



真 珠 の 光 沢

相 田 貞 藏

熊本大学工学部電子工学科 〒860 熊本市黒髪 2-39-1

(1986年1月30日受理)

Luster of Pearl

Teizo AIDA

Electronic Department, Faculty of Engineering, Kumamoto University,
2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860

1. はじめに

真珠養殖用の貝には、アコヤガイ、クロチョウガイ、シロチョウガイ、マベ、イケチョウガイ、カワシンジュガイなどがある。しかし、国内においてネックレス、指輪などの飾りに用いられている真珠は、おもに、養殖アコヤ貝より採取されたものである。しかも、採取されたままの真珠(浜揚げ珠)ではなく、浜揚げ珠に、しみぬき、漂白、研磨などの加工を施した最終段階の真珠(商品珠)である。

国内においては、商品珠のうちで、ピンク真珠が最高といわれ、次に、グリーン、シルバー、ホワイトなどの白色系真珠と、ブルー、ブラックの黒色系真珠が評価され、イエロー真珠は品位の低いものとして扱われる。しかし、ピンク真珠よりもイエロー真珠を好む国(たとえばインド)、あるいはブルー、ブラック真珠を最高とする国もあって、真珠の色の評価は国によって異なる。

このように、色は真珠の価値を決める重要な因子ではあるが、真珠の生命はむしろ光沢にあるといわれている。しかも、光沢の評価には真珠表面の輝きばかりでなく、輝きのなかに含まれる「吸い込まれるような深み」すなわち“てり”という感触も加えられ、てりのある真珠ほど高く評価される。このように、真珠の価値は光沢によって決まるといっても過言ではないが、光沢の有無はほとんど浜揚げ珠の段階で決まってしまう。たとえば、光沢の低い浜揚げ珠をいかに研磨しようとも、光沢はそれほど増すものではない。よって、ここでは、おもに、浜揚げ珠の光沢要因について述べる。

次に、真珠の浜揚げは12月から2月までの2カ月半の期間に集中する。この浜揚げ期間中に開かれるセリ市で浜揚げ珠のほとんど全部が加工業者に売り渡される。そのため、浜揚げ業者は1日当たり何万個という多数の真珠を、その光沢や色によって迅速に、1級品、2級品、すそ珠、イエロー真珠に分類しなければならない。また、1級品と2級品では価値にかなりの差が生ずるので、浜揚げ珠の分類は迅速さのほかに、正確さが要求される。

このようなきびしい要求に応ずる真珠分類装置は開発されていないので、浜揚げ珠の分類は熟練した鑑定者の視感判定に依存している。そのため真珠分類装置の実例については述べていくので、ここでは、一般の光沢測定法とその真珠への応用見通しを述べるにとどめる。

なお、以下で種々の光沢用語を使うので、用語の意味を述べておく。心理的な内容を示すものを「光沢感」、光沢感を生ずるような物体表面の性質を「光沢」、心理的な判定法で量的に表わしたものを「心理的光沢度」、また、物理装置で測定して量的に表したものを「物理的光沢度」¹⁾。他に「光沢量」という言葉もあるが、これは光沢度に準じた漠然とした表現である。

2. 真珠光沢の要因

浜揚げ珠は直径によって2, 3, ..., 8, 9 mm に分けられたのち、光沢、色、形状によって

- 1級品: 高光沢で球形の白色系真珠,
- 2級品: 光沢は1級品よりも低いが、ほぼ球形の白色系真珠と、高光沢でもしみの多い白色系真珠、およ

び光沢にかかわらずほぼ球形の黒色系真珠全部、
すそ珠：低光沢か、形の大幅にくずれた真珠、
イエロー真珠：光沢にかかわらず、かなり黄色の真珠
に分類される。

その後、1級、2級品とイエロー真珠は加工業者に売
り渡され、水溶液中でのしみぬきと漂白などの処理後、
研磨されて商品珠となる。浜揚げ時に2級品であって
も、しみぬきや漂白のしやすいものの中には、処理
後、1級品同等の価値を発揮するものもある。

2.1 真珠の巻き

アコヤ貝真珠をモデル的に示すと図1のようになる。
中心に人工核があり、その表面が多重真珠層で包まれて
いる。多重真珠は、その表面から核近くまでの大部分が
生体鉱物学上で「結晶層」と呼ぶ薄膜の多重層からでき
ている。結晶層は一種の薄膜構造といっても、光学干渉
フィルターのような厚さの決まった整然としたものでは
ない。

結晶層の厚さを巻きという。真珠に入った光が球形核
で反射するが、その反射光が見えなくなるためには巻き
が少なくとも核の上に0.3~0.4 mm 以上形成される必
要がある²⁾。そして図2²⁾に示すように、一般的には巻
きが厚くなるにつれて光沢量は増大する。

しかし、ここで注意すべきは結晶層が厚いにもかかわらず、
光沢感の鈍い真珠もあるので、その理由を真珠の
養殖季節との関係において述べる。

2.1.1 光沢の増す季節

5月から8月頃にかけてアコヤ貝を海中より取り出
し、貝の体内に外科手術によって球形の人工核(貝殻)
を入れ、同時に他のアコヤ貝より取り出した「外套膜」
の薄片を移植したのち、海中に戻す。やがて人工核の表
面が結晶層で覆われるようになる。ここで、梅雨時期か
ら夏期高温水期にかけては、結晶層は一般に腐食像を示
しながら成長し、表面に凹凸を生ずるので、この間の真
珠の光沢はよくない³⁾。しかし、そのままアコヤ貝を海
中で育成すると、晩秋から初冬にかけて貝は肥満し、海
水の環境がおだやかなので結晶層内の各層が同等の厚さ
で様に成長し、結晶層全体の厚さ(巻き)が増すにつ
れて真珠の光沢も高くなる³⁾。

また、各層の厚さ d が同等なため、2.4 項で詳述す
るように、光の干渉効果も現われて光沢はいっそう高
くなる。そのため、真珠の浜揚げは12月から2月に行な
われる。

2.1.2 光沢の鈍る季節

真冬は貝の生理代謝が低下するので結晶は成長しなく

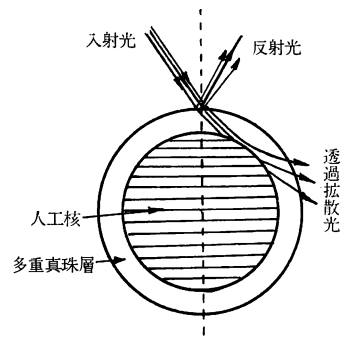


図1 アコヤ貝真珠のモデル

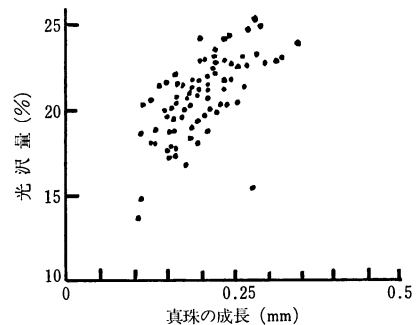


図2 アコヤ貝真珠の巻きと光沢量の関係

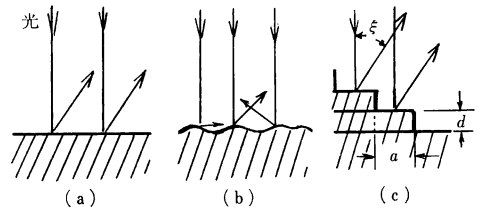


図3 真珠表面の微細組織

なる。春期に入って貝が冬眠からさめると結晶層は成長
する³⁾。しかし、結晶層内の各層の厚さ d が不均一に成
長したり、また各層の成長が著しいので

$$d \gg \text{可視光波長} \quad (1)$$

となる場合がある。

このような真珠の色は白く濁り、光沢感は鈍い³⁾。ま
た、たとえば、各層間に光の干渉が生じて、干渉光は人
間には感知できない近赤外領域に入るので、干渉光によ
る光沢の増大効果も現われないと推察される。また、結
晶層成長に最適な晩秋から初冬にかけても、海水環境の
異変によって結晶層が厚いにもかかわらず、光沢感の鈍
い真珠が生ずる場合があるといわれている。

2.2 真珠表面の微細組織

真珠表面(結晶層の表面)の微細組織は三つに大別さ

れる。凹凸の少ない一様な面(図3(a))では、正反射光強度が大で光沢感は大きい^{4,5)}。このような真珠はよい海水環境(2.1.1項)で育成されたものに多い。

一方、結晶の不完全成長、および腐食溶解による凹凸表面(図3(b))では乱反射によって光沢感は少ない^{4,5)}。しかし、多くの真珠では図3(c)に示すように、真珠表面に結晶層の各層ごとの断面が現われ、周期的階段構造となっている^{4,5)}。

一説によると、このような周期的階段構造でも、結晶層内の各層が比較的成長している真珠では、図3(c)のおどり場の長さ a が長いので、それだけ正反射のおきる面の長さが増す。その結果、正反射光量が多くなるので光沢感は割合に大になる。これに対し、結晶の発育が悪い真珠では、おどり場の長さ a が短くなって真珠表面がギザギザした形となる。そのため乱反射光が増すので光沢感は少なくなる。

2.3 真珠表面の回折作用^{4,5)}

図3(c)のような周期的階段構造は一種の回折格子の役割を演ずる。隣接階段間の光路差を Δl とすると、

$$\Delta l = d + d \cos \xi - a \sin \xi \quad (2)$$

ここで、 d : 階段の高さ、 ξ : 回折角、 a : おどり場の間隔(長さ)

となる^{4,5)}。

このような場合は、真珠表面から回折作用による特定波長の色が現われ、この色による光沢感が生ずる。しかし、このような独特の光沢感は、真珠が球形のためにそれほど現われないが、この光沢感は、アコヤ貝殻内面が平面であるため、貝殻内面にはよく現われる。

2.4 結晶層の光干渉

回折作用は結晶層表面での現象であるが、結晶層内に入った光は干渉をおこす。光沢ある真珠では、その結晶層は厚さの異なる多重薄膜からできている。図4に示すように、このような結晶層の各層(各薄膜)の厚さを d とすると、結晶層に入射した2本の光線の光路差 ΔL は

$$\Delta L = 2d\mu \cos \phi = n\lambda_1 \quad (3)$$

ここで、 μ : 結晶層の屈折率、 ϕ : 結晶層の屈折角、 $\phi = \sin^{-1}(\sin \theta / \mu)$ 、 $n=1, 2, \dots$ 、 λ_1 : 波長、 θ : 入射角

で表わされる^{6,7)}。

(3)式が成り立つ場合は、光の干渉作用によって波長 λ_1 の光は強められるので、真珠の光沢感は増大する。事実、等間隔の厚さの結晶層が $30 \mu\text{m}$ 、層数にして $60 \sim 100$ 枚ほど真珠表面に形成されると、光沢感のよい美しいピンクの干渉色を生ずるとの報告がある⁷⁾。このよう

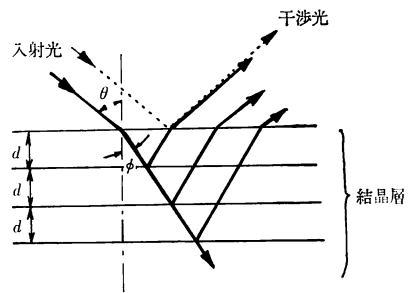


図4 真珠結晶層表面での光の干渉モデル

な真珠は当然、2.1.1項のおだやかな海水環境で育ったものに多い。

これに対し、2.1.2項で述べたように、 d が一定でない真珠や、たとえ d が一定でも結晶層内の各層が成長しすぎて、 $d \gg$ 可視光波長の真珠では、その色は白く濁り、光沢感は鈍い⁷⁾。

2.5 真珠の彩度、明度および直径

ネックレスはほぼ同一色調、光沢、直径の真珠で作られるから、以下に述べる事柄は不必要であるが、筆者が長年にわたって真珠を観察した経験をもとに、真珠の彩度、明度、直径と光沢との関連について考察する。

2.5.1 彩度と光沢

一般に、同一表面状態、同一形状、同一材質の物体では、彩度の大きいほう(たとえば、白味がかった赤よりもあざやかな赤色)が光沢感は大きい。光沢感の増す理由は物体表面に映る像のコントラストが明確になるためである。真珠の場合にも、彩度のやや大きいピンク、グリーン、イエロー真珠のほうが、彩度の小さいシルバー、ホワイト真珠よりも光沢感が大きい傾向がある。

2.5.2 明度と光沢

明度の大きいシルバー、ホワイトなどの白色系真珠よりも、明度の小さいブラック真珠のほうが光沢感は大きい傾向がある。その理由はブラック真珠表面の映像のコントラストのほうがより明確なためである。

2.5.3 直径と光沢

直径 $3 \sim 5 \text{ mm}$ の真珠よりも、一般に直径 $8 \sim 9 \text{ mm}$ の真珠のほうが光沢感は大きい。光沢感は物体自体の物理的性質に依存するだけではなく、人間の光沢知覚機構にも影響される。すなわち、光沢感は物体表面の映像の鮮明度合に依存するが、この鮮明度合は人間の知覚機構に関係する。筆者らのこれまでの研究⁹⁾によると、肉眼では、平らな面よりも曲率半径が小さくなるにつれて光沢感が増し、直径約 12 mm の物体で光沢感は極大に達する。そして直径が約 12 mm より小さくなると肉眼の分

解能では映像の細部が感知できなくなるので光沢感は低下しはじめ、以後、直径が小さくなるにつれて光沢感は低下する傾向がある。

小形の真珠には小さい核が、大形の真珠には大きい核が入っているので、小形の真珠と大形の真珠とでは巻き(結晶層の厚さ)に極端な差はないであろう。それにもかかわらず、一般に大形の真珠のほうが光沢感が大きいのは、上述のような人間の光沢知覚のメカニズムが関与しているためではないかと推察される。

3. 真珠の光沢測定法

JIS⁹⁾には鏡面光沢度、対比光沢度、鮮明度光沢度が規定されており、また、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定すると示されている。このように、光沢度は画一的なものでないため、古くは蓮沼の光沢計¹⁰⁾をはじめ、綿、絹、紙など¹¹⁾、自動車塗装面¹²⁾、航空機外板用金属研磨面¹³⁾などの光沢度測定法、近年はAl合金の陽極酸化皮膜の像鮮明度(一種の光沢度)測定法¹⁴⁾などがある。

しかし、これらの方法は平面を対象にしているので、球形真珠にはそのまま適用できない。また、真珠の光沢度測定法は現在規定されていない。そのため、上述の方法のうちで代表的方法を述べ、あわせてその真珠への適用可能性について検討するが、検討に先立ち、真珠業界からみた場合の真珠光沢測定、または分類上の基本事項について述べる。

(1) 真珠直径のばらつき: 通称 5, 6, …, 8 mm 珠といっても各珠の直径に約 1 mm のばらつきがある。たとえば 8 mm 珠グループ (8 mm を越え, 9 mm 未満) を測定するにしても、JIS のように光源→試料→受光器からなる装置において、光源と受光器の位置関係があらかじめ決められた状態で測定するものであれば、試料(真珠)の直径が小さいので、直径ばらつきによって光沢度測定値に大きな誤差が生ずる。

(2) 測定の高速化: 浜揚げ珠の光沢分類時には、1秒間に1個以上の速度が要求される^{*1)}。また、浜揚げ珠は加工業者が購入し、しみぬき、漂白、研磨などの処理加工を施すが、最終段階でのネックレス用連珠選びは別として、他の段階での光沢分類にもかなりの速度が要求される。

(3) てり: 浜揚げ珠でも商品珠でも、“てり”のある真珠ほど高価である。光沢分類時にてりも含めて分類する必要がある。

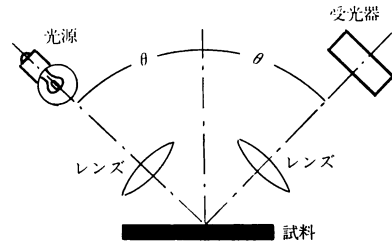


図5 鏡面光沢度の測定装置

3.1 鏡面光沢度測定法と真珠への応用

鏡面光沢度はなめらかな面の光沢の一般的表示に用いられ⁹⁾、その測定原理説明図を図5⁹⁾に示す。あらかじめ基準面からの反射光束 φ を測定しておき、次に試料面からの鏡面反射光束 φ_s を測り、鏡面光沢度 $G_s(\theta)$ は次式によって求められる。

$$G_s(\theta) = (\varphi/\varphi_s) \times (\text{使用した基準面の光沢度}) \quad (4)$$

装置の開き角 θ は、紙面その他 75°, 塗装面その他 60°, ホウロウ面やタイル面など 45°, 光沢ある塗装面その他 20°, 金属面その他 0° と定められている。以上の解説¹⁵⁾も報告されている。

上述の方法を応用して、筆者らは真珠光沢測定装置を試作した。光検知器には Si ホトセルを用い、開き角 θ は 20~60° に変えられるようにした。この装置を用いて直径 8 mm の浜揚げ珠の光沢量を測定したが、光沢量は心理的光沢度に大体比例し、実験室的には良好な結果を得た¹⁶⁾。

しかし、実用化には前述した、(1)真珠直径ばらつき、(2)測定の高速化、(3)てりの評価に問題があり、とくに直径ばらつきによる測定誤差が大きく、光沢のおおざっぱな分類にしか役立たない。

3.2 対比光沢度測定法と真珠への応用

試料に入射角 θ で光をあて、正反射方向および他の特定方向の反射光束をそれぞれ φ_θ , φ_r とすると

$$\theta \text{ 度対比光沢度 } G_r(\theta) = (\varphi_\theta/\varphi_r) \times 100 \quad (5)$$

で示される⁹⁾。

筆者らはこの原理を拡張して球形または曲面物体の光沢度測定用に n 点拡散光沢度測定装置を試作した⁹⁾。この装置も同一直径の真珠には適用できるが、直径ばらつきによる測定誤差が大きく、実用化上の問題が多い。

3.3 像鮮明度測定法と真珠への応用

3.1 項の鏡面光沢度は正反射光のみを、3.2 項の対比光沢度は正反射光束と拡散光光束の比のみを取り上げ、試料表面に映る像の鮮明度を考慮していない。真珠の光沢感は映像の鮮明度に強く影響されるので、参考に、Al および Al 合金の陽極酸化皮膜の像鮮明度測定法¹⁴⁾を述べ

*1) 熟練者は10秒間に3~5個を選別する。

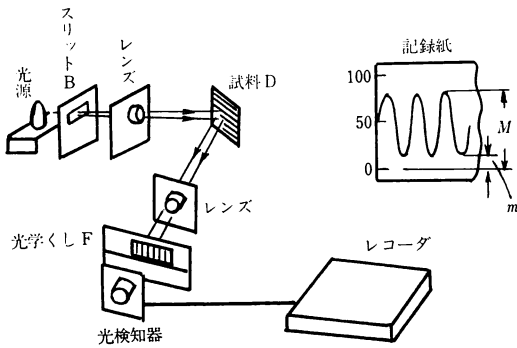


図 6 アルミニウムおよびアルミニウム合金の陽極酸化膜の像鮮明度測定装置

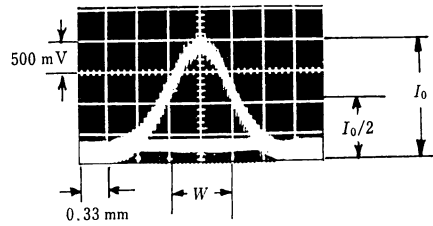


図 8 商品珠 (真珠) の反射光強度分布

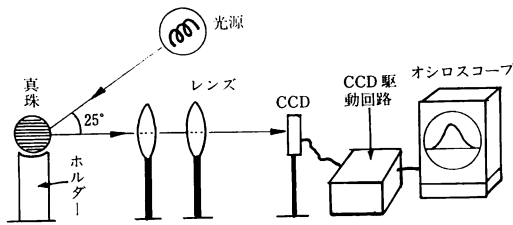


図 7 真珠の光沢度測定装置 (試作)

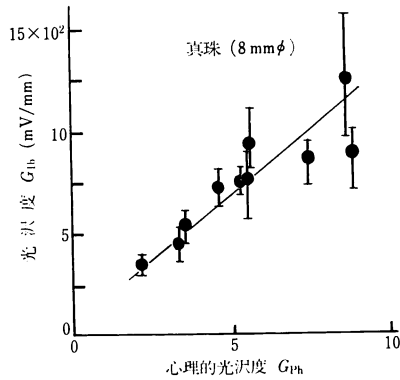


図 9 商品珠 (真珠) の光沢度 G_{ID} と心理的光沢度 G_{Ph} の関係

る。図 6 に同装置の構成を示す。スリット B を通して試料 D に角度 45° で光をあて、その鏡面反射光を移動する光学くし F を通して測定する。測定波形 (図 6 右上) から、最高波高を M 、最低波高を m として像鮮明度 C_0 は

$$C_0 = \{(M-m)/(M+m)\} \times 100 \quad (6)$$

で計算される。

ところで、直径 2~9 mm のアコヤ貝真珠面上には、図 6 右上のような波形を映すことがむずかしいので、光学くしを用いず、真珠表面の映像部からの反射光強度分布を測定し、同分布より鮮明度を評価する方法を研究した。

その装置の構成を図 7 に示す^{16,17)}。角度 θ は 25° 、光検知部は電荷転送素子 (CCD ラインセンサー) とオシロスコープからなる。同装置による商品珠の反射光強度分布の一例を図 8 に示す。図 8 より波高値 I_0 と半値幅 W を求めて光沢度 G_{ID} を計算した。

$$G_{ID} = I_0/W \quad (7)$$

図 9 に G_{ID} と心理的光沢度 G_{Ph} ^{*2} の関係の代表例を示す。 G_{ID} は G_{Ph} に大体比例する。また、 G_{ID} には真

珠反射光量に関連する I_0 のほかに、映像の鮮明度合を表わす W が含まれているので、前述の $G_s(\theta)$ や $G_e(\theta)$ に比較して真珠直径ばらつきによる G_{ID} の誤差が少ない。

今後は、受光面の広い CCD エリアセンサー、またはテレビビデオカメラなどを用いることによって、真珠直径にばらつきがあっても受光面上のどこかに結像するようにし、 G_{ID} 計算にはマイクロプロセッサを用いて高速化を図れば性能はさらに向上すると思われる。ただし、この方法によっても“てり”を含めた真珠の光沢を測定することはむずかしいと思われる。

4. む す び

光沢は真珠の生命といわれながら、光沢発生機構の複雑さ、真珠直径のばらつきに加えて、光沢測定・分類の高速化の必要性などから、未解決の問題があり、真珠光沢測定技術はそれほど進んでいない。そのため、とくに浜揚げ珠の光沢、色による等級分けはほとんど熟練者の視感判定に依存しているが、長期間の視感判定は視力減退や乱視になるおそれもあるといわれている。

3.3 項で述べたように、真珠の光沢評価を正反射光量のほかに、鮮明度合を表わす第 2、第 3 の因子を含めて

*2 N 個 (または組) の試料を P 人に光沢の大きい順位に並べてもらい、光沢順に $N, N-1, \dots, 1$ 点を与え、各試料ごとに総得点を求め、総得点を P で割って平均を求め、各平均点をそれぞれの心理的光沢度 G_{Ph} とする¹⁸⁾。

行ない、さらに画像処理技術を用いれば真珠光沢測定、分類に新しい展開が得られるであろう。

国内では海水産のアコヤ貝真珠のほかに、淡水産で種種の形の真珠も養殖されているが、紙面の都合で割愛した。最後に、有益にして貴重な文献を参照させていただいた水産庁養殖研究所和田浩爾博士、ならびに光沢研究の関係各位に深く感謝する。

文 献

- 1) 蓮沼 宏：光沢 (コロナ社, 東京, 1960) pp. 3, 79.
- 2) 和田浩爾：“真珠袋の Ca 代謝機構と品質形成”, 国立真珠研究所報告, **16** (1972) 1994-2000.
- 3) 和田浩爾：真珠 (全国宝石学協会, 東京, 1982) pp. 260-263.
- 4) 和田浩爾：“真珠の構造と色沢”, 国立真珠研究所報告, **8** (1962) 1004-1005.
- 5) C. V. Raman: “On iridescent shells, Part II,” *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Sec. A* (1935) pp. 584-586.
- 6) C. V. Raman: “On iridescent shells, Part II,” *ibid.* (1935) pp. 575-579.
- 7) 和田浩爾：真珠 (全国宝石学協会, 東京, 1982) pp. 126-128.
- 8) 古賀隆史, 相田貞藏：“曲面物体の物理的, 心理的光沢度測定法の一提案”, 電子通信学会論文誌, **62-C** (1979) 711-718.
- 9) 日本工業標準調査会：光沢度測定法・JIS Z 8741, 日本規格協会 (1962 制定, 1971 確認).
- 10) 蓮沼 宏, 奈良治郎：“鮮明度を利用した光沢計について”, 応用物理, **25** (1956) 214-216.
- 11) 沢路雅夫：“つやの質についての一考察”, 応用物理 **29** (1960) 789-794.
- 12) M. Matsuta and K. Kito: “Development of a gloss tester for paint coatings,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (1982) 133-136.
- 13) 上坂辰男, 川手剛雄, 堀内健文：“金属研磨面の美観計測装置の開発”, 応用物理, **52** (1983) 505-508.
- 14) 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, 日本規格協会 (1978).
- 15) 須賀 蕨：“鏡面光沢と視感”, 科学と工業, **58** (1984) 253-260.
- 16) 芹川聖一, 中石浩志, 松原賢治, 釘沢秀雄, 相田貞藏：“真珠の光沢度測定法の検討”, 60年応物九州支部講演会予稿集, **11** (1985) pp. 57-58.
- 17) 釘沢秀雄, 相田貞藏：“曲面用光沢度測定装置の誤差の検討”, 60年応物九州支部講演会予稿集, **11** (1985) p. 55.
- 18) 蓮沼 宏：光沢 (コロナ社, 東京, 1960) p. 81.