

高速新幹線用 C/C 複合材ディスクブレーキの開発

Development of C/C Composites Disk Brake of High Speed Shinkansen

技術本部 涌沢 邦章^{*1} 高崎 勝明^{*2}

松井 昭彦^{*3} 森本 立男^{*4}

三原製作所 勢登 利孝^{*5}

東日本旅客鉄道株式会社 廣瀬 俊夫^{*6}

新幹線の高速化に伴い、ブレーキエネルギーは増大する傾向にある。C/C（炭素繊維強化炭素）複合材は比熱が大きく、耐熱性、軽量性、強度・靱性に優れ、この材料を用いたディスクブレーキ装置は、本用途に向いているが、摩擦係数が不安定であるという問題がある。当社は東日本旅客鉄道(株)と、本ブレーキ装置の開発を行い、最適な C/C 複合材の選定と含浸による改質等によって、従来に比べ摩擦係数の安定なディスクブレーキ装置を開発した。車両搭載用の試作機を製作し、走行試験によってその性能を確認し、C/C 複合材を用いたディスクブレーキ装置の今後の実用化のめどを得ることができた。

Train brakes need to absorb more energy as the speed of Shinkansens increases. Carbon/Carbon (C/C) composites have many favorable properties for this brake, such as durability under high temperature, light weight, strength, and toughness, but they have the problem of an unstable friction coefficient. With the cooperation of JR East, we have successfully developed a disk brake unit using a C/C composite whose friction coefficient is stable. We selected the most suitable C/C composites for the brake and improved its properties with a special impregnation method. The brake unit was tested using a real train (JR East STAR21 high speed Shinkansen) to verify its performance and stability. The tests showed that good progress towards the practical use of C/C composites disk brake unit had been made.

1. ま え が き

新幹線では電気ブレーキが主体で、機械ブレーキはフェイルセーフ系ブレーキとして使用されているが、高速化に伴うブレーキエネルギーの増大により、現在の鍛鋼製ディスクブレーキでは重量が増え、車両の軽量化に反する結果になる。炭素繊維強化炭素複合材（以下、C/C 複合材と称す）は比熱が大きく、耐熱性、軽量性、強度・靱性に優れ、ブレーキ材としての利点はあるが、摩擦係数が不安定という問題や摩擦熱による高温での酸化消耗の問題がある。

当社は、東日本旅客鉄道(株)（JR 東日本）と C/C 複合材を用いたディスクブレーキの開発を行い、摩擦摩耗特性の優れた C/C 複合材の選定、摩擦係数安定化のための含浸処理、高温酸化防止のための耐酸化処理等を盛込んだ試作機を開発を行った。定置試験及び現車試験（952/953 形式新幹線低騒音高速試験電車：

STAR 21）によってその性能を確認したので結果を報告する。

2. C/C 複合材ディスクブレーキ装置の概要

開発したブレーキ装置は、図 1 に示すように軸方向に動くことができる円盤状のロータとステータから構成され、このステータ

表 1 各社 C/C 複合材の特徴

Characteristics of C/C composites

メーカー	炭素繊維の材質	繊維の形状配向	マトリックスの材質	炭化焼成プロセス
A 社	PAN 系	長繊維織布積層	ビッチ系	繊維に自己焼成コークスを電着後、炭化
B 社	PAN 系	長繊維織布積層	ビッチ系	ビッチ含浸、炭化の繰返し
C 社	ビッチ系	短繊維分散	ビッチ系	ビッチ含浸、炭化の繰返し
D 社	ビッチ系	短繊維分散	ビッチ系	繊維にバインダ・コークスを含浸ホットプレス後、炭化

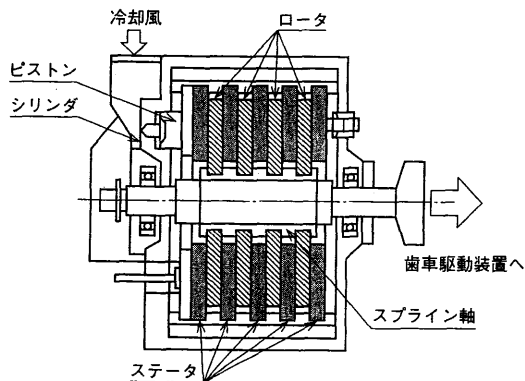


図 1 試作機の構造 試作機は 4 枚のロータと 5 枚のステータディスクを有している。
Test model of C/C composites disk brake unit

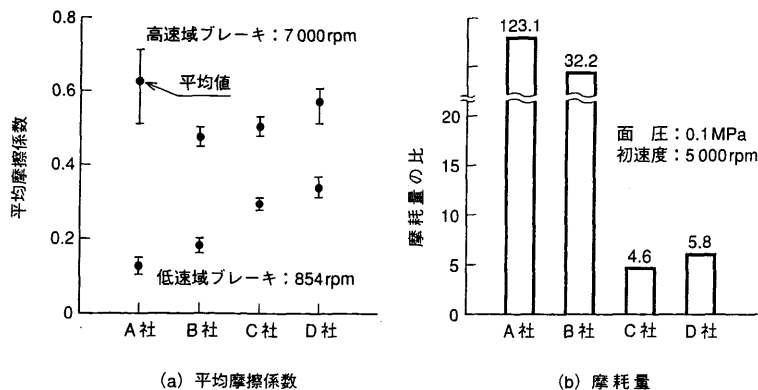


図 2 C/C 複合材の一次評価結果 C 社、D 社製の C/C 複合材が速度による平均摩擦係数変化が小さく、摩耗も少ない。
Preliminary test results of C/C composites

*1 広島研究所主管

*2 広島研究所機械研究室長

*3 長崎研究所トライボロジー研究室

*4 基盤技術研究所機能材第一研究室主務

*5 機械・プラント技術部空制装置設計課主務

*6 総合技術開発推進部車両開発・都市交通課長

を空気圧で押付け、ロータと摩擦させることでブレーキ力を得る多板式ディスクブレーキ装置である。設置方法は主電動機の後部を考えており、最終的には主電動機と一体（同一回転軸上に配置）となるように考えている。またブレーキエネルギーによる軸受温度上昇を抑えるために、冷却風を取込む構造とし、現車試験においては電動機用の冷却風を使用した。目標とする諸元は軸重 9.4 t で、速度 350 km/h からの非常ブレーキ可能であることとした。

3. ディスク材料の選定及び改質

3.1 C/C 複合材の選定

現在、日本国内には、30 社以上の C/C 複合材メーカーがあり、原材料（マトリックス及び繊維）の種類、繊維配列法、成形・炭化焼成プロセス等で多様化し各社独自のものを開発している。それらの中から、表 1 に示す 4 社の C/C 複合材を一次選定し、自作の高速小型摩擦摩耗試験機を用いて評価を行った。試験片寸法は、 $\phi 40$ である。試験結果を図 2 に示すが、この結果から、速度によって平均摩擦係数の差が小さく、摩耗量の少ない C 社、D 社のものがブレーキ材として適当と判断した。ただし C 社のものは、材料入手に問題があったため、試作機用としては D 社のものを使用した。表 2 に D 社製 C/C 複合材の特性を示す。選定した C/C 複合材はピッチ系短繊維分散型のものであるが、短繊維分散型のもは、織布積層型のものに比べ、摩耗・はく離が均一であるために、摩擦摩耗特性が良いものと考えられる。

表 2 D 社 C/C 複合材の特性

Properties of C/C composites made by D company	
焼成温度	2 000°C
繊維体積含有率	40 vol %
かさ密度	1.7 g/cm ³
曲げ強さ	90 MPa

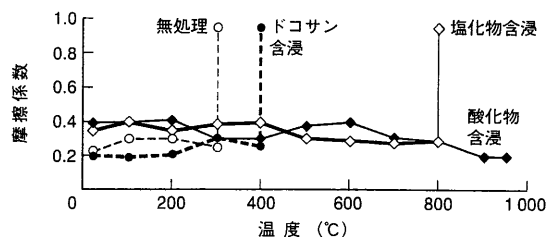
3.2 摩擦係数安定化処理

3.2.1 摩擦係数安定化の方法

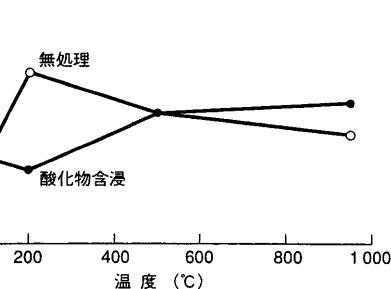
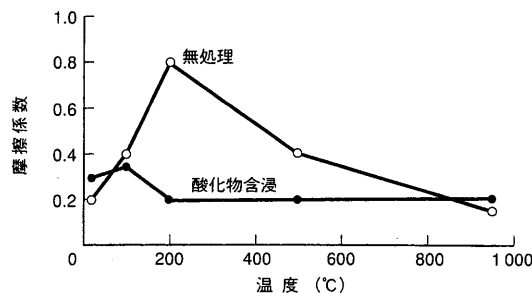
試作機によるブレーキ試験の結果、摩擦特性の優れるピッチ系短繊維分散型の C/C 複合材でも、瞬間摩擦係数の急増等があり、平均摩擦係数のばらつきが目標に入らないことが分かった。当社では C/C 複合材を摩擦材として適用するために、必要な摩擦特性評価と改善に基礎的に取り組んでいたが、リング/ディスク型の摩擦試験で、摩擦面温度 200°C 前後に摩擦摩耗が急増する温度（以下、遷移温度と称す）があり⁽¹⁾、この現象が摩擦係数を不安定にさせていると考えられた。文献によれば、摩擦係数の安定化のためには、黒鉛や炭素の固体潤滑性に水蒸気などのガス吸着が必要であり、より吸着エネルギーの高い有機物の蒸気導入により、遷移温度が上昇することが報告されている⁽²⁾。しかし、遷移温度は精々 400°C 程度であり、ディスクブレーキへの適用を考えると、さらに高温域まで改善することが必要である。そこで C/C 複合材に吸着エネルギーの高い高カーボン数の炭化水素や吸水性の無機物を含浸させ、遷移温度を上げて高温摩擦特性の改善を試みた⁽³⁾。

3.2.2 含浸剤の選定

ピッチ系短繊維分散型の C/C 複合材に含浸処理を施したリング/ディスク型試験片を用い、赤外線ランプの加熱による昇温摩擦試験（昇温速度 10°C/min）と一定温度下（100, 200, 500, 950°C）の摩擦試験を行った。図 3 (a) に温度上昇に伴う摩擦係数の変化を示す。無含浸の C/C 複合材の摩擦係数は、遷移温度が高いもので



(a) 昇温に伴う摩擦係数の変化



(b) 摩擦摩耗特性に及ぼす温度の影響

図 3 含浸剤による摩擦特性の改善 (a)は各種の含浸処理により遷移温度が上昇することを示す。(b)は酸化物含浸により摩擦遷移温度が上昇し、高温まで摩擦摩耗の安定化が図れることを示す。
Improvement of friction characteristics with incorporated additives

も 300°C 到達前に急増したが、高カーボン数のドコサン ($C_{22}H_{46}$) あるいは塩化物を含浸したものは、それぞれ約 400°C, 800°C まで遷移温度が向上した。さらに、高融点で吸水性の高い酸化物を含浸したものは、更に高い温度まで安定した摩擦特性を示した。

次に、最も効果のあった酸化物含浸材と無含浸材について一定温度下での摩擦試験を行った。各温度での摩擦係数と比摩耗量を図 3 (b) に示す。無含浸材の摩擦係数及び比摩耗量は 200°C で最大となり、それより低温側、高温側で低くなる傾向である。これに対し、酸化物含浸材の方は温度依存性がなく安定した摩擦摩耗特性を示した。また、熱重量及び質量分析結果から、摩擦特性改善の要因としては、高温までの保水性の向上が考えられる。

以上の結果を基に酸化物含浸 C/C 複合材を用いたブレーキ試験を行うことにした。

3.2.3 試作機による摩擦係数安定化効果の確認

試作機によって無含浸 C/C 複合材と含浸 C/C 複合材を用いたブレーキ試験を行った。試験はフライホイールを用いた定置試験である。

図 4 (a) はブレーキ初速 125 km/h から停止までの摩擦係数の時間変動を示す。無含浸材の場合は摩擦係数が 0.13~0.43 まで変動し、摩擦係数変動幅（以下、瞬間摩擦係数変動幅と称す）は 0.3 程度あるのに対し、含浸材の方の変動は少ない。また、停止までの平均摩擦係数は含浸 C/C 複合材の方が低くなっており、リング/ディスク試験による結果とも整合している。ブレーキ初速度、デ

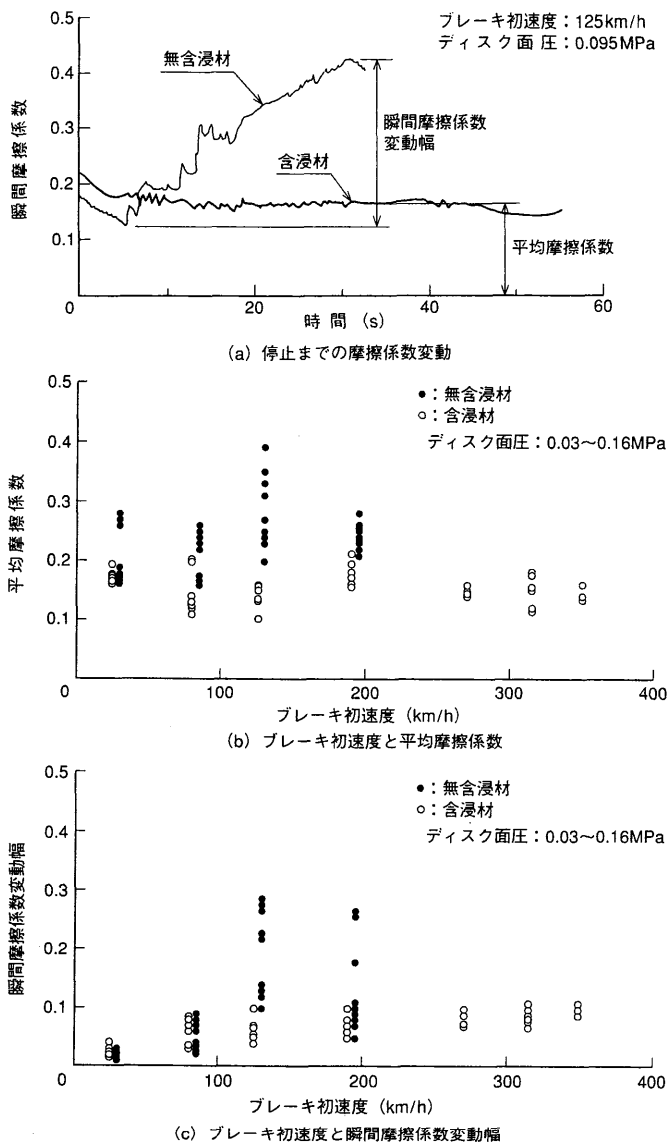


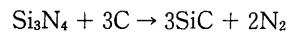
図4 試作機による含浸 C/C 複合材と無含浸 C/C 複合材の摩擦特性の比較 含浸材を用いたものは、ブレーキ初速度によらず、平均摩擦係数のばらつき、瞬間摩擦係数変動幅共に小さい。
Comparison of friction characteristics between incorporated and non-incorporated C/C composites

ディスク面圧を変えて、多数回のブレーキ試験を行った。ブレーキ初速度と平均摩擦係数及び瞬間摩擦係数変動幅の関係を整理したものが図4 (b), (c)である。初速度 125 km/h からブレーキを掛けた場合、無含浸材の方は平均摩擦係数及び瞬間摩擦係数変動幅共に急増しているが、このとき、ディスク最高温度は 300℃を超えており、遷移温度を超えたことが原因と考えられる。図4 (b)の平均摩擦係数を見ると、無含浸材の方は 0.15~0.4 の間に分布し、ばらつきの幅は 0.25 であるが、含浸材の方は 0.1~0.2 の間に分布し、ばらつきの幅は 0.1 と安定化している。瞬間摩擦係数の変動幅についても、含浸材の方は全速度域にわたり、安定した値を示している。含浸剤の効果が確認できたので、酸化物含浸 C/C 複合材を用いた試作機で現車による試験を行うことにした。

3.3 耐酸化処理法の開発

C/C 複合材は大気中で 600℃以上に加熱されると、酸化消耗する。350 km/h からブレーキを作用させるとディスクは約 1000℃程度に上昇し、大気に触れる非しゅう動面に酸化消耗が生じるので、表面に耐酸化処理を施す必要がある。C/C 複合材の耐酸化処

理法は種々開発されているが、今回は塗工型 SiC コンバージョン法を開発し、適用した。SiC コンバージョン法は宇宙用途等のために開発され、当社でも独自に研究開発を進めているが、本開発に適用した塗工型の特長は、必要な部分にのみ原料スラリーをはけ塗りし、窒素ガス中高温下で拡散処理を行うことにより、容易に必要な部分に耐酸化膜を形成できることである。拡散処理によりスラリー中の原料粉 (Si₃N₄) と C/C 複合材のカーボンとの間に下式の反応が生じ、表面に SiC 層が形成される。断面観察の結果、表面から 50~150 μm の深さまで SiC の形成が認められ、試験片による酸化試験により、350 km/h からのブレーキ回数が設計目標を超える 40 回相当の熱負荷に耐え、非常ブレーキ用としては十分なことを確認した。



4. 定置試験及び現車搭載試験

4.1 試験方法

定置試験は、フライホイールを一定速度 (最高 350 km/h 相当) まで加速した後、ブレーキを掛ける方法で行った。また、現車搭載試験は、JR 東日本の STAR 21 試験電車の 1 号車第 3 軸に取付け、上越新幹線でブレーキ初速度 310 km/h まで実施した。いずれも、試験は設定したブレーキ初速度から停止するまでブレーキを掛ける停止ブレーキを基本とした。

ディスク押付力については、定置試験では一定押付力を基本に、現車試験では、図5に示す押付力パターンとした。

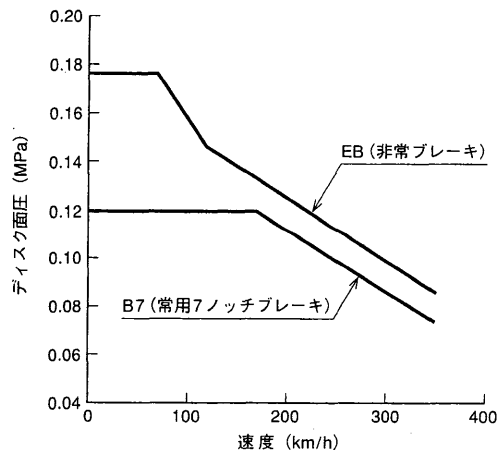


図5 ブレーキノッチとディスク面圧 高速新幹線のブレーキノッチとディスク面圧の関係を示す。
Relation between brake notch and disk surface pressure

4.2 試験結果

4.2.1 摩擦特性

(1) 停止までの摩擦係数変動

現車試験における瞬間摩擦係数の変動を図6 (a)に示す。初速度 (110, 210, 267 km/h) から B7 のブレーキを作用させた場合、停止するまでの摩擦係数の時間的変動を示す。いずれの場合も摩擦係数の急激な変動は見られず安定しており、含浸剤の効果が得られている。

(2) ブレーキ初速度と摩擦係数

ブレーキ初速度と摩擦係数の関係を図6 (b), (c)に示す。平均摩擦係数は現車試験でも定置試験と同様なばらつき範囲に入っている。

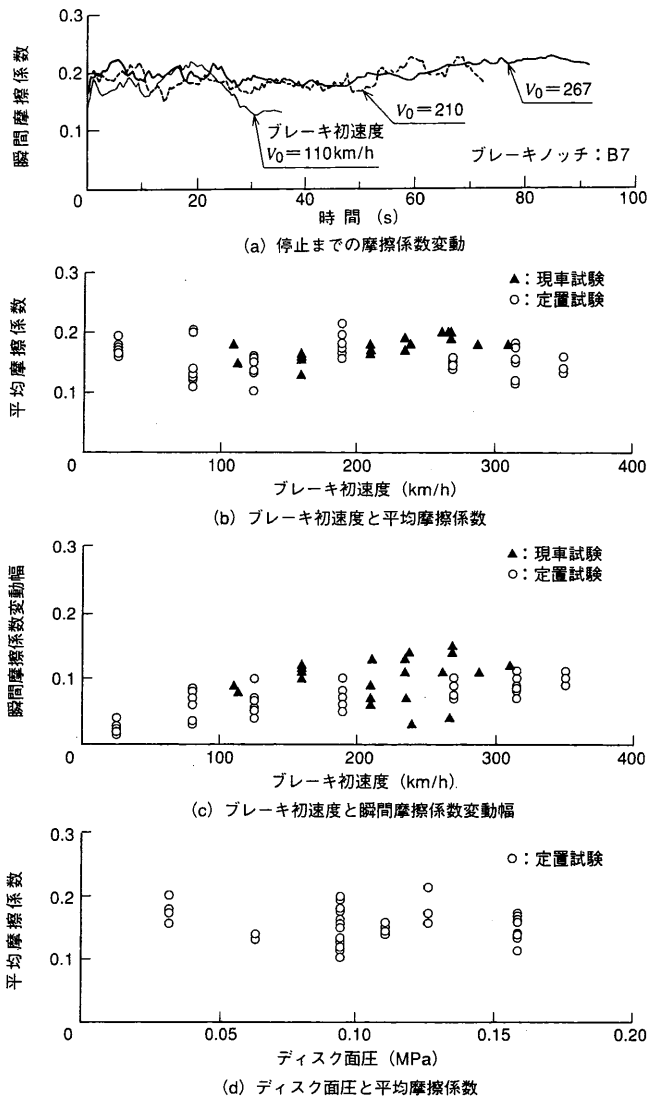


図6 摩擦特性試験結果 現車試験においても、定置試験と同様な摩擦安定性が得られている。
Test results of friction characteristics by actual brake test

瞬間摩擦係数変動幅については、現車試験では定置試験に比べやや増加しているが、変動幅は0.15以内に入っている。

(3) ディスク面圧と摩擦係数

ディスク面圧と平均摩擦係数の関係を図6(d)に示す。平均摩擦係数はディスク面圧に依存していない。摩擦係数が速度や面圧に依存しない性質はブレーキ材としては好ましいと考えられる。

4.2.2 摩耗特性

定置試験における比摩耗量は、 $4.2 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ であり、リング/ディスク試験の結果と大体合っている。この値は、非常ブレーキのみに使用する場合は問題ないが、常用ブレーキと併用する場合には、使用条件を検討する必要がある。

4.2.3 温度特性

(1) ディスク温度

図7にブレーキ初速度とディスク最高温度の関係を示す。温

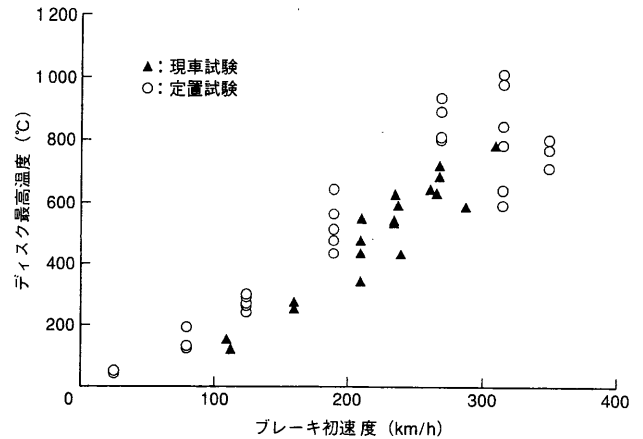


図7 ディスク最高温度 350 km/hからのブレーキの場合はディスク最高温度は1000°Cを超える。
Maximum temperature of C/C composites disk

度は中央のステータの摩擦面から5 mm内側の位置で計測している。グラフから350 km/hからのブレーキでは、ディスク最高温度は1000°Cを超えるため、ディスクの耐酸化処理、耐熱仕様の軸受等、熱対策が必要になる。

(2) 軸受温度

軸受には高速回転による自己発熱とディスクからスプライン軸を介して伝わる熱による温度上昇があるため、許容温度200°Cの耐熱軸受を使用し、強制冷却構造とした。冷却風は、現在の電動機冷却風をそのまま使用し、定置試験でも原則として冷却風を入れながら試験を行った。その結果、現車試験・定置試験いずれにおいても1回のブレーキによる軸受温度上昇は100°C程度であり、特に問題ないことを確認した。

(3) 耐酸化処理の効果

今回現車試験で用いたディスクには、塗工型のSiCコンバージョン法の耐酸化処理を施したものをを用いた。現車試験の熱負荷は十分ではなかったが、試験後の分解検査では酸化の形跡が見られず、本処理法の実用の可能性に見通しがついた。

5. む す び

ピッチ系短繊維分散型C/C複合材に酸化物を含浸させたディスクブレーキを試作し、定置試験並びに現車試験を行い、従来に比べ摩擦特性の安定した装置の開発に見通しを付けた。また、耐酸化処理法や機械構造の改善により、350 km/hからの非常ブレーキに対し、熱・振動等についても問題ないことを確認し、C/C複合材ディスクブレーキ装置の今後の実用化へ向けて大きく前進することができた。最後に、全般にわたるご指導並びに現車試験の機会を与えて頂いた東日本旅客鉄道(株)に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 松井, C/C複合材の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気の影響, トライボロジー会議予稿集(1994-10) p.645
- (2) Lancaster J. K. et al., The influence of environment and pressure on the transition to dusting wear of graphite, J. Phys. D: Appl. Phys., 14 (1981) p.747
- (3) 松井ほか, C/C複合材の高温摩擦摩耗特性の改善, トライボロジー会議予稿集(1996-10) p.539