

ショットブラスト加工面の表面性状評価

拓殖大学 工学部 機械システム工学科
教授 杉林俊雄
(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008026)

キーワード：テクスチャ評価、ショットブラスト加工、表面性状パラメータ

1. 研究の目的と背景

日本の工業製品は高品質かつ信頼性の高い製造展開を行い、欧米やアジアへ輸出されている¹⁾。さらに、近年の工業製品には、高性能のみならず見栄えと触感等も加味した外観設計による高付加価値化が重要視されている²⁾。こうした高付加価値製品には、人間の勘や閃き、感性など定量化しにくい設計因子が数多く含まれている³⁾。しかし、工業製品の色、風合い、感触等を総合的に評価した外観については、目視に頼っているのが現状である。外観の評価システムが確立すれば、カタログに掲載された製品の外観を数値化することや、外観の品質を担ってきた職人技術の役割を果たすといったことも可能となる。このため、外観が問題になるような全ての産業分野では、外観の測定方法及びその数値化について技術開発が求められている。

塑性加工品製造においては、製造単価の引き下げを行うため、多くの企業は労働賃金の安価な海外に製造拠点を移している現状がある。同時に、種々の工業製品において高機能化や多様化が進んでいる。この現状を踏まえ、他社製品との差別化を測るためには高い工業意匠性を考慮する必要がある。塑性加工品における外観評価は、表面色、光沢度、表面粗さといった個別のパラメータがあり、それぞれの因子の測定方法については JIS 及び ISO で規定されている。これらのパラメータを相互に関連付ける「外観(テクスチャ)」は評価システムが確立していない。また、手が滑らずべたつきのない“さらさら”や“ひんやり”といった他の掴み部にはない手触り感が要求される際、この手触りを得るために、皮膚や粘膜の刺激で誘引される触覚⁴⁾の定量的な評価方法を確立することも必要である。人間の手が物体に触れた時に感じる触覚は乾湿感、粗滑感、硬軟感及び温冷感により表すことが可能とされている⁵⁾。乾湿感は触った時のしっとり感やべたつき感等のなじみややすさ、粗滑感は表面の粗さや滑らかさ等物体に触れた時の動きやすさをそれぞれ表す。これらの「外観」に関する測定方法及び評価方法を確立すれば、外観の品質について安定した製品を製造することが可能となり、日本と他国との製品製造における差別化を図ることができる。

そこで、塑性加工部品の外観における再現性の精度向上を目的とし、目視に代わる表面性状の定量的な評価方法の確立を目指す。まず、表面性状を三次元パラメータにより面評価し、表面性状評価と光沢度及び表面色評価との整合性を高めることを検討した⁶⁾。試料には、身の回りにある工業製品の外観材料として多用されている金属材料の中からアルミニウム合金 A2017、

洋白 C7541 及びステンレス鋼 SUS304 をそれぞれ用いた。そして、外観機能の向上を行うためにショットブラスト加工条件が金属表面の表面色、光沢度、表面粗さ及び触覚(静摩擦)に与える影響とこれらの因子の相互関係について調べた。さらに、エンジニアリングプラスチックとして多用されている ABS 樹脂上の金属メッキの塑性加工表面においてテクスチャを観察する角度(視角)によって変化する反射光及び表面色について実験的に調べる。

2. 実験方法

2・1 試料

供試材の A2017、C7541 及び SUS304 は板材から 70×70×3mm の試片を切り出し、表面には工業製品のバリ取りや装飾等で使用されているガラスビーズを投射材としたショットブラスト加工を施した。このとき、投射材の粒度を #80、#150、#300、#600 及び #800 と変え、さらにショットブラスト加工時の加工圧及び投射距離を調整することにより、算術平均粗さ R_a が 0.1~1.0 μ m の範囲で段階的に異なる表面とする。

ABS 樹脂は 70×70×3mm の板材とし、表面にはショットブラスト加工を施した。投射材はガラスビーズ、アルミナ及びセラミックビーズとした。また、粒度はガラスビーズが #100、#300、アルミナが #100、#220、セラミックビーズは #120 とした。

金属メッキには ABS 樹脂(40×60×3mm)の板材を用いた。表面には、鏡面加工及びショットブラスト加工、比較としてヘアライン加工をそれぞれ施し、それぞれ表面に六価クロムメッキ処理を行った。最外層メッキの皮膜厚さは 0.2 μ m とする。

なお、各々の測定直前には試料表面の汚れや油分を除去するため、A2017、C7541 及び SUS304 はアセトンで洗浄した。また、ABS 樹脂及び金属メッキは中性洗剤にて除去する。

2・2 表面性状測定

表面性状の測定方法は、触針式と光切断方式、光干渉方式等の光学式とに大別される。これら二方式の相関関係を探るため、同一試料について触針式と光干渉方式の測定機を用いて測定した。触針式測定には、(株)ミットヨ製触針式表面粗さ測定機 SV-624 用いた。カットオフ値 0.8mm、測定長さ 4mm とし、試料表面の中央近傍において 0°、45° 及び 90° の 3 方向を測定し、その平均値を表面粗さとした。光学式測定は、Ametek(株)製超精密非接触三次元表面性状測定機 Talysurf CCI6000 を用いた。測定方式は白色光干渉方式であり、試料中央部の近傍領域 0.9×0.9mm の

面を 1024×1024 画素で走査して測定する。

2・3 表面色と光沢度の測定方法

表面色は、ミノルタ(株)製分光測色計 CM-2600d を用いて $L^*a^*b^*$ 表色系 (JIS Z 8729:2004) により表示した。測定面の形状は直径 3mm の円形とした。試料の測定位置は中央部の近傍とそこから直交 2 方向に約 ±5mm 離れた位置の 5 箇所とし、これら 5 点の値の平均値を表面色とした。なお、金属メッキは、観察する角度によって変化する表面色を評価するため、入射角度を一定とし、測定角度を 0° から 180° に変化させて測定する。

光沢度の測定は JIS Z 8741:1997 に準拠し、装置に Gardner 製光沢度計 mirror-TRI-gloss を用いて測定した。光源は白色光である。その分光特性は、CIE 標準光源 C であり、正反射方向の光をシリコンフォトダイオードで受光する。CIE 標準光源 C の分光特性は、紫外部を除いた平均的な昼光を示す。ここでの光沢度は屈折率 1.567 であるガラス面の反射率を基準とし、そのガラス面の光沢度を 100% とした場合の測定面の光沢を相対的に表している。

2・4 反射強度及び透過光強度の測定

反射強度及び透過光強度の測定は Fig1 に示す株式会社相馬光学製角度可変測定ユニットを用いた。この角度可変測定ユニットは試料置き台の両側に射光部及び受光部を配した構成であり、両部とも 180° の回転が可能な機構である。なお、回転方向の符号は基準角度 0° (垂直方向) から時計回りを +、反時計回りを - とする。反射強度の測定では射出器を入射角 -60° に固定し、受光器を -20° から +90° まで 5° 刻みで可変させ測定を行う。透過光強度の測定では、受光器及び射出器を向かい合わせに固定する。

2・5 静摩擦係数測定

静摩擦係数の測定には新東科学(株)製ポータブル摩擦計トライボギア ミューズ TYPE : 94i II を用いた。なお、試料表面に直接接触するスライダ部には表面粗さを一定にするため、住友スリーエム(株)製テフロン粘着テープを貼付して測定した。

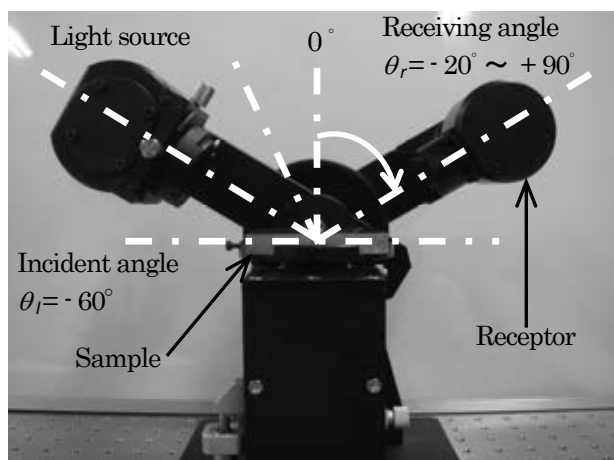


Fig.1 Measurement for variable angle.

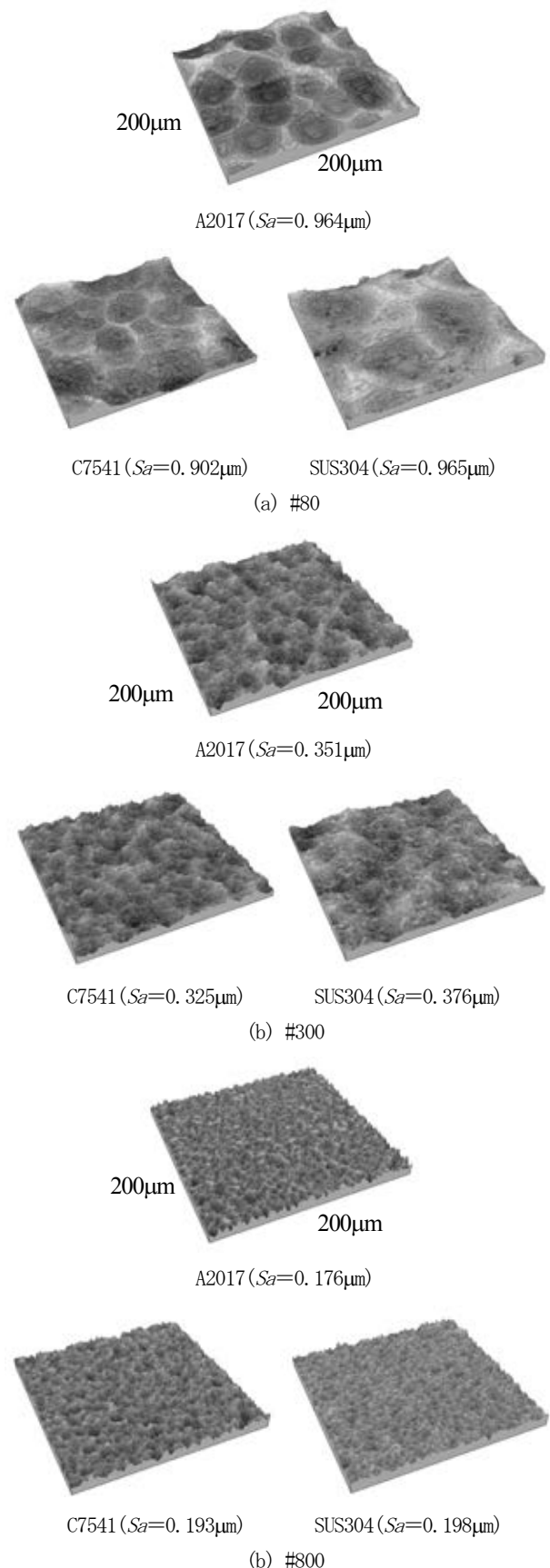


Fig.2 3D surface texture for the surface of the A2017, C7541 and SUS304 specimens shot blasted with #80 glass beads(a)、#300(b) and #800(c).

3. 実験結果及び考察

3・1 試料表面の三次元表面性状

Fig. 2 に粒度#80、#300 及び#800 の投射材でショットブラスト加工を施した A2017、C7541 及び SUS304 の試料表面を、光干渉方式で $200 \times 200 \mu\text{m}$ について測定した三次元表面性状を示す。解析には Ametek(株)製 Talymap Gold version 4.1.1 を用いた。全ての試料において、表面に投射材の形状が転写され、梨地加工が施されていることが確認できる。しかし、Fig. 2(a) において A2017 及び C7541 は投射材による加工痕が深いのにに対し、SUS304 は加工痕が滑らかである。これは A2017 及び C7541 に比較して、SUS304 表面の硬度の値が高いことによる。

3・2 触針式と光干渉方式の比較

触針式と光干渉方式では、計測する物理量がそれぞれ異なるため、触針式の縦分解能が 200pm であるのに対し、光干渉方式は 10pm である。従って、同じ試料を測定した際、それら測定結果の整合性が問題となる。そこで、各々の測定方式により得られた表面性状パラメータの値を比較した。

Fig. 3 に触針式によって算出した算術平均粗さ $Ra_{(Stylus)}$ (以下、 $Ra_{(S)}$ と呼ぶ) と、光干渉方式により算出した算術平均粗さ $Ra_{(Noncontact)}$ (以下、 $Ra_{(N)}$ と呼ぶ) との関係、及び $Ra_{(S)}$ と ISO 25178 で定義された三次元算術平均高さ Sa との関係をそれぞれ示す。図中の黒丸印(●)は $Ra_{(S)}$ と $Ra_{(N)}$ との関係を、白抜き丸印(○)は $Ra_{(S)}$ と Sa との関係をそれぞれ示す。ここで、 $Ra_{(S)}$ と $Ra_{(N)}$ は線評価による二次元パラメータを表す。また、 Sa は面評価によって得られる三次元パラメータである。 $Ra_{(S)}$ の値が大きくなるに従い、 $Ra_{(N)}$ 及び Sa の値は共に直線的に増加する傾向がある。そこで、単回帰分析により各々の相関関係を調べる。A2017 では、 $Ra_{(N)}$ 及び Sa に対する $Ra_{(S)}$ の決定係数 R^2 はそれぞれ 0.9975 及び 0.9984 と非常に高い値を示す。また、C7541 及び SUS304 においても、決定係数 R^2 はそれぞれ非常に高い値を示す傾向がある。

3・3 算術平均高さ と表面性状パラメータとの比較

試料表面は三次元算術平均高さ Sa とスキューネス Ssk 及びクルトシス Sku の 3 種類の粗さパラメータにより加工表面の特徴付けを行い、結果を Fig. 4 に示す。 Ssk は二次元パラメータである Rsk を三次元に拡張したパラメータで平均面を中心とした対象性を示す。また、 Ssk は二次元パラメータである Rku を三次元に拡張したパラメータで表面の鋭さを表し、高さ分布を特徴付ける。なお、 Rsk 及び Rku は共に無次元化した値である (JIS Z 8729:2004)。従って、三次元に拡張した Ssk 及び Sku も無次元化した値となる。 Ssk は Eq. (1)、 Sku は Eq. (2) により求める。

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3 A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \quad (1)$$

$$Sku = \frac{1}{Sq^4 A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \quad (2)$$

三次元算術平均高さ Sq は二次元パラメータである二乗平均平方根粗さ Rq を三次元に拡張したパラメータであり、 A は測定面積をそれぞれ表す。また、 $Z(x, y)$ は基準平面を xy 面、高さ方向を z 軸としたとき、測定面の形状曲線を表す。

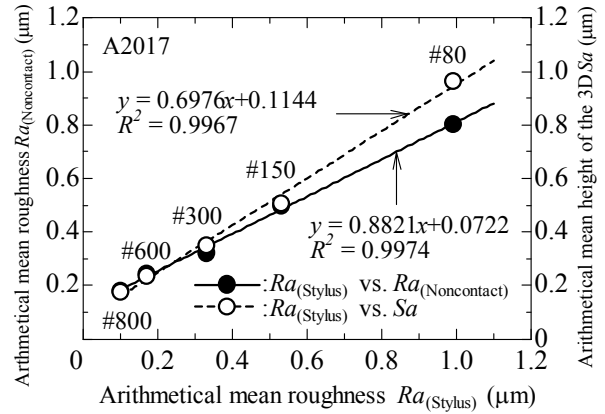


Fig. 3 Effect of arithmetical mean roughness $Ra_{(Stylus)}$ on $Ra_{(Noncontact)}$ and arithmetical mean height of the 3D Sa for aluminum alloy A2017.

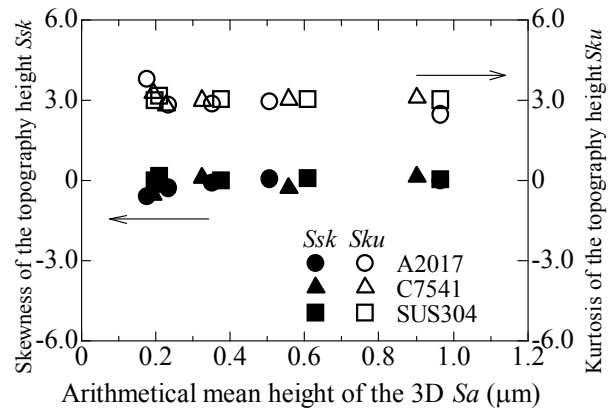


Fig. 4 Effect of arithmetical mean height of the 3D Sa on skewness of height distribution Ssk and kurtosis of height distribution Sku .

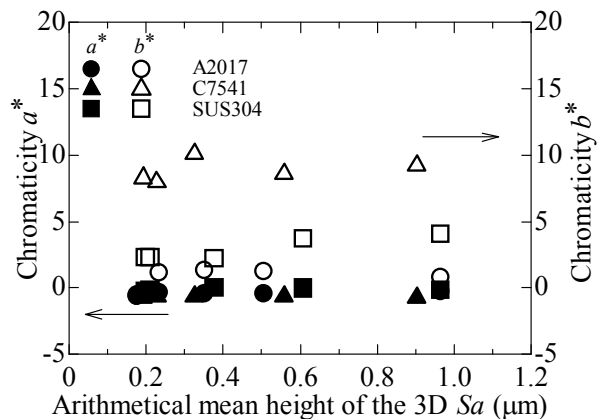


Fig. 5 Effect of arithmetical mean height of the 3D Sa on chromaticity a^* and b^* .

全ての試料表面において、三次元算術平均高さ Sa の値に関らず、 $Ssk \approx 0$ 、 $Sku \approx 3$ となった。これらは、凹凸高さ分布が平均面に対して対象、かつ正規分布であることを示している。

3・4 算術平均高さ と表面色との関係

表面色の評価には、 $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた。Fig. 5 に三次元算術平均高さ Sa と色度 a^* 及び b^* との関係をそれぞれ示す。試料

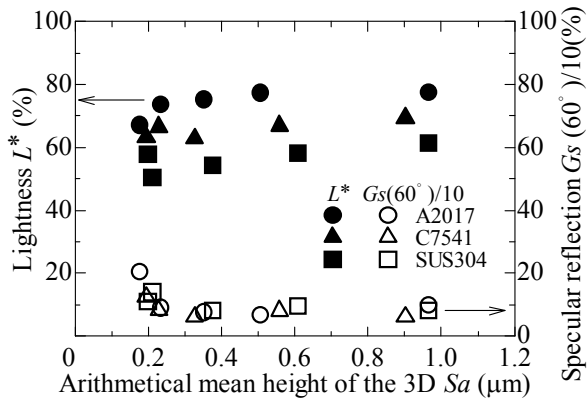


Fig. 6 Effect of arithmetical mean height of the 3D Sa on lightness L^* and specular reflection $G_s(60^\circ)/10$.

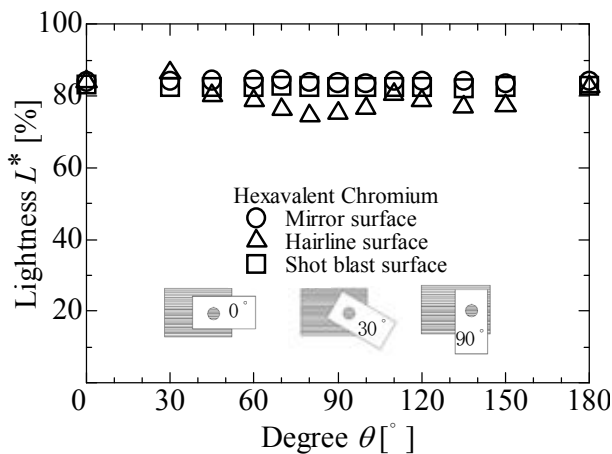


Fig. 7 Effect of measured angle on lightness L^* .

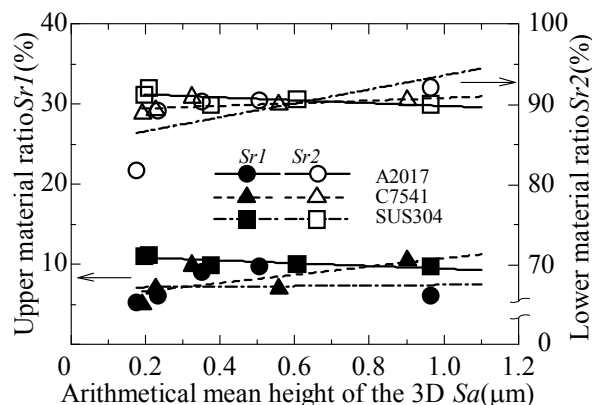


Fig. 8 Relationship amongst arithmetical mean height of the 3D Sa , upper material ratio $Sr1$ and lower material ratio $Sr2$.

表面の色度 b^* は Sa の値を変化しても、各金属において一定の値を示す傾向がある。しかし、 b^* の値は各金属により大きく異なる。このことは b^* の評価により各金属の特徴付けが可能であることを示唆している。それに対して色度 a^* は Sa 及び金属種の影響を受けずほぼ一定である。すなわち A2017、C7541 及び SUS304 の表面色は色度 a^* による評価は困難である。

3・5 算術平均高さとも度及び正反射率との関係

三次元算術平均高さ Sa と明度 L^* 及び正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ と

の関係を図. 6 に示す。ここでの正反射率は光源入射角を 60° の光沢度 $G_s(60^\circ)$ を 10 で除した値を示す。3 種類の金属において Sa の値が低下すると L^* の値も低下する傾向がある。それに対して、 $G_s(60^\circ)/10$ の値は 3 種類の金属とも Sa の値が $0.2\mu\text{m}$ 近傍を境として変化する。すなわち、 Sa の値が小さくなると $G_s(60^\circ)/10$ の値は増加する。この一つの要因として、凹凸がレイリー基準値より小さくなると反射光の多くが拡散されずに正反射する¹⁰⁾。ここで、表面の平滑さを定義するレイリー基準を Eq. (3) に示す。

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (3)$$

ここで、 h は凹凸高さ、 λ は光の波長、 θ は光の入射角をそれぞれ示す。光沢度測定で用いた光源の波長域は、約 $0.38 \sim 0.78\mu\text{m}$ の可視領域であり、ここでの入射角は 60° である。そのため、Eq. (3) から凹凸高さ h が $h < 0.195\mu\text{m}$ のとき、表面が平滑であるとみなされる。従って、 Sa が約 $0.2\mu\text{m}$ 以下になると正反射率が急激に高くなると考えられる。

Fig. 7 に六価クロムメッキを施した鏡面、ヘアライン及びショットブラスト加工面における明度をそれぞれ示す。なお、横軸は図中にポンチ絵で示すように、試料の長手方向を 0° とした際の測定角度を表している。鏡面及びショットブラスト加工面は測定した角度に関らずほぼ一定の値となった。これは、試料の方向に関らず Ra がほぼ一定であることを表している。それに対して、ヘアライン加工面は試料の方向によって Ra が変化する。従って、測定する角度によって明度の値が変化する。具体的には、ヘアライン加工面では測定角度が 90° 近傍の場合、 L^* 値は低下する。すなわち、 90° 近傍（ヘアラインに直角方向）で暗く見えることを意味する。

3・6 算術平均高さとも度曲線パラメータ

負荷曲線パラメータを用いて表面色及び正反射率の評価を詳細に行う。ここでの負荷曲線パラメータは ISO 1365-2 で定義された三次元パラメータを用い、負荷面積率はそれぞれ山部を $Sr1$ 及び谷部を $Sr2$ する。

3 種類の金属表面の三次元算術平均高さ Sa と負荷面積率 $Sr1$ 及び $Sr2$ との関係を図. 8 にそれぞれ示す。A2017 と C7541 がそれぞれ正の相関関係を示している。それに対して、SUS304 では Sa の値が増加しても $Sr1$ 及び $Sr2$ の値はほぼ一定となっている。すなわち、SUS304 のショットブラスト加工表面は滑らかな表面を意味し、Fig. 2 の三次元表面性状と同様の特徴を表している。色度 b^* と $Sr1$ 及び $Sr2$ との関係を図. 9 に示す。A2017 と C7541 がそれぞれ正の相関関係を示している。それに対して、SUS304 では b^* の値が増加しても $Sr1$ 及び $Sr2$ の値はほぼ一定である。次に、正反射率 $G_s(60^\circ)/10$ と負荷面積率 $Sr1$ 及び $Sr2$ との関係を図. 10 に示す。A2017 と C7541 ではそれぞれ正の相関関係を示しているのに対して、SUS304 では負の相関関係とにある。すなわち、負荷面積率 $Sr1$ 及び $Sr2$ を用いることにより、三次元算術平均高さ Sa だけでは評価できなかったショットブラスト加工表面の特徴を詳細に表すことが可能である。

3・7 反射角の比較

Fig. 11 に ABS 樹脂の反射強度を示す。なお、測定結果は光源の強さで除して無次元化した。ここでの入射角は測定面に対して $\theta_i=60^\circ$ (Fig.1 参照) と設定する。従って、最も強く反射する角度は正反射光が生じる 60° 近傍となる。 Sa の値が大きくなると $\theta_r=60^\circ$ 近傍における反射率の値は低下し、その分布曲線はほぼ円形状態となる。また、 Sa の値が小さくなると、反射強度における正反射光の割合は大きくなる傾向を示す。

Fig. 12 に六価クロムメッキ表面の反射光強度の分布を示す。反射光強度は正反射角である $\theta_r=60^\circ$ 近傍で強くなる傾向があり、特に $Sa=0.01\mu\text{m}$ の鏡面においては針状の反射分布となる。

3・8 透過光強度

Fig. 13 に ABS 樹脂の透過光強度を示す。測定の際に用いた波長領域は $200\sim 800\text{nm}$ とする。ここでの ABS 樹脂は三次元算術平均高さ Sa の値が大きくなるに従って、その透過率の値は低下する傾向がある。さらに、短波長領域 ($200\sim 300\text{nm}$) では光を吸収する傾向が見られる。

3・9 三次元算術平均高さ と 静摩擦係数 μ との関係

Fig. 14 に 3 種類の金属における三次元算術平均高さ Sa と静摩擦係数 μ との関係を示す。3 種類の金属試料において、その三次元算術平均高さ Sa が変化しても静摩擦係数 μ の値はほぼ一定の値を示している。しかし、試料の金属種類に依存して静摩擦係数 μ の値は異なる。

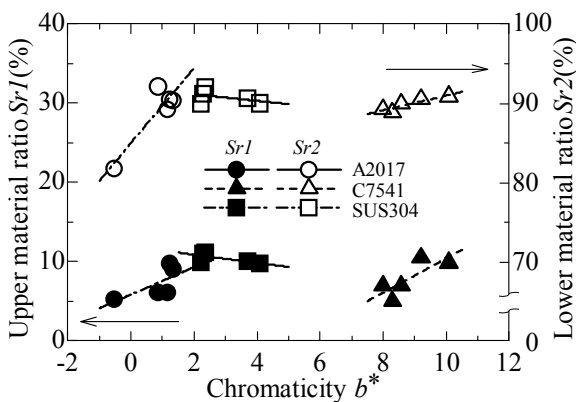


Fig. 9 Effect of chromaticity b^* on upper material ratio $Sr1$ and lower material ratio $Sr2$.

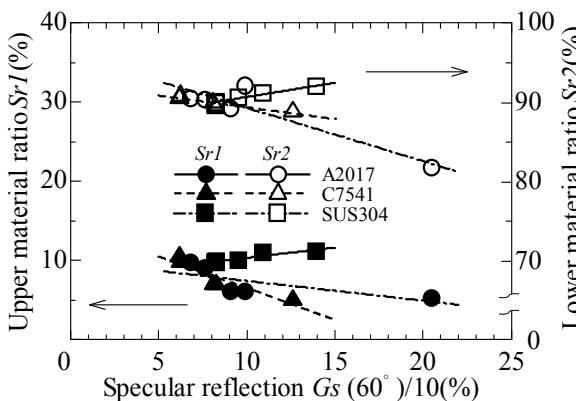


Fig. 10 Effect of specular reflection $G_s(60^\circ)/10$ on upper material ratio $Sr1$ and lower material ratio $Sr2$.

4. 測定装置の試作

4・1 角度可変測定装置

方向性を有するショットブラスト加工面などにおいて、観察者の見る方向や角度により変化するの表面色を測定するため、射光部及び受光部の回転角度が可変な測定装置を試作した。現在、ヘアライン加工表面についても予備実験を行っている。Fig. 15 に試作した測定装置を示す。本装置は射光部及び受光部の両者の位置を可変とし、さらに、測定機中央部に設置した回転ステージを用いることで測定角度の変更が可能である。すなわち、試料の表面色や光沢度を三次元で測定でき、曲率を有する試料に対してもテクスチャ評価が可能と考えられる。

4・2 分力比の測定装置

触覚を評価する因子として、金属表面への接触時における 3 方向の力成分の分力比 (加圧方向に対する) を取り上げる。具体的には、Fig. 16 のように 3 成分動力計を用いて、平面試料に対する各種表面粗さと分力比の関係について系統的に調べる。

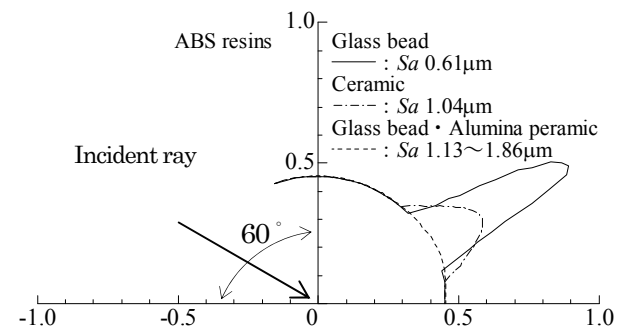


Fig. 11 Spectral reflectance curve of ABS resins.

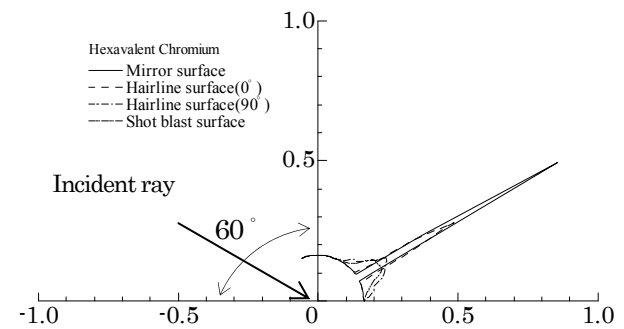


Fig. 12 Spectral reflectance curve of hexavalent chromium.

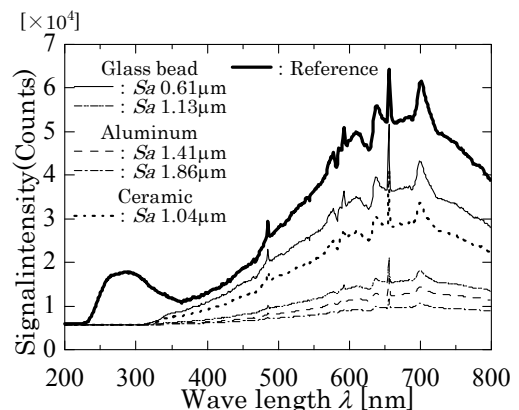


Fig. 13 Transmitted light intensity of ABS resins.

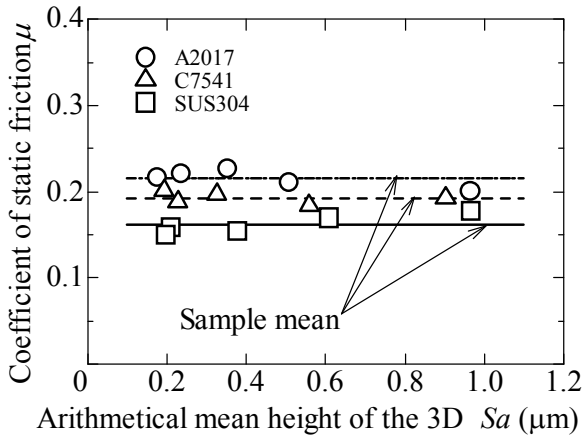


Fig. 14 Relationship between arithmetical mean height of the 3D S_a and coefficient of static friction.

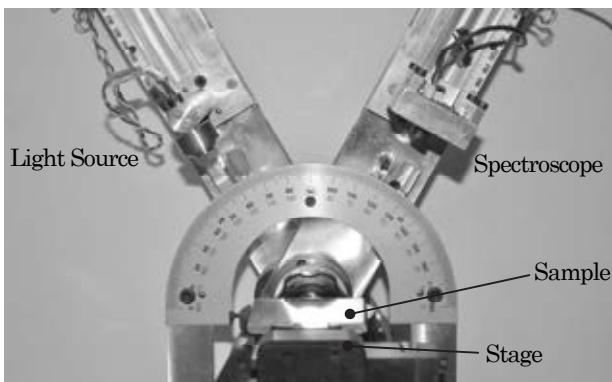


Fig. 15 Variable angle unit.

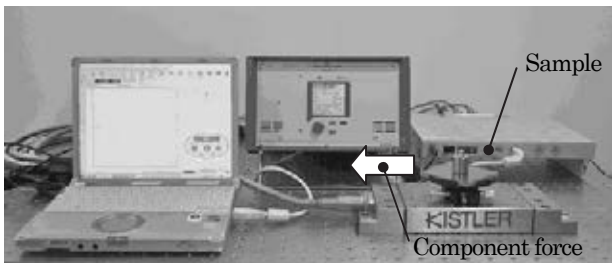


Fig. 16 Device for the component force ratio.

5. 結言

アルミニウム合金 A2017、洋白 C7541、ステンレス鋼 SUS304、ABS 樹脂及び金属メッキを取り上げ、ショットブラスト加工面について、表面性状、表面色及び光沢度に関する三次元領域に拡張した評価指標による特徴付け、さらに、負荷曲線パラメータを用いた評価方法の実験的検討を行い以下の結果を得た。

- (1) 光干渉方式より算出した線評価の算術平均粗さ R_a 及び面評価の三次元算術平均高さ S_a は、触針方式より算出した線評価の算術平均粗さ R_a と強い正の相関を示した。すなわち、従来の触針式に代わり、光干渉方式による測定を用いた表面性状の評価が可能である。
- (2) 二次元の表面性状パラメータである表面粗さ R_a と三次元の表面性状パラメータである三次元算術平均高さ S_a は強い正の相関を示した。従って、三次元領域による表面性状

の評価は有効である。

- (3) ショットブラスト加工を施した加工表面において、投射材による転写性の評価指標として、負荷面積率 $Sr1$ 及び $Sr2$ が有効である。
- (4) 金属メッキを施した鏡面加工及びショットブラスト加工面は測定する角度に関らず表面色はほぼ一定の値となる。しかし、ヘアライン加工面は測定する方向によって表面色に違いが見られる。
- (5) ABS 樹脂、金属メッキ共に反射光強度は正反射角である 60° 近傍で強くなる。また、ABS 樹脂は三次元算術平均高さ S_a が小さくなると、反射強度の正反射光の割合が大きくなる傾向を示し、金属メッキは鏡面において針状の反射分布となる。
- (6) ABS 樹脂は三次元算術平均高さ S_a が大きくなると、透過率が低下する。また、短波長領域 ($200\sim 300\text{nm}$) では光を吸収する傾向が見られる。
- (7) ショットブラスト加工表面の静摩擦係数はその表面粗さに変化しても一定の値を示す。しかし、金属の種類によって静摩擦係数はその値に違いが見られる。

本報告は主に拓殖大学 杉林俊雄、職業能力開発大学校 磯野宏秋准教授、近畿大学 次世代基盤技術研究所 博士研究員 米原牧子氏、拓殖大学 工学部 共同研究員 吉田瞬氏 (現東京農工大学工学府) の4名による共同研究の成果です。

謝辞

本報告の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 20 年度研究助成によって行いました。ここに記して関係各位に深く感謝の意を表します。さらに、三次元表面性状測定に際し、Ametek 株式会社 Taylor Hobson 事業部のご高配をいただきましたことをここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小坂田宏造：日本塑性加工学会，第 8 回材料加工戦略会議「海外技術戦略」，(2010)，1-16.
- 2) 伊東諠：日本塑性加工学会，第 8 回材料加工戦略会議「海外技術戦略」，(2010)，31-54.
- 3) 伊東諠：生産文化論，日科技連，(1997).
- 4) 尾崎俊行：基礎人体生理学，(1984)，117-122.
- 5) 松村譲児：人体解剖ビジュアル，(2005)，152-157.
- 6) 堺章：新訂 目でみるからだのメカニズム，(2000)，166-169.
- 7) 鈴木克幸，西原鉄平：日本機械学会，第 5 回最適化シンポジウム講演論文集，(2002)，229-234.
- 8) 吉田瞬，大竹佳織，川邊和宏，磯野宏秋，香川美仁，杉林俊雄：軽金属，61 (2011)，187-191.
- 9) 高村和成，大竹佳織，森きよみ，杉林俊雄：第 61 回塑性加工連合講演会，(2010)，425-426.
- 10) 虎尾 彰，奥野 眞：塑性と加工，41 (2000)，648-652.