

種々の波浪条件における流体運動機構に関する研究

学位論文内容の要旨

沿岸域における砂移動の観点から、浅海域における砂質底面の極近傍の波動境界層内の流れは直接砂への外力としてはたらし、流体の運動に応じた砂漣等の凹凸を造る。水面波の時空間的流速変化より、流体の非線形性は岸向きの定常2次流を発生させ、砂を岸方向へと運ぶ。また、砂漣を持つ海底では、剥離渦を伴う複雑な流速場を形成し、底質の浮遊及び輸送に大きく関わる。一方、砕波帯内においては、さらに複雑な乱れの影響が顕著となる。砕波後のジェットの突っ込みは、大規模な水平渦を中心とする組織的乱流構造を形成する。多量の空気を含んだジェットは数度にわたってスブラッシュアップを繰り返し、新たな大規模渦を形成しながら進行する。しかし、砕波帯では砕波時に発生するジェットの突入及びスブラッシュアップに伴う気泡の混入のため流速の測定が困難であるため、この領域の流速場、特に乱流場の評価に関する研究の障害となっていた。この領域では時空間的流速場の変動が重要であるが、砕波後の流速場は一般に再現性がなく、砕波点の移動や生成渦の相違のため厳密な意味での流速の空間分布をとらえることが困難であった。

本研究は、沿岸域に形成される流速場の特性を調べ、海岸における乱れ及び流れが及ぼす問題を数値的及び実験的に評価しそのメカニズムを解明したものである。

第1章では、沿岸域の工学的問題を指摘し過去の研究のレビューをすると共に本研究の目的を説明している。

第2章では、浅海域の海底に形成される砂漣上の流れを数値的に解き、次に示す点を中心に調べられている。

振動流下における砂漣上の流速場の直接数値計算の結果から、底面に砂漣底面をもつ波動場に対する一方向定常流を評価する手法を提案し、既存の解析解との検証を行った。この定常流は砂漣上の剥離によって浮遊した砂を輸送するため漂砂問題において重要と考えられる。また、同時に砂漣底面をもつ波動場全体を数値的に解き、本研究で提案する手法による結果と比較されている。

砂漣上における剥離を伴った流れ場におけるエネルギー散逸特性を調べ、剥離渦及び流速場との関係を明らかにしている。また、このエネルギー散逸の結果から実海域及び実験水槽における波の波高減衰を評価する手法を提案し考察した。水理実験においてはFroudeの相似則が広く適用されているが、この相似則はエネルギー損失のある系においては適用できないことは良く知られている。Froudeの相似則に従う波動水槽内におけるこのエネルギー散逸の効果を定量的に明らかにしている。

さらに、砂漣上の流速場を平均流と乱れ成分に分解しその特性を調べると共に工学

において広く用いられている渦粘性モデルの検証が為されている。また、実海域に対応する高 Reynolds 数において生成される渦の規模とその時空間特性に関して詳細に調べられている。

第3章では碎波帯内の瞬時流速場の時空間分布を取り扱っている。

前述したように碎波帯内では実験的な問題からその流速場の計測は困難であった。しかし、ビデオ画像を使った動画像処理によってこの領域の流速場を計測することに成功した。碎波帯内ではフロントのジェットのような速い速度をもつ運動や底面付近の遅い流速をもつ運動まで広いレンジの運動スケールを持つ。本研究において適用した動画像処理によって空間的に連続なこのような瞬時流速場を解析することが可能となった。この結果より空間的な内部波動場の減衰過程及び碎波形態の違いによる流速場の違いを調べ、さらにこの方法の現段階における適用限界について考察している。

碎波帯内において特徴的な流体運動はジェットの突っ込みによる大規模な乱れだけでなく波の質量輸送に起因する戻り流れもこの領域の流速場に顕著な影響を与える。この戻り流れは砂の輸送にも密接に関係するため無視できない。

第4章では、造波水槽底面に設置された環流パイプを調節し wave setup 及び戻り流れを制御することによって次に示す点を中心にこの流れの影響を調べている。

この流れの碎波指標への影響及び wave setdown と setup の違いと流体運動のメカニズムを考察している。戻り流れは碎波指標への明確な寄与を与えないが内部流速の分布に大きな影響を与えることを明らかにしている。一方、碎波帯内では大規模水平渦の生成と共に3次元斜行渦が発生するため、この領域は3次元流速場を構成している。碎波帯内の3次元時間平均流、周期的変動成分、乱れ成分の特性を調べることにより岸沖方向の3次元流速特性を明らかにすると共に一般に2次元と考えられる戻り流れ等の時間平均流が3次元流速場に与えるメカニズムを解明している。さらに、造波水槽底面に砂を敷き、その移動を計測することによって時間平均流が与える3次元流速の特性を検証し、砂の浸食・堆積が戻り流れによって加速され3次元的地形になりやすいことを指摘している。

これらの実験結果は、実海域において離岸流の有無に対応すると考えられ、工学的に有益な研究成果を得た。

碎波後の大規模な流体運動及び複雑な自由水面をとらえるためには精度良く計算する必要があり、非定常で高歪みの渦が卓越するため乱流モデルは妥当な結果を示さない可能性があるため、直接数値計算をする必要がある。第5章では、Plunging Breakerの碎波帯内の流速場をダイレクトシミュレーションにより計算し、詳細にその特性を調べている。特に、ジェットの突っ込みによって発生する大規模渦の輸送と拡散及び渦間の干渉プロセスが詳細に調べられている。さらに、時間平均流速場を調べその空間分布の特性と従来広く適用されてきた碎波の力学的モデルと比較し検証し、Plunging Breakerにおいては従来の力学モデルでは評価できないことを指摘している。これらの結果は碎波の物理モデルを構築する上で重要な基礎データとなると考えられる。

第6章は、粘性の効果が無視できるポテンシャル波動場における非線形流速場に関して次に示す点を中心にまとめている。

グリーンの公式による境界要素法を使った非線形数値波動水槽の計算法とその海岸構造物への適用例を示している。また、水位変動のデータを用いて内部流速を評価す

る手法を提案し波動理論、実験と比較検証を行い、その妥当性を確認している。

これらの一連の研究により海岸工学において問題となる種々の波浪条件下における流速場を総合的に評価し明らかにすることを第一の目的としている。特に時間平均流と乱れの関係に着目し非定常場におけるそれらの数値解析法及び実験手法を提案し、現在まで計測不可能であった領域における時空間的流速場及び他の流体運動に関わる物理量を定量的に把握することが可能となった。以上、本研究は、浅海域における波動内部の流体運動機構を考察し明らかにしているものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 山 下 俊 彦

学位論文題名

種々の波浪条件における流体運動機構に関する研究

沿岸域における砂移動の観点から、浅海域における砂質底面の極近傍の波動境界層内の流れは直接砂への外力としてはたらし、流体の運動に応じた砂漣等の凹凸を造る。水面波の時空間的流速変化より、流体の非線形性は岸向きの定常2次流を発生させ、砂を岸方向へと運ぶ。また、砂漣を持つ海底では、剥離渦を伴う複雑な流速場を形成し、底質の浮遊及び輸送に大きく関わる。一方、碎波帯内においては、さらに複雑な乱れの影響が顕著となる。碎波後のジェットの突っ込みは、大規模な水平渦を中心とする組織的乱流構造を形成する。多量の空気を含んだジェットは数度にわたってスブラッシュアップを繰り返し、新たな大規模渦を形成しながら進行する。しかし、ジェットの突入及びスブラッシュアップに伴う気泡の混入のため流速の測定が困難であるため、この領域の流速場、特に乱流場の評価に関する研究の障害となっていた。この領域では時空間的流速場の変動が重要であるが、碎波後の流速場は一般に再現性がなく、碎波点の移動や生成渦の相違のため厳密な意味での流速の空間分布をとらえることが困難であった。

本研究は、沿岸域に形成される流速場の特性を調べ、海岸における乱れ及び流れが及ぼす問題を数値的及び実験的に評価しそのメカニズムを解明したものである。

第1章では、沿岸域の工学的問題を指摘し過去の研究のレビューをするとともに本研究の目的を説明している。

第2章では、浅海域の海底に形成される砂漣上の流れを数値的に解き、次に示す点を明らかにした。

振動流下における砂漣上の流速場の直接数値計算の結果から、底面に砂漣底面をもつ波動場に対する一方向定常流を評価する手法を提案し、既存の解析解との検証を行い、その妥当性を検証した。この定常流は砂漣上の剥離によって浮遊した砂を輸送するため漂砂問題に確実に役立つことが予想される。また、同時に砂漣底面をもつ波動場全体を数値的に解き、本研究で提案する手法による結果と一致することを示した。

また、砂漣上における剥離を伴った流れ場におけるエネルギー散逸特性を調べ、剥離渦及び流速場との関係を明らかにしている。また、このエネルギー散逸の結果から実海域及び実験水槽における波の波高減衰を評価する手法を提案した。水理実験にお

いては Froude の相似則が広く適用されているが、Froude の相似則に従う波動水槽内におけるこのエネルギー散逸の効果を定量的に明らかにしている。

さらに、砂漣上の流速場を平均流と乱れ成分に分解しその特性を調べるとともに工学において広く用いられている渦粘性モデルの検証を行うとともに、実海域に対応する高 Reynolds 数において生成される渦の規模とその時空間特性を初めて明らかにした。

第3章では砕波帯内の瞬時流速場の時空間分布を取り扱っている。

前述したように砕波帯内では実験的な問題からその流速場の計測は困難であったが、ビデオ画像を使った動画像処理によってこの領域の流速場を計測することに成功した。砕波帯内ではフロントのジェットの様な速い速度をもつ運動や底面付近の遅い流速をもつ運動まで広いレンジの運動スケールを持つが、本研究において適用した動画像処理によって空間的に連続なこのような瞬時流速場を解析することを可能にした。この結果より空間的な内部波動場の減衰過程及び砕波形態の違いによる流速場の違いを明らかにするとともに、この方法の適用限界を明らかにした。

第4章では、造波水槽底面下に設置された環流パイプを調節し wave setup 及び戻り流れを制御することにより、流れの砕波指標への影響及び wave setdown と setup の違いと流体運動のメカニズムを明らかにするとともに、砕波帯内の3次元的时间平均流、周期的変動成分、乱れ成分の特性を実験的に調べることににより岸沖方向の3次元流速特性を明らかにするとともに、一般に2次元的と考えられる戻り流れ等の時間平均流が3次元流速場に与えるメカニズムを解明した。さらに、造波水槽底面に砂を敷き、その移動を計測することによって時間平均流が与える3次元の流速の特性を検証し、砂の浸食・堆積が戻り流れによって加速され3次元的地形になりやすいことを指摘している。

砕波後の大規模な流体運動及び複雑な自由水面をとらえるためには精度良く計算する必要があり、非定常で高歪みの渦が卓越するため乱流モデルは妥当な結果を示さない可能性があるため、直接数値計算をする必要がある。第5章では、Plunging Breaker の砕波帯内の流速場をダイレクトシミュレーションにより計算し、詳細にその特性を調べている。特に、ジェットの突っ込みによって発生する大規模渦の輸送と拡散及び渦間の干渉プロセスが詳細に調べられている。さらに、時間平均流速場を調べその空間分布の特性と従来広く適用されてきた砕波の力学的モデルと比較し検証し、Plunging Breaker においては従来の力学モデルでは評価できないことを指摘した。これらの結果は砕波の物理モデルを構築する上で重要な基礎データとなると考えられる。

第6章は、粘性の効果が無視できるポテンシャル波動場における非線形流速場に関して、グリーンの公式による境界要素法を使った非線形数値波動水槽の計算法とその海岸構造物への適用例を示している。また、水位変動のデータを用いて内部流速を評価する手法を提案し波動理論、実験と比較検証を行い、その妥当性を確認している。

これを要するに、著者は海岸工学において問題となる種々の波浪条件下における流速場を総合的に評価し、明らかにすることを目的とし、特に時間平均流と乱れの関係に着目し非定常場におけるそれらの数値解析法及び実験手法を提案するとともに、現在まで計測不可能であった領域における時空間的流速場及び他の流体運動に関わる物理量を定量的に把握することが可能としたもので、海岸工学及び沿岸海洋工学の進展に貢献するところ大きなものがある。

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。