

## 真実接触面積の可視化技術

原稿受付 2007年5月7日

“トライボロジスト” 第52巻 第12号 (2007) 843~848

新 田 勇

新潟大学 工学部機械システム工学科

〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町 8050)

### 1. はじめに

真実接触面積を測定する方法はいくつか開発されており、それらの解説もなされている<sup>1)</sup>。しかし、その大きさを $\mu\text{m}$ 単位で計測できる方法としては、片方の材料を透明体にして接触面を覗き込む方法しか今のところないようである。両方の材料共に不透明の場合には、表面に蒸着膜を付けるなどの特殊な処理を施し、接触後に膜が剥がれた部分を真実接触面とする方法が一般的であろう。

筆者は、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できる方法として、厚さ約 $1\mu\text{m}$ 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<sup>2)</sup>。本解説では、真実接触面積の測定法として高分子薄膜法と接触面顕微鏡を用いる方法について簡単に紹介する。詳細については別の解説記事<sup>3)</sup>を参照して頂くとして、ここではそれらの測定方法を実際の問題に適用した例について述べたい。

### 2. 高分子薄膜と接触面顕微鏡の概要

高分子薄膜法の原理を図1に簡単に示す。接触する固体表面間にPC(ポリカーボネート)薄膜を挿入する。真実接触部では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めることができる。接触面顕微鏡のように接触面の一方を透明材料とする必要がなく、広い見掛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のが特長である。

接触面顕微鏡は、湿式クラッチペーパー<sup>4)</sup>の接触の観察などに用いられている。筆者は市販の光

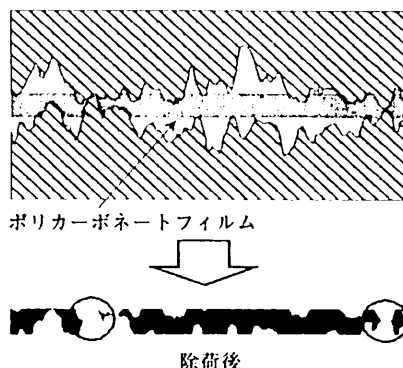


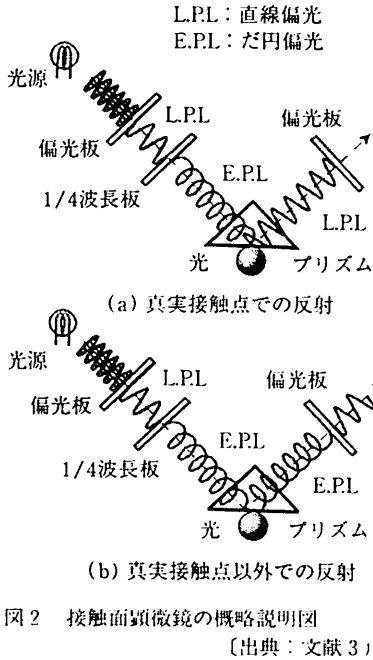
図1 高分子薄膜法の概略説明図  
(出典：文献2))

学顕微鏡のステージに設置できるコンパクトな接触面顕微鏡を製作した。このようなコンパクトな接触面顕微鏡を作ったのは、高分子薄膜法の妥当性を調べるためである。接触面顕微鏡の光路を図2に示す。図2(a)、2(b)はだ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だ円偏光が反射の様子を示した。図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 $1/4$ 波長板を通過してだ円偏光となる。真実接触部では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、接触部で反射しただ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もう一方の偏光板(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。図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だ円偏

## Visualization Technologies of Real Contact Area

By Isami NITTA, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University, 527-8580, Ikarashi Niinohō, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 950-2181. E-mail: nitta@eng.niigata-u.ac.jp

Key Words: real contact area, thin polymer film, contact microscope, visualization, seal, thermal transfer printer



光とは位相を異にする。しかし、位相の変化量は接触部のそれとは異なるため、反射後もだ円偏光のままとなりアナライザを透過する。これにより、真実接触部の境界が鮮明に見えるようになる。だ円偏光を用いないときはすきまが 200 nm 程度でも接触と判定されていたが、だ円偏光を用いることでそのすきまは 20 nm 程度に改善される。

### 3. 高分子薄膜法を用いたメタルガスケットのシール性評価

金属平形ガスケットの漏れ量を定量的に評価する際に、真実接触面積の測定法が役に立った例<sup>5)</sup>を以下に示す。図 3 は、鋼フランジと銅ガスケットの形状と寸法を示したものである。鋼フランジのシール面は旋削加工されており、らせん状の溝がついている。一方、銅ガスケット表面は研磨加工されている。図 4 に示すように 2 枚の鋼フランジが銅ガスケットを挟むようにセットされ、フランジ面の凹凸が銅ガスケットに食い込むことでシールがなされる。鋼フランジの締結荷重に対してシール部の漏れ量が推定できれば設計上便利である。しかし、これまでのところ漏れ量を定量的に推定することは非常に難しいとされていた。

さて、通常このような漏れの解析には、粗面と

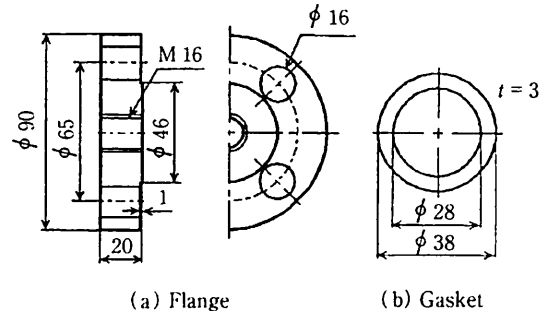


図 3 鋼フランジと銅ガスケット (出典：文献 5))

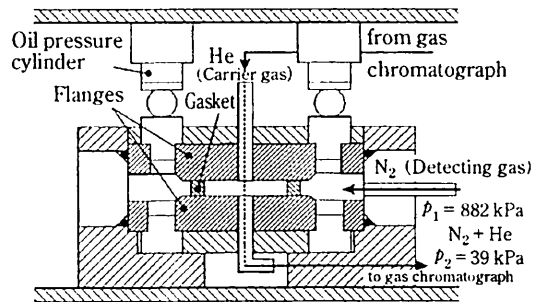


図 4 シール特性実験装置 (出典：文献 5))

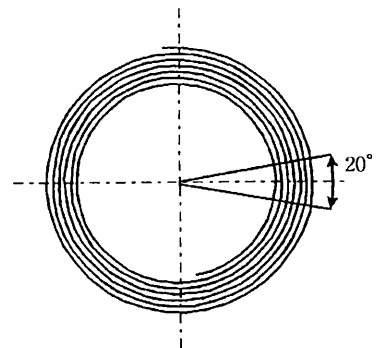


図 5 らせん状の接触痕 (出典：文献 5))

平面の接触論が適用される。すなわち、表面微小突起頂点の存在確率密度関数により、確率論的に接触が取り扱われる。しかし、確率論に頼っていると、漏れ特性を定性的には予測できても定量的には予測できない。これはなぜか。

たとえば、フランジ面は旋削されているのでらせん状の稜線ができています。締結荷重が大きくなれば、いずれすべての稜線が銅ガスケットと接触し図 5 に示すような、連続したらせん状の接触痕が銅ガスケットにできるはずである。このとき、

鋼フランジと銅ガスケットのらせん状の溝すきまに沿ってしか漏れは生じない。らせん状にしか漏れが生じないことがわかっていれば、漏れ量を定量的に予測することは比較的容易になる。したがって、この状態になる締結荷重を知ることは重要である。

一方で、締結荷重が小さいときには、らせん状の接触痕はところどころ途切れるはずであり、この状態では上記の漏れのほかに、半径方向の漏れも接触痕の途切れ部から生じることになる。

さて、確率に立脚した接触論で漏れを考えてみる。鋼フランジ上の稜線の存在確率としてガウス分布を仮定すると、高さがかかなり低い部分にも稜線が存在することになる。したがって、相当高い締結荷重を加えても銅ガスケット上の接触痕は連続したらせんにならないことになる。すなわち、確率論によれば相当大きな締結荷重を加えても、半径方向の漏れが生じていることになる。どの荷重でも半径方向とらせん方向の漏れが同時に起こっていることになる。これが、定量的な予測を不可能にしている原因である。

らせん接触痕がつながっている、すなわちフランジ上の稜線すべてが銅ガスケットと接触していることがわかれば、確率論によることなく、らせんすなわち円周方向漏れを仮定して決定論的に漏れ量を予測することができる。

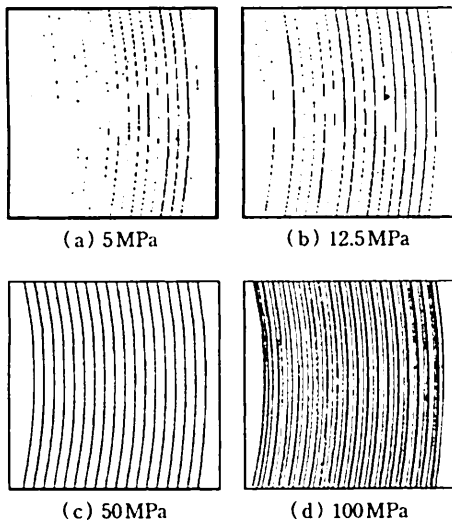


図6 真実接触面積の測定結果 (出典：文献5))

そこで、高分子薄膜法を用いてフランジと銅ガスケットの真実接触面積分布を計測した。測定結果の一例を図6に示す。ここでは、銅ガスケット全域ではなく、紙面の都合上、図5に示すようにらせん接触痕の内、中心角で20°の領域のみを示した。銅ガスケットの全域においてはほぼ均一な接触状態となっていることは確認している。図6は、高分子薄膜の観察画像を2値化処理したものであり、黒い部分が接触部である。接触圧力12.5 MPaでは、接触痕が途切れていることがわかる。これに対して、接触圧力50 MPaでは接触痕が連続していることがわかる。したがって、この接触圧力以上であれば、漏れの経路は、フランジ旋削面のらせん溝に沿ったものしかないことがわかる。

図7に示すように、フランジと銅ガスケットの間のらせん溝を、同等断面積の矩形流路に置き換え、流れは層流流れと仮定して、漏れ量を推定した。解析値と実測値を図8に示す。破線が実験値である。すべり線場理論 (S.L.F., Slip Line Field theory) で示している線が計算値である。

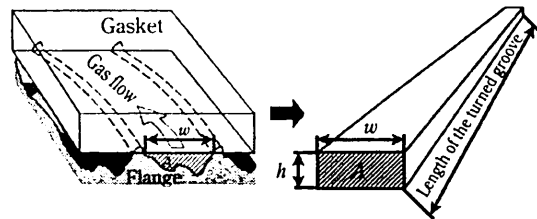


図7 漏れ流路の簡略化換 (出典：文献5))

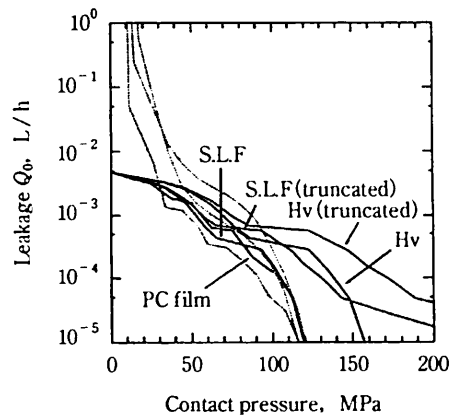


図8 漏れ実測値と計算値 (出典：文献5))

実験値と計算値は、接触圧力が約 40 MPa のところから接近していることがわかる。真実接触面積の測定結果より、接触圧力が 40 MPa 付近では、漏れの経路がらせん溝に沿ったものしかなくなることがわかる。計算においては、らせん溝に沿った層流流れしか仮定していないので、この結果は妥当なものと考えられる。接触圧力が 40 MPa 以下では実験値の方が漏れ量は多くなっているが、これは円周方向漏れに加えて半径方向漏れが生じているためである。このように、真実接触面積の分布を正しく把握することにより、適切に漏れ量を予測することが可能になった。

#### 4. 昇華型熱転写プリンタ用印刷用紙の評価<sup>6)</sup>

印刷用紙の新しい評価方法として、真実接触面積の測定が注目されている例を以下に示す。熱転写プリンタの特徴は、印刷ヘッドがインクリボンと接触することであり、摩擦と摩耗が関係するトライボロジ的な問題が多い機械である。熱転写プリンタは、熔融型と昇華型の二つの方式に大別できる。現在デジタルカメラが普及しているが、昇華型は 1 ドットのみでも連続的に階調が変えられるので銀塩写真並の画像印刷が可能である。また、インクジェットプリンタと比べても、昇華型は印刷ヘッドの小型化が可能なので携帯用途に向いている。熱転写プリンタの印刷原理を図 9 の原理図を基に説明する。

昇華型熱転写プリンタでは、円筒形のプラテンゴムの上に印刷用紙とインクリボンが置かれ、それらを熱転写ヘッドが押し付けている。インクリボンの染料 (dye) は印刷用紙上の受容層 (receiving layer) と接触することになる。この状態でマイクロヒータにより加熱されると、染料

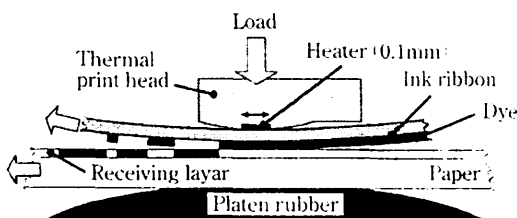


図9 熱転写プリンタの印刷原理図 (出典: 文献6)

が受容層に拡散し印刷が行われる。インクリボンと印刷用紙はできるだけ密着することが望ましいので、印刷用紙の表面粗さは印刷品位を左右する重要因子となる。通常、真実接触の具合を評価するために、表面粗さが測定される。しかし、印刷用紙の場合には、それではうまくいかない事情がある。図 10 は上質紙の切断面である。紙はセルロースが絡み合っていてできているので、断面には空洞が存在する。上質紙の表面が印刷ヘッドで押し付けられた場合、空洞部分が大きく変形するため、表面粗さだけから接触状態を評価するのは不可能となる。

そこで、実際に印刷用紙を相手材に接触させて真実接触面積を測定する必要が出てくる。図 11 は直径 5 mm の円形に切った印刷用紙とプリズム平面の接触状態を接触面顕微鏡で観察した結果である。接触面顕微鏡では、プリズムの斜面を観察するので一度に見える視野は 0.7 mm × 0.09 mm に限られる。図中の黒くなっているところが真実接触部である。視野を移しながら、観察を繰り返して全体画像を作製し、最終的には横方向に画像を少し引き延ばして真実接触面積の画像を完成させる。



図10 上質紙の断面 (出典: 文献6)

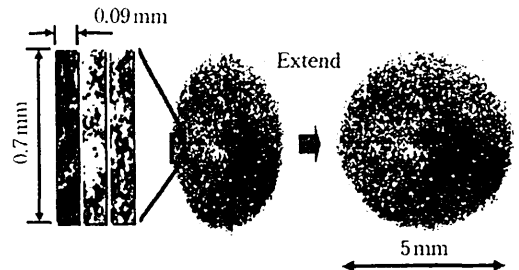


図11 接触面顕微鏡による測定の例 (出典: 文献6)

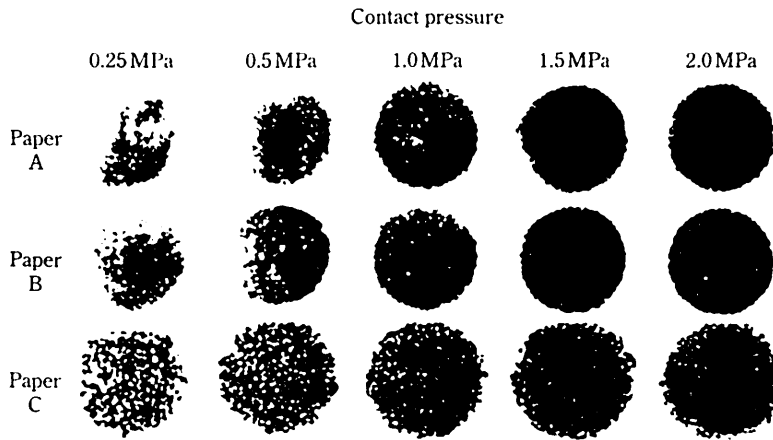


図12 3種類の印刷用紙の真実接触面積の測定例〔出典：文献6〕

図12は、3種類の紙について0.25 MPaから2 MPaまで接触圧力を変えながら、真実接触面積を測定した結果である。ちなみに、この3種類の紙の表面粗さ  $R_a$  はほぼ同じである。3種類の紙のうち、用紙Aと用紙Bは比較的同じ傾向を示している。接触圧力0.25 MPaや0.5 MPaのところを見ると細かな接触点が分布している。これに対して、用紙Cは粗い砂粒をまぶしたような接触形態となっている。

さて、印刷品位の評価法として、同一印刷条件下で、どれだけ多くの染料が紙に転写されるかを評価する方法がある。すなわち、染料が多く転写されれば、印刷濃度の測定値は大きな値を示す。同じ接触圧力で印刷を行った場合、印刷濃度が高ければ、よい印刷が行われたと評価する。印刷濃度の測定は、印刷物の反射率を調べる反射濃度計により行っている。

図13は、縦軸に印刷濃度を、横軸に真実接触面積をとり、用紙Bについての測定値を示した。ここでは、真実接触面積を見掛けの接触面積で割った、真実接触面積率を使用した。熱転写ヘッドの温度を80℃から120℃の範囲で変えて実験を行った。どの温度でも印刷濃度、すなわち染料の転写量と、真実接触面積の間にはきれいな相関関係が存在することがわかる。用紙Aと用紙Cでも、同様な関係が得られている。一方、溶融型熱転写プリンタにおいて、表面粗さと印刷濃度の関係が調べられているが、そこでは明確な相関関係が得

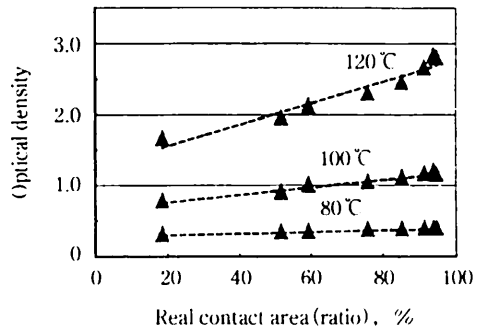


図13 印刷濃度と真実接触面積の関係〔出典：文献6〕

られていない。

これまで、熱転写プリンタ用の印刷用紙は実際に印刷を行うことでしか、その優劣を評価できなかった。この例でわかるように、印刷用紙の評価法として真実接触面積の測定が有効な方法であることがわかった。しかも、評価結果を数値的に示せる点が特長で、印刷用紙の新しい評価法として注目されている。

### 5. おわりに

真実接触面積の測定法として、高分子薄膜法と接触面顕微鏡を用いる方法を取り上げて、その測定法の概要を極簡単に説明した。測定方法の詳細は他の解説に譲ることにし、本解説では二つの方法の応用例について述べた。金属平形ガセットに應用した場合、真実接触面積の分布がわかるこ

