

学位論文内容の要旨

極地方を中心に、世界に広く分布している海氷の成長・融解は、地球環境と密接な繋がりがあり、それに関わる海氷の様々な性質を知ることは重要である。しかしながら、海氷の性質の多くは、その微視的な構造に依存しており、微視的な構造は、海氷の生育環境や置かれている環境によって変化する。そのため、海氷の微視構造形成の全体像を、実験的手法のみで知ることは容易ではない。本論文では、海氷の微視組織の発展の様子を数値的に再現・追跡し、海氷の成長条件・成長過程と形成される微視的構造の関係について検討した。

海氷の微視組織に注目したとき、その結晶粒内に存在する氷の板と海水からなる層状組織の存在、結晶方位 (c 軸方位) 分布は、海氷の浸水性、熱力学的性質、強度などを決定付ける重要な因子である。これらを対象とし、以下のシミュレーションを行った。

海氷の層状組織の形成には、塩分の拡散過程の詳細が関わっていることが知られている。結晶の成長を追跡するボロノイダイナミクスと称する手法に熱伝導および塩分の拡散過程を導入し、二次元平面において海水が海水面近傍から固化していく様子をシミュレートした。その結果、氷結晶が枝分かれして成長し、層状の組織を形成していく様子が再現された。また、海水面からの冷却によって生じる温度勾配が、この層状組織を深さ方向に揃える効果があることがわかった。

海氷の成長が進むと、その c 軸方位は水平面内に揃うことが知られている。ボロノイダイナミクスを三次元に拡張し、この過程の再現を試みたところ、実際の海氷の c 軸方位分布をよく模擬していた。また、 c 軸に垂直な面内での氷結晶の成長速度の異方性が弱い場合の方が、この c 軸方位の整列は起り易いことがわかった。さらに、氷の結晶核が海水面近傍に堆積していく過程を、粒子法の一つである MPS 法を用いて、二次元平面でシミュレートした。その結果、海氷形成初期において、海水中に発生した結晶核が、海水面近傍に浮き上がる過程で、どの結晶方位を向いて堆積し易いかが、直接的に海氷表面近傍の c 軸方位分布を決定していることがわかった。

これらのシミュレーション結果は、文献に報告されている実験観測結果等とよい一致を示しており、本研究で構築した手法は、海氷の微視構造に関わる様々な現象の理解に有効であると考えられる。

論文審査結果の要旨

本論文は寒冷な海域に形成される海氷の微視組織の成長過程をボロノイダイナミクスおよび粒子法の2つの新規な数値シミュレーション手法を用いて追跡したものである。海水に含まれる塩分は海水の固化とともに固体領域外に排出されるが、微視組織の成長過程において、固体に囲まれた液体中には塩分が濃縮してゆくことにより凝固点降下が起こり、未

固化領域（ブライン）が残る。またそれと同時に、固液界面の成長に不安定性が生じ、その結果として薄い固体の層と液体の層が積み重なった空間パターンが形成される。またメソスコピックレベルの特徴としては、大気と接触する海水表面近傍では結晶粒形状のアスペクト比が1に近い粒状晶で、結晶方位のc軸方向分布にも僅かな偏り（垂直方向を向く）があるにすぎないのに対し、たとえば表面から100mm程度下方では微視組織形状は垂直方向に伸びる柱状晶になっており、結晶のc軸方向が水平方向に揃う強い集合組織が形成される。

以上のような海水微視組織の特徴は海水自身の種々の物性に大きな影響を与えるだけでなく、海水の形成と融解に伴う塩分の集積や排出を通して様々な生物種の増殖や消衰に影響を与え、またより巨視的な観点では、海水表面の融解と再凍結による太陽光反射率の季節変化に関与するなど、広義の地球環境に幅広く関与している。したがって海水の微視組織形成過程を詳細かつ定量的に把握することの重要性は高い。

ポロノイダイナミクスは本学機械工学科計算力学研究室で開発が進められている微視組織形成数値シミュレーションの手法である。本論文では先ず2次元ポロノイダイナミクスシミュレーションと熱伝導解析および海水の固化による塩分の排出モデルとその拡散シミュレーションを連成させることにより、微視組織に粒状晶と柱状晶が形成されまた、固化に伴って結晶形状が分枝する現象、固液界面近傍に「組成的過冷却層」が形成される現象などが再現された。次にポロノイダイナミクスシミュレーション手法を3次元に拡張し、異方性結晶成長速度モデルを組み込んで組織形成シミュレーションを行い、結晶c軸方位が水平方向を向く結晶粒が組織成長とともに選択され、特異な集合組織が形成される過程の詳細を明らかにした。数値的に得られた結晶方位分布を実験結果と比較したところ、表面近傍におけるc軸方位の僅かな偏りの発生は見られなかったものの、それ以外の点では良く一致していた。

海水中で結晶核が発生し成長すると、固/液領域の密度差のために氷晶に浮力が発生して浮き上がることがよく知られている。本研究ではこの現象について、最近盛んに研究されている「粒子法」に結晶成長のモデルを組み込み、氷晶が成長しながら浮き上がる過程をシミュレートし、固化の進んだ段階でのc軸方位分布などについて調査を加えている。その結果、海水表面近傍でc軸が垂直方向に偏る現象が見られ、ポロノイダイナミクスシミュレーション手法で得られたc軸方位分布に実験結果と不一致があったことの原因が、氷晶の浮き上がりにより生じている可能性が高いことなどが明らかになった。

以上、本研究はこれまで実験的な研究が主であった研究領域に多くの新しい知見と新たな研究の可能性を提供するものであり、申請者は北見工業大学博士(工学)の学位を授与される資格が十分あるものと認められる。