

Simultaneous 3D-PTV and UVP Measurements of Unsteady Three-Dimensional Flow in a Suction Sump

Katsuya HIRATA*, Atsushi SHINTANI*, Ryo KAWAGUCHI*, Katsuhisa INAGAKI*, Takafumi NAGURA*
and Tsuyoshi MAEDA*

(Received August 22, 2016)

The authors attempt to understand the complicated flow inside a suction sump in the vertical-wet-pit-pump configuration. A three-dimensional particle tracking velocimetry (3D-PTV) technique is appropriate for this kind of flow. However, this technique includes more unknown factors in reliability and accuracy than other well-established measuring techniques. So, the authors examine the simultaneous measurement using both of the 3D-PTV and an ultrasonic velocity profiler with common tracer particles. As a result, the authors have successfully found out the suitable condition for the simultaneous measurement with high accuracy. Then, under this condition, the authors have revealed the time-mean and instantaneous velocity vectors of the flow inside the suction sump.

Key words : pump, suction sump, measurement, two-phase flow, unsteady flow

キーワード : ポンプ, 吸込水槽, 計測, 二相流れ, 非定常流れ

吸込水槽内の非定常三次元流れの 3D-PTV と UVP による同時計測

平田 勝哉, 新谷 淳, 川口 遼, 稲垣 勝久, 名倉 崇文, 前田 毅

1. 序

自由表面を持つ吸込水槽において、水槽の形状や流入形態、ポンプの運転状態が不適當であると、空気吸込がポンプの性能に大きな影響を与える。すなわち、空気吸込が発生すると揚水能力の低下や振動／騒音の増加をもたらす。よって、自由表面を有する吸込水槽としては、空気吸込が生じないことが不可欠の条件であり、吸込水槽の形状寸法は、コストと併せて上記の点を配慮して設計すべきである（文献^{1,2)}を参照）。著者らも、空気吸込の系統的研究^{3,4)}や空気吸込の発生時間比率の計測⁵⁾を行っている。しかし、空気吸込の発生を正確に把握し、現象の理解を深めるためには、より精密な流れ場の観察が有効と思われる。

これまでに、吸込水槽内の流れ場を観察した報告がいくつかある⁶⁻¹²⁾。その内、著者ら¹²⁾は超音波速度分布計 Ultrasonic Velocity Profiler (以降、UVP と呼ぶ)を用いた観察を報告している。しかし、装置の特性上、三次元時間平均流れ場の計測にとどまっており、三次元非定常流れ場の定量的観測が望まれている。

吸込水槽内流れも含め、一般に、工業的応用や環境問題に拘わる流れのほとんどは、非定常性と三次元性が共に強く、複雑である。その為、流れ場の瞬間的な三次元構造の把握は、有益な情報をもたらす。

三次元粒子追跡流速測定法（以降、3D-PTV と呼ぶ）は、このような問題に対して有効な手法の一つである。この方法では、一対のステレオ画像からトレーサー粒子の三次元位置を決定する。次に、異なる

*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6461, FAX: +81-774-65-6830, E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

複数の瞬間の三次元位置からトレーサー粒子の速度ベクトルを得る。3D-PTV には、次のような利点がある。(1) 本法は画像処理法の一つであり、流れを乱すセンサーが存在しない；(2) 同時に、多点の情報を得ることが出来る；(3) 対象となる三次元空間全体の情報を得ることが出来る。更に、もしハイスピード・ビデオ・カメラを使用して連続したステレオ画像を撮影すれば、流れ場全体の時間変化も観察出来る。このような利点の為、現在まで、3D-PTV に関する様々な研究¹³⁻²²⁾がなされてきた。その内、Doh et al. (2002)¹⁸⁾は精度の高い3D-PTV アルゴリズムを提案し、その信頼性と有効性をいくつかの応用を通して確認している。具体的には、円柱の後流(Doh et al., 2002)¹⁸⁾、噴流(Doh et al., 2002)¹⁹⁾、球の後流(Doh et al., 2004)²⁰⁾への適用が挙げられる。最近、著者ら^{21, 22)}により、3D-PTV により気泡流の解明が行われている。

上記のような利点にも拘わらず、3D-PTV の使用は充分普及していないようである。その主な理由の一つとして、データの信頼性すなわち精度評価の困難さが挙げられる。3D-PTV の精度に影響を及ぼす要因は多数あり、代表的なものだけを列举すると以下の通りである。(1) 流れの状態；(2) トレーサー粒子；(3) 照明装置；(4) カメラ；(5) 3D-PTV アルゴリズム。その為、3D-PTV についての具体的かつ実用的な精度予測法を確立することは、一般に容易ではない。この問題への対策の一法として、信頼性が高くかつ異なる計測原理に基づく別の補償計測法を用いて、3D-PTV と同時計測を実施することが考えられる。

本研究では、最初に、予備実験により 3D-PTV の簡便かつ柔軟な補償計測法として、UVP (Takeda, 1986²³⁾; Takeda et al., 1992²⁴⁾)を考えて、共通のトレーサー粒子を用いた同時計測の可能性を検討する。3D-PTV は非定常三次元流れ構造を計測出来る。一方、UVP は高い信頼性と安定性をもつ。具体的には、まず、円筒容器内の旋回流を、3D-PTV と UVP とで同時に計測する。もし、3D-PTV と UVP との同時計測が可能であり、その際の粒子径や粒子濃度等の目安を明らかにすれば、3D-PTV の精度確認は以前よ

りもはるかに容易になる。

次に、実際の吸込水槽模型を対象にして、まず、3D-PTV を UVP との同時計測により検証する。具体的には、吸込水槽内での流速を、3D-PTV と UVP によって同時計測する。その後、検証された 3D-PTV を用いて、吸込水槽内の非定常三次元流れ構造を定量的に明らかにする。

ここで、3D-PTV の補償計測法として、UVP 以外の方法も考えることが出来る。例えば、熱線流速計 HWV、レーザー・ドップラー流速計 LDV、粒子画像流速測定法 PIV、二次元粒子追跡流速測定法 2D-PTV などがある。HWV は高い信頼性と高い精度を有するがプローブが流れを乱す。LDV も同様に高い精度を持ち、更に高い時間分解能も持つが、トレーサー粒子の条件に影響を受けやすい。更に、HWV と LDV では、計測空間内の一点の情報しか得ることが出来ない為、特に未知の複雑な流れでは、慎重な計測点の選択が要求される。LDV や PIV、UVP については、異なる大きさのトレーサー粒子の混在により生じる複雑な影響や 3D-PTV の精度低下を避ける為、3D-PTV と共通のトレーサー粒子の使用が一つの可能性として考えられる。しかし、LDV では、トレーサー粒子の濃度は一様かつある程度高く保つ必要がある。PIV や 2D-PTV からは二次元情報を得られるが、3D-PTV と同種の光学的可視化画像情報を用いた解析の為、3D-PTV の補償計測には原理的に最適ではない。

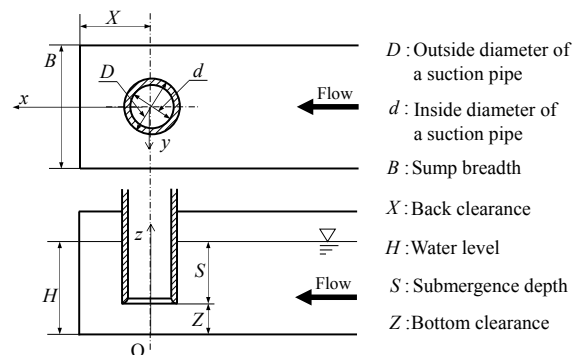


Fig. 1. Model: suction sump and suction pipe in the vertical-wet-pit-pump configuration, together with coordinate system.

2. 記号説明

- B : 吸込水槽幅 [mm]
 Bo : ボンド数,またはエトベス数 $\equiv \rho g A^2 / T$
 d : 吸込管内径 [mm]
 D : 吸込管外径 (ベルマウス径) [mm]
 D_{NP} : トレーサー粒子の数密度
 (単位体積あたりの N_p) [mm^{-3}]
 $D_{NP} V_{UVP}$: UVP の単位測定体積あたりの N_p [mm^{-3}]
 D_p : トレーサー粒子径 [mm]
 F_{VP} : トレーサー粒子体積率
 (単位体積当たりの V_p) [%]
 Fr : フルード数, $\equiv U_i / (gD)^{0.5}$
 g : 重力加速度 [mm/s^2]
 H : 水位 [mm]
 N_p : トレーサー粒子の総数
 Q : 吸込流量 (体積) [mm^3/s]
 Re : レイノルズ数, $\equiv \rho U_i D / \mu$
 S : 没水深さ [mm]
 t : 時間 [s]
 T : 表面張力 [g/s^2]
 U_c : 吸込水槽断面の平均流速 [mm/s]
 U_i : ベルマウス入口断面の平均流速 [mm/s]
 v_x, v_y, v_z : 流速 [mm/s]
 V_p : トレーサー粒子の全体積 [mm^3]
 V_{UVP} : UVP の単位測定体積 [mm^3]
 We : ウェーバー数, $\equiv U_i (\rho D / T)^{0.5}$
 x, y, z : 座標 [mm]
 X : 背面間隙 [mm]
 Z : 底面間隙 [mm]
 μ : 粘性係数 [g/mm s]
 ρ : 密度 [g/mm^3]
 σ : 標準偏差

3. 実験方法

3.1 吸込水槽と吸込管

Fig. 1 に, 吸込水槽と吸込管の形状を示す. 形状としては, 最も単純なものを考える. B は吸込水槽の幅, H は吸込水槽の水深, D は吸込管の外径, d は吸込管の内径 ($0.9D$ に等価), S は吸込管の没水深さ, Z は底面間隙 (吸込管入口から吸込水槽底壁

Table 1. Experimental parameters.

(d)	(34 mm)
B/D	3.16
X/D	1.58
Z/D	0.39
S/D	1.19
U_i	0.6 m/s
(U_c)	(0.095 m/s)
Fr	0.98
Re	2.2×10^4
We	14
(Bo)	(200)

までの距離), X は背面間隙 (吸込管中心軸から吸込水槽後壁までの距離) である. よって, $S=H-Z$ である. 吸込管入口は, 吸込水槽の中心軸上に設置する.

座標軸は, 吸込管中心線上の水槽底面に原点 O をとり, x 軸を水槽の流れ方向に, y 軸を水槽の幅方向に, z 軸を水槽の深さ反対方向にとる. x と y , z 方向の流速は, それぞれ, v_x と v_y , v_z とする.

吸込水槽は, 透明アクリル製で, 長さ 2 m, 高さ 0.4 m であり, 幅 B は最大 0.5 m まで拡張可能である. また, 吸込管外径 (0.014–0.048 m) は, 透明アクリル製である. 吸込管入口は, 内側を削ってベルマウス型に加工している. (よって, ベルマウス径は D と等価となり, 形状パラメータ数の少ない単純形状を考える. 空気吸込の臨界状態に及ぼすベルマウス径の影響は, 田籠(1979)⁷⁾ による規範 $D < 1.75d$ を満足する為, 無視する.)

フルード数 Fr とレイノルズ数 Re , ウェーバー数 We は, それぞれ, 以下のように定義する.

$$Fr = U_i / (gD)^{1/2}. \quad (1)$$

$$Re = \rho U_i D / \mu. \quad (2)$$

$$We = U_i / (\rho D / T)^{1/2}. \quad (3)$$

ここに, g は重力加速度, μ は水粘度, ρ は水密度, T は水/空気間の表面張力である. U_i は吸込管入口での平均流速であり, 以下の様に定義する.

$$U_i = 4Q / (\pi D^2). \quad (4)$$

ここに, Q は吸込流量である. 補助的な力学的パラメータとして, ボンド数 (または, エトベス数) Bo を以下に定義する.

$$Bo = \rho g A^2 / T . \quad (5)$$

Table 1 に、今回用いた主な実験パラメータとそれらの値を示す。今回の実験条件は、舟木ら(2007)¹²⁾の UVP による時間平均流れ場観測を実施した二つの条件 Case A と Case B の内、Case A と同様である。Case A の詳細については 4.3 節にて後述する。ここで、平田ら(2013)⁴⁾によると、Case A の We は十分に大きい、 Re は十分に大きいとは言えない。

3.2 実験装置

以下に、本実験システムの概要をまとめる。(詳細は、文献^{4, 5, 12)}を参照。)ポンプによって、貯水槽から吸込水槽へ、流体(水)を供給する。供給量をバルブで調節することにより、水槽の水位を希望の一定値に保持する。吸込水槽内の上流では、整流装置により流れを均一にする。整流装置としては、二枚の金網(線径 0.001 m, メッシュ間隔 0.001 m)ではさんだ不織布を、水槽後壁から 0.84 m 上流に設置する。さらに、吸込管からの流体は、通常のポンプよりスワールの少ないベンド型ジェットポンプにより、貯水槽に至る。吸込流量 Q は台秤で計測する。

3.3 3D-PTV

Fig. 2 は 3D-PTV と UVP の同時計測系を説明する為に、実験装置の内、吸込管近くを拡大したものである。本実験で用いた 3D-PTV のシステムの概略は、以下の通りである^{21, 22)}。まず、レーザー光を流れ場全体に照射し、吸込水槽上流より比重が 0.92 のポリエチレン粒子をトレーサー粒子として一様に流す。ここで、比重の調整やレーザーに対する反射を強める為に、トレーサー粒子に蛍光塗料を塗布している。トレーサー粒子が流れている空間を二台のハイスピード・ビデオ・カメラにより 1/500 秒間隔で撮影する。流れ場の解析は、撮影した二時刻間の画像から、四時刻間の粒子追跡により求める。これにより、三次元の実速度ベクトル場を得る。

より詳しく述べると、3D-PTV では、前もって校正した二台のハイスピード・ビデオ・カメラを用いて、計測空間の画像を撮影する。次に、同時刻の一对のステレオ画像からトレーサー粒子の三次元位置

を決定する。速度ベクトルは二時刻間の粒子の位置情報に基づいて近似する。すべてのデータ処理は、PC で行う。以下に詳細を述べる。

3D-PTV は、あらかじめ校正する必要がある。はじめに、計測空間全体が写るように二台のカメラを固定する。ここで、空間位置精度を確保する為、出来る限り二台のカメラの中心が直角に交わるようにする。次に、計測空間に複数の基準点を置き、ステレオ画像を撮影する。ここで、基準点の三次元位置は、あらかじめ計測しておく。しかし、実際の基準点は直径 0.5 mm のポール先端に設置した直径 1 mm の球を用いており、近似的に球の中心を基準点とする。本研究では、基準点の数は 43 個である。以上の手順で、PC 内に実空間に対応する仮想空間を構築し、座標系を決定する。

速度ベクトルは、二時刻間の粒子の位置情報を用いて決定する。粒子の三次元位置を知る為に、画像処理によりそれぞれの画像上で粒子の中心を特定する。つまり、計測時間内で変化しないピクセルの集合である背景画像を取り除いた後、最も高輝度の位置を粒子の中心と考える。それぞれの粒子を識別する為に、二つの閾値を使う(粒子の面積と明るさの最小値)。これらの閾値を用いることで、より正確な識別が出来るが、実験条件に応じて適切な値を決める必要がある。次に、粒子の中心とカメラの視点を結ぶ直線を決定する。一对のステレオ画像から得られる二直線の交点を粒子の位置座標とする。

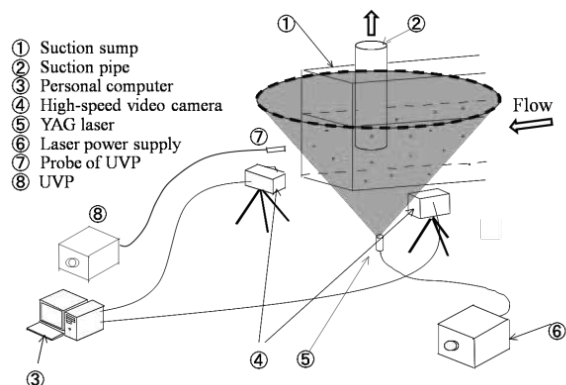


Fig. 2. Schematic view of a close-up experimental apparatus near a suction pipe for simultaneous measurement using both of 3D-PTV and UVP.

以上の手順により、各瞬間の実三次元空間における全トレーサー粒子位置を知ることが出来る。異なる時刻で同じ粒子かどうかを識別するには、四時刻間データに基づく遺伝的アルゴリズムを用いる。そして、連続した二時刻間データから粒子の速度ベクトルを得る。

3.4 UVP

今回の実験においては、Met Flow SA 社の UVP X-2-PS を使用した¹²⁾。使用周波数は 4 MHz、測定点数は 128 点で、時間分解能は最高で 32 ms、空間分解能は測定線方向で 0.75 mm である。トランスデューサのビーム直径は 5 mm であるので、一点での測定ボリュームは直径 5 mm、厚さ 0.75 mm の円板状となる。測定に際しては 1024 個のプロファイルを連続的に記録する。各点で 200 個のプロファイルデータの平均値を求めている。今回は、乱れ成分は含んでいないが、時間的に安定した流れ場を測定対象にしていることと、UVP の特性から平均値は安定しやすく、母数としては充分であることを確認した。なお、吸い込まれている空気塊のごく近くでは、空気存在の為に、計測が不可能となることがある。その場合は、計測出来る場合のみを対象とする。

3.5 スチル・カメラによる長時間露出撮影

今回の実験においては、3D-PTV と UVP に加えて、従来からの手法であるスチル・カメラによる長時間（シャッター速度 1/20 s）露出撮影も実施する。この手法は高い信頼性と低い精度を有する。なぜならば、時間積分量である流跡線（流れの道筋）が可視化される為である。更に、この手法の極端に少ない処理操作回数も高い信頼性に貢献している。適当に短い流跡線からは、流速ベクトルの大きさと方向とが類推出来る。

3.6 トレーサー粒子

共通のトレーサー粒子として、平均粒子径 D_p の球状架橋ポリエチレン樹脂を用いる。トレーサー粒子は蛍光塗料でコーティングし、実際の粒子径 D_p は、塗料の厚さにより調節する。Table 2 に、条件 I – IV

Table 2. Conditions of tracer particle.

Condition	I	II	III	IV
D_p [mm]	0.6–1.2	0.6–1.2	0.6–1.2	0.3–0.6
V_p [mm ³]	930	1900	3700	440
F_{TP} [%]	0.05	0.11	0.2	0.03
N_p	2500	5000	10000	9300
D_{NP} [mm ³]	0.001	0.003	0.006	0.005
$D_{NP}V_{UVP}$ [-]	0.041	0.083	0.17	0.15

の四つの実験条件を示す。 V_p と F_{TP} , N_p , D_{NP} , V_{UVP} は、それぞれ、トレーサー粒子の全体積、トレーサー粒子体積率、トレーサー粒子の総数、トレーサー粒子の数密度、UVP の単位測定体積である。条件 I – III では、同じ D_p である。条件 IV では、より小さい D_p であるが、 D_{NP} は条件 III とほぼ同じである。条件 I – III 間では N_p と D_{NP} が異なる。前述の様に、予備実験により、同時計測に適した条件を、四つの条件から探る。

ここで、ポリエチレン粒子は比重 0.92 である為、そのままでは水面浮遊するので、洗剤でコーティングすることにより、流体に混入することに成功した。なお、混入による表面張力の変化は見られなかった。

3.7 予備実験

3D-PTV の精度確認の為、二つの予備実験を行う。その内、第一の予備実験は、トレーサー粒子の最適状態の決定の為、単純な三次元乱流である旋回流を考え、3D-PTV と UVP とで同時計測を実施する。第二の予備実験は、本実験と同じ吸込水槽を対象に実施する。以下に、第一の予備実験の詳細を示す。（なお、第二の予備実験については、Fig. 8 にて後述。）

Fig. 3 に、実験装置を示す。円筒容器①は、アクリル製で、水を満たし、磁気攪拌器②の上に設置する。円筒容器の底にある攪拌子③により、旋回流が発生する。

3D-PTV は、次の装置で構成する：光源としての YAG レーザー④、および、フレームレート 1/500 s のハイスピード・ビデオ・カメラ⑤、カメラインターフェイス⑥、3D-PTV 解析用 PC⑦。円筒容器表面

の曲率による画像の歪曲を補正する為に、本実験では、円筒容器を覆う直方体容器を設置し、二つの容器の間に水を満たす。

UVP は、次の装置で構成する：UVP プロブ⑧、UVP モニタ⑨。UVP プロブは、具体的には超音波トランスデューサであり、円筒容器の外側に設置する。Fig. 4 に UVP プロブの位置を座標系とともに示す。

3D-PTV には、各瞬間に複数の画像を用いる為、二台以上のカメラを必要とする。本実験では、一対のカメラを用いる。Fig. 3 に示すように、一台のカメラは容器の上方に、もう一台のカメラは容器の前方に設置する。Fig. 5 に、撮影した画像の一例を示す。トレーサー粒子の状態は、後述の条件 II に近い。図では、トレーサー粒子が均一に散乱していることを確認出来る。

4. 結果と考察

4.1 第一の予備実験(同時計測時の共通トレーサー粒子条件)

この節では、トレーサー粒子状態の最適条件決定の為、第一予備実験を議論する。具体的には、トレーサー粒子状態の条件 I - IV を比較する。

Fig. 6 に、 $y = 0$ mm にて、UVP により得られた流速 (の y 成分) v_y の時系列波形を示す。なお、図の縦軸は、 v_y を時間平均値 $\overline{v_y}$ で正規化している。

条件 I (Fig. (a)) では、 $v_y/\overline{v_y}$ の値が 0 から 2 の間に分散して存在し、標準偏差 σ も 0.49 とかなり大きい。 $v_y/\overline{v_y} < 0.5$ でのデータは、トレーサー粒子欠如に関係したエラーと考えられる。トレーサー粒子数 N_p を多くすると (条件 II, Fig. (b)), $v_y/\overline{v_y} \approx 0$ の一部のデータを除き、 $v_y/\overline{v_y}$ は 1 の近くに集中し、ばらつきは $\sigma = 0.25$ と小さくなる。ここで、 $v_y/\overline{v_y} \approx 0$ のデータは少数であり、時間平均値 への影響は無視出来る。条件 II (Fig. (c)) では、 $v_y/\overline{v_y} \approx 0$ のデータが見られなくなる。以上より、UVP 計測を精度よく行う為には、粒子数密度 D_{NP} の値は条件 II のもの以上とすべきであることが分かる。

トレーサー粒子径 D_p の影響は、条件 III (Fig. (c)) と条件 IV (Fig. (d)) を比較することで考察出来る。こ

こで、条件 III の粒子径は条件 IV の粒子径の約二倍である。結果として、 D_p の影響は小さい。更に、調べた他の実験でも、 D_p の影響はほとんど見られなかった。

Fig. 7 では、条件 I (Fig. (a)) と条件 II (Fig. (b)) において、3D-PTV と UVP の結果を比較している。条件 I では、UVP の値が 3D-PTV の値よりも概ね低い。この事実は、Fig. 6(a) に示すように、UVP のデータに多くのエラーが含まれることに対応している。すなわち、Fig. 6(a) の UVP による時間平均値 $\overline{v_y}$ は、実際の $\overline{v_y}$ よりも小さい。一方、Fig. 7(b) では、3D-PTV と UVP の値がよく一致する。Fig. 6 で示した様に、条件 II での UVP の結果は、信頼出来る。従って、条件 II は、3D-PTV による高精度の計測に成功した例と見なせる。

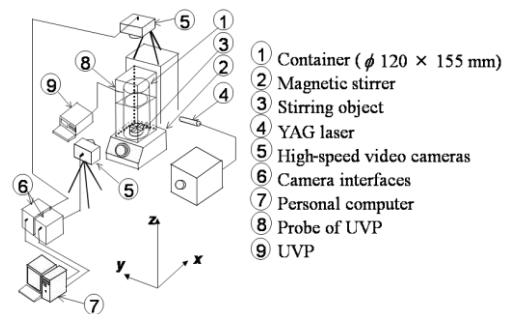


Fig. 3. Schematic view of experimental apparatus in preliminary test.

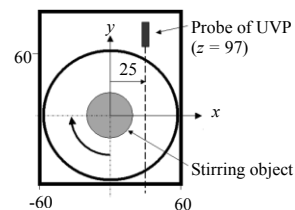


Fig. 4. Top view of a container in preliminary test, together with coordinate system and the position of a UVP probe (unit: mm).

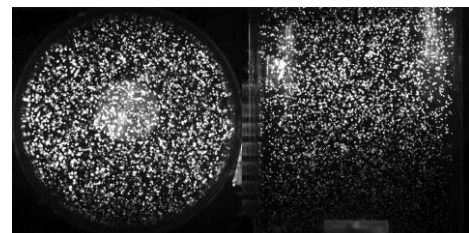


Fig. 5. Sample stereo photographs: top and side views of a container in preliminary test.

以上より、3D-PTV と UVP の同時計測には条件 II 以上の D_{NP} を用いるべきである。一方、更に大きな D_{NP} での 3D-PTV 計測では、処理速度低下に加え、誤認識等と関連した \bar{v}_y の低下が発生することを確認した。

結果として、今回の第一予備実験では 3D-PTV と UVP の同時計測に適した条件、すなわち条件 II ($D_p=0.6-1.2 \text{ mm}$, $D_{NP}=0.003 \text{ mm}^3$) を見出すことが出来る。なお、この実験と異なる流れ場を測定する場合でも、同時計測の可能性は高いであろうが、流速や流体の密度、透過性などの影響で、その最適条件は多少変化しうるので、その都度、若干の修正が必要と思われる。

4.2 第二の予備実験（吸込水槽での精度確認）

この節では、本実験と同じ吸込水槽内の検査領域を対象に、極単純な流れを作り出し、3D-PTV と UVP の同時計測を実施して、3D-PTV の計測結果の妥当性を検証する。単純な流れとして、計測領域全域にて至る所ほぼ一様な定常流れを考える。

その様な一様流れは、Fig. 8 に示す様に、吸込水槽流路に案内板を設置することによって作り出す。すなわち、Fig. 8 は、この一様流れの為の実験装置の平面模式図である。なお、吸込管は、流れの一様性を改善する為、吸込水槽の中心軸からずらして設置する。3D-PTV と UVP についての詳細は、Fig. 2 と同様である。

Fig. 9 には、実験結果の一例、すなわち、 $y'/B=0$ かつ $z/H=0.40$ での速度分布を示す。ここに、 y' は y の補助座標であり、案内板により作り出された流路の中心を原点とする。（この速度分布は、厳密には

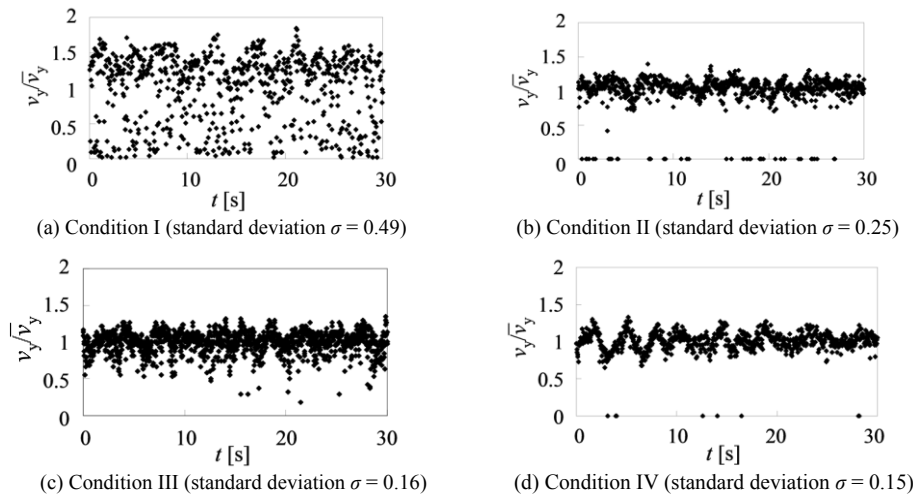


Fig. 6. Time history of flow velocity by UVP at $y = 0 \text{ mm}$ in preliminary test.

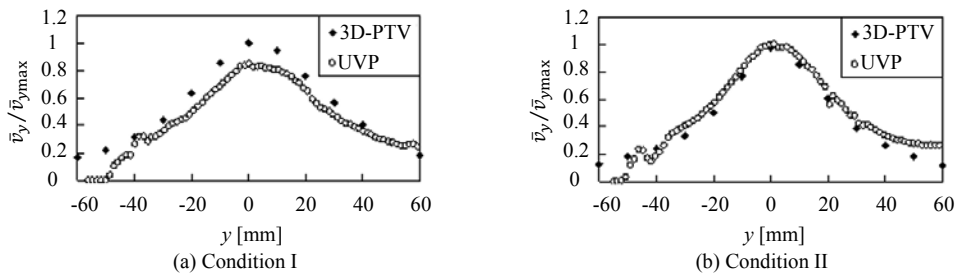


Fig. 7. Profile of time-mean velocity \bar{v}_y in preliminary test.

時間平均である。尤も、瞬間流速は時間平均流速と概ね同一である。なぜならば、この一様流は、流路内ではほぼ定常だからである。) 図からは3D-PTVとUVPとの、良好な一致を確認出来る。

Fig. 10には、実験結果の他の一例、すなわち、案内板により作り出された流路での3D-PTVによる流速ベクトル分布を示す。Fig. (a)とFig. (b)は、それぞれ、 $y'/B = 0$ での $x-z$ 平面上と $z/H = 0.40$ での $x-y'$ 平面上の結果である。厳密には、図中の流速ベクトルは、時間平均であり、かつ、等間隔に内挿して求められたものである。図からは、流れが、ほぼ一様であることが分かり、Fig. 9と同様3D-PTVの信頼性を確認出来る。

4.3 吸込水槽内の時間平均流れ

以降、吸込水槽内の複雑な流れを、3D-PTVを用いて明らかにする。まず、この節では、時間平均した流れを議論する。

Fig. 11には、3D-PTVとUVPの同時計測結果の一例を、高信頼性かつ低精度を有する旧来技術であるスチル・カメラによる長時間露出撮影の結果と共に示す。Fig. 11は、 $y/D = 0.79$ かつ $z/D = 1.05$ における

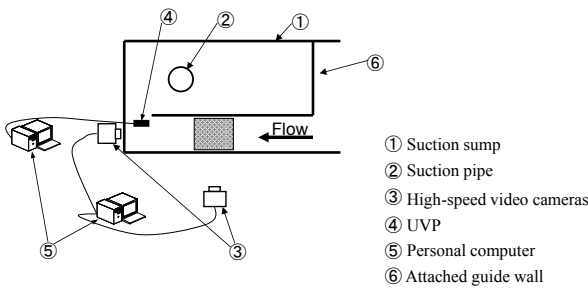


Fig. 8. Schematic top view of an experimental apparatus for simultaneous measurement using both of 3D-PTV.

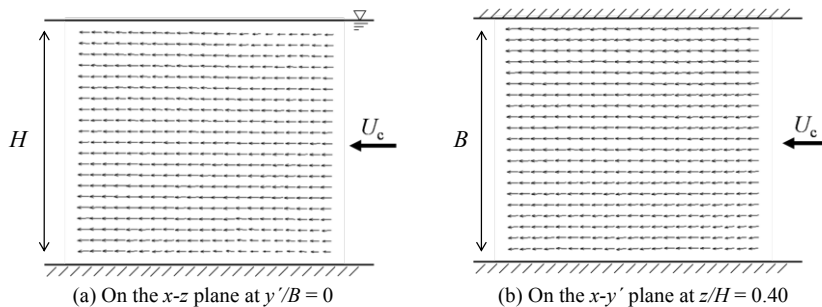


Fig. 10. Velocity vectors by 3D-PTV in a controlled channel for uniform flow.

0.6 sに渡って平均した流速の x 成分の分布である。

(厳密に述べると、スチル・カメラ撮影時の平均時間は1/20 sであって、3D-PTVやUVPの平均時間よりかなり短い。) 結論から述べると、流れの複雑さにも拘わらず三者は定性的観点からは良好な一致を示す。一方、定量的観点からは、3D-PTVによる \bar{v}_x のUVPに対する相対誤差は、 $x/D \approx -0.5$ で局所的に24%に達するが、平均すると13%程度となる。

Fig. 11の様な流速ベクトルを得る際の総平均数と平均時間に関して、舟木ら(2007)¹²⁾によると、UVP計測時に今回と同じ流れについては、500個の平均結果は、200個の平均結果とよく一致したが、50個の平均結果とは特に吸込水槽下流($x/D > 0$)において異なる。よって、舟木らは総平均数として200を採用している。この総平均数は、6.4 sの平均時間に対応する。本研究の3D-PTV計測では、ハイスピード・ビデオ・カメラのメモリの制約上、総平均数300かつ平均時間0.6 sである。また、同時に計測したUVP計測では、総平均数10かつ平均時間0.6 s(65 msの為)である。スチル・カメラ撮影では、総平均数

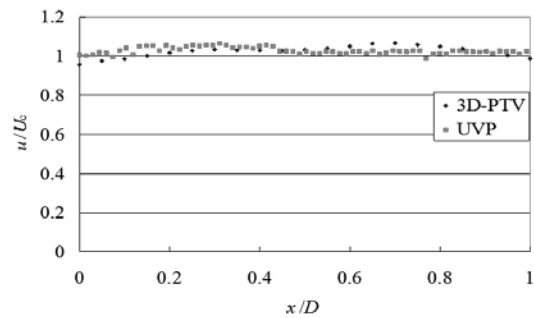


Fig. 9. Velocity profile by simultaneous measurement using both of 3D-PTV and UVP in a controlled channel for uniform flow, at $y'/B = 0$ and $z/H = 0.40$.

1 かつ平均時間 $1/20$ s である。よって、少なくとも平均時間については検討の余地があるが、今回の定性的議論に際しては、問題が無いと考えている。なぜならば、対象となる流れは、概ね定常であり大きな変動も見られないからである。特に吸込管上流 ($x/D \leq 0$) において、変動は極めて小さい (以下の Fig. 12 と Fig. 15 を参照)。なお、スチル・カメラ撮影は、吸込管上流にて実施している。

Fig. 12 に、3D-PTV 計測の結果、すなわち、 $Fr = 0.98$ かつ $Re = 2.2 \times 10^4$ 、 $B/D = 3.16$ 、 $X/D = 1.58$ 、 $Z/D = 0.39$ の時のいくつかの x/D における y - z 平面上の (時間) 平均流速ベクトル分布を示す。

3.1 節で述べた通り、今回の実験条件は、舟木ら¹²⁾が UVP を用いて時間平均流れ場観測を実施した二つの条件 Case A と Case B の内、Case A と同様である。Case A では、自由表面から吸込管への空気吸込を、常にはないがほとんどの瞬間に観察出来る。詳述すると、吸込水槽内で自由表面から吸込管入口に至る一組の対称な水中空気系 (あるいは、糸状の水中空気塊) が一部の瞬間を除くと時間的にほぼ安定して存在する。それら二本の水中空気系は、吸込管下流に位置する。上流からの流れに含まれる微小擾乱の為、それらの対称性は、時折、破れる。そのような瞬間には、水中空気系は二本の内の一本のみが現れるか、二本ともに現れないかの、いずれかである。

舟木ら¹²⁾は、UVP 計測の結果を、時間平均場の三次元流れ構造を示す模式図としてまとめている。二つの模式図の内の一つは、今回と同じ Case A でのものである。そこでは、流れは吸込水槽の中央鉛直目に関して対称である。さらに、吸込管下流では、渦

度の絶対値が大きな値を持つ二つの渦糸 A-3 と A-4 が存在する。各渦糸の一端は自由表面に到り、別の一端は吸込管入り口に到る。これら二つの渦糸は、多くの瞬間に水中空気系、すなわち、空気吸込により発生する吸込管入口に到る糸状水中空気塊を伴う。また、吸込管上流では、一組の弱い渦糸 A-1 と A-2 が存在する。それらは、縦渦で回転方向が逆である。

Fig. 12 を見ると、吸込管の上流とその近傍 ($x/D \leq 0.26$) では、流れは互いによく似る (Fig. (a)ないし Fig. (d)を参照)。すなわち、 $y/D > 0$ で、流体は、時計方向に旋回しながら、自由表面近くの吸込水槽中央から、吸込水槽底面上の吸込水槽中央へと集まる傾向がある。一方、 $y/D < 0$ で、流体は同じ傾向をもつが、旋回方向は反時計方向である。その結果、各図には、 $y/D = 0$ の中央鉛直面に関する対称性が現れる。これら二つの対称旋回運動は、渦糸 A-1 と A-2¹²⁾によく対応する。更に、各図には、吸込水槽底面の中央に、明瞭な流れの収束点が存在する。逆に、明瞭な流れの発散点は、どこにも存在しない。なぜならば、Fig. (a)と Fig. (b)では投影流速ベクトルの絶対値 ($v_y^2 + v_z^2$)¹²⁾ が非常に小さい為であり、Fig. (c)と Fig. (d)では吸込管が存在する為である。Fig. (a)と Fig. (b)では、明瞭な発散点の代わりに、 $y/D \approx 0$ かつ $z/D \approx 1$ の領域に不明瞭な発散点あるいは鞍点が現れる。もちろん、その領域で流速ベクトルの絶対値が非常に小さいことは、理屈に適うものである。なぜならば、 x 方向 (主流方向) 成分 v_x は、その領域の全てで他の成分よりはるかに卓越するからである。よって、その領域では対称性が破れがちになる。

更に Fig. 12 を見ると、吸込管の下流 ($x/D < 0.29$)

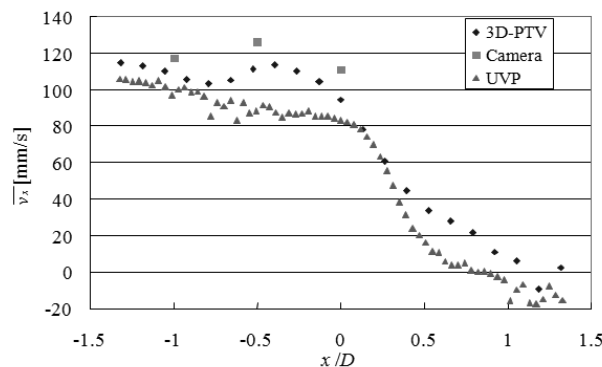


Fig. 11. Time-mean velocity profile at $y/D = 0.79$ and $z/D = 1.05$.

では、流れは再び互いによく似る (Fig. (e)と Fig. (f)を参照)。すなわち、Fig. (a)ないし Fig. (d)とは対照的に、明瞭な収束点は、どこにも現れない。 $y/D > 0$ で、流体は、概ね $y/D \approx 0.5$ かつ $z/D \approx 1$ を中心として時計方向に回転する。一方、 $y/D < 0$ で、流体は、概ね $y/D \approx -0.5$ かつ $z/D \approx 1$ を中心として反時計方向に回転する。その結果、各図には、 $y/D = 0$ の中央鉛直面に関する対称性が現れる。これら二つの対称回転運動は、渦糸 A-3と A-4によく対応する。更に、 $y/D \approx 0$ で明瞭な上昇する流れが存在する。この上昇する流れの存在は、Fig. (a)や Fig. (b)とは対照的である。Fig. (a)と Fig. (b)では、上述の水槽底面近くの明瞭な発散点と水槽中央近くの不明瞭な発散点/鞍点領域の存在の為、明瞭でないがむしろ下降する流れが現れる。

Fig. 13は、UVPにより計測した $x/D = 0.63$ における $y-z$ 平面上の(時間)平均流速ベクトル分布である¹²⁾。(なお、前述の通り、Fig. 13のUVP計測結果の平均時間は、Fig. 12の3D-PTV計測結果のそれと同じ0.6 sである。また、UVP計測結果は、厳密には、各測定ボリューム内の空間平均値である。)

Fig. 14は、スチル・カメラにより撮影した $x/D = 0$ における $y-z$ 平面上の流跡線分布である。(なお、前述の通り、Fig. 14の計測結果の平均露出時間は、Fig. 12や Fig. 13の3D-PTVとUVPの計測結果の平均時間よりも短い。また、トレーサー粒子の状態は条件IIとはかなり異なる。) Fig. 13を Fig. 12(e)と比較すると、或いは、Fig. 14を Fig. 12(c)や Fig. 12(d)と比較すると、様々な条件の違いにも拘わらず定性的にほぼ一致することを、確認出来る。

4.4 吸込水槽内の瞬間流

今回対象とする流れは、一組の水中空気糸が比較的安定して存在するので、流れも安定していると思われる。実際、3D-PTV計測により得られた各瞬間の流れの大部分は、Fig. 12に示すような時間平均流れとよく似る。一方、稀にかつ非周期的に、二つの水中空気糸の対称性は崩れる。そのような瞬間の流れは、時間平均流れとは異なることが予想出来る。

Fig. 15に、その様な瞬間の流れの一例を示す。具

体的には、唯一つの空気糸のみが $x/D \approx 0.8$ かつ $y/D \approx 1.2$ に存在する。より詳しく述べると、 $Fr = 0.98$ かつ $Re = 2.2 \times 10^4$, $B/D = 3.16$, $X/D = 1.58$, $Z/D = 0.39$ の時のいくつかの x/D における $y-z$ 平面上の(瞬間)平均流速ベクトル分布を示す。

吸込管の上流とその近傍の $x/D \leq 0.26$ (Fig. (a)ないし Fig. (d))では、流れはお互いによく似る。更に、その流れは Fig. 12ともよく似る。すなわち、(1)渦糸 A-1と A-2に対応する二つの回転運動、および、(2)吸込水槽底面中央近くでの明瞭な流れの収束点、(3) $y/D \approx 0$ かつ $z/D \approx 0$ での $(v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$ の小さな領域内で不明瞭な流れの発散点/鞍点が、認められる。一方、吸込管下流の $x/D > 0.26$ (Fig. (e)と Fig. (f))では、流れはお互いに似ていない。ただし、例外は、 $y/D \approx 1$ での自由表面から下降する流れであり、Fig. (e)にも Fig. (f)にも共通して現れる。この共通の下降する流れは、計測した瞬間、 $x/D \approx 0.8$ かつ $y/D \approx 1.2$ に偶然現れた水中空気糸の影響と考えられる。更に、Fig. (e)と Fig. (f)のどちらも、Fig. 12(e)や Fig. 12(f)とは似ていない。

具体的には、Fig. 15(e)では、(1)二つの対称回転運動も、(2)水槽中央近く($y/D \approx 0$)での上昇する流れも、認められない。対照的に、Fig. 15(e)には、 $y/D \approx 0$ にむしろ下降する流れが現れる。この流れは、水槽底面近くの収束点と自由表面近傍領域内の不明瞭な発散点/鞍点の存在と関係している。このような流れは、むしろ Fig. 12(a)ないし(d)とよく似る。尤も厳密な意味では、Fig. 15(e)の下降する流れは、鉛直方向からは多少傾いている。発散点/鞍点の領域が水槽中央鉛直面からずれている為である。

Fig. 15(f)は、Fig. 15(e)とも Fig. 12や Fig. 15の他のどれとも似ていない。すなわち、流れは、概ね、 $y/D \approx 0.3$ かつ $z/D \approx 1$ を中心とする単一の回転運動で特徴づけられる。

以上をまとめると、吸込管下流の瞬間流れは、吸込管上流や近傍の流れ(時間平均流れに、常時、類似する)よりも、複雑な空間構造の変化を伴って時間変動しがちである。

5. 跋

吸込水槽内の空気吸込の発生を正確に把握し現象の理解を深める為、3D-PTV を用いてより正確な非定常三次元流れ場の観察を実施した。本研究では、

最初に、予備実験により 3D-PTV の簡便かつ柔軟な補償計測法として、UVP を考えて、共通のトレーサーを用いた同時計測の可能性を検討した。次に、実際の吸込水槽模型を対象にして、まず、3D-PTV を

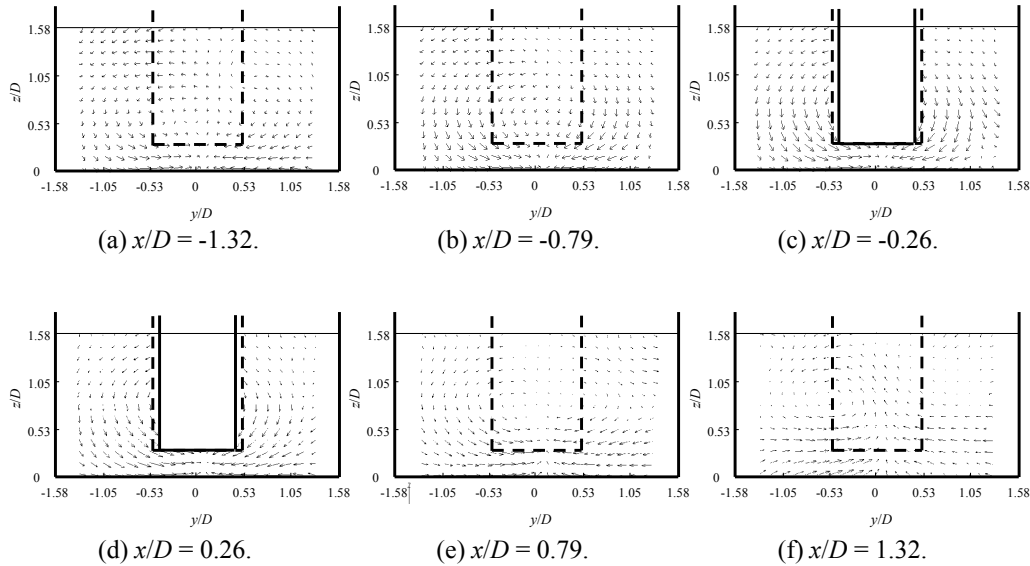


Fig. 12. Time-mean velocity vectors by 3D-PTV.

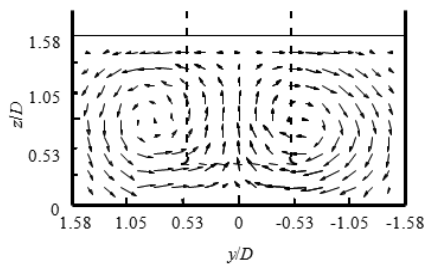


Fig. 13. Time-mean velocity vectors by UVP at $x/D = 0.63$ (Funaki et al., 2008).

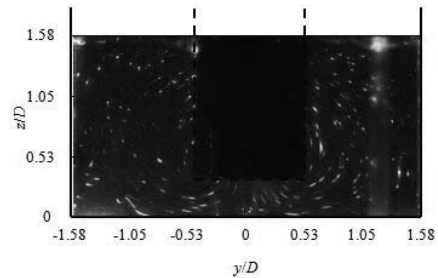


Fig. 14. Paths of tracer particles by a still camera on the y - z plane at $x/D = 0$, with a shutter speed of $1/20$ s.

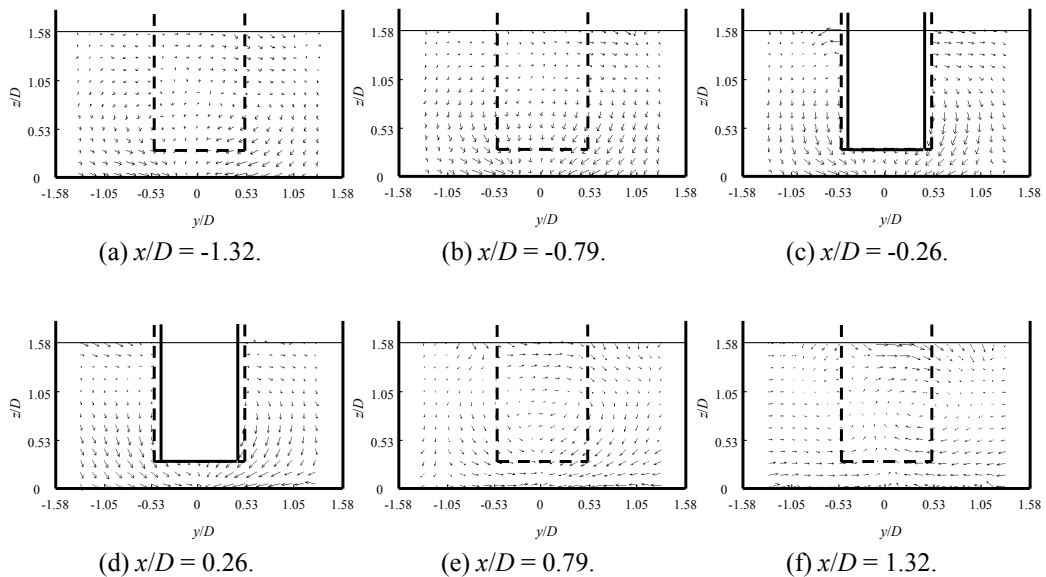


Fig. 15. Instantaneous velocity vectors by 3D-PTV.

UVP によって同時計測した。その後、検証された 3D-PTV を用いて、吸込水槽内の非定常三次元流れ構造を定量的に明らかにした。結果として、吸込管下流の瞬間流れは、吸込管上流や近傍の流れ（時間平均流れに、常時、類似する）よりも、複雑な空間構造の変化を伴って時間変動しがちであることを明らかにした。

本論文の作成にあたり、本学の桑鶴智大氏と森田彰氏の援助を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ターボ機械協会基準, ポンプ吸込水槽の模型試験方法, TSJ S 002 (2005).
- 2) American National Standard for Pump Intake Design, ANSI/HI 9.8 1998 (1998).
- 3) 平田勝哉, 舟木治郎, 中島宣武, “吸込水槽内に発生する空気吸込渦の臨界没水深さについて”, 土木学会論文集, 747/II-65, 61-69 (2003).
- 4) 平田勝哉, 舟木治郎, 久保田義啓, 稲垣勝久, 田岡未樹, 斉田拓也, “縦軸ポンプへの取水槽からの空気吸込の発生条件”, 日本機械学会論文集(B編), 79[804], 49-64 (2013).
- 5) 平田勝哉, 斉藤康平, 服部匡克, 中谷友輝, 舟木治郎, “吸込水槽内に発生する空気吸込の出現時間率の測定”, 日本機械学会論文集(B編), 74[739], 95-102 (2008).
- 6) R. T. Hattersley, “Hydraulic Design of Pump Intakes”, *J. the Hydraulics Division, Proc. ASCE*, 91[HY2], 223-249 (1965).
- 7) 田籠雅, “吸込水槽内のフローパターンと空気吸込渦”, ターボ機械学会, 7[8], 451-460 (1979).
- 8) H. O. Anwar, J. A. Weller, and M. B. Amphlett, “Similarity of Free-vortex at Horizontal Intake”, *J. Hydraulic Research*, 16[2], 95-105 (1978).
- 9) 田籠雅, 上田治夫, “水中渦の発生とフローパターン”, 日本機械学会論文集(B編), 57[543], 3641-3646 (1991).
- 10) 田籠雅, “吸込水槽内の渦の挙動とフローパターン”, ターボ機械学会, 25[9], 504-509 (1997).
- 11) G. S. Constantinescu, and V. C. Patel, “Numerical Model for Simulation of Pump-intake Flow and Vortices”, *J. Hydraulic Engineering, Tran. ASME*, 4[2], 123-134 (1998).
- 12) 舟木治郎, 根屋雅史, 服部匡克, 谷川博哉, 平田勝哉, “吸込水槽内流れの超音波速度計による計測”, 日本機械学会論文集(B編), 73[726], 137-143 (2007).
- 13) D. E. Goldberg, “Optimal Initial Population Size for Binary-coded Genetic Algorithm”, *TCGA Report*, 85001, University of Alabama (1985).
- 14) T. P. K. Chang, A. T. Watson, G. B. Tatterson, “Image Processing of Tracer Particle Motions as Applied to Mixing and Turbulent Flow -I, the Technique”, *Chemical Engineering Science*, 40[2], 269-275 (1985).
- 15) 西野耕一, 笠木伸英, 平田賢, 佐田豊, “画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究”, 日本機械学会論文集(B編), 55[510], 404-412 (1989).
- 16) R. J. Adrian, “Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, 261-304 (1991).
- 17) 山本富士夫, 田懷璋, 植村和正, 近江和生, “相関法による三次元 PTV: 粒子対応付けのアルゴリズム”, 日本機械学会論文集(B編), 57[543], 3832-3836 (1991).
- 18) D. H. Doh, D. H. Kim, K. R. Cho, Y. B. Cho, W. J. Lee, T. Saga, and T. Kobayashi, “Development of Genetic Algorithm Based 3D-PTV Technique”, *Journal of Visualization*, 5[3], 243-254 (2002).
- 19) D. H. Doh, Y. B. Cho, W. J. Lee, D. H. Kim, T. Saga, S. Segawa, and T. Kobayashi, “Measurements of a Round Jet with a High-resolution 3D-PTV”, *Proceedings of 10th International Symposium on Flow Visualization*, 2023-2034 (2002).
- 20) D. H. Doh, T. G. Hwang, and T. Saga, “3D-PTV Measurements of the Wake of Sphere”, *Measurement Science and Technology*, 15, 1-8 (2004).
- 21) 舟木治郎, 新谷淳, 川口遼, 平田勝哉, “連続 3D-PTV を用いた気泡噴流の基本空間構造”, 日本機械学会論文集(B編), 75[760], 2379-2387 (2009).
- 22) 平田勝哉, 川口遼, 田岡未樹, 舟木治郎, “3D-PTV 計測による気泡噴流の気泡速度と液相速度の計測”, 日本機械学会論文集(B編), 77[784], 110-120 (2011).
- 23) Y. Takeda, “Velocity Profile Measurement by Ultrasound Doppler Shift Method”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 7, 313-318 (1986).
- 24) Y. Takeda, W. E. Fiscer, K. Kobayashi, and T. Takada, “Spatial Characteristics of Dynamic Properties of Modulated Wavy Vortex Flow in a Rotating Couette System”, *Experiments in Fluids*, 13, 199-207 (1992).