

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1402

回流式低速風洞に於ける煙を用いた振動翼まわりの 流れの可視化実験装置の開発

菊池孝男

2000年1月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

概要	1
1. はじめに	1
2. 風洞設備	2
3. 翼模型	3
4. 翼模型加振装置	4
5. 煙吹出装置	5
5.1 煙発生装置	5
5.2 煙吹出装置	5
6. 排煙装置	7
6.1 煙吸込口	7
6.2 流量調節弁	8
6.3 排気ファンと布製ダクト	9
6.4 排煙ダクト吹出口	9
6.5 流量の補償	10
7. 撮影装置	10
7.1 照明	10
7.2 カメラ	10
7.3 遮光	10
8. 使用例	13
8.1 煙吹出装置	13
8.2 排煙装置	15
8.3 翼模型加振装置	15
8.4 ビデオカメラと光量	16
8.5 その他	16
9. あとがき	17
9.1 達成事項	17
9.2 今後の課題	17
参考文献	18

回流式低速風洞に於ける煙を用いた振動翼まわりの 流れの可視化実験装置の開発*

菊 池 孝 男*¹

Development of a Flow Visualization System using Smoke in a Closed-Return Type Low-speed Wind Tunnel*

Takao KIKUCHI *¹

ABSTRACT

A flow visualization system using smoke was developed in a closed- return type low speed wind tunnel. The purpose of developing this system was to investigate the unsteady flow patterns around the "NASA GA(W)-1" 2D airfoils which are oscillated in a pitching quasi-harmonic motion around axes near the leading edge and the trailing edge. The feature of this system is that both the smoke creating and smoke exhausting devices are installed in the settling chamber and at the down stream part of the test section. Consequently, it is possible to conduct long experiments without any other efforts to exhaust the smoke or any significant pollution of the tunnel walls by the smoke oil. The model driving system enables quasi-harmonic oscillation up to a frequency of 8Hz, with 3 electric motors controlled by a personal computer. It is also possible to automatically change the parameters; the mean-angles of attack, the amplitudes and the frequencies in a short time by monitoring the information on the CRT. The efficiency of experiments is highly improved as a result. The following is an outline of the visualization system and its performance.

Keywords : flow visualization system, circulation type of low speed wind tunnel, oscillating system, flow visualization by smoke , smoke exhausting device

概 要

航空宇宙技術研究所の回流単帰路式小型低乱風洞で、NASA GA(W)-1 翼の回転中心位置が異なる場合における、翼まわりの気流の違いを煙の可視化により調べるために、煙を用いた振動翼まわりの流れの可視化実験装置を開発した。その構成は、煙吹出装置、2次元翼模型、2次元翼模型加振装置、排煙装置、撮影装置からなる。その機能は、風速 10m/s において、2次元翼模型の平均迎角 $\pm 45^\circ$ 、加振振幅 $\pm 10^\circ$ 、加振振動数 0.1 ~ 8Hz で可視化実験が可能である。試験の結果ほぼ満足のゆく結果が得られた。特に、排煙装置と2次元翼模型加振装置では良い結果が得られた。

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為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。これらの

計算の検証データを得るための振動翼に関する実験は一般に装置が複雑化するため、大変難しく、本実験例は稀少である。さらに、昨今のCFD (Computational Fluid Dynamics) 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(以後、翼模型という)を疑似正弦波加振し、その翼まわりの非定常流れ現象を調べるために煙

* 平成 11 年 2 月 22 日受付
(received 22 February 1999)

*¹ 構造研究部 (Structures Division)

りを使用した可視化実験装置を開発した。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為に、回転軸の位置を前縁から10%と64%の場合について、各種実験パラメータ（平均迎角、振動振幅、振動数、および風速）に合わせた煙可視化実験を想定している。実験は煙可視化実験装置の整備されていない航空宇宙技術研究所（以後、航技研という）の回流単帰路式の小型低乱風洞で行うこととし、本煙可視化実験装置を当該風洞に設置し、煙吹出装置（集合胴内）で発生させた油煙を翼模型の下流に設けた排煙装置（測定部内）で回収し、風洞外に排出させることで風洞内を汚さずに長時間の連続実験を可能にした。また、翼模型を強制加振（疑似正弦波加振）させる加振装置は測定部の側壁に設置されている。その駆動機構は3台の電動モータとリンク機構および制御用パーソナル・コンピュータ（以後、パソコンという）とからなっている。そのために、各種実験パラメータ（平均迎角、振動振幅および振動数等）の設定が容易である。本報告では、可視化実験装置の概要と機能について述べる。

2. 風洞設備

本可視化実験装置を設置した小型風洞は図2.1、図2.2に示すように、航技研の回流単帰路式（以後、回流式と

いう）の小型低乱風洞（以後、風洞という）²⁾を用いた。

本風洞は縮流部の絞り比が9:1、測定部の大きさが[550mm幅×650mm高さ×1,500mm長さ]軸芯高さは床面より1,280mmの回流形（ゲッチングン型）である。測定部は固定壁で、4本の角柱梁に上下壁および側壁をネジで固定する構造になっている。本可視化装置では縮流部直前に「煙吹出装置」を装着し、測定部の壁を外して代わりに「観測窓」・「翼模型加振装置」・「排煙装置の煙吸込口」・「外気取込壁」及び残りの壁に内面を黒色に

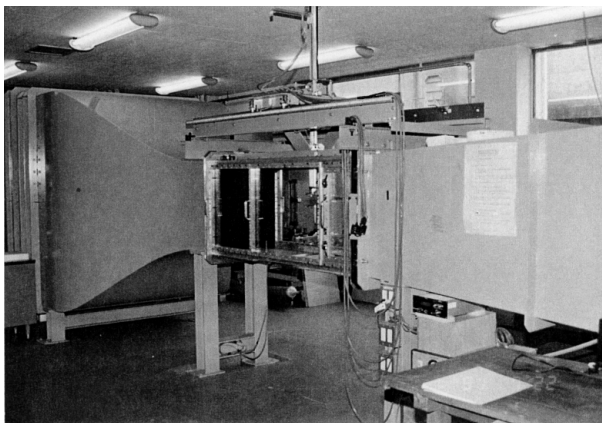


図2.1 航技研の小型低乱風洞の測定部

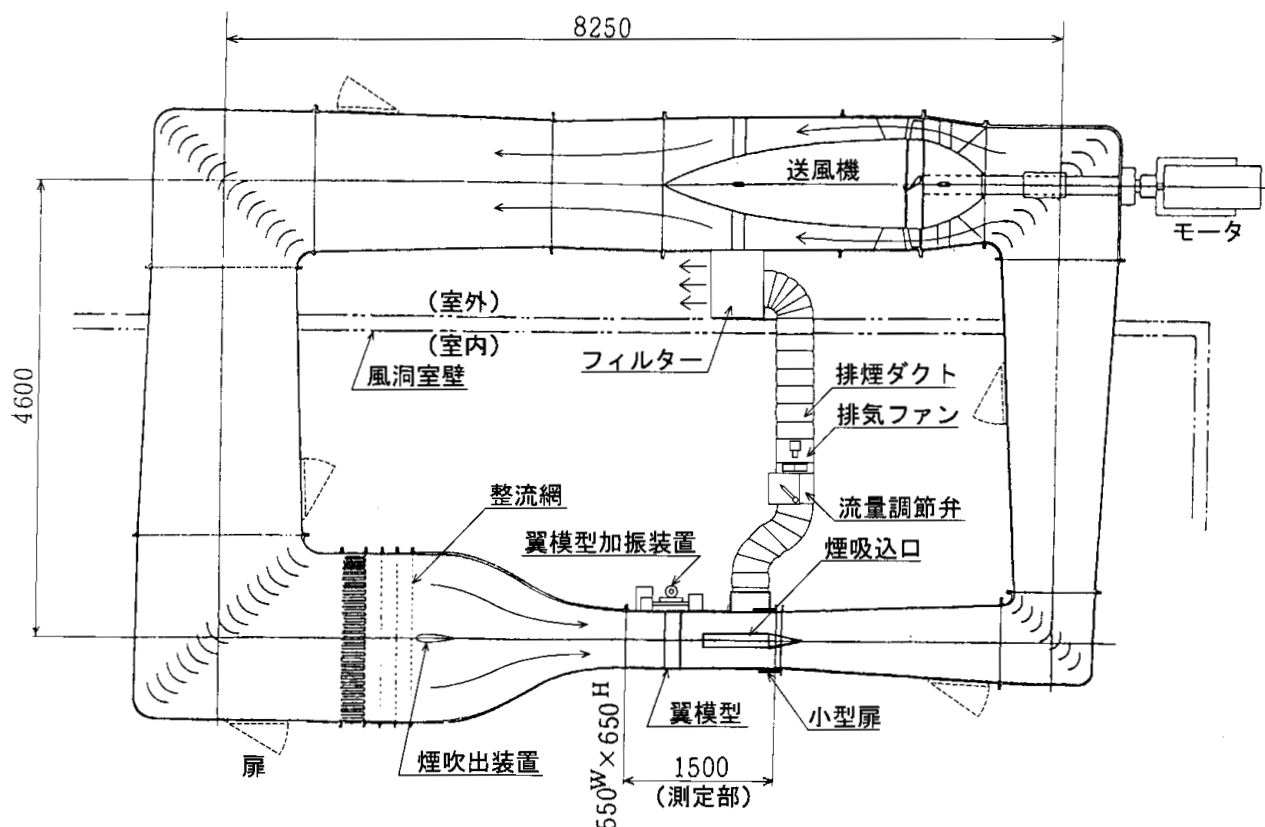


図2.2 小型低乱風洞平面図と煙吹出装置・排煙装置の配置図

表 2.1 小型低乱風洞の緒元および特性

(1) 風洞	
型 式 :	回流形 (ゲッチングン型)
絞 り 比 :	9 : 1
測 定 部 :	550mm W × 650mm H × 1,500mm L
(2) 性能	
風 速 :	1 ~ 65m/s
風 速 分 布 :	< ± 0.1 % (風速 40m/s)
気流の乱れ :	< ± 0.05 % (風速 40m/s)
(3) 送風機	
型 式 :	単段軸流送風機
直 径 :	1,300mm
回 転 数 :	1,300rpm
駆 動 方 式 :	直流電動機 (37 kW) 直結方式

塗装したベニヤ板製の壁を装着した。集合胴内の整流装置は、ハニカム(対辺26mm、厚さ0.1mm、長さ200mm)および整流網5枚(20メッシュ、開口比60%)より構成されている。風洞の特性は、風速範囲1 ~ 65m/s、風速分布< ± 0.1%、気流の乱れ< ± 0.05% (風速40m/s)である。緒元および特性を表2.1に示す。

3. 翼模型

翼模型の大きさは測定部に合わせて翼弦長を150mmに、翼幅を550mmよりわずかに短い寸法とした。翼模型は図3.1に示すように回転中心軸が異なる2種類(A翼模型、C翼模型)のものを製作した。A翼模型は回転軸中心を前縁より15mm(翼弦長の10%)位置とし、C翼模型は回転軸中心を前縁より96mm(翼弦長の64%)位置とした。なお、測定部の側壁と翼模型端との隙間は、スペーサー(翼型をしている)で調整している。翼模型製

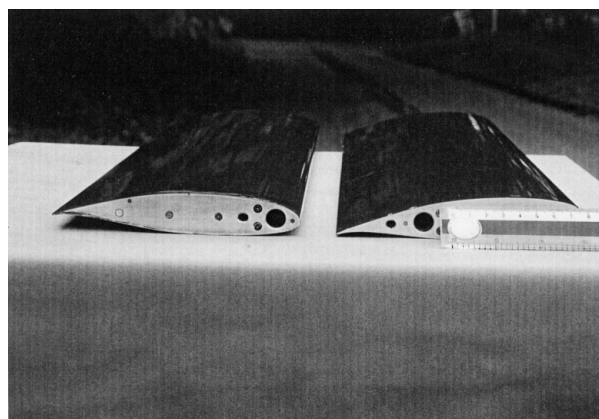


図 3.1 翼型[NASA-GA(W)-1] 二次元翼模型 (翼弦150mm、翼幅550mm) (左) A翼模型 (回転軸中心、前縁から15mm位置の大きい穴) (右) C翼模型 (同様に96mm位置の大きい穴)

作にあたっては実験における負荷条件として、風速15m/s、振動数8Hz、振幅±10°を要求値として定めた。そのため、翼模型は慣性とたわみを小さくする必要があり、軽量化と高剛性化を満たすために主桁材にジュラルミン材(A7075)を、翼型成形にバルサ材と朴を用いた。翼模型の回転軸の構造は、着脱を容易にする為に観測窓側にベアリングの穴に差し込む7の回転軸を取り付け、加振装置側には12の嵌合穴を設け、加振装置から中空軸を差し込む様にしている。また、トルクを伝達するのに加振装置側に回転中心から20mmのところ5嵌合穴を設け、加振装置の回転軸からピンを差し込み結合できる様にしている。また、高速加振している翼表面流れの煙

表 3.1 翼模型の緒元と製作条件

(1) 翼 模 型	2 次 元 翼		
(2) 翼 型	「NASA - GA (W) - 1」		
	翼 弦	150mm	
	翼 幅	550mm	
(3) 回転軸位置と質量			
A 翼模型	回転軸位置	10 %	質量：1.08kg
C 翼模型	回転軸位置	64 %	質量：1.26kg
(4) 負荷条件			
	風 速	15m / s	
	振動数	8Hz	
	振 幅	± 10°	
(5) 材 料	主にバルサ、朴、1 部にジュラルミン (A7075)		
(6) 色	濃い青、艶消し		
(7) 翼面の煙吹出孔	4 個所		

観察において、上流からの煙供給だけでは、翼面と剥離せん断層間の流れを観察することが困難である。そこで、翼模型構造に工夫を施して翼の上下表面の一部に、コアンダ効果が得られるように整形した煙吹出穴(0.4mm×1mm)を2箇所づつ設けて、吹き出した煙が翼表面に沿って流れるようにした。煙の供給は外部の煙発生器からビニールホースで回転軸まで導き、回転継ぎ手を介して中空に成形されている回転軸の中に入る。次いで、翼の翼幅中心に有る約32cm³の煙室に入り、その後翼表面の煙吹き出し孔より外に流出する。翼表面の色は黒色が一番であるが測定部側壁を黒色に仕上げているので、写真撮影した時に翼模型の視認性を良くするために濃い青色の艶消しとしている。表3.1に翼模型の緒元と製作条件を示す。

4. 翼模型加振装置

本翼模型加振装置の詳細は報告書「2次元翼模型加振装置の開発」を刊行する予定であるのでそちらを参照して頂きたい。ここでは簡単に概略を述べるにとどめる。

本翼模型加振装置は大きさが縦719mm×横796mm(最大平均迎角時)×奥行き356mmあり、加振振幅、平均迎角および振動数をパソコンの操作画面からの指令で自動変更可能な疑似正弦波加振装置である。図4.1、図4.2、図4.3の各々に下流側から見た駆動部を含む測定部断面、調整中の駆動部の概観および駆動系を制御するパソコンの概観を示している。

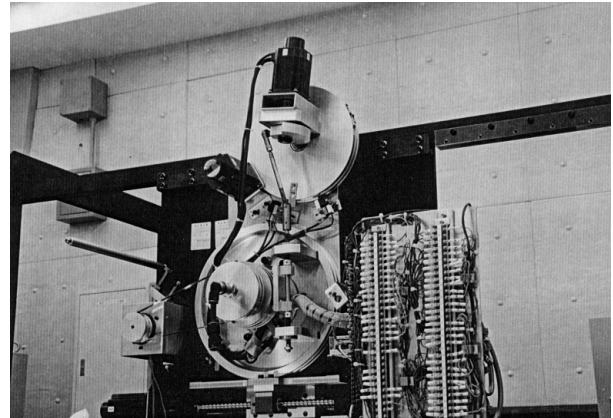


図 4.2 翼模型加振装置の駆動部の概観

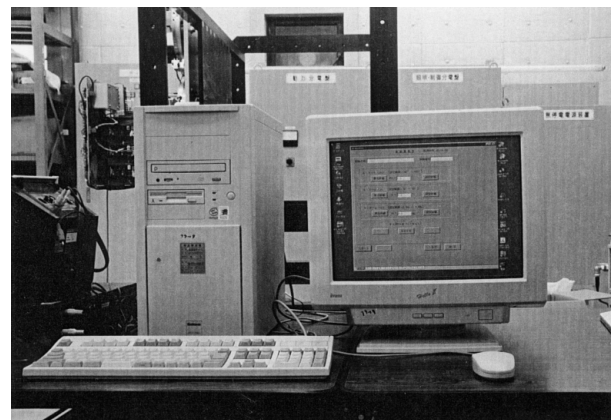


図 4.3 駆動系を制御するために使用したパーソナル・コンピュータの概観

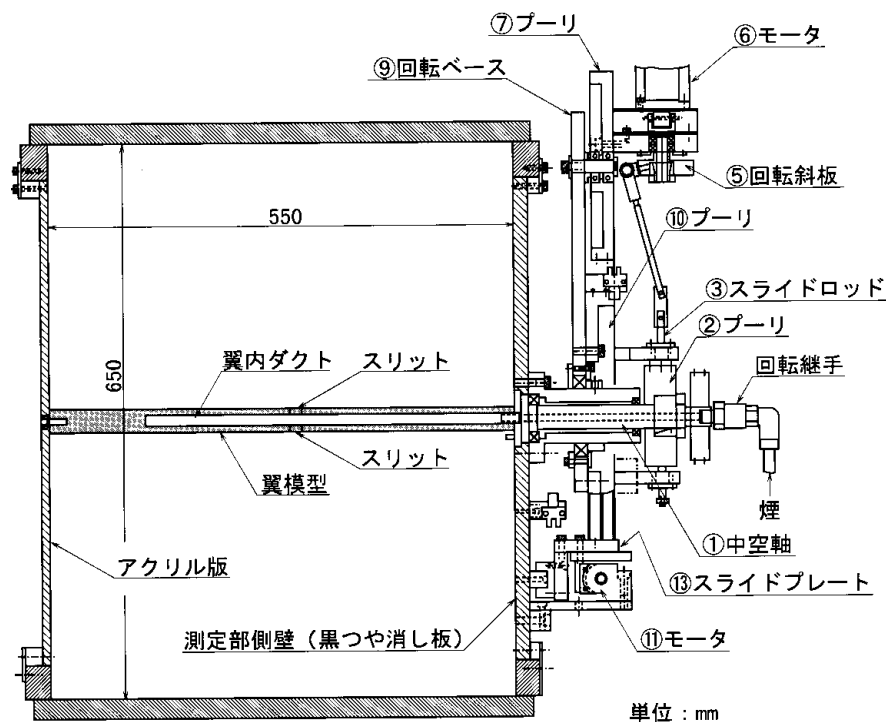


図 4.1 測定部内の翼模型・翼模型加振装置の取付概要図(後方より見る)

この加振装置で加振される振動翼模型の迎角は次の近似式により表すことが出来る。

$$\alpha = m + A \sin \omega t$$

ここで t : 時間
 α : 迎角
 m : 平均迎角
 A : 加振振幅
 ω : ピッチング振動数 (rad/sec)

である。

本翼模型加振装置の常用範囲は

風速	U	10 m/s
平均迎角	0°	$m \pm 45^\circ$
加振振幅	0°	$A \pm 10^\circ$
振動数	0.1Hz	f 8Hz

である。また、翼弦長 C が 150mm の時、無次元振動数 $k = C / 2U$ は風速 3m/s 場合 0.1 k 0.7、風速 9m/s の場合 0.1 k 0.383 を想定している。

パソコンには駆動系を制御する機能の他にスチール写真を撮るためのトリガー信号出力と翼模型の迎角データの保存機能を有している。

5. 煙吹出装置

5.1 煙発生装置

煙発生装置の製品仕様を表 5.1.1 に示す。煙発生装置には発生させた煙を、長いビニールホースを介して煙吹出装置に安定供給するために小型コンプレッサー（ロータリーベピコン）の空気圧を必要としている。そのために、



図 5.1.1 油煙供給の脈動を抑えるダンパー（20 リットル缶を使用）

実験では風速が 6m/s 近傍で、煙の吹き出しに脈動が発生することが確認された。そこで、図 5.1.1 に示すように圧力ダンパー容器（20 リットル缶）をホースの中間部に設けることで脈動を抑えることにした。

5.2 煙吹出装置

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ことが知られているが³⁾、既設の風洞を改修せずに利用する制約を課せられた経緯があるため、縮流胴の曲面をした壁にボルト無しで固定するのは難しい、そこで、本装置の設置は図 2.2 に示すように、集合胴に設置することにした。集合胴内の設置場所としてはハニカム整流格子と整流網の上流に設置して煙の流れを整流するのが良い。しかし、濃い煙がハニカム整流格子と整流網を汚す事を避ける目的で下流側に設置した。この場所は縮流胴の入り口に当たり煙吹出装置から出た煙りは直ぐに縮流胴に入り絞られて濃い煙シートが得られる。煙吹出装置は図 5.2.1 に示すように、集合胴の内壁に固定するためにスクリー・ジャッキ機構（上下突っ張り機構）が設けてあり、上下壁に垂直に保持出来るようになっている。なお、スクリー・ジャッキの頭部は曲面にも対応できるように自由度がある。また、煙吹出装置の低部にはゴム製パットが設けてある。煙の供給は外部の煙発生器からの煙をビニールホースを使用して縮流胴出口より風洞内に入れ床伝いに集合胴に導き、次いで床面から 20mm の位置にある煙吹出装置の供給口に導く。中に入った煙は二等分されて各々煙り貯めに入る。煙り貯めの出口には開口率 52% の多孔板があり煙は多孔板の前後で拡散する。次いで、一方の煙は直接煙吹出口のある煙貯め の下部より入り拡散とノズルからの吹き出しをしながら上昇する。他方の煙は煙貯め に入り拡散しながら上昇して上部で煙貯め に入り拡散とノズルからの吹き出しをしながら下降する。その後下から来た煙と合流するので煙貯め の上下の圧力勾配は小さくなりノズルの上下の煙吹きだし量の均一化が改善される。煙貯め のノズルからシート状の煙がコアンダ効果により対称翼型をした煙吹出装置の表面に沿って下流に向かって流る。最終的に、後縁のカルマン渦を弱める為の厚さ 0.5mm、幅 150mm のステンレス板に沿って流れ、風洞主流中に入る。

表 5.1.1 煙発生装置の仕様

(1) 寸法	660W、770H、400D
(2) 質量	約 45kg
(3) ヒーター	ファイヤーロッドカートリッジヒーター（ワットロー社製） 120V、500W、19.1 W / cm ²
(4) ブロワー	ロータリーベビコン 型式：RC - 20S（日立製） 常用圧力 39 kPa 吐出空気量 55 l / min 回転数 1450R.P.M モーター 100V、200W、単相
(5) 制御	a. ヒーター（定格の 70 % で使用） CA 熱電力、温度調節器による ON・OFF 温度制御（設定温度 300 ～ 400 °C） b. ブロワー リリーフ弁により、リリーフ圧力 49 kPa で大気放出する。
(6) オイル消費量	最大 0.4 l / h
(7) オイル名	オンジナオイル 32（シェル石油社製）
(8) 外 装	銅板製
(9) 安全装置	加熱防止用温度調節器（ヒーターコントロール用とは別） による回路遮断。 ヒーター OFF （設定温度 500 °C の予定） オイル OFF ブロワー ON （冷却のため）
(10) 製 造	理化精機工業（株）

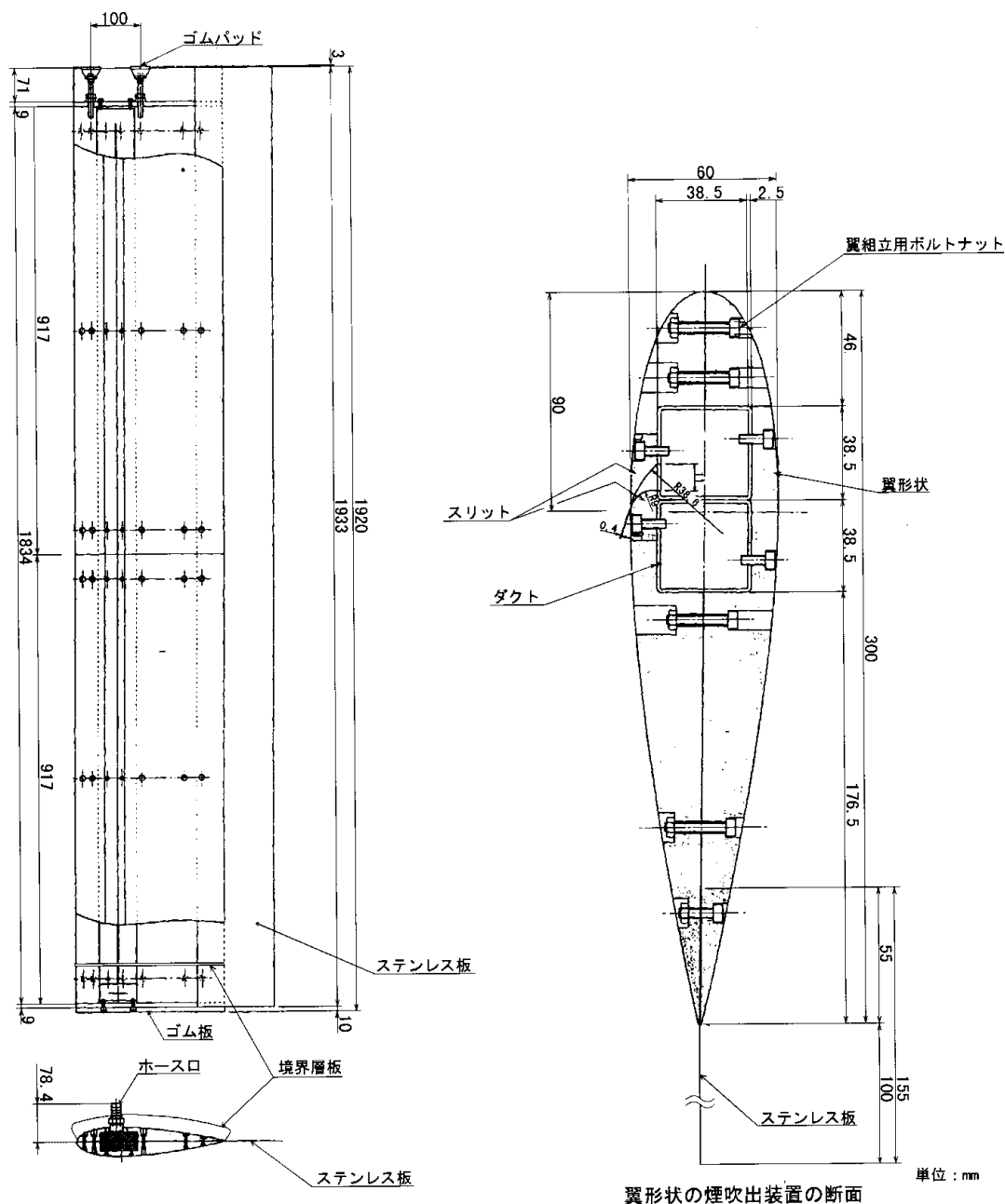


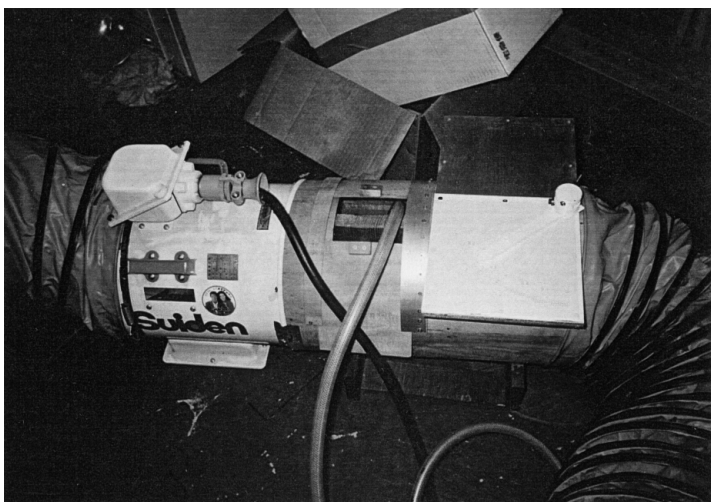
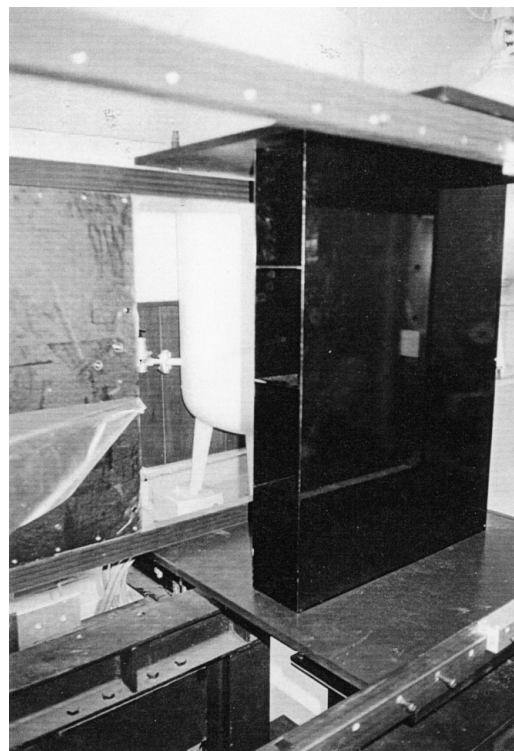
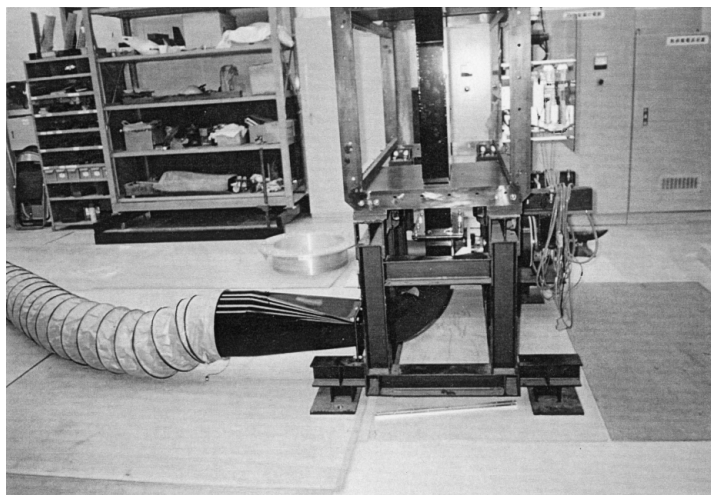
図 5.2.1 煙吹出装置の概要図

6. 排煙装置

回流式の密封された風洞では煙を連続注入すると、直に風路内に煙が充満して煙の流跡観察に支障を来すことになる。さらに、充満した風路内の煙を換気するのに大変苦勞する。また、風洞内部を油煙で著しく汚す。これらの問題点を解決するために排煙装置を開発した。排煙装置の構成は図6、図8.1に示すように、煙吸込口と流量調節弁と排気ファンと煙吹出口（フィルター）と排煙ダクト（一部布製）および外気取入壁（測定部下流の側壁に設置）からなる。

6.1 煙吸込口

煙吸込口の設置位置は翼模型から十分離れた位置の測定部後方の拡散胴内が理想であるが取付加工についての制約から測定部内に設置することにした。このため翼模型の後流の観察範囲は狭まったが今回の実験の目的は翼面上の気流を観察することなので支障はない。また、装置の取付・取り外しは便利となった。本煙吸込口は翼模型の後縁より 227.5mm 後方で翼幅の 1/2 ライン上に幅 109.6mm、高さ 657.25mm（設置された位置の測定部の高さに等しい）の矩形断面で奥行き 480mm、閉塞率 19% の大きさのものを設置した。後縁部には長さ 343mm の対称



左上の図：煙吸込口背面とダクト
（測定部の下流より見る。）
左下の図：流量調整弁と排気ファン
右上の図：煙吸込口
（測定部内を上流より見る。）

図6 排煙装置

翼の後縁部に似せて成形したものを付け足している。煙吸込口の横幅寸法はだまかに煙流線幅よりも少し広くした。煙吸込口内の流路は入り口から出口まで薄板を使って上下に4等分に分割し、半径150mmの円弧で下に90°曲げている。煙吸込口下部には水平方向に90°曲がり、断面が矩形から円形に変換しているスチール製のダクトを接続している。内部には気流を整流するために入り口と出口にアルミハニカムが備えられており、この後に 320 の布製ダクトが接続されている。

6.2 流量調節弁

試作した流量調節弁は図 6.2.1 に示すように、外径 315mm（内径 300mm）長さ 500mm の簡易な円筒形状（ベニヤ構造）のもので、内部に蝶形弁（バタフライ弁）が設けてある。弁の開度調整は目盛指示針を直読しながら手動式で行う。その、読みとり精度は $\pm 0.5^\circ$ で流量調節には十分である。当該流量調節弁は、手作りのために

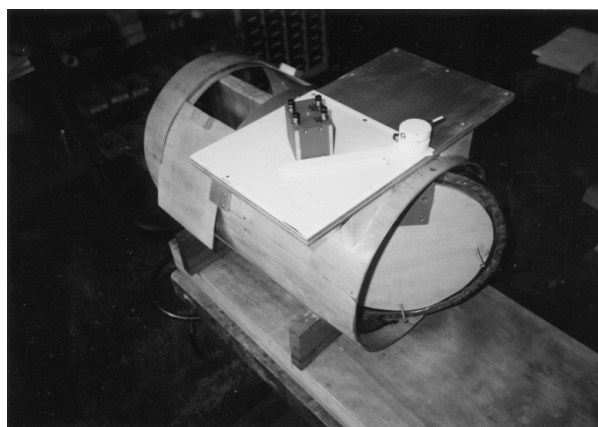


図 6.2.1 流量調節弁（ダクトを外した状態）

工作精度が悪く、開度 0° でもかなりの漏れ流量があり、流量の微調節が不可能であった。その改善策として、排気ファンと蝶形弁の間にスライド扉付きの大気吸気調整口（開口部の大きさ：縦115mm×横275mm）を設けて、

大気取り込み量を調整して蝶形弁の前後差圧を調節することにより蝶形弁の流量を調節する機能を付加した。そのために、煙排気の調整には弁とスライド扉の双方を使用して、測定部の一様流の速度に合わせて微調節が可能である。

6.3 排気ファンと布製ダクト

排気ファンと布製ダクトは市販製品の防爆タイプを使用している。これは可燃性の煙を使用しているので安全側に考えてのことである。排気ファンの最大排気流量は

72m³/minで吸い込み口の面積は0.065m²である。表6.3.1に排気ファンと布製ダクトの仕様を示す。

6.4 排煙ダクト吹出口

一般に可視化用油煙は灯油を熱して白煙化したものを利用しているため、そのまま室外に放出すると隣接する住宅や研究棟に大いに影響（悪臭を与えることになり、生活環境を守るうえからも排煙吹出口にフィルター機構を設ける必要がある。そこで図6.4.1に示すように、排煙吹出口は多層フィルターを設けても排気ファンの能力を

表 6.3.1 排気ファンとフレキシブルダクトの仕様

(1) ファン（商品名：ジェットスイファン）

ファン形状	軸流ファン
タイプ	安全増防爆型
形式	S J F - 3 0 6 D 2
電源	三相 2 0 0 V
適合ダクト径	φ 3 2 0
ファン 外径	φ 2 9 0
枚数	6 枚
最大風速	7 2 / 7 9 m ³ /min
電動機出力	4 0 0 W
極数	2 P
回転数	2 8 5 0 / 3 4 4 0 r.p.m.
質量	2 5.5 kg
備考	アース端子付き クロロプレンキャプタイヤコード 1 0 m 付き

(2) フレキシブル・ダクト（布製）

品番	φ 3 2 0 防爆ダクト
寸法	φ 3 2 0 × 5 m
備考	アースクリップ付き

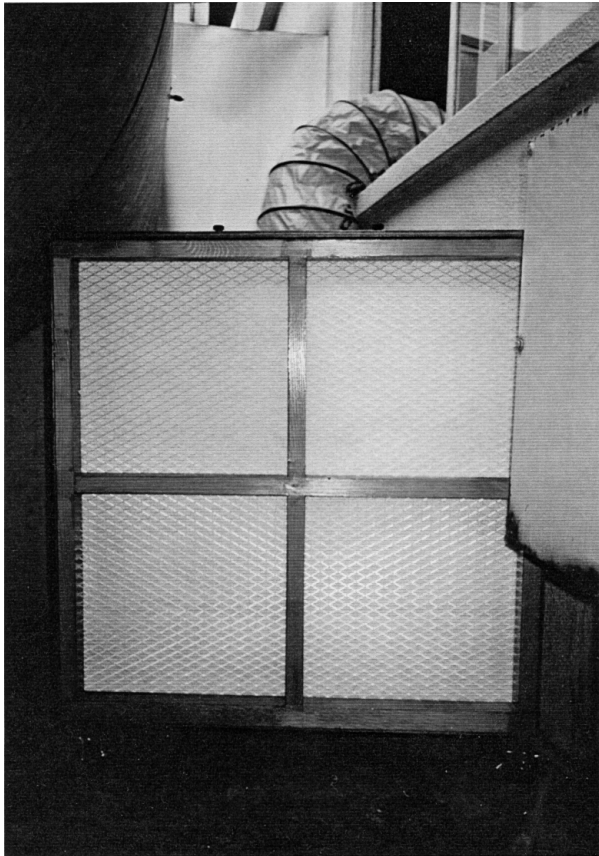


図 6. 4. 1 排気ダクト吹出口に取り付けたフィルター

落とさないように大きなボックス型にした。多層フィルターは上流から順に、多孔板を2枚(2層)を間隔をとって固定、その後不織布フィルターを4枚重ね合わせて油煙のマイクロ・ミストを効率よく付着出来るようにした。

6. 5 流量の補償

排煙装置は風洞内の空気の一部を強制排気するために気流を乱す要因となるので排気量に相当する空気を下流側で補給して内圧バランスを取る必要がある。そこで、排煙装置を取り付けている測定部後部の両側壁に設けてある既設の小型アクリル扉を、空気の流入が可能な多孔質の不織布(縦480mm×横171mm)製の壁に取り替えることで、排煙装置の運転に伴う測定部内圧変化に対して自然に内圧調整が出来るようにした。

7. 撮影装置

7. 1 照明

照明装置の光源は、表7.1の仕様に示すように「YAGレーザー可視化システムCQY-25((株)日本レーザー製、Nd:YAGパルス・レーザー)」を使用している。このレーザー光源を出た光を二分割し、各々の光は光ファイバーで測定部の上下壁の観測窓にセットされているライト・シート光学系まで導き接続した。ライト・シート光学系は手動でX、Y、Z軸方向に移動・回転可能なレール上にセットされているので、任意の位置からライト・シート光を出すことが出来る。レーザー光源の平均出力は最大25Wまで、パルス周波数は4KHz～50KHzの間で可変である。また、パルス周波数は4KHz～50KHzの間で外部同期が可能であるから、外部同期の為の信号線は、遅延パルス発生器を介して高速度ビデオカメラに接続される。

7. 2 カメラ

本可視化装置の実験条件の内、最大風速と翼模型の最大振動数は、煙発生能力と排気能力および翼模型加振能力等から総合的に判断してそれぞれ9m/sで7.3Hzと想定される。したがって、シャッター速度1/4500秒以上で300～500コマ/秒で撮影出来るカメラとして(株)フォトロン製の白黒のデジタル・ハイスピード・ビデオカメラであるFASTCAM-ultima-1を準備した。また、カラーのホーム・ビデオカメラであるソニー製の20倍ズーム・レンズ付きの8mmビデオカメラの(handy cam)も併用する。なお、ホームビデオカメラの撮影速度は30コマ/秒である。

表7.2にFASTCAM-ultima-1の仕様を示す。

7. 3 遮光

ライト・シート光を煙に当てて得られる反射光量は非常に弱く、測定部の観測窓(アクリル板)とカメラのレンズに外光が当たらないように暗幕で遮断して撮影する必要がある。風洞が設置されている実験室にはブラインドが備わっているが、外光を遮断して室内を暗くする暗室能力に欠ける。そこで、観測窓とカメラの間は30mm×30mm×1.8mのアンギュル材で1.8m×0.9m×1.8mの長方形の枠組を作り、その枠組を暗幕で覆って簡易暗室とした。同様に、測定部上下壁の観測窓にセットされているライト・シート光学系の回りも暗室とした。

表 7.1 YAG レーザー可視化システム CQY-25 ((株) 日本レーザー製) の仕様

(1) レーザー光源 (875MQG) Nd : YAG パルス・レーザー

発振波長	532nm
モード	マルチ
ビーム径	2mm
ビーム広がり角度	6mrad
偏光	直線偏光
平均出力	最大 25W (10kHz)、20W (4kHz)
パルスエネルギー	5mJ (5kHz)
同期周波数	4kHz ~ 50kHz
パルス幅	< 250ns
ピークパルス出力	> 10kW (10kHz)

(2) 光ファイバー

ファイバー長	20m
コア径	800 μ m

(3) ライトシート光学系

ライトシート厚さ	約 5mm 以下
ライトシート 広がり角度	約 25 度 又は 約 50 度

(4) オプティカルベンチ
・レーザー光源及び光学系用

サイズ	約 1500mm (L) × 500mm (W) × 600mm (H) キャスター付き
-----	---

表 7.2 デジタル・ハイスピード・ビデオカメラ (FASTCAM-ultima-1)((株) フォトロン製) の仕様

レンズマウント	C マウント (標準)	
撮像方式	固体平面撮像素子	
記録方式	IC メモリ (ダイナミック RAM) 記録容量	
記録容量	FASTCAM - ultima - 1 64M BYTE (67, 108, 924 BYTE)	
撮影速度	フルフレーム	30, 60, 125, 250, 500, 750, 1125, 2250, 4500PPS
	セグメントフレーム	9000, 13500, 18000, 27000, 40500PPS
シャッター速度	1/4500 秒 ～ 1/40500 秒	
画素数	フルフレーム	256X256
	セグメントフレーム	256X128, 256X64, 128X128, 128X64, 64X64 DOT
濃度表現	8 BIT (256 階調)	
再生速度	2, 5, 10, 15, 30 PPS	
記録枚数	フルフレーム	FASTCAM - ultima - 1 1024 枚
	セグメントフレーム	FASTCAM - ultima - 1 16384 枚
記録時間	フルフレーム	FASTCAM - ultima - 1 0. 22 秒
	セグメントフレーム	FASTCAM - ultima - 1 0. 40 秒
アナログビデオ出力	IVP - P 75 Ω 2 系統	
デジタル出力	有り	
データ表示	撮影速度, フレーム番号, ID 番号	
外部トリガ入力	接点 / TTL オープンコレクタ (負極性)	
同期出力信号	TTL オープンコレクタ (負極性)	
エンドレス記録機能	有り	
寸法 / 質量	本体 430 (W) X500 (D) X220 (H) 約 20kg カメラ 156 (W) X333 (D) X155 (H) 約 3kg	
電 源	AC 100V 120V 50 / 60Hz 約 250VA	

8. 使用例

前節で述べた各装置の使用上の問題点とその対策等について、図8.1と図8.2をもとに詳しく述べることにする。

8.1 煙吹出装置

(1) 風洞を起動させて風洞内に煙を吹き出し、測定部入口近傍にライト・シート光を当てて可視化すると、縮流胴の下方から大きい渦状乱流が上方に向けて発達し、

測定部中心軸まで到達しているのが確認された。煙吹出装置の翼型ストラット下部には図8.3に示すように、太めの煙供給ホース接続部があり、そこから剥離渦が発生しているのが判った。風速(測定部)3m/sと6m/sの時に、上向きにそれぞれ約30°と45°の剥離渦が発生し、その後流は剥離し、翼面上を後縁まで流れた後、気流中に押し出され小さな渦状の流れとなる。次いで、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来ることが分かった。

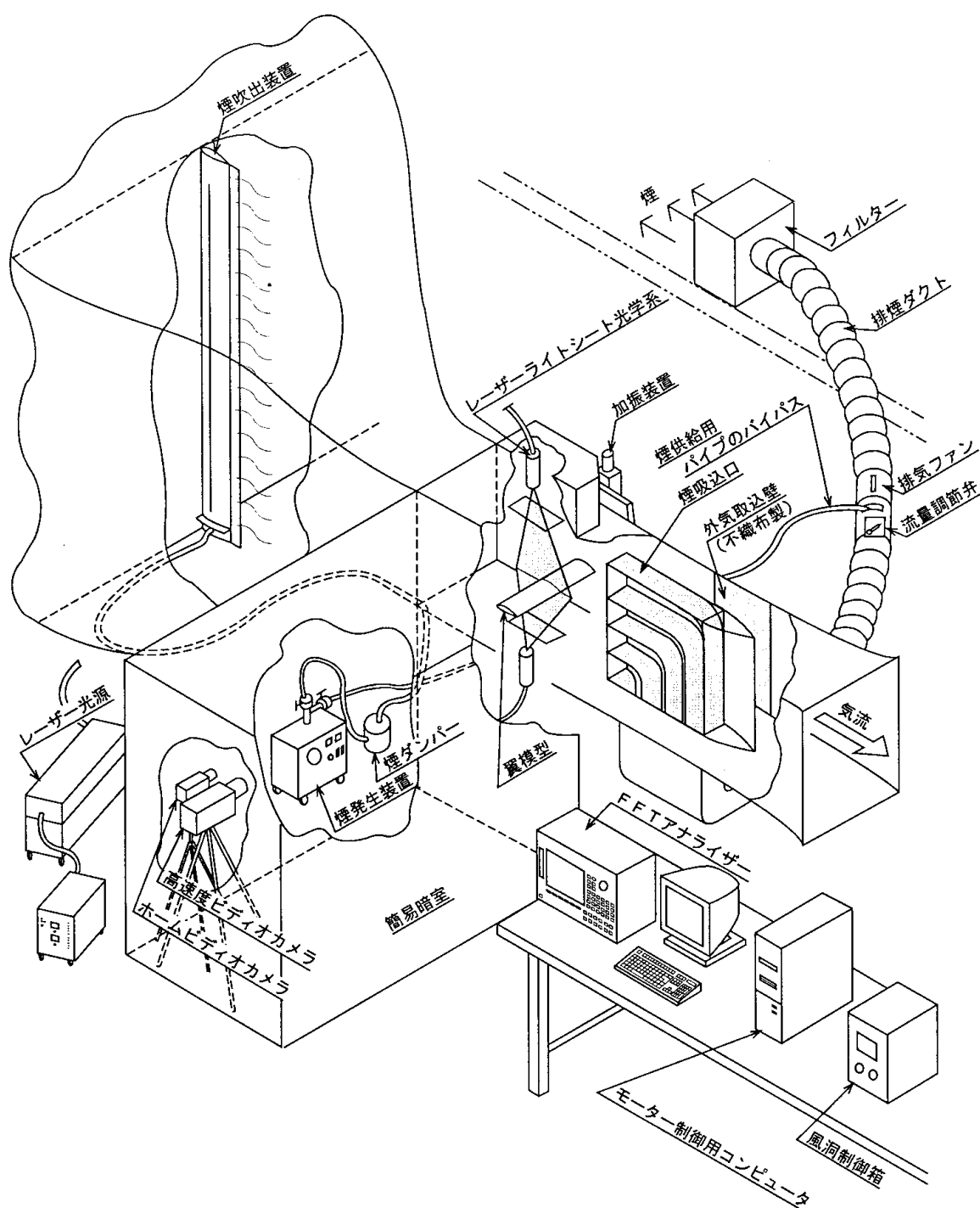


図 8.1 可視化実験装置のスケッチ



左上の図：暗幕によるカメラまわりの遮光

左下の図：翼模型加振装置駆動系制御用パソコンとFFTアナライザー

右上の図：煙発生装置、レーザー光源、ビデオデッキの配置



図 8.2 実験装置の配置

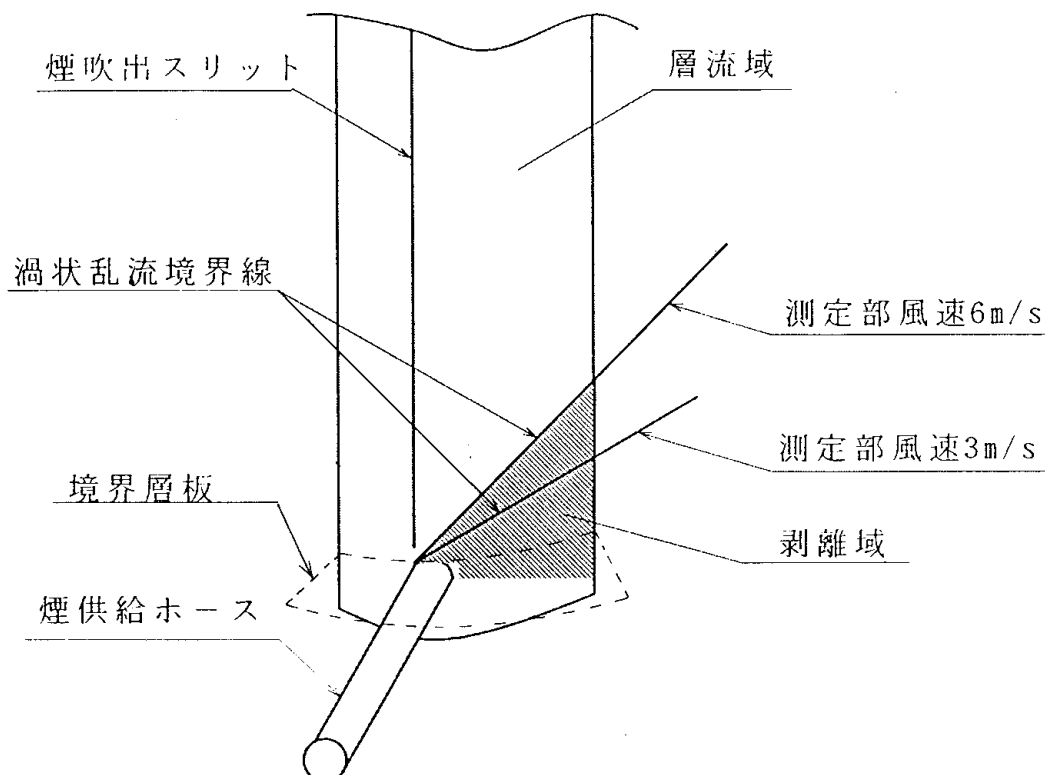


図 8.3 煙供給ホース接続部から発生する渦状乱流境界線

その対策として、煙供給ホースホース接続金具部からの剥離渦（渦状乱流）が翼模型に影響を与えないようにするために、図 8.4 に示すように、接続金具の上部に境界層板（長さ：翼弦長と同じ、幅：翼型ストラットの最大翼厚と同じ）を水平に取り付けた結果、乱流が上向きに発生するのは防止できた。境界層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 30mm であった。

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

（３）翼型ストラットの後縁に接続した単板を離れた煙は渦層となり縮流部に入って強く加速されるまで横方向に大きく成長する。次いで、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 50mm であった。

（４）長時間使用する場合にはドレーンにかなりの液化油が貯まるので、この液化油を簡単に抜く方法が必要であった。

8.2 排煙装置

図 8.5 の排煙装置の使用例に示す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。

8.3 翼模型加振装置

パソコン制御による翼模型の加振パラメータ（平均迎角、加振振幅、振動数）に関する変更操作は約 2 分で設定完了となる。加振パラメータの設定には 3 台のモータが使用されているが、一つの操作画面で設定出来る。また、それぞれのモータのパラメータ（例：スタート速度、傾斜レート等）の設定は独立した操作画面（3 画面）を有して独立制御できるようになっている。そのために設定変更が容易になり実験効率が高められた。

図 8.6 は風速 9m/s、平均迎角 16°、加振振幅 5°、設定加振振動数 7.3Hz で翼模型を加振しているとき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 7.3Hz に対して翼模型は 7.375Hz 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。パワースペクトルにおいて加振振動数よりも高い振動数位置のスペクトルは疑似正弦波加振しているために正弦波が歪んでいることにより表れた加振振動数の高調波とポテンシオメーターの出力信号に乗っている 50Hz の電源ノイズである。電源ノイズはフィルターを使用することで除去出来る。

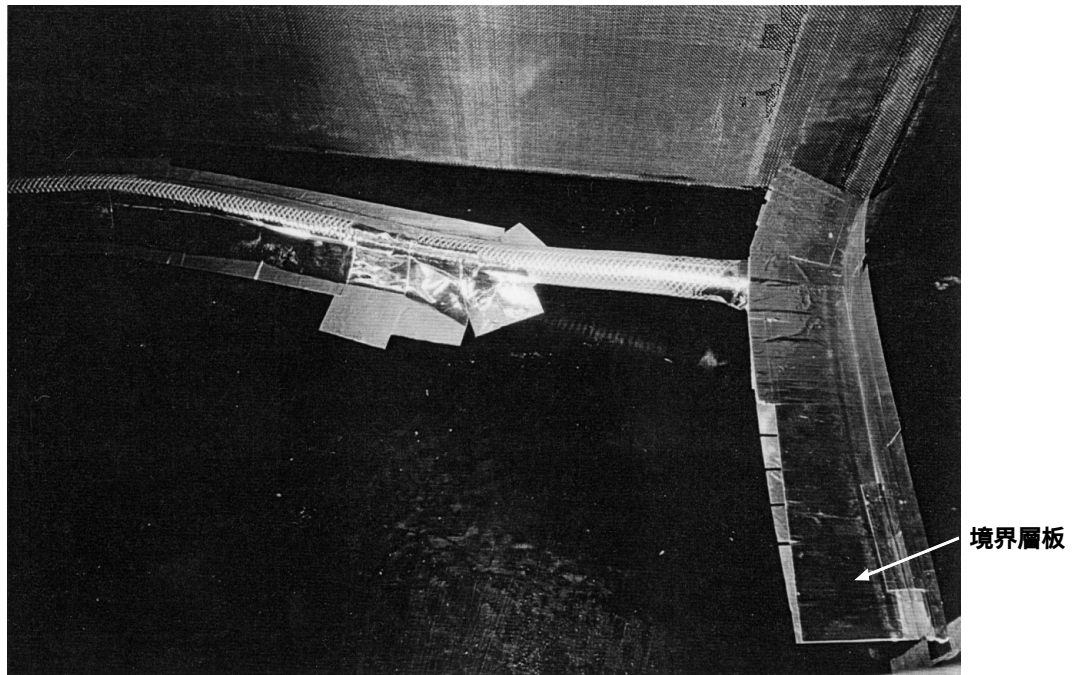


図 8.4 煙供給ホース接続部から上の方に境界層が剥離するのを防止するための境界層板

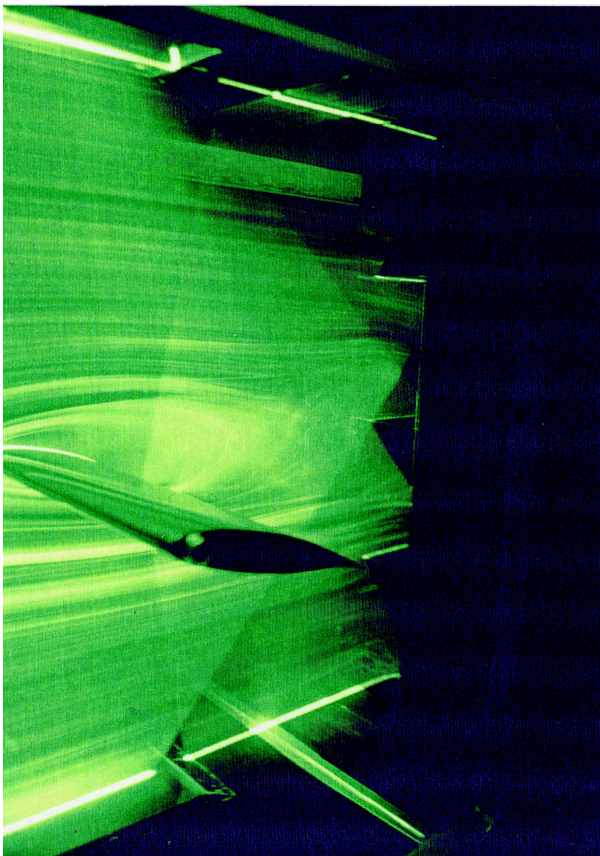


図 8.5 排煙装置使用例

8.4 ビデオカメラと光量

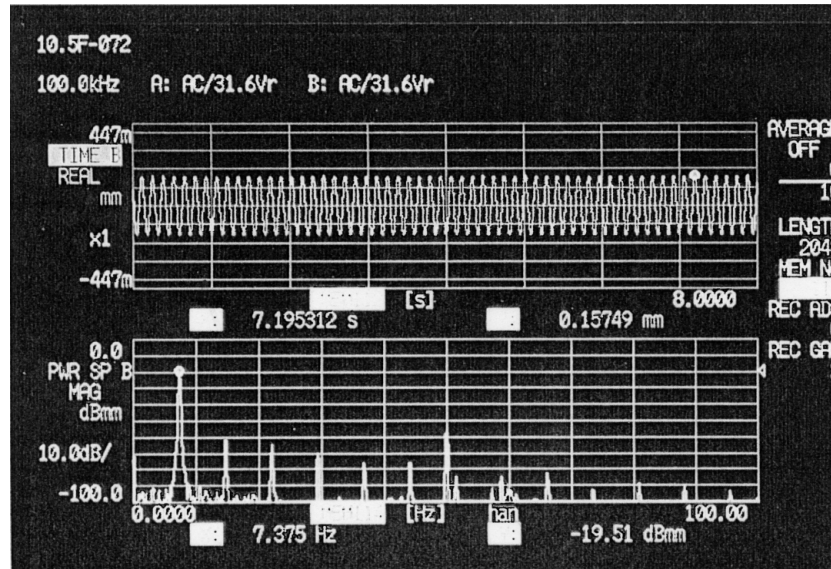
ホームビデオカメラによる撮影は、毎秒 30 フレームでシャッターも遅いため光量としては、ほぼ十分であった。しかし、シャッター速度が $1/4500$ 秒（毎秒 4500 フレーム）の高速度ビデオカメラによる撮影では、かなり光量不足となることが判った。そのために、画像処理による輪郭等の画質改善が必要である。

8.5 その他

- (1) 翼模型の表面から吹き出した煙は、翼表面に沿って流れないで翼面にほぼ垂直に吹き出し、翼の剥離せん断層に入ったので、翼面と剥離せん断層間の気流の流れを見ることは出来なかった。
- (2) 煙のシートが測定部内で左右（カメラから見て前後）に時々 20mm ぐらい変動する。現在この理由は不明である。

9. あとがき

航技研の小型風洞に、前記の新しく開発した煙可視化実験装置（煙吹出装置、排煙装置、翼模型加振装置等）を設置し、実際に翼模型を加振して煙による可視化を試みた結果、風速、加振能力、煙可視化等についてほぼ目的を達成したものの、幾つかの技術課題もあることがわ



風速	9m/sec
平均迎角	16°
加振振幅	± 5°
設定加振周波数	7.3Hz

図 8.6 通風中に翼模型を加振した時のポテンシオメーター出力の振動波形とパワースペクトル

かった。それらの事項について下記に示す。

9.1 達成事項

- (1)「煙吹出装置」と「排煙装置」をそれぞれ集合胴と測定部下流端に準備したことにより回流式の風洞に於いて長時間の連続実験が可能であるうえに、煙を排出するための無駄な労力と時間を必要とせず、長時間実験した場合でも風洞の風路を油煙で汚すのは極僅かである。
- (2)「翼模型加振装置」では3台のモーターをパソコンで制御することにより疑似正弦波加振ができるとともに、実験パラメーターである翼模型の「平均迎角」、「振動振幅」、「振動数」をパソコンの操作画面により短時間に自動変更可能にして実験効率を上げる事が出来る。
- (3)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。なお、シャッター速度が 1/4500s 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。

9.2 今後の課題

- (1) 将来、高速度ビデオカメラを使用できるようにす

るには、さらに出力の大きい照明と高速度ビデオカメラにイメージ・インテンシファイヤを接続して光量増幅することを検討する必要がある。

- (2) 煙のシートが測定部内で左右（カメラから見て前後）に時々 20mm ぐらい変動する原因を明らかにして対策を行う必要がある。
- (3) 煙吹出装置では、風洞利用の制約（風洞壁の加工禁止からくる改修の困難さ、縮流胴内の狭くて、大きい曲率を持つ床面のある所での固定作業の困難さ等）から理想的な設置場所である縮流胴に設置出来なかったのが気流特性を悪くしている。今後、固定方法を工夫して縮流胴に煙吹出装置を設置する必要がある。
- (4) 設置した多層フィルター機能では悪臭を完全に除去できない。今後は、消臭効果の大きい活性炭フィルターの追加等の工夫する必要がある。

おわりに、本可視化実験装置の製作にあたっては、翼模型駆動装置と翼模型の基本設計から据え付け調整までを担当していただいた国際技術開発株式会社の上野康男氏、機械設計と据え付け調整を担当された（有）藤巻設計事務所の藤巻恵一氏、モーターのパソコン制御を担当された株式会社中原設計事務所の田原容氏、翼模型の製

作を担当された(有)みずほ製作所の黒澤秀章氏、煙吹出装置と排煙装置を担当された理化精機工業株式会社(現ツクバリカセイキ(株))の森田政義氏の皆さんに御協力頂いた。この場を借りて、厚く感謝の意を表します。また、当所の工作係の井上育三氏、倉持三郎氏には流量調節弁と風洞の測定部側壁の一部の製作ならびに、本可視化実験装置の据え付け調整の際に発生した作業に御協力頂いた。低乱校正風洞を使用するにあたっては、元空力性能部の萱場重男室長、現空力特性研究部の馬場滋雄主任研究官、中谷輝臣主任研究官、野中修主任研究官、室田勝一主任研究官、星野秀雄主任研究官、現流体科学総合研究グループの高木正平グループリーダー、徳川直子研究員の皆さんに御協力頂いた。現革新宇宙プロジェクト推進センターの吉原正一主任研究官には8 mm ビデオカメラを貸して頂き、種村利春主任研究官には暗室を組み立てる機材を提供して頂いた。アルバイトの山田真一君には実験装置の組立と実験を手伝ってもらった。著者の所属する構造研究部の中道二郎室長には本実験装置の開発する機会を頂いた。

参考文献

- 1) Robert J. McGhee and William D. Beasley; 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 , No.352, (1988/8) .
- 3) A.M.Lippisch; Flow Visualization. Aeronautical Engineering Review, (February, 1958) p.25

航空宇宙技術研究所報告 1402 号

平成 12 年 1 月 発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7 44 1
電話(0422)47 5911 〒182 8522
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1 7 8

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

