

三次元 Super-Resolution PIV の開発と砕波下の混相流への適用

渡部 靖憲*・秀島 賢保**・佐伯 浩***

この論文は、低計算コスト、高精度、高解像度で三次元粒子速度を取得可能な三次元 Super-Resolution PIV を提案し、計測精度及びその粒子数依存性を検証し工学的問題への適用性について議論するものである。また、大規模渦モデルの速度場における本 PIV システムの解析と数値試験の解析解との比較を行い、その実践的適用性を検証すると共に、砕波後に生成された大規模渦が海底砂を巻き上げる際に形成される混相乱流に対してもこの PIV 法を適用し、砕波通過後の流体、固体両相の三次元速度分布の時間変化について議論される。

1. はじめに

砕波帯では、生成された大規模渦及び乱れが海底面へ到達し多量の海底砂を浮遊させる。浮遊砂量を予測するためには巻き上がり開始時刻、浮遊時間として初期浮遊量の特定が不可欠である。これらを推定するためには、抗力により海底砂が巻き上げられ、この浮遊砂が大規模渦に捕捉され、さらに捕捉砂は大規模渦を変形させその渦度を強化するという一連の固液間相互作用を定量的に評価する必要がある。この相互作用に対するモデルを構築するためには流体及び浮遊砂の速度の時空間変化を知る必要があるが、非常に高い数密度をもつ海底面近傍の混相流中の砂の移動速度を測定することは非常に困難であり、また砕波が生成する乱れは空間的に三次元構造をもち時間的に間欠性を示す特徴もこの領域の混相流計測を困難にさせている。

一方、三次元 StereoPTV (例えば奥村ら 2001, Kieft et al. 2002) によるステレオ画像合成をベースとした流体計測は非接触で粒子速度の空間分布を取得するために有利であるが、PTV の短所である粒子数の増加に伴う誤対応確率の増加及びフレーム間の三次元空間内の粒子探索に費やす計算コストの増加のため、高数密度を有する海底砂の局所的な浮遊・移流イベントの統計評価するための長時間粒子速度計測を行うためには効率が非常に悪い (渡部ら, 2003)。竹原ら (2000) は、相関法によって得た粒子速度をベースに探索領域内の粒子を追跡する二次元 Super-Resolution (以下 SR と略記) 法により風波砕波時の流速場を精度良く測定することに成功している。本研究は、著者ら (2001, 2003) が提案している三次元 StereoPTV を改良し、三次元空間内のステレオ合成された粒子位置情報による三次元パターン相関を元に検査領域内の速度を算出しこれをベースに検査領域内の粒子追跡を行い高解像度で速度を算出する三次元 SRSter-

eoPIV を提案すると共に、この方法が相関法と追跡法の欠点 (即ち低解像度と対応可能な粒子数の制限) を補う計算効率の良い高精度動画像解析法であることを数値実験を通して証明するものである。また、この方法の応用例として砕波帯内の底面近傍の固液混相流計測に適用し、砕波に起因する大規模渦が誘発する浮遊粒子速度の時空間変化の特徴について議論を行う。

2. 3DSRStereoPIV

(1) アルゴリズム

三台のカメラから撮影された画像を合成し三次代数方程式による座標変換により三次元空間内の実座標を特定する著者ら (2001, 2003) が提案する方法により粒子重心位置を決定する。解析領域を適当なサイズの立方体あるいは直方体の検査領域で分割し、この領域と領域内に存在する個々の粒子位置が対応付けられる。この検査領域サイズは着目する流体運動のスケール以下である必要があり、さらに十分な相関を得るため領域内に適当な粒子数以上が存在する必要がある。本手法は、バイナリ相関法をベースとし、最初に領域内の粒子重心位置に仮想球形粒子を配置する。この仮想粒子群と次のフレームにおける探索領域内の仮想粒子群とのオーバーラップ体積を正規化した以下に示すパターン相関 (C_p) が極大となる空間変位 (Δx) が特定され、閾値以上の極大相関をもつ組み合わせの空間変位の中央値 (Δx_m) からその検査領域の速度 (u_c) を (2) によって定義される。

$$C_p(\Delta x) = \sum_{M,N} f(r) / \sqrt{MN} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f(r) = 1/\pi [\cos^{-1}(2(r/d)^2 - 1) - (r/d)(1 - (r/d)^2)]$, 粒子間重心距離 $r(\Delta x, \mathbf{x}_{t=t_0}, \mathbf{x}_{t=t_0+\Delta t}) = |\mathbf{x}_{t=t_0} + \Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_{t=t_0+\Delta t}|$, そして d は仮想球形粒子の直径。なお、 M と N は $t = t_0$, $t = t_0 + \Delta t$ における検査、探索領域内の粒子数である。

$$u_c = \Delta x_m / \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

次に、検査領域内の全ての粒子と前後 2 フレームの探索領域内の粒子をリンクした場合の粒子速度と (2) で

* 正会員 工博 北海道大学助手 大学院工学研究科環境資源工学専攻
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻
*** フェロー 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻

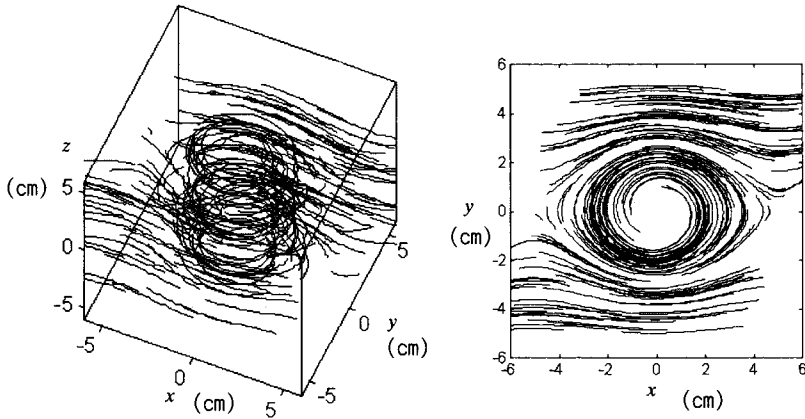


図-1 入力粒子位置をリンクさせた粒子軌道

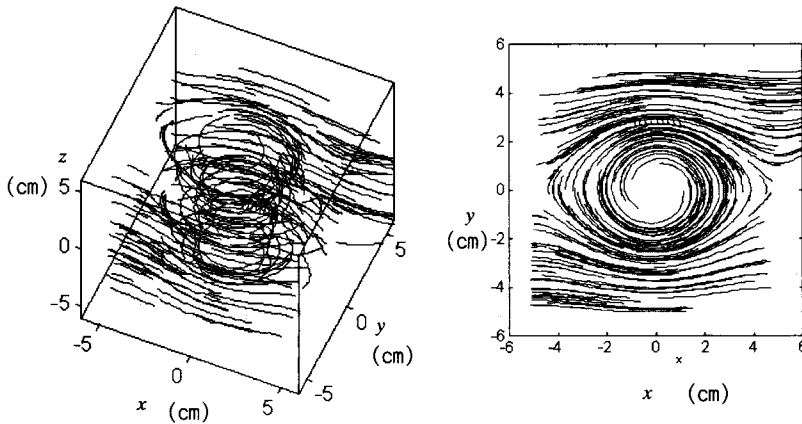


図-2 3DSRStereoPIVにより再構成した粒子軌道 (N=200)

得られた速度との逸脱を探索し、3フレーム間に渡って最小の誤差をもつ粒子リンクが同一の粒子であると定義し(即ち3時刻の最小加速度原理に対応する)、検査領域内の個々の粒子位置における粒子速度 (u_p) が中央差分で決定される。粒子数とほぼ同一点数で取得される高解像度流速情報は、任意のオイラー座標系に補間される。

(2) 数値試験

本論文で提案する3DSRStereoPIVの精度、計算コストそして工学諸問題への適用性を評価するため、簡単な数値試験を行った。碎波によって生成されるせん断流中の大規模渦のモデルとして、スチュアートの渦列(図-1参照)を構成するせん断流中に一辺10 cmの立方体あたり粒子数 N の粒子を乱数で決定された初期位置から次式の流速の解析解で移流させた連続する粒子位置情報を入力データとして、3DSRStereoPIVで解析し、この流速場の解析解と比較を行った。

$$\begin{aligned} u &= A \sinh(2\pi y/L) / (\cosh(2\pi y/L)) \\ &\quad - q \cos(2\pi x/L) \dots \dots \dots (3.a) \end{aligned}$$

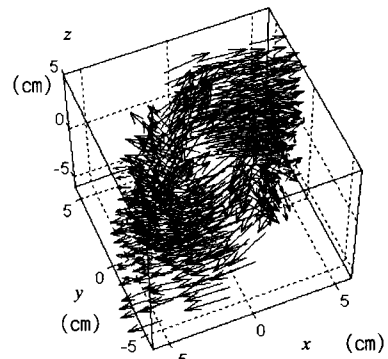


図-3 3DSRStereoPIVにより算出した3次元流速ベクトル (N=200)

$$\begin{aligned} v &= -Aq \sinh(2\pi x/L) / (\cosh(2\pi y/L)) \\ &\quad - q \cos(2\pi x/L) \dots \dots \dots (3.b) \end{aligned}$$

$$w = 0 \dots \dots \dots (3.c)$$

ここで、 $y \rightarrow \infty$ での流速 $A = 5$ cm/s, 渦列の波長 $L = 10$

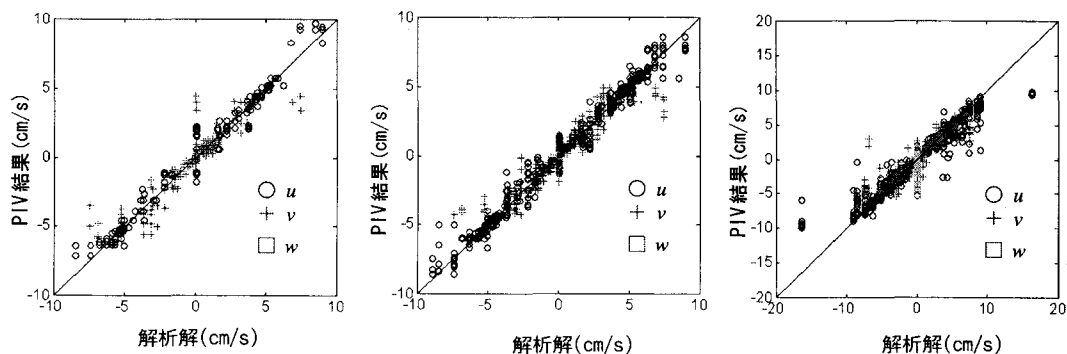


図-4 テストケースに対する解析解と PIV 解析結果の比較 (左: $N=50$, 中: $N=200$, 右: $N=1000$)

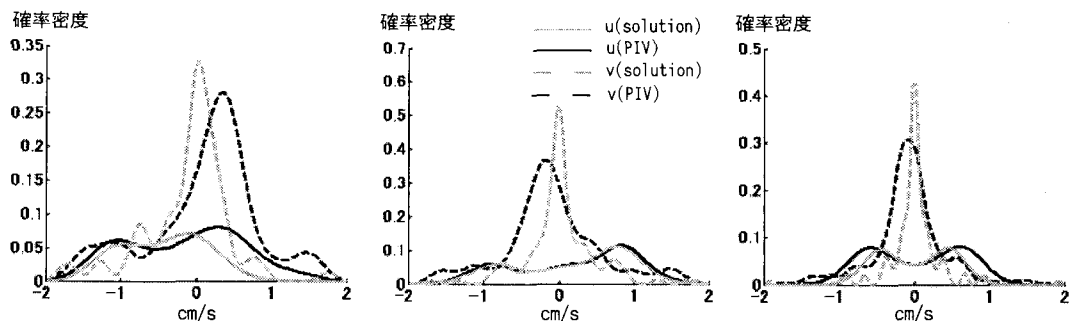


図-5 テストケースに対する解析解と PIV 解析結果の確率密度分布 (左: $N=50$, 中: $N=200$, 右: $N=1000$)

cm としてせん断パラメータ $q=1.0$ を与えた。

図-2 は、本 PIV により図-1 に示す 30 時刻に渡る 200 の粒子位置を入力値として解析を行い、粒子軌道を再構成したものである。本解析結果は、若干の軌道の途切れもあるが明らかにスチュアートの渦列の流線の特徴を再現しており、図-1 の入力値をリンクさせた軌道と酷似していることがわかる。また、同一テストケースに対して解析された 3 次元ベクトルもまた、せん断流中に存在する流体の渦運動を矛盾なく再現していることがわかる (図-3 参照)。

図-4 は、(3) で表した流速の解析解と対応する位置における PIV の結果をそれぞれ横軸、縦軸にとり、本 PIV 結果の精度の粒子数に対する依存性を調べたものである。本手法による結果は $N=50, 200, 1000$ の全てのケースについて解析解と高い相関があることがわかる。これらのそれぞれのケースに対する平均誤差は、 0.9040 cm/s , 0.6252 cm/s , 0.6590 cm/s であり、最大流速との相対誤差はそれぞれ 5.5% , 3.8% , 4.0% であった。この結果は、粒子数が少ない場合若干精度が低下するが、計算精度の粒子数依存性は決して大きくなく、その低い相対誤差は本 PIV 法が十分な信頼性を有していることを表している。注目すべきことは、一般的に相関法は粒子数の減少と共に精度が低下し、追跡法は粒子数の増加と共に精度が低下する。本論文で提案する 3DSRSTER-

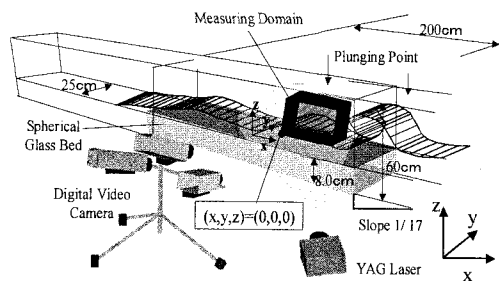


図-6 浮遊粒子速度計測実験装置

eoPIV は両者のスキームを併用し両者の欠点を補うことにより精度の粒子数依存性の少ない高精度解析を可能にするものである。

図-5 は、渦運動を構成する流速 u と v の確率密度分布を解析解と PIV 結果とで比較し、その粒子数依存性を調べたものである。粒子数が少ない場合には、粒子の存在位置に依存してその確率分布が大きく歪み、解析解との差異が大きくなる可能性があるが、粒子数の増加と共にこの歪みは低減され解析解と類似した分布となることがわかる。

これらを要するに、本 PIV 法は流速算定精度の粒子依存性は低い、本手法の最小解像度は粒子数で決定されるため、流速場の特徴を再現するためには粒子数を増加させその解像度を増加させる必要がある。なお、この数

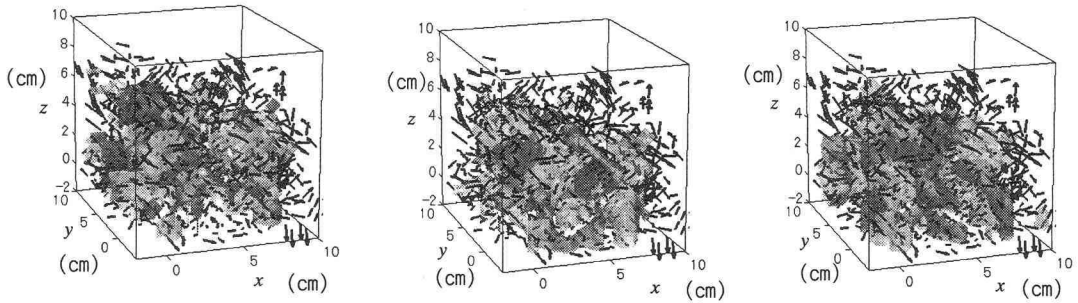


図-7 斜行渦到達位相の位相平均流速と等位相平均渦度分布 (左: $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$, 中: $\partial u/\partial z - \partial w/\partial x$, 右: $\partial w/\partial y - \partial v/\partial z$)



図-8 碎波フロントと斜行渦発生位置を撮影したスナップショット (図-7 の位相と対応する)

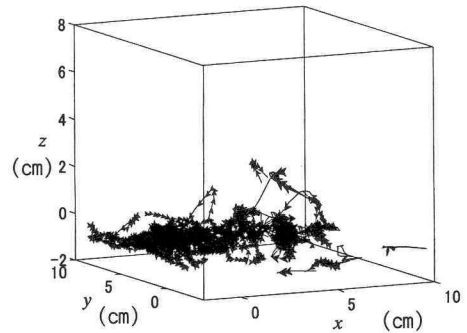


図-9 斜行渦到達時に発生する巻き上げイベントにおける典型的な浮遊粒子軌道

値試験に対して解析に要する時間は $N=1000$ のケースにおいても数分であり、実践的な問題に対しても十分適応可能な低コストアルゴリズムであるといえる。

3. 碎波帯の固液混相流への適用

碎波帯の海底砂の浮遊、移動と流体運動との相互関係を調べるため、海底砂の巻き上がりが顕著となる遷移領域での固液両相の速度を本論文で提案する 3DSRStereoPIV により測定し、その特徴について議論を行う。

(1) 実験装置

海底砂のモデルとして蛍光着色された球形ガラスビーズ (径 1 mm) を全面アクリル張り造波水槽内 1:17 勾配の碎波帯に敷設した (図-6 参照)。三台の視軸角の異なるデジタルビデオカメラ (Kodak 製 ES1.0, 記録周波数 30 Hz) が水槽側方に設置され、着水点背後 (碎波点から 70 cm 岸側) の底面上の計測領域 ($L: 15 \text{ cm}$, $W: 15 \text{ cm}$, $H: 10 \text{ cm}$) に照射した YAG レーザーによって励起された蛍光ガラスビーズからの励起光が撮影される一方、入射レーザーと同一波数をもつ混入気泡等からの反射光は光学フィルターにより取り除かれる。流速計測には蛍光中立粒子 (粒径 20~100 μm , ダイアイオン) を流体に混入し同様なフィルター及び照明を使用して励起光画像を取得した。取得画像は多重フィルター処理後、輝度勾配を用いて粒子の重心座標がサブピクセル精度で決定され

表-1 実験及び波浪条件

実験 波浪条件	固相粒子計測	流体計測
入射波浪の周期	2.0 (s)	2.0 (s)
入射波浪の振幅	100 (mm)	100 (mm)
碎波水深	23.5 (cm)	23.5 (cm)
碎波波高	13 (cm)	13 (cm)

る (渡部ら, 2003)。三台のカメラの画像座標は三次代数式により実座標に変換され、2.1 に示した方法で局所粒子速度が解析される。実験条件を表-1 に示す。

(2) 巻き上げイベント発生領域の流体運動

図-7 は、計測領域を碎波フロント通過後、生成された斜行渦が底面近傍に達する位相 (図-8 参照) における位相平均流速及び同一位相における位相平均渦度の等渦度面を表したものである。斜行渦内では気泡を巻き込んだ流体運動が顕著となるため、三次元的に複雑に変化する流速場が構成され、複数の渦管が絡み合う様な特徴的な分布を示している。しかしながら、渦度の様な微分形の物理量の評価は非常に高精度と解像度で測定された空間的にスムーズな流速場による算定を要求するので、この結果が空気を巻き込んだ局所性の強い渦度分布を的確に表現できているかさらなる検証が必要である。

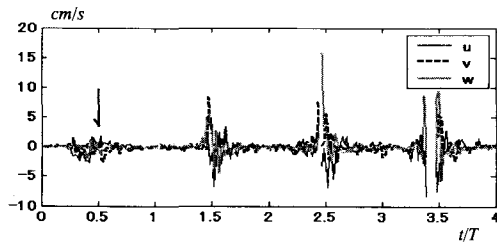


図-10 空間平均ガラスビーズ粒子速度の時系列

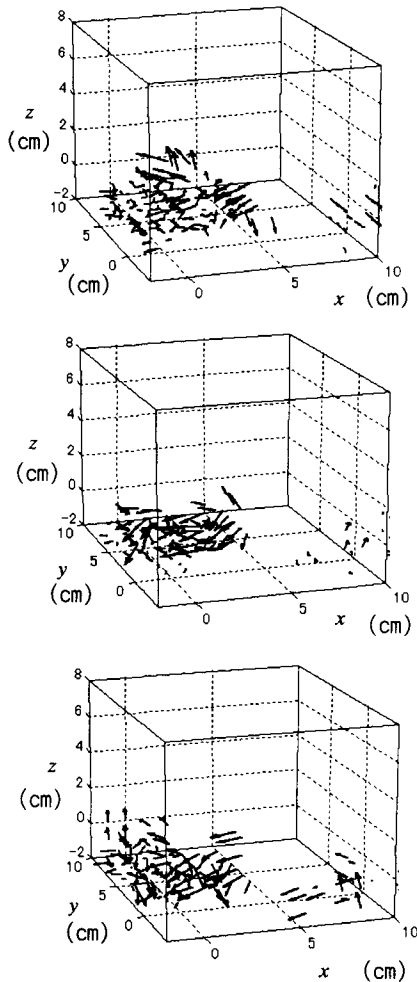


図-11 浮遊イベント時の三次元粒子速度ベクトル (時間間隔: 1/30 秒)

図-9 は、斜行渦の到来する位相における海底に敷設した蛍光ガラスビーズの浮遊イベント時の典型的な粒子軌道 (計測時間: 0.2 秒) を表したものである。斜行渦に捕捉されたと予想される数個の粒子が数 cm 上方に巻き上げられ岸方向に僅かに輸送されて再び着床する粒子軌道を再現している。本実験条件では、斜行渦の底面への

到達と同時に発生する浮遊イベント時にのみ粒子の移動が確認されている。それ故、この領域の平均粒子速度はこの浮遊イベント時にのみ周期的に発生し、約 $T/4$ 間 (T : 周期) に渡ってスパイク状の三次元変動が継続する特徴的な時間変動を示した (図-10 参照)。図-11 は、図-9 に示す粒子輸送がなされた時間内の瞬時粒子速度ベクトルを表したものである (図-10 中に矢印で示された位相に対応する)。局所的に発達する浮遊時の鉛直速度並びに岸向き移流速度分布が矛盾なく算出されていることがわかる。三次元相関法と追跡法を併用した 3DSRStereoPIV により、マーカーの密度分布に極めて差がある (一様に粒子が分布しない) 領域の三次元粒子速度についても適当な算定が可能であると考えられる。

4. 結 論

三次元空間内の三次元速度を取得するための高精度、高解像度計測法である 3DSRStereoPIV を開発しその精度を検証すると共に砕波帯における固液混相流への適用性について議論した。

数値試験により、この方法は対象粒子数への精度依存性が低くまた工学的問題へ適用するのに十分な精度 (相対誤差が 3.8~5.5%) で三次元速度計測が可能であることが証明された。

砕波後に生成された斜行渦に起因する粒子の浮遊イベント時の三次元流速及び浮遊粒子速度分布を計測した。斜行渦による粒子の浮遊時に予期されるような典型的な巻き上げ軌道が取得され、この軌道を構成する上で矛盾のない粒子速度が算出された。海底砂の様なマーカーとなる粒子の密度分布に極めて差がある (一様に粒子が分布しない) 領域の三次元粒子速度についても適当な算定が可能であり、それ故、本論文で提案する 3DSRStereoPIV は現在まで計測が困難であった様々な領域の三次元粒子速度計測に有効な手法であると考えられる。

他の計測法による結果と何らかの方法で比較し、本 PIV 法の実流体を使った計測精度を検証する必要がある。

参 考 文 献

- 奥村悠樹・渡部靖憲・佐伯 浩 (2001): 砕波帯内の 3 次元流速の実験的評価, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 96-100.
- 竹原幸生・江藤剛治・前田崇雄・相武克彦 (2000): PTV による風波発生時の水表面近傍の気流・水流計測法, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 101-105.
- 渡部靖憲・秀島賢保・佐伯 浩 (2003): 砕波乱流下の底質粒子の三次元的挙動及び巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 446-450.
- Kieft, R. N, K. R. A. M. Schreel, G. A. J. van der Plas and C. C. M. Rindt (2002): The application of a 3D PTV algorithm to a mixed convection flow, Experimental in Fluid.