

高強度低温仕様鋼材向け フラックス入りワイヤの開発

岡崎 喜臣^{*1)} 石田 斉^{*1)}
日高 武史^{*2)} 末 永和之^{*3)}

1. はじめに

各種鋼構造物の大型化に伴い、鉄鋼材料の高強度化による軽量化が進められている。近年は構造物の安全性向上(脆性破壊の発生防止)や使用環境の変化(寒冷域化)への対応と相まって、靱性や脆性破壊防止特性(CTOD 値)の向上など、高品質化の要求が一段と高まっている。一方、大型構造物の建造においては全姿勢溶接(下向、横向、立向、上向)が必須となるが、溶接作業の高能率化並びに脱技能化の観点から、これまで主に適用されてきた被覆アーク溶接棒に代替して、フラックス入りワイヤ(FCW)の適用要求も高まっている。

軟鋼から HT590 MPa クラスの全姿勢溶接用 FCW は TiO₂ スラグタイプが主流であり、HT780 MPa クラスまでの高強度鋼用 FCW の場合にも良好な溶接作業性が得られる。しかし、TiO₂ スラグ主体の FCW によって形成された溶接金属には多量の酸素が含有される。一方、酸素量を低減できる高塩基性タイプの FCW では、靱性確保は可能であるが全姿勢溶接ができない等の問題がある。

溶接金属に含有される酸素は酸化物系介在物として存在し、アシキュラーフェライトと呼ばれる粒内変態組織の核として機能し組織微細化に寄与することはよく知られる⁽¹⁾。HT590 MPa 級以下の溶接金属においては、溶接材料に含有されるフラックス成分から粒内変態組織分率を予測する手法が提案され⁽²⁾、適切な成分設計の下で酸化物は積極的に活用される。これに対し、HT780 MPa 級以上の高強度溶接金属では、Ti 添加により粒内変態が促進されることが明らかとなっているが⁽³⁾、酸素は靱性に対して悪影響を及ぼすことから低酸素化が有効とされ⁽⁴⁾、全姿勢溶接作業性との両立策は

見出されていない。

著者らは高強度溶接金属の機械的性質(引張強度、靱性)と全姿勢溶接作業性を兼備できる FCW 開発に取り組み、酸化物組成を適切に制御することでその実現に成功した。本報では、新たに開発した高強度鋼用 FCW 設計の考え方と各種性能を紹介する。

2. 開発技術

(1) 粒内変態促進の考え方

著者らは HT650 MPa から HT780 MPa クラスの溶接金属靱性に及ぼす組織と酸化物の影響を調査し、アップーシェルフエネルギーには酸化物数が、延性脆性遷移温度(DBTT)には粒内ベイナイト組織のサイズが支配因子となることを確認した⁽⁵⁾。すなわち高強度溶接金属の低温靱性確保には、酸化物の個数低減と粒内ベイナイト組織の微細化を両立させねばならない。粒内ベイナイトが酸化物を核に生成することを考慮すると、より効果的に粒内変態を促進できる酸化物を分散させることが必要となる。

この課題に対し、酸化物の微細構造解析を通して従来にない着眼点を見出し改善に成功した。図 1 は粒内ベイナイト組織の光学顕微鏡組織と促進に有効な酸化物の FE-TEM 像である。酸化物の微細構造解析から、1 個の酸化物内部には Si, Mn, Al を含有する非晶質相と Ti, Mn を主成分とする結晶相(MnTi₂O₄)の両方が混在し、結晶相分率が粒内変態能に寄与することを突き止めた⁽⁵⁾。この知見を踏まえ、脱酸素制御により、酸化物数が減少しても微細組織が実現できる酸化物分散に成功した。

(2) 低酸素化と全姿勢溶接性両立の考え方

TiO₂ 系スラグは全姿勢溶接を可能とするために設計されており、溶接金属の低酸素化には限界がある。つまり高強度溶接金属では、粒内変態促進だけでは十分な低温靱性が確保できない。これに対し、酸素量と全姿勢溶接作業性の支配因子について熱力学的観点から検討し、TiO₂-MgO 系に着眼

* 神戸製鋼所
材料研究所：1)主任研究員
溶接カンパニー：2)研究員 3)主任研究員
Development of Flux Cored Wire for Low Temperature Service High Strength Steels; Yoshitomi Okazaki, Hitoshi Ishida, Takeshi Hidaka and Kazuyuki Suenaga (KOBE STEEL, LTD.)
2009年10月30日受理

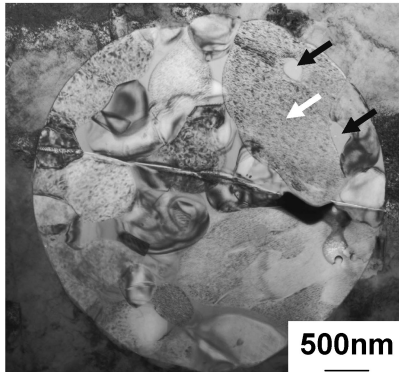
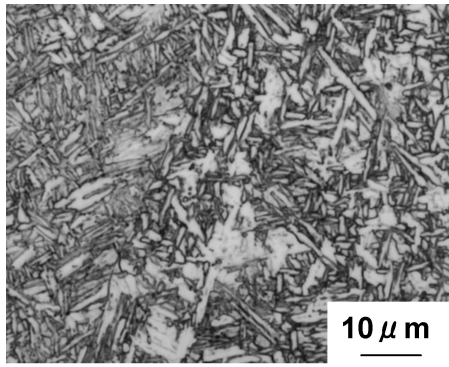


図1 高強度 FCW 溶接金属の光学顕微鏡写真および粒内変態核として機能した酸化物の FE-TEM 像 (黒い矢印は非晶質相を示し白い矢印は結晶相を示す)。

することで両立に成功した⁽⁶⁾。

まず溶接金属中の酸素量について詳細を述べる。酸素量が Ti-O 平衡(式(1))に支配されると仮定すると、平衡定数の算出式(式(2)(3))より数式(4)に示すように酸素濃度[%O]低減には TiO₂ 活量(aTiO₂)が減少, Ti 活量(aTi)が増大する成分系を抽出することが必要となる。



$$\Delta G_0 = -RT \ln K \quad (2)$$

$$K = \frac{a_{\text{TiO}_2}}{a_{\text{Ti}} \times a_{\text{O}}^2} \quad (3)$$

式(3)より

$$[\% \text{O}] = \left(\frac{1}{K \times f_{\text{O}}^2} \times \frac{a_{\text{TiO}_2}}{a_{\text{Ti}}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 ΔG_0 は標準生成 Gibbs エネルギー、K は平衡定数、 a_{M} は物質 M の活量、 f_{M} は物質 M の活量係数、[%M] は物質 M の濃度を示す。

著者らは TiO₂ スラグ系での各種酸化物添加の影響を熱力学計算し、特に TiO₂ 活量低減効果が大きい MgO に着眼した。フラックス中の MgO/TiO₂ 比と溶接金属中の酸素量を図2に示す。TiO₂ のみでは溶接金属中の酸素量は約 500 ppm であるが、MgO/TiO₂ 比の増加に伴い酸素量は低減され、MgO/TiO₂ が 0.2 で約 400 ppm まで低減することを明らかにした。

次に全姿勢溶接作業性に対しては、溶接時に垂れ落ちる溶鋼をスラグによって固めていく必要があることから、スラグの融点ならびに固液共存温度幅が影響すると仮定した。図

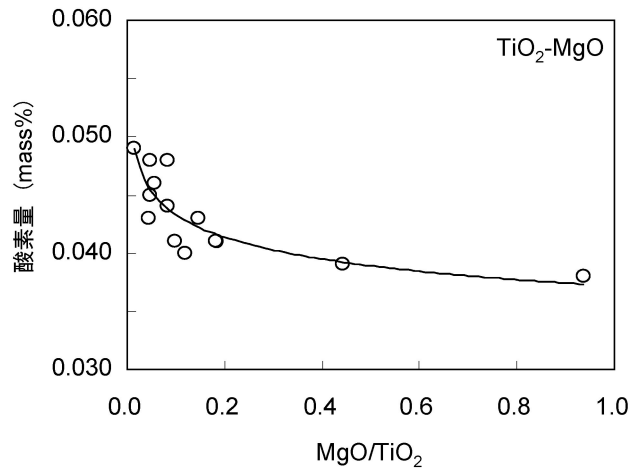


図2 溶接金属酸素量に及ぼす MgO/TiO₂ 比の影響。

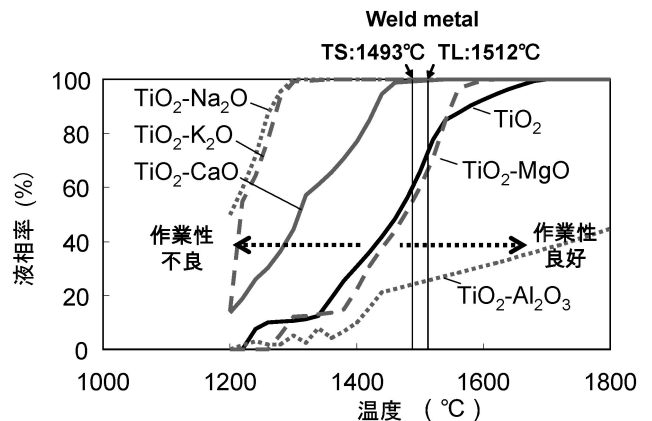


図3 各種スラグ系の液相率と全姿勢溶接性の関係。

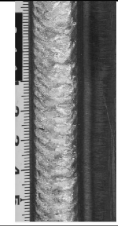
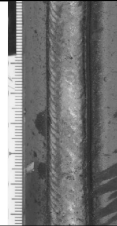
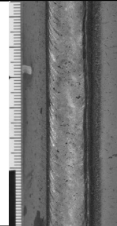
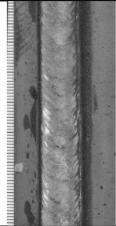
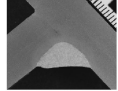
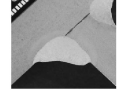
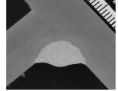
3に TiO₂ スラグ系に各種酸化物を添加した場合の液相率を示す。図中には全姿勢溶接作業性の傾向も示しており、比較的低融点で固液共存温度幅が小さい TiO₂-CaO, TiO₂-Na₂O, TiO₂-K₂O では溶接作業性が劣化するのに対し、高融点で固液共存温度幅が大きい TiO₂, TiO₂-MgO, TiO₂-Al₂O₃ では良好な溶接作業性を確保できる。

以上の検討を踏まえ、低酸素化と全姿勢溶接作業性を両立すべく、TiO₂-MgO 系における固液共存温度幅と溶接作業性の関係を調査した。なお、全姿勢溶接での溶接作業性は立向上進すみ肉溶接でのビード形状係数(H/L=余盛高さ/脚長×100)により評価した。図4に示すように MgO/TiO₂ 比<0.1において良好なビード形状が確保できており、図2に示した低酸素化との両立が達成できた。

3. 開発ワイヤの諸特性

本技術を適用した YP620 MPa 級ならびに YP690 MPa 級の低温仕様鋼材向けフラックス入りワイヤの諸特性を紹介する。

表1に溶接施工条件を、表2に引張特性を示す。溶接金属中の酸素量を 440~450 ppm に制御することに成功し、Ni, Mo 等の合金元素の制御によりそれぞれのスペックに対応できる高強度化を達成している。なおこれらの強度クラスの溶

TiO ₂	MgO/TiO ₂ =0.02	MgO/TiO ₂ =0.05	MgO/TiO ₂ =0.1	MgO/TiO ₂ =0.4	MgO/TiO ₂ =2.3
					
					—
H/L=5.0	H/L=9.4	H/L=6.3	H/L=9.5	H/L=17.1	—

※H/L=[Weld reinforcement height]/[Leg length]×100
Vertical upward (Automatic), 220A-22~24V-140mm/min.,
Weaving width:7mm, Wire stick out: 15mm, Leg length: 9~10mm

図4 全姿勢溶接性に及ぼす MgO/TiO₂ 比の影響.

表1 溶接施工条件.

電 流	280 A
電 圧	30 V
入 熱	1.7 kJ/mm
積 層	6層12パス
シールドガス	80%Ar-20%CO ₂
予熱温度	150℃
パス間温度	150℃

表2 全溶着金属の引張特性.

Class	引 張 特 性			
	0.2%耐力(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)	絞り(%)
YP620	650	700	25	68
YP690	745	780	21	66

接金属は、含有される拡散性水素量や継手拘束度によっては低温割れ(水素誘起割れ)を生じる場合がある。開発ワイヤではこの点も考慮し極低水素化が図られている。

図5にシャルピー衝撃試験によって評価した低温靱性を示す。YP620級、YP690級ともに-40℃においても良好な吸収エネルギーを確保できており、全姿勢溶接可能なFCWとして大幅な低温靱性改善が達成できていることがわかる。

4. 特許および実用化状況

良好な全姿勢溶接作業性を有し、かつ機械的性質性に優れた高強度フラックス入りワイヤを開発した。海洋構造物をは

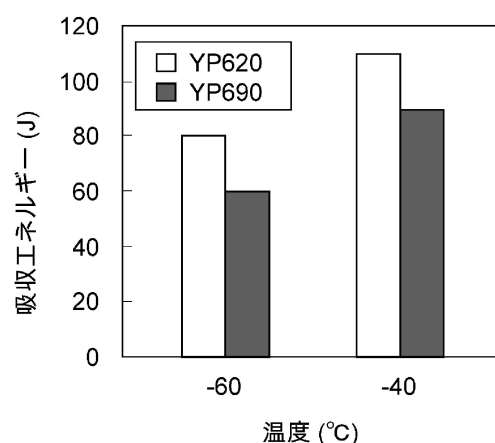


図5 全溶着金属の低温靱性.

じめとする大型鋼構造物の高強度化の流れを支える溶接材料として今後の適用拡大が期待される、

本報で紹介した高強度フラックス入りワイヤに関する特許は特開2006-257481、特開2006-281223、特開2007-144516、特開2008-149341など6件が公開されている。

文 献

- (1) 森 直道, 本間弘之, 大北 茂, 若林正邦: 溶接学会誌, **50** (1981), 174.
- (2) P. Kanjilal, S. K. Majumdar and T. K. Pal: ISIJ Int., **45**(2005), 876.
- (3) 畑野 等, 中川 武, 杉野 毅, 原 則行: 鉄と鋼, **91** (2005), 397.
- (4) 原 則行, 末永和之: 溶接学会論文集, **21**(2003), 160.
- (5) 岡崎喜臣, 石田 斉, 日高武史, 末永和之: 溶接学会論文集, **27**(2009), 131.
- (6) T. Hidaka, K. Suenaga, Y. Okazaki and H. Ishida: 溶接学会論文集, **27**(2009), 154s.