

大気－陸面－植生結合モデルによる 森林の高解像度CO₂吸収機能評価

吉野 純¹・竹市 宗平²・安田 孝志³

¹正会員 岐阜大学助教 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: jyoshino@gifu-u.ac.jp

²岐阜大学 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: o3130015@edu.gifu-u.ac.jp

³フェロー 岐阜大学教授 大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: coyasuda@gifu-u.ac.jp

本研究では、ha単位で森林生態系機能の評価を可能にする大気－陸面－植生結合モデルの開発を行い、大八賀川流域における森林による総一次生産量 (GPP) や正味生態系交換 (NEE) を高解像度で算定し、観測値との対比によりその有用性を実証した。この結合モデルは、微地形の効果を物理的に加味できる独自のダウンスケーリング手法を導入することにより、日射量、地上気温、地上風速などの地上気象値のみならずGPPやNEEといった森林生態系機能の高解像度評価を可能にした。更に、この結合モデルを基に構築されたデータベースの詳細な解析により、本手法の高精度性が実証され、特に、標高の高い上流域においてNEEが小さくなりやすく、炭素固定機能を最大限発揮しやすい可能性が明らかとなった。

Key Words : *terrestrial ecosystems, carbon budget, growth primary production, net ecosystem exchange, coupled atmosphere-land-vegetation model*

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による第4次評価報告書 (AR4) は、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、地球温暖化は人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされている確率が90%を超えている。温室効果ガスの中でも二酸化炭素CO₂の影響が量的に最も大きく、化石燃料の使用の増大、急速な森林破壊などによって大気中に大量に放出されたCO₂は、1970年から2004年の間に約80%も増加している。現状の世界のCO₂排出量は自然界の吸収量の2倍を超えており、このままでは21世紀中に世界の気候システムに多大なる影響をもたらすものと懸念されている。

その一方で、1800年～2000年までの200年間に森林破壊と化石燃料の使用によって大気中に放出された4700億トンの炭素量のうち約10～30%を森林が吸収しており (Houghtonら, 1999) ¹⁾、森林が地球の炭素循環に大きな役割を果たしていることが再認識されるようになった。

そのような背景から、CO₂削減量のうち一定量を森林による炭素吸収、固定能力で確保できることが2001年の気候変動枠組条約第7回締約国会議 (COP7) で合意されている。よって、国ごとに新規植林、再植林、農耕地の変換などを考慮して正味の炭素固定量を算定する必要がある。森林によるCO₂吸収機能の高精度な推定手法の開発が急務となっている。

また、「緑の社会資本」である森林は、「大気中の温室効果ガスの削減機能」のみならず、「洪水・土砂災害防止機能」、「水源涵養機能」や「熱的緩和機能」などの種々の生態系サービスとしての価値もあり、地域固有財として大きな期待が寄せられている。こうした森林の機能を最大限発揮させるには、森林経営単位であるha単位でかつ流域全体にわたって森林生態系機能を高精度に評価し、その情報に基づき森林環境を保全してゆく必要がある。機能的に優れた森林とは、「光合成」によるCO₂吸収が活発であり、その結果として、温暖化防止機能に加えてその他の機能も向上することになる。それゆ

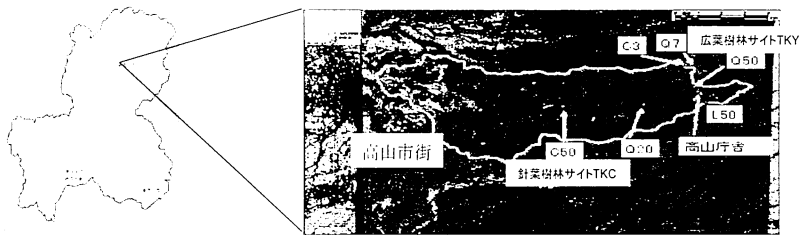


図-1 計算対象とする岐阜県高山市の大八賀川流域。

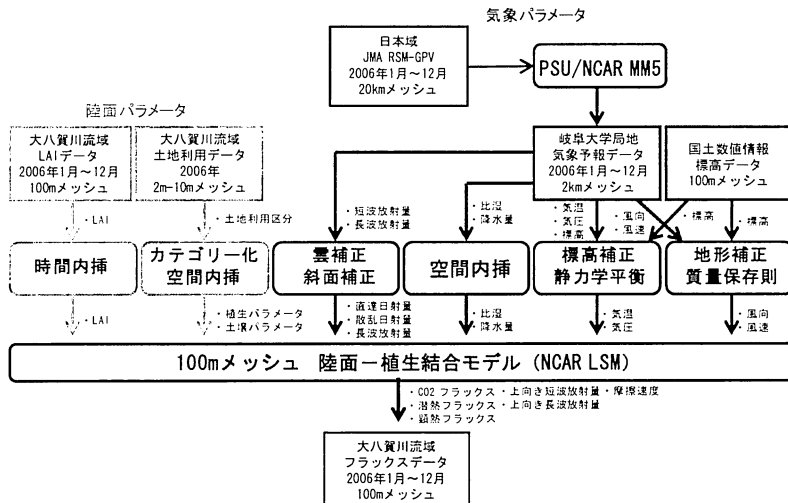


図-2 大気－陸面－植生結合モデルの計算フローチャート。

え、森林経営単位であるha単位で森林のCO₂吸収機能を算定できることが、最小経営単位での森林の生態系機能評価、さらには機能向上の大前提になると言ってもよい。

このような背景から、森林生態系機能を高解像度に評価することに特化した、素過程をベースとした大気－陸面－植生結合モデルの構築が不可欠となると言える。今日まで、モデリングベースのCO₂吸収機能評価に関する研究は散在しているものの、それらの殆どが、衛星観測をベースとした統計的なアプローチであったり（例えば、Cookら、2008）²⁾、地上観測をベースとする鉛直1次元の数値計算（1地点のみ）であったり（例えば、Inatomiら、2010）³⁾、大気モデルと結合していても低解像度な数値計算（せいぜい1kmメッシュ）であったり（例えば、Massonら、2003）⁴⁾と、複雑地形上をha単位の高分解能で評価可能な数値モデルの開発は皆無であった。

そこで本研究では、高精度な森林生態系機能評価を可能にする、これまでにない高解像度な大気－陸面－植生結合モデルを開発することを目的として、まず、検証用のフラックス観測データが入手可能な大八賀川流域（図-1）を対象領域として、2006年1年間の100mメッシュ（ha単位）の高解像度な気象データベース、および、陸面データベースを構築する。次いで、観測データに基づき大八賀川流域に適合した陸面－植生結合モデルのチ

ューニングを行い、用意されたデータベースを入力条件として大気－陸面－植生結合モデルによる森林生態系機能の定量評価を行う。このようにして構築されたフラックスデータベースに基づいて、高解像度化の効果やそれによって見えてくる広域炭素循環の特性について明らかにしたい。

2. 大気－陸面－植生結合モデルの概要の計算設定

ここでは、本研究で用いるメソスケールからマイクロスケールまでを計算対象とする大気－陸面－植生結合モデルの概要と計算設定について示す。このモデルは、既存の大気モデルと陸面－植生結合モデルがベースとなっている。大気モデルとしてはPSU/NCAR MM5（Dudhia, 1993）⁵⁾が、陸面－植生結合モデルとしてはNCAR LSM（Bonan, 1996）⁶⁾が採用されている。これらは岐阜大学流域圏科学研究センターが管理する2つのフラックス観測サイト（TKYおよびTKC）で取得された森林生態系データに基づいて独自に改良が加えられている。TKYでは50年生落葉広葉樹（シラカンバ、ダケカンバ、ミズナラ、クマイザサ）が、TKCでは50年生常緑針葉樹（スギ人工林）が卓越しており、いずれも大八賀川流域の優占種であり、それぞれ異なったフェノロジー特性を示す。

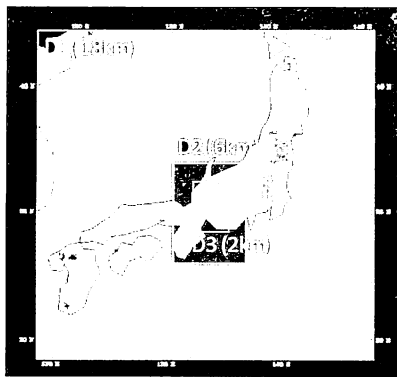


図-3 大気モデルMM5の計算領域。

図-2は、大気-陸面-植生結合モデルの計算フローチャートを示す。このように、陸面-植生結合モデルには、陸面パラメータと気象パラメータが格子点毎およびタイムステップ毎に境界条件として一方向的に入力され、最終的には、出力値として各種のフラックスデータが評価される。前述のように、入力の陸面パラメータとしては高分解能リモートセンシングデータが用いられ、入力の気象パラメータとしては大気モデルMM5をダウンスケーリングすることによって得られる高解像度な気象データベースが用いられる。

本研究では、大気-陸面-植生結合モデルの計算期間は、2006年1月1日0時UTCから2007年1月1日0時UTCまでの計1年間とし、大八賀川流域を覆う100mメッシュ（200×64格子）を計算領域として、1時間ステップ毎に時間積分を行った。以下、結合モデルの核となる大気モデル、陸面モデルおよび、植生モデルの概要と計算設定について順次解説する。

(1) 大気モデル

後述の陸面-植生結合モデルを駆動するためには、格子点毎およびタイムステップ毎に外力となる地上気象値を入力する必要がある。先行研究の大半においては、AMeDAS等の観測値を時空間内挿して入力するのが一般的であるが、本研究では、Pennsylvania State University (PSU) と National Center for Atmospheric Research (NCAR) により開発されたメソ気象モデルMM5 (5th-generation Mesoscale Model) によって地上気象値を与えている点において新規性がある (Dudhia, 1993)⁵⁾。このモデルは、3次元完全圧縮非粘性系の非静力学平衡プリミティブ方程式系からなり、鉛直座標としては地形準拠座標（シグマ座標）を採用している。水平座標としては、マップファクターの導入により地球曲率の効果を加味することができ、ネスティングの適用により局所的に水平解像度を上げることができる。基礎方程式系としては、運動方程式（3成分）、気圧方程式および熱力学方程式の5つから構

表-1 大気モデルMM5の計算設定。

	領域1	領域2	領域3
水平解像度	18km	6km	2km
鉛直層数	20 (100hPa)		
タイムステップ	54s	18s	6s
予報時間	36時間		
初期値・境界値	気象庁RSM(3時間間隔, 20km格子)		
海面温度データ	NCEP daily SST (1° × 1° 格子)		
雲物理スキーム	Reisner graupel (Reisner et al.,1998)		
積雲パラメタリゼーション	Kain-Fritsch (Kain et al.,1993)	なし	なし
境界層スキーム	Eta (Janjic,1993)		
放射スキーム	Cloud (Stephens,1984)		
地表面スキーム	Five-Layer Soil (Dudhia,1996)		
土地利用情報	USGS(国外), 国土数値情報(国内)		

成され、スキームの選択によっては、水蒸気などの混合比や乱流運動エネルギーの方程式を追加できる。また、主要な物理過程として、雲微物理過程、積雲対流過程、地表面過程、大気境界層過程および大気放射過程が考慮されており、それぞれが相互作用しながら時間積分が繰り返される。

本研究におけるMM5の計算設定を、表-1に示す。計算領域については、図-3に示すように、岐阜県を中心とする18kmメッシュ領域（145×145格子）、6kmメッシュ領域（145×145格子）および2kmメッシュ領域（145×166格子）の3つの計算領域を設定した。鉛直方向には、気圧1000hPaから100hPaまでを24分割した。時間ステップは3秒とし、初期および境界条件としては、20kmメッシュで6時間毎の気象庁領域客観解析データJMA RSM-GPV（水平風、高度、気温、相対湿度）を使用することで、毎日12時UTCを初期時刻として24時間予測サイクルを計365日分を繰り返した。

このようにして構築された2kmメッシュの気象データベースは、2006年1年間分の1時間毎の3次元気象値（風向、風速・高度・気温・相対湿度・雲微物理量・地上気圧・降水量・日射量など）を収録しており、後述のダウンスケーリング手法が適用された後に、陸面-植生結合モデルへの入力値として用いられる。これらの気象パラメータの計算精度については、橋本ら（2005）⁷⁾によって検証がなされ、観測との高い相関性が実証されている。

(2) 陸面モデル

陸面モデルとして、NCARにより開発されたLSM（Land Surface Model）を採用する。LSMは、Bonan（1994）⁸⁾、Bonan（1995）⁹⁾、Bonan（1995）¹⁰⁾、Bonan（1996）⁶⁾に基づき開発されており、その計算フローチャートを、図-4に示す。LSMは、熱・水・運動量・日射量に関する生物物理的フラックスに加えて、後述する植生モデルとの結合により、森林生態系による生化学的フラックスを計算できる鉛直1次元の陸面-植生結合モデル

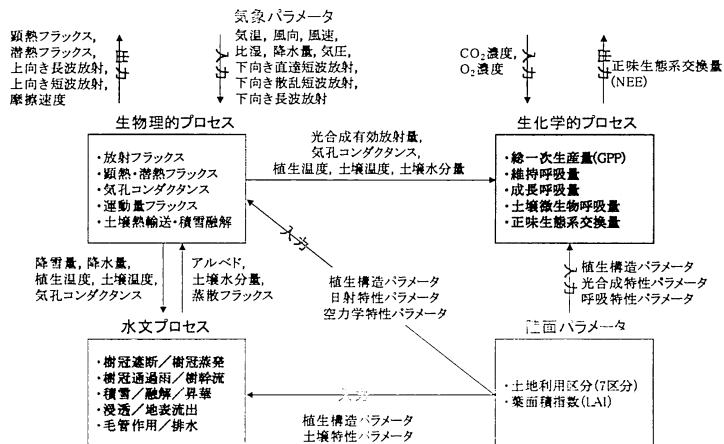


図-4 陸面-植生結合モデル (NCAR LSM) で考慮される各素過程。

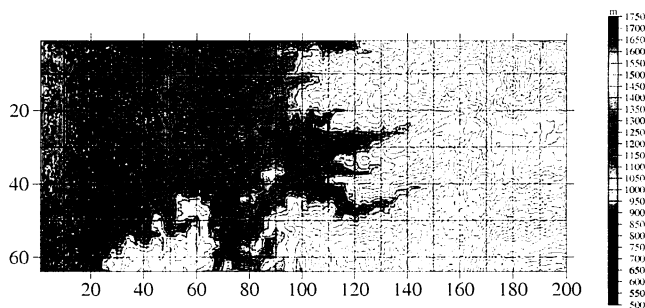


図-5 大気-陸面-植生結合モデルに入力される 100m メッシュ標高データ (大八賀川流域)。

であり、格子点毎の植生・土壌の特性を考慮した地表面フラックスの面的算定を可能にする。また、表層土壌を6層に分割することで(地下0.05m, 0.2m, 0.5m, 1.1m, 2.3m, 4.7m)、地温や土壌水分量の時間変動をも計算できる。

LSMの入力値として、地上観測や大気モデルなどから得られる地上気象値(気圧、風速、気温、比湿、観測高度、降水量、下向き長波放射、下向き短波放射)が必要となる。また、各格子点に対して計12種類の土地利用区分(植生区分)の中から1つを設定する必要がある。土地利用区分毎に、植生構造パラメータ、日射特性パラメータ、空力学特性パラメータ、光合成特性パラメータ、呼吸特性パラメータ、土壌特性パラメータを高精度に定義する必要がある。これらのパラメータは、後述のように大八賀川流域内のフラックス観測サイトで得られた観測データに基づいて最適化がなされている。

(3) 植生モデル

LSMには、森林による詳細な炭素固定機能を評価可能な植生モデルが実装されている。この植生モデルでは、森林生態系を単層キャノピーとして表現しており、大気-森林間の正味生態系交換量(NEE: Net Ecosystem Exchange)を、「①森林の光合成による総一次生産量

(GPP: Gross Primary Production)」によるCO₂吸収、「②森林バイオマスの維持・成長呼吸(地上部呼吸)」によるCO₂放出、および、「③樹木根や土壌微生物による呼吸(土壌呼吸)」によるCO₂放出、の3つの素過程の総和によって評価される。GPPは、気孔コンダクタンスに依存するため、エネルギー収支の一部として機能していることから、陸面-植生結合モデルによる取り扱いが要求される。一方で、維持呼吸、成長呼吸および土壌微生物呼吸については生化学的プロセス内で閉じており、エネルギー収支には影響しないため結合モデルによる扱いは必ずしも必要ではない。ここで、②と③の各呼吸の総和は、生態系呼吸量(RE: Ecosystem Respiration)と呼ばれ、 $NEE = RE - GPP$ という関係にある。これら各素過程の計算のためには、多数の陸面パラメータの設定が必要となるが、オリジナルのLSMにおいては、それらの大半が北米地域の森林に典型的な値で定義されているため、本研究の対象領域に対してそのまま適用することは精度上の問題があると考えられる。

そこで本研究では、LSMの各素過程の計算(図-4)に用いられる陸面パラメータを、大八賀川流域内のTKYおよびTKCでの観測データに基づいて再定義し、植生モデルの最適化を行っている。具体的には、この地域(冷温帯林)の種優占的土地利用区分である常緑針葉樹と落葉

広葉樹に対応する多数の陸面パラメータ、すなわち、植生構造パラメータ（樹冠高、樹冠底高、バイオマス、など）、日射特性パラメータ（アルベド、透過率、など）、空力学特性パラメータ（粗度長、ゼロ面変位、など）、光合成特性パラメータ（標準温度25°Cでの最大光合成速度、など）、呼吸特性パラメータ（標準温度25°Cでの呼吸速度、など）、および、土壌特性パラメータ（アルベド、土壌タイプ、など）に対して、観測データや文献情報に基づいて最適値を設定している。特に、光合成特性パラメータに対しては、現地測定に基づき月毎の変動を加味できるような改良を加えている。このような最適化により、複雑地形上における炭素固定機能を高精度に評価できるようになると期待される。

3. 気象パラメータのダウンスケーリング

この大気－陸面－植生結合モデルを実行するためには、前述の図-2に示したように、予め気象パラメータと陸面パラメータに関するデータベースを用意しておく必要がある。まず、図-5に示す様に、100mメッシュの大八賀川流域の標高データを国土数値情報より切り出し、それに基づき大気モデルMM5により出力された2kmメッシュの気象データベース中の日射量、地上風速、地上気温および地上気圧に対してそれぞれ補正を行い、100mメッシュへと物理的に高解像度化（ダウンスケーリング）を施す。一般的には、これらの地上気象値は、周囲の微地形の影響を強く受けることから、その効果を適切に加味し補正を施す必要がある。このような処理によってはじめて、我が国の森林の殆どが山岳地域に立地しているという現実にもった炭素固定機能評価が可能になる。なお、降水量と比湿に対しては、合理的な標高補正手法が存在しない上に、2kmメッシュの気象データベースに顕著な系統的誤差が存在しなかったため、単なる空間内挿の処理のみに留めている。

(1) 雲による短波放射量の補正

この結合モデルによって評価されるGPPは、下向き短波放射に対する直散分離（直達日射量と散乱日射量の分

離）の影響を特に強く受ける。一般的には、散乱日射量がより大きな微気象環境の方が、GPPはより増大しやすい。直散比は、天候（雲量）や太陽高度によって大きく変化することから、高精度な直散分離法を導入することは不可欠となる。本研究では、岐阜大学工学部屋上における日射量観測データによって構築された以下の直散比 R の回帰関係式、

$$R = 0.00735CF + 0.0297AM + 0.141 \quad (1)$$

に基づき、2kmメッシュの気象データベース中の短波放射に対する直散分離を行った。ここで、 AM はエアマスを、また、 CF は雲量を示し、

$$CF = 3.0 \times \max \{000 > p > 100 | RH(p)\} / 100 - 1.3 \quad (2)$$

に基づき評価される。ここで、 $RH(p)$ は2kmメッシュの気象データベース中の相対湿度であり、対流圏内（気圧 p が1000hPaから100hPaの間）の相対湿度の最大値によって雲量 CF が求められる。

(2) 斜面による短波放射量・長波放射量の補正

高精度な日射量評価のためには、大気モデルMM5により鉛直1次元的に評価された日射量に対して、雲のみならず周囲の地形起伏による影響をも補正する必要がある。

そのためには、まず、各格子点において周囲を見渡した際（方位角毎）に周辺地形が作る高度角の分布をデータベース化する必要がある。本研究では、この高度角－方位角データを、100mメッシュの国土数値情報に基づき各格子点に対して作成する。次に、この高度角－方位角データに対して、月・日・時間毎に太陽の方位角と高度角を比較することで、太陽からの直達日射が遮断されるか否かを判定する。周辺地形により直達日射が遮断されると判定された場合には、直達日射量を $0W/m^2$ に置き換える。また、この高度角－方位角データに基づき天空率（樹冠上における天空の占める立体角投射率）もデータベース化し、それに基づき、前述の雲による散乱日射

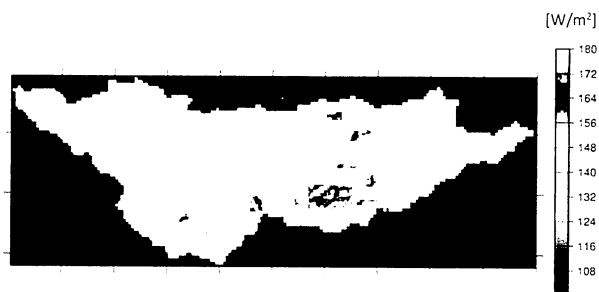


図-6 100mメッシュの年平均（2006年）日射量分布（大八賀川流域）。

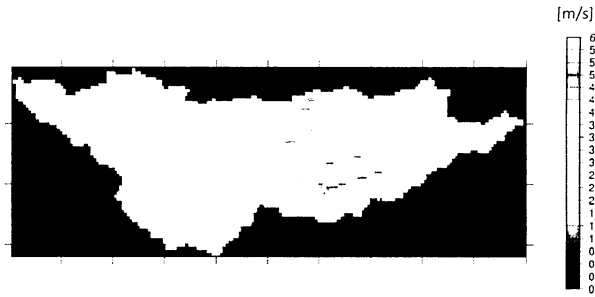


図-7 100m メッシュの年平均 (2006 年) 地上風速分布 (大八賀川流域)。



図-8 100m メッシュの年平均 (2006 年) 地上気温分布 (大八賀川流域)。



図-9 100m メッシュの年平均 (2006 年) 葉面積指数分布 (大八賀川流域)。

量に対して再補正を施す。天空率が1より小さい地点では、周囲の斜面に入射した直達／散乱日射が散乱されて対象格子点に入射する可能性があることから、雲による散乱だけでなく斜面による散乱の効果も加味する必要がある。この補正は、特に起伏の激しい山岳地域においては重要となってくる。ここでは、周囲の斜面における直達／散乱日射の反射率は、森林に典型的な0.15としており、斜面における多重散乱の影響は微小であるとして無視している。

更に、天空率が1より小さい地点では、大気からの下向き長波放射に加えて斜面からの長波放射をも加算できるように斜面補正を行った。ここで、斜面からの長波放射量は、気温程度の黒体放射量に一致するものと仮定して算出している。

図-6に、大八賀川流域における補正後 (100mメッシュ) の2006年1年間の年平均日射量分布を示す。斜面補正により、流域の中央部を東西に流れる大八賀川に面した南向き斜面で日射量がより多く、北向き斜面でより少なくなるという適切な補正がなされていることが分かる。

(3) 地形による地上風速の補正

地上風速は微地形の影響を受けて変化しやすいため、2kmメッシュの風速データに対して、100mメッシュの標高データに基づいた補正が必要となる。本研究では、高効率かつ高解像度な風況評価を可能とするMASOCNモデル (吉野ら, 2007)¹⁰⁾を用いて地上風速の補正を行った。この手法は、地上観測や大気モデルから得られた気流場を高解像度な地形起伏を加味して質量保存則を満たすように修正するものであり、これまでに種々の大気拡散調査や局地気象調査に多くの適用例がある。本研究では、まず、2kmメッシュの気象データベース中の風速データをMASOCNモデルのための第一推定値として荷重平均により評価する。次いで、格子点毎に質量保存則 (連続式) を満足するように変分問題を解くことで、第一推定値に対する修正量を評価し、地上風速を算出した。

図-7は、補正後 (100mメッシュ) の2006年1年間の年平均地上風速の分布を示す。詳細な地形起伏の分布に応じて、峰部で高風速となり、谷部で低風速となるような



図-10 100m メッシュの土地利用分布（大八賀川流域）。

適切な補正がなされていることが見て取れる。

(4) 標高による地上気温・地上気圧の補正

気温や気圧についても、標高依存性の高いパラメータである。地上気温については、2kmメッシュの気象データベースの標高と100mメッシュの国土数値情報の標高との間の標高差に対して、気温減率 $0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$ を乗じることで気温補正量を算出した。また、地上気圧に対しても、静力学平衡の式に基づき、補正後の地上気温を入力値とすることで気圧補正量を算出し、補正を行った。

図-8は、補正後（100mメッシュ）の2006年1年間の年平均気温分布を示す。地上気温の分布パターンは、基本的には標高の分布パターンに対応しており、谷部ではより高温側に、峰部ではより低温側に補正され、より現実的な地上気温分布を表現できている。

4. 陸面パラメータのダウンスケーリング

陸面-植生結合モデルは、気象パラメータのみならず、陸面における植生・土壌状態の違いを表現する陸面パラメータを入力値として用意する必要がある。本研究では、高分解能リモートセンシングデータに基づき得られた葉面積指数（LAI：Leaf Area Index）と土地利用区分をデータベース化し、それぞれ陸面パラメータとして入力した。

(1) 葉面積指数（LAI）

LAIは、GPPを精度良く計算する上で不可欠な指標の1つであり、おおよそ、LAIの増加に比例してGPPも増大すると言える。特に、冷温帯落葉広葉樹におけるLAIは、展葉・落葉により年間を通じて大きく季節変化することから、その時々刻々の変化を適切に加味することは極めて重要となる。本研究では、250mメッシュのMODIS（MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）センサにより、3次元放射伝達理論（Mineniら、1998）¹²⁾に基づき逆推定された8日間合成LAIデータベースを使用する。そして、植生区分に応じたフェノロジー特性を適切に反映させるために、後述の土地利用データベースに基づき、Look-up Tableアプローチ（Knyazikhinら、1998）¹³⁾により、

100mメッシュのLAIデータベースへとダウンスケーリングし、陸面-植生結合モデルのための入力値とした。

図-9は、100mメッシュの2006年1年間の平均LAIの分布を示す。同じ流域内の同じ植生区分であってもLAIは空間的に大きなばらつきを伴っていることが見て取れる。落葉広葉樹が存在する格子点では、春季に展葉し秋季に落葉するといった適切な季節変化を確認することができる（図省略）。

(2) 土地利用区分

森林生態系機能をha単位で評価する上で、土地利用区分の分布的差異を適切に反映させることは極めて重要である。本研究では、QuickBird画像による2mメッシュの土地利用データベース（14区分）を、その他のデータベースの水平解像度と合致するように100mメッシュ（7区分）へと水平内挿および再カテゴリー化し、植生-陸面結合モデルのための土地利用データベースを再構築した。その際、各格子点内において面積率が最大となる土地利用区分（優占種）が、その格子点内全体を一様に覆っているものとして仮定している（図-10）。本研究のように、ha単位で評価する場合には、このような仮定に起因する誤差は無視できるほど小さいと見なせる。

5. 大気-陸面-植生結合モデルの精度検証

この結合モデルは、前述の陸面パラメータを境界条件として、時々刻々と変化する気象パラメータを入力することで、GPP、RE、および、NEEといった森林生態系機能を100mメッシュ（ha単位）で出力できる。本手法の有用性を実証するためには、これらの入出力値に対して観測データとの対比により精度検証を行う必要がある。精度検証には、前述の大八賀川流域（図-1）における50年生落葉広葉樹サイト（以降TKY：北緯36.1461度、東経137.4231度、標高1428m）と50年生常緑針葉樹サイト（以降TKC：北緯36.1397度、東経137.3708度、標高800lm）の連続観測データ（校正及び欠測処理済み）を使用した。

以下では、結合モデルへの重要な入力値となる「日射量」と「地上気温」、そして、結合モデルの出力値であ

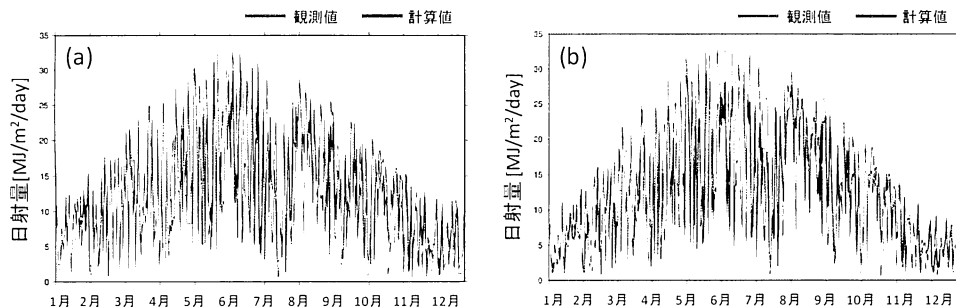


図-11 大気-陸面-植生結合モデルにより評価された(a)TKY と(b)TKCにおける日平均日射量の時系列。

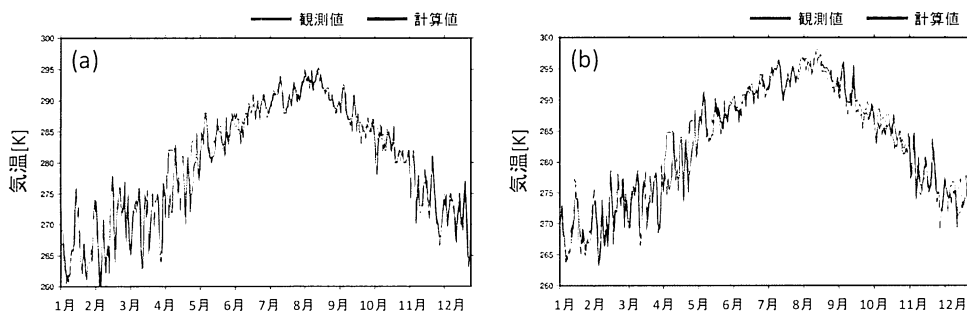


図-12 大気-陸面-植生結合モデルにより評価された(a)TKY と(b)TKCにおける日平均気温の時系列。

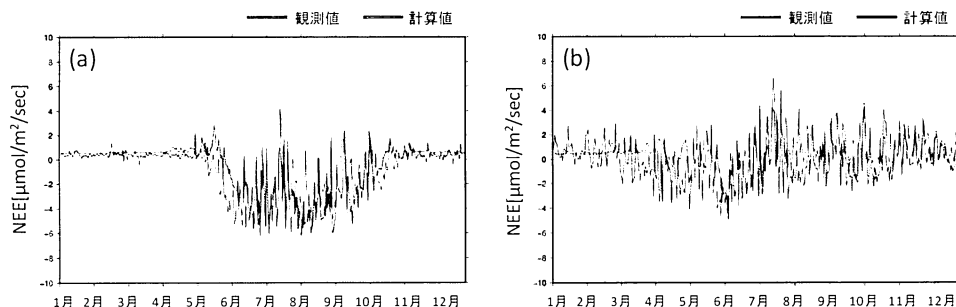


図-13 大気-陸面-植生結合モデルにより評価された(a)TKY と(b)TKCにおける日平均NEEの時系列。

る「NEE」に対して、TKYおよびTKCでの観測値との時系列比較により精度検証を行った。

(1) 日射量

図-11は、2006年1年間のTKYおよびTKCにおける、観測と計算による日射量の時系列をそれぞれ示す（いずれも日積算値）。計算と観測の両者共に、太陽天頂角高度の変化に対応して、6月頃に最大となり、12月頃に最小になっており、現実的な日射量の季節変化を再現できていると言える。更に、梅雨期に曇天日・雨天日が多くなるために日射量が大幅に減少する様子も再現できており、雲微物理過程を考慮した大気モデルとの結合によって、高精度な日射量変動を表現できていることが見て取れる。

また、TKYおよびTKCでのバイアス誤差（年間）は、それぞれ0.65MJ/m²/dayおよび1.41MJ/m²/dayであり、またRMS誤差（年間）は、それぞれ5.62MJ/m²/dayおよび

5.80MJ/m²/dayであり、GPP評価に最も重要となる日射量の計算精度は、適切な斜面補正の結果として極めて良好であると言える。

(2) 地上気温

図-12は、2006年1年間のTKYおよびTKCにおける、観測と計算による地上気温の時系列をそれぞれ示す（いずれも30m高度の日平均値）。共に、夏季に高くなり、冬季に低くなるといった季節変化を適切に捉えており、標高補正の結果として、観測値にほぼ一致した時系列を再現できている。

また、TKYおよびTKCでのバイアス誤差（年間）は、それぞれ0.17Kおよび0.33Kに収まり、またRMS誤差（年間）も、それぞれ2.05Kおよび2.31Kとなり、いずれも高い精度を示し、前述の日射量と併せて100mメッシュにダウンスケーリングされた地上気象値の計算精度は極め

て高いことが分かる。

(3) 正味生態系交換量 (NEE)

NEEは、大気と森林生態系との間で交換されるCO₂の収支量に相当している。NEEが正ならば大気側へのCO₂の放出が卓越 (RE>GPP) し、NEEが負ならば森林側へのCO₂の吸収が卓越 (GPP>RE) することを意味している。すなわち、森林生態系機能を評価する上で最も重要な指標の1つであると言える。前述の日射量や地上気温といった気象パラメータが極めて高精度であることから、結合モデルによって出力されるNEEもまた高精度であると期待される。図-13は、2006年1年間のTKYおよびTKCにおける、観測と計算によるNEEの時系列をそれぞれ示す (いずれも日平均値)。これらの観測サイトではフラックスタワーが設置されており、渦相関法によるCO₂フラックス (30分毎) が常時測定されている。

TKYにおいては、展葉期にNEEが急激に減少し、梅雨期に曇天となるため若干の増大を示すものの、夏季にはCO₂吸収のピークを迎える。展葉期においては、計算値の方が観測値に比べてより早くNEEの急変が生じており、無視できない誤差が生じている。この誤差は、1ヶ月毎に観測された光合成特性パラメータを時間内挿して入力していることに起因しており、展葉期については、より時間分解能の高い観測データに基づき光合成特性パラメータを変化させる必要があると考えられる。その後、落葉期になると、短期間でLAIが0m²/m²へと急激に減少するため、GPPはほぼ0μmol/m²/sとなり、NEEは再びCO₂放出側となる。また、冬季のTKYでは、積雪や土壌凍結により土壌温度は常に0°Cで一定となるため、REはほぼ一定となり、結果としてNEEもCO₂放出側で

ほぼ一定値を示すようになる。

一方で、TKCについては、TKYとは異なりLAIの季節変化は殆ど生じないため、NEEの季節変化もTKYと比較してより緩慢となる。年間を通じて光合成による炭素固定がなされるため、冬季であっても、CO₂吸収側で変動しやすいという特徴を有している。また、TKCは、標高の比較的低い箇所に位置していることから、TKYに比べてREはより大きくなりやすい傾向にある。TKCの計算値を見ると、冬季にNEEを過大評価する傾向にあり比較的誤差が大きい。この誤差は、主として、積雪が樹冠上を覆い被さってしまうことで、GPPを過小評価していることが原因であると考えられ、依然として改善の余地が残されていると言える。

以上のように細部には問題があるものの、いずれのサイトでも、計算値と観測値は年間を通じてよく一致していることから、極めて高精度な森林生態系機能評価が可能であると言える。TKYおよびTKCでは、NEEのバイアス誤差 (年間) は、それぞれ0.06μmol/m²/sおよび0.69μmol/m²/sとなり、またRMS誤差 (年間) も、それぞれ1.38μmol/m²/sおよび1.67μmol/m²/sとなり、結合モデルの高精度性が実証された。

6. 森林生態系機能に対する高解像度化の影響

ここでは、構築された大八賀川流域における森林生態系を考慮したフラックスデータベースに対する水平解像度の影響について、100mメッシュおよび2kmメッシュの分布を比較することにより検討を行う。

図-14は、100mおよび2kmメッシュでのGPPの年平均値の空間分布をそれぞれ示す。これらより、100mメッ

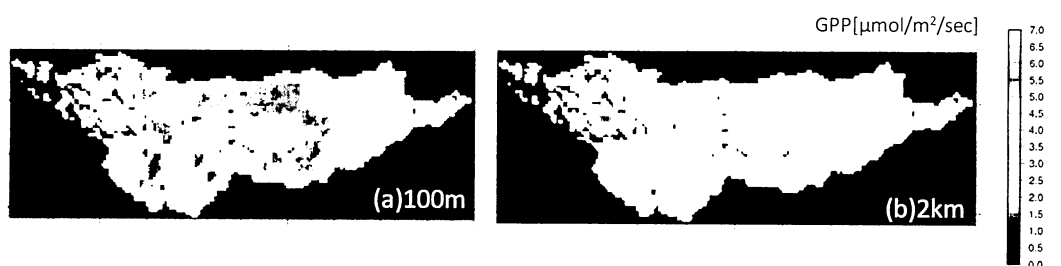


図-14 大気-陸面-植生結合モデルによる(a)100mメッシュと(b)2kmメッシュの年平均GPPの分布 (大八賀川流域)。

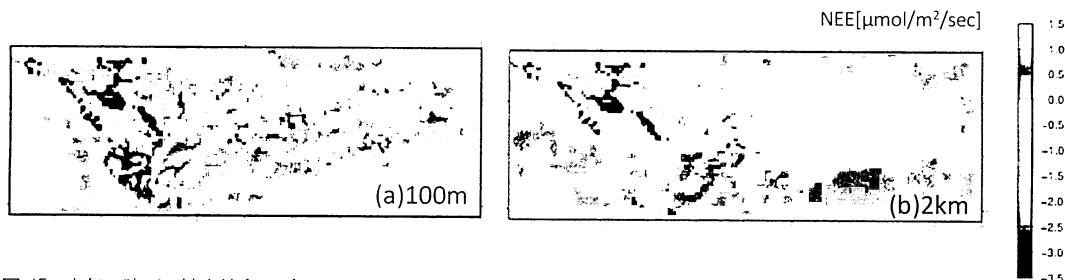


図-15 大気-陸面-植生結合モデルによる(a)100mメッシュと(b)2kmメッシュの年平均NEEの分布 (大八賀川流域)。

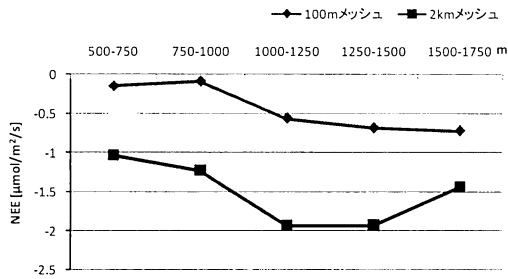


図-16 標高と年平均NEEの関係。

と2kmメッシュの間で、GPPに無視できない絶対量の差が生じていることが分かる。これは、主として、日射量の斜面補正の結果として、100mメッシュにおいては全体的に日射量が減じられたことに起因するものである。前述した100mメッシュの日射量の高精度性に鑑みても（図-11）、2kmメッシュの日射量は全体的に過大評価であることが推察される。また、100mメッシュでは、同一樹種（前述の図-10の土地利用区分の分布を参照）であっても、場所によってはGPPの値にばらつきが見られ、複雑地形上の微気象環境の影響が現れていることが分かる。GPPは、森林の多様な作用機能の根源となる光合成生産量を表わしていることから、森林の健康度指標とも呼ぶべきものである。そのGPPの値が同一樹種の森林内であっても変化しているという事実は、森林経営の最小単位面積であるha単位で森林の生態系機能进行评估することの重要性を示すものと言える。

図-15は、同様に、100mおよび2kmメッシュでのNEEの年平均値の空間分布をそれぞれ示す。100mメッシュの分布を見ると、常緑針葉樹ではCO₂の吸収と放出がほぼバランスした中立に近い状態（GPP≒RE）にあり、落葉広葉樹ではCO₂の吸収が卓越（GPP>RE）していることが分かる。また、下流域から上流域に標高が増すに従って、REがより減少し、GPPがより卓越するため、炭素固定により適した環境になっている。100mメッシュでは日射量の斜面補正の結果として、2kmメッシュに比べて流域全体で日射量が減じられるため、NEEはより大き

な値を示すことになる。

図-16は、100mメッシュと2kmメッシュでのNEEの年平均値の標高毎の変化をそれぞれ示す。いずれの解像度であっても、下流域から上流域までCO₂吸収側（GPP>RE）を示しており、2kmメッシュではGPPとREの差が最大となる標高1000mから1250mでCO₂吸収のピークを示している。一方で、100mメッシュでは、全体的にNEEはより大きく評価する傾向にあり、標高が増すにつれて緩やかに減少する傾向にある。大八賀川流域の上流域では、REがより小さくなるため、炭素固定により適した環境であると考えられる。100mメッシュと2kmメッシュを比較すると、特に中下流域において4倍以上の極めて大きな差が生じていることが分かる。つまり、森林生態系機能を精度良く評価するためには、微細な標高変化を物理的に加味してダウンスケーリングを施すことが必須であると言い換えられる。

IPCC第4次報告書にて引用されている各国の全球気候モデルにおいても、陸域生態系が炭素循環に及ぼす影響は大きいとして森林生態系モデルが組み込まれているが、現状の全球気候モデルの空間解像度（2.5°×2.5°メッシュ）では、特に、山岳地域においてNEE（GPP）は大幅に過小評価（過大評価）している可能性が高く、地球温暖化問題の議論の際には、このような誤差が存在する可能性を十分に考慮に入れる必要がある。以上より、100mメッシュと2kmメッシュの出力結果の違いは極めて大きく、森林生態系機能評価に関しては、ダウンスケーリング手法に基づく100mメッシュまでの高解像度化が必須であると結論付けられる。

次に、100mメッシュの結果から大八賀川流域の森林生態系機能の特性について考察する。

図-17には、流域内の全格子点に対する年平均LAIと年平均GPPの散布図と、同じく年平均日射量と年平均GPPの散布図を示す。まず、LAI-GPPの散布図から、LAIの増加に伴ってGPPも増加するといった明瞭な関係性を見て取れる。おおよそ3つのグループに大別されるが、これは土地利用区分の違い（特に、落葉広葉樹、常緑針葉

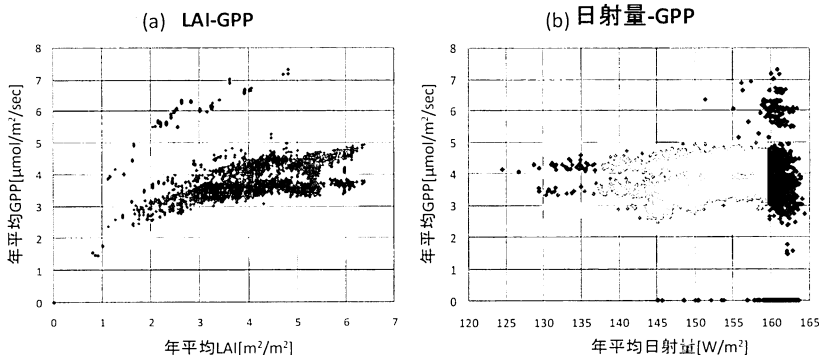


図-17 (a)年平均LAIと年平均GPP、(b)年平均日射量と年平均GPPとの散布図（全格子点）。

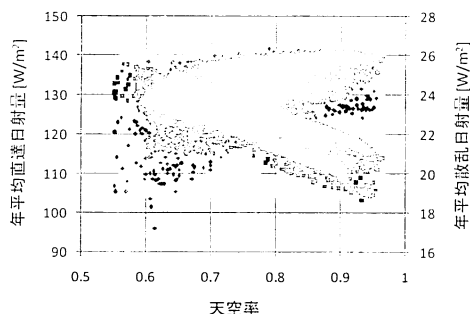


図-18 天空率と直達/散乱日射量（年平均）との散布図。

樹、農耕地）に起因したものである。しかしながら、日射量－GPPの散布図からは、日射量とGPPの間には明確な関係性を見出すことはできず、GPPは、日射量には依らずほぼ独立しており、2割程度のばらつきはあるものの土地利用区分毎にある一定の値に集中していることが分かる。本来は、日射量とGPPの間には明確な比例関係が存在するはずであるが、そのような結果とならない理由としては、本研究で適用されたダウンスケーリング手法、特に日射量の直散分離による影響が大きいものと考えられる。図-18には、流域内の全格子点に対する天空率－年平均直達日射量、および、天空率－年平均散乱日射量の散布図をそれぞれ示す。天空率の大きな場所（流域の山頂部や平野部）では、直達日射がより大きく、散乱日射がより小さくなる傾向にあり、天空率の小さな場所（流域の谷部）では、逆に、斜面補正の結果として、直達日射はより小さく、散乱日射はより大きくなる傾向にある。平均的にみて、散乱日射は直達日射の1/5程度であり、例えば天空率0.6の溪谷部では、斜面からの散乱日射は直達日射の10%にも満たないと見積もられる（残念ながら観測データは存在しない）。しかし、直達日射は陽葉のみ（平均的にみて、全LAIの1/5程度）によって光合成するのに対して、散乱日射は全LAI（陽葉＋陰葉）で光合成できることから、散乱日射の方がGPPに対してより大きな感度特性を有することになる⁶⁾。その結果、流域全体で見ると、直達日射によるGPPの増減が、散乱日射によるGPPの増減によって相殺され、結果として、日射量の分布的差異があってもほぼ一定のGPPにな

るものと考察できる。

図-19は、流域内における年平均LAIと年平均GPPの格子点数の頻度分布（流域内面積率）を示す。LAIの頻度分布について見ると、双峯型を示し、 $4.2\text{m}^2/\text{m}^2$ 付近のピークは主に落葉広葉樹によるもの、 $5.4\text{m}^2/\text{m}^2$ 付近のピークは主に常緑針葉樹によるものであり、比較的ばらつきの大きな分布を示している。次に、GPPの頻度分布を見ると、LAIと同じような双峯型となり、落葉広葉樹によるピークはおおよそ $3.8\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 付近に、常緑針葉樹によるピークはおおよそ $4.6\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 付近に形成されている。この結果からもGPPとLAIとの間の明確な関係性が示唆される。一方で、GPPの頻度分布は、LAIに比べてばらつきが比較的小さい点が特徴的である。地上気象値には分布的差異が存在するにも関わらず、GPPではそれらの影響は互いに相殺されて、結果として、ある一定の値に集中している点については非常に興味深い事実である。この結果は、本手法のように100mメッシュまで高解像度化することが無意味であるかのような感を抱かせる。しかしながら、前述した様に系統的誤差の少ない森林生態系機能評価のためには、本手法のように100mメッシュにまで高解像度化することが必須となるだけでなく、依然として不明な点の多い広域炭素循環の理解を深め、更に、ha単位で効果的な森林整備対策を講じてゆくためにも、本手法は決して無意味なものではなく、むしろ、更なる改良と発展が不可欠になると言えるだろう。

以上の詳細な解析結果から、第一近似的には、まず、LAIによってその森林が持つ光合成潜在能力（上限値）が決定し、次いで、日射量、地上気温、地上風速などの微気象環境に応じて、その機能がどの程度発揮されるか（どの程度上限値に近づくか）が決まるということが明らかとなった。よって、樹種や樹齢に応じて格子点毎にLAIの上限値と測定値との差を評価することで、ある程度、森林健康度を定量化できるものと期待される。

7. 結語

本研究では、ha単位での高解像度なCO₂吸収機能評価を可能とする大気－陸面－植生結合モデルを新たに開発

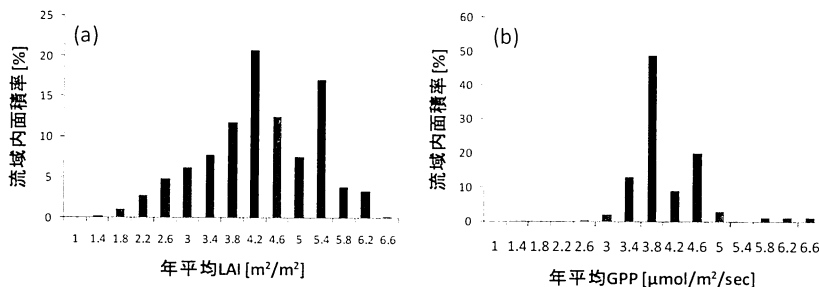


図-19 (a)年平均LAIと(b)年平均GPPの発生頻度分布（流域内面積率）。

し、岐阜県高山市の大八賀川流域における森林生態系を考慮したフラックスデータベースを構築した。この結合モデルでは、100mメッシュの気象パラメータおよび陸面パラメータを入力する必要があるため、大気モデルMM5に対する力学的スケーリングダウン手法や高分解能リモートセンシングデータを新たに導入した。

本研究で構築されたフラックスデータベースに対して、対象領域内に存在するフラックス観測サイトの観測データを用いて精度検証を行った結果、いずれのサイトでも高い精度でCO₂吸収機能を評価できていることが明らかとなり、本手法の高精度性を実証できた。また、構築されたフラックスデータベースに基づき大八賀川流域の森林生態系機能について詳細な解析を行った結果、特に、標高の高い上流域ほど、NEEが小さくなりやすく、炭素固定機能を最大限発揮しやすいことが明らかとなった。

今後は、本手法による計算領域を日本全域に拡大適用し、我が国の陸域生態系がもたらす影響を高精度に定量評価することにより、CO₂排出量に対する森林の吸収源としての役割を、信頼度の高い明確な数値的根拠として提示する必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、岐阜大学流域圏科学研究センターの村岡裕由氏、永井信氏、石原光則氏、斎藤琢氏、児島利治氏、玉川一郎氏には貴重なご意見をいただきました。本研究は岐阜大学21世紀COE衛星生態学創生拠点、及び、国土交通省建設技術研究開発助成の研究成果の一部であることをここに付記する。

参考文献

- 1) Houghton, J., Hackler, J. L. and Lawrence, K. T. : The US carbon budget: contributions from land-use change, *Science*, Vol. 285, 1999.
- 2) Cook, B. D., Bolstad, P. V., Martin, J. G., Heinsch, F. A., Davis, K. J., Wang, W., Desai, A. R. and Teclaw, R. M. : Using light-use and production efficiency models to predict photosynthesis and net carbon exchange during forest canopy disturbance, *Ecosystems*, Vol. 11, 2008.
- 3) Inatomi, M., Ito, A., Ishijima, K. and Murayama, S. : Greenhouse gas budget of a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan estimated using a process-based model, *Ecosystems*, Vol. 13, 2010.
- 4) Masson, V., Champeaux, J. L., Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R. : A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models, *Journal of Climate*, Vol. 16, 2003.
- 5) Dudhia, J. : A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Monthly Weather Review*, Vol. 121, 1993.
- 6) Bonan, G. B. : A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide, NCAR Technical Note, pp. 150, NCAR, 1996.
- 7) 橋本篤, 吉野純, 深尾一仁, 安田孝志: 岐阜県における自然共生エネルギー普及を目的とした高解像度気象データベースの開発, 太陽/風力エネルギー論文集, 2005.
- 8) Bonan, G. B. : Comparison of two land surface process models using prescribed forcings, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99D, 1994.
- 9) Bonan, G. B. : Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100D, 1995.
- 10) Bonan, G. B. : Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces, *Journal of Climate*, Vol. 8, 1995.
- 11) 吉野純, 竹内紘基, 嶋田進, 安田孝志 : 広領域・長期間・高解像度風況シミュレーション手法の開発と有用性の検証, 風力エネルギー, Vol. 31, 2007.
- 12) Myrneni, R. B., Nemani, R. R. and Running, S. W. : Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, 1997.
- 13) Knyazikhin, Y., Martonchik, J. V., Myrneni, R. B., Diner, D. J. and Running, S. W. : Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, 1998.

AN EVALUATION METHOD OF HIGH-RESOLUTION ECOSYSTEM FUNCTION USING A COUPLED ATMOSPHERE-LAND-VEGETATION MODEL

Jun YOSHINO, Sohei TAKEICHI and Takashi YASUDA

In this study, an evaluation method of the terrestrial ecosystem function, such as growth primary production (GPP) and net ecosystem exchange (NEE), is developed based on a coupled atmosphere-land-vegetation model with a one hectare grid size. The coupled model enables us to estimate the high-resolution distribution of the ecosystem function with the use of downscaling technique. The high-accuracy ecosystem database evaluated for the Daihachigawa river basin indicates that higher carbon assimilation ability may typically occur around the region where the altitude is higher in the basin.