

(技術資料)

薄鋼板用アーク溶接ワイヤ「SEA-50FS」

“SEA-50FS” Arc Welding Wire for Thin Steel Sheet



梅原 悠*
Yu Umehara



鈴木 励一*
Reiichi Suzuki



中野 利彦*
Toshihiko Nakano

A new solid wire for Ar-CO₂ mixed gas welding has been developed for automobile part welding such as frame assemblies and underbody parts, which are typically made of thin steel sheets that are 2-4mm thick. This new, innovative chemical composition wire design resulted in considerably improved molten pool properties. The most important advantages of this newly developed wire, compared to conventional solid welding wires, are as follows. 1) It has a wider and more stable bead shape; 2) It allows for higher welding speeds since under-cut defects do not occur; 3) The welding condition settings are made easier for operators because the bead shape is immune to voltage changes; 4) The wire has very low slag generation and excellent paint-ability characteristics.

まえがき = 自動車のアーク溶接工程は、ほとんどがロボットにより自動化されており、プレス成形した複雑な3次元構造の薄鋼板を組合わせて接合する。このため、高いプレス精度が要求されるが、現実には限界があり、ルートギャップや狙い位置の変動が生じている。これらは溶接線(ビード)のスレや溶落ちなどの溶接不良を引起こし、手直し作業の工数増加として問題となっている。また、能率面から高速での溶接が望まれているが、高速化はアングカットやビードの凸化、幅不足が生じやすく、手直し作業の工数増加を助長する。

これらの問題は、溶接速度を低下させてビード幅を確保することで比較的容易に解決できるが、能率やコストを考えた場合に適用は極めて難しい。高速溶接での上記問題の改善手段としては、ビードの溶込み形状を変化させ、幅の広いビード形状にすることが挙げられる。幅の広いビード形状は、不良率を低減させ、高い溶接品質を確保することが可能であり、薄鋼板を溶接する業界でのニーズは極めて高い。また、溶接部の品質保証の観点においては、塗装を剥離させる溶接スラグの一層の低減も望まれている。

こうした状況に対し、当社では革新的なワイヤ成分設計により溶接時の溶融池物性を大きく変更することに成功した。その結果、従来ワイヤにはない幅の広いビードを形成し、スラグも極めて少ないことを特徴とする「SEA-50FS」を開発した。本稿では、SEA-50FSの特徴と諸性能について紹介する。

1. SEA-50FSの使用用途

SEA-50FSは良好なビード形状と低スラグ性を有しており、自動車、電気機器などの薄鋼板(約2~4mm)の重ね継手およびT継手のすみ肉溶接に最適である。また、混合ガス(Ar-CO₂)溶接に適しており、特にパルス

MAG溶接でその効果を発揮する。以下に開発ワイヤの特徴についてまとめる。

2. SEA-50FSのワイヤ設計思想

ビードを幅広く形成させるためには、溶融池の粘性を低下させることが効果的である。溶融金属の粘性と表面張力を著しく低下させ、溶込み特性に影響を及ぼす元素としてOやSが挙げられる¹⁾。ただし、Oはシールドガスから積極添加できるものの、熱分解による吸熱反応でアークを冷却・緊縮させ、不安定化させる。さらに、ワイヤ中または鋼板中に存在するO親和性の高いSiやMn等の元素と反応し、SiO₂やMnOで構成させるスラグとしてビード表面に多く排出される。スラグはビード表面に残存しやすく、ビード外観や塗装性が劣化する原因となりやすい。また、ビード形状の改善効果についても、実用的なO量増加レベルでは有意性のあるビード形状改善効果は得られない。

一方、Sは高温割れ感受性を高める元素として知られており²⁾、従来は不純物として扱われ、ワイヤへの混入は極力抑制される。そのため、溶接ワイヤにSを意図的に添加することはこれまでなかった。当社は大幅な粘性と表面張力の低下を実現すべく、積極的にSを添加した溶接材料の開発を行い、世界で初めて「SEA-50FS」として実用化した。

SEA-50FSは、0.06%程度と従来ワイヤに対して数倍のSを含有していることが最大の特長である。SはOと異なりスラグを増加させることはない。また、粘性と表面張力の低下だけでなく、溶融池の対流(マランゴニ対流)を変化させる効果も持っており³⁾、溶融池の物性を大きく変化させることで、様々な長所を発揮する。

S添加の短所と考えられる耐高温割れ性についての詳細は後述するが、高温割れを発生させる要因として、

* 溶接カンパニー 技術開発部

Sのような低融点化合物の偏析排出現象などの冶金的な因子、および凝固のマクロ的な形態の形状的な因子がある。SEA-50FSはこれらの要因を考慮して設計され、さらに薄鋼板の使用限定にすることで、従来ワイヤと比較して同等の耐高温割れ性を達成した画期的な溶接ワイヤである。

3. SEA-50FSの特徴と諸性能

3.1 ビード形状

写真1に重ねすみ肉溶接における従来ワイヤとSEA-50FSのビード外観および断面形状を示す。従来ワイヤに比べて、幅広、平坦、なじみ性の良好なビード形状が得られることがわかる。溶接ビードは極めて安定的に形成され、過剰な余盛が生じ難く、切削工程が低減できるなどのメリットも有する。また、止端部形状が滑らかなことは応力集中の緩和に効果的である。

図1に電圧を変化させたときの H/W (余盛高さ： H /ビード幅： W)の関係を示す。SEA-50FSは従来ワイヤと比較すると全ての電圧範囲において、幅が広く、余盛りの低いビードを形成する(H/W が小さい)。また、従来ワイヤでアンダカットが生じている電圧28V以上において、SEA-50FSではアンダカットが発生せず、良好なビードを形成している。この現象は、電圧が高い場合に顕著となるアンダカットを抑制し、広範囲の条件で良好なビードが得られることを示している。

自動車プレス材料のような三次元形状のワークを溶接する場合、ワイヤ突出し長さの変化や狙いズレなどの外

乱を受け、電流やアーク長の変動が容易に生じる。SEA-50FSはこれらの外乱により生じる不整ビードの抑制に貢献する。また、ビード形状の安定性が優れているのでテーチング時の条件設定が容易となる。

図2には、板厚1.6~3.2mmの重ねすみ肉溶接における、70~130cm/minの溶接速度での電流とビード幅の関係を示す。板厚、速度、電流によらず、全ての条件においてSEA-50FSは従来ワイヤと比較して幅の広いビードを形成する。

薄鋼板の溶接における大きな問題として、アーク力の増加(電流の増加)に起因した溶落ちによる欠陥がある。このアーク力の増加は、速度増加による脚長不足を解消するために電流を上げることで生じていた。また、随時発生してしまうルートギャップに対して架橋させるためにも電流を上げる必要があり、板厚が1.6mm以下の非常に薄い鋼板での溶接では、溶落ちが容易に発生してしまう。このSEA-50FSで形成される幅広いビードは、従来ワイヤと比較して低い電流(少ないワイヤ溶着量)でも、脚長不足や架橋不足を解消でき、溶接速度の増加や不良率の低減に大きく貢献できる。

3.2 架橋性(耐ギャップ性および耐狙いズレ性)

図3に水平重ねすみ肉溶接における狙い位置およびルートギャップとビード形状の関係を示す。SEA-50FSは従来ワイヤと比較すると広い範囲で良好なビード形状を有し、ギャップ裕度が大きい。すなわち、従来ワイヤに比べて狙い位置が多少ずれても継手として問題なく溶接ができる。

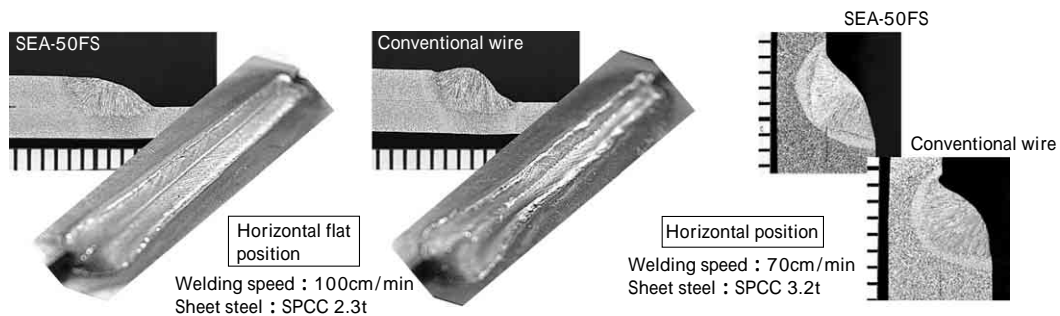
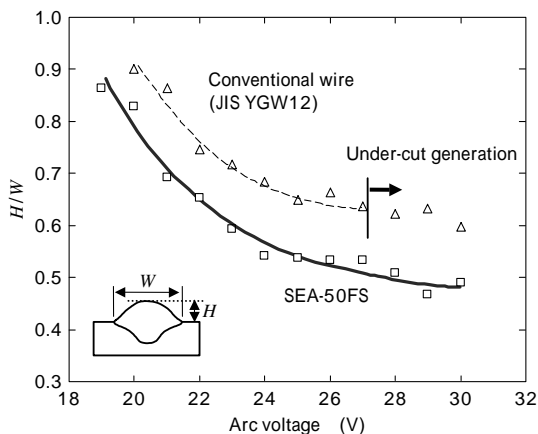
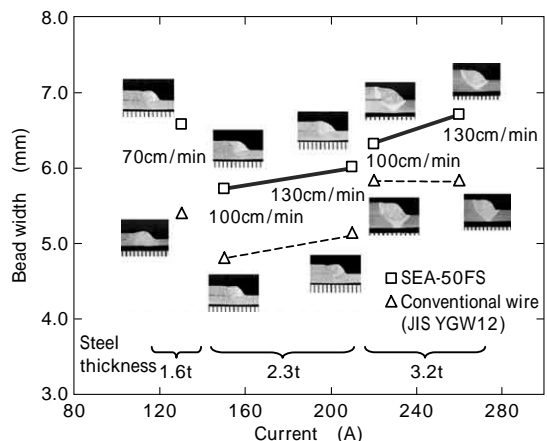


写真1 断面形状とビード外観の比較
Photo 1 Comparison of cross-section shape with bead appearance along lap joint



Welding method : Pulse GMAW, position : bead on plate, steel plates : SPCC 3.2t
Welding current : approximately 200A, welding speed : 80cm/min, wire dia. : 1.2mm

図1 ビード形状と電圧の関係
Fig. 1 Relationship between bead shape and arc voltage



Welding method : Pulse GMAW, steel plates : SPCC, wire dia : 1.2mm

図2 各種板厚、速度における電流とビード幅の関係
Fig. 2 Relationship between current, bead width, steel thickness and welding speed along lap joint

ルートギャップが大きい際の典型的なビード断面形状を写真2に示す。SEA-50FSは、従来ワイヤでは発生していた上板アンダカットが発生しておらず、止端部が滑らかで平坦なビードを形成する。

3.3 低スラグ性

SEA-50FSは従来にない優れたスラグ性状を有している。写真3は高速度カメラによって溶融池を撮影した写真である。ここでは、SEA-50FSと従来ワイヤの溶融池上に形成するスラグ挙動の違いを比較している。従来ワイヤのスラグは、溶融池の後方に堆積し、薄く分散、凝固するのがわかる。一方、SEA-50FSのスラグは、アーク直下近傍でスラグが玉状に凝集して維持し、引きずられ(写真3の), ある程度の合体・成長した段階で溶融池後方にて凝固する(写真3の), それは溶融池の表面張力、および溶融池/スラグ界面張力を大きく変化させ、制御することで成し得る現象である。

写真4は凝固後のスラグ外観を示す。従来ワイヤのスラグは、ビード表面に薄く形成し、また不均一に分散しているのがわかる。一方、SEA-50FSで形成されるスラグは、ビード表面には残存せずにクレータのみに凝集し、その面積は極めて小さく美しいビード外観を呈する。図4にパルスMAG用の各種ワイヤ(JIS YGW17)とSEA-50FSのスラグ面積率(スラグ表面積/全ビード表面積)を示す。SEA-50FSはスラグ面積が他のワイヤと比べて1/3~1/5程度と圧倒的に少ない。また、この

スラグの剥離性は良好であり、ほとんどが自然剥離か、もしくは軽く叩くだけで剥離できる。

薄鋼板を扱う業種では、溶接後に耐錆性を確保するために電着塗装を施すことが多いが、スラグ剥離により塗装不良が生じ、錆の原因となる。SEA-50FSの特性は、スラグ除去作業の削減や電着塗装後のスラグ剥離による錆不良の低減につながるため、コスト削減と品質改善に有効である。

3.4 高速溶接性

図5にSEA-50FSと従来ワイヤの溶接可能な範囲を溶接速度と電圧の関係より示す。ここでは、短絡が過剰でスパッタが多く発生する条件(短絡回数 100回/sec)と、アンダカットやハンピングと呼ばれる不整ビードが発生する条件を不合格としている。SEA-50FSは、従来

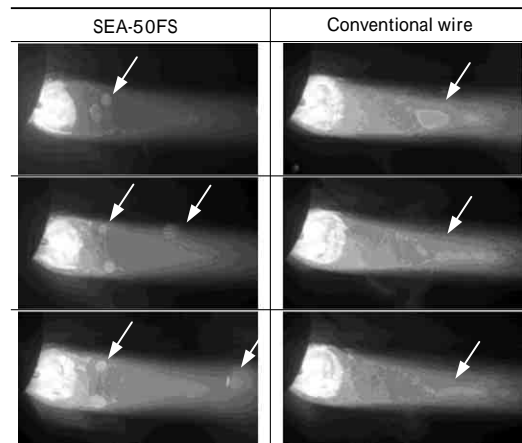


写真3 高速度カメラによる溶融池上のスラグ挙動の観察(電流220A, 溶接速度100cm/min)

Photo 3 Observation of slag movement on molten pool by the high speed camera (Current:220A, welding speed:100cm/min)

Welding method : Pulse GMAW
Wire dia. : 1.2mm
Steel plates : SPCC 2.6t
Welding current : approximately 250A
Welding speed : 100cm/min

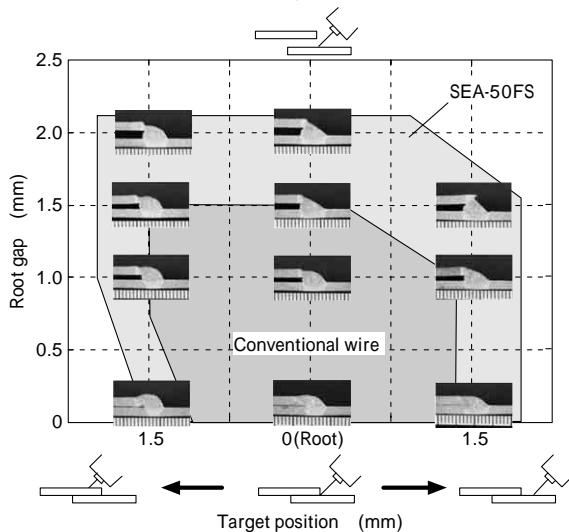


図3 ワイヤ狙い位置およびギャップとビード形状

Fig. 3 Relationship between bead shape, wire target position and root gap along lap joint

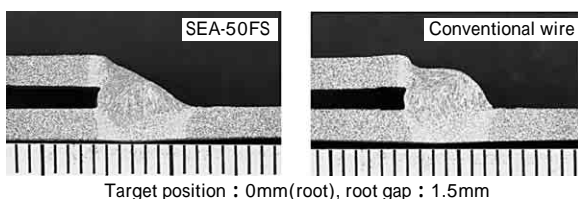


写真2 ビード形状比較

Photo 2 Comparison of bead shape at wide root gap

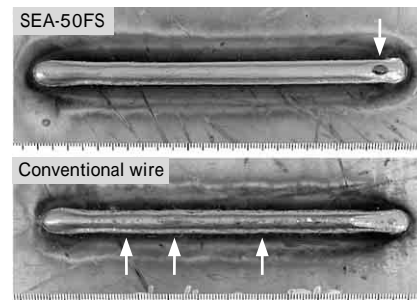


写真4 溶接後のスラグ分布比較

Photo 4 Comparison of slag distribution after welding

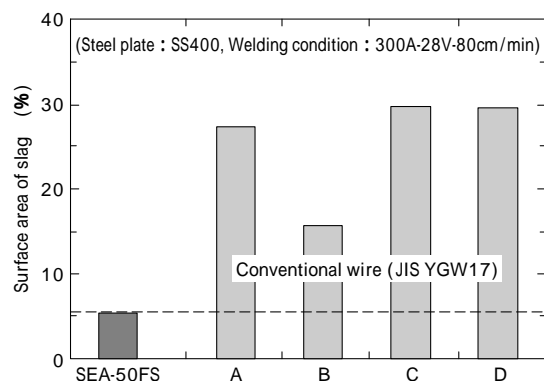


図4 スラグ面積率の比較

Fig. 4 Comparison of slag area

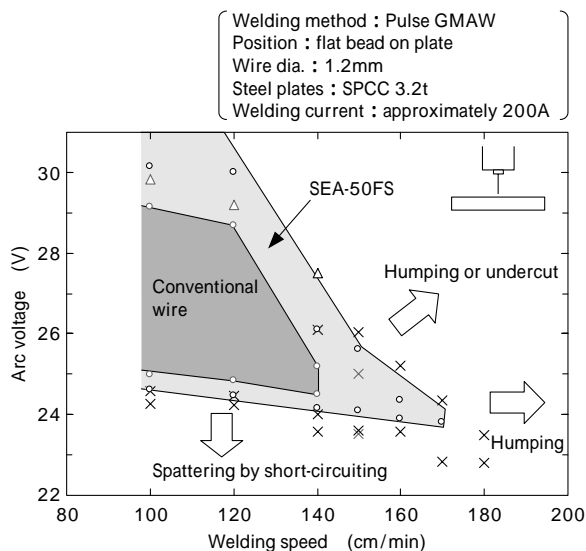


図5 溶接速度と電圧の適用可能範囲

Fig. 5 Applicable range of welding speed and arc voltage

のワイヤではハンピングまたは短絡が過剰でスパッタが多く発生してしまう高速条件でも溶接が可能である。

一方、速度の遅い条件においては適用可能な電圧範囲が広く、特に高い電圧でのアンダカットやハンピングの抑制効果がある。これは、アーク長を長くしても正常なビードを形成できることを意味し、すなわち、溶滴の短絡を抑制し、スパッタ発生量を極めて少なくすることが可能である。

写真5は重ね継手でのSEA-50FSと従来ワイヤとのビード形状を高速溶接下(150cm/min)で比較した例である。従来ワイヤではアークスタート部にハンピングが発生しているのに対して、SEA-50FSはこのハンピングが生じ難く、安定したビードを形成する。このビードのハンピングはアークスタート時に湯流れが不安定となり、分断されることで生じるが、特に高速溶接ではこの問題が助長される。改善方法として、アークスタート時のみトーチ角度に前進角を付けることや速度を遅くすることで対応できるが、SEA-50FSはこの現象が生じ難いため、複雑なティーチングや細かい条件設定をする必要がなく、管理が容易である。また、SEA-50FSのビード形状は、幅が広く余盛の少ない形状となる傾向にあり、高速化するに従って生じるハンピングやアンダカットの他にビード形状不良(凸型、幅不足、くびれ)が抑制され、形状の観点からも高速化に有利である。

3.5 耐高温割れ性

前述したようにSEA-50FSの成分的な最大の特徴はSの積極添加である。一般的にはSは高温割れを発生させやすくする元素として知られており、軟鋼用および490MPa級高張力鋼用ソリッドワイヤのJIS規格では0.030%の上限が規定されている。高温割れとは金属の凝固に伴う低融点物質の排出現象により、最終凝固線が液状を呈し、熱歪による引張応力に耐えられなくなることが主因と考えられている。高温割れを発生させる要因としては(1)冶金的因子として、低融点不純物として凝固時に結晶粒界で液相を形成しやすいP, S, Bが多い、固液共存温度幅を拡大するとともに、先述の低融点物質の固

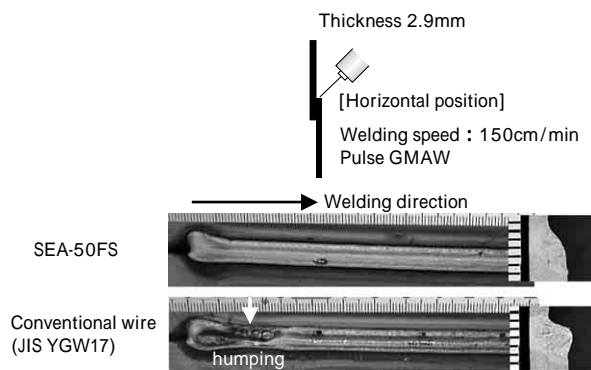


写真5 高速溶接時のビード外観の比較

Photo 5 Comparison of start bead appearance at high speed welding

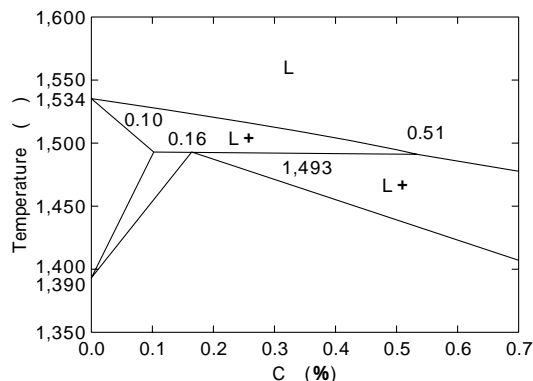


図6 Fe-C 状態図

Fig. 6 Fe-C binary alloy phase diagrams

溶濃度が低い 相の比率を高める元素(C等、図6)が多いことがあげられる。一方、(2)形状因子としては、ビード幅(W)に対してビード高さ(のど厚:P)が過剰な場合、すなわち形状係数 P/W が大きいほど割れが発生しやすい⁴⁾。

拘束力や形状係数の点から比べると、薄鋼板では厚鋼板より割れが発生しにくい。S添加による高温割れ感受性を調査するため、加速試験として厚鋼板の狭間先施工の割れ試験を行った。図7に示すように積層間を連続的に溶接することで端部のビード断面形状係数(P/W)を大きくして、意図的に高温割れを引き起こさせる試験方法をとった。図8はワイヤS量と割れ率との関係を示す。ワイヤS添加量の増加に伴い割れ率が増加することがわかる。これまでに述べた数々の特性が得られる最低S量は0.05%であることを見出しているが、一般的な成分系に適用した場合の割れ率は11~20%程度になる。別途の高温割れの研究において、実用的成分範囲ではSやP, BよりもむしろCが支配的であることを見出している⁵⁾。SEA-50FSでは、高S添加による耐割れ性低下を補うために、固液共存温度幅を狭め、S固溶濃度の高い相の析出を促進するため、低C化を図っている。この効果によってSEA-50FSはS含有量が高くても極めて低い割れ率を示す(割れ率: 0~2%)。また、市販されるワイヤにて同試験を行い、特に割れ率が高いワイヤの結果をA~Cとして記載しているが(割れ率: 4~11%)、SEA-50FSは、これら市販ワイヤと比較しても割れ率は低い。

薄鋼板では厚鋼板施工に対して P/W は一般的に小さ

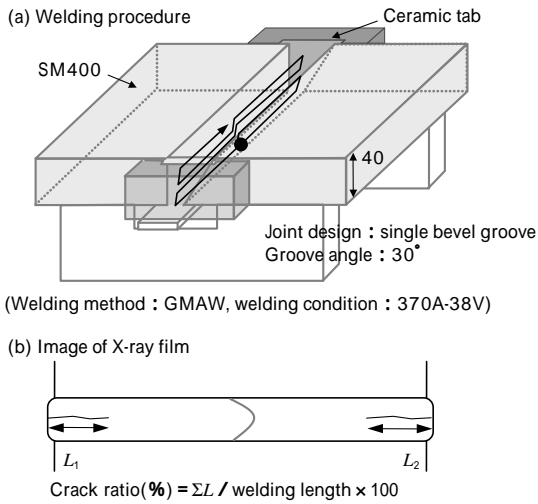


図7 高温割れ試験方法の(a)溶接要領および(b)線透過写真模式図
Fig. 7 (a)Welding procedure and (b)image of X-ray film of hot cracking test

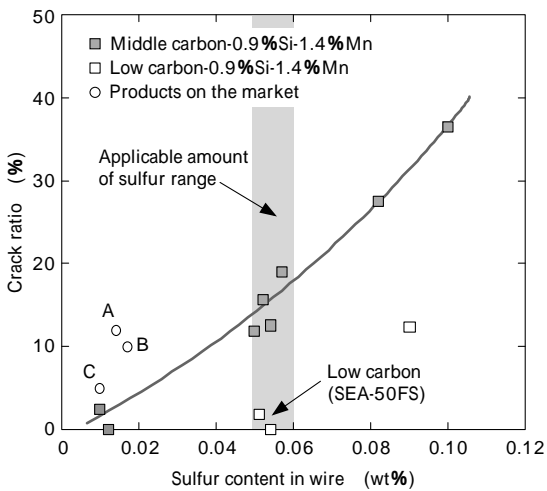


図8 ワイヤS量と割れ率の関係

Fig. 8 Relationship between crack ratio and sulfur content in wire

くなるが、ここでは意図的に P/W が大きくなるような施工を適用し、さらに高温割れ性について評価した。試験方法は、図9に示すようにパイプを並べ、フレア部分に溶接を行い、ビード断面から割れの有無について確認した。写真6には溶接速度 100cm/min での断面マクロ観察結果の一例を示す。従来ワイヤと共に SEA-50FS は全条件にて割れは発生しなかった。

以上より、SEA-50FS は高S化による高温割れ感受性の劣化を低C化で相殺することで冶金面から従来ワイヤと同等以上の耐割れ性を実現するとともに、用途としても、形状係数 (P/W) が小さく単パス溶接に限られる薄鋼板用に限定することで、形状面からの割れ防止にも万全を図っている。

3.6 溶着金属の機械的性能

表1に全溶着金属の機械的性質を示す。490MPa 級と

表1 SEA-50FS の全溶着金属の機械的性質
Table 1 Mechanical properties of deposited metal of SEA-50FS

Steel plates and groove	Shielding gas	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI. (%)	Adsorbed energy (J) 0
SM490A 20mm thickness 45°V GAP12mm	80%Ar-20%CO ₂ Gas flow rate : 25L/min	434	527	29	87 87 78 Avg. 84

(Welding conditions : 200A-22V, heat input : 10kJ/cm, interpass temp. : 150)

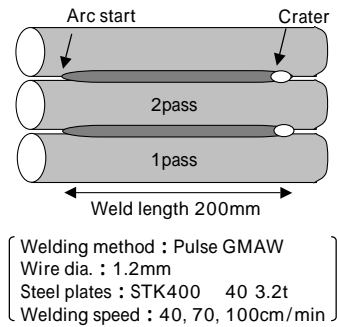
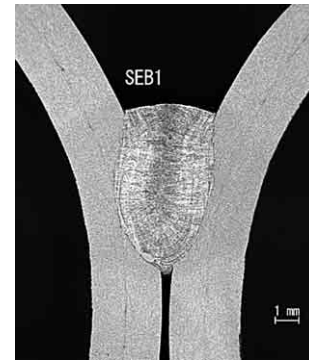


図9 パイプ割れ試験の模式図
Fig. 9 Schematic diagram of pipe welding crack examination



Welding condition : 350A-26V-100cm/min
Distance from arc start : 10mm

写真6 断面写真の一例
Photo 6 Typical photograph of cross section

して十分な強度と靱性を有している。なお、薄鋼板の場合には 590MPa 級鋼板までは問題なく十分な継手強度が得られ、適用可能である。

むすび = 本稿では、SEA-50FS の基本的な特性やワイヤ設計思想について紹介した。本ワイヤはこれまでにない優れたビード形状を呈し、特に自動車業界で代表されるような薄鋼板の溶接において高い品質を提供できる。また、本ワイヤの適用における生産の能率や不良率の改善効果は極めて高いと考える。

今後、自動車業界を取巻く情勢はさらに厳しくなると予想され、溶接技術の高度化や高能率化、高い溶接品質へのニーズが高まるなか、SEA-50FS が活躍できる機会が増えることが期待される。

参考文献

- 萩野和巳ほか：鉄と鋼，Vol.69, No.16 (1983) p.1989.
- 黄地尚義ほか：溶接学会論文集，Vol.8, No.1 (1990) p.54.
- 篠崎賢二：西山記念講座，鉄鋼材料の溶接，Vol.184-185 (2005) p.3.
- 原沢秀明ほか：JSSC，Vol.10, No.103 (1974) p.31.
- 笹倉秀司ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.79, (2006) p.32.