

(解説)

アーク溶接用高性能銅めっきなしソリッドワイヤ「SE」シリーズの発展

Growth of High-performance, Arc-welding Solid Wires, “SE” Series, without Copper Coating



鈴木 励一*
Reiichi SUZUKI



中野 利彦*
Toshihiko NAKANO



興石 房樹*
Fusaki KOSHIISHI

Conventional solid wires are coated with copper to maintain their weldabilities. Recently, Kobe Steel has developed a non-copper-coated solid wire, named “SE-wire”, which is evaluated highly in the industry with its innovative improvement in weldability. Now as a main product, further features are being added to the SE-wire to adapt it for (1) galvanized steel and (2) low slag and improved bead shapes.

まえがき = 従来、溶接用ソリッドワイヤは銅めっきを施すことが常識とされてきた。当社が2000年から販売を開始した「SE」ワイヤは、この常識を覆すべく銅めっき工程を省略することに成功したソリッドワイヤである。SEワイヤは、当社の炭素鋼用溶接ワイヤの主力製品の一つであり、銅めっき工程の省略に伴う環境改善効果と優れた溶接性によって、市場から高い評価を受けている。当社は、現在も新しいSEワイヤの開発を行っており、亜鉛めっき鋼板用、低スラグ・ビード形状改善用など特徴的な製品を創出している。本解説ではSEワイヤの特徴を中心に紹介する。

1. SEワイヤの市場性

主なアーク溶接材料の分類を図1に示す。日本溶接棒工業会統計¹⁾によれば、現在の溶接材料の国内生産量は年間約30万ton超である。溶接法別ではガスシールドアーク溶接法が70%を超えて圧倒的主流であり、その中でもソリッドワイヤが約40%と最も多く、代表品種となっている。ソリッドワイヤは他の溶接材料と異なり、アーク安定化効果のあるフラックスを全く用いない。し

たがって、低コストではあるものの、フラックス入りワイヤなどと比べるとアーク安定性が劣り、スパッタも多い。これに対し、コンタクトチップとワイヤ間の通電性を高めることで多少なりともアーク安定性の改善を図ることを狙うなど、様々な目的で銅めっきを施してきた。しかし、銅めっきなしで通電性を高める新技術を用いたSEワイヤ(図2)の登場以降、他社も類似商品を投入した結果、めっきなしソリッドワイヤという新たな分野を創出するに至った。図3に示すとおり、当社においては、全ソリッドワイヤにおけるSEワイヤ比率が32%と、約1/3に達している。

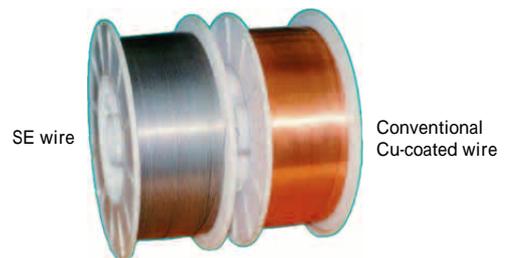


図2 SEワイヤと従来銅めっきワイヤの外観
Fig. 2 Appearance of SE and conventional Cu-coated wire

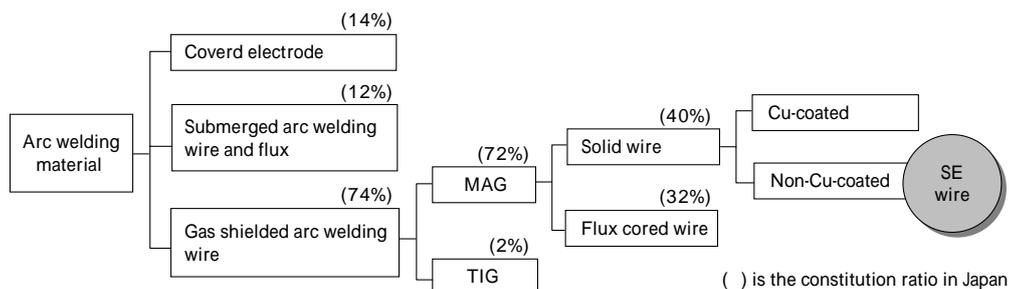


図1 主な溶接材料の種類と構成比
Fig. 1 Types and the constitution ratio of main welding materials

* 溶接カンパニー 技術開発部

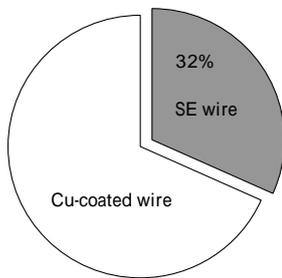


図3 当社ソリッドワイヤにおけるSEワイヤと銅めっきワイヤの構成比率（07年度）

Fig. 3 The ratio of SE and Cu-coated solid wire manufactured by Kobe Steel (2007)

2. 銅めっきに関する定説の再検証とSEワイヤの基本的技術^{2)~6)}

通電性改善以外にも、銅めっきは後述する種々の長所を有すると信じられていた。当社がこれらの定説を改めて検証した結果、何点かは実際には必ずしも正しくないことを確認した。表1に検証項目と結果を示す。これらの結果を踏まえ、銅めっきに代わる表面処理技術と新たな製造技術の組合せによって、溶接性を飛躍的に改善可能との結論を導いた。その理論を実現したワイヤがSEワイヤである。以下に検証項目別に技術の詳細を示す。

2.1 通電性

銅めっきの最大の長所は、電気抵抗低下による通電性改善であるとされてきた。しかし、溶接ワイヤの表面状態は、ミクロ的に観れば完全に被覆されてはならず、鉄地が露出したり亀裂が入っているのが実態である（図4）。その理由は、めっきの膜厚はわずか0.5 μ m程度にすぎないことから、伸線加工時にダイスとの摩擦で裂けたり部分的にはく離してしまうためである。

このような不均一表面状態のワイヤとコンタクトチップの接触点では、ワイヤ表面の銅と鉄地が不規則に入れ代り、急激な電気抵抗の変化（図5）に起因してアーク不安定が引起されると考えた。すなわち、急激な通電性（電気抵抗）の変化に伴うスパーク現象と融着の発生がアーク不安定やワイヤ送給不良の大きな原因であるとの仮説を立てた。この仮説からは、さらに次の仮説が導かれる。すなわち、微視的に不規則な通電抵抗差がアーク不安定の原因であるならば、むしろ銅めっきを施さず、鉄地のみとする方が電気抵抗値は高位であるものの安定するのではないかという仮説である。我々は実際にこの仮説が正しいことを種々の実験によって確認した。さらに、SEワイヤでは電気抵抗変動のみでなく、その絶対値の低下も狙って導電性物質のワイヤ表面への均一塗布技術を開発し、適用した。この生産技術によって、SEワイヤは従来銅めっきワイヤや単なる銅めっきなしワイヤでは得られない画期的な通電安定性を達成している。

2.2 耐錆性

銅は鉄よりも酸素親和性が低いいため、銅めっきは錆防止に役立つと考えられてきた。しかし、実際に銅めっきワイヤを用いて耐錆性の確認を行った結果、銅めっきワイヤよりもめっきなしワイヤのほうが優れていた（図6）。銅めっきワイヤの錆形成を調査すると、めっきの亀裂やはく離部の鉄地露出部が局所的に急激に腐食していた。このように、銅めっきワイヤのほうが耐錆性が劣るのは、ワイヤ表面で隣合う銅と鉄の異種金属間に局部電池が形成され、電子移動によって電気陰性度の大きい鉄の腐食が進むためと考えられる。SEワイヤは異種金属接触がないため局部電池を形成せず、さらに油脂による防錆処理も施すことで耐錆性を高めている。なお、銅

表1 銅めっきに関する従来の知見と確認されたその真偽，SEワイヤとして開発された技術
Table 1 Conventional understanding on coatings, their authenticities and technologies developed for SE wire

Merits of Cu coating and non-Cu coating		True or false	Technologies developed for SE wire
Cu coating	Energizing stabilization	False	Non-Cu-coating and innovational surface treatment
	Rust prevention	False	
	Improvement of the wear resistance of tip	True	
	Improvement of wire productivity	True	Innovative drawing plant
Non-Cu coating	Ungeneration of Cu flakes and non blockage	True	Non-Cu-coating
	High efficiency of deposit rate	True	
	Non Cu fume generation	True	
	A toxic material is not necessary at Cu-coating process of manufacture	True	
	The droplets is easily to be separated from wire (New knowledge)		

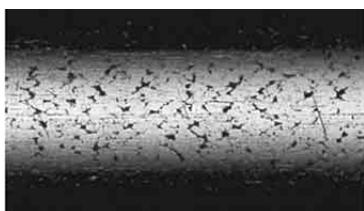


図4 銅めっきワイヤの表面亀裂

Fig. 4 Surface crack of conventional Cu-coated wire

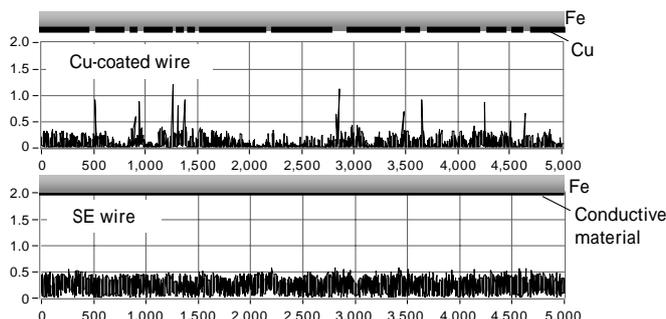
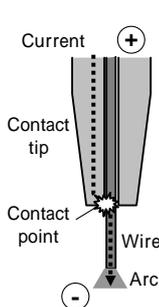


図5 銅めっきワイヤとSEワイヤの長さ方向の表面電気抵抗分布

Fig. 5 Comparison with distribution of surface energizing resistance between Cu-coated and SE wire

めっきを施さないフラックス入りワイヤは海岸付近の造船所などで多く使われているが、一般的な管理・使用条件下において錆発生による特段の問題は生じていない。今回の研究を通じてその理由が理論的に裏付けられた。SE ワイヤでもこれまで、所定の管理・使用環境では錆が問題となったことはない。

2.3 耐チップ摩耗性

コンタクトチップは、溶接時間とともに通電部である先端内面が削れていく。チップ摩耗量が増加するにしたがい、ワイヤとの接触圧の低下や接触点の移動が生じ、アーク不安定やワイヤ狙いズレが発生しやすくなる。従来のめっきなしワイヤは、銅めっきワイヤに比べてチップ摩耗速度が著しく速く、大きな問題とされてきた。この原因として、銅めっきがなくワイヤ表面の電気抵抗が高いことに起因して、チップの通電点近傍の温度が上昇し、チップ内壁が軟化する電気抵抗因子、硬い鉄製ワイヤとの接触により軟らかい銅チップの内面が機械的に削られる摩擦抵抗因子の2因子が考えられている。SE ワイヤでは、これらチップとの通電抵抗および機械的な摩擦抵抗の2因子を低減する作用のある、銅めっきに代わる独自の表面処理によって改善を図っている(図7)。

2.4 ワイヤ生産性

銅めっきなしソリッドワイヤの短所は、上述の耐錆性や耐チップ摩耗性などに対する使用者側の懸念のみならず、製造コストの上昇という生産者側の課題もあった。めっきなしワイヤではめっき関連設備が不要なため、一見、低コストのように思われる。しかし、銅めっきは軟質のため、引抜伸線時の固体潤滑剤の役割も担い、伸線速度を高める効果を有している。銅めっきがないと、摩擦抵抗が上昇するため伸線性が劣化し、一般的に断線防止のための伸線速度の低下や引抜ダイス交換頻度上昇などが避けられない。差引きではコストアップとなり価格

競争力が低下するのである。そのため、SE ワイヤの実用化にあたっては、製造コストの上昇を抑制すべく、伸線方式、潤滑剤など生産技術の革新を図り、専用ライン化することで銅めっきワイヤ同等の生産速度を得ることに成功した。この生産技術面の開発・実用化がSE ワイヤの他社追従を許しにくくしている大きな要因ともなっている。

3. SE ワイヤの長所

前章で述べたように、SE ワイヤは従来の銅めっきなしワイヤで指摘されていた欠点を克服するとともに、銅めっきワイヤでは得られない数々の長所を具備している。

3.1 銅めっき粉が発生しない

銅めっきは、ワイヤ送給経路の様々な箇所での接触により傷つけられ、はく離する。その銅粉はワイヤ送給ケーブルやチップ内にたい積し、ワイヤ送給障害などのトラブルを引き起こす(図8)。銅めっきを施さないSE ワイヤではめっき粉たい積が全く生じないことから、送給トラブルや清掃メンテナンス回数的大幅削減を図ることができる。

3.2 溶着効率の増大、耐溶落ち性の向上、電力コストの低減

ワイヤを溶融するエネルギーは、アーク放射熱、チップの通電点からワイヤ先端までの電気抵抗によるヒューズの発熱、の二つに大別される。銅めっきなしワイヤは電気抵抗が高いため、項が大きくなる。すなわち、抵抗発熱量が大きいため、ワイヤ送給速度が同じであれば銅めっきワイヤよりも供給電力は少なくて済む。電流とワイヤ溶融速度の関係を図9に示す。電流一定とすれば、SE ワイヤは銅めっきワイヤより多くのワイヤを溶かすことができ、高能率である。逆に、ワイヤ送給量一定とすれば、入熱が小さくなるため薄板でも溶落ち不良が発生しにくくなる。また電力コストも低減される。

3.3 溶滴離脱性の向上と低スパッタ性

ワイヤ先端が溶融し、溶滴として溶融池に移行する際の駆動力は、導体を電流が流れる際に中心方向に作用する電磁ピンチ力が主体である⁷⁾。電磁ピンチ力に抗する力の一つが溶滴表面張力であり、これが大きいと、溶滴のくびれ形成が阻害されて、不規則な溶滴移行となりやすい。その結果、溶滴は大粒化し、飛散して大粒スパッタ

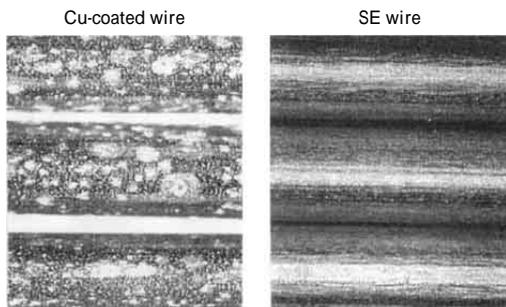


図6 強制発露試験でのワイヤ表面状況
Fig. 6 Optical micrograph of wire surface after salt test (Corrosion test; 0.01N NaCl solution, 30 , 80%RH, 2h)

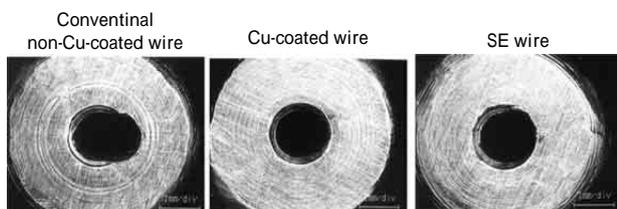


図7 耐チップ摩耗性の比較
Fig. 7 Condition of tip wear (1.2mm, CO₂, 280A, Continuous welding for one hour)

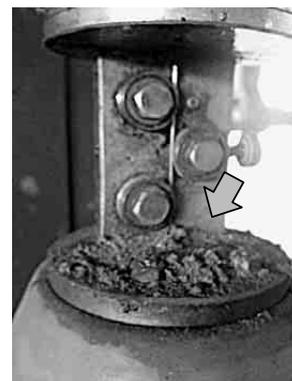


図8 はく離した銅めっき粉
Fig. 8 Cu-coat flakes

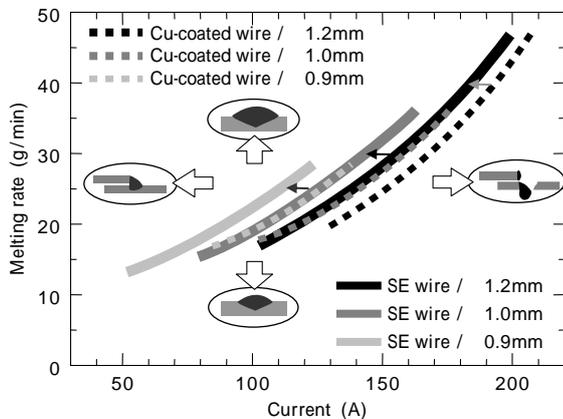


図9 電流とワイヤ溶融速度の関係

Fig. 9 Relationship between current and wire-melting rate

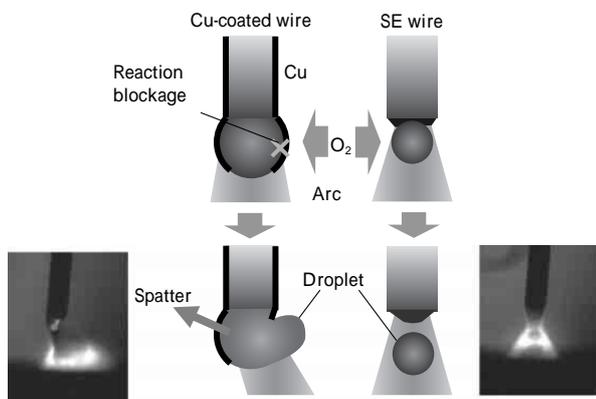


図10 銅めっき有無による溶滴の酸化性差異が離脱に及ぼす影響
Fig.10 Influence of oxidization difference caused by Cu-coating and non-coating on droplet transfer

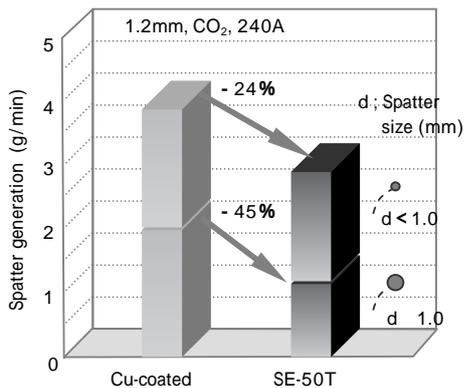


図11 SE ワイヤと銅めっきワイヤのスパッタ発生量の比較

Fig.11 Comparison between SE wire and Cu-coated wire on amount of spatter generation

タとなる。この現象に対し、SE ワイヤでは改善効果がある。溶鉄の表面張力は酸素量の増加とともに低下する⁸⁾。溶滴形成時には、周囲雰囲気であるシールドガス中の酸素が溶鉄と化学反応を起こして溶滴に供給される。しかし、その供給速度は反応速度律速であり、酸素親和性の低い銅めっきを施すと溶滴中の酸素濃度が抑制される。一方、銅めっきを施さないSE ワイヤでは、溶滴の酸素吸収が促進されることが明らかとなった。この酸素濃度の上昇により溶滴の表面張力が低下、離脱性が向上し、小粒の溶滴移行が円滑に行われる(図10)。さらに、SE ワイヤでは、電子放出を容易にする効果を持つアーク安定剤を塗布する表面処理を施すことにより、スパッタ発生を一層低減している。図11 にSE ワイヤの低スパッタ特性を示す。

3.4 環境負荷が小さい

SE ワイヤでは、溶接時に発生するヒューム中に銅めっき由来の銅成分が含有されない。粉じんとしての銅は、例えば米国 ACGIH (米国産業衛生専門家会議)において環境中許容濃度に制限が設けられており⁹⁾、SE ワイヤを用いることによって溶接管理負荷が軽減される。

一方、ワイヤ製造時には、銅めっき工程において有害物質を大量に使用せざるを得ないのが実情であり、嚴重な廃液処理が必要となっている。

このように、銅めっきを施さないSE ワイヤは、溶接時およびワイヤ製造時の両方において環境に及ぼす影響が小さく、環境に優しいエコロジー商品と位置付けることができる。

4. 新しいSE ワイヤ

SE ワイヤシリーズはその表面に特徴がある商品群であり、電流域とシールドガスの組合せとして最も汎用性の高いJIS規格 YGW11, 12, 15, 16 を従来から取りそろえている。これらに加え、最近では特殊なワイヤ組成を組合せ、特徴的な溶融池特性に起因した溶接特性を発揮する新しいSE ワイヤを開発している。現在のSE ワイヤの商品ラインナップを表2に示す。

4.1 亜鉛めっき鋼板用SE ワイヤ「SE-A1TS」^{10), 11)}

溶融亜鉛めっき鋼板(GI)や合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)は、防錆能力が高いことから自動車用鋼板として多く採用されている。しかし、そのアーク溶接性は非常に悪く、多量のスパッタ飛散、ピットやブローホ

表2 SE ワイヤシリーズ一覧
Table 2 SE wire series

Brand name	JIS Z3312 : 2009 classification	Shielding gas	Power source	Recommended current range	Use and characteristics
FAMILJARC SE-50	YGW11	CO ₂	DC	Middle ~ high	General
FAMILJARC SE-50T	YGW12	CO ₂	DC	Low ~ Middle	General
FAMILJARC SE-A50S	YGW15	Ar + CO ₂	DC, Pulse	Middle ~ high	General
FAMILJARC SE-A50	YGW16	Ar + CO ₂	DC, Pulse	Low ~ Middle	General
FAMILJARC SE-A1TS	G49A2M16	Ar + CO ₂	Pulse	Low ~ Middle	Galvanized steel etc.
FAMILJARC SE-A50FS	G49A0M0	Ar + CO ₂	Pulse	Low ~ Middle	High speed, Low slag Wide & flat bead shape

ールなど気孔欠陥の多発、が大きな問題となっている。その原因は亜鉛の沸点(906)が鉄の融点(1,536)よりも大幅に低いためである。すなわち、溶接時に気化した亜鉛ガスがアークを著しく乱し、かつ溶融池内で気泡を形成してピットやブローホールとなる(図12)。これらの問題の改善には、(a)溶接電源(電流波形)、(b)シールドガス、(c)溶接ワイヤの総合的な取組みが必要とされる¹²⁾。この内、(a)と(b)はAr+CO₂あるいはAr+CO₂+O₂ガスを用いたMAGパルス溶接法が最も優れているとされ、溶接ワイヤには高周期であるパルス電流波形に適合した溶融特性が要求される。既述のとおり、SEワイヤは溶滴の離脱性に優れ、パルス溶接に好適である(図13)。一方、気孔欠陥の防止については、図14に示すように、アーク直下での円滑な亜鉛ガス放出、および溶融池後方でのガス浮上防止の両立が有効であることを見出した。この機構を実現すべく、SE-A1TSではワイヤ成分の最適化により、溶滴形成時の表面張力は低いままに、溶融池の粘性を高めることに成功した。図15にスパッタ特性を、図16に耐ピット性を示すが、いずれもSE-A1TSが従来ワイヤよりも優れていることが明らかである。

4.2 ビード形状改善・低スラグSEワイヤ「SE-A50FS」^{13)~15)} 溶接速度の向上は全ファブリケータの共通ニーズであ

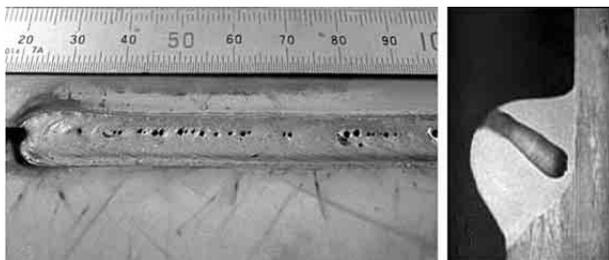


図12 亜鉛めっき鋼板の溶接で発生した気孔欠陥
Fig.12 Porosity caused by welding of galvanized steel



図13 パルス溶接法におけるSE-A1TSと従来ワイヤの溶滴離脱性の比較
Fig.13 Comparison between SE-A1TS and conventional wire on droplet transfer at pulse-MAG welding method

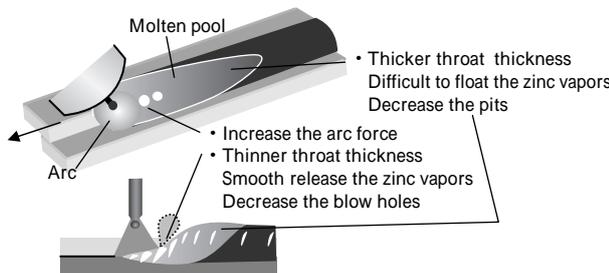


図14 気孔欠陥(ブローホール・ピット)の低減機構
Fig.14 Mechanism to decrease the porosity defect (blow holes and pits)

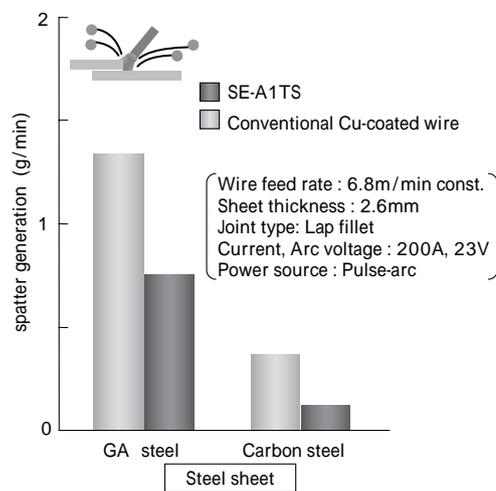


図15 パルス溶接におけるスパッタ発生量の比較
Fig.15 Comparison of spatter generation when pulsed MAG welding

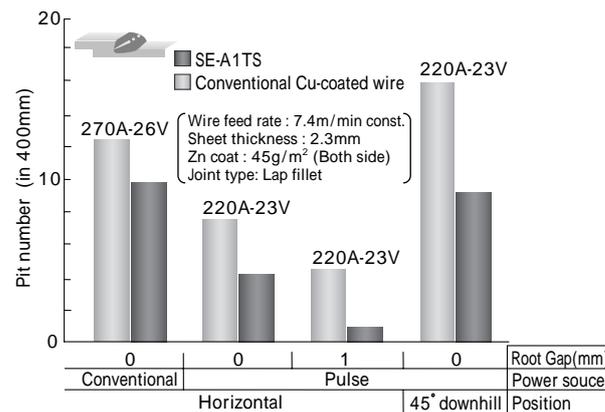


図16 亜鉛めっき鋼板溶接時のピット発生数の比較
Fig.16 Comparison of pit generation when galvanized steel is welded

るが、速度上昇に伴ってビード形状は幅が狭く、凸型となって劣化してくる。また、ビード周囲の母材を掘ってしまうアンダカット不良も生じやすくなる。幅の狭い凸ビードは融合不良が発生しやすく、また、狙い位置ずれによってビード形状が影響を受けやすくなる。さらに、応力集中が高まるため、疲労特性の点からも継手品質として好ましくない。

また、他のニーズとして塗装性改善が挙げられる。自動車部品は防錆目的で溶接後に電着塗装が施されるが、溶接時に発生したスラグによって塗装がはく離する問題があり(図17)、改善が望まれていた。

これら二つのニーズをかなえるべく開発したワイヤがSE-A50FSである。本ワイヤの研究過程の要点は、基礎検討として溶融池の流動と力の作用を観測および理論的に明らかにし、これまでにない革新的な成分系によって流動性(湯流れ性)の高い溶融池を作り出したことにある。図18に溶融池の長さ方向および幅方向断面における流れ方向と作用力の模式図を示す。幅方向断面模式図では鉛直方向に作用する表面張力と重力の関係を示すが、ビード形状はこれらの力のバランスが大きく影響を及ぼす。SE-A50FSでは、その溶融池は極めて表面張力が低く、相対的に重力が強くなり溶融池が平坦化する。鋼板へのなじみ性も大幅改善する。一方、溶融池の



図17 溶接スラグによる塗装不良

Fig.17 Paint defect caused by welding slag

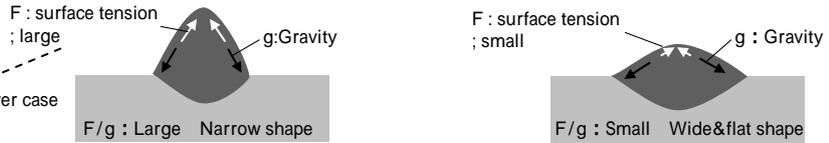
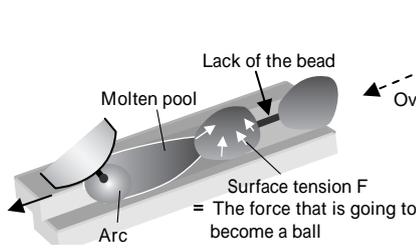
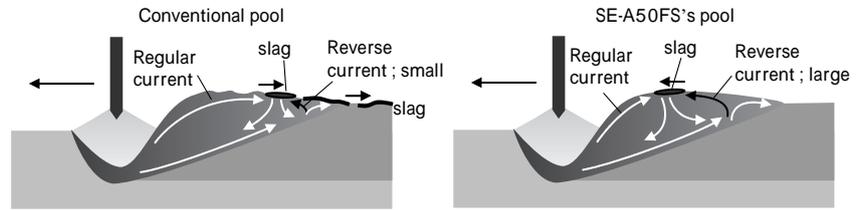


図18 ビード形状改善とスラグ面積低減の機構

Fig.18 Improving mechanism of bead shape and slag area decrease

溶接線方向の流れについては、一般的にはアーク力によって溶融池が後方に押出される流れが支配的である。浮遊するスラグも順次押されてビード全体に広がる。これに対し、粘性も著しく低いSE-A50FSの溶融池は溶融池内の底面流が後方で浮上して押戻す力（逆流）が強くなり、溶融池後方へ向かう流れと平衡する。その結果、スラグは押流されることなくアーク直下に留まり、溶接終了時点で固まる。すなわち、スラグは分散することがないため、面積は極めて小さくなる。図19にSE-A50FSと従来ワイヤのビード形状の比較を、図20にスラグ付着状態を示す。SE-A50FSのビードは平坦かつなじみ性に優れ、スラグ面積も非常に小さいことがわかる。図21に高速溶接時のビード形状を示すが、従来ワイヤで発生するハンピング現象がSE-A50FSでは発生しにくく、高速溶接性に優れていることが明らかである。このような性質を実用化した溶接ワイヤはSE-A50FS以外には存在しない。

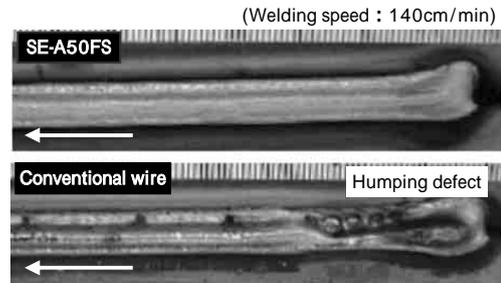


図21 高速溶接時のビード形成比較

Fig.21 Comparison of bead form at high speed welding

むすび=高性能銅めっきなしソリッドワイヤ「SE」ワイヤシリーズは、アーク現象、通電機構、溶接冶金、溶融池挙動などの従来概念を基礎から見直し、多角的な研究成果を結びつけて設計された。さらに、商品として実用化を図るべく、新たな生産技術を開発、適用している。環境対応の重要性を早期に捕えると同時に先駆的な取り組みを迅速に進めたことによって、現在も品質、市場占有率ともに他社の追従を許さない優位性を維持している。そして現在も、さらなる品質向上とメニューの拡充による適用拡大を目指し、研究開発を継続しており、今後の一層の発展が期待されている。

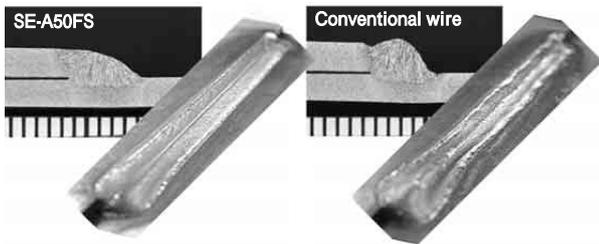


図19 SE-A50FSと従来ワイヤのビード形状および外観の比較

Fig.19 Comparison of bead shape and appearance between SE-A50FS and conventional wire

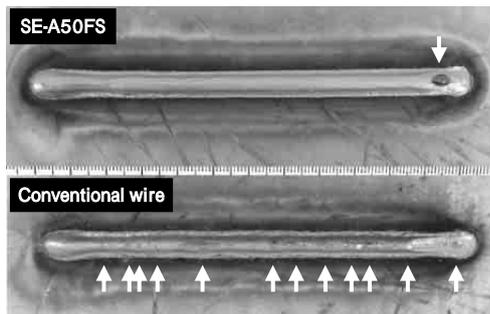


図20 スラグの分布比較

Fig.20 Comparison of slag distribution

参考文献

- 1) 日本溶接棒工業会：溶接展望，No.96（2008）p.4.
- 2) 清水弘之：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50，No.2（2000）p.15.
- 3) 興石房樹：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51，No.1（2001）p.45.
- 4) H. Shimizu et al.：54th Annual Assembly of the international Institute of Welding，Doc. XII-1681-01（2001）
- 5) 鈴木勲一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.3（2002）p.74.
- 6) 鈴木勲一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55，No.2（2005）p.56.
- 7) 安藤 ほか：溶接アーク現象，増補版，産報出版，1962.
- 8) K. Nogi et al.：Japan High Temp.soc.，Vol.18（1992）p.14.
- 9) 2008 TLVs and BEIs；ACGIH
- 10) 鈴木勲一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54，No.2（2004）p.29.
- 11) R. Suzuki et al.：54th Annual Assembly of the international Institute of Welding，Doc.XII-1679-01（2001）
- 12) 鈴木勲一：溶接技術，連載講座「亜鉛めっき鋼板のアーク溶接」，2006年9～12月号，産報出版．
- 13) 梅原 悠ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.57，No.2（2007）p.90.
- 14) 鈴木勲一：溶接技術，2007年8月号，産報出版，p.58.
- 15) Y. Umehara et al.：61th Annual Assembly of the international Institute of Welding，Doc. XII-1947-08（2008）