

## 各種鑄鉄製制輪子の摩耗特性評価

— 摩擦・摩耗特性に優れた高機能鑄鉄材料の開発及びその評価に関する研究 —

高橋芳朗\*・江藤博明\*・吉浦洋之\*\*・清水一道\*\*\*・片岸庄史\*\*\*\*

\*材料開発部・\*\*機械電子部・\*\*\*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 Several Cast Iron Brake Shoes — Development and Evaluation of High Functional Cast Irons Having Excellent Friction and Wear Characteristics —

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

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

#### 要旨

鉄道車両におけるブレーキの制動性、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、安定した制動性、車輪への低攻撃性等が要求される。そこで我々は、平成7年度21テクノ研究開発事業で取り組んだ小型ブレーキ試験機の製作と予備実験で得た評価技術<sup>1)</sup>をもとに、各鉄道で実際に使用されている鑄鉄製制輪子の摩耗特性について調査した。今回は小型ブレーキ試験機の車輪部材質も実際の車輪と同じ材質(JIS E5402 SSW-Q1S)に変更し、実機試験により近い状態で評価を行った。その結果、鑄鉄中にP, Cr, B, Cu等を合金元素として0.05~1.0mass%の範囲で適量添加することで、制輪子の耐摩耗性、制動性等が向上するという結果が得られた。また、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から、鑄鉄中への各種合金元素の添加による共晶ステダイト、セメンタイト等の炭化物の析出及び片状黒鉛の析出抑制、かつ微細化が制輪子の耐摩耗性、制動性等の向上に効果的であることが分かった。さらに、基地組織をブリネル硬さ約250~290の範囲で硬く、また黒鉛面積率を低くすることにより、耐摩耗性、制動性等は向上することが分かった。

#### 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。

摩擦ブレーキを構成する制輪子に要求されることは、耐摩耗性、安定した制動性、車輪への低攻撃性等である。一般的に、制輪子材料には引張強度250N/mm<sup>2</sup>以上の鑄鉄が用いられるが、摩耗が著しいため、P, Cr, Ti, V等を添加した合金鑄鉄製制輪子の開発研究<sup>2)~6)</sup>、セラミックブロックを鑄ぐるんだ複合鑄鉄製制輪子の開発研究<sup>7)</sup>

~8)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、合金添加元素の影響の他に黒鉛面積率、黒鉛形状等<sup>1), 9)~11)</sup>にも影響を受けることから、更なる制輪子材料の開発研究とともに摩耗形態の解明が求められている。

本研究では実機試験コストの削減を目的として、平成7年度21テクノ研究開発事業で取り組んだ小型ブレーキ試験機の製作と予備実験で得た評価技術<sup>1)</sup>をもとに、各鉄道で実際に使用されている鑄鉄製制輪子の摩耗特性について調査したので以下に報告する。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 試験制輪子の作製

3tの低周波誘導電気炉を用いて、(株)八幡ハイキャストで各種鑄鉄製制輪子(約350×80×65mm)を溶解・鑄造し

Table 1 Chemical Composition and Hardness of Specimens

| Sample No. | Chemical composition(mass%) |      |      |        |       |      |       |        |       |                     | Hardness HBS10/3000 |
|------------|-----------------------------|------|------|--------|-------|------|-------|--------|-------|---------------------|---------------------|
|            | C                           | Si   | Mn   | S      | P     | Cr   | V     | B      | Cu    | Others (Ni, Mo, Ti) |                     |
| A          | 3.26                        | 1.80 | 1.68 | 0.017  | 0.52  | 0.49 | 0.32  | 0.0024 | 0.021 | 0.051               | 253                 |
| B          | 3.26                        | 1.44 | 1.59 | 0.012  | 0.42  | 0.34 | 0.37  | 0.054  | 0.014 | 0.016               | 288                 |
| C          | 3.30                        | 1.51 | 1.60 | 0.011  | 0.43  | 0.65 | 0.50  | 0.0029 | 0.019 | 0.019               | 285                 |
| D          | 3.27                        | 1.52 | 1.53 | 0.0092 | 0.39  | 0.52 | 0.36  | 0.016  | 0.031 | 0.032               | 262                 |
| E          | 3.37                        | 1.50 | 1.59 | 0.0096 | 0.38  | 0.55 | 0.39  | 0.057  | 0.025 | 0.012               | 282                 |
| F          | 2.78                        | 1.23 | 0.65 | 0.057  | 0.79  | 0.10 | 0.050 | —      | 0.081 | 0.053               | 248                 |
| G          | 3.04                        | 1.52 | 1.44 | 0.014  | 0.21  | 0.86 | 0.018 | —      | 0.93  | 0.857               | 306                 |
| H          | 3.02                        | 1.53 | 1.27 | 0.12   | 0.28  | 0.41 | 0.023 | —      | 0.22  | 0.094               | 251                 |
| I          | 3.18                        | 1.46 | 1.35 | 0.13   | 0.29  | 0.42 | 0.028 | 0.062  | 0.23  | 0.068               | 262                 |
| J          | 3.16                        | 1.74 | 0.72 | 0.045  | 0.027 | 0.10 | —     | —      | 0.10  | 0.079               | 183                 |

た.そして機械加工により,小型ブレーキ試験機用に30×30×26.8mmの形状の試験制輪子を作製した.ただし,車輪との接触面は車輪と同じ曲率(R=140mm)とした.これらの試験制輪子の化学組成及びブリネル硬さをTable 1に示す.

鑄鉄中への各種合金元素の添加は,耐摩耗性の向上(P, Cr, V, B, Cu, Mo等),耐熱性の向上(Cr, V, B等),黒鉛及び基地組織の微細化(Cr, V, B, Cu, Ni, Mo, Ti等),耐食性の向上(Cr, Cu, Ni, Ti等),脱酸・脱窒等の浄化作用(V, B, Ti等)等に効果的である<sup>12)~13)</sup>が,これらの効果を考慮して添加量を調整している.

また,試験制輪子の金属組織をFig. 1に示す.組織中の片状の黒い部分は黒鉛,基地部分はパーライトを示している.中には黒鉛が単体として完全には析出せず,一部白鉄化して耐摩耗性,制動性に効果的とされている<sup>1)~5)</sup>共晶ステダイト(Fe, Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>3</sub>Pの三元共晶組織),セメントイト(Fe<sub>3</sub>C)等の炭化物<sup>12)</sup>が析出しているものもある.

### 2.2 小型ブレーキ試験機によるブレーキ試験

実機試験コストの削減を目的として,平成7年度21テクノ研究開発事業で小型ブレーキ試験機の製作に取り組んだ.小型ブレーキ試験機本体をFig. 2に示す.ただし,車輪部材質をJIS E5402 SSW-Q1Sに変更し,実機試験により近い状態で評価できるように今回改良を加えている.

本試験機の制動機構は,てこの原理により,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

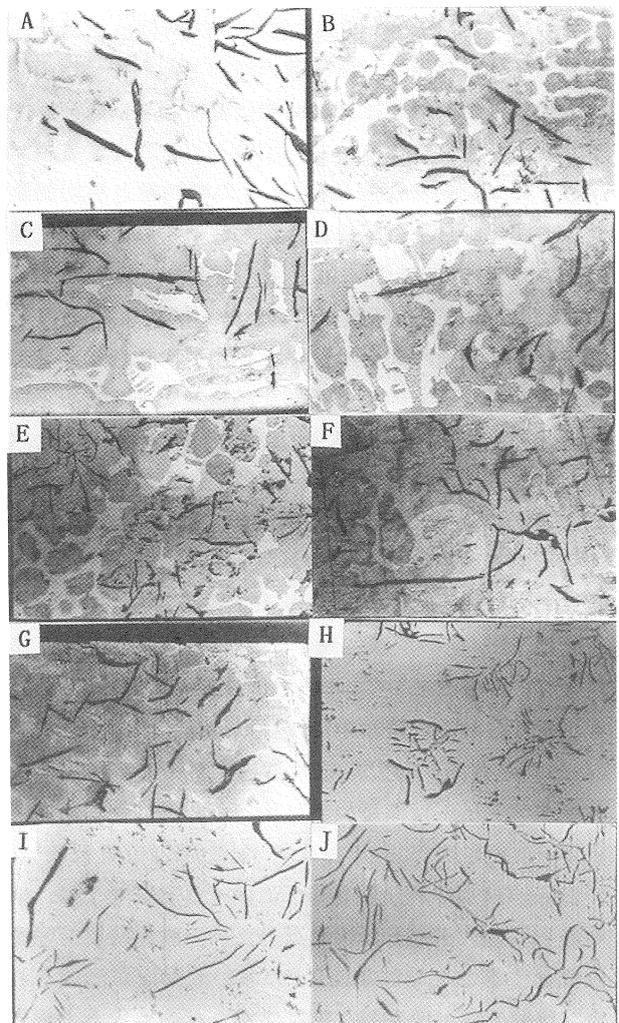


Fig. 1 Microstructures of Specimens

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。

作製した試験制輪子をそれぞれ小型ブレーキ試験機に取り付け、制動荷重980N、ブレーキ初速度25.2m/sの条件で試験を行った。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。また試験後の制輪子を切断して、鏡面研磨、ナイタールによるエッチングの後、金属顕微鏡による断面組織観察から制動面の歪み等を観察した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 各種試験制輪子の摩耗量と制動時間との関係

ブレーキ試験を1つの条件につき20回行った場合、試験制輪子の摩耗量は試験回数の増加とともに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予備実験より分かっている。そこで、各種試験制輪子のブレーキ試験1回当たりの摩耗量と平均制動時間との関係から、耐摩耗性、制動性に優れた試験制輪子について調べた。

Fig. 3に各種試験制輪子のブレーキ試験1回当たりの摩耗量と平均制動時間との関係を示すが、摩耗量、平均制動時間の少ないものほど優れた試験制輪子であるといえる。この結果より、制輪子Fは他の試験制輪子に比べてかなり制動性が優れており、比較的耐摩耗性も優れていることが分かった。また、制輪子B, Eについては全体的に耐摩耗性、制動性が優れており、制輪子D, G, H, Iも比較的耐摩耗性、制動性に優れていることが分かった。

制輪子Fが他の試験制輪子に比べてかなり優れた制動性を有する理由として、Pの添加量が0.79mass%と多いことが挙げられる。鋳鉄中にPを添加することでFe, Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>3</sub>Pの3元共晶組織である共晶ステダイトが析出する。共晶ステダイトは基地組織に比べて非常に硬い組織（ピッカース硬さ約750）であるが、融点が1220Kと低い<sup>12)</sup>。Y. Zhangらの含P鋳鉄製制輪子に関する研究<sup>4)</sup>では、鋳鉄中の共晶ステダイトが低融点のため、制動時に熔融または軟化することで制動面にPの多い流動層が形成されて真実接触面積が増大し、摩擦係数 $\mu$ が高くなると報告されている。また同様に、優れた耐摩耗性を有する理由として、硬質相である共晶ステダイトの析出が多いこと、Cの添加量が2.78mass%と少ないことが考えられる。鋳鉄製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<sup>1)</sup>こ

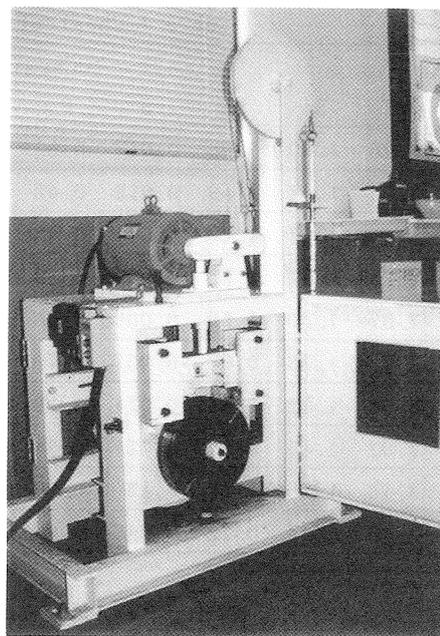


Fig. 2 Braking Test Machine

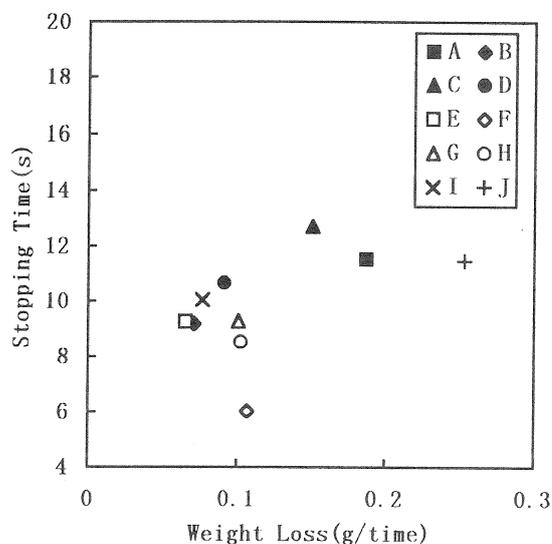


Fig. 3 Relationship between Weight Loss and Stopping Time

とから、Pの添加に伴った共晶ステダイトの析出による片状黒鉛の析出抑制、Cの添加量が少ないことによる片状黒鉛の析出抑制、制動面にPの多い流動層が形成されることによる片状黒鉛の剥離抑制等が耐摩耗性の向上に影響するものと考えられる。

また、制輪子B, Eが他の試験制輪子と比較して耐摩耗性、制動性に優れている理由として、Bの添加量が0.054, 0.057mass%と多いことが挙げられる。Bを添加することで硬質相であるセメントイト(Fe<sub>3</sub>C)等の炭化物が析出して基地組織が強化され、ブリネル硬さも288, 282と上昇している。また、制輪子Iも同様の傾向があると考えら

れる。しかし、制輪子GはP, Bの添加量が少ないにも関わらず、耐摩耗性、制動性が比較的に優れている。これはCr, Cu等を0.86, 0.93mass%添加したことにより、セメントイト等の炭化物が析出したこと、基地組織がパーライトで強化されたこと等の影響によると考えられる。また、ブリネル硬さが306と上昇したことにも関係している。

以上のことから、P, Cr, B, Cu等の添加は鑄鉄製制輪子の耐摩耗性、制動性に効果的であり、更には合金添加元素同士の相乗効果をもたらすと推測できる。しかし、硬質相である共晶ステダイト、セメントイト等の炭化物の析出は、熱伝導率を高める片状黒鉛組織を減少させ、制動時における摩擦熱の蓄積による材質劣化を招く可能性もある<sup>3), 5)</sup>ことから、析出量をある程度制御する必要もある。また、鑄鉄製制輪子の耐摩耗性、制動性に与える各種合金添加元素の相乗効果は、現象的に非常に複雑であるため評価する上で簡略化する必要がある。そこで、次に各種合金元素の添加量と摩耗量、制動時間との関係について述べる。

### 3.2 各種合金元素添加量と摩耗量、制動時間との関係

Fig. 4に各種合金元素添加量とブレーキ試験1回当たりの摩耗量との関係を示す。多項式近似曲線で示した本結果の通り、P, Cr, B, Cuの鑄鉄への添加は耐摩耗性の向上に効果的である。特にPの添加は上述したように共晶ステダイトを析出させることから、耐摩耗性の向上に効果的である。またCr, Cuの添加も、セメントイト等の炭化物の析出、基地組織のパーライト化等から耐摩耗性の向上に効果的である。Bの添加は範囲が狭く傾向が掴み難いが、僅かの添加量でもブリネル硬さが上昇することから、耐摩耗性の向上に効果的であると考えられる。しかし、Vの添加は耐摩耗性の向上にあまり効果を示さなかった。

Fig. 5に各種合金元素添加量と平均制動時間との関係を示す。多項式近似曲線で示した本結果の通り、P, B, Cuの鑄鉄への添加は制動性の向上に効果的である。特にPの添加は、耐摩耗性の向上と同様に制動性を著しく向上させる。これも基地組織中の共晶ステダイトの影響であることは、上述の通りである。Bの添加は範囲が狭く傾向が掴み難いが、僅かの添加量で制動性が向上している。また、Cuの添加も制動性の向上に効果的である。しかし、耐摩耗性を向上させるCrの添加は制動性を僅かに低下させる傾向を示し、Vの添加も制動性を低下させている。新井らの含Cr鑄鉄製制輪子に関する研究<sup>5)</sup>では、基地組織に比べて非常に硬いセメントイト(ピッカース

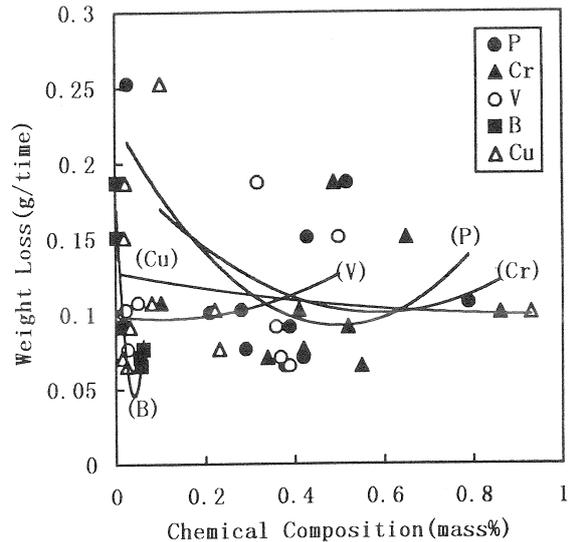


Fig. 4 Relationship between Chemical Composition and Weight Loss

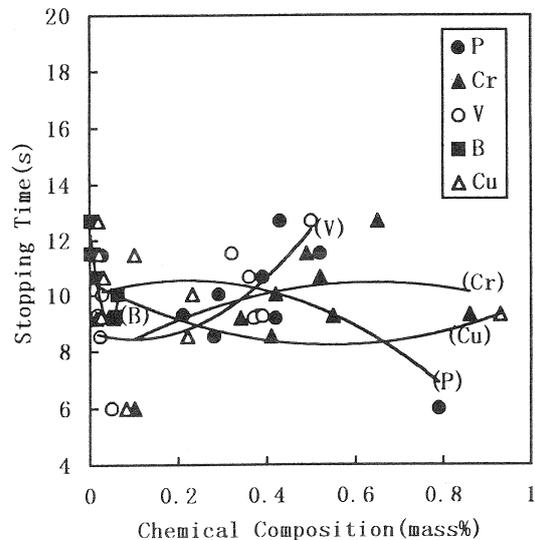


Fig. 5 Relationship between Chemical Composition and Stopping Time

硬さ約1200)の析出は耐摩耗性の向上に効果的であるが、約1273Kで母相(このときの母相はオーステナイトとなっている)に固溶されるため、制動時に発生する摩擦熱により軟質オーステナイトに変化して制動性を低下させる可能性もあると報告されている。

以上のことから、P, Cr, B, Cu等の添加は鑄鉄製制輪子の耐摩耗性、制動性に効果的であることが分かった。しかし、何れの合金元素の添加量も適正值があると考えられ、適正值を越えた添加は耐摩耗性、制動性を低下させると考えられる。

### 3.3 各種試験制輪子制動面の断面組織

耐摩耗性、制動性に優れた制輪子B, E, F, G, H及び耐摩

耗性、制動性に劣る制輪子Aのブレーキ試験後の断面組織から、制動面付近における組織変化について観察を行った。その結果をFig. 6に示す。

これらの結果より、制動面付近の組織に歪みが生じ、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。また、制輪子Aは基地組織中の片状黒鉛形状が大きく析出量も多いが、炭化物の析出は少ない。制輪子B, F, Gは炭化物の析出により、片状黒鉛の析出が抑制されている。制輪子E, Hは炭化物の析出により、片状

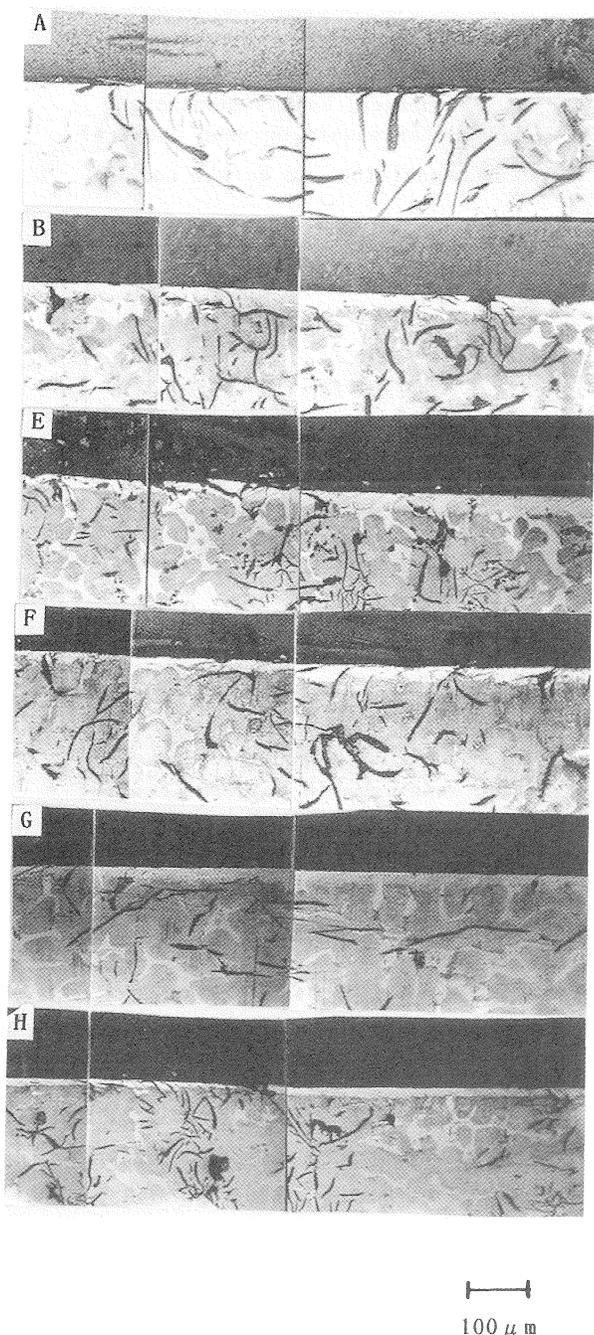


Fig. 6 Cross Section of Several Cast Iron Brake Shoes

黒鉛の析出が抑制、かつ微細化されている。ブリネル硬さが同程度(253, 251)の制輪子A, Hを比較すると、耐摩耗性、制動性に優れた制輪子Hは、炭化物の析出とともに片状黒鉛の析出が少なく、かつ微細である。

以上のことから、鑄鉄製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と考えられる。よって、鑄鉄製制輪子における耐摩耗性、制動性の向上は、炭化物の析出による基地組織の強化及び片状黒鉛の析出抑制、かつ微細化が効果的であると考えられる。

### 3.4 各種試験制輪子の硬さ、黒鉛面積率と摩耗量、制動時間との関係

各種試験制輪子において、耐摩耗性、制動性に影響を及ぼす因子は複数に存在する。耐摩耗性、制動性の向上は、合金元素を添加することによる基地組織の強化及び炭化物の析出、片状黒鉛の析出抑制、かつ微細化等が効果的であると考えられる。よって、これらのことから基地組織の硬さ及び黒鉛面積率について調べ、耐摩耗性、制動性に及ぼす影響についてまとめた。

Fig. 7に各種試験制輪子の硬さと摩耗量、制動時間との関係を示す。多項式近似曲線で示した本結果の通り、基地組織が硬くなるに従って摩耗量は減少し、制動時間も減少することが分かった。ただし、ブリネル硬さが約250~290の範囲で摩耗量、制動時間が僅かに増加していることから、基地組織の硬さの適正值があるものと考えられる。

Fig. 8に各種試験制輪子の黒鉛面積率と摩耗量、制動時間との関係を示す。多項式近似曲線で示した本結果の通り、黒鉛面積率が高くなるに従って摩耗量は増加し、

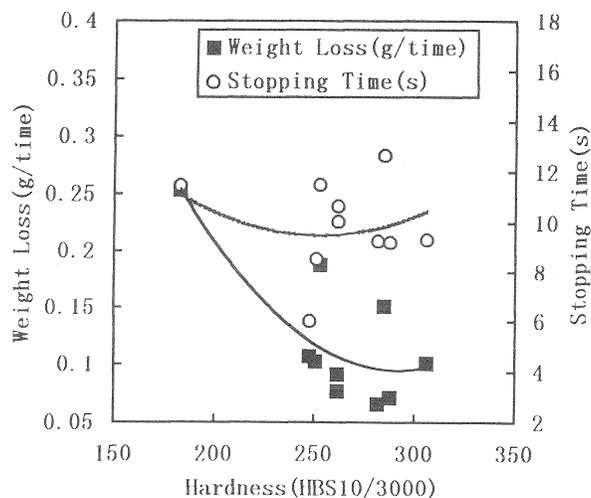


Fig. 7 Relationship between Hardness and Weight Loss, and Stopping Time

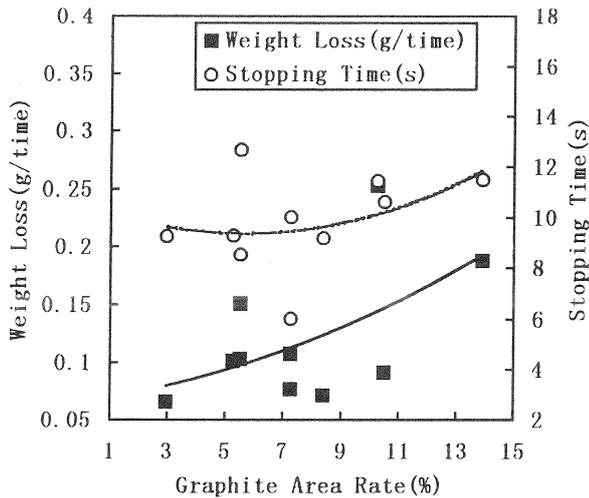


Fig. 8 Relationship between Graphite Area Rate and Weight Loss, and Stopping Time

制動時間も増加することが分かった。上述したように、鑄鉄製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、基地組織の影響は大きいものの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ため、本結果はこれを裏付けるものであるといえる。

以上のことから、鑄鉄製制輪子の基地組織をブリネル硬さ約250～290の範囲で硬く、黒鉛面積率を低くすることにより、耐摩耗性、制動性は向上すると考えられる。

#### 4. 結言

独自に製作した小型ブレーキ試験機を用いて、各種鑄鉄製制輪子のブレーキ試験を行った。これまでの実験より、以下の結果が得られたのでまとめて報告する。

- 1) 鑄鉄製制輪子の耐摩耗性の向上に、P, Cr, B, Cuを合金元素として0.05～1.0mass%の範囲で適量添加することが効果的である。
- 2) 鑄鉄製制輪子の制動性の向上に、P, B, Cuを合金元素として0.05～1.0mass%の範囲で適量添加することが効果的である。しかし、耐摩耗性を向上させるCrの添加は、制動性を僅かに低下させる。
- 3) 鑄鉄製制輪子の摩耗は制動面付近の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ため、各種合金元素の添加による共晶ステダイト、セメントイト等の炭化物の析出及び片状黒鉛の析出抑制、かつ微細化が耐摩耗性、制動性の向上に効果的である。
- 4) 鑄鉄製制輪子の基地組織をブリネル硬さ約250～290の範囲で硬く、また黒鉛面積率を低くすることにより、耐摩耗性、制動性は向上する。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、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の皆さんに深く感謝の意を表します。また、小型ブレーキ試験機の製作及び改良、試験制輪子の加工にご協力頂いた藤原夏義氏、化学分析にご協力頂いた工業化学部の後藤文治主幹研究員、佐藤壱主幹研究員に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 平成7年度大分県産業科学技術センター研究報告, P96
- 2) 高沢克朗, 辻村太郎, 由利三郎: 鑄物57(1985)8, P. 516
- 3) 新井浩, 清水保雄: 鑄物67(1995)6, P. 403
- 4) Y. Zhang, Y. Chen, He and B. Shen: Wear 166(1993) 179
- 5) 新井浩, 辻村太郎, 清水保雄: 鑄物67(1995) 11, P. 800
- 6) 新井浩, 清水保雄: 鑄物第126回全国講演大会講演概要集, P. 53
- 7) 辻村太郎, 宮内瞳苗, 大野薫, 片山信一, 藤原直哉: 鑄物第124回全国講演大会講演概要集, P. 25
- 8) 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
- 9) 宮内瞳苗, 辻村太郎, 新井浩, 藤原直哉: 鑄物第125回全国講演大会講演概要集, P. 86
- 10) 宮内瞳苗, 辻村太郎, 中山淳一, 新井浩: 鑄物第126回全国講演大会講演概要集, P. 54
- 11) 宮内瞳苗, 辻村太郎, 新井浩, 依田俊也: 鑄物第128回全国講演大会講演概要集, P. 95
- 12) 岡本正三, 依田連平: 金属材料組織解説鑄鉄編, 養賢堂
- 13) 大平五郎, 井川克也: 鑄造工学, 日本金属学会, P137-