

377.5

K-11

2-26-1

学位論文

光沢度測定と光沢知覚に関する
研究



芹川 聖一

目 次

第 1 章 序 論	1
第 2 章 平面物体の光沢度測定法	9
2. 1 まえがき	9
2. 2 光沢とは	10
2. 3 従来の光沢度測定法	12
2. 3. 1 鏡面光沢度測定方法	13
2. 3. 2 写像性試験方法	15
2. 4 平面用光沢度の測定原理	16
2. 5 試作器による測定結果	24
2. 5. 1 心理的光沢度の測定概要	24
2. 5. 2 物理的光沢度と心理的光沢度の比較	25
2. 6 検討	28
2. 6. 1 入射角の変化による光沢度のばらつき	28
2. 6. 2 光沢度に影響を与える要因	29
2. 7 むすび	31
第 3 章 心理的光沢度の測定	32
3. 1 まえがき	32
3. 2 心理的光沢度の測定手順	32
3. 3 一対比較法と順位配列法の比較	36

3. 4	曲率半径と心理的光沢度の関係	38
3. 5	むすび	42
第4章	曲面物体の光沢度測定法	43
4. 1	まえがき	43
4. 2	従来の曲面物体の光沢度測定法	44
4. 3	曲面用光沢度の測定原理	46
4. 4	測定結果と検討	50
4. 4. 1	測定結果	50
4. 4. 2	光源の検討	52
4. 5	光沢測定の高精度高速化	56
4. 5. 1	高精度高速化の手段	56
4. 5. 2	測定結果と検討	59
4. 6	拡散反射光を含む物体への対策	62
4. 6. 1	拡散反射光を含む物体への適用方法	62
4. 6. 2	結果と検討	67
4. 7	むすび	69
第5章	彩色物体の光沢度測定法	71
5. 1	まえがき	71
5. 2	明度・彩度・色相の心理的光沢度への影響	71
5. 2. 1	試料	71
5. 2. 2	明度と心理的光沢度の関係	73
5. 2. 3	彩度と心理的光沢度の関係	76
5. 2. 4	色相と心理的光沢度の関係	78

5. 2. 5	色の光沢に及ぼす影響の説明	79
5. 3	彩色用光沢度の定義	80
5. 3. 1	表面状態の一樣な場合	80
5. 3. 2	表面状態の異なる場合	84
5. 4	むすび	89
第6章	光沢知覚機構の検討	90
6. 1	まえがき	90
6. 2	光沢知覚モデル	91
6. 3	光沢知覚シミュレーション結果	93
6. 3. 1	試料の反射光分布モデル	93
6. 3. 2	曲率半径の等しい場合の結果	95
6. 3. 3	曲率半径の異なる場合の結果	96
6. 4	モデルの検討	98
6. 5	シミュレーション結果の検討	101
6. 6	むすび	103
第7章	仮想光沢感の測定	105
7. 1	まえがき	105
7. 2	仮想光沢感の測定	105
7. 2. 1	測定手順	105
7. 2. 2	測定装置	107
7. 3	測定結果	109
7. 4	検討	111
7. 4. 1	試料の輝度と仮想光沢感の関係	111

7. 4. 2	仮想光沢感の最大発生条件	114
7. 4. 3	従来の光沢度と仮想光沢感の関係	116
7. 5	むすび	118
第8章	結 論	120
参考文献		127
謝 辞		137
付 録		138

第1章 序 論

現在、生産工程における自動化が進められているが、目視による計測や検査、選別などは自動化の困難な工程である。人間の視覚に頼っていた種々の検査をいかに機械設備を通して正確に判断するかが、目視検査装置に要求される機能と言える。現在のFA市場における目視検査の自動化の例として、部品の寸法・バリ検査、捺印・印刷・ラベル検査、ビンの容量のレベル検査、三次元形状検査⁽¹⁾⁽²⁾、製品の色差度合判別などが上げられ、様々な用途で実用化が進められている。このような目視検査の自動化の流れは、FA市場ばかりでなく産業の各方面に広がっている。農水産業においても、野菜、果物、魚などの選別自動化が試みられている。さらに、最近では、人間の感覚、感性を考慮に入れた製品の開発が強く求められるようになってきており、人間の知覚する感覚量が、品質を決定する要素の一つとなっている。塗装面、真珠、陶磁器などに関しては、物体の持つ光沢感が品質を決定する重要な要素である。このため、目視検査に代わって人間の感覚に一致する光沢自動測定装置の開発が望まれている。

工業製品に多く見られるプラスチックや塗装面の光沢測定にはJIS Z 8741による鏡面光沢度測定方法が広く使用されている。しかし、この方法によって得られる物理的光沢度は必ずしも人間の知覚する心理的光沢度と一致しない場合がある。そこで近年では、別の塗装面用の光沢度測定法も提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、これらの方法は平面にしか適用できないため、車のボディのような曲面には適用できず⁽⁵⁾、曲面を持つ製品の最終的検査には適さない。このような現状からプラスチックや塗装面に適する曲面用の光沢度測定法の開発が望まれている。また、真珠はわが国の誇る輸出商品の一つであるが、その生産額は1986年で約720億円にも達し、そのうち約9割は

輸出されている⁽⁶⁾。真珠の養殖を今後とも盛んにしていくためには、省力化のために真珠の分類の自動化が必要であり、その要望も強い。しかし、真珠の色や光沢は微妙であるため^{(7)~(10)}、その測定は容易ではない。このため、主として熟練した鑑定者の視感判定により、真珠の品質は判定されているが、熟練した鑑定者の養成や確保は徐々に困難になってきている。真珠の価格はその品質によって相当大きな開きがあるので、その分類は正確さが要求される。さらに、真珠の分類は時期的に集中し、1日当たり何万個という多数の真珠を迅速に分類しなければならない。これらの理由から、真珠の色や光沢、形状などをいずれかの物理的方法で測定し、真珠の分類を自動化することが強く望まれる。色や形状に関しては、最近の研究^{(11)~(16)}で分類の見通しが得られているが、光沢に関しては正確さと高速性の点で問題が残されており、真珠選別装置の開発が待たれる。一方、陶磁器に関しては、茶碗などの日常生活に使用される製品は工場で大量生産されている。比較的大きな工場では、焼き方の温度制御等の自動化も進んでおり⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、色や傷などの目視検査の一部は自動化が可能である。しかし、曲面の光沢測定が困難であり、さらに、色が異なると心理的光沢度が変化するが、これに一致する光沢度測定法がない。よって、最終的な品質の判定はやはり目視に頼らざるを得ない。このような現状から、陶磁器のような高光沢物体用の光沢度測定装置の開発が期待されている。

このように、目視検査に代わる光沢度測定法が開発が望まれているが、光沢知覚機構に関する研究も同様に重要である。現在、人間の感性を重視した製品の開発が求められるようになり⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、「人間生活工学」の役割が非常に重要になってきている。この分野では、感覚量計測は重要な領域であるが、未だに不明な点が多い。光沢知覚に関しても未解明な部分が多く残されており、その知覚機構もほとんど解明されていない。光沢知覚機構を研究するこ

とは、視覚のしくみを解明するために役立ち、最終的には人間の感性を考慮した製品の開発に役立つと思われる。

このような光沢の研究は、物理光学の立場から、“つや”の基となる反射特性の理論的解析から始まった⁽²¹⁾。国内では、1950年代に、蓮沼らによって反射面の理論的解析および実験が盛ん行われた^{(22)~(32)}。しかし、光沢をただ一つの物理量で決めることはできず、その後、工業製品の光沢を測るという点から、心理学的な要素を離れて、物体表面の物理的な性質に準拠した量を光沢度として定義し、これを測定しようとする方法が種々提案された。これらの方法は次の2種類に大別できる：(1)正反射光沢：正反射方向での反射光の強さを測る方法、(2)鮮明度の比較：試料面の像の鮮明度を測る方法。この中で、(1)の正反射光沢を測る方法が最も多く使用されており、米国では、ASTM(米国工業規格)で規定されている⁽³³⁾。同様の測定法が、国内ではJIS(日本工業規格)によって定められている⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾。また、(1)と類似した方法として正反射光と拡散反射光の強さの比を測る方法(対比光沢度測定法)もある。この方法は、歴史的に最も古くから用いられた方法であり、偏光角において全反射光束と表面反射光束の比を求めるもの、正反射方向の輝度とある特定方向の輝度の比で表すもの、正反射方向での受光器の開き角を変えた場合の反射光束の比で表すものが報告されている⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。方法(2)の鮮明度の比較は、試料に映った図形の鮮明さから光沢度を求めるものであり、視感判定による方法が一般的であるが、光電的に測定する方法も多く発表されている。古くは、鮮明度を利用した光沢計⁽³⁸⁾がある。しかし、これらの方法では、単にある物理量を光沢度として定義しているのであるから、心理的光沢度と一致しない場合が多い⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。そこで、近年では、塗装面の光沢測定⁽⁴⁾⁽⁵⁾、金属表面の鮮明度を測る方法^{(41)~(43)}などが報告されており、塗装面や研磨された金属表面等の光沢測定に利用されている。これらの方法は、特

定の高光沢の平面物体の光沢測定には有用であるが，中低光沢の平面物体には適用できない。また，曲面には適用できない。そこで，1970年代に対比光沢度測定法を改良した曲面用の光沢度測定法も開発されたが⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾，曲率半径の異なる物体間の光沢測定には適さない。一方，物体の色も光沢に影響を与えるので，色と光沢の関係についても従来より調べられてきた^{(46)~(49)}。その結果，定性的には両者の関係もわかってきた。しかし，定量的関係は未だに明らかにされていない。このため，色を考慮した光沢度測定方法は殆ど見当たらない。また，光沢知覚機構に関する研究は少なく，近年，渡辺らによる生体工学モデルが報告されているのみである⁽⁵⁰⁾。しかし，このモデルでは，曲率半径によって心理的光沢度が増加するという光沢に特有の現象は説明できない。

これらの光沢度測定法と光沢知覚モデルに関する問題点をまとめると以下のようなことになる。(a)低光沢から高光沢までの広範囲にわたって心理的光沢度に一致する平面物体用の光沢度測定法がない。(b)曲面物体に適用できる光沢度測定法がない。(c)色の異なる物体に適用できる光沢度測定法がない。(d)人間の光沢知覚現象が不明である。本論文では，これらの問題点を解決するための新しい光沢度測定法および光沢知覚機構に関して論じる。本質的には人間の光沢知覚機構を解明すれば，光沢度測定法にも適用できるはずであるが，光沢知覚機構の解明には，生理光学，視覚心理，認知工学などの領域の研究を今後とも進める必要があり，現時点ですぐにこれを適用することは困難である。しかし，光沢測定のニーズを満足させることは工業的に有用性があるので，まず(a)~(c)を解決することを目的とした新しい光沢度測定法を提案し，次に，(d)を解明するための新しい光沢知覚モデルについて検討する。光沢に影響を及ぼす要因はいくつもあり，(a)~(c)のすべての条件を同時に満たすような光沢度測定法を開発することは難しい。そこで，今回は測定対象

を上述の(a)~(c)のように平面，曲面，彩色物体と限定することによって，反射光強度と心理的光沢度の関係，曲率半径と心理的光沢度の関係，色と光沢の関係を明らかにし，それらの結果を基に新しい光沢度測定法を提案する。平面，曲面，彩色物体の光沢度測定法に関しては，それぞれ第2，4，5章で述べ，その中で新しい方法を提案している。本論文で提案する光沢度測定法を用いることにより，紙のような低光沢の物体からプラスチックのような高光沢物体までの広範囲にわたって光沢測定が可能となり，また，真珠や陶磁器のような曲面の光沢測定も可能となる。さらに，色と光沢の定量的関係も明らかになり，色の異なる物体の光沢の測定の見通しを得る。なお，心理的光沢度はすべての章に関係するので，心理的光沢度の測定に関しては第3章でまとめて述べる。また，第3章では心理的光沢度と曲率半径の関係も定量的に明らかにする。光沢知覚に関しては，第6章と第7章で述べる。これらの章では，網膜をモデル化することによって，曲率半径によって心理的光沢度が変化するという現象を説明するとともに，仮想光沢感の発生に関する新たな知見を示す。これらの結果は視覚のしくみを解明するために役立つと思われる。以下に各章の概要について述べる。

第2章では，平面の光沢度測定法について述べる。従来提案されている平面物体の光沢度測定法は広範囲には適用できず，また，心理的光沢度と比例関係にないので，これらを解決するための新しい方法を提案する。反射光強度は光沢を決定する重要な要因であるが，心理的光沢度は反射光強度そのものには比例するのではなく，人間の知覚する心理的な明るさに比例することを明らかにする。このことに基づき，新しい物理的光沢度 G_d を提案する。次に，光源の入射角の変化による測定データの変動を低減させるために，反射光分布をCook-Torranceモデルに当てはめることによって表面の滑らかさ係

数 m' を抽出し、それより光沢度 G_d を求める方法も提案する。紙やプラスチックなどの低光沢から高光沢までの種々の試料に対して、物理的光沢度 G_d は心理的光沢度 G_p とよく一致する。また、入射角の変動による光沢度 G_d の変動率は、従来の代表的な光沢度である鏡面光沢度 G_s の変動率の約 $1/3$ 以下である。このように今回提案する方法は、低光沢から高光沢までの広範囲に渡って平面物体の光沢度測定に有効である。

第3章では、心理的光沢度の測定手順について述べる。すべての章が心理的光沢度と関連を持つが、各章ごとに心理的光沢度の説明を行うと繁雑になるので、心理的光沢度に関してはこの章でまとめて説明する。また、心理実験より曲率半径と心理的光沢度に関して新たに以下のような結果を得ている。(1) 心理的光沢度は曲率半径によって異なり、ある曲率半径 R_{max} の時に最大となる。(2) 平面時において低光沢の試料ほど、 R_{max} が小さい。(3) 曲率半径によって心理的光沢度は異なるが、平面状態で光沢のある試料のほうが心理的光沢度の最大値も高い。さらに、この原因を像の鮮明度と解像度を用いて説明する。ただし、視覚モデルによる説明は第6章で述べる。

第4章では、曲面に適する光沢度測定法について論じる。ここでは、CCD センサを用いて反射光分布曲線より映像の鮮明さ、すなわち、物体表面の映像のぼけの度合を求める方法を提案する。この方法をここでは、「ぼけ度合光沢度」と呼ぶ。ぼけ度合光沢度は、曲率半径が一定の物体は勿論、曲率半径が異なる物体の場合も、心理的光沢度とかなりよい相関を示す。これによって、ぼけ度合光沢度は、塗装曲面、浜あげ真珠のような曲面物体の光沢度測定に役立つと思われる。

次に、ぼけ度合い光沢度測定装置を改良し、PSDを用いることにより、高

速高精度に測定可能な方法を提案する。この方法は高級商品真珠のように光沢差の小さい高光沢物体に適した方法である。

さらに、測定範囲を拡張し、低光沢で拡散反射成分を多く含む物体でも測定が可能なように方法を改善する。この方法で得られる物理的光沢度は、低光沢から高光沢までの広範囲の曲面物体の光沢測定に有効である。

以上より、本章で提案する方法は曲面物体の光沢測定に有効である。

第5章では、色と光沢の関係について述べる。表面状態が全く等しくても色が異なると心理的光沢度は変化する。本研究では、光沢感に及ぼす色の影響を明らかにするための基礎実験を行なっている。その結果、光沢と明度、彩度、色相の関係が明らかになるので、これらを用いて色と光沢の関係式を導く。その式を表面状態が等しく色のみが異なる種々の試料に適用した結果、心理的光沢度とほぼ一致する。さらに、この式を用いて第2章で定義した光沢度 G_p を補正し、色の影響を考慮した物理的光沢度 G_{pc} を提案する。陶磁器やプラスチック製品などのように表面が非常に滑らかな物体は色の違いによる光沢差が品質に影響する。このような物体に対して本方法は有効である。

第6章では、生体工学モデルを用いた光沢知覚機構を検討する。第3章で示されるように、心理的光沢度は曲率半径によって異なる。この現象に一致する光沢度測定法は第4章で提案しているが、なぜ心理的にこのような現象が生じるのか未だに明らかでない。そこで、網膜に類似した処理を用いた光沢知覚モデルを提案する。このモデルは、眼の順応機能を模倣して反射光輝度を内部信号に変換し、さらに神経節細胞の受容野の感度分布を近似したDOG関数で畳み込み積分することによって出力波形を得ている。本モデルによって得られる出力のピーク値 H_{max} は網膜からの出力値と類似しているが、

$H_{m,x}$ は以下のように心理的光沢度と非常に類似した特性がある。(1)曲率半径が等しい場合、 $H_{m,x}$ と心理的光沢度は単調増加の関係にある。(2)同一物体に対しては、曲率半径が変化すると $H_{m,x}$ は変化し、ある曲率半径のときに $H_{m,x}$ は最大となる。(3)低光沢の物体ほど $H_{m,x}$ が最大となる時の曲率半径は小さい。このような現象は心理的光沢度と非常に類似しており、本モデルは光沢知覚解明の基礎資料として重要である。

第7章では仮想光沢感について論じる。紙に描いた白と黒の図形それぞれは全く光沢感がないにもかかわらず、ハーフミラーを通してそれらを重ね合わせると、光沢感を感じることもある。このことは従来の鏡面反射光や鮮明度を用いた光沢度測定法では説明できない。ここでは、照明条件を様々変化させ、心理的光沢度と輝度の関係を定量的に調べる。その結果、重ね合わせる2つの図形の平均輝度が等しいときに心理的光沢度が最大となること、試料の平均輝度が高い場合と低い場合とでは、平均輝度が高い場合の方が心理的光沢度が高くなる傾向にあることを新たに発見する。次に、この現象を、光沢感を”物体の知覚を妨げる感覚量”と考えることによって説明する。さらに、この考え方で、従来の光沢度測定方法も定性的に説明できることを示す。これらの成果は、光沢のある仮想空間を作り出したり、光沢知覚機構を研究する上で役立つと思われる。

第8章では本研究のまとめを行い、本研究で提案した新しい光沢度測定法、および光沢知覚機構について述べている。また、今後の展望についても述べる。

第2章 平面物体の光沢度測定法

2.1 まえがき

光沢は色と並んで物体表面の光学的性質を決める重要な要素である。光沢の判断の基準はあくまでも人間にあるが、光沢度測定装置によって測定された光沢度がかならずしも人間の知覚する心理的な光沢感(これを量的に表したものを心理的光沢度と呼ぶ)と一致するとは限らない。平面物体については、種々の光沢度測定法がある。例えば、古くは蓮沼の鮮明度を利用した光沢計⁽³⁰⁾、**JIS Z 8741**の鏡面光沢度、対比光沢度、鮮明度光沢度の各測定法⁽³⁴⁾があり、最近では、**JIS H 8686**のAl及びAl合金の陽極性酸化皮膜の写像性試験法⁽⁴¹⁾、自動車塗装面を対象にした光沢度測定法⁽⁴⁾⁽⁵⁾、航空機外板用金属研磨面の美観計測装置による方法⁽⁴²⁾などがある。これらの方法は2つに大別される。一つは、物体表面に映る像の鮮明さを用いる方法である^{(30)(41)~(43)}。この方法によって得られる光沢度は、心理的光沢度と比較的一致するが、測定対象が高光沢物体に限定される。また、紙などのように表面に像の映らない場合はこの方法は適用できない。もうひとつの方法として、物体からの反射光強度を測定する方法がある^{(27)(33)~(37)}。この方法によれば、低光沢から高光沢までの広範囲にわたって物体の光沢度を測定することが可能である。平面物体の光沢度測定法としては、この方法が最も一般的であり、**JIS Z 8741**に測定手順が細部規定されている⁽³⁴⁾。しかしながら、この方法によって得られる光沢度は、必ずしも人間の知覚する心理的光沢度には比例しない。この方法では、光沢度は物体表面からの反射光強度に比例するものとして定義されているが、実際には心理的光沢度は反射光強度には比例しない。この

ように、現状では、低光沢から高光沢までの広範囲に渡って、心理的光沢度に一致する光沢度測定法は見当たらない。

そこで、上述の問題点を解決するために、平面物体用の新しい光沢度測定法を提案する。ここでは、広範囲にわたって測定可能とするために、光沢度を表す量として反射光強度を用いている。本章では、心理的光沢度が人間の心理的に知覚する明るさに比例することを明らかにする⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾。次に、この結果をもとに新たに光沢度を定義する。従来の方法では、試料によって光源の入射角を変える必要があるが、ここで提案する測定方法では、光源の入射角が異なっても得られる光沢度のばらつきが小さいという利点がある⁽⁵³⁾。

2. 2 光沢とは

光沢とは何であろうか？ JIS⁽⁵⁴⁾によれば、光沢とは、“反射光分布によって生ずる物体表面知覚の属性”のことであり、鏡面光沢⁽³⁴⁾とは、“鏡面反射光の強さによって定められる視知覚の属性”と規定されている。これらの表現は抽象的である。実際の光沢度測定法では、光沢に関連する物理量もしくはそれに準拠した値を光沢度と定義している。例えば、鏡面光沢度は、正反射方向へ反射する光の強さに比例した値であり、対比光沢度は正反射方向の輝度と別の反射方向の輝度の比として表される。しかしながら、これらはあくまでも定義であり、光沢の一面を表しているに過ぎず、実際に我々が知覚する光沢感と物理量の間には以下に示すように若干の隔りがある。

(i) 反射光が強い物体ほど光沢感があるが、心理的光沢度と反射光強度は比例関係ではない。また、光源の光強度を高くすれば物体からの反射光は強くなるにもかかわらず、光沢感はあまり変化しない。

(ii) 表面粗さと光沢は相関が高いが、表面粗さが全く等しくても、物

体の曲率が変化すれば光沢感は変わる。同様に、表面粗さが等しくても色が異なると光沢感は変化する。

(iii) 表面に像の鮮明に映る物体ほど光沢感があるが、紙のように像が全く映らない物体であっても曲率半径や光源の位置を変えれば光沢感が生じる。

このように、現在提案されている物理的光沢度の定義は、ある面で光沢を表す量であるが、その物理量そのものが実際に人間の知覚している光沢感を定量的に表していることにはならない。光沢には、それぞれの要因が複雑の影響している。

光沢の基準はあくまでも人間の心理的光沢度にあるから、光沢度を定義しても、心理的光沢度とよい相関が得られなければ問題である。現在までに心理実験によって得られた光沢感の共通事項をまとめると以下の2つのように表される。ここでは、これらを総称して光沢と呼ぶ。

- (1) 人間の心理的に感じる物体表面の滑らかさ
- (2) 物体知覚を妨げる心理的感覚量の大きさ

(1)は光沢感の特徴をよく表している。光沢が一般に”つや”と呼ばれることからわかるように、物体のつややかさ、つまり滑らかさを意味する。表面が滑らかであれば物体からの反射光は強くなる。しかし、光源の明るさが変化しても心理的に感じる滑らかさはあまり変化しない。また、表面粗さが等しくても、曲率半径は異なれば心理的に知覚する滑らかさは変化し、ある曲率の時に最大となる。さらに、物体色によっても心理的に知覚する滑らかさは異なる。別の観点から、光沢感を(2)とみなすこともできる。我々が光沢のある物体を見ると、物体の表面に周囲や光源の像が映る。表面に映る像つまり正反射光が、物体本来の色や形状の知覚を妨げる。この知覚を妨げる感覚が光沢感を生じさせる⁽³⁷⁾。低光沢物体であれば、表面から反射する正反射

光強度が小さく、物体の知覚を妨げる感覚が小さい。また、光源の明るさが変化しても順応状態も変化するので、同一物体であれば物体の知覚を妨げる感覚はあまり変化しない。さらに、この考え方で、＜第7章＞で述べる仮想光沢感も説明できる。

よって、本論文では、上述の(1)、(2)を人間の知覚する光沢と考え、この量に一致する光沢度測定法の開発およびこの知覚現象の解明を本論文の目的とする。

2. 3 従来の光沢度測定法

光沢度測定法は従来より多く研究され、金属、陶磁器、紙類などの光沢度測定法は、国内では日本工業規格JIS Z 8741によって規定されている。JIS Z 8741による光沢の呼び名に従えば、心理的なものを「光沢感」と言い、心理的な判定法で量的に表したものを「心理的光沢度」と言う。これに対し、物理装置で測定して量的に表したものを「物理的光沢度」と言う。なお、あらゆる物体に適用可能な光沢度は存在しないので、JIS Z 8741の4項(1)の中に、「個々の表面について、いずれの光沢度測定法を利用するかは、物体表面の特徴を考慮して選択する」と細部規定されている。本論文でも、これに従い、「光沢感」、「心理的光沢度」、「物理的光沢度」を適時使い分けて使用する。

さて、平面物体の光沢度測定法には種々の方法がある。たとえば、古くは蓮沼の鮮明度を利用した光沢計、JIS Z 8741の鏡面光沢度、対比光沢度、鮮明度光沢度の各方法があり、最近ではJIS H 8686のアルミニウム及びアルミニウム合金の陽極性酸化皮膜の写像性試験法、自動車塗装面を対象にした光沢度測定法、航空機外板用金属研磨面の美観計測装置による方法などがある。

表2.1 既発表の主な光沢度測定法

分類	名称	備考	文献
正反射光量を重視した方法	鏡面光沢度 (JIS Z 8741)	平面对象	(34)
	対比光沢度 (同上)	同上	(34)
	n点拡散光沢度測定法	曲面对象	(45)
映像の鮮明さを重視した方法	鮮明度を利用した光沢計	平面对象	(30)
	写像性試験方法 (JIS H 8686)	Al, Al合金	(41)
	塗膜の光沢度測定法	自動車外板用	(5)
	表面美観計測装置	航空機外板用	(42)
	像の鮮明度計測装置	原理は文献(41)に近い	(43)

これらの光沢度の種類と適用例を表2.1にまとめた。表2.1より、物体表面の正反射光量を重視した方法の代表例として、**JIS Z 8741**の鏡面光沢度測定方法を選び、また、物体表面の映像の鮮明さを重視した方法として、**JIS H 8686**の写像性試験方法の選び、以下の理解を助けるために、それらの原理を簡単に述べる。

2.3.1 鏡面光沢度測定方法⁽³⁴⁾

図2.1は鏡面光沢度測定装置の構成を示す。鏡面光沢度は、試料面Eに規定された入射角 α の平行光を入射し、正反射方向への反射光束を受光器Hで受光する。光源Aの開口CはレンズDの焦点位置にあるものとし、試料の位置に鏡面を置いたとき、Cの像が受光器Hの開口Gの中央に鮮明な像をつくるものとする。このとき、鏡面光沢度 G_s は反射光束 Φ_s に比例するものとして、以下のように定義される。

$$G_s = (G_{0s} / \Phi_{0s}) \cdot \Phi_s \quad (2.1)$$

ここで、標準面の反射光束を Φ_{0s} 、標準面の光沢度を G_{0s} を表す。標準面とは、

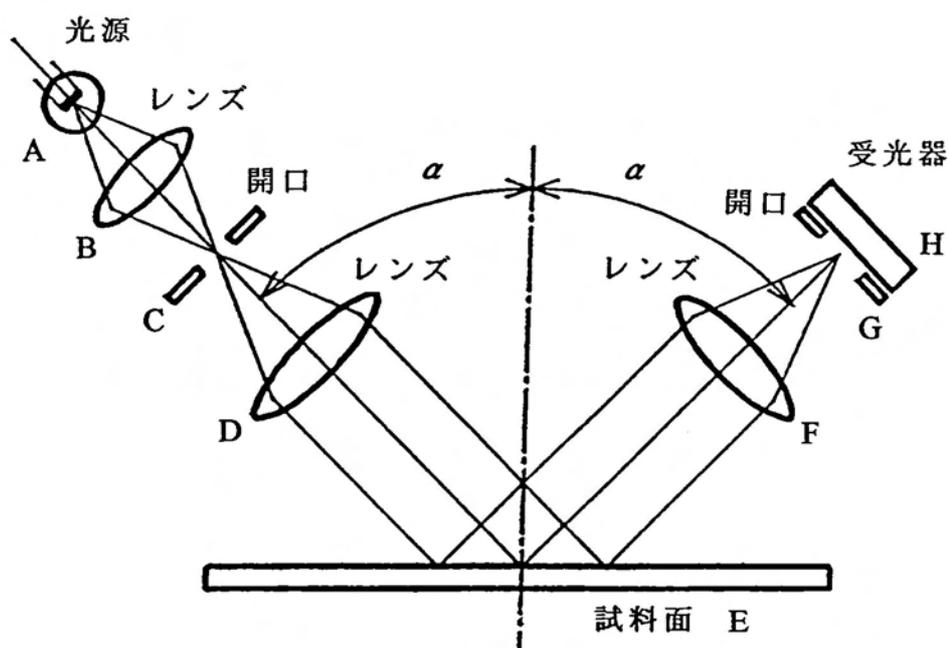


図2.1 鏡面光沢度測定装置の構成

表面が滑らかで可視波長内の屈折率が1.567のガラスのことである。通常、標準面の光沢度 G_{0s} を100とする。

実際に種々の入射角における心理的光沢度 G_{ph} と鏡面光沢度 G_s の関係を調べるために、JIS Z 8741に基づく装置を試作し、試料の光沢度を測定した結果を図2.2に示す。ただしこの時、光源Aとして、標準光源Cと類似した分光放射特性を持つ演色光源（岩崎製，HYLUX4500K）を用いた。また、受光器として、被視感度曲線と類似した分光感度特性を持つフォトダイオード（モリリカ製，MBC-3026CF）を用いた。この装置は、60°鏡面光沢度測定装置（ミノルタ製，GM-060）を用いて校正されている。図2.2に使用されている試料は、白色の紙およびプラスチックである。この図における横軸の心理的光沢度 G_{ph} については、第3章で詳しく述べる。この図より、鏡面光沢度 G_s と心理的光沢度 G_{ph} は単調増加の関係にはあるが両者は比例関係にないことがわ

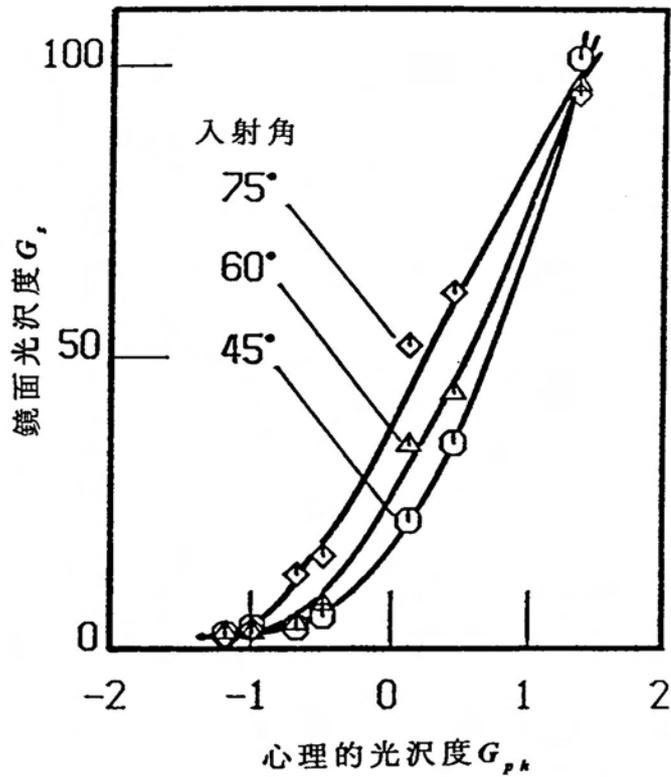


図2.2 鏡面光沢度 G_s と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係

かる。また、同一物体であっても、光源の入射角によって鏡面光沢度 G_s は大きく異なる。

2. 3. 2 写像性試験方法⁽⁴¹⁾

装置の構成を図2.3に示す。スリットBを通して、試料Dに45°の角度で光を当て、その鏡面反射光を移動する光学くしFを通して検知する。光学くし上にスリット像が結像するようにB、FおよびレンズC、Eは調整されている。この時測定された受光波形・図2.3右上から、次式によって鮮明度 C_0 は求まる。

$$C_0 = \frac{E - e}{E + e} \times 100 \quad (2.2)$$

ここで、 E :最高波高、 e :最低波高である。

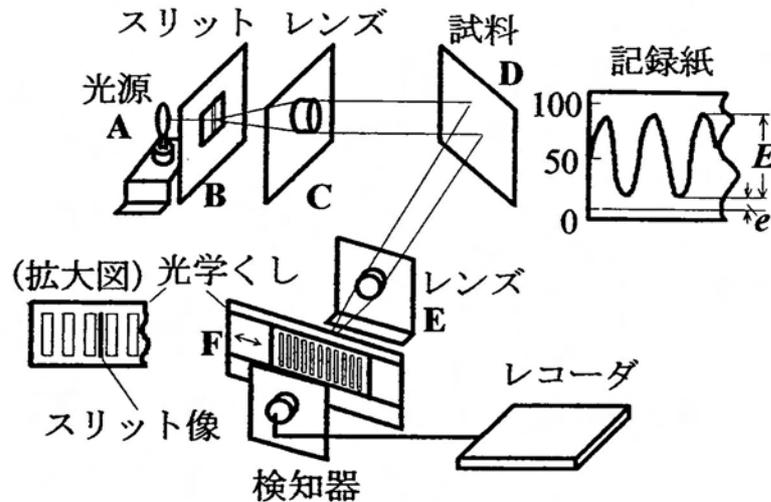


図2.3 写像性試験装置の構成図

低光沢の試料ほどスリット像がぼける。そこでこの方法では、一定幅のすき間を通る光量を測定することによって、散乱の度合つまり鮮明度を測ろうとするものである。スリットBの幅と光学くしFの幅によって検知される光量は異なるので、スリットBの幅は $0.2\text{mm} \pm 0.02\text{mm}$ 、光学くしFの明暗部の比は1:1、その幅は0.5mm、1.0mm、2.0mmの3種類と規定されている。また、光学くしFの移動速度は $10\text{mm}/\text{min}$ 前後でなければならない（その他の細部規定は文献(41)を参照）。しかし、この方法は表面に像が映るような光沢物体を対象としているため、紙のように低光沢の物体の光沢測定には適さない。

このように現状では、低光沢から高光沢までの広範囲に及んで、心理的光沢度と一致する光沢度測定法は存在しない。今回は、この点を改善する新たな光沢度測定方法を提案する。

2. 4 平面用光沢度の測定原理

光沢は物体からの反射光の強さ、色、形状などによって変化する。これらの要因と光沢の関係を調べるためには、調べようとする要因以外の条件はすべて一定にする必要がある。そのためには、測定対象を平面、曲面、彩色物

体と限定した方が都合がよい。本章は平面用の光沢度測定法の開発を目的としているので、試料を同色の平面に限定する。これによって、形状や物体色の影響を考慮する必要なくなり、測定法の開発が容易になる。（形状や物体色と光沢の関係は第3章以降に述べる。）

光沢は物体表面からの光の反射の性質に関係している。反射の形式は大別して正反射と拡散反射に別れる。正反射とは、物体表面での通常の正反射の法則に従う反射である。正反射光強度は、面の光学定数（透明体であれば屈折率、金属であればそのほかに吸収率）と入射角によって決まる。拡散反射は表面より試料内部に入射した光が、多数回の反射、屈折、吸収を繰り返し表面から出てくる光のことである。出てくる光の角度はほとんど指向性をもたず、ほぼ完全拡散になる。この2つの反射は光沢に大きく影響を与える。具体的に光沢度を表す要因として次のような量が考えられる⁽³⁷⁾。

- (I) 正反射光の強さ
- (II) 正反射光と拡散反射光との比
- (III) 拡散反射光の少なさ
- (IV) 表面に映る像の鮮明さ

この中で、(I)が光沢に影響を及ぼす主要因であり、また、(I)と(IV)は非常に相関が高い。つまり、正反射光強度の大きい物体ほど表面に映る像も鮮明である。このため、光沢測定には、正反射光強度と像の鮮明度の何れかを用いる場合が多い。また、拡散反射光も光沢度を表す要因である（(II)、(III)）。例えば、色の異なる種々の紙の表面を透明フィルムで覆った場合、表面から反射する正反射光強度はどの物体でも全く等しい。それにもかかわらず、光沢感は色によって変化する。これは色が異なると拡散反射光強度が変化するためである。したがって、表面状態が等しく色の異なる物体の光沢測定には(III)を、表面状態も色も異なる物体の光沢測定には(II)を用いるこ

とが適当と考えられるが，単純に心理的光沢度を正反射光と拡散反射光の比として表すことはできない。この章では，同色の平面物体を対象としている。同色物体であれば物体色を表す拡散反射成分はどの試料でもほぼ等しい。よって，光沢を表す要因として，正反射光強度または像の鮮明さを表す量を用いることが適当と考えられる。しかし，光沢度を表す要因として，像の鮮明さを用いた場合は低光沢物体には適応できないので，ここでは正反射光強度を用いる。

Stevensによれば，物体の反射光強度 L_{max} （入力刺激）と人間の知覚する明るさ B （感覚量）との間には以下の関係が成立する⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾。

$$B = K_1(L_{max} - L_0)^\beta \quad (2.3)$$

ここで， K_1 ， L_0 ， β は定数である。この関係式は，明るさのみならず他の感覚量（例えば，うるささ，暖かさ，甘み，痛み）に対しても成立することが実験的に知られている。光沢感も人間の知覚する感覚量であるので，入力刺激に対し，(2.3)式と同様の関係が成立することが推察される。そこで，人間の知覚する心理的光沢度は，視覚への入力刺激である反射光強度 L_{max} に対してべき乗則となると仮定し，以下のように物理的光沢度 G_d を定義する⁽⁵¹⁾⁽⁵³⁾。

$$G_d = K(L_{max} - L_0)^\beta \quad (2.4)$$

ここで， K ， L_0 ， β は定数である。この式の妥当性は次節で述べる。本論文では，(2.4)式に基づく光沢度測定装置を実用的な装置とするために，さらに以下のように工夫した。

物体の反射光強度分布を測定し，その分布を反射光強度分布モデルに当てはめることによって，一旦試料の表面の滑らかさを表す量 m' を抽出する。次に， m' を用いて入射角 60° における反射光強度 L_{max} を推定し，それを(2.4)式に代入することによって光沢度 G_d を得ている。反射光強度分布モデルにはCook-Torranceモデルを用いた⁽⁵⁷⁾。このモデルは，コンピュータグラフィ

クス等によく用いられる反射光強度分布^{(57)~(64)}の代表的モデルである。このモデルの概要は以下の通りである。

図2.4にCook-Torranceモデルによる反射光強度分布を示す。この図において、 v はフォトセンサの方向を示す単位ベクトル、 n は試料の標準面の単位ベクトル、 l は入射角方向の単位ベクトル、 h は v と l の2等分角方向の単位ベクトルを表す。図中の v 方向の反射率 R は以下の式で表される。

$$R = s \cdot R_s + d \cdot R_d, \quad \text{ここで } s + d = 1 \quad (2.5)$$

ここで、 s は正反射率の係数、 d は拡散反射率の係数、 R_s は正反射率、 R_d は拡散反射率を表す。ただし、モデルでは拡散反射を完全拡散反射とみなし、 $R_d = 1$ とした。正反射率は次のようになる。

$$R_s = \frac{P \cdot D \cdot T}{\pi (n \cdot l) (n \cdot v)} \quad (2.6)$$

ここで、 P は表面が完全に滑らかな場合のその試料の反射率、 T は表面の幾何学的減衰係数、 D は表面の傾斜の分布関数⁽⁶⁵⁾ (Beckmann function) を表し、それぞれ以下の式で表される。

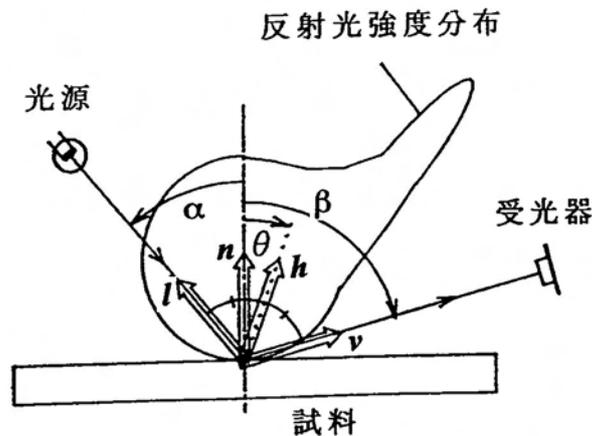


図2.4 Cook-Torranceモデルによる反射光強度分布

$$P = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left\{ 1 + \frac{[c(g+c)-1]^2}{[c(g-c)+1]^2} \right\} \quad (2.7)$$

ここで、 $c=(v \cdot h)$ 、 $g=\sqrt{f^2+c^2}-1$ であり、 f は試料の屈折率を表す。

$$T = \min \left\{ 1, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot v)}{(v \cdot h)}, \frac{2(n \cdot h)(n \cdot l)}{(v \cdot h)} \right\} \quad (2.8)$$

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \theta} \cdot \exp \left\{ -\frac{\tan^2 \theta}{m^2} \right\} \quad (2.9)$$

ここで、 θ はベクトル n と h のなす角である。物体の表面は様々な傾斜の微小面より構成される。(2.9)式の m は面の傾斜の標準偏差を表し、表面の粗さを表す要因である。つまり、 m が小さいければ物体表面からの反射光強度分布は正反射方向にピークを持つ急峻な波形となる。一方、 m が大きい場合、反射光強度分布は緩やかになる。ここで、表面粗さを表すの係数 m の逆数を m' とすると、 m' は表面の滑らかさを表す係数となる。

実験では、反射光強度分布を上述の(2.5)式に当てはめることによって、未知定数である(2.5)式の s と d 、および(2.9)式の m が得られる。(2.5)式へのマッチングには、非線形最小二乗法^{(66)~(70)}の代表的な方法である準ニュートン法⁽⁷¹⁾を用いた。実測された反射光強度分布とマッチングによって得られた(2.5)式の反射モデルによる分布を図2.5に示す。図2.5(a)(c)が測定データ、図2.5(b)(d)がマッチングによるモデルの分布を表す。これらの図からわかるように、実測による反射光強度分布とモデルによる反射光強度分布はよく一致している。このモデル中の係数 m' ($=1/m$)は光沢を表す最も重要な要因である(その理由は<2.5.2節>で述べる)。

今、光源の入射角 60° における物体からの反射光強度分布を測定し、その分布の最大輝度を L_{max} とし、 L_{max} と係数 m' の関係を調べると、図2.6のようになる。横軸が係数 m' 、縦軸が L_{max} を表す。この図からわかるように、 m' は

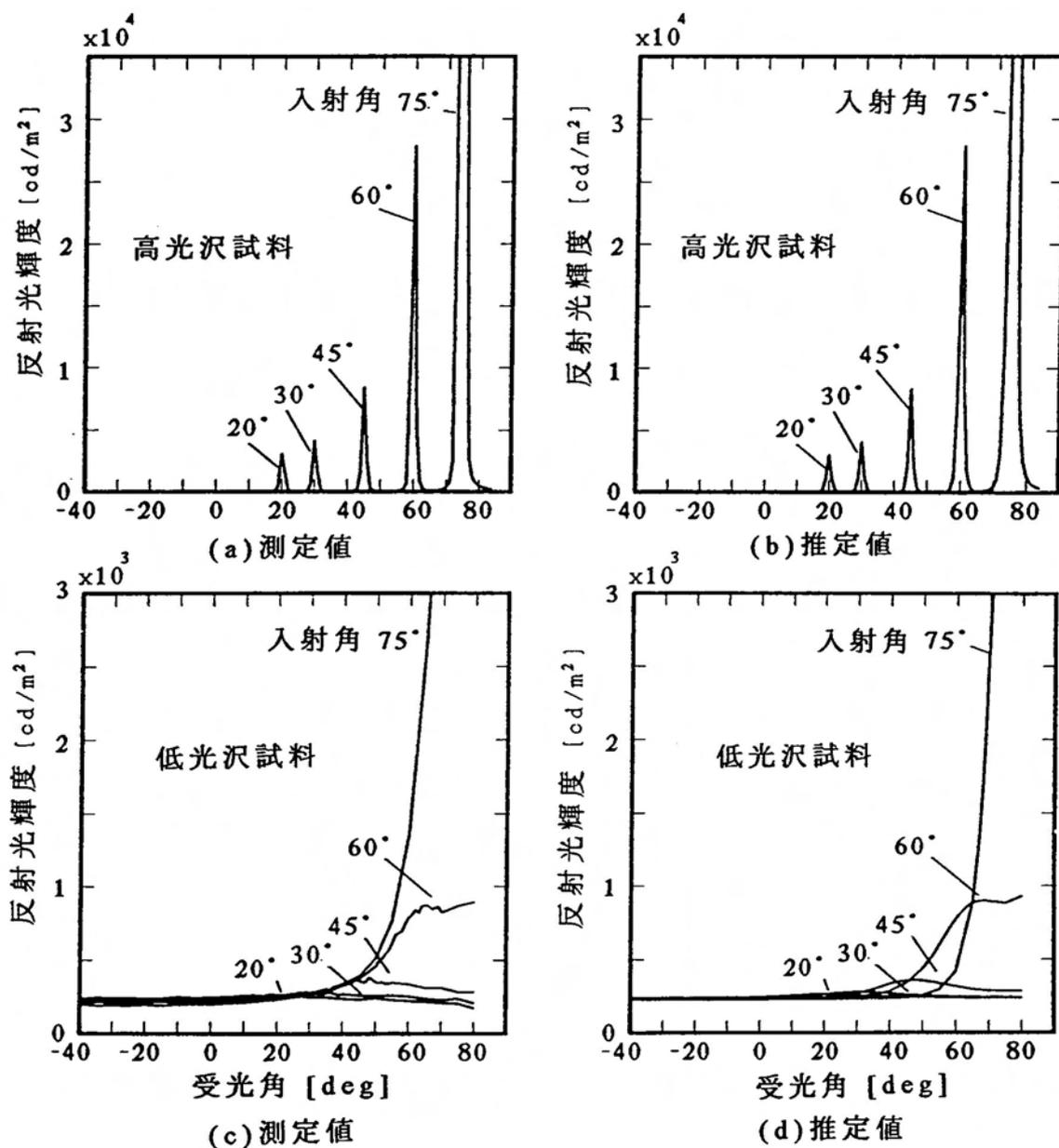


図2.5 様々な入射角における反射光強度分布, (a) 高光沢試料の反射光強度分布の実測値, (b) (2.5)式によって推定された高光沢試料の反射光強度分布, (c)低光沢試料の反射光強度分布の実測値, (d) (2.5)式によって推定された低光沢試料の反射光強度分布

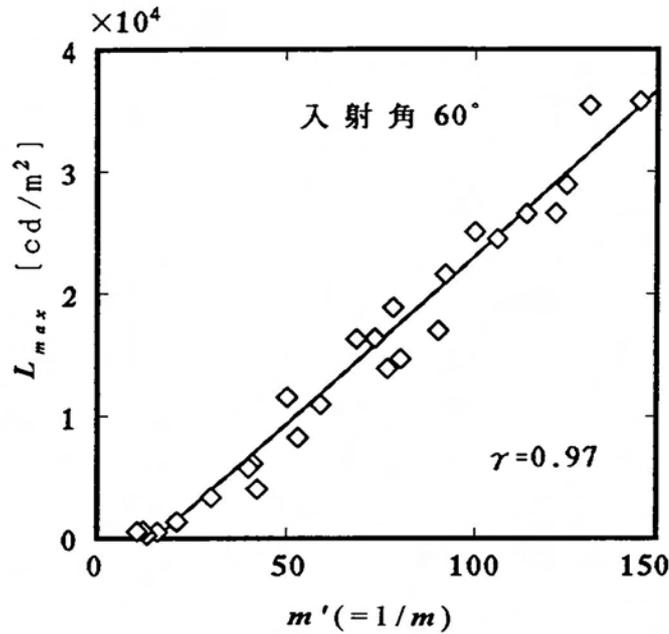


図2.6 正反射方向の反射輝度 L_{max} と表面の滑らかさ係数 m' の関係

L_{max} と強い相関がある（両者の相関係数は0.97である）。そこで、入射角 60° における m' と L_{max} の関係を以下の式で表す。

$$L_{max} = a \cdot m' + b, \tag{2.10}$$

ここで、 a 、 b は定数で、それぞれ 2.72×10^2 、 4.19×10^3 である。

よって、以下の手順により物理的光沢度 G_d を抽出することができる。

- (1). 物体の反射光強度分布を測定する。
- (2). 反射光強度分布を(2.5)式の当てはめることにより、表面の滑らかさを係数 m' を抽出する。
- (3). m' を(2.10)式に代入することによって L_{max} を求める。
- (4). L_{max} を(2.4)式へ代入することによって G_d を得る。

本質的に m' は物体の表面状態を表す要因であり、同一物体であれば光源の入射角に関係なく一定となる。したがって、 m' を用いて光沢度を定義するこ

とによって、光源の入射角が変化しても同一物体であれば同一の光沢度を得ることができる。また、この方法では、光源の明るさが変化しても反射光強度分布の波形は変わらないので、抽出される m' は光源の明るさの変動に影響されない。よって、経年変化等によって光源の明るさが低下しても、 m' を用いて得られる光沢度 G_p は変動しない。

図2.7に実際に試作した測定装置の構成を示す。光源Aには小型で容易に平行光を照射できるHe-Neレーザ（オーディオテクニカ製，1mW，632.8nm）を用いた。入射光の直径 ϕ は約1mmである。入射角 α の方向から試料Bに光が照射される。入射角 α は、試料を載せているステージCを回転させることによって変えることができる。フォトセンサD（モリリカ製，MBC-2014F）で試料からの反射光強度を受光する。フォトセンサDからの出力電流はアンプEによって電圧に変換され増幅された後に，A/D変換器Fを通してパーソナルコンピュータGへ入力される。フォトセンサDが搭載されている検知部にはモータJが取り付けられており，モータJを回転させることにより，受光角 β を $-45^\circ \sim 80^\circ$ まで変化させることができる。よって，モータを回転させることにより試料からの反射光強度分布を測定することができる。また，受光角 β は角度セン

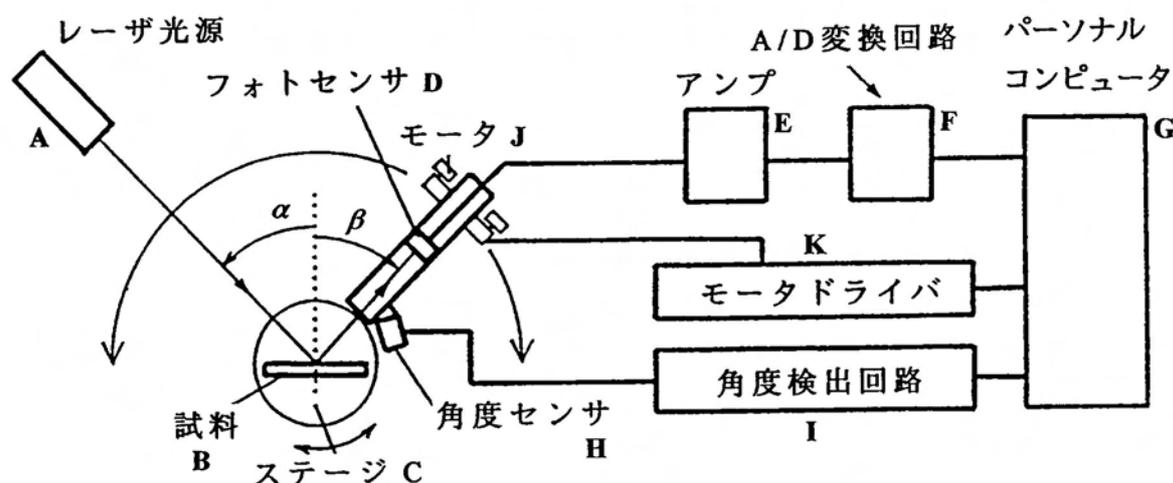


図2.7 測定装置構成

サHと角度検出回路Iを通して、パーソナルコンピュータGへ入力される。

2. 5 試作器による測定結果

2. 5. 1 心理的光沢度の測定概要

光沢の判断の基準は人間の知覚する心理的光沢度であるため、心理量を何らかの方法で数値化する必要がある。本論文の中のすべての章は心理的光沢度と関連があるので、心理的光沢度の測定に関しては<第3章>にまとめて述べることとし、ここでは平面試料の心理的光沢度の測定概要について簡単に説明する。

心理的光沢度の測定には、一対比較法的一种である中谷法を用いた⁽⁷³⁾。測定に用いた試料は、種々の光沢の紙およびプラスチックである。それらの試料は、色別に、(a)白グループ、(b)青グループ、(c)赤グループに分けられ、各グループの試料数はそれぞれ15枚、10枚、10枚である。それらの試料に対し、一対比較法を実施し、有意差検定を行った(危険率5%)。そして、最終的に光沢に有意差のある試料のみを選択し、それらの試料のみが物理的光沢度の測定に使用された。各試料の国際照明委員会によるCIE1931xy色度座標⁽⁷⁴⁾および反射率は表2.2に示される。また、これらの試料の一対比較データに対して分散分析を行ない各効果の有意性を検定した結果を表2.3に示す。この表のなかのFは分散比を表す。表中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であるといえる。また、グループによっては個人差や組合せ効果の影響がみられるものもある。しかし、その程度はF値($F_{324}^{81}=1.43$, $F_{324}^{36}=1.55$)と比較して大差なく、若干

表2.2 各試料のCIE1931 xy 色度座標および反射率

グループ (色)	白	青	赤
CIE1931 xy 色度座標 x	0.353~0.372	0.146~0.215	0.567~0.634
y	0.353~0.390	0.176~0.265	0.326~0.352
反射率($\times 10^{-2}$) 入射角 20° , 波長632.8nm	0.09~3.75	0.02~2.54	0.10~2.83

表2.3 試料の分散分析表

要因	自由度	F値 (白)	F値 (青)	F値 (赤)
主効果	9	421*	328*	227*
主効果 \times 個人	81	0.82	2.08*	1.59*
組み合わせ効果	36	4.44*	1.21	1.36
誤差	324	-	-	-

の個人差や組み合わせ効果があるとみてよい。これらの試料の中の高光沢試料にはコーティング用紙やプラスチックが含まれ、低光沢試料にはコピー用紙やノート用紙が含まれる。高光沢試料の場合、その表面に周囲の像が比較的鮮明に映るが、低光沢試料の場合、像は全く映らない。これらの試料のJIS Z 8741に規定された鏡面光沢度 G_s を測定すると5~95となり、この範囲は低光沢から高光沢の広範囲に相当する。

2. 5. 2 物理的光沢度と心理的光沢度の比較

図2.8に入射角 60° における反射光強度 $L_{m,x}$ を直接測定し、その値を(2.4)式に代入して得られた物理的光沢度 G_s と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係を示す。この図より、 G_s と $G_{p,h}$ はほぼ比例関係にありことがわかる。よって G_s は平面用の物理的光沢度として有効である。このとき、(2.4)式の係数 K 、 L_0 、 β は、非線形最小二乗法によってそれぞれ以下のように決定された。

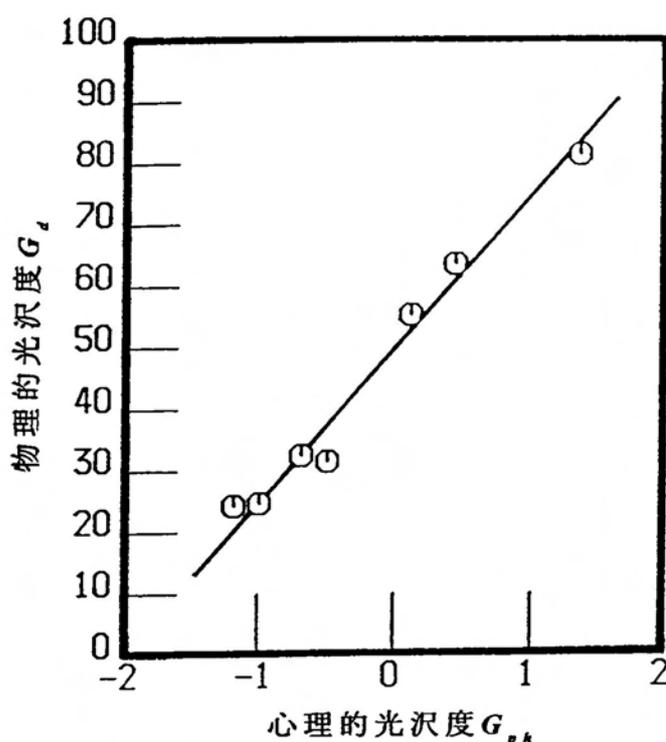
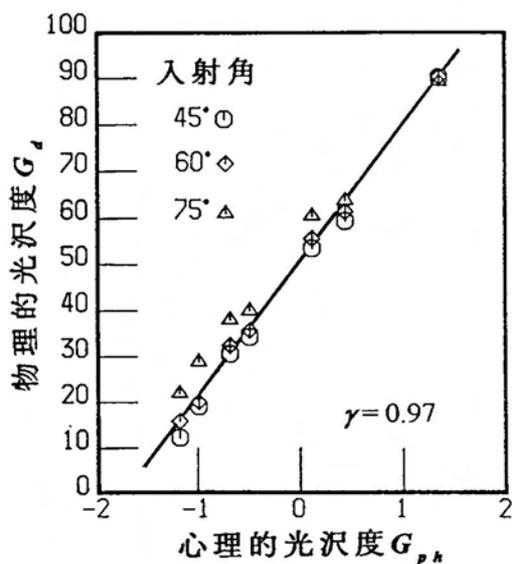


図2.8 物理的光沢度 G_d と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係

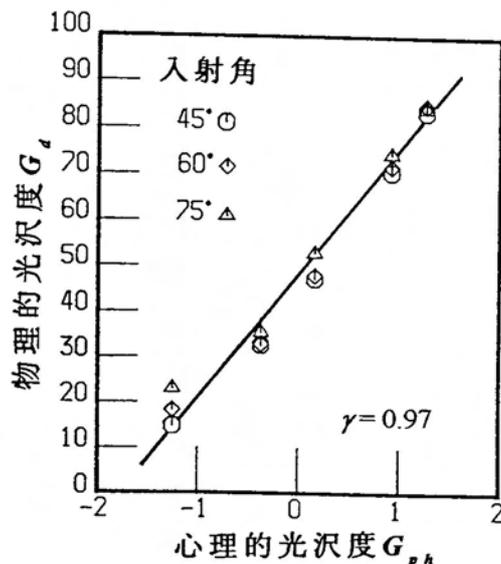
$$K=1.25, L_0=0.165, \beta=0.411 \quad (2.11)$$

人間の知覚する心理的明るさ B に関しては(2.3)式が成立するが、係数 L_0 、 β を調べると⁽⁵⁶⁾、(2.11)式の L_0 、 β とほぼ同様の範囲内にある。このことから、光沢度は反射光強度そのものではなく、人間の知覚する心理的明るさ B に比例すると考えてよい⁽⁵¹⁾。

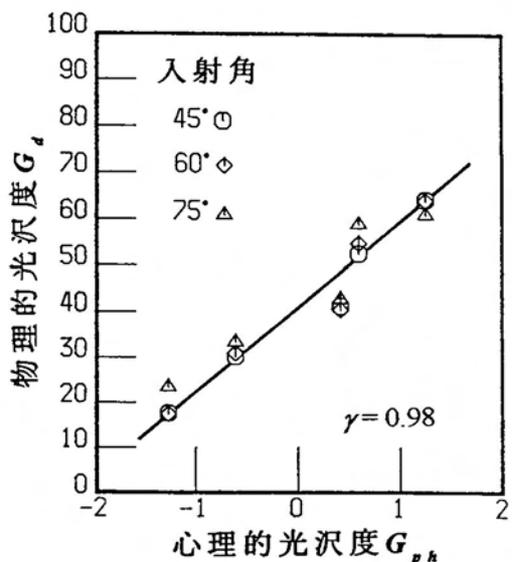
次に、直接反射光強度 $L_{m,x}$ を測定しそれを(2.4)式に代入して得られた物理的光沢度 G_d と、係数 m' より $L_{m,x}$ を推定し、それを(2.4)式に代入して求めた光沢度を区別するため、係数 m' より求めた光沢度を G_d' と表す。図2.9に、係数 m' より求めた光沢度 G_d' と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係を示す。また、図中には相関係数 γ の値も示されており、それぞれ、白色試料の場合0.97、青色試料の場合0.97、赤色試料の場合0.98である。このことから、係数 m' より求めた光沢度 G_d' も平面物体の光沢測定に有効である。また、この方法で得られる光



(a) 白色試料の場合



(b) 青色試料の場合



(c) 赤色試料の場合

図2.9 反射光強度分布より抽出した滑らかさ係数 m' を用いて求めた物理的光沢度 G_d' と心理的光沢度 G_{ph} の関係, (a)白色試料, (b)青色試料, (c)赤色試料の場合

沢度 G_d' は、光源の入射角が変化しても値のばらつきが小さい。入射角が 75° の場合を除けば、 G_d' と $G_{d,s}$ は殆ど一致している。

2. 6 検討

2. 6. 1 入射角の変化による光沢度のばらつき

図2.10は、光源の入射角度 α と物理的光沢度 G_d' および $G_{d,s}$ の変動率 ΔG の関係を表す。ここで、入射角 20° における試料の光沢度を G_{20} とする。入射角 x° における光沢度 G_x の変動率 ΔG を以下のように定義する。

$$\Delta G = \frac{G_x - G_{20}}{G_{20}} \quad (5.12)$$

この図からわかるように、変動率 ΔG の絶対値は入射角 75° の場合に最も大きい。今回提案する光沢度 G_d' の変動率は、鏡面光沢度 $G_{d,s}$ の変動率の約 $1/3$

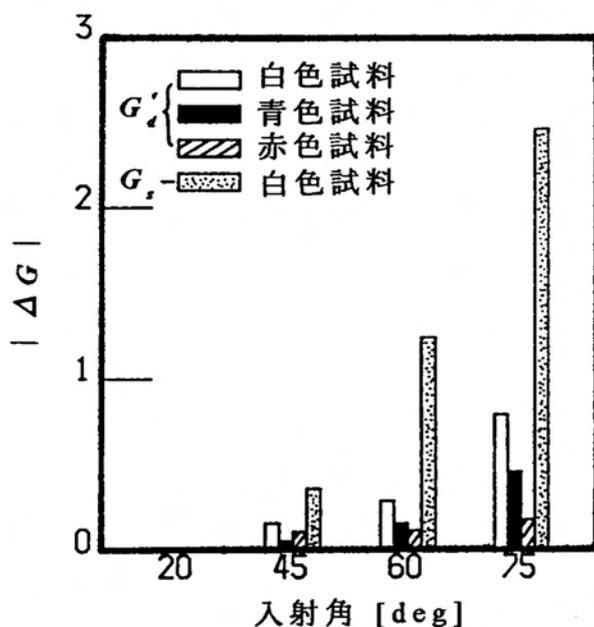


図2.10 光源の入射角度と物理的光沢度 G_d' および鏡面光沢度 $G_{d,s}$ の変動率 ΔG の関係

である。また、入射角 60° 以下の場合、 G_d' の変動率は約0.2以下と非常に小さい。この理由は以下のように考えられる。鏡面光沢度 G_s は、(2.1)式からわかるように試料からの反射光束 Φ_s を標準試料の反射光束 Φ_{0s} で規格化している。標準面の反射はFresnel則に従った反射であるが、実際の試料からの反射光はFresnel則には従わない。特に、低光沢の試料ほど、入射角が大きくなるにつれてFresnel則から大きくずれる。したがって、 Φ_s/Φ_{0s} は、入射角によって大きく異なる。よって、鏡面光沢度 G_s は入射角によって大きく変化する。

一方、今回の測定法によって得られる光沢度 G_d' は、反射光強度分布より物体表面の滑らかさ係数 m' を抽出し、それを(2.10)式に代入することによって、 $L_{m,x}$ を求めている。(2.10)式で得られる $L_{m,x}$ は、入射角 60° における反射光輝度を表している。このため、入射角が変動しても G_d' の変化が小さくなったものと思われる。しかし、実際には、入射角によって m' の値も若干変化するため G_d' の値もばらついている。これは、モデルによる反射光強度分布と実測された反射光強度分布が完全には一致しないためである。これを解決するためには、今後、より忠実な反射光強度分布モデルの構築が必要となる。

2. 6. 2 光沢度に影響を与える要因

反射光強度 $L_{m,x}$ を光沢度を表す要因として用いることによって、心理的光沢度 G_{ps} と一致する光沢度 G_d を定義することができた。光学的観点からは、光沢に影響を及ぼす要因は、正反射光と拡散反射光である。図2.11は、入射角 45° における種々の光沢の試料の反射光強度分布を示している。この図の中で、Aの部分には主に正反射成分が、Bの部分には拡散反射成分が含まれる。正反射成分は、光沢に最も影響を及ぼす要因である。今回抽出した表面の滑らか

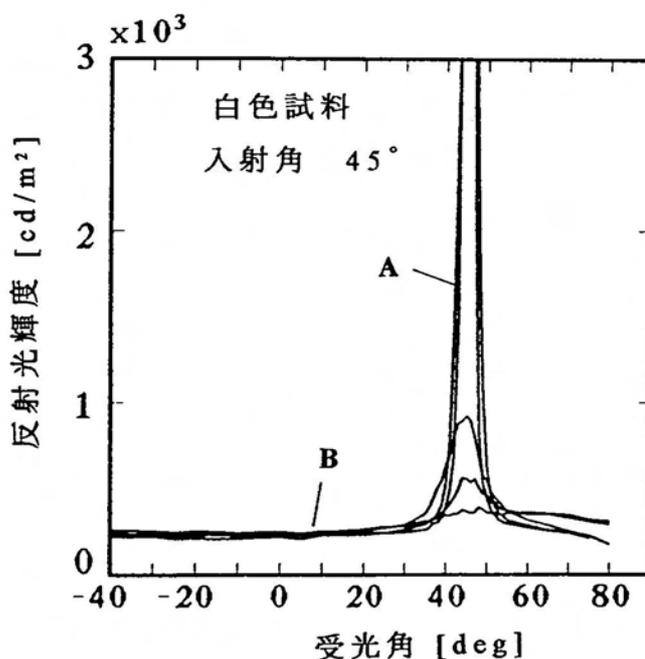


図2.11 様々な試料の反射光強度分布曲線

さ係数 m' もまた、(2.10)式で表されるように正反射光の最大輝度 L_{max} と強い相関があり、光沢度を規定する重要な要因である。

拡散反射成分も光沢に影響を与える要因と考えられているが、今回用いた試料に対しては、拡散反射光と光沢度の相関は小さい。図2.5からわかるように(2.5)式のモデルは反射光強度分布の実測値とよく一致するが、(2.5)式の中の係数 d によって拡散反射成分の大きさが決まる。そこで、各試料の心理的光沢度 G_{ps} と拡散反射係数 d の相関係数 γ を求めると、白色、青色、赤色試料の場合 γ はそれぞれ、 -0.03 、 -0.05 、 0.35 と非常に小さい。このことは、図2.11からも明らかである。正反射成分（図中のAの部分）は、試料によって大きく異なるが、拡散反射成分（図中のBの部分）の大きさは殆ど差が無い。このことから、同色物体に関しては、光沢は正反射成分で決定され、拡散反射成分の影響は少ないことがわかる。しかし、色の異なる試料の光沢を測定

する場合は、拡散反射成分を考慮する必要がある（光沢と色の関係については第5章で述べる）。

2.7 むすび

従来提案されている平面物体の光沢度測定法は、低光沢から高光沢まで広範囲には適用できず、また、心理的光沢度と比例関係にないので、これらを解決するための新しい方法を提案した。

反射光強度は光沢を決定する重要な要因であるが、心理的光沢度は反射光強度そのものには比例しない。本章では、平面物体に関しては、心理的光沢度は人間の知覚する心理的な明るさに比例するとことを明らかにした。このことに基づき、新しい物理的光沢度 G_p を提案した。

次に、光源の入射角の変化による測定データの変動を低減させるために、反射光強度分布をCook-Torranceモデルに当てはめることによって表面の滑らかさ係数 m' を抽出し、それより光沢度 G_p' を求める方法も提案した。測定に使用した試料の入射角 60° における鏡面光沢度 G_s は約5~95であり、この範囲は低光沢から高光沢の範囲に相当する。これらの試料に対し、提案する物理的光沢度 G_p' と心理的光沢度 G_{ps} の相関係数 r は0.97以上と非常に高い。また、入射角の変動による光沢度 G_p' の変動率 ΔG は、鏡面光沢度 G_s の変動率の約1/3以下である。さらに、 G_p' は原理的に光源の明るさの変動には影響されない。

このように今回提案する方法は、低光沢から高光沢までの広範囲に渡って平面物体の光沢度測定に有効である。

第3章 心理的光沢度の測定

3.1 まえがき

光沢の基準はあくまでも人間の心理的光沢度にある。たとえどのように正確にある物理量を測定し、それを光沢度と定義しても、心理的光沢度とよい相関を示さなければ問題である。したがって、光沢度測定方法の善し悪しを判断する場合、得られる物理的光沢度が心理的光沢度とどの程度一致するのか調べる必要がある。本論文のすべての章は心理的光沢度と関連を持つ。しかし、各章毎に心理的光沢度の測定手順を説明すると、本文の構成が繁雑になるので、この章で心理的光沢度に関する共通部分をまとめて述べる。また、物体の曲率半径と心理的光沢度の関係について、新しい知見が得られたのでそれについても報告する⁽⁷²⁾。

3.2 心理的光沢度の測定手順

光沢の判断の基準は人間にあるので、何らかの方法で人間の知覚する心理的光沢度を数値化する必要がある。心理量を尺度化するための官能検査手法として、一対比較法⁽⁷³⁾、順位配列法⁽⁷⁵⁾、マグニチュード推定法⁽⁷⁶⁾などがある。マグニチュード推定法で得られる心理量は、心理量の間隔尺度に関していくつかの問題が残されてるので、心理的光沢度の測定には、一般的に順位配列法と一対比較法が用いられる。本論文でも同様に心理的光沢度の測定には順位配列法と一対比較法を用いる。

官能検査には一対比較法が多く用いられる。これは、心理量の場合、評価の基準が明瞭ではなく変動しやすく判断しにくい場合が多いが、2つのもの

を比較して順位あるいは評点をつける程度なら比較的簡単に行えるからである。一対比較法では、比較判断の結果を評点で表すか、順位で表すかによって二分される。評点による方法としてSheffeの方法があり、順位による方法としてBradleyの方法およびThurstoneの方法がある⁽⁷³⁾。本論文では、心理的光沢度を数値化する必要があるので評点として表すSheffeの方法を用いる。また、この方法で得られる心理量は、検定により間隔尺度の等間隔性を調べることができ、分散分析により心理的光沢度、個人差、組み合わせ効果の有意性を調べることができる。しかし、比較すべき試料の数 t に対して、最小限でも $t(t-2)/2$ 回の比較実験を実施しなければならない。このため、試料数が多くなると、組み合わせの数が膨大となり、被験者が多数必要になったり、あるいは小数の被験者で行う場合には、1人の実験回数が多くなるので、疲労して実験が困難になる場合がある。これらの問題については、その変法を選択することによって、ある程度解決することができる。Sheffeの方法そのものは、被験者1人が1つの組み合わせのみを判定するが、浦の変法では、1人ですべての組み合わせを判定する⁽⁷³⁾。また、芳賀の変法では比較順序を無視する⁽⁷³⁾。中谷の変法では、1人ですべての組み合わせを比較し、さらに順序効果も無視する⁽⁷³⁾。今回の心理的光沢度の測定には、他の光沢度測定法の場合と同様、中谷の変法を用いた。この理由は、(1)光沢の判定が微妙であるため、一人にすべての組み合わせを提示した場合の方が光沢の評点を付けやすいこと、(2)被験者に同時に2つの試料を提示するため順序効果は無視できることによる。

光沢度測定法を確立するためには、光沢に及ぼす種々の要因を調べる必要がある。このため、各章毎に使用されている試料が異なる。例えば、第2章では同色の平面試料、第4章では球形および円筒形試料、第5章では色の異なる試料を用いている。各試料の光学的特性、被験者数、および心理的光沢

度の測定結果は、各章毎に適時示すこととし、この章では心理的光沢度の測定手順のみを述べることにする。

図3.1に一对比較法による心理的光沢度測定の概念図を示す。実験はすべて暗室で行われる。水平面より 30° 上の方向から試料に光を照射する。光源には平均輝度 $1.18 \times 10^4 \text{cd/m}^2$ の蛍光灯を用いた。このとき、光沢のある試料の場合は、試料の表面の一部に正反射光（光源色）が知覚され、その周囲の部分より物体色が知覚される。また、部屋の周囲の背景は試料には映らない。蛍光灯の光強度が強く、明順応状態と考えられるため、被験者が着席してから実験を開始するまでの時間は5分とした。机の表面は黒色の無光沢の紙（視感反射率0.158, CIE1931xy色度座標 $x=0.308$, $y=0.315$ ）で覆われており、その時の紙からの放射輝度は 3.8cd/m^2 である。ここで、測定に使用する試料数を t とする。 t 個の試料の中から任意に2つの試料、例えばLとRが選択され、被験者Iに提示されたとする。被験者は提示された2つの試料の光沢を比較す

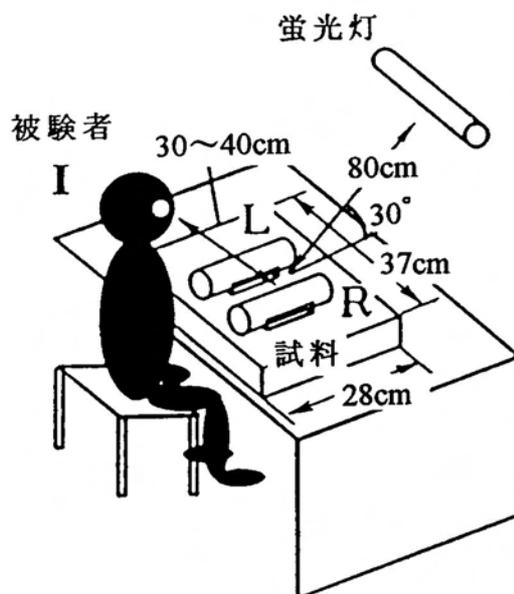


図3.1 一对比較法による心理的光沢度測定の概念図

る。今、試料 L の光沢を G_L 、試料 R の光沢を G_R とすると、被験者は以下のような評点を各試料に与える。

$$\left. \begin{array}{l} G_L \gg G_R \text{ なら, } L: 2 \text{ 点, } R: -2 \text{ 点} \\ G_L > G_R \text{ なら, } L: 1 \text{ 点, } R: -1 \text{ 点} \\ G_L = G_R \text{ なら, } L: 0 \text{ 点, } R: 0 \text{ 点} \\ G_L < G_R \text{ なら, } L: -1 \text{ 点, } R: 1 \text{ 点} \\ G_L \ll G_R \text{ なら, } L: -2 \text{ 点, } R: 2 \text{ 点} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

一人の被験者が、すべての試料の組み合わせに対してこのような比較を行う。なお、被験者に提示する組み合わせの順番はランダムである。このような比較実験を多数の被験者の実施し、これらの評点をもとに、各試料の心理的光沢度が求められる。また、分散分析、有意差検定（危険率5%）も行い、個人差、組み合わせ効果、試料間の有意差についても調べる。なお、心理的光沢度、分散分析、有意差検定の詳細な計算手順は文献（73）に従っている。

次に、順位配列法の測定手順を述べる。順位配列法では被験者に同時に複数の試料を提示するため、測定装置の構成は図3.1と若干異なるので、図3.2に順位配列法による測定の概念図を示す。この方法では、一人の被験者に t 個の試料を同時に提示し、被験者は試料を光沢の高い順に並べる。各試料には光沢の高い順に、 $t, t-1, \dots, 2, 1$ 点が与えられる。これを p 人の被験者に実施したとすると、それぞれの試料の総得点を p で割り平均をとった個々の値が、各試料の心理的光沢度となる。この方法は一対比較法に比べ手順が簡単であるため、測定時間も少なく被験者の疲労も小さい。このため、順位配列法による光沢測定の文献も多い^{(27)~(32)}。しかし、この方法によって得られる心理的光沢度は等間隔尺度を持たない。例えば、得られた心理的光沢度が1点と2点の試料間の光沢差と、心理的光沢度が8点と9点の試料間の光沢差が等しいとは限らない。間隔尺度という点では一対比較法の方が信頼性が高

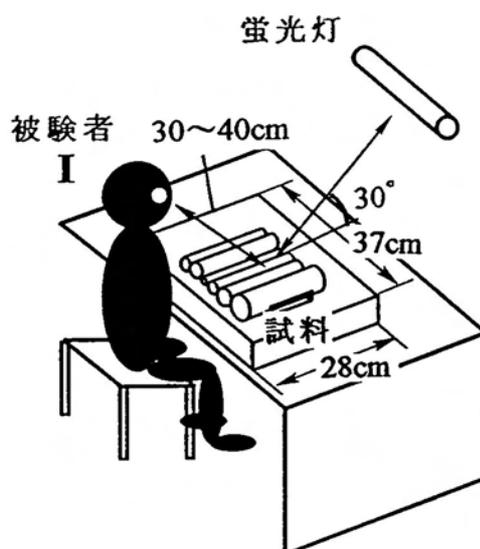


図3.2 順位配列法による心理的光沢度測定概念図

い。しかし、測定試料数がある程度以上多くなると一対比較法による測定が実質的には不可能となるので、本論文は一対比較法と順位配列法の両方を用いている。

3.3 一対比較法と順位配列法の比較⁽⁷⁶⁾

一対比較法によって得られる心理的光沢度 $G_{p,i}$ の間隔尺度は等間隔とみなすことができる。一方、順位配列法によって測定された心理的光沢度 $G_{p,i}'$ は間隔尺度を持つとは限らない。得られる心理データが間隔尺度を持たないのであれば、順位配列法による心理的光沢度を基準とし、それと一致するような光沢度を定義したとしても意味がない。しかし実際には、順位配列法によって得られる心理的光沢度 $G_{p,i}'$ と一対比較法によって得られる心理的光沢度 $G_{p,i}$ は直線関係にある⁽⁷⁷⁾。つまり、順位配列法によって得られる心理的光沢度も等間隔性を持つとみなしてよい。これについて以下に説明する。

まず、比較的高光沢に属する直径8mmの真珠の場合は、順位配列法によっ

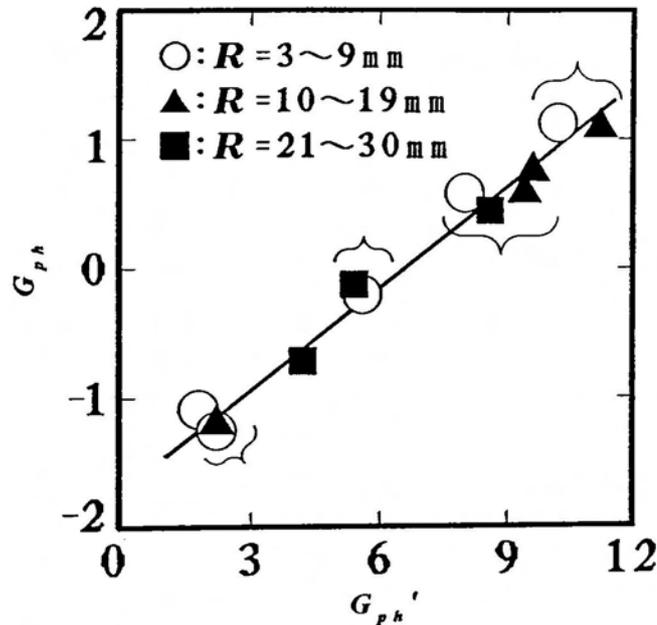


図3.3 球形白色試料において一対比較法によって得られた心理的光沢度 G_{ph} と順位配列法によって得られた心理的光沢度 G_{ph}' の関係

て測定された心理的光沢度 G_{ph}' と一対比較法によって得られた心理的光沢度 G_{ph} は直線関係にあることが報告されている(77)。したがって、このような試料に対しては順位配列法による心理的光沢度も等間隔尺度を持つとみなしてよい。

次に、低光沢から高光沢までの広範囲の試料について考える。図3.3に、直径3mmから30mmの種々の球形試料に対する一対比較法と順位配列法による心理的光沢度の関係を示す。この図において、横軸は一対比較法によって得られた心理的光沢度 G_{ph} を示し、縦軸は順位配列法によって測定された心理的光沢度 G_{ph}' を表す。被験者は矯正視力1.0以上の成人男性10名である。試料は白色の球形のプラスチックで、これらの試料の平面時の入射角 60° における鏡面光沢度 G_s は約10~95で、この範囲は低光沢から高光沢までの広範囲に属する。これらの試料の一対比較データに対して分散分析を行ない各効果の有

表3.1 図3.3に使用された試料の分散分析結果

要因	自由度	F値 (白)
主効果	11	185*
主効果×個人	99	2.12*
組み合わせ効果	55	1.12
誤差	495	-

意性を検定した結果を表3.1に示す。¹この表のなかのFは分散比を表す。表中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であるといえる。また、個人差の影響がみられるが、その程度はF値($F_{495}^{99}=1.35$)と比較して大差なく、若干の個人差があるとみてよい。図3.3中の括弧でくくられた試料は、有意差検定(危険率5%)により、有意差のないとみなされた試料である。つまり、人間はそれらの試料間の光沢差を区別できない。この図より、 $G_{p,k}$ と $G_{p,k}'$ の関係はほぼ直線関係であるといえる。よって、この試料に関しても、順位配列法による心理的光沢度は等間隔尺度をもつとみなして問題ない⁽⁷⁷⁾。

本論文では、順位配列法による心理的光沢度の測定結果を第3章と第4章の一部に使用している。その中で用いられている球形真珠、紙、プラスチックは文献⁽⁷⁷⁾と同一もしくはほぼ同じ光沢の範囲にある。したがって順位配列法を用いても問題ない。

3.4 曲率半径と心理的光沢度の関係⁽⁷²⁾

表面状態が全く等しい場合でも、物体の曲率半径 R が異なると、心理的光沢度が異なる。平面($R=\infty$)より物体の半径が小さくなると、心理的光沢度は増大し、更に半径が小さくなると、心理的光沢度は逆に減少するという報告

がある⁽⁴⁵⁾。しかし、平面時の光沢が低い試料と高い試料では、曲率半径と心理的光沢度の関係がどのように変化するのか、現時点では定量的に明らかでない。そこで今回は、平面状態において低光沢から高光沢までの種々の光沢の試料を用い、それらの試料の曲率半径を変え、曲率半径と心理的光沢度の関係を測定した⁽⁷²⁾。

試料として、光沢の異なる6種類の白色の紙を用意した。以下、これらの試料をNo.1, No.2, …, No.6と呼ぶ。これらの試料のJIS Z 8741に規定されている入射角 60° における鏡面光沢度 G_s は、それぞれ84.2, 75.4, 46.1, 9.6, 7.1, 6.3である(ミノルタ製, GM-060にて測定)。まず、各試料を半径の異なる6種類の円筒(半径3, 4, 7.5, 9.5, 14, 30mm, 高さ10cm)に巻付け、計36本の円筒を作成した。測定には順位配列法を使用した。同一の紙を張り付けた曲率半径の異なる6種類の円筒を被験者に同時に提示する。被験者は光沢のある順番にそれを並べる。そして、光沢のある順番に6, 5, …, 1の点が各試料に与えられ、それぞれの試料の平均点より心理的光沢度が得られる。被験者は矯正視力1.0以上の成人男性14名である。

図3.4に高, 中, 低光沢試料の心理的光沢度 $G_{p,i}$ と曲率半径 R の関係を示す。図中の G_s は、その試料の平面時の鏡面光沢度を表す。なお、図3.4(a)の右側の座標については、後で述べる。この図より、以下のことがわかる。心理的光沢度 $G_{p,i}$ は曲率半径によって異なる。(a)~(c)を比較すると、低光沢の試料ほど心理的光沢度 $G_{p,i}$ が最大となるときの曲率半径 R_{max} は小さい。この理由としては、以下のことが推察される。高光沢試料では、曲率半径がある程度以上小さくなると、像の細部が感知できなくなり像の鮮明度が低下し光沢感が低下したように感じる。中光沢試料の場合、試料表面に映る像はぼけているが、曲率半径が小さくなるにつれて、表面に映る像が小さくなり像のコントラストが大きくなる。したがって、鮮明度が増し光沢感が増大する。さらに

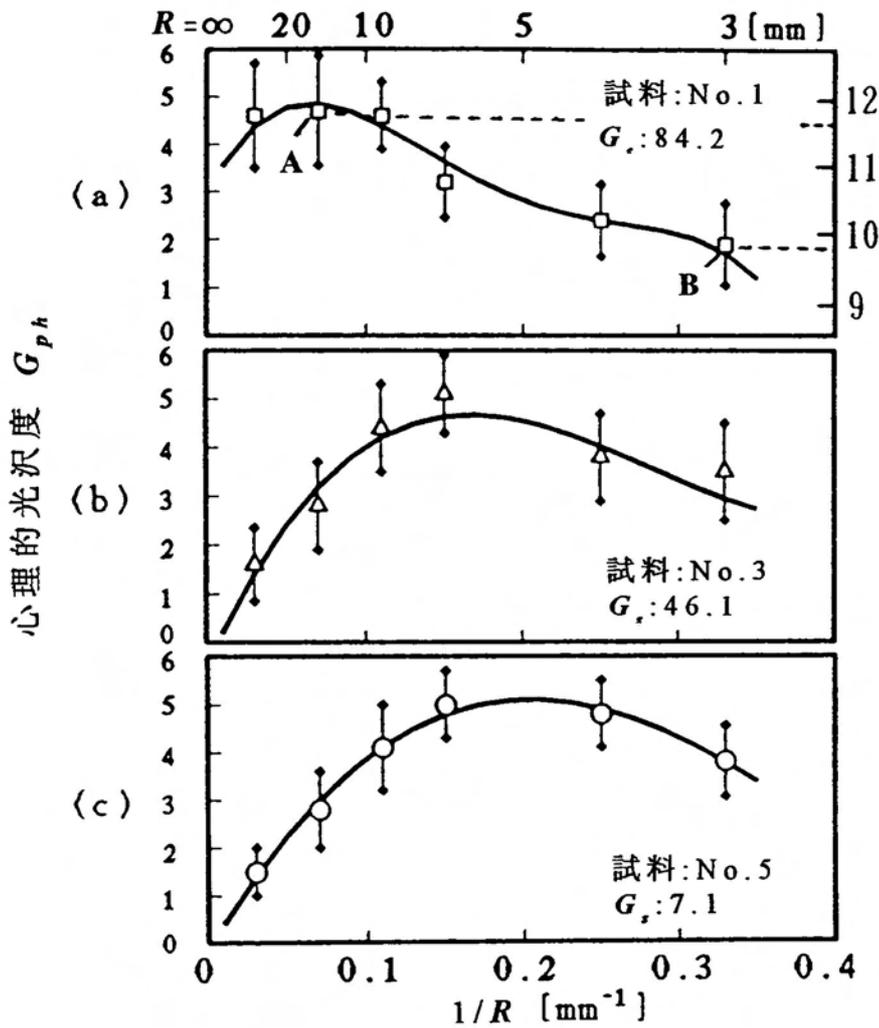


図3.4 心理的光沢度 G_{ph} と曲率半径 R の関係, (a)高光沢試料, (b)中光沢試料,
(c)低光沢試料の場合

小さくなると、肉眼の分解能では感知できなくなり鮮明度が低下したように感じ光沢感が減少する。低光沢試料の場合、像そのものは試料には全く映らないが、曲率半径を小さくするにつれて試料表面の一部分に反射光が集中し光沢があるように感じる。しかし、曲率半径がある程度以上小さくなると、反射光強度が低下し光沢感が低下する。

試料No.1とNo.5を比較すると、どの曲率半径の場合も明らかにNo.1の方が心理的光沢度が高いが、このことは図3.4だけではわからない。種々の曲率

半径 R において、6つの試料 (No.1, No.2, ..., No.6) の心理的光沢度の関係がどのようになっているのかを調べるためには、36本のすべての円筒試料を同時に被験者に提示して心理実験を行う必要がある。しかし、これは実質的に困難である。そこで今回は、 $R=14\text{mm}$ と $R=3\text{mm}$ の場合の合計12本の円筒試料について、順位配列法で心理的光沢度 G_{ph}' を測定した。被験者に提示する試料数は12であるため、各試料に与えられる点数は光沢のある順番に12, 11, ..., 1となる。これを、矯正視力10以上の成人男性14名に実施した。これによって、 $R=14\text{mm}$ と $R=3\text{mm}$ の場合については、異なる試料間 (No.1, No.2, ..., No.6) の心理的光沢度の大小関係がわかる。この心理データを基準として心理的光沢度の補正を行った。例えば試料No.1の場合、 $R=14\text{mm}$ と $R=3\text{mm}$ の場合の G_{ph}' はそれぞれ11.6と9.8となるので、図3.4(a)のAとBの心理的光沢度がそれぞれ11.6と9.8となるように座標を変換する [図3.4(a)]

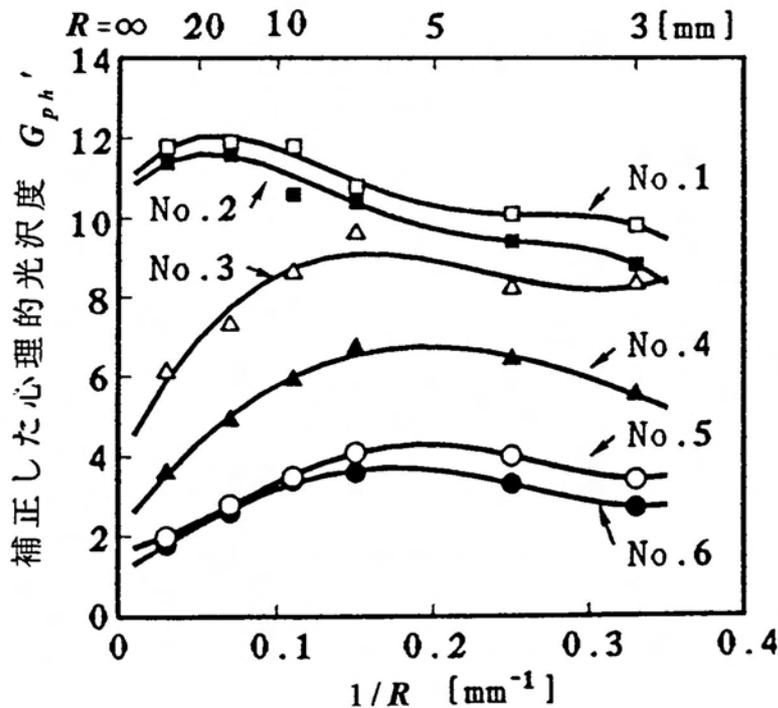


図3.5 曲率半径 $R=14\text{mm}$ と $R=3\text{mm}$ の心理的光沢度を基準として補正した心理的光沢度 G_{ph}' と曲率半径 R の関係

の右側の座標となる。同様に他のすべての試料に対して、 $R=14\text{mm}$ と $R=3\text{mm}$ の場合の心理的光沢度が $G_{p,k}'$ と一致するように補正した。その結果を図3.5に示す。心理的光沢度が等間隔尺度を持つとすればこのように座標を線形変換してもその等間隔性はそこなわれない。この図より以下のことが定性的に推察される。各試料の心理的光沢度の最大値を $G_{p,k1}$ 、 $G_{p,k2}$ 、 \dots 、 $G_{p,k6}$ とすると、 $G_{p,k1} > G_{p,k2} > \dots > G_{p,k6}$ であり、この大小関係は、平面時の試料の心理的光沢度の大小関係と一致する。つまり、心理的光沢度は曲率半径によって異なるが、平面状態で光沢のある物体のほうが最大となる心理的光沢度の値も高い。

3.5 むすび

本論文は、すべての章が心理的光沢度と関連を持つ。そこでこの章では、まとめて心理的光沢度の測定方法について述べた。さらに、曲率半径の異なる試料の心理的光沢度を測定することにより、新たに以下のような心理結果を得ることができた。

- (1) 一対比較法によって得られる心理的光沢度 $G_{p,k}$ と順位配列法によって得られる心理的光沢度 $G_{p,k}'$ は、ほぼ直線関係にあり、本論文で使用した試料に関してはどちらの方法を用いても問題ない。
- (2) 心理的光沢度 $G_{p,k}$ は曲率半径 R によって異なり、平面時に低光沢の試料ほど、心理的光沢度 $G_{p,k}$ が最大となるときの曲率半径 R_{max} が小さい。
- (3) 心理的光沢度 $G_{p,k}$ は曲率半径 R によって異なるものの、平面時に光沢のある試料のほうが最大となる心理的光沢度 $G_{p,k}$ の値も高い。

また、この原因を像の鮮明度と解像度を用いて簡単に説明した。ただし、視覚モデルによる詳細な検討は第6章で述べる。

第4章 曲面物体の光沢度測定法

4.1 まえがき

平面物体については、種々の光沢度測定法がある。これに対し、塗装曲面、陶磁器、球形真珠のような曲面物体用の光沢度測定法はJIS⁽³⁴⁾の中には規定されておらず、この種の報告は殆ど見当たらない。そこで、JIS⁽³⁴⁾の中の θ 度対比光沢度測定法を改良したn点拡散光沢度測定法が提案された⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。この方法は、特定条件、例えば、曲率半径の等しい同一ロットの製品の光沢度判定や光沢不良品検出などであれば、用い得る程度にまで改良されている。しかしながら、n点拡散光沢度は次のような問題点がある。

同一材料、同一表面状態の曲面物体でも、曲率半径が変われば人間の知覚する心理的光沢度は異なり、ある曲率半径 R_{max} の時に心理的光沢度は極大に達する⁽⁴⁵⁾。しかし、n点拡散光沢度は、曲率半径が変化すると心理的光沢度との間にはよい相関関係は得られなかった。

そこで本章では、CCD(Charge coupled device)センサと光学レンズを組み合わせて、曲面物体表面上の反射光強度分布を測定し、反射光強度分布曲線より映像の鮮明さ、すなわち、曲面物体表面の映像のぼけの度合を求める方法を提案する。この方法による光沢度を、ここでは、「ぼけ度合光沢度」と呼ぶことにする⁽⁷⁷⁾⁽⁷⁸⁾。ぼけ度合光沢度は、曲率半径が一定の物体は勿論、曲率半径の異なる物体の場合も、心理的光沢度とかなりよい相関を示すことから、本測定法は、塗装曲面、球形真珠のような曲面物体の光沢度測定に役立つと思われる。

次に、ぼけ度合い光沢度測定装置を改良し、CCDの代わりにPSD(Position sensitive device)を用いた高速高精度な測定法を提案する⁽⁸⁰⁾。

さらに，測定範囲を拡張し，低光沢で拡散反射成分を多く含む物体まで測定可能な方法についても述べる⁽⁸¹⁾⁽⁸²⁾。

4. 2 従来の曲面物体の光沢度測定法

第2章の表2.1に示した既発表の殆どの光沢度測定法は平面物体を対象としている。その中で， θ 度対比光沢度測定法を改良した n 点拡散光沢度測定法が曲面物体を対象とした測定法であるため，この方法を選び，以下の理解を助けるために，測定原理を簡単に説明する。

図4.1に n 点拡散光沢度測定装置の構成を示す。曲面試料 A に光が照射された場合，試料からの正反射光量を I_n ，一連の拡散反射光量を $I_1 \sim I_{n-1}$ とすると，これらの反射光量は各Siホトセルで検知され，電圧に変換・増幅後，出力される。 I_1, I_2, \dots に比例する出力電圧を e_1, e_2, \dots とすると， n 点拡散光沢度 G_N は次式で定義される⁽⁴⁵⁾。

$$G_N = I_n / \sum_{i=1}^n I_i = e_n / \sum_{i=1}^n e_i \quad (4.1)$$

正反射光用検知器1個，拡散反射光用検知器5個（ $n=6$ ）を用い，同一黄色ラッカーエナメルで塗装した曲率半径 R の異なる8個の試料について G_N を測定した。その結果を図4.2に示す。また，同試料について測定された心理的光沢度 $G_{p,h}$ を図4.2に破線で示す。この図からわかるように， G_N と $G_{p,h}$ は曲率半径に対して全く異なる曲線となる。したがって， G_N は曲率半径の異なる物体間の光沢測定には適当でない。

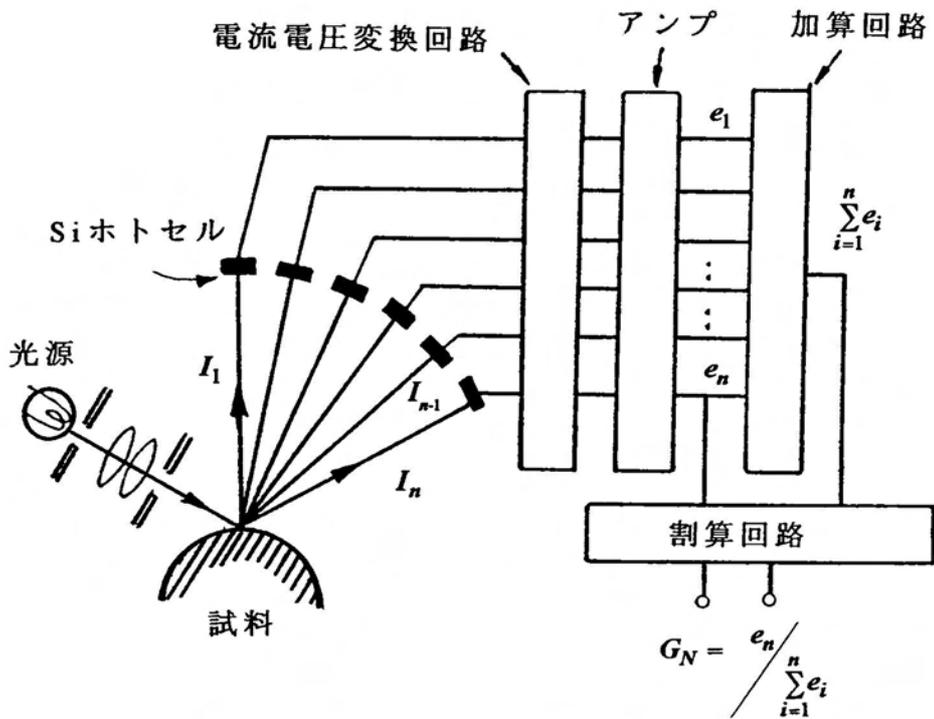


図4.1 n点拡散光沢度測定装置の構成

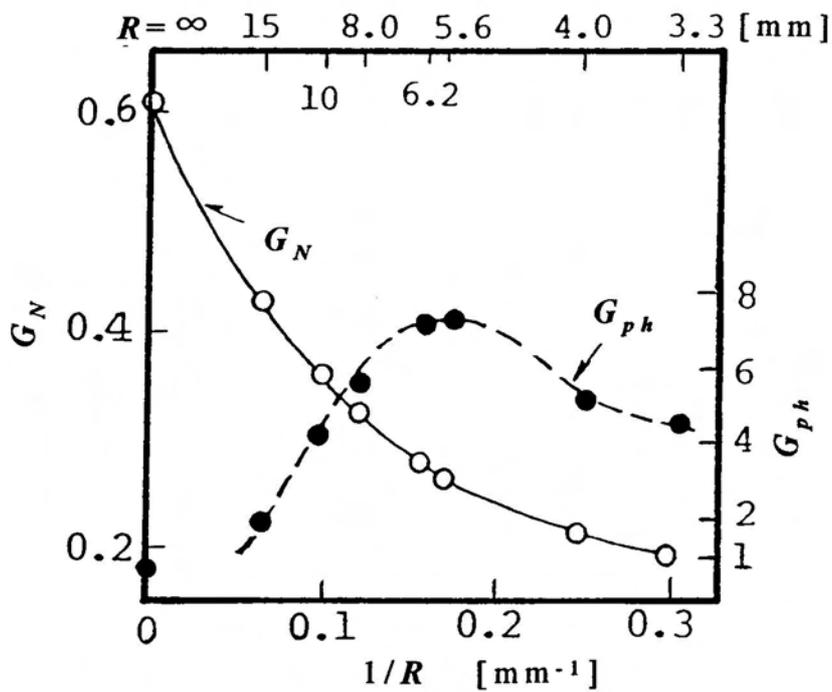


図4.2 塗装球の曲率半径 R とn点拡散光沢度 G_N 及び心理的光沢度 G_{ph} の関係

4.3 曲面用光沢度の測定原理

本研究で試作した装置の構成を図4.3に示す。光源Aにはハロゲンランプ（または蛍光灯）を用い、光源Aの像が曲面試料Bの表面に映るように、A、B間の距離を設定する。本研究では、試料として、曲率半径Rが15～3.3mmの球形物体を用いたので、これらの球形表面に映像ができるように、A-B間の距離を125mmとした。

次に、試料表面上の映像の中心の反射光強度分布をレンズCを通して、CCD（沖電気製、S-1、256ビット）ラインセンサD上で受光する。CCDラインセンサの出力をオシロスコープEに入力すると、図4.4のような反射光強度分布に比例する出力電圧曲線が観察される。図4.4(a),(b),(c)は、それぞれ光沢が高、中、低の球形物体の反射光強度分布（比例する出力電圧曲線）を表す。

図4.4の反射光強度分布（比例する出力電圧曲線）において、最大値 L_{max} は物体表面の映像中心からの正反射光強度に比例する。次に、反射光強度分布（比例する出力電圧曲線）を正規確率紙上にプロットすると大体直線となる

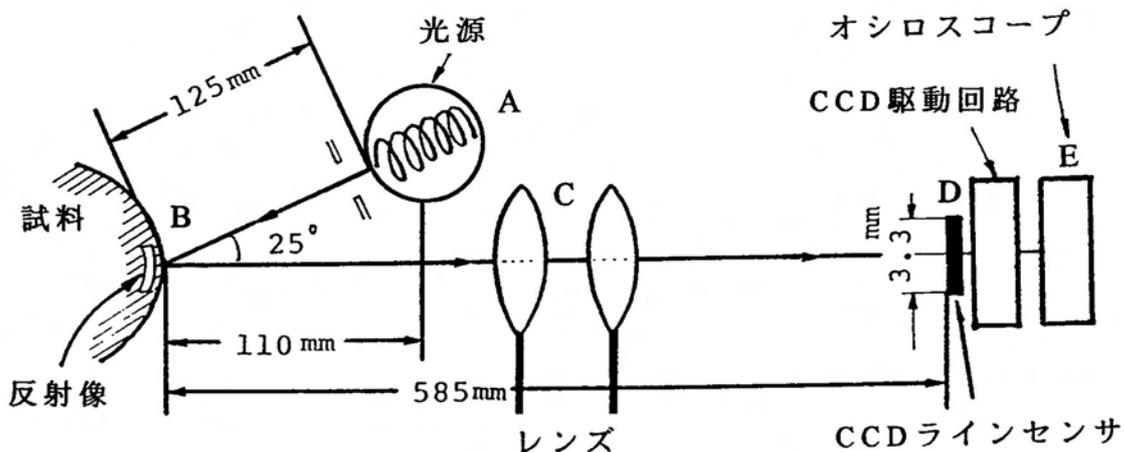


図4.3 ぼけ度合光沢度 G_D 測定装置の構成

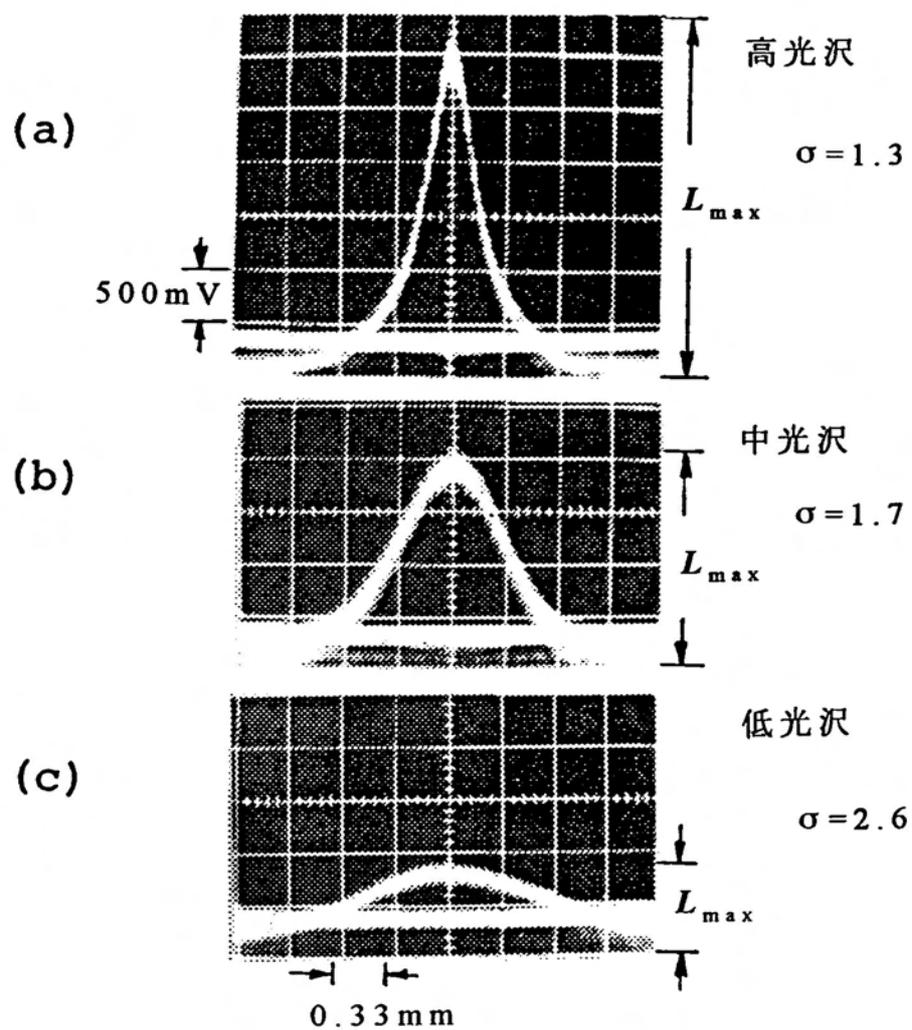


図4.4 反射光強度分布に比例するCCDの出力電圧波形

ことから（付図1），同曲線は正規分布曲線で近似され，更にその曲線の急峻さ（又は広がり度合）は標準偏差 σ で表される。

このようにして，図4.4(a)~(c)の L_{max} と σ を求め，一方，別途に求めた図4.4の試料の心理的光沢度 G_{ph} との関係を描くと図4.5のようになる。図4.5より，

$$G_{ph} \propto L_{max} \tag{4.2}$$

$$G_{ph} \propto 1/\sigma \tag{4.3}$$

の関係が得られる。ただし，第2章では心理的光沢度 G_{ph} は反射光強度 L_{max} のべき乗に比例すると述べたが，塗装球や球形真珠のように高光沢物体に測定対象を限定する場合は，図4.5に示すように近似的に心理的光沢度 G_{ph} は反射光強度 L_{max} に比例すると見なしてよい。（紙のような低光沢試料も含めて測定範囲が広い場合については<4.6節>で述べる。）

ところで，いま，われわれが定義しようとしている物理的光沢度は心理的

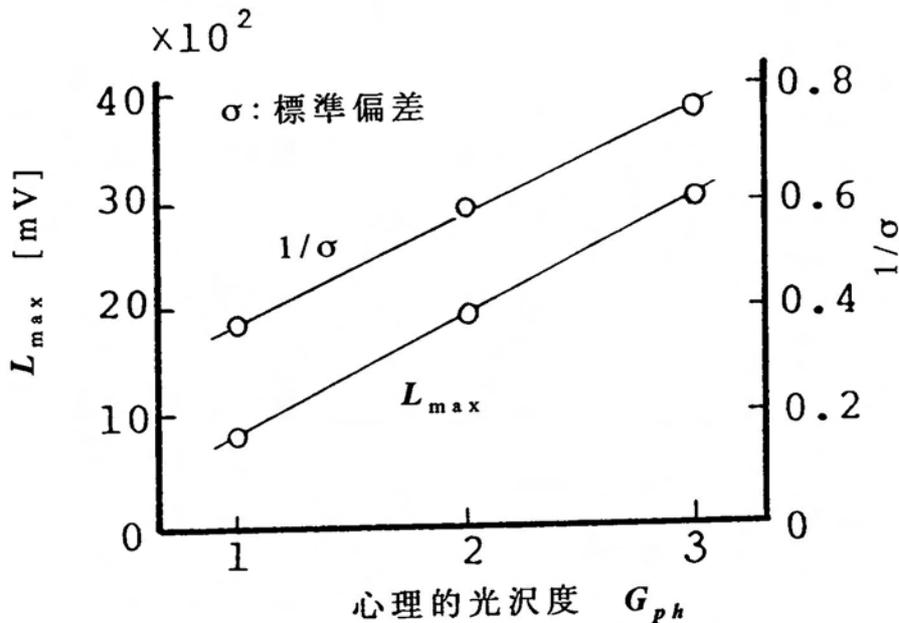


図4.5 心理的光沢度 G_{ph} と L_{max} 及び $1/\sigma$ の関係

光沢度 G_{ph} と強い相関を示すものであるから、差し当たり、その物理的光沢度を \bar{G} とすると、 \bar{G} と L_{max} 、 σ の間にも、(4.2)、(4.3) 式と同様に

$$\bar{G} \propto \frac{L_{max}}{\sigma} \quad (4.4)$$

の関係が成立すると仮定する。

ここで、図4.6に示すような正規分布曲線の半値幅を W とおくと、次式となる。

$$W = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = K\sigma \quad (4.5)$$

ここで $K=2.35$ (付録A・2参照) である。

式(4.4)に式(4.5)を代入すると、

$$\bar{G} \propto \frac{KL_{max}}{\sigma} \propto \frac{L_{max}}{W} \quad (4.6)$$

の関係を得る。

ここで、 L_{max}/W を G_{ID} とおくと、

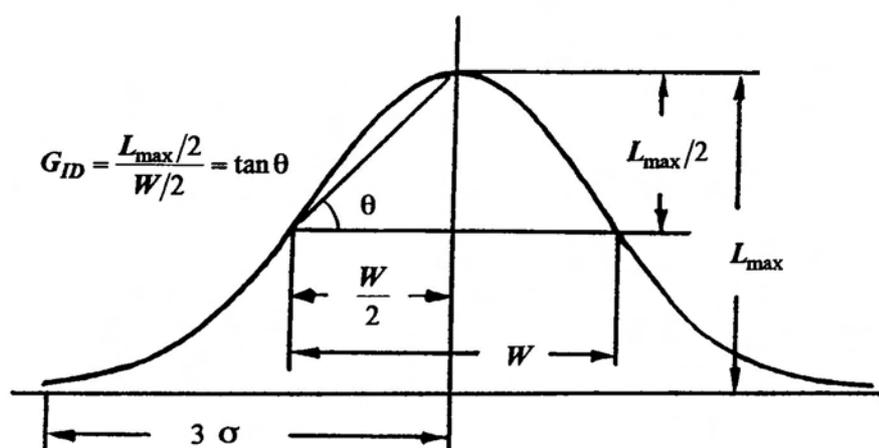


図4.6 ぼけ度合光沢度 G_m 説明用の正規分布曲線

$$G_{ID} \equiv \frac{L_{\max}}{W} = \frac{\frac{1}{2}L_{\max}}{\frac{1}{2}W} = \tan \theta \quad (4.7)$$

となる。

以上によって、 G_{ID} なる物理的光沢度が定義されたが、 G_{ID} は映像のぼけ度合を表す標準偏差 σ を含んでいるから、ここでは、 G_{ID} をぼけ度合光沢度と呼ぶことにする。 G_{ID} は曲率半径の異なる物体間の光沢比較に有効であるが、そのことは<4.4節>で実証する。なお、(4.3)式、図4.5で用いた心理的光沢度 G_{ph} は順位配列法で求められた。被験者数は成人男性10名である。

4.4 測定結果と検討

4.4.1 測定結果

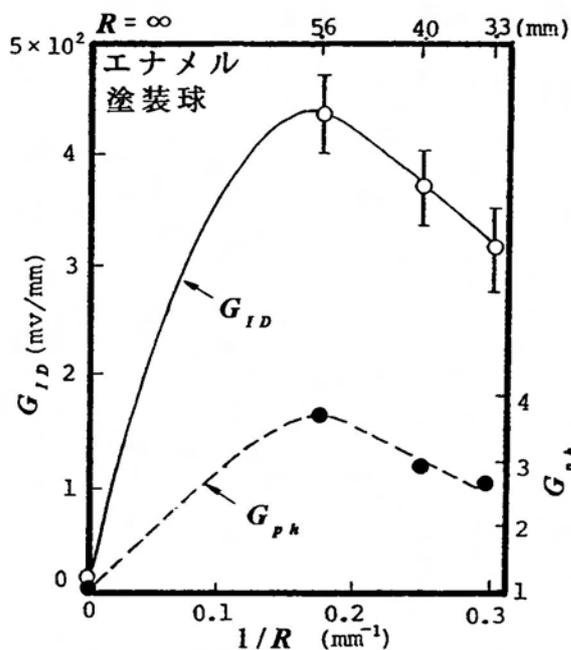
図4.3の装置によって、図4.4のような反射光強度分布に比例する出力電圧曲線を撮影し、これより G_{ID} 計算した。図4.7は曲率半径 R の異なる黄色ラッカーエナメル塗装曲面、図4.8は R の異なる金属球の R とぼけ度合光沢度 G_{ID} の関係、及び R と心理的光沢度 G_{ph} の関係を示す。但し、図4.7(a)と(b)では塗装面の色は試料の都合で若干異なり、図4.8(a)と(b)では金属球の材料が異なる。図4.9は直径8mmの球形真珠の G_{ID} と G_{ph} の関係を示す。各図で○印は、10回の測定回数平均値を表す。各試料毎に曲率半径 $R=\infty$ から3.3mmまでの試料を用いて相関係数 γ を計算すると、

塗装球面・図4.7(a)で $\gamma=0.96$ 、図(b)で $\gamma=0.88$

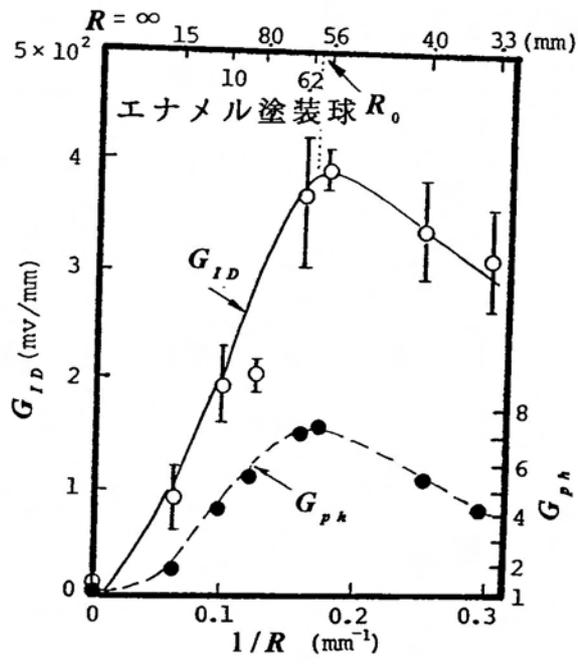
金属球・図4.8(a)で $\gamma=0.95$ 、図(b)で $\gamma=0.88$

真珠・図4.9で、 $\gamma=0.90$

となる。 G_{ID} と G_{ph} の間には強い相関がある。このことより、提案するぼけ度

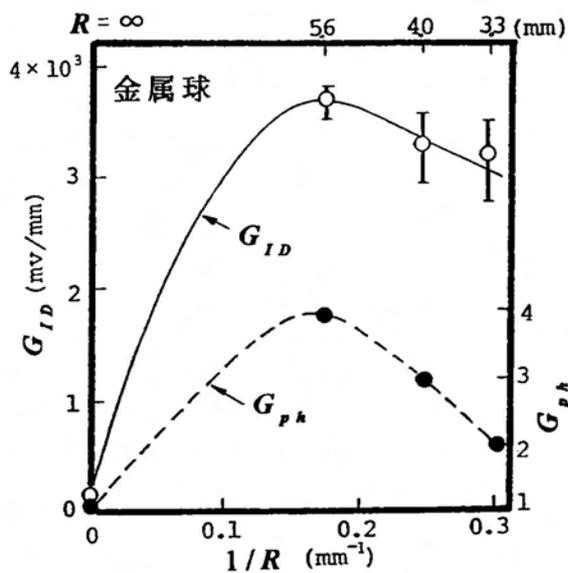


(a)

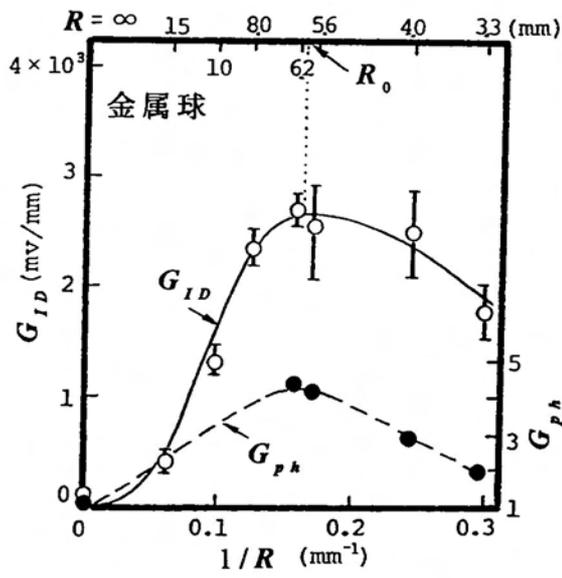


(b)

図4.7 エナメル塗装球の曲率半径 R とぼけ度合光沢度 G_{ID} 及び心理的光沢度 G_{ph} の関係



(a)



(b)

図4.8 金属球の曲率半径 R とぼけ度合光沢度 G_{ID} 及び心理的光沢度 G_{ph} の関係

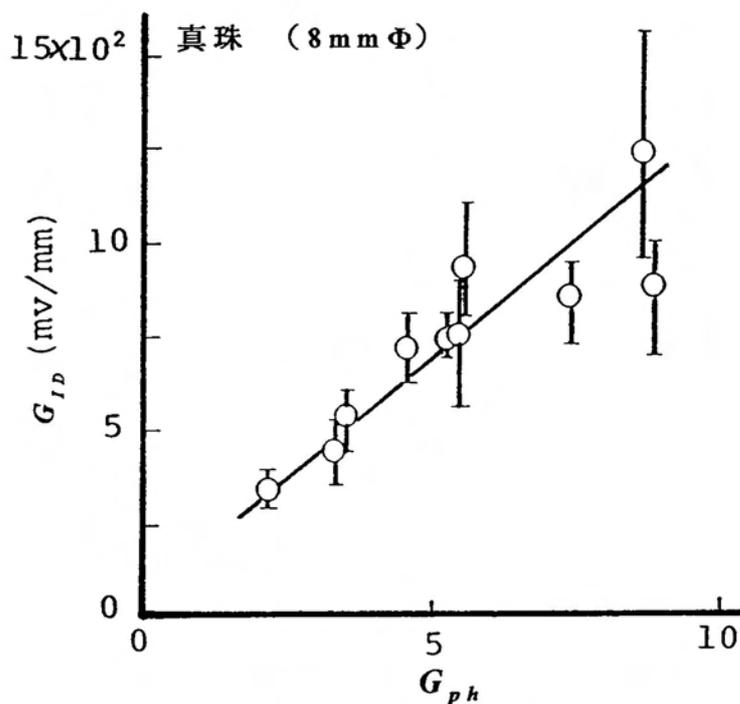


図4.9 球形真珠のぼけ度合光沢度 G_{ID} と心理的光沢度 G_{ph} の関係

合光沢度 G_{ID} は曲率半径の異なる物体に適した光沢評価量と言える。

4. 4. 2 光源の検討⁽⁷⁹⁾

ぼけ度合光沢度 G_{ID} が色に対応できるか否かを知るために、本装置の光源の種類を変えて G_{ID} を測定した。図4 10(a)は蛍光灯、(b)はハロゲンランプの場合の結果である。ただし、この測定では、測定自動化のため、受光器にTVカメラを用い、TVカメラの映像信号は画像処理装置に取り込まれた。そして、画像処理装置につながれているパーソナルコンピュータによって、ぼけ度合光沢度 G_{ID} が計算された。横軸の心理的光沢度は一対比較法によって得られた。また、これらに対して分散分析を行ない、各効果の有意性を検定（危険率5%）した結果を表4.1に示す。この表の中の F は分散比を表す。表中の（*）

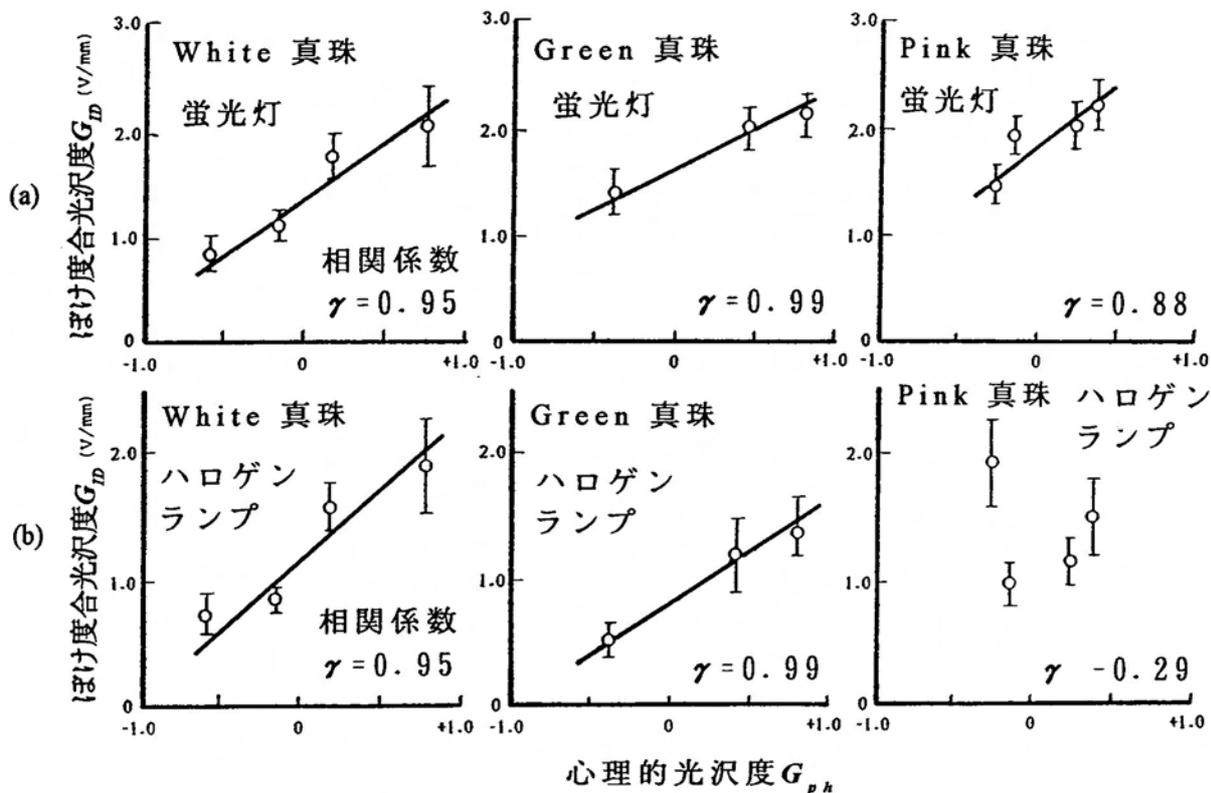


図4.10 ぼけ度合光沢度 G_D と心理的光沢度 G_{ph} の関係, (a)蛍光灯の場合, (b)ハロゲンランプの場合

表4.1 試料の分散分析表

要因	自由度	F値 (White)	F値 (Green)	F値 (Pink)
主効果	9	330*	489*	94*
主効果×個人	81	1.22	1.41	2.39*
組み合わせ効果	36	3.90*	3.81*	1.2
誤差	324	-	-	-

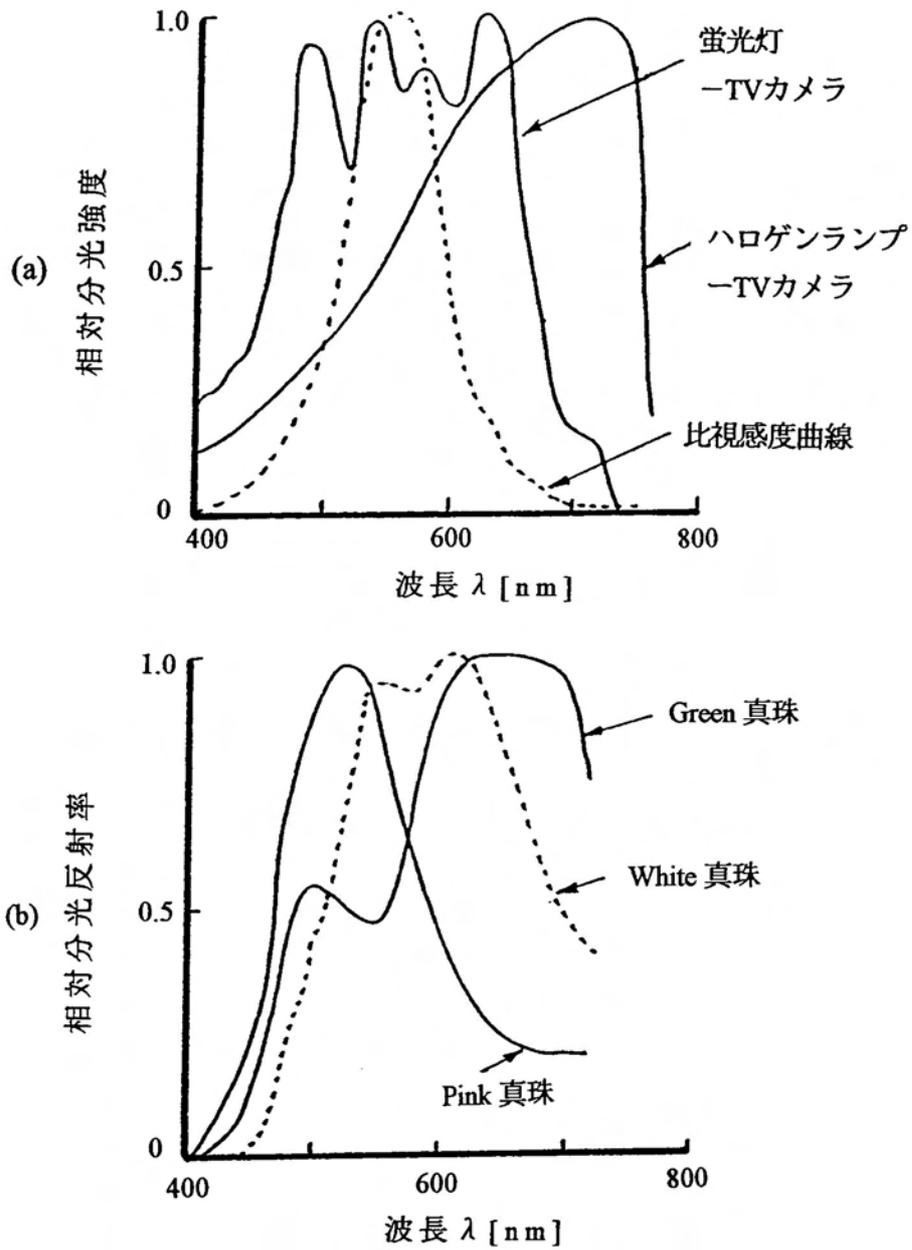


図4.11 (a) 蛍光灯-TVカメラ, ハロゲンランプ-TVカメラの相対分光特性と人間の比視感度曲線
(b) 真珠の相対分光反射率

表4.2 図4.11の各曲線における最大値に対応する波長

真珠		蛍光灯-TV	ハロゲン-TV
種類	λ_p (nm)	λ_F (nm)	λ_H (nm)
White	600	450~650	600~750
Green	650		
Pink	520		

印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果（心理的光沢度）が有意であるといえる。また、個人差や組合せ効果の影響がみられるものもある。しかし、その程度は F 値（ $F_{324}^{81}=1.43$, $F_{324}^{36}=1.55$ ）と比較して大差なく、若干の個人差や組合せ効果があるとみてよい。

図4.10(a)と(b)を比較すると、White真珠やGreen真珠では光源の色が変わっても $G_{p,k}-G_{I,D}$ 特性は殆ど変わらない。一方、Pink真珠の場合、蛍光灯を用いると、図4.10(a)の右端に示すように $G_{I,D}$ は $G_{p,k}$ に比例し相関係数 γ も0.88と高い。これに対し、ハロゲンランプを用いると、図4.10(b)の右端に示すように $G_{I,D}$ と $G_{p,k}$ は殆ど無関係で相関係数 γ も-0.29と低い。

このことより、Pink真珠の場合にはハロゲンランプはあまり好ましくないが、その原因を検討するため、光源-TVカメラの分光特性を図4.11(a)に、真珠の分光反射率の測定結果を図4.11(b)に示した。さらに、図4.11より各光学的特性曲線の最大値に対応する波長を表4.2にまとめて示した。表4.2によると、Pink真珠の最大値対応波長 λ_p は520nmで、蛍光灯TVカメラの最大値対応波長 λ_F は450~650nmであるから、Pink真珠の λ_p は λ_F の範囲内に入る。これに対し、ハロゲンランプ-TVカメラの最大値対応波長 λ_H は600~750nmであるから、 λ_p は λ_H の範囲内に入らない。従って、光源にハロゲンランプを用いた場合には、Pink真珠からの主要反射光は受光器に検知されな

いことになる。以上のことより、Pink真珠の光沢度測定にはハロゲンランプよりも蛍光灯の方が適しており、光源-受光素子の相対分光特性が被視感度曲性に近いほうが望ましいことがわかる。しかし、これだけの実験ではデータが少ないので、これについてはさらに研究しなければならない。

4. 5 光沢測定の高精度高速化⁽⁷⁹⁾

4. 5. 1 高精度高速化の手段

CCDラインセンサを用いたぼけ度合光沢度測定方法は、塗装球、浜あげ真珠等の光沢測定に有効であるが、光沢差の小さい商品真珠の光沢測定には十分でない。そこで、PSD（位置検出素子）を用いた光沢度測定法を開発した。本方法でもぼけ度合光沢度を測定するので、本方法はぼけ度合光沢度測定装置の改良版と考えられる。しかし、測定手法はCCDラインセンサによる方法と全く異なる。この方法は白色系商品真珠の光沢分類に有用である。以下にその手法について述べる。

ここではPSDを光沢度センサとして使用するが、PSDは一般に位置検出のための素子として使用される⁽⁸³⁾⁽⁸⁴⁾。本研究で使用したPSDは、10mm×10mmのエリアセンサである。以下、PSDについて概要を述べる⁽⁸⁵⁾。PSDは受光面上に入射したスポット光の位置を検出するセンサである。図4 12はPSDセンサの受光面を表す。ここで、受光面の中心を原点とし、右方向に x 座標、上方向に y 座標を取る。今、 (x,y) の位置に光強度 $L(x,y)$ の光が入射したとする。それによって生じる光電流を $I(x,y)$ とする。この時、PSDの左右の電極の出力電流 I_1 、 I_2 はそれぞれ以下の式で表される。

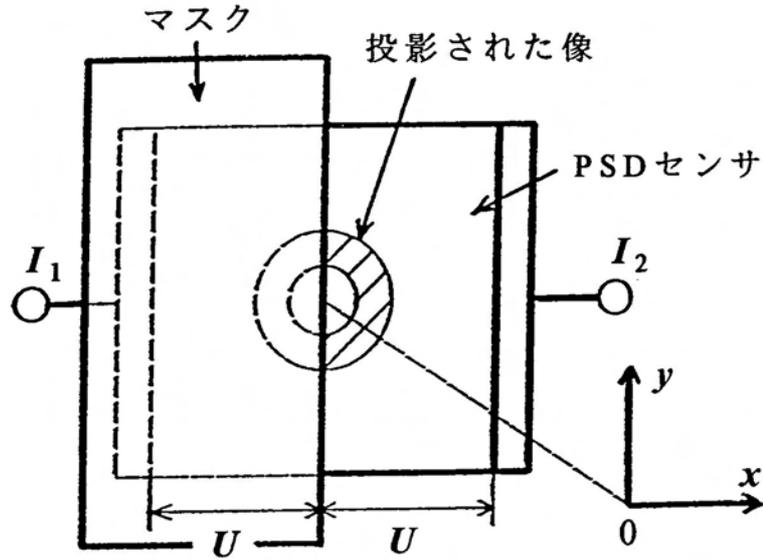


図4.12 PSD受光面と受光面上に投影された像

$$I_1 = \frac{U-x}{2U} I(x,y) \tag{4.8}$$

$$I_2 = \frac{U+x}{2U} I(x,y) \tag{4.9}$$

ここで、 $2U$ は受光面の1辺の長さである。今、受光面へ照射される光がスポット光でなくある広がりをもつ場合、左電極からの出力電流は次式で表される。

$$I_1 = \int_{-U}^U \int_u^U \frac{U-x}{2U} I(x,y) dx dy \tag{4.10}$$

ここで u は積分範囲を表す (u の値については(4.12)式の説明の時に述べる)。

今回の実験では、受光面上に球形試料の反射光分布 $L(x,y)$ が投影される。球形試料の反射光分布は正規分布に近似できるので、 $L(x,y)$ を以下の式で表す。

$$L(x,y) = L_{\max} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{4.11}$$

ここで、 L_{\max} は反射光強度分布の最大輝度、 σ は標準偏差を表す。

今回の実験においては、 $5\sigma < M$ であるので、 $\sigma \ll M$ とみなし、(4.11)式を(4.10)式に代入すれば、(4.11)式は近似的に以下の式で表される。

$$I_1 \cong K \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\mu}^{\infty} \frac{U-x}{2U} L_{\max} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) dx dy \quad (4.12)$$

ここで、 K は $I(x,y)$ と $L(x,y)$ の間の比例定数である。

PSDを光沢度センサとして使用するために、図4.12に示すように、受光面の左半分をマスクする。すると、 x 方向の積分範囲は0から ∞ となる。つまり、(4.10),(4.12)式において $\mu=0$ である。ただし、PSDを通常的位置検出素子として使用する場合は、マスクがないため積分範囲は $-\infty$ から ∞ となる。よって、 $\mu=0$ とし、(4.12)式を整理すると(4.13)式となる。

$$I_1 = \frac{K \cdot L_{\max}}{2} \sigma^2 \left(\pi - \frac{\sqrt{2\pi}}{U} \sigma \right) \quad (4.13)$$

同様の手順で右電極からの出力電流 I_2 を計算すると次のようになる。

$$I_2 = \frac{K \cdot L_{\max}}{2} \sigma^2 \left(\pi + \frac{\sqrt{2\pi}}{U} \sigma \right) \quad (4.14)$$

ここで、 $(I_2 + I_1)^4 / (I_2 - I_1)^3$ を G_{PSD} と置くと、 G_{PSD} は次のような関係がある。

$$G_{PSD} = \frac{(I_2 + I_1)^4}{(I_2 - I_1)^3} \quad (4.15)$$

$$= \frac{K \cdot U^3 \cdot \pi^{5/2} \cdot L_{\max}}{2\sqrt{2}\sigma} \propto \frac{L_{\max}}{\sigma} \propto G_{ID} \quad (4.16)$$

このように G_{PSD} はぼけ度合光沢度 G_{ID} に比例する。よって、 G_{PSD} を用いて光沢度を測定することが可能である。 G_{PSD} の利点は高速高解像度の点にある。CCDラインセンサを用いる場合は、反射光分布の最大値と半値幅を求める必要があるため、CCDラインセンサの映像信号と同期を取り高速AD変換器によりパソコンに映像信号を取り込んだ後に、反射光分布の最大値と半値幅を計算する必要がある。それに対し、PSDを用いる場合は、(4.15)式からわかる

ようにPSD電極からの出力電流 I_1 , I_2 を取り出し(4.15)式を計算するだけで光沢度が求まる。また、今回の実験に使用したCCDラインセンサの解像度は1/256であるのに対し、PSDの解像度は1/5000である。よって、PSDを用いた場合、微妙な反射光分布の違いも出力として検出可能であり、光沢差の小さい試料の光沢分類に適する。

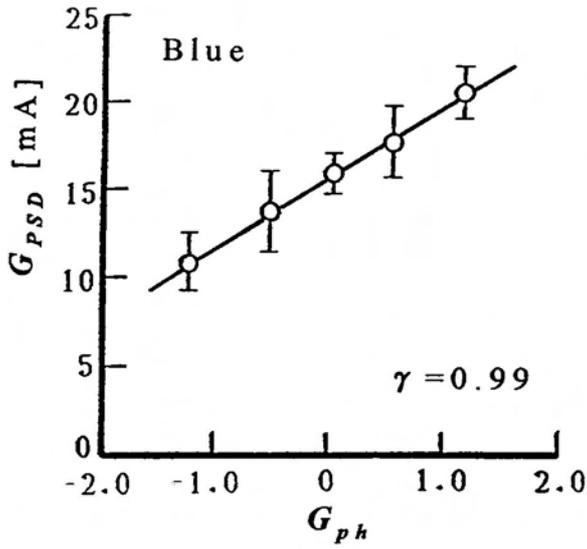
上述の手順によって光沢度 G_{PSD} を得ることが可能となったが、ここでマスクの意味について述べる。もし、PSDの左半分がマスクされていない場合、(4.12)式において $u=-U$ となるため出力電流 I_1 と I_2 は次のように等しくなる。

$$I_1 = I_2 = K \cdot L_{\max} \cdot \pi \cdot \sigma^2 \quad (4.17)$$

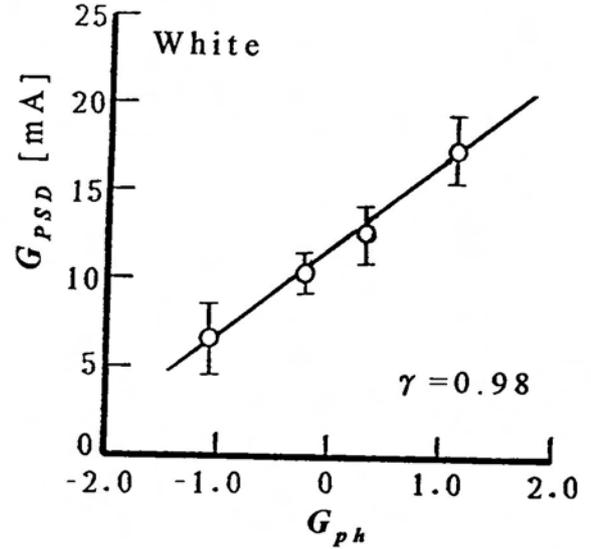
よって、(4.17)式を(4.15)式の代入すると $G_{PSD}=\infty$ となり、光沢度を得ることができない。

4.5.2 測定結果と検討

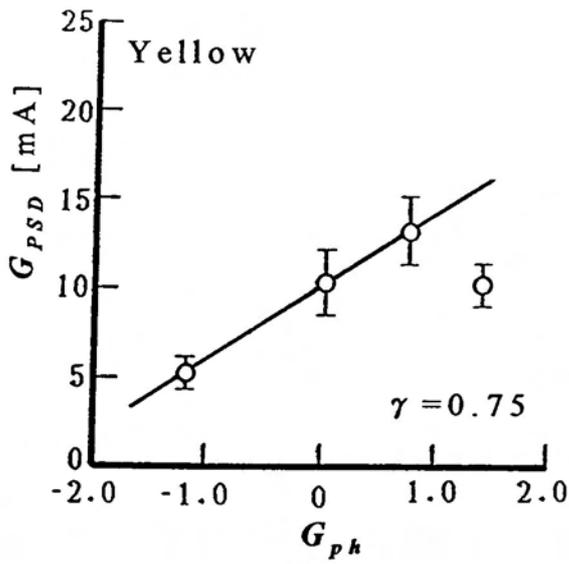
試料は一次選別後の直径8mmの高級商品真珠を使用した。試料の色はblue, white, yellowの3種類で、それぞれ10個ずつ用意した。これらの試料の物理的光沢度 G_{PSD} と心理的光沢度 G_{pk} の関係を図4.13に示す。心理的光沢度の測定には一対比較法を用いた。ただし、この図には有意差検定(危険率5%)により光沢に有意差があるとみなされた試料のみが示されている。被験者数は成人男性14名である。これらの試料の分散分析結果を表4.3に示す。この表のなかの F は分散比を表す。表中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であるといえる。また、グループによっては個人差や組合せ効果の影響がみられるものもある。しかし、その程度は F 値($F_{468}^{117}=1.35$, $F_{468}^{36}=1.50$)と比較して大差なく、若干の個人差や組合せ効果があるとみてよい。図4.13中には G_{PSD} と G_{pk} の相関係数 γ も示



(a)



(b)



(c)

図4.13 球形真珠の物理的光沢度 G_{PSD} と心理的光沢度 G_{ph} の関係
(a)Blue真珠, (b)white真珠, (c)yellow真珠の場合

表4.3 試料の分散分析表

要因	自由度	F値 (Blue)	F値 (White)	F値 (Yellow)
主効果	9	804*	424*	685*
主効果×個人	117	2.21*	1.3	1.94*
組み合わせ効果	36	0.7	3.91*	3.81*
誤差	468	-	-	-

されている。**blue**真珠の相関係数 γ は0.99、**white**真珠の相関係数 γ は0.98と高い。一方、**yellow**真珠の相関係数 γ は0.75である。これは**yellow**真珠の中で G_{pk} の最も高い試料は、他の試料と色がわずかに異なり、**pink**色を含んでいるからである。実際の真珠は、一つの色系の中にも、色の濃いものから薄いもの、白色系、黄色系、黒色系の中間色のものなどどちらとも判断できないものも多く、中間色に属するものはあらかじめ色選別によって取り除く必要がある⁽¹³⁾。そこで、この試料をあらかじめ除けば相関係数 γ は0.99となる。よって、新光沢度 G_{psd} は色分類後の同色の高級商品真珠の光沢分類に有効である。

ここで、光沢度 G_{psd} が光沢差の小さい試料の光沢測定に有効である理由を考える。前述のCCDラインセンサの画素数は256である。この中で反射光分布の半値幅と等価な画素数は約30～50画素である。この画素数は、光沢差の類似した試料間の光沢差を区別するのには不十分である。一方、PSDの解像度は1/5000であり、反射光分布のわずかな違いでも出力電流は変化しやすい。このため、光沢のわずかな違いでも G_{psd} は変化しやすい。また、PSDは1つの半導体素子であるので応答速度が速く、1回の計測にかかる時間は10msecと非常に高速である。

4. 6 拡散反射光を含む物体への対策

4. 6. 1 拡散反射光を含む物体への適用方法

ぼけ度合光沢度は，測定対象が，塗装曲面，球形真珠等の高光沢物体であるため，紙のように低光沢から高光沢まで測定範囲が広く拡散光を多く含んだ試料の光沢測定には適さない。ここでは，ぼけ度合光沢度をこのような場合にも適用できるように改善する⁽⁸¹⁾⁽⁸²⁾。

図4.14に測定装置の構成を示す。<4.4節>の結果より，光源-受光素子の相対分光特性が被視感度曲性に近いほうが望ましいことがわかったので，光源には標準光に近い分光特性を持つ演色光源（岩崎製，HYLUX4500K）を用い，また光受光器として，被視感度曲線と類似した受光感度曲線を持つTVカメラ（東京電子工業，VC-810B）を用いた。また，点光源とするため光源の前に直径2mmの穴の開いた遮光板を置いた。試料から反射された光はTVカメラに入力され，さらにその映像出力信号は，画像処理装置（エデック

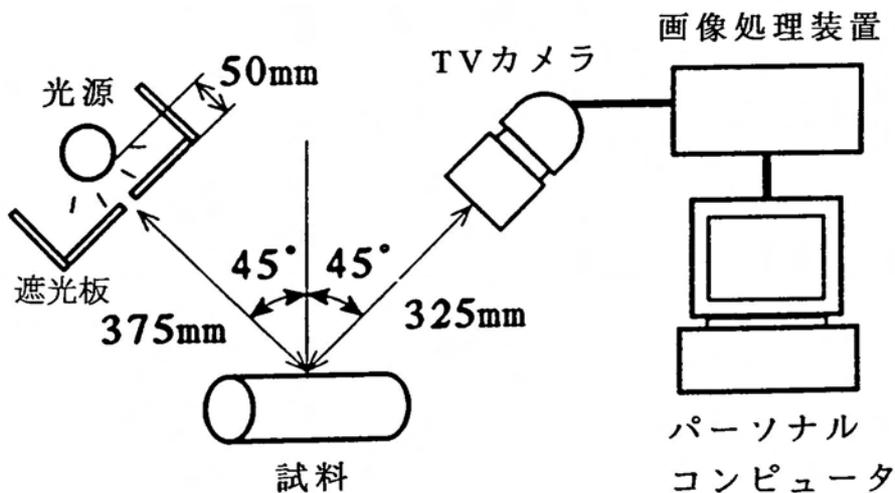


図4.14 $\sqrt{2}G$ 光沢度 G_g の測定装置の構成

製，ED-1181，256×256画素，256階調度）に取り込まれる。

使用した試料は，平面状態で光沢の異なる4種類の白色紙（平面時の鏡面光沢度 G_s がそれぞれ84.2，75.4，46.1，9.6）である。これらを半径の異なる6種類の円筒（半径3，4，7.5，9.5，14，30mm，長さ10cm）の側面に巻き付け，計24枚の円筒試料を作成した。心理的光沢度の測定には順位配列法を用いた。測定手順は第3章の<3.3節>と同様である。円筒試料の場合1方向は平面であるが，TVカメラの垂直走査方向が試料の平面方向となるように試料を置いた。

図4.15(a)に中光沢試料における反射光強度が最大となる画素を含む水平走査方向の反射光強度分布の例をに示す。縦軸は反射光の輝度を表す。また，図中において反射光強度分布の最大輝度を L_{max} とする。横軸は試料の水平走査方向の長さを表す。参考のためTVカメラ受光面上の50画素の長さも図上に

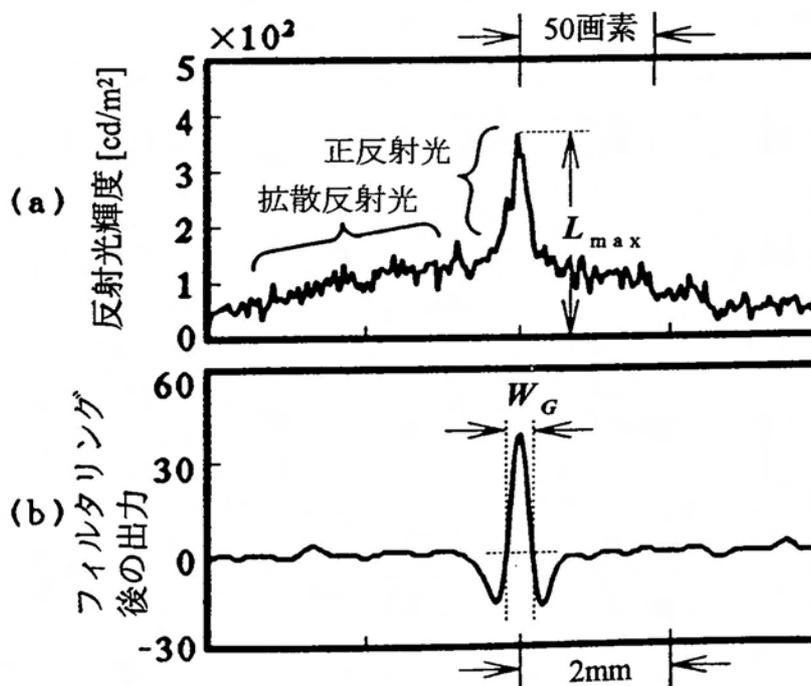


図4.15 (a)中光沢試料の反射光強度分布と，(b)それを(4.18)式によってフィルタリングした分布波形

示す。図4.15(a)より、反射光強度分布の中央付近が非常に急峻になっていることがわかる。これは、試料の表面に光源の像が投影されているためである。波形の急峻さは光沢と非常に相関がある。ぼけ度合光沢度 G_{ph} を表す要素の一つとして、正反射光成分の半値幅 W がある。しかし、この図からわかるように、反射光分布中に拡散反射成分が多く含まれる。このため、この分布の半値幅を求めても、それが正反射光成分の半値幅とはならない。そこで、今回は試料の反射光強度分布 $L(x,y)$ を、(4.18)式で示すLaplacian-Gaussianフィルタ($\nabla^2 G$)による空間フィルタリングを行った(86)。

$$\nabla^2 G(x,y) = K_0 \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4.18)$$

ここで、 K_0 、 σ は定数である。このフィルタは人間の網膜の空間感度分布曲線に類似した分布特性を持つ(87)(88)(89)。

図4.15(b)は、図4.15(a)の試料の反射光強度分布 $L(x,y)$ を(4.18)式で

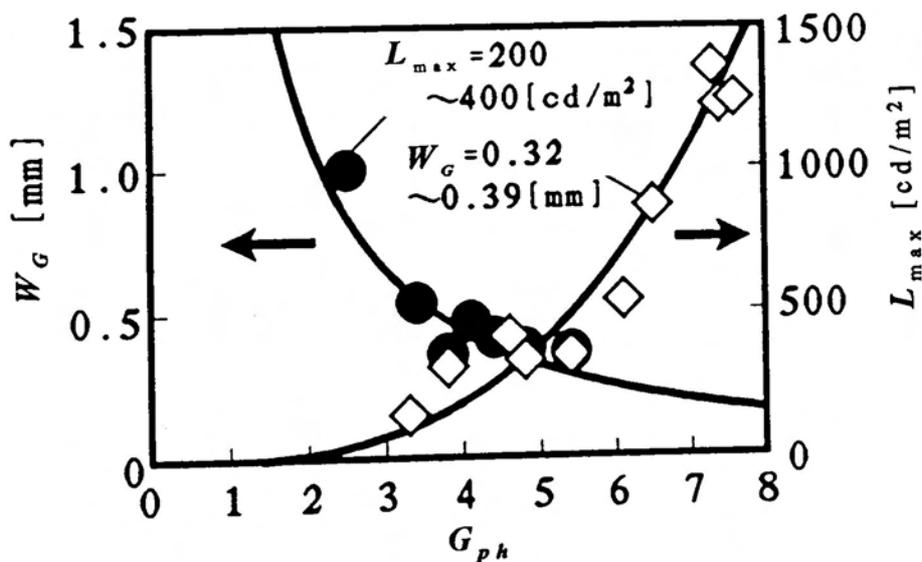


図4.16 心理的光沢度 G_{ph} と W_G 及び G_{ph} と L_{max} の関係

フィルタリングした後の図4.15(a)と同一ラインの分布波形を示す。縦軸がその出力の大きさを示しており、図中に示されるように出力が正となる幅を W_G とする。ただしこの時、(4.18)式の定数は $K_0=1, \sigma=0.14\text{mm}$ (4画素)とした。横軸は図4.15(a)と同様である。急峻な波形ほど W_G は小さい。また、心理的光沢度は反射光強度にも影響される。そこで、両者と心理的光沢度の関係を調べた。その結果を図4.16に示す。横軸は心理的光沢度 G_{ph} 、左の縦軸はフィルタ後の分布の出力が正となる幅 W_G 、右の縦軸は反射光分布の最大輝度 L_{max} を表している。この図には、 L_{max} のほぼ等しい ($L_{max}=200\sim 400\text{cd/m}^2$) 試料に対する G_{ph} と W_G の関係 (図4.16の●印)、および W_G のほぼ等しい ($0.32\sim 0.39\text{mm}$) 試料に対する G_{ph} と L_{max} の関係 (図4.16の◇印) が示される。この図より G_{ph} と W_G および G_{ph} と L_{max} の関係は次のように近似される。

$$G_{ph} \propto 1/(W_G - W_0)^\gamma \quad (4.19)$$

$$G_{ph} \propto (L_{max} - L_0)^\beta \quad (4.20)$$

ここで、 W_0 、 γ 、 L_0 、 β は定数で、最小自乗法によりそれぞれ0.036、0.77、10、0.33とした。第2章で述べたように低光沢から高光沢まで測定範囲が広い場合 (図4.16の試料の平面時の鏡面光沢度 G_s は9.6~84.2である) は、(4.20)式と同様の関係式が成立する。

そこで、(4.19)、(4.20)式をもとに、低光沢から高光沢までの広範囲の物体に対する新しい光沢度 G_G を次のように定義する。

$$G_G \equiv K_G \frac{(L_{max} - L_0)^\beta}{(W_G - W_0)^\gamma} \quad (4.21)$$

ここで、 K_G は定数で、 $K_G=0.33$ とした。以下、 G_G をぼけ度合光沢度と区別するため、Laplacian-Gaussianフィルタ ($\nabla^2 G$) 光沢度と呼ぶ。

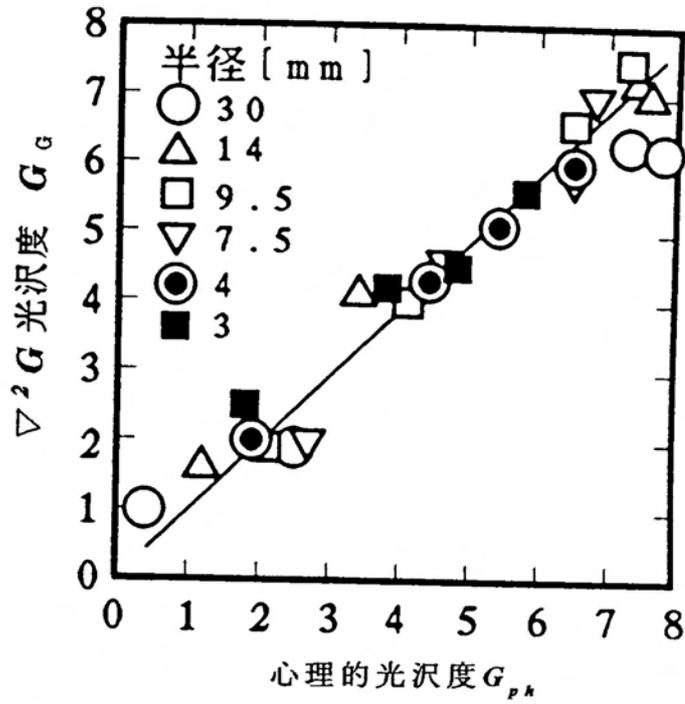


図4.17 $\nabla^2 G$ 光沢度 G_g と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係

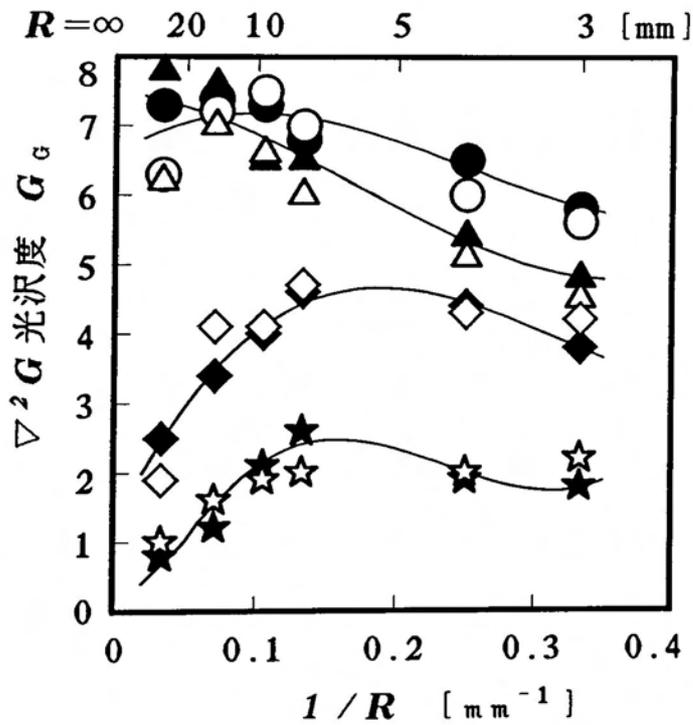


図4.18 曲率半径 R と $\nabla^2 G$ 光沢度 G_g 及び R と心理的光沢 $G_{p,h}$ 度 の関係

4. 6. 2 結果と検討

$\nabla^2 G$ 光沢度 G_G と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係が図4.17に示される。この図には、低光沢から高光沢までの種々の試料が用いられている（平面時の鏡面光沢度 G_p が 9.6～84.2）。また、図4.16(a)に示すように拡散反射成分が多く含まれる。この図より両者はほぼ直線関係にあることがわかる。

図4.18に曲率半径 R と ∇^2 光沢度 G_G の関係および R と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係を示す。図中の白抜きの印（○，◇，△，☆）が心理的光沢度 $G_{p,h}$ を，黒塗りの印（●，◆，▲，★）が ∇^2 光沢度 G_G を表す。この図より，心理的光沢度 $G_{p,h}$ が曲率半径 R によって異なることがわかるが，ここで提案している新光沢度 G_G も心理的光沢度 $G_{p,h}$ と同様の傾向を示す。以上の結果より，今回の測定法は，低光沢から高光沢まで測定範囲が広く拡散反射成分が多く含まれる物体の光沢度測定に有効であると言える。

次に， $\nabla^2 G$ 光沢度 G_G とぼけ度合光沢度 $G_{I,D}$ との関係について考察する。ぼけ度合光沢度 $G_{I,D}$ は比較的光沢の高い物体の光沢測定に適している。今，高光沢物体における G_G と $G_{I,D}$ の関係を考える。高光沢物体に対しては $W \propto W_G$ であるので，ぼけ度合光沢度は $G_{I,D} (=L_{max}/W)$ は次のように表せる。

$$G_{I,D} = K_g \cdot L_{max} / W_G \quad (4.22)$$

ただし， K_g は比例定数である。図4.17に示される試料の中で心理的光沢度が5以上の比較的光沢の高い試料は， $L_{max} = 300 \sim 2000 \text{ cd/m}^2$ ， $W_G = 0.25 \sim 0.35 \text{ mm}$ である。そこで，この範囲内で， L_{max} と W_G の値を様々変化させ，(4.21)式と(4.22)式で表される G_G と $G_{I,D}$ を計算し，両者の関係を調べた。その結果を図4.19に示す。この図より，高光沢試料（心理的光沢度が5以上の試料）に限定すれば， G_G と $G_{I,D}$ はほぼ直線関係にあると言える。このことは実験的にも確かめられる。図4.20は，心理的光沢度が4以上の試料に対する

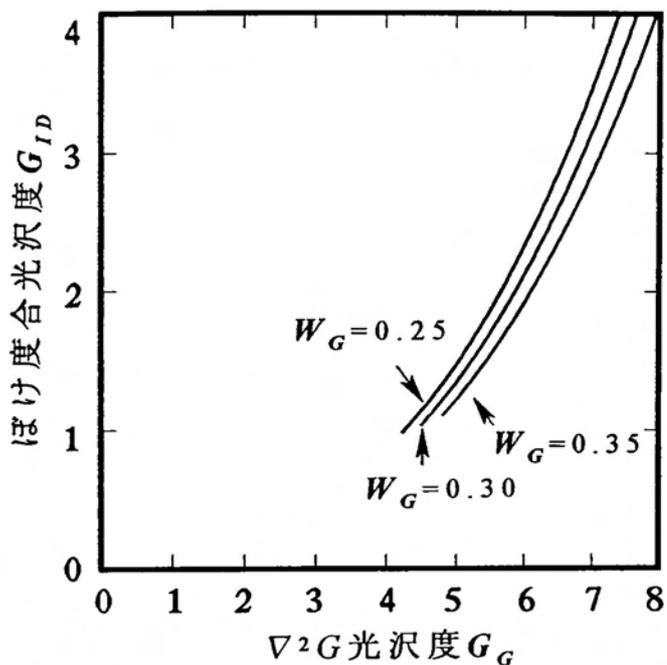


図4.19 L_{max} を W_G を変化させ、(4.21)式と(4.22)式に代入して計算したぼけ度合光沢度 G_{ID} と $\sqrt{2}G$ 光沢度 G_G の関係

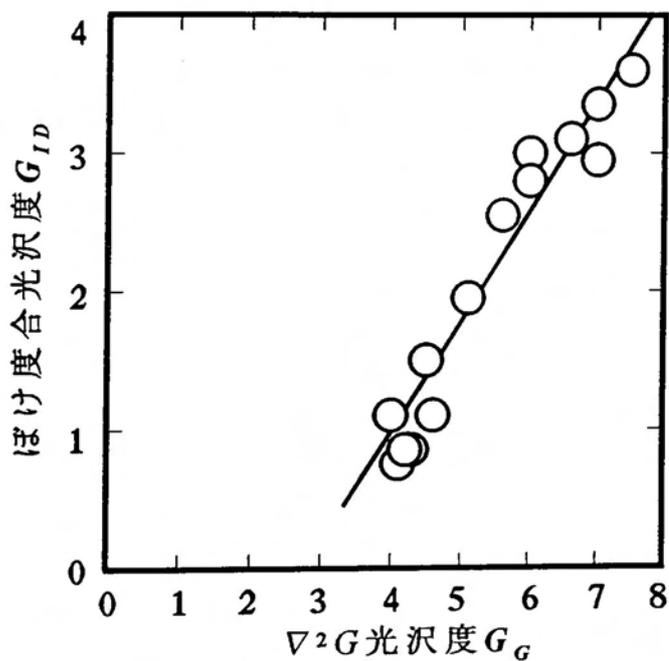


図4.20 図4.17に示される試料の中で、心理的光沢度が4以上の試料に対するぼけ度合光沢度 G_{ID} と $\sqrt{2}G$ 光沢度 G_G の関係

G_G と $G_{I,D}$ の関係を示しているが、両者は直線関係にある。よって、高光沢物体の光沢を測定する際、 $G_{I,D}$ の代わりに G_G を用いても問題ない。また、(4.21)式の係数を $\beta=\gamma=1$ 、 $L_0=W_0=0$ とおき、 $W_G=W$ とすれば、 $\nabla^2 G$ 光沢度 G_G はぼけ度合光沢度 $G_{I,D}$ と比例関係にある。したがって、 $\nabla^2 G$ 光沢度 G_G はぼけ度合光沢度 $G_{I,D}$ を低光沢物体用に拡張した光沢度と考えることができる。以上の結果より、 G_G は、低光沢から高光沢までの広範囲の曲面物体の光沢測定に有効である。ただし、この方法では2次元の画像データを畳み込み積分する必要があるので、1回の測定に数秒かかる。測定対象が高光沢試料に限定されていて、高速処理が必要な場合は、<4.5節>で述べたPSDによる方法の方がより有効であろう。

4.7 むすび

CCDセンサを用いて試料の反射光強度分布を測定し、その分布曲線より映像の鮮明さ、すなわち、曲面物体表面の映像のぼけの度合を求める方法を開発した。この方法による物理的光沢度、すなわち、ぼけ度合光沢度は、曲率半径が一定の物体は勿論、曲率半径の異なる物体の場合も、心理的光沢度とかなりよい相関を示し、従来のn点拡散光沢度が曲面物体に対して有する問題点が解決される見通しを得た。よって、本研究結果は、塗装曲面、球形真珠のような高光沢の曲面物体の光沢度測定に役立つと思われる。

次に、ぼけ度合い光沢度測定装置を改良し、PSDを用いることにより、高速高精度に測定可能な方法を提案した。この方法は高級商品真珠のように光沢差の小さい高光沢物体を対象にした光沢度測定である。

さらに、測定範囲を拡張し、低光沢で拡散反射成分を多く含む物体の場合でも測定可能なようにぼけ度合光沢度測定方法を改善した。この方法で得ら

れる光沢度 G_c は、低光沢から高光沢までの広範囲の曲面物体の光沢測定に有効である。しかし、測定対象が高光沢試料に限定されていて、高速処理が必要な場合は、PSDによる方法の方がより適している。

以上より、本章で提案した方法は曲面物体の光沢度測定に有効である。

第5章 彩色物体の光沢度測定法

5.1 まえがき

色と光沢の関係については未だに不明な点が多い。表面状態や物体の形状が等しくても、物体の色が異なると光沢感は異なるがこの原因は明らかでない。また、この種の報告も少ない⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。例えば、文献(48)では、明度と光沢の関係を表す模式図が示されているのみである。また文献(49)では、物体の表面に様々な光沢の材料を塗布することによって、物体の色相、明度、彩度がどのように変化するかを調べており、その結果の一部として、光沢が高くなるにつれて明度が低下することおよび彩度が上昇することが定性的に報告されている。しかし、あくまでも光沢の違いによる色の変化を主眼としているため、物体色の変化によって光沢感がどのように変化するか定量的にはわからない。

本章では、物体色、つまり色の3要素（色相、彩度、明度）が、光沢に及ぼす影響を直接調べる。次に、それらの結果をもとに色と光沢の関係式を作成する。さらに、第2章で提案した物理的光沢度 G_p をこの式によって補正する。これによって、従来では不可能であった色の異なる試料の光沢測定の見通しを得る⁽⁹⁰⁾。

5.2 明度・彩度・色相の心理的光沢度への影響

5.2.1 試料

試料は以下のような方法で準備した。図5.1に示すように、直径28mm、長

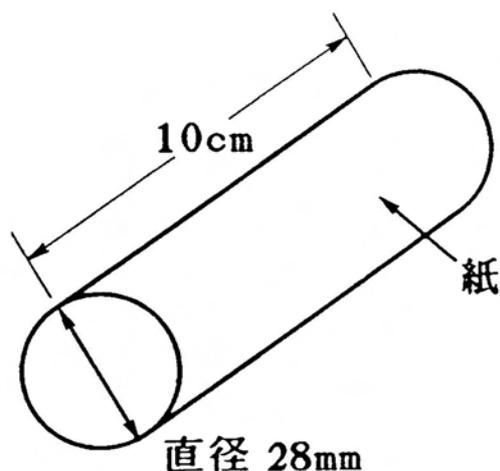


図5.1 試料の形状

さ10cmのプラスチック製の円筒に、様々な色の紙を巻き付ける。使用した紙は色彩紙（東洋インキ製，TOYO80 COLOR FINDER，1050色）である。さらにその上には透明なフィルムを巻き付ける。これは、表面の粗さが試料によって異なることを防ぐためである。これによって物体表面はほぼ同一と考えることができ、表面から反射する正反射光強度は試料の違いにかかわらずほぼ一定とみなすことができる。また、試料の形状を円筒としたのは以下の理由による。一般に、物体から反射してくる光は正反射光と拡散反射光に分けられる。正反射光は物体表面から反射する光であり、物体表面に映る光源や周囲の像がこれに相当する。拡散反射光は一度物体内部に透過し、内部で透過、反射、吸収を繰り返して表面に出てくる光であり、この光によって物体本来の色が知覚される。我々は、物体の表面に物体本来の色とは別の光である正反射光が存在することによって光沢感を知覚する。試料を平面とした場合、被験者の位置によって正反射光が知覚される場合と知覚されない場合がある。一方、試料を円筒にすると試料の側面に沿って正反射光が映りやすく、被験者の位置が若干変化しても正反射光を知覚できる。このため試料の形状を円筒とした。

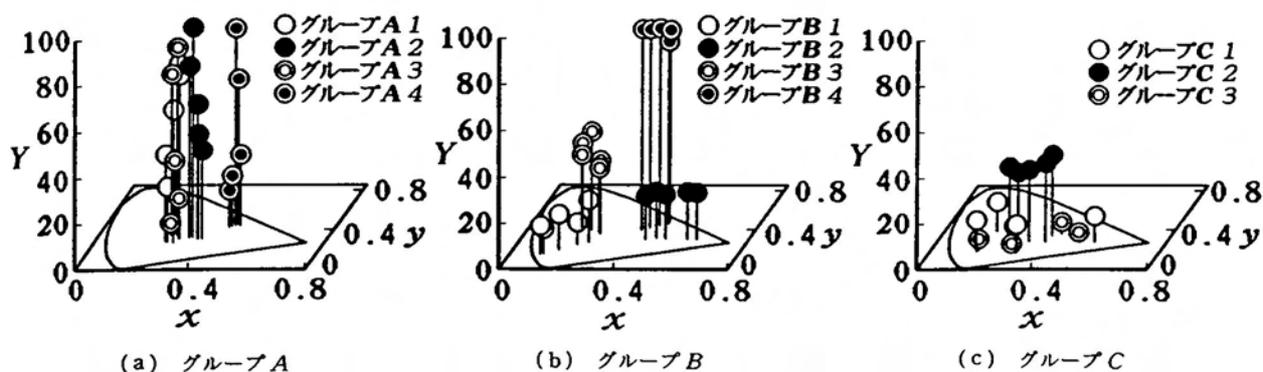


図5.2 測定に使用した試料の三色表示

今回は心理的光沢度に及ぼす色相，彩度，明度の影響を調べるため，試料をA，B，Cの3つのグループに分けた。Aグループは彩度，色相がほぼ等しく明度が異なる試料，Bグループは明度，色相がほぼ等しく，彩度が異なる試料，Cグループは明度，彩度がほぼ等しく色相が異なる試料である。今回の実験に用いた試料の色の特性を図5.2に示す。Yは視感反射率，x，yはCIE1931xy色度座標⁽⁷⁴⁾である。物体色の表示法はCIE1931xy色度座標とマンセル表色系⁽⁹¹⁾に大別される。マンセル表色系の方が直感的にわかりやすいが，CIE1931xy色度座標は微妙な色の差まで数値として表すことができるので，今回は，CIE1931xy色度座標を用いた。Aグループは色相の違いによりさらにA1，A2，A3，A4に細分類される。Bグループは色相の違いによりB1，B2，B3，B4に細分類される。Cグループは明度の違いによりさらにC1，C2，C3グループに細分類される。

5. 2. 2 明度と心理的光沢度の関係

心理的光沢度測定のために，一対比較法の一つである中谷変法⁽⁷³⁾を用いた。測定手順は，<3.1節>で詳しく述べているので省略する。被験者数は15で，

すべて成人男性である。実験は図5.2に示される各グループ毎に別々に行った。

表5.1に、明度の異なる試料に対する一対比較実験データを用いて、分散分析を行ない各効果の有意性を検定した結果を示す。この表のなかの F は分散比を表す。 F 分布表より求めた自由度4, 36, 6における5%の F 値はそれぞれ

$$F_{54}^4 \cong 2.53, F_{54}^{36} \cong 1.59, F_{54}^6 \cong 2.25 \quad (5.1)$$

であり、表の中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であるといえる。また、グループによっては個人差や組合せ効果の影響がみられるものもある。しかし、その程度は F 値(F_{54}^{36} , F_{54}^6)と比較して大差なく、若干の個人差や組合せ効果があるとみてよい。

主効果(心理的光沢度)が有意であることがわかったので、図5.3に同彩度、同色相の状態における視感反射率 Y と心理的光沢度 G_{pk} の関係を示す。縦軸は心理的光沢度 G_{pk} 、横軸は視感反射率 Y を表す。図中に示される曲線は以下の式で表される。

$$G_{pk} = k_1 \left(\frac{1}{Y} + k_2 \right) \quad (5.2)$$

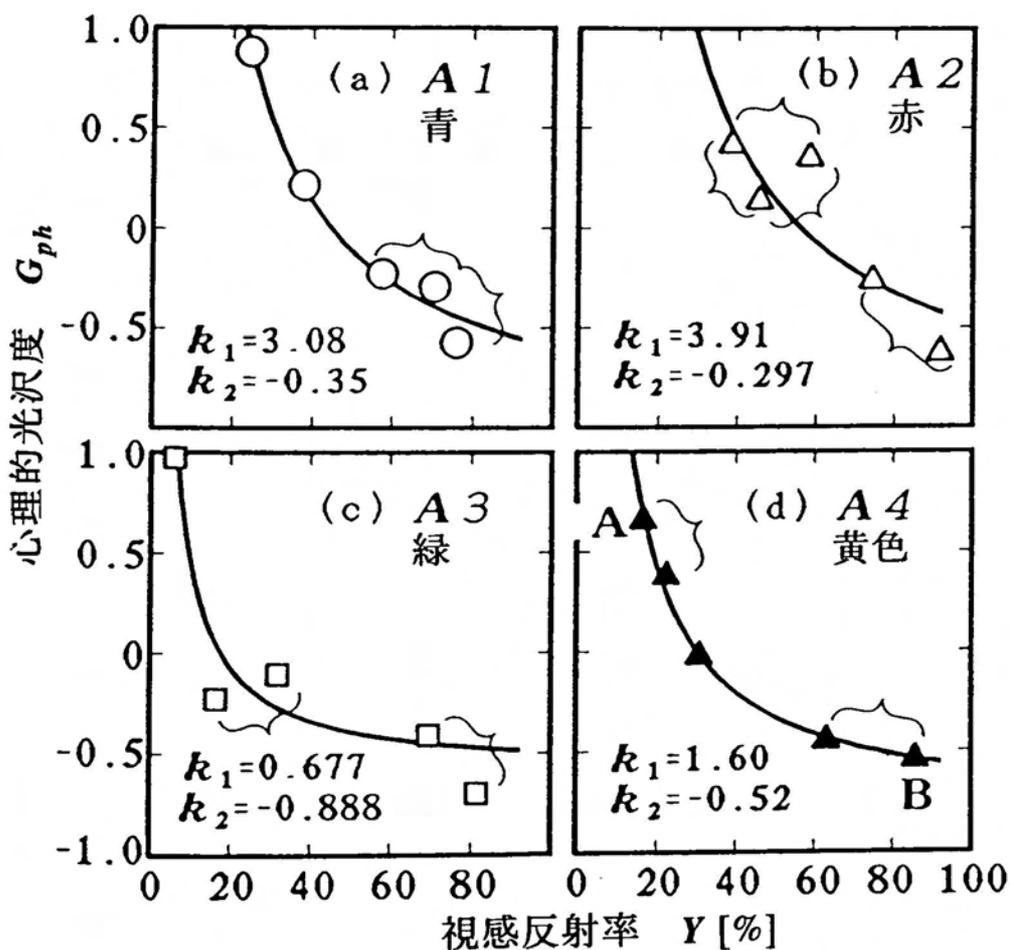
ここで、 k_1 , k_2 は定数である。ただし、図中の(a), (b), (c), (d)では、それぞれ別々の k_1 , k_2 の値が使用されている。その理由は、心理的光沢度は各グループ毎に別々に見積もられているため、図中の(a), (b), (c), (d)では心理的光沢度の間隔尺度が異なるためである。明度 V と視感反射率 Y の関係式は以下のように表され⁽⁹²⁾、両者は単調増加の関係にある。

$$Y = 1.2219V - 0.2311V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008484V^5 \quad (5.3)$$

図中の括弧で示される試料間には有意差検定により有意差がないとみなされた

表5.1 グループAの分散分析表

要因	自由度	A1 F	A2 F	A3 F	A4 F
主効果	4	26.0*	13.5*	55.8*	22.4*
主効果 ×個人	36	2.11*	1.50	3.10*	2.56*
組合せ 効果	6	3.75*	3.23*	1.83	1.67
誤差	54	-	-	-	-



- (a) グループ A 1, (b) グループ A 2
(c) グループ A 3, (d) グループ A 4

図5.3 心理的光沢度 G_{ph} と視感反射率 Y の関係

試料である。つまり、それらの2つの試料間の光沢差を人間は区別できない。これらの図からわかるように、どの色の試料の場合も、物体の視感反射率 Y が増加するにつれて心理的光沢度 G_{pk} が減少することがわかる。このことと(5.3)式より、明度 V の増加に伴って心理的光沢度 G_{pk} が減少すると言える。

5. 2. 3 彩度と心理的光沢度の関係

表5.2に、彩度が異なる試料に対する一対比較実験データの分散分析結果を示す。表の中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であるといえる。また、グループによっては若干の個人差や組合せ効果の影響がみられる。

CIE1931 xy 色度座標と視感反射率 Y から彩度を求めるためには、JISZ8721に記載されているCIE色度図とマンセル記号との対応図を用い、 V , x , y に対応する彩度を探さなければならず手続きが煩雑である。また、 V , x , y を用いて直接彩度を式として表現できない。そこで、今回は次の式を彩度評価量 S として用いた。

$$S = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (5.4)$$

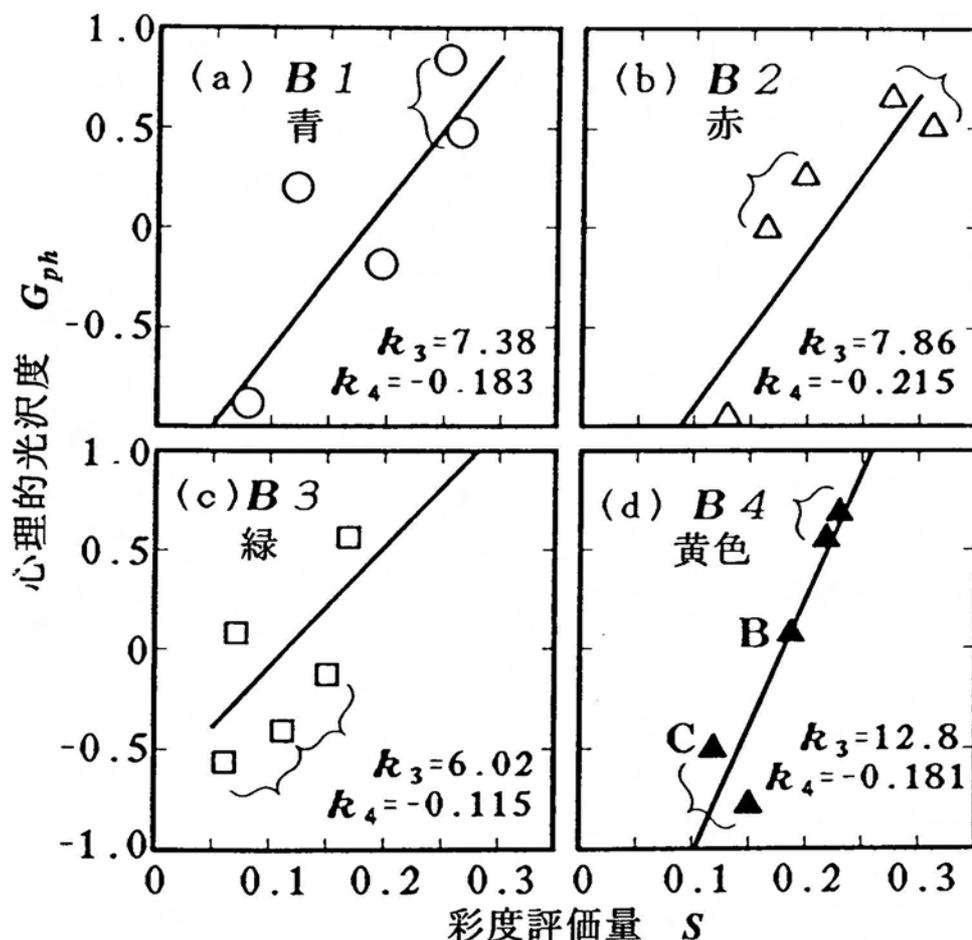
ここで、 (x, y) は試料の色度座標を表し、 (x_0, y_0) は無彩色点の色度座標を表す。この式は、無彩色点から試料の色度点までの距離を表し、同色相、同明度の試料に対してはこの値が大きいほど彩度が高いと言える。図5.4にほぼ同色相、同明度の試料に対する S と G_{pk} の関係を示す。図5.4に示される直線は次の式で表される。

$$G_{pk} = k_3(S + k_4) \quad (5.5)$$

ここで、 k_3 , k_4 は定数であり、その値は図中に示される。この図からわかる

表5.2 グループBの分散分析表

要因	自由度	B1 F	B2 F	B3 F	B4 F
主効果	4	82.0*	60.0*	27.7*	38.7*
主効果 ×個人	36	3.18*	3.42*	2.78*	1.44
組合せ 効果	6	3.59*	2.23	2.35	1.23
誤差	54	-	-	-	-



(a) グループ B 1, (b) グループ B 2
(c) グループ B 3, (d) グループ B 4

図5.4 心理的光沢度 G_{ph} と彩度評価量 Y の関係

ように S が大きい物体ほど G_{ps} が大きい。つまり，同色相，同明度の試料に対しては彩度が高いものほど光沢感があると言える。

5. 2. 4 色相と心理的光沢度の関係

表5.3に，色相の異なる試料に対する分散分析の結果を示す。表の中の(*)印を示している効果が有意である。この表より，主効果（心理的光沢度）が有意であるといえる。しかし，表5.1，5.2の主効果と比較すると値が非常に小さく，色相の違いが光沢に与える影響が，明度や彩度が与える影響

表5.3 グループCの分散分析表

要因	自由度	B1 F	B2 F	B3 F
主効果	4	4.40*	6.02*	7.52*
主効果× 個人	36	1.55	1.71*	2.92*
組合せ 効果	6	2.55*	2.98*	1.14
誤差	54	-	-	-

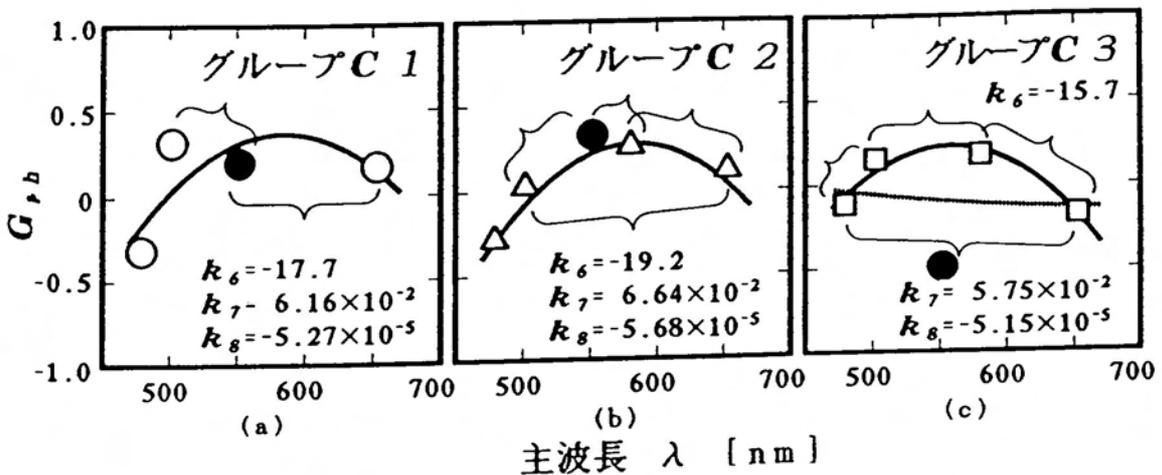


図5.5 心理的光沢度 G_{ps} と主波長 λ の関係

よりも少ないことが示唆される。また、グループによっては若干の個人差や組合せ効果の影響がみられる。

図5.5にほぼ同明度，同彩度の試料に対する物体の主波長 λ と G_{pk} の関係を示す。ここで主波長とは，CIE色度図上で，試料の座標 (x, y) と無彩色点 (x_0, y_0) を直線で結んだ延長線と，スペクトル円軌跡との交点の位置の波長のことである。また，図中の(●)印は紫色の試料を表しており，この試料には主波長が存在しないため，補色主波長を表している。図中の曲線は，次に示す2次曲線で最小2乗近似した値である。

$$G_{pk} = k_5 + k_6 \cdot \lambda + k_7 \cdot \lambda^2 \quad (5.6)$$

ここで， k_5 ， k_6 ， k_7 は定数であり，その値は図中に示される。ただし，図5.5(c)に示す曲線は(●)印の試料を除いて最小2乗近似している。(●)印の試料を含めると図中の点線のようになる。これらの図を見ると，紫色の試料を除くと，主波長約550～600[nm]付近を最大とする曲線となるように考えられるが，明確には断定できない。その理由として，有意差のない試料が多いこと，得られた心理的光沢度の範囲が-0.5～0.5と小さく試料間の光沢差が小さいことがあげられる。

5.2.5 色の光沢に及ぼす影響の説明

<5.2.2節>より明度が大きくなるにつれて心理的光沢度 G_{pk} が減少することがわかったが，この原因について考えてみる。一般に，表面に映る像が鮮明な物体ほど光沢感がある。明度が増すにつれて拡散反射光が増加するので，正反射光である像が知覚されにくくなる。このため鮮明度が低下し心理的光沢度が低下したと考えられる。

次に、彩度と心理的光沢度の関係について考えてみる。図5.4から S が高くなるにつれて心理的光沢度が高くなることがわかる。 S が大きい物体ほど彩度が高く、物体色に深みが出てくるので、投影された光源の像（正反射光）をはっきり知覚しやすい。つまり、彩度の高い物体ほど表面に映る像を鮮明に感じ、心理的光沢度が増加したものと推測される。

図5.5からわかるように、光沢と色相の相関性は小さい。相関性の小さい理由として、実際に両者の相関が小さい場合と、被験者の判定に問題がある場合が考えられる。図5.3、図5.4の結果からは被験者は試料間の光沢差を判定できており、図5.5も同一の被験者から得られている。このため、実際に相関性が小さいものと思われる。

5.3 彩色用光沢度の定義

5.3.1 表面状態の一様な場合

心理的光沢度と明度、彩度との関係を(5.2),(5.5)式のように、非常に簡単な近似式で表現した。それは以下の理由による。心理的光沢度の測定結果の中には、試料間に光沢の有意差のない場合がいくつもある。また、心理的光沢度の評点が-2~+2の範囲で実験を行ったにもかかわらず、得られた心理的光沢度はすべて-1~+1の範囲内である。このことは、試料間の光沢差が小さく、色の光沢に及ぼす影響は比較的小さいことを意味する。したがって、別の式で表現することも可能であるが、必要以上に式を複雑にしても現在の実験データのみからその妥当性を検証することは困難である。以上の理由により(5.2),(5.5)式のように簡単な式で表現した。

色相が心理的光沢度に及ぼす効果は小さいので(5.6)式を考慮しない場合、

(5.2), (5.5)式より次の関係が成立する。

$$G_{ph} \propto \left(\frac{1}{Y} + k_2 \right) (S + k_4) \quad (5.7)$$

(5.7)式の妥当性を検証するためには、あらかじめ定数 k_2 , k_4 をある値に設定しておき、任意に選択された種々の色の試料に対して、(5.7)式の右辺が心理的光沢度 G_{ph} と一致するか否かを調べる必要がある。そこで、(5.7)式の右辺を G_{col} と置き次のように表す。

$$G_{col} = \left(\frac{1}{Y} + k_2 \right) (S + k_4) \quad (5.8)$$

定数 k_2 , k_4 は以下のようにして決定した。

今、仮に図5.3(d)のグループの試料を基準とすれば、図5.3(d)に示されるように非線形最小自乗法により $k_2 = -0.52$ が決定される。また、同様に図5.4(d)のグループの試料を基準とすることによって $k_4 = -0.181$ が決定される。しかし、図5.3(d)と図5.4(d)では心理的光沢度の大きさも間隔尺度も異なるため、このようにして求めた k_2 , k_4 を基準としても意味がない。そこで図5.3(d)と図5.4(d)に示される試料の間隔尺度を同一にするため以下のような補正を行った。まず、図5.3(d)と図5.4(d)に示されるA, B, Cの試料を基準試料とし、これらの試料に対して10名の被験者により一対比較法を用いて心理的光沢度を求めた。ここで、図5.3(d)と図5.4(d)に示される試料Bは同一試料である。その結果それら試料の心理的光沢度はそれぞれ0.625, -0.042, -0.583となった。この時、分散分析によれば個人差も組み合わせ効果の影響もみられなかった。そこで、図5.3(d)と図5.4(d)のA, B, Cの心理的光沢度がそれぞれ0.625, -0.042, -0.583となるように座標を変換する。その結果を図5.6に示す。一対比較法によって推定された心理的光沢度はほぼ等間隔尺度を持っているとみなしてよいので、このように線形に座標を変換しても等

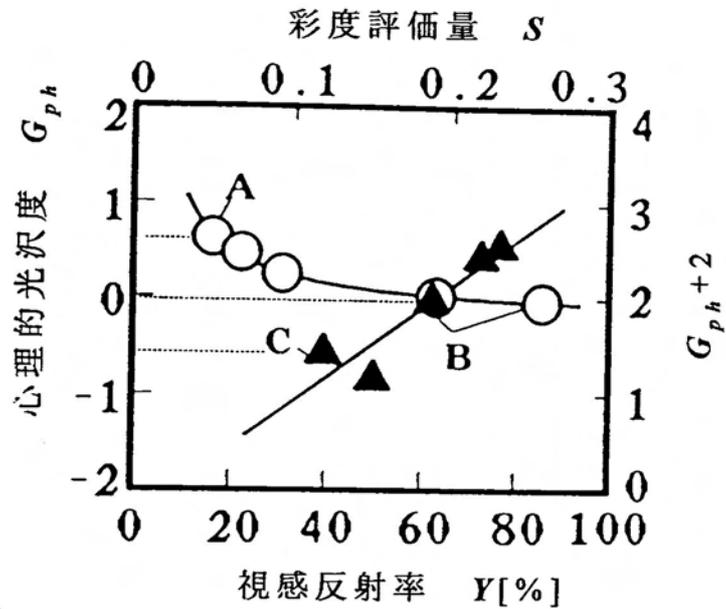
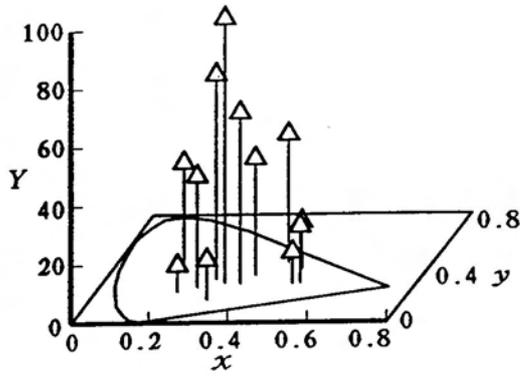


図5.6 試料A, B, Cの心理的光沢度 G_{ph} が0.625, -0.042 -0.583となるように図5.3(d)と図5.4(d)の縦軸を補正した結果

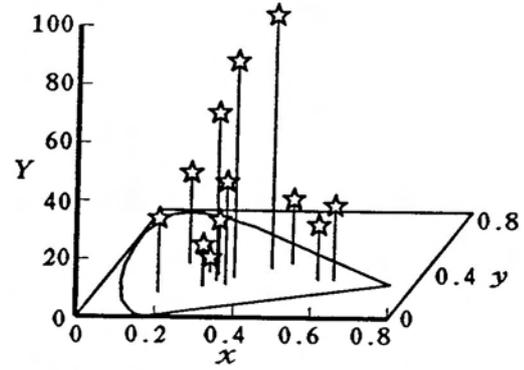
表5.4 基準とした試料の光学的特性と設定した心理的光沢度の値

試料名	CIE1931 xy 色度座標		視感反射率 Y	心理的光沢度
	x	y		
A	0.438	0.421	0.163	2.625
B	0.454	0.438	0.858	1.958
C	0.402	0.395	0.872	1.417

間隔性は保たれると考えてよい。また，一対比較法を用いた場合，各心理量の間隔には意味があるが，原点の取り方には任意性が残されており，原点の位置は意味を持たない。そこで，図5.6の右側の縦軸のように+2だけ心理的光沢度をシフトし，右側の座標の値と最も一致するような(5.2),(5.5)式の曲線の係数を非線形最小自乗法によって求めた。その時の定数 k_2 ， k_4 の値は次の通りである。

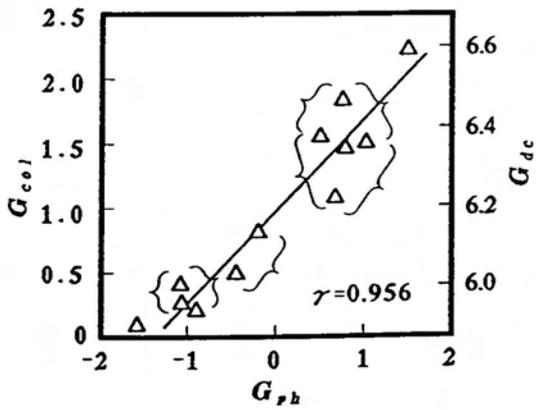


(a) グループD1

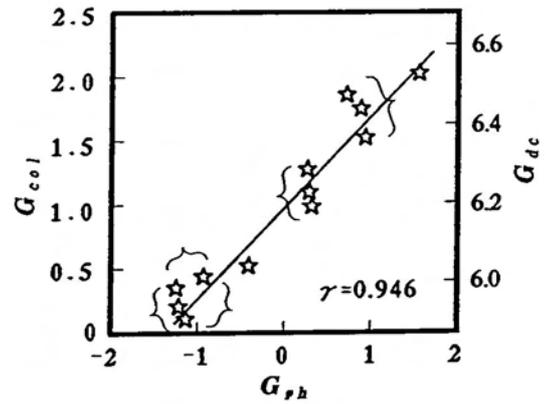


(b) グループD2

図5.7 測定に使用した試料の三色表示



(a) グループD1



(b) グループD2

図5.8 図5.7に示される試料の心理的光沢度 G_{ph} と(5.8)式によって定義された G_{col} の関係

$$k_2 = 2.02, k_4 = -0.023 \quad (5.9)$$

以上のことから定数 k_2 、 k_4 が決定された。また、この時の試料A、B、Cの心理的光沢度の値はそれぞれ、2.625、1.958、1.417である。この値を基準試料A、B、Cの心理的光沢度とする。これらの試料の光学的特性および心理的光沢度を表5.4に示す。

次に明度、彩度、色相の異なる試料を任意に12枚ずつ2グループ選び、それらの試料に対し一対比較法によって心理的光沢度を求めた。この時の被験者数は10名である。分散分析によれば若干の個人差（分散比2.08）が認められた。図5.7にこれらの試料のCIE1931 xy 色度座標と視感反射率 Y を示す。これらの試料に対して求めた $G_{c,i}$ と心理的光沢度 $G_{p,i}$ の関係を図5.8に示す。この図から明らかなように両者はほぼ直線関係にある。ただし、図中の括弧で挟まれた試料は有意差検定により光沢差がないとみなされた試料である。図中の右側の縦軸については<5.3.2節>で説明する。従来ほとんどの測定法では、表面状態が等しければ光沢度は同一となるため、表面状態が等しくて色の異なる物体の光沢度は測定できない。これに対し、 $G_{c,i}$ は $G_{p,i}$ と比較的一致しており、 $G_{c,i}$ は色の異なる試料の光沢度を表す指標として有効であると言える。

5.3.2 表面状態の異なる場合

今回は表面状態のほぼ等しい物体に対する色と心理的光沢度の関係を調べた。その結果、(5.8)式は心理的光沢度と比較的一致することがわかった。しかし、光沢に最も大きな影響を与える要因は表面状態であり、表面状態が異なると正反射光強度が変化し心理的光沢度が異なる。そこで、正反射光強度の様々な異なる物体に対して、色の効果を考慮した光沢度をどのように定義し

たらよいか検討する。

今回の実験に使用された試料の平面時の鏡面光沢度を測定すると約93となり、高光沢物体に属する。実際に、表5.4に示される試料A、Bを含め正反射光強度の様々な異なる試料の心理的光沢度を測定した。その結果、すべての試料の心理的光沢度が0~4の範囲であるのに対し、試料A、Bの心理的光沢度はそれぞれ3.35と3.20となりその他の試料に比べ高い評点（心理的光沢度）が得られた（付録A.3参照）。この時の心理的光沢度を G_{ph}' とする。試料A、Bは、表面状態が等しく色のみが異なる試料であり、その心理的光沢度が3.20~3.35の範囲にあると言うことは、色による光沢差は比較的小さいことを意味する。したがって、表面状態の様々な異なる試料を含めて光沢度を測定する場合は、(5.8)式で示される G_{col} の効果は小さいと思われる。心理的光沢度が等間隔尺度を持つと仮定すれば、 G_{ph}' と G_{col} の間には次の関係が成立する。

$$G_{ph}' = k_8(G_{col} + k_9) \tag{5.10}$$

ここで、 k_8 、 k_9 は定数である。この概念図を図5.9に示す。横軸 G_{ph} は、表面状態が等しく色の異なる試料より得られた心理的光沢度とし、その時の試料A

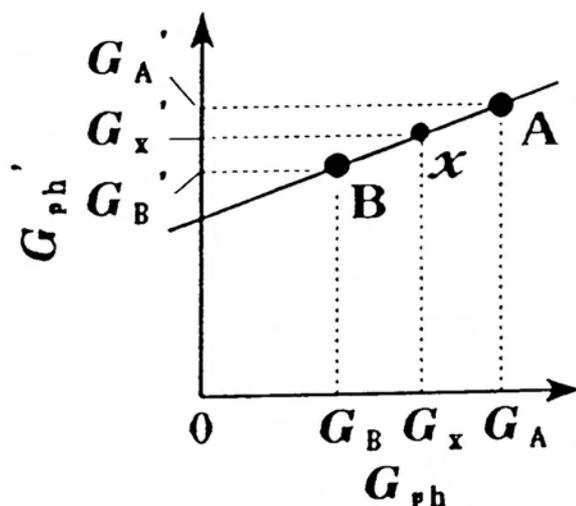


図5.9 心理的光沢度の座標を変換する概念図

とBの心理的光沢度を G_A , G_B とする。縦軸 G_{pk} 'は、試料A, Bも含めて正反射光強度の様々異なる試料を比較して得られた心理的光沢度とし、その時の試料AとBの心理的光沢度を G_A' , G_B' とする。両軸とも等間隔尺度を持つとすれば、試料AとBの中間の心理的光沢度 G_x をもつ試料xは、 G_{pk} 'の座標においても試料AとBの中間の心理的光沢度 G_x' をもつことになる。つまり、 G_{pk} 'と G_{pk} は直線関係があることになる。また図5 8より、表面状態が等しく色の異なる試料に対して G_{pk} と G_{col} はほぼ直線関係にある。したがって、(5 10)式が成立する。

筆者の実験によれば、同色物体（明度、彩度、色相がほぼ等しい物体）で、表面状態の異なる試料に対しては、第2章より心理的光沢度 G_{pk} は以下のように表される⁽⁵¹⁾。

$$G_{pk} \propto (L_{max} - L_0)^\beta \quad (5.11)$$

ただし、 L_{max} は物体からの正反射光強度、 L_0 , β は定数である。そこで、(5 10), (5 11)式より次のような光沢度 G_{dc} を定義する。

$$G_{dc} \equiv k_0(L - L_0)^\beta(G_{col} + k_9) \quad (5.12)$$

ここで k_0 , β , L_0 , k_9 は定数である。 k_0 は比例定数であり0.02とした。 β と L_0 は第2章の(2.11)式よりそれぞれ0.441, 0.165とした。(5 12)式において $|k_9| \gg |G_{col}|$ ならば、 $G_{col} + k_9 \approx k_9$ となり、 G_{col} が無視される。したがって、定数 k_9 の大きさが色の光沢に及ぼす効果の程度を決める。 k_9 は以下のようにして決定した。試料A, Bの G_{col} は(5 8)式より求まりそれぞれ1.51と0.66である。また、 G_{pk} 'は付表5 1よりそれぞれ3.35, 3.20である。これを(5 10)式に代入することによって k_9 が求まる。その時、 $k_9 = 17.5$ となった。以上のように決定した k_9 を含めてこれらの定数をまとめると次のようになる。

$$k_0 = 0.02, \beta = 0.441, L_0 = 0.165, k_9 = 17.5 \quad (5.13)$$

次に正反射光強度、および色相、彩度、明度の異なる試料を任意に10枚ず

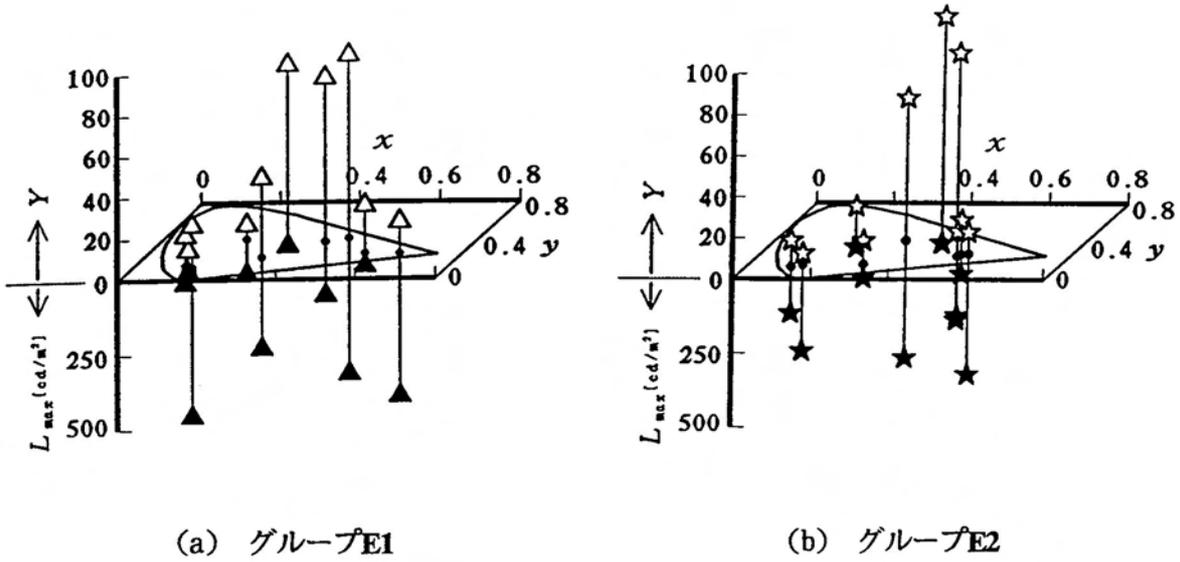


図5.10 測定に使用した試料の三色表示と正反射方向の輝度 L_{max}

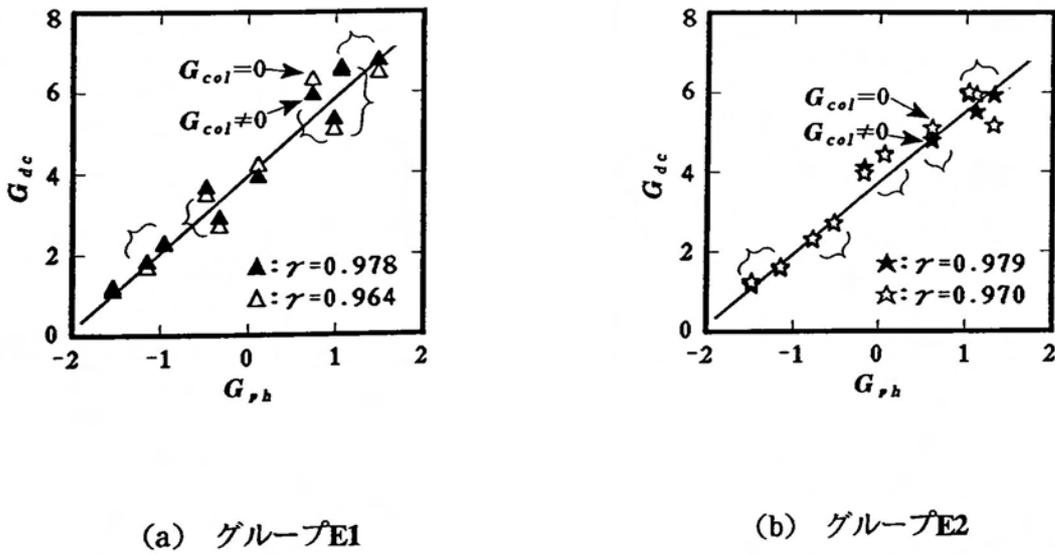


図5.11 心理的光沢 G_{ph} と新光沢 G_{dc} 及び(5.10)式において $G_{col}=0$ として場合の G_{dc} と G_{ph} の関係

つ2グループ選び，それらの試料の心理的光沢度を一対比較法によって求めた。この時の被験者数は10名である。またこの時，若干の個人差（分散比1.59）と組合せ効果（分散比3.18）の影響がみられたが，主効果の明確な有意性（分散比122）は確認された。図5.10にこれらの試料のCIE1931 xy 色度座標と視感反射率 Y および正反射光強度 L_{max} の関係を示す。ただし，正反射光強度 L_{max} は試料からの正反射方向の輝度を輝度計（トプコン製，BM-5）で測定した。これらの試料に対する G_{dc} と心理的光沢度 G_{pk} の関係を図5.11に示す（図中の（▲，★）印）。図中の括弧でくくられた試料間には光沢に関する有意差はない。この図からわかるように G_{dc} と G_{pk} はほぼ直線関係にあり，両者の相関係数 γ は0.97以上と高い。このことから(5.12)式は表面状態の異なる試料の光沢測定に適用できる。またこの図には，(5.12)式において $G_{c,i} = 0$ とした場合の G_{dc} （これを（△，☆）印で表す）も示されている。ただし，（▲，★）印と（△，☆）印がなるべく重なるように表示した方が両者の微妙な違いがわかりやすいので，（△，☆）印の場合に限り比例定数 k_0 を0.022として G_{dc} を計算ししている。両者を比較すると，（▲，★）印の方が γ が高く， $G_{c,i}$ を(5.12)式の中にも入れることの効果が表れている。しかし， $G_{c,i} = 0$ の場合でも $\gamma = 0.96$ 以上となり比較的高い相関を示している。このことから，色の光沢に及ぼす影響よりも正反射光の影響の方がかなり大きいことがわかる。よって，低光沢からの高光沢までの広範囲の試料の光沢度を大まかに分類するのであれば色の影響は考慮せず(5.12)式において $G_{c,i} = \text{一定}$ と置いてもよい。また，同色物体に対しては $G_{c,i} = \text{一定}$ となるので， G_{dc} は第2章で定義した光沢度 G_d と比例関係にある。よって， G_{dc} を第2章で定義した光沢度 G_d の代わりに使用してもよい。

図5.8の右の縦軸は(5.12)式によって得られた G_{dc} を示している。 G_{dc} と $G_{c,i}$ は座標の原点の位置と目盛りの間隔が異なるのみであり，両者の心理的

光沢度 $G_{p,k}$ との相関係数は等しい。したがって、数値は $G_{c,i}$ と異なるものの、表面状態の等しい物体に対して $G_{c,i}$ を適用しても問題ない。漆器やプラスチック製品などのように表面が非常に滑らかな物体は色の違いによる光沢差が品質に影響する。このような場合には、 $G_{c,i}$ は色を選定する上での一つの指標となるであろう。

5. 4 むすび

表面状態が全く等しくても色が異なると心理的光沢度は変化する。本研究では、光沢感に及ぼす色の影響を明らかにするための基礎実験を行なった。その結果、明度が高くなるにつれて心理的光沢度が減少すること、および彩度が高くなるにつれて心理的光沢度が増加することがわかった。また、色相と光沢の相関性は小さいことがわかった。次に実験結果より、色と光沢の関係の近似式を作成し、その式を表面状態の等しい試料に対して適用した結果、心理的光沢度と比例関係にあることがわかった。さらに、筆者が第2章で提案している物理的光沢度 G_p をこの式によって補正した結果、表面状態の違いによって低光沢から高光沢まで光沢の大きく異なる試料に対しても新光沢度 $G_{c,i}$ はよく一致するが、色の違いによる光沢差は小さく、おおまかに分類する場合は色の影響は無視できることもわかった。

漆器やプラスチック製品などのように表面が非常に滑らかな物体は色の違いによる光沢差が品質に影響する。このような物体に対して本方法は有効と思われる。

第6章 光沢知覚機構の検討

6.1 まえがき

従来より様々な光沢度測定法が提案されているが、これらの方法で得られる光沢度が、必ずしも人間の知覚する心理的光沢度と一致しない場合がある。そこで、第2章から第5章までに心理的光沢度に一致する光沢度測定法を幾つか提案した。しかし、これらの方法は、あくまでも反射光強度や反射光分布の半値幅などの光沢に起因する物理的要因を用いて光沢度を定義しているだけであり、これらの定義から人間の光沢知覚機構を説明できるわけではない。人間の光沢知覚機構がどのようなになっているのか現時点では明らかでない。

光沢は人間の眼によって知覚されるものであるから、人間の視覚情報処理機能を模倣することによって心理的光沢度に類似した結果を得ることができると推察される。そこで本章では、光沢知覚機構解明の一助とするための光沢知覚モデルを考える。今回は機能的に網膜に類似するモデルを考える。まず、反射光分布を眼の順応機構を考慮した視細胞の内部信号に変換する。次に、その内部信号を網膜機能に類似した空間フィルタによって畳み込み積分する。その結果、曲率半径が等しい物体に対しては本モデルからの出力と心理的光沢度は単調増加の関係にあること、曲率半径が異なると出力が変化し、ある曲率の時に最大となることなど、本モデルによって得られる出力は心理的光沢度と類似した特性⁽⁷²⁾が得られ、光沢知覚に関する基礎資料として有効と思われるので以下に記述する⁽⁹³⁾⁽⁹⁴⁾。

6. 2 光沢知覚モデル

ここでは網膜に類似したモデルを考える。網膜は視細胞、水平細胞、双極細胞、アクマリン細胞、神経節細胞からなり多層構造を形成している⁽⁹⁵⁾。しかし、各細胞の特性について十分解明されていない点もあり、各層ごとにモデル化すると処理が複雑になるので、網膜全体を1つの処理ユニットとみなし、網膜全体の処理について考える。ただし、簡略化のために以下のような条件を設けた。(1)1次元モデルとする。(2)視細胞1個の大きさは位置によらず一定とする。(3)網膜面は平面とする。また、網膜のモデルに受容野の概念が一般に用いられるので⁽⁹⁹⁾今回もこれを用いる。神経節細胞は大きくX細胞とY細胞に分類されるが、光強度分布の検出にはX細胞が関係するため⁽⁹⁶⁾、X細胞について考える。網膜を1つのユニットと考えると、視細胞が網膜の入力面に、神経節細胞が網膜の出力面に相当する。神経節細胞の出力は、視細胞上の特定の領域の光の分布に反応する。この領域を受容野といい、受容野の感度分布 $G(x)$ は一般にDOG関数(Difference of Gaussian)で記述される。

$$G(x) = A \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_e^2}\right) - Q \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_i^2}\right) \right\} \quad (6.1)$$

ここで、 σ_e 、 σ_i は興奮性領域および抑制性領域の広がりを表すガウス関数の標準偏差で、 A 、 $A \cdot Q$ は2つのガウス関数のピーク値である。網膜中心窩の受容野の興奮性領域の大きさは約2.5' (10 μm) であるため⁽⁸⁹⁾、今回は受容野の興奮性領域の直径が2.5'になるように σ_e を設定した($\sigma_e = 4.75 \mu\text{m}$)。また抑制性領域の大きさは興奮性領域の約3倍であるので⁽⁸⁹⁾ $\sigma_i = 3 \cdot \sigma_e$ とした。さらに、網膜面全体を一様光で覆うと出力が出ないという事実より⁽⁹⁶⁾

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x)dx = 0 \quad (6.2)$$

となるように A , Q を選んだ ($A=1$, $Q=0.331$)。

今、視細胞への入力光の輝度を $h_{in}(x)$ とする。すると神経節細胞からの出力 $h_{out}(x)$ は、次のように表される⁽⁸⁹⁾。

$$h_{out}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{in}(x')G(x-x')dx' \quad (6.3)$$

(6.3)式の場合、入射光輝度 $h_{in}(x)$ が a 倍になると、出力 $h_{out}(x)$ も a 倍になる。しかし実際の生理データでは、出力の大きさは入射光輝度には比例しない⁽⁹⁷⁾。また、眼の順応機構により出力の大きさは背景光の輝度によっても変化する。光沢知覚に関しては出力の大きさは重要な要因であるため、今回は、入射光輝度と出力の関係がなるべく生理データと一致するように、(6.3)式の一部を変更し、入出力の関係を次のように表す。

$$h_{out}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(h_{in}(x'))G(x'-x)dx \quad (6.4)$$

ここで、 $f(x)$ は視細胞の反応電位と入射光強度 x の関係式⁽⁹⁷⁾に準じて次のように表した。

$$f(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{n}{2} \log \frac{x}{\sigma_s} \right) \right\} \quad (6.5)$$

ただし、 n は動作曲線のこう配に対応する値で約 0.7~1 の範囲である。また、 σ_s は背景光輝度に比例した値である。

(6.4)式は、視細胞に入射した光の強さ $h_{in}(x)$ を視細胞の反応電位に比例した内部信号 $f(h_{in}(x))$ に変換し、その内部信号を空間フィルタ $G(x)$ で畳み込み積分することを意味している。本章では(6.4)式が光沢を表す重要な要因であると考え、(6.4)式と光沢の関係について以下に論じる。

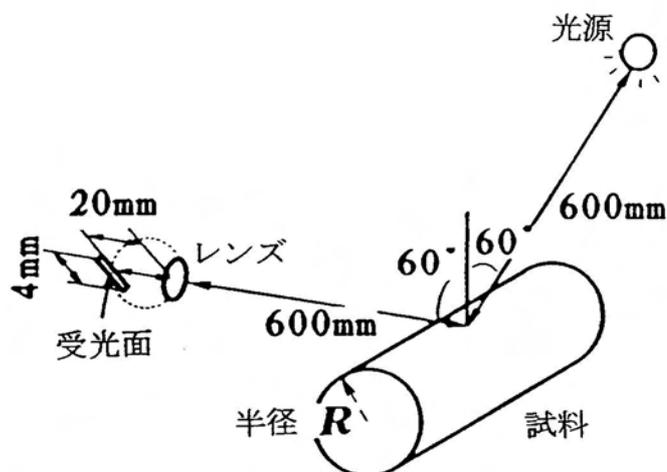


図6.1 シミュレーションにより反射光分布を作成する際に用いた光源，試料，受光面の位置関係

6.3 光沢知覚シミュレーション結果

6.3.1 試料の反射光分布モデル

実際に人間の眼に投影された反射光分布を測定することはできないので，人間の眼に投影された反射光分布に等しい分布をシミュレーションにより作成する必要がある。心理的光沢度を測定した時の位置関係に類似するように配慮して⁽⁷²⁾，図6.1に示すような装置の位置関係を設定した。レンズと受光面の距離は，眼球の直径が約20mmであるので20mmとした。視細胞には錐体とかん体があるが，我々が心理的光沢度を判断する通常のもろさでは，ほとんど錐体が優勢に働くと考えられ，網膜中心では錐体の直径が約 $2\mu\text{m}$ であるので，受光素子1個の大きさを $2\mu\text{m}$ とし，これが受光面4mmに並んでいるように設定した。

反射光分布の作成にはレイトラッキング法⁽⁹⁸⁾を用い，物体からの反射モデ

ルには、Cook-Torranceモデルを採用した⁽⁵⁷⁾。<第2章2.4節>からも明らかのように、反射光分布の実測値とCook-Torranceモデルによって推定された分布は比較的一致する。また、物体からの反射光分布を3つのパラメータ d 、 s 、 m で表現できる⁽⁵³⁾。 d は物体の拡散反射率、 s は正反射率、 m は表面の粗さを表す係数である。そこでまず、第2章の<2.4節>と同様の実験装置と同様の手順により、光沢の異なる様々な試料の平面時における反射光分布を測定する。次に、非線形最小二乗法⁽⁷¹⁾によって測定された反射光分布にCook-Torranceモデルを当てはめる。これによって、各試料の反射光分布のパラメータ d 、 s 、 m を推定する⁽⁵³⁾。そしてこの推定されたパラメータを用い、新たに図6.1の位置関係において、受光面上に投影された反射光分布をレイトラシング法によって作成した。またこの時、試料の曲率半径を様々な変化させ、様々な曲率半径における試料の反射光分布を作成した。

ここで、このモデルによって作成された反射光分布の妥当性を確認するため、図6.1のレンズの位置にTVカメラを置き、光源の位置に蛍光灯を置いて

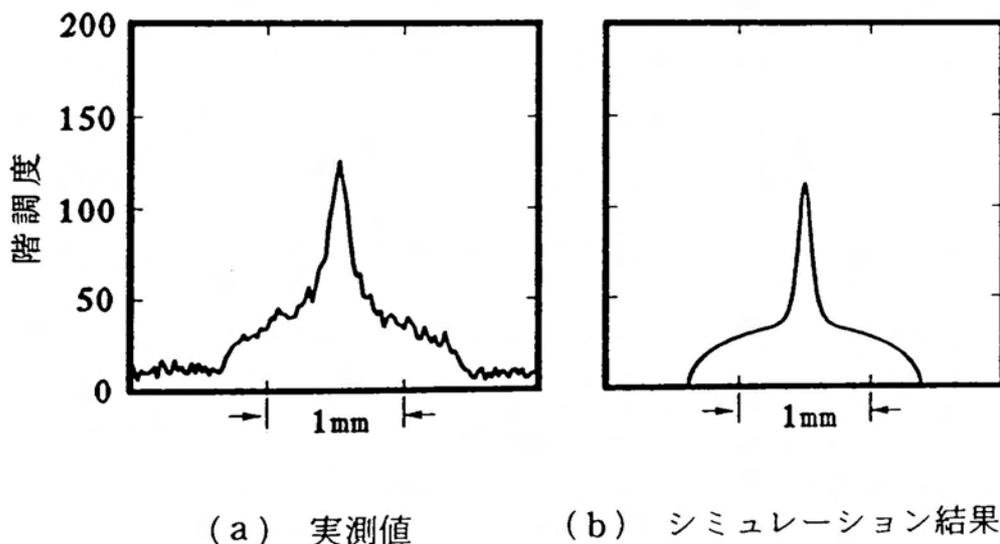


図6.2 反射光強度分布の例

実測した反射光分布波形と，このモデルによって得られた分布波形を図6.2示す。モデルでは光源を点光源としたため，反射光分布は実測値よりやや急峻となっているが，両者はほぼ一致している。ただし，TVカメラにあわせて受光面とレンズとの距離は60mmとし，1画素の大きさは $12.5\mu\text{m}$ とした。また，シミュレーションでは試料の周囲の背景光強度は零とした。

6.3.2 曲率半径の等しい場合の結果

図6.3に曲率半径 R が14mmの物体における高中低光沢試料の反射光分布シミュレーション結果 $h_{i,n}(x)$ とその分布を(6.4)式に代入することによって得られた出力波形 $h_{o,n}(x)$ を示す。ただし，今回の実験では(6.5)式における n は1

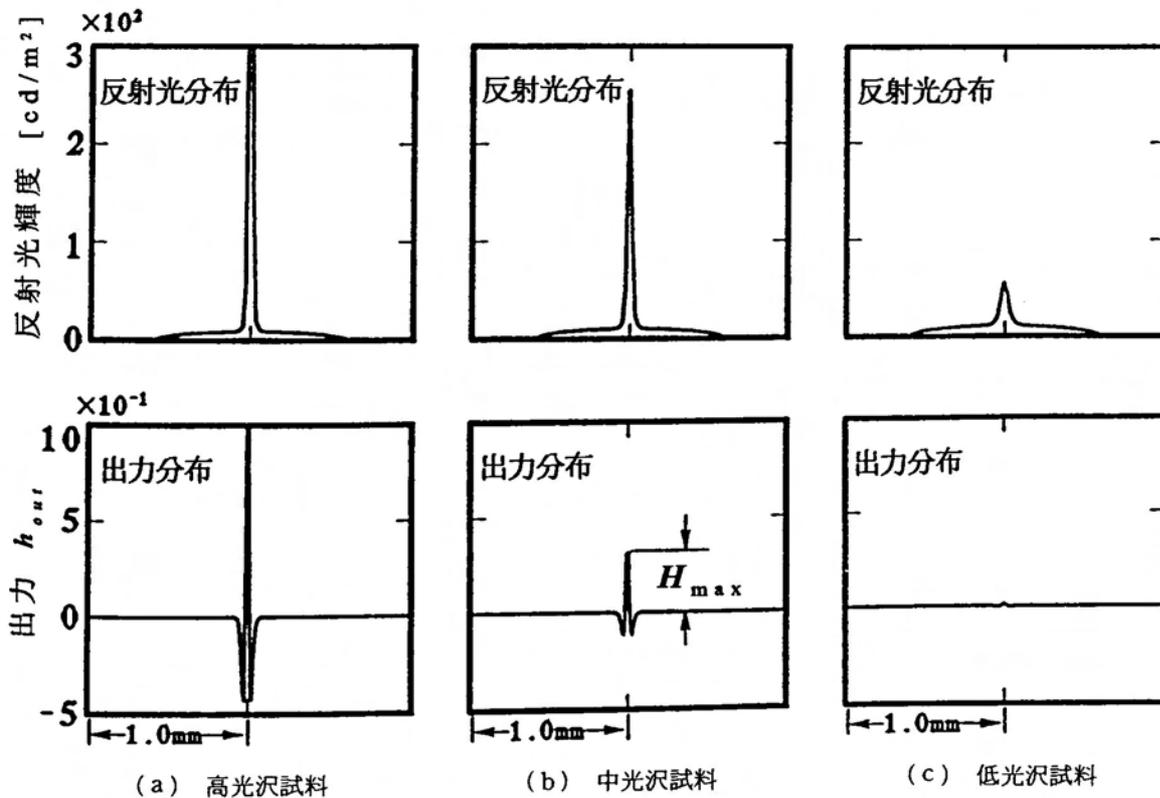


図6.3 Cook-Torranceモデルによって作成された反射光分布とその分布を光沢知覚処理ユニットに通した後の出力波形

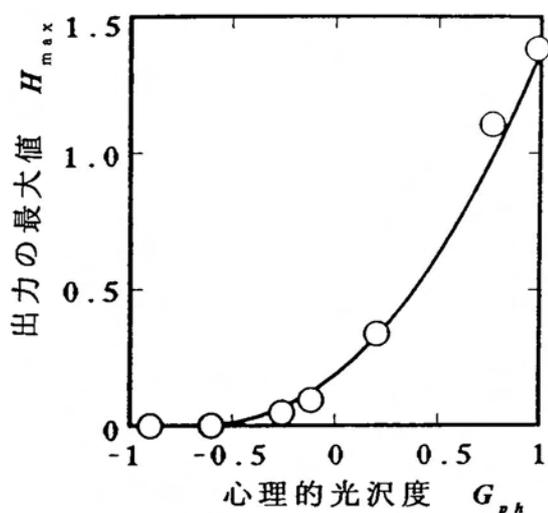


図6.4 曲率半径30mmの物体における心理的光沢度 G_{ph} と出力の最大値 H_{max} の関係

とした。また、背景光の輝度は 10cd/m^2 とみなし、 $\sigma_s=10$ とした。この図からわかるように、反射光分布は高光沢物体ほどピーク値が大きい。出力分布波形も同様に高光沢物体ほどピーク値が大きい。そこで、曲率半径14mmにおける心理的光沢度が既知の7つの試料に対して、反射光分布をシミュレートし、その分布を光沢知覚モデルに入力することによって出力波形 $h_{out}(x)$ を得た。そのピーク値を H_{max} とおくと、7つの試料の心理的光沢度 G_{ph} と H_{max} の関係は図6.4のようになる。この図より、両者は単調増加の関係にあることがわかる。本モデルによって得られた出力のピーク値 H_{max} は、網膜からの出力値と比較的類似することから（<6.4節>参照）、心理的光沢度 G_{ph} と網膜からの出力信号の大きさはほぼ単調増加の関係にあると考えられる。

6.3.3 曲率半径の異なる場合の結果

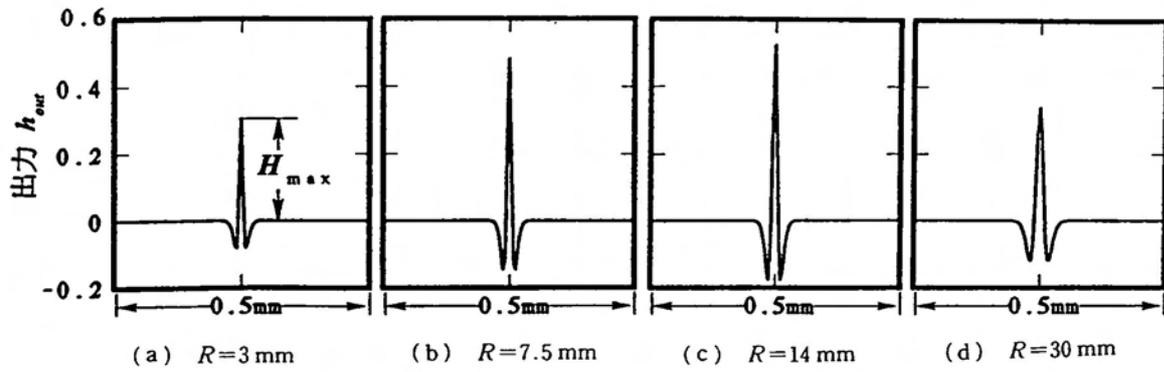


図6.5 光沢知覚モデルによって得られた出力波形の例

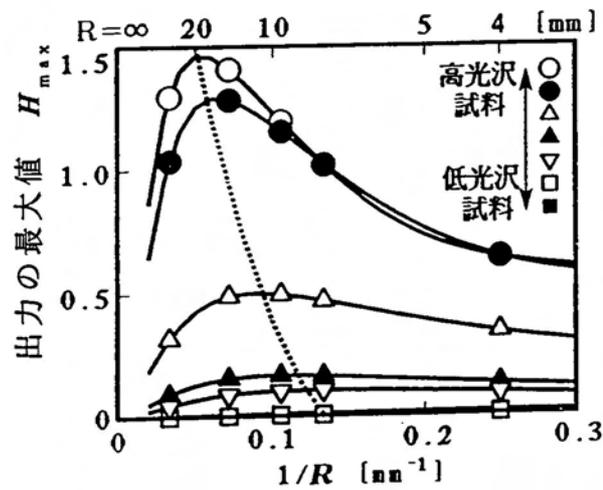


図6.6 曲率半径 R と光沢知覚モデルの出力の最大値 H_{max} の関係

図6.5に中光沢試料の種々の曲率半径 R における(6.4)式によって得られた出力波形 $h_{out}(x)$ を示す。この図からわかるように曲率半径 R が大きくなるにつれて出力波形のピーク H_{max} は増加し、曲率半径 R が14mm(図6.5(c))のときに最大となり、それより大きくなると H_{max} は減少することがわかる。このような現象は、心理的光沢度 G_{ph} と曲率半径 R の関係に類似する⁽⁷²⁾。心理的光沢度 G_{ph} も同様に曲率半径 R が大きくなるにつれて増加し、ある曲率半径のときに最大となり、それより大きくなると減少する。そこで、平面状態において光沢の異なる7つの試料に対して、曲率半径 R と出力波形 $h_{out}(x)$ の最大値 H_{max} との関係を調べてみる(図6.6)。この図からわかるように、 H_{max} は曲率半径 R によって異なり、ある曲率半径の時に H_{max} は最大となっている。また、図中の点線からわかるように、低光沢試料ほど H_{max} が最大となるときの曲率半径が小さくなっている。この現象も心理的光沢度 G_{ph} と曲率半径 R の関係に類似する。

6.4 モデルの検討

今回は光沢知覚モデルとして網膜に類似したモデルを考えたが、このモデルが網膜の機能面で妥当か否かを検討する。網膜からの出力モデルとして**DOG**関数が一般的に用いられるが、**DOG**関数の最も重要な点は、零交差の位置が、光の分布の急変化している位置を表していることである。このため、この関数は画像処理におけるエッジ抽出に用いられる。図6.7に反射光分布を**DOG**関数で畳み込み積分した出力波形((6.3)式の結果)と、(6.4)式による出力波形を示す。この図からわかるように、出力の大きさは異なるものの両者の分布波形の零交差の位置(図中のA、B点とA'、B'点の位置)はほぼ等しい。したがって(6.3)式の代わりに(6.4)式を用いてもエッジ抽出という機能面で

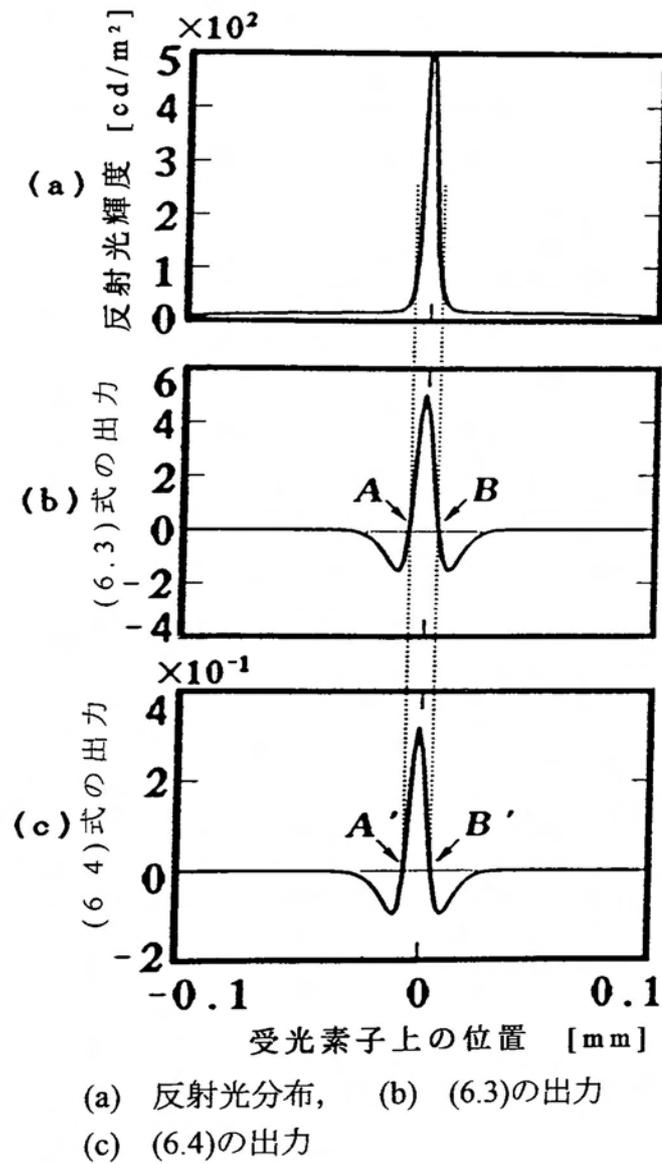


図6.7 反射光強度分布を(6.3)式と(6.4)式に入力した場合の出力波形

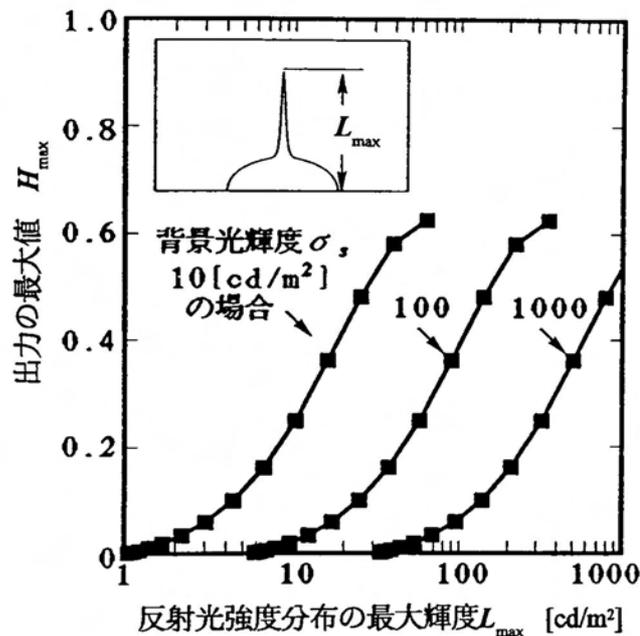


図6.8 半径14mmの試料における反射光強度分布の最大輝度 L_{\max} と光沢知覚モデルからの出力の最大値 H_{\max} の関係

は特に問題ない。

次に、網膜からの出力の大きさについて考える。DOG関数を用いた場合、出力の大きさは入射光強度に対して単調増加の関係にあるのに対し、(6.4)式を用いると入射光強度と出力の関係は図6.8のようになる。図6.8左上に受光面上に投影した反射光分布の例を示してある。反射光分布の作成には前述のCook-Torranceモデル⁽⁵⁷⁾を用い、表面の粗さ係数 $m=0.03$ とし、正反射率 s と拡散反射率 d を様々変化させることによって様々な分布を作成した。図6.8は神経節細胞からの出力特性と非常によく類似してある⁽⁹⁷⁾。このことから、出力の大きさに関しては、(6.3)式を用いるより(6.4)式を用いた方が網膜からの出力に近いといえる。以上のことから、(6.4)式で表したモデルの出力は、エッジ抽出機能と網膜からの出力の大きさという点では網膜の特性と比較的一致する。

また、(6.3)式をそのまま用いた場合、光源の光強度が変化すると出力

$h_{o,r}(x)$ も変化するが、(6.4)式の場合、出力は変化しない。これは(6.5)式に背景光強度 σ_s が含まれているためである。光源の光強度が a 倍になると受光面への入射光強度 x も a 倍に変化するが、背景光強度 σ_s も a 倍に変化することになり結果として(6.5)式の出力は変化しない。この結果は、光源の光強度を変化させても、高光沢物体は高光沢のままであり、低光沢物体は低光沢のままであるという実験結果⁽⁵³⁾と一致する。

6.5 シミュレーション結果の検討

図6.1の受光素子上に照射される反射光強度は物体の曲率半径が小さくなるにつれて徐々に減少する。しかし、 H_{max} は曲率半径が小さくなるにつれて減少するのではなく、ある曲率半径の時に最大となる(図6.6)。以下、反射光分布がどのような場合に H_{max} が最大となるのかについて検討する。ここで、反射光分布の広がり具合を表すため、図6.9に示すような反射光分布の半値幅 W を調べる。図6.6に示した7つ試料の H_{max} が最大となるときの反射光分

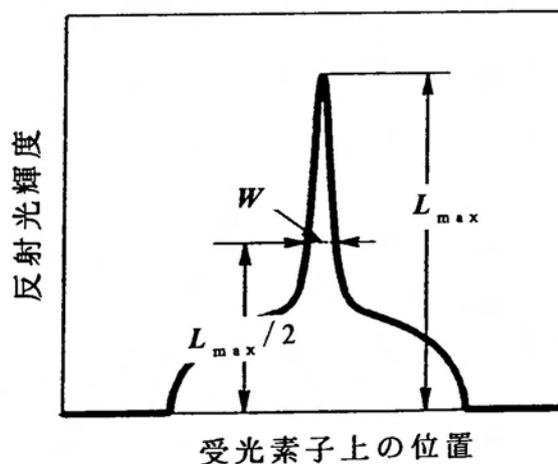
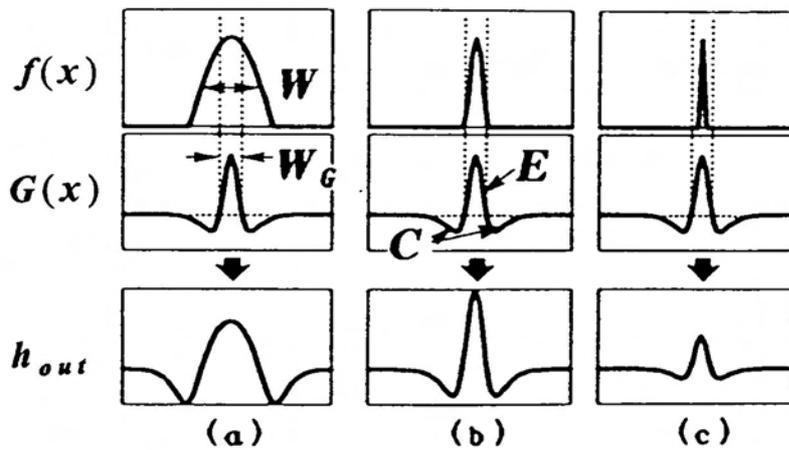


図6.9 反射光強度分布の半値幅 W の求め方



- (a) $f(x)$ の半値幅 W が DOG 関数 $G(x)$ の興奮性領域 W_G より大きい場合
- (b) 同程度の場合, (c) 小さい場合

図6.10 反射光強度分布 $f(x)$ の広がり方によって異なる出力 h_{out} の波形

布の半値幅 $W_{H_{max}}$ は、光沢のある試料の順（図6.6の○→■に順番）にそれぞれ、5.0, 5.5, 7.6, 8.4, 8.8, 10.1, 11.0 μm となっている。曲率半径 R を ∞ から 5mm まで変化させた場合、反射光分布の半値幅 W は 0.8 ~ 84 μm と変化するにもかかわらず、 $W_{H_{max}}$ はすべて 5 ~ 11 μm の範囲内にある。さらに、各試料の H_{max} が最大となるときの反射光分布を(6.5)式に代入して得られた分布波形の半値幅 W_{fx} を調べると、すべての試料に対し W_{fx} は 9.4 ~ 11.6 μm の範囲であった。この大きさは、受容野の興奮性領域の大きさ 10 μm (2.5') と同程度の大きさである。つまり、視細胞の反応電位に相当する(6.5)式の分布波形の広がり（半値幅）が受容野の興奮性領域の大きさと同程度の時に H_{max} が最大となっている。

この理由を以下のように考える。簡単のため図6.10のような分布 $f(x)$ を考える。分布 $f(x)$ の半値幅 W が受容野の興奮性領域 E の広がり W_G より大きい場合（図6.10(a））、受容野 $G(x)$ の抑制性領域 C にまで信号が入力されることに

なる。このため(6.4)式によって畳み込み積分を行った場合、抑制性領域の影響により出力 $h_{o,r}$ は抑えられる。逆に興奮性領域より小さい場合（図6.10(c)）、興奮性領域内の一部にしか信号は入力されないことになり、畳み込み積分による出力は小さい。結果的に図6.10(b)のように半値幅が興奮性領域と同程度の大きさの場合に出力が最大となる。以上のことより(6.5)式で得られた分布波形の半値幅 $W_{f,x}$ が受容野の興奮性領域にほぼ等しいときに $H_{m,x}$ が最大となることがわかったが、(6.5)式で得られた分布波形よりも反射光分布の方が直観的には理解しやすい。そこで反射光分布がどのような場合に $H_{m,x}$ が最大となるのか考えると、反射光分布の半値幅 W が約 $5 \sim 11 \mu\text{m}$ の場合に $H_{m,x}$ が最大となっていることから、大まかには反射光分布の半値幅が受容野の興奮性領域と同程度の場合に $H_{m,x}$ が最大となると考えてもよい。

今回は、(6.5)式の中で使用されている変数 n 、 σ_r をそれぞれ、1、10としてシミュレーションを行ったが、これを別の値（ $n=0.5 \sim 1.5$ 、 $\sigma_r=10 \sim 100$ ）に代えると、(6.5)式の値が変わるため出力 $h_{o,r}(x)$ も変化し、図6.4、図6.6の曲線も変化する。しかし、<6.6節>で述べる特性(1)(2)はどの場合も成立したので、ここでは、 $n=1$ 、 $\sigma_r=10$ の場合について結果を示した。

6.6 むすび

反射光強度は物体の曲率半径が小さくなるにつれて減少するのに対し、心理的光沢度はある曲率半径のときに最大となる。この現象に一致する光沢度測定法は既に述べたが、なぜこのような現象が生じるのか未だに明らかでない。そこで、光沢知覚機構の解明の一助とするために、網膜に類似した処理を用いた光沢知覚モデルを提案した。このモデルは、眼の順応機能を模倣して反射光輝度を内部信号に変換し、さらに神経節細胞の受容野の感度分布を

近似したDOG関数で畳み込み積分することによって出力波形を得ている。本モデルによって得られた出力のピーク値 $H_{m,x}$ は網膜からの出力値と類似しているが、 $H_{m,x}$ は以下のように心理的光沢度と非常に類似した特性があることが明らかになった。

(1) 曲率半径が等しい場合、 $H_{m,x}$ と心理的光沢度は単調増加の関係にある。

(2) 同一物体に対しては、曲率半径が変化すると $H_{m,x}$ は変化し、ある曲率半径のときに $H_{m,x}$ は最大となる。また、低光沢の物体ほど $H_{m,x}$ が最大となる時の曲率半径は小さい。この現象は心理的光沢度とほぼ同様の現象である。

このように、本モデルによって得られる出力は心理的光沢度と類似した特性が得られ、光沢知覚に関する基礎資料として有効と思われる。

今後、大脳領域の処理も含め詳細な光沢知覚モデルを検討したい。

第7章 仮想光沢感の測定

7.1 まえがき

前章までに取り扱ってきた通常の物体では、一般に、反射光強度が高いほど、また、表面に映る像が鮮明な物体ほど光沢感がある。しかし、これらの反射光強度や鮮明度では説明できない光沢知覚現象が存在する。紙に描いた白と黒の図形それぞれは全く光沢感がないにもかかわらず、ハーフミラーを通してそれらを重ね合せると、光沢感を生じることがある⁽³⁷⁾。このような視覚心理現象は日常生活ではほとんど見られないが、どのような条件下で光沢感が生じるのか詳しく調べることは、光沢知覚機構解明の基礎研究として役立つと思われる。

しかしながら、現時点ではこのような仮想光沢感が生じることが知られているのみであり、定量的にどのような条件の時に光沢感が高くなるのか全く不明である。そこで本章では、照明条件を様々変化させ同様の実験を行い心理的光沢度を測定することにより、どのような条件下で仮想光沢感の発生が最大となるのか解明する⁽⁹⁹⁾⁽¹⁰⁰⁾。さらに、この仮想光沢感の発生の原因および通常的光沢度測定法との関連についても検討する。

7.2 仮想光沢感の測定

7.2.1 測定手順

図7.1に仮想光沢知覚の概念図を示す。まず、図7.1(a)のように黒環Aと白環Bの図形を試料として作る。次にそれらの図形を、図7.1(b)のようにハーフミラーを通して重ね合わせる。

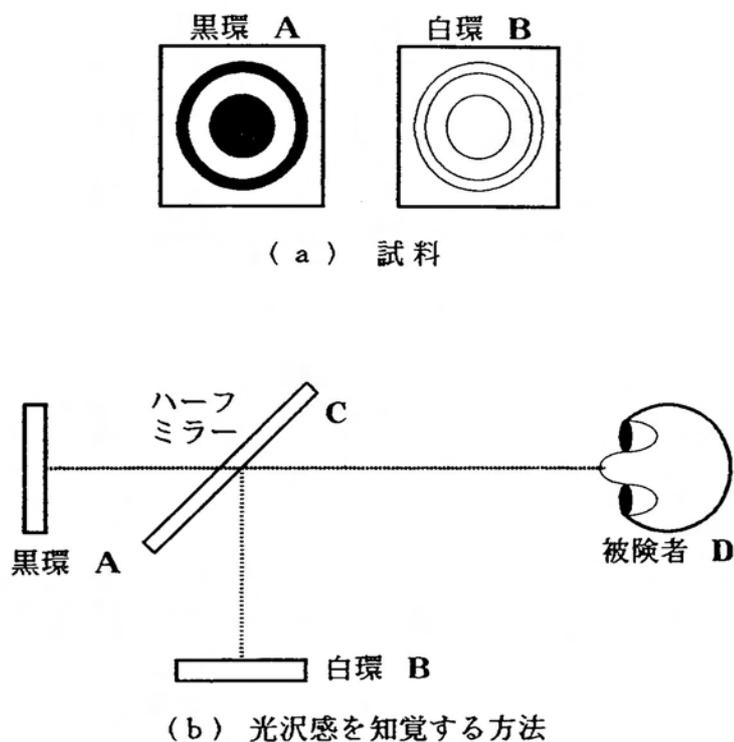


図7.1 仮想光沢知覚の概念図

フミラーCを中心として対称な方向に置く。すると、被験者Dから見た図形は単に灰色に見えるだけでなく、光沢感を感じることがある。今回はこの光沢感をさらに定量的に測定するため、試料の明るさを様々変化させて、光沢感を測定した。

心理的光沢度を尺度化するために、一対比較法の1つである中谷変法⁽⁷³⁾を用いた。一対比較法の測定手順は第3章で既に述べているが、この実験では、黒環と白環の図形を重ね合せた図形が一つの試料に相当する。このため、装置構成と測定手順が第3章で示した装置構成および測定手順と若干異なる。そこで、以下に測定手順および測定装置について述べる。

試料は、図7.1(a)に示すような黒と白の円環を描いたコピー紙である。コピー紙自体には、光沢感は全く知覚されない。

まず黒環の輝度を一定値： L_B に調整する。白環の輝度はN段階に変化させる

ことができる。N段階の輝度の中から2つの輝度，例えば L_{wi} と L_{wj} を選択し，最初に黒環の輝度 L_B ，白環の輝度 L_{wi} の場合におけるハーフミラーによる合成図形を被験者に提示し，次に黒環の輝度 L_B ，白環の輝度 L_{wj} における合成図形を被験者に提示する。その時被験者が知覚した光沢感をそれぞれ G_i ， G_j とする。ここで，輝度の組 (L_B, L_{wi}) ， (L_B, L_{wj}) をそれぞれ c_i ， c_j と置くと，以下のような評点が組 c_i ， c_j に与えられる。

$$\left. \begin{array}{ll} G_i \gg G_j \text{ なら,} & c_i: 2 \text{ 点, } c_j: -2 \text{ 点} \\ G_i > G_j \text{ なら,} & c_i: 1 \text{ 点, } c_j: -1 \text{ 点} \\ G_i = G_j \text{ なら,} & c_i: 0 \text{ 点, } c_j: 0 \text{ 点} \\ G_i < G_j \text{ なら,} & c_i: -1 \text{ 点, } c_j: 1 \text{ 点} \\ G_i \ll G_j \text{ なら,} & c_i: -2 \text{ 点, } c_j: 2 \text{ 点} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

これを白環のN段階の輝度のすべての組合せについて行う。この比較実験を p 人の被験者に対して行う。そしてこれらの評点をもとに，白環と黒環の各組合せに対する心理的光沢度 G_{pk} を求める。また，分散分析，有意差検定（危険率5%）を行い，個人差，組合せ効果，試料間の有意差についても調べる。

以上の実験を，黒環の輝度 L_B を白環と同様にN段階変化させて順に行う。

今回の実験では，黒環，白環とも試料の輝度は5段階（試料の内円の平均輝度を5，15，30，45，60 cd/m²の5段階）に変化させた。被験者数 p は10である。

7. 2. 2 測定装置

図7.2に測定装置の構成を示す。試料の黒環のサイズは，図7.2上の通りである。ハーフミラーEから黒環Aまでの距離は50mm，白環Bまでの距離は55mmである。これは両者の距離を若干ずらし視差をもたせた方が，光沢感を

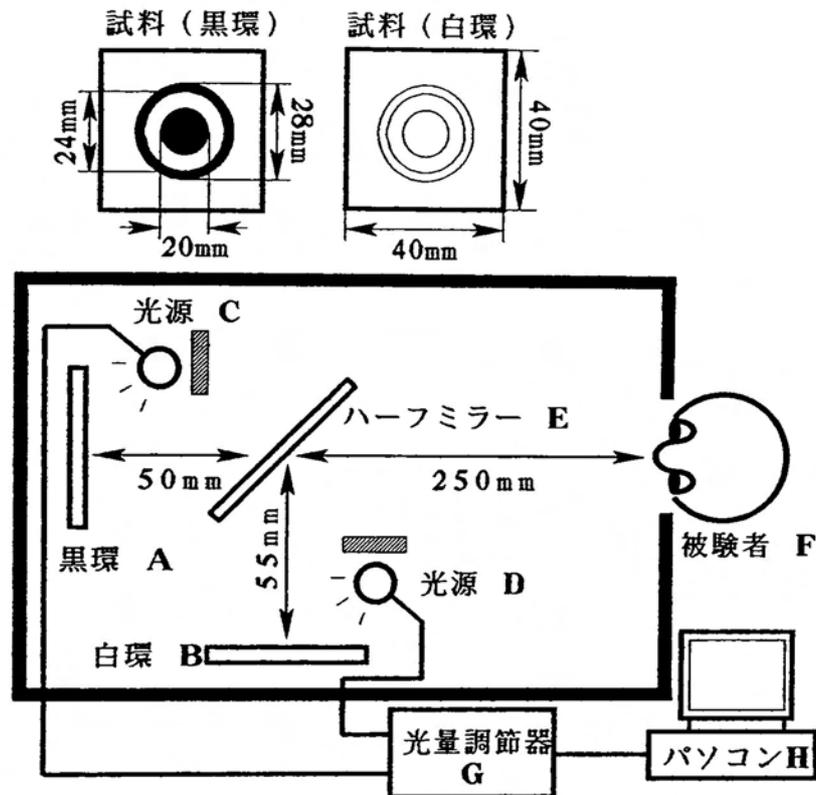


図7.2 測定装置の構成

知覚しやすいためである。目視によれば白環の距離を50mmより遠ざけると52mmまでは光沢感が高くなるが、それ以上遠ざけても光沢感に差異は感じられなかった。今回の実験では55mmとした。被験者Fから見た円環の大きさが等しくなるように、白環のサイズは黒環より2%大きく作成されている。各試料A、Bは、それぞれ光源C、D（ハロゲンランプ）によって別々に照射される。また、パーソナルコンピュータHからの信号によって光量調節器Gの出力電圧を変化でき、光源の輝度を調節できる。光源に印加した電圧値と試料表面からの輝度の関係は、輝度計（トプコン製、BM-5）を用いあらかじめ測定されている。心理実験時にN段階の輝度の中から2つを選択し提示する順番は、パーソナルコンピュータHによってランダムになるように設定されている。

7. 3 測定結果

一対比較データをもとに分散分析を行い、各効果の有意性を検定した⁽⁷³⁾結果を表7.1に示す。この表の中の F は分散比を表す。 F 分布表より求めた5%の F 値はそれぞれ

$$F_{54}^4 \cong 2.53, F_{54}^{36} \cong 1.59, F_{54}^6 \cong 2.25 \quad (7.2)$$

であり、表の中の(*)印を示している効果が有意である。この表より、特に主効果(心理的光沢度)が有意であると言える。また、組合せ効果の影響はなく、今回用いた白環と黒環の輝度を、5、15、30、45、60 cd/m²と設定し、それらを組み合わせたことに問題はない。一方、黒環の輝度が5、15、45 cd/m²の場合、個人差が認められる。これは個人によって光沢の判断の基準が異なっているためと思われる。しかし、その程度は F 値(F_{54}^{36})と比較して大差なく、若干の個人差があると見てよい。

主効果(心理的光沢度)が有意であることがわかったので、図7.3に様々な黒環の輝度における白環の輝度 L_w と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係を示す。横軸は白環試料の輝度 L_w 、縦軸は一対比較法により求めた心理的光沢度 $G_{p,h}$ である。この図の中の括弧で囲んだ2つは、有意差検定(危険率5%)により、有意差がないとみなされた組合せである。したがって、それらの試料間の光沢差を

表7.1 心理的光沢度の分散分析表

要因	自由度	黒環1 F	黒環2 F	黒環3 F	黒環4 F	黒環5 F
主効果	4	135.53*	55.48*	38.59*	98.77*	125.81*
主効果×個人	36	2.16*	1.94*	1.51	2.24*	1.51
組合せ効果	6	0.46	2.00	1.71	1.70	2.20
誤差	54	—	—	—	—	—

黒環1:黒環輝度が5 cd/m²の場合、黒環2:黒環輝度が15 cd/m²の場合、黒環3:黒環輝度が30 cd/m²の場合、黒環4:黒環輝度が45 cd/m²の場合、黒環5:黒環輝度が60 cd/m²の場合

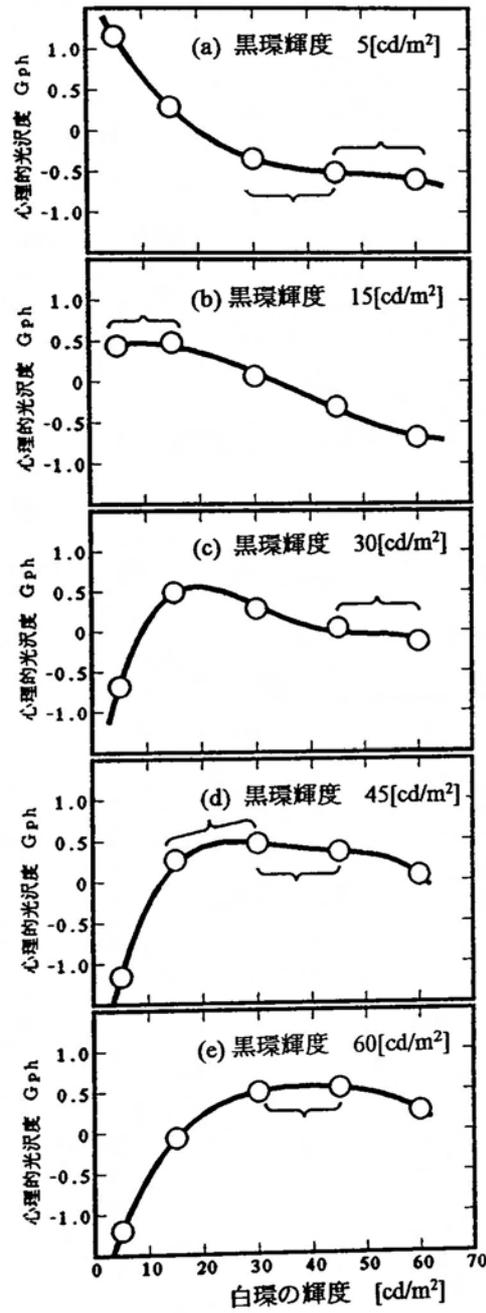


図7.3 種々の黒環輝度における白環輝度 L_w と心理的光沢度 G_{ph} の関係

人間は区別できないことを意味する。

この図から以下のことがわかる。黒環の輝度が低い場合（図7.3(a)）は、白環の輝度を高くするにしたがって光沢感がなくなる。逆に、黒環の輝度が高い場合（図7.3(e)）は、白環の輝度を高くするにしたがって光沢感が強くなり、ある輝度で光沢感が最大になり、それ以上白環の輝度を高くすると逆に心理的光沢度が低くなる。

7. 4 検討

7. 4. 1 試料の輝度と仮想光沢感の関係

黒環輝度の異なる図形の比較実験を行っていないため、図3(a)～(e)の5つの図を直接比較することはできない。この関係を求めるためには、黒環の輝度5通り、白環の輝度5通りのすべての組合せ25組に対し、一対比較法を実施しなければならない。しかし、これを実施するためには、被験者一人に対し最低でも ${}_{25}C_2$ 回の比較実験が必要であり、実質的に困難である。そこで、異なった黒環輝度における心理的光沢度の大小関係の比較を可能にするため、以下の処理を行った。

白環の輝度2通り（ 5cd/m^2 、 60cd/m^2 ）と黒環の輝度5通り（<7.2.1>節と同様の5段階の輝度）を用いて、白環と黒環の組合せを求めると10組である。この10組に対し、<7.2.1節>と同様の手順で一対比較法を実施し、心理的光沢度 $G_{p,i}$ を求めた。このときの被験者数 p は10人である。結果は図7.4の通りである。この図によって、白環の輝度が 5cd/m^2 と 60cd/m^2 については、黒環輝度と心理的光沢度との関係がわかる。図中の括弧で囲んだ組は光沢に有意差がない組である。図7.3(a)～(e)のみでは黒環の輝度が異なった場合の白

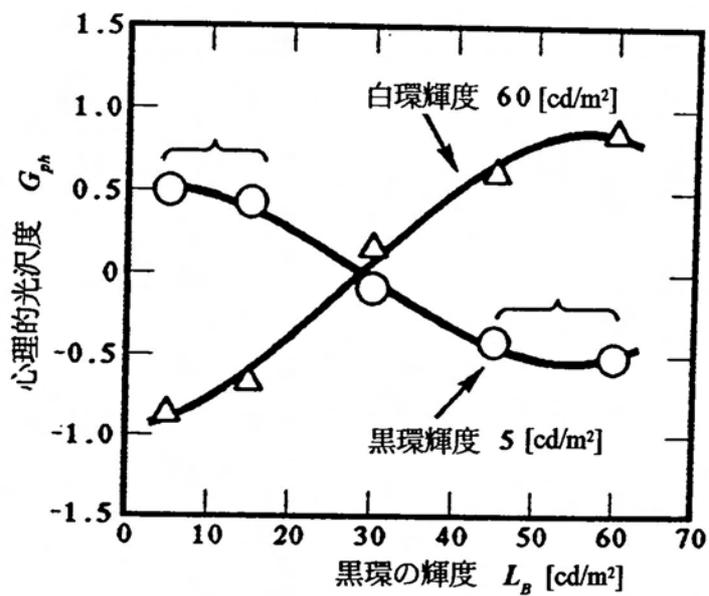


図7.4 黒環輝度 L_B と心理的光沢度 G_{ph} の関係

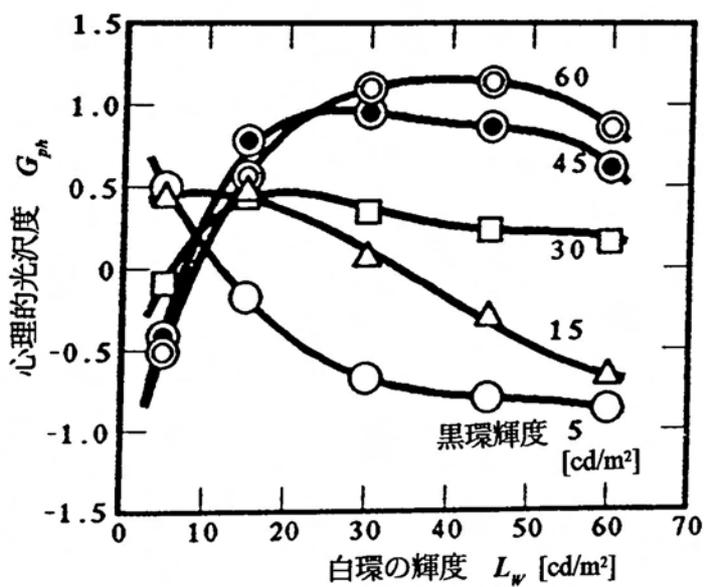


図7.5 図7.4の心理的光沢度を基準として補正した白環輝度 L_w と心理的光沢度 G_{ph} の関係

環輝度 5cd/m^2 における心理的光沢度を比較することはできないが、図7.4ではこの関係がわかる。そこで、この図を用いて、図7.3の白環輝度 5cd/m^2 の場合の心理的光沢度が、図7.4の心理的光沢度と一致するように補正した。同様に白環輝度 60cd/m^2 の場合についても補正した。その結果を図7.5に示す。図7.3の心理的光沢度は一対比較法によって決定されており等間隔尺度とみなすことができるので、このような補正を行っても心理的光沢度の大小関係は損なわれない。

図7.5より以下のことがわかる。黒環の輝度が高くなるにつれて、心理的光沢度が最大となる時の白環輝度も高い方へシフトする。

今回得られた結果を、正反射光強度や鮮明度に比例するというような従来の測定法の測定原理では説明することはできない。そこで、定性的ではあるが、本質的に人間は何を光沢感として感じるのかについて考える。我々は物体を見て、物体の形状、表面状態、模様等を認識する。特に、陶磁器や車のボディ等々の光沢のある物体を見ると、物体そのものの模様や色とは別の模様、例えば光源や窓わく等も同時に知覚する。この模様は、人間が見る位置を変えるとそれに合わせて移動することから、物体本来の模様でないことがわかる。この模様は、物体そのものの知覚を惑わす。このような物体そのものの知覚を惑わす感覚が光沢感を感じさせる⁽³⁷⁾。よって心理的光沢度を”物体そのものの知覚を惑わす感覚量の大きさ”と考える。

今、黒環の輝度が低く、白環の輝度も同程度に低い場合(図7.3(a))を考える。黒環と白環の距離が若干異なるため、人間は黒環か白環のどちらか一方を注視しようとする。黒環を知覚しようとするすると白環がその知覚を妨害し、逆に白環を知覚しようとするすると黒環が妨害する。このため、黒環を注視した場合、あたかも黒環の表面に白環の像が映っているように感じ、白環を注視するとその表面に黒環の像が映っているように感じ、光沢感を知覚する。と

ころが、白環の輝度を高くするにつれて、白環のみが強く知覚され、黒環の存在が次第に薄れ、黒環は知覚されなくなり、黒環は白環の知覚を感ずる要因でなくなる。このため、図7.3(a)のように白環の輝度を高くするにしたがって心理的光沢度が低くなる。

逆に黒環の輝度が高い場合(図7.3(e)), 白環の輝度が高くなっても黒環は知覚される。このため、白環の輝度が高くなるにつれて、白環が黒環を感ずる感覚が大きくなり、心理的光沢度が高くなる。ところが、白環の輝度をさらに高くすると、白環の方のみが強く認識され、黒環が次第に知覚されず光沢感が減少する。

7. 4. 2 仮想光沢感の最大発生条件

白環と黒環がどのような条件の時に心理的光沢度が最大となるのか検討する。図7.5より白環の輝度 L_w および黒環の輝度 L_B と心理的光沢度 $G_{p,k}$ の関係が得られたので、その実験データより L_w/L_B と $G_{p,k}$ の関係を表してみる(図7.6)。この図より、 L_B を一定とし L_w を変化させた場合、 L_B の大きさに関わりなく L_w/L_B が約0.7の時心理的光沢度 $G_{p,k}$ が最大となり、0.7から離れるにしたがって $G_{p,k}$ が減少することがわかる。次に、 $L_w/L_B=0.7$ の時 $G_{p,k}$ が最大となる理由を考える。図中の L_w 、 L_B は試料の白環と黒環の内円の平均輝度を表している。今、白環と黒環の試料面全体($40 \times 40 \text{ mm}^2$)の平均輝度 L_w' 、 L_B' を求める。内円の平均輝度が5、15、30、45、60 cd/m^2 のときの試料面全体の平均輝度は、白環の場合、それぞれ5、14、28、45、58 cd/m^2 、黒環の場合、4、11、23、32、42 cd/m^2 であり、 $L_w' \cong L_w$ 、 $L_B' \cong 0.7L_B$ である。よって、 $L_w/L_B=0.7$ のとき、 $L_w'/L_B' \cong 1$ となる。つまり、白環と黒環の試料面全体の平均輝度が等しいときに心理的光沢度が最大となる。

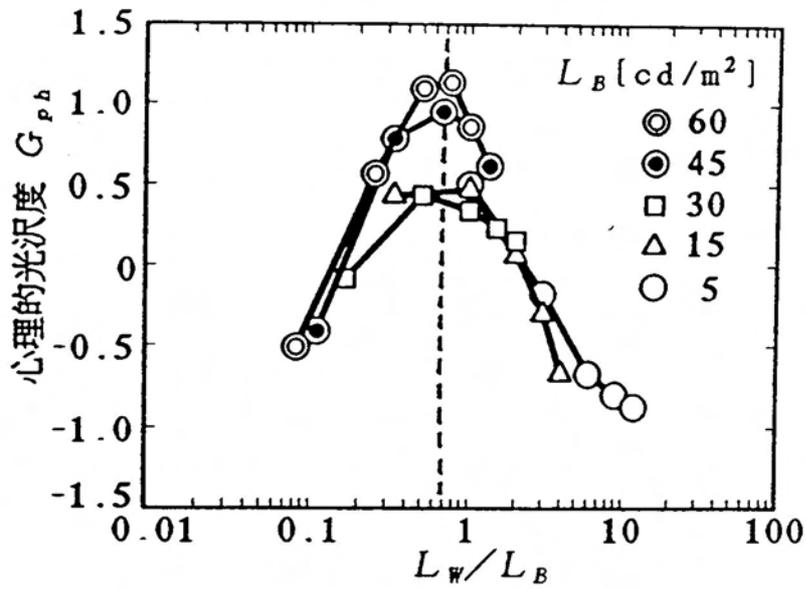


図7.6 白環の円内の輝度 L_w と黒環の円内の輝度 L_B の比と心理的光沢度 G_{ph} の関係

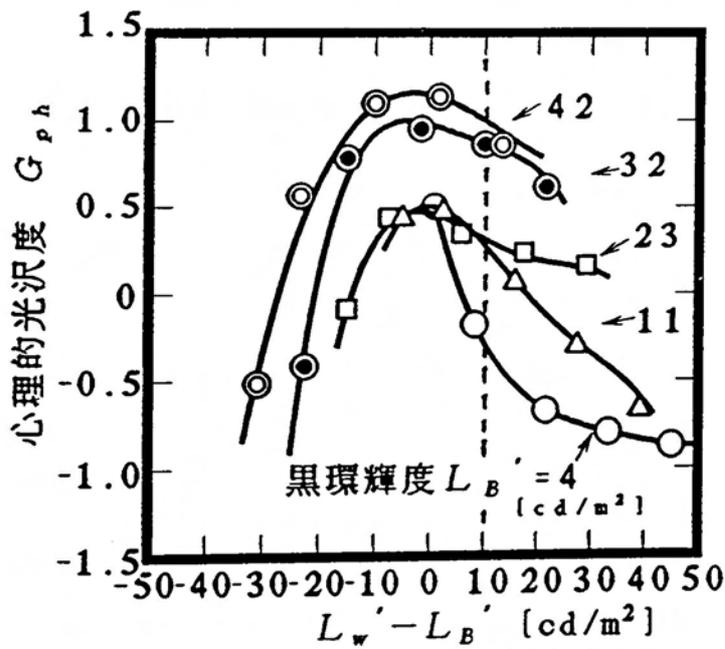


図7.7 白環の試料面全体の平均輝度 L_w' と黒環の試料面全体の平均輝度 L_B' の差と心理的光沢度 G_{ph} の関係

次に、白環と黒環の平均輝度の差($L_w' - L_B'$)と心理的光沢度 $G_{p,h}$ の関係を図7.7に示す。この図からも、輝度差が零のときに $G_{p,h}$ が最大となることがわかる。また、輝度差が等しい場合について考えると、黒環の輝度が高い方が $G_{p,h}$ も高くなる傾向にある。例えば図7.7に点線で示すように、 $L_w' - L_B' = 10$ の場合、 L_B' が $4 \rightarrow 23 \rightarrow 42 \text{ cd/m}^2$ となるにつれて $G_{p,h}$ も高くなる。一般に、物体からの反射光が強い物体ほど光沢感が高い。今回の場合、輝度差が等しい場合、黒環の輝度が高い方が白環と黒環を合わせた試料面全体の反射光強度も高くなるので光沢感も高くなったと考えられる。

7. 4. 3 従来の光沢度と仮想光沢感の関係

光沢度測定法を大別すると、鮮明度を用いる方法⁽³⁰⁾⁽⁴¹⁾と正反射光強度を用いる方法⁽³³⁾⁽³⁴⁾に分けられるが、両者は強い相関があり、一般に像が鮮明に映る物体ほど表面が滑らかで正反射成分が大きい。そこで代表的な光沢度測定法として正反射光を利用した鏡面光沢度測定方法⁽³⁴⁾を選択し、それと今回の測定結果との関連について検討する。

鏡面光沢度測定方法は、物体にある方向から平行光を照射し、正反射方向で反射光束を受光する方法である。その時、鏡面光沢度は、反射光束に比例するものとして定義される。正反射光は、物体表面で正反射の法則にしたがって反射した光であり、物体に投影された光源や周囲の像はこれに相当する。しかし、我々が物体の色や模様を知覚するのは、拡散反射光によってである。したがって正反射成分は物体本来の模様の知覚を妨げる要因である。このため、正反射光が強くなると、物体そのものの知覚を妨げる感覚が大きくなり、光沢感が強くなる。このことは、黒環を拡散成分と見なし、白環を物体の知覚を妨げる正反射成分と考えれば、図7.3(e)と類似した傾向にある。

我々は拡散反射光によって物体の色や形状を知覚する。図7.3(e)では、白環の輝度が低い場合、黒環（これを物体の知覚に關係する拡散反射光とみなす）がはっきり認識され光沢感が低いが、白環（これを物体表面に映る正反射光と考える）の輝度を高くするにつれて、黒環の表面に白環が映ったように感じ、白環が黒環の知覚を妨げ光沢感が強くなる。

今回の心理実験結果と鏡面光沢度の異なる点は、鏡面光沢度では正反射成分が大きくなるにつれて心理的光沢度は大きくなるが、心理実験では、白環の輝度をある程度以上高くすると逆に光沢感が減少することである。この原因として以下のようなことが考えられる。普通の物体は正反射光が強くなっ

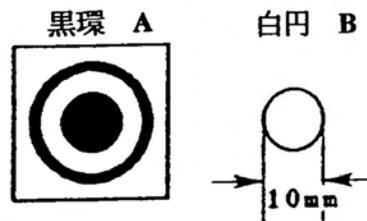


図7.8 異なった図形の試料

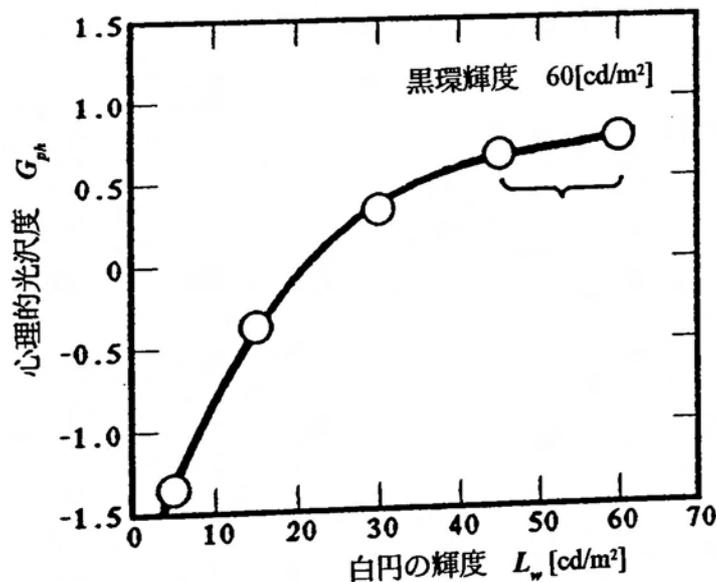


図7.9 異なった図形の試料を用いた場合の図形の輝度と心理的光沢度の関係

ても、正反射の部分以外から物体をはっきり認識できる。このため、正反射成分が大きいほど物体の知覚を妨げる感覚が大きくなり心理的光沢度は高くなる。一方、今回の実験では、白環と黒環が全く重なっているため、白環の輝度を大きくすると、黒環自体がほとんど認識されなくなる。よって光沢感が減少する。このことを確認するため図7.8のような試料を作成した。図形A(黒環)は正方形であるが、図形B(白円)は直径10mmの白色の円板であり、図形Aより小さい。このため、被験者が図7.2の装置のハーフミラーを通して図形を見た場合、両者は完全には重ならない。よって白円の輝度を高くしても重なっていない部分から黒環の存在を知覚できる。この試料に対して<7.2.1節>と同様の心理実験を行った。その結果、図7.9のように白円の輝度を高くするにつれて心理的光沢度は高くなった。なおこのときの被験者数 p は10人である。

以上のことから、物体の存在が確認できる範囲では、物体の知覚を妨げる要因が大きいほど心理的光沢度も高くなるという点で、今回の測定した心理的光沢度と通常の方法から測定された鏡面光沢度は、定性的に一致する。

正反射成分が高くなるにつれて心理的光沢度が低くなる現象は、鏡のように非常に表面が滑らかな物体に対して生じる。鏡は反射率が高く、また拡散反射成分が小さいため、鏡の表面そのものは知覚されにくい。このように、物体の表面が知覚されにくい場合、光沢感は感じられず、鏡の中に映っている物体のみが知覚される。今回の実験においても同様に、黒環の輝度が低い場合、白環の輝度を高くすると黒環が知覚されにくくなり光沢感が減少する。

7. 5 むすび

紙に描いた白と黒の図形それぞれは全く光沢感がないにもかかわらず、

ハーフミラーを通してそれらを重ね合わせると、光沢感を感じることもある。このことは従来の鏡面反射光や鮮明度を用いた光沢度測定法では説明できない。そこで、照明条件を様々変化させ、心理的光沢度と輝度の関係を定量的に調べた。その結果、以下のようなことが新たにわかった。

重ね合わせる2つの図形の平均輝度が等しいときに心理的光沢度が最大となる。また、試料の平均輝度が高い場合と低い場合では、平均輝度が高い場合の方が心理的光沢度が高くなる傾向にある。

次に、光沢感を”物体の知覚を妨げる感覚量”と考えることによってこの現象を説明した。また、この考え方で、従来の光沢度測定方法も定性的に説明できることを示し、今回の結果が通常 of 物体の光沢感と無関係ではないことを示した。

これらの結果は、光沢のある仮想空間を作り出したり、光沢知覚機構をさらに検討する上で有用と思われる。

第 8 章 結 論

本論文では、種々の工業製品や真珠、陶磁器などの光沢測定の前自動化を前提として、光沢の電子計測法について述べてきた。また、視覚情報処理の立場から、光沢知覚モデルの検討および心理的光沢度の計測を行った。

光沢の測定法に関しては、従来の測定法には主に以下のような問題点があった。すなわち、(1)平面物体用の測定法は、低光沢から高光沢の広範囲にわたって適用できない。また、光源の入射角によって得られる光沢度はばらばらで、心理的光沢度と一致しない。(2)曲面に関しては、物体の曲率が異なると得られる物理的光沢度と心理的光沢度は全く無関係であり、曲率半径が異なる物体の光沢を測定できない。(3)色と光沢の関係が不明で、異なる色の試料間の光沢測定ができない。そこで、平面、曲面、彩色物体に適用できる新しい光沢度測定法を提案した。ここで提案する測定法を用いることにより、紙のような低光沢の物体からプラスチックや塗装面のような高光沢物体までの広範囲にわたって光沢測定が可能となり、また、真珠や磁器のような曲面の光沢測定も可能となった。さらに、色と光沢の定量的関係も明らかになり、色の異なる物体間の光沢の測定の見通しも得た。光沢知覚に関しては、人間の知覚する心理的光沢度が物体の曲率半径によって変化し、ある曲率半径の時に心理的光沢度が最大となる心理知覚現象を、網膜モデルにより説明した。また、全く光沢のない紙に描いた白と黒の図形を重ね合わせると光沢感が生じるといふ仮想光沢感の定量的測定を行い、仮想光沢感の発生条件や従来の光沢度測定方法との関連を明らかにした。

以上の結果から、光沢測定実用化の見通しと光沢知覚機構解明の手掛かりを得ることができた。それらの具体的成果について以下に述べる。

第2章では、平面物体用の光沢度測定法を提案した。従来の平面物体用の光沢度測定法は、低光沢から高光沢まで広範囲には適用できず、得られる物理的光沢度は心理的光沢度に比例しない。また、光源の入射角によって得られる光沢度はばらばらである。この章では以下のことを明らかにした。

- (1)人間の知覚する心理的光沢度は反射光強度そのものに比例するのではなく、人間の知覚する心理的な明るさに比例する。
- (2)このことに基づき、新しい物理的光沢度 G_p を提案した。低光沢から高光沢の広範囲の試料に対し、物理的光沢度 G_p と心理的光沢度 G_{ps} の相関係数は0.97以上と非常に高い。
- (3)さらに、光源の入射角の変化による測定データの変動を低減させるために、反射光分布をCook-Torranceモデルに当てはめることによって表面の滑らかさ係数 m' を抽出し、それより(2)で定義した光沢度 G_p を求める測定方法も提案した。この方法を用いた場合、光源の入射角の変動による光沢度の変動率 ΔG は、鏡面光沢度 G_s の変動率の約1/3以下である。
- (4)この方法は、経年変化等による光源の明るさの変動に影響されない。

以上より、本研究で提案する方法は、低光沢から高光沢までの広範囲に渡って平面物体の光沢度測定に有効であることが確かめられた。

第3章では、心理的光沢度の測定手順について述べた。すべての章が心理的光沢度と関連を持つが、各章毎に心理的光沢度の説明を行うと繁雑になるので、心理的光沢度についてこの章でまとめて説明した。さらに、曲率半径の異なる試料の心理的光沢度を測定した結果、新たに以下のような成果を得ることができた。

- (1)一対比較法によって得られる心理的光沢度 G_{ps} と順位配列法によって得られる心理的光沢度 G_{ps}' は、ほぼ直線関係にあり、本論文で使用した試

料に関してはどちらの方法を用いても問題ないことを確認した。

(2) 心理的光沢度は物体の曲率半径 R によって異なり，ある曲率半径 R_{max} の時に最大となることを定量的に明らかにした。

(3) 平面状態の時に低光沢の試料ほど，心理的光沢度が最大となるときの曲率半径 R_{max} が小さい。

(4) 心理的光沢度は曲率半径によって異なるものの，平面状態で光沢のある試料のほうが最大となる心理的光沢度の値も高い。

(5) この原因を像の鮮明度と解像度を用いて定性的に説明した。

以上より，ここで得られた心理データは，心理的知覚現象を解明するために基礎試料として役立つと思われる。

第4章では，曲面に適する光沢度測定法を提案した。同一材料，同一表面状態の曲面物体でも，曲率半径が変われば心理的光沢度は異なる。従来の曲面用の光沢度測定法である n 点拡散光沢度測定法はこのような場合には適用できない。この章では以下のことを明らかにした。

(1) CCD センサを用いて，反射光分布曲線より映像の鮮明さ，すなわち，物体表面の映像のぼけの度合を求める方法を提案した。この方法で得られる物理的光沢度，すなわち「ぼけ度合光沢度」は，塗装球，真珠のすべての試料に対して，心理的光沢度との間の相関係数が 0.88 以上となり，曲率半径が一定の物体は勿論，曲率半径が異なる物体の場合も，心理的光沢度とかなりよい相関を示す。

(2) 次に，ぼけ度合い光沢度測定装置を改良し，PSD を用いることにより，高速高精度に測定可能な方法を提案した。この方法は高級商品真珠のように光沢差の小さい高光沢物体に適する方法である。

(3) ぼけ度合光沢度の測定範囲をさらに拡張し，低光沢で拡散反射成分を多

く含む物体でも測定が可能ないように方法を改善した。この方法で得られる物理的光沢度は、低光沢から高光沢までの広範囲の曲面物体の光沢測定に有効である。

以上より、本章で提案する方法は曲面物体の光沢度測定に有効であり、塗装球、陶磁器、球形真珠等の光沢度測定に有用である。

第5章では、色の異なる試料間に適用できる光沢度測定法を提案した。表面状態が全く等しくても色が異なると心理的光沢度は変化する。しかし、色と光沢の定量的関係は明らかになっていない。このため、色の異なる試料間に適用できる光沢度測定法は現時点ではではない。本章では以下のことを明らかにした。

- (1) 光沢感に及ぼす色の影響を明らかにするための基礎実験を行なった。その結果、明度が高くなるにつれて心理的光沢度が減少すること、および彩度が高くなるにつれて心理的光沢度が増加することがわかった。また、色相と光沢の相関性は小さいことがわかった。
- (2) これらの結果を用いて色と光沢の関係の近似式を作成し、その式を表面状態の等しい種々の試料に対して適用した結果、心理的光沢度と比例関係にあることがわかった。
- (3) 第2章で提案した物理的光沢度 G_d を(2)の式で補正した結果、低光沢から高光沢まで光沢の大きく異なる試料に対しても新光沢度 G_{dc} はよく一致することがわかった。しかし、色の違いによる光沢差は正反射光の違いによって生じる光沢差と比較すると小さく、おおまかに分類する場合は色の影響は無視できることもわかった。
- (4) 同色の平面物体に関しては、 $G_{dc} \propto G_d$ であるので、 G_{dc} を平面物体用の光沢度として使用することも可能である。しかし、光源の入射角や明る

さの変動が無視できない場合は、第2章で提案した物理的光沢度 G_p の方が適当であろう。

以上より、本章で提案する方法は彩色物体間の光沢度測定に有効である。陶磁器やプラスチック製品などは色の違いによる光沢差が質感に影響する。このような物体に対して本方法は有効である。

第6章では、生体工学モデルを用いた光沢知覚機構を検討した。反射光強度は物体の曲率半径が小さくなるにつれて減少するのに対し、心理的光沢度はある曲率半径のときに最大となる。この現象に一致する光沢度測定法は第4章で提案したが、なぜそのような現象が生じるのか未だに明らかでない。そこで、網膜に類似した処理を用いた光沢知覚モデルを提案し、以下のことを明らかにした。

(1)このモデルは、眼の順応機能を模倣して反射光輝度を内部信号に変換し、

さらに神経節細胞の受容野の感度分布を近似したDOG関数で畳み込み積分することによって出力波形を得ている。本モデルによって得られた出力のピーク値 $H_{m,x}$ は網膜からの出力値と類似している。

(2)曲率半径が等しい場合、 $H_{m,x}$ と心理的光沢度は単調増加の関係にある。

(3)同一物体に対しては、曲率半径が変化すると $H_{m,x}$ は変化し、ある曲率半径のときに $H_{m,x}$ は最大となる。また、低光沢の物体ほど $H_{m,x}$ が最大となる時の曲率半径は小さい。この現象は心理的光沢度と同様の現象である。

(4)この現象を網膜の受容野の大きさと反射光分布波形の関係から説明した。

このように、本モデルによって得られる出力は心理的光沢度と類似した特性が得られ、本研究成果が光沢知覚機構解明の基礎資料として役立つと思われる。

第7章では、仮想光沢感の測定を行い、その結果について検討した。紙に描いた白と黒の図形それぞれは全く光沢感がないにもかかわらず、ハーフミラーを通してそれらを重ね合せると、光沢感を感じることもある。このことは従来の鏡面反射光や鮮明度を用いた光沢度測定法では説明できず、この現象を解明することは光沢知覚現象解明の手掛かりとなると思われる。本章では以下のことを明らかにした。

- (1)重ね合わせる2つの試料の照明条件を様々変化させ、心理的光沢度と輝度の関係を定量的に調べた。その結果、重ね合わせる2つの図形の平均輝度が等しいときに心理的光沢度が最大となることが明らかになった。
- (2)試料の平均輝度が高い場合と低い場合では、平均輝度が高い場合の方が心理的光沢度が高くなる傾向にある。
- (3)これらの現象を、光沢感を”物体の知覚を妨げる感覚量の大きさ”と考えることによって説明した。またこの考え方で、従来の光沢度測定方法も定性的に説明できることを示した。

これらの成果は、光沢のある仮想空間を作り出したり、光沢知覚機構を研究する上で役立つと思われる。

今後の展望として、

- (1)すべての物体に適用できる光沢度測定法はなく、また、現時点ではそのような要求もないので、実用的立場から、平面物体用、曲面物体用、彩色物体用とそれぞれの用途別に幾つかの方法を提案した。今後、これらの方法を統合して、すべての用途に適する測定法を開発する。
- (2)光沢自動測定装置の実用化のためには、本論文で提案した測定部分の他に、試料の搬送部、仕分部などの機械的機構の開発が必要であり、処理速度に

については、これらを含めたシステム全体の評価が必要である。

(3) 多少室内の明るさが異なっても物体の光沢感はほとんど変化しないが、非常に暗い部屋や逆に非常に明るい部屋では、人間の知覚する光沢感は変化することが予測されている(101)。今後、眼の順応状態と光沢の関係を調べ、測定法や光沢知覚解明に役立てたい。

(4) 視覚情報処理の立場からアプローチすることによっても、心理的光沢度に一致する光沢度測定法を開発することが可能である。しかしながら、これには、認知工学、心理学、生体工学などの学際領域が関わっており、今後さらに研究を進めなければならない。

などにより、光沢測定の自動化および光沢知覚機構の解明が実現できるものと思われる。将来的には、物体の光沢、色、形状、配色、光源の明るさ、位置関係等を総合的に判断し、人間の感性を重視した室内インテリアの自動設計支援システムを開発したい。

参考文献

- (1) 芹川, 相田: "PSDカメラによる3次元座標の高速検出", 電子通信学会論文誌C, Vol.J69-C, No.9, pp.1207-1210 (1986).
- (2) 相田, 芹川, 中島, 山下, 永村: "背景光の影響を補正したPSDカメラによる三次元座標検出法", 電気学会論文誌C, Vol.107-C, No.7, pp.632-636 (1987).
- (3) 松田, 鬼頭: "塗膜の光沢感を規定する因子", 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.6, pp.645-649 (昭和56).
- (4) M.Matsuta and T.Kubota: "Gloss Measurement on Painted Surfaces", Jpn.J.Appl.Phys., Vol.20, No.6, pp.1145-1152 (1981).
- (5) 松田, 鬼頭, 久保田: "塗膜の光沢測定", 計測自動制御学会論文誌, Vol.18, No.5, pp.471-475 (昭和57).
- (6) 水産庁真珠研究所: "真珠検査統計年報", 神戸・東京真珠検査所 (昭和59).
- (7) 相田貞蔵: "真珠の光沢", 光学, Vol.15, No.3, pp.207-212 (1986).
- (8) 和田浩爾: "真珠形成機構の生鉱物学的研究, 第4章 真珠の構造と光沢", 国立真珠研報, Vol.8, pp.948-1059 (1962).
- (9) 和田浩爾: "真珠", 全国宝石学協会 (1982)
- (10) 白井祥平: "真珠", 講談社 (昭和46).
- (11) 相田, 嶋田, 小鉢, 芹川, 釘沢, 内村: "表面反射光による白色系真珠の色分類システムの試作", 電気学会論文誌C, Vol.109-C, No.2, pp.67-74 (1989)
- (12) 相田, 釘沢, 内村: "球形ドーム形の真珠分光特性測定器の基礎研究", 応

- 用物理, Vol.53, No.8, pp.692-702 (1983).
- (13) T.Aida, T Shimada, M.Kobachi, S.Serikawa, H.Nakanishi, H.Kugisawa and K.Uchimura: "Comparison of Pearl Color Sorting System Utilizing Transmitted-Diffusion-Light and That Utilizing Surface-Reflection-Light of Pearls", Proc. of the 1st China-Japan International Symp. on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, pp.511-518 (1989).
- (14) H.Kugisawa and T.Aida: "Method for Measuring Glossiness by Brightness Distribution and Its Application for Pearls", IEICE Trans., Vol.E72, No 4, pp.330-332 (1989).
- (15) H.Kugisawa and T.Aida: "New Methods for Measuring Pearl Glossiness and Detecting Projection on Its Surface by Image-Processor", Proc. of the 1st China-Japan International Symp. on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, pp.522-526 (1989).
- (16) H.Kugisawa and T.Aida: "Method for Detecting Projection on Pearl Surface by Brightness Distribution", IEICE Trans., Vol.E71, No.10, pp.955-956 (1988).
- (17) 大西政太郎: "陶芸の土の窯焼き", 第3章, 理工学社 (1983).
- (18) 素木洋一: "陶芸のための科学", 建設総合試料社, p 100 (昭和58).
- (19) 亀山貞登: "質感の行動科学", p.87, 彰国社サイエンス (1988).
- (20) 太田, 坂上, 小迫: "視認性の基づく先染織物デザインの視覚的特徴", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J74-D-II, No.11, pp.1491-1498 (1991)
- (21) 例 え ば , V G.Harrison and S.R.C.Poulter: Brit.J.Appl.Phys.

- Vol.2, p.92, (1951); G.I.Pokrowski: Z.f.Phys, Vol.30, p.66(1924); Vol.35, p.34(1935); Vol.36, p.497(1936) など.
- (22) 蓮沼宏: "拡散反射と表面の光沢 I:表面の拡散反射の性質", 応用物理, Vol.23, No.11, pp.501-507 (1954).
- (23) 福島栄之助: "紙の光沢", 応用物理, Vol.23, No 6, pp.268-273 (1954).
- (24) 蓮沼宏: "拡散反射と表面の光沢 II:第1種面の光沢と光沢計", 応用物理, Vol.23, No.12, pp.548-555 (1954).
- (25) 中村常郎: "反射映像による光沢の測定", 応用物理, Vol.24, No.2, pp 79-83 (1955).
- (26) 蓮沼宏: "拡散反射と表面の光沢(3)", 応用物理, Vol.24, No.3, pp.97-102 (1955).
- (27) 蓮沼, 奈良: "紙の正反射光沢について", 応用物理, Vol.24, No.3, pp 74-78 (1955).
- (28) 蓮沼, 奈良: "Sheen"光沢の研究(II)", 応用物理, Vol.24, No.11, pp.457-461 (1955).
- (29) 栗田, 矢野, 奈良, 蓮沼: "紙の拡散反射光のBarkas解析について", 応用物理, Vol.24, No.8, pp.318-324 (1955).
- (30) 蓮沼, 奈良: "鮮明度を利用した光沢計について", 応用物理, Vol.25, No.5, pp.214-216 (1956).
- (31) 田中俊一: "偏光による紙の反射特性の測定", 応用物理, Vol.25, No.5, pp.207-213 (1956).
- (32) 西脇慈円: "色彩紙の光沢", 応用物理, Vol.25, No.9, pp.370-374 (1956).
- (33) 例えば, ASTM (米国工業規格) 規格番号 D523-67, D1834-65,

- D2895-70T, C346-59, D523-67など、測定対象別に種々の規格がある。
- (34) 日本工業標準調査会: "鏡面光沢度測定方法", JIS Z 8741 (1983確認)
日本規格協会
- (35) 日本工業標準調査会: "紙および板紙の75度鏡面光沢度試験方法", JIS
P 8142 (1971確認) 日本規格協会
- (36) L.R.Ingersoll: "The glarimeter, an instrument for measuring
the gloss of paper", J Opt.Soc.Am., Vol.5, p.213 (1921).
- (37) 日本色彩学会編: "色彩科学ハンドブック", 東京大学出版会,
pp.625-644 (昭和55).
- (38) R.S.Hunter: "High Gloss Measurement", Off.Dig., No.4, p.348
(1964).
- (39) V G.W.Harriso: "Definition and Measurement of Gloss",
Cambrige (1945)
- (40) 沢路雅夫: "つやの質についての一考察", 応用物理, Vol.29, No.11,
pp.789-795 (1960)
- (41) 日本工業標準調査会: "アルミニウム及びアルミニウム合金の陽極酸化皮
膜の写像性試験方法", JIS H 8686 (1978確認) 日本規格協会
- (42) 上坂, 川手, 堀内: "金属研磨面の美観計測装置の開発", 応用物理,
Vol.53, No.6, pp.505-507 (1983).
- (43) 須賀翁: "像の鮮明度測定装置", 特許広報, 昭56-5329
- (44) 古賀, 相田: "球形物体の光沢度測定法", 電子通信学会論文誌C,
Vol.J62-C, No.2, pp.161-162 (1979).
- (45) 古賀, 相田: "曲面物体の物理的, 心理的光沢度および物理的光沢度測定
法の一提案", 電子通信学会論文誌C, Vol.J62-C, No 10, pp.711-718
(1979).

- (46) Jien Nishiwaki: "Effect of Color on Visual Gloss (Part 1)",
J.Appl.Phys., Vol.28, No.5, pp.267-272 (1959).
- (47) Jien Nishiwaki: " Effect of Color on Visual Gloss (Part 2),
J.Appl.Phys., Vol.28, No.5, pp.273-276 (1959).
- (48) 相沢正:"塗装の色と光沢", 塗装技術, No.5, pp.170-179 (1971).
- (49) 相沢, 渡辺, 西条, 川上:"光沢度と色度との相関性の視覚的評価に関する研究(I)光沢度が色に及ぼす影響(その1)", 製品科学研究所研究報告,
Vol.63, pp.23-32 (1970).
- (50) 渡辺, 相田, 北田:"外側膝状体の両眼性細胞を用いた光沢知覚モデル",
電子通信学会論文誌A, Vol.A-22, No.2, pp 138-139 (昭和55).
- (51) 芹川, 下村: "平面物体の光沢の一測定法", 電気学会論文誌C,
Vol.112-C, No.3, pp.205-206 (1992).
- (52) S.Serikawa and T.Shimomura: "Method for measuring the
glossiness based on psychological sense", Proc. of the 1992
International Conference on Industrial Electronics, Control,
Instrumentation and Automaton, Vol.3, pp.1619-1624 (1992).
- (53) S.Serikawa and T.Shimomura: "Method for measuring
glossiness of plane surfaces based on psychological sensory
scale", IEICE Trans., Vol.E76-A, No.3, pp.439-446 (1993).
- (54) S.S.Stevens and J.C.Stevens: " Brightness Function:
Parametric Effects of Adaptation and Contrast",
J Opt.Soc.Am., Vol.50, No 11, p 1129 (1960).
- (55) J.C.Stevens and S.S.Stevens: "Brightness Function: Effects
of Adaptation", J.Opt.Soc.Am., Vol.53, No.3, pp.375-385
(1963).

- (56) 日本工業標準調査会: "色の関する用語", JIS Z 8105 (1978確認) 日本規格協会
- (57) R.L.Cook and K.E Torrance: "A Reflection Model for Computer Graphics", Computer Graphics, Vol.15, No.3, pp.307-316 (1981).
- (58) K.E.Torrance and E.M.Sparrow: "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", J Opt.Soc.Am., Vol.57, No 9, pp 1105-1114 (1967).
- (59) B T.Phong: "Illumination for Computer Pictures", Vol.18, No.6, pp.311-317 (1975)
- (60) J.F.Blinn: "Models of Reflection for Computer Graphics", Computer Graphics, Vol.11,No 2, pp.192-198 (1977).
- (61) T.S.Trowbridge and K.P.Reits: "Average Irregularity Representation of a Rough Surface for Ray Reflection", J Opt.Soc.Am., Vol.65, No.5, pp.531-536 (1975).
- (62) Turner Whitted : "An Improved Illumination Model for Shaded Display", Communications of ACM, Vol.23, No.6, pp.343-349 (1980).
- (63) T.S.Trowbridge: "Rough-surface retroreflection by focusing and shadowing below a randomly undulating interface", J Opt.Soc.Am.A, Vol.A.1, No.10, pp.1019-1027 (1984).
- (64) T.S.Trowbridge: "Retroreflection from rough surfaces", J.Opt.Soc.Am., Vol.68, pp 1225-1245 (1978).
- (65) P.Beckmann and A.Spizzachino: "The Scattering of Electro-magnetic Waves from Rough Surfaces, MacMillan(New

- York), pp.80-97(1963).
- (66) M.C.Bartholomew-Biggs: "The estimation of the Hessian matrix in nonlinear least square problems with non-zero residuals", *Mathematical Programming*, Vol.12, pp.67-80 (1977).
- (67) J.E.Dennis and H.F Walker: "Convergence theorems for least-change secant update methods", *SIAM J Numerical Analysis*, Vol.18, pp.949-987 (1981).
- (68) J.E.Dennis, D.M.Gay and R.E.Welsch: "An adaptive nonlinear least-squares algorithm", *ACM Trans. on Mathematical Software*, Vol.7, pp.348-369 (1981).
- (69) S.P.Han: "Variable metric methods for minimizing a class of nondifferentiable functions", *Mathematical Programming*, Vol.20, pp.1-13 (1981).
- (70) S.Takahashi, N.Yamaki and H.Yabe: "Some modifications of sequential quadratic programming method for constrained optimization", *TRU Mathematics*, Vol.23, No.2, pp.281-295 (1987).
- (71) ASNOP研究会: "非線形最適化プログラミング", 日刊工業新聞, p.81 (平成3).
- (72) 芹川, 下村: "物体の曲率半径が心理的光沢度に及ぼす影響の検討", *電気学会論文誌C*, Vol.112, No 12-C, pp.851-852 (1992).
- (73) 日科技連官能検査委員会: "官能検査ハンドブック", 日科技連, pp.349-385 (昭和48).
- (74) 日本工業標準調査会: "XYZ表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系による色の表

- 示方法", JIS Z 8701 (1982確認) 日本規格協会
- (75) 蓮沼宏: "光沢", コロナ社, p 81 (昭和35).
- (76) K.Nakatani: "On ratio scale of weight", Japanese Psychological Research, Vol.9, No.4, p.155 (1967).
- (77) S.Serikawa and T.Shimomura: "Extraction of glossiness of curved surfaces by the use of spatial filter simulating retina function", IEICE Trans., Vol.E77-D, No.3, pp. 335-342 (1994).
- (78) 相田, 釘沢, 芹川, 田村: "CCDラインセンサを用いた曲面の光沢度測定法", 電子通信学会論文誌C, Vol.J68-C, No 11, pp.933-941 (1985)
- (79) S.Serikawa and T.Aida: "Improvement of the instrument for measuring glossiness of curved surfaces", IECE Trans., Vol.E69, No.5, pp.589-592 (1986).
- (80) S.Serikawa and K.Takagi: "Method for measuring the glossiness of high glossy pearl using PSD", IEICE Trans., Vol.E74, No.5, pp.1043-1046 (1991).
- (81) 芹川, 下村: "拡散反射光を多く含む円筒物体の光沢度測定法", 電気学会論文誌C, Vol.113-C, No.11, pp.1032-1033 (1993).
- (82) S.Serikawa and T.Shimomura: "A method for measuring the glossiness of curved surfaces", Proc. of the 2nd Asia/Pacific International Symp. on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, pp 99-103 (1993).
- (83) 倉沢一男: "位置測定におけるPSDの応用", 精密機械, Vol.51, No.4, pp.730-737 (1985).

- (84) 倉沢, 山本: "非走査型ポジションセンサ", O plus E, Vol.16, No.3, pp.79-87 (1981).
- (85) 寺田, 山本: "半導体二次元位置検出器の改良", 光学, Vol 12, No.5, pp.367-373 (1983).
- (86) R.J.Watt: "Visual Processing: Computational, Psychophysical and Cognitive Research", Lawrence Erlbaum Assoc. Ltd, pp.30-50 (1988).
- (87) D.Marr: "Vision - A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information", W.H.Freeman, p.68 (1982).
- (88) D.Marr and S Ullman: "Directional selectivity and its use in early visual processing", Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Vol.275, pp.483-524 (1981).
- (89) 乾敏郎: "視覚情報処理の基礎", サイエンス社, p.21: 30: 33: 43 (平成2).
- (90) 芹川, 下村: "物体の色が光沢度に及ぼす影響の検討", 電気学会論文誌C, Vol.113-C, No 11, pp 1013-1022 (1993).
- (91) 日本工業標準調査会: "三属性による色の表示方法", JIS Z 8721 (1977確認) 日本規格協会
- (92) 小磯稔: "色彩の科学", 美術出版社, p.102 (昭和53).
- (93) 芹川, 下村: "網膜に類似した処理による光沢知覚シミュレーション", 電気学会論文誌C, Vol.113-C, No 11, pp.1023-1029 (1993).
- (94) S.Serikawa and T.Shimomura: "Gloss Sensing System Using Spatial Filter with Multiresolution", Proc. of the 1993 International Conference on Industrial Electronics, Control,

- Instrumentation and Automaton, Vol.3, pp 1774-1778 (1993).
- (95) 池田光男: "目はなにを見ているかー視覚系の情報処理", 平凡社, p 11 (1988).
- (96) 福島邦彦: "神経回路と情報処理", 朝倉書店, p.41 (平成元).
- (97) 福島邦彦: "視覚の生理とバイオニクス", 電子通信学会, p.99 (昭和51)
- (98) 千葉, 村岡: "CによるCGレイトレーシング", サイエンス社 (平成3).
- (99) 芹川, 下村: "二つの図形の重ね合せによって生じる心理的光沢度の測定", 電気学会論文誌C, Vol.112-C, No 12, pp.835-840 (1992).
- (100) 芹川, 下村: "図形の重ね合せによって生じる心理的光沢度に及ぼす輝度の影響", 電気学会論文誌C, Vol.113-C, No.3, pp.228-229 (1993).
- (101) 芹川, 下村: "Stevensの明るさ関数の順応レベルによる一近似表現", 電気学会論文誌C, Vol.114-C, No.2, pp. 282-283 (1994).
- (102) 北島賢治: "信頼性の考え方と技術", コロナ社, p.35 (昭和50).

謝 辞

本研究を進めるにあたり，多くの貴重な時間を費やし，終始懇切なるご指導とご助言を賜った九州工業大学工学部 下村輝夫教授に心から感謝の意を表します。また，本論文をまとめるに際して貴重な御教示と御鞭撻とを頂いた九州工業大学工学部 北島博愛教授，野上暁一教授，松岡清利教授，情報工学部 横関俊介教授に深く感謝致します。さらに，本研究の機会と時間を与え，常に励ましのお言葉を下さった九州工業大学工学部 高樹慶次教授に深く感謝致します。

なお，テクノポリス財団電子機械応用技術研究所，各真珠養殖会社の方々，福岡工業大学 相田貞蔵教授，九州東海大学 釘沢秀雄助教授には有益な御助言と御協力を頂き，深い感謝の意を表します。

最後に，本実験に協力された電子工学教室の大学院生，学部学生諸君に感謝致します。

付 録

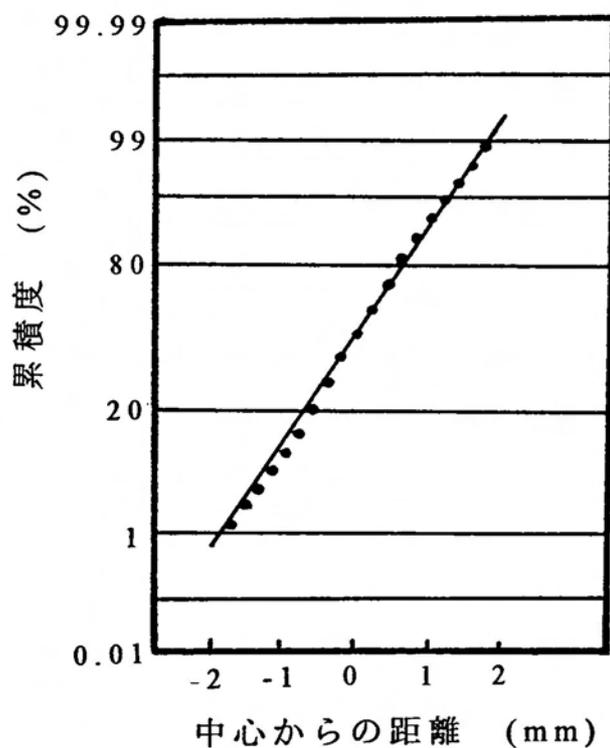
A.1 反射光強度の累積分布と標準偏差 σ

図4.4のような反射光強度分布曲線より求めた累積分布の一例を付図1に示す。縦軸の累積度50%, 15.87%に対応する横軸上の値をそれぞれ μ_0 , μ とすると, 標準偏差 σ は

$$\sigma = |\mu - \mu_0| \tag{A.1}$$

として求められる(102)。

付図1では μ_0 が零であるから, σ が次式となる。



付図1 正規分布確率紙における反射光強度分布の累積度

$$\sigma = |\mu| \quad (\text{A} \cdot 2)$$

A.2 (4.5)式の導出

正規分布 $f(x)$ は、同分布の中心線上に原点 $x=0$ をとり、標準偏差を σ とする
と次式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A} \cdot 3)$$

いま、 $x=0$ のときの $f(x)$ を L_{\max} 、また $x=W/2$ のときの $f(x)$ を $L_{\max}/2$ とおくと
(図4.6参照)。

$$L_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

$$\frac{1}{2}L_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{W^2}{8\sigma^2}\right) \quad (\text{A} \cdot 5)$$

但し、 W は半値幅である。

次に、(A・4)式と(A・5)式の比をとって整理すると、(4.5)式を得る。

$$W = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2.35\sigma \quad (4.5)$$

A.3 彩色物体の光沢度を定義するために使用した試料の心理的光沢度測定

表面状態の異なる試料（鏡面光沢度 G_s が約5～90の試料）の中で試料A、B
がどの程度の光沢度をもつのかを見積もるために、10名の被験者に一対比較
法を実施した。その試料の光学的特性および得られた心理的光沢度を付表5.1
に示す。分散分析によれば若干の個人差（分散比3.10）が認められたが、主
効果の明確な有意性（分散比185）は確認された。この表の試料A、Bと表

5.3の試料A, Bは同一試料である。心理的光沢度は、図5.6と同様に0から4の範囲になるように設定している。この表からわかるように、試料A, Bはこれらの試料のなかで、高い評点（心理的光沢度）を得ている。

付表1 新光沢度を定義するための実験に使用した試料の光学的特性と心理的光沢度

試料名	CIE1931 xy 色度座標		視感反射率 Y	正反射光強度 L (cd/m^2)	心理的光沢度 G_{ph}
	x	y			
A	0.438	0.421	0.163	556	3.35
B	0.454	0.438	0.858	564	3.20
D	0.193	0.279	0.358	251	2.63
E	0.620	0.291	0.180	207	2.47
F	0.118	0.168	0.150	145	2.05
G	0.289	0.259	0.372	117	1.77
H	0.229	0.410	0.234	67	2.05
I	0.452	0.468	0.952	38	0.94
J	0.536	0.282	0.191	28	1.01
K	0.169	0.167	0.095	5.7	0.50