CO₂-O₂ アーク溶接による溶融鋼における 諸反応 (第1報)*

——送給ガスの酸素混合率と溶着鋼生成スラグの化学組成との関係——

益 本 功**

On the Chemical Reactions in Molten Steel with CO₂-O₂ Arc Welding (Report 1)*

—Relations between Rate of Oxygen Mixed in Supplied Gas and Chemical
Compositions of Weld Steel and Produced Slag—

By I. Masumoto**

Abstract

The purpose of this research is to investigate the chemical reactions in the weld metal with the CO₂-O₂ arc welding. Many kinds of weld metal and slag by the CO₂-O₂ arc welding were analysed chemically, changing the rate of oxygen mixed in supplied gas.

In this first report the author describes the method of the experiment and the results showing relations between the rate of oxygen mixed in supplied gas and chemical compositions of weld steel and slag. And he shows that, when welded on plate, an decrease rate of carbon of weld metal is closely connected with a porosity of weld metal.

He will discuss the oxidizing reactions of carbon, silicon and manganese in the second report.

1. 緒 言

著者は、既報の研究において、すでに CO₂-O₂ アーク溶接法を実施する際必要な諸事項または諸条件、すなわち諸種鋼材に適当な電極鋼線の組成、送給ガスの混合率、送給ガスの湿気に対する注意および溶接部の諸性質等について明らかにしてきた。これによって CO₂-O₂ アーク溶接法は現在すでに実用されている。従来は溶接実施上関係ある諸因子の究明および適当な諸数値の探究に努めて来たため、本溶接法に際して、アーク移行中の溶融鋼滴および溶融池で起る冶金の化学反応についての理論的検討はいまだ十分ではない。

たとえば、他の溶接法に関しては溶接中におこる諸化学反応、脱酸過程、金属・スラグ間反応等について詳しい研究が行われ、わが国でも数多くの報告がある。しかし CO₂-O₂ アーク溶接法に関しては、本法が創始されて間がないため、これらの実験的究明は十分でない。そこで本研究では、CO₂-O₂ アーク溶接中溶融鋼中で起る諸元素の減耗および生成スラグの化学組成について検討し、平衡論的立場

論から理論的に考察を加えることとした。

CO₂-O₂ アーク溶接法に限らず、一般に裸鋼線によるガス被包アーク溶接法では、フラックスを供給しないから、溶接中におこる諸反応を単純化して考察することができるように思われる。そしてこの成果はフラックスを用いる他の諸溶接法の解明にも大いに役立つであろう。

第1報においては、先ず実験の方法と結果とを述べ、次いで脱酸元素特に炭素の含量低下または減耗率と気孔生成との関係を調べた成果を報告する。

2. 実験方法

本報の実験に用いた試験片ならびに溶接方法は、「炭酸ガス関口線材アーク溶接法について」(第6報)¹⁾に報告したものと同様である。すなわち Table 1 に示す組成の直径 1.6mm の DS 1 L 電極鋼線を用い、リムド鋼板、セミキルド鋼板、キルド鋼板および Welten 55 高張力鋼板(10×125×300mm 短冊型)上に自動装置によりビードを置いた。ビード上に生じたスラグを採取して分析試料とした。また溶接ビードを X 線透過試験した後、ビード余盛部を切削して分析試料とした。

溶接に際しては送給混合ガス(炭酸ガス+酸素)の酸素混合等を 0~100% の範囲に変化させた。溶接条件は一定

* 原稿受付、昭和34年8月2日(昭和34年度溶接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員、名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University

Table 1 Chemical Analyses of Electrodes and Base Metals

Electrode and base metal		Elements, %									
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Ti
Electrode	DS1L	0.04	0.59	1.64	0.010	0.020	0.13	0.08	0.05	—	0.21
	DS1	0.12	0.80	1.73	0.007	0.007	0.12	0.06	0.06	—	0.18
Base metal	Rimmed steel	0.12	0.02	0.55	0.011	0.015	0.13	0.04	0.05	0.005	—
	Semi-killed steel	0.12	0.08	0.60	0.008	0.026	0.16	0.04	0.03	0.008	—
	Killed steel	0.09	0.27	0.51	0.010	0.008	0.17	0.06	0.04	0.020	—
	High tensile steel, (Welten 55)	0.17	0.53	1.27	0.018	0.020	0.19	0.06	0.03	0.074	—

になるように努めたが、溶接電源としてセレン整流型定電圧直流溶接機を用いたため、一次電圧の変動その他により次に示すごとく溶接条件がかなり変化した。

開路電圧 44~46V, アーク電圧 34~36V, 溶接電流 380~460A, なお鋼線供給速度を 7m/min とし、ビード進行速度を 40cm/min. とした。

3. 実験結果

(i) 炭素, 珪素, マンガンおよびチタンの減耗

送給ガスの酸素混合率の増加による溶着金属の炭素, 珪素およびマンガン含量の変化を Fig. 1~4 に示す。これらは母材がそれぞれリムド鋼, セミキルド鋼, キルド鋼および 55kg/mm² 高張力鋼の場合である。キルド鋼の場合 (Fig. 3) を除きいずれの母材の場合も、大体同様の傾向を示している。すなわち送給ガスの酸素混合率の増加とともに、マンガンの減耗が急激となり、珪素の減耗はややゆるやかである。キルド鋼の場合は Fig. 3 に示すごとくマンガンの変化と珪素の変化に著しい差違は見られない。炭素はいずれの場合もほとんど変化しないように見える。

母材鋼の種類にかかわらず、Fig. 1~4 に見られるごと

く、酸素混合率45~60%附近からさらに急激にマンガンの減耗が著しく、珪素が消費している。(Fig. 3 については70~80%附近)。リムド鋼, セミキルド鋼の場合は、すでに「炭酸ガス関口線材アーク溶接法について」(第6報) Fig. 6¹⁾ に

Fig. 2 Relations between oxygen content of supplied gas and contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a semi-killed steel

Fig. 1 Relations between oxygen content of supplied gas and contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a rimmed steel

Fig. 3 Relations between oxygen content of supplied gas and contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a killed steel

Fig. 4 Relations between oxygen content of supplied gas and contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a high tensile steel

示したごとく、この酸素混合率45~60%附近から気孔が発生し始める。キルド鋼および高張力鋼については酸素混合率70~80%附近から気孔が発生し始めている。

また溶着金属の酸素含量も Fig. 5²⁾ に示すごとく、送

Fig. 5 Relation between oxygen content of supplied gas and the total oxygen content of weld metal with the gas²⁾

給ガスの酸素混合率50%附近までは大して変化なく、これ以上の混合率になると急激に上昇している。

母材がリムド鋼の場合の溶着鋼のチタン含量の変化を Fig. 6 の下部に示す。チタンは送給ガスが炭酸ガスの場合に後述 Fig. 13 に示すごとく、すでにその76%が酸

Fig. 6 Relations between oxygen content of supplied gas and contents of phosphor, sulphur and titanium of weld metal

Remarks : ○...Content of phosphor
●...Content of sulphur
⊗...Content of titanium

化消耗し、送給ガスに酸素が40%以上混合されると、85%以上が酸化消耗する。そして溶着金属にはほとんど痕跡程度しか残らない。

(ii) 燐および硫黄含量の変化

溶着金属の燐および硫黄含量は送給ガスの酸素混合率の増加によって Fig. 6 に示すごとくほとんど変化しない。母材鋼板の燐および硫黄含量の差によって若干の相異が現われているのに過ぎない。

(iii) スラッグの生成量

Fig. 7 Increment of amount of slag produced by $\text{CO}_2\text{-O}_2$ arc welding with increasing of oxygen content of supplied gas

CO₂-O₂ アーク溶接において、送給ガスに酸素を混合することにより、スラグ生成量が多くなり、ビードを一様に蔽い、このためビード形状が改善され、またスラグ自身の剥脱性も良くなることはすでに報告した³⁾。Fig. 7 によると、送給ガスの酸素混合率の増加とともに生成スラグの重量が増大する傾向があることが明らかである。勿論スラグ生成量は母材、電極鋼線の組成および溶接条件によっても変わる筈である。本実験の場合は、前述の厚さ 10mm セミキルド鋼板上に Table 1 に示す組成の DS1 鋼線を用い、アーク電圧 27V、溶接電流 480A、溶接ビード進行速度 40cm/min. で自動的にシングルビードを置き、生成スラグを剥脱せしめ秤量した結果である。スラグ量はビード 10cm 当りの重量として表わしてある。

(iv) スラグの組成

送給ガスの酸素混合率の増加によるスラグ組成の変化を、Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8 は母材がセミキルド鋼の場合、Fig. 9 は母材が高張力鋼の場合である。スラグは MnO、SiO₂ および FeO の和が 90~98% を占めている。送給ガスが炭酸ガスだけの場合は、MnO、SiO₂ および FeO の合計は 89% でやゝ低い。これは Fig. 7 に示したごとく、炭酸ガスだけの場合はスラグ生成量がきわめて少く、しかもチタンはこの場合すでにほとんど消耗するので、TiO₂ の成分が相対的に多いためと考えられる。

スラグの SiO₂ 含量は最高 33% で不飽和珪酸塩である。Fig. 8 および Fig. 9 において酸素混合率が数% から約 50% の範囲で、(SiO₂+MnO) が極大値に達する。これに対応してスラグの FeO 含量は、純炭酸ガスで被包する場合よりもこの範囲の酸素を含む混合ガスを送給する場合の方がやゝ低い。しかし酸素混合率の一層の増加とともに約 50% 附近から再び急激に上昇している。すなわち Fig. 8 およ

Fig. 8 Change of contents of slag constituents with the change of oxygen content of supplied gas in case of CO₂-O₂ arc welding
Remarks: —base metal, semi-killed steel electrode, DSIL

Fig. 9 Change of contents of slag constituents with the change of oxygen content of supplied gas in case of CO₂-O₂ arc welding

Remarks: —base metal, high tensile steel electrode, DSIL

び Fig. 9 のごとく送給ガス中の酸素が約 50% 以下の場合は、スラグ中の FeO 含量が低いので Fig. 5 のごとく溶着鋼の酸素含量がこの範囲では高くないものと考えられる。

Fig. 5 において送給ガスの酸素混合率が約 50% を越えると、溶着鋼の全酸素含量が増加する傾向は前記スラグ中の FeO 含量の増加に対応するものと考えられる。CO₂-O₂ アーク溶接法では普通、酸素を約 28% (アルゴン流量計の読みで CO₂:O₂=30:10cfh) 添加している。したがってこの場合にはスラグ中の FeO 濃度は高くなく、溶着鋼の酸素含量は高くない範囲内にある。

4. 脱酸性元素炭素、珪素およびマンガンの含量低下または減耗率と気孔生成との関係

一般に CO₂-O₂ アーク溶接においては、電極鋼線および母材の脱酸剤含量が溶着金属の気孔防止に重要な関係を有している⁴⁾。また電極鋼線および母材の脱酸剤含量の相異によって、溶着鋼に気孔が発生し始める限界の送給ガス酸素混合率が異なる¹⁾。Fig. 5 にはこの傾向が現われている。

本実験でも Fig. 1~4 に示したごとく、送給ガスの酸素混合率の増加とともに、珪素およびマンガンの著しい消耗に対応して、母材がリムド鋼およびセミキルド鋼の場合には混合率 46% 乃至 56% 以上でビードに気孔が発生している。また母材がキルド鋼および高張力鋼すなわち珪素およびマンガン含量の高い場合には、混合率 77% 以上で、ビードに気孔が発生している。

これらの現象については既報の研究³⁾ において述べたごとく、次の 3 式の反応

の相互関係によって理解できる。ここで $[\]$ は溶融鋼中の成分濃度、 $(\)$ はスラグ中の成分濃度を表わす。

しかし Fig. 1~4 の溶着鋼の残留炭素含量は、送給ガスの酸素混合率が増加して珪素およびマンガンが消耗し、気孔が発生するに至るも、これに対応した著しい変化を示していない。これは気孔生成の原因となる炭素の消耗量がきわめて僅かであるためと考えられる。例えば 100g の鋼に対し 0.001% の炭素の消耗は 1500°C で 12cc の CO ガスを発生する。溶着鋼の残留炭素含量のこの程度の変化は、ビード形状および溶込みの影響すなわち母材の混合率の相異¹⁾ その他分析誤差等のため Fig. 1~4 には現われていないものと思われる。

Fig. 10 Section of bead

そこで Fig. 10 に示す如く、ビード横断面の余盛部分 A と溶込部分 B の断面積を、各試片について数箇所宛

測定し、それぞれの平均を求めた。今母材および鋼線中の元素は溶接に際し減耗しないと仮定すると、母材の溶融および鋼線の溶融によって生じたビード中に存するある元素の全量 P は次式で示される。

$$P = AlrE_a + BlrE_b \quad \dots\dots\dots(4),$$

ここで l : ビードの長さ

r : ビードの比重

E_a : 電極鋼線の元素含量, 重量%

E_b : 母材の元素含量, 重量%

次にビードの全重量は次式で表わされる、

$$W = (A+B)lr \quad \dots\dots\dots(5)$$

したがって溶接に際し元素は減耗しないと仮定した場合のビードの元素含量 E_t は次式で表わされる、

$$E_t = \frac{P}{W} = \frac{AE_a + BE_b}{A+B} \quad \dots\dots\dots(6)$$

しかし溶接または溶着に際しては、アーク雰囲気による酸化その他によって元素は減耗して、ビードの実際の元素含量は $E_a\%$ となる。この差 $E_t - E_a = \Delta E\%$ を、元素含量の低下と称することにする。すなわち元素含量の低下は次式で示される。

$$\Delta E = \frac{AE_a + BE_b}{A+B} - E_a \quad \dots\dots\dots(7)$$

本研究の溶着に際して炭素、珪素およびマンガンが如何に減耗したかを示すと Fig. 11 および Fig. 12 のごとくである。前者は母材鋼がセミキルド鋼の場合、後者は高張力鋼の場合である。何れも縦座標には元素含量の低下 $\Delta E\%$ がとっており、横座標には送給ガスの酸素混合率がとっている。

次に溶着に際しての元素の減耗率について考えよう。ビ

Fig. 11 Relations between oxygen content of supplied gas and decrease of contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a semi-killed steel

Fig. 12 Relations between oxygen content of supplied gas and decrease of contents of carbon, silicon and manganese of weld metal on a high tensile steel

ード溶着に際し実際にある元素が減耗した全量を Q とすれば次式で表わされる、

$$Q = \Delta E(A+B)lr \quad \dots\dots\dots(8)$$

またビード溶着のため、溶融した母材部および溶融した鋼線部に存在した元素の総量は、溶着に際しその元素が減耗しないと仮定した場合のビード中に含まれるその元素の全量 P に等しい。そこでこの元素の溶着に際しての実際の減耗率 μ は(4)および(8)式から誘導でき、次式で与えられる。

$$\mu\% = \frac{Q}{P} \times 100 = \frac{\Delta E(A+B)}{AE_a + BE_b} \times 100 \quad \dots\dots\dots(9)$$

この減耗率 $\mu\%$ を縦座標にとり、送給ガスの酸素混合率を横座標にとって図示すると、Fig. 11 に対応して Fig. 13

Fig. 13 Relations between oxygen content of supplied gas and decrease rates of carbon, silicon, manganese and titanium of weld metal on a semi-killed steel

Fig. 14 Relations between oxygen content of supplied gas and decrease rates of carbon, silicon and manganese of weld metal on a high tensile steel

が得られ、Fig. 12 に対応して Fig. 14 が得られる。

Fig. 13 および Fig. 14 によれば、珪素およびマンガン
の減耗率はほぼ等しいことが認められる。

Fig. 11 および Fig. 13 によれば、母材がセミキルド鋼
の場合には気孔の発生する酸素混合率56%以上では、珪素
およびマンガンの含量低下が著しく、また両元素の減耗率
が高いのに対応して、炭素含量の低下4E%がわずかに認
められ (Fig. 11 参照)、炭素減耗率 $\mu\%$ の増大が明らか
に認められる。(Fig. 13 参照)。

Fig. 2 に示したごとく、酸素混合率56%におけるセミキ
ルド鋼母材上の溶着鋼の珪素含量は0.12%およびマンガン
含量は0.51%である。したがって送給ガスの酸素混合率
が増大し、溶着鋼の珪素およびマンガンが減耗し、0.12%
珪素および0.51% Mn 程度になると、前述(1)式の反応が

右方に進行して一酸化炭素を生じ、その一部は凝固中に逸
出できないで、気孔が生じたものと考えられる。

また Fig. 12 および Fig. 14 の高張力鋼母材の場合には、
酸素混合率の増加により、セミキルド鋼母材の場合と同
様、珪素およびマンガンの含量低下が著しく、減耗率が高
くなるが、炭素の含量低下および減耗率増大はわずかであ
る。そして酸素混合率77.3%以上で気孔を発生している。
Fig. 3 および Fig. 4 に示したごとく、酸素混合率77.3%に
おけるキルド鋼および高張力鋼母材の珪素およびマンガン
含量はそれぞれ；0.18珪素、0.53%マンガンおよび0.16%
珪素、0.55%マンガんで、この程度珪素およびマンガンが溶
着鋼に存在すれば、気孔はいまだ発生していない。したが
って(1)式の反応が右方に進行して、気孔を発生するか否か
の限界の脱酸剤含量はこれらの値の間、すなわち珪素0.12
~0.16%、マンガン0.51~0.53%にあるものと思われる。

これらの実験結果は、 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接において、前
述(1)、(2)および(3)式の反応の相互関係が溶着鋼気孔生成に
密接な関係を有することを示すものである。

5. 結 び

$\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接法における諸反応を明らかにする目
的で送給ガスの酸素混合率を種々変えて、リムド鋼、セミ
キルド鋼、キルド鋼および55kg/mm² 高張力鋼板上にビ
ードを溶着した。そして、溶着鋼および生成スラグの化学
分析を行い、送給ガスの酸素混合率と溶着鋼の諸元素含量
ならびに生成スラグの組成との関係を明らかにした。また
溶着鋼の脱酸性元素の含量低下または減耗率と気孔生成と
の関係を調べた。

$\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接の際の溶融鋼内で起る炭素、珪素お
よびマンガンの酸化反応については、第2報で考察する予
定である。

本研究の遂行に当っては、恩師関口春次郎博士から終始
懇切な御指導を蒙った。同教授に対し深厚なる感謝の意
を表する。なお実験に当たり大同製鋼株式会社研究所より多
大の便宜を与えられた。同所長錦織清治博士、同所員岡田
泰治技師ならびに関係各位の御支援御協力に対し深謝す
る。

文 献

- 1) 関口、益木；“炭酸ガス関口線材アーク溶接法につ
いて (第6報) 一炭関アーク溶接法によるビードの
形状”，27 (1958) No. 1, 31~35
- 2) H. Sekiguchi & I. Masumoto; Low Crack Sensi-
tivity of Steel Joint by $\text{CO}_2\text{-O}_2$ Arc Welding,
The Welding Journal, 37(1958), No.7, 327-s~387s
- 3) 関口、益木；炭酸ガス関口線材アーク溶接法につ
いて (第5報) 一送給ガス中の酸素の効果，26 (1957)
No. 11, 702~707
- 4) 関口、益木；同上 (第4報) 一リムド鋼の溶接なら
びに溶着金属の遷移温度，26 (1957) No. 9, 573~
578