

金属、樹脂間のしゅう動による摩擦係数上昇メカニズムの実験的解析

Experimental analysis of friction coefficient increase by sliding between metal and resin

株式会社 日立製作所・早川 智久（正）

Tomohisa Hayakawa

Hitachi, Ltd.

1. 緒言

制動装置は、樹脂系摩擦材と金属の制動材の組合せにより使用される。ホイストやエレベーター、産業用・医療用ロボットなどで使用される無励磁作動型の制動装置は、摩擦材をばねの復元力で制動材に押し付けることで制動力を発生する。そして、ばねの復元力に打ち勝つ電磁力を電磁石により発生することで摩擦材を制動材から引き離し、制動力を解除する。無励磁作動型の制動装置の制動力は、摩擦材と制動材間の摩擦係数、制動材の外周半径、摩擦材を押し付ける力の積で決まる。制動力を大きくするために制動材の外周半径、摩擦材を押し付ける力を大きくする場合、装置が大型化する傾向があり、材料増加によるコストアップや設置面積の観点から小型化が望まれる。よって、摩擦係数を大きくすることは重要である。例えば自動車の制動装置では、新品の摩擦材を使用する前にならし運転等により準備的に稼働することで、安定した制動力が得られることが一般的に知られている。これは、素材間のしゅう動における表面層の性状変化の過程である「なじみ (running-in)」による。なじみの過程は、摩擦および摩耗をはじめとするライボロジー現象に影響をおよぼすことから、自動車だけでなく加工機械などの分野でも古くから経験的におこなわれており、工学的意義は大きい¹⁾。なじみ現象に関しては、摩耗を抑制するための低摩擦化に着目した研究がある²⁾。本報では、樹脂系摩擦材と金属の制動材におけるしゅう動初期の摩擦力の増加における摩擦係数の上昇メカニズムおよび摩擦係数が静定するまでの時間に影響する因子について、加工およびしゅう動による金属制動材の表面の性状変化に着目し、実験的に解析した結果を述べる。

2. 摩擦材のしゅう動による制動面の性状と摩擦係数の関係

2.1 摩擦係数上昇メカニズムの推定

Fig. 1に摩擦材のしゅう動における制動材の表層の遷移の概念図を示す。Fig. 1(a)に示す機械加工のみのしゅう動面は、切削加工により切り出された状態であることから、制動面に加工変質層が形成されている。加工変質層の最上層部では、切削の摩擦熱で結晶状態が保てずに微粒化または纖維層を形成し、母材と比較して組織の結晶子径が小さい。Fig. 1(b)(c)に示す摩擦材によるしゅう動状態では、摩擦材制動面に押付強制的にしゅう動することで、加工変質層の非結晶層や微粒化・纖維層を切削し、粒径の大きい流動層以下の層が露出、さらにしゅう動することで塑性流動層が形成し結晶子径が大きくなると考えられる。摩擦材には制動面の表面に発生した酸化膜を除去するなどの目的で制動面表面を切削するための成分

(カシューダストなど)が含まれており、自助加工効果(摩擦材の切削効果と定義)により制動面を微小に切削する効果がある。以上の制動材表面の性状変化から、摩擦係数の遷移との関係性を以下と考える。まず、加工変質層は一般に低硬度であり耐摩耗性が低いことから、しゅう動の初期では脆い加工変質層を摩耗しながらしゅう動するため摩擦係数が低くなると考えられる。さらに、しゅう動距離が長くなると、母材が露出し、塑性流動層を形成することで潤滑性の高い黒鉛を覆い、真実接触面積の増加により摩擦係数が上昇すると考えられる。

2.2 摩擦係数が静定するまでの時間に影響する因子

前節の推定から、摩擦係数の上昇には加工変質層の除去が必要となる。よって、静定するまでの時間短縮するには、制動材の加工段階で加工変質層の形成を抑制すること、もしくは制動材の使用前に加工変質層を除去することが効果的と考えられる。摩擦係数が静定するまでの時間を制御可能な因子としては、以下の四つが挙げられる。(1)表面粗さ、(2)摩擦材のしゅう動の前処理、(3)摩擦材の押し付け面圧、(4)しゅう動速度。次章以降で、上記の因子の影響について実験計画法を用いて要素試験を実施した結果について述べる。

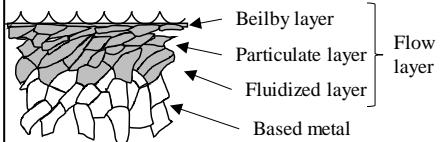
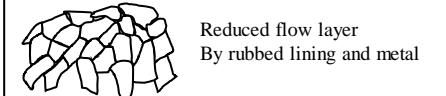
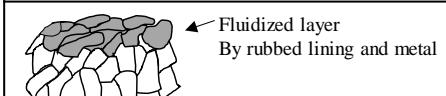
Status		Transition of surface condition
(a)	After machining	 <p>Beilby layer Particulate layer Fluidized layer Based metal Flow layer</p>
(b)	Rubbed friction lining and metal	 <p>Reduced flow layer By rubbed lining and metal</p>
(c)		 <p>Fluidized layer By rubbed lining and metal</p>

Fig. 1 Transition of surface condition

3. 実験と結果

3.1 要素試験の概要

Fig. 2 に本研究で実施した要素試験の試験片の形状を示す。摩擦材をブロック状、リング状に切り出した制動材の組合せで実施した制動装置の関係性を再現するため、リング状の制動材を回転して、固定した摩擦材に押付ける回転式のしゅう動試験を実施した。素材は、摩擦材は、ノンアスベスト、レジン系モールドタイプのブレーキライニング、制動材は球状黒鉛鉄 FCD450 とした。この時の制動材の回転トルクと固定片である摩擦材の押し付け力を測定することで摩擦係数を算出する。摩擦係数の評価は、式(2)により計算した。

$$\mu = \frac{T}{Fr} \quad (2)$$

μ は素材間の摩擦係数、 T は制動材の回転トルク、 r は動材の外周半径、 F は摩擦材を押し付ける力である。

3.2 制動材のしゅう動面の X 線回折法による結晶子径の計測

Fig. 3 に制動材断面の SEM 観察、Table 1 に X 線回折法 (X-ray Diffraction, 以下 XRD) による結晶子径の計測結果を示す。しゅう動の前後に加えて、制動材の機械加工した面をしゅう動前の前処理としてバフ研磨した条件の三条件で計測した。結晶子径は大きい順に、摩擦材とのしゅう動後、バフ研磨した試験片、機械加工のみとなったバフ研磨した試験片は 2.1 節で推定した Fig. 1(b) の条件に相当すると考えられ、この結果は 2.1 節の推定の結果と一致する。

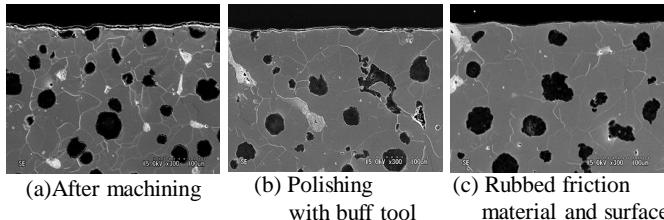


Fig. 3 Cross section of FCD450

3.3 摩擦係数静定時間の制御因子の感度解析

Fig. 4 に摩擦係数が静定するのに要するしゅう動距離 (以下、静定距離) の制御因子の感度解析結果を示す。縦軸が静定距離に対する効果である。静定距離を短縮するには各制御因子がマイナス側に推移する水準が静定距離の短縮効果が大きいことになる。同図から、制動材の機械加工時の表面粗さを滑らかすること (Fig. 4(A))、バフ研磨すること (Fig. 4(B)) が効果的である。摩擦材の制動材への押し付け面圧としゅう動速度に関しては効果の傾向が凸形状となったため制御因子間の相互作用があるため今回は評価対象外とした (Fig. 4(C)(D))。制動材の機械加工時の表面粗さを滑らかにすることに関しては、加工条件が関連していると考えられる。一般的に加工粗さを滑らかにするには、バイトの送り速度を遅く、送り深さおよび、バイトのノーズ半径を小さくする。バイトの送り速度の低減により発生する熱の低下、送り深さの低減による金属表面組織の破壊、応力の低減により加工変質層の厚さが低減していると推定される。また、バフ研磨による効果に関しては、バフ研磨により加工変質層が研磨され、母材に近い層が露出したと推定できる。つまり、摩擦係数の静定距離の短縮には機械加工時の制動材表面の加工変質層の形成の抑制、もしくは事前の除去が肝要といえる。

4. 結言

摩擦材と制動材を模擬した要素試験の結果から樹脂系の摩擦材と球状黒鉛鉄 (FCD450) 製の制動材のしゅう動面の性状と摩擦係数の変化の関係、摩擦係数の静定時間に影響する因子を明らかにした。本結果から、無励磁作動型制動装置の摩擦材と制動材に使用前の処理に適用することで、制動力の向上もしくは装置を小型化することができる。

文献

- 1) 平野：金属のなじみ過程、潤滑、30, 5 (1985) 377-384.
- 2) 足立：低摩擦システムのための摩耗、トライボロジスト、第 64 卷、第五号 (2019) 288~293

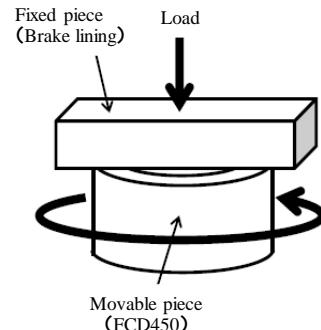


Fig. 2 Schematic of test piece

Table 1 Crystal size

Status	Crystal size
(a) After machining	28.6 nm
(b) Polishing with buff tool	32.7 nm
(c) Rubbed friction material and surface	40.0 nm

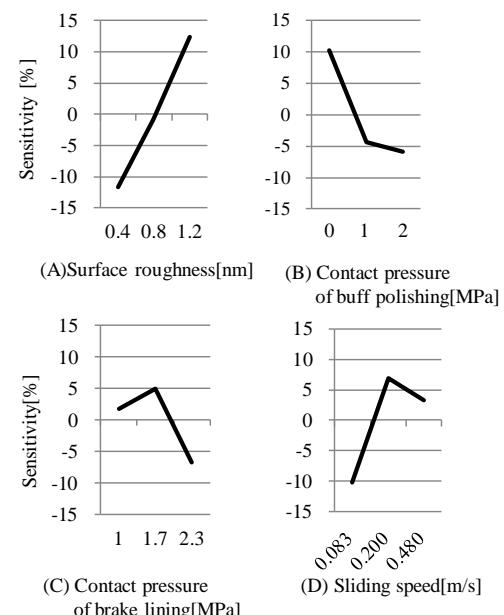


Fig. 4 Sensitivity analysis