

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

○ [機] 西森 久宜 狩野 泰 阪井 章悟

辻 貴史 (鉄道総研) 北澤 結寿華 (東海旅客鉄道)

New Proposal for Evaluating Heat Resistance of Base Materials Composing Copper-based Sintered Alloys

○Hisanori Nishimori, Yasushi Karino, Shogo Sakai,
Takafumi Tsuji, (Railway Technical Research Institute)
Yuzuka Kitazawa, (Central Japan Railway Company)

Mechanical brake can obtain deceleration effects by friction force, which is generated by pushing friction material to a wheel or a brake disc. At the increased heat load such as shortening of braking distance for the improvement of safety, friction material is required to have the heat capacity which can accept given kinetic energy and furthermore stability of friction coefficient against the heat load. As a new evaluation method for Shinkansen vehicle brake friction material, this paper introduces a method for evaluating heat resistance of base materials composing copper-based sintered alloys using a high-temperature friction test apparatus which enables us to measure friction coefficient up to 1100 degree Celsius

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

Key Words : Shinkansen vehicle friction materials, solid lubricant, base materials, thermal analysis, friction coefficient, high-temperature friction test apparatus

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もので、ブレーキ摩擦材（以降、摩擦材という）を車輪やディスクに押し当て、その際に発生する摩擦熱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、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、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には、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、現状よりも不足の小さい摩擦材を準備し、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、実物大台上試験を繰り返し実施することとなる。このように、実物大台上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、膨大な時間と労力を費やす試験でもある。そこで、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、筆者らは室温から 1100℃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^{1), 2), 3)}。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（以下、摩擦材とよぶ）を対象に、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、得られた結果を用いて摩擦材の基材耐熱性に関する新たな評価手法（固体潤滑材の摩擦係数に及ぼす温度依存性の影響を少なくし、基材の耐熱性を明瞭にする）を検討したので提案する。

2. 固体潤滑材の熱分析

2.1 熱分析の概要

摩擦材に含まれる固体潤滑材は、摩擦係数に影響を及ぼす大きな要素である。熱的に安定した摩擦係数の確保のためには、固体潤滑材が温度によらず安定した潤滑性能を示すことが望ましい。一方で、ブレーキ時の摩擦材は大気雰囲気下で高温状態となるため、酸化などの化学変化や融解などの物理変化によって固体潤滑材の性能は刻々と変化する

ることが想定される．そこで，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⁴⁾．調査対象とした固体潤滑材には，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の合計4材質を選定した．表1に熱分析条件を示す．

2.2 熱分析結果

黒鉛の熱分析結果を図1に，六方晶窒化ホウ素の熱分析結果を図2に，二硫化モリブデンの熱分析結果を図3に，二硫化タングステンの熱分析結果を図4にそれぞれ示す．

（1）黒鉛

図1より，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%を示した．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，600℃から黒鉛は分析装置内の酸素と結合し燃焼反応が生じ，黒鉛が一酸化炭素または二酸化炭素へ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2より，TG曲線から六方晶窒化ホウ素は1000℃までは重量変化が生じず，1000℃以降から重量増加が始まり1370℃で最大となった後は重量減少に転じた．DTA曲線では，1245℃に発熱反応，1370℃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1000℃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3より，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，重量減少の変曲点が350℃，510℃，560℃，700℃，770℃の5箇所を確認された．特に700℃の変曲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質量数は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へ変化したものと考えられる．

（4）二硫化タングステン

図4より，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，重量減少の変曲点が400℃，850℃，1150℃，1350℃の4箇所を確認され，特に1150℃の変曲点以降は大幅な重量減少となった．DTA曲線では，400℃から1200℃にかけて吸熱反応が生じており，1185℃に吸

表1 熱分析条件

試料条件		測定項目			雰囲気条件		温度条件	
試料（粉末）	重量	TG※3	DTA※3	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℃※2	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※1			
二硫化タングステン	2.7mg	○	○	○	擬似大気※1			

※1 測定装置の構成上，活性ガス（O₂）と不活性ガス（He）の混合による擬似大気（20%O₂-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．

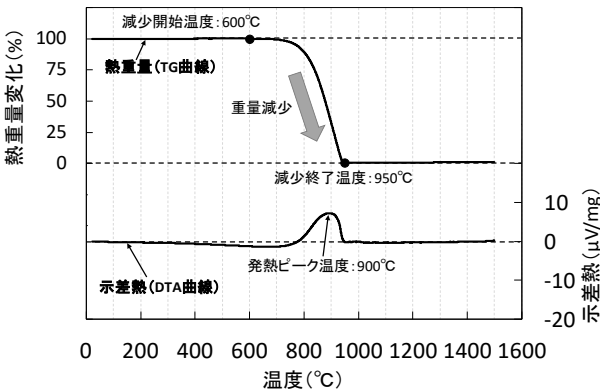


図1 黒鉛の熱分析結果（TG-DTA）

[出典：参考文献3)より一部改編]

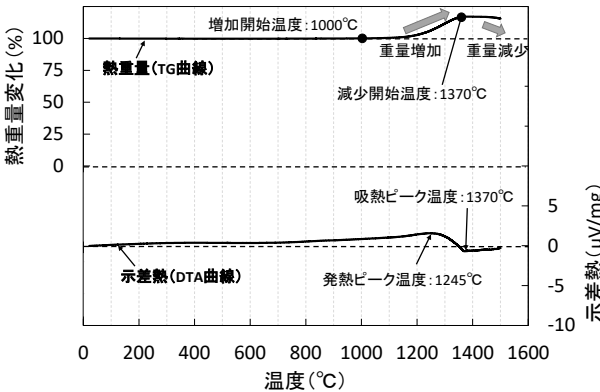


図2 六方晶窒化ホウ素の熱分析結果（TG-DTA）

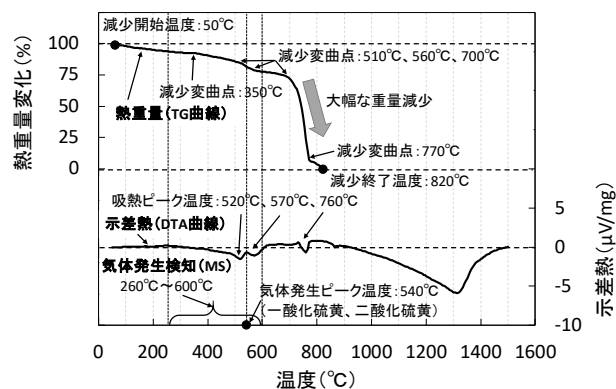


図3 二硫化モリブデンの熱分析結果 (TG-DTA/MS)

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質量数は 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、400℃の重量減少変化点と 420℃の吸熱反応のピークが近い温度であることと、420℃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℃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へ変化したものと考えられる。

3. 摩擦材の基材耐熱性に関する新たな評価手法

3.1 黒鉛より熱的に安定した固体潤滑材

前章で得られた熱分析結果より、各固体潤滑材の熱重量変化開始温度と反応ピーク温度を表 2 にまとめ、熱的安定性を比較した。その結果、熱重量変化開始温度、反応ピーク温度のいずれにおいても、六方晶窒化ホウ素が最も高く、1000℃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。このことは、摩擦材に配合している黒鉛の替わりとして、熱的変化が 1000℃まで生じず高温まで熱的に安定な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変化が摩擦係数に及ぼす影響に隠

表 2 固体潤滑材の熱的変化開始温度比較結果

固体潤滑材	熱重量変化	反応ピーク
黒鉛	600℃	900℃
六方晶窒化ホウ素	1000℃	1245℃
二硫化モリブデン	50℃	540℃
二硫化タングステン	100℃	420℃

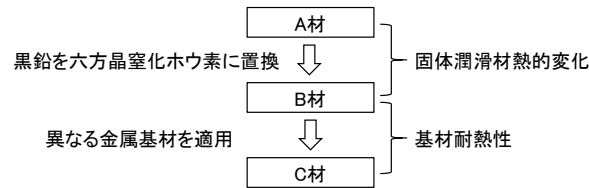


図5 高温摩擦試験のフロー

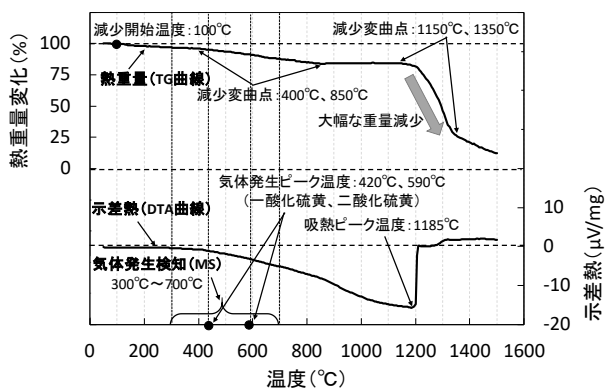


図4 二硫化タングステンの熱分析結果 (TG-DTA/MS)

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の可能性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。

3.2 高温摩擦試験の概要

高温摩擦試験のフローを図 5 に、試験条件を表 3 に示す。なお、高温摩擦試験装置の概要については、筆者らの過去の研究報告を参考とされたい^{1), 2), 3)}。第一段階では、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昇温により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、高温摩擦試験で摩擦材基材の耐熱性評価を実施した。

3.3 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 μ_0 を基準として、その他の試験温度の平均摩擦係数 μ がどの程度変化したかを表す平均摩擦係数変化率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。

表 3 高温摩擦試験の試験条件

[出典：参考文献 1) を一部改編]

面圧	1.1MPa
しゅう動面積	11cm ²
接触面有効半径	35mm
摩擦速度	0.11m/s
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)
試験環境	大気雰囲気

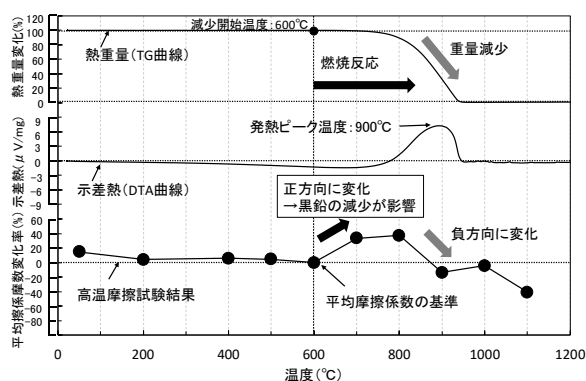


図6 A材の高温摩擦試験整理結果

$$\left(\frac{f_e}{f_m} - 1\right) \times 100[\%] \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、基準となる平均摩擦係数には、表2に示すように黒鉛の熱的変化開始温度（熱重量変化）が600℃であることから、各摩擦材の600℃における平均摩擦係数を基準とした。

3.4 固体潤滑材の熱的変化と摩擦係数の関係

図6にA材の高温摩擦試験の整理結果を示す。なお、図6には黒鉛のTG-DTA測定結果もあわせて記載する。図6より、平均摩擦係数変化率（以降、変化率とよぶ）は200℃から500℃までは温度上昇によらずほぼ一定であった。しかし、700℃で変化率は正方向に変動、すなわち摩擦係数が上昇し800℃で最大となった後、900℃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℃から700℃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℃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。

また、図7にB材の高温摩擦試験の整理結果を示す。なお、図7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7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。一方、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1000℃まで熱的に安定であることから、1000℃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は小さいと考えられる。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変化の差異が大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

3.5 摩擦材の基材耐熱性評価手法

図7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

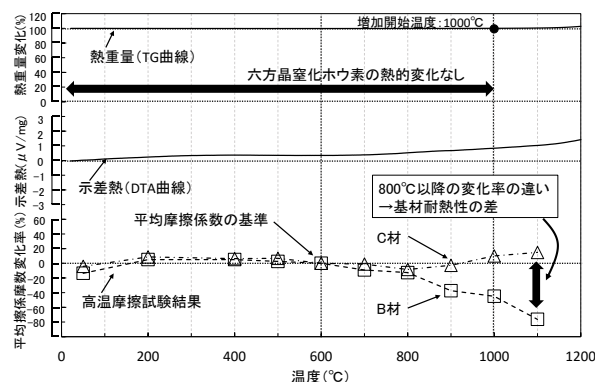


図7 B材およびC材の高温摩擦試験整理結果

値を示しており、B材に比べてより高温領域まで室温時と同等以上の摩擦係数を維持してい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ものと考えられる。

5. おわりに

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した場合、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変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紹介した。

今後の新幹線用ブレーキ摩擦材の開発プロセスにおいて、本手法を実物大ブレーキ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

本研究を進めるにあたってご協力をいただいた㈱ファインシンターの関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 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)，CD-ROM, 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，No.8/V32，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，No.12/V65, 2020.
- 4) 日本工業規格 JIS K0129 (2005)