

学 位 論 文 題 名

Study on intraseasonal variability
of sea-ice concentration in the Antarctic

（南極海氷域の季節内変動に関する研究）

学位論文内容の要旨

南極海氷域は、海氷面積の季節変動の大きい海域である。このため、海氷域の変動が気候変動に与える影響が大きいと推測され、多くの研究がなされてきた。しかし、大半の研究は、季節変動や経年変動などの長周期変動についての議論であった。そのため、それより小さい季節内程度の現象は解明されておらず、その時間スケールでの大気・海氷・海洋の関係は明らかではない。

本研究では、季節内程度の海氷変動の特徴を明らかにし、その変動を引き起こす原因とそのメカニズムを解明することを目的として解析を行った。データは、マイクロ波放射計 DMSP/SSMI による輝度温度から NASA/TEAM アルゴリズムを用いて計算された海氷密接度データ、ECMWF の大気データおよび OISST の海面温度データを使用した。対象期間は 1991 年から 2000 年で、毎日のデータを解析に用いた。

海氷域は、夏季から冬季に向けて季節進行にともない低緯度へ拡大していくが、毎日の海氷密接度データを使って時系列で表すと、低緯度海氷縁を中心に一ヶ月未満の時間スケールでも海氷密接度の変動がみられた。この変動に注目するために、5 - 30 日のバンドパスフィルターを海氷域に適応した。その結果、低緯度海氷縁域を中心に東進伝播する波形がみられた。そこで、伝播成分を解析するのに有効な Complex Empirical Orthogonal Function (CEOF) 解析を行った。この CEOF 解析は、データをヒルベルト変換して複素数化し、複素回帰行列にした後に複素固有ベクトルを求め、時間関数と空間分布を導き出す手法である。これら時間関数と空間分布のそれぞれに振幅と位相が求められ、空間分布と時間関数の各モードをかけ合わせることで再構築が出来るものである。

海氷密接度を用いて、5 - 30 日のバンドパスフィルターをかけた CEOF 解析を行った結果、第 1 モードが第 2 モードの 2 倍を越えていた。よって、この卓越している第 1 モードに注目して解析を行った。空間分布をみると、大きな振幅が周極的に分布しており、特に西南極海域において目立って振幅の値が大きかった。また、海氷域全体において、波数 3 で東進伝播している様子が現れた。時間関数からは、冬季において振幅が最大となり、周期は 10~15 日という結果が求められた。さらに、季節内 (5 - 30 日) の時間スケールを 5 日毎の周期帯に細分化して CEOF 解析を行った結果、振幅の空間分布は周期帯によらず、振幅の大きなところは周極的に分布し、特に西南極域において顕著に大きな値を示していた。位相分布から、周期の短い 10~15 日未満では波数 3~4 波で東進伝播しているが、それを越える長周期になるにつれて、東南極から伝播性は弱くなり、20 日を越える周期では、全般的に伝播性はみられなくなることが分かった。

次に、海氷の季節内変動をもたらす原因について考えた。時間スケールを考慮すると、

大気の影響が推測できるため、まず、海氷密接度と大気場(地上10m 南北風)との回帰係数および相関係数を求めた。その結果、西南極域を中心にそれぞれの回帰係数および相関係数が大きいことが認められた。よって、大気の変動についても CEOF 解析を適応して海氷との比較を行った。地上10m 南北風の5-30日でバンドパスフィルターをかけたデータで CEOF 解析を行った結果、周期10~15日、波数4で東進伝播していて、西南極域において高緯度まで変動が大きい様子が現れた。また、海氷と同様に大気においても冬季に変動の大きいことが分かった。海氷との振幅の時系列を比較すると、大気場が先行して変動が大きくなる様子が現れた。他の大気成分(等圧面高度、気温)を用いた解析においても同様な傾向が示された。また、5日毎の周期帯別のバンドパスフィルターをかけた CEOF 行った結果、変動の大きなところは、最も短い周期(5-10日)は周極的に分布しているが、その他は西南極海域であることが示された。

さらに、海氷と大気の季節内変動のメカニズムについて解析を行った。海氷密接度と地衡風の変化を比較した結果、地衡風が北向き(沖向き)成分の時に海氷域が低緯度に拡大し、南向き(岸向き)成分の時に海氷域が高緯度に後退することが時系列から確認された。両者間の相関係数は、同時相関で最も大きく、0.8を越える値であった。また、海氷密接度と気温の相関では、気温の変動が1~2日先行しているときに最も大きく、相関係数は0.8程度である。

最後にこのような海氷域の変動を引き起こすメカニズムについて解析を行った。ある経度線上において低緯度海氷縁位置の変化する速さ(海氷縁速度)と、海氷域の海氷自身の移動速度(漂流速度)を比較した結果、両者間の相関係数は0.6程度で、北向き(沖向き)および南向き(岸向き)の漂流速度よりも海氷縁速度の方が大きいことが分かった。また、地衡風南北成分と海氷縁速度との相関係数は0.5~0.6であり、低緯度海氷縁位置は地衡風の5~8%の速さで変化していた。これらの結果から海氷域の変動は、海氷の移流だけでは説明が出来ず、現場での生成・融解によっても変動していることが示唆された。このことは、海氷縁域付近の海水面温度偏差の変動からも推測される。海氷域が後退する地衡風が南向き(岸向き)のときに正偏差となり、海氷域が拡大する地衡風が北向き(沖向き)のときに負の偏差が現れていた。これは、現場での海氷の生成・融解の場が促進されやすい場があることを示している。

南極海氷域において、海氷の季節内変動に注目して解析を行った結果、波数3~4波で10~15日の周期を持った波が東進伝播している様子が現れた。特に変動が大きい海域は、Amundsen~Bellingshausen Seaを中心とした西南極海域であることが分かった。その海域では、大気場の変動が大きく、高緯度まで達していることから、その影響が大きいことが示唆された。また、海氷と地衡風の変動の関係からは、海氷域の変動は低緯度海氷縁域を中心に、海氷の移流と現場での生成・融解の双方によって起因している。つまり、この季節内の時間スケールにおいて、海氷と大気は西南極を中心に大きく変動していて、その下では、その影響を受けて海氷の生成・融解が生じている。そしてその効果は、ブライン排出などにより熱塩の変化を海洋場に与えていることが予想される。同時に海氷密接度の変化が大気海洋間の熱交換に大きく作用していることも推察される。よって、これらの効果は、気候変動の一因を担っていることが考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	若 土 正 暁
副 査	教 授	池 田 元 美
副 査	教 授	山 崎 孝 治
副 査	教 授	江 淵 直 人
副 査	助教授	大 島 慶一郎
副 査	助教授	見 延 庄士郎 (理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Study on intraseasonal variability of sea-ice concentration in the Antarctic

(南極海水域の季節内変動に関する研究)

近年、地球温暖化などによる気候の変化が懸念されているが、全球気候モデルによる将来予測には、高緯度海域に分布する海水の役割の理解が不可欠と言われている。特に南極海水域は、その面積の季節変動幅が最も大きいことや、また、太平洋・大西洋・インド洋の世界三大洋と直接交流をもつ、等の特徴から、世界の気候に重要な役割を果たしていることで知られている。しかし、現場観測が極めて困難なこともあり、海水のデータは非常に少なく、人工衛星から送られてくるデータを解析することが、現在のところ、海水研究で最も有効な手段である。

申請者は、大学院入学以来、人工衛星からの主にSSM/Iマイクロ波データを用いた解析によって、南極海水域の実態把握とその変動機構、特に、これまでほとんど研究の無かった季節内変動のメカニズムの解明に向けて研究を進めてきた。まず、変動が最も大きいと考えられている冬季の海水縁域に注目し、そこでの季節内時間スケール変動について、人工衛星による毎日の海水密接度データを用いて調べた。その結果、低緯度海水縁域における海水密接度の増減領域が波数2-4、周期10-15日の波として、南極大陸の周囲を東向きに伝播していることが分かった。この新知見に基づいて、次に南極海水域全体の一年にわたる季節内時間スケールでの変動について調べた。

伝播性波動の研究に有効な手法であるCEOF解析を、毎日の海水密接度データを用いて行なった結果、以下のことが明らかになった。

(1) 海氷域変動は、波数3、周期8日－18日の波動として、南極大陸のまわりを東向きに伝播する。

(2) 変動の振幅は、氷縁域で大きく、最大は Amundsen Sea から Bellingshausen Sea を中心とする西南極海域で見られた。

(3) 変動の振幅は、冬季ほど大きく、しかも、その冬期間において、短い時間スケール（季節内）の変動が顕著であった。このことは、3－4波の典型的なパターンが常に維持されているわけではなく、実際には乱れたパターンを伴いつつの東向き伝播であることを示唆している。また、そのような東向き伝播パターンの季節内変動の年による違いも顕著であった。

(4) 地衡風(南北成分)の海氷密接度変動への影響を調べたところ、西南極海域で相関係数が高く、その海域では、地衡風の位相が海氷より90度先行するという結果が得られた。

次に、南極海氷域の実際の時空間変動について、特に、その振幅の大きい西南極（Amundsen Sea 付近）を例として調べた。その結果、北向きの風（地衡風）の時に拡大、南向きの風の時に後退、という予想通りの海氷域変動パターンが実際に起こっていることが分かった。また、それら拡大、後退いずれの場合でも、海氷密接度の南北勾配は一定のまま進行することも分かった。このことは、海氷域変動の一つの指標として、今回採用した海氷密接度15%の氷縁変動が、十分にその代表性のあることを示している。そこで、海氷密接度、地衡風南北成分、気温の三者の関係を調べたところ、北向きの風が強くなると気温が低下し、海氷密接度が増大するのに対して、南向きの風の時には逆の傾向になることが分かった。これら三者の関係をより詳しく知るためにそれぞれのラグ相関をとって見たところ、風に一日遅れて気温低下と海氷密接度増大がほぼ同時に起こるという結果が得られた。

以上、風やそれに伴う気温変化による海氷密接度変動が実際に起こっていることが示されたが、次に風の影響を受けることによる海氷自身（海氷域全体）の変動を調べることを試みた。そのためには海氷漂流速度の導出が不可欠である。しかし、導出された海氷漂流速度（Kimura(2000)のアルゴリズムを用いて求める）から予想される氷縁の位置と実際の氷縁の位置（人工衛星データによる実測）は、必ずしも一致しないことが予想される。実際に両者の速度を比べてみたところ、拡大期も後退期も共に、実際の氷縁速度の方が速いことがわかった。これは、今回使用したすべてのデータ（1992－2000）で、南極海氷域のどこで調べても全く同じ傾向であった。漂流速度から予想される氷縁の位置より、実際の氷縁の位置の方が先行するということは、それによってできる空間スペースにおいて新生氷形成や氷融解が起こるはずであることを意味している。つまり、拡大期には全体的に氷形成が起こり、後退期には海氷域全体で氷融解を伴っていることになる。

申請者は、海氷域拡大期における氷縁付近でのこの新生氷形成が、実際に起

こっていることの確認を試みた。それにはNASAアルゴリズムと THIN ICE アルゴリズムを用いて、近似的にみて氷厚に対応する海氷分類から調べてみたところ、一度後退した海氷域が再び拡大していく時期に、前面の氷縁近くで新生氷が実際に形成していることが確認された。

これらすべての解析結果を総合することにより、南極海氷域は風による移流だけでなく、新たな氷形成や融解を伴いながら南北方向に変動しつつ、南極大陸の周囲を東向きに伝播していることが明らかになった。

本研究の成果は、世界の気候システムに大きく関わっている南極季節海氷域の変動、特に季節内変動の機構を明らかにしたものであり十分に評価できるものであり、極域における大気－海洋相互作用のメカニズムに関する今後の研究に大いに貢献するものと期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。