ディスクブレーキパッドのスティックスリップ運動*

井 上 光 弘^{*1}

The Stick-Slip Motion of Disc Brake Pads

Mitsuhiro INOUE

In order to examine the brake noise occurring at very low speeds, disc brake pads were connected with coil springs, and the stick-slip motion at a low friction speed was measured. The stick-slip motion was relatively prompted with steel fibers contained in the pad material. The addition of graphite to the pads and the lubrication of the frictional surface with water or castor oil increased the amplitude of the stick-slip motion. On the other hand, the formation of the transferred films on the opposite surfaces and the addition of cashew nut resin to the pads decreased the amplitude of the stick-slip motion. These results were explained by using the friction model of the disc brake pad. Moreover, the amplitude of the stick-slip motion and the brake noise level were compared.

Key Words: Friction, Automobile, Disc Brake Pad, Brake Noise, Stick-Slip Motion

1. ま え が き

最近、自動変速機の普及に伴って、停車中にディスクブレーキのブレーキノイズが発生し、その低減や発生防止が望まれている。このブレーキノイズは自動変速機装着車のクリーピングを押えるためにブレーキを踏んでいるときや、坂道で停止しているときのように、ブレーキディスクにトルクが加わった状態で停止したのち、極めて遅いすべり速度で動くとき発生する。このブレーキノイズは100~200 Hz前後で俗にグー音⁽¹⁾とも称され、アスベスト規制に対処するために、ステール繊維、黒鉛やフェノール樹脂を主体とするセミメタリック系のディスクブレーキパッドが採用されるに従い顕著になってきた。

ところで、すべり速度が極めて遅く、すべり面の一方がある程度の弾性自由度をもっているならば、運動は連続にならず、間欠的となりスティックスリップ運動が生じる。したがって、極めて遅いすべり速度で発生するブレーキノイズは、ディスクブレーキパッドのスティックスリップ運動と関係するのではないかと

考えた。

そこで、各種のディスクブレーキパッドを弾性自由度を与えて支持し、低速度ですべらせたときのスティックスリップ運動を測定した。この測定結果を説明するため、ディスクブレーキパッドの摩擦モデルを考え、スティックスリップ運動の発現機構について考察することにした。また、スティックスリップ運動と実車試験でのブレーキノイズの関連性についても検討することにした。

2. 実 験 方 法

2・1 試験装置 ディスクブレーキパッドのスティックスリップ運動は、図1に示す装置を油圧サーボ式疲労試験機に取付けて測定した。コイルバネのバネ定数は1.18 MN/mであり、試験機の剛性の影響を受けず、試験速度域でスティックスリップ運動が発生する値とした。また相手材と連結棒付チャックの質量は4.39 kgであり、スティックスリップ運動と共振しないようにした。相手材はブレーキディスク材と同じFC 25を用いた。テストピースの押付力は、二つのエアシリンダの空気圧で調節した。

2・2 試験方法 ディスクブレーキパッドから切り取った20 mm×20 mmのテストピースを、JIS

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年11月9日。

^{*1} 正員、日立化成工業(株)下館研究所 (〒308 下館市小川1500)。

D 4411 を基本とした摩擦試験機⁽²⁾を用いて熱履歴を与えた。この摩擦試験機は、摩擦面直径 340 mm の回転するディスクの片面に、2 個のテストピースを押付ける構造である。熱履歴は押付前温度 373 K、ディスク速度 9.0 m/s、押付圧 1.23 MPa、1 回の押付時間 3 s で 100 回行った。熱履歴の付与が終了するとテストピースを接着してある取付金具を摩擦試験機から取りはずし、スティックスリップ運動測定装置に取付けた。次にテストピースと相手材のすり合わせを行うにあたり、相手材を 1200 番のサンドペーパーで研磨した後、アセトンで洗浄した。すり合わせは押付圧 2.45 MPa で、相手材の温度が 323 K 以上にならないようにテストピースを全振幅 80 mm、周期 10 s の正弦波状に 1000 回往復させた。スティックスリップ運動の測定は、テストピースの位置をすり合わせ往復の中央に戻した後、3 mm/min でテストピースを引張って行った。

2・3 供試ディスクブレーキパッド 表 1 に供試ディスクブレーキパッドの基本組成を示し、図 2 に成形方法を示す。繊維の種類を変えたディスクブレーキパッドは、スチール繊維のかわりに他の繊維を用いた。黒鉛を増量したディスクブレーキパッドは、増量

分と同量の硫酸バリウムを減量させ、黒鉛を増量したものは、同量の硫酸バリウムを増量させた。また、カシュー樹脂を配合したディスクブレーキパッドは、配合量だけ硫酸バリウムを減量させた。

3. 実験結果

図 3 に示すように、スティックスリップ波形の最初から 10 サイクルまでのピーク値の平均を μ_s 、振動の中心値の平均を μ_k とし、 $\mu_s - \mu_k$ を振幅 $\Delta\mu$ とした。

3・1 試験条件の影響 図 4 はすり合わせ往復回数と μ_k の関係を示す。1000 回のすり合わせが終了すると、相手材とテストピースをスティックスリップ運動測定装置から取りはずさないで、再び相手材表面を 1200 番のサンドペーパーで研磨し、アセトン洗浄を行ったのち、再び 1000 回のすり合わせを繰返したときの μ_k の変化を見たものである。 μ_k は最初のすり合わせが進行するに従って上昇し定常値に近づく。再び相手材の表面を研磨、洗浄すると μ_k は約 0.13 小さくなるが、すり合わせが繰返されると最初の定常値と同じ値に近づく。

図 5 はすり合わせ往復回数と $\Delta\mu$ の関係を示したものである。最初のすり合わせでは $\Delta\mu$ は小さいが、すり合わせが進行するに従い大きくなり 0.02 前後で安定した。再び相手材を研磨、洗浄した直後の $\Delta\mu$ は 0.065 と大きく、再びすり合わせが繰返されるに従い低下し 0.02 前後に安定した。

すり合わせを行った後、テストピースの摩擦面を観察すると、熱履歴を与えたときに生じた円弧状の条痕が消え鏡面となっていた。また、相手材の摩擦面はすり合わせが進行するに従い、黒色半透明のフィルム状移着が生じたが、サンドペーパーで研磨すると移着フィ

図 1 スティックスリップ運動測定装置

表 1 ディスクブレーキパッドの基本組成

Composition	Vol %	
Phenolic resin	25.0	
Steel fibre	30.0	
Graphite	30.0	
Barium sulfate	15.0	
Void content	Vol %	8~10

図 2 ディスクブレーキパッドの成形方法

ルムは除去され金属光沢のある鏡面となった。この移着フィルムの形成は、一般の有機系摩擦材において報告⁽³⁾されている現象である。最初のすり合わせの進行に伴い、相手材とテストピースの幾何学的な接触面積が増加し μ_k と $\Delta\mu$ は大きくなった。また移着フィルムの形成は μ_k を大きくするが、 $\Delta\mu$ の増大を阻止する方向に働いたといえる。

図6は押付圧力と摩擦速度を変化させて $\Delta\mu$ を測定したものである。 $\Delta\mu$ は押付圧力にほぼ比例しているが、摩擦速度に対して非線形である。

図7は無潤滑時と潤滑時のスティックスリップ波形を示す。潤滑時の測定は、1000回のすり合わせが終了すると、テストピースと相手材の間にスポイトを用いて水またはひまし油を付着させたのち測定した。潤滑時のスティックスリップ運動は、無潤滑時に比べ大きく、水より粘度の大きいひまし油による潤滑のほうがさらに大きかった。

3.2 組成との関係 図8は各種繊維と $\Delta\mu$ の関係を示す。セミメタリックディスクブレーキパッドに用いているスチール繊維は、アスベストや他の繊維に比べて $\Delta\mu$ が大きかった。

図9はカシュー樹脂含有率と $\Delta\mu$ の関係を示すが、カシュー樹脂の含有率の増加に従い $\Delta\mu$ は小さくなった。

図3 スティックスリップ運動時の摩擦係数

図4 すり合わせ往復回数と μ_k の関係

た。また、カシュー樹脂が柔らかいため相手材に厚い移着フィルムが形成されていた。

図10は黒鉛含有率と $\Delta\mu$ の関係を示しているが、黒鉛含有率が30 Vol %のとき $\Delta\mu$ は最大となった。

4. 考 察

4.1 ディスクブレーキパッドの摩擦モデル スティックスリップ運動は、摩擦力がすべり速度の増加とともに減少するときや、静摩擦から動摩擦に移る際の不連続な摩擦低下を含むときに発生するとされている。摩擦力は真実接触面積、降伏圧力や結合部のせん断強度に依存し、すべり速度の極めて遅いところでは、これらの諸因子が変わって、結合部の強さはすべり速度の高い場合よりもしばしば大きくなると多くの研究者が明らかにしている。そこで図11に示す摩擦モデルを用いて、ディスクブレーキパッドの摩擦機構について考える。摩擦モデルは、フェノール樹脂、スチール繊維、黒鉛、硫酸バリウムからなり、摩擦表面ではフェ

図5 すり合わせ往復回数と $\Delta\mu$ の関係

図6 押付圧力、摩擦速度と $\Delta\mu$ の関係

ノール樹脂が熱分解している。また相手材表面には移着フィルムが形成されている。この移着フィルムはフェノール樹脂やその熱分解物、黒鉛をはじめとする摩擦粉よりなる。

いま、垂直荷重を W 、移着フィルムの降伏応力を p_t 、移着フィルムのせん断強度を τ_t 、ディスクブレーキパッドと相手材の真実接触面積を S とする。移着フィルムが突き破られない場合、

$$W = p_t S \quad \dots\dots\dots (1)$$

であり、 F を摩擦力とすると

$$F = \tau_t S \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。しかし実際の摩擦は移着フィルムが突き破られて行われる。スチール繊維が移着フィルムを突き破った場合、

$$W = p_t S_t + \sigma_f S_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで S_f はスチール繊維と相手材の真実接

触面積であり、 σ_f はスチール繊維の真実接触面積部の応力である。また、 S_t は $S - S_f$ である。摩擦力 F は

$$F = \tau_t S_t + \tau_f S_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで τ_f はスチール繊維のせん断強度である。次にディスクブレーキパッドがスティックすると同時にスチール繊維の真実接触面積 S_f がクリープして、接触面積が増加⁽⁴⁾すると考える。スチール繊維の真実接触部における垂直方向のクリープひずみ ϵ を、 σ_f と時間 t の関数⁽⁵⁾として次式に表す。

$$\epsilon = \varphi(\sigma_f) \psi(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

クリープ後の S_f の増加 ΔS_f は

$$\Delta S_f = \beta \epsilon^n \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 7 無潤滑時と潤滑時のスティックスリップ波形

図 9 カシュー樹脂含有率と $\Delta\mu$ の関係

図 8 各種繊維と $\Delta\mu$ の関係

図 10 黒鉛含有率と $\Delta\mu$ の関係

で表される。ここで β, n は定数である。式(5)を式(6)に代入すると

$$\Delta S_f = \beta \{ \varphi(\sigma_f) \psi(t) \}^n \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ところで、 S_t 部でも垂直方向にクリープ変位するが、 S_f 部に比べその増加率は小さいと考えられる。また $\tau_f \gg \tau_t$ であるから、 S_t 部の面積の増加を無視すると、ディスクブレーキパッドの摩擦力は

$$F = \tau_t S_t + \tau_f S_f + \tau_f \beta \{ \varphi(\sigma_f) \psi(t) \}^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

4・2 実験結果と摩擦モデルの関係 スティックスリップ運動測定装置を用いて、極めて遅いすべり速度で求めた μ_s は静摩擦係数を表し、すべっている間の動摩擦力が一定と近似すれば μ_k は動摩擦係数を表すことになる。したがって、 $\mu_k, \Delta\mu$ は式(8)から

$$\mu_k = \frac{\tau_t S_t + \tau_f S_f}{W} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta\mu = \frac{\tau_f \beta \{ \varphi(\sigma_f) \psi(t_i) \}^n}{W} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで、 t_i はスティック時間である。

図4に示すように、すり合わせ回数の増加とともに μ_k が増大したが、これは移着フィルムの形成に伴って式(9)の S_t が増加したためといえる。

図5に示すように移着フィルムの除去による $\Delta\mu$ の増大は、垂直荷重 W が S_f 部に集中することにより、式(10)の σ_f の値が高くなった結果といえる。

図8に示すように、各種繊維のうちスチール繊維が最も $\Delta\mu$ が大きかった。これは式(10)に示すスチール繊維と相手材の接触面積部分のせん断強度 τ_f が、他の繊維を用いた場合のせん断強度 τ_f より大きいためといえる。

- 1: Phenolic resin 2: Steel fibre
3: Graphite 4: Barium sulfate
5: Thermally-decomposed material
6: Transferred film 7: Opposite material

図 11 ディスクブレーキパッドの摩擦モデル

図9に示すように、カシュー樹脂含有率の増加とともに $\Delta\mu$ は減少したが、これは相手材表面の移着フィルムが厚くなり、 S_t が増加し垂直荷重 W を S_t 部で支える結果、式(10)の σ_f の値が小さくなったためといえる。

図7に示すように水やひまし油を付着させたとき、 $\Delta\mu$ が増大した。これは、スリップしているときに摩擦面の一部に形成された潤滑膜がスティックすると絞り出され、接触面積 S_t, S_f が増加することにより、 μ_s が μ_k より大きくなったためと考えられる。また、図10に示すように、黒鉛含有率が増加すると $\Delta\mu$ が大きくなった。これはスリップしている S_f 部には黒鉛の摩耗粉が介在して τ_f を低下させているが、スティックしたときの S_f 部には黒鉛の摩耗粉が介在せず、 μ_s が μ_k より大きくなったと考えた。

4・3 スティックスリップ運動とブレーキノイズの関係 各種ディスクブレーキパッドのブレーキノイズと、同一ディスクブレーキパッドから切り出したテストピースのスティックスリップ運動の比較を図12に示した。ブレーキノイズ試験は、まず供試ディスクブレーキパッドを試験車に取付け、制動前ディスクブレーキパッド温度 373 K、制動減速度 2.94 m/s、制動回数 100 回のならし運転を行った。次に、ディスクブレーキパッドを 323 K まで放冷し、試験車を傾斜度 17 度の斜面上に停止させた後、ブレーキを徐々に解除してブレーキノイズを発生させた。ブレーキノイズの騒音レベルの測定は、JIS C 1502 で規定されている普通騒音計を用いた。ブレーキノイズの測定は、摩擦係数の大小にかかわらず油圧を調節して摩擦力一定で行っており、また騒音レベルは対数表示である dB を用いている。そこで、スティックスリップ運動のほうも、 $\Delta\mu$ と μ_k の比をとりその対数を用いて比較した。騒音レベルの聴感補正や懸架系の共振等の影響を考慮すると、ブレーキノイズとスティックスリップ運動には良い相関があった。

また、図13はブレーキノイズ発生時のディスクブレーキパッドの振動加速度を示す。ディスクブレーキパッドのバックプレートに加速度ピックアップを取付けて、ブレーキディスク回転方向の振動加速度を測定した。振動加速度は約 40 Hz と約 2 kHz の振動よりなっており、40 Hz の振動波形はスティックスリップ的な運動と見られる。この結果からも、低すべり速度で発生するブレーキノイズは、ディスクブレーキパッドのスティックスリップ運動と関係して発生しているといえる。

図 12 ブレーキノイズの騒音レベルと $\log \Delta\mu/\mu_k$ の関係

5. あ と が き

低すべり速度でのブレーキノイズが、スティックスリップ運動に関係するとの推察のもとに、ディスクブレーキパッドのスティックスリップ運動を測定し、その発生機構を説明する摩擦モデルを考えた。しかし、このモデルは数種類の材料からなるディスクブレーキパッドの各材料間の相互作用や、化学的变化については考慮していない。とくに結合材として用いられる樹脂や相手材に移着した有機物の摩擦による熱変化やメカノケミカルの変化を調べる必要があると思う。

図 13 ディスクブレーキパッドの振動加速度

終わりに、本研究をまとめるにあたりご指導いただいた東京工業大学、笹田 直教授、および実車テストをはじめ種々ご協力いただいた日立化成工業(株)桜川工場関係者に深く感謝する。

文 献

- (1) 三部・ほか 1 名, 自動車技術会学術講演会前刷集 881, (1988), 77.
- (2) 井上, 機論, 51-466, C (1985), 1433.
- (3) Liu, T., ほか, *Wear*, 60 (1980), 1.
- (4) Kosterin, J. I. and Kraghelsky, I. V., *Wear*, 5 (1962), 190.
- (5) 川田・ほか, 材料強度工学ハンドブック, (1972), 675, 朝倉書店.