

航技研極超音速風洞における ESP システムによる圧力分布測定

○小山 忠勇，津田 尚一，平林 則明（宇宙航空研究開発機構）

関根 英夫（航空宇宙技術振興財団）

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)総合技術研究本部の極超音速風洞システムは、0.5m 極超音速風洞(マッハ数 5,7,9,11)と 1.27m 極超音速風洞(マッハ数 10)の 2つの風洞からなり、いずれも吹き出し吸い込み型の間欠風洞で、持続時間は約 30~60 秒程度である。¹⁾

今回、極超音速風洞システム用に ESP(電子走査型圧力変換器)による高速多点圧力分布測定システムを構築し、実際に運用し始めたので報告する。^{2),3)}

2. 圧力分布測定システム導入の背景

圧力分布の測定法には、1つ1つの圧力孔に直接圧力センサをつなぐ方法、スキャニバルブの様に機械的に圧力ポートをスキャンして測定する方法、ESP の様に電子的に走査する方法などがある。

どのような圧力分布測定システムが極超音速風洞システムに適しているかを検討した。

2-1 風洞の特徴からくる制約

極超音速風洞の特徴からくる制約としては次の 3 点が考えられる。

- ① 測定する圧力が非常に低い。
- ② 供試模型周りの温度変化が急激で大きい。
- ③ 通風時間が比較的短い。(30~60 秒程度)

①については、例えばマッハ数 10 の場合、気流の静圧は 0.1kPa 程度で、模型背面圧力やベース圧力に至っては、数 10Pa と非常に低いこともよくある。ピトー圧力でも、澱み点圧力によるが、5~20kPa 程度である。マッハ数 7 でもピトー圧は最大で 100kPa 程度である。

②については、マッハ数 10 で 30 秒間通風した場合、模型の温度は 10 数°C 上昇し、気流がブレイクした後は 10~20°C 上昇する。もちろん模型の温度上昇がすべてセンサに伝わる状況ではないが、温度環境への配慮が不可欠である。

③については、特に低い圧力測定の場合に圧力配管の応答遅れが問題となる。これを解消するためには配管長さを短くする必要がある。圧力配管を太くすることも対策として考えられるが、模型の大きさを考慮すると困難である。

2-2 測定要求からくる制約

極超音速風洞での圧力分布測定要求からくる制約としては、模型全表面にわたる圧力分布が 1 回の通風で測定できること、迎角変化に対応した計測が可能であることがあげられる。つまり、高速多点の圧力測定が行え、かつ、データの生産性が良いことが求められる。さらに、配管長さを考慮すると小型、軽量で模型内に装着できる大きさであることも重要なファクターとなる。

測定精度として、真空環境や温度変化に対応でき、総合精度で±0.3%以内が確保できるものが求められる。

以上のことから米国 PSI 社の電子走査型圧力変換器 PSI システム 8400 を導入した。

3. 極超音速風洞における ESP システムの概要

3-1 極超音速風洞における ESP システム系統

Fig. 1 に極超音速風洞における ESP システムの概観図を示す。に極超音速風洞計測室に ESP 操作用パソコン、ESP8400 システム本体、ESP 操作器を設置し、風洞室にリモートプロセッサ、SDI (A/D 変換器)、測定室内に ESP センサを設置した。それぞれの機器を専用ケーブルおよび光ケーブルで接続した。センサのキャリブレーション用にリモートプロセッサおよび真空ポンプからの空気配管をセンサの CAL ポートおよび基準ポートに接続し、ESP システム全体を構成した。



Fig. 1 極超音速風洞の ESP システム概観図

極超音速風洞ではESPセンサとして以下のものを現在、保持している。

- DTC(温度補償機能)付き ESP ±5psid 64ch 1台
- DTC(温度補償機能)付き ESP ±15psid 64ch 1台
- DTC(温度補償機能)なし ESP ±5psid 48ch 2台

3-2 ESPシステムの高度化

極超音速風洞でのESPシステムは前述したように温度環境の悪い状態で使用せざるを得ない。そのような環境下で測定精度を確保するため、DTC(温度補償機能)付きのESPセンサを導入した。Fig.2にESPシステムの温度特性試験結果を示す。4)

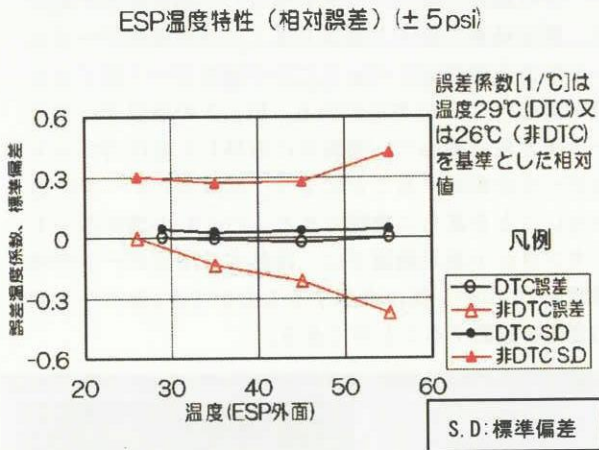


Fig. 2 ESPシステムの温度特性試験結果

DTC(温度補償機能)付きのESPセンサとDTCなしのESPセンサについて温度環境を約25℃~55℃の間で変化させて誤差を測定した。DTC付きのセンサは温度環境が変化しても誤差はほとんど変わらず、0.1%以下を保っている。それに比べDTCなしのセンサは環境温度が高くなるほど誤差が増大し、ESP外面温度が50℃を超えると0.3%以上の誤差が生じてくるのが分かった。

さらに、ESPシステムのノイズ対策としてFig.1に示す光ファイバケーブルの導入やアナログ信号線の長さの短縮を行い、S/N比の改善を図った。

4. ESPシステムのソフトウェアの構築

ESPシステムを極超音速風洞の常用の圧力計測システムとして実用化するためには、ソフトウェアの構築が不可欠である。ESPシステムソフトウェアの構築にあたっては次の点に考慮した。

① 操作性の向上

GUI(グラフィック・ユーザ・インターフェース)画面を導入し操作性を高めるとともに、誰でも分かりやすく操作できるようにして人為ミスによる失敗を回避する。

② データ生産性の向上

風洞基準量(澱み点圧力、澱み点温度、迎角等)との同

期が自動的で行えること、各種の圧力レンジや多チャンネルの試験に対応できるようにする。

Fig.3に極超音速風洞におけるESPシステムのソフトウェア構成を示す。

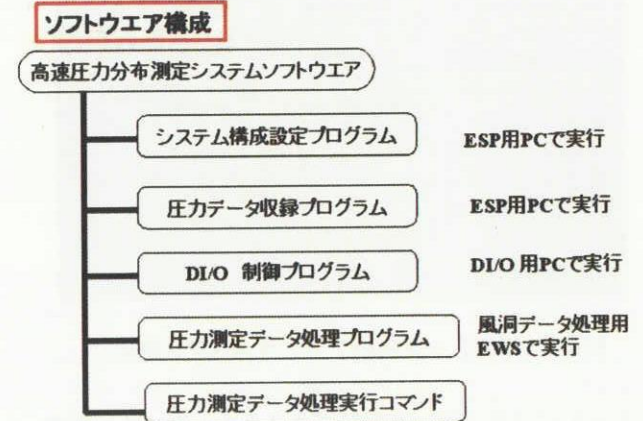


Fig. 3 ESPシステムソフトウェア構成図

図に示すように、どのような圧力レンジのセンサを何チャンネル使用するかを設定する「システム構成設定プログラム」、実際に圧力測定するための「圧力データ収録プログラム」、バルブ等の機器操作および風洞機器とのハンドシェイクを行う「DI/O制御プログラム」、ESP圧力測定データと風洞基準量等との同期を行い、データを統合する「圧力測定データ処理プログラム」、その操作を遠隔で行うための「圧力測定データ処理実行コマンド」から構成されている。

ここでは、ESPシステムソフトウェアの根幹となる「圧力データ収録プログラム」について詳細に述べる。

「圧力データ収録プログラム」の構成をFig.4に示す。

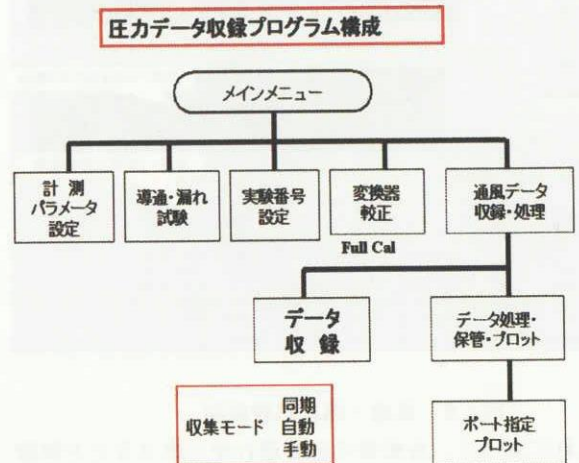


Fig. 4 圧力データ収録プログラム

この「圧力データ収録プログラム」は、計測パラメータの設定、漏れ試験、事前校正および通風データの収録と実際の圧力測定のすべてをコントロールしている。

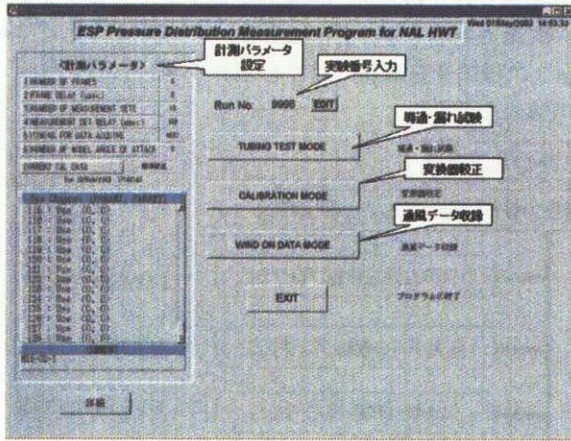


Fig. 5 圧力データ収録プログラムメイン画面

Fig. 5 に「圧力データ収録プログラム」のメイン画面を示す。ここでは、それぞれの画面に設定されているボタンをクリックすることによって、各種操作を自動的に行うことができる。

計測パラメータの設定および実験番号の設定は、試験開始前に行っておく。

導通・漏れ試験は圧力配管接続時や測定室を真空排気するときにモニタリングして配管につまりがないことを確認するときに使用する。Fig. 6 に導通・漏れ試験画面を示す。同図に示すように計測している全ポートの圧力グラフおよび数値表示を每秒1回行うことができ、さらに選択したポートの時間履歴を表示することが可能である。

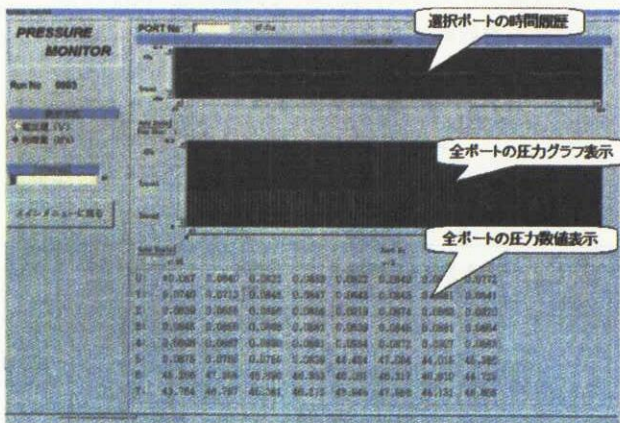


Fig. 6 導通・漏れ試験画面

これによって、各配管の応答遅れやつまりなどを試験前に容易に調べることができ、圧力測定試験の効率をあげることができる。さらに測定室が真空状態の時にこの操作を行うことによって、データのばらつきや誤差を容易に調べることができる。

圧力変換器の較正は、ボタンをクリックすることにより自動的に配管を較正モードに切り換え、予め設定した較正圧力をセンサに印加して較正係数を決定する。この

操作は通風直前に実行し、通風時の圧力測定データの信頼性を確保する。

通風データの収録はボタンをクリックすることにより圧力計測モードに測定配管を切り換えた後、トリガ待ち画面になり、風洞各機器からの信号により測定データの収録を行う。

圧力測定は、予め設定した収集モード(同期モード:風洞各機器とのハンドシェイクによりデータを収録する。自動モード:予め設定したタイマーにより自動的にデータを収録する。手動モード:マウス等を手動でクリックすることによって、その都度データを収録する。)によって行なう。

データ収録完了後、データを保管し、測定結果を表示する。測定結果の表示方法はFig. 7に示す通風データ全ポート圧力表示画面とFig. 8に示す選択ポート別プロット表示画面の2つの方法がある。Fig. 7の通風データ全ポート圧力表示画面で、通風中に取得した全圧力ポートの全データを表示することにより、試験中のデータに異常がないことを直ちに確認できる。Fig. 8の選択ポート別圧力プロット表示画面では、注目する圧力ポートの時間履歴を10ポート毎に表示することができ、各ポートの圧力変化を観測することができる。

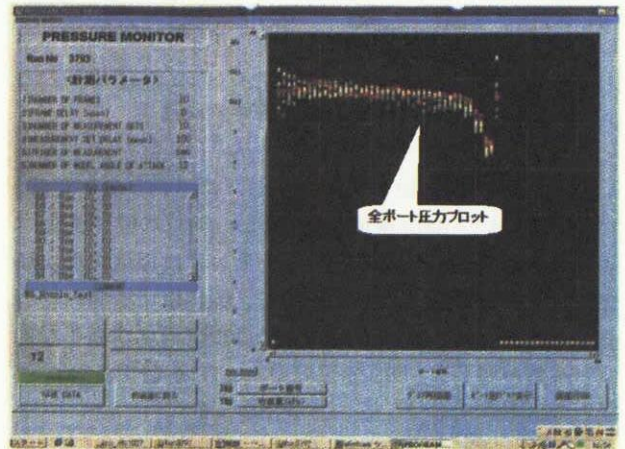


Fig. 7 通風データ全ポート圧力プロット表示画面

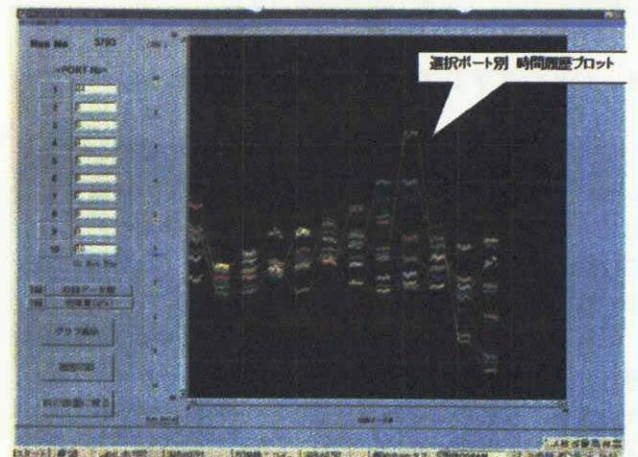


Fig. 8 選択ポート別圧力プロット表示画面

5. ESP システムによる圧力測定例

これまで、極超音速風洞における ESP システムの概要およびソフトウェアの詳細について述べてきた。ここではそれらを実際の通風試験に使用して測定してきた例について述べる。

Fig. 9 は、1.27m 極超音速風洞のノズル較正試験結果の 1 例である。P₀=4.0MPa、T₀=750℃の気流条件で、ノズル出口から 500mm の位置におけるマッハ数分布である。⁵⁾ 10mm 間隔に設置された 91 本のピトーレークを水平に取付け、上下方向に 10mm 間隔で±350mm の範囲をトラバースして得た結果である。断面の総測定点数は 91×71=6461 点であり、コア直径 700 mm 内の平均マッハ数 9.72 に対し、マッハ数の分散は±0.15%以内であることが判る。このように測定点にして 6000 点以上の計測を ESP システムにより 4~5 回の通風で計測できる様になった。

ESP システムは、0.5m 極超音速風洞の「M5 ノズル較正試験」、「M7 ノズル較正試験」、「AGARD-E 模型(半球模型)の表面圧力分布測定試験」、各種エンジンの「インテーク試験」における圧力測定などで活用されている。

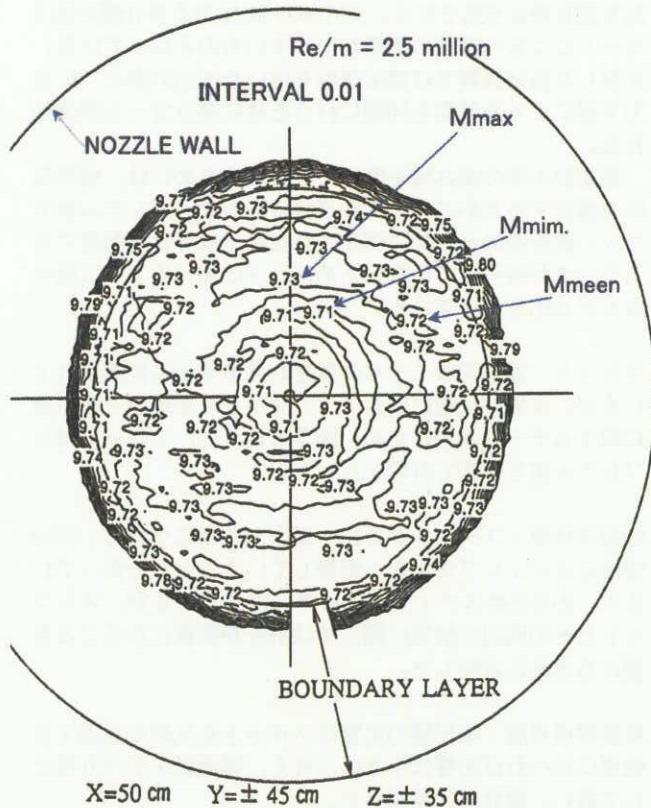


Fig. 9 1.27m 極超音速風洞のノズル較正試験結果

6. まとめ

- ① JAXA 極超音速風洞において ESP システムを適用した高速多点圧力分布測定システムを構築した。
- ② これにより、圧力分布測定のデータ生産性を飛躍的に高めた。具体的には 1 度に計測できる測定点を最大 256 チャンネルまで拡大した(現在は最高で 96 チャンネルまでの実績)こと、圧力分布測定データと風洞基準量との時間的対応をとる統合データ作成プログラムの導入により、データ処理に要する人的・時間的な効率を高めたこと、風洞各機器との同期をハンドシェイクで行い、効率的にデータを取得できるようになったことが上げられる。
- ③ DTC(温度補償機能)付きの ESP の導入により、測定精度を高めることができた。(±0.1%F.S 程度)。
- ④ GUI 画面によるプログラム開発により、操作性の向上を図り、誰でも使用できるように汎用性を高めた。
- ⑤ 極超音速風洞において ESP システムを用いて、各種の実験を行ってきた。ESP システムによる圧力測定は十分な測定精度が確保できており、極超音速風洞における常用の圧力計測システムとして確立した。

参考文献

- 1) 大型極超音速風洞の計画と構造-極超音速システムの概要-, NAL TR-1261 (1995/1)
- 2) 関根, 津田, 平林, 小山, 榊原: 大型極超音速風洞における高速圧力分布測定システムについて, 第 31 回流体力学講演会講演集, (1999/9)
- 3) 関根, 津田, 永井, 小山, 平林, 穂積: 航技研 0.5m 極超音速風洞マッハ数分布測定試験, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会講演集, (2001/10)
- 4) 関根, 津田, 永井, 小山, 平林, 穂積: ESP システム高度化による航技研 0.5m 極超音速風洞マッハ数分布測定, 第 34 回日本航空宇宙学会年会講演会講演集, (2003/4)
- 5) 平林, 小山, 津田, 関根, 永井, 榊原: 1.27cm、マッハ 10 極超音速風洞の気流検定結果について, NAL SP-45 (2000/7)