

ステレオ PIV による 流場計測の実用化について

1. はじめに

船体周囲の流速・流向を計測、可視化し、その流場を把握することは、船型開発およびプロペラ設計において重要な作業の1つです。当センター（以下 SRC）では依頼者のニーズに対応するために、5 孔ピトー管を用いた流場計測を行ってきました。しかしながら、5 孔ピトー管は接触式の計測装置であり、物体近傍の流速を計測する場合、5 孔ピトー管そのものを物体に近づける必要があるため、物体と 5 孔ピトー管の干渉により、流速が変化し計測精度が悪化するという問題があります。また、物体が複雑な形状である場合、5 孔ピトー管が物理的に接触してしまうため、計測が困難または不可能な領域が生じます。加えて広い範囲で計測を行おうとする場合、少しずつ移動させながら計測するため多くの時間が必要になります。

一方、近年ではダクトやステータ、舵フィン等の流力学的な省エネ装置（ESD）の開発が盛んに行われています。SRC で水槽試験を行う船も例外ではなく、その大半に ESD が装備されています。ESD は船体、舵、プロペラ前後に取り付けられ流体力学的な相互干渉が強いため、その周囲の詳細な流場を把握することが、高性能な ESD の開発には必要だと考えています。

そこで SRC では新たに非接触式の流速計測装置である、ステレオ PIV（Particle Image Velocimetry）を導入することで前述の問題を解決し、ESD 周囲の流場計測を行える態勢を整えました。本稿ではステレオ PIV 計測法の技術的な概要と、SRC における実用化に向けた取り組みについて紹介致します。

2. PIV（粒子画像流速測定法）とは

PIV（粒子画像流速測定法）とは、流体中に混入したトレーサ粒子の粒子画像により、2 次元平面内の速度および方向を非接触で求めることができる流体計測手法です。流れの定常的把握にすぐれ、非定常流れ場の 2 次元、3 次元解析に用いられる手法です¹⁾。

PIV は連続する 2 画像間の粒子の移動量より流速を計測する原理としては簡単なものですが、空間的なデータを得るには高度な演算処理を高速で実施できる PC や、高解像度のカメラ等が必要となり、ハードウェア的なハードルが高いものでした。PC や計測機器類の発達とともに、高精度な計測が比較的手軽に行えるようになり、近年様々な分野への導入・開発が行われています。

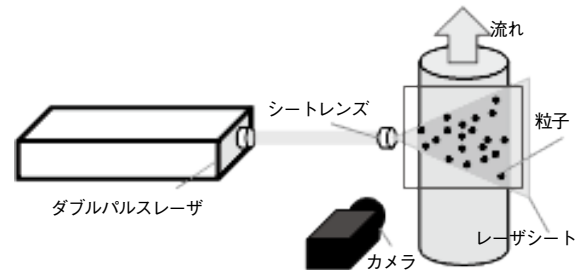


図-1 動作原理(1)

動作原理としては、流体中に追従性のよい微小な粒子を混入し、レーザをシート状に放射して流れ場を可視化し、高解像度カメラで記録します。短い時間間隔 (Δt) で 2 回照射して Δt の間の、粒子の移動量 (Δs) から速度 ($V(t)$) を求めます (図-1、図-2)。複数台のカメラを用いれば、速度の 3 方向成分を求めることができ、SRC では精度とコストを勘案し、2 台のカメラを用いたステレオ PIV 計測法を選定しました。

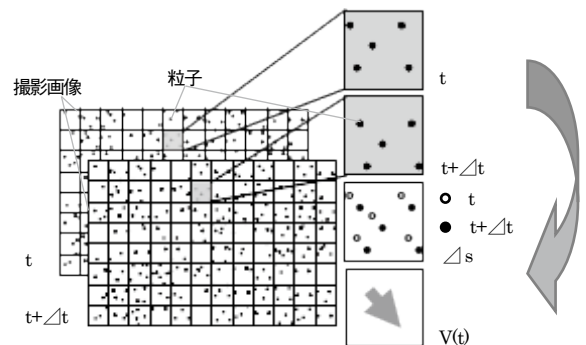


図-2 動作原理(2)

3. ステレオ PIV システム

3.1 計測装置

ステレオ PIV 装置として計測制御から解析まで一体のシステムとなっている LaVision 社の装置を導入しました。主な仕様を表-1、表-2 に、カメラとレーザ部分を図-3 に示します。内部のカメラは図-4 に示します。



図-3 カメラ、レーザ部分



図-4 カメラ



図-5 レーザ電源

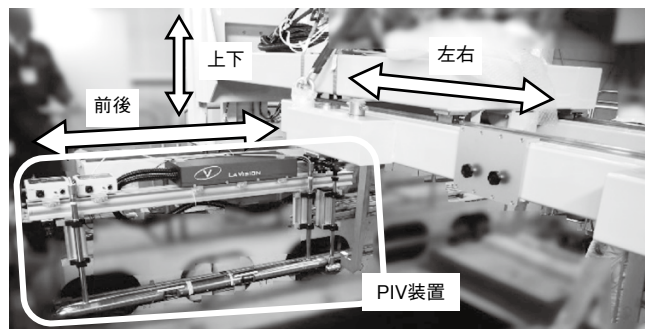


図-8 ステレオ PIV の計測システム

表-1 ダブルパルス YAG レーザ

モデル	DPIV-L200S
出力	200mJ/Pulse
最大繰り返し	15Hz
波長	532nm
ビーム径	7mm

表-2 PIV カメラ仕様

モデル	Imager Pro SX 5M
センサ	CCD
有効画素数	2448 × 2050pixel
ダイナミックレンジ	12bit
ピクセルサイズ	3.45 μ m×3.45 μ m

ステレオ PIV の計測時のイメージを図-6、図-7 に示します。SRC の計測は Under Water での PIV 計測となり、風洞や管内の計測と異なり計測する流れ場の中にカメラやレーザを配置しています。なので、流れ場への影響が小さくなるように考慮した配置となっています。

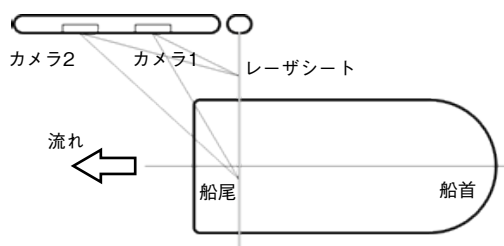


図-6 ステレオ PIV の計測システム

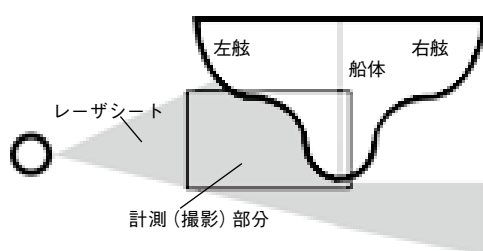


図-7 ステレオ PIV の計測システム

カメラとレーザは進行方向に向かって左側に設置しており、船体であれば左舷側からの計測となり、レーザシート面が計測面となります。レーザシートに反射した粒子をカメラで撮影し解析することで流場がわかります。撮影カメラは魚雷のような筒に入っており、進行方向に対して前後に 2 台設置され、ミラーを通してレーザシート後方から撮影しています。SRC のステレオ PIV 装置には治具に三方向にトラバース機構 (図-8) が付いているため、一断面取り終えたらすぐに別断面の計測が可能です。

3.2 キャリブレーション

キャリブレーションには 300mm × 300mm の奥行の異なる 2 面を交互に配列したプレートを使用しています。プレートには等間隔で印が印字されています。このプレート (図-9) を計測面上に置き、カメラで撮影します。等間隔に配置された印を撮影し解析することでキャリブレーションを行います。

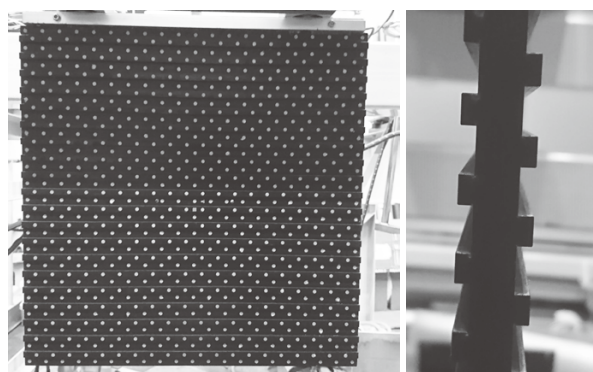


図-9 キャリブレーションプレート

プレートを計測面に正しく設置出来ているかどうか、誤差に直結するので、その設置には細心の注意を払う必要があります。しかし完全に一致させることは非常に難しいため、粒子画像からシート面の位置を検出するセルフキャリブレーション手法も用いています。プレートを用いて実施した後さらにセルフキャリブレーションを行うことで、さらなる精度向上が見込めます。

SRC ではキャリブレーション後に一様流計測を実施し確認を行っています。

3.3 トレーサ粒子・散布方法

トレーサ粒子は PIV 計測において重要な要素となります。トレーサ粒子は作動流体に対する追従性が重要な条件となります。また 1 画素の中に粒子像が埋没してしまう様な粒径であると PIV の解析には適しません。

SRC では、比重が 1.0 に近いナイロンパウダー (粒径 4.1 μ m) および反射率が高く粒径の大きな銀でコーティングされた中空ガラス粒子 (粒径 10.0 μ m) を使用しています。後述する反射光対策でカメラにレンズフィルターを取り付ける際には後者の銀粒子を使用しています。

また、PIV 計測を行うには、計測を行う流体中に粒子を散布しておく必要があります。しかしながら、水槽内すべてに粒子を満たすのは難しいため、計測を行う範囲に限って粒子を散布しています。粒子の散布は曳引車の前方に治具(図-10)を設置して散布しています。SRC では流れ場に影響がないように、水面より少し上から水で溶いた粒子を散布しています。粒子がなければ計測精度が著しく悪化するため、毎航走散布して確認しながら計測を行っています。



図-10 散布治具

3.4 計測方法

PIV で計測精度を向上するには撮影画像を増やし平均値を求めます。SRC では1航走当たり約250枚の画像を撮影し、数航走分の画像データ(約1000枚)を解析して、流速を求めています。なお、5孔ピトー管でPIVと同じ範囲の流場計測を行うと、十数航走する必要があり、それを考えるとPIVは時間効率にも優れた計測装置であることがわかります。

ここで、画像を撮影する時間間隔(Δt)の設定には注意が必要です。 Δt が大きいと大半の粒子がレーザシート幅を突き抜けてしまい、全く別の粒子での解析となり大きな誤差の要因となります。一方 Δt を短くしすぎれば粒子の移動量が小さくなり、これも誤差の要因にもなるため、試験速度に適した値に設定する必要があります。

PIVの解析、粒子移動量の算出において代表的な手法、注意点について下記に示します。

1) サブピクセル補間

PIVの画像解析では整数画素数単位の移動量を推定しているので精度は画像の画素分解能にも依存してしまいます。画素数にも限界があるため、画素間を補間し二次元正規分布として連続関数にした上で変位ベクトルを求めることで、誤差を減少させる手法(サブピクセル補間)がとられます。

2) ピークロッキング

粒子像の径が1画素未満であると整数値でしか移動量を検出することが出来ず、誤差の要因となってしまう。これをピークロッキングといい、粒子像の径は3画素以上であることが望まれます。

3.5 反射抑制方法

PIVでは強力なレーザ光をシート状に流場に照射して、粒子を撮影します。その際、レーザシートの先に物体が存在するとレーザ光が物体表面で反射して、反射光として画像に映り込み、解析の際の粒子の解像が困難になります。反射光が多く映り込んだ船体断面計測時の撮影画像を図-11に示します。船体下部において大きく反射し、このような場合粒子が識別出来ず反射している周囲の解析は正しく出来ません。船体やESD、舵等の物体を含む断面においてPIV計測を行おうとする場合、物体にレーザ光を照射する必要があり、避けられない問題となります。

反射光への対策としては、物体に黒色塗料を塗布して反射量そのものを減らす方法と、蛍光塗料を塗布し、反射光に特定の波長を持たせてカメラのレンズフィルターにより減衰させる方法があります。SRCでは両方の方式で比較試験を行った結果、蛍光塗料を塗布する方法を用いています。

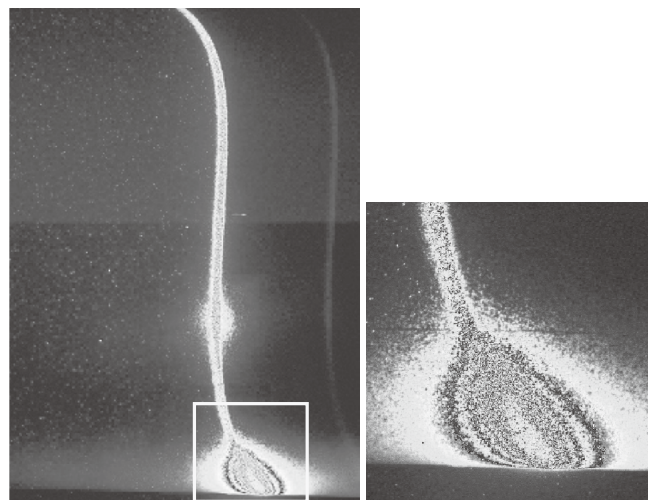


図-11 撮影画像

ただし、減衰はさせるものの、図-12に示すように、反射光の影響は完全に除去出来ないため、物体表面のごく近傍(10mm程度)の流速は計測出来ないという状況は原理的に不可避な部分として残っています。

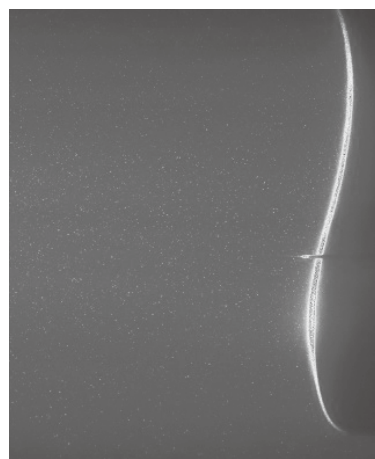


図-12 船体画像

4. 計測事例

1) 肥大船におけるプロペラ伴流分布計測

計測事例として、まず曳航状態における肥大船のプロペラ伴流分布を PIV と 5 孔ピトー管で計測した例を紹介します。図-13 にステレオ PIV の結果を、図-14 に 5 孔ピトー管の計測結果を示します。両者は概ね一致しており、ステレオ PIV は実用上十分な精度を有していることが確認出来ます。

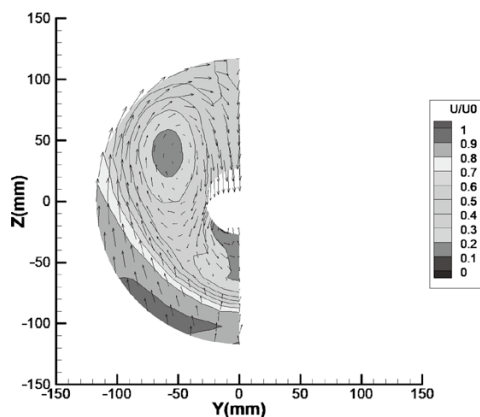


図-13 ステレオ PIV 計測結果

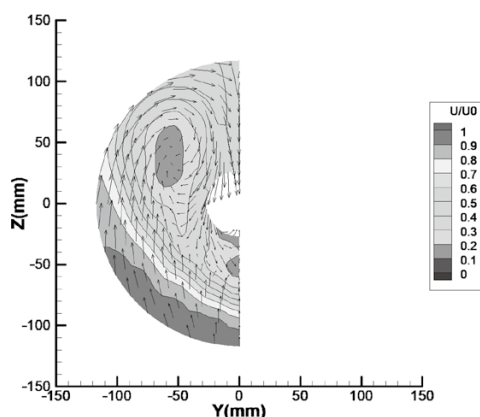


図-14 5 孔ピトー管計測結果

2) 舵断面計測結果

次に PIV による自航状態における舵まわりの流場計測結果を図-15 と図-16 に示します。図-15 は舵のみ、図-16 は舵に省エネ付加物が付いた状態の計測結果です。なお、右舷側は逆ピッチのプロペラ、左右反転した舵付加物を用いて、左舷側に右舷側の流れを再現し計測しています。計測プロペラ回転流による、左舷と右舷における流場の非対称性と舵フィンにより流れが上下に分離されている様子が良くわかります。

5. 今後の課題

今後の技術的な課題の一つに反射の抑制があげられます。物体近傍のおよそ 10mm は計測出来ていません。ESD の開発のことを考慮すれば、より物体近傍まで計測出来るようにすることが課題となります。解決方法の一つに透明素材の導入があり

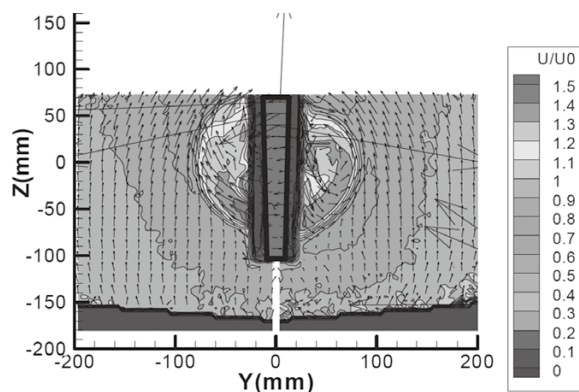


図-15 舵断面計測結果 (舵)

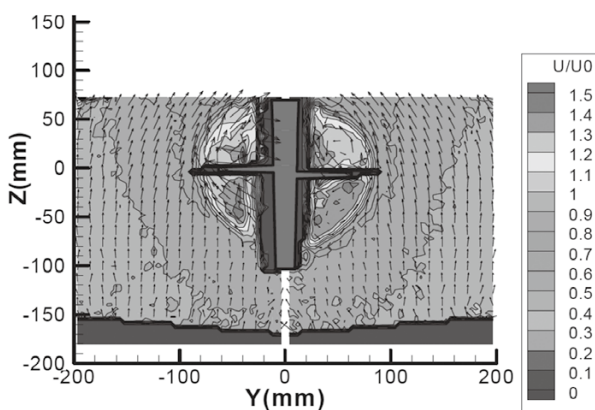


図-16 舵断面計測結果 (舵 + 舵付加物)

ます²⁾。計測する船、プロペラ、ESD 等を水に屈折率の近い素材で製作できれば大きな反射の抑制につながるため、SRC でも透明素材の導入を目指し検討しています。また、現状では平均流場しか計測することが出来ず、乱れの大きい流場において、瞬時の流れの変化を捉えることなどは困難です。調査検討を行い、今後幅広いニーズに対応出来るようにと考えています。

SRC で装置を導入してから計測方法の確立や、他の計測方法との比較を行い計測結果の妥当性等について主に行ってまいりました。今後は標準的な流場計測法の一つとなるように、準備時間の短縮など、よりスムーズな計測も目指して開発を進めていきたいと考えています。

ここでご紹介したような PIV による流場計測にご興味のある方は、是非ご連絡をいただければと思います。

参考資料

- 1) 第 14 回可視化フロンティア「PIV 講習会 2013」可視化学会資料
- 2) 「屈折率整合技術の水槽試験への応用—省エネダクト内部の詳細流場計測法の開発—」濱田達也、平成 30 年度 (第 18 回) 海上技術安全研究所研究発表会講演集

(試験センター技術部 白倉 潤)