

学位論文

光透過式レプリカによる加工面の  
表面粗さ測定に関する研究

平成 28 (2016) 年 2 月

谷田部 幸太郎

# 目 次

## 第 1 章 序 論

1.1 研究の目的	1
1.2 表面粗さの定義と既存の測定方法	4
1.2.1 表面粗さの定義	4
1.2.2 既存の測定方法	9
1.3 論文の構成と内容	20
1.4 論文の記号, 単位, 名称, および記号の説明	22
参考文献	25

## 第 2 章 透明レプリカにおける測定原理の提案

2.1 表面粗さ測定の概要	28
2.2 測定原理	30
2.2.1 回折光を利用した表面粗さの測定	30
2.2.2 散乱光を利用した表面粗さの測定	34
2.3 レプリカの作製	37
2.3.1 レプリカの素材	37
2.3.2 レプリカの作製方法	38
2.3.3 レプリカの表面粗さを比較対象とした比較用表面粗さ標準片	39
2.4 測定装置	40
2.4.1 光源の選択	40
2.4.2 測定装置の構成	41
2.4.3 測定方法	45
参考文献	46

## 第 3 章 光透過式レプリカの透過像による表面粗さの測定

3.1 緒 言	48
3.2 透過光の透過像パターン	48
3.2.1 比較表面粗さ標準片と透過像パターンの分類	48

3.2.2	ポイント形状パターン	49
3.2.3	円形状パターン	51
3.2.4	楕円形状パターン	52
3.2.5	回折スポットパターン	53
3.3	回折光による加工面の表面粗さ測定	54
3.4	散乱光による加工面の表面粗さ測定	56
3.5	結言	60
	参考文献	61

#### 第4章 光透過式レプリカによるスクエアエンドミル加工面の表面粗さの測定

4.1	緒言	64
4.2	実験方法	64
4.2.1	スクエアエンドミルと加工面	64
4.2.2	スクエアエンドミル加工面とレプリカ	67
4.3	実験結果	67
4.3.1	加工面の測定位置	67
4.3.2	プロフィール A の表面粗さ	68
4.3.3	プロフィール B, C, D, および E の表面粗さ	70
4.3.4	プロフィール F の表面粗さ	75
4.3.5	触針式表面粗さと光透過式レプリカの粗さ比較	77
4.3.6	稜線の交差角度	79
4.4	結言	82
	参考文献	83

#### 第5章 素材の違いによる透明レプリカの透過像特性

5.1	緒言	85
5.2	実験方法	85
5.2.1	透明レプリカ素材の特性比較	85
5.2.2	透明レプリカの製作	85
5.3	実験結果および考察	89

5.3.1	ポイント形状パターンの透過像を比較	89
5.3.2	円形状パターンの透過像を比較	91
5.3.3	楕円形状パターンの透過像を比較	93
5.3.4	回折スポットパターンの透過像を比較	95
5.3.5	透明レプリカ素材の転写性能を比較	97
5.3.6	レプリカ素材の総合性能評価	98
5.4	結言	99
	参考文献	100
第6章 総括		102
謝辞		105

# 第 1 章 序 論

## 1.1 研究の目的

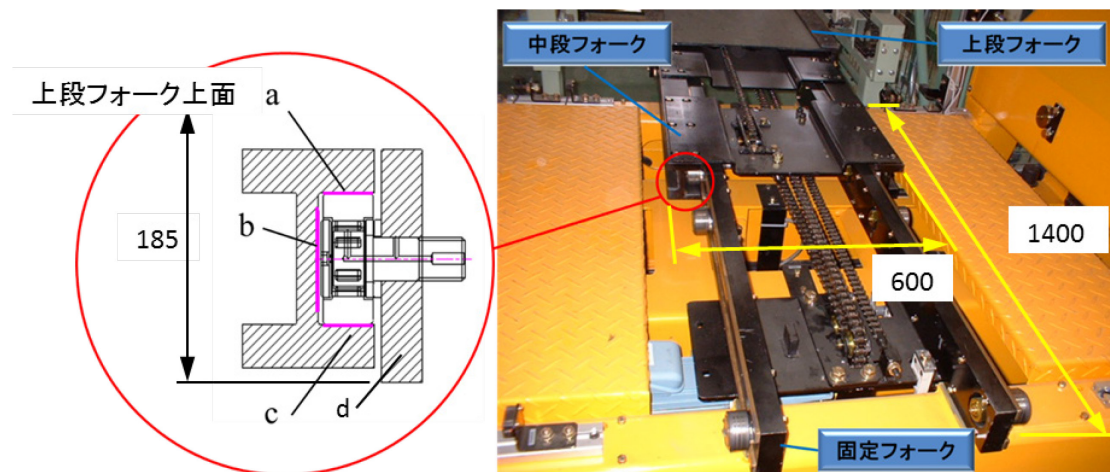
機械部品は素材を切削，研削，研磨などの機械加工により所望の寸法と表面粗さ<sup>1)</sup>に仕上げられるが，それらの加工面は，完成した機械の性能や外観に影響を及ぼすので，これらの管理や計測方法<sup>2)</sup>はますます重要になってきている．機械加工された加工面の凹凸の評価は，波長の短い凹凸を表面粗さ，やや波長の長い凹凸を表面うねり，最も波長の長い凹凸を形状精度に区分されている<sup>2)</sup>．機械加工を施した部品を検査する項目の中には，表面粗さの測定法がある．従来の測定技術の多くは，凹凸の高低を表面粗さとして測定するものであり，主な測定方法<sup>3)</sup>としては，比較用表面粗さ標準片による比較測定法が普及している．また粗さ測定装置としては，加工面へ触針を押し付ける接触式粗さ測定法，光切断や光干渉<sup>4)</sup>を利用した非接触式粗さ測定法がある．

触針による接触式粗さ測定法<sup>5)~7)</sup>は，押付け力の大小，凹凸溝幅と触針先端寸法の関係，または先端の摩耗等により測定精度に影響する．また，表面に傷が付く試料，変形する試料，表面粘着物を有する試料には不向きであり，位置決めに時間を要したり，試料の寸法制限等がある．光切断<sup>6)</sup>を利用した粗さ測定法は，照射するスリット光の投影方法によっては数マイクロメートル程度まで表面粗さを測定することが可能である．しかし，この測定方法は，スリット光の投影角度位置によって測定精度が変化するため，十分な信頼性のある測定値が得られない場合がある．さらに，光干渉<sup>8)</sup>を利用した粗さ測定法は，測定の対象となる表面粗さが1マイクロメートル以下でも計測できるが，反射率は比較的高い部材であることが望ましい．一方，加工面に直接照射された光線の反射光強度は表面粗さが大きくなるほど広がるので，その散乱光の広がりから表面粗さを評価する光散乱法がある．これに関する報告は数多くある．<sup>9)~14)</sup>しかし，これらの表面粗さ測定機は，試料を測定機のステージに載せるため，試料の寸法が制約を受ける．また，汎用型の表面粗さ測定装置は，大型で設置する設備が必要となるなど，一般的には普及しにくい背景がある．

この他に，加工面を直接測定するのではなく，加工面の凹凸を転写したレプリカを利用することがある．この方法はレプリカ測定法<sup>15)~17)</sup>と呼ばれ，構造物や大型部品の表面のレプリカを採取して，その表面の凹凸に直接レーザ光を照射し，凹凸の性状に応じて

反射する回折光や散乱光の輝度強度分布により、表面粗さパラメータを計測する手法が現在は主流である。従来のレプリカ測定法は、反射光を利用しているために反射像の歪みによる補正が必要になること、また複数の反射ミラーから構成され光学系の部品点数が、多くなることなどが欠点として挙げられる。これらに対して、提案する光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法は、透明レプリカ素材の反映面に転写された凹凸の性状に応じた透過光で得られた透過像の形態から粗さを測定するため、装置は小型軽量であり、レプリカの背面は平坦であるため透過光の歪みは現れにくい。

本研究では、光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法<sup>18)~20)</sup>を提案する。本研究の動機付けは、既存の表面粗さ測定機または測定装置では表面粗さを測定する際に加工物を測定用のステージに載せる必要があり、そのサイズにより試料の形状や寸法に制約がある等の理由から、主に研究機関や工業試験所等の施設に設置されているのが現状である。さらに、本研究は測定部位の表面をレプリカで直接転写することにより、組立てられた部品表面の経年変化の状態や欠陥、および表面粗さ等を分解することなく計測できる。また、垂直面や天井面などの測定面の傾斜角度の制限を受けずに計測ができ、既存の各種表面粗さ測定機に対し、比較的コンパクトである。



- a : カムフォロアと中段のフォークのガイドレール部とのクリアランス 20 $\mu$ m
- b : 中段のフォークのガイドレール部とのクリアランス 20 $\mu$ m
- c : 中段のフォーク, SCM440, 高周波焼入れ層 50 $\mu$ m 表面粗さ Ra1.2
- d : 固定フォーク

図 1.1 自動倉庫の 3 段フォークの全景写真および中段フォークの詳細断面図

次に具体的な動機の事例を述べる。図 1.1 は、自動倉庫の 3 段フォークの写真および中段フォークの詳細断面図を示す。これらは各部品により組立てられており、この動力源には電動機とローラチェーンで行い、これを制御するセンサや制御装置が一体化されたシステムとして、倉庫に設置されている。寸法は、幅 600mm、奥行き 1400mm、高さ 185mm、および左右の最大可動範囲 1300mm である。上段のフォークは写真の前後方向に動き、その可動範囲は、固定フォークに対して中段のフォークが可動する距離に対して 2 倍可動するシステムである。この各フォークの可動部には、中段フォークの断面で示したように、カムフォロアを固定フォークに取付けて、これを中段のフォークのガイドレールに沿って走行させる機構である。c のガイドレールは、SCM440 の材料表面に深さが約 50 $\mu$ m の高周波焼入れした硬化層に表面粗さ Ra1.2 で仕上げられており、a と b 部のクリアランスは 20 $\mu$ m 程度の組立精度である。このガイドレールの上に a のカムフォロアが前後に転がり運動する。可動初期の表面粗さ Ra1.2 は、カムフォロアとの馴染みにより小さくなるが、経年や可動頻度の状況により、ころがり接触部分の摩擦摩耗が進行する。その後、硬化層の一部が剥離するため、カムフォロアを含むガイドレールの損傷が進み使用できなくなる。メンテナンスの中では、この剥離現象が表れる前に、接触部分の表面粗さが顕著に大きくなることが観察されているため、この進展程度と剥離現象に移行する関連について予め分かればメンテナンス経費等が節減できる。これには、転がり接触部分の表面粗さを計測する必要がある。現状では、計測部位を分解組立する作業工程が必要であり、また計測部位によっては計測装置に載せられない事例や凹んだり内側に入り込んだ部位では計測ができない場合もある。このような事例は他の機械装置、生産ライン、および大型プラント等でも発生する。このように、摺動面や転がり接触面の表面粗さの計測から、メンテナンスの管理や機械制御装置の性能に関わる診断等が分解しないで計測するためには、計測診断したい部位の表面粗さが容易に行なえる測定装置の開発が望まれている。

具体的には、機械装置に組み込まれている加工部品の表面粗さを管理測定する場合には分解しないで行うことが可能であり、大型部品の加工面の表面粗さを測定する場合には、必要とする部位の粗さが分かる必要がある。これらの粗さは既存の触針式表面粗さ測定機と同等程度の測定精度を有する必要がある。本研究では、これらの要件を備えた光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法および測定装置の開発が目的である。

## 1.2 表面粗さの定義と既存の測定方法

加工面の表面粗さのパラメータの呼び方<sup>2)1)</sup>について、従来から多用されているものは、次に挙げる名称と記号になる。輪郭曲線が粗さ曲線の場合は「最大高さ粗さ  $Rz$ 」, 「算術平均粗さ  $Ra$ 」があり, 輪郭曲線がうねり曲線の場合は「最大高さうねり  $Wz$ 」, 「算術平均うねり  $Wa$ 」がある。また, 粗さ曲線の最大高さ粗さとして「十点平均粗さ  $Rz_{JIS}$ 」は「最大高さ粗さ  $Rz$ 」や「算術平均粗さ  $Ra$ 」と同様に広く普及しているパラメータでもあり, JIS の附属書 C に参考として記述されている。

ここでは, 本論文で取り上げている JIS の「粗さパラメータ」の定義とその関係を述べ, 次に接触式表面粗さ測定と非接触式表面粗さ測定に用いられている機器と装置の特徴を示す。

### 1.2.1 表面粗さの定義

#### 1) 粗さ曲線の算術平均粗さ $Ra$

図 1.2 に示す粗さ曲線の基準長さ  $lr$  における高さ方向  $Z(x)$  の絶対値の平均であり, 式 (1.1) から求められる。この値をマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )で表したものをいう。

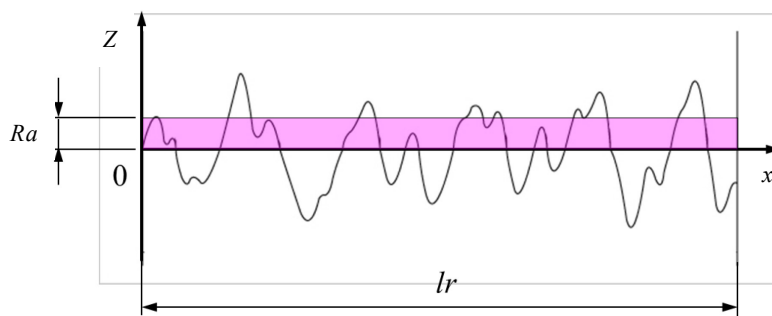


図 1.2 輪郭曲線が粗さ曲線の場合の算術平均粗さ  $Ra$  の算出図

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (1.1)$$

#### 2) 粗さ曲線の最大高さ $Rz$

図 1.3 に示す粗さ曲線の基準長さ  $lr$  における粗さ曲線の山高さ  $Rp$  の最大値と谷深さ  $Rv$  の最大値との和であり, 式 (1.2) から求められる。この値をマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )で



表したものをいう。

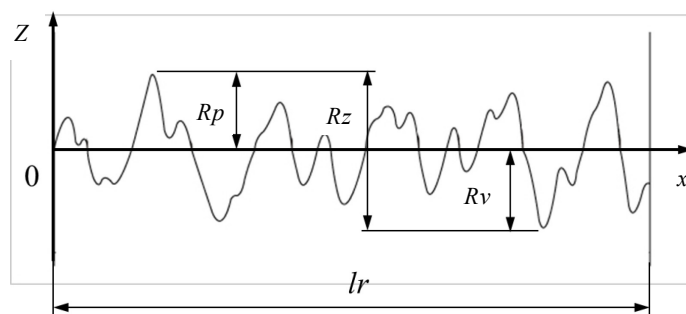


図 1.3 輪郭曲線が粗さ曲線の場合の最大高さ粗さ  $Rz$  の算出図

$$Rz = Rp + Rv \quad (1.2)$$

### 3) 粗さ曲線の十点平均粗さ $Rz_{JIS}$

断面曲線にカットオフ値  $\lambda c$  の位相補償高域フィルタを適用して、得た図 1.4 示す。基準長さ  $lr$  の粗さ曲線において、最高の山頂  $Rp$  から高い順に 5 番目までの山高さの平均と、最深の谷底  $Rv$  から深い順に 5 番目までの谷深さの平均との和であり、式 (1.3) から求められる。この値をマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )で表したものをいう。

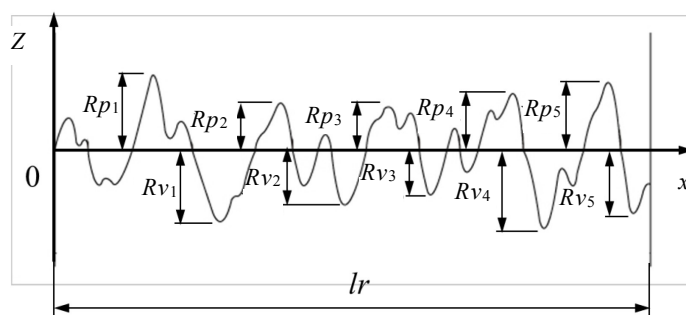


図 1.4 輪郭曲線が粗さ曲線の場合の十点平均粗さ  $Rz_{JIS}$  の算出図

$$Rz_{JIS} = \frac{|Rp_1 + Rp_2 + Rp_3 + Rp_4 + Rp_5| + |Rv_1 + Rv_2 + Rv_3 + Rv_4 + Rv_5|}{5} \quad (1.3)$$

### 4) 算術平均粗さ $Ra$ と表記の関係

表 1.1 は算術平均粗さ  $Ra$  に対する最大高さ  $Rz$  と十点平均粗さ  $Rz_{JIS}$  の表記の関係<sup>2 1)</sup>を

示す。表面粗さ測定機を用いて得られた輪郭曲線<sup>17)</sup>では、粗さの波長成分より短い波長成分を除去するためにカットオフ値 $\lambda_s$ の低域フィルタを適用して断面曲線が得られる。これには、粗さ波長成分とこれより大きい波長のうねり波長成分が含まれている。これらを分離するために、断面曲線からカットオフ値 $\lambda_c$ の高域フィルタによって長波長成分を遮断して粗さ曲線が得られ、さらにこの粗さ曲線にカットオフ値 $\lambda_f$ の長波長成分を遮断してうねり曲線が得られる。これらの曲線から、粗さパラメータ、うねりパラメータ、および断面曲線パラメータが算出される。同表は粗さパラメータの $Ra$ 、 $Rz$ 、および $Rz_{JIS}$ の関係である。粗さ曲線の標準カットオフ値 $\lambda_c$ は基準長さ $lr$ に相当し、評価長さ $ln$ は基準長さ $lr$ を5倍した値である。

表 1.1 算術平均粗さ  $Ra$  と従来表記の関係表

算術平均粗さ $Ra$ $\mu\text{m}$		最大高さ $Rz$ $\mu\text{m}$	十点平均粗さ $Rz_{JIS}$ $\mu\text{m}$	$Rz \cdot Rz_{JIS}$ の 基準長さ $lr$ mm
標準整列	カットオフ値 $\lambda_c$ $\mu\text{m}$	標準整列		
0.012a	0.08	0.05 s	0.05 z	0.08
0.025a	0.25	0.1 s	0.1 z	
0.05 a		0.2 s	0.2 z	0.25
0.1 a	0.8	0.4 s	0.4 z	
0.2 a		0.8 s	0.8 z	
0.4 a		1.6 s	1.6 z	
0.8 a		3.2 s	3.2 z	
1.6 a	2.5	6.3 s	6.3 z	0.8
3.2 a		12.5 s	12.5 z	
6.3 a		25 s	25 z	
12.5 a	8	50 s	50 z	2.5
25 a		100 s	100 z	
50 a		200 s	200 z	
100 a	—	400 s	400 z	8
				—

5) 表面粗さに関する規格の推移

ISOにより、新しい表面粗さパラメータが国際規格として導入されてきたことから、JISも国際規格との整合性を図るため、JIS B 0601を含む表面粗さに関するJISの改正が行われた。主な変更点としては、以下の通りである。

- 1) JIS B 0601:1994の最大高さ  $R_y$  が、最大高さ  $R_z$  に変更された。
- 2) 十点平均粗さ  $R_z$  は規格から削除され、それに伴い最大高さ  $R_z$  と区別するため、十点平均粗さを  $R_{zJIS}$  に変更された。
- 3) 輪郭曲線から断面曲線、粗さ曲線、うねり曲線に分けて、それぞれの曲線ごとに断面曲線パラメータ、粗さ曲線パラメータ、うねり曲線パラメータを規定した。
- 4) 表面粗さ測定機のメーカー間の誤差をなくすため、触針から位相補償形フィルタについての規格も規定した。表 1.2 には、JIS B 0601:2013 と JIS B 0601:1994 及び JIS B 0660:1998 とのパラメータの記号の相違を示す。

表 1.2 JIS B 0601:2013 と JIS B 0601:1994  
及び JIS B 0660:1998 とのパラメータの記号の相違

JIS B 0601:2013 の箇条	JIS B 0601:2013 の基本用語	JIS B 0601:1994 及び JIS B 0660:1998 の記号	JIS B 0601:2013 の記号
3.1.9	基準長さ	$l, l_p, l_r, l_w$	a)
3.1.10	評価長さ	$l_n$	$l_n$
3.2.8	縦座標値	$y Z(x)$	
3.2.9	局部傾斜	—	$\frac{dZ(x)}{dx}$
3.2.10	輪郭曲線の山高さ	$y_p$	$Z_p$
3.2.11	輪郭曲線の谷深さ	$y_v$	$Z_v$
3.2.12	輪郭曲線要素の高さ	—	$Z_t$
3.2.13	輪郭曲線要素の長さ	—	$X_s$
3.2.14	レベル $c$ における輪郭曲線の負荷長さ	$\eta_p$	$MI(c)$
注 a) 異なった三つの輪郭曲線の基準長さは、次の名称とする。 $l_p$ (断面曲線), $l_r$ (粗さ曲線), $l_w$ (うねり曲線)			

表 1.2 の続き

表面性状パラメータ（粗さパラメータの例）			
JIS B 0601:2013 の箇条	JIS B 0601:2013 のパラメータ	JIS B 0601:1994 及び JIS B 0660:1998 の記号	JIS B 0601:2013 の記号
4.1.1	粗さ曲線の最大山高さ	$R_p$	$Rp^{b)}$
4.1.2	粗さ曲線の最大谷深さ	$R_m$	$Rv^{b)}$
4.1.3	最大高さ粗さ	$R_y$	$Rz^{b)}$
4.1.4	粗さ曲線要素の平均高さ	$R_c$	$Rc^{b)}$
4.1.5	粗さ曲線の最大断面高さ	—	$Rt^{b)}$
4.2.1	算術平均粗さ	$R_a$	$Ra^{b)}$
4.2.2	二乗平均平方根粗さ	$R_q$	$Rq^{b)}$
4.2.3	粗さ曲線のスキューネス	$S_k$	$Rsk^{b)}$
4.2.4	粗さ曲線のクルトシス	—	$Rku^{b)}$
4.3.1	粗さ曲線要素の平均長さ	$S_m$	$RSm^{b)}$
4.3.2	粗さ曲線要素に基づくピーク カウント数	—	$RPC^{b)}$
4.4.1	粗さ曲線の二乗平均平方根 傾斜	$\Delta_q$	$R\Delta q^{b)}$
4.5.1	粗さ曲線の負荷長さ率	$t_p$	$Rmr(c)^{b)}$
4.5.3	粗さ曲線の切断レベル差	—	$R\delta c^{b)}$
4.5.4	粗さ曲線の相対負荷長さ率	—	$Rmr^{b)}$
附属書 JA	十点平均粗さ (ISO 4287:1997 から削除)	$R_z$	$RzJIS^{c)}$

注 b) パラメータは、断面曲線、うねり曲線及び粗さ曲線の 3 種類の輪郭曲線に対して定義される。  
この表には、粗さパラメータだけを示してある。一例として、3 種類のパラメータは、 $Pa$ （断面  
曲線パラメータ）、 $Wa$ （うねりパラメータ）及び  $Ra$ （粗さパラメータ）のように表示する。

c) 十点平均粗さは、JIS だけの粗さパラメータであり、断面曲線及びうねり曲線には適用しない。

## 1.2.2 既存の測定方法

JIS の表面粗さ測定法の変遷は、比較用標準片、接触式、および非接触式が制定されている。始めは、表面粗さを触覚、視覚等によって比較し、加工面の表面粗さを推定するときに用いられる比較用標準片が 1957 年に JIS として制定<sup>2 2)</sup>され、比較用測定法が可能になった。接触式による表面粗さ測定機としては、1973 年に「触針式表面粗さ測定機」が JIS で制定<sup>2 3)</sup>された。非接触式による表面粗さ測定機としては、2014 年に三次元表面性状計測方法の分類体系<sup>2 4)</sup>について規定され、その原理には、光の波長による干渉、光の反射光、表面画像の鮮明度、走査電子顕微鏡画像、および電流の変化が利用されており、二次元輪郭曲線を測定する方法と三次元の表面凹凸を測定する方法が示されている。この分類体系に示されている測定機は、既に開発または市販<sup>2 5)</sup>～<sup>3 2)</sup>されている。ここでは、比較用表面粗さ標準片を用いた比較用測定法、接触式測定法、および非接触式測定法について述べる。表 1.3 には、接触式と非接触式を代表する測定機の仕様と特徴を比較している。

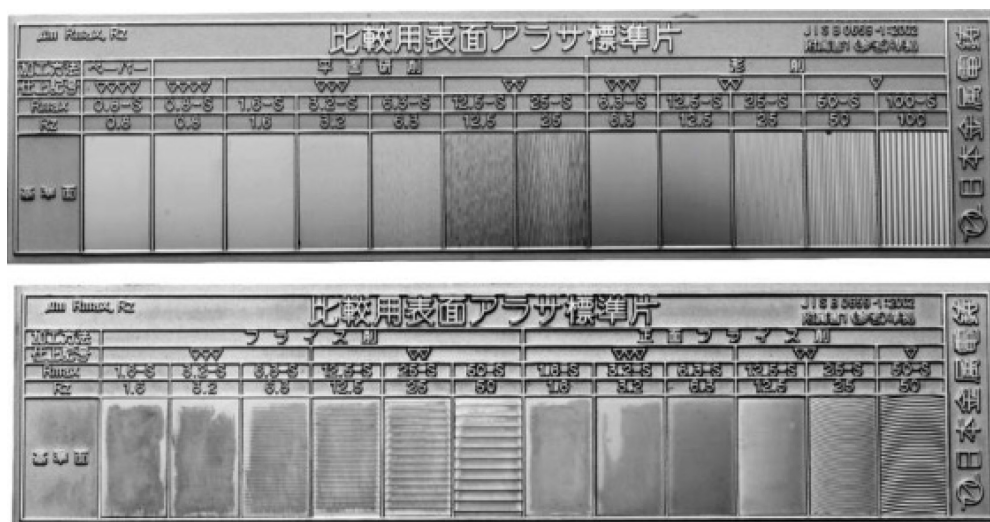
表 1.3 表面粗さ測定方式の違いによる仕様と特徴 ※)

方式	接触式		非接触式	
	触針式表面粗さ測定機	原子間力顕微鏡 (AFM)	白色干渉計	レーザ顕微鏡 (共焦点式)
測定分解能	1 nm	< 0.01 nm	< 0.1 nm	0.1 nm
高さ測定レンジ	～ 1 mm	< 10 μm	< 数 mm	< 7 mm
測定領域	数 mm	1 ～ 200 μm	40 μm～15 mm	15 μm ～2.7 mm
角度特性	—	×	△	○
データ解像度	—	VGA 相当	VGA 相当	SXGA 相当
測定箇所的位置決め	自由設置	オプション	光学カメラ内蔵	光学カメラ内蔵
加工物へのダメージ	接 触	接 触	非接触	非接触

※) [http://www.keyence.co.jp/microscope/special/3dprofiler/arasa/equipment/surface\\_00.jsp](http://www.keyence.co.jp/microscope/special/3dprofiler/arasa/equipment/surface_00.jsp)

(1) 比較用表面粗さ標準片を用いた比較用測定法

加工面の表面粗さを触覚や視覚などによって、比較測定する際には図 1.5 に示す比較用表面粗さ標準片<sup>3,2)</sup> が用いられる。触覚による場合は、指の腹でさわるよりも標準片を上向きにおいて指を軽く曲げ、爪で静かに表面をこする方法で測定を行う。また、鉛筆の先で軽くこすって比較する方法もある。面の光沢などが問題になる時は、視覚により比較する。これらの方法で識別できる粗さの程度は、最大高さ  $Rz0.8$  程度とされている。標準片の面は破損、摩損、および錆等がなく、表面のうねりなどがあってはならない。また、JIS B 0651:2001 で定義される輪郭曲線方式の触針式表面粗さ測定機の計測特性の校正に、エタロン（実量器）として用いられ、非接触式測定法においても同様な用途に用いられている。JIS B 0659-1:2002 附属書 1（参考）の形状および品質において、標準面の粗さの呼び値と範囲は、算術平均粗さ  $Ra$ 、最大高さ  $Rz$ 、および十点平均粗さ  $Rz_{JIS}$  について表 1.4 と表 1.5 に示す。これらを参考に、日本金属電鍍株式会社が製作している比較用表面粗さ標準片<sup>3,8)</sup> の種類についても、 $Ra$ 、 $Rz$ 、および  $Rz_{JIS}$  の標準片の種類を表 1.6、表 1.7、と表 1.8 に示す。



注) 加工方法、上の写真は左からペーパー、平面研削、形削  
 下の写真は左からフライス削、正面フライス削

図 1.5 JIS B 0659-1:2002 附属書 1（参考）準拠した比較用表面粗さ標準片の例

表 1.4  $Ra$  の呼び値による比較用標準片の範囲

単位  $\mu\text{m}$

$Ra$ の呼び値		0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50
$Ra$ の範囲	最小値	0.02	0.04	0.08	0.17	0.33	0.66	1.3	2.7	5.2	10	21	42
	最大値	0.03	0.06	0.11	0.22	0.45	0.90	1.8	3.6	7.1	14	28	56

表 1.5  $Rz$  および  $RzJIS$  の呼び値による比較用標準片の範囲

単位  $\mu\text{m}$

$Rz, RzJIS$ の呼び値		$\nabla\nabla\nabla\nabla$				$\nabla\nabla\nabla$			$\nabla\nabla$		$\nabla$		
		0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50	100	200
$Rz, RzJIS$ の範囲	最小値	0.08	0.17	0.33	0.66	1.3	2.7	5.2	10	21	42	83	166
	最大値	0.11	0.22	0.45	0.90	1.8	3.6	7.1	14	28	56	112	224

表 1.6  $Rz$ (最大高さ) 用粗さ標準片の種類 1

様 式	加工法	$\nabla$	$\nabla\nabla\nabla\nabla$			$\nabla\nabla\nabla$			$\nabla\nabla$			$\nabla$		
		$R_{max}$	0.2S	0.4S	0.8S	1.6S	3.2S	6.3S	12.5S	18S	25S	35S	50S	100S
		$Rz$	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	18	25	35	50	100
平 面	ペーパー仕上				○									
	研 削				○	○	○	○		○				
	形削り							○	○		○		○	
	正面フライス削り					○	○	○	○		○		○	
	フライス削り					○	○	○	○		○		○	
円 筒 (外面)	研 削				○	○	○							
	丸削り					○	○	○	○	○	○	○	○	
手仕上面	ペーパー仕上			○	○	○	○	○						
	ヤスリ仕上						○	○	○	○	○			
ガス切断		A	0.10mm		0.12mm		0.16mm		0.25mm			0.60mm		
ガス切断		B	0.04mm		0.05mm		0.10mm		0.12mm			0.18mm		

表 1.6 の続き

ガス溶断面 A	平坦性(F)				上縁の溶け(M)		
	15mm ≤ 板厚 ≤ 25mm		板厚 > 25mm				
	1 級	2 級	1 級	2 級	1 級	2 級	3 級
アラサ標準片 B	粗さ (R)			スラグ (S)			
	1 級 50-S	2 級 100-S	3 級 200-S	1 級	2 級	3 級	4 級
	○	○	○	○	○	○	○

表 1.7 Rz(最大高さ) 用アラサ標準片の種類 2

様 式	▽	▽▽▽▽			▽▽▽			▽▽			▽		
	R <sub>max</sub>	0.2S	0.4S	0.8S	1.6S	3.2S	6.3S	12.5S	18S	25S	35S	50S	100S
	Rz	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	18	25	35	50	100
教材用 平面	ペーパー仕上				○	○	○						
	研 削			○	○	○							
	形削り						○			○		○	
	ヤスリ仕上					○	○	○					
ラップ仕上面	○	○	○										
放電加工面						○	○	○	○	○	○		
鋼板仕上面アラサ 標準片 (塗料下)	グラインダー面				25-S		35-S		70-S		100-S		
					○		○		○		○		
	サンダー面				12μm		16μm		26μm		36μm		
					○		○		○		○		
平 面 R <sub>rms</sub>	P			5									
	GROUND			6	12	24	58	95		265			
	SHAPED						68	130		260	590	1200	
	ENDMILLED				20	35	80	135		260	540		
	MILLED				16	35	65	130		260	530		
円筒外面 R <sub>rms</sub>	GROUND			5	12	24							
	TURNED				17	34	70	130	190	260	530	990	



表 1.8 Ra(算術平均粗さ)用粗さ標準片の種類

加工法		▽▽▽▽		▽▽▽			▽▽		▽
		0.1a	0.2a	0.4a	0.8a	1.6a	3.2a	6.3a	12.5a
		N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
平面	研削用		○	○	○	○			
	形削用					○	○	○	○
	フライス用			○	○	○	○		
	正面フライス用			○	○	○	○		
円筒	研削用	○	○	○					
	丸削用				○	○	○	○	

(2) 接触式表面粗さ測定機

1) 触針式表面粗さ測定機

触針式表面粗さ測定機<sup>3)1)</sup>は、触針の先端が試料の表面に直接接触する方式で、プローブの先端には触針がついており、この触針で試料の表面をなぞり、表面の輪郭形状の偏差を測定し、パラメータを計算し、輪郭曲線を記録できる測定機である。輪郭曲線はデジタルデータとして保存される。触針式表面粗さ測定機で微細な形状や粗さを精度良く測定する

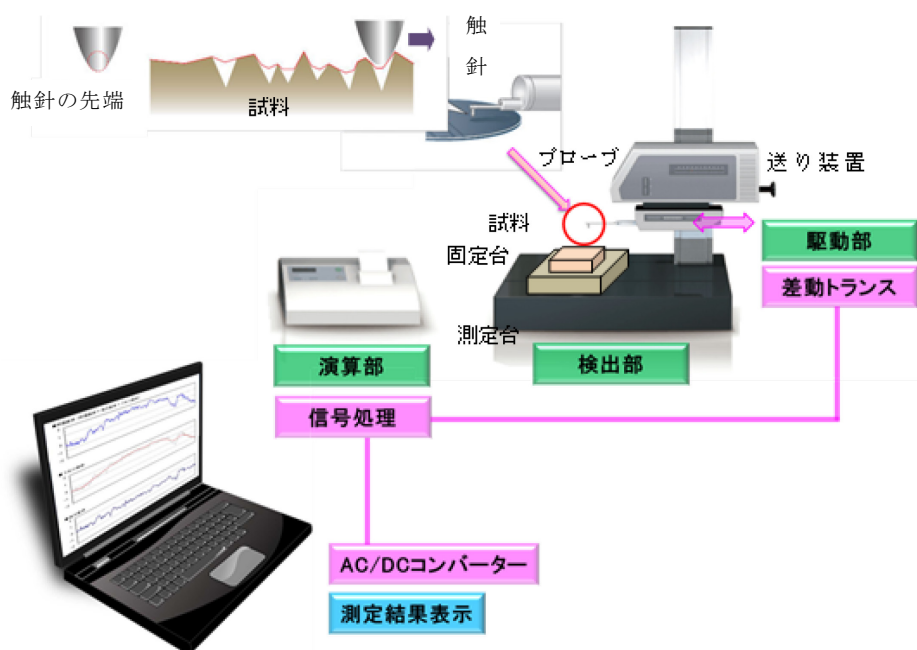


図 1.6 触針式表面粗さ測定機の概略図

ためには、触針の先端  $R$  になるべく小さいことや静的測定力および静的測定力の変化の割合が少ないことが求められる。触針の材質はサファイヤまたはダイヤモンドが使われ、JIS では先端曲率半径の呼び寸法として、 $2\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ <sup>3 0)</sup> の 3 種類、触針の形状は球状先端で円錐テーパ角度の呼び寸法として 60deg と 90deg が規定されており、理想的な測定機の円錐のテーパ角度は 60deg を推奨している。表 1.9 に触針式表面粗さ測定機の長所および短所を示す。触針式表面粗さ測定機の原理の模式図および PC 画面に測定結果の例として表したものを図 1.6 に示し、触針式表面粗さ測定機の一例として、Taylor Hobson 社製のフォームタリサーフ・i-シリーズ<sup>3 1)</sup> を図 1.7 に示す。



図 1.7 触針式表面粗さ測定機の一例  
Taylor Hobson 社製フォームタリサーフ i-シリーズ

表 1.9 触針式表面粗さ測定機の長所および短所

長 所	短 所
・明瞭な粗さ曲線が得られる。	・触針が磨耗する。
・比較的長い距離の測定が可能である。	・測定力により試料の表面に傷を残す。
	・粘着性のある試料は測定できない。
	・触針の先端 $R$ より小さい溝は測定できない
	・測定時間が長い。
	・微小な測定ポイントの位置決め確認が困難である。
	・検出器でトレースできるように試料の切断・加工が必要である。

## 2) 原子間力顕微鏡

原子間力顕微鏡<sup>3 2)</sup>は、微小なバネ板の先端に鋭い探針を取り付けたカンチレバーを試料表面より数 nm の距離にまで近づけて、探針先端の原子と試料の原子の間に働く原子間力によって試料の凹凸を測定する。原子間力顕微鏡は、原子間力が一定になるよう(カンチレバーのたわみが一定になるよう)ピエゾスキャナにフィードバックをかけながら走査を行う。ピエゾスキャナにフィードバックされた変位量を測定することにより Z 軸の変位、すなわち表面粗さを取得する。

ピエゾスキャナの変位量を測定する方法としては、カンチレバーの背面にレーザ光を照射し、その反射光を 4 分割(または 2 分割)フォトダイオードで検出する、光てこ方式を採用したものが一般的である。表 1.10 に原子間力顕微鏡の長所および短所を示す。原子間力顕微鏡の概略図<sup>3 3)</sup> および、PC 画面に測定結果の例として表したものを図 1.8 に示し、原子間力顕微鏡の一例として、オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社製の原子間力顕微鏡システム Cyper<sup>3 4)</sup> を図 1.9 に示す。

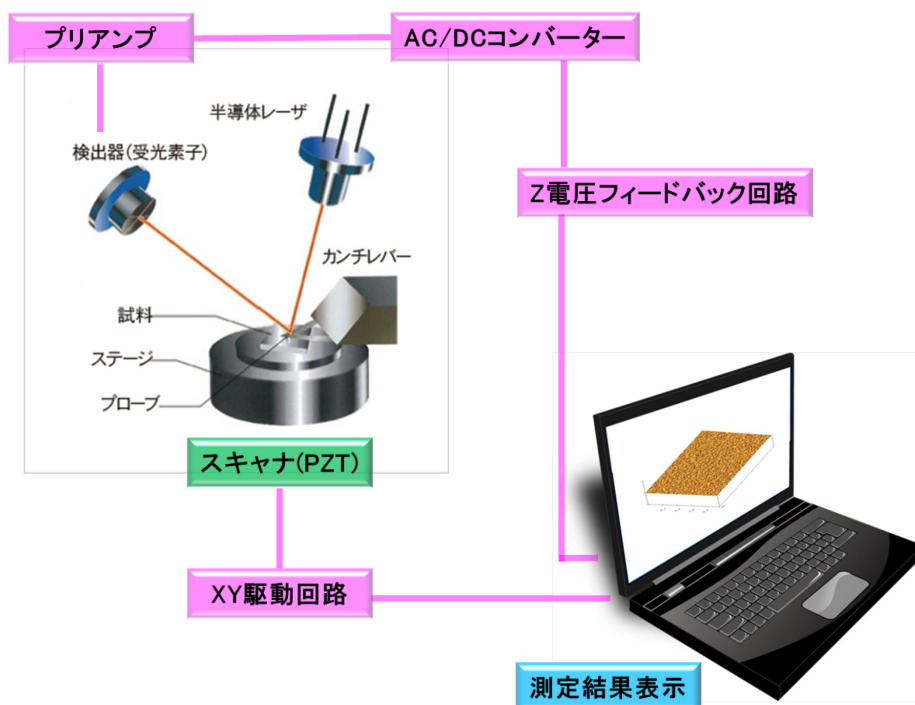


図 1.8 原子間力顕微鏡による表面粗さ測定機の概略図  
<http://microscopelabo.jp/learn/015/>



図 1.9 原子間力顕微鏡の一例  
 オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社製  
 原子間力顕微鏡システム Cyper

表 1.10 原子間力顕微鏡の長所および短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 分解能(2 点を見分ける最小距離)が高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低倍率(広領域)や大きな凹凸(数 <math>\mu\text{m}</math> 以上の高低差)の試料は測定不可である。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超高倍率の 3 次元測定が可能。データの後加工もできる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 場所探しが困難。広視野から狭小領域へ視野を絞り込んでいくため 1 サンプルあたりの解析時間がかかる。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大気中での観察が可能で、試料への前処理が不要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大きな試料は測定できない。(前処理・加工が必要)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物性(電気物性、磁気物性、摩擦・粘弾性など)解析ができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 比較的操作が難しく、カンチレバー交換などに熟練が必要である。</li> </ul>

### (3) 非接触式表面粗さ測定機

#### 1) 走査型白色干渉顕微鏡

光の干渉とは、対象物表面からある点までの光の距離(光路)に差が生じると発生する現象である。この現象を利用して、対象物表面の凹凸を計測している光干渉計である。光源(半導体レーザーなど)から射出された光は、ハーフミラーによって一方は透過して参照面に到達し、他方は反射して試料表面に導かれる。透過した光は、参照面で反射して受光素子である CCD 素子で結像する。他方の反射した光は、対象物表面で反射してハーフミラーを透過し、同じく受光素子である CCD 素子で結像する。表 1.11 に走査型白色干渉顕微鏡の長所および短所を示す。走査型白色干渉顕微鏡の概略図および測定結果表示の PC 画面を

図 1.10 に示し、走査型白色干渉顕微鏡の一例として、<sup>3,5)</sup> 株式会社日立ハイテクサイエンス社製の走査型白色干渉顕微鏡の VS1000 シリーズを図 1.11 に示す。

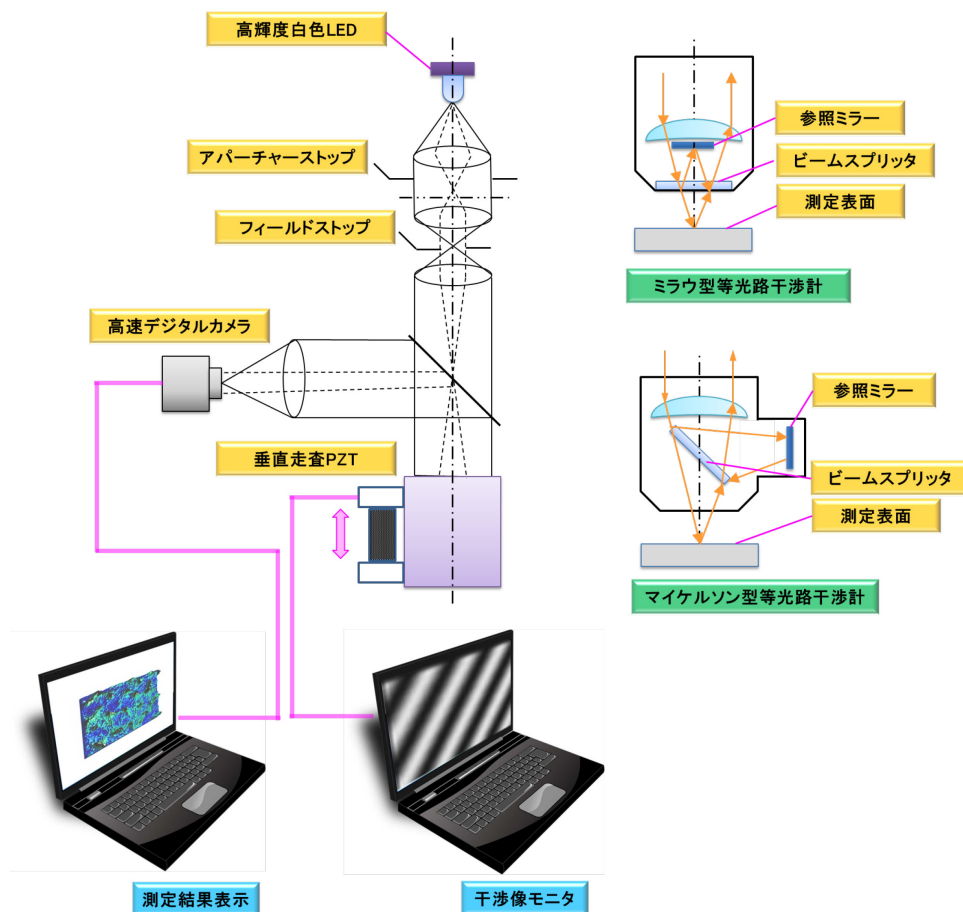


図 1.10 走査型白色干渉顕微鏡の概略図



図 1.11 走査型白色干渉顕微鏡の一例  
 株式会社日立ハイテクサイエンス社製  
 走査型白色干渉顕微鏡 VS1000 シリーズ  
<http://www.hitachi-hightech.com/hhs/products/tech/em/wi/descriptions/>

表 1.11 走査型白色干渉顕微鏡の長所および短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広視野(数角)を，測定可能である。</li> <li>・ 広視野(数角)を，サブナノメートルの高さ分解能(0.1nm)で測定可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 振動に弱い。</li> <li>・ 振動に極めて敏感であるため除振台の設置はもちろん，設置場所も限定される。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 測定時間が早い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 角度特性が低い。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 使える対象物が限られる。</li> <li>・ 光干渉計はよく反射する面でないと測定が難しいため，様々な対象物への対応が不可。参照面からの反射光と測定面からの反射光に極端な差があると測定できない。(鏡面は有利だが，凹凸の激しい試料や反射率の少ない試料は難しい)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 傾き補正が必要。</li> <li>・ 測定前に，ゴニオ(傾斜)ステージによる試料の傾き補正が必要。試料が傾いていると干渉縞が密集してしまうため，正しい測定ができない。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XY 計測の分解能が低い。</li> <li>・ サンプルングデータ数が少ない(約 30 万)ため，XY 計測の分解能が低い。</li> </ul>

## 2) レーザ顕微鏡

レーザ顕微鏡<sup>36)</sup>は，焦点深度が深い観察と 3 次元計測が同時に行える測定装置で，常温環境の下で観察ができ，操作が容易で光学顕微鏡感覚で使える測定装置になっている。試料への前処理が不要であり，カラー観察もできるため，対象物の状態を忠実に解析することが可能である。また，透明体の膜表面，膜の内部や裏面の観察，膜形状の厚み測定も可能である。SEM や AFM と比べると使い勝手は優位であるが，観察倍率や測定分解能では劣る。また，アスペクト比の高い底部や角度の大きな斜面は，レーザの反射が返ってこないため観察や粗さ測定が不可能である。表 1.12 にレーザ顕微鏡の長所および短所を示す。レーザ顕微鏡の概略図および測定結果表示の PC 画面を図 1.12 に示し，レーザ顕微鏡の一例として，株式会社キーエンス社製の VKL-X シリーズ<sup>37)</sup>を図 1.13 に示す。

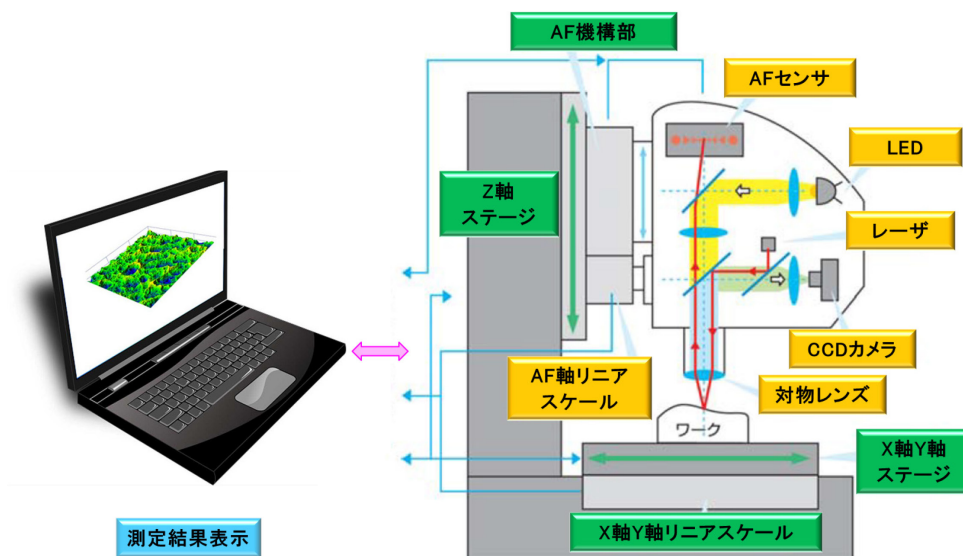


図 1.12 レーザ顕微鏡の原理模式図

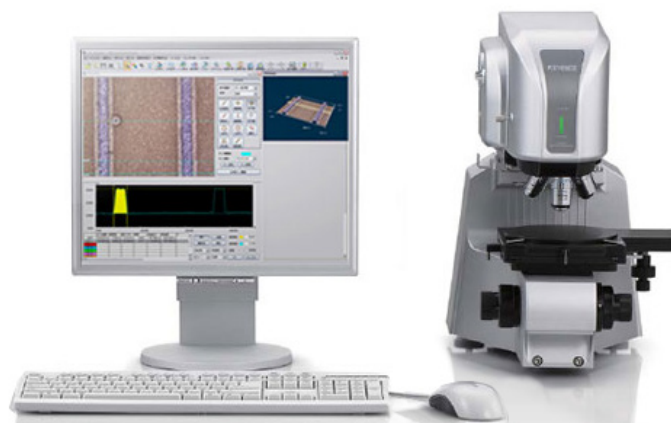


図 1.13 レーザ顕微鏡の一例  
株式会社キーエンス社製 VKL-X シリーズ

表 1.12 レーザ顕微鏡の長所および短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 焦点深度が深くしかもカラーで対象物を観察できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超高解像度な観察，1nm 以下の高精度な測定ができない。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 3次元形状を取得でき，カラー3D像を表示することができる。また，レジストなどの透明体の膜厚測定も可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ レーザ光が照射されない試料の側面(壁面)などの情報は取得できない。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大気中での解析が可能で，試料への前処理が不要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ レーザ光源の波長を吸収する材質は測定できない。</li> </ul>

### 1.3 論文の構成と内容

本論文は、6章から構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

第1章（本章）では、本研究の目的と背景、および表面粗さの定義と既存の測定方法について述べている。機械装置等に組込まれた摺動部品の表面粗さがその性能の優劣に影響を及ぼす場合には、粗さの管理が重要であり、分解組立しないで必要な部位の表面粗さが測定できる方法の必要性を述べている。また、既存の接触式や非接触式の粗さ測定装置の優劣を示して、この研究の動機等についても示している。代表的な JIS の表面粗さのパラメータについて、ISO の推移に対応して JIS も改定され、近年では JIS B 0601-2013 が制定されており、記述はこれに準じている。また、本論文の構成とその内容を述べ、最後に本論文で使用している、記号、単位、名称、および記号について説明している。

第2章では、透明レプリカに転写された表面粗さの透過像には、概ね4つのパターンが存在することが予備実験により分かっている。この種の透過像は、レーザ光の屈折が反映面の凹凸性状に応じて回折光や散乱光になって射出するため、射出した回折光と散乱光の特性を用いてこれらのパターンから表面粗さが求められる原理と算出方法について述べている。三角山に近似した規則正しい凹凸の場合には主に回折光の現象、曲面で不規則な凹凸の場合には主に散乱光の現象、および両者の中間的な現象も現れる。回折光は、山高さの最大高さと凹凸のピッチが光の干渉により一列に点在するため、これを測定する。散乱光では、粗さが濃淡分布になる任意の形状パターンになるため、これを階調化した回転半径に置き換えて、粗さとの関係式を与えることで粗さが求められる点について述べている。また、透明レプリカの素材、その製作方法、測定装置の概要、および測定方法について説明している。

第3章では、透過像から表面粗さが算出できることを第2章で述べており、これの有効性を確認するために、4つの透過像パターンを用いて検証している。4つの分類とは、散乱光になる粗さ性状ではポイント形状パターン、円形状パターン、および楕円形状パターン、回折光になる粗さ性状では回折スポットパターンである。4つの表面粗さは、比較用表面粗さ標準片を用いて、顕微鏡写真、触針式表面粗さ測定機による粗さ曲線、透過像写真、および透過像の輝度分布をそれぞれ現し、各パターンの特徴を示している。散乱光による透過像の濃度分布の面積による回転半径と表面粗さの山高さの大きさには、正の相関が認められており、特に円形状と楕円形状では実験式が求められる。回折光による透過像は、



凹凸の筋目方向に対して位相角度 90deg 方向に回折スポットパターンが一行に現れ、粗さ測定の際の輝度間隔と山高さ測定の際の輝度間隔から得た寸法で算出した粗さが、触針式表面粗さ測定機の粗さと同等であることを確認しており、これらについて述べている。

第 4 章では、スクエアエンドミルで加工された切削痕を対象として、光透過式レプリカによる表面粗さ測定の実用的な有効性を確認している。連続した円弧状になる切削痕の中心から外周の半径方向に向かって測定した 6 箇所の位置の結果と考察について述べている。この 6 箇所は、円弧状切削痕の稜線が半径方向に向かって平行から交差する稜線を対象としている。そのため稜線の交差角度に応じた位相角度 90deg の所に、1 列または交差した回折スポットパターンの透過像が現れることを示している。6 箇所において、それぞれ顕微鏡写真、透過像写真、触針式表面測定機による粗さ曲線、および測定値と算出値を求めて比較している。各箇所の粗さ算出値は触針式表面粗さ  $Ra$  と同等であることが分かり、さらには交差する稜線の透過像からの角度は顕微鏡写真の角度と一致することも示しており、その原理も模式図で説明している。光透過式レプリカは、円弧状が連続した切削痕の表面粗さと同時にその稜線の方法が測定できることを示している。

第 5 章では、透明レプリカ素材の要件は、被測定物表面性状が正確に転写でき、歪がなく、透明度が高く、および容易に製作ができる点である。第 3 章および第 4 章で用いた素材は、透明液状シリコーンゴムであるがレプリカ製作までには約 12 時間を必要としている。これに対して入手し易い素材に、透明ホットメルト、透明粘土、および透明ビニールテープの 3 種類を用いている。第 3 章の比較用表面粗さ標準片と同じ 4 つの分類に対するレプリカ透過像の精度と製作の良し悪し度合いから素材の適合性を検討している。透明粘土と透明ビニールテープでは、転写部分が歪んだり変形したりする。透明ホットメルトの素材は、加熱させて流動化した状態で被測定物表面に押し付けた後には、数十秒で硬化する。被測定物が温度の影響を受ける材質の場合には使用の制限を受ける。4 つに分類された加工面すべてにおいて、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトは転写精度が優れていたレプリカ素材であることを示している。

最後に、第 6 章では、本研究で提案した光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定に関する研究の結果をまとめ、本提案を用いた測定方法の有効性と妥当性について、本論文で得られた成果から述べ、これらを総括している。

## 1.4 論文の記号, 単位, 名称, および記号の説明

表 1.13 に論文の記号, 単位, 名称, および記号の説明を示す.

表 1.13 論文の記号, 単位, 名称, および記号説明

記号	単位	名称	記号解説
$Ra$	$\mu\text{m}$	算術平均粗さ	粗さ曲線からその平均線の方向に基準長さだけを抜き取り, 粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したとき $Ra = \frac{1}{l} \int_0^l  f(x)  dx$ によって求められる値.
$Rz$	$\mu\text{m}$	最大高さ	粗さ曲線からその平均線の方向に傷とみなされるような並はずれて高い山及び低い谷がない部分から, 基準長さだけ抜き取り $Rz = Rp + Rv$ によって求められる値.
$Rp$	$\mu\text{m}$	最大山高さ	粗さ曲線の平均線から並はずれて高い山の数値.
$Rv$	$\mu\text{m}$	最大谷深さ	粗さ曲線の平均線から並はずれて低い谷の数値.
$Yp$	$\mu\text{m}$	山頂の標高	粗さ曲線の平均線から山頂の標高の数値.
$Yv$	$\mu\text{m}$	谷底の標高	粗さ曲線の平均線から谷底の標高の数値.
$\lambda_s$	mm	輪郭曲線カットオフ値	輪郭曲線に対し, 断面曲線を得るための低域フィルタのカットオフ値.
$\lambda_c$	mm	粗さ曲線カットオフ値	断面曲線に対し, 粗さ曲線を得るための高域フィルタのカットオフ値.
$\lambda_f$	mm	うねり曲線カットオフ値	粗さ曲線に対し, うねり曲を得るために長波長成分を遮断するためのカットオフ値.
$Rz_{JIS}$	$\mu\text{m}$	十点平均粗さ	粗さ曲線からその平均線の方向に, 最高の山頂 $Rp$ から高い順に 5 番目までの山高さの平均と最深の谷底 $Rv$ から深い順に 5 番目までの谷深さを基準長さだけ抜き取り $Rz_{JIS} = \frac{ Rp_1 + Rp_2 + Rp_3 + Rp_4 + Rp_5  +  Rv_1 + Rv_2 + Rv_3 + Rv_4 + Rv_5 }{5}$ によって求められる値.
$P$	mm	三角山の谷の間	光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法の回折光を利用した表面粗さの測定原理における, 三角山のブレード面の模式図の三角山の谷の間の距離.
$R_r$	mm ( $\mu\text{m}$ )	頂と谷の高さ	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_r$ 算出モデルの, によって求められる値で, 光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法の回折光を利用した表面粗さの最大高さを示す.
$S_\mu$	mm ( $\mu\text{m}$ )	回折スポット 0 次間距離	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_r$ 算出モデルの, 連続したブレード回折格子によりスクリーンに映し出される, 回折スポット 0 次間距離の 1/2 を示す.

表 1.13 の続き

記号	単位	名称	記号解説
$S_p$	mm ( $\mu\text{m}$ )	回折スポット ±1次と0次間距離	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_r$ 算出モデルの、連続したブレード回折格子によりスクリーンに映し出される、回折スポット±1次と0次間距離を示す。
$L$	mm	スクリーン距離	転写した透明レプリカ表面から、スクリーンまでの距離を示す。
$\alpha$	deg	入射角度	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_r$ 算出モデルでは、光透過式レプリカの内部から、大気境界線に侵入する角度を示す。
$\beta$	deg	出射角度	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_r$ 算出モデルでは、光透過式レプリカの内部から、大気境界線へ出射角度する角度を示す。
$n_r$	—	透明レプリカの 屈折率	光を透過する物質から、大気に出る際の屈折率を表し、透明液状シリコーンゴムの場合、成分構成から約 1.40 の値を得る。
$n_a$	—	大気の屈折率	光を透過する物質から、大気に出る際の屈折率を表し、約 1.00 の値を得る。
$D$	mm	スリット直径	レーザ光源の直径をスリットにより、寸法制御した値を示す。本研究では、0.5mm となっている。
$\lambda$	$\mu\text{m}$	レーザ光の波長	レーザ光の波長を示し、本研究では、635 $\mu\text{m}$ (赤色) となっている。
$A$	$\text{mm}^2$	透過像の面積	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデルの、散乱光を利用した表面粗さの測定原理での透過像の面積を示す。
$L_c$	mm	透過像の 特徴的な長さ	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデルの、散乱光を利用した表面粗さの測定原理での透過像の特徴的な長さを示す。
$N$	—	フラクタル次元 に関連する、構 成要素の個数	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデル、散乱光を利用した表面粗さの測定原理でのフラクタル次元に関連する、構成要素の個数を示す。
$r_i$	—	フラクタル次元 に関連する、構 成要素の位置	光透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデル、散乱光を利用した表面粗さの測定原理でのフラクタル次元に関連する、構成要素の位置を示す。

表 1.13 の続き

記号	単位	名称	記号解説
$R_g$	mm	回転半径	透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデル, 散乱光を利用した表面粗さの測定原理での $R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2}$ によって, 求められる回転半径.
$D_r$	—	フラクタル次元	透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデル, 散乱光を利用した表面粗さの測定原理での回転半径 $R_g$ に含まれるパターンの構成要素のフラクタル次元数.
$L_a$	mm		散乱光を利用した楕円形パターン表面粗さにおける, 楕円形状の長径 $L_a$ .
$L_b$	mm		散乱光を利用した楕円形パターン表面粗さにおける, 楕円形状の長径 $L_b$ .
$R_{rab}$	mm ( $\mu\text{m}$ )	表面粗さ	透過式レプリカ法による表面粗さ $R_{ra}$ および $R_{rb}$ 算出モデル, 散乱光を利用した表面粗さ.

## 参考文献

- 1) 渡辺 健志, 後藤 隆司, 神 雅彦, “ダイヤモンド焼結体エンドミルの製作および超硬合金金型の精密切削法に関する研究”, 砥粒加工学会, Vol.58, No.8(2014), pp.520-524.
- 2) 吉田 一郎, “表面粗さ-その測定方法と規格に関して-”, 精密工学会, Vol.78, No.4(2012), pp. 301-304.
- 3) 吉田 一郎, 岡崎 祐一, 加藤 教之, 田中 信章, 小林 好行, 宮本 紘三, “表面粗さ用の標準片の製作と評価”, 精密工学会, E66, (2010), pp. 1447-1449.
- 4) 副島 辰夫, “表面粗さ測定法の比較に関する研究(第2報)”, 佐賀県工業技術センター研究報告, (1996), pp.99-103.
- 5) 直井 一也, 赤津 利雄, 佐藤 浩志, 黒澤 富蔵, “触針式表面粗さ測定機を用いた段差測定における不確かさ評価”, 精密工学会, Vol.68, No.11(2002), pp. 301-304.
- 6) Yang Chunlan, Pu Zhaobang and Zhao Hui, “Diffraction Analysis and Evaluation of a Focus-error Detection Scheme for an Optical Profilometer”, Proc. SPIE 4221 (2000) 180.
- 7) R. Brodmann, and W. Smilga, “In-process Optical Metrology for Precision Machining”, Proc. SPIE 802 (1987) 165.
- 8) 内田 真之介, 佐藤 壽芳, 大堀 真敬, “光切断法による二次元表面粗さ計測に関する研究”, 日本機械学会, Vol.46, No.407(1980), pp. 711-780.
- 9) 池田 直人, 小林 義和, 白井 健二, 戸澤 幸一, “エンドミル加工による表面テクスチャの平面度評価に関する研究”, 精密工学会, B66, (2008), pp. 155-156.
- 10) 栗田 正則, 佐藤 誠, 中島 一馬, “レーザによる表面粗さの迅速な測定法”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.56, No.532(1990), pp.2588-2592.
- 11) 深谷 次助, 佐々木 彰, 岩田 太, 田口 敬之, 橋本 保幸, 山中 崇志慶, “シングルスリットを用いた鏡面反射率による表面粗さ測定の研究”, 精密工学会, Vol.75, No.11(2009), pp.1305-1309.
- 12) 栗田 正則, 鄧 智聡, “散乱光を用いた直交二方向の光学的表面粗さ測定法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63-605(1997-1), pp.254-261.
- 13) 小田 功, 佐々木 拓哉, “縞パターン投影による透明体および半透明体の表面性状の評価法”, 精密工学会, Vol.76, 5(2010), pp.529-534.

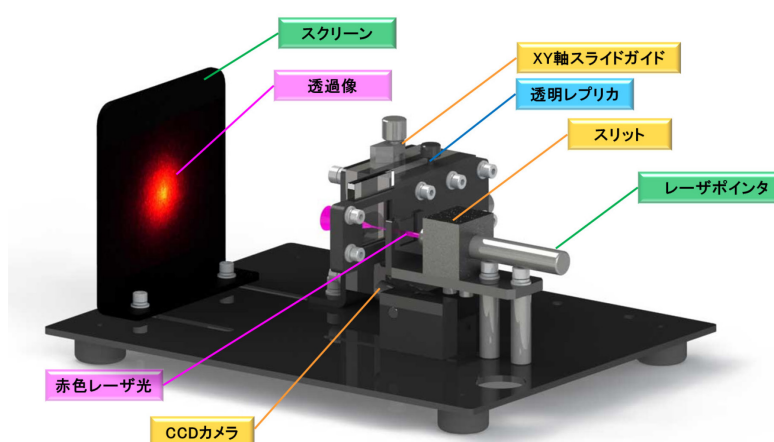
- 14) 秋山 伸幸, 吉田 昌弘, 栗田 正則, 鄧 智聡, “鋳物表面粗さ光学式測定における測定精度向上法”, 精密工学会誌, Vol.65, No.12(1999), pp.1756-1760.
- 15) 日本鉄鋼協会特定基礎研究会, “耐熱鋼の高温クリープ及びクリープ疲労損傷材のレプリカ法による非破壊的損傷量/寿命評価”, 日本鉄鋼協会(1991).
- 16) 長谷川 幸平, “表面粗さ計測方法”, 公開特許 JP1988-191010(1988).
- 17) 中山 誠二, “植物考古学と日本の農耕の起源”, 同成社(2011).
- 18) 横田 理, “加工表面評価装置”, 特許 JP4845003(2011), (平成 23 年 10 月 21 日).
- 19) 横田 理, 谷田部 幸太郎, 長尾 光雄, 神馬 洋司, 齋藤 明德, “透明レプリカ法による加工表面の粗さ測定方法の提案”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 787, pp.842-851(2011).
- 20) Kotaro Yatabe, Osamu Yokota, Akinori Saito, Mitsuo Nagao and Yoji Jimba, “The Proposal of Measuring Method of Machined Surface Roughness Using Transparent Replica”, 5th Pacific-Asia Conference on Mechanical Engineering, A5-3-0056, (2012).
- 21) JIS B0601, “製品の幾何特性使用(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”, 日本規格協会(2013).
- 22) JIS B 0659-1, “製品の幾何特性仕様 (GPS)－表面性状:輪郭曲線方式; 附属書 1 (参考) 比較用表面粗さ標準片”, 日本規格協会(2002).
- 23) JIS B 0651, “製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状:輪郭曲線方式－触針式表面粗さ測定機の特性”, 日本規格協会(2001).
- 24) JIS B 0681-6, “製品の幾何特性仕様 (GPS)－表面性状:三次元－第6部:表面性状測定方法の分類”, 日本規格協会(2014).
- 25) 関根 俊彰, 宇野 彰一, 島崎 景正, 信本 康男, “接触式・非接触式粗さ測定結果の相関性について”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 第6巻(2008).
- 26) “機械測定法”, 独立行政法人 雇用・能力開発機構, (2006), pp.130-146.
- 27) 福地 哲生, 布施 則一, 水野 麻弥, 福永 香, “テラヘルツ波を用いた誘電体の表面粗さ測定”, 電気学会論文誌, A 135 (2015), pp.450-455.
- 28) 関根 俊彰, 宇野 彰一, 島崎 景正, 信本 康男, “接触式・非接触式粗さ測定結果の相関性について”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 第6巻 (2008).
- 29) 原 精一郎, 尾形 佳昭, 笹島 和幸, 吉田 一朗, “電気伝導を利用した表面粗さ計触針先端の挙動の観察”, 精密工学会, 2011A(0) (2011), pp.902-903.

- 30) 吉田 一郎, 塚田 忠夫, “粗さプロフィール補正による触針先端半径に起因する不確かさの解析”, 精密工学会, 2003A(0) (2003), pp.113.
- 31) 例えば, Taylor Hobson 社: フォームタリサーフ i-シリーズ.  
<http://www.taylor-hobson.jp/products/13/107.html>
- 32) 仙田 康浩, 今橋 信行, 嶋村 修二, Blomqvist Janne, Nieminen Risto M, “シミュレーションによる原子間力顕微鏡のエネルギー減衰の研究”, 日本物理学会, 68(2-4) (2013), pp.800.
- 33) 常見 英加, “デュアルプローブ原子間力顕微鏡の開発及びナノスケール電気特性評価への応用”, 京都大学, 工博第 3416 号, pp.28-37.
- 34) 例えば, オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社: Cypher (サイファ) AFM.  
<http://www.asylumtec.co.jp/>
- 35) 例えば, 株式会社日立ハイテクサイエンス: 走査型白色干渉顕微鏡 VS1000 シリーズ. [http://www.hitachi-hightech.com/hhs/product\\_detail/?pn=em-vs1000](http://www.hitachi-hightech.com/hhs/product_detail/?pn=em-vs1000)
- 36) 藤本洋久, 根本学, “レーザ顕微鏡/透過波面測定干渉計”, 精密工学会, Vol.75 (2009), pp.119-120.
- 37) 例えば, 株式会社キーエンス: 16bit 形状解析レーザ顕微鏡 コントローラ部 VK-X250 測定部 VK-X260.  
<http://www.keyence.co.jp/microscope/special/3dprofiler/vkx/?motive=TOP>
- 38) 例えば, 日本金属電鍍株式会社: 比較用表面粗さ標準片.

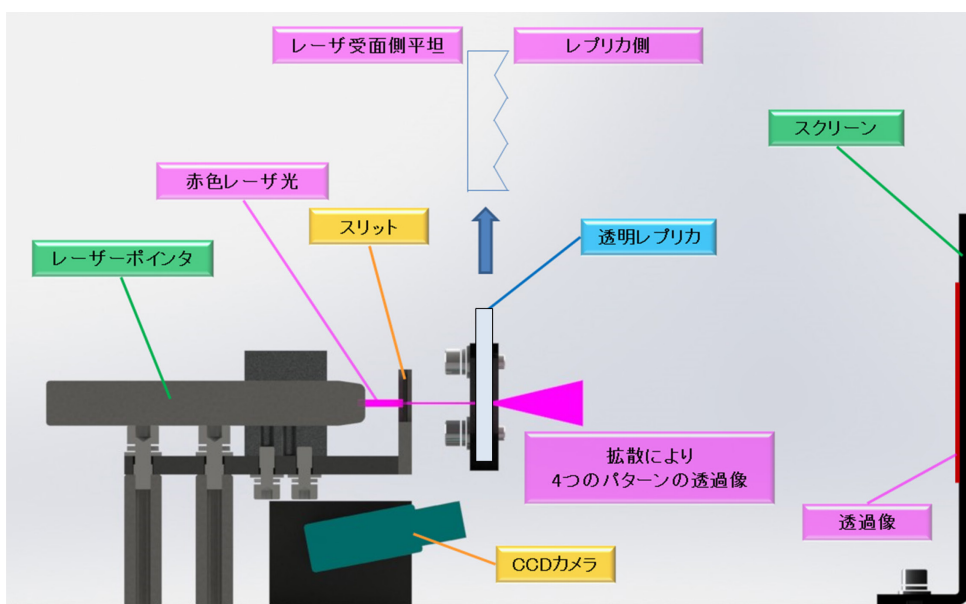
## 第2章 透明レプリカにおける測定原理の提案

### 2.1 表面粗さ測定の概要

光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定用に試作した，測定装置の主な構成概略を図 2.1 に示す．透明レプリカは，赤色レーザ光源と透過像を映し出すスクリーンとの間に



(a) 測定装置の概要構成図（測定時は外枠で覆う）



(b) 入射光と透過像の概略

図 2.1 試作した光透過式レプリカ測定装置の概略



設置されている XY 軸スライドガイドホルダに収められ、設置による変形や歪等はなく、スクリーン側は転写した反映面、その反対側の面は平坦で入射光側である。入射するレーザー光の直径は、レーザーポインタ<sup>1)</sup>からの光源を円形スリットにて任意の大きさに絞ることができ、XY 軸スライドガイドによりレプリカには任意の位置に照射ができる。入射光側面とスクリーン面は平行位置にあり、レーザー光は垂直に入射光側平坦面に照射される。スクリーン上の透過像は、CCD カメラ<sup>2)</sup>で観察しながら撮影した後、画像処理等で寸法を計測できる。レプリカ反映面からスクリーンまでの距離は、フラウンホーファ回折領域<sup>3)</sup>～<sup>6)</sup>に設置される。加工面の凹凸をレプリカした反映面からは特徴的な透過像が現れ、図 2.2 に示す 4 つのパターンに分類される。(a)、(b)、および(c)の透過像は散乱光、(d)は回折光による透過像である。

これら透過像のパターンから表面粗さに相当する値を求めている。次節には、その測定原理を述べる。

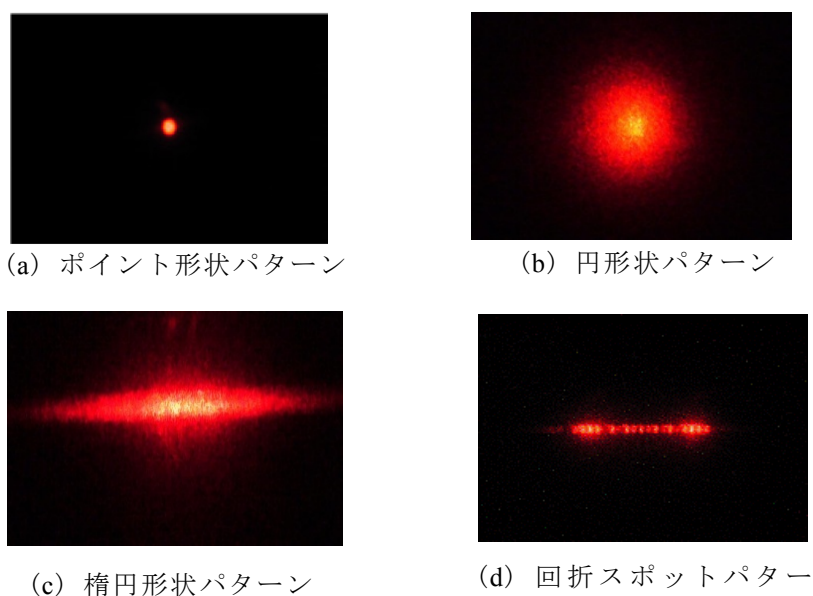


図 2.2 レプリカ反映面から射出した透過像の分類

## 2.2 測定原理

前節で示した図 2.2 の 4 つの透過像パターンには，散乱光による (a)，(b)，および (c) と回折光による (d) に分類される．ここでは，散乱光と回折光により射出された透過像から表面粗さを求める測定方法について述べる．先に，レプリカ反映面の凹凸のピッチと高低差が比較的均一な三角山のブレード面から射出される回折光からの測定方法を示し，次にこの三角山ブレード面の凹凸が曲面でピッチと高低差もランダムな場合に射出される散乱光からの測定方法について示す．

### 2.2.1 回折光を利用した表面粗さの測定

一般にスリットに空いた開口部に入射したレーザー光の回折像および回折の輝度はスクリーンの位置により変化する．開口部近くの像は，フルネル回折と言われてほぼ開口部の形をしており，開口部から離れるに従い像は徐々に広がり，フラウンホーファ回折と言われる格子状の点状の像が現れる．図 2.3 示すように提案する本測定方法の光透過式レプリカでも，このフラウンホーファ回折領域<sup>3)~6)</sup>に現れる点状の回折像が得られる距離  $L$  にスクリーンが配置される．

回折スポットパターンの場合の光透過式レプリカ法の表面粗さおよびピッチ  $P$  の算出方法について述べる．図 2.3 には採取したレプリカ表面の三角山が連続したブレード回折格子<sup>7)~14)</sup>ならびに関連する記号をモデル的に示したものである．三角山のブレード面からの回折については，三角山のブレード面における  $m$  次の回折モデル図 2.4 で示す．

三角山の谷の間がピッチ  $P$ ，頂と谷の高さを  $R_r$ ，三角山の角度  $\alpha$ ，透明レプリカ表面からスクリーンまでの距離  $L$  ( $R_r \ll L$ ) とする．はじめに，1 つの三角山で考える．透明レプリカ背面から三角山斜面に入射角  $\alpha$  で入射したレーザー光は，2 つの屈折面（ブレード面）から屈折角  $\beta$  で出射し，距離  $2S_\mu$  だけ離れて屈折スポットとしてスクリーン上に出現する． $2S_\mu$  は  $L$  が一定の場合には， $R_r$  の高さに応じた正の相関になるため，この原理を用いてレプリカの最大高さ粗さ  $R_r$  は算出できる．

また，周期的に並んだ図 2.3 の三角山からの回折により，距離  $2S_\mu$  離れた 2 つの屈折スポット ( $m=0$  次 ( $m$  は波長の次数)) を中心にして，それぞれ対称的に  $m=\pm 1$  次， $m=\pm 2$  次，…とスポットが現れる．この  $m=\pm 1$  次の回折スポット距離  $S_p$  は，ピッチ  $P$  の大きさに対して反比例の関係にある．ピッチ  $P$  は， $m=\pm 1$  次の回折スポット ( $m=0$  次) とのスポ

ット中心間距離  $S_p$  を測定して算出できる。

光透過式レプリカ法による表面粗さ  $R_r$  は最大高さ粗さを表す。図 2.3 のレーザー光入射側の三角山を参照して、 $R_r$  は式 (2.1) により与えられ、これを  $R_r$  で現したものが式 (2.2) である。

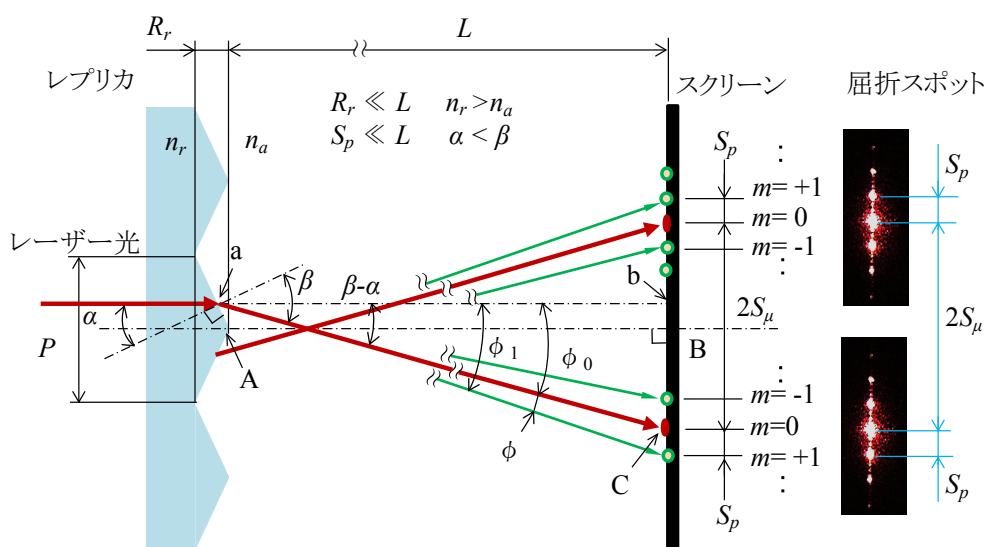


図 2.3 光透過式レプリカ法による表面の最大高さ粗さ  $R_r$  算出モデル

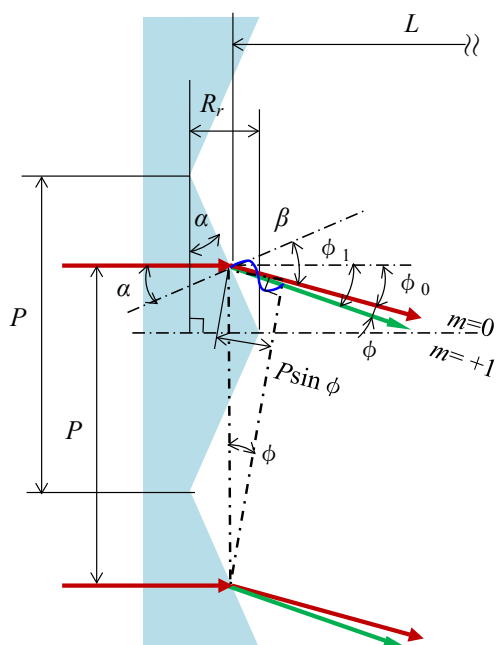


図 2.4 三角山のブレード面における  $m$  次の回折モデル

$$\tan \alpha = \frac{R_r}{P/2} = 2R_r/P \quad (2.1)$$

$$R_r = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \tan \alpha \quad (2.2)$$

ここで、入射角  $\tan \alpha$  とピッチ  $P$  を図 2.4 により検討する。

図 2.4 のレプリカ背面から平行なレーザー光（図中赤線）が三角山のブレードド面に入射角  $\alpha$  で入射し、これが境界面から屈折角  $\beta$  で出射して、図中右側のスクリーン下方に屈折スポットとして現れる。他方の三角山のブレードド面からも同様に屈折角  $\beta$  で出射して、図中のスクリーン上方に屈折スポットとして現れる。これらが、 $2S_\mu$  隔てた  $m=0$  次の屈折スポットである。このとき測定する寸法は図 2.3 の  $L$  と  $2S_\mu$  である。特に  $2S_\mu$  の誤差を最少にするためには、左側からのレーザー光が入射する軸線とスクリーンとが垂直に当たる点までの距離  $L$  として、その点から  $m=0$  次間の  $2S_\mu$  を測定する。

この図において、 $L$ 、 $2S_\mu$  と  $\alpha$ 、 $\beta$  の関係を考える。入射するレーザー光の軸がブレードド面からスクリーンへ垂直に延長した線と屈折角  $\beta$  で出射してスクリーンへ出現したスポットを C ( $m=0$  次) とする。この両線による角度  $\beta - \alpha$  により三角形 abc の関係が現れ、レプリカとスクリーンとの位置条件が  $R_r \ll L$  のため、近似的にこれを三角形 ABC とおける。この関係から式 (2.3) が得られ、 $\beta - \alpha$  に直すと式 (2.4) になる。

$$\tan(\beta - \alpha) \cong \frac{S_\mu}{L} \quad (2.3)$$

$$(\beta - \alpha) \cong \tan^{-1} \left( \frac{S_\mu}{L} \right) = (t) \quad (2.4)$$

ここで  $\alpha < \beta$  について、図 2.5 およびスネルの法則<sup>5), 6)</sup> の式 (2.5) より、媒質の屈折率  $n_r > n_a$  のため、 $\alpha < \beta$  の関係になる。また、 $\sin \beta$  はスネルの法則から式 (2.6) を導き、 $\beta$  について解き式 (2.7) になる。

$$\sin \beta = \frac{n_r}{n_a} \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{n_r}{n_a} \cdot \sin \alpha \right) \quad (2.6)$$

式 (2.2) の  $\tan \alpha$  を式 (2.3) と式 (2.4) から, 式 (2.7) を導く.

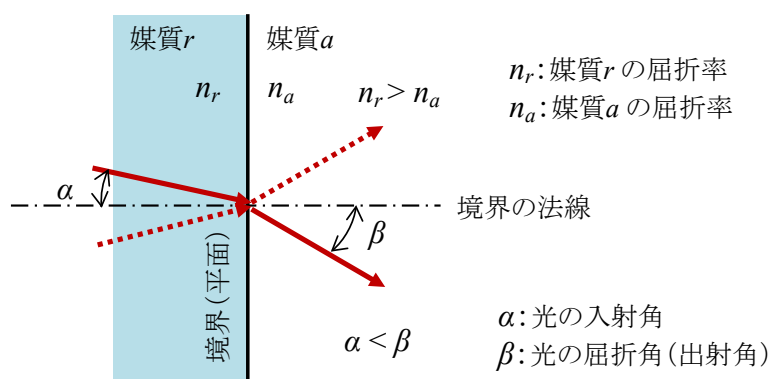


図 2.5 スネルの法則モデル

$$\tan \alpha \cong \frac{\sin(t)}{\frac{n_r}{n_a} - \cos(t)} \quad (2.7)$$

次に, 式 (2.2) の  $P$  を  $S_p$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , およびレーザ光の波長  $\lambda$  を用いて, 図 2.3 と図 2.4 から式 (2.12) が導ける.

入射角  $\alpha$  とそこからの屈折角  $\beta$  により射出した屈折光  $m=0$  次とその回折光  $m=+1$  次があり, これが距離  $L$  離れたスクリーンに図 2.3 のような  $m=0$  次と  $m=+1$  次の回折スポットとして現れる. このスポットの中心間距離を  $S_p$  とする. これらの出射角度をそれぞれ図 2.5 のように

$$\phi_0 = \beta - \alpha, \quad \phi_1, \quad \phi = \phi_1 - \phi_0 \quad (2.8)$$

と与えれば, このときの光路差  $m\lambda$  は, 図中の角度  $\phi$  とした三角形から式 (2.9) が知られている.

$$P \sin \phi = m\lambda \quad (2.9)$$

図 2.4 では、 $\phi$  は  $m=+1$  次と  $m=0$  次との差のため  $m=1$  となり、式 (2.9) は式 (2.8) から式 (2.10) となる。

$$P(\sin \phi_1 - \sin \phi_0) = P(\sin \phi_1 - \sin(\beta - \alpha)) = \lambda \quad (2.10)$$

ここで、 $S_p \ll L$  のため図 2.3 より、 $\phi$  は微小なため式 (2.10) の  $\sin$  は近似的に式 (2.11)、式 (2.12) で表せる。

$$P \left( \frac{S_\mu + S_p}{L} - \frac{S_\mu}{L} \right) \cong \lambda \quad (2.11)$$

$$P \cong \lambda \cdot \left( \frac{L}{S_p} \right) \quad (2.12)$$

よって、レプリカの表面の最大高さ粗さ  $R_r$  は、式 (2.2)、式 (2.7)、および式 (2.12) より、次の式 (2.13) を算出できる。

$$\begin{aligned} R_r &= \frac{1}{2} \cdot P \cdot \tan \alpha \\ &\cong \frac{1}{2} \cdot \lambda \left( \frac{L}{S_p} \right) \cdot \frac{\sin \left( \arctan \frac{S_\mu}{L} \right)}{\frac{n_r}{n_a} - \cos \left( \arctan \frac{S_\mu}{L} \right)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

### 2.2.2 散乱光を利用した表面粗さの測定

レプリカ反映面の凹凸が曲面で高低とピッチがランダムな場合には、入射したレーザ光は反映面から射出され光線は回折光のようにはならず、広がりながらスクリーンに射出像として映し出される散乱光になる。その面積や形は距離  $L$ 、反映面の形状や粗さ  $R_r$  の大きさ、および方向性により異なる。その射出像の広がりを、図 2.6 に示すような 2 次元平面

上の閉曲線の周長さ  $L$  で囲まれた図形をパターンと呼びその面積  $A$  は、代表する長さ  $L_c$  との間に式 (2.14) の関係<sup>15)</sup>がある。

$$A \propto L_c^2 \quad (2.14)$$

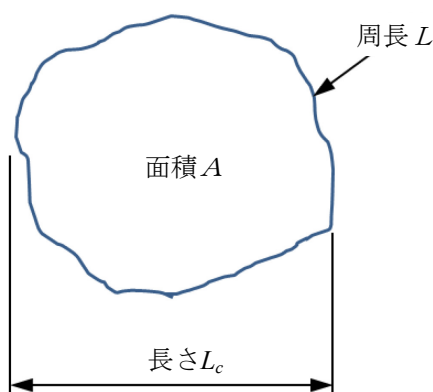


図 2.6 2次元平面上の閉曲線モデル

一つのパターンが近似相似形で拡大縮小する場合や、同じ図形要素から成る多くのパターンが共存している場合においては、フラクタル次元に関連する回転半径法を用いることにより、それらのパターンの平均的な広がり度合いを算出することができる。  $N$  個の構成要素からなるパターンについて、 $i$  番目の構成要素の位置を  $r_i (i=1, 2, \dots, N)$  とすると、このパターンでスケーリングされる特徴的な長さ、すなわち回転半径  $R_g$  は

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \quad (2.15)$$

ただし、 $\bar{r}$  はパターンの重心とし、式 (2.16) に示される。

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (2.16)$$

ここで、パターンの重心を原点とすると、 $\bar{r} = 0$  となる。

回転半径  $R_g$  に含まれるパターンの構成要素総数  $N$  のフラクタル次元  $D_r$  は式 (2.17) の

関係が成立する.

$$N \cong R_g^{D_r} \quad (2.17)$$

そこで, スクリーン上に写し出される射出像輝点の総和は面積  $A = \pi R_g^2$  になるので, フラクタル次元は  $D_r=2$  となる. したがって, 求める回転半径  $R_g$  は式 (2.17) より式 (2.18) となる.

$$A \cong \pi R_g^{D_r}$$

$$R_g = \sqrt{A/\pi} \quad (2.18)$$

一方, 散乱分布が長径  $L_a$ , 短径  $L_b$  をもつ楕円形状の場合には, 幾何平均としての式 (2.19) の回転半径  $R_g$  で示せる.

$$R_g = \sqrt{L_a \cdot L_b} \quad (2.19)$$

このように, スクリーン上の射出像が円形でも楕円形でも回転半径  $R_g$  として表される. 表面粗さが大きくなるほど, 映し出された射出像の濃淡は変わり, その散乱分布の裾野も広がるので, 式 (2.18), あるいは式 (2.19) の回転半径  $R_g$  と透過式レプリカによる散乱光を利用した表面粗さ  $R_{rab}$  との関係を式 (2.20) のように示すことができる. 式 (2.20) において, 円形状の関係では  $R_{ra}$ , 楕円形状の関係では  $R_{rb}$  のように表す.

$$R_{rab} = a \cdot R_g^2 + b \cdot R_g + c \quad (2.20)$$

ここで, 定数  $a$ ,  $b$ , および  $c$  は, 実験式より得られる.



## 2.3 レプリカの作製

### 2.3.1 レプリカの素材

光透過式レプリカを採取する材料に求められる要件は，加工面の表面にできた凹凸を

表 2.1 光透過式レプリカに用いた素材の仕様<sup>1)6)</sup>

項目	内容
製造元	東レ・ダウコーニング株式会社
品名	Dow Corning®CY52-205
種別	2液エラストマー
用途	プリント基板保護用ポッティング材
特長	非接着
基本的な特性	
混合比	100 : 10
外観	透明
粘度 25℃ (mPa・s) *1)	1600
ポットライフ[25℃]*2)	3.5 hr
標準硬化条件	100 °C/30min
透過率 (%)	97
屈折率 $n_r$ *3)	1.41
硬化後の物性特性	
密度[25℃] (g/cm <sup>3</sup> )	1.02
硬さ[JIS Type A]	43
針入硬度[JIS K 2220] (mm/10)	NA
引張強さ (MPa)	7.3
伸び (%)	160
硬化後の電気特性	
絶縁破壊強さ (kV/mm)	31
体積抵抗率 (Ω・cm)	$2 \times 10^{15}$
誘電率[1MHz]	3.2
誘電正接[1MHz]	$1 \times 10^{-3}$

\*1) 2液品は混合後の粘度

\*2) 常温にて2液混合後の粘度が2倍になるまでの時間

\*3) この素材で製作して24時間後の測定値

そのまま反転でき、透明度が高く、内部に気泡や歪が残らず、硬化後も反転した寸法情報が劣化せず、入手や製作が容易でなければならない。測定に用いたレプリカ素材は、表 2.1 に示す透明液状シリコンゴムである。

この素材は、光通信システムの伝送媒体である光ファイバを機械的、光学的に保護し、特性を向上させる。特に光ファイバの歪みによって引き起こされる伝送損失を防ぐためのクッション材として、また、水分や傷に敏感なファイバ表面を保護しながら雑音を除去するためのコーティング材として利用されているものである。

### 2.3.2 レプリカの作製方法

被測定物が比較的小さく小型の場合には、図 2.7(a)に示す透明液状シリコンゴムを流し込むためのアルミ合金 A5052P の専用トレイを製作し、これに被測定物や比較用表面粗さ標準片を上向きにセットした状態が(b)である。大型の部品表面からレプリカを採取する場合には、その部位を洗浄し、枠を載せる。

透明レプリカの製作は、流動性が高い透明液状シリコンゴムと硬化剤の 2 液を混合させるため、レプリカの厚さは均一に製作できる。次に、正確に加工面の表面性状を転写するためには、混入している気泡を超音波振動により、約 15 分程度与えて脱泡を行う。約 12 時間常温で硬化させてレプリカは完成する。図 2.8(a)に比較用表面粗さ標準片とそれにより作製された、レプリカの一例を図 2.8(b)示す。また、研削加工面（最大高さ粗さ  $R_z = 3.2\mu\text{m}$ ）とそのレプリカの反映面の写真を図 2.8(c)および(d)に示す。図 2.8(c)の加工面には、規則正しい縦方向の研削痕が見られる。図 2.8(d)に示すレプリカ反映面の凹凸や形状は、図 2.8(c)の研削面のそれらとは左右対称の位置にある。

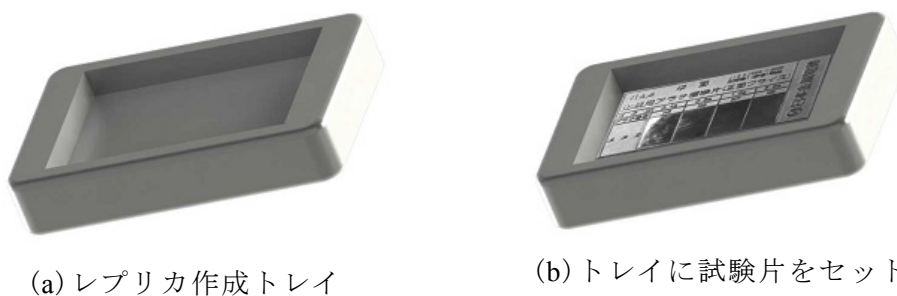


図 2.7 比較用表面粗さ標準片とレプリカ作製トレイ

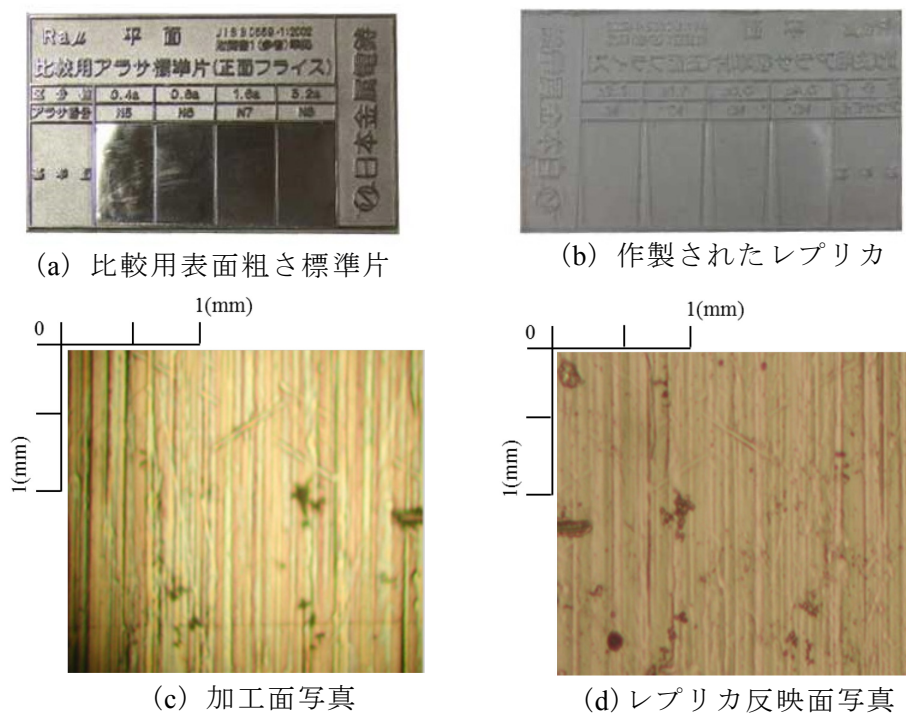


図 2.8 比較用表面粗さ標準片からのレプリカ作製された写真および転写精度確認用加工面とレプリカ反映面拡大写真

### 2.3.3 レプリカの表面粗さを比較対象とした比較用表面粗さ標準片

レプリカ作製に用いた日本金属電鍍株式会社製の比較用表面粗さ標準片<sup>17) 18)</sup>を表 2.2 に示す.

表 2.2 レプリカを製作した比較用表面粗さ標準片の種類

名 称	表面粗さ (μm)
(1) 比較用ラップ仕上面標準片	$Rz0.2, Rz0.4, Rz0.8$
(2) 比較用粗さ標準片-フライス用	$Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6, Ra3.2$
(3) 放電加工粗さ標準片	$Rz3.2, Rz6.3, Rz10, Rz12.5, Rz15, Rz18, Rz25, Rz35$
(4) 精密铸造面粗さ標準片	$Rz6.3, Rz12.5, Rz25, Rz35, Rz50, Rz70$
(5) 比較用粗さ標準片-形削用	$Ra1.6, Ra3.2, Ra6.3, Ra12.5$
(6) 比較用ペーパー手仕上面粗さ標準片	$Rz0.4, Rz0.8, Rz1.6, Rz3.2, Rz6.3$
(7) 比較用ヤスリ手仕上面粗さ標準片	$Rz3.2, Rz6.3, Rz12.5, Rz18, Rz25$
(8) 比較用粗さ標準片-正面フライス	$Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6, Ra3.2$
(9) 比較用粗さ標準片-研削用	$Ra0.2, Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6$

## 2.4 測定装置

### 2.4.1 光源の選択

光(可視光線)とは、電磁波<sup>1 9)</sup>～<sup>2 1)</sup>の中で人間の目で見える波長のことであり、JIS Z8120 の定義によれば、可視光線に相当する電磁波の波長は、おおよそ短波長側が 360 nm～400 nm、長波長側が 760 nm～830 nm である。可視光線より波長の短いものを紫外線、長いものを赤外線と呼ぶ。赤外線と紫外線を指して、不可視光線と呼ぶ場合もある。図 2.9 に波長による色の変化、表 2.3 に色の波長範囲を示す。測定には、赤色の半導体レーザー<sup>2 2)</sup>を使用している。

レプリカに照射するレーザーにはレーザー媒質(光の素)によるいくつかの分類があり、ここでは主な 4 つに分類し、表 2.4 に示す。

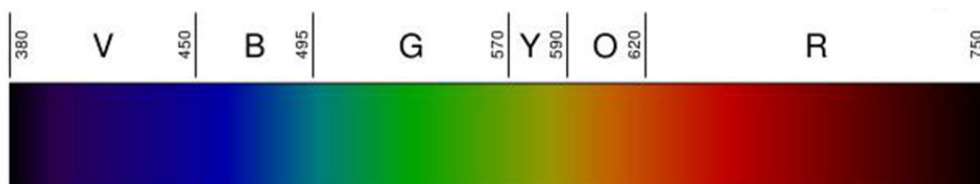


図 2.9 波長による色の変化

表 2.3 色の波長範囲

色	波長
紫	380～450nm
青	450～495nm
緑	495～570nm
黄	570～590nm
橙	590～620nm
赤	620～750nm

表 2.4 レーザ媒質による分類

半導体レーザー	<p>媒質が半導体である物は、固体レーザーとは区別して「半導体レーザー」あるいは「レーザーダイオード (LD)」と呼ばれている。</p> <p>低出力のレーザーに主に使用されており、レーザーポインタやパソコン内での CD・DVD の読み取りなど、安価で小型なため、いろいろな分野で多く使われている。</p>
固体レーザー	<p>媒質が固体であるものを「固体レーザー」といい、一般的には人工結晶が用いられ、代表的なものには</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クロムを添加したルビー結晶によるルビーレーザー</li> <li>・イットリウムを他の希土類元素で置換した種々の YAG レーザ</li> <li>・ガラスレーザー</li> </ul> <p>などがあり、固体レーザーの励起光源としてレーザーダイオードを用いたものを DPSS (ダイオード励起固体レーザー) という。</p>
ガスレーザー	<p>媒質がガス (気体) のものは「ガスレーザー」といい</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・炭酸ガスレーザー (赤外)</li> <li>・ヘリウムネオンレーザー (赤色)</li> <li>・アルゴンイオンレーザー (青色または緑色)</li> <li>・エキシマレーザー (紫外)</li> </ul> <p>などがある。</p>
液体レーザー	<p>媒質が液体のものは「液体レーザー」といい、色素レーザーの利点は使用する色素や共振器の調節によって発振波長を自由に、連続的に選択できることである。</p>

#### 2.4.2 測定装置の構成

図 2.10 には、データ処理 PC と外蓋を付けた全体の写真を示す。CCD カメラや設置したレプリカを XY 方向に移動するスライドガイド等の詳細写真を図 2.11 に示す。測定装置は、加工表面の状態を反映する反映面を有するレプリカに対し、レプリカ面とは反対の面にあたる平坦な背面から赤色の半導体レーザーを垂直に照射する光源、レプリカを透過した射出像を受光するスクリーン、スクリーンにおいて透過光の広がり範囲を撮影する CCD カメラより構成されている。なお、CCD カメラで撮影する際は、内部を暗室にする必要性から、取外し可能な外蓋が設置されている。CCD カメラの位置は固定、シャッタースピードと倍率はすべて同じ条件で撮影している。レプリカのホルダは、スクリーンに対し XY 軸に可動ができ、撮影部の電源は PC からの USB 電源から供給される。また、レーザー光源の照射

する光軸直径を 0.3mm から 1.2mm まで 0.1mm ごとに変えることにより，透過パターンの変化が計測できるように，スリットホルダを設けた．この測定では，照射する光軸直径がスリットの径を 0.5mm 一定として，計測している．以下に測定装置の構成要素を示す．

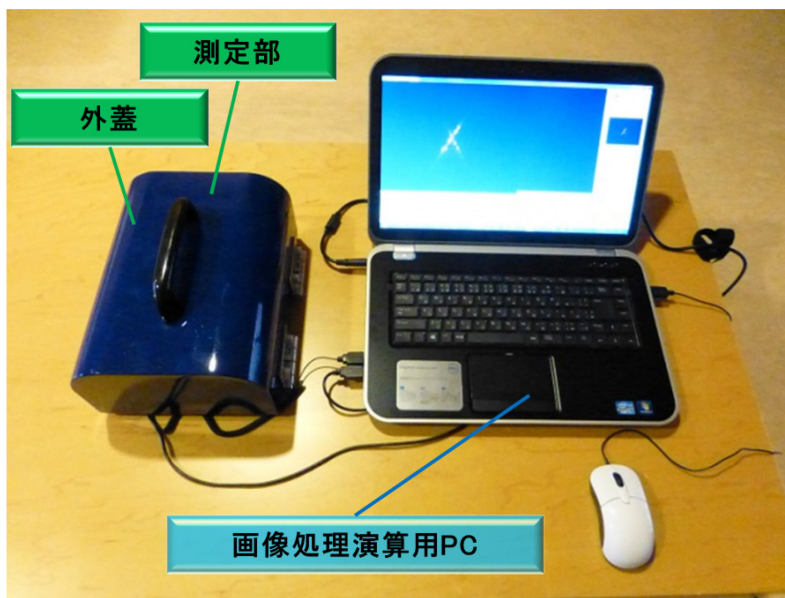


図 2.10 測定装置全体の写真

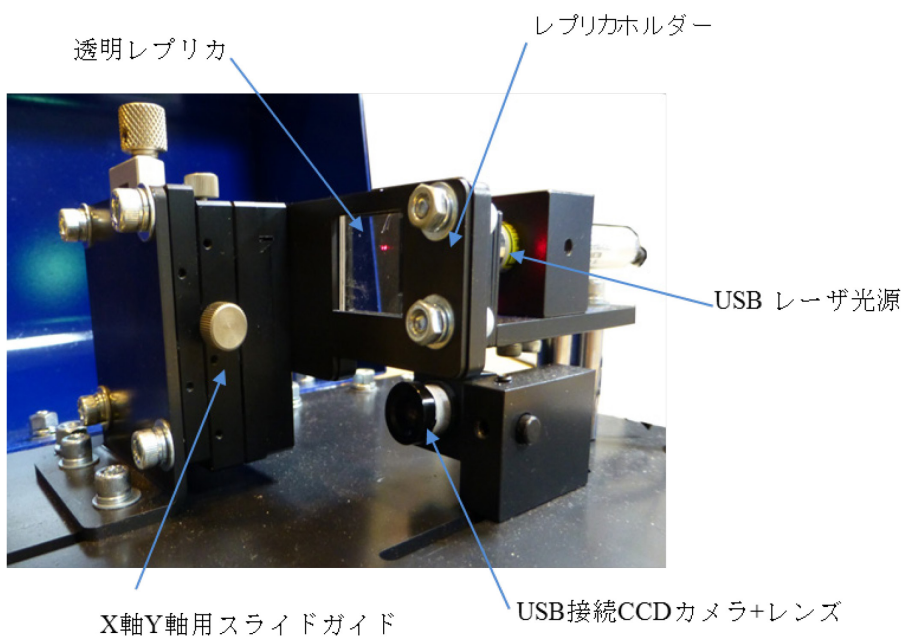


図 2.11 測定装置の撮影部

### (1) レーザ光源

用いた赤色レーザーポインタ<sup>2 2)</sup>で、仕様諸元は以下の通りである。

レーザー素子：可視光赤色半導体レーザー

レーザー出力：1mW 未満 (JIS 規格クラス 2 以下)

レーザー波長：635nm (赤色)

到達距離：約 100m ~ 120m (形状可視可能範囲 ビーム径：5m 先で 7mm)

電源：USB 端子 (DC5V)      USB ケーブル長さ：60cm

本体材質：アルミニウム／真鍮

本体サイズ：直径 12mm×80mm

本体重量：27g

### (2) 透明レプリカホルダ機構

図 2.11 に透明レプリカホルダ機構を示す。これはスクリーンに対し XY 軸の 2 軸で可動させ、透明レプリカの複数のポイントが計測可能にしている。本測定では、手動にて 5 点を計測している。XY 軸をステッピングモータで位置決めすることも可能であり、その仕様諸元<sup>2 3)</sup>を以下に示す。

相数：2

入力定格電圧：5V

基本ステップ角：0.9 度±5%

定格電流：1.0A／相

1 回転ステップ数：400

静止トルク：4.4Kgf・cm

絶縁抵抗：100MΩ (500VDC)

重量：0.34Kg

コイル抵抗：5.0±10%Ω/相

### (3) USB 電源 2 軸ステッピングコントローラ

透明レプリカホルダ機構部を自動計測が可能になるように X 軸，Y 軸で駆動させるステッピングモータ用ドライバ IC<sup>2 4)</sup>のステッピングコントローラの仕様諸元は以下のとおりである。

電源：USB バスパワー DC5V 約 350mA

制御モータ数：2 台 (同時制御)

制御出力：CW, CCW 出力 各モータドライバに対し、+5V, 4mA (ラインドライバ)

HOLD OFF 出力：+5V, 4mA (ラインドライバ)

出力周波数：1～5,000,000PPS

制御パルス数：±2,147,483,647 (32bit)

加減速レート：1000ms/1000PPS～0.016ms/1000PPS

加減速方法：一定速駆動

出力仕様：Pulse-Pulse (2 パルス) Pulse-Direction (1 パルス)

リミット SW 入力：各制御モータに対し CW-LS, CCW-LS, HP-LS 5V, 5mA

重量：約 350g

#### (4) 撮像スクリーン

スリットにより光源直径を制限されたレーザ光は，透明レプリカを透過することにより撮像スクリーンに透過像が映し出される．部品材料は，冷間圧延鋼板(SPCC)を用い光反射の起こりにくい超微粒子のグラファイトを主成分とした，耐水，耐油，耐熱性に優れた膜厚 2～3 $\mu\text{m}$  の黒染スプレ<sup>25)</sup> で被覆した．

#### (5) CCD カメラ

測定装置に取り付けた CCD カメラは，200 万画素で撮像している．この画素数が 1200 万画素になれば，図 2.12 に示すように，(a) の 3 階調が (b) の 6 階調以上となり，式 (2.13) から式 (2.16) の実験式を求める際の測定精度が向上し， $R_{rab}$  の算出値と最大高さ粗さ  $Rz$  との誤差は小さくなることが期待される．図中の 1 マスは 1pixel である．

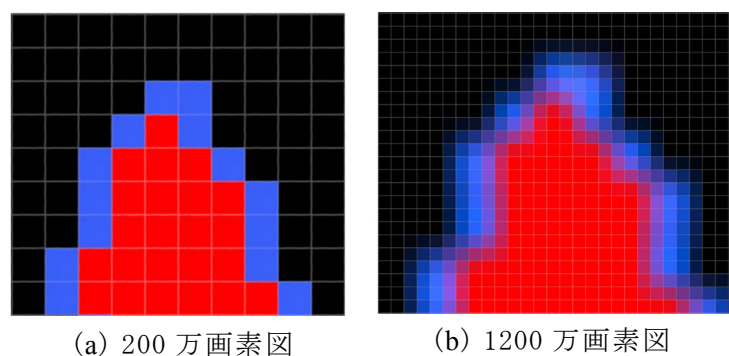


図 2.13 画素数による画像精度比較

#### (6) 筐体

本研究の測定装置の構成部品は，ほとんどが SPCC および SPHC により製作されている．



以下の強度を必要としないユニット(部品)を ABS 等の素材で製作することにより，測定部は軽量化に伴う可搬性が向上する．

- |            |             |
|------------|-------------|
| 1) 測定部ベース  | 4) レーザ光源ホルダ |
| 2) レプリカホルダ | 5) 測定部カバー   |
| 3) スクリーン   |             |

#### (7) 補足

これまで提案してきた自動計測装置としての概要と諸仕様を以下に要約する．

- 1) 撮影部の装置総重量は，部品の軽量化によりバッテリーを含め約 3kg 程度となる．
- 2) ノート PC の USB ポートは，CCD カメラ通信用，2 軸ステッピングコントローラ用の 2 ポートが必要である．
- 3) USB の仕様は，情報処理量から大差がないので 2.0，3.0 どちらでも可能である．
- 4) 撮影部の消費電力は，DC5V 5.0A となる．PC の USB ポートは，1 ポートあたりの許容電流値が 500mA 程度とされているので，スイッチング電源もしくは，利便性を考慮すると消費電力から DC5V 15.0A 程度の容量のリチウムイオン・バッテリーを撮影部に搭載するのが望ましい．リチウムイオン・バッテリーは，携帯電話充電用の汎用バッテリーを流用できると考えられる．これにより測定場所に AC 電源が無くとも測定装置を使用可能となる．

### 2.4.3 測定方法

測定方法は，**図 2.1** に示すように加工表面の状態を反映する反映面を有するレプリカに対し，反映面とは反対の面にあたる左側背面から 0.5mm に絞られた赤色レーザー光線は，反映面に向けて垂直に照射され，レプリカを透過した透過光が受光面のスクリーンに透過像として映し出され，これを CCD カメラより撮影する．なお，反映面とスクリーン間距離  $L=600\text{mm}$  とし，カメラの位置やシャッタースピード，倍率を固定して撮影した．ここで，レプリカ反映面は，その反映面とほぼ同じ表面粗さを示す 5 箇所を選定した．また，透過像は代表的な像を表示した．**図 2.3** の算出のための  $S_p$ ， $S_\mu$  は，画像のピクセル値から求めている．なお，触針式による表面粗さ測定機は，ミットヨ製サーフテストを用いて，加工表面の切削方向あるいは研削方向に対して直角方向に触針を移動させて測定した．

## 参考文献

- 1) 尾花 明, 植田 俊彦, “光・レーザーによる眼傷害事例”, The Journal of Japan Society for Laser Medicine, 日本レーザー医学会, 32(4), (2012), pp.452-455.
- 2) 小松 浩一, “CNC 画像測定機の展開”, The Society of Historical Metrology, 日本計量史学会, 37-1(43), (2015), pp.7-13.
- 3) ALI Maifuz, ANDO Makoto, “Fast Estimation of Shadowing Effects in Millimeter-Wave Short Range Communication by Modified Edge Representation”, IEICE Transactions on Communications, E98.B(9), (2015), pp.1873-1881.
- 4) Oshiyama Fumika, Murakami Naoshi, Guyon Olivier, Martinache Frantz, Baba Naoshi, Matsuo Taro, Nishikawa Jun, Tamura Motohide, “Central-Obscuration Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126(937), (2014), pp. 270-279.
- 5) Hoshino Tetsuya, Banerjee Saswatee, Itoh Masahide, Yatagai Toyohiko, “Diffraction pattern of triangular grating in the resonance domain”, Journal of the Optical Society of America, A 26(3), (2009), pp. 715-722.
- 6) Go Chun-Soo, Lim Sungwoo, Oh Yong-Ho, Lee Jai-Cheol, “Spatial Frequency Filtering Characteristics of Three-Phase and Two-Phase Two-Dimensional Gratings”, Japanese Journal of Applied Physics, 43(8A), (2004), pp. 5352-5356.
- 7) 山崎正之, “厚い回折格子としてとらえたブレード回折格子”, 東海大学紀要, 工学部 39(2), (1999), pp.45-47.
- 8) 工藤 恵栄, 上原 富美哉, “基礎光学”, 現代工学社, (1990).
- 9) 鶴田 匡夫, “応用光学 I”, 培風館, (1993).
- 10) 安藤 幸司, “光と光の記録「光編その 2—光の属性・干渉・回折」”, 産業開発機構株式会社, (2007), pp.133-145.
- 11) LI J, “Electrooptic wafer beam deflector in LiTaO<sub>3</sub>”, IEEE Photonics Technol, Lett. 8(11), (1996) pp.1486-1488.
- 12) LEE T. C, “Light deflection with electrooptic prisms”, IEEE J. Quantum Electron, QE-4(7), (1968) pp.442-454.
- 13) 小林 幸一, “光の物理”, 東京大学出版会, (2009), pp.4-5.
- 14) 青木 貞雄, “光学入門”, 共立出版株式会社, (2002), pp.101-115.

- 15) 栗田 正則, 鄧 智聡, “散乱光を用いた直交二方向の光学的表面粗さ測定法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63-605 (2002), pp.254-261.
- 16) 東レ・ダウコーニング・シリコン株式会社: 透明液状シリコン CY52-205.
- 17) JIS B 0659-1, “製品の幾何特性仕様 (GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式; 附属書 1 (参考) 比較用表面粗さ標準片”, 日本規格協会(2002).
- 18) 例えば, 日本金属電鍍株式会社:比較用表面アラサ標準片.
- 19) 安藤 幸司, “光と光の記録「光編その 2-光の属性・干渉・回折」”, 産業開発機構株式会社, (2007), pp.133-145.
- 20) 小林 幸一, “光の物理”, 東京大学出版会, (2009), pp.4-5 .
- 21) 青木 貞雄, “光学入門”, 共立出版株式会社, (2002), pp.101-115 .
- 22) 例えば, スカイニー株式会社: 赤色レーザーポインタ ULP-300B.
- 23) 例えば, MERCURY MOTOR: ステッピングモータ ST-42BYH1004-5013.
- 24) 例えば, 株式会社東芝セミコンダクター: ステッピングモータ用ドライバ IC TA7774PG.
- 25) 例えば, 東美化学株式会社: トビカ トップガートマットタイプ.

## 第3章 光透過式レプリカの透過像による表面粗さの測定

### 3.1 緒言

第2章で提案した光透過式レプリカによる加工面の表面粗さの測定方法の有効性について、比較用表面粗さ標準片<sup>1)</sup>~<sup>2)</sup>を用いて確認する。用いた標準片は表面性状が、主に機械加工されている代表的な4種類の表面性状を対象とした。鏡面に近い加工面のラップ仕上げ<sup>3)</sup>~<sup>6)</sup>、凹凸が曲面で形状とピッチがランダムな放電加工面<sup>6)</sup>~<sup>9)</sup>、鋭利な刃物で引っ掻いた凹凸の高低差が小さくランダムな切削痕を有する研削面<sup>10)</sup>~<sup>12)</sup>、およびバイト等の切削工具で加工した凹凸の形状が三角山で高低差、ピッチ、および切削痕の方向が均一な形削面<sup>13)</sup>~<sup>15)</sup>を代表にした。これら4種類の加工面の透過像は、散乱光による場合と回折光による場合となり、これらの凹凸の粗さの算出は第2章で提案した方法より求めて、その測定精度の信頼性を接触式表面粗さ測定機で求めた粗さと比較した。その結果から提案した粗さの測定方法の有効性を確かめている。

### 3.2 透過光の透過像パターン

#### 3.2.1 比較表面粗さ標準片と透過像パターンの分類

表2.2に示す比較用表面粗さ標準片<sup>2)</sup>(1)から(9)の透過像パターンを調べた結果を表3.1に示し、図2.2には代表的な透過像パターンの写真を示した。(2)のフライス用の標準片では、 $Ra1.6$ 以上では円形状パターンとした。スポットパターンと円形状パターンの違いは、レプリカに入射する赤色光の直径はスリットで $0.5\text{mm}$ に絞られて、これが反射面から射出してスクリーン上に透過像として映し出される。このときレプリカのない状態で映し出されたレーザ光の直径と輝度が同程度の場合には、ポイントパターンとして扱い、これより直径が大きく、輝度は中心が強く円周側に寄ると弱くなるパターンを円形状パターンとして分類した。また、(6)、(7)、および(9)に示す楕円形状パターンは、円形状パターンが縦または横方向に散乱した透過像であり、(5)と(8)は回折光による回折スポットパターンである。

以下に、代表する4種類の透過像からの表面粗さ測定について述べる。

表 3.1 各種比較用表面粗さ標準片の透過像パターン（表 2.2 参照）

比較用表面粗さの種類	表面粗さ (μm)	形状パターンの分類
(1) ラップ仕上面	$Rz0.2, Rz0.4, Rz0.8$	ポイント形状パターン
(2) フライス用	$Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6, Ra3.2$	ポイント形状パターン $Ra1.6$ 以上は円形状パターン
(3) 放電加工	$Rz3.2, Rz6.3, Rz10, Rz12.5, Rz15, Rz18, Rz25, Rz35$	円形状パターン
(4) 精密鋳造面	$Rz6.3, Rz12.5, Rz25, Rz35, Rz50, Rz70$	円形状パターン
(5) 形削用	$Ra1.6, Ra3.2, Ra6.3, Ra12.5$	回折スポットパターン
(6) ペーパー手仕上面	$Rz0.4, Rz0.8, Rz1.6, Rz3.2, Rz6.3$	楕円形状パターン
(7) ヤスリ手仕上面	$Rz3.2, Rz6.3, Rz12.5, Rz18, Rz25$	楕円形状パターン
(8) 正面フライス	$Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6, Ra3.2$	回折スポットパターン
(9) 研削用	$Ra0.2, Ra0.4, Ra0.8, Ra1.6$	楕円形状パターン

### 3.2.2 ポイント形状パターン

図 3.1 は表 3.1 の (1) に示す比較用表面粗さ標準片のラップ仕上面の粗さ  $Rz0.2$  について表している。(a) は実体顕微鏡<sup>16) 17)</sup>による表面写真, (b) は触針式表面粗さ測定機による粗さ曲線<sup>18) ~ 20)</sup>, (c) はスクリーン上の透過像写真, (d) は (c) の輝度強度分布<sup>21)</sup>をピクセル数で表した濃度物体画素数の分布図である。(b) に示す粗さ曲線には明瞭な凹凸がなく (a) の写真でも同じである。(c) の透過像はその中心が明るく, 輝度の強度と直径は図 3.2 のように透過像の XY 軸の長さの合計が 17.0mm であり, レプリカがない透過像とほぼ同等のため, これをポイント形状パターンと呼ぶことにし, 他のパターンと分類した。(d) はこの輝度を白黒の濃淡 256 階調にデジタル画像処理して, 横軸は (c) の透過像中心を含む水平方向の寸法 60mm, 縦軸はこの水平方向の白黒濃淡分布をピクセル画素数で表しており, 黒は 0 ピクセルと数えられる。この図からポイント形状パターンの中央部では, 輝度の強度が強くと現れその周辺への散乱は見られない。図 3.2 の (a) にはレプリカなしの輝度画像を示し, (b) にはラップ仕上面の粗さ  $Rz0.2$  の透過像を示す。

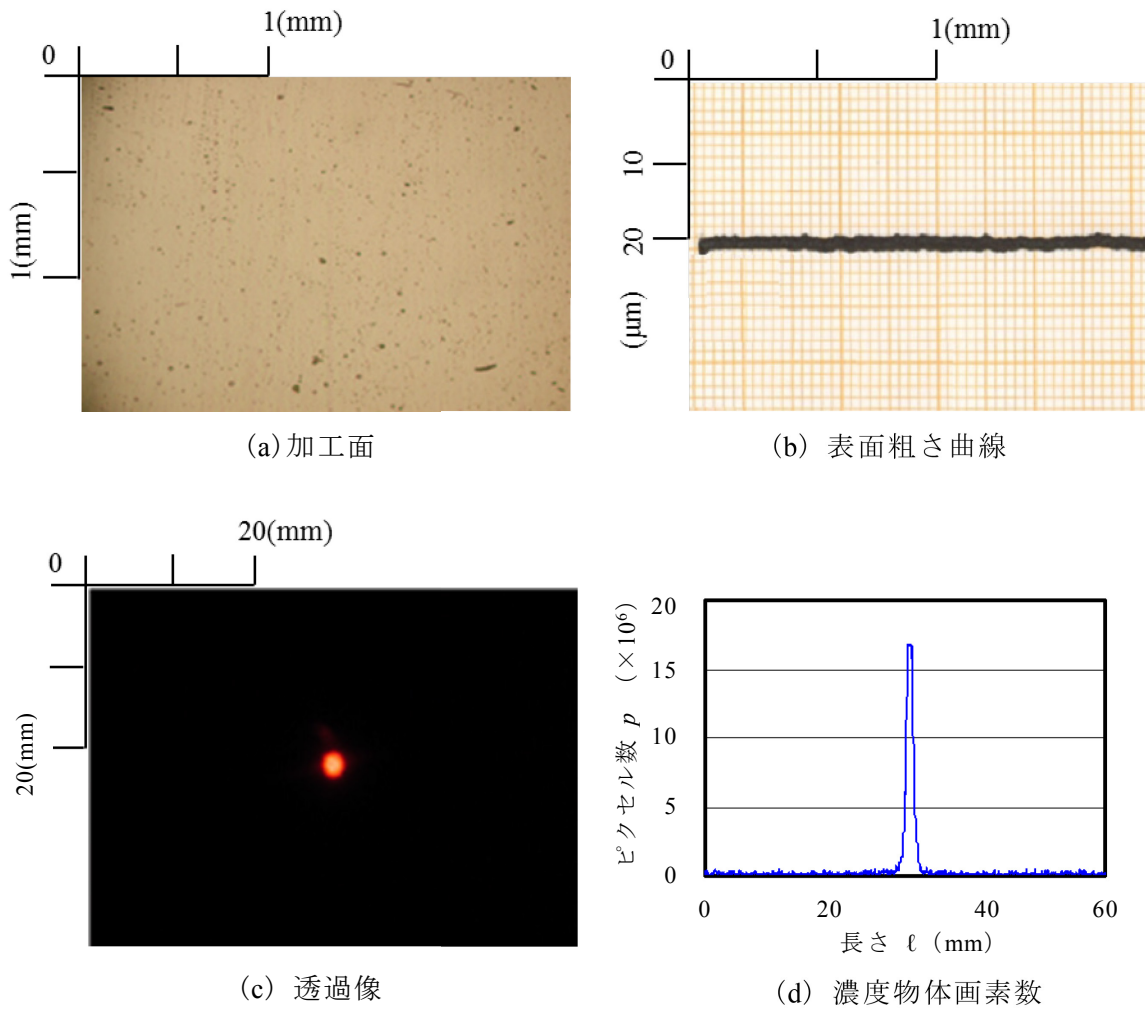


図 3.1 比較用表面粗さ標準試験片のラップ仕上面  $Rz0.2$  の場合

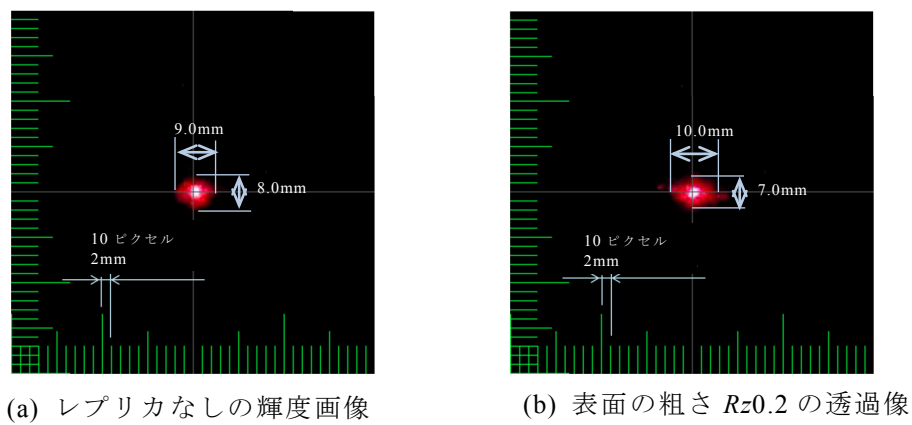


図 3.2 レプリカなし輝度画像とラップ仕上面  $Rz0.2$  のレプリカ透過像輝度の比較

### 3.2.3 円形状パターン

図 3.3 は、表 3.1 の (3) の放電加工粗さ標準片の粗さ  $Rz15$  について示す。(a) は実体顕微鏡による表面写真である。表面の写真からも分かるように、この種の加工は表面が連続的に熔融されて行われるため、切削工具による加工面の凹凸とは異なり、凹凸形状は曲面で高低やピッチがランダムであり、その断面曲線もランダムな曲面になる。(b) の粗さ曲線はこれらの現象を説明した結果になっている。(c) の透過像は図 3.2 (c) に比べて輝度の強い中心から放射状に広がりながら輝度の強度も弱くなる様子が映し出されており<sup>22)</sup>、細かく見れば輝度の強い点が点在しながら広がっている。この点は反映面から射出された光の波長が干渉して強めあった部分である。表面の凹凸が写真のようなランダムな形状のため、その点もランダムに点在している。このような形状の透過像を円形状パターンと呼

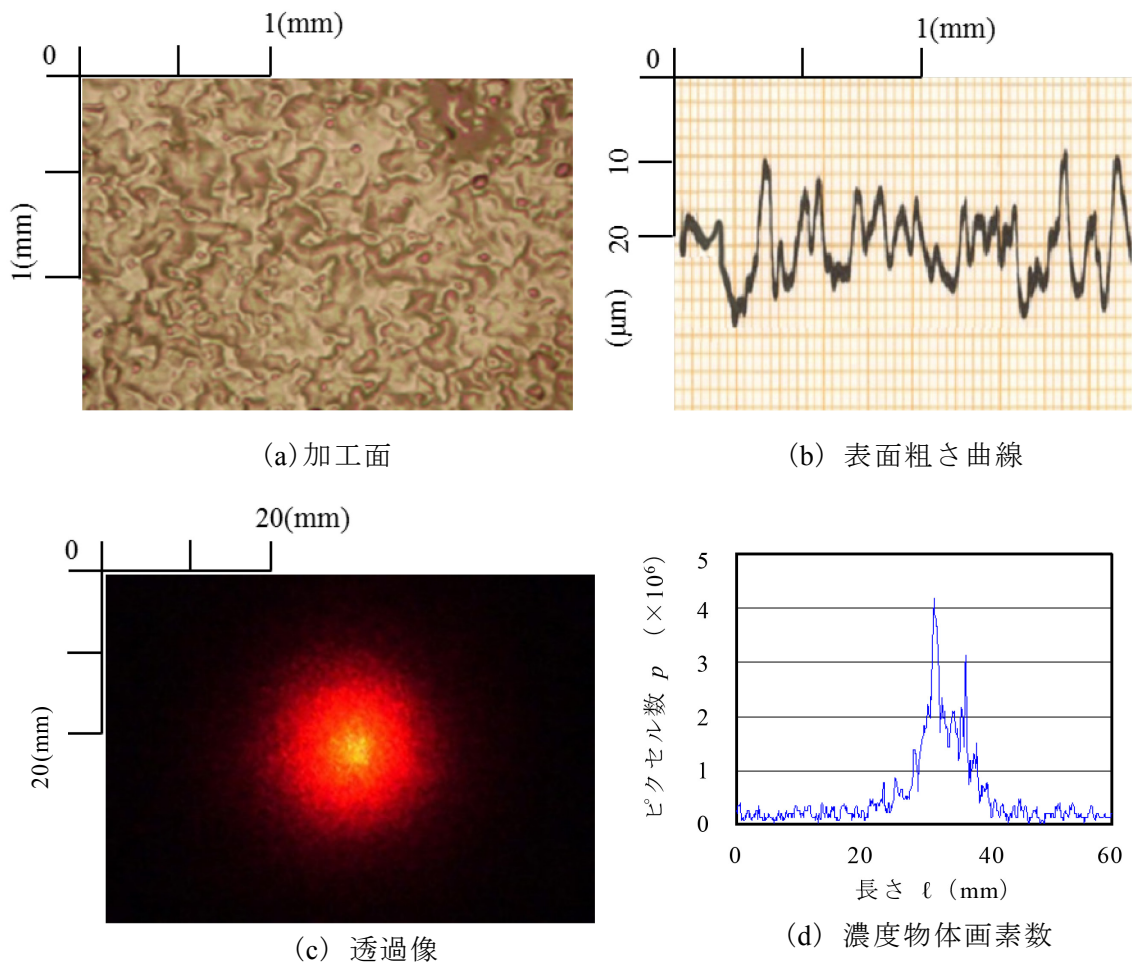


図 3.3 比較用表面粗さ標準試験片の放電加工粗さ標準片  $Rz15$  の場合

ぶことにした. この透過像の輝度が強い中心の水平方向の濃淡階調の分布を数値化した(d)からは, 図 3.2 (d) とは異なり, 中心部の白色部分の数は少ないが左右にこれが広がり白い部分の占める割合が多くなっており, ランダムに点在している干渉光の部分も数値が多くなっていることが分かる. 円形状パターンの広がり大きさは, 凹凸形状の大小と関連しており, これが散乱光の広がりとも関連しているためである.

### 3.2.4 楕円形状パターン

図 3.4 は, 表 3.1 の (9) に示す比較用表面粗さ標準片-研削用の粗さ  $Ra0.8$  ( $Rz3.2$  相当) について示す. (a) は実体顕微鏡による表面写真である. 表面の写真からも分かるように, この種の加工は硬い砥粒が引っ掻くように切削するため, 表面の加工方向は一方向のスジ状の高低差を有する連続的でピッチがランダムな凹凸になり, 放電加工の表面性状の凹凸

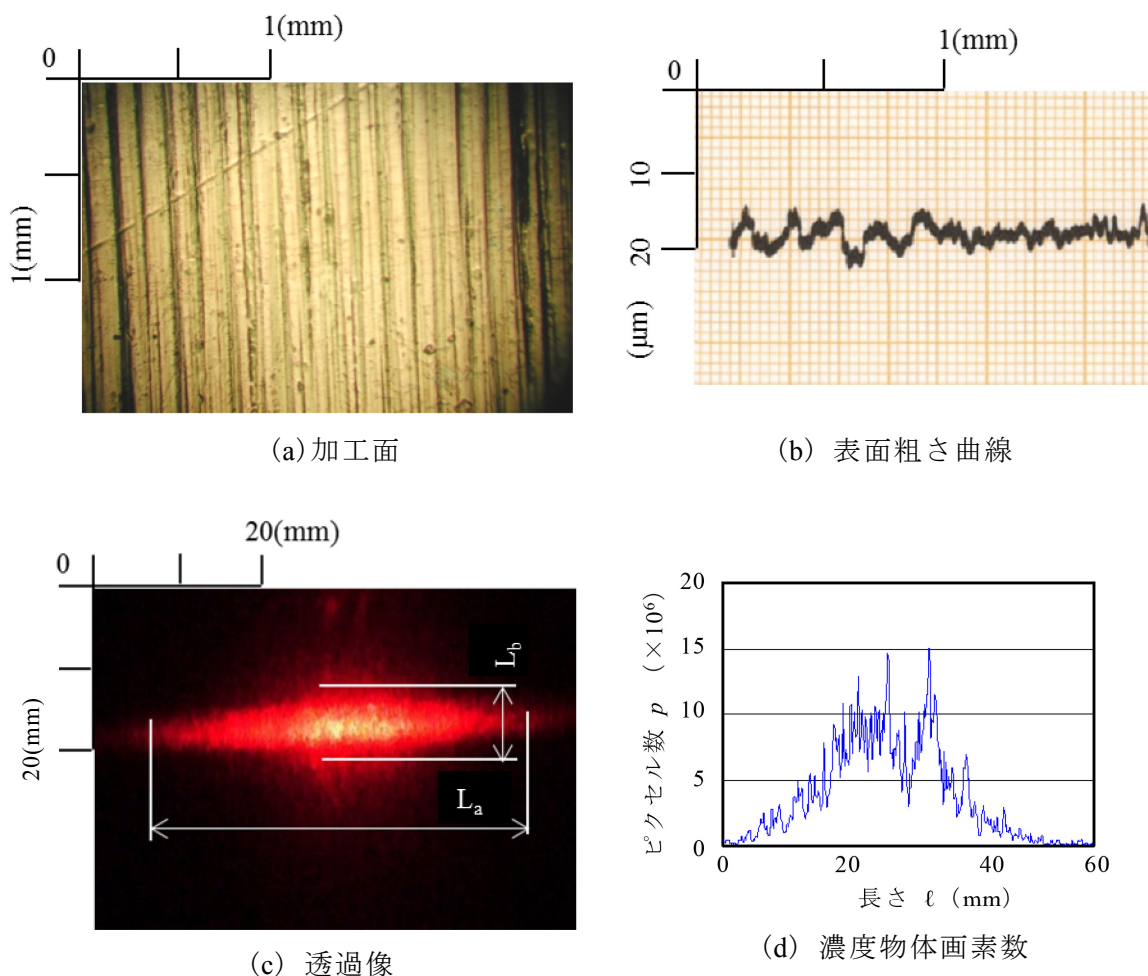


図 3.4 比較用表面粗さ標準試験片-研削加工  $Ra0.8$  ( $Rz3.2$  相当)



とは異なる。したがって、(b) の粗さ曲線の凹凸もこれらの現象を説明する結果になっている。(c) の透過像は図 3.2 (c) では円形状の放射状であるが、加工方向に対して直角方向  $L_a$  と加工方向  $L_b$  に広がる散乱光の組合せとなり、加工方向に対する直角方向の広がり大きい横長の楕円形状の透過像になる。これを円形状とは異なるため楕円形状パターンと呼ぶことにした。

この横長  $L_a$  の大きさは、 $Ra$  が  $Ra0.4$ ,  $Ra0.2$  のように粗さが小さくなるにしたがい、長さは短くなり小さくなる。同様に輝度の強さも  $L_a$  と  $L_b$  の大きさに反比例しており、反映面から射出された光の波長が干渉して輝度が強い部分が点在する。透過像の輝度が強い中心を含む  $L_a$  軸方向の濃淡階調の分布を数値化した (d) からは、寸法  $L_a$  が大きく図 3.1 (d) とは異なり、中心部の白色部分が少なくなり左右に広がる白い部分の占める割合が多くなっており、図 3.3 同様にランダムに点在している干渉光の輝度が強い部分も数値に表れていることが分かる。

### 3.2.5 回折スポットパターン

図 3.5 は、表 3.1 の (5) に示す比較用表面粗さ標準片-形削用の粗さ  $Ra3.2$  ( $Rz12.5$  相当) について示す。(a) は実体顕微鏡による表面写真である。

表面の写真からも分かるように、この種の加工は切削工具の送り量と切り込み量は一定のため、表面には一方向の切削痕が形成され、その凹凸の形状は三角山となり、その高低差とピッチは一定である。これを測定した (b) の粗さ曲線の凹凸には、規則正しい三角山の凹凸とこれらのピッチが測定されている。(c) の透過像は図 3.3 (c) では横長の楕円形状パターンであるが、三角山の凹凸が規則正しく並んでいるため、レプリカに入射した光が反映面から出射する際には、規則正しい出射角となる回折<sup>2) 2) ~ 3) 3)</sup> が起きる。これが図 2.4 に示す原理によるもので、その透過像が (c) である。水平方向に並んだ輝度の強度は、図中矢印で示す両側の  $m=0$  次の強い点が現れて、さらにその点の両側にも矢印で示す  $m=+1$  次と  $m=-1$  次の弱い輝度の点続き、その隣には  $m=+2$  次、 $m=-2$  次、... のように数点並んでおり、左右の  $m=0$  次の中央になる点を中心とすれば、左右対称になる。この並びの水平方向の濃淡階調の分布を数値化した (d) からは、 $m=0$  次が強く、次に  $m=+1$  次と  $m=-1$  次、... と続いており、輝度が最も強い  $m=0$  次を境として左右に  $m$  次の次数が高くなるにしたがい輝度が弱くなりながら一列に並んでいる。表面粗さの凹凸のピッチ  $P$  は  $m=0$  次と  $m=\pm 1$  次の寸法  $S_p$  の間隔から算出ができ、 $P$  と  $S_p$  は反比例の関係にある。また、凹凸の高さ  $R_r$

は両方の  $m=0$  次の間隔の寸法となる  $2S_\mu$  から算出ができ、 $R_r$  と  $2S_\mu$  比例関係にある．

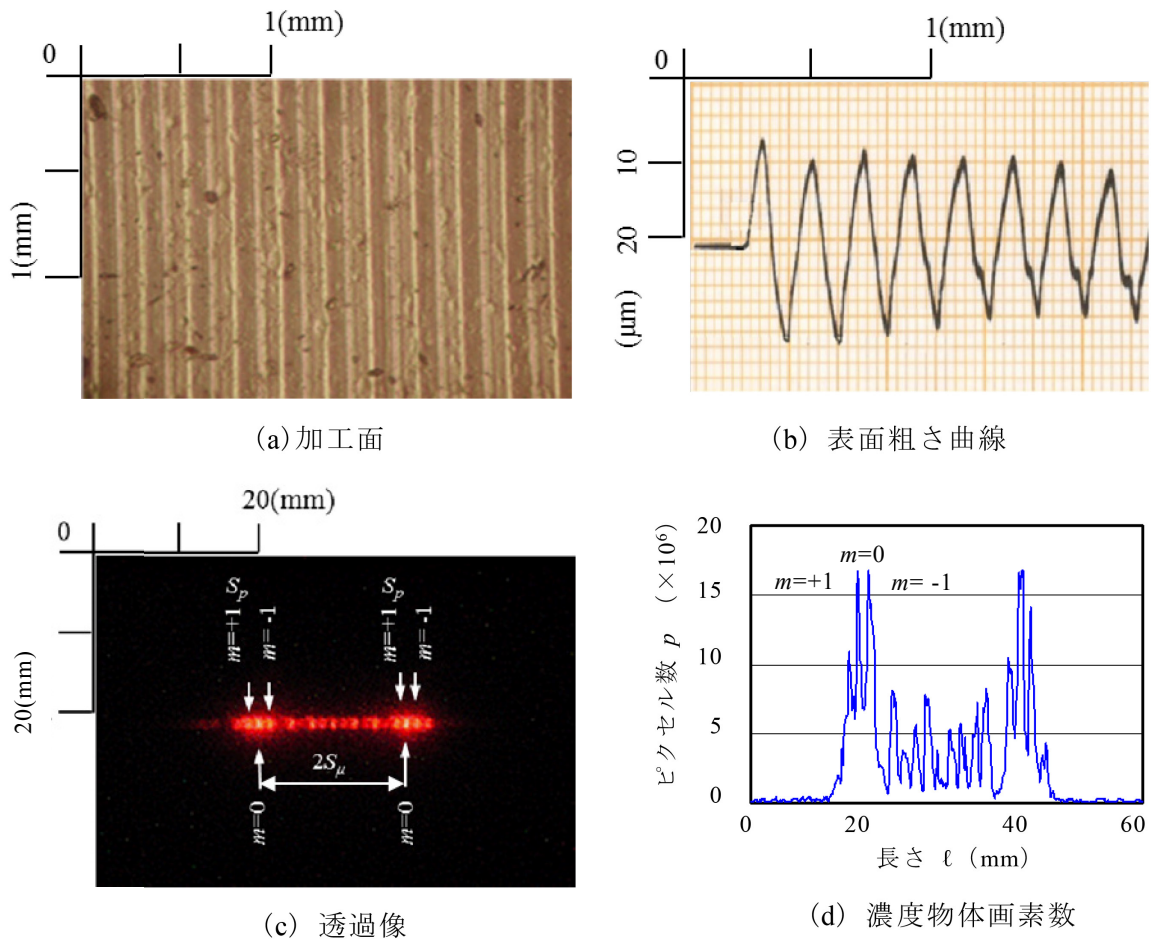


図 3.5 比較用表面粗さ標準試験片-形削用  $Ra3.2(Rz12.5)$  相当

### 3.3 回折光による加工面の粗さ測定

式 (2.13) の  $R_r$  を用いて、図 3.5 の比較用表面粗さ標準試験片-形削用の (c) に示す透過像が得られ、これより被測定物の表面粗さ  $R_r$  が算出できる．ここでは、図 3.5 と同じ表 3.1 の (5) である比較用表面粗さ標準試験片-形削用呼び粗さ 4 種類のレプリカを採取し、これを図 2.1 に示す装置にレプリカホルダに載せて赤色レーザー光の直径をスリットにて 0.5mm に絞り、これを計測する部位に照射しながら XY 軸スライドガイドで移動させ位置を決める．このときのレプリカの反映面からスクリーンまでの距離は  $L=600\text{mm}$  である．

この距離は、測定装置の入射光の直径  $d=0.5\text{mm}$ 、波長  $\lambda=635\text{nm}$  の条件からフラウンホーファ回折領域になる境界の距離は、 $L > d^2/\lambda=394\text{mm}$  から点状の回折像が得られる距離にした。図 3.5 (c) に示す透過像からそれぞれ  $2S\mu$  と  $S_p$  の長さを測定して  $R_r$  を算出する。また、算出値  $R_r$  の信頼性を確認するため、同じ被測定物を JIS で規定されている触針式表面粗さ測定機を用いて最大高さ粗さ  $R_z$  で表記した。両方の測定では測定を 5 回行いその結果を表 3.2 に示し、これらの関係を図 3.6 に示す。

表 3.2 比較用表面粗さ標準片-形削用を用いた  $R_z$  と  $R_r$  の比較 (単位  $\mu\text{m}$ )

比較用表面粗さ標準片-形削用呼び粗さ		$Ra1.6$	$Ra3.2$	$Ra6.3$	$Ra12.5$	
触針式表面粗さ測定機	$R_z$ (最大高さ粗さ)	5.5	8.0	22.0	29.5	
	$R_r$ (最大高さ粗さ)	平均値	5.3	9.3	19.0	27.3
最大値		6.0	11.0	22.0	29.5	
最小値		4.5	7.5	16.0	25.0	
提案する測定方法		平均値の差 $ R_r - R_z $	0.2	1.3	3.0	2.2
		誤差率 $\Delta R_r =  R_r - R_z  / R_z$ (%)	3.6	16.3	13.6	7.5
		平均誤差率 $\overline{\Delta R_r}$ (%)	10.2			

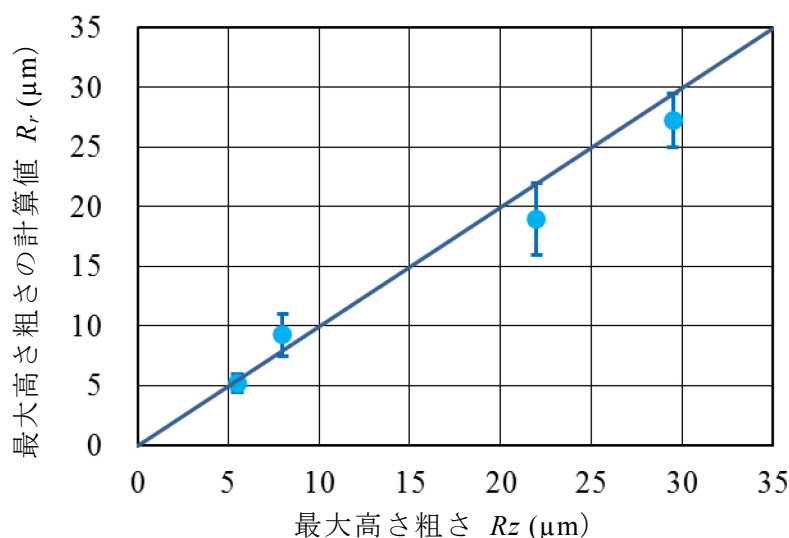


図 3.6 比較用表面粗さ標準片-形削用を用いた  $R_z$  と  $R_r$  の比較

表 3.2 には、 $R_z$  は平均値を表記し、 $R_r$  は平均値と最大最小値も示し、これらの関係と  $R_z$  と  $R_r$  が線形関係になる線も追加して表したのが図 3.6 であり、粗さの表記は最大高さ粗さである。各呼び粗さの  $R_z$  に対する誤差率  $\Delta R_r$  は、3.6%から 16.3%との範囲となるが平均値は 10.2%となり、触針式表面粗さ測定機に対して、約 10%程度の誤差範囲で粗さ値が一致することが分かる。この主な要因はデジタルカメラで撮影した図 3.4 に示す  $2S\mu$  と  $S_p$  の長さを測定する際の測定精度が関係しており、これらの測定寸法は透過像の輝度が強い点を位置決め特定するため、これの正確さが影響していた。

### 3.4 散乱光による加工面の粗さ測定

光透過式レプリカを用いて加工面の表面粗さ測定において、図 3.5 のようにレプリカの反映面から回折した透過像では式 (2.13) から算出できる。しかし、図 3.3 や図 3.4 のように円形状パターンや楕円形状パターンとなる透過像においては、透過像の寸法から直接的に粗さの算出はできない。また、これらの透過像には、表面粗さの大小に応じて円形の直径や楕円の  $L_a$  と  $L_b$  寸法が関連していることから、透過像の画像と粗さとの関連付けができれば、そこから透過像の寸法から粗さが推定できるものと考えた。具体的には、反射型表面粗さ測定機に用いられている方法に、反射光強度分布を二次元ガウス関数の直交する標準偏差を用いて表面粗さを表わす方法<sup>3,4)</sup>がある。提案する方法は、直交する二次元方向による手法を採らないで、透過像の全周囲を含む 360deg 方向の画像情報から粗さを測定する方法である。

透過像の円や楕円の寸法が表面粗さと相関することを利用する。透過像の輝度は中心部付近が強くそこから周辺に広がりながら弱くなることは図 3.3 と図 3.4 の (c) と (d) から観察されている。この輝度の強度分布を図 3.6 (a) のようにデジタル画像化により、同図 (d) で示したように、等階調線図に分類することを考えて、256 階調から 6 階調程度に抑えた。図 3.6 に示すようなそれぞれの等階調分布により得られた円の図形面積  $A$ 、または楕円の  $L_a$  と  $L_b$  の寸法が得られる。6 階調のため図形面積  $A$  または楕円の  $L_a$  と  $L_b$  の寸法は、図 3.6 (b) に示す  $A_1$  から  $A_5$  となり式 (2.18) と式 (2.19) より回転半径  $R_g$  が求められる。各々の階調により得られた  $R_g$  と JIS に規定されている触針式表面粗さ測定機による最大高さ粗さ  $R_z$  との関係図から、実験式 (2.20) が得られる。この実験式が分かっているならば、これらと同じ計測条件で得られた白黒画像の  $R_g$  からは容易に表面粗さの大きさが推定でき

る．なお、輝度が強い場合には、デジタル画像の中央部にスペックルパターン<sup>3.5)</sup>が現れるが、6階調の白黒画像に変換するとスペックルパターンは除去することができる．

以降では、円形状パターンと楕円形状パターンの透過像と表面粗さ測定機から得られた数値から実験式 (2.13) を求めてみる．

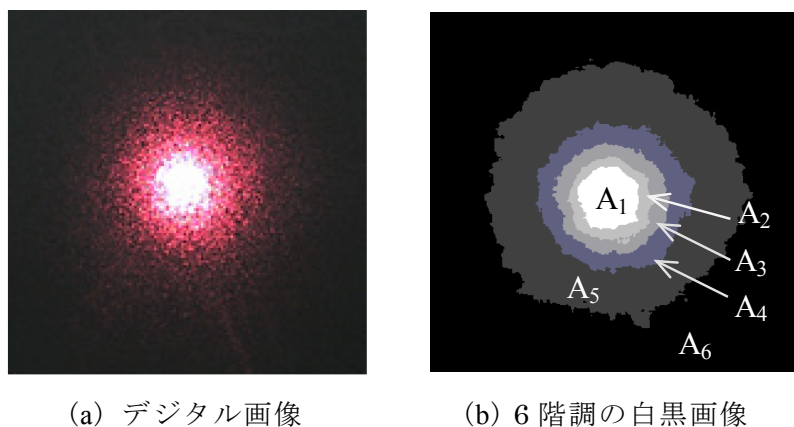


図 3.6 図 3.2 (c) を 6 階調の白黒画像デジタル処理した例

始めに表 3.1 の (3) 放電加工粗さ標準片により得られた透過像である図 3.2 の円形状パターンについて実施した．表 3.3 はそれらの結果をまとめたもので、図 3.7 は呼び粗さにおける  $R_z$  と階調ごとの面積  $A_1$  から  $A_5$  までの  $R_g$  を求めた関係図である．

表 3.3 放電加工粗さ標準片による円形状パターンの  $R_z$  と  $R_g$  の関係

放電加工粗さ標準片-呼び粗さ $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )		$R_z6.3$	$R_z10$	$R_z12.5$	$R_z18$	$R_z25$	$R_z35$
触針式表面粗さ測定機 $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	平均値	5.0	8.8	12.9	17.5	28.9	43.2
回転半径 $R_g$ (mm)	$A_1$	28.0	37.2	35.8	32.7	22.4	15.0
	$A_2$	32.5	44.5	45.5	44.8	40.9	37.5
	$A_3$	37.5	52.3	54.5	55.7	55.0	54.5
	$A_4$	44.0	61.2	64.0	68.2	70.5	69.0
	$A_5$	54.2	72.8	78.6	86.1	91.2	91.5

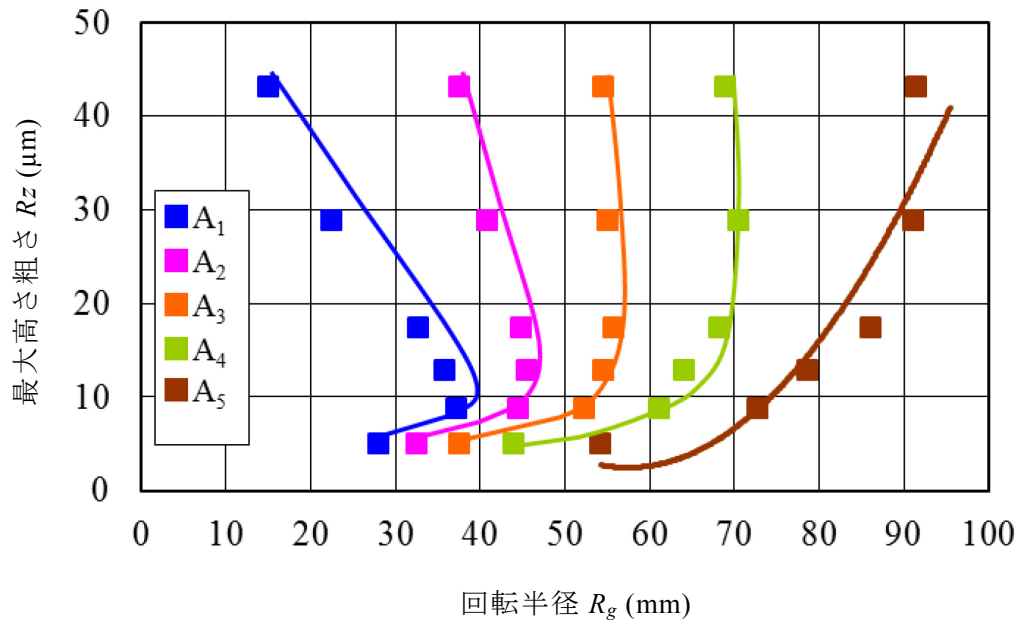


図 3.7 放電加工粗さ標準片による円形状パターンの  $R_z$  と  $R_g$  の関係

階調  $A_1$  と  $A_2$  は触針式粗さ  $R_z 5.0$  と  $R_z 8.8$  では  $R_g$  も増加するが、 $R_z 12.9$  以上になると  $R_g$  は減少する。階調  $A_3$  と  $A_4$  は  $R_z 17.5$  までは  $R_g$  も増加するが、これ以上では  $R_g$  の変化がない。これらに対して、階調  $A_5$  は  $R_z 5.0$  からと  $R_z 28.9$  までは  $R_g$  も増加関係にあり、これらの関係においては  $R_g$  から  $R_z$  が推測可能である。この  $A_5$  の場合における  $R_g$  が  $55\text{mm}$  から  $92\text{mm}$  の範囲の実験式を式 (2.20) を適用して、それぞれの定数項  $a=0.0265$ ,  $b=-3.0483$ , および  $c=90$  となり、式 (3.1) が求められる。式 (3.1) からは、円形状パターンの階調  $A_5$  における  $R_g$  が  $55\text{mm}$  から  $92\text{mm}$  の範囲で、最大高さ粗さ  $R_{ra}$  が  $5\mu\text{m}$  から  $35\mu\text{m}$  の範囲で得られる。

$$R_{ra} = 0.0265 \cdot R_g^2 - 3.0483 \cdot R_g + 90 \quad (3.1)$$

次に表 3.1 の (7) 比較用粗さ標準片-研削用を用いて得られた透過像である図 3.3 と同様な楕円形状パターンについて実施した。表 3.4 はそれらの結果をまとめたもので、図 3.8 は呼び粗さにおける  $R_z$  と階調  $A_1$  から  $A_5$  までの  $R_g$  を求めた関係図である。

階調  $A_1$  から  $A_5$  において触針式粗さ  $R_z 3.8$  からと  $R_z 12.9$  のすべてにおいては、 $R_g$  が増加する傾向となり、その傾きは階調  $A_5$  が階調  $A_1$  より緩やかであり、これらの関係は円形状

パターンと異なっている. この場合の実験式は円形状パターンと同じ階調  $A_5$  を用い表すと, 式 (2.20) を適用して求めれば, それぞれの定数項  $a=0.0113$ ,  $b=-0.8233$ , および  $c=6$  となり, 式 (3.2) が得られる. 式 (3.2) からは, 楕円形状パターンの階調  $A_5$  における  $R_g$  が 28mm から 50mm の範囲で, 最大高さ粗さ  $R_{rb}$  が  $3\mu\text{m}$  から  $14\mu\text{m}$  範囲で得られる.

表 3.4 比較用アラサ標準片-研削用による楕円形状パターンの  $R_z$  と  $R_g$  の関係

比較用アラサ標準片-研削用-呼び粗さ $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )		$R_z3.2$	$R_z6.3$	$R_z12.5$
触針式表面粗さ測定機 $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	平均値	3.8	6.4	12.9
回転半径 $R_g$ (mm)	$A_1$	16.0	23.0	29.0
	$A_2$	18.0	26.0	32.5
	$A_3$	20.5	29.0	36.5
	$A_4$	24.0	33.2	42.0
	$A_5$	28.0	38.2	48.3

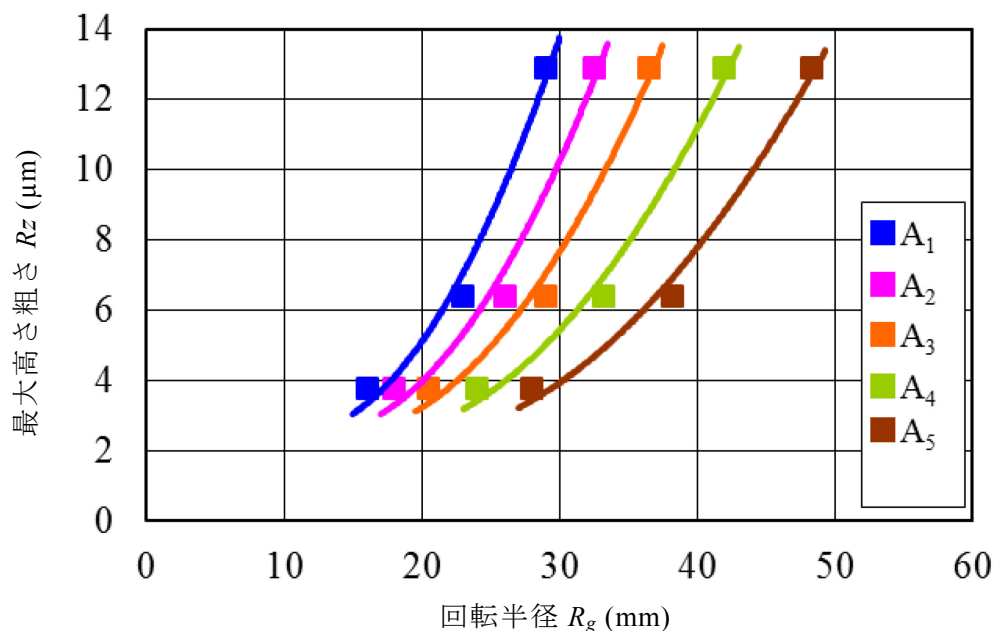


図 3.8 比較用アラサ標準片-研削用による楕円形状パターンの  $R_z$  と  $R_g$  の関係

$$R_{rb} = 0.0113R_g^2 - 0.8233R_g + 6 \quad (3.2)$$

これまで述べてきた円形状パターンや楕円形状パターンの光透過式レプリカの反映面から射出した透過像からは、式 (2.20) を適用させて、式 (3.1) と式 (3.2) の実験式が求められる。  $R_g$  の適用範囲はあるが、被測定物の凹凸の最大高さ粗さが求めることが可能になる。なお、式 (2.20) の定数  $a$ 、 $b$ 、および  $c$  は、レプリカ素材の屈折率およびレプリカ反映面からスクリーンまでの距離  $L$  により決められる定数であるため、この実験式を用いる場合には同じ計測条件でなければならない。

### 3.5 結 言

光透過式レプリカによる透過像から、加工面の表面粗さ測定方法について、第 2 章でその原理を提案した。この章では、その原理に基づいて被測定物からの透過像より、次の結果が得ることができたので要約する。

- (1) レプリカ反映面からの透過像には、加工面の表面に形成された凹凸の性状により、主にポイント形状パターン、円形状パターン、楕円形状パターン、および回折スポットパターンの 4 つに分類できる。
- (2) これらのパターンから反映面の表面形態である加工面の凹凸形状や加工方法も推定できる。
- (3) 回折スポットパターンは、提案した最大高さ粗さの式 (2.13) により算出できる。円形状パターンと楕円形状パターンでは、回転半径と最大高さ粗さの関係を表わす実験式 (3.1) と (3.2) が得られた。
- (4) 本測定方法の環境条件における粗さ  $Rz$  は、回折スポットパターンでは  $5\mu\text{m}$  から  $30\mu\text{m}$  の範囲、円形状パターンは  $5\mu\text{m}$  から  $35\mu\text{m}$  の範囲、および楕円形状パターンは  $3\mu\text{m}$  から  $14\mu\text{m}$  の範囲において、それぞれの表面性状に応じた粗さ値が算出できる。



## 参考文献

- 1) JIS B 0659-1, “製品の幾何特性仕様 (GPS) –表面性状: 輪郭曲線方式; 附属書 1(参考) 比較用表面粗さ標準片”, 日本規格協会(2002).
- 2) 例えば, 日本金属電鍍株式会社:比較用表面アラサ標準片.
- 3) 伊藤 伸英, 大森 整, “非真円断面穴のラップ仕上”, 日本機械学会, Vol.56, No.9(1990), pp. 1723- 1728.
- 4) 加藤 仁, 山口 勝美, 加藤 隆雄, “表面あらさ変化による金属接触面の圧力分布測定法: 第 3 報,ランダムなあらさをもつ金属面の場合”, 日本機械学会, C 編 48(427), (1982), pp. 408- 417.
- 5) 久曾神 煌, 豊山 晃, “高いピッチ精度を目的とする歯車ラップ仕上法”, 精密機械, 39(458), (1973) , pp.293-298.
- 6) フィン ヴァン・ニャン, 戸倉 和, 吉川 昌範, 浅枝 敏夫, “Si 単結晶の電解パフ仕上の研究:研摩材を使用しない場合(第 1 報)”, 精密機械, 42(500), (1976) , pp.790-796.
- 7) 北田 良二, 日置 裕彦, 岡田 晃, 宇野 義幸, “型彫り放電加工面の離型性に関する礎的研究”, 電気加工学会, The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century , (2007) , pp.52-57.
- 8) 上野 雅裕, 神田 岳文, 鈴森 康一, 道廣 善彦, 妹尾 典久, “ワイヤ放電加工面への水熱合成法による PZT 薄膜の成膜”, 精密工学会, 学術講演会講演論文集, (2010) , pp.853-854.
- 9) 鷺見 信行, 後藤 昭弘, 寺本 浩行, 安永 裕介, 中野 善和, “放電表面処理による Si 含有アモルファス層に関する研究”, 精密工学会, 学術講演会講演論文集, (2010) , pp.887-888.
- 10) 嶋田 慶太, 水谷 正義, 厨川 常元, “統計的手法による研削面粗さの解析-基礎と応用法について”, 精密工学会, 80(9), (2014) , pp.807-810.
- 11) 大坂 剛士, 高木 純一郎, “極微小切込ドレッシングを用いた鏡面研削における表面品位改質に及ぼす砥粒径の影響”, 砥粒加工学会, 58(6), (2014) , pp.396-401.
- 12) 古本 達明, 鷺塚 大祐, 細川 晃, 上田 隆司, “非真円断面穴のラップ仕上”, 砥粒加工学会, 58(6), (2014) , pp.380-385.
- 13) 佐久間 敬三, 鬼鞍 宏猷, “スカイピング切削法の研究 (第 2 報)総形削りにおける切削機構”, 精密機械, 44(527), (1978) , pp.1348-1353.

- 14) 横山 良明, 小川 潔, 紅林 晋, “非円形遊星歯車機構の研究”, 日本機械学会, C 編 48(428), (1982), pp.592-598.
- 15) 大野 威徳, “ガラスの微細切削における切れ刃稜線形状による脆性破壊への影響”, 精密工学会, 学術講演会講演論文集 2013A(0), (2013), pp.305-306.
- 16) 三宅 範夫, 水田 正宏, 品田 伸宏, “25 倍ズームと高解像度を両立した実体顕微鏡 Perfect Zoom System”, O plus E, Optics・Electronics 37(6), (2015), pp. 442-446.
- 17) 黒川 豊, 上林 仁司, 枝根, “鋳鉄鋳造欠陥の走査電子顕微鏡像と実体顕微鏡写真の対比”, 日本鋳造工学会, Journal of Japan Foundry Engineering Society 86(11), (2014), pp. 864-870.
- 18) JIS B 0651, “製品の幾何特性仕様(GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式-触針式表面粗さ測定機の特性”, 日本規格協会(2001).
- 19) JIS B 0681-6, “製品の幾何特性仕様(GPS)-表面性状: 三次元-第6部: 表面性状測定方法の分類”, 日本規格協会(2014).
- 20) 吉田 一郎, 塚田 忠夫, “粗さプロフィル補正による触針先端半径に起因する不確かさの解析”, 精密工学会, 2003A(0) (2003), pp.113.
- 21) 河村 拓哉, 岡部 孝弘, 佐藤 洋一, “拡散反射板を用いた光源の放射輝度分布の計測”, 情報処理学会, 2013-CVIM-186(7) (2013), pp.1-5.
- 22) ALI Maifuz, ANDO Makoto, “Fast Estimation of Shadowing Effects in Millimeter-Wave Short Range Communication by Modified Edge Representation”, IEICE Transactions on Communications, E98.B(9), (2015), pp.1873-1881.
- 23) Oshiyama Fumika, Murakami Naoshi, Guyon Olivier, Martinache Frantz, Baba Naoshi, Matsuo Taro, Nishikawa Jun, Tamura Motohide, “Central-Obscuration Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126(937), (2014), pp. 270-279.
- 24) Hoshino Tetsuya, Banerjee Saswatee, Itoh Masahide, Yatagai Toyohiko, “Diffraction pattern of triangular grating in the resonance domain”, Journal of the Optical Society of America, A 26(3), (2009), pp. 715-722.
- 25) Go Chun-Soo, Lim Sungwoo, Oh Yong-Ho, Lee Jai-Cheol, “Spatial Frequency Filtering Characteristics of Three-Phase and Two-Phase Two-Dimensional Gratings”, Japanese Journal of Applied Physics, 43(8A), (2004), pp. 5352-5356.
- 26) 山崎正之, “厚い回折格子としてとらえたブレード回折格子”, 東海大学紀要, 工学部 39(2), (1999), pp.45-47.

- 27) 工藤 恵栄, 上原 富美哉, “基礎光学”, 現代工学社, (1990).
- 28) 鶴田 匡夫, “応用光学 I”, 培風館, (1993).
- 29) 安藤 幸司, “光と光の記録「光編その 2—光の属性・干渉・回折」”, 産業開発機構株式会社, (2007), pp.133-145.
- 30) LI J, “Electrooptic wafer beam deflector in LiTaO<sub>3</sub>”, IEEE Photonics Technol, Lett. 8(11), (1996) pp.1486-1488.
- 31) LEE T. C, “Light deflection with electrooptic prisms”, IEEE J. Quantum Electron, QE-4(7), (1968) pp.442-454.
- 32) 小林 幸一, “光の物理”, 東京大学出版会, (2009), pp.4-5.
- 33) 青木 貞雄, “光学入門”, 共立出版株式会社, (2002), pp.101-115.
- 34) 栗田 正則, 鄧 智聡, “散乱光を用いた直交二方向の光学的表面粗さ測定法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63-605 (2002), pp.254-261.
- 35) 新井 泰彦, 横関 俊介, “電子スペックル干渉計測のためのフーリエ変換技術を用いた 2 枚のスペックルパターンによる空間的縞解析法”, 精密工学会, 学術講演会講演論文集 2013S(0), (2013), pp. 7-8.

## 第4章 光透過式レプリカによるスクエアエンドミル加工面の表面粗さの測定

### 4.1 緒言

第3章では第2章で提案した光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法<sup>1)</sup>の有効性について、比較用表面粗さ標準片<sup>2) 3)</sup>を用いて確認した。レプリカの透過像には、加工面の凹凸の高低差や方向性、およびピッチがランダムな場合には出射光が散乱した形状のパターン<sup>4) ~6)</sup>となり、凹凸の高低差や方向性、およびピッチが比較的規則正しい場合では出射光が回折した回折パターンになることが分かり<sup>7) ~18)</sup>、主にその透過像は4つのパターンに分類できることを明らかにした。このパターンから、第2章で提案した粗さ算出式からの値と接触式表面粗さ測定機による粗さ値との間では同等の値となり、その有効性が確かめられた。そこで、製品に組み込まれる部品は一般的には機械加工されるものが多く、その加工面を対象とした表面粗さの測定精度について検討した。立型フライス盤で用いられる切削工具の一つであるスクエアエンドミル<sup>19) 20)</sup>で加工した加工面を対象とした。切り込み深さと回転速度は変えないで、送り量を5段階に変えた際の切削痕は円形状に凸型に残る。この切削痕の凸の高い部分を稜線と呼ぶことにする。この稜線は円弧状が連続した切削痕になるため、切削工具の中央部分と周囲の部分とでは切削痕の凹凸形状や稜線の方向性が異なる。提案する測定方法では、これらの凹凸形状による表面粗さと稜線の方向は同時に計測することが可能になる。このような切削痕が残る加工面に対して、提案した粗さ測定方法が適用でき、第3章と同様な結論が得られるのか確かめた<sup>21)</sup>。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 スクエアエンドミルと加工面

加工物の切削に用いたスクエアエンドミル<sup>22)</sup>は、2枚刃で外径20mm、全長110mmを用いその主な仕様は表4.1、その外観も図4.1に示し、既に使用時間が約120時間経過したものをを用いている。加工に用いたNC立型フライス盤<sup>23)</sup>の一例を図4.2に示す。

加工物の素材は、材質が18クロムステンレス鋼と呼ばれるSUS304であり、表4.2と表4.3には化学成分と機械的性質を示し、寸法を厚さ $t$ ×幅 $W$ ×奥行 $D$ とすれば9mm×150mm×150mmの板材である。この素材を用いて、表4.3に示す切り込み深さ0.5mm一定として、刃物の送り量を5段階に変えて加工した加工物の加工面が図4.3の写真である。

スクエアエンドミルの加工は、同図(a)に示すように下方から上方に向かって右側に回転

しながら、任意の送り量で送られ切削している。送り量の違いが分かるように同図 (a) の枠線 A で囲まれた部分を拡大した写真が同図 (b) である。この図において、送り量は右側端の 0.40mm/rev から順次大きくなり、左端が 6.40mm/rev で切削した後の 5 段階の切削痕が観察される。2mm は送り量の違いの境界が分かるようにした間隔である。この図から形成された切削痕の見た目の凹凸の高低差やピッチの大小は送り量の数値と感覚的に相関が認められる。また、刃物の中央部より外径側に近くなると凹凸部の稜線の交差角度が大きくなっていることも分かる。

表 4.1 加工に用いたスクエアエンドミルの仕様<sup>2)2)</sup>

項目	内容	項目	内容
型番	SUS-EDS20	使用の経過時間 $h$	約 120 時間
刃径 $D$	20mm	刃長 $l$	38mm
加工物素材	一般鋼/ステンレス鋼/鋳鉄/アルミニウム/銅	刃形状の種類	スクエア
刃数	2 枚	工具の材質	コバルトハイス
加工用途	平面/側面/溝/傾斜切り込み	シャンク径 $d$	20mm
コーティング	なし	全長 $L$	110mm
ネジレ角 $\theta$	標準ネジレ, 30~40deg	シャンク形状	ストレート



図 4.1 加工に用いたスクエアエンドミルの外観



図 4.2 NC 立型フライス盤の一例<sup>2)3)</sup>  
株式会社山崎技研社製 YZ-400NCR

表 4.2 SUS304 の化学成分<sup>7)</sup> (単位:%)

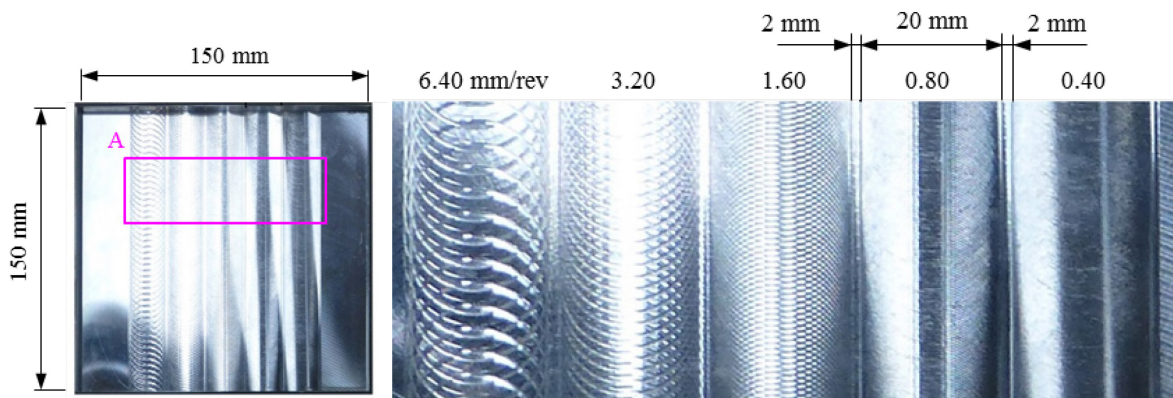
材料記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	その他
SUS304	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	-	-	-	-

表 4.3 SUS304 の機械的特性<sup>2 4)</sup>

材料記号	耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	硬さ		
				HBW	HRBS または HRBW	HV
SUS304	205 以上	520 以上	40 以上	187 以下	90 以下	200 以下

表 4.4 スクエアエンドミルによる SUS304 の切削加工条件

項目	内容	項目	内容
刃物外径	20mm	送り量	0.40mm/rev, 0.80mm/rev, 1.60mm/rev, 3.20mm/rev, 6.40mm/rev
切り込み深さ	0.5mm 一定		
主軸回転速度	280rev/min	素材	SUS304
使用の経過時間	約 120 時間	素材寸法	t9 × W150 × D150mm



(a) SUS304 の加工物

(b) A 部拡大図

図 4.3 スクエアエンドミルによる加工物

## 4.2.2 スクエアエンドミル加工面とレプリカ

図 4.4 に示す加工物の加工面のレプリカは、その素材には表 2.1 に示す透明液状シリコーンゴム<sup>2.5)</sup>を用い、その製作方法は図 2.7 と同様にレプリカの厚さが 5mm 程度になるように型に流し込み、約 12 時間経過した後型から固形化した透明液状シリコーンゴムを取り外す。このとき、透明液状シリコーンゴム中の気泡や塵等がなく反映面反対の表面起伏のムラがないことを確認する。レプリカで転写した加工面側が反映面となり、その反対側は背面側であり、入射光はこの背面側に照射される。図 4.3 (a) の加工面を転写したレプリカの反映面の写真が図 4.4 (a) であり、図 4.3 (a) で観察された表面性状が転写されている。さらに、送り量 0.80mm/rev を 5 倍に拡大した同図 (b) からは、図 4.3 (b) で述べたような凹凸や稜線の交差している状況が転写されている。この被測定物を使って、スクリーン上の透過像から粗さ  $R_r$  を推定し、これを接触式表面粗さ測定機<sup>2.6)</sup>の粗さと比較する。

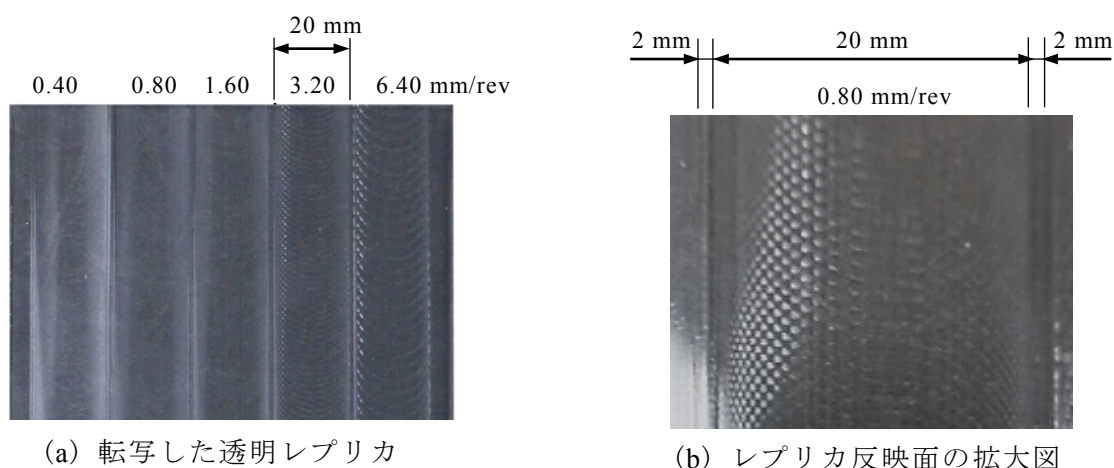


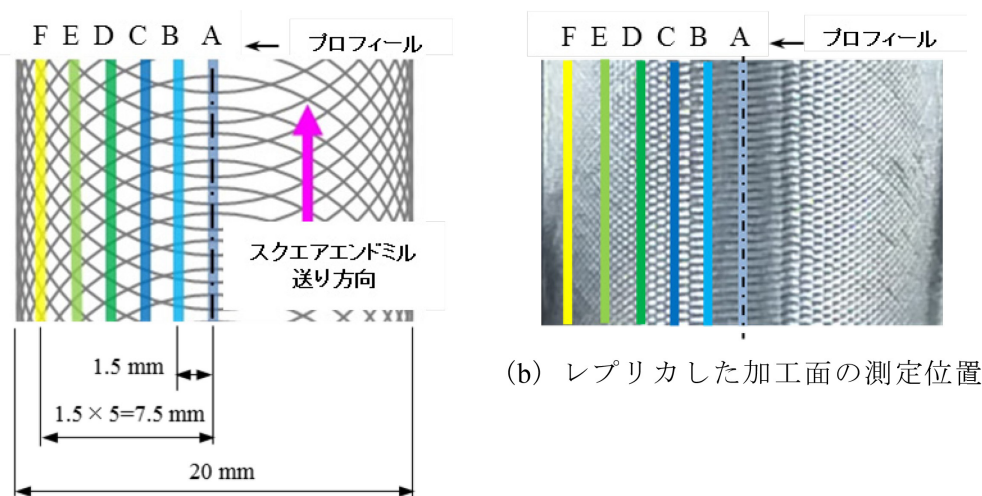
図 4.4 スクエアエンドミル加工面を転写した透明レプリカ

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 加工面の測定位置

図 4.4 で採取したスクエアエンドミル加工面のレプリカから、測定対象とするプロフィールについて検討する。図 4.5 (a) は、スクエアエンドミル 2 枚刃の円周先端が送り量 0.80mm/rev において、矢印方向に切削した際の刃物軌跡を幾何学的に表した図である。同図 (b) はその送り量に対応したレプリカ反映面の写真である。スクエアエンドミル加工による切削痕の稜線の特徴は、刃物の中心付近の水平に近似する送り方向の位置を A として、

これより外側の左側方向に 1.5mm 離れた位置を B, 同様にその位置が外側に離れる方向に C, D, E, および F のようにプロフィールの位置を選択した. その理由として, 切削痕の稜線が中央部のほぼ水平の部分から外側に離れるにしたがい, 稜線の交差する角度も大きくなるため, これらの形態が透過像に現れると考えたからである. この透過像から最大高さ粗さ  $R_r$  や稜線の間隔からピッチ  $P$  が算出できる.



(a) 稜線を幾何学的に表した測定位置

図 4.5 加工面からレプリカした被測定物の測定位置, 送り量 0.80mm/rev

#### 4.3.2 プロフィール A の表面粗さ

図 4.5 に示すプロフィール A 方向の任意の位置における光学顕微鏡<sup>27)</sup>の写真は図 4.6 (a), その透過像写真が同じく (b), および接触式表面粗さ測定機の粗さ曲線は同じく (c) にそれぞれ示す. (a) の二点鎖線の稜線は送り方向に対してほぼ水平で等間隔に並んでいる. これらの稜線が作る相対角度を  $2\theta$  と置けば, この方向の測定値は  $2\theta=0\text{deg}$  となる. 上下の稜線は山の先端部分にあたり, その中間が谷の部分である. この送り方向で測定した粗さ曲線が (c) であり, これの最大高さ粗さ  $R_z=17.8\mu\text{m}$ , 山と山のピッチ  $P=0.40\text{mm}$  である. この曲線において三角山が形成されているのは山から谷に向かって約  $12\mu\text{m}$  までであり, 谷の部分には小さい凹凸が連続する. これを転写したレプリカの透過像は (b) であり, 上下方向が (a) の送り方向および (c) の山側の左右方向と一致する.

この透過像について説明する. 2ヶ所の白丸印の中の輝度が強い赤点は, 図 2.3 の原理



の  $m=0$  次のスポット点であり，図 4.6(c) の三角山両側のブレード面で回折したスポット点で，この 2 点間の中心間距離が  $2S_\mu$  である．次に  $m=0$  次の上下に現れているスポット点が  $m=\pm 1$  次の点であり，この  $m=0$  次と  $m=\pm 1$  次のスポット点中心間距離が  $S_p$  である． $2S_\mu$  と  $S_p$  は，(c) の粗さ曲線の  $Rz$  と  $P$  に相当する寸法であり，式 (2.12) と式 (2.13) から  $Rz$  と  $P$  が算出できるため， $2S_\mu$  と  $S_p$  の測定精度が  $Rz$  と  $P$  の精度に反映される．表 4.5 はレブリカに照射するレーザ光の位置を 5 ヶ所変えた値平均値から求めた値である．透明液状シリコーンゴムの屈折率  $n_r=1.40$ ，大気の屈折率  $n_a=1.00$  を用いている．最大高さ粗さで比較すると算出値は  $R_r=18.0\mu\text{m}$ ，測定値は  $Rz=17.8\mu\text{m}$  となり，同程度の数値である．また，算術平均粗さの算出値  $R_{rc}$  は最大高さ粗さ  $R_r$  の 1/4 としている．なお，表中の有効数字について，算出値に用いる平均値  $S_p$  と  $2S_\mu$  は，それぞれ小数点以下第 2 位と小数点以下第 1 位としている．

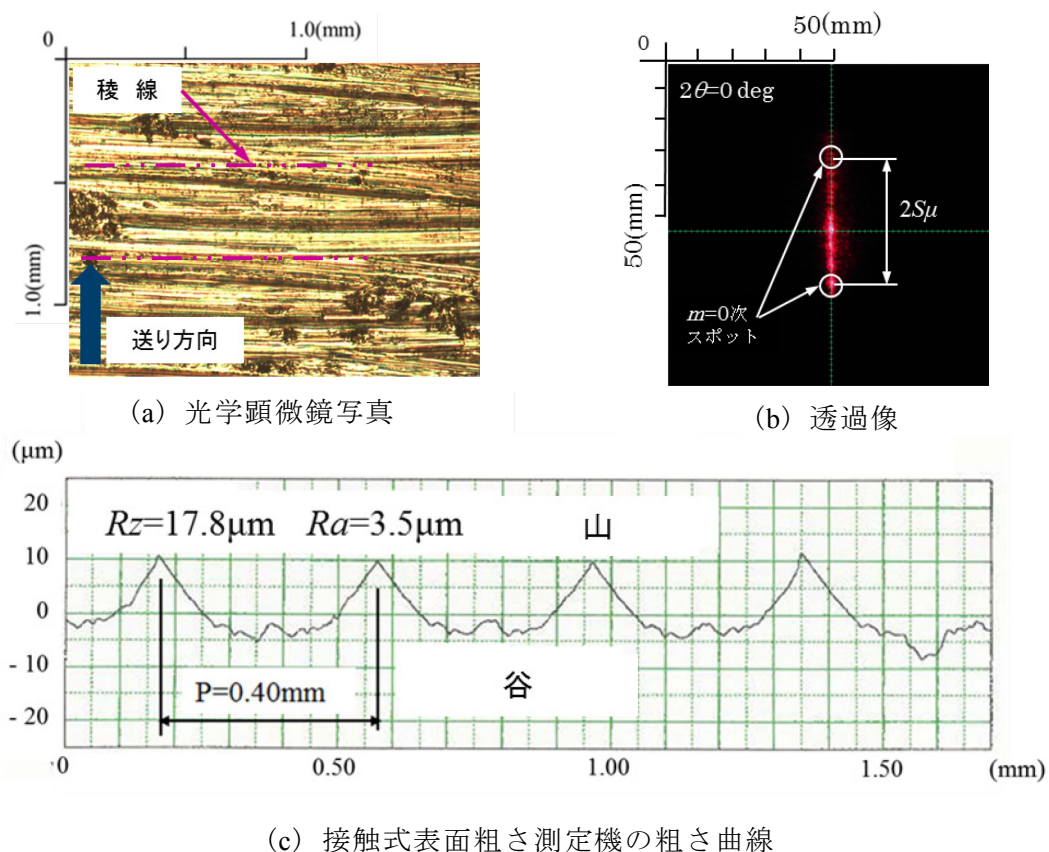


図 4.6 プロフィール A における透過像パターンと表面粗さ

表 4.5 プロフィール A の表面粗さ

測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	0.96
測定値 $2S_\mu$ mm	43.0	45.0	44.0	43.0	43.0	43.6
ピッチ $P$ mm	送り量		0.40			
	算出値		0.40			
	触針粗さ		0.40			
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$		18.0			
	触針式 $R_z$		17.8			
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$		4.5			
	触針式 $R_a$		3.5			
切削痕交差角度 deg	$2\theta$		0			

#### 4.3.3 プロフィール B, C, D, および E の表面粗さ

図 4.5 に示すプロフィール B, C, D, および E 方向の任意の位置における光学顕微鏡写真, 透過像写真, および接触式表面粗さ測定機の粗さ曲線をそれぞれ図 4.7, 図 4.8, 図 4.9, および図 4.10 に示す.

プロフィール B はカッターマークの中心であるプロフィール A から 1.5mm 外側に移動した上下方向の位置であり, 図 4.7(a) の稜線が作る山ごとの相対角度  $2\theta$  の値は  $2 \times 9\text{deg}$  であった. この方向で測定した粗さ曲線が(c)であり, これの最大高さ粗さ  $R_z=23.9\mu\text{m}$ , 山と山のピッチ  $P=0.40\text{mm}$  であった. この曲線において転写したレプリカの透過像は (b) であり, カッターマーク (a) の方向と  $90\text{deg}$  の方向に  $2\theta$  となるスポット点が並んでいる. この点の並びをスポットラインと呼ぶ. スポットラインは, 図 4.7(c) の三角山両面のブレード面で回折したスポット点が上下に現れるため, 交差角度  $2\theta$  は三角山両面の交差角度と一致しており, 回折光はカッターマークである三角山の方向と  $90\text{deg}$  の方向に結像する. すなわち, (a) の  $2\theta$  で交差した稜線の透過像は, その交差角度に相当したスポット点が並んで現れており, 交差角度の数値は  $2\theta=2 \times 9\text{deg}$  となっていた.

プロフィール A で示した表 4.5 と同様に, 表 4.6 にはプロフィール B の測定結果と算出結果をそれぞれ示す. 最大高さ粗さで比較すると算出値は  $R_r=18.8\mu\text{m}$ , 測定値は  $R_z=23.9\mu\text{m}$

となり，同程度の数値である．

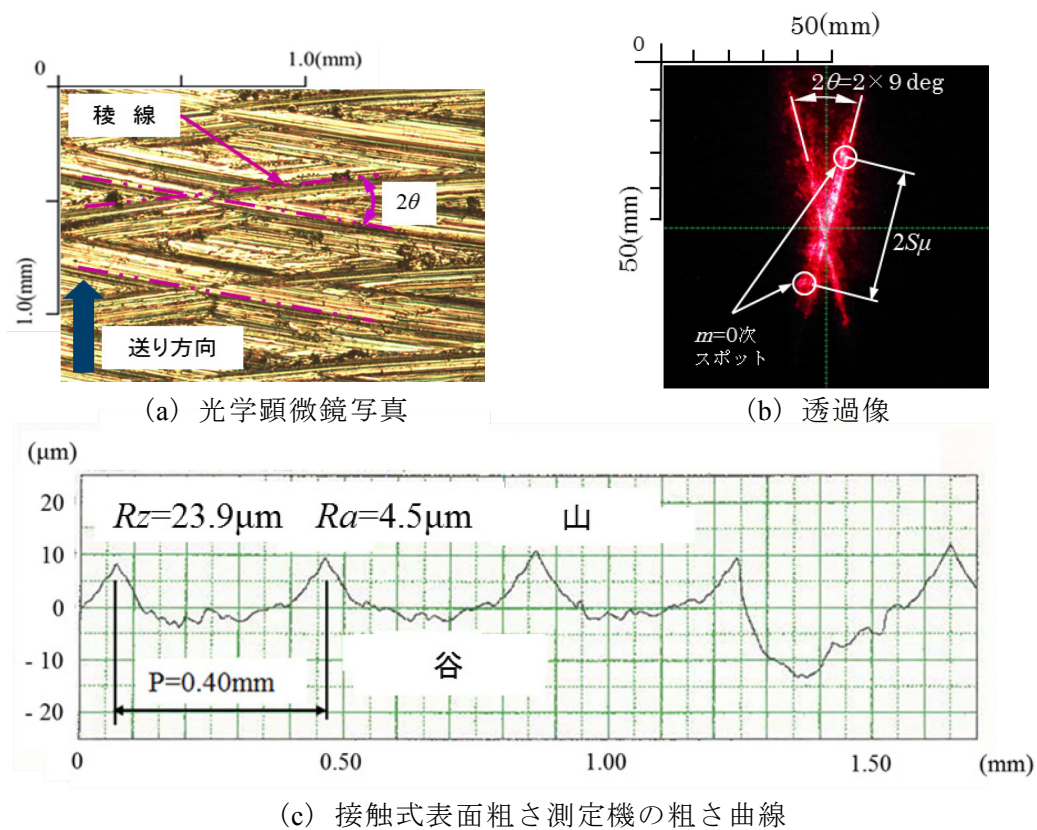


図 4.7 プロフィール B における透過像パターンと表面粗さ

表 4.6 プロフィール B の表面粗さ

測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.88
測定値 $2S_\mu$ mm	42.0	41.0	42.0	41.0	42.0	41.6
ピッチ $P$ mm	送り量	0.40				
	算出値	0.43				
	触針粗さ	0.40				
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$	18.8				
	触針式 $R_z$	23.9				
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$	4.7				
	触針式 $R_a$	4.5				
稜線交差角度 deg	$2\theta$	$2 \times 9$				

続いて、プロフィール C, D, および E のカッターマークは、1.5mm 間隔でカッター外周側にそれぞれ位置した上下方向である。これらの顕微鏡写真を (a) に示し、そのカッターマークが作る相対角度  $2\theta$  は、 $2 \times 18\text{deg}$ ,  $2 \times 27\text{deg}$ , および  $2 \times 37\text{deg}$  であり、スクエアエンドミル外周側に寄るプロフィールごとに大きくなる。この方向で測定した粗さ曲線が (c) であり、これらの最大高さ粗さは  $R_z=17.8\mu\text{m}$ ,  $12.0\mu\text{m}$ , および  $10.4\mu\text{m}$ , となり、ピッチはすべて  $P=0.40\text{mm}$  であった。これらの曲線において転写したレプリカの透過像は (b) であり、稜線 (a) の方向と  $90\text{deg}$  の方向に、(a) の  $2\theta$  と同じ交差角度でスポットラインが形成されていることが確認できる。プロフィール C, D, および E の測定結果と算出結果を表 4.7, 表 4.8, および表 4.9 に示す。これらの結果から最大高さ粗さ  $R_r$  は、 $R_r=14.4\mu\text{m}$ ,  $8.8\mu\text{m}$ , および  $8.0\mu\text{m}$  と求められており、前述の  $R_z$  と同程度の数値である。

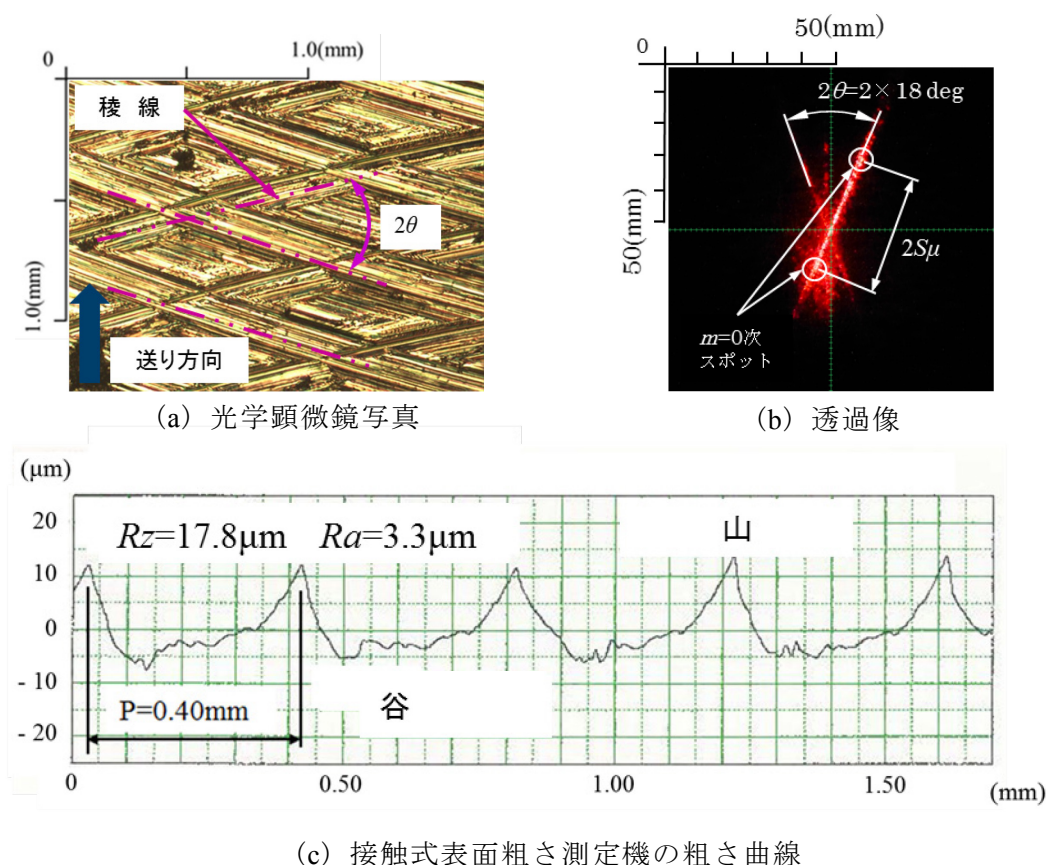


図 4.8 プロフィール C における透過像パターンと表面粗さ

表 4.7 プロフィール C の表面粗さ

測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0
測定値 $2S_\mu$ mm	36.0	36.0	37.0	35.0	37.0	36.2
ピッチ $P$ mm	送り量		0.40			
	算出値		0.38			
	触針粗さ		0.40			
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$		14.4			
	触針式 $R_z$		17.8			
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$		3.5			
	触針式 $R_a$		3.3			
稜線交差角度 deg	$2\theta$		$2 \times 18$			

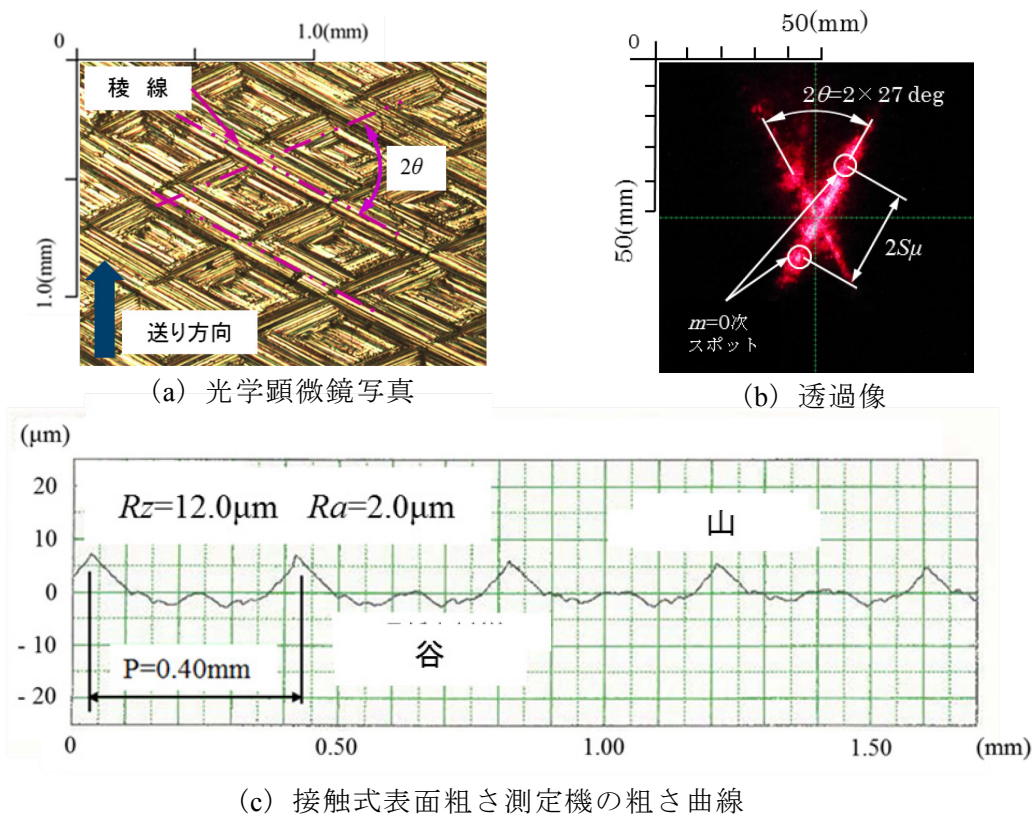
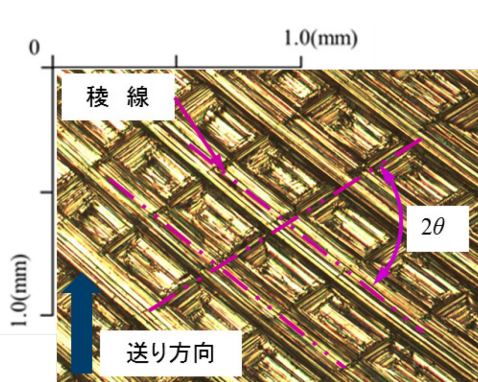


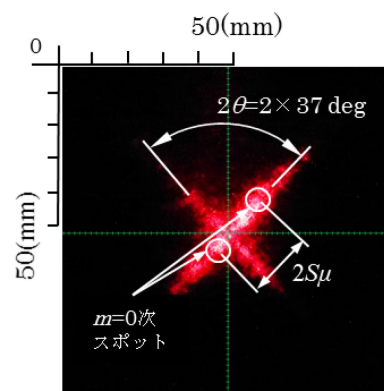
図 4.10 プロフィール D における透過像パターンと表面粗さ

表 4.8 プロフィール D の表面粗さ

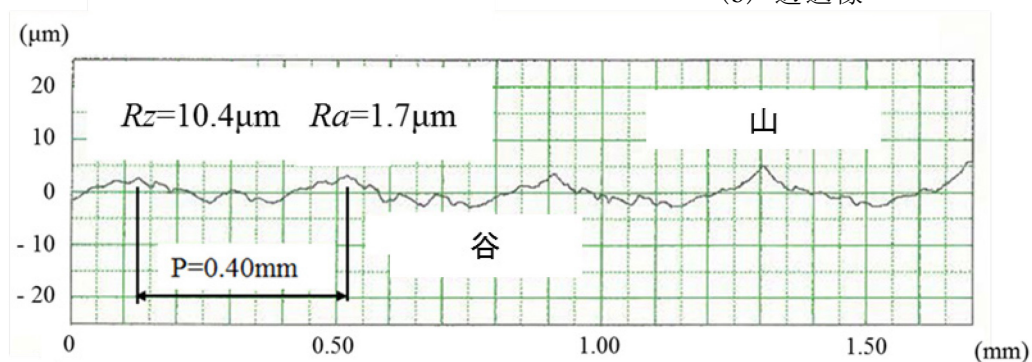
測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.98
測定値 $2S_\mu$ mm	24.0	22.0	20.0	22.0	20.0	21.6
ピッチ $P$ mm	送り量		0.40			
	算出値		0.39			
	触針粗さ		0.40			
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$		8.8			
	触針式 $R_z$		12.0			
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$		2.2			
	触針式 $R_a$		2.0			
稜線交差角度 deg	$2\theta$		$2 \times 27$			



(a) 光学顕微鏡写真



(b) 透過像



(c) 接触式表面粗さ測定機の粗さ曲線

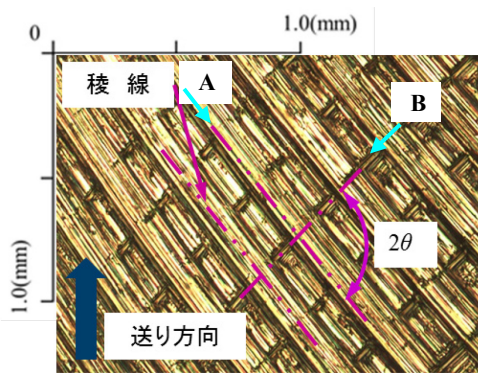
図 4.11 プロフィール E における透過像パターンと表面粗さ

表 4.9 プロフィール E の表面粗さ

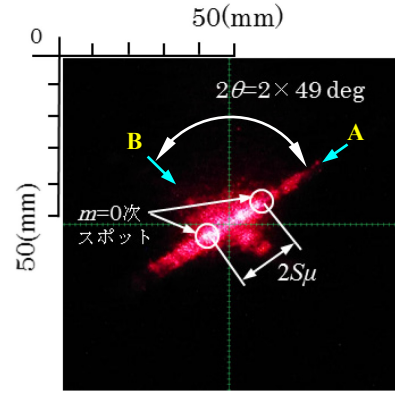
測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.94
測定値 $2S_\mu$ mm	19.0	18.0	19.0	20.0	19.0	19.0
ピッチ $P$ mm	送り量		0.40			
	算出値		0.41			
	触針粗さ		0.40			
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$		8.0			
	触針式 $R_z$		10.4			
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$		2.0			
	触針式 $R_a$		1.7			
稜線交差角度 deg	$2\theta$		$2 \times 37$			

#### 4.3.4 プロフィール F の表面粗さ

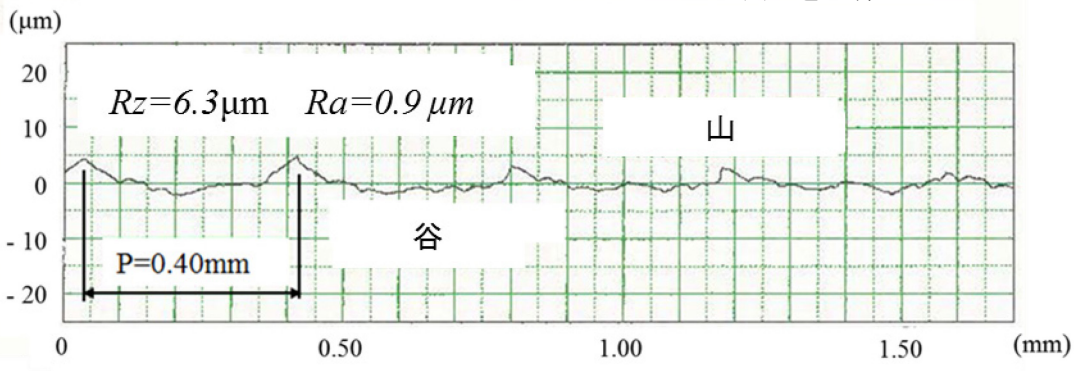
図 4.11 にはプロフィール E より 1.5mm 外周側に寄ったプロフィール F 方向の任意の位置における光学顕微鏡の写真，その透過像写真，および接触式表面粗さ測定機の粗さ曲線をそれぞれ (a)，(b)，および (c) に示す。(a) の一点鎖線が交差している稜線が作る相対角度の測定値は  $2\theta=49\text{deg}$  となった。上下の送り方向で測定した粗さ曲線からの最大高さ粗さは  $R_z=6.3\mu\text{m}$ ，ピッチはすべて  $P=0.40\text{mm}$  であった。図中矢印 A で示す稜線の幅は広く，これに交差する矢印 B の稜線は狭くなっており，(c) の粗さ曲線の山谷からそれぞれ約  $6\mu\text{m}$  と約  $3\mu\text{m}$  と読み取れる。この凹凸の大きさの違いが (b) の透過像にも現れており，矢印 A の三角山が高い回折光の方が強い輝度のスポットラインとして現れ，これに対して三角山が低い矢印 B では明瞭ではないがスポットラインは確認でき，その交差角度は約  $2\theta=49\text{deg}$  である。表 4.10 はレプリカに照射するレーザー光の位置を 5ヶ所変えた値の平均値である。最大高さ粗さで比較すると算出値は  $R_r=7.2\mu\text{m}$ ，測定値は  $R_z=6.3\mu\text{m}$  となり，同程度の数値である。



(a) 光学顕微鏡写真



(b) 透過像



(c) 接触式表面粗さ測定機の粗さ曲線

図 4.12 プロフィール F における透過像パターンと表面粗さ

表 4.10 プロフィール F の表面粗さ

測定回数	1	2	3	4	5	平均値
測定値 $S_p$ mm	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.94
測定値 $2S_\mu$ mm	18.0	17.0	16.0	16.0	18.0	17.0
ピッチ $P$ mm	送り量	0.40				
	算出値	0.41				
	触針粗さ	0.40				
最大高さ粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_r$	7.2				
	触針式 $R_z$	6.3				
算術平均粗さ $\mu\text{m}$	算出値 $R_{rc}$	1.8				
	触針式 $R_a$	0.9				
稜線交差角度 deg	$2\theta$	$2 \times 49$				



#### 4.3.5 触針式表面粗さと光透過式レプリカの粗さ比較

図 4.5 に示した稜線に対する表面粗さを測定するプロフィール A から F について、測定値と算出値を表 4.5 から表 4.10 に示した。図 4.13 は、これらの表面粗さを整理したものである。図中の  $R_{rc}$  は、算術平均粗さ  $R_a$  と比較するために最大高さ粗さ  $R_r$  を単純に四分の一とした値である。同様に図 4.14 には、光学顕微鏡で観察した稜線の交差角度とレプリカによる透過像からの交差角度を表している。両者の  $2\theta$  は、表 4.5 から表 4.10 から分かるように同じ数値になっているため、図中では透過像からの数値を優先し丸印のシンボルマークで表示している。

光透過式レプリカによる加工面の表面粗さは入射光により回折した透過像寸法から算出しており、この測定法の有効性については触針式表面粗さ測定機との比較によって行っている。プロフィール A から F の最大高さ  $R_r$  は、触針式の最大高さ  $R_z$  と近似している。最大高さ粗さは、第 2 章の図 1.3 で述べたように「基準長における輪郭曲線の山高さ  $Z_p$  の最大値と谷深さ  $Z_v$  の最大値との和」と定義されている。この  $R_z$  の測定では、傷とみなされるような並はずれて高い山および低い谷がない部分から、基準長さだけ抜き取る付帯事項もあり、測定位置によっては  $R_z$  の値が大きくばらつくこと分かる。したがって、 $R_r$  と  $R_z$  は同じ値と考えてよい。次に  $R_z$  のばらつきを平均化する手法として算術平均粗さ  $R_a$  の表示があり、図中には  $R_a$  と  $R_{rc}$  で示している。両者の関係からプロフィール A から F は近似の値である。また、スクエアエンドミルの稜線中心部 A から外周の F に向かう B から E の粗さ値は、小さくなる傾向にある。これは、図中の挿入図からも分かるように、稜線のピッチ間隔は外周側に寄るほど山高さが低くなり、これと粗さ値が相関しているからである。これらにより、提案した光透過式レプリカを用いた加工面の表面粗さは、測定可能であることが分かった。

稜線の交差角度  $2\theta$  については、スクエアエンドミルの回転速度と送りの数値により決定されるもので、平面上の幾何学的に連続した模様となる。交差する稜線の三角山の高さ寸法が、同じ高さで交差する場合と一方が低く交差する場合について考察する。同じ高さの透過像は、稜線の交差方向と位相角度  $90\text{deg}$  の方向に、同程度の輝度となるスポットラインが現れ、プロフィール A, B, および C はこれに相当する。高さが異なる透過像では、高い山側は輝度が強く低い山側はこれと比べて輝度が弱いスポットライン現れて、交差角が形成される。プロフィール D, E, および F はこれに相当している。高低差のある稜線が交差した透過像の  $2S_\mu$  は、高低差の度合で異なるので、これらの違いにより稜線ごとの

最大高さ粗さ  $R_r$  が算出できる。本実験では、輝度が強いスポットラインを優先した。交差角度  $2\theta$  は、透過像に交差するスポットラインが明瞭に現れれば精度よく測定できる。これの詳細については次節で述べる。

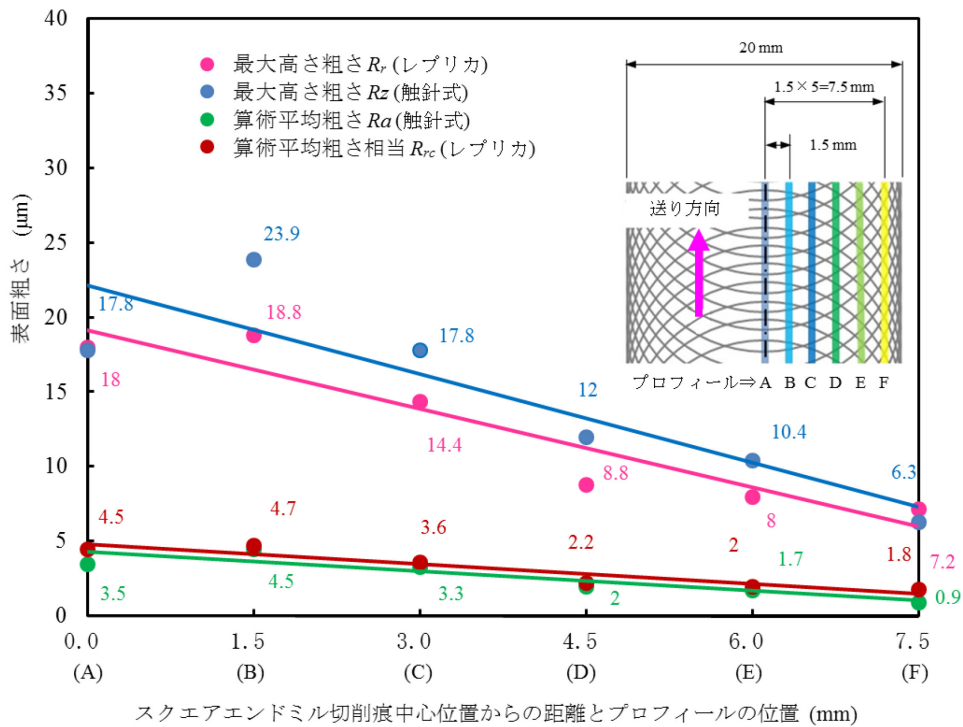


図 4.13 触針式表面粗さの測定値と光透過式レプリカによる測定値の測定結果比較

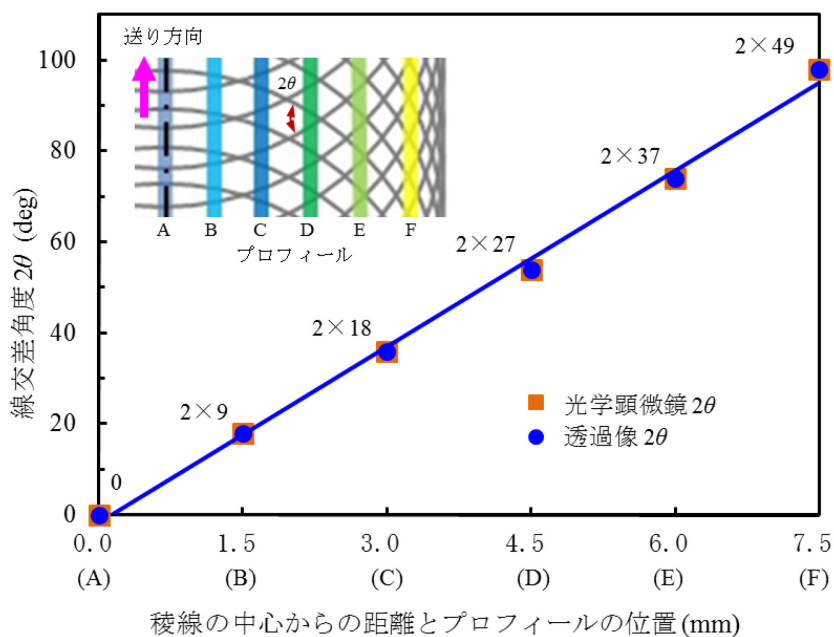


図 4.14 光学顕微鏡と透過像の稜線交差角度の比較

#### 4.3.6 稜線の交差角度

図 4.14 に示すプロフィール A から F の稜線により形成された交差角度  $2\theta$  がレプリカ透過像に現れる現象の説明と、この交差角度からスクエアエンドミルの稜線が推定可能な点について説明する。一般的に表面粗さは、稜線の凹凸を測定するためその方向に対して概ね垂直方向に基準長さが設定される。接触式表面粗さ測定機や非接触式表面粗さ測定装置においては、交差角度が容易に推定できないが、提案する光透過式レプリカでは容易に推定できる特長を有している。

稜線の交差角度の説明には、図 4.15 に示す三角山の高さおよびそのピッチが等しい同心円の 3 山を模式した図により行う。描いた線の部分は三角山の山頂の部分であり、これをレプリカで転写した部分を a, b, および c とおいて、これらの部分は a の部分の Y 軸を基準として  $2\theta=45\text{deg}$  右に位置した部分を b,  $2\theta=90\text{deg}$  右に位置した部分を c とする。この 3 点をとるレプリカ断面の輪郭を同心円の外側に 3 山として示している。a の断面を取り上げたレプリカの透過像 a' から説明する。入射光は矢印で示すように右側からレプリカに入り、その反対側の反映面の三角山から回折した光はその右側に示した透過像となり、Y 軸方向に並んだスポットラインとなる。これは、輝度が強く大きなスポットが X 軸を対称に上下に  $m=0$  次で現れ、これに対称となる小さいスポットが上下に  $m=\pm 1$  次のスポットが現れている模式図である。このスポットラインは、三角山の山頂部が X 軸方向に対して直角方向に現れるため、山頂が連なる方向に対して位相角度  $90\text{deg}$  の所に連なる。同様に、b と c の  $2\theta$  が  $45\text{deg}$  と  $90\text{deg}$  の場合も山頂の方向に対して位相角度  $90\text{deg}$  の所に透過像 b' と c' は現れる。

上記のスポットラインは、山頂が平行に並んでいる場合であり、これが交差した場合について述べる。三角山 a と b が  $2\theta=45\text{deg}$  で交差した場合の透過像は図中右側上方の a' と b' のスポットライン  $2\theta$  の交差角度で現れ、各スポットラインの中央となる  $\theta$  の線に対して対称に現れる。同じく三角山が  $90\text{deg}$  で交差する a と c の場合は、図中右側下方の a' と c' のスポットラインが交差角度  $\theta$  の線に対称の位置に現れる。ここで示した透過像のスポットラインの交差角度  $2\theta$  からは、三角山の山頂の連なる方向が位相角  $90\text{deg}$  で換算することで、実体表面に形成された山頂が連なる交差角度が推定可能となり、 $\theta$  を基準線に設定した場合にはこれに対称となる  $2\theta$  から実体の交差角度が求められる。図 4.14 の結果は模式図で示した測定方法で数値化したものであるが、図 4.6 から図 4.12 の (a) に示した光学顕微鏡からの実体とこれのレプリカからの透過像 (b) には良い一致が見られた。

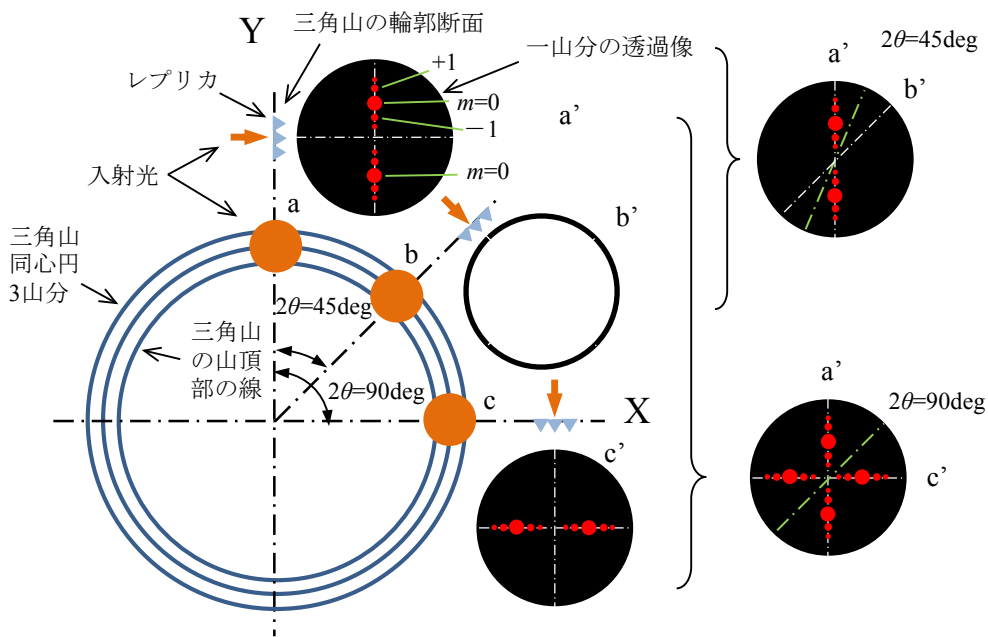
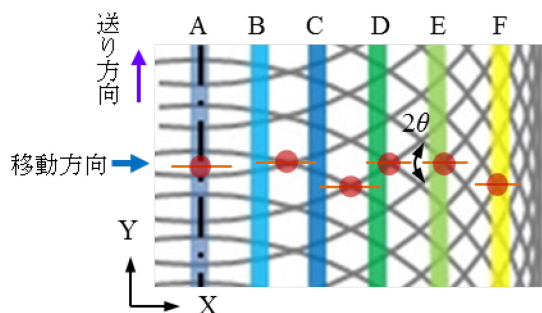


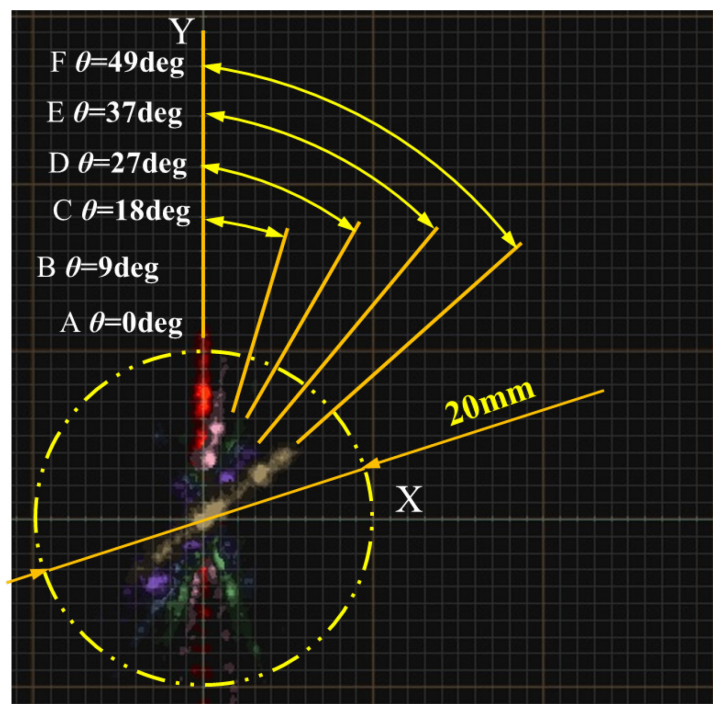
図 4.15 稜線を三角山に模式化し，そのレプリカと透過像

図 4.15 で述べた三角山が連なる凹凸が交差して形成された交差角度の推定について，図 4.5 に示す稜線を用いて示す．図 4.16(a) に示す稜線の形成は，Y 軸方向が切削工具の送り方向，X 軸方向が切削工具の直径方向である．これより転写したレプリカはこれと同じ方向になるよう試験装置に設置し，これにレーザ光を照射しながら右矢印で示す X 軸右側に移動すれば，稜線が交差している所の回折像が得られる．レーザ光の直径がスキャンするモードを幅が広い線で現わし，プロフィール A から F の部分で現れた透過像のスポットラインから  $2\theta$  を求め，プロフィール A から F のスポットラインと  $\theta$  を図 4.16(b) に示す．この図はプロフィール A から F のスポットラインをまとめたものであり，交差角度は Y 軸を基準とすれば対称に現れるため，角度は  $\theta$  でそれぞれ示している．この交差角度は(a)に示した  $2\theta$  と印した丸点の A から F の部分に相当する．プロフィール A の稜線は X 軸方向のほぼ水平に並んでいるため，これに対して位相角度  $90\text{deg}$  の Y 軸方向にスポットラインは現れる．同図(b)の Y 軸方向に対して  $\theta=0\text{deg}$  のスポットラインとなっている．同じく，プロフィール B から F までの交差角度を Y 軸に対称となる角度  $\theta$  とおいて算出すれば，それぞ

れ, 9deg, 18deg, 27deg, 37deg, および 49deg となる. この測定事例から分かるように, 稜線が交差するレプリカにおいては, 入射光を X 軸方向に移動するだけで, 最大高さ粗さ  $R_r$  およびその交差角度  $2\theta$  が容易に推定することが可能である. なお, 図 4.14 で整理した 図 4.6 から 図 4.12 のプロフィール A から F の透過像(b)からの交差角度  $\theta$  と 図 4.16 の交差角度は一致している.



(a) プロフィール A から F とレーザー光の移動方向



(b) 透過像 A から F の交差角

図 4.16 プロフィール A から F のスポットライン合成図

#### 4.4 結 言

光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定方法の有効性を確かめるために、金属の加工物にスクエアエンドミルで切削加工して残った切削痕の凹凸を対象として、その検証を行った。表面粗さの検証には、基準を接触式表面粗さ測定機の  $R_z$  と  $R_a$  とおいて、これに対してレプリカからの  $R_r$  と  $R_{rc}$  を比較して行った。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 光透過式レプリカによる最大高さ粗さ  $R_r$  と触針式の最大高さ粗さ  $R_z$ 、および  $R_r$  からの  $R_{rc}$  と触針式の算術平均粗さ  $R_a$  の数値には、大差がなく同等の数値であった。
- (2) 円形状が送り方向に連続して形成される切削痕においては、円形状の中心部とその外周方向に向かって稜線が交差する。この交差角度  $2\theta$  に応じた透過像がスポットラインとなって現れる。
- (3) スポットラインのスポット間隔から表面粗さ  $R_r$  が求められる。
- (4) 交差したスポットラインの角度から、この角度に対して位相角度  $90\text{deg}$  回転した方向に切削痕の稜線が交差した実体がある。
- (5) 切削痕をレプリカした透過像からは、最大高さ粗さ  $R_r$  と稜線の交差角度  $2\theta$  も分かる。

## 参考文献

- 1) 横田 理, 谷田部幸太郎, 長尾光雄, 神馬洋司, 齋藤明德, “透明レプリカ法による加工表面の粗さ測定方法の提案”, 日本機械学会 C 編, Vol.78, No.787(2012), pp.842-851
- 2) JIS B 0659-1, “製品の幾何特性仕様 (GPS) –表面性状: 輪郭曲線方式; 附属書 1 (参考) 比較用表面粗さ標準片”, 日本規格協会(2002).
- 3) 例えば, 日本金属電鍍株式会社:比較用表面アラサ標準片.
- 4) 河村 拓哉, 岡部 孝弘, 佐藤 洋一, “拡散反射板を用いた光源の放射輝度分布の計測”, 情報処理学会, 2013-CVIM-186(7) (2013), pp.1-5.
- 5) ALI Maifuz, ANDO Makoto, “Fast Estimation of Shadowing Effects in Millimeter-Wave Short Range Communication by Modified Edge Representation”, IEICE Transactions on Communications, E98.B(9), (2015), pp.1873-1881.
- 6) Oshiyama Fumika, Murakami Naoshi, Guyon Olivier, Martinache Frantz, Baba Naoshi, Matsuo Taro, Nishikawa Jun, Tamura Motohide, “Central-Obscuration Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126(937), (2014), pp. 270-279.
- 7) Hoshino Tetsuya, Banerjee Saswatee, Itoh Masahide, Yatagai Toyohiko, “Diffraction pattern of triangular grating in the resonance domain”, Journal of the Optical Society of America, A 26(3), (2009), pp. 715-722.
- 8) Go Chun-Soo, Lim Sungwoo, Oh Yong-Ho, Lee Jai-Cheol, “Spatial Frequency Filtering Characteristics of Three-Phase and Two-Phase Two-Dimensional Gratings”, Japanese Journal of Applied Physics, 43(8A), (2004), pp. 5352-5356.
- 9) 山崎正之, “厚い回折格子としてとらえたブレード回折格子”, 東海大学紀要, 工学部 39(2), (1999), pp.45-47.
- 10) 工藤 恵栄, 上原 富美哉, “基礎光学”, 現代工学社, (1990).
- 11) 鶴田 匡夫, “応用光学 I”, 培風館, (1993).
- 12) 安藤 幸司, “光と光の記録「光編その 2—光の属性・干渉・回折」”, 産業開発機構株式会社, (2007), pp.133-145.
- 13) LI J, “Electrooptic wafer beam deflector in LiTaO<sub>3</sub>”, IEEE Photonics Technol, Lett. 8(11), (1996) pp.1486-1488.
- 14) LEE T. C, “Light deflection with electrooptic prisms”, IEEE J. Quantum Electron, QE-4(7), (1968) pp.442-454.

- 15) 小林 幸一, “光の物理”, 東京大学出版会, (2009), pp.4-5 .
- 16) 青木 貞雄, “光学入門”, 共立出版株式会社, (2002), pp.101-115 .
- 17) 栗田 正則, 鄧 智聡, “散乱光を用いた直交二方向の光学的表面粗さ測定法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63-605 (2002), pp.254-261.
- 18) 新井 泰彦, 横関 俊介, “電子スペックル干渉計測のためのフーリエ変換技術を用いた 2 枚のスペックルパターンによる空間的縞解析法”, 精密工学会, 学術講演会講演論文集 2013S(0), (2013), pp. 7-8.
- 19) 鈴木伸哉, 神谷和秀, 松本公久, 岩塚健一, 前田幸男, 野村俊, “結像を用いた工具の刃先位置検出に関する研究:(第 2 報) 光学シミュレーションを用いた照明光学系の開口数に対するスクエアエンドミルの刃先位置の誤差”, 精密工学会 C 編, 80(6), (2014), pp. 609-614.
- 20) 堂田邦明, “金型のしくみ”, ナツメ社, Chapter6 切削加工・フライス加工, (2010) .
- 21) 谷田部 幸太郎, 横田 理, 齋藤 明德, 長尾 光雄, 神馬 洋司, “光透過式レプリカ法によるスクエアエンドミル加工面の粗さ測定に関する研究”, 日本機械学会 C 編, Vol.81, No.821(2015), pp. 14-00204.
- 22) オーエスジー株式会社: ハイススクエアエンドミル SUS-EDS20, HSS END MILLS 2015 カタログ, pp.157.
- 23) 例えば, 株式会社山崎技研社製: NC フライス盤 YZ-400NCR.  
<http://www.yamasakigiken.co.jp/>
- 24) JIS G 4303, “ステンレス鋼棒”, 日本規格協会(2012).
- 25) 東レ・ダウコーニング・シリコーン株式会社: 透明液状シリコーン CY52-205.
- 26) JIS B 0651, “製品の幾何特性仕様(GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式-触針式表面粗さ測定機の特性”, 日本規格協会(2001).
- 27) 例えば, 株式会社ニコン: 研究用偏光顕微鏡 ECLIPSE LV100N POL / Ci-POL.



## 第5章 素材の違いによる透明レプリカの透過像特性

### 5.1 緒言

第3章と第4章の光透過式レプリカのレプリカ素材には、第2章の表2.1に示す2液エラストマー系の素材であるが、本論文ではこれを「透明液状シリコーンゴム」<sup>1)</sup>と呼んでレプリカ素材として用いている。第3章と第4章では、得られた透過像から加工面の表面粗さおよび稜線の交差角度が推定可能である点を述べている。本章では、加工面の表面粗さ測定に用いる光透過式レプリカ素材として具備すべき要件について検討した。その中でも主な要件には、被測定物にレプリカ素材を流し込む作業の容易さ、被測定物からレプリカ素材を取り外す作業の容易さ、被測定物の凹凸を転写した転写精度の良し悪し、転写したレプリカ情報の経年変化、素材の光透過率などが挙げられる。これらについて、比較対象として用いたレプリカ素材は、透明液状シリコーンゴム<sup>1)</sup>、透明ホットメルト<sup>2)</sup>、透明粘度<sup>3) 4)</sup>、および透明ビニールテープ<sup>5)</sup>である。実験の結果からは、レプリカの転写精度と取り扱い易さから透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトが適している。しかし、硬化までの時間や被測定物の材質の制限を受けることが分かった。

### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 透明レプリカ素材の特性比較

2液混合の透明液状シリコーンゴム<sup>1)</sup>、透明ホットメルト<sup>2)</sup>、透明粘土<sup>3) 4)</sup>および透明ビニールテープ<sup>5)</sup>の4種類の素材の主な特性は表5.1に示す。

#### 5.2.2 透明レプリカの製作

表5.1の4種類の素材は、第3章の表3.1中に示す比較用表面粗さ標準片の中から表5.2に示す4種類を選択した。選定した表面粗さからのレプリカによる透過像の形状には4種類のパターンが確認しており、これの透過像を素材ごとに比較し、レプリカに適する素材を実験的に検討のするためである。

各素材による測定性能を比較するために、次の4種類の試験片について同一箇所のレプリカを製作した。

表 5.1 透明レプリカ素材の特性比較

	透明液状 シリコーンゴム	透明 ホットメルト	透明粘土	透明 ビニールテープ
メーカー名	東レ・ダウコーニン グ株式会社	松村工芸 株式会社	アイボン 産業有限会社	ニチバン 株式会社
型 式	Dow Corning <sup>®</sup> CY52-205	グレースティック・ クリア 7mm	透明粘土 すけるくん	VT-19 透明
化学的性質	シロキサン化合物	エチレン・酢酸ビ ニル共重合体	エチレン・酢酸ビ ニル共重合体に シリカ・セルロー スエーテル・ポリ ビニルピロリド ンを含有	ポリ塩化 ビニール
軟化温度	初期液状状態	84.0℃	初期粘土状態を 保持	初期状態を保持
硬化時間	約 12 時間	6 秒	硬化せず	硬化せず
屈折率	1.40	1.54	1.51	1.54

表 5.2 レプリカ素材に用いた比較用表面粗さ標準片の透過像パターン（表 3.1 参照）

比較用表面粗さの種類	表面粗さ (μm)	形状パターンの分類
(1) ラップ仕上面	Rz0.2	ポイント形状パターン
(3) 放電加工	Rz6.3	円形状パターン
(8) 正面フライス	Ra3.2 (Rz12.5 相当)	回折スポットパターン
(9) 研削用	Ra0.8 (Rz3.2 相当)	楕円形状パターン

表 5.3 には、各素材によるレプリカ製作方法の要点をまとめて示し、次に具体的な製作方法は以下に示す。

1) 透明液状シリコーンゴムを素材としたレプリカの製作は、第 2 章「透明レプリカにおける測定原理の提案」の透明レプリカの作製方法で述べた。

2) 透明ホットメルトを素材としたレプリカは、透明アクリル板に加熱により軟化した透明ホットメルトを滴下した後、標準片の表面に押付けて約 6 秒経過後に標準片表面より剥離する。

3) 透明粘土を素材としたレプリカは、透明アクリル板に 1mm 程度の厚さにした透明粘土に標準片表面を押付け、転写した形状を可能な限り崩さないように標準片表面より剥離する。使用した透明アクリル板は、厚さ 3mm の引抜き材を使用している。

4) 透明ビニールテープを素材としたレプリカも透明アクリル板に SBR 系溶剤形の透明接着剤で接着し、粘着部分に標準片表面を押付けて、その後剥離する。

表 5.3 各素材によるレプリカ製作方法の比較

	ベース材料	接着方法*2)	剥離までの時間
透明液状シリコーンゴム	流し込むトレイ	標準片のトレイに流し込む	約 12 時間
透明ホットメルト	透明アクリル板*1)	過熱しベース材にのせ標準片に押し付ける	約 6 秒
透明粘土	透明アクリル板*1)	厚さ 1mm として標準片に押し付ける	約 30 秒
透明ビニールテープ	透明アクリル板*1)	粘着面を標準片に押し付ける	約 30 秒

\*1) 厚さ 3mm、一片が 30mm の表面も傷がない透明アクリル板

\*2) 透明液状シリコーンゴム、透明ホットメルト、および透明粘土の素材では、標準片表面より転写されるレプリカの粗さ形状が正確に保持されるように、シリコーンスプレ<sup>6)</sup>を比較用表面粗さ標準片の表面に噴霧し、転写を行っている。

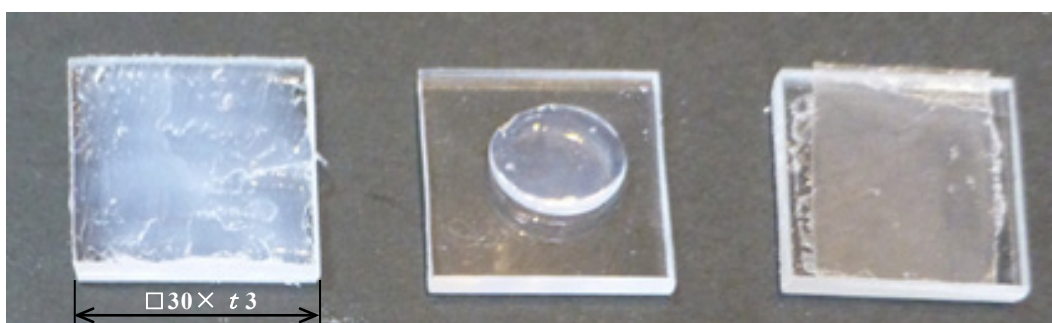
また、透明液状シリコーンゴムを含めた4種の素材ともに、標準片表面より転写されるレプリカの粗さ形状が正確に保持されるように、シリコーンスプレ<sup>6)</sup>を比較用表面粗さ標準片の表面に噴霧し、転写を行っている。図 5.1 には、透明液状シリコーンゴム素材以外の各素材で使用した比較用表面粗さ標準片の表面に剥離剤として塗布したシリコーンスプレと透明ホットメルトを液化させるためのグルーガン<sup>7)</sup>を示す。また、転写前の状態写真を図 5.2 には透明アクリル板に載せた転写前の素材を、それぞれ(a)には透明粘土、(b)には透明ホットメルトを滴下した状態図、(c)には透明ビニールテープを接着した状態図を示す。



(a)剥離剤シリコーンスプレ  
株式会社エーゼット社製  
ドライタイプ(無溶剤) Y007

(b)グルーガン  
太洋電機産業株式会社製  
HB-45

図 5.1 剥離剤として塗布したシリコーンスプレ  
およびホットメルトを液化させるためのグルーガン



(a)透明粘土

(b)透明ホットメルト

(c)透明ビニールテープ

図 5.2 透明粘土、透明ホットメルト、および透明ビニールテープの転写前レプリカ

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 ポイント形状パターンの透過像を比較

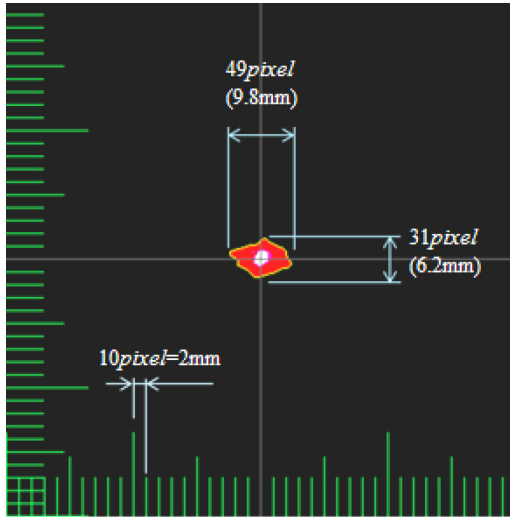
図 5.3 から図 5.6 のスケールの最小目盛の単位は 10pixel で 1pixel は 0.2mm である。背面から照射したレーザー光軸の直径は 0.5mm 一定にして計測した結果である。なお、レプリカ表面とスクリーン間距離  $L$  はフラウンホーファ回折領域<sup>3) ~ 6)</sup> の 600mm とし、カメラの位置やシャッタースピード、倍率も同じ条件で撮影した。

図 5.3 には、表 5.2 のポイント形状パターンの透過像を想定した比較用表面粗さ標準片<sup>1) 2), 1 3)</sup> のラップ仕上げ面の最大高さ粗さ  $Rz0.2$  を対象物として、4 種類のレプリカ素材の透過像を (a) から (d) に示す。この透過像は、撮像した画像を階調処理した後の 1pixel でアウトライン処理した画像である。

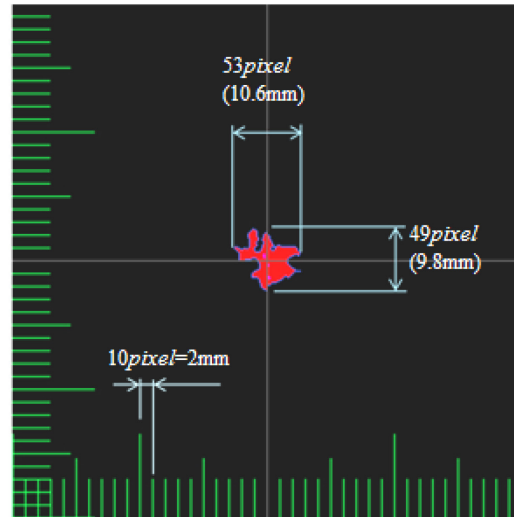
これらの透過像について、(a) の透明液状シリコーンゴムと (c) の透明ホットメルトの透過像の特徴は類似しているが、(b) の透明粘土の透過像では凹凸の大きな変形が認められる。また、(d) の透明ビニールテープの透過像は、面積が小さな円形状透過像パターンの他に、その周辺には点在する斑点が認められる。次に表 5.4 には、各透過像からアウトラインが形成する総面積とアウトラインの全長をそれぞれ 5 回計測した平均値で表し、そこから回転半径  $R_g$  を求めている。回転半径  $R_g$  に着目すれば、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトは同等の数値であることが分かる。同様に、表 5.5 から表 5.7 も同じ方法で算出している。

表 5.4 ラップ仕上げ面  $Rz0.2$  に対する  
透明レプリカ素材の転写性能の比較

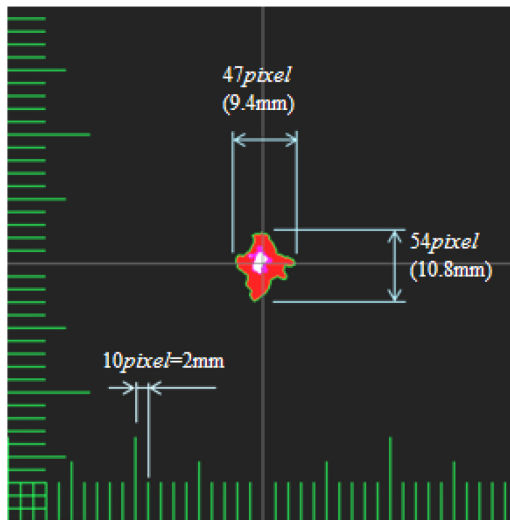
レプリカ素材	透明液状 シリコーンゴム	透明粘土	透明ホットメルト	透明ビニール テープ
アウトラインの 総面積	866( pixel ) 34.6 ( mm <sup>2</sup> )	1043(pixel) 41.6 ( mm <sup>2</sup> )	882(pixel) 35.5( mm <sup>2</sup> )	717(pixel) 28.7( mm <sup>2</sup> )
アウトラインの 全 長	127.8(pixel) 25.7(mm)	226.4(pixel) 45.3(mm)	148.0(pixel) 29.6 ( mm )	132.4(pixel) 26.5(mm)
回転半径 $R_g$	16.6(pixel) 3.32(mm)	18.2(pixel) 3.64(mm)	16.8(pixel) 3.36(mm)	15.1(pixel) 3.02(mm)



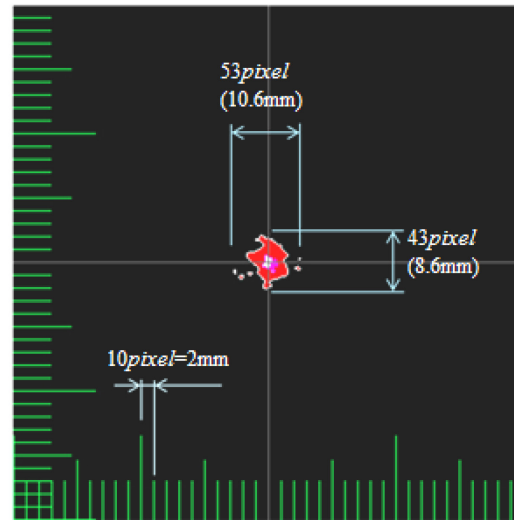
(a) 透明液状シリコーンゴム



(b) 透明粘土



(c) 透明ホットメルト



(d) 透明ビニールテープ

図 5.3 レプリカ素材によるポイント形状パターンの透過像を比較  
比較用表面粗さ標準片のラップ仕上げ面 Rz0.2 の場合

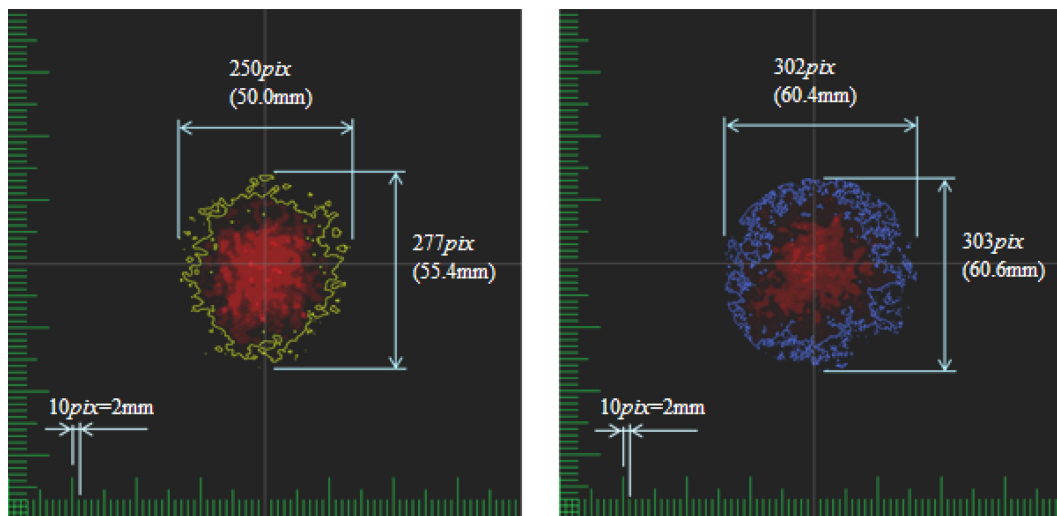
### 5.3.2 円形状パターンの透過像を比較

図 5.4 には、表 5.2 の円形状パターンの透過像を想定した比較用表面粗さ標準片の放電加工した最大高さ粗さ  $Rz6.3$  を対象物として、4 種類のレプリカ素材の透過像を (a) から (d) に示す。この透過像は、撮像した画像を階調処理した後の 1pixel でアウトライン処理した画像である。

これらの透過像について、(a) と (c) の透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトの透過像の特徴は、主な透過像のアウトラインおよびその周辺に点在する斑点の分布状態は類似している。(b) の透明粘土の透過像では、アウトラインによる面積が大きく、その周辺に点在する斑点が多数認められる。また、(d) の透明ビニールテープの透過像は、アウトラインによる面積が非常に小さくその周辺に点在する斑点も他と比べて少ない。表 5.5 に各レプリカ素材からのアウトラインによる総面積とアウトラインの全長、および回転半径  $R_g$  を示す。回転半径  $R_g$  は、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトは同等の数値であることが分かる。

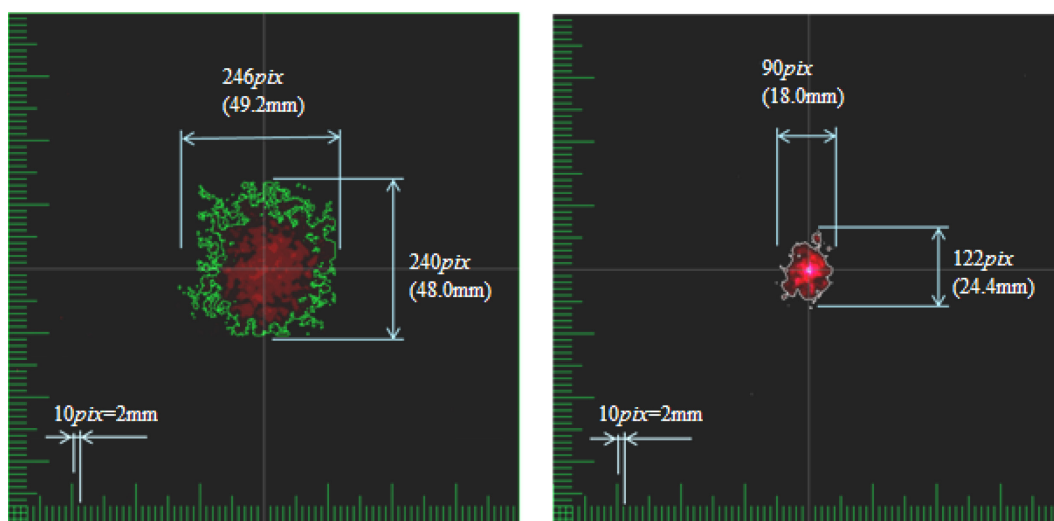
表 5.5 放電加工  $Rz6.3$  に対する  
透明レプリカ素材の転写性能の比較

レプリカ素材	透明液状 シリコーンゴム	透明粘土	透明ホットメルト	透明ビニール テープ
アウトラインの 総面積	41408(pixel) 1656.3(mm <sup>2</sup> )	49690(pixel) 1987.6(mm <sup>2</sup> )	38924(pixel) 1556.9(mm <sup>2</sup> )	4757(pixel) 190.3(mm <sup>2</sup> )
アウトラインの 全長	1333.4(pixel) 266.7(mm)	1446.0(pixel) 289.2(mm)	1330.0(pixel) 266.0(mm)	302.6(pixel) 60.5(mm)
回転半径 $R_g$	114.8(pixel) 22.92(mm)	125.8(pixel) 30.56(mm)	111.3(pixel) 22.26(mm)	38.9(pixel) 7.78(mm)



(a) 透明液状シリコーンゴム

(b) 透明粘土



(c) 透明ホットメルト

(d) 透明ビニールテープ

図 5.4 レプリカ素材による円形状パターンの透過像を比較  
比較用表面粗さ標準片の放電加工  $Rz6.3$  の場合



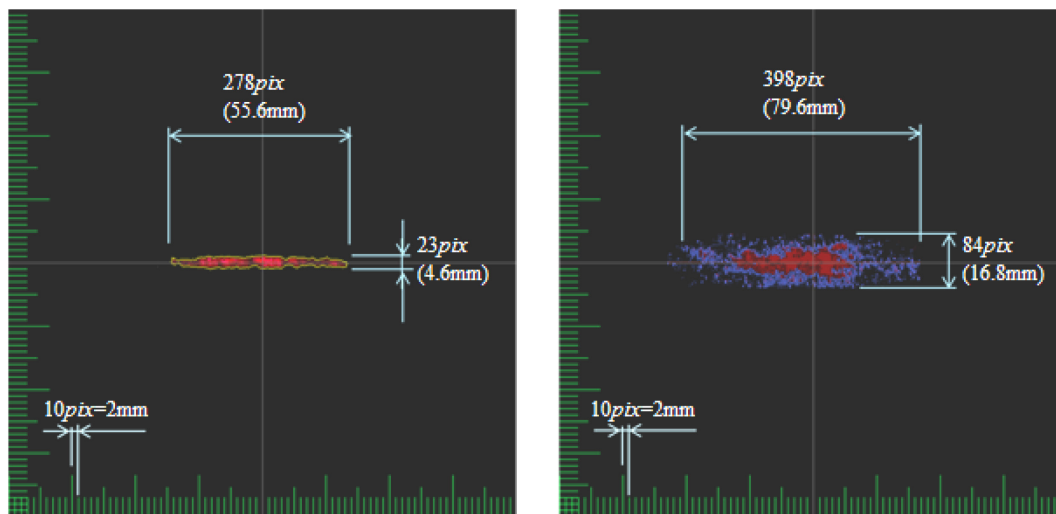
### 5.3.3 楕円形状パターンの透過像を比較

図 5.5 には、表 5.2 の楕円形状パターンの透過像を想定した比較用表面粗さ標準片の平面研削加工した算術平均粗さ  $Ra0.8$  ( $Rz3.2$  相当) を対象物として、表 5.1 示す 4 種類のレプリカ素材の透過像を (a) から (d) に示す。この透過像は、画像を階調処理した後の 1pixel でアウトライン処理した代表的な画像を示す。

(a) と (c) の透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトでは、 $X$  軸に細く広がる画像となり類似している。(b) 透明粘土の透過像は、アウトラインによる面積が大きく、その周辺に点在する斑点が多数認められる。また、(d) 透明ビニールテープの透過像は、透明粘土を小さくしたアウトラインであり、面積が小さくその周辺の斑点の点在は少ない。表 5.6 に各レプリカ素材の透過像からアウトラインによる総面積とアウトラインの全長、および回転半径  $R_g$  を示す。この回転半径  $R_g$  は、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトは同等の数値であることが分かる。

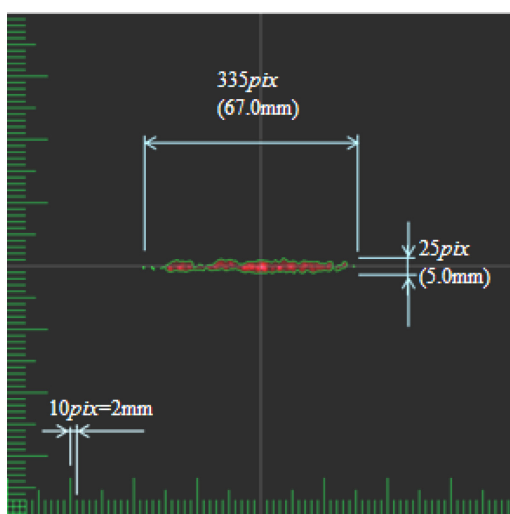
表 5.6 平面研削加工  $Ra0.8$  ( $Rz3.2$  相当) に対する透明レプリカ素材の転写性能の比較

レプリカ素材	透明液状 シリコーンゴム	透明粘土	透明ホットメルト	透明ビニール テープ
アウトラインの 総面積	3891(pixel) 155.6(mm <sup>2</sup> )	9984(pixel) 399.3(mm <sup>2</sup> )	3930(pixel) 157.2(mm <sup>2</sup> )	7843(pixel) 313.7(mm <sup>2</sup> )
アウトラインの 全長	600.3(pixel) 120.0(mm)	551.5(pixel) 110.3(mm)	625.3(pixel) 125.0(mm)	364.8(pixel) 72.9( mm)
回転半径 $R_g$	35.2(pixel) 7.04(mm)	56.4(pixel) 11.28(mm)	35.4( <i>pix</i> ) 7.08(mm)	50.0(pixel) 10.00(mm)

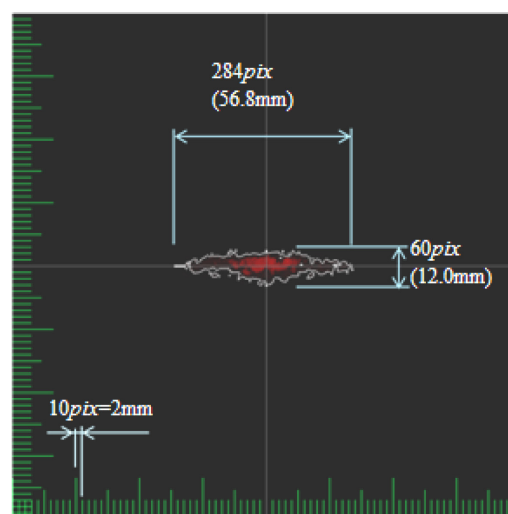


(a) 透明液状シリコーンゴム

(b) 透明粘土



(c) 透明ホットメルト



(d) 透明ビニールテープ

図 5.5 レプリカ素材による楕円形状パターンを比較  
比較用表面粗さ標準片の平面研削加工の算術平均粗さ  
 $Ra0.8$  ( $Rz3.2$  相当) の場合

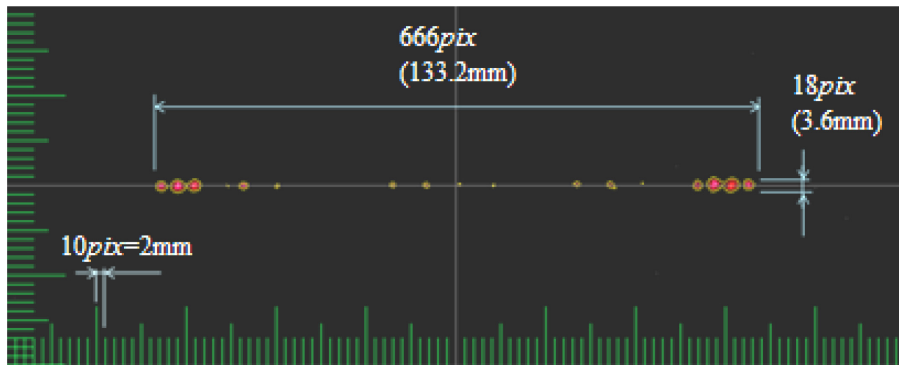
### 5.3.4 回折スポットパターンの透過像を比較

図 5.6 には、表 5.2 の回折スポットパターンの透過像を想定した比較用表面粗さ標準片の正面フライス加工した算術平均粗さ  $Ra3.2$  ( $Rz12.5$  相当) を対象物として、この透過像の画像は、階調処理を行った後に 1pixel のアウトライン処理した代表的な画像である。

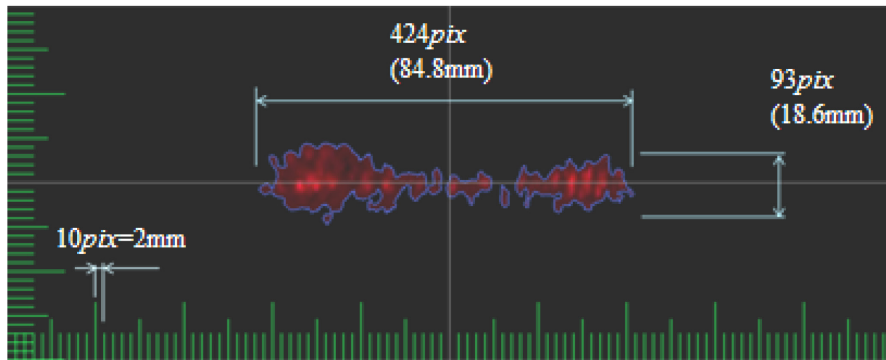
同図において、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトの (a) と (c) の特徴は、第 2 章の回折光を利用した表面粗さの測定<sup>14)</sup> ~<sup>21)</sup> で述べたとおり、素材による屈折率が異なるため、回折スポットパターンの広がり異なるが、高さは類似している。(b) の透明粘土の透過像は、アウトラインによる面積が大きく、回折スポットパターンが認められないため測定が不可能である。また、(d) の透明ビニールテープの透過像も同様に、回折スポットパターンが認められないため測定が不可能である。表 5.7 に各レプリカ素材の透過像からアウトラインが形成する総面積とアウトラインの全長を示す。

表 5.7 正面フライス加工  $Ra3.2$  ( $Rz12.5$  相当) に対する  
透明レプリカ素材の転写性能の比較

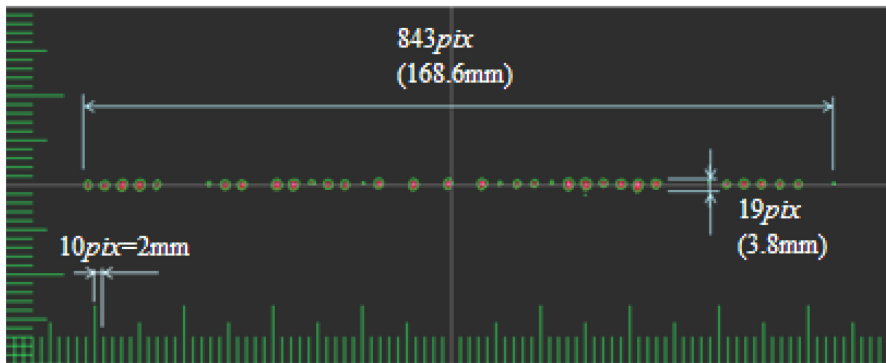
レプリカ素材	透明液状 シリコーンゴム	透明粘土	透明ホットメルト	透明ビニール テープ
アウトラインの 総面積	1201(pixel) 48.0(mm <sup>2</sup> )	14451(pixel) 578.0(mm <sup>2</sup> )	1830(pixel) 73.2(mm <sup>2</sup> )	1094(pixel) 43.7(mm <sup>2</sup> )
アウトラインの 全長	412.6(pixel) 82.5( mm)	1543.0(pixel) 308.6(mm)	952.3(pixel) 190.4(mm)	253.6(pixel) 50.7(mm)



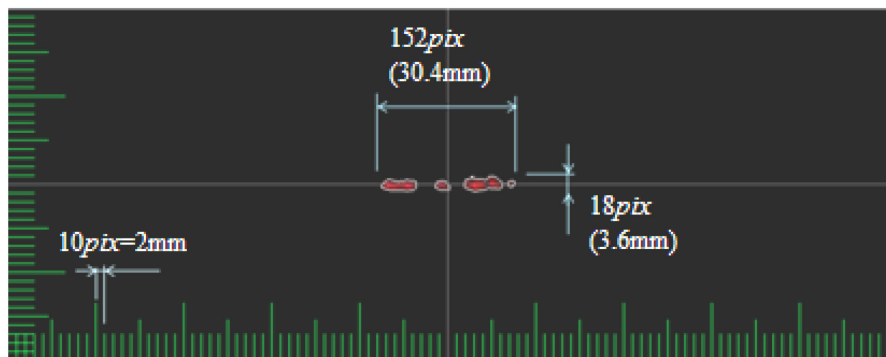
(a) 透明液状シリコンゴム



(b) 透明粘土



(c) 透明ホットメルト



(d) 透明ビニールテープ

図 5.6 レプリカ素材の回折スポットパターンを比較  
比較用表面粗さ標準片の正面フライス加工  $Ra3.2$ ( $Rz12.5$  相当)の場合

### 5.3.5 透明レプリカ素材の転写性能を比較

表 5.1 で選定したレプリカ素材を用いて表 5.2 の対象物で得られた図 5.3 から図 5.6 の透過像，および表 5.4 から表 5.7 の画像を階調処理したアウトラインの総面積，アウトラインの全長，および回折スポット形状パターンを除く回転半径  $R_g$  について，透明液状シリコーンゴムを基準に述べる．

#### (1) 透明粘土

表 5.4 から表 5.7 の比較用表面粗さ標準片において，アウトラインの総面積とアウトラインの全長は比較的大きな値を示している．図 5.7 は，透明粘土を被測定物の凹凸形状から剥離する際の状況について示したモデル図である．透明液状シリコーンゴムや透明ホットメルトが液状から硬化する性質を有するのに対して，透明粘土は硬化しないため，剥離する際には表面の粘着張力や凹凸形状との接触によりレプリカ表面には変形や欠損を与えていたと推測される．また，素材の粘度が高いため，レプリカ製作の際に押し付ける圧力の加減の度合により完全に表面の凹凸が転写できないことも考えられる．

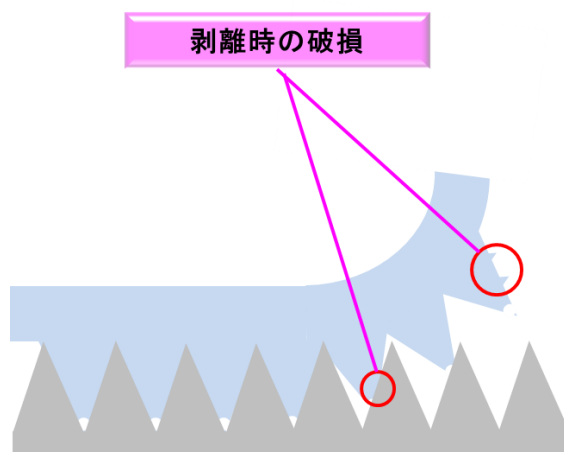


図 5.7 透明粘土を被測定物から剥離する際のレプリカ欠損モデル

#### (2) 透明ホットメルト

透明粘土と同様に比較用表面粗さ標準片のそれぞれにおいて，表 5.4 から表 5.7 に示すアウトラインの総面積とアウトラインの全長は，同等の値を示している．これは透明液状シリコーンゴムと同様に透明ホットメルトが液状化した素材を被測定物に押し付けてから

硬化する性質を利用しているため、剥離する際に変形を与えずに転写していると推測される。

### (3) 透明ビニールテープ

透明粘土と同様に表 5.4 から表 5.7 の比較用表面粗さ標準片のそれぞれにおいて、アウトラインの総面積とアウトラインの全長は比較的小さな値を示している。図 5.8 は、透明ビニールテープを被測定物の凹凸形状から剥離する際の状況について示したモデル図である。透明液状シリコーンゴムや透明ホットメルトが液状から硬化する性質を有するのに対して、透明ビニールテープの粘着部分は透明粘土と同様に硬化しないため、剥離する際にレプリカ表面の変形や欠損が起こり、さらには粘着部の厚さが薄いため転写できる凹凸の高さが制限される等の素材であると推測する。

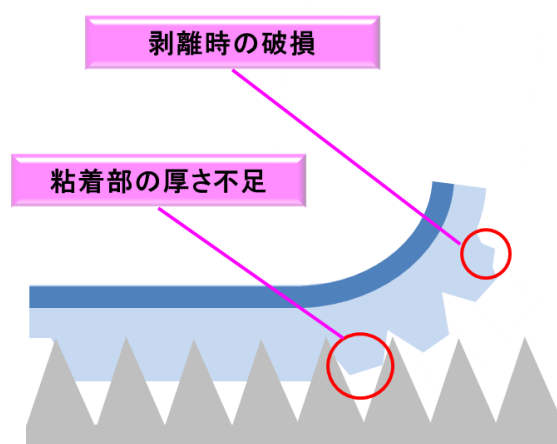


図 5.8 透明ビニールテープを被測定物から剥離する際のレプリカ欠損モデル

#### 5.3.6 レプリカ素材の総合性能評価

光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定を提案し、透明レプリカ製作作業を改善させるために、入手しやすいレプリカ素材を4種類選定して、各素材の転写精度、レプリカを採取し測定するまでの作業の容易さ、レプリカ製作時間、および特筆すべき条件等について検討し、これらより総合的に透明レプリカ素材の性能評価を行った結果が表 5.6 に示す内容である。

表 5.6 透明レプリカ素材の性能評価

	透明液状シリコーンゴム	透明粘土	透明ホットメルト	透明ビニールテープ
転写精度	触針式粗さ測定機と同等の結果	不安定な結果	触針式粗さ測定機と同等の結果	不安定な結果
作業の容易さ	他の3種類に比べ難しい	容易である	容易である	容易である
レプリカ製作時間	約 13 時間	約 10 秒	約 20 秒	約 120 秒
特筆すべき条件	レプリカ製作に時間を要する	低温環境では粘性が高くなる	84.0℃の高温での作業となるが、転写時の被測定物に制限を受ける	表面粗さにより、制限をうける
透明レプリカ素材としての評価	使用に適する(○)	使用に適さない(×)	使用に適する(○)	使用に適さない(×)

## 5.4 結言

光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定に適する透明レプリカ素材の選定について、容易に入手できる素材として、透明ホットメルト、透明粘土、および透明ビニールテープの3種類を選定した。これらに対して、透明液状シリコーンゴムから得られた透過像を基準とした、転写精度、作業の容易さ、およびレプリカ製作時間等から透明レプリカ素材の性能評価を行った。以下に要約する。

- (1) 透明粘土および透明ビニールテープは、加工面の表面粗さ測定の透明レプリカとしては、転写精度が不安定であり、その後の管理が困難であるために適さない。
- (2) 透明液状シリコーンゴムは、触針式粗さ測定機と同等の値が得られる素材であるが、レプリカ製作に時間を要する。
- (3) 透明ホットメルトは、触針式粗さ測定機と同等の結果が得られる可能性はあるが、転写時に 84.0℃の高温になるため、被測定物の材質に制限を受ける。
- (4) 現状では、透明液状シリコーンゴムと透明ホットメルトがレプリカ素材として適していることを明らかにした。

## 参考文献

- 10) 東レ・ダウコーニング・シリコーン株式会社: 透明液状シリコーン CY52-205.
- 11) 松村工芸株式会社: グルースティック・クリア 7mm.
- 3) アイボン産業有限会社: 透明粘土すけるくん.
- 4) アイボン産業有限会社, “粘土、及びその製造方法、並びに工作物の製造方法”, 製法特許(3834576号)(2006), (2006年7月28日).
- 5) ニチバン株式会社: ビニールテープ VT-19 透明.
- 6) 株式会社エーゼット: シリコーンスプレードライタイプ(無溶剤) Y007.
- 7) 太洋電機産業株式会社: グルーガン HB-45.
- 8) ALI Maifuz, ANDO Makoto, “Fast Estimation of Shadowing Effects in Millimeter-Wave Short Range Communication by Modified Edge Representation”, IEICE Transactions on Communications, E98.B(9), (2015), pp.1873-1881.
- 9) Oshiyama Fumika, Murakami Naoshi, Guyon Olivier, Martinache Frantz, Baba Naoshi, Matsuo Taro, Nishikawa Jun, Tamura Motohide, “Central-Obscuration Removal Plates for Focal-Plane Phase-Mask Coronagraphs with a Centrally-Obscured Telescope”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126(937), (2014), pp. 270-279.
- 10) Hoshino Tetsuya, Banerjee Saswatee, Itoh Masahide, Yatagai Toyohiko, “Diffraction pattern of triangular grating in the resonance domain”, Journal of the Optical Society of America, A 26(3), (2009), pp. 715-722.
- 11) Go Chun-Soo, Lim Sungwoo, Oh Yong-Ho, Lee Jai-Cheol, “Spatial Frequency Filtering Characteristics of Three-Phase and Two-Phase Two-Dimensional Gratings”, Japanese Journal of Applied Physics, 43(8A), (2004), pp. 5352-5356.
- 12) JIS B 0659-1, “製品の幾何特性仕様 (GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式; 附属書 1 (参考) 比較用表面粗さ標準片”, 日本規格協会(2002).
- 13) 例えば, 日本金属電鍍株式会社:比較用表面アラサ標準片.
- 14) 山崎正之, “厚い回折格子としてとらえたブレード回折格子”, 東海大学紀要, 工学部 39(2), (1999), pp.45-47.
- 15) 工藤 恵栄, 上原 富美哉, “基礎光学”, 現代工学社, (1990).
- 16) 鶴田 匡夫, “応用光学 I”, 培風館, (1993).
- 17) 安藤 幸司, “光と光の記録「光編その2-光の属性・干渉・回折」”, 産業開発機構株



- 式会社, (2007), pp.133-145.
- 18) LI J, “Electrooptic wafer beam deflector in LiTaO<sub>3</sub>”, IEEE Photonics Technol, Lett. 8(11), (1996) pp.1486-1488.
  - 19) LEE T. C, “Light deflection with electrooptic prisms”, IEEE J. Quantum Electron, QE-4(7), (1968) pp.442-454.
  - 20) 小林 幸一, “光の物理”, 東京大学出版会, (2009), pp.4-5 .
  - 21) 青木 貞雄, “光学入門”, 共立出版株式会社, (2002), pp.101-115 .

## 第6章 総括

本研究では、光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定に関する研究をまとめたものである。本研究の主要な結論は次のようになる。

- (1) 光透過式レプリカによって転写された表面粗さの測定原理に関して、回折光を利用した場合、および散乱光を利用した場合の2つの粗さ測定原理を提案した。
- (2) スクリーンに現れる透過像のパターンには、ポイント形状パターン、円形状パターン、楕円形状パターン、および回折スポットパターンの4つに分類される。
- (3) 回折スポットパターンによって得られる表面粗さは、触針式表面粗さ測定機による算術平均粗さと比較すると、それらには10%以内の測定精度で求められる。
- (4) 円形状パターンおよび楕円形状パターンでは、任意の階調による回転半径と触針式表面粗さ測定値との関係を実験式により予め求めておけば、回転半径から表面粗さが求められる。
- (5) スクエアエンドミルで加工された加工面に形成された切削痕の稜線方向に対して、位相角度  $90\text{deg}$  回転した方向に回折スポットパターンとして現れ、また稜線が2つ交差すると、2つの回折スポットパターンが  $90\text{deg}$  の位相で現れる。
- (6) 光透過式レプリカ素材として、透明液状シリコーンゴム、透明ホットメルト、透明粘土、および透明ビニールテープの4種類について、転写精度、作業性、レプリカ製作時間等により性能評価した結果からは、透明液状シリコーンゴムおよび透明ホットメルトが適する。

次に、本論文の各章の結論は次のとおりである。

第1章は「序論」であり、本研究の目的と背景、および表面粗さの定義を示し、代表的な表面粗さの求め方、比較用表面粗さ標準片、各種の表面粗さの測定原理などについて述べた。また、本論文の構成とその内容を述べ、最後に本論文で使用した記号、単位、名称および記号について説明した。

第2章は、透明レプリカからの透過像のパターンには、ポイント形状パターン、円形状パターン、楕円形状パターン、および回折スポットパターンの4つに分類できことが分かった。これらの透過像パターンは、レプリカ反映面の表面粗さ性状に起因して起こる光の特性があり、回折光になる場合と散乱光になる場合がある。回折スポットパターンは回折

光，ポイント形状パターン，円形状パターン，および楕円形状パターンは散乱光で起こる透過像である．回折光の透過像から表面粗さを求める測定原理と理論式を導いた．また，散乱光の透過像から表面粗さを求める測定原理は，透過像の白黒濃淡階調した図形からフラクタル定理を応用した面積から回転半径と表面粗さとの関係式を求めておくことによって，任意の表面粗さが算出できることを示した．さらに，透明レプリカの作製手順について説明した．測定装置では，光源の選択の理由，装置の構成，および測定手順などについて述べた．

第3章では，第2章で示した回折光と散乱光から加工面の表面粗さ性状に応じた透過像から表面粗さ算出方法を用い，これを4つのパターンに分類された透過像に適用させて，その有効性を確認している．用いた表面粗さは，比較用表面粗さ標準品のラップ仕上げ面，放電加工面，研削面，および形削面の4種類である．これら表面の顕微鏡写真，触針式表面粗さ曲線，透過像写真，および透過像輝度分布を現す濃度物体画素数について，それぞれ示した．形削の表面は，凹凸と山高さが規則正しく分布するため回折光による透過像が得られ，これの算出式により求めた粗さの測定精度は触針式表面粗さ測定機で求めた粗さに対して約10%以内の誤差であった．また，一列に点在する回折光の方向は，凹凸の筋目方向に対して位相角度が90deg方向に現れる．散乱光による透過像からの粗さは，最大高さ粗さとその濃淡分布の回転半径から実験式が得られることを示した．

第4章では，スクエアエンドミルで加工した加工面の切削痕を対象にして取得したレプリカ反映面からの透過像から，切削痕の粗さと交差する稜線の方向について確かめている．透過像は，規則正しく連続した円弧状の切削痕が形成されるため，回折光により一列に点在する．これより求めた粗さは触針式粗さと同等であり，稜線が交差する角度も同時に測定できるため，その方向や形状が推定できる．回折光が稜線方向に対して位相角度90deg方向に現れる場合と交差して角度が求められる場合について，模式図から説明している．

第5章では，表面粗さ測定に適するレプリカ素材を選定するために4種類の素材について，その優劣を実験的に考察した．レプリカ素材の要件を述べて，選んだ素材は透明粘土，透明ホットメルト，透明ビニールテープ，および透明液状シリコンゴムである．これらの素材において，ポイント形状パターン，円形状パターン，楕円形状パターン，および回折スポットパターンのそれぞれに対して，転写精度，作業の容易さ，レプリカ製作時間等の性能評価を行った．これらの項目を総合評価した結果からは，透明液状シリコンゴムと透明ホットメルトが適することを示した．

第 6 章では，本研究で提案した「光透過式レプリカによる加工面の表面粗さ測定に関する研究」について，本論文で得られた結果を述べ，これらを総括した．

以上のように，本研究で提案した透明レプリカによる加工面の表面粗さ測定は，工業材料の加工面の表面粗さの測定にとどまらず，透明レプリカ素材の進化および画像処理技術の進歩により，将来的には肌年齢やポリープ等の生体部位の分野，柔らかく複雑な形状の食品加工物や生鮮食料品等の分野に大きく貢献すると考える．

## 謝 辞

本論文は、日本大学工学部機械工学科 横田 理 教授のご指導によりとりまとめたものです。先生からいただきました終始懇切なご指導とご助言に対して深く感謝の意を表します。

本論文の作成に際して、副査として日本大学工学部機械工学科 齋藤 明德 教授には生産工学・加工学の立場から、日本大学工学部機械工学科 長尾 光雄 准教授には計測工学の立場から有益なご助言とご指導を賜りましたことに厚く感謝いたします。さらには、日本大学工学部機械工学科 柿崎 隆夫 教授、日本大学工学部総合教育科 神馬 洋司 准教授、ならびに山形大学 大学院・理工学研究科 水戸部 和久 教授からは、有益なご助言とご討論を賜りましたことに厚く感謝いたします。

加えて、日本大学工学部機械工学科の先生方には励ましの言葉をいただき感謝いたします。

第4章においては、加工物の製作にあたり株式会社 MTC 代表取締役 松崎 宏行 氏より加工情報等提供頂きました。関係各位には感謝いたします。

本研究ならびに本論文作成にあたり、通常業務のサポートを賜りました神田産業株式会社 代表取締役 神田 雅彦 氏、ならびに、ハニリアル事業部 営業技術 部長 石澤 秀忠氏、その他のハニリアル事業部関係者の方々にも心より感謝いたします。

実験を遂行するにあたり、大学院博士前期課程の学生、卒業研究の学生ならびに機械工学科の学生の皆さん方に感謝いたします。

本研究は、以上の方々をはじめ数多くの皆様のご指導、ご助言を得ることによってなされたものであり、本論文を終えるにあたりこれらの方々に深甚の謝意を表する次第です。