

# JAXA/WINTEC における低速 PSP 計測技術の研究開発

満尾 和徳, 栗田 充, 中北 和之, 藤井 啓介, 渡辺 重哉  
(宇宙航空研究開発機構)

## Research and Development of Low-Speed PSP Measurement System in Wind Tunnel Technology Center of JAXA

Kazunori MITSUO, Mitsuru KURITA, Kazuyuki NAKAKITA  
Keisuke FUJII and Shigeya WATANABE  
(JAXA)

### 概 要

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 風洞技術開発センター (WINTEC) では感圧塗料 (PSP : Pressure-Sensitive Paint) 計測システムの大型実用風洞群への構築を進めている。これまで超音速/遷音速風洞への実績は十分にあり、現在では国産小型旅客機開発にも貢献している。WINTEC では次のフェーズとして、PSP 計測システムの低速風洞実験への適用を進めている。低速 PSP 計測の応用範囲は広く、航空機開発だけではなく自動車や鉄道への利用も期待できる。しかし、圧力差の小さい低速域では PSP の発光強度変化が小さく温度の影響を受けやすいため、従来の計測方法では十分な計測精度が望めない。本稿では JAXA/WINTEC における低速 PSP システムの開発状況と計測精度向上への取り組みについて紹介する。

### 1. はじめに

圧力の違いによって発光強度が変化する感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) を用いた表面圧力場計測が注目を浴びている<sup>1,2)</sup>。これまで、超音速や遷音速域の速い気流中における PSP 計測は数多くの実績があり実用段階にある<sup>3,4)</sup>。近年、この PSP 計測を低速域へ適用する試みがなされており、各国の研究機関が開発を進めている<sup>5-8)</sup>。低速に適用できれば航空宇宙分野だけではなく、自動車や鉄道への応用が期待できる。

低速域では模型上の圧力差が小さいため PSP 発光強度の変化が小さく S/N が悪くなる。そのため、高速気流中では顕著に現れなかった誤差要因が問題になる。残念ながら、PSP は圧力感度と同時に温度感度を有する。例えばポルフィリンと呼ばれる感圧色素では 1℃あたり発光強度が約 1% 変化し、この変化量は圧力に換算すると約 1kPa に相当する。また、PSP の発光は励起光強度の安定性に強く依存し、励起光強度が 1% 変動すれば約

1 kPa の誤差になる。50m/sec の風速で動圧が 1.5kPa であることからこれらが致命的な計測誤差になることは容易に推察できる。励起光強度の変動に起因する計測誤差については、静圧孔を参照する圧力変換手法 (In-situ 法) を用いることで解消できるが、温度による誤差を軽減するためには積極的な温度補正が必要となる。

JAXA においても PSP システムの低速風洞への適用を進めている。PSP の温度感度に起因する計測誤差を補償するため、遷音速/超音速風洞実験では PSP/TSP 塗り分けによる温度補正を行っている。しかし、低速では微弱的な圧力変化を計測するため、感温塗料自身の計測精度や左右翼構造の差異に起因する計測誤差により十分な精度が得られなかった<sup>8)</sup>。

次に、通風直後の模型温度が通風中の温度と同じであるという仮定のもと、通風直後の基準画像を使用する<sup>9)</sup> ことにより PSP の温度補正を試みた。しかし、航空機模型のように翼厚が薄い構造ではこの仮定は実現せず、計測精度向上のためには積極的な温度補正が必要である

ことがわかった<sup>10)</sup>。

本研究では上記問題を解決するために温度補正法として、赤外線カメラ (IR カメラ) を用いた PSP 温度補正<sup>10)</sup>と、感圧/感温複合塗料による温度補正を試みた。PSP が塗られた部分の温度分布を直接計測できるので上述したような問題は生じず、計測精度向上が期待できる。なお、データ処理は In-situ 法を用いるため励起光強度変動に起因する計測誤差は受けない。本研究では実証試験に 8.5 % SST 模型 (3 次形状) を用いてデルタ翼表面圧力場を計測し、システムの温度補正機能の有効性を評価した。

## 2. 温度補正を考慮した PSP 計測法

### 2.1 PSP の仕様

IR カメラ併用 PSP 計測システムにおいて実験で使用した PSP は、白金ポルフィリン (PtTFPP) とフッ素系ポリマー (Poly-IBM-co-TFEM) からなる。この PSP は圧力感度が高く、光劣化にも強い。参考までに、PSP の圧力/温度感度特性を図 1 と図 2 に示す。PSP は圧力感度特性と同時に温度依存性を有するため温度補正が必要となることがわかる。実験では、この温度による PSP 発光強度の変化分を、IR カメラで計測した温度を用いて補正し、圧力画像を算出した。

次に、実験に使用した複合感圧塗料 (複合 PSP) の仕様を示す。複合 PSP とは、PSP に温度を計測するための感温色素を混合したものであり、要求される特性として以下のものが挙げられる。

- (1) 2 色素を共通の励起波長で励起できる。
- (2) 2 色素の発光がはっきりと分離できる。
- (3) 2 色素、ポリマーは共通の溶媒に溶解する。
- (4) 2 色素の感度特性の一様性。
- (5) 光劣化に強い色素を組み合わせる

複合 PSP が発する 2 色の発光を、異なる光学フィルタを介して CCD カメラで計測することにより、圧力分布と温度分布を得ることができる<sup>11,12)</sup>。

本実験で使用した複合 PSP は、感圧色素である白金ポルフィリン (PtTFPP)、感温色素であるクマリン (C6H)、およびフッ素系ポリマー (Poly-IBM-co-TFEM) からなる。感圧色素と感温色素の発光ピークは 650nm と 460nm にある。発光波長の分離性が高く、共通の波長で励起できる。さらに、両色素とも共通の溶媒に可溶である。感圧色素の圧力感度特性と感温色素の温度感度特性を図 3、4 に示す。感圧色素の圧力感度は温度に依存せず、また感温色素の温度感度は線形性が良い。

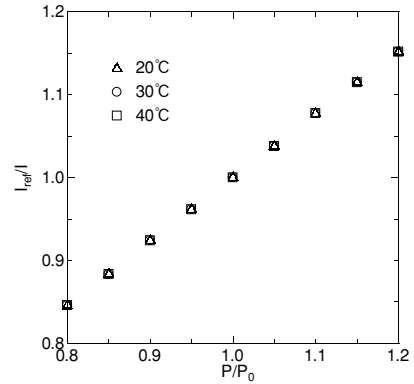


図 1 感圧塗料の圧力感度

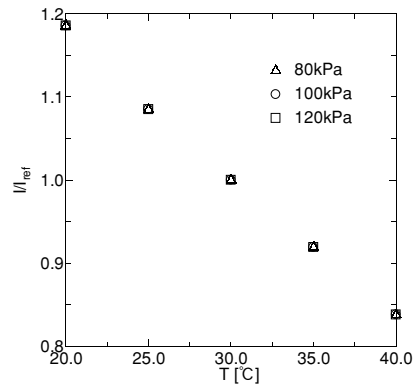


図 2 感圧塗料の温度感度

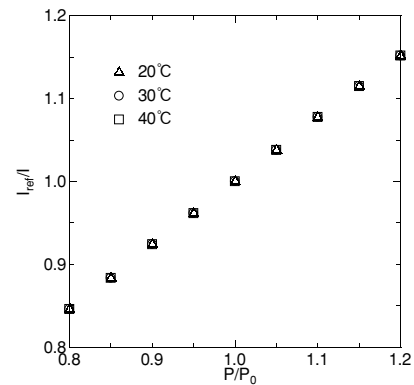


図 3 複合 PSP における感圧色素の感圧特性

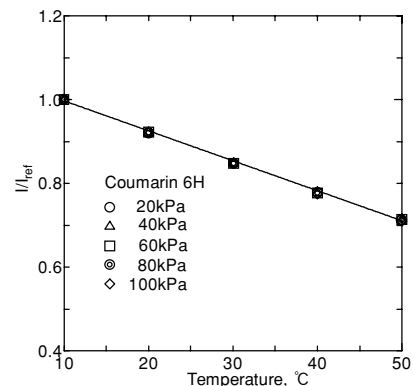


図 4 複合 PSP における感温色素の感温特性



### 3. PSP 画像処理方法

本計測システムでは、IR カメラによって得られた温度分布、あるいは複合 PSP を用いて計測した温度分布を用いて PSP の温度補正を行った。PSP 画像から圧力画像への変換は、静圧孔を参照する In-situ 法を用いた。PSP の温度感度特性（発光強度と温度の関係）を予め計測しておき、計測した温度分布から PSP の発光強度補正を行った。

なお、通風時と無風時の模型温度差が小さい方が計測誤差を軽減できるため、無風時画像として通風直後の画像を用いることにした。画像処理手順は以下の通りである。

- (1) PSP 画像の平均化とダーク画像減算（CCD のショットノイズを軽減し、S/N を高めるため処理画像枚数を 64 枚とした）
- (2) 模型上のマーカー座標を用いて、通風時画像と無風時画像の位置合わせ
- (3) IR カメラ（複合 PSP）により取得された温度分布を用いて、通風時画像（ $I_{run}$ ）と無風時画像（ $I_{ref}$ ）の温度補正
- (4) 圧力孔周り発光強度比（ $I_{ref}/I_{run}$ ）と静圧孔データから In-situ 較正曲線を求めて、PSP 画像を圧力画像へ変換

## 4. 計測結果

### 4.1. IR カメラ併用 PSP システムによる計測結果

$U=50$  m/s,  $AoA$  (Angle of Attack)  $=20^\circ$  における IR カメラを用いて計測した温度分布を図 8 に示す。通風中の温度分布はほぼ均温であるが、通風直後の温度分布は翼端の温度が低く、不均一であった。これは、模型翼端の翼厚が薄く、また試験を実施したのが真夏（7 月）の気温が高い日であったため、風洞を停止した直後から翼端の温度が急激に低下したことが原因である。このように、模型の温度分布は環境温度に左右されやすく、PSP 計測精度を高めるためには積極的な温度補正が必要である。

本 PSP システムを用いて計測した圧力画像を図 9 に示す。デルタ翼特有の前縁剥離渦により生じる低圧領域が鮮明に可視化されているのがわかる。迎角が大きい場合、デルタ翼の上流側に強い低圧領域が形成され、迎角が小さくなるに従い下流方向に低圧領域が伸びている。なお、楕円で囲まれた領域はオイルで汚染された箇所であり、その領域は正確に計測できなかった。

次に、静圧孔データと PSP 計測結果の比較を図 10 に

示す。図中には PSP の IR 画像による温度補正処理ありと無しの結果を示してある。温度補正処理無しとは、通風直後の基準画像でのみ処理した結果を意味する。すべてのケースにおいて温度補正を施すことにより明らかに計測精度が改善されているのがわかる。

計測精度を評価するため、PSP 画像を圧力に変換する際に用いた In-situ 較正曲線（ $U=50$ m/s,  $AoA=16^\circ$ ）を図 11 に示す。温度補正処理を行った結果ではデータのばらつきが軽減され、温度による影響が補正されていることがわかる。温度補正ありの場合は、RMS (Root-mean-Square) 値は  $C_p=0.07$  であり、補正無しの場合は  $C_p=0.25$  であった。ここで示す RMS は、PSP により得られた測定値の In-situ 較正曲線に対する差分から算出した。

IR カメラを併用したシステムを用いることにより、計測精度は著しく向上したが、実用化を想定した場合、以下の点が問題となる。IR カメラで認識させるためアルミ箔マーカーは PSP の上に貼り付けなければならない、そのため通風中に剥がれることがあった。また、観測用光学窓ガラス材質が限定されることや、周囲温度の写りこみ、異なるシステムを併用することによる手間が問題として挙げられる。

### 4.2 複合 PSP システムによる計測結果

複合 PSP システムを用いて計測した圧力分布と、通風と無風間の温度差分布（ $U=50$ m/s,  $AoA=20^\circ$ ）を図 12 に示す。圧力分布からデルタ翼特有の前縁剥離渦により生じる低圧領域が鮮明に可視化できているのがわかる。また、温度分布から翼端ほど温度変化が顕著であることがわかる。この傾向は、IR カメラで測定した温度分布と合致している。

次に静圧孔データと PSP 計測結果の比較を図 13 に示す。図中には複合 PSP による温度補正ありと無しの結果を示してある。温度補正無しは、通風直後の基準画像で処理した結果である。温度補正を施すことにより計測精度が改善されているのがわかる。

計測精度を評価するため PSP 画像を圧力に変換する際に用いた In-situ 較正曲線を図 14 に示す。温度補正処理を行った結果ではデータのばらつきが軽減され、温度に起因する計測誤差が軽減されていることがわかる。温度補正ありの場合で RMS 値は  $C_p=0.15$ 、補正無しの場合で  $C_p=0.17$  であった。

$C_p$  分布をみるとノイズ成分が多いように感じられる。IR カメラを用いた温度補正の結果と比較するとわかる

ように、IRカメラによる補正の方が鮮明に圧力場を計測できている。この理由は、感温色素による温度データのS/Nが悪く、その結果を反映しているためである。精度良く温度を計測するためにはさらに温度感度の高い感温センサーを用いる必要がある。

比較のため両システム（IRカメラ併用PSPシステムと複合PSPシステム）の星取表を表1に示す。IRカメラを併用したシステムの方が精度良く計測することができるが、光学アクセスの汎用性や同じタイプのカメラでシステムを構築できる利点などから、複合PSPシステムの方が実用向きであると言える。

表1 各PSPシステムの星取表

項目	標準PSP計測	IRカメラによる補正	複合PSPによる補正
計測精度 (RMS)	× (Cp~0.2)	○ (Cp~0.1)	△ (Cp~0.15)
計測準備の時間	○ 通常のPSPと同じ	× 異なる2つのシステムを抱えることによるため時間がかかる	○ 通常のPSPとほぼ同じ
実用化	× 高い計測精度が望めない。	× ・アルミ箔のマーカースか使えない。厚みがあるため突起になりやすく、剥がれやすい。 ・使用できる光学窓ガラス材質が限られている。 ・周囲温度の写りこみ	○ 現時点での複合塗料は、感温色素の温度感度が悪く、精度が悪い。しかし、色素の改良により精度改善が期待できる。

## 5. まとめ

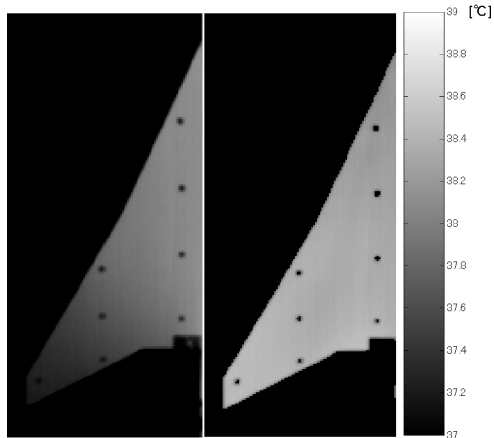
低速PSP計測の精度向上を目的として、IRカメラを併用したPSPシステムと、複合塗料を用いたPSPシステムを開発し、JAXA低速風洞(LWT2)においてそれぞれのシステムを評価した。積極的な温度補正を施さない従来の計測と比較して、いずれの手法も計測精度を高めることができた。実用化の観点からすると、複合PSP計測システムの方が現実的である。現在のところ感温センサーの温度感度は低く未だ実用段階にないが、大学の協力のもと複合PSPシステムの実用化に向けて開発を進める。

## 参考文献

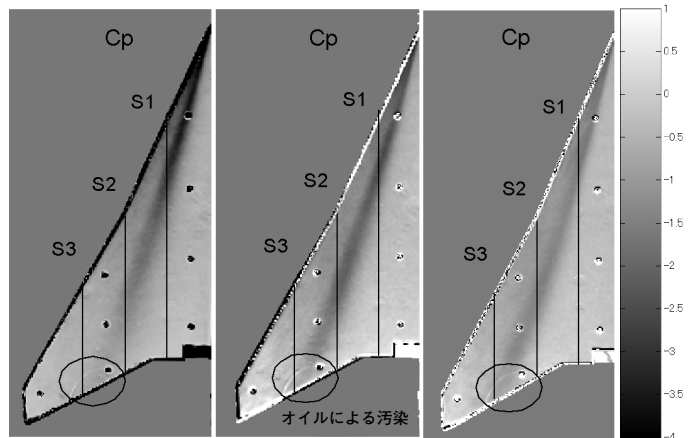
- [1] Bell, J. H., Schairer, E. T., Hand, L. A. and Mehta, R. D., "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," Annu. Rev. Fluid Mech., 33, 2001, pp.155-206.
- [2] Liu, T., Campbell, B. T., Burns, S. P. and Sullivan, J. P., "Temperature- and Pressure-Sensitive Luminescent Paints in Aerodynamics", Appl. Mech. Rev., 50-4, 1997, pp.227-246.
- [3] Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Watanabe, S.,

"Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA", Meas. Sci. Technol. 17 No 2, 2006, pp.359-366.

- [4] Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K. and Watanabe, S., "Temperature Correction of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing", Journal of Aircraft, Vol.43 No.5, 2006, pp.1499-1505.
- [5] Le Sant, Y., Bouvier, F., Merienne, M. C. and Peron, J. L., "Low Speed Tests using PSP at ONERA," 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2001-0555, Reno, Nevada, 2001.
- [6] Mitsuo, K., Kurita, M., Kuchi-Ishi, S., Fujii, K., Ito, T. and Watanabe, S., "PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel", AIAA-2007-1065, Reno, Nevada, 2007.
- [7] Mebarki Y. and Cooper K.R., "Aerodynamic Testing of a Generic Automotive Model with Pressure Sensitive Paint," the 10th International Symposium on Flow Visualization, ISFV-2002-F0120, Japan, 2002.
- [8] Mitsuo, K., Nakakita, K. and Kurita, M., "Application of Pressure-Sensitive Paint to Low-Speed Wind Tunnel Testing at Japan Aerospace Exploration Agency," 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004-3.2.3, Yokohama, Japan 2004.
- [9] Bell, James H., "Applications of Pressure-Sensitive Paint Testing at Very Low Flow Speeds," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-2004-0878, Reno, Nevada, 2004.
- [10] Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K. and Watanabe, S., "Temperature Correction of PSP Measurement for Low-Speed Flow Using Infrared Camera," 21st International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF' 05 10-1, 30 August, Sendai, Japan, 2005.
- [11] Mitsuo, K., Asai, K., Hayasaka, M. and Kameda, M., "Temperature Correction of PSP Measurement Using Dual-Luminophor Coating," Journal of Visualization, Vol.6, No.3, 2003, pp.321-331.
- [12] 田部井孝聡, 満尾和徳, 浅井圭介, 亀田正治「複合塗料を用いた圧力・温度場計測」第31回 可視化情報シンポジウム, 2003年7月22日.



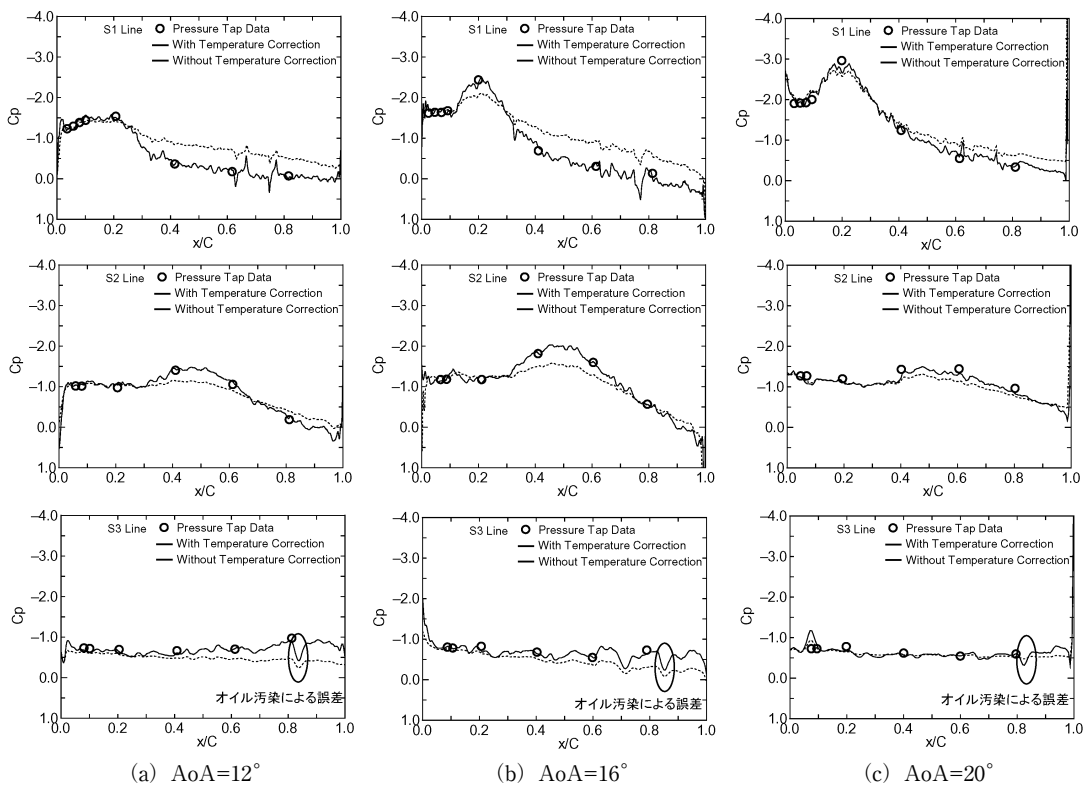
(a) 無風時の温度分布 (b) 通風時の温度分布



(a) AoA=20° (b) AoA=16° (c) AoA=12°

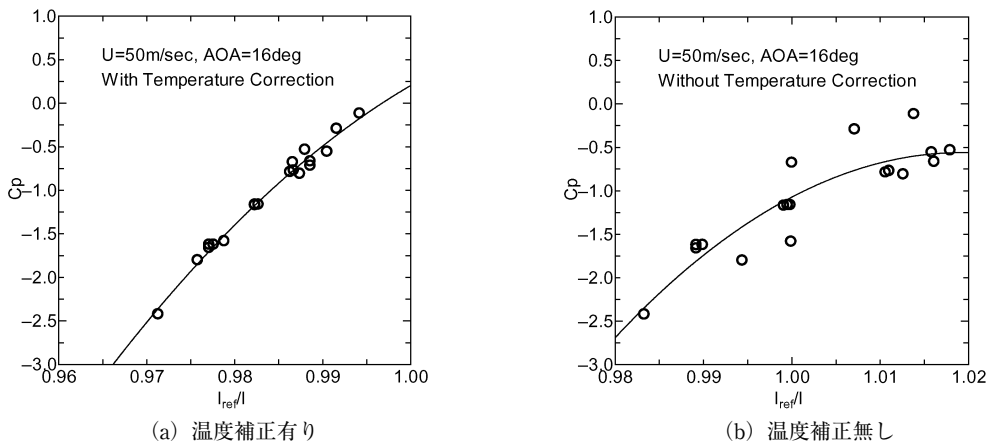
図 8 IR カメラで計測した温度分布 (U=50 m/s, AoA=20°)

図 9 IR カメラ併用 PSP システムで計測した圧力分布 (U=50m/s)



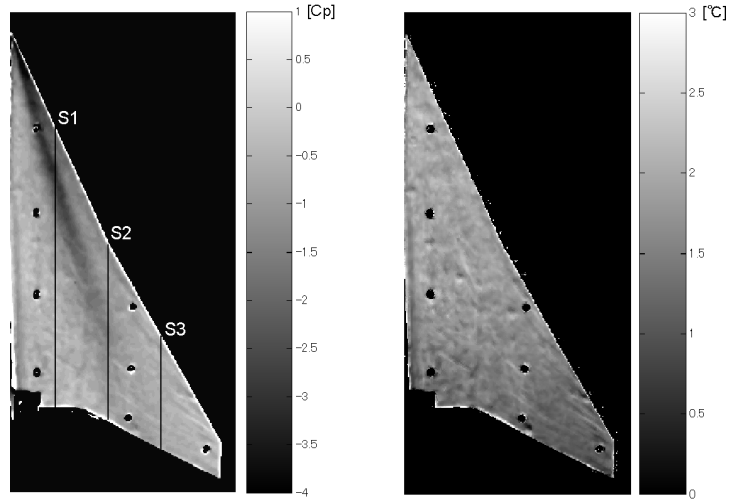
(a) AoA=12° (b) AoA=16° (c) AoA=20°

図 10 PSP データと静圧孔データとの比較 (U=50m/s)



(a) 温度補正有り (b) 温度補正無し

図 11 In-situ Calibration カーブ (U=50m/s, AoA=16°)



(a) 圧力分布 (b) 温度差分布 (通風時温度-無風時温度)

図 12 複合 PSP による計測結果 (U=50m/s, AoA=20deg.)

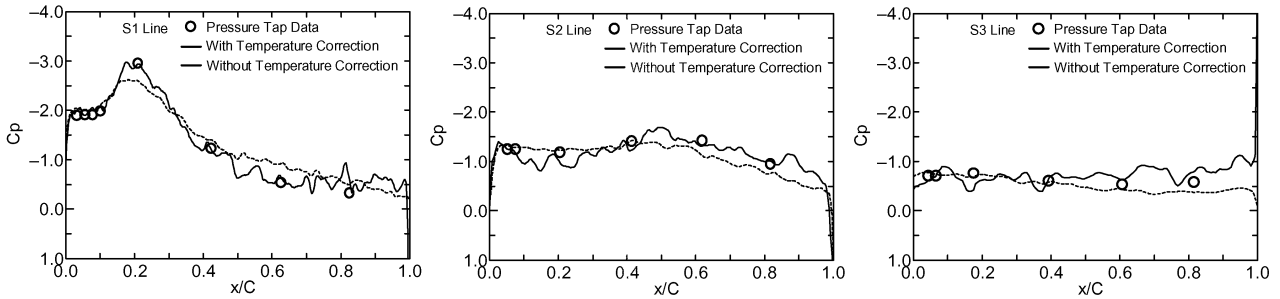
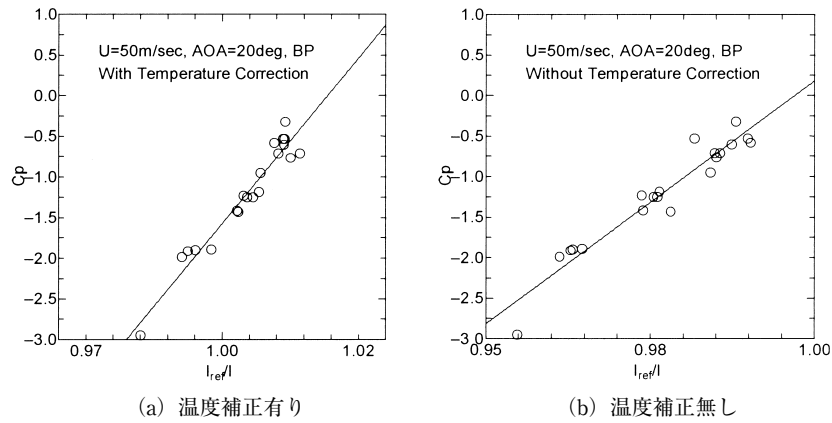


図 13 複合 PSP データと静圧孔データの比較 (U=50m/s, AoA=20deg.)



(a) 温度補正有り

(b) 温度補正無し

図 14 複合 PSP システムの In-situ Calibration カーブ (U=50m/s, AoA=20deg.)