

学 位 論 文 題 名

A study on growth processes of sea ice in the southern region of the Okhotsk Sea, evaluated from heat budget and sea ice sample analysis

(熱収支と海水サンプルの解析によるオホーツク
海南部の海水の成長過程に関する研究)

学位論文内容の要旨

オホーツク海南部は冬期海水に覆われる南限の海域として知られている。このため、これまでも多くの研究者の関心を集めてきたものの、海水域内部での組織的な観測がなかったため、これまでの研究は主として沿岸域の海水特性に限られていた。従って、この海域にはどのような海水があつてどのように成長するのか、未知の部分が多かった。また、この海域は極東における冬期の主な低気圧経路の一つに位置しており、大気循環という立場からも興味ある海域である。これまでも、海水域が大気循環場に与える影響について、主に数値実験により指摘されてきたものの観測データがなかったため、実際にどの程度大気に影響を及ぼしているのか、よく分かっていなかった。更に、近年、この海域は北太平洋中層水の起源としての可能性が指摘されており、実際にこの海域においてどの程度海水が生成され得るのかを知ることは海洋循環という観点からも興味のある問題である。

このようにこれまでは季節海水域は、海水データも気象データも不足しているため、未知の部分が多かったが、2年程前から、オホーツク海南西部において砕氷船「そうや」を用いた観測プロジェクトが始まり、海水域内の現場データを取得することが可能になった。本研究では、1996、1997年の観測をもとに、氷況の定量解析、得られた気象データに基づいた熱収支解析、および海水サンプルの解析を通してこの海域に置ける海水の特性を、主として成長過程に焦点をあてて調べた。まず、熱収支の計算に必要となる海水のアルベドの解析を行い、続いて得られたアルベド、それに気象観測値を用いて海水域の熱収支を見積もった。次に、海水サンプルの解析結果を示し、熱収支の結果が海水の成長過程にどのように影響を与えているかを考察した。その中で、薄い海水サンプルで特徴的な構造が見い出せたので、室内実験によってその性質についてさらに詳しく調べた。

アルベドは上向き及び下向きの短波放射計を船首部分に取付けて観測を行い、数 km のスケールを対象とした解析を行った。ビデオ解析により定量的に見積もった海水密接度と比較した結果、両者に高い相関が見られた。また、太陽天頂角と有意な相関が見られ、氷厚とも弱いながら有意な相関が見られた。太陽天頂角と海水密接度を変数にした重回帰式から、日計のアルベドは 0.629 ± 0.030 と見積もられ、従来極域の沿岸定着氷上で観測されたアル

ベド (0.75) よりも幾分小さな値を示すことが分かった。この原因は海水上の雪粒子の性質に負うところが大きいと考えられる。海水域内部では海水の影響を受けやすいこと、低緯度であるため太陽放射量が多いこと、などにより雪粒子が成長しやすい環境を考慮すれば、この領域の海水が特有のアルベドをもつ可能性が示唆される。

ここで見積もられた海水アルベド、それに現場の気象観測値をもとに、海水熱力学モデルを用いて熱収支の計算を行った。計算に当たっては、氷厚頻度分布をもとに各氷厚の占有面積率を算定し、氷厚別に求められた各熱フラックス値を加重平均した。その結果、1) 平均海水成長率は 0.5 cm/day と見積もられること、2) 大気に輸送される乱流熱フラックスは $15 \sim 30 \text{ W/m}^2$ と見積もられ、海水が存在することによりほぼ半減されること、3) 乱流熱フラックスの半分以上は開水面とニラスの薄い海水域が担っていること、が分かった。1) については、夜間は成長するものの、短波放射による日中融解の寄与が大きい点が特徴である。ここでは取り扱わなかった海洋熱フラックスの寄与も考慮すれば海水成長量は実質的に少なく、この海域は海水の熱力学的成長の限界に近いと考えられる。2) の結果は、氷厚が比較的薄いオホーツク海南部においては、北極域とは異なって海水域は大気にとって熱源として働くことを示している。すなわち、シベリア方面から吹き出された寒気は海水域上で徐々に変質を受けていることが示唆される。3) の結果から、極域と同様、この海域でも大気との熱交換において薄い海水域は重要な役割を担っていることが示された。

次に、実際に現場で採取した海水の構造を調べることにより、成長過程についての考察を行った。1996 年に 14 個のサンプル、1997 年に 35 個のサンプルを比較的広い範囲で採取して厚片／薄片解析、塩分分析、密度測定を行った結果、以下のことが分かった。1) first-year ice、young ice における granular / columnar の比率は 1996 年のサンプルで 100/0 (%)、1997 年のサンプルで 50/42(%) と、共に granular ice が卓越していること、2) first-year、young ice の多くは層構造を示し、平均層厚は 1996 年のサンプルで 5.8 cm 、1997 年のサンプルで 9.4 cm と見積もられたこと、3) 海水塩分は氷厚と良い相関があり、first-year ice は $3 \sim 4 \text{ permil}$ 、young ice は $3 \sim 5$ 、paneske ice は $6 \sim 10 \text{ permil}$ の値を示したこと、4) 海水密度は全体平均で $864 \pm 35 \text{ kg/m}^3$ と見積もられ、極域の一年氷よりもむしろ多年氷に近い値を示すこと、5) 全層にわたって C 軸がほぼ鉛直な氷厚約 1 cm のニラスが発見されたこと。1)、2) の結果から、この海域では海水の力学的な成長過程が熱力学的な成長よりも卓越していることが示され、熱力学的な成長は少ないと見積もられた熱収支の結果と合致する。これらの結果は、南極域の海水に似た特徴であり、特に 2) の結果から南極域と同様、rafting 過程の重要性が示唆される。3) の観測値は極域の海水に比べて 3 permil 程低く、日中の表面融解による flushing 過程の影響が示唆される。4) の結果も海水内の融解による空隙率増加の寄与が示唆される。このように、この海域では厳冬期においても融解過程が海水の構造に影響を与えている点、この海域の海水の一つの特徴と思われる。5) については、これまで報告例のない構造であったので、室内実験により、その性質を更に詳しく調べてみた。

室内実験においては、温度条件 ($-10, -15, -20^\circ\text{C}$) および海水塩分 ($8.17, 25, 34 \text{ permil}$) をパラメータとして、海水表面に形成される C 軸が鉛直な層がどの程度の厚さまで成長し得るのかを調べた。その結果、1) 成長し得る層の厚さは温度条件よりも海水塩分に対する依存性が高いこと、2) 観測された約 1 cm の厚さまで発達するためには、低塩分水が必要であること、が分かった。熱収支解析の結果から、この海域においては、日中融解により表面付近に低塩分水が形成され得ることが示唆される。従って、この低塩分水がニラスの構造に

影響を与えた可能性が高い。融解の影響を受けているという点で、これもこの海水域の一つの特徴と考えられる。

以上のように、本研究において、いくつかこの海域の海水の特徴を見い出すことができた。世界的に見ても季節海水域における観測データは、熱収支観測も海水サンプル解析も一部南極域を除いて不十分な現況であるため、本研究の成果は季節海水域の海水特性の理解に役立てられるものと思われる。今後は、更に海水サンプル解析から海水構造を調べることで、海水成長過程の特性を解明することが期待される。

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 竹 内 謙 介

副 査 助 教 授 大 島 慶 一 郎

副 査 教 授 山 内 恭 (総合研究大学数物科学研究科)

学 位 論 文 題 名

A study on growth processes of sea ice in the southern region of the Okhotsk Sea, evaluated from heat budget and sea ice sample analysis

(熱収支と海水サンプルの解析によるオホーツク
海南部の海水の成長過程に関する研究)

高緯度海域に広く分布する海水が、世界の気候に大きな役割を果たしている事はよく知られている。なかでも、オホーツク海は地球上で最も低緯度に位置する海水域であり、地球温暖化の影響が顕著に現れる場所として、近年、特に注目されている。また、その海水域が北太平洋中層水の起源水域であり、二酸化炭素の吸収域として等、物質循環の見地からも重要である可能性が指摘されている。

しかし、オホーツク海はこれまで観測が少なく、何故そのような低緯度で海水が形成・発達できるのか等、基本的な問題が未解決である。本研究は、1996年以来砕氷船“そうや”を用いてオホーツク海南西部で実施している、厳冬期の海水域現場観測に自ら参加して得たデータの中で、特にこの海域の海水の成長過程に焦点を当てて解析したものである。季節海水域での本格的な現場観測は本研究が最初であり、オホーツク海南部の、極域とは異なる海水の特性のいくつかが明らかになった。その中でも特に注目されるのは以下の4点である。

- (1) 海水のアルベドを現場での観測から評価した。
- (2) 熱収支の解析から、南部海域における海水の一日当たりの正味成長量は非常に少ない事を指摘した。
- (3) 海水サンプルの解析から、この海域での海水成長過程に関しては熱力学的成長より力学的成長の寄与の方が大きい事を示した。

(4) 氷厚約1 cmの全層でC軸がほぼ垂直という特徴をもつニラスが広範囲に分布している事を発見した。その成因を室内実験で調べ、日中の海水融解により海表面に生成した低塩分水の影響による事を示した。

先ず第一の点であるが、オホーツク海のように低緯度に存在する海水域における熱収支の計算にはアルベドの評価が特に重要であるが、今までにその観測例は無い。本研究では、海水アルベドを同時に実測した海水密接度の関数として精度良く求める事に成功し、その観測値と現場の気象観測値とを用いた熱収支計算結果から日平均の海水アルベドとして 0.629 ± 0.030 が得られた。これは従来知られていた極域の沿岸海水域の値(0.75)に比べて幾分小さく、その原因として積雪粒、氷厚、太陽高度、雲などが考えられるが、今のところまだよく分からない。しかし、アルベドが小さいのはオホーツク南部海水域の特徴の一つである。

次に第二の点は、簡単な熱収支の計算から、この海域では夜間に結氷するもののそのほとんどが日中に融解するため、海水の1日当たりの正味成長量が0.5 cm以下である事や、比較的薄い海水が多いため、海水域全体では大気にとって熱源として働く事など、極域とは異なるこの海域の特徴を明らかにした。

第三の点では、二冬の観測で得た約50個の海水サンプルの塩分、密度、構造解析の結果から、この海域における海水の成長過程に関するいくつかの特徴が明らかになった。構造上の最も大きな特徴は、通常の海水に見られる短冊型構造のcolumnar iceよりも小さな結晶粒からなるgranular iceの方がはるかに多かった事、それら海水サンプルの多くが厚さ5-10 cmのいくつかの層から構成されていた事などである。これは、一枚板の海水が下向きに静かに成長するというより、それぞれ独立した成長過程を経た海水盤が衝突したり、乗り上げたりしながら何枚かの海水盤が重なり合って厚い海水になった事をうかがわせている。従って、この海域で得られた海水の成長過程においては、熱収支からも示唆された通り、熱力学的成長よりも力学的成長が支配的であることが示唆される。

最後の点では、風波が無く非常に静かな条件の時にのみ形成するといわれている、従って、実際の海では余り見られないニラスの存在を観測し、それをサンプリングし構造の解析を行った。結晶構造の解析から、氷厚約1 cmの全層でC軸はほぼ垂直であった。C軸が垂直な構造は、通常純粋氷に特有なもので、海水にはほとんど見られない。そこで、本研究では、実際にオホーツクの海で観測されたこのニラスの成因を探るための低温水槽実験を行った。実験結果とこの海域の熱収支などから、日中の海水融解によって表面に生成した低塩分水の存在が、そこで純粋氷に似た結晶構造の海水(ニラス)を生む原因となったと考えられる。

本研究の成果は、地球上で最も低緯度に位置するオホーツク海水に特有な、いくつかの特徴を現場観測に基づいて明らかにした点にあり、今後のオホーツク海における本格的な海水研究の進展への大きな貢献として高く評価される。

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ゆう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。