

冷たい水の拡散における地形依存性の測定

久保宮玲於奈（開成中学校）

2016年8月31日

1 提案の目的

本提案書¹は、冷たい水（氷河からの融解水²と海水生成による高密度水³）の拡散における地形依存性の測定を提案するものである。提案の目的は、不規則な流れの海水に対して、冷たい水がどのように拡散するのか、またその地形依存性はどうなのか、などを研究するため、実際に極地で観測しようとするものである。研究のゴールは、従来の海洋モデルの検証、そして地形依存性を考慮した極域環境の理解にある。以下、本研究について記す。

■背景

今まさに、地球規模での温暖化が、極地の氷の減少という、目に見える形で進行している。これら気候変動は、海洋の変化と密接に関係しており、海洋に関する多くの研究が行われている²。しかし、広大な海洋についてはわからないことが多く、従来からある海洋循環モデルも、十分に解明されているわけではない³。環境への関心が高まる中、海洋モデルの検証、海洋の変化の解明に、期待が集まっている。

■問題点、解決すべき点

海洋モデルの検証、海洋の変化の解明における、問題点、疑問点、解決すべき点を以下に挙げる。

- 海洋の変化自体、広域かつ直接観測が難しく、十分把握されていない
- 不均一な海水での拡散や地形依存性など、身近な現象でも不明な点が多い
- 詳細な実測データ（多点の時系列データ）の収集が必要である

■研究課題

問題点、疑問点、解決すべき点に対して、以下の3つの課題に取り組む。

- 冷たい水（氷河融解水、高密度水）の拡散における地形依存性の観察
- 地形依存性を知るための、観測手法・分析手法の開発
- データ解析

氷河・氷床からの融解水と海水生成による高密度水は、重要な研究対象であり、生成過程、生成域、流量など、これまで多くの調査が行われている⁴。拡散過程や地形依存性についても、観測データの収集をはかり、詳しく解析してみたい。

■研究方法

具体的には、観測可能な、氷河が融解する棚氷下と海水を生成する海域において測定を試みる。それぞれ、棚氷下の海水に塩分濃度が低く冷たい融解水が混ざった状態と海水生成下の海水に塩分濃度が高く冷たい高密度水が混ざった状態である。

¹本書作成において TeX 入門本¹⁾を参考にした

²氷河底面または氷床底面の融解で生まれる塩分濃度が低く冷たい水

³海水の生成で生まれる塩分濃度が高く冷たい水

観測には、Fig.1のような、海水の分布を調べるのに適した2点以上の測定点を利用する。同期した2点以上の海水データ⁴を収集し、同時に、各点での地形データ⁵を記録する。時間に対する測定値の変化および2点以上の連動性などから不均一な分布や特定の効果を推定する⁶。

また、観測手法の開発のため、可能であれば、トレーサー⁷の分布測定（ある一時点のデータではなく時系列データの収集）や流れの可視化についても検討したい。

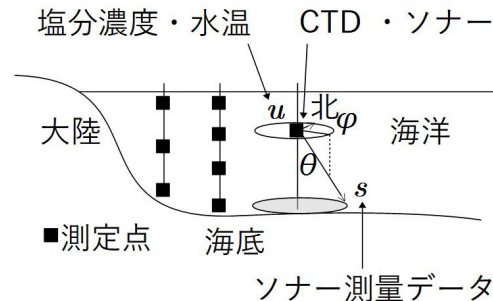


Fig. 1 測定の方法

■研究の特色

● 実現可能性

氷河からの融解水、海氷生成域の高密度水、それぞれ、すでに調査があるとおおり、観測自体は可能と考えられる。本研究の鍵は、多点同期データの取得と分析手法の工夫にある。

● 着眼点, 独創性

本研究は、拡散過程と地形依存性に着目した観測・分析である。独創的な点は、数値シミュレーションやモデリングではなく、実測値のデータ解析によるアプローチという点である。

● 位置づけ, 意義

地形依存性を知るための、観測手法・分析手法の開発は有意義である。統計的なデータ解析の成果により、沿岸における冷たい水の挙動の推定や極域環境の高精度の予測に貢献できる。

■予想される結果

不規則な流れをともなう表層の海水に対しては、冷たく重い水といえども、非常に早く拡散してしまうものと予想する。そのため、地形依存性は薄いものとする。

一方、流れが抑制される地形あるいは一方向に流れが定まった地形の海水に対しては、より多くの冷たい水が沈み込むものと予想する。そして、海底の形状や傾斜に大きく影響されるものとする。

本研究の成果により、地形依存性の特徴による分類などから、地形単位での冷たい水の拡散（流れ）を推定できるようになると考える。

⁴CTD（電気伝導度・水温・水深計）で測定したデータ。塩分濃度、水温の時系列データ。

⁵ソナー（音波を用いて水中で測距する装置）で測量したデータ。測定点において、鉛直下方向からの角度 θ と方角 φ で決まる方向に対する反射距離のデータ。

⁶時刻 t における測定点 i の塩分濃度、水温の時系列データを \mathbf{u}_{it} 、ソナーで測量した時系列ではないデータを \mathbf{s}_i とすると、 N 個の測定点に対して、 $\{\mathbf{u}_{it}, \mathbf{s}_i\}$ ($i = 1, \dots, N$)と表せる。時間の変化にともない \mathbf{u}_{it} 、 \mathbf{u}_{jt} はどのような関係にあるか、 \mathbf{u}_{it_1} 、 \mathbf{u}_{jt_2} はどのような関係にあるか、時間に依存しない \mathbf{s}_i に対してどのような特徴を持つかなど、統計的手法を用いてデータ解析する。

⁷微量元素や同位体など

2 その提案がひらめいたきっかけ

■着想に至った経緯

以下の2つの点から、研究の必要性を感じた。

- 模型による沈み込み・拡散の観察⁸から海洋循環モデルに疑問をもった（冷たい水の沈み込みが循環の駆動力だろうか）。また、水槽の中の水の流れが、水槽の大きさや形状に強く依存していることがわかり興味をもった。
- 冷たい水の混合拡散について調べた際、参考になる研究があまり見つからなかった。不規則な流れをともなう海水中での拡散は、解析的には解かれず、非常に複雑だろうと考えた。

3 その提案を南極や北極で行う方法

■第1ステップ

1. 氷河融解水の拡散過程の観測
2. 地形依存性を知るための観測手法の検討

観測可能な氷河下⁹の融解水において観測を試みる⁴⁾。これは、棚氷下の海水に、塩分濃度が低く冷たい融解水が混ざった状態である。第1ステップでは、試験的な測定になるが、氷河融解水の拡散過程についてデータを収集する。

測定は、Fig.2 のとおり、分布を調べるのに適した2点以上の測定点を利用する。同期した2点以上の時系列データ（塩分濃度、水温）を収集し、同時に、各地形データ（ソナーの測量値）を記録する。時間に対する測定値の変化および2点以上の連動性などから不均一な分布や特定の効果を推定する。

地形依存性の観測手法については、まず測定点の数について考える必要がある。多点であるほど望ましいが、あまりに多い数は現実的ではない。地形の特徴にあった適当な測定点の数を、観測を通じて決定していく。研究計画において、測定点の数と配置の最適化が、最初の目標になる。

■第2ステップ

1. 高密度水の拡散過程の観測
2. データ解析

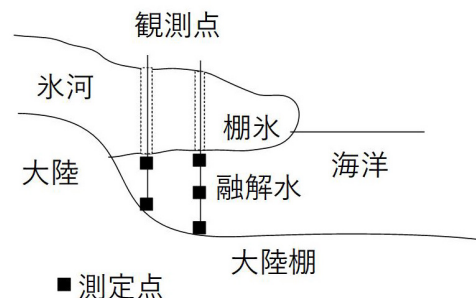


Fig. 2 融解水の観測

⁸水槽を使った海洋循環モデルの検証実験（後述）

⁹昭和基地近くのラングホブデ氷河の棚氷底面など

観測可能な海水生成域¹⁰の高密度水において測定を試みる⁵⁾。これは、海水生成下の海水に、塩分濃度が高く冷たい高密度水が混ざった状態である。

第2ステップでも、引き続き試験的な測定になるが、高密度水の拡散過程についてデータを収集する。

測定は、Fig.3 のとおり、分布を調べるのに適した2点以上の測定点を利用する。測定以降は、第1ステップと同様である。

データ解析については、コンピュータを用いた統計的な分析（多変量解析など）を想定している。多くのデータから特徴（因子）を抽出する解析を試み、特定の効果を推定する。また、観測データが公開されれば、データ解析の手法についても研究する。

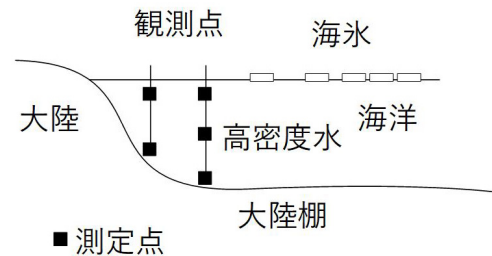


Fig. 3 高密度水の観測

4 この提案のために、予備実験等を行った場合は、その手順と結果

■モデルによる沈み込み・拡散の観察

モデルを使った実験¹¹を行い、沈み込み・拡散について観察した。実験の手順と結果は、以下のとおりである。

■実験の手順

1. 大きめの水槽に、水温 24℃、濃度 3.5% の食塩水を準備する。2. 水槽上部左に氷 (0℃) を入れた底の空いたカップ、水槽上部中央に熱湯 (70~90℃) を入れたアルミ缶、水槽上部右に氷と食塩 (-15~-5℃) を入れたアルミ缶を設置する。3. 水の動きをわかりやすくするため、冷たい所 (左端、右端) に青いインク、暖かい所 (中央) に赤いインクを水面から静かに数滴垂らし、冷たい水と温かい水の動きを観察する (実験開始直後の様子 Fig.4)。

■結果と考察

沈み込みの様子、拡散の様子、表層の様子は、それぞれ、Fig.5, Fig.6, Fig.7 のようになった。5分後、Fig.6 のとおり、表層、中間層、深層の3層に分かれた。さらに時間が経過すると、深層の冷たい水は、徐々に拡散した。

実験において、冷たい水の沈み込みは見られたが、温かい水の上昇は見られなかった。よって、一定の速さで循環するような動きは観察されなかった。もう一点、水の動きについて、水の流れは水槽の大きさや形状に強く依存することがわかった。

¹⁰ロス海、ウェッデル海、アデリーランド沖、ケープダンレー沖など

¹¹文献⁶⁾を参考に実験を行った

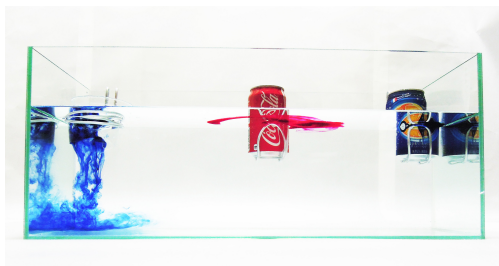


Fig. 4 実験開始直後の様子

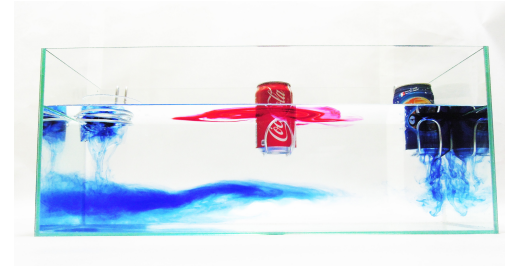


Fig. 5 沈み込みの様子

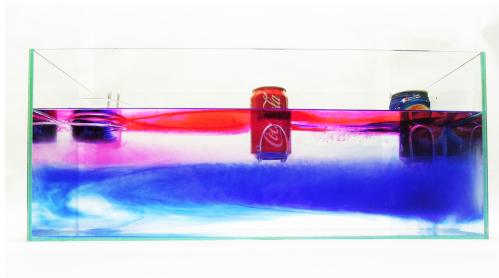


Fig. 6 拡散の様子



Fig. 7 表層の様子

参考文献

- 1) 奥村晴彦, 黒木裕介 (2013), [改訂第6版] L^AT_EX 2_ε 美文書作成入門, 技術評論社
- 2) 岡英太郎, 磯辺篤彦, 市川香, 升本順夫, 須賀利雄, 川合義美, 大島慶一郎, 島田浩二, 羽角博康, 見延庄士郎, 早稲田卓爾, 岩坂直人, 河宮未知生, 伊藤幸彦, 久保田雅久, 中野俊也, 日比谷紀之, 寄高博行 (2013), 海洋学の10年展望 (I) —日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, **22**,6,p.199-201
- 3) 深町康, 青木茂, 若土正暁, Stephen R. Rintoul, John A. Church, Serguei Sokolov, Mark A. Rosenberg (2010), 南極から「冷たさ」を運ぶ深海の強い流れの解明, 北海道大学 2010年4月26日 PRESS RELEASE
- 4) 杉山慎, 澤柿教伸, 福田武博, 青木茂 (2014), 南極で棚氷の下を直接観測 厚い氷の底に海の循環と生物を発見, 北海道大学 2014年6月16日 PRESS RELEASE
- 5) 大島慶一郎, 深町康, G.D. Williams, 二橋創平, F.Roquet, 北出裕二郎, 田村岳史, 平野大輔, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, 青木茂, 若土正暁 (2013), 未知の南極底層水を発見—海洋大循環を駆動する一番重い水—, 北海道大学 2013年3月4日 PRESS RELEASE
- 6) 内田裕 (2008), 実験! 海水は巡る, 独立行政法人海洋研究開発機構, Blue Earth, **20**,4,p.12-13