

# 20km 格子地域気候モデルによるヤマセ型低温の再現性と将来予測

遠藤洋和<sup>1)</sup>、蒔苗仁、森浩俊<sup>2)</sup>、倉橋永<sup>3)</sup> (仙台管区气象台)、栗原和夫 (気象研究所)

## 1. はじめに

気象庁は平成17年に「温暖化予測情報第6巻」(以下、気象庁(2005))において気象研究所が開発した解像度20kmの地域気候モデル(RCM20)を用いた、地球温暖化に伴う日本の気候変化の予測結果を公表した。気候変化予測および現在気候再現精度の検証は、日本域を7地域に分け気温および降水量の地域平均値に対して行われた。しかし、20kmという高解像度を考慮すると、より詳細な地域での利用可能性を検討することも意味があると考えられる。一方、各地で特徴的な気象現象の変化も大きな関心事であるが、モデル内での再現性が十分に検証されており、予測結果もまだ検討されていない。このため、仙台管区气象台は平成17～18年度に気象研究所との地方共同研究を行い、モデルの細かい地域ごと再現性検証や将来予測結果の解析を行った。この中で、東北地方の夏季の気候変動で重要な因子であるヤマセについても取り上げ、詳細な解析を行った。

## 2. 解析方法など

### (1) 地域気候モデル

地域気候モデル(RCM20)は、気象庁の短期予報現業で使用しているRSM(Regional Spectral Model)(NPD/JMA, 2002)をもとに気象研究所で改良したものである。RSM20の水平解像度は20kmであり、日本付近を領域としている。地球温暖化による日本の気候変化予測を行うために、全球大気・海洋結合モデル(CGCM2.2(水平解像度280km))(Yukimoto et al., 2001)の計算結果を境界条件として、アジア域を領域とする地域気候モデル(RCM60(水平60km格子))をネスティングし、さらにRCM60の結果を境界条件としてRCM20を計算するというダブルネスティングにより予測を行う。

海面水温についてはRCM20では予測されないため、CGCM2.2で計算された海面水温を与える。ただし、CGCM2.2の現在気候の海面水温は観測から若干ず

れるため、バイアス補正を行ったものを用いる。

CGCM2.2による1981～2000年の気候の再現実験の結果を初期・境界条件として、RCM20で1981～2000年の日本付近の詳細な気候の再現実験(現在気候再現実験)を行った。これはモデルの再現性検証のために、観測データのそろっている期間を対象に行うものである。そして、CGCM2.2による2081～2100年のSRES実験(SRES-A2シナリオで想定された温室効果ガス濃度を与え、2100年までの気候をモデルで予測したもの)の結果を初期・境界条件として、RCM20で2081～2100年の日本付近の詳細な気候の予測計算(将来予測実験)を行った。

### (2) 解析方法

現在気候再現実験(1981～2000年)および、将来予測実験(2081～2100年)の結果を解析した。最初に再現実験の結果を観測と比較し、再現性や問題点を把握した後、将来予測結果の検討を行った。

産業等に影響を与えるような、ある程度長期間に渡って影響をおよぼすヤマセを対象としたいため、半月平均および月平均の時間スケールを対象とした。下層雲や霧はヤマセの重要な構成要素であるが、再現性の検証が難しいため、本研究では気温や循環場による検討を行った。

ヤマセは局地性の強い現象であるが、近年は大規模スケールの変動の一部分という見方が強く、Ninomiya and Mizuno(1985)やKodama(1997)は、ヤマセ気流は「北太平洋で発達した海洋性極気団(maritime polar airmass)の南西方向への大規模な流出」であるとの見方を示している。また木村(1995)は「亜寒帯水域で涵養された冷氣団が海上を南下して東北地方にやってくる現象」がヤマセであると述べている。本研究においても、彼等と同様、海洋性極気団の南西方向への大規模な流出を広義におけるヤマセと解釈し、そのような観点から解析を行った。

また、昔から長期予報関係者や農業関係者の間では、冷夏には2種類の型があることが知られている(たとえば、気象庁, 1972; 卜蔵, 2001)。一つはオホーツク海高気圧が発達してヤマセが頻発する通常の冷夏であり、「第1種型冷夏」と呼ばれる。もう一

現所属: 1) 気象研究所、2) 気象庁気候情報課、3) 気象庁数値予報課

つは、オホーツク海高気圧がほとんど出現しないが、移動性擾乱の頻繁な通過による寒気移流でもたらされる冷夏であり、「第2種型冷夏」と呼ばれる。冷夏の及ぶ地域は異なり、前者は東北太平洋沿岸域、後者は日本海側地域や北海道での被害が大きくなる(坪井, 1986)。したがって、本研究では客観的な基準を導入して両者の分類を試みた。本研究では前者を「ヤマセ型低温」、後者を「上層寒気型低温」と名付け、「ヤマセ型低温」に注目して再現性の検証や将来予測を行った。

### (3) データ

解析に用いたデータは、モデル側は、RCM20の地上1.5m気温、RCM20およびRCM60の循環場データである。再現性検証に用いた観測データは、地上気温はAMeDASデータ、循環場はNCEP/NCARの再解析データ(CDAS-DOE: 水平解像度は緯度・経度2.5度格子)(Kanamitsu et al., 2002)である。地上気温については、AMeDAS観測値、モデル格子点値ともに、 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の気温減率で海面高度へ補正し、地形の差を取り除いて評価を行った。

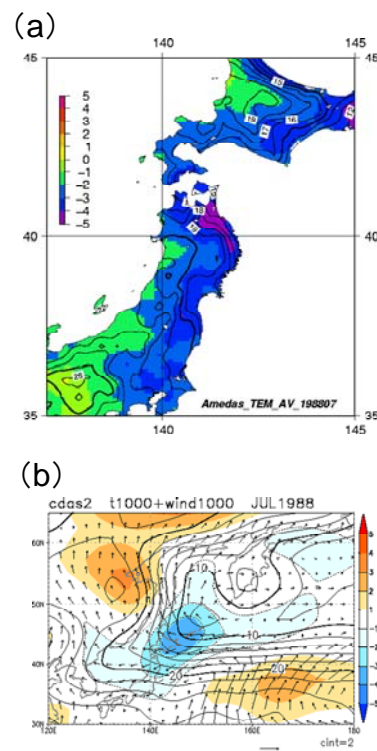
## 3. 観測事実

### (1) ヤマセによる低温事例

ヤマセによる低温の事例として、1988年7月の事例を示す。第1図(a)はAMeDASの気温分布である。北海道のオホーツク海側～太平洋側、東北地方～関東地方の太平洋側では顕著な低温偏差となっており、東北北部太平洋側には年間偏差 $-4^{\circ}\text{C}$ 以下の地域も存在する。東北地方では気温の東西差が大きく、東北北部の太平洋側沿岸は日本海側沿岸よりも $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 低い。また日照時間<sup>1)</sup>は、東北太平洋側で年比42%、東北日本海側で年比85%であり、東北太平洋側では顕著な寡照となっている。

次に循環場の状況を示す。第1図(b)は1000hPa面の風と気温分布である。北海道東部に $-3^{\circ}\text{C}$ 以下の負偏差域が分布し、東北地方は $-2^{\circ}\text{C}$ 以下の負偏差に覆われている。気温と風の分布を併せて見ると、この気温の負偏差域は水平寒気移流の強い地域に対応しており、北太平洋の寒気の南西方向への流出でもたらされているように見える。東北地方には北東風が卓越しており、ヤマセ現象時にみられる風の分布である。NCEP-DOEの1000hPa気温(第1図(b))とAMeDAS気温(第1図(a))を比較すると、興味深い特

徴に気づく。1000hPa気温の等値線の東北地方における走行は、大規模場を表すNCEP-DOE(緯度・経度 $2.5$ 度格子)では東西方向であるのに対し、AMeDAS気温では南北方向である。つまり、ヤマセ現象時の地上気温は顕著な局地性を示し、東北太平洋側地域に低温域が局在化する。このような特徴はNinomiya and Mizuno(1985)によって詳しく示されている。彼らは低温域の局在化の主要因として、東北地方東方海域の海面水温が低いために海洋性極気団が十分な気団変質を受けずに東北地方に到達すること、および東北地方の脊梁山脈の存在を挙げている。



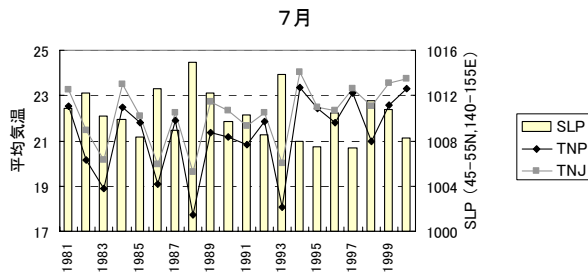
第1図 1988年7月の(a)AMeDAS気温、(b)1000hPa風と気温

等値線は実況( $^{\circ}\text{C}$ )、陰影は年間偏差( $^{\circ}\text{C}$ )。ベクトルは1000hPa風、(b)では年間偏差が負の場合、等値線を点線で示す。ベクトルの長さの基準(m/s)は図の右下に示す。

図は省略するが、1988年7月の500hPa高度の等値線はオホーツク海付近で $\Omega$ 型の分布を示しており、極東域における偏西風の分流が明瞭である。また、地上ではオホーツク海からベーリング海にかけて明瞭な高気圧が存在している。一方、本州の南東海上には低圧域が分布していることから、本州東海上では気圧の南北傾度が強く、オホーツク海方面の冷気が日本へ南下しやすい状況にある。このように、ヤマセは対流圏下層のみに現れる現象ではなく、対流

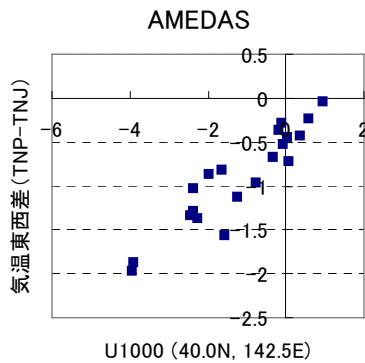
<sup>1)</sup> 地上気象官署の観測値から算出

圏中～上層の偏西風の分流など対流圏全体の大規模場の変動と密接に関連している。



第2図 7月におけるオホーツク海付近 (45-55°N, 140-155°E) の地上気圧と東北北部の平均気温の年々変動

線グラフが平均気温 (°C) で黒色が TNP、灰色が TNJ の地域平均値。棒グラフが地上気圧 (hPa)。横軸が西暦。



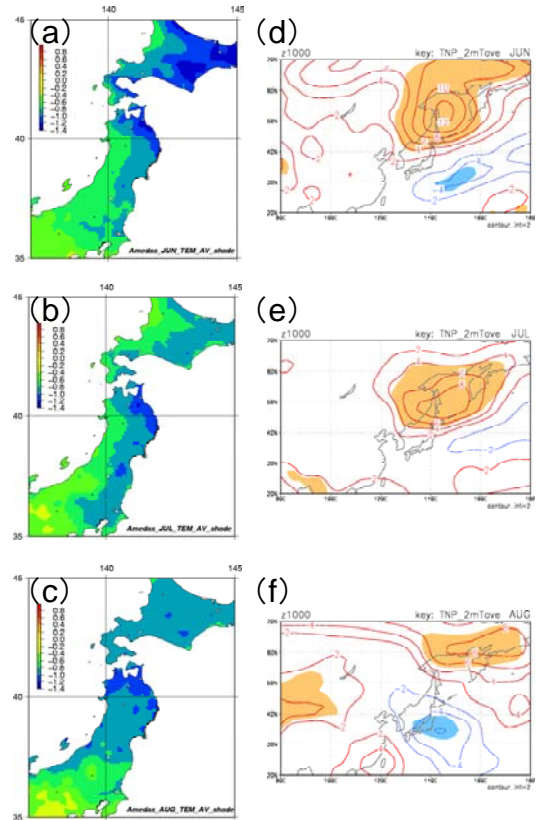
第3図 7月における東北地方東方海上 (40.0°N, 142.5°E) の1000hPa 東西風速と (a) TNP と TNJ の平均気温差

単位は、東西風速は m/s、平均気温差は°C。東西風速は NCEP-DOE、気温は AMeDAS 観測値。

## (2) 年々変動

第2図は7月の東北北部の平均気温とオホーツク海付近(45-55°N, 140-155°E)の地上気圧の経年変化である。東北北部太平洋側における顕著な低温はオホーツク海高気圧の発達と密接に関連していることがこの図から明らかである。また第1図でも示したように、オホーツク海高気圧の発達により海洋性極気団が南下すると、東北北部太平洋側 (以下、TNP) と東北北部日本海側 (以下、TNJ) の気温差が大きくなる傾向が見られる。この関係を詳しく示したのが第3図である。海洋性極気団の流出の強さを表す指標として、横軸に NCEP-DOE の東北地方東方海上 (40.0°N, 142.5°E) の 1000hPa 東西風速を選び、縦軸は TNP と TNJ の平均気温の差とした。両者には

かなり強い線形相関があり (相関係数: +0.93)、東風の強さに比例して TNP 気温は TNJ 気温よりも低下している。



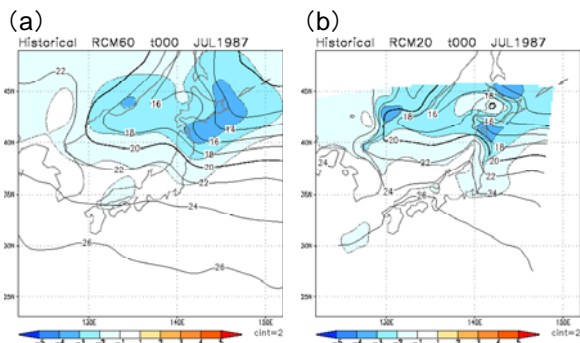
第4図 TNP の平均気温に対する回帰係数

左列は AMeDAS 観測値、右列は NCEP-DOE の 1000hPa 高度。上から順に6月、7月、8月。単位は左図は°C、右図は m。右図の等値線は正偏差 (負偏差) が実線 (破線)。右図の陰影は危険率 5% で統計的に有意な領域。

これまで、7月の気温変動の特徴を示してきたが、6月や8月についてはどうだろうか? 第4図は TNP 平均気温に対する回帰係数分布で、左列が AMeDAS 気温、右列が RCM60 の 1000hPa 高度である。便宜上、回帰係数に -1 を乗じており、TNP 平均気温の年々偏差が -1°C の場合に統計的に現れやすい分布に相当する。6~7月は、気温の低い地域が太平洋側～オホーツク海側地域に偏っているまた、オホーツク海方面の 1000hPa 高度は高い。一方8月になると、異なった特徴が見られ、気温の低い地域は東北北部を中心に東北地方から北海道にかけて広がり、オホーツク海方面の 1000hPa 高度との関係が弱くなる。

以上から、東北日本においては6~7月の気温は、海洋性極気団の南下、すなわちヤマセにより変動するが、8月になるとこれとは別の要因で変動すると考えられる。8月は東北地方直上の 500hPa 高度と地

上気温の関係が強くなることから(図略)、この時期の低温は他の季節と同様、主に対流圏中～上層の寒気(正の渦位アノマリー)の南下によってもたらされると推測される。



第5図 地域気候モデルで再現されたヤマセ型の低温事例

積分7年目の7月。いずれも1000hPa気温で(a)はRCM60、(b)はRCM20。等値線は実況値、陰影は平年偏差。平年偏差が負の場合、等値線を点線で示す。

#### 4. 地域気候モデルの再現性

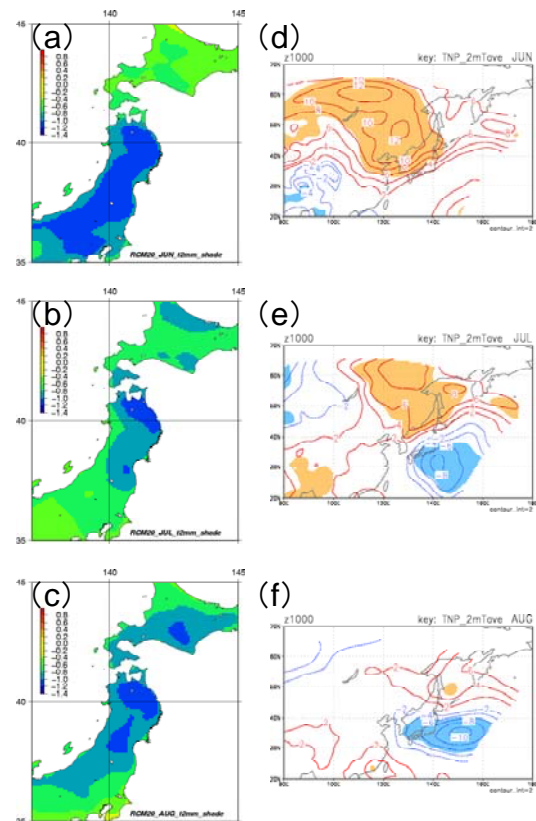
##### (1) ヤマセによる低温事例

第5図は、地域気候モデルに現れたヤマセによる低温事例である(モデルの積分7年目7月)。図は省略するが、RCM60の地上気圧はオホーツク海方面で高く本州の南東海上で低く、実況で見られたヤマセ卓越時のもの(第1図)に良く似ている。RCM60の1000hPa気温を見ると(第5図(a))、北太平洋の海洋性極気団の流出により、北海道～関東の太平洋沿岸や沿海州沿岸を中心に寒気が南下している。高解像度のRCM20では(第5図(b))、北海道～関東の太平洋沿岸および沿海州沿岸における寒気の南下が鮮明となり、東北地方では太平洋側地域と日本海側地域のコントラストが解像されている。以上のことから、地域気候モデルにおいてもヤマセ型低温をもたらす大規模循環場が再現されており、RCM20では東北日本の太平洋沿岸に沿った寒気の南下が再現されている。

##### (2) 年々変動

第6図は、TNPの1.5m平均気温(以下、地上平均気温と略記)に対する回帰係数分布である。左列がRCM20の地上平均気温、右列がRCM60の1000hPa高度である。第4図と同様、回帰係数に-1を乗じている。6月は、気温の低い領域が東北地方以南に広く分布しており、観測で見られた特徴(第4図)とは大きく異なる。1000hPa高度では、大陸方面に正

偏差の中心が位置しており、オホーツク海方面の高度との関係は弱い。一方、7～8月については観測をおおむね再現している。7月は気温の低い地域が東北太平洋側に局在化しているが、8月になると気温の低い地域は日本海側まで広がる。1000hPa高度では、7月はオホーツク海方面に正偏差が分布しており、海洋性極気団が東北地方に流入し易いが、8月になるとそれは不明瞭となる。ただし、モデルでは7月に本州南東海上に1000hPa高度の大きな負偏差が見られる点、7月に低温領域の東北南部以南への広がりが弱い点を、観測との相違点として挙げておく。

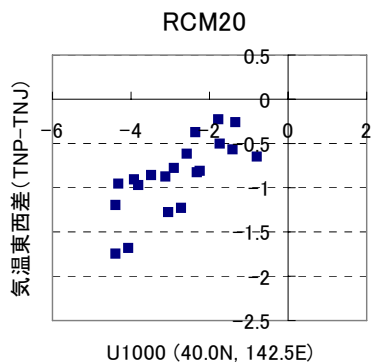


第6図 RCM20の地上1.5m気温、RCM60の1000hPa高度を用いている以外は第4図と同じ

左列はRCM20の地上1.5m気温、右列はRCM60の1000hPa高度

7月の東北地方東方沖におけるRCM20の1000hPa風と、TNPとTNJの平均気温差の関係を第7図に示す。ここで、第3図と比較できるようにRCM20の1000hPa風はNCEP-DOEと同じ解像度(緯度、経度2.5度格子)に空間平均した値を用いている。RCM20においても、観測と同様に(第3図)、東西風に比例してTNPとTNJの気温差が大きくなるという関係が再現されている。散布図の相関係数は0.74、回帰係数は

0.28 であり、どちらも観測(相関係数:0.93、回帰係数:0.35)に比べてやや値が小さいが、太平洋側に局在化した気温低下がモデルでも良く再現されていると言える。



第7図 RCM20 の1000hPa 東西風および地上1.5m 気温を用いている以外は第3図と同じ

ただし、RCM20 の1000hPa 風は、NCEP-DOE と同じ解像度に空間平均した値を用いている。

## 5. 将来予測

### (1) 気温

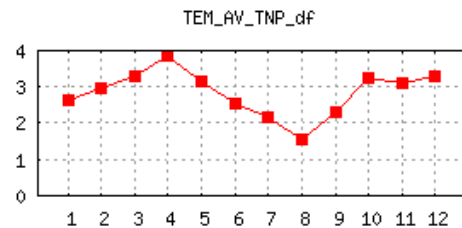
東北北部太平洋側における月平均気温の変化量(将来気候の20年平均—現在気候の20年平均)を第8図に示す。一年を通して上昇すると予測されているが、夏の昇温は他の季節に比べて小さく、7月は+2℃、8月は+1.5℃程度上昇すると予測されている。夏季の気温の年々変動の大きさは将来気候でも大きく変化しないと予測されているため(図略)、絶対値で見た場合の低温は減少すると予測される。

### (2) ヤマセ型低温の割合

5～9月の半月平均データを元に、前述の「第1種型」と「第2種型」の分類を行う。ここでは、前者に分類されたものを「ヤマセ型低温」、後者を「上層寒気型低温」と呼ぶ。低温型の分類は、モデルの現在気候および将来気候、観測についてそれぞれ行う。

第2～4章で示したように、海洋性極気団の流出すなわちヤマセによる低温ではTNPとTNJの気温差が大きくなる。この性質を利用して分類を行う。方法は次の通りである。対象半月の前後1半月の期間のTNP気温を20年分並べ(20×3=60事例)、低い方から30%(60事例中の20事例)を低温事例として抽出する。そして、抽出された低温事例のうち、TNPとTNJの気温差が-1℃以下の低温を「ヤマセ型低温」、それ以外のものを「上層寒気型低温」とする。なお低温とは、現在気候、将来気候ともに対象とするサ

ンプルの気温の下位30%であるため、相対的なものである。



第8図 TNPの平均気温の変化量

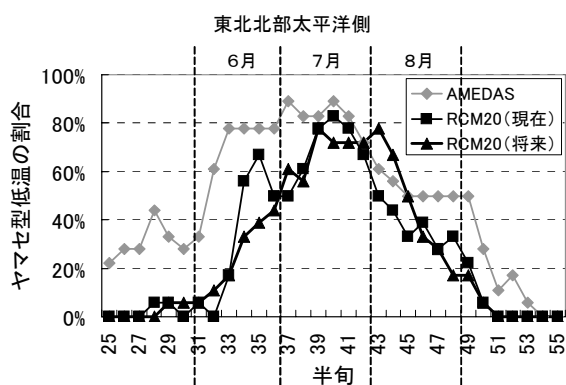
変化量は、(将来気候20年平均値) - (現在気候20年平均値)。RCM20の地上1.5m気温を使用。

分類の妥当性を確認するため、低温の型ごとの循環場合成図を作成する。合成図は月別に作成する。7月、8月ともに、ヤマセ型低温の合成図ではオホーツク海方面の地上気圧が高く、一方で本州南東海上の地上気圧は低く、東北太平洋側に寒気が流れ込みやすい。一方、上層寒気型低温の合成図ではそのような特徴は不明瞭である(いずれも図略)。このため、TNPとTNJの気温差を用いた低温型の分類は妥当であると考えられる。

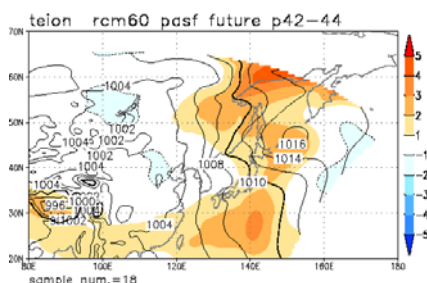
第9図は、低温に占めるヤマセ型低温の割合の季節変化である。観測では、梅雨期間に相当する6月から7月にかけてヤマセ型低温の割合が高いが、その後次第に減少し、8月は半分程度の割合で推移し、9月になると急速に0に近づく。このような季節変化は経験と良く合っている。モデルの現在気候では、季節変化が定性的には良く再現されているが、全般的にヤマセ型低温の割合が観測よりも少なく、その傾向は5～6月に顕著である。次に、再現性が比較的良かった7～8月において将来気候と現在気候を比較すると、梅雨期から盛夏期への移行期に違いが見られる。将来気候では、ヤマセ型低温の割合の大きい時期が8月上旬まで続いており、現在気候に比べると10日程度長引く。

将来気候と現在気候で違いが見られた、第42～44半月の低温時(TNP気温の低い方から30%の事例)の地上気圧合成図を第10図に示す。千島列島付近に高圧部が分布し、海洋性極気団が東北地方へ流入し易い状況にある。現在気候からの変化量を見ると、オホーツク海方面の気圧が上昇する一方で、関東南岸の梅雨前線付近での気圧の上昇はこれに比べて小さい。このため、現在気候に比べオホーツク海方面から寒気が流れ込みやすくなると考えられ、第9図

で示したヤマセ型低温の割合の増加と整合している。



第9図 TNPの低温に占めるヤマセ型低温の割合  
分類方法の詳細は本文参照。



第10図 将来気候における第42~44半旬の低温時の地上気圧合成図(RCM60)  
合成値を実線、現在気候からの変化量を陰影で示す。単位は hPa。低温は現在気候と将来気候で各半旬平均気温の下位30%で定義。平年偏差が負の場合、等値線は点線で示す。

## 6. まとめ

本研究では、海洋性極気団の南西方向への大規模な流出を広義におけるヤマセと解釈し、半旬、月平均気温から、RCM20 のヤマセの再現性評価および将来予測を行った。併せて、RCM60 の大規模循環場の解析も行った。本研究により以下のことが示された。

東北地方の夏季の低温には、ヤマセの南下に伴う太平洋側を中心とした低温(ヤマセ型低温)と、東北地方全体の気温が低下する低温(上層寒気型低温)があるが、前者は6月と7月、後者は8月に現れやすいことが観測結果の解析から見出された。モデルでは、7月と8月は観測と同様の低温型であったが、6月のヤマセ型低温は再現されていなかった。なお、モデルではヤマセの南下に伴う低温は定性的には再現されていたが、観測に比べて程度が弱かった。

半旬平均データを用いて TNP と TNJ の平均気温差からヤマセによる低温とそれ以外の低温との分類を試みた。循環場の合成図および、ヤマセ型低温の割

合の季節変化から、この分類法の妥当性を確かめた。モデルにおいても、ヤマセ型低温の割合の季節変化が定性的には良く再現されていた。

温暖化時(将来気候)は、7~8月のTNPの平均気温は1.5~2°C程度上昇するため、絶対値で見た場合の低温は減少する。しかしながら、梅雨期から盛夏期の移行期に、低温に占めるヤマセ型低温の割合の大きな時期が10日程度遅延することが示された。

Uchiyama and Kitoh(2004)は、CGCM2.2(Yukimoto et al., 2001)の降水量を用いた解析から、将来気候(2071~2100年)の梅雨明けの時期は現在気候よりも遅れる傾向にあることを示している。本研究では、RCM20の地上気温やRCM60の循環場を用いた解析から、東北地方にヤマセ型低温を引き起こす循環場が、将来気候では8月上旬まで長引くことを示した。この結果はUchiyama and Kitoh(2004)の示した梅雨明けの遅延と関連していると考えられる。

## 引用文献

- 卜蔵建治, 2001: ヤマセと冷害, 成山堂書店, pp.148
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis(R-2), Bull. Am. Meteorol. Soc., 83, 1631-1643.
- 気象庁, 1972: 季節予報作業指針, pp.468.
- 気象庁, 2005: 地球温暖化予測情報第6巻, 58pp.
- 木村龍治, 1995: ヤマセの地球流体的側面, 気象研究ノート「ヤマセ」, 183, 91-105.
- Kodama Y.-M., 1997: Airmass Transformation of the Yamase Air-flow in the summer of 1993. J. Met. Soc. Japan, 75, 737-751.
- Ninomiya, K. and H. Mizuno, 1985: Anomalous Cold Spell in Summer over Northeastern Japan Caused by Northeasterly Wind from Polar Maritime Airmass, J. Met. Soc. Japan, 63, 845-871.
- NPD/JMA, 2002: Outline of the operational numerical weather prediction of the Japan Meteorological Agency, 158pp.
- 坪井八十二, 1986: 気象と農業生産, 養賢堂, pp.259.
- Uchiyama T. and A. Kitoh, 2004: Changes in Baiu-Changma-Meiyu rain by global warming in MRI-CGCM. Proceedings of the International Conference on High-Impact Weather and Climate, 22-24 March 2004, Seoul, Korea, pp.218-221.
- Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda and T. Uchiyama, 2001: A New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) - Model Climate and its Variability -. Pap. Meteor. Geophys., 51, 47-88.