

# 振動荷重を受ける湿式ペーパー摩擦材の真実接触挙動

服部 泰久\*

## Real Contact Behavior of Paper-Based Wet Friction Material Subjected to Fluctuating Load

by

Yasuhisa HATTORI\*

(Received on Sep. 30, 2018 and accepted on Nov. 8, 2018)

### Abstract

In this study, the dynamic real contact behavior of paper-based wet friction material subjected to fluctuating contact pressure was investigated experimentally, and compared with the material compression behavior. The real contact area was measured by a contact microscope that utilizes the light characteristics of total reflection and polarization. A strobe light source was used to obtain the contact surface image at an arbitrary phase in the contact pressure change cycle. It was observed that in the wet condition, the phase delay of the real contact area to the contact pressure decreased with the exciting frequency and that the tendency was similar to the phase delay of the compressive strain. It was also recognized that in the wet condition, the amplitude ratio of the real contact area to the contact pressure decreased with the frequency in the same manner as the amplitude ratio of the compressive strain. Finally, a model representing the change in the real contact area and compressive strain by the rise in fluid pressure was proposed, which was able to explain the experimental tendencies.

**Keywords:** Paper-based friction material, Real contact area, Dynamic response, Contact microscope, Automatic transmission fluid

## 1. 緒言

ペーパー摩擦材は自動車用自動変速機(AT)の湿式クラッチのフェーシング材として一般的に用いられている材料である。この摩擦材は紙をベースに作られており、繊維が絡み合った柔軟な網目構造を有している。また、自動変速機油(ATF)に浸されて使用され、内部に潤滑油を含んだ状態で動作する。この摩擦材が変動する荷重を受けて撓動するとき、網目構造の圧縮伸長により材料内を潤滑油が流動し接触面から滲入出することによって、潤滑状態に変化を与え摩擦特性に影響しうることは、この材料独特の状況であると考えられる。

接触面における真実接触部は荷重負担と摩擦発現に直結する部分であり、その測定はトライボロジー特性の把握にきわめて重要である。種々の測定法が報告されているが、中でも古くからある接触面顕微鏡は、簡便に接触点分布が光学的に可視化できる方法として実績があり<sup>1,2)</sup>、標準的な方法の位置づけとなっている。

接触面顕微鏡がペーパー摩擦材の真実接触面積測定に応用された報告は多い<sup>3~5)</sup>。また、他の方法<sup>6,7)</sup>を含め、

ペーパー摩擦材は真実接触面積測定の対象として最も関心が持たれている材料であると言える。しかしながら、そこでの注目は荷重依存性<sup>3,6,7)</sup>と撓動によるなじみの影響<sup>4~7)</sup>に限定されており、この材料の独自の状況である荷重変動の影響についての言及は見受けられない。また、材料内部を流動する潤滑油の効果を知るためには潤滑油の有無による比較が必要となるが、ひとつの接触部材料を複数の雰囲気に対して真実接触面積の測定を行った例は、著者の知る限り見られない。

そこで本論文では、湿式ペーパー摩擦材の振動荷重時の摩擦特性変化に強く関わると見られる真実接触面積挙動を実験的に調べ、圧縮ひずみの測定結果と合わせて、そのメカニズムを推定することを目的とする。

## 2. 試料および実験装置

### 2.1 試料および実験装置

Fig. 1 および 2 に試料と実験装置主要部の概略を示す。試料は一般的な材質で厚さ 1.5 mm の未使用ペーパー摩擦材を 5 mm 角に切断し、円筒形の台座に接着して用いる。これをガラス製の相手面に押し当てて振動荷重を与える。荷重は電磁石にかける電流をコントロ

\* 工学部機械工学科准教授

ールすることで任意の周波数で与えることができ、その変化はロードセルでモニタされている。また、このときの試料の変形量を台座の変位を測定することで得ることができる。相手面の上には液体を貯められるようになっており、ここでは試料油には ATF (Automatic Transmission Fluid) を用いる。

## 2.2 接触面の可視化と画像取得

Fig. 3 に真実接触部の可視化原理を示す<sup>1,2)</sup>。ガラス製の相手面を通して接触面に臨界角以上の入射角で光を導入すると、非接触部では全反射が起こるが、接触部では一部吸収が起きるため、両者からの反射光の間

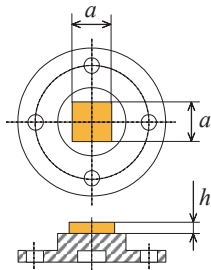


Fig. 1 Test piece.

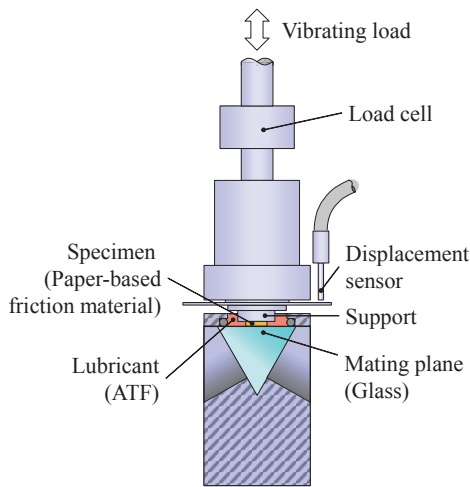


Fig. 2 Experimental apparatus.

に明暗の差が生ずる。それに加えて、接触部からの反射光が直線偏光になるように入射光の偏光状態を調節すると、非接触部からの反射光は位相のずれにより一般にだ円偏光となり (直線偏光とならず)、接触部からの反射光が透過軸を直交させた偏光板で遮断されるのに対して、非接触部からの反射光は偏光板を透過する成分を持つため、明暗の差をより大きくすることができる。

この反射光をビデオカメラで撮影することで、Fig. 4 のような真実接触部が暗部となる接触面画像を得る。ただし、接触部と非接触部の境界は明確ではなく、輝度が連続的に変化する状態となる。そこで真実接触面積の測定は、既定のしきい値に対する明暗によって接触面画像を2値化し、暗部に対応する画素を計数することで行う。また、ストロボ光源を用い、加振周波数に同期し、かつ、荷重変化に対して位相をコントロールして発光させることで、任意の位相での接触状態の画像を得ることができる。

## 3. 実験方法および条件

### 3.1 実験方法

前述の試料および実験装置を用いて、変動する面圧に対する真実接触面積と圧縮ひずみの応答を測定する。

次のように周波数  $f$  で正弦波状に変化する面圧  $p$  を与える。

$$p = p_0 + \Delta p \exp[i(2\pi ft + \phi_p)] \quad (1)$$

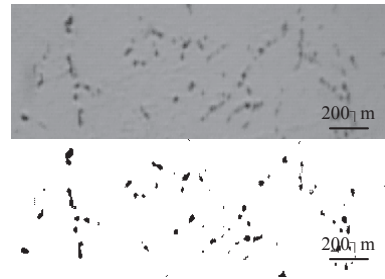


Fig. 4 Sample of captured and binary image.

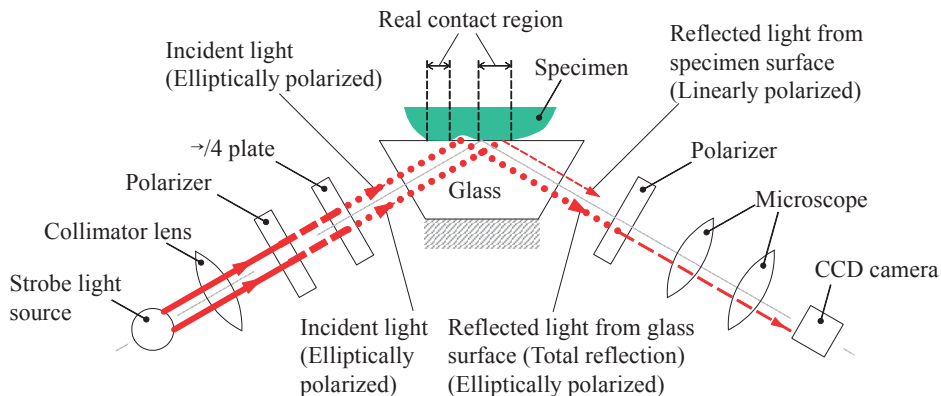


Fig. 3 Principle of visualization of real contact area.

ここで、 $p_0$ 、 $\Delta p$ 、 $\phi_p$  はそれぞれ面圧の平均値、振幅、位相角である。

合わせて、これに応じて起こる真実接触面積  $A_r$  および圧縮ひずみ  $\varepsilon$  を測定する。

$$A_r = A_{r0} + \Delta A_r \exp[i(2\pi ft + \phi_{Ar})] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon \exp[i(2\pi ft + \phi_\varepsilon)] \quad (3)$$

同様に  $A_{r0}$ 、 $\Delta A_r$ 、 $\phi_{Ar}$ 、と、 $\varepsilon_0$ 、 $\Delta \varepsilon$ 、 $\phi_\varepsilon$  は、真実接触面積と圧縮ひずみに関する諸量である。

式(1)、(2)より、面圧  $p$  に対する真実接触面積  $A_r$  の応答が次のように得られる。

$$G = \frac{\Delta A_r / A_{r0}}{\Delta p / p_0} \quad (4a)$$

$$\delta_{A_r} = \phi_{A_r} - \phi_p \quad (4b)$$

$G$ 、 $\delta_{A_r}$  は応答の振幅比、位相差である。真実接触面積は観察する視野における接触点密度に大きく依存するため、振幅応答は予め各振幅を平均値で除して正規化し、正規化振幅比の形で示すことにする。

式(1)、(3)より、圧縮ひずみの応答は次のようになる。

$$J = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p} \quad (5a)$$

$$\delta_\varepsilon = \phi_\varepsilon - \phi_p \quad (5b)$$

この応答はコンプライアンスにあたり、 $J$ 、 $\delta_\varepsilon$  はその振幅、位相角である。

面圧  $p$  と圧縮ひずみ  $\varepsilon$  の測定は、各周波数において 1 サイクルを 32 分割する時間間隔で行う。真実接触面積  $A_r$  については、32 分割した各位相でストロボを発光させて得た接触面画像を全て揃え、2 値化処理をしたのちに変化が得られることとなる。各測定量の平均値、振幅、位相角は、1 サイクル分 (32 点) のデータに正弦波をカーブフィットさせて算出している。

### 3.2 実験条件

Table 1 に実験条件を示す。潤滑油流動の効果を見るため、潤滑油なし (乾) とあり (湿) それぞれの条件で測定を行う。加振周波数  $f$  は 1~10Hz で変化させ、周波数応答を見る。面圧  $p$  は実用条件の範囲である。ここでは真実接触面積の変化  $\Delta A_r$  を大きく得るために、面圧振幅  $\Delta p$  に比較的大きい値 0.3MPa を与えている。

真実接触面積の測定値は、前述の光学系の調整に加えて、光源の強度および 2 値化のしきい値に依存する。ここでは、乾・湿の条件で測定値が等しくなるように、

Table 1 Experimental conditions.

Lubricant condition	Dry, Wet
Excitation frequency $f$ [Hz]	1~10
Mean contact pressure $p_0$ [MPa] (Mean load $N_0$ [N])	0.5 (12.5)
Contact pressure amplitude $\Delta p$ [MPa] (Load amplitude $\Delta N$ [N])	0.3 (7.5)

背景 (非接触部) の輝度を一定にしたうえで、それぞれの場合でしきい値を設定している (Fig. 5)。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 実験結果

Fig. 6 および 7 に結果の周波数応答を示す。各測定点 10 回の測定であるが、真実接触面積に関する測定値、特に位相差のばらつきが大きい。この理由にはストロボの発光あたりの輝度のばらつきと、差の演算による誤差の累積が考えられる。とは言え、代表値は 10 回分のすべてのデータに対してカーブフィットして求めているので、単純な平均処理よりばらつきの影響は小さくなっていると考えている。また、湿の条件でばらつきが大きいのは、Fig. 5 に見られるように接触部・非接触部境界の輝度分布が緩やかであるため、ストロボ光強度のばらつきの影響を受けやすいことが理由と考えられる。ただし、これは確率的なものであるので、統計処理により本来の特徴が得られていると考えている。

位相差については、真実接触面積  $A_r$ 、圧縮ひずみ  $\varepsilon$  とともに、湿の条件で周波数  $f$  の増加にともなって遅れが大きくなっている。これはペーパー摩擦材空隙内に存在する潤滑油の流動によって液体圧力が発生し、材料全体の圧縮変形、ならびに、接触面での固体接触を遅らせているためと考えられる。圧縮ひずみの位相の遅れの方が大きいのは、材料自体の粘弾性のためと想像される。振幅比は、真実接触面積  $A_r$ 、圧縮ひずみ  $\varepsilon$  とともに、湿の条件で周波数の増加にともなって減少が見られる。これは液体圧力発生によって、接触面では固体接触圧力、材料内部では固体部分の負担応力が減少したためと考えられる。

### 4.2 メカニズムの推定

実験結果の傾向は、液体圧力発生という共通の原因を想定することによって、各条件の振動のベクトル図 (Fig. 8) を描いて以下のように説明できる。

真実接触は表面、圧縮ひずみは材料全体の特性であるが、繊維の密度は同程度であり、どちらも繊維の変形が原因となる現象であることから、応力の固液の配分は表面と内部で同等であると仮定し、内部の固体・

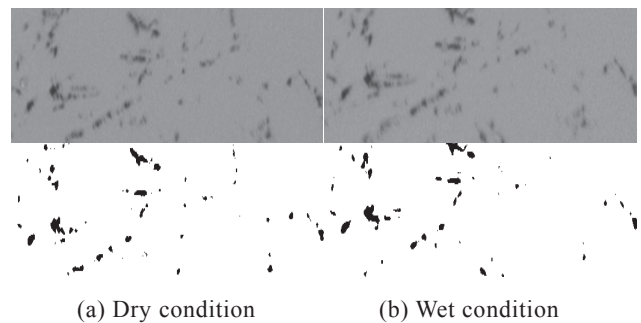


Fig. 5 Captured and binary images under adjusted imaging conditions (Contact pressure  $p = 0.7$ MPa).

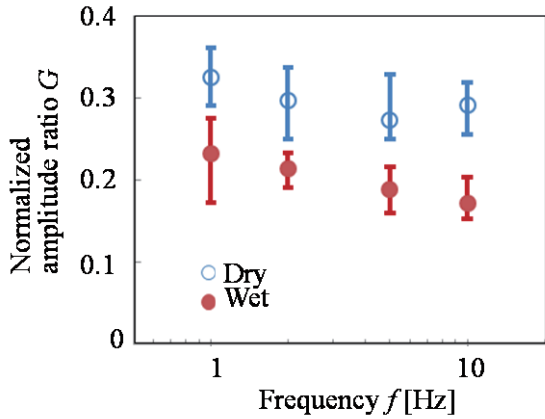
液体応力成分  $\sigma_s$ ,  $\sigma_f$  を表面の固体接触・液体圧力  $p_c$ ,  $p_f$  で置き換えて表す。

乾の条件 (Fig. 8(a)) で, 真実接触面積  $A_r$  は固体接触圧力  $p_c$  に比例する. 圧縮ひずみ  $\varepsilon$  も大きさは固体接触圧力  $p_c$  に比例するが, 材料固有の一定の遅れ  $\delta_\varepsilon$  を持っている. 乾の条件では液体圧力がなく, 固体接触圧力  $p_c$  は外部圧力  $p$  と等しい.

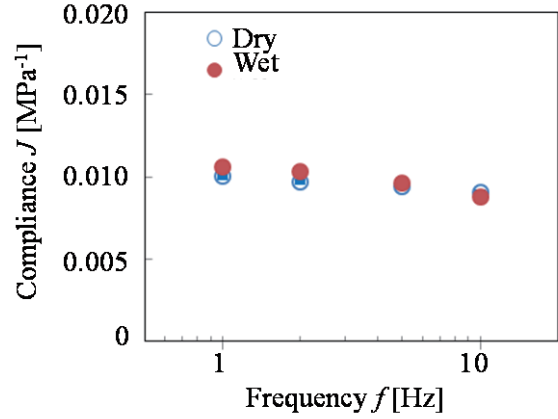
湿の条件 (Fig. 8(b)) では, 構造の変形による液体の流動から液体圧力  $p_f$  が発生する. これは構造の変

形速度に比例し, 固体接触圧力  $p_c$  より  $90^\circ$  進んだ位相を持っているため, 合力が外部圧力  $p$  とバランスを取るため, 固体接触圧力  $p_c$  は外部圧力  $p$  より遅れ, かつ, 大きさも減少する. 真実接触面積  $A_r$  と内部ひずみ  $\varepsilon$  は, 固体接触圧力  $p_c$  の変化の分, どちらも比例的に小さくなり, 同じだけ遅れが大きくなる.

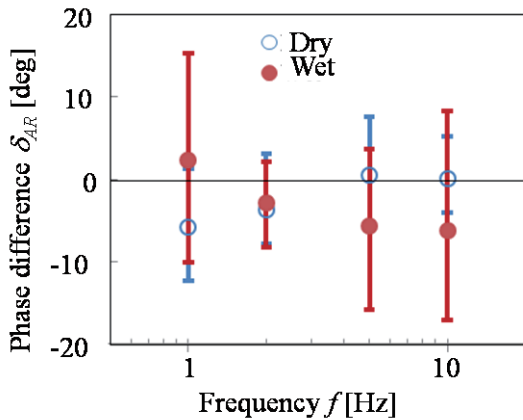
さらに周波数  $f$  が高くなると (Fig. 8(c)), 液体圧力  $p_f$  が大きくなる分, 固体接触圧力  $p_c$  はいっそう大きさが減少し, 遅れが大きくなる. 真実接触面積  $A_r$  と



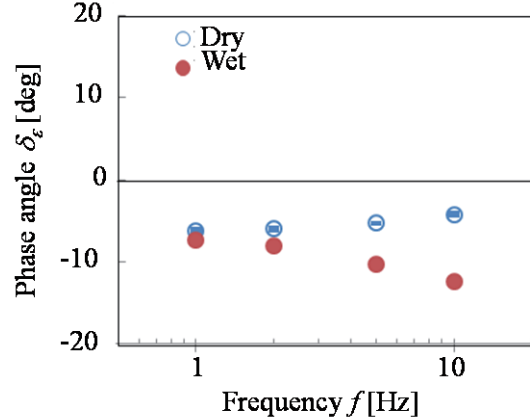
(a) Amplitude ratio



(a) Amplitude ratio



(b) Phase difference



(b) Phase difference

Fig. 6 Frequency response of real contact area.

Fig. 7 Frequency response of compressive strain.

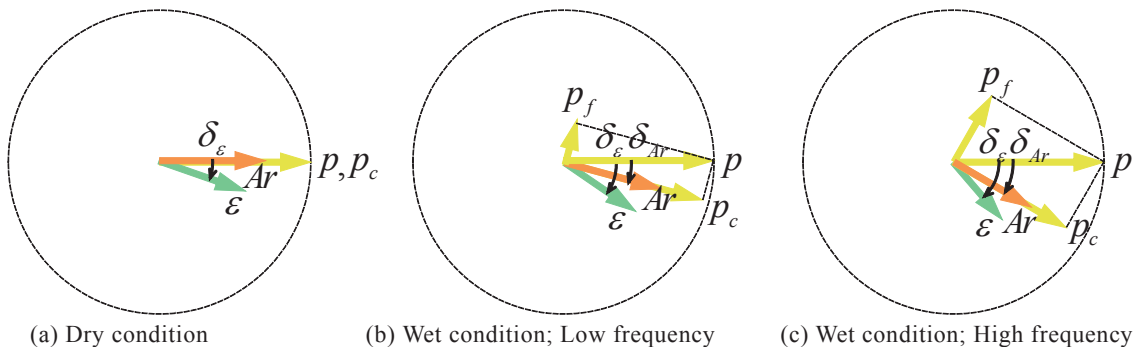


Fig. 8 Mechanism of reduction and delay of real contact area and compressive strain.

内部ひずみ  $\varepsilon$  も同様の变化を受ける。

## 5. 結 言

面圧変動時の湿式ペーパー摩擦材の真実接触面積の変化を測定し、圧縮ひずみの変化と比較したところ、振幅と位相が周波数とともに減少する傾向が同様であったことから、2つの現象は同一の原因から起きていることが推測される。この立場から想定される、液体圧力の発生を共通の原因とするモデルは、振動荷重に対する真実接触面積と圧縮ひずみの変化のメカニズムをひとつとおりに説明することができる。

## 参考文献

- 1) 大谷親・木村好次：湿式ペーパー摩擦材の接触状態の解析，トライボロジスト，Vol. 39, No. 12, pp. 1042-1046 (1994).
- 2) 新田勇・諸橋明，大谷親：PET 薄膜を用いた真実接触面積の分布の測定，トライボロジスト，Vol. 44, No. 2, pp. 128-134 (1999).
- 3) 黄志強，相原了，梅澤栄記，松本堯之：湿式ペーパー摩擦材のなじみ機構に関する研究—接触面の可視化による真実接触面積および表面形状の測定などに基づく検討—，トライボロジスト，Vol. 42, No. 3, pp.233-239 (1997).
- 4) 大谷親・岡田美津雄・木村好次：湿式ペーパー摩擦材の接触特性（第1報）—未使用摩擦材の接触—，トライボロジスト，Vol. 44, No. 11, pp.898-905 (1999).
- 5) 江口正夫：湿式ペーパー摩擦材の真実接触部解析（第1報）—なじみしゅう動の真実接触面積に及ぼす影響—，トライボロジスト，Vol. 57, No. 11, pp. 768-776 (2012).
- 6) 江口正夫：湿式ペーパー摩擦材の真実接触部解析（第2報）—粒子解析と接触モデルに基づく検討—，トライボロジスト，Vol. 58, No. 9, pp.667-675 (2013).
- 7) M. Ingram, H. Spikes, J. Noles, R. Watts: Contact properties of a wet clutch friction material, Tribology International, Vol. 43, pp.815-821 (2010).