

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12148

研究課題名（和文）気候変動に伴う森林生態系の炭素収支に関するデータ同化解析と数値モデル実験

研究課題名（英文）Data assimilation and numerical studies to evaluate uncertainty of terrestrial forest carbon balance under changing climate

研究代表者

戸田 求（Toda, Motomu）

広島大学・統合生命科学研究所（生）・講師

研究者番号：40374649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本課題の目的は、北半球に広がる森林生態系を対象に既存の炭素フラックスデータベースと大気-生態系モデルを用いて極端気象現象を想定した生態系炭素応答の影響評価を行うことであった。シミュレーションでは、対象とするバイオームにおいて異なる群落構造の複雑性を反映したシナリオを設定し、極端気象情報を含む環境条件下での森林の総生産量(GPP)を定量化した。その結果、森林群落構造が複雑になるほどGPPが高まり、群落内部における葉の光利用率が高まる効果によるものであることがわかった。一方で、将来の気候変動に対する生態系応答の更なる解明に向けてより高度なデータ同化手法を用いた更なる影響評価研究が必要とされる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の気候変動問題は地球規模の社会問題として位置付けられる。そのため、気候緩和機能を有する森林生態系の環境応答を定量的に評価する取組みが世界中で行われている。本課題で研究対象とした森林は非管理の自然状態にある生態系が主であるが現実には人的影響下に置かれた管理森林が多いため、攪乱影響評価においても様々な群落構造の違いを加味した研究が必要とされた。研究の結果、生態系の構造的特性を考慮した攪乱影響評価は重要な成果と位置付けられる一方で、より高度なデータ同化手法を用いた攪乱影響評価研究が社会問題としての気候変動問題解決には必要である。したがって、更なる研究の継続が重要と考える。

研究成果の概要（英文）：In the present research, we conducted simulated effects of the specific forest biomes in northern terrestrial ecosystems on gross primary productivity (GPP). In the simulations, we accounted for structural characteristics of each forest so that it was possible to evaluate the difference in GPP between natural (or unmanaged) and artificial (or managed) forests with different complex canopy structure as affected by climatic extremes. Our simulation results indicated that for a given biome-specific LAI and individual foliage shape, GPP increases with increasing canopy structural complexity that is associated with a broader vertical distribution of foliage, supporting the localisation of leaves in multiple layers. By contrast, further study with more sophisticated algorithm of the data assimilation than the one used in the present simulations is required to elucidate forest responses to climate change in the near future.

研究分野：生態系生態学

キーワード：大気-生態系モデル 気候変動 攪乱 森林構造

1. 研究開始当初の背景

自然に存在する生態系の中で陸域生態系は温室効果気体の主要吸収源であり、特に森林はその複雑な構造と機能特性から外的変動（攪乱）に対する耐性が高く安定した生産量が期待される（Hardiman et al. 2013 Forest Ecology Management）。しかし、近年は極端な気象現象の頻度や強度が増加しており（IPCC 特別報告書 2019; Steffen et al. 2018 PNAS）、森林生態系の状態安定性（生理的・構造的機能）や炭素固定機能への影響が懸念されている。（Sierra et al. 2009 Ecology; Reichstein et al. 2015 Nature）。「極端気象」という用語はある地域で生じた特異的現象を指す場合が多く、局所的な暴風雨雪、極度の高温、乾燥、寒冷など比較的短時間スケールでの稀な気象イベントと解釈されるが、近年ではこれらの影響が稀ではなく高頻度化することで森林の機能低下が認められるとの報告が多い（例えば、Ciais et al. 2005 Nature; Hufkens et al. 2012 Global Change Biology）。一方で、森林が持つ構造的特性は攪乱に対する頑強性を保持する上で重要な森林の特徴であるが、特に群落構造の複雑性が生態系機能に及ぼす影響については十分調べられていなかった。これまでに行われてきた攪乱研究の多くは森林生態系を一斉に倒壊させるほどの影響力を持つ自然災害級の攪乱を対象としたものであったためであるが、今後の極端気象が原因となって起こる攪乱は生態系が一斉倒壊する大規模型攪乱ではなく、むしろ中規模だが機能や構造に損害を与える攪乱事象が増加すると考えられている（Jentsch et al., 2008 Front in Ecology and the Environment; Toda et al., 2018 Trees）。そこで、本研究課題では、気象攪乱影響評価と合わせて群落構造の違いに着目した数値モデル研究も加えた研究として取りまとめることとした。

2. 研究の目的

上記の研究背景に基づき、主に中・高緯度の森林生態系を対象に極端気象を包含する気象データベースと炭素フラックスデータベースを用いて生態系応答評価の数値実験を行うことを目的とした。具体的には複数の森林を対象とし極端気象が総生産量(gross primary productivity, GPP)に及ぼす影響を評価するための数値実験研究と位置付けた。この研究を行う上では、データ同化アルゴリズムと使用する大気-生態系モデルとの結合、攪乱スキームの開発と検証、さらには群落特性を反映するパラメータの事前決定、群落構造の違いが GPP に及ぼす影響評価、などの事前研究が必要とされた。そこで筆者は3年間の実施計画の中でこれらの課題を段階的に遂行した。

3. 研究の方法

3-1 計算方法

本課題に先行して、はじめに簡易版炭素動態モデルとベイズ統計手法に基づくデータ同化アルゴリズムを結合した。ここでは冷温帯落葉広葉樹林を対象に情報量の少ない土壌炭素動態の変動要因機構を解明するためのパラメータ選定を行い、統計アルゴリズムを用いた計算が適切に行われることを確認した（Toda et al., 2020, Ecological Modelling）。その後、複雑な群落構造内の気象や炭素動態を記述できる群落多層構造モデルに切り替

えて数値実験を行うが、ここでの群落多層構造モデルには MINoSGI (Multi-layered Integrated Numerical Model of Surface physics-growing plants Interaction) を使用した (Watanabe et al., 2004 Global Change Biology; Toda et al., 2011 Ecological Research; Toda et al., 2023 Forest Ecology and Management)。課題の最終段階では MINoSGI と攪乱スキームを結合させ、攪乱影響実験を行った。

3-2 野外調査

群落多層モデルを使用するためには植物葉の特性値に関わる変数が多く含まれていた。特に、葉光合成や葉面積指数(leaf area index, LAI)の決定に大きな影響を及ぼす葉の傾斜角(leaf inclination angle, LIA)の実際の計測値が必要とされた。そこで、ドローンを用いて群落全体の代表的な LIA を計測する研究を実施した。

4. 研究成果

統計アルゴリズムを用いた計算の結果、生態系炭素モデル中のパラメータおよび統計誤差モデルのパラメータはサンプリング期間中で一定範囲内で変動を繰り返し、特定の領域でピークを持つ分布を示した (図 1) (Toda et al., 2020 Ecological Modelling)。この結果より用いた統計アルゴリズムは与えられた気象環境を反映して生態系モデル内のパラメータを適切に検出できる有効なツールであることがわかりその他の生態系モデルとのカップリングにおいても使用できることを確認した。

次に、個葉レベルでの葉傾斜角 (LIA) 計測結果を示す (図 2)。ここでは対象林内にあるギャップ空間を利用して小型ドローンを飛行させ優占種の LIA 鉛直分布データを取得・評価

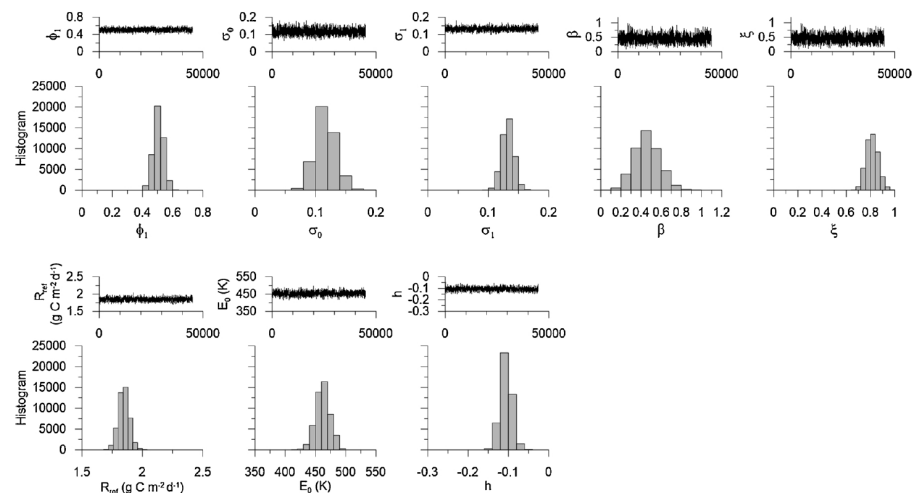


図1：生態系炭素動態モデルと使用した統計誤差モデルのパラメータ検出結果。統計誤差モデルパラメータ (ϕ_1 , σ_0 , σ_1 , β , ξ) と生態系土壌炭素パラメータ (R_{ref} , E_0 , c , h)の事後分布を示す (Toda et al., 2020 Ecological Modelling)

する手法を用

いた。研究結果から、観測対象地の代表的樹種であるイヌシデおよびブナの LIA を定量的に評価できた。LIA の鉛直分布の特徴を定量化できたことに加え、このデータを用いて数値計算モデルの入力値として必要になる LAI も定量化できた (Toda et al., 2022 Agricultural and Forest Meteorology)。

これらの事例と既往文献から大気—植生動態モデル(MINoSGI)を駆動するために必要な対象バイオームのパラメータをリスト化し、森林群落構造の総生産量(GPP)に及ぼす影響評価を目的としたシミュレーション実験を行った(図3)。ここでは当初の目的であった北半球の中・高緯度帯の代表的森林バイオームだけでなく、熱帯林まで含めた5つのバイオームを対象とする数値実験へ拡張させた。それぞれの計算では複数の構造複雑性を有するキャノピー構造を想定し3つの構造シナリオを設けた。本

シミュレーション結果から、複雑なキャノピーの階層構造を有する場合は単純な構造のキャノピーと比較して全てのバイオームでGPPが増加することがわかった(Toda et al., 2023 Forest Ecology and Management)。さらにこのメカニズムを調べるため群落内の陽葉、陰葉での光合成量、葉量、吸収光量と葉光合成との関係を調べた。その結果、複雑群落構造を持つ森林では陰葉による光合成が大きくなり、これは拡散光の光利用効率を高めた結果であることが明らかになった。本論文研究は多層構造モデルの特徴をうまく活かしたシミュレーションであり、従来のフィールドベースのみの手法と異なる独自性を見出した点においてReviewerから高い評価を得た。

ここまでの研究成果を踏まえ、攪乱を加味した数値実験を実施した。ここで研究開始1年目(2020年度)から準備していた攪乱スキームに計算上のミスが見つかったことを受け、急遽、簡易的だが実用的な攪乱スキームのコードを作成し(Bonan, 2018)、統計モデルとMINoSGI生態系モデルからパラメータ推定を試みた。

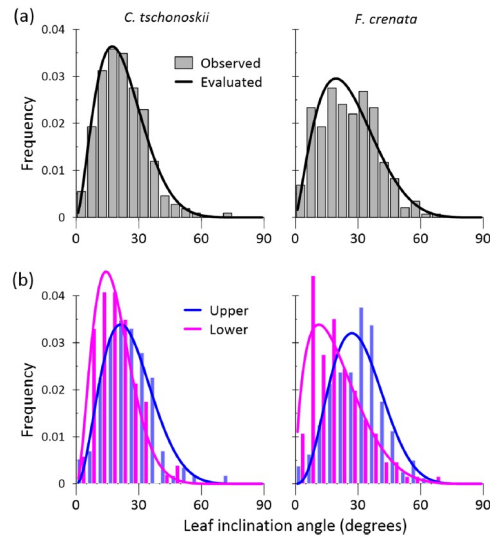


図2: イヌシデ (*Carpinus tschonoskii*)とブナ(*Fagus crenata*)の葉傾斜角の計測 (a) 計測値と計算値の比較、(b) 群落内上層および下層における計測結果 (Toda et al., 2022 Agricultural and Forest Meteorology)

冷温帯森林を対象とした計算の結果、通常気象傾向が示された年(通常年)と気象攪乱が生じた年(ここでは極端な乾燥をもった攪乱年とする)との比較から主に光合成に起因するパラメータに違いが見られることがわかった。そのような攪乱有無の気象傾向を反映したパラメータを用いて生

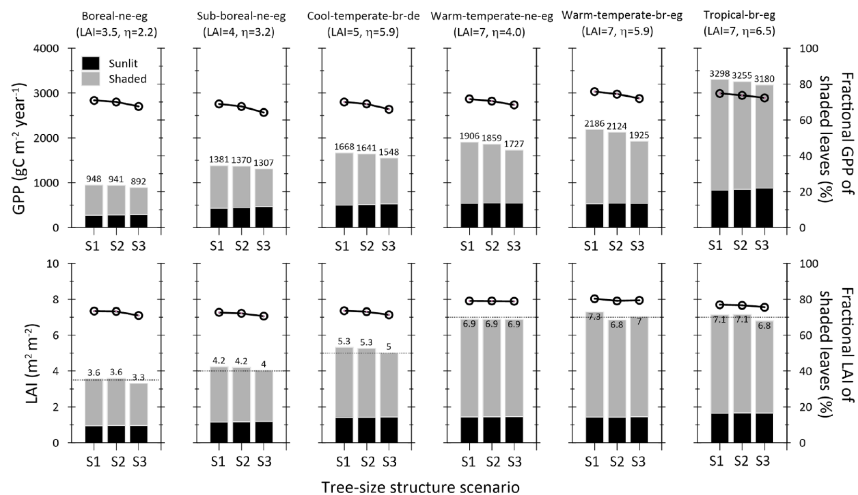


図3: (上図)核バイオームで計算された3つの群落構造シナリオ (S1,S2,S3)での総生産量(GPP)と(下図)葉面積指数(LAI) 各図における右の軸は全体量に対する群落内引用による寄与率(%)を示す (Toda et al., 2023 Forest Ecology and Management)

産するパラメータを用いて生

生態生産量(net ecosystem exchange, NEE)が計算された (図 4)。シミュレーション結果から、実測値をある程度の不確実性幅を持って再現できていることは確認できた。一方で、取り扱った攪乱スキームの違いが NEE の精度に及ぼす影響は検討の余地があると思われる。

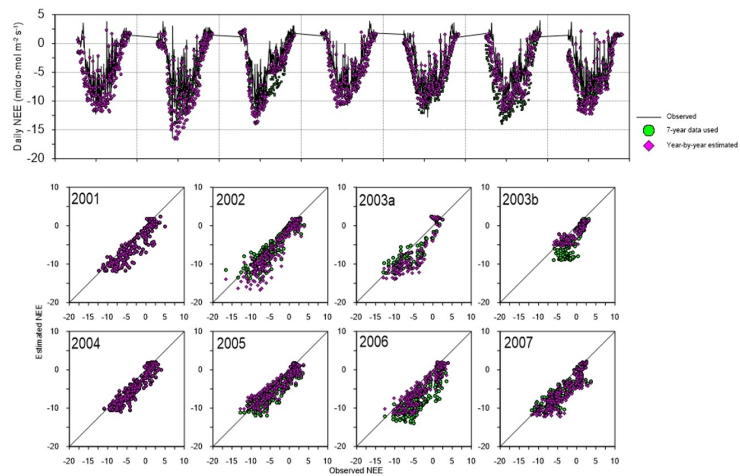


図4: 冷温帯林の生態生産量の年変化の計算結果
攪乱年を2003年とする (Toda et al. in preparation)

以上より、本課題において筆者は予定通り研究課題を進めることができた。今後は、複数の攪乱スキームを用いて森林生態系の炭素機能評価に関する研究をさらに継続する必要があると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Toda, M., Doi, K., Ishihara, I.M., Azuma, A.W., Yokozawa, M.	4. 巻 418
2. 論文標題 A Bayesian inversion framework to evaluate parameter and predictive inference of a simple soil respiration model in a cool-temperate forest in western Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecological Modelling	6. 最初と最後の頁 108918
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ecolmodel.2019.108918	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toda, M., Doi, K., Ishihara, I.M., Hara, T.	4. 巻 325
2. 論文標題 Determination of species-specific leaf angle distribution and plant area index in a cool-temperate mixed forest from UAV and upward-pointing digital photography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology,	6. 最初と最後の頁 109151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2022.109151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toda, M., Knohl, A., Luysaaert, S., Hara, T.	4. 巻 538
2. 論文標題 (2023) Simulated effects on size structural complexity on forest productivity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 120978
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.foreco.2023.120978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 ロッシュフェリックス拓磨（早稲田大），横沢正幸（早稲田大），戸田求（広島大）
2. 発表標題 パーティクルフィルタを利用した森林生態系の環境応答の解析
3. 学会等名 日本農業気象学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田求(広島大)、Alexander Knohl (Goettingen Univ.), 原登志彦(北大)
2. 発表標題 シンポジウム：植物群集におけるサイズ構造モデルの過去、現在、未来 「微気象過程を導入したサイズ構造モデル」
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田求、石原正恵、土井一希
2. 発表標題 デジタル画像を用いた温帯混交林の葉傾斜角分布と葉面積指数の評価
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田求(広島大)
2. 発表標題 森林構造の複雑性がGPPに及ぼす影響評価のシミュレーション研究
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	University of Goettingen			
オランダ	Vrije Universiteit			