

湿式ペーパー摩擦材の動的圧縮特性

服部泰久*1

Dynamic Compression Properties of Paper-Based Wet Friction Material

by

Yasuhisa HATTORI

(Received on Sep. 30, 2002 & accepted on Jan. 17, 2003)

Abstract

The objective of this study is to investigate the dynamic compression properties of paper-based wet friction material experimentally and theoretically. First, the frequency characteristics of storage and loss modulus were measured changing the material size and lubricant viscosity. It was found that under wet conditions the loss modulus increases with frequency compared to that under dry conditions and that the effect is greater for larger material size and for larger lubricant viscosity. Next, the dynamic response of a poroelastic block saturated by viscous fluid which was put between two impermeable rigid planes and subjected to compressive vibration was analyzed theoretically. The experimentally obtained results were accounted for qualitatively in the calculation and the mechanisms of dynamic compression properties were discussed.

Keywords: Dynamic response, Paper-based friction material, Poroelasticity, Compression, Wet clutch

1. 緒言

ペーパー摩擦材は、自動車・建設機械・農業機械などの湿式クラッチあるいは湿式ブレーキのフェーシング材として近年広く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のが特徴である。また、湿式で使用されることが前提となっており、内部に潤滑油を含んだ状態で摺動を受け、動力伝達を行っている。

このような材料が変動する圧縮荷重を受ける場合を考えると、網目構造の変形と潤滑油の流動が相互に影響しながら材料全体の变形が決定されるという複雑な挙動を示すことが容易に想像される。この動的な圧縮挙動が関わっていると考えられる湿式クラッチの実用上の問題として、係合時のショックと、連続すべり時に時折見られる摩擦振動が挙げられる。これらはいずれも操作者に不快感をもたらすような不都合であるため、その対策は必須の条件となっている。

湿式クラッチ係合時のショックは係合終了直前の摩擦係数の増大によるものと考えられており、実際にこの摩擦係数を減ずる対策が講じられる。この摩擦係数の増大は、現段階では単にすべり速度依存性で説明がつけられているが、係合による摩擦材圧縮の進行にともなう固体接触割合の増大もこれに少なからず影響を与えているはずであり、上述の変形と流動の連成現象の寄与が窺われる。Natsumeda¹⁾らは、ペーパー摩擦材の弾性と多孔性を独立に取り扱ったモデルによる混合潤滑解析によって、係合時の摩擦トルク変動のシミュレーションを行った。しかしながら、この例は流体潤滑を主体にした解析であり、また材料の変形と材料内部の潤滑油の流れの相互作用を考えていないため、係合初期の摩擦トルク変化挙動を説明するにとどまっている。

一方、湿式クラッチ連続すべり時の摩擦振動は、摩擦係数(μ)のすべ

り速度(v)依存性(μ - v 特性)の関係曲線が負勾配($d\mu/dv < 0$)となることに起因する自励振動と捉えられ、現段階では μ - v 曲線を正勾配($d\mu/dv > 0$)化することが対策の目標となっている。自動車用自動変速機の専用油であるATFは、こうした観点から添加剤の調合により μ - v 曲線の正勾配化をはかり、自励振動対策が施された潤滑油である。しかしながら、ATF長期使用による性能劣化のため添加剤の防振効果が消失する問題や、自動変速機以外ではATFが使用されないこともあることから、摩擦材側にも有効な対策が望まれる。そのためには、ペーパー摩擦材の材料特性と直接かかわる摩擦振動抑制の効果を把握する必要があるが、経験的にはペーパー摩擦材の柔軟さが関与していることはよく知られているものの、これを系統的に取り扱った研究は少ない。著者ら²⁾は、潤滑油を含むペーパー摩擦材の変形と流動の連成にもとづく粘弾性的な変形特性が、摩擦面に作用する垂直力と摩擦力の関係を変化させ摺動安定性に影響を及ぼす可能性を示したが、その中で変形特性には特定のモデルが仮定されているに過ぎず、その発現を現象的に確認していない。

以上のように、ペーパー摩擦材の変形と材料内部の潤滑油の流動の連成現象の把握、すなわち、多孔質弾性体としての変形挙動の把握が求められている。Ting³⁾は、多孔質弾性を有する摩擦材に圧縮荷重を与えたときの準静的な変形挙動について、理論・実験の両面から研究を行った。湿式ペーパー摩擦材の動的な圧縮挙動については理論的にも実験的にもTingの解析とは違った取り扱いが必要となるが、このような視点の研究は著者の知る限り他に見られない。

そこで、本論文では、湿式ペーパー摩擦材の動的な圧縮によって、ペーパー摩擦材の弾性と多孔性からだけでは説明できない変形特性が実際に起こることを実験的に確認し、その特性が多孔質弾性で表現可能であることを示す。具体的には、動的圧縮特性に大きく影響すると考えられる因子として摩擦材寸法と潤滑油粘度に注目し、これらをパラメータとして圧縮振動荷重に対する変形応答を測定し、そ

*1 工学部機械工学科講師

の変化を多孔質弾性理論によって説明を試みることから、この材料の変形メカニズムを明らかにする。

2. 動的圧縮特性の測定

2.1 測定理論

潤滑油を含んだペーパー摩擦材の動的圧縮特性は動的粘弾性として捉えられる。すなわち、試料に次の微小変動圧力 p

$$p = p_0 + \Delta p e^{i 2\pi f t} \quad (1)$$

を作用させたときに発生する圧縮ひずみ ε を

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon e^{i 2\pi f t} \quad (2)$$

とすれば、複素弾性率 E は

$$E = E' + iE'' = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

で与えられ、その実部、虚部から、それぞれ、貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' が得られる。従って、実験により、 p および ε の変動の波形を測定すれば、両者の振幅比と位相遅れから E' および E'' を算出することができる。動的圧縮特性は振動周波数 f に依存するため、 E' および E'' は一般に f の関数となる。

2.2 試料および実験装置

本実験では、ペーパー摩擦材には自動車用自動変速機にも用いられる標準的な材料のものを用いる (表1参照)。ペーパー摩擦材は、実用では厚さ0.5mm程度のものがよく使われ、これがリング状のスチールプレートあるいはスチールバンドの表面に接着された形の機械要素としてクラッチやブレーキに組み込まれる。ここでは、特に実用品の形状

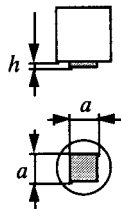


Fig. 1 Shape of specimen

Table 1 Properties of paper-based friction material specimens

Paper-based friction material specimen	A3	A5	B3	B5	B7
Thickness h [mm]	0.5	0.5	1.5	1.5	1.5
Dimension of square surface a [mm]	3	5	3	5	7
Porosity α	0.55				
Darcy's permeability β [$\times 10^{-12}$ m ²]	1.0				
Density ρ_s [kg/m ³]	1550				

Table 2 Properties of lubricants

Lubricant	Base oil for ATF	Kerosene
Density ρ_l (@25°C) [kg/m ³]	850	800
Viscosity η_l (@25°C) [Pa·s]	56	1.0
Bulk modulus K_f [GPa]	2	2

にとらわれず、ペーパー摩擦材の寸法を実験のパラメータとして捉え、表1に示すとおり2種類の厚さのものを3種類の正方形に切り出して計5種類の試料とした。これらの試料は、図1に示すように、直径10mmの鋼製の円筒形圧子端面に接着して実験に供した。接着剤はエポキシ系の流動性の低いものを使用した。また、これを圧子端面にできるだけ薄くのばして使うことによって接着剤層の厚さはせいぜい30 μ mと見積もられ、ペーパー摩擦材表面粗さの最大高さ R_q と同程度であることから、接着剤浸透の影響はほとんどないと考えている。

表2に実験で使用した潤滑油の特性を示す。潤滑油粘度をパラメータとするため、ATF用のベースオイルと市販の灯油の2種類の液体を用いた。ATFはベースオイルに対してさほど粘度の違いはなく、せいぜい10%増であるので、添加剤を含まないベースオイルを試料として採用し、ATFは特に取り上げなかった。

図2に実験装置主要部を示す。平行板ばね (図示略) によって上下方向にのみ並進可能なロッドの先端に上述の試料を取り付け、これを固定されたアンビルに接触させた後、電磁力により正弦波状の振動荷重を与える。このときの荷重はアンビル下部のロードセルでモニタしている。試料の厚さ変動はロッドとアンビルの相対変位を光ファイバ変位計によって測定することで得られる。荷重と厚さ変動は時間差なく連続測定され、その波形はコンピュータに記録される。なお、アンビルには油槽を取り付けられるようになっており、潤滑油を使う場合には、ペーパー摩擦材試料が完全に液面下になるような油量で実験を行う。

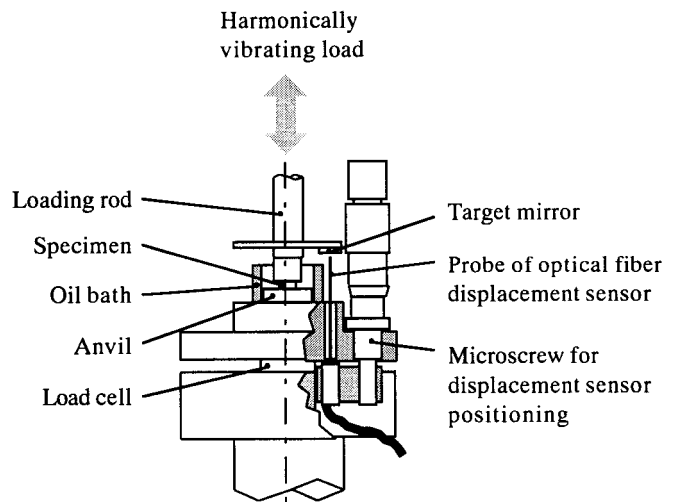


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 3 Loading conditions

Mean pressure p_0 [MPa]	0.5
Pressure amplitude $ \Delta p $ [MPa]	0.1
Frequency f [Hz]	1.0 - 50

Table 4 Lubricant conditions

Condition	Dry	Wet	
Lubricant	(No lubricant)	Base oil for ATF	Kerosene

2.3 実験条件および実験結果

表3は実験を行った荷重条件である。平均面圧 p_0 は自動変速機クラッチで使用される面圧と同程度である。面圧変動 Δp は比較的小さく取っており、この変動範囲では変形は線形的であるとみなすことができる。周波数範囲は、自動変速機クラッチ摺動時に摩擦振動が比較的良好に見られる周波数を参考に決定した。

また、表4は潤滑油の条件である。すべての試料は、ATF用の

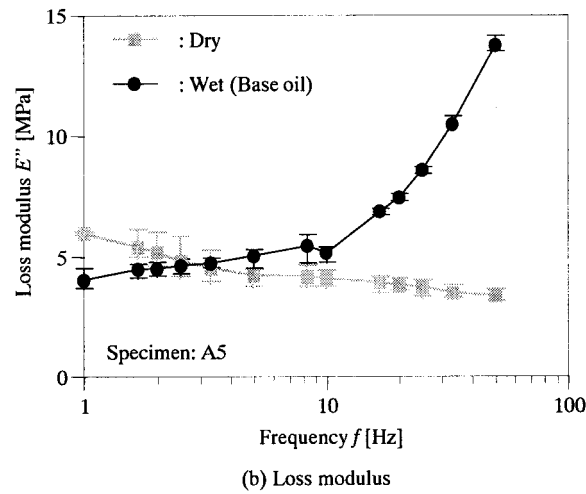
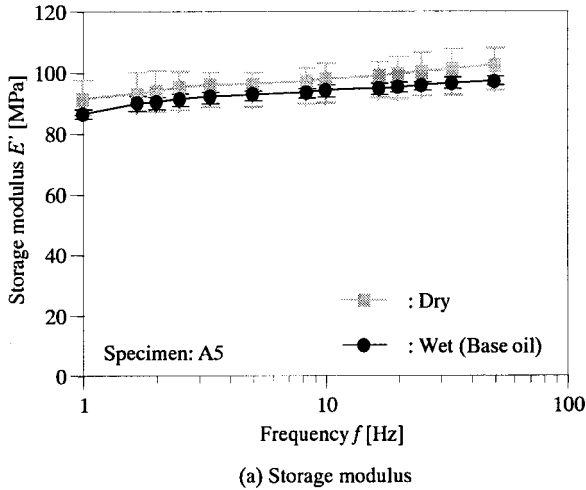


Fig. 3 Frequency response of storage and loss modulus

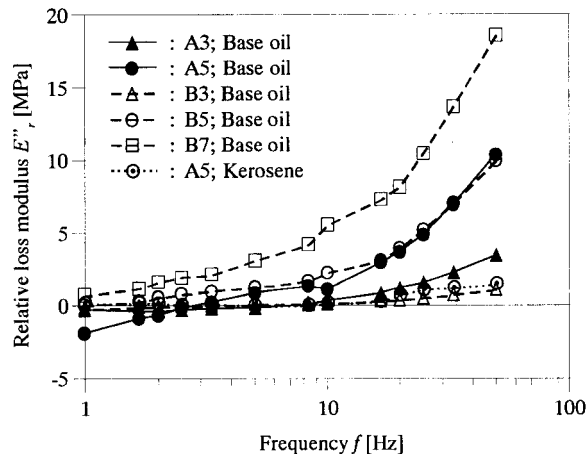


Fig. 4 Measured relative loss modulus

ベースオイルあるいは市販の灯油を用いた場合（湿）の他に、ペーパー摩擦材単独の変形応答を参照するため潤滑油なし（乾）についても測定を行った。

図3(a),(b)は試料A5の場合の測定例である。貯蔵弾性率 E' は周波数に対して若干増加する傾向であり、潤滑油の有無（乾・湿）によって大きな違いは見られなかった。一方、損失弾性率 E'' は、乾の場合(E''_d)は周波数に伴って若干減少するのに対して、湿の場合(E''_w)は急増するような傾向を示した。ここでその差はペーパー摩擦材自体の変形特性の影響を排除した潤滑油存在による効果のみを表していると考えられるため、相対損失弾性率 $E''_r = E''_w - E''_d$ を定義して、これに注目することにする。図4は、各試料についての相対損失弾性率 E''_r の比較である。いずれの場合にも E''_r は周波数とともに増大し、潤滑油の流動の影響が現れているのがわかる。また、その程度は試料の接触面寸法が大きいものほど大きく、粘度が低い灯油では小さく、試料の厚さにはあまり依存しないという傾向が得られた。

3. 多孔質弾性理論に基づく動的粘弾性解析

前章で得られた実験結果を説明し、湿式ペーパー摩擦材の動的圧縮変形のメカニズムを調べるために、潤滑油を含んだペーパー摩擦材を、粘性流体で満たされた多孔質弾性体でモデル化して動的粘弾性解析を行う。

図5に示すように、2次元のブロック状の多孔質弾性体が平行な剛平面に挟まれて圧縮振動を受けるモデルについて考える。多孔質弾性体の動的な変形応答はBiotによって定式化されている^{(4),(5)}。今、材料の厚さが小さいため慣性力の効果を無視すると、支配方程式は次のようになる。

$$G\nabla^2 \mathbf{u} + (\Lambda + G)\text{grad} e_s - \text{grad} p_f = 0 \quad (4)$$

$$\alpha \text{grad} p_f = \frac{\eta_f \alpha^2}{\beta} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} - \mathbf{U}) \quad (5)$$

$$p_f = -K_f \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} e_s + e_f \right) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{u} (= (u, w))$ と $\mathbf{U} (= (U, W))$ はそれぞれ、固体部分、液体部分の変位、 $e_s (= \text{div} \mathbf{u})$ と $e_f (= \text{div} \mathbf{U})$ はそれぞれの体積ひずみ、 p_f は液体の圧力、 G と Λ は固体構造のLameの弾性係数、 α と β はそれぞれ、多孔質体の空隙率とDarcyの透過係数、 K_f と η_f はそれぞれ、液体の体積弾性率と粘度を表す。

式(4)および(5)は、流動抵抗による固体部分と液体部分の相互作用を考慮した力の釣合を、式(6)は連続性の関係を示している。いま、式(5)の発散をとって式(6)へ代入し、 e_f を消去すると次式を得る。

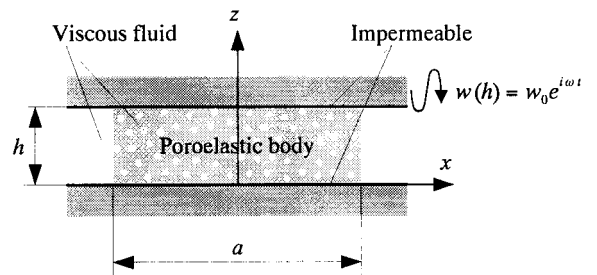


Fig. 5 Analytical model of paper-based friction material containing lubricant

$$\nabla^2 p_f = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{b}{\alpha^2} e_s + \frac{b}{\alpha K_f} p_f \right) \quad (7)$$

簡単のため、材料各所で厚さ方向の圧縮ひずみは均一であり、せん断ひずみは無視できる、という2つの仮定を設ける。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

これらより式(4)および(7)は次のように簡潔な形になる。

$$D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial p_f}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_f}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 p_f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{b}{\alpha^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{b}{\alpha K_f} p_f \right) \quad (12)$$

ただし、

$$D = \Lambda + 2G \quad (13)$$

この問題の境界条件は以下のように与えられる。

$$\left. \frac{\partial p_f}{\partial z} \right|_{z=0,h} = 0 \quad (14)$$

$$p_f \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}} = 0 \quad (15)$$

$$\sigma'_{xx} \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}} = [2G \varepsilon_{xx} + \Lambda e_s - p_f]_{x=\pm \frac{a}{2}} = 0 \quad (16)$$

ここで σ'_{xx} は固体・液体両成分からなる全引張応力である。式(8),(10),(15),(16)を用いて式(12)から $\partial u / \partial x$ を消去すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 p_f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k_0 \frac{\partial w}{\partial z} + k_1 p_f \right) \quad (17)$$

ただし、

$$k_0 = \frac{2Gb}{\alpha^2 D} \quad (18)$$

$$k_1 = \frac{b}{\alpha} \left(\frac{1}{\alpha D} + \frac{1}{K_f} \right) \quad (19)$$

境界条件(14)は式(11)によって自動的に満たされる。

材料上面に次の振動変位

$$w(h) = w_0 e^{i\omega t} \quad (20)$$

を与える場合を考えると、式(8)および(17)からなる連立方程式は、境界条件(15)と対称性を利用して、次のように解析的に解くことができる。

$$w = \frac{w_0}{h} z e^{i\omega t} \quad (21)$$

$$p_f = \frac{k_0 w_0}{k_1 h} \left(\frac{\cosh(\kappa x)}{\cosh(\kappa a/2)} - 1 \right) e^{i\omega t} \quad (22)$$

ただし、

$$\kappa(\omega) = (1+i) \sqrt{\frac{\omega k_1}{2}} \quad (23)$$

材料上面に働く垂直力 F は、全引張応力 σ'_{zz} を接触面全体にわたって積分することによって次のように得られる。

$$\sigma'_{zz} = 2G \varepsilon_{zz} + \Lambda e_s - p_f \quad (24)$$

$$F = \int_A \sigma'_{zz} \Big|_{z=h} dA \quad (25)$$

これより、圧縮振動に対する複素弾性率 E は次のような形となる。

$$E(\omega) = \frac{Fh}{Aw \Big|_{z=h}} = \frac{4G(D-G)}{D} + \frac{2k_0 G}{k_1 D} \left(1 - \frac{\tanh(\kappa a/2)}{\kappa a/2} \right) \quad (26)$$

4. 計算結果および考察

表5に計算に用いた数値を示す。ペーパー摩擦材の圧縮はおもに気孔体積の減少によって起こり、ポアソン比が小さいと思われるため、Lameの弾性係数 Λ は0と仮定した。せん断弾性係数 G は、測定した貯蔵弾性率 E' から見積もった。

図6に計算した相対損失弾性率 E''_r の周波数特性を示す。周波数とともに増加する特性が、試料の接触面寸法が大きいものほど大きく、また、潤滑油粘度が低い場合は小さいという実験結果の傾向をよく表している。なお、前章のモデルでは厚さ方向

Table 5 Parameters for calculation

Paper-based friction material	
Shear modulus G [MPa]	48
Lame's modulus Λ [MPa]	0
Darcy's permeability β [$\times 10^{-12} \text{ m}^2$]	1.0
Porosity α	0.55
Lubricant	
Viscosity η_f [mPa·s]	56 (Base oil) 1.0 (Kerosene)
Bulk modulus K_f [GPa]	2

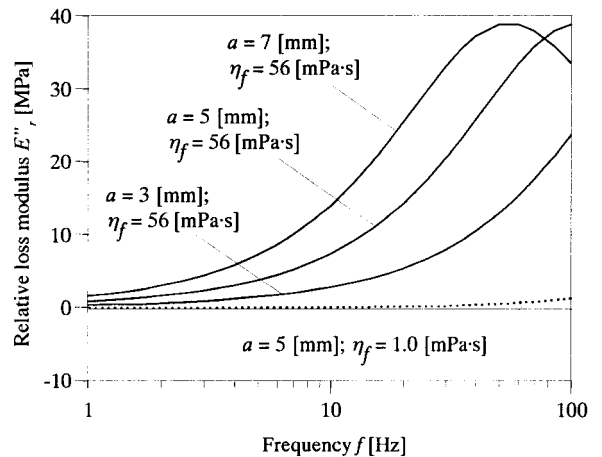


Fig. 6 Calculated relative loss modulus

の圧縮ひずみを均一としているため、厚さの影響は考慮できないが、実験結果の傾向とは矛盾しない。

図7は多孔質弾性体モデルが実験と同じ変動圧力 $|\Delta p| = 0.1$ MPaを受ける場合の液体圧力 p_f の振幅と位相のそれぞれの分布を示したものである。位相は付加圧力 Δp の変動を基準に取っている。図より、圧力振幅は相対損失弾性率 E'' が大きくなる条件ほど大きな値を示しており、液体圧力の発生が相対損失弾性率 E'' の増加の原因となっていることがわかる。周波数が大きいほど圧力発生が大きいのは、液体の流速が大きくなり流動抵抗が大きくなるためである。ただし、流動抵抗が大きくなると、逆に流動が妨げられることによって液体が滞留し、これが直接圧縮を受けることによって圧力を発生するというメカニズムも起こってくる。これは液体圧力の位相が、周波数の増加とともに $\pi/2$ （流動による圧力発生）から0（直接圧縮による圧力

発生）にシフトしていることから判断される。また、多孔質弾性体の幅が大きいものほど、同じ加振条件でも大きな圧力分布が現れている。これは、幅が大きいほど材料から出入りする流量が大きくなり流入速度も大きいため端部での圧力勾配が大きくなることに加え、端部から中央までの距離が大きいためピーク圧力が大きくなるためと考えられる。粘度が小さい灯油の場合は、ベースオイルに比較して流動抵抗が小さく液体が流れやすくなっているため、圧力発生も小さい。これは、液体圧力の位相がほぼ $\pi/2$ に近いことから確認できる。

5. 結 言

湿式ペーパー摩擦材の圧縮振動荷重に対する変形の周波数応答を、摩擦材の寸法および潤滑油粘度を変化させて測定し、動的粘弾性を潤滑油の有無について比較した。その結果、潤滑油の存在により、損失弾性率は周波数とともに相対的に大きくなる傾向にあり、接触面の寸法が大きいほど、あるいは、潤滑油の粘度が高いほど、その傾向が大きいことがわかった。

次に、平行剛平面間に挟まれて圧縮振動を受ける2次元の多孔質弾性ブロックの変形-流動挙動を、慣性を無視した多孔質弾性理論を用いて解析した。その結果は、実験結果に及ぼす摩擦材寸法と潤滑油の影響をよく表し、動的圧縮変形のメカニズムを説明できた。

以上のことより、湿式ペーパー摩擦材の動的圧縮変形を多孔質弾性モデルで表現することの妥当性が確かめられた。

参考文献

- 1) S. Natsumeda and T. Miyoshi, Numerical Simulation of Engagement of Paper Based Wet Clutch Facing, *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, **116**, 2 (1994) 232.
- 2) Y. Hattori and T. Kato, Theory of Frictional Vibration in Wet Clutches Considering Poroelastic Properties of Paper-Based Facing, *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, **118**, 3 (1995) 520.
- 3) L. L. Ting, Engagement Behavior of Lubricated Porous Annular Disks, *Wear*, **34** (1975) 159.
- 4) M. A. Biot, Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 2 (1956) 168.
- 5) M. A. Biot and D. G. Willis, The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, **24** (1957) 594.

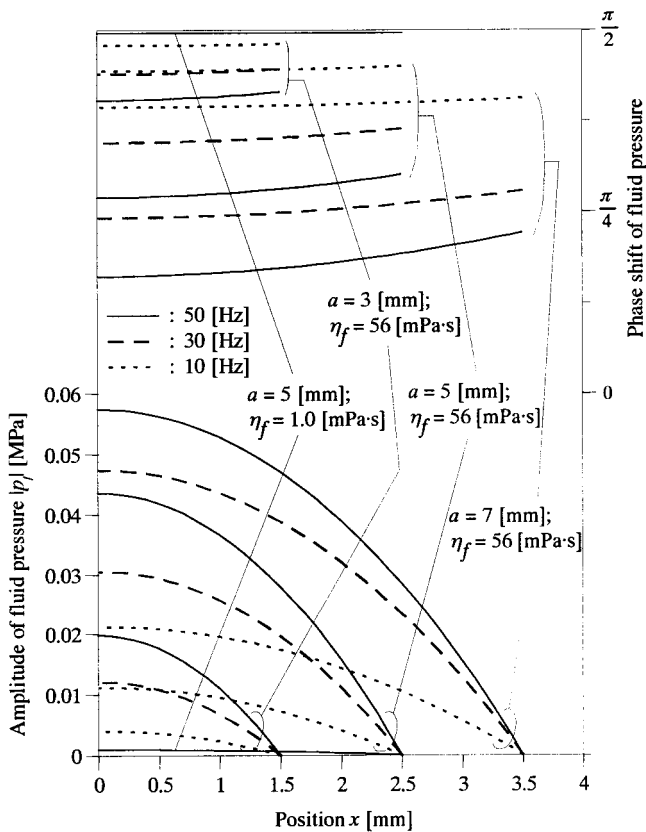


Fig. 7 Amplitude and phase shift of fluid pressure