

鑄ぐるみ法によるセラミック複合鑄鉄制輪子の製造と特性評価の研究 (第1報) —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—

高橋芳朗*・江藤博明*・斉藤雅樹*・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

A Manufacturing Method of Several Ceramic Filters/Gray Cast Iron Composite Brake Shoes and Evaluations of Frictional Wear Characteristics of Their Brake Shoes (First Report)

—Development of Superior High-temperature Wear Resistant Composites Materials—

Yoshiroh TAKAHASHI*, Hiroaki ETOH*, Masaki SAITOH*, 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

本研究は、平成9年度地域コンソーシアム研究開発事業(NEDO補助事業)に採択された「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」における再委託研究の一つである。我々は、平成7年度より取り組んできた大分県内の産学官共同研究成果^{1),2)}をもとに、三次元網状セラミック構造体(ポリウレタン発砲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三次元網状としたもの)を鑄鉄で鑄ぐるむ溶浸複合技術を用いた凝固制御を行い、各種合金元素の添加により従来の鑄鉄制輪子に比べて基地組織が微細制御された耐摩耗性、制動性に優れたセラミック複合鑄鉄制輪子の開発を行う。

本年度は、三次元網状セラミック構造体の成形と溶浸複合技術を用いたセラミック複合鑄鉄制輪子の試作・評価に関する研究を行った。その結果、三次元網状セラミック構造体の成形に適したセラミック泥漿の溶媒及び粘性条件と焼成条件を得た。また、鑄鉄との複合化により、摩耗の要因となる黒鉛組織を微細化し、硬質セラミックがマクロ的均一に分散したセラミック複合鑄鉄制輪子を試作した。試作したA28S制輪子は他のセラミック複合鑄鉄制輪子より耐摩耗性、制動性に優れ、母材となるFC250制輪子に比べ、約12.8倍の耐摩耗性と約1.5倍の制動性を示した。さらに、普通鑄鉄にマンガン、燐、クロム、バナジウムを添加して耐摩耗性を約2.7倍、制動性を約1.1倍向上させた合金鑄鉄制輪子に対し、ボロンを0.074mass%追添加して耐摩耗性で約1.7倍、制動性で約1.1倍さらに向上させた0.074mass%B含有合金鑄鉄制輪子よりも、耐摩耗性で約2.7倍、制動性で約1.3倍の向上を示した。

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-40

1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。

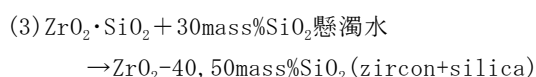
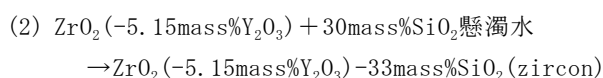
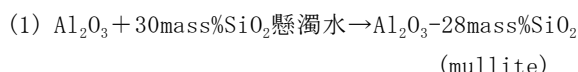
一方大分県では、平成7年度より㈱八幡ハイキャスト、大分工業高等専門学校と共同で、時間とコストのかかる実車試験の前試験用として独自に小型ブレーキ試験機の開発を行い、在来線で使用されている各種合金鋳鉄制輪子を中心とした摩擦・摩耗特性の評価に関する研究を行ってきた^{1), 2)}。その結果、鋳鉄制輪子の摩耗は制動面付近の組織の歪みが原因であり、切り欠き効果により黒鉛組織の先端から起こることが分かった。また、各種合金元素の添加による炭化物の析出とそれに伴った黒鉛析出の抑制・微細化が、鋳鉄制輪子の耐摩耗性、制動性の向上に効果的であることも分かった。

そこで本研究では、鋳鉄制輪子の摩耗の要因となる制動面付近の組織の歪みを抑制し、かつ黒鉛析出の抑制と炭化物析出の促進を目的とした基地組織制御を行うため、三次元網状セラミック構造体を鋳鉄で鑄ぐるむ溶浸複合技術を用いた凝固制御を行い、各種合金元素の添加により従来の鋳鉄制輪子に比べて基地組織が微細制御された耐摩耗性、制動性に優れたセラミック複合鋳鉄制輪子の開発を行う。本年度は、三次元網状セラミック構造体の成形と溶浸複合技術を用いたセラミック複合鋳鉄制輪子の試作・評価に関する研究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

セラミック複合鋳鉄制輪子を製造するための第1段階として、三次元網状セラミック構造体の成形を行った。酸化物系セラミックは化学的に安定で、機械的性質に優れかつ安価であることから、機械材料として一般的に利用されている¹⁸⁾。そこで、アルミナ粉末(大明化学工業㈱製TM-DAR, 99.99mass%, 0.22 μ m)、イットリア添加部分安定化ジルコニア粉末(東ソー㈱製TZ-3Y, 5.15mass%Y₂O₃添加, 0.27 μ m)、ジルコンフラワー(岩谷産業㈱製SF#350, 350mesh以下)を出発原料に、ポリウレタン発砲体への付着・成形に優れたセラミック泥漿用溶媒¹⁹⁾であるシリカゾル(日産化学工業㈱製スノーテックス30)²⁰⁾を用いた成分調整を以下に行った。ただし、セラミック泥漿の混練は均一に分散させるため、㈱品川工業所製万能混合攪拌機50MRを用いて1時間行った。



上記の組成は、ムライト、ジルコンと呼ばれる化合物を形成し、共有結合性が強いことが知られている¹⁸⁾。特に、ムライトは高温強度に優れた物質として知られており、ジルコンは精密鑄造におけるロストワックス法のセラミック鑄型材としても用いられている^{20), 21)}。

ポリウレタン発砲体を用いて作製される三次元網状セラミック構造体は、鑄造時における濾過フィルターとして一般的に鉄鋼・鑄造業界で用いられている。また、各種触媒担体、吸音材等への利用もなされており、その用途も多様化している。しかし本研究では、三次元網状セラミック構造体と鋳鉄との複合化によるセラミック複合鋳鉄制輪子の製造を目的としているため、目づまりのないようにポリウレタン発砲体へセラミック泥漿をコーティングすること(湯回り不良を起こさないため)、焼成時のポリウレタン発砲体溶融・分解によるセラミックコーティング部の崩壊を避けることが課題となる。そこで、セラミック泥漿の粘性、焼成条件の検討を行った。

また、セラミック複合鋳鉄制輪子を製造するための第2段階として、上述した三次元網状セラミック構造体4種と市販のSiCフィルター(各形状約80×50×20mm)を鑄型内にそれぞれ固定し、JIS(日本工業規格)FC250相当の普通鋳鉄を用いた複合化を行った。普通鋳鉄の溶解は、㈱八幡ハイキャストの3t低周波誘導電気炉を用いて行い、350×65×65mmの形状のセラミック複合鋳鉄制輪子を鑄造した。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。得られた試験制輪子は、組織観察、セラミック分散率測定、母材組織部及びセラミック部のマイクロビッカース硬さ(押付荷重0.4903N)測定を行った。また、これらの試験制輪子の母材鋳鉄成分をTable 1に示す。

Table 1 Chemical Composition of Grey Cast Iron

C (mass%)	Si (mass%)	Mn (mass%)	P (mass%)
3.27	1.89	0.45	0.056
S (mass%)	Cu (mass%)	Cr (mass%)	Ni (mass%)
0.011	0.014	0.065	0.031

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、重りを用いて ϕ 280mmの車輪(JIS E5402 SSW-Q1S)に試験制輪子を押し付

けるものである。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(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。

Fig.1 Image of Brake Test Machine

3. 実験結果及び考察

3.1 三次元網状セラミック構造体の成形

Fig. 2に三次元網状セラミック構造体の成形過程を示す。上述したように、成分調整されたセラミック泥漿は、目づまりのないようにポリウレタン発砲体へコーティングする必要がある。よって、成分調整されたセラミック泥漿は、乾燥あるいはアルコールの追加により、最終的にコーティングに適した粘性とする必要がある。そこで、(株)山崎精機研究所製回転粘度計YV-6S型を用いて、次式によりコーティングに適した粘性を測定した結果、15～25Pa・s(ザーンカップ5号で8～10秒)の粘性調整が適当であることが分かった。

$$\eta = 10 \alpha \cdot T / n \quad (1)$$

η : 粘性 (Pa・s) α : ロータ係数

T: 測定トルク (g・cm) n: 回転速度 (rpm)

また、焼成過程でセラミックが三次元網状形状を十分に保持するために、最低3回のコーティング+乾燥工程を必要とすることが分かった。

Fig. 3に三次元網状セラミック構造体の焼成条件を示す。三次元網状セラミック構造体の焼成は、ポリウレタン発砲体の熔融・分解温度が543～573Kということから、セラミックコーティング部の崩壊を考慮した厳密な温度制御による昇温を必要とする。また、鑄造時の溶湯温

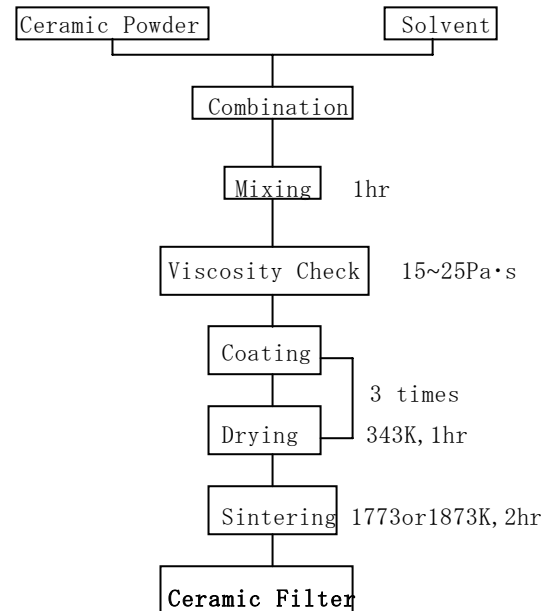


Fig.2 A Manufacturing Process of Ceramic Filters

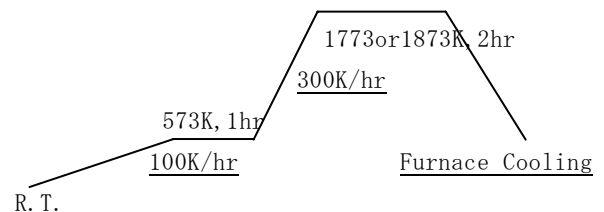


Fig.3 Sintering Condition of Ceramic Filters

度(約1673K)を考慮した焼成温度の設定も必要である。そこで、(株)モトヤマ製SH型高温電気炉を用いて焼成に適した条件を調査したところ、573Kまでは100K/hrで昇温し、573Kで1hr保持した後300K/hrで Al_2O_3 -28mass% SiO_2 セラミックは1773K、 ZrO_2 -30, 40, 50mass% SiO_2 セラミックスは1873Kまで昇温及び2hr保持することで三次元網状セラミック構造体が得られることが分かった。

しかし、上記構造体は焼成前後で収縮による形状変化が起こる。これは、鑄鉄で鑄ぐる際の湯回り、セラミック分散率の違いによる制輪子の摩擦・摩耗特性に影響を及ぼすと考えられる。よって、焼成前後の形状、見掛け体積減率(収縮率)、気孔率を測定したのでTable 2に示す。

この結果より、 Al_2O_3 -28mass% SiO_2 及び ZrO_2 -33mass% SiO_2

は焼成前後でかなり収縮をしたため、気孔率も減少することが分かった。

三次元網状セラミック構造体を熔融金属で铸ぐるむ技術は、(株)ナベヤより特許として出願²²⁾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。

3.2 溶浸複合技術を用いたセラミック複合铸铁制輪子の試作

Table 2 Contraction and Porosity of Ceramic Filters

Ceramic Filter	Before Sintering(mm)	After Sintering(mm)	Contraction(%)	Porosity(%)
Al ₂ O ₃ -28mass%SiO ₂	85×55×22	75×47×19	35	86
ZrO ₂ -33mass%SiO ₂	85×55×22	76×48×20	29	83
ZrO ₂ -40mass%SiO ₂	85×55×22	83×53×21	10	94
ZrO ₂ -50mass%SiO ₂	85×55×22	80×54×21	12	93
SiC	—	75×50×22	—	81

る^{23), 24)}。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¹⁷⁾が、セラミックの材質、分散率、車輪への攻撃性、耐熱亀裂性等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。

Fig. 4及びFig. 5に試作制輪子の組織を示す。Fig. 4は、ZrO₂-33mass%SiO₂セラミック複合铸铁制輪子の制動面観察を行ったものである。この結果から、試作制輪子は湯回り不良による欠陥もなく、制動面に硬質セラミックがマクロ的均一に分散した様子が分かる。また、Fig. 5は母材となる普通铸铁制輪子とZrO₂-33mass%SiO₂セラミック複合铸铁制輪子の組織を比較したものである。この結果から、三次元網状セラミック構造体を铸ぐるみ、铸铁の凝固制御を行うことで、摩耗の要因となる黒鉛組織を僅かではあるが微細化することが分かった。これらの結果は、他の試作制輪子にも同様に見られた。

また、耐摩耗性、制動性に効果があると考えられる試作制輪子のセラミック分散率をTable 3に、試作制輪子の母材組織部及びセラミック部のマイクロビッカース硬さ(押付荷重0.4903N)をTable 4に示す。ただし、母材となる普通铸铁制輪子をFC250制輪子、Al₂O₃-28mass%SiO₂セラミック複合铸铁制輪子をA28S制輪子、ZrO₂-30, 40, 50mass%SiO₂セラミック複合铸铁制輪子をZ33S, Z40S, Z50S制輪子、SiCセラミック複合铸铁制輪子をSiC制輪子とする。また、硬さ測定は、各7点測定のうち上下2点を切

Fig.4 Microstructure of Specimen

Fig.5 Microstructures of Specimens

Table 3 Ceramic Area Fraction

Brake Shoe	Ceramic Area Fraction(%)
FC250	0
A28S	14
Z33S	19
Z40S	12
Z50S	10
SiC	27

Table 4 Vickers Hardness of Microstructures of

Specimens

Microstructure	Vickers Hardness (GPa)	Range of Hardness (GPa)
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}28\%\text{SiO}_2$	11.9	9.80~14.1
$\text{ZrO}_2\text{-}33\%\text{SiO}_2$	11.1	10.3~12.0
$\text{ZrO}_2\text{-}40\%\text{SiO}_2$	8.90	8.20~9.90
$\text{ZrO}_2\text{-}50\%\text{SiO}_2$	5.10	4.40~6.20
SiC	11.0	8.10~13.5
Ferrite	2.20	2.10~2.30
Pearlite	3.20	2.70~3.90
Graphite	0.58	0.36~0.73

り捨てた残り5点の平均とした。この結果から、セラミック分散率にばらつきが生じることが分かった。これは、三次元網状セラミック構造体の焼成において、A28S、Z33S制輪子に含有するセラミックの収縮が大きく、気孔率が86%, 83%であったことに起因している。それに対して、Z40S、Z50S制輪子に含有するセラミックの収縮率は小さく、気孔率が94%, 93%であった。また、SiC制輪子に含有するセラミックは市販のため、製造条件が他と異なる。

3.3 試作制輪子のブレーキ試験

小型ブレーキ試験機¹⁾を用いて、試作制輪子のブレーキ試験を行った。また、在来線で使用されている合金鋳鉄制輪子について、ボロン含有量の変化による耐摩耗性、制動性への効果を合わせて比較・検討した。

Fig. 6に各種セラミック複合鋳鉄制輪子の試験回数と摩耗量との関係を示す。この結果より、試験回数の増加に従って摩耗量は一定の割合で増加していることから、各種セラミック複合鋳鉄制輪子は定常摩耗の状態にあることが分かった。また、A28S制輪子はFC250制輪子に比べて約12.8倍の耐摩耗性を示し、セラミック分散率の高いSiC制輪子、Z33S制輪子に比べても約2.4倍、約3.0倍の耐摩耗性を示した。

このように、A28S制輪子が最も優れた耐摩耗性を示した理由として、セラミック部の硬度が他に比べて高いことが考えられる。また、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ことが分かっている^{1), 2)}が、耐摩耗性を全体的に向上させる理由として、三次元網状セラミック構造体を鑄ぐるむことで制動面付近の組織の歪みを抑制すること、鋳鉄の凝固制御により摩耗の要因となる黒鉛組織の析出を抑制することが考えられる。

Fig. 7に各種セラミック複合鋳鉄制輪子の試験回数と制動時間との関係を示す。この結果より、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、A28S制輪子はFC250制輪子に比べて約1.5倍の制動性を示し、セラミック分散率の高いSiC制輪子、Z33S制輪子に比べてもそれぞれ約1.2倍の制動性を示した。このように、A28S制輪子が最も優れた制動性を示した理由として、 Al_2O_3 系セラミックの持つ摺動特性が影響しているものと考えられる²⁵⁾。

また、**Table 1**の普通鋳鉄をベースに、Cを3.30mass%, Siを1.80mass%, Mnを1.50mass%, Pを0.33mass%, Crを0.37mass%, Vを0.09mass%, Bを0.008~0.074mass%添加して、在来線で使用されている成分に調整した7種の合金鋳鉄制輪子を作製した。これらの合金鋳鉄制輪子を用いてブレ

Fig. 6 Relationship between Weight Loss and Number of Experiment

Fig. 7 Relationship between Stopping Time and Number of Experiment

Fig.8 Relationship between Weight Loss and Number of Experiment

べ、耐摩耗性、制動性ともに優れている。また、FC250制輪子に比べ、耐摩耗性で約12.8倍、制動性で約1.5倍の向上を示した。さらに、FC250制輪子にMn, P, Cr, Vを添加して耐摩耗性を約2.7倍、制動性を約1.1倍向上させた合金鑄鉄制輪子に対し、Bを0.074mass%追添加して耐摩耗性で約1.7倍、制動性で約1.1倍さらに向上させた0.074mass%B含有合金鑄鉄制輪子よりも、耐摩耗性で約2.7倍、制動性で約1.3倍の向上を示した。

Fig.9 Relationship between Stopping Time and Number of Experiment

一キ試験を行ったところ、Fig.8及びFig.9の結果が得られた。Fig.8はボロン含有合金鑄鉄制輪子の試験回数と摩耗量との関係を、Fig.9はボロン含有合金鑄鉄制輪子の試験回数と制動時間との関係を示すが、ボロンの添加により耐摩耗性、制動性が向上することが分かった。また、成分調整された0.008mass%B含有合金鑄鉄制輪子は、FC250制輪子(Fig.6及びFig.7参照)に比べて耐摩耗性で約2.7倍、制動性で約1.1倍の向上を示すが、ボロンを0.074mass%追添加することでさらに耐摩耗性で約1.7倍、制動性で約1.1倍の向上を示すことが分かった。しかし、A28S制輪子は0.074mass%B含有合金鑄鉄制輪子よりも、さらに耐摩耗性で約2.7倍、制動性で約1.3倍の向上を示している(Fig.6及びFig.7参照)。

この結果は、成分調整のために専用の溶解・鑄造ラインを設けていた従来の制輪子製造に対し、他の製品と同様の溶解・鑄造ラインで製造できる可能性を示すもので、性能の向上とコストダウンに繋がるものと期待される。

4. 結言

- (1) ポリウレタン発砲体へのシリカゾルを用いたセラミック泥漿コーティングは、粘性を15~25Pa・sに調整することが適当である。
- (2) 三次元網状セラミック構造体の焼成は100K/hrで573Kまで昇温し、1hr保持して300K/hrで1773or1873Kまで昇温及び2hr保持する。
- (3) 三次元網状セラミック構造体を鑄鉄で鑄ぐるむことで、硬質セラミックがマクロ的均一に分散し、かつ摩耗の要因となる黒鉛組織を微細化したセラミック複合鑄鉄制輪子が得られた。
- (4) A28S制輪子は他のセラミック複合鑄鉄制輪子に比

謝辞

本研究は、NEDOの地域コンソーシアム研究開発事業再委託研究として、(株)北九州テクノセンターより委託されたものです。本研究の遂行にあたり、貴重な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の竹下一義氏、本島直樹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、橋本賢二氏に心より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) 宮内瞳苗, 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) 宮内瞳宙, 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, 宮内瞳宙他: 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) ファインセラミックスその機能と応用(日本規格協会)P. 23
- 19) 平成5年度大分県工業試験場研究報告P. 17
- 20) 精密鑄造研究部会活動報告-20回の歩み-((社)日本鑄造工学会東海支部)P. 13
- 21) 平成6年度大分県産業科学技術センター研究報告
P. 138
- 22) 特許登録第1627579
- 23) 実用新案登録第2014894
- 24) 実用新案公開平05-56273
- 25) セラミック材料の力学的特性評価(日刊工業新聞社)
P. 162