

PS-7 ステレオカメラによる自由表面付近の 波粒子速度の計測法

流体性能評価系 * 宝谷 英貴、谷澤 克治
東京大学 早稲田 卓爾

1. はじめに

巨大波中の船体横揺れ運動等を議論する上で、波の粒子速度は重要なパラメータである¹⁾。しかし、水槽実験において波高計により直接的に波粒子速度を計測することはできない。そこで著者らは、波の非線形影響が最も現れる自由表面の波粒子速度について調べるため、水面に撒いたマーカーをステレオカメラ撮影し、その軌跡を追跡していくという Particle Tracking Velocimetry (PTV)による計測法を構築した²⁾。規則波による造波実験結果を容量式波高計による計測値や理論値と比較し、本手法を検証した結果²⁾を紹介する。

2. 計測方法概要

Hoyer and Tulin (2002)³⁾は、水面に浮かべたマーカーをステレオ PTV で撮影し、その運動を計測することで自由表面の波粒子の運動を推定する手法を開発している。2 台のカメラで撮影した画像から、各マーカーの 3 次元座標を推定する方法が詳細に述べられている。本研究でも基本的にはこの手法を採用することとするが、マーカーの 3 次元座標の取得には既存のシステムを利用し、極力簡易な方法で自由表面上の波粒子運動を計測することを試みる。

そこで、マーカーの撮影及び 3 次元運動の計測には、Qualisys 社の Oqus という赤外線カメラ及び QTM (Qualisys Track Manager) という解析ソフトウェアを使用した。このシステムは、船舶海洋工学の分野では、水槽実験において船舶や海洋構造物の模型の 3 次元 6 自由度運動の非接触計測等に使用された実績がある⁴⁾。マーカーは赤外線を反射するものである必要があるため、本研究では木球 (直径 20mm、比重 0.6 程度) に赤外線反射テープを巻いたもの、及び Qualisys 社の専用マーカーである Lightweight Marker (直径 18mm 及び 12mm、比重 0.5 程度) を使用した。水槽における計測システムの設置の様子を図-1 に示す。実験は、当所の動揺水槽 (長さ 50m×幅 8m×水深 4.5m) で実施した。

計測の前準備として、図-2 に示す L 字キットを用いたカメラのキャリブレーションを実施する。これを撮影することで、L 字の 2 直線が交差する点を原点とする、図-2 に示すような XYZ の直交座標系が定義さ



図-1 動揺水槽におけるカメラ及びマーカーの設置の様子²⁾

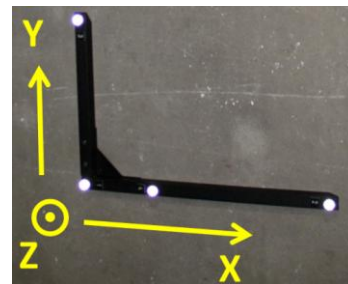


図-2 カメラのキャリブレーション用 L 字キット²⁾

れる。以後、この座標系に基づく各マーカーの 3 次元座標が取得されることになる。しかし、動揺水槽において、計測範囲内にこの L 字キットを平水面に平行に配置することが困難であった。そこで、このキャリブレーションとは別に、平水面に多数のマーカーを浮かべた状態で撮影を行い、平水面の検出を行った。この情報を元に、平水面が $Z=0$ となるよう、回転や平行移動という座標変換を行った。本研究では、水槽の長手方向、波の伝播の向きを X 正とし、水槽の幅方向を Y 、鉛直上向きを Z 正とした。

また、計測を実施していると、明らかに水面から離れた場所に誤認識されるマーカー、 Y 方向の速度 v の分散値が他に比べて大きいマーカー等が検出された。これらは、実際には異なる 2 つのマーカーを同一のマーカーとして 2 台のカメラで認識してしまう、また複数のマーカーがくっついてしまうことにより座標の推定にばらつきが生じる、等によるものと考えられる。これらのマーカーは Z 座標の平均値や v の分散値をもとに、解析対象から除外した。

図-3 に、ステレオ PTV による変調不安定波 (発達する波群) の計測例を示す。これは QTM で描画される

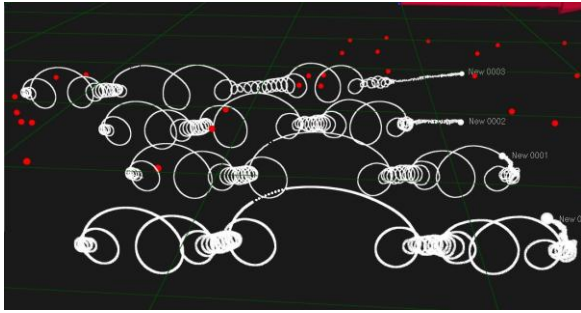


図-3 ステレオ PTV による変調不安定波の計測例

図であり、座標変換する前の状態のものである。ある 4 つのマーカーの軌跡を示している。この位置座標の時系列を数値微分することで、速度成分を得ることができる。また、軌跡は表示していないが、図中のその他の点も、ステレオカメラにより認識されているマーカーである。

3. ステレオ PTV 計測手法の検証

規則波（波長 3m）の造波実験を行い、ステレオ PTV による波計測を実施した。図-4 では、水槽に造波された規則波について、ステレオ PTV 及び容量式波高計で計測した波高とクレスト高さを比較している。いずれも良好な一致を示していることが確認される。

続いて、自由表面上の波粒子速度に関する検証を行う。深海波について、2 次の非線形性まで考慮したストークス波（波数 k 、角周波数 ω ）の自由表面上波粒子のラグランジュ的速度 U_L, W_L は以下の式 (1) で表される⁵⁾。ただし、 U_L は水平成分、 W_L は鉛直成分を表している。

$$\begin{cases} U_L = \epsilon c_p \sin(kx - \omega t) + \epsilon^2 c_p \\ W_L = -\epsilon c_p \cos(kx - \omega t) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $\epsilon = Hk/2$ (H :波高)、 $c_p = \omega/k$ である。1 次成分の速度振幅 ($|U_{L1}, W_{L1}|$) は ϵc_p となる。ここでは、ステレオ PTV から求められる波粒子速度の 1 次成分の振幅と 2 次成分を理論値と比較する。理論値は、容量式波高計で計測した波高 H を用い、式(1)により計算した。ステレオ PTV の計測結果については、各マーカーの時系列から粒子速度の平均値を求め、それを 2 次成分速度 (U_{L2}, W_{L2}) とみなし、またこれを以下の式(2)に代入することで、1 次成分の振幅を推定した。

$$|U_{L1}, W_{L1}| = \sqrt{(U - U_{L2})^2 + (W - W_{L2})^2} \quad (2)$$

比較の結果を図-5 に示す。1 次成分の振幅、2 次成分いずれも理論値と良好な一致を示している。また、実験において、マーカーを水面に投入してから造波を開始するまでの間に、マーカーがゆっくりとドリフトしている様子が見られた。これは、マーカーの投げ入れ速度や水槽内に残っている流れによるものと考えられる。図-5 において、低波高時にステレオ PTV によ

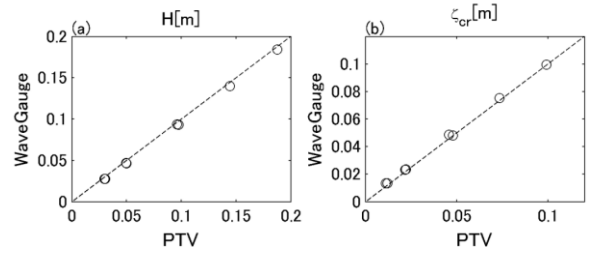


図-4 ステレオ PTV 及び容量式波高計で計測した波高 (左) 及びクレスト高さ (右) の比較²⁾

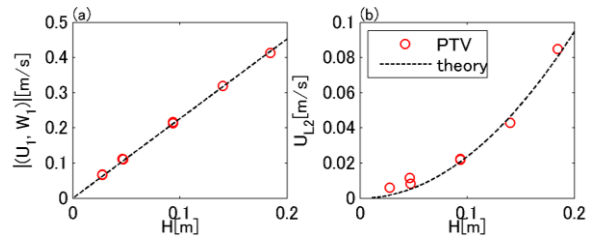


図-5 ステレオ PTV で得られた波粒子速度と理論値の比較。左：1 次成分の振幅、右：2 次成分²⁾

る計測値が理論値をやや上回っている理由として、この影響が考えられる。

4. まとめ

ステレオ PTV により、波の自由表面の粒子速度を計測する手法を構築した。規則波中の粒子速度の計測を行い、理論値と良く一致することを確認した。比較的容易な方法で自由表面の波粒子速度を精度よく計測できることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25249126 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 石田茂資：小型船の横波中転覆機構に関する模型実験（その 2 左右揺の減衰力とその着点の非線形性について），日本造船学会論文集，第 174 号，1993.
- 2) 宝谷英貴：実験水槽におけるフリーク波再現に関する研究，東京大学博士論文，2015 (in press) .
- 3) Hoyer, K. and Tulin, M. P. : A stereo video imaging system for surface particle tracking, in PIV and Modeling Water Wave Phenomena Abstracts, 2002.
- 4) QUALISYS : Marine _ Application note, 2014.
- 5) Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. : Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific, 1991.