ホログラフィ干渉法による粗さモデルの 変形挙動解析*

——プラスチック材を用いた突起間の相互干渉の測定——

格 内 敏** 坂 本 亨** 長谷川 素由**

Analysis of Deformation on an Asperity Model of Surface Roughness
by Holographic Interferometry
-Interaction of Asperities with Plasticine Material-

Satoshi KAKUNAI Tohru SAKAMOTO Motoyoshi HASEGAWA

Deformation of multiple asperities model of surface roughness subjected to pressure by flat punch is measured continuously by multiple aperture holographic interferometry and the interaction of asperities is discussed. In this experiment, peak and valley of asperity is observed from just above by selecting the plasticine with small deformation resistance as the model material and by using the transparent flat punch. Asperity models are cone type of single, double and triple with the asperity angle of 150° .

Key words: holographic interferometry, multiple asperities model, surface roughness, flat punch, plasticine

1. は じ め に

接触面における微視的表面突起の押しつぶし過程の解明は、加工製品の表面仕上げ、機械要素の接触面の摩擦機構、圧接技術などを考える上で極めて重要であるが^{1)~4)}、実際に表面の幾何学的輪郭を3次元的に把握したり、突起の変形挙動を解析することは困難である。突起モデルを用いた押しつぶし過程の基礎的研究としては、すべり線場法^{5)~6)}や有限要素法による計算力学的手法により^{7)~8)}多くの知見が得られてきた。一方、著者らは変形挙動の解析に、連続して変形分布を記録できる多数開口ホログラフィ干渉法を用いた実験力学的手法の導入を試みた⁹⁾。前回はモデル材料に工業用純アルミニウム材を選び、円すい単一突起モデルについてその挙動を解析し、さらにすべり線場法による解と比較を行い、定性的に良く一致することがわかった。

本報告では、より実際に近い複数突起の粗さモデルの変形挙動の測定について検討した。突起の相互干渉を伴う変形挙動をインプロセスで測定するには、透明

なスタンプが使用でき、スタンプを通して真上より突起と突起間の変形を観察できることが必要となる。そこで突起モデル材料には、塑性加工時の材料流れの研究に利用されてきた変形抵抗の小さいプラスチック材¹⁰⁾の使用を試みた。変形の記録は、多数開口ホログラフィ干渉法で非接触に高感度で行った。その結果、プラスチック材からなる単一突起モデルの押しつぶしによる変形挙動は、工業用純アルミニウム材による変形挙動と定性的に一致し、さらに突起とスタンプとの接触面近傍の挙動や、突起と突起間の変形挙動が、本手法により詳細に観察できることがわかった。

2. 実験装置および方法

図1に使用した実験光学系を示す。この光学系では、突起間の相互干渉による粗さモデルの連続した変形挙動を詳細に観察できるように、突起を透明スタンプで押しつぶし、その変形を真上から観察できるようになっている。光源にはArレーザ光(波長 $\lambda=0.514\mu\text{m}$ 、出力約150mW)を用いており、レーザ光はエクスパンダを通り平行光(直径80mm)となり、ハーフミラーで物体照明光と参照光に分けられる。物体照明光は、移動ステージ上に取り付けた透明なガラススタンプを通して、突起モデルを真上から照明する。

* 原稿受付 平成2年10月29日。1990年度関西地方定期学術講演会(平成2年7月17日)にて発表

** 正会員 姫路工業大学(姫路市書写2167)

Fig.1 Schematic system of the experimental setup

スタンプの圧下は、フレキシブルワイヤを用いてマイクロメータを直接回転する粗動と、マイクロメータヘッドの前方に取り付けた圧電素子(P.Z.T.)による微小移動によって、遠隔位置から与えることができる。なお圧下量は変位計によって読み取る。

物体からの物体光は、乾板上で参照光と干渉してホログラム記録される。乾板の前にはマスクが配置されており、開口位置を制限して観察したい突起の変

形ごとに二重露光を繰り返すことにより、多数のホログラムを記録できる¹¹⁾¹²⁾。記録された干渉じまは、物体の変形前後の光波の光路差に対応しており、本光学系のように物体照明方向と観察方向を同じくした場合、使用光源の波長 λ の $1/2$ の感度で変位分布がホログラム記録される。こうして得られたホログラムの再生による物体上の干渉じまの動きより、物体の変形挙動が解析できる。

粗さ突起モデル材料には、変形抵抗が小さいプラスチック材(英国 Harbutt's Plasticine 社製; 比重

Fig.2 Shape of asperity model

1. 8, 体積変化率 50.0%, せん断強さ 83 kPa (15°C), 白色)を選んだ。粗さ突起モデルの作成は、CAM3次元加工機(Roland DG 社製CAMM-3)でワックスに突起モデルの型を加工し、それよりプラスチックを成形した。図2に作成した突起モデル形状及び寸法を示す。突起形状は円すい形とし、頂角は150°で突起すそ野径は15mmとした。実験は無潤滑で室温をできるだけ一定(約20°C)に保ち、突起の押しつぶしは静的に行った。

Fig.3 Deformation of single asperity model by holographic interference fringe

3. 実験結果と考察

3. 1 単一突起モデルの変形挙動

はじめに、プラスチック材からなる単一突起モデルの押しつぶしによる変形挙動を測定し、工業用純アルミニウム材からなる突起モデルの変形挙動との比較を行った。図3にプラスチック材からなる単一突起モデルのホログラフィ干渉法による変形の測定例を示す。なお記録したホログラフィ干渉じまの作製手順を図中に示す。粗さモデルを観察したい初期圧縮量 X_0 まで押しつぶし、この状態で1回目のホログラフィ記録を行う。このとき、押しつぶされた物体は突起側面の盛り上がり量となり、接触面半径 r_c は見かけの半径 r_a より大きくなる。次に、ホログラフィの感度で変形の観察ができるような微小圧下量 Δx を加えると、初期圧縮量で盛り上がった形状とほぼ似たような微小変形(図中で黒く塗りつぶした部分)が生じる。この状態で2回目のホログラフィ記録を行う。すなわち、記録されたホログラフィ干渉じまは、圧縮量 X の近傍における変形挙動を表すことになる。図の干渉じまは、圧縮率 $x/H = 0.25$ 近傍において、微小圧下量 Δx 約 $9\mu\text{m}$ に対する変位分布で、1しき当たり約 $0.25\mu\text{m}$ の等変位線を示す。なお干渉じまの中央部の黒い

Fig.4 Radius of contact area with compression

部分は、スタンプと試料との接触面積を表す。この近傍には密な干渉じまが局在していることから、この部分で変形が局部的に起こっていることがわかる。

グラフは干渉じまの解析結果で、縦軸は荷重方向の突起の変形量を、横軸は突起中心から干渉じまの位置までの距離 r を突起すそ野半径 R で無次元化して示している。変形は主にスタンプ近傍で起こり、ゆるやかに突起すそ野($r/R = 1.0$)へ及びバルク(基地の部分)に至ると、さらにゆるやかになって広がっていることがわかる。このような変形挙動は、工業用純アルミニウム材の場合⁹⁾と比較すると、傾斜がわずかに急になることを除いてほぼ同じである。この傾斜の

Fig.5 Deformation of double asperities model

Fig.6 Deformation of triple asperities model

違いの主な要因は、スタンプと突起間の摩擦力の違いによるものと思われる。図4に、突起の押しつぶし量と接触面半径の関係を示す。図中には、プラスチック材による接触面半径 r_a に加えて、工業用純アルミニウム材による接触面半径 r_c （二点鎖線：変形が突起部分で主に起こる圧縮率 $x/H=0.3$ 近傍までの実験式）及び見かけの接触面半径 r_a （一点鎖線）の関係を示す。プラスチック材の場合も工業用純アルミニウム材と同様に、かなりの圧縮率まで接触面半径は比例して増加する。なお、突起の変形域がバルクに及ぶにしたがい、接触面の増加はしだいに少なくなっている。

3. 2 複数突起モデルの変形挙動

図5に、2個突起モデルの押しつぶし変形のホログラフィ干渉じまとその解析例を示す。図は圧縮率 $x/H=0.42$ において、微小圧下量 $\Delta x=4\mu m$ に対する変位分布を表す。干渉じまからわかるように、突起間では左右対象な変形をするので、図中に示すような突起A・O・Bの部分について解析を行った。スタンプ近傍のA方向では干渉じまが密となり、単一突起の場

合同様に、変形がこの辺りで局部的に起こっていることがわかる。突起に挟まれたC・O間では、突起間の中央部であるO部の変形量が多くなり、盛り上がりが生じていることがわかる。一方、OB方向では拘束が少ないために、A方向に比べ緩やかな変形となる。

2個突起間の中央部の盛り上がりの変形機構をさらに詳しく調べるために、3個突起による押しつぶしの変形挙動を測定した。図6に圧縮率 $x/H=0.3$ において、微小圧下量 $\Delta x=4\mu m$ に対する解析例を示す。ホログラフィ干渉じまは2個突起に比べて複雑な形をしており、突起間の相互干渉による影響がかなり現れていることがわかる。3つの突起間の中央部には盛り上がりを表す干渉じまが現れているが、その等変位じまの領域から、中央部で盛り上がった材料が、3つの突起すそ野である谷間方向に流れていることがわかる。一方、突起間中央部の反対方向のスタンプとの接触点近傍には、この中央部からの材料流れによるよどみが起因すると思われる三ヶ月状の干渉じまが生じている。なおグラフに示した変形挙動は、図中のAB方向について、他の同様な2方向で測定した結果の平

均値より求めた。

図7に、3個突起モデルでの盛り上がりの生成過程を表す連続した変形解析例を示す。図は圧縮率 $x/H = 0.05, 0.1, 0.14$ における変位分布を示す。圧縮初期においては、変形はスタンブ近傍において局部的に生じ、圧縮が進むにつれて突起間中心部Oにおいて盛り上がりが生じ始め ($x/H = 0.14$)、その後、突起間接触部のすそ野であるD方向に広がっていくことがわかる。なお押しつぶし初期では、中央部の盛り上がり量が少なく、材料が谷間方向 (DB方向) に充分流れないために、CA方向には三ヶ月状の盛り上がりはまだ生じていない。

4. ま と め

プラスチック材からなる粗さ突起モデルについて、ホログラフィ干渉法による変形挙動解析を試みた。以下に主な結果を示す。

- (1) プラスチック材による単一突起モデルの変形挙動は、工業用純アルミニウム材における変形挙動と定性的に一致する。
- (2) 2個及び3個突起の相互干渉による中央部の盛り上がりの変形挙動が、詳細に観察できることがわかった。
- (3) プラスチック材は成形性が良いので、3次元加工機と組み合わせることにより、種々の粗さ突起モデルを作成することが容易である。

なお、本実験に協力いただいた元学生、石尾博明君 (現 神戸製鋼所)、廣中拓志君 (現 三菱重工業) に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 築添 正：表面あらさと面の接触機構について，潤滑，13，(1968)101.
- 2) 久門輝正：固体仕上げ面間の接触機構，日本機械学会論文集，35，(1969)861.
- 3) 大矢根守哉：塑性加工による素材の表面あらさの変化，潤滑，19，(1974)155.
- 4) 塚田忠夫：表面あらさと接触変形問題，潤滑，

Fig.7 Deformation of triple asperities model at initial stages of compression

19，(1974)135.

- 5) 太田友弥，進藤明夫，福田秀和，杉本和雄：剛体平面によるくさびの押しつぶれ，日本機械学会論文集，25，(1957) 242.
- 6) L.A.Mitchell & M.D.Rowe:Assessment of Face Seal Performance Based on the Parameters of a Statistical Representation of Surface Roughness, Proc Instn. Mech. Engrs., (1967-68)101.
- 7) 牧野内昭武，池 治，L.F.Ciupik：バルクの塑性変形を考慮した表面の平滑化機構 (第1報，無摩擦での3連くさび形突起押しつぶしのFEM解析)，第36回塑加連講論，(1985)5.
- 8) 池 治，牧野内昭武，木村美喜雄：バルクの塑性変形を考慮した表面の平滑化機構 (第5報，表面凹凸のくさび角の影響)，第38回塑加連講論，(1987)657.
- 9) 格内 敏，長谷川素由，石尾博明：ホログラフィ干渉法による粗さモデルの変形挙動解析，精密工学会誌，56,4，(1990)685.
- 10) 例えば 栗野泰吉：Plasticineを用いる塑性加工の実験，塑性と加工，1，(1960)203.
- 11) S.Kakunai, K.Iwata, R.Nagata & M.Hasegawa: Multiple Aperture Holographic Interferometry and its Application to the Measurement of Plant Movement, Appl.Opt.,25，(1986)1638.
- 12) 格内 敏，渡邊嘉郎：種々の潤滑状態下での軸方向圧縮円柱の側面変形のホログラフィ干渉法による観察，精密機械，48,3，(1982)299.