

論文の内容の要旨

氏名：谷田部 幸太郎

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

素材や部品は切削，研削，研磨などの加工により所望の寸法に仕上げられるが，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，多様で測定精度の高い表面粗さ測定方法および測定装置が要求される．表面粗さを測定する方法としては，比較用表面粗さ標準片を用いた視覚や触覚による比較測定法がある．また試験機としては，加工面への触針による接触式表面粗さ測定法，光切断や光干渉を利用した非接触式表面粗さ測定法がある．

触針式表面粗さ測定法では，選定する触針の先端曲率半径ならびに測定力の大きさによって粗さが増えるので，比較的高い測定力の場合には，表面粗さは大きくなるが，表面に傷が発生し正確な粗さが測定できないおそれがある．また，光切断を利用した表面粗さ測定法は，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の粗さが測定できる．しかし，スリット光の投影角度位置の影響を受けて，粗さは変化する場合がある．さらに，光干渉を利用した表面粗さ測定法は，表面粗さが 1 マイクロメートル以下でも測定できるが，比較的高い反射率が望ましい．

一方，加工面から反射する光の散乱光の広がりから表面粗さを測定する光散乱法がある．この原理は，表面に照射した光の反射強度の度合いが表面粗さの高低の度合いと相関することを利用している．この測定法は被測定物を試験機のステージに載せる必要があるため，被測定物の寸法に制約があり，専用の設備も付属するため試験機が大型になる．その他の粗さ測定法としては，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法がある．この方法は，構造物や大型部品の表面からレプリカを採取して，その表面粗さに直接レーザ光を照射し，その反射光は形状によって回折光や散乱光となるので，これの輝度分布より表面粗さを測定する方法である．反射光を利用している従来のレプリカ法は，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を用いるので光学系の部品点数が多い．これに対して，本研究で提案する光透過式レプリカは，レプリカ反映面の背面が平坦であるため透過光の歪みは現れにくく，触針式表面粗さ測定機と同等の測定精度が得られる新しい測定法を提案している．また市販の試験機の大きさに比べてコンパクトであり，機械装置に組み込まれている部品の摺動面等の表面粗さを分解しないで測定できる工業的な有用性がある．

本論文は，6章から構成されており，各章の概要は以下のとおりである．

第 1 章では，本研究の目的と背景，および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，透明レプリカ反映面からの透過像のパターンには，表面粗さの山谷のピッチ間隔，その筋目方向，および山谷の高低差等による表面性状に応じて，回折スポット，ポイント形状，円形状，および楕円形状の 4 つに分類されることを確認している．これらの形状パターンから表面粗さを測定する原理については，回折光と散乱光の特性を用いた算出式が提示されている．レプリカ反映面の三角山の間隔とその山高さが一定の場合には，回折光による回折スポットパターンの透過像が現れる．この表面粗さは，レーザの波長，媒体の屈折率，レプリカ反映面からスクリーンまでの距離， $m=0$ 次のスポット間距離，および $m=0$ 次と $m=\pm 1$ 次の距離を測定することにより求められる．一方，散乱光による透過像の輝度分布は，中央の輝度が強く周辺が弱くなる濃淡分布になる．透過像形状の面積は，フラクタル次元に関連させた回転半径法を利用した回転半径に置き換えられる．これを白黒濃淡分布に変換して階調化した面積ごとの回転半径で表わすことができるため，表面粗さと回転半径との関係式が得られる．楕円形の場合も同様に，濃淡階調の長径と短径から回転半径と表面粗さとの関係式が得られる．これらの関係式を予め調べておけば，未知の表面粗さの透過像階調の回転半径から表面粗さが求められる．次に透明レプリカ素材からレプリカの作製方法とその手順，粗さ測定装置の構成要素の仕様，および測定方法について述べている．

第 3 章では，反映面からの回折光と散乱光による透過像の測定から求めた表面粗さの測定精度とその有

効性を確認するために、比較用表面粗さ標準片による透過パターンと触針式表面粗さ測定機の測定結果を比較している。初めに、代表的な4つのパターンの表面粗さの分類を示し、それぞれの顕微鏡写真、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濃度物体面素数により、各パターンの特徴を示している。ラップ仕上げ面 $Rz0.2$ では、凹凸が平坦であるため粗さ曲線も直線状となり、光の散乱が殆どなく、輝度は中央部が強く、濃度物体面素数に広がりのないポイント形状パターンになる。このため白黒濃淡分布の回転半径と表面粗さとの関係式は得られないので、表面粗さを表示できないことを示している。放電加工面粗さ $Rz15$ は、凹凸形状がなだらかな曲面でその分布と山高さが不規則であるため粗さ曲線も同じくなり、透過像と濃度物体面素数は中央部の輝度が強く周辺外側にかけて弱くなる濃淡分布の円形状パターンになる。 Rz の大きさと円形状濃淡分布の面積は比例関係になるため、実験では $Rz5$ から $Rz35$ の範囲で粗さ測定ができる。研削用の粗さ $Rz3.2$ では、表面を鋭利な刃物で一方向に引っ掻いた凹凸形状とその分布および山高さが不規則であるため粗さ曲線も同じくなり、透過像は Y 軸の引っ掻き方向に対して位相が 90deg の X 軸方向に長径となる濃淡分布の楕円形状パターンが現れる。 Rz の大きさと楕円形状濃淡分布の面積は比例関係になるため、実験では $Rz3$ から $Rz14$ の範囲で粗さ測定ができる。形削用の粗さ $Rz12.5$ は、凹凸の形状が三角山でそのピッチと山高さは規則正しくなるため三角山が連続した粗さ曲線となり、透過像は三角山筋目方向が Y 軸に対して 90deg 位相の X 軸方向に回折光が一行に並ぶ回折スポットパターンが現れる。粗さ測定対象になる輝度の強い2点が対称に現れ、この点を対称としたピッチ測定の対象になる輝度の強い点が連続して現れる。この2点間距離は粗さの大きさと正の相関となるが、ピッチ測定対象とする輝度の間隔は反比例の関係になる。実験では $Rz6.3$ から $Rz30$ の範囲で粗さ測定ができ、触針式表面粗さ測定機の粗さに対する誤差率は約10%程度であることを述べている。

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 A から F のプロフィール位置で測定した6箇所の結果と考察を述べている。この6箇所は、円弧状の軌跡を呈した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。そのため採取したレプリカの反映面からは A から F の位置における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、触針式表面粗さ曲線、および測定値と算出値を求めて比較している。これら A から F 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されており、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向が測定できることを明らかにしている。

第5章では、本測定の要である表面粗さを転写する素材の要件には、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、2液を混合して製作する透明液状シリコンゴムであり、硬化するまでに約12時間を必要としている。これの比較対象にした素材は、入手し易い素材として、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種類である。第3章で用いた比較用表面粗さ標準片と同じ4つに分類された、ラップ仕上げ面、放電加工面、研削面、および正面フライス面から各素材でレプリカを採取して、透過像の精度と製作工程からレプリカ素材の適合性を考察している。透明粘土と透明ビニールテープは、転写時に素材が硬化して安定しないため、被測定物から転写する際には転写部分が歪んだり変形したりする。そのため正面フライス面では回折スポットパターンの透過像にはならない。透明ホットメルトは、素材を流動化するために約 84°C まで過熱させて被測定物表面に押し付ける。硬化時間は数十秒のため製作は容易であるが、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要約し、総括している。

以上のように、本研究で提案した光透過式レプリカを用いた表面粗さ測定は、工業材料の加工面の表面粗さ測定の分野にとどまらず、透明レプリカ素材の進化により、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である食品加工物や生鮮食料品の分野等に大きく貢献できると考える。