

氏 名	よし だ けい すけ 吉 田 圭 介
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2457 号
学位授与の日付	平成 17 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	工 学 研 究 科 環 境 地 球 工 学 専 攻
学位論文題目	水面上に風シアアを伴う開水路における組織乱流構造と気体輸送に関する基礎的研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 欄 津 家 久 教 授 小 森 悟 助 教 授 牛 島 省

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、自由水面上に風応力を伴う開水路流れ場における乱流現象とそれに伴う水・空気間のガス交換現象に関して、実験手法および数値解析手法を併用して、詳細に検討を行ったものである。実験ではまずフルード数がゼロの水面上に風応力が作用する風波乱流場をレーザー流速計およびPIVを駆使して詳細に計測し、その流速分布、乱れ特性また組織乱流構造を解明した。次に、溶存酸素計(DOメーター)を用いた水中溶存酸素濃度計測を行って、界面でのガス交換において支配因子と考えられる組織乱流構造とガス交換現象の関連性について実験的に検討した。さらに、近年その発展が目覚ましい数値流体解析手法を主に気液混相流に適用して、その新たな計算手法を提案し、実現象への適用性について考察を行った。本論文は、以下の5つの章から構成される。

第1章は、緒論であり、本論文の研究背景、研究動機や研究目的および論文構成についてまとめたものである。

第2章では、フルード数がゼロの水面上に風応力が作用する風波乱流場の乱流構造を高精度計測機器で計測した。実験では、2台の2成分アルゴンイオンレーザー流速計(LDA)を鉛直方向に離して水・空気層に各々1台ずつ設置し、2台のLDAによる同時乱流計測を行って水・空気層の時間平均構造および相関構造を考察した。また、PIVを用いて風波下の水層の流体場をデジタル可視化し、瞬間的な乱れ場の構造を計測した。次に、位相平均手法を用いて水層界面近傍の局所的な乱流構造を検討した。さらに、明確な波立ちが存在する2次元重力風波場における水層流体挙動をPIV法によって可視化し、時間周波数解析手法を利用して、界面近傍流体の挙動および組織構造に対する風波の影響について考察を行った。実験の結果、風波乱流場における水層乱流境界層の代表スケールが界面せん断摩擦速度と水面変動強度であることが明らかとなった。風シアアの増大とともに水面波は3次元リップル波から2次元波へと変化し、水面変動に起因する卓越した流速変動が観察された。さらに、水面近傍では空気層と水層とで相関が高い高周波変動成分が観察され、これは界面での水流と空気流との小規模の相互作用が存在するものと示唆される。

第3章では、水面上に風シアアが存在する開水路流れ(水・空気混成乱流場)を対象として、系統的に実験条件を変化させて、水路中央鉛直断面における水・空気流をレーザー流速計(LDA)で計測し、両層の乱流構造やその相互作用を実験的に解明した。また、水素気泡法を用いて水層界面近傍の組織渦運動の可視化により組織渦運動の定性的な考察を行い、さらに、LDA計測データの条件付きサンプリング法とWavelet-LFT解析を併用して、水・空気混成乱流場における組織渦構造について定量的な考察を行った。これに付け加えて、溶存酸素計(DOメーター)を用いた水槽内の酸素濃度計測を行い、混成流場の気体輸送速度の評価を行った。実験の結果、混成乱流場における支配パラメータが水流のフルード数と底面/界面せん断応力比であることが明らかとなった。線形理論や時間周波数解析により、フルード数が卓越した条件では底面からのバースト構造が混成場を支配し、界面シアアが卓越した条件では界面からのバースト構造が混成場を支配することが明らかとなった。一方、開水路乱流場における気体輸送では底面シアアに起因するボイル渦が支配的であり、混成流場における気体輸送は水流のフルード数および底面/界面せん断応力比によって支配される。また、いずれの流れ場においても、

低レイノルズ数では Large-eddy Model, 高レイノルズ数では Small-eddy Model により気体輸送が良好に記述されることがわかった。

第4章では, 水・シリコン成層流場および水・空気混相乱流場を対象として, Navier-Stokes 式, 連続式および流体密度を正規化した輸送方程式を基礎式として有限差分法に基づき離散化し, 流体界面を直接的に取り扱うことで流体界面現象に関する高精度な数値計算手法を提案した。また, 並行して行った実験や既往の数値解析(水柱崩壊現象, 水・シリコンオイル2相流, 平行平板乱流)の結果との比較を行うことで, 本計算手法の検証と適用性について考察を加えた。数値解析の結果, 本研究で提案された数値計算手法は既往の数値結果と同様の精度を有することが示された。また, 最後に, 低レイノルズ数を対象とした水・空気二層流の直接数値計算(DNS)を行い, 第3章で得られた実験結果と比較することで, 本数値計算が乱流統計量に関してほぼ妥当な結果を与えることが明らかとなった。一方, 界面波が周期境界条件の影響で2次元的となった可能性もあり, またレイノルズ数の相違により, 境界層の外層で平均流速分布が一致しない等の結果も得られた。

第5章は結論であり, 本論文で得られた成果について総括し, 今後の研究課題についても言及した。すなわち, 自由水面上に風応力が作用する開水路流れでの乱流構造と気体輸送特性は水流のフルード数と底面/界面せん断応力比により規定される。特に, 表面更新理論に基づく解釈により, 水流中の界面近傍の乱流渦が気体輸送を支配することが明らかとなった。また, 混合しない非圧縮性気液2相流を対象として, 本研究で提案された数値解析手法は, 実験結果と比較した結果, 物理的に妥当な結果を与えることが明らかとなった。

論文審査の結果の要旨

従来, 社会基盤工学の基礎学理として, 潤辺水理学は治水などに多大な貢献を果たしてきたが, 近年, 地球温暖化現象や生態系の保全に密接に関連する重要な課題として, 水・空気界面乱流場とそれに伴う乱流輸送に関する研究は世界的規模で分野を問わず精力的に行われている。本論文は, 自由水面上に風応力が作用する開水路流れ場における組織乱流と水・空気間のガス交換現象に関して, 実験的手法および数値解析的手法を併用して, 考察を行ったものである。本論文では, 長時間にわたる流体の可視化実験や高精度計測を行い, 時間周波数解析および線形理論を適用して, 水・空気界面場の組織渦構造を解明した。また, その知見に基づいて, 気液界面のガス交換現象における既往の概念モデルや渦セルモデルを検討し, ガス交換現象を乱流渦構造の観点から考察した。さらに, 混合しない2つの流体の界面構造を直接的に扱う高精度数値計算手法を提案し, 他の数値計算法との比較を行うことで, 本計算法の数値計算精度の検証を行った後に, 水・空気二層流の直接数値計算を行った。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 水流と空気が同じ方向に流れる水・空気二層混成流では, 水流のフルード数および底面/界面せん断応力比の2つのパラメータにより, 界面波の特性や界面乱流構造がほぼ規定される。特に, 線形理論や時間周波数解析により, フルード数が卓越した条件では底面からのバースト構造が混成流を支配し, 界面シアアが卓越した条件では界面からのバースト構造が混成流を支配することが明らかとなった。
- 2) 開水路乱流場における気体輸送はボイル渦が支配的である。一方, 混成流場における気体輸送は水流のフルード数および底面/界面せん断応力比によって規定される。また, どの流れ場においても, 低レイノルズ数では Large-eddy Model, 高レイノルズ数では Small-eddy Model により気体輸送が表現される。
- 3) 本数値計算法を気液界面流へ適用し, 実験と比較した結果, 平均流速および乱れ統計量はほぼ一致した。一方, 界面波の形状はほぼ2次元的となり, 周期境界条件の影響が示唆された。また, 数値計算結果と実験結果ではレイノルズ数が異なるために, 境界層の外層では乱れ統計量に差違が見られた。

以上, 要するに本論文は, 水・空気二層混成流の乱流構造とガス交換現象を実験的に解明し, また混合しない気液界面流の数値解法を提案したものであり, 学術上, 實際上寄与するところが少なくない。よって, 本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また, 平成17年1月12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。