

アルミナフォームを含んだ鋳鉄複合制輪子の ブレーキ特性

宮内 瞳苗* 中山 淳一** 藤原 直哉**

Brake performance of Cast Iron Composite Brake Blocks Containing Alumina Foams

Toru MIYAUCHI Junichi NAKAYAMA Naoya FUJIWARA

Cast iron composite brake blocks, which contain silicon carbide foams in alloyed cast iron brake blocks, have been developed to improve friction coefficient and wear resistance. However, it has been clarified that the effect produced by alumina foams is similar to that of silicon carbide foams. Thereupon, the effects of silicon carbide foams and two kinds of alumina foams on friction and wear performance when used with alloyed cast iron brake blocks were examined. It is considered that the ceramic wear particles produced between the wheel tread and the brake block during braking, improved the friction coefficient. Wear of the cast iron composite brake blocks decreased because the cast iron matrix of the cast iron composite brake blocks was strengthened by inclusion of ceramic foams. It was found that silicon carbide foams in cast iron brake blocks were able to replace alumina foams because of their brake performance. Ceramic foams are therefore considered to have a cleaning effect by removing adhesive materials on the wheel tread.

キーワード：鋳鉄複合制輪子，セラミックフォーム，炭化ケイ素，アルミナ，摩擦係数，摩耗

1. はじめに

鉄道車両には、車輪踏面にブロックを押し付ける踏面ブレーキといわれるブレーキ方式があり、そのブロックのことを制輪子という。制輪子に求められる性能としては、在来線では機械ブレーキにより600m以内に停止しなければならないため、高速での摩擦係数が高いこと、メンテナンスコスト削減のため、制輪子の摩耗量が少なく、車輪踏面を痛めない、すなわち、車輪踏面を摩耗させないこと、車輪踏面に熱き裂等を発生させないことなどが挙げられる。制輪子として使われる材料には、鋳鉄、合成樹脂、焼結合金の3種類がある。そのうち鋳鉄制輪子は、耐摩耗性、摩擦係数が他の制輪子と比較して低いものの、ブレーキ性能が雨や雪の影響を受けず、車輪の踏面を適度に粗し、車輪とレールの粘着力が高く得られるなどの特徴を持つ^{1) 2)}。これまで、鋳鉄制輪子の耐摩耗性や摩擦係数の向上は、リン、クロム、モリブデン等の合金元素を多く添加することにより、組織中に硬質相を析出することで行われてきた²⁾。しかし、材質が脆くなってしまうなどの問題から、これ以上の合金元素添加による鋳鉄制輪子のブレーキ性能の向上は難しいと考え、硬質粒子としてセラミックス粒子を用いて、高速での摩擦係数の向上を図った。車輪・制輪子間に炭化ケ

イ素、アルミナ、ジルコニアの3種類のセラミックス粒子を外部から供給しながら合金鋳鉄制輪子のブレーキ試験を実施したところ、供給しないものと比較して、ブレーキ距離が炭化ケイ素粒子では短縮し、ジルコニア粒子では同等、アルミナ粒子では逆に長くなった^{3) 4)}。

炭化ケイ素粒子は鋳鉄と比較して比重が低いため、鋳造により複合させることは困難である。そこで、元来、鋳造時に溶湯の中に存在するゴミ（ノロ）をこすために使われている炭化ケイ素発泡体（フォーム）を鋳ぐるむ手法を開発し⁵⁾、高速で摩擦係数や耐摩耗性の高い鋳鉄複合制輪子を開発してきた^{6) ~ 10)}。しかしながら、アルミナは、資源が豊富で、セラミックスの中でも最も汎用性のある材料であり¹¹⁾、しかも、車輪・レール間の粘着力を向上するセラジェットにも使われている鉄道で実績のある材料であるため¹²⁾、炭化ケイ素ではなく、アルミナを鋳鉄制輪子に適用したいという要望があった。そこで、アルミナの適用を検討してきたところ、鋳鉄制輪子にアルミナフォームを鋳ぐるむと炭化ケイ素フォームと同様の効果があることがわかってきた¹³⁾。

本稿では、鋳鉄制輪子へのアルミナフォームの適用の可能性を検討するため、鋳鉄制輪子中に、汎用品のアルミナフォームと開発したアルミナフォームを鋳ぐるんだ鋳鉄複合制輪子を試作してブレーキ試験を実施し、現用品と既存の炭化ケイ素フォームを鋳ぐるんだ鋳鉄複合制輪子のブレーキ性能を比較した結果を報告する。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 北海道旅客鉄道株式会社

特集：材料技術

2. 試験方法

2.1 供試品

供試品を表1に示す。供試品は、高速用合金鋳鉄制輪子(以下、現用品とする)、それに炭化ケイ素フォームを鑄ぐるんだもの(以下、SiCとする)、汎用品である酸化ケイ素を結合剤としたアルミナフォームを鑄ぐるんだもの(以下、Al-Bとする)、開発品であるリン酸アルミニウムを結合剤としたアルミナフォーム¹⁴⁾を鑄ぐるんだもの(以下、Al-Iとする)の計4種類である。

セラミックフォームの外観を図1、セラミックフォーム鑄ぐるみ制輪子の試験前の摩擦表面を図2に示す。いずれのフォームも制輪子1本につき、2箇所、同位置に鑄ぐるんだ。

制輪子に鑄ぐるまれるセラミックフォームは、体積率10%、外径φ60mm、高さ40mmであり、製造時にガイドバーを挿入するため中央にφ6mmの穴が開けられている。Al-Iのみ高さが20mmのため、2枚重ねて鑄ぐるんだ。

表1 供試品

供試品	詳細
現用品	合金鋳鉄制輪子
SiC	現用品+SiCフォーム
Al-B	現用品+Al-Bフォーム(結合剤:酸化ケイ素)
Al-I	現用品+Al-Iフォーム(結合剤:リン酸アルミニウム)

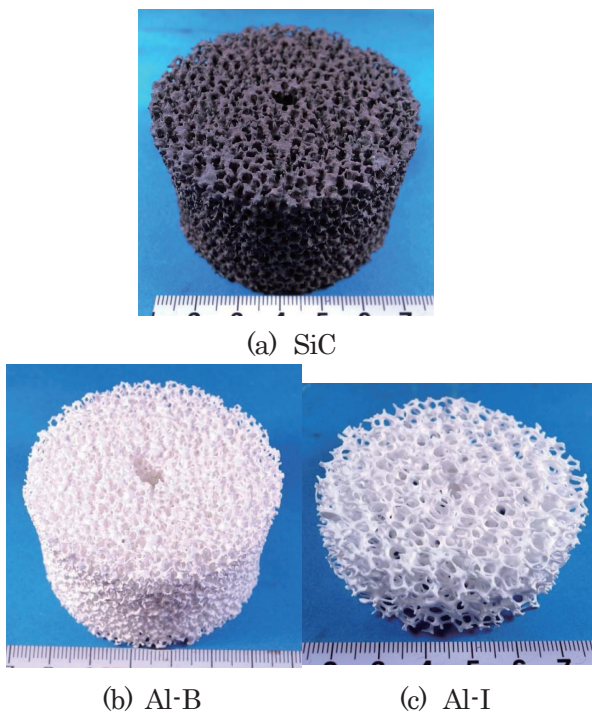


図1 セラミックフォーム外観

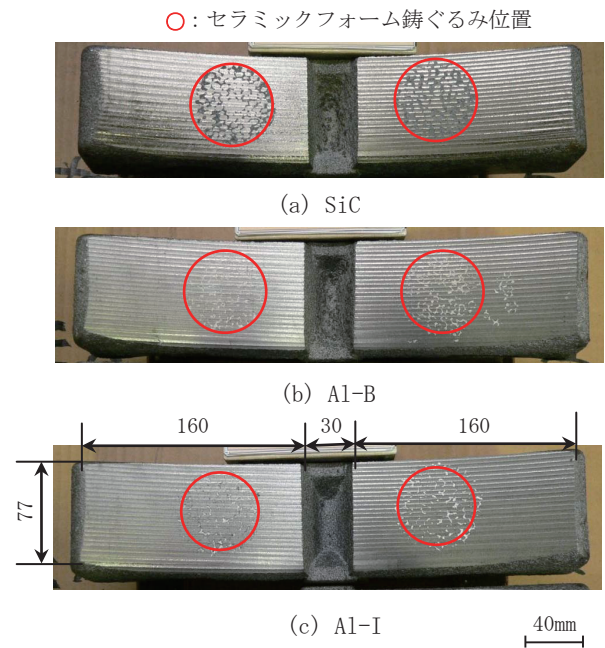


図2 セラミックフォーム鑄ぐるみ制輪子の試験前の摩擦面

2.2 試験条件

制輪子のブレーキ性能を調べるため、図3に示す実物大ブレーキ試験機を使用した。本試験機は、車輪一枚あたりの慣性モーメントを負荷して、制輪子のブレーキ性能を調べるものである。試験条件を表2に示す。

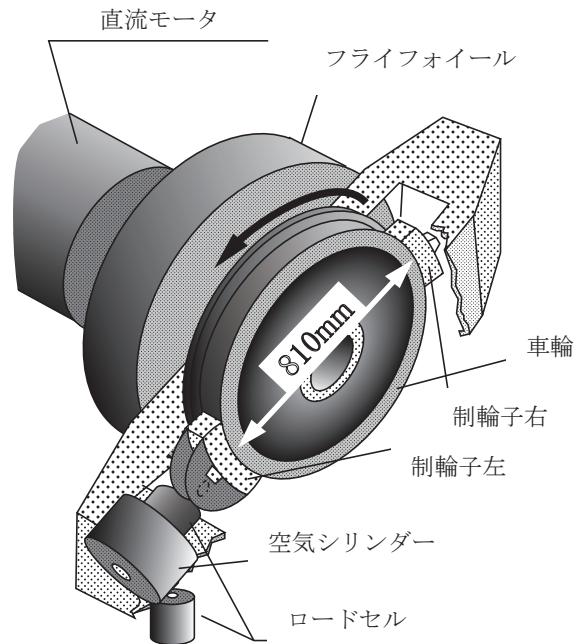


図3 実物大ブレーキ試験機の模式図

表2 試験条件

項目	詳細	
車輪径	810mm	
ブレーキ初速度	95 km/h	125, 135 km/h
押付力	25kN × 2	40kN × 2
試験回数	5回	
慣性モーメント	1068 kgm ²	
試験開始車輪温度	60℃	

摩擦係数、制輪子摩耗量、車輪温度、制輪子温度の測定を行った。

制輪子の摩耗量 δ は各ブレーキ初速度におけるブレーキ1回毎の制輪子1個分の摩耗厚さで示し、以下の(1)式により算出した。

$$\delta = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot n \cdot t} \quad (1)$$

ここで、 Δm :各ブレーキ初速度の制輪子摩耗質量 (g)、 A :制輪子摩耗面積 (mm²)、 ρ :制輪子密度 (g/mm³)、 n :各ブレーキ初速度の試験回数 (回)、 t :制輪子押付個数 (個)

制輪子密度は鑄鉄の 7.2×10^{-3} g/mm³ を採用、制輪子摩擦面積は見かけ上とし、図2より $77 \times 160 \times 2$ mm²、各ブレーキ初速度の試験回数は5回、制輪子押付個数は両抱きのため2個である。

車輪温度は、車輪リム部から70mm、40mm、10mmで車輪踏面から10mmの位置に熱電対を挿入して測定した。制輪子温度は、制輪子上部から40mm、制輪子側面から40mm、摩擦表面から10mmの位置に熱電対を挿入して測定した。

3. 試験結果

ブレーキ距離の測定結果を図4に示す。ブレーキ距離は、ブレーキ初速度95km/hでは、いずれの制輪子も同等であったが、ブレーキ初速度125km/h、135km/hでは、現用品と比較して、セラミックフォームを鑄ぐるんだ制輪子の方が著しく短かった。セラミックフォームを鑄ぐるんだ制輪子の中では、Al-BおよびAl-Iのブレーキ距離は、SiCより若干短かった。

制輪子摩耗量の測定結果を図5に示す。制輪子摩耗量は、ブレーキ初速度95km/hでは、いずれの制輪子も同等であったが、ブレーキ初速度125km/h、135km/hでは、現用品と比較して、セラミックフォームを鑄ぐるんだ制輪子の方が著しく低かった。特に、Al-Iの制輪子の摩耗量は、SiC、Al-Bと比較しても少なかった。

車輪最高温度の測定結果を図6に示す。車輪最高温度は、ブレーキ初速度95km/hでは、いずれの制輪子も同

等であったが、ブレーキ初速度125km/h、135km/hでは、現用品と比較して、セラミックフォームを鑄ぐるんだ制輪子の方が高かった。それは、セラミックフォームを鑄ぐるむことにより、制輪子の摩擦係数が向上することが原因の一つだと考えられる。最高温度は、最も高かったAl-Bの場合においても300℃以下であり、車輪踏面の目安温度400℃に対して十分な余裕があった。

制輪子最高温度の測定結果を図7に示す。制輪子最高温度は、ブレーキ初速度の上昇に伴い高くなったが、制輪子の相違による傾向は認められなかった。

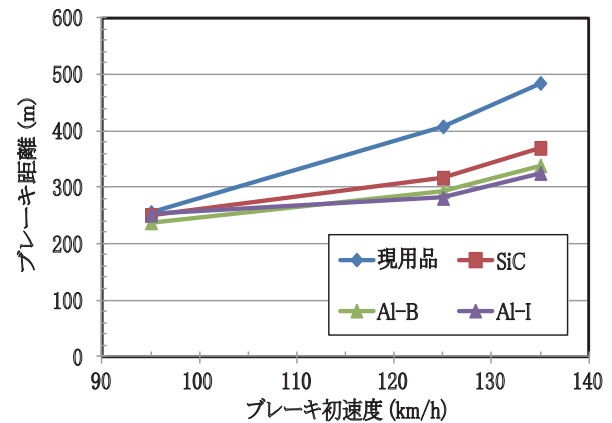


図4 ブレーキ距離

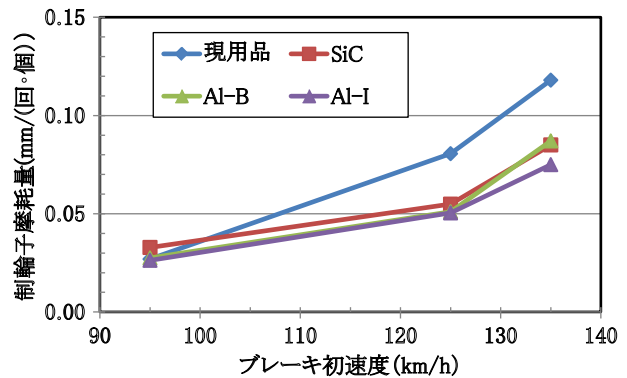


図5 制輪子摩耗量

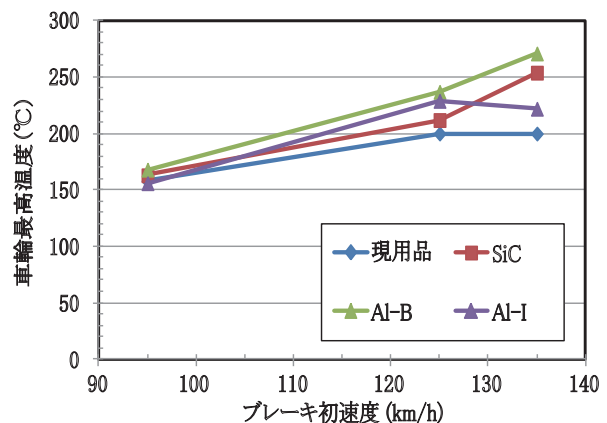


図6 車輪最高温度

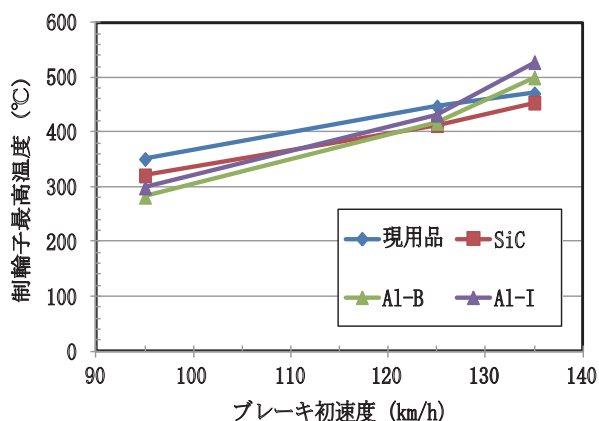


図7 制輪子最高温度

4. 考察

アルミナフォームを鑄鉄制輪子に鑄ぐるんでも炭化ケイ素フォームと同等以上に、ブレーキ距離短縮や制輪子摩耗量低減の効果が明らかとなり、炭化ケイ素フォームをアルミナフォームに置き換えることが可能であることがわかった。

これまでの報告によると、鑄鉄制輪子と車輪間にアルミナ粒子を外部から供給したブレーキ試験では摩擦係数の向上は認められなかった^{3) 4)}が、今回のように、アルミナをフォーム状にしたものを鑄鉄制輪子に鑄ぐるむと、摩擦係数の向上が認められた。そこで、セラミックフォームを鑄ぐるむことによる鑄鉄制輪子の摩擦係数や耐摩耗性向上のメカニズム、鑄鉄制輪子と車輪間にアルミナ粒子を外部から供給した場合と鑄鉄制輪子にアルミナフォームを鑄ぐるんだ場合の摩擦係数の相違について考察した。

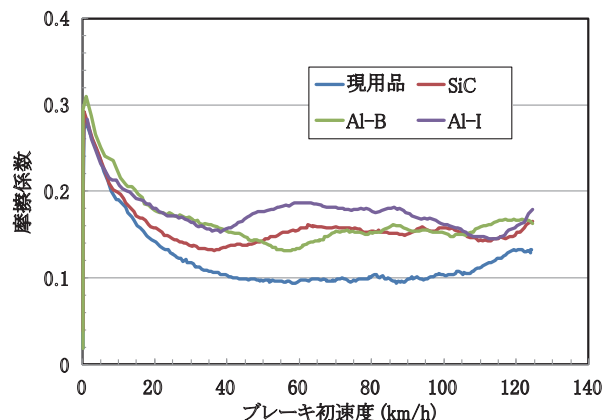
4.1 摩擦係数と制輪子耐摩耗性の向上

ブレーキ初速度 125, 135km/h からのブレーキ作動による摩擦係数 (3 回目) を図 8 に示す。現用品では、いずれのブレーキ初速度からもブレーキを作動してすぐに摩擦係数は低下し、0.1 という低い値を維持して、40km/h 以下で急上昇し、停止間隙で約 0.3 となった。一方、セラミックフォームを鑄ぐるんだ鑄鉄制輪子は、摩擦係数の低下が少なく、摩擦係数は現用品より高い値 0.15 もしくはそれ以上を維持して 40km/h 以下で上昇した。

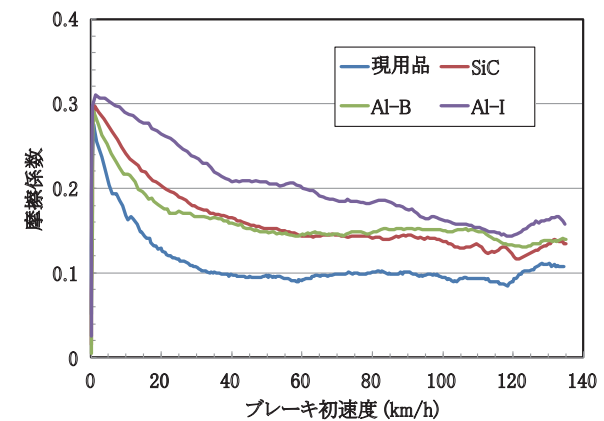
炭化ケイ素フォームを鑄ぐるんだ鑄鉄複合制輪子は、高速からブレーキがかかると鑄鉄部分は溶融するが、セラミックス部分は溶融せずに摩耗粒子として排出され、車輪と制輪子間に介在し、摩擦係数の低下を抑えるため、結果として、摩擦係数が高くなることが報告されている¹⁵⁾。今回の摩擦係数の測定結果より、炭化ケイ素だけでなく、アルミナフォームでも同様な効果があることがわかった。

高速からの鑄鉄制輪子によるブレーキでは、鑄鉄制輪子の表面が溶融し、それにより、摩擦係数が低下し、制輪子摩耗量も増加すると考えられる。鑄鉄とセラミックスの物性比較を表 3 に示す。炭化ケイ素は、鑄鉄と比較して、軟化温度やビッカース硬さが著しく高い。アルミナは炭化けい素ほど軟化温度やビッカース硬さは高くないが、鑄鉄と比較すると著しく高い。軟化温度やビッカース硬さの高いセラミックフォームが母材である鑄鉄と良好に鑄ぐるまれることにより、母材が強化され、制輪子の摩耗量を低下させると考えられる。

アルミナについては、汎用品と結合材を変更した開発品の 2 種類を検討した。開発品に含まれるリン酸アルミニウムは、セラミックス等の結合剤として使用した場合、高耐火性、高温加熱による結晶の転移等により優れた硬化結合性を発現する¹⁶⁾。そのため、結合剤を酸化ケイ



(a) ブレーキ初速度25km/h



(b) ブレーキ初速度135km/h

図8 摩擦係数 (3 回目)

表3 鑄鉄とセラミックスの物性比較

	軟化温度, °C	ビッカース硬さ, HV
鑄鉄	500	350
炭化ケイ素	1480	2400
アルミナ	1260	1600

素としたアルミナフォームより耐摩耗性が若干向上したと考えられる。

4.2 アルミナ粒子とアルミナフォームの相違

試験後の車輪の摩擦表面を図9に、車輪踏面への現用品の摩耗粉の付着を図10に示す。現用品の車輪踏面には図9のように制輪子からの摩耗粉の付着物が多く認められるが、セラミックフォームを鑄ぐるんだ鋳鉄制輪子の車輪には、それが認められなかった。その理由の一つには、図5で示したように、現用品の摩耗量がセラミックフォームを鑄ぐるんだ鋳鉄制輪子よりも多かったため、車輪踏面の付着も多かったと考えられる。別の面からは、セラミックフォームを鑄ぐるんだ鋳鉄制輪子には鋳鉄の摩耗粉の車輪への付着を取り除く効果、すなわち清浄効果があると考えられる。高速からのブレーキにおいて、現用品の摩擦係数が低下する主要因は、摩擦表面の溶融によるものと考えられるが、さらに、現用品の車

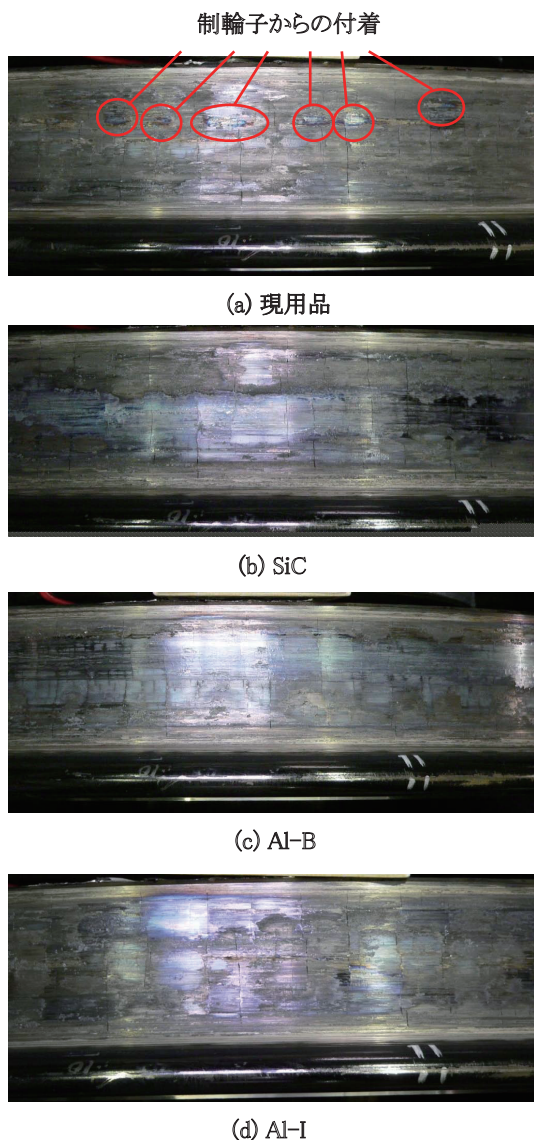


図9 試験後の車輪踏面

輪踏面への付着は、車輪踏面に凹凸を形成し、制輪子と車輪との接触を妨げ、制輪子の有効な摩擦面積が低減することも要因の一つと考えられる。

これまでの報告によると、鋳鉄制輪子と車輪間にアルミナ粒子を外部から供給したブレーキ試験では摩擦係数の向上は認められなかった^{3) 4)}。それは、この方法では、アルミナを車輪踏面全域に介在させることが難しく、先に述べたような車輪の踏面の清浄効果を得ることはできなかったためと考えられる。一方、アルミナフォームを鑄ぐるんだ鋳鉄制輪子は、セラミックフォームが制輪子のほぼ横幅全域に存在し、ほぼ車輪踏面全域に接触するため、ブレーキ試験において、車輪踏面の清浄効果が得られたため、摩擦係数の向上が認められたと考えられる。



図10 車輪踏面の摩耗粉の付着

5. 結言

鋳鉄制輪子へのアルミナフォームの適用可能性を検討するため、鋳鉄制輪子中に、汎用品のアルミナフォームと開発したアルミナフォームを鑄ぐるんだ鋳鉄複合制輪子を試作してブレーキ試験を実施し、現用品と既存の炭化ケイ素フォームを鑄ぐるんだ鋳鉄複合制輪子のブレーキ性能を比較した結果をまとめると次のようになる。

- (1) 鋳鉄複合制輪子はいずれも高速での摩擦係数が向上した。それは、ブレーキにより制輪子中のセラミックスが摩耗粒子として排出され、それらが制輪子と車輪間に介在したためであり、そのことが、摩擦係数を向上させたと考えられる。
- (2) 鋳鉄複合制輪子は、いずれも現用品と比較して高速での摩耗量が少なかった。それは、鋳鉄制輪子にセラミックフォームを鑄ぐるむことにより、母材である鋳鉄とセラミックスが一体化し、母材が強化されたためと考えられる。
- (3) アルミナフォームを鋳鉄制輪子に鑄ぐるんでも炭化

特集：材料技術

ケイ素フォームと同等以上に、ブレーキ距離短縮や制輪子摩耗量低減の効果が明らかとなり、炭化ケイ素フォームをアルミナフォームに置き換え可能であることがわかった。

- (4) 開発品であるアルミナフォームを鑄ぐるんだ鑄鉄複合制輪子は、汎用品であるアルミナフォームより、高速において、若干耐摩耗性が高かった。これは、開発品に含まれるリン酸アルミニウムの影響によるものと考えられる。
- (5) セラミックフォームを鑄ぐるんでいない鑄鉄制輪子の車輪踏面への付着は、車輪に凹凸を形成し、制輪子と車輪との接触を妨げ、制輪子の有効な摩擦面積を低減するため、摩擦係数の低下を引き起こす。しかし、セラミックフォームを鑄ぐるんだ鑄鉄制輪子は、車輪踏面の付着物を取り除く効果、清浄効果があり、車輪と制輪子の接触を良好に保ち、制輪子の有効な摩擦面積を確保するため、摩擦係数の低下を防ぐと考えられる。

文献

- 1) Vernersson, T.: "Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels Part 1: brake rig experiments", *Wear*, Vol.236, pp.96-105, 1999.
- 2) 辻村太郎: "ブレーキ材料の変遷と展開", *金属*, Vol.70, No.2, pp.119-127, 2000
- 3) 辻村太郎, 大野薫, 宮内瞳, 中山淳一: "高速車両用複合型鑄鉄制輪子の開発", *鉄道総研報告*, Vol.11, No. 9, pp. 7-12, 1997
- 4) Miyauchi, T., Tsujimura, T., Ohno, K. and Nakayama, J.: "Development of a Complex Type Cast Iron Brake Shoe for High Speed Train", *QR of RTRI*, Vol.39, No.3, pp.110-113, 1998.
- 5) 特許第 4705887 号: 鉄道車輛用鑄鉄制輪子
- 6) 高梨智昭, 宮内瞳, 辻村太郎: 日本鑄造工学会 第 131 回全国講演大会, p.8, 1997
- 7) 高橋芳朗, 清水一道, 足立真彦, 大城桂作, 片岸庄史: 日本鑄造工学会 第 138 回全国講演大会, p.72, 2001
- 8) 宮内瞳, 半田和行, 辻村太郎, 中山淳一: 日本鑄造工学会 第 149 回全国講演大会, p.63, 2006
- 9) 宮内瞳, 辻村太郎, 半田和行, 中山淳一, 清水一道: "鑄鉄制輪子のブレーキ性能に及ぼす炭化けい素フィルタ複合化の影響", *鑄造工学*, Vol.78, pp. 503-509, 2006
- 10) 森本文子, 宮内瞳, 半田和行, 辻村太郎, 川口清: "摩擦特性に優れた鑄鉄複合化制輪子の開発", *鉄道総研報告*, Vol.22, No.4, pp.17-22, 2008
- 11) たとえば, *セラミック工学ハンドブック*, 社団法人日本セラミック協会, p.2004, 1989
- 12) 大野薫, 伴巧, 小原孝則: セラミックス粒子噴射による車輪・レール間の増粘着, *トライボロジスト*, 第 41 巻, 第 12 号, pp.973-978, 1996
- 13) 宮内瞳, 中山淳一, 藤原直哉, 西村浩之, 近藤美沙: 日本鑄造工学会 第 157 回全国講演大会, p.122, 2010
- 14) 特願 2010-31870: 車両用制輪子及び制輪子用制動ブロック
- 15) Miyauchi, T., Tsujimura, T., Handa, K., Nakayama, J. and Shimizu, K.: "Influence of silicon carbide filters in cast iron composite brake blocks on brake performance and development of a production process", *Wear*, Vol.267, pp. 833-838, 2009.
- 16) リン酸アルミニウム系バインダー: 多木化学株式会社カタログ