

Super-resolution PIV法を用いた砕波下の流体運動に関する実験的研究

Experimental Study of Fluid Motion in a Surf Zone by Super-resolution PIV

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 秀島賢保 (Yoshiyasu Hideshima)
北海道大学大学院工学研究科助手 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
北海道大学大学院工学研究科教授 フェロー 佐伯浩 (Hiroshi Saeki)

1. はじめに

砕波帯における底質の巻き上げ現象は、砕波に伴い発生し底面にまで到達する大規模渦が多量の砂を浮遊させることに起因する。特に斜降渦がその底質の浮遊に大きく関与することが報告されている(岡安ら2001)。また、最近までの多くの研究により砕波帯内の組織渦や乱れの分布構造等が明らかにされつつある(例えば、水谷ら2000)。しかしながら、詳細な渦構造についてはいまだ未解明な部分も多く、砕波後の流体運動の三次元性を正しく把握する必要がある。さらに、底質の浮遊により砕波帯内は固相及び液相が存在しその両相の相互作用を経て複雑な混相流へと発達する等、この領域における計測を困難にしている。一連の巻き上げ現象を評価するには、各相の運動学的情報を計測し、統計的に評価する必要がある。しかしながら、非常に高い粒子数密度を持ち、間欠性や三次元性を示す砕波帯内の粒子速度を計算する手法が確立されていないのが現状である。

一方、画像解析処理を用いた手法では、トレーサの工夫を要するものの、非接触の状態で固相、液相及び気相のそれぞれの挙動を計測することが可能となる。例えば、PIV(Particle Image Velocimetry)及びPTV(Particle Tracking Velocimetry)は、低レイノルズ数の流れを扱う場合、粒子速度を比較的容易に取得できる手法である。しかし、PIVでは相関法を用いた場合に粒子数の減少とともに精度が低下する、PTVでは粒子数の増加に伴い精度が低下するというそれぞれ短所を持つ。

そこで本研究では、奥村ら(2001)の三次元Stereo

PTVを改良し、粒子数依存性の少ない高精度動画画像解析法である渡部ら(2004)の三次元Super-Resolution PIV(以下SR PIVと略記)を用いて砕波帯内の流体運動についての計測を行い、流速及び乱れエネルギーの時空間変化を中心に評価し、渦構造を含む流体運動についての議論を行う。

2. 実験方法

延長800cm、高さ60cm、幅25cmの全面アクリル張り可変勾配可視化造波水路を用いる。底面は1/17の一樣勾配になっており、視軸の異なる三台のデジタルビデオカメラ(Kodak製ES1.0、記録周波数30Hz)を水路側に設置し、砕波点から岸側に50cmの計測領域1(L:12cm、W:12cm、H:9cm)及び砕波点から岸側に100cmの計測領域2(L:12cm、W:12cm、H:8cm)において実験は行われた。蛍光着色された中立粒子(粒径20～100 μm)が計測領域内に散布され、同じく水路側方に設置したYAGレーザーにより入射光を照射し、中立粒子からの励起光のみを撮影した(図-1参照)。なお、入射レーザー光と同一波長を持つ混入気泡からの反射光は光学フィルタにより除去される。また、今回の実験条件は表-1に示す。

3. 解析手順

あらかじめ行われたキャリブレーションにより、(1)式の実座標 X_k^{ij} と画像座標 $x_k^{ij}(i,j=1,2,3; \text{カメラ番号}, k=1,3; \text{座標番号})$ を関連付けるための三次代数方程式の $a^0 \sim a^{19}$ の20個の係数が決定される。

表-1 実験条件

条件	計測領域1	計測領域2
勾配	1/17	1/17
波浪の周期(s)	2.0	2.0
砕波点からの距離(cm)	50	100
砕波水深(cm)	14.0	14.0
砕波波高(cm)	10.0	10.0

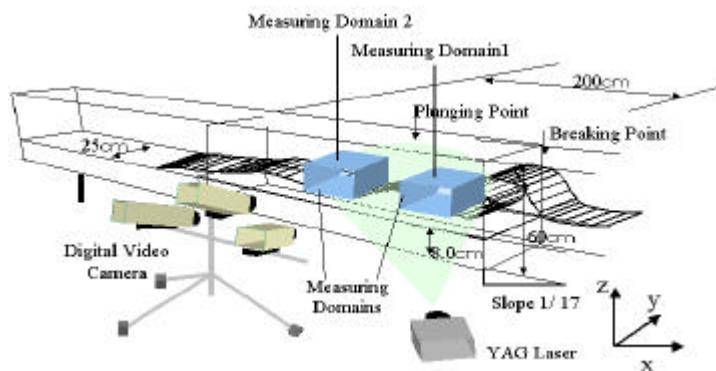


図-1 実験装置

$$\begin{aligned}
 X_k^{ij} = & a_k^0 x_1^i x_3^j x_1^j + a_k^1 x_1^i x_1^i x_3^j + a_k^2 x_1^i x_1^i x_1^j + a_k^3 x_3^j x_3^j x_1^i \\
 & + a_k^4 x_3^j x_3^j x_1^i + a_k^5 x_1^i x_1^i x_1^i + a_k^6 x_1^i x_1^i x_3^j + a_k^7 x_1^i x_1^i x_1^j \\
 & + a_k^8 x_3^j x_3^j x_3^j + a_k^9 x_1^i x_1^i x_1^i + a_k^{10} x_1^i x_3^j + a_k^{11} x_1^i x_1^j \\
 & + a_k^{12} x_1^i x_3^j + a_k^{13} x_1^j x_1^i + a_k^{14} x_3^j x_3^j + a_k^{15} x_1^i x_1^i \\
 & + a_k^{16} x_1^j + a_k^{17} x_3^j + a_k^{18} x_1^i + a_k^{19}
 \end{aligned} \quad \text{--- (1)}$$

実験によって得られた画像にガウシアンフィルタ及びメディアンフィルタによるノイズ除去を施した後、励起光の強度に対して相対閾値を用い、粒子の重心位置をサブピクセル精度で抽出する。解析領域を適当なグリッドに分割し、計算された粒子重心位置に仮想の粒径を持つ粒子を配置する。同様にして配置された次のフレームの探査領域内にある仮想粒子とのオーバーラップ体積を用いた以下の直接相互相関係数により探査領域平均流速を決定する。

$$\begin{aligned}
 F(s/d) &= \frac{1}{p} [\cos^{-1}(2(s/d)^2 - 1) - (s/d)(1 - (s/d)^2)] \\
 C &= \frac{\sum F(s/d)}{\sqrt{M * N}} \quad \text{--- (2)}
 \end{aligned}$$

ここで、 d : 粒径、 s : 重心間距離、 F : 近接度関数、 M, N : 各時刻における探査領域内粒子数、 C : 直接相互相関係数である。相関係数においても閾値を設定し、ある閾値よりも大きい場合のすべての組み合わせのうちで中央値を持つ探査領域の空間変位を時間間隔で除した速度を探査領域平均速度として採用する。その後、探査領域平均流速を元にした個々の粒子のリンクを行い、最終的に任意の大きさのグリッドへ粒子速度の貼り付け及び内挿を行う。

4. 結果

今回の実験では、砕波点から150cm沖側に設置された波高計からの信号により波浪による水面変動と撮影画像を同期させることが出来る。

図-2は、計測領域1における水面変動の時系列(上)と同時刻の同期された5セットの各探査領域平均速度のアンサンブル平均を計測領域全体の空間で平均した流速の時系列(下)である。波浪の通過後も水平方向流速 v がかなり小さいことから、この領域は水平渦による2次元運動が支配的な領域と考えられる。また、図-3は計測領域2における図-2と同様の図である。波浪のピークと共に、 v が u, w とほぼ同等のオーダーになっていて、砕波によって生成する渦により流速が三次元化しているのがわかる。

図-4.a.は、計測領域1の水面変動の時系列であり、図-4.b.は同時刻における乱れエネルギーの空間平均量である。波浪のピークより若干早く乱れエネルギーの極大が見られ、ここがジェットの着水時刻と思われる。また、図-4.c.はT1～T3における各時刻の三次元速度ベクトルを表しており、図-4.d.は同時刻の乱れエ

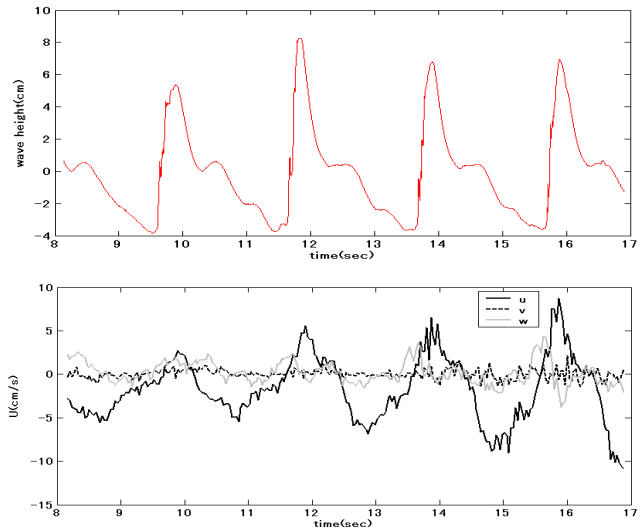


図-2 計測領域1における水面変動の時系列(上)
同時刻における計測領域内空間平均流速[5
セットのアンサンブル平均](下)

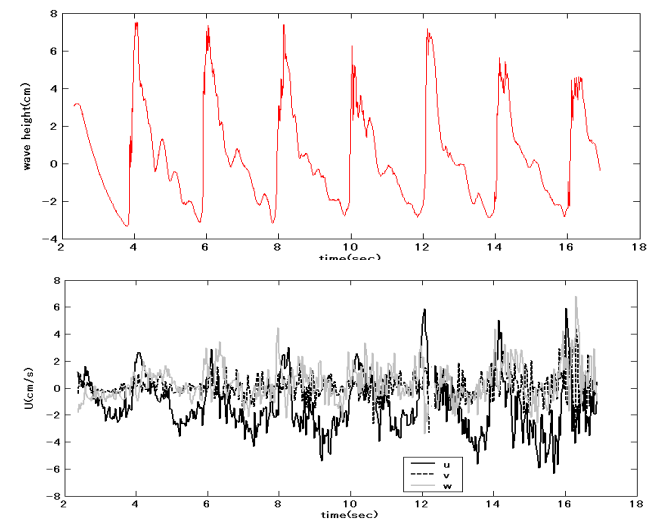


図-3 計測領域2における水面変動の時系列(上)
同時刻における計測領域内空間平均流速[5
セットのアンサンブル平均](下)

ネルギーの等特性サーフェスを示している。d.の時刻T1ではジェットの着水後に生成した水平渦が上層(およそ $z=7$)に存在しているのが確認され、図-2と同様に水平渦が支配的と思われる。また、時刻T2～T3では、時刻T1からの位相の経過と共に急速に乱れエネルギーが減少している。

図-5.a.は、計測領域2の水面変動の時系列であり、図-5.b.は同時刻における乱れエネルギーの空間平均量である。波浪のピークに比べかなり遅れて乱れエネルギーの極大が見られる。また、図-5.c.はT1～T3における各時刻の三次元速度ベクトルを表しており、図-5.d.は同時刻の乱れエネルギーの等特性サーフェスを示している。d.の時刻T2では、水平渦によるものと思われる乱れエネルギーの特性が下層(およそ $z=2$)に見られ、波浪から離れて残留しているものと思われる。

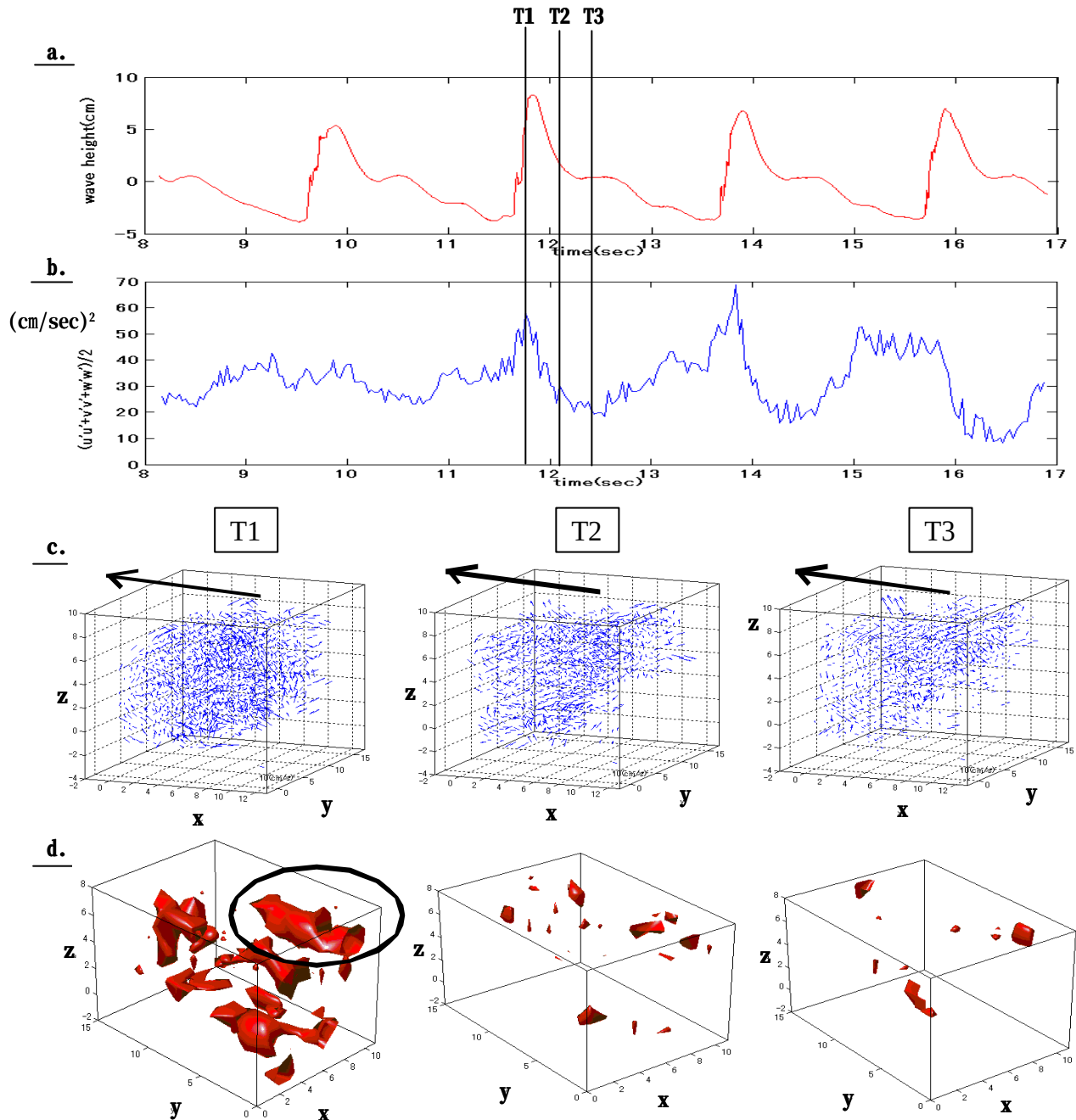


図-4 a:計測領域1における水面変動の時系列, b:同時刻の乱れエネルギーの空間平均量
c:T1~T3の時刻に対応する三次元速度ベクトル, d:同時刻の乱れエネルギーの等特性サーフェス

また、d. の時刻T3では底面近傍(およそ $z = -1$)にまで乱れエネルギーが存在しているのが確認できる。

5. 結論

SR PIV法を碎波下の流体運動に対して適用した。解析により得られた三次元流速及び乱れエネルギーを元に以下の結果を得た。

1) 碎波点より岸側50cmの計測領域1では、着水点より沖側に位置し大規模水平渦による2次元的な流体運動が支配的な領域と考えられる。また、碎波点より100cm岸側である計測領域2においては、碎波後に流れ場が急速に3次元化する様子が計測された。しかしなが

ら、斜降渦によると思われる明確なベクトル及び乱れエネルギーの等特性は検出できなかった。

2) ジェット着水時に生成される水平渦によりはじめ乱れは計測領域上層に存在するが、位相の経過と共に底面近傍の下層で乱れが顕著となる。このことは上層で生成した渦が波浪から離れて取り残され、着水点近傍では底面付近にまで到達しているのではないかとと思われる。

なお、今回の解析では1cmのグリッドで流速ベクトル及び乱れエネルギーを計算している。今後、計算コストとの兼ね合いを考え、正確に運動を再現できる適当な大きさのグリッドを用いてのさらなる計算、検討を

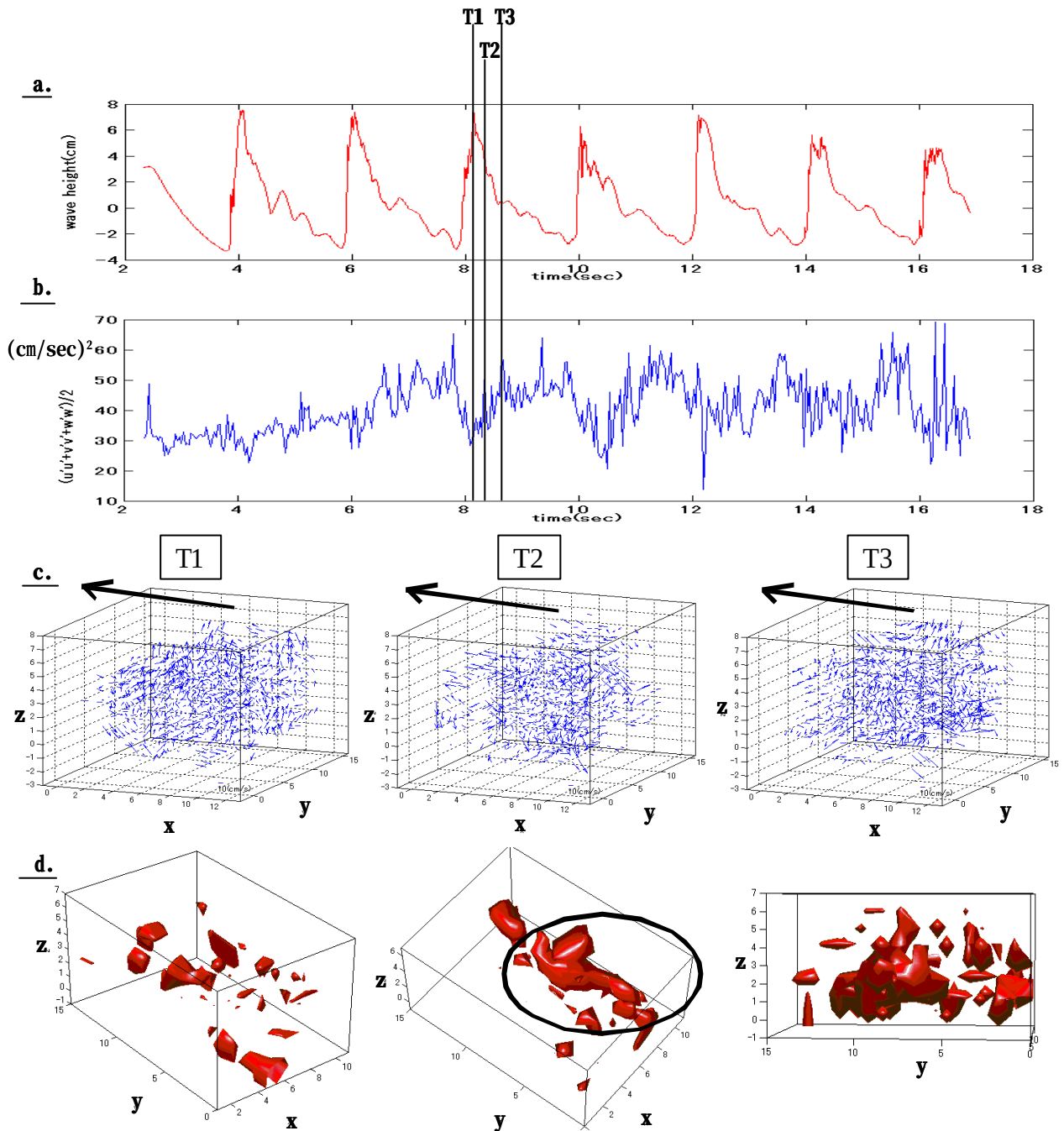


図-5 a:計測領域1における水面変動の時系列, b:同時刻の乱れエネルギーの空間平均量
c:T1~T3の各時刻に対応する三次元速度ベクトル, d:同時刻の乱れエネルギーの等特性サーフェス

必要とする。

参考文献

- 1) 岡安章夫、岩澤秀光、片山裕之、敦賀仁：斜降渦による底面近傍3次元流速変動に関する実験的研究、海岸工学論文集、第48巻、pp.81-85、2001
- 2) 奥村悠樹、渡部靖憲、佐伯浩：碎波帯内の3次元流速の実験的評価、海岸工学論文集、第48巻、pp.96-100、2001
- 3) 水谷夏樹、安田孝志、武田真典：碎波後の組織渦構造とエネルギー散逸の関係について、海岸工学

論文集、第47巻、pp.156-160、2000

- 4) 渡部靖憲、秀島賢保、佐伯浩：三次元 Super-resolution PIVの開発と碎波下の混相流への適用、海岸工学論文集、第51巻、pp.106-110、2004
- 5) 木村一郎、植村知正、奥野武俊著：可視化情報計測、近代科学社、2001
- 6) 可視化情報学会：PIVハンドブック、森北出版、2002