

[共同研究成果]

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

島田照久 沢田雅洋* 岩崎俊樹

東北大学大学院理学研究科

(*現在 東京大学大気海洋研究所)

1. はじめに

気候変動の影響が顕在化するにつれて、気候変動研究は、気候変動そのものの解明に取り組むという本来の目的に加えて、気候変動の影響評価に貢献する必要性があると強調されるようになってきている。気候変動の予測には不確実性が伴うが、気候変動の起こりうる範囲を考慮したうえで、気候変動の影響評価が求められるようになってきているのである。このような影響評価は、温暖化適応策や気候変動に起因する様々なリスク管理を推進する上で重要な基礎情報となる。さらに、気候変動の影響評価は、地域レベルで求められるようになっており、それに応える科学的知見が必要である。このような社会的要請に応えるための方法の一つが、気候モデル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)である。つまり、低解像度の気候モデルによる大規模場の計算結果をもとに、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のである。気候モデルの予測から、地域レベルでの気候変動の予測と影響評価を行うためにダウンスケーリングに関する様々なプロジェクトが実施されている[1-4]。

本研究では、気候モデルのダウンスケーリングによって、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の理解を進めることを目的としている。ヤマセとは、夏季に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のことである。背の低い(<1000m)下層の冷気層は、逆転層を伴って安定成層しており、地形の影響を大きく受ける。そのため、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。一方で、オホーツク海高気圧の消長に合わせて、ヤマセの発生頻度や低温の程度は顕著な経年変動を起こす。ヤマセは、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[5]を背景に、社会的に重要な課題でありつづけている。その一方で、気候変動に伴うヤマセの将来変化を予測し、ヤマセの局地気候への影響の理解をさらに進めることが重要な課題となってきている。しかし、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、私達は、再解析データや気候モデルデータのダウンスケーリングによって、長期間にわたって地域スケールの気象・気候解析ができるデータセットを作成し、ヤマセとその将来変化について研究を進めている[2]。本稿では、これまでの取り組みの概要について述べる。

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(非静力学モデル JMA-NHM [6])を用いて、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(図1)。北日本全体を計算領域に含めることによって、ヤマセの影響が顕著な北日本の太平洋側だけに着目する

のではなく、北日本の太平洋側と日本海側の気候の対照性を明らかにすることができる。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(現在気候から将来気候まで)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。

今回、作成したデータセットは次の通りである。まず、再解析データを境界条件とする現在気候データを作成した(1979-2011 年)。用いたデータは、再解析データ JRA-25(1.25 度格子)[7]と 0.25 度格子の海面水温[8](1979-1981 年は、COBE-SST[9]を用いた)である。10km にダウンスケーリングを行うために、30km 解像度の計算領域を介し、2 回のネスティングを行う。次に、気候モデルデータをダウンスケーリングした。今回用いたのは、気象研究所のグループが開発した水平解像度約 20km (TL959)鉛直 60 層の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM) によるタイムスライス実験データである。現在気候(1979-2003 年)、将来気候(2075-2099 年)の各 25 年間を解析対象とする。温室効果気体の濃度は、SRES A1B シナリオに基づいている。下部境界条件の海面水温は、現在気候実験では、英国ハドレーセンターの HadISST データセットを用いている。将来気候実験については、第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) の 18 の大気海洋結合モデルの平均から作成されており、線形トレンドを除去した後の経年変動については、現在気候の経年変動に置き換えられている[10]。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(1h)を有し、ヤマセの経年変動を扱える長期間(25, 33 年)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。

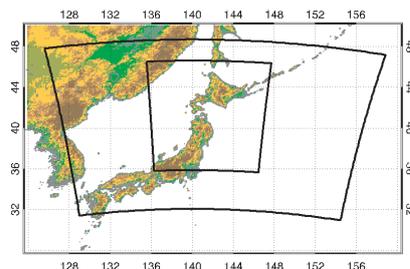


図 1 モデルの計算領域(外側が 30km 解像度、内側が 10km 解像度)。

数値気象モデルによるデータ作成は、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)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を利用することで可能になった。

3. 解析事例

(1) ダウンスケーリングの効果

まず、空間解像度の観点からダウンスケーリングの効果を見てみる。ヤマセを特徴づけるインデックス(ヤマセインデックス) [11]を用いて、ヤマセインデックスが1標準偏差を越える時(つまり、ヤマセが卓越する時)の6-8月の地表気温の気候平均と偏差を図2に示す。ここでは、稚内と仙台の気圧差で定義され、ヤマセ卓越時の北高型の気圧配置をよく表すヤマセインデックス[12]を用いた。再解析データ JRA-25(図2左)の1.25度格子の解像度では、オホーツク海からの冷気が日本列島とユーラシア大陸の東側に沿って舌状に伸びていることがわかる程度であるが、10km場(図2右)では、北海道から北東北にかけて山地の東側で低温偏差が大きいことがわかる。つまり、10kmの解像度のデータでは、北日本の主要な地形を考慮した局地気候が解析可能であると言える。一方で、時間解像度の違いを見てみる(図3)。ダウンスケーリングによって計算された1時間毎の八戸の気温は、気温の日変化とともに、ヤマセ卓越時(下層雲量が多いときに対応)に気温の日振幅が減少する様子が再現されている。このような特徴を、6時間間隔のJRA-25データから解析することは難しい。つまり、ダウンスケーリングにより時間解像度も改善され、ヤマセに起因する日周期の変動を考察することができる。例えば、日変化の周期帯のウェーブレットパワーが、ヤマセのよい指標となることを示した[11]。

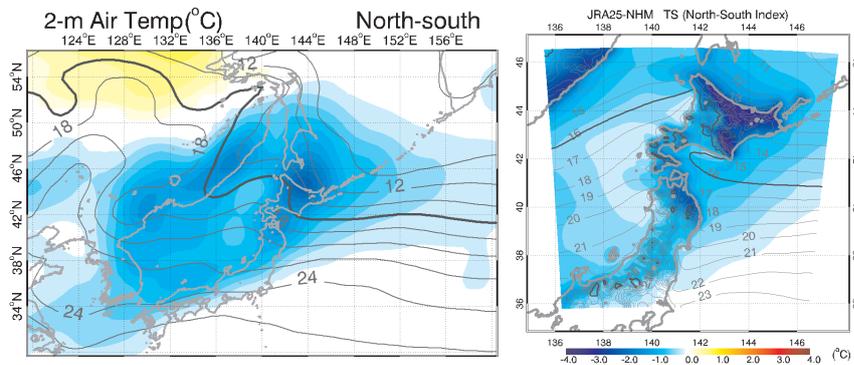


図2 ヤマセ卓越時の気候平均の気温分布(コンター)と年間偏差(カラー) (6-8月, 1979-2011年)。(左) JRA-25 と(右) 10km ダウンスケーリングデータ。

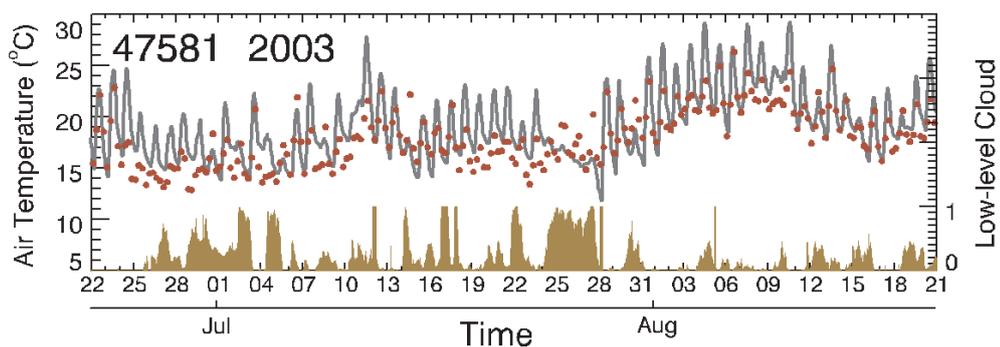


図3 八戸の気象官署に対応する格子の10kmデータの1時間毎の気温(灰色実線)とJRA-25の6時間毎の気温(赤点)(2003年)。下層雲量を合わせて示す。

(2) 気温の変動

現在気候の再現性と将来の気温上昇を確認するために地表気温をデータセット間で比較した。図4には、八戸について、各データセットのヒストグラムと、観測値に対するQ-Qプロットを示す。現在気候のデータセット(JRA-25とMRI-AGCM)は観測に対しやや高温のバイアスを持つが、分

布形はほぼ一致することが確認できる。将来気候の気温は、夏季平均では現在気候よりも 3.2°C 上昇するが、将来気候の気温のヒストグラムの全体の形状は現在気候のものに近い。高温バイアスの原因の一部は、MRI-AGCM で用いられた海面水温の解像度の問題、雲物理過程の解像度依存性にあることがわかっている。

各データセット間で気温の頻度分布には違いが見られるものの、ヤマセに伴う気温の変動パターンを検証してみると、各データセット間でよい一致が見られる。図 5 には、各データセットについて、気象官署の観測点における気温の主成分解析による第 3 モードの空間パターンを示す。北日本全体の気温変動を表す第 1 モード(寄与率 80%)、南北変動パターンを示す第 2 モード(寄与率 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パターンを示す第 3 モード(寄与率 3%)が各データセット間に共通してみられる。このモードは、ヤマセ卓越時に特に強調される[11]。この結果は、現在気候の再現性の良さを示すとともに、ヤマセ卓越時の気温変動パターンが将来気候データにおいても見られることを示す。ただ、MRI-AGCM の結果では、福島から茨城にかけては、日本海側と同符号になっており、気候モデルではヤマセによる冷気の南下の表現が弱いことが示唆される。

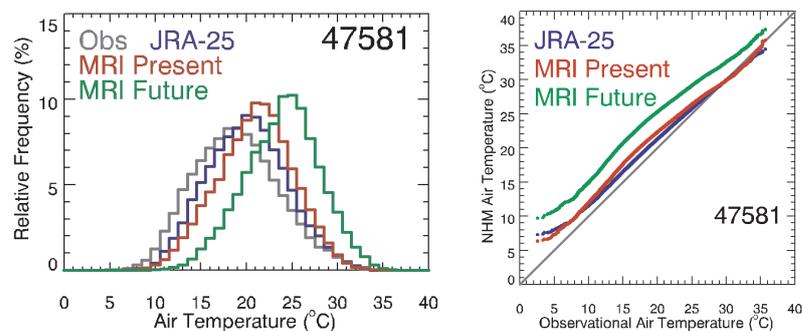


図 4 八戸における気温のヒストグラムと観測に対するモデルの気温の Q-Q プロット(6-8 月)。気象官署における観測(灰色)、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ(青)、MRI-AGCM からの現在気候(赤)と将来気候(緑)のダウンスケーリングデータ。現在気候については 1979-2003 年で共通で、将来気候は 2075-2099 年である。

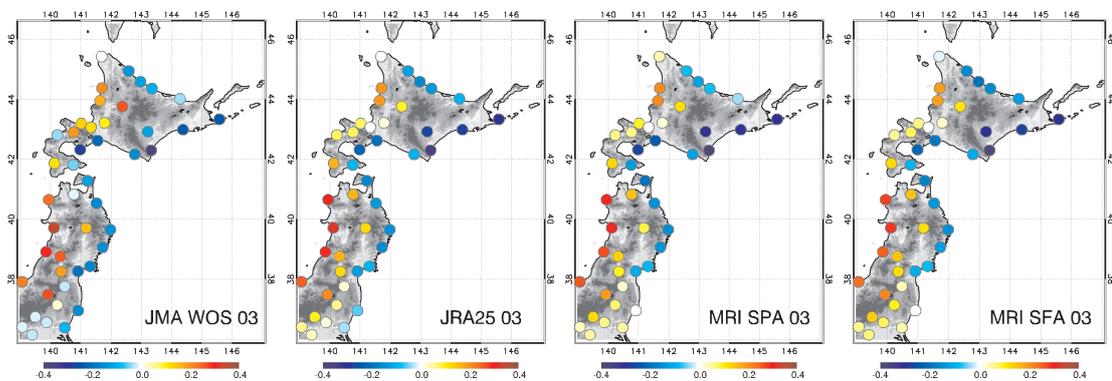


図 5 気象官署の観測地点における気温の主成分解析の第 3 モードの空間分布(6-8 月)。左から、気象官署の観測、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCM からの現在気候と将来気候のダウンスケーリングデータを用いた結果を示す。

(3) ヤマセの将来変化

ヤマセが卓越する頻度が現在気候と将来気候でどのように違うかを、ヤマセインデックスを用いて検証した(図 6)。ここでも、ヒストグラムと観測に対する Q-Q プロットを示す。ヒストグラムの分布は各データセット間でほぼ一致し、極値にわずかな違いがみられるものの変動幅がほぼ同じであることがわかる。実際に、ヤマセ卓越時の海面気圧を比較してみる。図 1 と同様に、ヤマセインデックスが、1 標準偏差を越えるときのコンポジット場を作成した(図 7)。海面気圧の分布は、MRI-AGCM と JRA-25 からダウンスケーリングした現在気候、MRI-AGCM からダウンスケーリングした現在気候と将来気候は、ともに北高型の気圧配置を示す。上記の結果は、MRI-AGCM の現在気候の再現性の良さを示すとともに、気温上昇した将来気候においても、北高型の海面気圧分布が現在気候と同様に出現することを示す。つまり、ヤマセは将来気候においても現在気候とほぼ同じ頻度と強度で発生していると言える。ただし、将来気候と現在気候の差を詳しく見ると、将来気候においては、北日本付近では、約 1hPa の気圧傾度の弱化が示される。一方、地表気温分布についても、将来気候の平年偏差にしてみると、図 1 右にみられるようなヤマセ卓越時の気温分布が出現することがわかった。しかし、地形の東側の低温偏差は、現在気候に比べ 0.2℃ほど小さくなっていることを確認しており、ヤマセの弱化を示唆する。

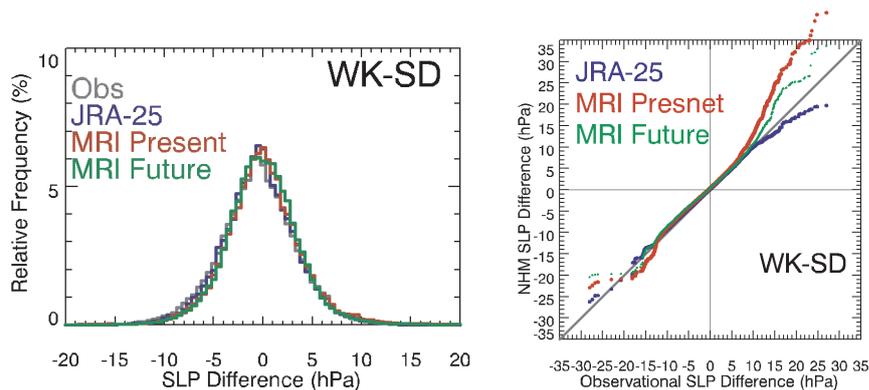


図 6 ヤマセインデックス(稚内と仙台の海面気圧差)のヒストグラムと観測に対するモデルの Q-Q プロット(6-8 月)。気象官署の観測(灰色)、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ(青)、MRI-AGCM からの現在気候(赤)と将来気候(緑)のダウンスケーリングデータ。

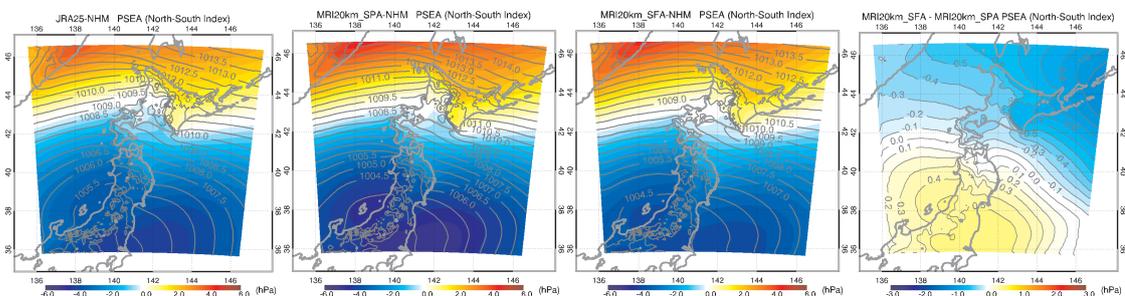


図 7 ヤマセ卓越時の海面気圧のコンポジット(コンター)と各データセットの気候平均からの偏差(カラー)。左から、JRA-25 からのダウンスケーリングデータ、MRI-AGCM の現在気候と将来気候からのダウンスケーリングデータ。右端は、MRI-AGCM の将来気候と現在気候の差である。

4. まとめと今後の方針

本稿では、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を解析するために、再解析データと気候モデルデータから 10km にダウンスケーリングしたデータセットの概要と解析結果を報告した。ダウンスケーリングにより、北日本の主要な地形を解像でき、日変化が表現できるデータセットを現在気候と将来気候について作成することができた。そして、MRI-AGCM の将来気候データでは、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見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。今後は、ヤマセの影響の地域性や顕著なヤマセ事例について解析する予定である。また、今回作成したデータセットは、その長所を活かして、例えば、農業気象分野における気候変動の影響評価(生育予測モデルへの適用等)への応用が期待される。

一方で、気候モデルによる将来気候の不確実性を考慮するために、別の気候モデルのダウンスケーリングを行うことを予定している。さらに、多数の気候モデルの中で、ダウンスケーリングに用いた気候シナリオと気候モデルの位置づけを把握することが重要である。ヤマセの再現性においても、気候モデルの再現性の差が大きいことが示されている[13]。ここでは、最新の気候モデルデータを用いて、オホーツク海南部の領域(東経140-155度、北緯45-50度)の平均海面気圧(オホーツク海高気圧の消長の指標となる)について、7月の統計(2075-2099年)を気候モデルごとに比較してみる(図8)。これらの気候モデルは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次報告書に用いられる、第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の気候モデルのうち、本稿作成時に入手可能なものである。ここでは、CMIP5 に採用されている気候変動予測シナリオ(RCP: Representative Concentration Pathways)のうち、RCP4.5 のデータを用いた。気候モデル間で、平均値の差は最大約7hPaにもなり、変動幅の違いも大きいことがわかる(RCP8.5でも同様な傾向を示す)。MRI-AGCMは、この中ではオホーツク海高気圧の気圧が高い方から11番目に位置する。この位置は、現在気候の比較においても同じで、かつ再解析データJRA-25の結果に最も近いことを確認している。現在、これらの気候モデルの比較や解析利用が世界中で進んでいる。今後、各モデルの特徴(現在気候の再現性や気候感度)が明らかになるにつれて、ダウンスケーリングに利用した気候モデルの位置づけがより明確になってくると考えられる。

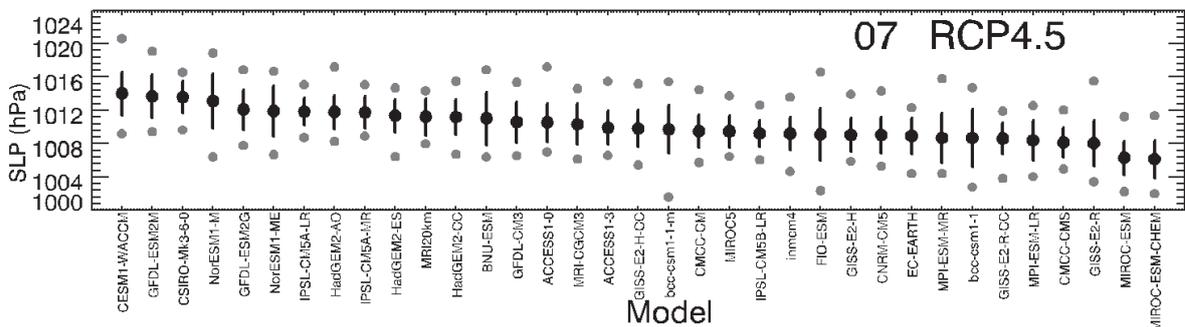


図8 CMIP5 のRCP4.5シナリオを用いた気候モデルとMRI-AGCM(図中のMRI20km)から求めた7月平均のオホーツク海南部の領域平均海面気圧の2075-2099年の統計。黒丸と棒が平均値と±1標準偏差、灰色の点が、最大値と最小値を示す。左から平均値の大きい順に並べた。

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。気候モデルデータは、気象研究所から提供いただいた。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] 環境省環境研究総合推進費 S-8 「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」
http://www.nies.go.jp/s8_project/index.html
- [2] 気候変動適応研究推進プログラム <http://www.mext-isacc.jp>
- [3] ENSEMBLES project <http://www.ensembles-eu.org>
- [4] North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP)
<http://www.narccap.ucar.edu/index.html>
- [5] 卜蔵建治, 2001: ヤマセと冷害: 東北稲作のあゆみ, 成山堂書店.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Murakami, H. and B. Wang, 2010: Future Change of North Atlantic Tropical Cyclone Tracks: Projection by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model. *J. Climate*, 23, 2699–2721.
- [11] Shimada, T., M. Sawada, and T. Iwasaki, Indices of cool summer climate in northern Japan: Yamase indices, in submission.
- [12] Kanno, H., 2004: Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in northern Japan from 1982 onwards, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 711-724.
- [13] Endo, H., 2012: Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 123-136.