

氏名（本籍）	陸田秀実（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位記号番号	乙第 19 号
学位授与年月日	平成 12 年 3 月 24 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	大規模砕波による気液混相流体場における高精度数値計算手法の開発 (A highly accurate numerical scheme for a fully developed turbulent flow caused by large scale breakers)
学位論文審査委員	(主査) 教授 安田孝志 (副査) 教授 藤田裕一郎 教授 湯浅晶

## 論文内容の要旨

本論文は、固気液共存場における物理現象を一つの集合体として統一的に取り扱うため、非圧縮性・圧縮性流体場を同時に解いて、多相流体場を統一的に取り扱える C-CUP 法に基づく高精度な 3 次元数値計算手法を開発し、さらに、この手法に Dynamic LES 乱流モデルを組み込み、気液混相乱流場の数値計算手法に発展させたものである。ついで、この手法の応用として、気液界面の大変形問題を扱い、本手法の有効性、妥当性および汎用性を検討した。また、これまで理論的な取り扱いが困難なため、その重要性に比べて解明が遅れている大規模砕波の砕波後の複雑な気液混相流体場に適用し、砕波後の連行気泡の挙動を考慮した 3 次元的な流体の力学的運動機構の解明を試みたものである。

以下に主要な結論を列記する。

- (1) 数値計算によって再現すべき砕波後の流体場の諸特性を明確にするため、水理実験を行った。その結果、砕波後のスプレイアップサイクル過程は複雑な気液混相乱流場となっており、ジェットサイズ、大規模水平渦の規模、スプレイの幾何学的形状、気泡混入量、波高伝達率の各物理パラメータ間には密接な関係があることを明らかにした。特に、大規模砕波によって連行される気泡の挙動は無視できないことを示した。
- (2) 本論文では、固気液共存場に対して現在最も有力な統一解法として考えられている C-CUP 法をベースに数値アルゴリズムを構築することが出来た。その特徴としては、局所的な音速を含めた圧力に関するポアソン方程式を用いて、解析対象とする多相流体場の物理法則を満足しつつ、各相の連続的な圧力場を求め、その結果を基に他の物理諸量（速度、密度、密度関数、熱・物質のスカラー量など）を時間発展することで、相間の煩雑な境界条件を排除している点にある。これに加えて、非線形項（移流項）の差分には高精度な CIP 法、各相の界面の捕獲には密度関数法を適用し、高密度比、高粘性比を有する固気

液 3 相が共存する流体場を追跡することが可能となっている。この他、界面の不安定現象などへの適用も考慮して表面張力モデル (CSF Model) の導入も行っている。

- (3) モデル定数の決定に任意性・不確定性を極力排除でき、ここで解析対象としている連行気泡を含む大規模な砕波後の気液混相流体場への適用が可能な Dynamic LES モデル (乱流モデル) を導入し、本数値計算手法の気液混相流体場への拡張を行った。
- (4) 本数値計算手法の基本的特性を確認するため、自由表面解析モデルの典型的な検証問題として良く用いられる 2 次元および 3 次元の水柱崩壊、3 次元液滴落下 (ミルククラウン現象) 問題に適用し、気相と液相の運動の精度検証を行った。さらに、単一気泡の上昇、複数気泡の合体・分裂などの流れ場解析に適用し、液相中に存在する気相の運動についても数値シミュレーションを行い、気液両相の界面を介した相互作用の取り扱いの可能性を示した。
- (5) 本数値計算手法を用いて、砕波後の大規模ジェットにより生成される気液混相流体場のスプレイアップサイクル過程に対する数値解析を行い、砕波帯における連行気泡を含めた流速場の 3 次元構造および組織的渦構造について明らかにした。また、スプレイアップサイクル過程における気液混相流体場の乱流諸量 (レイノルズ応力、乱流エネルギー、乱流散逸など) について検討を加え、砕波後の連行気泡を含めた乱流場の 3 次元的な発達過程を明らかにした。
- (6) 実流体場における気液二相界面の代表的な不安定問題である風波の発生・発達現象について、その力学機構の解明を行う第一段階として、砕波を伴う気液界面で行われる界面相互作用現象への本数値計算手法の適用を試みた。その結果、気相領域の一樣風速と界面の状態には一定の関係があり、安定、不安定、砕波領域に分類されることがわかった。また、3 次元場の風波の発達では、砕波後、急速に 3 次元化が進むことを示した。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、現象の複雑さから解明が遅れている大規模砕波による気液混相流体場に対し、多相流体場の統一的取り扱いに適した C-CUP 法に基づく 3 次元数値解法に Dynamic LES 乱流モデルを組み込んだ高精度な数値計算手法を開発するとともに、その適用を試みたものである。これによって得られた成果は以下のように要約され、博士 (工学) 論文として相応しいものと判定した。

- (1) 数値計算によって再現すべき砕波後の流体場の諸特性を明確にするため、水理実験を行った。その結果、砕波後のスプレイアップサイクル過程は複雑な気液混相乱流場となっており、ジェットサイズ、大規模水平渦の規模、スプレイの幾何学的形状、気泡混入量、波高伝達率の各物理パラメータ間には密接な関係があることを明らかにした。特に、大規模砕波によって連行される気泡の挙動は無視できないことを示した。
- (2) 本論文では、固気液共存場に対して現在最も有力な統一解法として考えられている C-CUP 法をベースに数値アルゴリズムを構築することが出来た。その特徴としては、局

所的な音速を含めた圧力に関するポアソン方程式を用いて、解析対象とする多相流体場の物理法則を満足しつつ、各相の連続的な圧力場を求め、その結果を基に他の物理諸量（速度、密度、密度関数、熱・物質のスカラー量など）を時間発展することで、相間の煩雑な境界条件を排除している点にある。これに加えて、非線形項（移流項）の差分には高精度な CIP 法、各相の界面の捕獲には密度関数法を適用し、高密度比、高粘性比を有する固気液 3 相が共存する流体場を追跡することが可能となっている。この他、界面の不安定現象などへの適用も考慮して表面張力モデル（CSF Model）の導入も行っている。

- (3) モデル定数の決定に任意性・不確定性を極力排除でき、ここで解析対象としている連行気泡を含む大規模な砕波後の気液混相流体場への適用が可能な Dynamic LES モデル（乱流モデル）を導入し、本数値計算手法の気液混相流体場への拡張を行った。
- (4) 本数値計算手法の基本的特性を確認するため、自由表面解析モデルの典型的な検証問題として良く用いられる 2 次元および 3 次元の水柱崩壊、3 次元液滴落下（ミルククラウン現象）問題に適用し、気相と液相の運動の精度検証を行った。さらに、単一気泡の上昇、複数気泡の合体・分裂などの流れ場解析に適用し、液相中に存在する気相の運動についても数値シミュレーションを行い、気液両相の界面を介した相互作用の取り扱いの可能性を示した。
- (5) 本数値計算手法を用いて、砕波後の大規模ジェットにより生成される気液混相流体場のスプレイアップサイクル過程に対する数値解析を行い、砕波帯における連行気泡を含めた流速場の 3 次元構造および組織的渦構造について明らかにした。また、スプレイアップサイクル過程における気液混相流体場の乱流諸量（レイノルズ応力、乱流エネルギー、乱流散逸など）について検討を加え、砕波後の連行気泡を含めた乱流場の 3 次元的な発達過程を明らかにした。
- (6) 実流体場における気液二相界面の代表的な不安定問題である風波の発生・発達現象について、その力学機構の解明を行う第一段階として、砕波を伴う気液界面で行われる界面相互作用現象への本数値計算手法の適用を試みた。その結果、気相領域の一樣風速と界面の状態には一定の関係があり、安定、不安定、砕波領域に分類されることがわかった。また、3 次元場の風波の発達では、砕波後、急速に 3 次元化が進むことを示した。

## 最終試験結果の要旨

審査委員会から論文提出者に対して提示された課題

I) 現地スケール 100km×100km×2km（鉛直）への適用を念頭に非定常・非平衡乱流場に対する各種乱流モデルの優劣を論ぜよ。

II) 気泡連行流（白濁流）の研究に関するレビュー

に対する解答（レポート）を中心に環境流体力学・海岸工学に関連する専門的な知識・理解力について学力試問を行うとともに、学術雑誌等への論文公表状況についても口答試問を行った。

その結果、学位論文提出者は学位を授与するに十分な専門的知識を有し、学位論文の内容に関する論文を印刷中も含めて 12 編公表しているため、最終試験を合格と判定した。