

特集 衛星生態学による流域圏機能の解明  
研究論文

## 生態プロセスとリモートセンシングを結ぶモデルの開発

岐阜大学流域圏科学研究センター\* 玉川一郎  
岐阜大学工学研究科\*\* 吉野 純、加野利生、安田孝志  
岐阜大学流域圏科学研究センター\* 村岡裕由、児島利治、石原光則  
永井信、斎藤琢、李美善、牧雅康\*\*\*、秋山侃、小泉博\*\*\*\*

### 要旨

岐阜大学 21 世紀 COE「衛星生態学創生拠点—流域圏をモデルとした生態系機能評価—」(代表:村岡裕由 平成 16 年度~20 年度)ではプログラムの中心的課題として、岐阜県高山市の大八賀川流域を対象に炭素吸収量などの生態系機能を面的に評価する研究を行っている。対象地域の代表的植生を示す場所にある2つの重点的観測サイト(スーパーサイト)での現地観測で得られた結果を用いて、陸面モデル NCAR LSM を対象地域に適した形に改良し、衛星リモートセンシングによって得られた土地利用などのデータを取り込み、気象モデルMM5と結合して流域での生態系機能評価を行うという手順を考え研究を行っている。そこでは生態系プロセス研究と衛星リモートセンシング、数値モデルの3つの研究分野の研究者がそれぞれの知識や技術を出し合い、相互理解を深めつつ協力して研究を進展させている。完成に近づいた現在の姿を報告する。

キーワード: 森林、数値モデル、生態プロセス、炭素吸収量、リモートセンシング、流域

### 1. はじめに

岐阜大学では、流域圏科学研究センターを中心として、21 世紀 COE プログラム「衛星生態学創生拠点—流域圏をモデルとした生態系機能評価—代表:小泉博(平成 19 年まで)、村岡裕由(平成 19 年以降)」を平成 16 年度から平成 20 年度に実行している。そこでは、森林での炭素動態に関する長年の研究蓄積がある岐阜県高山市での観測サイトを中心に、狭領域での集中的な観測と衛星などのリモートセンシングを併用して、領域内での主に炭素循環に係る生態系機能を評価する研究が行われている。

各地点での生態系および気象水文観測で取られたデータとリモートセンシングにより得られたデータを結びつけ領域の評価を行うために、我々は森林生態系を含む陸面過程の数値モデルと気象学で言うメソスケールの気象モデルを結合して、両者のデータを取り込んで使用する戦略を採った。まだ、最終結果には至っていないが、領域での生態系機能評価の方法論はかなりの程度完成した。ここではこの研究活動の現在の状況を報告する。

### 2. 衛星生態学

よく知られているように、近年の人工衛星によるリモートセンシングは、空間・時間・波長のそれぞれの分解能において著しい進歩を遂げている。例えば、1970 年代から運用されている極軌道衛星 NOAA の AVHRR が 1km 程度の解像度であるのに対し、2001 年打ち上げの QuickBird は数 10cm の解像度を持っている、同様に 70 年代からある Landsat では現行の7号の ETM+ で 16 日周期であるのに対し、1999 年の TERRA MODIS は毎日画像が得られる、あるいは NOAA AVHRR が可視赤外の4波長であるのに対し、2000 年の EO-1 Hyperion が、220 の波長を観測するといった点が指摘できる。このような進歩の結果、地上にある森林、農地などの分類や、その季節変化の把握が正確に行えたり、過去には得られなかったパラメータが得られたりする可能性が高まった。衛星リモートセンシングは広域を観測する特徴を活かしてグローバルな研究に使用されるのが通常であるが、上記のような進歩の結果、地上での観測との対応あるいは連携が可能になってきたのではないかと考え、両者を使った流域での生態系機能の評価に挑む新たな学問分野「衛星生態学」を作っていこうと本プログラムが開始された。

「衛星生態学創生拠点」では、以下の3つのグループ

\*,\*\* 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1  
(Correspondence: tama@green.gifu-u.ac.jp)

\*\*\* 現所属、京都大学工学研究科

\*\*\*\* 現所属、早稲田大学教育・総合科学学術院

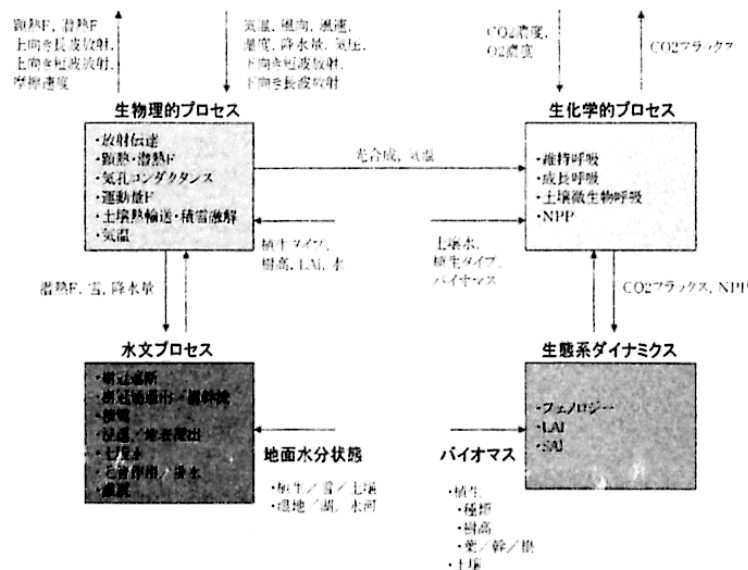


図1 NCAR LSMで考慮されている様々な過程の概略

に分かれて活動を行っている。

- 生態プロセス研究グループ
- リモートセンシング研究グループ
- モデリング解析・評価グループ

それぞれが、それぞれの分野の研究活動を展開する一方で、大半のメンバーが「統合作業」と称して、本論で紹介する流域での生態系機能評価に取り組んでいる。生態学、リモートセンシング、気象学、水文学などさまざまな専門の研究者が、数年間に亘り、相互理解を深めつつ、お互いの知識やデータを交換し、評価に使用する数値モデルのさまざまな設定や計算結果について議論を続けている。

この数値モデルを使った「統合作業」の概略は以下の通りである。対象地域は前記「高山サイト」のある岐阜県高山市東部の乗鞍岳山麓の大八賀川流域である。観測サイトの概要については他論(秋山ほか 2008)を参照していただきたい。

#### A) 大八賀川流域にある2つのスーパーサイト

- 落葉広葉樹林サイト TKY
- 常緑針葉樹林サイト TKC

での多くの観測データに基づく、陸面モデル(NCAR LSM)の改良作業による高山版作成

#### B) 衛星リモートセンシングを使った広域でのパラメータ取得とその入力

#### C) 気象モデル MM5 と陸面モデル(高山版 LSM)と

の結合による流域での生態系機能評価

もちろん、これ以外にも、将来の発展を考えたより複雑な数値モデルの適用や衛星データをもっと直接的に利用する方法の検討なども進められているが、ここでは触れない。

### 3. 陸面モデルの改良

衛星リモートセンシングによって得られるデータは、雲による影響を取り除いてしまうと時間分解能が10日のオーダーになってしまう。従って、日と年の周期の変動が卓越する光合成量などの生態系機能を直接観測しているのではなく、それらに関係の深い地表面状態を観測していると考えられる。この地表面の状態から炭素吸収量などの生態系機能を評価するには、地表面状態をパラメータに持ち、気象データで駆動される陸面(ここでは主に森林)の数値モデルが必要になる。

その陸面モデルを豊富な生態プロセス観測や気象観測のデータを取得している高山落葉広葉樹林サイト(TKY)および高山常緑針葉樹林サイト(TKC)に適用し、観測された気象データで駆動して森林の表現やそこで使われているパラメータの適合性を検討し、高解像度な領域評価にふさわしい精度をもつモデルに仕上げるのが最初に必要となる仕事である。

この作業のために、我々は多数ある陸面モデルの中

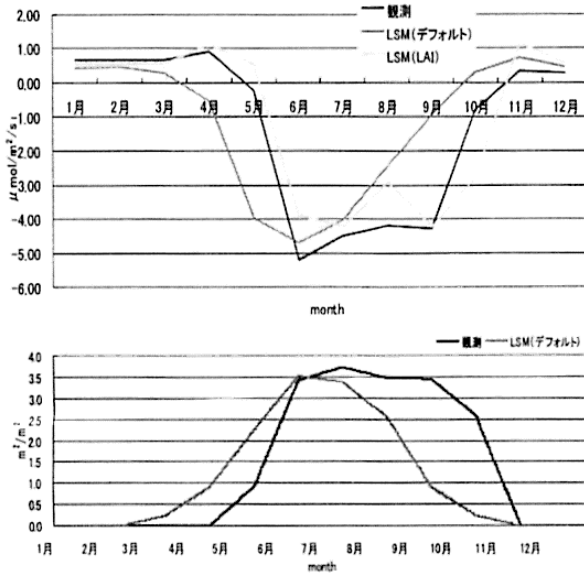


図2 LAIの年変化の変更。

上図は、森林上での $\text{CO}_2$ フラックス(上向きを正とした)の比較、下図はLSMで用意されているLAIの年変化とTKYでの観測値

から、比較的古いシンプルなものでありながら、光合成などの植物活動が取り込まれている NCAR LSM (Bonan 1996, 1998) をベースに選んだ。このモデルは、図1に示すように、放射や熱、水の移動、光合成や呼吸などの生物過程を単層の植物キャノピー層と多層の土壌で解き、パラメータとして、葉面積指数(LAI)などの植物の特性を受け取り、外部からの気象データによって駆動されるというものである。もともとは全球スケールの気候モデルへの適用を意図したものであり、これを踏まえた陸面モデルが現在の気候モデルで使われている (Dickinson *et al.* 2006)。

このような陸面モデルを、高山での豊富な観測データを活かして1点での詳細な観測値と比較し、観測を再現できるように改良を施した。加野(2007)によると改良された点は以下の通りである。

- LAIの年変化
- 地表面アルベド
- 積雪面積率、積雪内不純物量
- 森林粗度長、0面偏位
- 蒸発に係る土壌パラメータ

これらの内から、観測データを投入した LAI の変更と潜熱フラックスの過大評価に対応した土壌パラメータの変更について紹介する。

NCAR LSM では、植生タイプ毎に LAI の年変化パタ

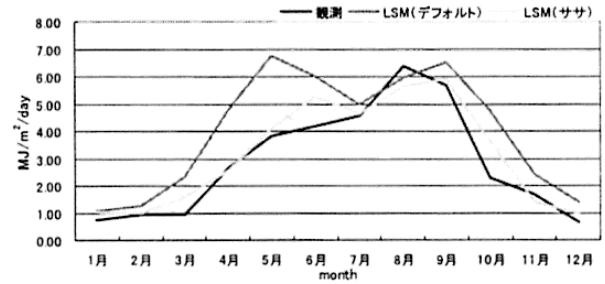


図3 ササ蒸発抵抗を最適値で導入した結果と導入前、観測値との比較

ーンをデータベースとして持ち、それを適用するようになっているが、全世界での適用を考えたモデルで考慮されている LAI の年変化は当然、TKY での観測値とは異なる。そこで、観測で得られている LAI の年変化を月毎に適用した結果を適用前と比較したのが、図2である。もともと用意してあるデフォルト値では LAI は3月頃から6月にかけてゆっくりと立ち上がり、その後12月までかけてゆっくりと低下している。しかし、観測によると5月から急速に立ち上がり、7月から10月最大値を保ち、その後急速に低下している。この違いは、基にした観測データの違い以外に、全球を対象として、例えば100km というような解像度での適用を考えた NCAR LSM では1点で計算される領域内にさまざまな分布があることを考えた結果ではないかと推測されるが、ここではその議論に深入りせず、あくまで高解像度での狭領域計算における1点としての1次元モデルとして扱う。観測による LAI の変化を取り入れた結果、 $\text{CO}_2$  フラックスは春秋の変化パターンが大きく観測に近付いていることがわかる。

さらにさまざまな検討を重ねていった結果、NCAR LSM は森林からの潜熱フラックス(蒸発散量)を過大に評価しており、その原因はどうか地面からの蒸発が大きいことにあるように思われた。本モデルは単層のモデルで植生層の下に地面があるが、高山 TKY サイトでは落葉広葉樹林の下に、ササに覆われた地面がある。そこで地表面アルベドを土から植物の値に変え、さらにササがあることによって地表面付近の気流を妨げ蒸発に抵抗を及ぼす効果を仮定して、潜熱フラックスの計算に直列に蒸発抵抗を挿入した。潜熱フラックスの観測値にあうようにパラメータフィッティングして得られた抵抗値を導入した結果が図3である。図3によると「ササ抵抗」の効果は LAI が最大値をとる時期にはほとんどなくなるが、それ以外では蒸発を抑制し、観測値に近付けていることがわかる。ただ、この効果は単層である NCAR LSM で表現

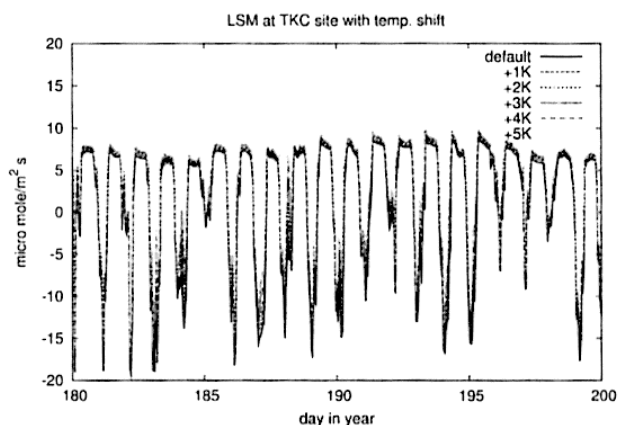


図4 高山常緑針葉樹林サイト TKC の気象値を使った NCAR LSM 気温変化実験の結果。  
default が観測値で、そこから気温を 1K ずつ変化させた。

できない種々の効果を地表面直上の抵抗で代用したとも解釈でき、地温をやや上げすぎる副作用とともに、今後さらなる検討が必要である。

同種の検討は、もう一つのスーパーサイトである TKC でも行われており、これらの結果より NCAR LSM を本対象流域の代表的な 2 植生での観測に適合させた高山版 LSM が近い内に完成する予定である。

#### 4. 狭領域で展開する際に注目すべきもの

2つのスーパーサイトTKYとTKCでの観測に基づき、狭領域での適用と高山の自然特性に合わせて改良を加えた陸面モデルを、気象モデルと結合して大八賀川流域での CO<sub>2</sub> 吸収量などの生態系機能を評価するのが、ここで報告する活動の当面の目標であるが、結合に話を移す前に、高解像度で狭領域を対象に陸面モデルを使って評価を行う意義について少し述べておきたい。

日本の山岳地帯を念頭に幅数 km と言った小さな谷を再現するような高解像度で生態系機能の評価を行うことは、低解像度での評価では存在しない地形があり土地利用分布があるので、個々のポイントにおいて、その評価値に意味があるのは当然である。しかし、例えば低解像度での計算値と、高解像度での評価値との間に簡単な関係がある場合、わざわざ大きな労力を払って高解像度での陸面モデルを活用した評価を行う意義が薄れてしまう。そこで、どのような効果を重要視すべきか、ということに関する示唆を得るために、簡単な実験を行った。

実験は同じ NCAR LSM を用いて行った。TKC で

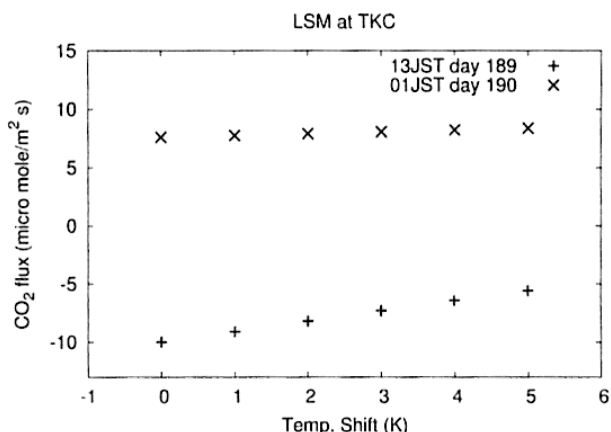


図5 気温変化実験における日本時間 189 日 13 時 (13JST day 189)と 190 日の 01 時(01JST day 190)での CO<sub>2</sub>フラックスの比較

の気象観測値を用いて、デフォルトの針葉樹林のパラメータを使用した NCAR LSM を走らせ、谷などの表現により変化する気象値を模して、気温を観測値から人為的に変化させて、計算結果の反応を調べた。気温は森林モデルの多くのパラメータに使用されていることから複雑な影響が見られることを期待して選んだ。大八賀川流域の標高差およそ 1000m に対応する気温変化幅は、日本の平均的な気温の高度変化から 5.5K 程度と考えられるので、実験は観測値から 1K おきに +5K まで機械的に変化させて行った。夏にあたる年通算日で 180 日から 200 日の結果を図4に挙げる。非常に似通った日変化を示しており、劇的な変化は見られない。ここで気温変化に対する依存性をみるため、日本時間で 189 日の 13 時と 190 日の 01 時の CO<sub>2</sub> フラックスを取り出し、気温を変化させた量とともにプロットしたのが図5である。夜間でも日中でもこのデフォルト設定による計算の場合には、気温を上げると呼吸が増え CO<sub>2</sub> フラックスは正の方向へ変化していくと計算されている。しかし、ここで注目してほしいのは、その変化である。気温を観測値から +1K, +2K と変化させるに従ってほとんど完全に線形に変化している。光合成などの計算式内では指数関数など非線形な式で気温は用いられているが、この程度の変化では所詮 Taylor 展開の1次の項までしか効いてこないことを示している。

このような場合、線形性により空間での代表値は領域内に気温差があっても、植生ごとに面積の重み付き平均などの適切な平均を使い計算することによって代表値が計算できることになり、大きな視点から見た場合、高解像度化する意義はそれほど大きくないことになる。

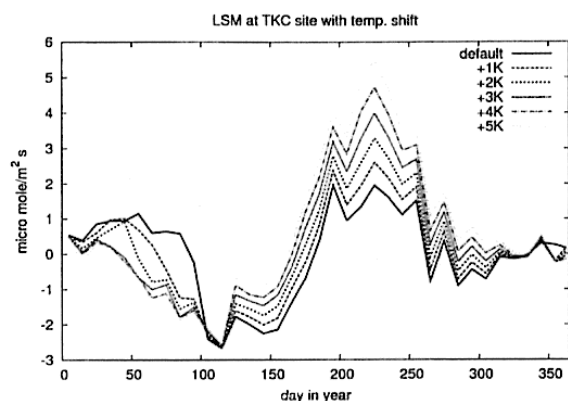


図6 気温変化実験の旬平均値

次に旬平均値で年変化をみたのが、図6である。季節により1Kあたりの変化量は違っているが、基本的に等間隔に折れ線が並び、120日から330日程度の期間で線形性が維持されていることがわかる。しかし20日から100日程度の期間では、それぞれの折れ線の振る舞いが大きく異なり、ここでは非線形な振舞がみられる。実はこの時期、TKCでは積雪のある時期であり、与える気温によって、降水が雪なのか雨なのかのモデル上での判別、および積雪モデルにより計算される積雪量が大きく異なることがわかった。つまりこの非線形な振舞は積雪の効果であった。

以上見てきたように、高解像度で狭領域を計算する際に場所ごとに変わってくるであろう気温変化を模した実験では、その効果は基本的には線形であること、しかし積雪の効果を考慮すれば非線形に影響が表れ、狭領域高解像度評価が広領域にも影響を与えうることが示された。LSMではLAIは計算するものではなく与えるものであるが、本実験のような常緑樹ではなく落葉樹の場合、展葉や落葉などの季節変化も同様な影響を及ぼすものと考えられ、それらの結果、植生タイプの分布そのものも同様に非線形な効果を及ぼすと考えられる。このように、我々の研究では、植生タイプ分類やフェノロジー変化などの衛星リモートセンシング情報の持つ意義は大きいと言わざるを得ない。リモートセンシングで得られたさまざまな分布情報をLSMに取り込んで活用することが大切であり、LAI分布など一部は取り込んで計算することができるよう既に改造がなされている。今後、その効果を確かめつつ多くのリモートセンシング情報を面情報として取り入れていくことが期待される。更に言えば、現在取り組んでいる過去を対象にした診断的評価ではなく、将来取

り組むであろう未来を対象にした予測計算の場合、これらの分布のモデル化が重要な問題となると想像される。

## 5. 気象モデル MM5 と陸面モデルとの結合による流域での評価

ここまで検討してきた陸面モデル NCAR LSM 高山版を、メソスケールの気象モデル MM5(Duhia 1993)と結合し、流域でのCO<sub>2</sub>吸収量や蒸発散量などさまざまな生態系機能の分布を計算する。結合には、気象モデルで得られた気象データを陸面モデルに渡すだけの単方向結合と、陸面モデルが気象データを受け取り、計算した熱や水蒸気などの交換量を気象モデルにフィードバックする双方向結合の2種類がある。この種の計算にかかる計算コストの大部分は気象モデルの計算のためのものなので、単方向結合の場合、気象データを一度計算しておけば、それを利用して何度でも陸面の計算をやり直せる利点がある。現在、詳細なデータ補間法と合わせて非常に高解像度での単方向結合計算を試みているが、まだ公表できる段階にはないので、ここでは双方向結合で行われた試算の結果を、その過程とともに報告する。

MM5は広く使われているメソスケールの気象モデルであり、その安定性と多くのユーザがいて様々な研究が行われていることによる情報の多さ、および使いやすさが特徴である。岐阜大学では、気象庁による予報業務の認可を受け、このMM5を利用して岐阜県および愛知県を

### 第1領域

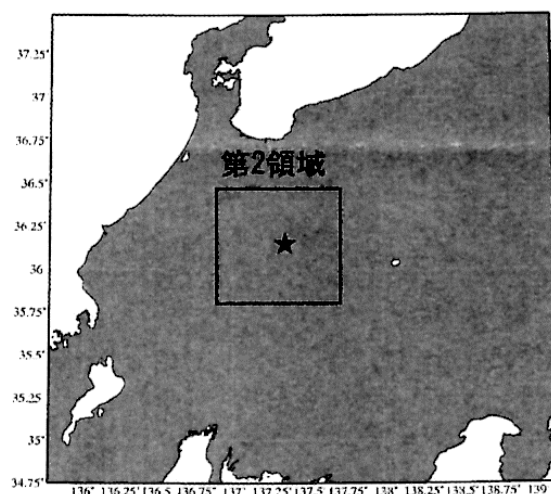


図7 MM5 および LSM の計算対象領域。★はTKYの位置を表す。



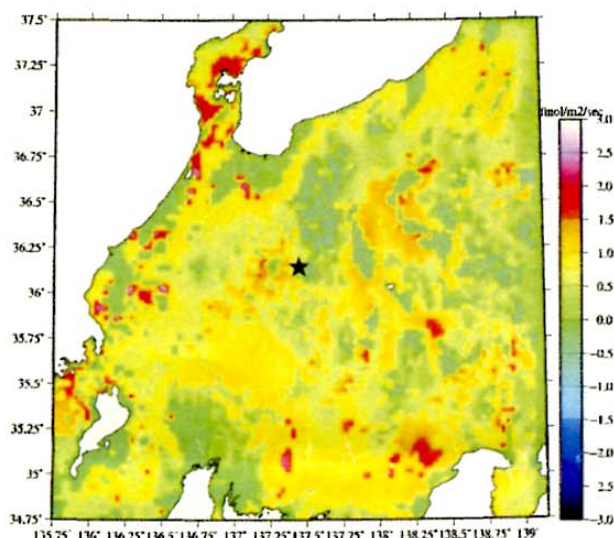


図8 第1領域で計算された年間の炭素吸収量の試算値の例。★はTKYの位置を示す。

対象に局地予報を発表している (<http://net.cive.gifu-u.ac.jp>)。その予報計算と基本的に同様の方法を取り、気象庁作成のメソ客観解析データ(20kmあるいは10km格子:時期により異なる)を初期値および境界条件に与えて、図7に示す領域を対象に3km×3kmの格子を水平方向に100×100、鉛直方向には100hPaまで23層として、気象現象の方程式を数値的に解き(第1領域)、さらにその計算結果を境界条件に使用して、1km×1kmの格子で高山付近を細かく計算している(第2領域)。その計算結果を、それぞれに合わせた解像度の地表面情報を与えたNCAR LSMに入力し、その計算結果を逆にMM5に返して計算をすすめていく。

ここでは2003年の1年間を対象に3km格子の計算を行い、その中で8月7日から1週間、1km格子の計算を試みた結果を紹介する。これらの領域に、土地利用分布や標高などのデータを投入して計算を行う。その際、NCAR LSMの土地利用分類では、サバンナやツンドラ、砂漠、熱帯林などこの地域に存在しないものがあるので、これらの代わりに、常緑針葉樹と落葉広葉樹の割合を変えた森林をいくつも設定するなど細かく分類し直して使用した。このような処理の上計算した結果の例を図8に示す。まだ試算であるので値については改良の余地が多くあるが、山岳地形の影響などが中部日本領域で計算されていることがわかる。

また、第2領域については我々のグループで衛星リモートセンシングを用いて独自に分類した詳細な土地利用

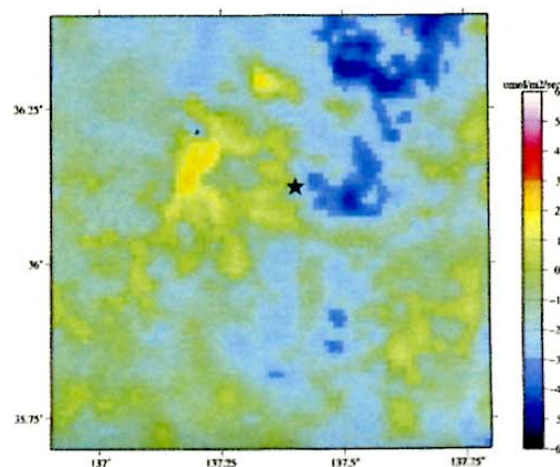


図9 第2領域での2003年8月7日から14日の平均炭素吸収量の試算値の例。★はTKYの位置を示す。

分布(ただし2006年のもの)を用いて計算を行った。図9に計算された期間の平均炭素吸収量を示す。尾根や谷などの地形、細かな植生分布、更には雲量の違いなどを反映した計算結果が得られる。ただ、ここで紹介した2つの計算には、まだ3章で述べた現地観測値を用いた陸面モデルの改良結果はあまり取り込まれていないので、これは全くの試算であり、計算結果は今後大きく変更されることに注意が必要である。ここでは、このような計算を行える枠組みが既に完成していることを伝えるために例として示した。

このような枠組みに、3章で述べたような現地データを用いた検討に基づく改良を施されたNCAR LSM高山版を組み合わせ、衛星リモートセンシングの結果を十分取り込んで、大八賀川流域を含む領域での、炭素吸収のみならず、光合成量、呼吸量などの各要素や、蒸発散量などさまざまな地表面生態系が流域で果たしている機能を、詳細に評価していく予定である。

## 6. 結び

岐阜大学21世紀COEプログラム「衛星生態学創生拠点」で行われている気象と陸面の数値モデルを用いて、現地での生態プロセスおよび気象の観測結果と衛星リモートセンシングの両方を活用して流域での炭素吸収量などの生態系機能評価を行う研究の概要を述べた。

ここでは、以下のような研究が進行中である。

- 対象流域の代表的な植生状態にある2つの重点的な観測が行われている観測サイトのデータを中心に陸面モデルに改良を加え、対象地域や解像度にあった高山版陸面モデルを作成する。
- 土地利用分布や森林のフェノロジーなど単純に平均できないものを重要視しつつ、衛星リモートセンシングによって地表面状態を示すパラメータ分布を取得する。
- 気象モデルと陸面モデルを結合し、衛星リモートセンシングから得られたパラメータを取り入れて、対象地域での生態系機能を計算する。

現在、更なる陸面モデルの改良、改良結果を結合モデルに反映させる作業、森林 LAI の分布の時間変化を直接陸面モデルに取り込むなど衛星リモートセンシングデータの十分な活用を図る作業が進められ、狭領域高解像度ならではの生態系機能の評価が 2008 年度中になされる予定である。その先には、都市モデルの導入や、蒸発散だけでなく河川などの水文過程の導入などを行い、流域あるいは地域の総合的な環境評価へと研究を展開することを希望している。

#### 謝辞

本研究で使用した高山落葉広葉樹林サイト TKY での CO<sub>2</sub> 吸収量のデータは、産業技術総合研究所の三枝信子博士によるものである。ここに記して感謝を表す。

#### 引用文献

- 秋山侃・児島利治・石原光則, 2008, 21世紀COE研究「衛星生態学創生拠点」のめざすところ、システム農学、Vol.24, No.2, pp.137-142.
- 加野利正, 2007, 大気-陸面-植生結合モデルの開発と岐阜県地域における森林生態系炭素固定能の評価, 岐阜大学工学研究科修士論文.
- Bonan, G., 1996, Land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide., Technical note, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States), pp.159.
- Bonan, G., 1998, The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate*, 11, pp.1307-1326.
- Dickinson, R.E., Oleson, K.W., Bonan, G., Thornton, P., Versteinst, M., Hoffman, F., Yang, Z., and Zeng, Z., 2006, The Community Land Model and Its Climate Statistics as a Component of the Community Climate System Model, *J. Climate*, 19, pp.2302-2324.
- Duhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the Pennstate-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp.1493-1513.

Contributed paper

## Numerical model for connecting ecological process study and satellite remote sensing

Ichiro TAMAGAWA<sup>\*</sup>, Jun YOSHINO<sup>\*\*</sup>, Toshio KANO<sup>\*\*</sup>, Takashi YASUDA<sup>\*\*</sup>,  
Hiroyuki MURAOKA<sup>\*</sup>, Toshiharu KOJIMA<sup>\*</sup>, Mitsunori ISHIHARA<sup>\*</sup>, Shin NAGAI<sup>\*</sup>,  
Taku M. SAITOH<sup>\*</sup>, Mison Lee<sup>\*</sup>, Masayasu MAKI<sup>\*\*\*\*</sup>,  
Tsuyoshi AKIYAMA<sup>\*</sup> and Hiroshi KOIZUMI<sup>\*\*\*\*\*</sup>

River Basin Research Center, Gifu University<sup>\*</sup>  
Graduate school of engineering, Gifu University<sup>\*\*</sup>

(Received 27 December 2007; in final form 21 January 2008)

### Summary

The 21st century COE program at the River basin research center, Gifu University, "Satellite ecology for basin ecosystem studies" was started from 2004. The main target of the program is to evaluate the distribution of the basin ecosystem functions, such as the amount of carbon absorption, in Daihachiga river basin in Gifu, Japan. Two intensive observation sites are located on the representative two surface types: deciduous broadleaf forest and evergreen coniferous forest. The ecological process study data obtained by field observations mainly in two intensive observation sites are used to improve land surface numerical model. The distributions of the parameters, such as surface type in the basin, are from satellite remote sensing. The land surface model with the distributed parameters is connected with the meso-scale numerical weather model and calculates the ecosystem functions, such as the distribution of the amount of carbon absorption in the basin. The researchers in ecosystem, satellite remote sensing and numerical simulation collaborate with each other to accomplish the work above and also they deepen mutual understandings. The evaluation of ecosystem function is now reaching to final stage.

**Key Words:** Carbon absorption, Ecological process, Forest, Numerical model, Remote sensing, River basin

---

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup> 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan  
(Correspondence: tama@green.gifu-u.ac.jp)

<sup>\*\*\*</sup> present affiliation, Graduate school of engineering, Kyoto University

<sup>\*\*\*\*</sup> present affiliation, Faculty of education and integrated arts and science, Waseda University