

氏 名	三 角 隆 太
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2005 号
学位授与の日付	平 成 13 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 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	風波乱流場の気泡による物質輸送に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 小 森 悟 教 授 芹 澤 昭 示 教 授 禰 津 家 久

論 文 内 容 の 要 旨

高速気流により碎波現象が起こる場合の気液界面を通しての物質移動機構を明らかにすることは、大気・海洋間での物質の交換量の正確な評価およびガス吸収装置等の気液接触型の工業装置の最適設計の問題に関連して流体力学および環境工学上重要である。本論文は、気液界面上を高速の乱流状態で流れる気流の持つせん断力によって崩壊した気液界面下に生成された気泡による物質移動機構を室内実験と数値計算の両面から詳細に検討した結果をまとめたものであり、6章からなっている。

序論である第1章では、本研究の目的およびその必要性について述べるとともに、既往研究との関連性について概説している。

第2章では、風波の崩壊により生成される気泡に関する諸特性を評価することを目的とし、海洋のシミュレーション装置である風波乱流水槽を用いて、気液界面下に生成される気泡の数密度、単一気泡に対する粒子レイノルズ数を算出するうえで必要となる気泡の直径、および気泡とその周囲流体間に生じる相対速度の実測を行っている。風波乱流場で観察される気泡径の分布を気泡の数密度で正規化したスペクトルの形状は、水深には依存せず、気泡径が約 $50\mu\text{m}$ でピークをとる形状となること、風波乱流場での気泡のボイド率は0.01%未満と効率的なガス吸収を目的とした工業装置におけるそれと比較して非常に小さいこと、さらに、風波乱流場中を運動する気泡とその周囲の流体間に生じる相対速度はストークス流を仮定した場合の終末速度に比べて小さくなることを明らかにしている。

第3章では、乱流場中での気泡の運動機構を明らかにすることを目的として、振動格子乱流水槽を用いた室内実験を行うことにより、液相の格子乱流場での気泡の運動、特に物質移動係数を評価するうえで重要となる気泡と周囲の流体間での相対速度の評価を行っている。また、液相格子乱流場に気泡の運動方程式を組み込んだ直接数値計算を適用することにより、気泡の運動をラグランジュ的に追跡して乱流場中の気泡に働く流体力を評価するとともに、浮力および抗力に着目して相対速度を決定づける要因について言及している。液相格子乱流場中の気泡と周囲流体間に生じる相対速度のアンサンブル平均値は、乱流強度に関わらず、水平方向に関してはほぼ零となるが、鉛直方向に関しては気泡径が大きくなるとともに増大し、その大きさは気泡の界面をすべり条件としたストークス流を仮定した場合の終末速度と比較して約0.5倍の大きさとなることを明らかにしている。また終末速度との違いを生じる要因を、界面の流動抑制効果と粒子レイノルズ数の増大に起因して発生する圧力抗力を考慮した抗力の評価式を用いることにより定量的に説明している。

第4章では、広い気泡径範囲に対して一律に適用可能な単一気泡に対する物質移動係数の評価式を確立することを目的として、単一球形気泡周りの流動場、濃度場を直接数値計算により解析している。単一気泡に対する物質移動係数は、海洋化学の分野で用いられていたストークス流の仮定に基づく解析による従来の評価では物質移動量を実際より過小評価すること、気泡周りの流れの速度勾配は気泡からの物質移動に対して影響を及ぼさないことを明らかにしている。

第5章では、本研究で行った室内実験、数値計算を通して得られた知見をもとに、碎波状態にある風波気液界面を通して

の物質の輸送に及ぼす気泡の効果を定量的に評価している。風波気液界面を通しての物質の輸送に対する気泡の効果は、碎波が起こっていない風速 12m/s 以下ではほとんどみられず、風波界面の崩壊が激しくなる風速 18m/s でも全体の物質移動量のわずか 7%程度に過ぎないことを明らかにしている。このことは、従来から考えられてきた高風速域での物質移動係数の急激な上昇の主因が気泡の巻き込み現象によるものとする通説を否定している。また、本研究を通して得られた知見は、高風速域で飛躍的に物質移動が促進される要因が、波の崩壊により内部のフレッシュな流体が界面を更新することにより気液界面に存在する極微量の界面活性物質による物質移動の抑制効果がほとんど消滅することにあるとする Komori *et al.* (1999) の説を支持している。

第 6 章では、本研究を通して得られた知見を総括し、本研究の今後の進展と将来の研究課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

高速気流により碎波現象が起こる場合の気液界面を通しての物質移動機構を明らかにすることは、大気・海洋間での物質の交換量の正確な評価およびガス吸収装置等の気液接触型の工業装置の最適設計の問題に関連して流体力学および環境工学上重要である。本論文は、気液界面上を高速の乱流状態で流れる気流の持つせん断力によって崩壊した気液界面下に生成された気泡による物質移動機構を室内実験と数値計算の両面から詳細に検討した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 風波乱流水槽を用いて碎波状態にある風波を再現し、気泡の生成に関する諸特性を測定した結果、風波界面下に巻き込まれる気泡のボイド率は 0.01%未満と非常に小さいこと、物質移動を支配する気泡と周囲流体との間に生じる相対速度はストークス流を仮定した場合に得られる終末速度に比べて約半分になることを明らかにした。
- 2) 液相格子乱流場での気泡の運動機構について振動格子乱流水槽を用いた実験および直接数値計算により検討した結果、界面の流動抑制効果と粒子レイノルズ数の増大に起因して発生する圧力抗力を考慮することにより、気泡と周囲流体との間に生じる相対速度を定量的に評価できることを示した。
- 3) 単一気泡周りの流動場・濃度場に対して直接数値計算法を適用することにより、ストークス流の仮定に基づく従来の解析法では単一気泡に対する物質移動量を過小評価すること、および、気泡周りの流れの速度勾配は気泡界面での物質移動に対して影響を及ぼさないことを明らかにした。
- 4) 以上の結果をもとにして、気泡による物質移動量を定量的に評価した結果、風波気液界面を通しての物質移動に及ぼす気泡の効果は、碎波が起こっていない風速域ではほとんど見られず、碎波が激しくなる風速 18m/s においても全体の物質移動量のわずか 7%程度にすぎないことを明らかにし、高風速域での物質移動の主要な促進要因が気泡の巻き込みとする海洋化学分野での従来の説を見直す必要があることを示した。

以上要するに、本論文は、高速気流により碎波現象が起こる風波乱流場中での気泡による物質輸送現象に関して新たな知見を提示したものであり、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13年1月19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。