

鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすボロンの影響

—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・***大分工業高等専門学校・****(株)八幡ハイキャスト

Effects of Boron on Frictional Wear Characteristics of Cast Iron Brake Shoes

—Development and Evaluation of High Functional Cast Irons Having Excellent Frictional 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

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¹⁾をもとに、各鉄道で実際に使用されている鑄鉄制輪子の摩擦特性について評価を行ってきた²⁾。その結果、鑄鉄制輪子の摩擦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ことが分かった。また、各種合金元素の添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化が、鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的であることも分かった。

そこで本研究では、鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼす合金元素個々の影響について調査するために、ボロン添加量のみを変化させた鑄鉄制輪子の作製と摩擦・摩耗特性の評価を行った。その結果、鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性はボロンの添加量増加に伴って向上し、ボロンを0.074mass%添加することで耐摩耗性が約1.7倍、制動性が約1.1倍向上することが分かった。

1. 緒言

鉄道車両の高速化に伴って、動力ブレーキと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、低コスト化等が要求される。一般的に鉄道用制輪子には鑄鉄系のものが古くから用いられているが、近年はフェノール樹脂系(金属粉末、黒鉛粉末等含有)のものや焼結金属系のものもあり、用途に応じた利用が行われている³⁾。

鑄鉄系制輪子に関する研究開発は、欧米でかなり異なる発展をしてきたようである⁴⁾。米国ではA. A. R. M-401によるチルド鑄鉄、またはこれにクロム鋼を埋め込んだ硬質のものが主となっており、欧州ではUIC(国際鉄道連合会)規格による高燐鑄鉄制輪子、ソ連のチタン入り鑄鉄制輪子、その他一般にはブリネル硬さ200前後の普通鑄鉄のものが使われてきた。また国内においては、鑄鋼制輪子、鑄鉄に鑄鋼を入れたもの、球状黒鉛鑄鉄のものが試験されてきた。近年の研究開発の動向とし

て(財)鉄道総合技術研究所、JR等では、鑄鉄制輪子の摩擦摩耗に及ぼす燐、クロム、チタン、バナジウムの影響に関する研究^{3), 5)~9)}、鑄鉄制輪子の摩擦摩耗に及ぼす炭素量、黒鉛形状の影響に関する研究^{10)~14)}、セラミック含有鑄鉄制輪子に関する研究^{3), 15)~17)}等が行われている。

一方大分県では、平成7年度より(株)八幡ハイキャスト、大分工業高等専門学校と共同で、時間とコストのかかる実車試験の前試験用として独自に小型ブレーキ試験機の開発を行い、在来線で使用されている各種合金鑄鉄制輪子を中心とした摩擦・摩耗特性の評価に関する研究を行ってきた^{1), 2)}。その結果、鑄鉄制輪子の摩擦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ことが分かった。また、各種合金元素の添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化が、鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的であることも分かった。

そこで本研究では、鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼす合金元素個々の影響について調査するために、ボ

Table 1 Chemical Composition and Hardness of Specimens

Sample	Chemical Composition (mass%)							Vickers Hardness (GPa)
	C	Si	Mn	P	Cr	V	B	
A	3.32	1.73	1.50	0.328	0.37	0.09	0.008	3.09
B	3.31	1.77	1.49	0.314	0.37	0.09	0.012	2.97
C	3.34	1.79	1.49	0.333	0.37	0.09	0.016	3.22
D	3.33	1.85	1.52	0.345	0.38	0.09	0.025	3.08
E	3.29	1.89	1.52	0.328	0.38	0.09	0.038	3.84
F	3.26	1.87	1.47	0.323	0.37	0.09	0.057	3.53
G	3.23	1.87	1.51	0.318	0.37	0.09	0.074	3.68

ロン添加量のみを変化させた鋳鉄制輪子の作製と摩擦・摩耗特性の評価を行っ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、㈱八幡ハイキャストでボロン含有鋳鉄制輪子(350×80×65mm)を溶解・鑄造した。そして、機械加工により、小型ブレーキ試験機用に30×30×27mm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成分及び基地組織のマイクロビッカース硬さ(押付荷重4.903N)をTable 1に示す。

本研究に用いた試験制輪子は、JIS(日本工業規格)のFC250相当鋳鉄をベースに、燐、クロム、マンガン、バナジウム等を合金元素として添加することで、実際に使用されている鋳鉄制輪子と同成分に調整している。そして、更にボロンを0.008~0.074mass%追加することで基地組織を強化している。

試験制輪子の組織を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(Fe, Fe₃Cの2元共晶組織)を示している。また、耐摩耗性、制動性の向上に効果的とされている共晶ステダイト(Fe, Fe₃C, Fe₃Pの3元共晶組織)^{1)~3), 5), 7), 8)}、セメンタイト(Fe₃C)が一部析出している。これらの組織を比較すると、ボロンの添加量増加に伴って摩耗の要因となる黒鉛が減少・微細化し、代わりにセメンタイトが増加している。また、これらの組織をもとに、黒鉛面積率、黒鉛粒数、黒鉛長さを求め、ボロン添加量との関係を調べた。

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本体を示す。本試験機の制動機構は、てこの原理により、重りを用いてφ280mmの車輪(JIS E5402 SSW-Q1S)に試験制輪子を押し付ける

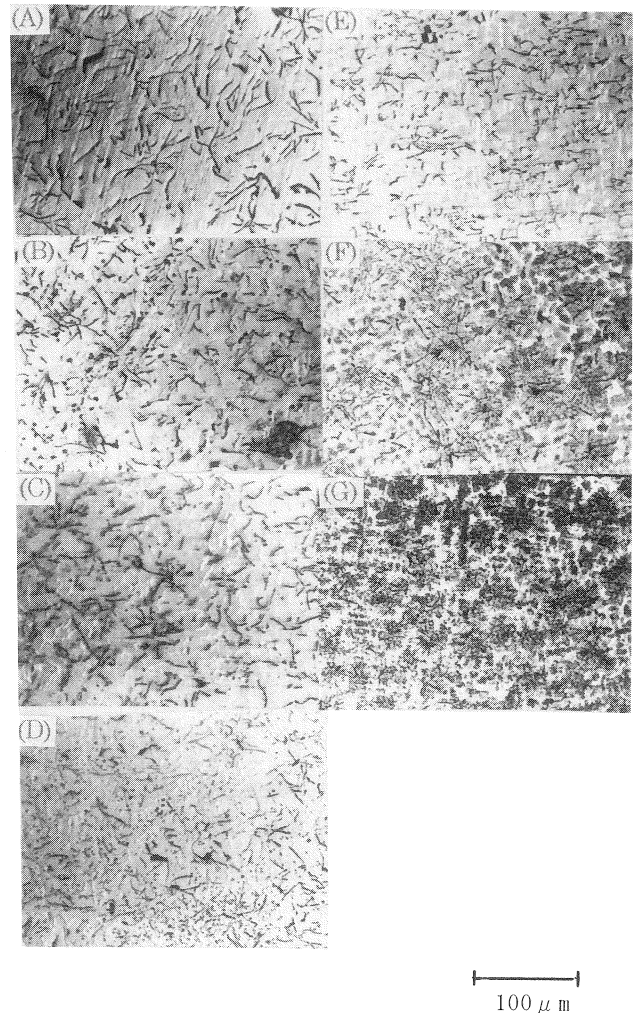


Fig. 1 Microstructures of Specimens

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、3.7kW三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

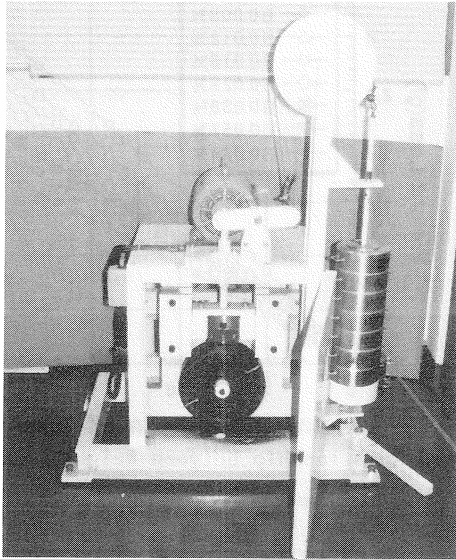


Fig.2 Brake Test Machine

に取り付け、制動荷重980N(面圧約1MPa)、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を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 試験制輪子の黒鉛面積率、黒鉛粒数及び黒鉛長さとの関係

Fig. 3に黒鉛面積率とボロン添加量との関係を示す。また、Fig. 4に黒鉛粒数とボロン添加量との関係を示す。これらの結果より、ボロンの添加量増加に伴って黒鉛面積率、黒鉛粒数ともに減少することが分かった。これはFig. 1に示したように、ボロンの添加により基地組織中のセメントイトが増加することと深く関係している。

大城ら¹⁸⁾は鋳鉄の凝固過程における燐、ボロンの挙動について調査を行っているが、燐は大部分が Fe_3P として、ボロンは大部分が $Fe_3(CB)$ として晶出すると報告している。また、燐とボロンを同時に添加することで微細な共晶ステダイト($Fe+Fe_3C+Fe_3P$)組織ではなく、粗い $Fe_3(CB)$ と微細な $Fe(\gamma)+Fe_3P$ の組み合わせられた組織を形成すると報告している。本研究における試料組織においても、ボロンの添加により粗い $Fe_3(CB)$ の析出が確認された。よって、黒鉛組織の減少は、 $Fe_3(CB)$ の

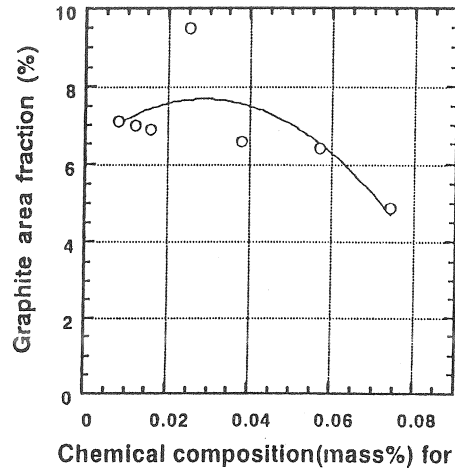


Fig.3 Relationship between Graphite Area Fraction and Chemical Composition for B

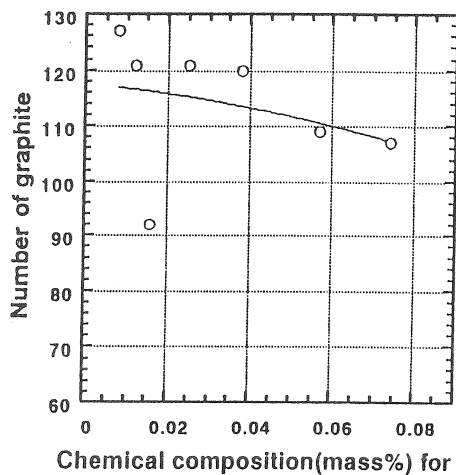


Fig.4 Relationship between Number of Graphite and Chemical Composition for B

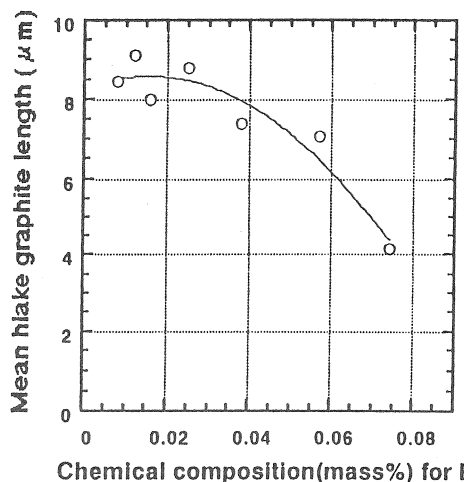


Fig.5 Relationship between Mean Flake Graphite Length and Chemical Composition for B

析出が影響していると考えられる。

また、Fig. 5に黒鉛長さとボロン添加量との関係を示す。この結果より、ボロンの添加により黒鉛長さが短

くなり、微細化されることが分かった。

以上の結果から、ボロンの添加は摩耗の要因となる黒鉛組織を減少・微細化するため、鋳鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的であることが予想される。

3.2 試験制輪子の摩耗量(摩耗割合)と試験回数、ボロン添加量との関係

Fig. 6に試験制輪子の摩耗量と試験回数との関係を示す。この結果より、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ていることから、試験制輪子は定常摩耗の状態にあると考えられる。そこで、試験1回当たりの摩耗量を摩耗割合として算出し、ボロン添加量との関係を調査した。

Fig. 7に試験制輪子の摩耗割合とボロン添加量との関係を示す。この結果より、ボロン添加量の増加に伴って摩耗割合が減少し、ボロンを0.074mass%添加することで耐摩耗性が約1.7倍向上することが分かった。

上述したように、鋳鉄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。よって、ボロンの添加による試験制輪子の黒鉛組織の減少・微細化が、耐摩耗性の向上に影響すると考えられる。また、ボロンを添加することにより、粗い $Fe_3(CB)$ と微細な $Fe(\gamma)+Fe_3P$ の組み合わせられた組織を形成するため、耐摩耗性が向上すると考えられる。

3.3 試験制輪子の制動時間(平均制動時間)と試験回数、ボロン添加量との関係

Fig. 8に試験制輪子の制動時間と試験回数との関係を示す。この結果より、試験制輪子の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。そこで、試験1回当たりの制動時間を平均制動時間として算出し、ボロン添加量との関係を調査した。

Fig. 9に試験制輪子の平均制動時間とボロン添加量との関係を示す。この結果より、ボロン添加量の増加に伴って平均制動時間が減少し、ボロンを0.074mass%添加することで制動性が約1.1倍向上することが分かった。

上述したように、鋳鉄制輪子の制動性の向上は、基地組織中に析出したステダイトが効果的である。よって、ボロンの添加による試験制輪子の制動性の向上は、基地組織に析出したステダイトが粗い $Fe_3(CB)$ で強化されることに影響されると考えられる。

3.4 試験制輪子の断面組織観察

Fig. 10にブレーキ試験後の試験制輪子の断面組織を

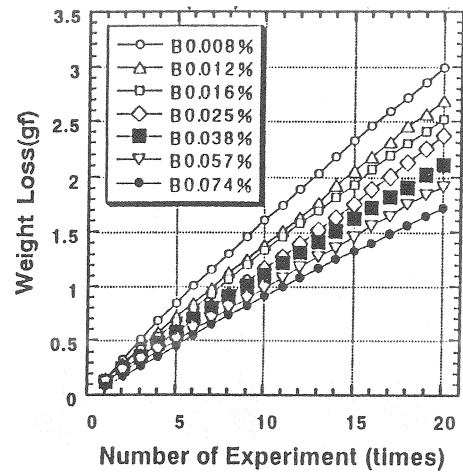


Fig. 6 Relationship between Weight Loss and Number of Experiment

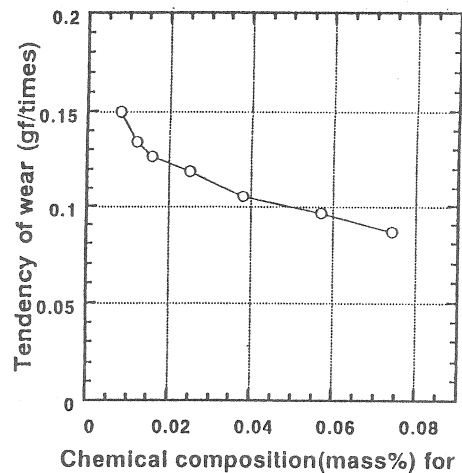


Fig. 7 Relationship between Tendency of Wear and Chemical Composition for B

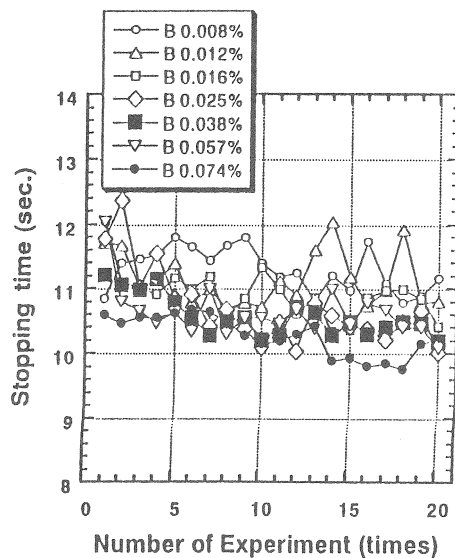


Fig. 8 Relationship between Stopping Time and Number of Experiment

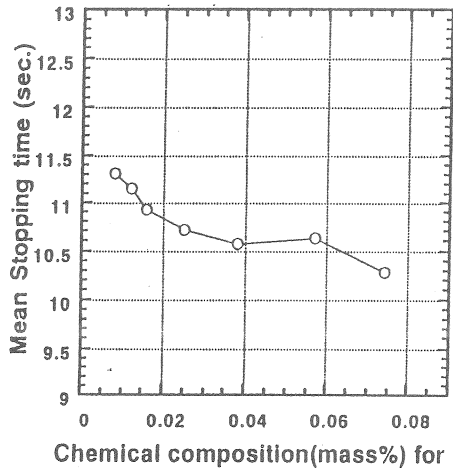


Fig. 9 Relationship between Mean Stopping Time and Chemical Composition for B

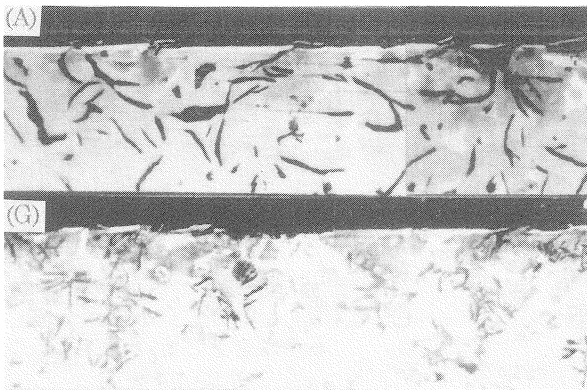


Fig. 10 Cross Section of Sample A and Sample G after Brake Test

示す。試料Aは耐摩耗性、制動性ともに最も劣った試験制輪子の断面組織を、試料Gは耐摩耗性、制動性ともに最も優れた試験制輪子の断面組織を示す。これらの結果より、試料Aは黒鉛組織が粗大化していることが分かった。また、ブレーキ時に受けた摩擦により制動面付近の組織が歪み、表面に析出した黒鉛部分から剥離が生じていることが分かった。しかし、試料Gは黒鉛組織が微細化しており、炭化物も多量に析出していることから制動面付近の組織の歪みも少ない。

上述したように、各種合金元素の添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化が、鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的である。よって、ボロンの添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化が、試験制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に影響していると考えられる。しかし、ボロンを0.074mass%以上添加した場合、ブレーキ機構への取り付け部がチル化して脆くなる危険性がある。よって、ブレーキの安全面から考慮すると、本研究にお

けるボロン添加量は0.074mass%程度が適当であると考えられる。

4. 結言

小型ブレーキ試験機を用いて、鑄鉄制輪子の摩擦・摩耗特性に及ぼすボロンの影響について調査した。以下に、その結果をまとめる。

- (1) 鑄鉄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。
- (2) 鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性は、ボロンの添加量増加に伴って向上する。特に、ボロンを0.074mass%添加することで、耐摩耗性が約1.7倍、制動性が約1.1倍向上した。このことは、ボロンの添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化による効果と考えられる。
- (3) ボロンの添加は鑄鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的であるが、過剰の添加はブレーキ機構への取り付け部のチル化を招く危険性がある。よって、ボロンの最適添加量は0.074mass%程度である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ご協力頂いた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、試験制輪子の加工にご協力頂いた藤原夏義氏、実験補助としてご協力頂いた橋本賢二氏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P. 96
- 2) 平成8年度大分県産業科学技術センター研究報告P. 44
- 3) (社)日本鑄物協会研究報告69, P. 167
- 4) 鑄物のすべり摩耗, (財)総合鑄物センター, P. 111
- 5) 新井浩, 清水保雄: 鑄物67 (1995) 6, P. 403
- 6) 新井浩, 辻村太郎他: 鑄造工学67 (1995) 11, P. 800
- 7) 高沢克朗, 辻村太郎, 由利三郎: 鑄物57 (1985) 8, P. 516
- 8) 辻村太郎, 真鍋修二: 鑄物60 (1988) 2, P. 98
- 9) 新井浩, 清水保雄: 日本鑄物協会第126回全国講演大会講演概要集, P. 53
- 10) 宮内瞳苗, 辻村太郎他: 日本鑄物協会第125回全国講演大会講演概要集, P. 86
- 11) 宮内瞳苗, 辻村太郎他: 日本鑄物協会第126回全国講演大会講演概要集, P. 54
- 12) 宮内瞳苗, 辻村太郎他: 日本鑄造工学会第128回全国講演大会講演概要集, P. 95

- 13) 宮内瞳岬, 辻村太郎他: 日本鑄造工学会第130回全国講演大会講演概要集, P. 86
- 14) 宮内瞳岬, 辻村太郎: 日本鑄造工学会第131回全国講演大会講演概要集, P. 107
- 15) 辻村太郎, 宮内瞳岬他: 日本鑄物協会第124回全国講演大会講演概要集, P. 25
- 16) 中山淳一, 辻村太郎他: 日本鑄造工学会第127回全国講演大会講演概要集, P. 10
- 17) 高梨智昭, 辻村太郎他: 日本鑄造工学会第131回全国講演大会講演概要集, P. 108
- 18) 若杉孝三, 大城桂作: 日本鑄造工学会九州支部平成9年度講演概要集P. 9