

## 学位論文題名

## 砕波乱流中の気液相互作用及び気体輸送の素過程

## 学位論文内容の要旨

沿岸域で発達する波浪の砕波は、連続する砕波ジェットの着水によって流体中に大量の気泡と大規模な三次元渦を生成する。流体中に混入した大量の気泡は個々の気泡からの溶解を通じて大気から海中への気体輸送の役割を担う一方、大規模な三次元渦は底質の巻き上げや浮遊砂等の輸送、拡散に大きく寄与することが指摘されている。これら砕波に伴う気泡と大規模渦による物質の輸送、拡散は沿岸流による広域流動場の物質輸送と共に沿岸域の生態的、物理的環境変化に大きく影響を与えていると考えられる。砕波帯における物質の輸送、拡散を定量化するためには、気液各相の速度や乱れおよびそれらの時空間遷移を明らかにする必要があるが、砕波帯は空隙率が10%以上で混入する気泡と液相が異なる時空間スケールで運動する極めて複雑な気液混相乱流場であり、それらの物理量を精度良く計測した例は少なく十分な情報が得られていない。従来、多くの流体計測で使用されている超音波流速計(ADV)やレーザー流速計(LDV)は液相単相を対象とした点計測法であり、砕波帯に生成される気泡の運動や三次元的渦の時空間遷移を明らかにすることはできない。一方、平面上の瞬時流速分布を計測可能な Particle Image Velocimetry(PIV)や超音波放射軸上の瞬時流速プロファイルを計測可能な Ultrasonic Velocity Profiler(UVP)に代表される新たな流体計測手法は、波浪場の空間的な速度情報を効率よく取得することが可能であり、点計測では困難であった砕波帯における乱れ構造やその遷移等を解明するための有効な計測手法として期待されている。本研究では、UVP および気泡・流体同時画像計測手法を適用した PIV により、未だ不明な点が多い砕波下の気泡運動および三次元的渦の構造やスケール、さらにそれらの時空間遷移について明らかにするとともに、これらの情報をもとに、砕波により海中へ輸送される気体として炭酸ガスの輸送量、拡散過程を明らかにすることを目的としている。

本研究は4つの章で構成されており、各研究の内容および主要な結果を以下に示す。

**(1) 実海域における砕波下の気泡生成および気泡輸送過程の観測**

実海域において砕波帯の海底面に水中ビデオカメラを設置し、砕波ジェット着水による気泡の生成および輸送、拡散過程を撮影した。砕波ジェット着水時に生成された大量の気泡は無秩序に拡散するのではなく、その多くが底面方向へ輸送され、局所的に大量の気泡が集中する気泡塊を形成する。この気泡塊は砕波フロントの進行とともに雲状に広く分布し、砕波フロント直下およびその背後において規則的に配列する組織的構造を形成する。気泡塊に巻き込まれて底面近傍まで連行される気泡の多くは非常に径が小さく、浮上せず非常に長い間対流を続ける。これら比較的深い領域に連行される気泡は、深部に対する気体の供給源として重要な役割を有する可能性があり、(3)、(4)により詳細に検討される。

**(2) UVP による波峰方向流速分布の計測**

二次元造波水路において UVP による波峰方向流速分布の計測を行い、砕波後の三次元乱流構造の時空間変化を特徴化した。遷移領域において、水路横断面上で循環する一対のセル状大規模渦および二対の循環渦が形成

され、この大規模循環渦の生成箇所と比較的強い乱れエネルギー領域が存在することを発見した。計測された波峰方向流速に対する Wavelet 波数スペクトルにより波峰方向に非一様な分布を持つ三次元流れの波数分布を特徴付けた。波高の半分程度のスケールをもつ高エネルギー領域は、碎波初期段階では管状に岸沖方向へ伸張する分布をもち、遷移領域では斜め下方へ伸びる分布となる。これらの分布と碎波直後に発生する交互交代縦渦および斜降渦の分布との類似性は、このスケールの波峰方向流速成分がこれらの渦の波峰方向変動を特徴付けている。

### (3)PIV による碎波帯の気液両相の速度同時計測

光学的波長選択による気泡・流体同時画像計測手法を適用することにより碎波乱流場の気泡と水粒子を分離して撮影し、PIV による速度計測を経由して、気液両相の乱流統計量およびそれらの相互作用の水深・岸沖方向変化について特徴化、定量化を行った。碎波時に生成された大量の混入気泡は碎波後の水位変動に起因する強い水平圧力勾配と碎波に伴う三次元大規模渦内の圧力勾配に敏感に応答し、水粒子の運動軌道に追従せず高速で輸送される。このとき発生する水粒子より卓越した気泡速度は流体側に新たな乱れを誘発する。気泡の運動が誘発する乱れエネルギーは遷移領域のトラフレベルにおいて最大値を示し、碎波によって生成される乱れエネルギーの 10% 程度となる。

### (4) 碎波帯における溶存炭酸ガス濃度の計測

密閉した二次元造波水路内の気相に炭酸ガスを充填し造波することにより、碎波帯で水中に溶解する炭酸ガスの濃度を 2 色の蛍光試薬を用いる Laser Induced Fluorescence(LIF) によって計測した。碎波ジェット着水点近傍では、複雑に変形した気液界面および混入気泡から炭酸ガスが水中に溶解するため、200ppm 以上の高濃度溶存炭酸ガス領域が現れる。混入気泡は三次元的渦によって深部まで輸送され、個々の気泡から炭酸ガスを溶解する。遷移領域では三次元的渦によって輸送される気泡量が多く、深部における炭酸ガスの供給源として大きく寄与するとともに、気泡運動が溶解した炭酸ガスを拡散する乱れの供給源としても作用する。三次元的渦による乱流拡散は、水面近傍の高濃度溶存炭酸ガスを急速に深部へ輸送し、その速度は静水時における分子拡散速度の 20000 倍以上に達する。水深が深い遷移領域では供給された溶存炭酸ガスが容易に拡散するため、比較的長時間、低濃度状態を継続する。一方、水深が浅いボア領域では供給された溶存炭酸ガスが空間的に十分混合されやすく、相対的に速く継続的な濃度上昇を開始する。

以上、(1) から (4) に示した各研究の結果より、本研究は、今まで計測されなかった碎波帯への気泡混入過程と碎波乱流による輸送過程、さらにこれらを通じた碎波帯へのガス輸送過程について系統的に実験を行い、未解明である碎波下の気液混相乱流と物質輸送過程に関する新たな知見を与えるものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 渡 部 靖 憲  
副 査 教 授 山 下 俊 彦  
副 査 教 授 清 水 康 行  
副 査 教 授 泉 典 洋

## 学位論文題名

### 砕波乱流中の気液相互作用及び気体輸送の素過程

沿岸域では波浪の砕波によって、流体中に大量の気泡と大規模な渦が生成される。大量の気泡は大気から海中への気体輸送に対して重要な役割を担う一方、大規模渦は気液両相の輸送、拡散に影響を与えることが指摘されている。このような砕波による海中への気体輸送は、海生生物による生産活動が活発な沿岸域において、その活動に必要な溶存酸素や溶存炭酸ガスの供給源として大きく寄与している。多様かつ複雑な生態系を有する沿岸域の環境変化を予測するためには、砕波による気体の輸送メカニズムを明らかにし、その輸送量を求めることが不可欠といえるが、砕波現象に関する多くのことが未だ不明であり、砕波による気体輸送の基本的メカニズムすら解明されていないのが現状である。

砕波現象の理解を困難にしている主要な原因は、次のとおりである。(1) 流体中の気泡の径や数など、気泡に関する物理量の計測では主に高速ビデオカメラやボイド計が使用されているが、これらの計測法は砕波帯のように気泡が空率率 10 % 以上で混入する領域では計測精度が著しく低下するため適用することができない。(2) 従来、多くの乱流計測で使用されている Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) や Laser Doppler Velocimetry (LDV) は空間上のある点の流速を取得する計測法であり、時間的、空間的に変化する砕波下の渦構造を把握することができない。(3) 砕波帯に混入する大量の気泡がその浮力や抗力によって流況全体の変化に影響を及ぼすことが指摘されているが、そのメカニズムを解明する計測手法が確立されていない。つまり、砕波帯において適用可能な計測ツールがないことが砕波現象の理解を妨げているおもな要因といえる。こうした背景の中、本研究は、新たな流体計測法を適用・開発することにより、これまで十分理解されていなかった砕波帯における気液両相の運動について新たな知見を得るとともに、これらの情報をもとに砕波による海中への気体輸送の素過程を明らかにするものである。

本研究で得られた主要な結果を以下に示す。

①実海域において砕波帯の水中撮影を行い、砕波ジェット着水による気泡の生成および輸送、拡散過程を明らかにした。砕波ジェット着水時に生成された大量の気泡は無秩序に拡散せず、その多くが底面方向へ輸送され、局所的に大量の気泡が集中する気泡塊を形成する。この気泡塊は砕波フロントの進行とともに雲状に広く分布し、砕波フロント直下とその背後において規則的に配列する組織的構造を形成する。

②二次元造波水路において超音波放射軸上の流速分布を計測可能な Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) による波峰方向流速分布の計測を行った結果、碎波後、水路横断面上で循環するセル状循環渦が生成され、その生成箇所に比較的強い乱れエネルギー領域が存在することを発見した。この領域では水面から底面方向への気体輸送が促進される。

③②で取得された波峰方向流速分布に対して Wavelet 波数解析を行い、碎波フロント背後において管状の高強度ウェーブレットスペクトル領域が、水面から斜め下方に生成されることを明らかにした。この形状は斜降渦と極めて類似性が強く、これまで気泡の運動軌道からのみ確認されていた斜降渦のスケールを初めて計測することに成功した。

④光学的波長選択による気泡・流体同時画像計測手法を開発し、碎波乱流場の気泡と水粒子を分離して面的計測を行い乱流中の碎波連行気泡の力学的相互作用を見積もることに成功した。碎波時に生成された大量の混入気泡は碎波後の水位変動に起因する強い水平圧力勾配と碎波に伴う大規模渦内の圧力勾配に敏感に応答し、水粒子の運動軌道に追従せず高速で輸送される。このとき発生する水粒子より卓越した気泡速度は流体側に新たな乱れを誘発し、その乱れは遷移領域のトラフレベルにおいて最大値を示すことを明らかにした。

⑤碎波帯で水中に溶解する炭酸ガスの濃度を 2 色の蛍光試薬を用いる Laser Induced Fluorescence(LIF) によって計測した。碎波ジェット着水点近傍では、複雑に変形した気液界面および混入気泡から炭酸ガスが水中に溶解するため、高濃度溶存炭酸ガス領域が現れる。③に示した斜降渦によって輸送される大量の気泡は、深部における炭酸ガスの供給源として大きく寄与するとともに、溶解した炭酸ガスを拡散する乱れの供給源としても作用することを明らかにした。

これを要するに、著者は、今まで計測し得なかった碎波特有の流れを抽出する計測法と解析法を提案し、碎波乱流に関する新たな知見を得ることに成功するとともに、碎波による海中への気体輸送の素過程を明らかにしており、海岸工学のみならず流体力学、混相流体力学、海洋物理学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。