

流跡線画像を用いた3次元流動計測法の開発と混相流計測への適用

環境水域工学分野

馬瀬 慎也

Abstract

物質の複数の相が混ざり合って流動する現象は混相流と呼ばれ、身の回りに多く存在する。その流動特性は、複数の相間での力学的干渉により変化するが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。本研究では力学的干渉メカニズム解明に資する簡便な3次元速度分布計測法(3D-PLCV)の開発を行った。本稿では、3D-PLCVの解析アルゴリズムについて、詳細に記すとともに、CG画像を用いた精度検証結果を基に、本研究で提案する端点抽出法の有用性を示す。また、本手法の適用事例として、移動物体まわりの流動運動を、移動物体の運動とともに計測した。その結果、移動物体の通過による流体運動および速度変動の生成過程について概ね計測が可能であることが検証された。

1 はじめに

物質の複数の相が混ざり合って流動する現象は混相流と呼ばれ、身の回りに多く存在する。その流動特性は、複数の相間での力学的干渉により変化するが、その詳細なメカニズムは明らかになっていない。海岸工学分野における代表的な混相流としては、水中に土粒子が混在する固液混相流が挙げられ、数値モデルの構築が盛んに行われている[4][5]。これらは、解析モデルに力学的相互作用を示す項や乱流モデルの導入はなされているが、詳細なメカニズムに基づくモデルは提案されていない。

計算機器能力の向上に伴い、画像計測手法による流速の面的計測や直接数値計算が可能となり、流動変調メカニズムは明らかになりつつある。例えば、佐藤ら[6]は実験結果から乱れの消散および生成は、従来の単一スケールの乱流モデルでは表すことができないと指摘し、二相流モデルを提案している。このように、流動変調メカニズムの解明に寄与する画像計測手法は、未だ次のような研究課題を有する。それは、時・空間的に変動する場の3次元計測である。いくつかの方法が提案されているが、光学機器の設置が煩雑であること、高価な機器を必要とすることから、これらの手法の導入は容易でない。

このような背景から、本研究では流動変調メカニズム解明に資する簡便な3次元速度分布計測法の開発を目的とする。以降では、3次元流動計測手法(3D-PLCV)の詳細について記すとともに、提案する端点抽出法の有用性をCG画像を用いた精度検証により示す。最後に、3D-PLCVを用いた移動物体まわりの流動計測の結果を示す。

2 3次元流跡線連結法の開発

PLCVは流し撮影法により取得した流跡線画像から露光時間中における移動距離(始点・終点間距離)を求め、露光

時間で除すことによってトレーサの存在位置における速度を求める方法である。その3次元化に際しては、2台の高速カメラを用いたステレオ撮影法を採用している。

3D-PLCVは、それぞれのカメラで撮影された連続する画像間で流跡線を対応付ける「時系列マッチング(TM:Temporary Matching)」と、異なるカメラで撮影された画像中の流跡線を対応付けて3次元空間座標を再構築する「ステレオマッチング(SM:Stereo Matching)」から成る。本手法では、まずカメラ毎にTMを行った後、流跡線端点の時系列情報を利用したSMを行う。Guezennec[3]はStereo-PTVにおいて、5時刻のトレーサ座標を用いることによってSMの精度が向上すると報告している。Guezennec[3]が用いたPTVでは画像上のトレーサの位置情報をsub-pixel精度で抽出できる粒子マスク相関法[1]を適用しているが、従来のPLCVは、2値化・細線化処理を施すことによって流跡線の端点を抽出していたため、端点の位置情報はpixelオーダーの精度に留まる。その結果、連続撮影された画像における流跡線の端点座標が厳密には一致しないという課題を有していた。中條ら[8]は、このような端点座標の不一致が計測精度に及ぼす影響を低減する手法を提案しているが、より精度の高い端点座標抽出法が望まれる。そこで、本研究では、連続する3時刻のモノクロ流跡線画像に対して各々異なる単一色相(R・G・B)を与え、それらを合成することでカラー画像を作成し、色相および輝度情報を利用した高精度な端点抽出法を提案する。以下では、図-1に従い、3D-PLCVの解析アルゴリズムの説明とともに、新たに導入した流跡線の端点抽出法の詳細について記す。

2.1 撮影方法

従来の凍結撮影法は、パルスレーザーを短時間に複数回照射し、照射毎に瞬時のトレーサ像を円状に撮影する

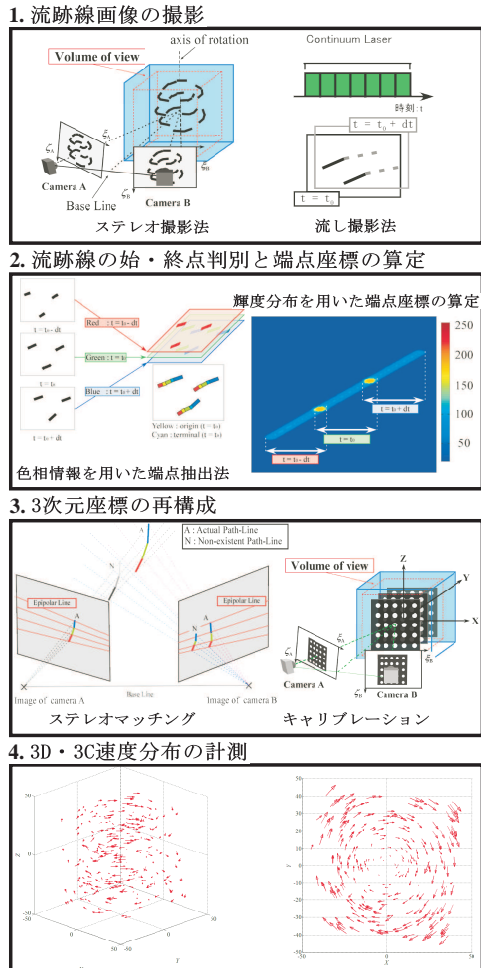


図-1 : 解析フロー

(図-2(a) 参照). そのため、後述する流し撮影法と比較して計測可能な速度帯が狭く、界面のように速度勾配が大きな地点の計測に適さない。

本手法では、連続光源を用いて、画像の撮影間隔 T_c とカメラシャッターの開放時間 T_s が等しいという条件下で、トレーサの移動軌跡を撮影する(図-2(c) 参照). 従来の流跡線法では、 T_c と T_s を等しく設定しておらず、現象を断続的に撮影していたため、流跡線の始点・終点の判別が課題であり、逆流を含むような複雑な流れの計測に不向きであった(図-2(b) 参照).

図-2(c) のようにして、撮影した時系列画像を重ね合わせると、 $t = t_0$ に撮影された画像中の流跡線の流跡線は、次時刻 ($t = t_0 + t$) に撮影された画像中の流跡線と連結することができるとともに、その端点は重複する. このことで、従来の流跡線法で課題であった、始点・終点の判別が容易となる. つまり、重ね合わさった端点は、 $t = t_0$ に撮影された画像中の流跡線の終点を、 $t = t_0 + t$ に撮影された画像中の流跡線の始点を表すため、容易に判別することができる.

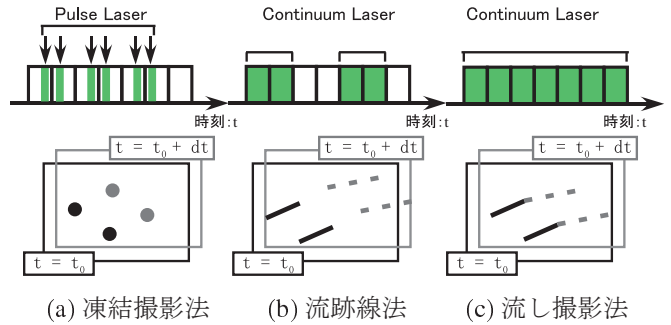


図-2 : 撮影方法の違いによる撮影画像の比較

2.2 色相情報を用いた端点座標の抽出および始・終点の判別

本手法では、白黒画像として撮影された流跡線情報に、連続する画像に異なる色相情報 (R・G・B) を付加し、これらの画像を重ね合わせることによって、両画像の色相の和として示される同一時刻におけるトレーサ像を抽出し、このトレーサ像の輝度分布から端点座標を算出するものである. 以下にその詳細を記す.

2.2.1 色相情報を用いた始・終点の判別および端点座標の抽出

まずはじめに、流し撮影法によって撮影された、連続する3時刻の白黒画像から端点抽出に用いるカラー画像の作成方法について説明する.

時刻 $t = t_0$ から Δt 間に撮影された画像 $\text{Image}(t_0)$ 中のトレーサの流跡線像情報を $\text{PL}(t_0)$ とする. 河野ら [7] に倣って、連続光源を用いた流し撮影を行えば、間断なくトレーサを撮影することができるので、時刻 $t = t_0$ における $\text{Image}(t_0)$ 中の流跡線 $\text{PL}(t_0)$ の終点は、 $\text{Image}(t_0 + \Delta t)$ 中で流跡線 $\text{PL}(t_0 + \Delta t)$ の始点として撮影されることになる. したがって、たとえば、 $\text{Image}(t_0 - \Delta t)$ をカラー画像の色相 R に、 $\text{Image}(t_0)$ を色相 G を付加し、さらに、 $\text{Image}(t_0 + \Delta t)$ をカラー画像の色相 B に付加する. この結果得られるカラー画像は、図-3 に示すような色相を持っている. このカラー画像において、 $\text{Image}(t_0 - \Delta t)$ と $\text{Image}(t_0)$ の重複部分は黄色の色相を、 $\text{Image}(t_0)$ と $\text{Image}(t_0 + \Delta t)$ の重複部分はシアン色の色相をそれぞれ持つことから、黄色の色相をもつ画素群は $t = t_0$ でのトレーサ像 (始点) を示し、シアン色の色相をもつ画素群は $t = t_0 + \Delta t$ でのトレーサ像 (終点) を示すことになる. つまり、色相情報を用いて $\text{Image}(t_0)$ 中の流跡線の始・終点の判別が可能である.

2.2.2 輝度分布を考慮した端点座標の抽出

上記にしたがって、カラー画像を作成すると、図-4 のような輝度分布を示す. 連続する2時刻の流跡線画像で重複する部分、つまり $t = t_0$ の流跡線画像の始・終点において、輝度分布のピークが存在することがわかる. 本手法では、この輝度分布をガウス分布と仮定し、流跡線端点の位置情報抽出に利用する. 具体的には、重複する部分の重心位置を流跡線端点の位置情報とする. このとき、カラー

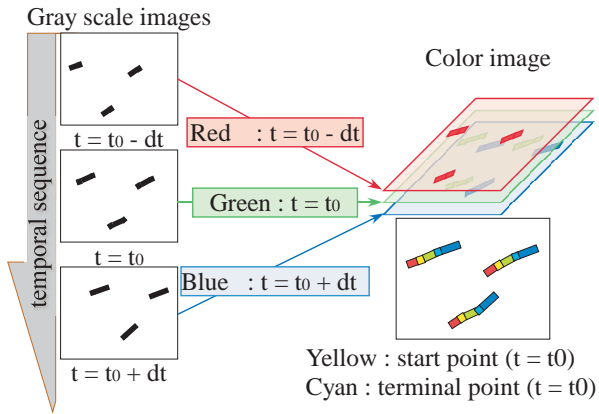


図-3 : カラー画像の作成法と始・終点の判別

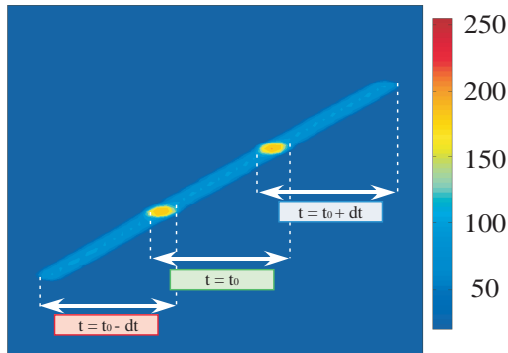


図-4 : カラー画像の輝度分布

画像の輝度情報を用いて重み付けすることで、より高精度に端点位置情報を抽出することができる。その端点位置情報の抽出精度については後述する。

2.3 ステレオ撮影法による3次元座標の再構成

本手法は、2台のカメラを用いたステレオ撮影を行い、下記の区分的カメラモデルを介することで、画像中の画像座標から実空間の3次元座標への変換を行う。この際、先の時系列マッチングの結果を利用した3次元座標の再構成を行うことで、計測精度の向上を実現する。

3次元座標の再構成は、撮影画像中の座標 (ξ, ζ) と3次元座標 (\mathbf{X}) を対応付けるためのキャリブレーションと、2台のカメラ間で撮影された画像中の流跡線に対応付けるためのステレオマッチングから成る。

キャリブレーションは、撮影画像中の座標と物理空間座標を、Watanabe[2]の手法に従って3次代数方程式による区分的カメラモデルによって行った。この手法は、水槽壁面やカメラレンズの歪みなどでもたらされる光路の屈折の影響を補正することができることから、高精度で撮影画像中の平面座標 (ξ, ζ) と空間座標 (\mathbf{X}) を対応付けることができる。カメラ番号*i*で撮影された画像座標 (ξ_i, ζ_i) における被写体と、カメラ番号*j*で撮影された画像座標 (ξ_j, ζ_j) における同一被写体の3次元座標 (x, y, z) を、式(1)~(3)によ

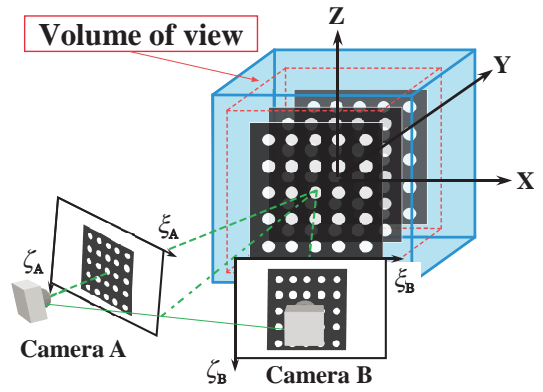


図-5 : キャリブレーション

て求める。なお、SM演算を高速化するため、Watanabe[2]らの3次代数方程式を一部行列演算化した。

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

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

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

ここで x, y, z は3次元座標を、 ξ, ζ は画像座標を表し、また、 $a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{20}, c_1 \sim c_{20}$ はカメラ校正係数を、添え字の*i, j*はカメラ番号をそれぞれ表す。ただし、 x, y, z, ξ_j は列ベクトルであり、その大きさはカメラ*j*で撮影された画流跡線数である。

上式中のカメラ校正係数 $(a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{20}, c_1 \sim c_{20})$ を決定するため、図-5に示すように、マーカの相対的な位置が既知である校正板をトラバースして画像を撮影する。その後、既知であるマーカの3次元座標 (\mathbf{X}) と、それぞれのカメラで撮影された画像上の座標 (ξ, ζ) から、最小二乗法によりカメラ校正係数を求める。

キャリブレーションの際には、異なるカメラで撮影された画像中の校正マーカの位置関係は既知である。しかし、実際の測定では2台のカメラで撮影された画像中の多数のトレーサの中から、同一トレーサを視覚的に抽出することは不可能である。従来から、ステレオ撮影による多点計測では、異なる視点から撮影されたトレーサ画像の誤対応による虚像の発生が課題であった。

従来の方法では、空間中の任意の点の座標 \mathbf{X} は、カメラ1による撮影画像中では (ξ_1, ζ_1) に、また、カメラ2に

よるそれでは (ξ_2, ζ_2) に位置するとすれば、前述のカメラモデルにおいては、 (ξ_1, ζ_1, ξ_2) から推定される空間座標 \mathbf{X}_1 と (ξ_2, ζ_2, ξ_1) から推定される空間座標 \mathbf{X}_2 が求められることになる。両画像中のトレーサの位置情報から適切な組み合わせが選択された場合には、 \mathbf{X}_1 と \mathbf{X}_2 に差違は生じない（正確には、大きな差違は生じない）。しかし、不適切な組み合わせを選択した場合には、両者には大きな差違が生じる。このことから、従来法では $\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$ を SM の適性指標 I_{SM} とする方法がとられてきた。

提案手法では、流跡線の時系列情報を用いることで、このような虚像の発生確率を低下させることができる。仮に、流跡線の端点の一方が虚像を発生させる位置関係にあったとしても、もう一方の端点は異なるエピソード線上に存在する確率が高いので、両端点情報を対にして SM 操作を施すことによって虚像の発生を抑制することができる。すなわち、流し撮影によって得られる情報量は凍結撮影によって得られるそれよりも多く、これを有効活用することによって解析時間の短縮および計測システムの低価格化を実現することが可能である。さらに、連続する数枚の画像を用いた流跡線の連結操作 (TM) の情報をあわせて用いれば、虚像の発生はさらに抑制することができる。このことから、本手法では連結された流跡線の端点ごとに、適正指数 I_{SM} を算定することで、虚像の発生を抑制する。

本研究では、5 時刻の流跡線画像 ($t = t_0 - 2\Delta t \sim t_0 + 2\Delta t$) から、3 時刻間 ($t = t_0 - \Delta t \sim t_0 + \Delta t$) の流跡線始・終点の 3 次元座標を得たのち、始点・終点間距離を露光時間で除すことで、速度の 3 成分を得た。

3 CG 画像を用いた端点抽出精度の検証

本研究で提案する色相情報を用いた端点抽出法の効果を確認するため、CG 画像を利用した端点抽出精度の検証を行った。

3.1 検証方法

輝度がガウス分布を有する円形トレーサを作成し、このトレーサを任意の流向・流速で移動させることによって流跡線画像を作成した。ここでは、端点の抽出精度のみを議論の対象とするため、トレーサの初期配置を格子状とし、流向 θ を 0~90 度の範囲で 15 度刻みに変化させて CG 画像を作成した。画像のサイズは 1040×1280 pixels、トレーサの数密度は 18 個/(100×100) pixels である。なお、流跡線の端点の抽出精度の議論であるため、ここでの画像の作成にあたっては、2 次元平面上でトレーサを移動させている。作成した CG 画像の一例を図-6 に示す。図中の白い線は流跡線像であり、トレーサ径を 4 pixel とした。拡大図中の θ は流向を示し、画像の長手方向を基準として、反時計回りに正とした。

端点の抽出精度の検証にあたっては、トレーサ端点情報を与えた時刻におけるトレーサ中心座標 (ξ_M, ζ_M) と、解析で求められた端点座標 (ξ_T, ζ_T) の差

$$Err = \sqrt{(\xi_M - \xi_T)^2 + (\zeta_M - \zeta_T)^2} \quad (4)$$

を評価指標とした。

Case1 画像の 2 値化・細線化処理を経て連結数から端点を抽出する手法

Case2 Case1 の手法では流跡線の縮退によって連続撮影画像から求められる任意の流跡線の同一端点の座標は一致しない。両者の座標位置の平均位置へと修正する手法

Case3 色相情報を用いた本手法

3.2 検証結果

上述の端点座標の決定方法ごとに、端点の抽出誤差を検討した結果を図-7 に示す。同図は、撮影画像の水平軸に対して流向 θ を変えて検討を行った結果を示したもので、棒グラフは平均誤差 Err_M をその標準偏差 Err_S をエラーバーで表している。

図-7 によれば、Case1 の手法を用いた場合の誤差は $0.61 \pm 0.23 \sim 1.01 \pm 0.20$ pixel 程度、Case2 および Case3 の誤差は、それぞれ、 $0.56 \pm 0.17 \sim 0.87 \pm 0.19$ pixel 程度、 $0.26 \pm 0.11 \sim 0.47 \pm 0.23$ pixel 程度であることがわかる。すなわち、端点抽出精度は Case3 が最も高く、sub-pixel 精度の端点抽出を実現していることがわかる。したがって、色相情報を用いて端点座標を抽出する本手法の有用性が検証できたと言える。

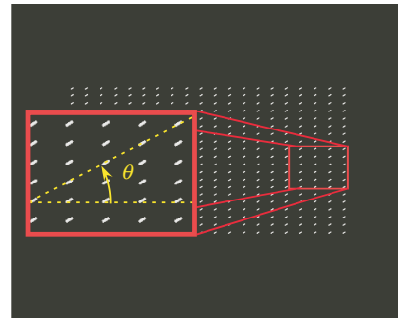


図-6 : CG 画像の一例 ($\theta = 30$ deg.)

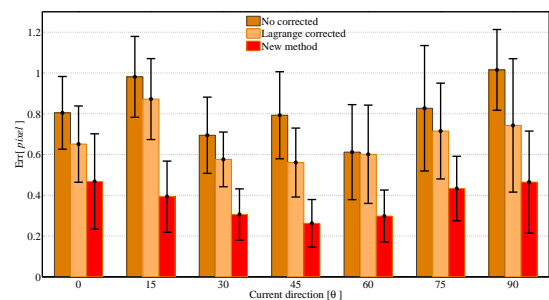


図-7 : 端点抽出誤差の平均 Err_M および標準偏差 Err_S

4 3D-PLCV の適用事例

3D-PLCV の適用事例として、浮上球によって誘起される流動の計測を行った。移動物体に誘起される流れを 3 次元的に計測できるか検証するとともに、誘起される流れの特性を調べる目的で本実験を行った。



図-8 : 実験に用いた水槽

4.1 実験概要

実験に使用した水槽を図-8に示す。本実験では、流体に比重 $1.03(\rho_L)$ の食塩水を、浮上粒子に比重 $0.6(\rho_S)$ 、直径 $15\text{mm}(D_n)$ のゴム球を使用した。また、タナックス製の蛍光塗料を塗布した粒子(比重 1.03 、粒径 $0.2\sim 1.2\text{mm}$)を 0.63mm 目のふるいにかかけ、通過したものを流体のトレーサとして用いた。流体を乱さず粒子を投入するため、水槽底面に直径 5cm の投入口を設けた。この投入口に端部が開閉可能なチューブを接続し、チューブを介して水槽内に3つの球を連続して投入した。

計測領域は、水槽底部の投入口の直上 $8.15 \times 16.45 \times 10.45\text{cm}^3$ とした。同期の取られた2台のカメラを用いて、撮影間隔および露光時間は共に $1/60\text{sec}$ として画像を撮影した。なお、3次元座標の再構成においては、ORIENTAL MOTOR製の電動スライダ(位置決め精度: $\pm 0.02\text{mm}$)を用いて、校正板を 2cm 毎に平行移動させて、キャリブレーションを行った。3次元座標の再構成精度を確認するため、キャリブレーションのステレオ画像から校正板に付したマーカの3次元座標を算出した。その結果を図-9に示す。図中の \circ は計測値、 $+$ は校正マーカの3次元座標を示す。 x 軸をトラバース方向、 y 軸を水槽の長手方向、 z 軸を水深方向となるよう座標系を設定した。図-9によると、全計測領域において3次元座標を良好に再現できていることがわかる。求められた校正係数を用いて、撮影画像から校正マーカの3次元座標 \mathbf{X}_m を求め、既知座標 \mathbf{X}_l との差の平均値をキャリブレーション誤差と定義する。このとき、本実験における3次元座標の再構成精度は撮影空間領域に対して 0.7% 程度であった。

4.2 計測結果

ここでは、3D-PLCVを用いて浮上球の運動とその周囲流体の運動をそれぞれ解析した結果を記す。

4.2.1 浮上球の運動

目視観測によれば、底面の投入口より水槽中に浮上した球は、中央からまっすぐに浮上するのではなく、水槽の長手方向(y 軸方向)に移動しながら、浮上する様子が両ケー

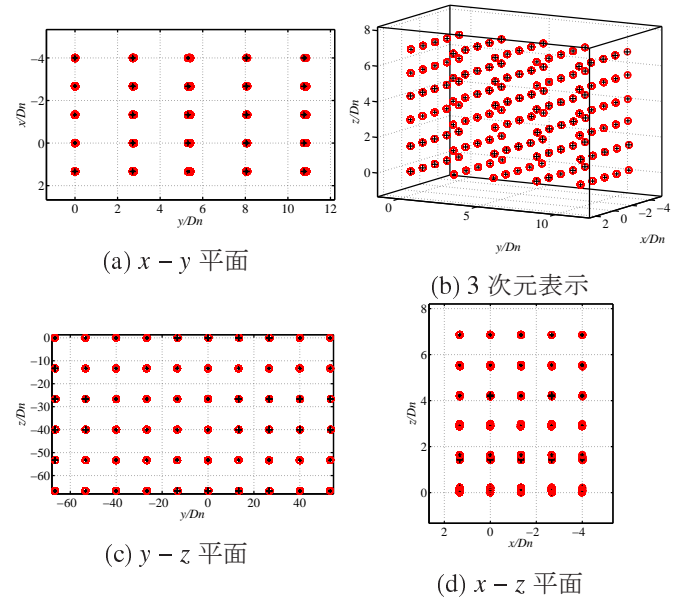


図-9 : キャリブレーション結果

スに共通して観察された。底面の投入口より水槽中に浮上した球は、青色球と緑色球が先行して浮上し、それに追従するように赤色球が浮上する様子が観察された(図-10参照)。青色球と緑色球の浮上速度はほぼ同じ大きさで、赤色球のそれに比べて遅い速度であったが、その後3つの球はほぼ同程度の速度で浮上するようになった。

計測領域の下限から上限までの浮上球の運動を図-10に示す。図-10は、解析結果を $1/12$ 秒ごとに 0.33 秒間(25枚の撮影画像)の移動軌跡を点線で示した。以降では、十分な時間計測領域内に存在した、赤球と緑球について述べる。図-10によると、球は直線的に浮上するのではなく、 xy 平面内で反時計回りにらせん運動をしながら浮上する様子が確認できる。

浮上速度の時間変化を図-10(d)に示す。なお、球の浮上速度は式(5)で示される代表速度 V_n を用いて無次元表示している。

$$V_n = \sqrt{g(1 - \rho_S/\rho_L)D_n} \quad (5)$$

図-10(d)によると、計測領域内において、緑色球は加速、赤色球は減速し、やがてほぼ同じ速度に漸近していく様子が確認できる。漸近する速度は、 V_n の 8 割程度(19.5cm/sec)であり、この速度から求められるレイノルズ数は 2925 であった。

4.2.2 流体の運動

目視観測によれば、浮上球の通過時にはトレーサの移動量は大きいですが、通過後は比較的短時間のうちに静止状態に戻る様子が観察された。

計測領域内を浮上球が通過する時間は約 0.35 秒間(21枚の撮影画像)で、1組の流跡線画像から計測できた速度ベクトルの総数は $7,000$ 程度、速度ベクトルの数密度は浮上球の体積あたり 4.0 本程度であった。図-11に計測結果の一例を示す。なお、速度ベクトルは代表速度 V_n を用いて

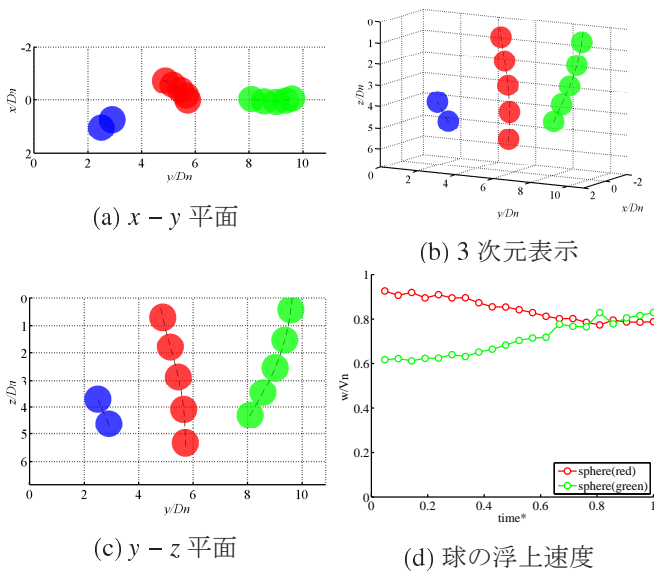


図-10 : 浮上球の運動

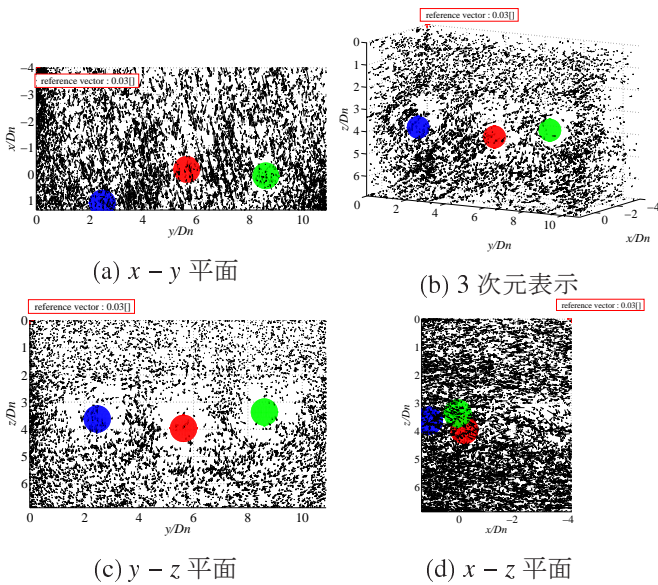


図-11 : 浮上球周囲の流動 (計測結果の一例)

無次元表示している。同図より計測領域内で、比較的均一に3次元流速情報を得ることができていることがわかる。

浮上球による速度変動 V' の生成過程を検討するため、球の直下点 (LP.1) と $\frac{1}{2}D_n$ だけ鉛直下方に離れた点 (LP.2) の2点を対象として、球の後流域における V' をLagrange的に追跡した。速度変動量 V' は、式(7)で示され、その各方向成分を $|u'|$, $|v'|$, $|w'|$ とする。その結果を図-12に示す。

$$\langle V \rangle_{(x_c, y_c, z_c)} = \frac{1}{M} \int_{V_s} V_m(x_m, y_m, z_m) dv \quad (6)$$

$$V'_{(x_m, y_m, z_m)} = V_m(x_m, y_m, z_m) - \langle V \rangle_{(x_c, y_c, z_c)} \quad (7)$$

ここに、 V_m は計測流速である。また、 V_s は空間平均操作を施す領域を表し、ここでは直径 $30\text{mm}(2D_n)$ の空間とし、 M はその領域内における計測流速の個数を表す。

図-12によると、LP.1においては間欠的に V' が発生しているにも関わらず、LP.2においては全計測時間を通し

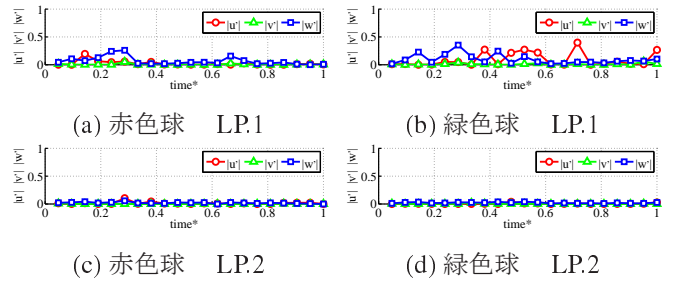


図-12 : 浮上球に誘起される速度変動量の生成過程

て、 V' が0である。すなわち、本実験条件の下では、浮上球の通過に伴う速度変動量 V' は、浮上球から半径以内で減衰していると推察される。

5 おわりに

CG画像による精度検証の結果、本研究で提案する端点抽出法の有用性を示すことができた。また、3D-PLCVを用いて、移動物体によって誘起される流体運動を、移動物体の運動とともに計測した。その結果、移動物体の通過による流体運動および速度変動の生成過程について概ね計測可能であることが検証された。

参考文献

- [1] N.Kiritsis. Statistical investigation of errors in particle image velocimetry. *M.S.Thesis*, 1989.
- [2] Yasunori Watanabe. Three-dimensional stereoscopic particle tracking velocimetry for a large domain(3dsptv-ld) and its application.
- [3] Y.G.Guezennec, R.S.Brodkey, N.Trigui, and J.C.Kent. Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*, Vol. 17, No. -, pp. 209-219, 1994.
- [4] 玉井昌宏, 村岡浩爾, 下屋陽八郎. 2流体モデルを基礎とした $k-\epsilon$ 乱流モデルによる粒子プルームの数値計算. 海岸工学論文集, 2003.
- [5] 原田英治, 後藤仁志, 鶴田修己. 固液混相乱流モデルによるブロック群の沈降・堆積過程の数値シミュレーション. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2009.
- [6] 佐藤洋平, 福市潮, 菱田公一. ラグランジアン計測による矩形管内流中の固体粒子群間乱れ歪構造. 日本機械学会論文 (B編), 2000.
- [7] 重松孝昌, 河野哲也. 高濃度分散相によって誘起される固液混相流の計測手法の開発. 混相流研究の発展 2, pp. 141-148, 2007.
- [8] 中條壯大, 重松孝昌, 馬瀬慎也. 複雑流動計測のための二視点系三次元 ptv に関する基礎的研究. 海岸工学論文集, 2009.

討 議 等

◆討議 [鈴木広隆 准教授]

アルゴリズムとしては、流し撮影法よりも凍結撮影法の方が簡便であるが、流し撮影法の利点はなにか。

◆回答：凍結撮影法と比較して、流し撮影法では時刻間の対応付けが正確である。また、計測可能な速度帯が広いため、速度勾配の大きな流れ場にも適用することができる。

◆討議 [鈴木広隆 准教授]

凍結撮影法と流し撮影法による誤差の違いは。

◆回答：端点抽出精度については、両手法とも sub-pixel 精度であり、大きな差はないと考えられる。3次元速度分布の計測精度については、計測に用いる画像が異なり、他の方法と比較できないため、一概には言えない。

◆討議 [谷池義人 教授]

高レイノルズ数の計測も可能か。

◆回答：理論上、撮影間隔とカメラのシャッター開放時間を調整することで、高レイノルズ数の流動計測も可能である。

◆討議 [大島昭彦 准教授]

目的では沈降過程の混相流を挙げていたが、実験では浮上球を扱っている。固相の比重は、流動解析に関係するのか。

◆回答：流動解析において、固相の比重は関係しない。固相の沈降過程で発生する流動計測では、流体中に物体を投入する際の初期条件を一様にするのが困難である。そのため、初期条件を一様にするのが容易な浮上物体周りの流動計測を行った。

◆討議 [西岡真稔 准教授]

追跡可能なトレーサ径はどの程度までか。

◆回答：撮影画像中において、1pixel以上の大きさがあるものから画像中に収まる大きさまでのトレーサを追跡することが可能。ただし、撮影画像における被写体の大きさは、相対的な大きさである。そのため、カメラと被写体との距離、使用するレンズの焦点距離によって、その大きさは変化することに留意する必要がある。