電子ビーム溶接による鋳鉄の溶接性と高ニッケル鉄合金を介した軟鋼との接合

Electron Beam Welding Characteristics of Cast Iron and Bonding of Mild Steel to Cast Iron by using Iron-base Alloy of High Nickel Content

旗手 稔*・塩田俊雄*・長寄羊一*・阿部信行**・天野昌春***・田中俊夫***

Minoru HATATE, Toshio SHIOTA, Yoichi NAGASAKI, Nobuyuki ABE, Masaharu AMANO and Toshio TANAKA

(Received September 26, 2007)

Bonding characteristics of mild steel to cast iron using electron beam welding (EBW) process are investigated from the viewpoint of microstructure and mechanical properties. When the electron beam is radiated to a cast iron, remelting of the surface and corresponding rapid cooling take place, and it results in formation of brittle fine-cementite structure whose hardness is over 700 Hv. As Ni is an alloying element that may prevent formation of cementite, we compare two kinds of welding methods with Ni addition. One method is EBW process, radiating the electron beam to a thin plate made of spheroidal graphite cast iron with a high Ni content after the plate inserts between cast iron and steel, and other one is a metal active gas (MAG) welding process using a Fe-Ni wire. Bonding tensile strength by EBW process is higher than that by MAG welding process. In case of welding of cast iron and other metallic material, EBW process is found to be more advantageous than MAG welding process.

Key Word: Electron Beam Welding, Cast Iron, Microstructure, Mild Steel, Bonding Tensile Strength

1. 緒言

鋳鉄は鋳造技術によって溶製されるため、設計する上で形状に制約を受けない特徴を持つ理由から、広く構造部材に適用されている。しかし、最近では設計要求として鋼材などの異種材料との接合による部材のコンパクト化が課題となっている。

ところで、鋳鉄は難溶接材として知られており、溶接する場合には、再溶融に伴う急冷凝固によるセメンタイト化を回避しなければならない。この問題を解決するために、溶射皮膜を介した固相接合法^{1,2)}、インサート材を介した溶接法^{3,4)}、溶接材を工夫した溶接法^{5,6,7)}などが研究されているが、まだ検討段階のものが多い。

そこで、本研究では被溶接材の熱影響が小さく、かつ高エネルギー密度熱源ビームの得られる電子ビーム溶接法を適用し、鉄系鋳造材に電子ビームを照射して、まず基本的な溶接性を把握することにした。そして、大過冷が伴う凝固条件でもセメンタイト化しない高ニッケル (Ni) 鋳鉄をインサートして球状黒鉛鋳鉄と鋼材の電子ビーム接合を行

い、両材料を市販の Fe-Ni 合金ワイヤーで MAG (Metal Active Gas) 溶接した場合と比較した。

2. 実験方法

鉄系鋳造材の電子ビーム溶接した場合における基本的条件を把握するために、板厚 15 mm のねずみ鋳鉄 (FC300) と球状黒鉛鋳鉄 (FCD450) と、鋳鋼の中では溶接が難しいとされる 1% Mn 鋳鋼 (SCMn2H) を使用した。供試材の化学組成及び組織を、Table 1 及び Fig. 1 に示す。溶接条件は、約 5 Pa の圧力中で加速電圧 70 kV、溶接速度 10 mm/s としてビード・オン・プレートで溶接し、ビーム電流及び a_b 値⁸⁾ (ビーム焦点の指標であり、ビーム活性変数である) を変化させて、溶接入熱を変化させた。

FCD450 と鋼材 (SS400) の電子ビーム溶接は、1 mm 厚さの板状の 35% Ni を含有する球状黒鉛鋳鉄をインサートし、そのインサート材の中心に照射して行った。また、板厚 12 mm の FCD450 と SS400 を Fe-40% Ni 合金ワイヤーによる MAG 溶接を行った。溶接は、開先なしの FCD450 と、SS400 に開先角度 45 度を付けてルート・ギャップを 3

* 近畿大学工学部機械工学科 (〒 739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Kinki University
(#1 Takayama-nobe, Higashihiroshima-city, Hiroshima, 739-2116 Japan)

** 大阪大学接合科学研究所 (〒 567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047 Japan)

*** コマツ生産技術開発センタ (〒 573-1011 枚方市上野 3-1-1)

Manufacturing Engineering Development Center, Komatsu Ltd. (3-1-1 Ueno, Hirakata-city, Osaka 573-1011 Japan)

Table 1 Chemical composition of material used (%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Mg
FC300	3.10	1.74	0.86	0.045	0.018	—
FCD450	3.68	2.67	0.31	0.044	0.010	0.032
SCMn2H	0.41	0.40	1.07	0.013	0.005	—
SS400	0.16	0.12	0.53	0.015	0.005	—

Fig. 1 Microstructure of material used.

mm にして突き合せ、裏当て材（SS400）を置いた状態に、シールドガスとして CO_2 ガスを流入させて溶接電圧 40V、溶接電流 300 A と 305 A でそれぞれ 2 層盛りの条件で行った。なお、溶接後のビード断面における組織と硬さ分布（以下、マイクロビッカース硬さは HV 0.1 の条件ですべて測定した）及び接合引張強度を調査した。

3. 実験結果及び考察

3.1 電子ビーム溶接のビード・オン・プレートにおけるビーム電流、 a_b 値の影響

板厚 15 mm の FC300、FCD450、SCMn2H をビード・オン・プレートでビーム電流を変えて電子ビーム溶接したビード断面の形状を、**Fig. 2** に示す。各試料共に、ビーム電流が大きくなるに従って、溶け込み深さは大きくなり、ビード幅も大きくなるが、ビームが照射された表面における熱影響を受けた幅はあまり変化していない。このビード幅は、FCD450、FC300、SCMn2H の順に大きくなっている。板厚 15 mm のこれらの試料を溶接するには、80 mA 以上の電流が必要となることがわかった。**Fig. 3** に、90 mA の電流とした場合における各供試材の硬さ分布を示す。照射した電子ビームの深さ方向における中心を 0 とし、照射表面から約 1 mm 深さにおける照射ビームと垂直方向の断面の硬さ分布を示している。FC300 及び FCD450 の溶融部は 800 から 1000 HV を示し、非常に硬くなっており、一方 SCMn2H では 600 から 800 HV である。溶融部及び熱影響部における顕微鏡組織の代表的なものを、**Fig. 4** に示す。FC300 及び FCD450 は再溶融後に急速冷却によるセメンタイト化し、SCMn2H はマルテンサイト化している。この入熱による組織変態によって、**Fig. 3** に示したように、硬さがそれぞれ上昇する。

ビーム電流を 100 mA で一定にして、 a_b 値を変化させた

Fig. 2 Macrostructure on the cross-section of bead. (70kV, a_b value : 1.05) **Fig. 3** Hardness distribution on the cross-section of bead. (70 kV, 90 mA, a_b value : 1.05) **Fig. 4** Typical microstructure on the cross-section of bead.

Fig. 5 Macrostructure on the cross-section of bead. (70 kV, 100 mA)

Fig. 6 Change in bead width and depth as a function of a_b value. (70 kV, 100 mA)

場合におけるビードの断面形状を、Fig. 5 に示す。 a_b 値が 0.85 と小さい場合には、ビームが照射される表面でビードが大きく拡がっており、0.95 以上でなければビードの深さは 15 mm 以上にならない。ビード形状は a_b 値の影響として、照射表面の幅が大きく変化することが認められる。そこで、 a_b 値が変化した場合におけるビード幅の変化を、Fig. 6 に示す。この図の黒印はビードの深さが 15 mm 以下であり、白印は 15 mm 以上であることを示している。 a_b 値が 1 付近で、電子ビームは最もシャープになるので、その状況がよく現れている。しかし、その a_b 値の影響は、FCD450 と SCMn2H 及び FC300 とは相違している。試料表面にビームが照射されると、FCD450 ではあまり拡がらずにビーム

Fig. 7 Change in tensile strength, hardness and width of bead as a function of a_b value. (70 kV, 120 mA)

は深さ方向に進行し易いが、SCMn2H 及び FC300 はある程度、試料表面でビームが拡がりながら深さ方向へ進行し易い結果となっている。この図に示したように、同じ入熱条件で熱影響が試料によって異なるのは、FCD450 の方が SCMn2H 及び FC300 より熱伝導率が低いことに起因すると考えられる。

次に、ビームの照射電流を 120 mA にして、 a_b 値が 1 から 1.4 の範囲における FCD450 及び SCMn2H のビード幅、ビード中心部の平均硬さ及び引張強さを測定した。なお、 a_b 値が 1 より大きくなり、特に a_b 値が 1.2 より大きくなると、照射面の上部に凹部が残るようになるため、この凹部を研磨除去した後に引張試験と硬さ試験を行った。この結果は Fig. 7 に示すように、ビードの中心における硬さは、FCD450 では再溶融によって生成したセメントタイトの硬さであり、800 HV 程度であるが、硬さは a_b 値が大きくなるに従って低下する傾向がある。一方、SCMn2H の硬さはマルテンサイトの生成による約 550 HV であり、 a_b 値によって大きく変化しない。引張強さは、FCD450 及び SCMn2H

Fig. 8 Microstructure of fused zone. (70 kV, 120 mA)

共に、 a_b 値によってほとんど変化せず、平均するとそれぞれ 377 MPa、658 MPa である。SCMn2H はすべて溶接部ではなく、母材での破断であるが、FCD450 ではすべて溶接部における熱影響部で破断している。 a_b 値が 1.10 及び 1.30 の場合における溶融部の顕微鏡組織を、Fig. 8 に示す。FCD450 では a_b 値が大きくなると、電子ビーム照射後の冷却速度が小さくなり、晶出するセメンタイトの間隔がやや大きくなっており、このために硬さが低下すると考えられる。SCMn2H の場合には、マルテンサイトのラス間隔はほとんど変化していないので、硬さはあまり変化しないと判断される。

3.2 FCD450 と SS400 の溶接に使用するインサート材の検討

前項において、ビーム照射条件として電流及び a_b 値を変化させた検討によって、電子ビーム溶接できることが認められた。しかし、FCD450 では溶融部のセメンタイト化は防止できない。このセメンタイトの晶出を防止するには、試料の予備加熱及びビームのオシレーションを組み合わせることや、1 回ではなく数回のビーム照射、タンデムの溶接などが考えられる。ここでは、インサート材の工夫によってその防止を検討することにした。

急冷によるセメンタイト化を回避する方法として、Fe-C 系共晶凝固に及ぼす第 3 元素の影響から考え⁹⁾、大過冷が起り得る条件でもセメンタイト化（オーステナイト-セメンタイト共晶凝固）することなく、黒鉛化（オーステナイト-黒鉛共晶凝固）するインサート材を選定する必要がある。この共晶凝固における黒鉛化を促進させる元素として、Si がよく知られている。しかし、4%以上の鉄系合金では脆化が著しくなり、かつ鋳造性が悪くなってインサート材の溶製も難しくなる。Cu や Al は鉄に対する固溶に限界がある。その点で Ni は、鉄に対する固溶限はなく、かつ約 35% 程度の含有量とすれば、オーステナイト単相となる。特に、35% 付近ではインバー効果による低熱膨張材¹⁰⁾であり、固相接合における応力緩和材として使用されている。これらのことから、35% Ni を有する球状黒鉛鋳鉄

Fig. 9 Hardness distribution and microstructure on the cross-section of high Ni FCD radiated electron beam.

(1.8% C、1% Si) を溶製し、インサート材に適用することにした。

まず、溶製した 35% Ni を有する球状黒鉛鋳鉄自身の溶接性を把握しておく必要がある。ビード・オン・プレートで電子ビームを照射した場合における SEM による組織観察結果及び硬さ分布を、Fig. 9 に示す。溶融部の硬さは 400 HV 程度であり、引張強さは 360 から 396 MPa となっており、溶接状況は良好である結果を得た。溶融部を高倍率で観察した組織は、微細な樹枝状晶オーステナイトと 1 から 3 μm の非常に小さい黒鉛が再分布して構成されていることがわかった。この Fig. 9 における SEM 観察した水平方向の範囲内で EPMA による Ni 濃度分布を測定したところ、Ni の濃度は溶融部でやや低下するが、平均濃度に対する変化はほとんど認められることなく、ビーム照射による再溶融の影響は小さいこともわかった。

3.3 FCD450 と SS400 との溶接

溶製した 35% Ni を有する球状黒鉛鋳鉄を切断してフライス加工、砥石による仕上げ加工を施し、1mm 厚さの板状のインサート材を作製した。そして、FCD450 と SS400 の

HAZ (FCD450 side)

HAZ (SS400 side)

Fig. 10 Hardness distribution of FCD450/SS400 welded by MAG using a Fe-40%Ni wire.

間にそのインサート材を介して電子ビーム溶接を行った。条件は 115 mA で、 a_b 値は 1.3 である。また、比較として、Ni を 40% 含む市販の Fe-Ni ワイヤで MAG 溶接も行った。**Fig. 10** に、MAG 溶接した場合における硬さ分布及び組織の SEM 観察結果を示す。MAG 溶接の場合には、45 度の開先を付けて溶接したので、熱影響を受けた範囲は同図の -5 から 3 mm までの約 8 mm になっており、溶融部の硬さは母材とほとんど変わらない 200 HV 程度である。FCD450 側の熱影響部にはセメンタイト化したところと、マルテンサイト化したところが混在しており、700 HV の硬い部分が認められる。

一方、電子ビーム溶接の場合は **Fig. 11** に示すように、セメンタイト化は完全に防止できている。熱影響を受けた範囲は約 1mm であり、溶融部は 300 HV 程度の硬さであり、FCD450 側の熱影響部は黒鉛を囲むようにマルテンサイトが生成しており、約 550 HV の層が存在する。

高 Ni 鉄合金を使用して、鋳鉄の溶接時に問題となるセメンタイトの晶出を小さくした 2 種類の溶接方法によって両者の特徴が現出されるように配慮して、FCD450 と SS400 を溶接した。接合引張強さは、溶接条件やインサート材が違うために、簡単には比較することができないものの、電子ビーム溶接では約 400 MPa を示し、MAG 溶接では約 350 MPa の結果となった。いずれも FCD450 側の熱影響部で破断した。この組織変化が強度の差に現れたものと考えられる。このように、熱影響が問題となる鋳鉄などの難溶接材

HAZ (SS400 side)

HAZ (FCD450 side)

Fig. 11 Hardness distribution of FCD450/SS400 welded by an electron beam inserted high Ni FCD.

には、熱影響が少ない電子ビーム溶接の方が MAG 溶接より有利であるといえる。

4. 結言

本研究では、被溶接材の熱影響が小さく、かつ高エネルギー密度熱源ビームの得られる電子ビーム溶接法を適用して鉄系鋳造材の基本的な溶接性を調査した。そして、高 Ni 球状黒鉛鋳鉄をインサートし、球状黒鉛鋳鉄と鋼材の電子ビーム溶接した結果を要約すると、以下のようなものである。

- 1) ビード幅は、FCD450、FC300、SCMn2H の順に、大きくなる。
- 2) FCD450 の溶融部はセメンタイト化によって硬さが 800 から 1000 HV を示し、SCMn2H ではマルテンサイト化によって硬さが 600 から 800 HV となる。
- 3) FCD450 及び SCMn2H のビードの平均硬さは、FCD450 では a_b 値が大きくなるに従って低下する傾向があるが、SCMn2H では a_b 値によって大きく変化しない。引張強さは、FCD450 及び SCMn2H 共に、 a_b 値によってほとんど変化せず、それぞれ平均すると 377 MPa、658 MPa である。
- 4) 1mm の厚さの 35% Ni を含む球状黒鉛鋳鉄をインサートして電子ビーム溶接すると、セメンタイト化は防止できる。接合引張強さは約 400 MPa の良好な接合体が得られる。熱影響が問題となる鋳鉄などの難溶接材には、熱影

電子ビーム溶接による鋳鉄の溶接性と高ニッケル鉄合金を介した軟鋼との接合（旗手・塩田・長寿・阿部・天野・田中）

響が少ない電子ビーム溶接の方が MAG 溶接より有利であるといえる。

引用文献

- 1) 鴨田秀一、酒井昌宏、宮腰康樹、田頭孝介：日本金属学会誌、55(1991) 459-463
- 2) 屋良秀夫、生田明彦、藤木大輔：溶接学会論文集、11(1993) 474-478
- 3) 迎静雄、西尾一政、加藤光昭、中村憲和：溶接学会論文集、8(1990) 97-104
- 4) 柴田文男：鋳物、64(1992) 9-14
- 5) 平塚貞人、堀江皓、中村満、小綿利憲、青沼昌幸、小林竜彦：鋳物、70(1998) 860-865
- 6) 宮本剛汎、成田英記、工藤博明：鋳物、69(1997) 599-606
- 7) 糸村昌祐、平敷兼貴、松田福久：溶接学会論文集、3(1985) 789-795
- 8) 荒田吉明、西口公之 共著：“溶接法の基礎”、産報出版、(1979) 63-64
- 9) 香川明男、岡本平：鋳物、57(1985) 113-119
- 10) 旗手稔、塩田俊雄、炭本治喜、中村幸吉：鋳物、66(1994) 809-814