

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### ステレオPIV計測における模型表面ハレーション防止法

加藤 裕之, 橋本 拓郎, 渡辺 重哉

2006年3月

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



# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA Research and Development Report

## ステレオ PIV 計測における模型表面ハレーション防止法

### Techniques for Reducing Surface Halation in Stereoscopic PIV Measurement

加藤 裕之<sup>\*1</sup>, 橋本 拓郎<sup>\*2</sup>, 渡辺 重哉<sup>\*3</sup>

Hiroyuki KATO, Takuro HASHIMOTO, Shigeya WATANABE

- \* 1 : 総合技術研究本部 風洞技術開発センター  
(Wind Tunnel Technology Center, Institute of Aerospace Technology)
- \* 2 : 株式会社 IHI エアロスペースエンジニアリング  
(IHI Aerospace Engineering Co., Ltd)
- \* 3 : 総合技術研究本部 事業推進本部  
(Program Management and Integration Department, Institute of Aerospace Technology)

2006 年 3 月  
March 2006

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



# ステレオ PIV 計測における模型表面ハレーション防止法\*

加藤 裕之<sup>\*1</sup>、橋本 拓郎<sup>\*2</sup>、渡辺 重哉<sup>\*3</sup>

## Techniques for Reducing Surface Halation in Stereoscopic PIV Measurement \*

Hiroyuki KATO<sup>\*1</sup>, Takuro HASHIMOTO<sup>\*2</sup>, Shigeya WATANABE<sup>\*3</sup>

### ABSTRACT

This paper compares techniques for reducing model surface halation in stereoscopic PIV measurement. The reflection intensities of several samples having different surface finishes including black paint and fluorescent paint of different thicknesses were compared. Test results show that surfaces painted with gloss-black or fluorescent (Rhodamin6G) paint have the lowest reflection among the samples tested and have a significant effect on reducing halation under quasi-mirror reflection conditions. Furthermore, diffuse reflection for a surface painted matt-black has a lower reflection intensity under quasi-mirror conditions. It is expected that combining these surface finishes according to each test model geometry and camera position will result in more efficient reduction of halation.

**Keywords:** Flow measurements, Particle Image Velocimetry, Surface halation reduction, Fluorescent paint

### 概 要

現在、宇宙航空研究開発機構 風洞技術開発センターでは風洞試験計測技術としてステレオPIVシステムの整備を進めている。ステレオPIVシステムは2次元PIVと異なり、カメラをシート光に対して垂直に配置することができないため、模型表面でのレーザー光の反射の影響を十分に考慮する必要がある。この反射の影響により模型近傍の速度情報をほとんど失ってしまうケースも少なくない。従来から、この対策として黒色塗料や蛍光塗料による表面処理が用いられているが、限られた経験に基づき塗料や塗装方法を選択していることが多いように見受けられる。そこで、各種の表面処理方法の優劣を実験により定量的に確かめ、最適な表面処理方法選定のための基礎データを取得したので、その結果を報告する。

### 1. はじめに

ステレオPIVシステムによる速度場計測は、基本的な2次元PIVシステムによる計測と比較して、同時に速度3成分の計測が可能であることから、一般的な3次元複雑

流れに対する有効な速度場計測手法としての活用が期待されている。さらに、2次元PIVと比較したときのステレオPIVの利点としては、2次元PIVでは、カメラの光軸をシート光面に対して垂直に配置する必要がある一方で、ステレオPIVでは、そのようなカメラ配置の制約がなく、

---

\* 平成18年2月20日受付 (received 20 February, 2006)

\*<sup>1</sup> 総合技術研究本部 風洞技術開発センター (Wind Tunnel Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

\*<sup>2</sup> 株式会社 IHI エアロスペースエンジニアリング (IHI Aerospace Engineering Co., Ltd)

\*<sup>3</sup> 総合技術研究本部 事業推進本部

(Program Management and Integration Department, Institute of Aerospace Technology)



設置の自由度が高い。この利点は、特に光学アクセスが制限されることの多い実用風洞において、非常に有利となる。また、シート光に対してカメラ配置を前方散乱の位置に設置することで、シードの散乱光強度を高めることも可能である。特に大型風洞における計測で、広い計測対象をカバーするために、シート光の幅を広げる必要がある場合においては、相対的にシート光の光量が弱くなるため、弱いシート光でも、シードの散乱光強度が強くなる配置は、非常に有効である。しかしながら、カメラの光軸をシート光に対して垂直に配置されていない場合、模型表面でのレーザー光の反射が強い領域において、撮影画像中にハレーションが発生し、シード画像の取得が困難となり、模型表面近傍の計測において大きな問題となっている。過去のステレオPIVによる計測例では、この反射の影響でシード粒子が判別できず、模型近傍の速度情報の多くを失ってしまうケースも少なくない<sup>1</sup>。図1に過去のステレオPIV計測においてこのハレーションが計測結果に影響を及ぼした例を紹介する。図1の例は、JAXA 2m×2m遷音速風洞において実施されたSSTロケット実験機模型のインテーク周りの流れに対してステレオPIV計測を実施したときのものである<sup>2</sup>。この計測例では、インテークが計測対象となっているため、模型を180度ロールし、測定部上方からシート光を照射した。PIVカメラは測定部側壁のシュリーレン窓から、シート光に対して、斜め上流、及び下流方向から観察できる位置に設置されている。図中、模型の一部（ラフネスが貼付されている部分）を除き、模型表面には、過去の経験からレ

ーザ散乱防止効果の高いとされる塗料が塗布されている。緑丸で示した部分は、ラフネス部分に当たり、レーザー散乱防止用塗料の塗装中に、ラフネスを保護するために、マスキングを施したため、その部分のみ、模型表面が下地（つや消し黒塗装）のままとなっている。シード画像を見ても分かるように、レーザー散乱防止用の塗料が塗られたところと比較して、マスキングされていた部分では、シート光が模型表面に直接当たる部分のみならず、ハレーションによって、その周囲の部分も明るく光ってしまい、シードが判別しにくくなっている。さらに、模型には、計測断面と模型との相対位置関係を知るための目印として、白色マーカが貼付されているが、この部分においても、強いハレーションが生じており、さらには、そのハレーションによるゴーストが発生していることが分かる。また、翼前縁部においても、シート光の反射が強い領域でハレーションが生じている。この条件で撮影されたシード画像から、ステレオPIV計測を行った結果を図2に示す。図2に示されているように、表面処理が異なる部分や、白色マーカがある部分ではハレーションの影響により、計測不能となる領域が広がっている。この計測例のように、模型近傍の流れを対象とした場合、模型表面でのレーザー散乱光の影響は非常に重要な問題となっており、この影響を低減するための工夫が必要とされている。

従来、流れの可視化（スモークワイヤ、オイルフロー、チャイナクレイ等）や、PIV計測等の光学計測では、照明光による模型表面での反射を防止する対策として、つや

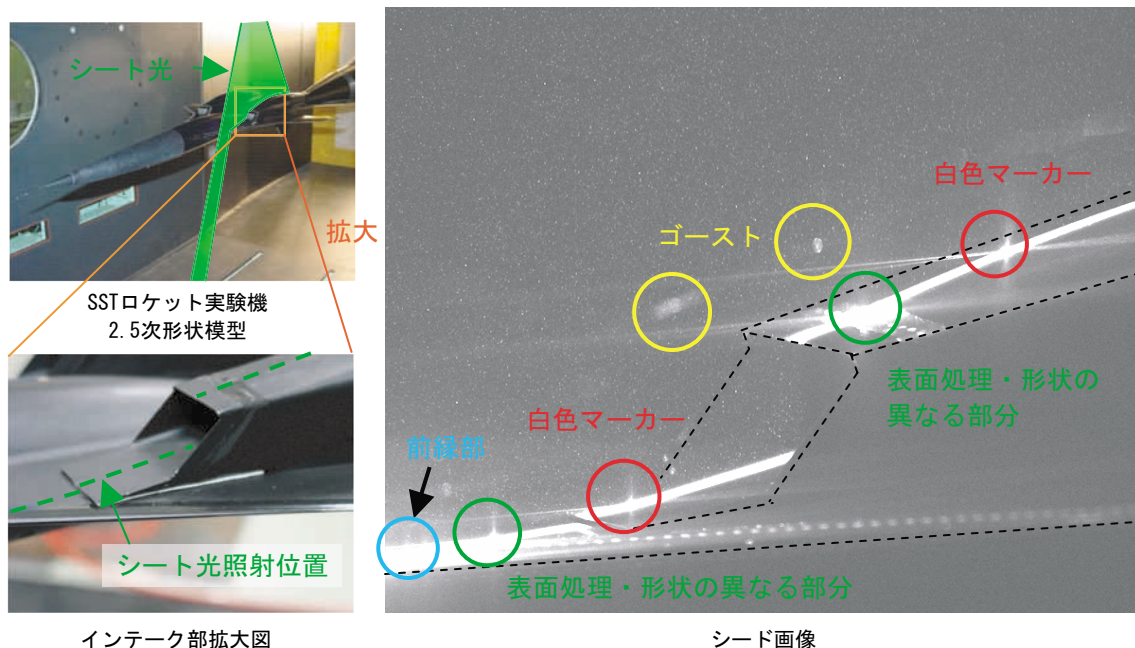


図1 SSTジェット実験機模型のステレオPIV計測

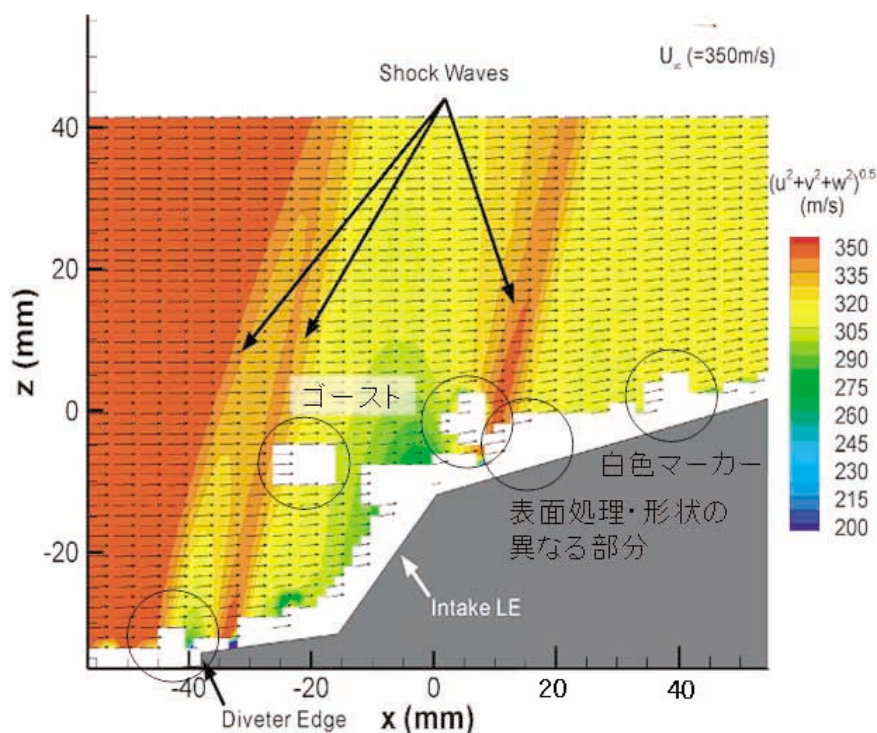


図2 インテーク周りのステレオ PIV 計測結果

消し黒塗料による塗装が広く用いられてきた。しかしながら、図2のマスキング部分の結果を見ても明らかなように、従来のつや消し黒塗装では、レーザ散乱防止効果は乏しく、ハレーションがPIV計測結果に大きな影響を与えることを避けるのは難しい。近年、PIV計測においては、蛍光塗料を使った波長シフトを利用した反射防止法もしばしば用いられるようになってきている<sup>3</sup>。この手法では、ローダミン等の、PIVで使用するNd:YAGレーザの波長(532nm)に対して効率よく光を吸収する蛍光物質を入れた塗料を模型表面に塗布することで、模型表面に照射されたシート光を効率よく吸収し、蛍光発光へと変換させる。PIVカメラには、レーザ光の波長のみを通す狭帯域バンドパスフィルタ(干渉フィルタ)を取付けて、蛍光発光をカットし、シード粒子の散乱光のみが撮影されるようにすることで、模型表面におけるハレーションを抑えるという手法である(図3参照)。しかしながら、この方法を用いた場合でも、完全にハレーションの影響を取り除くことは難しく、場合によっては、逆に、つや有りの黒色塗装よりもハレーションが増大するといった状況も見られた。

以上のように、現状では、どのような表面処理方法が適切かは明確とはなっておらず、その評価方法も経験的なものに依存しており、過去に、多くの異なる手法を系統的に比較して最適な表面処理方法に関する検討を行った報告はなされていない。そこで本研究では、従来から

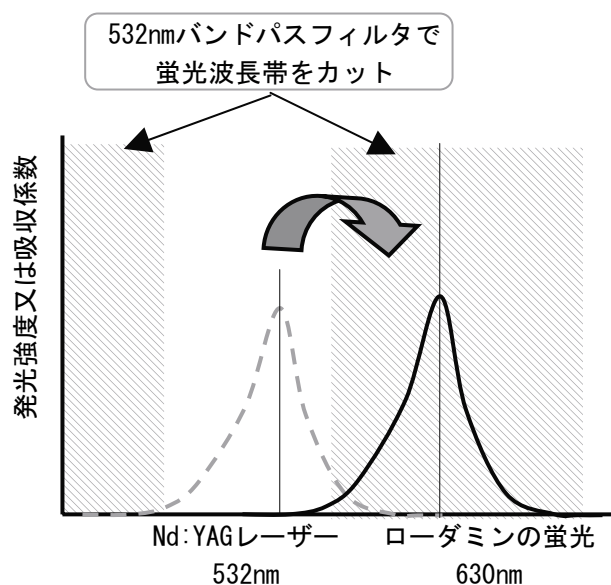


図3 蛍光塗料を利用したレーザ光散乱防止手法

一般的に用いられる表面処理方法、及び、高い効果が期待される表面処理方法を施したサンプルを作成し、表面ハレーション防止方法の優劣に関する比較実験を行い、反射防止効果を定量的に計測し、個別の実験に応じた最適な表面処理方法選定のための基礎データを取得した。また将来のPIV計測用模型の可能性としてガラス模型の提案も含めた、より効果的なステレオPIV計測用の模型表面処理方法を提案し、その有効性について検討した結

果を報告する。

## 2. 試験サンプル

本試験において準備した、表面ハレーション防止のためのサンプルを表1に示す。従来から模型塗装として一般的に使用されているつや消し黒塗料で塗装したものを比較対象の基準となるサンプルとした。また、レーザ光散乱防止効果の高い塗料として、つや有り黒塗料を塗布したサンプルを用意した。さらに、もう一つのレーザ光散乱防止効果が認められている手法として、蛍光物質を入れた塗料を準備し、白色と黒色の2種類の下地塗装を施したサンプルの上から重ね塗りしたサンプルを用意した。また、つや有り黒塗料の代替品として、塗料と同等の色合いを持つ黒色テープを用意した。他のサンプルとしては、よりハレーション防止効果の高い手法の候補として、板ガラスと平面ミラーを用意した。以下に、各サンプルの詳細について述べる。

塗装またはテープを貼付する、サンプルの母材としては、アルミ合金A2024（縦50mm、横50mm、厚さ1mm）を使用した。黒色塗料は市販の2液型ポリウレタン塗料で、つや消し黒塗料はつや有り黒塗料につや消し剤を混入させたものである。塗装膜厚さの効果についても調べるため、塗装膜厚さの異なる2種類のサンプルを用意し

た。さらに、表面研磨による効果を調べるために、つや有り黒塗装後に塗装面をコンパウンド（住友3M、Hard2）により研磨したサンプルも用意した。黒色テープに関しては数社のものを取寄せ、その中から、目視においてなるべく真黒色に近いもの、つや有り黒塗料に最も色が近いものを選定してサンプルとした。図4に蛍光塗料を塗布したサンプルの写真を示す。蛍光塗料は蛍光物質としてローダミン6Gを使用し、2液型ウレタン系クリアをバイндаとして調合したものである。蛍光塗料の蛍光強度は蛍光物質濃度の上昇とともに増大するが、ある濃度を超えると消光効果により、蛍光強度は減少に転ずる。そこで、表面ハレーション防止に適切な条件を調査するため、蛍光物質濃度・塗装膜厚さを変えたサンプルを用意した。また下地に塗布する塗料として、白色と黒色の2色の2液型ポリウレタン塗料を用意した。その他に市販蛍光テープも比較検討の対象とした。ガラスは、B27（白板ガラス）に反射防止膜  $\text{MgF}_2$  シングルコートが施されたものと、反射防止コートなしのもの2種類を用意した。平面ミラーとして用意したサンプルは、フロートガラスにアルミ蒸着を施したもので、面精度  $4 \sim 6 \lambda / 25.4\text{mm}$ 、表面品質（キズ・ブツ）は60-40（ $6 \mu\text{m} - \phi 0.4\text{mm}$ ）である。

表1 ハレーション評価サンプル

No.	表面処理	塗料等詳細	膜厚（ $\mu\text{m}$ ）
1	つや消し黒	大日本塗料、Auto V-Top FTBK	23、40
2	つや有り黒	大日本塗料、Auto V-Top 729	26、42
3	つや有り黒 ＋コンパウンド研磨	大日本塗料、Auto V-Top 729 ＋住友 3M hard2	19、30
4	黒色テープ	3M、中川ケミカル、リントック他、 屋外装飾用テープ	30～70
5	蛍光塗料 （下地：つや有り白） ※濃度の異なる数種類の サンプルを用意	ローダミン6G ＋デュボン、HC7600 （大日本塗料、Auto V-Top 731）	50～230
6	蛍光塗料 （下地：つや有り黒）	ローダミン6G ＋デュボン、HC7600 （大日本塗料、Auto V-Top 729）	50～150
7	蛍光テープ	シンロイヒ、ルミノテープ	160
8	白板ガラス B270	エドモンド	n/a
9	白板ガラス B270 （ $\text{MgF}_2$ single coating）	エドモンド	n/a
10	平面ミラー	エドモンド	n/a

母材：アルミ合金 A2024



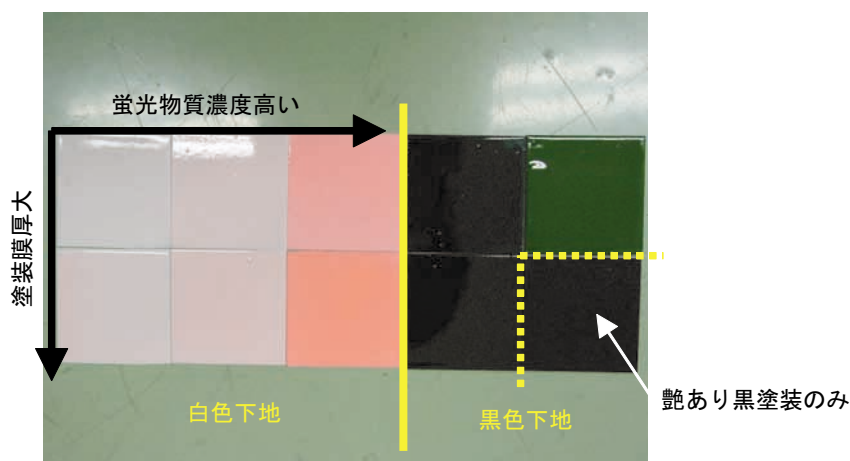


図4 蛍光塗料サンプル

### 3. 実験装置

試験サンプルを用いたハレーション評価試験を実施するために構築した試験装置の概略図を図5に、試験時の写真を図6に示す。試験装置では、アルミ合金製の構造部材を利用して、試験サンプルを固定して回転させるテーブルとCCDカメラとが一直線上に固定されている。この構造部材は、回転可能な三脚によって支えられており、構造部材を回転させることで、カメラとレーザーとのなす角を自由に変えることができる機構となっている。本試験では、図7に示されるような、準鏡面反射条件と拡散反射条件との2つの反射条件におけるハレーション評価を実施するため、三脚の回転軸と回転テーブル回転軸とが一致するように設計され、2つの軸の回転角のみを変更することにより、表2に示すような準鏡面反射 ( $\theta_1 \equiv \theta_2$ ) と拡散反射条件 ( $\theta_1 \neq \theta_2$ ) との両特性を観察することが可能な機構とした。本来は、準鏡面反射条件ではなく、鏡面反射条件における計測を実施すべきであるが、鏡面反射条件に設定した場合、レーザー光の反射が直接 CCD 素子面に当たること、素子を焼損させる恐れがあり、安全に計測が可能な角度差を確保するため、本来の鏡面反射条件から10度ずらした位置を準鏡面反射条件として、完全な拡散反射条件ではなく、鏡面反射条件に近い状態における評価とした。ただし、総合評価に関しては、レーザー光の出力をできる限り低くし、かつ減衰フィルタを用いることで、完全鏡面条件での計測も実施した。なお、板ガラスのサンプルに関しては、ガラスを透過するレーザー光の影響を排除するため、図8に示すような専用のテーブルを用いて試験サンプルを設置した。

評価試験に使用した機器は、JAXA/IAT 風洞技術開発センターで整備した、ステレオ PIV システムを利用して<sup>4</sup>。カメラは  $1280 \times 1024$  画素、4096 階調 (12bit)

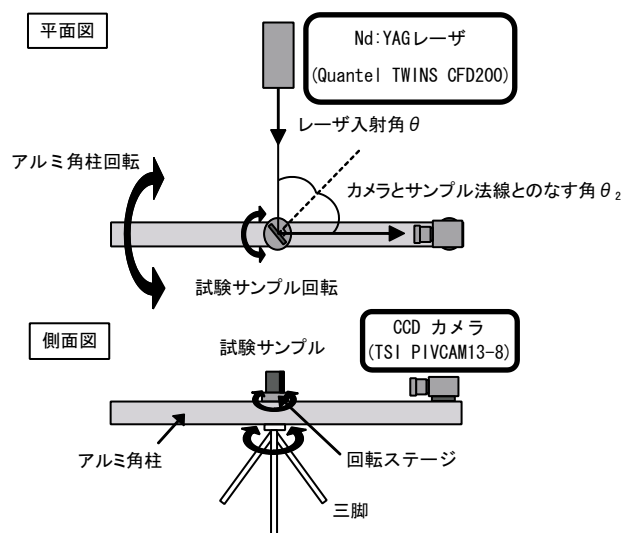


図5 ハレーション評価試験概略図

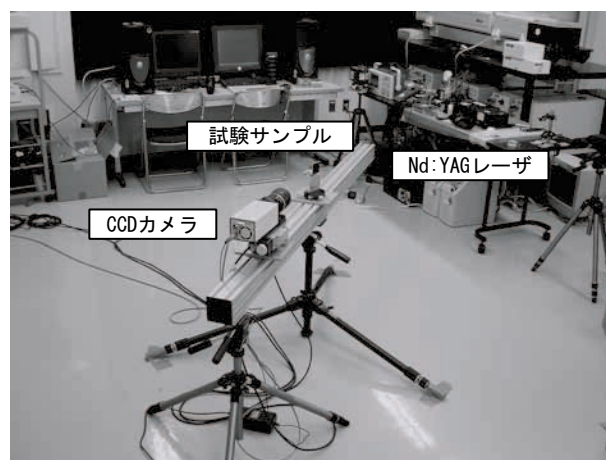


図6 ハレーション評価試験写真

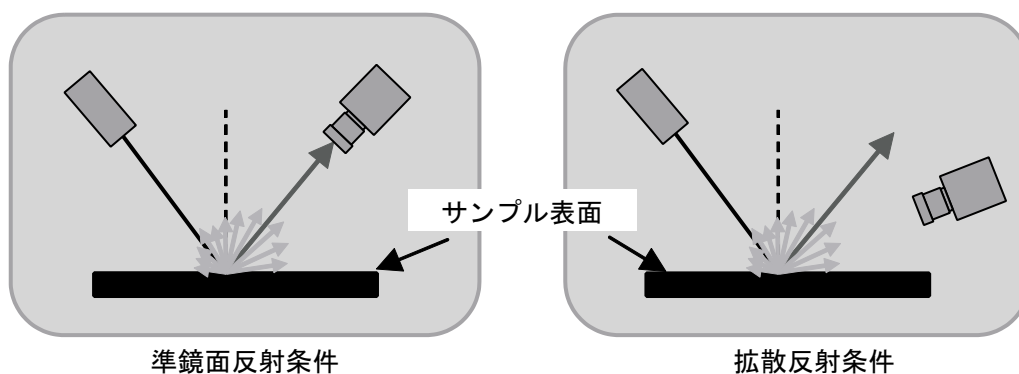


図7 反射条件

表2 サンプル試験条件

No.	レーザ入射角 $\theta_1$ (度)	カメラとサンプル法線とのなす角 $\theta_2$ (度)	角度差 $\theta_2 - \theta_1$ (度)	反射条件
1	5	15	10	準鏡面
2	30	40	10	準鏡面
3	60	70	10	準鏡面
4	5	85	80	拡散
5	30	60	30	拡散
6	60	30	-30	拡散

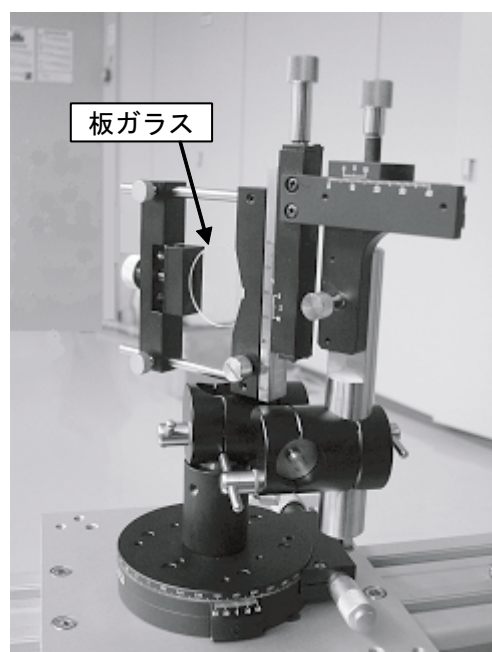


図8 ガラス特性評価用テーブル

の冷却型高解像度白黒 CCD カメラ (TSI 社 PIVCAM13-8) である。また光源として使用したレーザは、ダブルパルス Nd:YAG レーザ (200mJ/pulse、532nm) である。レーザ光の偏光方向は反射面に垂直 ( $p$  偏光) の一方向のみであり、偏光面が異なる場合には試験片表面での反射率が若干変化するが、本試験は相対的な比較が目的であるために、評価には差し支えないと判断した。厳密な評価には差異が生じることが考えられるが、本試験では簡便さを優先して、偏光面は一方向のみで計測を行った。偏光面による効果については、今後の検討課題である。

#### 4. 計測結果

##### 4-1 黒色塗料による塗装

まず始めに、本評価試験装置の特性を把握するため、つや消し黒及び、つや有り黒塗装を施したサンプルを用いて、反射強度の角度依存性に関する評価試験を実施した。入射角  $\theta_1$  を 30 度で固定し、CCD カメラ角度  $\theta_2$  を 0~60 度に変化させて計測した。CCD 素子を強力なレーザ光から保護するため、レーザ光出口および CCD カメラのレンズ前のそれぞれに ND フィルタを設置した。その評価結果を図 9 に示す。

図中、縦軸の散乱光強度は、30 枚の画像を平均化処理

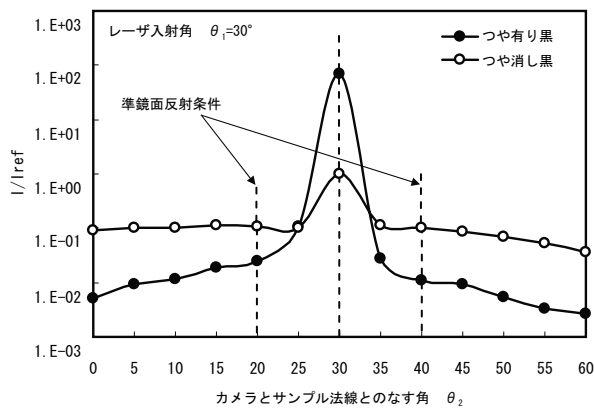


図9 反射強度の角度依存性

し、さらに、図12に示される、幅50画素の平均輝度に対して、つや消し黒塗料による反射ピーク値 ( $I_{ref}$ ) で正規化したものである。カメラ角度  $\theta_2=30$  度におけるつや有り黒塗料の反射強度は、表面光沢の影響により、つや消し黒塗料より100倍程度大きく、鏡面反射条件下では、つや消し黒が有効であることが分かる。本評価試験で設定した反射角から10度ずらした位置(表2の準鏡面反射条件)は、完全な鏡面反射条件とは異なるため、データの解釈に若干の注意を必要とする。逆に入射角 ( $=30$  度) とカメラ角度とに大きな差がある領域では、つや消し黒の反射強度は、観測する角度を変えても、ほとんど変化しない(理論的な拡散反射に近い)のに対して、つや有り黒の場合には、観測する角度との差が大きくなるに従い、散乱光強度は低下する。特にずれ角が  $5^\circ$  までの範囲では、ずれ角の増大に伴い反射強度が大きく低下し、ず

れ角が  $5^\circ$  以上ではつや有り黒の方が有効となることが分かる。図10につや消し黒塗装及びつや有り黒塗装を施した試験サンプルのレーザ照射部の画像を示す。先に述べた通り、完全な鏡面反射から少し外れた今回の計測においては、レーザの散乱光が強い範囲は、どの角度においても、つや有り黒塗料の反射強度の方がつや消し黒塗料より大幅に小さくなっている。

前述の評価試験で、鏡面反射を除き、つや有り黒の散乱防止効果がつや消し黒に比べて、非常に効果が高いことが明らかとなったが、さらに鏡面の効果を高めるために、塗装面の仕上げに使うコンパウンドを用いて、表面を研磨したサンプルによる評価試験を行った。図11につや有り黒色塗料の表面研磨による効果の評価結果を示す。図9と同様に縦軸はつや消し黒塗料による反射ピーク値との比を示している(以降、図中の反射プロファイルの縦軸はすべてこの表記とする)。さらに縦軸の散乱光強度に関しては、輝度ノイズの低減を図るため、30枚の画像を平均化処理した後、図12に示される、レーザ照射部の中心を含む幅50画素の範囲の輝度を平均化し、20画素分の輝度値を移動平均したもので評価している。表面の鏡面度を高めるため、つや有り黒塗装後にコンパウンド研磨されたサンプルの反射強度は、コンパウンド研磨を施さないサンプルより大きい。コンパウンド研磨を行うと表面は平滑となるが、サンプルを観察すると、研磨前と比較して、より透明感のある黒色となっている様子が観察され、研磨を行う前よりも、黒色の度合いが低く感じられる。従って、表面研磨が散乱防止に対して逆効果となる理由としては、コンパウンド研磨により鏡面反射は

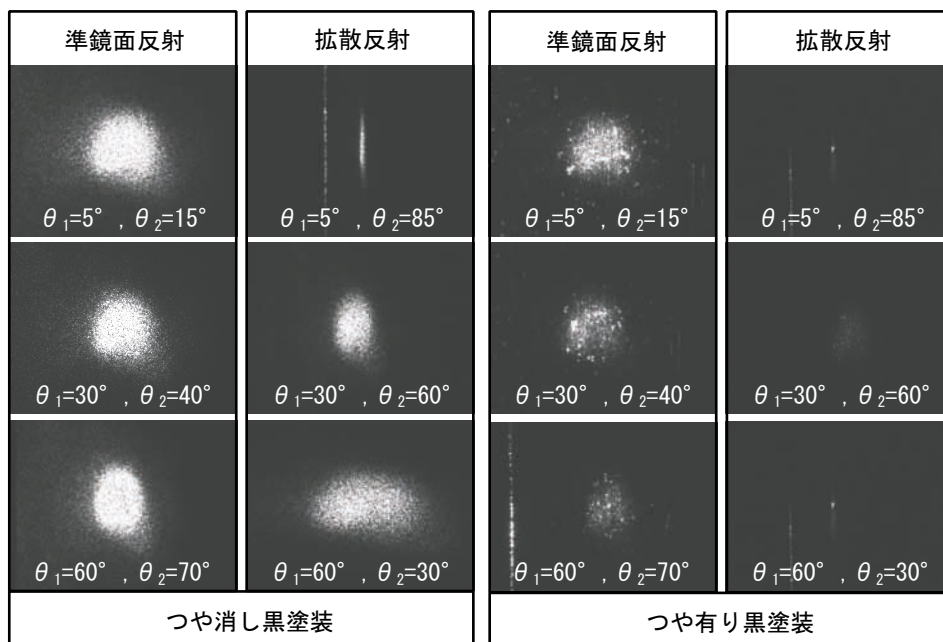


図10 試験サンプル画像例

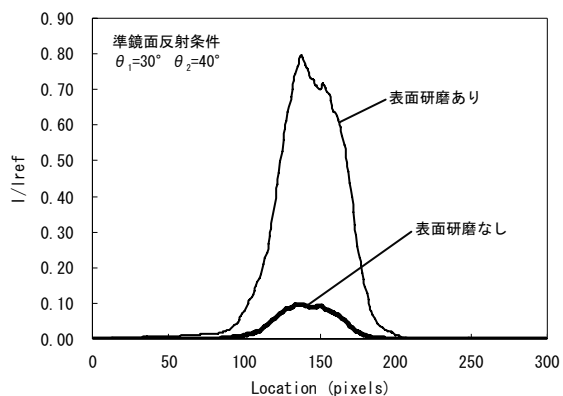


図11 表面研磨の評価結果

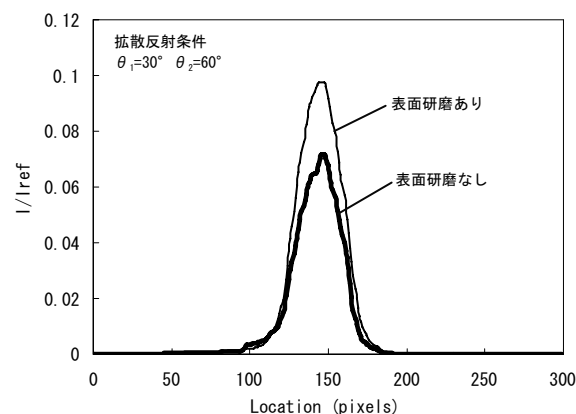


図12 レーザ照射部計測領域

強くなるものの、表面でのレーザ光吸収率が低下してしまったためと推測される。同様の試験として、黒色テープを貼ったサンプルを用いた試験結果を図13に示す。黒色テープにおいても、コンパウンド研磨のときと同様に、目視で黒色に近く（すなわち吸収率が高く）光沢の高いもののほど反射強度が低いという結果となっている。

#### 4-2 蛍光塗料による塗装

次に、蛍光物質を利用した塗料を塗布した試験サンプルに関する結果について述べる。図14に $\theta_1=60^\circ$ 度、 $\theta_2=70^\circ$ 度における蛍光塗料と干渉フィルタの効果に関する評価結果を示す。用意したサンプルは白色下地の上に蛍光塗

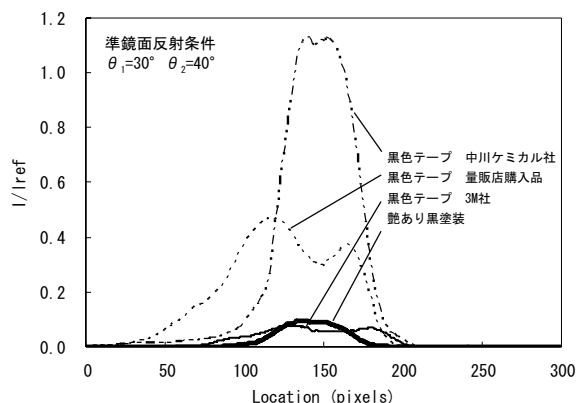


図13 黒色テープの評価結果

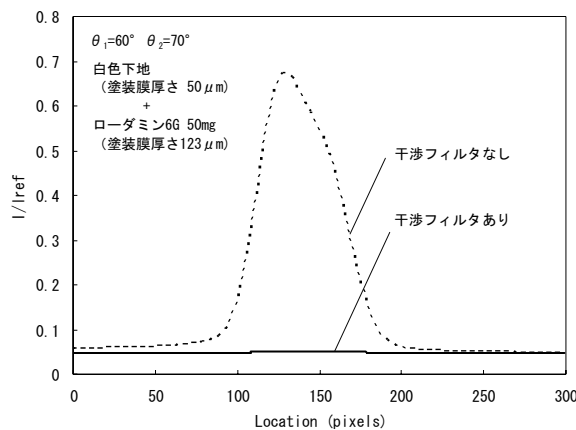
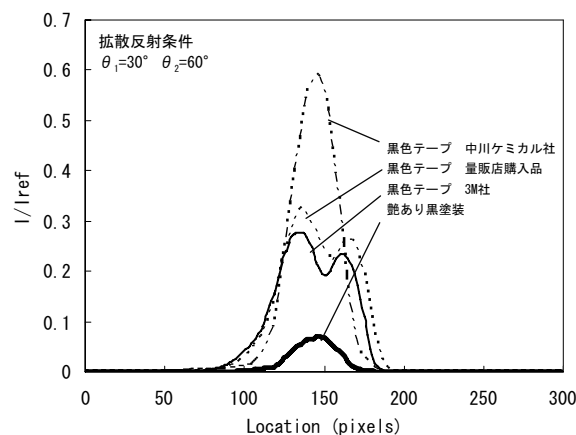


図14 蛍光塗料の評価結果

料を施したものである。図14より、干渉フィルタを通すことにより、散乱光強度が大きく低下することが分かる。この結果より、蛍光塗料による蛍光吸収の効果は非常に大きいことが明らかとなった。さらに、下地の色と蛍光塗料濃度・塗装膜厚を変化させて、その影響を評価した結果を図15に示す。計測では、図14の計測時で使したものと同じの干渉フィルタを用いた。図中の凡例は、左からバインダ100mlに対する蛍光物質質量/蛍光塗料塗

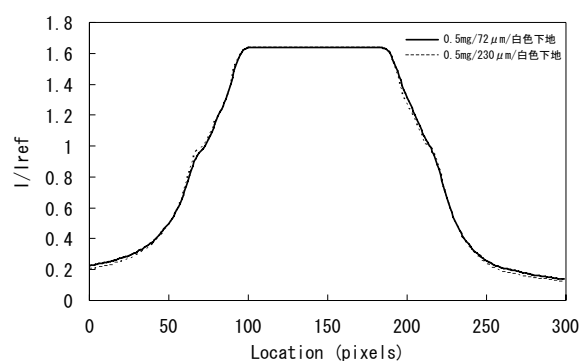


図 15-1 膜厚効果（蛍光物質濃度 0.5mg、白色下地）

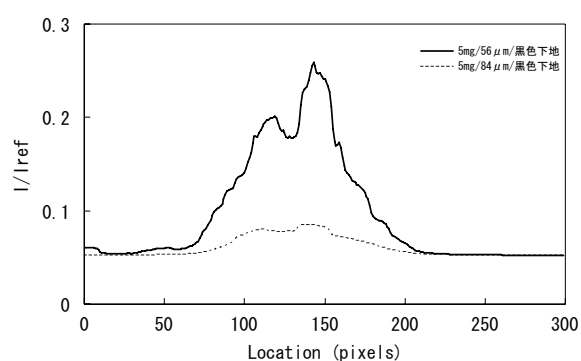


図 15-4 膜厚効果（蛍光物質濃度 5mg、黒色下地）

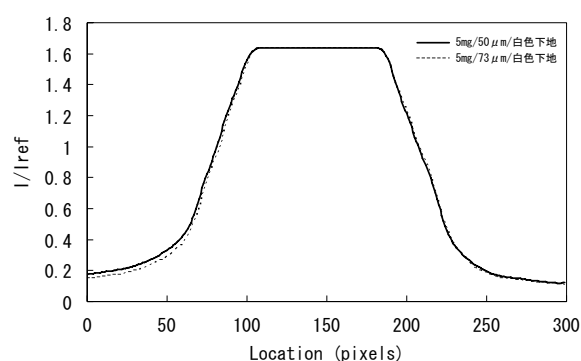


図 15-2 膜厚効果（蛍光物質濃度 5mg、白色下地）

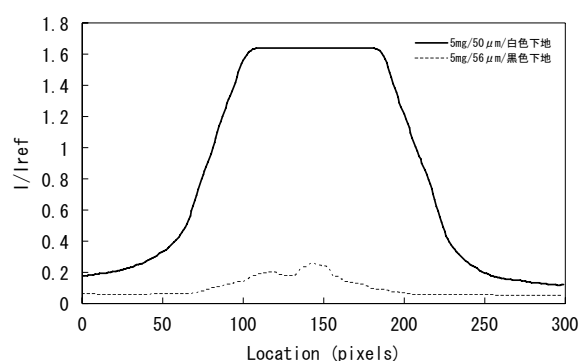


図 15-5 下地効果（蛍光物質濃度 5mg、膜厚約 50μm）

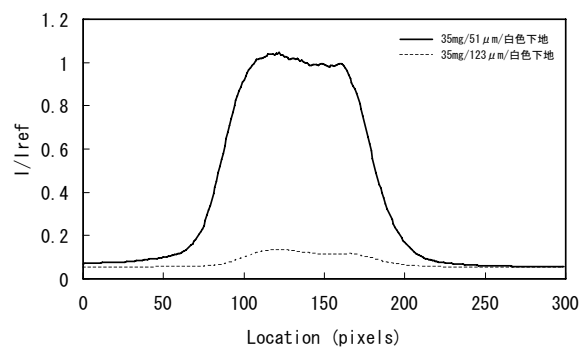


図 15-3 膜厚効果（蛍光物質濃度 35mg、白色下地）

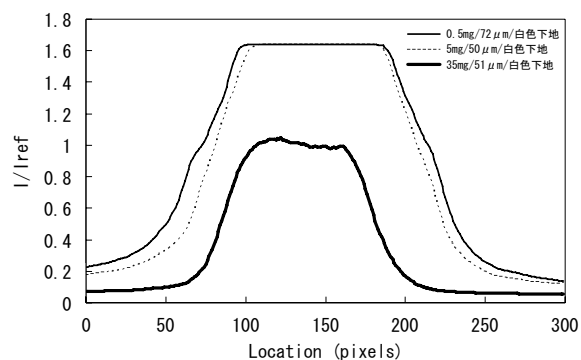


図 15-6 蛍光物質濃度効果（膜厚約 50μm、白色下地）

装膜厚さ / 下地塗料の色の順に表記されている。下地が白の場合には混入させた蛍光物質が多いほど反射強度が低下し、また、膜厚が厚いほど反射強度が低下している。一方、下地が黒の場合、白色下地の場合よりも、さらに反射強度が低減していることが分かる。しかしながら、下地が黒色の場合、反射強度は蛍光塗料の厚さや蛍光物質濃度には単調に依存しておらず、黒色塗料による吸収効果と蛍光による波長シフトの効果の最適な組み合わせが存在するものと考えられる。例えば、黒色塗料上に高濃度の蛍光物質を塗布した 50mg/152 μm/Black と

5mg/84 μm/Black を比較した場合、前者の色は深緑であるのに対して後者はほぼ黒色を示しており、濃度の高い蛍光塗料が黒色下地塗装による吸収効果を悪化させ、総合的な反射が逆に増加するという結果になっていると考えられる。また、蛍光塗料の代わりとして、蛍光テープを貼ったサンプルに関しても評価試験を実施した。蛍光テープの評価結果を図 16 に示す。この試験においても干渉フィルタの効果は見られたものの、反射強度の低下は蛍光塗料の場合に比べて小さかった。



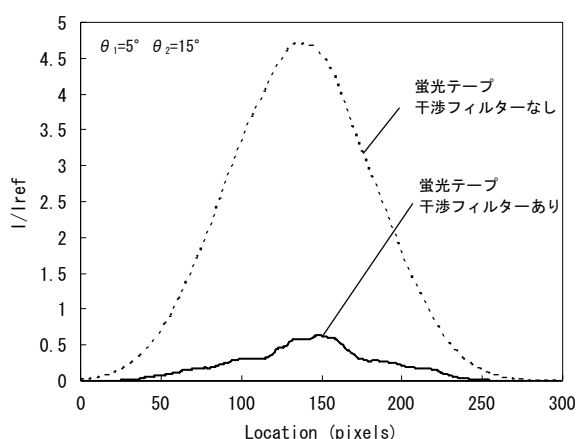


図16 蛍光テープの評価結果

#### 4-3 ガラス及びミラー

最後に、より反射防止効果が期待されるガラスサンプルとミラーサンプルに関する結果について述べる。図17に白板ガラスB27に反射防止コート(MgF<sub>2</sub>)を施したものとコートをしていないものに対して、 $\theta_1=5^\circ$ 、 $\theta_2=15^\circ$ 度の条件下で反射強度を観察した結果を示す。コートなしガラス表面での反射は比較的大きく、この条件では、前述のつや有り黒塗料よりも反射強度が増大しており、ハレーション防止効果は低いことが分かった。一方、反射防止コート(MgF<sub>2</sub>)を施したガラスでは、つや有り塗装を施したものと比較して、どの設定角度においても、反射強度は低減しており、レーザー光が直接照射される部分に対して、適切に使用すれば有効な表面ハレーション防止効果が得られることが期待される。さらに、図17に、フロートガラスにアルミ蒸着を施した平面ミラーの評価結果を示す。平面ミラーのサンプル結果は、準鏡面反射条件においても、つや消し黒塗料より反射強度が増大しており、完全な鏡面反射条件ではさらに大きくなることが予想される。また、さらに角度差をとり拡散反射条件にすると、反射強度は低下するが、つや有り黒塗料と比

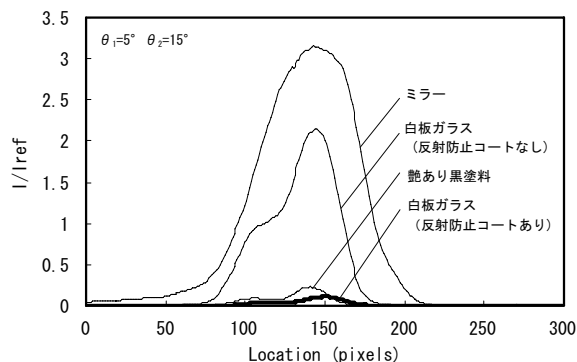


図17 板ガラス及びミラーの評価結果

較しても、より反射強度が低下する角度範囲は存在しなかった。この結果は、ミラーと比較して、黒色塗料の場合では、塗料による吸収効果が高いためと推測される。なお、散乱防止効果の差異を生む要因に関しては、目視による観察のみではなく、さらに客観的な評価法を取り入れた定量的な解析が必要と考える。

#### 4-4 総合評価

以上の結果をまとめ、現有の手法の中で最も有効であると予想される表面処理法に関して考察する。ここでは、表面ハレーション防止性能が比較的高いとされるサンプルに関して、 $\theta_1$ を30度に固定して $\theta_2$ を変化させた場合の、各サンプルの散乱光強度をまとめたものを図18に示す。完全鏡面反射条件( $\theta_1=\theta_2$ )では、つや消し黒のサンプルが最もハレーション防止効果が高く、次いで、蛍光塗料のサンプルの効果が高い。一方、拡散反射条件( $\theta_1 \neq \theta_2$ )では、蛍光塗料よりもつや有り黒塗料の方が、ハレーション防止効果が高い場合が多い。ガラスにMgF<sub>2</sub>反射防止コートを施したサンプルについての結果は図18に示されていないが、準鏡面反射条件における比較では、つや有り黒塗料よりも高いハレーション防止効果を示しており、シート光が当たる部分をガラスに置換えることで、現有の塗料による防止方法よりも、高い反射防止効果を得られる可能性がある。

以上の結果より、塗装を用いた手法においては、準鏡面反射条件において蛍光塗装(下地につや有り黒)を施したものが比較的性能がよいが、蛍光物質濃度・塗装膜厚さ等により性能差があるため、それらのパラメータを適切に設定する必要がある。また、拡散反射条件ではつや有り黒色塗装の性能もよく、場合によっては蛍光塗料よりも、防止効果が高く、蛍光塗料の場合では、下地と蛍光塗料との2度塗りが必要であることを考慮すると、現有のハレーション防止対策としては、つや有り黒塗料による塗装が最も適用しやすい方法と考えられる。

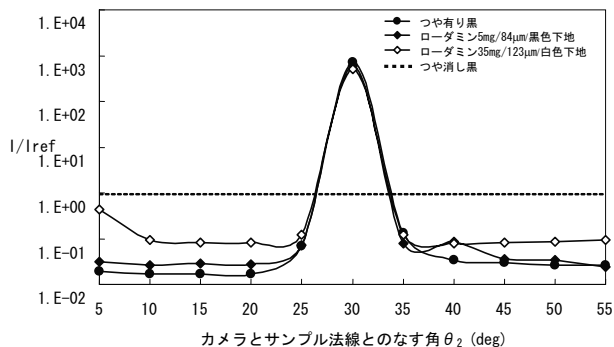


図18 表面処理方法による比較

## 5. まとめ

ステレオ PIV 計測を想定した、模型表面ハレーションを防止するための表面処理を適切に施すことができるように、標準的な表面処理方法及びガラス、ミラーを使った方法を用いたサンプルを用意して、防止の評価試験を実施した結果、PIV 計測における表面ハレーション防止対策には下記の 3 つのアプローチが有効であることがわかった。

1. 塗装により、意図的に模型表面を鏡面に近い状態に仕上げ、レーザ光を PIV カメラに入らない方向に誘導する。
2. 黒色塗料を塗布して、積極的にレーザ光を吸収する。
3. 蛍光塗料を塗布して、レーザ光を吸収し、蛍光発光は、カメラの前に干渉フィルタ取付けてカットする。

試験に応じて、上記の防止対策を適切に組み合わせることにより、現状で最も有効な表面ハレーション防止対策を施すことが可能となる。しかしながら、鏡面に近い表面処理を施した場合には、強度の強い鏡面反射の対策も別途考慮する必要がある。それらを全て含めた最適な表面処理が必要となる。ハレーション防止効果の高いつや有り黒塗装を施した場合でも、図 19 に示されるような、翼端のエッジ部等では強いハレーションが大きな問題となっており、今回得られた知見と、直接、反射を低減させるための偏光フィルタを組み合わせることで反射の低減を図る必要がある。また、表面近傍データの取得が非常に重要な場合、反射防止コーティングを施した部分ガラス模型を使用することで、より模型表面近傍の流れ場を計測できる可能性がある。

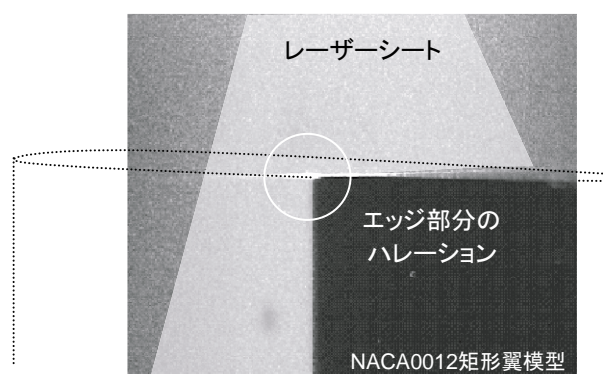


図 19 ステレオ PIV 計測例

## 参考文献

- (1) V.Wendt, M.Furll: Flow field measurements around a car using particle image velocimetry, 40th International Symposium on Particle Image Velocimetry (2001)
- (2) 加藤裕之, 渡辺重哉, 唐沢敏夫, 野口正芳, 橋本拓郎, 吉村定修: 可搬型 PIV システムの遷音速風洞への適用, 第 74 回風洞研究会議論文集 (2006), JAXA-SP-05-016, pp34-41.
- (3) 加藤裕之, 渡辺重哉, 近藤夏樹, 末永尚史, 齊藤茂: ヘリコプタ・ロータ翼端渦のステレオ PIV 計測, 第 34 回流体力学講演会講演集 (2002), pp237-240.
- (4) 渡辺重哉, 加藤裕之, 橋本拓郎: 大型風洞用粒子画像流速測定 (PIV) システムの開発, 第 41 回飛行機シンポジウム論文集 (2003)



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-027

---

発 行 平成18年3月31日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL : <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 (株) 共 進

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。  
宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター  
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1  
TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。



本書は再生紙を使用しております。