

ステレオ画像合成法による碎波水面形の三次元計測

Three-dimensional measurements of surface deformation on breaking waves using a stereoscopic method

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 大塚淳一 (Junichi Otsuka)
北海道大学大学院工学研究科助手 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

碎波は碎波クレストから前方水面へのジェット着水に伴う急激な運動量の供給によって三次元的に大きく変動する極めて複雑な水面形を形成する。碎波の進行に伴う連続的な碎波ジェットの着水過程において水面形はその変動スケールを時空間に大きく変化させる。一方、水面直下で発達する渦は scar と呼ばれる周囲の水面より隆起する水面形を渦近傍の局所的領域に形成することが知られている (Brocchini & Peregrine 2001)。碎波は水平ローラー渦および斜降渦を含む大規模三次元渦構造を組織することから (Nadaoka ら 1989)、これらの渦が流体内部から水面形の変動に大きく寄与していると考えられる。また、Watanabe ら (2005) は流体単相流を仮定した数値計算結果より、碎波クレスト背後に斜降渦と同一配列のリブ状水面形が現れることを説明している。

碎波による水面形遷移を特徴化することは流体内の物理変化を見積もる上で極めて重要であると認識されているが、従来行われてきた容量式波高計による点計測やビデオカメラによる断面二次元計測では非再現的な渦の局所作用を含む極めて複雑な三次元流動場の水面形を計測することはできない。

本研究では、碎波による水面形遷移の高精度計測手法を開発することを目的とし、視軸がそれぞれ異なる 3 台の CCD カメラを使用して碎波水面上に一様に散布された小径浮体粒子を撮影し、取得画像にステレオ画像合成法を適用することにより碎波水面形の三次元計測を行った。

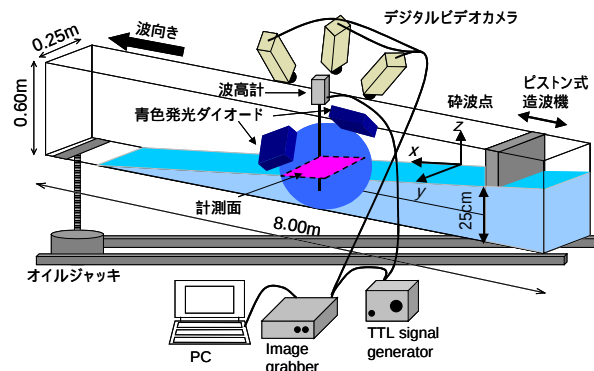
2. 実験手法

2.1 実験装置と実験条件

実験は延長 8.00m、幅 0.25m、高さ 0.60m の可変勾配型二次元造波水路で行われた (図 - 1 参照)。本実験では水平勾配における非碎波進行波と水路勾配 1/20 における崩れ巻き波碎波の水面形計測を実施した。表 - 1 に各波浪条件を示す。なお、崩れ巻き波碎波の波高と水深は碎波点における値である。座標系は碎波点の静水位を原点として波向きに x 軸、鉛直方向に z 軸、水路側壁を原点として波峰方向に y 軸を定義した。崩れ巻き波碎波の計測は碎波ジェット着水直後 ($x = 40\text{cm}$)、遷移領域 ($x = 70\text{cm}$) およびボア領域 ($x = 150\text{cm}$) の 3 領域で行われ、進行波の計測は造波板前面から 160cm の地点で行われた。本実験では水面形計測用トレーサー粒子として、蛍光着色された球形浮体粒子 (直径 2.0mm、比重 0.025) を採用し、水路内に一様に散布した。これらの蛍光浮体粒子を水路両側面から計測領域に照射された青色発光ダイオード光 (波長 520nm) により励起し、その励起光を計測領

表-1 実験条件

	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	水路勾配 -
進行波	5.0	1.43	16.8	-
碎波	13.6	1.43	17.5	1:20



域上方に視軸がそれぞれ異なるように設置した 3 台の CCD カメラ (frame rate 1/29.5s) により撮影した。なお、各カメラのレンズ前面に励起光波長 (約 600nm) 以上の光のみを透過する光学フィルターを設置し、水面および碎波時に生成される飛沫からの青色ダイオード反射光を含まずに蛍光浮体粒子の励起光のみを撮影した。各粒子の位置は、メディアンフィルタおよびガウシアンフィルタによって取得画像からノイズ除去が行われた後、奥村ら (2001) が用いたステレオ画像合成法をベースに各粒子の画像座標を実座標系へ変換することにより決定した。

また、本実験では計測領域中心に容量式波高計を設置し、この波高計からの信号のゼロアップクロスと同時に出力されるトリガー信号により 3 台の CCD カメラを同時に起動し、水位変動の記録と同一時刻の画像を記録した。

2.2 幻影粒子像の除去方法

空間変動が比較的小さな平面上に存在する粒子位置をステレオ画像合成法により特定する場合、通常 2 台の CCD カメラが使用される。しかし、碎波帯のような極めて空間変動の激しい水面上の粒子に対してステレオ画像合成法を適用する場合、各カメラの視軸上に複数の粒子像が現れるため実座標系への変換を一意に行うことができない。そこで本実験では 2 台のカメラとは視軸が異なるもう一台のカメラを用いることにより各カメラの視軸上に現れる幻影を除去し、画像座標から一意に実座標系へ変換することを可能とした。図 - 2 に本実験で採用した幻影除去システムの概要を示す。

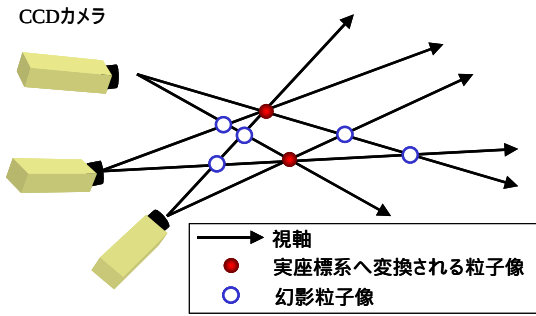


図-2 幻影粒子像除去システム

2.3 ステレオ画像合成法

各粒子の画像座標 (ξ, ζ) から実座標 (x, y, z) への変換は式(1)から式(3)に示す三次代数方程式により行われた。ここで、 i, j はカメラ番号を示している ($i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, i \neq j$)。また、各係数 a, b, c はキャリブレーションにより得られる値である。

キャリブレーションでは1辺が1cmの正方格子点が記されたアクリルボード (20cm×16cm) を計測領域に水平に設置し、このボードを水平を保ったまま鉛直方向に1cmずつ移動しながら撮影することにより1cm格子の直交実座標系に対応する画像座標が得られる。各格子点の画像座標と実座標を式(1)から式(3)に代入し、最小二乗法によって各係数は決定される。なお、本実験で決定された各係数を用いて直交実座標系に対応する画像座標を実座標系に変換した結果、最大誤差は0.67mmであることが確認された。

$$x = a_1 \xi_i \zeta_j + a_2 \xi_i^2 \zeta_j + a_3 \xi_i^2 \zeta_j + a_4 \xi_i^2 \zeta_i + a_5 \xi_i^2 \zeta_j + a_6 \xi_j^2 \zeta_i + a_7 \xi_j^2 \zeta_i + a_8 \xi_i^3 + a_9 \xi_i^3 + a_{10} \xi_j^3 + a_{11} \xi_i \zeta_i (1) \\ + a_{12} \xi_i \zeta_j + a_{13} \xi_i \zeta_j + a_{14} \xi_i^2 + a_{15} \xi_i^2 + a_{16} \xi_j^2 + a_{17} \xi_i \\ + a_{18} \xi_i + a_{19} \xi_j + a_{20}$$

$$y = b_1 \xi_i \zeta_j + b_2 \xi_i^2 \zeta_j + b_3 \xi_i^2 \zeta_j + b_4 \xi_i^2 \zeta_i + b_5 \xi_i^2 \zeta_j + b_6 \xi_j^2 \zeta_i + b_7 \xi_j^2 \zeta_i + b_8 \xi_i^3 + b_9 \xi_i^3 + b_{10} \xi_j^3 + b_{11} \xi_i \zeta_i (2) \\ + b_{12} \xi_i \zeta_j + b_{13} \xi_i \zeta_j + b_{14} \xi_i^2 + b_{15} \xi_i^2 + b_{16} \xi_j^2 + b_{17} \xi_i \\ + b_{18} \xi_i + b_{19} \xi_j + b_{20}$$

$$z = c_1 \xi_i \zeta_j + c_2 \xi_i^2 \zeta_j + c_3 \xi_i^2 \zeta_j + c_4 \xi_i^2 \zeta_i + c_5 \xi_i^2 \zeta_j + c_6 \xi_j^2 \zeta_i + c_7 \xi_j^2 \zeta_i + c_8 \xi_i^3 + c_9 \xi_i^3 + c_{10} \xi_j^3 + c_{11} \xi_i \zeta_i (3) \\ + c_{12} \xi_i \zeta_j + c_{13} \xi_i \zeta_j + c_{14} \xi_i^2 + c_{15} \xi_i^2 + c_{16} \xi_j^2 + c_{17} \xi_i \\ + c_{18} \xi_i + c_{19} \xi_j + c_{20}$$

3. 崩れ巻き波砕波における水面形計測結果

図-3は崩れ巻き波砕波の水面形計測時における水位変動の時系列を、図-4は崩れ巻き波砕波の水面形計測結果を示している。図-4は波峰通過後の比較的水面の乱れが小さな位相の結果であるが、粒子は鉛直方向に数cm程度の幅を持って分布している。その分布幅は同一波峰軸上

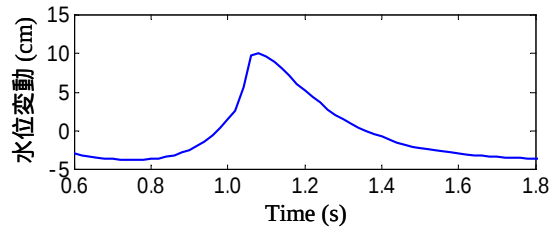
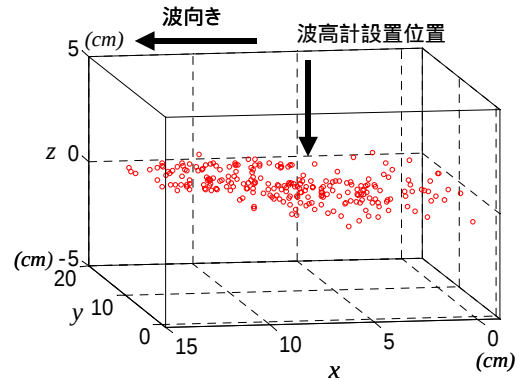


図-3 水位変動

図-4 崩れ巻き波砕波の水面形計測結果
(波峰通過後から0.3秒後)

において最大で3cm以上に達し、水面の乱れの変動スケールよりも大きい。また、このような傾向は他の位相においても確認されており、計測手法に何らかの問題があったと考えられる。

4. 結 論

本実験ではステレオ画像合成法による砕波水面形の三次元計測を行った。今回の実験では砕波水面形を十分な精度で計測することができなかったが、その原因として浮体粒子の散布密度の過多、青色発光ダイオードの光量不足および各カメラ設置位置が不適切であったことが現段階で明らかとなっている。これらの問題は今後の研究で十分解決可能であると判断できることから、今後の研究において十分な精度を有する計測手法が開発されるものと思われる。

5. 参考文献

- 奥村悠樹, 渡部靖憲, 加藤雅也, 佐伯浩 (2002): 砕波帯内の3次元流速の実験的評価—拡張型3次元ステレオグラム PTV の開発と応用, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.96-100.
- Brocchini, M. & Peregrine, D. H. 2001a, The dynamics of strong turbulence at free surfaces. Part1. Description. J.Fluid Mech. 499, 225-254.
- Nadaoka, K., Hino, M. & Koyano, Y. 1989, Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone. J. Fluid Mech. 204, 359-387.
- Watanabe, Y., Saeki, H. & Hosking, R. J. 2005, Three-dimensional vortex structures under breaking waves. J. Fluid Mech 545, 291-328.