

(解説)

アーク溶接ソリッドワイヤの開発

Development of Solid Wire for Arc Welding



中野利彦*
Toshihiko Nakano



鈴木励一*
Reiichi Suzuki

Solid wire is the most popular welding material and accounts for about 45% of the all the welding wire used. Solid wire is used in automatic welding robots and is highly efficient and the weld metal is excellent quality. Kobe Steel developed an epoch-making high potential non-copper-coated solid wire called SE wire which is especially suited to the automobile industry. In addition, development trends for solid wire for steel structures, for super high strength steels, and for heat-resistant low alloy steels are introduced.

まえがき = 当社は創立 100 周年を迎えるが、溶接材料部門の歴史は、1940 年に当時の海軍工廠の要請を受け、被覆アーク溶接棒「B-2」を開発し、販売開始したことから始まった。以後、現在までの 65 年間、当社は溶接材料の国内トップメーカとして確固たる地位を築いて、各種産業の発展に寄与してきた。その間、常に先進的な商品と生産技術の開発を行い、時代の変化を先取りして商品構成を変化させてきた。図 1 に示すように、かつて国内市場は被覆アーク溶接棒が約 90%と圧倒的であったが、近年はガスシールドアーク溶接ワイヤ(約 70%)へとシフトしている。そこで本稿では、構成比率 45%と最大品種になったガスシールドアーク溶接ソリッドワイヤについて、その動向を述べる。

1. 当社ソリッドワイヤの歴史

当社におけるソリッドワイヤの歴史は、現在でも主力の「MG-50」を 1968 年に販売開始したことに始まる。以後、ソリッドワイヤを用いたガスシールドアーク溶接法は、後述する数々の優れた特性から急速に普及し、適用用途に応じて多数の種類が開発されるとともに、その生産量を飛躍的に伸ばした。現在は、国内 1 工場、海外 2 工場で行っており、日本の生産グループ会社である(株) KOBE ウェルディングワイヤは国内最大、海外でも最大級のソリッドワイヤ生産工場となった。

一般的には、ソリッドワイヤは C, Si, Mn などの成分を含有した線材に、通電性を確保するなどの目的で銅めっきを施して伸線し、完成する。しかし、2000 年にこの常識を打破り、銅めっきを施さない高性能ソリッドワイヤ「SE ワイヤ」を他社に先駆け開発、上市して新分野を形成するに至り、他の溶接材料品種と同様、ソリッドワイヤの技術においても業界を先導し続けている。

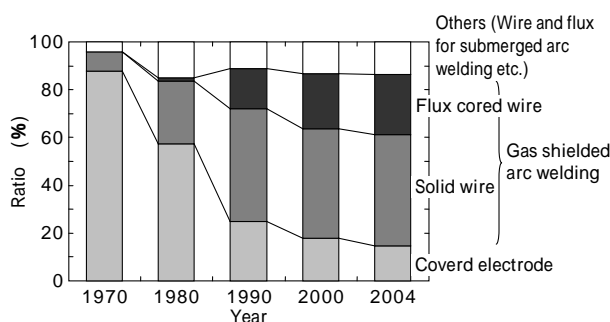


図 1 日本国内における溶接材料の品種構成比の年次推移
Fig. 1 Transition of ratio of welding material in Japan

2. ソリッドワイヤの特徴

他のアーク溶接法に対するソリッドワイヤを用いたガスシールドアーク溶接法の特徴を表 1 に示す。ソリッドワイヤは、低コスト、優れた溶接金属品質という特性によってあらゆる用途に使われ、特に高能率を重視する鉄骨建築、自動車、建機などで最も多く採用されている。逆に短所としては、フラックス入りワイヤ(以降 FCW)と比較して、炭酸ガス溶接ではスパッタ発生量が多い、ビード外観や全姿勢溶接性が劣ることがあげられる。しかし、についてはワイヤの化学組成及び表面性状、溶接電源の出力波形制御、シールドガス組成の改良などによってスパッタ低減が図られている。特に溶接電源の発達にはソリッドワイヤの進展と密接な関係にあり、ガスシールドアーク溶接法全体の発展に貢献している。以降に代表的なソリッドワイヤの特性について述べる。

3. 高性能銅めっき無しソリッドワイヤ「SE ワイヤ」¹⁾

上述したとおり、溶接作業性に関して従来の銅めっきワイヤ以上の諸性能を有し、かつ生産及び使用(溶接)時の環境に配慮した画期的ワイヤが「SE ワイヤ」である。

* 溶接カンパニー 技術開発部

表1 ソリッドワイヤの長所
Table 1 Merits of solid wire

Superior point	Effect	Required industry
(1) High depositing rate	High efficiency	Steel structure, Construction machinery
(2) Deep penetration	Low penetration defect	Steel structure
(3) Good arc stability at low current range	Improvement resistance to burn through of the lower plate	Automobile
(4) Low slag generation	Decrease/unnecessary of cleaning process	Automobile, Steel structure, Construction machinery (robot welding)
(5) Low impurities composition	Improvement toughness and hot crack resistance	Pressure vessel, Engineering works, Steel structure
(6) Low hydrogen	Improvement hydrogen crack resistance	Pressure vessel, Engineering works
(7) Good wire straightness	Automatic welding using the robot	Automobile
(8) Low price	Low cost production	All industry



写真1 SEワイヤと従来銅めっきワイヤの外観

Photo 1 Wire appearance of SE-wire and conventional copper-coated wire

外観を写真1に示す。特徴は次のとおりである。

- 1) 従来のマグ溶接ソリッドワイヤでは一般的であった銅めっきを廃し、特殊な表面処理を施した。
- 2) ワイヤの表面改質によって、送給性、アーク安定性、スパッタ発生量、適正条件範囲などを大幅に改善した。
- 3) ヒューム（アークで発生する金属蒸気が冷却されて固化した物質）中の銅を排除し、溶接作業者の健康への負荷を軽減した。
- 4) 銅めっき用の有害化学薬品を使用しないため、製造プロセスとして環境にやさしい。

一方、従来の銅めっきワイヤでは、以下の不具合が生じる場合があった。

- A) 銅めっきが微視的に不均一であったり疵がある場合、コンタクトチップとの接触電気抵抗のばらつきが大きくなり、アーク不安定あるいはスパッタ増加が生じる。
- B) 銅めっきの剥離によってめっき屑がワイヤ送給経路に堆積したり（写真2）、ワイヤとチップの融着を助長するため、ワイヤ送給性が劣化する。
- C) 溶滴移行を安定させるために必要な元素（酸素、アルカリ金属）を付与するために、特殊な製造工程を必要とする。

SEワイヤは、このような従来の銅めっきワイヤの欠点を見直し、全く新規な手段でそれらを改善したワイヤである。具体的には、銅めっきを廃することでワイヤ表面の不均一性を改善し、コンタクトチップとの接触電気抵抗を安定させて、アーク安定性及びスパッタ発生量を改善した。また、当然のことながら銅めっきの剥離が生じなくなるため、ワイヤの送給不良が解決される。さらに、ワイヤ表面に鉄と銅の接触部が存在しないことから耐錆性も改善された。加えて、新開発の特殊表面処理に

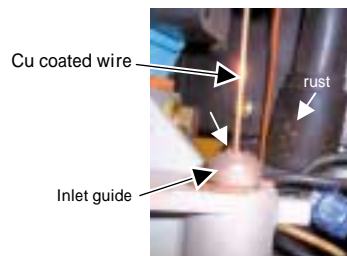
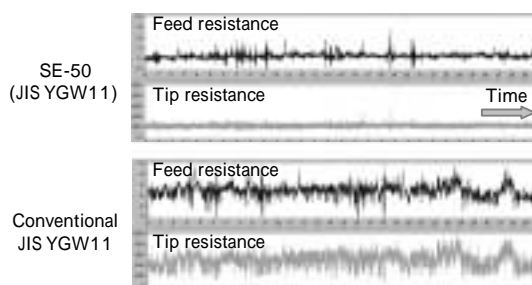


写真2 送給系で生じた銅めっき粉の例

Photo 2 Example of copper rust in wire feeding system

より、(a)接触電気抵抗の安定性向上、(b)耐錆性向上、(c)コンタクトチップの耐磨耗性向上を果した。溶接作業性の面では、銅めっきを廃することにより、溶接時に溶滴の酸素吸収が促進されて表面張力が低下する効果があり、溶滴の小径化、溶融池への移行の安定性向上につながる。通電点が安定することによってチップとの瞬間融着現象が低減され、ワイヤ送給性も向上する（図2）。以上の特徴を有するSEワイヤでは、スパッタ及びヒューム発生量の低減効果が得られるばかりでなく、ワイヤ送給性が向上することで溶接ラインの停止頻度が低下し、生産性の向上に寄与する（図3）。



(Torch Length : 6m, Current : 280A, Wire dia. : 1.2mm)

図2 SEワイヤの送給安定性一例

Fig. 2 Example of wire feedability of SE-wire

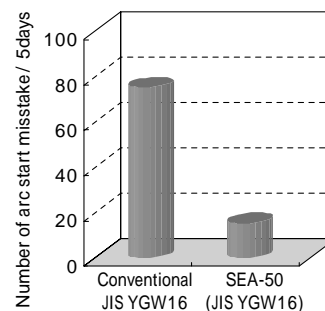


図3 SEワイヤによるアークスタート不良の改善例

Fig. 3 Example of improvement with arc start error by SE-wire (Survey by an automobile assembly fabricator)

SE ワイヤは、自動車市場を中心として発売以来高い評価を受けて拡大を続けており、環境対応商品としても開発、改良に注力していく所存である。

4. 建築鉄骨用高能率ワイヤ「MG-55」, 「MG-55R」²⁾³⁾

溶接材料全体での最大需要家である鉄骨建築分野は、溶接姿勢、溶込深さ及び溶接コストなどの面からソリッドワイヤが圧倒的に多く使われている市場である。

建築業界では、1995年の阪神・淡路大震災をきっかけとして、鉄骨造建築物の耐震性向上を目的とした技術検討及び開発が活発に行われてきた。中でも柱-梁溶接接合部の破壊抵抗を向上させるために、溶接部の機械的性質が注目され、これまでほとんど管理されていなかった入熱量やパス間温度管理の必要性が示された。当社はこの動向に逸早く着目し、従来ワイヤ(490MPa級)よりも入熱・パス間温度管理を緩和でき、かつ高強度・高靱性な溶接金属が得られる新ワイヤ「MG-55」を、他社に先駆け開発・実用化した。

MG-55では、脱酸元素や焼入れ性向上元素を適度高めることにより、従来ワイヤと同等の適用範囲において、より高い入熱量やパス間温度でもマイクロ組織を微細化し、良好な機械的性質を得ることが可能となった。その後MG-55相当のワイヤが他社でも開発され、Z 3312 YGW18規格(540MPa級)として1999年にJIS化された。ワイヤの性能が認められるにつれて市場が急速に拡大し、現在 YGW18 規格ワイヤは鉄骨建築向けの主力商品となるに至った。

最近では、コストダウン、納期短縮をはかるツールとして適用が急増している鉄骨溶接ロボットに組み合わせるべく、作業性改良を加えた YGW18 ワイヤ「MG-55R」を新たに開発した。

当社は国内最大の溶接材料メーカーであるとともに、中・厚板向け溶接ロボットシステムにおいてもトップメーカーに位置している。特に鉄骨建築向けには長年の実績があり、「アークマン鉄骨溶接ロボットシステム」(写真3)の販売数、市場占有率は鉄骨需要の回復と共に急速に高まってきている。

ロボット溶接では、人手による半自動溶接と異なり、可能な限りの無人運転が要求される。このため溶接の中断は、作業復帰に要する時間と労力の面から大きな問題となる。一般にアーク溶接では、ワイヤや鋼材に含まれ



写真3 当社製アークマン鉄骨溶接ロボットシステム

Photo 3 "ARCMAN" steel structure robot welding system of Kobe Steel

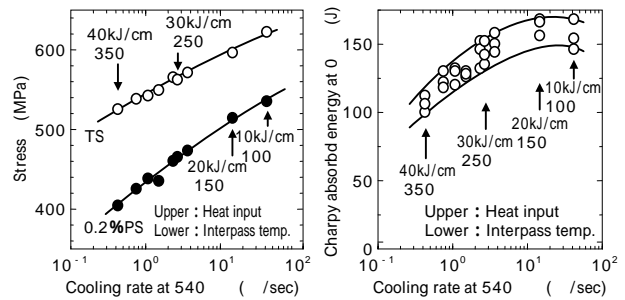


図4 MG-55Rの溶接金属の入熱・パス間温度と機械的性質の関係
Fig. 4 Relationship between mechanical properties of weld metal and heat input, interpass temperature of MG-55R



写真4 スラッグ剥離性の比較

Photo 4 Comparison with slag detouchability of MG-55R and conventional wire

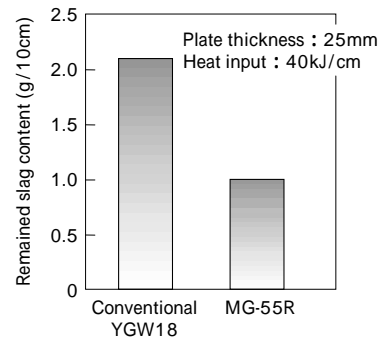


図5 ワイヤとスラッグ残留量の関係

Fig. 5 Relationship between wire and remained slag content (Remained = generated - natural detouched)

るSi, Mn, Tiといった脱酸元素が溶接スラッグとなってピード表面に堆積する。一般的な YGW18 (540MPa 級) ワイヤでは、上述のとおり焼入れ性を高める脱酸成分を多く添加しており、YGW11 (490MPa 級) と比較してスラッグ発生量が多かった。対象板厚が大きくなるに伴ってスラッグ堆積量も増加することになり、アーク安定性の阻害、スラッグ巻込の発生、アークスタート性の劣化といった問題が発生する。したがって、ロボット溶接においても適時スラッグ除去が必要となるため、この負荷を軽減可能な低スラッグの溶接ワイヤが望まれていた。当社では、溶接スラッグに関する研究成果を基に、鉄骨溶接ロボットで使われる溶接条件を検討し、良好な溶接金属の性質はそのまま(図4)、スラッグ量の大幅低減及び剥離性向上に成功した(写真4)。スラッグ量を比較した結果を図5に示す。スラッグ量の低減により、ロボットのスラッグ除去不要な推奨最大板厚が、従来の19mmから25mmに約30%拡大した。適用板厚の拡大はロボットの稼働率を増大し、ユーザにおけるコストダウンに大きく寄与する。

当社は、溶接ワイヤと溶接ロボットとの両面からの開発機能を保有する唯一のメーカーであり、このシナジ効果が十分に発揮された成果がMG-55Rである。

5. 薄板のパルスマグ溶接用ソリッドワイヤ 「MIX-1PS」, 「MIX-1TS」, 「SEA-1TS」^{4), 5)}

自動車向溶接材料は鉄骨建築、造船に次ぐ第3位の市場規模である。ソリッドワイヤに限ると、鉄骨建築と2大市場を形成しており、非常に重要な市場である。薄鋼板の溶接の特徴は、アーク熱による溶落ちを防ぐため、ロボットを用いて低電流かつ高速で使われている点である。使用電流域が溶滴の短絡領域と自由移行領域（非短絡）の間である場合が多いため、スパッタの発生が多い。

一方、要求品質の面では、精度の高い部品が多いことから逆に低スパッタ性が強く要求されている。この電流域での低スパッタ性を大幅に改善する施工法がパルスマグ溶接法である。パルスマグ溶接法は、電流を約70Aと約460Aの間を数百Hzの周期で変動させる溶接法で、低電流でもスプレアークと呼ばれる極めて低スパッタな溶滴移行が得られる特徴がある。この周期が短い、つまり高周波のパルスが実現すると、低スパッタ性と高速溶接性がさらに改善される。

その仕組みを図6に示す。高周波になるほど、ワイヤを溶融離脱させるエネルギーが小さくなるため、優れた溶融特性が必要となる。従来のワイヤでは溶滴の粘性や表面張力が高いため、離脱に大きなエネルギーを必要とし、高周波パルスでは溶滴の移行とパルス波形が同期しない。このため、非常に不安定な溶滴移行となり、大粒のスパッタが多く発生する。パルスマグ用ワイヤ「MIX-1PS」では、高周波のパルスに適合するように、溶滴の

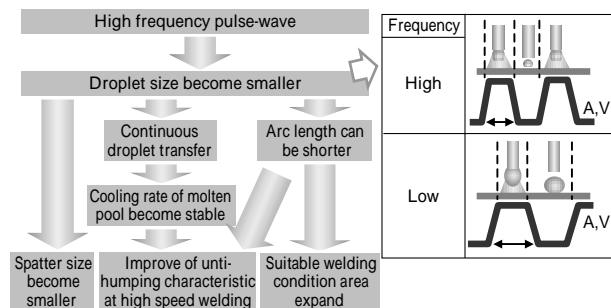


図6 高周波パルス溶接の長所の仕組み

Fig. 6 Scheme of merits of high frequency pulsed MAG welding method

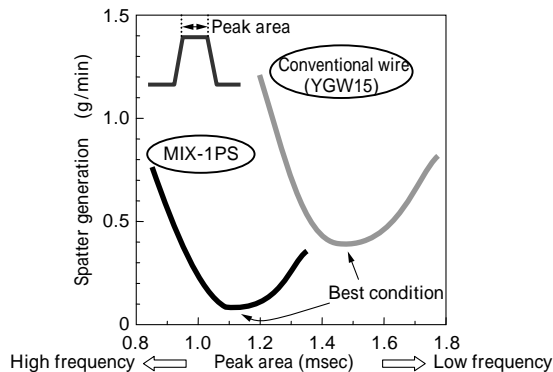


図7 パルス条件とスパッタ発生量の関係

Fig. 7 Relationship between pulse condition and spatter generation
Shielding gas : Ar80% + CO₂ 20%, Peak current : 460A
Welding current & voltage: 210A & 22V, Wire dia.: 1.2mm

粘性や表面張力が小さくなる化学組成としている。また、アークの電位傾度が大きくなり、短いアーク長で安定なスプレアークとなる特殊な表面処理も施している。

これらの手段によって、「MIX-1PS」は従来のワイヤに比べて高周波パルスに最適化され、低スパッタで高速性にも優れている。図7にピーク期間とスパッタ量の関係を示す。また、パルス特性に加え、優れた耐溶接（高温）割れ性を有する「MIX-1TS」、さらにSEワイヤ化した「SEA-1TS」を順次開発している。

6. 950MPa 級高張力鋼用ソリッドワイヤ 「MGS-100J」⁶⁾

ソリッドワイヤは他のアーク溶接法と異なり、水素源となるフラックスを用いないので、溶接金属中の拡散性水素量が少なく、耐溶接（低温）割れ性に優れる。このため、水素割れ感受性が高い高張力鋼の溶接に好適であり、鋼板の高強度化に伴って高強度ワイヤの開発も進んでいる。

中・厚板分野では、590~780MPa 級がこれまでの一般的な実用化上限である。しかし、水力発電用水圧鉄管（ペンストック）では950MPa 級高張力鋼が最近実用化されており、これに適用するソリッドワイヤ MGS-100J と溶接法が開発され、実機適用された。この開発の考え方と諸特性を紹介する。

一般に鋼の強度が上昇するにしたがって破壊靱性或耐割れ性は低下する傾向があるが、950MPa 級ともなるとこれらの改善が非常に大きな課題となる。溶接金属組織がラスマルテンサイトやベイナイト組織では、破壊靱性は低値を示す。強度と破壊靱性を両立するためには、組織のアシキュラフェライト化と微細化、及び吸収エネルギーの遷移温度低下、延性亀裂抵抗の改善が必要である。一般に溶接金属中の酸素量は300~1000ppmであり、鋼板の100ppm以下と比べ非常に高く、組織も粗大である。酸素量の低減により、変態点が低下して結晶粒の微細化が図れること、真ひずみが増加して延性破壊エネルギーが向上することが期待できる。したがって、組織微細化には大幅な低酸素化技術の開発が必要であった（図8）。これに対しては、一般的なシールドガス組成が80% Ar + 20% CO₂ であるのに対し、CO₂ 分圧を下げるべく5~10% CO₂ + 残 Ar とする組成のガスを開発ワイヤに組合わせて解決した。

溶接ワイヤ成分面では、適量のNi添加によるマトリックスの強靱化、アシキュラフェライト化促進のための核生成元素の添加を行った。一方、高強度化に伴う

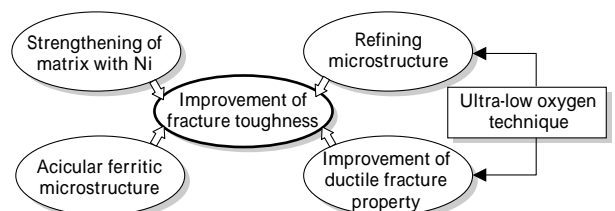


図8 溶接金属の高靱性化の考え方

Fig. 8 Method of fracture toughness improvement of weld metal

表2 MGS-100Jの溶着金属の化学成分と溶接金属の諸性能
Table 2 Chemical compositions of deposit metal and characteristics of weld metal

Deposit metal	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	O
	0.06	0.34	1.34	0.005	0.003	2.60	0.46	0.75	0.016

Weld metal	Tensile strength ¹ (MPa)	Charpy notch toughness ¹		CTOD ¹ (mm, 0)	Crack arrest preheating temp. ² ()
		Absorbed energy (J, -20)	Ductile-brittle transition temp. ()		
	1 019	111	< -60	0.17 (m) 0.18 (m)	50
Target	950	100 (0)	-45	0.1	100

1 Shielding gas:Ar95% + CO₂5% ,Heat input:1.3kJ/mm, Base metal:950MPa-class 50mm thickness
2 Window type restraint weld cracking test

表3 MGS-12CRSの溶着金属の化学成分と機械的性質
Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of MGS-12CRS weld metal

Chemical compositions of deposit metal							Mechanical properties (PWHT 740 × 8h SR)				
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	σ _{E0} (J)	CRT (h)
0.07	0.31	0.93	0.005	0.004	0.01	0.50	619	745	27	47	1 670
Cr	Mo	Co	V	Nb	W	N					
9.54	0.40	1.50	0.29	0.04	1.60	0.04					

() Creep rupture time (Test condition:650 for 98MPa)

優れた耐割れ性の確保については、拡散性水素量の一層の低減が必要とされる。MGS-100Jでは、水素を保有するワイヤ表面の性状を改善することにより、極低水素化を図った。これらの手法により開発されたMGS-100Jの溶接金属の性質と成分を表2に示す。溶接金属中の酸素量は200ppm未満と低減され、いずれの性能も目標を十分に満足していることがわかる。

材料の高強度化は、鋼構造物の板厚の減少を可能にして鋼材重量を軽減し得ること、及びより高い設計応力を採用し得ることの利点があり、今後もあらゆる分野で大型化、高強度化の検討が進捗するものと思われる。溶接材料面でこの傾向に対応が可能となることは、非常に意義が大きく、大幅な技術進歩である。

7. 高強度低合金耐熱鋼用ソリッドワイヤ「MGS-12CRS」⁷⁾

耐熱鋼は高温環境下の機械的性質や耐食性が優れていることから、石油精製リアクタや発電用ボイラ分野で使用されている。従来よりこれらの分野では、効率向上の面から操業条件の高温・高圧化が求められており、対応する新しい鋼材が開発されてきた。

ボイラ分野では、高いクリーブ破断強度を有する9~12%Crフェライト系耐熱鋼の開発が進んでいる。これらの鋼材に適用するソリッドワイヤとしてMGS-12CRSを開発した。溶着金属には鋼材同様に高いクリーブ破断強度と衝撃性能が要求されるが、これらは相反する特性であり、その両立が最も重要な課題であった。クリーブ

破断強度を確保するためにCr, Mo, V, Nb, Wといった強化元素を添加すると共に、CoやNといったフェライト相を抑制する元素も添加させることで、韌性を確保している。

表3にMGS-12CRSの溶着金属の化学成分と機械的性質を示す。今後もこのような耐熱鋼の高性能化に対応し、優れた特性を有する溶接材料を開発して、鋼構造物の品質向上に寄与していく所存である。

むすび=ソリッドワイヤは、今後も溶接材料の主力品種であり続けることは疑いなく、引続き需要家の要求に応じた高エネルギー・高性能な商品開発を行っていく。また、これからさらなるガスシールドアーク溶接化の進展が見込まれ、かつ大きな市場となることが予想される海外向けにも今後注力していく所存である。

参考文献

- 1) 清水弘之：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.2 (2000) p.15.
- 2) 鈴木勲一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.1 (2000) p.60.
- 3) 鈴木勲一：神戸製鋼 溶接だより 技術がいど No.415 (2004) p.1.
- 4) 鈴木勲一：神戸製鋼 溶接だより 技術がいど No.368 (2000) p.1.
- 5) 鈴木勲一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2 (2004) p.29.
- 6) 原 則行：未来材料, 第2巻, 第5号 (2004) p.36.
- 7) 山下 賢ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2 (2004) p.34.