

鉄道制輪子用金属基複合材料の実用化に向けた試作品開発と実証試験 — 鑄ぐるみ法によるセラミックス分散合金鑄鉄制輪子の製造と特性評価の研究 (第5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

Prototype Developments for the Practical Application and Braking Tests for the Real Train Wheel of Composite Materials Based on Metal for Brake Shoes of the Railroad

— A Manufacturing Method of Ceramic Filler/Fe-C-Si-Mn-P-Cr-V-(B) Alloy Composite Brake Shoes in Cast-In Insertions and Evaluations of Frictional Wear Characteristics of Them (5th 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)~4)}をもとに、実用化に向けた試作品開発と(財)鉄道総合技術研究所保有の実機ブレーキ試験機を用いた実証試験を実施した。その結果、九州管内の第3セクター路線で使用されているJIS E 7501に規定された2種相当のYHC1制輪子に比べて、同様の適用範囲で摩擦・摩耗特性を改善したYHC2およびYHC3制輪子を開発することに成功した。また、セラミックスを複合化することで、125km/hの高速走行に対応可能な1種B相当のSiC/YHC3制輪子を開発することに成功した。特に、SiC/YHC3制輪子は摩擦・摩耗特性と製造コストおよびメンテナンス性などの経済面のバランスを考慮しても、十分に上記路線で適用が可能であることが分かった。

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鑄鉄系、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鑄鉄系制輪子は、(財)鉄道総合技術研究所が中心に研究開発を行っている⁵⁾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セクター路線では鑄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を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鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性評価を行ってきた^{6)~8)}。

そこで、これらの結果^{6)~8)}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)を熔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)~4)}をもとに、実用化に向けた試作品開発と(財)鉄道総合技術研究所保有の実機ブレーキ試験機を用いた実証試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 実用化に向けた試作品開発

Fig.1に研究概念図を示す。これまでの結果^{1)~4)}をもとに、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;YHC1制輪子とする)をベースとして、P添加量を約1.0mass%前後に変化させ、さらにBを微量添加して成分調整したP添加合金鑄鉄制輪子(以下、YHC2およびYHC3制輪子とする)を製品形状で試作した。また、YHC2およびYHC3制輪子と網目状セラミックス構造体(SiC系)を複合化させたP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子(以下、SiC/YHC2およびYHC3制輪子)を製品形状で試作した。

Table1に上記合金鑄鉄制輪子の化学成分を示す。大城ら⁹⁾は鑄鉄の凝固過程におけるP,Bの挙動について調査を行っているが、Pは大部分がFe₃Pとして、Bは大部分がFe₃(CB)として晶出する報告している。また、PとBを同時に添加することで微細なステダイト¹⁰⁾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。さらに、Bの微量添加は粗い硬質炭化物を晶出させるのに効果があり、鑄鉄系制輪子の摩擦・摩耗特性向上にも効果があることが確認されている⁸⁾。そこで、小型ブレーキ試験機による予備評価で得られた選定材料をもとに、さらに改良を加えた合金鑄鉄をベースとした試作品を作製した。

2.2 実機ブレーキ試験機による実証試験

Fig.2に実機ブレーキ試験機を示す。これまでの研究開発は、実機ブレーキ試験機に供するための小型ブレーキ試験機による材料選定試験が中心であり、九州管内の第3セクター路線で使用されている鑄鉄系制輪子の摩擦・摩

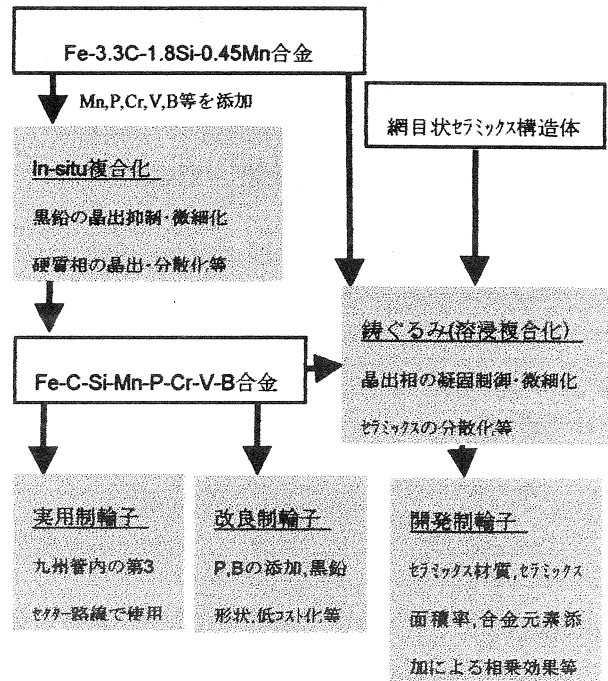


Fig.1 研究概念図

Table1 合金鑄鉄制輪子の化学成分(mass%)

制輪子名称	C	Si	Mn	P
YHC1	3.39	1.58	1.46	0.35
YHC2	3.19	1.65	1.32	0.66
YHC3	3.24	1.76	1.34	1.14
制輪子名称	S	Cr	V	B
YHC1	0.014	0.37	0.20	—
YHC2	0.015	0.43	0.11	0.05
YHC3	0.014	0.43	0.11	0.05

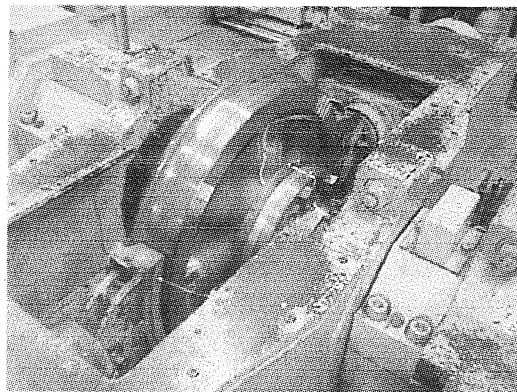


Fig.2 実機ブレーキ試験機

耗特性改善が主な目的であった。そこで、これまでの成果を実用化に結びつけるため、(財)鉄道総合技術研究所辻村研究室のご協力により、実機ブレーキ試験機による実

証試験を実施し、試作品の性能を確認した。ただし、試験条件は、JIS E 7501「鉄道車両—鉄製制輪子」に準じたものとし、以下に示すとおりである。

- (1) 車輪径： $\phi 860\text{mm}$
- (2) 慣性モーメント： $1259\text{kgm}^2(128.5\text{kgfms}^2)$
- (3) ブレーキ初速度：
YHC1 35,65,95,125km/h
YHC2およびYHC3 35,65,95,115,125km/h
SiC/YHC2およびSiC/YHC3 35,65,95,115,125,135km/h
- (4) 試験回数：各ブレーキ初速度において5回ずつ
- (5) 制輪子押付力：35~125km/hでは25kN両抱き
135km/hでは34kN両抱き
- (6) 試験開始温度：基準車輪温度(車輪踏面から10mm, リム部から40mmの位置)60℃以下
- (7) 測定項目：ブレーキ初速度,ブレーキ距離,ブレーキ時間,瞬間摩擦係数,平均摩擦係数,制輪子および車輪の温度,制輪子摩耗量,制輪子および車輪摩擦面の状態観察他
- (8) 備考：ブレーキ試験は制輪子摩擦面が車輪踏面と約70%以上馴染んだ状態から開始する。

3. 実験結果及び考察

3.1 実用化に向けた試作品開発

これまでの小型ブレーキ試験機用試験片の作製は、実物大の簡易形状(直方体)からなる鑄造試験片より切出しを行っていた。しかし、最終的には実用化に向けた実機ブレーキ試験機による実証試験を行うため、製品形状での試作が要求されている。そこで、網目状セラミックス構造体の鑄型内での固定方法、鑄造方案等を検討した。

Fig.3に網目状セラミックス構造体の鑄型内での固定状態を示す。網目状セラミックス構造体を鑄型内で固定せずに熔融鑄鉄で鑄ぐるむ場合、網目状セラミックス構造体の比重が軽いことから注湯時に浮遊してしまい、冷却時の状態によっては制動摩擦面にセラミックスを逐次定量的に供給することができない。また、注湯時に浮遊しないように鑄型内全体を網目状セラミックス構造体で置き換えた場合、加圧鑄造せずに熔融鑄鉄で鑄ぐるむのは困難であり、湯回り不良による鑄造欠陥ができる可能性がある。また、仮に鑄ぐるみに成功したとしても、小型ブレーキ試験機では得られなかった熱拡散や車輪への攻撃性が実機レベルでは大きな問題になると考えられる。そこで、これらの諸問題を考慮して、無数の連通空隙を持つ網目状セラミックス構造体を熔融鑄鉄との比重差により鑄型内で浮遊しないように下鑄型内に配置

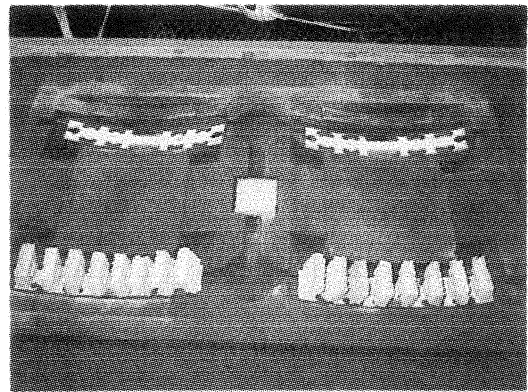


Fig.3 網目状セラミックス構造体の鑄型内での固定

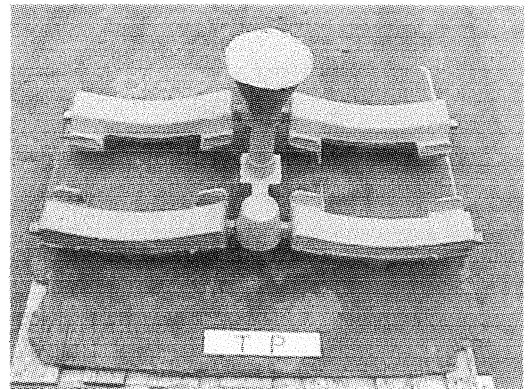


Fig.4 鉄道制輪子原型

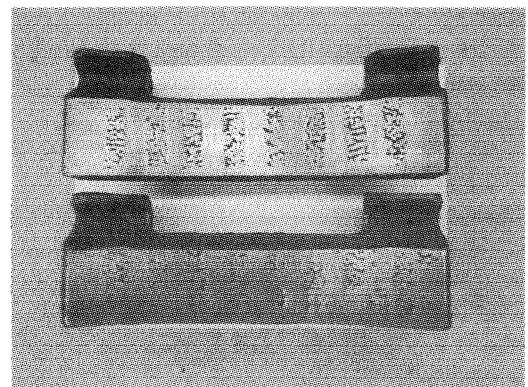


Fig.5 鉄道制輪子試作品例

したバックメタルに一定間隔で取り付けられた、または一定間隔で一体に突出形成されたブロック止めに固定し、制動摩擦面形成部を含む上鑄型を下鑄型に衝合して制輪子本体成形鑄型を作製した。そして、Fig.4に示すように制輪子本体成形鑄型内に予め成分調整した熔融鑄鉄を注湯し、バックメタルと連通空隙内を含む網目状セラミックス構造体全体を鑄ぐるんだ状態の制輪子本体を成形することに成功した。

Fig.5に上述した製品化工程により試作された鉄道制輪子の試作品例を示す。目視による検査の結果、熔融鑄鉄

は網目状セラミックス構造体の連通空隙内に至るまで充填され、湯回り不良等による鑄造欠陥のない製品を試作することに成功した。そして、これらの試作品を後述する実機ブレーキ試験機を用いた実証試験に供した。

3.2 実機ブレーキ試験機による実証試験

Fig.6に試作制輪子のブレーキ初速度 V_0 と平均摩擦係数 f_m との関係を示す。ただし、平均摩擦係数 f_m は、各ブレーキ初速度 V_0 における5回の試験により得られた平均摩擦係数 f_m をさらに平均化したものである。また、平均摩擦係数 f_m はJIS E 7501に記載されるように、次式より算出している。

$$f_m = 0.0386 \times (I/R) \times (V_0^2 / L \cdot 2P) \quad (1)$$

f_m : 平均摩擦係数(m/s²)

I : 慣性モーメント(kgm²)

R : 車輪径(m)

V_0 : ブレーキ初速度(km/h)

L : 実ブレーキ距離(m)

P : 制輪子1個あたりの押付力(N)

この結果より、九州管内の第3セクター路線で使用されている最高速度域約95km/hまでは、P添加量の増加に従ってP添加合金鑄鉄制輪子の摩擦性能が向上することが確認された。しかし、115km/h以上ではP添加量の違いによる摩擦性能の差はあまり見られず、平均摩擦係数 f_m は0.08~0.09m/s²前後を示した。JIS E 7501では鑄鉄系制輪子の適用範囲を各ブレーキ初速度 V_0 における平均摩擦係数 f_m から1種A~Cおよび2~4種に分類しているが、上述した摩擦性能の結果から今回評価を行ったP添加合金鑄鉄制輪子は2種相当の製品であることが分かった。それに対し、網目状セラミックス構造体をP添加合金鑄鉄で複合化したP添加合金鑄鉄/セラミックス複合制輪子はP添加合金鑄鉄制輪子に比べて、低速側(35~95km/h)での摩擦性能の向上とともに、115km/h以上での高速摩擦性能も改善され、SiC/YHC2制輪子は115km/hの平均摩擦係数 f_m が0.11m/s²を示すことから1種Cに相当する製品であることが分かった。また、SiC/YHC3制輪子はSiC/YHC2制輪子に比べてさらに摩擦性能が改善されており、125km/hの平均摩擦係数 f_m が0.12m/s²を示すことから1種Bに相当する製品であることが分かった。

以上のことから、鑄鉄系制輪子の95km/hまでの摩擦性能向上にはP添加が効果的であり、それ以上の高速での摩擦性能向上にはセラミックスを複合化することが効果的であることが分かった。このことは、P添加によって晶出したステダイトが軟化して摩擦性能を向上させることと関係しており、約90km/hにおける瞬間摩擦熱Tが

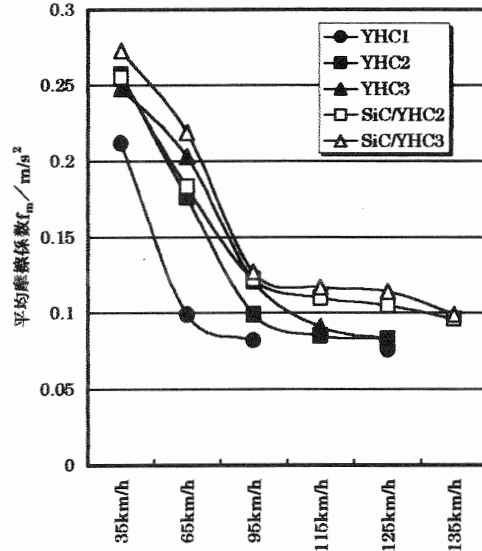


Fig.6 試作制輪子のブレーキ初速度 V_0 と平均摩擦係数 f_m との関係

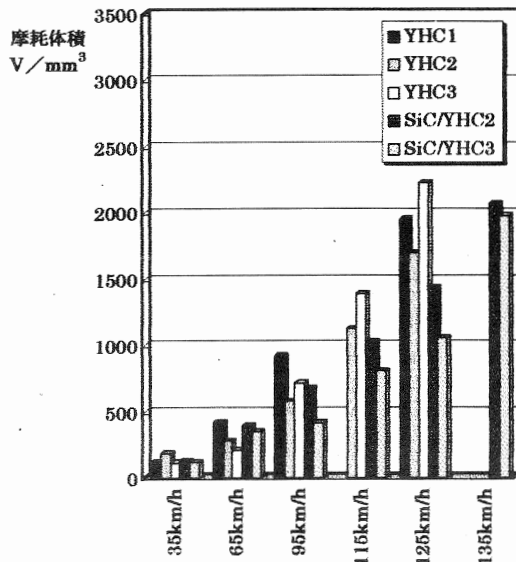


Fig.7 試作制輪子のブレーキ初速度 V_0 と摩耗体積 V との関係

最高約1023Kであるのに対し、それ以上のブレーキ初速度 V_0 では約1273K以上の瞬間摩擦熱Tが発生していると推測されるため、これに起因してステダイトが溶融して摩擦性能を急激に低下させるものと考えられる。よって、セラミックスを複合化することで高速での摩擦性能の低下は抑制されるものの、後述する耐摩耗性の向上とともにさらに摩擦性能を向上させるためには、基地組織そのものの耐熱性向上が課題となることが分かった。

Fig.7に試作制輪子のブレーキ初速度 V_0 と摩耗体積 V との関係を示す。ただし、摩耗体積 V は次式より算出して

いる。

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

V: 摩耗体積 (mm³), W: 摩耗量 (g)

ρ_1 : 鋳鉄の比重 (g/mm³)

ρ_2 : セラミックスの比重 (g/mm³)

R_v: 網目状セラミックス構造体の体積比 (%)

この結果より、P添加合金鋳鉄制輪子において、95km/hまでは実用制輪子であるYHC1制輪子に比べてYHC2およびYHC3制輪子の方が耐摩耗性に優れていることが分かった。また、YHC3制輪子は35,65km/hの低速では最も耐摩耗性に優れているものの、95km/h以上の高速域では逆に劣っている。これは、前述したように基地組織に比べて高硬度かつ低融点のステダイトの晶出量R_{sc}が多いことから低速側では耐摩耗性が高いものの、95km/h以上ではステダイトが軟化もしくは溶融することで著しく耐摩耗性を低下させるものと考えられる。また、YHC2制輪子はYHC1制輪子に比べてステダイトの晶出量R_{sc}が多いものの、YHC3制輪子のようにステダイトを含む硬質相中のステダイトの割合が多くないために、その他の硬質相の影響を受けることから耐摩耗性に優れた傾向を示している⁴⁾。それに対し、網目状セラミックス構造体をP添加合金鋳鉄で複合化したP添加合金鋳鉄/セラミックス複合制輪子は、特にSiC/YHC3制輪子が95km/h以上において摩耗体積V₀が著しく少ないことが分かった。また、P添加合金鋳鉄とセラミックスとの複合化は、35,65km/hの低速ではあまり耐摩耗性に差がないものの、95km/h以上では著しく耐摩耗性を改善することが分かった。このことは、セラミックスの持つ耐熱性に大きく関係しており、さらに耐摩耗性を改善するためには基地組織そのものの耐熱性を向上させることが重要になると考えられる。

Fig.8に135km/hから制動させた後のSiC/YHC3制輪子摩擦面の様子を示す。また、Fig.9に135km/hから制動させた後の車輪踏面の様子を示す。この結果より、制輪子摩擦面は摩擦熱Tにより変色しているもののセラミックスの大きな欠落もなく、セラミックスと基地組織との接合性も良好であることが確認できた。また、合金鋳鉄制輪子中へのセラミックスの分散は車輪踏面への攻撃性が懸念されたが、前述したようにセラミックスの固定方法を検討したことでほとんど影響がないことが観察された。

以上のことを総合すると、九州管内の第3セクター路線で使用されているJIS E 7501に規定された2種相当のYHC1制輪子に比べて、同様の適用範囲で摩擦・摩耗特性を改善したYHC2およびYHC3制輪子を開発することに

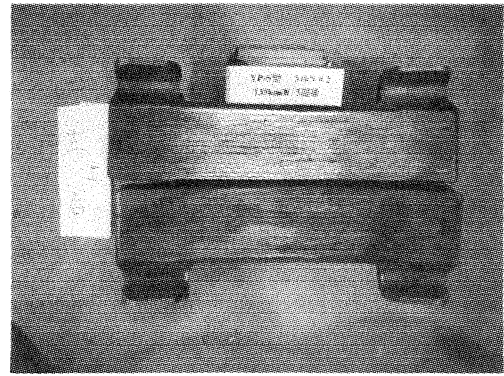


Fig.8 135km/hより制動させた後のSiC/YHC3制輪子摩擦面の様子

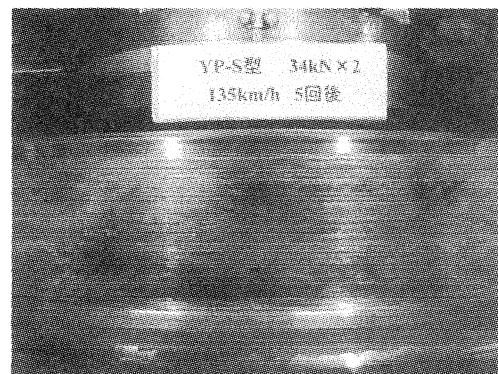


Fig.9 135km/hより制動させた後の車輪踏面の様子

成功した。また、セラミックスを複合化することで、125km/hの高速走行に対応可能な1種B相当のSiC/YHC3制輪子を開発することに成功した。特に、SiC/YHC3制輪子は摩擦・摩耗特性と製造コストおよびメンテナンス性などの経済面のバランスを考慮しても、十分に上記路線で適用が可能であることが分かった。

4. まとめ

今回の実験より、以下の結果が得られた。

- (1) 網目状セラミックス構造体の鋳型内での固定方法、鋳造方案等を検討し、鉄道制輪子用金属基複合材料の製品形状での試作に成功した。
- (2) 九州管内の第3セクター路線で使用されているJIS E 7501に規定された2種相当のYHC1制輪子に比べて、同様の適用範囲で摩擦・摩耗特性を改善したYHC2およびYHC3制輪子を開発することに成功した。
- (3) セラミックスを複合化することで、125km/hの高速走行に対応可能な1種B相当のSiC/YHC3制輪子を開発することに成功した。特に、SiC/YHC3制輪子は摩擦・摩耗特性と製造コストおよびメンテナンス性など

の経済面のバランスを考慮しても、十分に九州管内の第3セクター路線で適用が可能であることが分かった。

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ゾスコピック複合材料WGの皆様にご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・突田芳宏氏ならびに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(財)鉄道総合技術研究所・辻村太郎氏ならびに宮内瞳当氏、藤原夏義氏、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) 高橋芳朗他：平成11年度大分県産業化学技術センター研究報告別途掲載予定
- 5) 辻村太郎：金属Vol.70(2000)No.2,P.33～P.41
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 大城桂作他：日本鑄造工学会九州支部平成9年度講演概要集P.9～P.15
- 10) 鑄物のすべり摩耗,(財)総合鑄物センターP.111