

JAXA2mx2m 遷音速風洞における境界層 PIV 計測

小池俊輔, 加藤裕之, 高間良樹,
徳川直子, 中北和之(宇宙航空研究開発機構)

Particle Image Velocimetry for Boundary Layer in JAXA 2m x 2m Transonic Wind Tunnel

Shunsuke Koike, Hiroyuki Kato, Yoshiki Takama,
Naoko Tokugawa, and Kazuyuki Nakakita (JAXA)

概要

JAXA2mx2m 遷音速風洞における遷音速および超音速領域の Particle Image Velocimetry (PIV) を用いた境界層計測について紹介する。PIV の要素であるトレーサ粒子, 撮像系, レーザシート系, 処理手法を工夫することで, 遷音速領域では約 10mm, 超音速領域では約 1mm の境界層内部の速度分布を取得した。PIV の各要素の工夫点を紹介するとともに, 遷音速領域のロケットフェアリングと超音速領域のフレア型円錐の計測結果を紹介する。

1. はじめに

境界層の状態が層流か乱流かにより, 流体抵抗や熱伝達率は大きく変化する。様々な流体デバイスの効果は境界層高さや横流れの有無により大きな影響を受ける。壁面近傍に発達する境界層の情報を取得することは, 航空宇宙機の空力研究において極めて重要である。

しかしながら, 航空宇宙機の開発を対象とする大型かつ高速度域の風洞においては, 境界層の速度分布を取得することは極めて困難である。プローブの支持機構やトラバース機構を容易に導入することができないためである。そのため, 現状の多くの風洞試験では, 境界層の状態については, 数点の計測結果や数値流体力学(CFD)等による推算に依存している。

このような背景を受け, 著者らは国内の航空宇宙機開発の主要風洞である JAXA 2m×2m 遷音速風洞において, 粒子画像流速測定法(PIV) [1]を使用した遷音速および超音速領域の境界層速度分布計測[2-4]を試みた。本稿では, JAXA 2m x 2m 遷音速風洞(JTWT)における境界層 PIV 計測のための工夫点や計測結果について紹介するとともに, 今後の課題について報告する。

2. 境界層 PIV 計測のシステムと工夫点

2.1 トレーサ粒子

図 1 に境界層 PIV と広域 PIV (通常の PIV) との比較を示す。黒丸は PIV のトレーサ粒子を表し, 四角の枠は撮影領域を表す。図 1 では, 広域の PIV に対しては十分な粒子濃度となっている。領域内に一定数の粒子が存在し, この粒子群の移動軌跡を追跡することで, 速度分布を取得できる。境界層 PIV では, 高分解能を要求されることから拡大撮影となる。図 1 に示すように, 広域の PIV で適切とされる粒子濃度では撮影領域に十分な粒子数を確保できていない。境界層 PIV では, 粒子濃度の確保が重要となる。

図 2 は遷音速境界層計測時の粒子供給系を示している。(参考)としたものは, 広域 PIV における粒子供給系である。撮影領域における粒子濃度を高めるために, 境界層 PIV においては, 供給管

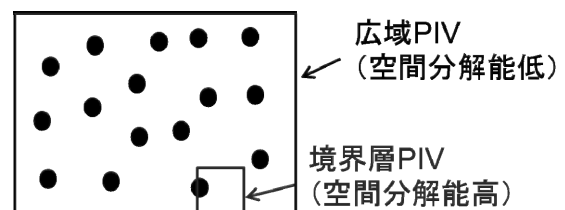


図 1 境界層 PIV と広域 PIV の比較

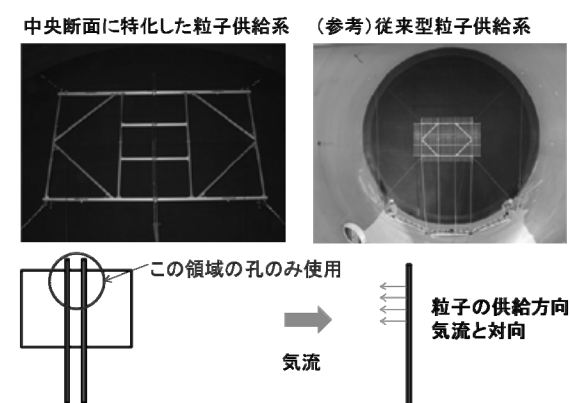


図2 トレーサ粒子供給用の多孔管(遷音速)

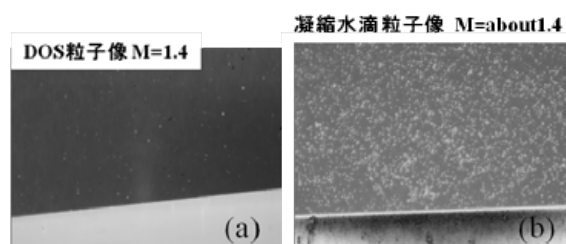


図3 粒子画像の比較(超音速)

を測定領域に当たる中央に限定して配置した。また、粒子の一樣性を高めるために、一樣流に対しては、対向する方向に噴射した。

図3は、超音速領域の境界層計測における粒子像の比較である。図3(a)は、通常使用している油滴粒子(セバシン酸ジオクチル, 直径約 $1\mu\text{m}$)の粒子散乱画像である。通常の方法では、粒子濃度が確保できていない。図3(b)は、凝縮水滴を使用した粒子像である。超音速境界層計測では、境界層の遷移状態を赤外線カメラでモニタしながら、境界層への影響が大きく現れない範囲で、凝縮水滴を発生させた。そして、その凝縮水滴をトレーサ粒子として使用して、境界層 PIV に使用した。図3(b)に示すように、この手法では、十分な粒子量を撮影領域において確保できた。

2.2 撮像系

JTWT の境界層 PIV では、測定部が $2\text{m} \times 2\text{m}$ と大きいことから、長距離の拡大撮影が必要となる。図4に JTWT 試験において使用したカメラとレンズを含む撮像系を示す。遷音速の境界層計測においては、

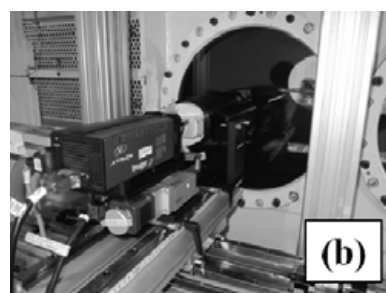


図4(a) カメラ (300mm レンズ) , (b)カメラ (QM1) (c)カセグレンレンズ QM1.

長焦点のレンズ(Nikkor AF-S 300mm f/4D)とテレコンバータを使用することで、所定の拡大率を確保した。超音速境界層においては、約 1mm の境界層分布を取得する必要があったため、さらに拡大する必要があった。そこで、マクスツフ・カセグレンレンズ (QM1, Questar 社製)を使用した。

カメラについては、いずれの試験においても CCD カメラ(Imager Pro Plus 4M, LaVision 社製)を使用した。高速領域の境界層 PIV においては、拡大撮影となることと、粒子の移動速度が速いことにより、レーザ発振間隔 Δt が数百 ns オーダーとなる。上記の CCD カメラは、フレーム間を十分短くとることができ、レーザ発振間隔 Δt を 100ns 程度まで短くすることができる。カメラ選定に際しては、解像度に加え、フレーム間の時間間隔を十分短くとれるかどうかにも留意する必要がある。

2.3 レーザシート系

2.2 の撮像系で紹介したレンズはF 値が大きい。そのため、粒子の散乱光強度は高いほどよい。レーザシートについては、模型を損傷させない範囲でエネルギー密度を高めた。後述の超音速境界層のPIV で使用したフレア円錐模型は樹脂性であり、模型表面を損傷させる危険性が高かった。そこで、事前に同材質かつ類似形状の模型を使用して、レーザの上限値を決定した。

信号系にも依存するが、通常のPIV 系では、設定値と実際のレーザ発振間隔の間に、少なくとも数十 ns 程度のずれが生じる。2.2 でも述べたように、境界層 PIV では、レーザ発振間隔 Δt が数百 ns 程度となり、数十 ns 程度のずれが無視できない。そこで、JTWT の試験においては、全フレームに対して、レーザ発振間隔をフォトディテクタで計測し、不確かさを低減した。

2.4 処理手法

前述のようなハードウェアに加え、処理手法についてはアンサンブル相関法 (Ensemble

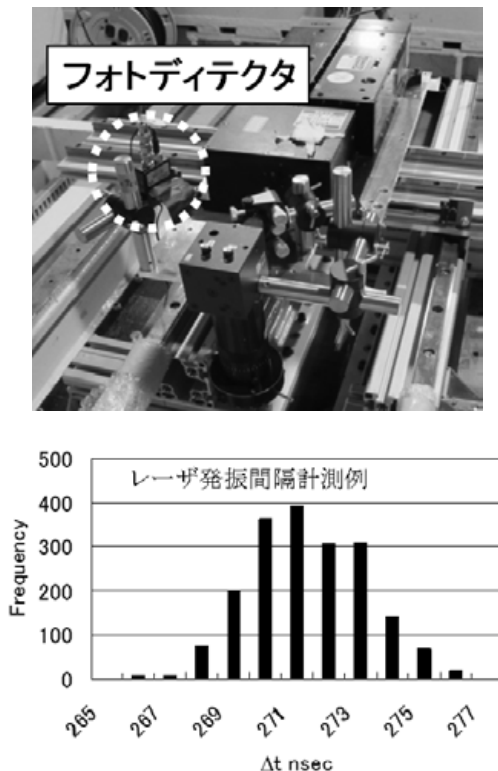


図5 レーザシート系およびフォトディテクタ

correlation method, Sum of correlation) [5-6]を使用した。通常のPIV では、1 画像対ごとに相関係数を算出し、そのピーク値を探索することで速度ベクトルを得る。アンサンブル相関法では、各画像対から相関係数を得た後に、全画像対の相関係数の総和をとる。その後、相関係数の総和のピーク値を求め、速度ベクトルを得る。一般に、1 画像対ごとに速度ベクトルを得る手法に比べて、空間分解能を高められ、壁面近傍まで計測値を得られる点が境界層計測に適している。超音速境界層の計測においては、アンサンブル相関法の極限である1 画素ごとに速度ベクトルを求める手法 (Single pixel ensemble correlation method) [5-6]を使用した。図6 に概念図を示す。

2.5 模型

模型表面からのレーザの反射を抑えることが、壁面近傍まで速度ベクトルを得るためには重要である。特に、後述のロケットフェアリング模型は、非常感圧塗料計測のために模型表面に陽極酸化処理がなされており、模型表面の拡散反射が問題となった。同試験では、レーザシートが当たる位

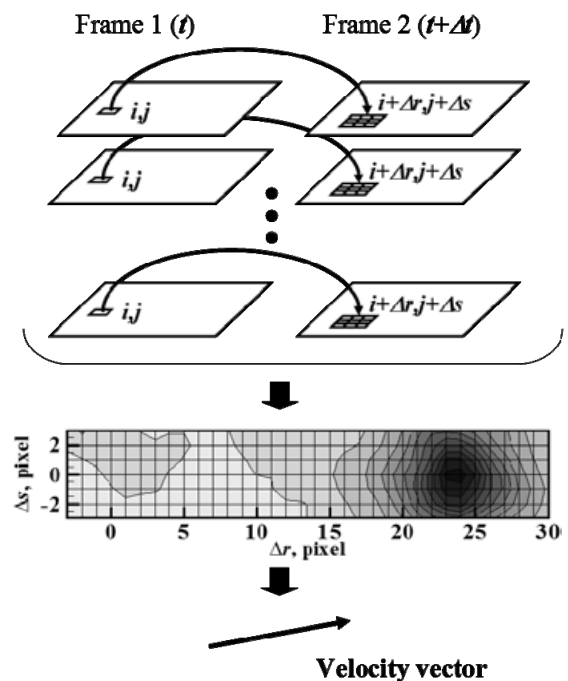


図6 Single pixel ensemble correlation

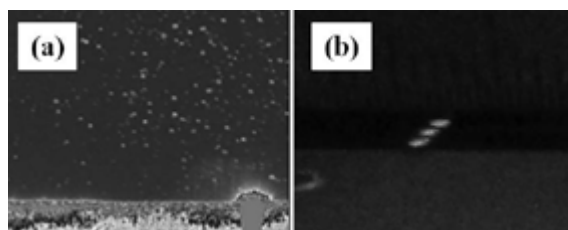


図7 壁面近傍の粒子画像とステンシルマーカ

置に黒色塗装を施すことで、この問題に対応した。図7の(a)図は、ロケットフェアリングの粒子画像であるが、模型表面近傍まで良好に撮影できていることが分かる。

境界層 PIV では拡大撮影をしているため、空力荷重等での模型のわずかなたわみも問題となる。模型の画像上での位置を求めるため、本試験では、ラフネス高さよりも十分に薄い、数 μm 程度のステンシルマーカを撮影領域の上下流端に設置した。図7(b)に模型に設置したステンシルマーカを示す。図7(a)では右下に半円上の発光が見られる。これがステンシルマーカの反射光である。処理においては、この発光を目印に画像上での模型位置を決定した。

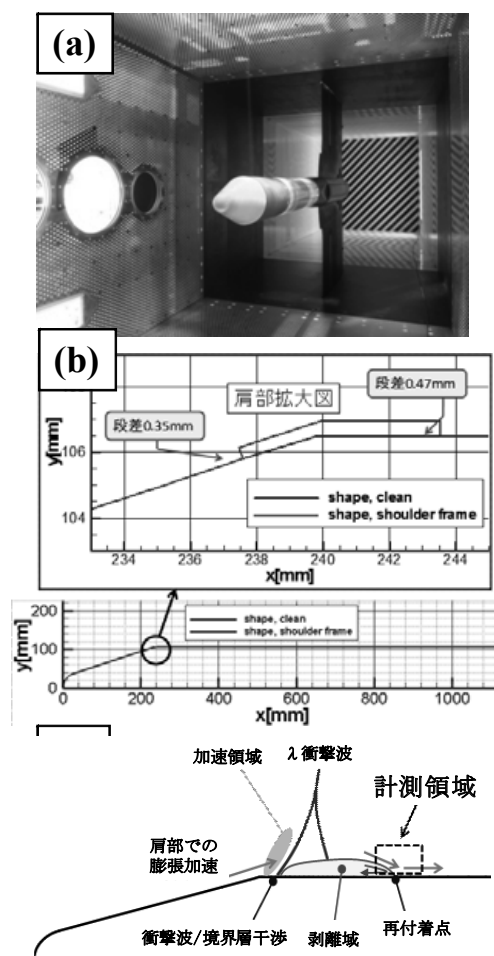


図8 ロケットフェアリング模型と流れ場

3. 境界層 PIV の計測例

3.1 ロケットフェアリング模型[4]

ここでは、遷音速の境界層 PIV の例として、ロケットフェアリング模型の結果を紹介する。図8に対象としたロケットフェアリング模型を示す。(a)は写真、(b)は形状の模式図、(c)は流れ場の模式図である。ロケットフェアリング模型の境界層 PIV では、図8(b)に示すように肩部の形状が異なる2種類の模型の差異を調査した。トレーサ粒子の追従性を考慮して、衝撃波近傍を避け、図8(c)に示す剥離領域下流側の再付着点近傍を計測領域として選択した。

図9にロケットフェアリング模型の境界層 PIV の結果を示す。本計測位置での境界層厚さは約10mmであり、図9に示す通り、再付着点を含む速度分布を良好に計測できた。プロット図は、2次元

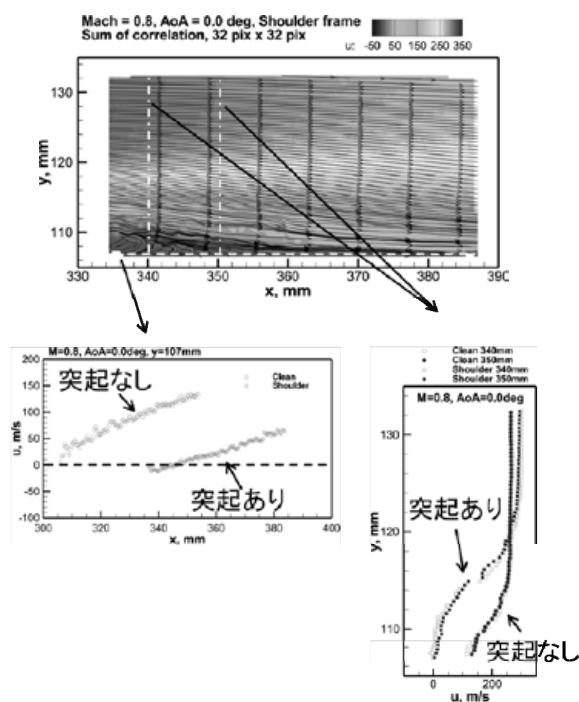


図9 ロケットフェアリング模型の計測結果

分布の破線上の速度分布を示す．図 8(b)で示した肩部の有無により，再付着点の位置や境界層の速度分布が変化する様子を明瞭にとらえている．

3.2 フレア円錐模型の場合[2, 3]

超音速境界層の計測例として，図 10 に示すフレア円錐模型の試験結果を紹介する．本模型は，図 10(b)のように迎角をとると，下面側から上面側に向かう 2 次流れが生じ，Top line に境界層が集まり，Top line の境界層内に変曲点が現れることが予想されていた[7]．本試験では，この検証のために，1.2m 先の模型上面の約 1mm の境界層を計測した．計測に際しては，前述のように，トレーサ粒子として凝縮水滴を使用した．凝縮による流れ場への影響については，境界層の遷移状態を赤外線カメラで確認することで評価し，遷移状態の変化がない状態で速度分布は計測した．

図 11 は，迎角 2° 時の Top line 上の境界層分布である．1mm 間隔ごとに平均化した値を示している図中の X_c は中心軸上での頂点からの距離である．

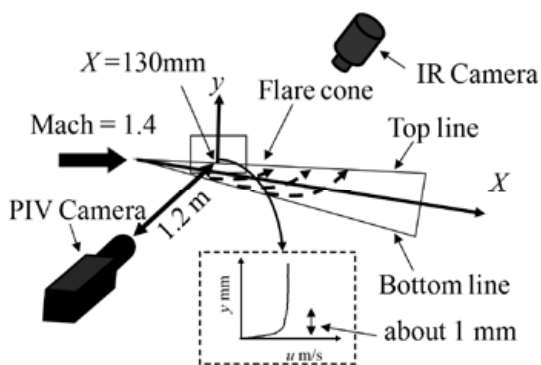
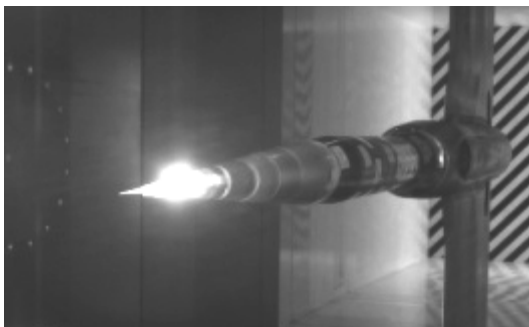


図 10 フレア円錐模型

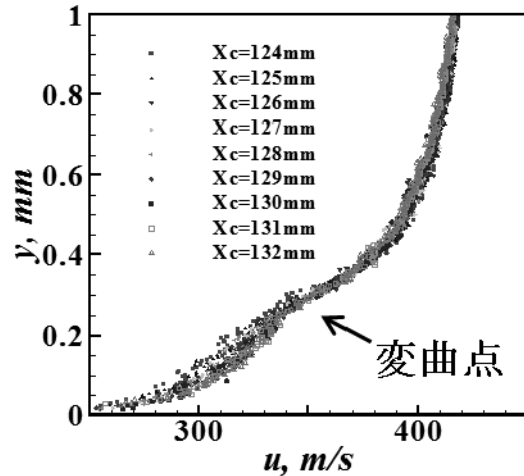


図 11 フレア円錐模型の速度プロファイル

壁面近傍の位置合わせには，やや課題を残すが，約 1mm の超音速境界層の速度プロファイルを取得できた．計測範囲において，図中の矢印の位置に変曲点が存在することが分かる．

4. 課題

複数回の境界層 PIV 試験を実施することで，共通の課題が明らかになってきた．最大の問題は，トレーサ粒子の供給方法である．ロケットフェアリングの超音速境界層の計測においては，油滴粒子を使用した，粒子濃度は不足しており，また粒子の分布も一様でないことから，良好な瞬時速度場は得られなかった．粒子量の増加や粒子供給位置の最適化等により，粒子分布の改善を図る必要がある．

また，粒子分布が悪い状態であっても，アンサンブル相関法を拡張することで，相関分布を粒子移動位置の確立密度分布の関数と捉え，乱流統計量を求めることは可能であると考えている．解析手法についても改良の余地はある．

その他の改良すべき手法としては，壁面位置の特定方法，壁面からの反射光対策を挙げられる．壁面の特定は，CFD 等との比較の上でも重要な課題である．

5. まとめ

本稿では、JAXA2m×2m 遷音速風洞における遷音速領域および超音速領域の境界層速度分布計測について述べた。PIV を使用して実際に境界層速度分布を取得した際の、工夫点を述べるとともに、計測例を2例紹介した。現状の最大の課題は、トレーサ粒子の供給方法にある。今後、トレーサ粒子の供給方法を改善することで、乱流統計量を含む境界層速度情報の取得に努めたい。

謝辞

本稿で紹介した一連の風洞試験を実施するに当たり、JAXA 風洞技術開発センターの関係者に多大なる支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1]可視化情報学会編, “PIV ハンドブック”, 森北出版, 2002.
- [2]小池ら, “PIV による軸対称物体の超音速境界層計測,” 第43回流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2011, (2011), 2B01.
- [3]Koike et al., “Measurement of Supersonic Boundary Layer Using Long Range μ -PIV with Condensed Water Droplets,” PIV13, Delft, (2013).
- [4]小池ら, “PIV によるロケットフェアリング模型の境界層計測,” 第44回流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, (2012), 2D10.
- [5]Westerweel et al., “Single-pixel resolution ensemble correlation for micro-PIV applications,” Experiments in Fluids 37 (2004) pp. 375-384.
- [6]Kähler et al., “Wall-Shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV,” Experiments in Fluids 41 (2006) pp.

323-341.

- [7]Tokugawa et al., “Transition within Leeward Plane of Axisymmetric Bodies at Incidence in Supersonic Flow,” AIAA-2012-3259 (2012).