

論文の内容の要旨

生物・環境工学 専攻
平成 17 年度博士課程 進学
氏 名 羽島 知洋
指導教員名 大政 謙次

論文題目 陸上生態系物質循環モデルによる森林炭素収支の推定

気候変動に関する政府間パネルが新たに第 4 次報告書を公開し、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスによってもたらされた可能性がかなり高い、という内容を報告している。主要な温室効果ガスである CO₂ は、大気から海洋・陸上生態系によって取り込まれ、これらは大気 CO₂ の重要なシンクとなっている。陸上生態系においては、炭素収支を推定するために、大規模なフラックスタワー観測や生態学的調査が進められているが、生物が関わる要素が他と比べて多いこともあり、炭素循環プロセスと気候システム内で陸上生態系が果たす役割の理解は未だ不確実な部分が多い。陸上生態系における諸過程をモデル(プロセスモデル)化し、シミュレーションとして再現するという試みは、観測結果の補完や将来予測、さらには陸上生態系へのより一層の理解等への方法として有効であるものの、様々な課題が残されている。

陸上生態系における炭素収支をプロセスモデルとして表現する際には、対象と

する時間スケールによって、日変動～季節変動のエネルギー収支や水収支等を扱う短期的モデル、季節変動～年変動における物質循環を推定する中期的モデルなどに分類することができる。実験結果や観測結果をモデルに直接反映させるためにも、日内の物質の移動・エネルギー収支等が積算され、長期の炭素収支等に結びつける必要がある。

そこで本研究の目的は、森林における炭素フラックスの日変化を再現可能な地上部フラックスモデルを作成し、地上部フラックスモデルと物質循環モデルの結合を行い、地上部フラックスモデルによる短期的な炭素収支を積み重ねた上での炭素収支の推定を行うこととした。

地上部フラックスモデルでは、植物群落における総光合成速度(GPP)を算出することを目的とする。また、同時にエネルギー収支式を解くことにより顕熱・潜熱を算出する。そこで、群落光合成速度の算出には、Farquhar et. al, (1980)の光合成モデルと半経験的な気孔コンダクタンスモデル(Collatz et. al, 1991)を用いた。なお、個葉光合成速度から群落光合成速度へスケールアップするため、気孔コンダクタンスモデルを群落頂部からある高さまでの積算葉面積 L により積分した。この際、群落内の鉛直方向に対する相対湿度、葉表面 CO_2 濃度、気孔コンダクタンス、葉温等は全て一定であると仮定した。

Farquhar の光合成式を群落レベルへ拡張する際には、Depury and Farquhar (1997)の方法を用いた。これは、群落内の鉛直方向の位置関係による光環境の違いと、葉の光合成能力の違いとを表現し、解析的に積分することにより群落の光合成速度を算出する方法である。その際、単純な鉛直方向の積分にともなうエラーを極力減らすために、葉を日向葉と日陰葉とに分離している。

群落光合成速度・蒸散速度を上記の方法により算出するためには、葉温の値が必要となる。そこで、群落を地表面と森林群落面とに分離してエネルギー収支を計算し、葉温の推定を行った。この際、群落面におけるエネルギー収支式には群落光合成モデルと気孔コンダクタンスモデルによって求められた群落抵抗が組み込まれる。また、大気から葉面までの抵抗として中立を仮定した空気力学的抵抗を、葉面から気孔までの抵抗である葉面境界層抵抗が考慮されている。

このモデルの入力データは、エネルギー収支に用いられる純放射量 $[\text{W m}^{-2}]$ 、光合成の駆動力となるPPFD $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ 、潜熱フラックスと気孔コンダクタンスに影響する相対湿度[%]、大気 CO_2 濃度[ppm]、空気力学的抵抗と葉面境界層抵抗に影響する風速 $[\text{m s}^{-1}]$ となる。

モデルの検証には、フラックスタワーの観測結果を用いた。多くのフラックスタワーサイトでは、樹冠上における CO_2 交換速度(NEE)、潜熱・顕熱フラックス

を計測すると同時に、純放射量や PPFD、気温、湿度、風速等を計測している。これらの気象データをモデル入力値とし、フラックスデータとモデルが出力する各種フラックスと比較した。

地上部フラックスモデルでは、顕熱・潜熱を出力することはできるが、求まる CO₂ フラックスは大気から植物へ吸収される総光合成速度(GPP)のみであり、樹冠上部で計測される CO₂ 交換速度(NEE)と直接比較することはできない。そこで、ここでは Falge (2002)の方法を用いることにより、タワー観測によって得られた NEE データから GPP を算出した。

常緑/落葉性、広葉/針葉、気候帯等によるフラックスの違いを確認するため、以下の2つのサイトを選んだ。1つは温帯落葉樹林 (Temperate Deciduous Forest, 以下 TDF サイトとする)であり、2つ目は寒帯常緑針葉樹林(Boreal Coniferous Forest, 以下 BCF サイトとする) のデータである。

モデル計算には、入力データとして純放射量や風速のような気象データの他に、群落の積算葉面積(LAI)等が必要になる。BCF サイトでは LAI を 3.0[m² m⁻²]で一定とし、TDF サイトでは LAI は葉展開日を 1/1 から数えて 120 日目として 10 日間で最大 4.5[m² m⁻²]となるようにした。また、305 日目に全ての葉が落葉するとした。

モデルによって得られた GPP と、タワーフラックスデータから得られた GPP の結果を比較したところ、BCF サイトにおいて、春～夏先の GPP の過大推定はあるものの、夏の光合成が活発な期間における GPP はよく再現された。また TDF サイトでは、植物の水利用に制限がないという仮定で計算を行っているため、秋の少雨期間における光合成速度の低下は表現できないものの、成長期間における GPP はよく表現されていた。

森林生態系における大気-陸面間での炭素収支を推定するためには、地上部フラックスモデルによる GPP 推定だけでは不十分である。大気-陸面間での正味の炭素交換量 NEE を推定するためには、植物自身による呼吸 (Autotrophic Respiration, AR) と土壤有機物の分解による CO₂ 放出 (Heterotrophic Respiration, HR) が必要となる。これらは、陸上生態系に蓄積された植物バイオマスや土壤炭素量と関係するため、長期間における生態系内での炭素量の変動が必要となる。また、土壤水分による地上部フラックスモデルの気孔コンダクタンスの低下や、土壤内栄養塩と光合成速度・呼吸速度との関連付けを行う必要がある。そこで本研究では、陸上生態系物質循環モデルである CENTURY モデル (Parton, 1998) を物質循環モデルとして採用し、地上部フラックスモデルと結合することにした。

CENTURY モデルは、主に農地における炭素・窒素・水循環等を再現するために開発されたモデルであり、一定の評価をこれまで受けてきている。CENTURY

モデル内部には森林における物質循環サブモジュールが入ってはいないものの、他の計算タイムステップが1日であるのに対し、森林モジュールは1週間単位と、他のサブモジュールと比べて粗い構造をしている。

炭素の物質循環は、いくつかの炭素プールを設け、その炭素プール間を1日単位で炭素移動が生じるとして計算を行っている。植物の炭素プールは、葉プール、枝プール、幹プール、根プール、細根プールの5つであり、土壌炭素プールは、大きく分けて枯死物プール、地表面活性プール、土壌活性プール、土壌遅効プール、土壌抵抗プールとなる。

本研究で作成した地上部フラックスモデルと、物質循環モデルであるCENTURYモデルとは、葉炭素/窒素量、純光合成速度、蒸発散速度等で結合を行い、地上部フラックスモデルによって時間スケールで計算した炭素・窒素・水のフラックスを、CENTURYモデルの物質循環に受け渡している。

モデルの検証には、TDFサイトとBCFサイトに加え、温帯針広混交林(Temperate Mixed Forest, 以下TMFサイトとする)と熱帯常緑樹林(TROPICAL Evergreen Forest, 以下TREFサイトとする)のフラックスタワー観測データを用いた。

長期間の物質循環も推定するため、シミュレーションにはサイトにおける観測期間以前の気象データ等が必要となる。各サイトにおける観測期間での計算にはタワーサイトでの気象データを、それ以前の期間にはNCAR/NCEP再解析データ(Kanly et. al, 1998)による気象データを用いた。

地上部フラックスモデルとCENTURYモデルを結合した後の、NEEの推定結果であるが、TMFサイトでは、年平均のNEEが $77.5[\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}]$ に対し、モデル推定値は $50.5[\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}]$ と、良く推定できていることがわかる。また、TREFサイトにおいて、2002年のみではあるが、観測データの積算値は $267[\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}]$ であるのに対し、モデル推定値は $263.5[\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}]$ とかなり近い値を示した。

本研究では、日内での炭素フラックスが算出可能な地上部フラックスモデルを作成し、これを長期間の炭素動態を再現する物質循環モデルと結合した。これにより、時間～日での時間スケールのフラックス計算結果を物質循環モデルに反映させるとともに、長期間の炭素変動を短期間の炭素収支の結果に反映することができる、再現性の高いモデルを構築することができた。