

氏 名	木 原 直 人
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3002 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 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	気・液界面近傍の乱流構造と輸送機構に関する数値的研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 石 川 裕 彦 教 授 余 田 成 男 教 授 木 田 秀 次

論 文 内 容 の 要 旨

海洋と大気との間では、運動量、顕熱、潜熱や二酸化炭素などの交換が生じ、運動や状態を支配する重要な要素のひとつとなっている。この交換過程は、観測や室内実験で得られた様々な経験式で定式化されているが、観測結果や実験結果のばらつきが大きく、経験式間の一致はあまり良くない。そこで、気・液界面近傍で生じる乱流の構造と輸送機構を素過程から調べるため、乱流を陽に解く3次元直接数値計算により流れ場を計算しその解析を行った。

論文の前半では、水面上を吹送する気流による風波の発達と、これに伴う気層側の乱流運動を調べた。風波とともに移動し、波面の形に沿う境界適合座標系に準拠した計算プログラムを作成し、風波の発達の度合を示す‘波齢’をパラメータとした一連の数値実験を実施した。計算結果を平均流、波状組織構造、乱流成分に分解して流れの構造とその波齢依存性を詳細に調べた。この結果に基づいて、まず風波の発達率に関する Miles の準層流理論を検証した。低～中波齢では、風波の位相速度と平均風速が一致する高さ(臨界面)を中心に形成される cats eye に伴う圧力分布が波の発達率を決定し準層流理論と一致した。臨界面が波面から離れる高波齢では、計算された流れ構造は準層流理論の仮定と一致しないが、数値実験では波頭に対象な圧力分布が波面近傍で形成されることにより、また準層流理論では発達率を決める臨界面の変動振幅が高さとともに指数関数的に減衰することにより、両者とも発達率が小さくなる結果を示すことがわかった。次に、数値実験結果から運動量フラックスを計算し、その波齢依存性を調べた後、バルク輸送式で用いられる抵抗係数を計算した。抵抗係数は波齢とともに一旦減少したのち、波齢4～6で増加し、それ以上の波齢では再び減少するという結果を得た。スカラー量の輸送についても同様に調べ、スカラー輸送係数が抵抗係数と相似な挙動を示すことがわかった。

論文の後半では、気・液界面直下液層側で発達する熱対流の乱流構造とその輸送機構を固体壁面上のそれと比較して調べた。気・液界面の液側熱輸送では、固体壁面上と同様に分子拡散が支配的であり熱フラックスは温度勾配で決まること、液層側の乱流統計量の分布が界面のごく近傍を除き固体壁面上と水面の場合とで類似していることがわかった。しかし、界面のごく近傍では、固体壁の場合と異なり、乱流渦の鉛直方向運動エネルギーが圧力歪み項を通して水平方向運動エネルギーに再配分され界面近傍での水平乱流運動が生じること、これに伴う発散により局所的に強い下降流が生じ表面の低温流体は下層に運ばれ、またその補償流により下層の高温流体が汲み上げられることが新たにわかった。この熱輸送により液面近傍の温度勾配が固体壁面の場合より大きくなり、界面での熱輸送が促進され、固体壁の場合よりも熱輸送が大きくなるという結果を得た。

さらに、熱交換と物質交換の相似性に基づき二酸化炭素の交換係数を試算したところ、気・液界面直下にこのような熱対流が生じた場合、その効果は高度10m風速に換算して4～5m/sの風速に相当する効果を持つことがわかった。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

この論文は、気・液界面での運動量、熱、物質の交換過程の理解を目指し、ナビエ・ストークス方程式を直接法で解くこ

とにより、気・液界面近傍での素過程として重要である流れの乱流構造とこれによる輸送機構を調べたものである。

論文の前半では、水面上を吹送する気流による水面波（風波）の発達と、これに伴う気層側の乱流運動を扱っている。申請者は、自ら作成した計算プログラムを用いて風波上の気流を計算し、計算結果を解析することにより、波の発達率に関する Miles の準層流理論の乱流状態への適用性の検証、運動量、スカラー量の輸送機構の詳細な検討を行った。さらに、応用的に用いられるバルク輸送式と対応させて、抵抗係数、スカラー輸送係数を算出し、これらの波齢依存性を検討した。申請者の行った数値実験は、最近になり実施されるようになったものであり、流れ場の記述に関しては先行研究があるが、運動量輸送や物質輸送のメカニズムに踏み込んで解析したのは、申請者が初めてである。計算資源の制約で、現実の大気・水面間の現象を忠実に再現する結果ではないが、このような素過程の研究を通じて、経験的に定式化されている抵抗係数や輸送係数などを再吟味することの重要性を本研究は示している。

論文の後半では、液層表面の冷却により気・液界面直下の液層側に生じる熱対流の乱流構造、及び熱・物質輸送を調べている。これまで固体壁面上での熱対流の構造は研究されてきたが、滑り表面を持つ水面直下での熱対流に関する知見は乏しかった。申請者は、直接法による数値計算プログラムを作成し、これを用いた数値実験結果を室内実験のデータと照合しながら、水面直下で発達する熱対流の乱流構造を示し、固体壁面上の熱対流との相違を明らかにした。さらに、熱対流に伴う熱・物質輸送を調べ、水面直下で発達する熱対流は固体壁面上のそれと比べて、1.5から2.0倍の熱・物質の混合効果を持つことを示した。これまで、気・液界面における物質の交換係数は、風速のみに依存する定式化が行われてきたが、申請者は、熱対流による交換係数への寄与が、風速と同等の効果を持ちうることを初めて示した。この成果は、物質交換係数の定式化に液層側の熱対流の効果を考慮することの必要性を示唆するものとして重要である。

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、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。