[共同研究成果]

気候モデルデータのダウンスケーリングによるヤマセの将来変化

島田照久¹ 沢田雅洋² 吉田龍平¹ 岩崎俊樹¹ 1 東北大学大学院理学研究科 2 東京大学大気海洋研究所

気候モデルデータのダウンスケーリングによって、東北地方の冷夏の要因となるヤマセの将来 変化を調べた結果、地球温暖化によって夏季の平均気温が上昇した後も、将来気候の平年偏差で みるとヤマセが出現することがわかった。ただ、ヤマセの頻度と強度はやや減少する。このダウ ンスケーリングデータセットを利用して、東北地方の夏季気候の将来変化とその影響評価につい ての研究を進めている。

1. はじめに

東北地方の夏季気候は、間欠的に発達するオホーツク海高気圧から北日本の太平洋側に吹きつ ける冷たい東風(ヤマセ)の影響を大きく受ける。この東風とともに、背の低い(<1000m)下層の冷 気が北日本のオホーツク海側と太平洋側に押し寄せて低温をもたらす。さらに、下層雲や霧が低 地を覆い、放射冷却により低温を維持する。一方、ヤマセの発生頻度や低温の程度は、オホーツ ク海高気圧の消長に合わせて、経年変動が顕著であり、卓越したヤマセは夏季の異常気象(冷夏) と言われることもある。ヤマセのこのような特徴は、地域気象・気候、そして社会活動(農業、海 洋安全、航空安全等)に影響を与えるため、ヤマセの理解は、特に東北地方の冷害の歴史[1]を背 景に、社会的に重要な課題でありつづけている。

卓越したヤマセが異常気象と言われる大きな要因は、ヤマセの発生頻度や低温の程度の経年変 動が大きいことにある。しかしながら、ヤマセの持続期間や低温の程度に経年変動があるとはい え、毎年繰り返し発生しているという事実が重要である(例えば、2013年は、7月17-23日にかけ て東北地方の太平洋側で、顕著な低温低日射の状態が続いた)。また、防災や避難等に関わる台風 や集中豪雨などの顕著現象とは対照的に、ヤマセとその影響には、"日々の生活、業務、操業のな かで対応していかなければならない"という面が強いと言える。例えば、農業にとっては、毎年 発生する数日程度のヤマセによる低温期が、農作物の重要な成長期に当たるかどうかが大きなリ スクとなっている[2]。また、下層雲と霧の発生は、船舶の航行や航空の安全に関わる[3]。一方、 海上の業務に従事する人々にとってヤマセは時化と認識されており、特に沿岸域では、ヤマセが 地形の影響を受けて局地的強風を発生させ、それに伴う高波高域が出現する[4]。このように、北 日本の気象・気候・海況に大きな影響を与えるヤマセについて、顕在化する気候変動に伴うヤマ セの将来変化の理解と影響評価が求められている。

そこで私達は、再解析データや気候モデルデータの力学的ダウンスケーリング(数値気象モデル を用いた再計算によるデータの詳細化のこと。以下、ダウンスケーリングという)によって、東北 地方の夏季気候に重要な役割を果たすヤマセとその将来変化について研究を進めている[5,6]。ダ ウンスケーリングによって、低解像度の気候モデルによる大規模場の計算結果に対して高解像度 の地形等を入力することで、下部境界の状態に大きく依存した小さな現象を解像し、気候予測の 結果に付加価値を付けることができる。北日本の気候について考えてみると、温暖化シミュレー ションを行うほとんどの気候モデルの空間解像度は100kmより粗く、気候モデルではヤマセにと って重要な役割を果たす北日本の地形(脊梁山脈等)を十分に解像することはできていない。そこ で、ダウンスケーリングによって、気候モデルで表現された気候変動が地域スケールではどのよ うに現れるのかを明らかにする。さらに、このダウンスケーリングデータは、起こりうる将来の 気候を想定した気候データ(気候シナリオ)となるため、温暖化の影響評価や適応策の検討、リス ク管理のために活用される。本稿では、これまでの取り組みについて述べる。

2. ダウンスケーリング

気象庁・気象研究所の数値気象モデル(気象庁非静力学モデル JMA-NHM[7])を用いて、再解析デ ータと気候モデルデータを、北日本全体(東北地方と北海道)を含む領域について、10km 解像度ま でダウンスケーリングする。北日本全体を計算領域に含めることによって、北日本の脊梁山脈を 境にした太平洋側と日本海側の気候の対照性や海峡地峡からの日本海側へのヤマセの下層冷気の 流出も考慮することができる。また、今回は長期間の気候データセットを作成することが目的で あるので、ダウンスケーリングする解像度は、計算時間とのトレードオフで決める必要がある。 今回選択した 10km という解像度は、北日本全体の長期積分(現在気候と将来気候)に必要な計算時 間が妥当な範囲でありながら、ヤマセにとって重要な地形(脊梁山脈、山地と平野、海峡や地峡、 半島等)を解像し、地域スケールの解析が可能となる解像度である。実際、20-30km 解像度では、 北日本の脊梁山脈全体は表現できるものの、平野の形状再現や海峡の解像が難しく、標高の過小 評価が著しい。鉛直方向には 38 層設定し、1 時間間隔でデータを出力する。データ作成の対象期 間は、各年の 6-8 月である。

	再解析データ	気候モデルデータ			
データ/	JRA-25/JCDAS[8]	MRI-AGCM3.2S[11]	MIROC5[14]		
モデル					
種類	再解析	大気モデル	大気海洋結合モデル		
期間	1979-2011 年	現在: 1979-2003 年(25 年)	現在: 1981-2000年(20年)		
	(33年)	将来:2075-2099 年(25 年)	将来: 2081-2099年(19年)		
シナリオ	-	SRES A1b	RCP4.5		
解像度	1.25° /6 h	20km/6 h	1.4° /6 h		
ネスティ	2 回	1 回	2回(気象研究所で 20km, 1		
ング		時間にダウンスケーリング			
			されたデータを利用 [15])		
海面水温	NOAA-OISST v2[9]	現在気候: HadISST[12]			
(SST)	(COBE-SST[10]	将来気候: CMIP3の18CGCMの			
	(1979-1981))	平均のトレンドに現在気候の	_		
		経年変動を加算 [13]			

表1ダウンスケーリングの初期・境界条件に用いた再解析データと気候モデルデータ

ダウンスケーリングに用いた気候モデルデータは、気象研究所のグループが開発した超高解像 度全球大気モデル(MRI-AGCM)と東京大学大気海洋研究所/国立環境研究所/海洋研究開発機構が 共同開発した MIROC5 の現在気候と将来気候(21世紀末)である(表1)。MRI-AGCM は現在気候の再 現性を重視した大気モデルで、水平格子間隔は 20km である。MIROC5 は、第5期結合モデル相互 比較計画(CMIP5)に提出された気候モデルの一つであり、気候変動に関する政府間パネル(IPCC) の第5次報告書にその結果が用いられている。同じ仕様で、再解析データ JRA-25/JCDAS を境界条 件とする現在気候データも作成して、現在気候の再現性の評価基準に用いる。以上のようにして 作成したデータセットは、東北地方の地域特性を考慮できる空間解像度(10km)と日変化を解析で きる時間解像度(1時間)を有し、ヤマセの経年変動を現在気候・将来気候ともに扱える長期間の 均質な(同じモデル、スキーム、計算領域)データとなり、このような特徴を持つデータセットは 初めてである。

数値気象モデルによるダウンスケーリングデータの作成は、東北大学サイバーサイエンスセン ターのスーパーコンピュータ SX-9 で行った。各年の 6-8 月の 3 ヶ月分の JRA-25(MRI-AGCM, MIROC5)の2(1)段階のダウンスケーリングにかかる時間は、ノード内の 8CPU(ジョブクラス p8)を 用いた MPI による並列処理で、約 25(12)時間である。この計算を JRA-25 については 33 年分、 MRI-AGCM については計 50 年分、MIROC5 については、計 39 年分実施した。このような長期間の気 候データセットの作成は、スーパーコンピュータの利用によって初めて可能となる。

3. 結果

(1) CMIP5 の気候モデル群における MRI-AGCM と MIROC5 の位置づけ

まず、気候モデルデータそのものを用いて、ヤマセの発生要因となるオホーツク海高気圧の変 動を中心に、CMIP5 の気候モデル群(47 個)における MRI-AGCM と MIROC5 の現在気候(1979-2003 年,6-8 月)の再現性を調べた。その結果、MRI-AGCM, MIROC5 の順で再現性がよく、両気候モデル は、比較的バイアスが小さく、経年変動が JRA-25/JCDAS に近いグループにあることがわかった。 例えば、オホーツク海高気圧が発達した時の空間分布についてもこの特徴が確認できる(図1)。



図1 月平均のオホーツク海高気圧インデックスの1979-2003年の間の上位8事例の海面気圧の 平均場(30-62°N、120-165°E)の比較。(左)JRA-25に対する領域平均バイアスと平均場の2乗平 均平方根誤差。(右)空間相関と差の標準偏差を関連づけるTaylor Diagram。灰色の点は、MIROC5 以外の CMIP5の各モデルの結果で、濃い灰色の点はバイアスが-1hPaから1hPaの間にあるものを 示す。

次に、21世紀末のデータが存在する CMIP5 の気候モデル(39個, MIROC5 を含む)と MRI-AGCM について、オホーツク海高気圧の将来変化を調べた(図 2)。オホーツク海高気圧の発達の指標とし

てよく用いられるオホーツク海高気圧インデックス(オホーツク海での領域平均海面気圧)の変化 を見ると、80%以上の気候モデルがオホーツク海高気圧インデックスの下降を示し、その中に MRI-AGCM と MIROC5 も含まれる。両モデルは、0.2-0.3hPa の下降を示しており、オホーツク海高 気圧インデックスの弱化を示唆するものの、その程度は比較的低い方に位置する。なお、オホー ツク海高気圧インデックスの顕著な増加を示したのは、3つの気候モデルだけである。



図 2 オホーツク海高気圧インデックスの将来変化(将来気候平均と現在気候平均の差)。増加 するものから順に並べた。

一方、MRI-AGCM と MIROC5 のシナリオの違いについて検討した。MRI-AGCM のシナリオは、SRESA1b の排出シナリオであり、今回用いた MIROC5 データのシナリオは、濃度シナリオ RCP4.5 である。 夏季(6-8 月)の気温の将来変化を調べた結果、シナリオは違うものの、どちらのダウンスケーリ ング場においても東北地方の陸上(ドメイン全体)で約 2.9(3.0-3.2)℃の気温上昇がみられた(図 3)。これにより、両気候モデルのデータセットは、「21 世紀末に、北日本の陸上(北日本とその周 辺)の気温上昇が 2.9(3.0-3.2)℃する気候シナリオ」と位置づけることができる。つまり、シナ リオの違いとモデルの気候感度を、気温が 2.9(3.0-3.2)℃上昇する時期の違いに持たせるのであ る。これにより不確実性の原因を一つ減らすことができる。ここで用いる MRI-AGCM と MIROC5 で は、2.9(3.0-3.2)℃の気温上昇を示す時期も一致していることになる。なお、両モデルとも気温 のパターンは、海面水温のパターンを反映しており、MIROC5 の北日本東方の気温極大域は、MIROC5 における黒潮が将来北上していることを示すと考えられる。



図3現在気候(1981-1999)に対する21世紀末(1981-2099年)の6-8月平均の気温の将来変化。(左)MRI-AGCM、(右)MIROC5。

以上の結果より、MRI-AGCM と MIROC5 の特徴は下記のようにまとめられる。1)オホーツク海高 気圧の変動や空間分布に関して、現在気候の再現性のよいモデル群に属し、MRI-AGCM、MIROC5 の 順で現在気候の再現性がよい。2)オホーツク海周辺の海面気圧の将来変化はやや減少となっており、CMIP5の気候モデルの80%と一致する。3)シナリオおよび気候モデルは違うが、21世紀末に 北日本の陸上(北日本とその周辺)の気温上昇は2.9(3.0-3.2)℃で一致している。

(2) ヤマセの将来変化

気温の変動パターンを調べるために、北日本の気象官署に対応する地点のデータを用いて主成 分解析を行った。北日本全体の気温変動(日変化、季節変化、トレンド)を表す第1モード(寄与率 約80%)、南北変動(梅雨前線等の影響)を示す第2モード(寄与率約7%)に加えて、北日本の山地を 境にした太平洋側と日本海側の変動(ヤマセ時に強調される)を示す第3モード(寄与率約3%)が各 データセット間に共通してみられる。図4には、各データセットについて、第3モードの空間パ ターンと寄与率を示す。各データセット間で、地形に依存した同様のパターンが見られ、寄与率 は同じ程度であることがわかる。この結果は、現在気候については気候モデルの再現性の良さを 示す。将来気候については、ヤマセに伴う気温の変動パターンが将来気候においても見られるこ とを示す。また、MRI-AGCM と MIROC5 の各モードの寄与率の将来変化は一致しており、第1モー ドの寄与率は増加し気温のトレンドが強化すること、第2モードの寄与率は減少し北部での気温 上昇が大きいこと、第3モードの寄与率は減少しヤマセが弱化することが示唆される。



図4 気象官署の観測地点における地表気温の主成分解析の第3モードの空間分布(6-8月)。左から、気象官署の観測、JRA-25からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCMからの現在気候と将来気候のダウンスケーリングデータ、MIROC5からの現在気候と将来気候のダウンスケーリングデータを用いた結果を示す。

ヤマセの頻度と強さの将来変化をヤマセインデックスで検証する。ヤマセインデックスには、 津軽海峡の東西気圧差で定義されるものを用い、このインデックスは南東北まで南下したヤマセ をよく表現する[16]。図5には、バイアス補正したヤマセインデックスの頻度分布の将来変化を 示す。現在気候の1標準偏差を越える領域をヤマセ卓越時と考えると、MRI-AGCMでは、低温をも たらす強いヤマセが減少し、MIROC5では、強弱によらず全体的にヤマセの頻度が減少している。 MRI-AGCMとMIROC5の結果を、現在気候と比べると、ヤマセの頻度は1-3%の減少となる(表 2)。 また、ヤマセインデックスの変化は約-0.2hPaである。これは、ヤマセの下層冷気層の気温が上 昇して日本海側との気温差が小さくなることを意味し、高度1500m(1000m)以下で温度一定の下層 冷気を仮定すれば、ヤマセの冷気が0.3℃(0.5℃)上昇することに対応する。



図5ヤマセインデックスの頻度分布の将来変化。 横軸がヤマセインデックス、縦軸がヤマセイ ンデックスの各レンジの変化(%)。青い点線が現在気候の1標準偏差を示す。

表2 現在気候の1標準偏差を越えるときのヤマセインデックスの平均値と頻度

	現在気候	MRI 将来気候	MIROC5 将来気候
平均值(hPa)	4.10	3.89	3.91
(将来変化)	_	(-0.21)	(-0.18)
頻度(%)	16.2	15.2	13.0

4. まとめと今後の方針

本稿では、2つの気候モデルデータのダウンスケーリングを用いた、東北地方の夏季気候に重要な役割を果たすヤマセの将来変化についての研究を紹介した。地球温暖化によって気温上昇した後も、将来気候の平年偏差でみるとヤマセが出現していると言え、下層大気に対する地形の影響は現在気候のものと同様であることがわかった。しかし、ヤマセの頻度と強度はやや減少することがわかった。今後の課題は、この2つのモデルの将来変化の原因がどこにあるのかを検証することである。

一方で、私達の研究グループ内では、今回作成したダウンスケーリングデータを気候シナリオ として用いた影響評価研究も現在進行中である。まず、水稲について、現在の品種別の収量変化 推定を行っており、東北・北海道品種が最大収量となるエリアは北へ移動し、中京品種が東北で 主要品種となる可能性が示されている。また、低温が水稲の生育に影響を及ぼす指標である冷却 量(20℃以下の日平均気温の積算)を調べた結果、21世紀末のある最も低温な年(冷夏年)において も、冷害危険域は北東北沿岸だけに限られることがわかった。これについては、同時に温暖化に よって出穂時期が早まること、出穂後の高温日への移行の問題を含めて検討中である。さらに、 一時的な低温期の影響に加えて、水稲の高温障害への影響の評価にも取り組んでいる。農作物の 病害虫発生予測モデルを用いて、温暖化とそれに伴う夏季気候の将来変化により、病害虫の発生 リスクがどのように変化するかについての研究も進行中である。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実 現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位から有益なご指導とご協力を いただいた。MRI-AGCM3.2Sデータは、気象研究所から提供いただいた。MIROC5データは、環境省 の地球環境研究総合推進費戦略研究開発プロジェクト S-5の成果として提供を受けた。本研究は、 文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」に採択されている課題「東北地域の ヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」(代表 岩崎俊樹)の一環として実施した。

参考文献

[1] ト蔵建治, 2001: ヤマセと冷害: 東北稲作のあゆみ, 成山堂書店.

[2] 下野裕之, 2012:地球温暖化でも冷害はなくならない―そのメカニズムと対策, 農山漁村文化協会.

[3] 青森県青森空港管理事務所, 青森空港: 計器着陸システム CAT-3a: 霧の壁を突き破れ,

http://www.aomori-airport.jp/wordpress/wp-content/uploads/hpb-media/pdf/pamph/pamph_rj sa.pdf.

[4] Shimada, T. and H. Kawamura, 2007: Case study of wind jet transition and localized responses of wind wave along the Pacific coast of northern Japan by synergetic use of satellite and in situ observations, *J. Oceanogr.*, **63**, 953-966.

[5] 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム: http://www.mext-isacc.jp

[6] 島田照久, 沢田雅洋, 岩崎俊樹, 2013: ヤマセ研究のための再解析・気候モデルデータのダウ ンスケーリング, SENAC, 46(1), 9-15.

[7] Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 271–304.

[8] Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
[9] Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax, 2007: Daily High-resolution Blended Analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20**, 5473-5496.

 [10] Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865-879.

[11] Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi,
M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh, 2012: Climate simulations
using MRI-AGCM 3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233–258.

[12] Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P.Rowell, E. C. Kent, A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century *J. Geophys. Res.*, 108, 4407 doi:10.1029/2002JD002670.

[13] Mizuta, R., Y. Adachi, S. Yukimoto, and S. Kusunoki, 2008: Estimation of the future distribution of sea surface temperature and sea ice using the CMIP3 multi-model ensemble mean. MRI Tech. Rep. 56, 28 pp. [Available at http://www.mrijma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_56/56.html.]

[14] Watanabe, M., and Coauthors, 2010: Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312–6335.

[15] 環境省 地球環境研究総合推進費戦略研究開発プロジェクト S-5:
http://www-iam.nies.go.jp/s5/materials/newsletter.html
[16] Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki, 2014: Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 17-35.