

超音波によるゴム摺動時の接触圧力測定

新潟職業能力開発短期大学校

尾 田 雅 文
金 川 明

Ultrasonic Techniques for the Measurement of the Sliding Interfacial Stress between Rubber Specimen and Acril Disk

Masafumi ODA
Akira KANAGAWA

要約 超音波接触圧力測定法は、接触面における真実接触面積の大きさから接触圧力を測定する方法の一つであり、超音波探傷器を用い接触面からの反射波高値を測定することにより接触圧力を評価する。本法は接触面間に圧力センサーを挿入する必要がないことから接触面の状態を損なわずに測定可能であること、並びに摺動時の圧力測定時にセンサーの摩耗を考慮する必要がなく、動的な接触問題においても適用可能である等の特徴を有している。

一方、ゴムの摺動面にはしばしば摺動方向に対して直角にアブレーションパターンと呼ばれる波状模様が現れ、このパターンの間隔は相手面の表面粗さ、ゴムの弾性係数及び負荷の程度等の影響を受けることが知られているものの、その生成機構について未だ充分な解析はなされていない。

本研究では超音波を用い接触域端部の接触圧力測定時における反射波特性の補正方法を提案するとともに、アクリルディスク上をゴム試料が摺動する場合に超音波法を適用し、摺動時の接触圧力挙動を明らかにした。さらに、スティックスリップ現象がアブレーションパターンの生成に影響を及ぼすことを明らかにした。

I 緒言

ゴムの摺動面にはしばしば摺動方向に対して直角にアブレーションパターン⁽¹⁾と呼ばれる波状模様が現れる。このパターンの間隔は相手面の表面粗さ、ゴムの弾性係数及び負荷の程度等の影響を受けることが知られており、生産現場においてはパターンの間隔を求めることによりゴムに作用した負荷の大きさを推定する手段に用いられているようである。これに対し、後藤ら⁽²⁾は車両用ゴムタイヤの表面にしばしば生ずる周期的な異常摩耗痕生成機構の解明のために、回転する粘弾性円盤に接触荷重を与える実験的シミュレーション方法を提案し、さらに材料の動的粘弾性力学挙動に伴う発熱現象とそれにより形成される非一様温度場の影響を考慮した解析を行っている。また、内山ら⁽³⁾は半球状ゴムがガラス円板上を摺動する場合のパターン生成過程を観察し、パターン生成時におけるき裂伸展角度を明らかにするとともに、平均接触圧力とパターン間隔の関係を明確に表した。しかしながら、パターン

の生成機構については従来より多くの研究者により解析がなされているものの、未だ充分解明されてはおらず、また接触圧力の挙動もあまり考慮されていないようである。

一方、接触圧力測定法については従来より種々の方法、例えば測圧ピン法⁽⁴⁾、感圧箔法⁽⁵⁾、表面粗さの変化量から求める方法⁽⁶⁾、圧電セラミクス法⁽⁷⁾及び超音波を利用した方法⁽⁸⁾⁻⁽¹³⁾が提案されている。しかしながら、汎用性を有しかつ正確な測定値が得られる測定方法は見受けられないようである。この中で、超音波による接触圧力測定法は、接触面における真実接触面積の大きさより接触圧力を測定する方法の一つである。すなわち、接触面からの反射超音波のエネルギーに比例する反射波高値を測定することにより、接触圧力を評価する。本法は接触面間に圧力センサーを挿入する必要がないことから接触面の状態を損なわずに測定可能であること、並びに摺動時の圧力測定時にセンサーの摩耗を考慮する必要がなく動的な接触問題においても適用可能である等の特徴を有している。しかしながら、接触域端部の接触圧力測定時における超音波の伝

搬特性等の考慮が未だ充分ではなく、これが測定精度低下の一因となっている。

本研究では、接触域端部の測定時における超音波の反射特性の補正方法を提案するとともに、アブレーションパターンの生成機構を接触圧力の挙動から解明するために、ピンオンディスク型摩耗試験機を用い回転するアクリルディスク上において天然ゴム試料が摺動する場合の接触圧力を超音波法により測定し、これにより得られた接触圧力の変化曲線の解析を行った。その結果、Root Mean Square 値 (以下、R.M.S. 値) の分布と摩耗量の分布に相関が認められたことから、接触圧力の変化がアブレーションパターン形成に関与していることを明らかにした。

II 較正実験

1 測定原理

図1に示すように一般に機械加工された2層平板の接触部は加工時において完全に表面粗さを取り除くことができないことから、真実接触部と空隙部から構成されている。接触面における真実接触面積と接触圧力の関係は、接触部近傍が弾・塑性的な場合にはほぼ比例する⁽¹⁴⁾ことが知られている。超音波による接触圧力測定法では、超音波探傷器を用いて真実接触面積の変化を反射音圧の変化として検出する。一方、接触境界面からの反射波音圧は探触子の傾き並びに接触媒質の厚さ等の影響を受けること、治具等の重量による接触面積の変化が無視し得ないことから、本研究では反射波高値を式(1)で無次元化して、反射波特性値 E_R^* を求め、これにより接触圧力を取り扱う。

$$E_R^* = 1 - \frac{he}{he_0} \dots (1)$$

ここで、 he と he_0 はそれぞれ負荷時と非接触時の第一反射波高値である。なお、 E_R^* の値は無負荷時においては0であり、接触圧力の増加とともに増加するものの、その上限は接触面の粗さや接触する材質の音響インピーダンスにより異なる。

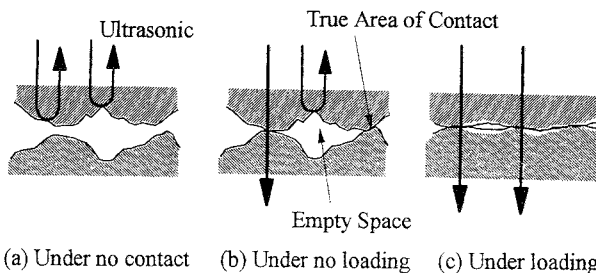
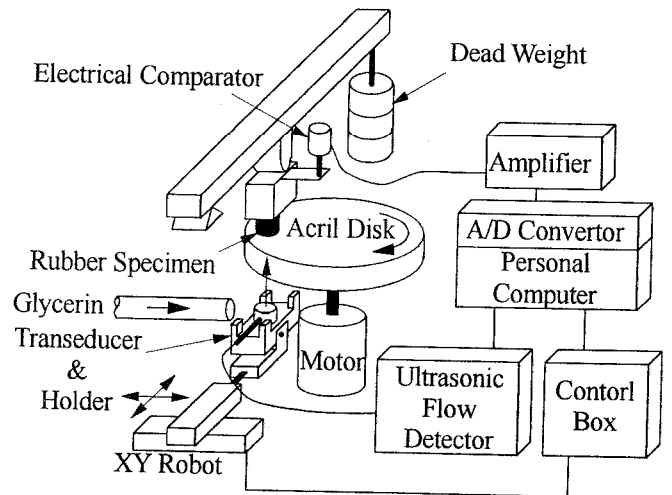


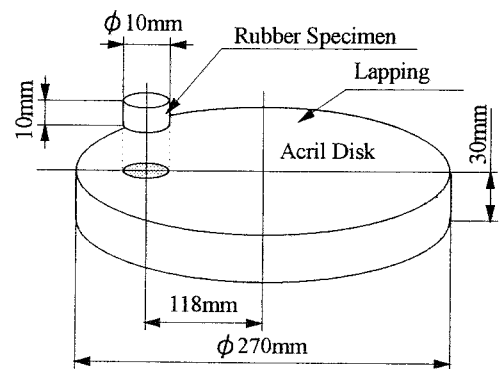
図1 接触境界面における超音波の伝達

2 較正実験方法

清水ら⁽¹³⁾は接触域全面の多数の点で反射波特性値を測定し、各測定点における E_R^* の履歴と接触面に作用している荷重より接触圧力を定量的に評価する逐次較正法を提案している。しかしながら、逐次較正法では測定時において常に接触面に作用する押し付け荷重を把握しなければならず、さらに接触域全面を同時に多数の箇所でも測定する必要がある。本研究の測定対象は摺動時における接触圧力であることから、これらの条件を満たすことは困難である。また、較正実験時と接触圧力測定実験における接触面の状態を等しくすることにより充分精度の高い接触圧力の測定は可能である。よって、予め接触圧力と接触面における超音波反射特性の関係の把握を行う従来の較正方法により、接触圧力を評価する。そこで、図2(a)に示す様にピン



(a) 実験システム



(b) ゴム試料とアクリルディスクの形状

図2 実験装置

オーソニクス型摩擦試験機を用い、大気中・室温で摺動する場合の両者の関係を求めた。図2 (b) に試験片の形状を示す。天然ゴム試験片は直径φ10mm、高さ10mmの円筒形状をしており、さらに接触面における接触圧力分布がなるべく一様になるように角部に面取りを施した。アクリルディスクは直径φ270mm、厚さ30mmである。反射波特性は接触面における表面粗さの影響を受けることからアクリルディスクはラップ加工面を、一方ゴム試験片は射出成形面を初期摺動面とした。表1に両試験片の初期表面粗さを示す。各試験片の接触表面は、実験開始前にエチルアルコールを用いて充分脱脂した。ゴム試験片の接触域中心におけるアクリルディスクとの相対速度を10.79mm/sになるように設定し、ゴム試験片をアクリルディスクの中心より118mmの位置で錘を用いて負荷した。この時のゴム試験片の接触面からの反射波高値を中心周波数5MHz、振動子直径φ6.4mmの垂直型探触子をアクリルディスクの下面の接触領域中心軸上に設置し測定した。なお、超音波探傷器のディスプレイ上に現れる接触面からの反射波高値は、非接触時において100%になるように、ゲインを設定した。また、探触子の摩擦の防止並びに安定した設置状態を得るために四角に突起を有する探触子ホルダーを用いるとともに、探触子とアクリルディスクの間に0.2mmの隙間を設けた。また、探触子が走査面と平行であることを確認した。なお、接触媒質としてグリセリンを用いた。電気マイクロメータを用い定常摩擦に移行したことを確認した後、接触面からの第1反射波高値を超音波探傷機より検出し、パソコンに入力するとともに、データ解析及び記録を行った。

3 較正実験結果

図3に較正実験結果を示す。横軸の公称応力はゴム試験片の接触面圧を一様分布とみなし、荷重をゴム試験片の見かけの接触面積で除した値を示してある。公称応力と反射波特性値 E_R^* の関係は公称応力が0.4MPa以下においてはほぼ直線で与えられるものの、それ以上の公称応力では上に凸の曲線を示す。すなわち、前

表1 ゴム試料とアクリルディスクの表面粗さ

	Roughness(Ra) μm
Acril Disk	0.4
Rubber Specimen	0.77

者においては接触面積と負荷の関係はほぼ比例関係が保たれているものの、後者においては空隙部に存在する空気が残る等の理由により完全に密着せず、徐々に比例関係が保たれなくなることが推測される。また、負荷時及び除荷時においてほぼ同一の履歴過程を示す。

III 接触域端部における反射波特性の補正

1 数値解析法

接触圧力の測定領域における超音波の分布は一様ではなく、図4に示すように半径a、面積Sの円盤が周波数f、速度 U_0 でピストン運動している時、媒質の音速をcとすれば時間tにおいて、遠方の任意の一点(r, θ, ϕ)での音圧 $P(R, \theta)$ は式(2)で示される。⁽¹⁵⁾

$$P(R, \theta) = \frac{2U_0 f S J_1(ka \sin \theta)}{Rka \sin \theta} \sin(\omega t - kR) \dots (2)$$

ここで、波長定数k、並びに角振動数 ω は

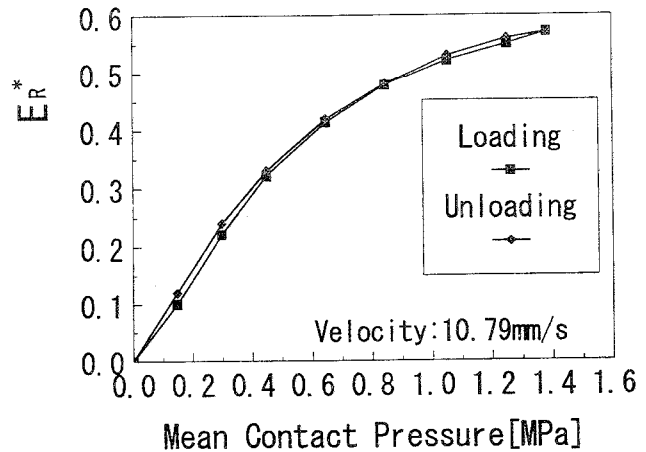


図3 接触圧力-ER*曲線

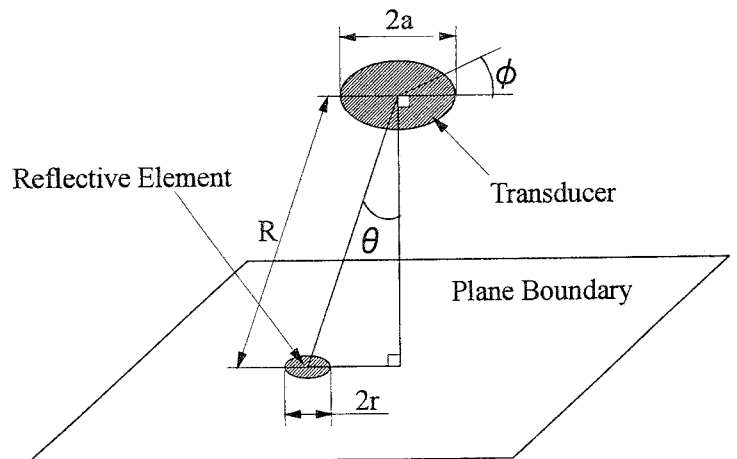


図4 音場解析モデル

$k = \omega / c, \omega = 2\pi f$
 であり、 $J_1(x)$ は第1種Bessel関数を示す。一方、 θ だけ傾いた半径 r の微小円形反射面からの反射指向性係数 $Dr(\theta)$ は式 (3) で示される。⁽¹⁶⁾

$$Dr(\theta) = \cos\theta \frac{2J_1(2kr \sin\theta)}{2kr \sin\theta} \dots (3)$$

よって、ピストン音源から放射された音波が遠方の境界面で反射し再び音源に戻ってくる場合、境界面上の (R, θ, ϕ) に位置する微小円形反射面からの反射波係数 P_r は境界面から全反射音圧を P_A とおけば式 (4) で表され、反射音圧分布が決定される。

$$P_r(R, \theta, \phi) = \frac{P(R, \theta) D_r(\theta)}{P_A} \dots (4)$$

2 実験方法

前述の数値解析法の実用性を評価するために図5に示す装置を用い、比較検討を行った。段部厚さ $T = 30\text{mm}$ の段付きアクリルブロック上面で四角に突起を有するホルダーに固定した垂直型探触子（中心周波数 5MHz 、振動子直径 $\phi 6.4\text{mm}$ ）をロボットにより走査し、この時の 30mm の位置からの反射波高値を測定し、段部からの距離 L と反射波高値の関係を明らかにした。なお、接触媒質にグリセリンを用いるとともに走査に伴う探触子の摩耗を防止するために、探触子は走査面から 0.2mm の位置に固定し、かつ探触子が走査面と水平であることを確認した。反射波の強度は探触子の傾き並びに接触媒質の厚さ等の影響を受けることから式 (5) に示すような反射波高値比 R_h を定義した。

$$R_h = \frac{h}{h_a} \dots (5)$$

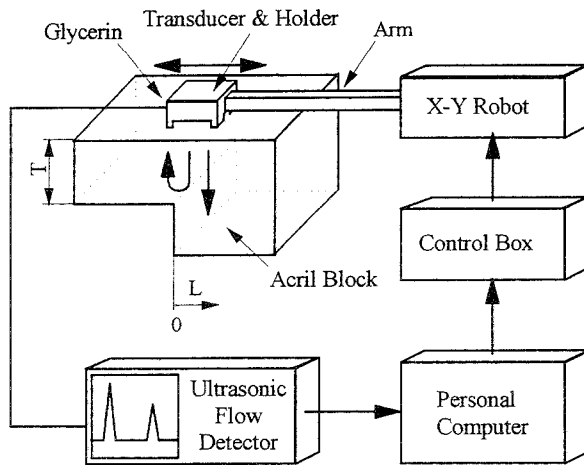


図5 実験装置概略

ここで、 h_a は超音波が段部反射面から全反射する時の反射波高値、 h は測定点 L での反射波高値を示す。一方、式 (4) をもとに求めた反射波高値比は式 (6) で表される。

$$Rhc(L) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^L Pr(x, y, T) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Pr(x, y, T) dx dy} \dots (6)$$

ここで、式 (6) 中の Pr は直角直行座標形で表しており、

$$x = R \sin\theta \cos\phi, \quad y = R \sin\theta \sin\phi \\ z = R \cos\theta = T$$

である。

3 実験結果及び数値計算結果

図6に反射波高値比の数値解析値と実測値を示す。縦軸には R_h 及び Rhc 、横軸には段部から探触子までの距離 L を示す。数値解析結果と実験結果は良く一致することから、本解析法を適用することで接触域端部の反射波強度を求めることが可能である。

4 接触域端部における反射波特性の補正方法

アクリル円盤上に接触するゴム試験片に超音波法を適用するに当たっては、アクリル円盤下面に探触子を設置し、接触圧力を測定する。そこで、接触端部の接触圧力を正確に測定するために、図7に示す超音波到達領域を非接触部 C と接触部 M に分割し、更に接触部 M を音圧分布の重心を通る直線によって領域 A と B に分割して考える。即ち、これらの分割領域から反射する超音波のエネルギーが等しくなるようにアクリル板の厚さを T として次式を利用する。

$$\iint_A Pr(x, y, T) dx dy = \iint_B Pr(x, y, T) dx dy \dots (7)$$

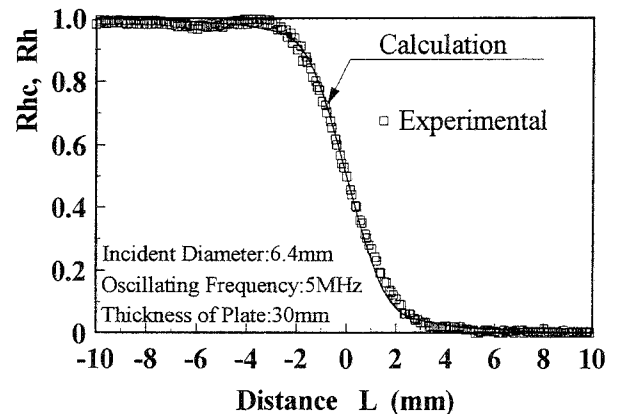


図6 反射波高値比の実験結果及び計算結果

式(7)より探触子中心と音圧分布の重心の半径方向距離 L_c を求め、測定位置の補正を行う。

一方、超音波到達領域 U 内の非接触領域 C から得られる反射波音圧は、接触領域 M における接触圧力の増減に関わらず不変である。即ち、実測可能なエコー高さの変化量 Δhe は、領域 M での反射波音圧の変化を示している。よって、領域 C においても領域 M と同様に反射率が変化し、領域 U の全域で反射率が一樣である場合のエコー高さの変化量 Δhe_U は次式で求めることが出来る。

$$\Delta he_U = \frac{\iint_U Pr(x, y, T) dx dy}{\iint_M Pr(x, y, T) dx dy} \cdot \Delta he \quad \dots (8)$$

接触域端部では Δhe_U を用いて接触圧力を評価する。

IV ゴム摺動時の接触圧力測定

1 測定システム

較正実験と同様にピン-オン-ディスク型摩耗試験機を用いた。摺動速度を 10.79mm/s に設定し、 $\phi 30\text{mm}$ のゴム試験片をアクリルディスク上に中心より 118mm の位置に 254.8N で押しつけた。この状態で、定常摩耗に移行した後に2軸ロボットを用いてホルダーに取り付けた探触子を 1mm 間隔で走査し、接触域全域において反射波高値を測定した。なお、超音波探傷器のディスプレイ上に現れる接触面からのエコー高さは、非接触時において 100% になるようにゲインを設定した。電気マイクロメータを用い定常摩耗に移行したことを確認した後に接触面からの第1反射波高値を超音波探傷器より検出し、パソコンに入力するとともに、データ解析及び記録を行った。アクリルディスク及びゴム試験片の初期接触表面粗さ及びその他の実験方法は較正実験と同様に行った。接触域端部を測定する場合は、接触面における音圧強度分布を考慮し前述の反射波特性値の補正を行い、その値を較正実験結果をもとにして接触圧力値に換算した。

2 実験結果

本研究で設定した摺動条件下においてゴム試験片摺動時にスティックスリップ現象が生じ、図8の走査型電子顕微鏡写真に示すように実験終了後のゴム摺動面にはアブレーションパターンが見受けられた。

図9は実験終了後におけるゴム試験片の形状を3次元測定機を用いて測定することにより求めた摩耗量の分布図である。図中の矢印はゴム試験片の摺動方向を示

しており、円の下端がリーディングエッジ、上端はトレーディングエッジを示している。リーディングエッジにおいて偏摩耗が見受けられる。さらに、接触域中央部で弓曲形状の摩耗量の多い領域が見受けられる。な

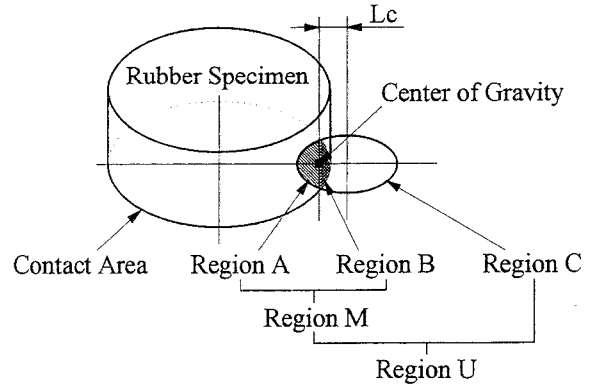


図7 接触域端部における超音波

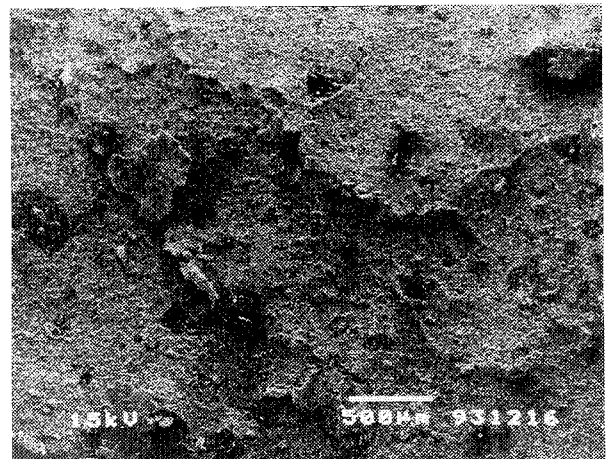


図8 ゴム試験片表面のアブレーションパターン

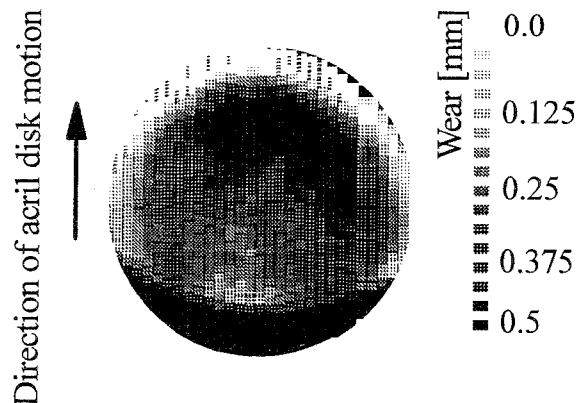


図9 摺動後の摩耗量分布

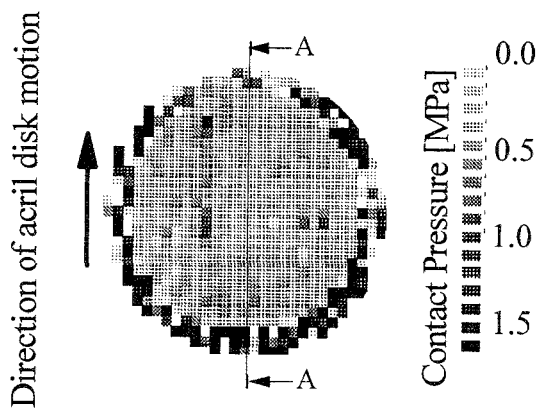


図10 摺動時の接触圧力分布

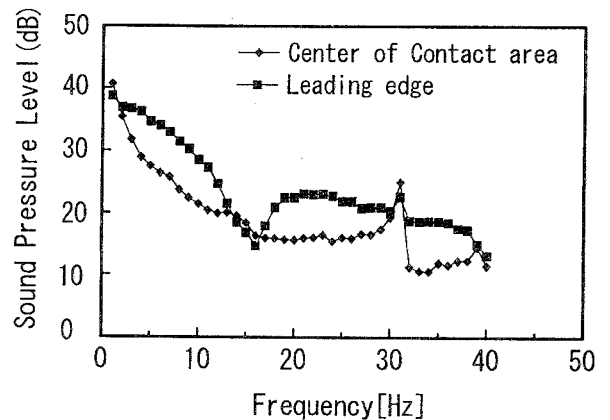


図12 接触圧力変化曲線のスペクトル

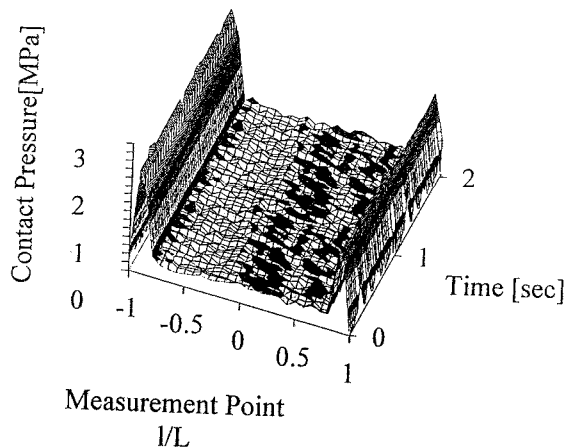


図11 接触圧力の時間変化曲線

お、図8に示したアブレーションパターンの多くはこの弓曲形状領域において観察された。

図10にゴム摺動時における接触圧力分布を示す。接触域端部の中でも特にリーディングエッジ近傍において接触圧力値は大きく、摺動によるモーメントの影響を表している。ゴム試験片の摺動方向中心軸上、すなわち図中AA断面における接触圧力の経時変化を図11に示す。測定位置1を円柱半径Lで除した値で示しており、1.0はトレーディングエッジを-1.0はリーディングエッジを表す。接触域の中央部での接触圧力は端部に比べ小さい値を示すものの、常に0.2MPa程度の振幅で振動していることがわかる。また、 l/L が0から0.7の位置において、接触圧力が0.4から0.6MPaの黒色で示す領域は時間の経過に伴い徐々にリーディングエッジ側に移動していることがわかる。これは、アブレーションパターンの生成及び移動に起因する接触圧

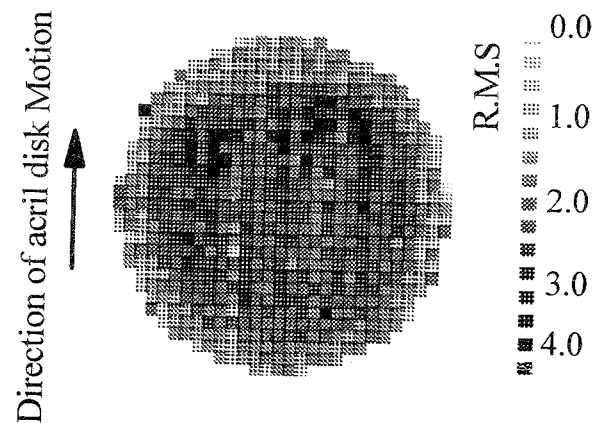


図13 接触圧力のR.M.S値分布

力変化である。

各測定点における接触圧力値の変化曲線をFFT解析し、スペクトルを求めた結果を図12に示す。接触域中央部における接触圧力の変化は30Hz程度にピークを有する。一方、リーディングエッジにおける接触圧力の変化曲線においては15Hz以下の周波数成分が多い。これは前者における接触圧力の変化がスティックスリップ現象に起因する接触圧力増減を生じていることに対し、後者においては摺動に伴う摩耗粉が接触面間を移動する際に生じた接触圧力の変化が支配的であるものと考えられる。

各測定点の接触圧力の変化曲線より求めたR.M.S値の分布を図13に示す。接触域中央部においてR.M.Sが大きな値を示す弓曲形状の領域が存在する。この領域は図9に示す接触域中央部における摩耗量が多い弓曲形状領域とほぼ一致することから、この領域では接触圧力は比較的小さいもののスティックスリップ現象による一時的な接触圧力の増加に起因するアブレーション

パターンの形成が行われるのに対し、接触域端部においては接触圧力が大きいため偏摩耗するものと考えられる。

V 結言

超音波による接触圧力の定量測定法に於いて、接触域端部における反射波特性の補正方法を提案するとともに、天然ゴムがアクリルディスク上を摺動する場合の接触圧力を同方法を用いて測定し、スティックスリップ現象がアブレーションパターン形成に及ぼす影響を調べ、以下に示す知見を得た。

- (1) ゴム摺動時における超音波の反射波特性は低接触圧力時においては接触圧力とほぼ直線関係で与えられる。一方、接触圧力が増加するに従い、上に凸の曲線で与えられる。また、負荷時、除荷時で同じ履歴を示す。
- (2) 接触域端部の接触圧力測定時において、接触領域外に反射超音波の存在領域が存在する。このような場合、本研究で提案する補正法を適用することにより充分精度の高い定量測定が可能である。
- (3) ゴム摺動時における接触圧力の変化曲線は接触域端部と中央部で接触圧力の変化傾向に差が生じていることが判明し、スティックスリップ現象が中央部のアブレーションパターン形成に起因することを明らかにした。

なお、本研究は平成5年度指定研究の助成を受けて実施されたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

[参考文献]

- (1) S.W.Zhang, Mechanisms of rubber abrasion in unsteady state, Rubber Chem. Technol., vol.57,(1984),755-768.
- (2) 後藤・三澤・隆・國尾, 接触負荷を受ける回転粘弾性円板周上の周期的摩耗に関する一考察, 機論, 60-572, A (1994), 1005-1010.
- (3) 内山, ゴムの摩耗とアブレーションパターンの生成過程, 潤滑, 30-7 (1985), 524-531.
- (4) 水口・小泉・渋谷, 測圧ピンによる接触圧力測定法の改良, 非破壊検査, 31-11 (1982), 843-848.
- (5) 池, 感圧箔による接触面圧分布測定, 塑性と加工, 33-383 (1992), 1394-1399.
- (6) 加藤・山口・加藤, 表面粗さ変化による金属接触

面の圧力分布測定法 (第1報, 基礎実験), 機論, 44-381 (1978), 1742-1751.

- (7) 尾田・本・井上・多保田, 圧電セラミックスを用いた接触圧力分布の測定用センサシステムの開発 (測定の多点化と高速化への試み), 機論, 55-513, A (1989), 1230-1235.
- (8) 伊藤・伊東・斉藤, 単一ボルト締結体の締付圧力分布 (二次元 締付圧力分布測定の試作と二, 三の測定結果), 機論, 50-458, C (1984), 1816-1824.
- (9) 伊東・益子, すべり案内面の圧力分布に関する研究 (第2報, 固体接触状態の面圧分布形状), 機論, 36-284 (1970), 639-648.
- (10) 水口・渋谷・小泉, 超音波による結合板間の接触圧力分布に及ぼす平面度の影響評価, 機論, 55-517, A (1989), 2021-2026.
- (11) 水口・渋谷・小泉, 超音波による接触圧力測定法の改良, 機論, 60-571, A (1994), 888-894.
- (12) 原・大石, 超音波による金属パンチと非金属板間の接触圧力測定, 機論, 51-471, A (1985), 2646-2650.
- (13) 清水・岡部・金, 超音波による結合面圧力分布の定量的測定法 - 逐次較正法の提案 -, 機講論, No. 940-10 (IV), 607-609.
- (14) 築添, 表面粗さと面の接触機構について, 潤滑, 13-3 (1968), 101-108.
- (15) 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社 (昭60), p.25.
- (16) 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社 (昭60), p.47.