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—

Non-contact Measuring Methods for Areal Surface Texture/Atsushi SATO

キヤノンマーケティングジャパン株式会社 佐藤 敦

1. はじめに

表面粗さ（表面性状）の測定・評価は、測定対象の性質や状態、特性を把握するための非常に重要な手段のひとつである。近年の工業技術、科学技術の高度化にともなって、その必要性和ニーズはさらに増加している¹⁾。その測定には、触針式表面粗さ測定機が古くから広く活用され、ISO/JIS 規格が整っているために、その数値はものづくりの現場で標準となってきた。

一方、光学式に代表される非接触式の表面粗さ計（または光学式プロファイラー）は、光学部品や超精密加工の開発分野で 1980 年代後半より積極的に活用され始め、そのデータは業界標準として認知されている。現在は、非接触で計測したいという測定ニーズに対応するために、非常に多くの種類の光学式の表面粗さ計が普及している。面領域 (x, y) を比較的短時間に凹凸情報 (z) としてデータ化できる装置も多く、“表面粗さ”だけでなく、試料表面の微細構造の三次元形状計測を目的に三次元表面性状測定機を活用しているユーザーも多いといえよう。

本稿では、非接触による三次元表面性状測定機の実際について、最新の ISO/JIS 規格にのっとり解説する。また、測定の生産性という見地から、初心者への測定のガイドとなるような説明も含めたいと思う。

2. 三次元表面性状とは

ISO/JIS 規格では、表面の凹凸、きず、筋目などこれらを全て含んだ表面の幾何学的な状態を総称して、“表面性

状 (Surface texture)”と呼んでいる²⁾。規格上の表面性状は、触針式表面粗さ計による輪郭曲線（二次元）から演算されるパラメータの定義であり、光学式粗さ計や三次元形状データについての定義は含まれていない。三次元の表面性状規格の制定の動きは 1990 年代に始まったとされているが、ISO 規格の制定までに長い年月がかかっている³⁾⁴⁾⁵⁾。現在の三次元の ISO 規格として発行されている書類の一覧を表 1 に示す⁶⁾⁷⁾。国内では、ISO 25178-6 (2010) Surface texture: Areal-Part 6 の制定を契機に、“三次元表面性状 (Areal Surface Texture)”が JIS 規格に加えられている。JIS B 0681-6: 2014³⁾は測定機の形式や名称を対象としたものではなく、測定方法の分類に関する用語と定義を体系化したものである。すでに工業界では、光学式を中心とした多くの測定原理による測定機が活用されており、測定方法の分類が優先された結果である。触針式と光学式の差別化、二次元から三次元への進化という意味でも、三次元表面性状の規格の意義は大きいと考えられる。図 1 に、三次元表面性状規格の意義をイメージ化してみたので参考にさせていただきたい。

3. 三次元表面性状の測定法の分類

前述した ISO 25178-6 (2010) ならび JIS B 0681-6 (2014) は、二次元の輪郭曲線および三次元の表面凹凸（形状）を導出する手法として、(1) 機械的な接触で検出する方法と、(2) 電磁波の相互作用によって検出する方法、の二つを代表格としている。それら以外の方法も含めた表面性状の測定方法の分類が系統的に規定されてい

表 1 三次元表面性状測定の評価法の書類

Document	Title	Publication	和訳名	JIS 化への和訳
Part 1	Indication of surface texture	DIS	表面性状の図示法	
Part 2	Terms, definitions and surface texture parameters	2012	用語、定義及び表面性状 パラメータ	2015 年度予定
Part 3	Specification operators	2012	仕様オペレータ	2015 年度予定
Part 6	Classification of methods for measuring surface texture	2010	表面性状の測定方法の分類	2013 年度完了 JIS B0681-6(2014)
Part 70	Physical measurement standards	2014	標準片の測定と装置校正	
Part 71	Software measurement standards	2013	ソフトウェアの測定規格	

表 2 三次元表面性状測定法の分類と対応規格

Document	Title	Publication	和訳名
601	Stylus instruments	2010/6	触針走査法
602	Confocal chromatic probes	2010/6	色収差式共焦点顕微鏡法
603	Phase shifting interferometer	2013/9	位相シフト式干渉顕微鏡法
604	Coherence scanning interferometry	2013/7	垂直走査型低コヒーレンス干渉法
605	Point autofocus profiling	2014/1	点合焦式輪郭曲線法
606	Focus variation microscopy	FDIS	全焦点画像顕微鏡法
607	Confocal microscopy	WD	共焦点顕微鏡法

図 1 三次元表面性状規格の意義

図 3 垂直走査低コヒーレンス干渉法

出展：JIS B0681-6(2014)

図 2 表面性状測定法の分類

る³⁾⁴⁾。図 2 にその概要を示す。各測定法に属する測定機器の標準仕様および精度検証に関する取り決めは、この分類規格に従属する形で ISO の規格化が進行している。

ここでは、代表的な 3 つの光学式の三次元表面性状測定機の簡単な原理紹介を行う。それぞれ、ユニークな特長があり、ユーザーには測定対象に応じて使い分ける柔軟性を期待したい。表 2 に、ISO 25178-6 (2010) における測定手法の分類を記載する。

3.1 垂直走査型低コヒーレンス干渉法 (ISO 25178-604)

垂直走査型低コヒーレンス干渉法は、白色光などの低コヒーレンス光源を使用することで、干渉じま（縞）の発生幅を限定させ、Z 軸方向走査により干渉強度のピーク高さを求めて表面凹凸を測定する方法である³⁾。検出器であるエリアセンサーの各画素 (x, y) が、測定対象面の XY に相当する。ISO 25178-603 の位相シフト式干渉顕微鏡法がコヒーレンスの高い単一波長を光源とした干渉計であるのに対して、走査型白色干渉計、白色光干渉顕微鏡法とも呼ばれている。図 3 に光学系レイアウト⁸⁾を示す。

本方式の特長は、干渉強度の変化を位相情報に変換するため、高さ (z) 分解能が対物レンズの倍率（焦点深度）に依存しないところにある。具体的には、低倍率の対物レンズで 10 mm 四方に観測視野を広げても、サブナノレベルの高さ (z) 分解能が維持できるものである。最近では、光源に高輝度白色 LED を採用することで、高倍率対物レンズでの測定や粗面の評価も容易になっている⁹⁾。

3.2 点合焦式輪郭曲線法 (ISO 25178-605)

点合焦式輪郭曲線法は、一点に集光する光を測定面に照射し、表面からの反射光を位置検出器で受光し、検出器上光点の位置ずれを減らすように自動合焦（オートフォーカス）させることで局所高さを求めて表面凹凸を測定する方法である。表面凹凸は、通常、Y 軸方向に等間隔で順送

図4 点合焦式輪郭曲線法

りに実施するX軸方向走査によって得られる平行な輪郭曲線の一群からとめる³⁾。レーザープローブ式、オートフォーカス式とも呼ばれている。図4に光学系レイアウト¹⁰⁾を示す。

本方式の特長は、対物レンズの倍率を上げて集光する光を絞っても、XY軸方向走査により広い測定範囲を確保できることや、傾斜面に対する高い追従性などがあげられる¹¹⁾。最近では、さまざまな部品の形状測定への応用が図られている。

3.3 共焦点顕微鏡法 (ISO 25178-607)

共焦点顕微鏡法は、光源によって照射されたピンホールからの光をレンズによって測定表面上に結像し、その反射光を再びレンズに通過させた後、空間フィルタとして作用する2番目のピンホールに通過させ、ピンホール後方の検出器で受光してZ軸方向走査によって局所表面の高さを求めて表面凹凸を測定する方法である。表面凹凸は、通常、Y軸方向に等間隔で順送りに実施するX軸方向走査によって得られる平行な輪郭曲線の一群からとめる³⁾。医療・生物用の観察顕微鏡としての歴史も長く、走査型レーザー顕微鏡という名称も広く知られている。図5に光学系レイアウト¹²⁾を示す。

本方式の特長は、高いコントラストで観察できるため、測定場所の特定が容易なことや、光検出のダイナミックレンジが広いこと、輝度差や急峻な形状に対応しやすいことにある。最近では、青色レーザーを搭載することで、高さ方向(z)および水平方向(x,y)分解能の向上も図られている¹³⁾。

4. 三次元表面性状の測定の留意点

ユーザーには、さまざまな測定手法の特性を理解して、適切な測定機を選んでもらいたい。とはいえ、三次元規格にのっとったSパラメータ⁵⁾でも測定結果に違いが出るの

図5 共焦点顕微鏡法

表3 三次元表面性状の仕様オペレータ (一部)

S-フィルタのネスティングインデックス値とサンプリング間隔との関係性(抜粋)
機械的な接触で検出する輪郭面の場合:

S-フィルタの ネスティングインデックス値(mm)	最大サンプリング間隔(mm)	球の半径の最大値(mm)
...	...	...
0.0025	0.0005	0.002
0.008	0.0015	0.005
...	...	...

電磁波によって検出する輪郭面の場合:

S-フィルタの ネスティングインデックス値(mm)	最大サンプリング間隔(mm)	空間波長検出限界の最大値 (mm)
...	...	...
0.0025	0.0008	0.0025
0.008	0.0025	0.008
...	...	...

出展: ISO25178-3(2012)

は現場に混乱を招く要因となるであろう。多くの場合にその原因は、高さ(z)分解の不足(もしくは、測定ノイズ)、空間(x,y)分解能の不足、フィルタ演算の違い、試料表面に依存する誤差要因にあると考える。

高さ(z)分解能不足は、超精密加工されたX線用ミラーの表面性状の測定などがあげられる。これらの表面は局所的な凹凸がナノメートル以下に仕上げ加工されており、十分な高さ(z)分解能がないと、どの加工レベルを計測しても同じ数値となる可能性が高い。測定ノイズが、実際の凹凸より大きく、必要なデータが埋もれてしまう場合もある。測定ノイズは、使用環境にも影響されるので、測定の平均化等で改善の余地もある。

空間(x,y)分解能については、仮に測定機が必要十分な分解能を有していれば、フィルタ演算によって合わせこむことが可能である。ただし、必要な分解能がなければ、その限りではない。ISO 25178-3でも、光学式では、Sフィルタを使用して最大サンプリング間隔の3倍のSフィルタを使用することを推奨している。これは、光学式によって検出する輪郭面の空間波長検出限界という理解に基づく考え方である。表3に、Sフィルタのネスティングイン

デックス値（断面曲線のカットオフに相当する値）とサンプリング間隔との関係性の抜粋を示す⁶⁾。注目すべきは、触針式と光学式が別々に定義されているところである。このSフィルタは、高周波数成分のノイズ成分の除去にも貢献するものである。フィルタ演算については、三次元の規格である、Sフィルタ、Lフィルタ、F演算という演算条件を極力合致させる必要がある⁷⁾。

試料表面に依存する誤差については、主に光学式を使用する場合の留意点である。たとえば光学的に透明な膜の評価では、光の反射面が物理的な表面と異なる可能性に注意が必要である。また、光学定数が異なる複数の材質では、光が反射する際に起こる位相差による、計測される凹凸への影響を考慮する必要がある。光特有の振る舞いについての詳しい説明は、誌面の制約で割愛させていただくが、多くの光学式の測定機メーカーでは、このような誤差に対する補正手段を含めた測定アルゴリズムを独自に開発して、実用化させている。

5. お わ り に

本稿では、光学式を中心とした非接触の三次元表面性状測定機の現状について解説した。三次元表面性状の仕様についての規格であるISO 25178-3のAppendix Dには、次のような意味の解説があるので紹介したい⁴⁾。「技術は進歩し、三次元の測定機が広く入手できるようになった。これは輪郭曲線から三次元へのパラダイムシフトとなり、この三次元—輪郭面—テクスチャのチェーンの規格の発展となった」このことから、三次元は輪郭曲線の延長や補完ではなく、「三次元表面性状」という新しい定量化の手段であると認識すべきと考える。

グローバル化するものづくりに国際標準規格は重要であり、三次元の規格も国内外の製造メーカで普及され始めている。精密工学に携わる皆さまには、積極的に非接触方式の三次元表面性状の評価を取り入れて、研究開発および生産に活用いただくことをここに願うものである。

参 考 文 献

- 1) 吉田一朗：表面粗さ—その測定方法と規格に関して—はじめての精密工学，精密工学会誌，**78**, 4 (2012)。
- 2) JIS B 0601:2001 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 (ISO 4287:1997)，財団法人 日本規格協会。
- 3) JIS B 0681:2014 製品の幾何特性仕様 (GPS)—表面性状：三次元—第6部：表面性状の測定方法の分類 (ISO 25178-6:2010)，財団法人 日本規格協会。
- 4) 柳和久：表面性状に関する国際標準規格の動向，トライボロジスト，**60** (2015)。
- 5) 吉田一朗：触針式の表面性状測定技術の最新動向，トライボロジスト，**60** (2015)。
- 6) ISO 25178-2, Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 2: Terms, Definition and Surface Texture Parameters, (2012)。
- 7) ISO 25178-3, Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 3: Specification Operators, (2012)。
- 8) ISO 25178-604, Coherence Scanning Interferometry, (2013)。
- 9) 佐藤敦：白色干渉法を利用した最新の表面形状評価技術，表面技術，**57**, 8 (2006) 554。
- 10) ISO 25178-606, Point Autofocus Profiling, (2014)。
- 11) 三浦勝弘：三次元表面性状 ISO 規格を用いた測定と評価—ポイントオートフォーカス法の測定事例を交えて—，ツールエンジニア，11月号，大河出版，(2013)。
- 12) ISO 25178-607, Confocal Microscopy, (2015)。
- 13) 林健彦，藤井章弘：走査型レーザ顕微鏡による非接触表面粗さ計測，実装技術ガイドブック 2009，工業調査会，(2009)。