平成24年度 卒業論文

海氷の再現性の高いモデルを用いた 北半球気候の将来

Possible future climate predicted by climate models with high reproducibility of Arctic sea ice

三重大学 生物資源学部

共生環境学科 自然環境システム学講座

地球環境気候学研究室 509376

平野 穂波

指導教員:立花義裕教授

Abstract	4
Chapter 1	Introduction5
Chapter 2	Data and method7
2-1.	Observational data
2-2.	CMIP3 model data
Chapter 3	Taylor diagram8
Chapter 4	Result9
4-1.	 Climate of the 20th Century [1979-2011] 4-1-1. 925hPa wind fields in June-August on the time series of September the Arctic sea ice concentration 4-1-2. 925hPa wind fields in September on the time series of September the Arctic sea ice concentration
4-2.	Climate of the future [2040-2050]
4-3	Climate of the north hemisphere in the future

Chapter 5	Discussion and remark	11
Acknowledgm	ent	12
References		13
Figure captio	ons	14

Abstract

近年,北極海氷域の減少傾向が観測されており,2007年9月には記録最も小さい海氷面 積が観測された.さらに昨年の2012年には2007年の記録を塗り替え史上最少の海氷面積 を記録し,海氷減少が顕著となっている. Ogi and Wallace. [2012]ではNCEP/NCAR 再解 析データを用いて,2007年9月の北極海氷域925hPaの風の偏差場を解析した.その解析 結果では,北極海中央付近での高気圧性循環の卓越や,ラプテフ海での低気圧性渦,また 北極海を横断しフラム海峡へと向かう風の流れなど特徴的な風の場が見られた.本研究で は,第三次気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)の複数の気候モデルによる実験結果と 観測された海氷と大気場の関係を比較することで再現性の高いモデルを選定し,選定した モデルを用いて大気場が海氷減少に与える影響を明らかにすることを目的として解析した. またその選定したモデルを用いて北半球における将来気候の変化も探った.

9月の海氷密接度時系列を 6,7,8月の大気場に回帰した結果では、北極上に高気圧性循環の卓越や、フラム海峡を大西洋向きに流れる風の場がみられた.また同様に 9月の大気場に回帰した結果では、北極海を横断しフラム海峡へ海氷を押し流す風の向きや、北極海上に低気圧性循環の発達がみられ、海氷減少と風との関係を見ることが出来た.また、将来気候での変化の結果では、正の AO が見られ、現在と比較して将来は正の AO パターンになりやすいと考えられる.

4

Chapter 1 Introduction

近年,北極域で海氷減少が顕著となっており,2007年9月では記録最少の海氷面積が観 測された.さらに昨年の 2012 年 9 月には 2007 年の記録を塗り替え,さらに小さい海氷面 積を観測した.Figure1は北極域の海氷面積の年変動を示している.この図から,北極域 の海氷面積はどの年も6,7,8月に急激に減少し始め、9月に最小の面積に達していることが 分かる. L'Heureux et al. [2008]では, 夏季の PNA パターンが夏の海氷域の急激な減少を もたらすと示しているが、いまだ要因は明らかになっていない. Ogi and Wallace. [2012] では NCEP/NCAR 再解析データを用いて,海氷減少を示した 2007 年と,示さなかった 2011 年の北極海氷域 9 月の 925hPa の平均風偏差場を解析した.結果,両年で海氷減少を示し た 6.7.8 月の平均風偏差場を見ると、両年とも高気圧性循環が発達し、フラム海峡から大西 洋向きに流れている大気場が見られた.同様に,9月の平均風偏差場を解析した結果,9月 以降も海氷が減り続けた 2007 年では 6.7.8 月よりさらに強い高気圧性循環の卓越とフラム 海峡から大西洋へと向かう風の場が見られた.しかし,9月以降海氷が増加傾向となった 2011 年では同様の風の場は見られず、フラム海峡から北極中心へと向かう逆向きの風の場 が見られた.これらの結果より,北極上の下層風が夏季における海氷の後退を調節する重 要な役割があると示した.本研究では, The third phase of the Coupled Model Intercomparison Project(CMIP3)マルチ気候モデルの中からまず海氷の再現性の高いモデ ルを選定し、その選定したモデルを用いて、大気場が海氷減少に与える影響を検証する. また選定したモデルを用いて将来温暖化した際北半球がどういった将来気候になるのかに ついても明らかにする.

もし、モデルデータを用いて海氷に対して影響を与えている風の場が見られれば、近年の海氷減少の一因を明らかにすることが出来る.また、CMIP3マルチ気候モデルデータの中から再現性の高いモデルを選定することで、より正確な温暖化後の将来気候予測が可能

 $\mathbf{5}$

となる. そこで、本研究でははじめに、Taylor diagram [Taylor. 2001] を用いて観測値に 対する各モデルの海氷の再現性を確認する.

Chapter 2 Data and method

2-1. Observational data

本研究では、英国ハドレーセンターによって作成された HadISST(Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature data sets)の海氷密接度の月別データを使用した.また、 アメリカ環境予報センター(National Centers for Environmental Prediction:NCEP)/アメリカ大 気研究センター(National Center for Atmospheric Research:NCAR) Reanalysis Project によって 作成された NCEP/NCAR 再解析データの風の東西成分・南北成分の月別データを使用した. 期間は二つのデータともに 1979~2011 年である.

2-2. CMIP3 model data

CMIP3 のデータは PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) によ り WEB 上で公開されている. CMIP3 マルチ気候モデルのうち PCMDI により公開されてい るモデルは 24 ある. そのうち本研究では 14 モデルを対象とし(Figure 2), Taylor diagram に よって MIROC3.2(medres),GFDL-CM2.0,GFDL-CM2.1 の 3 モデルを選定した. 選定方法につ いては後章で述べる. モデルデータの中から海氷密接度,海氷厚,風の東西成分,南北成 分,ジオポテンシャル高度,地上気温の月別データを使用した. 期間は 1979~2011 年・2040 ~2050 年である.

Chapter 3 Taylor diagram

より正確な将来気候を求めるために、まずモデルが現在気候を表している観測値といか に近いか、または全く合っていないかを客観的に判断する必要がある.そこで本研究では Taylor diagram を用いてモデルの再現性を評価する.Taylor diagram とは、観測値が示すある パターン場とモデルが示すパターン場がどれほど似ているかを視覚的に評価できるもので ある.本研究では、1979~2011年9月の海氷密接度時系列を同期間の6,7,8月平均で北緯75 ~90度の海面気圧場に回帰したパターン場をモデル・観測値で作成し、比較した.結果を Figure 4 に示した.Taylor diagram の円弧はパターン相関係数であり、中心からの距離は標準 偏差になる.また太線は観測値の標準偏差にあたる.つまり、Figure 4 中の星にあたる部分 が観測値のパターン場であり、星に近いものほど観測値により近いモデルであるといえる.

ここで、CMIP3マルチ気候モデルデータの24モデルのうち、対象期間のすべてにおいて、 風の東西成分・南北成分・海氷密接度,海氷厚データが存在した14モデルを対象とした. アルファベットは対象とした14モデル各々を示している.ここで、まず正の相関係数を持 ち、観測値の標準偏差に近い値を持つ7モデル(B,C,D,H,J,K,L)を選定した.さらに、その7 モデルの中から、正の相関係数を持ってはいるが海氷がほとんど減っていないモデルがあ るため、より観測値に近いモデルを選定するためにそれぞれのモデルの海氷密接度の減少 具合・傾きを比較した(Figure 3). 観測値である HadISST の減少の傾きが-0.3533 であったた め、この値に近いとみなした3モデルを選定した.その3モデルが C: MIROC3.2(medres),J: GFDL-CM2.0, K: GFDL-CM2.1 である. Figure 5 では Taylor diagram に使用した観測値のパタ ーン場と、選定した3モデルのパターン場を示した.

8

Chapter 4 Result

4-1. Climate of the 20th Century [1979-2011]

4-1-1 925hPa wind fields in June-August on the time series of September

the Arctic sea ice concentration

海氷減少と大気場にどう関係性があるかを求めるために, Taylor diagram を用いて選定 した3モデルに, 1979~2011年9月の海氷密接度時系列を1979~2011年6,7,8月の北極 上925hPaの風の場に回帰した(Figure 6). また色は同期間6,7,8月の平均海氷厚を示して いる. 色が青に近いほど海氷厚の減少率が大きく, 黄色に近いほどあまり減少していない ことを示している.

結果として、3 モデルに共通して北極上空に高気圧性循環の卓越が見られた.またモデル J,K では、ユーラシア大陸側の海域で低気圧性循環もみられ、その低気圧性循環の存在によ ってさらに高気圧性循環が強められ、フラム海峡から大西洋へと向かう風の場が強化され ているようにみえた.また海氷厚の減少率ではモデルごとに差が見られた.モデル C では 北極中心付近で大きな減少が見られたが、モデル K では全域で大きな減少は見られなかっ た.

4-1-2 925hPa wind fields in September on the time series of September the Arctic sea ice concentration

次に, 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 1979~2011 年 9 月の北極上 925hPa の 風の場に回帰した(Figure 7). 色は同期間 9 月の平均海氷厚を示している.

結果としてモデル K を除く2 モデルに共通して,北極海中心を横切り,フラム海峡に向かう風の場が見られた.また,ユーラシア大陸側の海域に低気圧性循環の卓越もみられ, 6,7,8月の大気場と同様に,北極中心を横切る風の場が強められて海氷がフラム海峡から大 西洋へと運ばれていることが分かった.またモデルKでは同様の大気場が見られなかった. 考えられる原因として,モデルKの9月平均海氷厚を見てみると他の2モデルより明らか に薄かったことから,モデルKでは6,7,8月の大気場によって海氷が溶かされ薄くなったた めに,他の2モデルとは異なった大気場になった可能性があると考えた.

4-2. Climate of the future [2040-2050]

将来の北極域において現在とどう異なる風が吹くのか,またどの海域でどれほど海氷厚 が減少するのかを明らかにするために,2040~2050年6,7,8月の平均風・海氷厚に1979 ~2011年6,7,8月の平均風・海氷厚を引いた偏差を示した(Figure 8). 色は海氷厚を示して おり,赤に近いほど減少が大きいことが分かる.

結果として3モデルに共通する風の場は見られなかった.しかし,3モデルの中で最も海 氷の減少率が大きかった C: MIROC3.2(medres)の大気場を見ると,北極上の大気場が現在気 候と完全に一致する訳ではないが,フラム海峡に向かい大西洋へと流れていく風の場を示 していた.この結果より,将来気候においても,フラム海峡へと向かう風の場が海氷減少 に影響を与えていることが分かった.しかし,全てのモデルではその風の場が見られなか ったことから,将来気候では現在気候とほとんど異なる風の場が吹くことが分かり,よっ て将来では違う要因により海氷が減少している可能性が高いと考えた.

4-3. Climate of the north hemisphere in the future

将来どういった気候変化になるか求めるために,2040~2050年9月のジオポテンシャル 高度・地上気温から1979~2011年9月のジオポテンシャル高度・地上気温を引いた偏差を 示した(Figure 9,10).3モデルのうち2モデルで正のAOパターンを示したことから,将来 において北半球では正のAOパターンになりやすいということが分かった.また地上気温 を見てみると,3モデルの結果から日本では3,4℃気温が上昇することが分かった.

Chapter5 Discussion and remarks

1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を同期間 6,7,8 月の海面気圧場に回帰した結果を Taylor diagram で表した結果,一部のモデルでは良い相関が得られたが,多くのモデルで あまりよくない相関を得た.この結果から,CMIP3 マルチ気候モデルにおける海面気圧場 に対する海氷の再現性の低さが分かった.また,全体的に再現性が低かったことから,選 定したモデルで見られた特徴的な風の場がすべてのモデルで見られなかったと考えられる. 選定した 3 モデルで,1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 6,7,8 月の風の場に回帰 した結果,3 モデルに共通して,北極海上空に大きな高気圧性循環が卓越した.また同様に 9 月の風の場に回帰すると,モデル K を除いて2 モデルに,北極海を横切りフラム海峡に 向かい,大西洋へと流れる風の場とユーラシア大陸側に存在する低気圧性循環の存在が見 られた.このことから,Ogi and Wallace. [2012]で示された特徴的な大気場が与える海氷減 少への影響をモデルにおいても再現することが出来た.また,6,7,8 月の大気場は海氷が溶け 始めるきっかけを海氷に与える風の場を示しており,また9 月ではさらに海氷を減少へと 向かわせる風の場を示していることが分かった.

また将来気候の結果から,温暖化により海氷が減少していくと,日本を含む北半球では 正の AO パターンになりやすい傾向にあり,地上気温が 2.3℃上昇することが分かった.

本研究では、実際の北極海氷の年変動の通り、6,7,8月に海氷が減少し始め、9月に最低 値に達するという前提でモデルデータでも見ていたが、もしかしたらモデルでは8月に最 低値に達している可能性もある。その場合大気場も一月ずつずれていくため、また違う大 気場になるかもしれない.

11

Acknowledgment

研究を進めるにあたって、立花義裕教授には気象に関する専門的知識に加えて、解析手 法、発表の仕方などご指導いただき、大変感謝しております.また海洋研究開発機構の小 木雅世氏には、北極の専門知識を教えていただいたり、研究を進めるにあたり生じた疑問 点をご相談に乗っていただいたり、コメントやアドバイスをいただき、厚く御礼申し上げ ます.三重大学生物資源学部共生環境学科自然環境システム学講座の先生方には、合同ゼ ミでご指導いただいたことはもちろん、海洋・大気・統計などの授業を通して研究の基礎 知識を多く学ばせていただきました.さらに、計算機の使い方や基礎知識、研究をおこな う上で分からないことなど、その都度丁寧に教えていただいた地球環境気候学研究室の先 輩方、ゼミでの議論を通じて多くの知識や意見をいただいた研究室の皆様には大変お世話 になりました.最後に、同級生の皆様には研究室配属からこれまで日々お互いに助け合い、 研究に対して意見を言い合うことで、楽しみながら切磋琢磨し成長できたことを深く感謝 いたします.

References

[1] Ogi, M., J. M. Wallace. (2012), The role of summer surface wind anomalies in the summer Arctic sea ice extent in 2010 and 2011, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 39, L09704, doi:10.1029/2012GL051330, 2012.

[2] Taylor, K. E. (2001), Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, J. *Geophys. Res.*, 106, 7183-7192, doi:10.1029/2000JD900719.

[3] http://www.ijis.iarc.uaf.edu/seaice/extent/Sea_Ice_Extent_L.png

Figure captions

Figure 1 北極域海氷面積の年変動を示している.この図から 6,7,8 から急激に減少し始めて 9月に最小値を記録していることが分かる.昨年の 2012 年 9 月に記録最小値を観測した.

Figure 2 対象とした CMIP3 のモデルである.

Figure 3 Taylor diagram の結果より、正の相関係数をもち、観測値の標準偏差に近い値をもつ7モデルと観測値の9月海氷密接度の減少率と平均海氷厚を示している.

Figure 4 Taylor diagram を示している. アルファベットは対象とした 14 モデルを示している. また赤いアルファベットは最終的に選定したモデルである.

Figure 5 Taylor diagram で用いた観測のパターン図と選定した3モデルのパターン図である. 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 6,7,8 月の海面気圧場に回帰したパターンである.

Figure 6 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 6,7,8 月の風の場に回帰した図である.

Figure 7 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 9 月の風の場に回帰した図である.

Figure 8 2040~2050 年 9 月の平均風・海氷厚から 1979~2011 年の値を引いた偏差を示している.

Figure 9 2040~2050 年 9 月のジオポテンシャル高度から 1979~2011 年 9 月の値を引いた 偏差を示している. Figure 10 2040~2050 年 9 月の地上気温から 1979~2011 年 9 月の値を引いた偏差を示している.



Figure 1 北極域海氷面積の年変動を示している.この図から 6,7,8 から急激に減少し始めて 9 月に最小値を記録していることが分かる.昨年の 2012 年 9 月に記録最小値を観測した.

	model
Α	BCCR-BCM2.0
В	CSIRO-Mk3.5
С	MIROC3.2(medres)
D	MRI-CGCM2.3.2
Е	CCSM3
F	UKMO-HadCM3
G	UKMO-HadGEM1
Н	CGCM3.1(T63)
Ι	CNRM-CM3
J	GFDL-CM2.0
Κ	GFDL-CM2.1
L	GISS-AOM
Ν	MIROC3.2(hires)
0	CSIRO-Mk3.0

Figure 2 CMIP3 の対象とした 14 モデル.

	model	9月の海氷の減少傾向	海氷厚
В	CSIRO-Mk3.5	-0.0723	0.143334
С	MIROC3.2(medres)	-0.3012	0.58977
D	MRI-CGCM2.3.2	-0.0751	1.59184
Н	CGCM3.1(T63)	-0.0767	0.425704
J	GFDL-CM2.0	-0.3112	0.364981
Κ	GFDL-CM2.1	-0.2927	0.088591
L	GISS-AOM	-0.0619	1.291908
\star	Observation	-0.3533	

Figure 3 正の相関を持ち,観測値の標準偏差に近い値をもつ 7 モデルと観測値の,9月の海氷減少傾向と海氷厚.B,D,H,L ではあまり変動しておらず,海氷が減少していないことが分かる.



Figure 4 Taylor diagram を示している.アルファベットは対象とした 14 モデルを示している.また赤いアルファベットは選定したモデルである.



Figure 5 Taylor diagram で用いた観測のパターン図と選定した 3 モデルのパターン図 である.

1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 6,7,8 月の海面気圧場に回帰したパターンである.



Figure 6 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 6,7,8 月の風の場に回帰した図である



Figure 7 1979~2011 年 9 月の海氷密接度時系列を 9 月の風の場に回帰した図である.



Figure 8 2040~2050 年 9月の平均風・海氷厚から 1979~2011 年の値を引いた偏差を示している.



Figure 9 2040~2050 年 9 月のジオポテンシャル高度から 1979~2011 年 9 月の値を引いた偏差を示している.



Figure 10 2040~2050 年 9 月の地上気温から 1979~2011 年 9 月の値を引いた偏差を示している.