

摩擦特性に優れた鋳鉄複合化制輪子の開発

森本 文子* 宮内 瞳苗* 半田 和行*

辻村 太郎** 川口 清***

Improvement of Frictional Property of Cast-Iron Brake Shoes by Combining SiC Filters

Fumiko MORIMOTO Toru MIYAUCHI Kazuyuki HANDA

Taro TSUJIMURA Kiyoshi KAWAGUCHI

Alloy cast-iron brake shoes are inferior to the other kinds of brake shoes in frictional force, while are advantageous in terms of constant adhesion and a less degree of attack to wheels. We improved the frictional property of the alloy cast-iron brake shoes by combining filters made of SiC (silicon carbide), which has the effect to increase the frictional force of the cast-iron brake shoes. Because the hardness of SiC is much greater than that of the wheels, the amount of the filters to be used and the position of the filters on the frictional surface were optimized in order the degree of attack to wheels not to increase. We performed full-scale tests and on-track tests of the improved brake shoes, and then confirmed the effect of the filters that improved the frictional property.

キーワード：制輪子，合金鋳鉄，炭化けい素，摩擦係数

1. はじめに

従来から使用されてきた鋳鉄制輪子は、車輪踏面を適度にあらすため車輪／レール間の粘着力が安定して得られる、雨や雪の影響を受けにくい、車輪の温度上昇や踏面損傷等の車輪への攻撃性が低いといった良好なブレーキ性能を持つことから、現在でも北海道など雪の多い地域で使用されている。合成制輪子および焼結合金制輪子と比べて車輪との摩擦係数が低く摩耗量が多い傾向にあるものの、これまで、普通鋳鉄にリン、クロム、モリブデン、ほう素などの合金元素を添加することによって、鋳鉄制輪子に比べて摩擦特性および耐摩耗性を改善した合金鋳鉄制輪子が開発され^{1)～5)}、高速化に対応してきた。しかし、今後のさらなる高速化に対応するためには、より一層の摩擦特性の向上が必要である。

合金鋳鉄制輪子の摩擦係数向上には、車輪との摩擦界面における炭化けい素セラミックスの介在が効果的であることが明らかにされている^{6) 7)}。摩擦界面への供給方法として、炭化けい素製フィルタを制輪子中に鋳ぐるむ方法が製造およびコストの面から最も優れていると考えられ^{8) 9)}、鋳鉄複合化制輪子として研究が進められてきた。

しかし、炭化けい素は車輪に比べてはるかに硬質であるため、制輪子との複合化による車輪の摩耗量の増大お

よび踏面熱き裂の多発が懸念される^{10) 11)}。そこで、こうした車輪踏面への攻撃性の増大を抑えつつ摩擦力を向上できる鋳鉄複合化制輪子の開発を目的として、鋳ぐるむフィルタの必要最低量および摩擦面上の最適位置を、実物大ブレーキ試験により評価した。本報告では、実物大ブレーキ試験の結果および量産可能な鋳鉄複合化制輪子の製造方法、さらに同制輪子を取り付けた現車試験の結果を報告する。

2. 実物大ブレーキ試験

2.1 供試品

合金鋳鉄制輪子に鋳ぐるむ炭化けい素フィルタ量が摩擦特性に及ぼす影響を調べるため、制輪子1個あたりのフィルタ個数 N_F 、フィルタの炭化けい素面積率 S_F 、フィルタの1インチあたりの空孔数 N_{PPI} (空孔率) の異なる鋳鉄複合化制輪子を、表1に示すように3Stepに分けて製造した。フィルタの外観を図1に示す。フィルタ1個の大きさは40mm×60mmである。 S_F が大きいほどフィルタのフレームが太く、 N_{PPI} が大きいほどフィルタの目が細かい。

溶湯の目標成分は高速車両用の合金鋳鉄制輪子と同一であり、リン約2mass%、高速域における摩擦係数の安定性を目的としてクロム、ニッケル、モリブデン等が添加されている。なお、制輪子は3Stepに分けて製造したため、用いた溶湯は各Stepで異なる。比較のために製作したフィルタを含まない制輪子を含めると、試験に用い

* 材料技術研究部 (摩擦材料)

** 材料技術研究部

*** 車両制御技術研究部 (駆動制御)

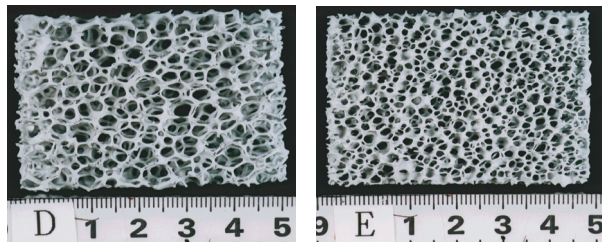
特集：材料技術

た制輪子は、Step1では5種類、Step2、Step3ではそれぞれ7種類である。

铸铁複合化制輪子の構造を図2に示す。背板の上に設置されたフィルタは、溶湯が枠内に進入すると浮力により制輪子摩擦面まで上浮する。摩擦面上のフィルタは、Step1の制輪子については摩擦面のほぼ全面を、Step2、Step3については摩擦面の1/3の面積を占める。Step2、Step3の制輪子については摩擦面中央にフィルタが配置されるよう、予め背板にφ4mmの鋼製の案内棒を溶接し、φ5mmの穴を開けたフィルタをセットした。

表1 供試制輪子のフィルタ条件

項目	Step1	Step2	Step3
制輪子中のフィルタの個数 N_f (個)	6	2	2
フィルタの炭化けい素面積率 S_f (%)	8.6, 15	6.0, 8.6, 15	6.0, 8.6
1インチあたりの空孔数 N_{PPI} (PPI)	10, 20	10, 20	10, 20, 30



(a) $S_f=8.6\%$, $N_{PPI}=10PPI$ (b) $S_f=15\%$, $N_{PPI}=20PPI$

図1 フィルタの外観

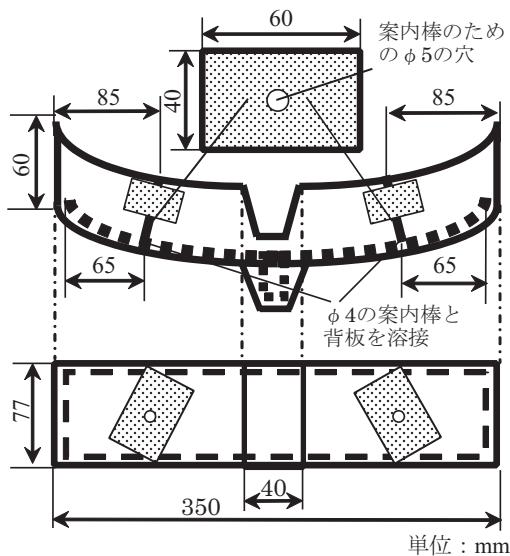


図2 铸铁複合化制輪子の構造

2.2 試験条件

試験条件を表2に示す。試験は実物大ブレーキ試験機を用いて乾燥状態で行った。なお、フィルタを含まない制輪子に対するブレーキ初速度155km/hの試験は行っていない。測定項目は、制動距離、平均摩擦係数、車輪最高温度、制

表2 試験条件

項目	詳細
車輪径	810mm
ブレーキ初速度	125, 135, 145, 155km/h
押付力 (制輪子2個分)	34kN × 2
試番数	5回
慣性モーメント	1067kgm ²
車輪初期温度	60°C

輪子摩耗量である。平均摩擦係数 f_m は、次式(1)で算出し、各速度について5試番分を平均した。

$$f_m = 0.0386 \frac{I}{R^2} \cdot \frac{V_0^2}{L \cdot 2P} \quad (1)$$

ここで、 I は慣性モーメント (kg・m²)、 V_0 はブレーキ初速度 (km/h)、 R は車輪半径 (m)、 L は実ブレーキ距離 (m)、 P は制輪子1個あたりの押付力 (N) である。

制輪子摩耗量は、試験前後の重量差を運動エネルギーで除して算出した。車輪温度は、外側面から40mm、踏面から深さ10mmの位置で測定し、各速度の最高温度を各試験の結果を平均して算出した。また、Step2、Step3では、フィルタの最適位置を決定するため別途ブレーキ試験を実施し、制輪子温度を測定した。ブレーキ初速度を135km/h、制輪子初期温度を100°Cとし、それ以外の条件は表2と同様とした。制輪子の温度測定点は図3の通りである。左右とも各測定点は制輪子端面からの距離を40mmおきとし、いずれも摩擦面からの深さを10mmとした。

さらに、フィルタと铸铁の鑄ぐるみ状態を調べるため、試験前後の制輪子摩擦面の目視観察および、フィルタと铸铁の複合部を切断、研磨した供試片の観察を行った。

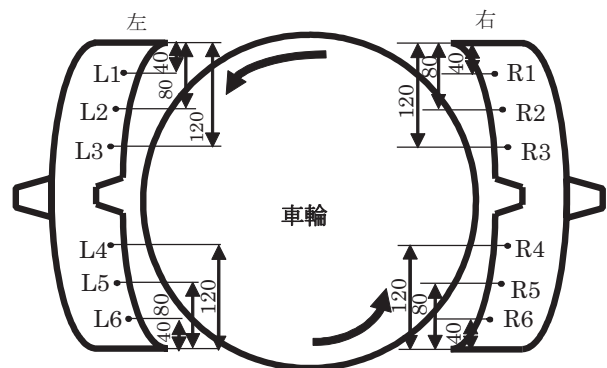


図3 制輪子の温度測定点

2.3 試験結果

2.3.1 フィルタによる平均摩擦係数の向上

Step1、Step2の試験におけるフィルタの炭化けい素面積率と平均摩擦係数の関係を、空孔率20PPIの場合について図4および図5に示す。Step3の試験における空孔数と平均摩擦係数の関係を、フィルタの炭化けい素面積率6%の場合について図6に示す。なお、フィルタのない場

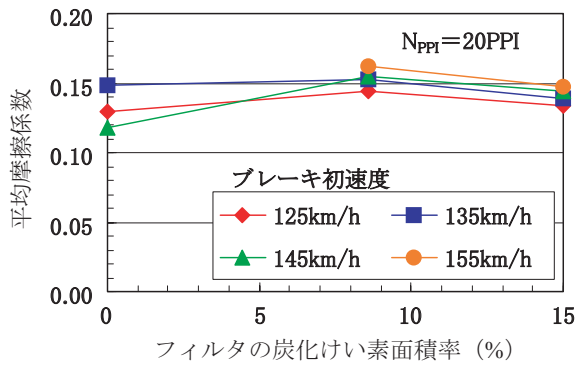


図4 フィルタの炭化けい素面積率と摩擦係数 (Step1)

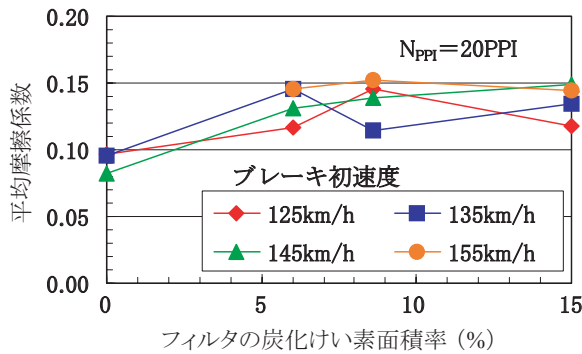


図5 フィルタの炭化けい素面積率と摩擦係数 (Step2)

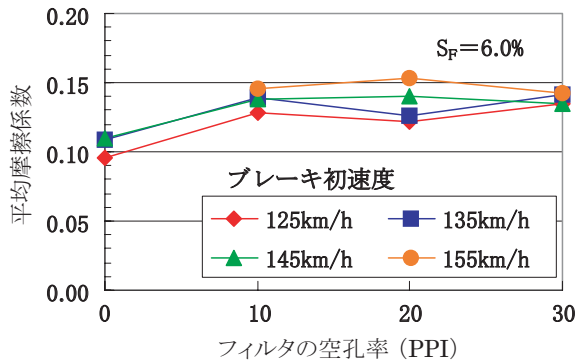


図6 フィルタ空孔率と摩擦係数 (Step3)

合の試験結果が Step ごとに異なるのは、各 Step の制輪子製造の際に使用した溶湯が異なるためである。全 Step の試験で、いずれのブレーキ初速度においてもフィルタによる摩擦係数の向上効果が認められ、6%の炭化けい素面積率のフィルタが2個入っていれば十分な効果が得られることが分かった。Step3においては、空孔率による平均摩擦係数の顕著な差は認められなかった。

2.3.2 フィルタ量と摩擦特性の関係

制輪子に铸ぐるむフィルタ量と摩擦特性の関係を、条件の異なる3Step分の試験を通して評価するにあたり、制輪子摩擦面に占める炭化けい素面積率 S_B を次式(2)により算出した。

$$S_B = A_F \cdot N_F \cdot S_F / A_B \quad (2)$$

ここで、 A_F はフィルタ面積 $40 \times 60=2400\text{mm}^2$, A_B は制

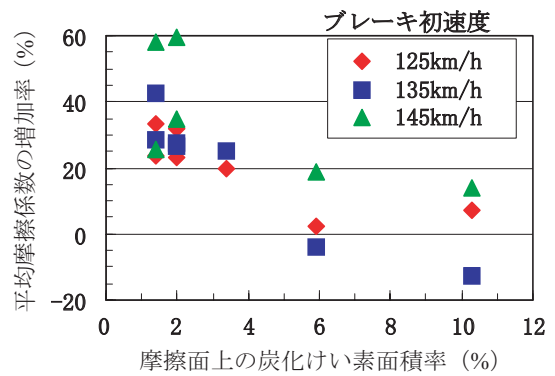


図7 摩擦面上の炭化けい素面積率と平均摩擦係数の関係

輪子摩擦面積 $150 \times 70 \times 2=21000\text{mm}^2$ である。フィルタの個数 N_F , 炭化けい素面積率 S_F については表1の通りである。

空孔率20PPIのフィルタ入り制輪子による試験を対象として、摩擦面における炭化けい素面積率 S_B を指標としたブレーキ性能試験結果を以下に示す。ただし、平均摩擦係数については、Step間の溶湯の相違による影響を排除するため、各Stepでフィルタを含まない制輪子の結果を用いて規格化し、フィルタの複合化による平均摩擦係数の増加率として示した。

摩擦面における炭化けい素面積率と平均摩擦係数の増加率の関係を図7に示す。炭化けい素面積率が高いほどフィルタによる効果が低く、中にはフィルタを含まない制輪子よりも平均摩擦係数が低下した試験もあった。最も効果的に平均摩擦係数を上昇させたのは、炭化けい素面積率が2%以下の制輪子であった。

摩擦面における炭化けい素面積率と制動距離の関係を図8に示す。フィルタを含まない制輪子の制動距離は、ブレーキ初速度125～145km/hにおいて450～950mであり、ばらつきが大きい。一方、フィルタを含む制輪子の制動距離は400～600mとばらつきが小さい。また、炭化けい素面積率の増加に対する制動距離の変化は認められなかった。

摩擦面における炭化けい素面積率と制輪子摩耗量の関係を図9に示す。フィルタの影響はブレーキ初速度

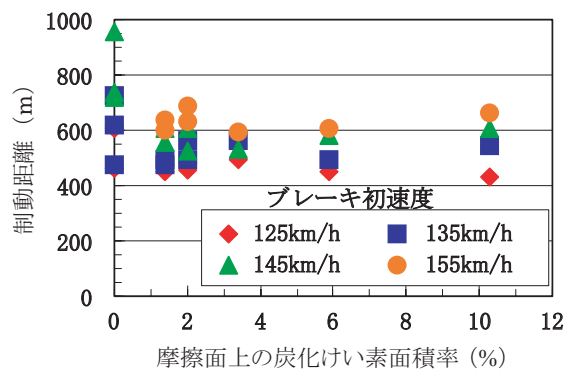


図8 摩擦面上の炭化けい素面積率と制動距離

特集：材料技術

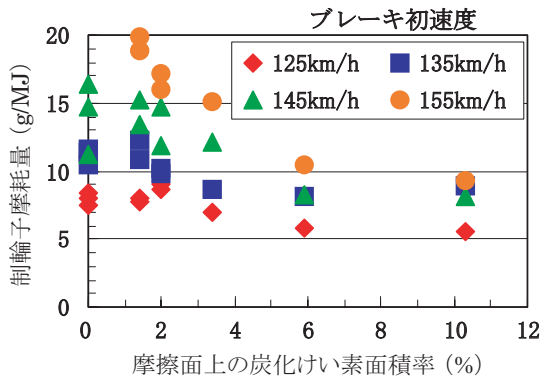


図9 摩擦面上の炭化けい素面積率と制輪子摩耗量

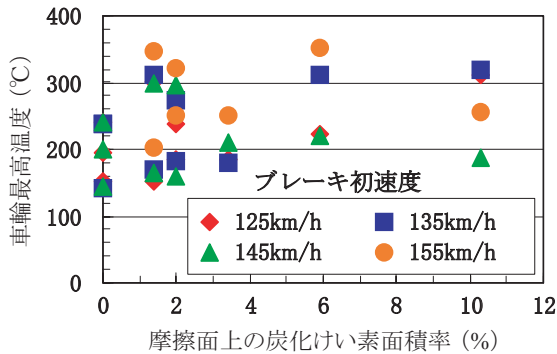


図10 摩擦面上の炭化けい素面積率と車輪最高温度

135km/h以下では小さいが、ブレーキ初速度145km/h以上では顕著であり、炭化けい素面積率の増加とともに摩耗量は低減した。

摩擦面における炭化けい素面積率と車輪最高温度の関係を図10に示す。車輪最高温度は、フィルタの含有により上昇する傾向を示し、ばらつきの大きい炭化けい素面積率約2%の場合を除くと、炭化けい素面積率の増加とともにやや高くなる傾向にあった。

2.3.3 制輪子温度

制輪子温度の測定例として左側の制輪子における一回目の測定結果を図11に示す。試番ごとに最高温度を示す測定点は異なるが、左右の制輪子とも多くの試番で制輪子の中央部付近が他の位置に比べて高温を示し、制輪子の両端部が高温を示した試番はなかった。

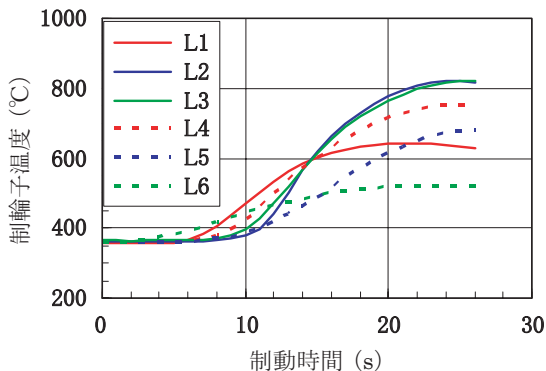


図11 制輪子温度の測定例

2.3.4 フィルタの複合状態

炭化けい素面積率6%、空孔率20PPIのフィルタを2個鋳ぐるんだ鋳鉄複合化制輪子の試験後の制輪子摩擦面を図12に示す。フィルタは、摩擦面において形状が確認できないほど鋳鉄と一体化しており、フィルタの割れや欠けは認められなかった。

フィルタと鋳ぐるんだ部分の断面組織を図13に示す。母材の鋳鉄がフィルタおよび案内棒と一体化していることが確認できた。



図12 鋳鉄複合化制輪子の試験後の摩擦面

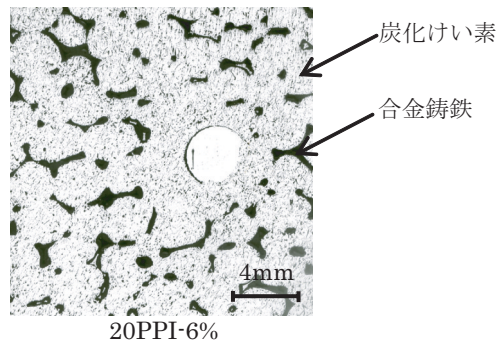


図13 フィルタと合金鋳鉄の断面組織

2.4 考察

優れた鋳鉄複合化制輪子として必要な要件は、次の通りと考えられる。

- ①高速域における摩擦係数が高く、制動距離が短い。
- ②車輪踏面への攻撃性が低い。
- ③低コストである。
- ④制輪子摩耗量が少ない。

これらの要件を満たすフィルタの最適な使用量および摩擦面上の位置を、実物大ブレーキ試験の結果から検討する。

フィルタ使用量については、平均摩擦係数の上昇および制動距離の短縮に対して、摩擦面における炭化けい素面積率は2%以下で十分であり、かつ効率的であることが分かった。制輪子摩耗量に関しては、硬質であるフィルタの使用量が多いほど低減できる反面、車輪踏面への攻撃性が上がり車輪温度が上昇した。制輪子に比べて車輪の方が交換コストが高いため、摩擦面における炭化けい素面積率は低い方がよいと考えられる。さらに、フィ

ルタのコスト面を考慮しても、フィルタ個数は少ない方が望ましい。以上より、摩擦面における炭化けい素面積率は低い方が望ましいため、今回の試験で製作した中では、フィルタの炭化けい素面積率6.0%、空孔数20PPIのフィルタを2個使用した鑄鉄複合制輪子が最も優れていると考えられる。

2個のフィルタの効果を最も上げるための摩擦面上の最適位置は、車輪と良好に接触する位置、すなわち制輪子温度が最も上昇する位置と考えられる。車輪と制輪子の押付圧は接触領域内で不均一であり、最も高い押付圧となる位置は随時移動するため、最高温度を示す位置は試番によって異なった。しかし、多くの試番で制輪子の中央部付近が高温を示したため、フィルタの最適位置は、制輪子の中央部付近、すなわち、図3におけるLおよびRの2, 3, 4, 5の位置と考えられる。

Step2とStep3で使用した制輪子に鑄ぐるんだ2個のフィルタは、最適位置である制輪子中央部に配置されていたため効果的に作用し、フィルタを含まない制輪子に比べて平均摩擦係数を大幅に向上させたと考えられる。

3. 量産方法の開発

前節までの検討により、フィルタの使用量および制輪子摩擦面上の位置について最適化することができた。しかし、製造方法に関して二つの問題がある。一つは、フィルタの向きによって摩擦性能が変わる可能性があるものの、フィルタの向きを制御できないことである。そこで、フィルタ形状を直方体から円筒に変更することにより向きの考慮を不要とした。円筒形フィルタを図14に示す。寸法はφ50mmで、案内棒挿入のためのφ5mmの穴を持つ。フィルタの炭化けい素面積率は6%、空孔数は20PPIである。このフィルタを2個用いた場合、制輪子摩擦面における炭化けい素面積率 S_B は、(2)式により1.1%となる。

もう一つの問題は、製造にあたり背板に案内棒を溶接するための追加工程が必要となることである。そこで、図15に示すように背板に案内棒挿入のためのφ5mmの穴を開けておき、背板を通して鑄型に案内棒を突き刺す

ことにより、溶接工程を省略した。

製造方法は、次の通りである。

- ① 鑄型に背板を設置する。
- ② 背板の穴を通して鑄型に案内棒を突き立て、案内棒にフィルタを通す(図16参照)。
- ③ 上型をかぶせて溶湯を流入させる。

従来の合金鑄鉄制輪子の製造工程に対し、フィルタを複合化するための追加工程は②のみである。この製造方法の開発により、従来の制輪子の製造工程に大きな変更を加えることなく、鑄鉄複合化制輪子を量産することが可能となった。

2個の円筒形フィルタを含む鑄鉄複合化制輪子について、実物大ブレーキ試験を行った結果を表3に示す。試験条件は表2と同様である。制動距離は、いずれのブレーキ初速度においても在来線の基準である600m以内であった。図17に、ブレーキ初速度135km/hの場合の瞬間摩擦係数を、従来の合金鑄鉄制輪子の場合とあわせて示す。フィルタを鑄ぐるんだことにより、中高速度の広いブレーキ速度域にわたって瞬間摩擦係数が増加していることが分かる。また、制輪子摩耗量および最高車輪温度は、直方体フィルタ入り制輪子の結果と比較して低

案内棒挿入のための穴

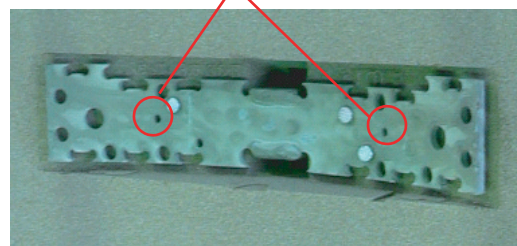
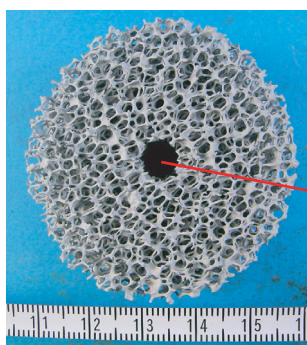


図15 背板



図16 設置されたフィルタ



案内棒挿入のための穴

図14 円筒形フィルタ

表3 試験結果

ブレーキ初速度 (km/h)	制動距離 (m)	制輪子摩耗量 (g/MJ)	車輪最高温度 (°C) 細
125	433	7.21	176
135	471	8.35	212
145	563	9.88	214
155	579	13.61	214

特集：材料技術

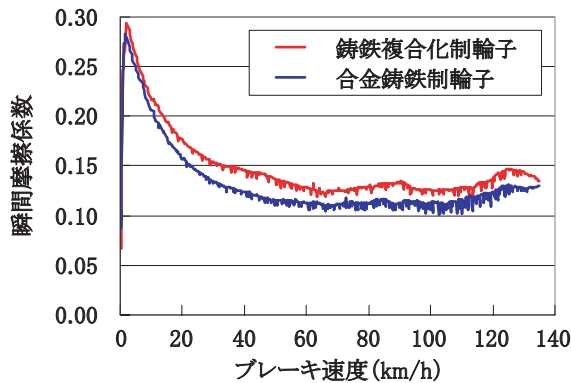


図17 鋳鉄複合化制輪子と合金鋳鉄制輪子の瞬間摩擦係数の比較

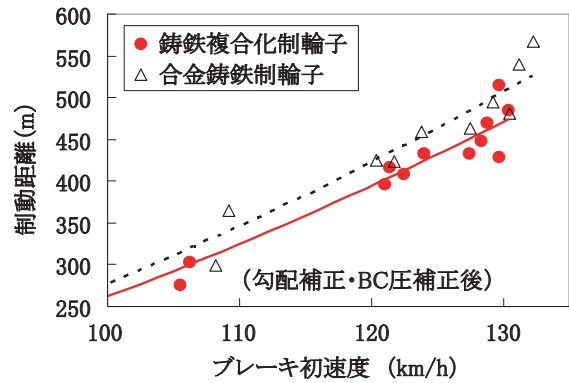


図19 鋳鉄複合化制輪子と合金鋳鉄制輪子の制動距離の比較（散水状態含む）

かった。フィルタ形状の変更により、量産化が可能になっただけでなく、ブレーキ性能も向上した。

レーキ試験と同様に鋳鉄複合化制輪子の優れた摩擦特性が確認できた。

4. 現車試験

5. まとめ

円筒形フィルタ入り鋳鉄複合化制輪子を特急気動車の4両中1両に搭載し、現車試験を実施した。制輪子、散水装置等の設置状況を図18に示す。試験の結果をまとめると次の通りである。

従来の合金鋳鉄制輪子に、摩擦係数の上昇効果を持つ炭化けい素フィルタを必要最少限鑄ぐるむことにより、車輪の温度上昇を従来並みに抑え、車輪踏面に大きな損傷を与えることなく摩擦力を向上させた鋳鉄複合化制輪子を、その量産方法とともに開発した。実物大ブレーキ試験および現車試験により、同制輪子の優れた摩擦特性を確認した。

- (1) 鋳鉄複合化制輪子を搭載した編成の制動距離について、勾配補正およびBC圧補正を行って合金鋳鉄制輪子だけの編成と比較すると、図19に示すように短縮することが確認された。
- (2) サーモラベルにより測定した車輪リム部の最高到達温度は、鋳鉄複合化制輪子、合金鋳鉄制輪子ともに150℃であった。熱電対によって測定した、摩擦面から10mm深さにおける制輪子の最高温度は、ばらつきはあるが両制輪子とも約450℃であり、大きな相違は認められなかった。
- (3) 試験後の車輪踏面状態について、両制輪子間に大きな相違はなかった。試験後の車輪踏面の算術平均粗さRaは、合金鋳鉄制輪子の場合の3μmに対し鋳鉄複合化制輪子ではほぼ同等の2μmであり、車輪とレール間の粘着力を得るには十分な大きさであった。
- (4) 試験後の鋳鉄複合化制輪子の摩擦面において、フィルタと鋳鉄が一体化している状態が観察され、フィルタの割れや欠けは認められなかった。

文 献

以上のように、現車による試験においても、実物大ブ

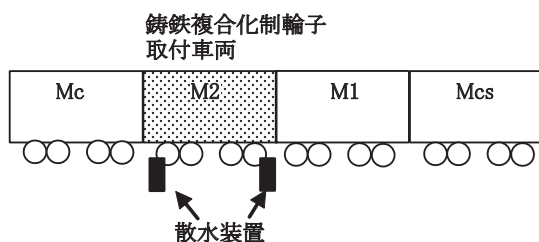


図18 現車試験設置状況

- 1) 高沢克朗, 辻村太郎, 由利三郎: 鋳物, Vol.57, No.8, pp.516-521, 1985
- 2) 新井浩, 清水保雄: 鋳物, Vol.67, No.6, pp.403-409, 1995
- 3) 新井浩, 辻村太郎, 清水保雄: 鋳物, Vol.67, No.11, pp.800-806, 1995
- 4) 高橋芳朗, 吉浦洋之, 清水一道, 大城桂作, 片岸庄史: 鋳造工学, Vol.73, No.11, pp.715-720, 2001
- 5) 高橋芳朗, 清水一道, 足立真彦, 大城桂作, 片岸庄史: 鋳造工学, Vol.75, No.3, pp.196-201, 2003
- 6) 辻村太郎, 大野薫, 宮内瞳苗, 中山淳一: 鉄道総研報告, Vol.11, No.9, pp.7-12, 1997
- 7) T. Tsujimura, K. Ohno, T. Miyauchi and J. Nakayama: QR of RTRI, Vol. 39, No.3, pp.110-113, 1998
- 8) 高梨智昭, 宮内瞳苗, 辻村太郎: 鋳造工学会第131回全国講演大会講演概要集, p.108, 1997
- 9) 高橋芳朗, 清水一道, 足立真彦, 大城桂作, 片岸庄史: 鋳造工学会第138回全国講演大会講演概要集, p.72, 2001
- 10) 宮内瞳苗, 半田和行, 辻村太郎, 中山淳一: 鋳造工学会第147回全国講演大会講演概要集, p.142, 2005
- 11) 宮内瞳苗, 辻村太郎, 高梨智昭: 鋳造工学, Vol.74, No.3, pp.156-162, 2002