

鉄道車両のブレーキ材料の性能を評価する

車輪やブレーキディスクなどの回転体にブレーキ材料を押し当てることで発生する摩擦力によって車両を減速させる機械ブレーキは、停電などの異常時も想定してどのような状況でも確実かつ安全に車両を停止させる性能が求められます。機械ブレーキでは、摩擦力に大きく影響するブレーキ材料の性能評価が非常に重要です。ここでは、ブレーキ材料の温度と摩擦係数の関係に注目した性能評価手法を紹介します。



西森 久宜
Hisanori Nishimori
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
副主任研究員

はじめに

新幹線を含む電車では、通常時には電気ブレーキがおもに使用されますが、停電などの異常時や緊急時には機械ブレーキがバックアップするようにシステムが構成されており、機械ブレーキは鉄道車両の安全を確保するための重要な装置といえます。図1は機械ブレーキの仕組みの例として、新幹線に使用されているディスクブレーキを表したものです。回転するブレーキディスクにブレーキ材料を押し当て、生じた摩擦力をブレーキ力として車両を減

速・停止させます。

このとき摩擦を利用するため、摩擦熱がかならず発生します。車両の速度が高くなる分だけ大きなブレーキ力、すなわち摩擦力を必要としますが、摩擦熱もより多く発生することになります。現在、最高速度320km/hで走行する新幹線も、高速から確実に停止できる性能が機械ブレーキには備わっています。図2は鉄道総研所有のブレーキ性能試験機で実物大の車輪とブレーキディスクを取り付け、新幹線を想定した高速からのブレーキを作用させた

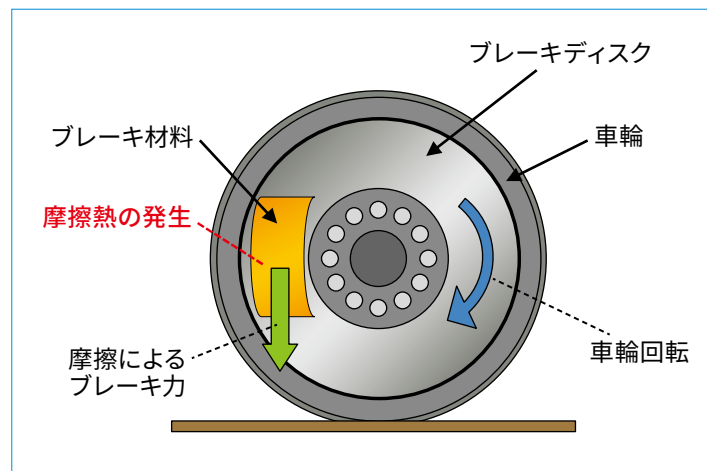


図1 ディスクブレーキの仕組み

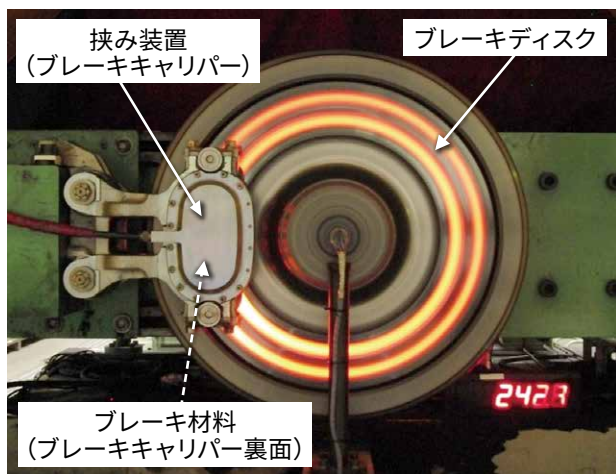


図2 ベンチ試験の様子
(出典：文献1より一部改変)

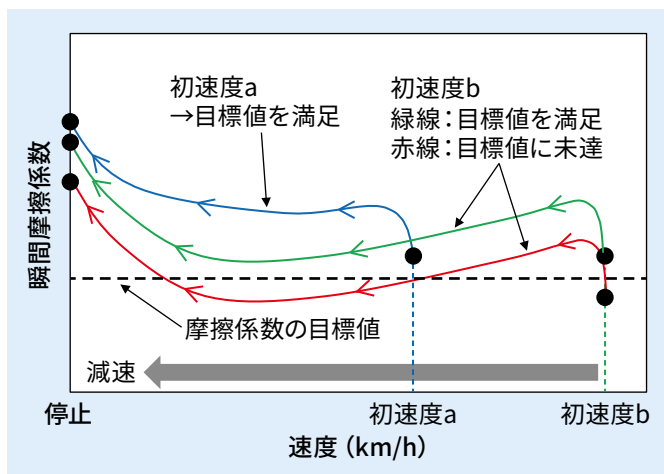


図3 ベンチ試験における瞬間摩擦係数の変化

ブレーキ試験（以降、ベンチ試験）の様子です。ブレーキディスクの表面が全周にわたって赤熱しており、摩擦熱によってブレーキディスク、ブレーキ材料が非常に高温になっていることがわかります。

ブレーキ性能と摩擦係数

機械ブレーキでは摩擦力をブレーキ力とすることから、異常時も含めた鉄道車両のブレーキ性能として、摩擦力を評価する必要があります。この摩擦力の評価には、ブレーキ材料をブレーキディスクに押し付ける押付力と、そのとき得られた摩擦力の比で表せる摩擦係数が用いられます。摩擦係数は、摩擦する材料の組み合わせによって大きく異なります。鉄道車両の場合、回転体である車輪やブレーキディスクに対し、用途に応じて種類の異なるブレーキ材料が使用され、新幹線では焼結合金（図3参照）が使用されています。

ブレーキ材料の性能評価には、実際の車両を想定したベンチ試験が用いられ、摩擦係数が目標値を満たしているかを確認します。図3はベンチ試験の結果として、速度に対する摩擦係数の瞬時値（瞬間摩擦係数）の変化を模式的に表したものです。目標とする摩擦

係数の値を黒の点線とすると、青線で示す初速度aではすべての速度域で目標値を上回っています。一方、赤線で示す初速度bでは一部の速度域で摩擦係数が目標値を下回っています。この場合、このブレーキ材料は性能不足と評価され、緑線のように目標の摩擦係数を満足するまで、材料の選定とベンチ試験による性能評価を繰り返すことになります。

ベンチ試験は、とくに速度向上などの厳しい目標を達成しようとする場合、重量や速度をできるだけ実物に合わせ、ブレーキ材料が高温となる状況を再現したうえでの性能を評価するために重要です。一方で、実際の車両を想定したさまざまな条件で試験を行うには、準備や実施に非常に多くの労力と時間を費やします。

そこで、新幹線のブレーキ材料を対

象に、高温環境下での摩擦係数をベンチ試験に比べて簡易に評価できる手法として、任意の温度で摩擦係数が測定可能な「高温摩擦試験装置」を用いたブレーキ材料の評価手法を提案しました¹⁾²⁾。

高温摩擦試験装置

高温環境下のブレーキ材料の性能評価として、特定の温度での摩擦係数の測定が必要です。しかし、高速からの摩擦試験では、速度の変化とともに摩擦熱によってブレーキ材料の温度が徐々に変化するため、特定の温度で摩擦係数を測定することは非常に困難です。この課題を解決するため、摩擦熱によらずブレーキ材料を加熱する方法として、高周波誘導加熱方式を用いました。高周波誘導加熱とは、電磁誘導現象（図3参照）を利用して金属自身のもつ抵抗

焼結合金

母材となる金属粉末にその他の金属や非金属の粉末を混合、成形し、融点以下の温度で加熱して得られる複合材。熔融による合金ではないため、セラミクスなどの高融点材料をはじめとしたさまざまな材料を使用できる点が特徴。

高周波誘導加熱における電磁誘導現象

金属などの導体の周囲にコイルを設置し、高周波の交流電流を流すことで磁束が変化し、導体内に電位差が生じる現象。このときに導体内に発生する電流を誘導電流とよぶ。

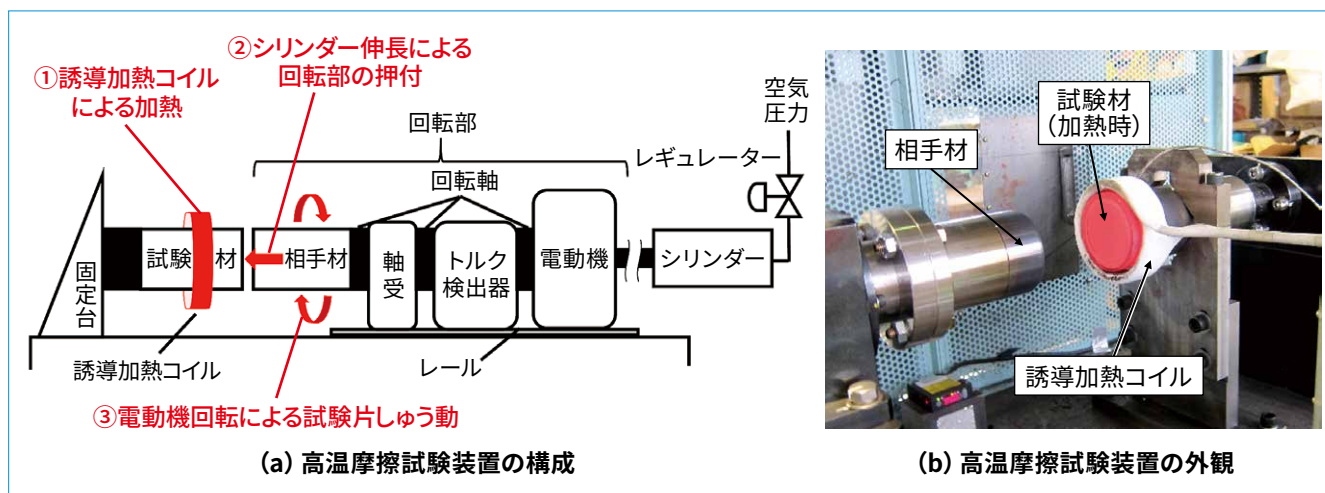


図4 高温摩擦試験装置（出典：文献1より一部改変）

の発熱により加熱されるものです。

この高周波誘導加熱装置と摩擦試験機を組み合わせ「高温摩擦試験装置」を構成しました（図4）。固定台にはブレーキ材料と鉄鋼材から成る摩擦材試験片（以降、試験材）を取り付けます。この試験材の周囲に誘導加熱コイルを設置し、高周波誘導加熱により任意の温度に加熱します。一方、電動機とつながって回転する回転部は、レギュレーターで調整した空気圧力で伸長するシリンダーによってレール上を移動します。この回転部の先端にブレーキディスクを想定した相手材試験片（以降、相手材）を取り付け、加熱された試験材に押し付けて回転させることで、任意の温度に加熱された試験材で摩擦試験が実施できます。

摩擦係数 μ は、以下の式（1）により求めることができます。

$$\mu = T / (P \times r_d) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Tは回転軸に設置したトルク検出器で測定される摩擦により発生するトルク、Pは相手材を試験材に押し付ける押付力で、レギュレーターで調整した空気圧力とシリンダーの面積から求められます。 r_d は試験材と相手

材が接触し摩擦している面（以降、しゅう動面）の有効半径（参照）です。

しゅう動面の形状は、試験条件の一つである試験材と相手材の面圧（単位面積あたりの押付力）に応じて設定します。試験材の加熱に用いる高周波誘導加熱では、誘導加熱コイルに近い外周部分が加熱されやすい特性があるため、しゅう動面をできるだけ外周に近く配置する必要があります。

高温摩擦試験によるブレーキ材料の性能評価

この高温摩擦試験装置を用い、表1に示す試験条件で組成が異なる2種類の新幹線用ブレーキ材料の摩擦係数を測定しました。試験材および相手材の外観を図5に示します。なお、金属の種類によって誘導加熱されやすさが異なり、新幹線のブレーキ材料に用いられている銅を主体とした焼結合金（以降、銅系焼結合金）は誘導加熱されにくい材質であるため、誘導加熱されやすい鉄鋼材を銅系焼結合金に接合させた試験片を作製し、鉄鋼材を加熱してその伝熱で銅系焼結合金を加熱することとしました。これにより、ブレーキ材料を最高1100℃までの任意の温度に加熱し、その温度を維持することを

可能としました。

そして、有効半径上の周速度である試験速度は、摩擦熱による温度上昇を可能な限り抑える目的で、電動機が安定して出力可能な下限値に設定しました。また、面圧が実物大のブレーキ材料の使用条件と合うように、シリンダーに供給する空気圧力としゅう動面の形状・面積を決定しました。

摩擦試験は、誘導加熱によって試験材を各試験温度に調整した後に相手材を押し付け、一定の試験速度で60秒間回転させる条件を1回とし、しゅう動面ができるだけ均一に接触し摩擦係数が安定するまですり合わせを行います。その後に行った3回の試験の結果から、温度と平均摩擦係数の関係を図6に示します。なお、ここでの平均摩擦係数は、1回の試験ごとに瞬間摩擦係数の平均値を求め、それをさらに繰り返して試験回数である3回で平均した値です。

この例では、試験材Aの平均摩擦係数は、室温から600℃までは試験温

有効半径

実際には面で作用している摩擦力を一点に作用していると仮定したさいの、回転中心からその作用点までの距離。

表1 試験条件 (出典：文献1より一部改変)

試験条件	設定値
試験速度	0.11m/s
面圧	1.1MPa
しゅう動面積	11cm ²
有効半径	35mm
試験温度	室温, 200℃, 400℃, 400℃以降は 1100℃まで 100℃刻み
試験時間	60 秒
試験回数	3 回 (摩擦係数安定後)

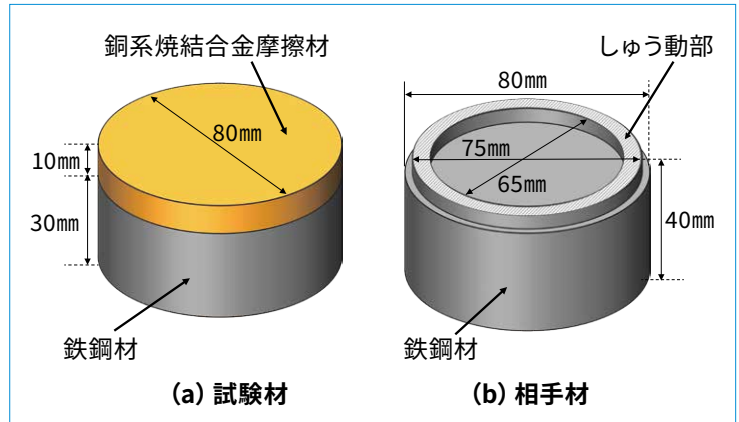


図5 試験材および相手材の形状

度が高くなるにつれ低下, 600℃から900℃では増加に転じ, 1000℃から1100℃でふたたび急激に低下しました。

一方, 試験材Bの平均摩擦係数は, 室温から400℃までは試験温度が高くなるにつれ低下, 400℃から800℃では増加に転じ, 800℃から900℃でふたたび急激に低下しました。また, 試験材Bでは, 試験温度1000℃にて試験材が変形して誘導加熱コイルに接触したため, 1100℃の試験はできませんでした。

このように, 高温摩擦試験装置により, 同じ銅系焼結合金でも温度に対して異なる摩擦係数を示す特性があることがわかります。

また, 図6に示した結果からブレーキ材料が期待する性能を満たせる温度範囲の上限を設定できます。例えば, 図6に点線で示した0.3を摩擦係数の目標値と仮定すると, 図3で説明したように目標値を上回れば性能を満足するので, 各試験材が目標値を上回った最高の試験温度, すなわち試験材Aは1000℃まで, 試験材Bは800℃までの範囲であれば目標とする性能が期待できます。

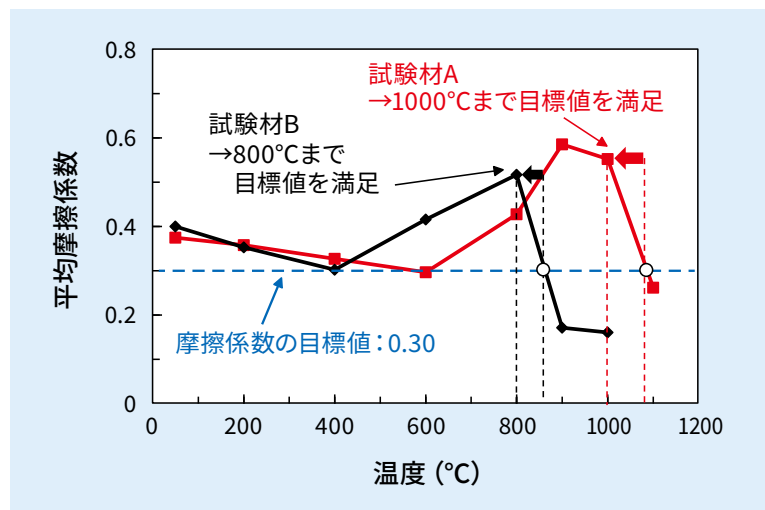


図6 高温摩擦試験結果

おわりに

ここでは, ブレーキ材料の評価手法として, 実物大のベンチ試験に比べて簡易に高温環境下での摩擦係数を測定できる高温摩擦試験装置を用いた評価手法を紹介しました。

ブレーキ材料に求められる性能は多岐にわたり, 実用化するためには厳しい条件で総合的な性能評価を行うベンチ試験を省略することはできません。

しかしながら, ブレーキ材料を選定する過程において, 「温度と摩擦係数の関係」のような, ある特定の性能を効率的に把握できる手法を確立することは, 摩擦・摩耗現象の把握やブレーキ材料開発の効率化に貢献できると考えます。

今後は, 高温摩擦試験と実物大ベンチ試験を組み合わせることで, 評価手法としての妥当性・信頼性を高め, ブレーキ性能の向上に貢献したいと思います。 **RRR**

文 献

- 1) 松岡耕作, 西森久宜: 任意の温度でブレーキ摩擦材の摩擦係数を測定する手法, 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL 2017) 講演論文集, 講演番号S1-2-3, 2017
- 2) 西森久宜, 松岡耕作: 高温摩擦試験装置を用いたブレーキ摩擦材の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.8, pp.41-46, 2018