



Title	噴火湾・日高湾の初夏に発達する3種類の水平渦流の観測と数値実験 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小林, 直人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	乙第7100号
Issue Date	2020-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78951
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Naoto_Kobayashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（水産科学）

氏名： 小林 直人

学 位 論 文 題 目

噴火湾・日高湾の初夏に発達する3種類の水平渦流の観測と数値実験 (Observations and Numerical Experiments of Three Types of Horizontal Eddy Growing during Early Summer in Funka Bay and Hidaka Bay)

1. 諸言

申請者は北海道大学水産学部附属練習船「うしお丸」の航海士であるため、個人的な研究興味から海洋調査を別途実施することは許されていない。それゆえ、本研究はうしお丸の停泊港と乗船教員（研究者）が指定した調査海域との往復航海で蓄積された流速データ（超音波流速計：ADCP）の断片情報から、過去に研究されていない海洋物理現象を探索する、という発見的な研究スタイルとなる。その探索の結果、「津軽 Gyre の分岐現象」と「噴火湾の表層時計回り水平渦流」ならびに「水平渦流を伴う急潮現象」の3つの物理現象を選択した。津軽 Gyre から派生した水塊が噴火湾へ流入することは知られているが、どこで、どのように Gyre 分岐が生じているか、その観測及び力学的研究は過去に全くない。夏季の噴火湾表層には時計回りの水平渦流の存在が古くから知られているが、渦流発生の物理機構はまだ解明されていない。急潮はめったに発生しない予測不可能な現象であるため、観測的な証拠さえほとんどない。この3つの物理現象の時空間スケールは大きく異なるものの、いずれも成層強化時期の初夏に発生し、水平渦流を伴った現象という共通点をもっている。そこで、日高湾内の亀田半島沖に限られるが、蓄積された ADCP と水温・塩分データの解析をもとに、密度成層の季節変化を最初に記述した。その後、3つの物理現象に関する資料解析及び観測結果を記述し、数値モデル実験を加えて、それぞれの形成機構を推測した。

2. 北海道亀田半島沖における流れ場及び水塊の季節変化

北海道亀田半島沖には地元の漁業者によって恵山潮（南東流）と鹿部潮（北西流）と称される二つの流れがあると考えられているが、実測資料にもとづく定量的記述が行われていない。ここでは亀田半島沖の ADCP・水温塩分（CTD）データを解析し、この海域の流れ場の季節変化と水塊出現の関係を調べる。ADCP のデータ解析から、春季から夏季には傾圧的な南東流（恵山潮）、冬季には順圧的な弱い北西流（鹿部潮）の存在を確認することができた。また、津軽暖流水は両潮の遷移時期である夏季の底層から次第に現れるが、冬季に入るとすぐに親潮水に置き換わることがわかった。夏季底層から出現する津軽暖流水は、初夏の津軽 Gyre 分岐後、陸棚斜面に捕捉された流れによって、ゆっくりと輸送された水塊と考えられる。加えて、初夏の時期は主に雪解けによる河川流入量が最も多く、日高湾の表層付近では噴火湾表層水と同様に、高温低塩分水が支配的となる。

3. 日高湾陸棚斜面上における津軽 Gyre 分岐とその物理機構

集中海洋観測

津軽 Gyre 分岐の物理的特徴を調べるために、2010 年の初夏、北海道の南部に位置する日高湾において集中海洋観測を実施した。この観測によって、時計回りの津軽 Gyre が北部陸棚斜面に接した直後の分岐初期段階の海洋構造を初めて捉えることに成功した。津軽 Gyre の中核水は春季以前に津軽海峡内に存在していた高塩分の津軽暖流水であり、Gyre は周辺の親潮水と混合しながら、次第に成長していることが推測された。浅い密度帯にあたる $26.18 \sigma_\theta$ 面上では、津軽暖流の変質した水が西向き分岐の先端へ移流されパッチ状

に存在していた。この分岐先端付近の流れ場は小蛇行流の形状を呈している。より深い密度帯にあたる密度帯 ($26.5 \sigma_\theta$ 面) で調べると、この分岐先端よりもさらに西方まで広がっていた。この結果は、津軽 Gyre の分岐現象が表層よりも底層側で先行していたことを示唆している。

数値モデル実験

上述した海洋観測により、初夏に津軽 Gyre が日高湾陸棚斜面上に侵入したときに生じる分岐流は時計回りの小蛇行流であることがわかった。この分岐流の形成及び発達過程を調べるために、単純化した陸棚地形を有する f 平面 σ 座標モデルを用いた数値実験を行った。成長を続ける津軽 Gyre が北部陸棚斜面域に侵入している間、斜面上の下層水柱は連続的に押し縮められ、負の相対渦度を生成する。その結果として、侵入域の西側ではほぼ順圧もしくは海底捕捉の時計回り渦流擾乱が形成され、分岐域から陸棚斜面に沿って西方へ伝播する。また、この侵入域には海底捕捉モードと表層捕捉モードの 2 種類の低周波擾乱が同時に存在している。反対に、侵入域の東側では反時計回りの渦流擾乱が形成され、沖合の底層低温水を沿岸域へ定常的に供給する。この現象は津軽 Gyre が北岸境界に沿った鏡像効果によって東方移動することを抑える働きをする。このようにして、分岐直後の小蛇行流は日高湾陸棚斜面に沿って西方へ引き延ばされる津軽 Gyre にまで発達することがわかった。

4. 噴火湾における表層時計回りの水平循環流とその物理機構

数値モデル実験

初夏の噴火湾の典型的な成層期を想定し、(1)河川供給に伴う淡水化、(2)津軽 Gyre 水の密度流的流入、(3)海面熱供給の 3 つの強制力とした数値モデル実験を行い、表層水平循環流の形成過程を調べた。その結果、この循環流の励起に寄与する基本的な物理的要因は、海面加熱強制により生じる「地形性貯熱効果」であることがわかった。加熱強制の初期段階では、浅い沿岸域と深い湾中央部の間に生じる水温差で駆動される鉛直循環流(重力循環流)により、反時計回りの弱い表層地衡流が形成される。継続的な加熱強制にもかかわらず、2~3 カ月経過したころから、鉛直循環流は陸棚斜面上で冷たく重い海水の湧昇を次第に強化させる。沿岸近傍の斜面底層付近において、冷水湧昇による冷却量が下向き熱拡散による加熱量より大きくなったとき、沿岸表層水は沖合表層水よりも相対的に冷たくなり始める。その結果、内部境界面変位が岸側に向かって浅くなり、時計回りの表層地衡流へ変化が生じる。この変化に応答して、北部湾奥の表層付近から時計回り水平循環流が形成され、一方で、初期に形成された反時計回り流は深い領域へ移動する。

5. 噴火湾湾口沖を通過する急潮とその物理機構

海洋観測資料解析

2006 年 5 月 30 日、噴火湾外の南東に位置する亀田半島沿岸一帯において、急潮による漁業施設破損等の被害が発生した。このとき、噴火湾の北東に位置する白老沖と亀田半島沿岸の臼尻沖に設置されていた係留計システムが急潮にかかわる現象を捉えていた。そこで、急潮が発生しなかった前年の 2005 年と 2006 年のこの時期の気象・海象状態を比較し、この急潮の発生条件について調べた。両年の大きな相違は海洋の成層構造にみられ、急潮発生前の気象擾乱に伴う多量な降水により、表層付近には非常に薄い塩分躍層が形成された。そこに南東風が吹いた後、位相速度 ($0.3 \sim 0.8 \text{ ms}^{-1}$) にも匹敵する強い流速 ($0.3 \sim 1.2 \text{ ms}^{-1}$) が引き起こされた。さらに、ADCP で観測された急潮発生直後の流速分布を地衡流調節による定常流場とみなしたとき、この急潮は噴火湾内へは侵入せず、湾口沖を通過していたことが推測された。

数値モデル実験

急潮発生直前 (5 月 28 日) の降雨後に形成された薄い表層成層を初期条件として設定し、静水圧近似のブリミティブ方程式を用いた風強制による数値モデル実験により、今回の急潮の再現を行った。南東風の連吹後、湾外の北部沿岸に沿って強い表層南西流が形成され、この南西流は噴火湾の湾口付近の海岸線が大きく変化する場所で次第に成長する時計回りの渦流を励起した。このとき、計算された表層流速は、内部重力波の位相速度と同等もしくはそれ以上の値となる。そして、北側湾口で成長する渦流の先端が対岸の南側 (亀

田半島側) 沿岸に到達したとき、この渦流と噴火湾から流出した沿岸流との相互作用により、亀田半島に沿った局所的な海域で急潮が発生することがわかった。

次に、矩形の噴火湾地形を用いた単純な 2 層モデル実験を用いて、この時計回り渦流の力学機構について調べた。本モデルの風強制で励起される沿岸密度流の表層流は、内部重力波の位相速度 (C_i) よりも大きな流速値 (V) となるように設定した。 $V > C_i$ となる強い表層南下流が湾外の北部沿岸に沿って形成され、軽い表層水塊は湾口付近の海岸線が大きく変化する場所に蓄積される。この蓄積水塊は時計回りに回転し始め、その場で傾圧的な渦流が次第に成長する。その渦流の先端が南側沿岸の亀田半島に到達したとき、湾口沖を通過する一続きの強い南下流経路が完成する。なお、この渦流の成長は圧力傾度力・コリオリ力・遠心力の傾度流バランスが局所的に成立することで制限されることがわかった。

5. 結言

初夏の日高湾は大雑把には 3 層構造を示し、河川水流入による表層の高温低塩分水、Gyre 分岐流の水平移流による中層の高温高塩分水、主に親潮が残留したことによる深層の低温低塩分水である。このような成層状態において、急潮は表層、Gyre 分岐は中層で支配的な物理現象であった。Gyre 分岐が数か月、急潮が数日という時間スケール (慣性周期よりも長い) をもつため、両現象は地球自転の効果を受けた回転系流体の力学領域にある。それゆえ、Gyre 分岐は渦位保存則に従い、津軽 Gyre が北部陸棚斜面上へ侵入し、斜面上の下層水柱が縮むことによる負の渦度供給が分岐流の発生源となる。めったに発生しない急潮は、通常年の成層状態に加えて、雨低気圧による薄い表層水の形成と南東風の連吹という二つが必須条件であった。海岸線が鋭角に変化する噴火湾湾口において、強い沿岸流は慣性流として湾口沖合に移流され、そこで傾度流バランスに至る大きさになるまで水平渦流が発達し、これが噴火湾口を通過する急潮となる。

夏季の噴火湾表層に形成される時計回りの水平渦流は、「地形性貯熱効果」により駆動される鉛直循環流が、基本的物理要因として大きく関わっている。沿岸近傍の熱拡散と底層からの冷水移流のバランスが変化する時に、表層の水平渦流は反時計回りから時計回りへと変化する。しかし、鉛直熱拡散と鉛直移流の大小関係については、定量的な考察まで及ばず残された課題となった。今後も研究者の皆様が実施される噴火湾調査を通して、この水平渦流の形成機構に関わる物理情報を探査していきたい。