

(解説)

# ガスシールドアーク溶接フラックス入りワイヤの開発

## Developments in Flux-cored Wire for Gas Shielded Arc Welding



森本朋和\*

Tomokazu Morimoto

The use of flux-cored wire for gas shielded arc welding has increased dramatically over the past 25 years in Japan. Flux-cored wire commands more than 30% of the total consumption of arc welding materials domestically. Flux-cored wire is especially dominant in the shipbuilding industry. However, due to its excellent cost effectiveness, the use of this kind of welding wire has expanded dramatically in other industries. This paper outlines developments in the production and expanded use of flux-cored wire for mild steel, 490MPa class high strength steel and stainless steel.

まえがき = 約 90 年前に船舶分野で被覆アーク溶接棒の実用化検討が開始されて以来、わが国のアーク溶接技術は着実な進歩を遂げてきた。溶接技術の発展は、常に溶接工程の「高能率化・高効率化」を追求する歴史でもあった。その流れのなかで、被覆アーク溶接棒から始まったアーク溶接材料は、より高能率なサブマージアーク溶接材料あるいは自動化・ロボット化にも適したガスシールドアーク溶接材料へと発展してきた。

ガスシールドアーク溶接材料は、主にソリッドワイヤとフラックス入りワイヤ（以下 FCW）に大別されるが、なかでも FCW は溶接作業性、能率性における優れた特性から、年々その使用量が増加している。図 1 に、わが国における各業種の FCW 使用状況調査結果を示す<sup>1)</sup>。FCW の使用比率は、「船舶・海洋構造物」において特に

高いが、「車両・自動車」を除く各分野においても高い比率を示しており、全業種の平均では 30% を超えている。

本稿では、現在溶接材料の主要な地位を占めるに至った FCW について、炭素鋼 FCW を中心に、一部ステンレス鋼 FCW も含めて、最近の開発動向について概説する。

### 1. 炭素鋼 FCW 発展の歴史

これまでの FCW の発展は、大きく 3 つの段階に分けられる<sup>2)</sup>。第 1 段階では、太径（ 3.2mm など）が主体であり、溶接作業性・適用性の制約から肉盛溶接などに限定されていた。FCW の適用範囲が飛躍的に拡大したのは 1979 年の第 2 段階以降であり、現在主流となっている細径（ 1.2mm など）の全姿勢用スラグ系 FCW が開発されている。全姿勢用スラグ系 FCW は溶接トータルコストの低減に大きく貢献し、今日の船舶分野においても汎用性のある半自動・自動溶接ワイヤとして多用されている。写真 1 に全姿勢用スラグ系 FCW の適用状況を示す。

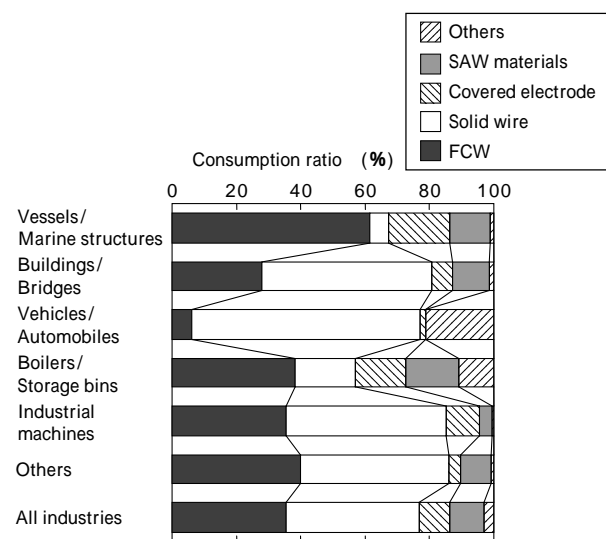


図 1 溶接材料の業種別使用状況

Fig. 1 Investigation results on application ratio of welding materials in various fields



写真 1 全姿勢用スラグ系 FCW の船舶への適用例 (DW-100)  
Photo 1 Application of slag type FCW to vessels (DW-100)

\* 溶接カンパニー 技術開発部

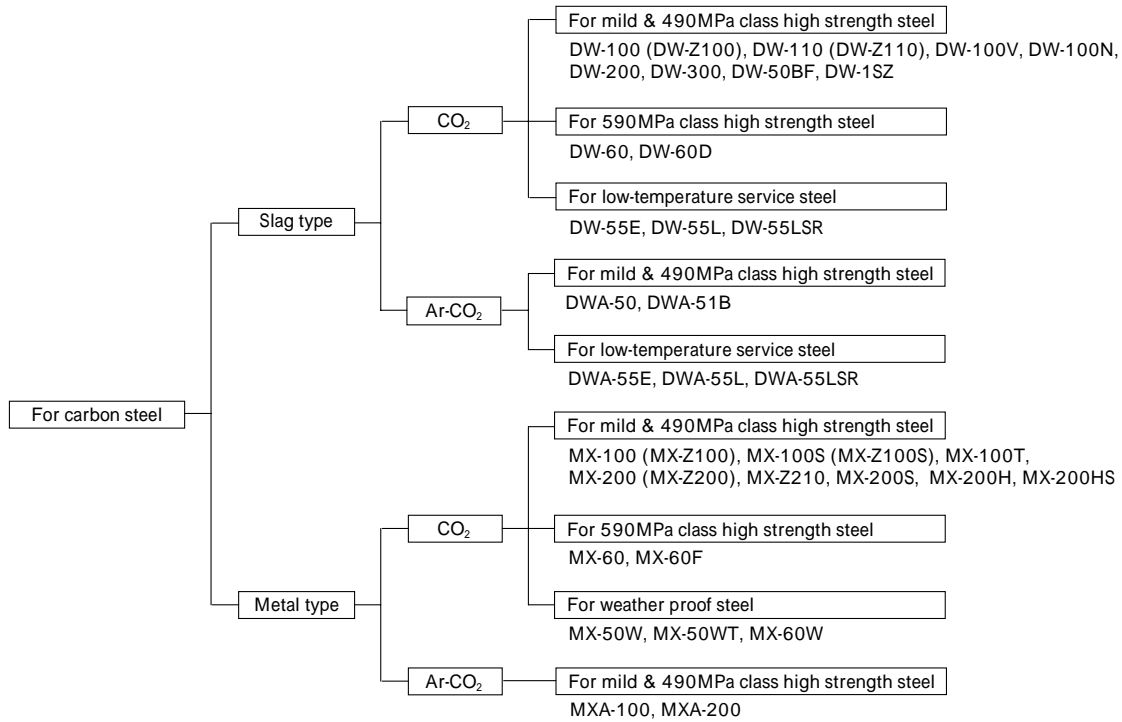


図2 炭素鋼用FCWの分類  
Fig. 2 Classification of FCW for carbon steel

1985年に始まる第3段階では、メタル系FCWの開発などにより、FCWの適用範囲が更に拡大した。メタル系FCWはマグ溶接ソリッドワイヤのもつ低スラグ特性に加えて高溶着速度、低スパッタ特性も併せ持っており、自動化・ロボット化の流れのなかで船舶以外の分野にも広がりを見せた。更に、1989年には船舶・橋梁分野で多く用いられるプライマ塗布鋼板のすみ肉溶接において、優れた耐気孔性を有するプライマ塗布鋼板用メタル系FCWが開発され、軟鋼・490MPa級高張力鋼FCWにおける今日の基盤技術が確立している。そして、これらの技術は590MPa級高張力鋼、低温用鋼、ステンレス鋼などの鋼種別、あるいは海外で多用される混合ガスアーク溶接など各種用途のFCWに展開・応用され、多様化する市場ニーズにこたえてきた。図2に炭素鋼FCWの分類を示す。

## 2. FCWに求められる特性

前述したように、溶接技術の発展は溶接工程の「高能率化・高効率化」を追求する歴史でもあり、FCWの開発においても、大溶着化や高速化あるいはロボット化への対応が常に重要な課題となってきた。図3に、FCWに求められる特性について調査した結果の一例を示す<sup>3)</sup>。「スパッタの低減」、「低ヒューム」、「耐気孔性」、「ワイヤ送給性」、「高速性」などが上位に位置しているが、「低ヒューム」のみが作業環境の改善に対する要求であり、それ以外はいずれも「高能率化・高効率化」の観点からの要求と言える。

一方、高能率化の実現に向けた新しい「溶接プロセス」、あるいはこれまでFCWの適用が困難であった「加工プロセス」などに適合できる、新しいFCWの開発も大きな課題となってきた。これについては、多電極溶接

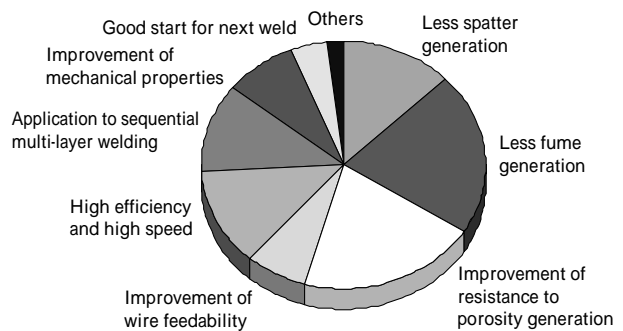


図3 炭素鋼用FCWに対する市場ニーズ  
Fig. 3 Market needs for welding materials

法への対応や、これまでFCWでの施工が困難であった溶接後熱処理(PWHT)に対応したFCWの開発などが挙げられる。

## 3. 炭素鋼FCWの開発動向

### 3.1 高能率化・高効率化への対応

船舶分野では立向・上向姿勢の溶接も多く、全姿勢での溶接作業性が良好なスラグ系FCWが既に多く用いられている。特に最近では、ロボット化への対応として図4に示すように、従来材料に比べて立向溶接における適用溶接条件範囲が広く、溶落ちが発生し難いワイヤが開発されている<sup>4)</sup>。開発材(DW-100V)では、溶融金属の粘性及びスラグの粘性・融点を高めることにより、溶融金属の支持力を増大させている。これにより、主に立向姿勢のロボット溶接による高能率化が可能となっている。

また、船舶分野では、鋼板の突合せ継手の開先裏側にセラミックバックリングを貼付けて、片側からの溶接作業を実施しやすくした「ガスシールドアーク片面溶接施工」が一般的に採用されてきた。しかし、全姿勢用スラグ系

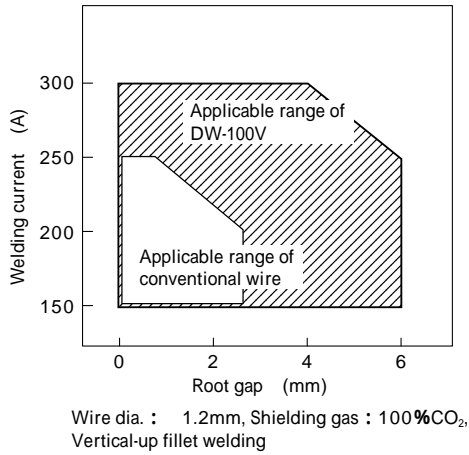


図4 DW-100Vの適用条件範囲  
Fig. 4 Applicable range of DW-100V

FCWは、ソリッドワイヤと比較して高温割れ感受性が高く、特に高電流での片面突合せ初層溶接においては、図5に示すような「凝固割れ」が発生しやすい傾向にある。このため、低電流での使用が一般的であり、高能率化・高品質化を図る上で大きな阻害要因となってきた。この問題の解決に対して、最近、耐高温割れ性に優れたFCWの開発が行われている<sup>5)</sup>。開発材(DW-100N)では初層溶接部の化学成分の最適化を図ることにより、優れた耐高温割れ性能を実現している。表1に、下向片面溶接の初層におけるDW-100Nの耐高温割れ性を示す。DW-100Nでは、高温割れが発生しない条件範囲が、従来のFCWと比較して大幅に拡大していることがわかる。開先角度40°の場合ではDW-100Nを使用することにより、初層で最大260A(1.2mm)の高電流、高能率施工が可能となる。

橋梁分野においては、建設コストを削減する手段の一つとして、少主桁橋が増えている。これにともない、主

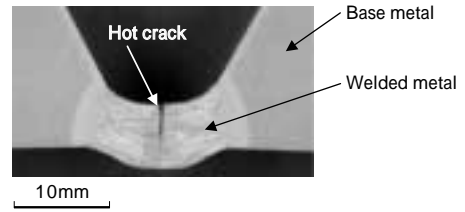


図5 片面溶接での高温割れ発生状況の一例  
Fig. 5 Typical hot crack in one side welding

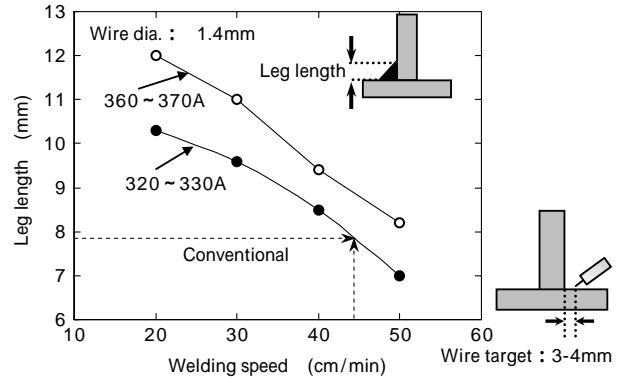


図6 DW-50BF(1.4mm)による水平すみ肉溶接の溶接条件(溶接電流、溶接速度)と脚長の関係  
Fig. 6 Relationship between welding parameters (welding current, welding speed) and leg length in horizontal fillet welding by DW-50BF(1.4mm)

桁部材が大型化し、板厚が大きくなり、すみ肉溶接の脚長も大きくなっている。図6に示すように、大脚長すみ肉溶接用のFCWも開発されている<sup>5)</sup>。従来のFCWでは、水平すみ肉溶接における1パスでの最大脚長は、上脚側のアンダカットや下脚側のオーラップなどを防止する観点から、8mm程度が限界であった。しかしながら、開発材(DW-50BF)では、生成するスラグの粘性を高めること及びスラグ量の増加により、脚長10mm程度までの1パス溶接が可能となった。

表1 従来型FCWとDW-100Nとの片面初層溶接部における耐高温割れ性の比較  
Table 1 Comparison of resistance to hot crack in one side welding between conventional FCW and DW-100N

	Conventional 1.2mm	DW-100N 1.2mm
Groove 40° (Typical)		
Groove 30° (Narrow)	<p> Impractical combination</p>	

\* ) Checked by radiography (X-ray) except crater

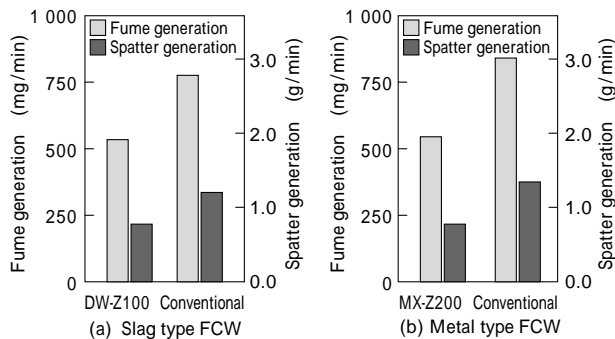
### 3.2 作業環境改善への対応

近年の各種産業分野における環境改善への関心の高まりを受け、ヒューム発生量及びスパッタ発生量を大幅に低減させたFCWが開発されている<sup>4)</sup>。図7に開発材(Zシリーズ)の特性を示す。ワイヤの低C化やアルカリ金属の添加などによって溶滴移行及びアークを安定させ、従来ワイヤに比べて30%以上の低ヒューム・低スパッタ化を達成している。Zシリーズでは、ヒューム発生量低減による作業環境改善効果とともに、スパッタ発生量低減による溶接後処理工程の削減にも寄与している。

### 3.3 溶接・加工プロセスへの対応

海洋構造物やLPG船などの低温用鋼を用いる重要部材では、SR(Stress Relief)などのPWHTを施すことも多いが、スラグ系FCWではSR後の靱性が劣化するため、これまでは能率の劣る被覆アーク溶接棒で溶接されていた。図8に示すように、SR可能な低温用鋼の全姿勢用スラグ系FCWが開発されたことにより、SR仕様部材溶接の大幅な高能率化が可能となっている<sup>6)</sup>。開発材(DW-55LSR)は、フラックス中の不純物元素(Nb, Vなど)の低減及び脱酸剤の適正添加により、溶接金属の清浄度を向上させ、SR後の靱性を大幅に改善している。

一方、船舶・橋梁などの分野においては、鋼材表面にプライマ(一次防錆塗料)が塗布されている場合が多く、プライマがアーク熱によって分解・生成するガス(H<sub>2</sub>, COなど)や金属蒸気(Znなど)に起因して気孔欠陥が発生し易い。この傾向は高速溶接で助長され、高能率化の阻害要因となっていた。



(Wire dia. : 1.2mm, Shielding gas : 100%CO<sub>2</sub>, Welding current : 280A)

図7 低ヒューム・低スパッタFCWの特性(DW-Z100, MX-Z200)  
Fig. 7 Characteristics of low fume and low spatter type FCW (DW-Z100, MX-Z200)

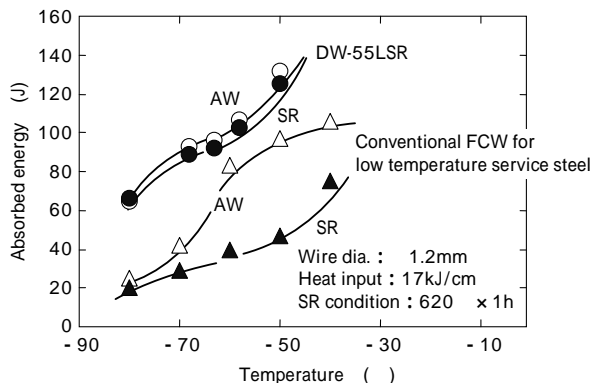


図8 DW-55LSRのSR後における低温靱性  
Fig. 8 Charpy energy of DW-55LSR after SR

現在、水平すみ肉溶接の高能率化・高品質化の要求に対して、プライマ塗布鋼板での耐気孔性及び高速溶接性に優れたツインタンドム方式の1プール溶接法(以下TOP法)とプライマ塗布鋼板用メタル系FCWの組合せによる施工法が実用化されている。

TOP法は図9に示すように、立板に対して4つの電極を配置し、それぞれ2つの電極で1つの溶融池を形成させて溶接を行うプロセスである。従来のツインシングル法及びツインタンドム2プール法(2電極で2つの溶融池を形成)に比較して、クレータ長さの増大によって気泡の浮上・放出が促進されるため、耐気孔性に優れた特性を有している。TOP法では、現状約150cm/min(脚長5mm)の高速溶接が可能となっているが、更なる高速化を目指した新しいメタル系FCWの開発も行われている<sup>7)</sup>。従来のメタル系FCWの場合、高速化のために溶接電流を増大すると耐気孔性及びビード形状・外観の不良が発生するが、開発材(MX-200HS)ではフラックス中のアーク安定剤、ワイヤ断面形状などに検討を加え、図10及び写真2に示すように200cm/minの超高速溶接においても良好な耐気孔性、ビード外観・形状を得ることが可能となっている。

### 4. ステンレス鋼FCWの開発動向

ステンレス鋼は、優れた耐食性を有することから各種工業分野で広く適用されており、その使用量は年々増加

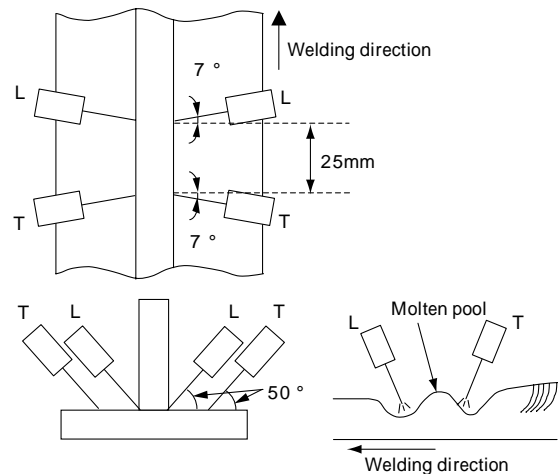


図9 電極1プール法

Fig. 9 Twin-tandem one pool method

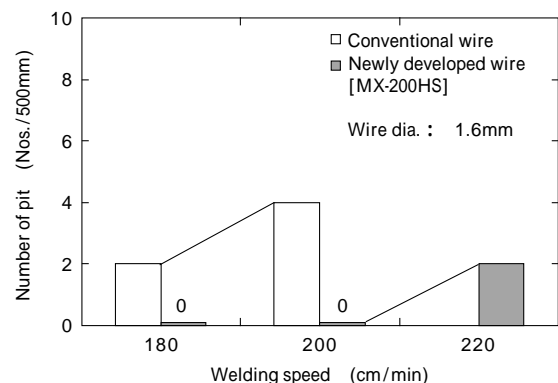

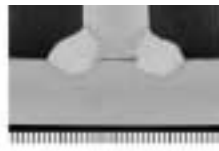




図10 高速すみ肉溶接におけるピット発生数  
Fig.10 Porosity generation in high speed horizontal fillet weld

Wire	Bead appearance	Bead shape
Conventional wire		
Newly developed wire [MX-200HS]		

(L : 540A, T : 470A, Wire dia. : 1.6mm, Welding speed : 200cm/min)

写真2 高速すみ肉溶接におけるビード外観およびビード形状の一例  
Photo 2 Bead appearance and shape in high speed horizontal fillet weld

している。これらステンレス鋼の溶接においても炭素鋼の溶接と同様に、被覆アーク溶接、ティグ溶接、サブマージアーク溶接及びガスシールドアーク溶接が適用されているが、とりわけFCWの適用比率が高いのが特徴である。近年では、全ステンレス鋼溶接材料中の50%近くがFCWによって占められている。当社のステンレス鋼FCWは大きく分けて3種類あり、下向・水平すみ肉用FCW（低ヒューム・低スパッタシリーズ）、全姿勢溶接用FCW（LPシリーズ）と極細径FCW（0.9mmシリーズ）によって構成されている。これらは、用途・目的に応じて各工業分野において広く使用されている。さらに、昨今の各分野の新たなニーズに対応するステンレス鋼FCWとして、薄板の溶接に適したFCW（DW-Tシリーズ）、高温用途用FCW（Biフリータイプ）や高靱性二相ステンレス鋼FCWなどが開発されている<sup>8)</sup>。

図11にDW-Tシリーズの特性を示す。従来、薄板ステンレス鋼の溶接には0.9mmの極細径のFCWが使用されていた。DW-Tシリーズでは、高フラックス率化とスラグ組成の最適化によりアーク安定性が格段に向上しているため、1.2mmワイヤでありながら0.9mmの領域である130A以下の低電流であってもスパッタ発生量が少なく、良好なビード形状が得られる。これによって、0.9mmワイヤの適用域の多くの部分を、取扱いの容易な1.2mmワイヤでカバーすることが可能になった。

むすび=ガスシールドアーク溶接フラックス入りワイヤ（FCW）について、現在の開発動向を中心に述べた。FCW発展の背景には、汎用性あるいは簡便性に優れるものの溶着速度の低い被覆アーク溶接法をマグ溶接法に置換え、高能率化を図ろうとの考えが基本にある。さらに、生産性向上、溶接技能者不足などから、機械化・ロボット化を進めるうえでマグ溶接法が適していることも大きな要因となっている。

一方で、これまでのFCWの技術の進歩を顧みると、常

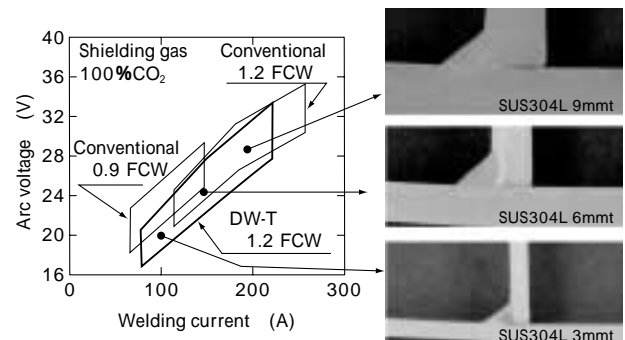


図11 DW-Tシリーズの適正溶接条件範囲とすみ肉断面マクロ  
Fig.11 Applicable welding parameters and cross sectional macro structures of DW-T FCW in horizontal fillet weld

にユーザサイドから厳しい要求が出され、新たな技術開発によりそれを達成するという繰返しを行ってきている。図3に示された「高能率化・高効率化」、「スパッタ・ヒュームの低減」、「耐気孔性向上」などについては、これまで以上に高いレベルでの実現を目指す必要があるが、更に高いハードルを乗り越えていくためには、今後、アーク現象や溶融金属・スラグの物性面からのアプローチなどもますます重要になるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本溶接協会：溶接の研究，Vol.40（2001）p.11.
- 2) 日本溶接協会編：フラックス入りワイヤの実践，（1994），産報出版．
- 3) 興石房樹：溶接学会誌，Vol.72, No.2（2003）p.16.
- 4) 黒川 剛ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.45, No.1（1995）p.17.
- 5) 伊藤和彦ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2（2004）p.15.
- 6) T. Suga et al.：Toughness of Weld Metal by MAG Welding Flux-Cored Wire for Low Temperature Service Steel, IIW Doc. XII-1492-97（1997）.
- 7) 長岡茂雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2（2004）p.20.
- 8) 渡辺博久ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2（2004）p.47.