

博士（環境科学）川口 悠介

学位論文題名

## **Ice–Ocean Coupled Systems Driven by Wind Forcing**

(風により駆動される海水海洋結合システムの研究)

### **学位論文内容の要旨**

本研究では、海水海洋結合システムにおいて風が果たす役割に注目し、主に二つのテーマで研究を行った。ひとつは、近年の北極海の海氷減少に関連して、低気圧による海氷の発散の問題である(①)。もうひとつは、沿岸ポリニアの形成過程とその下で形成される高密度陸棚水(DSW)に関する研究である(②、③)。

#### ①低気圧下の海氷発散に関する数値的研究

近年、融解期の北極海の海氷面積は急激に減少しているが、その決定的な要因は未だ明らかではない。融解期に海氷が力学的に発散することは、新たに生じた開放水面部で太陽放射が吸収され海氷の側面融解を促すため、近年の海氷減少に貢献している可能性が高い。本研究では、海氷の力学的発散に注目し、海上空に低気圧が停滞する際の海氷発散を数値モデルを用いて調べた。実験を行うにあたり、個体としての海氷の振る舞いを活かした海氷ラグランジアンモデルを独自に開発し、ランキン渦型の理想的な低気圧を外力に実験を行った。実験の結果、海氷密接度によって海氷の漂流・発散に違いが見られた。融解期や氷縁域など海氷密接度の小さい状況下では、漂流の抵抗となる内部応力がはたらきにくく海氷の発散がより促進されることがわかった。また、上記のモデルを鉛直高解像度の海洋モデルと結合することで、海洋表層の密度成層が海氷発散に与える影響を調べた。その結果、密度成層が強いとき、表層エクマン層の薄化に伴い海面付近のエクマン流が強化され、結果的に海氷発散が促された。夏季の北極海は、河川水や融氷水によって海洋表層の成層が発達しやすく、このメカニズムをとおして海氷減少の促進に寄与している可能性が高い。以上より、海氷密接度が小さく海洋表層の密度成層が顕著な夏季に低気圧が北極海に滞在することは、海氷減少の十分な引き金になることが示された。

#### ②岸沿い風によるポリニア下の平衡塩分値の見積もり

結氷期、風や海流によって海氷が発散し、海氷が集中的に生産される場所を潜熱ポリニアという。その中でも岸沿いに形成される沿岸ポリニアでは、海氷生産に伴い低温・高塩のブライン水がその下の陸棚に排出されることで中・深層水の起源となる重たい水塊(DSW)がポリニア下の陸棚上で形成される。沿岸ポリニアで形成されるDSWに関して、ポリニア面積に直接関係する沖向きの風速が注目されることが多いが、岸に平行な風に駆動される風制循環によてもDSWは変質を受ける。それによって、中・深層水に潜り込むDSWの量が変化し、海盆スケールもしくは地球規模の海洋循環に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、岸沿い風、特にdownwelling-favorableな風によるポリニア下の塩分アノマリについて調べた。まず、緩やかな傾斜と東西に長い沿岸線を持つ陸棚上の沿岸ポリニアを想定し、理想的な条件下で風速を変えて( $1 - 15 \text{ ms}^{-1}$ の東風)数値実験を行った。その結果、風速の増加に伴い、陸棚上の海洋循環によってポリニア域からの高塩

水の輸送が増大し最終的な DSW の密度が引き下げられることが分かった。その塩分排出において、下層から沖に流れるエクマン補償流 (Ekman Compensation Flow; ECF) が主導的な役割を果たしていることも示された。数値実験の結果を踏まえ、傾圧渦と風に駆動される流れの流速をスケーリングし、ポリニアから流出する塩分フラックスを見積った。その結果、風速が約  $5 \text{ ms}^{-1}$  を上回ると、風駆動の塩分フラックスが傾圧波よりも相対的に重要となった。また、沿岸線が十分長い場合、ECF が主導的に塩分排出を行い、DSW の平衡塩分値とそれに至る時間スケールを決めていた。ここで得られた見積もりを、Pease (1987)による熱力学モデルを用いて ECMWF の気温と風速データからオホーツク海の北西沿岸ポリニアと北部ポリニアに適用した。その結果、両者のポリニアは非常に近い場所にありながらもその風系が大きく異なり、downwelling-favorable な風が卓越する北部ポリニア域では風によって 15%以上も平衡な塩分値が減少するのに対して、北西ポリニア域ではわずか 3%にすぎないことがわかった。1979–2002 年の期間においても同様の解析を行った結果、風による高密度水の低塩分化は 1990 年代を中心に近年 10 年間で大きく増大していた。これは、冬季、アリューシャン低気圧の西端がオホーツク海の中心部に強い勢力をもって進出していることが直接的な原因と考えられる。

### ③巨大沿岸ポリニアの形成機構の解明

ポリニアに関するこれまでの研究の多くは、沖合い幅が 100 km 程度のポリニアに注目し、それより大きく拡大するポリニアに関して十分な議論をしていない。しかしながら、オホーツク海の北西沿岸ポリニアは沖合いに最大で 200~300 km まで拡大することが観測されている。また、南極周辺の沿岸ポリニアにおいても幅 100 km を超えるポリニア (e.g., Mertz Glacier Polynya) が観測されている。このような巨大な沿岸ポリニアがどのような物理過程で形成されるかその形成メカニズムは未だ明らかではない。これまでの研究の多くは、ポリニアの縁で厚い氷と薄い氷の相対速度が常に収束 (薄い氷が外側の厚い氷よりも速く漂流する) になることを仮定し定常な幅を決定してきた。しかし実際の海洋では、風が岸を左に見て吹く場合など、厚い氷が沖方向により速く進むような例も考えられる。このとき、ポリニア縁は発散場になる。そこで、ポリニア縁での氷の相対速度が収束と発散になる場合を区別して、風が陸から沖に様々な角度で吹いたときポリニア幅がどのように変化するかを調べた。ここで、薄い氷(frazil ice)と厚い氷(consolidated new ice)の漂流速度はそれぞれの運動方程式に基づいて計算した。その結果、北 (南) 半球において風が沖向きよりも左 (右) に数度傾いたときポリニア縁は収束場から発散場に切り替わり、それよりも左に風が吹くときポリニアが大きく拡大することがわかった。この理論結果の検証を兼ねて、オホーツク海の北西沿岸ポリニアに関して、AMSR-E の氷厚データと客観解析データ JRA-25 の海上風との関係性を調べた。AMSR-E のデータの存在する 2003–2005 年の冬季間 (1–3 月)、沿岸線に入射する風の角度ごとに氷厚の時間変化の平均を計算すると、沖から左に 0–30 度で風が吹いた場合にポリニアが大きく拡大していることがわかった。また、そのときの海上気圧分布を詳しく調べると、サハリン島以西の大陸とオホーツク海北部の海上気圧のコントラストが強い傾向にあった。これは、アムール川流域とオホーツク海内部の海上気圧差が、北西沿岸域で沖向き、もしくはそれよりやや左に吹く海上風を生み出し、その結果ポリニア縁が発散場となりポリニアが大きく拡大したと解釈できる。

### 最後に

本研究で注目した海洋現象は、全球のわずか 8 % の極域で起きている。しかしながら、②③で述べた海水生産に伴う高密度水の形成は、深層循環を含めた地球規模の循環に大きな影響を与える。また、①に関連した北極海の海水減少は、高密度水の低密度化や中層の塩分躍層の弱化をまねき、結果的に海水生産量の低下を引き起こす。したがって、海水・海洋間の相互作用の観点から地球規模の気候変動の解明を目指すことは今後の重要な課題である。

# 学位論文審査の要旨

主査教授 三寺史夫

副査教授 池田元美

副査教授 大島慶一郎

副査助教 豊田威信

副査准教授 秋友和典（京都大学大学院理学

研究科）

## 学位論文題名

### **Ice–Ocean Coupled Systems Driven by Wind Forcing**

(風により駆動される海水海洋結合システムの研究)

申請者は、海氷海洋結合システムにおいて風が果たす役割に注目し、大きく分けて二つのテーマで研究を行っている。ひとつは、近年の北極海の海氷減少に関連して、低気圧による海氷の発散の問題に関する数値実験である。もうひとつは、沿岸ポリニアの形成過程とその下で形成される高密度陸棚水(DSW)に関する研究である。

近年、融解期の北極海の海氷面積は急激に減少しているが、海氷が風によって発散し開放水面が広がり太陽放射吸収を促すためである可能性がある。そこで申請者は、海氷の力学的発散に注目し、海上空に低気圧が停滞する際の海氷発散を調べた。実験を行うにあたり、海氷の個体としての振る舞いを活かした海氷ラグランジアンモデルを開発した。実験の結果、海氷密接度が小さいケースと大きいケースでは海氷の漂流・発散に大きな違いが見られた。融解期など海氷密接度の小さい場合には、内部応力が働きにくくなるため海氷の発散がより促進される。また、海氷モデルを鉛直高解像度の海洋モデルと結合することで海氷発散に対する海洋表層の密度成層の効果を調べ、その結果、成層が強いときにエクマン流が強化され、結果的に海氷発散が促されたことがわかった。夏季の北極海は、海氷密接度が低く、また河川水や融氷水によって海洋表層の成層が発達しやすいので、これらのメカニズムを通して海氷減少が促進されている可能性がある。

次に申請者は沿岸ポリニア下で形成されるDSWについて、岸に平行な風の効果を調べた。傾圧渦と風により駆動される流れをスケーリングすることでポリニアから流出する各塩分フラックスを見積ったところ、風速が約 $5\text{ ms}^{-1}$ を超えるとき、傾圧渦よりも風により駆動される塩分フラックスが重要になることを明らかにした。特に沿岸線が十分長い場合、岸沿いの流れよりも沖向きのエクマン流が主導的に塩分排出を行い、DSWの平衡塩分値とそれに至るまでの時間スケールを決めている。このようにエクマン流の効果に注目しているところが新た

な視点である。また、申請者はここで得られた見積もりを、熱力学ポリニアモデルを用いて ECMWF の気温と風速データから海氷生産量を計算し、オホーツク海の北西沿岸ポリニアと 北部ポリニアに適用した。その結果、両者のポリニアは非常に近い場所にありながらもその 風系が大きく異なり、北部ポリニア域では風によって 15% 以上も平衡塩分値が減少するのに 対して、北西ポリニア域ではわずか 3% の低下にすぎず傾圧渦の効果が卓越していることを示 した。

最後に、沿岸ポリニアの形成機構について議論した。一般に、沿岸ポリニアが沖方向に 100 km 以上拡がることは物理的に難しいと考えられている。しかしながらオホーツク海の北 西沿岸域においては、沖合い幅が最大 200~300 km の沿岸ポリニアが観測されており、その 形成メカニズムは知られていなかった。申請者は海水の運動方程式から地球の回転の効果が 海氷の厚さに依存することに注目し、ポリニア幅の変化が風向に敏感に依存していることを見 出した。具体的にはポリニア縁での氷の相対速度が収束場と発散場になる場合を区別し、 風が陸から沖に様々な角度で吹いたときに、海氷厚によりポリニア幅がどのように変化するか調べている。その結果、北半球においては風が沖向きよりも左に数度傾いたときポリニア 縁が発散場になり、ポリニアが大きく拡大することがわかった。さらにこれをオホーツク海 の北西沿岸ポリニアに適用し、人工衛星 AMSR-E の氷厚解析値と比較したところ、理論と 整合する結果を得た。

以上、海氷海洋結合システムにおいて風が果たす役割に注目し、低気圧下での海氷の発散、 ポリニアの形成機構、高密度陸棚水の形成機構に新たな知見をもたらした。今後さらに熱力 学や大気力学を結合することにより、北極における温暖化の影響など寒冷圏気候変動の解明 に資するものと期待される。審査委員一同は、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、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。