回流式風洞における煙を使用した可視化実験装置^{*1}

An Apparatus for Flow Visualization by Smoke in Circular Wind Tunnel

菊 池 孝 男^{*2}

Takao KIKUCHI

Key Words: Flow Visualization, Oscillating Wing, Unsteady Aerodynamics

Abstract: An apparatus for flow visualization around oscillating wing was designed and assembled. To validate the modern CFD, the experimental data not only about the pressure distributions on the wing surfaces but also the flow patterns around the wing are needed. The present system aims to offer the experimental information on the flow patterns around oscillating 2-D wings. In this report, the outlines of the driving mechanism for the 2-D wing and the smoke generator are presented together with the related other devices. It is shown that the system works well in the low-turbulence wind tunnel at NAL and expected that it can be used for the research of low speed unsteady aerodynamics and aeroelasticity.

1. はじめに

航空機の空力弾性問題では、フラッタ限界の推定やフラッタ制御のために精度の高い非定常空気力の推定が重要である。近年、スーパー・コンピューターの著しい発展に伴いナビエ・ストークス方程式を用いて非定常空気を数値計算することが精力的に行われている。昨今のCFDでは翼面上の圧力分布データを検証データとして提供するのみでは不十分であり、流れ場の様子を可視化して提供することが必要となって来ている。そこでCFD計算結果の検証データを得るために、工作精度による特性の変化が少ないことで計算結果の検証に最適な翼であるとして注目されているNASA GA(W)-1翼型¹⁾の2次元翼模型を周期加振し、その翼まわりの非定常流れ現象を調べるために煙を使用した可視化実験装置を製作した。

この装置では翼模型の回転軸の位置の違いによって翼まわりの気流がどのように異なるのかを調べるために、回転軸の位置を前縁から10%と64%の場合について、平均迎角、振動振幅、振動数、および風速を実験パラメーターとする実験を想定している。実験は可視化装置の整備されていない航技研の回流式低速風洞である「小型校正用低乱風洞」で行う。本装置の特徴は、周期加振における翼模型の平均迎角、振動振幅、振動数の変更をパソコンの指令で自在に変更可能にした点にある。また、「排煙装置」を準備したことにより長時間の連続実験が可能であるうえに、風洞の風路を油煙で汚すことは少ない。翼模型加振装置と可視化実験装置の概要を速報する。

2. 可視化実験装置の構成

第1図に可視化実験装置のスケッチを示す。今回使用する「小型低乱校正風洞²⁾」は縮流部の絞り比が9:1、測定部の大きさが[幅550mm×高さ650mm×長さ1,500mm]の回流形である。風洞の特性は、風速範囲1~65m/s、風速分布 $\pm 0.1\%$ 、気流の乱れ $\pm 0.05\%$ (風速40m/s)である。翼模型取付用側壁の観測窓側は厚さ10mmの透明アクリル板を設置した。翼模型の回転軸が貫通する部分には翼厚を越えない外径 $\phi 16$ mmのボール・ベアリングを入れている。翼模型は主にバルサと朴を使用し、一部にジュラルミンを使用して製作している翼型「NASA-GA(W)-1」、翼弦150mm、翼幅550mmの2次元翼である。

加振機の加振機構を第2図を用いて説明する。翼模型の回転軸(中空軸)①に固定したプーリ②はスチールベルトでスライドロッド③と繋がっている。スライドロッド③の上端がコネクティングロッド④により回転斜板⑤と接続され、回転斜板⑤はモータ⑥で定速回転することにより振動数(ω)(max. 8 Hz)の周期加振が可能になる。モータ⑥は回転斜板⑤の取付部の中心を回転中心にしているプーリ⑦と共にモータ⑧によって任意の角度に回転($0^\circ \sim \pm 15^\circ$)して加振振幅(A)を決める。プーリ⑦とモータ⑧を載せた回転ベース⑨は同じ回転中心を持つプーリ⑩と一体になっていて、モータ⑪によって回転($0^\circ \sim \pm 55^\circ$)し平均迎角(α_m)を決める。 ω , A , α_m はパソコンの指令で自在に変更可能である。

一般に、煙吹出装置の設置場所は、気流速度の加速する縮流部が適しているが³⁾、風洞利用の制約上集合胴に設置することにした。煙は下部からのみ供給するので上下均等に吹き出すようにするため、煙貯は煙吹出部を持つダクトと持たないダクトを上下で連結した構造にしている。煙貯

^{*1} 平成11年1月18日原稿受理

^{*2} 航空宇宙技術研究所

第1図 可視化実験装置スケッチ

① 中空軸	⑨ 回転ベース
② プーリ	⑩ プーリ
③ スライドロッド	⑪ モーター
④ コネクティングロッド	⑫ 連結金具
⑤ 回転斜板	⑬ スライドプレート
⑥ モーター	⑭ ボールスクリュウ
⑦ プーリ	⑮ 中空軸にプーリ
⑧ モーター	⑯ プーリ

第2図 二次元翼模型加振装置

の煙は対称翼型をした煙吹出装置の片側にのみあるスリットからコアンダ効果によりシート状に表面に沿って下流に向かって流れる。「煙吸入口」は閉塞率 19% の大きさのものを設置した。「煙吸入口」内の流路は薄い鋼板で入り口から出口まで上下に 4 等分に分割し、半径 150 mm の円弧で下に 90° 曲げている。煙吸入口下部には水平方向に 90° 曲がり、断面を矩形から円形に変換し、内部に気流を整流するためのアルミハニカムを入り口と出口に装着しているスチール製のダクトを接続している。この後に $\phi 320$ の布製ダクトを接続している。定容量排気ファンを使用しているので「流量調節弁」を使用して「煙吸入口」付近の流速を微調節している。「排煙装置」で排出した分の流量を補給するために「煙吸入口」の両側の測定部側壁に開口部を作り、不織布を取り付け、測定部の気流の静圧と大気圧との差圧を相殺する目的で大気測定部に流入するようにした。

照明装置の「Nd: YAG パルス・レーザー」の光は光ファイバーを使用して測定部の上下壁の観測窓にセットされている。手で X, Y, Z 軸方向に移動・各軸まわりに回転可能なライト・シート光学系まで導いている。レーザー光源の平均出力は最大 25 W まで、パルス周波数は 4 kHz~50 kHz の間で可変であり、高速度ビデオカメラと

外部同期が可能である。

本可視化装置で想定される一番早い現象は風速 9 m/s 、翼模型の振動数が 7.3 Hz の場合である。したがって、シャッター速度 $1/4,500$ 秒以上で $300\sim 500$ コマ/秒で撮影出来るカメラを準備した。また、20倍ズーム・レンズ付きの 8 mm のカラー・ホーム・ビデオカメラも併用する。煙からの反射光は非常に弱いので観測窓とカメラの間は黒色の薄いビニールシートで覆って暗室とした。同様に、ライト・シート光学系の回りも暗室とした。

3. 使用例

3.1 煙吹出装置について

a) 実際に運転した場合、測定部入り口で縮流胴の下方から大きい渦が生じ測定部では断面の中心部よりも高く昇って測定部の気流を乱した。第3図に示す様に煙吹出装置の翼型ストラットの煙供給ホース接続部から始まる渦状境界線が発生していた。測定部で風速が 3 m/s と 6 m/s のとき渦状の境界線は各々上向きに約 30° と 45° の角度で発生し、その後流は剥離していた。気流中に出た渦は縮流胴に入り加速され、強い渦に成長して測定部に入ってくるのが分かった。対策として翼型ストラットの翼弦厚さに等しい幅の端板を第4図に示すように翼型ストラットの煙供給ホース接続部金具上部に取り付けた結果、渦状境界線が

第3図 煙供給ホース接続部から発生する渦状境界線

第4図 煙供給ホース接続部の端板

上向きに発生するのは防止できた。端板の下に押さえ込まれた乱れた気流は床を舐める様にして縮流胴に入り圧縮され薄くなって測定部に入り床に沿って流れる。この時の乱流部分の厚さは床より約 30 mm であった。

b) 測定部の流速が 3 m/s の場合には翼型ストラット表面上の流れは層流であったが、 6 m/s では後縁より少し手前より乱流境界層になった。

c) 翼型ストラットの後縁に接続した単板を離れた後流は渦層となり縮流部に入り圧縮されると共に、順次加速され細く引き延ばされた状態で測定部に入っていく。測定部の煙の厚さは約 50 mm であった。

d) 長時間使用する場合にはかなりのドレインが貯まるのでドレイン抜きが必要であった。

e) 翼型ストラット表面で発生した小さな乱れは縮流胴で成長して測定部の気流を大きく乱すため表面荒さはかなり小さくする必要がある。

3.2 排煙装置について 第5図に示す「排煙装置」の使用例の様に気流に対する影響も小さく、長時間使用しても油煙で風洞内を汚す程度は小さかった。

3.3 翼模型加振装置について 前もってモータの駆動パターンを調整することによりパソコンによる平均迎角、加振振幅、振動数の変更は2分ぐらいで完了する。第6図は風速 9 m/s 、平均迎角 16° 、加振振幅 5° 、設定加振振動数 7.3 Hz で翼模型を加振している時の迎角を検出しているポテンシオメーターの出力をFFTアナライザーで処理し、パワースペクトルと時間履歴を得たものである。設定加振振動数 7.3 Hz に対して翼模型は 7.375 Hz で振動している。また、パワースペクトルの形も頂部で一つの線に重なり合う急峻な形をしているので設定に対してかなり良い応答をしていることが判る。

第5図 「排煙装置」使用例

第6図 通風中に翼模型を加振したときの迎角を検出しているポテンショメータ出力の時間波形とそのパワースペクトル
風速, 9 m/s; 平均迎角, 16°; 加振振幅, $\pm 5^\circ$; 設定加振周波数, 7.3 Hz

3.4 ビデオカメラと光量について ホーム・ビデオカメラによる撮影において光量はほぼ十分であったが、シャッター速度が 1/4,500 s で撮影した高速度ビデオカメラに

よる撮影において光量がかなり不足であったので画像処理による画質改善が必要である。

3.5 その他 煙のシートが時々前後に 20 mm ぐらい移動する現象があった。現在この理由は不明である。

4. あとがき

本可視化実験装置は加振機をパソコンを使用して「振動数」、「加振振幅」および「平均迎角」を短時間に変更可能である。また、回流式風洞において「排煙装置」を使用して連続長時間の煙を使用した可視化実験が可能である。これらから実験効率を大幅に上げることが可能である。

参 考 文 献

- 1) McGhee, R. J. and Beasley, W. D.: Low-Speed Aerodynamic Characteristics of a 17-Percent-Thick Airfoil Section Designed for General Aviation Applications, NASA TN D-7428, 1973.
- 2) 空力性能部大型低速風洞制御研究室：小型低乱校正風洞完成，航技研ニュース, 352 (1988) pp. 1-2.
- 3) Lippisch, A. M.: Flow Visualization, Aeronautical Engineering Review, 17, February (1958), p. 25.