

No.17

航技研 1 m × 1 m 超音速風洞における高速多点圧力計測装置の導入

浜本 滋、 楯 篤志、 渡辺 光則
野田 順一、 原 亘利、 石田 洋治 (航技研)

Installation of the High Speed Pressure Acquisition System
in the NAL 1m×1m Supersonic Wind Tunnel

Shigeru HAMAMOTO, Atsushi TATE,
Mitsunori WATANABE, Junichi NODA,
Nobutoshi HARA, Yoji ISHIDA (NAL)

Abstract

The High Speed Pressure Acquisition System by "ZOC HyScan 2000" (Scanivalve Corp.) was installed in the NAL 1m×1m Supersonic Wind Tunnel in the end of FY1995. The system has been actively in operation since May, 1997, after some preparation works consuming about one year. The performance of the system is examined in this report, comparing with the conventional mechanical pressure scanner. The new system yields a dramatic rise in data productivity while the accuracy is kept satisfied.

1. はじめに

航技研 1 m × 1 m 超音速風洞 (以下「超音速風洞」) では圧力分布測定試験における圧力計測の高効率化をねらい、平成 7 年度末に高速多点圧力計測装置を整備した。その後、同装置を超音速風洞でのデータ計測に適応させるため、風洞ストラット内部へのモジュール配線の敷設工事および制御圧力系の各種の調整を経て、平成 9 年度はじめから本格的な運用に入った。現在 (平成 9 年 1 1 月) まで、HSCT 超音速圧力試験 (平成 9 年 5 月、試験運用)、宇宙往還機模型ガスジェット干渉試験¹⁾ (同 5 月)、および風洞特性試験 (同 7 月) に使用し、順調に成果をあげてきている。

本報告では高速多点圧力装置の概要を説明するとともに、従来のロータリーソレノイドによ

る機械式圧力走査器との比較を通して同装置の性能の評価を行う。高速多点圧力計測装置の導入により、満足しうるデータの精度を確保しながら計測効率の飛躍的な向上が実現された。

2. 高速多点圧力計測装置の概要

2. 1 システムの概要

今回導入した高速多点圧力計測装置は米国スキャニバルブ社製の ZOC HyScan 2000 システムである。同システムは圧力センサーとして電子式圧力走査 (EPS: Electronic Pressure Scanning) モジュールを用い、IBM 互換 PC を中心に構成される計測システムで、圧力センサーの較正、制御を自動的に行って複数ポートの圧力を高速に走査しながら計測を行う。図 1 に超音速風洞における高速多点圧力計測装置の位置づけを示す系

統図²⁾を、図2に ZOC HyScan 2000 システムの構成図を示す。

ZOC HyScan 2000 システムはコントローラ(DOS/V PC)、ZOC インターフェイスモジュール(IFM2000)、サーボ圧力較正器(SPC3000)、制御圧力モジュール(CPM3000)、ケーブルサービスモジュール(CSM2000)により構成されている。

コントローラ及びインターフェイスモジュールは風洞制御室に設置してあり、同システムのオペレーションを行う。サーボ圧力較正器および制御圧力モジュールは外部コンプレッサーから空気(7kg/cm²)の供給を受けて動作するため、風洞室内の JIS ラックに収納された ZOC エンクロージャーに実装されている。コントローラとサーボ圧力較正器はシリアルポート(RS-232C)経由のトランシーバで接続されており、コントローラから直接較正器を制御している。ケーブルサービスモジュールはインターフェイスモジュールと EPS モジュールを中継するもので、風洞本体上部に設置して同装置からの信号線(2系統)を風洞ストラット内部に引き込んである。また、風洞ストラット内部にはサーボ圧力較正器および制御圧力モジュールからの圧力用配管(4本)も引き込んであり、試験時の準備作業は EPS モジュールへの配線(コネクタ接続)、配管のみとなる。

計測システムの性能としてはカタログ値で最大 50,000EU(Engineering Unit)/sec となっているが、通常一般の運用では 10,000EU/sec で計測を行っている。ここで EU は 1 ポート 1 回分の測定データである。

2. 2 EPS モジュール

EPS モジュールはポート数分の差圧型の圧力変換器を内部に組み込んだモジュールである。従来風洞試験での圧力計測に用いてきた機械式圧力走査器(通称「スキャニバルブ」)と EPS モジュールを比較するため、各々の概略を図3および図4に示した。

図3に示したスキャニバルブは複数の圧力ポートに対して1台の圧力変換器を使用するため、圧力変換器に接続された配管と、圧力ポートから導かれた配管を機械的に切り替える仕組みになっている。一方、図4に示した EPS モジュールでは圧力ポート分の圧力変換器を内装しており、走査は各圧力変換器からの電気信号に対して行われる。さらに EPS モジュールでは圧力制御モジュール(CPM)からの空気圧により圧力変換器に接続されている圧力ポートを測定圧力と較正用圧力のいずれかに切り替えることができるようになっている。これによりオンラインでの較正が可能となっている。

今回整備した EPS モジュールの一覧を表1に示した。また、図5には ZOC22B および ZOC33 の写真を示した。表1にあるように、モジュールとして EPS モジュールの他に EIM (Electrical Input Module)モジュールを1つ用意した。この EIM モジュールは EPS モジュールでの圧力計測と同時にアナログ電圧信号を取り込むためのもので、圧力計測に付随する風洞基準量などのデータの取得を可能にしている。

EPS モジュールに組み込まれた圧力変換器は ± 15 psi (約 100kPa) の差圧型で、精度は $\pm 0.08\%$ F.S. が保証されている。この精度を圧力に換算すると ± 0.16 kPa である。差圧型であるため、基準圧近辺の圧力を測定する場合は誤差が大きくなる。また、温度変化の影響は Zero Shift が 0.10% F.S./°C、Sensitivity Shift が 0.05% F.S./°C となっている(ともにカタログ値)。精度については表2にスキャニバルブで通常用いる PDCR23 との比較として値をまとめた。EPS モジュールの圧力変換器では PDCR と比較して精度は多少劣る程度であるが、温度変化の影響は大きく、特に零点のずれは基準圧付近の精度の劣化と合わせて注意が必要である。

EPS モジュールには温度変化の影響を少なくするためにモジュールの温度を一定に保つためのジャケット(TCU: Thermal Control Unit)が用意

されており、ZOC22B、ZOC33 各1台ずつはジャケットに内装されている。ただし、このジャケットはサイズが大きく風洞内部に設置した測定には不都合である。実際の試験計測では、EPSモジュールの較正がオンラインで行えること、超音速風洞の通風時間が1分以内と短いことから、通風直前に温度変化による零点のずれの補正を行うことで温度変化の影響を最小限にとどめている。この場合でもモジュールを断熱素材で保護する等の最低限度の対策は講じている。

2. 3 ソフトウェア

本システムでは計測を効率的に独立して行えるようにデータ収集用のソフトウェアパッケージが用意されている。このパッケージでは計測にともなう各種の設定、較正、計測、およびデータ生成がプルダウンメニューで選択して行えるようになっている。

生成されるデータはアスキー形式、バイナリ形式を選択してファイルに保存される。通常はデータの取り扱いを考慮してアスキー形式を用いることが多い。その場合でも、ディスクスペースやデータ転送速度に問題が起こることはほとんどない。

プルダウンメニューからホストモードを選択すると、外部ホストから GP-IB 経由のキャラクタベースのコマンドを送信することでこのソフトウェアの機能のほとんどを実行することができるようになっている。データについては GP-IB 経由の転送速度に限界があるため、通常の運営ではローカル（コントローラ PC）のディスク上にファイルを作って保存し、それを計測終了後に転送（GP-IB 経由あるいは LAN 経由）している。

2. 4 計測タイムチャート

図6に超音速風洞での圧力分布測定試験の計測タイムチャートを簡略化して示した。風洞は起動釦の押下の後、基準データ取得等の猶予時

間を5秒とってから調圧弁が開き通風を開始する。気流整定には3～5秒（マッハ数が大きくなるほど時間も増大する）を要する。圧力分布試験ではさらに測定圧力の整定のために1.5～2秒程度の時間を要するので、模型の姿勢をケース毎に固定して行う。

スキャニバルブを用いた場合、48ポートの走査（1スキャン）を行うのに約7.2秒が必要なため、通風終了時刻を30秒とした場合、通風1回あたりの走査回数は2回が限度である。一方、EPSモジュールを用いた場合はポートの走査（1計測）は1秒以内で十分なため、圧力の整定時間を含めて3秒/ケースの時刻設定が可能となり、通風終了時刻を35秒とすると通風1回あたり8回の計測が可能となる。

図7にはスキャニバルブとEPSモジュールの圧力データの取得方式の違いを示した。スキャニバルブでは走査したポート毎に短い時間でデータを平均化してから走査を行う（1スキャン）のに対し、EPSモジュールでは全ポートの走査（＝フレーム）を指定回数繰り返して平均化を行っている（1計測）。従って定常測定を行う場合、EPSモジュールでは比較的low周波の変動が存在した場合でも有効なデータが得られる。

2. 5 風洞試験時の計測

風洞試験時の計測の手順は以下の通りである。

- (1) EPSモジュール及び各装置のウォーミングアップのために、計測を行う1時間以上前に電源を投入する。
- (2) 午前中のチェックラン（風洞計測手順の最終チェックで実際の通風を行わずに模型姿勢制御、データ計測を行う）直前、および午後の最初の通風の前にEPSモジュール内部の圧力変換器の較正を行う。
- (3) 必要に応じてHyScan 2000 Systemのパラメタを設定/変更する。

- (4) 通風毎に計測準備作業として零点のずれを補正するための較正を行う。
- (5) 通風時はホストシステムからのコマンド入力によりデータ収集を行う。
- (6) 通風終了後、収集データをホストシステムに転送する。

3. 風洞試験への運用例

3.1 HSCT 超音速圧力試験

平成9年5月に行われた同試験ではスキャニバルブを使用した本試験に引き続き、高速多点圧力計測装置の試験運用を行った。

HSCT (High Speed Civil Transport) -P1 模型の圧力測定点数は100点で、うち96点をZOC22BおよびZOC33をそれぞれ1台ずつ使用して測定した。図8に測定結果一部を示す。圧力分布のグラフ中、直線で結んだシンボル(小)はスキャニバルブでの測定データで、EPS モジュールのデータは中抜きシンボル(大)で示した。

この試験運用の目的は高速多点圧力計測装置の各構成、機能のチェックと、同装置を使用した計測が超音速風洞での使用環境(温度、振動等)に適応し、きちんとデータ収集が行えるかどうかのチェックを行うことであり、十分な成果が得られた。

3.2 宇宙往還機模型ガスジェット干渉試験

同じく平成9年5月に、前述のHSCT 超音速圧力試験に引き続いて宇宙往還機模型ガスジェット干渉試験として、模型の圧力分布の測定を高速多点圧力計測装置を用いて行った。

この試験では模型がEPS モジュールを胴体内に内装できるように設計されていたので、ZOC-33モジュールを内装して64点の圧力計測を行った。図9にEPS モジュールを模型に内装した様子を示した。また、図10には測定結果の一例を示した。

この試験ではガスジェットの圧力制御盤をPC (HP Vectra)とVXI 機器によりリモート操作して

いたので、そのシステムに便乗してZOC HyScan 2000を制御用ソフトウェア(HP VEE)に一つの計測機器として認識させて自動計測を行った。

3.3 風洞特性試験

平成9年7月に、楕形ピトー管を用いた超音速風洞の気流検定試験を行った。試験ではピトー圧を測定し、測定部断面でのマッハ数分布を求めた。

図11に測定結果の一例を示す。楕形ピトー管は図中の写真にあるように2cm間隔で21本のピトー管(総圧管)を1列に並べたものである。これを上下に移動させることで測定部中心から左右(東西方向)にそれぞれ20cmの幅で、ストラット機構の移動可能範囲(上下 ± 30 cm)の分布を測定することができた。今回の試験では上下方向の移動を総圧管の左右の間隔に合わせて2cm間隔で行い、横21点 \times 縦31点のメッシュ状に圧力データを取得し、マッハ数分布を求めた。図11に $M=2.0$ でのシュリーレン観測窓中心位置断面でのマッハ数分布を示した。

この試験では8走査/通風を行ったので、4回の通風で一つの気流条件(マッハ数)についてのデータを取得することができた。また、EPS モジュールにより得られたデータの信頼性を吟味するため、3つの圧力ポート(No.4、No.11、No.16)について配管を分岐し、従来の圧力変換器(PDCR23)を併用して計測を行った。図12に通風1回分のEPS モジュールでの取得データとPDCRでの取得データを比較した図を示した。図中の誤差線はEPS モジュールの測定精度である。両者の値は良好に一致しているが、全て一定方向にずれを生じていることから、高速多点圧力計測装置と風洞計測設備間でバイアス系のずれが存在すると考えられる。

4. 性能の評価

4.1 計測効率の向上

すでに2.4でチャートを示したように、高

速多点圧力計測装置を用いた計測では、わずかな通風時間の延伸で従来のスキャニバルブの4倍のデータの生産性を実現した。3.3の風洞特性試験は、従来のスキャニバルブでは(試験時間の制約上)十分なデータ数の取得が困難な試験であったが、同装置の導入によりデータの生産性が向上し、風洞特性に関する貴重なデータが多く得られたことは大きな成果であった。

4.2 計測精度

センサー自体の精度については従来のスキャニバルブの圧力変換器(PDCR)が $\pm 0.06\%$ F.S.に対してEPSモジュールが $\pm 0.08\%$ F.S.と遜色はない。問題は温度変化の影響で、 0.10% F.S./ $^{\circ}\text{C}$ というZero Shiftの値(PDCRは 0.02% F.S./ $^{\circ}\text{C}$)は無視できない。そこでZOC HyScan 2000システムではオンラインでの較正を行うことで温度変化の影響を最小限に留めるようにしており、実際通風時間が1分足らずの超音速風洞では通風直前に零点補正の較正作業を行うことで十分な精度を確保できていると考えている。ただし、高いマッハ数の試験でEPSモジュールが気流により著しく冷やされているような場合には、通風直前に零点補正だけではなく全較正を行う必要があると思われる(全較正は零点補正に比べて時間がかかる)。ただし、その場合でも通風時間中に温度変化の影響が出ることは少ないと予測される。この点についてはモジュールの温度を監視する等の確認が必要である。

4.3 トラブルレポート

システムを運営する上でのトラブルの発生はその原因を究明し、適切な対処を行うことが必要である。高速多点圧力計測装置を運用開始してからのトラブルは以下の2件である。

(1) ポート不良

(試験) HSCT 超音速圧力試験

(現象) ZOC22B(#222)のポート No.9 が較正時

にエラーを生じた。

(原因) 圧力変換器不良。

(対策) 該当ポートをスキップして走査を行うように設定。現在未修理。

(2) 較正失敗

(試験) 宇宙往還機模型ガスジェット干渉試験
(現象) 較正時に全ポートについてエラーを生じた。

(原因) 較正圧、基準圧の配管が模型に内装してあるマニホールド位置で折れ曲がっていた。

(対策) 試験を中止し、配管接続をやり直して解決した。

5. まとめ

高速多点圧力計測装置として米スキャニバルブ社製 ZOC HyScan 2000 を導入し、航技研 1 m \times 1 m 超音速風洞の実験環境下で実用的な運用が可能であることを確認した。また、同装置の使用により、従来の機械式圧力走査器(スキャニバルブ)を使用した計測に比べ、データ生産効率の飛躍的な向上を実現した。

同装置に関わる今後の課題として、

- ・ 測定精度の定量的な吟味
- ・ データ処理設備(平成8年度末更新)とのリンク
- ・ 非定常圧力計測への対応

があげられる。

参考文献

- 1) 渡辺光則、浜本滋、楯篤志、野田順一、原亘利;超音速流中でのガスジェット干渉試験(II) 圧力試験、第41回宇宙科学技術連合講演会、1997年10月
- 2) 浜本滋、楯篤志、原亘利;航技研 1 m \times 1 m 超音速風洞データ処理設備の更新、第58回風洞研究会議、1997年5月

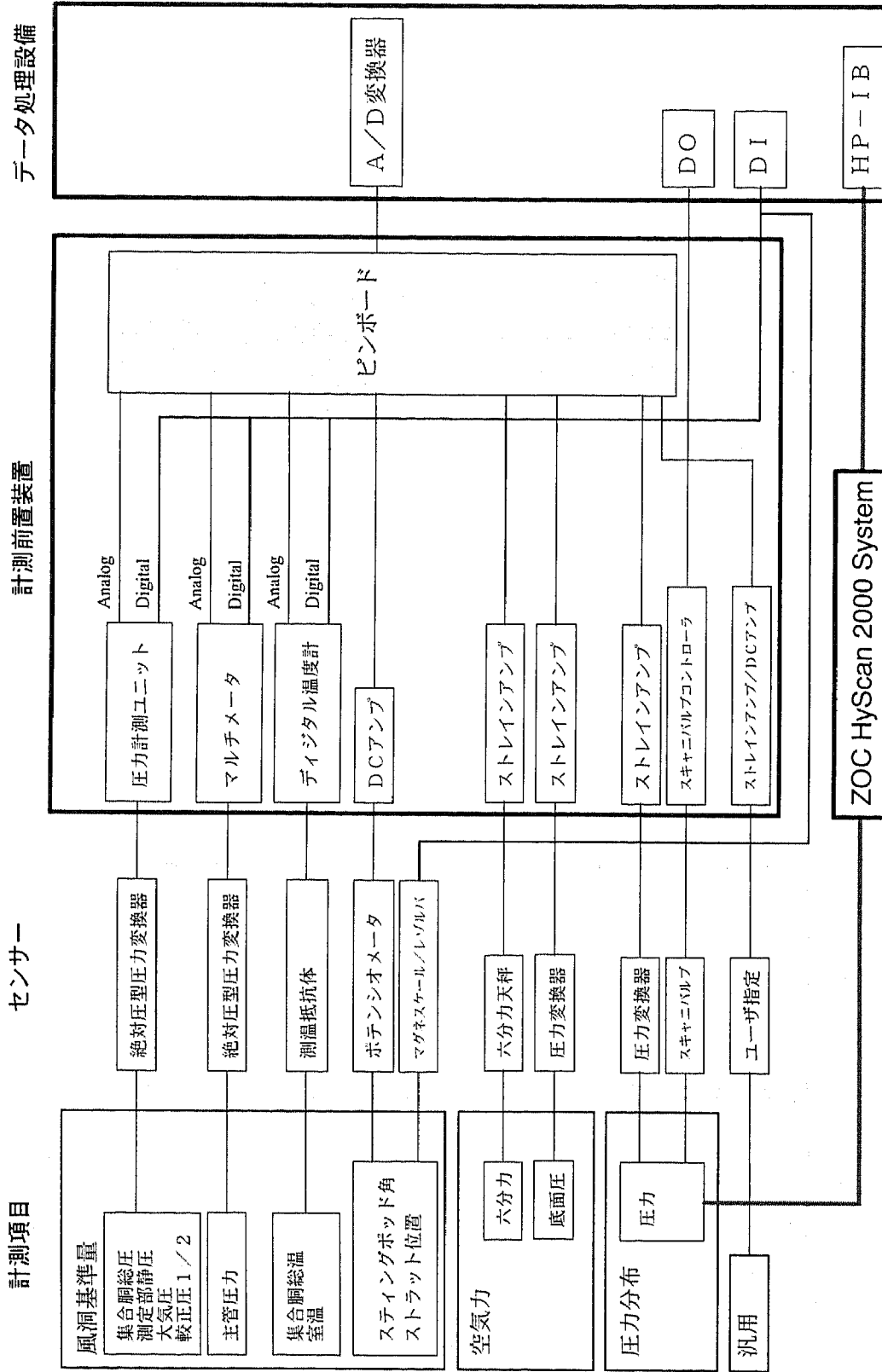


図1 超音速風洞計測系統図

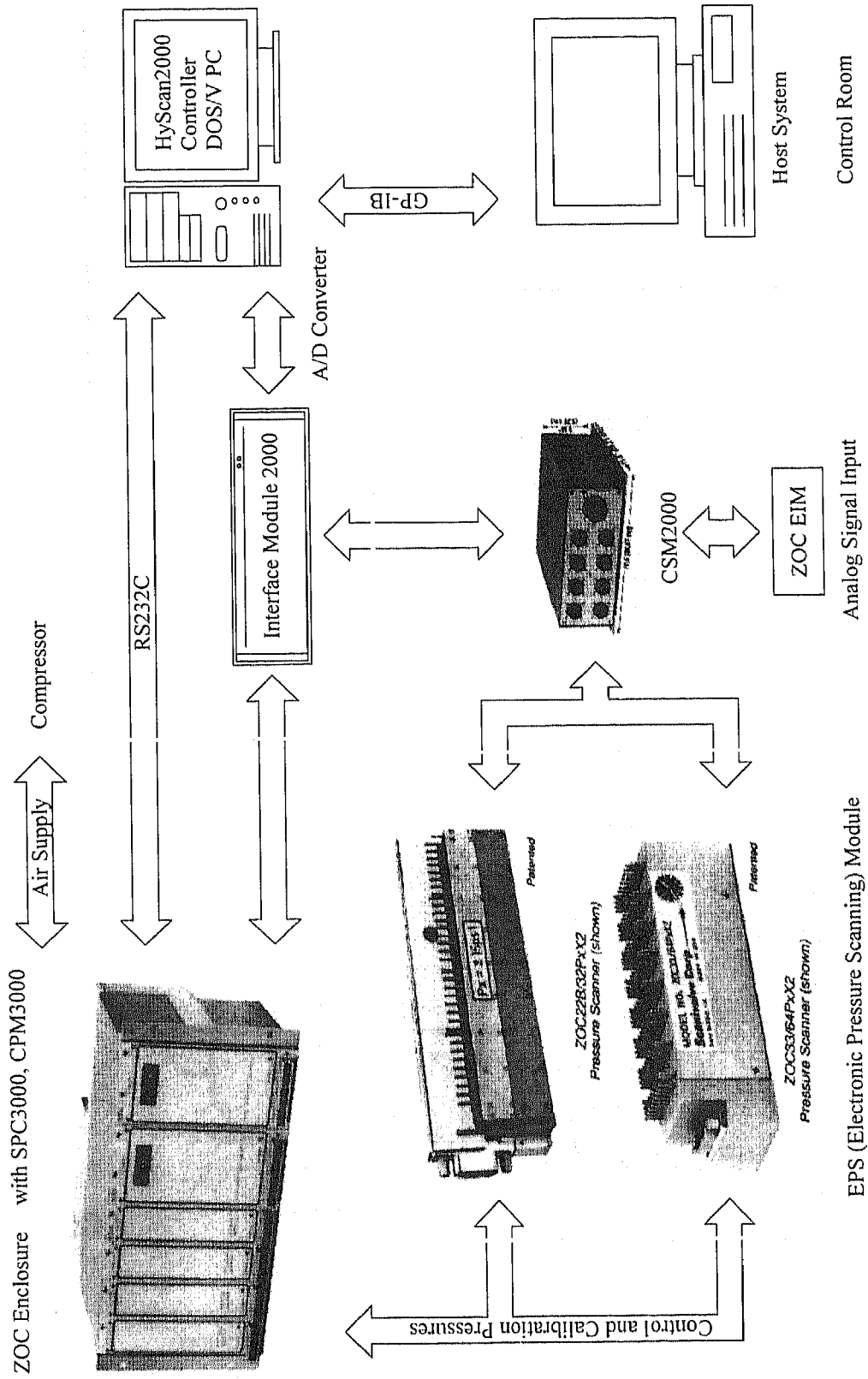


図2 高速多点压力計測装置 (ZOC HyScan2000 System) 構成図

EPS (Electronic Pressure Scanning) Module

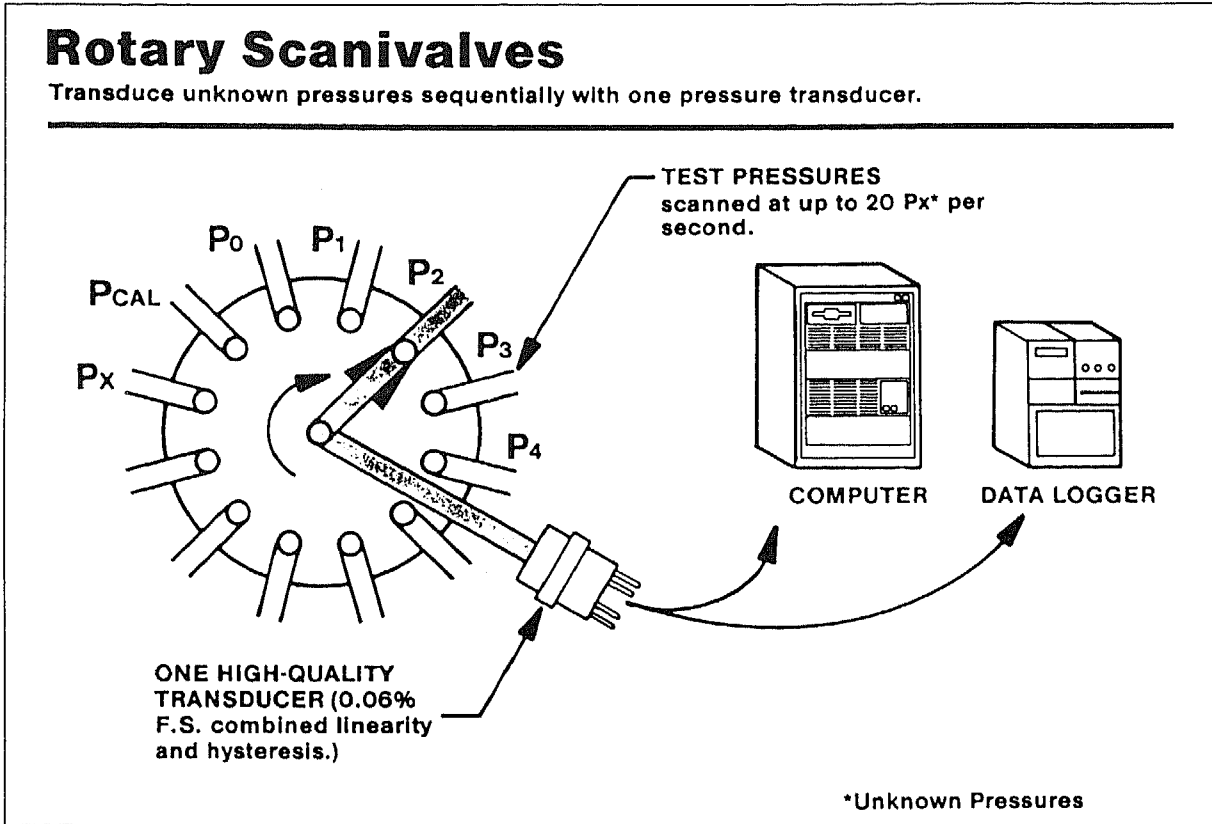


図3 機械式圧力走査器 (スキャニバルブ)

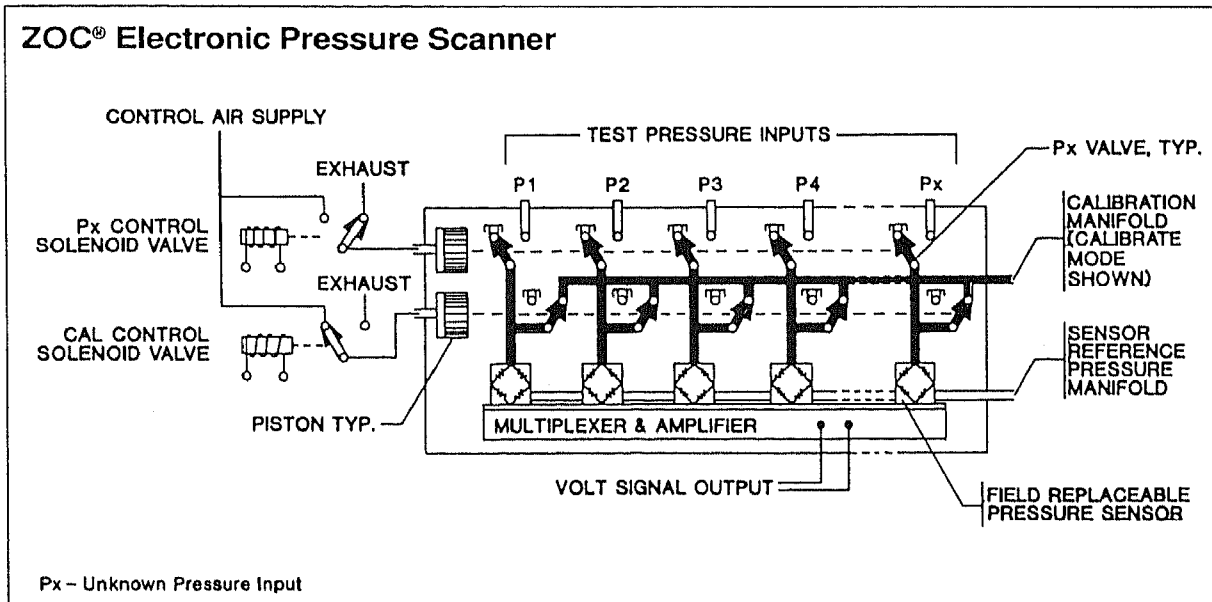


図4 電子式圧力走査器(ZOC Electronic Pressure Scanner)

表1 ZOC EPS モジュール一覧表

番号(S/N)	型式	ポート数	圧力レンジ	TCU(*)	備考
222	ZOC22B	32	±15psid	○	
223	ZOC22B	32	±15psid	○	
180	ZOC33	64	±15psid	○	
181	ZOC33	64	±15psid	○	
204	ZOC33	64	±15psid		
171	ZOCEIM16	16	N/A	○	電圧入力用モジュール

(*)TCU = Thermal Control Unit

表2 センサー精度

	ZOC	スキャニバルブ
Sensor	ZOC22B, ZOC33	PDCR23
Accuracy	±0.08% F.S.	±0.06% F.S.
Thermal Zero Shift	±0.10% /°C	±0.02% /°C
Thermal Sensitivity Shift	±0.05% /°C	±0.02% /°C

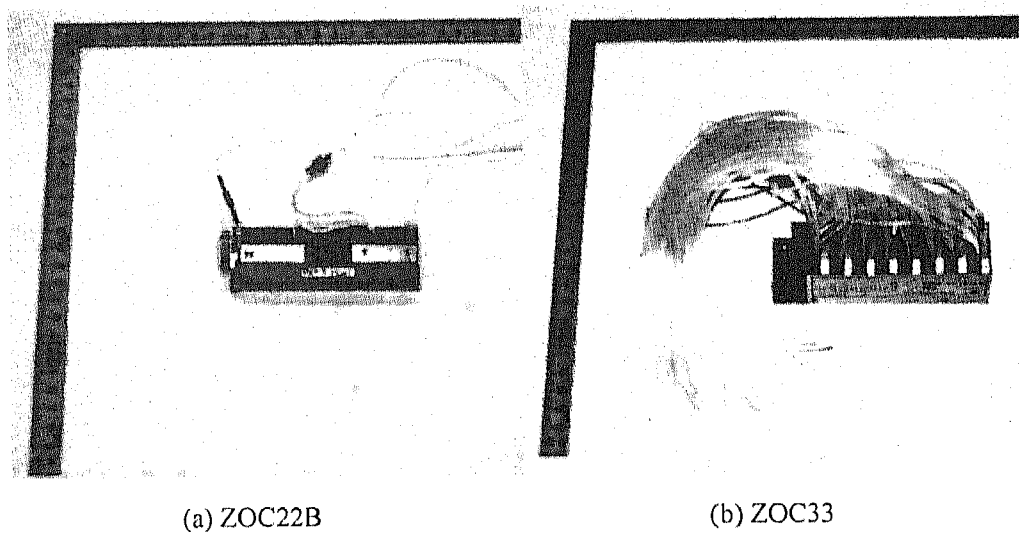
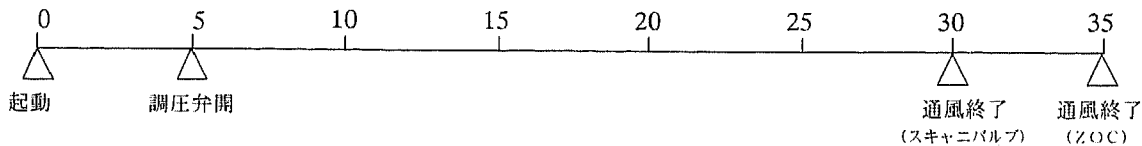
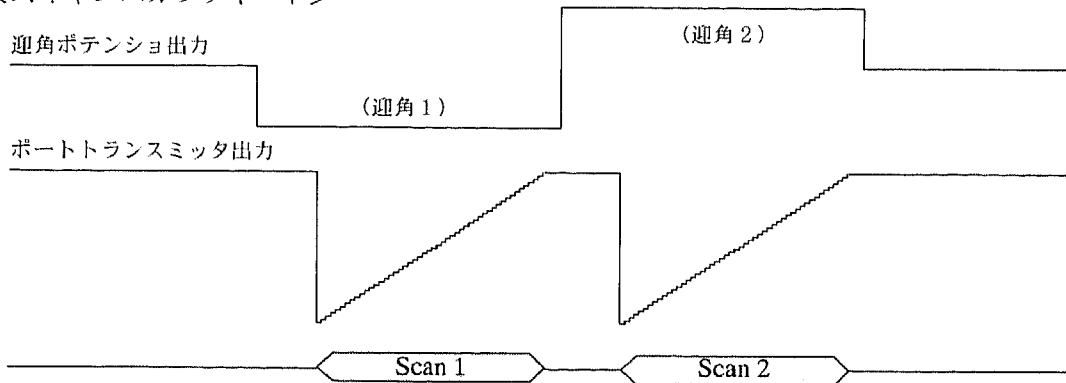


図5 ZOC EPS モジュール

<通風チャート>



<スキヤニバルブチャート>



<ZOCチャート>

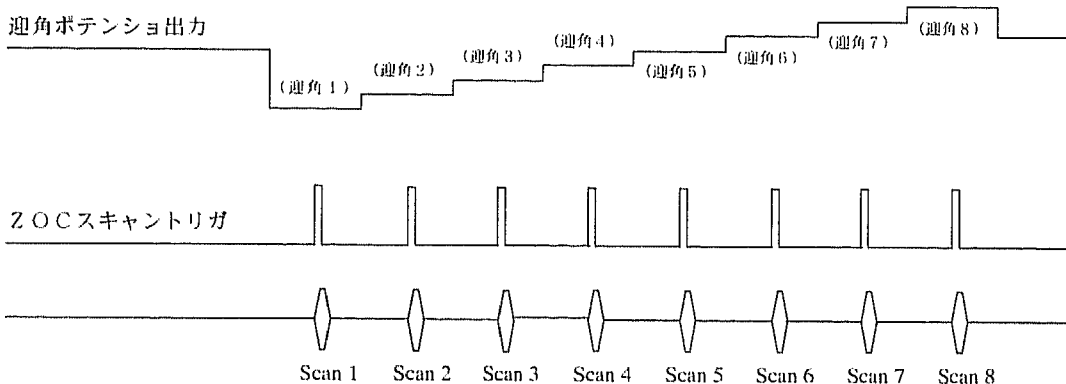


図6 計測タイムチャート

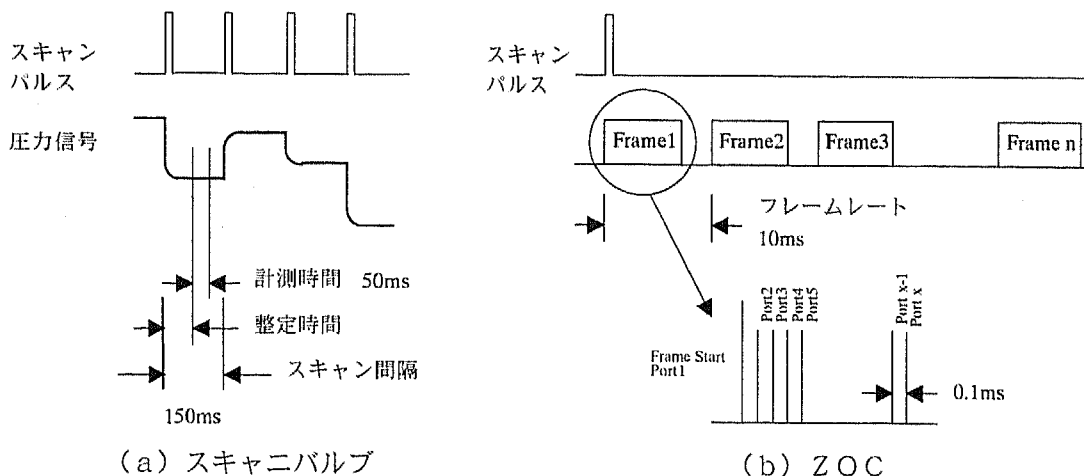


図7 圧力計測チャート

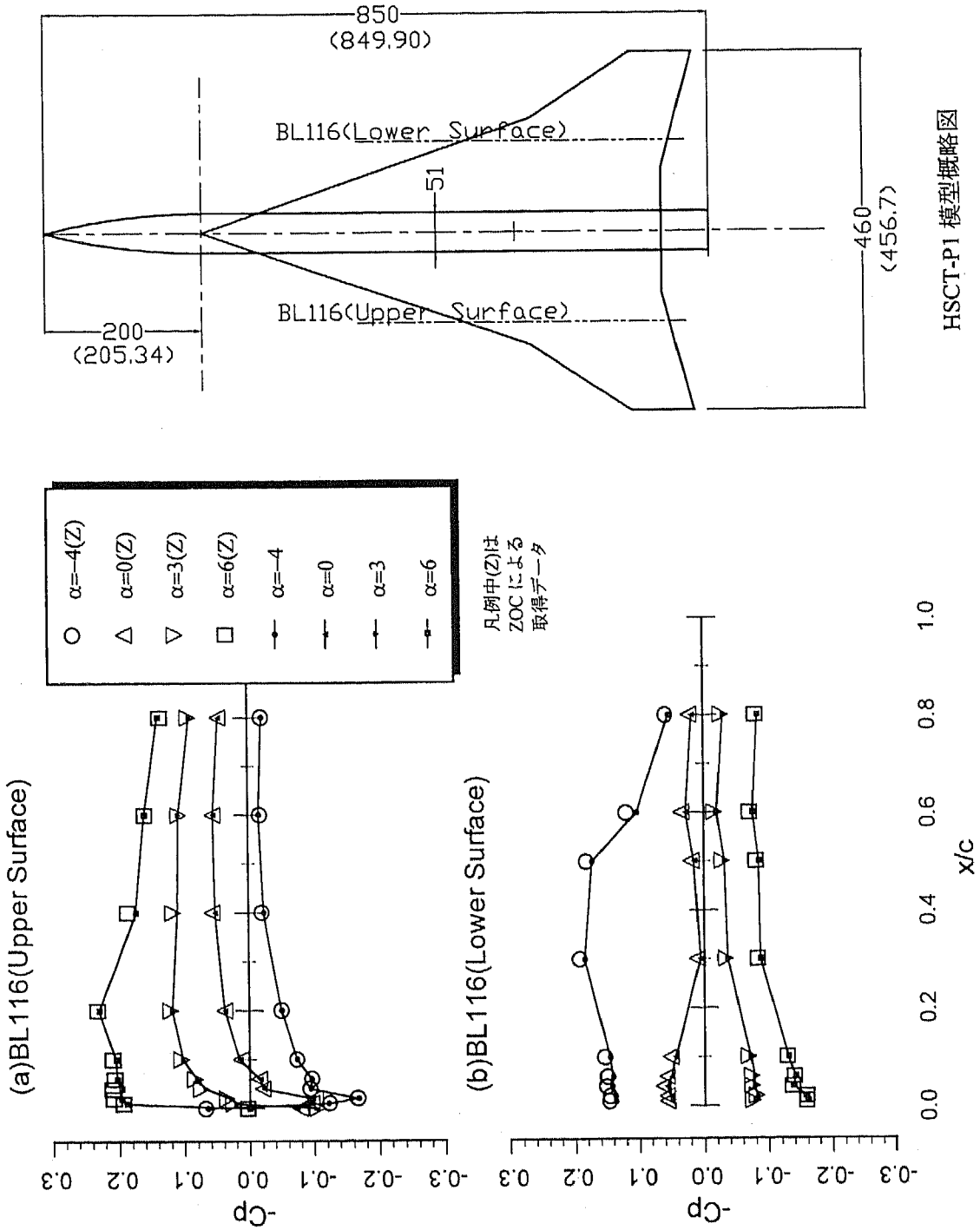


図8 HSCT 超音速圧力試験

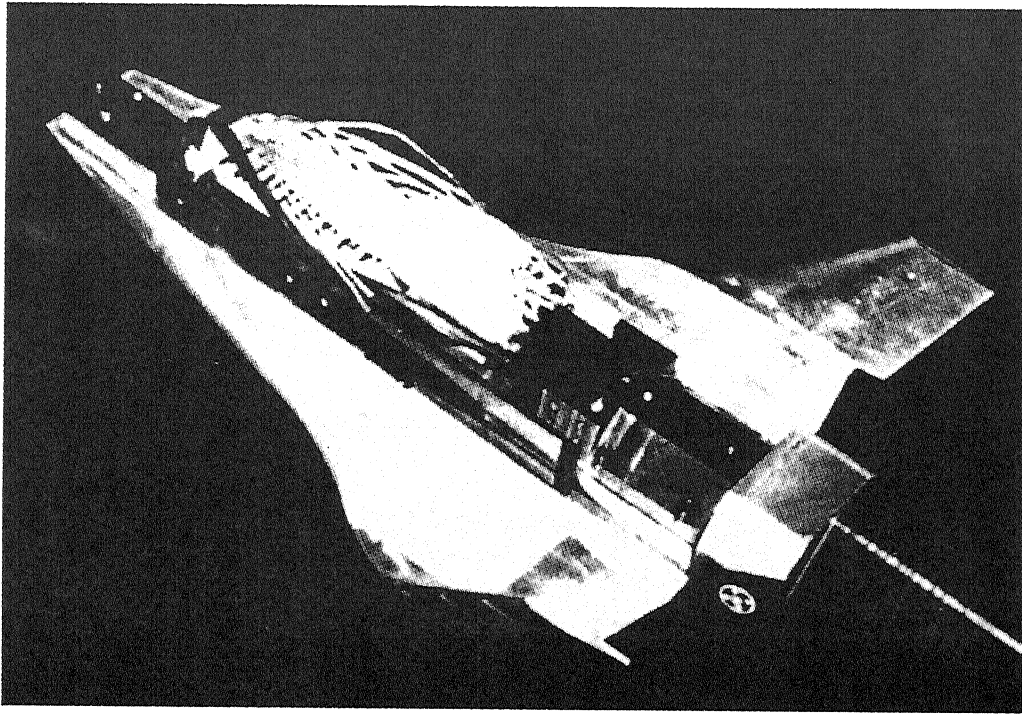


図9 ZOC33モジュールを内装した模型

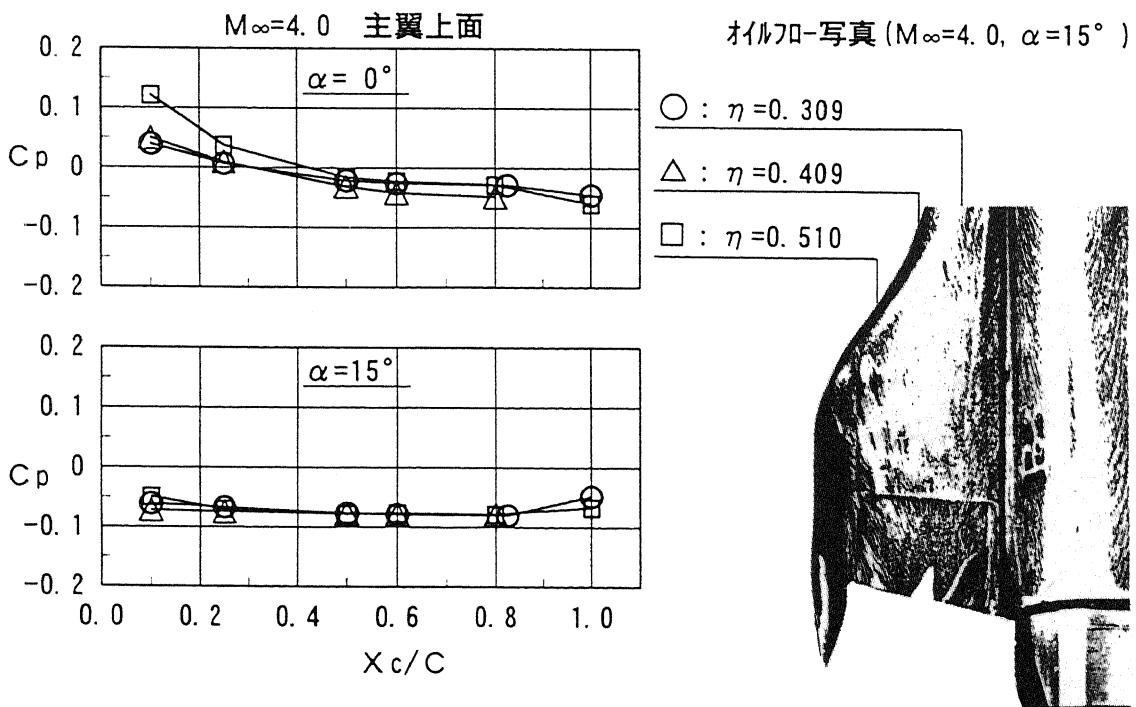
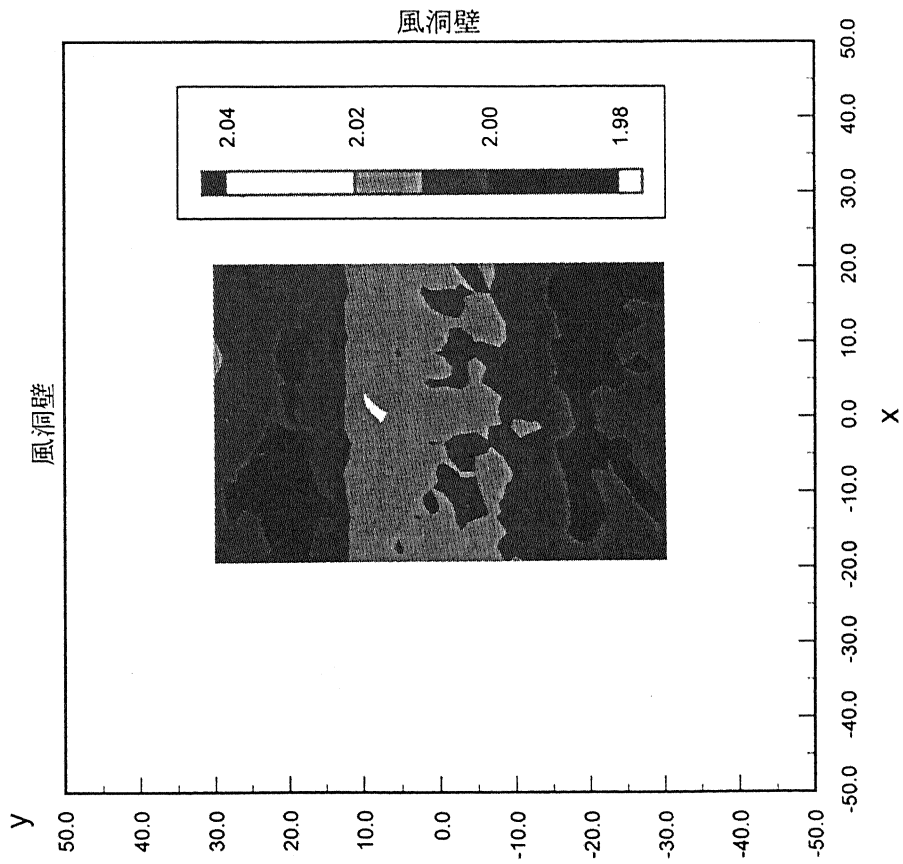
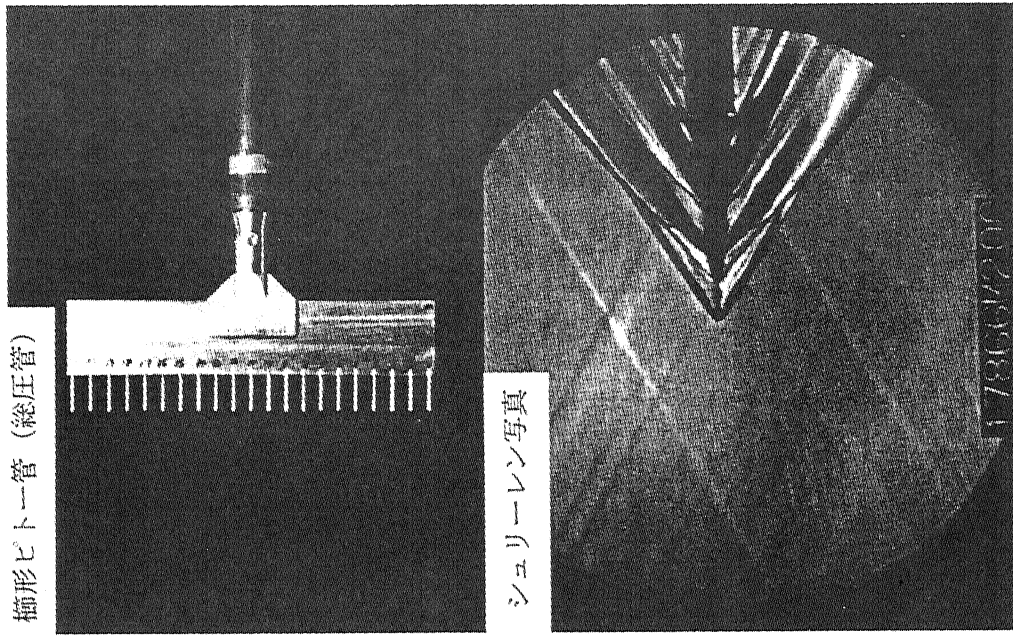


図10 宇宙往還機模型ガスジェット干渉試験における圧力計測結果例



シュリーレン窓中央断面でのマッハ数分布 ($M=2.0$)

図11 風洞特性試験

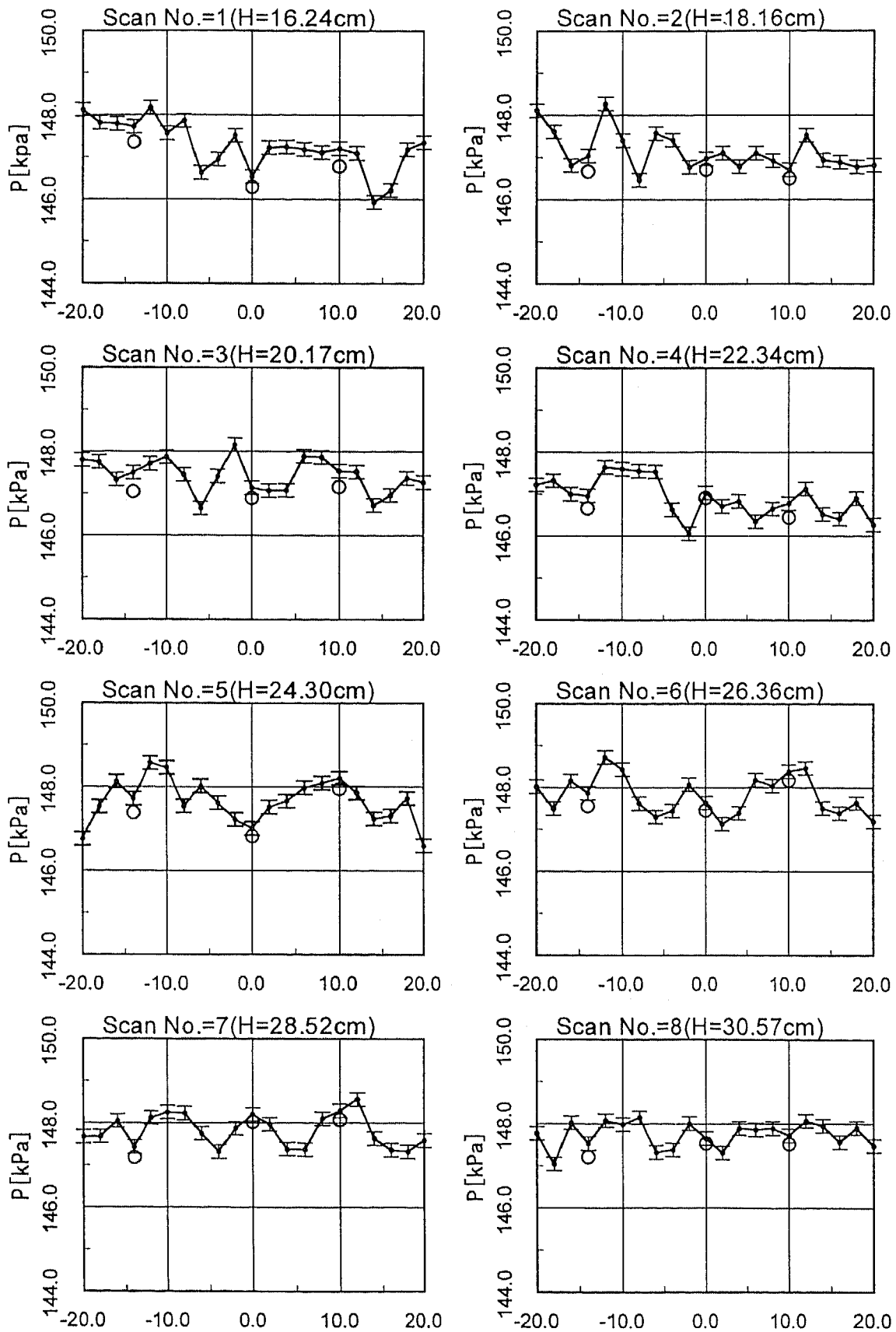


図12 通風1回での取得データ ($M=2, 5$, OはPDCRでの同時計測)