



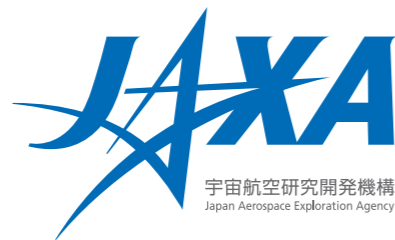
宇宙航空研究開発機構研究開発報告

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

感圧塗料計測法 Self-Illumination 補正プログラムの開発

口石 茂, 栗田 充, 満尾 和徳, 藤井 啓介



JAXA-RR-08-002

2008年12月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

感圧塗料計測法 Self-Illumination 補正プログラムの開発*

口石 茂^{*1}, 栗田 充^{*1}, 満尾 和徳^{*1}, 藤井 啓介^{*1}

Development of a Self-Illumination Correction Program for Pressure-Sensitive Paint Measurements*

Shigeru KUCHI-ISHI^{*1}, Mitsuru KURITA^{*1}, Kazunori MITSUO^{*1}
and Keisuke FUJII^{*1}

Abstract

This report presents a detailed description for the development of a computer program to correct self-illumination effects in pressure-sensitive paint measurements for use in the JAXA wind-tunnel testing. It has been found that the effects of reflected light in luminescent paint measurements can be corrected reasonably by applying techniques developed in the fields of radiative transfer and computer graphics, provided that the painted surface may be treated as a diffuse reflector. The implementation of the calculation of form factors that can handle occlusions between two surface elements is described in detail. Emphasis is placed on specific treatments that are needed to improve accuracy and minimize storage requirements. We first applied the technique to a calibration test for a simple saw-teeth model, and it was shown that the present program can sufficiently remove the measurement errors induced by the reflected light. The program was also applied to test data obtained in JAXA 6.5m × 5.5m low-speed wind tunnel using a semispan model with high-lift devices, and the corrected results as well as problems for the application of the present technique in industrial wind-tunnel tests are presented and discussed.

Keywords: *pressure-sensitive paint, self-illumination correction, form factor, hidden surface removal*

概 要

本報告は、JAXA 風洞試験に供せられる、感圧塗料試験データの self-illumination 効果を補正するプログラムの開発に関する詳細な記述である。発光性塗料の反射光の影響は、拡散反射を仮定すれば輻射解析およびコンピュータグラフィックスの分野において開発された手法によって妥当に補正可能であることが過去に示されている。陰面消去処理を含めたフォームファクタ計算手法の具体的な適用手順が、補正精度向上および記憶容量最小化のために必要な特別な取り扱いに重点を置いて述べられる。本手法はまず鋸歯形状模型に関する較正試験に適用され、測定誤差の一因となり得る反射光の影響を十分妥当に除去できることが示される。次に本プログラムを JAXA 6.5m×5.5m 低速風洞において実施された、高揚力装置標準模型試験データに適用し、補正結果の検討に加えて、実用風洞における本補正手法適用に関する問題点が議論される。

1. はじめに

感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測法は、近年の光学機器や計算環境の発展と相まって、気流中の物体表面圧力計測技術として標準的な地位を確立しつつある。感圧塗料は励起光を照射することによって発光し、その発光強度が酸素分圧に反比例する性質を利用し、物体表面に塗られた塗料の発光強度分布を CCD カメラ等で測定することで圧力データを得る。PSP 計測は従来の

圧力センサを用いた点計測と比較して、面全体にわたっての圧力情報が取得できるため、航空宇宙分野における風洞試験のための計測技術として魅力的である。JAXA 研究開発本部においても、低速域から極超音速域までに至る各種風洞への適用を試みることによりその有効性が認識され、実用風洞における標準的な計測手法として整備すべく作業が進められている[1]-[4]。

PSP 計測法は 1980 年代後半以降、塗料や較正手法、画

* 平成 20 年 8 月 18 日受付 (Received 18 August, 2008)

*1 研究開発本部 風洞技術開発センター (Wind Tunnel Technology Center, Aerospace Research and Development Directorate)

像処理技術の改良が加えられ、定性的のみならず定量的な信頼性も着実に向上しているが、計測手法としては本質的に多くの不確実要素を持つので、測定データには何らかの誤差を含み得る。その1つとして発光強度画像の取得における self-illumination の影響が挙げられる。

ここにおける self-illumination とは、ある計測点の発光強度を計測する際、計測点以外の点における発光が計測点に影響を与えることを意味している。例えば Fig. 1 のように翼胴面の発光強度を測定する場合、計測される発光強度には胴体面の発光が翼面で反射した間接光成分が含まれるため、本来翼面で発する発光強度より大きな値として計測されてしまう。この反射光の影響は物体形状や測定場所によって異なるが、場合によっては圧力値で3%程度の誤差を生じ得ることが指摘されている[5]。しかしながら PSP 表面における反射形態として拡散反射を仮定すると、拡散光による相互反射の影響は、熱力学における放射伝達やコンピュータグラフィックス（以下 CG）の分野において開発された手法を基礎として、実用上十分な精度での補正が可能であることが、Ruyten や Sant によって示されている[5]-[7]。

本報告は、先に Ruyten によって提案された感圧塗料計測法における self-illumination

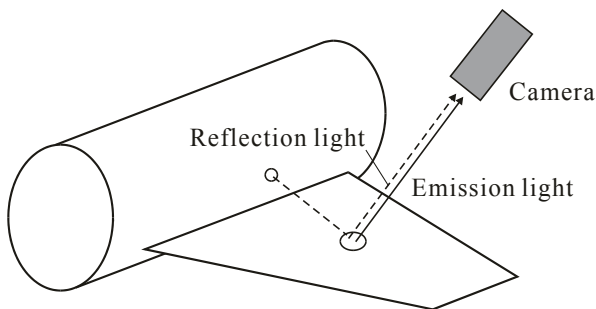


Fig. 1 翼胴反射の影響

（以下 SI）補正*手法[5]を適用した、JAXA 実用風洞 PSP 計測試験処理システムに供する、補正処理プログラムの開発に関する詳細な記述である。本補正処理においては、物体表面分割要素間の位置関係で決定されるフォームファクタを事前に計算する必要があるが、要素間に障害物が存在するような複雑形状物体についても適用可能な陰面消去法が取り入れられている。一方実問題では、場合によっては本手法の適用によりフォームファクタの計算値に大きな誤差が生じる可能性があり、これを回避する手段について検討を行った。また実用風洞試験では数万から数十万規模の要素を取り扱うため、フォームファク

タの保存に必要な計算機容量が膨大となる。よって保存容量を最小化するため、コード実装においていくつかの工夫を行った。

次に検証の目的で鋸歯形状模型について較正試験を実施し、本プログラムによって反射光の影響を妥当に除去できることの確認を行う。さらに実際の風洞試験への適用例として、JAXA 6.5m×5.5m 低速風洞において実施された、高揚力装置標準模型半裁風洞試験データを取り上げ、補正結果の詳細について述べるとともに、実使用における注意点、問題点を指摘する。

2. Self-Illumination 補正概要

SI 補正の基本原則については参考文献 [5]-[8]に詳しい記述が見られるので、ここでは概略を述べるにとどめる。

まず仮定として、PSP 表面を入射光があらゆる方向に一樣に反射する完全拡散面（Lambert 面）であるとみなす。このとき塗料の反射特性は反射率（reflection coefficient）と呼ばれるただ1つのスカラー量をパラメータとして記述することができる。鏡やガラスなど鏡面反射光や屈折光の影響が無視できない場合を除いて、拡散反射の仮定は十分妥当である。反射係数は PSP 塗料の較正試験により測定することができるが、これについては後述する。また補正に必要な前提条件は、1) 模型の形状が既知であること、および 2) 反射の影響を与え合う模型表面上の面が、試験における取得画像に全て含まれること、である。

完全拡散反射を仮定すると、光源から出た光線が複数の物体間で相互に拡散反射を繰り返す現象は、熱力学における放射伝達の分野で現れる基礎式によって記述することができる。物体表面を複数の要素に分割した場合、ある面要素 ΔS_i について測定される、他の要素 ΔS_j が放射する光成分の影響を含んだ発光強度 L_i は、 ΔS_i 自身が放射する発光強度を L_i^0 、反射率を R_i として（ ΔS_j 等についても同様）、次式で表される。

$$L_i \Delta S_i = L_i^0 \Delta S_i + R_i \sum_{j=1}^N F_{ji} \Delta S_j L_j \quad (1)$$

ここで N は要素総数を表す。 F_{ji} はフォームファクタと呼ばれ*、物理的には ΔS_j から全方向に放射される光エネルギーが ΔS_i に受け取られる比率（ ΔS_j から ΔS_i が全周囲に対してどの程度見えているかの割合）を表している。また両要素間のフォームファクタには次の関係が成立す

* Self-illumination correction の訳語としては自己照明補正が当てはまるが、これを反射補正と称する場合もあり[8]、本稿では混乱を避けるために self-illumination 補正とした。

* 参考文献[5]ではフォームファクタを $F_{ji}/\Delta S_i$ として定義しているが、ここでは CG の分野でより一般的に用いられる表記（例えば[9]および[10]）を採用した。

る。

$$F_{ij}\Delta S_i = F_{ji}\Delta S_j \quad (2)$$

(1)式と(2)式より、

$$L_i = L_i^0 + R_i \sum_{j=1}^N F_{ij} L_j \quad (3)$$

(3)式はCGの分野ではラジオシティ法と呼ばれるグラフィックス手法の基礎式として知られている。PSP計測において実際に取得されるデータは L_i であり、求めようとしている値は自ら放射した発光強度 L_i^0 なので、(3)式から測定された発光強度を以下のように補正できることがわかる。

$$L_i^0 = L_i - R_i \sum_{j=1}^N F_{ij} L_j \quad (4)$$

右辺第2項が補正項に相当する。(4)式がSI補正の基礎式である。

フォームファクタの値は物体形状が既知であれば、表面を有限個の要素に分割することにより、次節に示す手順で計算することができる。フォームファクタは各要素間の組み合わせについて必要となるので、総計 $N \times N$ 要素のマトリクスを構築する。これを以後フォームファクタ行列と称する。フォームファクタは要素間の位置関係のみに依存し、光源の強さや反射係数とは無関係に決定される係数なので、フォームファクタ行列は試験条件とは無関係に事前に1回のみ計算して保存しておけばよい。これと較正試験によって得られる反射率の値を用いることで、(4)式により試験で得られた発光強度分布から反射光の影響を取り除くことが可能となる。

3. フォームファクタ行列の計算

3.1 フォームファクタの定義

ここでは参考文献[10]に倣ってフォームファクタの定義を説明する。まず、Fig. 2のように三角形要素 ΔS_i を取り囲む半径 r の半球 Ω を考える。 ΔS_i と ΔS_j に関する微小要素を dS_i および dS_j 、 dS_i から放射される単位面積、単位時間あたりの光エネルギー(放射束)を q_i とすると、 dS_i から出て dS_j に到達する単位時間あたりの光エネルギー dQ_i は、以下のように表される。

$$dQ_i = (dS_i \cos \theta_{ij}) q_i d\omega_{ij} \quad (5)$$

ここで $d\omega_{ij}$ は dS_i から dS_j をのぞむ立体角で、

$$d\omega_{ij} = \frac{dS_j \cos \theta_{ji}}{|\mathbf{x}_{ij}|^2} \quad (6)$$

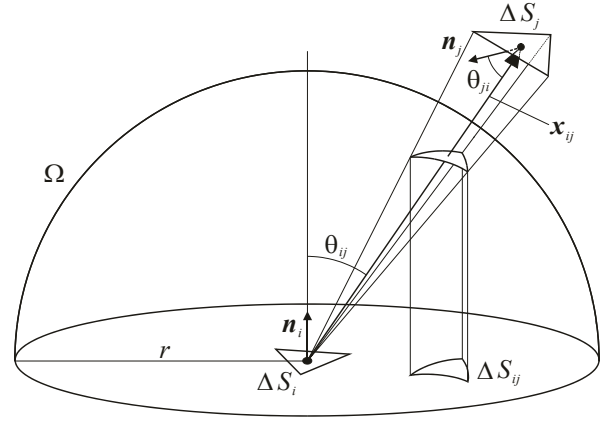


Fig. 2 フォームファクタ計算における半球底面への要素投影

と表される。(5)式を全半球 Ω にわたって積分すると、

$$\begin{aligned} Q_i &= \int_{\Omega} (dS_i \cos \theta_{ij}) q_i d\omega_{ij} \\ &= dS_i q_i \int_{\Omega} \cos \theta_{ij} d\omega_{ij} \\ &= \pi q_i dS_i \end{aligned} \quad (7)$$

dS_i から dS_j へのフォームファクタは、 dS_i から出て dS_j に受け取られる光エネルギーと、 dS_i から全方向に放射される光エネルギーとの比として定義され、(5)-(7)式より

$$F_{dS_i dS_j} = \frac{dQ_i}{Q_i} = \frac{\cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji}}{\pi |\mathbf{x}_{ij}|^2} dS_j \quad (8)$$

となる。

ここで改めて有限要素 ΔS_i および ΔS_j について考える。放射束 q_i には方向性が無く ΔS_i 上で一様とすると、 ΔS_i から出て ΔS_j に到達するエネルギーは

$$q_i \int_{\Delta S_i} \int_{\Delta S_j} \frac{\cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji}}{\pi |\mathbf{x}_{ij}|^2} dS_i dS_j \quad (9)$$

となる。一方、 ΔS_i から全半球にわたって放射されるエネルギーは $q_i \Delta S_i$ なので、 ΔS_i から ΔS_j へのフォームファクタ F_{ij} は

$$F_{ij} = \frac{1}{\Delta S_i} \int_{\Delta S_i} \int_{\Delta S_j} \frac{\cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji}}{\pi |\mathbf{x}_{ij}|^2} dS_i dS_j \quad (10)$$

ここで ΔS_i および ΔS_j が十分小さいとすると、(10)式の実積分関数は積分領域内で一定と見なすことができる。この場合は積分記号が外れて、最終的にフォームファクタ F_{ij} は以下の式で表される。

$$F_{ij} = \frac{\cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji}}{\pi |\mathbf{x}_{ij}|^2} \Delta S_j \quad (11)$$

(11)式の導出には ΔS_i および ΔS_j が十分小さいこと、放射束が ΔS_i 上で一様であることが前提条件となっている。

3.2 フォームファクタ計算手順

計算手法の選択

前節の(11)式を Fig. 2 に基づいて図形的に解釈すると、右辺は ΔS_j を半球面上に投影した後さらにその底面へ投影した図形 ΔS_{ij} の面積($\cos \theta_{ij} \cos \theta_{ji} \Delta S_j r^2 / |\mathbf{x}_{ij}|^2$)と、半球の底面積(πr^2)との比に等しいことがわかる。よってフォームファクタ値を求める手法には、(11)式から直接計算する方法と、投影面積 ΔS_{ij} を計算する方法の2種類が存在する*。前者は本来の定義式に基づいているため、先に述べた前提条件が満足されれば厳密値に近い計算結果を得ることが期待できるが、要素間に障害物が存在する場合はその影響を考慮することができない。一方後者も ΔS_j の投影面積 ΔS_{ij} を正確に計算することが可能であれば本質的に前者と同等の結果が得られるが、実際の数値計算において有限要素を投影する場合は、その頂点のみを投影した後に直線でつなぎ合わせて近似的な投影面とみなす必要があり、厳密な投影面とは異なる形状について面積を求めることになるので計算誤差が発生する(これについては後述する)。しかしながらこの場合は、CGの分野で確立された陰面消去法のアルゴリズムを用いることで障害物の影響を考慮することができるといった利点がある。複雑形状を扱う場合、要素間に障害物が存在する場面は頻繁に現れるので、これらに対応すべく本プログラムでは、後者の手法に基づき陰面消去法としてCGでよく用いられるZバッファ法を採用した、フォームファクタ計算アルゴリズムを開発した。

要素頂点の半球底面への投影

ここでは三角形要素を考える。フォームファクタ行列の構築には、 $N \times N$ 通りの要素組み合わせについて、フォームファクタの計算を行う必要があるが、2要素間でフォームファクタが物理的な意味を持つためには、両者が互いに向き合っていることが前提条件となる。これは Fig. 2 の記号を用いると以下の条件式となる。

$$(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{x}_{ij} > 0) \text{ and } (\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0) \quad (12)$$

ある要素の組み合わせが上の条件を満たさない場合、要素は互いに向き合わないのので、フォームファクタはゼロとして以降の計算は行わない。

次に ΔS_i に対して ΔS_j の各頂点を Fig. 2 のように半球

の底面に投影する。これは以下の手順で行う。

1. ΔS_j の各頂点を ΔS_i の中心が原点となるように平行移動する。
2. 原点中心半径 N_{map} の球面を考え、原点と ΔS_j の頂点を結んだ直線との交点を求める。
3. 2で求めた交点から ΔS_i を含む平面に対して下ろした垂線と、平面との交点を求める。
4. ΔS_i を含む平面を $x'y'$ 面としたローカル座標系(スクリーン座標系)を導入し、3で求めた交点を $x'y'$ 座標に座標変換する。
5. 1から4の操作を3つの頂点について行い、各点を直線で結んで投影面とする。

本計算手法では底面を半径 N_{map} 個分のピクセルに分割し、投影面が含まれるピクセルの個数を数えることにより、近似的に面積を算出する。 N_{map} は画像処理の解像度に相当するパラメータである。先に述べたように、フォームファクタは半径 N_{map} の半球底面に投影した要素の面積と半球底面積(πN_{map}^2)の比に等しい。相似関係が成立するので面積比は球面半径の値に関わらず一定であり、また実際の計算においては投影座標をピクセル値に変換する必要があるので、後の簡単のためここでは半径 N_{map} の半球底面に投影する。

まず手順1として、 ΔS_i の中心座標を (x_i, y_i, z_i) 、 ΔS_j の頂点の座標を (x_j, y_j, z_j) と置き、 ΔS_i の中心が原点となるように平行移動すると、頂点は

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i) \quad (13)$$

に移る。

次に手順2として、原点中心半径 N_{map} の球面を表す方程式

$$x^2 + y^2 + z^2 = N_{\text{map}}^2 \quad (14)$$

および原点と (x_1, y_1, z_1) を通る直線のパラメータ表示式

$$(x, y, z) = s(x_1, y_1, z_1) \quad (15)$$

を連立させることにより、

$$s = \pm \frac{N_{\text{map}}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} \quad (16)$$

と重解を得るが、Fig. 2 から明らかなように、交点の位置ベクトルは頂点の位置ベクトルと同方向になるので s

* 他にもヘミキューブ法と呼ばれる半立方体を用いた近似解法が存在するが、ここでは考慮しない。

は常に正であり、従って交点の座標は

$$(x_2, y_2, z_2) = \frac{N_{\text{map}}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} (x_1, y_1, z_1) \quad (17)$$

となる。

手順 3 については、 ΔS_i を含む平面の方程式は ΔS_i の法線ベクトル \mathbf{n}_i の各成分を (n_1, n_2, n_3) とすると

$$n_1x + n_2y + n_3z = 0 \quad (18)$$

と表される。この場合 (x_2, y_2, z_2) に下ろした垂線と平面の交点は

$$(x_3, y_3, z_3) = (n_1t + x_2, n_2t + y_2, n_3t + z_2) \quad (19)$$

ただし

$$t = -\frac{n_1x_2 + n_2y_2 + n_3z_2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}} \quad (20)$$

となる。

以上は絶対座標系における操作であったが、投影は ΔS_i を含む平面を底面とした半球について行う必要がある。ここでは ΔS_i を含む平面を $x'y'$ 面としたローカル座標系を導入して、 $x'y'$ 面に投影した頂点の座標を求める。 z' 軸は ΔS_i の法線ベクトルの方向とする。 x' 軸および y' 軸は平面に含まれていれば任意にとることができるが、ここでは x' 軸を原点と ΔS_i の頂点の 1 つとを結んだ直線として定義する。 (x_3, y_3, z_3) を $x'y'$ 座標に変換するには、原点から (x_3, y_3, z_3) に結んだ直線と x' 軸間の方向余弦 $\cos \theta$ を求め、

$$(x', y') = (r \cos \theta, r \sin \theta) \quad (21)$$

$$r = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}$$

とすればよい。 $\sin \theta$ の符号は、 x' 軸と上記方向ベクトルの外積で定義されるベクトルと、 ΔS_i の法線ベクトルとの内積の符号から判断することができる。

以上により頂点の半球底面への投影が完了するので、手順 1 から 4 までの操作を ΔS_j の 3 頂点それぞれについて行い、 $x'y'$ 面に投影された各点を直線で結んで ΔS_j の投影面とする。

Z バッファ法によるフォームファクタ計算

前節で ΔS_i に対する ΔS_j の投影面が求まったので、次に Z バッファ法のアルゴリズムを用いた面積計算の手順を示す。Z バッファ法の詳細な説明は参考文献[9]や[10]に詳しいので、ここでは省略する。Z バッファ法では、Z バッファと呼ばれる実数型 2 次元配列 $zbuff$ と、フレームフォルダと呼ばれる整数型 2 次元配列 $ffold$ の

2 種類の配列を用意する。配列サイズは共に半球底面のピクセル*分割数に対応して $2N_{\text{map}} \times 2N_{\text{map}}$ である。処理手順をまとめると以下ようになる。

1. ΔS_i を含む半球底面（投影面）を、半径 N_{map} 分のピクセルで分割する。
2. 全てのピクセルについて、Z バッファおよびフレームフォルダを $zbuff(x, y) = +\infty$, $ffold(x, y) = -1$ のように初期化する。
3. ΔS_j を前節の手順で投影面に投影し、あわせて各頂点と ΔS_i の中心間の距離（奥行きまたは Z 値）を求めておく。
4. 投影された三角形面を投影面のピクセルに対応（ラスタライズ）させ、三角形面を含む全てのピクセルに対して以下の処理を行う。
 - a. 各ピクセル位置における Z 値を、頂点における値を用いて内挿する。
 - b. Z 値とそのピクセルに対応した Z バッファの値を比較し、もし Z 値が Z バッファに保存されている値より小さいならば、 ΔS_j がその時点で最も手前に位置する（見えている）ことになるので、 $ffold$ に ΔS_j のインデックス j を、 $zbuff$ にはその Z 値を代入して更新する。
5. 3 および 4 の操作を全ての ΔS_j について繰り返す。
6. 最終的に更新された $ffold$ に格納された同じインデックス j の数を合計すると、それが ΔS_j の投影面積となる。

Z バッファ法では、陰面消去問題をピクセル単位での陰点消去問題に帰着させているため、アルゴリズムが単純で高速処理が可能となるが、投影面を有限個のピクセルに分割するので、面積計算および陰面消去の精度は解像度 N_{map} に依存することになる。

次に手順 4 の詳細について述べる。 ΔS_j は半径 N_{map} の半球底面に投影されるので、投影後の各頂点のスクリーン座標系における座標がそのままピクセルのインデックスに対応している。頂点の座標は実数値なので、例えば座標 x をピクセルのインデックス i に変換するには、

$$i = \text{round}(x + 0.5) \quad (22)$$

とすればよい。ただし $\text{round}()$ は小数点について四捨五入を行って、実数値を整数化する関数である。手順 4 の a における Z 値の内挿計算は、Fig. 3 のように一定の高さにおける走査線（スキャンライン）ごとに各ピクセルを

* ここで言うピクセルはあくまで半球底面の分割要素を示すものであり、PSP 取得画像に関するピクセルとは異なる。

順次横方向にスキャンすることにより実施する。内挿計算は各ピクセル位置で頂点における Z 値から厳密に行うことも可能であるが、ここでは計算の効率化のために以下の式を用いる。

$$z = z_1 + \frac{dz}{dx}(x - x_1) \quad (23)$$

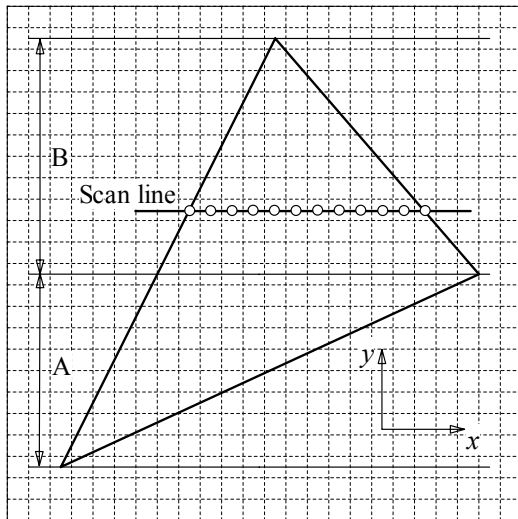


Fig. 3 Zバッファ法における投影要素のスキャンング

dz/dx の値をあらかじめ求めておけば、スキャンはピクセル単位 (増分 1) で行われるため、各スキャンライン上での Z 値は(23)式より dz/dx の値を順次加えていくだけで求まる。同様にあらかじめ dx/dy を求めておくと、次のスキャンラインにおける最初の x 座標は、 dx/dy を順次加えるだけで求めることができる。スキャンは事前に三角形の頂点を高さ方向にソートしておき、Fig. 3 のように A と B の上下に 2 分割してそれぞれ別個に行う。

手順 6 で求めた ΔS_j の投影面積 (ピクセル数合計) を N_{ij} とすると、最終的にフォームファクタは以下の式で与えられる。

$$F_{ij} = \frac{N_{ij}}{\pi N_{\text{map}}^2} \quad (24)$$

以上の手順で、陰面消去を考慮したフォームファクタの計算が可能となる。

計算誤差の発生とその対策

フォームファクタの基本的な計算手順は前節で述べた通りであるが、全ての要素について単純にこの操作を適用すると、場合によっては大きな計算誤差を生じる可能性がある。これは Fig. 2 のように要素 ΔS_j を半球底面に

ΔS_{ij} として投影する時、計算上は三角形要素の頂点のみを投影した後、投影点同士を直線で結んだ三角形で投影面を近似していることに起因している。端的な例として、Fig. 4 のようにある三角形要素と同一平面上にあり、かつ隣接した要素を投影することを考える。この場合厳密に投影すれば三角形は半球底面の外周上に線として投影され、面積はゼロとなる。しかしながら三角形の頂点のみを投影してその結果を直線で結ぶと、Fig. 4 にあるように本来存在しない大きな三角形が形成され、ゼロであるはずのフォームファクタが、非現実的に大きな値として計算されてしまうことになる。これは要素の頂点のみを投影している限りは避けられない事態である。

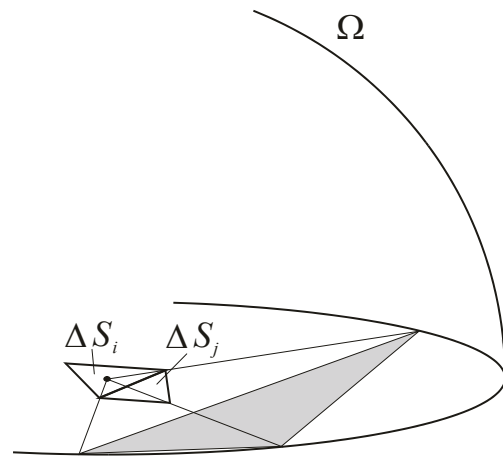


Fig. 4 隣接要素投影による誤差の例

同一平面の場合は(12)式の条件を満たさないので問題は生じないが、隣接もしくはそれに準じる位置にあり、かつ互いになす角度が浅い場合は同様な問題が生じる可能性がある。このような問題を避けるために、本プログラムでは Z バッファ法でフォームファクタを計算する前に以下の条件分岐処理を加えた。

1. (11)式を用いて定義式に基づいたフォームファクタ値 F_{fact1} を計算する。
2. 投影された頂点座標を用いて投影三角形の面積をベクトル公式により厳密に計算し、(24)式から障害物の影響を考慮しないフォームファクタ値 F_{fact2} を計算する。
3. 要素 ij 間で頂点を共有している場合は隣接要素となり、この場合は間に障害物は存在し得ないので、フォームファクタとして F_{fact1} の値を採用し、以降の操作は行わない。

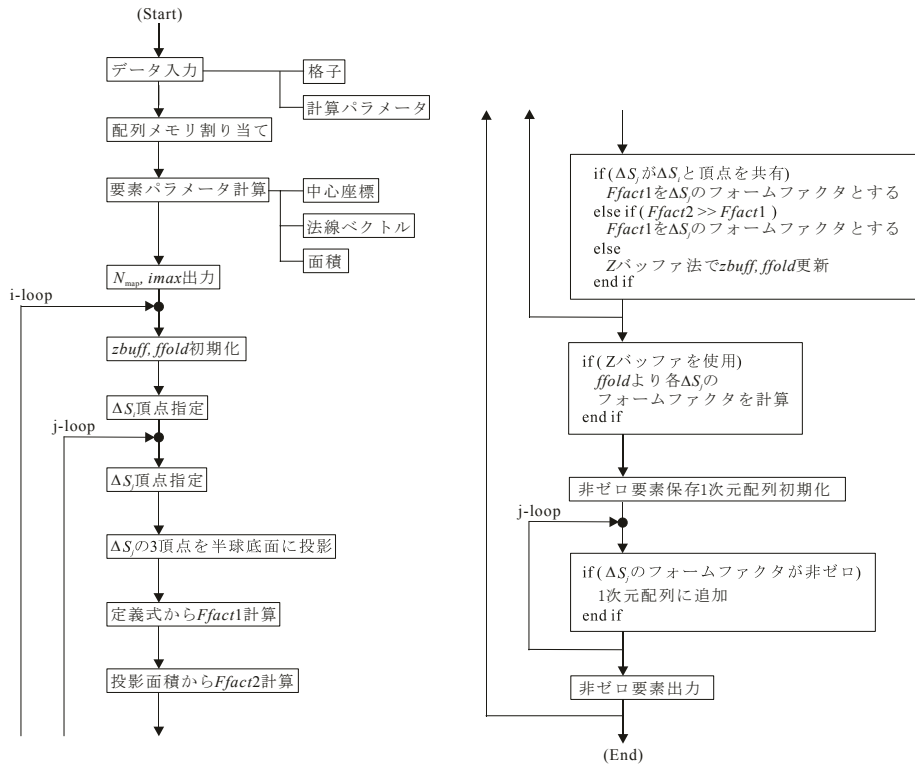


Fig. 5 フォームファクタ計算手順

4. 3 以外について、 F_{fact1} と F_{fact2} の値とを比較し、 F_{fact2} が F_{fact1} と比較して著しく大きい場合は、隣接に近い位置にあり、かつ大きな計算誤差を含む要素と判断し、 F_{fact1} をフォームファクタ値とする(本プログラムでは両者の差が2倍以上の場合に F_{fact1} の値で置き換えている)。
5. F_{fact1} と F_{fact2} の値が同程度の場合は正常に投影されていると判断し、Z バッファ法によりフォームファクタ計算を行う。

上記手順の問題として、要素間が互いに近い位置関係にあり、かつ間に障害物が存在する場合はその影響が考慮できないという点が挙げられるが、実用的な問題でそのような場面が生じる可能性はきわめて低いと考えられる。

最後に一連のフォームファクタ計算手順を Fig. 5 にまとめる。先述の通り、フォームファクタの値は要素間の相対的な位置関係のみで決定されるため、実際の試験においては同じ計算格子を用いている限り、試験条件の違いによらず事前に1回のみ計算して保存しておけばよい。

3.3 コード実装について

本プログラムの開発にあたって、プログラミング言語はメモリ管理に関して詳細な記述が可能であるC言語を用いた。以下はC言語の文法に従って説明する。前節で述べたフォームファクタ計算をプログラムとして実装す

るためには、Fig. 5 の手順に従ってプログラミングを行えばよい。しかしながら実用風洞における PSP の適用においては、数十万規模の要素を取り扱うことも予想され、この場合はフォームファクタの保存に必要な容量が膨大となることが予想される。例として物体表面を10万要素に分割した場合、フォームファクタ行列の要素数は10万×10万となり、これらを浮動小数点型データとして保存すると、単精度でも40ギガバイトの記憶容量が必要となる。これは現在の計算機能力を持ってしても厳しい要求である。しかしながらフォームファクタがゼロ以外の値をとるのは、(12)式で示される要素が互いに向き合う条件を満たす場合のみであり、さらに互いに向き合ったとしても、中間を障害物で遮断された場合はフォームファクタの値は結果的にゼロとなるため、実際のフォームファクタ行列は大多数の要素がゼロとなる疎行列であることが予想される。この場合は非ゼロ要素のみを効率的に保存できるようなプログラミングを行えば、記憶容量の大幅な低減が可能となる。

これを実現するには、Fig. 5 にある各 i ループについて構造体の1次元配列を用意する。構造体は、(1)フォームファクタ値、および(2)フォームファクタ行列の列番号を示すインデックス j の2種類のメンバから構成されている。構築手順としては、まず1次元配列を初期化する。次に ΔS_i に対する ΔS_j のフォームファクタを全ての j について計算し、非ゼロとなる場合は1次元配列の要素と

して順次追加する。これと同時に i 行における非ゼロ要素の総数 $jmax(i)$ をカウントしておき、最後に配列に格納された構造体を $jmax(i)$ 分 `fwrite` 関数を用いて出力する。これを全ての i 要素について繰り返せば、非ゼロ要素の個数分だけ領域を確保したフォームファクタ行列の出力が実現できる。さらに(24)式に着目すると、右辺の分母は全てのフォームファクタに共通な値であり、 N_{map} の値を記憶しておけば、フォームファクタは後から計算することができる。一方分子は Z バッファ法によってカウントされたピクセルの総数を示し、正の整数値である。各投影要素サイズの大部分は半球底面に対して十分小さいので、この値も一般的にさほど大きな値とはならない。

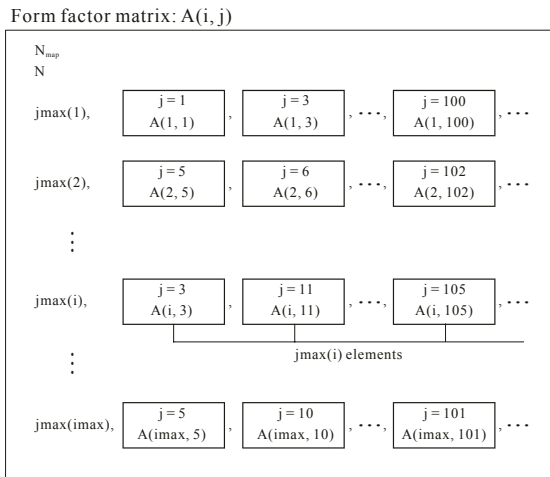


Fig. 6 フォームファクタ行列データ構成例

今回はフォームファクタを浮動小数点型データとして直接保存するのではなく、(24)式の分子を 2 バイトの `short unsigned int` 型バイナリデータとして保存し、SI 補正時に N_{map} の値を用いて(24)式よりフォームファクタの値を計算することで記憶容量を節約できるようにした。同様に列インデックスについても 2 バイトデータとして出力する。しかしながら問題によっては(24)式の分子もしくは列インデックスが `short unsigned int` 型で表現できる値の上限値 (65,535) を超えることも十分考えられるので、本プログラムでは連結リストの構造体として、メンバ変数であるフォームファクタおよび列インデックスの組み合わせについて、(`short unsigned int`, `short unsigned int`)、(`int`, `short unsigned int`)、(`short unsigned int`, `int`)、(`int`, `int`) の計 4 種類を考慮し、フォームファクタもしくは列インデックスの値が 65,535 を上回った場合は、通常の 4 バイト `int` 型としていずれかの構造体に保存するようにした*。

* C 言語において構造体メンバに 2 バイト型変数と 4 バイト型変数とを混在させるためには、定義時に `#pragma` コマンドを用いて構造体アライメントを変更させる必要がある。

Figure 6 に本プログラムにおけるフォームファクタ行列のデータ構成を示す。まず先頭に N_{map} および要素総数 $imax$ の値を保存し、次に各 i 行について、先頭に非ゼロ要素の総数 $jmax(i)$ を記録する。先述の通り、フォームファクタおよびインデックスのサイズに応じて 4 種類の構造体を定義しているため、実際のプログラムにおいて各行はこれらに対応した 4 層構造となっている。

SI 補正時には、フォームファクタ計算時と同じく構造体 1 次元配列を定義して、各 i について $jmax(i)$ 分の構造体データを読み込み、(24)式によりフォームファクタの値を計算する。その後(4)式を用いて補正計算を実施する。これを全ての i 要素について繰り返せばよい。(4)式から明らかなように、SI 補正では各 i 要素の補正に必要なフォームファクタは、フォームファクタ行列の i 行に属する要素のみであり、他の行は無関係なので、フォームファクタ行列要素総数分のメモリを確保する必要はなく、各 i に共通な 1 次元配列を 1 つ用意するのみで十分である。

4. 検証計算および考察

次に本プログラムの有効性を確認するために、2 つの試験データを用いた SI 補正計算を実施した。両者共にフォームファクタ行列は Linux ベースの PC (Dell Precision 670-n, Intel Xeon 3.60 GHz CPU, 4 GB RAM) を用いて計算し、SI 補正を含む PSP データ処理は、Windows ベースの PC (Fujitsu FMV, Intel Pentium 3.00 GHz CPU, 760 MB RAM) によって行っている。

4.1 鋸歯形状模型への適用

まず最初に要素間における反射の影響が顕著となり、かつ障害物を考慮しなければならない形状の典型例として、Fig. 7 で示されるような鋸歯形状の模型を設計・製作した。模型は二等辺の長さが 25mm、奥行き方向の長さが 50mm の直角二等辺三角柱を板上に 3 つ並べた形状となっている。

ここで用いられた PSP 塗料は、白金ポルフィリン (PtTFPP) およびフッ素系ポリマー (Poly-IBM-co-TFEM) から構成されており、PSP の発光を増強するために白色ベースコート塗装した模型表面に塗布した後、Fig. 8 のような周辺を暗幕および黒色の植毛紙で囲った反射率測定装置に設置する。その後、常温常圧状態で上方から励起光 (キセノンランプ) を照射し、発光強度分布を CCD カメラによって取得した。画像は各ケースについて 5 枚ずつ取得後平均化処理を行い、カメラの絞りを閉じた状態で撮影したダーク画像を差し引くことによってカメラ暗電流の影響を除去し、さらにフラットフィールド補正および空間フィルタリングを施した。

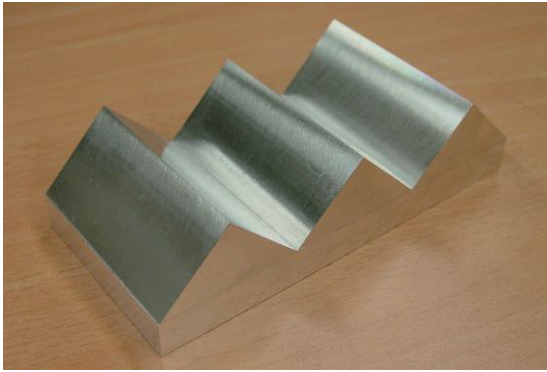


Fig. 7 鋸歯形状模型

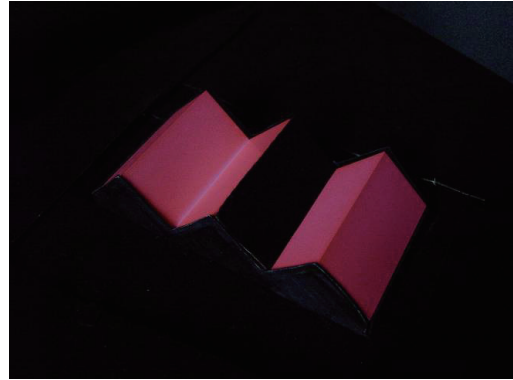


Fig. 9 試験時模型 (PSP 塗装、反射影響除去)



Fig. 8 反射率測定装置

次に計測した2次元発光強度分布を3次元模型グリッドへマッピングする。これは通常の試験においては、模型表面にマーカを設置し、模型マーカ座標と取得画像上のマーカ座標とを対応させることによって行われる。模型表面上の座標 (X_i, Y_i, Z_i) から画像座標 (x_i, y_i) への変換は、Direct Linear Transfer (DLT) と呼ばれる線形変換により次のように表される。

$$x_i = \frac{L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \quad (25)$$

$$y_i = \frac{L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \quad (26)$$

変換係数 L_k ($k=1, \dots, 11$) は、模型マーカ座標を上式で DLT 変換して得られる画像座標と、取得画像から特定されたマーカ位置における画像座標との差の二乗和を用いて、最小二乗条件により決定することができる。

$$\frac{\partial(F+G)}{\partial L_k} = 0 \quad (k=1, \dots, 11) \quad (27)$$

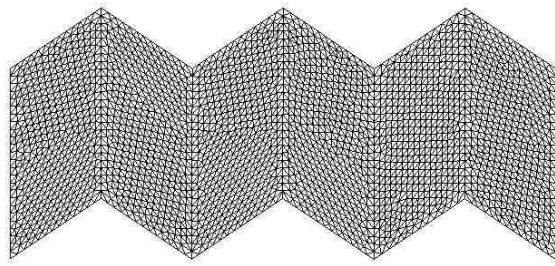
$$F(L_k) = \sum_i [L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4 - x_i(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)]^2 \quad (28)$$

$$G(L_k) = \sum_i [L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8 - y_i(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)]^2 \quad (29)$$

係数の総数は11なので、最低6点のマーカがあればそれぞれの値を決定することができる。本試験では簡単のために模型上の端点（模型外縁および尾根に対応する計8点）をマーカの代わりに用いて(27)~(29)式により DLT 係数を求め、模型表面格子上に発光強度分布をマッピングした。

マッピングされた発光強度分布は、計算格子から事前に計算されたフォームファクタ行列を用いて SI 補正が施される。本プログラムによって発光強度分布が正しく補正できているかを確認するために、Fig. 9 のように谷部の1平面に黒色の植毛紙を置くことにより、相対する平面に反射光の影響が及ばないようにして、各面について別途発光強度分布を取得し、補正結果と比較することを試みた。

通常の PSP 計測では、光源に PSP 塗料の励起波長帯に相当する青色光のみを透過させる励起フィルタを取り付け、一方 CCD カメラには塗料の発光波長帯である赤色光のみを透過させる発光フィルタを取り付ける。しかしながら本試験の目的は塗料発光に対する補正手法の検証であり、このためには青色励起光の反射およびカメラのフィルタを漏れ光として通過することによる誤差を排除し、赤色光に関する反射の影響のみを純粋に抽出して計測することが望ましい。よって本試験では励起光源につ



(a) 計算格子

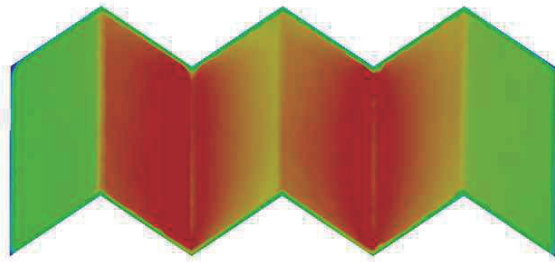
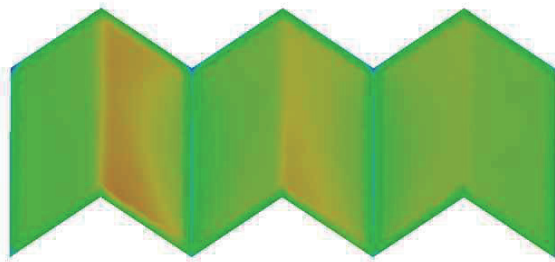
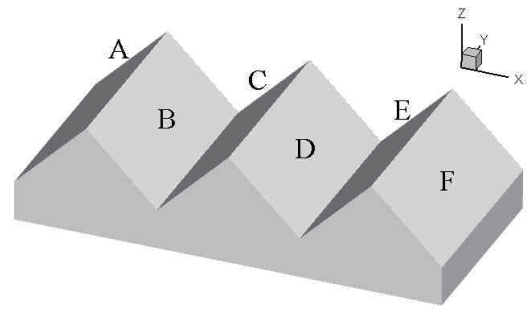
(b) 輝度分布画像マッピング結果
(SI 補正なし)(c) 輝度分布画像マッピング結果
(SI 補正あり)

Fig. 10 鋸歯形状模型試験データ処理結果

いても赤色光フィルタを取り付け、塗料を発光させない状態で (PSP 単体で発光している状態を模擬して) 計測を行い、正常な補正が行えているかについての確認を行った。

本試験終了後に、あわせて反射率測定のための較正試験も実施した。測定手順に関する詳細な説明は文献[6]および[8]に見られるので、ここでは概略を述べる。まず本試験と同じ PSP 塗料を塗装した平板を 2 枚用意して相対して組み合わせ、なす角度を 100, 120, 140, 160 度と変化させて発光強度分布を取得する。次にそれぞれの角度について SI 補正を施し、全角度にわたって 180 度 (反射の影響が無い場合) の結果との差が最小となる反射率の値を最小二乗法で決定する。本試験で得られた反射率の値は $R = 0.88$ である。

Figure 10 (a)に本試験で用いた計算格子を示す。複雑形



(a) 座標および面定義

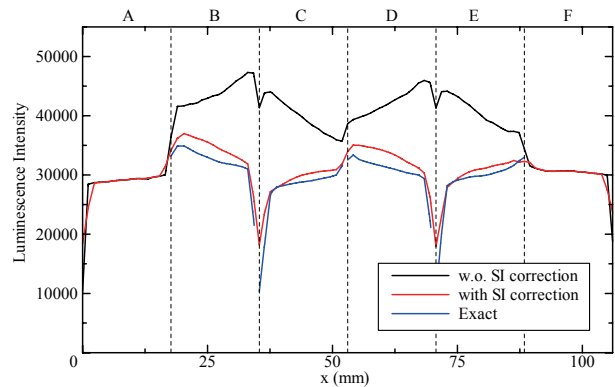
(b) x 方向輝度分布

Fig. 11 模型中心部輝度分布比較

状物体表面を簡単かつ効率的に要素分割するためには、非構造格子系の適用が有効である。本計算格子は模型製作時の CAD データを基に、非構造格子生成ソフトの EdgeEditor[11]を用いて作成された。格子点数は 2604、要素数は 5002 である。さらに本格子を用いてフォームファクタ行列を計算する。 N_{map} は 1000 とし、計算時間は 256 秒、フォームファクタ行列のサイズは約 11 MB となった。

Figure 10 (b)に本試験で取得された発光強度分布画像を、DLT 変換により模型グリッド上にマッピングした結果を示す。反射の影響を受けない両外側の面と比較して、谷部の面では本来生じないはずである勾配の存在が確認される。そこで今回開発されたプログラムを用いて、(b)の発光強度分布について SI 補正を行った結果を(c)に示す。(b)と比較して谷部における発光強度分布が一樣に近くなっていることが分かる。完全に一樣とならないのは、各面について励起光源との相対的な位置関係の違いにより光量が異なること、および塗料塗装時の塗りむらに起因している。風洞試験時の PSP 計測では、圧力値は無風時と通風時それぞれにおける発光強度分布の比から算出

されるため、圧力算出においてはこの影響はキャンセルされる。谷部の付け根では他の部分と比較して補正発光強度値が大きく異なっているが、これはこの部分は十分な量の塗料を塗装することができず正常な発光強度分布データが得られていないことに起因している。塗りむらの影響は SI 補正アルゴリズムの精度とは無関係なので、この部分は本プログラムの検証の対象外である。

次に模型中心部における発光強度の分布を、対面に黒色植毛紙を設置することにより反射の影響を除去した発光強度分布を真値と見なして SI 補正を行った場合と行わなかった場合とで比較した結果を Fig. 11 (a), (b) に示す。今回のプログラムによって反射の影響が妥当に補正されていることが分かる。真値との差を定量的に評価すると、SI 補正を施した場合は施さなかった場合と比較して最大 60% 程度の誤差の改善が確認される。

補正結果が真値と厳密に一致しない原因としては、1) フォームファクタの計算誤差、2) 反射率の測定誤差、3) 非拡散（鏡面）光の影響、4) 試験再現性、等が考えられる。これらのうち 4) については、繰り返し測定により再現性を確認したところほとんど差が見られなかったことから本質的ではないと考えられ、SI 補正における主要な誤差要因は 1)~3) ということになる。

1) については、さらに要素サイズ（十分細かな要素に分割されているか）および三角形要素を頂点のみ半球に投影したことによる誤差と、Z バッファ法における解像度 N_{map} の不足に起因する誤差の 2 種類に分割することができる。前者は模型表面の要素分割数を増加することによりある程度改善されることが期待されるが、当然ながら分割数は SI 補正の都合だけでは決定できず、また分割数の増加はデータ処理の効率を大幅に低下させることにつながるため、精度と効率とのトレードオフとなる。後者については、実際の測定では N_{map} の値をパラメトリックに変化させて補正計算を行い、補正量の収束具合をチェックすることで検討可能である。本試験データについても N_{map} をさらに増加させて補正結果を比較したが、大きな改善は確認されなかった。

2) と 3) は相互に関連しており、反射率の不確かさには測定誤差のみならず、塗料が拡散反射の条件を厳密には満たしていないことに起因する誤差も含まれる[6]。前述した 2 平板を用いた反射率測定試験において評価された不確かさは 0.25 程度であり、相応の誤差が結果に反映されていることが予想される。今後より信頼性の高い反射率の測定に加えて、このような非拡散光効果をも適切に処理できるような手法の開発が求められる。

いずれにしても本検証試験により、今回開発したプログラムを用いることで反射光の影響を十分妥当に補正できることが明らかとなった。

4.2 高揚力装置半裁翼模型における適用

次に実際の風洞試験への適用例として、JAXA 6.5m × 5.5m 低速風洞 (LWT1) において実施された高揚力装置 (High-Lift Device, HLD) 標準模型に関する PSP 計測試験を取り上げる。これは JAXA 航空プログラムグループが共同研究の形で参加協力した、経済産業省/産業技術総合開発機構プロジェクト「環境適応型高性能小型航空機研究開発」に関連して、高揚力装置空力設計技術の高度化を目的とした、高揚力装置形態旅客機研究模型の空力・騒音データ計測低速風洞試験の一環として実施されたものであり、PSP 計測としては LWT1 における低速用 PSP 計測システムの技術確認および CFD 解析に供する検証データの取得を主たる目的としている。LWT1 の仕様および試験全般については、参考文献[12]に詳しい記述が見られるので、ここでは割愛する。

今回の試験で用いられた模型の概略図を Fig. 12 に示す。本模型は国産旅客機の離着陸時形態を模擬した標準模型という位置づけで制作されたものであり、胴体、母翼、スラット、フラップ、ナセル、パイロンから構成された翼洞半裁模型である。翼形状は乗客数 100 人、最大離着陸時荷重 100,000 lbs 程度の旅客機を想定して設計されている。模型サイズは実物の約 1/6 を仮定して翼スパン方向 2.3m、胴体長 4.9m となっており、重量は支持部その他を含んで約 1000kg である。模型は風洞測定部底面のターンテーブル上に設置され、迎角の変更が可能となっている。模型表面

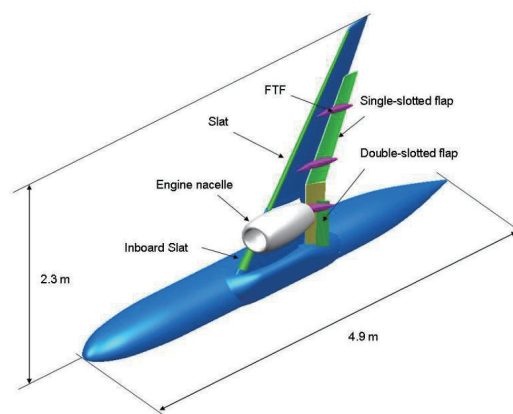


Fig. 12 高揚力装置 (HLD) 標準半裁模型概略図

には総計 456 個の圧力孔が設けられ、PSP 計測と並行してスキャニバルブを用いた静圧測定も行われた。PSP 計測システムとしては、2 台の高出力 LED 照明および 2 台の CCD カメラ (650 ± 20 nm BPF + IR カットフィルタ) を風洞光学窓部に設置し、主翼上面およびナセル・パイロンに塗装された PSP 塗料 (ISSI-FB-F470) の発光強度を取得した。試験条件としては、30, 40, 50, 60, 70 m/sec の各風速について迎角を 5 度から 21 度までパラメトリックに変化させて翼面

上の発光強度分布を取得した。

データ処理手順は、SI 補正までは前節で述べた鋸歯形状模型試験と同様である。よく知られているように PSP 塗料は圧力感度だけではなく温度感度もあわせ持っている。発光強度データから圧力データへの変換は、通風時画像と無風時画像の比から求められるが、両者の間で模型温度が異なれば温度補正を施す必要が発生する。現在 JAXA において標準的に用いられる温度補正手法は、模型上流れ場の左右対称性を仮定し、感温塗料 (Temperature Sensitive Paint, TSP) を対称面に塗装して温度分布を測定して補正に用いる方法[13]であるが、今回は半裁模型のため、代替手法として通風直後に取得された無風画像を基準画像とし、模型表面温度分布が通風時とほぼ同様であると仮定することにより、簡易的に温度感度の影響を除去することを試みた。圧力値算出手法としては、PSP 発光強度データと、同時に取得された模型上の圧力孔データとを対応させた較正カーブを作成し、これを用いて PSP データより圧力を算出する in-situ 法を採用した。その他試験の詳細については文献[14]に詳しい記述が見られる。

データ S/N 比の劣化する低速風洞試験において取得された PSP データを十分な精度で解析するには、データのスムージング処理におけるサンプリング数を確保するために、格子点数の大幅な増加は避けられない。ここでは模型表面を 124,623 個の三角形要素 (格子点数 63,989) に分割し、フォームファクタ行列の計算を実施した。さらにここでは、Z バッファ法における解像度を示すパラメータ N_{map} と補正結果との関係を調べるために、 N_{map} の値を変化させてフォームファクタ行列を計算し、補正結果を比較することを試みた。

Table 1 に各 N_{map} に対して得られたフォームファクタ行列のサイズ、計算時間、非ゼロ要素数・割合を示す。要素数の増加に応じてかなりの計算負荷が要求されるが、現在の計算機を用いれば、このような大規模な試験についても十分実用的な計算時間でフォームファクタ行列の計算が可能である。既に述べたように N_{map} は Z バッファ法の解像度に相当し、 N_{map} の値が小さい場合は半球底面のピクセル分割 (Fig. 3 の正方形) が粗くなるため、小さな要素は判別できずに全て陰面として処理され、非ゼロ要素数が相対的に少なくなるが、 N_{map} の値が増加するに従ってその総数が収束していく傾向が確認される。しかしながら $N_{\text{map}}=1500$ の場合でフォームファクタ行列の総サイズは 7GB にもおよび、前章で述べた記憶容量の節約処理を施したとしても、要素数が膨大となった場合は相応に多大なサイズとなることが分かる。

このようにして得られたフォームファクタ行列を用いて、本試験データについて SI 補正を実施した。各 N_{map} に対する SI 補正所要時間を Table 1 に示す。今回は PSP データ処理に Windows ベースの PC を用い、フォームファクタ行列データの参照は保存先の Linux マシンへネットワークを経由してアクセスすることにより行われたのでオーバーヘッドが生じ、 $N_{\text{map}}=1500$ の場合で約 24 分の補正時間を要しているが、大部分はバイナリデータの読み込みに費やされている。本試験のようにフォームファクタ行列の容量が大規模となる場合は、データ処理を行う計算機とフォームファクタ行列を保存している媒体が異なるケースが多く発生すると予想されるが、ネットワークを介してのデータ参照を如何に高速に処理するかは、

Table 1 高揚力装置模型フォームファクタ行列詳細

N_{map}	容量 (MB)	計算時間 (min)	非ゼロ要素占有率 (%)	SI 補正所要時間* (sec)
10	13	29.1	0.01	6
25	70	29.6	0.09	17
50	253	30.6	0.33	55
100	796	33.2	1.03	169
200	1923	40.9	2.47	401
300	2843	48.4	3.63	594
500	4199	78.6	5.31	904
750	5331	129.3	6.71	1114
1000	6093	185.2	7.64	1271
1250	6631	295.4	8.30	1395
1500	7024	363.6	8.79	1453

* 通風時画像補正と無風時画像補正の合計

データ処理の効率化において重要な課題である。PSP 計測プロセスにおける他のデータ処理（グリッドマッピング、圧力値変換等）に要する時間はいずれも高々数秒程度であり、現時点においては全プロセスに対して SI 補正が処理時間の大部分を占めている。

データ処理の 1 例として、風速 60m/sec、迎角 5 度のケースを取り上げる。Figure 13 に $N_{\text{map}}=1500$ の場合における SI 補正を施した圧力係数分布図を示す。低速域では圧力の変化量が小さいためデータの S/N 比が劣化し試験精度の確保が困難であるが、翼前縁における負圧領域等、特徴的な現象が定性的にはよく捉えられていること

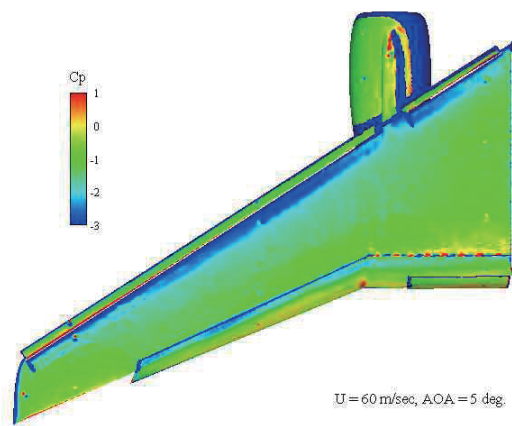
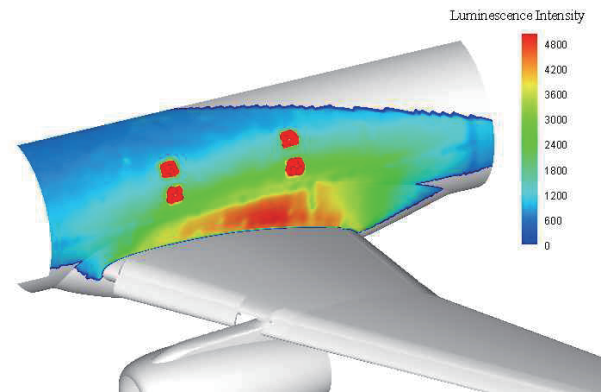
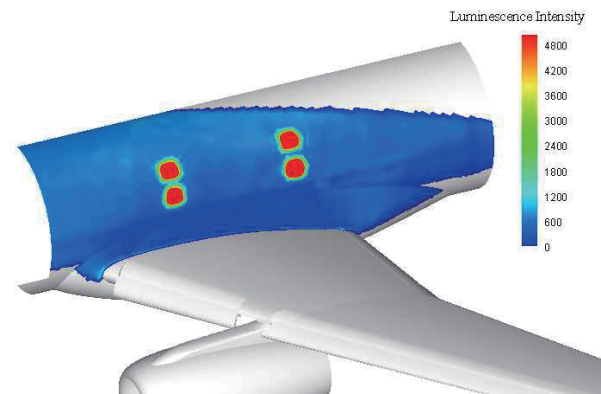


Fig. 13 圧力係数分布画像マッピング結果
(SI 補正あり)

が分かる。予期されるように、今回の試験で SI 補正の影響が最も顕著となる部分はパイロンとエンジンナセルの付け根部分であり、補正前後で圧力係数にして 0.3 程度の差が確認された。一方、今回の試験では胴体に PSP 塗料を塗装しなかったため、翼根における反射光の影響はほとんど見られなかったが、その反面翼面から生じる自己照明光が胴体で反射されることにより、本来生じないはずである胴体面の発光強度も記録されている。この反射光成分が SI 補正によって妥当に除去できているかを確認するために、胴体部について発光強度分布を補正前後で比較した結果を Fig. 14 (a), (b) に示す。SI 補正を施すことにより、全般的に発光強度分布が一様に近く、かつゼロに近い状態となっていることが分かる。胴体中央部に見られる 4 つの赤色部分は、画像データでマーカーを認識するために部分的に PSP を塗装した箇所に対応する。一方、翼胴結合部付近については、補正量が過大評価されたことにより発光強度が負の値となったデータが確認された。胴体部における発光強度は翼面と比較して 1/10 程度のオーダーと低く、そのためフォームファクタや反



(a) SI 補正なし



(b) SI 補正あり

Fig. 14 胴体面輝度分布の比較

射率の不確かさの影響が相対的に大きくなることが予想される。このような発光強度の低い部分に対しても妥当に補正するためには、補正精度そのものをさらに向上させる必要があるが、負の値とはいえ翼面発光強度のオーダーに対して高々 1% 程度であり、加えてこのような発光強度の低い部分における情報は通常重要ではないので、実用上大きな問題とはならないと考える。

最後に、補正結果が解像度 N_{map} によってどのように変化するかを調べた。Figure 15 は本計算における最大解像度 $N_{\text{map}}=1500$ における補正量を真値と仮定し、それ以下の解像度における補正結果の圧力係数に関する誤差の最大値を、各 N_{map} についてプロットしたものである。 N_{map} を増加させると誤差は急速に減少し、 $N_{\text{map}}=300$ 程度で最大解像度と大差ない結果が得られていることがわかる。これは AEDC 16-ft 遷音速風洞 TST 模型 (Dornier Alpha jet) について同種の検証計算を行った Ruyten と Fisher の傾向とよく一致するが [5]、どの程度の解像度で

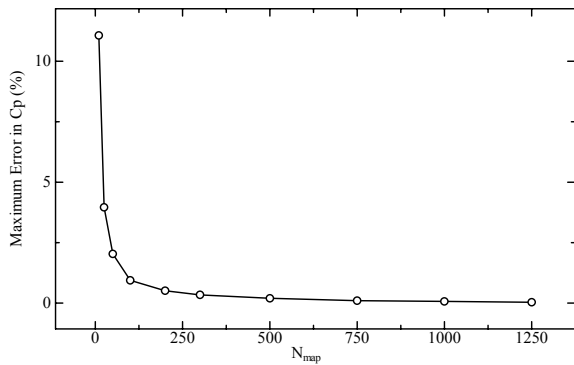


Fig. 15 圧力係数補正值における Z バッファ解像度 N_{map} の影響

十分かを一般的な観点から判断することは、物体形状や格子点密度に依存するために困難である。実際の適用においては、試験データの 1 例を取り上げていくつかの解像度で補正計算を行い、補正量の収束度合いを調べることで、精度とデータ処理効率のトレードオフから最適な解像度を決定して、その他のデータに適用するというアプローチが実用的であるが、本結果から推測されるように、一般的にはさほどの高解像度でなくとも十分妥当な精度で補正が可能であることが期待できる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、JAXA 実用風洞における PSP 計測試験に供するデータ処理の一環として、塗料発光時の反射光の影響を補正する、Self-illumination 補正プログラムの開発について詳細を述べた。本プログラムでは拡散反射を仮定することにより、輻射解析もしくはコンピュータグラフィックスの分野において開発された手法を基礎として、要素間の反射の影響度合いを示す値であるフォームファクタを数値的に求めている。複雑形状における障害物の問題に対応するために陰面消去法の一つである Z バッファ法を用いるとともに、投影誤差の補正結果に対する影響を極力排除するためにいくつかの是正処置が施された。また実用風洞試験における大規模要素分割においても最小限の記憶容量でフォームファクタを保存することが可能なように、コード実装においては細心の注意が払われた。

本プログラムの有効性を検証するために、まず反射の影響が顕著となり、かつ障害物の影響を考慮する必要がある典型的な形状として、鋸歯模型を用いた検証試験が実施された。得られた発光強度分布データについて本補正プログラムを適用したところ、妥当に反射の影響を除去でき、最大 60% 程度のデータの改善が確認された。また実際の風洞試験への適用例として、JAXA 6.5m×5.5m 低速風洞において実施された、高揚力装置標準模型試験

データに本プログラムを適用し、やはり妥当な補正が可能であることが示されたが、大規模な要素分割によりフォームファクタ行列の計算・保存に膨大な計算資源が必要であること、PSP データ処理の各段階と比較して SI 補正に要する計算時間が大きな比重を占めることが確認された。

本文中においても指摘したように、本 SI 補正の精度を左右する主要な要素としては、フォームファクタ算出精度と反射率測定精度（および拡散反射の妥当性）の二点が挙げられる。前者については、フォームファクタを半球投影法で求める際に各三角形要素を厳密に投影するのではなく、要素の頂点のみを投影するために生じる誤差が場合によっては無視できないことが主たる原因である。これについては、要素の各辺をさらに分割して頂点のみならずそれら分割点についても投影させ、投影結果として得られた多角形要素の面積を Z バッファ法で求めるような対策が考えられるが、当然ながらアルゴリズムの複雑化とともに計算負荷も増大するので、補正精度と計算効率の両観点から検討する必要がある。後者については、非拡散光の影響を考慮の上、より高精度に反射率を測定できる手法を検討する一方で、例えば要素間の向かい合う角度に応じて最適な反射率を指定するといった工夫により、補正精度を向上させることが可能であろう。

いずれにしても本プログラムを用いることにより、実用上十分な補正時間で PSP 計測法の測定精度を向上させることが可能であることが示されたが、特に実用風洞試験における大規模要素分割についてはフォームファクタ行列の容量が膨大であり、補正処理に相当の時間がかかってしまうことが問題となりうる。今後の課題としては、例えば何らかの方法で実用上十分な精度を維持したままフォームファクタ行列のサイズを減少させ、必要最小限の計算時間で補正が可能となるような、補正手法の効率化・高速化が挙げられる。

謝辞

本研究の実施にあたっては、まず鋸歯模型試験について、模型の CAD データ作成を IHI エアロスペースエンジニアリング (ISE) の橋本拓郎氏（現在、株式会社本田技術研究所）、試験実施を同じく ISE の伊藤正剛氏に担当していただいた。さらに HLD 模型試験については、JAXA 国産旅客機プロジェクトの一環として、総合技術研究本部（現研究開発本部）風洞技術開発センター低速風洞セクション、および航空プログラムグループ国産旅客機チーム空力技術セクションとの共同作業で実施されたものであり、今回の執筆にあたっては関係各位から試験データ使用の了解をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Mitsuo, K., Nakakita, K., and Kurita, M., "Application of Pressure-Sensitive Paint to Low-Speed Wind Tunnel Testing at Japan Aerospace Exploration Agency," Proceedings of the 24th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004-3.2.3, Aug. 2004.
- [2] Nakakita, K., Kurita, M., and Mitsuo, K., "Development of the Pressure-Sensitive Paint Measurement for Large Wind Tunnels at Japan Aerospace Exploration Agency," Proceedings of the 24th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004-3.2.2, Aug. 2004.
- [3] 栗田充, 中北和之, 満尾和徳, 神田宏, 浅井圭介, 渡辺重哉, "NAL 1m×1m 超音速風洞における SST 模型感圧塗料試験," 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会論文集, 2003.
- [4] Nakakita, K., and Asai, K., "Pressure-Sensitive Paint Application to a Wing-Body Model in a Hypersonic Shock Tunnel," AIAA Paper AIAA 2002-2911, June 2002.
- [5] Ruyten, W. and Fisher, C.J., "On the Effects of Reflected Light in Luminescent Paint Measurements," AIAA Paper AIAA 2000-0833, 2000.
- [6] Ruyten, W.M., "Self-Illumination Calibration Technique for Luminescent Paint Measurements," Rev. Sci. Instrum., Vol. 68, Issue 9, September 1997, pp. 3452-3457.
- [7] Sant, Y.L., "Overview of the Self-Illumination Effect Applied to Pressure Sensitive Paint Applications," ICIASF 2001 Records, 2001, pp. 159-169.
- [8] 杉浦裕樹, 飯島由美, 浅井圭介, "航空機風洞試験における感圧塗料の反射補正," 航空宇宙技術研究所報告 TR-1441, 2002.
- [9] 荒屋真二, 明解 3 次元コンピュータグラフィックス, 共立出版, Sept. 2003.
- [10] 千葉則茂, 土井章男, 3 次元 CG の基礎と応用[新訂版], サイエンス社, Oct. 2004.
- [11] 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.
- [12] Ito, T., Yokokawa, Y., Ura, H., Kato, H., Mitsuo, K., and Yamamoto K., "High-Lift Device Testing in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel," AIAA Paper AIAA 2006-3643, June 2006.
- [13] 中北和之, 満尾和徳, "実用試験への PSP の適用," 日本航空宇宙学会誌, Vol. 54, No. 624, Jan. 2006, pp. 9-14.
- [14] Mitsuo, K., Kurita, M., Kuchi-Ishi, S., Fujii, K., Ito, T., Watanabe, S., and Yamamoto K., "PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel," AIAA Paper AIAA 2007-1065, Jan. 2007.