

海氷の層状微視組織形成のボロノイダイナミクスシミュレーション*

河野 義樹^{*1}, 大橋 鉄也^{*2}Voronoi Dynamics Simulation of Development of
Lamellar Microstructure in Sea IceYoshiki KAWANO^{*3} and Tetsuya OHASHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Graduate Student of Kitami Institute of Technology,
165 Koencho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

Developments of sea ice polycrystals from the sea surface are simulated in two-dimensional approximation by combining numerical methods for crystal growth, salinity diffusion and flux of heat. An anisotropic growth of ice crystals from a number of nuclei and their mutual impingements are numerically reproduced by a simple and novel technique, named Voronoi dynamics. Discharge of salt from solidified region and salinity condensation at the solid-liquid interface are also taken into consideration. Diffusion process of salinity and heat flux are evaluated by solving equations for diffusion and heat conduction, and growth of ice crystals is affected by these two factors. Results show that a layer of granular grains is formed near the sea surface and columnar shaped grains develop below it. Brine regions are mainly formed along grain boundaries in the layer of granular grains. In the region of columnar shaped grains, brine regions exist not only along grain boundaries but also inside grains. Columnar shaped crystal grains consist of ice platelets growing in the vertical direction and brine layers between them. These microstructural features are in accordance with experimental observations.

Key Words: Sea Ice, Crystal Growth, Microstructure, Brine Region, Ice Platelet, Temperature Gradient, Phase Transformation, Computational Mechanics, Finite-Difference Method

1. 緒 言

極地方を中心に海洋の広い領域を覆う海氷には、太陽エネルギーの大部分を反射する性質や、海洋から大気への放熱を妨げる「海洋の蓋」としての役割があるため、海洋の熱収支や海洋-大気間の熱交換と大きな関わりがある。また、海氷の下では莫大な量のプランクトンが発生し、それを餌とする漁業資源も育まれることが知られている。このように、海氷は地球環境と密接な繋がりがあり、その諸性質について知ることの価値は高い。

氷結晶はほとんど結晶格子中には塩分を取り込むことができないため、海水中で氷結晶が成長する際には、塩分は氷-海水界面に吐き出される。この時、結晶粒は氷の薄い板 (ice platelet) に枝分かれして成長し、結晶

粒界やこの氷の板と板の隙間に海水を取り込んで、凝固点降下により海氷内に未固化の高濃度塩水領域 (ブライン: brine) を形成する。

このブラインを含む海氷の微視的構造は海氷の物理的性質と深い関わりがある。例えば、海氷の強度は、結晶粒の大きさや温度はもちろんのこと、ブラインの量や分布にも依存することが知られており、Assur は 1958 年にブラインの量や分布を考慮したモデルを提案し、ブラインの含有量・配置と海氷の強度の関係を理論的に調べる研究を行った⁽¹⁾。また、純粋な氷とブライン、気泡の混合物である海氷は多孔性物質であり、Golden らは 1998 年にモンテカルロパーコレーションモデルを用いて、ブライン体積比が 5% を超えると海氷は透水性を持つ事を示した⁽²⁾。このように、海氷の物理的な性質と大きな関わりがあるブラインを含むその微視的構造に関する研究の意義は大きい。

ところで、氷結晶は周囲の環境を反映した形状に成長することが知られており⁽³⁾、その環境によって様々なその構造、すなわち性質を変える。その成長の様子を調べた研究としては、例えば、分子動力学法を用い

* 原稿受付 2007年12月7日。

^{*1} 正員, 北見工業大学大学院工学研究科システム工学専攻
(〒090-8507 北見市公園町165)。^{*2} 正員, 北見工業大学。

E-mail: kawa@newton.mech.kitami-it.ac.jp

て分子レベルでの氷結晶の成長過程を追跡する研究⁽⁴⁾や、数値モデルを用いた円盤状氷結晶のパターン形成に関する研究⁽⁵⁾、過冷却水中で成長する氷結晶のパターン形成に関する実験的研究⁽⁶⁾などが行われた。しかし、海水の性質には上述のようにブラインといくつもの結晶粒からなる集合体としてのメソスコピックな構造が関わっており、我々の興味の対象はそこにある。

我々は海水多結晶体の成長を、簡単な数値モデルを用いて再現することで、海水の性質を追跡することを試みている^{(7)~(10)}。これまでの研究成果で、塩分の拡散過程に結晶の成長を律速させた場合のシミュレーションでは、platelet 状に枝分かれした結晶組織が得られた⁽¹⁰⁾。しかしながら、実際の海水の結晶構造と比較すると、platelet が海水面に対して垂直方向に揃っていない、ブライン含有率が多いといった問題が残されている。

現在我々のシミュレーションモデルで考慮されていない効果として、海水の結晶成長に大きな影響があると思われるものには、界面エネルギー、水深に依存した温度勾配、対流、凝固潜熱などがある。本論文では、これらの内、温度勾配の効果について注目し、2次元平面において熱伝導による温度勾配を導入したモデルを用いて海水多結晶体成長シミュレーションを行い、温度勾配が海水結晶の形成に与える影響について観察する。

2. シミュレーション手法

2・1 結晶成長手法とセルの固化条件 ある領域内に複数の結晶核が発生し、それらの結晶核の成長のぶつかり合いによって結晶構造が形成されていく様子を考える。この過程において、成長の速い結晶核は他の結晶核からの成長を抑えて成長し、より大きな結晶粒となる。この幾何学的な結晶形状決定は、結晶の成長過程においてよく見られるものであり、海水結晶の場合にも観察される⁽⁹⁾。

上記のような結晶成長過程を表現するため、ポロノイダイナミクスと称する手法を用いた。以下はその手順である。

- 試料を小さなセルに分割し、全てのセルの初期性質を液体 (-1) として設定する。その試料に、ある成長速度 g を有する結晶核 k を発生させる (図 1(a))。
- 各結晶核の時間発展を計算するための、時間離散における 1step の時間増分 Δt を決定する。 Δt は、1step の間に、速度 g で進む結晶核の成長がセルのサイズを越えることがないように設定する。本稿においては

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{d \times g_{\max}} \quad (1)$$

より求める。上式において、 Δx はセルサイズ、 g_{\max} は結晶の最大成長速度、 d は計算の細かさを決定するための数である。

- 時刻を t から $t+\Delta t$ まで経過させ、核 k の成長が各セルの中心へ届いたか判断する。この時、結晶核の成長がセルに届いているのであれば、その核の番号 k をそのセルに付加する。この番号が付加されたセルは固化したものと見なす (図 1(b))。ただし、セルの固化は固液界面でのみ起るものとする。
- 手順 c の作業を繰り返す。すると、セルの固化は時間経過と共に進行し、同じ番号のセルの集合が 1 つの結晶粒となる (図 1(c))

上記の手法は、発生した核による試料内のセル (領地) の奪い合いによる結晶の成長過程を表現している。全ての結晶核が同時に成長し始め、その成長速度が等方的の場合、出来上がる結晶組織は結晶核を母点とするポロノイ多角形となる。このため我々は、以上の手法をポロノイダイナミクスと称している。

上述した通り、本手法ではセルの固化する時刻の算出には、初期結晶核位置からセルの中心への直線距離と、その方向への成長速度を用いる。したがって、結晶界面の挙動を精密に追跡することはできなが、沢山の結晶核が相互に影響を及ぼし合いながら成長する状況を、近似的かつ効率的に計算することができる。

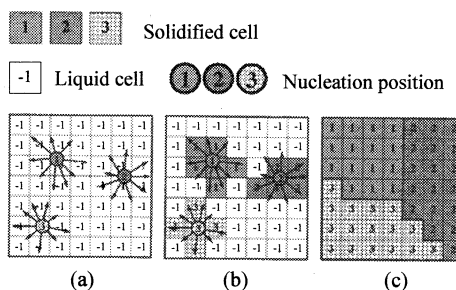


Fig. 1 Schematic illustration of Voronoi dynamics technique.

海水中で氷結晶が成長する場合、海水中の塩分は固液界面に吐き出され、界面付近で塩分は濃縮されて、結晶成長を阻害する。この過程を表現するため、次のようなモデルを考える。

結晶の成長と共に起る塩分の排除過程は、固化したセルから、そのセルの持っていた塩分を隣接する未固化のセルへ均等に分配することで表現する(図2)。これにより、セルの固化と共に塩分は固液界面で濃縮される。塩分と凝固点温度 T_s [K]の関係は近似的に、以下に示す塩分濃度 S_b [‰]の単調減少関数によって与える⁽¹⁾。

$$T_s = \frac{54.11S_b}{S_b - 1000} + 273.15 \quad (250.15 \leq T_s \leq 273.15). \quad (2)$$

各セルは温度が凝固点温度以下のときに固化できるものとし、この固化条件を、ポロノイダイナミクスでのセルの固化条件に追加する。これにより未固化領域(ブライン)の形成を表現する。

固液界面には、結晶の成長と共に塩分が濃縮されるだけでなく、同時に凝固潜熱が発生し、これも結晶成長を阻害する要因となる。この塩分および潜熱は、それぞれ拡散および熱伝導過程によって界面から除去されるが、塩分の排除過程は潜熱の排除過程に比べて非常にゆっくりとした速度で進行するため、海水結晶の成長は、塩分の除去過程に律速されると考えられる。したがって、本稿では凝固潜熱の発生については考慮せず、潜熱はセルの固化に影響を与えないものとする。

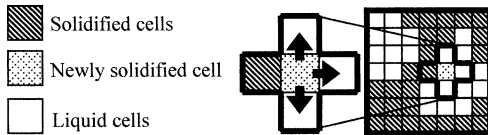


Fig. 2 Discharge of salinity from newly solidified cell. All the discharged salinity is distributed equally to neighboring liquid cells.

2・2 塩分の拡散および熱伝導モデル 試料内の塩分の拡散過程は、以下の式により表現する。

$$\frac{\partial c_{salt}}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c_{salt}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{salt}}{\partial y^2} \right). \quad (3)$$

c_{salt} は海水中の塩分の密度、 t は時間、 D は塩分の拡散係数である。また、熱伝導による試料温度 T の変化を次式により評価する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

a は熱拡散率である。(3)、(4)式をポロノイダイナミクスで用いたセルと同じ格子を用いて離散化し、各セルの性質に合わせてセルごとに海水または氷の物性値を与え、差分法を用いて解く。時間発展の計算には陽的オイラー法を用いた。ただし、塩分の拡散は液体セル間でのみ起るものとした。

2・3 結晶核の成長速度モデル 氷結晶は六方結晶で、その成長速度は一般に c 軸方向と a 軸方向で大きく異なり、さらに c 軸に垂直な面(結晶底面)内でも雪の結晶に見られるような六回対称性がある。実際に海水面から海水の固化が進行する状況を想定した場合、海水面近傍では、このような異方性を持った結晶核が3次的に様々な方位を持っている。しかし、結晶の形成過程で起こる幾何学的選別により、海水面近傍以外では結晶方位はほぼ c 軸が水平に揃うことが知られている⁽³⁾。

本稿では、結晶核 k の成長速度 $g^{(k)}$ を c 軸に垂直な面内での2次元モデルとして扱い、それを以下の式で表現する。

$$g^{(k)}(\theta) = g_0 + g_{ax} \times \cos(n\theta + \alpha^{(k)}). \quad (5)$$

g_0 は底面内における基本成長速度、 g_{ax} は成長速度の振幅、 n (=6)は対称性の数、 θ は x 軸と $g^{(k)}$ の成す角である。 α は $0 \sim 2\pi$ までの乱数で結晶核の方位を表す。図3に(4)式によって与えられる θ と g の関係を示す。

結晶の成長速度の異方性の強度 $R_{anisotropy}$ は以下のように定義する。

$$R_{anisotropy} = g_{ax} / g_0. \quad (6)$$

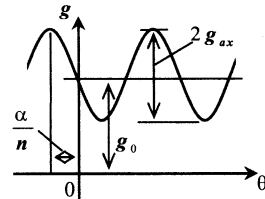


Fig. 3 Anisotropic growth rate given by eq. (5).

3. 時間刻みの細かさ d の決定

セルの固化判定を行う時間間隔 Δt の変化によって、結晶核の成長形がどのように変わるかを確かめるため、(1)式中の Δt の細かさを決定する数 d を 0.5, 1, 2 の 3

パターンに変化させて、結晶核を過冷却水中で成長させる。海水の塩分濃度は0%, 結晶核の成長速度の異方性の強度 $R_{anisotropy}=0.6$, 対称性の数 $n_s=6$ とした。得られた結果をそれぞれ図4に示す。

$d=0.5$ と 1 の場合 (図4(a), (b)) では、結晶核から伸びる6本の腕が成長しきれておらず、対称性が失われているのが確認できる。一方、 $d=2$ の場合 (図4(c)) は、綺麗な6回対称を再現できていることがわかる。よって、本稿で行うシミュレーションには $d=2$ を用いる。

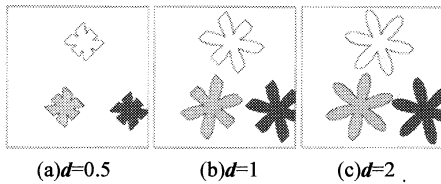


Fig. 4 Shape changes of growing nuclei when d is changed at $R_{anisotropy}=0.6$ and $n_s=6$.

4. シミュレーション条件

海水が海水面から冷却され、海水面付近に結晶核が発生し、それらが成長して、海氷を形成していく状況を想定する。この状況を再現するため次のようなシミュレーション条件を用いた。

サイズ $50 \times 150 \text{mm}^2$, セル数 200×600 , 初期塩分濃度 35%, 初期温度 -1°C の長方形海水試料を用意し、試料の海水面 (上端) を -5°C 一定で冷却する。試料下端は 35%, -1°C で一定とした。試料上端および側面からの塩分の出入りは無いものとし、試料側面の温度の境界条件は鏡映対称とした。この試料の海水面付近に 30 個の結晶核をランダムな配置で発生、成長させる。これらの核の発生タイミングは、その核の発生位置が凝固点温度以下になった時とし、この結晶核の成長速度パラメータは $g_0=0.1 \text{mm/s}$, $R_{anisotropy}=0.3$ とした。

Table 1 Physical constants used in the present simulations.

	Ice	Seawater
Diffusion coefficient of salt $D [\text{m}^2/\text{s}]$		$6.8 \times 10^{-10(12)}$
Specific heat $c [\text{J}/\text{kgK}]$	2040	4217
Diffusivity of heat $a [\text{m}^2/\text{s}]$	$1.17 \times 10^{-6(13)}$	$0.139 \times 10^{-6(14)}$
Density $\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$	916.8	1000

上記のシミュレーションから得られる結果と比較するために、試料内温度を 4°C 均一として、温度勾配が無い場合についてもシミュレーションを行った。この時の結晶核の成長速度パラメータは $g_0=0.0106 \text{mm/s}$, $R_{anisotropy}=0.3$ とし、それ以外の条件はすべて温度勾配がある場合のシミュレーション条件と同様である。これらのシミュレーションに用いた物性値は表1に記載する。

5. 海水成長シミュレーションの結果と考察

5・1 海水成長の過程 図5は海水面から徐々に冷却される条件で行った温度勾配がある場合のシミュレーション結果である。図5(a)-(e)は、海水の相対過冷却度 $\sigma[\%]$ を

$$\sigma = \frac{T_s - T}{T_s} \times 100. \quad (7)$$

から求め、その分布を示したものである。但し、 T_s 及び T はそれぞれ、海水の凝固点温度 (式(2)) 及び実際の温度 (式(4)) である。図5(a)-(e)において、白色に近い領域ほど相対過冷却度が高いことを示しているが、結晶も白色として表示してある。図5(f)は $t=5000\text{s}$ における結晶構造を示したものであり、結晶粒ごとに色づけて表示した。図5(g)-(k)は温度分布を表示したものである。図5(l)は $t=5000\text{s}$ における塩分濃度分布を示しており、白に近い色をしている領域ほど塩分濃度が低いことを示しているが、結晶も白色として表示してある。これらの図において、カラーバーの示す最小値以下の値は最小値と同色、最高値以上の値は最高値と同色とした。これらの図の過冷却度分布 (図5(a)-(e)) と温度分布 (図5(g)-(k)) に注目して、結晶の成長過程を観察する。

試料は時間の経過とともに海水面近傍から冷却され (図5(g)), 凝固点温度以下になった場所から順次結晶核が発生し、成長を始める (図5(a))。この結晶成長初期の段階では、海水面近傍の結晶の存在していない領域に高過冷却度の領域が存在している。過冷却度の高い領域ほど、凝固点温度と実際の温度との差が大きいため、結晶成長は塩分に邪魔されにくい。このため、海水面近傍の領域ほど結晶は成長しやすく、結晶は海水面を覆うようにして成長する (図5(b))。この時、氷は海水に比べ熱拡散率が高いため、結晶の存在する領域から冷却が進んでいる様子が確認できる (図5(h))。

海水で海水面が覆われると、海水面に近い場所ほど冷却されやすいため、浅い場所に存在する海水ほど固化しやすくなる。海水底面の凹部分は、凸部分に比べて浅い場所にあるため、そのような領域を埋めるようにして結晶は成長し、巨視的に見ると、海水底面の形状は、結晶の成長とともに海水面に対して平行な平面に近づいてゆく (図 5(c)-(e))。海水の厚さの違いによって生じていた水平面内の温度差も、海水の形状を反映して、結晶の成長と共に一様となっていく様子も確認できる (図 5(i)-(k))。つまり、海水面から海水が冷却されることによって生じる温度勾配は、結晶成長を海水面に対して平行に進めさせる効果があることがわかる。

5・2 温度勾配と分枝する結晶形状の関係 結晶の成長と共に、塩分は氷結晶側から海水側に吐き出され、氷-海水界面に高濃度の塩分層を形成し、この塩分は結晶の成長を阻害する。すると、結晶成長は、塩分の排除しやすい場所から進み、結晶界面は不安定化して、結晶には枝分かれが起る。図 4(f)を見ると枝分かれた結晶形状が得られているのが確認できる。この枝分かれとブラインの形成過程に注目して図 4 を観察する。

結晶核の成長初期 (図 5(a), (b)) においては、結晶領域は孤立しており、周囲には固化可能な領域 (海水) が存在しているため、結晶は様々な方向へ成長する。この時、結晶から固液界面へ排除された塩分の影響で、

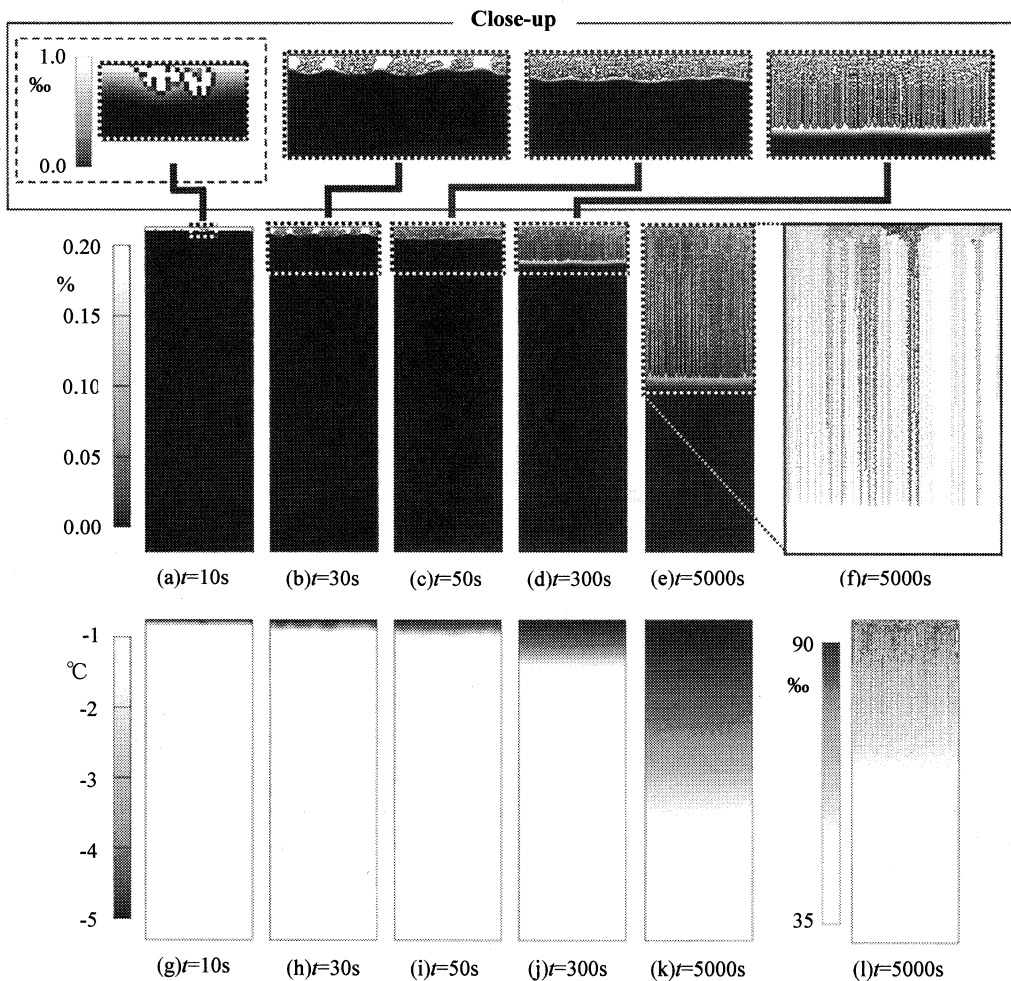


Fig.5 Obtained results when temperature gradient exists in the specimen. (a)-(e) are distributions of degrees of super cooling of seawater, (f) is crystal structure, (g)-(k) are temperature distributions and (l) shows salinity distribution.

界面には沢山の細かな凹凸ができる。この界面の凹領域内には濃縮された海水が取り込まれるが、塩分はこの小さな凹領域内からその外へは拡散しにくく、この凹領域内の塩分濃度は下がりにくい。そのため、この領域は固化しにくく、固化しやすい領域からの結晶成長の回り込みによって結晶粒内に取り込まれ、無数の粒状のブラインがランダムな配置で形成された。

一方、海水面が海水で覆われた(図5(c))後の結晶成長過程において形成されたブラインは、垂直方向に規則正しく整列して存在している(図5(f))。これには、5・1節で述べた、温度勾配が海氷底面を海水面に対して平行にするように結晶を成長させる効果に関わっている。上述のように、結晶界面には凹凸が存在しており、その凹部分は高塩分の海水のために固化しにくい。したがって、この凹部分の領域を取り残して、結晶の凸部分が成長することとなる。しかし、この時、結晶には海水面に対して平行に成長する作用が働いているため、突出した結晶は、他の突出した結晶とほぼ同じ速度で下方に向かって成長する。この突出した結晶の周囲には、濃縮された海水が存在しており、それらは突出した結晶同士の隙間に挟まり、結晶の先端同士が互いに連結するのを防ぐ。すると、結晶は、その枝分かれの形状を維持したまま下方に伸びる。その結果、柱状結晶部分において、海水面に対して垂直方向に揃った platelet 状組織が形成され、その隙間に取り込まれた海水は規則的に並んだブライン領域となった。

図5(f)において、plateletの幅に注目すると、その先端では0.25mmであり、海水面に近くなるほど太くなるという結果が得られた。実際の海氷において、結晶粒中に存在するplateletの幅は、通常0.5~1mm程度であることが知られており⁽¹⁵⁾、これはシミュレーション結果と概ね一致する。本稿においては、一辺が0.25mmのセルを用いてシミュレーションを行っており、突出した結晶は必ずセル1つ分(0.25mm)以上の幅を持って成長する。その結果、具体的に曲率と界面エネルギーの関係をモデルで考慮することなく、実際の海氷に類似なplatelet構造を再現できたと考えられる。

次に、図5(f)において、ブライン領域の大きさに注目すると、海水面に近い場所にあるものほど、その面積が小さいことがわかる。これは、海水面に近い場所ほど温度が低いために、高い塩分濃度の海水でも固化可能であるため、結晶成長が進んだからである。この時の塩分濃度分布(図5(l))を見ると、海水面に近い場所のブラインほど塩分濃度が高くなっており、温度に依存して結晶成長が進んだ様子が確認できる。

5・3 温度勾配と過冷却層の状態 海水面が海水で覆われた後の過冷却度分布(図5(c)-(e))を見ると、海水が成長すると共に海氷底面に存在する過冷却層の状態が変化していく様子が確認できる。この過冷却層は、温度の伝達速度が塩分の拡散速度よりも速いために発生した組成的過冷却⁽⁹⁾⁽¹¹⁾であり、この過冷却層の状態が形成する結晶形状と大きな関わりがあることが知られている。この過冷却層の状態と結晶成長の関係について調べる。

図6は、海水面が海氷で覆われた後の、海氷底面に形成された過冷却層の厚さと海氷の厚さ、最大氷厚から計算した海水の成長速度を時間経過ごとに調べたグラフである。この図を見ると、結晶の成長と共に過冷却層は厚くなるが、海水の成長速度は下がることがわ

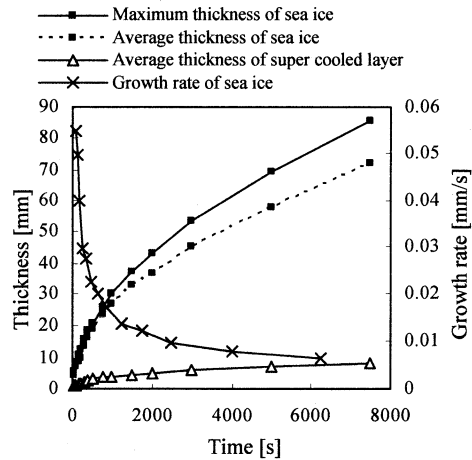


Fig.6 Relationship between thickness of super cooled layer, thickness of sea ice and its growth rate.

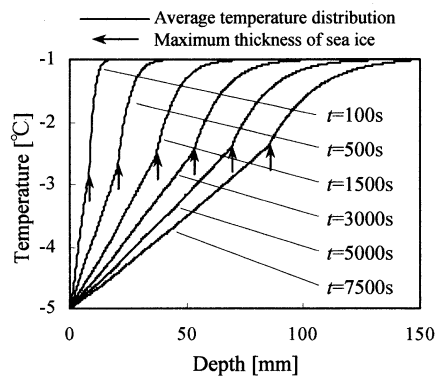


Fig.7 Changes of average temperature distribution during crystal growth.

かる。図7は、深さごとの平均温度と海水の厚さの時間変化を調べたグラフである。実線は温度分布であり、矢印は最も下方に突出した結晶先端の位置を示している。0mmは海水面である。この図を見ると、氷は海水に比べ熱拡散率が高いため、海水の成長とともに試料の冷却が進行し、試料の深さ方向に対する温度の勾配が緩やかになっていく様子が確認できる。つまり、海水の成長が進むほど、海水底面における温度の勾配は緩やかとなり、過冷却層の幅は氷厚の増大と共に広がりやすくなる。

しかし、試料内には温度勾配があり、深い場所ほど温度は高く、結晶成長が進むほど、海水底面付近の海水の温度と凝固点温度との差は小さくなる。その結果、結晶成長が進むほど、海水底面での過冷却度は低くなり(図5(e))、結晶の成長は塩分の影響を受けやすくなる。結晶成長が進むほど、その成長速度が低下したのはこのためである。この時、枝分かれして下方に突出した結晶の成長も阻害されやすくなるので、下方に突出する結晶の枝の数も海水の成長と共に減少した

(図5(f))。実際の海水において、成長速度が遅い場合ほど、plateletの幅は大きくなることが知られている⁹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。plateletの幅が大きくなることは、下方に成長する氷結晶の枝の数が少なくなることを意味しており、これは本シミュレーション結果と一致する。

5・4 温度勾配がない場合の結晶とブラインの形状

図8は35‰の試料全体を常に4℃一定に保ち、海水の初期過冷却度を約0.75‰に設定した場合のシミュレーション結果である。この条件の場合、過冷却度は、塩分濃度のみの影響を受けて変化する。なお、初期結晶核の位置は、図5のシミュレーションの場合と同様である。図8(a)-(e)は塩分濃度分布を示したものであり、結晶は白色として表示した。この図において、カラー

バーの示す最高値以上の値は最高値と同色とした。また、図7(f)は $t=5000s$ における結晶構造を示したものであり、結晶粒ごとに色づけしてある。

図8において、結晶の成長過程を観察する。試料全体が過冷却状態であるため、結晶核は一斉に成長し始め(図8(a), (b))、海水面近傍を結晶で満たす(図8(c))。その後、結晶は下方へ成長し始めるが(図8(d))、結晶核の成長速度の異质性を反映して、海水底面は波打った形状となった(図8(e))。この結晶の成長が下方に揃っていない状況においては、濃縮された塩分の効果によって界面に生じた細かな凹凸の隙間に挟まれた海水は、結晶成長の回り込みによって結晶内部に取り込まれる。その結果、温度勾配がある場合の結果とは異なり、海水面に対して垂直方向に並んだplatelet状組織が形成されることはなかった(図8(f))。

また、塩分濃度分布に注目すると、温度勾配がないために、海水内に取り込まれた海水の塩分濃度は均一なのが確認できる(図8(e))。

6. 結 語

塩分の濃縮と拡散、温度勾配の効果を考慮した海水多結晶成長シミュレーションを行い以下の結果が得られた。

- (1) 温度勾配の効果により、海水の成長速度と成長方向が揃えられ、実際の海水結晶と類似な、海水面に対して垂直方向に揃ったplatelet状組織が得られた。
- (2) 塩分濃度に依存した海水の凝固点温度と、垂直方向の温度勾配の効果により、海水面に近い場所ほど、ブラインの塩分濃度が高くなるという結果が得られた。
- (3) 海水底面に形成される過冷却層は、海水の成長とともにその厚さを増すが、温度勾配の効果により、

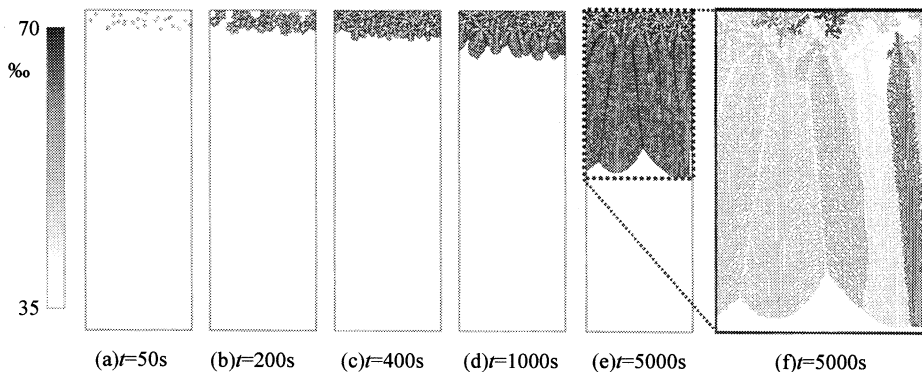


Fig.8 Obtained results when temperature gradient does not exist. (a)-(e) are salinity distributions and (f) shows crystal structure.

その過冷却度は下がった。その結果、海氷の成長が進むと共に、下方に platelet 状に突出して成長する結晶の数が減少した。

文 献

- (1) Assur, A., Composition of sea ice and its tensile strength, *Proceedings of the Arctic Sea Ice Conference, Easton*, (1958), pp106-138.
- (2) Golden, K.M. Ackley, S.F., Lytle, V.I., The Percolation Phase Transition in Sea Ice, *SIENCE*, Vol. 282, (1998), pp. 2238-2241.
- (3) Weeks, W.F. and Ackley, S.F., The growth, structure and properties of sea ice, *CRREL Monograph*, (1982).
- (4) Noda, H., Von der Eerden, J. P., Furukawa, Y., A clear observation of crystal growth of ice from water in a molecular dynamics simulation with a six-site potential model of H₂O, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 266, (2004), pp. 297-302.
- (5) Yokoyama, E., Sekerka, R.F., Growth trajectories of disk crystals of ice growing from supercooled water, *J. Phys. Chem. B*, Vol. 104, (2000), pp. 65-67.
- (6) Shimada, W., Furukawa, Y., Pattern formation of ice crystals during free growth in super cooled water, *J. Phys. Chem. B*, Vol. 101, (1997), pp. 6171-6173.
- (7) Ohashi, T., Sasaki, M., Yoshimura, Y., A numerical simulation of the development of ice-microstructures, *Proceedings of the 19th international symposium on Okhotsk sea & sea ice*, (2004), pp. 180-185.
- (8) Kawano, Y., Ohashi, T., Numerical simulation for development of polycrystal microstructure of sea ice and brine formation by salinity concentration, *Proceedings of the 21th international symposium on Okhotsk sea & sea ice*, (2006), pp. 95-98.
- (9) Kawano, Y., Ohashi, T., Numerical simulation of development of sea ice microstructure by Voronoi dynamics technique, *Proceedings of 18th IAHR International Symposium on Ice*, Vol. 2 (2006), pp. 97-103.
- (10) Ohashi, T., Kawano, Y., Numerical simulation of salinity diffusion and growth instability in the microstructure evolution of sea ice, *Proceedings of the 22th international symposium on Okhotsk sea & sea ice*, (2007), pp. 11-16.
- (11) Eicken, H., Growth, Microstructure and Properties of Sea Ice, In: Thomas, D.N., Dieckmann, G.S. (Eds.), *Sea Ice: An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology and Geology*. Blackwell, Oxford, (2003), pp. 22-81.
- (12) Toba, Y., Kaimen kyokai katei, In: *Physical oceanography I (Kaiyo butsuri I)*, Tokai univ. press, Tokyo, pp. 145-263.
- (13) Okagaki, O., Conduction of heat (Netsu Dendo), In: Nobuhiro S. (Ed.), *Engineering of heat transmission (Dennetsu Kogaku)*, (1998), Morikita press, p.5.
- (14) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *Data book of Heat Transmission (Dennetsu Kogaku Shiryo)*, (2003), p.353, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (15) Nakawo, M., Sinha, N.K., A note on brine layer spacing of first-year sea ice, *ATMOSPHERE OCEAN*, Vol. 22, (1984), pp. 193-206.
- (16) Lofgren, G., Weeks, W.F., Effect of growth parameters on substructure spacing in NaCl ice crystals, *Journal of Glaciology*, Vol. 8, (1969), pp. 153-164.