特集

溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開

総説 溶接材料*

興石房樹**

Welding Materials*

by KOSHIISHI Fusaki**

キーワード アーク溶接, 溶接材料, フラックス入りワイヤ, ソリッドワイヤ, 溶滴移行, 高効率溶接

1. はじめに

建築鉄骨, 造船, 自動車, エネルギープラントを始めとする各産業において, アーク溶接は不可欠な技術である。構造物の安全性向上や製作の効率化の観点から, 溶接プロセス技術の発展は継続している。溶接プロセスには, 鋼材の種類, 溶接法, 溶接電源, シールドガスなど様々な構成要素があるが, 特に溶接部の品質に対しては溶接材料に依存するところが大きく, その高機能化が望まれている。本報では, 高機能化を果たしている新しい溶接材料を紹介するとともに, 溶接材料の視点から, 溶接プロセスを更に進歩させていくための課題について考える。

2. 溶接材料の動向

2.1 概要

図1に, 至近の国内溶接材料の品種別需要推移を示す¹⁾。至近全体量は年間30万トンを超えるところで推移しており, 品種別の傾向としては, 被覆アーク溶接棒が徐々に減少し, 代わってフラックス入りワイヤ (以下FCW) が伸びており, ソリッドワイヤの比率も依然として高い。表1に, 各業種別に適用されているアーク溶接法の特徴を示す。造船・橋梁では, FCWの適用が多く, その他溶接箇所に応じてサブマージアーク溶接等が適用されている。建築鉄骨ではCO₂シールドでのソリッドワイヤの適用が多く, また自動車・建機ではAr-CO₂シールドでのロボット溶接の適用が多いなど, 業種により溶接法, シールドガスの棲み分けが進んできた。

2.2 各産業での溶接材料

造船・橋梁においては, ペイント鋼板のすみ肉溶接へのメタル系FCWや全姿勢溶接へのスラグ系FCWの適用が定着化している。少主桁橋では主桁部材が大型化し, 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中, 図2に示すような大脚長すみ肉溶接用のFCWが適用されている。本FCWは生成するスラグの粘性を高めることとスラグ量の増加により, 脚長10mm程度までの1パス溶接が可能である。なお, 490N/mm²級鋼用及

図1 品種別国内溶接材料需要

表1 業種別溶接法の特徴

業種	造船・橋梁	建築鉄骨	自動車・建機	エネルギー関連
溶接法 (溶材)	MAG溶接 (FCW) SAW SMAW EGW	MAG溶接 (ソリッド) SAW ESW	MAG溶接 (ソリッド)	MAG溶接 (FCW) MIG溶接 (ソリッド) SMAW SAW TIG溶接
ロボット化	少	中	多	少
シールドガス	CO ₂	CO ₂	Ar-CO ₂	Ar-CO ₂ Ar

*原稿受付 平成19年12月10日

**正員 株式会社神戸製鋼所 Member, Kobe Steel Ltd.

び590 N/mm²級鋼用に加えて、耐候性鋼用も実用化されている。

造船でのブロック継ぎ工程やロボット溶接では、全姿勢溶接性に優れる溶接材料への要求が大きく、図3に示すようなギャップが大きい場合でも高電流で立向上進溶接が可能なFCWが適用されている。本FCWは、溶融金属の粘性を高め、スラグの粘性・融点も高めることにより、溶融金属の支持力を増大させている。

建築鉄骨の分野では、大入熱・高パス間温度においても溶接部の品質確保できる540 N/mm²級ワイヤ「YGW18」が定着化してきた。図4に示すように、従来ワイヤ(YGW11)と比較して、大入熱・高パス間温度においても良好な機械的特性(引張強度、靱性)を有している。

自動車・建機の分野はロボット溶接化が最も進んでおり、その中でワイヤ送給性や低スパッタ性に優れた銅めっきなしマグ溶接ソリッドワイヤの適用が拡大している。

図2 大脚長すみ肉溶接用 FCW の特性

図3 立向溶接性に優れる FCW の特性

図4 540 N/mm²ワイヤ (YGW18) の特性

図5に、本ワイヤ(YGW12)のロボット溶接におけるアークスタートミス低減例を示す。本ワイヤは、銅めっきなしをベースとして新たな表面処理を施すことにより、チップでの給電安定化を達成しており、画期的なワイヤ送給性とアーク安定性を実現している。スパッタ発生量低減による溶接後処理工程の省略化やロボット稼働率向上を果たしている。

海洋構造物やLPG船などの低温鋼重要部材ではSR(応力除去焼なまし)を施すことが多く、従来のチタニヤ系のFCWではSR後の靱性が劣化するために、被覆アーク溶接棒で施工されていたが、図6に示すように、SR可能な低温鋼用チタニヤ系FCWが開発・適用され、SR仕様部材施工の大幅な高能率化を果たしている。本FCW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添加により、SR後溶接金属の靱性を大幅に改善している。

2.3 溶接材料から見た高能化

溶接プロセスの高能化の方向としては、溶接部の高性能化、プロセスの高効率化、環境対応が挙げられる。高性能化としては、構造物の大型化や寒冷地対応・高温操業に対して、溶接金属の強度や低温靱性など機械的特性の向上に対する要求がある。プロセスの高効率化としては、多電極化による大入熱化や高速化に対応できる溶接材料の設計が重要となる。スパッタやヒュームの低減などの環境対応もこれからの高能化の大きな課題である。これらの観点を中心に、新しい溶接材料を紹介しながら高能化について考えていきたい。

図5 高性能銅めっきなしワイヤのアークスタート性

図6 SR仕様・低温鋼用FCWの低温靱性

3. 新しい溶接材料

3.1 高性能化の追求

低温用途構造物の大型化に伴い、鋼材の高強度化が進んでいる。揚水式水力発電等の水圧鉄管鋼材の高張力化に伴い、950 N/mm²級鋼用高靱性溶接材料が開発された²⁾。図7に、溶接金属の性能一例として、被覆アーク溶接金属の酸素量と吸収エネルギーの関係を示す。溶接金属組成はSi-Mn-2.5~3.5%Ni-Cr-Mo系であり、酸素量を150~200 ppmとする超低酸素化技術により、高強度においても良好な低温靱性を確保している。被覆アーク溶接棒とともに、サブマージアーク溶接材料、MIG・TIG溶接材料が開発・実用化されている。

9%Ni鋼製LNGタンクでは、Ni基の溶接材料が適用されている。その大型化に伴い、溶接部に対して高強度・高低温靱性が要求されている。国内の施工法としては、自動TIG溶接とサブマージアーク溶接が中心であるが、海外では被覆アーク溶接の適用が多い。最近、全姿勢溶接が可能な9%Ni鋼用FCWが開発された³⁾。図8に、その耐割れ性を示すが、溶接金属の機械的特性と耐割れ性の面から最適な組成がシミュレーションされ、高性能なFCWの開発を達成した。今後、LNGタンク建設の高効率化に貢献することが期待されている。

低合金耐熱鋼は、高温環境における機械的性質や耐食性、耐酸化性が優れていることから、石油精製リアクタや火力発電ボイラ分野で使用されている。近年、使用条件の高温・高圧化が進んでおり、鋼材・溶接材料の開

図7 950 N/mm²級鋼溶接金属における酸素量と吸収エネルギーの関係

発・実用化が進められてきた。その中で、図9に示す石油精製リアクタの2.25%Cr-1%Mo-V鋼用の高靱性溶接材料が開発された⁴⁾。鋼材同様に高温・高圧水素環境下での耐水素侵食性が要求されるため、Vを0.25%以上添加することで3%Cr-1%Mo鋼溶接金属と同等の性能を確保している。また、クリープ破断強度、衝撃特性、耐遅れ割れ性を両立させるため、C量、Mn量、Nb量を最適に調整している。

3.2 高効率化の追求

建築鉄骨の分野では、高効率に溶接可能な540 N/mm²級ワイヤ「YGW18」が定着化してきた。一方、ロボット化が急速に進んでいるが、YGW18ワイヤは、溶接金属の高強度・高靱性化のためにワイヤ中の合金成分添加量が高い。そのため、スラグ発生量が多く、ロボット溶接の場合では連続溶接性が劣っていた。そこで、図10に示すように、低スラグ化を図ったロボット溶接用のYGW18ワイヤが開発された。ワイヤ組成の最適化により、低スラグ組成においても、溶接金属の強度と靱性を確保している。従来ワイヤに比べて溶込み深さも増大し、UT（超音波探傷）性能も向上しており、建築鉄骨でのロボット溶接の高効率化に大きく寄与している。

造船・橋梁などの大型構造物の溶接では、全姿勢での溶接性が良好なスラグ系FCWが多く適用されている。しかしながら、スラグ系FCWは、ソリッドワイヤよりも高温割れ感受性が高く、特に、片面突合せ初層溶接および狭あい部の溶接においては、凝固割れが発生しやすくなるため、低電流での施工が行われている。そこで、初層での耐高温割れ性に優れた全姿勢用スラグ系FCWが開発された⁵⁾。本ワイヤは、耐高温割れ性の向上とともに、従来ワイヤの良好な溶接作業性、溶接金属の機械的性質や低ヒューム・低スパッタ特性を両立させた設計と

図8 9%Ni鋼溶接用FCWのフィスコ割れ試験結果

図9 2.25%Cr-1%Mo-V鋼用溶接金属の焼き戻し脆化

している。図11に下向片面溶接の耐高温割れ性を示す。従来ワイヤに比べて耐高温割れ性が向上し、開先角度40°の場合でも、高効率な施工が可能となる。また、従来のFCWと同一条件（電流：220A以下）では、狭開先化を図ることができる。

多電極化によるプロセスの高効率化が進んでいるが、造船等の水平すみ肉溶接ラインウェルダの高速化を狙い、図12に示すように、従来の2電極法からフィラーワイヤを付加した3電極法が開発された。耐気孔性に優れ

るメタル系FCWを開発・採用し、また極性をDCENとしたフィラーワイヤを加えることにより、アーク干渉の軽減と溶融池の安定化を果たした。高速での耐気孔性と良好なビード形状を確保し、従来法の上限であった1.5 m/min を大幅に超える 2 m/min の高速化を可能とした。

コンテナ船の大型化によるハッチコーミングなどの極

図10 ロボット溶接用 YGW18 ワイヤの低スラグ性

図12 3電極拘束すみ肉溶接法の概略

Plate thickness: 80mm Root gap: 8mm
Heat input: 622kJ/cm

図13 2電極エレガス法による断面マクロ

図11 耐割れ性に優れた全姿勢溶接用スラグ系 FCW の特性

図14 高性能鋼めっきなしパルスマグ溶接用ソリッドワイヤ

厚板化に対応し、2電極のエレクトロガス溶接法が開発されている⁹⁾。図13に示すように、最大板厚 80 mm までの立向1パス溶接が可能であるが、ギャップ 10 mm では、600 kJ/cm 以上という大入熱溶接となる。-40℃での靱性を確保するために、溶接金属の Ti と B 量を最適化した専用の FCW が開発されている。第1電極（フェイス側，オシレート），第2電極（ルート側，固定）を異極性とすることで良好な溶込みを確保し，高効率な溶接を実現した。

3.3 環境対応の追求

自動車産業では，低スパッタ化の観点から，従来の定電流・定電圧制御の直流溶接電源に代わり，パルスマグ溶接電源の適用拡大が進んでいる。その中で，薄板のパルスマグ溶接に最適な高性能銅めっきなしソリッドワイヤが開発された⁷⁾。本ワイヤは図14に示すように，従来の銅めっきをなくし，最適な表面処理により優れたワイヤ送給性と給電安定性を付加することで，パルスマグ溶接での，①高速溶接性，②低スパッタ性，③低ヒューム性を実現した。ロボット溶接での高効率化と併せ，作業環境の改善に大きく貢献している。

4. 今後の課題

高性能化に関しては，構造物の大型化，操業の効率化や，それに伴う鋼材の発展により，更なる高強度化と高靱性化の要求が継続すると考えられる。そのためには，溶接金属組織を如何に制御していくかが重要である。高効率化に関しても，各産業・構造物に応じた高速化・高溶着化の要求は継続すると考えられる。基本的な傾向と

して，高速化・大入熱化により溶接部の品質は劣化する方向である。溶接金属の性能・品質向上に対しては，化学組成の最適化が最大課題となり，やはり溶接冶金的な取組みが重要である。画期的な向上を図っていくためには，既成概念に捉われず既存の溶接材料規格の枠をも超えたアプローチも必要であろう。

環境対応は今後ますます重要になってくる。特に溶接ヒュームに関しては，社会的な課題となってきており，Mn ヒュームや 6 価 Cr ヒューム⁹⁾に対する研究も進められている。溶接アーク現象解析や発生メカニズム解明など基礎的な取組みが必要であろう。その中で最近，ソリッドワイヤと FCW におけるマグ溶接の溶滴移行を詳細に観察し，その移行形態の分類見直しが実施されている⁹⁾。図15に CO₂ 溶接の結果，図16に Ar+20%CO₂ 溶接の結果を示す。溶接材料自体の設計も重要であるが，溶接電源やシールドガスなど溶接プロセスとしての低減化も非常に有効である。例えば，マグ溶接において，スラグやヒュームを減らしていくためには，酸素との親和力の強い成分を減らす必要があるが，それにより溶接金属の機械的特性が劣化し，溶滴移行も不安定化する。しかしながら，これまでの概念にない成分の添加もしくは従来成分の削除や，溶接プロセスとしてのアプローチにより，解決することが可能であるかもしれない。CO₂ シールドでの溶滴自由移行を見出した REM 添加型正極性ソリッドワイヤ¹⁰⁾などは良い例と考えられる。

各産業別の溶接プロセス高機能化の具体的な課題として，建築鉄骨ではロボットでの連続溶接性の向上，造船では更なる高速・高溶着化，海洋構造物では全姿勢溶接用 FCW の性能向上などが挙げられ，自動車では垂鉛め

図15 CO₂ 溶接における溶滴移行形態の変化

図16 Ar+20%CO₂ 溶接における溶滴移行形態の変化

つき溶接性の更なる向上，エネルギー分野では溶接部の高強度・高靱性化などが挙げられる。既存の溶接プロセスに対する溶接材料の開発に加え，溶接電源，溶接ロボット，シールドガスなど溶接プロセス全体を考えていくアプローチが主流となっていくであろう。その中で，溶接材料の設計は溶接部の品質を高め，構造物の信頼性を保つことが最も重要な役割と考えている。したがって，そのような観点を持った溶接技術者の育成も大きな課題の一つであろう。

参考文献

- 1) 日本溶接棒工業会データ。
- 2) 末永ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p38.
- 3) 鈴木ら：溶接学会全国大会講演概要，78 (2006) 426.
- 4) 山下ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p34.
- 5) 伊藤ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p15.
- 6) 長岡ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p20.
- 7) 鈴木ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p29.
- 8) 渡辺ら：神戸製鋼技報，54-2 (2004)，p47.
- 9) S. Izutani et al.: IIW Doc. 212-1090-06.
- 10) 片岡ら：溶接学会全国大会講演概要，75 (2004) 404