



4. 流体計測法

4. Flow Measurement Technique

松野 隆¹⁾, 本阿弥真治²⁾, 藤井孝藏^{2,3)}, 関本諭志³⁾, 飯田明由⁴⁾

MATSUNO Takashi¹⁾, HONAMI Shinji²⁾, FUJII Kozo^{2,3)}, SEKIMOTO Satoshi³⁾ and IIDA Akiyoshi⁴⁾

¹⁾鳥取大学, ²⁾東京理科大学, ³⁾宇宙航空研究開発機構, ⁴⁾豊橋技術科学大学

(原稿受付: 2015年7月10日)

プラズマアクチュエータが適用される流れ場の計測では、一般の流体計測と異なり、放電によるイオンの存在や電磁干渉 (EMI) が原因となり計測に利用出来る手法が制限される。本章では、プラズマアクチュエータ適用時の流体計測法の基本技術の代表例として、PIV・シュリーレン法および熱線風速計による速度場計測について、計測事例とともに紹介する。

Keywords:

plasma actuator, experimental method, particle image velocimetry, schlieren visualization, hot-wire anemometry

4.1 はじめに

本章ではプラズマアクチュエータによる流体制御の研究において用いられる流体計測法について紹介する。流体計測法の一般的な概要については、読者も既に様々な知識・経験をおもちと思われるのでここでは割愛する。プラズマアクチュエータのような流体制御デバイスが適用される流れ場の計測では、一般の流体計測と異なり、放電によるイオンの存在や電磁干渉 (EMI, electromagnetic interference) が原因となり、計測に利用できる手法が制限される点が問題となる。これに対し、広く行われているのが非接触の画像を用いた計測法である。また、EMI等の電氣的障害に対して、既存の計測手法を改良・発展させることで流体計測を可能にした例もある。

本章では、プラズマアクチュエータ適用時の流体計測法の基本技術を事例とともに紹介する。ここでは、非接触の計測法の代表として、流体制御デバイスのマイクロ流れに対する粒子画像流速測定法 (PIV, Particle Image Velocimetry) に関する研究、および、流体の密度変化を利用した光学的可視化法の一つであるシュリーレン法による噴流の可視化の例を示す。また、直接的な流体速度計測の代表として、熱線流速計を用いた放電部近傍の流体の速度変動計測について紹介する。

4.2 PIV

(1) 原理と特徴

PIV とは、トレーサー粒子が流れに追従すると仮定し、カメラにより流体中の粒子を時間間隔 Δt で撮影し、2枚の粒子画像から、粒子の移動距離を求め、時間間隔 Δt から速度に換算して、流体の速度を計測する方法である。基本PIVシステムでは、平面内 (2D) の速度2成分 (2C)、即

ち、速度の2D2Cを計測する。短い間隔のダブルパルスのレーザー光学系と画素数が多いCCDカメラ、そして移動距離を演算する高速計算機が主要構成要素である。各機器のコストパフォーマンスが向上し、研究機関での利用が進み、PIVは速度計測法の中で代表的な位置を占め、多くの解説がある[1-3]。

プラズマアクチュエータのデバイス周りの流れ計測にPIVが使用されるのは、プラズマ発生に基づく電場の影響を受け難いことが理由の一つである。デバイス廻りでは電気絶縁性材料のガラス製ピトー管を使用する等の対策を講じ、トレーサー粒子はクーロン力を受け、粒子軌道が影響を受けるので、PIV計測では粒子に及ぼす電場の影響が検討されている[4]。

PIVシステムはこの30年間、大きく分けて二つの方向に発展した。一つは、空間分解能、もう一方は、時間分解能の向上である。前者では、CCDカメラの画素数が増加し、さらに、ズームレンズを組み込んだ光学系により単位物理空間当りの画素数が増加し、3D3Cをめざしたステレオ方式が利用できるようになった[5-7] (図1参照)。後者では、レーザー光源とCCDカメラの高速化による時間分解能の向上により、乱流スケールの渦構造を含めた解析が可能となってきた。

(2) 計測事例

2006年6月に開催されたAIAA流体力学講演会では、Actuator Induced Flow Physicsと題するセッションが初めて設けられ、デバイス周りの流れに注意が向けられ、その後の各種アクチュエータデバイスの性能向上に大きく貢献した。

誘起流れの方向が主流の方向と一致する場合、流れは2次元であり、2D2CのPIVによる計測例が多い。時間分解能

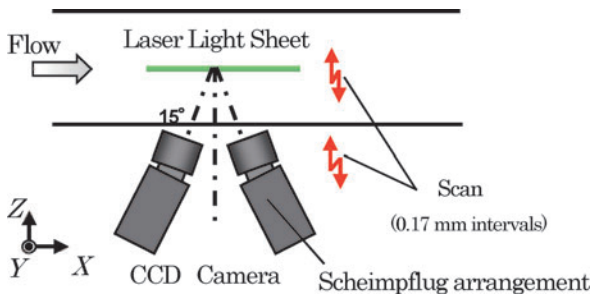


図1 ステレオスキャニング PIV システム (3D3C 計測).

の向上もみられ、Gurney Flap の剥離制御にフレームレート 2 kHz の Time Resolved (TR) PIV [8], さらに 5 kHz の結果もあり [9], 今後, TR PIV は増える傾向にある。

デバイス周りの流れをステレオ PIV により計測する例は少ない。アクチュエータによる誘起流れの方向が主流と同じであり, ステレオ計測が必要ないからである。しかし, デバイス電極を主流に平行に配置した場合や渦発生器のように誘起流れの方向が主流に対して傾斜している場合, デバイスの性能評価には主流と垂直な面内の 2 次流れベクトルを求めて, 流れ方向の軸廻りの渦度を評価関数とするので, レーザーシートを流れ方向に垂直に配置する光学系が必要となる。このような配置で渦発生器のように主流方向の軸廻りの縦渦を計測した例がみられる [10]。

図 1 に示すように 2 台の CCD カメラで撮影することにより, 面外速度成分 (Z 方向成分) が加わり 3C の PIV 計測となり, さらに, レーザーシート光とカメラを面外方向にスキャンすることにより測定流路の 3D3C 計測となる。シート光とカメラの配置に関しては, 流れ方向に関して 2 台のカメラを配置し, シート光は流れの軸に垂直な面 (YZ 断面) とする場合がある [11]。この他のステレオ PIV の計測では, 変動速度の相関を計測し, デバイス下流の乱流レイノルズ応力に及ぼすモジュール波形の影響を示した例がある [12]。

1960 年代半ばに熱線流速計が一般の利用に供され, 80 年代にレーザードップラ流速計と続いた。PIV が誕生してから 30 年の歳月が経過して, 成熟した計測技術となる状況のもとで, PIV は, プラズマアクチュエータ周りの流れの計測に広く利用され, デバイスの各種パラメータの評価に貢献している。
(本阿弥真治)

4.3 シュリーレン法による噴流可視化

(1) 原理と特徴

シュリーレン (Schlieren) 法とは, 媒質の密度変化による光の屈折率変化を利用し画像の明暗により流れの密度場を可視化する手法である。シュリーレン法の代表的な装置構成を図 2 に示す。まず点光源からの光を凹面鏡 (もしくは凸レンズ) により平行光線とし, 可視化対象は平行光線中に設置する。その後凹面鏡により平行光線を再度集光するが, その際ナイフエッジを片側からやや焦点に被るように設置する。対象により流体の密度変化が発生すると, 光の屈折率が変わり対象付近を通過する平行光線の進路が変わり, 集光される際の焦点位置も変化する。この変化でナ

イフエッジ側に逸れた光が遮断されるため, その先のカメラで撮像される画像に明暗が生じ, 流体の密度場の可視化が可能となる。シュリーレン法の詳細については文献 [13] を参照されたい。

シュリーレン法は密度勾配が大きいほど明確な可視化が可能であるため, 高速流や燃焼等への適用が多く, 低速流への適用は少ない。しかし, プラズマ放電による加熱により流体に密度変化が生じ, それらが誘起流速により移流するため, プラズマアクチュエータの誘起流速が比較的遅いにも関わらず可視化が可能となる [14]。

この方式の利点は PIV のようなトレーサー粒子の混入を必要としない点, また粒子の追従では示されない衝撃波を捉えられる点である。一方で欠点としてプラズマ領域近辺を通過しない流体については密度変化が少ないためにその流れを捉えられない点が挙げられる。

(2) 可視化事例

(a) 三電極 PA 誘起流れ場の可視化と速度場解析

図 3 はシュリーレン法による可視化結果であり [15], プラズマアクチュエータ電極端から流れが誘起されることがわかる。さらにこの画像に対し PIV と同様に画像相関を施し (Schlieren Image Velocimetry, SIV), 図 4 の通り流速分布を得ることに成功している。

(b) ナノ秒パルスプラズマアクチュエータ周りの可視化

図 5 は, プラズマアクチュエータの印加電圧に正弦波の代わりに立ち上がり 100 ナノ秒程度の高電圧パルスを印加した際の誘起流れ場である [16]。プラズマ放電領域である

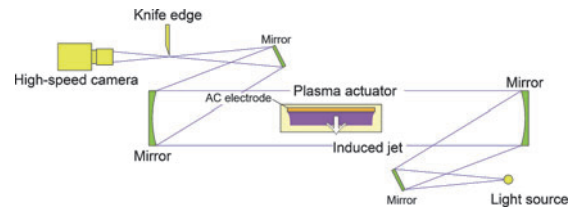


図2 高速度シュリーレン法の装置構成。



図3 シュリーレン法による誘起流れ場の可視化。

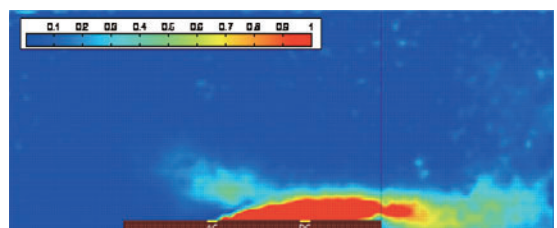


図4 SIV により得られた多電極 PA 誘起流れの速度場。

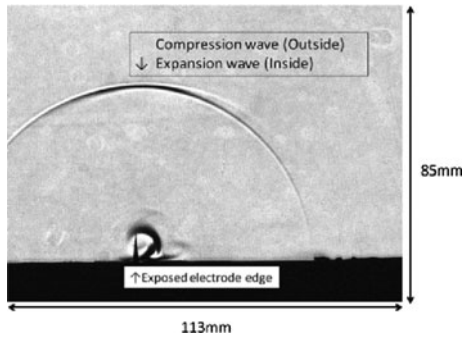


図5 PAの生成する衝撃波の可視化.

電極端から、図3のような壁面流れの生成と同時に発生する半円状の衝撃波を捉えている。この衝撃波はプラズマ放電のナノ秒オーダーによる急激な加熱により発生する。

(松野隆, 藤井孝藏, 関本諭志)

4.4 熱線流速計

熱線流速計は流体計測、特に乱流計測に広く利用されている計測器である[17, 18]。熱線流速計の特徴は時間分解能、空間分解能に優れることであり、乱流の速度変動を精度よく計測することが可能である。4.4節では熱線流速計の原理、プラズマアクチュエータ (PA) の利用環境における熱線流速計の取り扱いの注意点と実際の測定例を示す。

熱線流速計のセンサは図6に示すように先端が尖った2本の電極 (プロング) に直径 $1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 、長さ 1mm 程度の金属細線 (タンガステン線または白金線) を取り付けただものである。このセンサはブリッジ回路の一端に接続されており、ブリッジ回路に加えられた電流により発熱する。無風状態でこのブリッジが平衡状態になるように回路を調整し、センサを気流に挿入すると、センサ部が気流により冷却される。金属細線の抵抗 R_w は温度に依存するため、センサが冷却されると抵抗値が変化し、ブリッジ回路の平衡がくずれ、ブリッジ回路の出力端子に電位差が生じる。この電位差をオペアンプで増幅し、後段のトランジスタに接続することにより、ブリッジの印加電圧を制御することができる。気流により金属細線が冷却されると印加電圧が大きくなり、金属細線の温度が元の状態に戻るまで、印加電圧が変化する。このような熱線流速計を定温度型熱線流速計と呼ぶ。このシステムでは、気流の速度が変化するとセンサの温度が一定となるようにフィードバック回路が応答するため、出力電圧が速度変動に追従して変化するため、高い時間分解能を有する。

熱線流速計の出力電圧と速度の関係は金属細線周りの熱伝達とジュール発熱の関係から求めることができ、一般に

$$U = \{B_0(E^2 - C_0)\}^{1/n} \quad (1)$$

と表すことができる[19]。ここで定数 n は実験定数であり $0.45\sim 0.5$ 程度の値である。熱線流速計を使用する場合は、熱線回路のゲイン B_0 とオフセット C_0 を校正実験により求め、流速と電圧の関係をあらかじめ調べておく必要がある。

熱線流速計の計測では気流の温度が変化すると、熱伝達

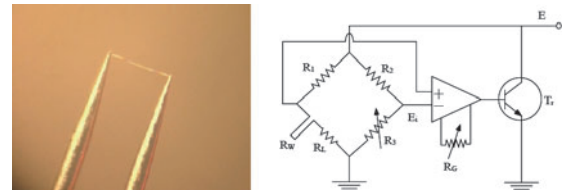


図6 熱線流速計のセンサ部の写真とフィードバック回路.

による放熱量が変化するため、正しい計測ができなくなる。温度変化を伴う場合は、文献[20]に示すように気流温度の補正が必要となる。このため、熱線流速計をPAの利用環境化で使用する場合、プラズマによる発熱の影響を考慮する必要がある。プラズマの発熱により周囲温度が上昇するような場合には温度計測を同時に行い、温度補正を行うことが一般的である。

著者らの実験環境 (電圧 4kV 、PAの励起速度 1m/s 程度) では、無風状態でPAを駆動した場合の温度上昇は 0.2 度程度であり、熱線に及ぼす影響は小さく、PAの電極付近の流速分布を熱線とPIVにより計測した結果、両者の結果はほぼ等しいことを確認した。また、気流速度 10m/s 以上の風洞実験では温度の影響は無視できるほど小さいことを確認した。

熱線流速計のフィードバック回路は共振系となっており、実際に使用する際は、ブリッジ回路の出力アンプに非平衡電圧を加えて、応答特性の調整を行った。熱線流速計の回路自体はもともと共振系であり、発振しやすい特性があるため、高周波数のノイズに対する対策が十分でないと回路が発振する可能性がある。PAを駆動した環境で熱線流速計による計測を行う際の問題点として、PAによる放電及び高電圧電源のノイズの問題がある。また、PAによるアーク放電が熱線を介して回路に加わると、熱線回路及びそれに接続されたPC等を壊す可能性がある。高周波数帯域のノイズをカットするフィルターを入れ、熱線流速計とセンサの間にバリスタを入れて回路を保護することにより、PAの利用環境化でも安全に使える回路を作成した。(PA用熱線回路の詳細については <http://aero.me.tut.ac.jp/PA> よりダウンロードが可能)

図7にPA用の対策をしていない回路とPA用の対策をした回路での計測事例を示す。PA用の保護回路を取り付けることで正しく計測できることがわかる。熱線流速計へのノイズはPAの駆動周波数に依存するため、熱線流速計

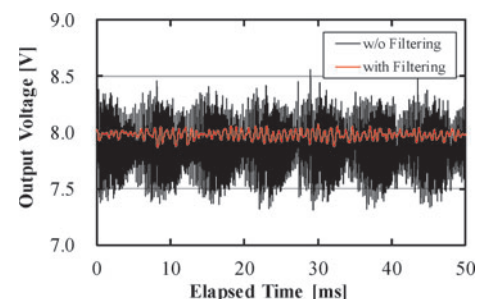


図7 ノイズ対策の有無による出力電圧の違い.

を用いる場合、PAの駆動周波数以下の速度変動しか測れないことに注意する必要がある。

図8に平板翼上面の流れ場の速度分布を熱線流速計で測定した結果の一例を示す。PAを駆動していない場合は、流れが前縁ではく離するのに対して、PAを駆動するとはく離が抑制される。この実験では、熱線はPAの下流3mmの位置に設置されており、PA近傍での計測が正しく行えることがわかる。このほかにキャビティの上流に縦渦を発生させるためのPAを複数設置し、境界層の流れと音を抑制する実験を行っているが、熱線流速計を使用して、制御前後の流れの変化と音の関係などを調べられることを確認済みであり、熱線流速計を用いることでPA動作環境下でも流れ速度変動の計測を行うことが可能とわかった。

(飯田明由)

4.5 おわりに

本章ではプラズマアクチュエータによる流体制御研究における代表的な流体計測法について事例とともに紹介した。上述の通り、プラズマアクチュエータの研究においては画像計測・光学計測による非接触な計測手法がアドバンテージを持っている。一方で熱線流速計のような、原理的に放電・プラズマに対し脆弱な手法においても、障害を受けない手法・対策の開発が行われ、よい結果を得ている。

その他、一般的な流体計測法についても、多くの研究者が工夫を凝らし適用可能領域を広げているが、流体制御を専門とする研究者にとってはプラズマの特性や計測手法については未知な点が多い。読者の方でよい計測手法についてご示唆いただける方がいらっしゃればぜひご教授いただきたい。

参考文献

[1] R.J. Adrian, *Exp. Fluids*, **39**, 159 (2005).

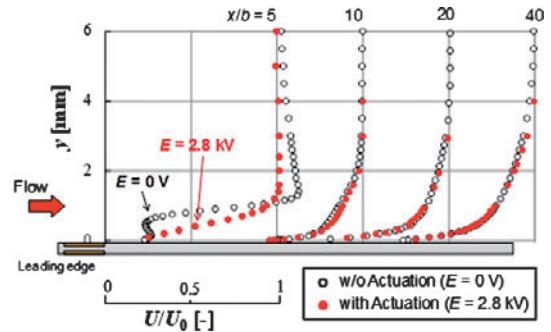


図8 平板翼周りの速度分布に及ぼすPAの影響。

- [2] C. Tropea *et al.* (ed), *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, 287 (Springer, 2007).
- [3] J. Westerweel *et al.*, *Ann Rev Fluid Mech.*, **45**, 409 (2013).
- [4] M. Hamdi *et al.*, *Exp. Fluids*, **55**, 1702 (2014).
- [5] T. Hori and J. Sakakibara, *Meas. Sci. Tech.*, **15**, 1067 (2004).
- [6] C.W.H. van Doorne, *Exp. Fluids*, **42**, 259 (2007).
- [7] T. Iai *et al.*, *J. Fluid Sci. Technol.* **5**, 35 (2010).
- [8] L-H Feng *et al.*, *Exp. Fluids*, **52**, 1533 (2012).
- [9] N. Benard *et al.*, *AIAA paper 2008-4202* (2008).
- [10] T.N. Jukes & K-S. Choi, *Exp. Fluids*, **52**, 329 (2012).
- [11] A. Fouras *et al.*, *Exp. Fluids*, **45**, 333 (2015).
- [12] P. Sujar-Garrido *et al.*, *Exp. Fluids*, **56**, 70 (2015).
- [13] G.S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques* (Springer, Berlin, 2001), 376p.
- [14] T. Matsuno *et al.*, *J. Fluid Sci. Technol.* **9**, JFST0048 (2014).
- [15] T. Matsuno *et al.*, *AIAA paper 2012-3238* (2012).
- [16] S. Sekimoto *et al.*, *AIAA paper 2014-0767* (2014).
- [17] J.O. Hinze, *Turbulence* (McGraw-Hill, 1975).
- [18] H.H. Bruun, *Hot wire anemometry* (Oxford Univ. Press, 1995).
- [19] L.V. King, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **214A**, 373 (1914).
- [20] 蒔田秀治他：温度流速計の高精度化第1報，日本機械学会論文集B編，58-545, 90 (1992).