

真実接触面積の測定

新田 勇*

Measurement of Real Contact Area

Isami NITTA

Two different methods of measuring real contact area have been described. One was the contact microscope that was modified by elliptically polarized light and could detect 20nm distance. The other was the thin polymer film method developed by the author. In the thin polymer method, the real contact area could be measured over the quit wide range of the nominal contact area. The effect of the surface roughness of the specimens on the thin polymer method was showed.

Key words: Real Contact area, Contact Microscope, Thin Polymer Film Method, Tribology, Contact Mechanics

1. はじめに

筆者はトライボロジーを専門として、主に接触問題の解析とその工学的応用を手がけている。トライボロジーの分野では、接触面積とは本当に接触している真実接触面積を意味する。自動車のタイヤの接地面積は、葉書一枚分と言われているが、これは見かけの接触面積に過ぎない。路面とタイヤが実際に接触している真実接触面積は葉書一枚よりもずっと小さい。

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はあるが、積極的に利用されているとは言いがたい。その理由の一つとして、簡便な真実接触面積の測定法がないことが挙げられる。

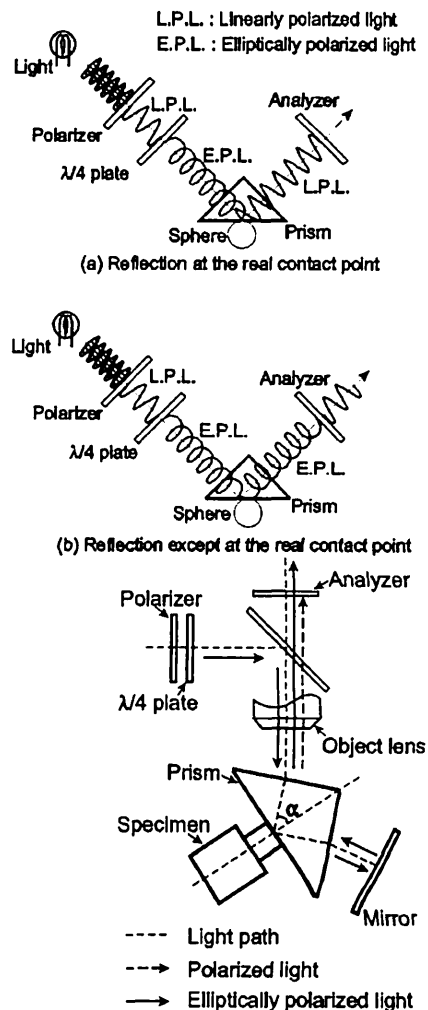
真実接触面積を測定する方法としては、接触電気抵抗や熱抵抗および超音波¹⁾²⁾を用いた方法、接触面に着色液を流し込む方法³⁾、接触面に煤を被覆する方法⁴⁾、接触面顕微鏡⁵⁾⁷⁾による方法等がある。しかし、種々の材料において表面に特殊な処理を施すことなく、簡便に真実接触面積とその分布を測定し得る方法はこれまでなかった。

著者らは簡便な真実接触面積の測定法として、厚さ約1μmの高分子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⁾。本解説では、真実接触面積の測定法として上記の方法と接触面顕微鏡を用いる方法について述べる。

2. 接触面顕微鏡

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有力な方法である。高分子薄膜法による真実接触面積の測定が正しいかどうかを判定するためにも、接触面顕微鏡を使用している。

光学プリズムと固体の接触では、真実接触部は暗く他の



(c) Layout of the contact microscope

Fig.1 Schematic diagram of the contact microscope

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⁾。この点を改善するために楕円偏光を用い、プ

原稿受付 2003年10月30日

* 非会員 新潟大学工学部 (〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)

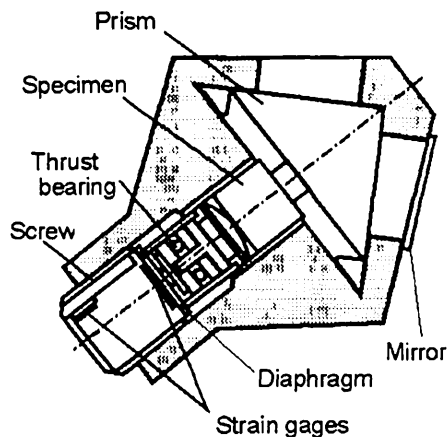


Fig.2 Loading unit of the contact microscope

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⁾がある。筆者は、市販の金属顕微鏡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.1 に示す。Fig.1(a),1(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.1(a)のハロゲンランプより出た光は偏光板(ポライザ)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。

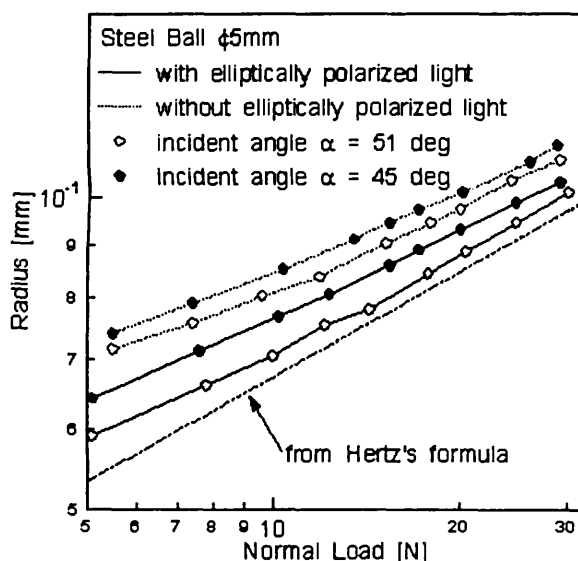


Fig.3 Contact radius of a steel ball

Fig.1(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.1(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.2 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。

全反射の際に、光がまったくプリズム(第1媒質)から空気中(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入り込むので、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-Hanchen effect)¹⁰⁾。Fig.1(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(空気中)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、直径 5mm の鋼球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.3 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。

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⁸⁾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. 高分子薄膜を用いた真実接触面の測定法

著者らは簡便な真実接触面積の測定法として、厚さ約 1 μm の高分子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.4 に簡単に示す。固体表面間の真実接触部では挿入された PC(ポリカーボネート)薄膜が塑性的に押し潰されるので、除荷後に PC 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むることができる。

測定法の原理よりわかるように、本方法は PC 薄膜を媒介にして真実接触面積を測定する間接測定方法であり、厳

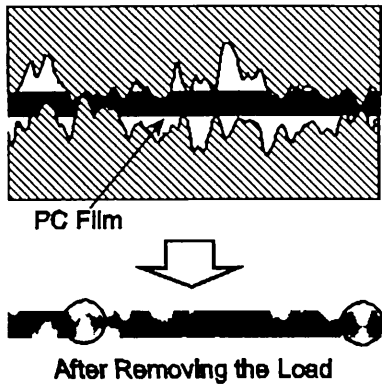
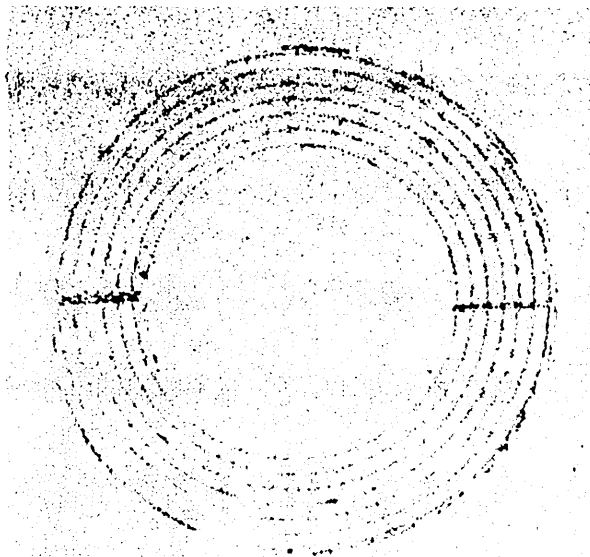
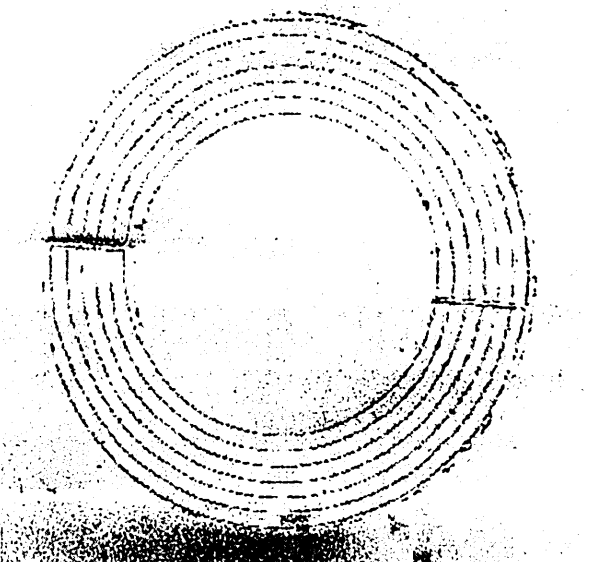


Fig.4 Principles of the PC film method



(a) by the PC film method



(b) by the contact microscope

Fig.5 Measured real contact area by the two different methods

密には正確な真実接触面積の測定は不可能である。しかし

ながら、接触面顕微鏡のように接触の一方に透明材料などの制限はなくなり、広い見かけの接触面積にわたり真実接触面積を測定することができる。

試験片とプリズムの間に PC 薄膜を挿入し、荷重を 1 分間加えた。その後 PC 薄膜を取り出し接触痕を金属顕微鏡により観察した。PC 薄膜の膜厚は約 $1\mu\text{m}$ である。PC 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⁸⁾。

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。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. 観察結果の一例

Fig.5 はそれぞれ PC 薄膜と接触面顕微鏡で測定した真実接触面積の例である。外径 5mm、内径 3mm のアルミ旋削面とプリズムの接触面の観察画像である。うず巻状に見えるのが旋削表面の凸部である。半径方向に見える 2 本の筋は、場所を特定するためにアルミ試験片に入れたケガキ線である。同一のアルミ試験片を使用しているので、どちらの方法でも同じような測定結果となっている。接触面顕微鏡の視野は狭いので、Fig.5 の画像を一度に得ることはできずに、いくつかの観察画像を合成している。したがって、広い面積を観察するときには、より多くの時間を要する。これに対して、PC 薄膜法は、広い面積を測定できるのが特徴である。原理的には、薄膜さえ用意できれば測定面積には制限はない。

一般的に高分子薄膜は粘弾性的な挙動を示す。したがっ

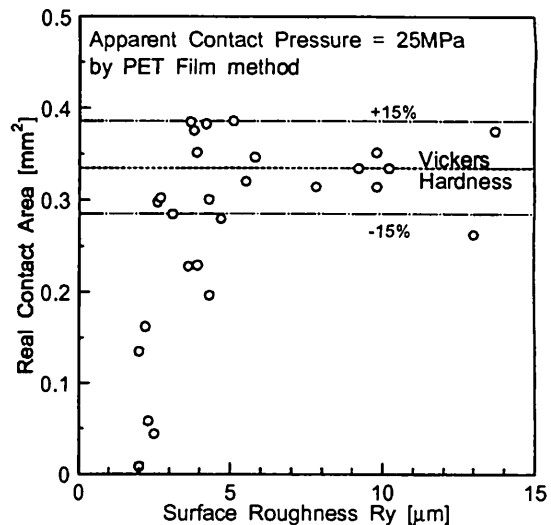


Fig.6 Area of the indenter on the film as a function of time

て、薄膜についての圧痕の深さは時間とともに浅くなること
が予想できる。実際に半年程度経過した圧痕は見かけ上深
さが減少しているように見られた。そこで、2週間にわたり
画像処理をもちいて圧痕の見え方を調べたが、この期間
内には特に変化が見られなかった。したがって、高分子薄
膜法においては、薄膜に圧痕をつけてから、画像処理によ
り面積を求める間が極端に長くなければ、粘弾性回復の影
響を気にする必要はないことがわかる。

さて、高分子薄膜として当初は、PET(ポリエチレンテレ
フタレート)薄膜を使用していたが、その内部に固体潤滑剤
を含むために、これらが真実接触面積と混同される問題があ
った。そこで、固体潤滑剤を含まない薄膜を作るためにPC
を使用した。PC以外にも透明な材料を試してみたが、一般
的に言ってその材用に適度な伸び特性がないと、1 μ m程
度の薄膜化は難しいことがわかった。同時に適度な機械的
強度がないと、実験の際に薄膜が破れてしまう結果となっ
た。筆者のところの実験では、PC膜が一番よいことがわか
った。

Fig.6は、高分子薄膜法に及ぼすアルミ試験片の粗さの影
響を示したものである。横軸は、試験片の最大高さである。
縦軸は、見掛けの接触圧力が25MPaのときに測定された真
実接触面積である。トライボロジーで真実接触面積の大き
さを評価するときには、第一近似的に作用した荷重を軟ら
かいほうの材料の硬さで割ることで計算する。したがって、
同一の材料を使い、かつ荷重が同じであれば、表面粗さが
異なっても、真実接触面積は同じということになる。そう
いう目で見ると、最大高さが5 μ mまでは、真実接触面積
は同じであることがわかる。すなわち、表面粗さが5 μ m
以上の表面に対しては、本測定法が適用できる。

表面粗さが5 μ mを下回ると、真実接触面積が小さくな
る。すなわち薄膜上の圧痕が小さくなるのは、アルミ試験
片の表面微小突起の頂上以外の谷部も接触に関与するた
めであると考えられる。すなわち、谷部が荷重を受け持つ
ために、頂上に作用する荷重が小さくなり、深い圧痕を生
じさせることができなくなる。

PC薄膜を使って同様の実験を行ったところ、測定できな
くなる限界の粗さは3 μ mとなった。これは、PET薄膜に
比べてPC薄膜のほうが膜厚が薄いためである。

本実験では、粗いアルミ試験片と平らなプリズム面の接
触であったが、両方ともに粗い試験片であれば、測定可能
な限界粗さはもう少し低い値になることが予想される。

本測定法は、現在ガスケットなどのシールの現象解明に
応用されている¹¹⁾。これまでは、真実接触面積が測定でき
なかつたために、漏れの現象が不明瞭であった。本測定法
により荷重により真実接触面の分布がどのように変化する
かが明瞭に把握できるようになったので、漏れ量をかなり
正確に予測できるようになってきた。

6. おわりに

真実接触面積を測定する方法として、高分子薄膜法と接
触面積顕微鏡について簡単に述べた。真実接触面積を測定
することは意外に難しく、すべての要求を満たす測定法は
ない。それぞれに一長一短があり、状況にあった測定法を
選ぶ必要がある。

高分子薄膜測定法は、接触面に特別な処理を施す必要が
なく、広い見掛けの接触面積にわたり測定できるのが特徴
である。しかしながら、しゅう動途中の真実接触面積は測
定できない。

接触面積顕微鏡は、分解能が高い測定法であるが、一方
の試験片が透明材料でなければならないという制約がある。
工夫次第では、しゅう動している最中の接触面を測定する
ことが可能となる。

トライボロジーの世界では、真実接触面積を測定するこ
とは重要なことである。その他の分野の人にとっても重要
となる場合があると思っている。そのような場合本解説が
少しでもお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 伊藤・盧・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:潤滑, 22, 1, (1980) 458
- 5) 曾田・河野:潤滑, 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:トライボロジー-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) 岩波 理化学辞典(第4版第4刷), 岩波書店(1989), 711.
- 11) 伊藤・新田・松崎・長谷川:トライボロジー予稿集(2003-11) 21.