

フル・カーボン・アカウンティングのための 森林炭素循環モデルの利用

Application of Forest Carbon Cycle Model for Full Carbon Accounting

伊藤 昭彦
Ito, Akihiko

キーワード: 京都議定書、数値シミュレーション、生態系炭素収支、プロセス・ベース・モデル

要約: 京都議定書の第二約束期間には森林生態系全体を対象としたフル・カーボン・アカウンティング (FCA) によって吸収源効果の定量化が行われると考えられる。広域的なFCAの実施には、インベントリーやリモセンなどの手法と同時に、プロセス・ベースの炭素循環モデルによる大気-植物-土壌を通じた炭素動態の数値解析が有効である。生態学的な炭素循環モデルを用いて、樹幹だけでなく根系や土壌を含めた炭素収支の時間変化を再現し、FCAに適用する可能性について議論した。

Abstract: In the Second Commitment Period of the Kyoto Protocol, it is expected that full-carbon-accounting (FCA) would be adopted as a standard method for quantifying forest carbon sequestration. To conduct FCA at broad scales, numerical analyses of carbon dynamics through atmosphere, vegetation, and soil, with appropriate process-based model, should be effective, in conjunction with inventory and remote sensing studies. In this study, using an ecological carbon cycle model, a numerical simulation was conducted to retrieve temporal change in carbon budget including not only woody stem but also root and soil organic matter; based on the result, discussions were made on the applicability of model approach to FCA operation.

Key Words: ecosystem carbon budget, Kyoto Protocol, numerical simulation, process-based model

はじめに

地球温暖化防止の方針設定を目的として1997年12月に京都において気候変動枠組み条約第3回締約国会議（京都会議）が開催された。そこで採択された京都議定書では、大気中の温室効果気体増加の主因となっている先進諸国（附属書I国）に排出量削減の数値目標が設定されたが、その削減量には森林における二酸化炭素（CO₂）収支が加算されることになった。つまり、一定期間中の植林や伐採に伴う国内の森林面積変化（3条3項）や、森林管理による炭素貯留量の増減（3条4項）を、化石燃料起源CO₂放出量の変化と同様に定量化する必要性が生じた。この方針は当初、森林の炭素収支に関する不透明さから大きな議論を巻き起こしたが、京都議定書以降の交渉（COP7（マラケシュ）など）で具体案が詰められ、日本も相応の対策を執ることが求められている。アメリカが京都議定書の枠組みから離脱したものの、ロシアは2003～2004年中に批准する見込みとなっており、京都議定書の内容は実現に移されようとしている。

日本は附属書I国に含まれており、2008～2012年の第一約束期間までに1990年比-6%の温室効果気体排出量削減が求められている。内閣が定めた地球温暖化対策推進大綱によると、3条3項に含まれる植林・伐採・再植林（ARD活動）の収支は+0.2%相当となるものの、3条4項に含まれる森林管理活動によって-3.9%相当（約1,300万炭素トン）の削減を実現するという。すなわち、合計-3.7%分が国内の森林による炭素吸収効果に依存することになる。これを受けて、農林水産省は「地球温暖化防止森林吸収源10カ年対策」を立ち上げ、森林の炭素吸収効果の評価と活用を推進することになった。第一約束期間の前年にあたる2007年までに、各国は森林炭素吸収量进行评估する体制を整備する必要があるが、時間的制約から、この時点では森林面積と平均材積に基づくインベントリー的手法が中心になると考えられる（IPCC 2000）。つまり、ここで採用されたグロス-ネット方式では1990年の森林吸収は考慮されないが、第一約束期間中の森林炭素収支は評価に組み入れられる。しかし、土壌や根系を含めた生態系全体での炭素収支は定量化が

困難なため、統計的データが整備されている森林面積と幹材積に基づいた手法が採用されると考えられる。そのため、現在、幹部から樹体全体の値へ変換する（拡大）係数や、材積/乾物重から炭素重へ変換する係数に関する研究が森林総合研究所などで実施されている（例えば小野 2003）。

一方、2013年以降の第二約束期間では、植物と土壌を含めた生態系全体での炭素収支を扱うフル・カーボン・アカウンティング（FCA）が採用されると予想されている。そこでは植林や伐採に伴うバイオマス量の変化だけではなく、土壌有機炭素量の変化をも考慮する必要がある。また、3条4項における森林管理の内容次第では、植林・伐採を伴わない既存の森林においても同様な測定を行う必要が生じる可能性もある。しかし、国内の全森林を対象に現地調査を行うことは現実的でないし、特定の森林を対象とした場合でさえ非破壊的に炭素貯留量を測定することは非常に困難である。生態系の状況を詳しく知ろうとするほど、その観測活動が対象の生態系に影響を与えてしまうため真の状況が把握できなくなるという、ある種の不確定性原理が存在するらしい。現在では、空気力学的方法（代表的には渦相関法など）によって群落上空でのCO₂交換を測定する方法が有力である。実際に、国内だけで20カ所以上に観測用タワーが設置されて継続観測が進行中である。この空気力学的手法には、施設の設営と維持には多くの資金と労力が必要なこと、測定データに反映される陸地面積（フット・プリント）が広くないこと、大気や地形の条件によっては誤差が大きくなること、などの問題が残されており、その解決に向けた努力が行われている。空気力学的方法で直接検出されるのは、あくまで大気との交換量であるため生態系の内部情報を得るためには生態学的・林学的な調査を同時に実施する必要がある。例えば、生態系から放出されるCO₂量を植生と土壌の寄与分に分離するには、個別構成要素に関する詳細なデータに基づいて解析を行わなければならない。

大きな問題の一つは、吸収源効果の推定を同等の精度で広域的に実施しなければならないことである。周知のように日本では森林率は67%に達しており、それは急峻な地形や南北差などの要因により著しく変異が大きい立地環境に成立している。また人工林が約40%を占め、その他の天然林も人手が加わっていないものはほとんど存在しない（日本林業協会 2001）。このよ

うな森林の多様性と不均質性のため、限られた地点数のデータから高い精度でFCAを実現することは一見して困難に思われる。その事情は他国でも同様であり、むしろ面積が広大な分だけ問題は深刻と言えるかもしれない。それでも、衛星リモートセンシングを用いた植生指数などの利用により、タワー観測（数km²）から地域（数万km²）へのスケールアップが試みられている（Martin et al. 1998）。吸収源問題に限らず、グローバル炭素循環研究ではリモートセンシングは不可欠の手法となっている。

もう一つの有効な手法は生態系の炭素動態プロセスに基づいた数値モデルの利用である。回帰関係に基づく統計的モデルは従来の林学的研究でも材積成長の予測などに盛んに利用されてきたが、それは多数の測定によってデータの信頼性が確立されていたこと、データが採取された幅広い条件内で内挿的に使用されていたことが妥当性の裏付けとなっていた。一方、FCAにおいては根系バイオマスや土壌炭素など、必ずしも質量ともに十分なデータが得られているわけではない要素について推定を行う必要があり、また測定条件の範囲外にある森林への外挿がしばしば必要になると予想されるが、その場合でも妥当な推定値を与えるモデルが期待される。いわゆるプロセスベースのモデルは、光合成・分配・呼吸・枯死・分配といった炭素の移動（フラックス、フロー）を直に推定し、その結果に基づいて炭素貯留量の変化および大気との正味交換を計算する（後述）。この手法では炭素フラックスの生理学的な制限要因を考慮するため、幅広い条件に適用した場合にも異常値を与える可能性が低く、環境変動（大気CO₂濃度の上昇や気候の温暖化）に対する影響評価にも適しているとされる（Reynolds et al. 1996）。国内ではプロセスベースのモデルに関する研究は必ずしも盛んではないが、例えばChiba（1998）はスギ林分、Oikawa（1998）は常緑広葉樹林における、炭素収支の数値シミュレーションを行っている。また、Nakane and Lee（1995）は伐採後の森林における土壌炭素貯留の変化をモデル的に解析している。吸収源問題における1990年に対する2010年の値、といった中長期的時間スケールでは、モデル的手法は特に有効性を発揮する。前出の温暖化対策推進大綱や森林吸収源10カ年計画などの政策決定においても、適切なモデル予測は重要な役割を果たすはずである。一例を挙げると、環境省の地球環境研究総

合推進費戦略的研究開発プロジェクトとして「21世紀の炭素管理にむ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）が目下実施中であるが、その最終目標は端的に表現するとアジア地域を対象としたFCAである。その中では炭素収支を推定するプロセスベースのモデル開発が重点項目の一つに上がっている。

本稿は、森林生態系を対象としたプロセスベースモデルについて現状を総括し、モデル研究の1例を示すとともに、そのFCAへの適用に関係した議論を提起することを目的としている。森林の炭素吸収源効果は広い意味で環境的資源とみなせ、炭素収支の評価と管理は、従来の木材生産を主目的とした森林資源管理の範囲を超える部分もあるが、共通する部分もまた多い。明確なのは、大気・植物・土壌にまたがる学際的な研究無くしては信頼性のあるFCAを実施することは限りなく困難という点である。ここで提示されるプロセスベースモデルは植物生態学的研究に端を発しているが、森林管理に関する林学的問題への応用を試みることで学際的研究の可能性を模索してみたい。

1. 森林生態系の炭素循環とFCA

森林から草原まで陸上生態系における炭素循環の枠組みは共通している。図7.1は森林（または草原）生態系における大気とのCO₂交換フラックス、植物と土壌内での炭素フロー、および主要な炭素貯留（プール）を示している。温室効果気体の排出削減という京都議定書の目的に鑑みて、最も重要な指標は大気に対する正味のCO₂交換量である。それは生態系生態学の用語で純生態系生産（NEP）と呼ばれ次式で定義される。

$$[1] \quad \text{NEP} = \text{光合成} - (\text{植物呼吸} + \text{微生物呼吸})$$

前出の空気力学的方法で測定されるのは、一般にこのNEPである。しかし、FCAの観点ではこのNEPでは不十分である。なぜなら、植林や伐採を伴う森林（人工林）では有機物の形で炭素が系外と交換される上、森林火災や草食動物による被食が無視できない影響を炭素収支に与える場合があるからであ

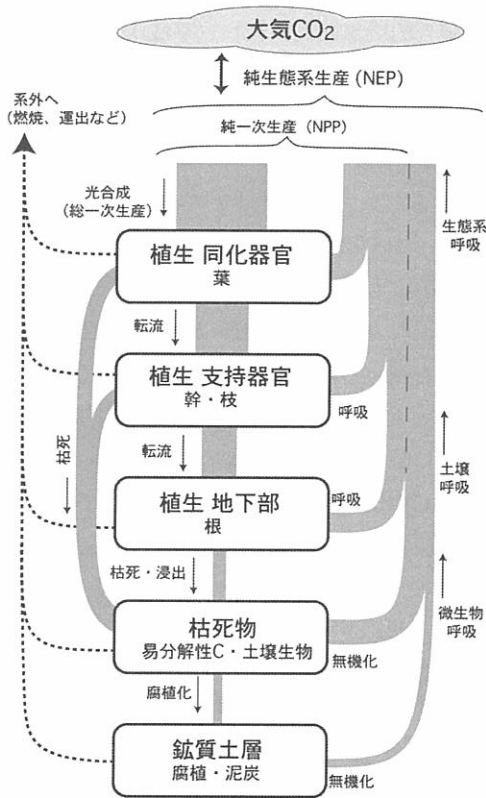


図7.1 森林生態系における炭素循環の模式図

大気に対する正味のCO₂交換(NEP)およびその他の火災・伐採に伴う放出を示す。それらの合計値が純バイオーム生産(NBP)となる。

る。そのため、より包括的な正味交換量として純バイオーム生産(NBP)という概念が提示されている(Schlze et al. 2000)(図7.1参照)。

$$[2] \quad \text{NBP} = \text{NEP} - (\text{伐採、燃焼など})$$

このNBPは攪乱を被った生態系においても炭素貯留変化と対応した量となっておりFCAに適している。図1に示されているように、森林の炭素循環にお

いて土壌有機炭素は重要な役割を果たしている。これまで多くの実測研究が、植物バイオマスよりも土壌有機物により多量の炭素が貯留されていることを明らかにしている（例えばDixon et al. 1994）。土壌有機炭素の貯留量変化 (Δ) は

$$[3] \quad \Delta \text{土壌有機炭素} = \text{枯死物供給} - \text{分解量} \text{ (一燃焼など)}$$

で求められる。しかし、根系からの枯死物供給を把握することは技術的に困難である。また、土壌表面からのCO₂放出には土壌有機物分解だけでなく根系の呼吸が含まれているので、上[3]式中の各項を定量化するには克服すべき課題が多いのが現状である。それでも、ミニライゾトロンを用いた細根動態の継続観察や同位体トレーサーを用いた根系呼吸の分離法などによって徐々に信頼性の高いデータが集積されつつある。日本独特の現象として、火山灰性土壌が広く分布し、それらは国外の同様な気候帯に生成する土壌と比較して有機炭素の含有率と貯留量が顕著に高いことが知られている。植生の生産力 (= 枯死物の供給) には大差がないので、これは土壌中での炭素の平均滞留時間が長いことを意味している。

光合成と呼吸は温度などの環境条件に敏感に応答するため、(自然状態でも) NEPには日一季節一経年的な変動が観察される(例えばSaigusa et al. 2002)。そのため、FCAは特定の短期間のデータではなく、少なくとも数年以上にわたる継続的なデータに基づいて実施されるべきであるとされる(例えば第一約束期間の5年間)。林分成長あるいは生態系遷移に伴う生産力および貯留量の変化に関しては、Bormann and Likens (1979) などの古典的な研究によってパターンが解明されており、Houghton et al. (1983) によって典型的モデルも提案されている。しかし、間伐や枝打ちなどの森林管理施策が、土壌を含めた炭素貯留に長期的に与える影響に関しては研究例が少ない。中長期的なNBPパターンは、FCAだけでなく今世紀中の気候変動に対する陸上生態系のフィードバック効果を明らかにする上で重要であり、今後ますますの研究が必要である。

2. 研究例

炭素循環モデル

炭素循環モデルがFCAに適用可能であるためには、自然要因と人為要因の両方を考慮した上でNBP（式[2]）、最低でもNEP（式[1]）を評価可能である必要がある（伐採に伴う炭素の系外への持ち出しはシナリオとして設定する人が多いため）。ここでは、地球フロンティア研究システムで開発された陸上生態系炭素循環モデルSim-CYCLE（Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems; Ito and Oikawa 2002）を使用した。モデル構造は、図7.1に示された森林生態系炭素循環に準拠している。つまり①葉、②幹枝、③根、④枯死物（リター）、⑤鉱質土層（腐植）の5個の炭素プールを設定し、それぞれについて貯留量の時間変化（ ΔW ）を次式によって逐次的に求める。

$$[4] \quad \Delta W / \Delta t = \text{input} - \text{output}$$

ここで Δt は計算の時間刻み幅、inputは単位時間幅あたりの外部からの流入速度（光合成、転流、枯死物供給など）、outputは外部への流出速度（呼吸、死亡、分解など）である。各炭素フローの推定方法と環境依存性は表7.1に要約されている。図7.1から明らかなように、陸域生態系炭素循環において、炭素固定を司る総光合成生産は決定的に重要な役割を果たしている。Sim-CYCLEでは、植物生理生態学に基礎を置く門司-佐伯理論モデルを用いて総光合成速度を推定している。生態系からの炭素放出である植生および微生物の呼吸速度は、炭素の現存量および環境条件（温度など）の半経験的関数から推定される。結果的に、NEPは炭素貯留量および環境要因を反映する。一方、NBPに含まれる伐採や燃焼に伴う炭素放出は、現モデルではシナリオ設定に基づく外部入力として扱われる。Ito and Oikawa（2002）では、マレーシア・パソアの熱帯多雨林、熊本県水俣の暖温帯常緑広葉樹林、ロシア・ヤクーツクの亜寒帯落葉針葉樹林において、純一次生産、葉面積指数、バイオマス、土壤炭素量に関して、シミュレーション結果を実測値と比較することでパラメータ値を較正するとともにモデルの検証を行っている。

表7.1 陸上生態系炭素循環モデルSim-CYCLEに含まれる諸過程の概要

プロセス	概要	環境依存性	主要なパラメータ
光合成有効放射 (PAR)	Iqbalsの経験式、直達放射と散乱放射に分離して評価。	緯度、季節、雲量	-
正味放射 (R_n)	短波放射収支はアルベドに依存。長波放射収支は表面温度、飽差、雲量の経験式より。	VPD (飽差), 表面温度, 雲量	アルベド, 積雪
蒸発散	可能蒸発散はPenman-Monteithモデルより。水分利用可能性 (土壌水分+降水) による制限を考慮した実蒸発散。	温度, 風速, 土壌水分, 降水, VPD	キャノピーコンダクタンス
光合成 (GPP)	個葉の光-光合成関係 (直角双曲線) を門司-佐伯法でキャノピーにスケールアップ。	温度, 土壌水分, PAR, 日長, 大気CO ₂	量子収率, 光飽和時の光合成速度, LAI, 光減衰係数, 比葉面積
呼吸 (AR)	2-コンポーネントモデル (成長呼吸と維持呼吸)。維持呼吸のみ温度に対し指数関数的応答 (温度順化含む)。	温度	単位重あたりの呼吸速度, Q ₁₀ (温度の関数)
分配 (PT)	理論的な最適LAIに基づいて葉に炭素を分配する。剰余分をroot/shootのアロメトリーに基づいて根と幹に分配。	(間接的に光合成速度と葉フェノロジー)	最適LAI, root/shoot比
枯死 (LF)	一定割合の老化による枯死と草原・落葉樹における葉フェノロジー	(葉フェノロジー) 温度, 降水量	単位重あたりの枯死率
分解 (HR)	平均滞留時間が異なる2層モデル。	土壌水分, 地温	単位重あたりの分解率

実行例

ここでは国内の森林 (水俣の暖温帯常緑広葉樹林) における環境条件と較正済みパラメータ (Ito and Oikawa 2002参照) を使用したシミュレーション結果を示す。数値実験は、まず稚樹に相当する微少な炭素貯留量 (0.001 Mg C ha⁻¹; 1 Mg=106 g=1 トン) を初期値とし、繰り返し計算により時間発展させていくことで実施される。若齢林から成熟林までの成長過程に対応して、林分は正味の炭素固定を行うが、一定の環境条件下では平均して約280年分の繰り返し計算を経ると、NEPは十分にゼロに近づいた。その時点 (定常状態) では光合成による炭素固定量は年間23.8 Mg C、植生の呼吸量は年間15.9 Mg C、土壌微生物の呼吸量は年間7.9 Mg Cと推定された。また、地上部と地下部のバイオマスは各164および33 Mg C、土壌有機炭素は101 Mg Cと推定された。

上記の定常状態は生態系機能のポテンシャルを示すものであり、実際には様々な環境的・人為的変動要因を被っている。そこで上記の定常状態に対し、伐採を想定したバイオマス除去という操作を加えた(図7.2)。この除去量が伐採時点でのNBPに相当する。図7.2では1990年に伐採した直後に再植林することを想定している。伐採直後は、植生からの枯死物供給が途絶えたために土壌有機炭素は一時的にCO₂放出源となり、NEPは大きな負の値を示す。しかし、植生の回復にともなってバイオマスへの蓄積と土壌の回復が生じ、NEPは逆に年間7MgC程度と大きな正の値に転じている。このシミ

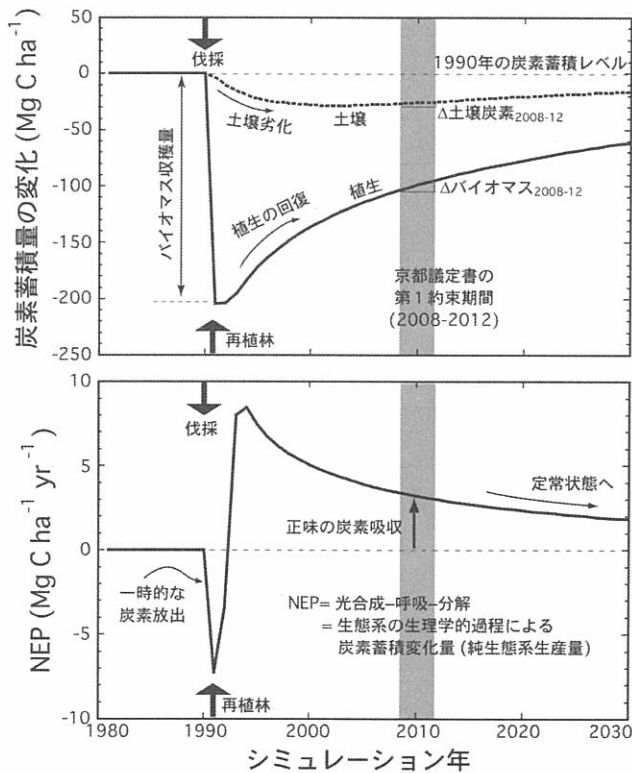


図7.2 温帯林における伐採に伴う炭素収支の変化に関するシミュレーション結果 (Sim-CYCLEを使用)

シミュレーションでは、伐採から約20年が経過した、京都議定書の第一約束期間にあたる2008～2012年にも年間約2 Mg Cの正味の炭素吸収が発生している。グロス-ネット方式によるFCAではこの約束期間内の吸収源効果を定量化する必要があるが、過去の伐採履歴などに関する情報があれば、Sim-CYCLEを用いたシミュレーションによる推定が可能であることが示された。また、このシミュレーションから伐採後に再び成熟林に向かってNEPが収束するには40年以上を要することが分かる。仮に、途中で間伐などの施業を加えればNEPにはさらなる変化が生じることが予想されるが、Sim-CYCLEでは密度効果を考慮していないので、その評価にはモデルの一部改良が必要かもしれない。

おわりに

地球温暖化対策推進大綱において、温室効果気体の削減分-6%のうち過半にあたる-3.7%を森林の吸収源効果に割り当てているように、森林炭素収支の重要性は非常に高い。逆に言えば、本来の産業排出の削減量がそれだけ少なくて済むことになり、これほど多量の炭素吸収を森林に配分することの是非には議論が尽きていない。しかし、1990年から2001年度までに、温室効果気体の排出量は逆に+5.2%の増加となっている現状では、第一約束期間に文字通り約束を果たすには森林にある程度の期待せざるを得ない状況かもしれない。過去の概算（例えば伊藤 2003）によると国内の森林による年間のバイオマス生産量は15,000～20,000万炭素トン程度と考えられる。従って、森林管理によって期待されている1,300万炭素トンという炭素吸収量は実現不可能ではないにせよ、決して小さな割合ではないことには留意すべきである。

プロセスベースの炭素循環モデルは森林生態系の炭素収支を長期的・広域的に推定する上で不可欠な道具である。そこでは数値的なモデル手法が主な役割を果たし、FORMATHで中心課題となる減反率や需給構造を扱う数理的モデルとは一線が画されているように見える。しかし、別な見方をすれば両者の差は表面的なものであり、森林動態を扱う基本的モデル構造には共通

化が可能な部分があるかもしれず、現在ではFCAを通じて目的の共通性さえも生じている。現に陸上生態系炭素循環モデルの分野では、従来のボックス-フロー型の近似を乗り越えて、植物の個体サイズ分布を考慮する方向性が打ち出されているが、そこでは減反率推定に用いられてきた林分遷移モデルの研究蓄積が活用されるかもしれない。逆に、生態学的モデルから推定された炭素収支を、森林資源管理のための数理モデルの中で指標として用いる可能性も興味深い検討課題ではないだろうか。FCAで頻繁に問題にされるのは地下部（根系・土壌）の炭素貯留量変動の定量化であるが、これは従来の数理的手法による森林管理モデルでは手薄な分野と言える。そのため、地上部（材積）に関しては数理モデル、地下部は炭素循環モデルという相補的な役割分担も可能かもしれない。もしこのような学際的モデル研究が実現されるとすれば、FCAによる森林吸収源の定量化への寄与だけでなく、新たな（そして長期的な）研究分野を開拓することにもなるだろう。ここで紹介した炭素循環モデルはまだ萌芽的な段階にあり、今後も様々な発展の方向性を探っていきたい。

謝辞

本研究の一部は環境省の地球環境研究総合推進費戦略的研究開発プロジェクト「21世紀の炭素管理にむけたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」の予算を用いて実施された。

引用文献

- Bormann, F. H. and Likens, G. E. 1979. Pattern and process in a forested ecosystem, p.253, Springer.
- Chiba, Y. 1998. Simulation of CO₂ budget and ecological implications of sugi (*Cryptomeria japonica*) man-made forests in Japan. *Ecol.Model.* 111: 269-281.

- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C. and Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Houghton, R. A., Hobbie, J. E., Melillo, J. M., Moore, B., Peterson, B. J., Shaver, G. R. and Woodwell, G. M. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecol.Monogr.* 53: 235-262.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2000. Land Use, Land-use Change, and Forestry, p377
- Ito, A. and Oikawa, T. 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecol.Model.* 151: 147-179.
- 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
- Martin, P. H., Valentini, R., Jacques, M., Fabbri, K., Galati, D., Quarantino, R., Moncrieff, J. B., Jarvis, P., Jensen, N. O., Lindroth, A., Grelle, A., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A. S., Vesala, T., Keronen, P., Matteucci, G., Grainer, A., Berbingier, P., Loustau, D., Grelle, A., Schulze, E.-D., Tenhunen, J., Rebman, C., Dolman, A. J., Elbers, J. E., Bernhofer, C., Grunwald, T. and Thorgeirsson, H. 1998. New estimate of the carbon sink strength of EU forests integrating flux measurements, field surveys, and space observations: 0.17-0.35 Gt (C). *Ambio* 27: 582-584.
- Nakane, K. and Lee, N.-J. 1995. Simulation of soil carbon cycling and carbon balance following clear-cutting in a mid-temperate forest and contribution to the sink of atmospheric CO₂. *Vegetatio* 121: 147-156.
- 日本林業協会 2001. 図説林業白書（平成12年度版）. 農林統計協会 p293.
- Oikawa, T. 1998. Modeling carbon dynamics of a lucidophyll forest under monsoon climates. *Global Environmental Research* 1, 25-33.

- 小野賢二 2003. 根現存量に影響を及ぼす原因の解析、森林資源管理と数理モデル 2: 49-74.
- Reynolds, J. F., Kemp, P. R., Acock, B., Chen, J.-L. and Moorhead, D. L. 1996. Progress, limitations, and challenges in modeling the effects of elevated CO₂ on plants and ecosystem. In: Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems (Eds. G. W. Koch and H. A. Mooney). Academic Press, pp347-380.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H. and Nishimura, N. 2002. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agr.For.Meteorol.* 112: 203-215.
- Schulze, E.-D., Wirth, C. and Heimann, M. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289: 2058-2059.