九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

風波界面における運動量・ガス交換機構のモデル化に関する研究

宮﨑, 大輔

https://hdl.handle.net/2324/1959158

出版情報：Kyushu University, 2018, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式３）Form 3

氏　　名　：宮﨑　大輔

Name

論 文 名　：風波界面における運動量・ガス交換機構のモデル化に関する研究

Title

区　　分　：甲

Category

論 文 内 容 の 要 旨

Thesis Summary

海洋は CO_2 の巨大な吸収源であり，地球温暖化の正確な予測のためには，大気－海洋間における運動量や CO_2 のフラックスを正確に見積もる必要がある．そのため，大気－海洋間の交換機構を流体力学的に理解し，適切にモデル化することは，地球温暖化問題にアプローチする重要な流体工学的課題である．海面を通しての運動量フラックスや CO_2 などのガス交換フラックスは，一般にバルク式の形で表現される．それぞれのバルク式における輸送係数は，海面抵抗係数，ガス交換速度と呼ばれている．また，海面抵抗係数は，その定義から，粗度長の形で表現することができ，その定量化は海面交換過程研究の重要な課題となっている．海面抵抗係数やガス交換速度については，これまで様々な経験式が提案されているが，その多くが海上高度 10m における平均風速を用いて定量化されている．しかし，同一の風速条件下においても，吹送距離や吹送時間が異なれば，風波の発達状態は大きく変化することから，海上風速のみで海面交換過程を定式化することはできないはずである．事実，従来の先行研究におけるガス交換速度の経験式は，研究者ごとにその推定値に大きなばらつきが見られる．従って，これらの輸送係数に，波浪特性の効果を適切に取り込むことは，局所大気海洋相互作用をより適切にモデル化する上で重要である．また，近年，大気－海洋－波浪結合計算が技術的に可能となっており，将来的な大気－海洋間交換過程の予測に実装する輸送係数として，波浪推算と結合した海面抵抗係数（または粗度長）やガス交換速度が必要となる．このような背景から，本研究では，風波界面における運動量・ガス交換機構を波浪特性に基づいてモデル化する手法について検討した．まず風洞水槽実験に基づいて，風波界面における遷移の素過程，特に砕波への移行とその臨界条件の記述に有用な風波パラメータについて調べた．次に，従来の風洞水槽実験および現地観測データを整理・統合し，風波のストークスドリフト流速に基づいた粗度長の新たなパラメタリゼーション手法について検討した．さらに，風波界面におけるガス交換速度を，乱流による寄与と砕波による寄与に分離してモデル化するハイブリッドモデルの手法に着目し，波浪特性を組み込んだガス交換速度の評価法の構築を試みた．さらに，海洋観測塔において得られた現地観測データに基づいて，モデル化したガス交換速度の有効性について検討を行った．本論文はこれらの研究成果をまとめたもので５章より構成されている．

第１章では，本研究の背景および従来の研究について解説し，本研究の目的と論文構成について述べた．

第２章では，回流式風洞水槽による室内実験を行い，風速を種々変化させた条件下において，画像撮影および風速，波浪，吹送流量の実験結果から，風波界面における遷移過程と風波パラメータの関係について検討し，どのような風波パラメータが砕波の発生の記述に有用であるかについて調べた．特に，ここでは風応力のせん断作用によって水側に生じる吹送流に着目し，吹送流速が風波界面を通しての運動量輸送を表す重要な物理量であるとのアイデアに基づいて，水側の吹送流と風波パラメータの関係性を検討した．その結果，断面平均吹送流速の挙動は，風波界面における微小砕波の前後で大きく変化することを見出した．また，水側摩擦速度は微小砕波の発生と密接に関係する物理量であることを確認し，風波クーリガン数や風波レイノルズ数が風波界面の遷移過程を記述する上で

有効なパラメータになりうることがわかった.

第3章では, ストークスドリフト流速を用いた風波界面における粗度長のパラメタリゼーション手法について検討した. 風から輸送される運動量が, せん断流と波動に輸送される割合を表すパラメータとして, 吹送流とストークスドリフトの流速2乗比を用いる手法を新たに提案した. 本研究では, ストークスドリフト流速を微小振幅波理論に基づいて風波の有義波高やピーク波周期から評価した. 従来, 水表面粗度長は摩擦速度と重力加速度によって無次元化され, 波齢の逆数（波風径数）を用いて定量化することが試みられてきたが, 室内実験データと現地観測データとの挙動の間に解離が生じることが大きな問題であった. ストークスドリフト流速と重力加速度を用いて無次元された粗度長を, 吹送流とストークスドリフトの流速2乗比による無次元パラメータを用いて表示した場合, 室内実験データと現地観測データの間に明瞭な相似性が成立することを明らかにした. ストークスドリフト流速に基づく無次元粗度長は, そのオーダーが1付近にあり, さらに波齢にほとんど依存しないことを示した. 既往研究による極端な高風速条件下の実験結果からは, 吹送流とストークスドリフトの流速2乗比であるパラメータが大きくなると, ストークスドリフト流速を用いて無次元表示した粗度長が一定値に漸近することが示唆されるが, これは極端な高風速の場合, 風波界面が再滑面化することに起因すると考えられる. 本研究では, 水表面の再滑面化を考慮した上で, 風波界面の粗度長を吹送流とストークスドリフトの流速2乗比を用いて評価する新しい経験式を構築した. また, この粗度長の経験式を海面抵抗係数に変換することによって, 波浪状態を考慮した海面抵抗係数の新たな経験式を提案した.

第4章では, 従来の先行研究におけるハイブリッドモデルの知見に基づいて, 波浪状態を考慮したガス交換速度のモデル化を行った. 風波界面におけるガス交換速度を, 乱流による寄与と砕波による寄与に分離し, 各々の寄与を流体力学的な仮説に基づいてモデル化した. 提案したモデルは従来の先行研究における経験式を包含しており, 経験式のばらつきは経験式が取得された観測データの波齢の違いによるものであることが示唆された. また, 本モデルは, 室内実験データにおける波齢依存性の傾向を表現することができた. 実海洋での観測データを用いて評価した推定値を比較した結果, 本モデルにより算出されたガス交換速度は, 風速のみで表現された経験式とは, その挙動が定性的・定量的に異なることが確認された. さらに, 現地観測によって評価された CO_2 フラックスと透過膜式気液平衡器を用いて測定した海水中の溶存 CO_2 濃度の観測データに基づいて, 提案したモデルの適用性について調べた. 現地観測データとモデルによる推定値を比較・検討した結果, 風波の相似則（3/2 乗則）の経験定数 0.062 に比較的近いデータ, すなわち風と風波の局所平衡性が比較的よく成り立つ条件においては本モデルから計算したフラックスは観測値と概ね近い挙動を示すことがわかった. 本モデルに含まれる定数値やモデル化における仮説の部分についてはさらに検証が必要であるが, 波浪特性に基づくガス交換機構のモデル化の有効性について重要な知見を得ることができた.

第5章では, 以上の結果を総括し, 本論文の結論とした.