

立体視とトレーサ追跡法を用いた 3 次元 PTV の開発

長 尾 昌 朋*・新 井 信 一**

構造物周辺や砕波現象を伴う領域では、流体運動が 3 次元적であり、そして、流速測定には非接触で空間分布まで測定できる方法が望まれる。そこで、複数のカメラを使用して立体視ができるように流れの可視化画像を撮影し、可視化画像を利用した流速推定法と組み合わせて、流速の 3 成分を 3 次元分布として測定する手法を開発した。さらに、撮影をハイスピードビデオカメラで行い、サンプリング間隔と流速推定の際に使用する可視化画像の時間間隔を工夫することで、乱流計測も可能であることを示している。この手法を、潜堤を構成するブロック周辺の複雑な波運動に適用し、実用性についても検討する。

1. はじめに

潜堤とは景観に配慮するために、天端を水面下とし、その天端上で砕波させることにより、潜堤背後での伝達波高を低減させることを目的としたものである。波が打ち寄せると潜堤の沖側法肩付近に大きな流体力が作用するため、その部分が破損しやすい。潜堤法肩のブロックに作用する流体力を推定するためには、法肩周辺の流速を知る必要がある。しかし、潜堤の天端上では砕波現象が起こっており、また、潜堤を構成するブロックの隙間から海水が出入りするため、これらの影響を受けて潜堤付近は乱流を伴う顕著な 3 次元流速場となっている。このような流速場の特性を明らかにするためには、流速の 3 成分を 3 次元分布として測定する必要がある。一般的に、流速の空間分布を測定する場合には、可視化手法を応用した方法が有効であり、その手法（例えば、PIV ハンドブック, 2002）や波動場への適用例（例えば、奥村ら, 2001; 重松ら, 2002）が蓄積されつつある。そこで本研究では、可視化画像を複数のビデオカメラで立体視できるように撮影し、トレーサ追跡法を組み合わせることで流速の 3 成分を 3 次元分布として測定できる 3 次元 PTV の開発を試みる。そして、可視化画像を利用した流速推定法で得られる流速の周波数特性を明らかにして、乱流計測における精度向上の工夫を行う。最後に、この手法を潜堤周辺での流速分布の測定に適用し、その実用性を検討する。

2. 実験方法

実験には図-1 に示す全長 363 cm, 幅 15 cm, 高さ 25 cm の全面アクリル製の 2 次元造波水槽を使用した。水槽の一端にプランジャ型造波機、他端に消波ブロック、そして水槽中央付近に潜堤（天端幅 22 cm, 底面幅 64 cm, 高さ 7 cm）を設置した。実験条件は、水深 10 cm, 周期 0.775 s, 波高 0.8 cm に設定した。潜堤周辺の流れ

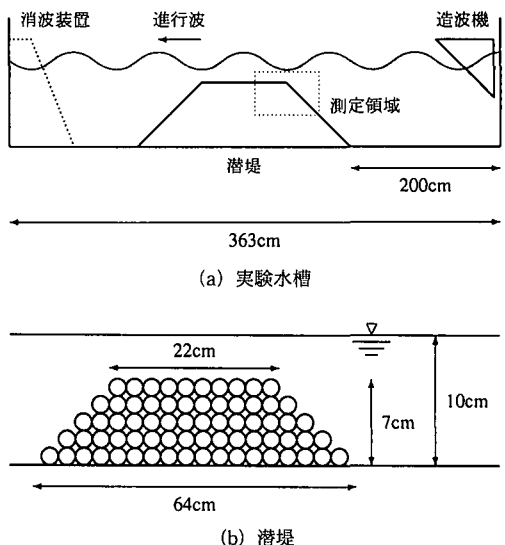


図-1 実験装置

の可視化には、3 次元的な可視化画像が撮影できるように注入トレーサ法を用いた。トレーサとして直径約 0.25 mm, 比重 1.03 のダイヤイオン HP 20（イオン交換用ポーラス真球粒子, 三菱化学（株）製）を使用した。トレーサを流体内に浮遊させるため、水槽内の流体として濃度 3% の食塩水を使用した。図-2 に示すように、可視化画像の撮影には、トレーサを立体視するためハイスピードビデオカメラ (FASTCAM-Rabbit, FASTCAM-Rabbit-mini, (株) フォトロン製) を 3 台同期させて使用した。水槽側壁から各々のカメラまでの距離を約 1.1 m, 左右のカメラの光軸を約 90° とした。原理的にはカメラ 2 台のみでも立体視は可能であるが、トレーサの幻影が生じる可能性があるため、中央にもやや高い位置にカメラを設置した。球状のトレーサ粒子は照明の光を当てた方向に散乱光を強く反射させるので、カメラの周囲に照明を設置した。ただし、水槽側壁で反射してカメラに直接に映り込まないように位置を調整した。流速分布の測定には、撮影速度 1/120 s で 8 周期分 750 組の画像を使用

* 正会員 博 (工) 足利工業大学助教授 工学部都市環境工学科
** 正会員 工 博 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科

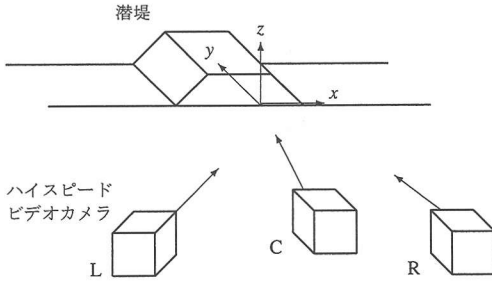


図-2 カメラ位置

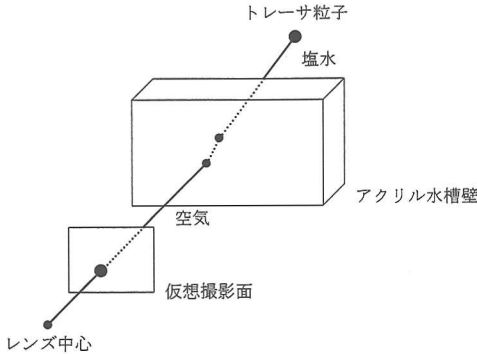


図-3 光線の経路



図-4 可視化画像の一例

示すように光路には食塩水とアクリルの屈折率、アクリル水槽側壁の厚さ、およびカメラ毎にカメラの姿勢、位置座標、ズーム、レンズひずみ、撮影画像での光軸位置、縦横比を考慮する必要がある。そのため、あらかじめ3次元座標が分かっている校正基準点を撮影し、最適化手法を用いてこれらのパラメータを決定した。最適化手法には大域的探索法の1つであるSCE-UA法を使用した。

4. 潜堤周辺での流体運動

撮影された可視化画像の例を図-4に示す。3台のカメラからトレーサを抽出し、トレーサの3次元座標を求めた結果を図-5に示す。撮影開始から5周期目のトレーサの動きである。トレーサの経路を見やすくするため、水槽壁面から2cm毎に区切った縦断面毎に3面図で示している。波は右側から進行している。図中の点線は潜堤を示し、マークはトレーサの位置、それから伸びる線はトレーサの移動先である。潜堤法面上方には波運動を現すトレーサの橢円軌道が見られる。潜堤法面付近には徐々に潜堤に潜り込むトレーサが見られる。また、水槽壁面付近では潜堤内部の隙間も観察できるので、その隙間を移動するトレーサも見られる。

5. 可視化画像を利用した流速推定法の周波数特性

可視化画像を利用した流速推定法により測定される流速は、参照する2枚の可視化画像の時間間隔 t_w 間の単純平均となり、次式で表される。

$$u(t) = \frac{1}{t_w} \int_{-t_w/2}^{t_w/2} \tilde{u}(t+\tau) d\tau \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\tilde{u}$: 実際の流速、 u : 可視化手法により測定される流速である。これをフーリエ変換すると

$$\mathcal{F}_u(f) = \frac{1}{\pi f t_w} \sin \pi f t_w \times \mathcal{F}_{\tilde{u}}(f) \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、 f : 周波数である。すなわち、式(2)右辺の係数が可視化画像を用いた流速推定法による流速

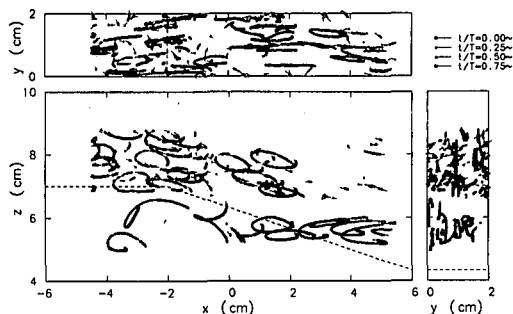
した。

3. 可視化手法による3次元流速測定方法

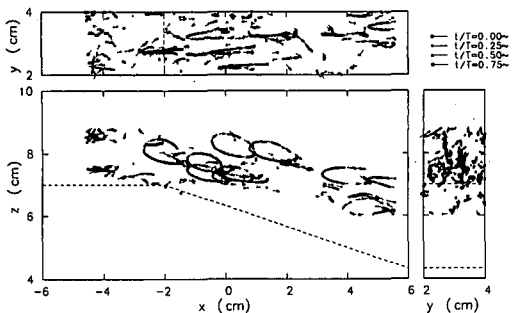
可視化画像を用いて流速3成分を3次元分布として得るためには、トレーサの3次元位置を測定する必要がある。そこで、まず可視化画像からトレーサの抽出を行う。照明の光が水面で反射することにより、可視化画像の明るさが時々刻々と局所的に変化するので、波の位相に合わせて画像を位相平均し、トレーサ粒子を消去した背景の画像を作成する。これを参考として元の画像に2値化処理を施し、トレーサを抽出する。

トレーサの画像座標からトレーサの3次元実座標および移動経路を求める手順としては、個々のトレーサの3次元実座標を求めてからトレーサを追跡して移動経路を求める方法と、可視化画像上でのトレーサの移動経路を求めてから3次元実空間での移動経路に変換する方法がある。ここでは画像のノイズなどによって誤って得られたトレーサを早い段階で削除するため、後者の方法を用いた。可視化画像上でのトレーサの追跡にはPTVの一種である4時刻追跡法を用いた。

3台のカメラ毎に得られた可視化画像上のトレーサの移動経路を組み合わせる3次元実空間での移動経路に変換するため、立体視の原理を応用した。その際、図-3に



(a) $y=0\text{ cm}\sim 2\text{ cm}$



(b) $y=2\text{ cm}\sim 4\text{ cm}$

図-5 トレーサの軌跡

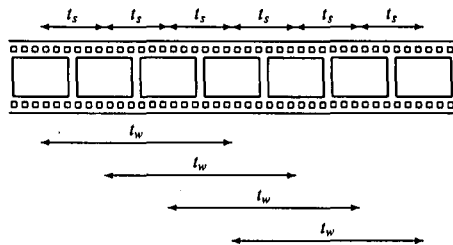


図-6 4時刻追跡法に使用する可視化画像の対応
(t_s : 撮影時間間隔, t_w : 流速推定に使用する時間間隔)

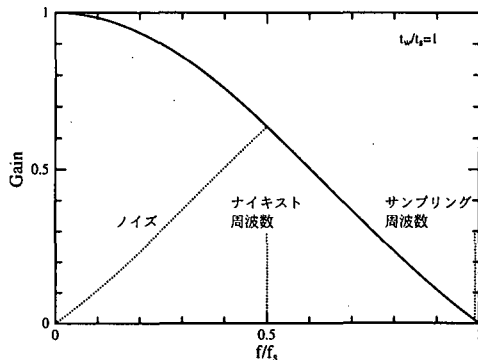


図-7 $t_w/t_s=1$ の場合の周波数特性

の周波数特性となる。

サンプリング周波数 f_s で撮影された連続する2枚の可視化画像から流速を推定する場合、図-6に示す撮影時間間隔 $t_s=1/f_s$ と流速推定に使用する2枚の可視化画像の時間間隔 t_w が一致する。このような流速推定法の周波数特性は図-7となる。有意なデータはナイキスト周波数 $f_s/2$ 以下であり、これより高周波数のデータは折り返しノイズとなる。このため、一般的なビデオカメラ ($f_s=30\text{ Hz}$) で可視化画像を撮影し、単純に空間相関法などを適用した場合は、高周波数領域 (5~15 Hz) に大きなノイズが発生する可能性があり、乱流の計測に対して深刻な影響を与えると思われる。

これに対して今回使用した4時刻追跡法では、トレーサの対応付けに連続する4枚の可視化画像を使用する。流速の推定には、例えば1枚目と4枚目の可視化画像を使用するので、図-6に示すように $t_w/t_s=3$ となり、このようにして得られた流速の周波数特性は図-8となる。この場合、高周波数領域での折り返しノイズを小さくすることができるが、一般的なビデオカメラ ($f_s=30\text{ Hz}$) を使用した場合は取得できる流速データの帯域は0~5 Hz程度と狭くなってしまふ。そこで、ハイスピードビデオカメラを使用して可視化画像を毎秒120コマ ($f_s=120\text{ Hz}$) で撮影すると、取得できる流速データの帯域が

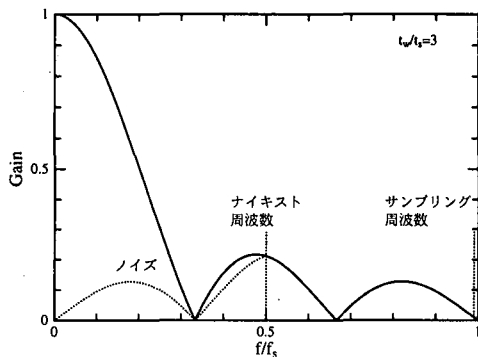
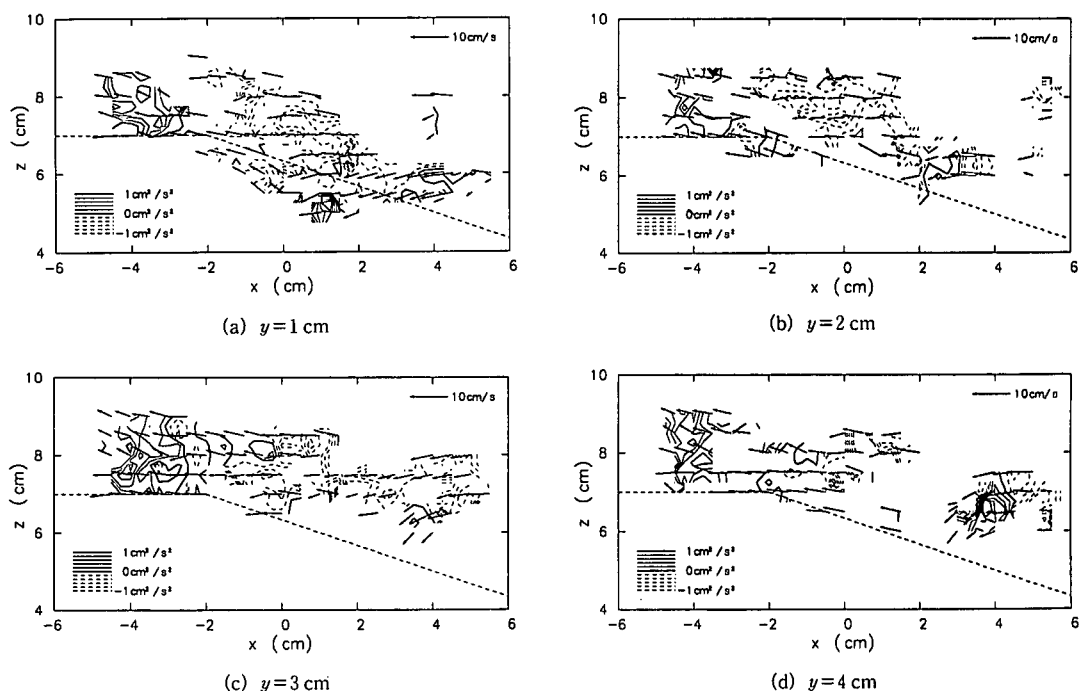


図-8 $t_w/t_s=3$ の場合の周波数特性

0~20 Hz程度となり、十分に乱流運動を計測することが可能となると思われる。なお、これはレーザー流速計の出力に20 Hz程度のローパスフィルターを取り付け、120 HzのサンプリングレートでA/D変換することに相当する。また、2枚の可視化画像から流速を推定する空間相関法の場合でも、図-6のように2枚空けるなどして可視化画像を対応させれば、同等の周波数特性になり、廣木ら (2001) によって開水路乱流の計測が可能であることが確認されている。

図—9 流速分布 (ベクトル) と $\overline{u'w'}$ 分布 (等値線)

6. 潜堤周辺での流体運動の乱流計測

トレーサ注入法により流れの可視化を行い、撮影された個々のトレーサの移動経路から流速を推定する場合、得られた流速ベクトルはその空間分布に偏りがある。そのため、格子状の着目点を設定してその地点での流速を内挿した方が流体運動の把握には便利である。そこで、以下の位相平均操作を行った。まず、着目点を中心とした時間軸 (位相) を含む局所空間に線形の位相平均流速分布を仮定する。その流速分布は局所空間内に存在する流速ベクトルから最小自乗法で求める。そして、着目点の流速ベクトルを内挿してその時刻での平均流速とした。さらに、局所空間での位相平均流速分布と実際の流速との差を乱れ成分として、乱流諸量を計算した。この位相平均操作を行う局所領域は流体運動の規模やトレーサ粒子の分布密度を考慮して、着目点から半径 5 mm とした。

このようにして得られた流速分布および乱流成分を幅方向に 1 cm 間隔の縦断面毎に図—9 に示す。位相平均操作に使用した波が 8 周期分と少なかったものの、比較的ノイズの影響を受けやすいレイノルズ応力の成分も十分に測定可能であると考えられる。また、流体運動の計測に今回開発した 3 次元 PTV を使用したので、幅方向の流体運動の変化も捉えることが可能である。

7. おわりに

本研究では、複数のカメラを使用した立体視とトレーサ追跡法を組み合わせ、可視化画像から流速の 3 成分を 3 次元空間分布で測定する手法を開発した。また、可視化手法を用いた流速推定法によって測定される流速の周波数特性を明らかにし、流速推定法に若干の工夫をするとともにハイスピードビデオカメラを使用することで、乱流運動も十分に計測可能であることを示した。さらに、この手法により潜堤周辺の流体運動を測定し、流速の 3 成分を 3 次元分布として計測することおよび乱流計測が可能性であることを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり岡村崇史、加藤洋 (当時、足利工業大学 4 年) の両氏には水理実験等に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 奥村悠樹・渡部靖彦・加藤雅也・佐伯 浩 (2001): 砕波帯の 3 次元流速の実験的評価, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 96-100.
- 可視化情報学会編 (2002): PIV ハンドブック, 328 p.
- 重松孝昌・渡部靖彦・竹原幸生・奥村悠樹・小池敏也 (2002): 波動場におけるブロック潜堤間隙内の三次元流体運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 806-810.
- 廣木恵悟・長尾昌朋・新井信一 (2001): 矩形断面開水路の乱流空間構造に関する研究, 足利工業大学研究集録, 第 32 号, pp. 99-105.