

5. 温暖化シミュレーションにみる雪氷と気候

保 坂 征 宏*

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による第4次評価報告書 (AR4) が2007年5月に公表された (IPCC 2007)。その第1作業部会レポートでは、「気候システムの温暖化には疑う余地はない」とし、その根拠の1つとして「雪氷の広範囲にわたる融解が観測されている」ことが挙げられた。

このように雪氷には、温暖化のシグナルを測る指標として扱われる側面がある。のみならず、雪氷は概してアルベド (太陽放射の反射率) が高いため、温暖化に伴う雪氷の減少によって地表面での太陽放射吸収が増加し、その結果としてさらに温暖化は加速されることになる (アイス・アルベドフィードバック)。冬季北半球高緯度の昇温は顕著であるが、雪氷がその影の主役であることはよく知られるところである。気候モデルの開発においても、雪氷、とりわけ海水分布の表現は、最も調整が難しいものの1つになっているが、それはこの強い正のフィードバックのためである。

ここでは、温暖化シミュレーション等における陸上積雪、海水の表現に注目する。まず IPCC の AR4 を基に、世界の最新の気候モデルにおける、雪氷圏の温暖化にともなう変化について示す。次いで、気象研究所のモデルによる計算結果を紹介する。

2. IPCC 第4次評価報告書と気候モデルによる予測結果

IPCC の AR4 作成に先立ち、世界の約20機関の気候海洋結合モデル (気候モデル) による過去再現・将来予測実験が行われた¹⁾。あらかじめ IPCC がいくつかの設定 (シナリオ) を決め、それにしたがって19世紀半ばから23世紀末までの数値積分が行われた²⁾。その

¹⁾ 今は CMIP3 と呼ばれる。

²⁾ いくつかの機関は複数のモデルを用いて計算を行った。また、積分期間がより短いモデルもある。日本からは、気象研究所 (MRI_CGCM2.3.2) と東大気候システム研究センター (CCSR) / 国立環境研究所 / 地球環境フロンティアのグループ (MIROC_hires, MIROC_lowres) が計算結果を提出した他、米国大気科学研究センター (NCAR) のモデルである CCSM3 の計算の一部を電力中央研究所が実施した。

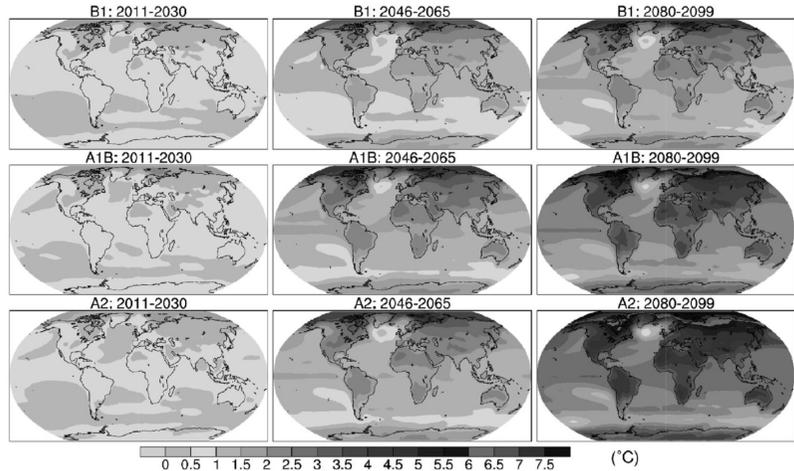
* 気象研究所気候研究部。mhosaka@mri-jma.go.jp
© 2008 日本気象学会

膨大なデータは、申請した多数の解析グループに提供され、1年余をかけて解析ならびに論文執筆がなされた。IPCCのAR4第1作業部会では、これらの研究成果を最新の気候モデルによる温暖化予測実験の解析結果として位置付けて、観測的研究や従来得られてきた知見と融合する形で、レポート「物理科学的基礎」を作成し、公表した。シミュレーション予測結果と観測との対応、モデルによる予測結果同士の一貫性、理論の裏づけなどをもとに、確からしさの情報も付

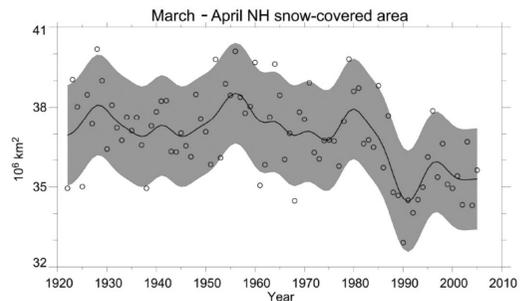
加したものになっている。第1図はCMIP3のモデルの積分結果を平均した、シナリオ・年代別年平均気温20世紀末からの変化の分布である（IPCC 2007）。

この図から、温暖化シナリオや将来の年代によって量的に多少の違いはあるものの、北半球高緯度の陸域では特に冬季に地上気温が大きく昇温することがわかる。同様の降水量の変化（図なし）からは、水蒸気量変化に伴って高緯度域では季節によらず降水が増加すること、などが、モデル平均結果として全般的に見られる結果であることがわかる¹³。なお、高緯度地域において、南極の周り、特にロス海周辺では昇温量が相対的に小さいこともほぼ共通に見られる特徴である。このような平均量の外、たとえば霜が降りる日数が減るなど、いわゆる極端現象においても温暖化の影響は見られることが示されている。

陸上の積雪に関しては、高緯度地域の降水量の増加は積雪の増加要因だが、昇温は融解・消耗の増加や降雪の降水に対する割合の減少により、積雪の減少要因である。これにさらに低気圧の経路の変化など大循環場の変化の効果が加わって、積雪が増加するか減少するかが決まる。積雪の被覆率という観点では、積雪域の縁辺部はもともと地上気温があまり低くない場所で



第1図 CMIP3モデル平均での、年平均地上気温の、20世紀末からの昇温量。単位は°C。左から、2020年ころ、2055年ころ、2090年ころ。上から、B1、A1B、A2シナリオ。IPCC（2007）による。



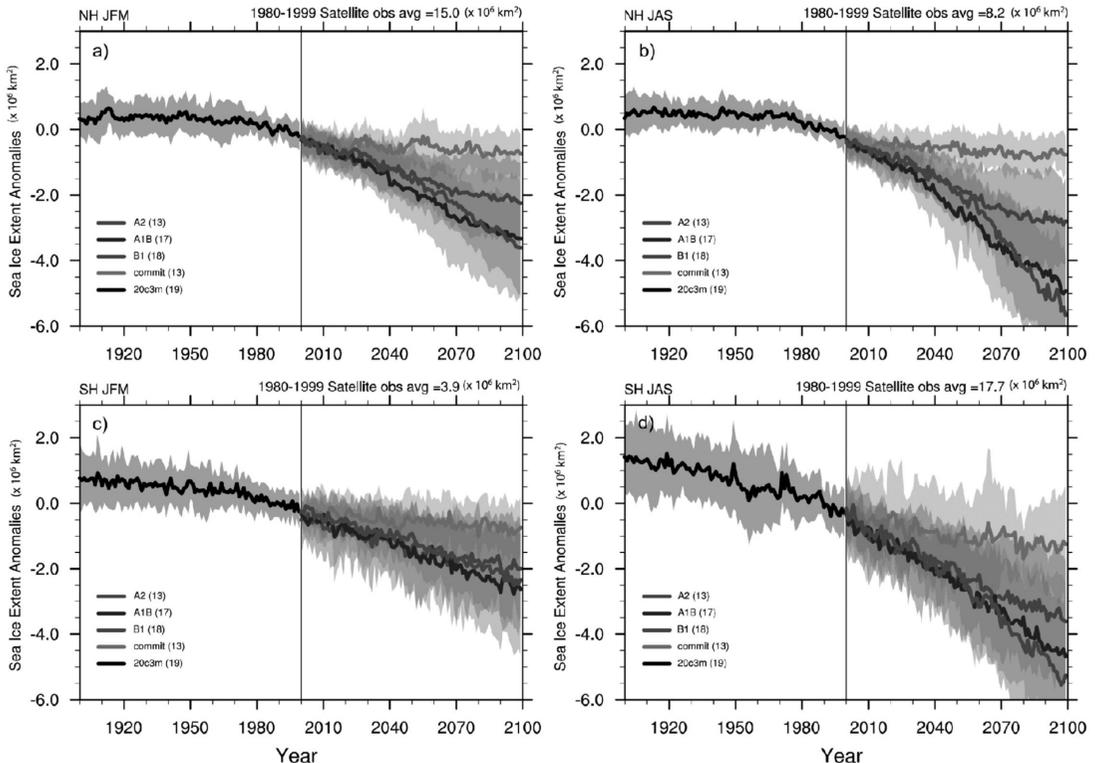
第2図 1920年から2005年までの、北半球の春（3、4月）の積雪被覆率の変化。この20年ほどで5%程度減少している。IPCC（2007）による。

あり、融解などの減少要因がより強く働くため、被覆率が減少すると予測される。実際観測事実でも第2図に示すように積雪被覆率が減少してきている。

緯度や標高が高い非常に寒冷な領域では、前述した増加要因が減少要因を上回って積雪量（積雪水当量）が増加する領域もあると考えられており、過去の観測的研究をみても積雪の減少はあまり報告されていない。

海水の変化に話を移そう。海水面積は、これまでの観測的研究によれば北半球では特に夏季の減少が顕著であり¹⁴、また北極海の海水は薄くなってきている¹⁵のに対し、南半球はむしろ微増していると報告されて

¹³ モデル平均では、個々の低気圧の経路の変化に伴うものなど、個々のモデルにみられる空間方向に細かな分布は打ち消している傾向があることに注意。



第3図 CMIP3モデルによる海水面積の変化予測。上：北半球，下：南半球，左：1-3月，右：7-9月。太い実線はシナリオごとのアンサンブル平均を，ハッチは個々のモデルの結果のレンジを表す。IPCC (2007) による。

いる。気候モデルによる予測は、南半球での微増までは再現していないが、おおむね観測結果を外挿したものになっている。すなわち、温暖化が進行すると北極域・南極域とも海水域は縮小されるが、北極域の海水面積は南極域に比べて減少が速く、それは夏に顕著である、というものである。21世紀後半には晩夏に北極海の海水がなくなると予測するモデルもある。また、海水は初期に厚いところほど薄くなるという予測傾向から、海水の体積は海水の面積よりも減少率が大きいと予測されている。

高緯度での気候変化の全般的な傾向はここまでに示したとおりである。しかし、第3図からも読み取るこ

とができるように、定量的には、また、より細かい地域的には、気候モデルの持つバイアスや、モデル間の結果のバラツキが大きく、予測の不確実性が大きい。

3. 気象庁・気象研究所全球20 km メッシュ大気モデルによる積雪の変化

気象庁と気象研究所は20キロメッシュ大気大循環モデルを用いて、20世紀末と21世紀末の条件のもとで10年を超える気候シミュレーションを行った¹⁶。このような高解像度全球大気モデルによる長期シミュレーションは当時も現時点でも他になく、その結果はCMIP3による予測結果に対して有益な補足情報を与えるものである¹⁷。特に、積雪のように地形や高度分

¹⁴ 20世紀後半の20年で、年平均海水面積は、南半球では10年あたり約0.5%増加、北半球では約3%減少している。IPCC (2007) による。

¹⁵ 潜水艦等による観測に基づく研究によれば、1980年代後半から90年代後半にかけて、北極海中央部で1 m 近く減少したという観測がある。IPCC (2007) による。

¹⁶ 平成14-18年度文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト」の「高精度・高分解能気候モデルの開発」のもと、地球シミュレータを用いて行われた。

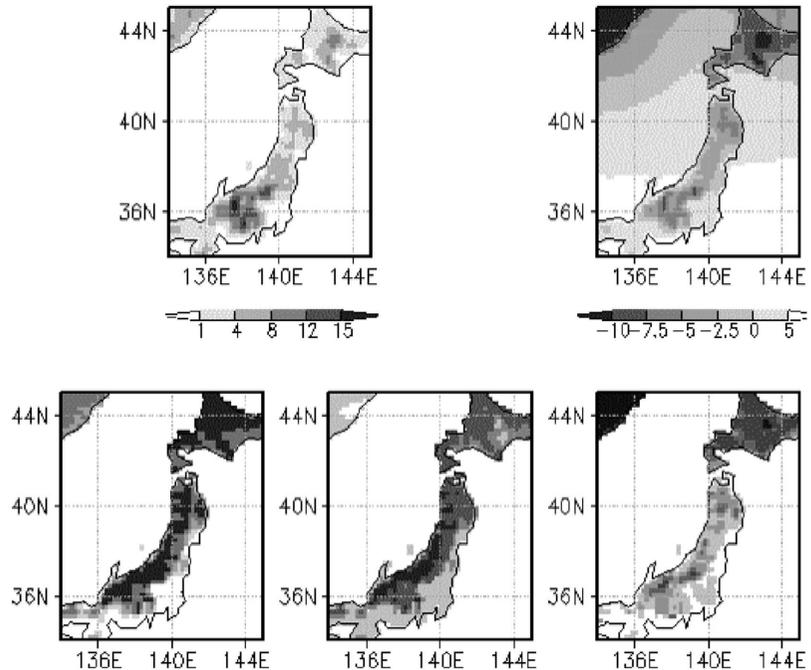
¹⁷ CMIP3ではもっとも高解像度のモデルでもMIROC_hiresの110 kmメッシュである。

布に敏感な物理量については高解像度のメリットは大きい。

まず短期予測の性能を気象庁の現業天気予報システムで精度を検証したのち、降水や積雪被覆率の季節進行も、観測される気候値におおむね一致するものであることを確認した上で、温暖化に伴う積雪の変化を調べた。北半球の積雪被覆率をみると、季節によらず積雪の境界領域で減少したのに対して、積雪量はかなり広い領域で減少するものの、高緯度の厳冬期には増加した。降水・降雪の変化を見ると、冬季の降水量は高緯度域のほとんどで増加している一方、温暖化に伴って降雪の占める割合は減少しており、降雪増加域は厳寒域である東シベリアやアラスカや北西カナダなどの厳冬期の積雪増加域に限られている。

日本における積雪の変化を第4図に示す。日本は十分低緯度にあり、積雪量はほぼ全域で減少している。ここで減少量の大きいのは、20世紀末に積雪量が多かった地域である(第4図下中と同下左)が、積雪の変化率(第4図下右)で減少の度合いが小さいのは、現在の気温(第4図右上)が低い北海道や脊梁山脈である。こうした傾向は、ヨーロッパでも同様に見られる。ただし、北米中部ではストームトラックの位置の変化に伴う降水域の変化の影響が大きく、積雪量の変化は必ずしも明瞭には見られなかった。

この結果は、積雪の予測では気温の再現性も重要であること、また、そのためには細かい地形が十分表現できる高解像度モデルの情報が必要であることを示している。また北米での変化は、寒気の吹き出しや低気圧の経路の変化のような、現象に立ち戻った調査の必要性も示している。



第4図 左上：モデル標高(単位：100 m)，右上：20世紀末条件での2月の地上気温(単位：°C)。下は積雪水当量で、左から、20世紀末の積雪水当量(単位：kg m⁻²)，その温暖化に伴う変化量(単位：kg m⁻²)，及びその変化率(単位：%)。Hosaka *et al.* (2005) による。

4. 気象研大気海洋結合モデルにおける海水分布の変化

北極海の海水被覆率に関しては、Stroeve *et al.* (2007) が20世紀末の20年ほどの間に観測された海水の減少がCMIP3モデルによる予測よりも速いことを示した他、2007年の夏には著しい減少が衛星観測された。こうした傾向が気候モデルで再現できていない理由としては、エアロゾルの影響や、海水モデルにサブグリッドスケールの現象の効果がきちんと採り入れられていないこと、北極海の海洋循環が変化したこと、などがその可能性として挙げられている。CMIP3に提出された気象研究所の気候モデルの計算でも観測に比べて減少傾向が緩やかであるが、今後予測以上に減少が速く進む場合にどういったことが起こりうるのかは調べておくべき問題であろう。

ここでは気象研究所で現在改良中の大気海洋結合モデルMRI-CGCM3を用いた、現在気候条件での感度実験の結果を紹介する。現在のモデル化の不確定性の範囲内で、標準実験での設定に比べて、海水のアルベドを小さく、また海水が凍りにくくなるようにして長

期積分（以下、海水減実験と呼ぶ）を行い、標準実験の結果と比較した。

海水減実験では海水被覆率が大きく減少しており、その差の大きいところでは当然ながら地上気温は高くなっている。それに加えて、ベーリング海から北日本にかけては、海水は夏にはもともとないにもかかわらず、標準実験に比べて地上気温が1～2°C高い。海水減実験では、この領域において冬から春にかけて海水被覆率が減少し、その高温状態は海水が張っている冬季から持続している。高アルベドの海水が減って日射が海洋により多く吸収されるようになった影響が、季節を越えて夏まで残っているためであると考えられる¹⁸。

そしてこのことは、温暖化に伴い、現在の予測結果以上に北半球夏の北極海で海水が張らなくなり、冬から春先にかけてのオホーツク海の海水面積も同様に予測以上に速く減少するとすれば、北日本の春から夏における昇温量が現在の予測値よりも大きくなる可能性を示唆している。

5. おわりに

温暖化に伴い雪氷は、氷アルベドフィードバックで

温暖化を加速しつつ、南極やグリーンランド内陸部、厳寒期のシベリア東部・北米北部などの厳寒域を除いた、現在の辺縁部を含む大部分で減少すると予測されている。この傾向は確度の高い予測結果として受け入れるのが自然だろう。

しかしながら、寒冷圏のモデリングにはまだまだ不確定性があり、改良の余地がある。観測的研究とリンクしながら、また、過去や現在の再現性能を確認しながら、再現精度・予測精度をあげていく努力が必要である。

参 考 文 献

- Hosaka, M., D. Nohara and A. Kitoh, 2005 : Changes in snow cover and snow water equivalent due to global warming simulated by a 20 km-mesh global atmospheric model. SOLA, 1, 93-96.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. 996 pp.
- Stroeve, J., M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos and M. Serreze, 2007 : Arctic sea ice decline : Faster than forecast. Geophys. Res. Lett., 34, L09501, doi : 10.1029/2007 GL029703.

¹⁸ ただし、大気再解析の結果を見る限りでは、オホーツク海の海水面温度と、その後の温度のアノマリとの間にあまりよい相関は見られない。