

# レーザ顕微鏡を用いた真実接触面の3次元変形測定

京都大学 ○女良畑佑規, 河野大輔

Three-dimensional deformation measurement of real contact area using laser micro scope  
Kyoto University Yuki JOROBATA, Daisuke KONO

Many studies have proposed deformation models on the real contact area. However, the model has not been sufficiently verified because the direct measurement of the deformation has not been conducted. In this study, the 3-dimensional deformation of the real contact surface was directly measured using a laser microscope. The measurement result was in a good agreement with the conventional calculation considering elastic and plastic deformations. The result shows that the elastic and plastic deformations are dominant in deformation of the real contact surface. Therefore, if the three-dimensional shape of the contact surface can be precisely modeled, the stiffness of the contact surface can be calculated using the finite element method.

## 1. 緒言

工作機械のボルト締結部をはじめ、各種機械要素間の金属接触面における表面形状変化は、結合部の剛性（接触剛性）と減衰性に影響を与えるため、機械の工作精度に大きな影響を与える。接触剛性のモデルは多数存在するが、推定精度が悪く、実際にはほとんど用いられていない。これは実際に接触面で起こっている変形がモデルと異なっていることに原因があると考えられる。接触面の変形モデルについては多くの研究が行われているが、そのモデルが実際の変形と一致しているかは直接的に確認できていない。実験的には圧力分布、電気抵抗などからモデル検証が行われてきた<sup>1)2)</sup>。しかしどの検証実験も間接的であり、実際の変形を議論するには真実接触面の分布や形状などの不確定要素がある。検証が間接的になってしまう原因は接触面を直接観察できないことにある。

本研究では透明体と金属の接触を扱うことで、真実接触面の3次元変形を直接的に観察する。金属と透明体の接触面はレーザ顕微鏡を用いて観察することができる。透明体を用いるとレーザ光の一部が透明体を透過するので接触面における金属の3次元表面形状を観察できる。この方法により観察できた変形とモデルにより推定した変形量を比較しモデルの妥当性を検証する。

## 2. 接触面変形モデル

接触面の塑性変形量と弾性変形量を求めるモデルについて述べる。図1に接触面の変形の模式図を示す。2平面の接触を考えた場合、それぞれの平面には微小な凹凸があり、真実接触面積は見かけの接触面積に対して小さい。小さい予圧荷重に対しても局所的な接触面においては大きな圧力が生じるため、圧力が材料の塑性流動圧力 $p_m$ となるまで真実接触面は塑性変形する。塑性変形領域以外の領域は弾性変形していると考えられる。塑性変形のみを考慮した真実接触面積 $A_r$ は次式で求められる<sup>3)</sup>。

$$A_r = \frac{W}{p_m} \quad (1)$$

ただし、 $W$ は荷重である。塑性流動圧力 $p_m$ は材料によって決まる値でビッカース硬さの1.08倍である<sup>4)</sup>。本研究では、塑性変形量を $A_r$ の変化で評価する。弾性変形量の計算には有限要素法を用いる。塑性変形後の形状をモデル化し、予圧荷重を加えて弾性変形量を求める。

## 3. 測定装置と測定方法

金属試験片の接触面の変形を明らかにするためにレーザ顕微鏡を用いて接触面を直接的に観察する。レーザ顕微鏡はレーザ光を照射し、その反射光量の極大点を観測することで3次元表面形状を得る。透明体を用いればレーザ光が透過するので透明体越しに金属表面の3次元形状を直接観測することができる。

図2aに測定セットアップを、図2bに接触面付近の拡大図を示す。本実験において、試験片は炭素鋼(JIS S45C)を用い、透明体はガラスを用いる。ガラスはステンレス薄板上部から支持されており、下から試験片を押し付けることで接触面とする。装置下部に取り付けられたボルトで強制変位を与えることで、試験片に荷重を与える。加えた荷重は力センサ(Kistler)を用いて測定する。図3に示すように、試験片にステップ1~6までの垂直荷重を順番に加えた。

試験片は、図4に示す形状にした。接触面には突起を設け、見かけの接触面積が顕微鏡の視野に収まるようにした。また、切削加工面の変形を観察するために接触面となる突起部表面にカスプを作った。カスプの寸法はレーザ顕微鏡で観察できる大きさの変形が得られるように図に示す値に決定した。

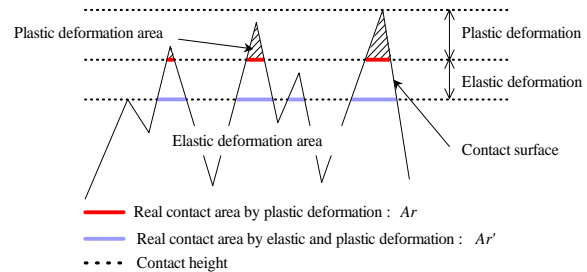


Fig.1 Schematic diagram of deformation of contact surface

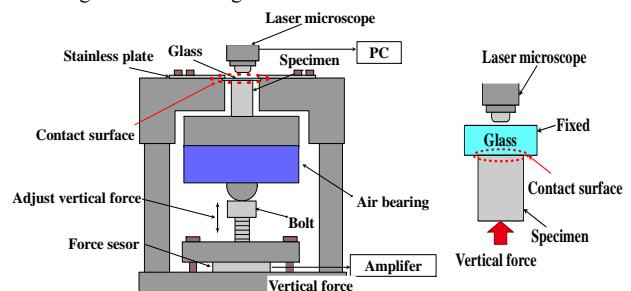


Fig.2 Setup of experiment for observing surface deformation

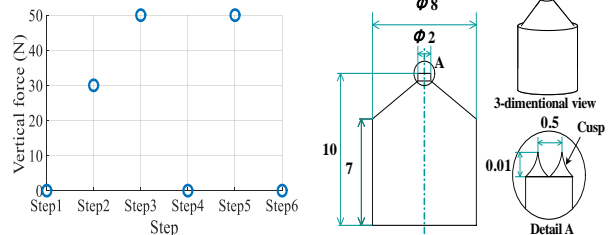


Fig.3 Force condition

Fig.4 Shape of the specimen

## 4. 実験結果と考察

図5に接触面の負荷前の3次元形状を示す。 $Y = 420 \mu\text{m}$ と $Y = 930 \mu\text{m}$ の位置に2列のカスプが観察できた。これらをそれぞれカスプ1、カスプ2と呼ぶ。図5に示すピークA、ピークBについて形状変形を検討する。

まず、負荷荷重に対する形状変形について述べる。図6にStep1, Step2, Step3の荷重条件におけるピークAとピークBの表面形状を示す。負荷前の高さが低いピークAはほとんど変形していないのに対し、高いピークBは変形している。このことから高い位置は接触しているのに対し、低い位置は接触していないことがわかる。また、荷重を大きくするにつれて変形量が大きくなり、30 Nで $7.0 \mu\text{m}$ 、50 Nで $10.2 \mu\text{m}$ の変形量が観察できた。

次に、弾性変形と塑性変形について述べる。図7aにStep1, Step3, Step4の荷重条件におけるピークBの表面形状を示す。負荷した荷重を除荷すると復元する領域と復元しない領域が観察できた。復元する領域は弾性変形領域、復元しない領域は塑性変形領域だと考えられる。ピークBの塑性変形量は $10.5 \mu\text{m}$ 、弾性変形量は $1.4 \mu\text{m}$ であった。図7bにStep4, Step5, Step6の荷重条件におけるピークBの表面形状を示す。弾性変形領域は負荷・除荷を繰り返しても復元する様子が観察できる。このことから観察できた弾性変形には再現性があることがわかった。Step4とStep6の形状が完全に一致しないのは負荷荷重の誤差により塑性変形領域が変わってしまったこととレーザ顕微鏡のノイズが原因だと考えられる。

## 5. 実験結果とモデルによる計算値の比較

弾性変形量と塑性変形量をモデルから求めて、測定値と比較する。変形量をモデルから計算するには、材料定数を測定する必要がある。カusp頂点における材料特性をナノインデンテーション法により測定した。ピッカース硬さへの換算値  $330 \text{ kgf/mm}^2$ 、押し込み弾性係数  $E=259 \text{ GPa}$  となった。ただし、ピッカース硬さへの換算値は Laubert らの仮定を用いた大村らの計算方法で算出した。本試験では局所的な真実接触面の変形を扱うので押し込み弾性係数を用いる。これらの値とせん断弾性係数  $G=79.7 \text{ GPa}$  とポアソン比  $\nu=0.29$  を用いて計算を行った。

### 5.1 塑性変形

式 (1) から塑性変形のみを考慮した真実接触面積  $A_r$  を求め、実験結果と比較する。加えた荷重と測定したピッカース硬さから  $A_r = 1.43 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$  となった。実験結果から  $A_r$  を求める。  $A_r$  は塑性変形のみから決まるので、荷重負荷前後のピーク高さの差から  $A_r$  を算出する。ガラス越しに形状を観察すると測定ノイズが大きくなるので、  $A_r$  の計算には Step1 と Step6 の際にガラスを取り外して測定した形状を用いる。ピーク頂上の周辺において塑性変形量が  $1 \mu\text{m}$  以上になる部分を  $A_r$  と考えて計算を行った。具体的にはカusp 1 は  $Y=375 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ 、カusp 2 は  $Y=865 \mu\text{m} \sim 990 \mu\text{m}$  において Step1, Step6 の荷重条件における高さの差が  $1 \mu\text{m}$  以上の点を検出し、点の数と顕微鏡の解像度を乗じて面積を計算した。  $1 \mu\text{m}$  は顕微鏡のノイズによる  $A_r$  の誤検出を防ぐために設けた値である。この方法により求めた塑性変形のみを考慮した真実接触面積はカusp 1 で  $6.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 、カusp 2 で  $8.4 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$  となり、全体で  $A_r = 1.46 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$  となった。実験値と計算値はよく一致しており、式 (1) から塑性変形量が計算できることが分かった。

### 5.2 弾性変形

弾性変形は有限要素法を用いて計算する。計算はカusp 2 について行い、Step4 から Step5 における弾性変形を検証する。モデル化したカuspの形状を図 8a に示す。カuspの形状は工具半径  $R=0.4 \text{ mm}$  とピックフィード  $F=0.514 \text{ mm}$  からモデル化した。カuspの X 方向の長さは変形が観測できた部分 ( $X=200 \mu\text{m} \sim 480 \mu\text{m}$ ) の長さとし  $280 \mu\text{m}$  とした。真実接触面は理想的にカusp頂点に均一に分布すると仮定し、形状を長方形とした。長方形の y 方向の長さは、真実接触面積が測定した  $A_r$  と一致するように  $30 \mu\text{m}$  と定めた。真実接触面での圧力は  $p_m$  で一定と考えられるので各カuspが受ける荷重の比は  $A_r$  の比に等しいと考えられる。実験結果より各カuspの  $A_r$  の比は  $62:84$  であったので、カusp 2 には  $28.8 \text{ N}$  の荷重がかかると考えられる。よって底面を固定し図 8a に示す斜線部に  $28.8 \text{ N}$  の垂直方向荷重を加えた。

実験より測定した弾性変形量とモデルから算出した弾性変形量を図 8b に示す。測定した弾性変形量は Step4 と Step5 のカusp頂点 ( $Y=920 \mu\text{m}$ ) における高さの差から算出した。測定した弾性変形量とモデルから算出した弾性変形量は近い値を示した。実験値と計算値に差が生じたのは、真実接触面が実際には偏って分布しており、長方形でないことが原因だと考えられる。

これらの結果から、観察できた変形において弾性変形と塑性変形が支配的であることがわかった。よって接触面の 3 次元形状がモデル化できれば、接触面における変形を算出することができ、接触剛性を推定することができることがわかった。接触面の変形が従来のモデルと矛盾していないにも関わらず接触剛性の推定精度が低いのは接触面のうねりの影響を考慮していないことに原因があると考えられる。接触面のうねりの影響で真実接触面の分布にばらつきが出るため剛性にばらつきが出ることで接触剛性の推定精度低下の原因だと考えられる。

## 5. 結言

本論文では、接触面の 3 次元変形をレーザ顕微鏡を用いて直接的に観察した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 接触面における形状変化は高い位置から起こり、荷重を大きくするにつれ、変形量が大きくなる。変形には弾性変形領域と塑性変形領域があり、塑性変形による真実接触面積は従来のモデルで計算できる。弾性変形には再現性がある。
- (2) 接触面で起こる変形は弾塑性変形が支配的であり、接触面の 3 次元形状を忠実にモデル化できれば有限要素解析で接触剛性を推定することができる。

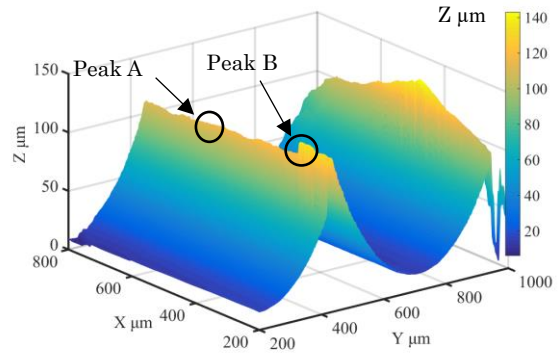
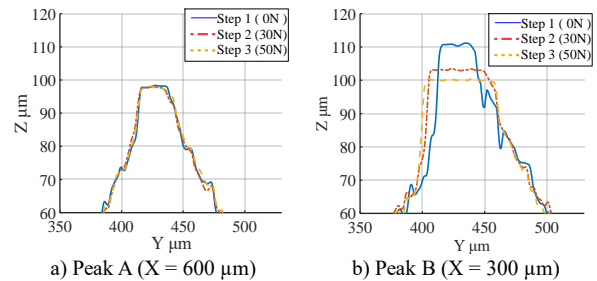


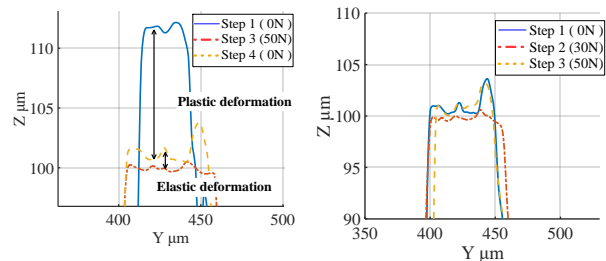
Fig.5 3-dimensional shape of contact surface



a) Peak A ( $X=600 \mu\text{m}$ )

b) Peak B ( $X=300 \mu\text{m}$ )

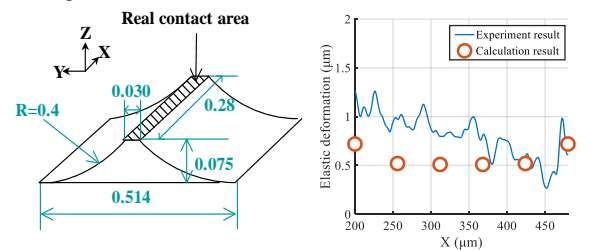
Fig.6 Surface shapes on the top of the cusp



a) Peak B ( $X=300 \mu\text{m}$ )

b) Peak B ( $X=300 \mu\text{m}$ )

Fig.7 Plastic and elastic deformation on the real contact area



a) The shape of cusp model

b) Experimental result and calculation result ( $Y=920 \mu\text{m}$ )

Fig.8 Elastic deformation on the real contact area

## 参考文献

- [1] 加藤仁, 山口勝美, 加藤隆雄, 表面粗さ変化による金属接触面の圧力分布測定法, 日本機械学会論文集 第3部, p.1742-1751
- [2] 久門輝正著, 金属接触面の電熱機構, 日本機械学論文集 39.299, p.1361-1368, 1971.
- [3] バウデン・テイバー著, 曾田範宗訳, 固体の摩擦と潤滑, 丸善株式会社, 1961.
- [4] 貞廣猛史著, 超高合金の押し込み硬さについて, 日本金属学会誌 37.11, 1973.
- [5] 大村孝仁, 津崎兼彰, ナノインデンテーションによる材料評価, まてりあ 46.4, p. 251-258, 2007.