

共焦点顕微鏡と触針式測定機で測定した表面粗さの等価性評価

光科 中野雅晴

Equivalence evaluation of surface roughness measured with a confocal microscope and a stylus instrument

NAKANO Masaharu

Surface roughness parameters (Ra, Rz, Rdq, and RSm) measured with a confocal microscope were compared with those measured with a contact stylus instrument. Non-directional and non-periodic surface roughness samples were measured. Height parameters (Ra, Rz) and a horizontal parameter (RSm) were equivalent without depending on the instruments. Rdq, which denoted a surface gradient, was measured with both instruments and corresponded only when below 19 degrees. The accuracy of confocal measurement with a 20x objective lens (NA0.75), which enabled the measurement of a large area at once, was also evaluated, and we confirmed that Ra parameter was equal to that measured using a 50x objective lens with high NA of 0.95.

Keywords : Surface roughness, non-contact, confocal microscope, stylus instrument

キーワード：表面粗さ、非接触、共焦点顕微鏡、触針式表面粗さ測定機

1 はじめに

表面粗さ測定は、微細な表面凹凸の幾何学的な特徴を定量的に測定することができ、表面の機能性評価に用いられている。例えば、接触させずに単独で使用する表面の機能性には、光沢や質感などの外観や、光学特性、ぬれ性などがある。また、表面が接触する用途での機能性には、密着性や摩擦特性などがある。

これまで、表面粗さ測定では、触針式の測定機が使われてきた。触針式測定機は、触針で測定対象の表面をなぞることで形状を測定する。評価方法は、ISO/JIS規格で定められており、信頼性が高い測定機として、製造現場で広く使われている¹⁾。しかし、触針式測定機は、触針を測定対象に接触させて測定するため、軟質材や粘着材、または表面に傷をつけたくない試料の測定には不向きであった。また、三次元に面全体の表面凹凸を評価する場合、面内方向に対しても触針を走査する必要があるため、測定時間がかかる。このため、短時間に三次元の表面粗さを測定できる非接触式の測定機も活用されている²⁾。浜松工業技術支援センターでは、非接触で三次元表面粗さを測定できる共焦点顕微鏡を導入し、令和元年度に地域の企業等に対して機器の供用を開始した。

本報告では、共焦点顕微鏡と触針式測定機で測定

した表面粗さの等価性を評価した結果について報告する。

2 方法

2.1 共焦点顕微鏡による形状測定

図1に、共焦点顕微鏡による形状測定概念図を示す。光学系の特徴は、検出器前に配置したピンホールにある。点光源から発した光は、対物レンズを介して試料に集光される。焦点にある物体からの反射光(実線)は、ピンホールを通過して光強度が検出される。一方、焦点から光軸方向に外れた位置からの反射光(点線)は、ピンホールで遮断される。よって、集光点を走査して、光を検出した位置の座標を繋ぎ合せれば、試料

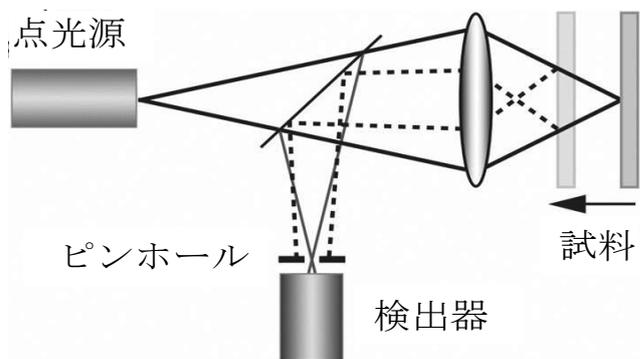


図1 共焦点顕微鏡による形状測定概念図

の三次元形状を測定できる³⁾。面で測定できることから、狙った場所の表面粗さを測定する場合にも有用である。また、観察面において、焦点の位置以外から反射して戻ってきた迷光が、ピンホールによって遮断されるため、高いコントラストの観察像が得られることも特長である。

測定に用いる対物レンズは、開口数 (NA) が高いほど集光点が小さくなるため、面内および高さ方向の空間分解能が高くなる。また、NA が高い対物レンズの方が、広角で反射光を収集することができるため、粗面などの急な斜面を有する試料の形状測定にも優位である。共焦点顕微鏡は、高 NA の対物レンズを使えることも特長である。

共焦点顕微鏡 OPTELCIS HYBRID L7 (レーザーテック(株)製) で、表面の凹凸形状を測定し、断面プロファイルから表面粗さを解析した。対物レンズは、高分解能で測定できる 50 倍レンズ (NA0.95) を用いた。50 倍レンズは、本共焦点顕微鏡の中で最も高い NA を有しており、広角で反射光を検出できる。しかし、レンズで収集できない方向に反射するような、凹凸に大きな角度成分を有する試料では、検出できる光量が減少するため、正確な形状測定が困難になる。そこで、測定限界を知るために、凹凸が大きい試料に対する表面粗さ測定と比較も行った。

また、一度に広い領域を測定できる 20 倍レンズ (NA0.75) でも測定し、精度を比較した。

2.2 試料

3種類の加工法 (ショットブラスト、グリットブラスト、放電加工) で作製された、表面粗さが異なる複数の比較見本板 (Rubert 社、日本金属電鍍社製) を試料として用いた。これらの試料は、一般的な測定対象と同様に、表面凹凸が様々な角度成分を持ち、方向性のない非周期的なテクスチャを有する。共焦点顕微鏡で測定した試料表面の輝度画像と点線部における断面形状を、図2に示す。ショットブラストとグリットブラストの試料は、それぞれ、球形の粒、鋭角の粒が衝突して作られた形状をしている。放電加工の試料は、溶かされて形成された表面形状をしている。

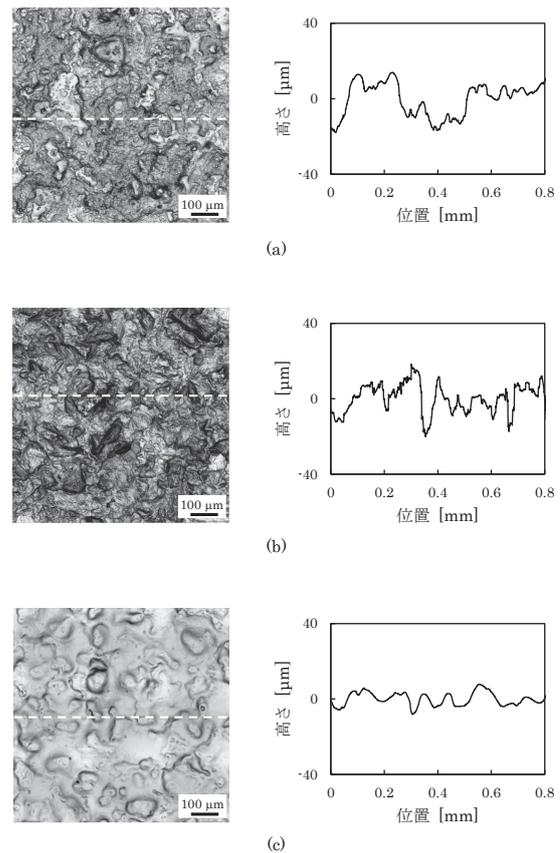


図2 試料表面の光学像 (左) と断面プロファイル (右)
試料表面の加工法は、(a) ショットブラスト、(b) グリットブラスト、(c) 放電加工である。

2.3 評価条件

表面粗さ測定において、基準長さや、フィルタのカットオフ値といった評価条件は、JIS B 0633:2001 と JIS B 0651:2001 の規格を参考にして決定した¹⁾。共焦点顕微鏡での測定では、1視野で基準長さを測定できないため、複数の視野をつなぎ合わせるステッチング処理により表面形状を取得した (最大で横方向に 30 画像を連結)。測定値とばらつきは、基準長さの測定を9箇所で行い、平均値を測定値とし、標準偏差を測定ばらつきとした。測定ばらつきの要因には、機器の測定精度と、表面形状の均一性が含まれている。触針式での測定では、基準長さの5倍を評価長さとした測定を5箇所で行い、測定値の平均値と標準偏差を評価した。

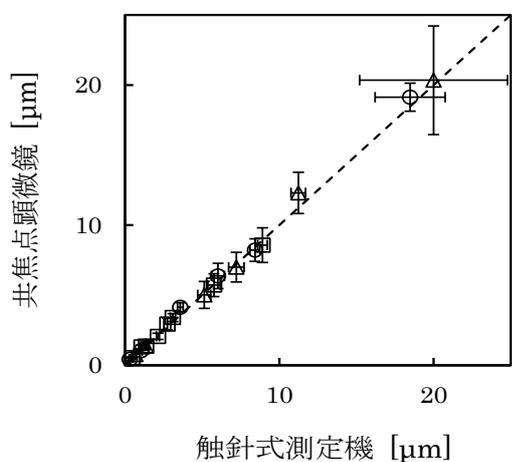
3 結果および考察

3.1 共焦点顕微鏡と触針式測定機の測定値比較

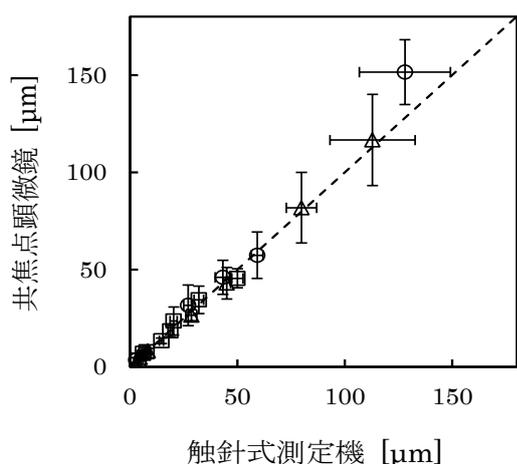
共焦点顕微鏡 (50 倍対物レンズ) と触針式測定機 フォームタリサーフ i-Series 2 (AMETEK 社製) で測定した粗さパラメータ (JIS B 0601:2013)⁴⁾ を比較した。図

【報告】

3に、凹凸の高さ方向成分を表すパラメータである、算術平均粗さRaと最大高さ粗さRzについて測定した結果を示す。RaとRzは、両機器で測定した値が等しいことを表す直線（点線）に測定値が集まっている。これは、測定原理が異なる機器で表面粗さを測定した場合、基準長さやフィルタのカットオフ値などの評価条件を統一すれば、等価な測定値が得られる旨を示した報告と同様な結果である^{5,6)}。また、表面加工法による測定精度の違いは、ほとんど見られない。測定ばらつきは、触針式測定機の方が小さく、信頼性が高い。触針式測定機でも測定値が大きくなると測定ばらつきが増加しているのは、表面形状の均一性に依存するところが多い。



(a)



(b)

図3 高さ方向の粗さパラメータ

粗さパラメータは、(a)算術平均粗さRa、(b)最大高さ粗さRzである。△：ショットブラスト、○：グリットブラスト、□：放電加工。

次に、凹凸の傾斜角（水平が0度）を表す粗さ曲線の二乗平均平方根傾斜Rdqを比較した。図4に示すように、Rdqが19度以下では両機器の測定値はよく一致している。しかし、19度以上では顕著な差が見られ、共焦点顕微鏡の方が大きな測定値となり、測定ばらつきが多かった。そこで、傾斜角の平均値だけでなく、粗さ曲線の傾斜分布についても解析した。図5(a)に示すように、Rdq=8.6度の試料では、粗さ曲線の傾斜分布が両機器でよく一致している。しかし、Rdq=23.8度の試料では、傾斜が大きい領域で傾斜分布に違いが生じている。共焦点顕微鏡の方が、傾斜分布の裾野が広がっており、Rdqが大きい値を示す結果になった。傾斜分布の違いは、両機器における測定原理の違いに起因していると推察する。

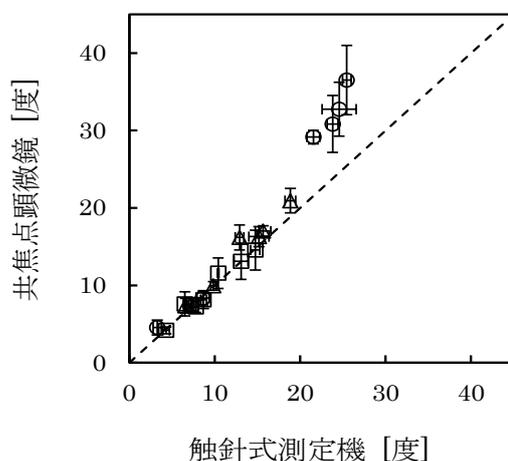


図4 粗さ曲線の二乗平均平方根傾斜Rdq

△：ショットブラスト、○：グリットブラスト、□：放電加工。

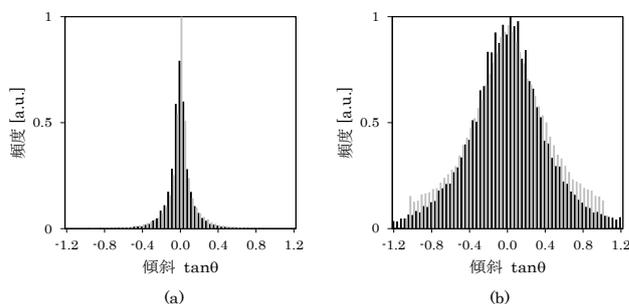


図5 粗さ曲線の傾斜分布

傾斜 $\tan \theta$ は、測定点間距離に対する高さ変化量の比率（JIS B 0601:2013で定義されている局部傾斜とは計算方法が異なる）を表す。黒色は共焦点顕微鏡、灰色は触針式測定機での測定結果である。触針式測定機で測定したRdqは、(a)8.6度、(b)23.8度である。グリットブラストで作製した試料で比較した。

図6に、凹凸の横方向成分を表すパラメータである粗さ曲線要素の平均長さ RSm の測定結果を示す。両機器の RSm 測定値は、大部分の試料において、よく一致した。しかし、RSm が 200 μm 以上において、明らかに共焦点顕微鏡の方が小さい測定値となった試料が2つ確認された。これらの試料の Ra は 20 μm 程度であった。他の試料と比べて凹凸が大きいいため、形状測定 of 正確さに問題があると考えた。しかし、粗さ曲線からは、要因となるような顕著なノイズ成分を確認することができなかった。

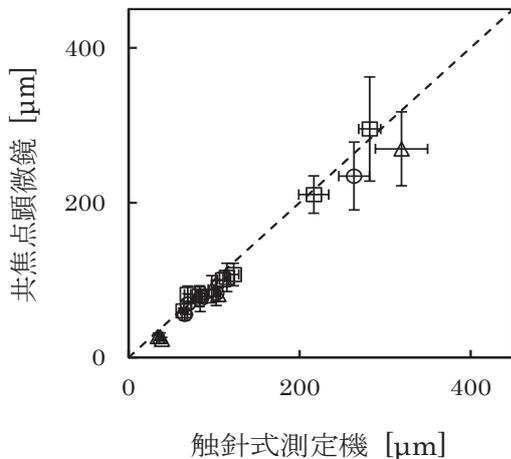


図6 粗さ曲線要素の平均長さ RSm

△ : ショットブラスト、○ : グリットブラスト、□ : 放電加工。

3.2 広視野対物レンズでの共焦点式粗さ計測

共焦点顕微鏡では、NA が高い対物レンズの方が高精度に形状を測定できる。しかし、一般的に NA が高くなると視野が狭くなるため、広い領域を測定しようとすると、形状データを連結させるステッチング計測が必要になり測定時間が増加する。よって、表面粗さ測定において、測定精度に支障がなければ、可能な限り低倍率の対物レンズを使った方が実用的である。そこで、NA0.95 の 50 倍対物レンズ (視野 0.3mm 角) と、NA0.75 の 20 倍対物レンズ (視野 0.75mm 角) を用いて、表面粗さ測定における精度を比較した。

図7に、2つの対物レンズで表面形状を測定した結果を示す。断面プロファイルを比べると、20倍対物レンズの方が、ノイズが多く正確さで劣っている。しかし、表面粗さ測定では、この断面プロファイルに波長帯域を制限する周波数フィルタを適用して、粗さパラメータを算出するため、ノイズの影響は軽減する¹⁾。

図8に、各粗さパラメータを比較した結果を示す。

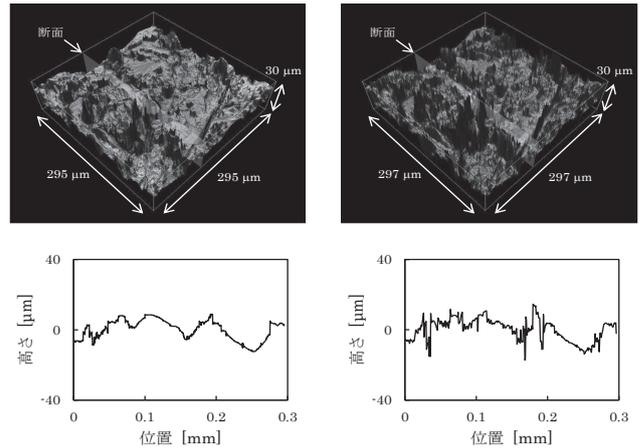


図7 各対物レンズにおける共焦点形状測定

(a) 50倍対物レンズ-NA0.95、(b) 20倍対物レンズ-NA0.75。

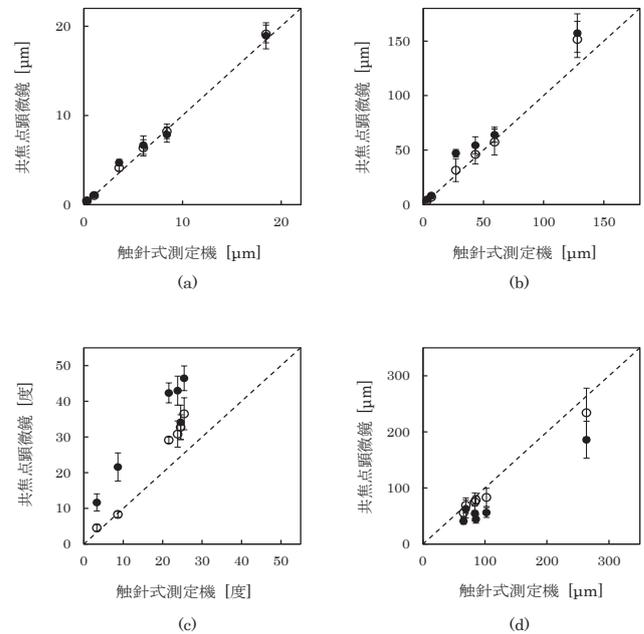


図8 各対物レンズにおける粗さパラメータの測定値 各対物レンズ (○ : 50倍、● : 20倍) を用いた共焦点式計測の測定値を触針式の結果と比較した。粗さパラメータは、(a) Ra、(b) Rz、(c) Rdq、(d) RSm である。グリットブラストで作製した試料を用いた。

Ra は、20 倍対物レンズでも高精度な測定が可能であることが分かった。Rz と Rdq、および RSm は、20 倍対物レンズで測定すると、触針式測定機との差が広がる傾向にあった。特に Rdq については、50 倍対物レンズとの差が顕著であり、20 倍対物レンズでは低い角度でも測定ばらつきが大きかった。これは、レンズの NA に起因しており、低 NA のレンズでは、三次元的な空間分解能が低下すること、レンズで収集できる光量が

減少することにより、正確な形状測定ができないためだと推察する。

4 まとめ

測定原理の異なる共焦点顕微鏡と触針式測定機で表面粗さを測定し、測定値の等価性を評価した。

- (1) 高さ方向のパラメータである Ra ($=0.3 \sim 20 \mu\text{m}$) と Rz ($=3 \sim 113 \mu\text{m}$) は、両機器での測定値がよく一致した。共焦点顕微鏡では、横方向に最大 30 枚の測定結果をスティッチングしたが、顕著な精度低下は見られなかった。
- (2) 傾斜を表すパラメータである Rdq は、3～19 度で両機器の測定における等価性は高かった。しかし、19 度以上では、共焦点顕微鏡の方が大きい測定値を示した。
- (3) 横方向のパラメータである RSm ($=34 \sim 319 \mu\text{m}$) は、Ra が大きい 2 つの試料 (Ra= $20 \mu\text{m}$ 程度) を除いた大部分で、高い等価性が見られた。
- (4) 共焦点顕微鏡において、一度に広い面積を測定できる 20 倍対物レンズは、Ra の測定で有用である。しかし、Rz、Rdq、および RSm の評価では、触針式測定機での測定結果と顕著な差が見られた。これらの測定では、より NA が高い 50 倍対物レンズを用いたほうがよい。

本報告では、JIS 規格に沿って触針式測定機に適した波長帯域制限フィルタを、共焦点顕微鏡での測定にも適用して表面粗さを解析した。共焦点顕微鏡の集光点半径はサブ μm であり、触針先端半径 $2 \mu\text{m}$ より小さい。このため、フィルタ値を最適化すれば、共焦点顕微鏡は触針式で測定できない短い波長成分の粗さ解析も可能である。一方で、集光点と同程度の波長の凹

凸形状を測定した場合、実際の振幅よりも大きな異常値が出現することが報告されている^{5,6)}。異常値の大きさは、共焦点顕微鏡の機種ごとに違うことが想定されるため、各機種で最適なフィルタ値を探索する必要がある。

非接触での三次元表面粗さ測定は、最初に例を述べた表面の機能性を向上させる技術開発において、今後いっそう必要とされるであろう。その評価ツールとして、当センターに整備した共焦点顕微鏡が活用されることを期待する。

参考文献

- 1) 吉田一朗：表面粗さ—その測定法と規格に関して—はじめの精密加工. 精密工学会誌, 78(4), 301-304 (2012).
- 2) 佐藤敦：非接触による三次元表面性状の測定の現状—三次元規格の意義とものづくりへの活用—はじめの精密加工. 精密工学会誌, 81(10), 922-925 (2015).
- 3) 阿部勝行：特集 裾野が広がる共焦点顕微鏡 総論:共焦点顕微鏡の概要. O plus E, 31(6), pp.636-639 (2009).
- 4) JIS B 0601 : 2013 製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：輪郭曲線方式—用語, 定義及び表面性状パラメータ. 財団法人 日本規格協会.
- 5) 藤井章弘 他：特集 裾野が広がる共焦点顕微鏡 3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4000 による 3D 表面性状計測. O plus E, 31(6), pp.640-644 (2009).
- 6) 小松利安 他：表面粗さの測定方法による比較評価(第2報). 山梨県工業技術センター研究報告書, 第 31 号, 51-55 (2017).