

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360406

研究課題名(和文) リモートセンシングによる陸域植生の炭素・水・熱収支の推定

研究課題名(英文) Estimation of carbon, water, and heat fluxes in the terrestrial vegetation by remote sensing

研究代表者：

山口 靖 (YAMAGUCHI YASUSHI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：80283472

研究成果の概要(和文)：

陸域生物圏モデル BEAMS を基にして、陸域生態系における地域スケール(数10km～1,000km程度)での炭素・水・熱収支の推定方法を開発し、1kmという高い空間分解能でそれらを求めることができた。また寒帯域での永久凍土層や積雪層の融解などのプロセス、温帯・熱帯域での水田における諸プロセスも組み込んだ。さらに地形効果を考慮した蒸発散量推定モデルを開発した。フラックス観測サイトでの実測データとの比較により、これらのモデルは十分な推定精度を持つことが確認できた。

研究成果の概要(英文)：

A new method to estimate carbon, water and heat fluxes in the terrestrial ecosystem was developed for a regional scale (several tens to one thousand kilometers) by modifying the terrestrial biosphere model BEAM, and allowed us to estimate the fluxes with 1 km spatial resolution. The permafrost and snow melting processes in the Frigid Zone and various processes in rice fields in the Tropical and Temperate Zones were incorporated the model as well. We also developed a new model to estimate evapotranspiration incorporating the topographic effect. We confirmed that these models fluxes have enough accuracy based upon the comparison with the ground measurement data at the flux observation sites.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	9,600,000	2,880,000	12,480,000

研究分野：リモートセンシング

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：リモートセンシング、炭素循環、地球観測、気候変動、生物圏現象

1. 研究開始当初の背景

近年の地球温暖化は、特に産業革命以降の化石燃料の燃焼や土地利用変化など、人間活動に起因する人為的な二酸化炭素の排出が原因であるとされている。陸域植生は今後も二酸化炭素の主要な吸収源となることが一般には期待されているが、さらに温暖化が進行した場合、森林土壌中の有機物分解による

二酸化炭素放出が急激に増加し、陸域生態系全体としては二酸化炭素の放出源となるという予測も出されている。このため、陸域生態系における炭素循環の実態解明と将来予測は、地球温暖化の研究において最も重要な課題の一つである。また陸域植生は、水収支や熱収支においても重要な役割を果たしている。特に蒸発散とそれに伴う潜熱輸送は、

気候変動や水資源管理などにおいて重要である。このように陸域植生は地球環境変動の解明において重要な研究対象であり、炭素収支・水収支・熱収支などが温暖化に伴ってどう変化しつつあるのか、明らかにする必要がある。

こうした陸域植生での炭素収支・水収支・熱収支については、フラックスタワーと呼ばれる定点での精密な観測が継続的に行われて来ている。これらの実測データは、植物生理学・森林生態学・微気象学などからの解釈と結びつけやすく、非常に価値の高いものである。しかし、フラックスタワーの設置や維持には多額の経費が必要なため、残念ながら運用中のタワーの数は多くない。このため、それぞれのサイトで取得したデータが、空間的にどの程度の広がり我代表しているかは、明らかでない場合も多い。

地球規模あるいは地域規模での植生の量や分布の変化、植生域での炭素収支・水収支・熱収支を明らかにするためには、衛星リモートセンシングによる観測が不可欠である。衛星リモートセンシングは、地球を周回する人工衛星により、広範囲を繰り返し観測することが出来る。衛星リモートセンシングによる観測データから導き出される炭素収支などの精度には、依然として改善の余地はある。しかし、フラックスタワーによる高精度の定点での観測と、衛星リモートセンシングによる広範囲の観測は、お互いに相補的なものであり、両者を組み合わせることにより、精度の高い面的なデータを得られる。

2. 研究の目的

全球スケールでの陸域生態系の炭素・水・熱収支と、ポイントスケールでのフラックスサイトでの実測値との間には、大きなスケールギャップが存在する。このギャップを埋めるため、本研究では衛星リモートセンシングと陸域生態系モデルの組み合わせにより、主に地域スケール（数10km～1,000km程度）での面的な炭素・水・熱収支を精度良く求めるための方法を確立することを目的とする。

さらに開発したモデルを用いて、気候・植生条件の異なるいくつかのテスト地域においてこれらの収支を求め、フラックスタワーでの現場観測データと比較し、その時間変動や地域間の差異について、気候変動による影響も考慮しつつ解析することも目的とする。

3. 研究の方法

われわれの研究グループでは、全球スケールでの陸域生態系の炭素・水・熱収支を推定するため、衛星リモートセンシングデータを入力とする陸域生態系モデル BEAMS を開発している (Sasai et al., 2005, 2007)。このモデルは、陸域生態系における総一次生産量

(植生による光合成量)、純一次生産量 (総一次生産量から呼吸量を差し引いたもの)、純生態系生産量 (純一次生産量から土壤中の有機物分解による二酸化炭素放出量を差し引いたもの) などを全球スケールで算出することができる。本研究では、BEAMS を基にして、高い空間分解能が要求される地域スケールでの炭素収支解析が可能なモデルに改良を行った。いくつかの特徴的な陸域生態系に対しては、BEAMS による炭素・水・熱収支の推定精度を向上させるため、それらの陸域生態系に特有のプロセスを組み込む改良を行った。

また陸面における水収支・熱収支の中でも、植生域では特に蒸発散活動に伴うものが重要である。温帯では降水量の20～50%程度の量であるとみられているが、季節変動や地域差が大きい。蒸発散に伴う潜熱輸送は、熱収支において非常に重要である。植生域での水収支・熱収支を見積もるサブモデルは、BEAMS の一部にも組み込まれているが、それを蒸発散見積もり用のモジュールとして取り出し、さらに地形効果や植生構造を考慮した蒸発散推定モデルとして開発した。

さらに改良されたモデルを用いて、気候条件の異なる熱帯、温帯、寒帯のテスト地域で炭素収支・水収支・熱収支を求め、モデルの妥当性の検証とともに、これらの収支の時間変動や地域間の差異について解析した。

4. 研究成果

(1) 地域スケールでの炭素・水・熱収支推定
陸域生態系モデル BEAMS による炭素収支解析の精度評価と精度向上のため、まずフラックスタワーで観測された複数点での地上観測データを収集し、ポイントスケールでの比較を行った。また、より広域スケールでのモデルシミュレーションを行うため、NCEP/NCAR 再解析データや MODIS などの衛星観測データ、土壌データなどを整備した。これらのデータを用いて BEAMS による炭素収支・水収支・熱収支を求め、その結果を検討しながら、高空間分解能の地域スケールでの解析が可能なモデルへと改良を行った。

図1と図2は、改良した BEAMS により極東アジア地域における炭素収支量を1kmという高い空間分解能で求めた結果である。ここでは図をかなり縮小しているため、細かい空間パターンを見ることは難しいが、日本のように土地被覆や地形が複雑に入り組んだ地域においても、それを反映した炭素収支の空間パターンが得られている。また、得られた純生態系生産量は、これまで既存研究で得られた植生のみ炭素収支量 (総一次生産量や純一次生産量) とは大きく異なり、吸収量が多い常緑広葉樹林 (四国・九州の一部) や低温のために放出量が大きく制限されている地

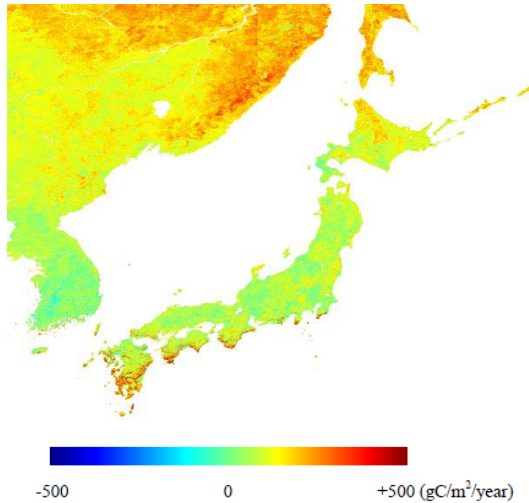


図1 日本周辺の純生態系生産量

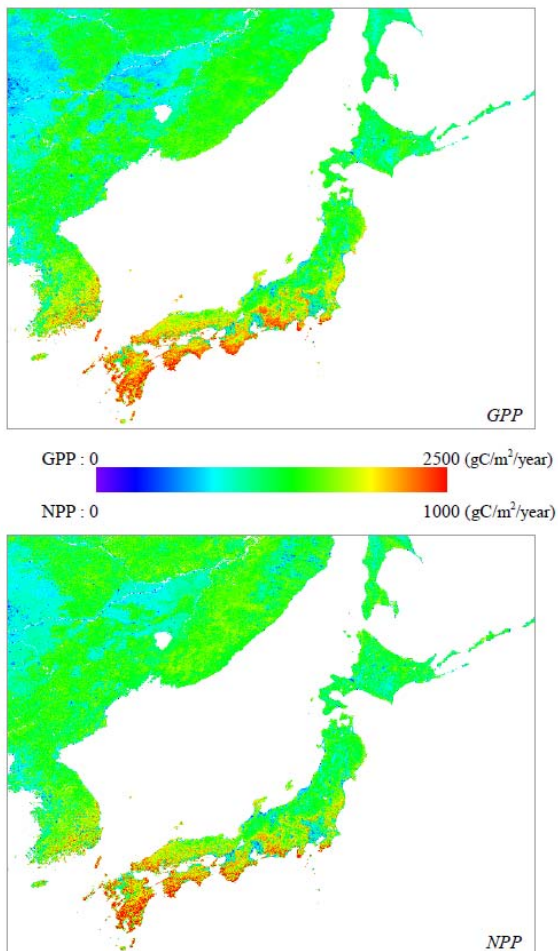


図2 日本周辺の総一次生産量（上）
と純一次生産量（下）

域（北海道の一部）で強い吸収傾向を示すことがわかった。植生とその直下の土壌微生物の活動は共存関係にあるため、陸域生態系を取り巻く環境が多少変化しても、単位面積あたりの炭素収支量は大きく変化せず、生態系が安定的に二酸化炭素を吸収すると考えられる。日本のような複雑な地形・地表被覆を持つ地域では、土壌も含めた自然生態系の炭素収支量を 1km 程度の高い空間分解能で推定する必要があることがわかった (Sasai et al., 2010)。

いくつかの特徴的な陸域生態系に対しては、BEAMS による炭素・水・熱収支の推定精度を向上させるための改良を行った。寒帯域では永久凍土層や積雪層の融解などのプロセスが炭素・水・熱収支に対して大きな影響を与えるため、これらを考慮できるように BEAMS を改良した。一方、アジアの温帯から熱帯域では水田が陸地のかなりの面積を占めており、炭素・水・熱収支の見積もりでは水田における様々なプロセスの影響を無視できないため、これらを BEAMS に組み込んだ (佐々井ほか, 2010)。いずれの改良結果についても、地上でのフラックスタワーでの現地観測結果との比較を行い、改良によって、炭素・水・熱収支の推定精度が向上したことを確認した。

さらに炭素循環における人間活動の影響評価のため、シンプル地球システムモデル (Murakami et al., 2010) に土地利用プロセスを統合し、土地利用による炭素排出量が大気中の二酸化炭素量や気温に与える影響を評価できるように改良した。その結果、1750 年から 2000 年までの BEAMS による炭素・熱収支の推定結果は、シンプル地球システムモデルによる推定結果と良く一致することが示された。

(2) 蒸発散推定モデルの開発

リモートセンシングでは空間分解能に限りがあるため、一つの画素の中に複数の地表被覆が含まれる場合が多い。植生域の場合は、センサから見た場合、植生自身と、植生に覆われていない地面（土壌）の 2 つが 1 つの画素内で混在している場合が代表的であり、こうした場合は Two Source Energy Balance (TSEB) モデルと呼ばれる方法でモデル化されてきた。TSEB モデルは、農地のように植生密度が低く、地形的にも平坦な場所で適用することを念頭に開発されてきた。本研究では、TSEB モデルを基にして、日本の森林のように地形起伏がある山地や丘陵において、地形効果を考慮した蒸発散散量を解析できるモデルを開発した。

従来の陸域植生の時間変動の研究は、NOAA/AVHRR や Terra-Aqua/MODIS に代表されるように、時間分解能は高い（観測繰り返し

周期は短い)が空間分解能は低い衛星センサを用いた解析が主体であった。一方、ASTERやLandsat ETMのような高い空間分解能のセンサは、観測繰り返し周期が長い為、純一次生産量や蒸発散量の解析には、あまり利用されてこなかった。しかし、本研究ではフラックスタワーによる高精度な実測値と、衛星リモートセンシングによる全球スケールでの観測・解析の間のスケールギャップを埋めることを目指しているため、ASTERタイプの高分解能センサも用いて、陸域植生での炭素収支・水収支・熱収支を求めるモデルとした。

具体的には、BEAMSの中の蒸発散水収支・熱収支を見積もるサブモデルを基にして、TSEBモデルとして改良し、さらに水・熱収支の計算に地形傾斜、標高、太陽方位などの効果を含めて計算できる新しい蒸発散量推定モデルを開発した(Kafle and Yamaguchi, 2009)。このモデルによる名古屋近郊の水・熱収支の推定結果を瀬戸フラックス観測サイトでの実測結果と比較したところ、十分に実用に耐える精度で一致することが確認できた。またモデルによる水・熱収支の空間分布パターンも、現実的なものであった。

(3) テスト地域での炭素・水・熱収支解析

1980年代以降の植生量や分布の変化について、気温・降水量・日射量等の気候パラメータとの関係を解析した。気候に対する植生の反応時間を考慮し、時間差を考慮した解析を行い、数ヶ月遅れでの対応を何ヶ所かで見出した。

前述のように寒帯域では永久凍土層や積雪層の融解などのプロセスが炭素・水・熱収支に対して大きな影響を与えるため、これらを考慮できるようにBEAMSを改良した。対象地域として東シベリアのヤクーツク付近を選び、BEAMSによる収支推定結果を地上でのフラックスタワーでの現地観測結果と比較した。この地域では、実際に融雪プロセスが炭素・水・熱収支に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。また、水田における様々なプロセスのBEAMSによるにおける様々なプロセスへの組み込みについては、茨城県つくば市のテストサイトを対象として検証を行った。水田では収穫による炭素の持ち出しが、炭素収支において大きな役割を果たしていることが確認できた(佐々井ほか, 2010)。

複雑地表面における広域蒸発散量の推定方法に関しては、その典型例として中国・黄土高原をテスト地域として選定し、蒸発散量推定において非常に重要な大気境界層過程と積雲生成に関しても解析を行った。またフラックス観測サイトで得られた蒸発散量の実測データを、衛星リモートセンシングデータから推定した蒸発散量、再解析データと大気水収支法により推定した蒸発散量と比

較・検討し、それぞれの推定精度について議論した。特に、空間スケール別の熱収支推定手法や蒸発散量推定手法について議論した(Nishikawa et al., 2009)。その結果、衛星リモートセンシングデータを用いた蒸発散量の推定には、まだ改善の余地があるものの、MODISなどの高頻度な衛星観測データの利用によって日蒸発散量の日々変動が議論できる可能性が示された。

さらに気候変動との関係に関しては、大気大循環モデルを用いて、インドと中国における18世紀以降の大規模な植生変化がアジアモンスーン気候に与える影響を解析した結果、インドモンスーンと中国南部でのモンスーン降水量が大きく減少する結果を得た(Takahashi et al., 2008)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件)

- ① Xu, J., Masuda, M., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Haginoya, S., Hayasaka, T., and Yasunari, T., Estimation and verification of daily surface short-wave flux over China Jour. Meteorol. Soc. Japan, 査読有、Vol. 89, 2011, pp. 225-238.
- ② Saigusa, N., Ichii, K., Murakami, H., Hirata, R., Asanuma, J., Den, H., Han, S. J., Ide, R., Li, S. G., Ohta, T., Sasai, T., Wang, S. Q., and Yu, G. R., Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on Gross Primary Productivity in East Asia, Biogeosciences, 査読有、Vol. 7, 2010, pp. 641-655.
- ③ Shakya, N. and Yamaguchi, Y., Vegetation, water and thermal stress index for study of drought in Nepal and central northeastern India, Inter. Jour. Remote Sensing, 査読有、Vol. 31, 2010, pp. 903-912.
- ④ Murakami, K., Sasai, T., and Yamaguchi, Y., A new one-dimensional simple energy balance and carbon cycle coupled model for global warming simulation, Theoretical and Applied Climatology, 査読有、Vol. 101, 2010, pp. 459-473.
- ⑤ Nishikawa, M., Hiyama, T., Tsuboki, K., and Fukushima, Y., Numerical simulations of local circulation and cumulus generation over the Loess Plateau, China, Jour. Applied Meteorology and Climatology, 査読有、

- Vol. 48, 2009, pp. 849-862.
- ⑥ Kafle, H. K. and Yamaguchi, Y., A new approach for estimating the spatial distribution of regional evapotranspiration over a heterogeneous area with ASTER data, Hydrological Processes, 査読有、Vol. 23, 2009, pp. 2295-2306.
- ⑦ Takahashi, H. and Yasunari, T., Decreasing trend in rainfall over Indochina during the late summer monsoon: impact of tropical cyclones, Jour. Meteorol. Soc. Japan, 査読有、Vol. 86, 2008, pp. 429-438.

[学会発表] (計 27 件)

- ① Sasai, T., Saigusa, N., Nasahara, K. N., Ito, A., Hashimoto, H., Nemani, R. R., Hirata, R., Ichii, K., Takagi, K., Saitoh, T. M., Ohta, T., Murakami, K., Oikawa, T., and Yamaguchi, Y., Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 30-second grid resolution. American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, 2010年12月16日、米国サンフランシスコ.
- ② 佐々井崇博, 脊戸山佑子, 山口 靖, MODIS プロダクトとBEAMSを用いた日本地域の陸域炭素収支解析、日本リモートセンシング学会第49回学術講演会、2010年11月10日、鹿児島.
- ③ 山口 靖, 宇宙からのリモートセンシング：環境変動を観る (基調講演)、第13回日本環境共生学会学術大会、2010年9月25日、名古屋.
- ④ 佐々井崇博, 個葉から地球までをつなぐ陸域炭素循環研究: その2 ~衛星観測とモデルを組み合わせた広域解析~ (招待講演)、第57回日本生態学会自由集会、2010年3月15日、東京.
- ⑤ 川合真一郎, 佐々井崇博, 山口 靖, 陸域生物圏モデルBEAMSへの植生動態の組み込みによる炭素循環の将来予測、日本気象学会2009年度秋季大会、2009年11月26日、福岡.
- ⑥ 飯島 雄, 樋口篤志, 檜山哲哉, 高橋厚裕, 西川将典, 中国黄土高原南部における補完関係と対流境界層モデルを用いた

広域蒸発量の推定、2009年度日本水文科学会学術大会、2009年10月3日、熊本.

- ⑦ Yasunari, T., Toward understanding the dynamics of continental to global scale eco-climate system, First SELIS Inter. Workshop Eco-Climate Dynamics in Eurasia/ Monsoon Asia, 2009年1月26日、名古屋.
- ⑧ Yamaguchi, Y. and Kafle, H. K., Estimation of evapotranspiration by ASTER, 6th Inter. Symp. Integrated Field Science, 2008年7月26日、仙台.
- ⑨ Kafle, H. K. and Yamaguchi, Y., Surface heat fluxes in heterogeneous area by remote Sensing, 26th Inter. Symp. Space Technology and Science, 2008年6月5日、浜松.

[図書] (計 2 件)

- ① 佐々井崇博 (分担執筆)、清水弘文堂書房、地球変動研究の最前線を訪ねる - 人間と大気・生物・水・土壌の環境 -、2010、439 pp.
- ② 檜山哲哉 (分担執筆)、学報社、黄河の水環境問題-黄河断流を読み解く-、2008、259 pp.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 靖 (YAMAGUCHI YASUSHI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：80283472

(2) 研究分担者

安成 哲三 (YASUNARI TETSUZO)
名古屋大学・地球水循環研究センター・教授
研究者番号：80115956

檜山 哲哉 (HIYAMA TETSUYA)
名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授
研究者番号：30283451

(2008-2009 年度)
佐々井崇博 (SASAI TAKAHIRO)
名古屋大学・大学院環境学研究科・助授
研究者番号：70443190
(2009-2010 年度)