

(解説)

マグ溶接フラックス入りワイヤの開発と発展

黒川剛志

溶接カンパニー・技術開発部

Past and Present Developments in Flux-cored Wire for MAG Welding

Tsuyoshi Kurokawa

Flux-cored wire use for MAG welding has increased dramatically over the past 20 years in Japan. Domestic production reached 84 000 tons in 1999, which was approximately 30% of the total production of arc welding materials. Flux-cored wire continues to be dominant in the shipbuilding industry. However due to its excellent cost effectiveness, use has expanded greatly in other industries. This paper outlines developments in the production and expanded use of flux-cored wire for mild and 490N/mm² class high tensile steels .

まえばき = 船舶・建築・自動車など各種産業分野において、溶接構造物の組立てにはアーク溶接技術が重要な加工手段として多用されている。アーク溶接材料としては被覆アーク溶接棒、サブマージアーク溶接材料、マグ溶接（炭酸ガスアーク溶接と混合ガスアーク溶接の総称）ソリッドワイヤとマグ溶接フラックス入りワイヤが主要なものである。わが国においてマグ溶接フラックス入りワイヤ（以下 FCW）は、1980 年頃までは量的にきわめて少なく、その存在はほとんど認められていなかった。

しかしながら、当時それまでにない優れた特性を有する細径の FCW が開発されたのを契機として、年々その使用量は急増を続けた。そして 1999 年には、FCW の生産量は約 84 000 トンでアーク溶接材料全体の約 30% の品種構成比となり、マグ溶接ソリッドワイヤにつぐ第 2 の溶接材料の地位をしめるに至っている（第 1 図）。

本稿では、軟鋼・490N/mm² 級高張力鋼用 FCW を中心に、その発展経緯と技術内容を概説する。

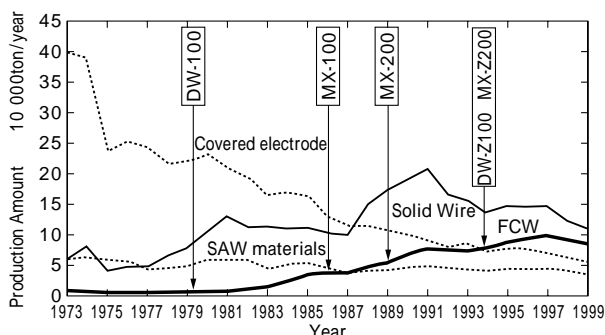
1. FCW の発展経緯

FCW の発展経緯はおおむね 3 期に分けられる。1979 年以前は、太径（3.2mm など）の FCW が交流電源で使用され、溶接作業性・適用性の不十分さから肉盛溶接で限定使用されるにすぎなかった。これに続く第 1 期は細径（1.2mm など）のスラグ系 FCW が船舶分野を中心に飛躍的に拡大した時期である。1985 年に始まる第 2 期は、メタル系 FCW の開発もあり、船舶以外の分野へ

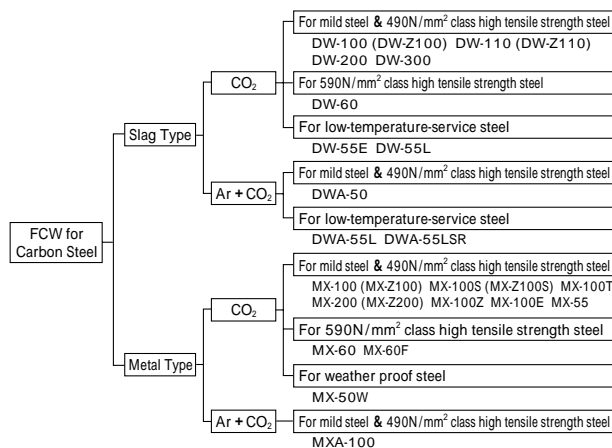
の適用が広まり溶接ロボットとの組合せなど新しい使い方が開始された時期である。そして 1990 年以降、半自動化・自動化の進展とともに適用鋼種・使用特性に応じた各種 FCW が実用化され、あらゆる産業分野の主要溶接材料として定着・拡大し、今日に至っている¹⁾。

当社は第 1 期以降のすべてにわたり先駆的な役割を果たした。軟鋼・490N/mm² 級高張力鋼用の主要 FCW である全姿勢用スラグ系 FCW は 1979 年に、厚板用メタル系 FCW は 1986 年にそれぞれを開発した。そして、これらの製品・技術は、低温用鋼、ステンレス鋼など各種用途の FCW の基盤技術として展開・応用され、多様化する市場ニーズにこたえてきた。炭素鋼用 FCW の分類を第 2 図に示すが、前述の汎用 FCW のほかに、スラグ系では、590N/mm² 級高張力鋼用、低温用鋼用 FCW さらには混合ガスアーク溶接にもちいられる FCW などがある。また、メタル系では、薄板用・中板用 FCW、プライマ塗布鋼板の溶接において優れた耐気孔性を有する FCW など多くのものが製品化されており、それぞれに対応した JIS の規格化もなされている。なお、日本における FCW の大半は炭酸ガスアーク溶接用である。

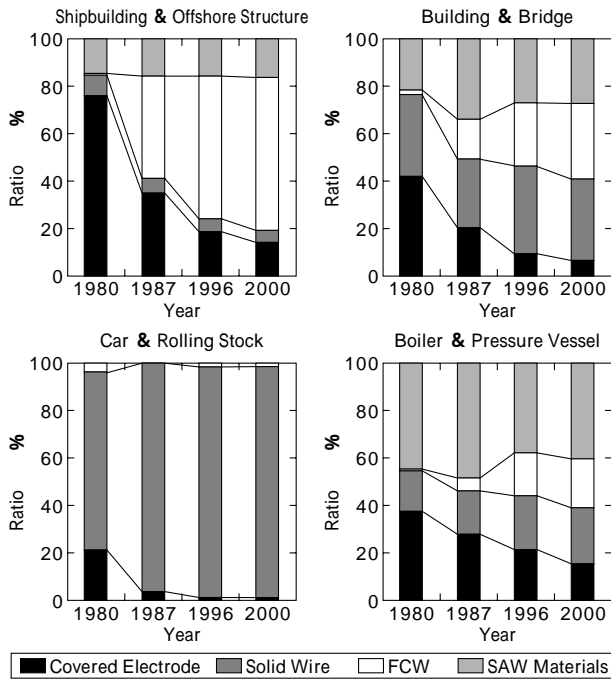
第 3 図にアーク溶接材料の使用動向に関する調査結果を示す²⁾。FCW の使用比率は、船舶分野においてもっとも高く、ついで建築、ボイラの順となっている。船



第 1 図 日本におけるアーク溶接材料の生産推移
Fig. 1 Production of welding materials in Japan



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



第3図 溶接材料の業種別使用状況

Fig. 3 Investigation results on application ratio of welding materials in various fields

船はFCWをはじめて実用化した分野であり、わずか10年たらずでFCWが被覆アーク溶接棒にかわり主要溶接材料となっている。建築ではそれよりほぼ5年遅れてFCWの実用化が進み、最近ではボイラなどの分野でもFCWが広く使用されるようになってきている。それは、FCWが被覆アーク溶接棒に似た品質特性をもつうえ、マグ溶接ソリッドワイヤに比べ高溶着速度、良好な溶接作業性を有しており、溶接工数の削減ひいては溶接トータルコスト低減に大きな効果があるからである³⁾。

2. FCWの基本原理

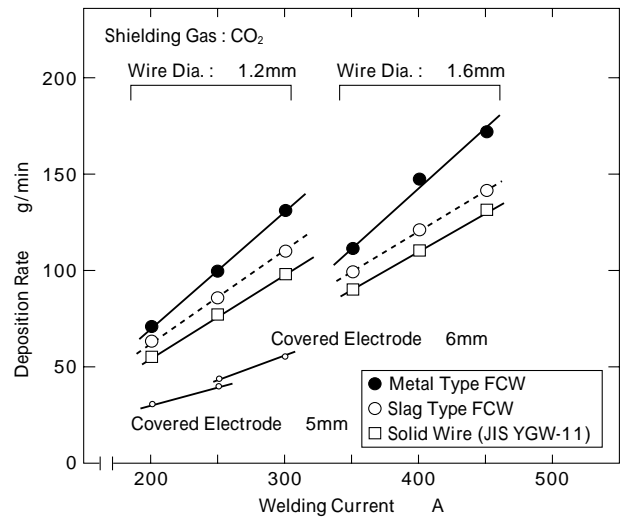
2.1 溶融現象

アーク溶接材料の標準的な溶着速度としては、被覆アーク溶接棒が30~40g/min、マグ溶接ソリッドワイヤがそのほぼ2倍、FCWはさらに10%程度高い(第4図)。マグ溶接ワイヤの溶融速度は、熱伝導論的観点より次式のとおり電流密度・ワイヤ突出し長さなどの関数として表現できる。

$$V = \frac{14.3C}{(H_o + b)} (j + aLj^2)$$

ここで、 V はワイヤ溶融速度g/min、 C はワイヤ単重g/mm、 ρ は比重g/mm³、 H_o は溶滴の保有熱量cal/g、 V は溶融の等価電圧V、 j は電流密度A/mm²、 L はワイヤ突出し長さmm、 $a \cdot b$ はHalm yの手法における定数(a : mm、 b : cal/g)である。

FCWの電流経路は、おもに外皮金属側に限定されるので、マグ溶接ソリッドワイヤに比較して電流密度が大きくなる。このことにより、とくにワイヤ突出し長さ部分のジュール発熱(上式の第2項)が増加し、FCWの高溶融速度の特性が生じている。一般に、FCWの溶融速度は、フラックス組成の影響は明確でなく、フラックス率の増加により高められる。



第4図 溶接材料の溶着速度の一例

Fig. 4 Typical deposition rate of welding materials

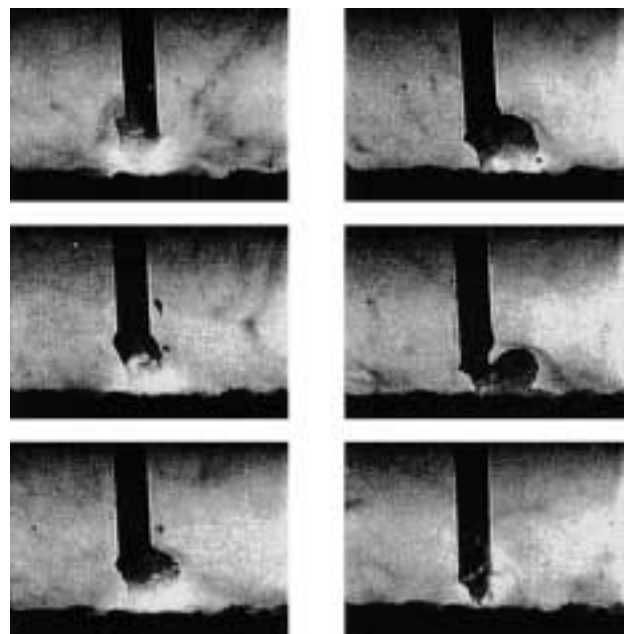


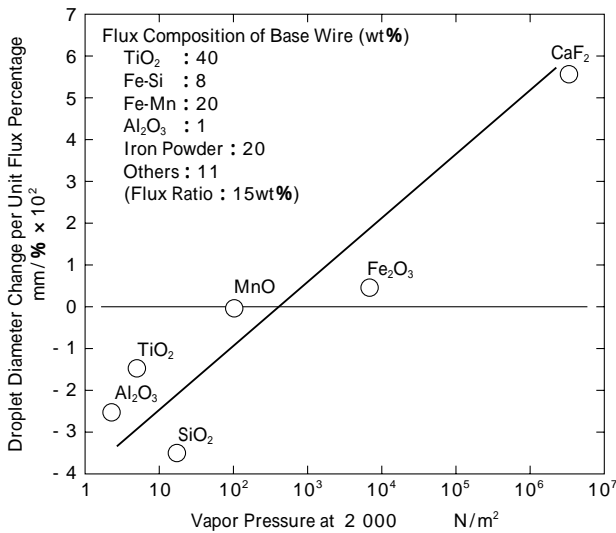
写真1 FCWの溶滴移行状態の一例

Photo 1 Typical pattern of droplet transfer by FCW (2000p/s, 1.6mm, YFW-C50DR, 300A)

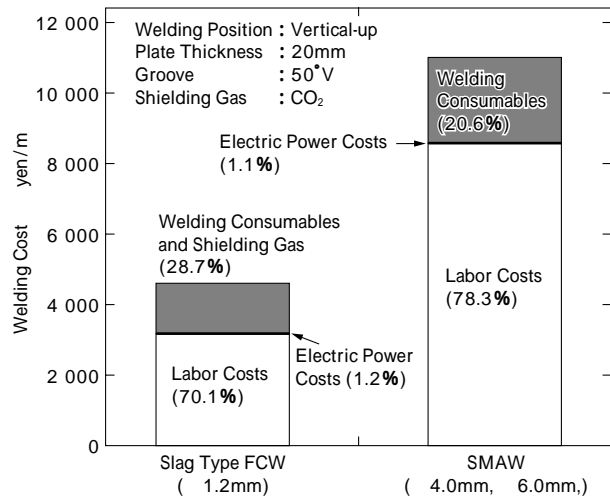
2.2 溶滴移行現象

炭酸ガスアーク溶接におけるFCWの溶滴移行状態を写真1に示す。アーク中にワイヤ先端部から伸びた柱状のフラックスが認められ、溶融金属は外皮金属に集まり溶滴を形成し、短絡を生じることなく溶融池側へ移行している。この溶滴移行形態は、IIW(国際溶接学会)の分類ではFree flight移行(スプレー状移行)に属する。ソリッドワイヤによる炭酸ガスアーク溶接では短絡移行にともなうスパッタの発生が問題視されるが、FCWの場合は短絡移行がほとんど生じないためスパッタの発生はきわめて少ない。

FCWの溶滴移行は、第5図に示すようにフラックス中のTiO₂・Al₂O₃の増加、CaF₂の減少などによって良好(スプレー化)する傾向にある。TiO₂など低蒸気圧成分の増加は、懸垂溶滴に作用するスラグの蒸発反力が減少することで、溶滴移行を促進させるといわれている。



第5図 溶滴径の変化に及ぼすフラックス成分蒸気圧の影響
Fig. 5 Relation between vapor pressure and droplet diameter change per unit flux percentage



第6図 全姿勢スラグ系FCWの溶接コスト
Fig. 6 Welding cost of slag type FCW for positional welding

3. 主要FCWの開発

3.1 全姿勢用スラグ系FCW

1970年代の船舶分野では、船舶過剰ならびに韓国の追い上げもあり、設備と要員の大幅な削減をおこない溶接の合理化を図るために、被覆アーク溶接からソリッドワイヤによるマグ溶接への切替えが試みられていた。しかし、船舶など大形構造物では立向、上向姿勢の溶接も多く、溶融金属の垂れ落ちに起因するビード形状不良が生じ易いことなどから、その実用化は困難をきわめた。

スラグ系FCWのワイヤ径を細径化(1.2mm)すること、フラックスの作用・効果、すなわちTiO₂をベースにSiO₂・ZrO₂などスラグ形成剤、Mn・Siなど脱酸剤、アルカリ酸化物などアーク安定剤の最適配合により全姿勢溶接(とくに立向溶接)での高溶着量化と作業性向上を達成した。また、従来FCWの欠点であったヒューム発生量、溶接金属中の拡散性水素量についても、外皮金属、フラックス組成の適正化さらには使用原料の厳選などにより解決した⁴⁾。

第6図に示すように、開発スラグ系ワイヤ(DW-100)は溶接トータルコストの低減に大きく貢献し、今日、船舶分野においてもっと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。また、橋梁、ボイラなどの分野においても広く使用されている。

3.2 厚板用メタル系FCW

1985年以降、産業界全般の活況と溶接技能者不足などを背景として、さらなる高速化・機械化およびロボット化などによる溶接の高効率化要求が高まった。こうした市場ニーズを先取りし、マグ溶接ソリッドワイヤのもつ低スラグという利点を維持した上で、溶接特性に優れたメタル系FCWを開発した(写真2)。

スラグ形成剤がほとんどない状態でのスパッタ発生メカニズムを溶滴移行現象より研究し、ワイヤ炭素量の低減によるCO・CO₂ガスの爆発現象抑制および特殊アーク安定剤(K₂Ti₄O₉)の適量添加などの有効性を見出し



Slag appearance on the bead



a) Metal Type FCW b) Solid Wire
Comparison of spatter emission state

写真2 厚板用メタル系FCWのスラグ、スパッタ発生状態
Photo 2 Slag appearance and spatter emission state of metal type FCW for thick plate

た。さらに、先に述べたワイヤ溶融現象の解析結果から、ワイヤ外皮金属厚さの極小化による電流密度の増大を図り、溶着速度のいっそうの向上を実現した。

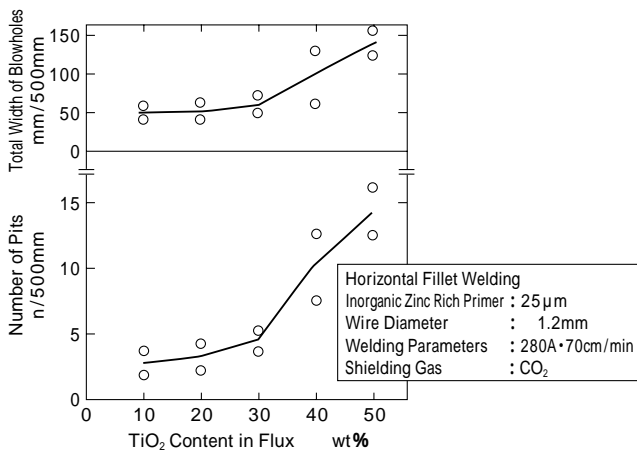
その結果、マグ溶接ソリッドワイヤにくらべ高溶着速度、低スパッタを利点とする厚板用メタル系FCW(MX-100)を開発し、続く各種メタル系FCWの開発への基盤を築いた。この特性は、とくに自動溶接で効果が発揮され、自動機・ロボットなどとの組合せによる実用化が推進された。もちろん、半自動溶接でも高効率、脱技能の点で高い評価を受けている。

3.3 最近開発されたFCW

1990年以降、FCWに関する技術開発はますます活発化し、特徴あるFCWが数多く実用化された⁵⁾。

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(H₂, 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。この傾向は高速度溶接で助長され、高効率化の阻害要因となっていた。

第7図に示すような、スラグ形成剤の減少、ふっ化



第7図 プライマ塗布鋼板での気孔発生に及ぼすフラックス組成の影響

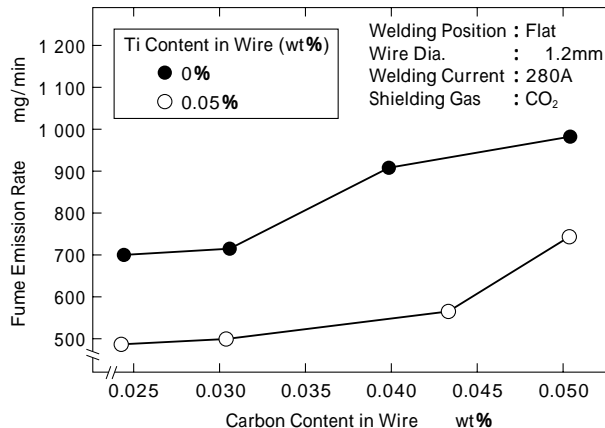
Fig. 7 Influence of flux composition on porosity generation in shop-primer coated plates

物の増加などに気孔低減効果が認められた。スラグ形成剤の減少は大気中への気泡の放出を容易にさせ、ふっ化物の増加は溶融金属中への水素の溶解を抑制する。さらに気泡の成長抑制と溶接作業性の観点から溶融金属粘性の最適化を図り、耐気孔性とビード形状・外観の良好なすみ肉用FCWを開発した。プライマ塗布鋼板の溶接における開発ワイヤ(MX-200)の耐気孔性は、全姿勢用スラグ系FCWにくらべ大幅に改良されており、専用溶接装置との組合せによる高能率施工が達成されている。

また、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、ヒューム発生量およびスパッタ発生量を大幅に低減させたFCWを開発した。溶接ヒュームはアーク中の高温蒸気が大気中に拡散し、冷却固化して生じる微粒子が主体である。第8図に示すように、ワイヤの低C化およびワイヤ中へのTiの適量添加により高温蒸気拡散の一因であるCO・CO₂の爆発を抑制し、ヒューム発生量の低減を達成した。スパッタ発生量は、ワイヤC量の最適化およびフラックス中の低蒸気圧成分(TiO₂など)の増加により減少させた。

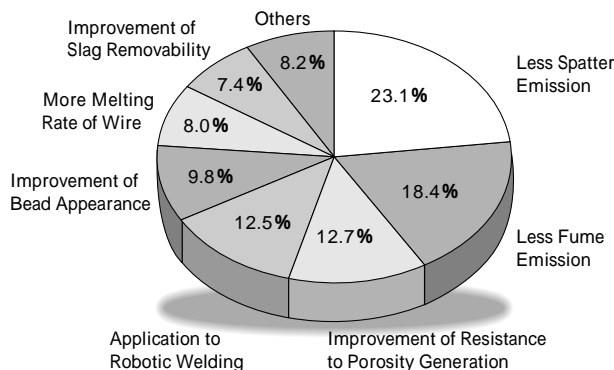
開発ワイヤ(DW-Z100・MX-Z100など)は、従来ワイヤにくらべヒューム発生量が約35%減少しており、作業環境の改善に大きく貢献している。また、スパッタ発生量についても約40%少ないことから鋼板表面などへのスパッタ付着量低減に効果があり、溶接後工程の削減に寄与している。

むすび=FCWの発展経緯を述べるとともに、その技術内容を紹介した。FCW発展の背景には、汎用性、簡便性に優れた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方が基本にある。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。第3図に示したアーク溶接材料の使用動向調査結果でも、FCWは今後と



第8図 ヒューム発生量に及ぼすワイヤ合金成分の影響

Fig. 8 Influence of alloy elements in wire on fume emission rate of FCWs



第9図 溶接材料に対する市場ニーズ

Fig. 9 Market needs for welding materials

もあらゆる産業分野でその適用が広まると予測されている。とくに現在、鉄骨分野などで普及しつつある“FCWとロボットの組合せ”はますます拡大し、溶接の合理化を促進して行くと考えられる。

いっぽうで、FCWの技術の進歩を顧みると、常にユーザー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り返しをおこなってきている。第9図にアーク溶接材料の改善要望に関する調査結果を示すが、ヒューム低減、スパッタ低減、耐気孔性向上が上位にランクされており、開発の方向性を示している。今後とも、発想の原点をユーザーの立場においた技術開発を続け、わが国産業界の発展に貢献して行きたい。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 日本溶接協会：溶接の研究，Vol.36 (1997) p.7.
- 3) 藍田 勲：溶接技術，Vol.46, No.1 (1998) p.102.
- 4) 酒井芳也：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35, No.3 (1985) p.9.
- 5) 菅 哲男：溶接学会誌，Vol.67, No.8 (1998) p.38.