科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ６ 月 ２０ 日現在

機関番号：８２１０９
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2013
課題番号：２３７４０３５９

研究課題名（和文）強い温帯低気圧発生の地球温暖化に伴う変化

研究課題名（英文）Projected change due to global warming in intense extratropical cyclones

研究代表者
水田　亮（Mizuta, Ryo）

気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官

研究者番号：８０５８９８６２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,400,000円、（間接経費）　　　　0円

研究成果の概要（和文）：大雨・大雪や強風災害をもたらすような強い温帯低気圧の発生が、地球温暖化に伴ってどのように変化するかについて、世界各機関の11の気候モデルによる実験結果の比較・解析を行った。北半球冬季について、とくに北西太平洋の極側で強い低気圧の増加や低気圧発達率の増大が見られることが多くのモデルで共通していた。また対流圏中上層のジェット風速もその領域で共通して強くなっており、その領域での月ごとの風速と低気圧発達率の間に高い相関が見られた。このような低気圧発達に対する上層の寄与と下層の寄与の見積もりを行ったところ、北西太平洋域において上層の寄与が相対的に増加していることを示唆する結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The projected change due to global warming in intense extratropical cyclones, which bring about disasters by heavy rainfall, snowfall, and strong wind, is investigated using 11 climate models. In the Northern Hemisphere winter, it is common to many models that the number of intense cyclones increases, and that the mean growth rate of the cyclones is enhanced on the polar side of the storm tracks, especially in the North Pacific. The upper-level zonal wind is also commonly enhanced around these regions, and highly correlated with the mean growth rate on a monthly time scale. Contributions from upper and lower levels to the cyclone growth are estimated in the western North Pacific, and the result suggests that the contribution from upper level is increasing in the future climate.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：温帯低気圧　地球温暖化

１．研究開始当初の背景

温帯低気圧は日本を含む中緯度域の秋から春にかけての気象現象を大きく支配している現象である。この活動が、地球が温暖化した際に変化すれば、われわれの生活に大きな影響を及ぼす。とくに強い低気圧の活動が変化すれば、強雨や強風による災害の頻度や大きさが変化を受ける。しかし地球温暖化に伴って中緯度の低気圧活動がこれまでと比べてどのように変化するかについては、まだ十分に明らかになっているとは言えない。

中緯度の低気圧活動については以下のようにどのような指標をとるかによって異なった結果が得られることが報告されていた。対流圏中上層では南北の温度差が増大し、それは南北の温度差をエネルギー源としている低気圧活動を強める効果を持つ。2-8 日周期の変動の大きさで定義される、低気圧に伴う擾乱の活動度の指標は、将来実験で強まっており、これはその変化と整合的である。

一方地上付近では、高緯度で積雪や海氷の融解が起こるために熱帯より大きな昇温が起きると考えられている。それにより下層では南北温度勾配が減少し、この変化は低気圧の活動を弱める効果を持つ。地上の温帯低気圧の発生数を指標にとるとそれは多くのモデルで将来実験において減少しており、これはその変化と整合的である。

ただし強い温帯低気圧のみを抽出すれば将来実験で発生数が増加しているということも指摘されていた。そのような増加は特定の地域でのみ見られるが、地域分布についてはモデルによるばらつきが大きい。そしてこの変化と環境場の変化との因果関係や、上記の活動度強化や全低気圧数減少との関連性については明らかではなかった。

２．研究の目的

本研究ではこれらの先行研究をふまえ、気候モデルにおける強い温帯低気圧の発生の将来変化について、その変化の大きさや地域分布に加え、それらが環境場の変化とどのような因果関係を持っているか、およびどの程度の確度を持った変化であるかを明らかにすることを目的としている。

変化の因果関係については、対流圏上層の変化と地上付近での低気圧発達の強化との関連性に着目する。対流圏上層の状態が温暖化によって変化することで低気圧発達が変化することが考えられる。気象研究所の高解像度大気モデルでの将来実験では、強い低気圧が増加する領域の上流側において低気圧発達率の増加が見られ、その領域での発達率は、対流圏上層での風速場と強い関係が見られた。ただし世界各機関の気候モデル実験結果にはモデル間のばらつきがあり、1 つのモデルだけでの結論では、この先地球温暖化時に起きうることを示すには十分とは言えないので、世界各機関の気候モデル実験結果を比較することで、そこで起きている様々な変化どうしの関連性からそれらの因果関係を明らかにする。また結果の共通点・相違点から、将来起こりうる可能性の高い事象と不確実性の高い事象を区別して示す。さらにこの結果をふまえて、これらの変化が温暖化に伴う外的条件の変化のどの部分に起因するかを、気象研究所の大気モデルを用いた実験によってより明らかにすることを目指す。

３．研究の方法

世界各機関のなるべく多くの気候モデル計算結果を比較・解析するために、CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase5)において公開された気候モデル計算結果を利用した。これは IPCC 第 5 次評価報告書での気候モデルによる将来予測のベースとなったものである。30 以上の機関からの実験結果が公開されているが、このうち以下の解析に必要なデータが取得できた 11 のモデル実験結果を使用した。使用したモデルを表 1 に示す。モデル毎に現在気候実験(Historical 実験の 1979-2003)・将来実験(RCP4.5 シナリオ実験の 2075-2099)それぞれにおいて発生している低気圧を抽出し、強度別の発生数や発達率の頻度分布・地理分布

表 1: CMIP5 気候モデル計算結果の比較に用いたモデル名とその作成機関。

モデル名	機関(国)
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (China)
CCSM4	National Center for Atmospheric Research (USA)
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology (Australia)
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (UK)
INMCM4	Institute for Numerical Mathematics (Russia)
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (Japan)
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre (Norway)

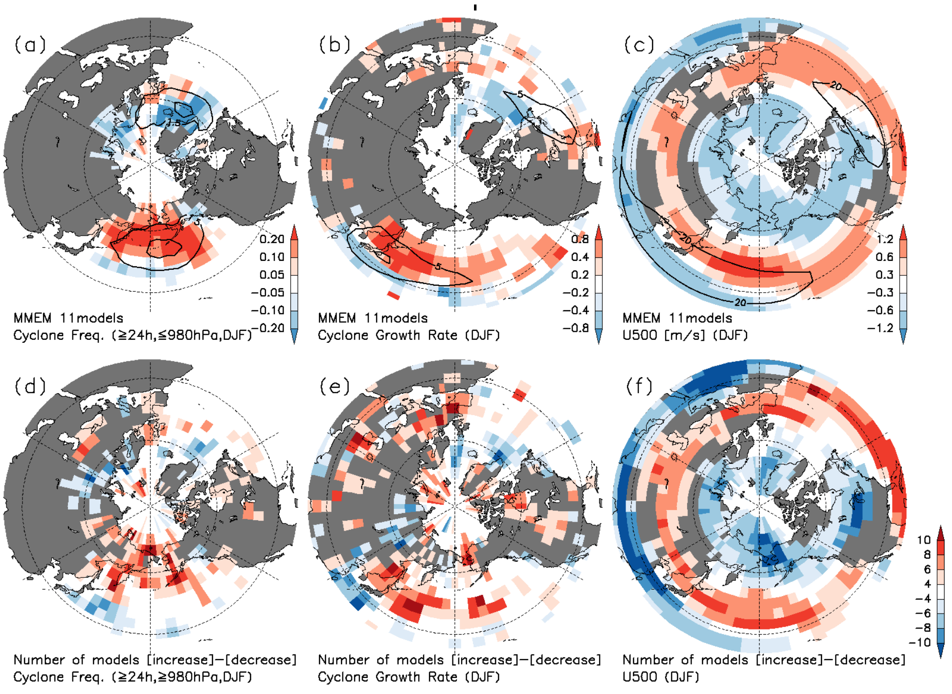

図 1：(a,d) 980hPa 以下になる低気圧の存在頻度(格子領域あたり月あたりの数)、(b,e) 平均発達率(hPa/day)、(c,f) 500hPa 東西風(m/s)の将来変化についての、(a-c) 11 のモデル平均と、(d-f)モデル間の一致度(増加を予測するモデル数から減少を予測するモデル数を引いた数)。コンターは現在実験でのモデル平均を表す。

を計算した。まず現在気候実験の結果について、これらを観測から得られたものと比較し、どのモデルも頻度の地理分布がおおむね再現されていることを確認した。次に、現在気候実験に対する将来実験の気候変化の比較をおこなった。また、将来起こりうる可能性の高い事象と不確実性の高い事象を区別するため、多くのモデルに共通する変化であるか、モデルによってばらつきの大きい変化であるかを指標として調べた。

さらにそこで得られた結果の因果関係を把握するため、気象研究所の高解像度大気モデルを用いた実験において、個々の低気圧発達について対流圏上層の寄与、あるいはその下層の寄与に対する割合を見積もった。そして北西太平洋域においてそれが将来気候実験でどの程度変化しているかを調べた。

４．研究成果

(1) CMIP5 マルチモデルにおける温暖化時の冬季の強い低気圧の増加

図 1(a)は 980hPa 以下になる強い低気圧の将来実験における存在頻度の変化を、11 のモデルで平均(マルチモデル平均)したものである。太平洋では北緯 40 度付近での減少、50-60 度での増加が見られる。増加する領域は、現在実験において最も頻度が多い領域(コンター)より極側に位置している。モデル間の一致(図 1d)は 60 度付近でとくに大きい。これらの特徴は単独の高解像度大気モデルを使った結果とも一致している。強い低気圧を 850hPa における相対渦度で定義しても同様の傾向が見られる(図略)。大西洋でも変化が見られるが、モデル間の一致は小さいので、極端に大きな変化をするモデルがマルチモデル平均に影響を与えている可能性がある。

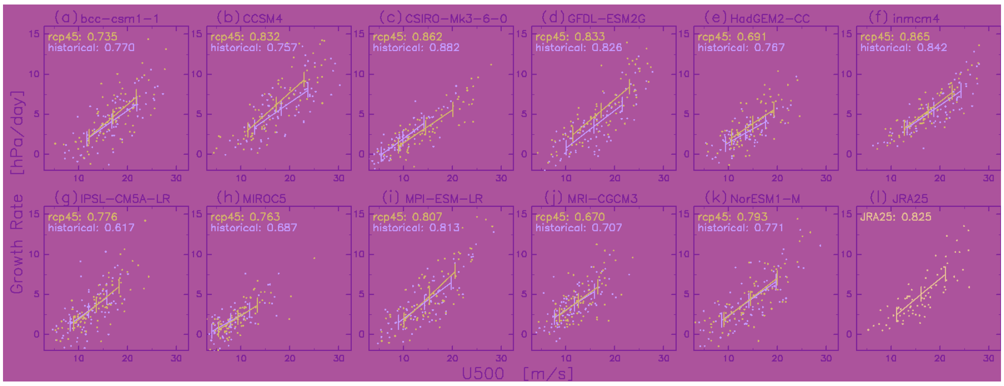

図 2：東経 140 度-西経 150 度、北緯 40-50 度について、その範囲で月平均の発達率と 500hPa の月平均東西風のモデル毎の散布図。青い点が現在実験、赤い点が将来実験の結果を表す。直線は分布の回帰直線であり、回帰直線の中央の縦線が平均値、直線の長さが風速の標準偏差を表す。

なお、弱い低気圧を含めた全低気圧の発生頻度についてはどのモデルでも減少しており、先行研究と整合的である。

図 1(b)は平均発達率のマルチモデル平均の将来変化を示したものである。平均発達率は、各格子領域内を通過する個々の低気圧の気圧の時間変化をすべて平均下値で定義している。強い低気圧が増加する場所の上流側で発達率の増加が見られる。個々のモデルで見てもそのような関係が見られる(図略)。こちらも太平洋でモデル間の一致が大きく、大西洋では一致は小さい(図 1e)。このような変化パターンは対流圏中上層(700-300hPa)での帯状風の変化パターンと、とくに太平洋でよく似ている(図 1c)。モデル間の一致度を見ると(図 1f)、かなり多くのモデルで中央アジアから中央太平洋で寒帯前線ジェットが強化される。とくに中央アジアと日本の東で一致度が大きい。一方大西洋では、より低緯度側のメキシコ湾から南ヨーロッパにかけて強くなる。これらについても単独の高解像度大気モデルを使った結果と一致している。

図 2 はとくに変化の大きい東経 140 度-西経 150 度、北緯 40-50 度における、モデル毎(11 モデルおよび JRA-25)の 500hPa 月平均東西風と月平均発達率の散布図である。各点はそれぞれの実験の 75 ヶ月(25 年間の 12,1,2 月)の各月を表す。再解析でも、いずれのモデルでも両者の間に高い相関がある。また現在実験と将来実験がほぼ同じ回帰直線上に乗っている。2 つのモデルを除いたすべてのモデルでこの領域平均の風速が増加していて、それと同時に平均の発達率が増加していることがわかる。

(2) 中緯度低気圧発達における上下層別寄与の見積もりとその将来変化

中緯度の低気圧発達における対流圏上層と下層の寄与を見積もる手法として、Q ベクトル形式の準地衡オメガ方程式と呼ばれる、大規模流が励起する上昇流を診断する方程式から、低気圧発達につながる下層の鉛直流に対する特定の層の寄与を逆変換法で算出する方法を用いた。

図 3 は ERA-Interim 再解析データを用いて、日本の東で低気圧の急発達が見られた 2013 年 1 月 14 日について、700hPa 上昇流の上層(50-650hPa)の寄与 ω_U と下層(750-975hPa)の寄与 ω_L を計算したものである。一般に ω_L は温度移流に伴い低気圧の前面で上昇・後面で下降であり、ω_U は上層トラフの渦度移流に伴いその前面で上昇・後面で下降となるが、後者の方が空間スケールが大きい。この例では両者による上昇流が重なり合って発達が強まっていることがわかる。またこの事例についての 2 週間前からの予報実験においては、上昇流に対して上層の寄与が大きいほど低気圧の急発達が起きやすいことが確かめられた。

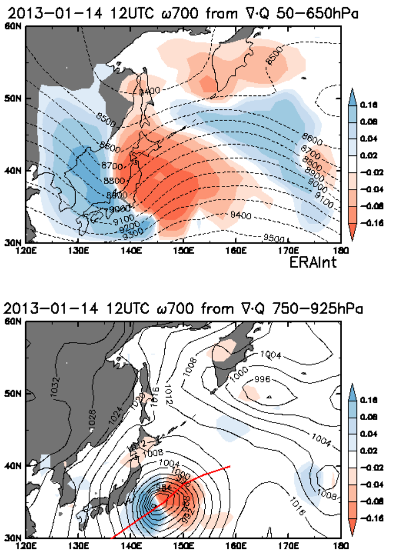

図 3: 2013 年 1 月 14 日 12UTC における(上) ω_U と(下) ω_L (トーン,単位 Pa/s)。コンターはそれぞれ 300hPa ジオポテンシャル高度(単位 m)と海面較正気圧(単位 hPa)。

次に、気象研究所の高解像度大気モデルを用いた実験において、北緯 20-65 度、東経 100-180 度で低気圧が急速に発達した時刻の前後 24 時間の期間での ω_U, ω_L について調べた。ω_U は低気圧中心から 600km 以内、ω_L は 300km 以内でそれぞれの振幅を計算し、両者の比を期間内で平均した。図 4 はその比の頻度分布を示したもので、現在気候実験に比べ、21 世紀末気候実験で急発達の頻度が増加していることがわかる。とくに比の値が 2 に近いものの頻度が増加しており、相対的に上層の寄与が増加していることが示唆される。これは上層で擾乱が増加するのと整合的である。ただしこの診断は準地衡近似の下であり、水蒸気の変化の影響も考慮されていないため、結果の解釈についてはより詳細に検討する必要がある。

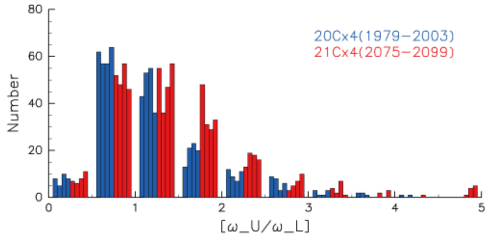

図 4: 現在気候実験(1979-2003:青)、21 世紀末気候実験(2075-2099:赤)において、北緯 20-65 度、東経 100-180 度で低気圧が急速に発達した前後 1 日間について、ω_U, ω_L の振幅の比を期間平均したものの頻度分布。

5．主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計２件)

1) Mizuta, R., Intensification of extratropical cyclones associated with the polar jet change in the CMIP5 global warming projections. Geophys. Res. Lett.,査読有, 39, 2012, L19707, doi:10.1029/2012GL053032.
2) Mizuta, R., M. Matsueda, H. Endo, and S. Yukimoto, Future change in extratropical cyclones associated with change in the upper troposphere. J. Climate, 査読有, 24, 2011, 6456-6470, doi:10.1175/2011JCLI3969.1.

〔学会発表〕(計９件)

1) 水田 亮, 2013: 中緯度低気圧発達における上下層別寄与の見積もりとその将来変化. 日本気象学会 2013 秋季大会, 2013 年 11 月 19 日-21 日, 仙台国際センター, 仙台.
2) 水田 亮, 2013: 温暖化実験における強い低気圧の変化. 爆弾低気圧がもたらす気象・海象災害の軽減に係るワークショップ, 2013 年 9 月 4 日, 九州大学, 福岡.
3) Mizuta, R., 2013: Projected change in extratropical cyclones in CMIP5 models associated with change in the UTLS region. The 3rd SPARC Dynamical Variability Workshop, April 22-26, Reading, UK.
4) Mizuta, R., 2013: Projected change in extratropical cyclones in CMIP5 models associated with change in the UTLS region. WCRP Regional Workshop on SPARC, April 1-3, Kyoto, Japan.
5) Mizuta, R., 2013: Intensification of extratropical cyclones associated with the polar jet change in the CMIP5 global warming projections, AMS 93rd Annual Meeting, January 6-10, Austin, TX, USA.
6) 水田 亮, 2012: CMIP5 マルチモデルにおける温暖化時の冬季の強い低気圧の増加, 京大防災研一般研究集会「週間及び 1 か月予報における顕著現象の予測可能性」, 2012 年 12 月 20 日-21 日, 京都大学宇治キャンパス, 宇治, 京都.
7) 水田 亮, 2012: CMIP5 マルチモデルにおける温暖化時の冬季の強い低気圧の増加, 日本気象学会 2012 秋季大会, 2012 年 10 月 2 日-4 日, 北海道大学, 札幌, 北海道.
8) Mizuta, R., 2012: Future change in extratropical cyclones in CMIP5 models associated with change in the upper troposphere, CMIP5 Workshop on Model Analysis, March 5-9, Honolulu, HW, USA.
9) 水田 亮, 2011: 高解像度大気モデルでの中緯度対流圏中上層の将来変化, 日本気象学会 2011 秋季大会, 2011 年 11 月 16 日-18 日, 名古屋大学東山キャンパス, 名古屋, 愛知.

６．研究組織

(1)研究代表者

水田　亮 (MIZUTA, Ryo)
気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官
研究者番号：８０５８９８６２