

# 制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキ及びセラミック面積率の影響

— 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2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

## Non-electrolytic Nickel-plated Influence to Several Ceramic Filters and The Influence of Ceramic Area Rate in The Research of As-cast Microstructures and Frictional Wear Characteristics of Several Ceramic Filters/Gray Cast Iron Composite 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 (2nd 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「メソ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をもとに、各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性の中で、制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキ及びセラミック面積率の影響について調査した。また、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、各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子について、セラミックへの無電解ニッケルメッキの効果は制輪子の摩擦・摩耗特性向上の面からはあまり期待できないが、鑄鉄とセラミックとの濡れ性改善への寄与が期待されることが分かった。また、制輪子組織におけるアルミナ系セラミックの面積率には、約15~23%の適正範囲があることも分かった。さらに、硬質なアルミナ系セラミックを分散したA28S(N)/FC250制輪子が優れた摩擦・摩耗特性を發揮しており、良いものでセラミックを含まないFC250制輪子に比べて約10.1倍の耐摩耗性と約1.5倍の制動特性を示し、Z33S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子に比べても約3.0, 2.7倍の耐摩耗性と約1.3, 1.2倍の制動特性を示すことが分かった。

### 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があり、我々の開発目標とする踏面型制輪子には鑄鉄系のもものが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、價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<sup>2)</sup>。

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<sup>2)~15)</sup>、海外でもいろいろな取り組みがなされてきた<sup>16)</sup>。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<sup>17), 18)</sup>。

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をもとに, セラミック分散鼠鑄鉄制輪子の組織及び摩擦・摩耗特性の中で, 制輪子組織及び摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキ及びセラミック面積率の影響について調査した。また, 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, 網目状セラミック構造体の材質をAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-28mass%SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>-33, 40, 50mass%SiO<sub>2</sub>, SiCとし, JIS規格FC250に相当する鼠鑄鉄(Fe-3.3mass%C-1.8mass%Si-0.45mass%Mn合金)で複合化した各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子(以下, A28S/FC250, Z33S/FC250, Z40S/FC250, Z50S/FC250, SiC/FC250制輪子とする)を試作したり, さらに, セラミックと鑄鉄との濡れ性改善及び基地組織強化による摩擦・摩耗特性の向上を目的として, 上記網目状セラミック構造体に無電解ニッケルメッキを施して上記鼠鑄鉄で複合化した各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子(以下, A28SN/FC250, Z33SN/FC250, Z40SN/FC250, Z50SN/FC250, SiCN/FC250制輪子とする)を試作した。ただし, セラミックを含まない上記鼠鑄鉄制輪子をFC250制輪子とする。そして, これらの各種セラミック分散鼠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)に試験制輪子を押すものである。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<sub>R</sub>:比摩耗量(mm<sup>2</sup>/N), W<sub>V</sub>:摩耗体積(mm<sup>3</sup>)

S<sub>P</sub>:制動荷重(N), S<sub>D</sub>:制動距離(mm)

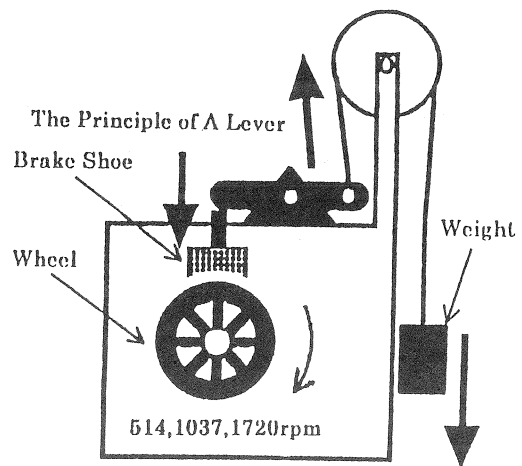


Fig.1 Image of Brake Test Machine

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 制輪子組織に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキの影響

網目状セラミック構造体を溶融金属で鑄ぐるむ技術は, (網)ナベヤより特許として出願<sup>19)</sup>されている。そして, その技術は各種流体透過製品として応用されている<sup>20)</sup>。また, 鉄道用制輪子の開発研究においてもその技術を応用した例は一部ある<sup>15)</sup>が, セラミックの材質, 面積率, 車輪への攻撃性, 耐熱亀裂性などの課題が残されていることから実用化には至っていない。そこで, 本研究ではこれらを考慮した開発研究を行う。

昨年度の結果<sup>1)</sup>をもとに、網目状セラミック構造体に無電解ニッケルメッキを施して鼠鑄鉄で複合化した各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子を試作した。Fig.2にA28S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子の顕微鏡組織を示す。この結果より、網目状セラミック構造体に無電解ニッケルメッキを施すことで、セラミック/鑄鉄界面の鑄鉄側でパーライト組織(Fe( $\alpha$ )+Fe<sub>3</sub>Cの共晶組織)が若干多く観察されることが分かった。パーライト組織の析出は、セラミックとセラミックとの隙間で凝固制御されるため、網目状セラミック構造体を鑄ぐるむことで摩擦の要因となる黒鉛組織が析出抑制・微細化され、パーライト組織の析出を促進することに起因する。また、網目状セラミック構造体に無電解ニッケルメッキを施すことで、パーライト組織の析出が促進されることも考えられる。しかし、無電解ニッケルメッキを施したセラミック/鑄鉄界面の元素分析の結果、無電解ニッケルメッキ層はほとんど観察されず、鑄鉄側にはニッケルの固溶、偏析などもほとんど観察されなかった。これは無電解ニッケルメッキ層が溶融鑄鉄中に溶解し拡散してしまったこと、無電解ニッケルメッキ量が鑄鉄全体量に対して数十ppm程度であるために分析が困難であったことに起因する。

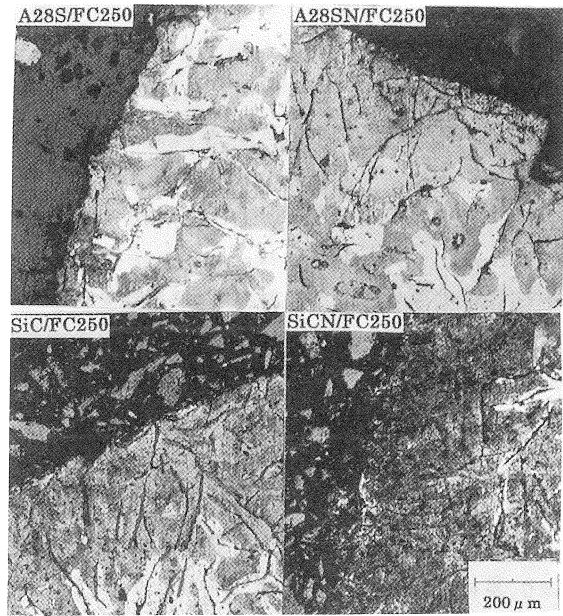


Fig.2 Microstructures of Specimens

次に、各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子のセラミック面積率をTable 1に、各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子の基地組織及びセラミック組織のマクロビッカース硬さ(押付荷重0.4903N)をTable 2に示す。この結果から、セラミック面積率にばらつきが生じることが分かった。これは網目状セラミック構造体の焼成において、同条件でポリウレタン発泡体へセラミック泥漿をコーティングしたにも関わらず、A28S(N)/FC250及びZ33S(N)/FC250制輪子に分散する網目状セラミック構造体の収縮率は大きく、それに対して、Z40S(N)/FC250及びZ50S(N)/FC250制輪子に分散する網目状セラミック構造体の収縮率は小さかったことに起因している。また、SiC(N)/FC250制輪子に分散する網目状セラミック構造体は、市販品のため製造条件が他の網目状セラミック構造体と異なることを付け加えておく。また、マクロビッカース硬さ(以下、Hvとする)については、A28S(N)/FC250、Z33S(N)/FC250、SiC(N)/FC250制輪子のセラミック組織が基地組織に比べて、12.0、11.1、11.0GPaの高い値を示すことが分かった。

Table 1 Ceramic Area Fraction of Brake Shoes

Brake Shoe	Ceramic Area Fraction(%)
FC250	0
A28S(N)/FC250	15
Z33S(N)/FC250	19
Z40S(N)/FC250	12
Z50S(N)/FC250	11
SiC(N)/FC250	27

Table 2 Vickers Hardness of Microstructures of Specimens

Microstructure	Vickers Hardness (GPa)	Range of Hardness(GPa)
Ceramics		
:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -28%SiO <sub>2</sub>	12.0	9.80~14.1
:ZrO <sub>2</sub> -33%SiO <sub>2</sub>	11.1	10.3~12.0
:ZrO <sub>2</sub> -40%SiO <sub>2</sub>	8.90	8.20~9.90
:ZrO <sub>2</sub> -50%SiO <sub>2</sub>	5.10	4.40~6.20
:SiC	11.0	8.10~13.5
Matrix		
:Ferrite	2.20	2.10~2.30
:Pearlite	3.20	2.70~3.90
:Graphite	0.58	0.36~0.73

### 3.2 制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキの影響

Fig.3及びFig.4に各種セラミック分散鼠鑄鉄制輪子

の平均比摩耗量及び平均制動距離の比較を示す。これらの結果より、同じタイプのセラミック分散鼠鑄鉄制輪子でも摩擦・摩耗特性にある程度のばらつきが生じること

から、無電解ニッケルメッキを施すことにより摩擦・摩耗特性が向上するという顕著な傾向を得ることができなかった。制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミックへの無電解ニッケルメッキの効果は、摩耗により現れる次摩擦面でのセラミック面積率の依存性が大きいと考えられ、ニッケルの添加量が鋳鉄全体量に対して数十ppm程度に相当するため、予想したほどの効果が現れなかった。よって、今後はさらに優れた摩擦・摩耗特性を得るために、セラミック面積率を増加させること、合金元素添加による鋳鉄組織制御を行うことが課題となり、セラミック分散率を高くした際の鋳鉄との濡れ性改善に無電解ニッケルメッキの効果が発揮されるものと期待される。

しかし、全体を比較すると、硬質セラミックを分散したA28S(N)/FC250制輪子が優れた摩擦・摩耗特性を発揮しており、良いものでセラミックを含まないFC250制輪子に比べて約10.1倍の耐摩耗性と約1.5倍の制動特性を示し、Z33S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子に比べても約3.0, 2.7倍の耐摩耗性と約1.3, 1.2倍の制動特性を示すことが分かった。ただし、制動特性に最も悪い結果を示したFC250制輪子でも約300mで停止していることから、今回のブレーキ試験条件では鉄道規格の制約(どのような条件下でも600m以内に停止するという)条件を満たす結果が得られている。

また、これまでの結果を総合して、各種セラミック分散鼠鋳鉄制輪子の平均比摩耗量と平均制動距離との関係をFig.5にまとめた。この結果より、若干のばらつきはあるものの耐摩耗性及び制動特性向上の両立という面から、A28S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子が全体的にバランス良く優れていることが分かった。また、Fig.6にFC250及びA28S/FC250制輪子のブレーキ試験後の断面組織を比較する。この結果より、FC250制輪子は摩擦面付近が車輪との摩擦により組織の歪みを生じ、表面に析出した黒鉛組織から剥離が進行しているのに対し、A28S/FC250制輪子はセラミック組織で摩擦面付近の組織の歪みを一時的に抑制していること(摩擦面付近全体の組織の剛性を上げていること)が分かった。よって、今後はA28S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子を中心に研究を進め、合金元素添加による鋳鉄組織制御と組み合わせた摩擦・摩耗特性の向上を図ることで、さらに優れた摩擦・摩耗特性を有する鋳鉄系制輪子の開発を行っていく。

### 3.3 制輪子組織及び制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミック面積率の影響

制輪子組織及び制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすセラミック面積率の影響を調べるために、優れた摩擦・摩耗特

性を示したA28S/FC250制輪子のセラミック面積率を15, 23, 48%と変化させたセラミック分散鼠鋳鉄制輪子(以下、15%A28S/FC250, 23%A28S/FC250, 48%A28S/FC250制輪子とする)を試作した。Fig.7は、15%A28S/FC250, 23%A28S/FC250, 48%A28S/FC250制輪子の摩擦面をビデオマイクロスコープで観察したものである。この結果よ

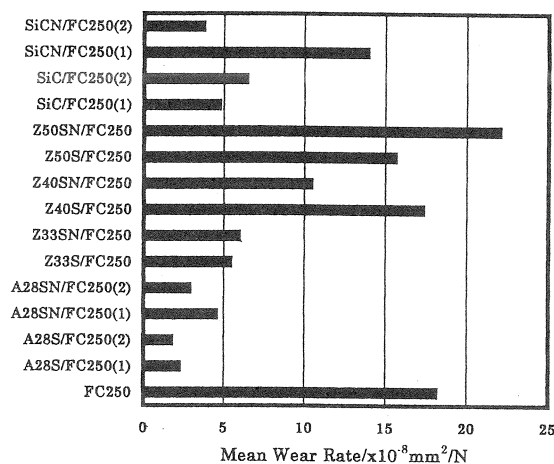


Fig.3 Mean Wear Rate of Brake Shoes

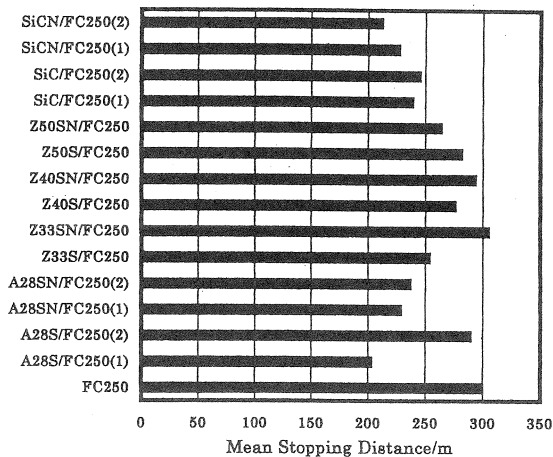


Fig.4 Mean Stopping Distance of Brake Shoes

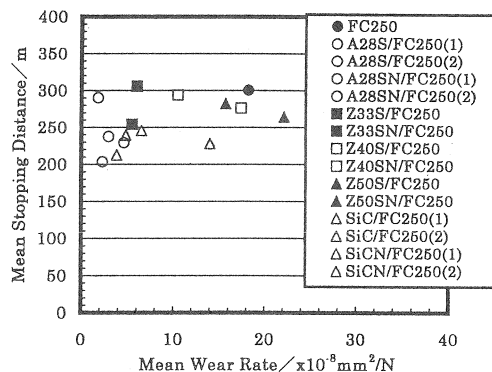


Fig.5 Relationship between Mean Wear Rate and Mean Stopping Distance

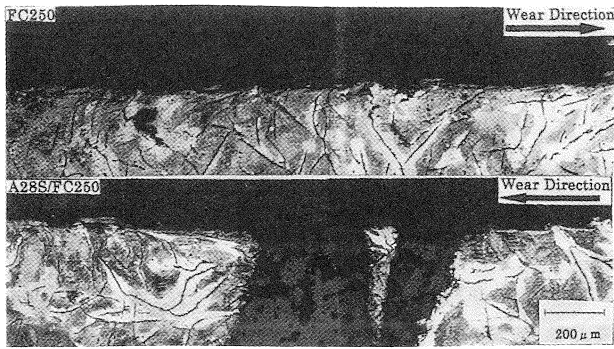


Fig.6 Cross Section of Brake Shoes after Braking Test

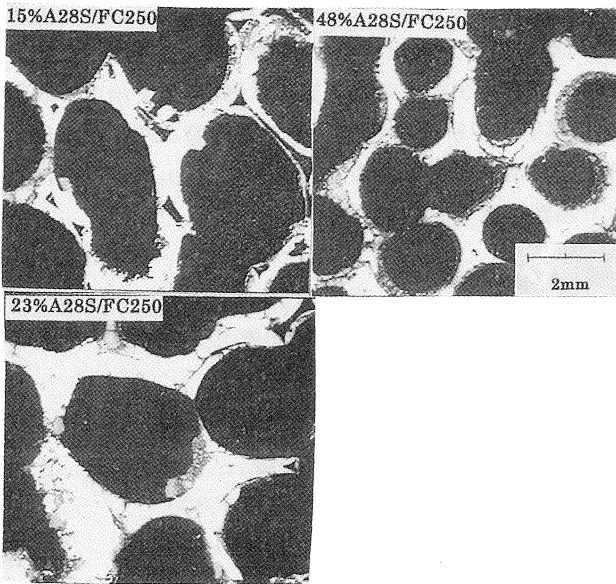


Fig.7 Microstructures of Specimens

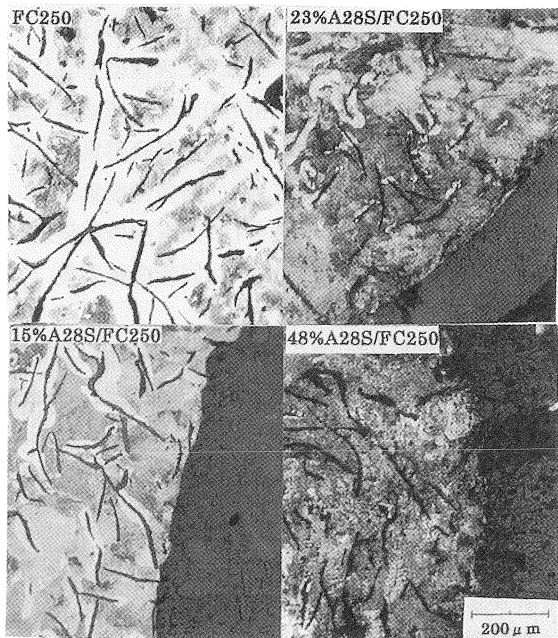


Fig.8 Microstructures of Specimens

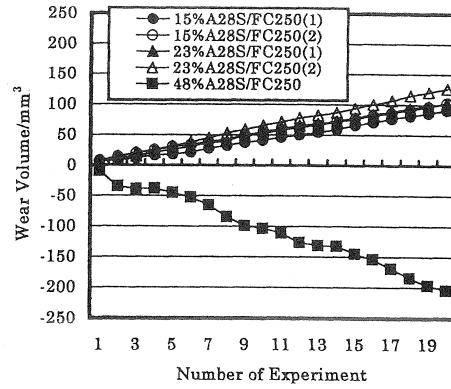


Fig.9 Relationship between Wear Volume and Number of Experiment

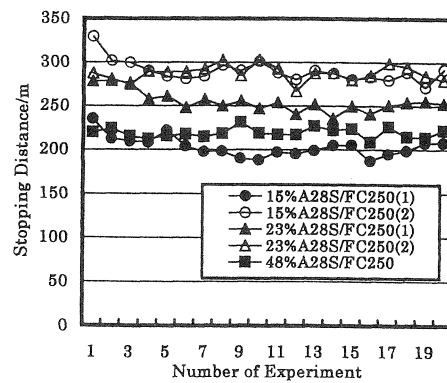


Fig.10 Relationship between Stopping Distance and Number of Experiment

り,上記セラミック分散鼠鉄制輪子はセラミック面積率に関係なく,また無電解ニッケルメッキを施さなくても湯回り不良による鑄造欠陥もなく,摩擦面に硬質セラミックがマクロ的均一に分散した状態のものが得られることが分かった.また, Fig.8はFC250, 15%A28S/FC250, 23%A28S/FC250, 48%A28S/FC250制輪子の顕微鏡組織を比較したものである.この結果より,セラミックを多く分散させることで凝固制御されたセラミック/鑄鉄界面の鑄鉄側にパーライト組織が若干多く観察されたほか,上述したように摩擦の要因となる黒鉛組織が微細化されることが分かった.

Fig. 9は, 15%A28S/FC250, 23%A28S/FC250, 48%A28S/FC250制輪子の試験回数と累積摩耗体積との関係を示したものである.この結果より, 15%A28S/FC250及び23%A28S/FC250制輪子は試験回数の増加に従って摩耗体積がほぼ一定の割合で増加していることから, 定常摩耗の状態にあることが分かった.また, セラミック面積率が影響するほどの差が付いていないことも分かった.しかし, 48%A28S/FC250制輪子は試験回数の増加に従って

摩耗体積がマイナス方向にほぼ一定の割合で増加していることから、車輪を削りながら制動を繰り返していたことが分かった。よって、48%A28S/FC250制輪子は耐摩耗性という観点から優れた性質を持つことが分かったが、車輪を削ることから鉄道用制輪子としての利用は好ましくないことが分かった。また、Fig. 10は15%A28S/FC250, 23%A28S/FC250, 48%A28S/FC250制輪子の試験回数と制動距離との関係を示したものである。この結果より、制動特性はばらつきが大きく、顕著な傾向を得ることができなかった。このことは上述したように、摩耗により現れる次摩擦面でのセラミック面積率の依存性が大きく影響しているものと考えられ、今後は合金元素添加による鑄鉄組織制御と組み合わせた摩擦・摩耗特性の向上を図ることで、さらに優れた摩擦・摩耗特性を有する鑄鉄系制輪子の開発を行っていく。以上のことから、A28S/FC250制輪子のセラミック面積率には適正值があり、15~23%の範囲内では摩擦・摩耗特性にあまり差がなく、車輪への攻撃性も少ないと判断される。

#### 4. 結言

今回の実験より、以下の結果が得られた。

- (1) 網目状セラミック構造体を溶融鑄鉄で鑄ぐるむことで、車輪との摩擦面に硬質セラミックがマクロ的均一に分散したセラミック分散鼠鑄鉄制輪子を得ることができた。また、セラミックとセラミックとの隙間で凝固制御されるため、摩耗の要因となる黒鉛組織が析出抑制・微細化され、パーライト組織が析出促進することが分かった。さらに、網目状セラミック構造体に無電解ニッケルメッキを施すことで、パーライト組織の析出が促進されることも分かった。
- (2) 網目状セラミック構造体への無電解ニッケルメッキの効果は、セラミック分散鼠鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性の向上にはあまり期待できないが、セラミック分散率を高くした際の鑄鉄との濡れ性改善への寄与が期待される。
- (3) A28S(N)/FC250制輪子は優れた摩擦・摩耗特性を示し、良いものでセラミックを含まないFC250制輪子に比べて約10.1倍の耐摩耗性と約1.5倍の制動特性を示し、Z33S(N)/FC250及びSiC(N)/FC250制輪子に比べても約3.0, 2.7倍の耐摩耗性と約1.3, 1.2倍の制動特性を示すことが分かった。
- (4) FC250制輪子は摩擦面付近が車輪との摩擦により組織の歪みを生じ、表面に析出した黒鉛組織から剥離が進行しているのに対し、A28S/FC250制輪子はセラミック組織で摩擦面付近の組織の歪みを一時的に抑

制していること(摩擦面付近全体の組織の剛性を上げていること)が分かった。

- (5) A28S/FC250制輪子のセラミック面積率には適正值があり、15~23%の範囲内では摩擦・摩耗特性にあまり差がなく、車輪への攻撃性も少ないと判断される。

#### 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ゾスコピック複合材料WG会議の皆様様に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)辻村:(社)日本鑄物協会研究報告69, P.167
- 3)新井, 清水:鑄物67(1995)6, P.403
- 4)新井, 辻村他:鑄造工学67(1995)11, P.800
- 5)高沢, 辻村, 由利:鑄物57(1985)8, P.516
- 6)辻村, 真鍋:鑄物60(1988)2, P.98
- 7)新井, 清水:日本鑄物協会第126回講演概要集P.53
- 8)宮内, 辻村他:日本鑄物協会第125回講演概要集P.86
- 9)宮内, 辻村他:日本鑄物協会第126回講演概要集P.54
- 10)宮内, 辻村他:日本鑄造工学会第128回講演概要集P.95
- 11)宮内, 辻村他:日本鑄造工学会第130回講演概要集P.86
- 12)宮内, 辻村:日本鑄造工学会第131回講演概要集P.107
- 13)辻村, 宮内他:日本鑄物協会第124回講演概要集P.25
- 14)中山, 辻村他:日本鑄造工学会第127回講演概要集P.10
- 15)高梨, 辻村他:日本鑄造工学会第131回講演概要集P.108
- 16)鑄物のすべり摩耗((財)総合鑄物センター)P.111
- 17)高橋, 吉浦, 清水, 片岸:平成7年度大分県産業科学技術センター研究報告P.96
- 18)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
- 19)特許登録第1627579
- 20)実用新案登録第2014894
- 21)実用新案公開平05-56273