超音波法による固体接触面積の測定*

竹内 彰敏^{*1}, 佐藤 光正^{*2}, 小野沢 元久^{*2}
菅原 康則^{*3}, 青木 弘^{*4}

Measurement of Contact Area using ultrasonic Technic

Akitoshi TAKEUCHI^{*5}, Mitsumasa SATOH, Motohisa ONOZAWA,
Yasunori SUGAWARA and Hiroshi AOKI^{*5} Kochi University of Technology, Dept. of Intelligent Mechanical Systems Engineering,
Tosayamada-chou, Kochi, 782 8502 Japan

In order to measure the contact area between mirror surface and regular rough surface with in contact by ultrasonic pulse reflection method, fundamental characteristics were experimentally examined under the stationary conditions. Obtained were that the reflection echo height ratio H from the contacting boundary is dependent not only on the normalized contact area but also on the nondimensional pitch Λ which is the ratio of the pitch of contacting spots to the ultrasonic wavelength. It was also revealed that the relationship between Λ and H can be expressed by a simple equation considering spring stiffness between two solid surfaces. As the reflection echo height not be influenced by the pitch and arrangement of contacting spots in the range of $\Lambda > 1.5$, it is possible to estimate the normalized contact area straightforwardly from H . In the usual case of $\Lambda < 1.5$, it is possible to estimate the normalized contact area with measuring the change in the reflection echo height under several incident wavelengths.

Key Words: Tribology, Ultrasonic Technic, Solid Contact Area, Spring Stiffness, Topography

1. 緒 言

相対運動する 2 面の接触状態の時間変化は、トライボロジーの興味ある課題の一つである。例えば、乾燥状態で運転されるしゅう動面での摩擦や摩耗、摩耗粉の移着・成長には、2 面の接触状態や固体接触面積が深くかかわってくる⁽¹⁾。種々の摩擦・摩耗機構の解明には、固体接触とその面積の時間変化を正確に観測できる方法が必要になってくる。

固体接触面積の測定方法としては、接触電気抵抗法⁽²⁾⁽³⁾、熱抵抗法⁽⁴⁾、着色液を接触部に圧入する方法⁽⁵⁾、光の内部全反射を利用した接触面顕微鏡による方法⁽⁶⁾⁽⁷⁾が上げられる。しかし、近年よく利用されるセラミックスやエンジニアリングプラスチックのような光を通さない材料で、不導体からなるしゅう動面の場合を考えると、これらの方法は必ずしも適当ではな

い。

そのような条件において、静止ならびに運動状態の双方の固体接触面積を測定できる可能性のある測定法の一つに、超音波パルス反射法がある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

超音波法では、接触境界面からの超音波の反射エコー強度、すなわちエコー高さは、固体接触面積に比例するといわれている⁽¹⁰⁾。しかし、実際のエコー高さは、固体接触面積ばかりでなく、接触面の表面粗さやうねり、その方向性、さらには超音波探触子の特性(例えば周波数特性)によっても異なる⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。だが、それら諸因子の影響については現在もなお不明な点が多く、定量的な固体接触面積の測定を行うことは難しい状況にある。

ところで、静止条件の場合は、同じ試験面、同じ超音波探触子により、前もって固体接触面積(接触圧力に比例)とエコー高さの関係を求めておけば、これを固体接触面積の推定に利用できる⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾。しかし、しゅう動面では、摩耗により表面粗さやその方向性が刻々変化するから、校正結果を基にした固体接触面積の推定は極めて難しくなる。

したがって、しゅう動面への適用を考える場合には、上述した各因子が、接触境界面からの超音波の反射エコー高さにどのような影響を及ぼすかを、まず、摩

* 原稿受付 1999 年 1 月 5 日。

^{*1} 正員、高知工科大学工学部 (〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町)。^{*2} 正員、日本大学工学部 (〒963-1165 郡山市田村町徳定字中河原 1)。^{*3} 福島ハイテクプラザ (〒963-0211 郡山市片平町字山神館 7-2)。^{*4} (故)正員、日本大学工学部。

E-mail: taeuchi@mech.kochi-tech.ac.jp

擦・摩耗に伴う表面の変化がない静止条件下で明らかにしておく必要がある。得られた結果は、ボルト等の各種締結面での固体接触面積の測定にも有効に利用できるものと考えられる。

ここでは、二次元の規則粗さ面や等間隔のドリル穴を設けた交差粗さ面をもつアクリル製試験片を用いて、静止した乾燥2面間に周波数の異なる縦波の超音波を入射させ、固体接触部のピッチや方向性ならびに超音波波長の影響を調べた。そして、エコー高さの測定結果を基にした、固体接触面積比推定の可能性について検討した。

2. 実験装置ならびに試験片

実験装置の概略を図1に示す。試験片への荷重の負荷は油圧シリンダによりロードセルを介して行い、接触面積の測定には高粘度の水溶性カプラントを介して支持台下面に取付けた垂直形縦波探触子を用いた。

試験片ならびに支持台の材質はともにアクリル(PMMA)であり、その音響的性質を表1に、表面プロフィールを図2, 3に示す。ここでは、接触点の分布状態が超音波の反射特性に及ぼす影響を調べる目的で、2種類の方向性をもつ試験片を使用した。

一つは、図2に示すように同じ高さの突起が規則的に並び、その稜線が一方方向に連なる二次元規則粗さ面である。試験片は外径 $D=25$ mmの円板であり、初期粗さのもの、それを#1500 エメリ紙上でそれぞれある段階になじませたものを用意した。なじみのランケーションによってできる平坦部は接触面となるが、この面積 A を固体接触面積、それとみかけの接触面積 $A_0(=\pi D^2/4)$ の比 $\alpha=A/A_0$ を固体接触面積比と呼ぶことにする。図2中の表には、粗さピッチ ι 、最大粗さ、そして三次元表面粗さ計により求めた面積比 α の値が示してある。なお、稜線方向でのランケート

面の粗さは、 $Ra=0.08$ μm ($Ry=0.6$ μm)、ろ波最大うねりは、 0.3 $\mu\text{m}/3$ mm 程度、また、突起先端の曲率半径は、試験片 I が約 20 μm 、II が約 30 μm 、III が約 60 μm であった。

使用したもう一つの試験片は、図3に示すように、支持台との接触部が格子状になるようドリル穴を等間隔に設けた試験片(以後交差粗さ試験片とよぶ)である。 α の値は、 0.5 、 0.65 、 0.8 、 0.87 の4種類であり、

Table 1 Acoustic characteristics of PMMA

Sound velocity C , m/s	Density ρ , kg/m ³	Sound impedance $Z = \rho C$, kg/(m ² s)
2670	1200	3.2×10^6

Note: Wavelength $\lambda = C/f$, f : Frequency

Test piece	ι , μm	δ_0 , μm	Normalized contact area α			
I	130	52	0.02*	0.29	0.56	0.85
II	210	110	0.02*	0.22	0.47	0.69
III	460	220	0.02*	0.37	0.59	0.78

*) α in the virgin surface is the value in the case of 1 MPa.

Fig. 2 2-dimensionally regular rough surface

Fig. 1 Test equipment

Relationship of pitch ι to hole diameter d , mm

A/A_0	d	0.2	0.3	0.4	0.5
0.5		0.25	0.38	0.5	0.63
0.65		0.3	0.45	0.6	0.75
0.8		0.4	0.6	0.8	1.0
0.87		0.5	0.75	1.0	1.25

Fig. 3 Checkered pattern regular rough surface

そのときの穴径 d とピッチ t の関係は図3中の表のようになる。また、支持台との接触面の粗さは $Ra \approx 0.05 \mu\text{m}$ 、ろ波最大うねりは約 $0.2 \mu\text{m}/3 \text{ mm}$ 程度である。

使用した垂直形縦波探触子の種類と特性は表2に示してある。なお、探触子から支持台表面までの距離は、接触面に入射する音波がほぼ平面波となるように、近距離音場限界距離より長い 50 mm とした⁽¹⁵⁾。

3. 測定原理ならびに実験方法

図4中に示すように、超音波探触子から送信されたパルス波の一部は固体接触部から透過し、残りは支持台表面で反射して探触子に戻り、第1反射エコーを形成する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

ここでは、超音波のパルス幅や送信エネルギー、接触媒質の影響、また探触子の取付状態、および伝ば経路での音波の拡散や散乱の影響⁽¹⁵⁾を除くために、負荷時の第1反射エコー高さ h と、試験片を接触させない場合の基準反射エコー高さ h_0 との比により定めた、エコー高さ比 $H = h/h_0$ により固体接触面積の測定を行う⁽⁸⁾。

ところで、縦波の超音波は油中を伝ばする。そしてアクリル面間の膜厚が油中波長(例えば 2 MHz の場合は、 $700 \mu\text{m}$)の $1/100$ 程度に薄くなると、薄膜部に入射した超音波はほぼ完全に相手側に透過する⁽¹⁵⁾。ここで、もし試験片と支持台の間が油膜で完全に満たされていたとするならば、縦波では接触面積の推定はおろか接触状態の評価さえ行えないことがある⁽⁸⁾。しかし、トランケート面の微少な粗さ ($Ry \approx 0.6 \mu\text{m}$) だけを埋める程度のごく薄い油膜であれば、超音波はトランケート面だけを通過する。実験では、より正確な固体接触面積比測定のために、支持台の表面にそのような薄い油膜を塗布しているが、非接触部は乾燥状態

のままである。

この状態で試験片に荷重 W を負荷していくと、エコー高さ比 H は図5のように、わずかの荷重で急激に低下し、試験片の平均面圧 $p (= W/A_0)$ が 0.4 MPa 以上では α に応じた一定の値をとる(実験の繰返し性は3%以内であった)。薄い油膜の塗布を行わない場合の H も、図5中に示した $\alpha = 0.85$ の例(破線)のように、 $p = 1 \text{ MPa}$ 程度で塗布面との差がほとんどなくなるが、エコー高さ比で最大 0.03 程度高く現れる。ここでは、トランケート面と支持台が音響的な密着状態にあると判断できる、平均面圧 1 MPa の塗布面でのエコー高さ比 H を採用した。

なお、図5の■印のデータは、初期粗さの試験片を用いた場合の測定結果である。このときの接触面積 A は、突起先端の曲率半径(試験片 I : 約 $20 \mu\text{m}$, II : 約 $30 \mu\text{m}$, III : 約 $60 \mu\text{m}$)と同じ半径をもつ円筒と平面のヘルツ接触として求めた。

4. 固体接触面積比とエコー高さ比

図6は、試験片 I ($t = 0.13 \text{ mm}$) を用いて求めたエコー高さ比 H と固体接触面積比 $\alpha = A/A_0$ の関係を示す。パラメータは反射波の中心周波数 f_c に対するアクリル中での超音波の波長 λ である。

Table 2 Characteristics of probes

Central frequency f_c , MHz	Probe diameter d_p , mm	Wave length in acrylic λ , mm	Limit length of near sound field x_0 , mm
1.64 (2)	10	1.68 (1.38)	18
3.80 (5)	10	0.72 (0.55)	45
6.15 (10)	5	0.46 (0.28)	22

Note: The value in bracket is the nominal central frequency or the wavelength in acrylic.

Fig. 4 Principle of measurement

Fig. 5 Example of measurement (2-dimensionally regular rough surface, Test piece I, $f_c = 1.64 \text{ MHz}$, $\lambda = 1.86 \text{ mm}$)

Fig. 6 Influence of wavelength
(Test piece I, $l = 0.13$ mm)

Fig. 7 Influence of wavelength
(Test piece III, $l = 0.46$ mm)

エコー高さ比 H は α の増加に伴って減少し、密着時 ($\alpha=1$) の値 $H=0$ に近づく。しかし、 α が同じであっても、超音波の波長 λ が違うと H は異なった値を取り、波長が短い高周波の探触子の場合ほど H は高く現われる。図中の破線は直線 $H=(1-\alpha)$ を表しており、 $\lambda=0.72$ mm (5 MHz) での H は破線とほぼ一致している。

ところが、 $l=0.46$ mm と粗さピッチが超音波の波長程度に長い試験片 III では、図 7 に示すように、上述した波長とエコー高さ比の間の規則的な関係は崩れ、逆に波長の長い低周波での H がむしろ高く現れる。また、 $\lambda=0.72$ mm での H は破線よりかなり高い値となっている。

さて、これまで述べたような二次元規則粗さ面にお

Fig. 8 Relationship between Λ and H

いて、突起先端が順次削り取られていくという単純な摩耗過程を考えると、例えば図 6 のような校正曲線を用いてエコー高さ比より固体接触面積を推定できる。しかし、二次元粗さ面であっても実際の摩擦面の粗さは不規則であり、接触部のピッチ l も異なる。また、その摩耗過程では、新たな固体接触点の増加や摩耗粉の移着成長により固体接触部の平均ピッチが変化する。したがって、本測定法をしゅう動面に適用するには、ピッチにあまり影響されずにエコー高さ比と固体接触面積比の関係が一義的に決まる条件を探る必要がある。

ところで、本実験と同じような、細長い帯形平面欠陥を等間隔で平行に並べた面からの音波の反射率は、欠陥のピッチと波長の比に依存する⁽¹⁶⁾。そこで、粗さピッチ l と波長 λ の比で決まる無次元ピッチ $\Lambda = l/\lambda$ を横軸に採り、図 6, 7 の実験結果および試験片 II の実験結果から、固体接触面積比 $\alpha=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ に対するエコー高さ比 H を読み取り、プロットし直した結果を図 8 に示す。なお、試験片 I と III の結果は図 6 と 7 に対応した記号で示し、試験片 II の結果は● ($\lambda=1.68$ mm), ■ ($\lambda=0.72$ mm), ▲ ($\lambda=0.46$ mm) で示した。

一定の α の値に対する H の値は、 $\Lambda=0.3$ 付近に山のあるなだらかな曲線で表される。そして、 Λ が大きくなると、ピッチ l の影響がなくなり、 H は α により一義的に決まるようになる。従来、校正試験片を用いて行われていた、種々の締結部での接触面圧力分布の測定において⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾、エコー高さが面圧に比例する場合としない場合があったが、これにも、測定を行った Λ の領域の違いが影響していたと考えられる。なお、図中の細線ならびに後に示す図 10 中の細線は、第 5 章で述べる 2 面の剛性の影響を考慮した式 (5) による計算結果である。

さて、上述の結果や後述の図10に示す交差粗さ面の結果も併せて考えると、接触部の方向性に関係なく、 Λ の値が1.5程度以上であれば、ほぼ、

$$H=1-\alpha \quad \cdots \cdots (1)$$

の関係が成立すると判断できる。したがって、波長の短い高周波の探触子を使用すれば、エコー高さ比から直ちに接触面の固体接触面積比を推定することができる。ボルト締結面や軟質材との接触を含めた場合、実際の粗さ面における固体接触部のピッチは、数十～数百 μm 程度と考えられるので、上述した $\Lambda=1.5$ での超音波の周波数はこの場合、数十～100 MHzとなる。

しかし、伝ば経路での超音波の散乱減衰が著しいことにより測定可能なビーム路程が短くなることもあり、実際の機械装置への適用を考えると周波数をあまり高くできないのが実状といえる⁽¹⁵⁾。

次に、固体接触部が交差する、図3に示した交差粗さ面の場合を調べてみる。図9は、固体接触面積比 α が0.5と0.87の場合について、ピッチ l によってエコー高さ比 H がどのように変わるかを示したもので

Fig. 9 Example of measurement (Checkered pattern regular rough surface)

Fig. 10 Relationship between Λ and H

ある。この場合も、 H は α だけでは決まらず、ピッチ l によっては波長 λ の影響が逆になる。そこで、図8に倣って、実験結果を無次元ピッチ $\Lambda=l/\lambda$ により整理すると図10のようになる。

固体接触部の方向性が異なるにもかかわらず、二次元規則粗さの場合と同様、 H は α に依存し、一定の α に対するそれらの関係は、 $\Lambda=0.5$ 付近に山のあるなだらかな曲線となる。そして、 $\Lambda>1.5$ の領域でやはり式(1)の関係が成り立つ。

5. 固体接触面積比の簡易推定

さて、図8, 10に示した Λ と H の関係をながめると、それは大きく三つの領域から構成されていることに気付く。つまり、 Λ に伴って H が増加する $\Lambda<0.3\sim0.5$ の領域、 Λ に関係なく α によって H が一義的に決まる $\Lambda>1.5$ の領域、そしてそれらの中間の遷移領域の3領域である。

同質の2物体の接触境界面に垂直に入射する平面波の伝ばを考えた場合、エコー高さ比 H が固体接触面積比 α に比例し、式(1)が成立することは、伊東らにより理論的に指摘されていた⁽¹⁰⁾。しかし、そのためには Λ を大きくとらなければならない、高周波探触子の使用が必要となり、前述のような測定上の難しさが現れる。実用面を考えると、より小さな Λ 、したがって、より低周波の探触子の使用が望ましい。 $\Lambda<0.3\sim0.5$ の領域がそれに当たるが、そこでは、 Λ の減少とともに境界面に入射した超音波の透過率が急増し、同じ固体接触面積比であっても、エコー高さ比は急激に $H=0$ に収束する傾向を示す。

ところで、波長に比べて小さな欠陥が同一平面上に規則的に配列された欠陥群からの反射ならびに透過については、KendallやTaborらの研究⁽¹⁷⁾をはじめ、多くの研究が行われており、その一部がBaikやTompsonらの解説⁽¹⁸⁾にまとめられている。

そして、準静的応力を考慮した場合の、不完全な接合平面からの音波の反射率 R は、本実験のような同じ物質同士の接合では、

$$R = \frac{\pi f Z / k}{\{1 + (\pi f Z / k)^2\}^{0.5}} \quad \cdots \cdots (2)$$

で与えられることがわかっている。式中の f は超音波周波数、 Z は物質の音響インピーダンスである。また、 k は接触面の単位面積当たりのばね剛性であり、例えば、本実験で使用した二次元規則粗さ面の場合は、同一平面上の同じ向きに規則的に配列された帯形の平面欠陥群に対する k に相当し、交差粗さ面では、被測定物を四角柱の集まりと仮定し、各角柱の横断面中央

に、円形の平面欠陥をもつ欠陥群を仮定した場合の k で近似できることが明らかにされている。いずれの場合も k は以下のように表される。

$$k = (E'/\iota)k^* \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $E' = E/(1-\nu^2)$ であり、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。また、 k^* は無次元バネ剛性であり、同じ方向性の面では固体接触面積比により一義的に決まり、材質やピッチ ι の影響は受けない。式(3)を式(2)に代入すると、

$$R = \frac{(\pi CZ/E'k^*)\iota/\lambda}{[1 + \{(\pi CZ/E'k^*)\iota/\lambda\}^2]^{0.5}} \\ = \frac{SA}{\{1 + (SA)^2\}^{0.5}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。なお、 C は物質中の縦波の音速である。したがって、式中の S は材質や粗さの方向性、固体接触面積比 α により決まる定数となり、同一試験片での反射率 R は、超音波の周波数だけに依存して変化することになる。

ここでは、以上の考察ならびに、波長 λ が短くなるとエコー高さ比が非固体接触面積比 $(1-\alpha)$ に漸近することを考慮して、以下に示す実験式で A と H の関

係を記述する(図 11 参照)。

$$H = R - N = R - \alpha(1 - e^{\beta A}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

図 8, 10 中の細線は、各 α でのすべての実験結果に最もフィットするような S と β を選んだ場合の計算結果である。この場合の β は、粗さの方向性や α に関係なく $\beta = -2$ となり、 S は図 12 に示すように α の増加につれて減少する。ここでの S の値には、非接触部の共振⁽¹⁹⁾ や、 $\iota \ll \lambda$ の条件から外れることの影響が含まれており、先の無次元バネ剛性 k^* を基に計算した値とは必ずしも一致しない。しかし、これまでの結果から、 A の小さな領域での反射特性には、2 面のばね剛性が影響していると判断できる。

ところで、式(5)はまた、粗さの方向性や材質の不明な接触面であっても、周波数 f を変化させた場合のエコー高さ比 H の測定結果から、固体接触面積比 α の推定が可能なことを示している。試みに、 $\alpha = 0.2$ の二次元規則粗さ面をもつ $\iota = 0.13, 0.21$ mm の二つの試験片について、 $f = 1.64, 3.8, 6.15$ MHz での H を基に推定した α の値は $0.198 \sim 0.202$ となった。 α の大きな場合を含め、実用的な精度での測定を考えると、より多くの f と H の関係を用いて面積比の推定を行う必要がある。前述した $A = 0.3 \sim 0.5$ で H がピークをもつ原因の究明と併せて、今後の課題である。

6. 結 言

超音波パルス反射法による固体接触面積の測定を目的として、乾燥静止 2 面での超音波の反射特性に及ぼす、接触突起間ピッチや超音波波長、粗さの方向性の影響を調べ、エコー高さ比による固体接触面積比推定の可能性について検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) エコー高さ比 H は固体接触面積比 $\alpha = A/A_0$ だけでは決まらず、固体接触部のピッチや超音波の波長 λ の影響を受ける。

(2) しかし、その比 $A = \iota/\lambda$ を与えると、エコー高さ比 H は固体接触面積比 α によって一義的に決まる。そして、 α をパラメータにとった H と A の関係は $A = 0.3 \sim 0.5$ に山のあるなだらかな曲線となる。

(3) この曲線は、伝ばする超音波の準静的応力の影響を受け、接触面のばね剛性に依存する $A < 0.3 \sim 0.5$ の領域、固体接触部のピッチやその方向性に関係なく $H = (1-\alpha)$ が成立する $A > 1.5$ の領域、そしてその遷移領域からなる。

(4) $A > 1.5$ の領域であれば、エコー高さ比から直接、固体接触面積比が推定できる。

(5) $A < 1.5$ の一般的な測定領域では、周波数の

Fig. 11 Relationship between A and H considering spring stiffness between two solid surfaces

Fig. 12 Estimated result of S

違いによるエコー高さ比の変化を知ることで、準静的応力の効き方を考慮した実験式を基に、固体接触面積比を推定できる可能性がある。

最後に、本研究は平成10年度文部省科学研究費補助金(基盤研究C, 課題番号10650152)による研究の一部として行われたことを付記し、感謝申し上げる。

文 献

- (1) 竹内彰敏・ほか2名, トライボロジスト, **43**-3(1998), 258.
- (2) HOLM, R. Z. *techn. Phys*, **3**(1922), 290.
- (3) 久門輝正, 潤滑, **19**-2(1974), 125.
- (4) WEILLS, N. D. and RYDER, E. A., *Trans. ASME*, **71**(1949), 259.
- (5) 久門輝正, 機論, **35**-272, C(1969), 880.
- (6) 曾田範宗・河野彰夫, 潤滑, **22**(1977), 17.
- (7) 河野彰夫・ほか2名, 応用物理, **53**-8(1984), 733.
- (8) 飯田司・ほか4名, トライボロジスト, **37**-1(1992), 69.
- (9) 竹内彰敏, 超音波 TECHNO, **8**-12(1996), 35.
- (10) 益子正巳・伊東誼, 機論, **34**-257, C(1968), 191.
- (11) GEIGER, M., ほか2名, *Anal. of the CIRP*, **41**-1(1992), 255.
- (12) 原利昭・大石浩彦, 機論, **51**-471, A(1985), 2646.
- (13) 伊東誼, 非破壊検査, **25**-10(1976), 669.
- (14) 水口義久・ほか3名, 機論, **50**-453, A(1984), 953.
- (15) 日本非破壊検査協会(編), 非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験III 1989..., (1995), 45, 6, 46, 日本非破壊検査協会.
- (16) 伊藤毅, 音響工学原論, (1978), 261, コロナ社.
- (17) KENDAL, K. and TABOR, D., *Proc. R. Soc. A.*, **323**(1971), 321.
- (18) BAIK, J. M. and THOMPSON, R. B., *J. Nondestructive Evaluation*, **4**(1984), 177.
- (19) 村上進・渡辺一美, 機論, **59**-562, A(1993), 1482.