

# 接触による粗さ面の変化に関する研究（第1報）

－ブリネル硬さ試験機を用いた実験的検討－

藤本 隆士\*・新田 悠二\*\*

## Study on Characteristics of Rough Surface on Contact

－ Experimental investigation with Brinell hardness tester －

Takashi Fujimoto\*, Yuji Nitta\*\*

### Abstract

height distribution and curvature distribution of asperities on a rough surface are important for analyse of friction and wear. The most of researches carried out for the analysis of the texture parameters were based on Greenwood and Williamson (G-W) model. The G-W model assumes that all asperity summits have the same radius and their heights are on Gaussian distribution. In this research, deformations of asperity summits were measured and their Abbott's curves were calculated on rough surfaces contacted with smooth sphere surfaces. Computer programmes to flatten the deformed surface profiles and to calculate the Abbott's curves were written. Further, a new apparatus to contact between rough surfaces and spheres was prototyped.

### 1. 緒 言

粗い面と平面が接触したとき、真実接触部は粗さの突起先端であり。その総面積は、見かけの接触面積の1万分の1程度であるといわれている<sup>1)</sup>。摩擦や摩耗は、真実接触部で生じるため、粗さ面の特に突起頂点付近の形状や分布が重要となってくる。しかし、従来までは、Greenwood-Williamson (G-W) モデルに代表されるように、粗さの突起先端半径は突起高さにかかわらず、どの突起も同じと考えることが多かった。さらに、G-Wモデルでは、突起頂点の高さ分布が正規分布をなすものとしている。<sup>2,3)</sup>

接触による突起の変形は弾性的につぶれる突起と塑性変形する突起の両方がある<sup>4)</sup>。このとき、高い突起がつぶれると、塑性変形により接触後の突起先端半径は大きくなる。さらに、谷部の盛り上がりなども生じ、突起先端の分布も変わってくる。そのため、工業的に使われるような、十分になじんだ表面を解析する場合に、従来の突起先端半径が一定で頂点の高さ分布が正規分布であることを前提にした解析手法を用いると問題が生じることも考えられる<sup>5)</sup>。

そこで、粗い面と平面を押し付けたときの、塑性変形による突起先端部の変化、突起頂分布の変化、突起頂点の曲率分布、負荷曲線の変化などを詳細に知ることが重要になる。

本研究では、粗い面に球を押し付けた際の粗さの変化を追うために、ブリネル硬さ試験機を用いて、押し付け実験を行い、塑性変形による突起先端部の変形挙動を追うことを試みた。そのために、今回、接触後の球状圧痕を平坦化し負荷曲線を求めるプログラムを自作した。さらに、その実験結果を受けて、ブリネル硬さ試験機では困難な30 N程度の軽荷重を負荷することができる試験機を試作した。装置試作の際に、今回は、研究目的のみならず教育的な観点から、設計、加工や組立工程までの全てを学生が自分で行うことを目指し、装置の設計手順の学習、および、部品の選定、さらに加工・組立てをし、予備実験による動作確認を行った。

### 2. 実験および解析プログラム

#### 2.1 ブリネル硬さ試験機による実験

図1にブリネル硬さ試験機の外観を、また、図2に押し付け実験前後の試料および、圧子の外観を示す。荷重を加えた際の粗さの変化を追うため、ブリネル硬さ試験機を使用し押し付け実験を行った。

試料は、 $\phi 30\text{mm}$ の真鍮丸棒の中心に $\phi 10\text{mm}$ の穴をあけ、突っ切り、厚さ10mmにフライスとラッピングで両面を仕上げた。圧子は、S55C丸棒を試料と同様に中心に $\phi 10\text{mm}$ の穴をあけ、厚さ10mmに

\* 弓削商船高等専門学校電子機械工学科

\*\* 弓削商船高等専門学校専攻科生産システム工学専攻

仕上げ、120° 間隔で3点のくぼみをつけて、電気炉で焼き入れをした後、φ5mmの軸受用鋼球を固定したものを用いた。図2(a)に実験前の試料の外観を、(b)に押付け実験後の試料の外観を、また、(c)に圧子の外観を示す。

実験方法は、まず、実験前の試料の断面曲線を測定し、ブリネル硬さ試験機に自作した圧子と試料を取り付け、試料台の水平をとり、測定箇所を4.9kNで押し付け、試料を一旦取り出し、押し付け箇所を粗さ計で測定した後、再び、同じ箇所を押し付けるよう位置を調整して、7.5kNに荷重を増して押し付け実験を行い、押し付け箇所の粗さ測定の後、同じ箇所を9.8kNで押し付けた。図2 (b) は、実験後の試料の外観であり、圧痕が3点確認できる。

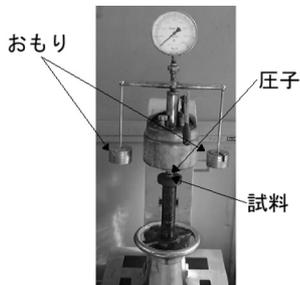


図1 ブルネル硬さ試験機

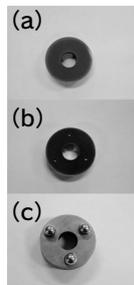


図2 試料と圧子、(a) : 実験前の試料、(b) : 実験後の試料、(c) : 圧子

### 2. 2 断面曲線の例

図3に実験後の各荷重の断面曲線の例を示す。(a)は実験前の断面曲線であり、ところどころに10μm程度の傷が付いている。(b)、(c)、(d)はそれぞれ4.9kN、7.5kN、9.8kNの荷重で押し付け実験した後の圧痕付近の断面曲線である。

押し付け荷重が大きくなるにつれて、試料の塑性変形が進み圧痕が大きくなっているのがわかる。また、塑性変形により圧痕肩部が盛上がってきていることが確認できる。

### 2. 3 解析プログラム

測定した粗さデータを解析するために圧痕部の平坦化を行う。2. 3. 1で後述するようにJISの規格にそった平坦化処理では圧痕の肩部が盛上がるため好ましくない。そのため、断面曲線の圧痕部を切り出し、それを二次曲線で近似し、さらに、断面曲線から近似曲線を引くことで圧痕部の平坦化を行うプログラムを作成した。さらに、圧痕底部付近の負荷曲線を求めるためのプログラムを作成した。

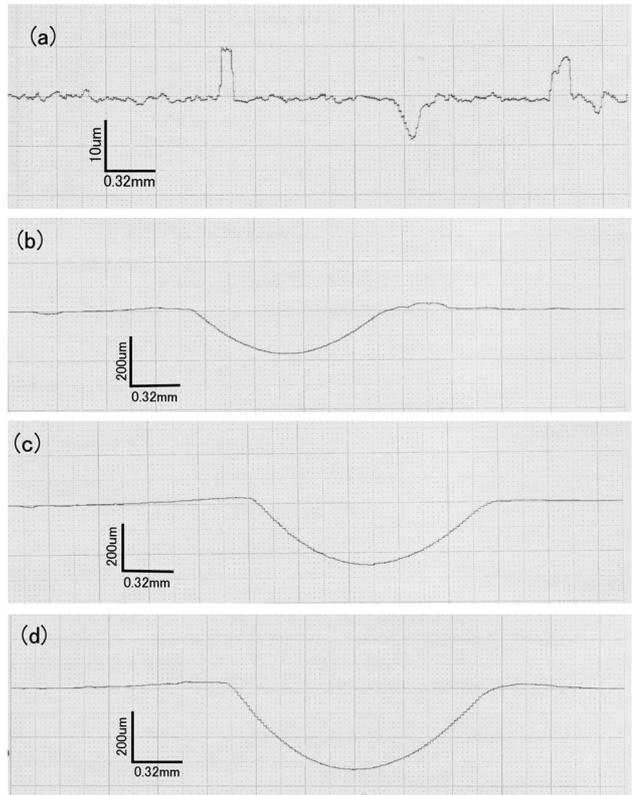


図3 実験後の断面曲線、(a) : 荷重0N、(b) : 荷重4.9kN、(c) : 荷重7.5kN、(d) : 荷重9.8kN

### 2. 3. 1 JISにおける粗さ曲線と断面曲線の扱い方

JIS規格では、図4に示すように、測定した断面曲線から任意の波長λc(カットオフ値)を超える成分をうねりと考えフィルタリングすることで取り除き、粗さ曲線を求めている<sup>6,7)</sup>。したがって、図4 (b)に示すように、圧痕肩部などの、急激に傾きが変化する部分は波長が短いために取り除くことができないことがある。そのため、自作プログラムを作成した。図5に市販の粗さ計による出力例を示す。丸で囲まれた部分が圧痕肩部と平坦化後の盛り上がりである。

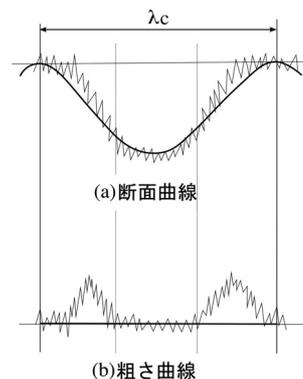


図4 JISによる粗さと断面曲線の考え方

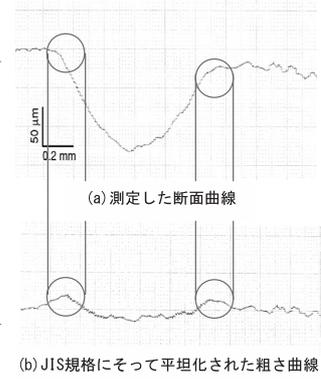


図5 市販の粗さ計による出力例

2. 3. 2 プログラムの流れ

自作したプログラムの流れを図6に示す。  
 まず、粗さ計から出力された測定データをコンピュータに取り込み、グラフソフトにより描画する。描画したデータから圧痕部分の大まかな範囲を目視により見極め必要な部分を切り出し、その後、作成したプログラムで切り出し部分のデータを読み込み、二次曲線近似を行い、近似曲線の係数を求める。さらに、求めた係数を用いて実際の粗さから二次曲線を差し引くことで平坦化を行っている。また、負荷曲線データの計算では、平坦化された粗さ曲線データを高さ方向に0.1μm幅で切断し、負荷長さ率Rmrを求める。さらに、切断レベル内のデータの平均高さを求めた。最後に平坦化後の粗さ曲線データと負荷曲線のデータをファイルに書き出してプログラムが終了する。

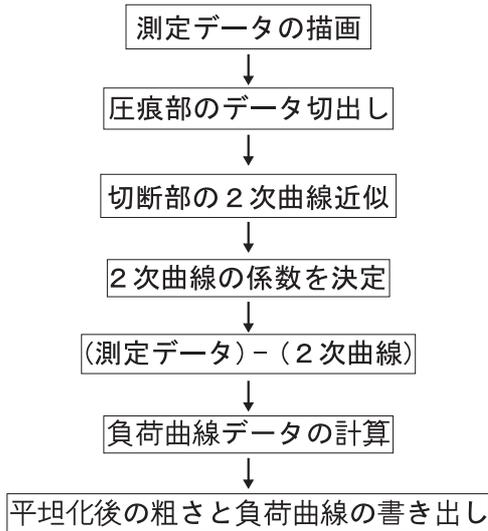


図6 プログラムの流れ

2. 3. 3 プログラムの検証

プログラムの平坦化処理の正確性を検証するためブリネル硬さ試験機による押付け実験後のデータを自作プログラムで二次曲線近似し係数を求めた。また、同じデータを、市販のグラフソフトを用い二次曲線近似し、自作プログラムによる結果と比較した。表1に計算結果を示す。

表1より平均誤差は0.20%でありほぼ一致しているといえる。

2. 4 プログラムによる断面曲線の処理結果

自作プログラムによる断面曲線の処理結果の一例を図7に示す。図7は、自作したプログラムを用い、それぞれ、4.9kN、7.5kN、9.8kNの荷重を加えた後の圧痕中心を含む試料表面の断面曲線を平坦化処理

表1 近似曲線の係数の比較

係数	プログラムによる数値	プログラムによる数値	誤差 %
a	0.000110	0.000110	0.00
b	-0.254	-0.255	0.39
c	72.083	72.238	0.22
平均誤差			0.20

近似二次曲線： $y = ax^2 + bx + c$

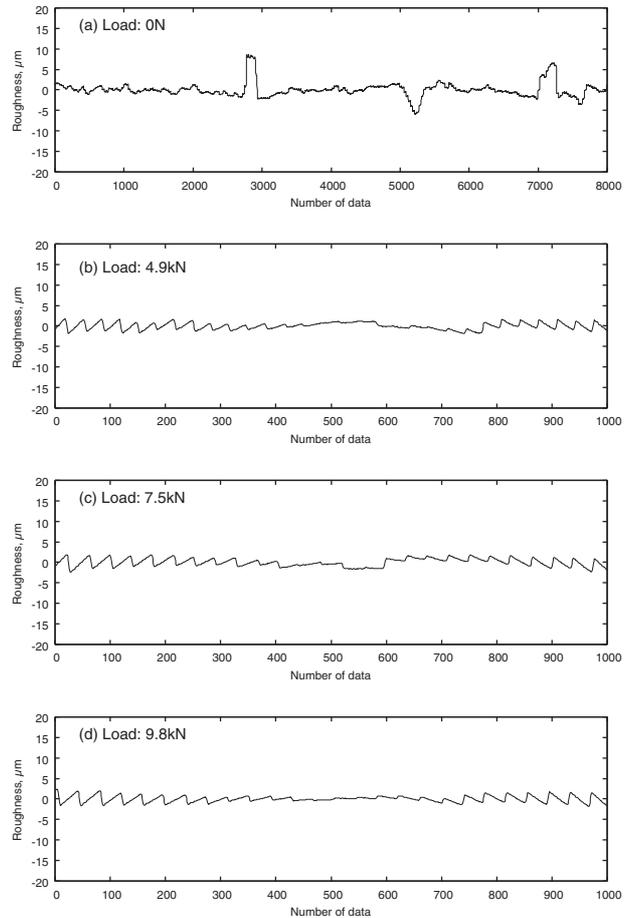


図7 断面曲線の処理結果の例

したもので、同図 (a) は実験前の断面曲線、(b) は4.9kN押付け後、(c) は7.5kN押付け後、(d) は9.8kN押付け後の粗さ曲線である。なお、図7 (b), (c), (d) において、周辺部に鋸歯状の波形が確認できるが、これは、圧痕の斜面部分の断面形状データが階段状になっており、それを近似曲線で平坦化したために生じたものである。今回は圧痕底部の粗さ曲線だけに注目しているため大きく影響されないと考えているが、今後の検討課題となっている。また、圧痕中心部を平坦化処理したデータから負荷曲線を求めた結果の例を4つ図8に示す。いずれも縦軸は粗さ、

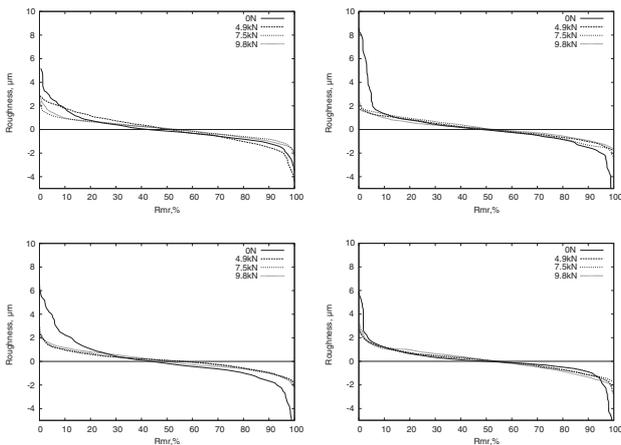


図8 負荷曲線の処理結果

横軸は負荷長さ率である。さらに、縦軸の値を標準偏差で割り、無次元化したものを図9に示す。

図8より、突起頂点の最大粗さは0Nの場合5~12 $\mu\text{m}$ となっているが、4.9kNの荷重を加えると急激に小さくなり、3 $\mu\text{m}$ 程度となり、それ以降荷重を増やしてもあまり変化しない。谷部も、同じような傾向にある。このことから、4.9kN以上の荷重では粗さの変化はほとんどなく母材の塑性変形のみが進んでいったと考えられる<sup>8)</sup>。

図9を見ると、図8と同様に0Nのときは高い突起や深い谷が存在しており、中心付近の低い突起が相対的に少ないことがわかる。4.9kNで押付け後は、高い突起や深い谷が少なくなり、粗さが平坦化されている。さらに、7.5kN以上になると高い突起と深い谷はより少なくなっていることがわかる。このようにして、30回分の実験データから各荷重条件ごとに粗さの最小値、最大値を取り出し、平均値を取ったものを図10に示す。

0~4.9kN間で粗さが急激に変化しており、最大高さ粗さは10.2 $\mu\text{m}R_z$ から5.2 $\mu\text{m}R_z$ に減少している。また、4.9~9.8kNでは、粗さの変化はほとんど見られず、粗さは5.2 $\mu\text{m}R_z$ からほとんど変化していない。このことから、粗さの変化をより詳細に追うためには軽荷重での押付け実験を行う必要があると考えられる。また、0Nの際のばらつきが大きいのは、試料の仕上げを手仕上げで行ったためと考えている。

### 3. 実験装置の試作

ブリネル硬さ試験機を使用し実験を行ったが、2.4で得られた結果より、荷重が大きかったため粗さの変化が急激で解析しにくかった。また、荷重を増しても粗さの変化は進まず、母材の塑性変形が進んでいくことがわかった。そのため、粗さが急激に変化する範囲の比較的軽い荷重で実験をする必要があ

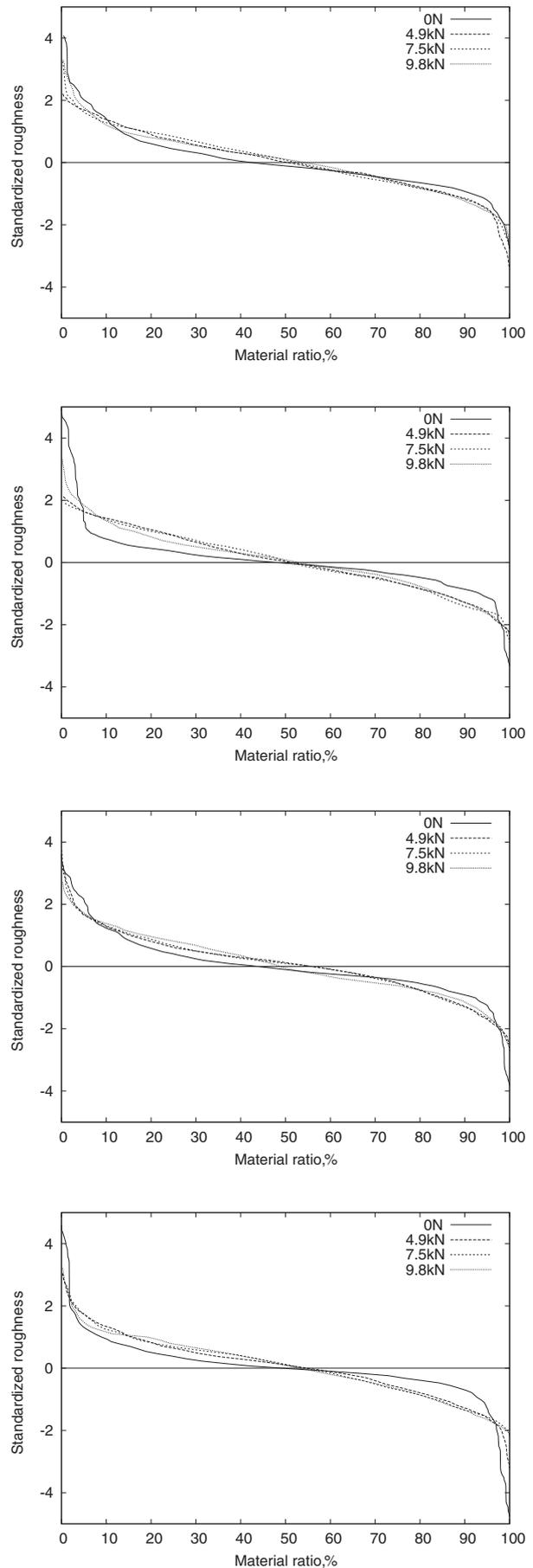


図9 標準化した負荷曲線

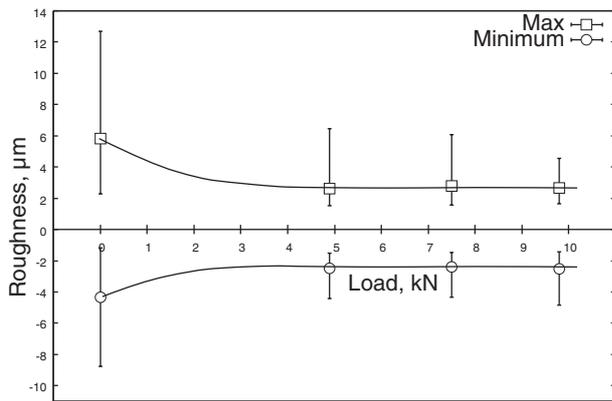


図10 粗さ曲線の最大値と最小値の変化

る。このことから、今回0~30N程度の比較的軽荷重域で押付け実験ができる装置を試作した。

今回は、研究目的のみならず教育的な視点も含め、設計、加工や組立工程までの全てを学生が自分で行うことを前提にして、装置の設計手順の学習、および、部品の選定、さらに加工・組立てをし、予備実験による動作確認を行った。設計の手順としては、最初に、装置のコンセプトをたて、それに従ってアイデアを出し検討した後、設計を行った。また、設計中に購入部品の選定や強度計算を行い、さらに、加工や組立も外注に頼らず、全て手作りすることとした。

### 3. 1 コンセプトとアイデアの例

試料と圧子は2. 1で示したφ30mm×厚さ10mmの真鍮試料と3点の鋼球を固定したS55C焼入れ材をそのまま用いることを前提とし、どのような装置にするかを考えた。粗い面に均一に静かに荷重を加えることを考えて、まず、コンセプトとして『急激に力を加えない』『接触面に垂直に力を加える』『接触面に均一に力を加える』『コンパクトにする』という4つを立てた。

試料面に力を加える際に急激に力が加わると、一瞬、一定以上の力が加わり、予想より塑性変形が大きくなることが考えられるため『急激に力を加えない』とし、力が斜めに加わったり、偏って力が加わると塑性変形が進んだ部分とそうでない部分が生じ、突起先端の変形が変わってくるため『接触面に垂直に力を加える』と『接触面に均一に力を加える』とした。『コンパクトにする』のは、設置場所の問題が生じるためである。

これらの、コンセプトを元に、いくつかのアイデアを出し検討した。例えば、油圧シリンダを使用し自由継ぎ手を介すことで試料に徐々に荷重をかける装置や電磁石を用い徐々に磁力を強めていき試料を

試料台に押し付ける装置などである。現実的には、油圧シリンダを用いると装置が大きくなってしまい、磁力を用いる場合、アルミや真鍮などの試料には適さないなどの問題が生じる。最終的には試料を下からおもりで引っ張り、押さえつける装置に決定し、設計を行った。

設計の際は、最初は手書きで概要を製図し、その後3DCADソフトのSolidWorksを用いた。図11に作成した3D図面を示す。テーブルの上面に試料ホルダを取り付け、アームにのせた負荷用のおもりをモータで移動させることで圧子を試料に押し付ける構造となっている。また、モータの振動を考慮し、モータ台と押付け部のベースを分けることにした。また、材質は安価で加工性の良い軟鋼を用いた。

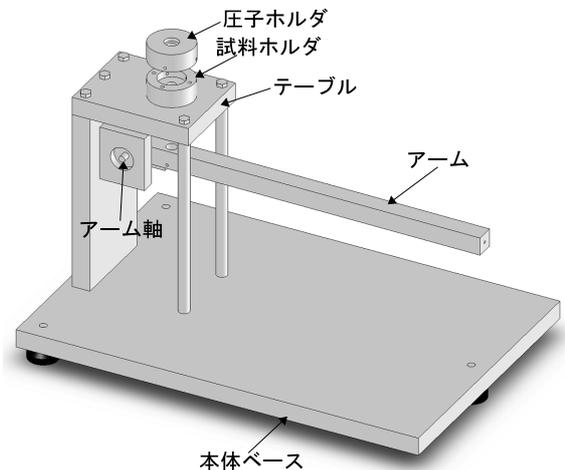


図11 実験機の3D図面

### 3. 2 試作機による予備実験結果の例

図12に試作機を用いて荷重30Nで押付けたときの実験結果を示す。同図 (a) は実験前の断面曲線であり、(b) は30Nで押付け後の圧痕部付近の断面曲線と圧痕部の近似曲線を重ねて示したものである。(c) は圧痕底部を平坦化処理した後の拡大図である。

図 (b) より、試作機を用いた実験では深さ10μm程度の圧痕が確認できる。また、圧痕中心付近の粗さは2.0μmRzであり、ブリネル硬さ試験機での実験よりも小さくなっている。これは、試料の初期粗さが小さめであったこともあるが、圧痕が小さいため近似曲線との誤差が少なく、さらに粗さ計自体のノイズも少なかったためと考えられる。

## 4. 結 言

粗い面に球を押し付けたときの粗さの変化を追うことを目的とし、ブリネル硬さ試験機で押付け実験

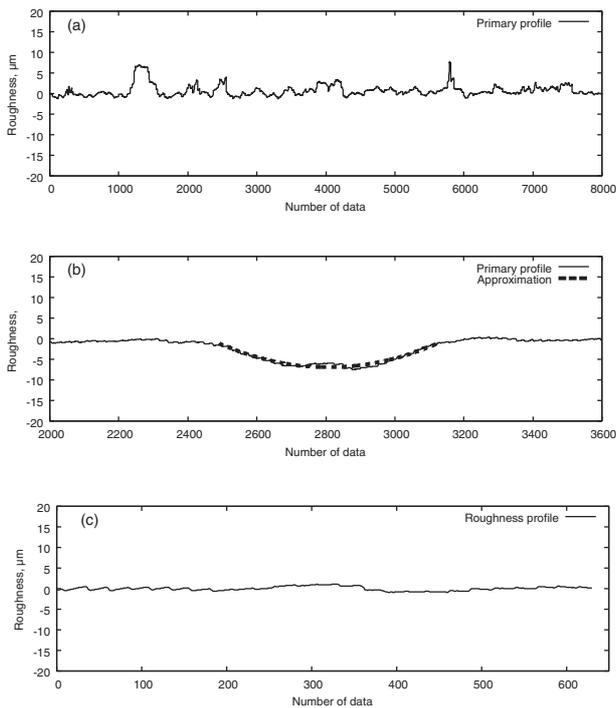


図12 試験機による実験結果

を行い、粗さ計で圧痕部の測定を行った。そして、断面曲線から圧痕部中心付近の粗さ曲線を切り出し平坦化するためのプログラムと、その粗さ曲線から負荷曲線を求めるプログラムを自作し、グラフソフトと比較することで正確性を確認した。

ブリネル硬さ試験機による実験データを処理し、各荷重における負荷曲線と最も高い突起頂点と最も低い谷の変化を調べた。ブリネル硬さ試験機では4.9kN以上の荷重では実験後の粗さの変化はほとんどなかった。

ブリネル硬さ試験機では軽荷重の押付け実験が困難であったため、押付け実験装置を試作した。装置の作成にあたっては、研究目的のみならず教育的な視点も鑑みて、コンセプトを立て、アイデアを出し、概要設計、詳細設計および部品の選定をし、材料を購入し加工・組立てを行った。試作機を使用し確認実験を行い、試作機の動作確認を行った。

以上により得られた結果を以下に示す。

1. 自作プログラムとグラフソフトによる圧痕部の近似結果を比較したとき、両者の誤差は0.2%程度であり、自作プログラムの正確性が確認できた。
2. 平坦化後の粗さ曲線から得られた負荷曲線から、4.9kNの荷重を加えると高い突起が少なくなり粗さが平坦化されていることがわかった。
3. 突起の平滑過程は、最初の押付けで急激に進み粗さが小さくなる。その後、荷重を増して

も粗さには大きな変化は見られず、母材の塑性変形のみが進んでいく。

4. 軽荷重での押付け実験装置を試作し、動作の確認をした。

今後、試験機を用い、軽荷重域で硬さの異なる試料の押付け実験を荷重を変えて行い、さらに、突起の振幅分布、突起頂点分布等を求めるプログラムを作成することで、粗さの変化を詳細に追えると期待できる。また、現在使用している粗さ計では、圧痕傾斜部の断面曲線が階段状になるため、圧痕中心部のみのデータしか使えない。これについては、今後の検討課題となっている。

実験装置の試作の際に、教育的な視点から、学生が従来までに学んでいた知識を活用して設計、加工・組立てを行うように意識した。今回、これによる効果をデータとしては採集していないが、学生にとっては、実際に自分たちで用いる装置の設計から組立てまでを一貫して行う経験は初めてであり、積極的な姿勢で取り組んでいた。このことから技術者教育としても、かなりの効果があると思われる。これについても、今後、さらに発展させていきたい。

## 参考文献

- 1) 岡本純三・中山景次・佐藤晶夫：トライボロジー入門，幸書房，(2009) 13-14.
- 2) 木村好次・岡部平八郎：トライボロジー概論，養賢堂，(2003) 196-197.
- 3) J.A.Greenwood and J.B.P. Williamson : Contact of nominally flat surfaces, Proc. R. Soc. London, **A295**, 1442 (1966) 300-319.
- 4) 藤本隆士・鏡重次郎・川口尊久・畑沢鉄三・吉岡直人：接線力による接触面間の微小変位特性－異方性粗さ面の場合－，トライボロジー会議予稿集(北九州) (1996) 262-264.
- 5) P.R.Nayak : Random Process Model of Rough Surfaces, J. Lubr. Tech., **93** (1971) 398-407.
- 6) 日本規格協会：JIS ハンドブック機械要素7, B0601 (2006) 184.
- 7) 同上, B0671-1 (2002) 277-280.
- 8) バウデン・テイバー・曾田範宗訳：固体の摩擦と潤滑，丸善株式会社，(2004) 17-18.