り難いと考えられる。これは実用的には有利である。

形状計測を高速に行う場合、数回測定して平均をとる余裕はない。対象が幾何学的図形のとき、最大と最小の

差を小さくするという意味では平均値0のノイズを重畳することも考えられる。つまり分散は一定でも分布の形がガウス曲線に近くなる。

高圧 Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気下でアーク溶接した鋼溶接金属の機械的性質*

桑名 武**, 粉川 博之**, 木口 立而**

Mechanical Properties of Mild Steel Weld Metals Produced in Pressurized Ar-CO₂ Atmospheres*

by Takeshi Kuwana**, Hiroyuki Kokawa** and Ryuji Kiguchi**

Mild steel sheets with V-groove were welded in pressurized Ar-CO₂ gas mixture atmospheres up to 2.0 MPa, using a 1.6 mm diameter solid wire. The effect of ambient gas pressure and gas composition on the mechanical properties of weld metals was studied. The Vickers hardness and tensile properties of weld metals were varied with the ambient gas composition but did not depend on the ambient gas pressure. The Charpy V notch toughness of weld metal was changed markedly with CO₂ partial pressure in the atmosphere, and showed a maximum at 0.1~0.2 MPa CO₂ partial pressure which resulted in about 0.03% oxygen content of weld metal having a fine ferrite microstructure. This suggests that toughness is strongly influenced by the oxygen content of weld metal. Mechanical properties of pressurized steel weld metal can be controlled by CO₂% in the welding atmosphere, because the oxygen content of weld metal is determined by CO₂ partial pressure.

Key Words: Hyperbaric welding, Mild steel weld metal, Pressurized Ar-CO₂ atmosphere, Effect of ambient pressure, Toughness of weld metal, Tensile properties of weld metal, Chemical compositions of weld metal, Oxygen content of weld metal.

1. 緒 言

海洋開発などの必要性から各種溶接法による水中溶接に関する研究が多くなされており¹⁻⁹⁾、著者らはこれまで乾式水中溶接に関する基礎的資料を得る目的で高圧雰囲気下での鋼のアーク溶接について研究を行ってきた。前報^{8,9)}では、活性ガスとしてのCO₂に注目して0.1~2.0 MPaの高圧Ar-CO₂混合ガス雰囲気下で鋼のアーク溶接を行い、電極線の溶融率、ビード形状、溶接過程における合金元素の挙動などに及ぼす雰囲気圧力及びCO₂分圧の影響を調べた。その結果、雰囲気圧2.0 MPaまで諸溶接欠陥が極めて少なく比較的良好な溶接を行うことが可能であることを示した。また、溶接金属中の酸素量が雰囲気圧力及びCO₂分圧に大きく依存して変化し、それに応じてSi, Mn, Ti等の脱酸素元素含有量が変化することが分かった。このような合金元素の挙動は溶接金属の諸性質とくに機械的性質に大きな影響を与えることが予想される。そこで本研究では、雰囲気圧0.1~2.0 MPaのAr-CO₂混合ガス雰囲気下で鋼のアーク溶接を行ない、溶接金属の靱性、引張特性、硬さなどに及ぼす雰囲気圧力及びCO₂分圧の影響について検討を行った。

2. 実験方法

使用した軟鋼電極線(直径1.6 mm)及び母材(SS 41

厚さ12 mm)は前報^{8,9)}とほぼ同じであるが、それらの化学組成をTable 1に示す。Table 2に示したような形状の開先付母材鋼板(200×250×12 mm)を溶接雰囲気

Table 1 Chemical compositions of electrode wire and base plate (mass%)

	C	Si	Mn	Ti	O
Electrode wire	0.07	0.75	1.48	0.14	0.0023
Base plate	0.18	0.20	0.46	—	0.0094

Table 2 Welding conditions used

Arc Voltage	Welding Current	Heat Input	Atmosphere and Pressure
33 40 V	330 380 A	3.5 kJ/mm	Ar, Ar-10, 20, 50 %CO ₂ CO ₂ , 0.1~2.0 MPa abs

Direct Current Electrode Positive

*原稿受付 平成2年7月23日 平成元年度秋季全国大会で発表

**正 員 東北大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tohoku Univ.

調整装置（容積約 1 m³）内にセットし、装置内を 66 Pa 以下に排気した後、CO₂ 及び Ar ガスをそれぞれ所定の圧力（最高全圧 2.0 MPa）まで封入することによって高圧 Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気を作り、10 分間攪拌後、消耗電極法（電極線正）により単層盛り溶接で突合せ継手を完成させた。Table 2 に溶接条件を示す。完全溶け込みでアンダカットのない継手を得るため、アーク電圧、溶接電流は多少変化させているが、溶接速度 3.3 mm/sec 一定とし入熱量は常に約 3.5 kJ/mm となるようにした。雰囲気組成は、Ar-CO₂ 混合ガス中の CO₂ ガス量を 0~100% と変化させ、全圧を 0.1~2.0 MPa の範囲で変えた。

溶接後、溶接部の外観、X 線透過試験、光学顕微鏡組織観察、ビッカース硬さ測定を行ったのち、溶接継手から引張試験片またはシャルピー衝撃試験片を Fig. 1 のように切り出した。すなわち、引張試験には溶接金属部

Fig. 1 Sketch of welded specimen showing location of test specimens for mechanical tests.

Fig. 2 Relationship between the Vickers hardness of weld metal and the ambient gas pressure.

より溶接線方向に JISZ 3111 の A2 号試験片（平行部直径 6 mm）を、シャルピー衝撃試験には溶接線に直角で溶接金属中央部に板厚方向の 2 mm V ノッチをつけた JISZ 2202 の 4 号試験片を作製した。引張試験は室温でクロスヘッドスピード 0.5 mm/min で行い、衝撃試験は、試験温度 273 K に 1.8 ks (30 min) 以上保持したのちシャルピー衝撃試験機を用いて行った。

また、溶接金属部から分析試料も採取し、各元素の定量を、炭素は電量測定法、ケイ素は重量法、マンガンとチタン（全チタン）は原子吸光光度法、酸素はアルゴン気流中溶融電量測定法で行った。

3. 実験結果

3.1 溶接金属のビッカース硬さ

Fig. 2 は、溶接金属中央部のビッカース硬さをビード表面側から裏面に向かって 1 mm 間隔で測定し、その平均値と雰囲気圧の関係を示したものである。いずれの雰囲気組成においても雰囲気圧の増加による溶接金属の硬さの変化はほとんどない。また、同一雰囲気圧では雰囲気中の CO₂ 量の増加とともに硬さは減少している。

3.2 溶接金属の引張特性

Fig. 3 は、溶接金属の室温における引張特性（引張強さ σ_B 、降伏応力（0.2% 耐力） $\sigma_{0.2}$ 、伸び ϵ 、絞り ϕ ）と雰囲気圧の関係を示したものである。いずれの雰囲気組成においても、これら引張特性に対する雰囲気圧の影響

Fig. 3 Relationship between the tensile properties of weld metal at room temperature and the ambient gas pressure.

Fig. 4 Relationship between the Charpy impact property of weld metal at 273K and the ambient gas pressure.

響はほとんど見られず、いずれもほぼ一定の値を示している。また、同一雰囲気圧においては、雰囲気中の CO_2 が増すにつれて引張強さと降伏応力は減少する傾向が認められるが、伸びと絞りにはほとんど差がない。同図中に点線で母材の引張特性値を示してあるが、いずれの溶接金属の引張特性も母材と同程度あるいはそれ以上の値を示している。

3.3 溶接金属の靱性

Fig. 4 は、溶接金属のシャルピー衝撃吸収エネルギーと雰囲気圧の関係を試験温度 273 K の場合について示したものである。なお、図中の値は 3 試験片以上の測定平均値を示している。Ar 雰囲気の場合、吸収エネルギーは雰囲気圧の増加とともに僅かに増す傾向があるが、2.0 MPa においても 20 J と全体的に極めて低い値である。 CO_2 雰囲気の場合、吸収エネルギーは雰囲気圧が 0.5 MPa 以上になると雰囲気圧の増加とともに減少し、1.5 MPa 以上では約 40 J と大気圧 (0.1 MPa) の場合の半分程度となっている。また、Ar- CO_2 混合ガス雰囲気の場合、同一 CO_2 % の雰囲気でも雰囲気圧が変わると靱性が大きく変化し、ある雰囲気圧で極大値を示す。すなわち、雰囲気圧によって最良の靱性を示す溶接金属が得られる CO_2 % が異なる。

3.4 溶接金属の化学組成

Fig. 5 は、溶接金属の C, Si, Mn, Ti 含有量と雰囲気圧の関係を示したものである。C はいずれの雰囲気組成、雰囲気圧においても 0.12~0.13% でほとんど変化はない。また、Si, Mn, Ti 含有量は雰囲気圧が一定の場合、雰囲気中の CO_2 % が多いほど少なくなっている。し

Fig. 5 Relationship between the chemical compositions of weld metal and the ambient gas pressure.

Fig. 6 Relationship between the oxygen content of weld metal and the ambient gas pressure.

かし、雰囲気組成が一定の場合、これらの元素は CO_2 雰囲気以外、雰囲気圧の影響を受けずほぼ一定となって

いる。

Fig. 6 は、溶接金属の酸素含有量と雰囲気圧の関係を示したものである。雰囲気中に CO₂ が含まれる場合、雰囲気圧の増加とともに酸素含有量は増加している。この傾向は CO₂% が高くなる程顕著である。

3.5 溶接金属のミクロ組織

Fig. 7 は、溶接金属中央部の光学顕微鏡組織例を示したものである。Ar 雰囲気 0.1 MPa の場合 (Fig. 7a) 粒

Fig. 7 Microstructure of weld metal.

- a) Ar atmosphere ($P_{\text{total}}=0.1$ MPa, 0.001 %O)
- b) Ar-20%CO₂ atmosphere ($P_{\text{total}}=1.0$ MPa, 0.036 %O)
- c) CO₂ atmosphere ($P_{\text{total}}=2.0$ MPa, 0.136 %O)

状フェライトが大部分を占めており、Ar-20%CO₂ 雰囲気 1.0 MPa の場合 (Fig. 7b) 粒界フェライトおよびフェライトサイドプレートが発達し粒内には微細フェライトが多く見られ、これらがほぼ均等に分布している。CO₂ 雰囲気 2.0 MPa の場合 (Fig. 7c), 粒界フェライト、フェライトサイドプレート、微細フェライトからなっているが、微細フェライトの占める割合が少なくなっている。

Ar-CO₂ 雰囲気溶接金属組織中には Fig. 8 に見られるような球形の酸化物系介在物がしばしば観察された。そこで、溶接金属中の酸化物系介在物の体積分率と酸素含有量の関係を調べ Fig. 9 に示した。この図から、酸化物系介在物量は雰囲気組成の違いによらず溶接金属の酸素含有量の増加とともに増加していることがわかる。

Fig. 8 Nonmetallic inclusions in the weld metal made in Ar-20%CO₂ atmosphere ($P_{\text{total}}=2.0$ MPa, 0.044 %O).

Fig. 9 Relationship between the volume fraction of inclusion and the oxygen content.

4. 考 察

一般に、溶接金属の機械的性質に重要な影響を与える因子としては、その化学組成とミクロ組織が挙げられる。このような観点から本実験結果について以下のような考察を行った。

本実験において、高圧 Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気下で得られた鋼溶接金属の機械的性質を調べた結果、ビッカース硬さ及び引張特性は雰囲気圧の影響をほとんど受けずほぼ一定の値を示した。また、同一雰囲気圧では雰囲気中の CO₂% の増加とともに硬さ、降伏応力、引張強さは減少した。これらは溶接金属中の化学組成で定性的に説明することが出来る。すなわち、Si, Mn, Ti 等の合金元素による固溶硬化等が溶接金属の硬さ、引張特性に影響を及ぼすと考えられる。Fig. 5 に見られるように CO₂ 雰囲気以外は、溶接金属中の Si, Mn, Ti 量は雰囲気中の CO₂% が増すと減少するが雰囲気圧による変化はほとんどなく、Fig. 2 と 3 の硬さ、引張特性はその組成変化にはほぼ対応している。

CO₂ 雰囲気の場合の硬さ、引張特性と Si, Mn 量の変化は対応していないが、これは Fig. 6 のように CO₂ 雰囲気の場合には溶接金属中の酸素含有量が雰囲気圧の増加とともに急激に増加していることと関連しているかもしれない。

なお、溶接金属の化学組成に及ぼす雰囲気ガス組成、圧力の影響はビード・オン・プレートの場合と同様、溶接雰囲気の酸化ポテンシャルと関連すると思われ、既報⁹⁾で考察している。

一方、溶接金属の靱性変化は、Fig. 4 に見られるように単純ではない。同一 CO₂% の雰囲気でも雰囲気圧が変わると靱性が大きく変化し、また、それぞれの雰囲気組成に応じて異なった極大値を示すことから、Fig. 4 の衝撃吸収エネルギーを雰囲気中の CO₂ 分圧 (P_{CO₂}) で整理したのが Fig. 10 である。いずれの雰囲気組成においても、溶接金属の靱性は CO₂ 分圧が増すとともに急激に増加し、ある程度以上 P_{CO₂} が増すと再び靱性が低下している。雰囲気組成によって靱性の極大値に違いはあるものの、P_{CO₂} が 0.1~0.2 MPa 付近に靱性の極大が存在している。ところで、伊藤¹⁰⁻¹³⁾は、鋼のサブマージおよびガス・メタルアーク溶接金属の靱性が Si, Ti, O 含有量に依存し、これらの元素が溶接金属中に適正量含まれる場合に靱性は極大値を示すことを報告している。本溶接金属の場合、Fig. 5 から分かるように Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気では雰囲気圧の増加による Si, Mn, Ti 含有量変化はあまり大きくない。一方、溶接金属の酸素量は、Fig. 6 に示すように雰囲気圧及び組成に依存して大きく変化している。また、この酸素量は既報⁹⁾で述べたごとく P_{CO₂} で一義的には整理できない。そのために Fig. 10 のように靱性が極大を示す P_{CO₂} が幅を持つと思われる。そこで、Fig. 11 に溶接金属の酸素量と衝撃吸収エネルギーの関係を整理してみた。この図から溶接金属の酸素量が 0.03% 付近のところに靱性の極大があることが分かる。酸素量を 0.03% 程度含む溶接金属組織は Fig. 7b のように微細フェライトが多く認められ、それより酸素量が多くても (Fig. 7c) 少なくとも (Fig. 7a) 組織が粗くなる傾向にあり、このような酸素量変化にともなうミクロ組織の変化が靱性の極大をもたらしたのと考えられる。酸素は固体鉄中にほとんど固

Fig. 10 Effect of CO₂ partial pressure on the Charpy impact property of weld metal at 273 K.

Fig. 11 Effect of oxygen content on the Charpy impact property of weld metal.

溶しないため、その大部分は酸化物として鋼溶接金属中に存在する¹⁴⁾。実際 Fig. 9 に見られるように、溶接金属中の酸化物量は、雰囲気組成、圧力によらず酸素量にのみ依存している。そして適当量の酸素量によってできた酸化物系介在物が微細 (アシキュラー) フェライト組織を生じ¹³⁾、靱性を向上させるものと思われる。従って、本実験の場合、良好な靱性が得られる溶接金属の酸素量は 0.03% 程度と考えられる。著者らの圧力 0.1 MPa の Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気下でアーク溶接した場合の研究結果¹⁵⁻¹⁷⁾ から、溶接条件が一定で化学組成が同じなら鋼溶接金属の酸素量は雰囲気中の CO₂ 分圧のみに依存すると思われる。本実験の高圧雰囲気下においても雰囲気圧、組成にあまり依存せず、CO₂ 分圧が 0.1~0.2 MPa の場合に 0.03% 程度の酸素量が得られている。以上のことから、適正な CO₂ 分圧が得られるように雰囲気中の CO₂% を選ぶことに依って、適正な酸素量で微細フェライト組織を有する鋼溶接金属を得ることが出来る。

最後に、本実験で得られた溶接金属の機械的性質を溶接構造用圧延鋼材 SM 41 B (JISG 3106)¹⁸⁾ のそれと比

較してみると、純 Ar 雰囲気以外の雰囲気中で溶接された溶接金属の靱性はすべての雰囲気圧において規格を満足している。また、引張特性についてはいずれの雰囲気中でも問題ない。機械的性質に関してはこのように溶接条件（雰囲気ガス組成）の調節で一応満足すべきものが得られる。しかし、溶接構造物として見る場合、外観も重要である。その点からすれば、Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気をを用いた方が、CO₂ 雰囲気のように雰囲気圧が 1.0 MPa 以上でのビード蛇行、アンダーカット、オーバーラップの発生もなく、良好な外観の溶接金属が得られることから適当と考えられる。

5. 結 論

0.1~2.0 MPa の高圧 Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気中で、軟鋼の開先継手溶接を行い、溶接金属の機械的性質を調べたような結果が得られた。

1. 溶接金属のビッカース硬さは、いずれの雰囲気組成においても雰囲気圧の増加による変化はほとんどなかったが、同一雰囲気圧では雰囲気中の CO₂% の増加とともに減少した。

2. 溶接金属の引張特性は、いずれの雰囲気組成においても雰囲気圧の影響はほとんど見られず、いずれもほぼ一定の値を示した。また、同一雰囲気圧においては、雰囲気中の CO₂% が増すにつれて引張強さ及降伏強さは減少する傾向が認められたが、伸びと絞りにはほとんど変化がなかった。

3. 溶接金属の靱性は、同一 CO₂% の雰囲気圧が変わると靱性が変化したが、それぞれの雰囲気組成に応じて異なった極大値を示した。靱性は雰囲気中の CO₂ 分圧が 0.1~0.2 MPa 付近で極大となり、その時溶接金属の酸素量は 0.03% 程度であり、微細フェライト組織を示した。

4. 溶接金属の機械的特性を、化学組成、ミクロ組織、酸素量と関係づけて説明することが出来た。そして、雰囲気中の CO₂% を制御することによって良好な機械的性質を有する鋼溶接金属を得ることが出来ることが示された。

謝 辞

終わりに臨み、本実験に協力された高森 晋、早川直哉、栗山真次各工学士および東北大学工学部本田 明技官に深く感謝する。また、本研究は文部省科学研究費の

援助を受けて行われたことを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Proc. IIW Conference on Underwater Welding, Pergamon Press, London, (1983).
- 2) 菅, 蓮井: 高圧アルゴン雰囲気中におけるアーク溶接, 本会論文集, 4-4 (1986), 691-696.
- 3) 屋良, 真喜志, 菊田, 松田: 湿式水中アーク溶接に関する研究 (第3報), 本会論文集, 3-2 (1985), 392-397.
- 4) 西口, 松縄, 堀: 高圧アルゴン気中におけるアーク特性, 本誌, 46-8 (1977), 553-560.
- 5) M. Perlmann, A. W. Pense and R. D. Stout: Ambient pressure effects on gas-metal-arc welding of mild steel, Weld. J., 48-6 (1969), 231s-238s.
- 6) 圓城, 菊地, 堀之内, 上田: 高圧 Ar 雰囲気下における MIG 溶接に関する研究, 本会論文集, 7-1 (1989), 56-63.
- 7) 中山, 山下, 尾崎, 服部: 高圧雰囲気下のアーク溶接について, 本誌, 50-8 (1981), 795-800.
- 8) 桑名, 木口: 高圧 CO₂ 雰囲気における鋼のアーク溶接, 本会論文集, 2-4 (1984), 625-632.
- 9) 桑名, 木口: 高圧 Ar および Ar-20%CO₂ 雰囲気における鋼のアーク溶接, 本会論文集, 6-2 (1988), 256-261.
- 10) 伊藤, 中西: 溶接部の靱性に関する研究 (第1報), 本誌, 44-9 (1975), 728-733.
- 11) 伊藤, 中西: 溶接部の靱性に関する研究 (第2報), 本誌, 44-10 (1975), 815-821.
- 12) 伊藤, 小西, 小溝: 溶接金属の連続冷却変態挙動におよぼす酸素の影響, 本誌, 50-12 (1981), 1211-1218.
- 13) Y. Ito, M. Nakanishi and Y. Komizo: Effects of Oxygen on Low Carbon Steel Weld Metal, Metal Const., 14-9 (1982), 472-478.
- 14) 桑名, 佐藤: 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, 本会論文集, 5-3 (1987), 396-402.
- 15) 桑名, 佐藤: Ar-CO₂ 雰囲気における鉄溶接金属の酸素吸収について—アーク溶接過程における鉄溶接金属の酸素吸収について (第2報) —, 本会論文集, 1-1 (1983), 16-21.
- 16) 桑名, 佐藤: Fe-Si 溶接金属の酸素吸収について—アーク溶接過程における鋼溶接金属の酸素吸収におよぼす合金元素の影響 (第1報) —, 本会論文集, 7-1 (1989), 43-49.
- 17) 桑名, 佐藤: Fe-Mn および Fe-Si-Mn 溶接金属の酸素吸収について—アーク溶接過程における鋼溶接金属の酸素吸収におよぼす合金元素の影響 (第2報) —, 本会論文集, 7-1 (1989), 49-56.
- 18) JIS: 溶接構造用圧延鋼材 (G3106).