

氏名・(本籍)	とお やま かつ や 遠 山 勝 也
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第2583号
学位授与年月日	平成22年9月8日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Three-dimensional structure of the North Pacific mode waters and central water viewed by Argo (Argoによる北太平洋のモード水と中央水の3次元構造の研究)
論文審査委員	(主査) 准教授 須賀利雄 教授 花輪公雄, 川村 宏, 中澤高 准教授 木津昭一

論 文 目 次

Abstract

Acknowledgement

Contents

1. General introduction

- 1.1 Scientific background
- 1.2 Mode water and central water
- 1.3 Purpose of the present dissertation

2. Detection of North Pacific mode waters using Argo data

- 2.1 Introduction
- 2.2 Data and procedures
- 2.3 Detection of low-Q water and mode waters using Argo data
 - 2.3.1 Spatial distribution and water properties of winter mixed layer
 - 2.3.2 Spatial distribution and water properties of low-Q water
- 2.4 Summary and remarks

3. Three-dimensional structure of North Pacific mode waters

- 3.1 Introduction
- 3.2 Data and methods
- 3.3 Results

- 3.3.1 Vertical gradients of θ , S, and σ_θ at the cores of mode waters
 - 3.3.2 Property anomaly histograms within mode waters
 - 3.3.3 Turner angle structure in mode waters
 - 3.3.4 Maps of Turner angle in pycnostads
 - 3.4 Summary and remarks
- 4. Three-dimensional structure of North Pacific central water**
- 4.1 Introduction
 - 4.2 Data and methods
 - 4.3 Distribution of North Pacific central water
 - 4.4 Possible contributions of mode waters on formation and maintenance of central water in the North Pacific
 - 4.5 Summary and remarks
- 5. General conclusion**

Bibliography

論文内容要旨

水温、塩分、密度は海洋の物理構造を記述するための基本的な物理量である。海洋の3次元構造の成り立ちを十分に理解するためには、密度だけでなく水温と塩分の成層構造も理解することが不可欠である。海洋では密度分布に応じて地衡流平衡により流れの場がほぼ決まるので、密度成層は力学的に重要である。このため、密度成層についてはこれまで多数の研究が行われてきた。一方、亜熱帯表層海洋の海盆規模での水温・塩分の成層構造、あるいは水温-塩分 (T-S) 関係については、20世紀中頃にはじめて組織的に記述されて以来、密度成層の研究に比べて目立った研究の進展はなかった。

モード水と中央水は亜熱帯循環の永年密度躍層水を構成する主要な水塊に関する2つの異なる概念である。モード水は海水特性が鉛直にも水平にもほぼ一樣な水であり、その密度の鉛直一樣性により、密度成層に直接影響を与える。このため亜熱帯循環の密度成層は、モード水の分布を通じて広く記述されてきた。北太平洋の外洋域には、少なくとも4つのモード水が存在する。すなわち、亜熱帯モード水、東部亜熱帯モード水、中央モード水、そして移行領域モード水である。一方で、中央水はある一定の密度比で特徴付けられる水塊である。ここで密度比とは、水温成層と塩分成層の密度成層に与える寄与の比を示す量である。北太平洋では、西部北太平洋中央水と東部北太平洋中央水が知られている。亜熱帯循環のT-S関係は中央水の分布を通じて記述されてきた。このように、モード水と中央水はいずれも亜熱帯表層海洋の3次元構造の形成・維持メカニズムを理解するための基本的な概念であるが、両者の関係性についての議論は充分にはなされてこなかった。

こうした水温・塩分成層に関する詳細な研究や、モード水と中央水の関係性に関する議論を妨げてきたひとつの要因として、時空間的に偏りなく分布した鉛直高解像度の現場観測データの不足があげられる。

従来のモード水や中央水に関する研究の多くは、データ数や分解能が不十分な気候値データや少数の定線船舶観測データに基づいているため、時空間的に限定的な描像しか示されていない。一方、近年著しい発達を遂げてきたArgo観測網によって提供されているCTD（電気伝導度—水温—深度）データは、海盆規模で時空間的に分布の偏りがほとんどない鉛直高解像度のデータである。Argoデータの活用により、海洋の3次元構造を水温・塩分・密度を用いて詳細に記述し、その形成・維持メカニズムを解明することが可能になった。

そこで、本研究では時空間的に高解像なArgoデータを利用することで、北太平洋亜熱帯表層の水温—塩分成層と密度成層を詳細かつ体系的に記述する。これにより、海洋の3次元構造の成り立ちに関する理解を深めるのが目的である。3章ではモード水の鉛直構造について、4章ではモード水の中央水への寄与について特に着目する。

第2章では、第3章においてモード水の統計解析を行うための準備として、Argoの個別プロファイルデータからの北太平洋の各モード水の検出を試みた。従来の気候値データに基づくモード水の描像とは異なり、Argoデータからは種々の水が低渦位水として地図上で、あるいはまたT-S図上で重なり合って分布するため、モード水の明瞭かつ客観的な検出には困難が伴うことが分かった。深い冬季混合層などの、モード水の分布および海水特性に影響を与える関連項目を考慮しつつ、様々な検出条件について試行錯誤の後、最終的には、厚い低渦位水（コア渦位が $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ よりも小さく厚さが100 mよりも厚い水）のうちの一部をモード水として検出した。

第3章では、検出した各モード水の水温・塩分の鉛直構造の解析を行った。結果として、モード水毎に特徴的な異なる水温・塩分の鉛直構造を有することをはじめて系統的に示した。つまり、鉛直方向の水温・塩分一様性は亜熱帯モード水、東部亜熱帯モード水、移行領域モード水で高く、中央モード水で低い。東部亜熱帯モード水（移行領域モード水）の水温・塩分については、その低温（高温）・低塩分（高塩分）側でのみ比較的一様性が低いことも分かった。この水温・塩分構造の違いはターナーアングルと呼ばれる密度比と等価な物理量を用いて定量的に評価できる。つまり、亜熱帯モード水（中央モード水）はほぼ $50^\circ - 60^\circ$ ($60^\circ - 70^\circ$)のターナーアングルを有し、東部亜熱帯モード水（移行領域モード水）についてはそのコアより下側（上側）の低渦位部で 70° を超えるターナーアングルを有する。

こうしたモード水毎の水温・塩分構造の違いは、各モード水の形成・変質過程と関係していると考えられる。気候値データに基づいた過去の研究から、亜熱帯モード水（東部亜熱帯モード水と中央モード水）の低渦位は主に高いサブダクション率（低い密度移流率）に起因すると推定されている。本研究で示された各モード水の鉛直構造は、推定されている各モード水の形成メカニズムから期待される鉛直構造と整合的であることから、モード水毎の形成メカニズムの違いを支持する結果となった。また、東部亜熱帯モード水（移行領域モード水）の下側（上側）は大きなターナーアングルを有することから、これらのモード水はより深層（表層）にある低温（高温）・低塩分（高塩分）の水とのソルトフィンガー型混合により変質する可能性が示唆された。

第4章では、北太平洋亜熱帯循環表層のT-S構造を、ターナーアングルを用いて記述した。北太平洋亜熱帯循環表層水はほぼ同一のT-S曲線上に集中し、また、ターナーアングルが 59° 付近で最頻値を示すことがArgoデータから確かめられた。また、Argoの時空間的に均質なデータ分布を利用して、緯度 \times 経度 $10^\circ \times 10^\circ$ の領域別、および密度面別により詳細にターナーアングルの分布を調べた。その結果、 $25.6 - 26.4 \text{ kg m}^{-3}$ の密度面では亜熱帯循環内部において、また 25.6 kg m^{-3} よりも軽い密度帯ではより東部から南部にかけての領域においてターナーアングルが 59° 付近に最頻値を示すことがわかった。本結果により、中央水の3次元的な分布がはじめて定量的に提示された。加えて、これらターナーアングルの分布の様子が

ら、中央水の分布とモード水の分布との間に何らかの関係があることも推察された。

そこで、中央水とモード水の間をさらに議論するため、中央水を代表する $56^{\circ}-63^{\circ}$ のターナー・アングルの出現頻度分布と、モード水を代表する低渦位の出現頻度分布を等密度面上で調べて比較した。その結果、中央水のターナー・アングルを形成・維持するメカニズムが場所によって異なる可能性を指摘した。中央モード水の沈み込みと移流は直接中央水の形成・維持に寄与すると考えられる。一方で、亜熱帯モード水の大部分は中央水に寄与しない。ただし、亜熱帯モード水の底部については中央水と同じターナー・アングルを示すため、亜熱帯循環西部の中央水の形成・維持に亜熱帯モード水が混合などを通じて寄与する可能性が指摘される。循環東部から南部にかけての中央水の形成・維持には、東部亜熱帯モード水、北太平洋回帰線水、あるいはまた浅い塩分極小の寄与が示唆される。

本研究は、Argoプロファイルの高い水平・鉛直解像度の活用により、従来の研究で見過ごされてきた水温・塩分の3次元構造をこれまでになく詳細かつ系統的に示した。特にモード水の水温・塩分の鉛直構造を詳細に示し、それが亜熱帯循環表層の水温・塩分成層（中央水）の形成・維持に果たす役割を定性的にはあるがはじめて系統的に整理した。これは北太平洋の亜熱帯循環表層の3次元構造の成り立ちを密度だけでなく水温・塩分も含めて理解するための大きなステップといえる。同様の解析は他の海盆についても行うことができるため、海盆間の成層構造の比較を行うことにより、海洋の3次元構造に関する重要な情報が得られると期待される。また、酸素、クロロフィルや栄養塩など、Argoに搭載可能なセンサーの開発が進展中の生物地球化学的な特性をも含めた海洋の3次元構造とその時間変動の研究も可能になりつつある。こうした研究により、海洋の物理構造のさらなる理解、物理構造が生物地球化学過程の維持に果たす役割の解明、そして高解像度大循環モデルにより再現された海洋構造の検証などの進展が期待される。

論文審査の結果の要旨

世界の大洋の亜熱帯循環の成層構造は、表層混合層と深層の間で数百メートルにわたり深さとともに密度が急激に増加する永年密度躍層によって特徴づけられる。永年密度躍層の形成メカニズムの解明は、海洋物理学の根本的課題の一つと言える。遠山勝也提出の博士論文は、近年構築された全球海洋観測網Argo（アルゴ）によるデータを駆使して、永年密度躍層の記述に従来用いられてきたモード水および中央水概念を更新するとともに、これまで別々に扱われてきた両概念の関係性を明らかにすることにより、北太平洋亜熱帯循環における永年密度躍層の形成・維持メカニズムの解明を目指したものである。

永年密度躍層を構成する主要な水塊であるモード水について、その鉛直構造をはじめて系統的に記述し、異なるモード水間で比較して、水温・塩分の鉛直一様性は亜熱帯モード水、東部亜熱帯モード水、移行領域モード水では高く、中央モード水においては低いことを明らかにした。また、鉛直構造の違いは、各モード水の形成メカニズムの仮説とも整合することを示し、その検証に寄与した。さらに、鉛直構造の特徴を、密度成層に対する水温成層と塩分成層の寄与の比を表すターナー・アングルによって定量化し、東部亜熱帯モード水および移行領域モード水が、それぞれその下側および上側において、ソルトフィンガー型二重拡散対流によって組織的に変質していることなどを示した。

永年密度躍層を構成する水の大半は、特定の水温塩分曲線で特徴づけられ、20世紀半ば以降、中央水とよばれてきたが、その成因は未解明であった。本論文では、永年密度躍層水全体のターナー・アングルを精査することにより、中央水の空間分布の詳細を明らかにし、各モード水および中央水の出現頻度の空間分布を示すことにより、中央水の大半がモード水のサブダクションと変質によって直接・間接的に維持されていることを明らかにした。

以上、遠山勝也提出の博士論文は、モード水の鉛直構造をはじめて体系的に明らかにすることに成功し、さらに、中央水の形成に対するモード水のサブダクションと変質の役割を示すことにより、永年密度躍層の3次元構造の形成・維持メカニズムの理解に貢献したもので、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、遠山勝也提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。