

氏 名	やま もと よし のぶ 山 本 義 暢
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2151 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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 原 子 核 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	熱輸送を伴う自由表面混相乱流場の直接数値シミュレーション

(主 査)
論文調査委員 教 授 芹 沢 昭 示 教 授 荻 野 文 丸 助教授 功 刀 資 彰

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は原子力・機械・化学工学、河川・海洋工学、環境工学等々で重要な熱輸送を伴う自由表面混相乱流場の直接数値シミュレーション手法を構築し、混相乱流場の構造及び熱・物質輸送機構の解明並びにそのモデル化を目指したものであり、浮力を伴う高プラントル自由表面乱流場、完全発達風波乱流場、空間発展風波乱流に対する直接数値計算手法を開発し、その妥当性の検証及び解析精度についての系統的評価を行うと共に、その結果に基づいて風波乱流場の物理的構造についての解明と考察を行ったもので、全6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、従来の研究との関連から見た本論文の位置づけを明らかにし、また、研究全体の構成を説明したものである。

第2章は低フルード数開水路流れの乱流構造と熱輸送に関する考察を行ったものであり、自由表面乱流場における乱流構造や乱流熱輸送現象における階層構造を解明し、その力学過程に及ぼすレイノルズ数、浮力、高プラントル数の効果を定量的に評価した。特に、自由表面乱流場において、安定成層による熱輸送の抑制効果が浮力やプラントル数の違いにより異なることを明らかにした。

第3章では3次元的なさざ波を伴う風波乱流場における乱流構造と熱輸送を考察し、風速2m/sの完全発達風波乱流場における流動形態及び乱流構造、波と流れの相互作用効果を解明した。特に、吹送効果の卓越する風波乱流場においては、micro-scale breaking を伴う水平方向に広がる鱗状の水面波が誘起され、この水面波と乱流構造との相互作用及び気液界面におけるせん断力の減少により、気相側の流速分布が層流化傾向を示すことを明らかにした。さらに、上記流動場における気液界面近傍では加速・減速流類似の乱流構造を有し、気相側の熱輸送を支配するとともに、界面近傍における温度境界層の発達を妨げることで、界面変形に伴う温度乱れが発生するが、気液間のプラントル数の違いにより乱流熱輸送効果は抑制され一定温度状態に近い状態となること等々を明らかにした。

第4章は砕波を伴う風波乱流場の数値シミュレーションであり、風速約18m/sの空間発展風波乱流場における流動特性とその乱流構造への影響として、風波による波高が水深の半分以上となると、波の峰が前面に覆い被さって前方へ投げ出される巻き波砕波現象が再現できることを確認するとともに、この効果により界面変形と壁乱流との相互作用効果が大きくなり乱流拡散効果が活性化されることを明らかにした。

第5章は自由表面乱流場におけるガス吸収と乱流モデリングに関する展望について述べたもので、自由表面乱流場における乱流モデリングに関する指針を示した。すなわち、自由表面近傍の濃度分布は、速度分布同様の縞構造を有するが、界面近傍では、界面が液側に沈み込んだ高圧領域において高濃度分布を示すとともに、界面吸収においては特に界面変形の効果が重要であること、また温度場に与える界面変形効果は気相側と液相側では異なることを示した。

第6章では本研究で得られた成果をまとめて結論とし、今後の展望についても言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、原子力・機械・化学工学、河川・海洋工学、環境工学等々で重要な気液自由界面を有する混相乱流場について、流体物理を基礎とした熱流体工学解析手法（直接数値シミュレーション法：DNS）を新たに構築し、混相乱流場の構造及び熱・物質輸送機構の解明並びにそのモデル化を目的とした研究成果を取り纏めたものである。特に、自由表面混相乱流場を3つの流動形態、(1)自由表面の変形が無視できる場合、(2)3次元的なさざ波が発生する層状二相流状態、(3)碎波状態に分類し、これらの流動形態を計算機上で十分な精度で再現できる混相乱流場の乱流構造、熱・物質輸送直接数値計算法を確立した。得られた成果の概要は以下の通りである。

1. 高プラントル数自由表面乱流場における直接数値シミュレーション手法を新たに構築し、表面変形を伴わない低フルード数開水路乱流場の乱流構造及び熱輸送特性に及ぼすプラントル数及び浮力の効果、レイノルズ数効果を定量的に評価・検討し、自由表面乱流場の多重構造性と相関構造を明らかにした。
2. 次に、発達風波混相乱流場の直接数値シミュレーション手法を考案・開発し、吹送効果の卓越する風波乱流場においては、壁乱流特有の組織乱流構造と界面変形効果が相乗作用すること、自由表面近傍領域には鉛直方向の乱れの抑制効果が存在すること等を明らかにした。さらに、界面変形効果及び乱流構造によって影響を受ける自由表面を通しての熱輸送機構・特性を明らかにした。
3. 碎波を伴う空間発展風波乱流場を対象とした数値風波水槽を構築し、大規模数値計算により、乱流境界層厚さが波高に比べ十分に大きい場合、碎波状態での統計乱流構造、組織乱流構造が、気相乱流領域、界面領域、液相領域の3領域から成る発達風波乱流場と類似であること、碎波の効果により界面領域の影響がより大きくなることを示した。
4. 自由表面近傍乱流場のモデリングを行い、低フルード数開水路流れ及び吹送効果の卓越した風波乱流場は類似の物理モデルに基づく乱流モデリングが有効であること、一方、スカラー輸送、特に高プラントル数乱流場における浮力効果及び気液界面を通してのガス吸収は、物性値及び界面変形の影響を強く受けるため、個別乱流モデルを必要とすることを明らかにした。

以上要するに、本論文は熱・物質移動を伴う自由表面乱流場の乱流構造や輸送構造を明らかにし、多くの新しい知見を示すとともに、原子炉工学、機械工学、化学工学、河川・海洋工学、環境工学等の広範な学問分野で共通する気液界面乱流場における熱物質移動現象の理解とモデル化に大きく貢献するものであり、その成果は学術上、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14年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。