

独立行政法人
航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1441

航空機風洞試験における感圧塗料の反射補正

杉浦裕樹・飯島由美・浅井圭介

2002年4月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

航空機風洞試験における感圧塗料の反射補正*

杉浦裕樹*¹, 飯島由美*¹, 浅井圭介*¹

Self-illumination Correction for Pressure Sensitive Paints on Airplane Models in Wind Tunnel Testing *

Hiroki SUGIURA *¹, Yoshimi IJIMA *¹, Keisuke ASAI *¹

ABSTRACT

One of the potential problems in applying pressure sensitive paints to a wing-body model is self-illumination of the model. A theoretical model of self-illumination correction by W. M. Ruyten was applied to two, square, painted samples and a wind tunnel test of the MU-300 model. The spatially averaged reflection coefficient of 0.75 was determined for a pressure sensitive paint PtOEP-GP197 by measurement on the two, square, painted samples at a range of included angles. As a result, the applicability of the self-illumination correction method was validated. The self-illumination effect on the MU-300 model was so small that the effect of the self-illumination correction was little.

Keywords : Pressure Sensitive Paint, Self-Illumination Correction, Reflection Coefficient

概 要

航空機形態の風洞試験において感圧塗料により圧力を計測する際の問題の一つとして、翼面からの光を計測する際、胴体面からの光が翼面で反射した分が含まれてしまうという問題がある。本報告では、Ruytenの報告を基に一般的航空機模型の感圧塗料試験に適用可能な計測手法とデータ処理プログラムを開発した。本手法では、感圧塗料の反射係数を一つのスカラー量に定めて風洞試験とは別に計測して、反射の影響を数値的に除去する。本手法を2つの平板を組み合わせた形状に適用したところ、本研究で用いた塗料PtOEP-GP197の反射係数の計測値は0.75であり、その値を用いた反射補正によって反射の影響を取り除くことができることがわかった。本手法をMU-300模型の風洞試験に適用したが、反射の影響が小さかったため、反射補正の効果はわずかであった。

記 号

(太字はベクトルまたは行列を表し、それ以外はスカラーを表す。)

A 形状行列 (その (i,j) 成分 A_{ij} は物体上の j 番目の要素面 ΔS_j の単位輝度の発光が点 x_i に与える光度)

D_{Bi} 板 C の発光が、板 B の i 番目の要素面において反射する光の輝度

I 単位行列
 i 要素面のインデックス
J 要素面の輝度
 j 要素面のインデックス
M マッハ数
N 画像の全画素数
n 物体上の要素面の法線ベクトル
 p 静圧
 ΔP 半球面上の要素面またはその面積

* 平成 13 年 11 月 27 日受付 (received 27 November, 2001)

*¹ 流体科学研究センター (Fluid Science Research Center)

R	感圧塗料の発光波長帯における反射係数
S	輝度分布を表す行列（その成分 S_i は i 番目の要素面の輝度）
ΔS	物体上の要素面またはその面積
T_{Bi}	板 C の発光が、板 B の i 番目の要素面に与える輝度
x	要素面の中心点の座標ベクトル
x_{ij}	$x_{ij} = x_j - x_i$
α	迎角
γ	反射係数計測試験で用いる板 B と板 C の交わる角度
θ	n_j と x_{ji} の交わる角度
Ω	点 x_j から ΔS_i を見る立体角
\cdot	ベクトルの内積

添字

B	2枚の平板を組み合わせた形状のうち、固定する平板、板 B
C	2枚の平板を組み合わせた形状のうち、固定する板 B とす角度を変える平板、板 C
corr	反射補正後
i	要素面のインデックス
j	要素面のインデックス
ref	圧力が既知の状態

1 序論

近年、新しい圧力計測法として、感圧塗料の実用化研究が進んでいる^{1),2)}。

感圧塗料は、適当 励起光源により発光し、その輝度が酸素消光現象により酸素分圧に反比例する事実を利用して、圧力センサとして用いられる。輝度の大きい点ほどその点における圧力は低い。模型に塗られた感圧塗料の輝度分布を、デジタルカメラ等により計測することで、模型上の圧力分布を計測することが可能となる。

当所もこれまで、感圧塗料による圧力計測技術の実用化を目指し、大型風洞への試験技術の適用を試み、圧力計測精度を向上させる為に必要、基本となるデータ処理手法と実験設備を整備してきた^{3),4)}。しかし、感圧塗料を、翼と胴体を持つ一般的な航空機のような複数の面を持つ形状に適用する際には、自己照射 (self-illumination) の問題が生じる。自己照射とは計測点の輝度を計測する際、計測点以外の点における発光が計測に影響を与えることである。航空機を例にあげれば、翼面の輝度を計測する際、翼面の発光とは別に、胴体面の発光が翼面で反射した光が含まれる (図 1) ために、翼面の圧力の測定値が実際の値より小さくってしまうのである。Dornier Alpha jet機の感圧塗料試験では圧力測定値

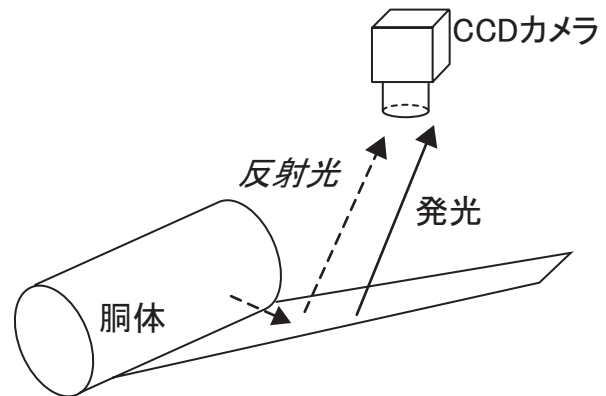


図 1 翼面反射の影響 (出典: 文献 9)

の 10% 以上の誤差が報告されている⁵⁾。

そこで Ruyten は、塗料の反射係数を一つのスカラー量に定め、実験前に計測することにより、取得した画像から反射の影響を数値的に除去する簡便 手法 (以後、反射補正と称する) を提案した⁶⁾。

本稿は、航空機形態の風洞試験への感圧塗料の適用を目的として、Ruyten の報告⁶⁾を基に航空機模型の一般的感圧塗料試験に適用可能 反射補正の手法およびデータ処理プログラムを開発し、2枚の平板を組み合わせた形状への適用を試みたので、その結果について報告する。また MU-300 模型の風洞試験への適用も試みたので、その結果について報告する。お本手法は感温塗料にも適用可能である。

まず次章で反射補正の理論について述べる。続く第 3 章では反射補正を 2枚の平板を組み合わせた形状に適用した結果について、第 4 章では反射補正を MU-300 模型の風洞試験に適用した結果について述べる。

2 反射補正の理論

2.1 仮定と前提条件

反射補正を行う際、塗料表面の反射率特性を求めることが必要である。

反射率特性は一般に光の波長によって異なるが、ここではただか 100nm の範囲の発光波長帯のみを扱うので、波長による反射率特性の違いは無視しうると考える。

反射率特性は一般に入射角および反射角によっても値が異なる。特に光沢/艶のある塗料面では、選択的に特定の反射角の光度を大きく与える。これに対し、感圧塗料は一般に光沢/艶の無いマット 塗料面を持つ。

そこで本研究では、塗料表面を、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) と仮定した。このとき塗料の反射率特性は入射角の余弦とひとつのスカラー量 (以下、これを R とし、反射係数と称する)

の積とるので計算が単純化される。これは計算時間の大幅短縮につながり、反射補正の風洞試験への適用を考えると、実用上非常に有利である。Ruytenは反射角による反射率特性の違いを考慮したBSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) を組み込んだ反射補正も適用しているが、その適用は完全拡散面モデルに基づく反射補正と比較して感圧塗料による圧力データの精度向上にはつがらんと報告している⁶⁾。Le Santも完全拡散面モデルに基づく反射補正とBSDFを組み込んだ反射補正を複数の感圧塗料に適用した結果、完全拡散面モデルに基づく反射補正結果はBSDFを組み込んだ反射補正結果とよく一致したと報告している⁷⁾。

本研究における反射補正に必要な前提条件はa) 模型の形状が既知であることと、b) 背景の影響が無視できるとして、模型表面の内、反射により影響を与え合う面が画像に全て含まれることである。

感圧塗料の輝度 I と静圧 p は理論的にStern-Volmerの関係式に従う⁸⁾。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \frac{p}{p_{ref}} \quad (2.1)$$

ここで、 A, B は較正係数である。上式の添え字の ref は圧力が既知の状態(たとえば、無風時)を意味する。無風時と通風時の模型の移動変形量が小さければ、無風時と通風時で胴体により反射された励起光が翼面に入射する光度は変化しない。圧力は無風時と通風時の輝度比をもとに算出されるので、励起光がどのような経路で入射しても無風時と通風時で光度が変化しなければ、圧力算出値に影響を与えない。したがって、反射補正を行う際は、励起光の反射を考慮しなくてよい。

感圧塗料の発光の波長と励起光の波長は異なり、フィルターによって分離される。まず光源は発光波長帯の光を出さないようにフィルターを通される。そして模型の画像は発光波長帯のみを透過するフィルターを通される。フィルターを適切に用いることで、フィルターの漏れは無視できる程度とするものとする。

2.2 反射補正の基礎式

いま、 \mathbf{S} を各要素面の輝度を表す行列と定義し、その成分 S_i は物体上の i 番目の要素面の輝度を表すとす(\mathbf{x}_i は物体上の i 番目の要素面の中心点を表す) と、反射補正後の \mathbf{S}^{corr} の i 成分は

$$\mathbf{S}^{corr}_i = \mathbf{S}_i - R_{ref} [\mathbf{A}_{ij} \mathbf{S}_j] \quad (2.2)$$

と表される⁶⁾。上式が反射補正の基礎となる式である。

また、 \mathbf{A} は形状行列であり、その成分 A_{ij} は物体上の j 番目の要素面 $\Delta \mathbf{S}_j$ における単位輝度の発光のうち、点 \mathbf{x}_i に与える光の光度を表す。 A_{ij} は次のように表される(次

式の導出過程に関しては付録Aを参照のこと)。

$$\mathbf{A}_{ij} = \frac{(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{x}_{ij})(\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{x}_{ji})}{\pi |\mathbf{x}_{ij}|^4} \Delta \mathbf{S}_j \quad (2.3)$$

但し、 $i=j$ なら、 $\mathbf{A}_{ij}=0$ とする。また $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0$ または $\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{x}_{ji} < 0$ なら、これは観測面で反射する光を発する面が観測面の裏側にある場合に対応し、 $\mathbf{A}_{ij}=0$ とする。また、点 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ を結ぶ直線上に光を遮る物がある場合は $\mathbf{A}_{ij}=0$ とする。

3 複数の平面を持つ形状への適用

3.1 試験の概要

複数の面を持つ最も単純な形状である、2枚の正方形の平板を組み合わせた形状に反射補正を適用した。この際、反射の存在するとき(2枚の平板のす角度が 180° 未満の場合)とし、ないとき(2枚の平板のす角度が 180° の場合)の平板の輝度分布を計測した。

図2に実験装置の概要を示す。感圧塗料の塗られた50mm四方、厚さ2mmのアルミ製平板2枚の裏面をアルミテープで貼り合わせ、発光波長帯の光を照射して、デジタルカメラにより2枚の板の輝度分布を取得した。デジタルカメラは固定する平板(板B)から距離545mmの位置に設置した。カメラには25mmのレンズを使用したので、基準となる観測面、すなわち固定する平板(板B)の画像の変歪(convergent distortion)を避けるために、カメラのレンズの光軸が板Bに垂直になるように設置した。2枚の板のす角度 γ が 90° 以下の角度の場合は板Bの一部がカメラの画像に含まれにくいため、角度 γ は $100 \sim 180^\circ$ の範囲で変えて、それぞれの場合における輝度分布を取得した。

光源は板Bから距離605mmの位置に、光源と、デジタルカメラのレンズの光軸のす角度が 16° となるように設置した。光源による発光波長帯の光度は感圧塗料の発光による発光波長帯の輝度と比較して大きいので、散光フィルター(diffusive filter)により減じた。

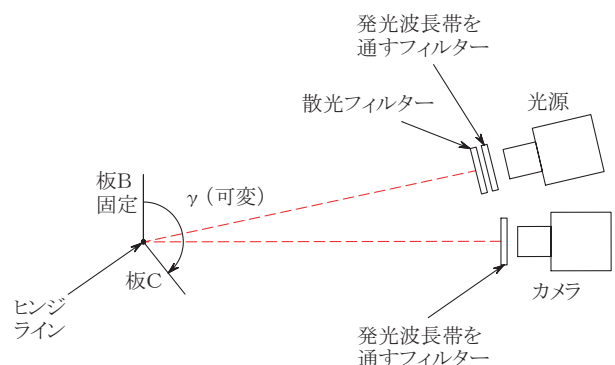


図2 反射係数計測試験のセットアップ

これらの画像を基に (3.5) 式に示すよう 数値的 処理を行った。本試験では $\gamma = 100, 120, 140, 160, 180^\circ$ の画像を取得した。画像の画素数は 512×512 であった。塗料に発光波長帯の光を照射するために、光源側には $620 \sim 700\text{nm}$ を透過するフィルターを用いた。

反射補正の対象と 風試模型と板2枚の塗装時の条件を同一にするために、双方同時に同様に塗装した。す わち、アセトンによって表面の脱脂を行った後に、光量を増加させる下地材として白色塗料を塗装した。次に、エアブラシ（スプレー）を用いて感圧塗料 PtOEP-GP197 を塗装した。

カメラ及び光源も風洞試験と同一とし、励起光源にはキセノンランプを用い、計測には14ビット冷却デジタル CCD カメラを用いた。カメラの飽和電荷容量は $60,000$ electrons であった。風洞試験と同様にカメラ側には波長 $600 \sim 700\text{nm}$ を透過するフィルターを用いた（光源側のフィルターが透過する波長帯とわずかに異なるが、その影響は無視しようと考えられる）。角度 γ を変更しても観測面を焦点深度内に保持し、像の周辺減光を小さくするために、カメラの絞りは $f22$ に固定した。カメラのシャッター速度は、今回計測する $\gamma = 100 \sim 180^\circ$ の範囲内で、画像中の最も輝度が大きい点において、CCDが飽和し い範囲で最大の値に調整し、試験を通して変更し かった。カメラは 0.25 秒露光した。

関係する面以外の光や反射光の影響が及ぶことの無いように、本試験は暗室内で実施し、暗室内の機器類は艶消しの黒色塗装を施すか、黒い布で覆った。金属面は艶消しの黒色塗装を施していても少量の光を反射して計測結果に影響を及ぼすため、関係する面以外の金属面（2枚の板の側面等）が光源に正対する位置に無いようにした。

また基準と 無風時の画像と、通風時の画像を取得する間に、励起光を一定以上の時間、感圧塗料面に照射すると、感圧塗料の蛍光特性が劣化し、無風時と通風時の輝度比に誤差が生じる。感圧塗料の劣化を最小限にするために、画像取得時以外は光源のシャッターを閉め、CCD カメラによる画像取得開始の数秒前に開き、取得終了の数秒後に閉じた。

本試験では1ケースについて5枚の画像を取得して平均化した。

CCDは光が入射し なくても、不純物や格子欠陥 によりわずか がら電流が観測される。光検出素子において、この様 入射光に起因し い電流を暗電流と呼ぶ。CCD カメラの各画素の暗電流による初期出力を補正するために、カメラの絞りを閉じた状態のダーク画像を各画像から減算した。

本研究で用いた感圧塗料の輝度 I の逆数と静圧 p は

(2.1) 式に示す線形関係に従う。従って、このセットアップでは発光波長帯の光だけが存在する面での発光波長帯の反射であるが、一般の感圧塗料による風洞試験のように励起光が入射し、発光する面の発光波長帯の反射と同じと考えてよい。

3.2 反射係数の求め方

2枚の板を図2に示すように、板B、板Cと呼称し、板Bとカメラのレンズの光軸の ず角は 0 とする。 \mathbf{S}_B 、 \mathbf{S}_C をそれぞれ板B、板Cの輝度分布を表す行列とすると、式 (2.2) から、

$$\mathbf{S}_B(\gamma) - R_{red} \mathbf{A}(\gamma) \mathbf{S}_C(\gamma) = \mathbf{S}_B(180^\circ) \quad (3.1)$$

と る。これは $\gamma = 180^\circ$ の時、2枚の板の間で光の反射は生じ いからである。

ここで板Bと板Cの要素面のインデックスをそれぞれ i 、 j として、

$$D_{Bi}(\gamma) = \mathbf{S}_{Bi}(\gamma) - \mathbf{S}_{Bi}(180^\circ) \quad (3.2)$$

$$T_{Bi}(\gamma) = \sum_j A_{ij}(\gamma) \mathbf{S}_{Cj}(\gamma) \quad (3.3)$$

と定義すると、(3.1) 式は

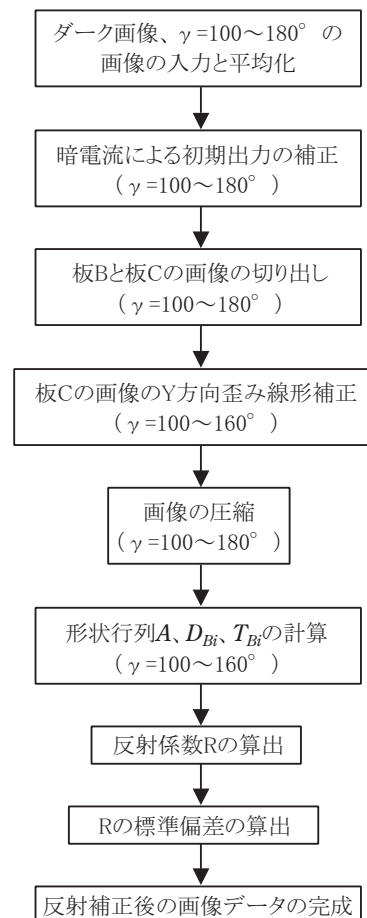


図3 反射係数算出プログラムのフローチャート

$$D_{Bi}(\gamma) = R_{red} T_{Bi}(\gamma)$$

と表される。 T_{Bi} は板Cの発光が、板Bの*i*番目の要素面に与える輝度を表し、 D_{Bi} は板Cの発光が、板Bの*i*番目の要素面において反射する光の輝度を表す。上式の右辺と左辺の差

$$Q = \sum_{\gamma} \sum_i [D_{Bi}(\gamma) - R_{red} T_{Bi}(\gamma)]^2 \quad (3.4)$$

が最小になるように最小自乗法を適用すると、

$$R_{red} = \frac{\sum_{\gamma} \sum_i D_{Bi}(\gamma) T_{Bi}(\gamma)}{\sum_{\gamma} \sum_i T_{Bi}^2(\gamma)} \quad (3.5)$$

と、この式を用いて反射係数を求めることができる。得られた全ての γ における画像の各要素面の D_{Bi} と T_{Bi} を計算し、式(3.5)に従って数値的に求める。

上述の原理を用いた反射係数算出プログラムを付録Cに示す。プログラムのフローチャートを図3に示す。

3.3 反射係数の計測結果と考察

$\gamma = 100, 120, 140, 160, 180^\circ$ の生の画像(画素数:512×512)を図4に示す。全画像において、塗りムラに起因する縞状の非一様性や光源との位置関係による明暗の差が観測される。

$\gamma = 180^\circ$ の画像には反射の影響が存在しないので、 $\gamma = 100, 120, 140, 160^\circ$ の画像からこの画像を減算することにより、 $\gamma = 100, 120, 140, 160^\circ$ の場合における反射の影響を求めることができ、これらを図5に示す。

$\gamma = 100, 120, 140^\circ$ では反射の影響が明瞭に現れているが、 $\gamma = 160^\circ$ になると、反射の影響は各画素における輝度の測定値のばらつきに埋もれ、観測されない。

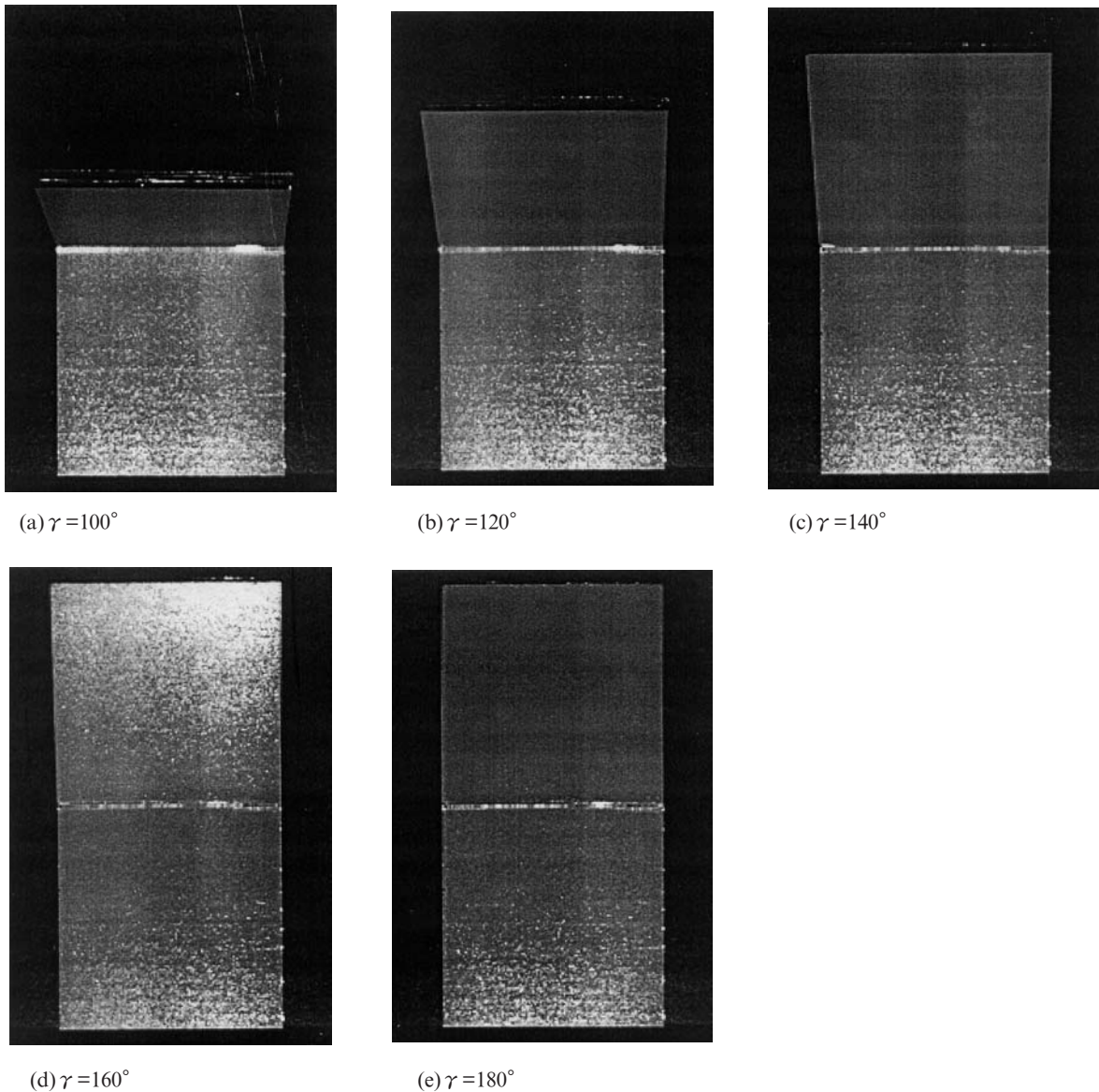


図4 $\gamma = 100, 120, 140, 160, 180^\circ$ の生の画像

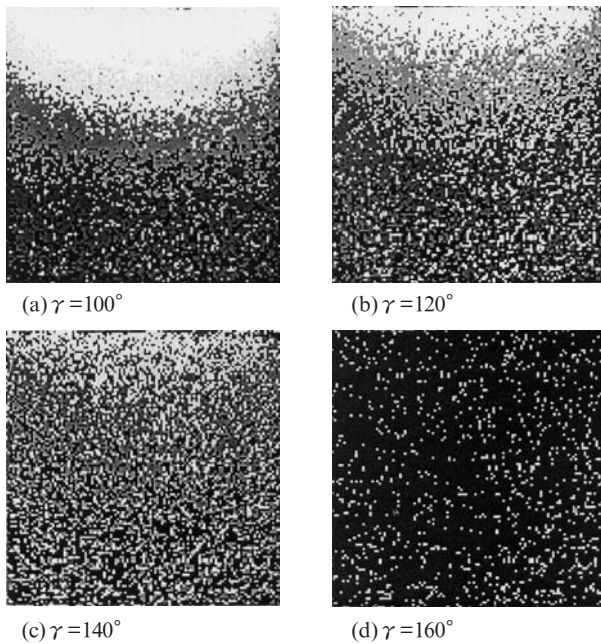


図5 $\gamma = 100, 120, 140, 160^\circ$ の場合における
反射の影響

$\gamma = 100, 120, 140^\circ$ の全画像で、板 B と C の境目において最も大きく反射の影響が現れている。また板 B, C の距離が最も近い 100° のとき、最も大きく反射の影響が現れている。

付録 C に示すプログラムを用いて、式 (3.5) より求めた R の計算値を表 1 に示す。

表の最後のケース以外については、データ処理速度を速めるために予め画像の平均化を行い、画素数を減らした。その結果できた画像と元の画像の全画素数の比を画像圧縮比と定義する。生画像データにおける板 B の画素数は 218×220 であり、 $1/16$ に圧縮したときの板 B の画素数は 55×55 である。表より、 $\gamma = 100, 120, 140, 160^\circ$ の全ての画像データに基づく反射係数の計算値に関して、 $1/4, 1/16$ に圧縮した場合と圧縮していない場合を比較すると、その差異はたかだか 3% であり、反射係数の計算値のばらつきの程度を表す標準偏差 Q の値 (30% 程度) と比較して非常に小さい (Q は付録 C に示すプログラムを用いて、式 (3.4) より求めた)。したがって、画像の平均化を行い、画素数を減らしても、反射係数の計算値に及ぼす影響は小さいといえる。

表より、 160° の画像のみに基づく反射係数の計算値が他の値と大きく異なることがわかる。 160° の場合は、例えば $1/4$ 圧縮では、標準偏差の値 $Q=0.36$ が反射係数の計算値 0.31 より大きいことから、このことは反射の影響が、各画素における輝度の測定値のばらつきに埋もれる程度に小さいために、反射係数を正確に計算できなかったことを示している。

表 1 反射係数の計算値

2枚の板が	す角度(deg)	画像圧縮比	反射係数 R	標準偏差 Q
100		1/16	0.77	0.15
100		1/4	0.77	0.15
100		1	0.77	0.15
120		1/16	0.70	0.20
120		1/4	0.70	0.19
120		1	0.70	0.19
140		1/16	0.66	0.31
140		1/4	0.66	0.30
140		1	0.66	0.30
160		1/16	0.30	0.38
160		1/4	0.31	0.36
160		1	0.32	0.33
100,120,140		1/16	0.74	0.20
100,120,140		1/4	0.74	0.18
100,120,140,160		1/16	0.73	0.21
100,120,140,160		1/4	0.74	0.19
100,120,140,160		1	0.75	0.17

以上の考察から、本塗料 PtOEP-GP197 の反射係数の値として、 $\gamma = 100, 120, 140, 160^\circ$ の画像データに基づく反射係数の計算値を採用し、

$$R = 0.75 \pm 0.17$$

とする。これは入射光の約 75% が本塗料表面により反射されたことを意味する。これは感圧塗料 FIB7 の反射係数の値 $R = 0.79 \pm 0.15^{1)}$ と非常に近い値で、上記の値は妥当と考えられる。

この値を用いて板 B からの光に含まれる反射の影響の分布を計算したものを、図 6 の (a) 欄に示す。比較のため、図 5 で求めた実測による反射の影響の分布を図 6 の (b) 欄に示す。両画像の比較を容易にするために、0 から最大値までの範囲を 8 色で線形表示するカラーバーを用いて表示されている。両画像の類似性は明瞭に現れている。

反射補正後の板 B の画像を図 7 に示す。反射補正後の板 B と反射が無い場合 ($\gamma = 180^\circ$) の板 B の画像の差を図 6 の (c) 欄に示す。残差は画像全体にちらばっており、偏りは観測されず、 $\gamma = 100, 120, 140^\circ$ の場合において両画像の差は非常に小さいといえ、反射補正によって反射の影響を取り除くことができることがわかった。

4 航空機形状への適用

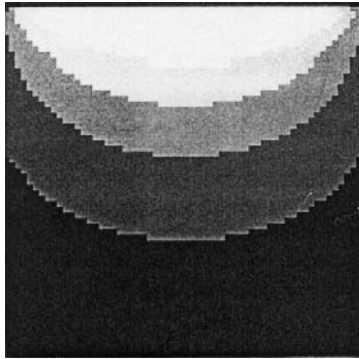
4.1 風洞試験の概要

2m × 2m 遷音速風洞を使った翼胴模型試験に、得られた反射係数を用いた反射補正を適用した。この際、本手

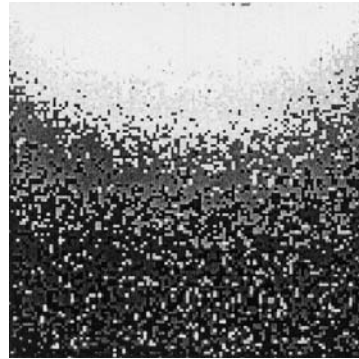
(a) Rを用いて計算された反射の影響

(b) 実測された反射の影響

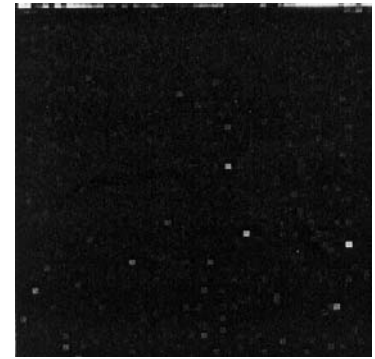
(c) 画像(a)と(b)の差



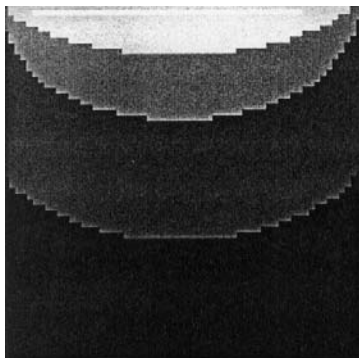
計算 ($\gamma=100^\circ$)



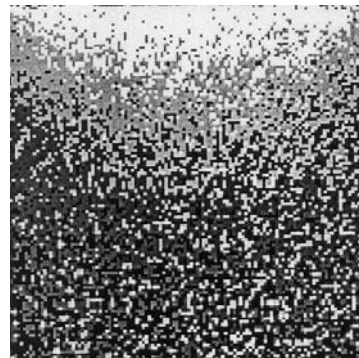
実測 ($\gamma=100^\circ$)



残差 ($\gamma=100^\circ$)



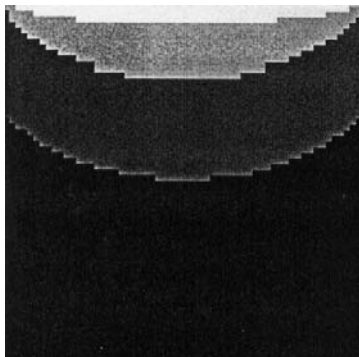
計算 ($\gamma=120^\circ$)



実測 ($\gamma=120^\circ$)



残差 ($\gamma=120^\circ$)



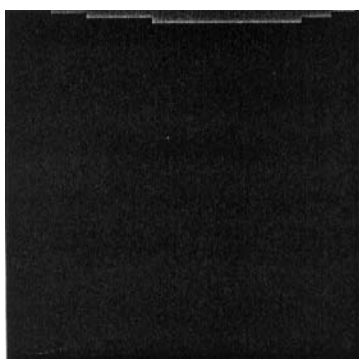
計算 ($\gamma=140^\circ$)



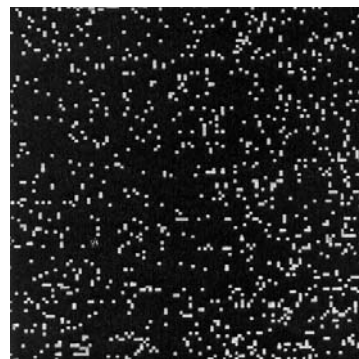
実測 ($\gamma=140^\circ$)



残差 ($\gamma=140^\circ$)



計算 ($\gamma=160^\circ$)



実測 ($\gamma=160^\circ$)



残差 ($\gamma=160^\circ$)

図6 実測された反射の影響と、求められた反射係数によって計算された反射の影響の比較

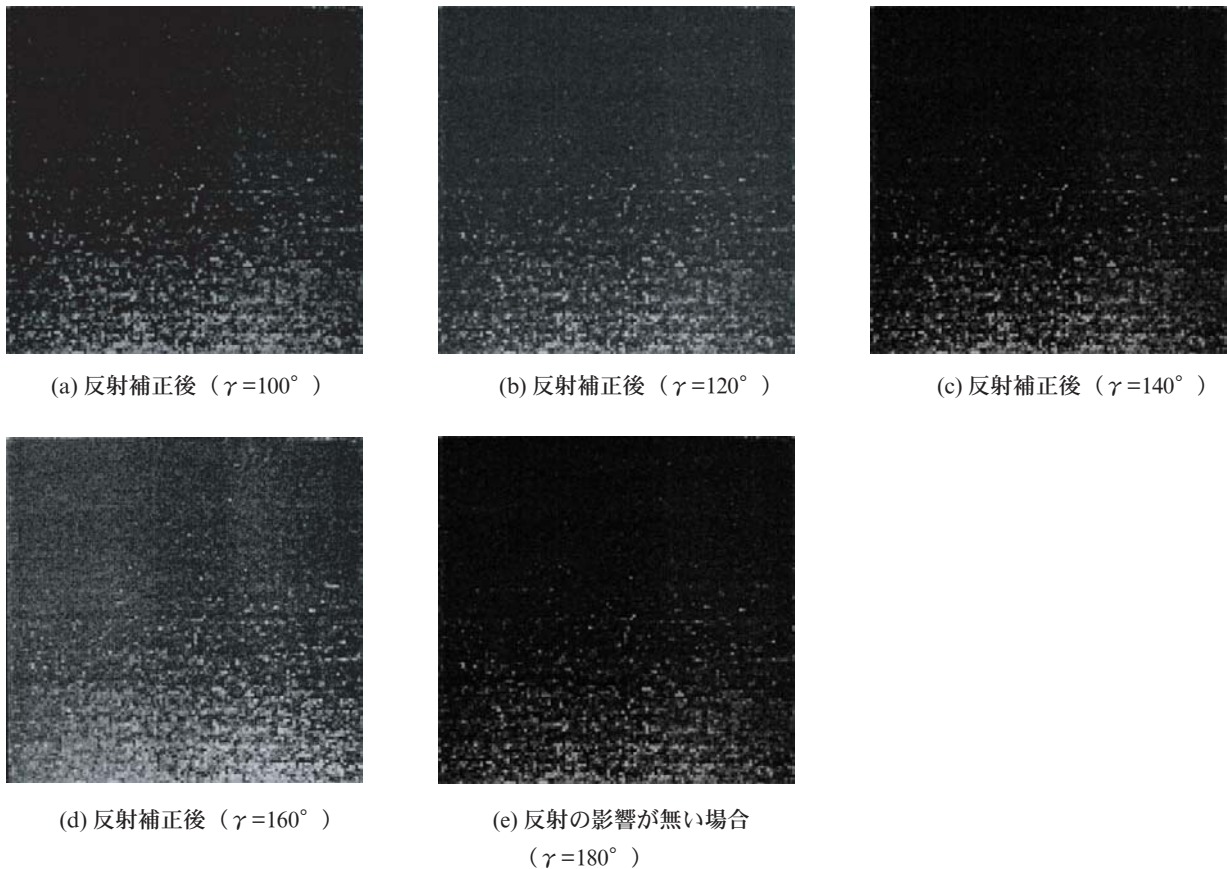
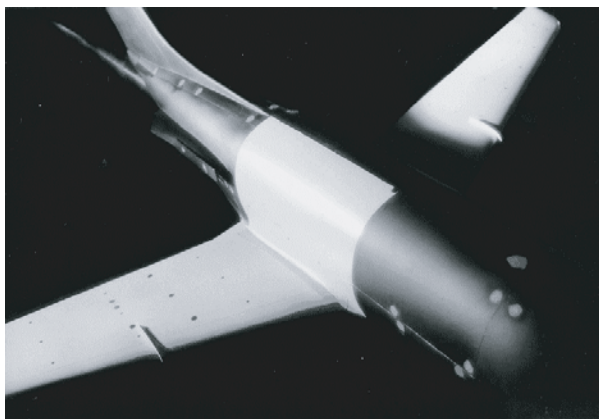
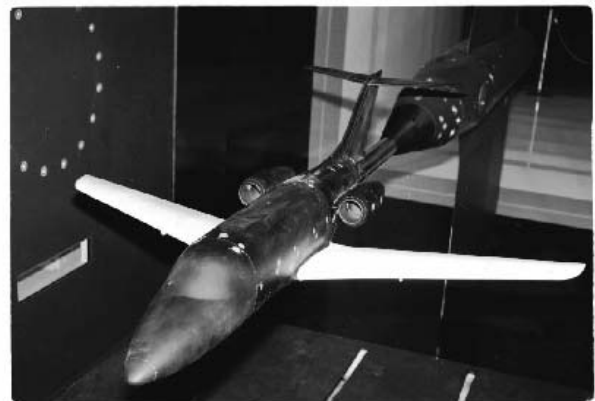


図7 反射補正後の板 B ($\gamma=100, 120, 140, 160^\circ$) と反射の影響の無い板 B ($\gamma=180^\circ$) の画像の比較



(a) 翼と胴体に感圧塗料が塗装され、翼胴反射の影響が有る場合 (翼胴反射onの場合)



(b) 翼のみに感圧塗料が塗装され、翼胴反射が存在しない場合 (翼胴反射offの場合)

図8 MU-300 の8% 圧力模型

法の有効性を確認するため、翼と胴体に感圧塗料が塗装され、翼胴反射の影響が有る場合 (以後、翼胴反射 on と呼称。図 8(a)) と、翼のみに感圧塗料が塗装され、翼胴反射が存在しない場合 (以後、翼胴反射 off と呼称。図 8(b)) の2ケースの通風を実施した。前者の通風を実施後に、胴体部の感圧塗料をアセトンで除去し、後者の通風を実施した。

供試模型はMU-300の8%模型を用いた。模型の右主翼

上面には、44点の圧力孔が空いており、胴体には12点の圧力孔が空いている。圧力はスキャニバルブ2台により計測され、模型のピッチ角は内蔵の傾斜計により計測された。

反射係数計測試験で述べたように、模型の右翼と胴体に反射係数計測試験で用いた板2枚と同一の塗装 (白色塗料および感圧塗料PtOEP-GP197) を同時に施した。反射補正の有効性を確認することが本試験の目的であるの

で、観測面の単位面積あたりの画素数を大きくするために、デジタルカメラで捉える画像の範囲をできるだけ小さくした。胴体に関しては、感圧塗料が塗装された右翼上面に対して反射の影響が最も大きい、主翼前縁位置から後縁位置の範囲を塗装した。右翼上面に影響を及ぼさない左舷側と下面側は塗装しなかった。また右翼の塗料は数時間乾燥させた後、ラッピングフィルム研磨剤により表面を仕上げた。図8に示すように、左翼にも塗料が塗られているが、これは反射補正とは別の試験で用いたものである。左翼と右翼は胴体を隔てており、今回計測する右翼への影響は無視しうると考える。

通風中の模型位置を確定するため、模型上に直径3mmの円形のマーカを右翼に6列計18点、胴体に2列計6点設置した。マーカは一般に「レタリング」と呼ばれる、グラフィックアートで用いられる転写シートから円形の点を転写した。マーカは3次元座標を把握している圧力孔位置を基準として設置した。

実験のセットアップの概要を図9に示す。カメラは反射係数計測試験と同一の14ビット冷却デジタルCCDカメラを用い、波長600~700nmを透過するフィルターを装着した。カメラの絞りも反射係数計測試験と同様にf22に固定した。これにより、迎角を変更しても観測面が焦点深度内に保持される。カメラのシャッター速度は、CCDが飽和しない範囲で最大の値に調整し、計測中は変更しなかった。カメラの露光時間は0.35秒であった。

2.1で述べたように、背景の影響が無視できるとして、模型表面の内、反射により影響を与え合う面が画像に全て含まれることが反射補正の前提条件である。塗料の塗られた右翼と右舷側胴体を同時に画像内に含めるために、図9に示すようにカメラをプレナム室内の右舷側の風路外壁に固定して、模型の右斜め上方より塗料の発光を計測した。カメラは風軸から距離1.2mの位置に、レ

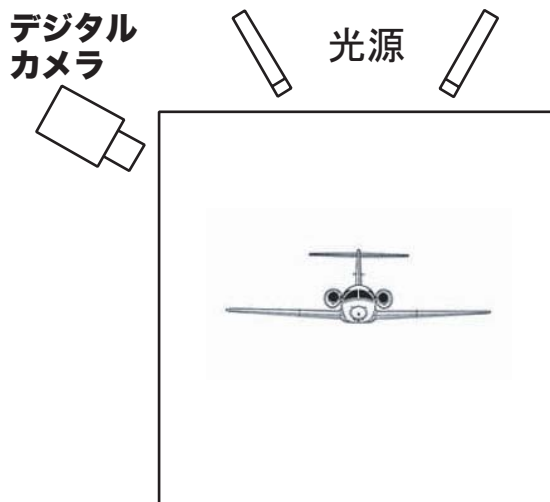


図9 風洞試験のセットアップの概要

ンズの光軸と測定部の上下対称面の傾斜角度が約30°となるように設置した。励起光源も反射係数計測試験と同一のキセノンランプを用い、模型に照射する光度が可能な限り均一となるように、模型の上方から1組の光源を用いて模型に照射した。光源は風軸から距離1.1mの位置に、光軸と測定部の上下対称面の傾斜角度が約80°となるように設置した。

関係する面以外の光や反射光が影響を及ぼすことがないように、図8に示すように、供試模型および風路の内壁は黒色に塗装され、測定部が存在するプレナム・チャンバー内の照明や表示灯類は通風中消灯した。黒色塗装面の反射率は、淡橙色の感圧塗料面の反射率より十分小さいと考えられ、感圧塗料の発光が黒色塗装面で反射する光は、感圧塗料面で反射する光と比較して十分小さいと考える(2節で述べたように励起光の反射は考慮しなくてよい)。感圧塗料の劣化を最小限にするために、画像取得時以外は光源のシャッターを閉め、CCDカメラによる画像取得開始の数秒前に開き、取得終了の数秒後に閉じた。

翼面反射onの場合とoffの場合の試験条件は同一とした。過去の圧力計測データと比較確認するため、通風条件は $M=0.74 \sim 0.77$ 、 $\alpha=0 \sim 4^\circ$ の範囲で実施した。風洞総圧は80kPaに固定し、各測定点において総温は308Kとなるように制御した。

4.2 データ処理

本試験では、取得した2次元画像データに最初に平均化等の前処理を施し、次に模型の移動・変形を補正する為にアフィン変換を適用した後に、3次元模型上にマッピングした。このマッピングデータを用いて、輝度比を算出し、輝度比から最も一般的in situ較正法を用いて圧力を算出した。反射補正に関しては、輝度比算出時に、(2.1)式に示す処理を適用した。

前処理に関しては、感圧塗料および光源の光度等の時間的な変化によるノイズと、CCDカメラのショットノイズの影響を低減するために、1ケースについて10枚の画像を取得して、平均化した。CCDカメラの各画素の暗電流による初期出力を補正するために、カメラの絞りを閉じた状態のダーク画像を各画像から減算した。今回、雑音除去と平滑化のための空間フィルタは適用しなかった。

In situ較正法では、圧力孔位置の感圧塗料の輝度比と、画像の取得時と同時に行った圧力孔計測のデータの関係を多項式近似によって代数的に定義し、これを他の全ての領域に適用する。この方法により、感圧塗料の温度依存性も補正される。

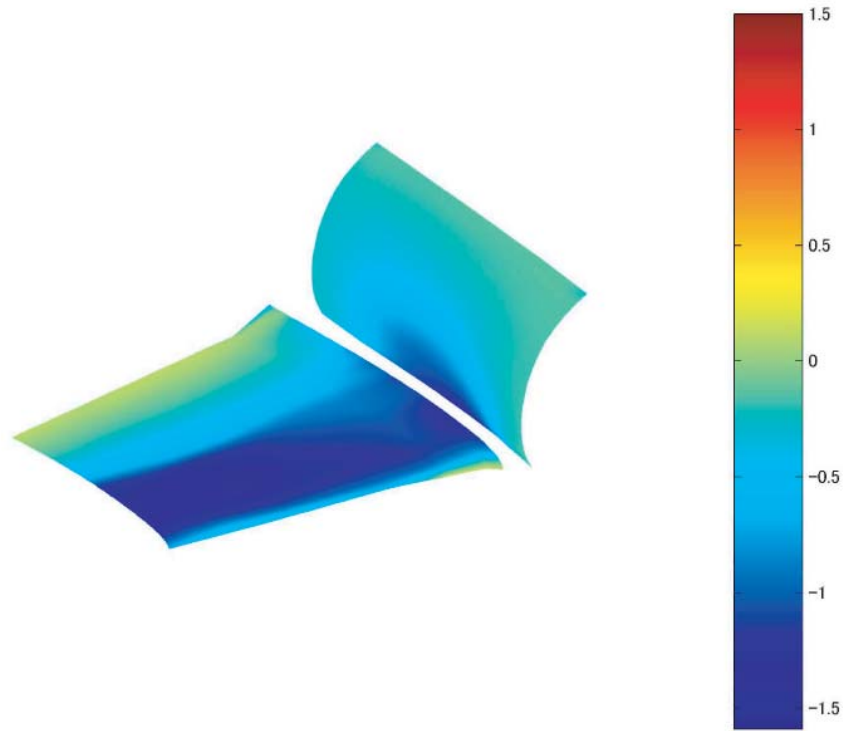


図10 $M=0.75$ 、 $\alpha =2.5^\circ$ における翼胴反射 on のケースに反射補正を適用して い ときの2次元 C_p 分布

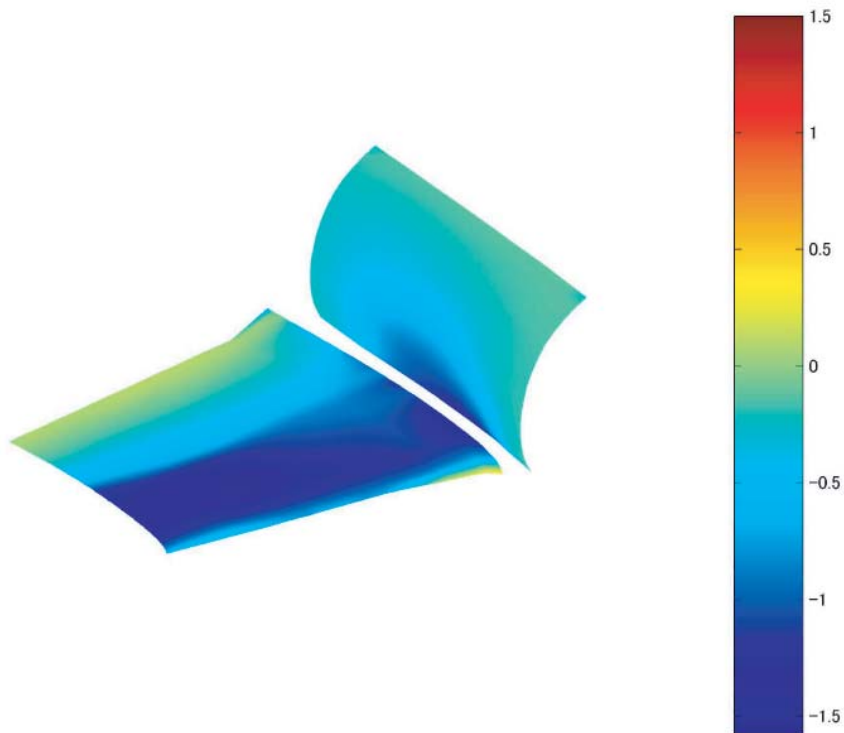


図11 $M=0.75$ 、 $\alpha =2.5^\circ$ における翼胴反射 on のケースに反射補正を適用したときの2次元 C_p 分布

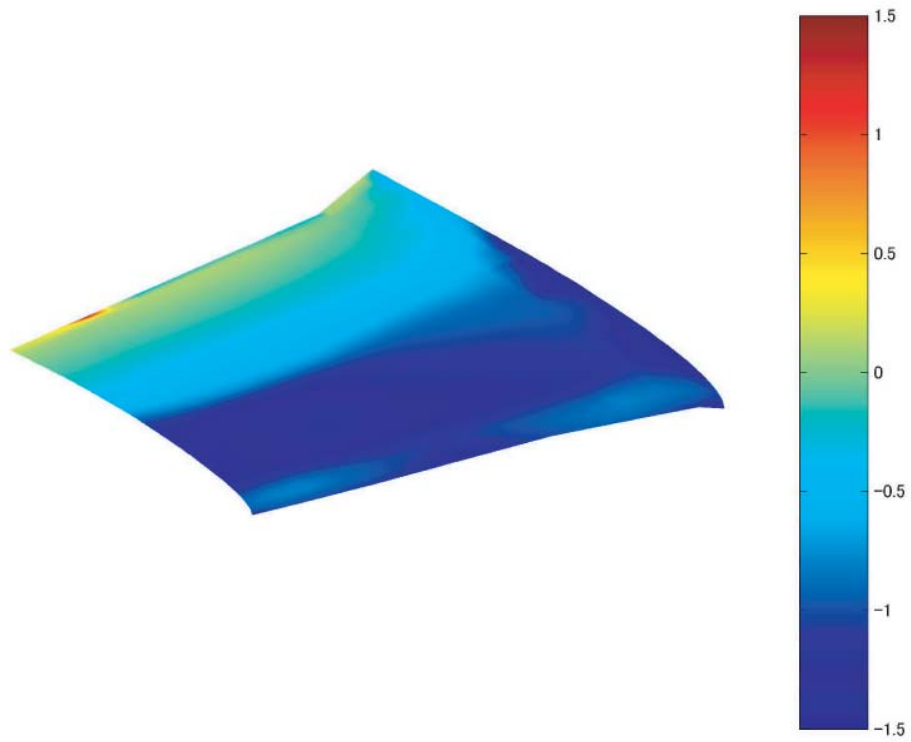


図 12 $M=0.75$ 、 $\alpha =2.5^\circ$ における翼胴反射 off のケースの 2 次元 C_p 分布

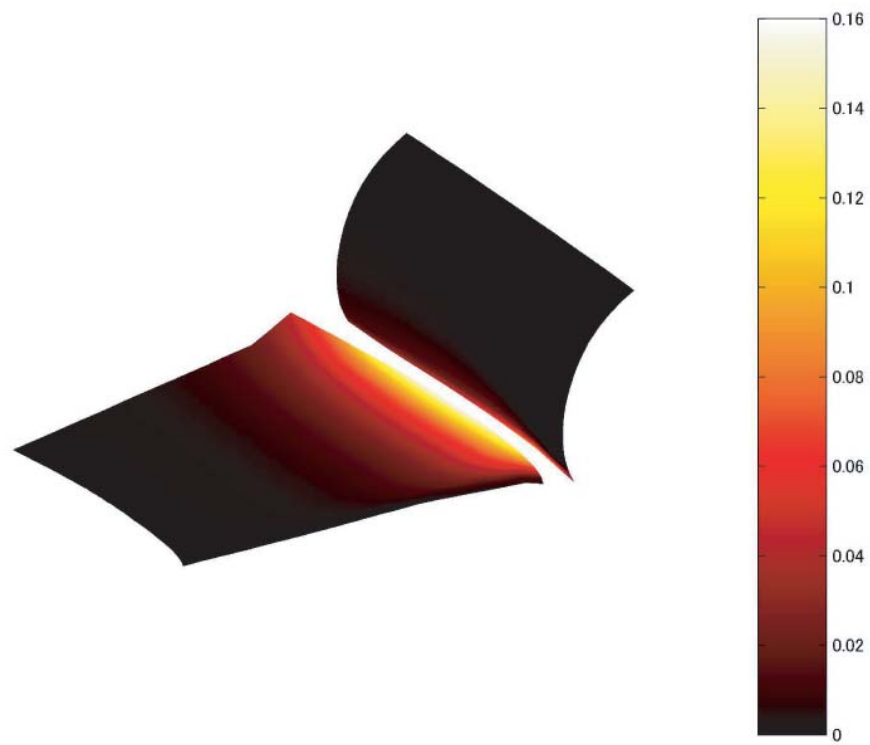


図 13 胴体面が単位輝度で発光したときの、計算による反射の影響の分布

4.3 計測結果と考察

$M=0.75$, $\alpha=2.5^\circ$ における翼胴反射 on のケースに反射補正を適用していないときの2次元 C_p 分布を図10に、反射補正を適用したときの2次元 C_p 分布を図11に示す。両図は、図中右のカラーバーに示すように、 $C_p = -1.5 \sim 1.5$ の範囲を RGB 表示している。両図を比較しても反射補正の効果は確認できない。次に同一条件における翼胴反射 off のケースの2次元 C_p 分布を図12に示す。図10と図12を比較すると、このように広い領域の面分布では反射の影響自体を確認できないことがわかる。

そこで、反射係数計測試験の項で述べたように反射の影響は胴体面と翼面の交線に近いほど大きくなるので、交線（13%半翼幅位置付近）に最も近い圧力孔列位置である19%半翼幅位置における翼弦方向 C_p 分布を比較する。図13に胴体面が単位輝度で発光したときの、計算による反射の影響の分布を示す。図は反射の影響を見易くするために、単位輝度で発行する胴体も黒く表示している。本図からも反射の影響が現れるのは、胴体面と翼面の交線付近に限られることが確認できる。

図14に $M=0.75$, $\alpha=2.5^\circ$ における19%半翼幅位置翼弦方向圧力分布を示す。文献9より感圧塗料の圧力測定値に対する相対圧力誤差を2%とすると、圧力測定値の最大位置においてこの値は $C_p = 0.03$ に対応し、図中に翼胴反射 off のケースの感圧塗料による圧力計測値の誤差幅として示した。図より反射補正の適用したケースとしないケースの間の差異は非常に小さく、感圧塗料による圧力計測値の誤差幅よりも小さい。従って、今回のケースは反射の影響が非常に小さく、反射補正の効果を確認

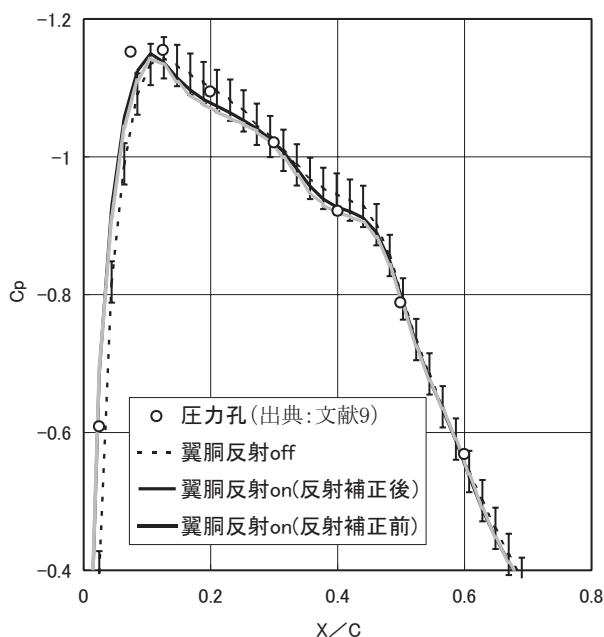


図14 $M=0.75$, $\alpha=2.5^\circ$ における19%半翼幅位置翼弦方向圧力分布

するには適当ではなかったことがわかる。これは本試験のセットアップでは光源を上方に設置した（光軸と測定部の上下対称面の傾斜角度が約 80° とするように設置した）ために、最も反射の影響の大きい、胴体面と翼面の交線付近に照射する励起光が小さく、胴体の発光が小さかったためと考えられる。

ここから、本試験のように単純翼と胴体の結合体の形状で、反射の影響の在る箇所で単調変化する圧力分布しか存在せず、その箇所の圧力分布を特に正確に把握する必要が無ければ、励起光のその箇所への照射量を小さくすることで反射の影響を小さくすることが可能であることが予想される。しかし実際の反射補正の適用例としては、エンジンナセルと翼の結合形状や、翼と胴体の結合部付近にリアエンジンが張り出している形状など、反射の影響の在る箇所で複雑な圧力分布が存在するケース、あるいは反射の影響の在る箇所の圧力分布を特に正確に把握したいケースなどが考えられる。本コードの有効性に関しては本手法をそのようなケースに適用して、吟味する必要がある。

5 結論

Ruytenの報告に基づいて、感圧塗料の反射の影響を補正する反射係数を求めるプログラムと、風洞試験および反射係数計測試験の試験手法を開発した。本手法の有効性を確認するため、2つの平板を組み合わせた形状に適用したところ、本手法によって反射の影響を取り除くことができることがわかった。実験に用いた塗料 PtOEP-GP197 の反射係数の値は 0.75 ± 0.17 であった。また同手法を MU-300 模型の風洞試験に適用したが、反射の影響が非常に小さかったため、反射補正の効果捉えることはできなかった。

謝辞

本研究は平成10年度に三菱重工業（株）と航空宇宙技術研究所の共同研究として実施された。本研究の遂行にあたっては三菱重工業（株）の北真也氏からは MU-300 模型の C_p 分布データをご提供いただき、小松信義氏と真保雄一氏からは反射補正に関して有益なご指摘をいただいた。また風洞技術開発センターの神田宏氏からは計測機器のセットアップに関して有益なご助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 浅井圭介：「圧力測定の最先端—光学的圧力分布測定法について—」, 流れ第18巻第4号, pp.215-221, 1999.
- (2) 真保雄一, 浅井圭介, 神田宏, 飯島由美, 野口正

芳, 牧野好和, 小松信義, 北真也, 石黒満津夫:「感圧塗料を用いた圧力計測風洞試験」, 第31回流体力学講演会講演集, pp.153-156, 1999.

- (3) Y. Shimbo, K. Asai, H. Kanda, Y. Iijima & N. Komatsu: “Evaluation of Several Calibration Techniques for Pressure Sensitive Paint in Transonic Testing”, AIAA 98-2502.
- (4) Y. Shimbo, K. Asai, Y. Iijima, H. Sugiura, H. Kanda, N. Komatsu, S. Kita & M. Ishiguro: “Pressure Sensitive Paint Application to a Business Jet Model in Transonic Testing”, 7th Pressure Sensitive Paint Workshop, 1999.
- (5) W. M. Ruyten: “Correcting Luminescent Paint Measurements for Self-illumination”, ICIASF '97 Record, International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, pp.3-9, 1997.
- (6) W. M. Ruyten: “Self-illumination calibration technique for luminescent paint measurements”, Review of Scientific Instruments, vol.68, no.9, pp.3452-3457, 1997.
- (7) Y. Le Sant: “Overview of the Self-Illumination Effect Applied to Pressure Sensitive Paint Applications”, ICIASF 2001 Record, pp.159-169, 2001.
- (8) R.C. Crites: “Pressure Sensitive Paint Technique”, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1993-05, Measurement Techniques, pp.1-69, 1993.
- (9) 小松信義, 石黒満津夫, 北真也, 浅井圭介, 真保雄一, 飯島由美, 神田宏, 杉浦裕樹:「感圧塗料による圧力計測試験のデータ処理手法」, 第63回風洞研究会議講演前刷り, 1999.
- (10) 浅井圭介, 天尾豊:「感圧塗料の最適使用圧力に関する理論的検討」, 第32回流体力学講演会講演集, pp.191-194, 2000.

付録 A 形状行列 A の定式化

点 x_j 基準とする点 x_i の位置ベクトルを x_{ji} と表す。物体上の要素面 ΔS_j の x_{ji} 方向への射影 (から見た面積) は, n_j と x_{ji} の交わる角度を θ とすると

$$\Delta S_j \cos \theta = \frac{(n_j \cdot x_{ji})}{|x_{ji}|} \Delta S_j \quad (A1)$$

i 番目の画素に対応する物体上の要素面 ΔS_i と ΔS_j の距離は $|x_{ji}|$ であるから, 点 x_j から ΔS_i を見る立体角は

$$\Omega = \frac{(n_i \cdot x_{ij}) \Delta S_i}{|x_{ij}| |x_{ij}|^2} \quad (A2)$$

である。いま ΔS_j の輝度 J が ΔS_i に与える光度を I とすると, ΔS_j が ΔS_i に与える光束は, (A1) より

$$\Omega I S_j \cos \theta = \frac{(n_i \cdot x_{ij})}{|x_{ij}|} \Delta S_j \frac{(n_i \cdot x_{ij}) \Delta S_i}{|x_{ij}| |x_{ij}|^2} I \quad (A3)$$

である。ここで (B4) より I と J の間に次式が成り立つ (導出過程は付録 B を参照)。

$$I = J / \pi \quad (A4)$$

(A3) に (A4) を代入すると, ΔS_j が ΔS_i に与える光束は

$$\frac{(n_i \cdot x_{ij})(n_j \cdot x_{ji})}{\pi |x_{ij}|^4} \Delta S_j \Delta S_i J \quad (A5)$$

とる。(A5) を $J \Delta S_j$ で割ると, ΔS_i における単位輝度の発光が ΔS_i に与える光度は

$$A_{ij} = \frac{(n_i \cdot x_{ij})(n_j \cdot x_{ji})}{\pi |x_{ij}|^4} \Delta S_j \quad (A6)$$

とる。上式が形状行列を表す式である。

付録 B 式 $I = J / \pi$ の導出

j 番目の画素に対応する物体上の要素面 ΔS_j の輝度を考える。図 15 に示すように, 点 x_j を中心とし, ΔS_j を底面とする半径 r の半球面上の要素面 ΔP_i を考える。いま ΔS_j が ΔP_i に与える光度を I とする。図より ΔP_i の面積は球座標系で

$$\Delta P_i = r d\theta \cdot r \sin \theta d\phi = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (B1)$$

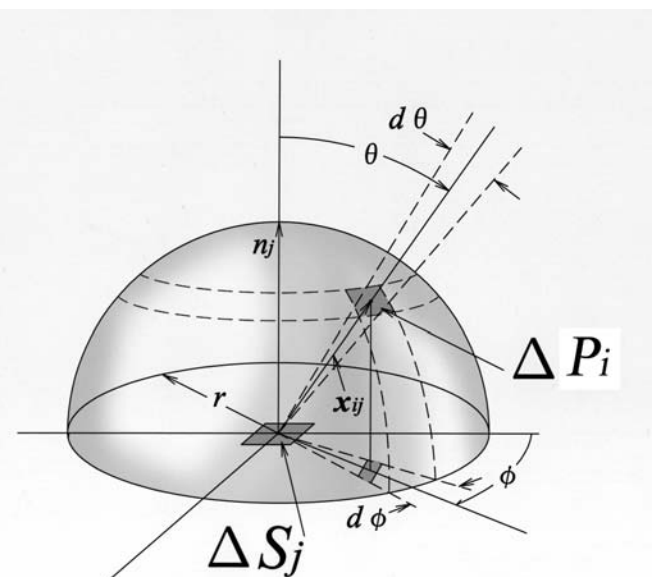


図 15 ΔS_j を底面とする半径 r の半球面上の要素面 ΔP_i

と表される。 ΔS_j の x_i 方向の射影は $\Delta S_j \cos \theta$ であり、点 x_i から ΔP_i を見る立体角は $\Delta P_i / r^2$ であるから、 ΔS_j が ΔP_i に与える光束は (B1) より

$$\Delta S_j \cos \theta \cdot \frac{\Delta P_i}{r^2} \cdot I = \Delta S_j I \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (B2)$$

したがって、半球面を通り抜ける全光束は

$$\Delta S_j \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi = I\pi \Delta S_j \quad (B3)$$

とる。 ΔS_j の表面が発する全光束は半球面を通り抜けるので、半球面を通り抜ける全光束は ΔS_j が発する全光束に等しい。 ΔS_j の輝度を J とすると、

$$\begin{aligned} J\Delta S_j &= I\pi \Delta S_j \\ \therefore I &= J/\pi \end{aligned} \quad (B4)$$

付録 C 反射係数算出プログラム (MATLAB で記述)

program: "CALCULATION OF REFLEX COEFFICIENT OF PSP"

% by Hiroki Sugiura (NAL), 99/12/28.

% based on W.M.Ruyten: Rev. Sci. Instrum. 68(9), 1997/9.

```
clear; tic; xmax=512; ymax=512; nrm=1/4000; {画像の縦横の画素数を定義}
sby1=211; sby2=329; sbx1=215; sbx2=335; {板 B の頂点の画素を定義}
xbnrm=sbx2-sbx1+1; ynrm=sby2-sby1+1;
Rup=0; Rdown=0; Dbsqr=0; Zdbi=0; Ztbi=0; scf=1; {画像の圧縮比を定義}
xnb=xbnrm; ynb=ynrm;
```

% Read Dark Image {ダーク画像の入力と平均化}

```
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%dark1.drk','r');
drk1=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%dark2.drk','r');
drk2=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%dark3.drk','r');
drk3=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%dark4.drk','r');
drk4=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%dark5.drk','r');
drk5=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
drk=(drk1+drk2+drk3+drk4+drk5)*0.2;
clear drk1 drk2 drk3 drk4 drk5;
```

% Read Image SB(180) { $\gamma = 180^\circ$ の画像の入力と平均化}

```
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t180f1.img','r');
temp1=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t180f2.img','r');
temp2=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t180f3.img','r');
temp3=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t180f4.img','r');
temp4=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t180f5.img','r');
temp5=fread(fid,[ymax,xmax],'short'); status=fclose(fid);
temp=(temp1+temp2+temp3+temp4+temp5)*0.2;
```

```

clear temp1 temp2 temp3 temp4 temp5;
temp=temp-drk;
at=temp(1:yymax/2+20,2:xymax);bt=temp(yymax/2+21:yymax,1:xymax-1);
temp=[bt; at];clear at;clear bt;
sb18=temp(sby1:sby2,sbx1:sbx2);clear temp;

% Read Image SB(100) and SC(100)    {  $\gamma = 100^\circ$  の画像の入力と平均化 }
v=100;disp(v)
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t100f1.img','r');
temp1=fread(fid,[yymax,xymax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t100f2.img','r');
temp2=fread(fid,[yymax,xymax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t100f3.img','r');
temp3=fread(fid,[yymax,xymax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t100f4.img','r');
temp4=fread(fid,[yymax,xymax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t100f5.img','r');
temp5=fread(fid,[yymax,xymax],'short');status=fclose(fid);
temp=(temp1+temp2+temp3+temp4+temp5)*0.2;
clear temp1 temp2 temp3 temp4 temp5;temp=temp-drk;
at=temp(1:yymax/2+20,2:xymax);bt=temp(yymax/2+21:yymax,1:xymax-1);
temp=[bt; at];clear at;clear bt;
sb10=temp(sby1:sby2,sbx1:sbx2);db10=sb10-sb18;db10=medfilt2(db10);

% Resize SC(100) in Y-axis    { 板 C の画像の Y 方向歪み線形補正 }
dymax1=5;dymax2=12;sc10y1=sby1-dymax1;sc10y2=sby2+dymax2;
dix=11;
sc10x1=round(sbx1-cos((180-v)*pi/180)*(sbx2-sbx1))+dix;sc10x2=sbx1-3;
ynrm=sby2-sby1+1;xc10nrm=sc10x2-sc10x1+1;
i=0;sc10y=zeros(ynrm,xc10nrm);
%imshow(nrm*temp(sc10y1:sc10y2,sc10x1:sc10x2),64);
for ix=sc10x1:sc10x2;
    dy1=round((sc10x2-ix)*dymax1/(xc10nrm-1)); dy2=round((sc10x2-ix)*dymax2/(xc10nrm-1));
    i=i+1;sc10y(1:ynrm,i)=imresize(temp(sby1-dy1:sby2+dy2-1,ix),[ynrm,1]);
end;
sc10=sc10y;tic;clear temp;

% Compress Image for Faster Calculation    { 画像の圧縮 }
xbnrm=round(xbnrm/scf);ynrm=round(ynrm/scf);xc10nrm=round(xc10nrm/scf);
db10=imresize(db10,[ynrm xbnrm]);sc10=imresize(sc10,[ynrm xc10nrm]);

% Calculate Matrix A(100),DBi(100),and TBi(100)    { 形状行列 A と  $D_{Bi}$  と  $T_{Bi}$  の計算 }
dbi10=reshape(db10,[1 xbnrm*ynrm]);scj10=reshape(sc10,[xc10nrm*ynrm 1]);
tan2v=(tan(v*pi/180))^2;tanv=tan(v*pi/180);tan2vp=tan2v/pi;
a=zeros(1,ynrm*xc10nrm);
tbi10=zeros(1,ynrm*xbnrm);
sbrate=(xc10nrm*scf+dix)/(xc10nrm*scf)

```



```

for ix=1:xbnrm;
    ixix5t2p=(ix-0.5)*tan2vp;
    ixyn=(ix-1)*ynrm;
    for iy=1:ynrm;
        for jx=1:xc10nrm;
            jxm=jx*sbrate; ijx2jix2=(ix+jxm-1)^2+(jxm-0.5)^2*tan2v;
            bunsix5t2p*(jxm-0.5); jxyn=(jx-1)*ynrm;
            for jy=1:ynrm;
                a(jxyn+jy)=bunsix5t2p/(ijx2jix2+(iy-jy)^2)^2;
            end;
        end;
        tbi10(ixyn+iy)=a*scj10;
    end;
end;

% Calculate Denominator and Numerator of Reflex Coefficient (100)
Rup=Rup+dbi10*tbi10;Rdown=Rdown+tbi10*tbi10;
Dbsqr=Dbsqr+dbi10*dbi10;
clear dbi10 tbi10 xc10nrm sb10 db10 sc10 sc10y scj10 tanv tan2vtan2vp a ix iy jx jy i j temp ;
clear dy1 dy2 sc10y1 sc10y2 dymax1 dymax2;
% Reset to Initial Value (*scf)
xbnrm=xbn;ynrm=yn;

% Read Image SB(120) and SC(120)      {  $\gamma = 120^\circ$  の画像の入力と平均化 }
v=120;disp(v)
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t120f1.img','r');
temp1=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t120f2.img','r');
temp2=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t120f3.img','r');
temp3=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t120f4.img','r');
temp4=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t120f5.img','r');
temp5=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
temp=(temp1+temp2+temp3+temp4+temp5)*0.2;
clear temp1 temp2 temp3 temp4 temp5;temp=temp-drk;
at=temp(1:ymax/2+20,2:xmax);bt=temp(ymax/2+21:ymax,1:xmax-1);
temp=[bt; at];clear at;clear bt;
sb10=temp(sby1:sby2,sbx1:sbx2);db10=sb10-sb18;db10=medfilt2(db10);

% Resize SC(120) in Y-axis {板 C の画像の Y 方向歪み線形補正}
dymax1=5;dymax2=11;sc10y1=sby1-dymax1;sc10y2=sby2+dymax2;
dix=16;
sc10x1=round(sbx1-cos((180-v)*pi/180)*(sbx2-sbx1))+dix;sc10x2=sbx1-3;
ynrm=sby2-sby1+1;xc10nrm=sc10x2-sc10x1+1;

```

```

i=0;sc10y=zeros(ynrm,xc10nrm);
for ix=sc10x1:sc10x2;
    dy1=round((sc10x2-ix)*dymax1/(xc10nrm-1)); dy2=round((sc10x2-ix)*dymax2/(xc10nrm-1));
    i=i+1;sc10y(1:ynrm,i)=imresize(temp(sby1-dy1:sby2+dy2-1,ix),[ynrm,1]);
end;
sc10=sc10y;tic;clear temp;

% Compress Image for Faster Calculation {画像の圧縮}
xbnrm=round(xbnrm/scf);ynrm=round(ynrm/scf);xc10nrm=round(xc10nrm/scf);
db10=imresize(db10,[ynrm xbnrm]);sc10=imresize(sc10,[ynrm xc10nrm]);

% Calculate Matrix A(120),DBi(120),and TBi(120) {形状行列AとDBiとTBiの計算}
dbi10=reshape(db10,[1 xbnrm*ynrm]);scj10=reshape(sc10,[xc10nrm*ynrm 1]);
tan2v=(tan(v*pi/180))^2;tanv=tan(v*pi/180);tan2vp=tan2v/pi;
a=zeros(1,ynrm*xc10nrm);
tbi10=zeros(1,ynrm*xbnrm);
sbrate=(xc10nrm*scf+djx)/(xc10nrm*scf)
for ix=1:xbnrm;
    ixix5t2p=(ix-0.5)*tan2vp;
    ixyn=(ix-1)*ynrm;
    for iy=1:ynrm;
        for jx=1:xc10nrm;
            jxm=jx*sbrate;ijx2jix2=(ix+jxm-1)^2+(jxm-0.5)^2*tan2v;
            bunsi=ixix5t2p*(jxm-0.5);jxyn=(jx-1)*ynrm;
            for jy=1:ynrm;
                a(jxyn+jy)=bunsi/(ijx2jix2+(iy-jy)^2)^2;
            end;
        end;
        tbi10(ixyn+iy)=a*scj10;
    end;
end;

% Calculate Denominator and Numerator of Reflex Coefficient (100,120)
Rup=Rup+dbi10*tbi10;Rdown=Rdown+tbi10*tbi10;
Dbsqr=Dbsqr+dbi10*dbi10;
clear dbi10 tbi10 xc10nrm sb10 db10 sc10 sc10y scj10 tanv tan2vtan2vp a ix iy jx jy i j temp ;
clear dy1 dy2 sc10y1 sc10y2 dymax1 dymax2;
% Reset to Initial Value (*scf)
xbnrm=xbn;ynrm=yn;

% Read Image SB(140) and SC(140) {γ =140° の画像の入力と平均化}
v=140;disp(v)
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t140f1.img','r');
temp1=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t140f2.img','r');
temp2=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t140f3.img','r');

```

```

temp3=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t140f4.img','r');
temp4=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%reflex%T991226%t140f5.img','r');
temp5=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
temp=(temp1+temp2+temp3+temp4+temp5)*0.2;
clear temp1 temp2 temp3 temp4 temp5;temp=temp-drk;
at=temp(1:ymax/2+20,2:xmax);bt=temp(ymax/2+21:ymax,1:xmax-1);
temp=[bt; at];clear at;clear bt;
sb10=temp(sby1:sby2,sbx1:sbx2);db10=sb10-sb18;db10=medfilt2(db10);

% Resize SC(140) in Y-axis {板 C の画像の Y 方向歪み線形補正}
dymax1=4;dymax2=8;sc10y1=sby1-dymax1;sc10y2=sby2+dymax2;
djx=14;
sc10x1=round(sbx1-cos((180-v)*pi/180)*(sbx2-sbx1))+djx;sc10x2=sbx1-3;
ynrm=sby2-sby1+1;xc10nrm=sc10x2-sc10x1+1;
i=0;sc10y=zeros(ynrm,xc10nrm);
for ix=sc10x1:sc10x2;
    dy1=round((sc10x2-ix)*dymax1/(xc10nrm-1));dy2=round((sc10x2-ix)*dymax2/(xc10nrm-1));
    i=i+1;sc10y(1:ynrm,i)=imresize(temp(sby1-dy1:sby2+dy2-1,ix),[ynrm,1]);
end;
sc10=sc10y;tic;clear temp;

% Compress Image for Faster Calculation {画像の圧縮}
xbnrm=round(xbnrm/scf);ynrm=round(ynrm/scf);xc10nrm=round(xc10nrm/scf);
db10=imresize(db10,[ynrm xbnrm]);sc10=imresize(sc10,[ynrm xc10nrm]);

% Calculate Matrix A(140),DBi(140),and TBi(140) {形状行列 A と DBi と TBi の計算}
dbi10=reshape(db10,[1 xbnrm*ynrm]);scj10=reshape(sc10,[xc10nrm*ynrm 1]);
tan2v=(tan(v*pi/180))^2;tanv=tan(v*pi/180);tan2vp=tan2v/pi;
a=zeros(1,ynrm*xc10nrm);
tbi10=zeros(1,ynrm*xbnrm);
sbrate=(xc10nrm*scf+djx)/(xc10nrm*scf)
for ix=1:xbnrm;
    ixix5t2p=(ix-0.5)*tan2vp;
    ixyn=(ix-1)*ynrm;
    for iy=1:ynrm;
        for jx=1:xc10nrm;
            jxm=jx*sbrate;
            ijx2jix2=(ix+jxm-1)^2+(jxm-0.5)^2*tan2v;
            bunsi=ixix5t2p*(jxm-0.5);jxyn=(jx-1)*ynrm;
            for jy=1:ynrm;
                a(jxyn+jy)=bunsi/(ijx2jix2+(iy-jy)^2)^2;
            end;
        end;
    end;
    tbi10(ixyn+iy)=a*scj10;
end;

```

```

end;

% Calculate Denominator and Numerator of Reflex Coefficient (100,120,140)
Rup=Rup+dbi10*tbi10';Rdown=Rdown+tbi10*tbi10';
Dbsqr=Dbsqr+dbi10*dbi10';
clear dbi10 tbi10 xc10nrm sb10 db10 sc10 sc10y scj10 tanv tan2vtan2vp a ix iy jx jy i j temp ;
clear dy1 dy2 sc10y1 sc10y2 dymax1 dymax2;
% Reset to Initial Value (*scf)
xbrnm=xbn;ynrm=yn;

% Read Image SB(160) and SC(160)      {  $\gamma = 160^\circ$  の画像の入力と平均化 }
v=160;disp(v)
fid=fopen('%matlab%\reflex\T991226\t160f1.img','r');
temp1=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%\reflex\T991226\t160f2.img','r');
temp2=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%\reflex\T991226\t160f3.img','r');
temp3=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%\reflex\T991226\t160f4.img','r');
temp4=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
fid=fopen('%matlab%\reflex\T991226\t160f5.img','r');
temp5=fread(fid,[ymax,xmax],'short');status=fclose(fid);
temp=(temp1+temp2+temp3+temp4+temp5)*0.2;
clear temp1 temp2 temp3 temp4 temp5;
temp=temp-drk;
at=temp(1:ymax/2+20,2:xmax);bt=temp(ymax/2+21:ymax,1:xmax-1);
temp=[bt; at];clear at;clear bt;
sb10=temp(sby1:sby2,sbx1:sbx2);
db10=sb10-sb18;db10=medfilt2(db10);

% Resize SC(160) in Y-axis { 板 C の画像の Y 方向歪み線形補正 }
dymax1=2;dymax2=4;sc10y1=sby1-dymax1;sc10y2=sby2+dymax2;
dix=9;
sc10x1=round(sbx1-cos((180-v)*pi/180)*(sbx2-sbx1))+dix;sc10x2=sbx1-3;
ynrm=sby2-sby1+1;xc10nrm=sc10x2-sc10x1+1;
i=0;sc10y=zeros(ynrm,xc10nrm);
for ix=sc10x1:sc10x2;
    dy1=round((sc10x2-ix)*dymax1/(xc10nrm-1));
    dy2=round((sc10x2-ix)*dymax2/(xc10nrm-1));
    i=i+1;sc10y(1:ynrm,i)=imresize(temp(sby1-dy1:sby2+dy2-1,ix),[ynrm,1]);
end;
sc10=sc10y;tic;clear temp;

% Compress Image for Faster Calculation { 画像の圧縮 }
xbrnm=round(xbrnm/scf);ynrm=round(ynrm/scf);xc10nrm=round(xc10nrm/scf);
db10=imresize(db10,[ynrm xbrnm]);sc10=imresize(sc10,[ynrm xc10nrm]);

```



```

% Calculate Matrix A(160),DBi(160),and TBi(160) { 形状行列 A と DBi と TBi の計算 }
dbi10=reshape(db10,[1 xbnrm*ynrm]);scj10=reshape(sc10,[xc10nrm*ynrm 1]);
tan2v=(tan(v*pi/180))^2;tanv=tan(v*pi/180);tan2vp=tan2v/pi;
a=zeros(1,ynrm*xc10nrm);
tbi10=zeros(1,ynrm*xbnrm);
sbrate=(xc10nrm*scf+djx)/(xc10nrm*scf)
for ix=1:xbnrm;
    ixix5t2p=(ix-0.5)*tan2vp; ixyn=(ix-1)*ynrm;
    for iy=1:ynrm;
        for jx=1:xc10nrm;
            jxm=jx*sbrate;
            ijx2jix2=(ix+jxm-1)^2+(jxm-0.5)^2*tan2v;
            bunsi=ixix5t2p*(jxm-0.5);
            jxyn=(jx-1)*ynrm;
            for jy=1:ynrm;
                a(jxyn+jy)=bunsi/(ijx2jix2+(iy-jy)^2)^2;
            end;
        end;
    end;
    tbi10(ixyn+iy)=a*scj10;
end;
end;

% Calculate Denominator and Numerator of Reflex Coefficient (100,120,140,160)
Rup=Rup+dbi10*tbi10';Rdown=Rdown+tbi10*tbi10';
Dbsqr=Dbsqr+dbi10*dbi10';
clear dbi10 tbi10 xc10nrm sb10 db10 sc10 sc10y scj10 tanv tan2vtan2vp a ix iy jx jy i j temp ;
clear dy1 dy2 sc10y1 sc10y2 dymax1 dymax2;clear drk;
% Calculate Reflex Coefficient { 反射係数の計算 }
R=Rup/Rdown;display(R)
toc

% Calculate Uncertainty of R { 反射係数の標準偏差の計算 }
qq=Dbsqr-2*R*Rup+R^2*Rdown;
urred=(qq/Rdown)^0.5;display(urred)

```