

噴火湾の内部ケルビン波

学位論文内容の要旨

1. はじめに

噴火湾は北海道の南西部に位置するほぼ円形状(直径 40~50 km)の湾であり、円周の約 6 分の 1 に相当する部分が南東方向に開き、水深約 90 m のシルと湾口付近の陸棚域を通して太平洋に接している。噴火湾には冬から春にかけては沿岸親潮と呼ばれる低温低塩分な亜寒帯系水、夏から秋にかけては対馬暖流を起源とした津軽暖流水(高温高塩分な亜熱帯系水)が交互に湾口から流入し、これら 2 つの水塊交換によって湾内の海洋構造の季節変化はほぼ説明できる。一方、春季における雪解け水の流入は湾内の表層塩分値を一気に低下させ、さらに夏季の海面加熱が加わり、海面下 10~30 m には顕著な季節躍層が形成される。このような噴火湾の沿岸域(水深 50 m 以浅)では耳吊りによるホタテ貝の養殖が盛んである。しかし、近年、ホタテ貝の斃死率が増加傾向にあることや斃死率や稚貝採集の良し悪しには地域性があることが指摘されている。そこで、このような地域性が水温環境の違いか否かを調査することを目的に、「渡島ネット(北海道渡島支庁において 2001 年に発足した海洋環境ネットワークシステム組織の略称)」は、噴火湾沿岸一帯に 10 点の水温計(海面下 5,30 m の 2 層)を配置した観測ネット網を設計し、1999~2001 年において水温観測を実施した。

本研究では「渡島ネット」による噴火湾沿岸において観測された水温データを解析し、夏季噴火湾沿岸域における水温変動の特徴を記述するとともに、その物理メカニズムを明らかにすることを目的とする。その際、次の 3 つの周期帯に分類して議論した。約 17 時間の近慣性周期帯の水温変動、風の強制周期に対応した数日周期帯の水温変動、夏季噴火湾表層に形成される時計回り循環流の形成・発達に伴う数十日周期帯の水温変動である。特に、各周期帯の水温変動の特徴を観測地点毎の位相差に注目して記述した。また、水温変動の物理メカニズムを明らかにするために、理想的な地形と単純な数値モデルを用いた解析を行った。以下に本研究の成果について、3 つの周期帯ごとにその概要を記す。

2. 近慣性周期の水温変動について

噴火湾に限らず、沿岸域では海洋環境モニタリングの一環として水温観測が数多くの地点で行なわれており、水温躍層が発達する夏季、突発的な風強制の後などに慣性周期帯の水温変動がしばしば観測される。噴火湾沿岸域における慣性周期帯の水温変動は、隣り合う観測点間(測点間距離は 15~20 km)で位相が 90° 前後も異なる位相分布を示した。岸に沿った水温分布で表現すると、観測点毎に正・負の水温偏差がほぼ交互に並ぶような形状である。このようなデータを二次元の離散フーリエ変換・逆変換の手法を用いて波数分解・合成した結果、(i)長波で岸を左手にみながら(時計回りの回転)早く伝播する内部波と(ii)短波で岸を右手に見ながら遅く伝播する内部波の重ね合わせで説明できることが示唆された。本研究で用いた 1.5 層モデルは、空間的に一様な流れ場を初期値として与え、何らかの強制によって地衡流場からずれた偏差流速成分を想定した初期問題とした。モデル計算の結果、湾口を有する場合においてのみ両波を同時に再現することができ、(i)の波が第一モードの傾圧ポアンカレ波(湾の半分で位相が変化する波)、(ii)の波が岸に捕捉された内部ケルビン波であることがわかった。この傾圧ポアンカレ波は湾の有限性によって、慣性周期よりも短い周期の近慣性周期となり、湾内を時計回りに回転する。しかし、湾口部分において傾圧ポアンカレ波の岸側の境界条件が崩れ、内部ケルビン波が励起される。それゆえ、内部ケルビン波の周期性は傾圧ポアンカレ波の周期に依存し、近慣性周期となることが推測された。

3. 数日周期の水温変動について

成層期における噴火湾沿岸に沿った水温の時空間変動を調べ、風強制による数日周期の水温変動の時空間構造とその物理メカニズムを明らかにした。海面下 30 m の水温計がこの季節躍層付近に位置していると推測される 7~10 月において、数日周期の水温と風の相関関係を調べた結果、3 年ともに 2~10 日の周期帯に顕著な相関が認められた。ところが、これら数日周期の水温変動は風強制周期が長くなるほど遅く伝播する傾向を示した。これは内部境界面変位の符号及び強制領域内の振幅分布そして位相が異なる対岸同士の内部ケルビン波の重ね合わせによって説明できることがわかった。周期 10 日程度の水温(内部境界面)変動は湾奥で大きく、湾口で小さい。一方、周期 2~3 日程度の水温(内部境界面)変動は、湾奥よりも南側湾口側で大きいことが示唆される。すなわち、湾奥では比較的周期の長い水温変動が卓越している可能性があり、南側湾口では周期の長い変動よりも周期の短い変動の方が卓越している。また、噴火湾外部からの擾乱の侵入が全くなければ、北側湾口付近の数日周期の変動は他の湾内沿岸域に比べて十分小さいことが推測される。

4. 夏季噴火湾表層循環流に関与する内部ケルビン波と沿岸水温の季節変化について

水温変動の季節変化を捉えるために、海面下 5 m と海面下 30 m の水温データに 25 日移動平均を行い、数日周期以下の変動除去した。その結果、水温躍層付近にある海面下 30 m の水温上昇には空間的な時間の差があった。表層混合層内にある海面下 5 m の水温の季節変化は湾内全領域でよく似たパターンを示し、海面加熱期(3~8 月)はゆるやかに水温上昇し、海面冷却期(9~2 月)はゆるやかに水温下降している。一方、海面下 30 m の水温の季節変化は、海面加熱期の水温上昇は海面下 5 m のものよりも遅れ、さらに地点毎に大きな時間差があった。その水温変化の様子は、5~6 月ころから湾北側で始まる水温上昇が、その後約 1 ヶ月かけて湾奥から湾南側へとゆっくりと伝播していることを示している。このような水温上昇に空間的な時間差が生じる時期と湾内に時計回り循環流が形成される時期は重なることから、両者の関係を議論するために、時計回り循環流の形成メカニズムについて調べた。水平プロセスが強調された McCreary モデルを用いて、湾内の沿岸一帯から表層混合層へ淡水を供給することにより、夏季噴火湾表層に形成される時計回り循環流形成の可能性について調べた。その結果、湾の北東部から約 1 ヶ月かけて湾全域に広がる時計回り循環流の形成・発達の様子をほぼ再現することができた。この時計回り循環流とともに水温躍層の下に凸の形状が湾全域に広がると考えれば、海面下 30 m の水温上昇にみられた湾の北東部ほど早く水温上昇が始まることが説明できる。

5. まとめと今後の課題

夏季成層期の水温躍層付近における慣性周期帯から数ヶ月時間スケールの水温変動を説明するためには、いずれの周期変動においても、内部ケルビン波の励起・伝播が重要な役割を演じていることがわかった。一方、本研究では示さないが、水温観測と同時に行った水温躍層付近の流速変動と水温変動の相関は低く、これは水温躍層付近の水温変動が内部ケルビン波による内部境界面変位(水温躍層変位)で説明できるのに対して、流速変動は内部ケルビン波の伝播だけでは十分に説明できないことを意味する。今後の課題として、噴火湾内の流速変動を理解するためには、噴火湾の成層条件に加えて海底地形変化の影響を受ける陸棚波を考慮した研究が必要であると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 磯 田 豊
副 査 教 授 久 万 健 志
副 査 教 授 木 村 暢 夫
副 査 准教授 高 津 哲 也

学 位 論 文 題 名

噴火湾の内部ケルビン波

沿岸水温は夏季の海面加熱、冬季の海面冷却によって、正弦曲線的な季節変化を示すのが一般的である。しかしながら、このような季節変化に重なって、夏季の成層期には数時間から数十日周期の水温変動が存在し、特に大振幅の短期的な水温変動(もしくは、水温変動に伴う流れ変動)は沿岸養殖施設における多大な水産被害(急潮による定置構造物の破壊や貝・魚類の斃死など)を生じさせている。それゆえ、どのような原因で沿岸水温変動が発生し、その水温変動の地域特性を予め知っておくことは、被害の軽減や予測のために重要である。

本研究では噴火湾の沿岸域に沿って 10 地点の水温測定器を配置し、それにより得られた水温記録をもとに十数時間から季節変化スケールの水温変動を整理し、各周期帯の変動特性を説明し得る海洋物理現象を提示している。水温変動の周期帯は大きく 3 つに分類されており、(1)慣性周期帯(17 時間程度)、(2)数日周期帯、(3)一ヶ月程度のゆっくりした水温上昇である。いずれの周期帯の水温変動にも、沿岸で大振幅となる内部モードのケルビン波(内部ケルビン波)の成長と伝播が関与していることが示唆されている。なお、申請者は内部ケルビン波の関与を示唆する物理モデルとして、季節躍層下の海底地形を無視した還元重力(1.5 層)モデルを用いている。各水温変動の物理的解釈をまとめると以下になる。

- (1) 地衡流調節過程において、慣性周期帯の流速・水温変動はどのような海域でも容易に発生する振動現象であり、過去の多くの研究ではポアンカレ波(または、内部慣性重力波)の励起・伝播として説明されてきた。しかしながら、観測された慣性周期帯の水温変動は、隣り合う観測点同士で位相が逆転しており、数十 km スケールの定在波的な変動パターンを示している。すなわち、ポアンカレ波の伝播(時計回り)だけでは説明できない水温変動である。本研究では、励起された慣性周期帯のポアンカレ波が湾口付近(岸境界の欠如)に達した際、同周期の内部ケルビン波(反時計回りの伝播)を励起し、伝播方向の異なる二種類の波の重ね合わせを考えることによって、沿岸水温の定在波的な変動が説明できることを示している。
- (2) 湾軸方向に数日周期の風強制があれば、表層エクマン流を介して、一方の沿岸では湧昇、他方の沿岸では沈降となり、それに伴う水温変動が容易に期待される。観測された数日周期の水温変動は、2 日・5 日・10 日周期付近で風強制との相関が高く、いずれも内部ケルビン波の伝播を示唆する岸を右手にみた方向に位相が遅れていた。しかしながら、2 日周期変動は理論上の内部ケルビン波の位

相速度に近いものの、周期が長くなるほど(10 日周期程度)、理論位相速度よりも遅い伝播速度を示すことが明らかとなった。本研究では、両対岸で励起された湧昇・沈降がそれぞれ正負の振幅値をもった内部ケルビン波として「成長しながら伝播し重ね合わさる」ことで、水温変動周期が長くなるほど、特に、湾内南側における水温変動の伝播速度が内部ケルビン波の理論上の位相速度よりも遅くなることを説明している。

- (3) 一ヶ月程度の時間スケールの流れ場は、ほぼ地衡流バランス(圧力勾配力とコリオリ力の力学バランス)している。申請者は、圧力勾配が密度勾配と内部境界面勾配の二つあることに注目し、雪解け水が河川水として沿岸域から供給される際、沖合域は密度勾配による反時計回り方向の地衡流、沿岸域は内部境界面勾配による時計回り方向の地衡流の存在を指摘した。すなわち、沿岸に沿った浮力供給による負の渦度の生成が湾口北側の境界付近で生じる可能性の指摘である。観測された夏季の水温上昇は必ず湾内の北側から始まり、この水温上昇は約一ヶ月もの時間をかけて湾内の南側に達することが明らかとなった。本研究では、湾内の北側から南側へゆっくりと水温上昇する現象を、上記の二つの地衡流により形成される時計回り表層循環流(負の渦度をもった渦流)の発達による季節躍層の深化で説明できることを示している。

以上の成果は、他の多くの内湾においても共通する夏季の海洋物理現象を明らかにしたものであり、沿岸海洋学及び沿岸域を対象とした水産海洋学の研究において新たな知見を加えるものと判断する。よって、審査員一同は申請者が博士(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。