

複合機能鑄造材料の機械的性質

勝負澤善行*、茨島明*、池浩之*

高川貫仁*

引張強さや靱性の高い球状黒鉛鑄鉄を、鑄造性や減衰性の良好なねずみ鑄鉄で鑄ぐるみ複合材料とし、更にオーステンパ熱処理を施す複合加工により、高い硬さと強度がある複合機能鑄造材料の開発を行った。

この複合機能鑄造材料は、異なる物性の鑄鉄からなる層状の傾斜材料である。曲げ試験では、下側をオーステンパ球状黒鉛鑄鉄とした場合は 2000N/mm^2 と高い抗折強度が得られ、これに対して下側をオーステンパねずみ鑄鉄とした場合は 650N/mm^2 と低く、強度に方向性がある。引張強さは、オーステンパねずみ鑄鉄と同じ $230\sim 290\text{N/mm}^2$ 程度と低いが、硬さは高くオーステンパ球状黒鉛鑄鉄側でHRC40~46、オーステンパねずみ鑄鉄側でHRC30~38であり、しかも勾配がある。

キーワード:オーステンパ球状黒鉛鑄鉄、オーステンパねずみ鑄鉄、複合機能鑄鉄

Mechanical Properties of Functionally Gradient Cast Iron

SHOUBUZAWA Yoshiyuki , BARAJIMA Akira , IKE Hiroyuki
and TAKAGAWA Takahito

Functionally Gradient Cast Iron has been developed. Firstly, cast-in bonding spheroidal graphite cast iron and gray cast iron, Secondly the bonding material was treated with Austemper heat procedure.

Mechanical Properties of this material are summarized as follows:

- (1) There are directional characteristics in bend strength and hardness.
- (2) There is 2000N/mm^2 of bend strength as under-side Austempred Spheroidal graphite cast iron, but 650N/mm^2 as under-side Austempred gray cast iron.
- (3) There is $200\sim 290\text{N/mm}^2$ of tensile strength.
- (4) Hardness are $30\sim 38\text{HRC}$ side of Austempred gray cast iron, and $40\sim 46\text{HRC}$ side of Austempred Spheroidal graphite cast iron.

key words : Austempred Spheroidal Graphite Cast Iron, Austempred gray cast iron,
Functionally Gradient Cast Iron

1 緒 言

複合材料¹⁾は、機能と特性が異なる2種類以上の材料をいろいろな方法で複合して得られ、新たな機能や特性を持つ材料である。現在まで多くの複合材料が研究・実用化²⁾されているが、最近、産業界ニーズの多様化に伴

い、傾斜機能や複合的な機能のある新たな複合材料の創成が望まれている。

鑄鉄系の複合材料は、鑄造や固相反応等³⁾を利用して造られるが、この中で鑄造による複合化、いわゆる「鑄ぐるみ」による方法は、容易で実用性が高い。例えば、

*金属材料部

電磁流量計³⁾にはステンレス鋼パイプを球状黒鉛鑄鉄で鑄ぐるんだ材料が、また、軟鋼を鑄鉄で鑄ぐるんだ材料が工作機械のしゅう動部³⁾や複合パイプ⁴⁾に使用されている。

一方、オーステンパ熱処理により基地組織をベーナイト化したオーステンパ球状黒鉛鑄鉄(ADI)⁵⁾は、強度や靱性および硬さに優れており、自動車・産業機械・建設機械等の各種部品として広く用いられ今後の用途拡大が期待されている。また、ベーナイト基地のねずみ鑄鉄は、一般のねずみ鑄鉄に比べて減衰性が非常に良好であることが報告⁶⁾されている。著者らは、ADIの優れた硬さと強靱性及びねずみ鑄鉄の減衰性に着目し、それぞれの鑄鉄の特性を高いレベルで備えた新規な複合機能鑄造材料開発を行った。

製造方法として、球状黒鉛鑄鉄をねずみ鑄鉄で鑄ぐるみ、更に、この複合材にオーステンパ熱処理を施す複合加工法を用いた。

本研究では、複合加工法で製造した複合機能鑄造材料の基本的な機械的性質について調べたので報告する。

2. 実験方法

(1) 鑄ぐるみ方法

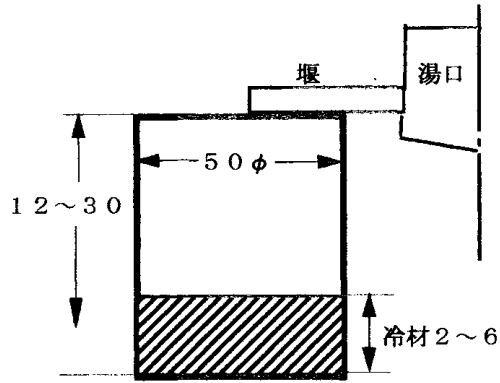
球状黒鉛鑄鉄をねずみ鑄鉄で良好に鑄ぐるむため、ねずみ鑄鉄溶湯の化学組成のうち炭化物生成元素であるP量やMn量の影響及び冷材と溶湯との体積比率の影響など基本的な項目について検討した。

鑄造方案は、図1(a)に示すように接触面が1面で一方方向に熱伝導が生じるものである。鑄ぐるみは、鑄型内に予め冷材として球状黒鉛鑄鉄(表1のFCDの化学組成)を置き、ここに各種ねずみ鑄鉄溶湯(表1のFC2を主としFC1で成分調整)を1723Kと1773Kで鑄込んだ。冷材の寸法は50φ×2~6mm、溶湯部分は50φ×24~28mmとそれぞれ変化させた。球状黒鉛鑄鉄を冷材としたのは、球状黒鉛鑄鉄の溶湯がねずみ鑄鉄に比較してチル化傾向(硬くて脆い炭化物として凝固する傾向)が高く、良好な鑄ぐるみができ難いためである。また、鑄型は主に珪砂(表2のFS)を骨材としたCO₂型を用いた。

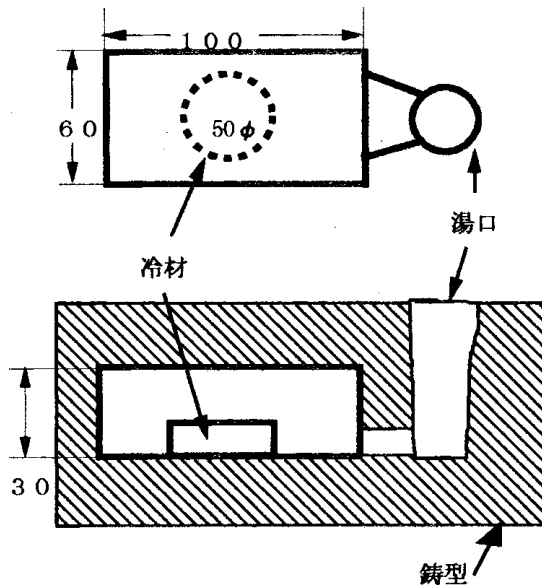
鑄ぐるみの良否は、得られた複合鑄鉄の融合部を切斷し顕微鏡組織により比較評価した。

表1 鑄鉄の化学組成 (mass%)

銘柄/元素	C	Si	Mn	P	S
FC1	4.42	2.32	0.44	0.13	0.036
FC2	4.18	2.09	0.25	0.053	0.023
FCD	3.71	2.81	0.27	0.019	0.011

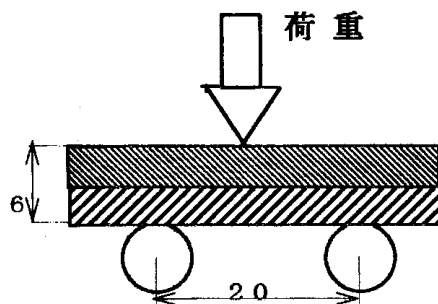


(a) 鑄ぐるみ条件試験用鑄造方法



(b) 曲げ試験片作成用鑄造方法

図1 鑄造方法 (単位: mm)



$$[\text{抗折力}(\text{N}/\text{mm}^2) = 3 \times \text{荷重} \times 200/2 \times \text{厚み} \times \text{幅}^2]$$

図2 曲げ試験方法

(2) 試験片の溶製と機械的性質

2.(1)に従い各種試験用複合鑄鉄を鑄造した。曲げ試験片は図1(b)により、冷材を50φ×6~9mmとする厚さ30×幅60×長さ100mmの鑄ぐるみ材を、引張試験片は円筒状の縦鑄込みにより、鑄造冷材を15φ×60mm

として30φ×120mmの鑄ぐるみ材をそれぞれ得た。なお、これらの鑄型骨材にはセラミック砂(表2のSB)を用い、注湯温度を1723Kとした。

複合鑄鉄は、接合面が中央となるように留意して、曲げ試験片は厚さ6×幅8×長さ30mm、引張試験片は13φ×95mm(ネック部12mm)に、それぞれ加工した。

その後、各試験片を、1173K×1hrのオーステナイト化後、スズ浴法⁷⁾により573K・673K×1hrで急冷・恒温保持し、空冷してオーステンパ熱処理を行った。

曲げ試験は、図2に示すようにスパン間を20mmとし、複合鑄鉄の主材質は2種類であるので、荷重方向を表裏の2方向とした。また、比較のため、オーステンパ処理ねずみ鑄鉄(AFC)とオーステンパ球状黒鉛鑄鉄(ADI)単体の試験も行った。

3. 実験結果及び考察

(1) 鑄ぐるみ条件について

① 体積比率について

良好な鑄ぐるみが可能な、冷材と溶湯との体積比率の範囲について図1-(a)の鑄造方法により検討した。その結果、珪砂(表2のFS)を骨材とした鑄型では、鑄込み温度1723Kで1/6.5~1/9であった。更に比率を上げるために、鑄込み温度を1773Kに上昇すると冷材側の融合面に溶損による凹凸部が生じ、均一な融合面を得ることは難しかった。そこで、体積比率を上げるため、熱伝導率が珪砂の8割のセラミック砂(表2)を鑄型骨材として用いた。その結果、1/5~1/6.5まで体積比率を上げることができた。それらの結果を表3に示す。

表2 鑄型骨材の物性

項目 種別	耐火度 SK	見掛 比重	単位容積重量 g/cm ³	気孔率 %	熱膨張係数 ×10 ⁻⁶	熱伝導率 Kcal/m·hr·°C
FS	34	2.64	1.55	0.18	9.7	0.223
SB	37	2.91	1.68	4.10	5.1	0.183

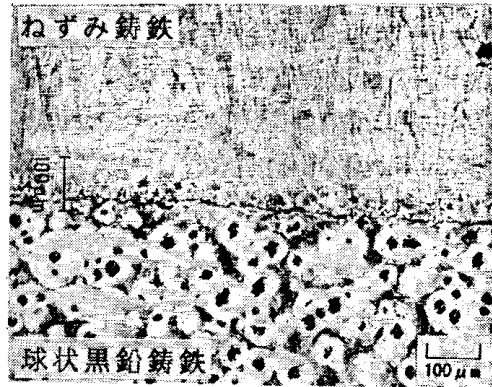
(FS:珪 SiO₂ 98%, SB:セラミック砂(Al₂O₃ 60%-SiO₂ 36%))

表3 体積比率と鑄ぐるみの良否(単位:mm)

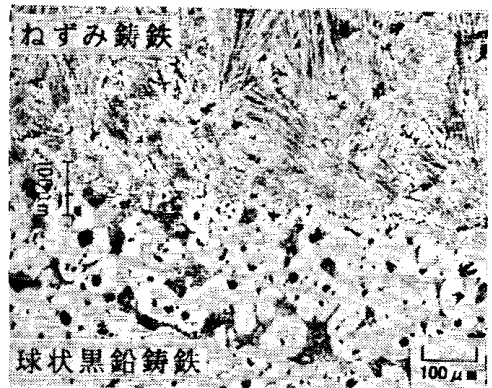
冷材 厚さ	溶湯分 の厚さ	体積比 率	鑄ぐるみの良否	
			珪砂	セラミック砂
2	28	1/14	× 融鉄	
3	27	1/9	○	△ 融鉄
4	26	1/6.5	○	○
5	25	1/5	×	○
6	24	1/4	×	×

○良、×否、△やや良

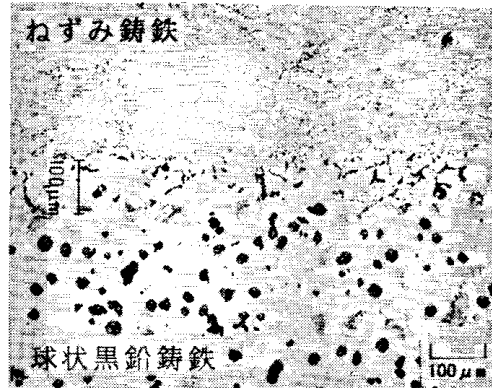
また、珪砂とセラミック砂鑄型による融合面の違いは、セラミック砂鑄型を用いた方が中間層であるCV黒鉛鑄鉄層が100~150μm明確に形成されることである。このことは、セラミック砂鑄型による材料の方が機械的性質が安定化すると予測され、以後の試験片の溶製にはセラミック砂を骨材とした鑄型を用いた。



3-1 未融合界面



3-2 チル発生界面



3-3 良好な融合界面

図3 冷材との融合界面

② ねずみ鑄鉄のP量とMn量の影響

ねずみ鑄鉄溶湯のP量とMn量による鑄ぐるみへの影響について、珪砂鑄型を用いて検討した。但し、冷材と溶湯との体積比率は1/9とした。P量0.1%以上、Mn量0.4%以上のねずみ鑄鉄溶湯を鑄込んだ場合は、図3-1に示すように冷材との界面に指向性のあるチルが生成して融

合されず、铸ぐるみは不可能であった。また、この対策として、铸込み直前に Fe-Si (75%合金) で接種を行い黒鉛化能を高めた溶湯を铸込んだが、図3-2に示すようにわずかな融合は認められるが、界面からチルが発生し良好な铸ぐるみはできなかった。次に、P量0.053%、Mn量0.25%の FC2(表1)のねずみ铸铁を铸込むと、図3-3に示すように冷材との融合が可能となり、良好に铸ぐるむことができた。また、この場合は、融合面に芋虫状黒鉛の晶出層が約100 μ m形成されているのが観察される。この層は球状黒鉛铸铁とねずみ铸铁との中間的な機械的性質を示す CV 黒鉛铸铁の層であり、両铸铁の緩衝層として有効に機能することが期待できる。

③ オーステンパ熱処理結果について

溶製材を試験片寸法に加工後、スズ浴法によるオーステンパ熱処理を行った。各試験片には歪みや割れ等の発生が見られることなく、図4に示すようにペーナイト化処理温度573K では、各部分とも均一な下部ペーナイト組織が得られた。

一般に、複合材は構成する材料の物性の違いにより、熱処理時の応力発生に伴って、界面での割れや材料自体の破損が懸念される。しかし、この铸铁同志の複合材は、化学組成や熱物性値等が類似し、しかも融合面に物性値(表4)が両者の中間的な芋虫状黒鉛を有する CV 黒鉛铸铁が 100~150 μ m 程生成され、熱伝導率の差が小さいこと等により割れや歪みの発生は起こらないものと考えられる。

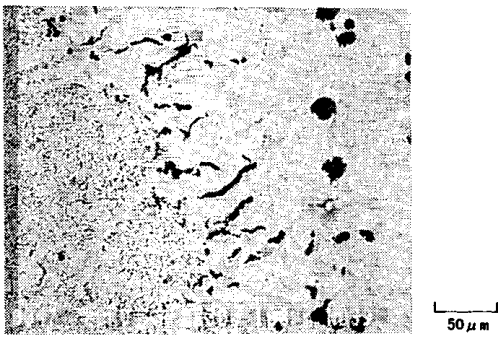


図4 オーステンパ処理後の界面の顕微鏡組織 (ペーナイト化573K×1hr、SEM像)

表4 各種铸铁材の物性値

性質\材種	FC	CV	FCD
引張強さ N/mm ²	150~400	>300	350~900
0.2%耐力 N/mm ²	—	>250	250~600
伸び%	<1.5	>2	3~25
抗圧力 N/mm ²	500~1400	600	600~1200
ブリネル硬さ	140~300	<160	120~350
ヤング率 kN/mm ²	75~155	140~155	165~185
熱伝導率 ×10 ² cal/cm·sec·°C	11~14	9~12	6~9
線膨張係数 ×10 ⁻⁶ mm·°C(20~200)	11~12	12~14	11.5~13

FC:ねずみ铸铁、 CV:CV 黒鉛铸铁、
FCD:球状黒鉛铸铁

(2) 機械的性質

① 曲げ試験

ペーナイト化573K 処理の複合機能铸造材料の曲げ試験結果を図5に示す。ADI 単体で2800N/mm²の抗折力が、下側を ADI とした場合は2000N/mm²であり単体の7割の高い強度が得られる。しかし、下側を AFC とした場合は650N/mm²で、AFC とほぼ同等の低い強度となる。一方、ペーナイト化673K 処理材では、基地が上部ペーナイト組織となるため、下側を ADI とした場合、前者と同様に、単体(2300N/mm²の値)の7割の高い強度が得られる。下側を AFC とした場合は、前者と同じレベルで低い強度である。

この複合機能铸造材料は、このように強度に方向性がある。図6は破断の仕方の模式図であり、下側を AFC とした場合は、下側に加わる張力で片状黒鉛の端部に応力が集中(切り欠け効果)して、高強度なペーナイトでも割れが発生し破断してしまう。これは、図7の破断面の電子顕微鏡写真に示す様に、AFC 側の破断面に黒鉛が多く観察されることから推察される。一方、強度的に強い ADI 側は、AFC 破断後も荷重をかけ続けることにより、伸びて変形する。そして、荷重をさらに加えると、中間層(CV 黒鉛铸铁層)が荷重方向と垂直に破断する。これに対して、下側を ADI とした場合は、強靱なペーナイト組織の ADI は張力に対抗すること、そして抗圧力が高い AFC(表4に示す FC、当然 AFC も抗圧力が高い)が圧縮に対抗することなど、複合化して抗折力を高めていると考える。

球状黒鉛铸铁とねずみ铸铁との間に形成される CV 黒鉛铸铁層は、両者の中間的な物性を示し、応力の緩衝相として作用して、複合機能铸造材料の抗折強度を制御し

ていると思われる。また、この層の生成を制御することにより、機械的性質を更に向上できると考える。

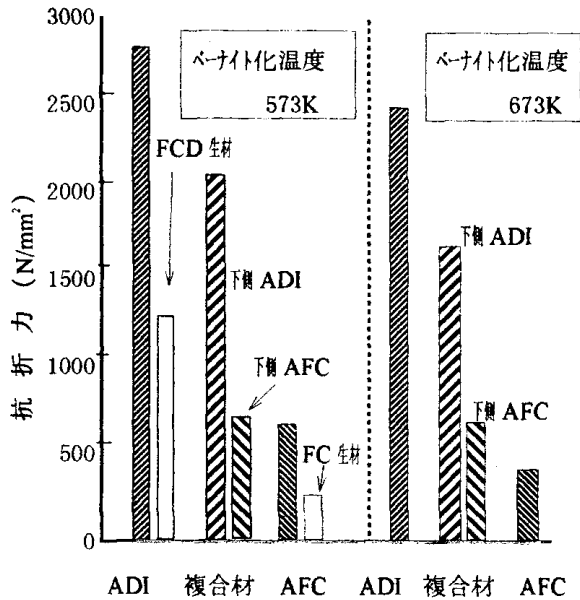


図5 曲げ試験結果

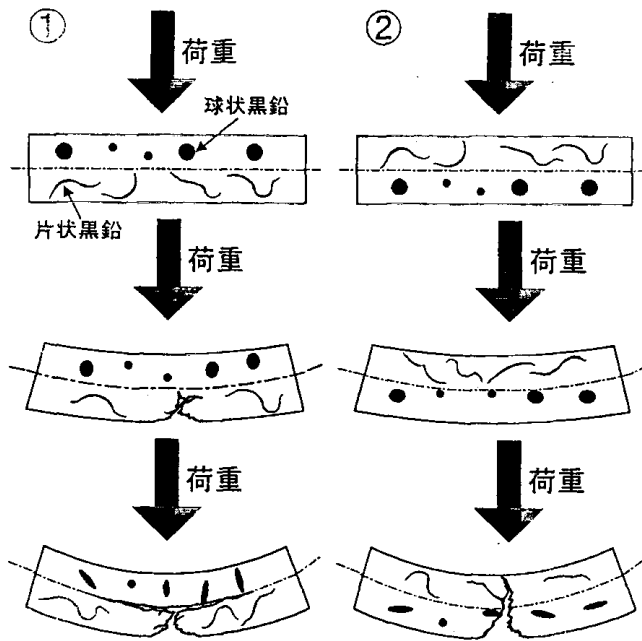


図6 破断の仕方

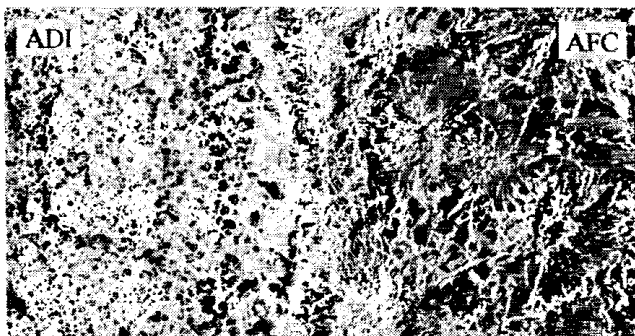


図7 破断面の様子(SEM像)

0.5mm

② 引張り試験

引張試験結果を、複合機能鑄造材の非熱処理材(生材)も含めて図8に示す。複合機能鑄造材の値は、いずれもAFC単体より小さく、230~290N/mm²(573K処理)程度である。また、破断は予測されるようにねずみ鑄鉄側で生じ、従って引張強さはAFCと近い値となる。破断箇所を調べると、融合界面近傍ではなく、内部の黒鉛が粗くなっている部分で起こっている。これは、融合界面のねずみ鑄鉄の黒鉛サイズが、球状黒鉛鑄鉄により急冷されるため微細で、界面から遠い箇所では黒鉛が粗くなるためである。

③ 硬さ試験

複合材の硬さ試験結果を図9に示す。硬さは高く、単体のADI及びAFCと同等である。573K処理でADI側は44~46HRC、AFC側で35~38HRC、673K処理ではADI側は40~43HRC、AFC側で30~33HRCである。中間層のCV黒鉛鑄鉄部は100μm程の厚さであり、硬さの測定は不可能であったが、AFCとADIの中間的な値と予測される。

このように、硬さはADIとAFC側では異なり、材料として硬さに勾配があることが分かる。

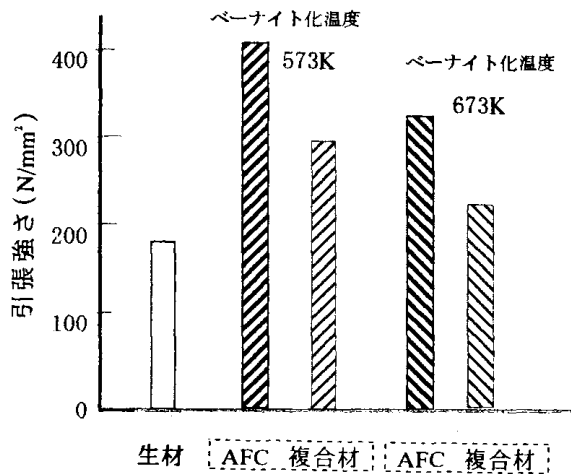


図8 引張試験結果

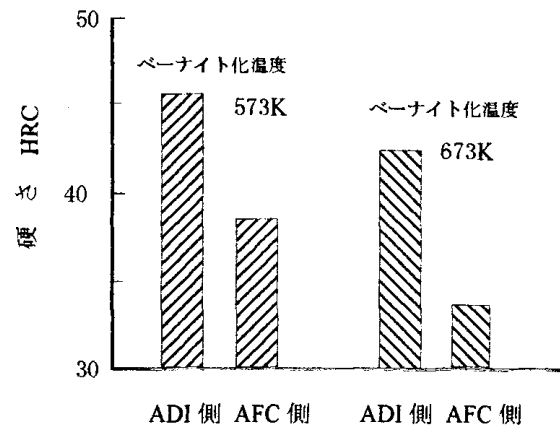


図9 硬さ試験結果

4. 結 言

球状黒鉛鑄鉄をねずみ鑄鉄で鑄ぐるみ複合化し、更にオーステンパ熱処理を施す複合加工により、複合機能鑄造材料を開発し、その機械的性質を調べた結果を得た。

また、この複合機能鑄造材料は同族の鑄鉄同志の複合材であり、リサイクルが非常に容易と考えられる。

- (1) 球状黒鉛鑄鉄をねずみ鑄鉄により鑄ぐるみ、良好な融合面を得るには、セラミック砂を骨材とした鑄型が適しており、冷材と溶湯との体積比は1/5~1/6.5である。
- (2) ねずみ鑄鉄溶湯のP量0.06%以下・Mn量0.3%以下で良好な鑄ぐるみが可能である。
- (3) 良好な鑄ぐるみ面に、100~150 μ m程度の間層(CV黒鉛鑄鉄層)が形成される。
- (4) 複合鑄鉄のスズ浴法によるオーステンパ熱処理では、歪みや割れ等の発生は生じなかった。
- (5) 抗折力は下側をオーステンパ球状黒鉛鑄鉄とした場合は2000N/mm²と高く、逆に下側をオーステンパねずみ鑄鉄とした場合は650N/mm²と低く強度に方向性がある。
- (6) 引張強さはオーステンパねずみ鑄鉄より低い230~290N/mm²である。
- (7) 硬さは高く勾配があり、オーステンパ球状黒鉛鑄鉄側で40~46HRC、オーステンパねずみ鑄鉄側で30~38HRCである。

本研究開発は、平成4年に制定された『特定中小企業集積の活性化に関する臨時措置法』に基づく水沢地域集積活性化事業を支援するため、中小企業事業団の特定中小企業支援技術開発事業として岩手県が委託され実施したものである。

事業の推進に対し、東北通商産業局久保田保技術振興課長に懇切なるご指導賜り謝意を表す。

また、研究を推進するに当たり、室蘭工業大学片山博教授、千葉大学青木弘行教授、岩手大学岩淵明教授・水野雅裕助教授、工業技術院機械技術研究所井上英夫部長(現、中央大教授)、同東北工業技術研究所前首席研究官岡田豊明氏、他多くの方々にご指導を得たことを記し厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 三浦編:「金属複合材料」共立出版(1973)
- 2) 桃野:鑄物62(1990)405
- 3) 桃野:日本鑄物協会東北支部大会講演概要(1991)
- 4) 鴨田、野口:鑄物64(1992),26
- 5) 塩川:鑄物56(1984),362
- 6) 渡辺、沓沢:秋田県工業技術センター
研究報告昭和63年度
- 7) 勝負澤、茨島、池、高川:岩手県工業技術センター
研究報告4号(1997)p43