

鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼす燐添加の影響

— 鑄ぐるみ法によるセラミック分散合金鑄鉄制輪子の製造と特性評価の研究 (第3報) —

高橋芳朗*・江藤博明**・清水一道***・片岸庄史****

*材料開発部・**工業化学部・***国立大分工業高等専門学校・****(株)八幡ハイキャスト

Effects of Phosphorus addition on Frictional Wear Characteristics of Cast Iron Brake Shoes

— A Manufacturing Method of Several Ceramic Filters/Fe-C-Si-Mn-Cr-V-P-B Alloys Composite Brake Shoes and Evaluations of Frictional Wear Characteristics of Them (3rd Report) —

Yoshiroh TAKAHASHI*, Hiroaki ETOH**, Kazumichi SHIMIZU*** and Syoji KATAGISHI****

*Material Development Division, **Industrial Chemical Division, ***Oita National College of Technology and ****Yahata High-Casting Co., Ltd.

要旨

我々は平成9年度より、九州大学を中心としたNEDO地域コンソーシアム研究開発事業「メゾスコピック複相組織制御耐熱・耐摩耗性金属基複合材料の研究開発」の分担課題である「溶浸複合材料の研究開発」の中で、鉄道制輪子用金属基複合材料の開発を目標に研究を行っている。本研究では昨年度の結果^{1),2)}をもとに、各種合金鑄鉄制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性の中で、燐添加型合金鑄鉄制輪子の燐添加による制輪子組織及び摩擦・摩耗特性への影響について調査した。さらに、鉄道制輪子材料として材料設計の最適化を図るため、昨年度の結果と比較を行った。

その結果、燐添加型合金鑄鉄制輪子において、燐添加量の増加に従って摩擦・摩耗特性の向上に効果的とされているステダイト組織が増加することが分かった。また、耐摩耗性については約3.0mass%の燐添加が優れていたものの、制動特性については約1~2mass%の燐添加が優れており、製造工程におけるコスト的試算も考慮した製品開発が今後の課題となることが分かった。さらに、昨年度実験を行ったボロン添加型合金鑄鉄制輪子に比べて燐添加型合金鑄鉄制輪子の方が摩擦・摩耗特性に優れており、セラミックとの複合化による摩擦・摩耗特性の向上が今後さらに期待されることが分かった。

1. 緒言

鉄道車両の高速化に伴って、電氣的に制動力を得る動力ブレーキと機械的に制動力を得る摩擦ブレーキを併用したブレーキの安全性、制動性及び経済性の向上が課題となっている。その中でも、摩擦ブレーキを構成する制輪子には、耐摩耗性、安定した制動性、車輪への低攻撃性、耐熱亀裂性、軽量化、低コスト化などが要求されている。

一般的に鉄道制輪子には踏面型のものやディスク型のものであり、我々の開発目標とする踏面型制輪子には鑄鉄系のもので古くから用いられている。鑄鉄系制輪子の長所としては、溶解・鑄造法を用いるために成形性に優れていること、価格的に安価であること、リサイクル性に優れていること、黒鉛による潤滑効果が優れていることなどが挙げられる。しかし、近年台頭してきたフェノール樹脂系制輪子や焼結金属系制輪子などに比べて摩擦・摩

耗特性に劣ることから、メンテナンスフリーを目的とした摩擦・摩耗特性の向上が求められている³⁾。

鑄鉄系制輪子に関する研究開発は、国内では(財)鉄道総合技術研究所が精力的に行っており^{3)~16)}、海外でもいろいろな取り組みがなされてきた¹⁷⁾。一方大分県では、平成7年度より地元企業のニーズにより試験時間、コストのかかる実車試験の前試験用として小型ブレーキ試験機の開発を国立大分工業高等専門学校清水研究室と共同で行い、九州管内のローカル線(松浦鉄道、島原鉄道、高千穂鉄道、球磨川鉄道など)で使用されている鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性の評価を行ってきた^{18),19)}。

このような背景の中、本研究では網目状セラミック構造体(ポリウレタン発泡体にセラミックの泥漿をコーティングして一定の厚みを確定後、乾燥・焼成してセラミックを網目状に成形したものを溶融鑄鉄で鑄ぐるむ溶浸

複合技術を用いた凝固制御を行い,さらに各種合金元素を添加することで従来の鑄鉄系制輪子に比べて基地組織が微細制御された摩擦・摩耗特性に優れたセラミック分散合金鑄鉄制輪子の開発を行うことを目標としている.本報告では昨年度の結果^{1),2)}をもとに,合金鑄鉄制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性の中で,燐添加型合金鑄鉄制輪子の燐添加による制輪子組織及び摩擦・摩耗特性への影響について調査した.さらに,鉄道制輪子材料として材料設計の最適化を図るため,昨年度の結果と比較を行った.

2. 実験方法

2.1 試験制輪子の作製

本研究では,鑄鉄系制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性に及ぼす燐添加の影響を調査するために,九州管内のローカル線で現在使用されているFe-3.3mass%C-1.8mass%Si-1.5mass%Mn-0.35mass%P-0.37mass%Cr-0.20mass%V合金の燐添加量を0.35,0.56,0.97,1.8,3.0mass%と変化させた燐添加型合金鑄鉄制輪子を試作した(以下,0.35%P,0.56%P,0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子とする).そして,これらの燐添加型合金鑄鉄制輪子の組織観察,硬さ測定などを行った.また,小型ブレーキ試験機用試験片の形状は30x30x27mmとし,車輪との接触面は車輪と同じ曲率R=140mmに機械加工を施した.

2.2 小型ブレーキ試験機によるブレーキ試験

Fig.1に小型ブレーキ試験機の概略図を示す.本試験機の制動機構は,この原理により,錘を用いてφ280mmの車輪(JIS E5402 SSW-Q1S)に試験制輪子を押し付けるものである.制動荷重は,49.0N刻みに49.0~980.0Nの範囲で調整が可能である.また,本試験機の動力部は,3.7kW3相交流モータによりプーリ,Vベルトを介した3段階の回転(514,1037,1720rpm)が調整可能であり,ブレーキ初速度を27.1,54.7,90.7km/hで一定に保つものである.

今回のブレーキ試験では,車輪を一定速度90.7km/hで60秒間回転させ,モータのスイッチ停止と同時に試験制輪子に980N(面圧約1MPa)の荷重を負荷した.この試験を1条件につき繰り返して20回行い,試験制輪子の摩耗量を1回毎に算出した.さらに,制動時間も1回毎に計測した.また,20回の試験における平均値を平均摩耗量,平均制動時間として算出した.さらに,セラミック分散率の異なる各種鑄鉄系制輪子との摩耗現象の絶対的な比較を行うため,次式より比摩耗量を算出した.ただし,各種鑄鉄系制輪子の摩耗体積は鑄鉄及びセラミック各々の比重,網目状セラミック構造体の気孔率,鑄鉄組織及びセラミッ

ク組織の体積比,摩耗量より算出し,また制動距離は制動時間及びブレーキ初速度90.7km/hより算出した.

$$W_R = W_V / S_P \cdot S_D \quad (1)$$

W_R :比摩耗量(mm²/N), W_V :摩耗体積(mm³)

S_P :制動荷重(N), S_D :制動距離(mm)

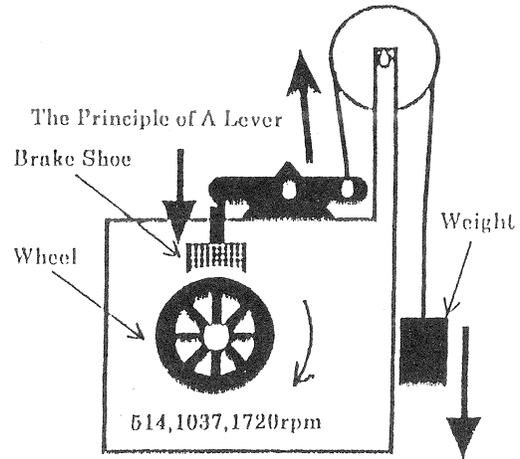


Fig.1 Image of Brake Test Machine

3. 実験結果及び考察

3.1 燐添加による制輪子組織への影響

Fig.2に0.35%P,0.56%P,0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子の顕微鏡組織を示す.この結果より,燐添加型合金鑄鉄制輪子は,灰色で示されるパーライト組織,白色で示される硬質炭化物組織,黒色で示される片状黒鉛組織で構成されていることが分かった.また,燐添加量の増加に伴って灰色で示されるパーライト組織中及び白色で示される硬質炭化物組織中に,鉄道制輪子の摩擦・摩耗特性向上に効果的とされているステダイト組織(Fe(α)+Fe₃C+Fe₃Pの三元共晶組織)^{3),4),6),17)}が析出・増加していることが分かった.

大城²⁰⁾は鑄鉄の凝固過程における燐,ボロンの挙動について調査を行っているが,燐は大部分がFe₃Pとして,ボロンは大部分がFe₃(CB)として晶出する報告している.また,燐とボロンを同時に添加することで微細なステダイト組織ではなく,粗いFe₃(CB)と微細なFe(α)+Fe₃Pの組み合わせられた組織を形成すると報告している.本研究では,ボロンの添加を行っていないため粗いFe₃(CB)の析出は確認できないが,燐添加量の増加に伴ってFe₃Pが析出・増加していることが確認された.

また,Fig.3に0.35%P,0.56%P,0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子のブリネル硬さを比較した.この結果より,燐添加量が約1mass%までの範囲では硬さが約220~225とあまり差がないものの,1.8mass%を超えると約240~250の硬さを示すことが分かった.上述したように,ステダイト組

織は基地組織に比べて高硬度(Hv約0.8GPa)かつ低融点(約1223K)のため、鉄道制輪子の摩擦・摩耗特性向上に効果的とされている。よって、基地組織中にステダイト組織が析出・分散することで、制輪子組織全体の硬さが向上したものと考えられる。この硬さの向上が燐添加型合金鉄制輪子の耐摩耗性向上に効果を発揮するものと期待され、ステダイト組織の析出による制動特性の向上と組み合わせられた高性能制輪子の開発につながるものと期待される。

3.2 燐添加による摩擦・摩耗特性への影響

Fig.4及びFig.5に0.35%P,0.56%P,0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子の平均比摩耗量及び平均制動距離を比較した。この結果より、耐摩耗性は燐添加量約3.0mass%の3.0

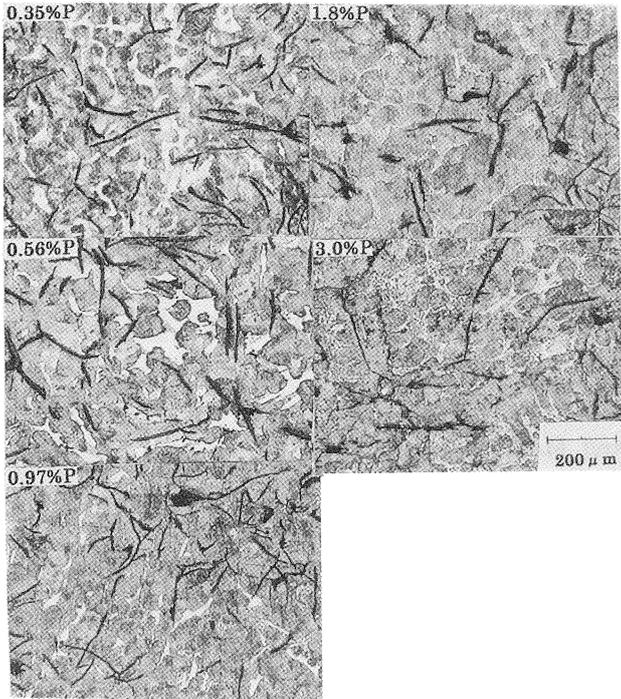


Fig.2 Microstructure of Specimens

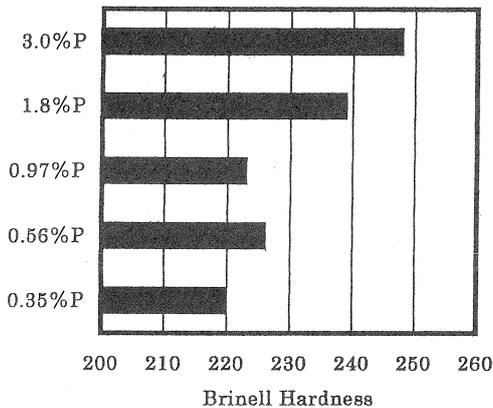


Fig.3 Relationship between Brinell Hardness and Phosphorus Addition Quantity

制輪子が燐添加量約0.35mass%の0.35%P制輪子に比べて約2.2倍と最も優れているものの、燐添加量約1~2mass%の範囲にある0.97%P及び1.8%P制輪子では0.35%P制輪子に比べて約0.6~0.7倍に低下していることが分かった。また、制動特性は燐添加量の増加に伴って向上し、燐添加量約1.8mass%の1.8%P制輪子が燐添加量約0.35mass%の0.35%P制輪子に比べて約1.6倍と最も優れているものの、燐添加量約3.0mass%の3.0%P制輪子では1.8%P制輪子に比べて約0.9倍に低下していることが分かった。ただし、0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子については、初期段階のブレーキ試験では車輪と制輪子との摩擦・摩耗特性の関係が成り立つものの、繰り返しブレーキ試験を行うために制輪子組織中のステダイト組織が一部溶解して車輪に凝着することから、車輪と制輪子との摩擦・摩耗特性の関係というよりも凝着したステダイト組織と制輪子との摩擦・摩耗特性の関係となっている。

燐添加型合金鉄制輪子の摩擦・摩耗特性は、燐添加量約3.0mass%の3.0%P制輪子が基地組織硬度もブリネル硬さ248と高く、耐摩耗性に最も優れているものの、制動特性は制輪子組織中のステダイト組織が多いため、車輪への凝着層も増え若干低下するようである。それに対

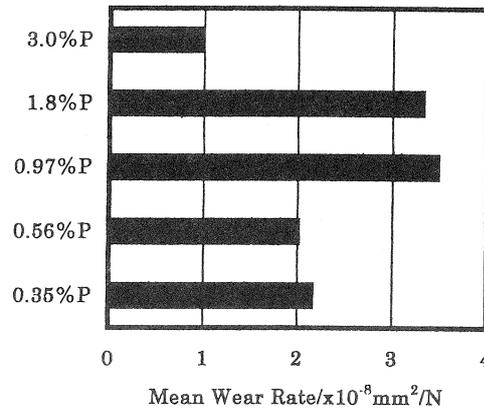


Fig.4 Mean Wear Rate of Brake Shoes

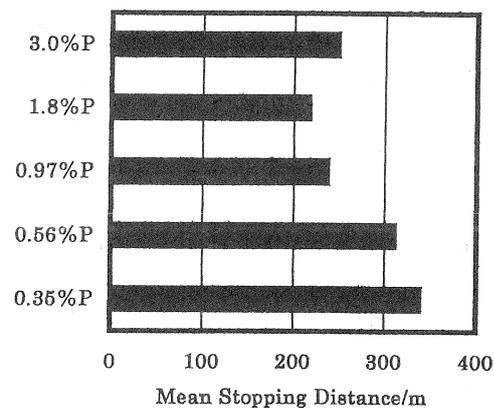


Fig.5 Mean Stopping Distance of Brake Shoes

し、燐添加量約1.8mass%の1.8%P制輪子が制動特性に最も優れており、燐添加による制動特性向上のための適性値であると考えられる。よって、今後はセラミックとの複合化により、摩擦面付近の制輪子組織の剛性を上げることと凝着層を削りながら車輪と制輪子との摩擦・摩耗特性の関係を常に保つことで優れた耐摩耗性と制動特性を兼ね備えた鉄道制輪子用金属基複合材料を開発するとともに、製造工程におけるコスト的試算も考慮した製品開発が期待される。

3.3 各種合金鋳鉄制輪子の摩擦・摩耗特性の比較

昨年度実験を行ったFe-3.3mass%C-1.8mass%Si-1.5mass%Mn-0.32mass%P-0.37mass%Cr-0.09mass%V-0.008mass%B合金のボロン添加量を0.008,0.012,0.016,0.025,0.038,0.057,0.074mass%と変化させたボロン添加型合金鋳鉄制輪子(以下,0.008%B,0.012%B,0.016%B,0.025%B,0.038%B,0.057%B,0.074%B制輪子とする)²⁾と0.35%P,0.56%P,0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子の摩擦・摩耗特性の比較を行った。Fig.6にその結果を示す。この結果より、鉄道制輪子の摩擦・摩耗特性向上という面から、ボロンの添加より燐の添加が優れた傾向を示すことが分かった。また、耐摩耗性及び制動特性向上の両立という面から、0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子が全体的にバランスが良く優れていることが分かった。よって、今後はこれらの材料を中心に、セラミックとの複合化による摩擦・摩耗特性のさらなる向上を図ることが期待される。

Fig.7は、昨年度の実験より摩擦・摩耗特性に優れた結果を示したAl₂O₃-28mass%SiO₂, ZrO₂-33mass%SiO₂, SiCセラミック分散鼠鋳鉄制輪子(以下,A28S(N)/FC250,Z33S(N)/FC250,SiC(N)/FC250制輪子とする¹⁾)と燐添加型合金鋳鉄制輪子の中で摩擦・摩耗特性に優れた結果を示した0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子の摩擦・摩耗特性を比較したものである。この結果より、耐摩耗性については、0.97%P,1.8%P,3.0%P及びA28S(N)/FC250制輪子が比較的優れており、その中でも3.0%P制輪子が最も優れていることが分かった。制動特性については0.97%P,1.8%P,A28S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子が比較的優れていることが分かった。よって、鋳鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性向上にはAl₂O₃-28mass%SiO₂セラミックとの複合化と適量の燐添加が優れており、これらを組み合わせた鋳鉄系制輪子の複相組織制御を行うことで摩擦・摩耗特性に優れた制輪子材料の開発が可能になるものと考えられる。また、製造工程におけるコスト的試算も考慮した製品開発が今後の課題になるものと考えられる。

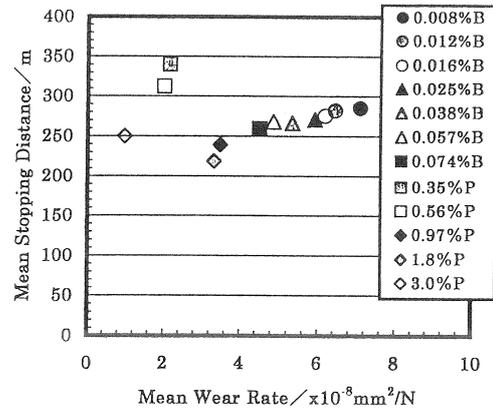


Fig.6 Relationship between Mean Wear Rate and Mean Stopping Distance

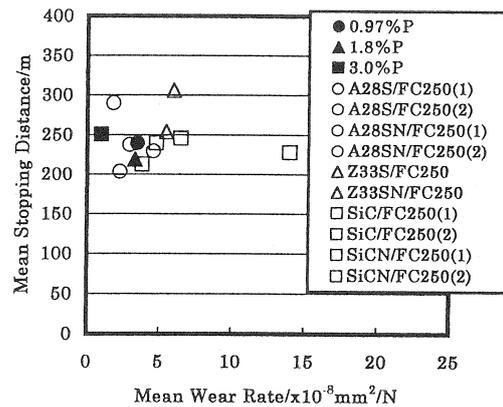


Fig.7 Relationship between Mean Wear Rate and Mean Stopping Distance

4. 結言

今回の実験より、以下の結果が得られた。

- (1) 燐添加型合金鋳鉄制輪子において、燐添加量の増加に伴って摩擦・摩耗特性に効果的とされている共晶ステダイト組織が増加する。
- (2) 耐摩耗性は、燐添加量約3.0mass%の3.0%P制輪子が燐添加量約0.35mass%の0.35%P制輪子に比べて約2.2倍と最も優れているものの、燐添加量約1~2mass%の範囲にある0.97%P及び1.8%P制輪子では0.35%P制輪子に比べて約0.6~0.7倍に低下していることが分かった。
- (3) 制動特性は、燐添加量の増加に伴って向上し、燐添加量約1.8mass%の1.8%P制輪子が燐添加量約0.35mass%の0.35%P制輪子に比べて約1.6倍と最も優れているものの、燐添加量約3.0mass%の3.0%P制輪子では1.8%P制輪子に比べて約0.9倍に低下していることが分かった。
- (4) 鉄道制輪子の摩擦・摩耗特性向上という面から、ボロンの添加より燐の添加が優れた傾向を示すことが分

かった。また、耐摩耗性及び制動特性向上の両立という面から、0.97%P,1.8%P,3.0%P制輪子が全体的にバランスが良く優れていることが分かった。

- (5) 鋳鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性向上には Al_2O_3 -28mass% SiO_2 セラミックとの複合化と適量の燐添加が優れており、これらを組み合わせた鋳鉄系制輪子の複相組織制御を行うことで摩擦・摩耗特性に優れた制輪子材料の開発が可能になるものと考えられる。また、製造工程におけるコスト的試算も考慮した製品開発が今後の課題になるものと考えられる。

センター研究報告P.96

- 19)高橋,江藤,吉浦,清水,片岸:平成8年度大分県産業科学技術センター研究報告P.44

- 20)若杉,大城:日本鋳造工学会九州支部平成9年度講演概要集P.9

謝辞

本研究の遂行にあたり、貴重なご助言を頂きました九州大学・大城桂作教授,工業技術院九州工業技術研究所・北原晃部長並びにメソスコピック複合材料WG会議の皆様、心より感謝の意を表します。また、事業全体の取りまとめにご尽力頂きました(株)北九州テクノセンターの田中洋征氏,突田芳宏氏に深く感謝の意を表します。また、実験にご協力頂きました工業化学部・後藤文治主幹研究員,佐藤孝主幹研究員,国立大分工業高等専門学校制御情報工学科清水研究室の皆様,藤原夏義氏,山本親志氏に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1)高橋,江藤,清水,片岸他:平成9年度大分県産業科学技術センター研究報告P.35
- 2)高橋,江藤,清水,片岸他:平成9年度大分県産業科学技術センター研究報告P.71
- 3)辻村:(社)日本鋳物協会研究報告69,P.167
- 4)新井,清水:鋳物67(1995)6,P.403
- 5)新井,辻村他:鋳造工学67(1995)11,P.800
- 6)高沢,辻村,由利:鋳物57(1985)8,P.516
- 7)辻村,真鍋:鋳物60(1988)2,P.98
- 8)新井,清水:日本鋳物協会第126回講演概要集P.53
- 9)宮内,辻村他:日本鋳物協会第125回講演概要集P.86
- 10)宮内,辻村他:日本鋳物協会第126回講演概要集P.54
- 11)宮内,辻村他:日本鋳造工学会第128回講演概要集P.95
- 12)宮内,辻村他:日本鋳造工学会第130回講演概要集P.86
- 13)宮内,辻村:日本鋳造工学会第131回講演概要集P.107
- 14)辻村,宮内他:日本鋳物協会第124回講演概要集P.25
- 15)中山,辻村他:日本鋳造工学会第127回講演概要集P.10
- 16)高梨,辻村他:日本鋳造工学会第131回講演概要集P.108
- 17)鋳物のすべり摩耗((財)総合鋳物センター)P.111
- 18)高橋,吉浦,清水,片岸:平成7年度大分県産業科学技術