

流域圏を支える森林環境保全のための 森林健康診断手法

吉野 純¹・村岡 裕由²・永井 信³・石原 光則⁴・斎藤 琢⁵・
児島 利治⁶・玉川 一郎⁷・安田 孝志⁸

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岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:muraoka@green.gifu-u.ac.jp

³岐阜大学COE研究員 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:nagai@green.gifu-u.ac.jp

⁴岐阜大学COE研究員 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:mishihara@green.gifu-u.ac.jp

⁵岐阜大学COE研究員 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:taku@green.gifu-u.ac.jp

⁶岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:kojima@green.gifu-u.ac.jp

⁷岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail:tama@green.gifu-u.ac.jp

⁸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

本研究は、独自に開発されたメソスケール大気-陸面結合モデル (SATECOモデル) を用いて、ha単位で森林による第一次生産量 (GPP) や正味生態系交換 (NEE) を算定することで、現在の森林の健康状態の数値化を可能とする診断手法を開発・提案するものである。この診断手法では、メソ気象モデルによる気象パラメータや、高分解能衛星による陸面パラメータが用いられ、これまでにない高い分解能で流域の森林生態系機能を評価できる。これにより、2002年1年間分の大八賀川流域 (岐阜県高山市) の森林生態系機能に関する高分解能データベースが完成した。標高1000mから1250m付近では、周囲に比べて炭素固定能力 (GPP) が高く、同一流域内であってもその機能は大きく変化していることが明らかとなった。

Key Words : *terrestrial ecosystems, carbon budget, growth primary production, land surface model mesoscale meteorological model, high-resolution remote sensing*

1. はじめに

森林は、「生きた社会資本」として地球温暖化防止のみならず水源涵養や洪水・土砂災害防止などに本質的役割を果たしている。このため、森林の機能を最大限発揮させるためには、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の健康診断を行い、その情報に基づき森林環境を保全する必要があると言える。ここで「健康な森林」とは、「①二酸化炭素吸収→②バイオマス成長→③落葉落枝→④肥沃な森林土壌形成」の過程の中で個々の機能が最大限活性化し、このサイクルが円滑に巡ることで生まれる。機能的に優れた健康な森

林は、この過程の出発となる「①二酸化炭素吸収」、すなわち「光合成」が活発であることが前提となり、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となる。従って、森林の健康度を最良にして機能を最大化するためには、森林全体としての炭素固定能すなわち総一次生産量 (GPP) を極大にする必要がある。ha単位でGPPを算定できれば、現在の森林の健康状態を森林経営単位で数値化できるようになる。これを衛星データに基づき広域的に行うことができれば、森林所有者の森林管理経営能力に依ることなく、森林の健康度を診断し、不健康な森林 (間伐などの手入れが早急に必要な森林) を検出することが可能になる。これにより、

「生きた社会資本」として重要な機能を担いながら、林業の衰退のために荒廃が進む我が国の森林に対し、健康な森林への回復に向けた効率的・効果的整備の第一歩が拓かれることになるであろう。それゆえ、ha単位での森林生態系機能の算定手法の開発が重要な緊急の課題となっている。

1997年の京都議定書以降、森林などの陸域生態系の炭素固定能やその気候への影響について定量的評価が世界各国で行われるようになった。例えば国内では、岐阜県高山市の大八賀川流域内に位置するアジアフラックス観測サイトの1つである冷温帯落葉広葉樹林サイト(Q50サイト)があり、1993年より今日まで正味生態系交換量(NEE)の常時観測が行われ、長期間の生態系・微気象データが蓄積されている。また同じ流域内には、常緑針葉樹林サイト(C50サイト)も2005年に新設され、同じく生態系・微気象に関する連続観測が実施されている。しかしながら、これらの限られたデータを時空間的に内挿・外挿するだけでは、広域的な森林の炭素吸収過程を精度良く評価したことにはならない。生態系スケールの二酸化炭素吸収量を適切にスケールアップするためには、「陸面過程モデル」と「衛星リモートセンシング」と「メソ気象モデル」の相互結合による高解像度数値モデリングの開発が解決の糸口になる。

ここで、「陸面過程モデル」とは、一般的に、地点毎の植生・土壌の特性を考慮して水・熱・運動量・放射・炭素収支を評価する鉛直1次元モデルのことを指し、入力値として多数の陸面パラメータや気象パラメータが必要となる。陸面パラメータとしては、例えば、土地被覆分類や葉面積指数(LAI)などが挙げられ、近年の高解像度な「衛星リモートセンシング」からの推定値を使

用できる。一方、気象パラメータとしては、例えば、地上における気温、気圧、風向・風速、日射量、降水量などが挙げられる。日本のような複雑な地形起伏からなる山岳地域に対して、グローバルスケールを対象とする「全球気象モデル」を適用した場合には、その格子間隔の粗さ(約100kmメッシュ)に起因して精度面での問題が発生する。よって、地域スケール(ha単位)で炭素固定能を正しく評価するためには、より高分解能な「メソ気象モデル」を選択する必要がある。近年になって、世界各国の気象機関にて、主に日々の気象予報を目的とした様々なメソ気象モデルが開発されるようになり、研究者レベルでも利用可能になっている(例えば、MM5, WRF, RAMS, NHMなど)。これらは、ネスティング技術の導入により、計算領域に対してより高分解能(約1kmメッシュ)に3次元気象値を評価・予測できるため、陸面過程モデルとの結合により、ha単位でのGPPやNEEを算定できるようになると期待される。

そこで本研究では、独自にメソスケール大気-陸面結合モデル(通称:SATECOモデル)を開発し、更に、高分解能衛星によるリモートセンシング観測情報を入力することで、森林による生態系機能を時空間的に高分解能に評価できる森林健康診断手法を開発・提案することを目的とする。計算対象として、Q50サイトやC50サイトが位置する岐阜県高山市の大八賀川流域を選択し、予め用意されたメソ気象モデルによる2002年気象データベースに基づき、100mメッシュ(ha単位)で1時間毎、1年間分の生態系データベース(GPPやNEEなど)を構築し、流域における森林生態系による炭素循環について詳細な解析を行った。

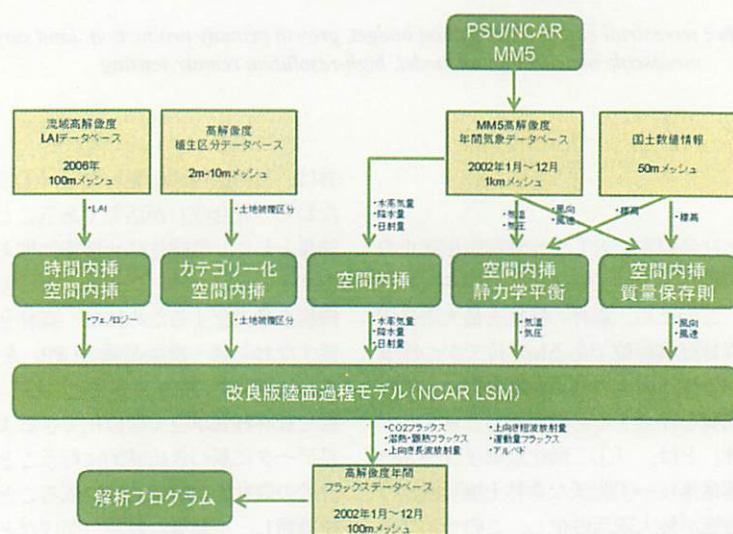


図-1 SATECOモデルの計算フローチャート。

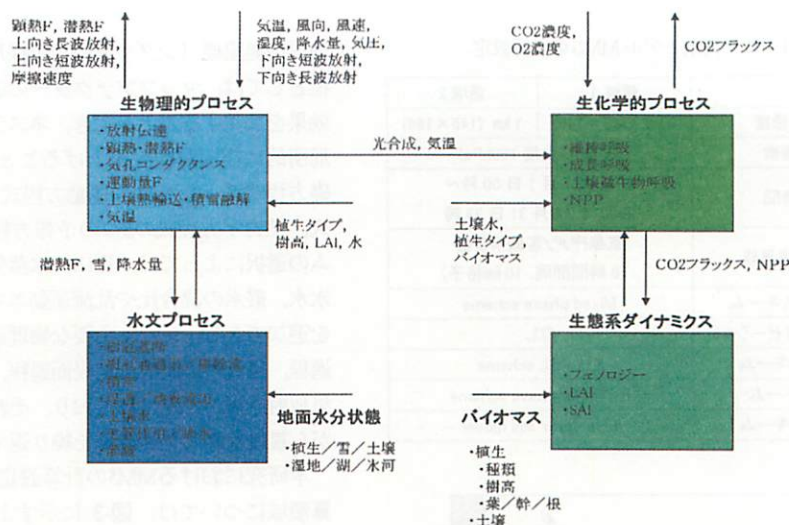


図-2 陸面過程モデル NCAR LSM の計算フローチャート。

2. SATECOモデルの概要と計算設定

ここでは、新たに開発したメソスケール大気-陸面結合モデル (SATECO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過程モデルがベースとなっており、大気モデルとしては PSU/NCAR MM5 (Dudhia, 1993) ¹⁾が、陸面過程モデルとしては NCAR LSM (Bonan, 1996) ²⁾が、それぞれ採用されている。いずれも、本研究の目的に応じて改良が加えられた独自バージョンであることに注意を要する。

図-1 は、SATECOモデルの計算フローチャートを示す。陸面過程モデルは、陸面パラメータと気象パラメータが一方向的に入力され、出力値として各種フラックス値がメッシュ毎に算出される。前述のように、陸面パラメータとしては高分解能衛星によるリモートセンシング観測情報が用いられ、気象パラメータとしてはメソ気象モデル MM5 により再現された高分解能気象データベースが用いられる。「双方向結合」でなく「単方向結合」による計算方式を採用することにより、メソ気象モデルによる莫大な計算コストの影響を受けることなく、極めて低い計算コストで高速に陸面過程モデル LSM を実行可能となる。以下、SATECOモデルの核となる陸面過程モデル LSM とメソ気象モデル MM5 の概要と計算設定について示し、最後に、SATECOモデルの計算設定について示す。

(1) 陸面過程モデル LSM について

NCAR LSM は、Bonan (1994) ³⁾、Bonan (1995) ⁴⁾、Bonan (1995) ⁵⁾、Bonan (1996) ²⁾の研究に基づき、NCAR (National Center for Atmospheric Research) にて開発された森林生態系を単層で考慮した陸面過程モデルであり、全球気象モデル NCAR CCM との下部境界条件における相

互結合を意識したモデル構成となっている。LSM の計算フローチャートを図-2 に示す。LSM では、熱・水・運動量・日射量に関する生物物理的フラックス (潜熱フラックス・顕熱フラックス・運動量フラックス・上向き短波放射・上向き長波放射) に加えて、森林生態系による生物化学的フラックス (光合成量、土壌呼吸量、バイオマス呼吸量、NEE) を計算できる統合的な1次元陸面過程モデルである。そのため、地点毎の植生・土壌の特性を考慮した地表面フラックスの算定が可能である。

LSM の入力値としては、点観測やモデルにより得られる気象パラメータ (気圧、風速、気温、比湿、観測高度、降水強度、下向き長波放射、下向き短波放射) を用意する必要がある。また、各メッシュに対して計12種類の植生タイプを定義し、それぞれのタイプ毎に、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などを適切に与える必要がある。これらの入力条件に基づき LSM により出力された各種フラックス値は、全球気象モデルやメソ気象モデルとの双方向結合により大気場へとフィードバックさせることもできる。

大気-生態系間で行われる二酸化炭素の交換は、「①植物の光合成による二酸化炭素吸収 (GPP)」、「②植物の維持呼吸・成長呼吸による二酸化炭素放出 (バイオマス呼吸)」、「③植物根や土壌微生物による二酸化炭素放出 (土壌呼吸)」の3つの過程に細分化でき、それぞれ帰納的・経験的な定式化がなされている。本研究では、Q50 サイトや C50 サイトなどの独自観測や文献情報に基づき改良が加えられた独自バージョンが用いられている。

本研究での LSM の計算期間は、後述の気象データベースの期間に合わせて2002年1月1日0時UTCから2003年1月1

表-1 メソ気象モデルMM5の計算設定.

	領域 1	領域 2
水平解像度	3 km (145×145)	1 km (145×166)
鉛直層数	24 層 (上端 100hPa)	
計算時間	2002 年 1 月 1 日 00 時～ 2003 年 12 月 31 日 23 時	
初期値・境界値	気象庁メソ客観解析値 (6 時間間隔, 10 km 格子)	
雲微物理スキーム	Mixed phase scheme	
積雲パラメタリゼーション	なし	
境界層スキーム	Eta PBL scheme	
放射スキーム	RRTM longwave scheme	
地表面スキーム	Five-layer soil model	

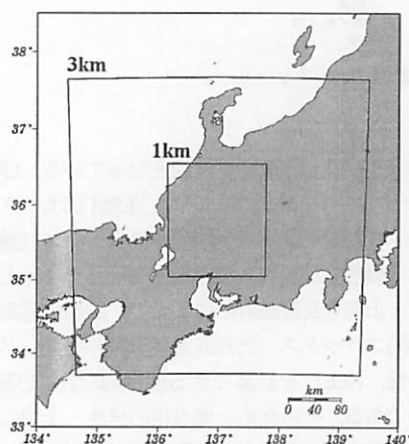


図-3 メソ気象モデルMM5の計算領域.

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。

(2) メソ気象モデルMM5について

前述のように、陸面過程モデルLSMは、メッシュ毎にタイムステップ毎に外力となる気象パラメータを必要とする。一般的には、高層観測・地上観測データが用いられることが多いが、これらは時空間的に疎であるため、詳細な空間的構造やその時間発展まで把握することは困難を極める。そこで、メソ気象モデルの出番となる。点観測に比して精度面での問題はあっても、近年のデータ同化技術の高度化や計算機能力の向上により、メソ気象モデルでも高精度かつ高解像度な地上気象要素の推定が可能になった。

本研究では、PSU (Pennsylvania State University) と NCAR (National Center for Atmospheric Research) にて開発されたメソ気象モデルMM5 (Dudhia, 1993)¹⁾が採用された。このモデルは、3次元完全圧縮非膨張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) が採用されている。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空間解像度を上げることができる。MM5の基礎方程式系としては、運動方程式 (3成分)、気圧方程式、熱力学方程式の5つの予報方程式から成り、スキームの選択によっては、更に、水蒸気、雲水、雨水、雪水、氷水、霰水の混合比や乱流運動エネルギーの予報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、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複雑な時間発展計算を繰り返す。

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3kmメッシュ領域 (145×145格子) と1kmメッシュ領域 (145×166格子) の2つの計算領域を設定した。鉛直方向には、1000hPaから100hPaまでを計24フルシグマレベルを置いた。時間ステップは3秒とし、2002年1月1日0時UTCから2003年1月1日0時UTCまでの計1年間の時間積分を行った。初期条件・境界条件・同化条件としては、10kmメッシュで6時間毎の気象庁メソ客観解析値 (水平風、高度、気温、相対湿度) を使用した。4次元データ同化手法の1つである「ナッジング法」を自由大気に対して適用することで、現実的かつ長期間の再現計算を可能にしている。

以上の計算設定により構築された1kmメッシュの気象データベースは、2002年の1年間分・1時間毎の2次元および3次元の気象パラメータ (風向、風速・ジオポテンシャル高度・気温・相対湿度・雲微物理量・地上気圧・降水量・日射量など) が収録されており、LSMへの入力値として用いられる。これら評価された気象パラメータの計算精度については、橋本ら (2005)⁹⁾により、観測データとの高い相関性が実証されている。

(3) SATECOモデルの計算設定

SATECOモデルを実行するためには、図-1に既に示したように、予め気象パラメータと陸面パラメータに関する100mメッシュのデータベースを用意しておく必要がある。

前述したように、MM5により評価された気象データベースは、1kmメッシュと若干粗いため、100mメッシュへと更に高解像度化する必要がある。そこで、図-4に示すような国土数値情報による100mメッシュの標高データを用意し、この高解像度な標高データに基づき、気象パラメータの高解像度化を図る。具体的には、気温に関しては気温減率0.0065°C/mを、気圧に関しては静力学平衡近似に基づき補正処理を施す。また、風向・風速

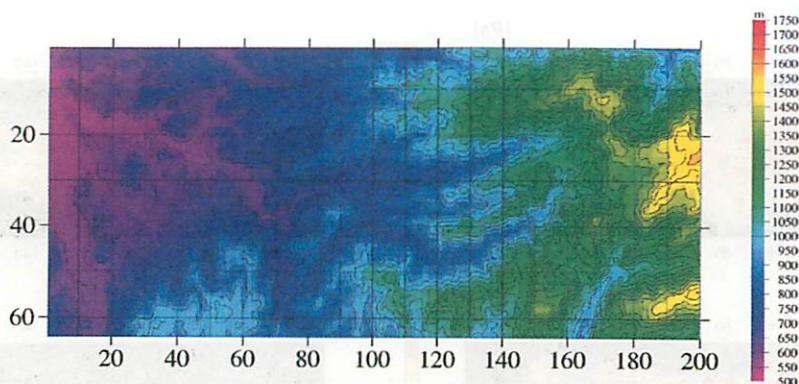


図-4 大八賀川流域の100mメッシュ標高分布（国土数値情報）。

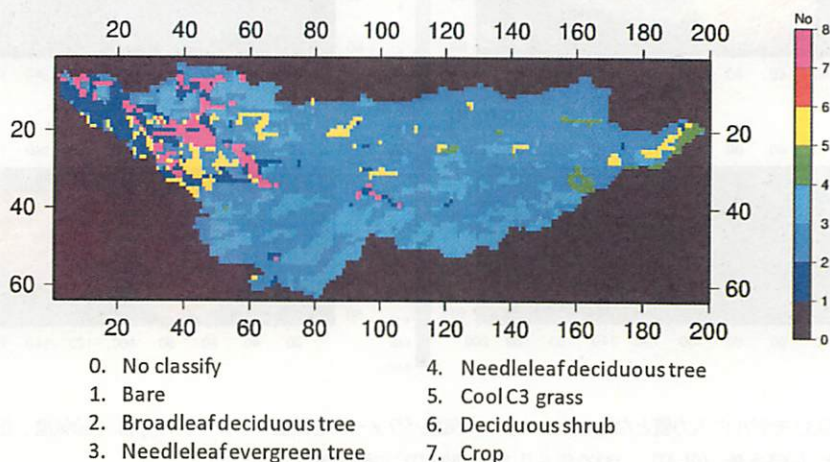


図-5 SATECOモデルの入力値となる100mメッシュ土地被覆分類の分布。

に関しては、吉野ら（2007）⁷⁾により開発された質量保存則を制約条件とする定常風況モデルMASCONを適用することで、1kmメッシュから100mメッシュへと高解像度化を施す。また、比湿・下向き短波放射量・下向き長波放射量に関しては、標高データとの直接的な因果関係がないため、滑らかさの制約条件のみからなる変分問題を解くことで平滑化を施す。これらの微地形の効果を加味した100mメッシュ気象データベースをLSMの入力条件として使用する。

また、陸面パラメータの1つとして、100mメッシュの土地被覆分類データベースを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観測（Quick Bird, ALOS, CASI-3）により評価された大八賀川流域内の10mメッシュ土地被覆分類データベース（全14タイプ）を使用した。ここで、この10mメッシュのデータベースからSATECOモデルの100mメッシュへと再メッシュ化するために、メッシュ毎に各タイプの面積率を計算し、優占するタイプをそのメッシュの土地被覆とすると再定義した。更に、全14タイプの中で類似するタイプを統合し、典型的な計7タイプへと再カテゴリー化することで、

SATECOモデル用の新たな100mメッシュ土地被覆分類データベースを構築した（図-5）。加えて、高分解能衛星（MODIS）により評価された100mメッシュのLAIデータベースもLSMの入力条件として用意する必要がある。LAIは、光合成量の算定に大きく影響する陸面パラメータの1つであるため、地点毎に固有の入力条件を設定することで高精度な評価が可能になるものと期待される。このLAIデータベースは、雲の影響を除去するために8日間平均値という形で存在するため、LSMに入力の際には時間内挿の処理が施される。

3. 結果と考察

ここでは、まず、SATECOモデルの入出力値を示し、その再現性について議論する。更に、得られたデータベースを基にして、対象領域である大八賀川流域における森林生態系による炭素循環の特徴についても考察を行う。

図-6 は、LSMに入力された2002年6月1日0時UTCにおける気象パラメータや陸面パラメータの分布を示す。これらの分布から、僅か128km²とごく狭い大八賀川流域に

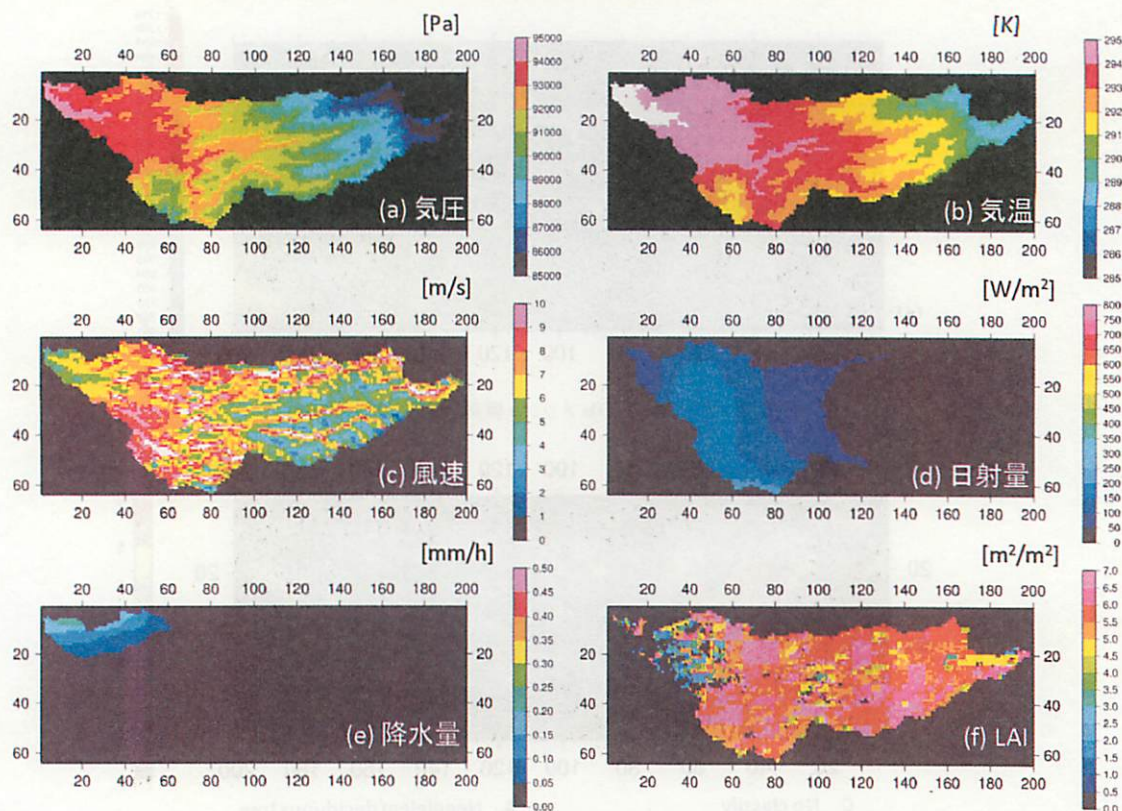


図-6 SATECO モデルの入力値となる 100m メッシュ気象パラメータと陸面パラメータの分布 ((a)気温, (b)気圧, (c)風速, (d)日射量, (e)降水量, (f)LAI) . 2002 年 6 月 1 日 0 時 UTC の瞬時値

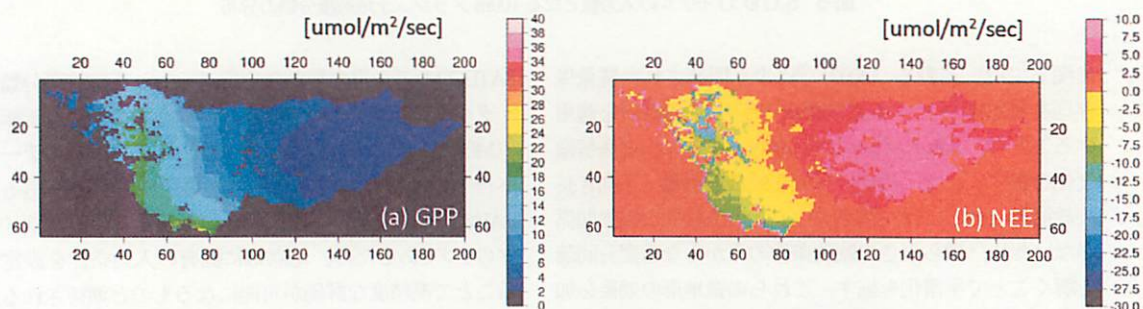


図-7 SATECO モデルにより出力された 100m メッシュ生態系パラメータの分布 ((a)GPP, (b)NEE) . 2002 年 6 月 1 日 0 時 UTC の瞬時値

においても気象パラメータの空間的変化は大きく、メソ気象モデルを導入することによる高解像度計算の必要性が理解できる。特に、気温や気圧は流域の峰や谷といった標高分布に応じた変化を呈しており、少なくとも 100m メッシュ程度の分解能まで高解像度化する必要があると言える。また、風速についても微地形の効果を受けて空間的に大きく変化しており、特に、山の峰に沿って強風となり、谷に沿って弱風となっていることが見て取れる。風速は地表面での乱流輸送を評価する上で重要な気象パ

ラメータとなるため、本手法のように、少なくとも 100m メッシュ程度の分解能まで高解像度化する必要があると言える。

また、この時間帯には、大八賀川流域上に積乱雲が通過しているために、広い範囲で日射量が低下しており、一部では降水も生じている。このような日射量の空間非一様性による影響は、SATECO モデルの出力値である GPP や NEE にも即座に現れてくる (図-7)。日射量の分布パターンに応じて GPP も変化しており、例えば、大八

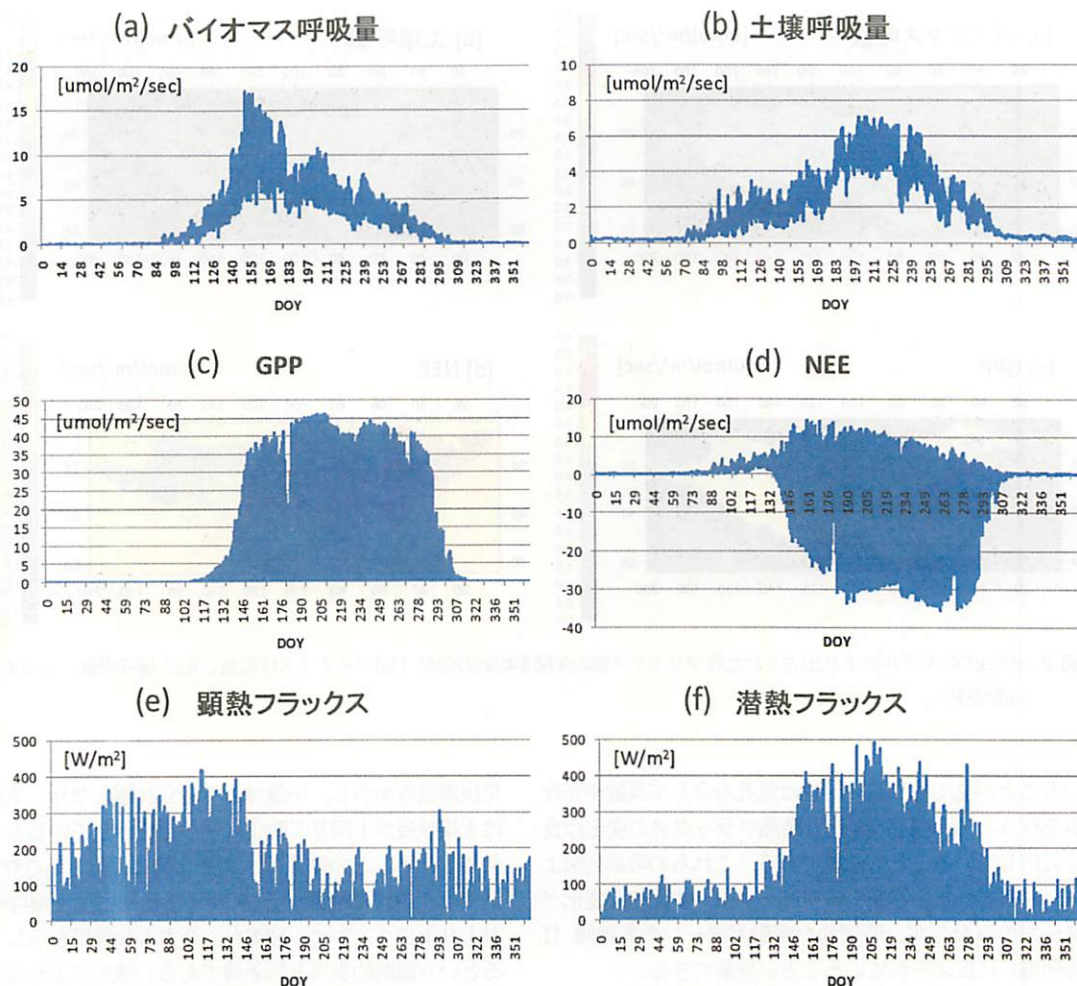


図-8 SATECO モデルにより出力された Q50 サイト (50 年生落葉広葉樹林サイト) における各フラックス値の年間時系列 ((a) バイオマス呼吸量, (b) 土壌呼吸量, (c) GPP, (d) NEE, (e) 顕熱フラックス, (f) 潜熱フラックス)。

賀川流域の中腹における比較的日射の強い場所で光合成はより活発となっている。結果として、NEEでは、日射の弱い上流域で二酸化炭素放出が勝り、日射の強い中腹で二酸化炭素吸収が卓越している。このように、高解像度なメソ気象モデルの適用により、上空の積乱雲の存在を考慮した詳細な日射量分布を評価できるため、より低分解能な全球気象モデルを用いるよりも現実的な炭素循環を表現できていると考えられる。

次に、LSMが出力した各種フラックス値 (1時間毎) の年間時系列 (Q50サイト) を、図-8 に示す。この場所では落葉広葉樹が優占するため、展葉の時期にバイオマス呼吸が活発となり、また、気温がピークになる8月～9月に土壌呼吸が活発となる。展葉の5月頃から落葉の10月頃まで、日中にはGPPは呼吸量を大きく上回り、光合成による二酸化炭素吸収が卓越する。このような時間変

化パターンについては、Q50サイトでの観測結果とよく一致しており、より詳細な精度検証が今後求められるが、SATECOモデルによりこの地域の生態系機能をある程度の精度で再現できていると見なせる。ちなみに、Saigusa et al (2005) によるQ50サイトでのフラックス観測の結果によると、2002年の年間積算NEEは -3.4 tC/ha/year であり、本研究の結果 (年間積算NEE -3.1 tC/ha/year) と良い一致を示している。また、常緑針葉樹が優先するC50サイトのフラックス観測と比較しても (図省略)、観測と良く一致したパターンを示した。

更に、SATECOモデルは、森林生態系による二酸化炭素フラックス (炭素収支) のみならず、顕熱フラックス (熱収支) や潜熱フラックス (水収支) も計算できる (図-8)。顕熱フラックスは冬季に比較的高く、潜熱フラックスは夏季に高いという観測的事実と良く一致して

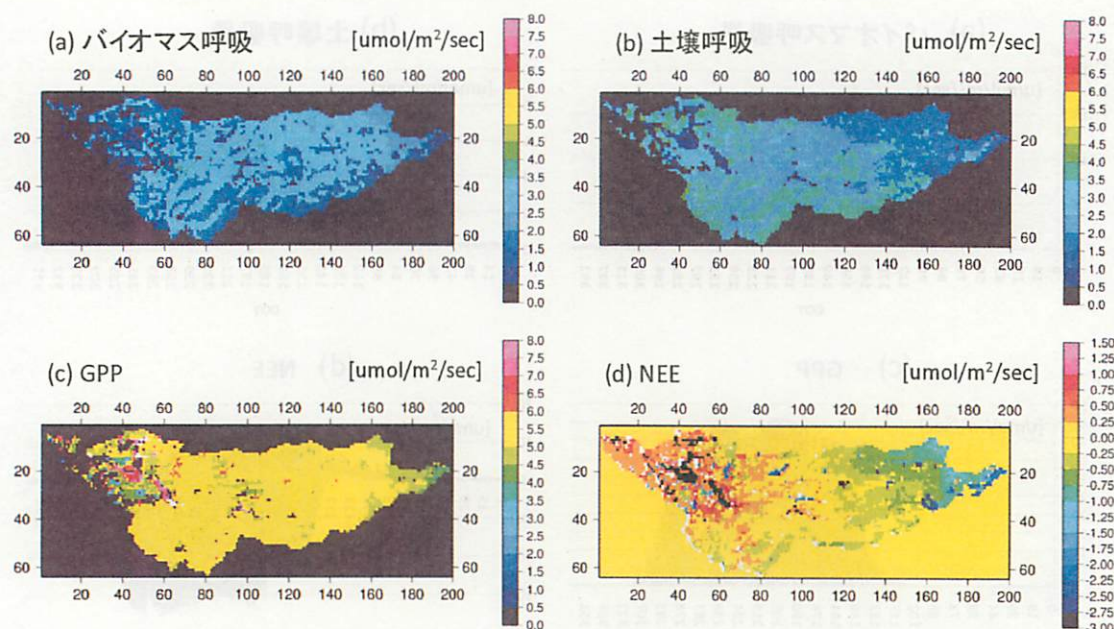


図-9 SATECO モデルにより出力された各フラックス値の年間平均値の分布 ((a)バイオマス呼吸量, (b)土壌呼吸量, (c)GPP, (d)NEE)。

いることが見て取れる。植物は気孔を介して蒸散や光合成を行うため、GPPの変化と潜熱フラックスの変化は良く対応していることも確認できる。これらの時系列図より、構築された生態系データベースは、空間的な変化パターンのみならず、時間的な変動パターンをも詳細（1時間毎）に捉えられていることが理解できる。

次に、図-9には、バイオマス呼吸量、土壌呼吸量、GPP、NEEの年間平均値の分布を示す。GPPは、気象パラメータや陸面パラメータの分布に応じて流域の上流から下流にかけて大きく変化しており、中腹でピークとなっていることが分かる。土壌呼吸量は、特に地温に依存しているため、特に上流で小さな値をとり、下流に向かって土壌呼吸は増大している。バイオマス呼吸は、特に落葉広葉樹が優先する場所で大きく、その他の植生タイプではそれほど大きな値を示さない。結果として、NEEを見ると、上流では土壌呼吸量が小さいために二酸化炭素吸収を示し、中腹付近で中立状態となり、下流では土壌呼吸が上回り二酸化炭素放出を示していることが見て取れる。この結果は、より上流に位置するQ50サイトでは、中腹に位置するC50サイトに比べて土壌呼吸量がより小さく、かつ、NEEもより大きな負値を示しているという観測的事実と無矛盾である。植生による炭素固定（GPP）という観点から言えば、この流域の中腹の植生が最も光合成が活発で、森林健康度の高い場所であると言えるのに対して、森林生態系による正味の炭素収支（NEE）という観点からは、より気温の低い上流側の方が正味の二酸化炭素吸収量は大きく地球温暖化防止に貢献していると言える。本研究では、森林の健康状態を光合成の活発さ（GPP）で定義していることから、特に大八賀川流域の中腹では、森林の健全な成長に適した環境であると見なすことができ、適切な森林管理経営により二酸化炭素吸収へと転じることも可能になると考えられ

化炭素吸収を示し、中腹付近で中立状態となり、下流では土壌呼吸が上回り二酸化炭素放出を示していることが見て取れる。この結果は、より上流に位置するQ50サイトでは、中腹に位置するC50サイトに比べて土壌呼吸量がより小さく、かつ、NEEもより大きな負値を示しているという観測的事実と無矛盾である。植生による炭素固定（GPP）という観点から言えば、この流域の中腹の植生が最も光合成が活発で、森林健康度の高い場所であると言えるのに対して、森林生態系による正味の炭素収支（NEE）という観点からは、より気温の低い上流側の方が正味の二酸化炭素吸収量は大きく地球温暖化防止に貢献していると言える。本研究では、森林の健康状態を光合成の活発さ（GPP）で定義していることから、特に大八賀川流域の中腹では、森林の健全な成長に適した環境であると見なすことができ、適切な森林管理経営により二酸化炭素吸収へと転じることも可能になると考えられ

表-2 計算領域内の落葉広葉樹と常緑針葉樹のそれぞれの年積算炭素収支量（2002年）。

	Area (ha) [coverage]	GPP (tC/ha/year)	Re (tC/ha/year)	NEE (tC/ha/year)
Broadleaf deciduous tree	3249 [57%]	18.7	18.5	-0.14
Needleleaf evergreen tree	1587 [28%]	19.4	19.7	0.25

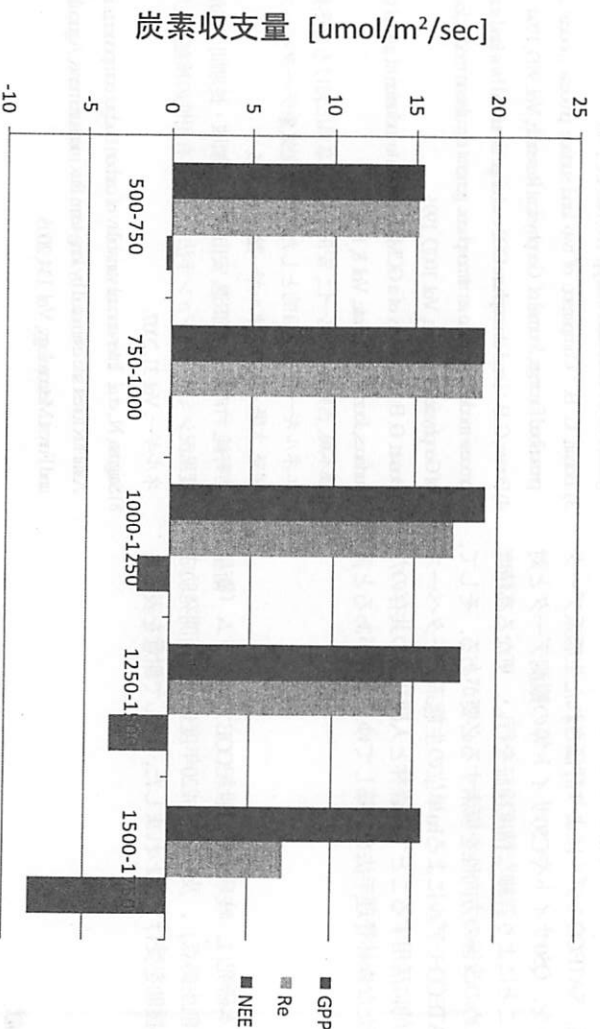


図-10 計算領域内の高度毎の年平均炭素収支量 (2002 年)。

標高 [m]

る。

次により詳しく、この流域における生態系機能の特徴について考察する。表-2 は、大八賀川流域の大半を占める落葉広葉樹 (面積率: 57%) と常緑針葉樹 (面積率: 28%) の年間積算の炭素収支量を示している。GPP は、常緑針葉樹の方が若干大きく、森林健康度は落葉広葉樹に比べて高いと言える。しかし、総呼吸量 (Re: 土壌呼吸量+バイオマス呼吸量) はそれをさらに上回るため、正味では二酸化炭素放出側であることが分かる。

このことは、常緑針葉樹の大半はより下流域に位置するため、地温が高く、土壌呼吸が卓越しやすいことに起因している。一方で、上流域に広く分布している落葉広葉樹は、Re よりもGPPが上回るため、平均的に見ると二酸化炭素吸収側であることが分かる。このように、GPP とReの微妙なバランスで吸収側になるか放出側になるかが決定され、特に標高による影響が強く刻印されているものと推測される。

図-10 は、標高毎のGPP, Re, NEEの年間平均値を示している。図-9 でも議論したように、GPPは標高1000m-1250m付近でピークとなり、Reは、若干下流域側の750m-1000m付近でピークとなっている。下流ほどGPPとReの差が小さくNEEは中立状態に近い。上流に向かうほどGPPとReもいずれも低下してゆくが、特に、Reの減少の方がより大きいため、NEEは大きな負値となり二酸化炭素吸収が卓越するようになる。

以上のように、ごく狭い大八賀川流域であっても、高低差の大きな急峻な地形起伏からなるために、生態系機能は大きく変化することが明らかとなった。よって、本研究のようにha単位で森林健康度を精度良く評価するためには、高解像度の気象パラメータや陸面パラメータを陸面過程モデルに入力する必要があると結論付けられる。

4. 結語

本研究では、広域にわたり森林経営単位 (ha単位) で森林の健康状態を数値化することを目的として、新しいメソスケール大気-陸面結合モデル (SATECO-モデル) を構築した。また、この開発したSATECO-モデルを用いて、岐阜県高山市の大八賀川流域を対象として、100mメッシュ (ha単位) の生態系データベース (GPPやNEEなど) を構築し、その時空間変動の特性について解析を行った。

評価された各種フラックス値は、観測的事実と矛盾しない時空間変動を示すことが明らかとなり、本手法の有用性が確認された。これまでにない100mメッシュという高い分解能で生態系機能を数値化することで、山岳地域におけるそれらの非一様な分布を表現することができた。この結果から、日本のように急峻な山岳地域において生態系機能を定量化する場合には、陸面過程モデルの入力値である気象パラメータや陸面パラメータの高解像

度化が必須となることを意味している。

今後、SATECOモデルにより評価された生態系データベースを、Q50サイトやC50サイト等の観測データと対比することにより詳細な精度検証を行い、更なる高精度化のための改善の方向性を模索する必要がある。そして、このSATECOモデルによるha単位の生態系データベースを積極的に活用することで、森林と人間社会の共存のための新たな森林管理手法を構築してゆく必要があると言えよう。

謝辞：本研究は、岐阜大学21世紀COEプログラム「衛星生態学創生拠点」、及び、平成20年度建設技術開発助成制度の援助を受けて行われました。謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Bonan, G. B. : Comparison of two land surface process models using prescribed forcings, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99D, 1994.
- 4) 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.
- 5) Bonan, G. B. : Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces, *Journal of Climate*, Vol. 8, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Saigusa, N., et al : Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 134, 2005.

AN EVALUATION METHOD OF THE BASIN-SCALE ECOSYSTEM FUNCTION FOR FOREST ENVIRONMENT CONSERVATION

Jun YOSHINO, Hiroyuki MURAOKA, Shin NAGAI, Mitsunori ISHIHARA,
Taku M. SAITOH, Toshiharu KOJIMA, Ichiro TAMAGAWA 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 mesoscale coupled atmosphere-land-vegetation model (SATECO model) using a one hectare grid size. The coupled model enables us to simulate high-resolution distributions of the basin-scale ecosystem function with use of high-resolution meteorological and remote-sensed database. The high-resolution ecosystem database evaluated for the Daihachigagawa river basin indicates that higher carbon assimilation ability may typically occur around an altitude of 1250 – 1500 m in this basin.