J054021

回転場に生ずる流れのオフアキス計測による空間構造復元

村井 祐一^{*1}, 白鳥貴久^{*1}, 田坂 裕司^{*1}, ラスカンプ ヨップ^{*2}

Spatial reconstruction of flow field induced in rotating system using off-axis measurement

Yuichi MURAI^{*1}, Takahisa SHIRATORI, Yuji TASAKA and Jop Vlaskamp^{*1} Laboratory for Flow Control, Faculty of Engineering, Hokkaido University
N13-W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628 Japan

Measurement of velocity distribution in flows requires multi-dimensional setup when the flow behaves on fully three-dimensional and unsteady manner. Experimentalists, therefore, often need an effort to acquire the quantitative flow field information with limited instrumentation that only measure flow velocity in partial dimension or restricted components. UVP (ultrasound velocity profiling technique) and PIV (particle image velocimetry) are categorized to 1C-1D and 2C-2D velocity measurement as their first principle while extension of the system for upper dimensional measurement is ongoing for the both cases. In this study, the methodology of the application of UVP and PIV to three-dimensional flow field without any introduction of additional hardware system is presented, and demonstrated with several representative flow fields which show unique features of rotating fluid mechanics. The method is commonly based on off-axis measurement of flow field, which allows 3-D flow field to be scanned by relative frame rotation between the velocity profiling line and the rotating flow structure.

Key Words : Flow visualization, Ultrasound Doppler technique, UVP, particle image velocimetry, Rotating flow

1. 結 言

流れ場の空間構造を定量計測するための技術が過去 25 年の間に世界に広まった。その代表格と言える 2 つの手法が、PIV= Particle Image Velocimetry (粒子画像流速測定法⁽¹⁾) と UVP= Ultrasound Velocity Profiling (超音波流速分布計測法⁽²⁾) である。いずれも流れの中にトレーサを入れて、その動きを空間分布として捉え、かつ、その時間変化によって、流れのダイナミクスを直接、流速分布として取得するというものである。一方、それぞれには欠点がある。PIV の場合では、三次元構造を計測しようとする、カメラを複数配置して異なる角度から同一空間を撮像することとなる。このときトレーサ粒子濃度を上げるほどオクルージョン (幾何光学的制限) が頻発し、データ欠落が多くなる。トレーサ粒子濃度を下げるとその分、計測の空間分解能が低下する。いわゆる Tomo PIV では、これを解決するために 4 台ものカメラを使って、粒子の空間濃度分布を CT の原理で再構築している⁽³⁾。しかし CT の原理であるゆえ、逆問題としての推定アルゴリズムが結果を左右しており、例えば粒子分布のアーチファクト (ファントム粒子) が発生するなどの問題は、速度ベクトル出力ルーチンにおける異常値の除去という経験的なソフトウェア処理の導入に依存している。要するに、カメラを多数配置しても、本質的には解決は不完全なままである。UVP の欠点は、PIV に比べて計測の空間次元が一つ少なく、1 次元であるということである。これを解決するために、超音波トランスデューサを複数配列して多次元計測を実現する開発例が多く発表されている。しかし、超音波パルスの直進性や減衰、残響、トレーサ粒子からの反射波の指向性など、計測対象空間全体の目に見えない複雑な音響場の特性を熟知しなければ、UVP における多次元計測の誤差評価は困難であり、しばしば計測結果を鵜呑みにして全く誤った結果の解釈を引き起こしてしまうこともある⁽²⁾。

^{*1} 正員, 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)^{*2} 非会員, The University of Dundee, Scotland, UK
E-mail: murai@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、PIV や UVP の本来の計測次元をそのままとし、流れ場のもつ特性を外部情報として利用することで、多次元計測を実現する方法を検討する。すなわち面計測である PIV からは、3 次元の流れ場の空間構造を復元する試みを行う。線計測である UVP からは、2 次元の流れ場の空間構造を復元する。無論、対象とする流れ場に制限なく、自由にこのような次元拡張を実現できるわけではない。本研究で計測対象とする流れ場は、回転する系が作り出す流れであり、回転場の軸対称性を計測システム構築における前提条件としている。回転場に対する流れの空間構造の計測は、流体機械など回転体の流れ、混合や遠心分離などの回転を伴う工業装置において共通したニーズがある。また、竜巻や渦輪、乱流の要素渦など、流体力学における、ありとあらゆる渦のダイナミクスを論じる上で、回転する流れの計測に対する関心から、回転流れの新しい計測の方法論を提唱したいという動機が、本研究の背景である。

2. 回転場におかれた球のコラムナー後流構造の PIV 計測

回転する系の中で球が移動するとき、テイラーコラム⁽⁴⁾⁽⁵⁾と球後流が干渉した固有の旋回構造が発生する。この問題は、流体力学では、回転系にある物体や粒子が、どのような抗力や揚力、モーメントを発生するかという運動論に照合され、地球・惑星物理学では、自転する惑星内部の流れの力学として取りあげられている。

2-1. 実験装置および計測原理

高さ 2m、直径 1.2m の水槽全体を回転させる設備を使い、その中心に直径 50mm の球を細い糸で吊す。この球を、水中で、回転軸方向（装置では鉛直方向）に一定速度で移動させ、その周囲に形成される流れを計測した。計測には PIV を利用した。PIV の計測面は、図 1 に示すように、回転中心から ε だけずらした。これにより流れ場のもつ流速のうち、計測面内に投影された流速分布が得られる。流れが軸対称であるとき、計測面内の速度成分から、周方向速度成分と半径方向速度成分を逆算することができる。このような方法を、Off-axis PIV と呼ぶこととする。

Fig 1. Relationship between the in-plane velocity components of the off-axis PIV and the velocity vectors in the axisymmetric flow field.

式(1)は、PIV計測面で得られる速度成分から、三次元速度ベクトル場を得る式である。これは図1(b)に示されたような軸対称な流れ場における幾何学的関係式であり、容易に誘導することが出来る。

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1(\text{from PIV}) \\ v_1(\text{from PIV}) \\ (v_1 \cos \theta - v_2) / \sin \theta \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_2(\text{from PIV}) \\ v_2(\text{from PIV}) \\ v_1 / \sin \theta - v_2 \tan \theta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

ここで、 u と v は計測面内の速度成分（図1(b)中に記載した x と y 方向に対応する流速成分）、 w は計測面に垂直となる面外流速成分である。それぞれの添字、1と2は、回転中心より右となる範囲と左となる範囲を表す。式(1)

を、軸対称座標系に従って、半径方向速度成分、周方向速度成分、ならびに回転軸方向速度成分として変換すれば、式(2)が得られる。

$$\begin{pmatrix} v_r \\ v_\theta \\ v_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cos \alpha (1 + \tan^2 \alpha) (v_1 - v_2) \\ \frac{v_2}{2 \sin \alpha} - \left(\frac{\cos \alpha}{\tan 2\alpha} + \sin \alpha \right) v_1 \\ \frac{1}{2} (u_1 + u_2) \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} \sin \alpha = \frac{\varepsilon}{r} \\ \tan^2 \alpha = \frac{(\varepsilon/r)^2}{1 - (\varepsilon/r)^2} \\ r = \sqrt{\varepsilon^2 + y^2} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、角度 α 、回転中心からの距離 r は、上記のように ε によって与えられる。なお、回転中心から ε となる位置よりも中心側にある流れは計測されない。しかし ε は十分に小さいこと、ならびに回転中心近傍では一定渦度を有する剛体回転場であることを境界条件として使うことができるため、外部からの線形内挿補間によって速度ベクトル場の欠損を穴埋め処理することができる。

2-2. 計測結果

図 2(a)は、球のレイノルズ数が $Re=1500$ 、回転と並進の比を表す無次元数であるロスビー数⁽⁵⁾が $Ro^{-1}=1.75$ のときの、PIV 計測面内の流速分布の一例を示す。このデータのうち、(a)の中に示した縦の白い線の位置で、流速成分 u と v をサンプリングし、それぞれの時間経過をマッピングしたものを(b)に示す。この図から、球の並進移動開始後、4s 程度で定常な後流構造に到達していることが確認できる。

Fig. 2 Velocity information obtained within off-axis PIV plane. (a) Instantaneous velocity vector distribution at the sphere speed of $U=30$ mm/s and the rotational speed of 2.5 rpm. (b) Temporal evolution of two velocity components at $x/D=0.5$.

式(1)と(2)を適用し、図 2 で得られた Off-axis PIV の計測面内の流速成分を軸対称座標系での流速分布に変換した。図 3 は、この結果を 3 つの渦度成分にさらに変換し、三次元表示したものである。この結果から、水槽が回転していない場合（同図の上段）に比べて、回転している場合（同図の下段）では、全く異なる後流構造が出現することが可視化された。例えば軸方向渦度 ω_x （同図の左列の結果）は、回転系においてのみ表れ、球の上流側と下流側に非対称な渦度分布を形成した。これは角運動量保存に乗って、球のまわりを流れが通過するためであり、特に球の背後には、ラッパ状の渦度ができた。これはサイクロニック渦であり、球の後流に竜巻状の流れが発生することを示している。この他、興味深い結果が他の条件でも得られており、現在、物理的な考察を進めているところである⁽⁶⁾。このように Off-axis PIV の手法は、わずか 1 枚の PIV 計測面しか扱っていないが、幾何学的に基づく変換方程式を導入することで、回転場がもたらす興味深い三次元後流構造を定量可視化することが可能であることを示すことができた。なお、回転水槽のような体系では、そもそものが複数のカメラとそれに対応した複数のシート照明を、同じ品質で実現することが困難であり、本手法は実験現場におけるセットアップの簡便性という観点でも利点があったと言える。

Fig. 3 Vorticity distributions normalized by U/D around the sphere for flow with and without background rotation at $Re=1.5 \times 10^3$, $Ro^{-1} = 0.88$ ($U=30$ mm/s, Ω is 5.0 rpm).

3. UVP による非定常せん断流れの定量可視化

前述の Off-axis PIV と同様な幾何原理により，線計測である UVP から，軸対称な流れ場の様相を定量可視化することができる．図 4 は，円筒を回転させたときにできる内部の流れを UVP で計測するシステムである．UVP の計測線を回転中心からずらすことで，計測線上で取得された流速分布を，軸対称二次元流れとして復元する．図 5 は，粘弾性流体（PAA 水溶液，0.5w%）を対象として，(a)スピニアップ応答，(b)スピンドアウン応答，(c)インパルス回転応答の，ある特徴的な瞬間の流れを可視化した例である．この方法により，未知の物性をもつ流体のせん断歪みや波動現象を，容易に可視化することができるようになった⁽⁷⁾．また，流体の運動量伝達速度やせん断歪みの測定値から，レオロジーのモデル方程式の構築や検証などが可能となった．紙面制約のためそれらの詳細は割愛するが，著者らの既報においてその基本的な方法を提案し，UVP を基本計測原理とした様々な流体のためのレオロメトリーを開発中である．

Fig. 4 Set up pf spinning flow measurement by UVP

(a) Spin-up response

(b) Spin-down response

(c) Impulsive spin response

Fig. 5 Distortion field on three different spin modes. Left: particle tracers; right: mesh tracers

4. 結 語

回転系で発現する軸対称な流れ場を、1枚のPIV計測面で、あるいは1本のUVP計測線で測定し、多次元の流れの構造を定量可視化する方法を提案した。両方とも基本原理は、計測面または計測線を回転中心からわずかにずらすこと(off-axis measurement)で、幾何学的方程式から多次元の可視化を実現するというものである。なお、本報では取りあげなかったが、対象とする流れ場の軸対称性は必要条件ではない。流速分布の時間軸方向の情報を利用すれば、流れ場の波動現象など周期性を伴う場合でも、復元可能である。これについては別途、次元拡張の研究を進めているところである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、大型回転水槽設備を提供して頂いた、英国ウォーリック大学流体力学センターのペーター・トーマス教授、運用で支援して頂いたマーク・ブレンド博士、PIV計測で補助役をして頂いた当時北海道大学大学院生の吉本君にそれぞれ謝意を表す。また、UVPによる計測について、スイス連邦工科大学の武田 靖 教授、当時 北海道大学大学院生の古屋君に謝意を示す。

文 献

- (1) 小林敏雄ほか, "PIV ハンドブック", 可視化情報学会編, 森北出版(2002)
- (2) Takeda, Y., Tasaka, Y. "Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, Fluid Mechanics and Its Applications", Springer, ISBN: 978-4-431-54025-0 (2012)
- (3) Elsinga, G. E., Scarano, F., Wieneke, B., von Oudheusden, B. W., "Tomographic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 41 (2006), pp. 933-947.
- (4) Taylor, G. I. "Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids", *Proc. R. Soc. London*, Vol. A 104 (1923), pp. 213-219.
- (5) Proudman, J., "On the motions of solids in a liquid possessing vorticity", *Proc. R. Soc. London*, Vol. A 92 (1916), pp. 408-424.
- (6) Murai, Y., Vlaskamp, J., Nambu, Y., Yoshimoto, T., Brend, M., Denissenko, P., Thomas, P.J., "Off-axis PIV for 3-D visualization of rotating columnar flows", *Exp. Thermal Fluid Sci.* (submitted)
- (7) Shiratori, T., Tasaka, Y., Murai, Y., Takeda, Y., "Development of ultrasonic visualizer for capturing characteristics of viscoelastic fluids", *Journal of Visualization* (submitted)