

解説

受賞技術-16

# 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術の開発

Ultra-low Spatter Electrode Negative CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding Technology

片岡時彦

Tokihiko Kataoka

JFEスチール(株)スチール研究所  
接合・強度研究部  
主任研究員

## 1 はじめに

炭酸ガスアーク溶接は国内で用いられているアーク溶接全体の30%を占める主要な溶接法であり、鋼を加工するさまざまな分野で使用されている。しかしながら、炭酸ガスアーク溶接における自由溶滴移行領域では溶接時に多量のスパッタが発生する。これを要因とする品質トラブルや付加作業が発生しており、スパッタの低減による溶接作業性の改善が課題とされている。これまでも溶接アーク現象に及ぼすワイヤ組成の影響に関する研究が報告され、炭酸ガスアーク溶接においては電極であるワイヤ中のC量低減とTi量増加による短絡抑制がスパッタ低減に有効である<sup>1-2)</sup>。また、ワイヤにK添加した低スパッタ溶接用ワイヤ<sup>3)</sup>および高周波パルス炭酸ガスアーク溶接法<sup>4)</sup>を開発し、より一層の低スパッタ化が可能であることを報告しているがこれらの方法ではスパッタの低減は十分であるとはいえない。

本開発では、炭酸ガスアーク溶接においてスパッタの発生を極限まで低減し、かつ、これまでにない高効率アーク溶接技術の実現を目指した。炭酸ガスアーク溶接法は、アークを比較的安定して維持できることから逆極性溶接(ワイヤがプラス極)が適用されてきた。しかし、炭酸ガス特有のアーク緊縮によって大きく成長した溶滴(ワイヤ先端の溶融金属)が揺れ動くことで、スパッタが多く発生する。これに対し、本開発では、正極性溶接(ワイヤがマイナス極)における陰極点制御技術の開発に取り組んだ。その結果、REM(希土類金属)を適量添加したワイヤを用いることで世界で初めて炭酸ガスアーク溶接の溶滴微細化「スプレー移行」の実現に成功し、極低スパッタ化(従来比1/10)を達成した。

本報告は、開発した超低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術の開発思想、アーク現象、溶接施工における諸特性について述べる。

## 2 炭酸ガスシールドアーク溶接の現状

シールドガスはアークプラズマ源になるとともに、溶融池(アークにより溶融した鋼板部分)を大気から保護する目的で用いられる。また、溶接アークが比較的安定化することでスパッタ(溶融金属の飛散)低減および溶け込み確保がしやすいとの観点から、逆極性溶接(ワイヤをプラス極、鋼板をマイナス極とする溶接)が用いられている<sup>5)</sup>。

図1に炭酸ガスアーク溶接の状況を示す。中央の白い部分がアークであり、白く立ち昇る煙がヒュームである。さらに、アークから周囲に向かって発光する飛散物がスパッタである。このように炭酸ガスアーク溶接では溶接時に多量のスパッタが発生する。スパッタは、シールドノズル、溶接部およびその近傍に付着し溶接欠陥の要因となる他、後工程の塗装欠陥の要因でもあり、除去には多大な工数を要するため、その削減が要望されている。

図2に電極であるワイヤ先端に懸垂する溶滴に対して作用する力と電流を模式的に示す。溶滴を保持する力となる表面張力、溶滴を離脱させる力となる重力、アーク電流によって発生する電磁力(アークの中心に向かって垂直に作用)、アー



図1 炭酸ガスアーク溶接の状況

クプラズマによって発生するプラズマ気流、の4つがあり、電磁力によって生じるアーク圧力は電流密度の2乗に比例し、溶接電流300A、アーク半径2mmにおける中心部の圧力は716Pa、プラズマ気流は170m/sと試算されている<sup>5)</sup>。

炭酸ガスアーク溶接におけるアークの特徴は、円柱状のアーク形状にある。この円柱状のアークは、アークプラズマの緊縮によって生じている。アークの緊縮は炭酸ガスの比熱が大きいこと、言い換えると炭酸ガスの解離反応が吸熱反応であることが原因とされている<sup>6)</sup>。

### 3 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術の開発思想と特徴

#### 3.1 研究開発の思想

炭酸ガスアーク溶接は、アークが比較的安定した状態となる逆極性溶接（ワイヤがプラス極）が従来より適用されてきた。しかし、炭酸ガスプラズマ特有のアーク緊縮現象によりスパッタが多発するという問題があった。

本開発では、溶接時の極性に着目し、正極性溶接（ワイヤがマイナス極）はアークが著しく不安定になるため溶接には不适当というこれまでの常識に対し、アーク発生に大きく影響を及ぼす陰極点位置さえ安定化できれば、本来、正極性はアーク安定化を実現するのに適した極性となり得るとの着想に至り、正極性溶接における陰極点制御技術の開発に取り組む、極低スパッタ化と狭開先溶接の実現を目指した。

次に、本開発での極低スパッタ化の狙いを、図3の溶滴径とスパッタ発生量の関係図で示す。スパッタ除去作業を省略できるレベルまでスパッタ低減すると観点から、図中における左下領域を開発目標とした。また、溶滴移行形態については、従来のグローブユラー移行に対して、極低スパッタ化の達成にはスプレー移行を実現することが必要と考えた。

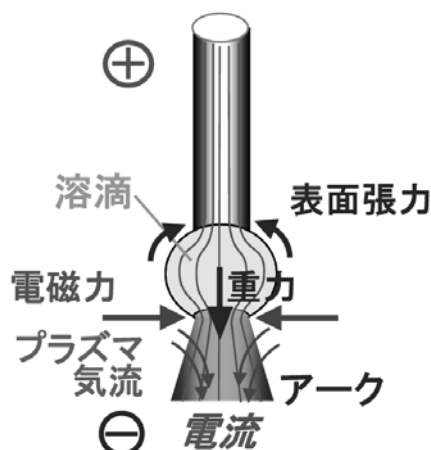


図2 溶滴に作用する力の模式図

#### 3.2 アーク安定化のための極性の選択

炭酸ガスアーク溶接において適用される逆極性溶接（ワイヤプラス）では、ワイヤ先端の溶滴に発生するアーク点（アークプラズマの陽極）がワイヤ組成の影響を受け難く、正極性溶接（ワイヤマイナス）と比較するとアークが安定化する。しかし、その一方で、アーク発生位置が溶滴の揺動とアークの偏向によって容易に移動するため、スパッタ低減の観点からみるとアーク安定性は十分ではなかった。これに対し、正極性溶接（ワイヤマイナス）では、アーク点（陰極）はFeよりも電子放出の容易なFeO等の酸化物に集中するが、酸化物がアーク集中によって破壊され、それによりアーク点が新たな酸化物を求めて移動し続けることにより、アークは著しく不安定になるとされている。そのため、溶滴は粗大になりスパッタ発生も多い。

逆極性（ワイヤプラス）の陽極点は比較的安定であるが、正極性（ワイヤマイナス）の陰極点は酸化物に集中し易く不安定である。この不安定なアークによって溶滴は変形し、溶滴移行が妨げられることで粗大化する。しかし、正極性溶接（ワイヤマイナス）においてアーク点（陰極）が安定化されれば、図のように安定なアーク形態が得られ、非常に有望な技術になり得ると考えられる。そこで、正極性溶接（ワイヤマイナス）における陰極点の安定化技術について検討した。

#### 3.3 正極性溶接（ワイヤマイナス）におけるアーク安定化

FeおよびFeOよりも仕事関数の低い元素は陰極点を形成し易く、沸点が高い元素は陰極点を安定化させ易いと考えら

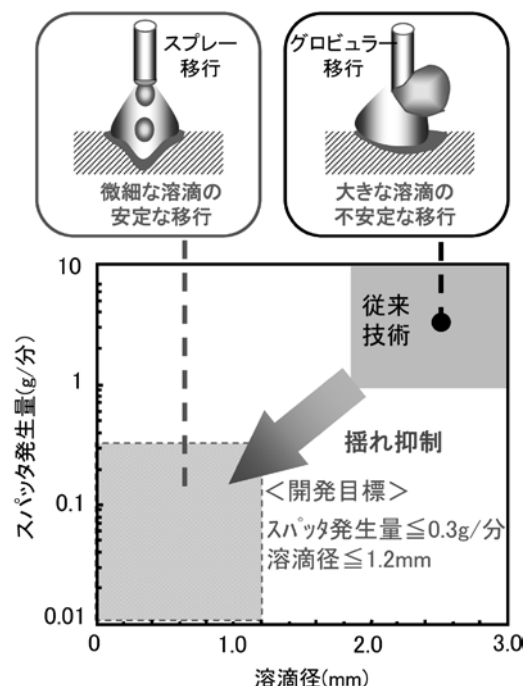


図3 溶滴径とスパッタ発生量

れる。REM (希土類金属、Ce、La、Y) はその酸化物を含めて仕事関数が低く、沸点が高い。以上のことから正極性溶接 (ワイヤマイナス) におけるアーク安定化のための添加元素としてREMを選択し、その有効性について検討した。

図4に溶接電流300Aにおける電極ワイヤREM量と移行溶滴径の関係を示す。逆極性溶接 (ワイヤプラス) における移行溶滴径の平均は2.2~2.4mmであり、電極ワイヤのREM含有量による明確な傾向は認められなかった。一方、正極性溶接 (ワイヤプラス) における移行溶滴径の平均は電極ワイヤREM量200ppm以下が2.9~3.2mmと粗大であったのに対して、REM量310、390ppmでは1.1~1.2mmにまで微細化した。

図5に正極性溶接 (ワイヤマイナス) における溶滴とアークの高速撮影画像を示す。また、アーク電圧の時間的変化を下段に示す。REMを添加していないワイヤのアーク点 (陰極) は大きく偏向するのに対して、REMを添加したワイヤではワイヤ先端にアークが集中し、偏向のない安定したアークが観察された。また、REMを添加していないワイヤのアーク電圧は大きく変動しているのに対して、REMを添加したワイヤのアーク電圧変動はほとんどなく、非常に安定している。正極性溶接 (ワイヤマイナス) においては、REM添加ワイヤを用いることが非常に有効であるといえる。

従来法 (逆極性：ワイヤプラス) の溶滴は直径2.4mm、重量は59mg、移行回数は27回/秒、これを正極性 (ワイヤマイナス) とした場合、溶滴は直径3.3mm、重量は147mgへと粗大化し、移行回数は15回/秒に減少した。しかし、正極性溶接 (ワイヤマイナス) においてREM添加ワイヤを用いることで、溶滴は直径1.2mm、重量は7mgへと微細化した。また、溶滴移行回数は222回/秒に増加しており、連続的かつ規則的な溶滴移行が実現できた。

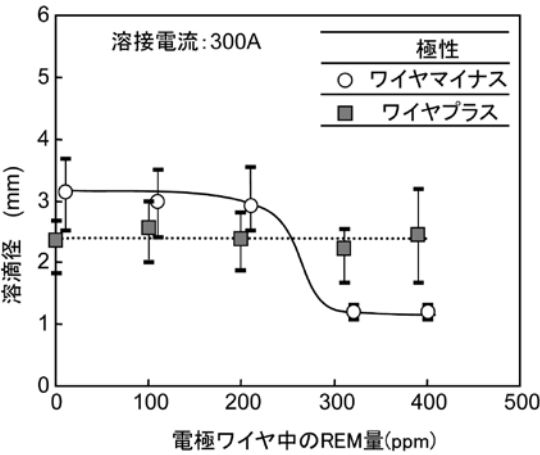


図4 電極ワイヤ中のREM量と溶滴径の関係

3.4 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術の特性

開発技術は前述したように、REMを添加したワイヤを用い、従来とは異なる正極性溶接 (ワイヤマイナス) を採用した点に特徴がある。そのアーク現象は、ワイヤ先端を頂点とする安定した円錐状アークを形成し、最も理想的な溶滴移行と考えられる微細スプレー移行を炭酸ガスアーク溶接において初めて実現した。開発技術の特徴を以下に列挙する。

- (1) スパッタ発生量が従来の1/10に低減される。
- (2) 溶接ビード近傍のスパッタ付着が極めて少ない。
- (3) ヒューム発生量が従来の1/2に低減される。
- (4) 溶込み深さは従来の1.5倍に増加する。
- (5) アーク音がソフト、音圧は従来の1/2に低減する。

図6に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。開発技術は、従来技術と比較して大幅なスパッタ低減が達成されており、その効果は溶接電流250~400Aの広い範囲で著しい。

開発技術を用いたビードオンプレート溶接における断面マ

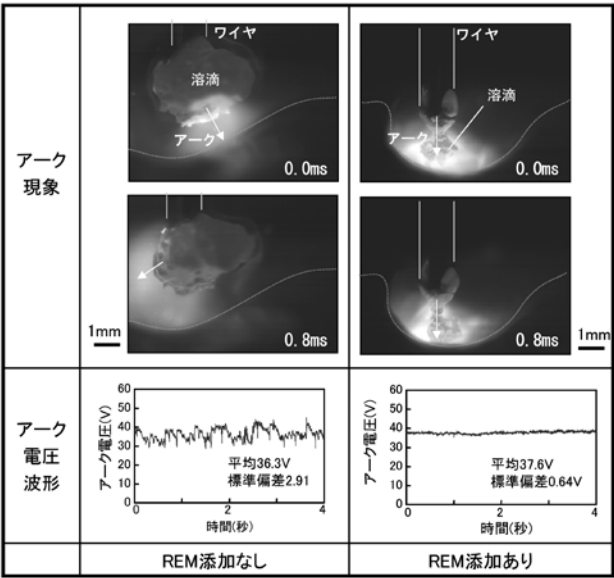


図5 正極性 (ワイヤマイナス) におけるアーク現象の比較

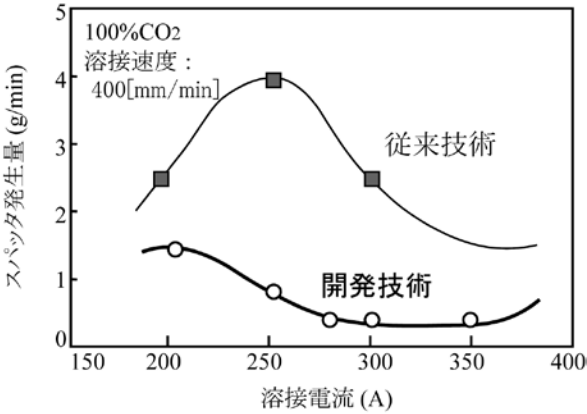


図6 溶接電流とスパッタ発生量の関係

クロ組織を図7に、外観を図8に示す。ビード近傍へのスパッタ付着がなく、ビード中央には従来比約1.5倍の深い溶込みが認められる。また、ワイヤの溶融速度は、従来の逆極性（ワイヤプラス）の溶接と同等である。

### 3.5 高能率狭開先溶接技術

狭開先溶接は、開先断面積の低減と溶接施工時間の短縮が可能であるが、安定した溶込み確保および積層溶接における開先面へのスパッタ付着防止が重要となる。この課題を解決する方法として、電流波形制御あるいはシールドガス組成制御が有効との報告<sup>7)</sup>がなされている。開発技術はスパッタの発生が少なくアークの集中と安定性に優れることから、これら制御機構を用いることなく狭開先の溶接が可能である。

図9に開発技術を用いた狭開先溶接に適した継手を示す。板厚22mm、無開先（I形）-Gap5mmの極狭開先の溶接であるにもかかわらず溶接欠陥のない良好なマクロ組織を得ている。

この開発技術を用いた狭開先溶接法は、財団法人日本建築

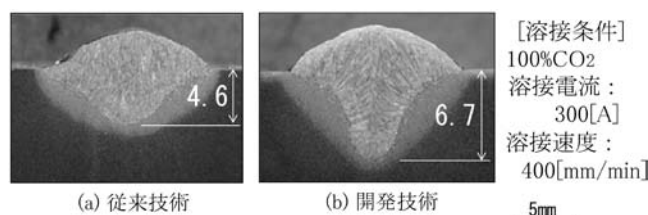


図7 ビードオンプレート溶接の断面マクロ組織

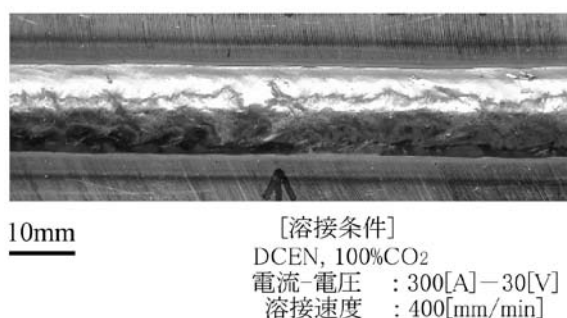


図8 開発技術を用いたビードオンプレート溶接部の外観

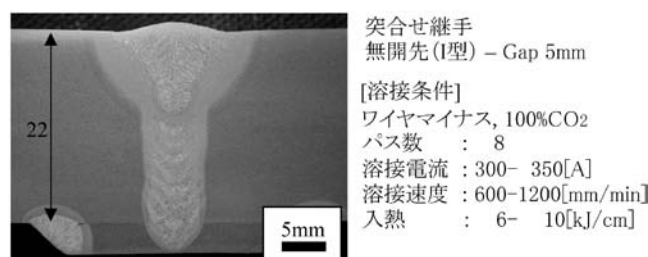


図9 開発技術を用いた狭開先溶接部の断面マクロ組織

## 4 おわりに

開発技術は、既存のガスシールドアーク溶接設備を使用することが可能である。よって、実用化において新たな設備投資を必要としない。溶接用ワイヤは、490N/mm<sup>2</sup>級鋼用、高強度な540N/mm<sup>2</sup>級鋼用および590N/mm<sup>2</sup>級鋼用を開発している。既に、橋梁、造船分野において狭開先溶接が可能な点が評価され、重要物件に採用されており、今後は、能率向上・コスト低減要求に加えて、環境意識の高まりと省エネルギーの指向によりその適用は着実に増加する。

### 参考文献

- 1) N.Yamauchi and K.Agusa : Effect Elements in Electrode Wire, Journal of Japan Welding Society, 50 (1981) 11, 35. (in Japanese)
- 2) T.Arai, M.Rokujo, T.Yamada and T.Suga : Spattering in CO<sub>2</sub> Arc Welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 1 (1983) , 2, 177. (in Japanese)
- 3) T.Kataoka, R.Ikeda, K.Yasuda, S.Sakaguchi and K.Amano : Influence of Minor Elements in Electrode Wire on Spattering Phenomena in CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 25 (2007) , 410. (in Japanese)
- 4) T.Kataoka, R.Ikeda, S.Sakaguchi, K.Yasuda and K.Tokinori : Development of Low Spatter CO<sub>2</sub> Arc Welding Process with High Frequency Pulse Current, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 25 (2007) 4, 480. (in Japanese)
- 5) 黄地 : 溶接・接合プロセスの基礎, (株) 精興社, (1996)
- 6) M.Tanaka and S.Tashiro : A Study of Thermal Pinch Effect of Welding Arcs, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 25 (2007) 2, 336. (in Japanese)
- 7) T.Nakamura and K.Hiraoka : Characteristics of Bead Formation Phenomena in Narrower Gap Welding and Proposal of New Welding Process at Ultra-Narrow Gap Joint -Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process (Report 1) -, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 19 (2001) 1, 44. (in Japanese)

(2013年11月27日受付)