

学 位 論 文 題 名

A mechanism for the variation of sea-ice extent in the Northern Hemisphere

（北半球における海水域の変動機構）

学位論文内容の要旨

北半球の海水域は大きく時間変動しており、過去の研究から、多くの海域でその変動が大気場の影響を強く受けていると指摘されている。しかし、海水域面積の変動と大気場との関係に関しては、主にその相関関係が議論されているのみで定量的な議論はなされていない。また、両者間に介在するメカニズムについても、ほとんど解明されていないのが現状である。

本研究では、海水の漂流速度と地衡風速度との関係を明らかにし、さらに海水域の変動が風速場の変動から受ける影響の大きさと、その変動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。海水データとしては海水密接度と海水漂流速度の二種類を用いた。海水密接度はマイクロ波放射計 DMSP/SSMI による輝度温度から NASA アルゴリズムを用いて計算した。また、海水漂流速度は同じ DMSP/SSMI の高解像度チャンネルの輝度温度から計算した。大気場データとしては ECMWF データから計算した地衡風速度のみを利用した。解析期間は 1991/92 年から 1997/98 年までの 7 冬（12 月から 4 月）とし、1050 日分の毎日のデータを用いた。本研究の最大の特徴は、衛星観測によって得られた長期かつ広範囲の毎日の海水データを用い、海水域の変動機構の地域的な違いを議論する点にある。

まず、SSM/I の 85.5GHz 水平偏波チャンネルの輝度温度を用いて海水漂流速度の導出を行った。計算には面相関法という、ある日のある窓画像内の輝度温度と最も高い相関を持つ場所を別の日の画像から検出する方法を用いた。窓画像の大きさは 6×6 ピクセル（75×75 km）、計算の時間間隔は一日とし、窓画像の位置を 1 ピクセルずつ移動させながら全域で同様の計算を行った。計算結果に対して最大相関係数の大きさ、相関のピークの鋭さ、周囲の点の結果との差を用いて 3 段階のフィルタリングを行い、信頼性の低いものを除去した。このようにして得られた結果から、最終的に 75×75 km グリッドの毎日の海水漂流速度データセットを作成した。また、以上の方法で計算された漂流速度は、高解像度の NOAA/AVHRR による赤外画像を用いて得られた漂流速度とも良い一致を示した。

次に、毎日の海水漂流速度と地衡風速度との関係を調べた。その結果、海水漂流速度は、地衡風に対して一定方向の向き（偏角）への、地衡風の一定の比率（減衰係数）の大きさでの動きとして、その変動の大部分が説明された。両者間の相関は特に季節海水域で高い値を示した。偏角には海水が地衡風に対してやや右向きに漂流する傾向が見られたが、その大きさは北半球全域でほぼ ±10 度以内であり、海水は地衡風とほぼ平行方向に漂流していることが分かった。減衰係数は北極海では 0.8% 以下であるのに対し、季節海水域では 1.5% から最大 2.5% に達し、海域によって大きく異なることが明らかとなった。この地域差をもたらす最大の要因は、海水密接度と氷厚の差に起因する海水の内部応力の差で

あると考えられる。また、残余として表層海流が得られ、グリーンランド海やラブラドル海の西岸沿いの強い南下流や、北極海の時計周りの循環、北極海を横断する流れ等の特徴が見られた。これらは、実測海流データとも良い一致を見た。

さらに、海水域の変動に及ぼす海水移流の効果を見積もり、海水域の変動機構を解明するための解析を行った。氷縁を横切るように氷縁に垂直方向の解析ラインを設定することにより、ライン上での氷縁位置の変動する速さ、氷縁での地衡風速度および海水漂流速度のラインに平行な成分の三者を直接比較した。その結果は以下の通りである。

- (1) 地衡風速と海水漂流速との間には、ほとんどの氷縁海域で非常に高い相関がある。
- (2) 海水漂流速と氷縁位置の移動速との相関は、バレンツ海、ベーリング海、オホーツク海では高いところで相関係数が 0.7 を越える良い相関があり、それらの海域では氷縁移動速の漂流速に対する回帰係数はほぼ 1 である。一方で、グリーンランド海やラブラドル海では両者間の相関は非常に低く、それぞれ決まった場所での海水融解によって海水の張り出しが抑制されている。
- (3) 地衡風速と氷縁移動速の相関係数の分布は (2) と非常に似ている。氷縁移動速の地衡風速に対する回帰係数はオホーツク海北部で最も大きく地衡風の 3% 前後、バレンツ海、ベーリング海では 2% 前後である。

また、ほとんど全ての海域において氷縁では定常的な海水融解が起こっていること、オホーツク海とベーリング海では沿岸ポリニヤ域での海水生成が重要であることも明らかとなった。以上の結果から、それぞれの海域での海水域の変動機構に対して以下のことが推測された。

- バレンツ海、ベーリング海、オホーツク海では、全体的な海水域の拡大は卓越する沖向き風による海水の移流によって起こる。短周期の変動に着目しても、地衡風の変化に伴って海水漂流速度が変化し、それが海水域の変化に強く反映されている。また、その変化の大きさも海水移流の効果のみによって説明可能である。
- グリーンランド海やラブラドル海では、海水漂流速度は地衡風の変化に伴って変化するが、海水域の変動は海水の動きに依存せず、海水域の張り出しは主に海洋側の条件により決定される。

さらに、11 月から 3 月までの平均風速と 3 月の氷縁位置の毎年の値にも上記 (2) と良く似た関係が見られ、日変化に見られる地域的な特徴は年々変動にも反映されていると考えられた。

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 助 教 授 大 島 慶 一 郎

副 査 教 授 榎 本 浩 之 (北見工業大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

A mechanism for the variation of sea-ice extent in the Northern Hemisphere

(北半球における海水域の変動機構)

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氷の役割の理解が不可欠だと言われている。しかし、現場観測が極めて困難なこともあり、海氷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、海氷研究で最も有効な手段である。

北半球の海氷域は、北極海内部を除いて、ほとんどが夏に完全に消滅してしまう季節海氷域である。季節海氷域は、時空間変動が大きく、海域によってまた年によってその変動も大きく異なる。海氷域の変動機構を定量的に議論するためには、海氷の「厚さ」と「漂流速度」の情報が必要不可欠である。

本研究は、人工衛星からの主に SSM/I マイクロ波データの解析によって、北半球における海氷域の実態把握とその変動機構を明らかにしたものである。特に、今までほとんど不可能と言われていた、マイクロ波データを用いた「高精度の海氷漂流速度」を導き出すことに成功し、北半球の海氷域の変動機構を「定量的」に議論し、海域による違いを明確に示した。本研究で得られた主な知見を要約すると以下の4点が挙げられる。

- (1) 海氷域の変動と風速場の関係を示した。
- (2) ほとんどの海域で、海氷の動きの変化は風速の変化によって説明できることを指摘した。
- (3) オホーツク海、ベーリング海、バレンツ海では、海氷域は海氷の移流によって拡大すること、また、海氷域の変動は風速の変動に伴う海氷の動きの変動によって、そのほとんどが説明できることを指摘した。
- (4) グリーンランド海、ラブラドル海では、海氷域の変動は海氷の動きに依存せず、特定の場所での海氷融解によって、氷縁の位置が決定されていることを指摘した。

本研究では、海氷の変動を定量的に議論するために不可欠な情報の一つである「漂流速度」を、DMSP/SSM/I の 85.5GHz チャンネルの輝度温度データを用いて面相関法により求めた。このマイクロ波データを用いて得られた漂流速度は、高解像度の NOAA/AVHRR 画像を用いて得られた漂流速度とも良い一致を示した。そこで、毎日の海氷漂流速度を求め、ECMWF データから計算した地衡風速度との関係を調べた。その結果以下の点が明らかになった。海氷は地衡風とほぼ平行方向に漂流し、その速度は地衡風速に対するある一定比率（減衰係数）をもつことが分かった。この減衰係数は、北極海で 0.8 %以下であるのに対して、季節海氷域では 1.5 %から最大 2.5 %に達し、海域によって大きく異なることが分かった。しかし、減衰係数は海域によって異なるものの、ほとんどの海域で、海氷の動きの変化は風速の変化によって説明可能なことが示された。

さらに、海氷域の変動に及ぼす海氷移流の効果を見積もるため、本研究では各海域の氷縁を横切る方向に解析ラインを設定することにより、ライン上での氷縁位置の移動する速さ、地衡風速および海氷漂流速のラインに平行な成分の三者の直接比較を行った。その結果以下のことが明らかになった。まず、1) 地衡風速と海氷漂流速の間には、ほとんどの氷縁海域で相関が非常に高かった。次に、2) 海氷漂流速と氷縁位置の移動速との相関は、海域によって異なり、オホーツク海、ベーリング海、バレンツ海では比較的高かったのに対して、グリーンランド海やラブラドル海では非常に低い値を示した。最後に、3) 地衡風速と氷縁位置の移動速との相関は、2) の特徴に似ており、特にオホーツク海で最も高い値を示した。これらの結果に基づいた、日変動スケールの海氷域変動機構は、上で挙げた(3)と(4)として理解される。このような日変化に見られる特徴は、年々変動にも反映されている可能性を示す解析結果も一部得られたが、この点については将来の研究課題となるであろう。

最後に、本研究の何よりも独創的なことは、今まで不可能だと言われていた、「高精度の海氷漂流速度」をマイクロ波(SSM/I)データから導出することに成功した点にある。それも北半球全海氷域に適用したことにより、海氷域の変動機構の海域よる違いを定量的に比較することを可能にした。今後、世界の気候における海氷域の役割を解明していく上で、本研究の成果は大きく貢献することが期待される。

以上の結果は、申請者が研究者として研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学力を有していることを示している。よって審査員一同は申請者が博士(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。