Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 雰囲気における 鋼溶接金属の機械的性質について*

—ガス・メタル・アーク溶接における鋼溶接金属の機械的性質について (第1報)—

佐藤 嘉洋**, 早川 直哉***, 桑名 武**

Mechanical Properties of Steel Weld Metal in Ar-O₂, Ar-CO₂ and CO₂-O₂ Welding Atmosphere

—Mechanical Properties of Steel Weld Metal during Gas Metal Arc Welding (Part 1)—

by Yoshihiro Sato**, Naoya Hayakawa*** and Takeshi Kuwana**

In an oxidizing gas welding atmosphere of Ar-O₂, Ar-CO₂ or CO₂-O₂ gas mixture, mechanical properties of steel weld metal such as ultimate tensile strength and Charpy impact property have been investigated, using a popular Fe-Si-Mn electrode wire (YGW 12) and rolled steel for welded structure (SM 400B). As an addition of oxygen to argon-based mixture, both the tensile strength and toughness tend to decrease. As an addition of carbon-dioxide to argon-based mixture, the tensile strength decreases and then improves, and impact property reveals complex behavior. As an addition of oxygen to carbon-dioxide-based mixture, changes in atmospheric gas composition have a minor effect on the mechanical properties of steel weld metal.

Key Words: arc welding, Ar-O₂, Ar-CO₂ and CO₂-O₂ welding atmosphere, mechanical properties, steel weld metal

1. 結 言

著者らは、アーク溶接過程における鋼溶接金属の酸素吸収挙動について基礎的な系で系統的な研究¹⁻⁶⁾を行うとともに Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 雰囲気において実用鋼も含めた鋼溶接金属の酸素吸収挙動および合金元素の変化について詳しく報告^{7,8)}している。溶接過程で吸収される酸素は、溶接金属の機械的性質に大きな影響をおよぼすことが知られており、特に靱性と溶接金属組織および酸素量の関係については、これまで多くの研究⁹⁻¹⁶⁾が行われている。しかし、溶接過程の酸素吸収と溶接金属の機械的性質の関係について系統的に行われた研究は、ほとんど見あたらない。

そこで本研究では、先の実用鋼の酸素吸収挙動を調べた著者らの研究結果^{7,8)}を踏まえて酸化性ガス雰囲気における鋼溶接金属の機械的性質を明らかにすることを目的にしている。すなわち、一般に広く使用されている Si-Mn 系である軟鋼試験片およびワイヤを用いて Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 雰囲気下で溶接を行い、溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性などを調べるものである。

2. 実験方法

実験装置および操作は、これまでの報告¹⁻⁸⁾と同様である。すなわち、溶接雰囲気を制御するために溶接は溶接雰囲気調整容器内で行った。

Table 1 Chemical composition of base metal and electrode wire. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	O
Base metal	0.10	0.16	0.64	0.019	0.003	0.0014
Electrode wire	0.10	0.78	1.35	0.013	0.013	0.0039

供試材の化学組成を Table 1 に示す。試験片は、一般に広く使用されている Si, Mn および炭素を含む溶接構造用圧延鋼材で JISG3106 の SM400B 材に相当する鋼板である。試験片寸法は、320×150×12 mm であり、試験片中央に深さ 7 mm 開先角 90° の溝加工を施している。ワイヤは、CO₂ ガスアーク溶接に用いられる JISZ3312 の YGW12 に相当する材料で、直径は 1.6 mm である。これらの材料を用いて V 型開先にシングルパス溶接を行った。溶接条件は、溶接電流 350 A、アーク電圧 30 V および走行速度 15 cm/min であり、入熱量は 42 kJ/cm 一定としているので、全ての溶接金属の冷却速度は、ほぼ一定と考えられる。溶接雰囲気は、Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ の混合ガスである。各々の 2 成分混合ガス雰囲気において Ar 分圧 (P_{Ar}) を 0~0.1 MPa に、CO₂ 分圧 (P_{CO₂}) を 0~0.1 MPa および O₂ 分圧 (P_{O₂}) を 0~0.04 MPa の間で変化させたが、全圧は 0.1 MPa である。

溶接金属の機械的性質を調べるために引張り試験および V 型ノッチシャルピー衝撃試験を行った。引張り試験片は全溶接金属から採取し平行部長さが 23 mm であり、JISG2241 の 14B 号に相当する。なお、歪速度は 0.5 mm/min で実験を行った。V 型ノッチシャルピー衝撃試験片のノッチ位置を溶接金属とし、JISZ3112 の A 4 号のサブサイズ試験片に相当しており厚さ 5 mm で、試験温度

*原稿受付 平成 4 年 1 月 20 日 平成 3 年度秋季全国大会で発表

**正 員 東北大学工学部 Member, Tohoku University

***正 員 東北大学大学院 (現在: 川崎製鉄㈱) Member, Graduate Student of Tohoku University (Present: Kawasaki Steel Corp.)

は、273 K である。

溶接金属の組織および介在物を光学顕微鏡で観察した。溶接金属の酸素量は不活性ガス融解赤外線吸収法、Si 量は重量法、Mn 量は ICP 発光分光分析法および炭素量は電量測定法を用いて各々定量した。

3. 実験結果及び考察

3.1 溶接金属の酸素量および合金元素量

Ar-O₂ 混合ガス雰囲気中で溶接を行い溶接金属の酸素量を調べた結果を Fig. 1 に示す。雰囲気中の P_{O₂} の増加と

ともに溶接金属の酸素量は著しく増加することがわかる。また、この図には純鉄および実用鋼(SM490A)の酸素吸収挙動を調べた著者らの研究^{7,8)} から得られた同一雰囲気での酸素量を示している。溶接条件などに違いがあるにもかかわらず、本実験の酸素量は純鉄と実用鋼との間に挟まれることがわかる。Fig. 2 には、Ar-O₂ 雰囲気での溶接金属の Si 量および Mn 量を示している。溶接金属の Si 量、Mn 量ともに P_{O₂} が増加するとともに大きく減少することがわかる。また、この図には純鉄および実用鋼の酸素吸収挙動を調べた研究^{7,8)} から得られた同

Fig. 1 The oxygen content of weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

Fig. 3 The oxygen content of weld metal in Ar-CO₂ welding atmosphere.

Fig. 2 The silicon and manganese content of weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

Fig. 4 The carbon content of weld metal in Ar-CO₂ welding atmosphere.

Fig. 5 The oxygen content of weld metal in CO₂-O₂ welding atmosphere.

一雰囲気での Si 量および Mn 量を示しているが、本実験の Si 量および Mn 量はほぼ純鉄と実用鋼との間に挟まれることがわかる。

Ar-CO₂ 雰囲気の場合の溶接金属の酸素量を純鉄および実用鋼の酸素吸収挙動を調べた研究^{7,8)} から得られた酸素量とともに Fig. 3 に示す。P_{CO₂} の増加とともに、酸素量は P_{CO₂} = 0.02 MPa 程度まで急激に、その後緩やかに増加することがわかる。これより、酸素量は Fig. 1 に示した Ar-O₂ 雰囲気の場合と比べるとかなり低いが、純鉄と実用鋼との間に挟まれることがわかる。また、この雰囲気では、溶接金属の Si および Mn 量は P_{CO₂} の増加とともに減少する傾向を示した。この雰囲気における溶接金属の炭素量を調べた結果を Fig. 4 に示す。炭素量に大きな変化は見られず、P_{CO₂} に依存せずほぼ一定の値を示している。

CO₂-O₂ 雰囲気における溶接金属の酸素量を純鉄および実用鋼の酸素吸収挙動を調べた研究^{7,8)} から得られた酸素量とともに Fig. 5 に示す。P_{O₂} が低いところでは、酸素量に大きな変化は見られないが、P_{O₂} が高くなると酸素量はやや増加する傾向をし、純鉄と実用鋼との間に挟まれることがわかる。

以上のように酸素量、Si 量、Mn 量および炭素量は、溶接条件などが異なるにもかかわらず純鉄および実用鋼 (SM490A) の酸素吸収挙動を調べた研究^{7,8)} で示された純鉄と実用鋼の場合との間に挟まれることがわかる。したがって、本実験においても以前の研究^{7,8)} と同様に酸素量は主に雰囲気酸化性に、Si および Mn 量は酸化消耗量に依存して変化しており、炭素量は酸化消耗および雰囲気に CO₂ が存在する場合には雰囲気からの吸収の 2 つの効果のバランスにより変化すると考えられる。したがって、各々の雰囲気における個々の元素の変化挙動については以前の研究^{7,8)} を参考にすることとし、ここでは詳しく述べない。

3.2 Ar-O₂、Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 雰囲気における溶接金属の機械的性質

3.2.1 Ar-O₂ 雰囲気の場合

酸素分圧 (P_{O₂}) を 0 ~ 0.04 MPa に変化させて溶接を行い溶接金属の引張り強さを調べた結果を Fig. 6 に、シャルピー衝撃吸収エネルギーを Fig. 7 に示す。P_{O₂} の増加とともに、引張り強さは一様に減少することがわかる。また、吸収エネルギーは P_{O₂} が低いところでは比較的高いが、P_{O₂} が高くなると非常に低くなることがわかる。このように P_{O₂} が高い場合には、引張り強さおよび衝撃特性ともに低下する傾向があることがわかる。

Fig. 6 The ultimate tensile strength of weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

Fig. 7 The Charpy v-notch absorbed energy of weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

Fig. 8 The microstructure of weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

P_{O_2} を変化させる場合の溶接金属組織の例を Fig. 8 に示す。 P_{O_2} が (a) 0.005 MPa および (b) 0.015 MPa の場合は似たような組織であり、粒界からウィッドマンステッチン状に成長したフェライトサイドプレートおよびポリゴナルフェライトの他に、粒内には針状の微細なフェライトも観察される。しかし、 P_{O_2} が (c) 0.040 MPa と高くなるとフェライトサイドプレートおよびポリゴナルフェライトは粗大化して粒内の微細なフェライトはほとんど観察されなくなる。また、この場合には大きな非金属介在物が多数観察されるようになる。

P_{O_2} が増加すると、溶接金属の酸素量は著しく増加し、組織は粗大化し、また大きな非金属介在物を多数含有すると同時に Si, Mn および炭素量が減少するために溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性ともに低下すると考えられる。

3.2.2 Ar-CO₂ 雰囲気の場合

CO₂ 分圧 (P_{CO_2}) を 0 ~ 0.1 MPa に変化させる場合の溶接金属の引張り強さを Fig. 9 に、シャルピー吸収エネルギーを Fig. 10 に示す。引張り強さは P_{CO_2} が増加するとともに一度減少した後再び増加する傾向があることがわかる。また、吸収エネルギーは、 P_{CO_2} が低いところでは低いが、 P_{CO_2} が増加すると増加した後減少し、また再び増加しており複雑な変化をすることがわかる。ここで共通しているのは P_{CO_2} が 0.05 MPa 付近では、引張り強さおよび衝撃特性ともに低いことである。

P_{CO_2} を変化させる場合の溶接金属組織を Fig. 11 に示

Fig. 9 The ultimate tensile strength of weld metal in Ar-CO₂ welding atmosphere.

Fig. 10 The Charpy v-notch absorbed energy of weld metal in Ar-CO₂ welding atmosphere.

す。 P_{CO_2} が (a) 0.005 MPa と低い場合には、粒界フェライトおよびフェライトサイドプレートが観察され、粒内には微細な組織も見られる。しかし、 P_{CO_2} が (b) 0.040 MPa になると粒界フェライトおよびフェライトサイドプレートが支配的組織となりかつ粗大化することがわかる。一方、 P_{CO_2} が (c) 0.085 MPa になると微細な組織は見られないが粗大な組織もあり観察されなくなる。

P_{CO_2} が増加すると、溶接金属の酸素量は増加し、Si および Mn 量は減少するとともに、組織は比較的細かいフェライト組織から粗大な組織になった後、粗大化が緩和

$P_{Ar} + P_{CO_2} = 0.1 \text{ MPa}$
 $350 \text{ A}, 30 \text{ V}, 15 \text{ cm/min}$
(a) $P_{CO_2} = 0.005 \text{ MPa}$
(b) $P_{CO_2} = 0.040 \text{ MPa}$
(c) $P_{CO_2} = 0.085 \text{ MPa}$

Fig. 11 The microstructure of weld metal in Ar-CO₂ welding atmosphere.

Fig. 12 The ultimate tensile strength of weld metal in CO₂-O₂ welding atmosphere.

Fig. 13 The Charpy v-notch absorbed energy of weld metal in CO₂-O₂ welding atmosphere.

$P_{CO_2} + P_{O_2} = 0.1 \text{ MPa}$
 $350 \text{ A}, 30 \text{ V}, 15 \text{ cm/min}$
(a) $P_{O_2} = 0.010 \text{ MPa}$
(b) $P_{O_2} = 0.020 \text{ MPa}$
(c) $P_{O_2} = 0.040 \text{ MPa}$

Fig. 14 The microstructure of weld metal in CO₂-O₂ welding atmosphere.

される傾向を示すことがわかる。したがって、この雰囲気では化学成分と溶接金属組織が複雑に作用するために引張り強さおよび衝撃特性の機械的性質は複雑な変化を考えると考えられる。

3.2.3 CO₂-O₂ 雰囲気の場合

酸素分圧 (P_{O_2}) を 0~0.04 MPa に変化させて溶接金属の機械的性質を調べた。引張り強さを Fig. 12 に、シャルピー吸収エネルギーを Fig. 13 に示す。この雰囲気の場合には溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性は大きく変化しないが、 P_{O_2} が高くなると引張り強さおよび衝撃特性ともにやや低下していることがわかる。

P_{O_2} を変化させる場合の溶接金属組織の例を Fig. 14 に示す。 P_{O_2} が (a) 0.010 MPa, (b) 0.020 MPa および (c) 0.040 MPa と変化しても溶接金属は似たような組織であり、やや等軸な粒界フェライトおよびフェライトサイドプレートが主な組織であり、粒内には微細なフェライトも少し観察される。

P_{O_2} が増加しても、溶接金属の酸素量はやや増加するものの、組織は大きく変化しないために溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性などの機械的性質についても大きな変化は見られないが、酸素量が増加すると非金属介在物などが増加することなどが考えられることから P_{O_2} が高い場合に機械的性質はやや低下すると考えられる。

3.2.4 各溶接雰囲気における鋼溶接金属の機械的性質の特徴

ここで各2成分混合ガス雰囲気での鋼溶接金属の機械的性質について整理し、その特徴を明らかにすることにする。

まず、Ar-O₂ 雰囲気の場合には P_{O_2} が増加し高くなると引張り強さおよび衝撃特性ともに低下する傾向を示す。次に、Ar-CO₂ 雰囲気では、引張り強さは P_{CO_2} の増加とともに一度減少した後再び増加し、吸収エネルギーは P_{CO_2} が低いところでは低く、 P_{CO_2} が増加すると一度増加した後減少し、また再び増加するが P_{CO_2} が 0.05 MPa 付近では、引張り強さおよび衝撃特性ともに低い傾向を示す。CO₂-O₂ 雰囲気において本実験範囲では、引張り強さおよび衝撃特性は大きく変化しないが、 P_{O_2} が高い場合引張り強さおよび衝撃特性ともにやや低下する傾向を示す。

溶接金属の機械的性質は、化学組成、溶接金属組織および非金属介在物などの因子により変化すると考えられるが、これらの因子はそれぞれが独立しているわけではなくお互いが複雑に作用し、絡み合っていると考えられる。しかし、いずれの場合にも溶接金属中の酸素はこれらの因子になんらかの作用をおよぼすことが考えられ、鋼溶接金属の機械的性質に大きな影響をおよぼしていると考えられる。

4. 結 論

Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 2成分混合ガス雰囲気中で軟鋼の溶接を行い、溶接金属の機械的性質を調べ以下の結果を得た。

(1) Ar-O₂ 雰囲気において P_{O_2} が増加すると、溶接金属の酸素量は著しく増加し、組織は粗大化する。また、 P_{O_2} が増加して溶接金属の酸素量が増加すると大きな非金属介在物が多数生成されると同時に Si, Mn などが減

少するために溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性ともに低下する。

(2) Ar-CO₂ 雰囲気において P_{CO_2} が増加すると、溶接金属の酸素量は増加し、Si および Mn 量は減少する。この時、組織は比較的細かいフェライト組織からやや粗大になった後、これら粗大な組織は減少する傾向を示す。この雰囲気では化学成分と溶接金属組織が複雑に作用するために、引張り強さは P_{CO_2} が増加すると一度減少した後再び増加し、衝撃特性は P_{CO_2} が低いところでは低いが、 P_{CO_2} が増加すると増加した後減少し、また再び増加するといった複雑な変化をする。

(3) CO₂-O₂ 雰囲気において P_{O_2} が増加しても、溶接金属の酸素量はやや増加するものの、組織は大きく変化しない。このために溶接金属の引張り強さおよび衝撃特性などの機械的性質も大きな変化は見られないが、 P_{O_2} が高い場合に機械的性質はやや低下する。

終わりに臨み、本実験遂行のために協力をいただいた東北大学工学部 本田明技官ならびに梅津知史工学士に対し深く感謝いたします。なお、本研究は文部省科学研究費補助金によるものであることを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 桑名武, 佐藤嘉洋: アーク溶接過程における鉄溶接金属の酸素吸収と酸化物系介在物について, 溶接学会論文集, 5-3(1987), 396-402.
- 2) 桑名武, 佐藤嘉洋: Fe-Si 溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 7-1 (1989), 43-48.
- 3) 桑名武, 佐藤嘉洋: Fe-Mn および Fe-Si-Mn 溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 7-1 (1989), 48-56.
- 4) 桑名武, 佐藤嘉洋: Fe-Al 鉄溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 7-3 (1989), 330-336.
- 5) 桑名武, 佐藤嘉洋, 乙部厚志, 大西秀貴: Fe-Ti 溶接金属の酸素吸収および酸化物系介在物について, 溶接学会論文集, 8-1 (1990), 91-97.
- 6) 桑名武, 佐藤嘉洋, 金田創太郎: Fe-Cr 鉄溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 10-3 (1992), 397-403.
- 7) 佐藤嘉洋, 富田健司, 桑名武: Ar-O₂, Ar-CO₂ および CO₂-O₂ 雰囲気における鋼溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 10-3 (1992), 384-390.
- 8) 佐藤嘉洋, 富田健司, 桑名武: Ar-CO₂-O₂ 雰囲気における鋼溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 10-3(1992), 390-396.
- 9) 伊藤慶典, 中西睦夫: 溶接部の靱性に関する研究(第1報), 溶接学会誌, 44-9 (1975), 728-733.
- 10) 伊藤慶典, 中西睦夫: 溶接部の靱性に関する研究(第2報), 溶接学会誌, 44-10 (1975), 815-821.
- 11) 渡邊之, 小嶋敏文: 靱性におよぼす Ti, B および酸素の影響, 溶接学会誌, 49-11 (1980), 772-780.
- 12) 渡邊之, 小嶋敏文: 組織微細化におよぼす Ti および B の役割, 溶接学会誌, 50-7 (1981), 702-709.
- 13) 森直道, 本間弘之, 大北茂, 若林正邦: Ti-B 系溶接金属における靱性向上機構, 溶接学会誌, 50-2 (1981), 174-181.
- 14) 森直道, 本間弘之, 若林正邦, 大北茂: Ti-B 系溶接金属の材質特性, 溶接学会誌, 50-8 (1981), 786-793.
- 15) 伊藤慶典, 中西睦夫, 小溝裕一: 溶接金属の連続冷却変態挙動におよぼす酸素の影響, 溶接学会誌, 50-12(1981), 1211-1218.
- 16) 伊藤慶典, 中西睦夫, 小溝裕一: 溶接金属の組織と靱性に関する研究(第2報), 溶接学会誌, 51-2 (1982), 111-118.