

P添加合金鋳鉄/セラミックス複合制輪子の組織と摩擦・摩耗特性
— 鑄ぐるみ法によるセラミックス分散合金鋳鉄制輪子の製造と特性評価の研究 (第4報) —

高橋芳朗・園田正樹・江藤博明*・清水一道**・大城桂作***・片岸庄史****
材料開発部・*企画・デザイン部・**大分工業高等専門学校・***九州大学・****(株)八幡ハイキャスト

Microstructures and Frictional Wear Characteristics of Ceramic Filter/Fe-3.3C-1.8Si-1.5Mn-xP-0.37Cr-0.20V Alloy Added of P Element Composite Brake Shoes

— A Manufacturing Method of Ceramic Filter/Fe-C-Si-Mn-P-Cr-V(-B) Alloy Composite Brake Shoes in Cast-In Insertions and Evaluations of Frictional Wear Characteristics of Them (4th Report) —

Yoshiro TAKAHASHI, Masaki SONODA, Hiroaki ETO*, Kazumichi SHIMIZU**,
Keisaku OGI*** and Syoji KATAGISHI****

Material Development Division, *Planning & Design Division, **Oita National College of Technology,
Kyushu University 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と製品化を目標に研究を推進している。本研究ではこれまでの結果^{1)~3)}をもとに、鋳鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性を飛躍的に向上させるため、合金鋳鉄制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したP添加合金鋳鉄制輪子と普通鋳鉄/セラミックス複合制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したA28S/FC250およびSiC/FC250制輪子に含有するAl₂O₃系およびSiC系セラミックスに注目し、P添加合金鋳鉄/セラミックス複合制輪子の組織と摩擦・摩耗特性に及ぼすP添加と網目状セラミックス構造体との複合効果について調査した。また、用途に応じた鉄道制輪子の材料設計最適化に取り組んだ。その結果、P添加合金鋳鉄のP添加量を1.0mass%前後とし、SiC系セラミックスと複合化した材料が基地組織の強度および摩擦・摩耗特性などに優れ、かつ製造コストおよびメンテナンス性などの経済面からも優れているとの結論を得た。

1. はじめに

走行している鉄道車両を安全に停止させ、また減速させることは重要なことである。現在の鉄道ブレーキは、動力ブレーキと摩擦ブレーキを組み合わせた機構が採用されており、摩擦ブレーキを構成する鉄道制輪子には、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、低コスト化などが求められている。

鉄道制輪子の機構には踏面方式とディスク方式があり、一部の高速車両を除いた在来線には踏面方式が採用されている。また、鉄道制輪子の材質には鋳鉄系、レジン系、焼結金属系があり、高速車両にはレジン系および焼結金属系が主に使われている。我々の開発目標とする鋳鉄系制輪子は、(財)鉄道総合技術研究所が中心に研究開発を行っている⁴⁾が、高速での摩擦・摩耗特性が他の材質に比べて劣ることから、高速車両への適用は過酷な湿潤条

件下にある一部の地域のみである。しかし、成形性、価格性、リサイクル性などに優れていることから、これらの長所を生かしつつも高速での摩擦・摩耗特性を改善した材料開発がさらに求められている。また、九州管内の第3セクター路線では鋳鉄系制輪子を多く採用しているが、高低差やカーブの多い山間部を走行することから鉄道制輪子の寿命も短く、耐摩耗性向上によるメンテナンス性改善が特に求められている。

このような背景の中、大分県では地場企業のニーズにより時間、費用のかかる実機ブレーキ試験の予備試験用として小型ブレーキ試験機の開発を大分工業高等専門学校清水研究室と共同で行い、地場企業で納入実績のある九州管内の第3セクター路線で使用されている鋳鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性評価を行ってきた^{5)~7)}。

そこで、これらの結果^{5)~7)}をもとに、本研究プロジェク

トでは、鑄鉄系制輪子の摩耗の要因となる車輪との摩擦面付近の組織の歪みを抑制し、かつ黒鉛の晶出抑制・微細化と硬質炭化物の晶出促進による摩擦・摩耗特性向上を目的とした基地組織制御を行うため、網目状セラミックス構造体(ポリウレタン発泡体にセラミックス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ス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と各種合金元素を添加することで基地組織中に硬質炭化物を晶出させるin-situ複合技術を組み合わせた凝固制御を行うことで、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鉄道制輪子用金属基複合材料の開発と製品化を行うことを目標としている。本研究ではこれまでの結果^{1)~3)}をもとに、鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性を飛躍的に向上させるため、合金鑄鉄制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したP添加合金鑄鉄制輪子と普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したA28S/FC250およびSiC/FC250制輪子に含有するAl₂O₃系およびSiC系セラミックスに注目し、P添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の組織と摩擦・摩耗特性に及ぼすP添加と網目状セラミックス構造体との複合効果について調査した。また、用途に応じた鉄道制輪子の材料設計最適化に取り組んだ。

2. 実験方法

2.1 試験制輪子の作製

Fig.1に研究概念図を示す。本研究プロジェクトでは、網目状セラミックス構造体の材質をAl₂O₃-28mass%SiO₂, ZrO₂-33,40,50mass%SiO₂, SiCとして、JIS規格FC250に相当する普通鑄鉄(Fe-3.3mass%C-1.8mass%Si-0.45mass%Mn合金;以下、FC250制輪子とする)で複合化した普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子(以下、A28S/FC250, Z33S/FC250, Z40S/FC250, Z50S/FC250, SiC/FC250制輪子とする)を実物大の簡易形状で試作したり、また、網目状セラミックス構造体と溶融鑄鉄との濡れ性改善および基地組織強化による摩擦・摩耗特性向上を目的として、網目状セラミックス構造体に無電解Niメッキを施して普通鑄鉄と複合化した普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子(以下、A28SN/FC250, Z33SN/FC250, Z40SN/FC250, Z50SN/FC250, SiCN/FC250制輪子とする)を実物大の簡易形状で試作した²⁾。そして、これらの供試体から切出した試験片を後述する小型ブレーキ試験機で評価し、鑄鉄系制輪子の組織および摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックスとの複合化による影響、セラミックスの材質による影響、セラミックス面積率による影響などから鉄道制輪子用金属基複合材料の開発に適した網目状セラミックス

構造体の選定を行った^{1),2)}。

また、実用制輪子として九州管内の第3セクター路線で使用されている合金鑄鉄(Fe-3.3mass%C-1.8mass%Si-1.5mass%Mn-0.35mass%P-0.37mass%Cr-0.20mass%V合金)をベースとして、P添加量を0.35~3.0mass%と変化したP添加合金鑄鉄制輪子(以下、0.35%P, 0.56%P, 0.97%P, 1.8%P, 3.0%P制輪子とする)を実物大の簡易形状で試作した³⁾。そして、これらの供試体から切出した試験片を後述する小型ブレーキ試験機で評価し、鑄鉄系制輪子の組織および摩擦・摩耗特性に及ぼすP添加の影響から用途に応じた最適合金設計を検討した³⁾。

そして、これらの結果^{1)~3)}をもとに、鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性を飛躍的に向上させるため、P添加合金鑄鉄と網目状セラミックス構造体との複合化によりP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子(以下、A28S/0.35%P, A28S/0.56%P, A28S/0.97%P, A28S/1.8%P, A28S/3.0%P, SiC/0.35%P, SiC/0.56%P, SiC/0.97%P, SiC/1.8%P, SiC/3.0%P制輪子とする)を実物大の簡易形状で試作し、組織観察、硬度測定、後述する小型ブレーキ試験機による予備評価などから製品化および実機ブレーキ試験機による実証試験に向けた材料の選定を行った。

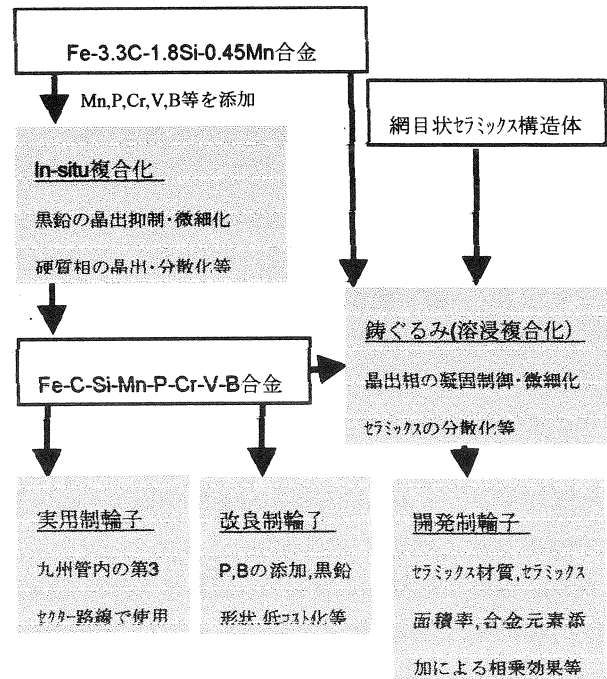


Fig.1 研究概念図

2.2 小型ブレーキ試験機によるブレーキ試験

Fig.2に小型ブレーキ試験機を示すが、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に機械加工した。本試験機の制動機構は、この原理により、錘を用いてφ280m

m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九州管内の第3セクター路線における使用最高速度を想定し、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じに試験片に980Nの荷重を負荷した。この試験を1つの条件につき繰り返し20回行い、試験片の摩耗量を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すると同時に、セラミックス分散状況の異なる各種铸铁系制輪子との比較を行うため、铸铁およびセラミックスの比重、網目状セラミックス構造体の気孔率、铸铁およびセラミックスの体積比、摩耗量より摩耗体積を算出した。また、制動時間およびブレーキ初速度90.7km/hより制動距離を算出した。ただし、摩耗体積および制動距離は次式より算出している。

$$V = W / \{ \rho_1 \times (100 - Rv) / 100 + \rho_2 \times Rv / 100 \} \quad (1)$$

V: 摩耗体積 (mm³), W: 摩耗量 (g)

ρ_1 : 铸铁の比重 (g/mm³)

ρ_2 : セラミックスの比重 (g/mm³)

Rv: 網目状セラミックス構造体の体積比 (%)

$$L = t \times (90.7 \times 1000 / 3600) \quad (2)$$

L: 制動距離 (m), t: 制動時間 (s)

3. 実験結果及び考察

3.1 普通铸铁/セラミックス複合制輪子の摩擦・摩耗特性^{1),2)}

Fig.3に普通铸铁/セラミックス複合制輪子の平均摩耗体積Vと平均制動距離Lとの関係を示す。この結果より、網目状セラミックス構造体を熔融铸铁で铸ぐるむことで、铸铁系制輪子の摩擦・摩耗特性は全体的に向上することが分かった。また、多少のばらつきはあるものの、A28S(N)/FC250制輪子は分散するセラミックスの硬度Hvが約12.0GPaと高いため、他の普通铸铁/セラミックス複合制輪子に比べてセラミックス面積率Rcが約15%と比較的低いにも関わらず優れた耐摩耗性を示し、良いものでFC250制輪子の約11.8倍の性能を示している。しかし、制動特性に関しては、Rcが低いために不安定な傾向を示している。それに対し、SiC(N)/FC250制輪子は比較的安定した制動性を示し、良いものでFC250制輪子の約1.4倍の性能を示している。これは、他の普通铸铁/セラミックス

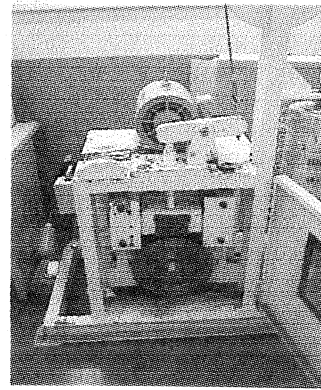


Fig.2 小型ブレーキ試験機

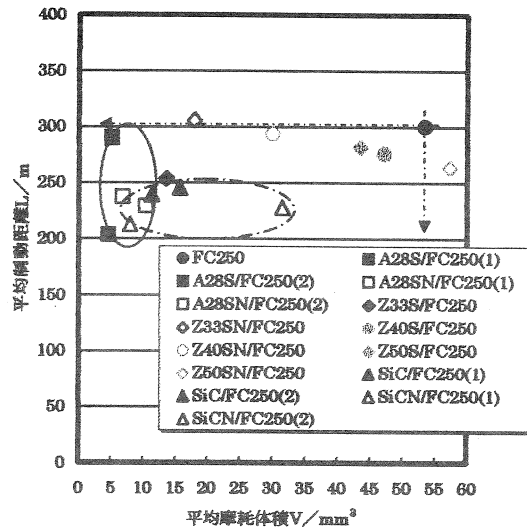


Fig.3 普通铸铁/セラミックス複合制輪子の平均摩耗体積Vと平均制動距離Lとの関係

複合制輪子に比べてRcが約27%と高いこと、セラミックスそのものの摺動性が優れていること⁸⁾による。しかし、耐摩耗性に関しては不安定な傾向を示し、Hvが約11.1GPaと高いものの、Rcも高いために制動時の衝撃によるセラミックスの欠落による影響が大きく現れた結果を示している。よって、これらの欠点を克服するためには網目状セラミックス構造体のサーメット化などと同時に、合金元素を熔融铸铁中に添加して成分調整することで基地組織そのものを強化する必要性が考えられる。

また、網目状セラミックス構造体へ無電解Niメッキを施すことで、熔融铸铁との濡れ性が改善され、摩擦・摩耗特性が向上することが期待された。しかし、Niメッキ量が熔融铸铁に対して数十ppm程度であること、Niメッキ層が熔融拡散してしまうこと、摩擦・摩耗特性へのセラミックスの影響が大きいことなどから、濡れ性改善には効果があるものの、摩擦・摩耗特性向上には効果が現れなかった。また、耐摩耗性に優れたA28S(N)/FC250制輪子のRcを変化させた試料を作製し、同様に評価したところ、約15~23%の範囲では耐摩耗性にほとんど差がなく、Rcの増

加に従って安定した制動性を示し、かつ車輪への攻撃性も少ない結果が得られた。しかし、約48%のものでは車輪を削るという結果が得られた。

3.2 合金鑄鉄制輪子の組織と摩擦・摩耗特性に及ぼすP添加の影響³⁾

これまでにP添加量の増加に従って、基地組織に比べて高硬度(Hv約0.8GPa)かつ低融点(約1223K)のステダイト(Fe(α)+Fe₃C+Fe₃Pの三元共晶組織)⁹⁾が多量に晶出していることが観察されている。また、P添加合金鑄鉄制輪子はPの他にMn, Cr, Vなどを含有していることから、ステダイトの他に粗い炭化物がγ+Fe₃Cとして晶出していることが観察されている。これらの硬質相は、合金鑄鉄の凝固過程で最終凝固部に硬質相形成元素が濃縮されて晶出するため、ステダイトはP添加量の増加に従ってセル界面を網目状に広がった形で晶出している。

Fig.4にP添加合金鑄鉄制輪子のP添加量とステダイトおよびステダイトを含む硬質相の晶出量(面積率)R_{sc}との関係を示す。ただし、ステダイトの理論値は以下に示すScheilの式から算出している。

$$C_L = C_0 (1 - F_s)^{K_0-1} \quad (3)$$

C_L: 凝固過程における液相中のP濃度

C₀: 合金鑄鉄中のP成分

F_s: 固相分率

K₀: 平衡分配係数

この結果から、ステダイトの理論値と実測値は多少のばらつきはあるものの、ほぼ等しい値を示すことが分かった。また、硬質相全体の晶出量がステダイト晶出量を上回っているのは、硬質相形成元素であるMn, Cr, Vなどが含まれていることから粗い炭化物がγ+Fe₃Cとして晶出したことによるものと考えられる。しかし、P添加量が約2.0 mass%近くなるとMn, Cr, Vなどの影響が少なくなり、晶出する硬質相はほぼ全てがステダイトとなることが理論値と実測値より推測できる。

Table1に、P添加合金鑄鉄制輪子の硬質相の晶出量と引張強度およびブリネル硬度との関係を示す。この結果より、硬質相の晶出とともに引張強度は低下し、ブリネル硬度は上昇することが分かった。実用面から考えると、ブリネル硬度の上昇は合金鑄鉄制輪子の耐摩耗性向上を示唆することから好ましいが、引張強度の低下は安全性の低下を示唆することからあまり好ましくない。通常、合金鑄鉄制輪子を使用する場合、バックメタルと呼ばれる鉄板を同時に鋳ぐるむことで熱衝撃割れによる事故を防いでいるが、高合金化は対象車両によっては製造コス

ト的に採算が取れない場合もある。よって、これらのことを考慮すると、後述する合金鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性と引張強度、ブリネル硬度、対象車両、製造コストなどのバランスが重要であるといえる。

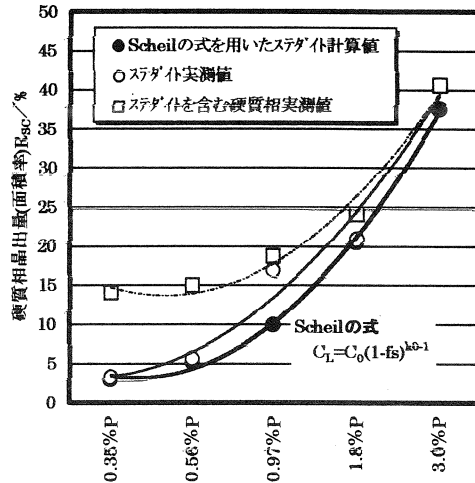


Fig.4 P添加合金鑄鉄制輪子のP添加量とステダイトおよびステダイトを含む硬質相の晶出量(面積率)R_{sc}との関係

Table 1 P添加合金鑄鉄制輪子の硬質相の晶出量と引張強度およびブリネル硬度との関係

制輪子名称	硬質相晶出量/%	引張強度/N/mm ²	ブリネル硬度
0.35%P	14.0	262	220
0.56%P	15.0	212	226
0.97%P	18.7	190	223
1.8%P	24.0	165	239
3.0%P	40.6	140	248

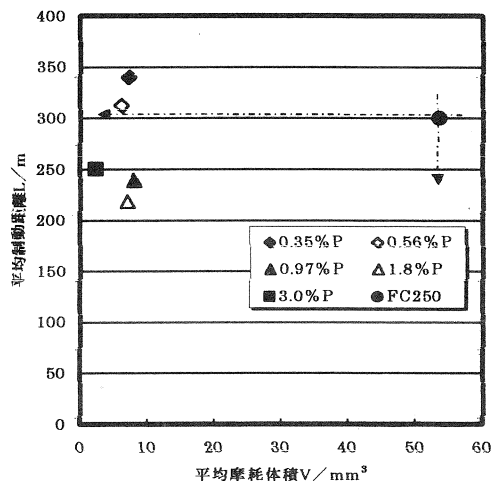


Fig.5 P添加合金鑄鉄制輪子の平均摩耗体積Vと平均制動距離Lとの関係

Fig.5にP添加合金鑄鉄制輪子の平均摩耗体積Vと平均制動距離Lとの関係を示す。この結果より、耐摩耗性はP添加量が約2.0mass%まではあまり変化が見られないものの、3.0%P制輪子はベースとなる0.35%P制輪子に比べて約3.1倍の性能向上を示した。また、制動性はP添加量の増加に従って向上し、約1.0mass%以上のP添加で飛躍的に向上することが分かった。これはP添加により、ステダイトが多量に晶出したことによるものと考えられる。また、1.8%P制輪子はベースとなる0.35%P制輪子に比べて約1.6倍の最も優れた制動性を示した。しかし、3.0%P制輪子では制動性が若干低下する傾向を示している。これは、P添加によって晶出したステダイトが基地組織に比べて融点が約1223Kと低く、本実験で発生する瞬間最高摩擦熱Tが約1023Kと高いために軟化して車輪へ大量に凝着したことによるものと考えられる。よって、試験開始時は制輪子と車輪との摩擦・摩耗の関係が成り立つものの、繰り返し試験を行うことで車輪へ凝着したステダイトと制輪子との摩擦・摩耗の関係となる。これに起因して、ステダイトの車輪への凝着と剥離が繰り返され、また逆に制輪子への再凝着を起こすと考えられる。また、摩擦熱による軟化および硬度低下を受けない制輪子内部は、高硬度の硬質相が多く分散していると考えられる。よって、制輪子の摩耗は比較的押さえられるものの、制動性が低下するものと考えられる。

これらの結果より、使用最高速度90km/hである九州管内の第3セクター路線を対象とした場合、制輪子の摩擦・摩耗特性、引張強度、製造コストなどとのバランスを考慮して、約1.0mass%前後のP添加が適当であると考えられる。しかし、上記のP添加では制動性は向上するものの、耐摩耗性の改善がなされないため、基地組織の強度を維持しつつも摩擦・摩耗特性をさらに向上させるために、網目状セラミックス構造体との複合効果が期待される。

3.3 P添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の組織と摩擦・摩耗特性

これまでの成果^{1)~3)}をもとに、鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性を飛躍的に向上させるため、合金鑄鉄制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したP添加合金鑄鉄制輪子と普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子の中で優れた摩擦・摩耗特性を示したA28S/FC250およびSiC/FC250制輪子に含有するAl₂O₃系およびSiC系セラミックスに注目し、P添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の組織と摩擦・摩耗特性に及ぼすP添加と網目状セラミックス構造体との複合効果について調査した。また、用途に応じた鉄道制輪子の材料設計最適化に取り組んだ。

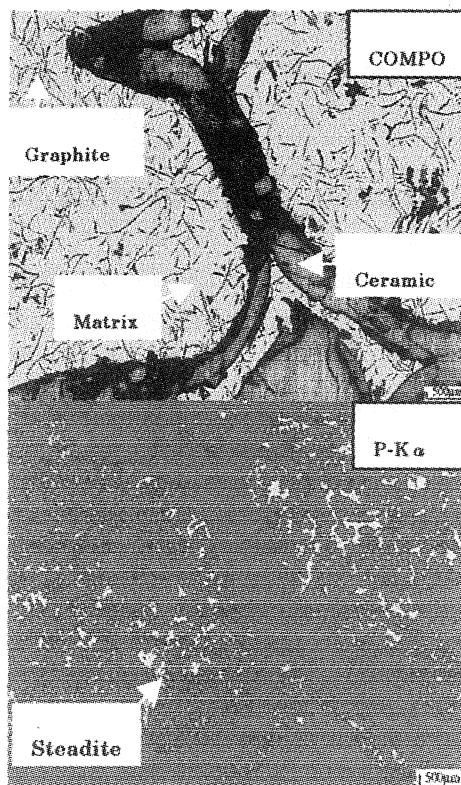


Fig.6 A28S/1.8%P制輪子のEPMA像

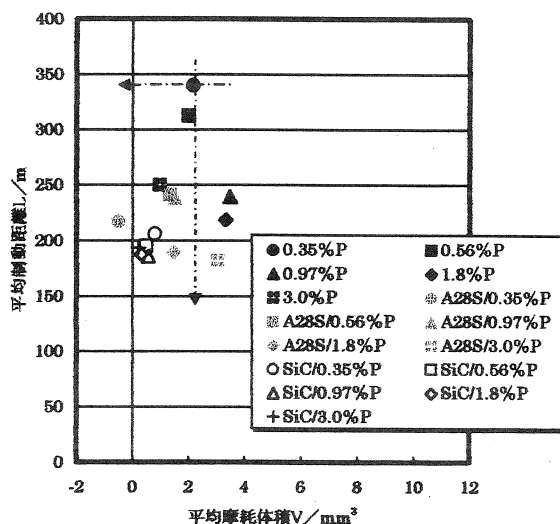


Fig.7 P添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の平均摩耗体積Vと平均制動距離Lとの関係

Fig.6にA28S/1.8%P制輪子のEPMA反射電子線像および特性X線像を示す。この結果より、常圧鑄造法により網目状セラミックス構造体を熔融鑄鉄で鑄ぐるんだ本制輪子は、引け巣、湯回り不良などの鑄造欠陥がないことが確認された。また、本制輪子はセラミックスがマクロ的均一に分散していることから、熔融鑄鉄がセラミックスとセラミックスとの隙間で凝固制御され、鑄鉄系制輪子の摩耗の要因となる黒鉛の晶出抑制・微細化および摩擦・摩耗特性向上に効果があるとされているステダイトを

微細晶出することが確認された。ただし、網目状セラミックス構造体による熔融鑄鉄の凝固制御により、ステダイトおよびステダイトを含む硬質相は微細晶出したものの、その晶出量 R_{sc} は前述したP添加合金鑄鉄制輪子とほぼ同じである。

Fig.7にP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の平均摩耗体積 V と平均制動距離 L との関係を示す。この結果より、網目状セラミックス構造体をP添加合金鑄鉄と複合化することで、全体的に摩擦・摩耗特性が向上することが分かった。また、 Al_2O_3 系セラミックスを分散させたP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子に比べ、 SiC 系セラミックスを分散させたP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の方が摩擦・摩耗特性に優れており、 SiC 系セラミックスの影響が大きく現れているために、本試験速度域ではP添加量の差がセラミックスを含まないP添加合金鑄鉄制輪子と比べて明確に現れなかった。それでも、 $SiC/0.97\%P$ 制輪子は実用制輪子として九州管内の第3セクター路線で使用されている $0.35\%P$ 制輪子に比べて、約3.8倍の耐摩耗性と約1.8倍の制動性を示している。また、 $SiC/1.8\%P$ 制輪子は同様に、約6.8倍の耐摩耗性と約1.8倍の制動性を示している。普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子に関して前述したように、 Al_2O_3 系セラミックスは耐摩耗性向上に効果があるものの、制動性にばらつきを生じていた。この原因として、他の普通鑄鉄/セラミックス複合制輪子に比べてセラミックス面積率 R_c が低いことが考えられる。また、同様に SiC 系セラミックスは制動性向上に効果があるものの、耐摩耗性にばらつきを生じていた。この原因として、 H_v が約11.1GPaと高いものの、 R_c も高いために制動時の衝撃によるセラミックスの欠落による影響が大きく現れたものと考えられる。よって、合金元素添加により、鑄鉄成分を調整することで基地組織そのものを強化することが必要となる。このような結果からも推測できるように、P添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子の摩擦・摩耗特性において、 Al_2O_3 系セラミックスを分散させたものは耐摩耗性、制動性ともに僅かながらばらつきを生じている。それに対し、 SiC 系セラミックスを分散させたものは、本試験速度域では SiC 系セラミックスの影響が大きいこと、合金元素添加により基地組織が強化されていることなどから耐摩耗性のばらつきが改善され、摩擦・摩耗特性が向上している。

以上の結果より、製品化および実機ブレーキ試験による実証試験に向けた材料を検討し、P添加合金鑄鉄のP添加量を約1.0mass%前後かつ SiC 系セラミックスと複合化した材料を選定した。

4. まとめ

今回の実験より、以下の結果が得られた。

- (1) 常圧鑄造法により、引け巣、湯回り不良などの鑄造欠陥がない鉄道制輪子用金属基複合材料を作製することに成功した。
- (2) 網目状セラミックス構造体を熔融鑄鉄で鑄ぐるむことにより、熔融鑄鉄がセラミックスとセラミックスとの隙間で凝固制御され、鑄鉄系制輪子の摩耗の要因となる黒鉛の晶出抑制・微細化および摩擦・摩耗特性向上に効果があるとされているステダイトを微細晶出することに成功した。
- (3) P添加合金鑄鉄のP添加量を1.0mass%前後とし、 SiC 系セラミックスと複合化した材料が基地組織の強度および摩擦・摩耗特性などに優れ、かつ製造コストおよびメンテナンス性などの経済面からも優れていることが分かった。

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工業技術研究所・北原晃部長ならびにメソスコピック複合材料WG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突田芳宏氏、松田弘道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九州大学工学部物質科学工学科大城研究室の皆様、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、河村拓哉氏に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋芳朗他：平成9年度大分県産業科学技術センター研究報告P.35～P.40
- 2) 高橋芳朗他：平成10年度大分県産業科学技術センター研究報告P.129～P.134
- 3) 高橋芳朗他：平成10年度大分県産業科学技術センター研究報告P.135～P.139
- 4) 辻村太郎：金属Vol.70(2000)No.2,P.33～P.41
- 5) 高橋芳朗他：平成7年度大分県産業科学技術センター研究報告P.96～P.101
- 6) 高橋芳朗他：平成8年度大分県産業科学技術センター研究報告P.44～P.49
- 7) 高橋芳朗他：平成9年度大分県産業科学技術センター研究報告P.71～P.76
- 8) ファインセラミックスその機能と応用,日本規格協会P.23
- 9) 鑄物のすべり摩耗,(財)総合鑄物センターP.111