

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007 ~ 2008
 課題番号：19710023
 研究課題名(和文)東アジアにおける陸域生態系炭素循環シミュレーションモデルのデータ同化手法の開発
 研究課題名(英文) Development of data assimilation method for terrestrial ecosystem carbon cycle model in eastern Asian region
 研究代表者
 加藤 知道 (KATO TOMOMICHI)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・研究員
 研究者番号：60392958

研究成果の概要：東アジアの炭素循環を陸域生態系モデルによってより現実に近く再現するため、パラメータ調整の際に観測データを取り込むデータ同化手法を利用し、実際に 1979-2003 年の陸域炭素循環を推定した。得られた炭素フラックスは、妥当な分布を示し、さらに、CO₂ 上昇による施肥効果を考慮した場合、しなかった場合よりも、誤差が小さく、データ同化によって、東アジア地域で、モデルの推定精度が向上する可能性が示唆された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	0	2,600,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	210,000	3,510,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：生態系 CO₂ 交換、総一次生産、生態系呼吸、地球環境変化

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化などの気候変化のメカニズムを理解するためには、主要な温室効果ガスである CO₂ をはじめとする炭素の循環とその影響要因を、定量的に把握する必要がある (IPCC, 2001)。一方で、その地球の炭素循環における、最大の不確定要素は、陸域生態系の挙動であるとされており (Friedlingstein et al., 2003)、それを解明するために、世界の各地域で、様々な研究が行われている (Ciais et al., 2005 など)。

本研究で対象とする東アジア地域は、内陸の乾燥・寒冷地帯の砂漠・草原・ツンドラから、海岸部の温暖・湿潤地帯の水田・温帯林・熱帯林までの多くの種類の生態系を抱え、それぞれの地域で、観測が行われてはいるが、

地域内には地理的辺境が多いため、観測の空白域が多く、陸域の炭素循環に関する統合的な研究が遅れている。

そこで、最近では、それら広域炭素循環解明のために植物や土壌の生理・生態学的プロセスを取り入れた陸域生態系シミュレーションモデルが開発されている。これらのモデルは、気候データさえあれば、観測空白域を含めた東アジアの定量的な陸域炭素収支を推定することができる。しかしながら、一方で、モデル内で使用されている多くのパラメータを、逐次的な当てはめと観測データとの検証によるいわゆる チューニング によって決定しており、作成者の先入観が混入している危険性が高い。また、シミュレーション開始時のバイオマス量については、産業革命以前の気候下で極相に達していることを想

定し決定しているが、そもそもこの仮定自体が間違いである可能性も高く、シミュレーションには多くの誤差が含まれ、結果として大きな不確実性を生じさせているという問題が指摘されている。

これらシミュレーションモデルにおける問題点を解決する方法として、データ同化という手法がある。これは、地球物理学分野で盛んに用いられており、数値モデルに観測データを挿入(同化)することで、より高精度な状態量の推定、データ補間、モデルの境界条件・パラメータの改善を行う手法である。近年、この手法が、陸域生態系 CO₂ フラックスデータについても、わずかではあるが用いられつつある。そこで、それらデータ同化手法を炭素循環モデルに適用し、作成者の恣意の混入や検証データの不足という弱点を克服することができれば、より信頼性の高いパラメータと初期値によるモデルシミュレーションを行うことができると考えられ、東アジア地域の陸域生態系炭素フラックスについてより現実的な振る舞いを把握することができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、東アジアにおける地上の CO₂ フラックスなどの観測データを利用し、陸域生態系炭素循環モデルに対するデータ同化手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

日本・韓国を中心とする AsiaFlux、中国による ChinaFLUX というネットワークが蓄積している東アジアの対象として、(1)代表的な生態系における既存のデータをまとめ、現在の炭素収支の分布の把握と、その制御要因について調べる。次に、(2)陸域生態系モデルにおける生理・生態パラメータの最適化のためのデータ同化手法の開発を行う。そして、得られたパラメータと再解析気候データを入力値とし、陸域生態系モデルを実行させ、東アジアのバイオマス分布を計算する。

4. 研究成果

(1) 既存データのレビュー

正味の炭素収支

基礎的な調査として、ツンドラから熱帯林まで、北緯 70 度-南緯 2 度、東経 83-161 度の間にある 50 ヶ所の渦相関法による CO₂ フラックス観測タワーを対象に、誌上発表された年間炭素収支と環境要因との関係を調べた。その結果、年間ベースの正味生態系 CO₂ 交換

(NEE)は多くの場所で、負であり、陸域生態系が炭素を吸収していることを示していた(図 1)。これについては、すでに始まっている 20 世紀中の大気 CO₂ 濃度や温度の上昇が、植物の光合成による炭素の吸収を活発にしていることや、引用した森林の年齢が若く、盛んな生長によって正味の吸収が起きていることが原因である可能性が考えられた。

各サイトの年間 NEE を、年平均気温と比較した(図 2)。その結果、いくつかの熱帯林サイトの正の値(はずれ値)を除いた場合に、年間 NEE は温度上昇に対して負の関係を示した。このことは、温度よりも湿度との関係が強い欧米のサイト(Law *et al.*, 2002)とは対照的である。これは、欧米が、中緯度に砂漠や地中海性気候帯などの乾燥地を含むのに対して、今回データを引用した東アジアのサイトでは、ほとんどが大陸沿岸部の比較的湿潤な場所であったため、乾燥地がほとんどなく、水分欠乏による生産力の低下の影響が小さいことを反映していると考えられた。

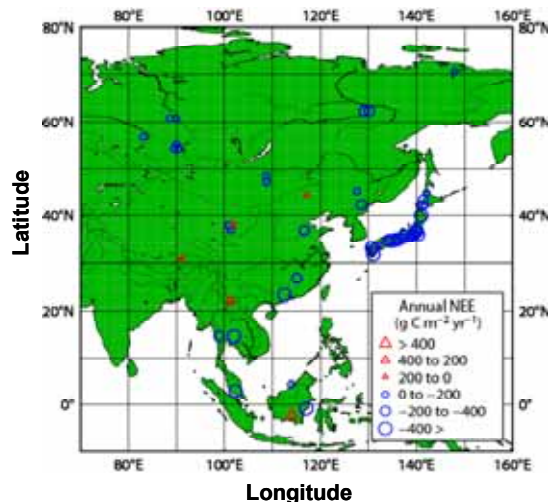


図 1. 東アジアの年間 NEE 分布

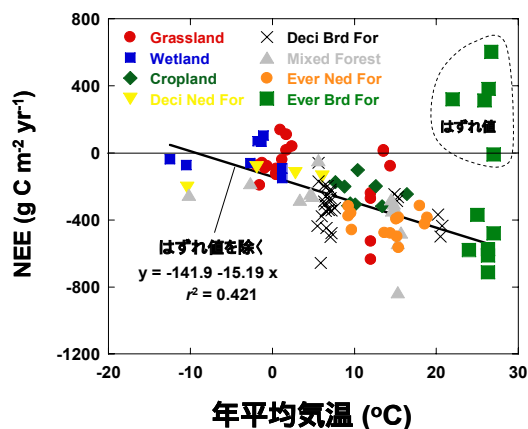


図 2. 年間 NEE の年平均気温に対する関係

しかしながら一方で、いくつかの熱帯のサイトでは、全地域にわたる負の傾向から離れた正の値が見られた。これら「はずれ値」は、近年、農地開拓のために排水が施されたインドネシア・カリマンタン島の熱帯泥炭林を含んでおり、人為的な土地改変が年間の炭素収支に大きな影響を与えていることを示唆した。また、そのほかのはずれ値は、複雑地形地で観測されたものが多く、複雑地形が、地域的な平均炭素収支を得る際に大きく影響を与えている可能性が示唆された。

生態系呼吸と総一次生産

年間の生態系呼吸(Re)については、年平均気温に対して指数関数的な増加が見られ、温度上昇による微生物活性や植物の呼吸活性、そして基質としてのバイオマス量の増加によって制御されていることが考えられた総一次生産(GPP)については、年平均気温と最大 LAI(Max LAI)に対して、正の強い相関が認められた。これは、光合成活性や生長期間を制御する温度と、光合成の基質としての葉面積の大きさが影響していると考えられる。

炭素収支観測における諸問題

本研究では、東アジアにおける渦相関法を利用した大気-陸域生態系間のCO₂フラックス観測データのレビューを行った。その結果、引用したサイトのうちのほとんどで、年間ベースにおいて、陸域生態系側の炭素吸収を示していることが明らかになった。

しかしながら一方で、大気CO₂濃度の地上観測データと、大気輸送モデルを利用したインバージョン解析によって計算されたアジアの平均年間炭素収支の値と比べると、渦相関法による年間NEEは、100-500 g C m⁻² yr⁻¹も非常に低かった(すなわち、吸収が大きかった)。仮に、大気観測+インバージョン解析の値が正しいとすると、それらの大きな差が生じていることは、渦相関による観測網が、湿潤で比較的生産力の豊かな沿岸部に偏って分布していること(つまり、内陸部の生産力の貧しい乾燥地帯・山岳地帯を含んでいないこと)、1-3年という観測期間は、森林生態系においては、その動態の時間スケールと比べると非常に短く、火災や台風による倒伏などの「攪乱」の影響を含んでいない、という2点が強く影響を与えていると考えられた。さらに、Janssens *et al.* (2003)で指摘されているように、DICやDOCなどの水に乗って系外に流出する炭素量や、草原・農耕地生態系においては、家畜や農耕による系外への炭素の持ち出しをほとんど考慮していないことが大きく影響している可能性もある。

これらのことから、今後、地上観測によって、より包括的で正確な地域の炭素収支を把握するためには、立地の偏り・観測期間の不

十分さを是正するようなフラックス観測体制の整備や、大気-陸域生態系間のCO₂交換以外の炭素フラックスについて見積もる必要があると思われる。

(2) データ同化手法の検討

データ同化手法の開発において、協力関係にある英国ブリストル大学の Prof. IC Prentice の研究室との議論を行った。その結果、本研究において、同研究室が開発しているアジョイント法を利用した炭素循環におけるデータ同化システム(CCDAS)を利用することを決定した。

CCDAS の概略

CCDAS(carbon cycle data assimilation system)は、陸域生物圏物質循環モデル BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Scheme)と大気輸送モデル TM2 を組み合わせ、陸域の炭素フラックスを forward と inverse の両方向に計算することのできる計算スキームである。BETHY では、全球の地表面を 2 度ごとのメッシュに格子化し、衛星観測によって得られた fPAR(植物による光合成有効放射吸収量)と、あらかじめ用意された気候データより、各陸面格子の CO₂ フラックスを計算する。その計算された値は、TM2 に送られ、地表の CO₂ 濃度の全球マップが計算される。次に、その地表の CO₂ 濃度における、推定値と観測値との差をあらゆるコスト関数 ($J(p)$; 式(1))が計算される。

$$J(\bar{p}) = \frac{1}{2} [\bar{p} - \bar{p}_0]^T C_{p_0}^{-1} [\bar{p} - \bar{p}_0] + \frac{1}{2} [\bar{y}(\bar{p}) - \bar{y}_0]^T C_{y_0}^{-1} [\bar{y}(\bar{p}) - \bar{y}_0]$$

・ ・ 式(1)

ここで、 p は最適化パラメータベクトル、 p_0 は事前パラメータ、 C_{p_0} は、事前パラメータに対する不確実性、 $\gamma(p)$ はパラメータ p に対する CO₂ 濃度の計算結果、 y_0 は CO₂ 濃度の観測値、 C_{y_0} は、観測値に対する不確実性、 T は行列の転置、 -1 は逆行列を意味する。CCDAS では、このコスト関数の値を最小化するように、繰り返し計算をおこない、観測された CO₂ 濃度について、最適なパラメータを求める(図 3)。次に、その最適化の流れを説明する。

パラメータ最適化の流れ

はじめに、初期パラメータに対して、に記された手順で、コスト関数を計算する。次に、計算されたコスト関数の 1 階導関数であるヤコビ行列について、そのアジョイント

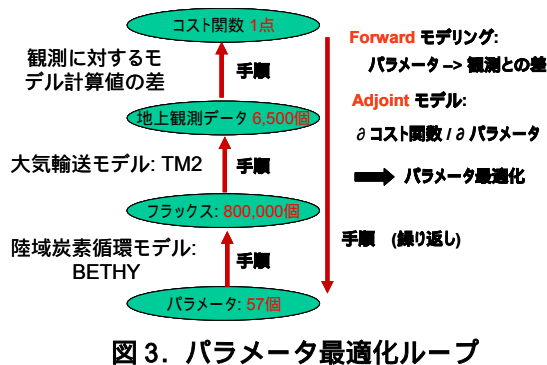


図3. パラメータ最適化ループ

(随伴行列)を利用し、BETHYの57個のパラメータそれぞれの微小変化に対して最も傾きのきつい方向を求める。次に、そのコスト関数を減少させる方向に微小に変化させた新しいパラメータを設定して、コスト関数を求める。そして、再度アジョイントを利用して、各パラメータの微小変化に対する最も傾きのきつい方向を求め、コスト関数を減少させる方向に微小に変化させた、さらに新しいパラメータを得る。この反復を行うことで、コスト関数を最小化させ、観測データに対して、モデルの計算値を近づけ、最終的に、最適化されたパラメータを得る。

また、パラメータに対する不確実性をコスト関数のパラメータに対する2階導関数であるヘッセ行列を利用して評価する。ヘッセ行列は、コスト関数のパラメータ微小変化に対する曲率を示し、その逆ヘッセ行列を計算することで、事後パラメータによる不確実性を近似して求める。

本課題における取り組み

初歩的な目標として、全球を対象とした2度メッシュの解像度による実行を目指し、コードの変更を行った。その結果、GLOBALVIEW-CO₂による、41箇所の二酸化炭素濃度の観測データに対して、CCDASを適用し、1979-2003年の陸域生態系モデルBETHYの最適化を行うことに成功した。その際に、同時にBETHYの植物生理部分に対して、変動したCO₂濃度と固定したCO₂濃度をそれぞれ挿入した状態でCCDASを動作させ、CO₂濃度上昇に対する、推定結果の違いを調べた。

得られたNPPは妥当な分布を示した(図4)。さらに、CO₂上昇による施肥効果を考慮した場合と、しなかった場合の観測データに対する平均平方誤差が、たとえば韓国TAPサイトなどで、2.45と2.41ppmvと(図5)、考慮した場合の方が、東アジア地域で、モデルの推定精度が向上する可能性が示唆された。

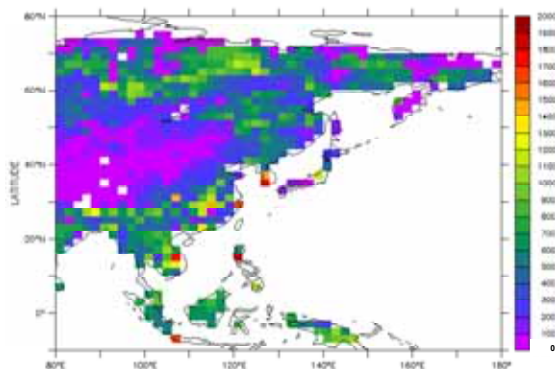


図4. CCDASによって最適化された年間NPP (gC yr⁻¹)

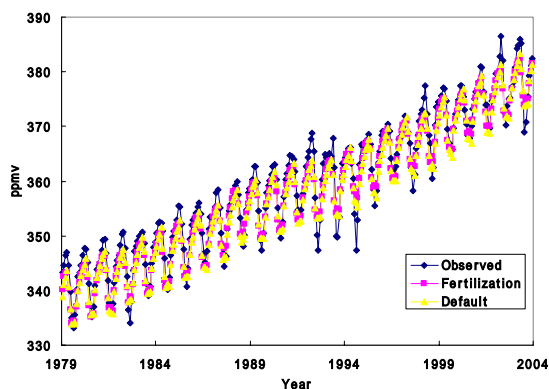


図5. CCDASによるCO₂濃度の最適化(韓国TAPサイト)

しかしながら一方で、本課題開始時の想定よりもコードが複雑であり、多くの時間をコードの理解と試行に費やしたため、東アジアに特化した同化手法の完成には至らなかった。そのため、本課題以降も継続して開発を行う必要がある。

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2件)

Kato, T., Tang, Y. Spatial variability and major controlling factors of CO₂ sink strength in Asian terrestrial ecosystems: evidence from eddy covariance data. *Global Change Biology*, 14, 10, 2333-2348, 2008, 査読有

加藤知道. 東アジアの年間炭素収支のレビュー. 「長期生態系モニタリングモニタリングの現状と課題 - 温暖化影響と生態系影響 - 」, CGER レポート. CGER-M019-2008, 47-50, 2008, 査読無

[学会発表](計5件)

Kato, T. Multi-temporal variability in global carbon dynamics during the 20th century simulated by a coupled climate-terrestrial carbon cycle model. Second OGED seminar, Tsukuba, Japan, 2007年12月12日.

Kato, T. Inter-site comparison, up-scaling, and integration efforts to quantify the distribution and strength of carbon sink/source, and their spatial and temporal variability and uncertainty, International Seminar of A3 Foresight Program "CarboEastAsia Meeting 2007", Beijing, China, 2007年11月30日.

加藤知道. 東アジアの年間炭素収支のレビュー. 国立環境研究所地球環境研究センター主催シンポジウム「長期生態系モニタリングモニタリングの現状と課題 - 温暖化影響と生態系影響」, つくば市, 2007年11月1日.

加藤知道. 東アジアの年間炭素収支のレビュー. 農業環境工学関連7学会2007年度合同大会, 府中市, 2007年9月12日.

Kato, T The temporal variability in global carbon dynamics during the 20th century simulated by a coupled climate-terrestrial carbon cycle model. Second International Conference on Earth System Model, Hamburg, Germany, 2007年8月30日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 知道 (KATO TOMOMICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
フロンティア研究センター・研究員
研究者番号: 60392958

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし