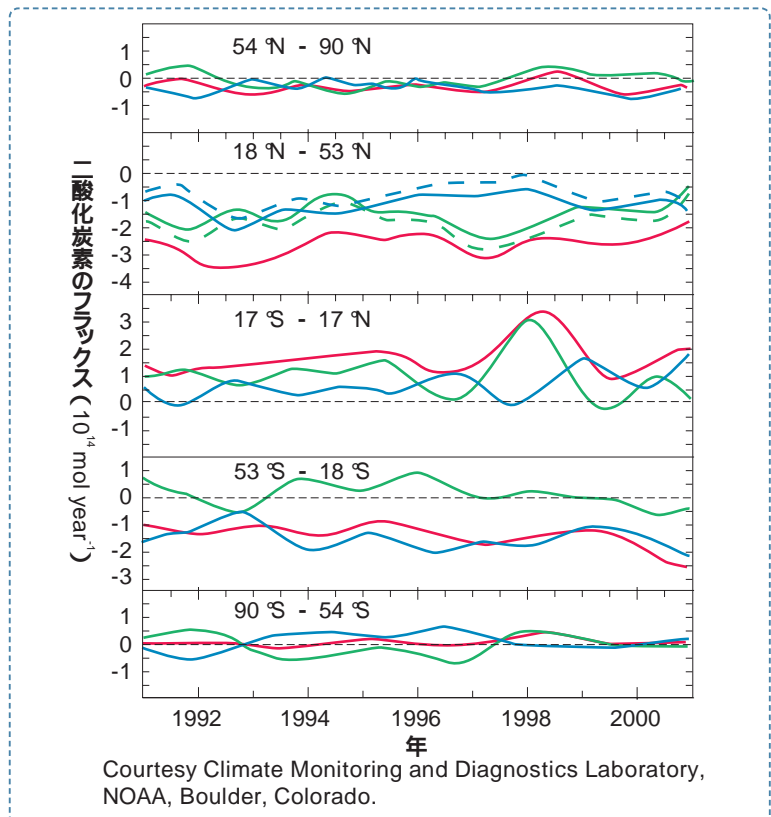


【図13】炭素循環のプロセスとその時間スケール

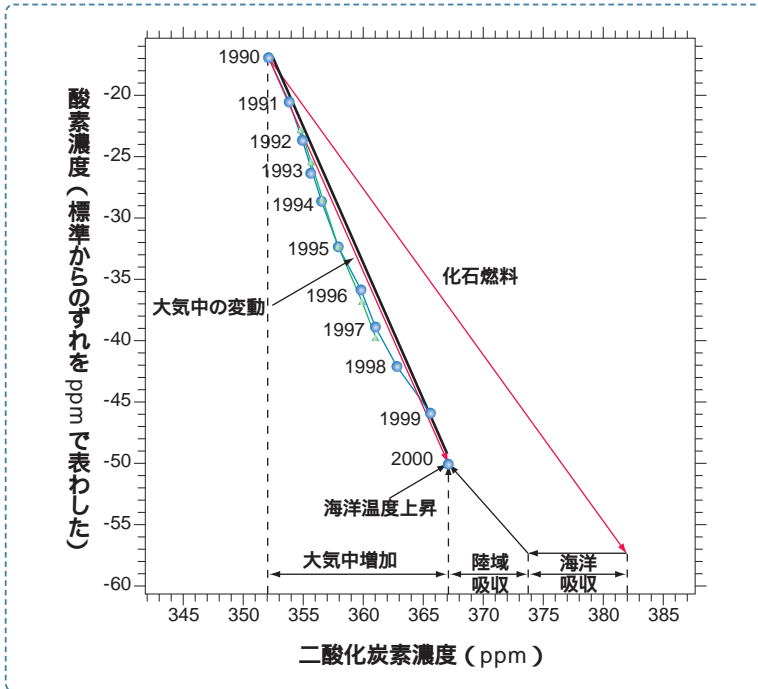
いる。

大気中の二酸化炭素には、質量数が12の炭素 (^{12}C) が約99%であるが ^{13}C の炭素同位体 (^{13}C) が1%含まれている。植物は ^{12}C の二酸化炭素をより効率よく吸収するので、過去の生物起源である化石燃料の中には ^{13}C が少ない。そのため化石燃料を消費すると大気中の ^{13}C の割合が少なくなり、逆に、現在の陸域の生物が二酸化炭素を吸収すると ^{13}C の割合が大きくなる。他方、海洋の吸収は物理的な溶け込みであるため同位体の分別が無い。これを利用して陸域と海洋の二酸化炭素吸収の割合を求めることができる。【図14】

同様なことが酸素濃度の変動についてもいえる。地球上の酸素は主として光合成により蓄積されたものであるが、化石燃料の消費に伴い消費される。植物は光合成により二酸化炭素を吸収し酸素を放出するので、化石燃料消費による酸素の減少を打ち消す働きをするが、海洋への溶け込みは酸素濃度に影響を与えない。



【図14】大気 - 陸域生態系 (緑) と大気 - 海洋 (青) の二酸化炭素フラックスの年々変動を各緯度帯についてプロットしたもの。赤は陸域・海洋の合計。緑と青の点線は炭素の同位体比 ($^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$) から推定した結果。点線は収支ゼロ、プラスは大気中への放出、マイナスは大気からの吸収を示す。(Tansら, 1989)

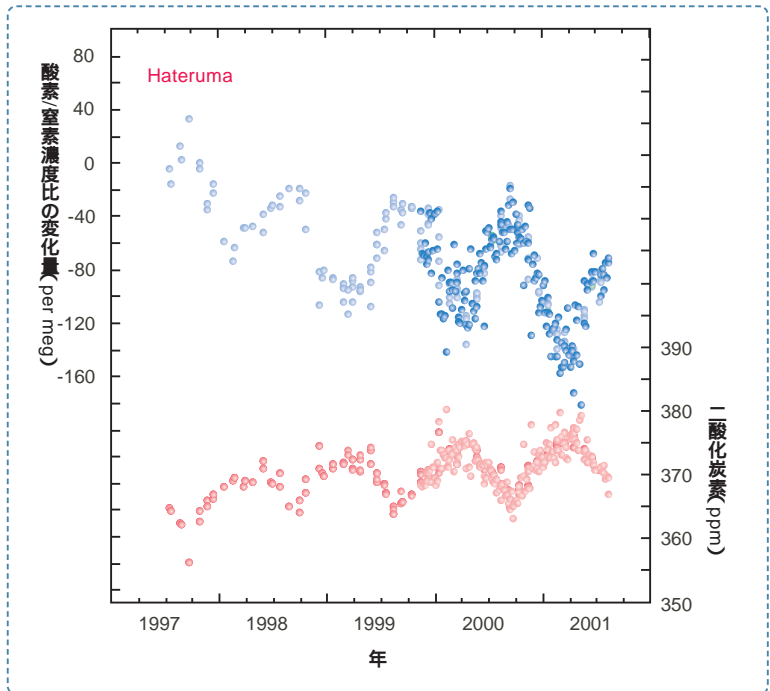


【図15】二酸化炭素と酸素濃度の変化割合は、化石燃料消費、海洋吸収、森林吸収により異なることを利用し、酸素濃度変化から陸域/海洋の二酸化炭素吸収量比を推定できる。(IPCC, 2001)

【図15】では1990年を出発点として、2000年までの化石燃料消費による酸素の減少と二酸化炭素の増加に伴う変動を第一の矢印で、次に海洋吸収による二酸化炭素の減少を第二の矢印で、陸域生態系での吸収による二酸化炭素の減少と酸素の上昇を第三の矢印で、さらに海水温の上昇で酸素が放出されるのを第四の矢印で示してある。そして第5の矢印が毎年の二酸化炭素増加と酸素減少の印の2000年の値に合致しなくてはならない。化石燃料消費量と海水温の上昇が分かっているのので、二つの矢印が合致するように海洋と陸域の吸収を調整した結果、海洋吸収が $1.7 \pm 0.5 \text{PgC/year}$ （ペタグラム炭素/年）、陸域吸収が $1.4 \pm 0.7 \text{PgC/year}$ という結果になった。

酸素の濃度変動は7桁の精度で測定しなくては検出できない。わが国ではガスクロマトグラフィー【11】による自動連続観測方式が開発され、波照間のモニタリングステーションで観測が実施されている【図16】。

【11】ガスクロマトグラフィー
ガスクロマトグラフィーとは、混ざり合った複数の成分を個々の成分に分離するクロマトグラフィーという分析手法の一種で、移動相（キャリアーガス）に気体（Heなど）固定相に液体を使用している。通常は注入されたサンプルを高熱で気化させ、窒素やヘリウムを流してカラム（管）中を通過する際に吸着・脱着を繰り返して成分ごとに分離が起こり、それを検出器で検知する。



【図16】波照間モニタリングステーションでの二酸化炭素濃度（赤）と大気中での酸素と窒素濃度の比（青）の変動の実測例。（Tohjima, 2000）

per meg

酸素/窒素濃度比の変化を示す単位

$$\left(\frac{[\text{O}_2/\text{N}_2]_{\text{測定}}}{[\text{O}_2/\text{N}_2]_{\text{標準}}} - 1 \right) \times 10^6$$

1ppmが4.8per megに相当

1 | 4 | 2 | 陸域にどのように二酸化炭素が吸収されているか？

地球上の炭素は「大気、海洋、陸上植生、地圏」という貯蔵庫に分かれて存在しており、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、循環している（このようなプロセスを炭素循環過程と呼んでいる）。大気中の二酸化炭素が増加しているということは、化石燃料消費や熱帯林の破壊などの人間活動による大気への二酸化炭素放出（大気貯蔵庫への入）が、海洋および陸上植生の貯蔵庫への吸収・固定を上回ることにより、炭素の大気貯蔵量が増えていると言い換えることができる。そこで、大気中二酸化炭素濃度上昇とその将来推移を考える上で、各貯蔵庫間の炭素の出入りの定量的説明が大変重要になる。

森林生態系における炭素の循環と固定

森林が光合成作用によって大気中の二酸化炭素を取り込み、有機物を生産することはよく知られている。この生産量の大きな部分は森林自体の呼吸により消費されて、二酸化炭素を大気に戻し、残りの部分が森林の生物部の増加となる。また、森林の生物部の一部は枯死し、落葉・落枝となって地面に落ちる。一方、地面上層部の土壌は多くの有機物を含んでおり、その量は落葉・落枝による有機物の増加と有機物の微生物による分解での二酸化炭素の放出により増減するが、有機物の分解速度は温度や土壌水分量などにも支配されている。

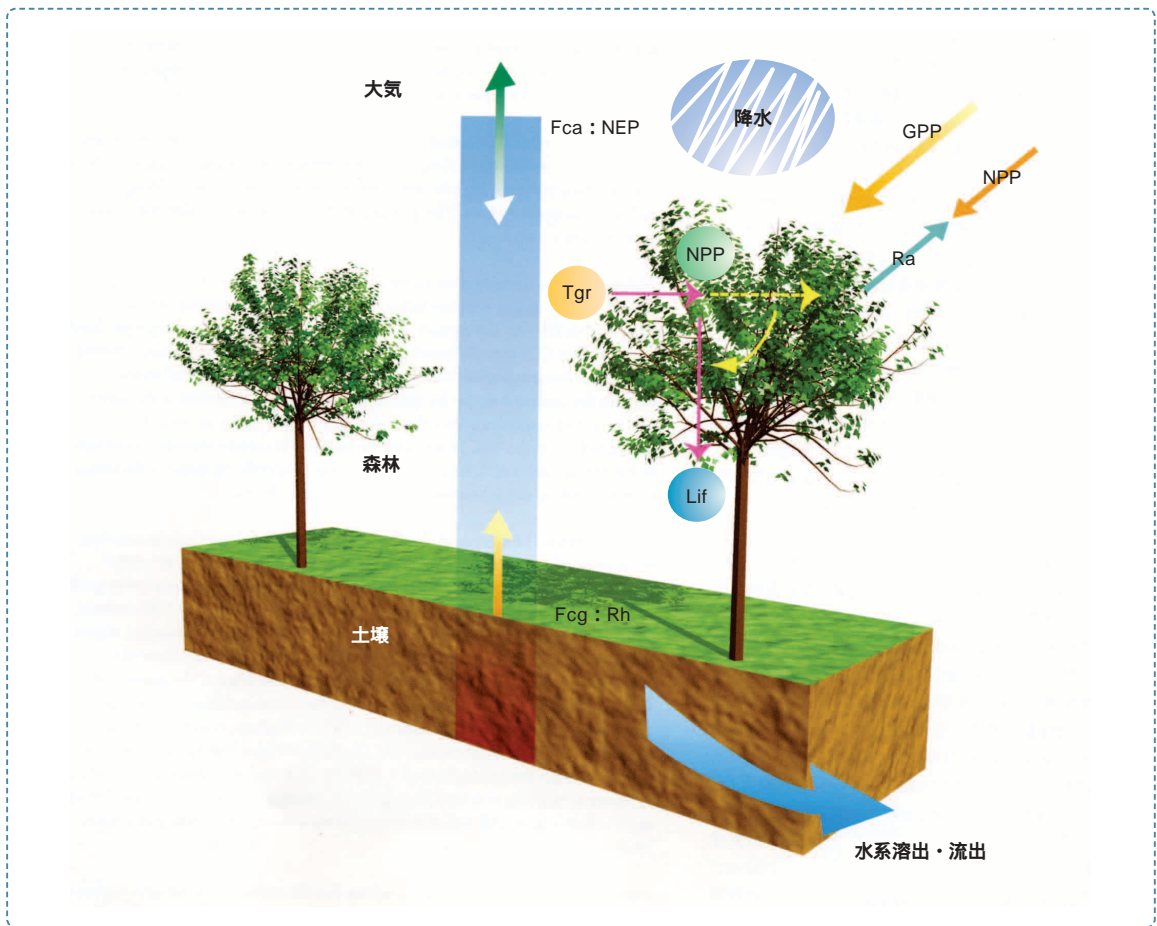
森林生態系でのこれらの諸量の関係を示したものが【図17】である。このように、森林生物部と土壌を含むこの森林生態系での炭素吸収、分解過程には多くの要因が関連し合っているが、現状では森林生態系での炭素循環は十分に解明されておらず、次のような課題が残されている。

第一に、森林生態系と大気間の二酸化炭素交換量を合わせて、生物部への炭素蓄積量（材積量）、土壌中の有機炭素の蓄積量の変動を長期的に観測し定量的に明らかにすること。

第二に、大気中二酸化炭素濃度は年々増大しているが、それに伴う野外環境での森林の光合成速度の増加（二酸化炭素施肥効果といい、温室栽培などではその効果は確認済みである）を量的に調べること。

第三に、大気中の硝酸塩やアンモニウム塩などが沈着・降雨などにより、土壌に取り込まれて生ずる土地富栄養化や気候温暖化などによる森林成長促進効果、気温上昇に伴う有機物分解速度などの増大の影響を解明すること。

これらは長期的かつ多地点での観測や研究が必要であるが、そう容易ではなく、現状ではこれらの課題を考える上での基礎的データや知見があまりにも不足している。



【図17】 森林生態系での炭素の循環と固定
 ここで、GPP（総生産：光合成生産量）、NPP（純一次生産量）、NEP（純生態系生産量）、 Ra （植物呼吸量）、 Rh （土壌呼吸量）、 Tgr （植物生物増加量）、 Lif （落枝・落葉量）である。

森林生態系による二酸化炭素の吸収はどのように測定されているか？

大気と森林生態系間の二酸化炭素フラックス（【図17】のNEP）を森林に立てた観測タワーで二酸化炭素と鉛直風速の変動観測から求め、大気と森林生態系間の二酸化炭素フラックスと気象条件の関係、炭素収支の季節変化、年々変化を解明している。このようなタワー観測は森林生態系での炭素循環モデルを構築する上で不可欠であり、特に特定地点での森林上層と大気間の二酸化炭素のフラックスを直接的に知ることができ、しかも長期的な連続観測に適している。

また、タワー観測地点の周辺で、「森林光合成・呼吸、土壌分解、樹木の高さ・直径や成長量」などの森林生態学的調査を併せて行うことも重要である。このようなタワー観測の試みが世界の諸研究機関、諸大学で始まっており、様々な植物生態系におけるフラックスの長期

モニタリングは、IGBP【12】研究計画の中でもBAHC【13】、IGAC【14】、GCTE【15】のコアプロジェクトにおける中心課題とされている。

産業技術総合研究所は岐阜大学流域環境研究センターと協力して、飛騨高山で1993年10月から二酸化炭素フラックスと気象条件のタワー通年観測を実施している。ここでは、大気と森林生態系間の二酸化炭素のフラックス、二酸化炭素濃度の他に熱や水蒸気のフラックス、気温・風・湿度・日射量等の気象条件、森林生物量、樹種・樹冠高度、葉面積指数(単位面積の地面上にある樹木の葉の面積の総和)、土壌水分・温度、土壌呼吸量、落葉や枯れ枝量とそれらの分解速度などを観測調査している。これらは世界でも数少ない貴重な長期観測データである。

日本の高山冷温帯落葉広葉樹林での二酸化炭素フラックスの季節・経年変化(日中、夜間、全日別の二酸化炭素交換量の月別積算値、1993年10月～1998年12月)を【図18】に示す。測定地点の海拔高度は1,420m、平均気温7.3℃、年間降水量2,400mm、積雪量1～1.5mで、主要樹種はカンバ類、ミズナラで樹高は15～20mである。森林が活動を開始する5月末から光合成が盛んになり、二酸化炭素交換量が正の値(森林への二酸化炭素吸収)となり7、8月に二酸化炭素吸収量が最大になっている。これが9月になると森林の生産活動が弱まり二酸化炭素吸収量は急減する。落葉の時期は10月上旬で、積雪は12月上旬から4月中旬の間見られる。また、フラックスの年々変動、たとえば1994年夏季と1995年夏季の日中の二酸化炭素吸収量を比較すると、後者は前者の70%程度と小さく、特に6、7月にその傾向が顕著である。このような年々変動は森林の光合成量、有機物分解量が日射量、気温の変化や梅雨の活動状況に関係していると考えられ、将来の気候変動により森林生態系の二酸化炭素吸収量が変わることを示唆している。

【図19】は、ヨーロッパのフラックス長期測定結果から推定した、二酸化炭素吸収量(負値は大気から森林生態系への取り込み)を緯度別に示したものである。これを見ると、0～7tC/ha/年とその幅は大きい、いずれの地点でも森林生態系が二酸化炭素を吸収しているという結果になっている。

東アジアとヨーロッパでの結果から、平均的には森林生態系は年間300gC/m²(3tC/ha)程度の炭素の取り込みとなっていることが分かる。この結果を用いて、世界の保護林(530万km²:全森林面積の13%)による二酸化炭素取り込み量を仮に推定すると1.6PgC(ペタグラム炭素)/年となる。このような現場での直接的な二酸化炭素フラックスの測定結果から、IPCC(1996)が森林再生やその他の植生活動よるとした吸収・固定量の推定値(0.5～1.9PgC/年)に相当する値が保護林だけで得られる事は注目に値するだろう。

【12】IGBP

[International Geosphere-Biosphere Programme]

地球圏 - 生物圏国際協同研究計画。科学とその応用分野における、国際的活動を推進する組織である国際科学会議(ICSU)が主催する学際的な国際研究計画。このプログラムは我々の生命を支えている地球システムを制御している物理的、化学的、生物学的プロセスの相互作用を記載し理解すること、又人間活動によるこの地球システムの変化の行方についても理解することを目的としている。そのために、八つのコアプロジェクトおよび三つの横断的なフレームワーク活動を行っている。1986年に設立。

【13】BAHC

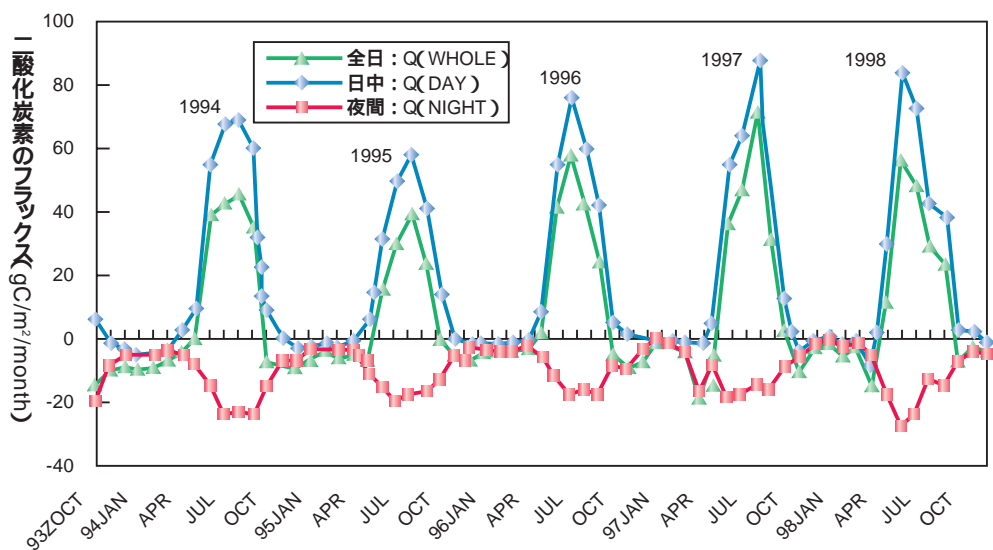
[Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle]

水循環の生物学的側面国際協同研究計画。土壌 - 植生 - 大気系におけるエネルギー・水フラックスモデルの開発のために、現場観測を通じて、生物圏の水循環を支配する因子を決定する。また、生物圏と物理的な地球システムとの相互作用を示し、このような相互作用のモデルシミュレーションのテストや検証に用いることが可能なデータベースを開発することを目的としている。IGBPのコアプロジェクトの一つ。

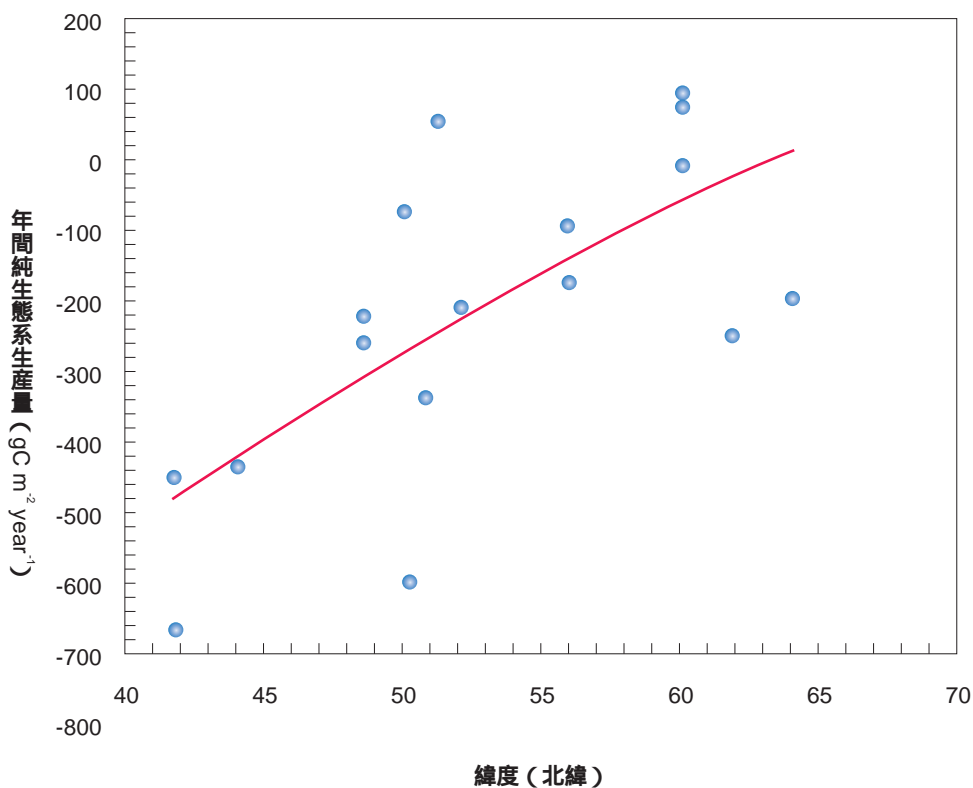
【14】IGAC

[International Global Atmospheric Chemistry Project]

地球大気化学国際協同研究計画。大気組成を主に扱う。その目的は、大気組成の基礎的な理解の向上、大気化学組成と物理、生物および気候の諸過程の相互関係の理解、大気組成に与える自然的影響および人為的影響の予測である。IGBPのコアプロジェクトの一つ。



【図18】 飛騨・高山の落葉広葉樹林における二酸化炭素のフラックス（全日:Q(WHOLE)、日中:Q(DAY)、夜間:Q(NIGHT)の月別積算値)の季節・年々変動(1993年10月~1998年12月) 正値が大気から森林への取り込み。(Yamamotoら, 1999)

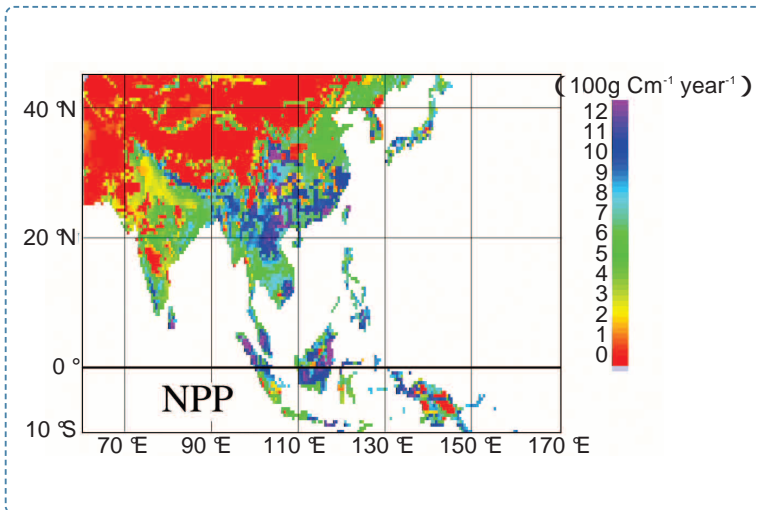


【図19】 ヨーロッパの長期測定結果による二酸化炭素吸収量(負値が大気から森林への取り込み)の緯度変化。(Ronald,1998)

森林吸収のモデルとスケールアップ

このような森林での観測データを基に、陸域生態系の炭素吸収量の分布や、将来予想される気候変化によりそれがどう変化するかを予測するには、【図17】に示した各プロセスをモデル化する必要がある。わが国の代表的なモデルであるSim-CYCLEを例として紹介しよう。ここでは「植物の葉、幹、根と落葉・落枝、無機土壌」の箱を考える。これに様々な種類の植生について、植物の光合成と呼吸、落葉・落枝量、土壌有機物の分解などの速度を、二酸化炭素濃度、気温、湿度などの環境因子をパラメータとして与えて計算する。長期にわたってこの計算をすると、安定な自然の炭素貯留量が分かるようになる。アジアでそれを計算した結果を【図20】に示す。また、二酸化炭素がその後70年の間に2倍になるとして、アジアモンスーン地帯でのNPP（純一次生産、【図17】参照）がどのように増加するかを計算した結果を【図21】に示す。

しかし、実際の二酸化炭素固定量がどのようになるかについては、二酸化炭素増加の結果引き起こされる気候変化（気温上昇、降雨の変化）や、それに伴う植生の変化など様々な要因が絡み合うので、未だモデルは開発中で信頼できる予想はできてはいない。

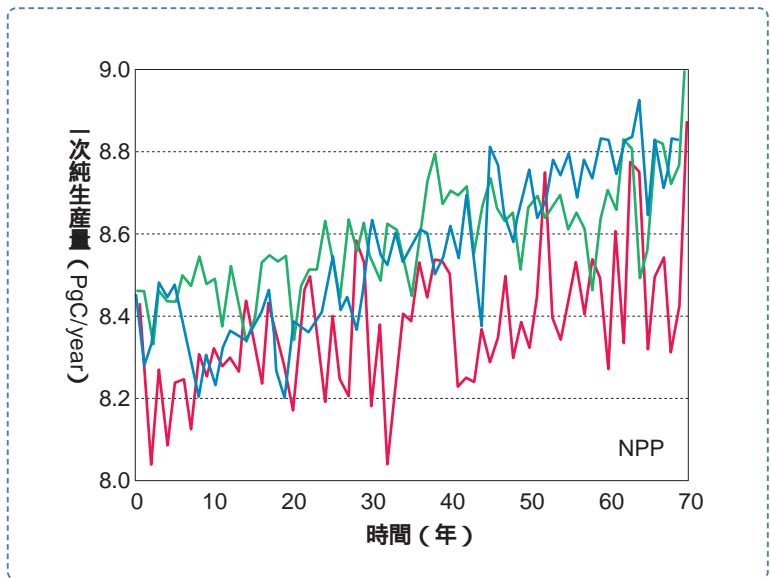


【図20】 Sim-CYCLEモデルで計算された東アジア地域での植生による純一次生産量（NPP Mg/ha/年）（Oikawa and Ito, 2001）

【15】GCTE

[Global Change and Terrestrial Ecosystems]

地球変化と陸域生態系研究計画。気候、大気組成および土地利用の変化による、農林業システムを含む陸域生態系への影響を予測し、これらの影響がどのように大気や気候システムにフィードバックされるかを観測することを目的とした研究計画。IGBPのコアプロジェクトの一つ。



【図21】アジアモンスーン地帯の陸域生態系の純一次生産の変動予測。赤はGFDL、緑はGISS、青はMRIの二酸化炭素漸増(年1%)に伴う気候変化予測を用いて計算した結果。(Oikawa and Ito, 2001)

モデルの信頼性はどのように確認できるか？ 大気観測からのアプローチ

個々のタワー観測ではその地域、植物種での炭素循環が解明されるが、その結果は緯度、気象条件の異なる諸地域、色々の植物種にそのまま適用することはもちろんできない。また、炭素蓄積量の調査では短期間の増加は計測することができない。陸上植物生態系のグローバルな吸収・固定量を推定するには、気候、緯度などの異なる諸地域での多様な植物種に対する測定結果を集結し、総合的に解釈することが大切である。

このような視点から、色々な緯度、環境での森林生態系と、大気間の二酸化炭素交換量(フラックス)の長期観測とネットワーク化が重要であり、さらにはフラックス観測と併せて気象条件調査、植生・光合成活動・土壌分解などの森林生態学的調査や、衛星による地表画像観測が不可欠である。

このような調査活動を進めるため、学際的な研究者の共同による世界的規模での観測網(フラックスネット)の構築が現在進んでいる。東アジアは欧米に比較して地表被覆が複雑であり、またモンスーン高湿、多雨気候下で特異であることから、日本を始めとする韓国、中国などの関連する研究所と大学が手を結び、アジアのフラックス測定網(AsiaFlux)が整備されつつある。(http://www-cger.nies.go.jp/moni/flux/asia_flux)

これとは独立して、大気中の二酸化炭素濃度観測ネットワークの

データから、どこでどれだけ放出・吸収が起こっているかを推定する試みがなされている。二酸化炭素の放出・吸収は地表で起こっているが、それが大気の運動で輸送され混合し、ある大気中での二酸化炭素濃度分布をもたらすことになる。単純化すれば、森林が吸収源であれば、その風上の濃度に比べ風下の濃度が下がることになり、風速と濃度差から途中で吸収された量が分かるという原理で推定が可能である。

世界の二酸化炭素モニタリングネットワークで得られた二酸化炭素濃度分布に合うように、世界を亜大陸規模に分割して、そこでの収支を推定した結果（インバースモデル）を【図22】に示す。図の中に示した数字がその地域での二酸化炭素の放出量（マイナスは吸収量）である。赤の数字は後述するシベリア上空の大気観測データを入れた場合の推定値である。

このデータ解析では、二酸化炭素濃度のわずかな差から吸収量を推定するので、相互に比較できる絶対濃度の信頼性が重要である。そこで現在測定器を校正する標準ガスを統一する方向で各観測機関の間での調整が進んでいる。また、二酸化炭素だけでなく、メタンや同位体、酸素なども同様に高精度の観測ネットワークを作ろうという動きがある。

もう一つ重要なことは、現在の観測ネットワークが先進国に偏りカバーしていない地域があることである。アフリカ中部、東南アジア、南アメリカ北部など熱帯域や、シベリアなど陸域がそれにあたる。陸域の地上ではごく近傍の森林や化石燃料消費の影響を直接受けるので、航空機などで上空の大気を観測することが有効と考えられる。

【図22】の赤数字は、国立環境研究所が行っている航空機モニタリングのデータを加えて計算した結果である。新たなデータは、風上にあたるヨーロッパやシベリアの吸収量が増え、推定誤差が小さくなるという効果をもたらした。今後、観測の欠けている地域を埋めることが重要で、地上観測を充実させるとともに、衛星などからの広域の観測が望まれている。また、現在の解析は数千kmの粗い分解能でしか解析できていないので、さらに密な大気観測網のデータから国別規模での吸収量を推定し、フラックス観測など地上観測データに基づくモデル推定と比較検証することが必要である。