

PET 薄膜を用いた真実接触面積の分布の測定

原稿受付 1997年12月24日
 “トライボロジスト” 第44巻 第2号 (1999) 128~134

新田 勇
 新潟大学 大学院自然科学研究科
 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050)
 諸橋 明
 国際電気(株)
 (〒164-8511 東京都中野区東中野3丁目14-20 東中野ビル)
 大谷 親
 千葉工業大学
 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2丁目17-1)

概要 固体表面間の真実接触面積の分布を薄いPET(Polyethyleneterephthalate)膜を使って測定した。本測定法の概略は次のようである。0.9 μm 厚さのPET薄膜を固体接触面に挿入して、加圧する。真実接触点では挿入されたPET薄膜が塑性的に押し潰される。除荷後に、PET薄膜を取り出し金属顕微鏡で観察すると、押し潰された部分は黒く観察されるので、真実接触面積が間接的に測定できる。本実験では、旋削されたアルミ合金(A2017)と光学プリズムとの間の真実接触面積を測定した。光学プリズムを用いたのは、接触面顕微鏡にてPET薄膜法で測定した真実接触面積の分布を検証するためである。接触面顕微鏡には、楕円偏光を用いて測定精度を高めた。二つの測定方法で得られた真実接触面積を比較した結果、PET薄膜法により真実接触面積が測定できる可能性のあることが分かった。今回用いた実験条件の下ではアルミ表面の最大高さあさが5 μm より小さくなると、PET薄膜法では真実接触面積を測定できなかった。

1. 緒言

真実接触面積を測定する方法としては、接触電気抵抗や熱抵抗および超音波¹⁾²⁾を用いた方法、接触面に着色液を流し込む方法³⁾、接触面に煤を被覆する方法⁴⁾、接触面顕微鏡^{5)~7)}による方法等がある。しかし、種々の材料において表面に特殊な処理を施すことなく、簡便に真実接触面積とその分布を測定し得る方法はこれまでなかった。

真実接触面積はトライボロジー理論の基礎をなす重要な概念であるにもかかわらず、積極的に利用されているとは言いがたい。例えば、摩耗過程中的真実接触面積の分布を測定し、それらの知識を基に摩耗量を予測するということはあまり行われていない。この理由としては、摩耗が多くの影響因子によるものであり、しかも個々の影響因子が摩耗に与える影響も複雑であるためと考えられる。一方で、簡便な真実接触面積の測定法がないことも理由の一部になっている。すなわち、真実接触面積の分布に関する豊富な測定データがないために、トライボロジー現象との関連性が考察できないのである。したがって、真実接触面積の分布を使った理論構築が困難になる。

著者らは簡便な真実接触面積の測定法として、PET薄膜を用いる測定法を提案して実験的に研究

してきた⁸⁾⁹⁾。本測定法の原理をFig.1に簡単に示す。固体表面間の真実接触部では挿入されたPET薄膜が塑性的に押し潰されるので、除荷後にPET薄膜上の押し潰された部分を測定することで真実接触面積を求めることができる。この測定原理によれば、PET薄膜の膜厚を一定とすれば被測定固体の表面あさが小さくなると測定が不可能になることが予測できる¹⁰⁾。本測定法を適用する上ではこの限界表面あさを調べる必要がある。

そこで、本論文では試験片の表面あさを変化させ、0.9 μm 厚のPET薄膜に対して測定可能な限界表面あさを実験的に求めた。

2. 楕円偏光を用いた接触面顕微鏡

PET薄膜を用いて測定した真実接触面積の分布が正しいかどうかを判定するために、接触面顕微鏡を使用した。接触面顕微鏡は接触の相手面が透明なプリズムに限定されるという制約があるが、真実接触部の分布が測定できる一方法である。

光学プリズムと固体の接触では、真実接触部は暗く他の全反射部は明るく観察される。ところが、全反射の際入射光は反射面の外側にまで入り込んで反射するため、およそ200nm程度の隙間が存在する場合でも接触している様に観察される⁵⁾⁶⁾。

Measurements of Distributions of Real Contact Areas Using Thin PET Films

By Isami NITTA, Graduate School, Science and Technology, Niigata University (Ikarashi 2-nochō 8050, Niigata-shi, Niigata 950-2181), Akira MOROHASHI, Kokusai Electric, Co. Ltd., (14-20, Higashinakano 3-chōme, Nakano-ku, Tokyo 164-8511) and Chikashi OTANI, Chiba Institute of Technology (17-1, Tsudanuma 2-chōme, Narashino-shi, Chiba 275-0016)

Key Words: tribology, surface roughness, PET film, real contact area, image processing

Table 1 Mechanical properties and refractive index of the specimens

Materials	Young's modulus	Poisson's ratio	Refractive index
steel ball($\phi 5$)	206Gpa	0.29	---
Prism(BK7)	81.0GPa	0.22	1.52

この点を改善するために楕円偏光を用い、プリズムの接触部以外での反射と接触部での反射の光の位相が不連続に変化することを利用して測定精度の向上を図った研究⁶⁾⁷⁾がある。本研究では、市販の金属顕微鏡(オリンパス, BHM-312KB)を改良して楕円偏光が利用できるようにした。

この顕微鏡の構成と光路の概略をFig.2に示す。Fig.2(a),2(b)は楕円偏光を用いた接触面顕微鏡の概略であり、それぞれ接触点および接触点以外で楕円偏光が反射する様子を示した。

Fig.2(a)のハロゲンランプより出た光は偏光板(ポラライザ)を通過して直線偏光となり、さらに1/4波長板を通過して楕円偏光となる。真実接触部で反射する際に光の位相が不連続となる。この現象を利用すると、ポラライザと1/4波長板の回転角度を調整することにより、接触部で反射した楕円偏光を直線偏光にすることができる。さらに、その直線偏光を遮断するようにアナライザの回転角度を調整する。この結果、接触部からの反射光は遮断されることになる。

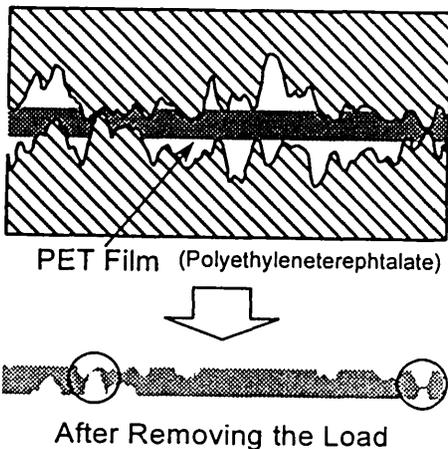
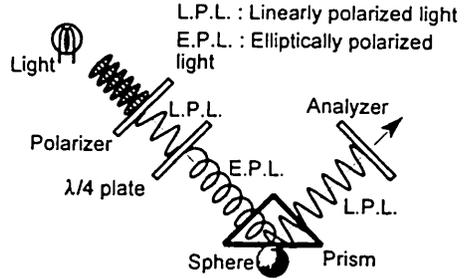
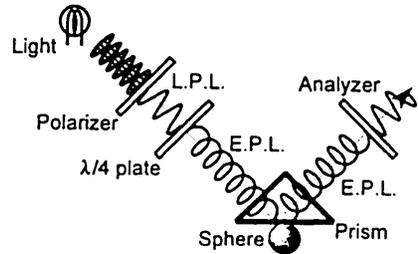


Fig.1 Principles of PET film method of measuring real contact area

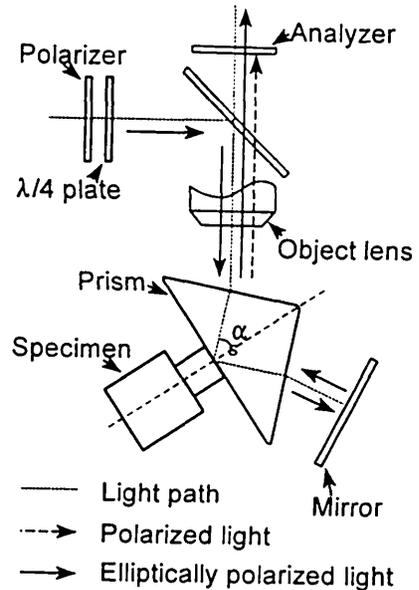
Fig.2(b)に示すように接触部以外の反射光も、反射の際に位相が不連続に変化し反射前の楕円偏光とは位相を異にする。しかし、位相の変化量は接触部でのそれとは異なるため、反射後も楕円偏



(a) Reflection at the real contact point



(b) Reflection except at the real contact point



(c) Layout of the contact microscope

Fig.2 Schematic diagram of a contact microscope with an elliptically polarized light

光のままなのでアナライザを透過する。これにより、接触部の像がより鮮明に見えるようになる。

Fig.2(c)に、今説明した楕円偏光を用いた測定を金属顕微鏡で実現するための構成を示した。

プリズムとアルミ試験片を含む負荷装置部分をFig.3に示す。ネジを回すことによりアルミ試験片をプリズムに押し付ける構造になっている。荷重の大きさはダイヤフラムに接着した歪ゲージにより測定した。ネジ部とアルミ試験片の間にはスラストベアリングを配置し、負荷途中のアルミ試験片の回転を防いだ。この負荷装置全体を金属顕微鏡のステージに載せた。

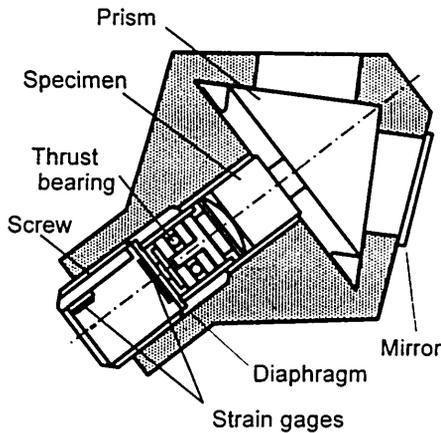


Fig.3 Details of the loading unit

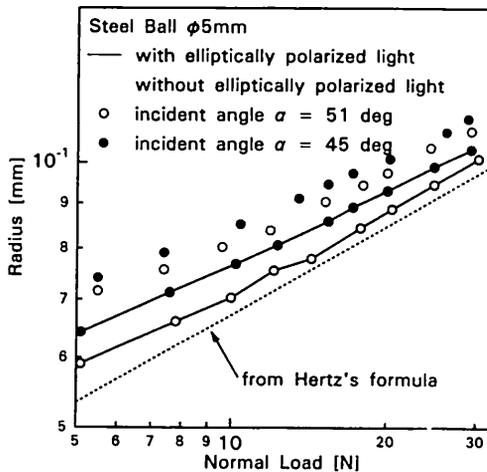


Fig.4 Hertzian contact radii measured by the contact microscope

全反射の際に、光がまったくプリズム(第1媒質)から空气中(第2媒質)にはみ出さないわけではない。第2媒質中には境界面に沿って進み、かつその振幅が境界面からの距離に比例して指数関数的に急激に減少するエバネッセント波と呼ばれる光波が存在する。光が第2媒質中にごくわずかり込むので、反射波は入射点から進行方向にわずかにずれた点から反射することになる(Goos-Hänchen effect)⁽¹¹⁾。Fig.2(c)に示す反射面への入射角 α を大きくすると、全反射の際に光がプリズムの外側(空气中)に入り込む深さが浅くなる⁽⁶⁾。入射角 α を変えることで、どの程度測定精度が向上するかを確認するため、鋼球($\phi 5$)とプリズムの弾性接触時の接触円半径を測定した。その結果をFig.4に示す。入射角 α を 45° から 51° にすることによって測定値はHertz理論計算値に接近し、かなりの測定精度の向上が認められた。しかし、入射角を 60° にした場合、接触部の像の焦点が合わず観察することが不可能であった。したがって、以下の測定では入射角を 51° にした。

楕円偏光を用いないときは隙間が 200nm 程度でも接触と判定されていたが⁽⁵⁾、楕円偏光を用いることでその隙間は 20nm 程度に改善された。

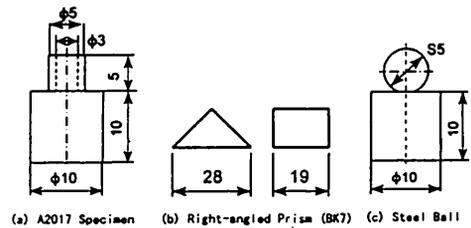


Fig.5 Shapes and sizes of the specimens

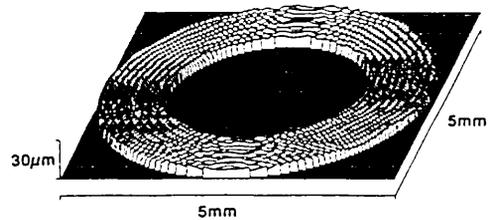
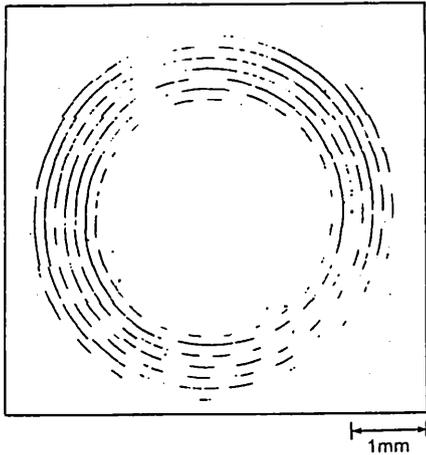


Fig.6 3-dimensional surface profile of A2017 specimen ($R_y=4.8\mu\text{m}$)

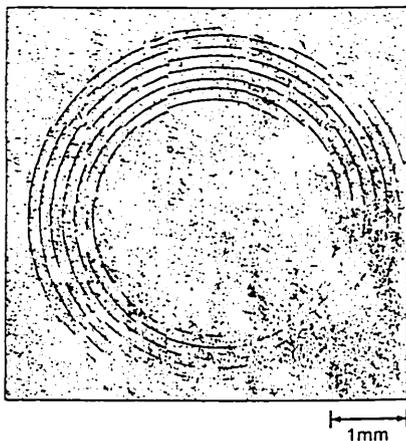
顕微鏡のステージは、x軸、y軸、z軸それぞれに独立にパソコン制御のもとで移動させることができる⁹⁾。このようにすることで、従来の接触面顕微鏡では困難であった、プリズム斜面の広範囲な部分を簡単に観察することが可能となった。

3. 実験方法

3. 1 試験片



(a) measured by the contact microscope



(b) measured by the PET film method

Fig.7 Distributions of real contact area measured by two different methods

試験片材料はアルミ合金A2017を用いた。その硬さはHV0.94GPa(2.94N)であった。接触面としては、外径5mm、内径3mmの円筒端面を用いた[Fig.5(a)]。相手材は、クラウンガラス(BK7)製の直角プリズムである。寸法をFig.5(b)に示す。Fig.5(c)は、Fig.4の実験で用いた鋼球試験片の形状である。Table 1に、試験片の機械的性質とプリズムの屈折率を示す。

広範囲な表面あらしを付与するために、アルミ円筒端面は旋盤により仕上げた。超硬工具研削盤により一定形状(前切刃角5°、切込み角5°、すくい角14°)に仕上げたバイトを用い、旋盤の送り速度のみを変更することで種々の表面あらしを与えた。Fig.6に一例として最大高さ $R_y=4.8\mu\text{m}$ の表面の3次元あらし測定結果を示す。

PET薄膜の膜厚は約 $0.9\mu\text{m}$ である。PET薄膜のしわやたるみを防ぐために、0.5%の予歪みを与えた状態で塩化ビニル製の円環に接着した⁹⁾。

3. 2 測定方法

真実接触面を2つの異なる方法で測定した。まず、接触面顕微鏡を用いて所定の荷重における真実接触面積を測定した。除荷後に試験片とプリズムの間にPET薄膜を挿入し、同じ荷重を1分間加えた。その後PET薄膜を取り出し接触痕を金属顕微鏡により観察した。観察画像はCCDカメラ、縦横共512画素で256階調の画像処理ボードを介し

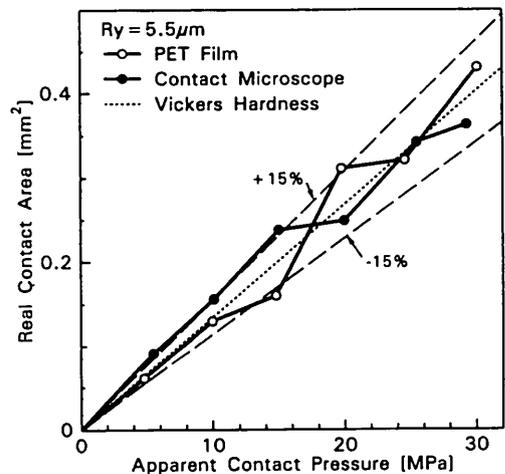


Fig.8 Real contact area, measured by two different methods, as a function of the contact pressure

てパソコンのメモリに取り込んだ。両測定法ともに真実接触部は暗く観察されるので、2値化処理を行って真実接触面積を求めた。具体的な測定方法は既報に記述した通りである⁹⁾。

2値化処理の際には、しきい値が重要となる。両測定法ともに予備的な実験を行い、しきい値を決めた。すなわち、測定した真実接触面積がビッカース硬さより求めたものと等しくなるようにそれぞれのしきい値を決定した。決定したしきい値

は、実験を通して変えることなく用いた。

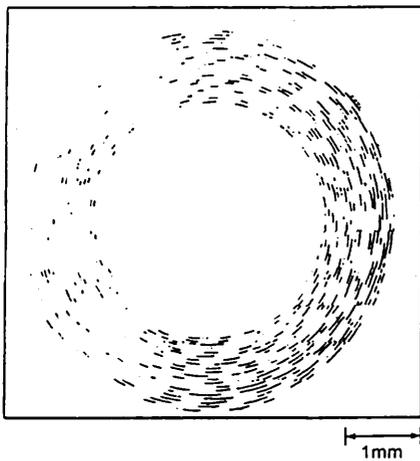
4. 実験結果および考察

PET薄膜法で真実接触面積が測定可能な場合と測定不可能な場合に分けて実験結果を示す。次いで、0.9 μm のPET薄膜で測定可能な限界表面あらさを示す。

4.1 測定可能な場合

アルミ円筒端面の最大高さ $R_y=5.5\mu\text{m}$ の試験片の真実接触面積を測定した。それぞれの測定法による測定結果をFigs.7(a),7(b)に示す。接触圧力はどちらも25MPaである。らせん状に見える黒い線が真実接触面積である。両者はよく一致することが分かる。ここで、PET薄膜による測定結果には小さな黒い点が多数散在するが、これは薄膜に最初から存在する微小ピットである。

測定の手順は先に説明した通り、最初に接触面顕微鏡で次にPET薄膜法である。同じ試験片を用い同じ荷重をかけてはいるが、一旦アルミ試験片とプリズムを分離しPET薄膜を挿入した後再負荷を行っているために、両測定法で試験片の当たり方が微妙に異なる。たとえば、Fig.7(b)では左上の部分が強く当たっており右下が弱い当たりになっている。このような、片当たりは大なり小なりほとんどの実験で見られた。



(a) measured by the contact microscope



(b) measured by the PET film method

Fig.9 Distributions of real contact area measured by two different methods

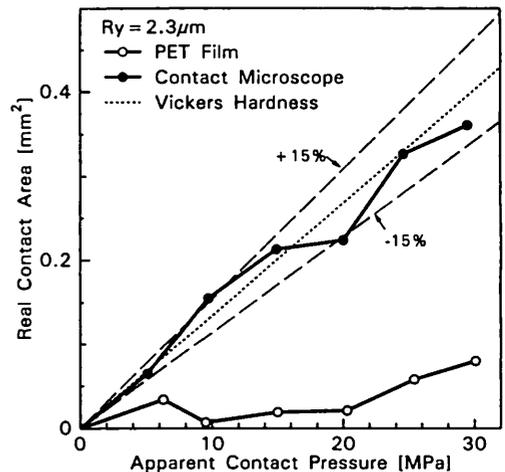


Fig.10 Real contact areas, measured by two different methods, as a function of the contact pressure

この試験片について測定した真実接触面積の合計と見かけの接触圧力の関係をFig.8に示す。両測定結果共に真実接触面積の測定値は接触圧力と比例関係にあることが分かる。図中の破線はアルミ合金のビッカース硬さより計算した真実接触面積と接触圧力の関係を示している。また、ビッカース硬を基にした計算値の±15%の値を一点鎖線で示した。これより、両測定法で測定した値はどちらもほぼ±15%の領域内にあることが分かる。

なお、PET薄膜による測定では0MPa時のピット面積を各接触圧力の測定値から減算している。

4.2 測定不可能な場合

$R_y=2.3\mu\text{m}$ の試験片の両測定法の測定結果をFig.9に示す。接触圧力はどちらも25MPaである。Fig.9(a)の接触面顕微鏡では真実接触面積が測定できた。しかし、PET薄膜法ではFig.9(b)の右上にかすかに接触痕が見られるものの、真実接触面積の測定は不可能であった。

Fig.10は、真実接触面積と接触圧力の関係である。接触面顕微鏡による測定値は、ビッカース硬さの計算の±15%の領域内にほぼおさまっていることが分かる。これに反して、PET薄膜による測定では接触圧力が大きくなっても、測定される真実接触面積はほとんど増加していない。Fig.1の測定原理に示したように、PET薄膜による測定で

は固体の表面あらかさが小さくなった場合、アルミ合金表面とプリズムの真実接触部以外のPET薄膜も接触荷重を分担するようになるので、真実接触面積の測定値は小さくなるものと考えられる。

4.3 表面あらかさの影響

このような測定を、見かけの接触圧力25MPaのもとで、表面あらかさの異なる試験片を用いて複数回行った。PET薄膜により測定された真実接触面積と最大高さの関係をFig.11に示す。図中の破線はビッカース硬さよりの計算値を示す。表面あらかさが小さくなると、接触圧力は一定であるにも拘わらず測定される真実接触面積が小さくなるのが分かる。ビッカース硬さからの計算値の±15%の領域にあれば真実接触面積が測定可能とみなすと、 $R_y=5.0\mu\text{m}$ よりあらかさが小さくなってくると±15%の領域を外れる測定値が出てくる割合が多くなった。

したがって、このような条件のもとでは、PET薄膜法は最大高さ R_y が $5\mu\text{m}$ 程度以上ならほぼ確実に測定可能であるといえる。

プリズム面もあらい場合、すなわち両接触面ともにあらかさを有する場合は、 $R_y=5\mu\text{m}$ より小さいあらかさでも測定可能であると考えられる。この場合は、PET薄膜で接触圧力を測定した過去の経験⁹⁾より $R_y=2.5\mu\text{m}$ 程度まで測定できるのではないかと推察している。また、より薄い膜あるいは強度の弱い膜を用いれば、さらに小さいあらかさでも測定可能となるものと考えている。

4.4 PET薄膜法(高分子薄膜法)に及ぼす影響因子について

高分子薄膜を用いて真実接触面積を測定する方法は、間接測定法である。高分子薄膜上の真実接触点のみに痕をつけられるかどうか、測定精度を左右する。

本測定法に及ぼす影響因子としては、固体表面のあらかさの大きさのほかに、微小突起先端の形状もある⁹⁾。表面あらかさが大きくても表面微小突起の先端の曲率半径が大きいと、高分子薄膜は弾性的に押し潰されることになり、除荷後に高分子薄膜に圧痕はつかないことになる。

高分子薄膜の変形特性も影響因子である。したがって、環境温度や高分子薄膜の材料を変えて実

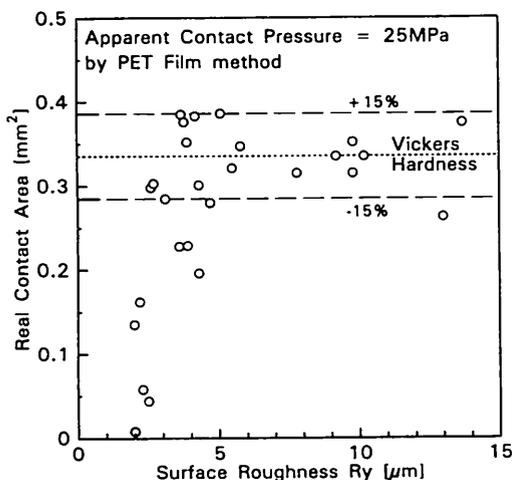


Fig.11 Real contact areas measured by two different methods, as a function of the surface roughness

験することも必要である。数値解析を用いて高分子薄膜の圧痕の生じ方を理論的に検討することも必要となってくると思われる。

計測装置の方では、金属顕微鏡やCCDカメラの分解能等の精度を高める必要も出てくるものと考えられる。

本測定法の特徴は、かなり広い見掛けの接触面積であっても容易に短時間で全域の真実接触面積の分布が測定できる点である。真実接触面積の測定法は緒言で述べた以外にも、接触両表面の3次元あらしさを測定して、コンピュータ上で接触表面を重ね合わせることでその分布を求めることができる。しかし、広い表面で3次元あらしさを計測することは多くの時間を要する。

今まで測定できなかった真実接触面積の分布を測定することで、トライボロジー現象の理解が進むと考えられる。今後は薄膜の材質や膜厚を変えて測定可能な限界あらしさを低減させることと同時に、様々なトライボロジー問題に本測定法を適用していく計画である。

5. 結 言

PET薄膜法を用いて平滑面とあらしさを有する表面の真実接触面積を測定し、本測定法に対する表面あらしさの影響について調べた。PET薄膜法で測定した真実接触面積の分布を吟味するために、楕円偏光を利用した接触面顕微鏡を試作した。

実験を行った結果、本測定法で真実接触面積を測定できる可能性があることが分かった。ただし、どのような条件のときに、本測定法により真実接触面積が測定可能であるかを今後明らかにしていく必要がある。

今回の実験条件、すなわちアルミ合金の旋削面を対象とし、接触圧力25MPaのもと、表面あらしさ R_y を $2\mu\text{m}$ ～ $13\mu\text{m}$ の間で変化させて測定した結果 $R_y=5.0\mu\text{m}$ 以上の表面あらしさであれば真実接触面積が測定できることが分かった。

謝辞

PET薄膜を提供していただきました東レ株式会社に対しまして深く感謝申し上げます。

文献

- 1)伊藤・廣・伊東:日本機械学会論文集(C編), 48, 425 (1982) 70.
- 2)竹内・佐藤・青木・菅原:トライボロジスト, 42, 1 (1997) 53.
- 3)久門:日本機械学会論文集, 35-272, (1969) 870.
- 4)山田・鏡・畑沢・佐藤・永田・潤清, 22, 1, (1980) 458.
- 5)曾田・河野・潤清, 22, 1, (1977) 17.
- 6)櫻井:機械試験所々報, 6, (1952) 215.
- 7)大谷・岡田・木村・大堀:トライボロジスト-会議予稿集(1992-5) 215.
- 8)新田・如澤:日本機械学会論文集(C編), 60, 579, (1982) 70.
- 9)I. Nitta:Wear, 181-183, (1995) 844.
- 10)新田・諸橋:日本機械学会講演論文集, 957-1, (1995) 91.
- 11)岩波 理化学辞典(第4版第4刷), 岩波書店(1989), 711.