講 義

鋼材融接における脱酸および溶接鋼の
衝撃値に及ぼすその影響*

関 口 春 次 郎**

Deoxidation in Steel Fusion Welding and Its
Effect on Impact Value of Weld Steel*

By Harujiro Sekiguchi*

序

著者は1964年3月31日定年のため名古屋大学教授を辞した。その2週間前すなわち3月16日同大学において、「溶接鋼についての関口理論、溶接用鋼線についての関口提案およびそれらの工業的応用」と題し、最終講義を行なった。また大同工業大学の開学記念日にあたり、鋼材溶接の研究と実用化の一例」と題し、記念講演を行なった。

その後、これら講義および講演の内容を一つの書物として公にすることを薦められ、同年8月10日次の書を公にした。

鋼材融接理論、提案及び応用……………(A)

なお、これを英訳し同年10月30日公表したのが、次の書である。

Theory and Proposal on Steel Fusion

Welding and Their Applications ……………(B)

これを著者は国際溶接学会およびその会員学会たる諸国(31ヶ国)の溶接関係学協会(66団体)に贈った。

また、これら両書の原稿執筆中に著者は、名古屋大学教授益本功博士の薦めおよび東ドイツ国マクデブルグ工科大学教授 Dr. rer. nat. M. Beckert の要請に応え、「鋼材融接における脱酸および溶接鋼の衝撃値におよぼすその影響」と題する英文論文を、同年6月、4. Internationales Kolloquium, Magdeburg, 1964 の準備を担当して居られた Beckert 博士に送付した。この論文は同大学の Institut für Schweisstechnik の Prof. Dr. R. Probst によって、つぎのようにドイツ語に訳され、

Desoxydation bei der Stahlschmelzschweissung
und ihr Einfluß auf die Kerbschlagzähigkeit
des Schweissgutes ……………(C)

11月10日上記 Kolloquium で配布され、同博士によってその内容が著者に代って発表された。その後討論が行なわれたのであるが、この Kolloquium には富士溶接棒株式会社研究所長森本泉氏がが出席されたので、上記文献の質疑に対しては同氏が応答に当って下さった次第である。このドイツ語論文は近く、つぎの二誌に掲載されるところである。

Der Wissenschaftlichen Zeitschrift der TH Magdeburg, Der Zeitschrift "Schweisstechnik".

なおドイツに送った英語論文は次の題名であったが、

Deoxidation in Steel Fusion Welding and Its
Effect on Impact Value of Weld Steel …(D)

この英語論文は大同工業大学紀要 (Bulletin of Daido Technical College) の第1集 (No. 1) に英文のまま掲載されることとなった。

これらドイツ語論文 (C) および英語論文 (D) は前記の書物 (A または B) を圧縮し、脱酸と衝撃値とに関しまとめ記述したものである。

他方において著者は本学会の溶接冶金研究委員会の依頼を受け、前記書物Aの内容を、8月3日に約2時間にわたり、解説した。その後、本学会誌の講義欄に著書Aの内容を適当に圧縮して掲載するよう要請を受けた次第である。

そこで著者は熟考した。そしてこの要請に対しては「前記論文 (C または D) を日本語でしたため提出すればおおむね宜しかろう」との結論に達した。著者は前に述べたとおり定年で退官したのであるが、その後も比較

* 原稿受付 昭和40年1月16日

** 名 誉 員 大同工業大学, Honorary Member, Daido Technical College

的に多忙である。そこで我儘ではあるが、上記のようにすることを御許し願いたい (E)。

すなわち、ここに掲げる内容はドイツ語 (C)、英語 (D) および日本語 (E) で発表されることを御了承いただきたい。なお講義は次の項目につき順次述べる予定である。さらに詳細を知られたい方は、邦文著書 (A) または英文著書 (B) を参照されたい。

【講義項目】

I. 緒 言

II. 溶接鋼についての関口理論

1. Fe-Mn-Si-O 系融液についての計算および図示
2. 清浄な鉄または鋼を得るための条件
3. 変形能および耐衝撃性大なる溶接鋼を得るための条件
4. 鋼材の溶融溶接に際して起こる諸要望に対する考慮

III. 溶接用鋼線についての関口提案

IV. 関口理論および関口提案の応用

1. 溶融鋼がほとんどガスだけと接触する場合
2. 溶融鋼がフラックスと接触する場合
3. ガスとフラックスとを用いる場合

V. 総 括

引用文献

I. 緒 言

著者は1938年、「鋼の電弧溶接用電極棒心線の研究」を公表し、鋼の溶融溶接に際し脱酸効果の顕著なことを明らかにした^{1,2)}。その後 H. Schenck の著書³⁾ C.H. Hertzy の著書⁴⁾ および F. Körber & W. Oelsen の論文⁵⁾ を読んで、Mn および Si による共同脱酸を重視する必要がある、この考えかたは鋼材の溶融溶接によって得られる溶接鋼についても重大な意味を有することに気付いた。

そして Körber-Oelsen 論文の結論から出発して計算および考察を行ない、1950年関口理論^{6,7)}を公表した。また「良好な溶接鋼を得るための一手段として Mn および Si の適量を含む鋼線を溶接用鋼線または被覆溶接棒の心線として用いるのが一案である」ことを主張する関口提案を、1951年に日本^{8,10)} および米国⁹⁾ で公表した。

その後関口提案は日本の溶接工業界でまず酸素・アセチレン溶接の場合充填材として実用されるようになった^{11,12)}。ついで著者は CO₂ アーク溶接法について攻究し¹³⁾、さらに CO₂-O₂ アーク溶接法を創始した¹⁴⁻¹⁶⁾。そしてこれらの溶接には関口提案を応用した鋼線が充填用鋼線として好適であることが明らかとなった。日本における CO₂-O₂ アーク溶接法の最近の進展については、1962年国際溶接学会で報告した¹⁷⁾。

なお関口提案の応用は日本では他の種々の溶融溶接法に対しても拡がりつつある。

また諸研究所および生産工場の試験結果によれば、種々の溶融溶接で得られる溶接鋼の Mn および Si についての化学組成が、関口理論の示すところに合致している場合は、その機械的性質中の伸びおよび衝撃値が優れていることが明りようとなった。

この講義においては、関口理論および関口提案の概要をのべ、ついで日本における鋼材溶接部の溶接鋼についての伸びおよび衝撃値を紹介したい。

II. 溶接鋼についての関口理論

1. Fe-Mn-Si-O 系融液についての計算および図示

Körber および Oelsen はケイ石ルツボを使用し、FeO-MnO-SiO₂ 鉱滓と溶融鉄とを平衡に達せしめ、まずケイ素平衡を、ついでマンガン平衡を研究した。その結果に基づき両氏は、SiO₂ で飽和した FeO-MnO-SiO₂ 鉱滓のもとにおける両平衡は、つぎの (A)、(B) および (C) 式で表わし得ると述べている^{3,5)}。

FeO + Mn ⇌ MnO + Fe に対し、

$$K_{Mn}^S = \frac{(\Sigma FeO)[Mn]}{(\Sigma MnO)} \dots\dots\dots (A)$$

2 FeO + Si ⇌ SiO₂ + 2 Fe に対し、

$$K_{Si}^S = (\Sigma FeO)^2 [Si] \dots\dots\dots (B)$$

鉱滓と金属との間における FeO の分配について、

$$L_{FeO}^S = \frac{[FeO]}{(\Sigma FeO)} \dots\dots\dots (C)$$

ここで K_{Mn}^S および K_{Si}^S は鉱滓が SiO₂ で飽和した場合のマンガン平衡およびケイ素平衡の濃度平衡恒数であり、 (ΣFeO) および (ΣMnO) は、それぞれこの場合の鉱滓中の全酸化鉄および全酸化マンガンの濃度である。また L_{FeO}^S はこの場合の分配恒数である。

著者はこれら三つの式から、つぎの四つの式を誘導した⁶⁾⁻¹⁰⁾。まず、

$$[FeO] = \frac{50 L_{FeO}^S \cdot K_{Mn}^S}{K_{Mn}^S + [Mn]} \dots\dots\dots (1)$$

$$[Si] = \frac{K_{Si}^S \cdot L_{FeO}^S}{[FeO]^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$[Mn] = K_{Mn}^S \left\{ 50 \sqrt{\frac{[Si]}{K_{Si}^S}} - 1 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

なお著者は H. Schenck の式³⁾および次式を用いて

$$(FeO) = \frac{[FeO]}{L_{FeO}}$$

つぎの (4) 式を誘導した⁶⁾⁻¹⁰⁾。

$$[Si] = K_{Si} \cdot \frac{100 - \frac{[FeO]}{L_{FeO}} \left(1 + \frac{[Mn]}{K_{Mn}} \right)}{\left(\frac{[Fe]}{L_{FeO}} \right)^2 + \left(\frac{[FeO]}{L_{FeO}} \right)^4 \left(\frac{1}{D_{(FeO)_2SiO_2}} + \frac{[Mn]^2}{K_{Mn}^2 \cdot D_{(MnO)_2SiO_2}} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $[Mn]$, $[Si]$ および $[FeO]$ は、溶融鉄中のそれぞれの濃度, K_{Mn} , K_{Si} および L_{FeO} は鉍滓中に SiO_2 が少ない場合の Mn または Si による脱酸反応の平衡恒数および FeO の分配恒数 (溶融鉄および鉍滓に対する) である。また $D_{(FeO)_2SiO_2}$ および $D_{(MnO)_2SiO_2}$ はそれぞれ解離恒数である。

K_{Mn}^S , K_{Si}^S , L_{FeO}^S , K_{Mn} , K_{Si} , L_{FeO} , $D_{(FeO)_2SiO_2}$ および $D_{(MnO)_2SiO_2}$ は、いずれも温度の函数であり、これらは諸研究者によってつぎのように報告されていた。

$$\left. \begin{aligned} \log K_{Mn}^S &= -\frac{7940}{T} + 3.172 \dots\dots\dots (a) \\ \log K_{Si}^S &= -\frac{19057}{T} + 11.101 \dots\dots\dots (b) \\ L_{FeO}^S &= 3.8 \times 10^{-5} t - 0.0512 \dots\dots\dots (c) \\ \log K_{Mn} &= -\frac{6234}{T} + 3.026 \dots\dots\dots (d) \\ L_{FeO} &= 5.588 \times 10^{-4} t - 0.0793 \dots\dots\dots (e) \end{aligned} \right\} \text{Köber-Oelsen}$$

$$\left. \begin{aligned} \log K_{Si} &= -\frac{11106}{T} + 4.50 \dots\dots\dots (f) \\ \log D_{(FeO)_2SiO_2} &= -\frac{11230}{T} + 7.76 \dots\dots\dots (g) \\ \log D_{(MnO)_2SiO_2} &= \frac{18880}{T} + 10.77 \dots\dots\dots (h) \end{aligned} \right\} \text{Schenck-Brüggemann}$$

ここで T は絶対温度 $^{\circ}K$, t は温度 $^{\circ}C$ を示す。すなわち温度が一定な場合には、これらは恒数である。著者はこれらの式 (a)~(h) を用いて、 $1510^{\circ}C$ に対するこれら恒数を計算し、それらを前記 (1)~(4) 式に代入して計算を進め、図-1 における境界線および多くの等酸素濃度線を図示した⁶⁾⁻¹⁰⁾。

同図において、曲線 $G'F'$: (3) 式

溶融鉄の酸素濃度を 0.002 とすれば、つぎの線が得られる。

直線 ij : (2) 式

" jk : (1) 式

曲線 lk : (4) 式

図-1 $1510^{\circ}C$ において平衡している溶融鉄の酸素濃度, マンガン濃度およびケイ素濃度の関係 (備考) 界域 I 内の直線および界域 II 内の曲線は、等酸素濃度線を示す。

(1) 式で表わされる直線 jk と (4) 式で表わされる曲線 lk とが交わる点 k 付近においては、溶融鉄と平衡する鉍滓は SiO_2 飽和の条件が著しく満たされないため、(1) 式の適用には無理があり、また鉍滓中には SiO_2 がやや多く存するため、(4) 式の適用もまた妥当ではない。そこで等酸素濃度線は k 点を経過せず、 $jk'l$ のようになるものと思われる。

同様に溶融鉄の酸素濃度として種々の値を決めれば、多くの等酸素濃度線が得られる。図-1 にはこれらが示されており、上方または右方ほど、溶融鉄の酸素濃度の低いことが明らかである。

2. 清浄な鉄または鋼を得るための条件

Körber-Oelsen によれば、図-1 の界域 I, II および III において、脱酸生成物として溶融鉄中に分離し分散するものは、図-2 に記入したとおりである。

図-2 溶融鉄の組成とそれより分離する脱酸生成物の形態との関係 (鉄の凝固点直上における平衡状態図)

溶融鉄中に溶けて存する FeO すなわち酸素は、温度降下につれ Si および Mn に対して不安定となり、冷却によって脱酸反応は進行する。凝固に際しても FeO の消費が起こる。すなわち晶出した金属は残留している溶融金属と組成を異にするから、つぎのように FeO の消費が起こる。まず凝固金属の Mn および Si 含量は小であるから、残留溶融鉄におけるこれら元素含量は大となる。しかし両元素の濃度の比は依然として凝固開始前の溶融鉄における両者の比とはほぼ等しい。

H. Schenck の著書³⁾ (Bd. II) には、この現象が明りように説明されている。すなわち図-3 において、凝固開始前の溶融鉄の $[Mn]$ 濃度を横座標にとり、 $[Si]$ 濃度を縦座標にとり、たとえば X, Y, Z, U, V および W 点のごとく図示すれば、凝固の進行につれ、残留溶融鉄の組成は、ほぼ原点とこれら諸点の各々を結ぶ直線の延長線に沿って変化する。この場合、凝固鉄の Si および

図-3 溶融鉄の凝固に際して起こる Mn および Si による脱酸の経過
(備考) 曲線 G'F' は 1,510°C に対する計算結果を示す。

Mn 濃度は小であり、その組成を示す点はほぼ原点付近にある。ある金属浴の Mn および Si 含量が凝固開始直前 X 点によって表わされるとすれば、脱酸によってまず固態の SiO_2 のみが生ずる。

凝固晶出の進むにつれ、残留溶融鉄の Mn および Si 含量は XX' に沿うて増す。そして X' に至って初めて残留溶融鉄中に飽和ケイ酸塩溶液が生じ、 X' を越えて不飽和ケイ酸塩溶液が生ずる。残留溶融鉄の組成が X' に達したとき、凝固金属の量がいくらであるかは、槓桿関係により知ることができる。すなわち残留溶融鉄の量 M_l と凝固した金属の量 M_s との間にはつぎの関係がある。
 $M_l : M_s = XA : XX'$

ここに XA および XX' は各線分の長さを示す。すなわちこの場合には、全金属の70%が既に凝固して初めてケイ酸塩溶液が分離する。同様にして境界線に近く位置している溶融鉄 Y は、ケイ酸塩溶液を生ずる前に40%凝固せねばならない。また Z は16%凝固する。しかるに溶融鉄 U は凝固の初めからケイ酸塩溶液を生ずる。つぎに溶融鉄 V は凝固の初めにはケイ酸塩溶液を生ずるが、凝固の進行につれ、残留溶融鉄の組成はついに界域 III 内に進入する。そして FeO-MnO 固溶体を分離する。また溶融鉄 W は凝固の初めよりこの固溶体を分離する。

溶融鉄より分離する脱酸生成物は、初め溶融鉄中に分散し懸垂しているが、溶融鉄との比重の差によりしだいに浮揚し、ついには鋇滓(スラグ)層内にはいる傾向がある。したがって溶融鉄が長く溶融状態にあれば、脱酸生成物は金属層より逸出する。しかし溶融鉄の温度が低下し、ついに凝固現象が開始すれば、残留溶融鉄中ではまた前述のように脱酸生成物が現われる。そしてその浮揚に十分な時間は与えられない。そこで脱酸生成物が一部残留しがちである。

以上の記述は Prof. H. Schenck の解説であるが、いま脱酸生成物を球状と仮定すれば、その浮揚速度は Stokes の法則により次式で表わされる。

$$C = \frac{2}{9} g r^2 \frac{S_M - S_D}{\eta}$$

$$\text{または } C = \frac{2}{9} g \frac{S_M - S_D}{\eta} \left(\frac{3}{4} \frac{V}{\pi} \right)^{2/3}$$

ここで C: 脱酸生成物の浮揚速度, cm/sec

g: 重力による加速度, 981 cm/sec²

η : 溶融鉄の粘性係数

S_M : 溶融鉄の密度, g/cm³

S_D : 脱酸生成物の密度, g/cm³

r: 脱酸生成物粒子の半径, cm

V: 脱酸生成物粒子の体積, cm³

したがって球状粒子の上昇速度は、半径の二乗あるいは体積の $\frac{2}{3}$ 乗に比例して増す。

脱酸生成物粒子が融液であれば、表面張力により球状を呈し、しかも小粒子はたがいに凝集して大粒となる傾向がある。すなわち半径または体積は大となり、各粒子はすみやかに溶融鉄の表面に浮きあがる。しかるに脱酸生成物が固態ならば、球状より偏倚した針状結晶であり、凝集し難い。したがってこれは著しく小さい速度で溶融鉄中を上昇し得るにすぎない。かような理由で、脱酸生成物は融液であることが望ましい。

3. 変形能および耐衝撃性大なる溶接鋼を得るための条件

変形能および耐衝撃性の大きな溶接鋼を得るためにはつぎの条件を満たす必要がある。

(A) 凝固鋼には、異相的に介在する脱酸生成物ができるだけ少ないことが望ましい。

(B) 凝固鋼中に固溶する酸素ができるだけ少ないことが望ましい。

このため、凝固前の溶融鋼についても

(A') 異相的に懸垂している脱酸生成物になるべく少ないこと、

(B') 溶解している酸素がなるべく少ないこと

が望ましい。したがって、次の諸項に留意することが肝要である。

(1) (A') の条件を満たすためには、2節で述べたように、脱酸生成物は融液であり、これがすみやかに溶融鋼中を浮揚し、溶融金属から分離して溶融スラグ層内にはいることが望ましい。

すなわち、溶融鋼の化学組成を示す点は、図-1 (または 図-2, 図-3) の界域 II 内になければならない。

(2) (B') の条件が満たされるためには、溶融鋼の化学組成を示す点は図-1の界域 II 内で、しかも

右上方がよい。しかし界域Ⅱ内である限界を越えた右上方の組成点で示される溶融鋼からの凝固鋼は、多量の Mn および Si を含むから、これら合金元素のために、鋼の引張強さ、降伏点、硬さなどはいよいよ大となるが、変形能や耐衝撃性はかえって小となる可能性が考えられる。

そこで変形能および耐衝撃性の大きな鋼の化学組成点は、界域Ⅱ内の右上方で、しかも適当な位置にあるはずである。

- (3) なお、真に清浄な鋼を得るため、凝固直前の溶融鋼の化学組成点が、前記(1)の条件を満たすばかりでなく、過去のいかなる時期にも、組成点が界域ⅠまたはⅢ内になく、界域Ⅱ内にあることが望ましい。

このような理論はすべての溶融溶接によって生ずる継手の溶接鋼(または溶着鋼)について有用と思われる。

この理論は関口理論と呼ばれている。

4. 鋼材の溶融溶接に際して起こる諸要望に対する考慮

溶接にあたっては、溶接ビードの外観、溶接速度、溶接姿勢などについて要望があり、また得られる溶接鋼の強さ、硬さおよび耐蝕性などについても種々の程度が要求される。そして溶接鋼の変形能や耐衝撃性のみが肝要なのではない。これら性質を多少犠牲にしても前記諸要望のうちのいずれかを満さねばならないことがある。

しかし溶接された鋼構造物は一般には変形能があり衝撃に耐え得ることが安全であり、これらが通常は望まれている。したがって一般には前節3の記述を重視することが妥当である。

III. 溶接用鋼線についての関口提案

優秀な溶接鋼を得るには、溶接用鋼線の化学組成を適当のように選ぶことが、妥当な方法である。

(1) 溶接用鋼線の Mn および Si 含量を示す組成点

図—5 鋼用ガス溶接棒の化学組成とV型継手の衝撃値
(備考) 後退法で溶接したまま

を図—1の界域Ⅱ内に置く。

- (2) 被覆の組成および量にしたい。または被包ガスの本性および送給量などにより、溶接用鋼線の Mn および Si 含量を適当に高くする。

この構想を論文として公表したのは、昭和25年(1950)^{8,9)}であり、また実用上の提案として組織的に解説したのは、昭和26年(1951)^{8,9)}および27年(1952)¹⁰⁾であった。これは溶接用鋼線についての関口提案と称されている。

IV. 関口理論および関口提案の応用

溶融溶接法をつぎの三つに分類して、

- 溶融鋼がほとんどガスだけと接触する場合
- 溶融鋼がフラックスと接触する場合
- ガスとフラックスを用いる場合

それぞれについて、関口理論および関口提案応用の実例を述べる。

1. 溶融鋼がほとんどガスだけと接触する場合

酸素・アセチレン・ガス溶接の場合の応用実例を挙げると、図—4¹²⁾および図—5¹²⁾のようである。前者は著者が得たデータであり、後者はスイス国の C.G. Keel 博

図—4 鋼用ガス溶接棒の化学組成と溶接鋼の機械的性質

(備考) ●点近傍の小さい長方形内に示した数値は図の左上部に示した機械的諸性質をあらわし、その順序も同一である。

士のデータを著者が図示したものである。図-5によれば界域Ⅰ内に組成点を有する充填用鋼線による溶接鋼の衝撃値は小さく、界域Ⅱ内の点線で包んだ部分に組成点を有する鋼線による溶接鋼の衝撃値は大きい。図-4についても、界域Ⅱ内の点線で示した包围線内では、衝撃値が大きい。伸びについてもおおむね同様である。

そこで大同製鋼株式会社では、図-6に示す DM 1, DM 2 および DM 4 と記した長方形で示す組成の鋼線を生産し、ガス溶接棒として供給している¹⁹⁾。

図-6 大同製鋼株式会社が製造している鋼用ガス溶接棒の組成範囲 (DM 1, 2, 4)

(備考) JIS G 3523 と記した長方形範囲は通常のアーク溶接棒の心線の組成範囲である。

つぎにガス被包アーク溶接法について述べる。

アルゴン・アーク溶接法には、図-7において△、×および◎点で示されている化学組成の鋼線が米国で使用されているようである。日本でも Mn および Si 含有鋼線が使用されている。図-7の×点および◎点は界域Ⅱ内にあり、関口提案に沿っている。

ソ連邦では CO₂ アーク溶接法として、初め図-8に示す長方形 ABCD, EFGH および IJKL の範囲を使用していたようである²⁰⁾が、その後長方形 QNSR および TUVW の範囲が推称されている²¹⁾。この傾向は関口提案に沿うものである。

図-7 Ar アーク溶接用鋼線の実例

図-8 ソ連の CO₂ アーク溶接用鋼線の組成範囲の変遷

(備考) 図中の長方形は鋼線の組成範囲を示し、4桁の数字は西暦年を示す。近年規格範囲が G'F' 曲線の下に移ったことがわかる。

・ : 鋼線 QNSR から得られた溶接鋼
× : 鋼線 TUVW から得られた溶接鋼

しかし国際溶接学会では、1963年に図-9内の諸長方形で示す範囲の化学組成を有する鋼線を、ガス被包アーク溶接用鋼線として推称した²²⁾。これらは曲線 G'F' にまたがっており、関口提案を顧慮していない。著者は、これは改訂さるべきものと考えている。

CO₂-O₂ アーク溶接法は、著者らによって研究し創始されたのである¹⁴⁾⁻¹⁷⁾が、CO₂ に O₂ を添加することにより、図-10のように溶融池の温度が上がるので、図-11のように溶込みが深くなる。したがって鋼材溶接にあたり、開先を省略または軽減でき、またアーク・スポット溶接が可能である。また充填すべき開先部が減ずるため、鋼線の必要量が減ずる。なお図-12に示すように、酸素添加により鋼線の溶融速度が大となる²³⁾。これらの事実に基づき、溶接速度は大きく、また溶接費を切り下げることができる。本法は1955年頃から日本で実用化され、その応用は年々増大している^{17, 24)}。この方法用の鋼

図-9 軟鋼のガス被包アーク溶接用裸鋼線に対する国際溶接学会規格案(1963)に基づく化学組成範囲

図-10 溶融池の温度におよぼす送給ガス酸素混合率の影響

図-11 ビード横断面の形状におよぼす送給ガスの混合酸素の効果

図-12 鋼線溶融速度におよぼす溶接電流ならびに送給ガスの影響

(備考) (1) それぞれのガス被包アーク溶接法実施にあたり適当な溶接条件を採用した
(2) 鋼線の直径: 1/16"
(3) 直流逆極性採用

図-13 CO₂-O₂ アーク溶接用鋼線の Mn および Si 含量

線としては、図-13のように、キルド鋼材溶接には0.3%以上のSiを含むものが適当であり、リムド鋼材に対しては0.5%以上のSiを含むものがよいとされている¹⁷⁾。X点、Y点の組成を有する鋼線は、キルド鋼にもリムド鋼にも適する。大同製鋼株式会社は図-14の中に示した二つの長方形範囲の鋼線を供給している¹⁷⁾。

日本における普通鋼々材および軟鋼用被覆アーク溶接

棒の年間生産量の変遷は図-15に示すようであり、後者の生産量の成長率は図-16の曲線3-3-3で示したとおりである。これに比べ、CO₂-O₂アーク溶接用機器の普及台数は図-16の曲線1-1-1のようであり、また図-14に化学組成を示したDS1鋼線の半年間需要量は

図-14 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接用鋼線の Mn および Si 含量についての製造内規

図-15 粗鋼, 普通鋼々材および軟鋼用被覆アーク溶接棒の年間生産量の変遷

図-16 炭関アーク溶接機器の普及台数の比, DS 鋼線年間需要量の比および軟鋼用被覆アーク溶接棒年間生産量の比の変遷 (備考) ●: 推定値

図-16の曲線 2-2-2 のように成長している²⁴⁾。本法応用の拡大が急激であることは、これらによって明りようである。

つぎに $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接法による溶接鋼の化学組成と衝撃値との関係を示すと、図-17および18のようである。領域 II 内の点線で包んだ範囲内に組成点を有する溶接鋼の衝撃値は、他に比べ大きい。すなわち関口理論の

図-17 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接して得られた溶接鋼の化学組成とシャルピー衝撃値 (20°C , kgm/cm^2) (備考) ●: リムド鋼を DS 1 で溶接した場合 △: 55 kg/mm^2 高張力鋼を DS 1 で溶接した場合
×: セミキルド鋼を " " □: 60 kg/mm^2 高張力鋼を DS 60 " " ○: キルド鋼を " " " " " "

図-18 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接して得られた溶接鋼の化学組成とシャルピー衝撃値 (-20°C , kgm/cm^2)
(備考) 図-17の備考参照

示すところと一致している。

2. 溶融鋼がフラックスと接触する場合

被覆棒によるアーク溶接の実験結果については、著者

図-19 鋼心線の Mn および Si 含量と溶接鋼の伸び
(備考) 黒点に付記した数字はその点の示す組成の鋼心線による溶接鋼の伸び (%) を示す

図-20 鋼心線の Mn および Si 含量と溶接鋼のシャルピー衝撃値
(備考) 黒点に付記した数字はその点の示す組成の鋼心線による溶接鋼のシャルピー衝撃値 (mkg/cm^2) を示す

は先に報告したことがある^{25,8)}。図-19によれば、界域 I に組成点を有する鋼線を心線とする被覆棒による溶接鋼の伸び (%) は、同酸素濃度線に近く位置し、しかも界域 II 内にある組成点を有する心線による場合に比べ、著しく小である。また図-20によれば衝撃値についてもほぼ同様のことが言える。

つぎに榊博士の研究報告²⁶⁾に基づき著者が図示したのが図-21である。溶接鋼の組成点の大部分は界域 I 内にある。同図において、各点に付記した数値のうち、比較的に小さい数値は溶接鋼の全酸素含量であり、比較的に大きい数値は衝撃値である。

図-21 塩基性被覆アーク溶接棒による溶接鋼の Si 含量, Mn 含量, 酸素含量と V ノッチ・シャルピー衝撃値 (kgm/cm^2) との関係
(備考) 鋼線の化学成分

0.014% C, 0.096% Mn, tr. Si, 0.003% P
0.014% S, 0.066% O
被覆剤: 石灰石・螢石型
石灰石48部, 螢石18部, ジルコン砂5部, 雲母4部

全酸素含量は高ケイ素含量となるにつれ初め減少するが、0.5% Si 以上の溶接鋼については必ずしも減少しない。これは図-1に示すように、溶融鉄または鋼中に溶けている酸素は、ケイ素の増加につれ減少するが、融液中に分離し懸垂している酸化物が多くなる(II章2節参照)ためと思われる。したがって溶接鋼の衝撃値もケイ素含量の増加につれ初めは大となるが、0.5% Si 以上ではかえって小となる傾向にある。また同じケイ素含量の溶接鋼については、マンガン含量の増すにつれ、全酸素含量は減ずる傾向にある。これは曲線 $G'F'$ に接近するにつれ、凝固に際し析出する酸化介在物が少なくなる(図-3参照)ためであろう。そして曲線に近づくにつれ衝撃値が大となっている。

図-21から推定すると、塩基性被覆アーク溶接棒による溶接鋼の組成点がさらに右に位置し界域II内にはいれば、衝撃値はさらに増大するようと思われる。

図-22は富士溶接棒株式会社研究所の実験値に基づき、著者が図示したものである。界域II内の点線で囲ま

れた範囲内に組成点を有する溶接鋼の衝撃値は他に比べ大である。この実験では、図中の×点で示す組成点を有する種々の鋼心線に、一種の被覆を施して得た被覆棒を使用し、被覆剤の組成は同一であった。

つぎに潜弧溶接結果の実例について述べる。

図-23は富士溶接棒株式会社研究所が、ボンドフラックスを用い、潜弧溶接して得た溶接鋼についての実験値を基として、著者が図示したものである。○点で示す化学組成の鋼線を用い、MnO 含量を異にする種々のフラックスにより得られた溶接鋼の化学組成は、図中の諸点・で示すように異なっている。そして衝撃値の大なる溶接鋼の組成点は、点線で示した包圍線内にあり、その範囲の大部分は界域II内にある。

また図-24~26は、八幡溶接棒株式会社における潜弧溶接による実験値に基づき、著者が図示したものである。図-24によると、使用フラックスの SiO_2 含量の低下につれ溶接鋼の Si 含量はおおむね減じ、また使用鋼線の Mn 含量の増加につれ、溶接鋼の Mn 含量は増大

図-22 特殊塩基性被覆アーク溶接棒による溶接鋼(全溶着鋼)のシャルピー衝撃値(2mm Uノッチ)と化学組成(備考) ●:全溶着鋼の化学組成点 ×:被覆溶接棒心線(鋼線)の化学組成点 被覆剤の組成はすべての場合同一

図-23 ボンド・フラックスにより潜弧溶接して得られた溶接鋼(全溶着鋼)の化学組成とシャルピー衝撃値(0°C)(備考) 多層溶接部(11パス)についての衝撃値

図—24 潜弧溶接用の充てん鋼線の組成およびフラックスの組成と溶接鋼（全溶着鋼）の組成との関係

(備考) (1) V型突合せ開先部を11パスで溶接した

(2) A, C, D および E 点は使用した鋼線の化学組成を示し, 1, 2, 3……15, 16 と記した諸点は得られた溶接鋼の組成点を示す. G 20, G 80, G 50 および G 90 は使用フラックスの記号であり, これらには SiO_2 および MnO の含量を示した.

図—25 潜弧溶接による溶接鋼（全溶着鋼）の化学組成とシャルピー衝撃値 (+20°C)

図—26 潜弧溶接による溶接鋼（全溶着鋼）の化学組成とシャルピー衝撃値 (-40°C)

していることが理解できる. すなわち溶接鋼の Mn およ

び Si 含量は, フラックスおよび鋼線の組成を変化することにより, ある限界内で自由に変化し得ることがわかる. そしてこの場合にも, 衝撃値の大なる溶接鋼の組成点が, 領域 II 内の適当範囲にあることは, 図—25 および 26 で明らかである.

図—27 には潜弧溶接用鋼線の化学組成点の実例を示す. ⊗ 点は八幡製鉄株式会社と八幡溶接棒株式会社とが製造供給している組成点であり, また長方形 ABCD は大同製鋼株式会社が製造供給している組成範囲である. そしてこれらは関口提案に沿っている.

図—28 は国際溶接学会が1958年, 潜弧溶接用鋼線に適当な化学組成として提案したものである²⁷⁾. これらの大部分は関口提案にしたがっているが, 組成範囲が曲線 $G'F'$ にまたがり, また $G'F'$ の上方に位置しているものがある. これらは関口提案から逸脱しているものであって, 今後改訂を要するものと著者は考えている.

またエレクトロ・スラグ法による鋼材溶接の実例について記述すると, つぎのようである. アークス式のエレクトロ・スラグ溶接法では, 薄鋼板を折り曲げて巻き,

図—27 関口の薦めにより生産されている潜弧溶接用鋼線の数例 (標準化学組成)

(備考) ⊗: 八幡製鉄株式会社, 長方形 ABCD: 大同製鋼株式会社

図-28 潜弧溶接用鋼線に対する国際溶接学会第12専門委員会案

(a) シャルピー衝撃値 (UF) (+20°C)

(b) シャルピー衝撃値 (V) (-20°C)

図-29 アーク式エレクトロ・スラグ溶接法で得られた溶接鋼のシャルピー衝撃値 (kgm/cm²)

その内部にフラックスやフェロアロイを詰め込んで作った有心複合線を採用しているが、この方法についてのアーク社の報告による溶接鋼の化学組成と溶接鋼の衝撃値との関係²⁸⁾を、著者は図示して図-29の(a)および(b)を得た。これらを見るも、衝撃値大なる溶接鋼の組成点は界域II内の包囲線内にある。すなわち関口理論の妥当なことが理解できる。

3. ガスとフラックスを用いる場合

アーク社では、フラックスおよびフェロアロイを内部に含ませた有心複合鋼線(アーク・アーク・ワイヤ)を用いて、アークを発生させ、さらにそのアークおよび溶融池の近傍に炭酸ガスを送給するか、あるいは母材間の溶接すべき空間を全く炭酸ガスで満たして、アーク溶接する方法を、工業界に推薦している。これらの方法についての日本アーク社および東洋火熱工業株式会社の実測値に基づき、著者は図示して、図-30および31を得た。

これらによれば、伸びおよび衝撃値の大なる溶接鋼の組成点を含む包囲線内の面積の大部分は界域II内の適当

組成範囲にあることが理解できる。すなわちこの方法による場合も、関口理論はおおむね妥当と思われる。

図-30 アーク・アーク・ワイヤにより炭酸ガス被包アーク溶接して得られた溶接鋼の化学組成と伸び

(備考) (1) アンダーラインを付した数値は伸び%を示し
(2) アンダーラインのない番号は使用ワイヤを示す

1. アーク・アーク・ワイヤ 51
2. " " " 52
3. " " " 1MM
4. ベルトマックス・ワイヤ 1MG

図-31 アーク・アーク・ワイヤにより炭酸ガス被包アーク溶接して得られた溶接鋼の化学組成とVノッチ・シャルピー衝撃値(0°C)
(備考) (1) アンダーラインを付した数値は衝撃値(kgm/cm²)を示す。
(2) 図-30の備考(2)参照。

V. 総 括

種々述べたが、この講義では特につぎの諸項について記述したつもりである。

(1) 著者は、鋼材を溶融溶接する際における脱酸反応特に Mn および Si による共同脱酸の現象を重視し、Körber-Oelsen 論文の結果から出発して計算および考察を進めた。そして約14年前に溶接鋼に関して関口理論を公にし、約13年前に溶接用鋼線について関口提案を発表した。

しかし当時これらがただちに学界および工業界の支持を得たとは思っていない。

(2) けれども次第に関口提案は応用され、まず酸素・アセチレン・ガス溶接用の充填鋼線として採用され、今日に及んでいる。日本では、一般の溶接技術者には、この鋼線は DM 型溶接棒または関口棒と呼ばれ、溶接工は技量検定試験を受けるに当たり、好んでこれを使用している。

(3) Ar アーク溶接法および CO₂ アーク溶接法にも、関口提案に沿う充填用鋼線が実用されるに至った。

(4) 関口提案が基盤となり、新溶接法すなわち CO₂-O₂ アーク溶接法が創始された。そしてこの方法は国内に普及し、諸方面で活用されている。また本法用鋼線は DS 鋼線と呼ばれて諸外国にも知られ、1964年の始めから輸出されている。

(5) 関口提案の被覆棒心線への応用は著しく遅れたが、最近に至り、特殊塩基性被覆アーク溶接棒の心線として活用されはじめた。

(6) 本講義に掲げた多くの図によると、高い衝撃値を示す溶接鋼の化学組成はほぼ Mn 0.6~2.0%, Si 0.1~0.7% の範囲内にある。そしてこれらの組成点を包囲す

る点線を書いてみると、その包囲面積の大部分はいずれの溶融溶接の場合でも、図-1の界域IIにある。そしてこの包囲範囲は界域IIの全域に広がっているのではなく、おおむね上記の限界内に限られているのである。

すなわち溶接鋼についての関口理論は、鋼材溶融溶接のすべてに対して適用でき、かつ有用なことが発表後14年間にわたる諸研究所および諸会社の実験値および生産工場の実績によって明らかとなった。

しかし今なお不明なことがあり、著者はつぎのように考えている。

(7) 高い衝撃値を示す溶接鋼の組成点を包囲する点線の位置は精密には一定していないで、溶接法の種類によって少しく異なっているようである。たとえばエレクトロ・スラグ溶接法の場合は包囲線がやや右方に寄っている。そしてこの相異の原因については未だ明らかでない。

(8) 溶接法により、実在のスラグが必ずしも FeO-SiO₂-MnO 系ではなく、これに CaO, TiO₂, Al₂O₃ その他の酸化物が加わることがあり、スラグ、金属間の相互関係に相異の生ずることが考えられる。また溶接条件によって溶融時間および冷却状況に相違があるのであろう。これらが前項に対する原因とも思われるが、他にも原因があるかも知れない。これが解明には今後の研究が必要である。

要するに、鋼材溶融溶接の現象は複雑多岐にわたり、これを簡潔に取扱い難いのであるが、著者は永年にわたる実験、考察および工業界の反響に基づいて自己の見解をまとめ、これを主張し続けているしだいである。

本講義を終わるに当たり、著者はつぎの諸先生に対し謹んで本稿を捧げる。

恩師 村上武次郎博士

故 F. Körber 教授 および W. Oelsen 教授

H. Schenck 教授

故 C.H. Hertly 博士

村上先生は30余年にわたり、著者の研究を見守り下され、著者は大局的立場から御指導を蒙った。また他の四人の先生が公にされた論文¹⁾および書物^{3,4)}を、著者は約28年前に熟読したのであるが、その内容が著者の永年にわたる一連の研究に重大な影響を与え、指導的役割を果たした。

著者はこれらの事実を静かに回顧し、諸先生に対し、謹んで深厚なる謝意を表する。

引用文献

- 1) 関口春次郎, “鋼の電弧溶接用電極棒心線の研究, 第1報, 心線中の諸元素が溶着鋼の健全性に及ぼす影響”, 日本金属学会誌, 第2

- 巻(1938), 第9号, 442-462.
- 2) 同上, “第2報, 心線における数種の脱酸性元素の共存が溶着鋼の見掛けの比重及び機械的諸性質に及ぼす影響”, 日本金属学会誌, 第2巻(1938), 第10号, 484-494.
- 3) H. Schenck, “Physikalische Chemie der Eisenhüttenprozesse”, Bd. I (1932), Bd. II (1934).
- 4) C.H. Hertý, “The Physical Chemistry of Steel Making” (1934).
- 5) F. Körber u. W. Oelsen, “Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung”, Bd. XV (1933).
- 6) 関口春次郎, “心線中にマンガン及び珪素を特に含有せしめた鋼用溶接棒の研究, 第1報, マンガン及び珪素含有鋼心線についての着想”, 本誌, 第19巻(1950), 第3号, 1-9.
- 7) H. Sekiguchi, “Research on Steel-Welding-Rods Containing Manganese and Silicon in the Core”, “The Japan Science Review”, Vol. 1 (1950), No. 4, 19-24.
- 8) H. Sekiguchi, “A New Proposal for Steel Filler Wire for Welding (Full Text), Memoirs of The Faculty of Eng., Nagoya University, Vol. 3 (1951), No. 2 (October), 45-80.
- 9) H. Sekiguchi, “A New Proposal for Steel Filler Wire for Welding (Outline), W.J., Vol. 30 (1951), No. 12, 622 s-624 s.
- 10) 関口春次郎, “溶接用鋼線材についての新提案”, 本会刊行(1952), 特別単行論文.
- 11) 関口春次郎, 松永寿男, “マンガン及び珪素を特に含有せしめた鋼用瓦斯溶接棒について(概要)”, 名古屋産業科学研究所・研究報告, No. 2 (1950), 34.
- 12) 関口春次郎, 森本泉, “脱酸剤を含む鋼用ガス溶接棒の化学組成及び溶接諸条件の影響について, 第1報, 溶接棒の化学組成及び表面状況の影響”, 本誌, 第23巻(1954), 第11・12号, 2-10.
- 13) 関口春次郎, 益本功, “炭酸ガス・関口線材アーク溶接法について, 第1報, 本法の着想”, 本誌, 第25巻(1956), 第11号, 12-15.
- 14) 同上, “第5報, 送給ガス中の酸素の効果”, 本誌, 第26巻(1957), 第11号, 34-39.
- 15) H. Sekiguchi & I. Masumoto, “A Japanese Process for CO₂-Shielded Arc Welding of Steel”, British W.J., Vol. 4 (1957), No. 5, 205-212.
- 16) H. Sekiguchi & I. Masumoto, “Low Crack Sensitivity of Steel Joint by CO₂-O₂ Arc Welding”, W.J., Vol. 37 (1958), 326 s-336 s.
- 17) H. Sekiguchi, “Recent Advancement of CO₂-O₂ Arc Welding Process in Japan”, Document Number of I.I.W., XII-127-62 (1962), 1-131.
- 18) C.G. Keel, “Über die Entwicklung Neuer Zusatzstäbe für die Autogenschweißung von Stahl”, (Der Würde eines Doktors der Technischen Wissenschaften, Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich), (1950).
- 19) 関口春次郎, 応用金属学大系, 第13巻, 溶接, (誠文堂新光社), (1962), 345.
- 20) N.M. Novojilov, A.M. Sokoloba, “Razrabotka elect-rodnix provolok dlja svarki Malovglerodistix i nizkolegirovannix stalej v uglekislom gaze”, Svarotshnoe proizvodstvo, (1958), No. 7.
- 21) N.M. Novojilov, A.M. Sokoloba, “Issledovanie svoistv shvov, vipolnennix v uglekislom gaze probolokami Sv-08 GSA i SB-08 G 2 SA”, Svarotshnoe proizvodstvo, (1959), No. 5.
- 22) “Recommendations for the Standardisation of Wires for Gas-Shielded Bare-Wire Welding of Mild Steel, Document Number of I.I.W., XII-211-63 E (1963).
- 23) O. Takagi, “Practical Development of Japanese Process for CO₂-O₂ Shielded Arc Welding, Reference Submitted to the Commission XII, (1958), 1-8.
- 24) 関口春次郎その他, “炭酸ガス・酸素アーク溶接法と生産性の向上”, 金属材料, 第4巻(1964), 第3号(同法特集号), 16-62.
- 25) 関口春次郎, 森本泉, 益本功, “心線中にマンガン及び珪素を特に含有せしめた鋼用溶接棒の研究, 第3報, 鋼用電弧溶接棒心線に含まれたマンガン及び珪素の効果について”, 本誌, 第19巻(1950), 第6・7号, 12-25.
- 26) 榊原千代, “塩基性型被覆アーク溶接棒に関する冶金学的研究”, 学位論文(名古屋大学, 1961).
- 27) “Proposal for Classification of Wires and Fluxes Used in the Submerged Arc Welding Process”, Document Number of I.I.W., XII-38-58 (1958).
- 28) 三上博, “エレクトロ・スラグ溶接法”, 日本機械学会誌, 第64巻(1961), 第508号, 80-89.
- 29) 関口春次郎著書, “鋼材融接理論, 提案及び応用”, 日刊工業新聞社(東京都千代田区飯田町1の1)発行, (1964).
- 30) H. Sekiguchi, “Theory and Proposal on Steel Fusion Welding and Their Applications”, Nikkan Kogyo Shinbun, Ltd. (I-1, Hida-machi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan), (1964).

会員の皆様へ

溶接学会誌に関するアンケートの件

先般, 溶接学会誌に関するアンケート回答を御依頼申上げましたところ, 御多忙中のおり多数の御回答をいただきまして厚く御礼申し上げます。

早速編集委員会で検討させていただき, 今後の編集の参考に資したいと存じます。

なお, アンケートの結果は後日まとめまして学会誌に御報告申し上げます。

編集委員会