ホログラフィ干渉法による粗さモデルの 変形挙動解析*

格 内 敏** 長谷川 素由** 石 尾 博 明***

Analysis of Deformation on an Asperity Model of Surface Roughness
by Holographic Interferometry

Satoshi KAKUNAI Motoyoshi HASEGAWA and Hiroaki ISHIO

Measurement of temporal deformation on an asperity model of surface roughness subjected to pressure by flat punch is performed and the deformation behavior is discussed. The method is based on the minute and continuous observation of the deformation of the asperity by multiple aperture holographic interferometry, which repeats of holographic double exposures through small apertures of a mask placed in front of single holographic plate. Industrial aluminum is selected as the material of the specimens. The shape of the asperity is cone type and the asperity angle is 120° , 154° and 171° .

Key words: holographic interferometry, asperity model, surface roughness, flat punch, deformation behavior

1. は じ め に

金属の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、機械要素の摩擦摩耗、圧接技術などの基礎として極めて重要であり、多方面から多くの研究がなされてきた^{1)~5)}。しかし、実際の金属表面の幾何学的輪郭を3次元的に把握したり、その表面突起の押しつぶし過程における挙動を解析することは極めて困難である。

従来、このような押しつぶし過程の解析では、一般に2次元のくさび型突起モデルを用いて、すべり線場法を用いた突起部分の変形挙動の解析^{6)~7)}や、突起とバルク（基地の部分）が共に変形する状態までの解析をめざした大変形弾塑性有限要素法などの手法により、多くの知見が得られてきた^{8)~12)}。一方、実験的には、巨視的な投影器などによる形状の拡大観察や、面内ひずみの観察を主とした格子法やモアレ法¹³⁾などの光学的手法に基づく測定例がみられる。しかし、これらの方法は、前もって格子等を試料に貼り付け、各圧縮段階ごとに試料を装置から取り出し、その変形格子を

観察することにより、突起形状を測定しなくてはならない。

本報告では、多数開口ホログラフィ干渉法^{13)~15)}による粗さ突起モデルの、押しつぶし過程における形状の変形挙動の測定について述べる。本手法では、非接触で高感度に変位分布の測定が連続的に可能なために、押しつぶし過程における粗さモデルの変形がインプロセスで計測できる特徴を持つ。また、本手法により材料の弾性領域と塑性領域に対する材料流れに起因した変形の密度分布の様子を、干渉じまとして観察できた。なお実験には、粗さモデルとして、主に突起部分の変形をできるだけ正確に観察するための円すい柱型試料と、突起部分とバルクの変形を共に観察するための台付き円すい柱型試料を用いた。

2. 測 定 原 理

ホログラフィ干渉法では、物体の変形前後の二つの光波間で干渉じまを作ることにより、波長オーダーの感度で変位分布の測定ができる¹⁶⁾。図1に示すように、物体の一点PがP'に変位したときの変位ベクトルとし、次数n（位相変化）には次式の関係がある。

$$u(S_i - S_0) = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 S_i はP点を照明するレーザ光の単位ベクトル

* 原稿受付 平成元年9月18日。1989年度精密工学会春季大会学術講演会（平成元年3月24日）にて発表

** 正会員 姫路工業大学（姫路市書写2167）

*** 正会員 神戸製鋼所（株）（神戸市中央区脇浜町1-3-18；前 姫路工業大学大学院）

Fig.1 Displacement analysis of a point

Fig.2 Multiple step type shutter with rotatable disk for measuring temporal deformation change

ル, S_o は観察方向の単位ベクトル, λ は使用光源の波長である。干渉じまから n がわかり, S_i, S_o は光学系で決まるため, ホログラフィ干渉法により変位ベクトル u の成分が決定できる。式より干渉じまは, S_i と S_o の二等分線方向の等変位成分を表す。実験では S_i と S_o の方向を同じとしたので, 干渉じまは $\lambda/2$ の等変位線を表す。

このホログラフィ干渉法において, ホログラフィ乾板の前に小さな開口を持つマスクを配置し, 乾板上の記録位置を制限して二重露光を繰り返す多数開口ホログラフィ干渉法を用いることにより, 種々の変位分布を記録できる。例えば図2に示すような回転板マスクをホログラフィ乾板の前に配置することにより, 物体の連続した変形挙動の記録ができる。この方法では, 物体の変形前の状態について, 第1回目の露光をホログラフィ乾板全面にわたって行う。次にマスクによって選んだ乾板上で, 次の変形段階における状態を記録する。同じようにして, 順々にマスクの開口位置を変えながら各変形段階における状態を露光して記録する。

Fig.3 Schematic system of the experimental setup

このようにして得られたホログラム再生による物体上の干渉じまの動きより, 物体の変形挙動を観察することができる。

3. 実験

粗さモデル試験片の, 押しつぶしによる形状の変形挙動を観察するために, 図3に示すような光学配置を用いた。光源にはArレーザ光(波長 $\lambda = 0.514 \mu\text{m}$, 出力約 100mW)を用いており, レーザ光はエキスパンダにより直径80mmの平行光となり, ハーフミラーにより, 一方は物体照明光に, 他方は参照光として乾板上に照射される。なお乾板の前には, 開口位置を決定するための回転板マスクを配置する。物体照明光は, 45° 傾斜したミラーにより, 粗さモデル試料に真上から入射し, 観察方向も同じく真上とした。したがって, ホログラムで記録される干渉じまは, 粗さモデル突起の荷重方向の変形の $\lambda/2$ ($0.26 \mu\text{m}$) ほどの等変位成分を表す。

加圧スタンプはS45C材で, 直径5mm, 6.4mm, 9mmを製作し, スタンプ部は焼入れ後, 研削仕上げをし $R_{\text{max}} = 1 \mu\text{m}$ 以下で, 500gビッカース硬さ290であった。これらのスタンプは, スタンプ接触面近傍での粗さモデルの変形挙動をできるだけ観察するために, 段階的に取り替えて使用した。加圧は, 変位計により圧下量を測定しながら, 油圧アクチュエ

(a) Conical cylinder type (b) Cone type with base

Fig.4 Size of asperity model

ータにより静的に行った。

粗さモデルは、3次元の円すい柱型突起モデルで、図4にその寸法形状を示す。突起部分の変形のみをできるだけ正確に観察するための試料（円すい柱型）と、突起部分とバルクの変形を共に観察するための試料（台付き円すい柱型）を準備した。突起の頂角は 120° 、 154° 、 171° を選び、材料には工業用純アルミニウムを用い、旋削後 270°C で1h焼きなまし、200g ビッカース硬さ27とした。

図5に突起の押しつぶしによる形状変化と、その実験手順について示す。はじめに、突起粗さモデルを観察したい初期圧縮量 X_0 まで押しつぶすと、スタンプの接触面半径は r_0 となり、突起頂上部で押しつぶされた体積は側面への盛り上がり量となる。この状態で1回目のホログラフィ記録を行う。次に、微小変位量 ΔX を加えると、側面に盛り上がった形状とほぼ相似に、図中で黒く塗りつぶした量だけ微小変形が生じる。ここで2回目のホログラフィ記録を行うことにより、初期圧縮量 X_0 近傍における変形挙動が観察できる。以下、このように観察したい形状の初期圧縮量 X_0 を変えながら、このような2重露光法を繰り返すことにより、各圧縮量近傍に対する突起の変形挙動が観察できる。なお、干渉じまは図中の変位成分 $u(r)$ が $\lambda/2$ ごとに現れる。

X_0 : Initial compression of asperity
 X : Compression of asperity
 ΔX : Small compression of asperity for recording holography
 r : Distance from center
 $u(r)$: Small deformation at distance r
 r_D : Maximum radius of a plastically deformed asperity by holography
 r_B : Radius of contact area
 R : Initial radius of asperity
 H : Initial asperity height

Fig.5 Deformed asperity and nomenclature

4. 実験結果と考察

4. 1 突起形状の変形挙動の測定

ホログラフィ干渉法による突起の変形挙動の測定例を図6に示す。図中の写真は円すい柱型の突起頂角 120° のモデルで、初期圧縮量 $X_0 = 1.475\text{ mm}$ において、微小変位量 $\Delta X = 4.5\text{ }\mu\text{m}$ に対する変位分布を示している。なお干渉じまは $0.26\text{ }\mu\text{m}$ の等変位線である。図中の縦軸は荷重方向の変位量で、横軸は中心からの距離 r を示している。スタンプ近傍で変位曲線の傾きが急になっていることより、変形は主としてスタンプ近傍で起きていることがわかる。

突起頂角 154° の台付き円すい柱型粗さモデルにおける突起の変形挙動の測定結果を図7に示す。実験に際しては、変形が主にスタンプと突起の接触部近傍で起きるため、微小変位量 ΔX のわずかな制御ミスにより干渉じまはすぐに密となり計数が困難となる。そのため、各圧縮率近傍で微小変位量 ΔX （約 $3\text{ }\mu\text{m}$ ）を注意深く与えて数こまずつ記録し、その平均値より変形量を求めた。上から圧縮率が、 0.29 、 0.38 、 0.54 における微小変位量 ΔX に対する変形挙動を示す。縦軸は各点の変位量 u を微小変位量 ΔX により無次元化し、横軸は突起中心から干渉じまの位置まで

Fig.6 Deformation of an asperity model by holographic interference fringe

Fig.7 Deformation behavior of asperity with increase of compression

の距離 r を、突起すその径 R で無次元化している。図より、変形は突起頂上部付近で局部的に起こり始める (a)。変形が突起すその径を越え出すと ($r/R = 1.0$)、しだいに緩やかとなって、すそのへ広がっていくことがわかる (b)。なお変形が突起部周辺のバルク上に及んでも、バルクには急な隆起などは見られず、むしろなだらかに変形は進行している (c)。なお、頂角が 120° 、 170° の突起モデルにおいても、ほぼ同じような結果が得られた。

Conical cylinder type
Asperity angle 120°
 $\Delta X = 100 \mu m$

Fig.8 Distinction between elastic deformation and plastic deformation by holographic interference fringes

4.2 突起の塑性変形域の測定

ホログラフィ干渉法の感度で粗さモデルの変形を捕らえた場合、微小変位量 Δx を大きくすると図8に示すような干渉じまが現れる。スタンプ近傍では極めて密な干渉じまが存在し、その外側に疎な干渉じまが存在している。密な干渉じまは、ほぼ同心円をなしているが、よく見ると細かい凹凸があり、材料内部に活発な流れがあったことが推察される。これらの干渉じまの密度分布の違いは、一般に金属の応力ひずみ線で、その勾配 (0.2% 耐力) により材料の弾性変形と塑性変形を区別しているのに相当すると考えられる。そこで、このようなしまの密度の不連続な境界が、材料の弾性と塑性の境界に相当すると考え、中心からこの境界までの半径を、ホログラフィ干渉法により検出される塑性域半径の最外径とした。

異なる頂角をもつ円すい柱型粗さモデルにおける、圧縮量 X に対する突起の形状変化について図9に示す。図中に、ホログラフィ干渉じまから求めた塑性域の最外径を r_p で、体積一定の法則より求めた塑性域の最外径を r_v で示す。この r_v は、圧縮量 X により排除された円すいの体積が側面に盛り上がるとして、接触面の長さ $2r_p$ が、盛り上がり直線近似した側面の長さに等しくなると仮定して算出した。 r_p は同様な実験について、万能投影器により圧縮中の突起形状を逐次測定して求めた接触面半径 r_c をもとに、図10に

Asperity angle	Holography r_D	Volume constant law r_V	Slip-line fields r_S	Radius of contact area r_B
120°	4.95X	3.76X	5.54X	2.09X
154°	13.4X	9.96X	14.7X	5.12X
171°	39.3X	36.2X	43.1X	15.9X

X : Compression of asperity

Fig.9 Influence of asperity angle on deformation of asperity

Fig.10 Slip-line fields of an asperity model subjected to pressure by flat punch

示すようなHillの2次元すべり線図¹⁷⁾を描いて求めた塑性域の最外径である。なお、すべり線は直線と円弧からなる有心扇形であり、以下の原則をもとに求めている。

- 1)せん断すべりは表面と45°の角度をなす。
- 2)境界条件が連続性を欠く所では、有心扇形場となる。

突起頂角120°、154°、171°について、圧縮量Xに対する形状変化を表すパラメータは、いずれも強い相関があり、図9に示すような実験式が得られた。この回帰直線における決定係数は、ともにほぼ0.99であった。

図11に、突起頂角154°の台付き円すい型の粗さモデルの押しつぶしにおける塑性域半径と圧縮量との関係を示す。図には、ホログラフィ干渉法により求めた塑性域半径 r_D と、参考にHillの2次元すべり線図より求めた塑性域半径 r_S を示している。図中の縦軸は、塑性域半径を突起すその径Rで無次元化し、横軸は圧縮量Xを突起高さHで無次元化してある。変形が突起部分($r_D, r_S/R$ が1以内)で起こっている場合には、塑性変形域は圧縮量に対して、ほぼ比例的に変化したので、図中には、その実験式を実線(ホログラフィ干渉法による値)と一点鎖線(すべり線場による値)で示す。

Fig.11 Relation between maximum radius of plastic deformation area and compression of asperity

より値)で示す。図より、変形がバルク部分におよぶと、しだいに圧縮量Xに対する塑性変形域 r_D, r_S は直線からはずれて緩やかに周辺に広がっていくことがわかる。この傾向は頂角が120°の場合には、より大きく、又171°の場合は小さかった。

5. ま と め

ホログラフィ干渉法を用いて、粗さモデルの変形挙動を解析する方法について検討を行った。以下に本手法によって得られた主な結果を示す。

- (1)ホログラフィ干渉法の測定感度を用いると、干渉じまの密度分布の相違により、簡単に突起の変形域を定量化できる。
- (2)突起の押しつぶし変形は、始め突起の頂上部付

近で局部的に起こり、突起すそのに塑性域が及ぶまでは圧縮量に比例して進むが、バルク上では緩やかに周辺に広がる。

- (3) ホログラフィ干渉法によって求めた圧縮量と塑性変形域との関係は、すべり線場による解と定性的に一致する。

おわりに、本実験に協力いただいた本学卒研究生、藤井裕寿君、山田浩平君に感謝します。

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，19 (1974) 135.
- 5) T.Wanheim：Friction at High Normal Pressures，Wear，25，(1973) 225.
- 6) 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，23，(1957) 242.
- 7) 進藤明夫：くさびの押しつぶれの一般的考察，日本機械学会論文集，27，(1961) 447.
- 8) 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.
- 9) 牧野内昭武，池 治，林 篤：バルクの塑性変形を考慮した表面の平滑化機構（第2報，表面突起の押しつぶしにおける素材拘束条件の影響），昭和61年度塑性加工春季講演会，(1986) 127.
- 10) 古関伸裕，住吉 宏，村川正夫，牧野内昭武，池治：バルクの塑性変形を考慮した表面の平滑化機構（第3報，モアレ法を用いた実験と有限要素法による計算結果の比較），第37回塑加連講論，(1986) 443.
- 11) 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4報，連続くさび形突起の無摩擦押しつぶしに及ぼす試験片の加工硬化特性と拘束条件の影響），昭和62年度塑性加工春季講演会，(1987) 269.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 格内 敏，渡邊嘉郎：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解析，精密機械，47, 3,(1981) 265.
- 15) 格内 敏，渡邊嘉郎：種々の潤滑状態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.
- 16) 例えば C.H.Vest：Holographic Interferometry John Wiley and Sons.,New York (1979) pp.68.
- 17) 例えば W.Johnson and P.B.Mellor著（清田堅吉，山田義昭，葉山益次郎 訳）：塑性加工学，培風館（1965）pp.129.