

令和3年1月修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)
人工衛星データを用いた南極海氷面積の変動要因の解明
Processes on a change of sea ice area in the Southern Ocean
revealed by satellite observation data

学籍番号 47-196630 小野村知之
指導教員 菊地 隆 客員教授

(令和3年1月27、28日発表予定)

Keywords: 南極海氷面積, 海氷漂流, 氷縁, 変動メカニズム

Keywords: Antarctic sea ice area, Sea ice drift, Ice edge, Fluctuation mechanism

1. 緒言

地球温暖化の影響により北極海の手氷面積が激減していることが注目されている一方で、南極海の手氷面積は人工衛星による手氷の観測が開始された1979年から2014年までは微増傾向にあった。しかし、2014年に観測史上最大の年平均手氷域面積を記録した後に急激に減少し、2017年には観測史上最低面積を記録した[1]。南極海において手氷は、大気・海洋の熱収支に影響を与えるアイスアルベドフィードバックにより気候変動に影響する要素の一つとされていること、沿岸での南極底層水の生成により海洋深層循環を駆動していること、南極海に特徴的な海洋生態系の維持において重要であることから、気候変動や地球環境および生態系と密接に関係している。このため、手氷動態の変動と気候変動の関係を明らかにすることは地球環境の変動の理解・予測に貢献することとなるが、南極海の手氷分布の変化の要因は未だ十分に理解されていない。

手氷分布を変化させる要因の一つとして手氷漂流が挙げられ、手氷は風、海流、手氷同士の相互作用によって駆動される。このことから、手氷漂流の変化と手氷密接度の変化、さらに手氷漂流を決定すると考えられる大気の循環と手氷密接度の変化を関連づけるための研究が活発に行われている。例えば、秋季の南北成分の手氷漂流速度の変化と手氷密接度の変化に関する報告や[2]、大気の変動パターンに着目しエルニーニョ・南方振動および南極振動と手氷密接度の変動パターンの関係を指摘する報告がされている[3]。

本研究では人工衛星による観測で得られた手氷密接度と手氷漂流速度の最新のデータを用いて、近年の南極海の手氷動態の変化の実態を明らかにする。特に、手氷分布の変化に対する手氷漂流による力学的要因と手氷の生成・融解による熱力学的要因の寄与に着目し解析を行った。これにより、近年の急激な変化を含めた南極海の手氷動態の変化の原因を説明することを目的とする。

2. 使用データ

本研究では時間解像度が1日の手氷密接度と手氷漂流速度のデータセットとして、人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計センサである AMSR-E および AMSR2 によって観測され、国立極地研究所と JAXA との協定の下に配布されている手氷密接度データと、Kimura (2004)などで使用されている既往のパターンマッチング手法で計算された手氷漂流速度データを使用した[4]。手氷密接度データおよび手氷漂流速度データの水平解像度は、それぞれ10 km、60 kmである。また、大気・海洋のデータセットとして欧州中期気象予報センターから提供されている大気再解析データの ERA5 より、月平均海面気圧データおよび月平均海面水温データを使用した。ERA5 より使用したデータの水平解像度はいずれも緯度経度方向に0.25度である。本研究において解析の対象となるデータ期間は主に2003年1月から2019年12月までであるが、2011年10月から2012年7月までの期間は AMSR-E から AMSR2 へのセンサの移行期間であったため、手氷密接度データと手氷漂流速度データが欠損している。

3. 南極海の手氷動態の特徴の把握

3.1 手氷分布の季節変化

南極海の手氷動態の平均的な季節変化を把握するため、2003年から2019年までの月平均手氷密接度と月平均手氷漂流速度の平均を計算した。また、得られた月平均手氷密接度を用いて手氷面積の平

均的な季節変化を計算した。Fig. 1 に示すように、南極海の水氷面積は2月（夏季）に最小を、9月（冬季）に最大を示す。水氷面積が最小になる夏季にはウェッデル海と大陸沿岸以外でほとんど水氷がなくなっている。水氷漂流速度は、一般的に氷縁部では東向き、沿岸部では西向きである。3月から水氷が拡大していく中で氷縁部の速度が水氷域内部と比較して速い。一方で水氷漂流速度に明確な季節間の違いが見られなかった。

3.2 水氷分布の経年変化

計算された水氷密度と水氷漂流速度のデータから、年平均および月平均の経年トレンドを求めた。合わせて、水氷密度の変動が大きい時期・海域を把握するため月平均水氷密度の経年変化による分散を計算した。Fig. 2 の年平均水氷密度のトレンドに示すように、冬季に水氷分布が大きく拡大するウェッデル海沖やロス海沖では年平均水氷密度のトレンドは減少傾向にあり、南極海全体の年平均水氷面積の減少傾向に影響を与えていることが考えられた。一方でアムンゼン海、ベリングスハウゼン海、東経90度から東経150度までの海域においては年平均水氷密度のトレンドは増加傾向にあることが確認された。水氷密度の分散は年間を通して氷縁部で大きく、冬季の水氷域内部ではほとんど変化がない。Fig. 3 に示すように月平均水氷密度のトレンドが氷縁部で顕著に現れており、経年変化の原因を明らかにするためには氷縁部の水氷動態の変動を解析することが必要であると示唆された。月平均水氷密度のトレンドからは、夏季の沿岸付近での水氷密度の増加傾向が年平均水氷密度における沿岸の増加傾向に影響を与えていることが示唆された。また、ウェッデル海沖、ロス海沖の氷縁部では年間を通して減少傾向であること、ロス海沖の東側からアムンゼン海、ベリングスハウゼン海にかけては7月から11月まで増加傾向であることが確認された。

月平均水氷漂流速度のトレンドでは7月、10月にウェッデル海沖やロス海沖で渦型のトレンドが形成されている様子が見られ、水氷密度のトレンドとの比較から、水氷が沖に流れ出ることによって水氷が存在しない海域に水氷分布が広がり、その海域の水氷密度が増加するというメカニズムが働いていることが考えられた。南北および東西成分の水氷漂流速度の偏差と水氷面積の偏差について、南極海を経度30度ごとに12の海域に分け、月ごとに相関係数を計算した。南北成分の水氷漂流速度について、7月から9月までウェッデル海沖では正の相関が見られるのに対し、ロス海沖では負の相関が見られた。正の相関が見られることから水氷漂流によって水氷が存在しない海域に水氷分布が広がるメカニズムの寄与が示唆される一方で、負の相関については水氷が低緯度帯の高い気温・海水温に触れやすくなることで融解が促進されるというメカニズムの寄与が考えられる。それぞれの時期・海域によって海水温をはじめとする海洋の条件や水氷漂流の方向が異なるため、南北および東西成分の水氷漂流速度のみによって水氷面積の経年変化の原因を一概に説明することはできなかった。

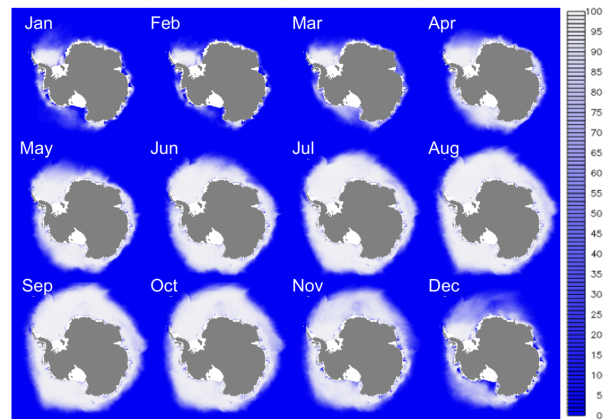


Fig. 1 Averaged seasonal change in sea ice concentration from 2003 to 2019.

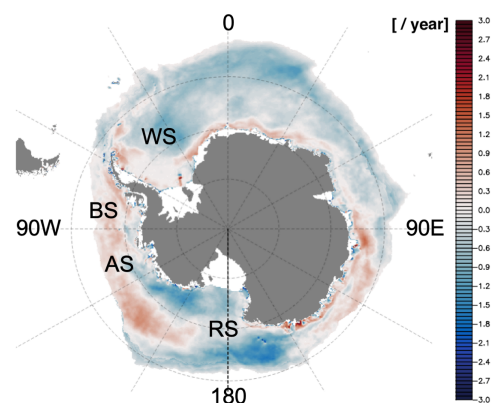


Fig. 2 Trend of annual mean sea ice concentration from 2003 to 2019.

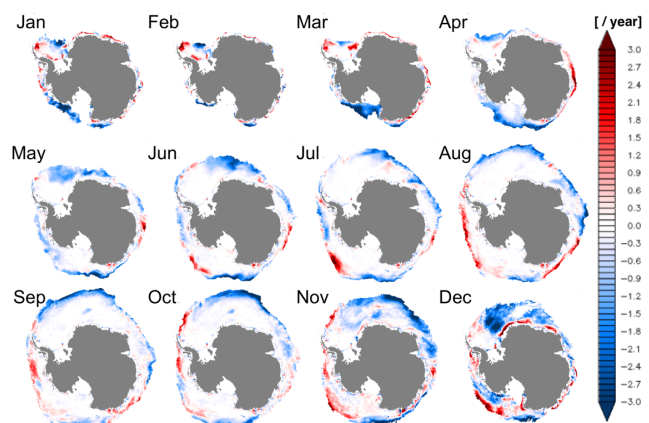


Fig. 3 Same as Fig. 2 but monthly mean sea ice concentration.

4. 海氷動態の変動と大気の変動の関係

EOF (Empirical Orthogonal Function) 解析とは、多数のデータからモードと呼ばれる少数の時間・空間関数を抽出し、もとのデータの持つ特徴を理解しやすくするための手法である。2003 年から 2019 年までの海氷密接度、海氷の収束・発散、海面気圧の月平均データについての EOF 解析を行い、第 1 モードから第 4 モードのまでの空間関数 (EOF)、時間関数 (Principal Component, PC)、寄与率を得た。

海氷密接度と海氷の収束・発散では年間を通して第 1 モードの寄与率は 20%以下と特筆して高い値ではなかった。海氷の収束・発散の EOF では相関係数の正負が反転する箇所が点在しており、海域ごとにまとまって分布を示すパターンは見られなかった。また、海氷密接度の EOF と海面気圧の EOF との間に類似性は確認されなかった。さらに、PC についてもそれぞれの月で共通点は確認されなかった。海氷動態の変動と大気の変動の関係を考察するために EOF 解析を行ったが、残念ながら有意な関係性は得られなかった。これを明らかにするには、伝播成分の表現が可能な CEOF (Complex EOF) 解析を行う必要があると考えられる。

5. 海氷域の変動メカニズム

5.1 4 成分データセットの作成

海氷面積の変化に対して海氷漂流による力学的要因と海氷の生成・融解による熱力学的要因が与える影響を評価するため、ある 1 日の海氷密接度から翌日の海氷密接度への変化分を力学的要因による変化分と熱力学的要因による変化分に分けた。海氷漂流速度のデータを用いてある海域への海氷の収束成分を力学的要因による変化分として計算し、これを海氷密接度の変化分から差し引くことで熱力学的要因による変化分とした。力学的要因は海氷の流入を正として移流による海氷密接度の増減を表し、熱力学的要因は海氷の生成を正として生成・融解による海氷密接度の増減を表した。さらに、海氷密接度の分散が氷縁部で大きかったことから、得られた力学的要因と熱力学的要因の成分をそれぞれ氷縁部の成分と海氷域内部の成分に分けることで、海氷密接度の変化を表す 4 成分のデータセットを作成した。

10 km 四方の海域ごとに、その海域を氷縁部として抽出する条件を次のように定めた。

- 1) その海域自身の海氷密接度が 5 より大かつ 100 以下である
- 2) その海域を中心とした周囲 7 x 7 の海域内に海氷密接度 0 以上 5 以下の海域が存在する
- 3) その海域を中心とした周囲 7 x 7 の海域内に陸がない

Fig. 4 に示すように海氷密接度データから正しく氷縁部が抽出されていることが確認された。また、時期・海域による海氷域の変動メカニズムの特徴を明らかにするため、4 成分データセットについて経度 30 度ごとに 12 の海域に分け、それぞれ 1 ヶ月ごとに積算した。

5.2 各海域の季節変化

海氷密接度データと作成した 4 成分のデータセットを用いて 1 ヶ月ごとの海氷面積の変化と、4 成分それぞれによる海氷面積の変化量を計算し、2003 年から 2019 年までの月ごとの海氷面積変化の平均を計算した。氷縁部の力学的要因は海氷の沖向きおよび陸向きの漂流、または 30 度ごとの経度線を横切る漂流によって、ある海域の海氷面積が増加または減少することを表す。

Fig. 5 は西経 150 度から西経 120 度までのロス海東側の海域における各月の平均的な海氷面積変化を示す。氷縁部の熱力学的要因 (赤斜線部) が 6 月から融解成分となっていることが特徴として挙げられるが、全体の海氷面積変化

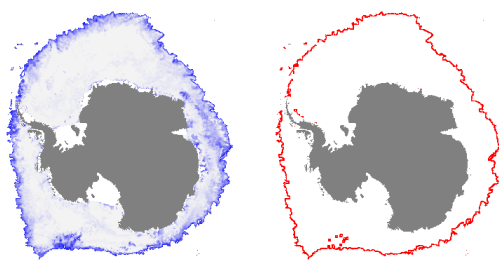


Fig. 4 (Left) Sea ice concentration on Sept. 1, 2003. (Right) Extracted ice edge on Sept. 1, 2003.

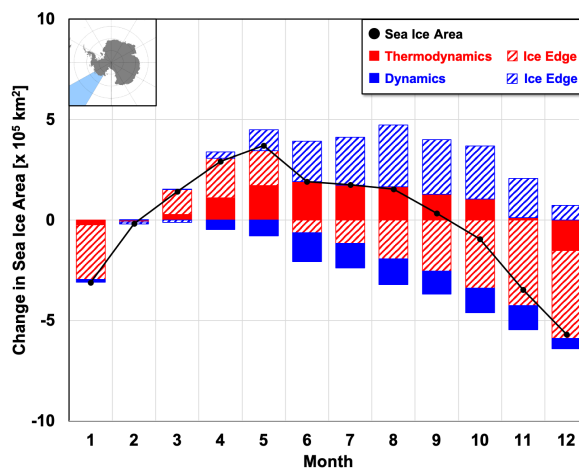


Fig. 5 Four components on seasonal changes in sea ice area in the region of 150W - 120W.

では9月まで拡大傾向となっている。これには氷縁部の力学的要因（青斜線部）が4月から12月まで拡大成分となっていることが影響しており、この海域で特徴的な北向きの海水漂流と、西経180度から西経150度までのロス海海域からの流入によるものと考えられる。このようにすべての海域について季節変化における海水面積変化のメカニズムを示した。

5.3 時期・海域ごとの経年変化の要因

各海域における海水面積の年々変動に影響を与える要因を明らかにするため、3月から9月までを海水拡大期、10月から2月までを海水後退期として、それぞれの時期における海水面積の経年変化に対し4成分が与える影響を評価した。時期ごとに海水面積の変化と4成分をそれぞれ積算し、海水分布に特に影響を与えていると考えられる氷縁部について力学的要因および熱力学的要因と各年の海水拡大面積および海水後退面積の相関係数を計算した。

Fig. 6およびFig. 7より、ウェッデル海沖、ロス海沖では氷縁部の熱力学的要因による面積拡大で全体の海水面積の拡大がほぼ説明できることが分かった。一方、西経150度から西経120度までの海域では氷縁部の力学的要因による面積の拡大が最も重要であった。海水拡大面積と氷縁部の熱力学的要因または力学的要因の相関関係に注目すると、ウェッデル海沖、ロス海沖をはじめとするほとんどの海域と同様に氷縁部の熱力学的要因と海水拡大面積の相関係数が高いことが分かった。また、東経30度から東経60度までの海域や東経90度から東経120度までの海域のように氷縁部の力学的要因が経年変化の決定要因であると考えられる海域も確認された。一方、海水後退期では季節変化の主要因は全ての海域で氷縁部の熱力学的要因であることが示唆された。また、東経120度から東経150度までの海域のような一部の海域以外では経年変化の決定要因も氷縁部の熱力学的要因であることが示唆された。

このように、海水拡大期と海水後退期について、各海域において氷縁部の熱力学的要因と力学的要因のいずれが季節変化の主要因および経年変化の決定要因として支配的であるかを示した。

6. 結言

本研究では人工衛星の海水密接度データと海水漂流速度データから南極海の海水動態の特徴を示し、海水動態の季節変化と経年変化において力学的要因と熱力学的要因が与える影響を評価した。海域ごとの特徴的な変動メカニズムを示すことで、海水動態の変化の原因を説明することへの有用性が示唆された。本研究で用いたデータおよび手法はさらに長期間の解析を対象とすることが可能であり、海水動態の変動と気候変動の関係を明らかにしていくための方法として期待される。

参考文献

- [1] Parkinson Claire L., Proceedings of the National Academy of Sciences 116.29(2019)14414-14423.
- [2] Holland Paul R. and Ron Kwok., Nature Geoscience 5.12(2012)872-875.
- [3] Doddridge Edward W. and John Marshall, Geophysical Research Letters 44.19(2017)9761-9768.
- [4] Kimura Noriaki, Journal of the Meteorological Society of Japan Ser.II82.4(2004)1223-1231.

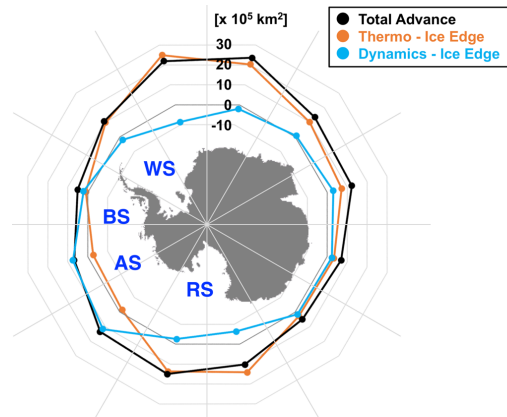


Fig. 6 Changes of sea ice area during expansion period. (Black: total change, orange: thermodynamic effect at the ice edge, cyan: dynamic at the ice edge)

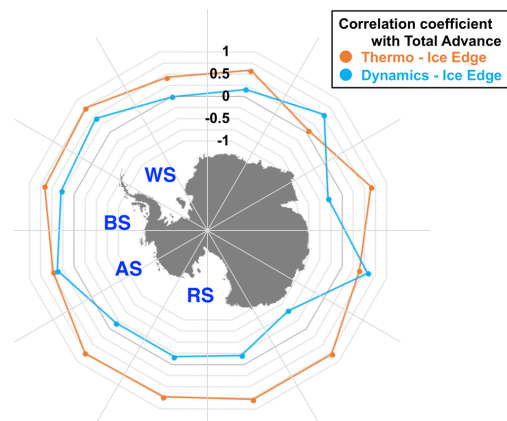


Fig. 7 Correlation coefficient between total changes of sea ice area and each mechanism at the ice edge during expansion period (Colors are the same as Fig. 6).