

自動 PSP 計測システムの研究開発

栗田 充、中北和之、満尾和徳（宇宙航空研究開発機構）
山谷英樹（IHI エアロスペース・エンジニアリング）

Automatic System for JAXA Pressure-Sensitive Paint Measurement

Mitsuru Kurita, Kazuyuki Nakakita, Kazunori Mitsuo (JAXA),
Hideki Yamaya (ISE)

概要

This paper describes a data processing method of a pressure-sensitive paint measurement in an industrial wind tunnel in Japan Aerospace Exploration Agency. In the industrial wind tunnel, the productivity is important as well as the accuracy of data. Data processing techniques are discussed to enhance the processing data rate. Especially a key technique is a method of detection of target markers in the image registration. The proposed data processing method is evaluated in JAXA's 2m x 2m transonic wind tunnel. The measurement system consists of several cameras that are controlled automatically. As the result, the measurement system realized a quasi-real-time pressure-sensitive measurement, which leads high productive pressure-sensitive paint measurement to the industrial wind tunnel.

1. はじめに

JAXA 風洞技術開発センターは風洞計測システムと連動させた Pressure-Sensitive Paint (PSP)計測システムの開発を進めている。PSP 計測法は光学的手法により風試模型の圧力場を非接触で定量的に計測できる特長を持つ。特に、3次元位置情報を持った圧力分布を得られることは、流れ場診断のみならず CFD 検証や空力荷重推算で直接利用できる点において、航空宇宙機の空力設計および構造設計の評価を行う上で非常に有力な技術になる。

JAXA 風洞技術開発センターでは、これまでに、1m×1m 超音速風洞、2m×2m 遷音速風洞、2m×2m 低速風洞及び 6.5m×5.5m 低速風洞へ PSP 計測技術を適用しその実用化を進めてきた。その成果は JAXA プロジェクトや国産旅客機等の実機開発に活用されている^{1~5)}。

しかし、画像を扱う PSP 計測は計測やデータ処

理に手間がかかる。これまでもデータ生産性の向上を進めてきたが、まだ手作業に頼る部分も多く、データ計測からデータ処理完了までに数週間を要していた。そのため、少なくとも計測したその日の内にデータ処理が完了するスピード化が求められている。

そこで、JAXA 航空本部風洞技術開発センターでは「基幹 PSP 計測システム」と題し、準リアルタイムとワンマンオペレーションをキーワードとして、カメラや励起光源を含む PSP 計測機器を風洞計測システムと連動させて、データ計測からデータ処理までを自動で行う PSP 計測システムを開発してきた。この内、本稿では、データ処理技術に関して PSP 計測システムを構築するために重要となる技術課題をあげ、その課題を解決するための手法を提案するとともに、JAXA 2m×2m 遷音速風洞における適用結果について述べる。

2. PSP 計測システム

PSP 計測システムはカメラ、PSP を励起させるための光源、トリガ信号発生装置及びパソコンで構成される(図1及び図2参照)。PSP 計測システムは風洞計測システムの圧力計測開始のトリガ信号によりカメラの撮影を開始する。カメラはメインのパソコンから遠隔操作され、PSP の発光を計測した画像データがオペレータの監視モニターに表示される。

カメラは複数台を同時に使用する。計測に1台のカメラのみを使用した場合は、計測できる模型表面の領域は限られる。複数台のカメラを使用することにより広い模型表面領域を同時に計測し、かつ、各カメラのデータを統合したデータ処理を行うことで、データ生産性を飛躍的に向上できる。

本研究では強度法を使用しているため、無風状態の発光強度データ、通風状態の発光強度データ及び光の無い暗い状態でのデータが必要である。この複数の画像データは、さらに風洞計測システムで計測した圧力孔データ及び気流データと対応付ける必要がある。そこで、風洞試験をスムーズに遂行させるため、予定の風洞試験ケースとともにこれらの対応関係の情報を風洞計測システムと PSP 計測システムの両方に予め登録しておく。なお、PSP 計測システムにはさらにカメラの露光時間や計測画像枚数等も登録しておく。

画像の計測が終了次第、メインのパソコンはデータ処理用パソコンに画像計測終了の信号を伝える。データ処理用パソコンはデータ処理に必要な、画像と風洞データを各々対応させた上でデータを処理する。

PSP は圧力のみならず温度にも感度を持つ。そのため、データ精度を確保するためには PSP の温度補正が必須である。通風中の模型表面の温度を知るために、模型の左右の流れ場の対称を仮定し、片側に PSP を、もう一方に感温塗料(TSP: Temperature Sensitive Paint)を塗装する(図3参照)。PSP と近い波長の TSP を使用する場合は、光学フィルタを付けたカメラ1台で PSP と TSP の2つの波長を計

測することができる。なお、この塗装方法は模型内部構造が左右均等とみなせ、かつ、横滑り角がない条件で有効である。

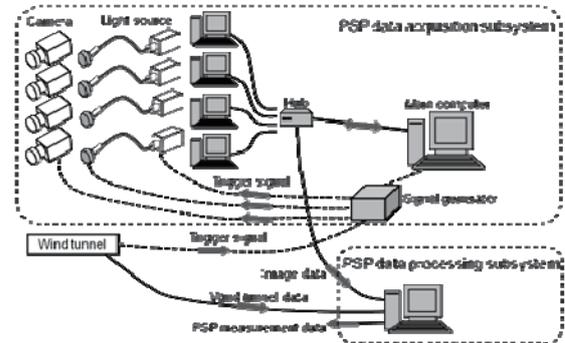


図1 計測システムの概要

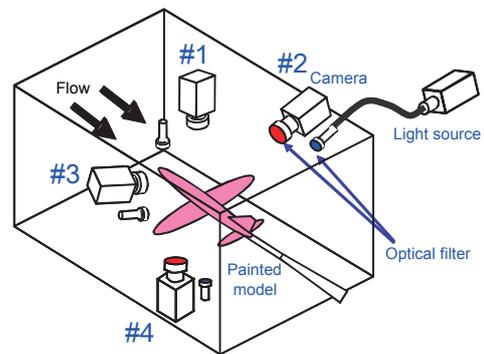


図2 カメラの設置例

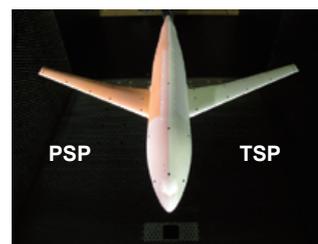


図3 塗装した模型

3. PSP 計測データ処理

PSP 計測データ処理の概要を図4に示す。まず、計測した画像のノイズ低減をさせた後に、画像を3次元格子⁶⁾にマッピングする。次に、self-illumination⁷⁻⁹⁾及びPSPの温度依存性を補正した後に、最終的に発光強度データを圧力データに変

換する²⁻⁴⁾。

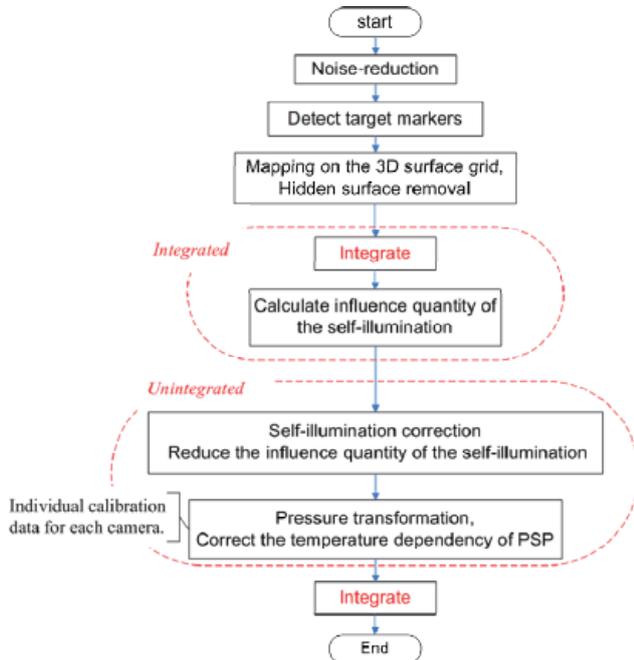


図4 データ処理の概要

3.1 マッピング

PSP計測の強みは3次元の位置情報を持つ圧力分布のデータが取得できることである。これは空力荷重推算やCFD検証に直接役立つ。

カメラで計測したPSP及びTSPの発光強度データは、次式のDLT(Direct Linear Transformation)により3次元の表面格子にマッピングされる。

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2)$$

(x, y) は画像座標におけるピクセル位置 [pixel]、 (X, Y, Z) は世界座標における位置 [mm]であり、係数 L_i は模型に設置され予め正確な位置データを持ったターゲットマーカを使って較正される。

3.2 Self-illumination 補正

PSPは発光するため、向かい合う面は互いに照らしかう。そのため、本来よりも強い発光強度が計測される self-illumination の影響による計測誤差を考慮する必要がある。図5はカメラで撮影した翼上の

PSP発光データには、翼上で反射した胴体上でのPSPの発光が含まれていることを示す。

self-illuminationの影響は拡散反射を仮定したラジオシティ法により補正する⁷⁻⁹⁾。要素面 S_i の光強度 I_i は、要素面 S_i が放射する光強度 $I_i^{(0)}$ と、他の要素面 S_j から放射される光のうち S_i に到達する光の反射成分との総和として表される。反射率 R_i は較正試験により予め得ておく。

$$I_i = I_i^{(0)} + R_i \sum_{j=1}^N A_{ij} I_j \quad (3)$$

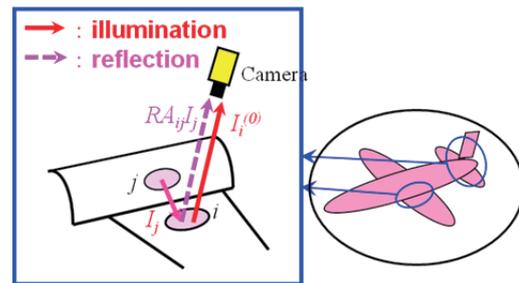


図5 Self-illumination

3.3 PSP温度依存性の補正

TSPを使用してPSPの温度依存性を補正する。較正試験により事前に得たPSPとTSPの発光強度の圧力と温度に対する関係を用い、風洞試験中のPSPとTSPの発光強度から模型表面の圧力と温度とを求める²⁻⁴⁾。

3.4 マルチカメラ

複数台のカメラを使用したマルチカメラシステムを構築することにより、広い模型表面領域を同時に計測し、かつ、各カメラのデータを統合したデータ処理を行うことで、データ生産性を向上させる。

4. データ生産性向上における技術課題

データ生産性の向上において特に重要となるのが、1) マッピングにおけるターゲットマーカの検出、2) self-illuminationの補正、3) PSPの専門家以外でも使える簡単な操作性である。

4.1 ターゲットマーカ検出

マッピングのための画像上のターゲットマーカ

の検出はデータ生産性に大きなインパクトを与える。数枚の画像であれば、手作業でターゲットマーカを容易に検出できる。しかし、実用風洞試験では1日当たり数百枚の画像を計測する。通常、1～2週間程度実施する風洞試験の画像の合計枚数は膨大になるため、ターゲットマーカの検出の自動化は必須技術である。

また、模型表面には部品を固定するためのネジ穴がある。そこはPSPを塗装できない場合も多い。ネジ穴部分は大きさ及び形がターゲットマーカに酷似しているため、ターゲットマーカ検出における誤認を防ぐ技術が特に重要になる。なお、圧力分布を計測するという観点からはターゲットマーカは出来る限り小さい方が好ましく、また、科学計測用CCDカメラは画素数が大きくないので、画像の形状認識のみによるターゲットマーカの検出は難しい。

さらに、模型は多様な姿勢角を持つため画像上でのターゲットマーカの移動量は大きい。以上のことから、画像におけるターゲットマーカの検出は実用風洞試験において非常に重要なキー技術となる。

4.2 Self-illumination の補正

フォームファクタ A_{ij} はデータサイズが大きい。本稿では10GB弱のサイズである。これまではフォームファクタを分割してハードディスクに保存し、計算の度に読み込んでデータ処理を行う必要があったため計算時間が大きかった。本研究の条件では約80秒程度必要であり、風洞の計測の間隔内に収まらないという課題がある。

4.3 操作性の向上

風洞試験のスケジュールに柔軟性を持たせるためには、PSPの専門家でなくても計測及びデータ処理ができる簡単な操作性が重要になる。

5. データ生産性向上における技術課題の解決策

5.1 ターゲットマーカ検出

重要な技術課題はターゲットマーカの誤認を防ぐことである。そのため、画像上のターゲットマー

カ位置を予測した上で検出を行う。

図6は基本的なターゲットマーカ検出の概要を示す。工程はSTEP1からSTEP4に分けられる。本研究での手法は3次元の模型(世界座標系)と2次元の画像(画像座標系)の幾何学的な関係を使用する。カメラの位置は固定されているので、3次元の模型上のターゲットマーカ位置が分かれば、幾何学的関係から画像上のターゲットマーカ位置を予測することができる。

STEP1 カメラ較正: 3次元のターゲットマーカ位置は予め正確に計測されている。風洞内の基準の高さに設置した場合の模型の画像と、模型を既知の高さに上下させた場合の模型の画像を計測しておき、それらのターゲットマーカの3次元位置と画像上のターゲットマーカ位置から式(1)及び式(2)の係数を求めてカメラを較正する。なお、この作業は手作業でのターゲットマーカ検出が必要になる。

STEP2 初期予測: 風洞模型は多様な姿勢を持つ。そのため、各姿勢での3次元の模型ターゲットマーカ位置は模型姿勢角と支持系の長さから算出される。ここで算出した3次元の模型ターゲットマーカ位置 (X, Y, Z) をSTEP1で求めたDLTに代入することで、画像上のターゲットマーカ位置 (x, y) を予測する。

STEP3 平行移動: 通風中、模型は空力荷重によって移動や変形が生じる。そのため画像上のターゲットマーカ位置が大きく移動する。そのため、STEP2の初期予測位置だけでは高い検出率は得られない。そこで、まず、STEP2の初期予測位置と実際のターゲットマーカの位置の差を求め、次に、初期予測位置を平行移動させることで、模型の移動による初期予測位置からのずれを補う。

STEP4 カメラ較正の更新: ここまでに検出できたターゲットマーカを使用してDLTを再較正する。これは模型とカメラの相対的な位置を微修正することに相当する。この再較正は検出されるターゲットマーカの数が増えなくなるまで繰り返す。

5.2 Self-illumination の補正

近年はメモリサイズの大きいパソコンが廉価になっている。そのため、フォームファクタ A_{ij} はメモリに格納した上でデータ処理を実施する。

5.3 操作性の向上

風洞通風中は風洞計測システムと連動させて自動で PSP の計測及びデータ処理を実行させる。オペレータは監視のみを主に実施し、何かしらのトラブルが生じた場合のみに対応を行う。

GUI を使用することにより操作性を向上させる。また、風洞試験終了後のオフラインの処理も同じ操作画面でデータ処理することを可能にする。

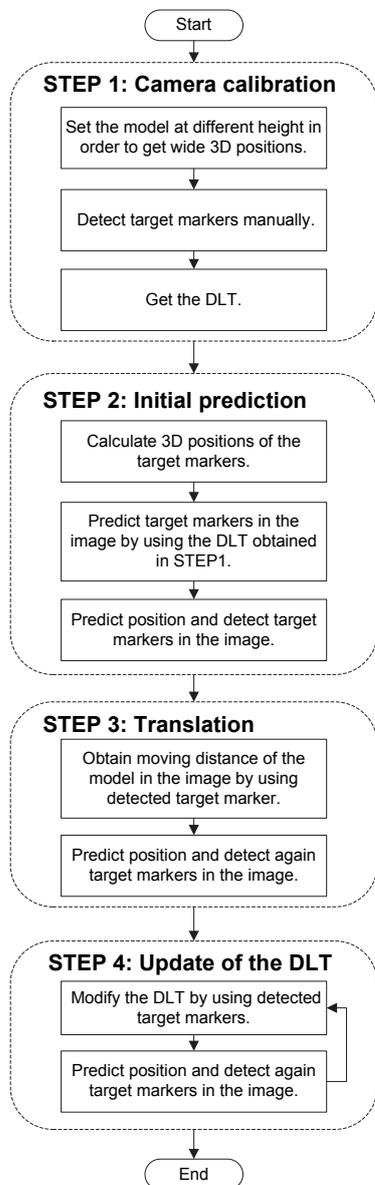


図6 ターゲットマーカ検出の概要

6. 結果

6.1 風洞試験概要

本手法はJAXA 2m×2m 遷音速風洞にて検証された。この風洞は測定部断面が2m×2mの連続循環式風洞で、マッハ数が0.1から1.4の範囲の試験が長時間連続的にできる。風洞模型はDLR F6 (90% scales)を使用した^{10,11)}。

6.2 ターゲットマーカ検出

図7と図8にPSPの発光強度データを示す。カメラは右舷側に設置されている。模型胴体にターゲットマーカと酷似したネジ穴が確認できる。この模型の場合は形態変更がないのでネジ穴は少ない。しかし、舵面等を変更する模型では翼に多数のネジ穴が生じる。そのため、画像の形状認識のみでターゲットマーカを識別することは難しい。一方、本研究の手法は3次元の情報を使用して画像上のターゲットマーカ位置を予測するため、ターゲットマーカを検索する際の領域を最小限にしてネジ穴等のノイズの混入を低減できるという特長がある。

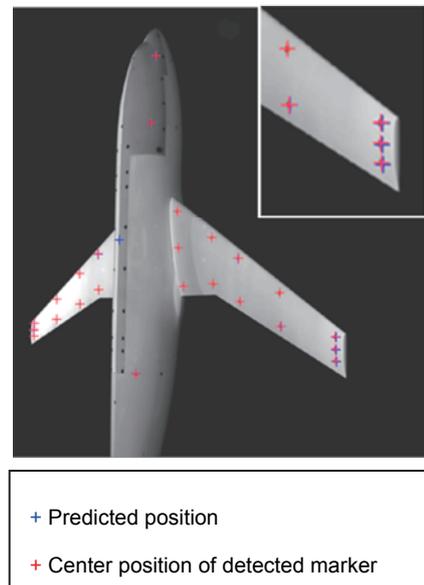


図7 ターゲットマーカの予測位置と検出位置：無風状態

図7は無風状態におけるSTEP2(図6参照)のターゲットマーカの初期予測位置と検出位置を示す。初期予測位置と検出位置はほぼ一致していることが分かる。この結果は本手法のSTEP1及びSTEP2

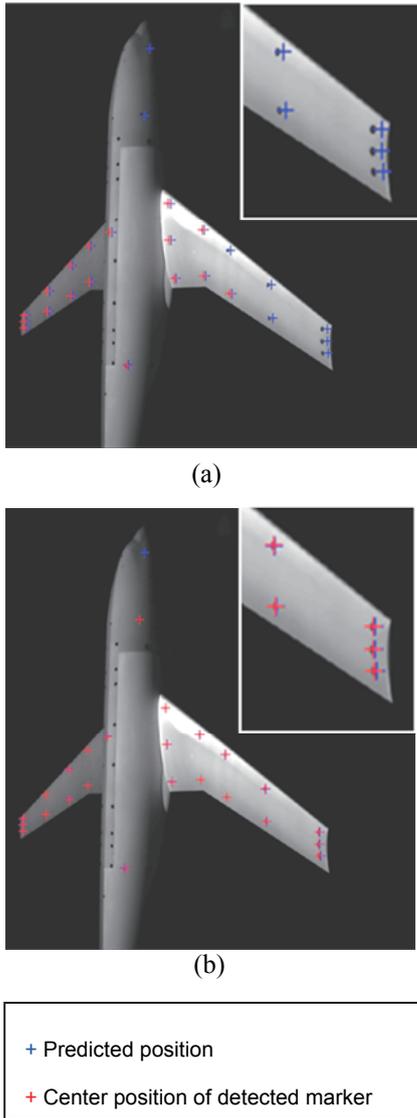


図 8 ターゲットマーカの予測位置と検出位置：通風状態、(a)初期予測位置、(b)更新した予測位置

の有効性を示す。初期予測位置と検出位置の差は RMS で 1.0 [pixel]である。

図 8 は通風状態の結果を示す。無風状態と比べ、模型は空力荷重により移動や変形を生じる。したがって、図 8(a)に示す様に STEP2 の初期予測位置は実際のターゲットマーカ位置から外れる。ターゲットマーカの検出率も低い。初期予測位置と検出位置の差は RMS で 7.3 [pixel]である。図 8(b)に STEP4 まで適用した予測位置と検出位置を示す。予測位置は実際のターゲットマーカ位置に明らかに近付い

ている。予測と検出の差は RMS で 1.0 [pixel]である。この結果は本手法の有効性を示している。

今後の課題として模型変形のモデル化があげられる¹²⁾。ある程度までの変形であればターゲットマーカの検索領域を広げることで吸収できる。しかし、過大な検索領域の拡大はノイズの混入を招くことを考慮する必要がある。

図 9 に風洞試験における計測及びデータ処理工程と要した時間を示す。計測開始から約 96 秒でデータ処理を終了できている。なお、Self-illumination 補正の計算時間は 2 秒程度であった。以上から、本稿の手法は準リアルタイムの PSP 計測システム構築に有効であると言える。

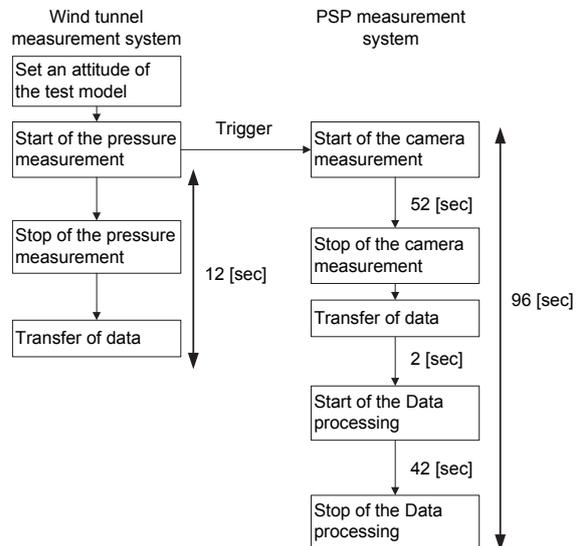


図 9 準リアルタイム計測

7. 結論

風洞計測システムと連動させた PSP 計測システムの自動化を進め、有効性を実証するための風洞試験を実施した。結果として、通風中はモニタリングを基本とするオペレーションで PSP 計測が可能であり、また、PSP 計測開始からデータ処理終了までが数分程度で終了する準リアルタイム PSP 計測システムの構築に成功した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご協力をいただいた、JAXA 口石 茂氏、渡辺重哉氏 遷音速風洞セクションのメンバ、三菱スペース・ソフトウェア 谷 祥こ氏、HI エアロスペース・エンジニアリング 中島 努氏、鈴木幸一氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) 中北和之, 栗田 充, 満尾和徳, 山谷英樹: JAXA における感圧塗料計測システムの高機能化, 第 52 回飛行機シンポジウム講演集, 2014.
- 2) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., Watanabe, S., "Temperature Correction of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 5, 2006, pp. 1499-1505.
- 3) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Shigeya, W, "Practical Pressure-Sensitive Paint Measurement System for Industrial Wind Tunnels at JAXA," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, 2006, pp. 359-366.
- 4) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., and Watanabe, S., "Data Processing of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," *AIAA Paper 2004-2189*, 2004.
- 5) kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., Yamaya, H., and Nakajima, T., "Automatic Data Processing of Pressure-Sensitive Paint Measurement in a Wind Tunnel," *AIAA Paper 2014-1412*, 2014.
- 6) Ito, Y. and Nakahashi, K., "Surface Triangulation for Polygonal Models Based on CAD Data," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 39, 2002, pp. 75-96.
- 7) Ruyten, W., "Self-Illumination Calibration Technique for Luminescent Paint Measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, 68, 1997, pp. 3452-3457.
- 8) Ruyten, W., and Fisher, C. J., "On the Effects of Reflected Light in Luminescent Paint Measurements," *AIAA Paper 2000-0833*, 2000.
- 9) Kuchiishi, S., Kurita, M., Mistuo, K., and Fujii, K., "Development of a Self-Illumination Correction Program for Pressure-Sensitive Paint Measurements," *JAXA-RR-08-002*, 2008.
- 10) Rossow, C, -C., Godard, J, -L., Hoheisel, H. and Schmitt, V., "Investigations of Propulsion Integration Interference Effects on a Transport Aircraft Configuration," *Journal of Aircraft*, Vol. 31, 1994, pp. 1022-1030.
- 11) Brodersen, O., and Stürmer, A., "Drag Prediction of Engine-Airframe Interference Effects using Unstructured Navier-Stokes Calculations," *AIAA Paper 2001-2414*, 2001.
- 12) Le Sant Y., Mérienne, M-C., Lyonnet, M., Deléglise, B., and Guilnard, A., "A Model Deformation Measurement Method and its Application on PSP Measurements," *AIAA paper 2004-2192*, 2004.