

氏 名	さか もと けい 坂 本 圭
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3254 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 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	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	回 転 系 に お け る 潮 流 海 底 境 界 層 の 不 安 定 と 乱 流 に 関 す る 研 究

論文調査委員 (主査) 准教授 秋 友 和 典 教授 淡 路 敏 之 准教授 林 泰 一

### 論 文 内 容 の 要 旨

潮汐・潮流は世界中の海洋に見られる普遍的な現象であり、その卓越周期はおよそ半日、一日と比較的短い、緯度によって変化する地球自転の影響を受ける。本論文は、理想化された状況の下、潮汐振動数 $\sigma$ とコリオリ・パラメータ $f$ の比で与えられる時間ロスビー数 $Ro_t (= |\sigma/f|)$  および潮流振幅を主なパラメータとして数値モデル実験を行い、回転系における潮流海底境界層の不安定と乱流の特性を明らかにするとともに、乱流や境界層(混合層)の特性に見られる $Ro_t$ (緯度)に依らない普遍性(相似性)を示したものである。論文は3部で構成され、それぞれで、潮流海底境界層の不安定、密度一様下での乱流特性、成層下での乱流混合層の発達過程が調べられた。

まず、 $Ro_t$ を変えた8つの3次元実験に加えて $Ro_t$ と潮流振幅を変えた88ケースの鉛直2次元実験を行い、海底境界層の不安定の特徴が議論された。 $Ro_t$ が1に近いほど、海底に形成される層流境界層が厚くなるため、より小さな潮流振幅で流れは不安定化する。また、発生する不安定には、エクマン層やストークス層に現れるものと同じメカニズムが働き、 $Ro_t$ の増加とともにエクマン層タイプI不安定( $Ro_t < 1.0$ )、タイプII不安定( $1.0 < Ro_t < 1.1$ )、およびストークス層不安定( $Ro_t > 1.1$ )が順次現れる。

次に、乱流に遷移した後の流れの特性が、8つの3次元実験について調べられた。実験結果の詳細な解析から、乱流境界層の流速、時間スケールはそれぞれ摩擦速度 $u_\tau$ と $|\sigma+f|^{-1}$ でスケーリングされ、それらの積 $u_\tau(\sigma+f)^{-1}$ で決まる境界層の厚さは層流境界層の厚さに比較して遙かに大きくなる。これらのスケールは乱流エクマン層を特徴づけるアウター・スケール(outer scale)のうち、時間スケール $|f|^{-1}$ を潮流海底境界層に適合するように $|\sigma+f|^{-1}$ と修正して新たに導入したものであり、これらによって規格化された乱流の特性量は、ほぼ乱流エクマン層と同じ相似性を示す。これは、潮流による海底境界層の乱流特性が、赤道域( $f \sim 0$ )を除く広い緯度範囲に渡って相似性を持つことを意味する。同様の相似性はトレーサー分布から評価された見かけの拡散係数にも認められ、乱流混合過程の普遍的定式化の可能性を示唆する。

最後に、安定な線形密度成層の下での乱流特性と海底乱流混合層の発達メカニズムが調べられた。混合層の発達段階において、水柱は密度一様で乱流状態にある混合層、初期成層が維持され層流状態にある成層域、およびそれらの間に形成され、乱流状態にあるが初期成層の残る遷移層によって構成される。混合層と遷移層での乱流は、それぞれ $u_\tau$ と混合層厚 $z_m$ 、および $u_\tau$ と $u_\tau/N$ ( $N$ は浮力振動数)のスケールを持ち、その特性量はそれぞれの層でほぼ相似な鉛直分布を持つ。

混合層の発達速度は $Ro_t$ が1に近づくほど大きくなる。これは遷移層がより厚くなり、上方の成層域から取り込まれる海水密度が小さくなるためである。潮流振幅が同じであっても、 $Ro_t$ が1に近いほど、乱流状態(混合層内)と層流状態(成層域内)での潮流流速差が大きくなるため、リチャードソン数が1になる高さまで達する遷移層はより厚くなる。また、混合層はその厚さが密度一様下での乱流境界層と同じになるまで発達するが、この終状態に達するまでの時間で各実験ケースの結果を規格化すると、混合層厚などの特性量の時間発展は、 $Ro_t$ に依らず、ほぼ一つの曲線上に分布し、時間的な相似性を示す。

## 論文審査の結果の要旨

海洋に遍在する潮汐・潮流は、浅海域において海水混合を引き起こすだけでなく、内部波を介して地球規模での熱塩循環を維持し、また高緯度海域での底・深層水形成にも深く関わっていると考えられている。潮流は地球自転の影響を受けるため、底層に形成される境界層（混合層）の厚さは緯度によって（潮汐振動数 $\sigma$ とコリオリ・パラメータ $f$ の大小によって）変化する。そのことを示す観測例はいくつか報告されているが、その形成機構は、乱流に対する幾つかの仮定の下に議論されるか、乱流クロージャール・モデルを用いた実験によって調べられることが多く、乱流を直接的に再現した研究はほとんどない。本論文は、乱流を解像する数値モデル実験によって、回転系における潮流海底境界層の不安定と乱流の特性を包括的に取り扱った初めての研究と言える。

まず、90を超える実験を通して潮流海底境界層の安定性が調べられ、出現する不安定の時間ロスビー数 $Ro_t (= |\sigma/f|)$ および潮流振幅に対する依存性が明らかにされた。 $Ro_t$ が1.1を超えて増加するのに伴い、不安定のタイプがエクマン層タイプからストークス層タイプへ変化するという結果は、地球自転と潮流（潮汐）の効果が境界層の不安定現象に対して同等に重要であることを示す興味深い成果である。

乱流状態へ遷移した後、密度一様下での海底境界層の乱流特性やそれに伴う混合効果は $Ro_t$ によって大きく変化する。しかし、修正されたアウター・スケール（outer scale） $u_\tau$ ,  $|\sigma+f|^{-1}$ ,  $u_\tau |\sigma+f|^{-1}$ を導入することで（ $u_\tau$ は摩擦速度）、赤道域（ $f \sim 0$ ）を除けば、乱流特性量や見かけの拡散係数が $Ro_t$ や潮流振幅に依らない相似性を持ち、それらの鉛直分布は乱流エクマン層のものとおおよそ一致することを初めて明らかにした。これは、潮流による乱流海底境界層の特性が、地球上の広い緯度範囲に渡って、潮流の振動数（ $\sigma$ ）、振幅（あるいは $u_\tau$ ）および緯度（ $f$ ）によって記述できることを示しており、高く評価できる。

密度成層下での実験では、混合層や遷移層における乱流特性量の相似性を確認したことに加えて、潮流振幅が同じであっても、 $Ro_t$ の大きさによって混合層の発達速度に大きな違いが生じるという現実海洋での混合過程を理解する上で重要な事実を明らかにした。さらに、混合層の発達機構を詳細に調べることで、その原因が乱流状態の混合層と層流状態の成層域での潮流流速差にあることを示した。この機構は風による表層混合層の発達過程にも適用可能な一般性を持ち、重要な成果である。混合層はいずれのケースでも密度一様な場合の乱流境界層の厚さまで発達するが、この終状態に達するまでの時間で規格化された混合層の時間発展は、 $Ro_t$ に依らず、ほぼ相似な振る舞いをする。混合層の発達についても普遍的な定式化が可能であることを示すものである。

以上のように、理想化された状況での数値モデル実験ではあるが、回転系における潮流海底境界層の不安定と乱流の特性および混合層の発達機構を明らかにし、赤道域（ $f \sim 0$ ）を除く広い緯度範囲に渡って成り立つ乱流および乱流混合の普遍性（相似性）を示したことは、潮流とその役割についての理解を大きく進める成果と評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。