円弧翼および円柱周り流れ場の PIV 測定

利 光 和 彦* ・小 川 哲 明**・山 崎 伸 彦* ・難 波 昌 伸***

PIV Measurements of Subsonic Flows around Biconvex Blade and Cylinder

Kazu TOSHIMITSU, Tetsuaki OGAWA, Nobuhiko YAMASAKI and Masanobu NAMBA

(Received May 6, 1999)

Abstract: This paper presents the quantitative comparison of particle image velocimetry (PIV) measurements and finite element method (FEM) analyses of the steady flow around a biconvex blade with 20% thickness, and the qualitative PIV flow visualization of the strong turbulent flows around a cylinder at Reynolds number 1.0×10^5 . In the former comparison, the maximum velocity of PIV is 6.5% smaller than that of the numerical calculation of the inviscid FEM. This difference is caused by the effect of boundary layers along the blade surfaces from mid-chord to trailing edge. In the latter case, we can qualitatively observe Kármán vortices and its vorticities in the wake region by means of a combined seeding equipment. As the results, the PIV system is useful for us to measure the steady flow velocities and observe the unsteady flow.

Keywords: PIV, Autocorrelation, Flow visualization, Velocity vector, Biconvex blade, Cylinder, Subsonic

1. は じ め に

流体工学において、PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimeter), LIF (Laser Induced Fluorescence) に代表される非接触 流れ場計測は,物理現象を解明する上で重要な技術となっている.特に,二次元および三次元流れ場の瞬間 的な速度分布が得られるPIV(例えば,文献1に原理 や適用例が解説されている)は,急速に開発が進んで いる速度計測法である.

PIVでは,流れの中に微細な粒子を混入した流れ場 に,レーザシートを入射させ,粒子の散乱光によって 流れ場を可視化する.速度分布は,その撮影画像をデ ジタル処理・解析することで得ることができる.詳細 については省略するが,次のような利点がある.

- 非接触測定であり,流れを乱さない.
- 2次元平面上の瞬間的な速度分布が得られる.
- 亜音速から超音速まで幅広い速度域に対応で

平成 11 年 5 月 6 日受理

- * 航空宇宙工学専攻
- ** 航空宇宙工学専攻修士課程(現在[株]小松製作所)
- *** 航空宇宙工学専攻(現在,熊本工業大学)

きる.

• 燃焼場などの化学反応流に適用できる.

本研究では, PIVの基本的な計測システムを確立す ることにより, 定常および非定常流れ場の二次元平面 内の速度分布を測定することを目的とする.そのた めに,

 対称円弧翼周りの流れの速度場測定と数値計算 との比較,

2. 非定常な流れ場(円柱周り)の可視化計測 をおこなう.

2. PIV システムの構成

PIV計測システム全体を図-1に示す.計測の手順 は,まず,Seed 1 ~ 3 から流れの中に微細な粒子を 混入,テストセクションにおいて壁面からレーザシー トを入射,粒子によるレーザ散乱光を上方のCCDカ メラで撮影,得られた画像を解析する.なお,流れの 中に粒子を混入させるためのシード部は,整流筒上流, 整流筒内,モデルの計3箇所あり,実験条件により適 宜使い分け,最適な粒子密度を得るようにしている. また,CCDカメラとレーザは,パルスジェネレータの 信号をトリガとして同期し,得られた画像は,PCの



I Schematic of Subsonic Wind Tunnel and Optical arrangement for PIV

メモリー内に記憶される.この画像はネットワークを 介して画像処理用のPCに送り,PIV解析ソフトウエ アVisiFlow(AEA社)を用いて速度ベクトル分布を求 める.これらのシステムの詳細は前報²⁾に述べたので ここでは省略する.

システムの構成は、

- シーディングシステム
- 画像取得システム
- 解析システム

の3つに大別される. PIVで測定誤差を極力小さくす るためには,各システムを最適化して,"鮮明で解析 しやすい画像を得る"ことが重要となる.特に, シーディングシステムは,この点で重要となり, 粒子密度が解析する上で適切であり,かつ粒子が 均一に分布していることを実現しなければなら ない.本報では,前報²⁾と同様にプラスチック製 の中空粒子(EXPANCEL 551DE (Micro-spheres), 平均粒径 40 μm,比重 0.02)の固体粒子を撹拌・サ イクロン装置を用いてシードした.

画像撮影システムは,レーザ光をシート状にするた

めのレンズ光学系,CCDカメラ,パルスジェネレー タ,PCにより構成される.画像の種類は解析法に依存 し,自己相関法を用いる場合は1枚の二重露光画像, 相互相関法を用いる場合は2枚の連続画像が必要とな る.本報では,相互相関法の画像データ取得システム が構築途中のため,自己相関法を用いた.また,良い 解析用画像を得るために,細かな最適化として,レー ザシート厚さ,CCDカメラのピント調整,同期撮影す るためのタイミング調整なども重要である.

3. 翼まわりの流れ



本節では,流速87.5m/s(マッハ数0.261)流れ中に 図-2に示す翼モデル(コード長50mm,厚み10mmの 対称円弧翼)を設置した場合の定常流れ場を可視化した結果を示す.このとき,翼弦長を代表寸法とした場合のレイノルズ数は2.8×10⁵となる.

まずシードは,整流筒上流のSeed 1より行い,翼ま わりの流れ場を可視化した画像を図-3に示す.流 れ方向は右向きで,画像サイズ61.74×36.75mm (1008×600pixel,61.25µm/pixel),レーザパルス間 隔3.5µsecの二重露光画像である.固体粒子の分布は ほぼ均-な画像を得ることができた.翼の後縁側翼表 面では境界層が剥離するため,翼の最大厚さより後流 側で見かけ上,翼厚が増したように見える.



☑-3 Visualized image of flow around the blade model

以下に, PIV計測結果と非粘性有限要素法³⁾による 解析結果の比較を示す.

まず PIV で は , interrogation spot サ イズ =3.92 × 3.92mm (64 × 64pixel), ベクトル 間 隔 =1.96mm, ベクトル 数=453 (図-4と 図-5の 上 図) と interrogation spot サイズ=1.96 × 1.96mm (32 × 32pixel), ベクトル間隔=0.98mm, ベクトル数 =1360 (図-4と図-5の中図)を得た.FEMの結果は 図-4と図-5の下図である.なお,座標の原点は翼モ デルの前縁とした.

PIVでは速度ベクトル,翼まわりの流れの状態が明 確に捕らえられている.翼近傍の流れに着目すると, PIV,FEMともに,翼先端で減速された流れは,翼の 表面に沿って加速し,翼厚最大部でほぼ最高速度に達 する.しかし,翼厚最大部を過ぎて翼弦方向下流側に なると,流れの様子に違いが見られる.非粘性解析の FEMでは,翼の表面に沿って減速し,翼前後でほぼ対 称な流れとなる.それに対し,PIVの結果では境界層 が翼表面から剥離してしまうため,FEMの結果に見



Z-4 Velocity Field; Upper) PIV(64×64), Middle) PIV(32×32), Lower) FEM analysis

られるような左右の対称性がない.このことは図-5に 示す流線図でも明確に分かる.したがって,流れ場全 体の流速分布においても,FEMでは翼厚最大部にお いて流速最大となり,翼面から離れた点においてもそ の傾向は変わらないが,PIVにおいては,流速最大部 が,翼弦中心から下流側へと移動する.

次に,定量的な比較を行うため図-6にy=5, 10mmでの速度分布を示した.ここでもPIV,FEM それぞれについて前述の傾向を確認できる.FEMは 翼弦中心を軸に左右対称な分布となり,PIVでは,境 界層剥離の影響により最大値が下流側へ移動する.流 れ場全体での最大流速は,PIVでは106.5m/s,FEM では113.8m/sとなり,PIVの方が約6.4%小さい値と なった.PIVでは,一般に測定誤差5%程度⁴⁾といわれ るので,FEMにおいて粘性の効果が考慮されていな いことを考えれば十分に精度のある測定結果が得られ たといえるであろう.



 \boxtimes -5Stream lines; Upper) PIV(64 × 64), Mid-
dle) PIV(32 × 32), Lower) FEM analysis



Lower) y=5mm

4. 円柱まわりの流れ

次に,非定常流れ場の測定例として,円柱モデル (直径20mm)を用いた場合を示す.実験での上流流速 はほぼ 90m/s(レイノルズ数が1.2×10⁵)である.

4.1 流れの可視化 (Seed 1)

円弧翼と同様に,エクスパンセルをSeed 1 より混入した場合の可視化結果を図--7に示 す.画像サイズ102.6×103.6mm (1008×1018pixel,



Z-7 Visualized flow around the cylinder (Seed 1)

101.8µm/pixel), レーザバルス間隔3.5µsecの二重露 光画像である.可視化により,円柱まわりの流れ場の 様子を非常に鮮明に捉えることができた.円柱後流部 では流れの剥離が生じており,粒子が入り込んでいな いが,後方から剥離した流れが,図中の円柱上下の表 面から,交互に流れを巻き込んで,蛇行している様 子がわかる.円柱まわりでは後流に渦対ができ, Kármán渦列が形成される.今回の実験ではレイノル ズ数がおよそ1.2×10⁵であり,渦列の生成に周期性が なくなり,乱流への遷移状態⁵⁾にあると思われる.

4.2 流れの可視化 (Seed 3)

Seed 1により円柱まわりの流れを測定することはできたが,円柱後流では流れが剥離するため,主流から



⊠-8 Visualized flow around the cylinder (Seed 3)

4.3 流れの可視化 (Seed 1 + Seed 3)

以上の,実験をもとに,Seed 1とSeed 3を 組み合わせることで,円柱まわりの流れ全 体を可視化した.結果を図-9に示す.図-9は, 画像サイズ103.0×104.0mm(1008×1018pixel, 102.2µm/pixel),レーザパルス間隔3.5µsecの二重露 光画像である.Seed 1,Seed 3のシード量がほぼ一致 しているが,後流の中に粒子が入り込めない部分が若 干残る.しかし,可視化という点では,これまでシー ド流量が多すぎて流れの様子がわからなかった円柱後 流部分の流れを観察することができる.円柱後流の上 方,下方の流出孔からの流れは,円柱上下面の流れの 剥離に従って逆流域から下流へと流され,中央の流出 孔からの流れは流れの状態によって,円柱後流内の上 面,下面へと蛇行する流れを形成している.

次に,この画像を自己相関法を用い



 \blacksquare -9Visualized flow around the cylinder (Seed
1+3)

て 解 析 を 行った . Interrogation spot サイズは 3.27×3.27mm(32×32pixel) である. 一般に,可視 化画像から算出される速度ベクトルには,バックグラ ウンド雑音や粒子像の歪みなどの要因でランダムな高 周波雑音がある.したがって,瞬間流速分布から,渦 度、ひずみ速度などを計算する際に、雑音に関連した 誤差を生じてしまう.そこで,流れを平滑化するのが -般的である⁶⁾. 今回の実験では, interrogation spotの半分, すなわち速度ベクトルのマッピング間隔 の標準偏差を持つGaussian filterによって平滑化処理 を行った. 平滑化フィルタを表-1に示す. 円柱前面で のランダムな速度ベクトルが抑えられ,滑らかな分布 を得ることができた.また,前処理として解析の際に 欠落したベクトルは,距離の逆数に比例した重みをつ けてまわりの値から内挿した.以上の解析によって得 られた速度場を図-10に示す.この解析により,円柱 まわりの流れの様子をほぼ捉えることができた.しか し, PIVでは, 得られる速度がinterrogation spot内 の平均速度となり, interrogation spotのスケール以 下の流れは捉えることができない.また,自己相関法 による解析では逆流を捉えることができない.そのた め,逆流が生じていると考えられる円柱の後流でも, 蛇行する程度の速度ベクトル変化となった.この点に ついては,今後,相互相関法による測定で逆流を捕ら える予定である.なお,Seed 3の流入により流れの状

Gaussian filter

表-1

8.979×10^{-8}	3.622×10^{-5}	$2.677{ imes}10^{-4}$	3.622×10^{-5}	8.979×10^{-8}
3.622×10^{-5}	1.461×10^{-2}	1.080×10^{-1}	1.461×10^{-2}	3.622×10^{-5}
$2.677 { imes} 10^{-4}$	1.080×10^{-1}	7.979×10^{-1}	1.080×10^{-1}	$2.677 { imes} 10^{-4}$
3.622×10^{-5}	1.461×10^{-2}	1.080×10^{-1}	1.461×10^{-2}	3.622×10^{-5}
8.979×10^{-8}	3.622×10^{-5}	$2.677{ imes}10^{-4}$	3.622×10^{-5}	8.979×10^{-8}



 \boxtimes -10 Velocity field filtered with Gaussian distribution

態を変えてしまうことには注意を要するが,PIVでは 可視化できなければ,速度場の測定もできないので, シードを混入することによる流れ場の変化は常に付き まとう問題であろう.

先の速度ベクトルから計算した渦度分布を図-11 に 示す.Seed 1だけの場合,円柱の後流では流れが可視 化できないため渦度の分布が計算できないが,Seed 3 が加わることにより,円柱後流内での渦度分布が得ら れた.円柱後流の上下から,正と負の渦度分布が交互 に現れ,互いに巻き込むように下流へと流れていく様 子がはっきりと分かる.

このように,逆流が捉えられない,流れが平均化さ れるといった問題はあるが,円柱後流での流れの傾向 を定性的に捉えることができた.また,これまで, シード粒子の混入が難しい円柱後流の流れ場を,定量 的な瞬間速度分布とともに可視化したという点が,本 研究の成果といえる.



2-11 Vorticity distribution around the cylinder

5.まとめ

本研究では, PIVシステムを構築し, 亜音速流中の 円弧翼および円柱周りの流れ場を, それぞれ定量的お よび定性的に可視化し,以下のことを明らかにした.

- 翼の厚みが20%の対称円弧翼に対して,PIV計測 と非粘性有限要素法による数値解析結果を比較した.実験では,翼中央付近から剥離が生じており, 非粘性コードではこれがうまく予測されないこと が分かった.
- ・ 円柱周り流れ場(Re~1.0×10⁵)の強い乱流流れ 場を可視化した.特に,従来はこのような高レイ ノルズ数においては,円柱後方における交番渦部 分においてシード粒子の混入が難しいために可視 化できなかった.本研究では,円柱後部からシー ド粒子を混入し,渦の様子を可視化した.これに よって,自己相関解析では,逆流は捕らえられな いものの,流れが蛇行する様子が定性的に捕らえ られた.

今後,相互相関解析が行えるトリガー二重露光モード による撮影システムを構築し,逆流や非定常同期速度 場計測システムを開発する予定である.

辞

謝

本研究は,平成9,10年度文部省科学研究費(基盤研 究(B)(2))「側壁音源による超音速翼列フラッタの抑 止に関する研究」(研究課題番号:09450371)の援助を 受けて行われたものである.また実験装置の製作では, 航空工学科 平川裕一技官,洲崎利徳非常勤職員,実験 では,折野稔技官にお世話になった.ここに謝意を 表す.

参考文献

 Adrian, R. J.: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 1991, pp.261-303.

- 利光・小川・村神・折野・難波: PIV および翼フラッタ実 験用亜音速風洞設備,九州大学工学集報, 72-3, 1999, pp. 215-222.
- 3) Yang, K.-C., Yamasaki, N. and Namba, M.: Numerical Caluculation of Aerodynamic Forces for Two-Dimensional Subsonic Oscillating Cascades by a Finite Element Method, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 48-4, 1988, pp.253-280.
- Keane, R. D. and Adrian, R. J.; Optimization of particle image velocimeters, Part I: Double pulsed systems, Meas. Sci. Technol. 1, 1990, pp. 1202-1215.
- 5) 巽; 流体力学, 培風館, 1982.
- 塩路、川那辺、燃焼計測技術の進展2-粒子画像流速測定法(PIV)によるガス流動計測-: 燃焼研究、113, 1998, p11-20.