

面的波浪水面形状計測法の開発と碎波への適用

Image Measurement of Free-surface Shapes and its Application to Breaking Waves

三戸部佑太¹・大島香織²・渡部靖憲³

Yuta MITOBE, Kaori OSHIMA and Yasunori WATANABE

The novel imaging technique for measuring planar free-surface shapes using a PC projector and digital camera is examined through model tests of planar wave field with coastal structures. The measured results reasonably represent local reflected and diffraction waves behind a breakwater and near a port mouth, which are consistent with computed ones. This technique is also applicable to the measurement of complex surface shapes of breaking waves. Typical finger-shaped jets formed after plunging overturning jets and local depression stretched behind a breaking-wave front are able to be obtained using the current technique.

1. はじめに

水面波の基本的特徴を知るために不可欠な物理量である水面変位は、この半世紀以上現在でも変わらず容量式波高計など点計測で行われている。しかしながら、通常多数の波高計を配置して水位変動を計測する平面水槽実験での構造物周辺の複雑な重合波浪場は、空間的に離散的な時系列群からでは説明が困難な場合がある。また、波浪数値計算技術が進歩し、時々刻々の面的な水位分布が計算可能となっている一方、検証のために比較されるべき実験において同一位相の面的水位変動を計測できない現状である。

特に、3次元的水面変動が顕著となる碎波においては、混入空気により従来の波高計の適用は本来適当ではなく、その水面形を計測する手段すら存在しない。碎波水面形状の定量化ができないために、碎波形態や波形遷移など目視による主観的状况説明をせざるを得ず、定義が不明確かつ抽象的なものとなり現象解明の障害となっている。

本研究は、渡部・三戸部（2009）が開発したPCプロジェクタとデジタルビデオカメラから構成する画像計測システムを回折波を含む重合波浪場の平面水槽実験及び碎波実験へ適用し、その有効性を検証すると同時に、特に国内外に例のない碎波水面形状計測結果からその組織的な局所変形について議論を行うものである。

2. 計測アルゴリズム

本研究で適用する形状計測法は、物体及び自由水面等光が反射する表面をもつ任意の物体あるいは液体に適用可能である（渡部・三戸部，2009）。次に簡単のため物

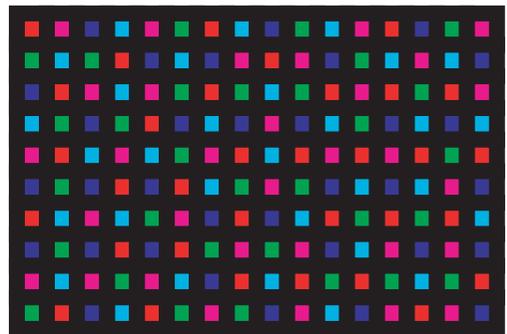


図-1 投影するカラーパターン（赤、緑、青、マゼンタ、シヤンの5色で色分けされる）

体表面形状計測を例に概略を説明する。

本計測法では、既知である投影カラーブロックをPCプロジェクターにより物体に照射し、物体表面で反射するカラー座標を1台のデジタルカメラによって撮影する。なお、このカラーブロックは隣接する色が全て異なるように配置され、全てのブロックの座標がその配置から決定できる様に作成してある（図-1参照）。図-2に示すように、カメラ及びプロジェクター両者についてピンホールモデルを適用する。カラーブロックを投影するプロジェクター座標、個々のブロックが照射された物体の実座標、そしてそのブロックパターンを撮影するカメラ座標の3つの座標系をピンホールモデルによる幾何学的関係を基に決定する。非線形方程式形となるこの関係は、予め実座標が既知のグリッドボードに対するキャリブレーション撮影から得られた対応する3つの座標に対して最少二乗法により決定される。

本計測法による物体計測の応用例を次に示す。図-3は、北海道古平漁港に係留された5トン級漁船に本計測法を適用し、撮影した原画像（左）と各カラーブロック中心に位置する漁船表面の実座標をプロットしたものであ

1 学生会員 北海道大学大学院工学院
2 正会員 博(工) 五洋建設(株)
3 正会員 博(工) 北海道大学准教授 大学院工学研究院

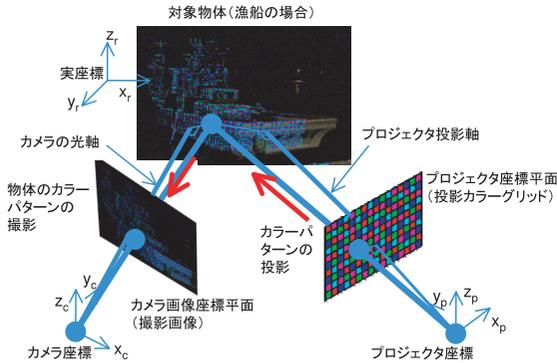


図-2 ピンホールモデルと座標系

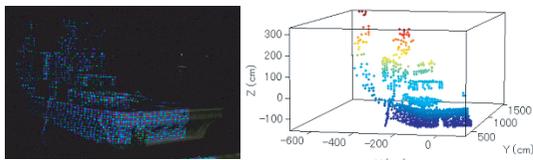


図-3 5トン級漁船を計測対象とした場合の撮影原画像(左)と計測された漁船表面座標(右)

る。手前に位置する船尾からキャビン、係留ロープに至るまでカラーブロックが抽出された全ての漁船形状座標が計測されているのがわかる。この計測技術を使いビデオカメラにより動画を撮影することで、従来一般にノイズが大きい加速度計などを複数個船内に配置してその時系列から見積もるしかなかった船体動揺を、船体の時々刻々の形状を非接触で高精度な計測を行うことが可能となり、観測作業を軽減し漁業者の観測協力の負担も軽減できる。なお、計測精度は実験室スケール(計測距離70cm)の計測では誤差の最頻値が0.09mm程度であり(渡部・三戸部, 2009), 大スケールの対象物体に対しても最大誤差が計測距離の0.1%以下となる実用上十分な高い精度で計測可能である事が確認されている。また計測の解像度はカラーブロック濃度および計測距離により任意に設定可能である。

3. 実験方法

本計測法を平面波浪実験, 2次元水槽中の砕波実験に適用し, その信頼性, 実用性を調査する。平面波浪実験は, 延長150cm, 幅90cmの亚克力製小型平面造波水槽に透明亚克力製直立堤体およびモデル港湾をそれぞれ設置し(縮尺1/100を想定している), その周辺に発生する回折波と入射波, 反射波の重合波浪場の時々刻々の水面分布を計測した(図-5参照)。水槽の1辺に設置した造波板により発生させた周期(T)0.5sec, 入射波高(H)0.4cmの規則波に対し計測を行った。模型縮尺が非常に

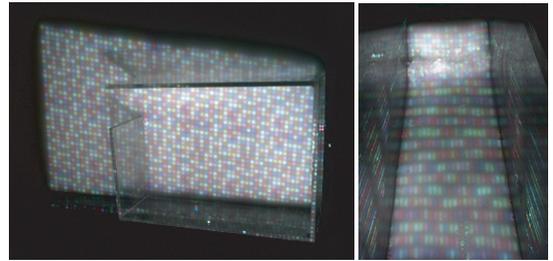


図-4 カラーブロックを投影した, 水に混入した石灰粉からの散乱光を計測原画像とする。モデル港湾周辺(左)と砕波(右)の原画像

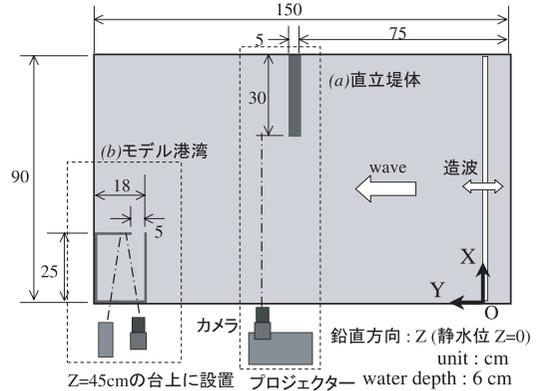


図-5 平面波浪場計測に対する実験装置の構成 (a) 直立堤体設置時および (b) モデル港湾設置時の計測位置

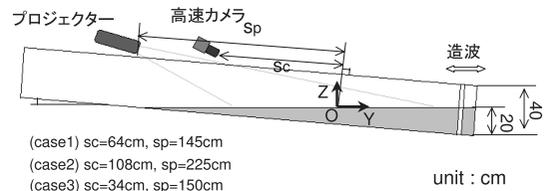


図-6 砕波計測に対する実験装置の構成。ケースごとにカメラおよびプロジェクター設置位置を調整して計測を行った。

小さく波浪スケールが小さいため, 表面張力の影響を軽減するためアルコール系界面活性剤を混入した。水槽斜め上方に設置したPCプロジェクター(解像度は1,024×768pixels, 輝度は3,000ルーメン)から投影されたカラーブロック(48×60=2,880個)は, 白色微粒子(石灰粉)を混合した水槽内の水表面近傍で微粒子からの散乱光として高速デジタルカメラ(解像度1,280×1,024pixels, シャッタースピード1/60sec, 60fps)で撮影される(図-4)。計測結果は, Madsenら(1991)の修正ブシネスク方程式(補正係数B=1/21)による対応する条件下の水位分布と比較した。砕波実験では, 延長8m, 幅25cm, 高さ60cmの亚克力製規則波造波水槽に斜め上方に同一のプロジェクター及び高速カメラを設置し, 同様に白濁させた水面波の砕波前後の水面形をシャッタースピード1/90, フレームレート90fpsで計測した。表-1に計測した3つの波

表-1 砕波計測の波浪条件

case	砕波波高 (cm)	砕波水深 (cm)	周期 (s)	海底勾配 (cm)
1	11.0	11.8	2.0	1/20
2	8.0	11.8	1.0	1/20
3	13.8	14.8	1.43	1/17

浪条件を示す。

水中に混入した微粒子からの散乱反射は厳密には水面位置からの反射だけではなく、混入微粒子の濃度に依存したプロジェクター光の透過深(最大光度となる位置から水面までの距離)と同等の誤差が発生する(渡部・三戸部, 2009)ため、補正する必要がある。光の透過深を L とし、プロジェクター光の水面への入射角 θ_A 、屈折角 θ_B とすると、スネル則と簡単な幾何学的関係を用いて入射光軸 (s) と直交する軸 (n) 方向への補正値は次式で表わされる。

$$\epsilon_s = 2L \sin\theta_B \cos\theta_A \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_n = 2L \sin\theta_B \sin\theta_A \dots\dots\dots (2)$$

ここで、空気と水の屈折率 $\sin\theta_A/\sin\theta_B = n = 1.33$ である。つまり、予め微粒子混入濃度に対する透過深 L を計測しておけば上式で容易に補正できる。この補正を適用し、約20%の水位変動計測の精度が向上したことを確認している。なお本実験では $L = 5.3\text{mm}$ であった。

4. 結果

(1) 平面波浪場水面形計測

図-7は、直立防波堤堤頭部周辺の平面波浪水位分布についてブシネスクモデルによる計算結果と計測結果を比較したものである。なお、設置したアクリル製構造物からの光の反射、屈折の影響によるスパイクノイズが確認されたため、メディアンフィルターで除去している。計算結果が表す様な主要な波浪場の特徴である堤体前面において延長方向の波高変動や堤体背後の回折波の伝達を適切に記述し、時々刻々の平面水位分布が矛盾なく計測されているのがわかる。防波堤背後の2点に対する計算値及び計測値の時系列は、最大入射波高の1割程の差異があるものの、同一の時間変動の特徴をもつ(図-8参照)。この差異は分散性をもつ波浪に対するブシネスクモデルの問題か計測誤差かはこの比較だけでは決定できないものの、全体的な特徴に矛盾はない。

図-9は、矩形モデル港湾近傍の水位分布の変化について同様な比較をしたものである。港内の固有振動や港口近傍の水位変化等局所的な水位分布の変化を計算及び計測結果が同一の特徴を表わしている。構造物を多く含む

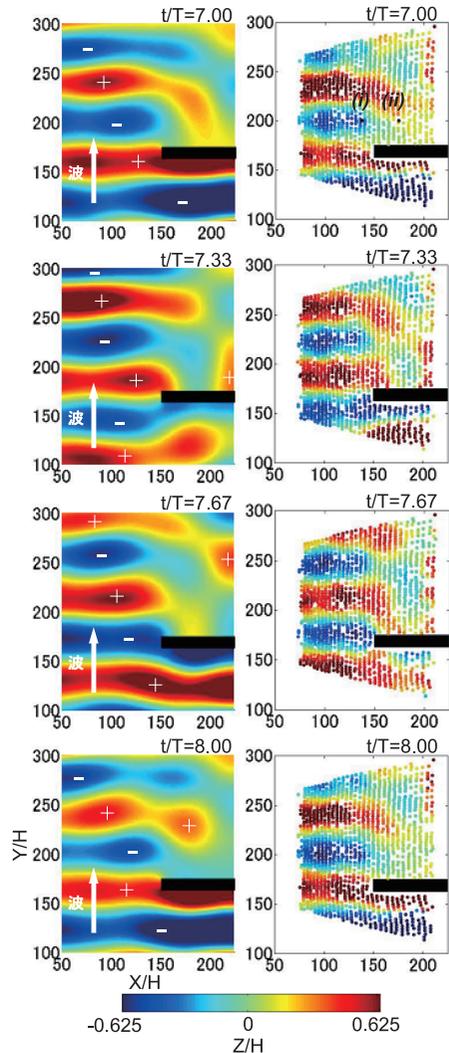


図-7 直立堤体周辺の水位分布の平面波浪計算結果(左)および計測結果(右)の比較(正負の符号を図中に示してある)

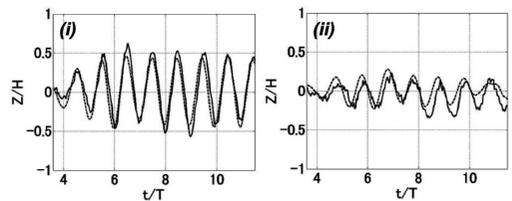


図-8 堤体後方の水位の時系列の比較.それぞれ図-7中(i), (ii)の水位を示す. 実線:計測結果, 破線:計算結果

波浪場においては、構造物によるカラーブロックの投影の遮断や反射、そして本実験の模型の様な透明壁体をもつものはカラーブロックの壁体中の透過屈折の影響が大きくなり、部分的に計測不能となる領域が増加すること

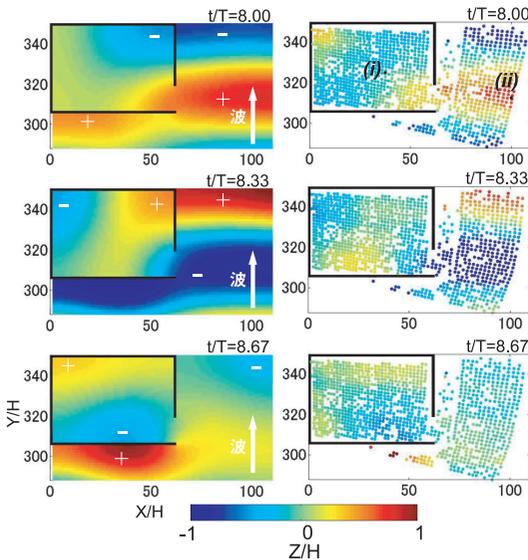


図-9 港湾部周辺での水位分布の平面波浪計算結果(左)と計測結果(右)の比較(正負の符号を图中に示してある)

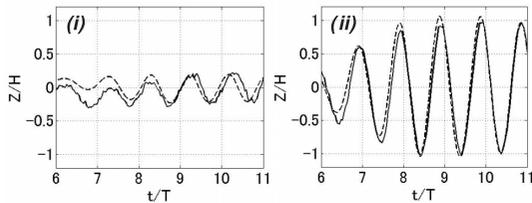


図-10 港湾内外における水位の時系列の比較.それぞれ図-9中(i), (ii)の水位を示す. 実線:計測結果, 破線:計算結果

が判明した. しかしながら, 大部分の領域においては矛盾のない水面変化を計測できており(図-10参照), 本計測法の平面実験への適応性と有効性が示されたものと考ええる. なお, 従来の波高計による定量的な比較のもとに詳細な精度検証を今後行う必要がある.

(2) 碎波水面形計測

複雑な水面変形を伴う碎波の水面形に対しても本計測法により座標化可能であることが明らかになった. なお, 投影カラーブロックの水面上の間隔は約7mmであり, それ以下のスケールの水面変動及び飛沫等は解像しない.

図-11は, 巻き波碎波(case1)の碎波後の水面形の時間変化を計測した結果である. ここで, 構造物による光の障害がない碎波のケースでは欠測点のない結果が得られたので, 計測した水面座標間をポリゴンで表現している. 碎波ジェットの巻き込みから着水に至るまでの断面2次元的な水面形だけでなく, 碎波面背後の波の進行方向に伸長する筋状の水位低下部(いわゆるscar)や着水後に発達するフィンガー状ジェットの形成を確認することができる. この着水後に生成されるフィンガー

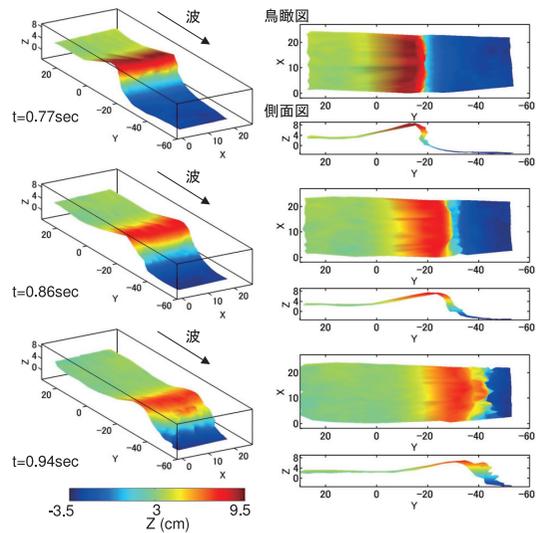


図-11 巻き波碎波(case1)の水面形計測結果

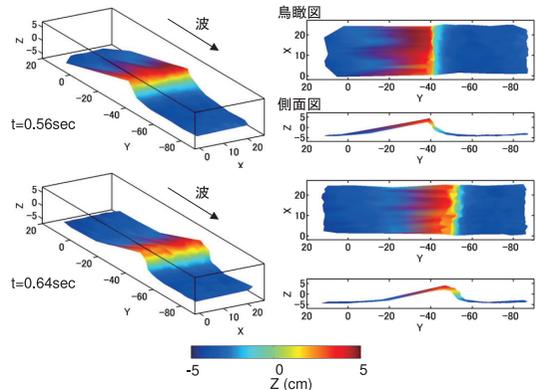


図-12 崩れ波碎波(case2)の水面形計測結果

トは, これまで定量的に計測する手法がなかったため, 先行して数値計算によって再現されその特徴が説明されてきた(猿渡・渡部, 2009). 計測されたフィンガージェットの間隔は, 約5cmであり, 対応する波浪条件の碎波に対して再現された数値計算結果と同一である.

崩れ波碎波(case2)では, 碎波初期のフロント部は横断方向に様な水面形状であるが, フロントのローラーが波を先行して広がる位相以降2cm以下の間隔で小規模なフィンガーが形成される(図-12参照). また, case1と同様に小規模ながら碎波面背後にscarの伸長が確認できる. なお, このscarの形成は目視でも確認している.

図-13は, 図-11と図-12のそれぞれの位相に対応する碎波後の水面形を側方から高速デジタルカメラで撮影したものである. 巻き波のジェットの形成から着水後に形成される2次ジェットの飛び出し, 崩れ波において形成さ

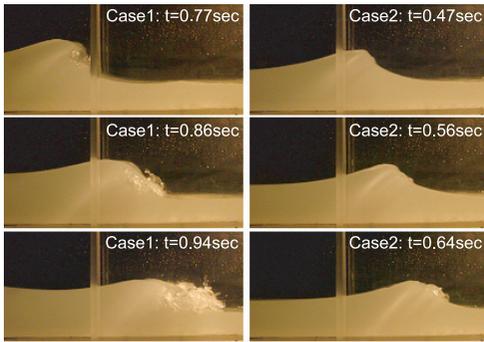


図-13 case1および2に対応する砕波の測方からの撮影画像

れるローラーが前面へ崩れる様子は、計測結果と酷似しており、妥当な計測結果が得られたことを表わしている。

図-14は、さらに大規模な巻き波砕波 (case3) の着水後のジェットの発達を計測したものである。着水直後は、波峰方向にはほぼ一様な間隔で小規模なフィンガージェットが形成されるが、その後これらジェットの一部が鉛直方向に跳ね上がり合体すると同時に波峰方向に非一様な複雑なフィンガ形状へと発達する。この様な極めて強い乱れを伴う砕波に対する水面形の組織的形狀の遷移については殆ど未解明であり、さらに詳細な計測を行い現象解明を目指していく。

5. 結論

3次元自由水面形状を座標化する新たな計測法を開発し、構造物を含む平面波浪場、砕波の水面形計測に適用した。

平面波浪場の直立堤堤頭部周辺に対する計測結果は、主要な波浪場の特徴である堤体前面において延長方向の波高変動や堤体背後の回折波の伝達を適切に記述していた。モデル港湾内外の波浪についても、同様に港内の固有振動や港外の複雑な波浪変形の水面分布が矛盾なく計測可能となる。即ち、本計測法は従来の波高計による点計測では不可能な構造物周辺の時々刻々の水位分布の直接計測を可能とし、平面波動場の計算モデルの検証だけでなく、構造物の配置や地形による局所的波浪集中箇所の特特定構造物自体の性能評価を即座に行うことを可能とするため、海岸工学における新たなイノベーションの基礎ツールとなり得るものと考えられる。

崩れ波砕波はもとより、連続的にジェットの着水を繰り返す巻き波砕波の複雑な3次元の水面形状を矛盾なく計測可能であることが明らかになった。ほぼ断面2次元的な巻き波ジェットが着水すると同時に横断方向に形状が変化するいわゆるフィンガージェットが放出される。

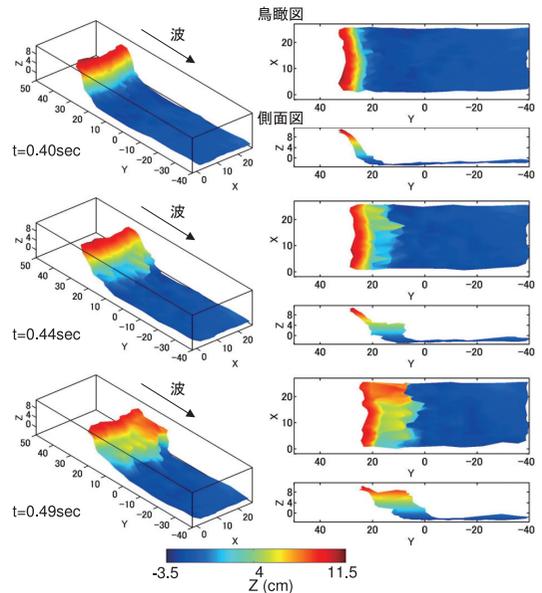


図-14 巻き波砕波 (case3) の水面形計測結果

計測されたフィンガージェットの間隔は、同等の波浪の砕波に対して先行して再現されてきた数値計算結果と同一である。崩れ波砕波では、砕波初期は横断方向に一様な水面形状が卓越するが、フロントが波を先行して広がる位相以降2cm以下の間隔で小規模なフィンガが形成される。

本計測法は、時間と共に急変する複雑な砕波水面形状を計測可能な現状唯一の方法であり、さらにグリッド解像度を高く設定することで複雑な砕波下の流体運動の解明に貢献するものと考えられる。

謝辞: この研究の一部は、国土交通省建設技術開発助成制度からのサポートにより行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 猿渡亜由未・渡部靖憲 (2009) : 砕波ジェットの局所水面変形機構と飛沫への分裂確率, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 65(1), pp. 16-20.
- 渡部靖憲・三戸部佑太 (2009) : 固体・液体表面の3次元形状計測法の開発, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 65(1), pp. 1466-1470.
- Madsen, P.A., R. Murray and O.R. Sorensen (1991) : A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics, Part I, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., 15, pp. 371-388.