

# 東京都立産業技術高等専門学校における大型煙風洞の改修について

## Renovation of the Large Smoke Wind Tunnel at Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

真志取 秀人<sup>1)</sup>, 山田 裕一<sup>1)</sup>

Hideto Mashidori<sup>1)</sup>, Hirokazu Yamada<sup>1)</sup>

**Abstract** : Flow visualization experiments can be conducted by passing smoke into an air stream. Experiments using a smoke wind tunnel are conducted to observe the flow around a wing or other structure. Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology has a large smoke wind tunnel with a 1700 mm wide and 1000 mm long observation window. The large smoke wind tunnel was refurbished between the end of 2021 and March 2022. The comb nozzles in the wind tunnel were replaced with new parts, and the lighting was changed to LED to save power. Preliminary experiments using NACA 2412 showed that streaky smoke was observed even in a flow with a Reynolds number of about 100,000, and the flow changes before and after the separation were clearly visualized. In the future, we plan to conduct particle image velocimetry (PIV) measurements using smoke as a tracer and to compare and verify numerical analysis results.

**Keywords** : Flow visualization, Large smoke tunnel, PIV

### 1. はじめに

学生らが航空工学をよりわかりやすく学ぶために、東京都立産業技術高等専門学校航空宇宙工学コースでは、各種専門科目講義の内容につながる学生実験実習テーマを用意している。流体力学分野においても、各学年での実験実習科目において各種風洞措置を用いた学生実験を行っており、その中の一つに、長さ 1700 mm かつ高さ 1000 mm の観察窓を持つ大型煙風洞を用いた可視化実験が含まれている。航空工学の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。そのため流体工学に関する教育の場で、煙風洞を活用することも多い。航空宇宙工学コースでは、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、産業技術高専荒川キャンパス内にある大型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]。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。また学生実験の他に、研究活動においても大型煙風洞を活用した可視化実験を行っている[3-5]。

2021 年の年末から 2022 年 3 月にかけて、この大型煙風洞装置の改修作業を行った。本報では、この大型風洞装置の概要と改修内容を紹介し、かつ改修後に行った NACA2412 翼型周りの流れの可視化実験の結果について述べる。また可視化実験結果と、翼周り流れの数値解析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. 荒川キャンパス内大型煙風洞装置

図 1 に今回取り上げる、東京都立産業技術高等専門学校荒川キャンパス内大型煙風洞実験装置の概略図を示す。風洞外観を示した写真を図 1(a)に、その主要構成と寸法値を図 1(b)に示している。エッフェル型の風洞であり、図の左から右方向へと気流が流れる。観察窓最上部より更に上流側に位置する楕円ノズルより、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用いた。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(Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法)用煙装置として使用された実績もある装置である[6]。専用液の成分には、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。風洞観察窓の寸法は幅 1700 mm、高さ 1000 mm であり、

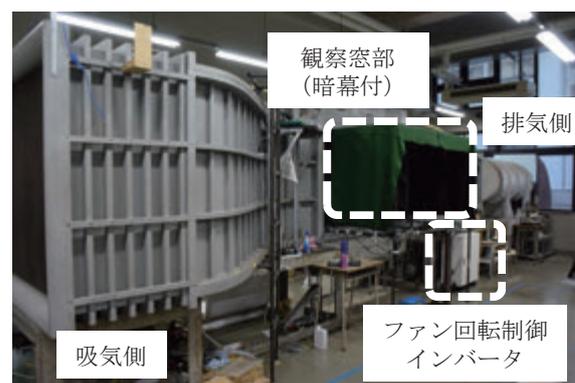
<sup>1)</sup>東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科、航空宇宙工学コース

図向かって奥行方向にあたる流路幅は 150 mm である。本装置の特色はこの大型の観察窓である。現在市販されている流れ可視化装置の中でも、このようなメートルサイズの試験領域を持つ装置は見当たらず、特色ある装置となっている。観察窓の中心には直径  $\phi 300$  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。

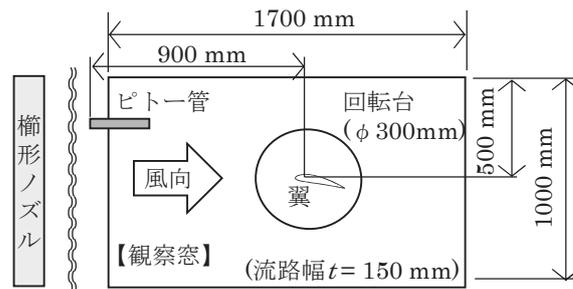
一方で装置導入から数十年も経過していることから、楯型ノズルの目詰まりによる煙噴出量低下や、風洞ファン回転モーターからの異音発生といった事象も発生していた。そこで 2021 年の年末から 2022 年 3 月にかけて、この大型煙風洞装置の改修作業を実施した。主な改修内容は、楯型ノズル取換え、ファン回転制御インバータ付電動モーターの取付け、試験部への LED 照明取付である。楯型ノズルは 75 ケの穴が 9 mm 間隔で並び、その結果として煙噴出幅が約 675 mm 確保されている。これにより 500 mm サイズの大型形状物周りの流れの可視化実験も実施可能となっている。ファン回転制御インバータ付電動モーターの取付により、実験時の異音は解消した。そしてインバータによるモーター回転数制御を行う装置が組み込まれたことから、任意の風洞風速条件（モーター回転数条件）をセットしたままでファン回転モーターの電源を ON/OFF することが可能となった。改修作業前にはこのような機能はなかったため、例えば実験中に翼模型を取り換える時など一時風洞運転を休止する際には、一旦ファン回転モーターの回転数設定を 0 に戻したうえで電源を OFF にし、その後取付作業を終えた後に再度モーター電源を ON にし所定の風速条件となるまでモーター回転数を調整する必要があった。一方今回の改修後は、モーターの回転負荷が過大とならないようなインバータ制御機構が装置に組み込まれていることから、所定のモーター回転数条件を設定したままモーター電源を ON/OFF することが可能となっている。そのため、風洞風速条件（モーター回転数条件）を維持したまま、風洞運転を休止し装置取換え作業を行うことが可能となっている。試験部の照明を LED に取り替える前は白熱球を使用していた。LED 照明に取り替えることで発熱/使用電力を抑えた状態で、十分な明るさで試験部を照らすことができるようになった。

### 3. 風洞改修前後での流れの可視化実験結果の比較

風洞改修前後における流れの可視化実験の結果を比較する目的で、翼型周りの流れの可視化実験を行った。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[7]。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



(a) 外観



(b) 主要構成ならびに寸法

図 1 大型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 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

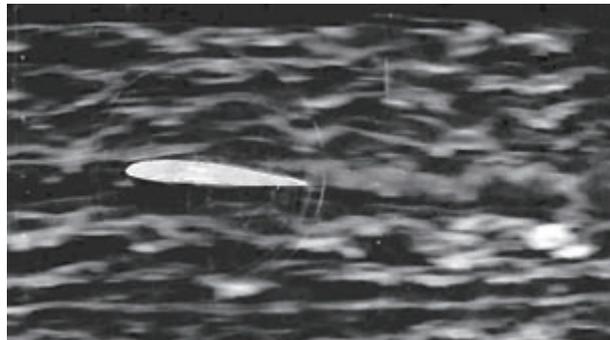
風洞流路幅と同一であるため、実験時の翼模型周りの流れは、二次元流れとしてみなすことができる。

今回使用したデジタルカメラの諸元を表 2 に示す。Nikon 社製の Nikon 1 J4 を使用した。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。なお改修前の画像データは静止画ではなく動画として取得されていたため、改修後の画像データも同じく動画として取得している。

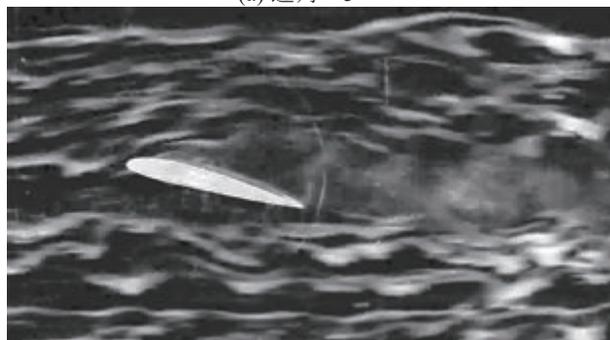
実験時の風速は、風洞内に取り付けられたピトー管を活用し 3.0 m/s、7.5 m/s に設定した。この時のレイノルズ

数  $Re$  はそれぞれ約 4 万, 10 万に相当する. 翼迎角は  $5^\circ$  と  $15^\circ$  に設定した. このうち迎角  $15^\circ$  は失速角近くの角度となる. 実験時の気温は約  $18^\circ\text{C}$ , 気圧は  $101\text{ kPa}$  である. 空気の動粘度は約  $15\text{ mm}^2/\text{s}$  として, そして代表長さに翼弦長の  $200\text{ mm}$  を用いてレイノルズ数  $Re$  を算出している.

風洞装置改修前の  $Re = 4 \times 10^4$  時の NACA2412 翼周辺流

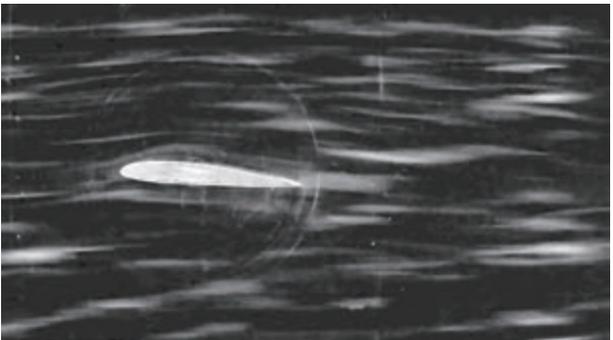


(a) 迎角  $5^\circ$

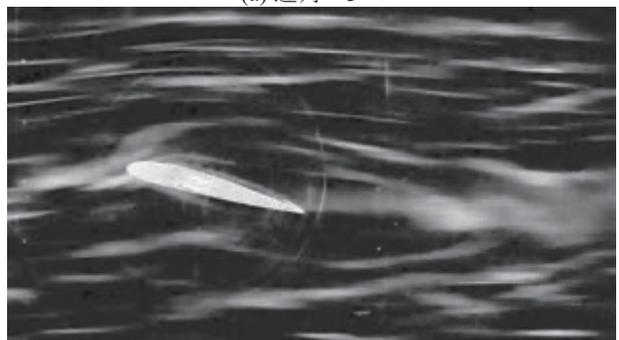


(b) 迎角  $15^\circ$

図 2  $Re = 4 \times 10^4$  時の NACA2412 翼周辺流(改修前)

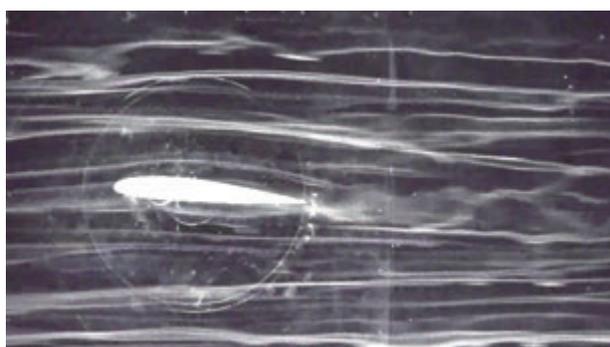


(a) 迎角  $5^\circ$

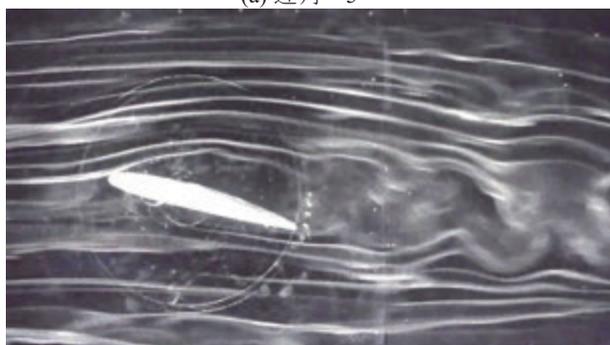


(b) 迎角  $15^\circ$

図 4  $Re = 1 \times 10^5$  時の NACA2412 翼周辺流(改修前)

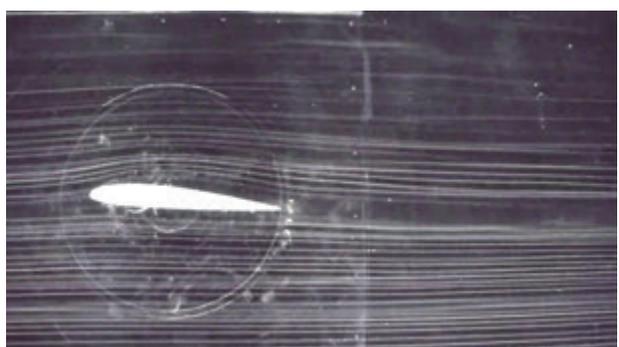


(a) 迎角  $5^\circ$



(b) 迎角  $15^\circ$

図 3  $Re = 4 \times 10^4$  時の NACA2412 翼周辺流(改修後)



(a) 迎角  $5^\circ$



(b) 迎角  $15^\circ$

図 5  $Re = 1 \times 10^5$  時の NACA2412 翼周辺流(改修後)

を図 2 に, 風洞装置改修後の  $Re = 4 \times 10^4$  時の NACA2412 翼周辺流を図 3 に, 改修前の  $Re = 1 \times 10^5$  時の翼周辺流を図 4 に, 改修後の  $Re = 1 \times 10^5$  時の翼周辺流を図 5 に示す. 2 つのレイノルズ数条件のいずれにおいても, 楕型ノズルからの煙の供給量が増えており, 風洞改修前に比べて, 改修後の方が筋状の煙を確認しやすくなっている. ただし図 3 と図 5 に示されているように, 風洞改修後も低

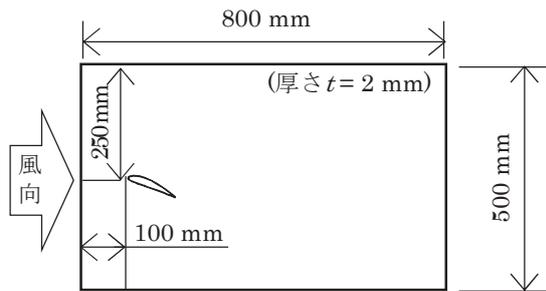


図6 数値解析領域図

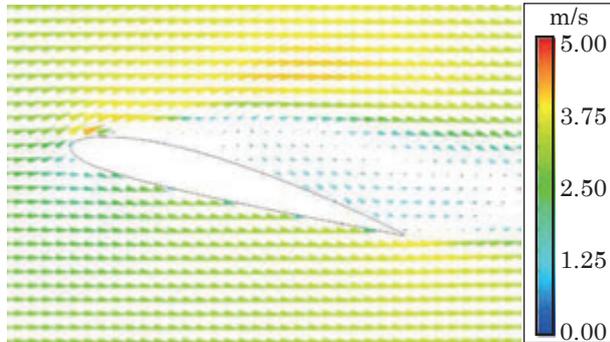


図7 NACA2412 周辺流解析結果( $Re = 4 \times 10^4$ , 迎角  $15^\circ$ ) [5]

レイノルズ数条件（低速条件）においては煙がやや乱れがちとなった。今後実施していく可視化実験においてはこの特性に留意する必要がある。一方で煙をトレーサーとして PIV 計測を実施する場合は、煙が完全に筋状とならずある程度ばらつきがみられる方が、トレーサーの形状パターン認識を行いやすくなる。そのため、PIV 計測を実施する際にも上記の装置特性に留意する必要がある。

#### 4. 将来展望と流体数値解析との比較

装置の改修を終え、今後は煙風洞の煙をトレーサーとして用いた PIV 計測の実施を検討している。昨年度より、市販デジタルカメラを用いた翼周り流れの PIV 計測を試みているが、前報ではトレーサーとなる煙の量が少ないためか、翼下面側では PIV 計測結果が示されなかった[5]。また翼下面以外で計測された PIV による流速計測値も、ピトー管による計測値と一致しなかった[5]。しかし今回の風洞改修により、画像から確認できる煙量が増えていることから新たに PIV 計測を行うことで、前報における上記課題に対し何らかの解決の手がかりが得られるものと期待される。

また前報では PIV 実験結果との比較を行うために、翼周り流れの数値解析を行っている[5]。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 6 に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。計算領域をメッシュ数 9 万の非構造メッシュに分割し数値解析を行っている。図 7 に  $Re = 4 \times 10^4$ , 迎角  $15^\circ$  における数値解析結果を示す。図 7 の翼上部に示されているような渦等が PIV 計測でも確認できれば、数値解析と実験結果との比較検証が可能となり、今後新翼型の形状検討研究などにおいて有用な結果が得られると期待される。

#### 5. まとめ

2021 年の年末から 2022 年 3 月にかけて、荒川キャンパス内大型煙風洞装置の改修作業を行った。改修後、風洞風速設定が簡便化された他、可視化に必要な煙の試験部への供給量が改修前に比べて増えていることが確認できた。今後は、より精密になった流れ場の可視化領域を活かして PIV 計測の精度向上を確認したい。これにより数値解析との比較精度も向上し、より有意義な結果が得られると期待される。

#### 謝辞

大型煙風洞の改修は 2021 年度の老朽化備品更新経費の助成を受け、株式会社メガケムの協力のもと行われました。関係者の皆様にお礼申し上げます。

#### 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] 細内翔太, 真志取秀人: 低  $Re$  翼のシグナスミル風車適用にむけた予備研究, 2020 年度自動車技術会関東支部学術研究講演会, オンライン, 2021
- [4] 韓スルチャン, 真志取秀人: 小型風力発電用垂直軸風車に向けた円弧組み合わせ翼の予備研究, 2020 年度自動車技術会関東支部学術研究講演会, オンライン, 2021
- [5] 真志取秀人, 山田裕一: 市販デジタルカメラを用いた翼周り流れの PIV 撮影試行, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 16, pp.72-75, 2022
- [6] 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
- [7] 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