

氏名・(本籍)	やぶき たかし 矢 吹 崇
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2289号
学位授与年月日	平成18年9月15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	Hydrography of the Antarctic Ocean and Its Variability Based on JARPA and the R/V <i>Kaiyo Maru</i> Survey (JARPA観測資料および開洋丸調査資料に基づく南極海の海洋構造とその変動の研究)
論文審査委員	(主査) 助教授 須賀利雄 教授 花輪公雄, 川村 宏, 青木周司 助教授 木津昭一

論 文 目 次

Abstract	i
Acknowledgment	iv
Contents	vi
1. General Introduction	1
1.1. Hydrographic features of the Antarctic and their roles in global thermohaline circulation	1
1.2. Japanese Whale Research Program in the Antarctic and its background	4
1.3. Objectives and the structure of the dissertation	5
2. Possible source of Antarctic Bottom Water in the Prydz Bay region	11
2.1. Introduction	11
2.2. Data	13
2.3. Results	15
2.4. Discussion and conclusions	17
3. Spatial variability of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current	25
3.1. Introduction	25
3.2. Data	27
3.3. Results	29
3.3.1. Frontal structure of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current	29
3.3.2. Variability of the front positions based on the synoptic data	29

3.3.3. Relation between the front locations and sea surface hight	30
3.3.4. Variability of the front position based on sea surface height	31
3.4. Discussion and conclusions	32
4. Hydrographic features and their variability of Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current	42
4.1. Introduction	42
4.2. Data	43
4.3. Result	45
4.3.1. Composite sections based on the stream coordimate system	45
4.3.2. Year-to-year variation of hydrographic fearures near the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current	46
4.4. Conclusion	46
5. Hydrographic features captured by the R/V <i>Kaiyo Maru</i> 2004/05 Antarctic survey and the comparison with historical date	57
5.1. Introduction	57
5.2. Data	59
5.3. Results	61
5.3.1. Hydrography of the Antarctic Circumpolar Current	61
5.3.2. Hydrography of the Ross Sea	62
5.3.3. Interdecadal comparison of the hydrographic features	63
5.4. Conclusion	65
6. General Conclusion	96
Bibliography	99

論 文 内 容 要 旨

南極海は全球規模の熱塩循環に重要な役割を担っている。全球熱塩循環はその熱・物質輸送のため気候システムに大きく影響しており、その理解は気候変動の研究において重要な課題に位置づけられている。北大西洋における深層水形成は全球熱塩循環を駆動するが、深層水が湧昇する海域が南極海であり、南極海は北大西洋同様に全球規模の対流セルすなわちオーバーターンの一端となる海域であるといえる。南極海では深層水が表層近くに達するために大気強制により表層水と混合し浮力を得て湧昇を遂げる。このように、南極海は大気が深層水に直接的に作用する唯一の海域である。また、湧昇する深層水は南極海において比較的高温であり、大気を加熱する。すなわち南極海には深層水湧昇と直接関係したユニークな大気海洋相互作用が存在する。さらに、南極大陸周辺では海水形成やポリニアにおける蒸発のため高塩分水が生じ、底層水が形成される。全球の底層部は南極海起源の底層水で広く満たされており、この循環は全球熱塩循環を構成する要素の一つである。

南極海の全球熱塩循環における重要性は認識されつつも、厳しい海況やアクセスのしにくさから海洋

観測が困難な海域であるため、海洋観測データは限られたものであった。そのため、南極海の海洋構造は主に歴史的海洋観測データの編集物に依存して研究されてきた。ごく限られた定線観測は行われているものの、広い南極海にわたる変動現象を捉えるのに十分なデータは得られていなかった。そのためシノプティックなデータから海洋構造を記述し、さらに変動を捉えることで、大気海洋相互作用の理解につなげることが必要とされている。

Japanese Whale Research Program in the Antarctic (JARPA) は鯨類資源の適正管理を目的とした鯨類捕獲調査である。JARPA では、海洋環境の変化が鯨類に与える影響も評価するため、生物調査と同時に海洋観測も行われている。JARPA 観測データは広域に分布しており、また、1987年度夏季(87/88年)からの長期の蓄積があるため、海洋物理学的な研究への貢献が期待される。一方、2004年度には水産庁漁業調査船開洋丸による航海で、JARPA で調査対象となっていない鯨類の餌生物等を含む総合的な生態系調査が行われた。調査は Ross 海とその周辺海域で行われ、海洋観測データを含む総合的なデータが得られた。

本研究は、JARPA よび開洋丸調査航海の海洋観測データの品質管理を行ない、データセットとして整備した上で、これらのデータを用いて、南極海の海洋構造を3次元的に捉え、その変動を記述することを目的とする。特に、深層水の湧昇と密接に関連する前線と考えられる Southern Boundary (SB) of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) の空間分布とその変動、SB 周辺の海洋構造とその変動を調査する。また、底層水の形成域である可能性が示唆されている Prydz 湾で底層水形成の直接的証拠を示すことを目的とする。

第2章では Prydz 湾における南極底層水 (Antarctic Bottom Water: AABW) の形成について議論した。AABW の形成域として Weddell 海や Ross 海が知られているが、全ての形成域の特定には至っていない。Prydz 湾における AABW 形成はその可能性が示唆されていたものの、直接的証拠が得られていなかった。Prydz 湾の陸棚域を特徴づける主な水塊として、Modified Circumpolar Deep Water (MCDW), Low Salinity Shelf Water (LSSW), Ice Shelf Water が観測された。LSSW のうち塩分が34.6 psu をこえる高塩分の LSSW が陸棚の窪みに蓄積されていた。陸棚北端において、高塩タイプの LSSW と MCDW との混合による、AABW に極めて近い密度の水の形成を捉えた。さらに、陸棚域の窪みが外部に通じる水路部分においても高塩分の LSSW の存在を捉えた。この LSSW は陸棚斜面を下るときに周囲の周極深層水と直接混合して AABW を形成することが強く示唆される。以上の結果は、Prydz 湾が AABW の形成域となっていることを示す有力な証拠であり、全球熱塩循環の理解に不可欠な AABW 形成域の特定に貢献するものといえる。

第3章では、JARPA 観測資料と衛星高度計データを併せて用いることによって、SB の空間分布とその変動を調べた。SB は貧酸素水塊である上部周極深層水の南限となる前線で、SB の位置は深層水湧昇の位置と関係している。このような前線構造の概観や前線の気候値的位置は示されているものの、その変動に関する研究は極めて少なく、3次元的な海洋構造とその変動を捉えることはほとんどなされていない。衛星高度計で得られた海面高度アノマリを2500 dbar 基準の海面力学高度に加えて海面高度 (sea surface height: SSH) とした。SB が特定の SSH 等値線に一致すると仮定し、断面観測から得られた SB の位置を通る SSH 等値線を用いて SB の位置を推定した。ここでは、SB における SSH を全断面について求め、この平均値を全期間における SB の位置を代表する SSH とし、月毎の SB の位置を推定した。広域に分布した JARPA 観測資料と SSH を比較することで推定誤差を算出し、SB の位置を緯度にして1.5°程度の精度で推定できることを示した。SB の分布は、Kerguelen 海台の南側をまわり、太平洋南極海嶺に沿った構造となっており、歴史的観測データで得られていた描像と同様の結果が得られた。南北変動幅は経度によって異なり、太平洋南極海嶺付近で $\pm 1^\circ$ 、Kerguelen 海台付近では $\pm 5^\circ$ であった。長期平均の位置からのずれとしての位置偏差は、東西非一様な符号・振幅をもつ年変動が卓越していた。年変動成分を除去

すると、東西一様な北上傾向と南下傾向がみられた。前線近傍の海洋構造の時間変動を調べるには前線の南北シフトの効果を考慮する必要がある、ここで得られた前線位置の時系列は海洋構造の変動を調べるためにも有用な情報である。

第4章では、JARPA で得られた断面観測データを用いて SB 周辺の海洋構造とその変動を調べた。SB の位置を基準にして海域別、年別のコンポジット断面を作成した。海域別に作成したコンポジット断面からは、Ross 海周辺海域では等密度面の傾きが大きく、SB 北側に位置する Southern ACC Front (SF) が近接した海洋構造になっていることを示した。年毎のコンポジット断面からは、 $30^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{E}$ において97/98年に厚い中冷構造がみられたが、01/02年の中冷構造はあまり発達していないなどの変動を明らかにした。97/98年は海水の発達減衰時期が遅かったことから、海水による蒸発の抑制、成層の安定化が示唆される。しかし、海域や年によっては海水との関連では説明できない変動もみられ、熱・淡水フラックスなどによるより定量的な議論が今後の課題として浮かび上がった。また、99/00年には発達した中冷構造と同時に、高濃度のクロロフィルがみられ、深い対流によって深層の栄養塩が表層に供給されたことが示唆される。ここで示した海洋構造の年々変動は従来ほとんど調べられていなかったもので、今後の南極海における大気海洋相互作用の研究に極めて有益な情報といえる。

第5章では、2004年度に行われた開洋丸調査航海で得られた海洋観測データを用いて、Ross 海とその周辺海域の海洋構造を記述し、過去のデータとの比較により長期変動を調べた。 175°E の測線上では極前線 (Polar Front: PF) は $58^{\circ} \sim 59^{\circ} \text{S}$ 、SF は 63°S 付近、SB は 64°S 付近にみられた。一方 175°E 測線に比較的近い位置で1996年に観測された World Ocean Circulation Experiment (WOCE) のP14断面では、 54°S の南に亜南極前線、 60°S の北に PF、 62°S に SF、 63°S に SB がみられ、前線の位置の変動が示された。AABW はともに 64°S より南でみられ、本調査ではWOCE-P14より低塩化していた。さらに歴史的データに最適内挿法を適用して1994年以前の状態を推定した結果に比べても有意な低塩化が見出された。このような低塩化は降水増加や氷床の融解が原因と考えられ、全球熱塩循環の気候変動に対する応答とみられる。これらの結果は大規模な循環場の長期変動の一部を捉えたものとして全球熱塩循環の変動の理解に重要な意味をもつ。

従来の南極海の研究は歴史的海洋観測データから気候値的な描像を調べるもので、海洋構造の変動は限られた断面観測から2次的に記述したものであった。本研究では、JARPA 観測資料や開洋丸調査航海による海洋観測資料を用い、海洋構造とその変動について調べた。これは、広域同時観測データを用いて海洋構造を3次的に捉え、その変動を記述した新しい研究といえる。ここで捉えられた海洋構造とその変動現象は南極海における大気海洋相互作用の研究の基礎となる。また、海洋環境の変化が生態系へ与える影響などの研究に有用な結果でもあり、今後の生態系研究への活用が期待される。

論文審査の結果の要旨

全球海洋循環の要である南極海は、熱・物質輸送とその変動を通じて、また、深層水の湧昇や海水形成などのユニークなプロセスを伴う大気海洋相互作用の場として、気候システムに大きく影響していると考えられるが、観測の困難さゆえに、その海洋構造や時間変動の理解は極めて限定されてきた。矢吹崇提出の博士論文は、南極海の海洋観測データを整備し、新たなデータも取得して、主要な海洋構造を3次元的に把握し、その変動を明らかにすることを目的とした。

1987年に始まったJapanese Whale Research Program in Antarctic (JARPA) による広域かつ継続的なデータに品質管理を施し、データベース化を行って、これを解析した。まず、ウェッデル海、ロス海に次ぐ南極底層水形成域であることが間接的に示唆されてきたPrydz湾において、底層水形成に不可欠な高塩分陸棚水が湾内の窪みを満たし、かつ、陸棚縁辺に達していることを明らかにして、陸棚斜面で南極底層水が形成され得ることを示した。

次に、北大西洋深層水の湧昇域にあたる前線Southern Boundary (SB) of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) を、JARPAの多数の観測断面内で同定し、SBと海面高度との関係を統計的に求め、これを衛星海面高度計データに適用して、広域における月ごとのSB分布を推定する手法を開発した。これにより、SBの南北変動が、東西非一様な年周期成分と一様な経年成分で特徴づけられることなどを示した。

さらに、年ごとのSB周辺の海洋構造の特徴を明らかにし、深層水の湧昇や海水の消長と関連する変動を示し、それらの変動が生物生産に与える影響を示唆した。

また、自ら参加した2004年度開洋丸調査航海のデータを用い、ロス海とその周辺の水塊を過去の観測と比較して、南極底層水の1990年代半ば以前に比べた低塩分化を明確に示し、地球温暖化に関する降水増加や氷床融解に伴い大規模な海洋変動が進行しているという仮説を支持する結果を得た。

以上、矢吹崇提出の博士論文は、南極海の主要な水塊・海洋構造の形成過程、3次元構造、時間変動に関する新しい知見を得ており、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、矢吹崇提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。