

## 表面・界面物性解析装置 (SAICAS) を用いた 銅系焼結合金の機械特性評価手法の検討

松原 孝聡\* 西森 久宜 野澤 仁裕 狩野 泰 (鉄道総研)

Investigation of Mechanical Property Evaluation Method for Copper-based Sintered Alloys Using SAICAS

Takatoshi Matsubara\*, Hisanori Nishimori, Masahiro Nozawa, Yasushi Karino, (Railway Technical Research Institute)

To evaluate the friction and wear characteristics of copper-based sintered alloy used in Shinkansen for brake friction materials, mechanical property evaluation method for base material of copper-based sintered alloy using SAICAS was investigated. Cutting force measurements were carried out on four types of copper-based sintered alloy samples, and the shear strength of each sample was estimated. A correlation was confirmed between the estimated shear strength and Vickers hardness. These results suggest that by evaluating estimated shear strength using SAICAS, it is possible to evaluate the mechanical property of copper-based sintered alloy effectively.

キーワード：銅系焼結合金，ブレーキ摩擦材，機械特性評価，せん断強度，表面・界面物性解析装置 (SAICAS)  
(Keywords, Copper-based sintered alloy, Brake friction material, Mechanical property evaluation, Shear strength, SAICAS)

### 1. はじめに

鉄道車両の機械ブレーキには、車両を確実かつ安全に停止させる性能が求められることから、ブレーキ摩擦材の開発において摩擦・摩耗特性評価は重要な項目である。一般的に、摩擦材の摩擦・摩耗特性は実物大台上試験機によって評価されるが、この手法は目標とする性能を有する摩擦材が得られるまでに複数の摩擦材を準備し、繰り返し試験を実施することになり、新幹線車両を対象とした場合には試験期間が数か月に及ぶなど、膨大な労力と時間を要する<sup>(1)</sup>。

ここで、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、摩擦材の配合設計を検討する段階で摩擦・摩耗特性に関連する物性を定量的に評価できる簡易な基礎試験を適用できれば、摩擦材の開発プロセスの中で最も長期間を要する材料選択の期間を大幅に短縮できる可能性がある。そこで、新幹線用ブレーキライニングに使用されている銅系焼結合金摩擦材（以下、摩擦材）について、摩擦材基材である銅系焼結合金部（以下、基材部）の機械特性に着目し、基材部のせん断強度を推定する方法として、表面・界面物性解析装置(SAICAS: Surface And Interfacial Cutting Analysis System)の適用を検討した。

SAICAS は微小な切刃を試料表面近傍の $\mu\text{m}$  オーダーの領域に切り込ませることで、試料の切削力や異種材料界面の剥離強度を測定する装置である<sup>(2)(3)</sup>。SAICAS を用いたせん断強度評価の例として、木嶋ら<sup>(4)</sup>は高分子材料について表層から数百 $\mu\text{m}$  の深さにおけるせん断強度を測定し、他の方法

で測定した引張強度、曲げ強度などの機械特性とよい相関が得られることを示した。一方で、SAICAS を金属材料のせん断強度評価に適用した例は少ない。

本稿では、SAICAS を用いた銅系焼結合金の機械特性評価手法を検討することを目的とし、各種銅系焼結合金試料について切削力測定を実施し、試料のせん断強度を推定した。さらに、推定したせん断強度との比較のために、硬さ試験機を用いてビッカース硬さを測定し、それぞれの結果を比較・検証したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 〈2-1〉 供試材

供試材には、基準となる純銅焼結材試料、それぞれ配合の異なる銅系焼結合金試料 3 種類(試料 A, 試料 B, 試料 C)の合計 4 種類を用いた。各試料の寸法は図 1 に示すように、半径 45 mm、厚さ 10 mm の円板形とし、厚さ 8 mm の焼結試料部と厚さ 2 mm の裏金で構成されている。なお、焼結試料部と裏金は拡散焼結にて接合されている。

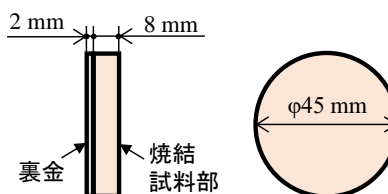


図 1 供試材の寸法

〈2・2〉 SAICAS による切削力測定およびみなしせん断強度評価方法

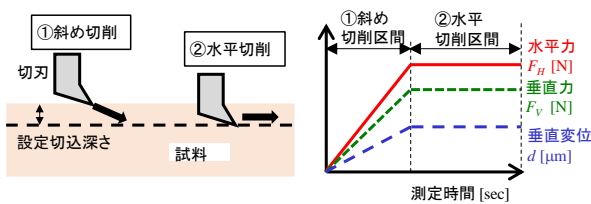
切削力測定には SAICAS(ダイプラウインテス製, EN 型)を使用した。図 2(a)に切削力測定時の切刃の運動方向を示す。まず測定開始位置となる試料表面に切刃を合わせ、この点を変位の基準点とする。そして、2 軸運動によって設定切込深さに垂直変位が達するまで試料を斜めに切削する(①斜め切削)。切刃が設定切込深さに到達した後、垂直変位を固定し 1 軸運動によって水平に試料を切削する(②水平切削)。SAICAS では、一連の切削時の水平方向の抵抗力  $F_H$  (以下、水平力)、垂直方向の抵抗力  $F_V$  (以下、垂直力)、切込深さとなる切刃垂直変位  $d$  の時間変化を記録する。図 2(b)に、測定結果の波形の例を示す。斜め切削時には  $d$  の増加に伴い  $F_H$ ,  $F_V$  も増加し、水平切削時には均質な材料で定常な切削が生じていれば  $F_H$ ,  $F_V$  は一定になる。

図 3 に、切削時のモデルとなる、せん断面モデル<sup>(5)</sup>を示す。せん断面モデルでは、切削は刃先を起点にせん断角  $\phi$  の方向に連続的にせん断すべりを起こすことで生じるものとする。Merchant の最小抵抗説<sup>(6)</sup>に基づく、被削材のせん断強度  $\tau_s$  は、 $F_H$ ,  $d$ , 刃幅  $w$ ,  $\phi$  を用いて式(1)で表される。

$$\tau_s = \frac{F_H}{2dw} \tan \phi \dots \dots \dots (1)$$

西山ら<sup>(3)</sup>は Merchant の切削理論を適用し、 $\phi$  を定数とみなすことで、SAICAS の測定結果である  $F_H$  と  $d$  の線形関係から  $\tau_s$  を求めることができるものとした。このときのせん断強度を、みなしせん断強度と称する。

本研究では、水平切削中の  $F_H$  と  $d$  の平均値から式(1)を用いて各種焼結合金試料のみなしせん断強度を算出した。



(a) 切刃の運動方向 (b) 切削力測定結果の例  
図 2 SAICAS の測定原理

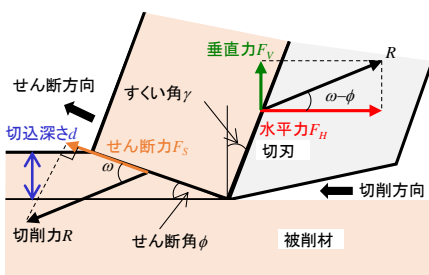


図 3 切削のせん断面モデル

〈2・3〉 切削力測定条件

SAICAS を用いた切削力測定は、表 1 に示す切刃形状および装置駆動条件で実施した。

切削中の  $F_H$  は  $d$  に対する試料表面の変位の大きさの影響を受ける。通常、摩擦材の表面は数  $\mu\text{m}$  オーダー以上の凹凸を有するため、この影響を除去するために、SAICAS を用いて幅 1.0 mm、深さ 20  $\mu\text{m}$  の前処理加工面を作成し、測定はこの前処理加工面内で実施した。図 4(a)に測定中の切り屑生成の様子、図 4(b)に測定後の切削面の写真を示す。各測定では、図 4(a)に示すような厚さ一定の流れ型切り屑が生成されており、定常な切削が得られていることを確認した。

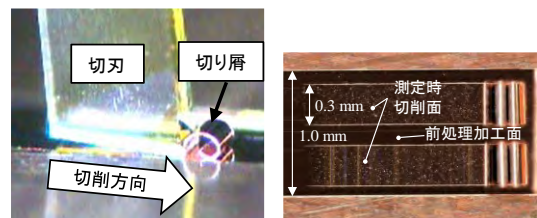
切削中の水平変位  $X$  は、測定時間  $t$  と水平速度  $v_x$  の関係から  $X = v_x t$  とし、各測定における  $F_H$  と  $d$  の測定値は、水平切削中の  $0.5 < X < 1.5 \text{ mm}$  における平均値を用いた。このとき得られた  $F_H$ ,  $d$  から、式(1)よりみなしせん断強度  $\tau_s$  を算出した。なお、せん断角は  $\phi = 45 \text{ deg}$  とした。

$\tau_s$  の比較は基準となる純銅焼結材試料に対するみなしせん断強度比  $\tau_s'$  を用いて行った。10 回の切削力測定における純銅焼結材試料のみなしせん断強度の平均値を  $\tau_{s(\text{Cu})}$  とし、 $\tau_s'$  を式(2)より算出した。

$$\tau_s' = \frac{\tau_s}{\tau_{s(\text{Cu})}} \dots \dots \dots (2)$$

表 1 切削力測定条件

切刃形状	刃幅	$w = 0.3 \text{ [mm]}$
	すくい角	$\gamma = 5 \text{ [deg]}$
	材質	単結晶ダイヤモンド
装置稼働条件	切込深さ	$d_{\text{max}} = 10 \text{ [}\mu\text{m]}$
	水平切削速度	$v_x = 5 \text{ [}\mu\text{m/sec]}$
	垂直切削速度	$v_y = 0.3 \text{ [}\mu\text{m/sec]}$
	測定時間	$t_{\text{max}} = 150 \text{ [sec]}$
測定回数		$n = 10$



(a) 切削時の切り屑生成 (b) 測定後の切削面

図 4 純銅焼結材試料の切削時の写真

〈2・4〉 ビッカース硬さ測定

SAICAS による切削力測定結果から算出したみなしせん断強度との比較として、金属材料の機械特性との相関性が高い物性値である硬さについて、ビッカース硬さ試験機(ミットヨ製, HV-100)を用いて各試料のビッカース硬さ

HVを測定した。表2にビッカース硬さの測定条件を示す。

ビッカース硬さ測定は切削力測定と同様に、SAICASを用いて幅1.0mm、深さ20μmの前処理加工面を作成し、この前処理加工面内で実施した。図5に、同条件における純銅焼結材試料の硬さ測定時の圧痕の写真を示す。いずれの試料も、SAICASによる前処理加工面の粗さが、圧痕の形成および読み取りに影響しないことを確認した。

硬さの比較は、基準となる純銅焼結材試料に対する硬さ比HV'を用いた。9回の硬さ測定における純銅焼結材試料のHVの平均値をHV(Cu)とし、HV'を式(3)より算出した。

$$HV' = \frac{HV}{HV_{(Cu)}} \dots \dots \dots (3)$$

表2 ビッカース硬さ測定条件

試験力	W = 5 [kgf]
保持時間	T = 10 [sec]
測定回数	n = 9

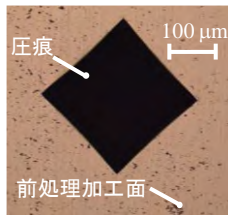


図5 純銅焼結材試料の硬さ測定面の写真

### 3. 結果と考察

#### (3・1) 切削力およびみなしせん断強度測定結果

図6に、切削力測定の結果、水平力FH、垂直力FV、垂直変位dの代表的な試験結果を示す。水平切削中のFHは、試料C > 試料B > 試料A > 純銅焼結材試料の順に大きい。

図7に、各試料の0.5 < X < 1.5 mmにおけるFH、dの平均値から算出した純銅焼結材試料に対するみなしせん断強度比σ'を示す。純銅焼結材試料に対して、平均値では試料Aが158%、試料Bが220%、試料Cが272%増加しており、SAICASの測定結果から、各試料の合金の配合によるせん断強度の違いを、有意に評価できることを示している。

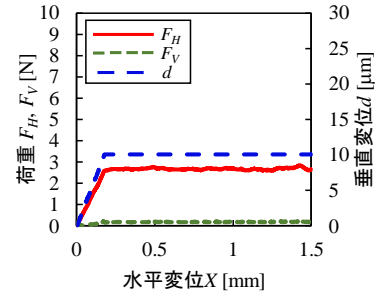
#### (3・2) ビッカース硬さ測定結果

図8に、各試料の純銅焼結材試料に対する硬さの比HV'を示す。ビッカース硬さは平均値では試料Aが112%、試料Bが183%、試料Cが190%増加する結果となった。

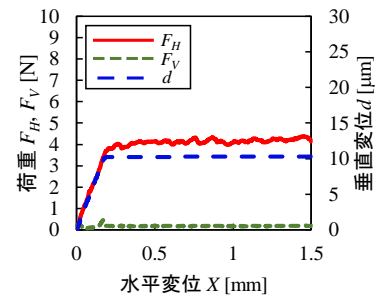
#### (3・3) 考察

図9に、硬さとみなしせん断強度の関係を示す。硬さとみなしせん断強度の間には相関性が確認され、SAICASを用いた切削力測定結果から推定したみなしせん断強度が、銅系

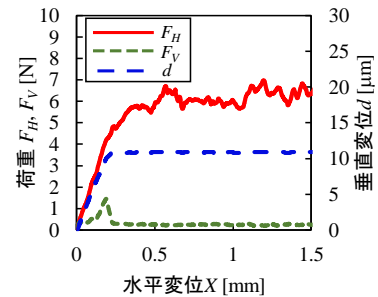
焼結合金の機械特性評価に有効である可能性が示唆された。



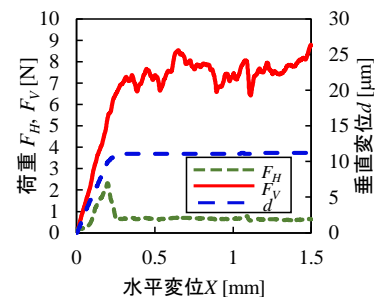
(a) 純銅焼結材試料



(b) 試料 A



(c) 試料 B



(d) 試料 C

図6 FH、FV、dの測定結果

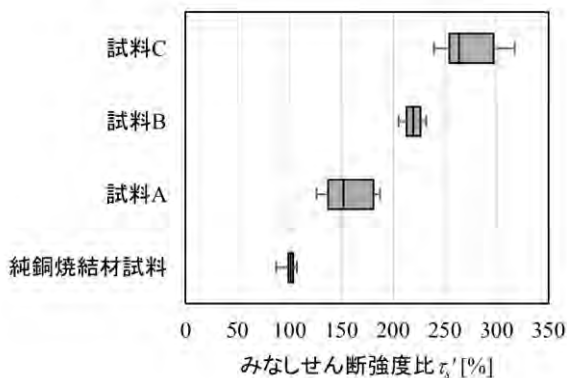


図7 みなしせん断強度の比較

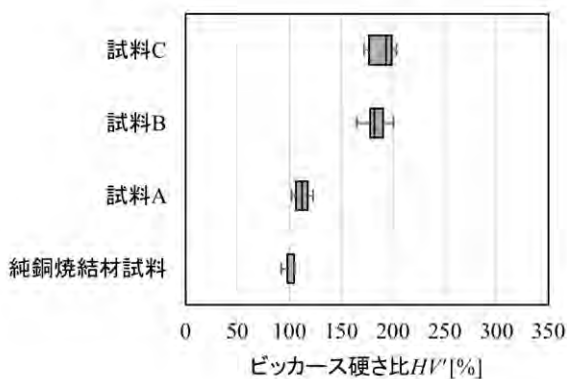


図8 ビッカース硬さの比較

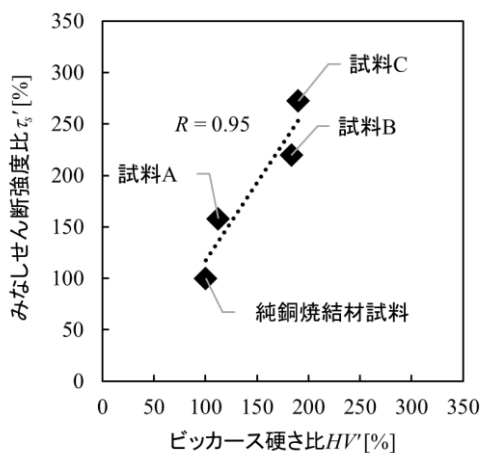


図9 ビッカース硬さとみなしせん断強度の関係

#### 4. 結論

新幹線用ブレーキライニングに使用されている銅系焼結合金摩擦材の摩擦・摩耗特性評価を目的として、摩擦材基材部の機械特性に着目し、基材部のせん断強度を推定する方法として、SAICAS (表面・界面物性解析装置) の適用を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) SAICAS による切削力測定結果から算出したみなしせん断強度は、それぞれ銅系焼結合金試料ごとに有意な差を示した。
- (2) みなしせん断強度と、硬さ試験機で測定したビッカース硬さは相関性を示した。
- (3) (1), (2)の結果から、本研究で実施したみなしせん断強度評価手法が、銅系焼結合金の機械特性評価に有効である可能性が示唆された。

今後は、得られた知見を基に、SAICAS を用いた銅系焼結合金の機械特性評価手法を活用して、ブレーキ摩擦材の摩擦・摩耗特性評価への適用可能性について検証を行う。

#### 文 献

- (1) 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)
- (2) 西山逸雄, 高橋建造: 「表面-界面切削法」による塗膜物性の定量的測定法」, 色材, Vol.62, No.12 pp.744-747 (1989)
- (3) 西山逸雄, 齋藤誠: 「表面・界面切削法による材料・機械的強度の深さ方向解析」, 日本印刷学会誌, Vol.42, No.12 pp.285-289 (2005)
- (4) 木嶋芳雄, 西山逸雄, 黒木健: 「サイカス法による高分子材料の特性評価」, マテリアルライフ, Vol.4, No.2 pp.86-91 (1992)
- (5) M. E. Merchant: “Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip”, Journal of Applied Physics, Vol.16, No.5 pp.267-275 (1945)
- (6) M. E. Merchant: “Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting”, Journal of Applied Physics, Vol.16, No.6 pp.318-324 (1945)