

PET 薄膜を用いた研削表面間の接触圧力分布測定*

新田 勇*¹, 如澤 健*²Measurements of Distributions of Contact Pressures
between Ground Surfaces using PET Films

Isami NITTA and Takeshi JOZAWA

A new method of measuring a distribution of contact pressures between ground surfaces using a thin PET film with 0.9 μm thickness has been developed. Punch specimens were made of carbon steel S 45 C and its ends were ground. The PET film was inserted between ground surfaces of the punch specimens and pressed at a given pressure for one minute. The PET film was indented by surface asperities on the ground surfaces at real contact points. Thus if the relationship between the areas of the indented parts and the applied pressures were known, the contact pressures could be determined by measuring the indented areas of the PET film. The indented areas of the PET films were proportional to the applied pressures in the range of 0 to 300 MPa. The indented areas were measured automatically with image processing through an optical microscope which was modified so that its stage was controlled by a microcomputer. The apparent contact area was divided into many portions with areas of about 0.017 mm^2 and the contact pressure was determined in each portion. The measured distributions of contact pressures for circular and square punches were compared with the calculated ones. They were in relatively good agreement with each other.

Key Words: Tribology, PET, Contact Pressure, Ground Surface, Asperity, Real Contact

1. 結 言

機械は種々の構成部品より組み立てられており、必然的に接触面を含んでいる。接触面の剛性は、表面あらし等の存在により構造材自体のそれより低下する。このことは、接触面の存在により機械全体の剛性が大きく影響を受けることを意味する。したがって、接触面がどのような接触圧力にさらされるかを知ることは設計上重要である。

最近では計算機が発達しており、市販の汎用解析プログラムを使用すれば比較的容易に接触圧力を計算することができる。しかし、それらの解析においては接触面は幾何学的に滑らかな面と仮定されている。実際の工学的表面はあらしやうねりおよび形状誤差が混在しており、これらを考慮して正確に接触圧力分布を求めるとは容易ではない。

一方で、接触圧力分布を求めることは、いわゆるトライボロジー的な問題を解決するための重要な解析因子となる。この場合は表面微小突起同士の接触により生ずる接触圧力分布を測定する必要があり、理想平面

同士が接触したときの接触圧力ではあまり意味をなさない。最近そのような面に対し接触圧力を解析することもようやく行われてきている¹⁾²⁾が、まだ改善すべき点もある。

加藤らは、接触前後のあらしの変化より接触圧力分布を求める方法を開発している³⁾。これは、真実接触部で表面微小突起が塑性変形を受けるということを利用しており、トライボロジー的な考え方に立脚した考え方である。しかし、その測定対象圧力が高く、表面微小突起の変形だけではなく母材表面が塑性変形を受けるような範囲に近いところでの圧力測定となっているようである。同じような考え方で、山口らは接触前後のサンドブラスト表面間の光の反射率を利用して接触圧力分布を測定する方法を開発している⁴⁾。しかしこの方法でも、接触圧力の分解能は約50MPa程度であるよ

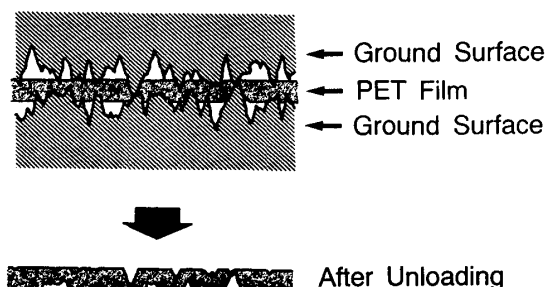


図1 PET薄膜を用いた接触圧力測定法の原理説明図

* 原稿受付 平成6年2月21日。

*¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。*² 学生員, 新潟大学大学院 [現: 東芝セラミックス(株)]。

うである。さらに、研削表面には直接適用できず腐食などの前処理を必要としている。

本研究を行うきっかけは、研削面同士の接触でも腐食などの前処理を行うことなく、真実接触部をたよりに接触圧力分布を測定できないかと考えたことである。そのようなことは超音波を用いる方法⁶⁾でも可能であるが、本研究で考案した方法は、それよりももっと狭い領域の測定が可能、すなわち空間分解能が高い測定法である。

その原理を図1に示す。2つの研削面に薄いPET薄膜を挟んで加圧する。研削面の真実接触部ではPET薄膜は塑性的に押し潰されるはずである。したがって、PET薄膜上の潰れた部分の面積を計測することにより接触圧力が測定できると考えられる。

考案した測定方法の妥当性を検討するために、本研究では厚さが約0.9 μm のPET薄膜を用いて研削面間の接触圧力分布を測定した。その結果、本測定法の基本的な特性を明らかにし、本測定法の妥当性が確認できたのでそのことについて報告する。

2. 実験

2.1 試験片 実験で用いたパンチ試験片材料は

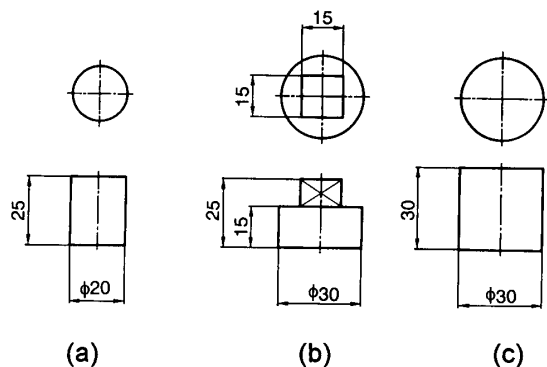


図2 パンチ試験片の形状と寸法

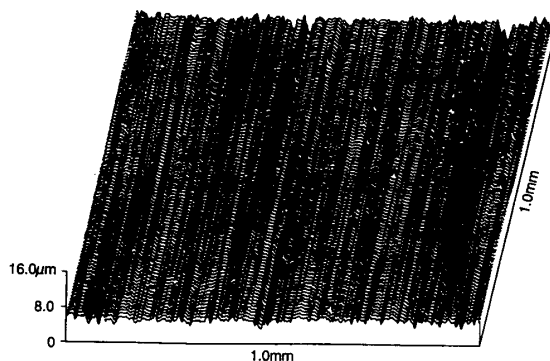


図3 研削表面の代表的な表面あらしの3次元表示

表1 パンチ試験片の表面あらしと硬さ

Surface Roughness(μm)				Hardness Hv(300g) (kg/mm^2)	Used Section
Rmax	Rz	Ra	Rrms		
2.6	1.5	0.29	0.38	235	3-1, 3-2 3-3 3-4, 3-5
2.7	1.7	0.35	0.44		
1.9	1.2	0.23	0.31		

S45Cである。図2にパンチ試験片の形状と寸法を示す。図2(a)は校正実験用で20個作製し、これを2個一組として用いた。後に述べる実験3-1から3-4ではこれらの試験片を用いた。図2(b),(c)が接触圧力分布測定用であり、これらは円形端面と矩形端面を接触させた。試験面はすべて研削仕上げである。

表1に試験片の表面あらしを示す。各実験において用いた試験片の表面あらしが異なっているが、これは使用した試験片の表面を研削しなおして再び使用しているためである。図3には代表的な表面あらしを3次元的に表示したものを示す。

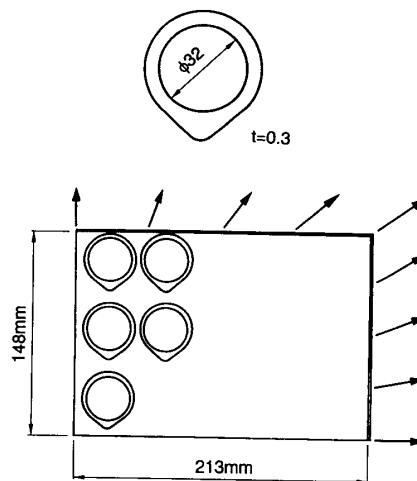


図4 PET薄膜の接着方法の説明図

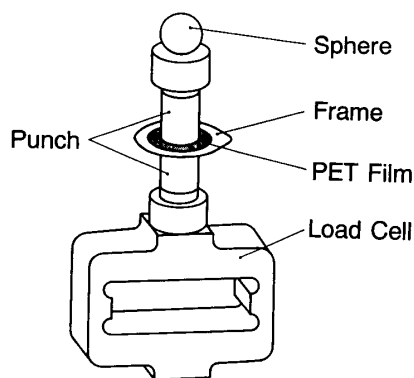


図5 加圧装置の概略図

使用したPET薄膜[東レ(株)製]の寸法は、厚さが約 $0.9\mu\text{m}$ で、縦横約 $296\text{mm}\times 213\text{mm}$ のものである。この薄膜を半分に切断した後、内径約 32mm で厚さが約 0.3mm の鋼製製の治具に貼り付けて取り扱いやすいようにした。その際図4に示すように縦横に約 0.5% の引張りずみを与えるように引き延ばし、接着の際にたるみやシワがつかないようにした。

2.2 実験方法 実験装置は油圧シリンダーからなる荷重装置と荷重検出用ロードセルからなっている。ロードセルの上に試験片をセットした様子を図5に示す。ここで示してあるパンチ試験片は校正実験用のものである。

まず、PET薄膜を接触面の間に挟んだ。この際PET薄膜は傷が付きやすいので、試験片でこすられることのないようにした。所定の荷重を加え、1分間保持した。その後PET薄膜を取り出して、光学顕微鏡で観察し、画像処理を行うことで表面微小突起により押し潰された部分すなわちくぼみ痕の分布と面積を求めた。

見かけの接触面積全域にわたってすきまなくPET薄膜を観察しなければならないので、パソコンにより顕微鏡ステージを3軸方向に制御できるように光学顕微鏡を改良した。図6に改良した光学顕微鏡を含む測定装置の概略を示す。画像取り込みには、分解能が縦横 512×512 画素で、256階調の画像取り込みボードを使用した。しかし、実際に測定に使用したのは図7に示すその中心部の 352×352 画素の部分である。この領域の寸法は約 $0.52\text{mm}\times 0.52\text{mm}$ であった。顕微鏡の対物レンズと撮影レンズの倍率はそれぞれ10倍と2.5倍である。顕微鏡の照明用電源は直流を用いて、時間による光のチラツキをなくした。それでも図7に示す視野内で中心部が明るく周辺部に行くにしたがってほんのわずかな暗くなる傾向があった。すなわち同心円上に明るさが変化した。それを補正する目的であらかじめガラス板を観

察し、1視野を図7に示すように縦横 16×16 に分割しそれぞれの部分で反射光の明るさの平均値を求め、その明暗データを基に明るさを補正する方法を採用した⁷⁾。

さらに個々のPET薄膜によって光の反射率がわずかに異なっていたので、測定前にPET薄膜上の見かけの接触面積以外の場所の16箇所(すなわち16視野)の明暗データを取得し、その平均の明るさが階調数で165になるように照明用の電圧を調整した。

くぼみ痕を計測するために、取り込んだ画像の2値化処理を行った。そのしきい値を決める基準としては、原画像で確認できたくぼみ痕が2値化後もほぼそのままの大きさを保つこととした。何回かの試行の結果、しきい値を120に決めた。

2値化処理前後の画像の例を図8に示す。2値化処理前の図8(a)で縦横に細長い黒い部分がくぼみ痕である。このようなくぼみ痕になったのは、上下試験片の研削方向が直交するようにセットしたためである。また、小さな丸い黒点はもともとPET薄膜に存在する微小なピットであり、本測定ではこれもくぼみ痕として測定されてしまっている。2値化処理後の画像で白い正方形の部分が 352×352 画素に対応する部分である。図より2値化処理することでくぼみ痕がほぼ検出されていることがわかる。

くぼみ痕の測定から接触圧力に変換するために、1視野を縦横 4×4 すなわち図7の太線で分割した。1つの分割部分の寸法は約 $0.13\text{mm}\times 0.13\text{mm}$ である。この範囲の画素中の何割がくぼみ痕であるかを測定し、校正実験より求めた同様の関係を基に接触圧力に換算した。したがって、本研究でいう接触圧力とはこの範囲の平均接触圧力のことである。図8(b)より、1分割部分には複数のくぼみ痕が存在することより、本分割が細かすぎることはないと考えられる。また、この1視野の分割範囲をもっと小さくして空間分解能を上げることも可能

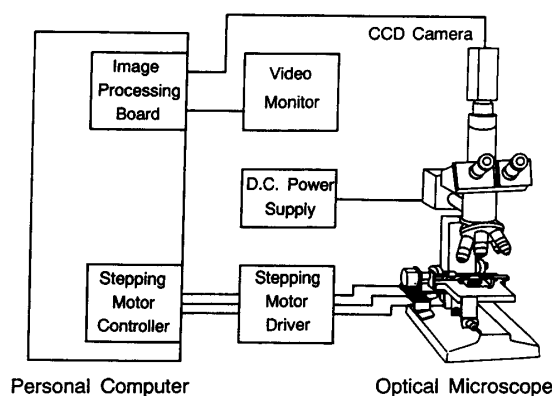


図6 くぼみ痕測定装置の概略図

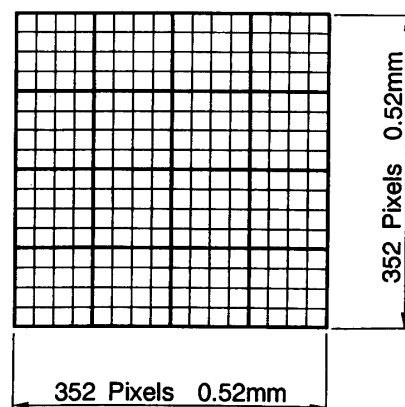


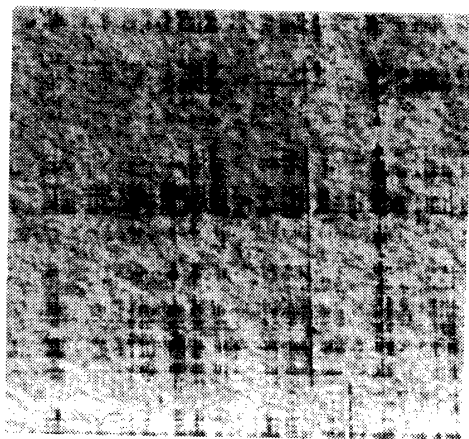
図7 1視野内の領域分割の説明図

と考えられるが、それについては検討が必要である。

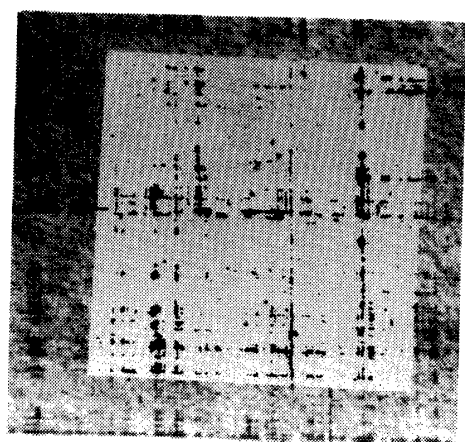
以上の測定はピント合わせも含めてすべて自動で行えるようにした。ちなみに前回の視野の計測を終えてからステージを移動し次の1視野の計測を終了するまでの時間は約2秒であった。

3. 実験結果

3-1 PET薄膜上のくぼみ痕の時間的变化 図9は、PET膜についたくぼみ痕が時間と共にどのように変化するか調べた結果である。縦軸は正規化されたくぼみ痕面積、すなわち校正用のパンチ試験片の見かけの接触面積に対する比である。見かけの接触圧力100MPaの場合は、500分まで時間とともにわずかにくぼみ痕面積が減少した。これは、PET薄膜の粘弾性的な回復によるものと考えられる。しかし、その後はくぼみ痕の減少はなく、2000分まで一定の値を保った。なお、図に



(a)2値化前の原画像



(b)2値化後の画像

図8 くぼみ痕の画像処理の例

表2 PET薄膜の両面のくぼみ痕面積の値と誤差率

Contact Pressure(MPa)	Normalized Indentation Area		Error(%)
	Obverse	Reverse	
20	0.03918	0.03300	±8.5
20	0.03308	0.03181	±1.9
20	0.02851	0.03003	±2.7
40	0.05874	0.05514	±3.2
40	0.05709	0.05247	±4.2
60	0.07613	0.07455	±1.1
60	0.08049	0.07338	±4.6

は示していないがこの後8000分経過しても一定の値であった。

見かけの接触圧力が60MPaや20MPaのときは、ほとんどくぼみ痕面積の低下は認められなかった。

以上の結果より本研究ではPET薄膜を加圧して取り出した後、1440分後すなわち一日経過した後で測定することにした。

3-2 PET薄膜の両面のくぼみ痕 PET薄膜の両面で機械的性質が異なっているとすれば、表面を測定するか裏面を測定するかによってくぼみ痕の測定値が影響を受けると考えられる。このことを確認するために、種々の見かけの接触圧力について加圧後のPET薄膜の両面のくぼみ痕を測定した。

表2はその結果をまとめたものである。各接触圧力に対して表面と裏面の正規化されたくぼみ痕面積が示してある。ここで、正規化されたくぼみ痕面積とは、1枚のPET薄膜に対して計測したくぼみ痕面積の総和を見かけの接触面積で割った値として定義する。表中の誤差率とは次式で定義したものである。

$$\text{Error} = 2(A_o - A_r) / (A_o + A_r) \quad (1)$$

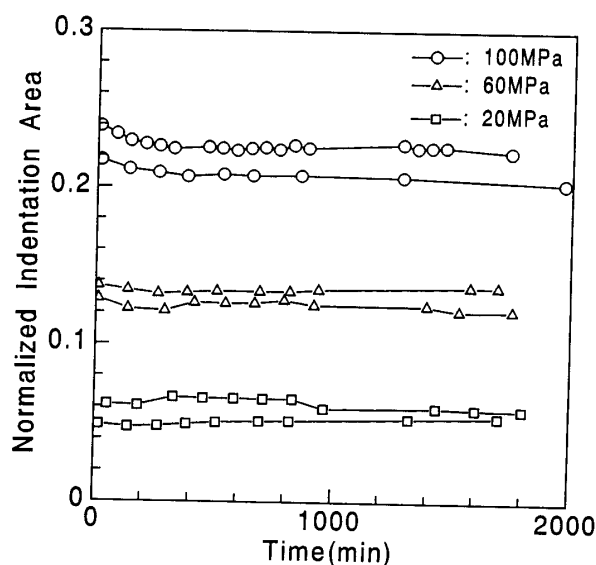


図9 加圧後の経過時間とくぼみ痕面積の関係

ここで、 A_o, A_r : 表面と裏面の正規化されたくぼみ痕面積

すなわち、表面と裏面のくぼみ痕の差をその平均値で割った値であり、平均値からの差として示している。見かけの接触圧力が20MPaの中に誤差率の大きいものもあったが、多くは±3%前後の値である。したがって、表面裏面のどちらを測定してもあまり問題はないものと考えられる。しかしながら本研究では、一応表面を測定するものとした。

3.3 研削方向の交差角の影響 図10は上下パンチ試験片の研削方向の交差角を変化させたときのくぼみ痕面積を示したものである。接触圧力80MPaでば

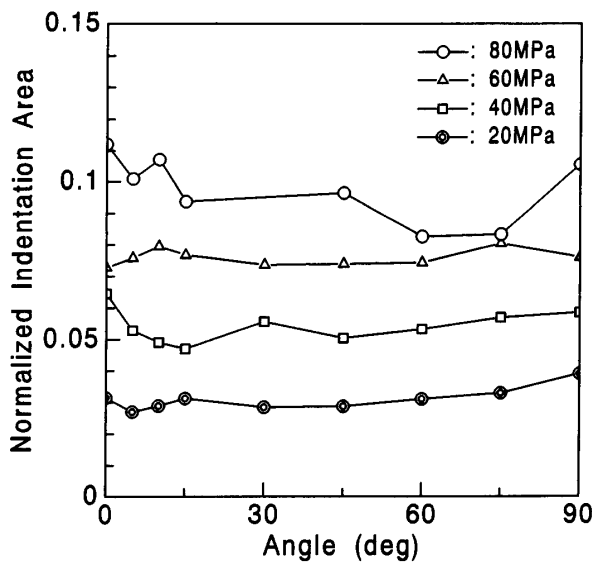


図10 研削方向の交差角とくぼみ痕面積の関係

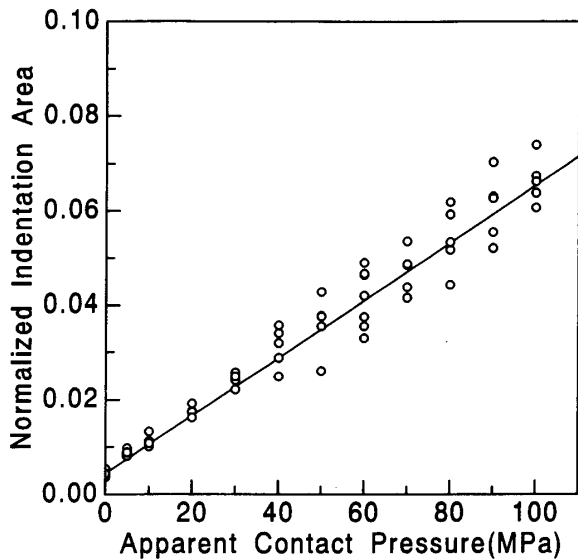
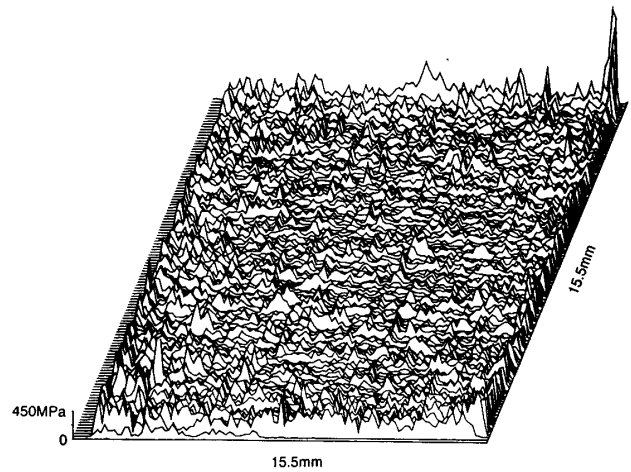


図11 くぼみ痕面積と接触圧力の校正

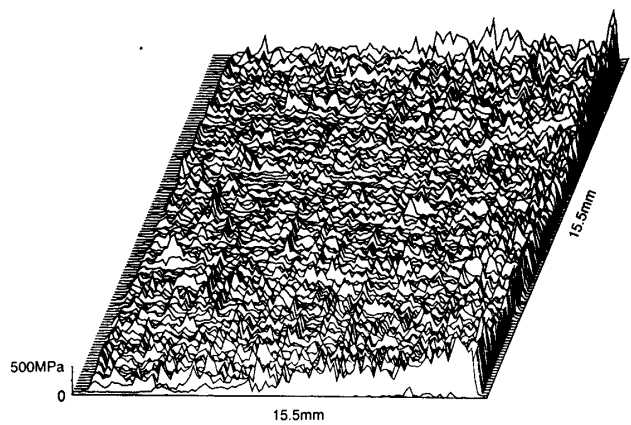
つきが大きい、ほかの接触圧力では交差角によらずほぼ一定の値を取っている。交差角が0になると、すなわち上下試験片の研削方向が一致すると、PET薄膜にはくぼみ痕以外のシワがつくようになった。このことが図に明瞭に現われない理由としては、目標の交差角のセットを目視と手動により行ったために、図の交差角0のところでも実際は1°から2°のずれがあったことが挙げられる。治具等を使用するなりして、交差角を正確に0にすれば測定されるくぼみ痕面積はもっと大きくなると考えられる。

交差角の影響があまりないことがわかったので、以降の実験では交差角は90°となるようにセットして実験を行った。

3.4 校正実験 これまでの実験により実験条件が決まったので、校正実験を行った。その結果を図11



(a) 比較的均一な接触



(b) 片当りのみられる接触

図12 接触圧力分布の3次元表示

に示す。縦軸は正規化されたくぼみ痕の測定面積を表し、横軸は試験片にかけた見かけの接触圧力を表す。これらの実験値は直径20mmのくぼみ痕のある範囲内で重ならないように取り込んだ1100視野の平均値である。ここで、1視野の実寸法は $0.52 \times 0.52 \text{ mm}^2$ である。この平均値が図の白丸1個に対応する。接触圧力範囲は5MPaから100MPaまでである。圧力が高くなるにつれて測定値のばらつきも大きくなるものの、ほぼ直線で近似できることがわかる。最小二乗法を適用して求めた直線が図の実線である。ここで用いたのは別の試験片により300MPaの範囲までの関係を求めたところ、やはり直線の関係は保たれていた。

この結果より、加藤⁹⁾らや山口⁹⁾らの実験と比べて接触圧力の測定精度が上がっていることが確認できる。

圧力0MPaのところにくぼみ痕測定値が0となっていないが、これはPET薄膜に最初から存在する微小なピットが測定されるためである。

3.5 接触圧力分布測定 図12は、図2(b),(c)の試験片を用いて実験を行ったときの接触圧力分布の測定結果を3次元的に表したものである。見かけの接触圧力は90MPaと100MPaである。接触面を均一に接触させることは極めて難しいことであり、同じように接触させているつもりでも、片当りが強かったり均一に接触したりした。

図12(a)は比較的片当りが少ない、実験結果であり、図12(b)は強く片当りをしている結果である。ここで、

接触圧力の換算の仕方は、図11の校正曲線を基にしているが、100MPaを越える範囲については、校正曲線を直線で外挿した。

この図では少しわかりにくいのが、見かけの接触面積の周辺部で接触圧力が高くなっているのが認められる。

超音波を使用する方法の測定結果等に比べて、接触圧力の変化が激しいことがわかるが、これは接触圧力測定の間分解能が超音波法より優れているためである。実際には真実接触部では金属の塑性流動圧力にほぼ等しくそれ以外のところでは接触圧力は0であり、実際の接触面上の接触圧力は本測定結果よりも激しく変化しているものと考えられる。

3.6 正規化されたくぼみ痕面積と見かけの接触圧力の関係 図13は、見かけの接触圧力範囲が5MPaから100MPaの範囲で19回の実験結果を示した図である。図中の破線は、校正曲線である。この校正曲線と実験値が一致すれば本測定法により接触圧力の積分値すなわち接触力を精度よく測定していることになる。言い換えれば、 $0.13 \times 0.13 \text{ mm}^2$ の微小面積について求めた接触圧力の値が妥当なものであることを示す。

見かけの接触圧力が50MPa以内であれば、実験値は校正曲線とよく一致することがわかる。しかし、それ以上の圧力のところでは実験値のばらつきが目につくようになり、破線と一致する実験値もあるが破線より下側に位置する実験値も存在するようになった。

実験値が破線の下側にくるような傾向はこのほかの

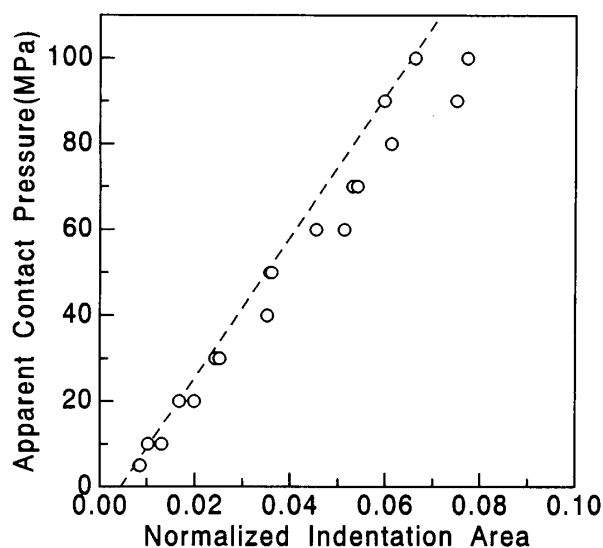


図13 見かけの接触圧力と正規化されたくぼみ痕面積の関係

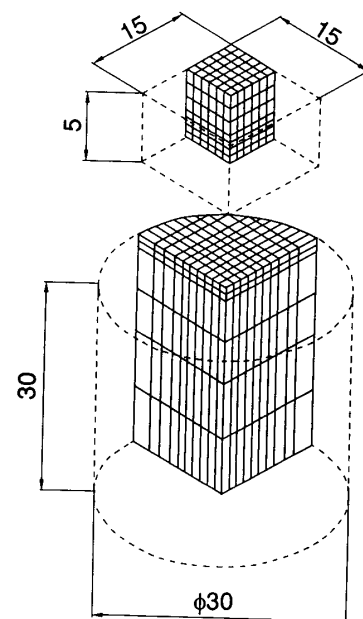


図14 解析における要素分割の説明図

実験にも見られたが、上にくるものはほとんどなかった。これは、同じ接触圧力のときには校正実験よりも本実験の方がくぼみ痕面積が大きいということである。この原因については、不明であるが本実験では上下試験片の形状が異なっているため見かけの接触面積周辺部で微視的相対すべりが生じ、そのためにPET薄膜によぶんな圧痕がついたためと推測している。

4. 考 察

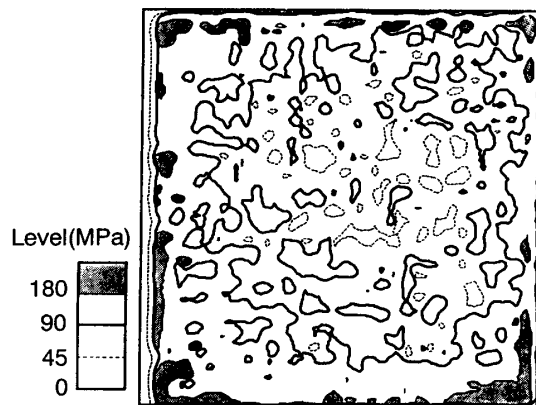
実験により、本測定法で研削面に作用する力の大きさ、すなわち接触力が測定できることがわかった。したがって、測定した接触圧力分布は単に定性的なものではなく、定量的な測定値であったことがわかる。

このことをさらに検討するために、本実験の接触状況を数値計算により解析し、接触圧力分布の解析値と実験値と比較した。計算にはポイントマッチング法を用いた⁹⁾。影響係数は3次元有限要素解析により求めた。

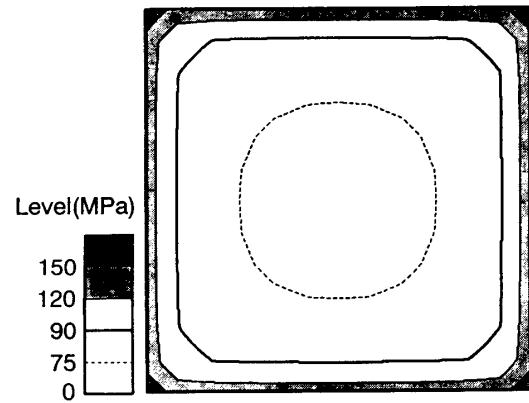
図14は、計算に用いた試験片モデルの形状と寸法を示したものである。上下試験片とも簡単のため全体の1/4だけを示している。計算においては摩擦は考慮せず、表面には微小突起が存在せず幾何学的に滑らかであると仮定した。このような仮定は、実際の工学表面には適用できるものではないが、接触圧力分布の傾向を調べることができると思う。

実験値は、そのまま等高線表示するとかえってわかりにくくなるので、移動平均によりある程度スムージング処理を施した後に、等高線を描いた。図15(a)は比較的均一に接触している実験例である。まだ、表面微小突起の影響を強くうけて接触圧力が強い部分が散在しているが、おおまかな傾向としては見かけの接触面積周辺部で圧力が高く中央部へ向かうに従い接触圧力が低くなっているようすがわかる。また、わずかなが

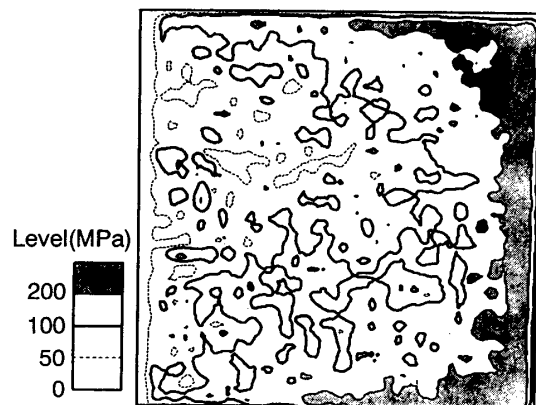
りになるので、移動平均によりある程度スムージング処理を施した後に、等高線を描いた。図15(a)は比較的均一に接触している実験例である。まだ、表面微小突起の影響を強くうけて接触圧力が強い部分が散在しているが、おおまかな傾向としては見かけの接触面積周辺部で圧力が高く中央部へ向かうに従い接触圧力が低くなっているようすがわかる。また、わずかなが



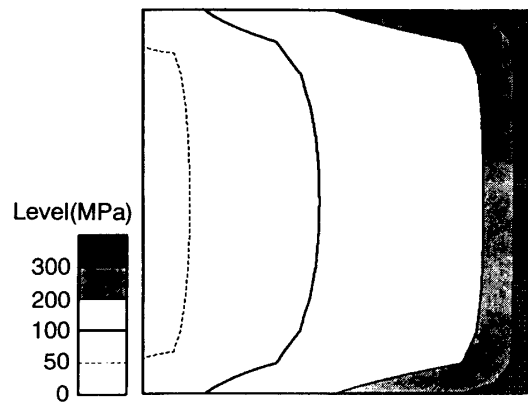
(a) 比較的均一な接触



(a) 比較的均一な接触



(b) 片当りのみられる接触



(b) 片当りのみられる接触

図15 PET薄膜で測定した接触圧力分布の等高線表示

図16 計算により求めた接触圧力分布の等高線表示

ら片当りしていたこともわかる。図15(b)は、片当りをおこしている例である。片当りがある場合は、コの字型に接触圧力が変化していることがわかる。

図16(a),(b)は図15(a),(b)に対応する計算結果の等高線表示である。図16(a)の計算においては、接触力が実験値と等しくなるように上下パンチ試験片のオーバーラップ量を決めた。この場合オーバーラップ量は場所によらず一定である。また、図16(b)の計算においては、接触力と接触圧力分布が実験値に近くなるように、上下パンチ試験片のオーバーラップ量を直線的に変化させた。したがって、この場合は場所によりオーバーラップ量が異なることになる。

これら、実験値と計算値の接触圧力分布は比較的よく一致しており、本測定法が接触圧力分布を測定していたことがわかる。

計算値と実験値の圧力分布が完全に一致しないのは、表面微小突起が存在することが原因^{9)~11)}であることはもちろんであるが、それに加えてうねりの存在のため試験片端面が幾何学的平面ではないことによると考えられる。

次に、空間分解能について考えてみる。本論文では $0.13 \times 0.13 \text{ mm}^2$ の微小面積の平均値として接触圧力を求めた。空間分解能を高めるためには、視野の分割を細かくするか、顕微鏡の倍率を上げればよい。しかし、際限なく空間分解能を高めることができるわけではなく、おのずと限界がある。試験片のピッカース硬さは約 235 kg/mm^2 であり、この値は表面微小突起の塑性流動圧力の近似値として用いられる。通常、接触圧力は真実接触点で塑性流動圧力に等しくそれ以外の点では0であると考えられている。一方で、PET薄膜についたくぼみ痕を真実接触面積と見なして、それより表面微小突起の塑性流動圧力を計算することができる。図11より、その値は約 170 kg/mm^2 と算出できる。これは、くぼみ痕面積の方が実際の真実接触面積よりも約40%程度多いということも意味する。そこで、1分割領域すべてがくぼみ痕または1分割領域にはくぼみ痕が全く存在しない程度までに視野を細かく分割する場合を考える。この場合は、接触圧力はすべて 170 kg/mm^2 となり、これ以上高い接触圧力は存在しえない。しかし、現実には真実接触点の接触圧力はピッカース硬さ値にほぼ等しいはずであり、 170 kg/mm^2 よりも高い接触圧力は存在しうる。このような結果になったのは視野を細かくし過ぎたためである。ここまで空間分解能を上げることはできないということである。

したがって、本測定法がどの程度の空間分解能があるかは、表面あらさなどの他の要因も含めてさらに検討しなければならない問題である。

5. 結 言

本研究では、高分子薄膜を用いて研削面間の接触圧力分布を測定する方法を考案した。本測定法の基礎的な特性と妥当性を確認する目的で $0.9 \mu\text{m}$ 厚さのPET薄膜を用いてS45Cの研削面間の接触圧力分布を測定した。

その結果以下の結論が得られた。

- (1)本測定法で接触圧力分布が測定できる。
- (2)従来のあらさ変化を利用する方法や反射率を利用する方法に比べて接触圧力の測定分解能が高い。
- (3)くぼみ痕面積は見かけの接触圧力に比例して増加した。
- (4)くぼみ痕面積は加圧後の経過時間に無関係に一定であった。ただし、見かけの接触圧力が高い場合はある時間までくぼみ痕面積がわずかに減少した。
- (5)くぼみ痕面積に及ぼす研削方向の交差角の影響は 0° を除いて特に認められなかった。
- (6)PET薄膜の表面と裏面ではくぼみ痕面積の大きさの相違は特に認められなかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたりPET薄膜をご提供いただきました東レ株式会社に対しまして厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1)D.M.Bailey and R.S.Sayles, ASME J. of Tribology, Vol.113,(1991),729.
- (2)K. Komvopoulos and D.H.Choi, ASME J. of Tribology, Vol.114,(1992),823.
- (3)J.Yongqing and Z.Linqing, Wear, Vol.157, (1992),151.
- (4)加藤・加藤・山口,機論,48-433,C(1982),1482.
- (5)K.Yamaguchi, M.Uchida and P.Abraha, Proc. of the Japan International Tribology Conference, Nagoya, (1990),1271.
- (6)伊藤・廬・伊東,機論,48-425,C(1982),70.
- (7)三井・大熊・野村・新井・長谷川,機論,58-546,C(1992),626.
- (8)新田・原,機論,55-520,C(1989),3062.
- (9)新田・加藤,トライボロジー会議予稿集(東京),(1991),469.
- (10)草間・新田・原,機講論,900-59,E(1990),317.
- (11)K.Kato,T.Kayaba,I.Nitta and S.Shimoda, ASME J. Vib. Acous. Stress Reliab. Des., Vol.111, (1989),318.