

温度補償機能付き ESP スキャナ (PSI) の特性確認試験

伊藤 文博 (三菱重工)、橋本 武彰 (中菱エンジニアリング)

Test for thermal performance evaluation of ESP scanner(PSI) with thermal compensation

Fumihito Ito (MHI)、Takeaki Hashimoto (CE)

1 はじめに

1950年代後半より用いられてきた多点圧力計測用の機械式圧力走査器 (以下スキャニバルブ) は、近年その製造が中止となったため、他の計測デバイスへの移行が必須となっている。これに代わる計測器として、小型かつ高速走査を可能とする電子式圧力走査器への移行が進みつつあるが、その温度依存性に課題を残すため連続循環式風洞 (JAXA 遷音速風洞等) への適用は不向きであるとされてきた。

今般、弊社において導入した ESP スキャナ (Pressure System 社製) は温度補償機能を有しており、これまで主に用いられてきたプローダウン式風洞以外への広範な適用が期待される。

本報告において上記 ESP スキャナの温度特性を把握するとともに、その有効性を確認する。

2 高速多点圧力計測装置の概要

2.1 システム概要

今回導入した高速多点圧力計測装置は米国 Pressure System 社製の System8400 である (以下 PSI とする)。同システムは、圧力変換器 (電子式圧力走査)、A/D 変換器 (SDI: Scanner Digitizer Interface)、解析装置、高圧ガス供給源、真空ポンプ、遠隔操作用 PC 等により構成され、センサーの較正、走査、制御等を高速かつ自動に行うことが可能である。これまでの System8400 に追加された主な機能としては、温度補償機能 (DTC: Digital Temperature Compensation)、A/D 変換機能をインターフェイスユニットに内蔵することにより圧力変換器周辺での交換が可能となったこと等である。図 1 に基本構成を示す。

2.2 ESP スキャナ

ESP スキャナは各ポートそれぞれに独立した差圧型圧

力変換器 (基準圧との差圧として計測) 及び温度センサー (RTD) を有し、この出力をもとに走査及び較正をオンラインにて行うことが出来る。ESP スキャナの外觀及び基本原理を図 2~4 に示す。圧力変換器容量 15psi (103.4kPa) における温度補償機能無し ESP スキャナ及び機械式圧力走査器 (以下スキャニバルブ) で通常用いられる PDCR 圧力変換器とのカタログ精度比較を表 1 に示す。DTC 機能の追加により、温度変化に起因する計測誤差はおよそ 20 分の 1 程度に低減されており、遷音速風洞試験等の模型温度変化が大きな試験環境下においても高精度に計測を行う事が可能である。なお、本報告においては風洞試験における温度補償機能確認を目的としているため、Heater Chamber 及び Purge 機能については仕様から削除してある。

2.3 制御用ソフトウェア

システムモニタ及び制御用ソフトについては、PSI 社の Firmware を基に製作を行った。

以下に主な機能を列挙する。

- ・各種設定 (サンプリング周波数、平均化回数、ディレイタイム、計測間隔、温度補償機能等)
- ・センサの出力モニタ機能
- ・温度表示機能 (較正後の温度変化量)
- ・センサー校正 / 基準点補正機能 (時間設定可能)
- ・計測データ取得 / 記録機能

3 性能評価

3.1 特性確認試験概要

温度特性を確認するため、恒温槽において温度環境を変化させ、出力特性を確認した。計測にあたっては圧力センサー部の温度が安定した後 (通電後 30~60 分)、初期状態として室温約 20℃ の状態から、恒温槽設定温度を 50℃ (温度変化は約 30℃) まで上昇させ、1~2min 間隔で計測を行った。(PSI 計測に要する時間は 2sec 以下)。

3.2 センサー部の温度動特性

図5に恒温層内温度およびセンサー部温度の動特性を示す。センサー部温度の立ち上がりに要する時間はおよそ8分程度であり、遅れ時間は約4分半程度であった。また、温度変化を与えてからの整定時間は20分程度である。

3.3 温度特性（温度ドリフト）

PSIの温度特性を把握するため、以下の手法について比較を行った。

手法1: 温度ドリフト補正無し（温度補償機能を使用せず）。

手法2: 既知の圧力を空きPortにて計測し、温度ドリフト補正を行う。

手法3: 計測毎に基準点補正*1を行う。

手法4: 温度補償機能を用いた計測（基準点補正無し）

*1: 既知の圧力をセンサーにかけた時の出力変化により温度ドリフト量を補正する手法。

手法1における温度ドリフトを図6に示す。各センサー部の温度特性は全て異なるため、手法の検討に際しては同一温度変化において温度ドリフト量が最大となるport（以下worst case）にて比較を行う。手法1のworst caseを図7に示す。温度変化が+2℃程度でカタログ精度の±0.05%FSを超過し、温度整定時には-0.3%FSの温度ドリフト量を示すようになる。本結果より、温度ドリフト補正を行わないPSI計測においては、温度変化と伴に十分な計測精度が確保できなくなる。PSIの温度補償法として、既知の圧力計測を空きPortにて行い、温度ドリフト量の推算を行う手法2が考えられる。しかしながら、図6に示す様に、本報告にて使用したPSIの温度特性は比較的正負両方向に分布しているため、母平均がほぼ基準点付近となり、手法1と同様の結果となった。但し、温度補償機能の無い既存PSIにおいては、各圧力センサーの温度特性が比較的一致するものもあり、手法2による有効性が確認された例もある。手法2の適用にあたっては各センサーの温度特性を十分に確認する必要があり、補正用Portに起因する誤差範囲について検討しておく必要がある。

温度補償機能を用いずに各計測において基準点補正を行った手法3を図7に示す。結果、全ての温度勾配（センサー部2℃/min以下）においてStatic Accuracy0.05%FS範囲内に補正可能であることが確認できる。しかしながら、本手法においては温度変化による校正曲線の傾き変化（以下Span siftとする）が補正されないこと、及び基準点補正に多大な時間を要すること、を考慮する必要が

ある。本報告と類似した温度環境変化である場合、前項3.2にて示した温度動特性より、計測開始からおおよそ15分を経過した頃にセンサー部温度が整定する事が既知である為、その後の温度環境に変化がない限りにおいては基準点補正を行う必要は無く、若干の効率化は可能である。一般に各試験においてその温度特性を予見することは困難であるため、定期的な基準点補正が必要となる。

温度補償機能を使用した場合の温度ドリフト特性を図9に示す（手法4）。約20℃のセンサー部温度変化に対して概ねStatic Accuracy0.03%FS内に補正されており、先の手法1及び2と比較して十分な補償効果を確認する事ができた。

以上の結果をまとめて表2に示す。手法3は従来のPSIにおいても比較的高精度な計測が可能である事を示しているが、基準点補正に要する時間によりスキャニバルブと比較して大幅な試験効率向上は望めない。図8に示すworst caseより、温度補償機能を使用した場合においてもセンサー部温度変化量のリアルタイムモニタを行い、温度変化量5℃以下を目安に基準点補正を実施する事が、テストプロダクティビティおよび計測精度の両面で最適であると考え（この場合、予想される評価も併せ、表2に示す）。

4 システムの実運用結果

4.1 試験概要

JAXA 2m × 2m 遷音速風洞におけるシステム構成を図9に示す。翼型を有する圧力模型の断面圧力分布をPSIおよびスキャニバルブにおいて計測を行った。基準圧としてプレナム室静圧、校正用圧力として大気圧を使用した。

4.2 風洞試験時の計測手順

JAXA 2m × 2m 遷音速風洞における運用手順は以下の通りである。

- (1) 計測開始の約1時間程度前に計測システムの電源を投入する。（ESP スキャナ及び各機器のウォーミングアップのため）
- (2) 2.3項に示す各種設定を行う。
- (3) No-Wind 状態において、センサー校正を実施（基準点補正を含む）
- (4) 所定の計測条件（通風時）において、遠隔操作用PCよりコマンドを送信しPSIによる計測を実施。PSI計測終了後、スキャニバルブによる計測を実施。
- (5) 通風中においては、各センサの温度変化量（ Δt ）のリアルタイムモニターを行い、 $\Delta t=5^\circ\text{C}$ を目安に基準点補正を行う。
- (6) 通風終了後、データ処理装置にて解析を行う。

4.3 データ検討

スキャニバルブ計測値に対するPSI計測値の変動幅(20port)を図10に示す。翼面上の各圧力計測点においてスキャニバルブと良く一致しており、計測器間の圧力差分($\Delta P = \Delta p @PSI - \Delta p @SV$)についても $\pm 0.05\%FS$ 以内となっている。本PSIシステムは、既存圧力計測システムとの比較においても実用上問題無い事が確認できた。

一方、一般にスキャニバルブの場合、走査port間に圧力差がある場合、各portにおける走査時間を長く取る必要がある。本報告においては走査ポート間圧力差 $\Delta P (= \Delta p @PSI - \Delta p @SV)$ に及ぼす影響についても検討を行った(図11参照)。翼の上下面等、差圧の生じているPort間を連続して走査する場合、その差圧量に応じてPSIとスキャニバルブの差 ΔP が大きくなる傾向がある。PSI計測においては十分な平均化を行っていること及びセンサー一部が独立していることより、本現象はスキャニバルブの圧力検出部の応答遅れによる影響であると考えられる(ポートDelay Timeの変更により対応可能)。PSI計測においては、本現象の様な計測手法に起因する誤差可能性を排除することができ、より信頼性の高いシステムであると言える。

5 まとめ

5.1 成果

- (1) 温度補償機能付き高速多点計測システムについて既存システムとの比較において以下のことが判った。
 - ・センサー温度特性(立上がり, 整定, 遅れ時間)を把握した。
 - ・温度ドリフト特性を把握した。
 - ・温度補償機能の無いPSI計測においても、基準点補正を適切に行うことにより、温度変化が大きな環境下においても比較的良好な精度が確保可能である。(但し、基準点補正には90sec/point程度の時間を要するため、スキャニバルブに比べ大幅な試験効率の向上が期待できない。)
 - ・温度補償機能を用いたPSI計測の有用性を確認した。(但し、精度向上のためセンサー一部温度変化量5℃を目処に、基準点補正を行う方が良い。)
- (2) JAXA 2m×2m遷音速風洞における運用において、既存システムに対し精度及び試験効率の両面で優位性を確認する事が出来た。

表1 ESPスキャナ及びPDCRカタログスペック

Performance	PSI (ESP-64HD)		Scanivalve (PDCR23, 24)	unit
	with DTC	conventional		
Static Accuracy	± 0.03	± 0.05	± 0.06	% FS
Thermal Zero Error	-	± 0.06	-	%FS/°C
Thermal Span Error	-	± 0.02	-	%FS/°C
Total Thermal Stability	± 0.002	-	± 0.02	%FS/°C

表2 まとめ

No	項目	精度 [%FS]	計測 Port 数	計測時間	評価	備考
1	スキャニバルブ (既存システム)	$\pm 0.02^{*1}$	20	22 (120msec/point)	-	-
2	DTC_OFF (手法1)	-0.3	64	2以下	×	$\Delta t < 2^{\circ}C$
3	DTC_OFF+測定圧補正 (手法2)	-0.3	64	2以下	▲	偏り+span
4	DTC_OFF+基準点補正 (手法3)	± 0.02	64	92以下	△	span
5	DTC_ON (手法4)	± 0.03	64	2以下	○	$\Delta t < 5^{\circ}C$
6	DTC_ON+基準点補正	$\pm 0.002^{*1}$	64	2以下 ^{*2}	◎	推奨

*1: カタログ精度 %FS/°C。

*2: 実運用においてはMach数調整時などに基準点補正を行う事により効率低下を抑えることが可能である。

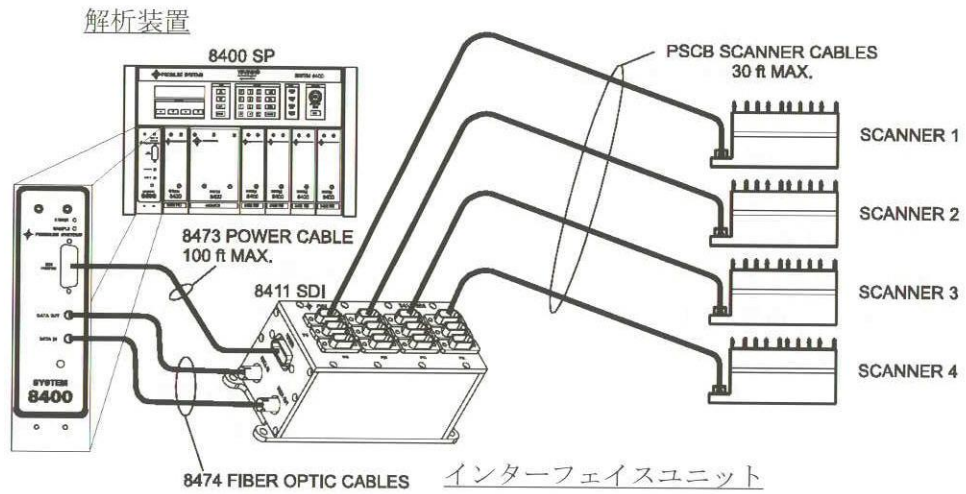


図1 PSI計測システム基本構成



図2 ESP スキャナ外観

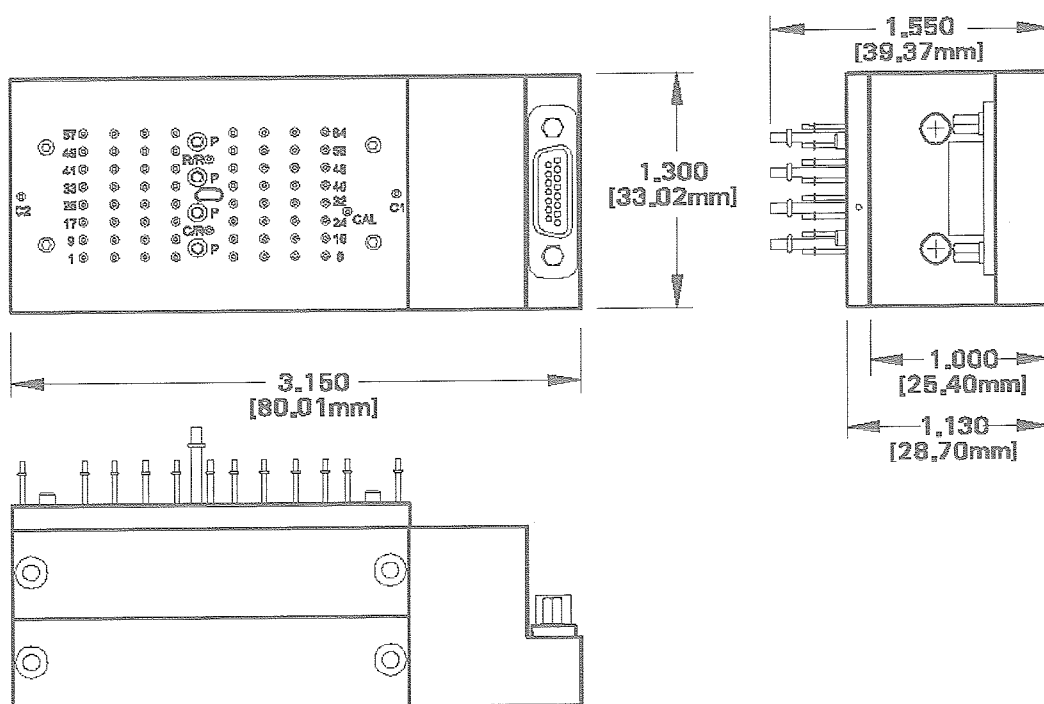


図3 ESP スキャナ寸法

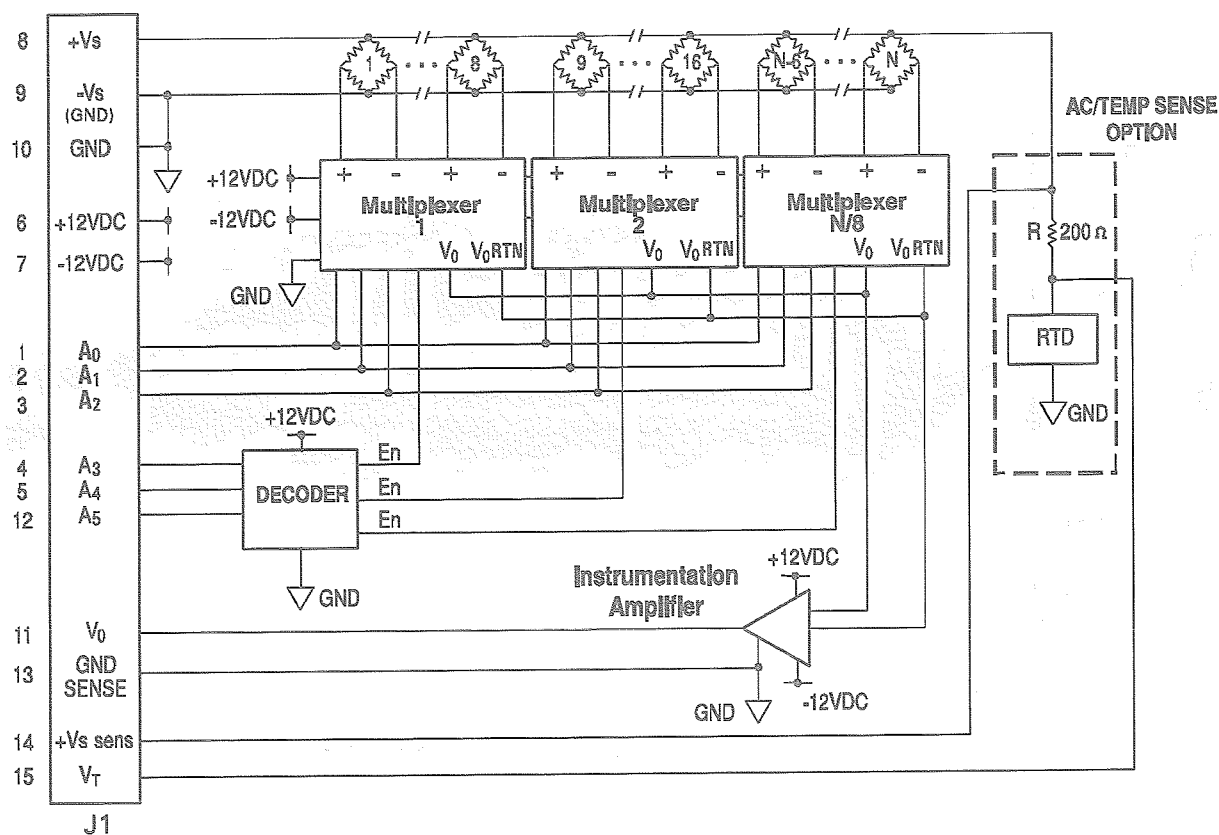


図4 ESP スキャナ内結線図

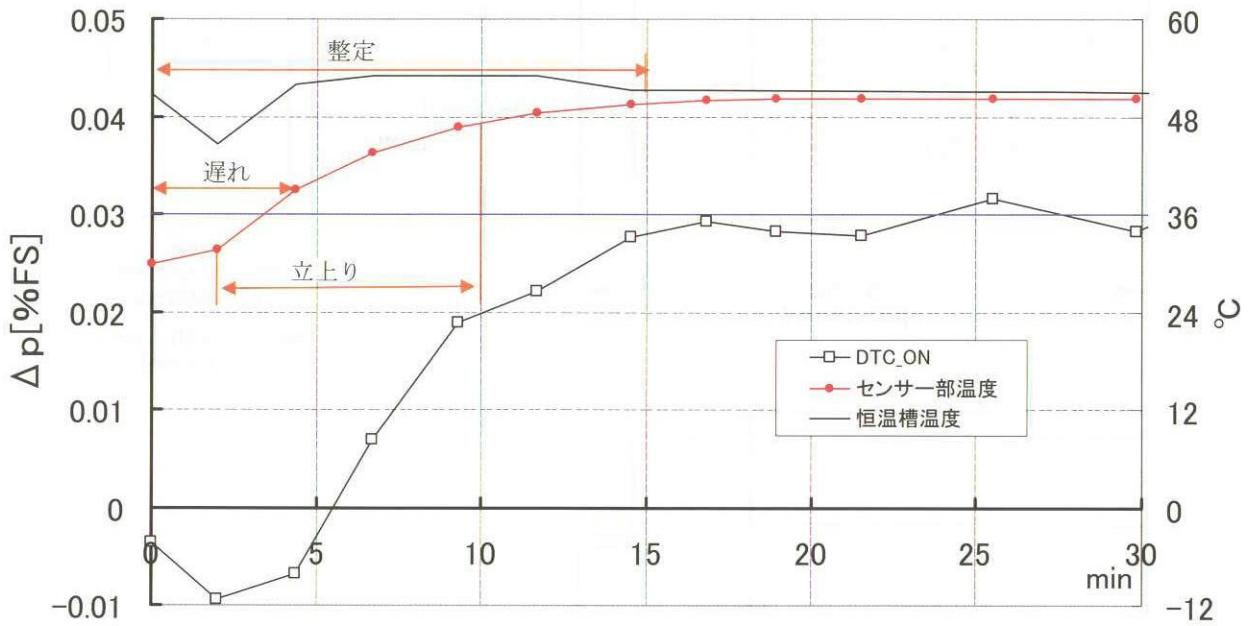


図5 ESP スキャナ温度動特性

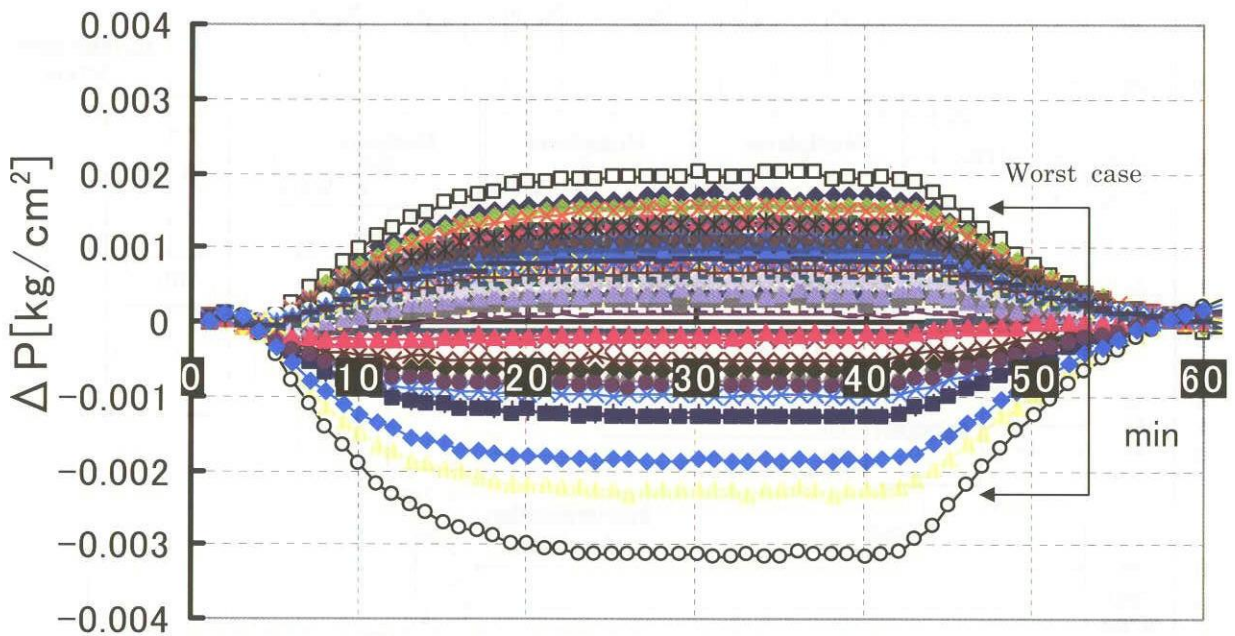


図6 温度ドリフト特性のばらつき (ESP64HD, 温度補償機能つき)

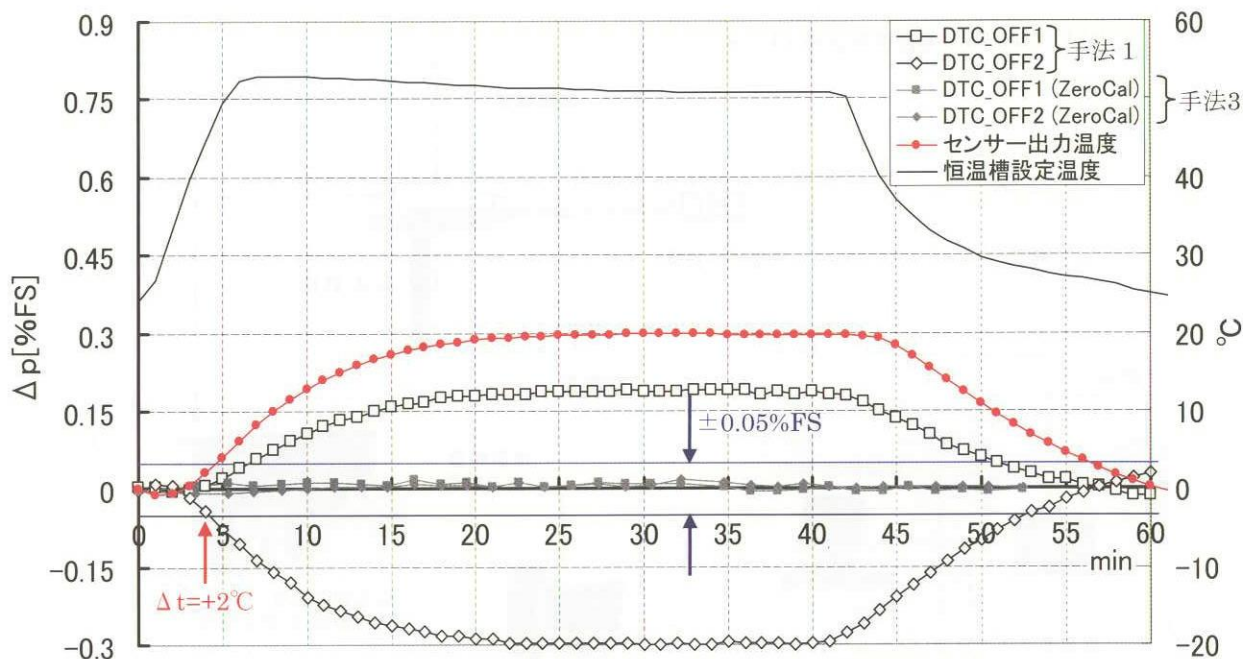


図7 温度ドリフト特性 (温度補償機能無し, worst case)

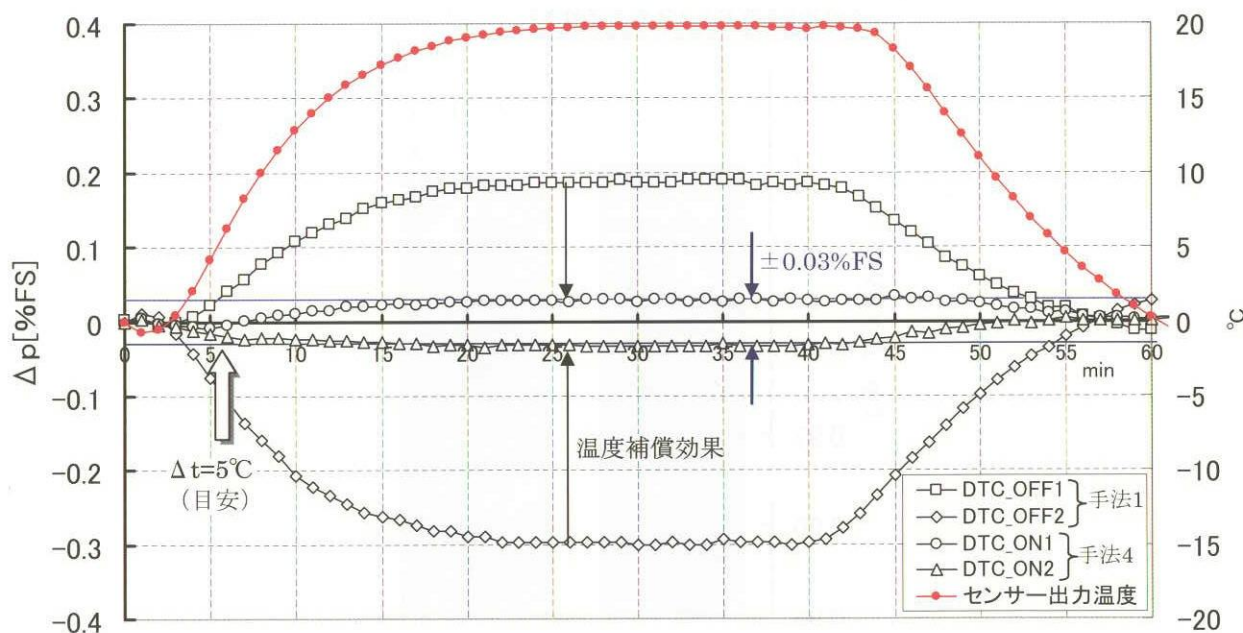


図8 温度補償効果 (worst case)

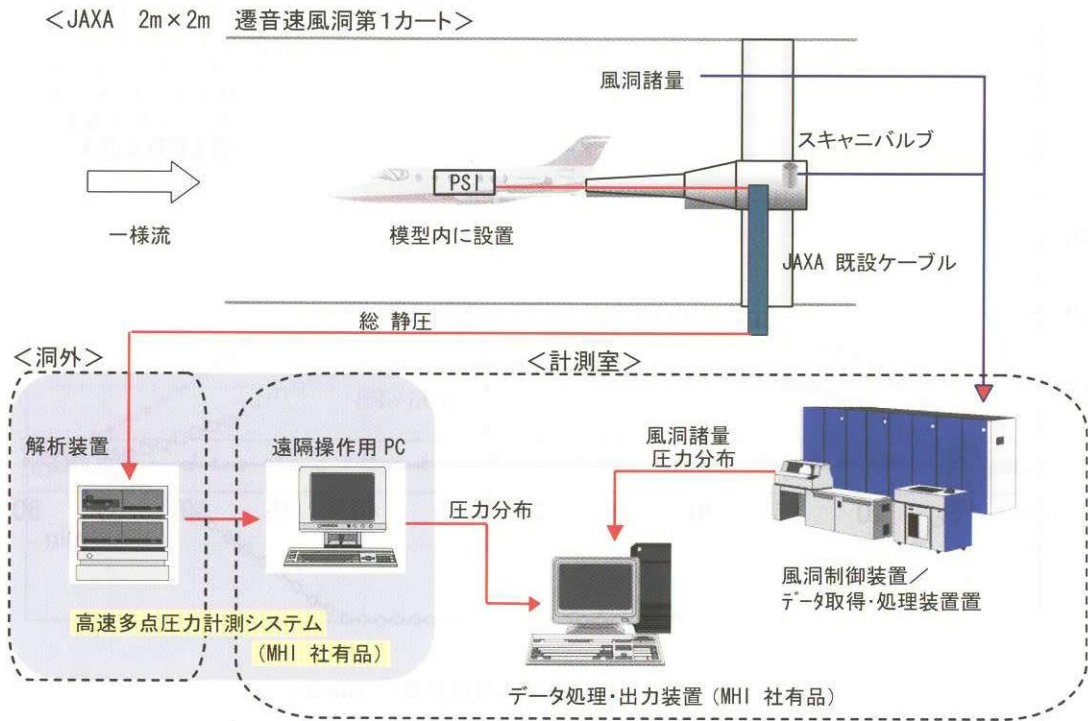


図9 風洞試験概要図

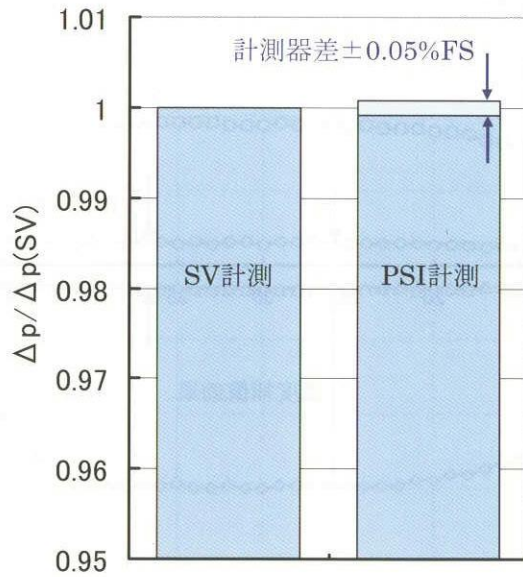


図10 計測器による違い
(Mach=0.6, 諸舵中立, $\alpha \beta = 0^\circ$, 20points)

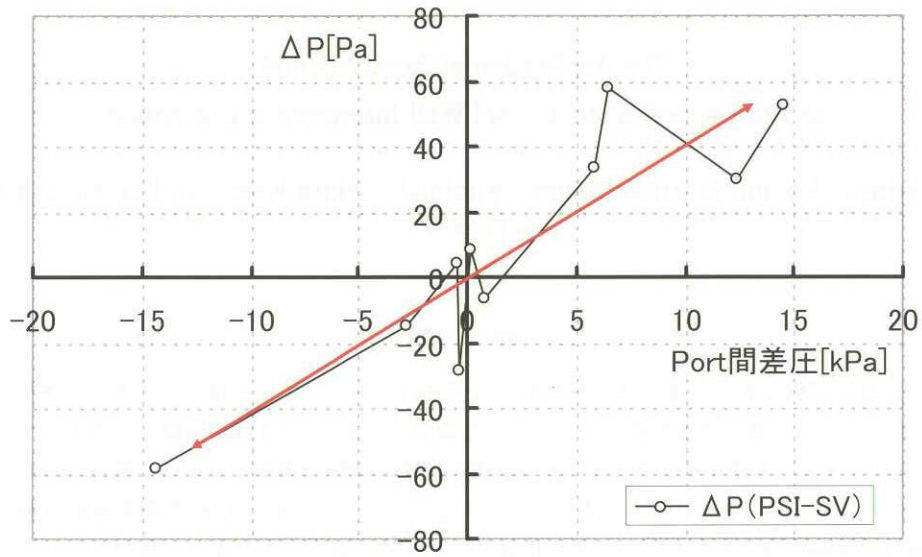


図11 Port間の差圧が及ぼす影響 (Mach=0.6, スキャニバルブ 120msec/port)