

塩水表面の凍結に伴う鉛直対流と氷層下の形状パターン

Vertical Convection Generated from Freezing of Saline Water and Shape Pattern at Ice bottom

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 辻輝 (Hikaru Tsuji)

北海道大学大学院工学研究科准教授 正員 山田明人 (Tomohito Yamada)

北海道大学大学院工学研究科教授 正員 泉典洋 (Norihito Izumi)

1.はじめに

海水の成長過程における対流の発生によって、海底の栄養分が巻き上げられ、その海水域の生態系が豊かになることが近年の研究で判明してきた。

例えば、知床は流水が到達する場所として北半球で最南端であり、この流水には豊かな栄養が含まれ、春になると溶け出した栄養と光で植物プランクトンが大量に増え、それが動物プランクトンのエサとなる。そこから始まり生き物たちが生きていくため食物連鎖が起こっている。また、サケやマスは、森に棲むヒグマやキツネなどの陸の動物たちの貴重なエサになり、知床は海の生態系と陸の生態系が見事な相互関係を表している。この見事な生態系が認められて知床は 2005 年に世界自然遺産に認定された。このように、海水は生態系に重要な影響を与えている。しかし、まだ海水下のメカニズムは解明されていない部分はまだ多くある。

先行研究を紹介すると、塩排出の著しい海水成長初期過程における海水下の塩対流の現象を、シュリーレン法を用いて光学的に観測された。その結果、海水下の塩対流は、海水の成長速度の大小によって違ったブライン流下を示すことが観察された。(若土,1977)

また、理論解析として海水下の対流は、海水が成長するとともに変化していることが分かっている。ただし、それは対流についてであり、氷層下面形状についてはまだ分かっていない。(Molemaker and Dijkstra, 1994)

実現象として、図 1 は冬季の稚内港に張った氷である。このように氷がハス型に割れているのは、対流によって出来た厚薄により薄い部分から割れたために形成されたと考えられる。しかし、海水下に大きな凹凸が見られることは稀であるので、他の影響が強い可能性も十分にある。

塩水表面が凍結するとき、淡水部分が凍り塩分は氷層の下部に排出される。そのとき氷層下部に濃度の高い塩水ができる。この濃度の高い塩水と底の方に存在する濃度の低い塩水との密度勾配と、塩水の温度勾配により対流が起こる。対流が発生すると流れが上方に向かう点では氷の成長が妨げられ、流れが下方に向かう点では促進される。そのため対流セルに応じて氷の下面にパターンが形成されていると予測出来る。



図 1.冬季の稚内港に張った氷

(<http://kuijira.tea-nifty.com/hanagara/2009/02/post-33da.html>)

そこで、今回は、塩水を表面から冷やし凍らせ、氷の下面の形状パターンを観察することで対流のスケールを計ることにした。この研空の目的は塩分濃度、水深等を変化させ実験を行い、それぞれの結果を比較することによって氷層下の対流を決定するパラメータを明確にすることである。

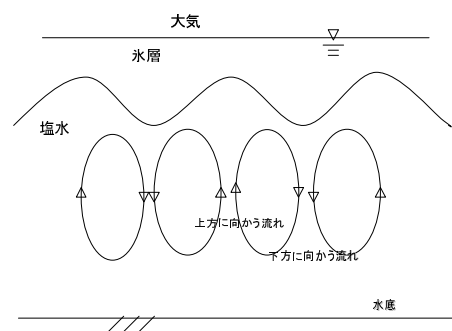


図 2.対流によって作られる氷の形状のイメージ

2.対流

対流とは流体において温度や表面張力によって生じた不均質性のために、その内部で重力によって引き起こされる流動が生ずる現象である。

本研究では、温度と塩分の 2 成分により不均質性が生

じるため二重拡散対流と呼ばれるものがある。

2.1 二重拡散対流

二重拡散対流は、拡散係数が異なる2つの成分（溶質あるいは温度）によって密度成層している流体で生じる対流運動である。そのうちいずれか1つの成分についてみたとき不安定な成層していれば全体が静力学的に安定な密度成層をしていても生じるのが特徴である。

2成分系の例として海水を考える。海水の密度は主として温度 T と塩分 S によって決まる。海水の密度は低温域を除けば T, S についてほとんど線形で表せることが分かっている、その式は、

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha T + \beta S) \quad (1)$$

となり、係数 α 、 β をそれぞれ熱膨張係数、塩分収縮係数と呼び、その値は海水では、

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S \sim 2.6 \times 10^{-4} K^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = +\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T \sim 7.6 \times 10^{-5} \%^{-1} \quad (3)$$

である。

二重拡散対流が起こるとき、最も重要なポイントは密度を決定する2成分の拡散の速さが異なっているということである。海水の温度と塩分の拡散係数 κ_T と κ_S は、

$$\kappa_T = 1.40 \times 10^{-3} cm^2 s^{-1} (20^\circ C) \quad (4)$$

$$\kappa_S = 1.51 \times 10^{-5} cm^2 s^{-1} (25^\circ C, 3\%) \quad (5)$$

である。2つの拡散係数の比 τ は Lewis 数と呼ばれ、

$$\tau \equiv \frac{\kappa_S}{\kappa_T} \sim 10^{-2} \quad (6)$$

程度の値である。つまり、海水では塩分の拡散は熱の拡散に比べて100倍も遅いと言える。

成層を潜在的に不安定にしている成分が熱か塩分かで対流の様相は大きく変わってくる。不安定にしている成分が拡散の遅いもの（海洋では塩分）の場合は **finger** 型、対して拡散の速いもの（海洋では熱）が不安定にしている場合は **diffusive** 型と呼ばれている。（野口、新野、1999）

3. 実験方法

幅 35.9cm、奥行き 22.0cm、高さ 26.2cm のガラスの水槽を使用した。周りを断熱材でおおい、水面からのみ塩水が冷やされるようにした。また、断熱材には発泡スチロールを使用し、その厚さは 2cm で行った。 $-10^\circ C$ まで調節出来る冷凍室を使用し凍らせることにした。

塩水の濃度は 35‰（濃い海水程度）とし、冷凍室を $-10^\circ C$ に設定（ただし冷凍室の性質上、常に $-10^\circ C$ に保つことは出来ず $\pm 2^\circ C$ 程度の誤差が生じる）して行った。また、水深は 13cm とし、水量約 9ℓ とした。

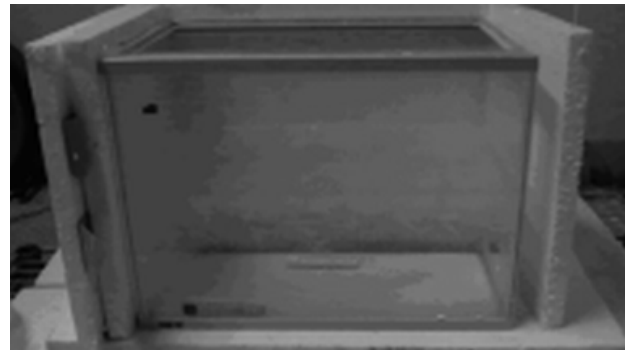


図 3. 実験に使用した水槽と断熱材
水槽のスケールは幅 35.9cm 奥行き 22.0cm 高さ 26.2cm
断熱材は発泡スチロール使用し厚さ約 2cm、水深 13cm

4. 実験結果

約 10 時間で水面に厚さが 3cm 程度の氷が張った。図 4 に見えるように氷の裏面に凹凸のパターンが現れた。最大で約 1cm の厚みの差が生じていた。また、そのような大きな凹凸の他に無数の小さな凹凸が確認された。氷は細長い結晶板状になって集塊を成しており、そのためにこのような細かな起伏ができたのだと推測される。海水の構造について観察がされており、海水のほとんどに短冊状の薄片が何枚かが平行にならんで一つの集塊を作り、その隣でも同様の集塊ができていたが、その方向が集塊ごとに異なっていた。（田畑、小野、1957）この氷の裏面も同様であるとみなせるだろう。また、結氷過程に、海水が濃縮され水中に閉じ込められることがあり、これはブライン細胞と呼ばれる。あるいはこのブライン細胞や気泡が氷下面に表れた可能性もある。

図 4 は氷を水槽の中央部から取り出し、裏側の写真を撮ったものである。図 4 の氷のスケールは幅約 22cm、奥行き約 13cm である。

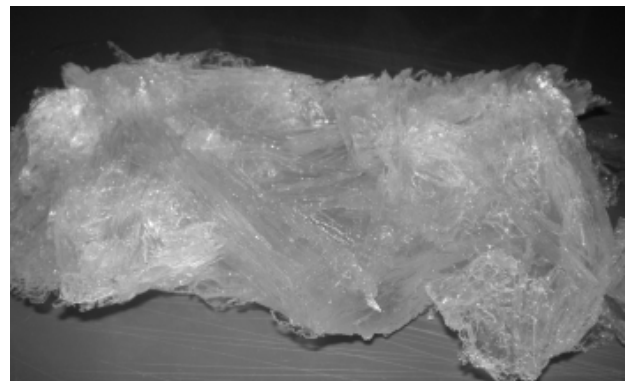


図 4. 実験後の氷の裏面形状の写真

図 4 は氷のほぼ中心部分を幅約 22cm、奥行き約 13cm で取り出したものである。左右に凸があり中央に凹が見える。厚さの差は最大で約 1cm が確認された。

5. まとめ

先に挙げた先行の実験的研究では、本研究と同程度の塩分濃度（32‰）で海水成長速度の大小を比較し、成長速度が速いときのみ拡散が起こると報告されている（若土、1977）。そのとき対流セルは最大で水平幅 10cm の

ものが確認された。今回の著者らの実験で確認された凹凸の凸から凸までの距離が約 20cm であることから、水平幅 10cm の対流が 2 つ発生し氷下面のパターンを形成したと言えるかも知れない。

一方で、結氷後の水槽底付近の水温は約-4℃であり、これは 35%の融点よりも低い温度である。先行の実験で、海水の成長速度が遅いときの特徴として、ブライン流下が拡散せずに底まで落下し、深くなる程塩分濃度が高く、かつ安定な鉛直分布になっている。今回の実験もこのパターンで底の塩分濃度が高くなり水温が-4℃まで下がった可能性もある。この場合は、氷下面のおおきな凹凸は対流によって出来たのではなく、側面から冷やされたために出来たものということになる。

今後の課題として、条件を変えて実験を行い、氷の下面のパターンにどのような変化を与えるかを観察すれば、対流を卓越するパラメータを明確にできるのではないだろうか。今後の研究では氷の成長過程を段階に分け氷の下面形状を観察することによって、対流の変化をとらえたいと思う。

謝辞: 今回の実験を行うにあたり北海道大学工学部構造システム研究室の実験用冷凍室を使用させて頂いた。

6.参考文献

- 1) 野口尚史、新野宏：海洋と室内実験にみる二重拡散対流、数理解析研究所講究録 1115 巻、1999
- 2) 若土正暁：海水の凍結によって起こる塩対流に関する実験、低温科学 物理篇 第 35 韓、1977
- 3) M.JEROEN MOLEMAKER and HENK A. DIJKSTRA :Double diffusive and direct instabilities below growing sea ice
- 4) 加藤由紀、藤村薫、橋場誠：密度最大点を含む流体層における二重拡散対流の安定性、数理解析研究所講究録 1226 巻、2006
- 5) 田畑忠司、小野延雄：海水の構造について、低温科学 物理篇第 16 韓、1957
- 6) 川内雅雄：オホーツク海の生態系モデルに関する研究、平成 20 年東京大学五月祭オープンラボ研究紹介、2008