

表面の光学特性に影響する粗さパラメータの解明

照明音響科 柳原 亘 豊田敏裕

Elucidation of roughness parameters related to optical properties of surfaces

YANAGIHARA Wataru and TOYOTA Toshihiro

Roughness parameters are standardized as indexes indicating the surface properties of materials. The purpose of using the roughness parameter is to evaluate the surface appearance geometrically. However, the relationship between roughness parameters and optical properties has not yet been clarified. In this study, the relationships between roughness parameters (RSm, RΔq etc.) and optical properties (light scattering intensity, glossiness etc.) were investigated. As a result, RSm (the average interval of unevenness) showed the highest correlation with light scattering intensity, and RΔq (the average inclination angle of unevenness) with glossiness. These mean that RSm and RΔq are much more important for the optical properties than Ra and Rz (the size of unevenness in the height direction). In conclusion, RSm should be evaluated to control the scattering intensity of an optical component surface, and RΔq should be evaluated to control the appearance of a component itself.

Keywords : roughness parameter, light scattering intensity, glossiness

キーワード : 粗さパラメータ、光散乱度、光沢度

1 はじめに

部材の表面性状を表す指標として、粗さパラメータが規格化されている (JIS B 0601:2013、JIS B 0681-2:2018)。粗さパラメータは、表面の出来栄を幾何学的観点で評価することが目的である。部材表面の光学特性を評価するためにも粗さパラメータが使われることが多いが、一般的に使われる凹凸の高さを表す Ra や Rz が同程度でも、光学特性が異なることがあり、これらのパラメータだけで部材の光学的な品質を評価することは難しい。これまで粗さパラメータと光学特性の関係について研究されているが^{1, 2)}、その明確な関係性を見い出すには至っていない。

本所が立地している静岡県は車載光学機器関連の企業が集積しており、県内企業から光学部品表面と光学特性の関係に関する相談が多数寄せられている。光学部品の表面性状は、それを製作するための金型加工や射出成型などの過程で生じるものであり、粗さパラメータと光学特性との関係が明らかになれば、企業は粗さパラメータから部品の光学特性を予測できるようになり、より高精度な光学設計の一助になると考える。

本研究では、粗さパラメータと光学特性の関係について検証したので、報告する。

2 方法

2.1 測定試料

樹脂成型用金型に使われる鉄鋼材料 (STAVAX : Cr 合金 SUS 工具鋼) に、5条件の走査ピッチ (表) で仕上げ加工した試料 (縦 70mm × 横 70mm × 高さ 5 mm の平板) を測定対象とした (写真1)。図1のように走査ピッチを変えることで凹凸の高さの異なる試料を製作した。

表 測定試料の加工条件

試料No	使用工具	走査ピッチ (mm)	工具回転数 (rpm)	走査速度 (mm/min)	切削時間
1	R1ボール エンドミル 2枚刃	0.02	58000	400	14h17m
2	R1ボール エンドミル 2枚刃	0.025	58000	400	11h25m
3	R1ボール エンドミル 2枚刃	0.03	58000	400	9h31m
4	R1ボール エンドミル 2枚刃	0.065	58000	400	4h24m
5	R1ボール エンドミル 2枚刃	0.09	58000	400	3h10m

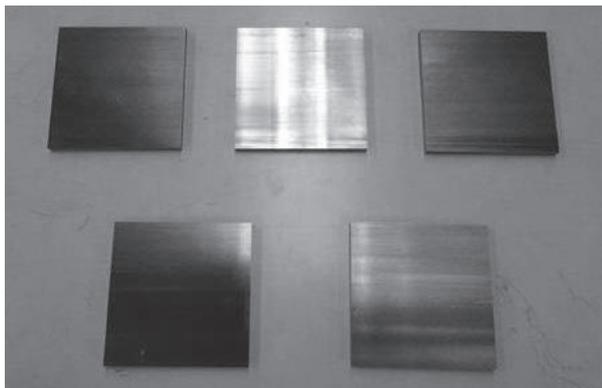
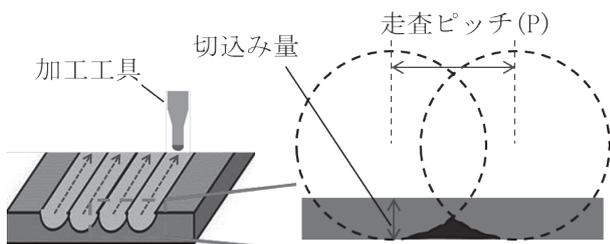


写真1 測定試料



走査ピッチで表面粗さの違いを制御

図1 走査ピッチによる表面粗さの違い

2.2 測定方法

2.2.1 粗さパラメータの測定

粗さパラメータは、干渉式の非接触表面性状測定機タリサーフ CCI HD XL (アメテック株製) (写真2) を用いて測定した。使用した対物レンズは 50 倍 (水平方向の分解能 $0.165\mu\text{m}$ 、垂直方向の分解能 0.01nm 、測定範囲 $0.33\text{mm} \times 0.33\text{mm}$) である。測定試料の中央部分8箇所を1ショットずつ測定した。測定で得た三次元表面性状データにおいて、加工工具の走査によってできた筋目に対し、平行と直交する方向で断面

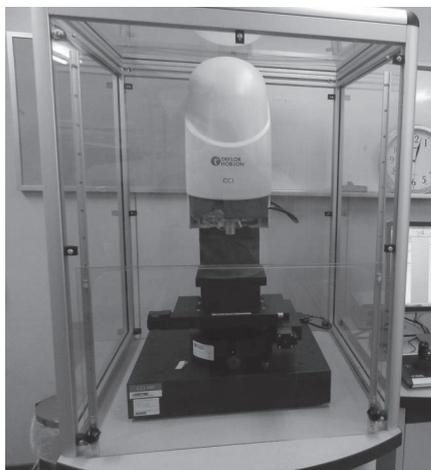


写真2 非接触表面性状測定機

を抜き出し、得た断面データから JIS B 0601:2013 に規定する種々の粗さパラメータを算出した。算出にはカットオフ値 $\lambda_c=0.08\text{mm}$ を使用した。算出した各粗さパラメータにおいて、8箇所の平均値を評価値とした。

2.2.2 光散乱度の測定

光散乱度の測定には変角分光測色システム GCMS-4 (榎村上色彩技術研究所製) を用いた (写真3)。測定入射角度は 15° 及び 60° 、入射方向は試料表面の筋目に対し平行と直交を選択した (図2)。正反射角度から $\pm 80^\circ$ の範囲を受光角度とし、正反射角度から $\pm 10^\circ$ の範囲は 0.1° ピッチ、それ以外は 1° ピッチで測定した。測定した Y 値 (明度) は観察角度による反射光強度分布を表している。そこで、分布の幅が散乱度合いに相当すると考え、データを正規化し計算した半値全幅を光散乱度の評価値とした (図3)。

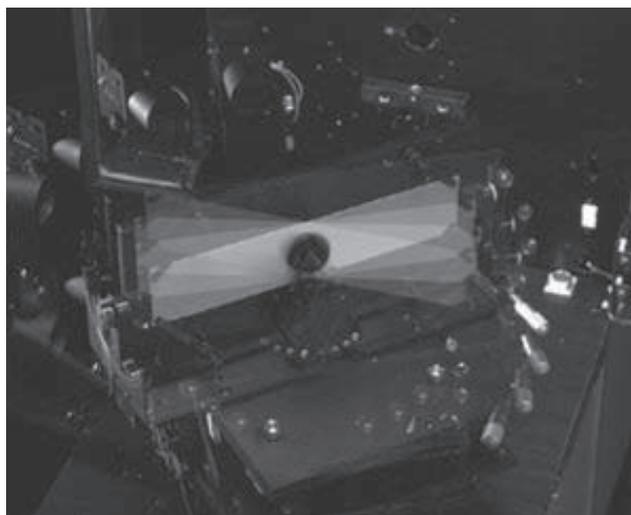


写真3 変角分光測色システム

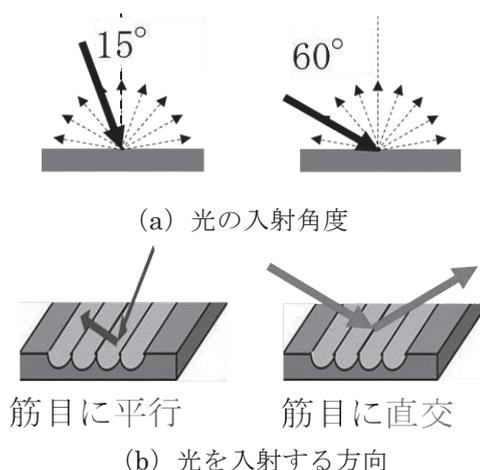


図2 光散乱度の測定条件

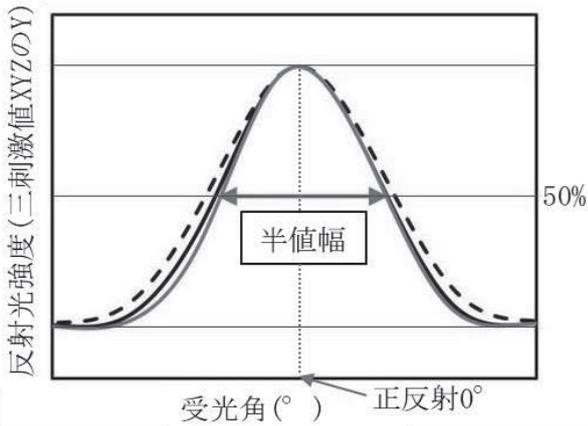


図3 光散乱度の定義

2.2.3 光沢度の測定

光沢度の測定には光沢度計 GM-26D (梶村上色彩技術研究所製) を用いた。光沢度は規定した光源及び受光器の角度 (θ と θ') にて鏡面方向に対象物から反射する光束と、屈折率 1.567 のガラスから鏡面方向に反射する光束の比で表される (JIS Z 8741:1997) (図4)。測定入射角度は 20° 及び 60° 、入射方向は試料表面の筋目に対し平行と直角を選択した。

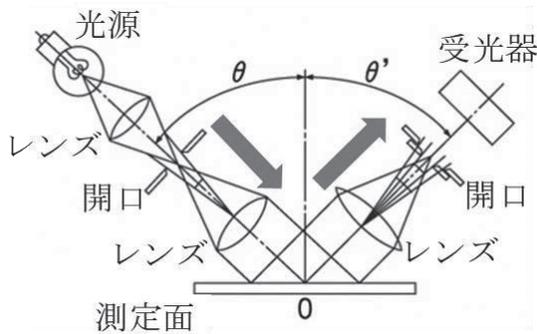


図4 光沢度の測定概略図

3 結果および考察

3.1 粗さパラメータと光散乱度について

各粗さパラメータにおいて、光散乱度との相関係数算出結果を図5に示す。縦軸は光入射角度 60° の場合の相関係数、横軸は光入射角度 15° の場合の相関係数を表している。全体として最も大きな相関係数の値を示したのは RS_m となった。 RS_m は図6に示すように粗さ曲線における凹凸間隔の平均値を表している。

例として図7に光の入射角度 60° における各試料の光散乱度の測定結果を示す。筋目に平行な方向ではほぼ変わらないが、筋目に直交する方向はピッチ 0.065mm と 0.09mm の試料が比較的大きな値を示して

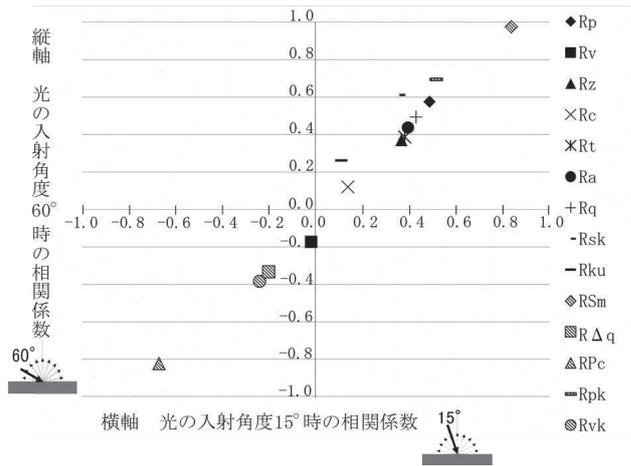


図5 粗さパラメータと光散乱度の相関係数結果

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si}$$

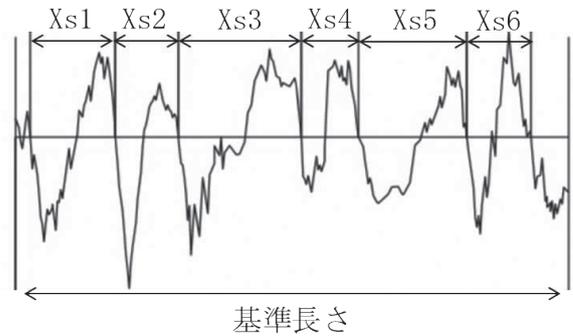


図6 RS_m の定義

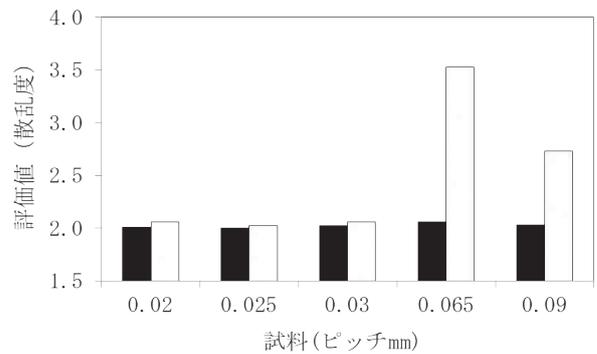


図7 光の入射角度 60° における光散乱度の測定結果

■ : 筋目に平行 □ : 筋目に直交

いる。各試料の RS_m の測定結果を図8に、各試料の測定断面曲線例を図9に示す。筋目に平行な断面曲線では、回転工具の回転数と送り速度はどの試料も同じであり、凹凸の間隔はほぼ同じである。その結果、 RS_m と光散乱度の結果もほぼ変わらない。対して、筋目に直交する方向の断面曲線では、ピッチ 0.02mm 、 0.025mm 、 0.03mm の試料における凹凸の間隔がほぼ

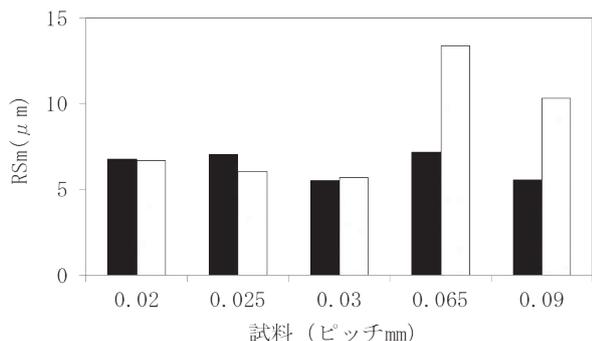


図8 RSmの測定結果

■：筋目に平行 □：筋目に直交

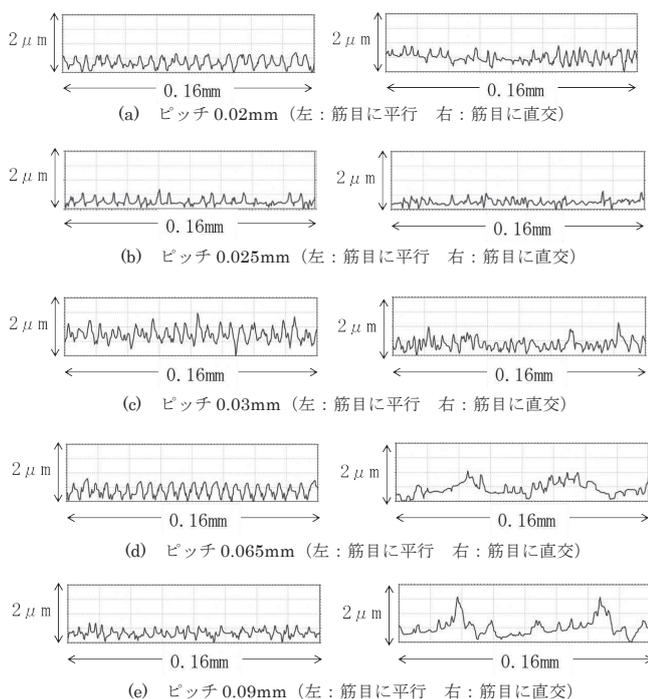


図9 各測定試料の測定断面曲線例

変わらない。これは、本来走査ピッチの違いによる凹凸間隔の断面曲線が表れるはずであるが、筋目に平行な方向の凹凸（つまり工具の回転によってできた凹凸）が支配的になり、結果として筋目に直交する凹凸の間隔（RSm）がほぼ同じになったと考える。ピッチ 0.065mm と 0.09mm の試料については、凹凸の高さが大きく、本来の走査ピッチの違いによる凹凸間隔が支配的になっている。しかし、ピッチ 0.065mm の試料に比べてピッチ 0.09mm の試料の方が RSm の値が小さい。2つの試料の PSD（パワースペクトル密度：横方向の周波数分布を示す）の結果を図 10 に示す。ピッチ 0.09mm の方が大きな波長域にピークがある。しかし、ピッチ 0.09mm の断面曲線は凸形状が尖っており、幅としては狭い。対して、ピッチ 0.065mm の断面曲線は凸形状はなだら

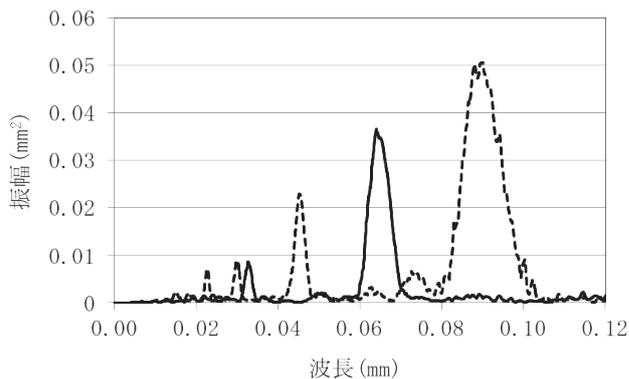


図10 測定断面曲線の PSD（パワースペクトル密度）

—ピッチ 0.065mm（筋目に直交）
 ----ピッチ 0.09mm（筋目に直交）

かで幅が広い。RSm は凹凸間隔の平均値であるため、より幅の広い凹凸が多い方が数値として大きくなると考える。今回製作した測定試料は走査ピッチだけ変えており、凹凸形状に上記のような違いが出る原因については今後検証する。

今回の検証で光散乱度と最も相関の高い粗さパラメータは RSm であることが明らかになった。

3.2 粗さパラメータと光沢度について

各粗さパラメータにおいて、光沢度との相関係数算出結果を図 11 に示す。縦軸は光入射角度 60° の場合の相関係数、横軸は光入射角度 20° の場合の相関係数を表している。全体として最も大きな相関係数の

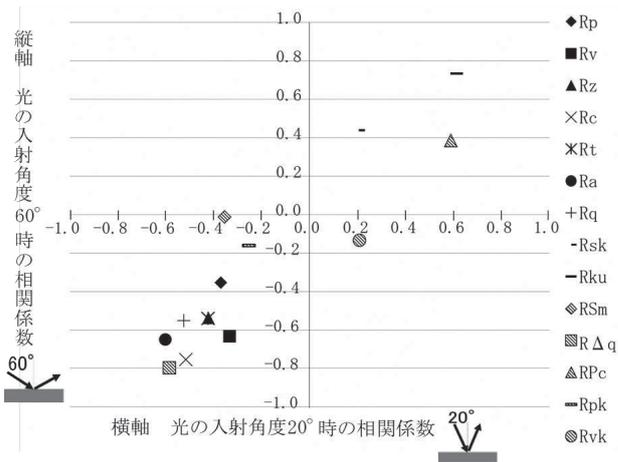


図11 粗さパラメータと光沢度の相関係数結果

値を示したのは R Δ q となった。R Δ q は図 12 に示すように粗さ曲線における局部傾斜角度の平均値を表している。

例として図 13 に光の入射角度 60° における各試料の

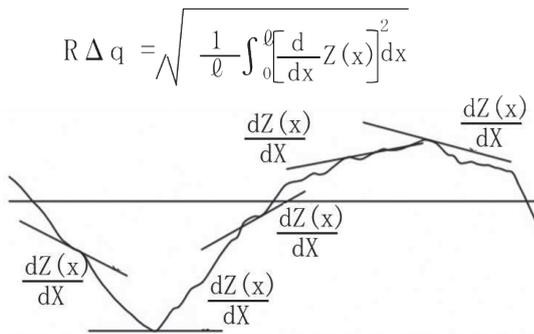


図12 RΔqの定義

光沢度の測定結果を示す。筋目に平行な方向と直交する方向で傾向は変わらず、ピッチ 0.025mm の測定試料の光沢度が最も高く、ピッチ 0.03mm の測定試料の光沢度が最も小さい。図9よりピッチ 0.025mm の断面曲線は全体的に凹凸形状がなだらかで平坦部が多いため、RΔq は小さくなると考える。対して、ピッチ 0.03mm の断面曲線は凹凸形状が尖っており平坦部が少ないため、RΔq は大きくなると考える。基本的に他の加工条件は同じとして走査ピッチだけを変えれば、より凸の高さが増えて傾斜面も増えるため、RΔq は大きくなると考

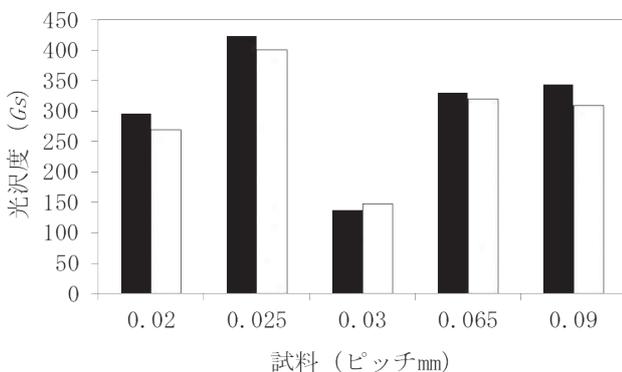


図13 光の入射角度60°における光沢度の測定結果
 ■ : 筋目に平行 □ : 筋目に直交

Rku > 3 の場合

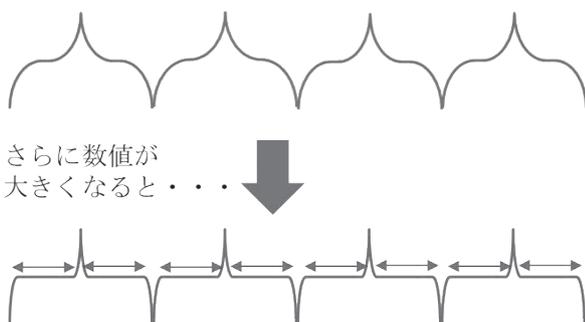


図14 Rkuと粗さ曲線の関係について

える。3. 1と同様に加工条件と凹凸形状の関係については今後検証する。

今回の検証で光沢度と最も相関の高い粗さパラメータは RΔq であることが明らかになった。

なお、光沢度と相関の高い粗さパラメータとして Rku も優位となった。Rku は凹凸の鋭さを表しており、3より小さいとなだらかで、3より大きいと鋭い形状を示す。今回の測定試料の Rku はどれも3より大きかった。そして、Rku の値が3より大きさら数值が増えると、凹凸がさらに尖り、平坦部が増えてくる (図14)。平坦部が増えることで、鏡面反射光も強くなり光沢度も高くなると考える。

4 まとめ

加工走査ピッチを変えることで異なる表面性状を施した測定試料を対象とし、表面粗さパラメータと光散乱度及び光沢度との相関関係を評価した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 光散乱度と最も相関の高い粗さパラメータは RSm (粗さ曲線における凹凸間隔の平均値) であることが明らかになった。よって、光の散乱状態を制御したい場合は、RSm の値に注目し最適な加工条件を探索できることが分かった。
- (2) 光沢度と最も相関の高い粗さパラメータは RΔq (粗さ曲線における局部傾斜角度の平均値) であることが明らかになった。よって、光の鏡面反射を制御したい場合は、RΔq の値に注目し最適な加工条件を探索できることが分かった。
- (3) 凹凸形状の尖りや幅の大きさなど、走査ピッチによる凹凸形状の傾向が明らかになってない部分もあった。加工条件と凹凸形状の関係については今後検証する。

本研究により、粗さパラメータと光学特性との関係が明らかになった。本研究で得た知見を今後の研究や技術指導に活かしていく。

参考文献

- 1) 米原牧子：自動車内装部品におけるシボ加工面の表面性状が光沢度と色に及ぼす影響，近畿大学次世代基盤技術研究所報告，Vol.3, 73-77 (2012)。
- 2) 米原牧子：5052 アルミニウム合金の光沢度および表面色に及ぼす凹凸形状の影響，軽金属学会誌 55 (1), 15-19 (2005)。