

## 制輪子材料の摩耗特性評価

高橋芳朗\*・吉浦洋之\*・清水一道\*\*・片岸庄史\*\*\*

\*材料開発部・\*\*国立大分工業高等専門学校・\*\*\*株式会社八幡ハイキャスト

### Evaluation of Wear Characteristics of Brake Shoe Materials

Yoshiroh TAKAHASHI\*, Hiroyuki YOSHIURA\*, Kazumichi SHIMIZU\*\* and Syoji KATAGISHI\*\*\*

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

#### 要旨

鉄道車両において、ブレーキの制動性、安全性は重要な課題である。そして、ブレーキを構成する制輪子には耐摩耗性が要求される。そこで我々は、燐を0~1.0mass%添加して得られた片状黒鉛鋳鉄製制輪子及びパーライト基地球状黒鉛鋳鉄製制輪子を作製し、独自に作製した小型ブレーキ試験機を用いて摩耗特性評価を行った。その結果、1) 制輪子の摩耗は摩擦による表面組織の歪みが原因であり、切り欠き効果により黒鉛組織の先端から起こること、2) 黒鉛形状が制輪子の摩耗に影響を与えること、3) 燐を添加すると耐摩耗性、制動性が飛躍的に向上すること等の知見を得た。

#### 1. 緒言

大量輸送機関である鉄道において、車両の高速化に伴ったブレーキの制動性、安全性は重要な課題である。そこで、高速鉄道車両の多くでは、電気ブレーキ等の動力ブレーキと踏面制輪子やディスクブレーキ等の摩擦ブレーキを併用して、安全性の向上と摩擦ブレーキに対する負担の軽減を行っている。しかし、機関車、貨物車、気動車等の中には、動力ブレーキを有しない車両もあるため、摩擦ブレーキに対する負担は大きくなる。

Fig.1に摩擦ブレーキの機構を示す。摩擦ブレーキを構成する制輪子に要求されることは、車輪に影響を与えずに制動距離を短くし、かつ耐久性に優れていることである。一般的に、制輪子材料には引張強度 $250\text{N/mm}^2$ 以上の鋳鉄が用いられるが、摩耗が著しいため、燐、クロム等を添加した耐摩耗鋳鉄製制輪子の開発<sup>1)~3)</sup>、セラミックブロックを鑄ぐるんだ耐摩耗鋳鉄製制輪子の開発<sup>4)</sup>等が行われている。しかし、制輪子の摩耗形態は非常に複雑であり、含有成分等で大きく変化することから、更なる制輪子材料の開発とともに摩耗形態の解明が求められている。

本研究では、コスト、時間等を要する実機ブレーキ試験の代わりに、小型ブレーキ試験機を独自に作製し、実験室レベルで燐を0~1.0mass%添加して得られた片状黒鉛鋳鉄製制輪子及びパーライト基地球状黒鉛鋳鉄製制輪子の摩耗特性評価を行ったので報告する。

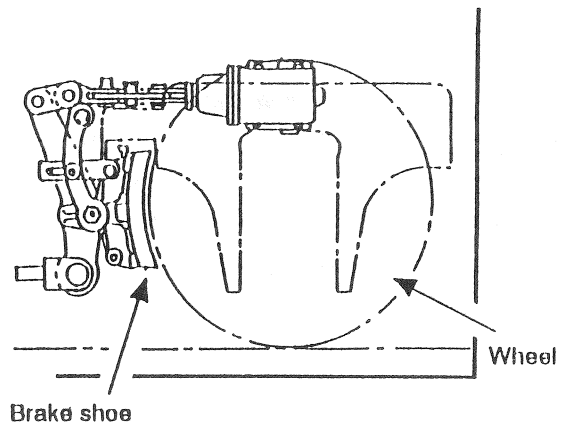


Fig.1 Braking mechanism of train

#### 2. 実験方法

##### 2.1 試験制輪子の作製

溶解には750kgの低周波誘導電気炉を使用し、外形寸法 $65 \times 65 \times 200\text{mm}$ の試験片を鑄造した。その後、機械加工により $30 \times 30 \times 26.8\text{mm}$ の試験制輪子を作製し、車輪との接触面を車輪と同じ曲率( $R=140\text{mm}$ )にした。Fig.2に試験制輪子の概略図を示す。

本研究では、燐を0~1.0mass%含む3段階の片状黒鉛鋳鉄製制輪子(以下;P0, P0.5, P1)及びパーライト基地球状黒鉛鋳鉄製制輪子(パーライト率10%, 以下;PDI)を作製した。Table 1に試験制輪子の化学組成及びブリネル硬さを示す。

Table 1 Chemical composition and hardness of specimens

Sample No.	Chemical composition (mass%)						Hardness HBS10/3000
	C	Si	Mn	S	P	Mg	
PDI	3.59	2.03	0.321	0.0103	0.0218	0.0427	163
P0	4.21	1.99	0.317	0.0267	0.0137	—	154
P0.5	3.76	1.80	0.303	0.0240	0.498	—	178
P1	3.56	1.73	0.321	0.0249	1.52	—	212

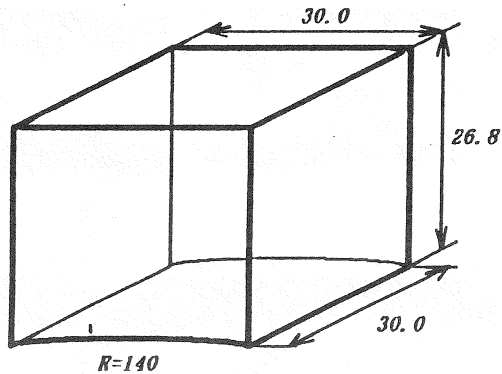


Fig. 2 Image of test piece

## 2.2 小型ブレーキ試験機の作製

従来、制輪子材料の摩耗特性評価は実機ブレーキ試験を中心に行われているが、コスト、時間等で多くの制約を受けることになる。また、市販の摩擦試験機等による制輪子材料の摩耗特性評価では、実機ブレーキ試験との比較評価はできるものの、制輪子本来の摩耗現象を解明するには至らない。そこで我々は、これらの問題点を解決するため、独自に小型ブレーキ試験機を作製した。小型ブレーキ試験機本体をFig. 3に示す。

本試験機の制動機構は、この原理により、分銅を用いてφ280mmの車輪に試験制輪子を押し付けるものである。制動荷重は49.05N刻みに49.05~981.0N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、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h)で一定に保つものである。

## 2.3 顕微鏡観察

試験制輪子の金属組織観察は、鏡面研磨、ナイトール液によるエッチングの後、光学顕微鏡により行った。また、ブレーキ試験後の試験制輪子の金属組織観察は、摩耗面断面から行った。さらに、ブレーキ試験により生じた摩耗粉を採取し、その形状等の観察を走査型電子顕微鏡により行った。

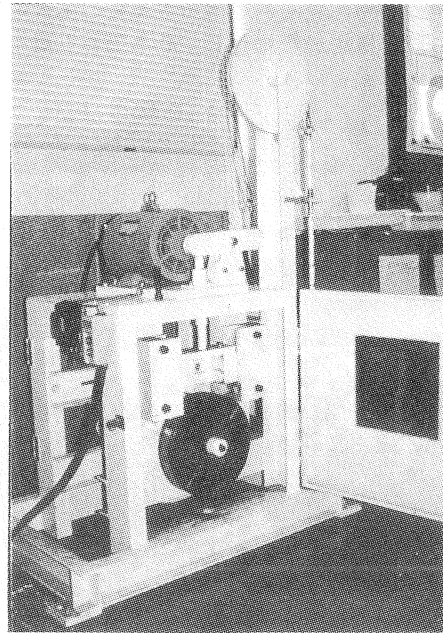


Fig. 3 Braking test machine

## 2.4 ブレーキ試験

試験制輪子として作製したPDI, P0, P0.5, P1をそれぞれ小型ブレーキ試験機に取り付け、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h)の3通りに分けて試験した。また、PDIの制動荷重は490, 735, 980Nの3通りに分け、P0, P0.5, P1の制動荷重は735N一定として試験した。

今回の試験では、車輪を一定速度で60秒間回転させ、モータのスイッチ停止と同時に制動荷重をかけた。この試験を1つの条件につき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。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 試験制輪子の金属組織

Fig. 4に試験制輪子の金属組織を示す。PDI組織中の球状の黒い部分は黒鉛、その回りの白い部分はフェライト、その他の部分はパーライトである。黒鉛の球状化は

片状黒鉛鑄鉄にマグネシウムを添加することにより得られる<sup>5)</sup>が、制輪子材料としては一般的にあまり使われていない。しかし、今回は黒鉛形状の違いによる摩擦特性を観察するため、予備実験材料として使用した。

また、P0, P0.5, P1組織中の片状の黒い部分は黒鉛、その他の部分はパーライトである。燐を添加すると白いコントラストで識別される共晶ステダイト (Fe, Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>3</sub>Pの3元共晶組織) が晶出し、燐添加量の増加に従いその晶出量が増加することが観察できる。また、燐を添加したもののほど黒鉛が微細化し、その割合も減少していることが観察できる。

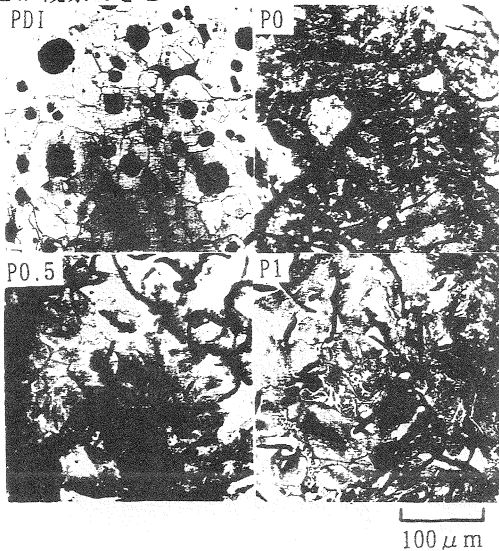


Fig. 4 Microstructure of specimens

### 3.2 パーライト基地球状黒鉛鑄鉄製制輪子のブレーキ試験

#### 3.2.1 摩擦面の微視的観察

制動荷重を735N一定として、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h) と変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 5にPDIの摩擦面断面の組織を示す。この結果より、摩擦速度が25.2m/sと高速の時、摩擦面付近の黒鉛がかなり引き伸ばされていることが観察できる。また、表面に析出した黒鉛部分から剥離が生じていることが観察できる。

さらに、摩擦速度を25.2m/s一定として、制動荷重を490, 735, 980Nと変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 6にPDIの摩擦面断面の組織を示す。この結果より、制動荷重が980Nと高い時、摩擦面付近の黒鉛は押しつぶされていることが観察できる。また、表面に析出した黒鉛部分から剥離が生じていることが観察できる。よって、この黒鉛形状の変形による黒鉛の細線化は、摩擦の起こる一つの形態であると考えられる。

また、ブレーキ試験により生じた摩擦粉を採取し、走

査型電子顕微鏡によりその形状等を観察した。しかし、PDIについては各種条件による大きな違いは観察できなかった。M. KerridgeとJ. K. Lancasterは真鍮と鋼の摩擦現象の研究において<sup>6)</sup>、真鍮のピンは摩擦過程で接触部が鋼ディスク面に移着し、移着物が破壊または剥離して摩擦粉が形成されると報告している。よって、本試験でも同様な生成機構で制輪子表面層が車輪との摩擦面に移着し、移着物が破壊または剥離して摩擦粉が形成されたと考えられる。

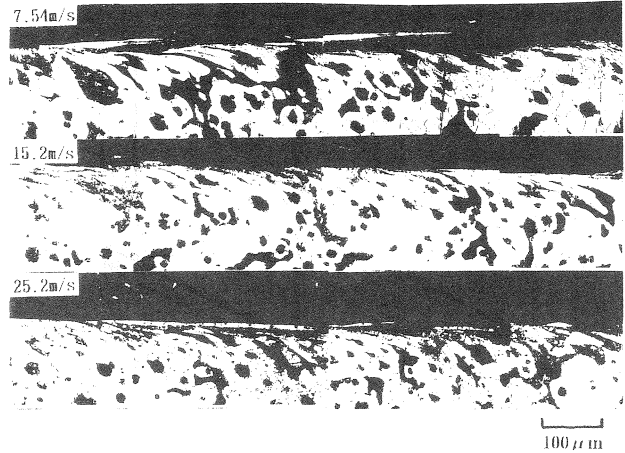


Fig. 5 Cross section of PDI after braking test at initial braking speed of 7.54, 15.2 and 25.2m/s; braking load of 735N

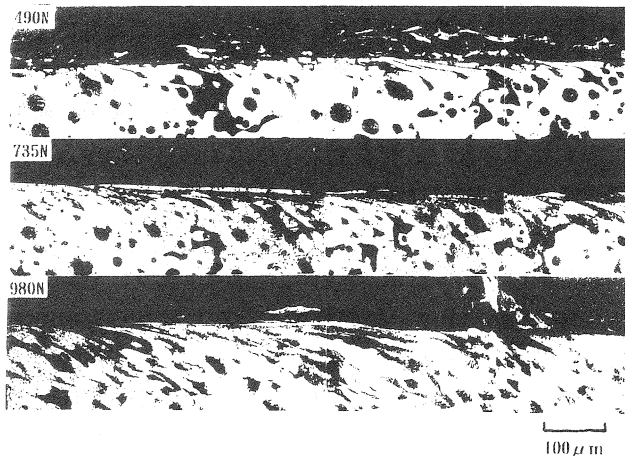


Fig. 6 Cross section of PDI after braking test at braking load of 490, 735 and 980N; initial braking speed of 25.2m/s

#### 3.2.2 摩擦速度と摩擦量, 制動時間との関係

制動荷重を735N一定として、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h) と変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 7に摩擦速度と摩擦量との関係を、Fig. 8に摩擦速度と制動時間との関係を示す。

この結果より、試験回数が増えると摩擦量は一定の割合で増加し、制動時間は試験回数に関係なくほぼ一定で

あることが分かった。また、摩擦速度が高いほど摩擦量、制動時間は増加することが分かった。

### 3.2.3 制動荷重と摩擦量, 制動時間との関係

摩擦速度を25.2m/s一定として、制動荷重を490, 735, 980Nと変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 9に制動荷重と摩擦量との関係を、Fig. 10に制動荷重と制動時間との関係を示す。

この結果より、試験回数が増えると摩擦量は一定の割合で増加し、制動時間は試験回数に関係なくほぼ一定であることが分かった。また、摩擦量は制動荷重が490, 735Nの場合には大差ないが、980Nになると増加することが分かった。これは、制動荷重が980Nと高い時に摩擦面付近の黒鉛形状が変形し、黒鉛の細線化が起こることに起因すると考えられる。さらに、制動時間は制動荷重が高いほど短くなることが分かった。

## 3.3 燐含有片状黒鉛鑄鉄製制輪子のブレーキ試験

### 3.3.1 摩擦面の微視的観察

PDI同様、制動荷重を735N一定として、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h)と変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 11に摩擦速度7.54 m/sの時のP0, P0.5, P1の摩擦面断面の組織を、Fig. 12に摩擦速度15.2m/sの時のP0, P0.5, P1の摩擦面断面の組織を、Fig. 13に摩擦速度25.2m/sの時のP0, P0.5, P1の摩擦面断面の組織を示す。

これら結果より、摩擦速度7.54m/sと低速の時、P0, P0.5, P1はどれもほとんど摩擦していないが、摩擦速度が高くなるに従ってP0の摩擦は目立ち始め、摩擦速度25.2m/sと高速になるとP0.5も摩擦していることが観察できる。しかし、P1は摩擦速度25.2m/sの高速時にもほとんど摩擦していなかった。

P1が耐摩擦性に優れている理由として、燐を添加することにより析出する共晶ステダイトが、基地組織を強化していることが考えられる。共晶ステダイトは基地組織に比べて非常に硬い組織であるが、融点が約1220K<sup>7)</sup>と低い。Y. Zhangらの含燐鑄鉄製制輪子に関する研究<sup>8)</sup>では、鑄鉄中の共晶ステダイトが低融点のため、摩擦面に

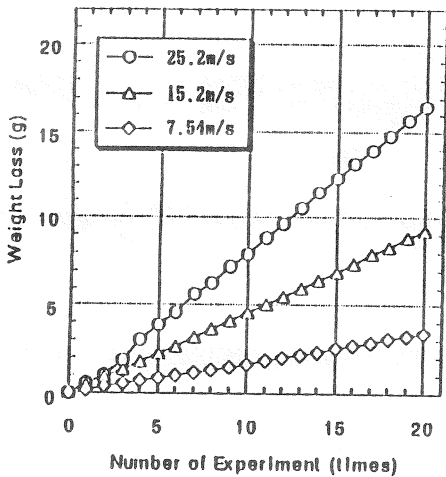


Fig. 7 Relationship between weight loss and number of experiment; PDI

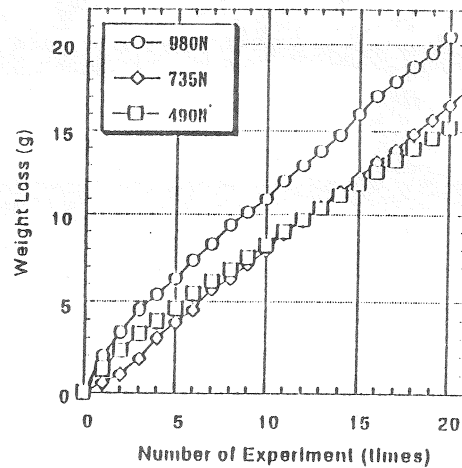


Fig. 9 Relationship between weight loss and number of experiment; PDI

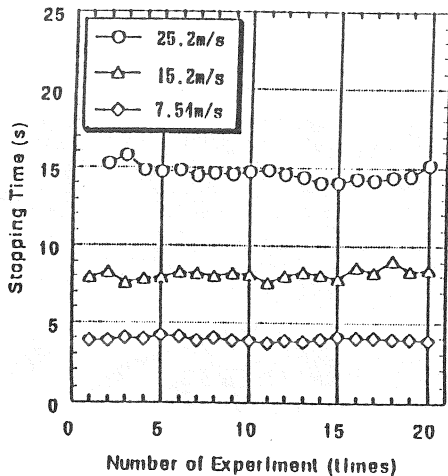


Fig. 8 Relationship between stopping time and number of experiment; PDI

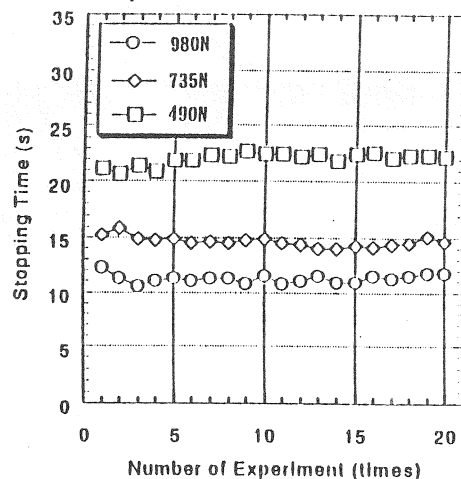


Fig. 10 Relationship between stopping time and number of experiment; PDI

において熔融または軟化することで摩擦面に鱗の多い流動層が形成されて実接触面積が増大し、摩擦係数 $\mu$ が高くなるとも報告されている。また、表面に析出した黒鉛部分から剥離が生じていることから、摩耗機構として、摩擦により表面組織に歪みが生じ、切り欠き効果により基地組織よりも硬い黒鉛組織の先端から破壊、剥離が起こることが考えられる。

さらに、ブレーキ試験により生じた摩耗粉を採取し、走査型電子顕微鏡によりその形状等を観察した。Fig. 14に摩擦速度25.2m/sの時のP0, P0.5, P1の摩耗粉の形状を示す。この結果より、P0は摩擦面で相互に移着して練られた様相はなく、剥離した状態がそのまま維持されていることが観察できる。しかし、P0.5, P1は板状に成長した様相を示しており、移着成長<sup>9)</sup>を示唆している。このことは、高速摩擦による摩擦面での発熱により、低融点の共晶ステダイトを含む摩耗粒子の移着が促進されることに起因する<sup>2)</sup>と考えられる。

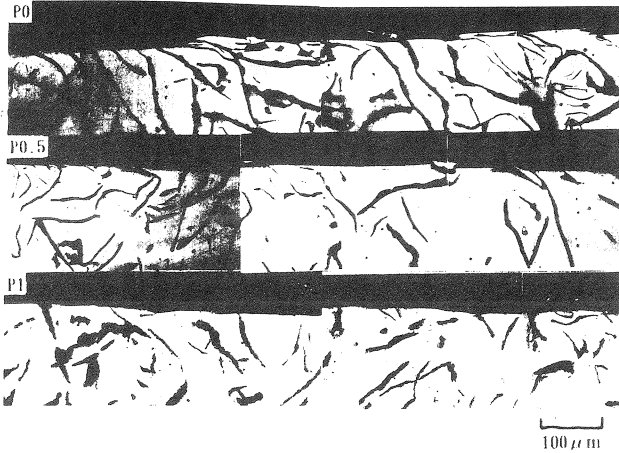


Fig. 11 Cross section of P0, P0.5 and P1 after braking test at initial brake speed of 7.54 m/s; braking load of 735N

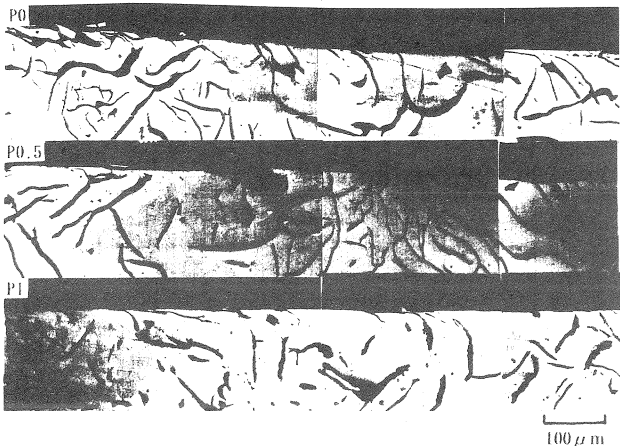


Fig. 12 Cross section of P0, P0.5 and P1 after braking test at initial brake speed of 15.2 m/s; braking load of 735N

### 3.3.2 摩擦速度と摩耗量, 制動時間との関係

PDI同様、制動荷重を735N一定として、摩擦速度を7.54, 15.2, 25.2m/s (27.1, 54.7, 90.7km/h) と変化させてブレーキ試験を行った。Fig. 15に摩擦速度と摩耗量との関係を、Fig. 16に摩擦速度と制動時間との関係を示す。

この結果より、摩擦速度と摩耗量との関係は、摩擦速度7.54m/sと低速の時にP0, P0.5, P1の摩耗量に大差はないが、摩擦速度が高くなるとP0の摩耗量が二次曲線的に増加することが分かった。しかし、摩擦速度が高くなってもP0.5, P1の摩耗量に大差はなく、直線的にわずかに増加する程度である。

また、摩擦速度と制動時間との関係は、摩擦速度7.54 m/sと低速の時にP0, P0.5, P1の制動時間に大差はないが、摩擦速度が高くなるとP1, P0.5, P0の順に制動時間が増加することが分かった。さらに、前出Fig. 15よりP0.5, P1の摩耗量は摩擦速度が高くなっても大差はないが、制動時間はP1に比べP0.5の方が増加していることが分かった。これは、P0.5に比べP1の方が低融点の共晶ステダイトが多く析出していることから、摩擦係数 $\mu$ が高くなることに起因する<sup>2)</sup>と考えられる。

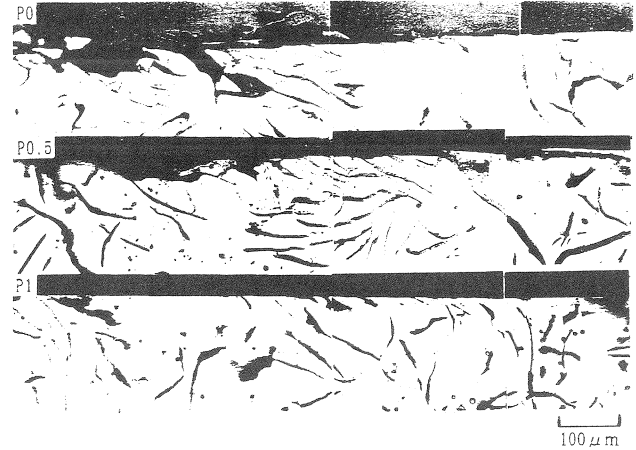


Fig. 13 Cross section of P0, P0.5 and P1 after braking test at initial brake speed of 25.2 m/s; braking load of 735N

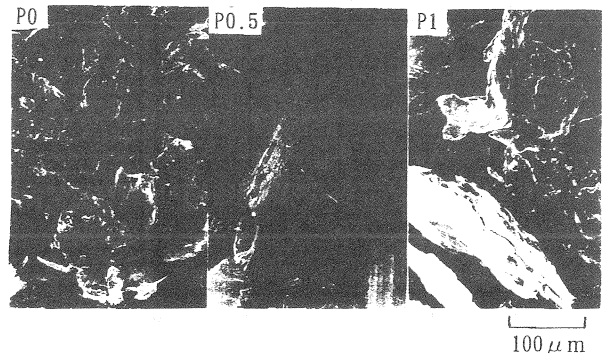


Fig. 14 SE images of worn particles

## 4. 結言

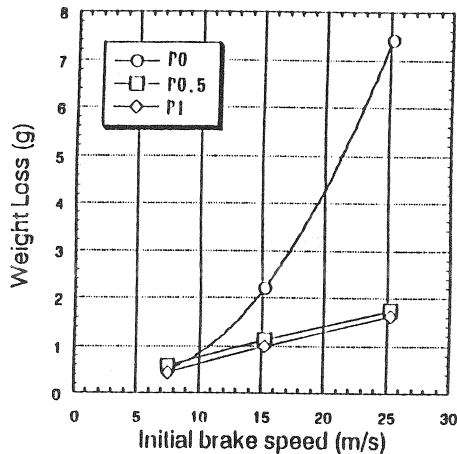


Fig. 15 Relationship between weight loss and initial brake speed of experiment; P0, P0.5 and P1

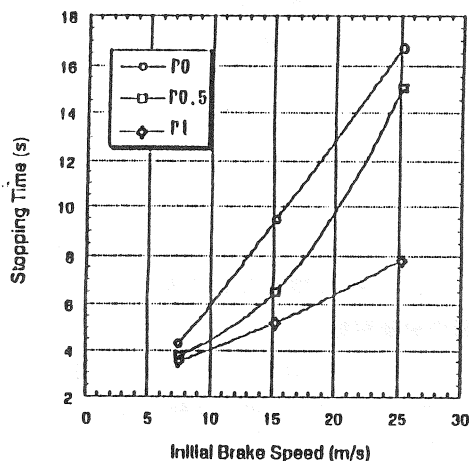


Fig. 16 Relationship between stopping time and initial brake speed of experiment; P0, P0.5 and P1

以上のことから、燐を添加すると耐摩耗性、制動性が飛躍的に向上することが分かった。

## 3.4 制輪子の摩耗に及ぼす黒鉛形状

先に述べたPDI, P0, P0.5, P1の摩耗は、摩擦による表面組織の歪みが原因であり、切り欠き効果により黒鉛組織の先端から起こると考えられる。前出のFig. 7, Fig. 15より、制動荷重735N、摩擦速度25.2m/sの時のPDI, P0, P0.5, P1の摩耗量を比較すると、約16.5, 7.4, 2.8, 2.6gと明らかにPDIの摩耗量が大きいことが分かった。この結果は、PDIがP0, P0.5, P1に比べ黒鉛が大きく球状であることから推測できる。摩擦速度7.54, 15.2m/sの時も同様の傾向が見られることから、黒鉛の形状は制輪子の摩耗に大きく影響すると考えられる。

小型ブレーキ試験機を用いて、パーライト基地球状黒鉛鑄鉄製制輪子及び燐含有片状黒鉛鑄鉄製制輪子のブレーキ試験を行い、摩耗特性評価を行った。以下にその結果をまとめる。

- 1) 摩擦速度が高いほど制輪子の摩耗量、制動時間は増加する。
- 2) 制動荷重が高いほど制輪子の摩耗量は増加し、制動時間は減少する。
- 3) 制輪子の摩耗は摩擦による表面組織の歪みが原因であり、切り欠き効果により黒鉛組織の先端から起こる。
- 4) 制輪子の摩耗が黒鉛組織の先端から起こることから、球状で黒鉛組織の大きいPDIはP0, P0.5, P1に比べ摩耗が大きい。
- 5) 燐を添加すると共晶ステダイトが析出し、制輪子の耐摩耗性を飛躍的に向上させる。
- 6) 共晶ステダイトの析出が制動時間を短くし、析出量が多いと制動性を飛躍的に向上させる。

本研究の遂行にあたり、小型ブレーキ試験機の製作を担当して頂いた藤原夏義氏、実験にご協力頂いた国立大分工業高等専門学校制御情報工学科清水研究室卒業生の皆さん、(株)藤原製作所の皆さん並びに新日本非破壊検査(株)の下郡貴久氏に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 高沢克朗, 辻村太郎, 由利三郎: 鑄物57(1985)8, P. 516
- 2) 新井浩, 清水保雄: 鑄物67(1995)6, P. 403
- 3) 新井浩, 辻村太郎, 清水保雄: 鑄物67(1999) 11, P. 800
- 4) 中山淳一, 辻村太郎, 青山俊彦: 鑄物第127回全国講演大会講演概要集, P. 10
- 5) 大平五郎, 井川克也: 鑄造工学, 日本金属学会, P. 137
- 6) M. Kerridge & J. K. Lancaster: Proc. Roy. Soc. (London) A236(1956)250
- 7) 岡本正三, 依田連平: 金属材料組織解説鑄鉄編, 養賢堂, P. 15
- 8) Y. Zhang, Y. Chen, He and B. Shen: Wear 166(1993) 179
- 9) 笹田直: 日本機械学会誌76 (1972) 90