

## 解説

## 塗装外観品質の測定

松田 守弘

(株)豊田中央研究所 〒480-11 愛知県愛知郡長久手町横道 41

(1984年1月25日受理)

## Measurement of Visual Quality of Paint Coatings

Morihiro MATSUTA

Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc.,  
Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi 480-11

## 1. はじめに

諸技術の進歩発展に伴い工業生産の大部分の工程が自動化あるいは機械化されたが、検査工程とくに外観品質の検査工程はまだほとんどが官能によって行なわれている。塗装外観品質の検査も例外でなく、大部分が官能によって行なわれている。

塗装は金属製品を錆から守るためだけでなく、それらを美しく見せるためにも行なわれる。とくに自動車の上塗り塗装面の光沢やゆず肌(ゆずの皮に似た表面性状)、色はその美観を大きく左右する重要な表面性状であるが、人間の感覚を基準としているためにその機器計測化はむずかしく、色を除いては十分な測定がなされていない。特殊な塗装面を除けば、光沢やゆず肌と外観品質の間にはつぎのような関係が存在する。すなわち、高光沢でゆず肌が良好(ゆず肌のない面が最も良い)なほどよい外観品質である。

ゆず肌が塗装面に特有な表面性状であるのに対し、光沢はすべての物体面に共通する表面性状である。そのため、ゆず肌の計測化に関する研究が少ないのに対し、光沢の計測化に関する研究は非常に多い。その研究の大部分は、1950年代に集中しており、それらは蓮沼の成書<sup>1)</sup>にまとめられているので参照されたい。1960年以降の研究は少なく、とくにゆず肌に関しては2件<sup>2,3)</sup>しか報告されていない。

これまでの研究のほとんどは定量性のない計測順位と官能順位の相関を調べたもので<sup>1,4)</sup>、感覚との対応が悪い。また、塗装面には大なり小なりゆず肌が観察される

が、光沢とゆず肌を区別して測定する研究は全然見あたらない。さらに、光沢測定には鏡面光沢度計と眼視式の鮮明度光沢度計<sup>5)</sup>が、ゆず肌測定には眼視式のゆず肌度計<sup>6)</sup>が広く使われているが、それぞれつぎのような問題点を抱えている。すなわち、鏡面光沢度計の問題点としては光沢感との対応の悪さのほかに、高光沢面に対しての感度の低さが挙げられる。また、眼視式の測定器では個人差の影響を受けやすく、客観性や再現性に劣る。

ここでは、これまでの測定法や測定器が抱えている前記の問題点を解決するために行なった筆者らの最近の研究について概説する。

2. 光沢感を規定する因子<sup>6)</sup>

光沢感と相関のよい計測値が得られる定量的な光沢度測定法、測定器の開発を行なうためには、まず光沢感を規定する塗膜の特性因子を明らかにしなければならない。これまでも光沢度や光沢感の因子についての研究がなされてはいるが<sup>7-9)</sup>、系統的に調べられた例は少なく、とくに塗膜についてはほとんどない。そこで、筆者らは顔料やビヒクル(塗料から顔料を除いた樹脂分)の異なる塗料でいろいろな塗膜を作り、それを人間に判定評価させて光沢感を規定する因子を系統的に調べた。

試料は30枚の塗板で、これに順位法による官能検査を実施した。各種因子との相関を調べる光沢官能値としては、27名の被験者の平均順位を用いた。図1に結果の一例として光沢官能値と表面粗さの関係を示す。これより光沢官能値が表面粗さと強い相関性を示し、表面粗さ

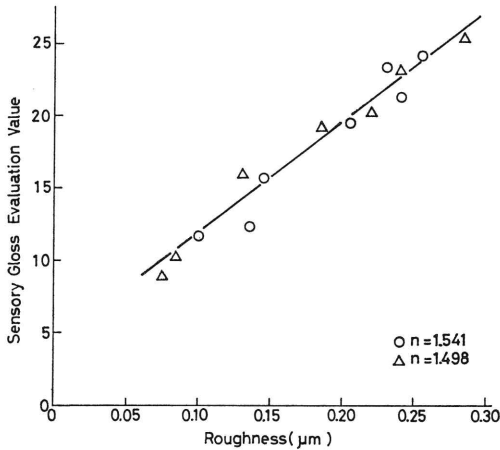


図1 光沢官能値と表面粗さ(最大高さ)の関係

が光沢感を規定する重要な因子であることがわかる。

前記表面粗さのほかにも屈折率や明度も因子であること、これら因子のなかで光沢感への寄与率が高いのは表面粗さ、屈折率、明度の順であることなども明らかにされた。

### 3. 光沢感の間隔尺度化<sup>10,11)</sup>

光沢感と相関の良い計測値が得られる測定法の研究を行なうためには、光沢感を間隔尺度化して新しい測定法による計測値との関係を定量的に論ずる必要がある。すなわち、間隔尺度化された光沢感(以後簡単のために光沢間隔と呼ぶことにする)のわかった標準試料を作り、それを物理的な方法で測定し、得られる計測値と光沢間隔の直線関係を調べる必要がある。そのための標準試料としての要件を、①光沢の差が各試料間で有意であること、②ゆず肌、色、塗料の種類ができるだけランダムに変化していること、と定めた。

光沢感の間隔尺度化に最適な手法として、一対比較法の変法の一つである中屋変法<sup>12)</sup>を選び出した。顔料やビヒクルの異なる塗料をいろいろな条件で塗装した塗板(大きさ: 145 mm × 70 mm × 0.8 mm)を約70枚用意したが、試料数が多いと官能検査実験回数が増して被験者が疲労し誤差が大きくなるため、できるだけ試料数を減らす必要がある。光沢感が表面粗さと<sup>6)</sup>、ゆず肌感がうねりと相関があることから、全試料の粗さ  $R_a$ (中心線平均粗さ)と、うねりの波長  $\lambda_w$ を測定し、横軸に  $R_a$ を縦軸に  $\lambda_w$ をとり、全試料の散布図(図2)を作成した。

前記要件ができるだけ満たされるように  $R_a$ と  $\lambda_w$ の

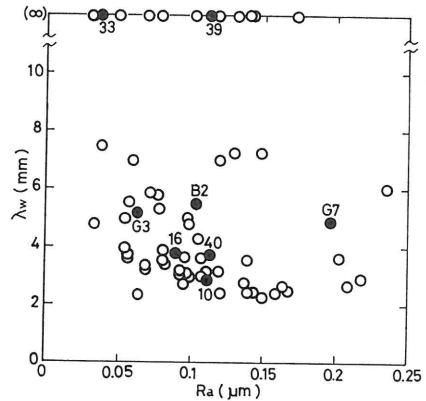


図2 散布図

$R_a$ : 中心線平均粗さ,  $\lambda_w$ : うねりの波長

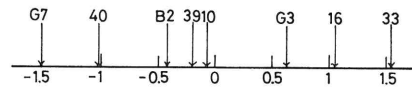


図3 光沢間隔

表1 分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比
主効果	412.86	7	58.98	265.41*
主効果×個人	15.14	42	0.3605	1.6224*
組合せ効果	31.0	21	1.4762	6.6429*
誤差	28.0	126	0.2222	
総平方和	487.0	196		

\* 高度に有意。

大小で選び出された10枚前後の試料に官能検査を実施した。そして、各試料の平均的な光沢感の度合(光沢間隔)などを求め、分散分析や各試料間の光沢間隔の有意差検定を行ない、前記要件が満たされるまで試料の選択と官能検査実験を繰り返した。被験者は塗装関係の7名で、各試料対について光沢の良否を5段階で比較してもらった。すなわち、一方が他方に比べて光沢が確かによい、いくぶんよい、まったく同じ、いくぶん悪い、確かに悪い、かを判定してもらい、それぞれに+2, +1, 0, -1, -2の評点を与えた。

図2から最終的に選び出された試料は黒丸の33, 16, G3, 10, B2, 40, G7の8枚で、これら各試料の光沢間隔を示す尺度図を図3に、分散分析結果を表1に示す。表1より主効果、主効果×個人、組合せ効果とも高度に有意で、試料間、被験者間に差があり、被験者は組合せによっても影響を受けていると推定される。光沢間隔の有意差検定を行なった結果、有意水準が5%のとき

表 2 光沢標準試料の光沢間隔と物理特性

試料 No.	光沢間隔	表面粗さ $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	うねり			塗料	色
			波長(mm)	振幅( $\mu\text{m}$ )	曲率(m)		
33	1.54	0.037	$\sim\infty$	$\sim 0$	$\sim\infty$	ソリッド	オレンジ
16	1.06	0.089	3.8	1.4	0.65	メタリック	シルバー
G3	0.625	0.062	5.1	0.82	2.0	↑	↑
10	-0.071	0.11	2.8	0.85	0.58	↑	↑
B2	-0.429	0.10	5.5	0.95	2.0	↑	ブルー
40	-1.02	0.11	3.7	0.88	0.97	ソリッド	グリーン

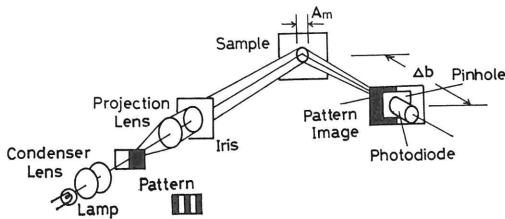


図 4 光沢測定系

試料 10 と 39, 39 と B2 の間に有意差がないことがわかり、試料 39 を除外した。また、試料 G7 は被験者全員から光沢が悪過ぎると指摘されたため除き、結局残った 6 枚の試料を標準試料とすることにした。

表 2 に以上のようにして作成した標準試料の光沢間隔と物理特性を示す。表面粗さ  $R_a$  は中心線平均粗さで  $0.04\sim 0.11\mu\text{m}$  の範囲にあり、うねりの波長  $\lambda_w$  は  $2.8\text{ mm}\sim\infty$ 、振幅  $h_w$  は  $0\sim 1.4\mu\text{m}$  の範囲にある。凹凸の激しいほど、つまり  $\lambda_w$  が小さく  $h_w$  が大きいほどゆず肌が悪いと判定される傾向があることから、6 枚の標準試料のなかでは 16 と 10 がゆず肌の悪い試料である。

4. 光沢の定量的測定<sup>10,11)</sup>

測定系は、図 4 に示すようにパターンを投影して像のぼけを検出するものである。パターンはナイフエッジと矩形波格子の 2 種類で、これをエッジあるいは格子と直交する方向に移動させた。パターン像は試料で反射され、試料から  $\Delta b$  だけ隔った位置に結像される。結像位置には直径  $0.18\text{ mm}\phi$  のピンホールを備えたフォトダイオードがあり、像強度の空間変化が時間変化として検出される。

光沢感との相関を調べる物理量として、ナイフエッジパターンの場合は暗から明に立ち上がる曲線の直線部分の傾き(すなわち、傾きの最大値)  $S$  を、矩形波格子パターンの場合はいわゆるコントラスト  $C$  を用いた。傾き  $S$  とコントラスト  $C$  はそれぞれつぎのように表わ

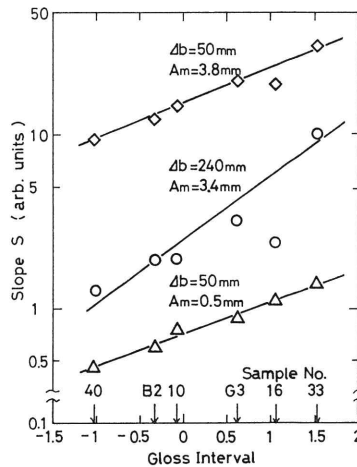


図 5 傾き  $S$  と光沢間隔の関係  
 $\Delta b$ : 試料から像面までの距離,  
 $A_m$ : 試料上の照明スポット径

される。

$$S = E/\tau \tag{1}$$

$$C = (E_p - E_b)/(E_p + E_b) \tag{2}$$

ここで、 $E$  は明部の出力、 $\tau$  は暗から明に立ち上がるまでの時間、 $E_p$  と  $E_b$  は矩形波格子の場合の明部と暗部の出力である。

図 5 に傾き  $S$  と光沢間隔の関係を示す。 $A_m$  (試料上の照明スポット径) がほぼ同じで、 $\Delta b=240\text{ mm}$  の場合の○印と  $\Delta b=50\text{ mm}$  の場合の◇印を比較するとつぎのようなことがわかる。 $\Delta b$  が大きいと横軸とのなす角が大、すなわち光沢度測定感度が大であるが、直線性が悪く、とくに高光沢でゆず肌の悪い試料 16 が直線から大きくはずれ、ゆず肌の影響を強く受けることがわかる。一方、 $\Delta b$  が小さくなると直線性がよくなり、試料 16 もかなり直線に近づいてくるが、まだゆず肌の影響を完全には除ききれていない。 $\Delta b$  が小さくなるとゆず肌の影響を受けにくくなるが、同時に測定感度も低下するため  $\Delta b$  を小さくするだけでゆず肌の影響を取り除くことに

は限界がある。Δb=50 mm で、A<sub>m</sub>=3.8 mm の◇印と A<sub>m</sub>=0.5 mm の△印を比較することにより、A<sub>m</sub> が小さくなると試料 16 も直線にのり、ゆず肌の影響を受けないようになることがわかる。

図 5 より A<sub>m</sub> と Δb を小さくするとゆず肌の影響を受けないようになり、傾き S と光沢間隔の間の直線性がよくなることがわかったが、これはつぎのように説明される。傾き S と後述のコントラスト C は、いずれも反射パターン像のぼけと関係のある量であるが、このぼけには光沢 (あるいは表面粗さ) に起因するものとゆず肌 (あるいはうねり) に起因するものがあると考えられる。したがって、ゆず肌の影響を受けなくなるということは、ゆず肌によるぼけが小さくなり光沢によるぼけに比べて無視できるようになることを意味する。ゆず肌のためにうねった面を凹面鏡と凸面鏡が交互に連なった面と仮定して、幾何光学的にゆず肌によるぼけを無視できる条件を求めると、

$$2A_m < \lambda_w, 2\Delta b \ll r_w \quad (3)$$

が得られる。ここで、λ<sub>w</sub> は凹面とつぎの凹面 (あるいは凸面とつぎの凸面) の間隔で、うねりの波長に相当する。r<sub>w</sub> は凹面あるいは凸面の曲率半径である。表 2 より標準試料の λ<sub>w</sub> と r<sub>w</sub> の最小値はそれぞれ 2.8 mm と 580 mm であり、A<sub>m</sub>=0.5 mm, Δb=50 mm のとき (3) 式が成立する。したがって、標準試料のすべてが (3) 式を満たし、傾き S と光沢間隔の間の直線性がよくなったものと解釈される。

図 6 にコントラスト C と光沢間隔の関係を示す。測定感度は図 5 の傾き S の場合より高いが、直線性が悪く、試料 B2 が直線からはずれる。これは試料 B2 の反射率がほかの試料に比べて低いためである。すなわち、コントラストは試料の反射率とは無関係で、表面粗さに基づく反射像のぼけだけと関係のある量であるためである。

以上のように光沢の定量的な測定にはコントラストよ

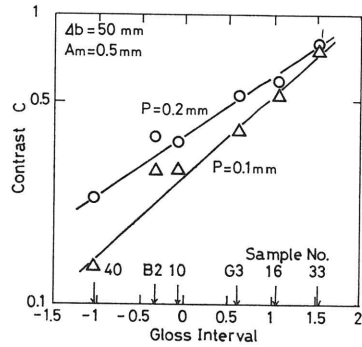


図 6 コントラスト C と光沢間隔の関係  
p: パターンピッチ

りも傾きが適しているが、この傾き S はレンズや感光材料などの性能評価に応用されている OTF<sup>13)</sup> (optical transfer function) のフーリエ変換であるインパルスレスポンスの極大値に対応している。

### 5. ゆず肌の定量的測定<sup>14)</sup>

矩形波格子パターンを試料で反射結像させ、その像の“ゆがみ”と間隔尺度化されたゆず肌感 (ゆず肌間隔) との直線関係を実験的に調べた。試料は光沢標準試料と同様の手続により作成されたゆず肌標準試料で、そのゆず肌間隔と物理特性は表 3 に示すとおりである。

測定系は図 4 の光沢測定系とほとんど同じであるが、光沢の場合はパターンを移動させたのに対し、ゆず肌の場合はパターンを固定してフォトダイオードを移動させる点が異なる。

矩形波格子像がゆず肌でゆがめられるためフォトダイオードからは山の間隔あるいは谷の間隔が変動する波形が得られる。そこで、ゆず肌間隔との直線関係を調べる物理量として、それら変動する格子の間隔で表わされる平均ゆがみ率 δ を用いることにした。

表 3 ゆず肌標準試料のゆず肌間隔と物理特性

試料 No.	ゆず肌間隔	表面粗さ R <sub>a</sub> (μm)	うねり			塗料	色
			波長(mm)	振幅(μm)	曲率(m)		
O1	1.28	0.03	~∞	~0	~∞	ソリッド	マルーン
G1	0.963	0.055	3.8	0.45	2.0	メタリック	シルバー
O4	0.407	0.032	4.8	0.7	1.7	ソリッド	マルーン
P45	-0.148	0.089	4.4	0.85	1.3	メタリック	ブルー
O7	-0.963	0.092	3.2	1.8	0.44	ソリッド	マルーン
T4	-1.54	0.106	3.0	1.9	0.39	メタリック	グリーン

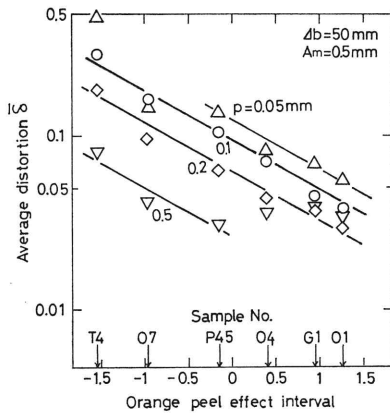


図 7 平均ゆがみ率  $\bar{\delta}$  とゆず肌間隔の関係

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (|l_i - l_0| / l_0) \quad (4)$$

ここで、 $n$  は格子の本数、 $l_0$  は鏡面で反射結像されたパターンの格子の間隔、 $l_i$  は塗装面で反射結像されたパターンの  $i$  番目の格子の間隔である。

入射角と反射角を 45 度に、投影倍率を 5.5 に固定し、矩形波格子パターンのピッチ  $p$  を 0.05~0.5 mm の範囲変化させたときの平均ゆがみ率  $\bar{\delta}$  とゆず肌間隔の直線関係を図 7 に示す。これからつぎのようなことがわかる。イ)  $\bar{\delta}$  とゆず肌間隔の直線関係は  $p=0.1\sim 0.2$  mm のときよい。ロ)  $p=0.05$  mm のときはゆず肌間隔が大きいとよく、小さいと悪い。ハ)  $p=0.5$  mm のときはゆず肌間隔が小さいとよく、大きいと悪い。

前記格子ピッチによる直線関係の良し悪しがつぎのような球面鏡モデルで説明できることがわかった。すなわ

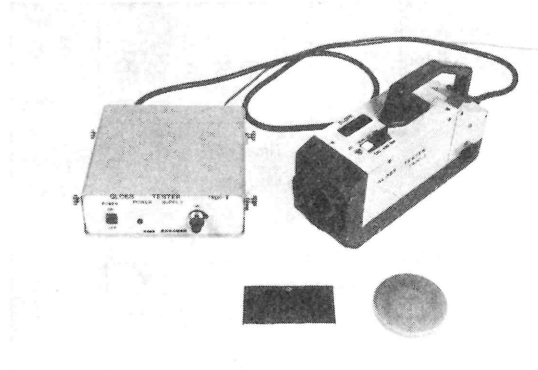


図 8 光沢度測定器

ち、塗装面を凹面鏡と凸面鏡が交互に連なった面と仮定し、像がゆがむ現象がそれら球面鏡による再結像に伴う反射像の縮小と拡大によって起こるとするモデルを想定した。そして、パターン上の格子点に対応する結像点を計算によって求め実験結果の説明を行なった。

### 6. 試作測定器<sup>15,16)</sup>

光沢度測定器、ゆず肌度測定器をそれぞれ設計・試作し性能を評価したが、両者は類似しており重複する部分が多いので、光沢度測定器についてのみ詳述し、最後に両者の性能をまとめて記すことにする。

#### 6.1 構成

図 8 に光沢度測定器の外観写真を示す。測定器は検出ユニットと電源ユニットの二つから構成されている。

図 9 に検出ユニットのブロック図を示す。検出ユニットは、ナイフエッジパターンを投影する光学系、パター

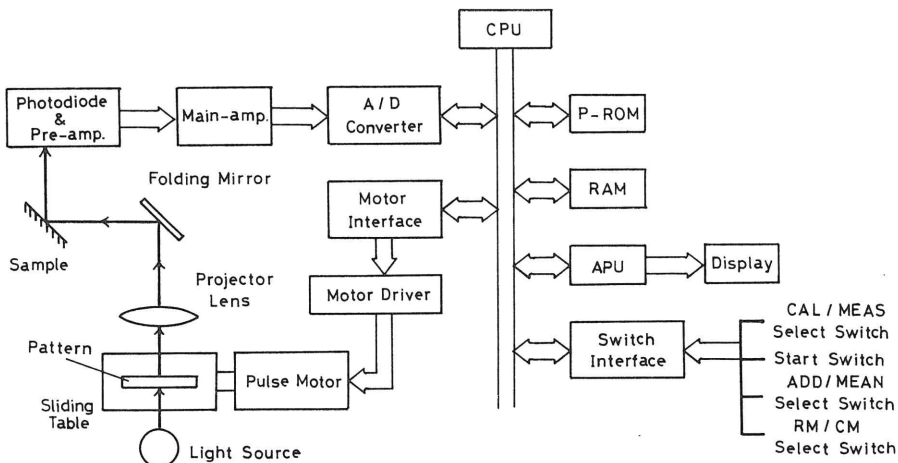


図 9 検出ユニットのブロック図

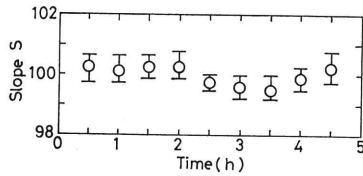


図 10 再現性

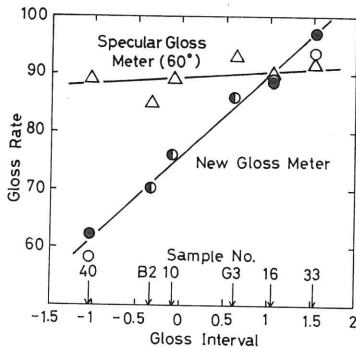


図 11 光沢感との相関性

●: スタティック測定, ○: ダイナミック測定

ンを移動させる機械系および電気系, 操作系から成っている. 自動車ボディの大部分は曲率半径 1 m 以上の凸面から成っており, 検出ユニットを手で押し当て測定(ダイナミック測定)する場合, 凸面による光路長の変化や手振れの影響を受ける. そこで, 両者の影響を除くために, 検出ユニットが被測定面と小さな 3 点マグネットとで接触するように設計された.

パターン移動のための機械系にはコンピュータによる制御性を考慮してパルスモータと送りねじ式の摺動テーブルの組合せが採用された.

電気系にはマイクロコンピュータが内蔵されており, それによってパターンの移動や操作系のスイッチ類の制御および信号処理, 傾きの演算処理とデジタル表示などが行なわれる. デジタル表示される数値は, 光沢基準板として JIS-Z 8741 に規定されている黒ガラスに対して 100 になるように規格化されている.

## 6.2 性 能

### 6.2.1 再現性

試料として前記黒ガラスを使って安定性も含めた再現性を調べた. 30 分ごとに 10 回の繰り返し測定を行なった結果を図 10 に示す. 各測定値がすべての測定値の平均値の  $\pm 1\%$  以内に入っている.

### 6.2.2 光沢感との相関性

光沢感との相関性の評価には任意に選んだ多数の試料を用いるべきであるが, 光沢感の間隔尺度化がむずかし

表 4 光沢度測定器とゆず肌度測定器の性能

項 目	光沢度測定器	ゆず肌度測定器
再現性	$\pm 1\%$ 以内	$\pm 2\%$ 以内
相関係数*	0.97	0.98
測定時間	0.7 s	2 s
使用温度範囲	5~40°C	←
測定対象面	曲率半径 1 m 以上の塗装面	←
ゆず肌の影響	受けない	
寸 法	280 mm × 92 mm × 135 mm	300 mm × 98 mm × 180 mm
重 量	2.9 kg	3.1 kg

\* 光沢間隔あるいはゆず肌間隔との相関係数.

く前記の光沢標準試料を用いることにした. 結果は, 図 11 に示すとおりで, 直線性がよく, 測定値と光沢間隔との相関係数は, 試料を 3 点マグネットに固定するスタティック測定の場合(●印) 0.99 であった. ○印は自動車ボディの直接測定を模擬するために試料を壁に固定し, 検出ユニットをもって押し当て測定(ダイナミック測定)した場合であるが, その場合の相関係数は 0.97 であった. ダイナミック測定でも相関性がよく, 手振れの影響を受けないといえる. また, ゆず肌の悪い試料 16, 10 も直線によくのっており, ゆず肌の影響も受けない. 図 11 には比較のためにこれまで最も広く使用されている 60 度鏡面光沢度と光沢間隔の関係も示してあるが, 試作した測定器のほうが直線性, 感度とも非常に優れているといえる.

### 6.2.3 凸面の影響

凸面の影響を除くために, 検出ユニットが被測定面と正三角形を形成する 3 個のマグネットとで接触するようになっているが, その効果をつぎのようにして調べた. すなわち, A1 を蒸着した平面鏡と曲率半径 1 m の凸面鏡を用い, 両者の測定値を比較した結果, 平面鏡の場合 100, 凸面鏡の場合 101 という値を得た. これらは  $\pm 1\%$  の再現性の中に入っており, 曲率半径が 1 m 以上であれば凸面の影響を無視することができるといえる.

### 6.2.4 ま と め

光沢度測定器とゆず肌度測定器のおもな性能は表 4 に示すとおりで, これまでの測定器が抱えていた問題点をほとんどすべて解決することができた.

## 7. お わ り に

人間の感覚に基づいている塗装面の光沢とゆず肌の計量化について概説した. 自動車の上塗り塗装面の光沢とゆず肌は一応計量化させたが, それらの良し悪しの範囲

は広く、今後計量化の範囲を広げていく必要がある。また、塗装面品質を表わす感覚には光沢感やゆず肌感のほかにメタリック感や肉持ち感などがあるが、今後はこれらの感覚量の計測化も図っていく必要がある。

#### 文 献

- 1) 蓮沼 宏：光沢 (コロナ社, 1960).
- 2) 笠野公昭, 加藤 司：塗装技術, **3** (1964) 65.
- 3) 真田隆治, 大賀康弘：塗装技術, **7** (1968) 76.
- 4) J. S. Christie: J. Coating Technol., **51** (1979) 64.
- 5) 分田槌男, 磯谷日出男, 川上元郎, 平井敏夫：色彩研究, **18** (1971) 2.
- 6) 松田守弘, 鬼頭完爾：計測自動制御学会論文集, **17** (1981) 645.
- 7) J. Nishiwaki: 応用物理, **28** (1959) 267.
- 8) 相川光夫：化学技術誌 MOL, **19** (1981) 84.
- 9) W. E. Craker and S. P. Smart: J. Oil Colour Chem. Assoc., **61** (1978) 463.
- 10) M. Matsuta and T. Kubota: Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) 1145.
- 11) 松田守弘, 鬼頭完爾, 久保田毅：計測自動制御学会論文集, **18** (1982) 471.
- 12) 野呂影勇：官能検査入門 (日本規格協会, 1976).
- 13) レンズ性能研究委員会：写真レンズとレスポンス関数(カメラ工業技術研究組合, 1961).
- 14) 松田守弘, 鬼頭完爾：計測自動制御学会論文集, **19** (1983) 241.
- 15) M. Matsuta and K. Kito: Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) 133.
- 16) M. Matsuta, T. Kubota and K. Kito: ACTA IMEKO '82 (Publishing House of the Hungarian Academy of Science, Budapest, 1982) p. 437.