

CMIP3 マルチモデルにおけるヤマセの季節性の再現性と将来変化

遠藤洋和（気象研・気候研究部）

1. はじめに

初夏を中心に日本の北東の冷たい海洋上から風が吹くことが度々ある。このとき、北日本太平洋側を中心に不順な天候（低温と日照時間の減少）に見舞われる。この風は一般にヤマセと呼ばれる。過去にヤマセの頻発がこの地域に大きな農業被害をもたらしてきた。このため、地球温暖化に伴いヤマセの頻度や発現時期が変化するか否かについてはこの地域の人々の大きな関心事である。ヤマセは身近な気象現象であると同時に、オホーツク海高気圧、太平洋高気圧、梅雨前線、ブロッキング流など、東アジアの夏を特徴づける大規模循環場と関係深い。このため、ヤマセに関して気候モデルの再現性や将来変化について検討することは気候学的側面からも有意義である。

近年、気候モデルの性能向上により地域的な気候変化予測が可能になってきた。温暖化に伴う日本付近の気候変化予測研究では、Kimoto (2005) は third phase of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3) の 17 の気候モデルの CO₂ の 1% 漸増実験結果を解析し、日本の南方の亜熱帯高気圧と北方の高気圧が強まり、梅雨前線の活動が活発化することを示した。Kitoh and Uchiyama (2006) は CMIP3 の 15 の気候モデルの 20C3M シナリオと SRES-A1B シナリオの解析から、日本付近は高いモデル間一致率で梅雨明けが遅れることを示した。Kusunoki et al. (2006) と Kusunoki and Mizuta (2008) は 20km 全球大気モデルの解析から、梅雨前線の活発化および梅雨明けが遅れることを示した。Arai and Kimoto (2008) は MIROC-hi の大気モデル実験から、東アジア循環場の将来変化は現在気候における冷夏レジームの頻度の増加として現れることを示した。

本研究では、World Climate Research

Programme (WCRP) による CMIP3 に参加した 18 の大気海洋結合モデルの実験データを解析して、ヤマセ頻度の再現性評価および将来変化予測を行った。また、その予測結果を補うため日本を含む北西太平洋の平均海面気圧 (MSLP) の将来変化予測を行った。将来予測は、ヤマセ頻度および MSLP の数値的な再現性能に基づき、再現性能の高いモデル群と低いモデル群に分類して行われた。そして、得られた予測結果について考察した。

2. データ

CMIP3 気候モデル群のうち、20 世紀再現実験 (20C3M) の 1981~2000 年、SRES-A1B シナリオの 2081~2100 年のそれぞれ 20 年間について日データが存在する 18 の気候モデルの実験データを解析した。一部のモデルでは複数の実験が存在するが、本研究では 1 モデルにつき 1 つの実験結果を解析した。再解析データは JRA-25 (Onogi et al., 2007) および NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) を使用した。モデルごとに水平解像度が異なるため、2.5° × 2.5° の緯度経度座標に内挿した後に解析した。解析期間は、ヤマセの季節と言われる 5~8 月とした。

3. 再現性の評価

北日本東海上 (142.5° E, 40° -45° N 平均) の地上風が北東風である場合をヤマセ出現と定義し、その頻度を累年の旬平均値から数えた。持続的に吹くヤマセに着目する目的で旬平均値を用いた。JRA における 20 年平均のヤマセ頻度を図 1 に示す。ヤマセ頻度は 5 月下旬以降上昇し、6 月上旬から 7 月上旬にかけて頻度が多くなり、ピーク時の出現頻度は 30% に達し、7 月中旬以降減少する。ヤマセ頻度の多い時期は梅雨の時期にほぼ一致する。

ヤマセ頻度をモデル別ならびに月別に集計した結果を表1に示す。同時にJRAのヤマセ頻度も示す。モデルのヤマセ頻度はモデル間のばらつきが非常に大きく、多くのモデルでJRAに比べて少ない傾向にあった。5～8月合計で見ると、JRAの4.3回/20年を超えるモデルは、mri_cgcm2_3_2aとipsl_cm4の2つしかない。月別の変化を見ると、ヤマセ頻度はJRAでは6月に最も多くて1.6回/20年である。6月にピークをもち1.0回/20年以上の頻度があるモデルは、csiro_mk3_0、csiro_mk3_5、gfdl_cm2_0、giss_model_e_r、inmcm3_0の5つしかない。一方、8月のヤマセ頻度は、JRAでは8回/20年であるが、その頻度を超えるモデルは、cnrm_cm3、csiro_mk3_0、csiro_mk3_5、iap_fgoals1_0_g、mri_cgcm2_3_2a、ipsl_cm4、ingv_echam4、miub_echo_gの8つある。

ヤマセ頻度の再現スキル(Skill_Yamase)を、月別のヤマセ頻度のバイアスの根2乗平均和

(5～8月)と定義した。値が小さいほどスキルが高いことを意味する。Skill_Yamaseの値を表1に示す。最もスキルの高いcsiro_mk3_5の2.35から最もスキルの低いcccma_cgcm3_1_t63の10.79までの範囲に分布している。

Skill_Yamaseと気候平均場の再現性の関係を探るため、ヤマセ頻度と関係が深いと考えられるMSLPの再現スキルを調べた。Taylor(2001)の式(4)の定義に従い、日本を含む北西太平洋(25°-60°N, 120°-180°E)のMSLPのスキルスコアを、5月、6月、7月、8月のそれぞれの月で計算し、それを同期間で平均した。この値をMSLPの再現スキル(Skill_MSLP)と定義した。Skill_MSLPの値を表1に示す。また、Skill_MSLPとSkill_Yamaseの関係を図2に示す。北西太平洋のMSLP再現性の良いモデルほどヤマセ頻度の再現性が良いという関係が見られる(R=-0.68)。

表1 モデルのヤマセ頻度、ヤマセ頻度のスキルスコア、平均海面気圧(MSLP)のスキルスコア。SSは正規化した2つのスキルスコアの平均値。MME18は18モデル単純平均、MME9hiはSSのスコアが高い9モデル平均、MME9lowはそれ以外の9モデル平均。s.d.はモデル間の標準偏差。JRAのヤマセ頻度も示す。モデル名の左の(*)はMME9hiに選択されたモデルを意味する。

Model	Yamase frequency (/20yr)						MSLP x-y map		Metric	
	May	Jun	Jul	Aug	May-Aug	Adjusted Skill	Skill	Adjusted Skill	SS	
	cccma_cgcm3_1	2	3	5	4	14	8.05	0.325	0.803	0.224
cccma_cgcm3_1_t63	2	0	1	0	3	10.79	0.000	0.758	0.000	0.000
* cnrm_cm3	8	9	8	10	35	4.18	0.782	0.914	0.771	0.777
* csiro_mk3_0	5	13	8	12	38	3.35	0.881	0.960	1.000	0.940
* csiro_mk3_5	3	15	11	10	39	2.35	1.000	0.929	0.846	0.923
* gfdl_cm2_0	6	10	7	4	27	4.42	0.755	0.949	0.942	0.848
* gfdl_cm2_1	3	6	7	7	23	5.96	0.572	0.957	0.985	0.779
* giss_aom	1	7	8	5	21	5.96	0.572	0.930	0.850	0.711
* giss_model_e_r	11	20	4	4	39	5.29	0.651	0.892	0.662	0.657
iap_fgoals1_0_g	3	4	18	11	36	7.16	0.430	0.850	0.455	0.443
inmcm3_0	4	11	3	5	23	5.57	0.619	0.891	0.656	0.637
miroc3_2_hires	5	8	5	4	22	5.77	0.595	0.811	0.263	0.429
miroc3_2_medres	6	8	2	0	16	7.57	0.382	0.771	0.068	0.225
* mpi_echam5	6	7	4	2	19	6.75	0.479	0.936	0.882	0.680
mri_cgcm2_3_2a	6	14	18	19	57	6.36	0.524	0.915	0.778	0.651
ingv_echam4	2	4	6	9	21	7.18	0.428	0.931	0.855	0.641
ipsl_cm4	10	14	19	15	58	5.27	0.654	0.872	0.562	0.608
* miub_echo_g	6	5	7	10	28	6.14	0.550	0.914	0.771	0.660
MME9hi	5.44	10.22	7.11	7.11	29.9	4.93		0.980		
MME9low	4.44	7.33	8.56	7.44	27.8	7.08		0.936		
MME18	4.94	8.78	7.83	7.28	28.8	6.01		0.972		
MME9hi s.d.	2.79	4.64	2.02	3.31	7.56	1.37		0.021		
MME9low s.d.	2.50	4.69	7.07	6.20	17.9	1.59		0.059		
MME18 s.d.	2.70	4.88	5.25	4.98	13.8	1.83		0.062		
JRA	7	16	12	8	43					

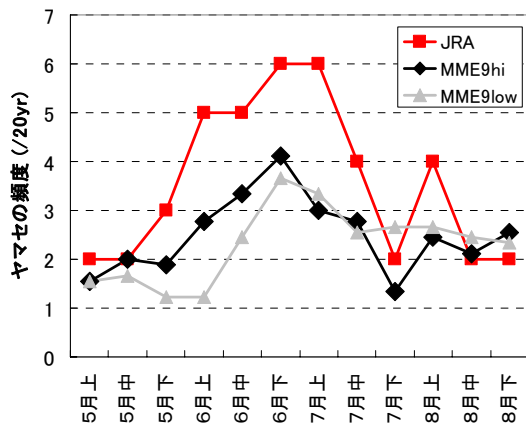


図1 旬別のヤマセ頻度 (/20年)。北日本東海上 (142.5° -155° E, 40° -45° N 平均) の地上風が北東風である場合をヤマセ出現と定義し、その頻度を累年の旬平均値から数えた。解析期間は1981~2000年。MME9hiはSSのスコアが高い9モデル平均、MME9lowはそれ以外の9モデル平均。

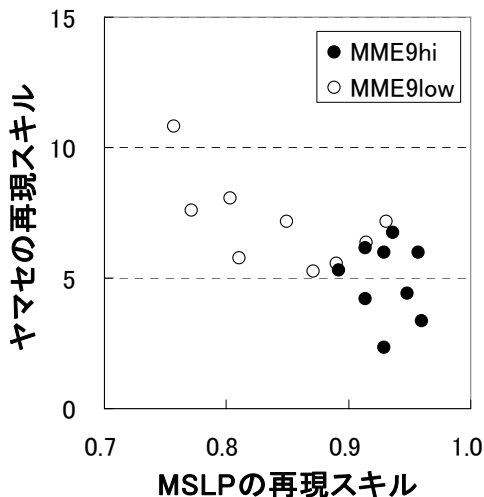


図2 MSLPのスキルスコアとヤマセ頻度のスキルスコアの散布図。MME9hiを●で示す。ヤマセ頻度(MSLP)のスキルスコアは0.0(1.0)に近いほどスキルが高い。

以上で定義された Skill_Yamase と Skill_MSLP を併せた再現スコア (SS) を定義した。計算方法は、Skill_SLP と Skill_Yamase それぞれで最小値が0、最大値が1になるように正規化した後(表1の Adjusted Skill)、両者を平均した。結果を表1の最右列に示す。SSに基づいて、再現性能の高い9つのモデル群(MME9hi)と低い9つのモデル群(MME9low)

に分類した。MME9hiに分類されたモデルを、表1の最左列に*で示し、図2では●で示す。ヤマセという短周期の気象現象とその背景場である気候平均場である MSLP の双方の再現スキルが高いモデルが MME9hi として選ばれている(図2)。

SSに基づいて選択された再現性能の高いモデル群(MME9hi)の再現性およびMME9lowとの違いについて述べる。図1にはJRA、MME9hi平均、MME9low平均の旬別ヤマセ頻度が示されている。MME9hi平均については、頻度は全体的に少ないものの、季節変化は適切に再現されている。6月下旬のピーク時にはJRAの2/3程度のヤマセ頻度がある。梅雨明け時期に相当する7月下旬にヤマセ頻度が一時的に減少する特徴がJRAとMME9hiの双方で見られ興味深い。一方でMME9low平均については、ヤマセ頻度が増加する時期がMME9hiに比べて遅い。頻度のピークはMME9hiと同様に6月下旬に見られるが、頻度はMME9hiより少なく、その後の頻度の減少が不明瞭である。MME9lowはMME9hiに比べてヤマセ頻度の季節変化の再現性が悪い。

図3はJRA、MME9hi平均、MME9low平均の月別のMSLPである。MME9hi平均のMSLPの季節進行は概してJRAと良く似ている。MME9hi平均場の Skill_MSLP は0.980で単体モデルのどれよりも高い(表1)。しかしながら、6月のMSLPを詳しく見ると、JRAで見られる日本付近の低圧域やオホーツク海付近の高圧域が不明瞭である。これは梅雨前線やオホーツク海高気圧の再現性が十分でないことを示している。モデルのMSLPのこのようなバイアスは、モデルのヤマセ頻度が少ないことに関連していると考えられる(図1、表1)。MME9hi平均とMME9low平均を比較すると、MME9hiに比べて、MME9low平均の亜熱帯高気圧は強く、季節進行にともなう亜熱帯高気圧の北上が遅い。また、MME9low平均では8月になっても高気圧の軸は日本の南海上に見られる。このような特徴は、MME9lowのヤマセ頻度の季節変化が不明瞭であった(図1)ことに整合的である。表1に示されている Skill_MSLP は5

～8月の平均値であるが、通年を通して各月ごとに見ても、MME9hi 平均のスキルスコアは10月を除いてMME9low 平均よりも高い値を示す。また、MME9hi はMME9low よりもモデル群内の Skill_MSLP の数値のばらつきが小さいという特徴がある。表1によれば、Skill_MSLP のモデル群内におけるばらつきは、MME9hi は0.021、MME9low は0.059であり、約3倍の違いがある。

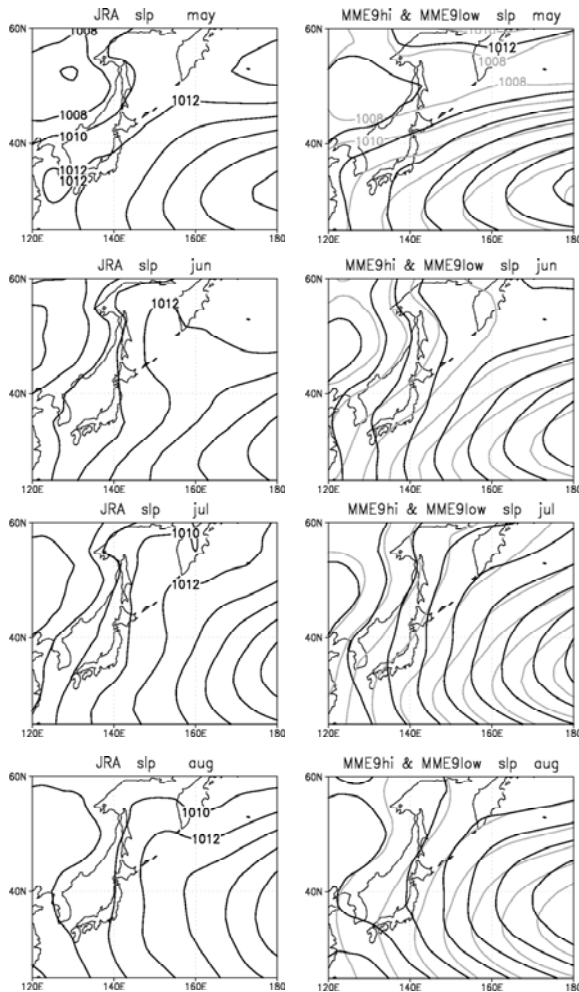


図3 JRA (左図)、MME9hi 平均 (右図の黒色)、MME9low 平均 (右図の灰色) のMSLP。上から順に5月、6月、7月、8月。いずれも1981～2000年平均。

4. 将来変化

図4はMME9hi とMME9lowそれぞれにおけるヤマセ頻度の将来変化である。MME9hi では5月はヤマセ頻度が減少すると予測するモデルが多く、8月はすべてのモデルがヤマセ頻度

は増加すると予測している。6月と7月は変化傾向にモデル間のばらつきが大きい、6月はヤマセ頻度の減少、7月はヤマセ頻度の増加を予測するモデルがやや多い。5～8月の合計ではモデル間のばらつきが大きく、明瞭な傾向は見られない。一方MME9lowでは、5月はMME9hi に比べ変化幅は小さいもののヤマセ頻度が減少すると予測するモデルが多いが、8月の変化傾向はモデル間で一致していない。5～8月の合計ではMME9hi と同様にモデル間のばらつきが大きく、明瞭な傾向は見られない。

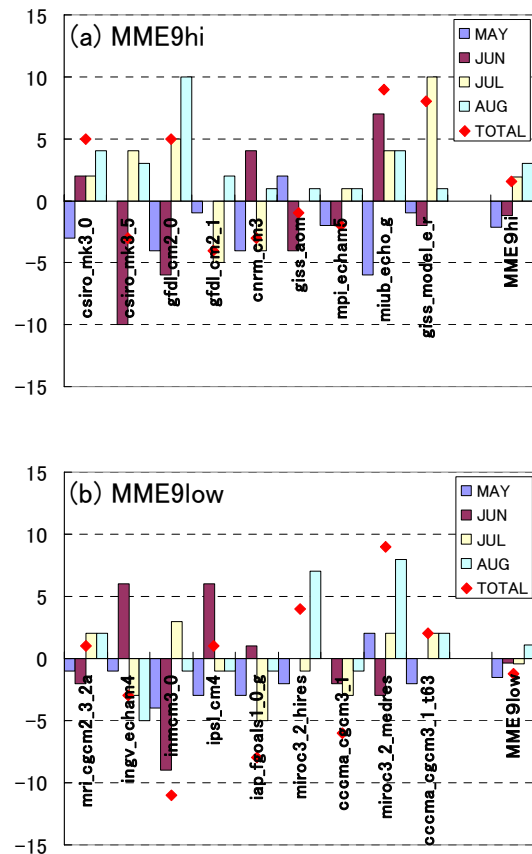


図4 ヤマセ頻度の将来変化。(a)はMME9hi、(b)はMME9low。2081～2100年のヤマセ頻度と1981～2000年のヤマセ頻度の差。

図5はMME9hi とMME9lowそれぞれにおけるMSLPの将来変化(ΔMSLP)である。MME9hiでは、5～6月は東シベリアからオホーツク海で気圧が低下するモデルが多い。7月はオホーツク海、8月はオホーツク海からベーリ

ング海で気圧が上昇するモデルが多い。加えて、8月は太平洋中緯度（～35°N）の気圧が低下するモデルが多い。このようなMSLPの将来変化は、MME9hiのヤマセ頻度の将来変化（図4）と整合的である。一方MME9lowにおいては、日本周辺では、5月に東シベリアからオホーツク海北部で気圧が低下するモデルが多いほかは変化傾向が不明瞭である。これはヤマセ頻度の変化傾向が5月を除いて不明瞭である（図4）ことと整合的である。

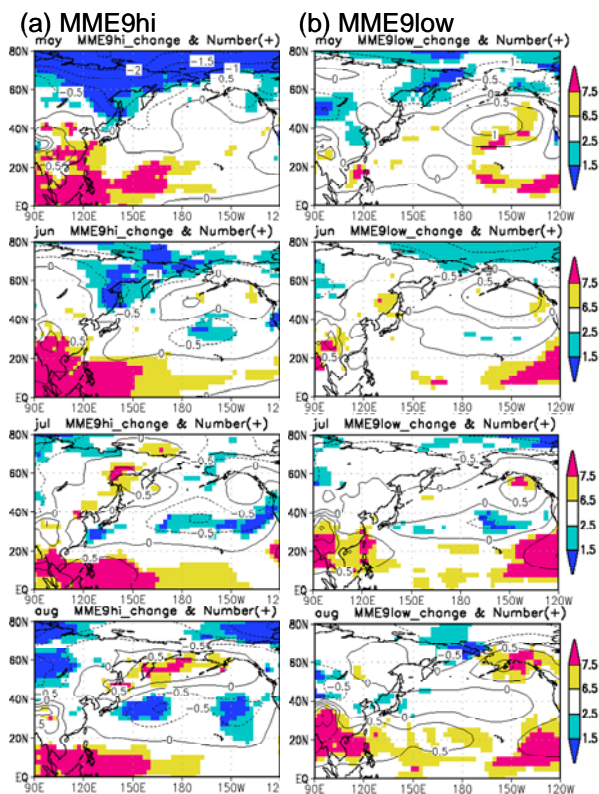


図5 MSLPの将来変化。左列はMME9hi、右列はMME9low。線はモデル平均値（間隔：0.5hPa）、陰影は正に変化するモデル数（/9モデル）。上から順に5月、6月、7月、8月。

5. 考察

MME9hiの8月の将来予測では、すべてのモデルがヤマセ頻度の増加を示した。MME9hiのMSLP変化はこれと整合的で、日本の東海上で低下、日本の北東海上で上昇するモデルが多い。これまでに温暖化に伴う東アジアの夏の気候変化について研究を行った Kitoh et al. (2005)、Kimoto (2005)、Kitoh and Uchiyama

(2006)、Kusunoki et al. (2006)、Arai and Kimoto (2008) はいずれも、東アジアの夏の天候変化をもたらす要因の一つにエルニーニョ的な海面水温変化を挙げている。そこで、このような熱帯域の変化とヤマセ頻度に関連する循環場の関係について調べた。図6はマルチモデル間における赤道東西気圧傾度（ $\Delta EQ-SOI$ ）と8月の日本東海上の $\Delta MSLP$ の関係である。EQ-SOIはVecchi et al. (2006)により定義された（5°S-5°N, 160°W-80°W）と（5°S-5°N, 80°E-160°E）の海面気圧差で、ウォーカー循環の強さの指標となる。ここで、 $\Delta EQ-SOI$ はその将来変化を意味する。MME9hiに着目すると、1つのモデルを除いて $\Delta EQ-SOI$ は負の値であり、正の相関関係が存在する（ $R=0.69$ ）。このような相関関係は現実の年々変動においても見られる。図7はNCEP/NCARにおけるMSLPをEQ-SOIへ回帰したときの回帰係数分布である。将来変化に見られる特徴（図5）と同様、EQ-SOIが低下すると太平洋中緯度の気圧は低下する傾向が見られる。以上の結果はエルニーニョ的な海面水温変化に伴うウォーカー循環の弱体化が8月のヤマセ頻度増加の要因の一つであることを示唆する。

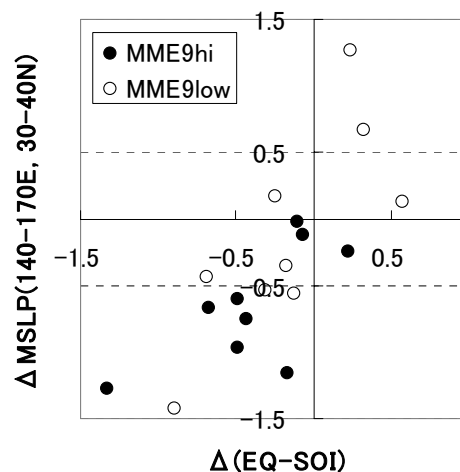


図6 赤道東西海面気圧差の将来変化（ $\Delta EQ-SOI$ ）と日本東海上のMSLPの将来変化（ $\Delta MSLP$ ）の散布図。MME9hiを●で示す。 $\Delta EQ-SOI$ は6～8月平均。 $\Delta MSLP$ は8月平均。 $\Delta EQ-SOI$ および $\Delta MSLP$ の定義領域は本文参照。

興味深いことに、MME9hi におけるヤマセ頻度の将来変化は、5月に減少、一方で8月には増加するモデルが多い。MME9hi の MSLP もこれに整合的で、オホーツク海付近では5～6月に低下し、7～8月に上昇するモデルが多い。Kusunoki et al. (2006) による 20km 全球大気モデルによる将来予測を見ても、統計的に有意な変化ではないが、オホーツク海付近の MSLP は6月に低下、7月に上昇している（彼らの Fig. 20）。現実の年々変動に関しても、EQ-SOI とオホーツク海付近の MSLP の相関係数の符号が5月と8月では反対の傾向を示す（図7）。このため、エルニーニョ的な海面水温変化に伴うウォーカー循環の弱화가オホーツク海付近の MSLP 変化の季節性をもたらしている可能性がある。そのほか、ユーラシア大陸の昇温 (Kimoto, 2005; Arai and Kimoto, 2005)、アジアモンスーンの初夏の季節進行の遅れ (井上と植田, 2009)、冬季北半球の正の A0 モード強化 (Yamaguchi and Noda, 2006) など、温暖化に伴う大規模な変化の影響を受けている可能性がある。今後、東アジアにおける初夏と盛夏の将来変化パターンの相違について、さらに詳しく調べていく必要がある。

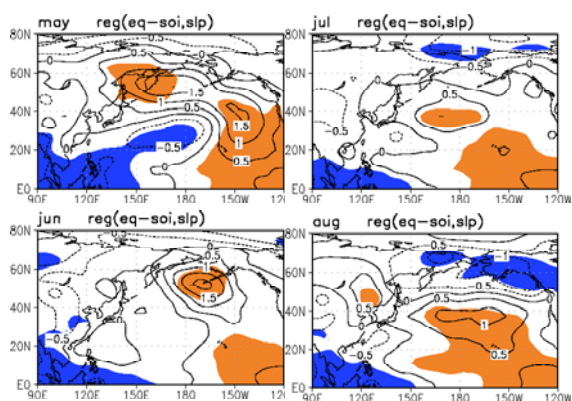


図7 SLP の EQ-SOI への回帰。線は回帰係数（間隔：0.5hPa）、陰影は有意水準 95%以上。NCEP/NCAR の 1958～2007 年のデータに基づく。回帰係数はこの期間の線形トレンドを除去した後に計算。

MME9hi のヤマセ頻度および MSLP の将来変化は MME9low に比べてモデル間一致率が高い。

2つの要因が可能性として考えられる。一つ目は、図6が示すように、将来気候で EQ-SOI が低下するモデルは、MME9hi では8つ、MME9low では5つあることから、MME9hi の方がウォーカー循環の強さの変化傾向に関するモデル間一致率が高いため、である。MME9hi と MME9low のいずれのモデル群においても Δ EQ-SOI と日本東海上の Δ MSLP に明瞭な正相関が見られることから分かるように、ウォーカー循環の将来変化と太平洋中緯度の循環の将来変化は密接に関連している。2つ目の要因は、MME9hi は気候平均場の形に近いモデル群だから、である。表1によれば、MSLP 再現スキルスコアのモデル間標準偏差は、MME9hi では0.021である。一方、MME9low では0.059でおおよそ3倍の違いがある。気候平均場のパターンが異なれば、変動パターンが異なり、さらに将来変化のパターンも異なる可能性が十分に考えられる。Arai and Kimoto (2008) は、東アジアの循環場の将来変化が現在気候における主要変動モードの出現確率密度の変化として現れることを示している。

6. まとめ

本研究では、CMIP3に参加した18の大気海洋結合モデルの実験データを解析して、ヤマセ頻度の再現性評価および将来変化予測を行った。また、その予測結果を補うため日本を含む北西太平洋の MSLP の将来変化予測も行った。

北日本東海上 (142.5°E - 155°E, 40°N - 45°N 平均) の地上風が北東風である場合をヤマセ出現と定義し、その頻度を累年の旬平均値から数えた。モデルのヤマセ頻度はモデル間のばらつきが非常に大きく、多くのモデルで JRA に比べて少ない傾向にあった。一部のモデルはヤマセ頻度の季節変化を適切に再現していた。北西太平洋の MSLP の再現性とヤマセ頻度の再現性には高い相関関係が見られた。

将来予測は、ヤマセ頻度および MSLP の数値的な再現性能に基づき、再現スキルの高いモデル群 (MME9hi) と低いモデル群 (MME9low) に分類して行われた。MME9hi におけるヤマセ

頻度の将来予測は、5月は多くのモデルで減少、8月はすべてのモデルで増加する傾向を示した。一方、5～8月合計ではモデル間のばらつきが大きかった。MSLPの将来変化は、ヤマセ頻度の変化と整合した変化を高いモデル間一致率で示した。MME9lowのヤマセ頻度の将来予測は、5月は多くのモデルで減少傾向だが、8月の変化傾向はモデル間の一致が悪かった。MSLPの将来変化は、日本周辺では5月を除いて傾向が不明瞭だった。

MME9hiの8月のヤマセ頻度増加の要因の一つに、エルニーニョ的な海面水温変化に伴うウォーカー循環の弱化が示唆された。MME9hiの将来変化の傾向が高いモデル間一致率を示した理由として、①ウォーカー循環の強さの変化傾向に関するモデル間一致率が高いため、②それぞれのモデルの気候平均場の形が似ているため、などが考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたって、環境省地球環境研究総合推進費「S-5地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究：(2)マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究」(サブテーマ代表：高藪縁東大教授)から支援を受けた。

引用文献

Arai, M. and M. Kimoto, 2005: Relationship between springtime surface temperature and early summer blocking activity over Siberia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 261-267.

Arai, M. and M. Kimoto, 2008: Simulated interannual variation in summertime atmospheric circulation associated with the East Asian monsoon. *Clim. Dyn.*, 31, 435-447.

井上知栄, 植田宏昭, 2009: CMIP マルチ気候モデルにおける夏季アジアモンスーン循環の季節変化再現性とその将来変化. 日本気象学会 2009 年度秋季大会, A362.

Kalnay, E., and co-authors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.

Kimoto, M., 2005: Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16701, doi:10.1029/2005GL023383.

Kitoh, A., and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 247-258.

Kusunoki, S., J. Yoshimura, H. Yoshimura, A. Noda, K. Oouchi, and R. Mizuta, 2006: Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 581-611.

Kusunoki, S. and R. Mizuta, 2008: Future changes in the Baiu rain band projected by a 20-km mesh global atmospheric model: sea surface temperature dependence. *SOLA*, 4, 85-88.

Onogi, K., and co-authors, 2007: The JRS-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.

Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.

Vecchi G. A., B. J. Soden, A. T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa and M. J. Harrison, 2006: Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441, 73-76.

Yamaguchi, K., and A. Noda, 2006: Global warming patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 221-241.