

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24510014

研究課題名(和文) 気候変動に伴った東シベリアの植生・凍土システム変化を予測するシミュレーターの開発

研究課題名(英文) Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends

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・地球表層物質循環研究分野・研究員

研究者番号：50392965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者が開発した動的全球植生モデルをベースとして、植生動態と凍土を含んだ土壌物理過程との相互作用を扱う統合モデルを開発した。

このモデルは、東ロシアのカラマツ成熟林で観測された蒸発散速度や地中温度・含水率の季節変化、さらに森林伐採前後の土壌熱水収支の変化を再現することに成功した。また、このモデルは、東シベリア全域における永久凍土・葉面積指数・バイオマスの地理分布を適切に再現できることが確認された。

このように一定の信頼性が担保されたモデルに、予測される21世紀末までの気候変動を入力したところ、東シベリア全域における地表近くの永久凍土の縮退と、植物生産性の大幅な増加が予測された。

研究成果の概要(英文)：The larch forest in eastern Siberia is the world's largest coniferous forest. Its persistence is considered to depend on near-surface permafrost, and thus forecast warming over the 21st century and consequent degradation of near-surface permafrost is expected to affect the larch forest in Siberia.

Here, we developed an integrated land surface model to analyze how the Siberian larch forest will react to current warming trends. This model analyzed interactions between vegetation dynamics and thermo-hydrology, and it satisfactorily reconstructs latitudinal gradients in permafrost presence, soil moisture, tree leaf area index, and biomass over the entire larch-dominated area in eastern Siberia. The model showed that, under climatic conditions predicted under gradual and rapid warming, the annual net primary production of larch increased about 2 and 3 times, respectively, by the end of the 21st century compared with that in the previous century.

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 生態系シミュレーション 動的全球植生モデル

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。これは、世界最大の針葉樹林帯であり、その変化が炭素収支に与える影響は大きい。また冬の長い期間、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変え、短波放射の反射率(アルベド)を大きく変化させる事で、気候へ強いフィードバックを与える。よって、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、これを的確に予測することの重要性は高い。

この地域の年降水量は僅か 200~300mm 程度であり、これは森林帯としては極めて低い値である。そのような気候条件の下に広大な森林帯が維持されている理由としては、降水が植物の成長期間である夏期に集中していること、また永久凍土が広がり、土壌中の水が地下深くまで浸透しないこと、などが指摘されている。それでも成長期の後半には、乾燥による樹木の光合成速度の低下が生じることが、東シベリア・ヤクーツク市近郊のスパスカヤパッド実験林における観察で明らかとなっている。また、研究代表者らのグループが構築した動的全球植生モデル(気候環境の変動に応じて植生分布を変化させながら、陸面の炭素・水・放射収支を出力する、長期予測に適した植生シミュレーションモデル)からも、年平均気温の上昇は、成長期間を延長させるが、成長期後半に生じる乾燥をさらに厳しくすることで、少なくとも成熟林においては年間の純生産量を低下させると示唆されている。

他方で、別の研究者グループによるモデル研究において、永久凍土層の無い条件ではカラマツは生き残れず、乾燥に強いアカマツやその他の種に取って代わられること、また山火事もカラマツ林の維持と更新に欠かせないことが示唆された(引用文献)。また、このモデルを用いた気候温暖化感度実験の結果、現在よりも2 以上の温暖化が生じると、このタイガ・凍土共生系は維持できなくなることが予測されている。

上記の二つのシミュレーション研究は、ロシア国ヤクーツク市近郊のスパスカヤパッド実験林のみを対象としており、植生変動の地理的範囲や、それが気候環境へ与えるフィードバックについては、検討していない。またスパスカヤパッド実験林は、この地域において突出的に高密度な森林帯にあり、東シベリア全域を代表するには適切でない。シベリア全域を対象とした動的植生モデルによる現時点で唯一のシミュレーション研究(引用文献)では、カラマツ以外の主要樹種をモデルに含めておらず、気候環境変動に伴った主要構成樹種の入替わりの可能性を排除している。また、この研究では、永久凍土を

単に植生が土壌水を吸い上げることを妨げる因子として扱っており、永久凍土が消失した場合には、カラマツ林の生産速度が2~3倍増加すると出力してしまう。実際には、カラマツ林と永久凍土の分布域は明瞭に一致することなどから、カラマツ林の存続に永久凍土は不可欠であると考えられており、このシミュレーション設定は非現実的と言える。

このように、東シベリア全域に適用でき、かつ今後数十年~数百年といった時間スケールにおいて信頼に足る出力をもたらす動的植生モデルは、未だ存在しない。そして、これがこの地域における気候予測に大きな不確実性をもたらしている。現在、東シベリアは地球上で温暖化進行の最も顕著な地域であるが、温暖化に伴う水循環変化、特に夏期の降水量変化については、気候モデルごとに予測が大きく異なっている。その理由のひとつは、この地域の植生・凍土システムの変化と、それに伴う陸面-大気間相互作用の予測とに著しいバラツキがあるためである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、東シベリア域における植生動態と凍土動態を再現する統合モデルを構築する。

(2) 構築した統合モデルの信頼性を担保するために、モデルの出力を、スパスカヤパッド実験林において長年観測されている諸データとの比較を行う。また、モデルの一般性を確認するために、東シベリア全域における、葉面積指数(LAI)・生物量・永久凍土分布などの地理分布を、モデルが適切に再現できることを確認する。

(3) 以上により一定の信頼性や一般性が担保されたモデルを用いて、今後数十年~数百年の間に予測される気候環境変動の元で、東シベリアの植物生態系がどのような挙動を示すのかを定量的に見積もる。

(4) さらに感度分析により、どの環境因子や物理・生態・生理プロセスが、予測結果に大きな変動をもたらしたのかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者らによって開発された動的全球植生モデル SEIB-DGVM(引用文献)に、既存の陸面物理過程モデル NOAH-LSM を結合することで、植生動態と凍土を含んだ水文過程との相互作用を扱うことのできるモデルを構築する。

続いて、このモデルの出力を、LAI 分布の季節変動、地上部バイオマス分布、山火事分布などが的確に再現できることを確認することで、その出力の信頼性を担保する。なお、これらの検証データのうち、LAI は本研究に

において独自に推定する。LAI は植物生産に強く規定する因子であるが、東シベリアカラマツ林のような、高緯度の疎林地帯における信頼性の高いデータセットが存在しないためである。

そして、今後数十年～数百年の間に予測される気候環境変動の元で、この系がどのような挙動を示すのかを定量的に見積もる。そして感度分析（入力する気候データや素過程のパラメータ値を変えた時のシミュレーション出力の変化の分析）により、どの環境因子や物理・生態・生理プロセスが、予測結果に大きな変動をもたらすのかを明らかにする。

4. 研究成果

動的全球植生モデル SEIB が、凍土を含んだ土壌物理過程を扱えるようにするため、ここに米国のグループにより開発された陸面物理モデルである NOAH-LSM を結合した。この結合モデルは、ヤクーツク近郊のカラマツ成熟林で観測された蒸発散速度や地中温度・含水率の季節変化（引用文献）（図 1）さらに森林伐採前後の土壌熱水収支の変化（引用文献）を再現することに成功し、本研究の対象地域において適切な挙動を示すことを確認した。

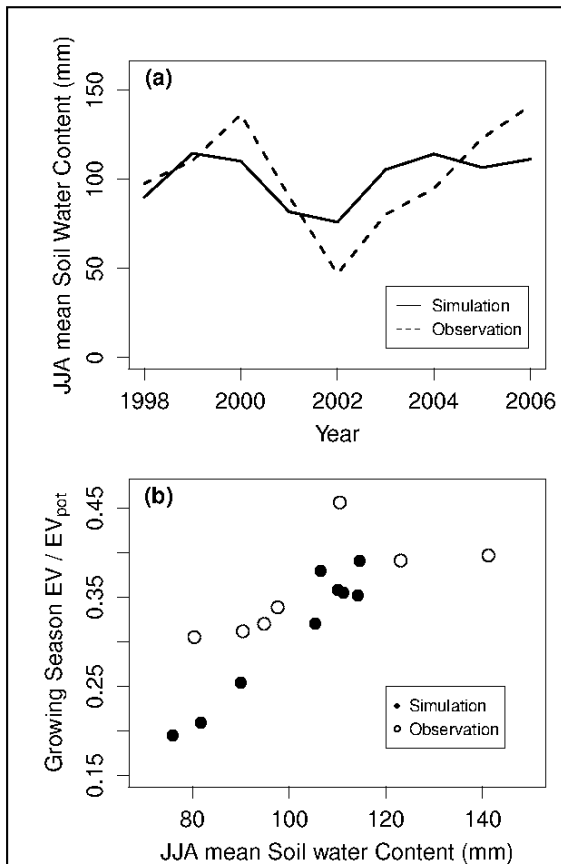


図 1：スパスカヤパッド実験林で観測された熱・水収支と、統合モデル出力との比較。(a) 成長期間における地表 0～50cm 含水率の年々変化、(b) 土壌含水率と蒸発散効率との関係

また、このモデルを用いて、東シベリア全域における植生等の地理分布の再現を試みた。なお、このモデルは木本としてカラマツのみを仮定しているため、モミ類などの常緑針葉樹林と入り交じる、カラマツ分布域の西端はシミュレーション範囲から除外した（図 2）。

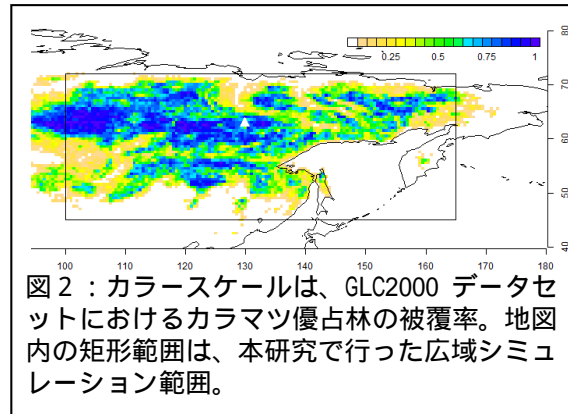


図 2：カラスケールは、GLC2000 データセットにおけるカラマツ優占林の被覆率。地図内の矩形範囲は、本研究で行った広域シミュレーション範囲。

現在の気候条件を入力したシミュレーション出力を、実測ベースの永久凍土・葉面積指数・バイオマスの地理分布と比較した。その結果、このモデルは、これらの実測ベースデータの緯度方向の傾度変化を適切に再現できることが確認された（図 3）。

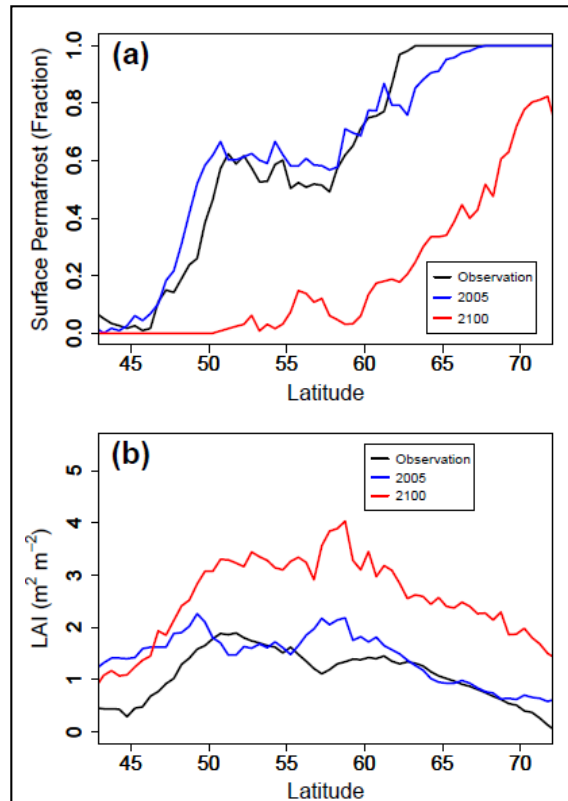


図 3：広域シミュレーションの検証例。(a) 地表面近くの永久凍土の分布率、(b) 葉面積指数、それぞれの観測ベースデータとシミュレーション出力について緯度方向の平均値を求めた。2100 年のシミュレーションは、RCP8.5 の元における気候変動予測を入力。

この検証作業によって、このモデルの広域シミュレーション出力に一定の信頼性が担保されたため、このモデルを用いた温暖化実験を行った。その結果、カラマツの分布域全域で大幅な植物生産性の増加が予測された(図3b、図4)

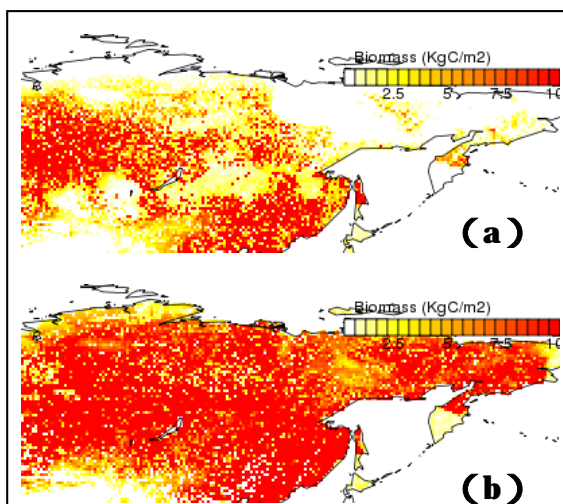


図4：広域シミュレーションにおける木本生物量の出力。(a)2005年の値、(b)2100年の値。2100年の値は、MIROC-ESMのRCP8.5シナリオの元における気候変動予測データを入力した。

この温暖化実験に用いた気候変動予測データにおいては、東シベリア全域で、年平均気温と年降水量が大幅に上昇していた。感度分析の結果、年平均気温の増大がカラマツの成長期間を延ばしたこと、年降水量の増大が成長期後半の乾燥ストレスを緩和したこと、これらが主な植物生産性の上昇の要因となっている事が示された。また大気中CO₂濃度の増大も、植物の水利用効率を高めることで、乾燥ストレスを緩和させていた。

他方で、この年平均気温と年降水量の上昇は、地表面近くの永久凍土融解させることで、土壌水の排出をもたらすという、乾燥ストレスを増大させる因子も生じさせた。しかしこの因子は、先に述べた植物生産性の増大効果を打ち消すほどの強さを持たなかった。

<引用文献>

Zhang et al. 2011, Environ Res Lett
Beer et al. 2007, Glob Biogeochem Cycles
Sato et al. 2007, Ecol Model
Ohta et al. 2008, Agric For Meteorol
Iwahana et al. 2005, JGR Biogeosciences

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Pisek J, Chen JM, Kobayashi H, 他7名,
Retrieval of seasonal dynamics of forest understory reflectance from semi-arid to boreal forests using MODIS BRDF data,

Journal of Geophysical Research - Biogeoscience, 査読有り、2016、121巻、doi:10.1002/2016JG003322.

Sato H, Ito A, Ito A, Ise T, Kato E,
Current Status and Future of Land Surface Models, Soil Science and Plant Nutrition, 査読有り、2015、61巻1号、34-47

Sato H, Kumagai T, Takahashi A, Katul G,
Effects of different representations of stomatal conductance response to humidity across the African continent under warmer CO₂-enriched climate conditions, Journal of Geophysical Research - Biogeosciences, 査読有り、2015、120巻5号、979-988
doi:10.1002/2014JG002838

〔学会発表〕(計16件)

佐藤 永、岩花 剛、太田 岳史、
Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends, AGU fall meeting, 2015年12月14日、(サンフランシスコ市・アメリカ)

佐藤 永、岩花 剛、太田 岳史、予測される気候変動が東シベリアのカラマツ生態系にもたらす影響、第6回極域科学シンポジウム、2015年11月19日、(国立極地研究所・東京都・立川市)

〔図書〕(計2件)

佐藤 永、共立出版、地球環境変動の生態学 7章「植生と気候の相互作用と動的全球植生モデル」、2014、pp129-147

佐藤 永、朝倉書店、地球環境の事典 項目 6.4「陸域生態系の数値モデル(2) 動的全球植生モデル」、2013、pp164-165

〔その他〕

ホームページ「SEIB-DGVM(動的全球植生モデル)Web-Site」
<http://seib-dgvm.com/>

6. 研究組織

(1) 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・地球表層物質循環研究分野・研究員
研究者番号：50392965

(2) 研究分担者

小林 秀樹 (KOBAYASHI, Hideki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・主任研究員
研究者番号：10392961