

No.18

## 航技研二次元風洞の改修（その2）

## — 風洞計測システムの更新 —

神田 宏、佐藤 衛、須谷 記和、重見 仁（航技研）

Revitalization of the NAL Two-dimensional Transonic Wind Tunnel (Part.2)

Renewal of the Wind Tunnel Instrumentation System

Hiroshi KANDA, Mamoru SATO, Norikazu SUDANI, Masashi SHIGEMI (NAL)

## Abstract

The new instrumentation system of the NAL High-pressure Two-dimensional Transonic Wind Tunnel has been developed since 1995. The system consists of wind tunnel control equipment, measurement equipment, data acquisition equipment, and data processing equipment, whose interfaces are connected each other by the computer network technology. These are newly designed to make highly accurate pressure measurements possible in wind tunnel tests. The data processing equipment has an image processing unit, with which new measurement techniques are expected to be developed for visualized flow images. This paper presents the outline of the new instrumentation system.

## 1. はじめに

1979年に完成した航技研二次元風洞は、運用開始から15年以上を経過して各部の老朽化が進んだことや試験内容の多様化に対応するため、'95年度補正予算を受けて改修工事に着手した。その後、2年にわたる詳細設計及び各コンポーネントの製作が行われ、完成に向けて組立工事が現在急ピッチで進められている。二次元風洞改修計画全体の概要については、第58回風洞研究会議で報告した。<sup>1)</sup>

この改修工事の一環として計測設備が更新されることになり、また既設設備に接続していたデータ処理システムの借入期限も同時期に迎えることから、風洞制御、計測装置及びデータ処理用計算機からなる風洞計測システムを新たに構築することにした。更新にあたっては、データ収集用計算機と風洞設備とのインターフェース(以下、I/Fと記述)を円滑にするために、風洞制御装置と同時期に設計を行って相互の整合性を高めた。また、近年急速に進歩している計算機ネットワーク技術や光エレクトロニクス技術を取り入れ、発展性のあるシステムを目指した。

新しい計測システムは、風洞本体の設置完了を待って機器の搬入を行うため、最終的な構築と調整作業が今年度末になる予定である。このため本発表では、この新しい二次元風洞計測システムの概要について、主にハードウェア構成を中心に報告する。

## 2. 風洞計測設備の概要

二次元風洞測定部の概要を図1に示す。改修前の測定部断面は幅30cm、高さ1mであったが、側壁境界層への対策と作業安全性の確保、及び三次元模型への対応などを狙って幅45cm、高さ80cmに改修された。二次元模型支持部に設置された翼型模型と、上下スロット壁中心に設置された風洞壁干渉量評価用プローブ(静圧レール)から取り出された圧力配管は、プリナム室内の圧力走査弁(SV)または電子式圧力スキャナ(ZOC)に導かれ圧力分布が計測される。翼型模型後方には、ウェークサーベイ用のピトー管が設置されトラバース装置(後流トラバースと呼ぶ)によって伴流分布が計測される。改修前は、側壁に設けられたピトープロ

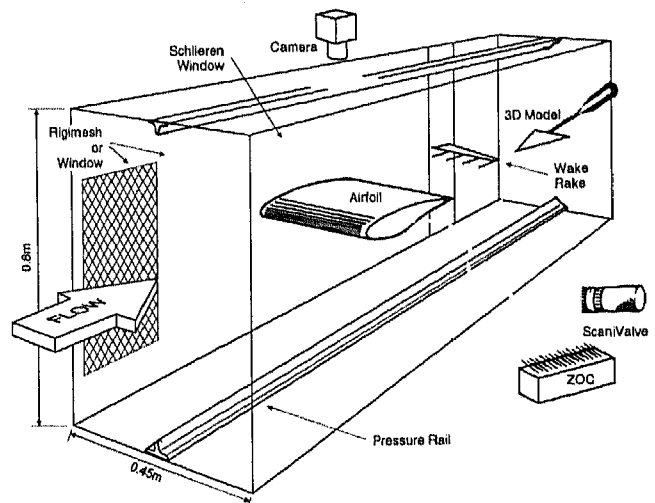


図 1. 改修後の二次元風洞測定部

ープ支持腕貫通溝のエッジトーン効果による気流騒音への影響が指摘されていた<sup>2)</sup>。この対策として新しい後流トラバース装置には、測定部と一体に設計されたスライドプレート方式が採用された。このスライドプレートにはピトープローブ取付座のほか、光学計測用の小型観測窓を設け、LDVなどへの対応を図っている。

二次元模型支持部には直径30cmのシュリーレン観測窓があり、以前はこの窓を焼結金網(リジメッシュ)と交換して側壁境界層吸い込みを行っていたが、これがマッハ数分布への悪影響を生む原因ともなっていた<sup>3)</sup>。そこでシュリーレン観測との両立も考慮し、側壁境界層吸取位置を模型より上流2箇所に変更した。この矩形領域は、観測窓に交換可能である。

今回の風洞改修のトピックとして三次元模型支持装置の新設があげられる。これに伴い、ストラットスティング支持機構の先端に取り付けられる内挿式6分力天秤も計測系とともに準備された。このほか、シュリーレン窓と交換して設置される半裁模型支持装置に取付ける3分力天秤が用意された。

測定部にはこの他、模型上方の-slot壁中央に観測窓があり、可視化試験の際にはこの部分の静圧レーンルを切離して取外せる構造となっている。また、スティ

ングポッド上部には、模型後方からの観測を行う超小型ビデオカメラが装着可能である。

二次元風洞では従来から、これらの計測対象を風洞制御装置で測定される風洞各部の圧力や温度、模型姿勢等の風洞基準データと共に、自動通風シーケンスに従って短時間で効率良くデータ集録を行う計算機システムが整備されていた。図2に通風時の計測タイムチャートを示す。これを実行する計測ソフトウェアは、風洞制御盤や各計測装置から送られてくる圧力や位置データ等のデジタル信号と、各センサーからのアナログ信号を同期して収集するように工夫されていた。

3. 既設システムの問題点と対策

今回更新された計測システムは、データ処理用計算機を中心に考えれば当風洞では3世代目にあたる。別表に旧システムと新システムの比較を示す。

初代のシステムはデータ収集と処理を1台の16bitミニコン(YHP 21MX)で行うもので、ハードウェア性能は初期のデスクトップパソコン程度であった<sup>4)</sup>。このシステムでは、1つのCPUとAD変換器(以下、A/Dと記述)1台で図2に示す4系統のデータ収集を同時に実行していた。このため、データ収集時はハードウェア能力の限界から、リアルタイムOS(RTE-3)のマルチタスク機能を

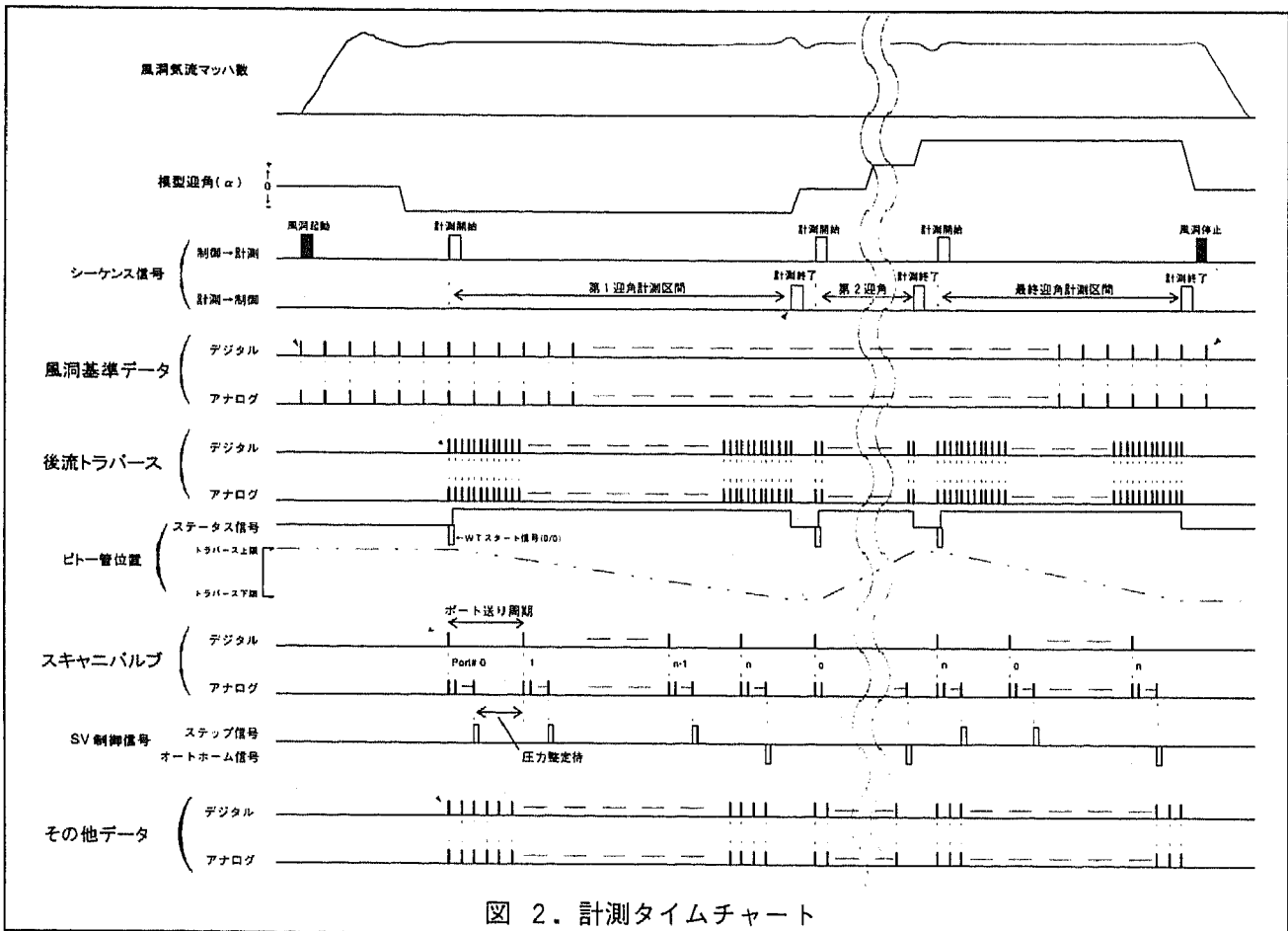


図 2. 計測タイムチャート

止め、他の処理を中断していた。データ処理の際も、メモリアイズの制限からプログラムを分割して記述しなければならないなど、何かと不便な事が多かった。

1990年に計算センターが一括管理している主要風洞の計算機システム更新を受けて、計測データ収集専用の独立したフロントエンドプロセッサ(FEP)を持つデータ処理システムが7年間の借入契約で導入された。収集したデータを処理するホスト計算機には32bitスーパーミニコン(NDG MV/7800XP)が採用され、主メモリおよびハードディスク(HDD)容量とも大幅に拡張された。FEPにはVMEバス規格を採用して、マイクロプロセッサ(MPU)内蔵のA/Dボード6台とデジタルI/O(PIO)ボードを、2台のCPUボードに搭載した小規模リアルタイムOS(pSOS<sup>®</sup>)により制御していた。このシステムは、ハードウェア性能の向上と複数のCPU構成による分散処理を採用した結果、データ収集時の性能が飛躍的に向上した。ホスト部では32bitOS(AOS/VS)の仮想メモリ環境によりプログラムサイズの制限が緩和され、データ処理プログラムの作成も容易になった。本システムは7年間運用されたが、故障頻度も初代に比べて非常に少なく、信頼性の高いシステムでもあった。

今回導入される計算機システムは、この前代のシステムの設計思想を受け継ぐことを前提として機種を選定した。そして、計測設備改修に当たっては、旧システムの問題点を明らかにし、これらの解決をシステム設計の目標とした。以下に、改修前のシステムの問題点とその対策について述べる。

(1) 計測装置はZOCを除いてそのほとんどが運用開始当初から使用しているもので、老朽化による計測精度の信頼性低下や、保守部品の確保が困難なものもあった。従って、これらの計測機器を風洞改修後の仕様に合わせて設計し直し、更新した。

(2) 初代のシステムでは、風洞制御装置から送られる風洞基準データのデジタル信号での受け渡しに問題が多かった。計算機システム代替の際にPIOボードのビット割り付けを工夫して多少改善したが、制御装置側の古いI/F設計による不整合はそのまま残った。今回は、計画当初から制御～計測間I/Fについて検討を重ね、最終的に計算機ネットワーク技術を応用した分散制御用LAN(以下、LONと記述)システムを採用した。

(3) 計測システムを組む上で最も重要となるのは計測精度である。各構成機器の高精度化は勿論であるが、それが直に精度向上に結びつくとは限らない。そこで、システム全体の計測精度維持という観点から、キャリブ

レーションを頻繁に行えるように考慮した。従来の設備でも計測前置装置内の校正切換機構により、電気信号系の校正は通風待機中に容易に行えるようになっていた。圧力計測の要となる圧力センサの校正では、基準となるクォーツ式高精度圧力センサ(DQ)と手動式圧力レギュレータをオペレータが操作して基準圧力を加える方法で行っていた。このため実験準備時に校正用配管作業を毎回行う必要があり、設定圧力の調節にも手間がかかる等の理由で、頻繁に校正を行うことが困難であった。また、準備時はプリナム室を大気開放するため、通風時と同じ圧力環境にならない。これも、計測誤差の要因となる。そこで、自動圧力校正装置を製作し、二次元風洞の特長の一つであるプリチャージ機能を利用して、通風時に近い圧力環境で自動圧力校正を行えるようにした。

(4) 従来のシステムでは前置増幅器や後流トラバースなどの動作設定を各パネルのスイッチで操作していたため、オペレータの操作ミスなどを招き易かった。この対策として、各計測装置を広く普及しているIEEE-488準拠のI/F(通称、GP-IB)で接続し、ほとんどの設定操作をワークステーション(WS)の画面上から行えるようにした。

(5) 近年ではインターネットに代表される計算機ネットワーク技術の発達を背景に、計算機同士の接続が容易に行えるようになった。前代のシステム導入時に当研究所内にも構内LANが整備されて、既にTELNETやFTP等の通信アプリケーションが利用されていた。しかし、当時のOSでサポートできたのは初期の規格のプロトコルであったため、その後に登場したWindows環境で利用できる利便性の良い通信アプリケーションが使用できなかった。そこで、最新のネットワーク環境が標準で搭載されたWSを導入し、複数のパソコン(PC)等と接続することにより、データファイルの共有や分散処理を行うことが可能となった。特に、数値解析結果と風試結果の比較などに有効であると思われる。

(6) 当風洞では流体现象の解明に流れの可視化手法を積極的に利用してきた<sup>5)</sup>。その映像は写真フィルムかビデオテープに記録し、定性的な観測と資料としての保存に留まっていた。最近のデジタル画像機器は目覚ましい進歩をとげており、CCDカメラ等で撮影された映像をデジタル画像として取り扱うことにより、より高度な可視化技術を応用できるようになった。今後、可視化画像を応用した新たな風洞計測技術に対応するため、高精度デジタルカメラ及び画像処理装置を導入した。

4. 新システムの構成

新しい計測システムの全体構成を図3に示す。このシステムは、大きく分けて風洞計測設備とデータ処理設備の2つの設備からなり、計測設備(図の左半分)は、以下の3つの装置で構成される。

(1) 風洞制御装置

風洞制御装置には保守性などの理由から、一般の工業プラント施設に普及している産業用シーケンサを採用している。このシーケンサを内蔵した機側制御盤と風洞監視盤および風洞操作卓は光ファイバによる専用リンク回線で結ばれている。シーケンサには外部出力用のアナログ信号とPIOが用意されており、ここから風洞基準データと呼ばれる圧力等の各信号が計測データ収集装置へ接続されている。風洞監視盤内のシーケンサからは、計測側との同期をとるためのシーケンス信号が出ている。このデジタル信号は、後述するLONと呼ばれる分散制御用LANのI/Oユニットを介して、各計測装置や計測データ収集装置へ接続されている。また、風洞操作卓となる工業用PCには標準LANであるイーサネットが装備され、これを介して計測データ収集装置のWSへ接続されている。

風洞制御装置の運転制御機能の詳細については別の機会に譲り、ここでは言及しない。

(2) 風洞計測装置

二次元風洞の計測装置は以下の機器で構成される。①～⑤の各装置は、次項の計測データ収集装置とGP-IBで接続されている。

① 圧力走査弁制御装置(更新)

スキャニバルブ(SV)の駆動制御装置である。旧設備と同様に4台のSVが接続でき、制御装置パネルとリモート操作器から手動でコントロールできる。また、GP-IB及びPIOによって計算機からの操作が可能である。

② 後流トラバース制御装置(更新)

後流トラバース装置は測定部変更に伴って新規設計となったので、次の機能を追加した。

外部I/Fとして従来のPIOのほかにGP-IBを追加し、移動範囲や速度設定を外部計算機から設定できるようにした。また、リモート操作器を設けた。

③ 計測前置装置(更新)

計測前置装置は風洞内部に設置されたセンサからの微小信号を増幅しデータ収集装置のA/Dへ送る前置増幅器と、この信号系を校正する基準電圧発生器と

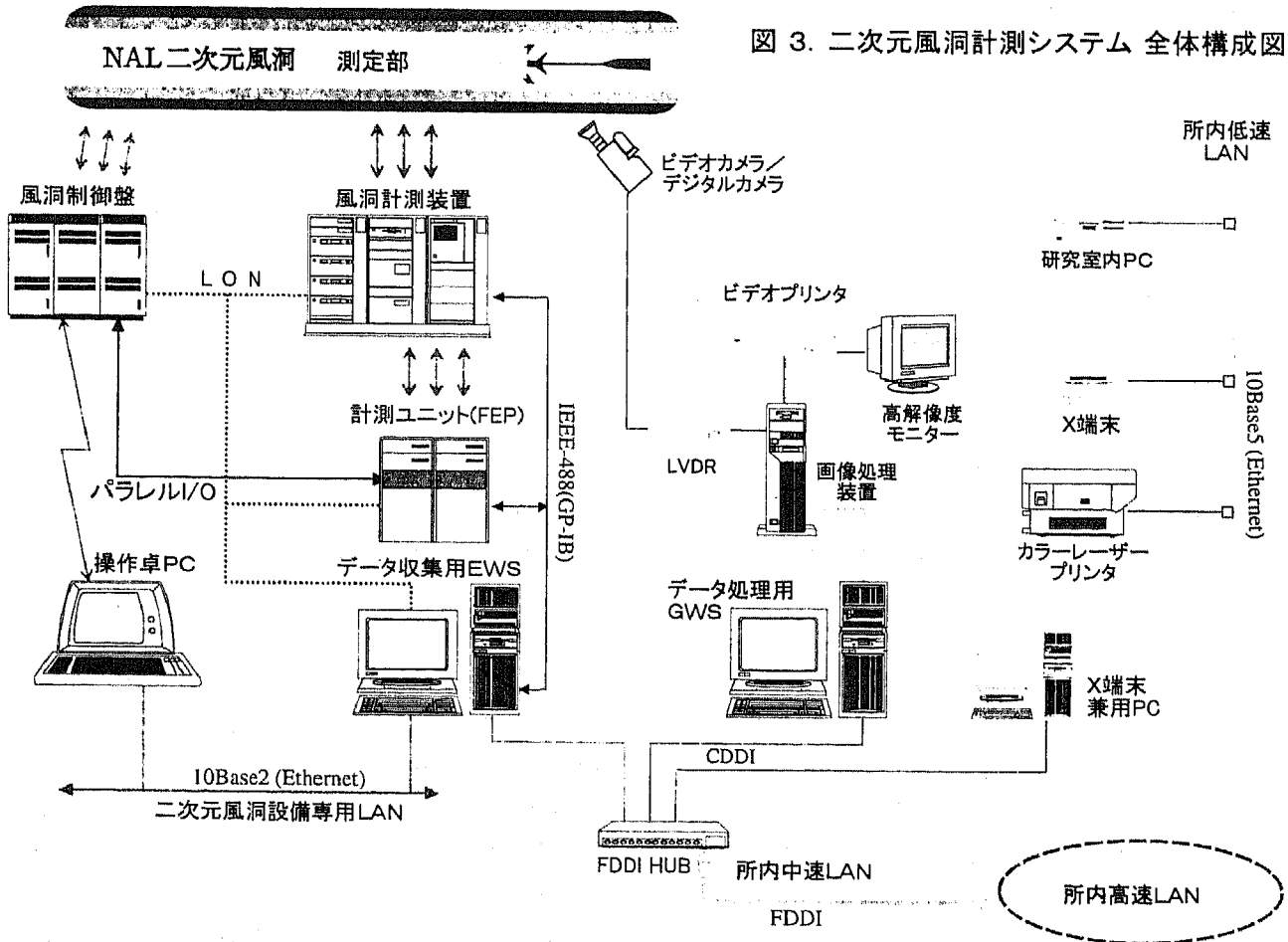


図 3. 二次元風洞計測システム 全体構成図

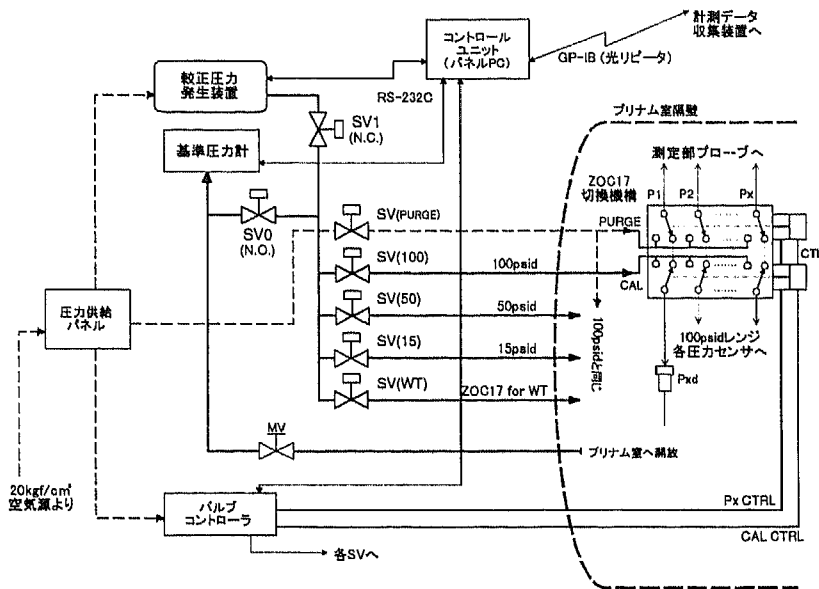


図 4. 自動圧力校正装置 概略図

デジタル電圧計(DVM)及び、モニタ信号切替用ピンボードやペンレコーダなどで構成される。

前置増幅器には、ゲイン、フィルタ、オートバランス、校正切替等の設定をGP-IBによってリモート操作できるプラグイン・モジュール方式のセンサアンプシステムを採用した。1台のシャーシにはアンプモジュール8chを差し込み、合計4台のシャーシを利用して32chまで対応できる。このアンプは半導体ゲージ式圧力センサに最も適合するように仕様を設定しており、非定常現象の測定にも対応するため周波数帯域をDC～100kHzとした。広帯域化に伴うノイズレベルの増加を考慮し、従来は外部リレーボックス方式であった校正切替機構を各アンプモジュール毎に内蔵とした。また、最大ゲインを1000倍に抑え、これ以上の増幅率を必要とする場合はセンサ近傍にプリアンプを設置してS/Nを確保する方針とした。

④ 電子式圧力走査システム (既設)

SVに代わる高速圧力分布計測装置として登場したのがZOCである。当風洞ではPCを用いたスタンドアロンな計測システム(HyScan2000)が導入され、試験的に運用していた。導入当初は校正ユニットが高圧仕様に設計されていなかったため、高レイノルズ数での試験時に不具合が生じていた。該当ユニットの各部品を高ライン圧用に改修してプリチャージ状態での校正が可能となり、試験運用を行って計測精度の評価をしている。現時点で、通常の翼型圧力分布試験ではSVと同程度の測定精度が得られ、計測時間がSV使用時の約1/3に短縮可能である。このシステムは、GP-IBで接続された外部計算機から操作できる。

⑤ 自動圧力校正装置 (新設)

MPU内蔵の自動圧力発生装置(PPC2)とプリナム圧力を計測する基準圧力計(RPM)、圧力レンジ毎に4系統に分けられた配管系統を切り換えるバルブコントローラ、及びこれらを制御するパネルPCから構成される。図4に概略を示す。本装置は約1.3MPaまでの高圧環境下で任意の差圧を発生することが可能である。本装置単体で運用できるほか、GP-IBにより計算機からリモート操作が可能である。PPC2およびRPMともにDQを内蔵しており、校正時には2つのDQのオフセット誤差の除去を行う。

⑥ 風洞天秤 (新設)

三次元支持装置の新設にともない、全機模型用内挿式6分力天秤および半裁模型用3分力天秤を各1台装備した。表1に仕様を示す。

各天秤から取り出されたケーブルは、耐圧シールコネクタを経由して風洞脇に設置された二次校正器へ接続される。ここから各エレメント毎に10倍のゲインを持つ差動型プリアンプを経由して計測室に設置された前置増幅器の入力端子へ平衡出力される。このプリアンプには、専用励起電源が内蔵されており、励起電圧は計測前置装置のマルチプレクサを経由してDVMで測定が可能である。

(3) 計測データ収集装置

風洞制御装置および各計測装置からのデータを処理する計算機システムである。本装置は以下の機器で構成される。(図5. 参照)

① エンジニアリングワークステーション(EWS)

計測メインコンソールとして各計測装置とFEPの制御及び風洞操作卓PCとの通信を行い、集録した生データの一次処理とモニタ表示を行う。このシステム(東

表 1. 風洞天秤の仕様

定格負荷	6分力	3分力
Fx [kgf]	80	100
Fy [kgf]	400	-
Fz [kgf]	400	200
Mx [kgf-m]	6	-
My [kgf-m]	20	15
Mz [kgf-m]	20	-
定格出力(10V励起)	約 7.5mV	約 5mV
非直線性	±0.3%FS	±0.5%FS
ヒステリシス	±0.3%FS	±0.5%FS
許容過負荷	±120%FS	±120%FS

芝 FW2000)は、Sun Microsystems社のWSをベースに産業用として信頼性と保守性を強化した計算機である。表2に主な仕様を示す。プログラム開発環境としては、C及びFORTRAN言語、及びGUI環境でプログラミングを行う汎用計測ソフト開発ツール(LabVIEW)がインストールされており、風洞試験データ収集とは別に、予備実験などに必要な計測プログラム開発が可能である。

② 計測ユニット (FEP)

風洞制御装置や計測装置からのアナログ及びデジタル信号を、図2のタイムチャートに従って収集するFEPである。メインフレームはVME/VXIバス規格準拠のシャーシに32bitMPUと16MBメモリを搭載したユニバーサル計測ユニット(横河Model 3585-31)である。本装置には、各ch毎にA/Dを搭載したアナログ入力ボード8枚(64ch)とPIOボード8枚(8+8ch)がメインフレーム2台に装着されている。GP-IB経由でEWSからのコマンドに従って、各ユニットに搭載されたOS (pSOS+)によってリアルタイムデータ収集を行うことができる。

③ Local Operation Network (LON)

制御装置や計測装置と計測データ収集装置との接続を簡略化するために、分散型制御ネットワークシステム(LON)を採用した。LONはEWSの拡張スロット用I/F(ISA-LON)から、1対のツイストペア線と同期信号用光ファイバケーブルでネットワーク接続されたI/Oユニットで構成される。LONで接続される機器は、風洞

監視盤、SV制御装置、後流トラバース装置、及びFEPである。風洞監視盤からの通風シーケンス信号に従って、各機器の制御とデータ転送が各I/OユニットのLONチップ内にプログラムされた手順で行われる。

(4) データ処理設備

前代の32bitミニコンによるデータ処理システムの代替として7年間の借入契約で導入された汎用計算機システムである。本設備は特に画像処理機能を強化し、以下の機器で構成される。

① グラフィックス・ワークステーション(GWS)

EWSと所内中速系LAN (FDDI)で接続され、風洞試験データの二次処理と可視化画像データ処理を行うWSである。機種選定に当たりEWSとの整合性及びグラフィック性能を重視したGWS(Sun Ultra2 Creator3D)を採用した。主な仕様は、表2を参照されたい。

GWSには、C及びFORTRAN言語によるプログラム開発環境、GUI画面でアプリケーション開発を行う三次元可視化ツール(AVS Viz/Express)等がインストールされている。

② 画像処理装置

最新の可視化技術を応用した画像計測方法を開発するために、ビデオ機器やデジタル画像機器の映像を解析する装置を導入した。本装置には、標準的なNTSC方式のビデオ信号のほか、ハイビジョン(HDTV)や最近急速に進歩しているデジタルカメラなどに対応できる汎用画像処理装置(nexus9000)を採

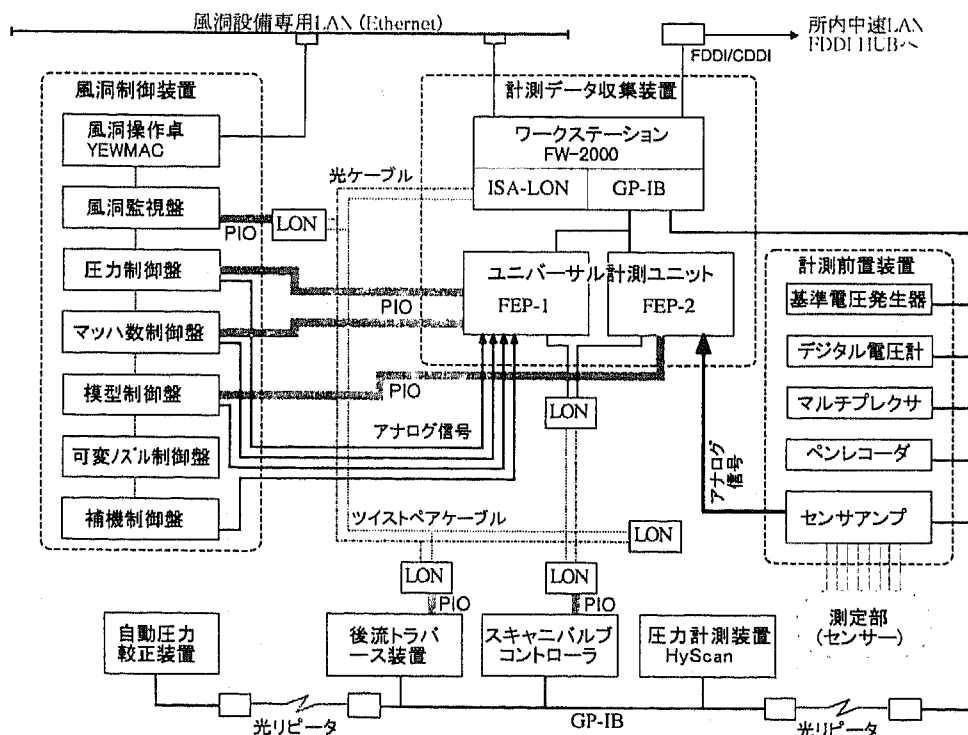


図 5. 計測データ収集装置 接続図

用した。この装置は最大で8192×4096画素×32bitの画像メモリ空間を任意サイズの画像ウィンドウとして分割定義でき、パイプライン型DSP4個と300MB/sの転送速度を持つ内部バス・アーキテクチャにより高速画像演算が可能である。また、ディスプレイ用アクセラレータにより、ズーム/スクロールやレイヤード等の画面表示が可能である。本体には、256MBの拡張画像メモリが搭載され、3CCDビデオカメラ(640×512画素)のRGB信号(各8bit)をリアルタイム(30Hz)で入力した場合、最大192フレーム(6.4秒)分のカラー動画像が非圧縮で取得可能である。なお、HDTV信号(1920×1024画素×8bit×3)で入力した場合は最大32フレーム(約1秒)となる。本装置とGWSは、ダイレクトメモリマッピング方式のI/Fで接続されており、テキスト形式のコマンドを送ることにより、画像入力や各種画像間演算及び高速画像データ転送が可能である。

現在、本装置をAVSの画面上から操作する画像処理モジュール群を作成中である。これが整備されると、高度なプログラミング知識が無くとも比較的容易に画像処理アルゴリズムの開発が可能となる。

③ X 端末兼用 PC

GWSやEWSのグラフィック端末(X-Window)としての機能を有するミニタワー型PC(digitalPC CELEBRIS GL6200)である。主な仕様は、表2を参照されたい。OSには広く普及しているWindowsを搭載し、Xサーバ・ソフトによりWSのX端末として利用できる他、NFSやFTPによりWSとのファイル共有が可能で

ある。アプリケーションには、汎用データ解析ツールや画像変換ツールの他、CADやDTPソフトをインストールしてWSの機能を補完している。

④ ネットワーク・カラープリンタ

EWSとGWS及び研究室内のPCから共有できるネットワークプリンタとして、カラー・レーザープリンタ(Tektronix Phaser550JX2)を導入した。最大で1200×1200dpiの解像度を持ち、ディザ法によるフルカラー印刷が可能である。用紙はA4サイズのPPC及びOHPシートが使用できる。本プリンタは、所内低速LANを介して各計算機に接続される。

⑤ デジタルカメラ

高精度画像計測用として冷却CCD型デジタルカメラ(浜松ホトニクスC4880)を導入した。このカメラは高解像度で高分解能のモノクロ撮影が可能である。

このほか、カラー撮影用としてデジタルスチルカメラ(FUJIX HC-2000D)を導入した。これは、流れ可視化試験の写真撮影を電子化し、デジタルデータとして画像処理を可能とする。

二次元風洞で使用できる主なCCDカメラの仕様を、表3に示す。

5. 主な改修内容

旧設備との主な相違点を以下に述べる。

(1) 風洞制御装置とのI/F

従来はPIOにBCDコードを用いていたため、整数1ワード(16bit)では10進数で4桁しか表現できない。今迄は制御装置のA/Dが12bit精度であったのでほとん

表 2. 各計算機システムの仕様

システム	風洞操作卓PC	計測ユニット(FEP)	データ収集用EWS	データ処理用GWS	X端末兼用PC
モデル名	YEWMAC 530	3585-31 S3	FW 2000	Ultra2 Creator3D	CELEBRIS GL6200
CPU	MC68030 (33.3MHz)	MC68040 (25MHz)	Super SPARC (40MHz)	Ultra SPARC (167MHz) x 2	Pentium Pro (200MHz)
メモリ	16MB	16MB	80MB	256MB	192MB
HDD	480MB	なし	内蔵 2GB+外付 2GB	内蔵 2GB x 2	内蔵 2GB x 2
Media	3.5" FDD	- -	5" MO	3.5" MO, DDS2/DAT	3.5" MO(640MB)
LAN	Ethernet (10Base5)	GP-IBで ホストへ接続	Ethernet (100Base) FDDI(MIC)	Ethernet(10/100Base) FDDI(MIC)	Ethernet(10/100Base) CDDI
その他I/F	RS-232C, PIO ML bus(シーケンサ用)	A/D, PIO, D/A Interval Timer	GP-IB, LON I/F SCSI, RS-232C	UltraSCSI, RS-232C ダイレクト-BUS I/F	SCSI-2 RS-422
CRT	14" カラー	なし	20" カラー	20" フルカラー	21" フルカラー
OS	YM-DOS2	pSOS*	OS/FW(Solaris 2.*) OpenWindow, TCP/IP	Solaris 2.5, CDE OpenWindow, TCP/IP	WindowsNT4.0 Windows95
アプリケーション	YM-BASIC/H	(ユニバーサル計測 ユニット 2台) LabVIEW	C, FORTRAN LabVIEW Netscape Navigator	C, FORTRAN77 AVS Viz/Express	C, FORTRAN90 Visual C++ Chameleon NFS/X PV-Wave, AutoCAD PhotoShop, MS-Office

どのデータが4桁以内に収まっていたが、一部は桁数が不足したり符号やステータス信号のために、必ずしも1つのデータがPIOカード1chに対応していなかった。これが原因となってデータの桁落ちやビットの欠落などが生じ、その補完のため処理プログラムが複雑化していた。制御精度の向上に伴いデジタル信号は16bit精度になったため、BCDコードをやめ、CPUで扱われる整数と同じバイナリフォーマットとした。これで、デジタル信号1chのデータが整数1ワードに対応し、処理プログラムが簡略化できた。

また、データ収集装置のPIO信号はch数が多いため装置間配線が煩雑化する。この点を改善すべく、新たなデジタルI/F方式を採用した。従来のPIO方式の代用として、一般的なシリアルI/FやLAN等が考えられるが、リアルタイム性を有する用途には向かない。改修計画当初、フライトシミュレータ等に利用されているCPU間結合方法の1つで、各ノード上のデュアルポートメモリを光ファイバケーブルで接続する共有メモリ方式が、高速性やノイズ環境に優れていたため採用を検討した。しかし、一般の制御機器用I/Fは製品化されていないため、特別なアーキテクチャで制御系を組む事になる。このため、コストがかかり開発要素も多いので他の方式を再検討した。その結果、分散制御用に開発されたネットワーク技術であるLONのPIOユニットを各装置のI/Fに接続する方法を採用した。但し、通風時の風洞基準データ(16bit×8ch)については、アナログ信号との同期性確保という点から、従来どおりのPIO方式としている。

LONは米国Echelon社によって開発された分散制御技術で、LONチップ(Neuron Chip)内にファームウェア化されたプログラムにより、ツイストペア線などの通信メディアで接続された各ノード間でパケット通信を行

う。通信プロトコルはLONTALKと呼ばれるISOのOSI参照モデルに基づく完全7層プロトコルである。ノードとしては用途に応じたI/Fを内蔵した各種I/Oユニットや、計算機拡張スロットに挿入するI/Fボードが用意されている。通信処理はすべてNeuron Chipが行うためユーザーは意識する必要はない。各ノードに内蔵されたLONチップ間の伝送速度は1.25Mbpsであるが、イーサネットに比べるとオーバーヘッドが小さい。制御装置のPIOと接続した場合の伝送遅れは数ms程度で、従来はリレーを介していた通風シーケンスなどのイベント信号の伝送には十分な転送速度である。

その他、運転条件等の静的なデータの通信には、構内LANとは別に、二次元風洞設備専用LANとして敷設したイーサネットを利用する。これは、操作卓PCとEWS間の通信に用いるほか、将来、MPU内蔵のインテリジェント型計測機器との通信にも利用可能である。

## (2) 計測精度向上と運用の合理化

圧力計測精度の向上をめざして、自動圧力校正装置を導入した。本装置は、ZOCによる圧力計測システムの実績を基に、SVや後流トラバース等で使用される差圧型圧力センサを、計測時と同じ高圧環境下で校正するために新たに製作した装置である。ZOCに用いられている圧力切換弁モジュールを本装置からコントロールすることによって、プリチャージ状態でも自動校正することができるため、計測精度の向上が期待できる。

また、各計測機器はほとんどの機能をWSから操作することができるため、通風条件によって決定される機器パラメータの半自動設定が可能になった。現時点では、Cp測定系統の前増幅器ゲインを気流条件に応じて最適に設定するサブルーチンを組み込んでいる。今後ソフトウェアを整備することにより、後流トラバース装置動作パラメータ設定の半自動化等が期待できる。

表 3. CCDカメラの仕様

メーカー・型番	東芝 IK-UM42	池上通信機 MKC-303A	FUJIX HC-2000D	浜松ホトニクス C4880-07
CCD有効画素数 (水平×垂直)	768 x 494 (1/3"IT,単板色差フィルタ式)	772 x 492 (1/2"FIT,3板式画素ずらし)	1280 x 1000 (2/3"VT3板式,正方面素)	1000 x 1018 (FT方式,12μ正方面素)
量子化ビット数	CCU内部で10bit処理 S/N 46dB	RGB各8bit (nexus使用時) カメラ部S/N 60dB	RGB各10bit (LUT処理後8bit)	14bit (高精度モード) 10bit (高速モード)
フレームレート (画面/秒)	約30(NTSC準拠) (インターレース)	約30(NTSC準拠) (インターレース)	0.5 (最大12フレーム)	0.25 (高精度モード) 7 (高速モード)
記録媒体	VTR, ビデオプリンタ nexus画像メモリ	VTR, LVDR nexus画像メモリ	PCメモリカード, 3.5" MO SCSI-2 I/FでPCIに接続	専用I/FでPCIに接続 RS-422でnexusに接続
その他特長	超小型ビデオカメラ (スティングポッドに取付)	3CCDビデオカメラ	3CCDデジタルカメラ	真空封切り冷却CCD CCD温度≥-40°C
主な用途	ペーパースクリーン 模型監視等	カラーシュリーレン 動的な現象	感温液晶 UVオイルフロー	感圧塗料 感温塗料



### (3) 流れ可視化画像処理

当風洞のプリナム室内で可視化試験の写真撮影を行う場合、10気圧以上の高圧環境となるため、機材の保護とピントずれ防止から耐圧ハウジング内にカメラを収納する必要がある。このため撮影状況の確認が大変不便で、フィルム交換作業も困難である。そこで、デジタルスチルカメラを導入し、オイルフローや感温液晶等の写真撮影を電子化して画像処理を可能にした。

近年、ある種の蛍光物質を風洞模型に塗布し、励起光照射時のルミネセンス強度を計測して、模型表面上の圧力分布や温度分布を画像データとして測定する風洞計測技術が開発されている<sup>6)</sup>。このような画像計測法に通常のビデオカメラを用いると、解像度やダイナミックレンジの不足、回路の非線形性等のため、十分な計測精度が得られない。そこで、冷却CCD型デジタルカメラを導入した。このカメラは高解像度・高分解能であり、長時間露光可能なシャッター機構と、CCD素子を-30℃以下に保つ冷却構造によって低照度における高感度撮影が可能である。

改修工事では、これらのカメラを収納し模型上方の観測窓に設置する大型カメラ用耐圧ハウジングを新たに製作している。また、上記のデジタルカメラやビデオカメラで撮影された可視化画像をデジタル化して、ノイズ除去やシェーディング補正、幾何学的歪補正などの映像処理を行い、最終的に現象の抽出や定量的な画像計測を目的として、新たに画像処理装置を導入した。本装置は次世代テレビジョン規格であるHDTV信号にも対応できる。将来、ハイビジョンカメラを導入すれば、さらに高解像度での撮影が可能となる。当風洞では、設置スペースの制限で高倍率ズームレンズが使用できない。ハイビジョンカメラとズーム表示機能を併用すれば、微細な現象も可視化し易くなる事が期待される。

### 6. まとめ

二次元風洞改修の一環として老朽化した制御装置と計測装置を更新することになり、また計算機システムと同時に設計できる機会が与えられた。これを機に風洞計測システムとして一貫した設計を行い、旧設備での課題を解消すべく新たな技術を探り入れたシステムを構築した。本システムの特徴を以下にまとめる。

- (1)各装置間および計算機システムとのI/Fの整合性と拡張性を両立するため、LAN技術を応用した。
- (2)オペレーションの合理化を図りつつ計測精度を向上するために、自動圧力校正装置を導入した。
- (3)可視化手法を用いた新しい風洞計測技術に対応

するため、高精度のデジタルカメラと画像処理装置を導入した。

本システムは構築途中であり、システムの完成に向けて現在、下記の作業に取り組んでいる。

- ① データ処理ソフトウェアの整備。
- ② 画像解析用ソフトウェアの整備。
- ③ 自動校正及びデータ集録機能の確認。
- ④ システム運用手順の確立。
- ⑤ 総合的な計測精度の評価。

最後に、二次元風洞計測システムの更新にあたっては、各装置の設計・製作を請け負った関係各社の御協力を得た。特に風洞制御・計測装置間I/Fの設計に当たった川崎重工業(株)原動機事業部、計測データ収集装置を製作した東芝エンジニアリング(株)、及び自動圧力校正装置を製作した(株)大手技研の各社担当者の努力に対し、感謝の意を表したい。

### 参考文献

- 1) 重見 仁、神田 宏、佐藤 衛、須谷 記和「航技研二次元風洞の改修」：第58回風洞研究会議 (May. 1997)
- 2) 榊原 盛三、三輪 等、小国 保男、佐藤 衛、神田 宏「航技研二次元風洞の気流特性について (II)」：航技研報告 TR-836 (1984)
- 3) 須谷 記和、神田 宏、佐藤 衛、馬場 滋夫、三輪 等、河本 巖、高橋 秀明「航技研二次元風洞における側壁境界層吸取時のマッハ数分布について」：日本航空宇宙学会 第21期年会講演集 (1990)
- 4) 空気力学第二部「航技研二次元遷音速風洞の構造と特性」：航技研報告 TR-647 (1980)
- 5) Sudani N., Noguchi M., Kanda H., Sato M., Ishida Y. "Visualization of Boundary-Layer Transition on Transonic Airfoils Using Liquid Crystal Coatings": 7th International Symposium on Flow Visualization, Seattle, Washington USA (Sept. 1995)
- 6) 浅井 圭介、飯島 由美、神田 宏、李 相京、大倉 一郎「各種の感圧塗料のサンプル特性試験」：第25回可視化情報シンポジウム、可視化情報Vol.17 Suppl. No.1, (July. 1997)

二次元風洞計測設備の新旧比較

別表.

比較項目	第1世代 ('79~'89)	第2世代 ('90~'97)	第3世代 ('97~現在)
CPU 主記憶容量 HDD, ハックアップ媒体 データ出力 データ通信 AD変換器	16bitミニコン(リアルタイムOS) 192KB(収集と処理を1台で兼用) (10MB固定+10MBカーソル) x 2台, MT(800bpi) ラインプリンタ, X-Yプロッタ(4色) 構内モデム(4800bps)による大型機との接続 12bits ±10.24V 45kHz(DMA時) 1台 マルチプレクサ式全48ch	MC68020(17MHz)x2, 12MB (VME BUS, pSOS*) 32bitミニコン(データ処理), 6MB 140MB x 2台, MT(800/1600bpi) レーザプリンタ, X-Yプロッタ(8色) 構内LAN(10Base5), TELNET, FTP 14bits 0~10V 50kHz/8ch 1台 14bits ±10V 50kHz/8ch 3台 12bits ±10V 200kHz/16ch同時S/H 2台 D/I 22+2ch D/O 15+1ch (16bits/card) PIT → AVDTリガとCPU割込 → D/I	MC68040(25MHz), 16MB(VME/VXI) x 2台 UNIX WS, 80MB(圧力等), 256MB(画像) 2GB x 4台, MO(5" & 3.5"), DDS2/DAT, FDD カラーレーザプリンタ(Network接続) 室内(Ethernet)+所内(FDDI), NFS, HTTP 16bits ±1/2/5/10V(PGA) 100kHz/ch 8ch同時サンプリング x 8台 = 64ch (同chに監視用低速A/D内蔵MPX式5Hz) VME 8+8ch LON 15+7ch (2Byte/card) LON → AVDTリガ → D/収集後パケット転送
デジタルI/O(PIO) 同期方式	D/I 24+2ch D/O 11+1ch (12bits/card) PIT → CPU割込 → プログラム → A/DとD/I	14bits Max 24ch (0~10V/8ch, ±10V/16ch) BCD 3~4.5桁 1~12ch 1~1000ms (10ms標準)	16bits ±1~10V, 1~24ch同時サンプリング 16bits, 2の補数表現, 1~8ch(VME) 10~1000ms
風洞 基準 データ 伴流分布 圧力分布	12bits ±10V 14ch固定 BCD 3~4.5桁 5ch固定 10~1000ms (50ms標準) 12bits 9ch固定 BCD 4桁+符号, ステータス D/Aを併用 5~20ms (20ms標準) 位置: BCD PIO 圧力: 12bits 4ch固定 ミニコンのCPU 電子式スキヤナは無	12bits ±10V 1~16ch同時S/H BCD 4桁+符号, ステータス 1~3ch D/Aは不要 0.5~500ms (5ms標準) 位置: BCD PIO 圧力: 14bits 1/2/4/8ch FEPのCPU ZOC14 100psid(96port), 15psid(96port)	16bits ±1~10V 1~16ch同時サンプリング 16bits, 2の補数表現+ステータス, 2ch(LON) 0.5~100ms, Max.4000点 位置: LON&GPIO 圧力: 16bits 1~8ch LONユニット HyScan2000 (GP-IB接続)
その他 データ	12bits 21ch固定 なし 10~500ms (100ms標準)	12bits 200kHz 1~16ch同時S/H 16bits 0~4ch 5μs~1ms(A/Dのみ)~1000ms (D/I同時)	16bits ±1~10V 1~16ch同時サンプリング 16bits 0~7ch(LON) 0.1~500ms (D/I同時)
計測前置装置	計測前置装置(BCD等パラレルI/F接続) 前置増幅器 DC~15kHz, 機械式オートバランス 全24ch, オートバランスのみリモート可 外付校正切替器(リレーボックス式)	(一部改修) 基準電圧発生器、デジタル電圧計 の更新(GP-IB接続)	前置増幅器 DC~100kHz, 電子式オートバランス (GP-IB接続) 全32ch, フルリモート制御 モジュール毎に校正切替リレー内蔵 マルチプレクサ付DVM(励起電圧測定用)
圧力変換器校正	手動式レギュレータによる圧力設定 大気圧基準	校正プログラムによりリルーチン化	自動校正装置(GP-IB接続) プリチャージ状態で校正可能
力計測	6分力天秤(円弧翼ストラット支持)試用	3分力天秤(側壁支持)の試験運用 信号系は従来の系統を流用	6分力天秤(三次元支持装置)の新設 3分力天秤(半載模型用)の設置 風洞脇に専用電源とリアンプを設置
流れ可視化	35mmFilm, VTR(カラー・シユリーレン) モノクロビデオカメラ(オイルフロー)	3CCDビデオカメラ(液晶, UVオイルフロー) カラービデオプリンタ	デジタルカメラ(感圧・感温塗料) 画像処理装置(NTSC, HDTV, RS-422信号対応)
備考	風洞本体・制御装置とは分離設計	データ処理装置の更新(他風洞と一括)	風洞本体・制御装置と一括設計