アルミニウム合金の表面色によるテクスチャ評価方法

米原 牧子*・木原幸一郎**・磯野 宏秋***
木嶋 彰**・杉林 俊雄**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 2 (2004), pp. 45-50

Evaluation method of surface texture by the surface colors of aluminum alloys

Makiko YONEHARA*, Koichiro KIHARA**, Hiroaki ISONO***
Akira KIJIMA** and Toshio SUGIBAYASHI**

In this paper, we carried out an experimental research for establishing the evaluation of metal's surface texture by analysis of surface color. The materials of samples used in the experiment were aluminum alloys (A2017, A5052), stainless steel (SUS304) and copper alloy (nickel silver C7541). The surfaces of samples were burnished by use of water-proof abrasive papers. The surface roughness of samples evaluated by arithmetical mean Ra , root mean square slope RDq and mean width of the profile elements Rs_m . The experimental results showed strong correlation for three different roughness parameters. Consequently, " Ra " was used as roughness parameter. As Ra decreased, the glossiness exponentially increased. The evaluation method of surface color was applied to *CIELAB*. The lightness L^* in *CIELAB* decreased as Ra decreased. Thus, it showed that relationship between L^* and Ra inverse correlation between glossiness and Ra . Moreover, surface color of four different materials showed that the chromaticness of blue increased as Ra decreased.

(Received July 1, 2003)

Keywords: surface texture, roughness, glossiness, color, characterization

1. 緒 言

物体表面のテクスチャを特徴づける感覚的因子として「凹凸感」, 「つや感」, 「深み感」などが挙げられる¹⁾。近年では, テクスチャが商品イメージを特徴づける重要な一因子として注目されている²⁾。しかし, 工業製品の製作図におけるテクスチャ表示は表面粗さと加工方法記号が図示される程度であり, 生産工程におけるテクスチャ評価は目視に依ることが多い。表面品位の再現性を向上させるためには, テクスチャを定量的かつ総合的に評価する方法の確立が必要である。

テクスチャに関する従来の研究は感覚量評価がほとんどであり^{3)~6)}, 定量的評価の多くは物理的に凹凸形状を評価している^{7)~10)}。著者らは前報において, アルミニウム合金 A5052 のテクスチャを表面の凹凸形状と光沢度の組合せによって評価する方法が有効なことを示した¹¹⁾。

本研究では, 無彩色系金属であるアルミニウム合金のテクスチャを特徴づけるため, 表面色を用いたテクスチャ評価方法について検討を行った。アルミニウム合金は A2017 および A5052 の 2 種類を用い, テクスチャ評価因子としては, 表面粗さ, 光沢度および表面色の 3 因子を取りあげ, 表面粗さと光沢度が表面色に及ぼす影響を実験的に調べた。また, アルミニウム合金に同じ無彩色系金属で身近に多用されているステンレス SUS304 と洋白 C7541 (銅合金) を比較材料として取りあげ, これらの金属材料について, 3 種類の因子の相互

関係から総合的にテクスチャを比較して, アルミニウム合金のテクスチャの特徴づけを行った。

2. 実験方法

2.1 試料と表面粗さ

各々の試料は 70×70 mm の形状として, 耐水研磨紙を用いて表面の Ra が約 1 μm 以下となるように研磨した。その際, 研磨方向は, 一方向と種々の方向の 2 種類とした。試料の表面粗さは触針式の表面粗さ測定機 SV-624 (株) ミットヨ製を用いて測定した。測定条件として, カットオフ値 0.8 mm, 測定長さ 4 mm に設定した。

測定位置, 方向および回数は, 一方向に研磨した試料については研磨方向に対して直角方向に試料中央部を約 5 mm 間隔で 3 か所測定した。種々の方向に研磨した試料は, 試料中央部を 0°, 45°, 90°, 135° の方向から 4 か所測定した。これらの平均値を各々の試料における表面粗さとした。

2.2 光沢度および表面色の測定方法

光沢度の測定は mirror-TRI-gloss (BYK-Gardner 製) を用いた。光沢度計の光源は, CIE 標準光源 C の分光特性を有する白色光源とし, 本実験では光源入射角を 60°, 受光器の開き角を入射面内 4.4±0.1° および垂直面内 11.7±0.2° として光沢度を測定した。試料の測定位置, 方向および回数は表面粗さの測定方法と同一とし, 各々の試料における測定値を平均して光沢度の値とした。

* 拓殖大学大学院生 (〒 193-0985 東京都八王子市館町 815-1)。Graduate student, Takushoku University (815-1 Tate-machi, Hachioji-shi, Tokyo 193-0985). E-mail: myonehar@ms.takushoku-u.ac.jp

** 拓殖大学 (八王子市)。Takushoku University (Hachioji-shi, Tokyo).

*** 職業能力開発総合大学校 (相模原市)。Polytechnic University (Sagamihara-shi, Kanagawa).

表面色は分光測色方法により分光測色計 CM2600d (㈱ミノルタ製) を用いて測定した。測色計の光源は光沢度計に同一とした。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とそこから直交 2 方向に約 ± 5 mm 離れた位置の 5 か所とし、これら 5 点の値の平均値を表面色とした。

3. 実験結果および考察

3.1 表面粗さと光沢度の関係

まず、試料表面における粗さの評価パラメータを検討するため、粗さ曲線の凹凸の高さ、傾斜および周期について各々の関係を調べた。

Fig. 1 および Fig. 2 に代表例として A2017 の算術平均粗さ Ra と二乗平均平方根傾斜 $R\Delta q$ の関係と、 Ra と凹凸周期の算術平均値を示す輪郭曲線要素の平均長さ RSm の関係をそれぞれ示す。Fig. 1 および Fig. 2 より、 Ra の値が大きくなるに従い $R\Delta q$ 、 RSm の値は、ほぼ線形的に増加する傾向が見られる。そこで、 $R\Delta q$ および RSm に対する Ra の重回帰関係を調べるため、 Ra の重回帰式を求めた。

$$\hat{y}_{Al.2017} = 0.068x_1 + 4.199x_2 - 0.313 \quad (1)$$

式 (1) に A2017 における重回帰式を示す。 x_1 および x_2 は $R\Delta q$ 、 RSm の値を示す。式 (1) より、A2017 の $R\Delta q$ および RSm に対する Ra の重回帰係数は $R_{Al.2017} = 0.990$ と高い値を示した。したがって、本実験での表面粗さは算術平均粗さ Ra を用いて評価する。

Fig. 3 に Ra と光沢度の関係を示す。Fig. 3 より、A2017 および A5052 の光沢度は SUS304 および C7541 に比べて低い値となった。さらに、すべての試料において Ra が小さくなるに従い光沢度は高くなる傾向があり、とくに Ra が約 $0.2 \mu m$ 以下のときに光沢度は急激に高くなる。この要因の一つとして、光の波長に比べて凹凸が十分に小さい場合、入射光は凹凸による拡散反射が起こりにくいことが挙げられる¹²⁾。ここで、表面の平滑さを定義するレイリー基準を式 (2) に示す。

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (2)$$

ここで、 h は凹凸高さ、 λ は光の波長、 θ は入射角をそれぞれ示す。

光沢度測定に用いた光源の波長域は約 $0.38 \sim 0.78 \mu m$ の可視領域で、入射角は 60° ある。そのため、式 (2) から凹凸高さ h が $h \leq 0.195 \mu m$ のとき、表面は平滑であるとみなされ、反射光の多くが拡散されずに正反射する。このことにより、Fig. 3 で Ra が約 $0.2 \mu m$ 以下の領域にて光沢度の値が急激に高くなったものとする。

3.2 表面粗さと表面色の関係

表面色の評価方法として $L^*a^*b^*$ 表色系 (JIS Z 8729:1994) を用いた。 $L^*a^*b^*$ 表色系は XYZ 表色系 (JIS Z 8701:1999) の三刺激値 X (赤)、 Y (緑) および Z (青) を基に、見かけの感覚色差と色度座標上における測色値間の幾何学的距離の差が等しい表色系である。

Fig. 4 に $L^*a^*b^*$ 表色系で色の明暗を示す明度 L^* と Ra および正反射率の関係を示す。正反射率は、入射角 60° のときの光沢度計における基準面 (屈折率 1.567 のガラス面) の正反射率 10 (%) が光沢度 $G_s(60^\circ) = 100(\%)$ となることより、

Fig. 1 Relationship between arithmetical mean Ra and root mean square slope $R\Delta q$. (A2017)

Fig. 2 Relationship between arithmetical mean Ra and mean width RSm . (A2017)

Fig. 3 Relationship between arithmetical mean Ra and glossiness $G_s(60^\circ)$.

光沢度 $G_s(60^\circ)$ の値に 10^{-1} を乗算して算出した。Fig. 4 (a) および Fig. 4 (b) はそれぞれ一方向、種々の方向に研磨した試料の測定結果である。

Fig. 4 より、 Ra が小さくなるに従って明度 L^* は低くなり、表面色が暗くなる傾向が得られた。また、明度 L^* は A2017 および A5052 は SUS304 および C7541 のそれに比して約 20% 高い値となった。すなわち、 Ra がほぼ等しいとき、ステンレ

(a) Unidirection

(b) Free direction

Fig. 4 Effect of arithmetical mean Ra on lightness L^* and regular reflectance $G_s(60^\circ)/10$.

スや洋白に比べてアルミニウム合金の表面色は明るい色（白っぽい色）を示す。

さらに、すべての材料において粗さ方向に関係なく、明度 L^* は約 40% を境として正反射率と Ra の関係に逆相関となった。これは、光沢度が正反射光成分であるのに対して、表面色の明るさを示す明度 L^* は拡散反射光成分より算出されることに起因する。したがって、試料表面の光沢および明るさを測定する場合、光沢度あるいは明度 L^* の一方の値を測定することで、他方の値を予測することが可能である。

Fig. 5 に $L^*a^*b^*$ 表色系の a^*b^* 色度図を示す。

横軸の a^* は、正の値で絶対値が大きいほど赤みが強く、負の値で絶対値が大きいほど緑みが強いことを示す。また縦軸の b^* は、正の値で絶対値が大きいほど黄みが強く、負の値で絶対値が大きいほど青みが強いことを示す。 $L^*a^*b^*$ 表色系での色相は、座標原点を中心とする円周上に色のスペクトルとして示される。また、座標原点から測色値までの距離の絶対値は色の鮮やかさを表す彩度を示し、その距離が大きいほど彩度が高く、かつ表面色は鮮やかとなる。一方、その距離が小さいほど彩度は低くなり、表面色から色みが減少して無彩色に近い状態となる。

Fig. 5 より、A2017、A5052、SUS304 および C7541 のすべての試料材料において、 a^*b^* 色度はそれぞれ b^* の座標軸上に並置しており、とくに A2017、A5052 および SUS304 は原点付近、C7541 は b^* 座標軸の正の方向、すなわち黄の方向にそれぞれ位置した。ここで、 $L^*a^*b^*$ 表色系で彩度を表す ab クロマ C_{ab}^* の値は、A2017 で約 0.80、A5052 で約 1.37、SUS304 で約 1.47 であり、C7541 では約 5.06 の値であった。すなわち、アルミニウム合金やステンレスの表面色にはほとんど色みがなく無彩色である。一方、洋白の表面色は無彩色に近いが黄みを帯びている。

洋白は銅 54.0~75.0% を主な成分として構成されている。そこで、洋白の色みに及ぼす銅成分の影響を調べるため、銅 99.90% 以上からなるタフピッチ銅 C1100 の表面粗さを変化させ、その表面色を測定した。C1100 の測色結果を Fig. 5 の a^*b^* 色度図上に菱形で示す。Fig. 5 より、C1100 の a^*b^* 色度の値は $+a^*$ と $+b^*$ 座標軸の中間（オレンジ）に位置し、彩度 C_{ab}^* の値は約 17.91 であった。したがって、洋白の表面色はその主成分である銅に依存すると考えられる。

Fig. 5 a^* , b^* chromaticity diagram.

さらに、Fig. 5 で示したすべての試料材料において Ra の値が小さくなるに従い色座標は $-b^*$ 方向、すなわち青の方向へ移動した。そこで、Fig. 6 (a)、Fig. 6 (b) に Ra と色座標 a^* および b^* の関係をそれぞれ示す。Fig. 6 (a) より、すべての試料材料において、 Ra の値に対して a^* の値はほとんど変化しなかった。

一方、Fig. 6 (b) に示した Ra と色座標 b^* の関係では、C7541 の b^* の値が最も高く、次いで SUS304、A5052、の順で低くなり、A2017 が最も低い値を示し、4 種類の材料にそれぞれ特徴的な表面色が見られた。すなわち、無彩色系金属である 4 種類の材料の表面色を巨視的に比較すると、洋白は黄みがかっており、ステンレスとアルミニウム合金の表面色は似ているが、アルミニウム合金の方が青みがかった無彩色系金属となる。さらに、アルミニウム合金でも A5052 より A2017 の方が青みを帯びている。したがって、表面色はテクスチャを評価する重要な一因子となり得る。

また、すべての試料において Ra が小さくなるに従い、色座標 b^* の値は負の方向、すなわち青の方向へ移動している。とくに、 Ra が $0.2 \mu\text{m}$ より小さくなると $-b^*$ 方向への移動が大きく、表面色に青の色みが増加していると考えられる。

そこで、 Ra が $0.2 \mu\text{m}$ 以下のときの色座標 a^* および b^* に対する重相関関係を調べた。式 (3) に A2017、A5052、

(a) color coordinate a^* (b) color coordinate b^* **Fig. 6** Relationship between arithmetical mean Ra and a^* , b^* chromaticity.

(a) A2017

(b) A5052

(c) SUS304

(d) C7541

Fig. 7 Spectral distribution curve. (Free direction)

SUS304 および C7541 の色座標 a^* , b^* に対する Ra の重回帰式をそれぞれ示す。

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_{ab(\text{Al.2017})} &= 0.159x_1 + 0.001x_2 + 0.207 \\ \hat{y}_{ab(\text{Al.5052})} &= 0.091x_1 + 0.022x_2 + 0.149 \\ \hat{y}_{ab(\text{SUS.304})} &= 0.135x_1 + 0.020x_2 + 0.166 \\ \hat{y}_{ab(\text{Cu.7541})} &= -0.004x_1 + 0.045x_2 - 0.077 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式 (3) の x_1 , x_2 は各々の材料における色座標 a^* , b^* の値を示す。式 (3) より、ここで用いた 4 種類の材料における x_2 の項が正であるため、 Ra が小さくなるに従い b^* の値は負の方向へ移動し、青みが増すことを示している。A2017, A5052, SUS304 および C7541 の Ra と色座標 a^* , b^* の重相関係数はそれぞれ $R_{\text{Al.2017}}=0.961$, $R_{\text{Al.5052}}=0.874$, $R_{\text{SUS.304}}=$

Fig. 8 Spectral distribution curve. (A2017, Unidirection)

0.866, $R_{Cu,7541}=0.915$ であり、高い相関関係が得られた。したがって、無彩色系金属の場合、 R_a が $0.2\ \mu\text{m}$ 以下の領域で R_a の減少に従い線形的に青みが増加する。

ここで、Fig. 7 (a)~Fig. 7 (d) に種々の方向へ研磨した各々の試料における分光分布曲線を示す。すべての試料において R_a が小さくなるに従い、測定した可視波長領域における反射率は低下する傾向が見られ、とくに短波長側に比して長波長側の反射率の低下が大きい。

Fig. 4 で示した R_a と明度 L^* および正反射率の関係より、 R_a が $0.2\ \mu\text{m}$ 以下で明度 L^* を示す拡散反射率は減少して正反射率は増加する。さらに、式 (2) より反射光は光の波長に依存する。すなわち、同一凹凸面の場合、短波長側の反射光は拡散されやすく、長波長側の光は正反射されやすい。したがって、Fig. 7 に示した分光分布曲線より、 R_a が小さくなるに従って長波長側の反射率は短波長側に比して大きく減少し、その結果、表面色は相対的に青みを帯びた色として測色される。

また、一方向に研磨した試料の分光分布曲線は、粗さ方向に対して 0° 、 45° および 90° の3方向からそれぞれ測定した。代表例として、一方向に研磨した A2017 の3方向に対して測定した分光分布曲線を Fig. 8 (a)~Fig. 8 (c) にそれぞれ示す。Fig. 8 より、粗さ方向に対して 0° 方向で測定した反射率は他の2方向から測定した値に比して最も高い。すなわち、表面

の粗さに方向性を有する場合、その表面色の測定方向に対する依存は大きい。

4. 結 言

本研究では、無彩色系金属であるアルミニウム合金のテクスチャを特徴づけるため、同じく無彩色系金属であるステンレス SUS304 および銅合金 (洋白 C7541) を比較材料として、表面色を用いたテクスチャ評価方法を実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) 表面粗さの凹凸傾斜を示す二乗平均平方根傾斜 RDq と凹凸周期の算術平均値を示す輪郭曲線要素の平均長さ RSm に対する凹凸高さを示す算術平均粗さ R_a の重相関係数は高い値を示した。

(2) アルミニウム合金 (A2017, A5052) の光沢度は、ステンレス (SUS304) および銅合金 (洋白 C7541) に比べて低い値を示した。また、算術平均粗さ R_a が小さくなるに従い光沢度は増加し、とくに R_a が $0.2\ \mu\text{m}$ 以下でその傾向は顕著である。

(3) アルミニウム合金 (A2017, A5052) の $L^*a^*b^*$ 表色系の明度 L^* はステンレス (SUS304) および銅合金 (洋白 C7541) に比べて高い。すなわち、アルミニウム合金の表面色は視覚的に白っぽいことを意味する。また、算術平均粗さ R_a が小さくなるに従って明度 L^* は低下する傾向にあり、 R_a

と光沢を示す正反射率の係に逆相関となった。

(4) アルミニウム合金 (A2017, A5052), ステンレス (SUS304) および銅合金 (洋白 C7541) の表面色は, 銅合金 (洋白 C7541) は無彩色に近いが黄みがかっており, ステンレスとアルミニウム合金の表面色は似ているが, アルミニウム合金の方が青みがかった無彩色を示す。とくに, アルミニウム合金でも A5052 より A2017 の方が青みを帯びている。

(5) アルミニウム合金 (A2017, A5052), ステンレス (SUS304) および銅合金 (洋白 C7541) の表面色は, 算術平均粗さ Ra が $0.2\mu\text{m}$ 以下の領域になると相対的に青の色みが増加する。

これらの実験結果は, 無彩色系金属の表面色を活かした工業製品をデザインする際の設計資料となり得る。

謝辞

本実験の試料作製および測定に際して, 拓殖大学大学院工学研究科 1 年生家田和幸氏ならびに同大学工学部 4 年生濱村和也氏にご協力いただきましたことを記して, 感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小池岩太郎, 清家 清: エンジニアリング・サイエンス講座 36

- 工業デザイン, 共立出版, (1978), 36.
- 2) 日経デザイン, 日経 BP 社, **4** (2001), 60.
- 3) 相沢 正, 渡辺哲夫, 西条博之, 川上元郎: 製品科学研究所報告, **63** (1970), 23.
- 4) 内藤郁夫, 藤井善博, 安武正剛, 飯岡正麻, 金子かつこ: デザイン学研究, **47** (2000), 25.
- 5) 金 正周, 内藤郁夫, 鈴木信康, 金子かつこ: デザイン学研究, **46** (1999), 1.
- 6) 岡島達雄, 棚橋 勇, 武田雄二: 日本建築学会論文報告集, **261** (1977), 1.
- 7) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸: 精密工学会誌, **65** (1999), 418.
- 8) 西川尚之, 高安拓朗, 岩田耕一: 精密工学会誌, **57** (1991), 1633.
- 9) 小豆島明, 岸 輝男, 宮川松男: 塑性と加工, **284** (1984), 765.
- 10) 神垣恵治, 橋本 洋: 精密機械, **51** (1985), 668.
- 11) 米原牧子, 鈴木圭介, 木原幸一郎, 木嶋 彰, 磯野宏秋, 杉林俊雄: 軽金属, **53** (2003), 164.
- 12) P. Beckmann, A. Spizzichino: The scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Pergamon press, Oxford, 9-10 (1963).
- 13) 米原牧子, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 木嶋 彰, 吉森 茂, 杉林俊雄: 銅と銅合金, **42** (2003), 340.