

JAXA 2m×2m 遷音速風洞における DLR F6 模型のステレオ PIV 計測

○加藤 裕之、渡辺 重哉、塩原 辰郎 (JAXA)
渡邊 篤史 (コスモテック)

Stereoscopic PIV Measurement of DLR F6 Model Applied to JAXA 2m x 2m Transonic Wind Tunnel

Hiroyuki Kato, Shigeya Watanabe, Tatsuro Shiobara (JAXA),
Atsushi Watanabe (COSMOTEC)

Abstract

Stereoscopic PIV technique was applied to the DLR F6 model. The measurements have been performed in the JAXA 2m × 2m Transonic Wind tunnel (JAXA TWT1). Application of PIV measurement techniques to transonic wind tunnels has particular difficulties associated with complex flows with shock waves. Due to these difficulties, practical experiments of PIV measurements in transonic wind tunnels are limited. In the present study, The wind tunnel tests were conducted in the cart #4 of JAXA TWT1 which is most frequently used, has four perforated walls and a support system for a full-span aircraft model. In the PIV results, wing tip vortex was clearly observed near the wing tip. And wake of main wing and flow through nacelle are clearly observed corresponding to be low speed regions. These results showed that the optical access of cart #4 was effective.

概 要

JAXA 2m×2m 遷音速風洞におけるステレオ PIV 計測の実用化を目的とした技術確認試験について報告する。本試験は、計測技術開発用標準模型として製作した DLR F6 模型を用い、第 4 カートにおける PIV 計測の確認及び、新規に整備を予定している PIV 用シーディングレークの動作確認を主な目的として実施された。模型後流の速度分布を中心に計測を行った。計測結果では、翼端渦、主翼後流、フロースルーナセル後流が明瞭に計測されており、TWT1 第 4 カートにおける光学アクセスの有効性が示された。

1. はじめに

JAXA 研究開発本部風洞技術開発センター (WINTec) では、風洞試験・計測技術の高度化業務の一環として、空間速度分布計測の可能な大型風洞用粒子画像流速計測 (PIV) システムの開発を推進している¹。開発初期段階では、空間速度場計測のニーズが高い低速風洞を主対象とし、JAXA 6.5m×5.5m 低速風洞 (LWT1) 及び JAXA 2m×2m 低速風洞 (LWT2) における PIV 計測を実施してきた。

本計測システムの開発では、可搬性の高いシステム構

成とすることをコンセプトとしている。可搬性を持たせることで、システムの共通化を図り、開発整備、メンテナンスコスト、マンパワーの低減させるとともに、システムの稼働率向上及び継続的な改善を効率よく進めることが可能となる。現在、本計測システムの可搬性を生かすことで、適用風洞の拡大を目指し、さらに高速流へと対象を広げるため、JAXA 2m×2m 遷音速風洞 (TWT1) を対象としたステレオ PIV システムの開発を行い、SST ジェット実験機模型を使用した予備試験を実施している²。

この予備試験では、ジェット実験機模型のフロース

ルーナセル周りの流れを中心に計測を行い、その PIV 計測結果は、シュリーレン可視化画像と定性的に良好な一致をみせており、TWT1 におけるステレオ PIV 計測の妥当性が占められた。本予備試験は多溝壁カート（TWT1 第 3 カート）で実施されたが、使用頻度の高い多孔壁カート（TWT1 第 1 及び 4 カート）における適用や、PIV シーディング用レークの設置及び撤収にかなりの時間を要するため、簡便な設置方法の検討が課題となっている。また、近年、TWT1 では、第 1 カートと同じ形状の第 4 カートが増設された³。第 4 カートでは、PIV や PSP（感圧塗料技術）への適用性を向上させるため、観測窓や機器固定棚が新設されている。

そこで、予備試験後も残されている課題の解決に向け、増設された第 4 カートにおける風洞試験を実施し、第 4 カートで増設された観測窓の利用や PIV シーディング用レークの設置方法の改善を試みた。本試験は、計測技術開発用標準模型として製作した DLR F6 模型を用い、模型後流の速度分布を中心に計測を行った。本報では、課題に対する改善点等を紹介するとともに計測結果について報告する。

2. ステレオ PIV システム

2.1 システム構成

図 1 に遷音速風洞用に改良されたステレオ PIV システムの構成図を示す。システムの主要機器は、シード粒子を光らせるための高出力ダブルパルス Nd:YAG レーザ、粒子画像取得のための高解像度 CCD カメラ、及びシステム制御、流速ベクトル解析用の計算機とソフトウェアとから構成されている。

図 2 に PIV 機器配置図を示す。遷音速風洞における PIV 計測を困難としている大きな理由としては、プレナム室により測定部が外部と隔離されているということであるが、本計測システムでは、通風中の PIV 機器への遠隔操作を可能とするため、無線 LAN を利用したりリモート制御システムを開発を実用化している。このシステムは、カメラフォーカスとシャイムフラグの調整及びレーザ制御とシート光厚さの調整に対して、PC によるソフトウェア制御（LabVIEW）システムを用いて、RS-232C と無線 LAN のコンバータを利用して、遠隔操作を行うものである。TWT1 では、プレナム室内に無線 LAN アクセスポイントが設置されており、このアクセスポイントを利用することで、準備に時間を要するプレナム室内外間の追加配線することなく、遠隔操作が可能となる。さら

に、通風中はプレナム室内の気圧低下及び温度上昇により、PIV 機器の冷却が不十分となる恐れがあるため、各機器（カメラ、レーザ、コントローラ等）には圧縮空気による強制冷却している。

2.2 PIV シーディング用レーク

予備風洞試験の結果より、遷音速風洞では、測定部における抽気による影響や冷却器等の風路内でのトラップによる減少が大きくシーディングレークによる局所シーディングが必要であること判明している²。投入するシードは低速風洞と同じく、DOS（セバシン酸ジオクチル）という液体粒子を用い、ラスキンノズル型のシード発生装置によって、1 μm 程度のシード粒子（液滴）を生成させる⁴。DOS は常温において無色透明な液体で、人体に無害であり、若干の揮発性があり、ある程度時間が経過すると自然に揮発するため、風路を汚すことがないという特徴を持つ。シードは、拡散胴中央部に設置される PIV シーディング用レークより、風路内に放出される。レークには、多数のシード噴出孔（直径 2mm）が設けられており、シードが均一に散布されるように工夫されている。予備風洞試験では、軟鋼棒を用いて、レークを拡散胴に固定した（図 3）。そのため、レーク設置では、拡散胴に足場を組む必要があり、レーク取付け作業に 3 日、取外し作業に 2 日を要した。そこで、レークの固定として、多数のワイヤを用いる機構に変え、滑車を活用することで、足場を組むことなく、レークを釣り上げながら、拡散胴中央に固定する方法を考案した。図 4 に PIV シーディング用レークの構成図を示す。レーク取付け作業では、レークを床に立てた状態（図 5 (a)）から、ワイヤでレークを吊上げ（図 5 (b)）、拡散胴中央に固定する。この方法により、レーク取付けは 1 日、取外し 0.5 日で可能となった。

2.3 PIV カメラ及びレーザ

PIV カメラ及びレーザは、第 4 カートにより新設された機器固定棚を活用して、カートの両側に配置された（図 6, 7）。カメラはシート光に対して、前方散乱となる配置とすることにより、シードからの散乱光を効率よく可視化することを可能とした。PIV カメラは、2048×2048 画素の高解像度白黒クロスコリレーション型 CCD カメラ（階調 14bit）であり、あおり機構を有したカメラアセンブリを介してレンズを取り付ける。本カメラアセンブリにより、ステレオ計測時にシート光面に対して斜めから撮影した状態でもシャイムフラグ条件を満足さ

せることにより、撮影領域全面でのピント合わせが可能となっている⁴。ステレオ計測時における左右カメラによる画像ペア取得レートは最大 4Hz である。カメラの出力は CameraLink インターフェースであるが、長距離の伝送を可能とするため、光ファイバー変換器を用いて、カートに設置されたカメラと計測室の PC とを接続した。

シード粒子の照明用には 2 つの独立したキャビティを持った高出力 Nd:YAG レーザ（最大出力：200mJ /pulse, 波長：532 nm）を用いる。レーザパルスの時間間隔 Δt は画像取得用ソフトウェア上で任意に設定可能であり、計測領域における流速及び計測領域のサイズに応じて決定する。また、高速流においては、 Δt 短くなるため、相対的にレーザ発振等のジッタが計測値に与える影響が無視できなくなる可能性がある。そこで、本試験では、フォトダイオードを設置して、 Δt の計測を試みた。同一条件での撮影において、1,000 回の計測における Δt の最大値と最小値の差は、およそ 15ns 以下に収まっており、 Δt の設定値（=4 μ s）と比較して、十分小さいことが確認された。レーザ光学系は、ビームデリバリ用光学系とシート光学系とから構成される。レーザ用ミラーを複数個（通常 2～4 個程度）組み合わせることにより、測定領域近くのシート光学系設置位置まで平行ビームを導く。シート光学系は、シート生成のためのシリンドリカルレンズ、シート厚さを薄くするためのフォーカシングレンズから成り、風路内への設置にも考慮し、円筒形状の一体構造となっている。

2.4 PIV 制御用システム

図 1 のシステム構成図で示されるように、PIV システム全体の制御は計測用 PC によって集中的にコントロールが可能となっている。計測用 PC は計測室に設置し、BNC ケーブルにより、カメラ及びレーザへの同期信号を供給している。カメラ画角調整等の計測準備作業時は、測定部周辺でモニタ及び操作が可能となるように、DVI 接続によるモニタ延長ケーブル及び USB エクステンダによるキーボード遠隔操作により、計測用 PC の操作が可能となっている。計測用 PC 上に搭載された商用ステレオ PIV ソフトウェア（LaVision 社 DaVis7）を用いてレーザ、CCD カメラの同期操作、画像取得、第 1 次の速度ベクトル処理（FFT 相関計算による 2 成分速度ベクトル処理、2 成分速度ベクトル段階での初期的な誤ベクトル除去、3 成分速度ベクトルへのステレオマッチング処理）を行う。なお、相関計算時の検査領域（interrogation spot）サイズは通常 64×64pixel であり、近接するベクト

ルの計算間隔は検査領域幅の 50% とした。瞬時速度ベクトル処理後、統計計算により、平均値及び乱流強度等の統計量を算出する。

3. DLR F6 模型の PIV 計測

本試験では、計測技術開発用標準模型として製作した DLR F6 模型を用いて、模型後流の速度分布を中心にステレオ PIV 計測を実施した。図 8 に本試験で使用した模型を示す。本模型のサイズは、DLR F6 の 90% スケールであり、PIV、PSP、変形量計測等の光学計測手法の技術確認を主な目的として製作されたものである。なお、模型全体には、レーザ散乱防止の目的で、黒色つや有り塗装が施されている（図 9）。

模型をカート内に設置した状況を図 9 に示す。今回の計測では、光学窓の配置を生かし、気流方向垂直に、レーザシート光を照射し、対向壁の上下流の観測窓から、シート光を挟み込む形でカメラを配置した。風洞試験は、総圧（ P_0 ）=80kPa、マッハ数（ M ）=0.75 を基本条件として、迎角及びマッハ数をパラメータとして行った。図 10 に、本試験のステレオ PIV における計測領域を示す。本試験では、模型後流の左舷側半分をカバーするように計測領域を設定した。

図 11 に迎角（ α ）=0°で、マッハ数（ M ）=0.2, 0.6 及び 0.75 における平均速度分布の計測結果を示す。本条件では、1 条件当たり 250（ M =0.75）または 1,000（ M =0.2, 0.6）枚の瞬時速度ベクトルを取得し、その平均値を平均速度として算出している。図は、計測面内の 2 次元速度をベクトル表示、計測面に垂直な方向の速度をカラーコンタで表示している。また、各速度成分は、一様流速度で、無次元化されている。どのマッハ数の条件においても、翼端部に強い翼短渦の存在が認められる。また、主翼後流による速度欠損の生じている領域も主流方向速度の低下として現れている。さらに、フロースルーナセル及び胴体部分における速度低下も見られ、概ね、定性的には良好な計測結果となっている。しかしながら、一様流部分の主流方向速度成分は、翼端側から胴体に向かってわずかながら遅くなる傾向があり、想定される分布とは異なる。この傾向に関しては、ステレオ PIV 計測における偏り誤差が、計測点ごとに異なり、測定位置によって傾向をもってしまったことによると考えられる。

図 12 にマッハ数（ M ）=0.75 で、迎角（ α ）=-0.25, 0.47, 1.11 における平均速度分布の結果を示す。本条件では、1 条件当たり 1,000 枚の瞬時速度ベクトルを取得し、その平均値を平均速度として算出している。

先の迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合と同様に、翼短渦、主翼後流、ナセル及び胴体後流における速度分布が定性的にとらえられていることが分かる。また、迎角が高くなるにつれて、吹き下ろしの影響で、主翼及びナセル後流の位置が、若干、低い位置に移動している様子が分かる。一方、翼短渦の中心位置はほとんど変わらなかった。

5. まとめ

JAXA 2m×2m 遷音速風洞（TWT1）におけるステレオ PIV 計測の本格的な実用化を目的とした風洞試験を行った。試験は、計測技術開発用標準模型として製作した DLR F6 模型を対象とし、主翼後流断面を中心に空間速度分布を計測した。PIV シーディング用レークの設置方法を改善し、設置は 1 日、撤収は半日で可能となり、従来の方法に比べて、大幅に短縮された。計測結果は、定性的には概ね良好な傾向を示したものの、一様流分布には、計測誤差による影響がみられた。

最後に、本文で報告した TWT1 におけるステレオ PIV 計測に関して、風洞試験全般にご協力頂いた JAXA 研究開発本部風洞技術開発センター遷音速風洞セクション各位、PIV シーディング用レーク全般にご協力頂いた JAXA 研究開発本部風洞技術開発センター藤井啓介氏、PIV 計測全般にご協力頂いた株式会社 IHI エアロスペースエンジニアリング佐藤寿洋氏、山内智史氏、テンブスタッフ株式会社松本一洋氏に心より感謝いたします。

文献

- (1) 渡辺他,「標準模型と実用風洞用 PIV システムについて」,第 66 回風洞研究会議論文集, JAXA-SP-03-003, (2004)
- (2) 加藤他,「可搬型 PIV システムの遷音速風洞への適用」,第 74 回風洞研究会議論文集, JAXA-SP-05-016, (2005)
- (3) 重見, 須谷, 唐沢,「風洞群の改修について」,第 73 回風洞研究会議論文集, JAXA-SP-04-014, (2004)
- (4) Raffel, M., et al, *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*, Springer, (1998)

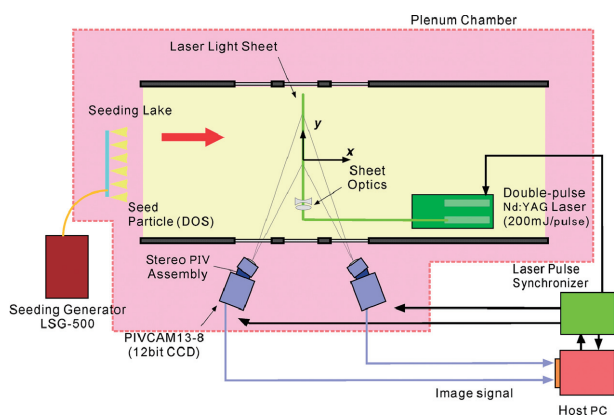


図1 ステレオ PIV システム構成図

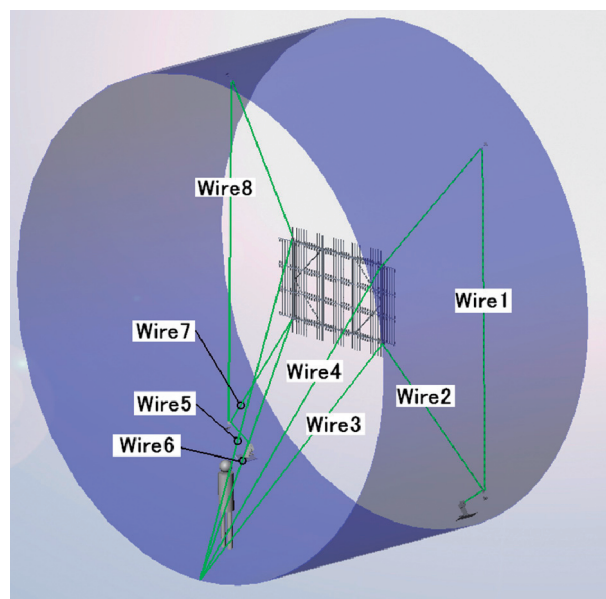


図4 PIVシーディング用レーク（改善後）

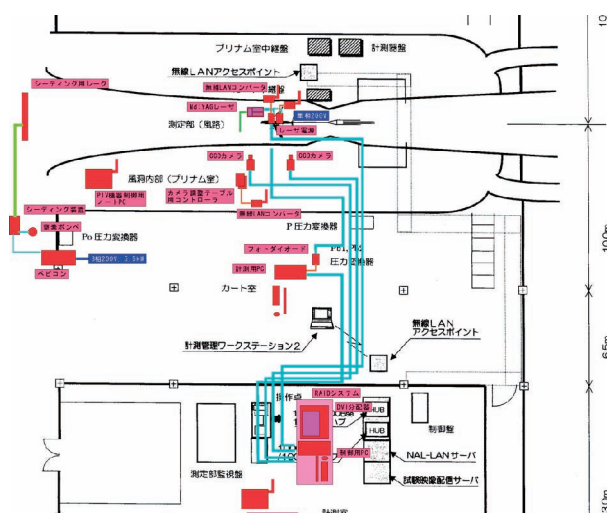
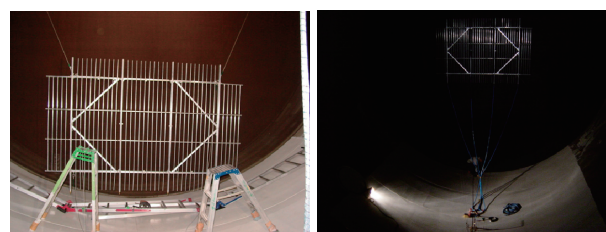
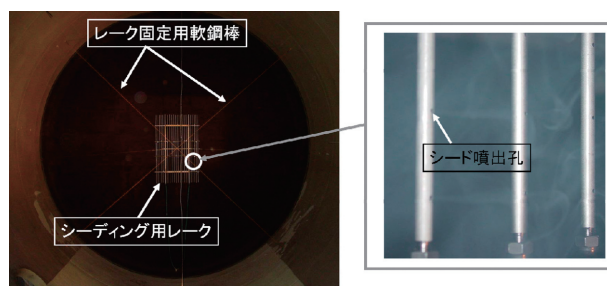


図 2 PIV 機器配置図



(a) レーク吊上げ前 (b) レーク吊上げ中

図5 PIVシーディング用レーク設置



(a) 拡散胴 (b) 拡大図

図3 PIVシーディング用レーク（改善前）

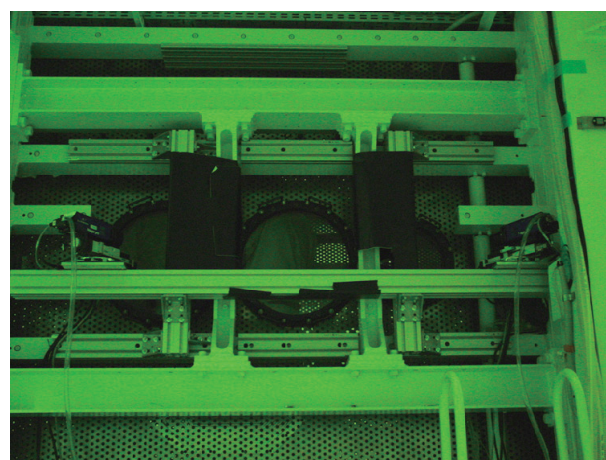


図6 PIV用クロスコリレーションCCDカメラ設置

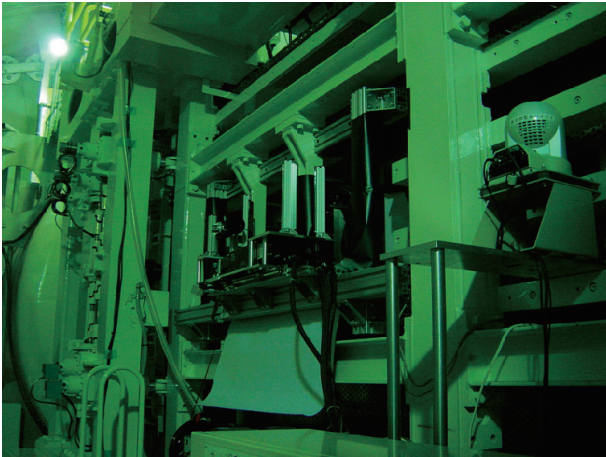


図7 PIV用ダブルパルスNd:YAGレーザ設置



図9 DLR F6 90%スケール模型設置

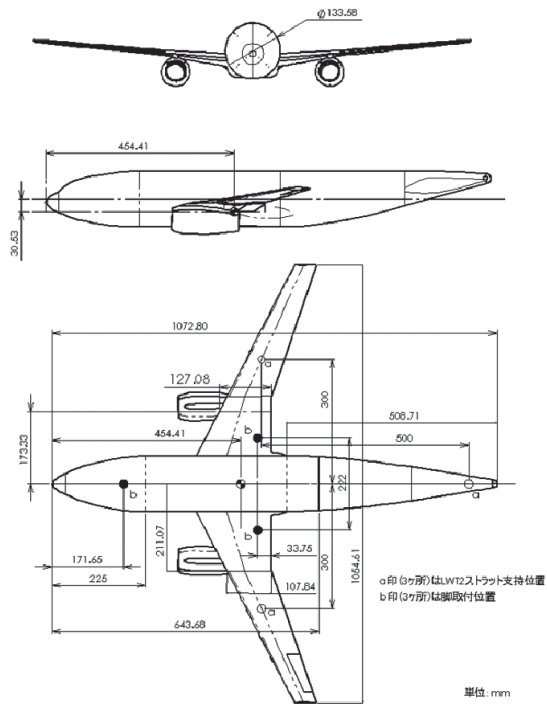


図8 DLR F6 90%スケール模型

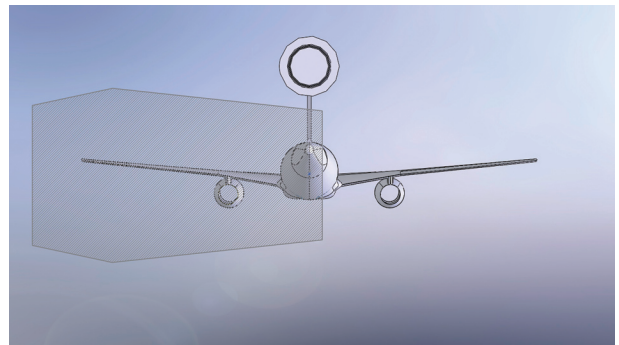
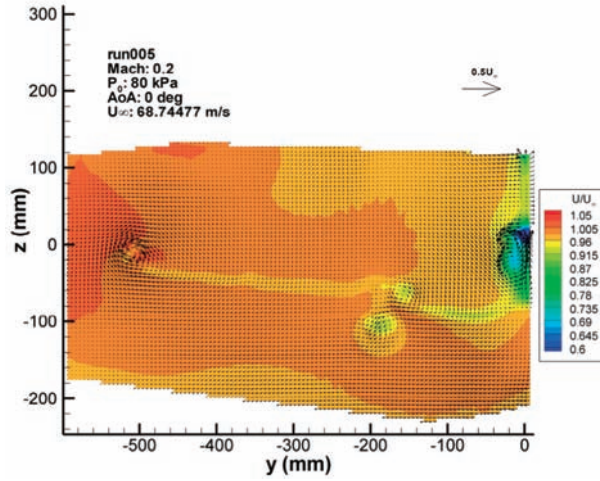
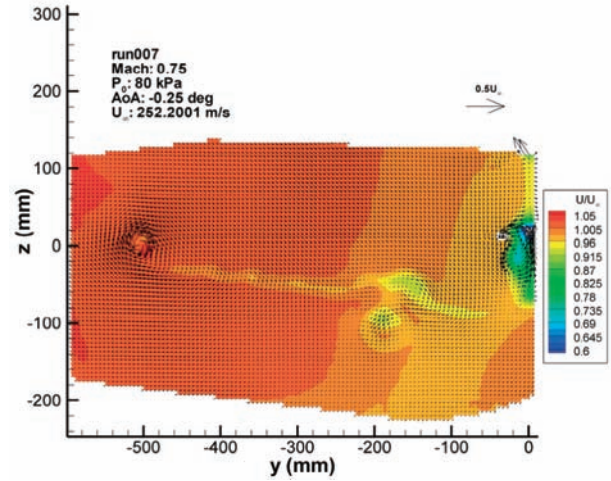
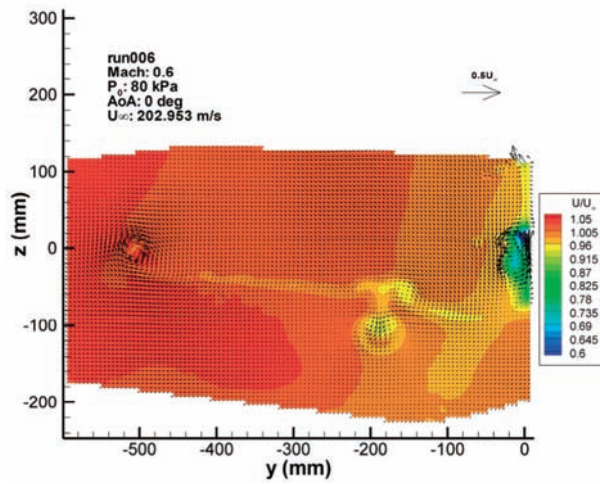


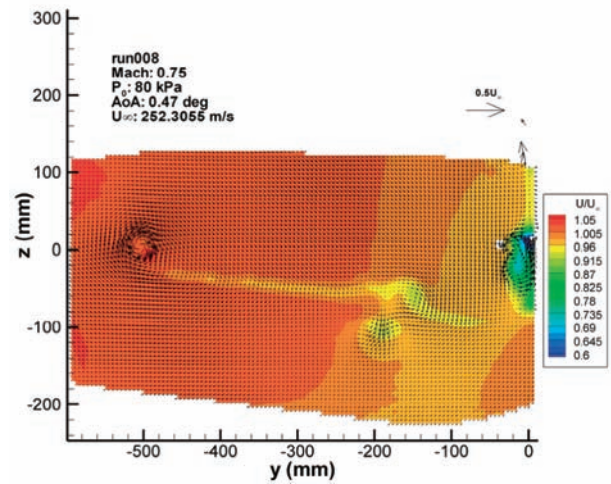
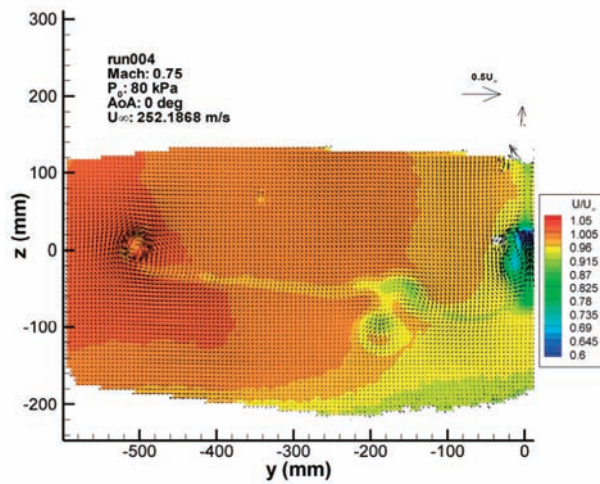
図10 ステレオ PIV 計測領域



(a) マッハ数 M=0.2

(a) 迎角 $\alpha=-0.25\text{deg}$ 

(b) マッハ数 M=0.6

(b) 迎角 $\alpha=0.47\text{deg}$ 

(c) マッハ数 M=0.75

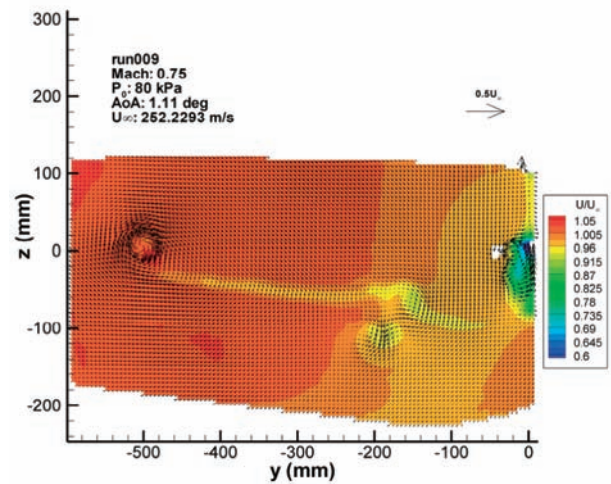
(c) 迎角 $\alpha=1.11\text{deg}$ 図 11 平均速度分布 (迎角 $\alpha=0\text{deg}$)

図 12 平均速度分布 (マッハ数 M=0.75)