

論文審査の結果の要旨

氏名 永井 平

豊後水道では、黒潮起源の暖水が北上することで、海域内の水温が短時間内に急上昇する「急潮現象」が発生し、養殖業に甚大な被害を与えることが古くから知られている。豊後水道における急潮現象の発生時期は夏季の小潮時に集中しており、その顕著な周期性から潮汐混合との関連性が指摘されてきた。しかし、豊後水道における潮汐混合強度の見積もりはこれまで行われておらず、その時空間分布はおろか、オーダーすら明らかになっていなかった。本論文は、乱流直接観測と数値モデリングによって、豊後水道における潮汐起源の乱流混合強度を定量化し、その物理過程の解明を図るとともに、得られた乱流混合場の情報を反映させた急潮の数値シミュレーションを行うことで、豊後水道内における急潮の発生と抑制の物理機構を明らかにした。

本論文は4つの章から成る。まず、第1章は導入部であり、豊後水道における急潮現象の特徴、またその発生と抑制に対する鉛直混合の役割、さらに、本論文の目的と構成が述べられている。

第2章では、豊後水道における乱流直接観測の結果が示されるとともに、観測結果を再現した高解像度3次元数値モデルを用いることで、豊後水道における乱流混合強度が定量化され、乱流混合の発生機構が議論される。観測からは、豊後水道における鉛直渦拡散係数は、大潮時に約 $10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、小潮時の値（約 $1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ）とは1オーダーの差があることが示された。これらの観測結果を再現した数値実験から、大潮時には、豊後水道に点在する島などの複雑な海岸地形と潮流との相互作用により、直径1 km スケールの小規模渦が励起され、この小規模渦形成に対応して豊後水道東岸に強い潮汐混合域が形成されることが明らかにされた。この小規模渦は、潮汐周期で平均しても残ることから、沿岸海洋学において物質拡散に重要な役割を果たすと古くから考えられている「潮汐残差流渦」であることが確認された。

第3章では、前章において再現された鉛直混合や潮汐残差流が急潮に与える影響を調べるために、上述の数値モデルを用い、急潮の数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果、豊後水道南部で発生した密度流が小潮時のみにしか豊後

水道東岸の多島海域を北上できない、という急潮の特徴が現実的に再現された。次に、大潮時に急潮が抑制される物理機構を調べるため、数値シミュレーションの結果から鉛直混合の効果を鉛直渦粘性・渦拡散係数の形でパラメタライズすることで取り出し、潮汐流の代わりにモデルに組み込む実験を行った。実験の結果、鉛直混合の効果だけでは暖水塊の北上を完全に妨げることができないことが明らかとなった。一方、鉛直混合の効果に加えて、潮汐残差流渦の効果を潮汐応力の形でモデルに組み込む実験を行った結果、豊後水道東岸で暖水の北上が妨げられ、急潮の数値シミュレーションと同等の結果が再現された。これらの結果は、豊後水道における急潮現象を支配する物理機構として、従来から指摘されてきた鉛直混合の効果に加え、潮汐残差流渦に伴う水平混合の効果が重要な役割を果たしていることを示している。

第4章では、論文全体のまとめと今後の課題が述べられている。

以上のように、本論文は豊後水道内での実地観測から得られた乱流混合の場の情報を反映させた高解像度数値実験に基づいて、潮汐起源の鉛直混合が急潮の発生と抑制に及ぼす寄与を定量的に明らかにした。鉛直混合の効果は急潮を抑制するのに十分ではなく、それを補う物理過程として、豊後水道東岸の多島海域で励起された潮汐残差流渦に伴う水平混合の効果が重要であることが初めて明らかになった。本研究は、豊後水道内における急潮現象の予報精度の向上に繋がるだけでなく、マイクロスケールの乱流混合とサブメソスケール渦の効果を的確にパラメタライズすることが、現実海洋のモデリングにおいて重要であることを明確に示した。これらの研究成果は、乱流混合と小規模渦の効果が取り入れられていない海洋循環モデルを含む現在の数値モデリング一般に警鐘を鳴らし、かつ、その高度化への道を切り拓く成果として、高く評価できる。

なお、本論文の主要な内容は、指導教員である日比谷 紀之 教授との共同研究であるが、いずれも論文提出者が主体となって研究を行ったもので、その寄与が十分であると判断できる。従って、審査員一同は、博士(理学)の学位を授与できると認める。