

特集：車両技術

# 銅系焼結合金摩擦材の基材耐熱性が摩擦係数に与える影響評価手法

西森 久宜\* 狩野 泰\* 阪井 章悟\*\* 辻 貴史\*

Evaluation Method of Effects of Heat Resistance of Copper-based Sintered Alloy Base Material on Friction Coefficient

Hisanori NISHIMORI Yasushi KARINO Shogo SAKAI Takafumi TSUJI

Train mechanical brake converts kinetic energy into friction heat, which is emitted, to obtain braking force. Therefore, when, a shortening a stopping distance for the improvement of safety is required, the heat load in the brake increases. Then, the friction material used for the brake is required to have the thermally stable friction coefficient in addition to the heat capacity capable of accepting a given kinetic energy. Therefore, we have focused our study on the evaluation method of brake friction materials used in Shinkansen, especially copper-based sintered alloy. We conducted experimental investigations, such as thermal analysis of solid lubricants and measurement of friction coefficient using a high-temperature friction test apparatus. This paper introduces the developed evaluation method of the heat resistance of base materials on the experiment results.

キーワード：新幹線用ブレーキ摩擦材，固体潤滑材，摩擦材基材，熱分析，摩擦係数，高温摩擦試験装置

## 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して放出する装置である。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、一層の安全性向上を目的に停止距離を短縮するためにはブレーキ力の向上に伴う熱負荷の増大が生じる。そのため、ブレーキ摩擦材には所定の運動エネルギーを受容する熱容量の確保に加え、熱的に安定した摩擦係数の確保が求められる。

これらの要求を満足する摩擦材の選定のため、実物大台上試験機を用いてブレーキ試験を実施し、減速度や停止距離、摩擦係数などブレーキ性能に直接関わる評価、車輪・ディスクや摩擦材の温度など各種仕様に基づく確認を行う。ここで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、より優れた高温特性が期待される摩擦材を準備し、設定されたブレーキ性能を満足する摩擦材が完成するまで、実物大台上試験（以降、ベンチ試験とよぶ）を繰り返し実施することとなる。

このように、ベンチ試験は最終的なブレーキ性能評価には必要不可欠である一方、高温時の摩擦係数を評価することに着目した場合には、膨大な時間と労力を費やす試験でもある。そこで、ベンチ試験に比べて簡易に摩擦材を評価する手法として、筆者らは室温から1,100℃まで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てきた<sup>1)2)3)</sup>。本稿では新幹線の

ブレーキ摩擦材として用いられてきた銅系焼結合金摩擦材（以降、摩擦材とよぶ）を対象に、熱負荷を受けた摩擦材の組織観察から確認された摩擦材に含まれる固体潤滑材および基材の変化に着目して、固体潤滑材の熱的变化と摩擦係数の関係を実験的に調査・分析し、得られた結果を用いて摩擦材の基材耐熱性が摩擦係数に与える影響を評価する手法について報告する<sup>4)</sup>。

## 2. 熱負荷を受けた摩擦材の組織観察

銅系焼結合金摩擦材は、銅を主体とした基材と固体潤滑材や摩擦調整材などから構成され、所望の摩擦係数値が得られるよう各成分の配合割合が調整されている。そこで、摩擦材を構成する各成分が摩擦熱によって生じる変化を調査するため、熱負荷を履歴する前の新品摩擦材、ベンチ試験および大気炉加熱により熱負荷を受けた後の摩擦材を準備し、表面近傍の組織分析を実施した。

### 2.1 ベンチ試験による熱負荷を受けた摩擦材

組織分析には、電子顕微鏡（SEM）による組織観察およびエネルギー分散型X線分析（EDX）による元素分析を行い、元素分析の対象として、固体潤滑材に用いられている黒鉛（炭素）、基材の主成分である銅および熱負荷による酸化現象を想定した酸素の3元素を選択した。図1にベンチ試験による熱負荷前後の組織分析結果を示す。なお、ベンチ試験後の摩擦材は、ブレーキ時に850℃以上の温度を履歴したものを選定した。

図1より、ベンチ試験による熱負荷前後で各元素の検出状態を比較すると、黒鉛は熱履歴を受けることで灰色

\* 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）

の検出領域が減少した。これは熱負荷により黒鉛が減少したことを示唆している。一方、酸素に注目すると熱負荷前にはほぼ検出されていないが、熱負荷後には灰色の検出領域が急増した。この熱負荷後における酸素の検出領域は、同じく熱負荷後の銅の検出領域と一致することから、熱負荷によって銅が酸化銅に変化したことが推測される。

## 2.2 大気炉加熱による熱負荷を受けた摩擦材

ベンチ試験により熱負荷を受けた摩擦材の調査より、熱履歴によって摩擦材に含まれる黒鉛が減少し、銅が酸化銅に変化する現象を確認した。これらの熱負荷による変化が、摩擦係数の温度依存性に影響を及ぼすものと仮

定すると、温度による摩擦材の変化をより詳細に調査する必要がある。しかしながら、ベンチ試験では摩擦熱による温度上昇が生じるため、摩擦材の温度を制御することが非常に困難である。そこで、本節ではベンチ試験に代わる熱負荷手法として、大気を雰囲気とした炉（以降、大気炉とよぶ）を用いて目標の温度まで摩擦材を加熱することで熱履歴を与える手法を採用し、大気炉加熱後の摩擦材の表面についてSEMによる組織観察およびEDXによる元素分析を実施した。表1に摩擦材に熱負荷を与える大気炉加熱の条件を示す。摩擦材は大気炉が目標の温度に達した後に炉内へ投入し、15分間炉内で等温保持した後に大気炉外へ取り出した。摩擦材を取り出し後はそのまま大気中で冷却した。また、EDXによる元素分析は、黒鉛、銅、酸素を対象とした。

表1 大気炉加熱による熱負荷条件

加熱温度	室温, 400°C, 400°C以降は1000°Cまで100°C刻み
加熱雰囲気	大気
保持時間	15分（目標の温度に到達後, 摩擦材を炉内に投入）
冷却方法	大気炉外の大気雰囲気下による 自然冷却

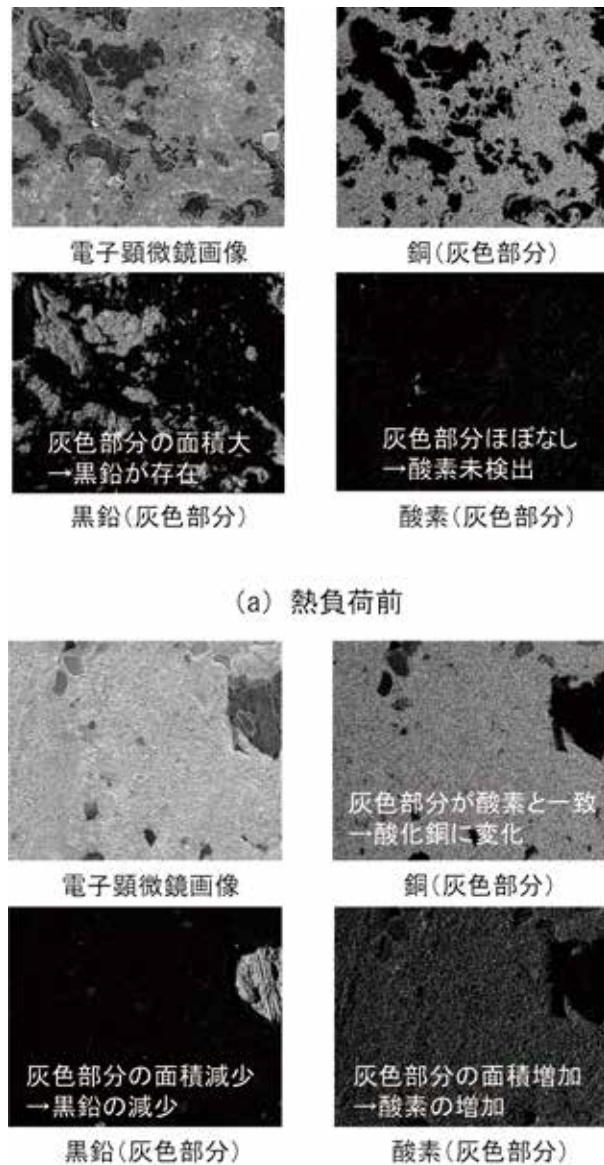


図1 ベンチ試験前後の摩擦材組織分析結果

組織分析結果の代表例として、熱負荷前および最大の熱負荷となる履歴温度 1,000°C の摩擦材の組織分析結果を図2に示す。各元素の変化としては、黒鉛は熱履歴前から履歴温度 600°C までは灰色の検出領域が認められたものの、履歴温度 700°C では灰色の検出領域が急激に減少し、履歴温度 1,000°C では図2 (b) に示すように黒鉛の検出はほぼ認められなかった。一方、酸素については履歴温度が上昇するにしたがい、検出される灰色の濃淡が濃くなる様子が確認された。また、酸素の検出領域は銅の検出領域と一致しており、ベンチ試験による熱負荷後の状況と同様の現象が確認された。また、図3は熱負荷前および1,000°Cの履歴を受けた摩擦材について、電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）を用いて表面から深さ方向にかけて摩擦材の元素分析を行った結果である。1,000°Cの履歴を受けた摩擦材は表面から深さ500μmの領域において黒鉛が検出されなかった。また、この領域では酸素の検出強度が500μmより深い領域に比べて強く、逆に銅の検出強度は500μmより深い領域に比べて減少していることから、深さ500μmまでの領域では酸化銅を形成しているものと考えられる。

これら大気炉加熱による熱負荷を受けた摩擦材の調査から、黒鉛は600°Cから700°Cを境界として急激に減少する変化が生じること、熱履歴を受けることで銅が酸化

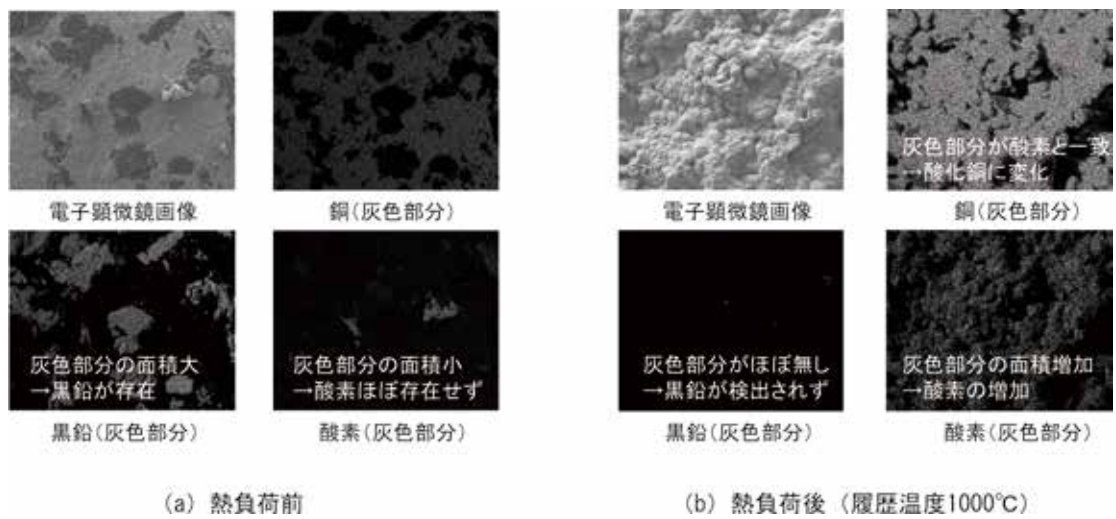


図2 大気炉加熱前後の摩擦材組織分析結果 (代表例)

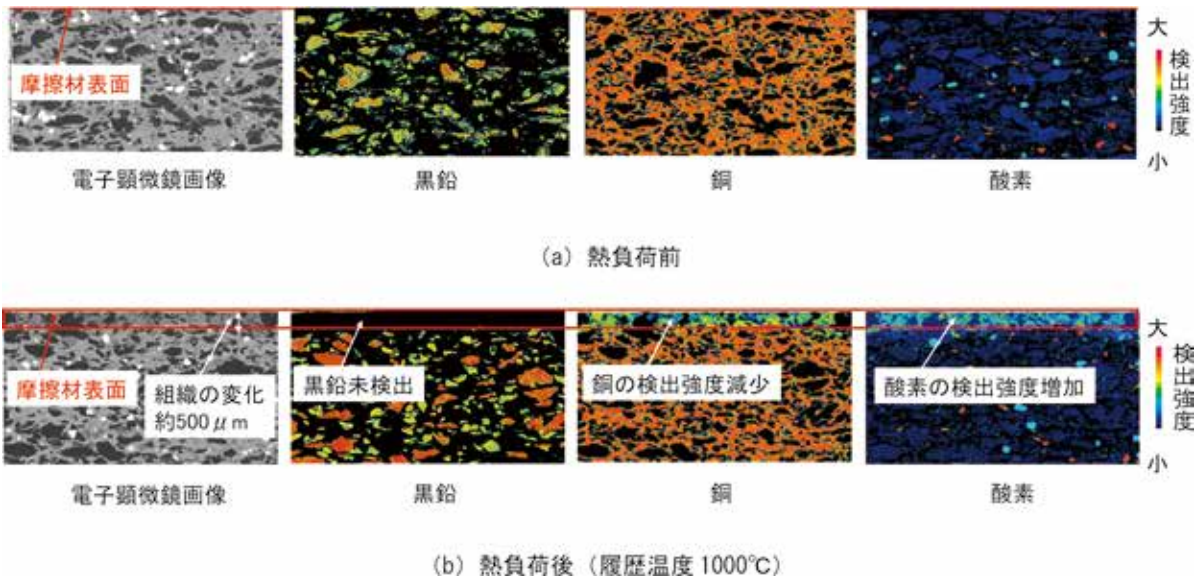


図3 EPMA による表面から深さ方向の摩擦材組織分析結果

銅に徐々に変化することが推測された。また、1,000°Cの熱履歴を受けた摩擦材では、表面から深さ500μmまで摩擦材組織の変化が及ぶことが確認された。

### 3. 固体潤滑材の熱分析

熱負荷を受けた摩擦材の組織分析より、黒鉛および銅が熱負荷によって変化することが明らかとなった。この中で、固体潤滑材として摩擦材に配合されている黒鉛は安定した摩擦係数の確保に大きな役割を果たすことから、黒鉛の減少は摩擦係数の変化に多大な影響を及ぼすものと考えられる。そこで、本稿で対象とした新幹線用ブレーキ摩擦材に使用されている黒鉛のほか、他の産業分野で使用されている六方晶窒化ホウ素、二硫化モリブデン、二硫化タングステンなど、合計4種類の固体潤滑

材について熱負荷による変化を調査するため熱分析を実施した。

#### 3.1 熱分析の概要

固体潤滑材の熱分析として、JIS K0129 (熱分析通則)で規定されている手法を用いて、大気雰囲気下における固体潤滑材の熱的変化の調査を行った<sup>5)</sup>。黒鉛および六方晶窒化ホウ素は示差熱-熱重量同時分析 (TG-DTA)、二硫化モリブデンおよび二硫化タングstenは示差熱-熱重量/質量同時分析 (TG-DTA/MS) を実施した。表2に熱分析条件を示す。

#### 3.2 熱分析結果

黒鉛の熱分析結果を図4に、六方晶窒化ホウ素の熱分析結果を図5に、二硫化モリブデンの熱分析結果を図6

表2 熱分析条件<sup>4)</sup>

試料条件		測定項目			雰囲気条件		温度条件	
試料(粉末)	重量	TG <sup>※3</sup>	DTA <sup>※3</sup>	MS	雰囲気ガス	ガス流量	温度範囲	昇温速度
黒鉛	20mg	○	○	—	大気	200ml/min	室温～1500℃ <sup>※2</sup>	5℃/min
六方晶窒化ホウ素	20mg	○	○	—	大気			
二硫化モリブデン	2.7mg	○	○	○	擬似大気 <sup>※1</sup>			
二硫化タングステン	2.7mg	○	○	○	擬似大気 <sup>※1</sup>			

※1 測定装置の構成上、活性ガス (O<sub>2</sub>) と不活性ガス (He) の混合による擬似大気 (20%O<sub>2</sub>-He) とした。

※2 測定装置で測定可能な最大の温度範囲とした。

※3 基準物質には、測定温度範囲内 (室温～1500℃) で物理変化および化学変化のないα-アルミナを選択した。

に、二硫化タングステンの熱分析結果を図7に示す。

(1) 黒鉛

図4に示すTG曲線から黒鉛は600℃で重量が減少し始め、700℃付近から重量減少が顕著となり、950℃で熱重量変化が0%となった。これは、950℃で黒鉛が全て消失し重量減少が終了したことを意味している。DTA曲線では800℃から950℃にかけて発熱反応が生じており、900℃で発熱反応のピークが確認された。これらTG-DTAの結果から、黒鉛は600℃から分析装置内の酸素と結合して燃焼反応が生じ、黒鉛が一酸化炭素または二酸化炭素に変化することで重量減少が生じたものと考えられる。

(2) 六方晶窒化ホウ素

図5のTG曲線から、六方晶窒化ホウ素は1,000℃までは重量変化が生じず、1,000℃以降から重量増加が始まり、1,370℃で最大となった後は重量減少に転じた。DTA曲線では、1,245℃に発熱反応、1,370℃に吸熱反応とみられる緩やかなピークが確認された。これらTG-DTAの結果より、六方晶窒化ホウ素は大気雰囲気下においても1,000℃までは化学変化および物理変化が生じず熱的に安定であることが確認された。

(3) 二硫化モリブデン

図6のTG曲線から、二硫化モリブデンは50℃から重量減少が始まり、重量減少傾向の変化点が350℃、510℃、560℃、700℃、770℃の5箇所を確認された。特に700℃の変化点以降は大幅な重量減少となり、

820℃で熱重量変化が0%となった。DTA曲線では、520℃、570℃、760℃に吸熱反応のピークが確認された。さらにMSの測定において、260℃から600℃にかけて気体が検出されており、特に540℃に気体の発生ピークが確認された。この発生した気体のマススペクトル *m/z* は48と64であったことから、発生した気体はそれぞれ一酸化硫黄および二酸化硫黄であると推定された。これらTG-DTA/MSの結果より、600℃以下では重量減少傾向の変化点と吸熱反応のピークが近い温度であることと、540℃で一酸化硫黄と二酸化硫黄と推定される気体の発生ピークが検出されたことから、擬似大気雰囲気下の二硫化モリブデンは260℃から分析装置内の酸素と結合し、温度上昇とともに段階的に酸化物に変化したものと考えられる。

(4) 二硫化タングステン

図7のTG曲線から、二硫化タングステンは100℃から重量減少が始まり、重量減少傾向の変化点が400℃、850℃、1,150℃、1,350℃の4箇所を確認され、特に1,150℃の変化点以降は大幅な重量減少となった。DTA曲線では、400℃から1,200℃にかけて吸熱反応が生じており、1,185℃に吸熱反応のピークが確認された。さらにMSの測定において、300℃から700℃にかけて気体が検出されており、特に420℃と590℃に気体の発生ピークが確認された。この発生した気体のマススペクトル *m/z* は48と64であったことから、発生した気体はそれぞれ一酸化硫黄および二酸化硫黄であると推定され

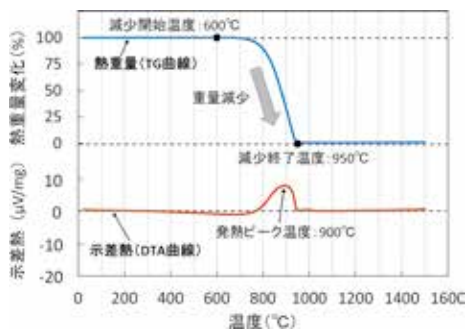


図4 黒鉛の熱分析結果<sup>3)</sup>を一部改変

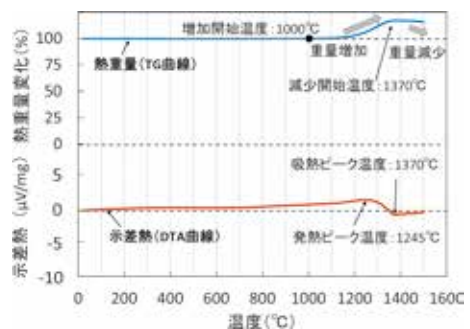


図5 六方晶窒化ホウ素の熱分析結果<sup>4)</sup>を一部改変

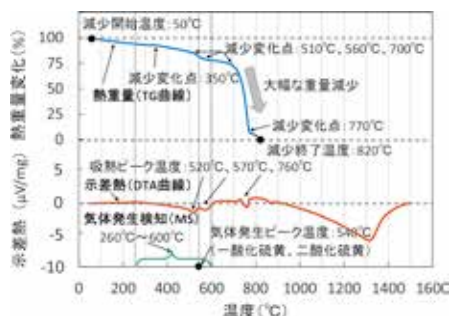


図6 二硫化モリブデンの熱分析結果<sup>4)</sup>を一部改変

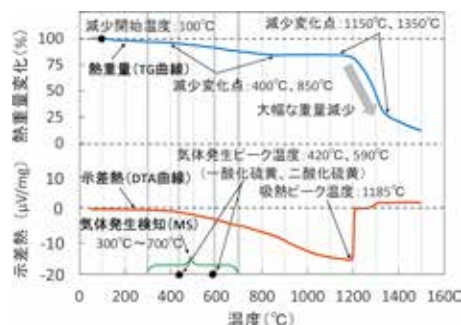


図7 二硫化タングステンの熱分析結果<sup>4)</sup>を一部改変

た。これら TG-DTA/MS の結果より、400°Cで重量減少傾向の変化点と吸熱反応の開始が認められることと、420°Cで一酸化硫黄と二酸化硫黄と推定される気体の発生ピークが検出されたことから、擬似大気雰囲気下の二硫化タングステンは300°Cから分析装置内の酸素と結合し、温度上昇とともに段階的に酸化物に変化したものと考えられる。

#### 4. 摩擦材の基材耐熱性に関する評価手法

固体潤滑材の熱分析結果より、変化開始温度は六方晶窒化ホウ素が最も高く、1,000°Cまで熱的に安定した固体潤滑材であることが確認された。これは、摩擦材に配合している黒鉛に代えて六方晶窒化ホウ素を配合した摩擦材とすることで、これまでは固体潤滑材の熱的变化に起因する摩擦係数の変化に隠れて評価が困難であった銅系焼結合金摩擦材の基材耐熱性評価が可能になることを示唆するものである。そこで、固体潤滑材に六方晶窒化ホウ素を用いた摩擦材を作製し、高温摩擦試験を実施することで、摩擦材基材の耐熱性評価の可能性を検討した。

##### 4.1 高温摩擦試験の概要

摩擦材基材の耐熱性評価の検討では、第一段階として、黒鉛を固体潤滑材として配合したA材および六方晶窒化ホウ素を固体潤滑材として配合したB材を準備し、高温摩擦試験でA材とB材の平均摩擦係数が変化する温度領域を比較した。次の段階では、六方晶窒化ホウ素を固体潤滑材として配合しているが、合金部分にB材と異なる金属基材を適用したC材を準備し、高温摩擦試験により摩擦材基材の耐熱性評価を実施した。高温摩擦試験条件を表3に示す。

##### 4.2 試験結果の整理方法

高温摩擦試験で得られた結果の整理には、各試験温度における摩擦係数の平均値（以降、平均摩擦係数とよぶ）の変化傾向をより明瞭に把握するため、本研究ではある特定の温度における平均摩擦係数 $f_m$ を基準として、そ

表3 高温摩擦試験の試験条件<sup>1)</sup>を一部改変

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

他の試験温度の平均摩擦係数 $f_e$ がどの程度変化したかを表す平均摩擦係数変化率 $\alpha$ を指標に用いることとした。式(1)に平均摩擦係数変化率の算出式を示す。

$$\alpha = \left( \frac{f_e}{f_m} - 1 \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

なお、基準となる平均摩擦係数には、黒鉛の熱的变化開始温度（熱重量変化）が600°Cであることから、各摩擦材の600°Cにおける平均摩擦係数を基準とした。

##### 4.3 固体潤滑材の熱的变化と摩擦係数の関係

図8にA材の高温摩擦試験の整理結果を示す。なお、図8には黒鉛のTG-DTA測定結果もあわせて記載する。図8より、平均摩擦係数変化率（以降、変化率とよぶ）は200°Cから500°Cまでは温度上昇によらずほぼ一定であった。しかし、700°Cで変化率が正方向に変動、すなわち摩擦係数が上昇し800°Cで最大となった後、900°Cで変化率は負方向に大きく変動、すなわち摩擦係数の大幅な低下を示した。変化率の正方向への変動が見られた変化点である600°Cから700°Cは、TG-DTAの結果より黒鉛の燃焼反応が発生する温度領域に相当しており、800°Cで変化率が最大になった点も燃焼反応による黒鉛の減少が影響したものと考えられる。

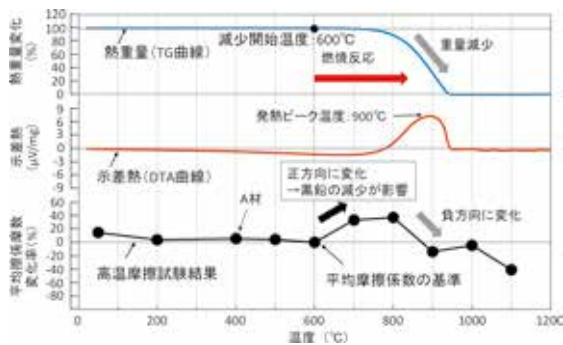


図8 A材の高温摩擦試験整理結果および摩擦係数と黒鉛の熱的变化の関係<sup>4)</sup>を一部改変

図9にB材の高温摩擦試験の整理結果を示す。なお、図9には六方晶窒化ホウ素のTG-DTA測定結果および次項で説明するC材の整理結果もあわせて記載する。図9より、変化率は200℃から500℃までは温度上昇によらず一定であった。700℃以降は温度上昇にともなって変化率は負方向、すなわち摩擦係数は低下を示し、特に900℃において大幅に低下した。TG-DTAの結果より六方晶窒化ホウ素は1,000℃まで熱的に安定であることから、1,000℃以下における変化率の変動は固体潤滑材として用いた六方晶窒化ホウ素の影響ではなく、基材耐熱性の影響によるものと考えられる。このように、高温摩擦試験結果で得られたA・B両材における変化率を比較すると、摩擦材に配合した固体潤滑材の熱的变化の差異が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

#### 4.4 摩擦材の基材耐熱性評価手法

図9にC材の高温摩擦試験の整理結果を示す。B材とC材の変化率を比較すると、室温から800℃までは温度に対する変化率の変動は両材とも同じ傾向を示した。しかしながら、900℃以降でB材は変化率が負方向となり摩擦係数が低下するのに対し、C材では900℃以降も変化率は正の値を示しており、B材に比べてより高

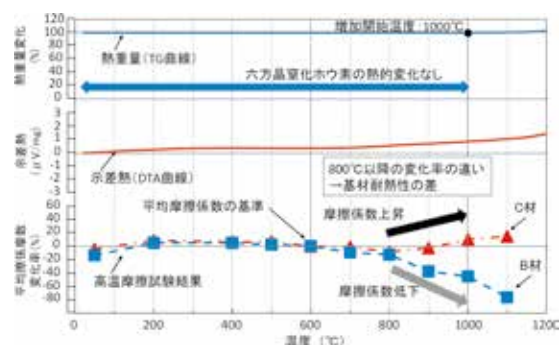


図9 B材およびC材の高温摩擦試験整理結果比較<sup>4)</sup>を一部改変

温領域まで室温時と同等以上の摩擦係数を維持することが明瞭に確認された。この結果から、固体潤滑材に六方晶窒化ホウ素を適用することで、摩擦係数の変化率を指標とした摩擦材基材の耐熱性評価が可能になると考えられる。

## 5. まとめ

実物大台上試験は最終的なブレーキ性能評価に必要な不可欠であるが、高温時の摩擦材を評価することに着目すると、膨大な時間と労力を費やす試験でもある。

本稿では、実物大台上試験に比べて簡易に摩擦材を評価する手法として、摩擦材に含まれる固体潤滑材の熱的变化と摩擦係数の関係を実験的に調査・分析し、熱的に安定な六方晶窒化ホウ素を固体潤滑材に適用した摩擦材による基材耐熱性の評価手法を提案した。

今後は、実物大台上試験結果との比較・検証を重ねて摩擦材の評価手法としての妥当性・信頼性を高め、新幹線用ブレーキ摩擦材の開発プロセスにおいて、本手法を実物大台上試験前における摩擦材選択の基礎試験として活用していきたいと考える。

## 謝辞

本研究における各種試験の実施にあたり、株式会社ファインシンターの関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

## 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, No.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
- 3) 狩野泰, 西森久宜, 阪井章悟, 藤田慧: 新幹線用ブレーキ摩擦材に関する最近の評価技術, トライボロジスト, Vol.65, No.12, pp.730-735, 2020
- 4) 西森久宜, 狩野泰, 阪井章悟, 辻貴史, 北澤結寿華: 銅系焼結合金摩擦材の基材耐熱性に関する新たな評価手法の提案, 第27回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020) 講演論文集, No.S1-2-2, 2020
- 5) 日本工業規格: JIS K0129, 2005