

学位論文の要約

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

牛島 悠介

第1章 研究背景

成層海洋中で混合層が深化する過程は、海面水温や栄養塩供給を通じて、大気や海洋生態系に影響を与える、海洋に留まらない重要な過程である。このような混合層の深化過程は、風によるシア乱流(風成乱流)や海面冷却による熱対流、波(波浪)と流れの相互作用に起因する乱流が複雑に関与する過程と考えられる。比較的知見の多い風成乱流と熱対流による混合過程に着目しても、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の混合過程については、未解明な点が多く残されている。このことが、海洋混合層モデルの再現精度を、したがって海洋大循環モデルの再現精度を低下させている懸念があった。そこで本研究では、主に低・中緯度における海洋表層混合層を想定し、風成乱流と熱対流による混合過程とそれに及ぼす地球自転の影響、そしてそれらの結果による混合層の深化過程について、主に数値実験を行うことで調べた。

第2章 LES モデル

この章では、本研究を通して用いる海洋モデル(Large-eddy simulation, LES)を説明した。LESは風成乱流や熱対流など、その特性によらずに乱流変動を精確に再現でき、本研究ではこの結果を解析することで風成乱流と熱対流による混合層の深化過程を明らかにした。

第3章 風成乱流による混合過程と混合過程に及ぼす地球自転の影響

風は海面下にシアを有する流れを発達させ、このシア流により生じた乱流によって混合層は深化するが、回転系ではコリオリ加速度による偏向のため、慣性周期以降、シア流とシア乱流の発達には制限される。これまでの研究においては、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が、慣性周期以降に混合層がどの程度深化するかについて定量的な議論がない、という問題点があった。第3章では、初めに風成乱流による混合過程を調べた結果、地球自転下の慣性周期以降の混合層の深化は非回転系に比べて小さいものの、慣性周期から4.5慣性周期までの深化量は慣性周期までの深化量の40%程度に相当しており、慣性周期以降であっても有意であることが明らかになった。さらに、乱流運動エネルギー(TKE)の収支項のパラメータ依存性を調べ、その依存性から慣性周期以降の

混合層深度も表現可能なスケーリング式を導くことに成功した。

第4章 風成乱流と熱対流による混合過程と混合過程に及ぼす地球自転の影響

第4章では第3章の実験に海面冷却を加えることで、風成乱流と熱対流が共存する状況での混合層の深化過程を調べた。風成乱流と熱対流が共存する場合には、両者は非線形的に作用し、シアが熱対流を抑制することが指摘されている。一方、シアは地球自転で抑制されるため、地球自転はシアによる熱対流の抑制に影響を与えられられるが、その影響については十分に調べられていなかった。そこで、風成乱流と熱対流が共存する場合の混合過程を、主に TKE 収支項の鉛直分布のパラメータ依存性をもとに調べた結果、地球自転により風成乱流が抑制され、熱対流の影響が相対的に増加すること、風成乱流と熱対流が共存する場合には熱対流が抑制されることを確認した。さらに、第3章で求めた純粋な風成乱流のスケーリングと先行研究で明らかとなっている純粋な熱対流のスケーリングを用いて、風成乱流と熱対流が共存する場合の TKE 収支の各項の依存性を調べたところ、シアによる熱対流の抑制は非回転系の方が大きい、回転系においても無視できず、そのことが混合層の深化に影響を与えている可能性があることを見出した。さらに、混合層の深化に伴う乱流運動エネルギーから位置エネルギーへの変換項のパラメータ依存性に基づいて、乱流を風成乱流レジーム、熱対流レジーム、共存レジームに分類し、秋季から冬季における現実海洋での乱流レジームを評価したところ、秋季、冬季ともに低緯度では共存レジームに分類されることが明らかになった。

また、海洋大循環モデルで用いられる混合層モデルとして K-Profile Parameterization モデル、Mellor-Yamada モデル、Nakanishi-Niino モデルを取り上げ、その再現精度の検証も行った。これらの混合層モデルの中では、Nakanishi-Niino モデルが最も再現精度が高いが、地球自転下で風成乱流が支配的な場合や風成乱流と熱対流が共存する場合には、主に熱対流の効果を表す乱流運動エネルギー輸送の収束項を過大評価する傾向があるため、混合層深度を過大評価する傾向があることを見出した。地球自転下の風成乱流と熱対流が共存する場合には、全ての混合層モデルにおける混合層深度の再現性が十分ではないが、秋季、冬季においては低緯度で風成乱流と熱対流の共存するレジームとなるため、これらの混合層モデルを用いた海洋大循環モデルにおいても、これらの季節・海域における混合層深度の再現精度は低い可能性が高い。そのため、混合層深度に影響を受ける秋季の植物プランクトンの増殖や冬季の海面水温の経年変動なども十分に再現できていないことが示唆される。

第5章 海面加熱期の日変化する海面フラックス下の混合過程と混合過程に及ぼす地球自転の影響

第5章では一定の海面フラックスではなく、日変化する海面熱フラックス下での混合過程に地球自転が与える影響を調べた。これまでの海面加熱期の混合層深度に関する研究は一定の海面熱フラックスを想定していたが、日変化は赤道域の混合層深度を深めるとの指摘もあった。しかしながら、日変化が混合層深度を変化させる過程や、その影響がどの緯度にまで及

ぶのかなど、不明な点が多かった。そこで、海面熱フラックスの日変化が海面加熱期の混合層深度の緯度依存性に与える影響を調べた。その結果、海面熱フラックスの日変化によって、混合層深度が低緯度で深く、高緯度で浅くなることを明らかにした。さらに、観測データを用いて、日変化による混合層深度の違いが、海面水温に与える影響を見積もったところ、高緯度では一ヶ月間に 0.1 K 程度、水温を変える可能性を示唆した。

第 6 章 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、特に地球自転の影響に着目して、風成乱流や熱対流による成層海洋中の混合過程について、従来の研究よりも系統的な調査を行い、風成乱流による混合過程に地球自転が及ぼす影響と、風成乱流と熱対流の非線形効果と非線形効果に地球自転が及ぼす影響を明らかにした。また、季節的な時間規模だけでなく、日変化の短い時間規模で風成乱流と熱対流が共存するときの混合効果が海面加熱期の混合層深度に与える影響も明らかにした。

本研究で明らかとなった上述の混合層の深化過程は混合層モデルの開発にも有用であると考えられる。とりわけ、従来の混合層モデルの開発では限られた観測や LES データに基づいて行われてきたが、本研究で得られた広いパラメータレンジでのデータは、より精確な混合層モデルの開発に活用できる。