光の表面反射特性を用いた接触圧力分布 測定装置の開発*

山口勝美** 打田元美*** 和田直敏† 五十君清司***

The Development of Pressure Distribution Measuring Device Using Laser Light

Katsumi YAMAGUCHI, Motomi UCHIDA, Naotoshi WADA and Kiyoshi ISOGIMI

In present study, the authors propose the new method to find the pressure distribution acting on contact surface and develop the measuring device. The principle of pressure measuring is based on the scattered surface reflection of light from the surface after contact. With this device, a pressure distribution is measured automatically and displayed in three dimension. It is shown pressure distributions in various contact cases measured actually using the developed device.

Key words: pressure distribution, surface contact, roughness change, laser reflection, optical method

1. 緒 言

金属接触面に働く圧力分布を直接実験により求めることは非常に難しく、これまでに3次元光弾性法のほか、超音波を使って表面反射強さから求める方法¹⁾、埋込みピンによる方法²⁾、感圧紙法³⁾、表面粗さ法⁴⁾などが用いられているが、測定精度、簡便さの両面から一長一短があり必ずしも使いやすいものとはなっていない。そこで、筆者らは過去、接触前後の表面の微細突起の形状変化が光の表面散乱反射特性を変化させることを利用し、この表面形状変化をとらえ、接触圧力分布を測定する方法⁵⁾を調べてきた。

本研究は、この原理を用いて、接触時に作用した圧力分布を自動的に測定し、3次元表示する“接触面圧力分布測定装置”を開発したものでここに報告する。

2. 測定原理および理論的考察

いま、硬さの大きい平滑な表面をもつ金属と、硬さの小さいある粗さをもった金属表面との接触を考える。負荷状態のとき、接触荷重は突起先端のみを通して一方から他方に伝

えられるため、突起先端にかかる圧力は降伏応力に達していると考えられる。このため図1(a)に示すように、硬さの小さい方の金属について母材は弾性変形状態にあっても表面の突起の先端は降伏応力 p_H （ほぼビッカース硬さHVと等しい）に達して塑性変形する。そして、除荷後における表面は図1(b)に示すように母材は弾性回復するが、表面の突起には永久変形が残る。この時、硬さの大きい方の金属の表面が十分滑らかならば、突起の先端のつぶれた部分にはその平滑面が写しとられる。すなわち、作用した荷重に応じて表面粗さは修正され、表面粗さ形状の中で平滑な面によって構成される部分が多くなると考えられる。この平滑面が全体の面積に占める割合は作用する荷重に比例するはずであるから、その面積率（以降これを接触率 R と呼ぶことにする）を測定することにより逆に、作用した圧力が測定できることになる。この関係を式で表せば、圧力 p は

Fig. 1 Surface profiles

* 原稿受付 昭和62年4月28日、昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月27日）にて発表

** 正会員 名古屋大学工学部（名古屋市千種区不老町）

*** 正会員 三重大学工学部（津市上浜町1515）

† 住友電気工業（株）（大阪市東区北浜5-15）

Fig. 2 Light reflection on surface before and after contact

Fig. 3 Reflected light distribution before and after contact

$$p = R \cdot p_H \quad (1)$$

で表される。そこで本研究では、この接触率 R を光の表面反射特性から求めようとするものである。以下にその測定原理を説明する。

試片の表面に照射した光の反射光強度の正反射方向に対する角度 θ に関する分布を $q(\theta)$ とし、 $q(\theta)$ はガウスの分布に従うと仮定する。図 2 (a) のように初期粗さをもつ面に光を照射した場合、光は広角度にわたり反射される。しかし、接触によって表面突起が押しつぶされた場合、図 2 (b) に示すように、表面粗さが増加していない部分では接触前と同様に光は広角度に反射するが、接触によって表面粗さが平滑になった部分では光は正反射の方向に集中して反射される。ここで、接触後平坦化された接触面からの反射分布を $q_1(\theta)$ とし、初期表面部分からの反射分布を $q_2(\theta)$ とすると接触後の表面の反射光の分布特性は、

$$q(\theta) = q_1(\theta) + q_2(\theta) \\ = \frac{SRI\epsilon}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{S(1-R)I\epsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2)$$

で表される。ここで、 S ：照射面積、 ϵ ：反射率、 R ：接触率、 I ：単位面積への入射光強度、 σ_1, σ_2 ：表面粗さによって定まる定数である。この関係を示したのが図 3 である。すなわち、 $R=0$ で表される接触前の反射分布は式 (2) の第 2 項による反射分布で図 3 (a) のようになり、接触後は式 (2) の第 1 項と第 2 項の和として図 3 (b) のような反射分布となり、反射光強度が中央、つまり正反射方向で高くなる。

いま、負荷の前後の正反射光強度の増分 $\Delta q(0)$ を考えると、この値は

$$\Delta q(0) = q(0)_R - q(0)_{R=0}$$

$$= \frac{SRI\epsilon}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} + \frac{S(1-R)I\epsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} - \frac{SI\epsilon}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} \\ = \frac{SI\epsilon}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \cdot R \\ = \frac{SI\epsilon}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \cdot \frac{p}{p_H} \quad (3)$$

で表される。ここで、 R は圧力に比例するので $\Delta q(0)$ を測定すれば圧力 P の大きさが求められることになる。しかし、式 (3) の係数には S, I および ϵ が含まれるため、この方法では光源の変動、表面の汚れやくもりなどの影響を受けやすく、安定した測定を行うには少々難がある。

そこで、本研究では正反射光強度 $q(0)$ と任意のある定められた角度 θ_1 における反射光強度 $q(\theta_1)$ との比を用いて測定する方法を採用する。いま、負荷前後の $q(0)/q(\theta_1)$ の増分を考えると、

$$\Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} = \frac{q(0)_R}{q(\theta_1)_R} - \frac{q(0)_{R=0}}{q(\theta_1)_{R=0}} \\ = \frac{R \{ 1 - e^{-\frac{\theta_1^2}{2} (1/\sigma_2^2 - 1/\sigma_1^2)} \}}{R e^{-\frac{\theta_1^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} (1-R) e^{-\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}}} \quad (4)$$

となる。ここで、接触後の粗さは初期粗さに比べ非常に小さいので $\sigma_1 \ll \sigma_2$ と考えることができ、また θ_1 を $\sigma_1 \ll \theta_1$ にとれば、

$$\Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \frac{R}{1-R} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \frac{p}{p_H - p} \quad (5)$$

と表すことができる。ここでもし、 $p \ll p_H$ のような条件の場合には

$$\Delta \left\{ \frac{q(0)}{q(\theta_1)} \right\} = \frac{\sigma_2}{p_H \sigma_1} e^{\frac{\theta_1^2}{2\sigma_2^2}} \cdot p \quad (6)$$

となる。式 (5) および式 (6) は、係数に S, I および ϵ が含まれていないため $\Delta \{q(0)/q(\theta_1)\}$ を用いると、光源の強さや反射率、照射面積には無関係に圧力が求められることになる。本研究では、この原理を用いて接触面圧力分布を求めることにした。

3. 基礎実験

3.1 反射光強度分布測定装置

まず、反射光の分布が接触による表面微細突起形状の変化によってどのように変わるかを知るため、様々な圧力を加え反射光強度分布を図 4 に示されるような装置を用いて測定した。光源には微小スポットに絞りをよく、しかも明るい部屋でも計測できるようにレー

Fig. 4 Outline of device measuring distribution of reflected light

Table 1 Indentor and specimen

	Indentor	Specimen
Size	$\phi 40 \times 40$ mm	$\phi 40 \times 40$ mm
Material	SKD (Quenching)	S 55 C
Vickers hardness	5.7 GPa (582 kgf/mm ²)	2.3 GPa (235 kgf/mm ²)

ザ光を用いた。

光源の He-Ne レーザ装置 (出力 20 mW) から発せられたレーザ光 (波長 633 nm) は絞りで直径 1 mm に絞られ、ミラーによって反射され、試料の測定面に照射される。測定面からの反射光はフォトダイオード (浜松フォトニクス, G 1117) に入り光電変換され、反射光強度は電流計 μA において電流値として表される。正反射方向からの振れ角 θ の方向の反射光強度の測定は、測定点を中心としてフォトダイオードを回転させることにより行う。

3.2 校正試験方法

一定の面圧を加えた時、表面反射特性がどのように変化するかを調べるために校正試験を行った。

試料の表面に一樣な圧力を加えるため、硬く滑らかな表面をもつ圧子と、硬さが小さくある粗さの表面をもつ試料とを同じ形状の円柱に作製し、その端面を押しつけて圧力を加えた。圧子と試料の諸元を表 1 に示す。

実験に用いた圧子は焼入れをし、表面を #8000 GC の砥粒でラッピングして表面粗さ $R_a = 0.052 \mu m$ 程度の平滑な表面に仕上げた。表面の粗さ形状を図 5 に示す。

また、試料の表面は #320 WA 砥粒を用いて湿式法により鋳鉄製定盤の上でランダムな方向にラッピング

$R_a = 0.052 \mu m$

Fig. 5 Surface profile of indentor

Fig. 6 Distribution of reflected light

を行い $R_a = 0.5 \sim 0.6 \mu m$ 程度の均一な粗さの面に仕上げた。

3.3 表面と反射光分布との関係

散乱反射光が上記試片につき各方向にどのように分布するかについて調べた。

荷重を加えた時の表面について反射光強度分布を測定した結果が図 6 である。横軸は反射光の正反射方向に対する角度を示す。正反射方向に対して片側だけ表示したのは、反対方向へも、ほぼ同様の特性を示したからである。

縦軸は各方向への反射光強度に応じてフォトダイオードで光電変換された電流の大きさを示す。図 6 を見て明らかのように無荷重状態、すなわち初期粗さ状態では反射光は広く分布するが、荷重が増すにつれて正反射方向、すなわち $\theta = 0^\circ$ の反射光強度は増加し、逆に正反射方向よりずれた方向への反射光強度は減少している。

これらの結果は、前章の理論的検討で示した式、および図によく一致している。以後、 $\Delta\{q(0)/q(\theta)\}$ を測定して接触面に負荷された圧力の値を求めることとする。

Fig. 7 Outline of device

Fig. 8 Device

4. 接触面圧力分布測定装置の開発

4.1 接触面圧力分布測定装置

本研究で開発した接触面圧力分布測定装置の概略図および写真を図7, 図8に示す。前述した反射光強度分布測定装置に加え, 受光ヘッドを正反射方向および正反射方向に対して 8° の角度をもつように取り付ける。ここで前述の θ_1 として 8° を用いたのは経験的にこの値が最も適していると考えられたためである。受光した正反射方向および 8° の方向の光は, それぞれ光ファイバ($\phi 4\text{ mm}$ ステップインデックス型)でフォトダイオードに導かれ, フォトダイオードで光電変換した後, 割り算回路に入力され $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ が得られる。割り算器には $\mu\text{PC 132 D}$ (NEC)の素子を用いた。この回路の概略を図9に示す。

この割り算器によって得られた $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ の電圧出力はX-YレコーダのY軸へ入力される。また, 試料の置かれたX-Yテーブルに取り付けられたポテンシオメータにより, 軸方向の動きを電圧に変換し, X-YレコーダのX軸へ入力する。

4.2 検定試験

接触面圧力分布測定装置を用いた場合の負荷された

Fig. 9 Block diagram of the device

Fig. 10 Relationship between parameter $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ and contact pressure p

圧力と $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ の値, すなわちX-YレコーダのY軸方向への増加量との関係を求めた。

圧子, 試料, および加圧方法等の試験方法は前述と同様に行った。その結果を図10に示す。横軸は圧力 p をビッカース硬度 p_H で割って無次元化した値であり, 縦軸はX-YレコーダのY軸方向への増加量, すなわち $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ の値である。この結果より, $\Delta\{q(0)/q(8)\}$ と圧力とは p/p_H の値が0.2以下の場合, 式(6)で表されるような比例関係が成立することが確認された。

以下この関係を利用して接触面圧力分布を求める。

4.3 接触面圧力分布の測定

この接触面圧力分布測定装置を用いて各種の接触面, 接触状態における圧力分布の測定を行った。測定方法を以下に示す。

この測定装置のX-Yテーブル上に試料を置き, テーブルをマイクロメータによって, X軸方向に手動で送る。このようにするとX座標を横軸とし圧力の分布を示す2次元グラフが書ける。次に, テーブルをY軸方向に一定量動かし, 同様のグラフを記録させる。この操作を繰り返すことによって接触面圧力分布が3次元表示される。測定に用いた試片及び圧子の材質, 表面仕上ならびに加圧方法は前記と同様である。圧子の形状は, 球面, 円柱, 中心に穴のあいた円柱, 切欠

Fig. 11 Pressure distribution on contact surface

きのある円柱，四角柱，中心に穴のあいた六角柱の6種類の形状のものを用いた。

結果を図11に示す。この図から，圧力の分布は，球面圧子の接触においては，圧力はHertzの楕円分布の様子がよく測定されることがわかる。また平面の圧子の接触では，縁の部分にいくに従い圧力は大きくなり，特に圧子の角の部分では圧力は急激に大きくなっており，Boussinesqの式で表されるような分布をすることがわかる。

次に，接触状態のもう一つの例として，試料の表面に油を塗布した場合の接触について調べた。

圧子は，球面，円柱，四角柱を用い，試料の表面にシリンダ油（JIS #1 200 相当品）をはけで塗布して，同様の方法で加圧した。結果を図12に示す。

この図から，油を塗布することにより，金属表面に金属接触を介して負荷される圧力は大きく減少し，特に中央部分では圧力はほとんど加わっておらず，縁の部分のみに圧力が負荷されている様子がよくわかる。

(a) Contact between spherical and flat surface

(b) Contact between end surface of cylinder and flat surface

(c) Contact between end surface of square pillar and flat surface

Fig. 12 Pressure distribution on contact surface in lubrication

先の図 11 の場合とこの図 12 の分布の圧力差は、油を介して伝えられる圧力ということになる。

以上のことより、本測定装置を用いて圧力の分布が接触面全体にわたりよく測定され、また、本測定装置を用いることにより様々な接触面、接触状態における

圧力分布が測定できることがわかる。

5. 結 言

- (1) 接触面圧力分布測定装置を作製し、簡単な操作で接触面圧力分布を自動的に測定し、3 次元表示することができた。
- (2) 工業上の実用例として、各種の接触面、接触状態における圧力分布を表すことができた。

参 考 文 献

- 1) Y. Ito, J. Toyoda and S. Nagata: Interface Pressure Distribution in a Bolt-Flange Assembly, Trans. ASME, J. Mech. Design, **101**, 4, (1979) 330.
- 2) G. T. Rooyen and W. A. Backofen: Friction in Cold Rolling, J. Iron and Steel Inst., **186**, 6, (1957) 235.
- 3) R. Plock: Die Übergangsstiffigkeit von Schraubenverbindungen, Ind. Anz., **93**, 27, (1971) 571.
- 4) 山口勝美, 加藤清隆: 粉体を用いた金属接触面の圧力分布測定法, 精密機械, **50**, 10 (1984) 1646.
- 5) 山口勝美, 水堀文浩: 光の表面反射特性を用いた接触圧力分布測定法, 日本機械学会論文集, C 編, **51**, 471 (1985) 2869.

●——精密工学会刊行図書のご案内

会誌「精密機械」および欧文誌“Bull. JSPE”総目次

1. 構 成 「精密機械総目次」第 31 巻第 1 号～第 49 巻第 12 号（昭和 40 年 1 月～昭和 58 年 12 月）
B 5 判, 本文 382 ページ
“Index to Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering” Vol. 1. No. 1-Vol. 17, No. 4 (Oct. 1963-Dec. 1983)
B 5 判, 本文 158 ページ
共に内容別・著者別分類からなっています。
2. 定 価 「精密機械総目次」 会員 2 000 円, 非会員 4 000 円
“Index to Bull. JSPE” 会員 1 000 円, 非会員 2 000 円
セット価格 会員 2 500 円, 非会員 5 000 円
(両方をセットとする場合)