

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	牛島 悠介
論文題目	風成乱流と熱対流による成層海洋中の混合過程に及ぼす地球自転の影響に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>海洋の表層では風や冷却、波により乱流が発生し、混合層と呼ばれる鉛直一様な層が海面下に形成される。この混合層が成層する海洋中を深化する過程は、海面水温変化を通じて大気場にも影響を与えることから、気候変動を予測する上でも重要な過程である。風や冷却による深化過程は、比較的知見が多いとはいえ、乱流現象の複雑さと観測データの不足のため、とりわけ両者が共存する場合に未解明な点が多く残されており、このことが気候変動の予測精度を低下させている懸念がある。そこで本申請論文では、主に低・中緯度を想定し、風成乱流と熱対流による混合層の深化過程について、地球自転の影響に焦点をあてながら数値実験を通じて調べた。</p> <p>第2章では本研究で用いる海洋モデル (Large eddy simulation) を説明した。</p> <p>第3章では、風成乱流に着目して実験を行った。風は海面下にシア流を引き起こし、乱流を発生させることで混合層を深めるが、地球自転の影響 (コリオリ加速度) が大きくなる慣性周期以降は、シア流とシア乱流の発達は抑制される。このため、従来の研究では慣性周期以降の混合層の深化を無視したスケーリング式がしばしば採用されてきた。しかし本研究では、慣性周期以降であってもその深化は有意であることを定量的に示した。さらに、実験で得られた乱流運動エネルギー収支のパラメータ依存性から、慣性周期以降の混合層深度も表現する新たなスケーリング式を導いた。</p> <p>第4章では第3章の実験に海面冷却を加え、風成乱流と熱対流が共存して混合層を深化する過程を調べた。その結果、風成乱流が熱対流を弱めるため、共存する場合の乱流はそれぞれの単純和より抑制されること、その抑制の度合いは (風成乱流を制限する) 地球自転の影響とともに小さくなるが、現実海洋においてその影響は小さくなく、混合層の深化に影響を与えている可能性があることを明らかにした。さらに第3章で求めた風成乱流のスケーリング式と先行研究による熱対流のスケーリング式を用いて、乱流諸量のスケーリング式を導出することに成功した。そしてこれらのスケーリング式を用いて、風成乱流レジーム、熱対流レジーム、共存レジームに分類し、さらに秋季から冬季における海洋観測データを解析することで、中緯度では熱対流レジームとなるが、低緯度では共存レジームになることを明らかにした。また、海洋大循環モデルで用いられる混合層モデルの再現精度の評価も行った。</p> <p>第5章では、風成乱流と熱対流が日周期で変化する春季から初夏の混合過程に着目し、日変化する熱フラックスの下での乱流混合と混合層深度のパラメータ依存性を調べた。その結果、海面熱フラックスの日変化は、低緯度では混合層を深めるが、高緯度では逆に浅くすること、そのメカニズムは慣性周期と日変化周期の大小関係から定まる風成乱流と熱対流の影響の違いにあることを明らかにした。また、海洋観測データを解析することで、この日変化による混合層深度の違いが0.1K程度の海面水温差を生み、気候に影響を与えうることを示した。</p> <p>第6章では、以上の結果をまとめ、今後の研究の課題を整理した。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

海洋表層における乱流境界層である混合層の深化過程は、海面水温変化を通じて大気場にも影響を及ぼす。したがって、海洋のみならず気候の変動機構の解明には、海洋表層の乱流による混合層の深化過程の正確な理解が不可欠である。しかし、現状では計測の困難さや現象の複雑さ故、その理解は十分でなく、気候システムモデルの再現精度を低下させる一因となっている。

海面下での風による乱流（風成乱流）や熱による乱流（熱対流）は大気境界層で発生する乱流と力学的に相似であり、大気境界層で得た知見をほぼそのまま海洋に適用可能であると考えられてきた。しかし申請者は、特に流体運動に及ぼす地球自転の影響が大気と海洋で大きく異なるため、適用可能性についての詳細な検討が必要であるという視点に立つ。この独自の視点のもと、本申請論文では、乱流を精度よく再現する数値実験を行うことで、海洋表層での風成乱流と熱対流が混合層を深化する過程の解明に取り組んだ。

乱流混合を単純化して解析的に導いた先行研究によると、風成乱流が成層した海洋中に形成する混合層の深度は慣性周期以降一定となる。この結果はその簡便さ故広く大気の研究においても活用されている。しかし、申請者は様々な風や成層強度、地球自転の効果を表すコリオリ係数のもと実験を行い、慣性周期以降も混合層が有意に進化し続けること、その深化速度は無次元パラメーター（ロスビー数）を導入することで統一的にスケールリングできることを新たに示した。申請者が導いた、慣性周期以降も適用できる混合層深度のスケールリング式は、簡便さを失っていないため、今後広く活用される可能性がある。また、海面冷却で生じる熱対流が風成乱流とともに混合層を深化する場合でも、冷却の強さを表す無次元数を導入することで、混合層の深化速度を統一的にスケールリングできることを示したことは、複雑な乱流過程の理解に一つの指針を与えるものとして価値が高い。得られたスケールリング式を用いて、混合過程を風成、熱対流、共存の三つのレジームに分類したことで、熱対流の影響が強いと考えられる秋季から冬季においても、低緯度では風成乱流との共存が重要であることを示したが、この成果は風成乱流の潜在的な重要性を初めて評価したものである。また、乱流混合をパラメタライズ表現する混合層スキームの再現精度も評価しているが、これらの結果は今後の混合層スキームの改善に有用な情報を与えるものとして評価できる。風成乱流と熱対流が短周期で入れ替わる加熱期の日周変動に着目した実験により、日周変動が混合層深度を低緯度では深化、高緯度では浅化させること、その結果海面水温が有意に変化し気候へ影響を及ぼし得ることを見出したが、これらの結果は長周期の気候変動研究においても、短周期変動に留意すべきであることを示す貴重な結果である。

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、令和2年8月27日、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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降