

学 位 論 文 題 名

3次元動的自由水面形状計測技術の開発

(Dynamic image measurements of three-dimensional free-surface wave shapes)

学位論文内容の要旨

国土全体が海で囲まれる我が国において沿岸域は生活や交通の場として重要な役割を担っており、沿岸域に存在する多数の街や港、道路の安全性を確保することの重要性は古くから認識されてきた。防波堤や護岸などの海岸構造物に作用する波力の算出や波浪による海岸浸食の定量的な評価は海岸工学分野における最重要課題の一つである。砕波時に発達する渦や乱流構造は水面下における流体力を局所的に変動させるため、構造物に作用する波力や砕波による底質の巻き上げを定量的に評価するためには、砕波の発生や砕波後に発達する渦や乱流構造のスケールおよび強度の時空間的な変化を予測する必要がある。

砕波限界や砕波下で発達する流れ場を明らかにするため数多くの研究者がその調査に取り組んできた。波形勾配 (波高波長比) は砕波限界を見積もるために古くから用いられており、経験的または特定条件下で解析的に得られた砕波限界式は対応条件下では実験値に一致する。しかしながら多様な海底地形や構造物形状をもつ環境で波形勾配のみにより統一的な砕波限界を与えることは困難である。また砕波後の水面形状遷移は砕波形態として特徴づけられる。砕波形態を示す目安としては経験的に砕波時の波形勾配や海底勾配と波形勾配の比である Surf Similarity Parameter (SSP) が用いられてきたが、その砕波形態との関係についての物理的な説明は不十分であり、砕波形態を示す定量的な水面形状パラメータは現在まで示されていない。砕波後に生じるジェットの発達度合いやその発達過程から目視により数タイプ程度の砕波形態に分類し、定性的な評価を行ってきたのが現状である。これらの問題を解決するためには砕波前後にわたる水面形状遷移やその砕波下で形成される渦や乱流構造との関係を明らかにすることが必要である。

容量式波高計は半世紀以上も前から波浪実験における水位計測に用いられてきたが、これによる水位の時系列から複雑かつ3次元的な変形を生じる砕波時の水面変形を捉えることは不可能である。砕波水面形状遷移を計測可能な計器が存在しないことが砕波現象を解明する上で一つの障害となっていた。本研究は固体・液体表面双方に適用可能な新たな3次元表面形状計測法を開発し、これにより砕波水面形状遷移を定量化することで砕波現象解明に向けた新たな知見を与えることを目的とする。

本研究では1台のプロジェクターから照射するカラーパターン照明の物体表面における反射光を1台のデジタルカメラで撮影することで物体表面の3次元座標を取得する新たな画像計測法を開発した。カラーパターンを照射するプロジェクター座標系、カラーパターンが物体表面において反射する実座標系、その反射光を撮影するカメラ座標系の幾何学的な関係をピンホールモデルに基づき決定する。この計測法では標準誤差が計測距離の0.1%以下となる高い精度で物体表面の3次元座標を計測可能である。白色微粉末を水中へ混入し、プロジェクター光の水面近傍における散乱光を動画像撮影することで同一アルゴリズムにより動的な水面計測へ適用可能である。このときプロジェクター光の水中への透過深に起因する誤差が生じるが、スネルの法則に基づき補正を行うこと

で固体形状計測と同オーダーの精度で計測可能である。

開発した計測法を海岸工学分野において一般的に行われる波浪実験に適用した。本計測法は複雑な形状のためその波浪に対する変位や変形量の定量的な評価が困難であった消波ブロック構造物の表面形状計測を可能とし、消波ブロックの飛散による変形量やその分布を定量化することができる。これは信頼性設計法における海岸構造物の性能評価に有用である。また平面型造波水槽において模型構造物周辺の平面波浪場の水位計測を行った。本計測法により、従来のように複数の波高計を設置して取得する空間的に離散的な水位時系列からは十分に説明できなかった複雑な重合波浪場の水位分布を詳細に計測することができる。

一様海底勾配を持つ2次元型造波水槽において周期や波高、海底勾配の異なる規則波の碎波水面形状を計測した。本計測法により取得した水面座標から波高計による水位の点計測では取得が不可能であった水面曲率を計算できる。碎波直前の波峰部前面における水面曲率は波の進行とともに増加し、その碎波時の曲率はすべてのケースで Longuet-Higgins (1983) の示した水面の限界形状の曲率と同程度の値を示した。これは碎波現象と水面が限界形状に達することによる動的不安定の関係を示すものであり碎波現象の解明に向けた新たな視点を与えるものである。

碎波後は碎波ジェット着水後に形成されるフィンガージェットなど水面変形が大きくなる箇所では水面曲率が大きくなる。水面曲率の分散の岸沖方向変動は碎波ジェット着水後のスプラッシュやその後のボアの形成など水面形状遷移に伴って変動し、碎波後の局所変形を記述するパラメータとして適切である。また水面曲率の水面にわたる積分値を示すパラメータを用いることで、碎波後の水面変形の複雑さや3次元性を評価できる。

水面の3次元形状は動圧力を介して水面近傍の乱流構造を反映するため、碎波後の水面変動スケールを抽出することは碎波乱流の空間変化を理解する上で重要である。碎波後の水面形状計測結果から水路横断方向の水面変動の大きさおよび間隔を抽出し各ケースの特徴を示した。これは現在まで数タイプ程度に分類するのみであった碎波後の水面遷移の特徴を定量的に示すものであり、碎波形態を示す定量的パラメータを決定する上で不可欠な情報である。

碎波により生じる水面の乱れスケールを定量化するため、計測した水面形状から碎波フロント部における水面変動の長さスケールおよび岸沖方向速度スケールを水位分布から抽出した。碎波ジェット着水後に形成されるフィンガージェットに代表される比較的大規模なジェットとともにこれに先行して変動スケールの異なる小規模ジェットが存在することを明らかにした。大規模ジェットのスケールは水面下の渦が支配的である一方で、先行する小規模ジェットのスケールは噴出するジェット表面における表面張力不安定に起因することを示した。抽出した水面上での乱れスケールから碎波ジェット規模の異なる碎波の水面変化パターンの差異が抽出可能である。

本研究では固体・液体双方の表面形状を計測可能な新たな画像計測法を開発した。この計測法は任意形状の物体を高精度に計測可能であり、海岸工学分野において広く行われている波浪実験における新たなツールとして有用であるほか、自然災害による建設物の損傷の高精度数値化をはじめ多様な工学的応用を可能とするものであり、海岸工学に大きく寄与するものである。さらに本研究では従来までの方法では計測が不可能であった遷移的碎波水面形状パラメータを決定するとともに、碎波現象の発生やその後の渦・乱流構造の発達メカニズムの解明に大きく寄与するものである。

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	泉 典 洋
副 査	教 授	田 中 洋 行

学 位 論 文 題 名

3次元動的自由水面形状計測技術の開発

(Dynamic image measurements of three-dimensional free-surface wave shapes)

沿岸域において波浪は碎波に伴い複雑な3次元変形を生じ、水面下では複雑に発達する乱流構造が形成される。この碎波乱流は底質の巻上げや輸送を通して海浜変形を支配する。碎波波浪の周囲の物理環境への影響を定量的に評価するためには碎波条件や碎波後の水面変形および乱流構造を明らかにすることが不可欠である。

100年以上に亘る研究にも関わらず碎波現象を工学的に取扱う上で多くの問題が残されている。主な問題として(1)碎波の発生メカニズムが未解明であり地形や構造物の影響を受ける多様な環境での統一的碎波限界は示されていない。次に(2)碎波後の波高変化や乱流を含む流れを見積もるため碎波の初期水面形状を定量的パラメータとして碎波後の水面変形や流れ場を特徴づける必要があるが、現状では碎波後の水面変形の特徴から目視により数タイプの碎波形態に分類する定性的な評価を行っている。また(3)碎波下の乱流構造を直接計測可能なツールがなくその発達過程が未解明である。これら問題の解決には時空間的に大きく変動する碎波時の水面形状や流れ場の詳細な調査が必要となる。

本研究は碎波水面形状を計測可能な新たな面的水面形状計測法を開発し、上述の問題を調査、解明するものである。従来唯一の水面計測手段であった波高計による離散点の水位時系列から碎波の3次元かつ遷移的な形状を捉えることは不可能であり、本計測法により初めて取得できる碎波水面形状の時空変化は碎波メカニズムの解明や碎波形態の定量的評価に向けた新たな知見を与えるとともに、動圧力を介し水面直下の流れ場を反映する水面形状遷移の力学機構を解明するための基本物理量を提示する。

開発した計測技術は画像計測により固体・液体双方の3次元表面形状の面的な決定を可能とする。本計測法は固体表面に対し標準誤差が計測距離の0.1%以下の高精度で計測可能であり、また水面計測において生じる誤差を新たに提案する補正方法により固体計測と同オーダーの精度の計測が可能となる。本計測法は多様な形状・スケールの対象に適用可能であり工学的に広く応用が考えられる。

海岸工学分野での応用として、波浪水槽実験に本計測法を適用し、既往の計測技術では評価できなかった構造物周辺の複雑な波浪場や波浪による構造物変形量を面的に計測可能となった。これは波・構造物相互作用の詳細な調査を可能とし、研究、実務両面において有用なツールとなる。

開発した計測法により碎波水面形状遷移の定量化に成功した。本計測法により初めて取得可能と

なった局所形状パラメータの碎波直前の変化を調査し、それぞれ崩れ波および巻き波となる2つの碎波過程を明らかにした。(1) 進行に伴い波峰部水面曲率が増加し水面の限界形状に近づいて不安定が生じる。(2) 波浪の前傾化によるフロント部の水平加速度の増加によりジェットが噴出する。この碎波後の水面変形に関するパラメータスタディにより、水面曲率分散が碎波水面遷移に応じて増減しその局所変形量を適切に記述する特徴づける形状パラメータとなることを明らかにした。また表面ポテンシャルエネルギーの増加率は曲率平均と相関があり、曲率による局所変形の定量化により表面エネルギー遷移が決定可能となった。

波峰方向水位分散と水面長さにより波峰方向水面変動スケールを抽出した。水面下の渦により波峰方向に分裂する2次ジェットの間隔および跳ね上がり高さと、斜面を駆け上がる波の加速度と重力の比を示す Surf Similarity Parameter(SSP) の相関を示し、碎波初期は重力が支配的な特殊なせん断場に応じて水面変形が生じるが、ボア形成後の変動スケールは SSP と相関がなく支配メカニズムが変化することを明らかにした。

碎波後に生じるジェットの速度及び長さスケールを解析し、水面下の渦が支配的で進行とともにスケールが大きく変動するジェットと表面張力に起因しスケール変化が小さい小規模ジェットの2種類のジェットが形成されることを発見した。これはそれぞれ水塊着水後の前方の水の押出しと着水時の接触面に生じる高曲率による噴出の異なる力学機構に起因することを解明した。それぞれのジェットの長さおよび速度スケールの相対関係から水面の支配外力の遷移が決定できる。

これを要するに、本研究は、多様な形状を持つ固体・液体双方の3次元表面形状を動的に計測可能な新たな計測技術を開発し、自由水面形状をパラメータとして近海域における波浪変形に関わる物理現象の解明を可能とするものである。即ち、これは海岸工学分野において広く行われている波浪実験における革新的なツールとなるとともに、国内外で初めて計測可能となった面的波浪分布、3次元碎波水面形状の定量化により、その遷移機構を明らかにするものであり、海岸工学、海洋物理学、流体力学並びに工学応用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。