令和二年度 卒業論文

全球温暖化に対する南極域の応答感度に ついての海氷の影響を減らした検証

Verification of Antarctic response sensitivity

related to global warming,

reducing the uncertainties involved in sea ice

三重大学 生物資源学部 共生環境学科

地球環境学教育コース

気象・気候ダイナミクス研究室

517370 山中 晴名

指導教員:立花 義裕 教授

目次

第1章	序論	
第2章	使用	データ ・・・・・・ 4
	2-1	CMIP6
	2-2	ERA5
第3章	解析	手法 ••••••• 8
	3-1	全球温暖化に対する上層気温の応答感度の検証
	3-2	アンサンブル平均値の差の t 検定
第4章	解析	結果 ••••••••••••••••••••••••••••••••9
	4-1	結合モデルの再現性の確認
		4-1.1 再解析データにおける標準偏差
		4-1.2 各モデルの誤差
	4-2	全球温暖化に対する上層気温の応答感度の検証
	4-3	考察 ~温暖化レベルの低い将来に存在する特異なシステム~
		4-3.1 偏西風の弱化
		4-3.2 顕熱輸送量の増加
第5章	結論	
謝辞 ·	• • • • •	
参考引。	用文南	犬
付録 ·	• • • • •	

第1章 序論

南極氷床は地球上の淡水の約 90%を涵養している。南極大陸縁辺部で生成される南極底 層水の沈み込みは、大気から莫大な熱と CO₂を吸収し、全世界の海へと再分配している。 このように、南極氷床・南大洋は地球システムにおいて巨大な淡水・熱・CO₂のリザーバ としての役割を担う。ゆえに南極氷床・南大洋は数百~数千年スケールの全球気候や海水 準を左右する極めて重要な要素である。よって、南極氷床・南大洋が Tipping Point (臨界 点)に達する時期や状況、全球に及ぼす影響をより詳細に予測することは、学術的価値が あるだけではなく、各国の政策決定にとっても有益な情報である (IPCC 第 5 次評価報告 書).

1970年代後半以降,西南極の温暖化や南大洋深層水の昇温が観測されている.一方,東 南極の地表気温や大陸沿岸部の表層水温には有意な温暖化が確認されず,海氷域面積はむ しろ増加傾向にある.南極域は観測の困難さから,その変動要因に未解明な部分が多い. それぞれの要素の変動メカニズムの解明や将来予測について観測データやアイスコア・海 底コアなどの古環境データ,数値実験を用いた研究が数多くなされている最中である(た とえば, Hansen et al., 2016 など).

数値実験を用いた南大洋の将来予測研究の一つとして,Bracegirdle et al., (2020)があ る.この研究では大気海洋結合モデルを用いて,温暖化レベルの低い実験のほうが,温暖 化レベルの高い実験よりも,全球の2m気温(海面水温)の上昇に対する南極域の2m気 温 (海面水温)の応答感度(Eq.1)が良いという結果を得た(Fig.1).この結果は,全球 の温暖化レベルと南極域の2m気温 / 海面水温は単純な比例関係にないことを示唆してい る.しかしながら,この結果を導くまでに1点の懸念が残る.2m気温と海面水温はとも に海氷の有無に大きな影響を受ける物理量であるが,使用された結合モデルは過去の海氷 の長期変化傾向をうまく再現できていない(Fig.2).ゆえに海氷の将来予測においても不 確実性が否定できない.よって先行研究の結果は,この不確実性による影響を少なからず 受けたものではないかと考えられる.

以上より本研究では,Bracegirdle et al.,(2020)に倣い,海氷の影響が少ない(主に大気 循環によって決まる)上層の気温の応答感度を求め,異なる温暖化レベルの実験間で比較 することを目的とする.そして,先行研究と同じく,温暖化レベルの低い実験のほうが温 暖化レベルの高い実験よりも応答感度が良いのかどうか検証する.また,温暖化レベルの 低い将来に存在する特異な大気循環の片鱗として,南半球高緯度の偏西風の弱化と顕熱輸 送量の増加についての解析結果を紹介する.

2

応答感度
$$\left[\frac{?}{K}\right] \equiv \frac{\overline{z} \overline{z} \overline{z} A \mathcal{O}\left(2081 \sim 2100 \, \mathrm{年平均} \mathrm{fm}\right) - \left(1995 \sim 2014 \, \mathrm{FF} \mathrm{FP} \mathrm{fm}\right)}{2 \, \mathrm{fm} \, \mathrm{fm}$$



Fig. 2 CMIP5,6 の結合モデルの過去の海氷域面積(SIE)の長期変化傾向の再現性. (c) 3
月, (d) 9 月 Shu et al., (2020) 4 頁より引用.
赤・桃:観測データ,青: CMIP5 アンサンブル平均,黒: CMIP6 アンサンブル平均,灰:

CMIP6の各44モデル

第2章 使用データ

2-1 CMIP6

先行研究に倣い,第6期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)(V. Eyring et al., 2015)で提供されている大気海洋結合モデルの実験データを利用した(<u>https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6</u> よりダウンロード). 鉛直層は 19 等圧面であり,水平解像度は CDO(Climate Data Operators)を用いて1度(経度)×1度(緯度)に統一変換した. 20世 紀再現実験(historical)の1995~2014年,4種類の将来実験(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5; Tbl.1, Fig.3)および 20 世紀再現実験のデータを使用した.いずれも月平均値デ ータであり,使用変数は気温(K), 2m 気温(K)である.

Tbl.1 4 種類の将来実験の差異;21 世紀末における放射強制力が異なる. B. O'Neill et al., (2016) より引用.

Scenario name	Forcing category	2100 forcing ¹ (W m ^{-2})	SSP
Tier 1 ³			
SSP5-8.5	High	8.5	5
SSP3-7.0	High	7.0	3
SSP2-4.5	Medium	4.5	2
SSP1-2.6	Low	2.6	1



Fig. 3 4 種類の実験における 2015~2100 年の全球 2m 気温変化. 横軸は年. B. O'Neill et al., (2016) より引用.

◎色と温暖化レベルの関係

緑:温暖化レベルが低い,黄:中程度,赤:高い,紫:極めて高い

2-2 ERA5

モデルの再現性の確認基準として、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の ERA5 (H. Hersbach et al., 2020)を用いた.本データの水平解像度は 0.25 度(経度)×0.25 度 (緯度),鉛直層は 37 等圧面であり、地表面データもある。今回は 1995~2014 年の月平 均データを使用した.使用変数は気温(K)である。



Fig. 4 ERA5 の月平均データによって求めた 1995~2014 年の期間の平均値 色:東西平均気温(K),等値線:東西平均東西風速(m/s) (a)南半球の春(b)南半球の夏



Fig. 5 ERA5 の月平均データによって求めた 1995~2014 年の期間の平均値 色:東西平均気温(K),等値線:東西平均東西風速(m/s) (c)南半球の秋(d)南半球の冬

第3章 解析手法

3-1 全球温暖化に対する上層気温の応答感度の検証

応答感度の定義・比較期間は先行研究に倣い,東西平均値に対して(Eq.1)を適用した.温暖化レベルの低い(SSP1-2.6)・中程度(SSP2-4.5)の実験の応答感度のほうが温暖化レベルの高い(SSP3-7.0)・極めて高い(SSP5-8.5)実験よりも高ければ先行研究と同じ結果となる.

3-3 アンサンブル平均値の差のt検定

複数モデルのアンサンブル平均を比較するにあたり、温暖化レベルの低い実験(SSP1-2.6)と極めて高い実験(SSP5-8.5)との間で差のt検定を行った。平均が等しいという帰 無仮説 $\mu_X = \mu_Y$ のもとで、検定統計量t(Eq.2)は自由度 $N_1 + N_2 - 2$ のt分布に従う。両実 験は当分散ではないが、 $N_1 \approx N_2$ であるためt検定を採用した。

$$t(\bar{X}, \bar{Y}, S_x^2, S_y^2 \mid \mu_X = \mu_Y)$$

$$= \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_x^2 + (N_2 - 1)S_y^2}{N_1 + N_2 - 2}} \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}$$
Eq. 2

 \bar{X} , \bar{Y} : X, Yの標本平均, S_x^2 , S_y^2 : X, Yの不偏分散, μ_X , μ_Y : X, Yの母平均 本研究では

標本グループ
$$X(1), X(2), \dots, X(N_1)$$
: SSP1-2.6 実験 $(N_1 = 6)$
標本グループ $Y(1), Y(2), \dots, Y(N_2)$: SSP5-5.8 実験 $(N_2 = 6)$

である. 信頼水準 90%を超えるとき両実験のアンサンブル平均値に差があるとみなす.

第4章 解析結果

4-1 結合モデルの再現性の確認

南極大陸は平均標高が約2,200mである。ゆえに対流圏下層のデータは本来地形に埋まっていて,真の値ではない可能性が高い(Fig.5).よって本研究では、500hPa面より上層の気温について図示する。



Fig.6 (a) データ欠損率 (%) (b) 地表面気圧 (hPa)

(a) は、それぞれの緯度・高度において東西平均をするとき、本来であれば地形に埋まっていると考えられるグリッドの割合を示している。地表面気圧(図 b) を利用し、地表面気圧がp座標の圧力よりも低ければ、そのグリッドは本来地形に埋まっているものと判断した。

4-1.1 再解析データにおける標準偏差

再解析データ(ERA5)における 1995~2014 年の各月の標準偏差は Fig.6 の通りである. 冬・春半球の極域成層圏において標準偏差が大きいという特徴が読み取れる.



Fig.7 各月の標準偏差 (K)

(a) 南半球の春 それぞれの図の上部に月を記した.



(d) 南半球の夏 それぞれの図の上部に月を記した.



```
Fig.9 各月の標準偏差 (K)
```

(b) 南半球の秋 それぞれの図の上部に月を記した.



(c) 南半球の冬 それぞれの図の上部に月を記した.

4-1.2 各モデルの誤差

Fig.7 は各モデルと再解析データを比較したときの合致率を表している。1995~2014 年 の各月,計 240 か月において,再解析データの気候値±3 σ範囲に収まる確率を色で示して いる。1 σ は Fig.5 で示した値である。このうち,特に合致率の良い6モデル(付録)のア ンサンブル平均値を用いて,応答感度の検証を行った。



Fig. 11 再解析データとの合致率 (%)



Fig. 12 再解析データとの合致率 (%)



Fig. 13 再解析データとの合致率 (%)



Fig. 14 再解析データとの合致率 (%)



Fig. 15 再解析データとの合致率 (%)



Fig. 16 再解析データとの合致率 (%)

4-2 全球温暖化に対する上層気温の応答感度の検証

6モデルのアンサンブル平均値を用いて、全球温暖化に対する上層気温の応答感度を求めた(Fig.8,9). その結果、12~2月の温暖化レベルの低い将来(Fig.8 (a))において、他3 種類の温暖化レベル実験(Fig.8 (b)(c)(d))とは異なる、特異な応答がみられた. その特徴 を以下に挙げる.

- 南極域の 250~50hPa 面高度で、全球温暖化に対して極めて敏感に応答し、昇温する;最大+4(K/K)
- 南極域の 50hPa 面以上の高度で,全球温暖化に対して極めて敏感に応答し,降温する;最大−4 (K/K)
- 北半球中高緯度の 150~20hPa 面高度で,他3種類の温暖化レベル実験は降温する. しかし,温暖化レベルの低い実験では昇温する
- 両半球低中緯度の 30hPa 面以上の高度で,他3 種類の温暖化レベル実験よりも全球温 暖化に対する降温の度合いが小さい

しかし、6~8月では上記のような応答の違いがみられない (Fig.9).



Fig. 17 12~2 月の気温の応答感度(K・K-1)

(a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて 高い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す





(a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて 高い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す



前節で示した,温暖化レベルの低い将来の12~2月に存在する特異な応答について考察 する. Fig.10は6モデルのアンサンブル平均値で作成した1995~2014年平均値の12~2月 の気温(色)と東西風(等値線)である.



色:東西平均気温 (K),等値線:東西平均東西風速 (m/s);西風を正とする

4-3.1 偏西風の弱化

特異な応答のひとつとして,南半球高緯度で顕著な偏西風の弱化がみられた (Fig.11). また,南半球中低緯度における偏西風の強化が他3種類の温暖化レベル実験と比べ,特に 大きい.しかしこのような応答の差異は,北半球の夏にあたる6~8月ではみられない (Fig.12).



Fig. 19 12~2月の東西風速の応答感度(m・s⁻¹・K⁻¹)

⁽a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて 高い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す





(a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて 高い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す

4-3.2 顕熱輸送量の増加

偏西風の弱化がみられたことから,低中緯度-高緯度間の熱のやりとりが増えたのでは ないかと考え,顕熱輸送量の応答を調べた.その結果,温暖化レベルの低い将来はその他 3 種類の温暖化レベルの将来と比較して 12~2 月,6~8 月ともに顕熱輸送量の応答に違い がみられ,特に南緯 60 度付近の全層において顕熱輸送量の増加が確認できた (Fig.13,14).

4-3.3 ブリューワー・ドブソン循環の強化

全球温暖化に対して、両半球高緯度の成層圏で昇温の応答感度が良く、両半球低緯度の 成層圏で降温の応答感度が悪い(Fig.8)ことから、ブリューワー・ドブソン循環の強化が 関係していることが考えられる.ブリューワー・ドブソン循環は、赤道域で対流圏から上 昇してきた空気が成層圏に入り、成層圏内で両極に向かって流れ、高緯度地方で下降して 対流圏にもどる循環である(Brewer 1949, Dobson 1956).温室効果ガスの増加により、ブ リューワー・ドブソン循環が強化することが、先行研究(たとえば、Garcia and Randel 2008)で知られている.しかし、本研究でみられたような温暖化レベルの違いによるブリ ューワー・ドブソン循環の応答の違いについての研究は存在しない.ブリューワー・ドブ ソン循環と気温の応答感度の関連性、そして温暖化レベルとブリューワー・ドブソン循環 の強弱との関係については、今後の展望とする.



(a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて高 い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す





(a) 温暖化レベルの低い将来(b) 温暖化レベルが中程度の将来(c) 温暖化レベルの 高い将来(d) 温暖化レベルの極めて高い将来(e) 温暖化レベルの低い将来-極めて高 い将来;点は信頼水準90%で両者に差がある領域を示す

第5章 結論

本研究では、海氷の影響の少ない 500hPa 面より上層の気温の全球 2m 気温上昇に対する 応答感度を4種類の温暖化実験で比較することを目的とした.そして、先行研究と同じ く、温暖化レベルの低い実験のほうが高い実験よりも南極域の応答感度が良くなるのかを 検証した.

特に再現性の良い6モデルのアンサンブル平均値で応答感度を求めた結果,南半球の夏 にあたる12~2月で,南極域の2m気温だけでなく南極域上層や他の緯度の気温でも,温 暖化レベルの低い将来において特異な応答をすることがわかった.この結果は,温暖化レ ベルの低い将来には,全球規模の特異な機構が存在する可能性を示唆するものである.そ の一端として,12~2月の南半球高緯度で偏西風の弱化が顕著であることが挙げられる. また,南極域への顕熱輸送量の増加が確認できた.

しかしながら,温暖化レベルの低いシナリオに存在する特異な応答の全体像や,そのメ カニズムを見い出すまでは至らなかった.特に,全球成層圏の昇温の応答感度に他3種類 の温暖化レベルと比較して違いがみられたため,今後はブリューワー・ドブソン循環の応 答を中心に解析を進め,全容解明を目指す.

謝辞

本研究を進めるにあたり,指導教員の立花義裕教授に厚く御礼申し上げます. ゼミにお いては気象力学および気候学の基礎について懇切丁寧にご教授いただき,知識を深めるこ とができました.さらに,研究集会や学会にてプロの研究者や他大学の学生の発表を聴講 したり,直にお話したりする機会を数多く与えてくださったことで,常に刺激を受けなが ら楽しい研究生活を送ることが出来ました.そして,地球環境学教育コースの先生方から は,地球環境に関する幅広い知識や考え方を学ばせていただき,世界を広めることができ ました.ありがとうございました.

また、気象・気候ダイナミクス研究室の先輩方にも心より感謝しております. 安藤研究 員には、多くの時間を割いて、研究議論を交わし励ましの言葉をかけてくださったり、手 法に関して様々なご助言をいただいたり、新しい計算機の立ち上げにあたり懇切丁寧なご 指導をいただいたりと、誠にお世話になりました. また、研究内容やプログラミング技 術、文章構成、スライド作成について多くのご助言をいただいた太田圭祐氏、中西友恵 氏、加藤茜氏、中村祐貴氏に深謝いたします. その他、同研究室の同期や後輩の皆様に は、根気強く発表練習に付き合っていただき、感謝しております.

参考引用文献

- ・ 大島慶一郎, 須藤斎, 北川暁子ほか, 2018: 巨大リザーバ:南大洋・南極氷床. *低温* 科学, 76, 1-12,13-23, 50-70, 145-152.
- Steig, E. J., et al., 2009: Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, **457**, 459-462.
- M. Meredith et al., 2019: Polar Regions : Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. *Water Policy*, **3**,203-320.
- Purkey, S. G. and G. C. Johnson, 2010: Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. *Journal of Climate*, 23, 6336-6351.
- 海氷域面積の長期変化傾向(全球),気象庁, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/series_global/series_global.html,最終閲 覧日:令和3年2月3日
- J. Hansen et al., 2016: Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °c global warming could be dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3761-3812
- T. Bracegirdle et al., 2020: Twenty first century changes in Antarctic and Southern Ocean surface climate in CMIP6. *Atmospheric Science Letters*, 21, 1-14.
- Q. Shu et al. 2020: Assessment of Sea Ice Extent in CMIP6 With Comparison to Observations and CMIP5. *Geophysical Research Letters*, **47**, 1-9.
- V. Eyring et al., 2015: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8, 10539-10583.
- B. O'Neill et al., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482.
- H. Hersbach et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
- A. Brewer 1949, Evidence for a world circulation provided by measurements of helium and water vapour distribution in thestratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75, 351–363
- G. Dobson 1956, Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere. *Royal* Society, 236, 187–193
- R. Garcia and W. Randel, 2008: Acceleration of the brewer-dobson circulation due to increases in greenhouse gases. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **65**, 2731-2739

NorESM2-MM	NorESM2-LM	MPI-ESM1-2-HR	CESM-WACCM (T	CESM2 National	AWI-CM-1-1-MR	Model name
Norwegian Climate Center (Norway)	Norwegian Climate Center (Norway)	Planck Institute for Meteorology (Germany)	Center for Atmospheric Research he United States of America)	Center for Atmospheric Research he United States of America)	Alfred-Wegener-Institut (Germany)	Institution (Nation)
3	3	10	3	11	5	historical
1	1	2	1	3	1	Number SSP1-2.6
2	3	2	5	3	1	of ensemble SSP2-4.5
1	1	3	1	3	5	member SSP3-7.0
1	1	2	5	3	1	SSP5-8.5

付録
使用
した6
モデル
いの情報

•