

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750117

研究課題名(和文) 温暖化に伴う積雪減少による東アジア気象場への影響の時空間特性の解明

研究課題名(英文) Effect of reduction in snow cover due to global warming on East Asian climate

研究代表者

阿部 学 (ABE, Manabu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・統合的気候変動予測研究分野・技術副主任

研究者番号：50377983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化によって高緯度域の積雪量が減少し、気温を上昇させ、気象場に影響を与える。それらの大きさやメカニズムを明らかにするために、地球システムモデルで予測された、ユーラシア北部における将来の積雪変化の特性や積雪-アルベドフィードバックの解析や気候モデルによる感度実験を行った。予測されたユーラシア北部の積雪変化の特徴は、冬季のシベリアでは積雪量が増加する傾向にあり、それ以外では減少する傾向を示した。特に、春季の積雪減少が顕著であり、この時期のアルベド減少の効果が気温上昇や大気場に与える影響が強いことが分かった。さらに、植生変化もアルベド減少の重要な要因であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Snow cover changes in high latitude regions due to global warming enhance a local warming through the reduction of surface albedo. This can affect atmospheric circulation. To investigate an effect of the snow cover changes on East Asia climate, snow-albedo feedback in northern Eurasia simulated by Earth system model (ESM) has been analyzed, and sensitivity experiments by climate model have been conducted.

In the future projections by the ESM, snow amount in northern Eurasia tends to decrease in fall, winter, and spring. However, in Siberia during winter, snow amount increases. Particularly decrease in snow during spring is dominant rather than that in fall and winter, and enhance local warming substantially through reduction of surface albedo. In addition to the snow cover changes, our analysis suggests future change in vegetation may be a factor in the reduction of local surface albedo.

研究分野：気候システム

キーワード：地球温暖化 積雪変化 地球システムモデル

1. 研究開始当初の背景

近年、北極海の海水は著しく減少し、ユーラシアなどの高緯度の陸上積雪量が減少しているというような温暖化の影響がすでに北極域には表れ始めている。また、将来気候変化予測では北極域の温暖化が中・低緯度域に比べると早く起こり、その北極域の顕著な温暖化は将来に向かって強くなる。このことから、北極域の温暖化の影響を理解することは重要な課題である。

ユーラシアでは積雪の減少/消失が予測されている。一方、20世紀の気候変動の解析では、ユーラシアの積雪変化は東アジアの気象場に影響を与えていた [Cohen and Entekhabi, 1999]。今後は温暖化によるユーラシアの顕著な積雪減少/消失がさらに東アジアにこれまでとは異なる影響を与えることが推測される。

例えば、日本では豪雪や暖冬など、いわゆる異常気象といわれる現象が近年頻発している。しかし、これらの異常気象といわれる現象は、自然的な要因によるものなのか、人為的な要因、または温暖化による影響なのか、さらに、北極域の気候変化の影響なのかなど、要因は明確ではない。

これまで多くの研究から、気候変化予測には予測値が完全には一致しないなどの不確実性、特に北極域の変化に対する大きな不確実性が明らかである。一方、不確実性の低減方法の開発が申請者を含めた多くの研究者によって行われているが、簡単な統計手法での予測の解釈では不十分であることもわかってきた。したがって、予測実験で起こっている陸域の重要な気候変数の変化とその変化による気象場への影響の理解をすることで、温暖化に伴う変化要因を明確にし、気候変化予測をより発展的に解釈することが将来にとって重要であると考えられる。

2. 研究の目的

これまで、温暖化による東アジアの気象場(モンスーン循環の変化)や温暖化による積雪域の変化を別々に調べた研究がある。しかし、将来予測においてユーラシアで起こる温暖化に伴う積雪変化のメカニズムや積雪変化の東アジアの気象場への影響を調べた研究はみられない。

20世紀とは異なる温暖化気候の条件化でのユーラシアの積雪変化から東アジアの気象場への影響の理解は近年の異常気象など気候変化の推移を考察する上でも興味深い。

温暖化に伴う積雪減少によって、アルベド減少や大気と陸との熱・水の交換効率の変化が起こるため、その効果の十分な検証が必要である。また、その検証には、植生を考慮することも必要である。将来の温暖化した環境

下における、植生を含めた陸面過程の気候システムでの役割を解明することは、現在の地球環境の形成を理解する上でも重要である。

以上から、本研究は将来予測実験にみられるユーラシアの積雪変化や積雪変化の東アジアの気象場への影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、大気海洋結合大循環モデルと生態系モデルを結合した地球システムモデル(MIROC-ESM)を用いて行った、20世紀再現実験と21世紀気候変化予測実験の結果を解析し、温暖化に伴う積雪変化と東アジアの気象場への影響について統計手法を用いて調べた。MIROC-ESMは海洋研究開発機構・東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所によって共同で開発された[Watanabe et al., 2011]。20世紀再現実験、および、21世紀気候変化予測の境界条件や外的強制条件は、世界気候研究計画(WCRP)の結合モデル相互比較実験プロジェクト(CMIP)の条件に従うものである。また、将来予測実験における不確実性の検証については、CMIP5に提出された複数機関の気候モデルや地球システムモデルの20世紀気候再現実験や21世紀の将来気候変化予測実験の結果を用いた解析を行う。

さらに、大気モデルMIROC-AGCMを用いた積雪アルベドの効果を調べる感度実験を行い、積雪アルベドの低下による温暖化への効果について検証を行う。

4. 研究成果

(1) CMIP5 マルチモデルの北半球高緯度域の積雪バイアス

将来気候変化予測実験の信頼性を考慮するためには、20世紀気候再現実験でみられる現在気候の再現性が重要である。CMIP5で行われた18つの気候モデル、または、地球システムモデルにおける、秋季(9・10・11月平均値)・冬季(12・1・2月平均値)・春季(3・4・5月平均値)の陸域の積雪量について、衛星観測から得られた積雪量(GlobSnow, [Takala et al., 2011])と比較し、モデルのバイアス評価を行った。その結果、ほとんどすべてのモデルが陸域の積雪量を過大評価していることが明らかになった。また、ほぼすべてのモデルにおいて、秋季・冬季に比べると春季にバイアスが增大する(図1)。また、積雪量の地理分布に関する特徴も、ほぼすべてのモデルが現実的な特徴を再現しているとは言えないことが分かった。以上から、気候モデルや地球システムモデルにおける積雪に関しては、再現性を向上させることが重要な課題である。

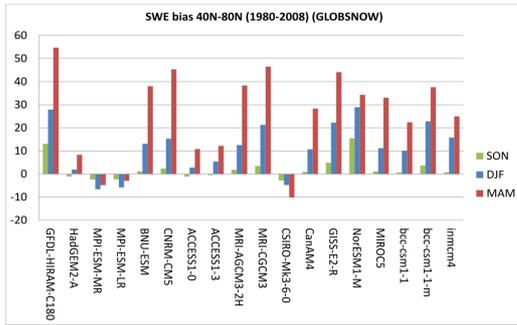


図 1: CMIP5 のマルチモデルにおける、北半球高緯度陸域 (45-90°N) の 1980-2005 年を平均した季節平均積雪水当量のバイアス。単位: kg /m²。

(2) マルチモデルによる将来の積雪変化予測

複数のモデルにおける将来の積雪変化に関して比較を行った。すべてのモデルにおいて、将来、ユーラシアの秋季から春季の平均的な積雪量が減少することが明らかになった。しかし、その傾向が冬季のシベリアや北極海沿岸では異なる。秋季の積雪量は減少傾向である一方、冬季には、平均的に気温が氷点下を下回るシベリアや北極海沿岸地域では積雪量が増加する傾向を示した。ヨーロッパなどユーラシア西部については冬季積雪量も減少傾向を示した。春季になると、積雪量の減少がすべてのモデルで明瞭になる。しかし、その量はモデル間でばらつき、不確定性が大きい。積雪域の後退についてもモデル間でのばらつきが大きい。積雪域の後退に伴う地表面のアルベド変化をモデル間で比較すると、空間的な分布特性以外にも積雪被覆率に対するアルベド変化量の違いがみられた。これは、20 世紀の気候再現において、モデル間で積雪による地表アルベドが異なることが関係していると推察され、現在気候の再現性を向上させることが重要であることを改めて強調する結果である。特に、我々が開発にかかわっている地球システムモデル、MIROC-ESM はユーラシア北部での春季の積雪量減少や気温上昇が顕著であった。

次に、シベリアを中心とした地域で冬季の将来積雪量が増加する要因について、MIROC-ESM のデータを用いて解析した。その結果、将来、地球温暖化によって気温上昇が生じるため、大気中の水蒸気量も増加する。そのために高緯度域では降水量が増加する傾向にある。シベリアでは将来温暖化しても気温が氷点下であるため、降水量の増加は降雪量の増加につながる。このような要因で将来の冬季にシベリア域を中心に積雪量が増加するということが分かった。

(3) MIROC-ESM での積雪 アルベドフィードバック効果と植生活動の将来変化による影響

MIROC-ESM ではシベリアで春季に、他のモ

デルと比べても大きな気温上昇が起きていた。この気温上昇には積雪量減少やそれに伴う積雪 アルベドフィードバック効果が強く作用していることから、積雪-アルベドフィードバックに関する定量的な評価方法を用いて、要因を分けて積雪 アルベドフィードバックに対するその寄与を評価した(図 2)。

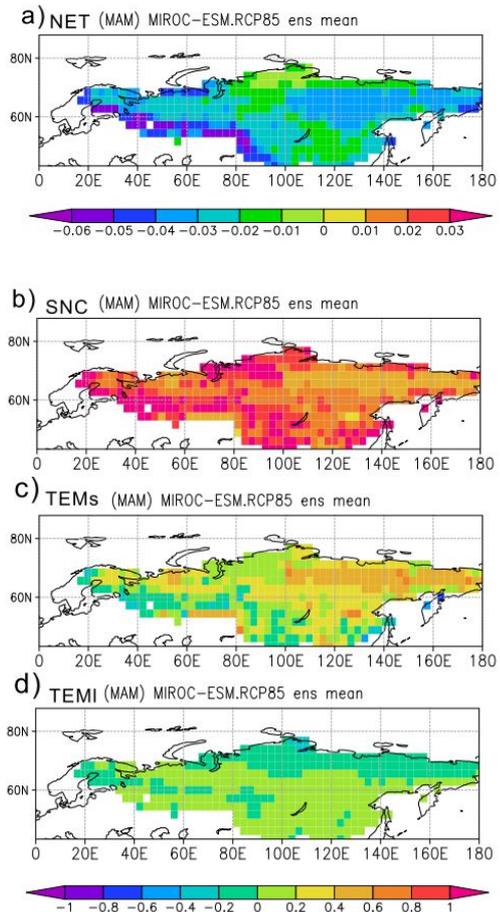


図 2: MIROC-ESM の将来予測実験における、ユーラシア北部の春季積雪アルベドフィードバック効果の大きさ。a) 正味(NET)、b - d) 次に説明する変化によって説明できる量の正味に占める割合: b) 積雪被覆率、c) 積雪に覆われた部分の地表面アルベド、d) 積雪の無い部分の地表面アルベド。単位: /K。

この解析において、評価した要因は次の 3 つである: 積雪被覆率の変化 (SNC)、グリッド内で積雪に覆われている部分の地表面アルベドの変化(TEMs)、グリッド内で積雪に覆われていない部分の地表面アルベドの変化(TEMi)。TEMs は、積雪そのものの表面アルベドの変化や植生活動の季節性によって植生に覆われる割合が変化することによって生じるアルベドの変化を意味する。TEMi は植生活動の季節性の変化や土地利用変化などの関連するアルベド変化を意味する。解析の結果、MIROC-ESM において、春季のシベリア域の積雪 アルベドフィードバックは積雪被覆率の減少による効果(SNC)が全体の 6 割程

度を説明し、積雪に覆われている部分の地表アルベドの減少による効果 (TEMs) が 4 割程度を説明することが分かった。また、TEMI についてはほとんど効かない。この結果は、陸域の温暖化にとって積雪量の減少が重要であることを示すほか、積雪の性質の変化に伴うアルベドの変化や植生活動によって生じるアルベド変化も、アルベド低下の重要な要因であることを示している。

上述した TEMs の効果のうち、積雪アルベドの変化そのもの減少については、シベリア域で冬季に積雪量が増加することから、その効果が小さいと推測される。一方で、地球システムモデル、MIROC-ESM の植生活動の季節性については生態系モデルによって計算される葉面積指数 (LAI) を用いて考慮している。北半球高緯度域では、この LAI が将来の地球温暖化に伴い増加していた。このことから、MIROC-ESM において、積雪 アルベドフィードバックの TEMs は将来の LAI の増加によって強く働いていることが推察できる。

さらに、この LAI の変化による影響を検証するために、LAI の将来変化を止めた実験を追加で行った。その結果、通常の将来気候変化予測実験でみられた、シベリア域での大きな気温上昇や積雪減少が LAI の将来変化を止めた実験では起こらなかった。積雪 アルベドフィードバックについても、そのほとんどが積雪被覆率の減少による効果で説明された。以上の結果は、将来の陸域の積雪 アルベドフィードバックにおいて、積雪減少だけでなく、植生活動の変化もフィードバックを強化する一つの要因となりうる可能性を示唆する。

積雪域の後退による地表アルベドの効果の季節性を検証するため、大気循環モデル (AGCM) を用いた感度実験を行った。実験では、大気中二酸化炭素濃度 (CO₂ 濃度) を 2000 年の量から 2 倍、4 倍、8 倍にそれぞれ急激に増加させて温暖化させたときに、積雪域・積雪アルベドを固定した場合と固定せずに通常どおりモデルが計算した場合の違いを評価した。北半球高緯度域 (北緯 45° - 90°) の陸域で平均した地表気温変化量を解析した結果、春季昇温量について、2 倍 CO₂ 濃度上昇場合で約 0.1、4 倍の場合で約 0.2、8 倍の場合で約 0.3 の差がみられた。一方で、その他の季節ではそれほど大きな差が生じなかった。従って、温暖化による積雪変化によるアルベド減少の効果は秋季・冬季においてはそれほど強くなく、春季に強く働き、春季の気温上昇に作用することが確認された。

(4) 積雪変化による大気循環場への影響

MIROC-ESM における、ユーラシア北部から東アジアの地表気圧の将来変化は、秋季から春季にわたり、気圧が低下する傾向である。秋季・冬季についてユーラシア北部の陸域でも有意な気圧低下がみられるが、北極海上の

気圧変化に比べると小さく、北極海の影響を強く受けた変化であると考えられる (図 3)。一方で、春季については、北極海での気圧低下量が小さくなり、シベリア域の気圧低下量が顕著になり、積雪減少に伴う気候上昇の影響であると考えられる。このようなシベリア域での気温上昇に関連する大気循環場の変化は、東アジアのブロッキング高気圧の発生頻度を高める可能性や、日本の梅雨活動に影響を与える可能性を示唆する結果であり、春季の積雪減少による東アジアの気象場の特徴の将来変化に大きな影響を与える可能性があることが分かった。しかし、マルチモデルデータについても同様な解析を行った結果、積雪変化の小さいモデルほど、その影響が弱いことが分かり、積雪に関する気候場や積雪 アルベドフィードバックの再現性の向上と不確実性の低減が予測の信頼性向上のための今後の課題である。

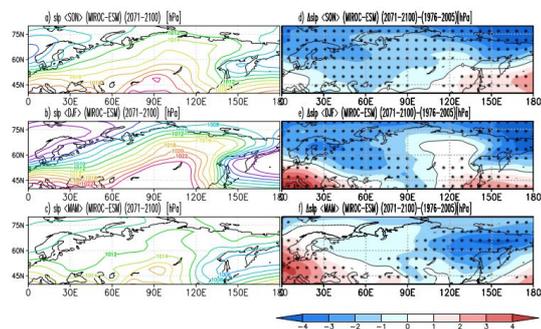


図 3: MIROC-ESM による将来気候変化予測の 2071 - 2100 年で平均した季節平均海面更生気圧 (SLP) (左の図) とそれらの 1976-2005 年平均値からの変化量 (右の図)。単位: hPa。上の図から秋季、冬季、春季に関する値を示す。

<引用文献>

- Cohen, J., and D. Entekhabi (1999), Eurasian snow cover variability and northern hemisphere climate predictability, *Geophys. Res. Lett.*, 26(3), 345-348.
- Takala, M., K. Luojus, J. Pulliainen, C. Derksen, J. Lemmetyinen, J.-P. Kärnä, J. Koskinen, and B. Bojkov (2011), Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements, *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3517-3529.
- Watanabe, S., et al. (2011), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev.*, 4(4), 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

阿部学、高田久美子、河宮未知生、渡辺真吾：MIROC-ESM の将来気候変化予測にみられるシベリアでの積雪アルベドフィードバックにおける植生マスキング効果、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月 26 日、幕張メッセ国際会議場（千葉県千葉市）

Manabu Abe, K. Takata, M. Kawamiya, S. Watanabe: Effect of snow-albedo feedback on future strong warming in boreal forest region of northern Eurasia in MIROC-ESM, the Sixth Symposium on Polar Science, 2015 November 19, National Institute of Polar Research (Japan, Tokyo)

阿部学、高田久美子、河宮未知生、渡辺真吾：MIROC-ESM の将来予測実験におけるユーラシア北部の春季気温上昇と積雪変化の関係、日本気象学会 2015 年度秋季大会、2015 年 10 月 30 日、京都テルサ（京都府京都市）

阿部学、高田久美子、河宮未知生：将来気候変化予測におけるユーラシアの積雪変化と大気循環への影響、日本気象学会 2014 年秋季大会、2014 年 10 月 23 日、福岡国際会議場（福岡県福岡市）

阿部学、野沢徹、小倉知夫、高田久美子：CMIP5 気候モデルの北半球の積雪に関する再現性検証、第 4 回極域科学シンポジウム、2013 年 11 月 15 日、国立極地研究所（東京都立川市）

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 学 (ABE, Manabu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・統合的気候変動予測研究分野・技術副主任
研究者番号：5 0 3 7 7 9 8 3