夏季噴火湾表層における 時計回りの環流の形成・維持機構に関する研究

学位論文内容の要旨

目的

北海道の南西部に位置する噴火湾はホタテやコンブの栽培漁場として広く利用されているだけでなく、スケトウダラの成育場としても利用されており、特に水深 50 m 以浅の全沿岸域にはホタテ貝の養殖場が存在している。この沿岸域でのホタテ貝養殖には、耳つり養殖法が用いられており、6~7 月頃に沿岸域でホタテ貝幼生の採苗が行われる。この時期の湾内表層には、高温・低塩分・低密度な特徴を持つ夏季噴火湾表層水を中心部に抱えた時計回りの環流が形成されていることが知られており、ホタテ貝幼生の沿岸域への輸送は、この時計回りの環流によって直接的に行われていると考えられる。したがって、湾内表層の時計回りの環流は、ホタテ貝幼生の採苗量に直接影響を与える要因であると言える。一方、最近では夏季噴火湾中央部の底層において、貧酸素水塊（溶存酸素濃度が 1.1 ml/l 以下）の発生が報告されている。この貧酸素水塊は、植物プランクトン起源の浮遊有機粒子と動物起源のホタテガイの糞などが、湾内表層の時計回りの環流によって湾中央部へ輸送・沈降されることによって形成されていると考えられており、この貧酸素水塊は湾内に生息するアカガレイやトヤマエビなどの底性漁業資源の生存や分布にも影響を与えることが知られている。このように、夏季噴火湾表層における時計回りの環流は、湾内の生態系、海洋環境、そして漁業環境にも大きな影響を与えており、この環流の構造を知ることの重要性は年々高まっている。

これまでの夏季噴火湾表層の環流に関する研究は、海洋観測によって得られた水温と塩分場の情報から環流構造を記述したものが多く、直接速流によって環流の流れを記述した研究はほとんどない。さらに、これまでは月一回程度、湾内数点で行われた断片的な海洋観測によって環流構造を議論したものが大部分を占めているため、環流の形成機構や環流の時間変化を議論した例はない。

そこで、本研究では、船底設置型 acoustic Doppler current profiler (ADCP) 観測と従来からの CTD 観測、そして湾内 3 点における海底設置型 ADCP を用いた係留観測を行うことによって、現場観測から夏季噴火湾表層に形成される時計回りの環流の力学特性、環流の形成機構、そして風と環流の相互作用を明らかにすることを目的とした。

結果および考察

1. 夏季噴火湾表層における環流の力学特性

夏季噴火湾表層の時計回りの環流は、水深 30 m 以浅に顕著にみられ、最大流速 40 cm s^{-1} 程度の傾圧的な流れによって形成されていた。環流の中心部付近では剛体回転の性質を持ち、この環流は密度躍層が形成する傾圧構造によって駆動されていることが示された。力学的には、夏季噴火湾表層における時計回りの環流は圧力勾配力、コリオリ力、そして、遠心力の 3 つの力がバランスした傾度流平衡にあることが明らかになった。

1997 年から 2004 年までの期間において求められた湾内表層における環流の相対渦度と回転周期は、それぞれ $(-4.04 \pm 1.03) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 3.77 ± 0.79 日程度であった。特に、1999 年における時計回りの循環は、回転周期が 5.10 日程度の弱いものであった。この年は例年よりも津軽暖流の勢力が強く、湾内全層にわたって津軽暖流の前駆水が流入していたことから、時計回りの循環が湾内に流入した津軽暖流の前駆水によって弱められていると考えられた。さらに、このことは秋口から湾内に本格的に流入する津軽暖流水が環流消滅の一因に成りえることを示唆している。

2. 環流の形成機構

毎年夏季噴火湾表層に時計回りの環流が形成される 5 月中旬から下旬は、冬季の北西季節風から夏季の南東季節風への風のスイッチング時期に相当していた。さらに、この南東季節風は、湾周辺の陸上地形によって局所的に偏向させられており、湾中央部～湾東部で負の風応力の回転成分を持っていることが示唆された。この南東季節風が吹く度に、湾内表層では低塩分水が湾東部へ収束するような挙動を示し、この低塩分水の収束に伴って、その下層に形成されている密度躍層の水深が深くなる変動がみられた。この低塩分水と密度躍層の挙動は、局所的に偏向させられた南東季節風による湾東部での沿岸沈降と、この南東季節風が持つ負の風応力の回転成分による下降流（エクマン収束による下降流）の 2 つの効果が重なり合うことによって生じていると考えられた。湾東部に収束している低塩分水内では、密度躍層の下に凸の構造を伴う時計回りの循環が形成されており、この低塩分水内での循環は南東季節風による湾東部での沿岸沈降と湾中央部～湾東部への負の風応力の回転成分の供給によって生じたものと考えられた。さらに、湾内表層の時計回りの環流は、この時計回りの循環を持つ低塩分水が湾内へ拡がることによって形成されることが明らかになった。実測流から得られた時計回りの環流の相対渦度は $-2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 程度の値を持っており、湾周辺のアメダス観測点で得られた風を 2 倍し、風から湾内へ供給される相対渦度（ $\sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）を見積もったところ、実測流から得られた相対渦度とよく一致した。このことから、湾周辺の風は陸上地形によって湾中央部の半分程度に弱められていること、夏季噴火湾表層における時計回りの環流が南東季節風によって形成されていることが推察された。

3. 風と環流の相互作用

夏季噴火湾表層における時計回りの環流内では、4 日以上周期帯の流速変動が卓越していた。この流速変動の渦運動エネルギーは、環流内での全渦運動エネルギーの 40

～60%程度に相当しており，この流速変動は時計回りの環流が湾内を移動するために生じていることが明らかになった．この環流の移動は局所的に偏向させられた南東季節風が吹いてから2-3日後の生じており，この南東季節風によって環流の中心部～北東部で時計回りの循環が強化されるために生じていると考えられた．さらに，南東季節風と湾中央部における相対渦度の変動との間には，非常に高い相関があることが示された．環流の中心部に相当する水深30m付近では風に対して11日程度で応答しており，環流の底部に相当する水深40mとそれ以深では風に対して5-6日程度で応答していた．環流の中心部（水深30m付近）における風に対する相対渦度の応答は，南東季節風によって時計回りの循環が強化されていることを示しており，この南東季節風からの負の相対渦度の供給によって時計回りの環流が維持されていると推察された．また，環流の底部以深（水深40m以深）における応答は，環流の移動によって生じる環流（表層水）の厚みの増加を示していた．これらの結果から，局所的に偏向させられた南東季節風が負の風応力の回転成分を持っていること，環流の移動に起因する流速変動が湾底部にまで及んでいることが示唆された．

本研究では，直接速流を中心とした現場観測データから夏季噴火湾表層に形成される時計回りの環流の力学特性，環流の形成機構，そして風と環流の相互作用を明らかにした．さらに，解析結果から，夏季噴火湾に吹く南東季節風は湾周辺の陸上地形によって局所的に偏向させられていること，この南東季節風が湾内表層の循環に大きな影響を与えていることが推察された．

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 宅 秀 男
副 査 教 授 岸 道 郎
副 査 助 教 授 磯 田 豊
副 査 助 教 授 大 島 慶 一 郎 (低温科学研究所)

学 位 論 文 題 名

夏季噴火湾表層における

時計回りの環流の形成・維持機構に関する研究

北海道の噴火湾は、ホタテガイ、スケトウダラ、ケガニなどの一大漁場になっている。この湾の夏季の表層には安定した時計回りの環流が形成されていることは1930年代の初めに発見されているが、その構造や発生の仕組みなどは未だにほとんど解っていない。ところが、最近この環流が、ホタテガイの幼生の分布や輸送に大きく影響したり、底層の貧酸素層の出現と関連して津軽暖流の流入との関係が示唆されるなど、噴火湾の漁場環境と密接に関わっていることが明らかになりつつある。

一方、CTD（水深・水温・塩分計）やADCP（音響ドップラー流向流速計）などの海洋計測機器の発達によって、水塊構造と同時に力学を記述する流れが短時間の航海で広範囲に精度良く測定できるようになった。このような背景の下で本研究は、環流の力学特性や、発生・維持機構を解明したものである。

全体は3部に分かれており、(1)環流の構造と海洋力学的記述、(2)環流の形成機構、(3)風と環流の相互作用から成っている。それぞれの概要は以下のようにまとめられる：

- (1) 最も典型的な2002年7月の環流をADCPから実測し、環流の中心部は水平的に剛体回転であること、その相対渦度は $-6.37 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ （-は時計回りを意味する）であり、湾を一回転する周期は2.3日になること示した。また、ADCPの記録がある1997年から2004年の間では、環流の相対渦度と回転周期の平均と偏差はそれぞれ、 $-4.04 \pm 1.03 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 3.77 ± 0.79 日となり、毎年安定して形成されている。このうち1999年は最も環流の回転速度が遅いが、この年には津軽暖流が既に

湾内に流入し、表層の低塩分水も少なく、環流を作る傾圧構造が弱かったためである。このことは、環流の減衰・消滅に津軽暖流水の流入が深く関わっていることを示唆している。ADCPによる実測流とCTDデータからの地衡流計算との比較から、力学的には傾度流平衡にあることを示した。

(2) 環流が形成される5月から6月には北西の季節風から南東の季節風に風系が変わる時期である。南東風は噴火湾周辺の陸上地形によって、局所的に偏向させられ、湾中央部から湾奥部に負（時計回り）の風応力の回転成分をもつ。また、この時期には河川からの融雪水の流入により低塩分水が湾内に広く分布するようになり、下層の親潮系水との間に密度躍層が形成される。この南東風の回転成分によって、表層高温低塩分水が湾奥部にエクマン収束を生じさせ、このため密度躍層が下に凸の構造が作られる。この傾圧構造に応答して時計回りの環流が発生する。

(3) 環流には4日以上流速変動が卓越しており、この変動は環流が湾奥へ移動するために生じる。環流の移動は局所的に偏向させられた南東季節風によって引き起こされており、環流の中心部から北東部に負の風応力の回転成分を供給する。環流が湾奥に移動し、南東風の緩みに伴って湾中央部に戻ってくる時には環流の回転は強まっている。このように風応力の回転成分の海洋への強制、エクマン収束とそれに伴う密度躍層の下に凸の構造の強化、さらには密度構造に対する傾圧応答という一連の過程によって環流が維持されていると結論した。

以上の内容は、夏季の噴火湾の力学や生態系にとって最も重要である時計回りの環流の流体力学的特性や形成・維持機構を初めて解明したものであり、この海域の海洋物理学や水産海洋学に大きく貢献するものである。よって審査員一同は本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。