溶射皮膜をインサート材とした鋳鉄と炭素鋼の固相接合*

—フレーム溶射に関する研究 (第4報)—

屋良 秀夫**, 生田 明彦***

Joining of Ductile Cast Iron and Carbon Steel with Thermal Spray

Coating of Ni Based Self-Fluxing Alloy*

—Study on Flame Spraying (Report 4)—

by Hideo Yara** and Akihiko Ikuta***

The solid phase joining of ductile cast iron (FCD 600) and carbon steel (SS 400) was carried out using thermal spray coating of nickel based self-fluxing alloy under atmospheric conditions for basic data. The size of joining specimen is 50 mm in length and 10 mm in diameter. After the each edged surface of FCD600 and SS400 specimens were blasted by used steel grid material sized No. 100, those were sprayed with self-fluxing alloy (S.F.A.) at the each surface of both specimens coated about 100 μm in thickness.

The effects of joining conditions on the structure and strength of joints were studied. The joints with excellent metallographic structures were obtained at the joining temperature near the melting point of the spray material.

The results are as follows:

- (1) The maximum tensile strength at the joint part was more than 500 MPa under conditions of 50 sec raising time and 40 sec holding time at 1223 K temperature.
- (2) The Vickers hardness distribution near the joining zone of FCD 600 was between Hv250 and Hv340. That was a little bit higher than base metal.
- (3) The microstructure near the joining zone of FCD 600 did not indicate transformation to white pig iron because of its lower cooling rate. The structure around graphite was ferrite and the base metal was pearlite structure.
- (4) By the EPMA line analysis across the joining zone of FCD 600, Cr, Ni and B were not observed because the inserted material S.F.A. was a very little diffused and the most of it was discharged out of the jointed part.

Key Words: Solid phase joining, Ductile cast iron, Carbon steel, Ni based self-fluxing alloy, Thermal spray coating, EPMA line analysis, White pig iron, Joining tensile strength

1. 緒 言

諸工業の発達により低価格で高品質な製品が要求されているが、単一材料ではコストがかかるため、それを低減する意味から異種金属の接合による材料の開発が注目されている¹⁾。異種金属の接合として、特に鋳鉄と他の金属との接合において鋳鉄本来の機能を失うことなく高度に接合する場合には、従来の溶融溶接で行うと鋳鉄母材は炭素の含有量が多いことより局所的な急速加熱、急速冷却の熱サイクルを母材に与えるため、溶接金属部には白鉄化、溶接熱影響部にはマルテンサイト化を生じ、延性や靱性の低下をもたらす溶接性がきわめて悪い状態となる²⁾。また、電子ビーム溶接法やレーザービーム溶接法では溶接部に大きな熱を与え、圧接法では大きな力を必要とするため、材料の著しい変質や変形が避けられない場合が多い³⁾。

著者らは前報⁴⁾において、自溶性合金粉末材料をインサート材として溶接が困難な鋳鉄の接合を高周波誘導加熱装置を用いて固相接合を行い、機械的性質と冶金的性質

について検討した。その結果、接合部の強さは素材の引張強度の約85%もあり、また温度制御によって接合部近傍の組織は冷却速度を遅くすることができるため白鉄化が見られず、良好な接合部が得られたことを報告した。

これまで同種金属や異種金属に関する固相接合では、一般に真空容器内やある雰囲気内で原子の拡散現象を利用しての実験が行われているが⁵⁻⁷⁾、本研究においてはインサート材を用いて大気中で接合実験を行った。そこで、本研究では鋳鉄と炭素鋼の異種金属の接合において、Ni系の自溶性合金粉末溶射材料を接合両端面に溶射しインサート材として、試験片の端面を突合せ拘束したのち、高周波誘導加熱装置で接合部を温度制御しながら加熱し、インサート材である溶射皮膜部を再溶融凝固させることによって鋳鉄と炭素鋼の異種金属の接合を行い、さらに温度制御によって徐冷を行った場合の接合条件や自溶性合金粉末溶射材料がインサート材としての接合性について検討したものである。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料および実験条件

本実験に用いた素材は球状黒鉛鋳鉄(FCD600、鋳鉄と略す)と一般構造用圧延鋼材(SS400、炭素鋼と略す)、インサート材は前報⁴⁾と同様にNi系の自溶性合金粉末溶射材料(MSFNi4相当—Self-Fluxing Alloy, S.F.A.)

*原稿受付 平成6年5月23日 平成4年度秋季全国大会で発表

**正 員 琉球大学 Member, University of the Ryukyus

***正 員 川崎重工(株) Member, Kawasaki Heavy Industries, LTD.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties.

(1) Chemical compositions (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cr	Mo	Cu	B	Fe
FC 600	3.55	2.38	0.61	0.023	0.012	0.045	—	—	—	—	—	Bal.
SS 400	0.17	0.03	0.88	0.014	0.013	—	—	—	—	—	—	Bal.
S.F.A.	0.80	4.5	—	—	—	—	Bal.	15.0	4.0	2.0	3.3	4.5

Melting point : FCD 600 (1353K), S.F.A. (1273K)

(2) Mechanical properties

	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers hardness (Hv)
FC 600	~	587.0	5.8	281
SS 400	274.4	487.1	28.0	127

Table 2 Spraying condition.

		S.F.A.
Oxygen (O ₂)	Pressure(MPa)	0.343
	Supply(m ³ /hr)	2.5
Acetylene (C ₂ H ₂)	Pressure(MPa)	0.0980
	Supply(m ³ /hr)	1.5
Air pressure(MPa)		0.274
Quantity of powder(kg/hr)		10
Distance(mm)		180~230
Thickness(μ m)		100

Fig. 1 Shape and size of specimen.

Fig. 2 Experimental apparatus of bonding.

Fig. 3 Shape of tensile specimen.

と略す)で、それらの化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。Fig. 1 は接合実験に用いた試験片形状を示したもので、直径10 mm、長さ50 mmである。接合部の両端面を直圧式プラスト装置を用いて、プラスト圧392 KPa、スチールグリッド No. 100 でプラスト前処理を行ったのち、Table 2 に示すような溶射条件で粉末式溶射ガンを使用し、燃料ガンとして酸素とアセチレンを用いて膜厚が約100 μm になるように溶射を行った。

2.2 実験装置および実験方法

実験に用いた固相接合装置は、前報と同様に Fig. 2 に示すような接合部を再溶融させるための高周波誘導加熱装置、加圧力と熱膨張による圧縮力を測定するためのロードセル、接合部の温度測定のための CA 熱電対、温度と圧力の記録を行うためのペンレコーダ、両試験片の軸心を一致させるための耐熱ガラスなどから構成されている。接合部近傍の最高加熱温度は S.F.A. の融点近傍の 1223 K と一定にし、最高到達温度までの昇温時間が50 s のとき最高温度での保持時間を20, 30, 40 s、また昇温時間が70 s のとき保持時間を20, 30, 40 s と変化させて接合実験を行った。実験方法も前報と同様に溶射した鋳鉄と炭素鋼の試験片の端面を突合せガラス管に挿入したのち、高周波誘導加熱コイル内にセットしてねじ式による機械的方法で約1.4 kN になるように加圧を行う。また、接合部近傍の温度を測定するために鋳鉄試験片側に CA 熱電対をセットする。接合実験終了後、それぞれの接合条体で接合した試験片について引張試験、硬度分布、組織観察などを行い、自溶性合金粉末溶射材料の適合性と接合性について調べた。なお、引張試験片の形状と寸法を Fig. 3 に示す。

3. 実験結果および考察

本実験において最高加熱温度を1223 K と一定にして最適接合条件を調べた。この値は前報で良好な接合部が得られた温度をもとにした。また、昇温時間および最高加熱温度での保持時間を変えて接合実験を行い、得られた接合試験片について機械的性質と冶金的性質を検討した。

3.1 引張試験

本実験における接合条件は最高加熱温度に達するまでの時間、すなわち昇温時間を50, 70 s とし、それぞれの場合における最高加熱温度での保持時間を20, 30, 40 s と変化させて接合を行った。その結果を Fig. 4 に示す。これより、昇温時間50 s では保持時間が20, 30, 40 s と長くなるにつれて接合強度も増加し、保持時間が40 s の場合に約500 MPa となり最も接合強度が高くなっている。なお、引張試験における破断は炭素鋼の母材部からで、本来の接合部の強度はそれ以上の値となっていることがわかる。このことは保持時間が長くなるにつれて十分な原子の拡散が行われたためと思われる。

Fig. 4 Relation between tensile strength and joining condition.

Fig. 5 Vickers hardness distribution of connected specimen.

次に昇温時間70 s では保持時間が20, 30, 40 s と長くなるにつれて接合強度は一度上昇したのち低下し、保持時間が30 s の場合約490 MPa となり最も接合強度が高くなっている。なお、SS400 材と FCD600 材の素材にそれぞれ1223 K まで加熱によって熱処理したのちの引張強度はそれぞれ495 MPa と590 MPa となっていたことから、保持時間が長くても短くても接合強度は低下している。その原因として保持時間が長くなれば原子の拡散は行われるが、インサート材の化学成分中の Si や Cr が影響して接合界面に脆弱な金属間化合物が形成されたものと考えられる。また、時間が短いと十分な溶融と拡散ができないためと思われる。

3.2 硬度分布

引張試験の結果より、最も接合強度の高かった昇温時間50 s、保持時間40 s の条件で接合した試験片の接合近傍における硬度分布を Fig. 5 に示す。測定は試験片中央部について接合部から軸方向に0.5 mm 間隔で行った。結果より、接合部の硬度は Hv368、FCD600 側の硬度は Hv250-340 とややばらついているが、SS400 側の硬度は約 Hv140 とほぼ一定になっている。通常、S.F.A. の硬度が Hv650-750 であることから、後述するミクロ観察でも見られるように、接合部にはインサート材である S.F.A. がほとんど残存していないものと考えられる。また、接合

前の FCD600, SS400 の硬度がそれぞれ Hv210-310, Hv130 となっていることから接合後でもほとんど硬度に変化は見られない。前報⁹⁾でも述べたように一般的な融接法であるアーク溶接の場合の接合硬度が約 Hv1200 となっていることを考えれば、本接合条件は接合部近傍がかなり低い値となっており、両母材の接合部近傍は加熱冷却による影響が少なく良好な接合状態となっているものと考えられる。

3.3 ミクロ観察

硬度分布の場合と同様に、最も接合強度が高かった昇温時間50 s、保持時間40 sの接合条件で接合した試験片の接合近傍におけるミクロ組織観察結果を Fig. 6 に示す。なお、観察は試験片中央部について接合部から軸方向に行った。これより、接合部にはインサート材である S.F.A. はほとんど残存しておらず、良好な接合部となっていることが観察される。本接合条件において接合中の状態を観察したところ、最高加熱温度になると S.F.A. と考えられるバリの発生が見られた。このことから、S.F.A. は FCD600 や SS400 の母材側に拡散とともにバリとなって接合部から排出されていることがわかる。比較のために試験片の端面に S.F.A. を溶射せず、すなわちインサート材を用いずに接合を試みたが、全く不可能であったことから、インサート材としての S.F.A. は接合界面に融点降下元素によるぬれ性の向上も備えているものと思われる。本実験における接合は大気中での固相接合で、時間が短く拘束も小さいために十分な拡散は伴っていないが、従来からのインサート材を用いた液相拡散接合法^{8,9)}は真空中またはガス雰囲気中で時間を長くすることにより十分な拡散を行っていることは異なっている。次に FCD600 の母材側について前報⁴⁾と同様に接合部から約 100 μm まで熱の影響を受けたと思われる組織が観察されるものの白鈍化は見られず、パーライト化している。それ以外のところでは黒鉛は球状化しており基底はパーライトとなっている。SS400 では接合部近傍が C の拡散により浸炭されたような組織が見られ、母材側についてはほぼ様なフェライトとパーライトの混在組織となっ

ている。このことから、FCD600, SS400 両母材ともに熱の影響はあまり受けておらず、一般的に鋳鉄の溶接で問題となる白鈍化も起っていないことから接合部近傍の材質にはほとんど影響を与えなかったものと思われる。

3.4 元素分析

元素分析に使用した試験片の場合も接合強度の高い条件で接合したものをを用い、EPMA によって接合部近傍の線分析を行った。その結果を Fig. 7 に示す。なお、分析元素は接合部の機械的冶金の性質に影響を与える Cr, Ni, Fe, B, C, Si である。これより、Fe はほぼ全体に観察され、Si は FCD600 側にわずかなではあるがほぼ均一に見られる。C はほとんど観察されなかったが、FCD600 側から SS400 側にかけてわずかな濃度勾配が観察される。Cr, Ni, B はほとんど観察されない。これらのことから S.F.A. の主成分である Cr, Ni, B が接合部に観察されないことから、S.F.A. の拡散量は少なく、大部分は接合部から排出されたにもかかわらず、インサート材としての S.F.A. は融点降下元素によりぬれ性によってろう接の効果の向上とわずかな拡散によって接合が可能になったものと考えられる。

4. 結 言

異種金属の接合において、インサート材として Ni 系の自溶性合金粉末溶射材料を用いて鋳鉄と炭素鋼の固相接合を行い、機械的性質や冶金の性質について検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 最高加熱温度を1223 K と一定にして、昇温時間と最高加熱温度での保持時間を変化させて接合した試験片の引張強度の結果から、最適接合条件は昇温時間が50 s のとき保持時間は40 s の場合で、接合部の強度は500 MPa 以上になっている。
- (2) 接合部近傍の鋳鉄側の硬度は Hv250-340 となり、素材の硬度よりわずかに硬化しているのが見られるが、熱による影響は少ないことがわかる。
- (3) 組織観察結果より、接合部近傍の鋳鉄試験片は白鈍化が見られず、接合部から離れるにつれて黒鉛は球状

Fig. 6 Microstructure of connected section.

Fig. 7 SEM microphotograph and EPMA line analysis of elements.

化して基地はパーライトとなっている。

(4) 最適接合条件における接合部をEPMAにより線分析した結果、S.F.A.の主成分であるCr, Ni, Bはほとんど見られず、接合部への拡散量は少なく大部分はバリとなって排出されている。

以上のことより、自溶性合金粉末溶射材料を用いて高周波誘導加熱装置による接合機構は、固相拡散接合とインサート材によるろう接が混在していることがわかった。

謝 辞

本実験の遂行にあたり御尽力を頂いた藤原俊一郎工学士に謝意を表します。本実験に用いた供試材料FCD600は銚栗本鐵工所より提供を受けました。また、接合部の線分析は沖縄県工業試験場機械金属室の比嘉真嗣主任研究員の協力を得ました。併せて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 舟本孝雄, 和知弘, 梶原良一, 加藤光雄, 松坂熾, 志田朝彦: Cu-Ti合金インサート材によるCuとSUS304の液相拡散接合, 溶接学会論文集, Vol. 6, No. 2 (1988), p. 219-225.
- 2) 迎静雄, 西尾一政, 馬場仁, 末永允, 石原安典: 球状黒鉛鋳鉄の固相接合(第1報)―接合性に及ぼす接合条件の影響, 溶接学会

論文集, Vol. 4, No. 1 (1986), p. 66-73.

- 3) 貝原正一郎, 中村照美, 村山武弘, 入澤敏夫, 河野武亮: 超高真空中および高純度Arガス中の常温固相接合―常温固相接合技術の開発(第一報), 溶接学会論文集, Vol. 8, No. 4 (1990), p. 515-521.
- 4) 屋良秀夫, 生田明彦, 藤木大輔: 溶射皮膜をインサート材とした鋳鉄の固相接合―フレーム溶射に関する研究(第2報), 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 4 (1993), p. 474-478.
- 5) 鴨田秀一, 酒井昌宏, 宮腰康樹, 田頭孝介: Ni-Cr-C系自溶合金の溶射皮膜を用いた鋳鉄と鋼の接合, 日本金属学会誌, Vol. 55, No. 4 (1991), p. 459-465.
- 6) 益本広久, 西尾一政, 浅田明弘, 迎静雄, 加藤光昭, 畠中望: モリブデンとチタンの拡散接合, 溶接学会論文集, Vol. 10, No. 3 (1992), p. 359-366.
- 7) 瀬戸佐智生, 太脇桂, 小口徹, 入沢敏夫: 異種金属の短時間拡散接合に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 10, No. 2 (1992), p. 246-251.
- 8) 中尾嘉邦, 西本和俊, 篠崎賢二, 姜晶允, 重田春樹: 合金粉末を用いた液相インサート金属拡散接合法の開発, 溶接学会論文集, Vol. 9, No. 4 (1991), p. 550-555.
- 9) Akira OHMORI, Zhan ZHOU and Katsunori INOUE: Bonding of Si_3N_4 to SS400 Steel with Activated Coating Layers Made by Low-Pressure Plasma Spraying, Trans. JWRI, Vol. 22 (1993), No. 1, p. 37-46.