

# 摩擦の発生機構と真実接触面積

## Mechanism of Friction and Real Contact Area



山本隆司\*

Prof. Takashi YAMAMOTO

Friction is a representative phenomenon of tribology caused by sliding motion and rolling motion. The function and operational performance of mechanical components are remarkably influenced by friction. The role of boundary lubrication is dominant in the operation of tribo-mechanical components since severe operating conditions can be allowed due to the improvement of processing accuracy in the surface finishing of mechanical components. Therefore, the clarification of the generation mechanism of friction with a relative motion in which a viscous effect is not included is important in analyzing the performance of mechanical components. It is the real contact area that becomes a starting point when the generation mechanism of the boundary friction is discussed. Therefore, more detailed discussion of the concept of real contact area is required. In this paper, we introduce mainly the content discussed in our research group regarding this subject.

**Key Words:** friction, boundary friction, boundary lubrication, real contact area, adhesion

### 1. 「摩擦」とその「トライボロジー」における位置

トライボロジーとは、The science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related thereto. (後半部分を…and of related subjects and practicesとする場合もある。)と定義されている。この定義は、学際的、抽象的であり、また、scienceとtechnologyが併記されていることがトライボロジーという学問分野の特徴を表している。この定義の文言中でのキーワードは、「相対運動」と「表面」である。相対運動とは、あい対する固体間の巨視的な運動形態を言っており、具体的にはすべり運動や転がり運動であって、technologyの分野で大いに関心が持たれている現象である。一方、相対運動の質を深く掘り下げようとする、微視的観点からの検討が必要になり、接触面(言い換えれば、表面)において、どのような現象が生じているかが問題になり、二つのキーワードは不即不離の関係になる。接触面で生じている現象の解明は、まさに、scienceの世界に属する。

摩擦はすべり運動や転がり運動という相対運動に伴っ

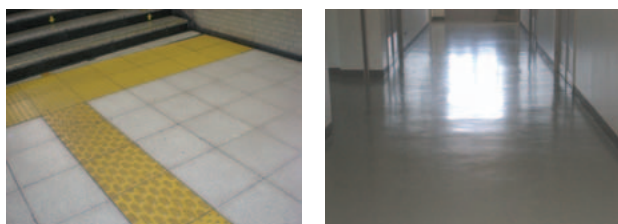
て生じるトライボロジーを代表する現象であり、その摩擦の大小、また目的に見合った摩擦の制御によって、トライボ要素の機能が発揮され、また性能が大きく影響される。流体潤滑では、流体の粘性効果により形成される潤滑膜が相対運動面を隔てて、固体同士の干渉を断ち摩擦を低減するが、ここで発生する摩擦は多くの場合粘性によって決まり、固体の材質と潤滑油物性とのマッチングが大きな課題になることはまれである。したがって、粘性効果の介在しない場合の摩擦の発生機構の解明がトライボロジーの研究分野では重視されている。

摩擦の発生機構を議論する際の原点となるのは、接触面における基本的現象：真実接触面積であるが、これに関してすでに議論が尽くされたかのように考えられて、最近取り上げられる機会が少なくなっている。本報では、この接触面積に関して、摩擦の発生機構の議論を深めることを目的として、我々の研究グループ内で日頃議論している事柄を中心に述べて本誌の読者の参考に供したい。摩擦の発生機構の主要因子である接触面積を現代的な目で再点検する意義は大きいと考えるからである。

\*東京農工大学 共生科学技術研究院 教授 工学博士

## 2. 身近に経験する摩擦現象から真理を探る

表面に凹凸があると摩擦は大きく、また平滑であると摩擦は小さくすべりやすいという現象は身近によく経験している。図1の左図で、路面に埋め込んである凹凸板上を歩く場合には、すべりにくい。これは、主として履き物が凹凸形状とかみ合うような状態になるためであり、摩擦力の発生機構の凹凸説に関係する。一方、図1の右図はいかにもすべりやすく見える。しかし、これもゴム靴で歩くと摩擦は大きくなり、きしみ音さえ発生させる。しかし、水や油成分が床に存在すればゴム靴といえども、たちまちすべりやすくなる。我が家では、きつく閉まった瓶の蓋を開けるように家人から命じられることがしばしばあるが、この時には、手に水をわずかに湿らせると大きな摩擦が発生して蓋を開けることができる。水の量が多いとすべってしまう。水の量が多い場合には、明らかに流体潤滑効果が支配的になり、大きな摩擦が得られないからであろう。この水の量の少なさ加減が摩擦増大に重要な役割を果たしているのである。



凹凸のある路面

びびびかの床面

図1 路面や床面の代表的な状態

Typical condition of road or floor surface

さて、我々の研究室で、アリの歩行のトライボロジーの研究を行ったことがある。試験板にアリを合わせ、試験板を傾けていってアリが試験板からすべり落ちる角度を計り、摩擦係数を算出する。試験板として5種類の材質を選び、また表面粗さを種々に変えてすべり落ちる時の摩擦係数を測定した。それらの結果を図2に示す。図2によると、摩擦係数は試験板の材質によって大きく変わり、アクリル板の場合の摩擦係数はアルミニウム板の場合の3倍程度に大きくなっている。また、粗さの影響は、粗さが小さい範囲では顕著ではないが、粗さが0.4 $\mu\text{m}$ 以上になると、大きくなっていく。このような測定を生きているアリと死んだアリの場合を比較したのが図3である。表面粗さは可能な限り小さく設定した。図3から、生きているアリでは、試験板の材質の影響は明白であって、死んだアリの場合には、試験板の材質の

影響を受けず、摩擦係数の値が0.3から0.4の範囲にある。これは多くの固体の乾燥条件下の摩擦係数に相当する値である。さて、生きているアリの場合の摩擦係数はアルミニウムの場合でも0.5程度あり、アクリルの場合には、1.0を超えている。これは、生きているアリの足から何らかの物質が分泌され、それが摩擦係数を増大させていることを示唆している。図2と併せて摩擦が材質と表面粗さの影響を受けることが分かる。このように、手にわずかに水が存在するような場合やアリの分泌物が介在するような場合には、乾燥摩擦とは違った、摩擦増大の効果が認められる。このような現象は、従来の境界摩擦の概念に立脚しては議論されてこなかったようである。

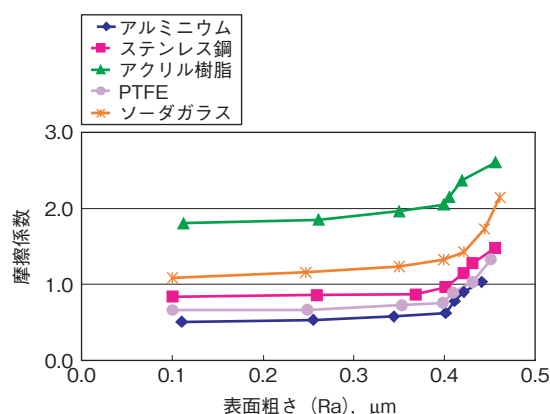


図2 摩擦係数に及ぼす材質および表面粗さの影響

Effects of material and surface roughness on coefficient of friction

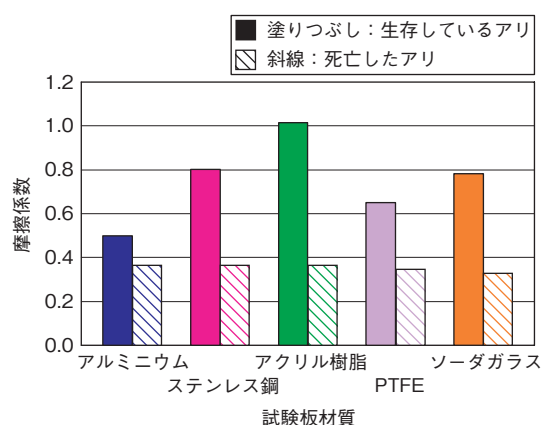
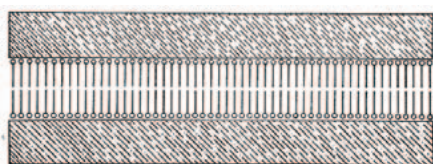


図3 アリの生死による摩擦係数の変化

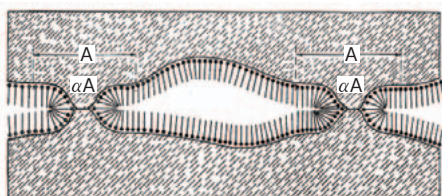
Variation of coefficient of friction depending on whether an ant is alive or dead

### 3. 境界摩擦の概念の拡張の試み

機械要素の主要な構成素材である金属の表面は、加工方法の性格により微小な凹凸がある。機械に用いるしゅう動面では、いくらなめらかでも  $0.1\mu\text{m}$  ぐらい、通常は数  $\mu\text{m}$  程度の凹凸がある。潤滑剤が介在する相対運動面のしゅう動条件を厳しくしていくと、やがて相対運動面同士の相互干渉が無視できなくなる。しかし、相対運動面間に分子膜のオーダーの油膜が介在してなお良好な潤滑状態が維持される場合がある。これを境界潤滑と言って、流体潤滑と双壁をなす機械要素の潤滑形態として重視されてきた。境界摩擦は、油性向上剤や極圧添加剤をはじめとする各種潤滑油に混入される添加剤の作用機構により大きく変化する。この境界潤滑の概念の基礎を提唱したのがハーディーであった。図4(a)はハーディーの境界潤滑のもととなる吸着膜を概念的に示したものである。表面に存在する微小形状を考慮した真実接触面積の概念を組み込んで現代的な境界潤滑の概念を確立したのが、パウデンとテイバー (Bowden, Tabor) であった (図4(b))<sup>1)</sup>。この境界潤滑が近年重視されるようになったのは、表面加工技術の発展による表面粗さの格段の向上により、微小突起同士による干渉が少なくなったことと、新規の添加剤の登場や性能向上により、分子膜が相対運動時に破断することなく大きな負荷能力を維持できるようになったことによるものである。現代では、分子膜がトライボロジー性能を支配する分野が増大しつつある時代に入ったことを意味している。



(a)Hardy の吸着膜モデル



(b)Bowden & Taborの微小形状を考慮した吸着膜モデル

図4 境界潤滑膜の概念

Concept of boundary lubrication film

ところで、潤滑条件下における摩擦力  $F$  は、

$$F = A_r \{ \alpha s_m + (1 - \alpha) s_i \} \quad (1)$$

$A_r$  : 真実接触面積

$\alpha$  : 潤滑膜が破断されて金属結合が生じている部分の占める割合

$s_m$  : 金属接合部のせん断強さ

$s_i$  : 潤滑膜のせん断強さ

と書き表される。境界潤滑は流体潤滑と並んで重視される潤滑形態であるために、境界潤滑膜のしゅう動面保護作用と摩擦低減の役割に注目した議論が主になされ、上の式から得られる知見としても、金属の直接接合部を少なくし ( $\alpha$  の減少)、また潤滑膜のせん断強さを小さくすることによって摩擦を減少させることのできる点に関心が寄せられてきた。しかし、式の中の影響因子をもとに、固体面間に存在する媒体と固体表面との相互関係に着目して摩擦を人為的に制御することが今後の重要な課題と我々は考えている。なお、この真実接触面積は、固体同士が真に結合している部分のみを言うのか、数分子程度の膜で隔てられた部分をも含んだ領域を言うのか、未だに十分な議論がなされていない。これは、今後の重要な課題である。式(1)では後者を採用している。

摩擦を目的に応じて制御する境界潤滑の課題に関連する例として、添加剤の中に摩擦を増大させるものの存在が検討される契機となった研究成果を表1および図5<sup>2)</sup>に示す。図5は、現在の乗用自動車の主流の自動変速機に用いられているペーパー系摩擦材と自動変速機油による摩擦特性の発現機構を示したものである。添加剤を適切に選択することによって、良好な摩擦—すべり速度特性が得られる根拠を与える実験結果である。ここで取り上げられている添加剤の効果としては、横軸の軸受定数の小さい領域におけるFM (Friction Modifier) 剤の効果と、軸受定数の相対的に大きな領域における清浄分散剤の効果であり、二者が有効に作用して、広範囲のすべり速度の下で平坦な摩擦係数と高い摩擦係数を実現できることを意味する。摩擦材は図6に示すように、有機質の紙を基質として、フェノールレジンを含浸させたものである。この摩擦材には多孔性があり (図7参照)、潤滑条件下におけるしゅう動条件下でも、流体潤滑膜が形成されにくく、境界潤滑が接触面で主体的役割を果たす性質をもっている。図8からもわかるように、ペーパー系摩擦材は自動変速機油 (Automatic Transmission Fluid : ATF) との組合せにより良好な摩擦特性を発揮



するのである。

表1 供試油の性状<sup>2)</sup>  
Properties of test oil<sup>2)</sup>

記号	供試油	動粘度, mm <sup>2</sup> /s		密度, g/cm <sup>3</sup>	VI
		40℃	100℃	15℃	
A油	パラフィン系基油	31.0	5.35	0.863	105
B油	同上	90.5	10.9	0.870	107
C油	同上	408	30.9	0.879	107
D油	A油+FM剤(1wt%)	31.0	5.35	0.863	105
E油	A油 +清浄分散剤(5wt%)	33.4	5.65	0.869	107
F油	A油+FM剤(1wt%) +清浄分散剤(5wt%)	33.4	5.65	0.869	107

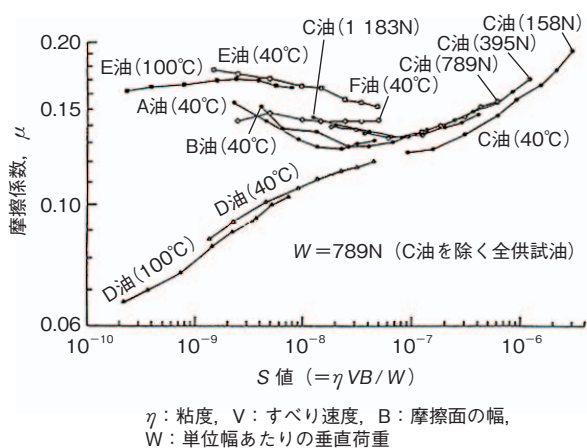


図5 各種潤滑油によるペーパー摩擦材の摩擦特性<sup>2)</sup>  
(シュトリベック線図による表示)

Friction characteristics of paper-based friction material with various lubricants (Presentation by the Stribeck's curve)<sup>2)</sup>

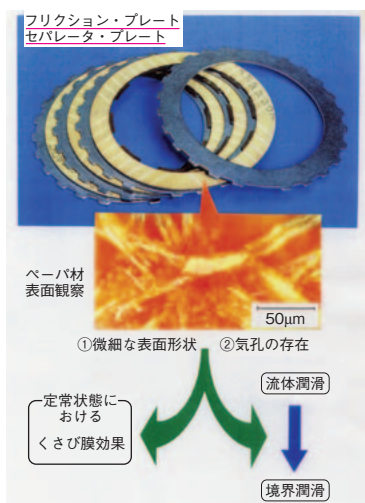


図6 ペーパー系摩擦材  
Paper-based friction material

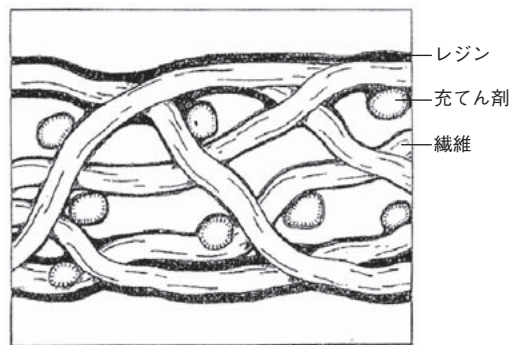


図7 ペーパー摩擦材の概念図  
Concept diagram of paper-based friction material

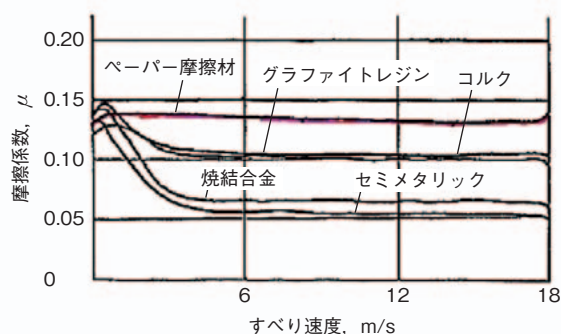


図8 各種の湿式摩擦材の摩擦特性<sup>3)</sup>  
Friction characteristics of various wet friction materials<sup>3)</sup>

さて、このペーパー系摩擦材の摩擦特性を式(1)と関連させて議論すると、 $\alpha = 0$ であり、しかし、 $S_1$ が大きいゆえに摩擦係数が大きくなるという、従来の境界潤滑の概念を拡張したモデルを想定することにより理解できる。要するに、境界潤滑膜の作用機構として、摩擦を減少させる場合と摩擦を増大させる双方の役割を考えるとどうかという提案である。

#### 4. 摩擦の発生機構と真実接触面積

トライボロジーの分野では、接触を見掛けの接触と真実の接触の2通りの概念に区別する(図9参照)。ごく一般に使われている意味での接触面積というのは、前者に対応する。凹凸のある二つの固体同士を押し付けると、表面のでこぼこのために、見掛け接触面積全体では接触は起こらない。ほんとうに接触している真実接触面積は、見掛け接触面積とは無関係に、押し付け荷重をP、塑性流動圧力を $p_m$ とすると

$$A_r = P/p_m \quad (2)$$

で与えられる。見掛け接触面積が幾何学的にはっきりしていれば、輪郭の外周部を除いて、本当に接触している

部分が均一に点在し、その総和が  $A_r$  に等しくなっていると考えられる。この真実接触面積の大きさを見掛け接触面積の比で表した例を表2<sup>4)</sup>に示す。

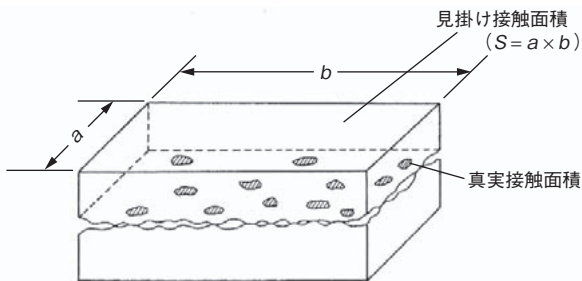


図9 見掛け接触面積と真実接触面積  
Apparent contact area and real contact area

表2 負荷荷重と真実接触面積／見掛け接触面積<sup>4)</sup>  
Real contact area/apparent contact area under varying loads<sup>4)</sup>

荷重 W (kgf)	A/S
300	1/130
100	1/700
20	1/10 000
3	1/170 000

A : 真実接触面積  
S : 見掛け接触面積

真実接触面積が見掛け接触面積に比べていかに小さいかがわかる。

我々が日常に経験する大気中の環境の下では酸素分子や、水の分子、あるいは微粒子などが存在して、それらが摩擦に大きな影響を及ぼしている。したがって、乾燥摩擦という語はできるだけきれいにした面の摩擦を表すと考えてよい。乾燥摩擦の発生原因とみなされているものには、固体面の凝着、面の凹凸のかみあい、切削のような掘り起こし、固体の粘弾性に基づくヒステリシス損失、静電気による抵抗など、さまざまな要因が考えられている。Coulombらの初期の研究者は、清浄な固体面の摩擦は表面の凹凸のかみあいによるものであると考えた。

表面に存在する種々の膜を除去した金属表面同士を押し付けると、金属の原子同士が直接に接触する。同一の金属を接触させた時には、その接触部は金属の内部とあまり変わらない強度をもつことになる。このような現象を凝着と呼んでいるが、これが機械のしゅう動面に生じる摩擦の主因とみる考えが現在主流である。しかし、現実には上で述べたように種々の膜が表面に形成されるため

に、接触部における相互の結合力は図10のように概念的に表すことが可能であろう。凝着説では、式(2)で表される真実接触部をせん断するに要する力が摩擦力であると考える。

摩擦力  $F$  は、真実接触部のせん断強さを  $s_i$  とすれば、次式で表すことができる。

$$F = A_r \cdot s_i = P/p_m \cdot s_i \quad (3)$$

$$\mu = F/P = (P/p_m \cdot s_i) / P = s_i/p_m \quad (4)$$

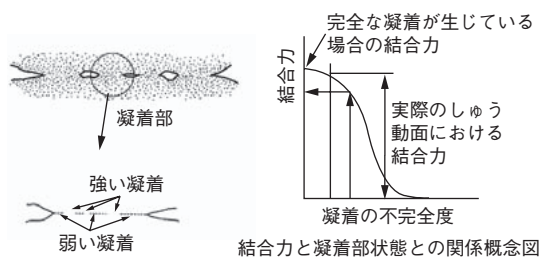


図10 接触部における結合力の概念  
Concept of binding forces in contact area

乾燥摩擦における固体面は吸着膜その他によって汚れているのが一般であって、接触部全域が母材と同じ強さをもった組織になっていると考えることはできない。潤滑条件下にある金属を接触させて荷重を加えると、接触面に加えられた荷重を支えるに十分なだけ塑性流動がおこり、真実接触部が形成される。この変形のために、潤滑膜は二つの金属面の間にはさまれて高圧を受けることになるが、この圧力は接触部全域にわたって一様に生じているとは考えられないので、圧力の最高になる部分で潤滑膜の破断が起こり、真の凝着が生じる可能性がある。図4(b)、図10はこれを、模式的に示したものである。この場合、運動に対する抵抗  $F$  は、真実接触面積を  $A_r$ 、その中で潤滑膜が破断されて真の凝着が生じている部分の占める割合を  $\alpha$  とすれば、式(1)で表される。これは式(3)の  $s_i$  を  $\{ \}$  内の式に置き換えただけであるから、式(1)は凝着説の境界摩擦への拡張の式と言ってもよい。

## 5. 摩擦の法則と摩擦発生機構としての凹凸説と凝着説の検討

摩擦に関するアモントン・クーロンの法則は、潤滑剤の介在しない乾燥状態の摩擦の経験法則として提唱されたものであるが、潤滑膜が数分子層程度の薄い条件下(1920年代になって確立された境界摩擦の範疇に属する

条件) の場合にも適用可能であることから、摩擦の関与する現象を定量的に取り扱う必要のある場合に好んで使われている。

この法則では、無潤滑下の固体同士の摩擦に関して、(1)摩擦は接触面積の大きさによらず一定、(2)摩擦は荷重に比例する、(3)摩擦はすべり速度によらず一定、としている。これを垂直力で摩擦力を割った値である摩擦係数で表現し、(1)摩擦係数は接触面積によらず一定、(2)摩擦係数は荷重の大きさによらず一定、(3)摩擦係数は速度の大きさによらず一定、ということの基本法則として提示している。さらに、(4)動摩擦は静摩擦より小さいという、法則を加える場合もある。当時すでに、摩擦の発生機構として、表面の微小形状のかみあい(一方の面が相手の面の凹凸を上下する過程を含む)を摩擦の主因とする凹凸説と、表面が近接することにより分子間力が生じて摩擦が発生するという凝着説が対比されて議論されていた。アモントン・クーロンの法則の重要な立脚点は、摩擦の大きさが荷重に比例して増大すること、および摩擦の大きさが接触面積の大小によらず一定であることにある。もし、凝着が主因であれば、摩擦力は接触面積に比例することになる。アモントン・クーロンは摩擦の大きさが接触面積に依存しないことを根拠に凝

着説を否定し、また、摩擦の大きさが荷重に比例することを、凸部を乗り越える際の位置エネルギーの増大によるという考えで凹凸説を採用したのであった。アモントン・クーロンらが接触面積という概念でとらえていたのは、現在の我々の常識となっている見掛け接触面積のことであった。接触に関与している真実接触面積は荷重に依存して増大することがわかっており、見掛け接触面積が異なっても、同一荷重条件下で生じる真実接触面積は同じ結果になる。結局、接触面積(見掛け接触面積)の影響と荷重の影響も、凝着説に依拠しても矛盾なく説明がつくことが明らかになった。

このように真実接触面積が乾燥条件下および境界潤滑条件下での摩擦を定量的に表示する際には重要になることから、従来まで種々の手法(図11)が提案されている。その中でも光学的手法が総合的に有効なデータの取得が可能であるという判断から、我々の研究グループでは、潤滑条件下でも真実接触面積を測定できるシステムに注力して研究を続けてきた。その測定結果の一例を図12に紹介する。このような測定システムを境界潤滑条件下でのしゅう動現象に適用することによって、やがて、摩擦の発生機構の解明の鍵となるデータが取得できるものと考えている。

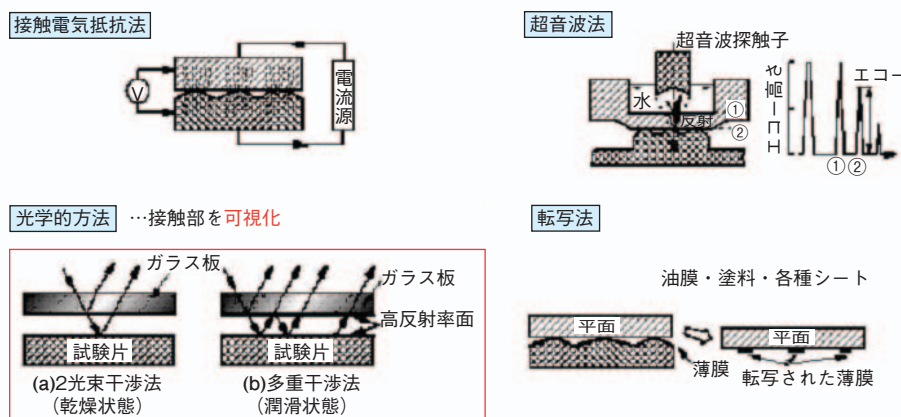


図11 真実接触面積の測定法  
Measuring method of real contact area



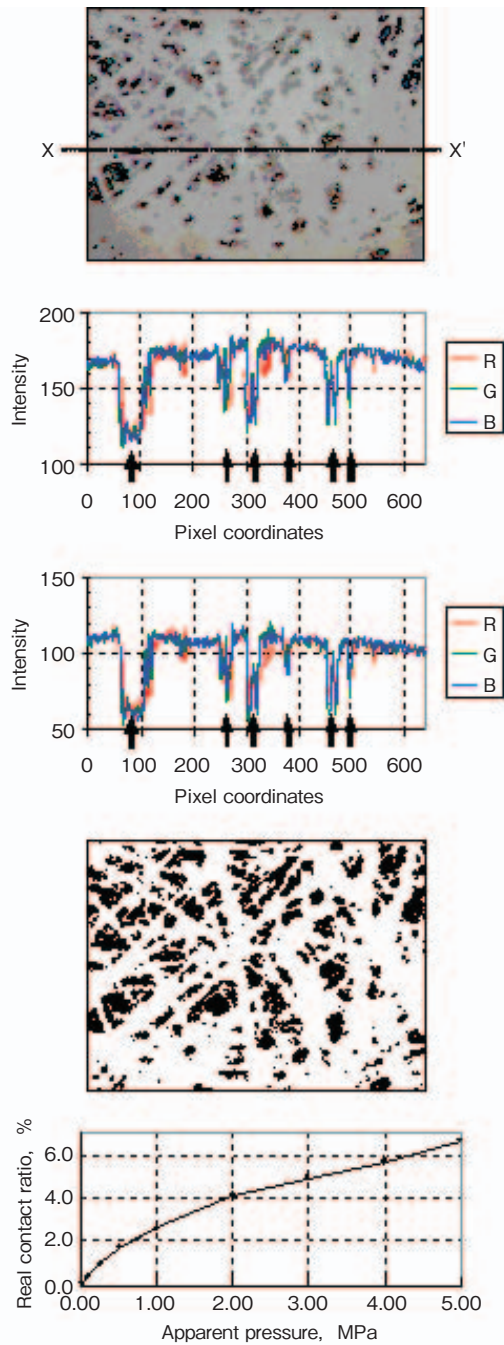


図12 白色干渉法による真実接触面積の測定例

Measurement example of real contact area by white light interferometry

## 5. おわりに

身近には摩擦が表面の凹凸により影響を受けて、人間生活の中で重要な役割を示している例が多い。しかし、機械要素の相対運動面では、凝着の概念に基づく摩擦の影響が極めて大きい。この凝着では固体表面の実際の微小形状を考慮すると、真実接触面積という概念が重要になる。本報がその理解に少しでも役に立てれば幸いである。

## 参考文献

- 1) F. P. Bowden and D. Tabor: The Friction and Lubrication of Solids-Part I, Oxford University Press(1950)223.
- 2) 江口正夫, 武居正彦, 山本隆司: トライボロジスト, vol. 36, no. 7(1991)535.
- 3) 松本堯之: ペトロテック, vol. 11, no. 2(1988)111.
- 4) 曾田範宗: 摩擦と潤滑, 岩波全書 192(1954)33.