

高温摩擦試験装置を用いたブレーキ摩擦材の評価手法

西森 久宜* 松岡 耕作**

Method for Evaluating Brake Friction Materials Using High-Temperature Friction Test Apparatus

Hisanori NISHIMORI Kosaku MATSUOKA

In the case of the speedup of the railway vehicle, it is required to develop brake friction materials usable under a thermal load increased due to the improvement of braking force. A full-size bench test is essential for evaluating the performance of the mechanical brake conclusively, but it takes a lot of time and efforts to evaluate the friction coefficient of the brake friction materials at high temperature. Therefore, we investigate a method for evaluating the brake friction materials more easily than evaluating them using a full-size bench test. This paper introduces a method for quantitatively evaluating the friction coefficient at arbitrary temperature using a high-temperature friction test apparatus, and the availability of this method by comparing the results obtained by this method with that obtained by a full-size bench test.

キーワード：ブレーキ摩擦材，摩擦係数，高温特性，摩擦試験装置

1. はじめに

機械ブレーキは，列車の運動エネルギーを摩擦熱に変換するもので，ブレーキ摩擦材（以下，摩擦材とする。）を車輪やディスクに押し当て，その際に発生する摩擦力によって減速効果を得る装置である。

列車の最高速度は機械ブレーキの性能に大きく影響され，更なる高速化を進める場合にはブレーキ力の向上に伴う熱負荷の増大に対応した摩擦材が求められる。一般的に摩擦材を選択するためには，想定される最大ブレーキ負荷（輪重，速度，押付力）を模擬した実物大ブレーキ試験（図1）を行い，熱負荷の増大により高温時の摩擦係数が設定値に対して不足していないか，設定された停止距離や減速度はブレーキシリンダ圧力で調整可能な範囲か，車輪・ディスクや摩擦材の温度が設定目安値を超えないかなどを確認する。このとき，高温時の摩擦係数が設定値に対して不足している場合には，高温特性の改良が期待できる摩擦材を準備し，設定されたブレーキ性能を満足する摩擦材が得られるまで，実物大ブレーキ試験を繰り返し実施することになる。

このように，実物大ブレーキ試験は最終的なブレーキ性能評価に必要不可欠である一方，高温時の摩擦係数の評価に着目する場合，膨大な時間と労力を費やす試験でもある。本稿では，実物大ブレーキ試験に比べて簡易に摩擦材を評価する手法として，任意の温度で摩擦係数を測定可能な高温摩擦試験装置の適用可能性を検討し，実

物大ブレーキ試験結果との比較により本手法の有効性を確認したので報告する。

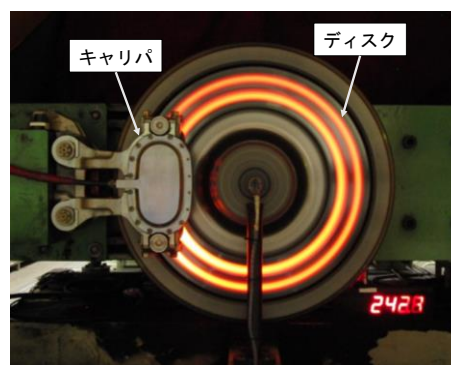


図1 機械ブレーキの実物大ブレーキ試験の様子¹⁾

2. 任意の温度で摩擦係数を測定する手法の検討

2.1 摩擦試験方法の選択

材料の摩擦・摩耗試験方法には，接触状態（点接触，線接触，面接触）や運動形態（すべり，転がり）により様々なものが存在する^{2) 3)}。また，ファインセラミックやプラスチックなど一部の材料では，JISにおいて摩擦試験方法が規定されている。金属材料にはJISによる規定はないものの，1999年に日本機械学会が摩耗試験の標準方法として，ブロック・オン・リング式，ピン・オン・ディスク式，スラストシリンダ式の3方式を規定している⁴⁾。図2に各方式の試験方法を示す。

本件では，新幹線電車の摩擦材を対象としており，図

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

** 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

特集：車両技術

1に示すようにディスクに摩擦材を押し付ける面接触の摩擦形態となることから、選択する試験手法も同様の面接触による摩擦試験がのぞましい。先述の3方式の中で面接触となるのは、ピン・オン・ディスク式およびスラストシリンダ式である。このうち、スラストシリンダ式はピン・オン・ディスク式に比べて試験片形状や寸法に自由度が大きく、負荷荷重の調整により面圧を必要に応じて任意に設定することが可能である。さらに、スラストシリンダ式であれば、後述の高周波誘導加熱コイルの設置も容易である。以上のことから、本手法の摩擦試験方式としてはスラストシリンダ式を選択した。

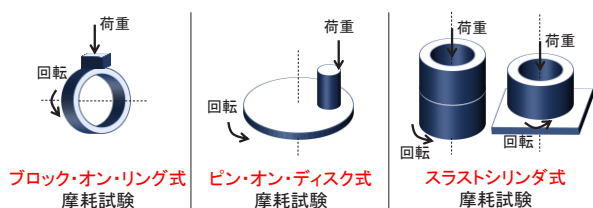


図2 日本機械学会が規定する摩擦試験の標準方法 (出典：社団法人日本トライボロジー学会：摩擦・摩擦試験機とその活用，養賢堂，pp.260，2007)

2.2 摩擦材加熱方法

摩擦材の加熱に用いる高周波誘導加熱方法の概略を図3に示す。高周波誘導加熱は、導体の周囲に設置したコイルへ高周波の交流電流を流すことで磁束に変化が生じ、導体に電位差が生じる電磁誘導現象を利用したものである。電磁誘導によって導体内に誘導される渦電流と導体自身の抵抗によって発生するジュール熱により加熱される。この時、導体内の電流密度は表面が最も高く、中心に向かうにつれて減少する。これは表皮効果とよばれており、交流電流が高周波になるほど顕著となる⁵⁾。

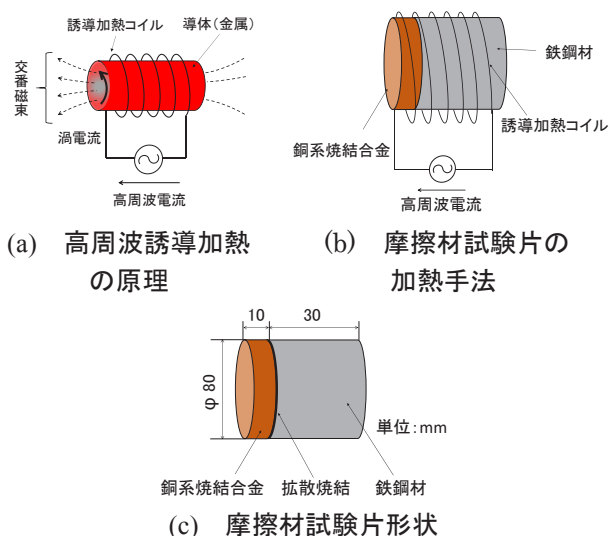


図3 高周波誘導加熱方法概略

高周波誘導加熱に用いられる導体としては、鉄鋼材をはじめとする磁性体材料が多い。磁性体材料では、磁束変化にともなうヒステリシス損によっても発熱が生じる⁶⁾。この発熱と前述のジュール熱により、導体が効率的に加熱される。

一方、本件が対象とする摩擦材は新幹線電車のブレーキ摩擦材に用いられている銅系焼結合金で、誘導加熱しにくい材質（抵抗が小さく透磁率も低い）である。そこで、図3 (b) に示すように誘導加熱コイルの内部に外径80mm、全長40mmの摩擦材試験片を設置し、高周波誘導加熱した鉄鋼材からの伝熱を利用して摩擦材を昇温する構成とした。試験片は、図3 (c) のとおり鉄鋼材に厚さ10mmの銅系焼結合金を拡散焼結したものである。

図4は誘導加熱時における摩擦材の様子である。図4 (a) の加熱前に対し、加熱後500秒経過した図4 (b) では摩擦材外周部が赤熱している様子が観察される。さらに、加熱後600秒経過時の図4 (c) では摩擦材全体が赤熱しており、特に外周側が明るく輝いている様子が観察される。加熱後700秒経過時の図4 (d) では、600秒経過時に比べて明るく輝く部分が中心部に向かって拡大する様子が観察される。このように、鉄鋼材からの伝熱を利用することで、摩擦材の加熱が可能であることが確認された一方で、加熱時の摩擦材は、外周側と中心部で赤熱状態が異なることも観察された。これは、前述した表皮効果の影響により、導体の表面部が中心部に比べて加熱されやすい状態、すなわち摩擦材内において温度勾配が存在することを示唆している。

本件において、高温摩擦試験装置の押付力と摩擦試験時の面圧条件を満たすには、摩擦摺動面積（以下、摺動面積とする）は11cm²とする必要があった。図5は同じ摺動面積11cm²となる試験片形状の例を示したものであるが、誘導加熱時に観察された摩擦材の状況から、摩擦試験における摺動位置は摩擦材が加熱されやすい外周部

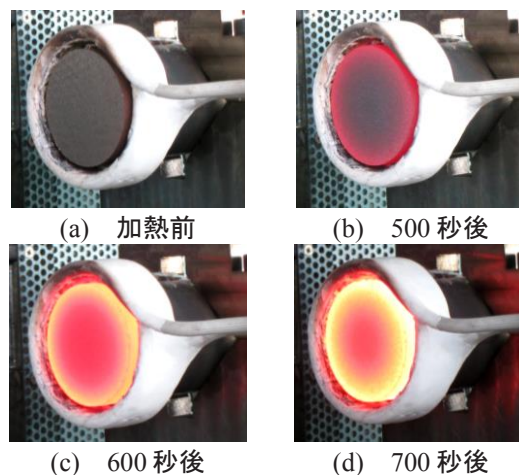


図4 誘導加熱時の摩擦材

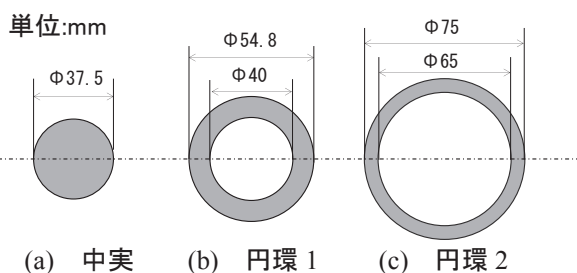


図5 同一摺動面積を有する試験片形状の例

に設定することがのぞましい。そこで、摩擦の相手となる試験片（以下、相手材とする）の形状として図5（c）の外径φ75mm、内径φ65mmの円環形状を選択した。

図6は、誘導加熱により室温から1100℃まで加熱した際の摩擦材温度の測定結果である。摩擦材の加熱速度は毎分100℃とし、摩擦材温度はK熱電対を用いて摺動部の中心位置（φ70mm）の摺動面直下において測定した。図6より、摩擦材の温度は、加熱時間に比例して昇温しており、加熱開始660秒後には高周波誘導加熱装置で設定可能な最高温度1100℃に達している。よって、検討した摩擦材試験片と高周波誘導加熱装置を用いることで、摩擦材を任意の温度に加熱できることが確認できた。

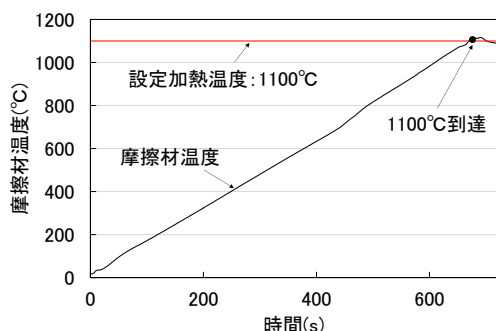


図6 誘導加熱時の摩擦材温度測定結果

2.3 高温摩擦試験装置の概要

スラストシリンダ式の摩擦試験方式と高周波誘導加熱装置を組み合わせた高温摩擦試験装置の概要を以下に説明する。

図7に高温摩擦試験装置の概略を示す。電動機とつながる回転部は、空気圧力によって動作するシリンダの伸長によりレール上を移動し、先端に取り付けた相手材が、固定台に設定され誘導加熱装置によって任意の温度に加熱された摩擦材に押し付けられる。この時の押付力 P [N]は、レギュレータにより調整した空気圧力で設定され、摩擦係数 f は式(1)により導出される。

$$f = \frac{T}{r_d \times P} \quad (1)$$

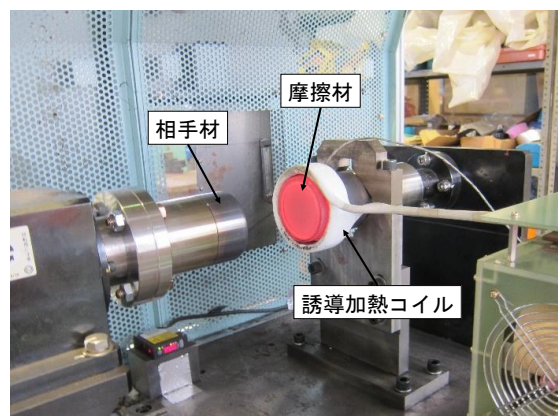
ここで、 T はトルク [N・m]、 r_d は接触面有効半径 [m]

(以下、設定有効半径とする。)である。

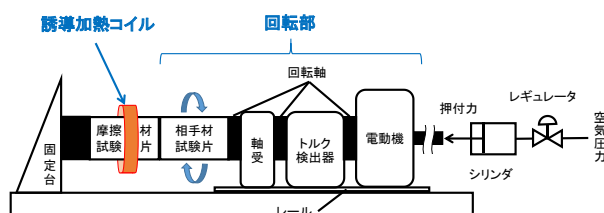
なお、設定有効半径は、軸荷重が摩擦面に均等に作用し、摩擦係数への半径方向の相対すべりの差の影響は無視できるもの⁷⁾として、式(2)から導出した。

$$r_d = \left[\int_{r_1}^{r_2} r^2 dr \right] / \left[\int_{r_1}^{r_2} r dr \right] \quad (2)$$

ここで、 r_1 は接触面内径 [m]、 r_2 は接触面外径 [m]である。表1に高温摩擦試験装置の仕様を示す。



(a) 摩擦材を加熱の様子



(b) 構成図

図7 高温摩擦試験装置概略¹⁾

表1 高温摩擦試験装置仕様¹⁾

形式	スラストシリンダ式	
負荷方式	空圧方式	最大押付力：5kN
回転方式	AC サーボモータ	回転速度：30 - 1500rpm 最大トルク：100Nm
加熱方式	高周波誘導加熱	最高温度：1100℃
計測項目	温度、空気圧力、トルク、回転速度、試験装置振動加速度	

3. 高温摩擦試験結果

図8に示す4種類の異なる銅系焼結合金摩擦材A材、B材、C材、D材、および相手材を準備して、高温摩擦試験装置による摩擦試験（以下、高温摩擦試験とする。）を実施した。高温摩擦試験に用いた試験条件を表2に示す。なお、本試験は摩擦摺動によって生じる摩擦熱が摩擦特性に及ぼす影響を極力排除するため、摩擦速度は試

表2 高温摩擦試験の試験条件¹⁾

面圧	1.1MPa
摩擦速度	0.11m/s (摺動半径：35mm)
設定温度	50℃－1100℃※ ※100℃もしくは200℃刻み 低温条件から順に高温まで試験を行う
試験時間	60秒
試験回数	3回※ ※摩擦係数が安定してから3試番

験装置の設定下限値である0.11m/s(回転速度30rpm)の極低速に設定した。高温摩擦試験後の摩擦材の外観を図8に、摩擦試験によって得られた各摩擦材の平均摩擦係数を図9に示す。

A材からD材の特性を以下に述べる。

(1) A材

平均摩擦係数は、200℃から600℃まではほぼ一定であったが、700℃で最も高い値0.38を示した。800℃以降は温度上昇にしたがい平均摩擦係数は低下し、900℃で0.19であった。また、900℃の試験後において、摩擦材の外周部側面が外側へ押し出されるように変形が生じ、外周部に欠けや亀裂が多数確認された。摩擦材の変形によって誘導加熱コイルとの干渉が生じたため、以降の温度における試験は中止した。

(2) B材

平均摩擦係数は、200℃から600℃まではほぼ一定であったが、800℃で最も高い値0.44を示した。900℃以降は、温度上昇にしたがい平均摩擦係数は低下し、最高温度1100℃で0.25となった。1100℃の試験後における摩擦材は、外周部には欠けや亀裂が認められたが、熱や押付力による変形は小さかった。

(3) C材

平均摩擦係数は、600℃までは温度上昇にしたがって緩やかな低下を示したが、800℃以降は上昇に転じ900℃で最も高い値0.59を示した。また、1000℃においても0.5を超える高い値を示したが、1100℃では0.26まで急激に低下した。1100℃の試験後における摩擦材は、外周部に欠けや亀裂が認められたが、熱や押付力による変形は小さかった。

(4) D材

平均摩擦係数は、400℃までは温度上昇にしたがって低下した後、600℃以降は上昇に転じ、800℃で最も高い値0.52を示した。しかしながら、900℃で0.17まで急激に低下し1000℃では0.16となった。また、摩擦試験後における摩擦材の状況は、900℃の試験後に摺動面のくぼみ、および摩擦材外周部側面の変形、欠けや亀裂の発生が認められた。さらに、1000℃の試験後では摺動面のくぼみや外周部の変形がさらに進展し、欠けや亀裂も多数認められた。摩擦材の変形によって誘導加熱コ

イルとの干渉が生じたため、以降の温度における試験は中止した。

このように、高温摩擦試験によって、各摩擦材の温度に対する摩擦係数の傾向を明瞭に捉えられたことから、本手法により任意の温度で摩擦材の摩擦係数の測定が可能であることが明らかとなった。また、高温摩擦試験で得られたこれらの試験結果から、例えば摩擦係数の設定値を0.3とした場合、A材、D材は800℃、B材、C材は1000℃が使用可能な目安温度と設定できる。

このことから、高温摩擦試験で得られた試験結果に対して、目標となる摩擦係数を設定することで、摩擦材の使用可能な目安温度を評価することも可能である。

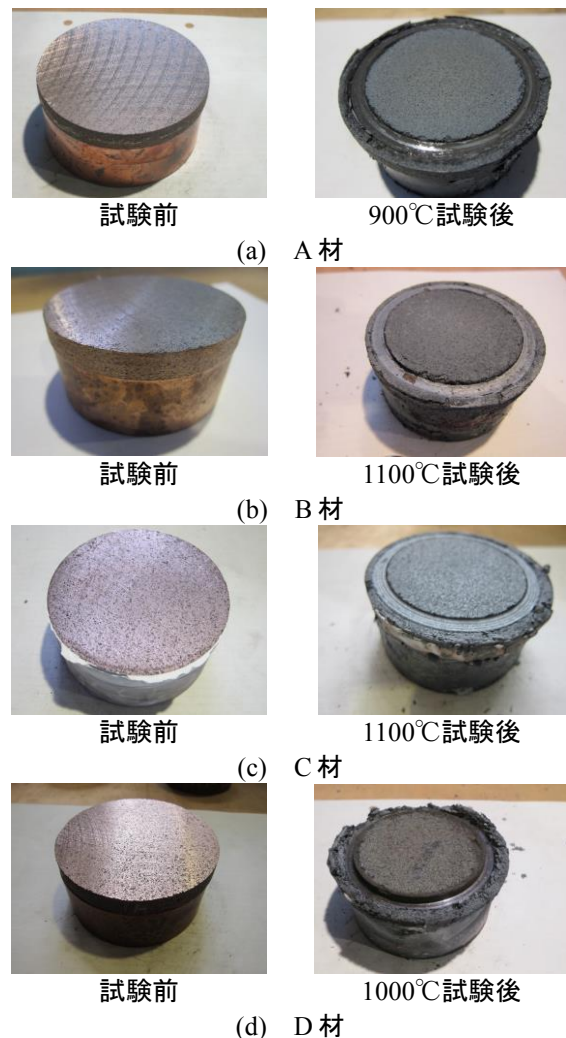
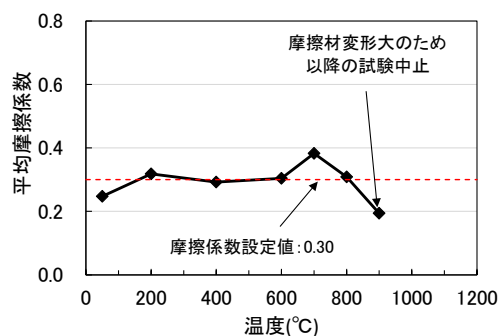


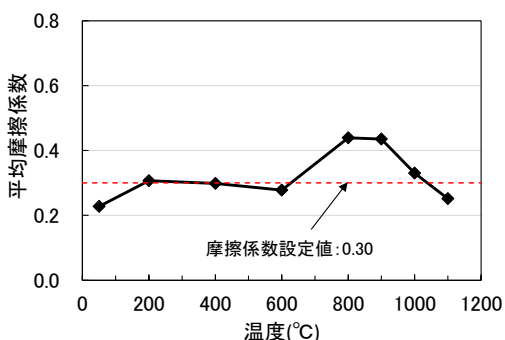
図8 摩擦材外観¹⁾

4. 実物大ブレーキ試験と高温摩擦試験の比較

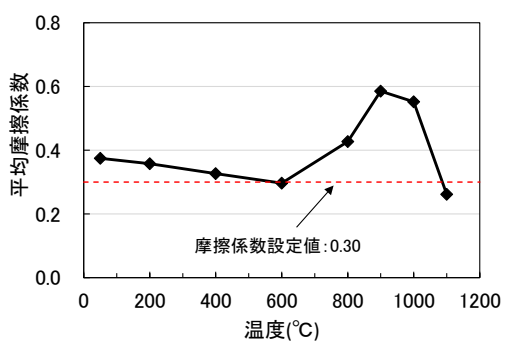
冒頭で述べたように、実物大ブレーキ試験は最終的なブレーキ性能評価として必要不可欠である。ブレーキ



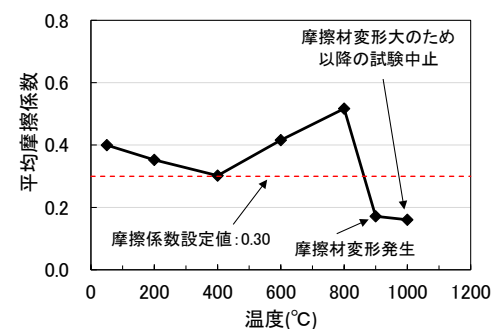
(a) A材



(b) B材



(c) C材



(d) D材

図9 温度に対する平均摩擦係数の変化¹⁾

性能において特に重要となるのは、必要なブレーキ力の確保である。ブレーキ力は機械ブレーキによる摩擦力によって得られ、その摩擦力を得るために必要な摩擦材を

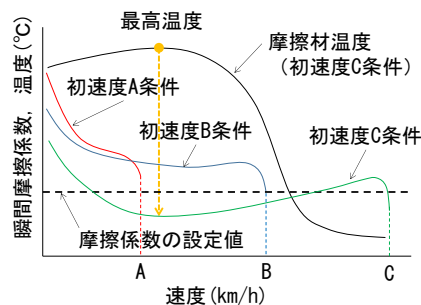


図10 実物大ブレーキ試験における初速度が異なる条件での瞬間摩擦係数の模式図¹⁾

押し付ける力(押付力)は、摩擦材の摩擦係数値に基づいて設定される。図10は、実物大ブレーキ試験における初速度が異なる条件での摩擦材の瞬間摩擦係数の推移を模したものである。この例では、初速度A条件と初速度B条件における瞬間摩擦係数は破線で示す設定値を全速度域で満足していることから、初速度B条件までは目標とするブレーキ力が確保されているといえる。しかしながら、さらなる高速化を想定した初速度C条件では、瞬間摩擦係数が設定値を下回っている速度域があり、ブレーキ力が不足して目標とする性能には未達となる。

このように、高速化にともなう熱負荷の増大が摩擦材の性能に及ぼす影響は非常に大きい。特に、実物大ブレーキ試験における瞬間摩擦係数の落ち込みは、摩擦材の最高温度付近で生じることが多い。この現象が摩擦材の高温時における摩擦係数低下による影響と仮定すると、高温摩擦試験における高温での摩擦係数の低下と、実物大ブレーキ試験で測定される瞬間摩擦係数の低下およびその時の温度には相関があると予想される。

そこで、3章の高温摩擦試験において摩擦係数の設定値を0.30とした場合に使用可能な目安温度が1000°Cと評価されたC材、および800°Cと評価されたD材を対象に、実物大ブレーキ試験における摩擦材最高温度での瞬間摩擦係数と、高温摩擦試験の結果を比較した。

図11は、高温摩擦試験の結果に対し、実物大ブレーキ試験における摩擦材最高温度時の瞬間摩擦係数を重ね合わせたものである。D材では、実物大ブレーキ試験における摩擦材最高温度は概ね840°Cから900°C、その時の瞬間摩擦係数は0.20から0.30であり、摩擦係数の設定値である0.30を下回った。これは、D材が使用可能な目安温度(800°C)を超えたことで摩擦係数が低下したものと推測される。このように実物大ブレーキ試験の結果と高温摩擦試験の結果が非常に近い値を示していることから、高温摩擦試験によって実物大ブレーキ試験と同等に摩擦材の特徴を抽出できると考えられる。

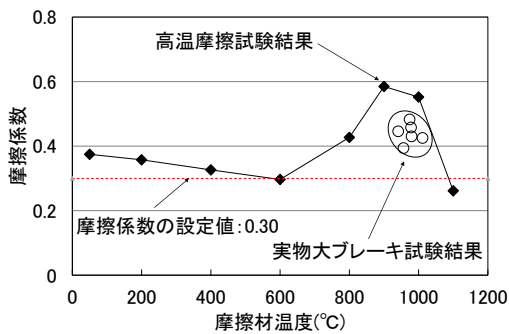
一方、C材では、実物大ブレーキ試験で得られた摩擦

特集：車両技術

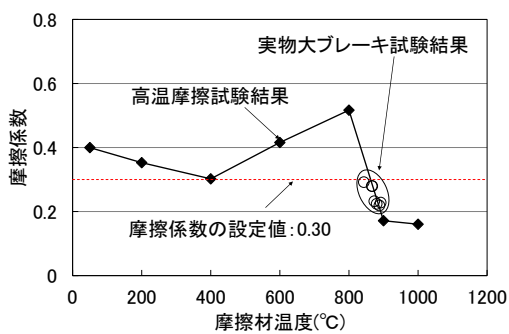
材最高温度は概ね 940℃から 1010℃，その時の瞬間摩擦係数は 0.39 から 0.49 であり，摩擦係数の設定値 0.30 を満足した。

これは，C 材が実物大ブレーキ試験において，高温摩擦試験で確認された摩擦係数が落ち込むような高温状態に至らなかったものと推測される。このことは，摩擦材の性能が確保される使用可能な目安温度，すなわち限界温度を見極める目的に対しては，実物大ブレーキ試験は摩擦温度の調整が困難であり十分な評価が行えないことを示唆している。その点，高温摩擦試験は任意の温度での摩擦試験が実施可能であり，摩擦材の使用可能目安温度を確実に評価できる。

これらのことから，本稿で提案した高温摩擦試験は，実物大ブレーキ試験と相関があり，摩擦材の高温時の摩擦係数評価に適用可能である見込みが得られた。よって，本手法が摩擦材開発プロセスにおいて，実物大ブレーキ試験前における摩擦材選択のための基礎試験として有効な手法であると考えられる。



(a) C 材



(b) D 材

図 11 高温摩擦試験結果と実物大ブレーキ試験結果の比較¹⁾

5. まとめ

本稿では，実物大ブレーキ試験に比べて簡易にブレーキ摩擦材を評価する手法として，任意の温度で摩擦係数を測定可能な高温摩擦試験装置の適用可能性を検討し，実物大ブレーキ試験結果との比較により本手法の有効性を確認した。結果は以下の通りである。

- (1) スラストシリンダ式の摩擦試験装置に対し，検討した誘導加熱方式，試験片形状および試験条件を用いることで，任意の温度において再現性の高い摩擦材の摩擦係数測定が可能となった。
- (2) 高温摩擦試験によって得られた結果に対し，目標とする摩擦係数を設定することで，摩擦材の使用可能な目安温度の評価が可能となった。
- (3) 実物大ブレーキ試験によるブレーキ中の摩擦材の最高温度における瞬間摩擦係数と，高温摩擦試験から得られた摩擦係数の比較により，高温摩擦試験は実物大ブレーキ試験と相関があり，摩擦材の高温時の摩擦係数評価に適用可能である見込みが得られた。

以上により，本評価手法は実物大ブレーキ試験前における摩擦材選択のための基礎試験として有効な手法であると考えられる。

今後は，高温摩擦試験と実物大ブレーキ試験によって得られた結果を用いて本手法の精度をさらに高め，摩擦材選択の基礎試験としての確立を目指していく。

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-RAIL2017) 講演論文集，講演番号 S1-2-3，2017
- 2) 社団法人日本トライボロジー学会：トライボロジーハンドブック，養賢堂，pp.351-354，2001
- 3) 佐藤健児：金属の摩耗とその対策，養賢堂，pp.101-117，1975
- 4) 社団法人日本トライボロジー学会：摩耗・摩擦試験機とその活用，養賢堂，pp.257-262，2007
- 5) 松岡孝一：誘導加熱と誘電加熱，鉄道と電気技術，Vol.15，No.8，p.89，2004
- 6) 社団法人日本金属学会：講座・現代の金属学 材料編第 4 巻 鉄鋼材料，社団法人日本金属学会，pp.127-128，1985
- 7) 千田哲也，高橋千織，植松進，天田重庚：高温摩擦摩耗試験装置の製作と焼結アルミナの摩擦摩耗試験，船舶技術研究所報告，第 28 巻，第 2 号，pp.49-66，1990