

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00540

研究課題名(和文) 地形が植生の分布や生産性へもたらす影響の解析、その植生シミュレーターへの導入

研究課題名(英文) Simulating interactions between topography, permafrost, and vegetation in Siberian larch forest

研究代表者

佐藤 永 (Sato, Hisashi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・研究員

研究者番号：50392965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：東シベリア域において予測される湿潤化傾向が、同地の植生帯に及ぼす影響を予測するために、木本の過湿枯死過程、および地形に基づいた土壤水の移動を、全球植生動態モデルSEIB-DGVMに導入した。この改変モデルに今世紀末までに予測される気候シナリオを導入したシミュレーションを行ったところ、周囲から土壤水の集まる比較的低標高のエリアにおいては森林衰退が生じるものの、その他のエリアでは植物生産性がむしろ上昇することによって、東シベリア域全体の平均値としては植物生産性が増加することが予測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東シベリアのカラマツ林帯は、日本の国土面積の10倍の面積を占める世界最大の針葉樹林帯であるが、この広大な森林帯が現在進行中の気候変動の下でいかに変化していくのかについては、世界の研究者の間でも見解が一致していない。この地域の森林変化は、全球の炭素バランスのみならず、河川流出を通じた北極海への物質流出量と海洋生産性、海水移動を通じたオホーツク海への物質流出まで、多くの影響の方向と大きさを決める重要な要素であるため、その予測精度の向上が望まれている。

研究成果の概要(英文)：To reconstruct complicated interactions between topography, permafrost, and vegetation in Siberian larch forest, the TOPMODEL, which is a physically based streamflow and water-table-depth computation scheme was implemented to a dynamic vegetation model SEIB-DGVM, which works with a thermo-hydrology model. I examined how this integrated model reasonably works, and how it can be employed for future projection of environmental conditions of the Siberian larch region.

研究分野：植物生態学

キーワード：東シベリア カラマツ林 永久凍土 地球温暖化 過湿枯死 炭素循環

1. 研究開始当初の背景

東シベリアには主にカラマツから構成される落葉性針葉樹林帯が広がる。この地域は、今世紀末にかけて大幅な気候変動が見込まれており、それに伴って大規模な植生の変化が生じる可能性が指摘されているものの、その変化予測は研究グループ間で大きく異なる(**Beer C** ら **2007 Glob. Biogeochem. Cycles 21**; **Shuman JK** ら **2011 Glob. Change Biol. 17**; **Sato** ら **2016 Ecol Evol. 6**)。その一方で、東シベリアの植生変動は、全球規模の気候システムに大きな影響を与えるものであり、その的確な予測の重要性は高い。なぜならば、ここは世界最大の針葉樹林帯であり、その変化が全球炭素収支に与える影響は大きく、また冬季は積雪に覆われるため、植被の変化は露出する雪面の比率を通じて日射反射率を大きく変化させるからである。

代表者は、プロセスベース植生モデルである **SEIB** (**Sato** ら **2007 Ecol. Model. 200**) を開発することで、東シベリア・カラマツ林帯の植生構造と機能の地理分布を再現するとともに、その今世紀末までの変化を予測するシミュレーション研究を行ってきた。このシミュレーションでは、入力に用いる気象データの解像度に合わせた **0.5** 度の格子系を採用しており、個々の格子(北緯 **60** 度において約 $56 \times 28 \text{ km}$) を **1** つの林分で代表させている。しかし、年降水量が僅か **200 ~ 300 mm** 程度と森林帯が存続できる極限環境にある東シベリアカラマツ林帯では、実際には個々の格子内に様々な植生が混在しており、しばしば数 **10 m** ~ 数 **km** 程度の地形に応じて、森林とステップ、または森林とツンドラがモザイク状に移り変わる。例えば、カラマツ林帯の南限付近では、北斜面にカラマツ林、南斜面にステップと、斜面方位ごとに植生が分かれる事例が観察されるが、これは斜面方位に応じて乾燥の度合いに差が生じるためと説明されている(**Kopp BJ** ら **2014 Arct., Antarc., Alp. Res. 46**)。これとは逆に、カラマツ林の分布北限域では、夏期においても活動層(季節的に融解と凍結を繰り返す土壌層)が浅く降水が容易に溢れ出てしまうため、比較的低位にある平坦地には、周囲からの流入水が集まり過湿状態となり、森林が成立しにくい事が知られている(**Liang M.** **2014 Polar Sci. 8**)。

実際に我々が先行的に行った解析では、木本の葉面積指数(**LAI**)は、格子内の地形多様性を考慮しない場合、ほぼ分布域の南北のみで決まる単純な地理分布が得られる。そして、地形多様性が格子の平均 **LAI** に与える影響は、地域ごとに正負すら異なる。これらは、東シベリアにおける植生構造を的確に再現するためには、地形要素がカラマツ林の生産性に与える影響を、環境条件の相互作用を含めながら適切に考慮する必要がある事を示している。

2. 研究の目的

東シベリア全域を対象に、地形要素が植生の分布や **LAI** に与える影響と、そのメカニズムを定量的に明らかにする。地形要素の影響の現れ方は、地域によって大きく異なる事が予備解析から分かっており、これは地域ごとの乾燥・灌水頻度に対応していると期待される。そこで、広域気象データ・河川流出量データ・灌水面積比の時系列データを解析に含めることで、地形要素と植生構造との相関関係を乾燥・灌水イベントの発生条件と関連づける。

上で明らかとなった関係を、**SEIB** モデルに取り込むことで、東シベリア全域の植物生産性や炭素循環における地形多様性の影響を推定する。また、この地域の植物生産性や蒸散量における木本と草本の相対寄与を推定する。最後に、予測されている気候条件の下における、東シベリア・カラマツ林帯の植生構造と機能の変動、および陸面から大気へのフィードバックの変化を予測する。

3. 研究の方法

本研究は次の **3** 要素から構成される。

- (1) 東シベリア全域を対象とした葉面積指数 (**LAI**) の推定
- (2) **LAI** と地形要素(斜度や斜面方位など)・気候値との関係解析
- (3) 明らかになった関係の **SEIB** モデルへの取り込みと広域シミュレーション。

植生構造と地形要素との関係解析においては、広域気象データ・河川流出量データ・灌水面積比の時系列データを解析に含めることで、地形要素と植生構造との相関関係を乾燥・灌水イベントの発生条件と関連づける。**SEIB** モデルへの、格子内の地形多様性の影響を扱う拡張においては、林分の傾斜と方位が太陽光入光量と水文過程に与える定式などを組み込む。

4. 研究成果

- (1) 東シベリア全域を対象とした葉面積指数 (**LAI**) の推定、および **LAI** と地形要素(斜度や斜面方位など)・気候値との関係解析

本研究では最初に、このカラマツの多寡を決める環境因子について定量的知見を得た。具体的には、まず気候・地形・土壌など森林の存続に影響を与える9種類の環境因子の地理分布を用いて主成分分析を行い、これら全環境因子の地理分散の過半量を、2つの環境軸（第1・第2主成分）に要約させた。ここで第1主成分は、緯度と強く相関する環境因子で、温量指数と降水量とに強く正の相関を持つ環境軸である。他方で、第2主成分は、斜度と強い負の相関を持ち、土壌厚と強い正の相関を持つことから、土壌保水力を決定する環境軸と見なすことができた。

研究協力者の小林によって作成されたカラマツのLAIと、上記の第1・第2主成分との間で重回帰分析を行ったところ、カラマツの葉面積指数は、第1主成分と単純な正相関、第2主成分とは閾値まで正相関、閾値を超えると負相関となる式が得られた。これより、この地域で森林を成立させる環境条件とは、より温暖で湿潤な環境、および土壌含水量が一定範囲にある環境であることを定量的に明らかにした。

ここで発見された傾向は別のデータからも支持された。すなわち、東シベリア域の近年の正規化植生指数（NDVI）は、第2主成分得点が低い地域で増加トレンド、第2主成分得点が高い地域で減少トレンド、を示した。このNDVIトレンドデータが得られた期間には、この地域全体に降水量の増加が生じており、第2主成分得点が低い（乾燥しやすい）地域で植生の水制限が緩和、第2主成分得点が高い（過湿になりやすい）地域で植生の水ストレスが激化したことを強く示唆するものである。

この成果は、**Sato & Kobayashi (2018) *JGR-Biogeosciences* 123** として出版された。

(2) 明らかになった関係のSEIBモデルへの取り込みと広域シミュレーション

これらの定量的知見を動的植生モデルSEIBを用いて再現した。このSEIBモデルにおいて、個々のシミュレーショングリッド内における地形多様性が格子内の水循環に与える影響を考慮するために、水文スキームTOPMODELを導入した。TOPMODELは、集水域内スケールにおける土壌水水平移動や地下水位のパラツキを物理ベースで計算するスキームである。

このTOPMODELを組み込んだSEIBモデルに環境変動を与えた感度分析を行ったところ、**Sato & Kobayashi (2018)**で明らかにしたカラマツの多寡と環境要因との間の相互作用と、定量的に矛盾がないことが確認された。

続いて、このシミュレーターに今世紀末までに予測される気候変動シナリオを入力して、東シベリアカラマツ林帯の消長の予測を行った。その結果、この地域において予測されている大幅な気温上昇と降水量上昇は、永久凍土の融解と湿潤化をもたらし、その規模は平野部のカラマツ林帯を壊滅させる程度であることが示された。しかし、そのような過湿枯死が生じると予測された地域においても、シミュレーションに地形要素を考慮に加えた場合、比較的高所の排水の良いエリアが一種のレフュージア（待避地）として機能し、カラマツ林帯はパッチ上に存続出来ることが示された。

この成果は、**Satoら(2020) *Environ.Res.Lett.*15** として出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hisashi SATO, Hideki KOBAYASHI	4. 巻 1
2. 論文標題 Topography Controls the Abundance of Siberian Larch Forest	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 106-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2017JG004096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 H. Sato, H. Kobayashi, C. Beer and A. Fedorov	4. 巻 15(9)
2. 論文標題 Simulating interactions between topography, permafrost, and vegetation in Siberian larch forest	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-9326/ab9be4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Hisashi SATO
2. 発表標題 Simulating topographic controls on the abundance of larch forest in eastern Siberia, and its consequences under changing climate
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi SATO
2. 発表標題 Interactions between topography, permafrost, and vegetation in Siberian larch forest: a simulation study
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi SATO
2. 発表標題 Interactions Between Topography, Permafrost, and Vegetation in Siberian Larch Forest: a Simulation Study
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (AOGS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi SATO, Hideki KOBAYASHI
2. 発表標題 Interactions Between Topography, Permafrost, and Vegetation in Siberian Larch Forest: a Simulation Study
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi SATO, Hideki KOBAYASHI
2. 発表標題 Topography controls the abundance of Siberian Larch Forest
3. 学会等名 EGU General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisashi SATO, Hideki KOBAYASHI
2. 発表標題 Simulating topographic controls on the abundance of larch forest in eastern Siberia, and its consequences under changing climate
3. 学会等名 International Symposium on Cryosphere and Biosphere (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究 分担者	小林 秀樹 (Kobayashi Hideki) (10392961)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境 変動総合研究センター)・グループリーダー代理 (82706)	
研究 分担者	楊 偉 (Yang Wei) (80725044)	千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・助教 (12501)	

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
---------	---------