

学 位 論 文 題 名

Development of clouds and air mass transformation
processes over the marginal ice zone of the Sea of Okhotsk

（オホーツク海の氷縁域における雲の発生と気団変質過程）

学位論文内容の要旨

寒気吹き出し時、オホーツク海の氷縁域から風下海上では、日本海と同様に筋状の雲が発生する。この雲は、大気海洋間の熱交換によって生ずる気団変質が可視化された結果である。それは同時に、風上に広がる海水域で、この熱交換が著しく抑制されていることも意味する。オホーツク海の海水によって熱交換が広い範囲で抑制される影響は、局地的にも全球的にも現れることが理論的には知られているが、実際の観測から広範囲の乱流熱フラックスを見積もる研究は極めて少ない。さらに、衛星画像を良く見ると、海水上で既に雲が発生している場合が頻繁に観測される。これは、風上の海水域に存在する割れ目（リード）から乱流熱フラックスが既に供給されていることを示唆している。従って、海水上あるいは氷縁域での熱収支を明らかにするには、海水密接度や、海水域に無数に存在する割れ目（リード）を陽に考慮した乱流フラックスの見積もりが極めて重要である。

そこで本研究では、海水域に存在する数 km スケールのリードが、風下の海水域および氷縁域に及ぼす熱力学的効果を、オホーツク海南西部で行われた航空機観測・高層気象観測、及びメソスケール雲解像モデルを用いて定量的に明らかにすることを目的とした。具体的には、可視・赤外カメラによる海水の画像解析、航空機による乱流熱フラックス観測、観測値を初期値とした数値計算、ゾンデデータを使用した熱収支解析により開水面を含む海水域の気団変質過程を調べた。

航空機から撮影した海水の可視画像から高分解能の海水密接度データを作成し、観測された乱流熱フラックスとの関係を調べた。その結果、風上の開水面では周りの海水域よりも 10～100 倍の乱流フラックスが供給されており、海面上での大気-海洋間の温度差が風下へ向かって急速に減少していることが明らかとなった。このことは、風上に存在する開水面（ポリニアやリード）で急速な海面冷却及び海水生成が生じていることを示しているだけでなく、風上における開水面の幅の積分値が風下の気団変質に大きな影響を及ぼしていることを意味する。

次に、風上の開水面が風下の気団変質・熱収支に及ぼす影響を調べるために、雲解像モデルを用いて数値計算を行った。初期値として観測値を用い、海水密接度も実際の測定値を用いた計算結果は、実際の観測結果と良く一致した。日平均の表面熱収支

から、風上の正味の熱フラックスは、風下の氷縁域ではその 60% にまで減少していることが示された。開水面の面積を変えた感度実験の結果、この氷縁域での正味の熱フラックスの減少は、大気-海洋間の温度差の減少による顕熱フラックスの減少と、雲が形成されることで生じる下向き長波放射の増加によってもたらされていることが明らかとなった。このことは、海水域が移動する際に生じる無数の割れ目やポリニアでの気団変質が、風下の氷縁域での海水生成とそれによる海水域の拡大を抑制する効果があることを示唆する。

さらに、広域の開水面の面積が、領域平均の乱流熱フラックスに及ぼす影響を調べた。すなわち、乱流熱フラックスを高層気象観測データから熱収支解析によって見積もり、この値と SSM/I から求められた海水密接度を用いて回帰分析を行った。その結果、乱流熱フラックスは、海水密接度と混合層内の温位との間で統計的に有意な相関が見られ、海水密接度と温位を変数とする重回帰式を導出した。この関係式を用いて海水密接度が 0% と 100% の場合の乱流熱フラックスを計算すると、その差は 350 Wm^{-2} に達した。これは広域の熱収支を考える際にも開水面の面積が重要であることを意味する。また、この重回帰式に航空機観測で得られた海水密接度と温位を与えて見積もられた乱流熱フラックスは、実際の測定値および数値計算の結果と極めて良く一致した。

このように、本研究で得られた成果は、大気-海洋-海水結合モデルにおける熱交換プロセスの改善に大きく貢献し、その結果、地球気候システムにおいて極めて重要な役割を担う大気-海洋-海水結合システムの理解をさらに深めることが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 助 教 授 大 島 慶 一 郎

副 査 教 授 榎 本 浩 之 (北見工業大学土木開発工学科)

学 位 論 文 題 名

Development of clouds and air mass transformation
processes over the marginal ice zone of the Sea of Okhotsk

(オホーツク海の氷縁域における雲の発生と気団変質過程)

寒気吹き出し時、オホーツク海の氷縁域から風下海上では、日本海と同様に筋状の雲が発生する。この雲は、大気海洋間の熱交換によって生ずる気団変質が可視化された結果である。それは同時に、風上に広がる海水域で、この熱交換が著しく抑制されていることも意味する。オホーツク海の海水によって熱交換が広い範囲で抑制される影響は、局地的にも全球的にも現れることが理論的には知られているが、実際の観測から広範囲の乱流熱フラックスを見積もる研究は極めて少ない。さらに、衛星画像を良く見ると、海水上で既に雲が発生している場合が頻繁に観測される。これは、風上の海水域に存在する割れ目（リード）から乱流熱フラックスが既に供給されていることを示唆している。従って、海水上あるいは氷縁域での熱収支を明らかにするには、海水密接度や、海水域に無数に存在する割れ目（リード）を陽に考慮した乱流フラックスの見積もりが極めて重要である。

そこで本研究では、海水域に存在する数 km 以下のスケールのリードが、風下の海水域および氷縁域に及ぼす熱力学的効果を、オホーツク海南西部で行われた航空機観測・高層気象観測、及びメソスケール雲解像モデルを用いて定量的に明らかにすることを目的とした。具体的には、可視・赤外カメラによる海水の画像解析、航空機による乱流熱フラックス観測、観測値を初期値とした数値計算、ゾンデデータを使用した熱収支解析により開水面を含む海水域の気団変質過程を調べた。

先ず、航空機から撮影した海水の可視画像から高分解能の海水密接度データ

を作成し、観測された乱流熱フラックスとの関係を調べた。その結果、風上の開水面では周りの海水域よりも 10~100 倍の熱が供給されており、海面上での大気-海洋間の温度差が風下へ向かって急速に減少していることが明らかとなった。このことは、風上に存在する開水面（ポリニアやリード）で急速な海面冷却及び海水生成が生じていることを示しているだけではなく、風上における開水面の幅の積分値が、風下の気団変質に大きな影響を及ぼしていることを意味する。

次に、風上の開水面が風下の気団変質・熱収支に及ぼす影響を調べるために、雲解像モデルを用いて数値計算を行った。初期値として観測値を用い、海水密接度も実際の測定値を用いた計算結果は、実際の観測結果と良く一致した。日平均の表面熱収支から、風上の正味の熱フラックスは、風下の氷縁域ではその 60%にまで減少していることが示された。開水面の面積を変えた感度実験の結果、この氷縁域での正味の熱フラックスの減少は、大気-海洋間の温度差の減少による顕熱フラックスの減少と、雲が形成されることで生じる下向き長波放射の増加によってもたらされていることが明らかとなった。このことは、海水域が移動する際に生じる無数の割れ目やポリニアでの気団変質と、その結果発生する雲が、風下の氷縁域での海水生成とそれによる海水域の拡大を抑制する効果があることを意味する。

さらに、広域の開水面の面積が、領域平均の乱流熱フラックスに及ぼす影響を調べた。すなわち、乱流熱フラックスを高層気象観測データから熱収支解析によって見積もり、この値と衛星搭載のマイクロ波センサー（SSM/I）から求めた海水密接度を用いて回帰分析を行った。その結果、海水密接度と混合層内の温位を変数とする、乱流熱フラックスを求める重回帰式を導出した。また、この重回帰式に航空機観測で得られた海水密接度と温位を与えて見積もられた乱流熱フラックスは、実際の測定値および数値計算の結果と極めて良く一致した。

このように、本研究で得られた成果は、大気-海洋-海水結合モデルにおける熱交換プロセスの改善に大きく貢献し、その結果、地球気候システムにおいて極めて重要な役割を担う大気-海洋-海水結合システムの理解をさらに深めることが期待される。

よって審査員一同は、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、大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。