

Future change of winter explosive cyclone using large ensemble climate prediction data

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-04-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00050484

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



大規模アンサンブル気候予測データを用いた 爆弾低気圧の将来変化

高 裕也¹・二宮 順一²・森 信人³

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: y.t.kanazawa.stu@gmail.com

²正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: jnino@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

現在気候実験3,000年(60年×50メンバ)および将来気候実験5,400年(60年×90メンバ)の大規模アンサンブル気候予測データ(d4PDF)を用いて、日本海沿岸における低頻度気象災害要因の一つである爆弾低気圧に対する気候変動の影響評価を実施した。現在気候および将来気候からの爆弾低気圧抽出結果から、発生個数にはほとんど将来変化はないが、最低中心気圧の強度は将来的に増加する傾向があることがわかった。また、日本沿岸域に被害を及ぼす可能性がある爆弾低気圧について解析した結果、全体に占める台風並みに発達する爆弾低気圧の割合が増加し、特に中心気圧の強度も増加する傾向を示した。

Key Words : *climate change, explosive cyclone, Sea of Japan, d4PDF, JRA-55*

1. 序論

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第5次報告書¹⁾によると、地球温暖化の進行に伴い台風のような極端現象の変化の可能性が指摘されている。日本周辺における極端現象の一つである爆弾低気圧は、急速な発達を伴う温帯低気圧として定義されており、冬季から春季にかけて日本沿岸に強風や雪氷による災害を引き起こしてきた。例えば、2006年1月に発達した低気圧によって日本海沿岸域に暴風雪をもたらし、交通機関に多大な影響が出た。また、2014年12月に北海道東部の沿岸で発達した強い低気圧は根室湾内の水位上昇を引き起こし、浸水被害などをもたらした。このような冬季における強い温帯低気圧の発生頻度が増加傾向にあるということが示されており、今後もその傾向が続くことが予想される²⁾ため、爆弾低気圧の活動に関する将来変化予測が必要である。

Yoshida and Asuma³⁾は気象再解析データを用いて爆弾低気圧の特徴や発達時の環境場、発達のメカニズムについて経路別にまとめた。その結果、北大西洋上での発達率の変化には潜熱解放が大きく関係していることを示した。また、Kuwano-Yoshida and Minobe⁴⁾は大気大循環モデルであるAFES(Atmospheric general circulation model For the Earth

Simulator)を用いて数値実験を行い、黒潮が熱帯から運ぶ熱によって爆弾低気圧が日本付近に集中し、これによって北東太平洋上でジェット気流の南北蛇行が引き起こされることを示した。

気候変動による沿岸災害への影響評価研究は主に台風について行われてきた。森ら⁵⁾は台風の最大潜在強度(MPI: Maximum Potential Intensity)を用いて東京湾および伊勢湾、大阪湾の三大湾に対して可能最大高潮の予測を行い、可能最大高潮が将来的に増加する傾向があることを示した。また、志村ら⁶⁾は極大波浪は地球温暖化の進行によって、東日本沖で増大する傾向があることを示した。しかしながら、気候変動による爆弾低気圧の将来変化に関する研究はほとんどなく、冬季から春季の高波、高潮の原因となる爆弾低気圧の将来変化を評価することは防災上重要である。

そこで本研究では、超長期積分データセット database for Policy Decision making for Future climate change(以下、d4PDF⁷⁾)を用いて気候変動による爆弾低気圧の変化を統計的に明らかにすることを目的とする。

2. 研究手法の概要

(1) d4PDFの概要

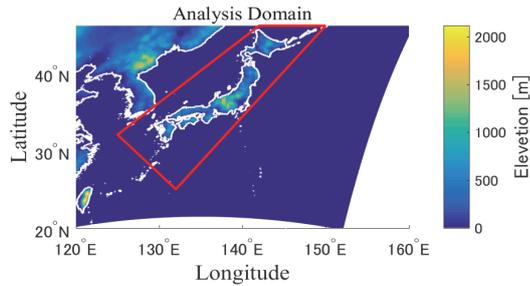


図-1 d4PDF 日本周辺域領域モデル実験の計算対象領域(赤線内は日本沿岸域を示す)



図-2 爆弾低気圧抽出のアルゴリズム

本研究で用いたデータセットであるd4PDFについて述べる。d4PDFは多数のアンサンブル実験によって極端現象の変化を議論すべく作成された。本研究では日本周辺域領域モデル(図-1)実験結果(水平解像度20km, 時間解像度1時間)を用い, その現在気候実験および将来気候実験の気候条件は以下になっている。詳しくはMizutaら⁹⁾を参照。

- (i) 現在気候実験：1950年9月～2011年8月×50メンバ (合計 3,000年)
- (ii) 将来気候実験：2050年9月～2111年8月×90メンバ (合計 5,400年)

将来気候実験は, 産業革命時(1850年)と比較して全球平均温度が4°C上昇した環境で定義される。温暖化のトレンドは含まれておらず, 現在気候と4°C上昇した環境とを比較・評価できる。将来気候アンサンブルメンバ作成においてはCMIP5 (Coupled Model Intercomparison Phase 5)の全球大気海洋結合モデル実験を対象にクラスター解析した結果をもとに6種類のSST (Sea Surface Temperature)将来変化の空間パターンを求め, 各SSTパターンに15種類の摂動を与えた合計90種類の分布に基づいている。なお, 本研究においてバイアス補正は実施していない。

(2) 爆弾低気圧の抽出方法

本研究では九州大学爆弾低気圧情報データベースの手法を参考に爆弾低気圧の抽出を行う。抽出は図-2に示す3つのStepで構成される。用いたパラメータは海面更正気圧(以下, SLP)であり, 解析対象領域は図-1に示した範囲で120°E～160°E, 20°N～45°Nとし, 解析対

表-1 爆弾低気圧の年平均発生個数の平均値と標準偏差(d4PDFはアンサンブル平均)

		Average	S.D.
	JRA-55	17.45	
	Present	10.15	2.09
	Future	10.56	0.71
SST	CC	10.01	0.33
	GF	10.23	0.33
	HA	9.67	0.27
	MI	11.39	0.27
	MP	11.17	0.34
	MR	10.91	0.41

象期間は10月～4月である。

Step1では, 数値的な振動に起因するような微小な凹みを低気圧として抽出することを防ぐため, ガウシアンフィルター(gridに対する標準偏差を2)による平滑化を行う。そのうえで, 周囲のSLPの平均値よりも1hPa以上小さいものを低気圧として抽出する。半径約300kmの領域に複数の低気圧が検出された場合はSLPがより小さいものを選択する。ただし, 標高が高い地点では海面更正によって定常的にSLPが小さくなる傾向があるため, 標高が1500m以上の地点は除外する。Step2では, Step1で抽出した低気圧のトラッキングを行う。東西各1.5度/hour, 南北各1.0度/hourまでの移動距離に収まり, 寿命が24時間以上のものを追跡する。移動範囲内に複数の低気圧が検出された場合はStep1と同様にSLPが小さいものを選択する。

Step3では, Step2まででトラッキングされた低気圧を対象に, 爆弾低気圧の判定を行う。Yoshida and Asuma⁴⁾を参考に, 爆弾低気圧の中心気圧低下率

$$\frac{P(t-12)-P(t+12)}{24} \times \frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi(t)} \quad (1)$$

の最大値(最大発達率)が1.0以上を爆弾低気圧と判定する。ここで, P はSLP [hPa], t は時間 [hour], φ は緯度[°]を示している。本抽出アルゴリズムは気圧低下率で爆弾低気圧を判定しているため台風とは区別されないが, JRA-55から抽出された爆弾低気圧1047個のうち, 台風は2個(0.19%)しか含まれておらず, 本解析に大きな影響はないと判断した。本アルゴリズムの詳細及びJRA-55による検証は先行研究⁹⁾を参照のこと。

3. 解析結果および考察

(1) 爆弾低気圧の個数の将来変化

将来的な気候変動による日本周辺での爆弾低気圧発生数の変化を調べるため, 現在気候および将来気候での爆弾低気圧数を比較した。さらに, 現在気候と気象再解析データであるJRA-55との比較も行った。

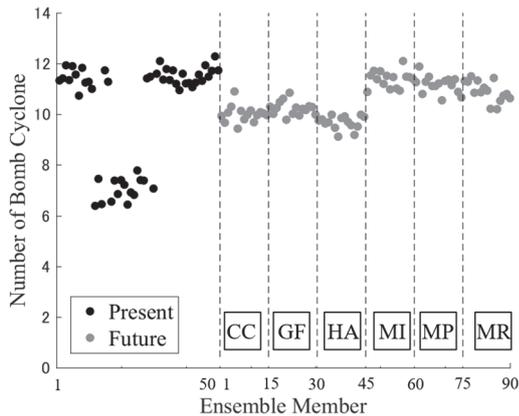


図-3 爆弾低気圧の各アンサンブルメンバにおける年平均発生個数(CC,GF,HA,MI,MP,MRはそれぞれ SST 将来変化の空間パターン)

表-1は抽出された爆弾低気圧の個数を、図-3は現在気候および将来気候の各アンサンブルメンバにおける爆弾低気圧の抽出個数を示している。JRA-55では年平均で17.45個、現在気候では10.15個となり、JRA-55で発生個数が増える結果となった。この原因としてJRA-55とd4PDFのモデル特性の違い、解像度、データ同化の有無が考えられるが、モデル特性の差についての議論は困難である。解像度、データ同化の有無については、台風について数kmの高解像度とデータ同化により高精度な再現計算が可能であることが報告されており、そこから類推するとJRA-55はd4PDFに比べて低解像度であるものの、爆弾低気圧がより多く表現されているのは、データ同化による効果だと考えられる。将来気候では10.56個と現在気候に比べてやや多くなるという結果となった。一方で、標準偏差は将来気候で0.71個に対して、現在気候で2.09個とかなりばらつきが大きく、図-3より現在気候では15メンバにおいて爆弾低気圧の個数が他のメンバと比べて少ない。日本周辺領域における爆弾低気圧発生数の将来変化に関するt検定では95%で棄却されず、増加傾向とは断定できないことを確認した。さらに、SST将来変化パターン毎の解析結果では、いずれのSSTパターンにおいても標準偏差は0.27~0.41個と非常に小さく、SST将来変化パターンと爆弾低気圧の発生数との関係性が示唆された。対象領域は異なるが北大西洋では潜熱開放が発達率に関与していることや、著者らの先行研究ではJRA-55からENSOやWPと爆弾低気圧の強度や数と弱い相関がある⁹⁾ことがわかっているが、日本近海におけるSST将来変化パターンと爆弾低気圧の発生数との関係性は見出されなかった。表面温度の時間変化を含めたより詳細な検討が必要である。

(2) 爆弾低気圧の経路の将来変化

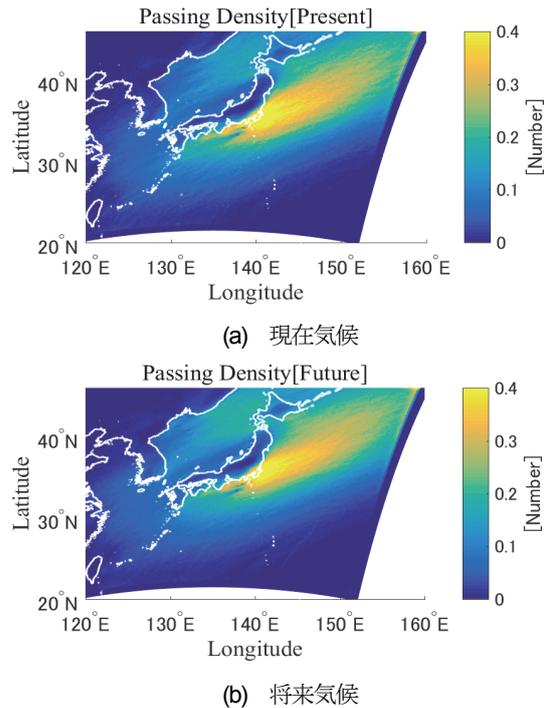


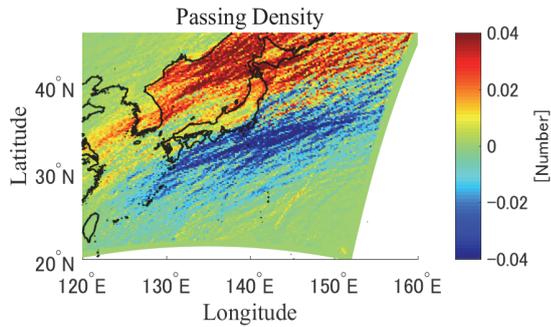
図-4 爆弾低気圧の年平均通過頻度

図-4は現在気候および将来気候における爆弾低気圧の年平均通過頻度を示している。この図より、主に日本海を通過する経路と太平洋上を通過する経路の2つに大別することができる。これはYoshida and Asuma⁹⁾の結果と概ね一致しており、特に、関東付近の沿岸域を通過する爆弾低気圧が0.4個/年程度と多くみられた。

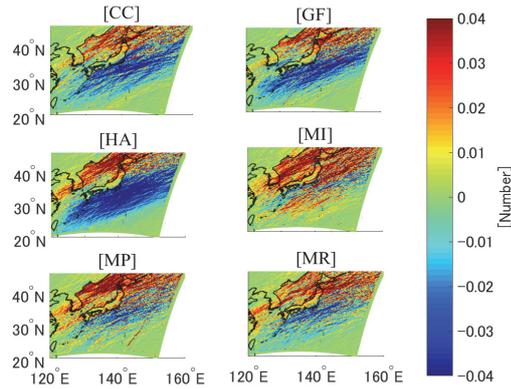
図-5は爆弾低気圧の通過頻度の将来変化量を示している。図-5(a)より、将来的に太平洋上を通過する爆弾低気圧の数が減少するのに対して、日本海上を通過する数が同程度増加することがわかる。また、太平洋上および日本海上における通過頻度の将来変化量は、t検定により95%で棄却され統計的に有意なことが示された。日本海上から東北や北海道を通過する爆弾低気圧数の増加が大きく、この領域内での爆弾低気圧の強度変化を解析することは防災上重要である。さらに、SSTパターン毎の通過頻度の将来変化量を図-5(b)に示す。変化傾向はCC, GF, HA, MP, MRのグループとMIの2つに大別することができ、MIでは太平洋上においても増加する傾向を示している。将来気候の爆弾低気圧は太平洋上を通過する頻度が減少して、日本海上を通過する頻度が増加し、SSTパターンが爆弾低気圧の経路に影響を及ぼす可能性が示唆された。

(3) 日本周辺域における最低中心気圧の将来変化

図-6(a)は現在気候および将来気候全体における爆弾低気圧の最低中心気圧における再現期間を示したものである。図中の破線と太線は、各アンサンブルメンバおよびアンサンブル平均値であり、黒線はJRA-55の解析結果



(a) 全メンバ平均での通過頻度将来変化

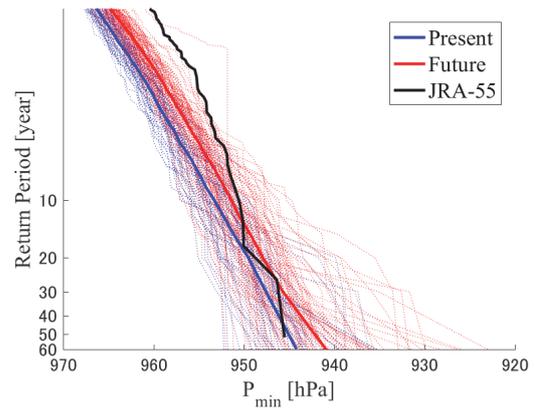


(b) SST パターン毎の通過頻度将来変化

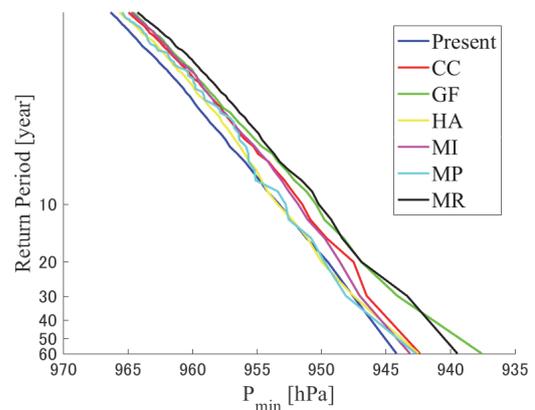
図-5 爆弾低気圧の通過頻度の将来変化量

である。アンサンブルメンバ毎のばらつきは、現在気候で 20.0hPa 程度、将来気候条件で 30.0hPa 程度の幅を有しており、これはアンサンブル平均値による将来変化量約 5.0hPa よりも大きく、将来変化とばらつきを区別することは難しい。一方で、太線で示すアンサンブル平均値は、将来気候の方がどの再現期間について比較しても現在気候よりも小さくなっていることがわかった。現在気候と JRA-55 を比較すると、JRA-55 は再現期間が短いところではアンサンブル中の上限もしくはやや外れたところに位置しており、再現期間が長いところではアンサンブル中の平均的なところに位置していることがわかった。さらには、最低中心気圧における平均値および最低値についても解析した結果、平均値では現在気候が 980.6hPa であったのに対して、将来気候は 980.2hPa とほとんど変化していないが、最小値は現在気候が 935.3hPa であるのに対して、将来気候では 923.0hPa と約 12.0hPa もの減少がみられた。

図-6(b)は SST パターン毎の最低中心気圧の再現期間を解析した結果を示している。再現期間 60 年の気圧値では CC, HA, MI, MP はほぼ同じ値をとっており、現在気候と比較すると 2.0~3.0hPa 程度の低下がみられ、GF では 7.0hPa 程度、MR では 5.0hPa 程度の低下となり、GF がすべての SST 条件の中では最も大きな低下傾向を示した。再現期間の長い、強い爆弾低気圧に限れば、いずれの SST パターンにおいても現在気候よりも最低中心気圧の



(a) 現在(青線)・将来気候(赤線)及び JRA-55(黒線)(実線はアンサンブル平均値、破線は各メンバを示す。)



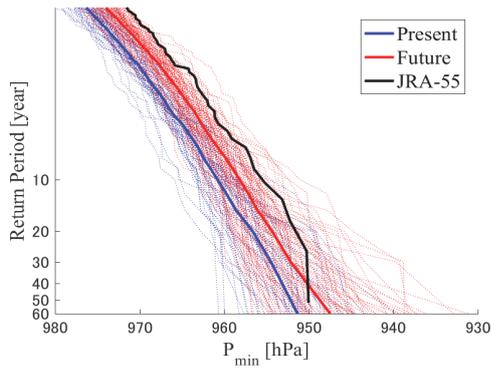
(b) 現在気候と SST パターン毎

図-6 日本周辺域における爆弾低気圧の最低中心気圧における再現期間

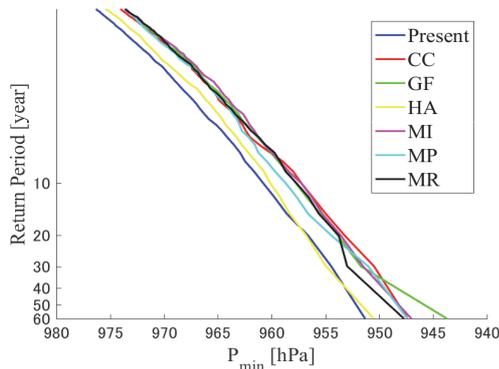
強度の増加を示した。爆弾低気圧の発生数および通過頻度同様に、SST パターンによって強度も変化することがわかったが、日本周辺の SST 上昇量との定性的な関係はみられなかった。

(4) 日本沿岸域の爆弾低気圧の中心気圧の強度変化

日本に災害をもたらす可能性がある沿岸域(図-1 赤線内)における爆弾低気圧の中心気圧の強度変化について解析を行った。図-7(a)は日本沿岸域内での現在・将来気候下における爆弾低気圧の中心気圧に対する再現期間を、図-7(b)は各 SST 条件における中心気圧の再現期間、表-2 は日本沿岸域における爆弾低気圧の最低中心気圧の最小値と平均値及び標準偏差を示している。現在気候アンサンブル平均値と JRA-55 を比較すると、再現期間が 20 年以下では 10.0hPa 程度の差があるが、それ以上の再現期間では差が小さくなっており、60 年(JRA-55 : 950hPa)には 1.3hPa 程度の差に収まる結果となった。このことから、d4PDF のアンサンブル平均は弱い爆弾低気圧を少なく推



(a) 現在(青線)・将来気候(赤線)及び JRA-55(黒線)(実線はアンサンブル平均値, 破線は各メンバを示す。)



(b) 現在気候と SST パターン毎の比較

図-7 日本沿岸域における爆弾低気圧の最低中心気圧における再現期間

定しており、強い爆弾低気圧の確率的な環境をよく捉えていると考えられる。もしくは、JRA-55で表現される過去気象は弱い爆弾低気圧を多く発生させるような環境だったとも考えられる。また、図-6(a)と比べて沿岸域では周辺域よりも各再現期間における強度が全体的に小さくなっており、沖合での爆弾低気圧強度が大きいことがわかる。表-2より、現在気候と将来気候全体の将来変化量は最小値で 8.5hPa、アンサンブル平均値で 4.0hPa 程度の減少が推定されており、最小値での将来変化量は沿岸域では小さくなったが、アンサンブル平均値での将来変化量やアンサンブルメンバの幅については日本周辺域と同様な結果を示した。標準偏差については、現在気候が 4.4hPa であるのに対して、将来気候が 5.7hPa と両気候ともばらつきが小さいことがわかった。

次に、図-7(b)の各 SST パターンにおける解析結果をみると、CC,GF,MI,MP,MR のグループと HA の 2つのグループに分類できる。前者は、再現期間が 40 年以上で GF が他の SST パターンに比べて強く推定していることを除いて、ほぼ同様に現在気候に比べて強く推定していることがわかる。後者は現在気候とほぼ変わらない分布を示した。表-2より、中心気圧の将来変化量の最小値については MI, MP がそれぞれ 8.5hPa, 7.0hPa 程度の減少となり、

表-2 日本沿岸域における爆弾低気圧の最低中心気圧の最小値(上段)と全爆弾低気圧最低中心気圧の平均値及び標準偏差(下段)

	Present	Future	
		All	
Min.	939.8	All	931.2
		CC	936.2
		GF	937.2
		HA	937.4
		MI	931.2
		MP	932.9
		MR	938.5
Avg. (S.D.)	951.3 (4.4)	All	947.5 (5.7)
		CC	947.4 (5.7)
		GF	943.7 (4.6)
		HA	950.5 (5.2)
		MI	947.0 (6.4)
		MP	950.8 (6.0)
		MR	947.7 (4.9)

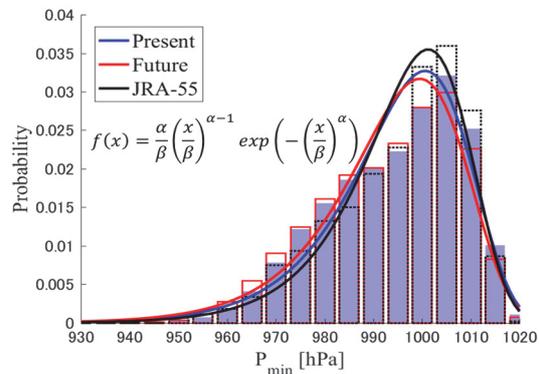


図-8 日本沿岸域の爆弾低気圧中心気圧の確率密度関数 (ヒストグラム: 計算結果, 実線: Weibull 分布)

他の SST パターンよりも大きくなっているのに対して、アンサンブル平均値についてはさきほども示した通り GF が 7.5hPa 程度の減少と最も大きくなっている。これは、GF では MI や MP に比べて沿岸域を通過する強い爆弾低気圧の割合が多いことを示している。また、いずれの SST パターンにおいても標準偏差が 4.6~6.4hPa とばらつきが小さいことがわかった。

沿岸域における爆弾低気圧の中心気圧の強度別の割合を解析した(図-8 の実線は α と β をパラメータに持つ Weibull 分布による近似線を示している)。現在気候($\alpha = 88.97, \beta = 1000.80$)と JRA-55($\alpha = 96.62, \beta = 1001.40$)を比較すると、970hPa 以上では差がみられるが、それ以下では類似していることがわかる。次に、現在気候と将来気候($\alpha = 88.61, \beta = 999.68$)を比較すると、将来的には台風並みに発達する強い爆弾低気圧の割合が増加する傾向にあることがわかった。また、この970hPa以下の強度における爆弾低気圧の発生数の将来変化に関する傾向は t 検定の結果、95%で棄却され統計的に有意である

ことが示された。

最後に、爆弾低気圧の中心気圧が低下しやすい時期を解析した。現在気候では970hPa以下の台風並みに発達する爆弾低気圧が来襲しやすいのは12月および1月であり、それぞれ年平均で0.09個、0.09個であった。それに対して将来気候では、12月、2月、3月に来襲しやすく、それぞれ0.12個、0.10個、0.11個であり、時期が変化することがわかった。

4. 結論

本研究によって得られた結果は以下の通りである。

- 日本周辺域における爆弾低気圧の発生数は、SST分布パターンに影響を受けるが、将来的に増加傾向にないことがわかった。
 - 通過頻度の解析の結果、太平洋上を通過する爆弾低気圧の数が減少するのに対して、日本海上を通過する数が増加することが有意な傾向であることがわかった。
 - 日本周辺域の爆弾低気圧の最低中心気圧の強度を解析した結果、将来的に強度が大きくなることがわかった。また、日本沿岸域における爆弾低気圧の強度や、台風並みに強い爆弾低気圧の割合が増加する傾向を示した。
 - SST将来変化パターンを太平洋、日本海の変動量に注目して定性的に分類し、爆弾低気圧の変動との関係性を説明しようとしたが、SST上昇量と爆弾低気圧の数、強度との相関がみられなかった。このことから、SST将来変化分布が直接的に爆弾低気圧特性に影響を与えているのではなく、大気上層などに影響を与えることで、間接的に特性が変化することが考えられる。
- 今後は爆弾低気圧が発達した環境場に対してのコンポジット解析および爆弾低気圧の寿命などからのブロッキング事例の解析、SST将来変化分布毎の結果の違いについて、海面更正気圧以外の他のパラメータを用いて明らかにする予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムおよび科学研究費補助金の支援による成果である。

参考文献

- 1) IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約：気象庁, 2014.
- 2) Graham, N. E. and Diaz, H. F.: Evidence for intensification of north Pacific winter cyclones since 1948, *Bull. Soc., Vol.82*, pp1969-1893, 2001.
- 3) Langenberg, H., Pzenmayer, A., von Storch, H., and Sandermann, J.: Storm-related sea level variations along the North Sea coast: natural variability and anthropogenic change, *Continental Shelf Res., Vol.19*, pp.821-842, 1999.
- 4) Yoshida, A. and Y. Asuma.: Structures and Environment of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region. *Mon. wea. Rev.*, 132, pp.1121-1142, 2004.
- 5) Kuwano-Yoshida and Minobe : Storm-Track Response to SST Fronts in the Northwestern Pacific Region in an AGCM , *Climate and Frontal Air-Sea Interaction*, pp.1081-1102, 2017.
- 6) 森信人, 有吉望, 安田誠宏, 間瀬肇 : 台風の最大潜在強度にもとづく高潮偏差の長期変動評価, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.72, No.2, pp.I_1489-I_1494, 2016.
- 7) 志村智也, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇 : MRI-AGCM3.2H アンサンブル実験にもとづく気候変動による極大波浪の将来変化予測, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.70, No.2, pp.I_1266-I_1270, 2014.
- 8) Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, E. Hirokazu, O. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan.* 90A, 233-258, 2012.
- 9) 森信人, 千綿蒔, 二宮順一, 間瀬肇 : JRA-55を用いた日本周辺の冬期低気圧の長期変動特性について, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.73. pp.I_487-I_492, 2017.

(2017.9.29 受付)

FUTURE CHANGE OF WINTER EXPLOSIVE CYCLONE USING LARGE ENSEMBLE CLIMATE PREDICTION DATA

Yuya TAKA, Junichi NINOMIYA, Nobuhito MORI

In this study, we evaluated the impact of climate change on explosive cyclone using the large ensemble climate prediction data (d4PDF) of present climate experiment 3,000 years (60 years × 50 members) and future climate experiment 5,400 years (60 years × 90 members). Explosive cyclones were extracted from sea level pressure and examined. Although the trend of increasing explosive cyclone didn't have statistical significance from the difference between present- and future-climate around Japan, the strongest explosive cyclone intensified in future-climate, and future change was estimated about -12 hPa. In addition, as a result of analyzing the explosive cyclone going through the coastal area of Japan, the proportion of strong explosive cyclone like the typhoon had increasing trend.