

市販デジタルカメラを用いた翼周り流れの PIV 撮影試行

Trial PIV Imaging of Flow around Airfoil Using Commercial Digital Cameras

真志取 秀人¹⁾, 山田 裕一¹⁾

Hideto Mashidori¹⁾, Hirokazu Yamada¹⁾

Abstract : The ability to capture particle image velocimetry (PIV) images of the flow around an airfoil is expected to aid in conducting experiments to evaluate the airfoil characteristics. However, the measurement system for PIV imaging usually uses a laser source that irradiates a laser sheet towards the flow as well as a high-speed camera. These devices are especially expensive and difficult to purchase. To realize an inexpensive PIV imaging system, imaging experiments using a commercial digital camera were attempted in this study. Movies of the flow around the NACA2412 airfoil were captured using a commercial digital camera, and these file were used to perform a PIV analysis. The Reynolds number during the experiment was approximately 40,000. The PIV analysis using the proposed experimental system suggested that the flow vectors were as expected by the numerical analysis. Unfortunately, the quantitative evaluation of the flow velocity distribution was not possible. The lack of quantitative velocity measurements were presumably due to the lack of stable supply of tracer smoke to the test area and the lack of optimization of the camera shooting conditions, such as the shutter speed. After considering the aforementioned statements, it is expected that the quantitative evaluation of the velocity measurement of the flow around the blade will eventually be possible.

Keywords : Flow visualization, PIV, Airfoil characteristics,

1. はじめに

流動現象を理解するうえで、流れの可視化実験は有用な手段である。煙風洞とは、この流れの可視化実験を行う機器の一つである。気流中にトレーサーとして煙を注入し、その挙動を観察することで、物体周りの流動現象を容易に観察することができる。そのため流体力学に関する教育の場で、煙風洞を活用することも多い。

東京都立産業技術高等専門学校航空宇宙工学コースでも、煙風洞を活用した学生実験を行っている。翼の迎角を大きく変化させていくと、失速角を超えたところで翼表面から流れが剥離する。この翼周り流れの剥離現象を学生が視認し定性的な理解を深めることを目的に、煙風洞を用いた二次元翼周りの流れ観察を行う学生実験を実施している[1-2]。迎角が失速角を超えたところで翼上面の流れが剥離する様子を視覚的に示すことができ、それにより学生の理解を促すことができる。しかしその一方で煙の目視観察のみでは、迎角が失速角に比べて十分に大きく超えている場合には明瞭に剥離現象を観察できるが、迎角が失速角に近い条件では剥離後も翼近くを煙が流れることから、リアルタイムの観察のみでは剥離の有無の判断は難しい。また煙の観察のみでは翼周りの流速分布等についての情報を取り出すこと

はできない。翼周りの流速分布は、翼周辺の圧力分布形成に寄与し、それゆえ翼特性に関連する項目となる。そのため、将来的に煙風洞を用いた翼周辺流の流速分布計測も実施可能となれば、学生への学習効果を更に高めることができるのみでなく、新規提案した翼型の評価研究なども実施可能となる。

煙風洞での可視化実験で用いた煙を活用して、流速分布計測も実施する手法として、PIV (Particle Image Velocimetry : 流体画像流速測定法) が挙げられる。流れ場に煙などのトレーサーを注入した後、数 ms もしくは数 μ s といった短い間隔で複数の画像を撮影する。そして 1 枚 1 枚の画像撮影の間に、流れがどの程度の速度でどの方向へ流れたのかを、画像中に示された流体粒子の動きより解析するといった手法である。よって翼周りの流れの可視化実験で使用した煙をそのまま PIV 撮影用トレーサーとしても用いることができれば、翼周りの二次元速度分布図などを実験的に求めることが可能となる。しかし PIV 測定システムは通常、流れ中のトレーサーに対しレーザーシートを照射するレーザー光源や、短期間での連続撮影を可能にするハイスピードカメラが使用されているが、これらのデバイスはとても高価なことが多い。例えばレーザー光源は数十万円程度、高速度カメラは同じく数十万円程度から百万円

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 航空宇宙工学コース

前後の品が用いられることもあり、それゆえ十分な予算が無ければ PIV システムの導入は難しい。しかし、近年市販汎用デジタルカメラの性能向上が著しく、この汎用デジタルカメラを高速カメラの代替装置として複数台組み合わせることで、PIV 撮影を試みた取り組みの報告も見受けられるようになった[3]。これと同様に翼周辺流の PIV 撮影を定価数万円ほどの市販汎用デジタルカメラで行えることができれば、安価で翼特性評価が可能な PIV イメージングシステムの構築の実現が期待できる。

本報では、市販のデジタルカメラを用いた PIV 撮影を試みることで、ベクトル分析や流速分布計測がどの程度可能か実験的に試みた結果について述べる。また、翼周り流れの数値解析を併せて行い、計測した実験結果との比較を行った。数値解析は山田が中心に、実験は真志取が中心に取り組んでいる。

2. 実験装置 - 実験条件

図 1 に、今回使用した風洞実験装置の概略図を示す。今回の実験では、東京都立産業技術高等専門学校荒川キャンパス内に設置されている、エッフェル型煙風洞を使用した。図の左から右方向へと気流が流れ、観察窓最上部より更に上流側に位置する楕形ノズルより、可視化用の煙が流れ場に注入される。煙発生器としてはダイニチ工業製のポータースモークを使用した。同機は専用の液体を加熱することで白煙を発生させる、通常は災害訓練等で使用される装置であるが、他機関で PIV 用煙装置として使用された実績もある装置である[4]。専用液の成分としては、食品や化粧品などで使用されるグリコール類が含まれており、取り扱いが容易かつ安全となる。スモーク粒子径はカタログ値で数十ミクロンである。風洞に取り付けられた観察窓の大きさは、幅 1700 mm、高さ 1000 mm であり、図向かって奥行方向にあたる流路幅は 150 mm である。観察窓の中心には直径 ϕ 300 mm の回転台が取り付けられている。この回転台の中心に、翼の空力中心が位置するように翼型模型を取り付けることで、翼の迎角を変化させた可視化実験を行うことができる。回転台中心より上流側に 900 mm 上流側には、風洞内風速計測用のピトー管が取り付けられている。表 1 は、今回の実験で使用した翼模型の諸元を示している。今回、翼型として NACA2412 を使用した。この翼型はセスナ機の主翼等に使用された実績もあり、国内でも 20 世紀前半の時期から翼特性が調査された実績例等もある[5]。本報の内容は市販デジタルカメラを用いた計測結果の報告までとなっているが、将来的に実験結果の信頼性の検証等を進めていく上で、比較対象となりうるデータが潤沢であるほど好ましい。そのため同翼型の採用に至った。使用した翼模型の翼弦長は 200 mm、翼幅は 150 mm である。翼幅は風洞流路幅と同一であるため、実験時の翼模型周りの流れは、二次元流れとしてみなすことができる。

今回使用したデジタルカメラの諸元を表 2 に示す。市販されているデジタルカメラの一つとして、Nikon 社製の

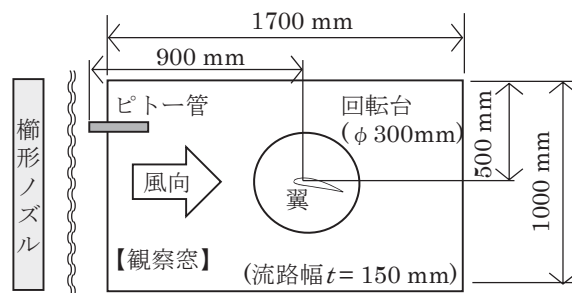


図 1 煙風洞実験装置概略図

表 1 翼型模型諸元

翼型	NACA2412
翼弦長	200 mm
翼幅	150 mm (風洞流路幅と同一)

表 2 PIV 撮影用デジタルカメラ諸元

製造元	Nikon
製品名	Nikon 1 J4
カメラ設置位置	風洞観察窓より 500 mm (図 1 紙面方向より手前側の位置)
撮影画像解像度	0.52 mm/pixel
撮影画像サイズ	1280×720
撮影時絞り値	F3.5
撮影時 ISO 感度	ISO 6400
フレームレート	120 fps
録画時間	3 秒

Nikon 1 J4 を使用した。選定理由としては市販品であることに加え、今回の実験ではある程度撮影条件を模索しつつ進めていくことが想定されたため、ISO 感度や撮影時のフレームレート等がある程度調整することが可能な機種が望ましいという点があげられる。撮影時、カメラは風洞観察窓より 500 mm 離れたところに設置された。その結果として、撮影画像の解像度はおよそ 0.52 mm/pixel であった。なお撮影画像のサイズは 1280×720 である。撮影時のカメラの設定値は、絞り値 F3.5、ISO 感度 6400、フレームレートは 120 fps である。上記設定で 3 秒間動画撮影を行っている。

今回 PIV 解析ソフトウェアとしては、株式会社ライブラリーの Flow - PIV を使用した。同ソフトウェアは大阪大学の加賀や大阪電気通信大学の木村らの研究[6-7]を元に開発されたものである。解析時の画像解像度とフレームレートは、それぞれデジタルカメラの撮影時の値をそのまま入力した。画像認識の際に必要な追跡格子間隔は、今回はソフトウェア内の初期値として与えられていた 15 pixel を、流れ方向・流れに垂直な方向共に設定した。なお PIV 解析結果は、動画が撮影された 3 秒間の平均値として出力される。

実験時の風速は、風洞内に取り付けられたピトー管を活用し 3.0 m/s に設定した。この時のレイノルズ数 Re はおよそ 4 万に相当する。翼迎角は 0° と 15° に設定した。このうち迎角 15° は失速角近くの角度となる。実験時の気温は 18°C 、気圧は 101 kPa であった。この時の空気

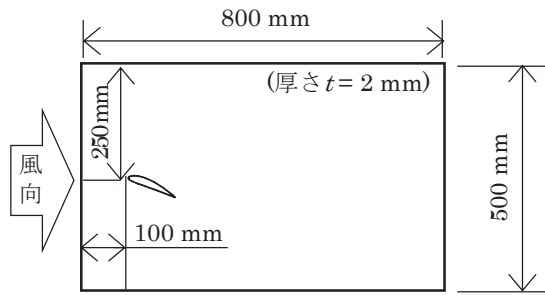


図2 数値解析領域図

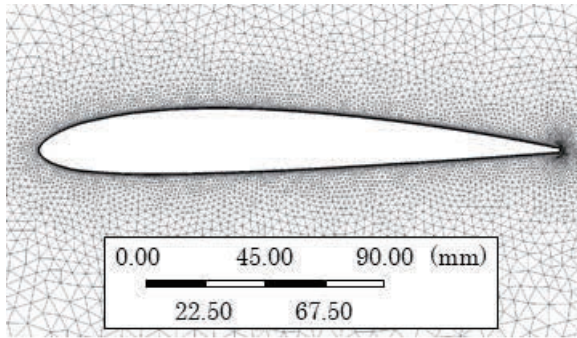


図3 翼周り非構造メッシュ例(迎角 0°)

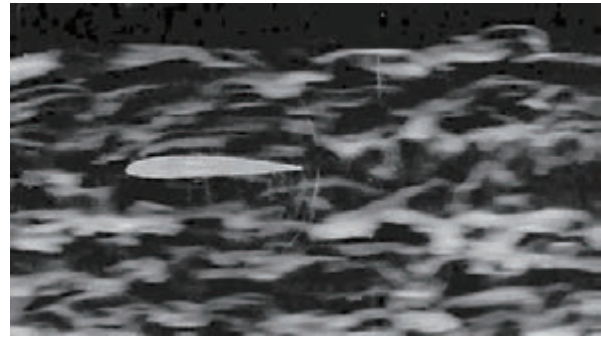
動粘度は約 $15 \text{ mm}^2/\text{s}$ として、そして代表長さに翼弦長の 200 mm を用いてレイノルズ数 Re を算出している。

3. 流体数値解析条件

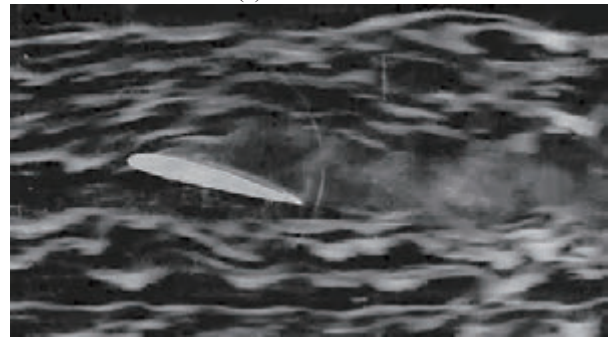
PIV 計測結果との比較を行うために数値解析を行った。解析には解析ソフト ANSYS Workbench 2019 R2 を使用した。解析モデルの作成においては 3DCAD ソフト Autodesk Inventor を使用した。図 2 は、今回行った流体数値解析計算領域を示す。流れ方向にあたる横幅は 800 mm 、流れと垂直方向にあたる縦幅は 500 mm 、図中奥行方向の流路幅は 2 mm とした。流れ方向は図向かって左から右方向であり、すなわち図左端が空気流入面にあたる。数値解析時の乱流モデルとしては SST (Shear Stress Transport $k-\omega$) モデルを用いた。この検査領域中に、実験でも使用する NACA2412 翼型を設置した。翼弦長は 200 mm であり、翼の空力中心が空気流入面から、縦幅の $1/2$ の位置になるようにした。この計算領域を図 3 に示すような非構造メッシュに分割し数値解析を行っている。メッシュ数は 9 万であり、メッシュ分割は解析ソフトにより自動的に行った。

3. 測定結果

図 4 は $Re = 4 \times 10^4$ 時、かつ各迎角における NACA2412 翼周辺流の様子を示している。翼とトレーサーの煙の様子が、図中に示されている。図 4(a) は迎角 0° の時の様子を示し、翼表面に沿って流れが形成されていることが示されている。図 4(b) は失速角付近となる迎角 15° の様子を示し、翼上面における流れが剥離している様子が見られる。



(a) 迎角 0°

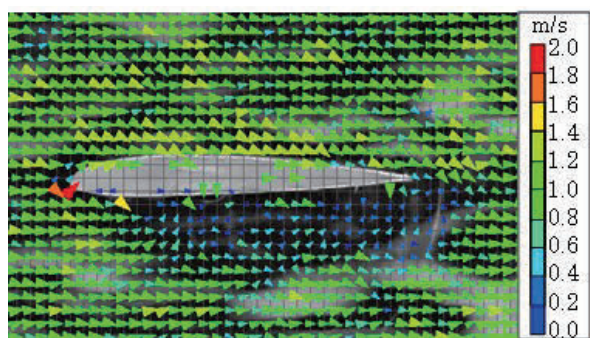


(b) 迎角 15°

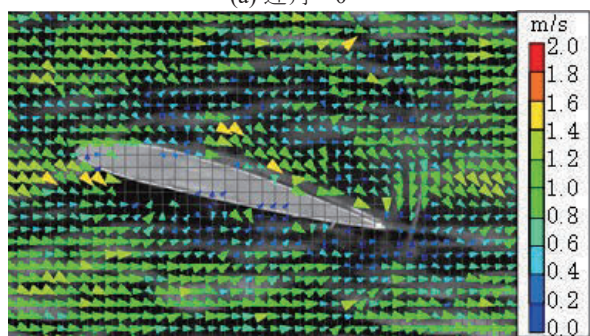
図4 $Re = 4 \times 10^4$ 時における NACA2412 翼周辺の流れ

この画像を元に、PIV 解析を行った結果が図 5 である。流速が大きければその分だけベクトル表示の矢印が大きく表示される設定となっているため、図中矢印が密の箇所は流速が大きく、疎の部分は流速が減速された領域か、煙の流入の少ない領域を示している。なお今回の実験中において翼下面側の楕円ノズルが終始詰まり気味となっていたため、図 5(a)(b)共に翼下面側では PIV 計測結果が示されなかった。また流速値は全般的にピトー管での計測値 (3.0 m/s) に比べて半分程度の値(およそ $1.2\text{--}1.4 \text{ m/s}$)となっており、流速の定量的計測についても課題が示された。一方で、煙の供給が順調に行われた翼上面では、剥離前の図 5(a)と剥離後の図 5(b)共に、流れ方向ベクトルの検出を行うことができた。そして計測時間 3 秒間の間の平均流速の検出という形で行った PIV 計測の結果、目視のみでは確認できなかった剥離後の翼上面での渦形成が、図 5(b)で示唆された。この渦形成は、図 6 に示される NACA2412 翼周辺流の数値解析結果でも示唆されている。流れの剥離前である図 6(a)では翼上面に沿った流れが形成されているが、剥離角付近の図 6(b)では翼上面付近に図 5(b)で見られたような渦形成が示された。このことから定量的評価等に課題はあるものの、流路内の煙が十分にあれば現状の市販デジタルカメラを用いたシステムでも、翼周り流の PIV 解析を行うことで、数値シミュレーションに近い測定結果を得ることができた。

流速計測が定量的に行えなかった要因としては、トレーサーとなる煙の供給が試験領域に安定的に行えなかったことや、シャッター速度等のカメラの撮影条件の最適化が未達成であることが推定される。これらを今後精査見直すことで、翼周り流れの流速分計測も、定量的な評価が可能になるとと思われる。

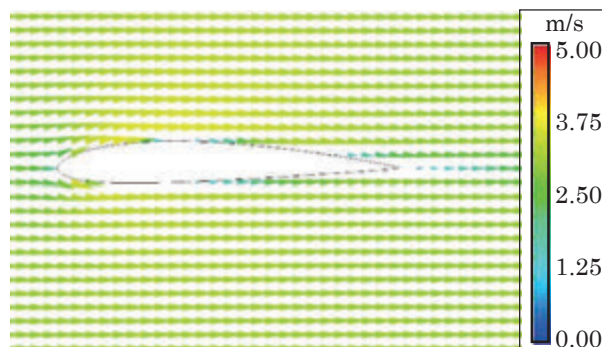


(a) 迎角 0°

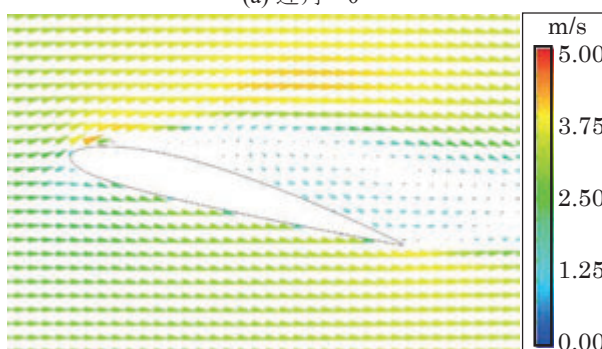


(b) 迎角 15°

図5 $Re = 4 \times 10^4$ 時の NACA2412 翼周辺流の PIV 結果



(a) 迎角 0°



(b) 迎角 15°

図6 $Re = 4 \times 10^4$ 時の NACA2412 翼周辺流数値解析結果

4. まとめ

翼の周りの流れの PIV 画像を撮影する機能により、翼の特性を評価するための実験を行うことができる。一方、PIV イメージングの測定システムは、通常レーザーシートを流れに向けて照射するレーザー光源や、高速度カメラを必要とする。これらのデバイスは非常に高価で、購入が困難である。そこで安価な PIV イメージングシステムを実現するために、今回市販のデジタルカメラを用いた PIV イメージング実験を試みた。NACA2412 翼の周りの流れを市販のデジタルカメラを使用して撮影し、これらのファイルを使用して PIV 分析を実行した。実験中のレイノルズ数は約 4 万である。

流速分布の定量的評価は行うことはできなかったものの流速ベクトル計測では、数値流体シミュレーションで予想されるような、失速後に翼上面部での渦形成を示唆するような結果を、今回の市販デジタルカメラを用いたシステムでも得ることができた。流速計測が定量的に行えなかった要因としては、トレーサーとなる煙の供給が試験領域に安定的に行えなかったことや、シャッター速度等のカメラの撮影条件の最適化が未達成であることが推定される。これらを今後精査見直すことで、翼周り流れの流速分計測も、定量的な評価が可能になるとと思われる。

なお 2021 年度の教育機器更新では、この煙風洞装置の更新が行われている。次年度以降には試験領域への煙の安定供給が図れるようになるため、本報の内容をより発展させていくことを予定している。

参考文献

- [1] 小出輝明, 宇田川真介, 真志取秀人: 産業技術高専 航空宇宙工学コースでの流体分野の実験実習の検証, 実践教育, 29-1, pp.74-79, 2014
- [2] 小出輝明, 真志取秀人, 宇田川真介ほか: 産業技術高専 航空宇宙工学コースでの流体分野の実験に関する総括と改善, 高専教育, 38, pp.306-311, 2015
- [3] 小野木茂, 橋本孔佑, 堀晃浩ほか: 汎用デジタルカメラを使用した PIV 撮影技術, 日本風工学論文集, 38-1, pp.11-14, 2013
- [4] 露木浩二, 須藤誠一, 五十嵐三武郎: 液体微粒子を用いたトンボの翅まわりの流れ場解析と数値シミュレーション, 実験力学, 7-3, pp.240-246, 2007
- [5] 岡本哲史, 福井悌吉: N.A.C.A.2412 翼型の風洞試験成績, 東京帝國大學航空研究所彙報, 118, pp.250-262, 1934
- [6] 木村一郎, 山下直文, 黒江康明: ニューラルネットワークによる過誤ベクトルの判定, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 福井, 1992
- [7] 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報学会雑誌, 14-53, pp.108-115, 1994