

## 技術解説

## Technical Review

## 特殊鋼鋼材 (Ⅲ) : 溶接材料と溶接・接合技術

上仲明郎\*, 堀尾浩次\*, 永井宏和\*, 山田慎之介\*, 山田龍三\*

## A Review on Special Steels (Ⅲ) : Welding Materials and Welding Technology

Akio Uenaka, Hirotsugu Horio, Hirokazu Nagai, Shinnosuke Yamada, and Ryuzo Yamada

## Synopsis

*Economical and technological environments of welding have been remarkably changed in the last decade by internationalization of the market, price competition for products from emerging nations and countermeasures against the environmental problems. Especially, environmental issues required the weld superior heat and corrosion resistances, and many welding materials and welding technologies have been developed with the needs of customers.*

*In this paper, trends in development on welding solid wires, bonding technologies, surface modification technologies and analytical technologies of welding arc phenomenon are reviewed.*

## 1. はじめに

市場の国際化, 地球環境問題への対応の加速など, この10年間は激動の中にあり, また最近では金融破綻を契機とした世界的な景気後退傾向とともに主要国内メーカーの業績下方修正の時事が浮上している. このような背景により, 溶接分野を取り巻く状況も大きく変化し, 厳しいコスト競争と, その中で生き延びていくための材料や技術の差別化が求められている. ここでは, 溶接材料, 溶接・接合技術に関する最近の動向を, 具体例を交えて概説する.

## 2. 溶接材料

## 2.1 概要

溶接材料の生産・出荷実績は, 建築鉄骨, 自動車・車輛, 造船, 建機, 産業機械など各業種とも国内の緩やかな成長と海外での業績の伸びが大きいことから, この10年の間で堅調に推移している.

Fig.1 に日本溶接棒工業会の統計による国内の主要4品種別溶接材料生産量を示す. この国内生産量の約14

%に相当する約5万tが輸出されている. フラックス入

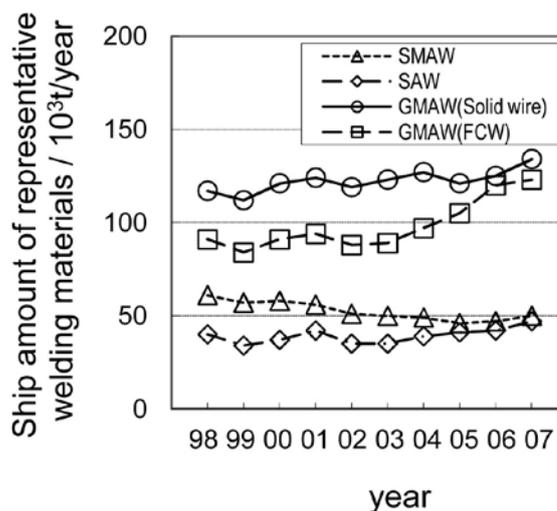


Fig.1. Ship amount transition of representative welding materials with containing export amount (by Japan Welding Rods Association).

りワイヤの生産量は、2003年までは横ばいであったが、昨今の造船業界の活況を受けて増加に転じ、ソリッドワイヤに迫っている。また、被覆アーク溶接棒は減少傾向、ソリッドワイヤ、サブマージアーク溶接用材は微増傾向である。

Fig.2にソリッドワイヤの輸入量を示す。市場国際化の影響を強く受け、その輸入量は2003年以降増加傾向である。2007年では約5万tであり、溶接材料輸出量に拮抗している。国別では、韓国からの輸入量が約70%と最大で、台湾、中国が残りの大部分を占めている。

溶接材料に求められる課題としては、「溶接部の高品質・高性能化」、「溶接の高効率化」、および、特に最近着目されている「溶接環境改善」などがある。本章では最近の溶接材料の開発動向について述べる。

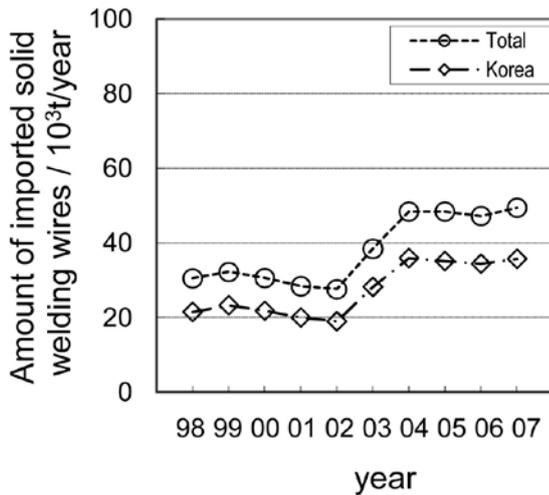


Fig.2. Amount of imported solid welding wires (by Japan Welding Rods Association).

## 2. 2 軟鋼および高張力鋼用ソリッドワイヤ

ソリッドワイヤでは、ワイヤそのものの研究のみならず、シールドガスや溶接電源との組合せによる研究も多い。その一例を Fig.3 に示す。パルスマグ溶接機と当社の軟鋼・490 N/mm<sup>2</sup> 高張力鋼パルスマグ溶接用ワイヤ DD50S (YGW15) との組合せで、スパッタの発生を抑制している。これは、パルス波形のピーク電流の下降速度を大きくすることでパルス周波数を高め（表皮効果が強まり、電流がワイヤ表面に集中するため、ピンチ力が増加し、溶滴はスムーズに移行する）、さらに主にアルカリ金属を含有した油脂をワイヤ表面に塗布することによる効果と考えられている。本ワイヤの適用により、溶接作業環境の改善が期待される。

また、薄鋼板の自動溶接を行っている自動車の生産ラインでは、上記のスパッタ低減以外に、ヒューム低減、溶接部の溶落ち、溶接線外れなどの溶接不良の低減が期待されている。そのため、今後も、溶接ワイヤ開発を積極的に行っていくことが重要になっている。

## 2. 3 フェライト系ステンレス溶接材料

自動車業界においては、世界的な排ガス規制の強化、燃費向上のための軽量化のニーズが高まり、排気処理系部材には、より耐食性、耐熱性に優れた高性能の部材が必要とされている。

自動車の排気系エキゾーストマニホールドでは、鋳物から板金を中心とした溶接構造が多く採用されるようになり、フェライト系溶接ワイヤの研究開発が進められた。

当社では、高温強度や耐食性を確保しつつ、高い溶接作業性が実現可能な溶接ワイヤの開発を行い、ワイヤ表面に銅めっきを施した「WSR シリーズ」として商品化し、多くの部位の溶接に適用されている<sup>1)</sup>。Table 1

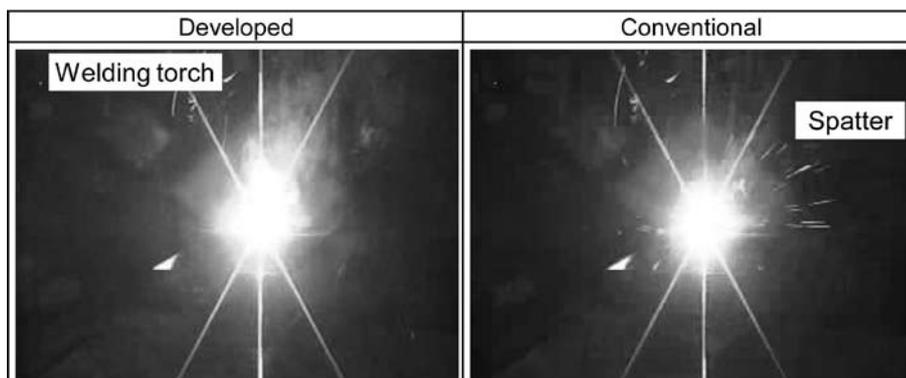


Fig.3. Comparative welding scene of DD50S(YGW15).

には、開発ワイヤ銘柄と化学成分例を示している。WSRシリーズは、WSR42K<sup>2)</sup>をベースとし、高温特性を向上させたWSR42KM (Fig.4)、耐食性を向上させたWSR35K、溶接金属の結晶粒微細化を可能にして耐溶接割れ性などに優れたWSR42KF (Fig.5<sup>3),4)</sup>、のラインナップ構成としている。また、それらの適用範囲例をFig.6に示す。

WSRシリーズは、当社独自のフェライト系ステンレス鋼めっきワイヤ製造ライン設備で量産されている<sup>5)</sup>。本設備はワイヤを電解脱スケール後めっき処理し、さらに、スキンパス伸線して巻き取りを行う自動ラインである (Fig.7)。母線表面はH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>による電解酸洗でスケール除去をした後、銅めっきの密着性を高めるためにNiストライクめっき処理を施し、連続して銅めっき処理しながらスキンパス伸線を行い、スプールに集材される。

## 2. 4 チタンワイヤ

チタンを溶接するアーク溶接法として、TIG溶接法、MIG溶接法、プラズマ溶接法がある。この中ではTIG溶接法が最も一般的に用いられているが、生産効率が低いという短所がある。そこで、当社は高い生産効率が確保できるチタンのMIG溶接法に着目し、それに適合した溶接ワイヤの開発を行った。

従来のチタン溶接ワイヤの技術課題に取り組み、溶接ワイヤ表面に酸素濃化層を形成させ、ワイヤの引張強さを適正化することにより、MIG溶接に適したチタン溶接ワイヤ「G-coat」を開発した<sup>6)~9)</sup>。

### 2. 4. 1 ワイヤ送給性

Fig.8にワイヤ送給装置からコンタクトチップまでの

Table 1. Chemical compositions of welding wires.

Relevant components	Welding wire	C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	Others	Remark
Exhaust manifold	WSR42K	0.01	1.03	0.45	18.7	0.18	—	—	Base
	WSR42KM	0.01	1.01	0.45	20.7	0.16	0.50	—	Gain in high temperature property
	WSR42KF	0.01	1.12	0.46	18.4	0.40	0.50	Al,Ti,N	Fine grain
Exhaust manifold and exhaust tube	WSR35K	0.01	0.44	0.30	17.0	0.50	—	—	Gain in corrosion resistance

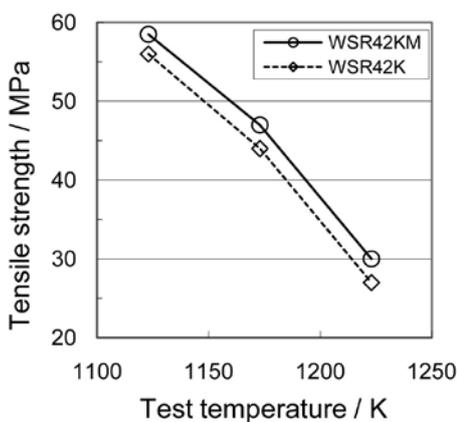


Fig.4. High temperature strength of deposited metal.

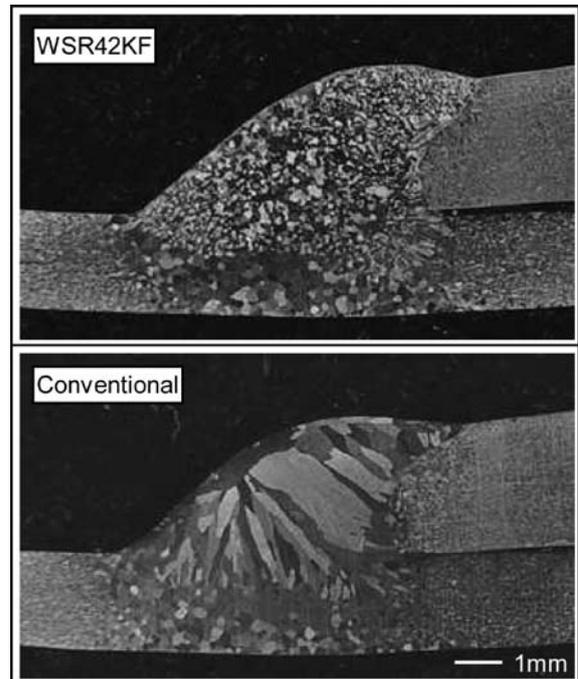


Fig.5. Macro photographs of weld bead.

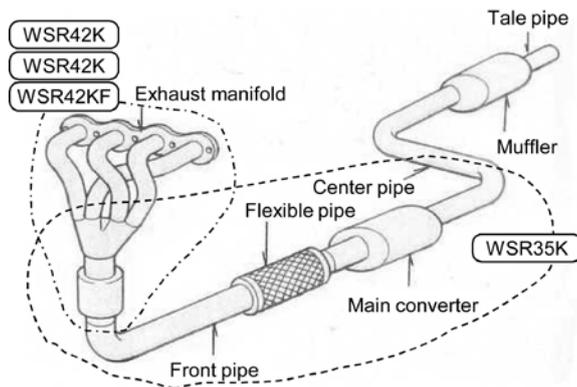


Fig.6. Applicability of welding wires at exhaust system.

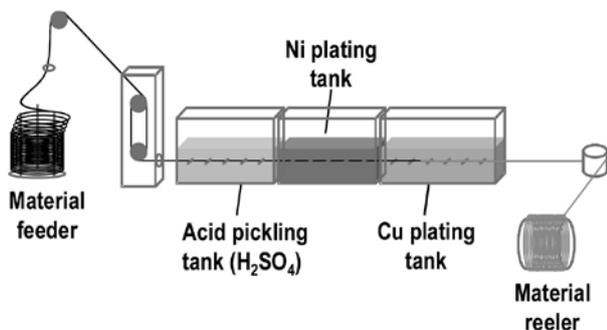


Fig.7. Schematic illustration of welding wire manufacturing PSL line.

送給負荷を測定した結果を示す。開発ワイヤの送給負荷は従来ワイヤに比べ低く、溶接ワイヤの送給が安定している。また、溶接ワイヤ自体の引張強さの増大により、座屈も皆無となった。

### 2. 4. 2 アークおよび溶滴移行の安定性

開発ワイヤおよび従来ワイヤのアークの発生状態を Fig.9 に示す。従来ワイヤに比べ開発ワイヤは、指向性のある安定したアークが得られている。

Fig.10 に開発ワイヤおよび従来ワイヤの溶滴を示す。開発ワイヤは1パルスで溶滴が全て離脱するのに対し

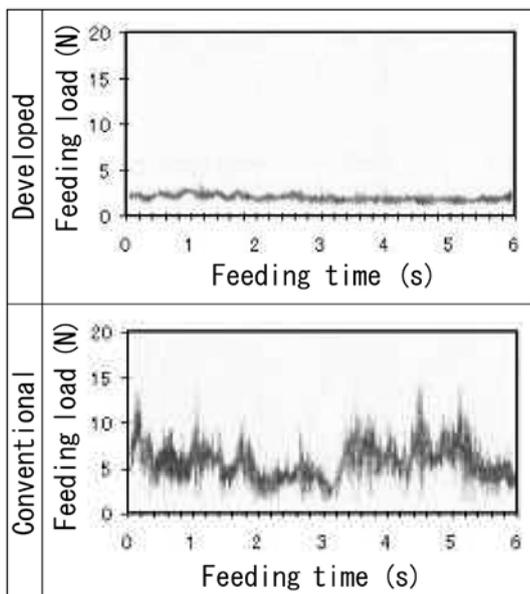


Fig.8. Results of measurement of feeding load.

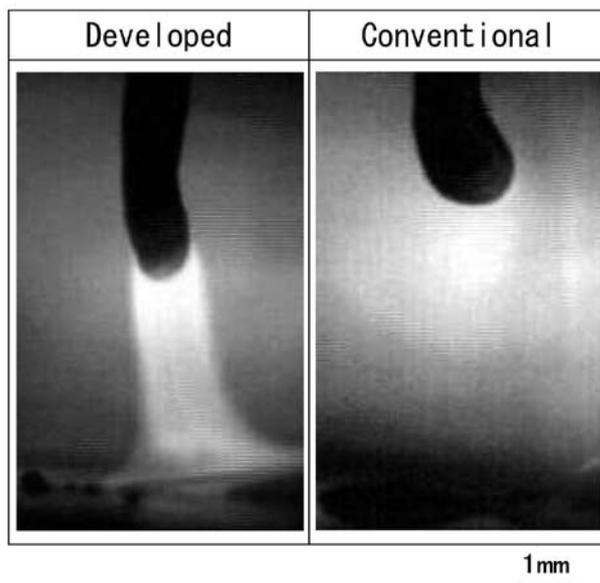


Fig.9. The difference of arc between the developed and a conventional wire.

て、従来ワイヤではほとんどの溶滴が複数回(2~10回)のパルスで溶滴が不連続に離脱しており、溶滴が大きく成長していた。

上記の課題を解決したことにより、Fig.11に示すように良好な溶接ビードが得られた。溶接継手の機械的性質もTIG溶接材と同等で良好な結果が得られている。開発ワイヤは高い送給性により、送給経路が厳しく、複雑な動きをするロボット溶接にも適し、いずれの溶接姿勢においても良好な溶接ビードが得られる。また、4mm以上の厚板の溶接では、すみ肉溶接などの1パス溶接が可能であり、溶接時間の大幅短縮に貢献できるため、そ

の用途拡大が期待されている。

また、自動車や半導体産業の好調などに牽引され、適用が堅調に増加しているレーザ溶接と、このアーク溶接を組み合わせたハイブリッド溶接においても<sup>10)</sup>、溶接速度のさらなる向上が可能となり、適用拡大を促進すると期待されている。

### 3. 溶接・接合技術

溶接・接合技術は多岐にわたり、溶接・接合の生じる相で区分すると、溶融接合法、液相-固相反応接合法、固相接合法に大別され、さらにそれぞれで多数の溶接法に分類される。また、各種溶接・接合関連機器、シミュレーション技術、検査技術など多分野との関連がある。ここでは、これらの技術の中からいくつかの事例を取り上げ概説する。

#### 3. 1 液相-固相反応, 固相接合技術

##### 3. 1. 1 概要

液相-固相反応接合プロセスには、ろう接、液相拡散接合がある。また、固相接合プロセスには拡散接合、摩擦圧接、摩擦攪拌接合、常温圧接、鍛接、爆着、超音波圧接などがある。本章では液相拡散接合および適用範囲が近年拡大してきている摩擦攪拌接合<sup>11)</sup>の開発動向について述べる。

##### 3. 1. 2 液相拡散接合

液相拡散接合は接合面にインサート材を挿入して、そのインサート材を溶融し母材は溶融させないで接合する方法であり、精密部品、複雑形状部品、特殊材料部品、異種材料の接合に用いられている。

液相拡散接合プロセスの模式図をFig.12に示す。この液相拡散接合法は比較的低い接合温度で接合が可能であり、液相による接合面の密着性向上などの利点があり、ガスタービンやジェットエンジンなどに適用されている。特に異種材料の接合において、有効な接合プロセスであり、溶融溶接では困難であるTi合金と鋼の接合に用いられている。自動車のターボ用タービンホイールに当社の接合技術が適用されている。

##### 3. 1. 3 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合は、Fig.13に模式図を示すように、円柱状のツールと呼ばれる部材を回転させながら接合部に押し込み、この際に発生する摩擦熱と加工熱で接合

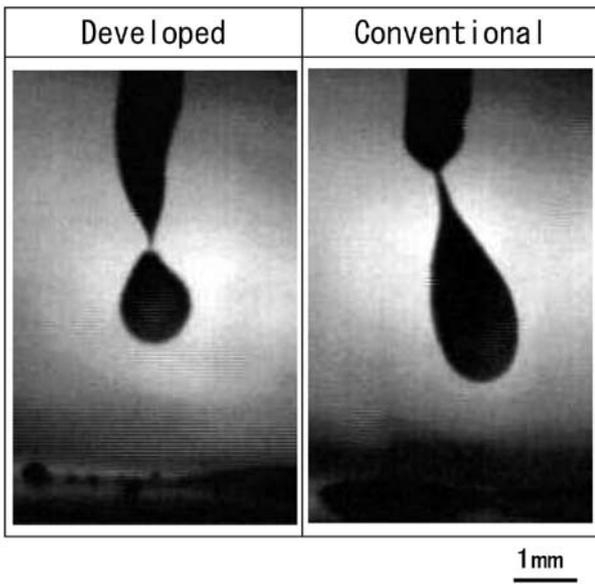


Fig.10. The difference of droplet between the developed and a conventional wire.

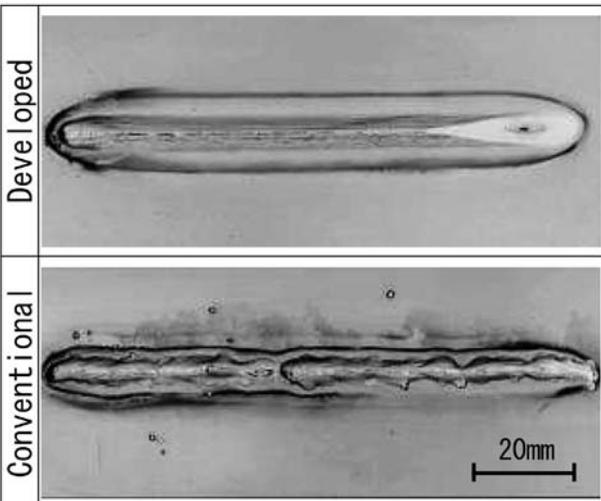


Fig.11. Appearance of weld beads.

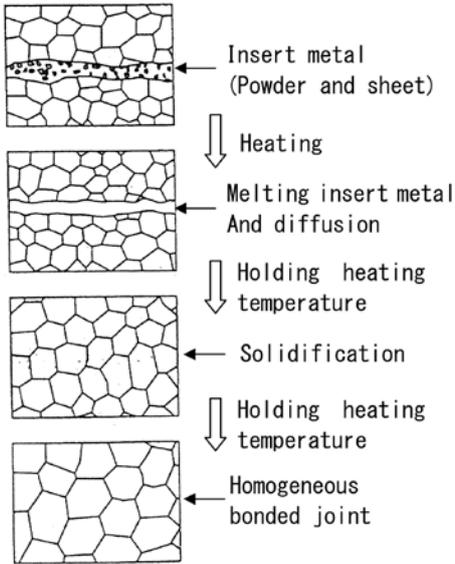


Fig.12. Schematic diagram of transient liquid phase bonding process.

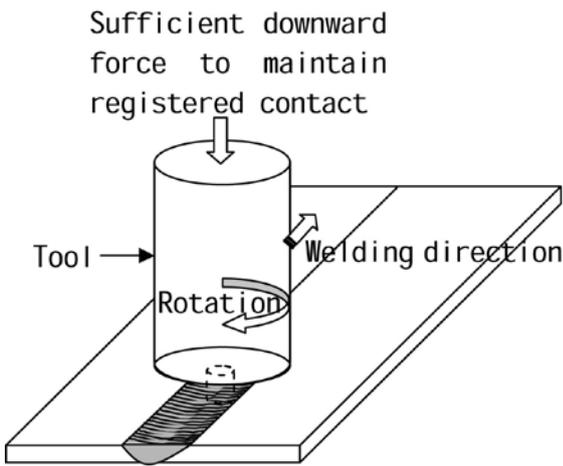


Fig.13. Schematic diagram of Friction Stir Welding process.

部を局部的に軟化させると同時にツールの回転で被接合材を塑性流動させながら接合する方法である。ツールは一般的に工具鋼が用いられている。溶接部の結晶粒は塑性流動によって母材よりも緻密になり、機械的性質が向上する。また、非熔融接合であるため、最高加熱温度が比較的低いことにより熱影響部が小さいという特徴を有する。Al合金のような融点の低い材料に対して実用化されており、鉄道車両<sup>12)</sup>、航空宇宙分野に多く適用されている。また、自動車業界でも、Al合金フレームを持つ自動車において、抵抗スポット溶接の代替技術として、摩擦攪拌接合を改良した摩擦攪拌点接合が適用され

ている。最近の研究では、ツール材質の改良により、炭素鋼、ステンレス鋼、チタンおよびチタン合金の接合が可能になったと報告がなされている<sup>13),14)</sup>。

### 3. 2 表面改質技術

#### 3. 2. 1 概要

表面改質に関しては、各種肉盛溶接（アーク、プラズマおよびレーザー）、蒸着（PVD, CVD）の他に、溶射が検討されているが、肉盛溶接および最近注目を浴びている溶射について述べる。

#### 3. 2. 2 肉盛溶接

近年、過酷な環境へのニーズに対応すべく耐摩耗性、耐食性、耐熱性などが部材に要求されてきている。肉盛溶接はそれらの要求を安価に対応できる手段である。また、作業時における対象部材の損傷部の補修においても、欠かせない溶接方法である。溶接プロセスとしては、アーク肉盛溶接、プラズマ粉体肉盛溶接、レーザー粉体肉盛溶接がある。アーク肉盛溶接は土砂摩耗用や金型の補修に使用されている。プラズマ粉体肉盛溶接については、多機能の粉末の製造が可能であるため、エンジンバルブの肉盛溶接、石油精製用分解炉用管のプラズマ粉体肉盛溶接（詳細は、技術解説 - 産業機械分野, 3. プラント関連：エチレン分解炉用 PPW クラッド鋼管 EST を参照）の他、多岐にわたり使用されている。レーザー粉体肉盛は、熱源がレーザーであるため、細部の肉盛に適している。今後、精密部品の金型の補修、ジェットエンジンの補修などに多く用いられると期待される。

#### 3. 2. 3 溶射

表面改質技術には、窒化、浸炭などの材料自身の表面組織や性質を変化させる技術と、めっき、イオンプレATINGなど高い特性を有する他の材料を表面に被覆する技術がある（Fig.14）。溶射法は後者の表面被覆法に位置づけられ、ボイラー配管などの耐食性改善、圧延ロールや冷間金型の耐摩耗性改善などを目的に用いられている。最近では、自動車の軽量化などによる燃費向上の観点から、エンジンシリンダボアへの鋳鉄ライナ圧入の代わりに溶射技術の適用も注目されている<sup>15)</sup>。

溶射法は、エネルギー源（熱源）によって熔融または半熔融状態になった金属やセラミックスなどの溶射材料（ワイヤ、粉末、棒）を高速で基材に衝突・堆積させ、成膜する方法である（Fig.15<sup>16)</sup>）。溶射の一般的な

エネルギー源(熱源)としては,燃料の燃焼や爆発などの化学エネルギー,火花放電やプラズマなどの電気エネルギーがある。また,最近では粒子の運動エネルギーだけで成膜するコールドスプレー法が注目されている<sup>17)</sup>。溶射法の特徴として,(1)溶射材料の選択範囲が広い,(2)母材の材質・寸法に制約がない,(3)成膜速度が大きい,(4)厚膜生成が可能,(5)多孔質の皮膜が可能,(6)現場施工が可能,などが挙げられる<sup>18)</sup>。

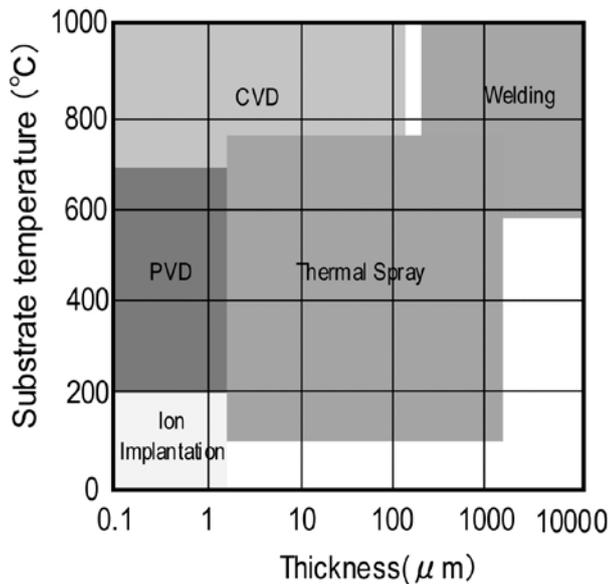


Fig.14. Relation between substrate temperature and thickness in surface modifications.

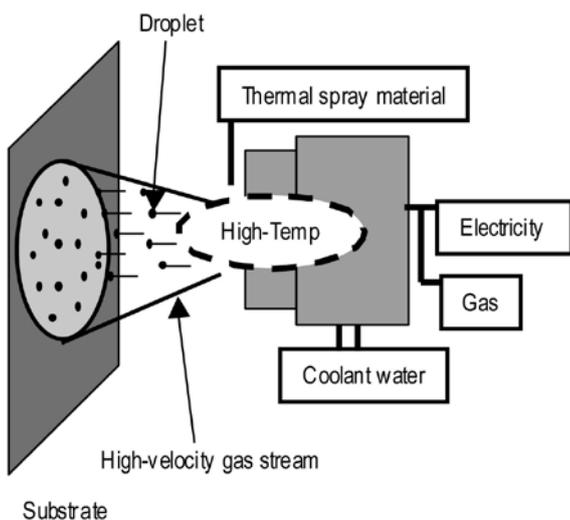


Fig.15. Principles of thermal spraying process.

### 3. 3 溶接関連の技術

#### 3. 3. 1 概要

溶接材は一般的には溶接後に種々の評価試験が行われる。マイクロ組織観察,硬さ試験,引張試験,シャルピー衝撃試験,溶接部の割れ試験などが挙げられる。また,溶接中の評価・解析も今後の溶接材料の開発では重要な鍵を握ると考えられている。ここでは溶接アーク現象の解析技術について述べる。

#### 3. 3. 2 溶接アーク現象の解析技術

高速度カメラによる溶接アーク現象の撮影では,溶滴移行形態の判定だけでなく溶接中に発生するアークの形態,溶融池の挙動を正確に捉えることが可能である。また,その画像を解析することにより,より高精度な材料・技術開発が可能になると考えられている。当社では独自の溶接アーク現象解析技術を開発し,ワイヤ先端の振動,溶滴サイズ,アーク長,溶滴離脱時のワイヤ先端角,ワイヤ送給速度,スパッタ数などの測定を簡便に測定し,かつ高精度な解析が可能になった<sup>19)</sup>。

今後,本技術を用いた解析結果を溶接中にフィードバックさせることで,より高品質で高精度な溶接を達成することができると期待されている。

## 4. あとがき

溶接分野を取り巻く市場は今後もさらに変化し,用途,材料,製造プロセスのいずれもが進歩していくと考えられる。そのため,時代の変化を読み取るとともに,最終用途から要求される機能を十分に理解し,そのために最適な材料,プロセスを,従来の枠を超えて提案,開発していくことがますます重要になっていくであろう。

(文献)

- 1) 内藤聞治:溶接技術, 56 (2008), 8, 111.
- 2) 上仲明郎, 永田雅:電気製鋼, 67 (1996), 155.
- 3) 乾圭吾, 永田雅:電気製鋼, 72 (2001), 155.
- 4) 上仲明郎, 山田龍三:電気製鋼, 78 (2007), 107.
- 5) 電気製鋼, 72 (2001), 205.
- 6) 堀尾浩次, 南川裕隆, 山田龍三:チタン, 53 (2005), 282.
- 7) 堀尾浩次, 豊田和洋:電気製鋼, 75 (2004), 231.
- 8) T.Kostrivas, L.Smith, G.Melton, A.Plewka: The bulletin, Jan/Feb (2006), 8.

- 9) 堀尾浩次, 南川裕隆: 電氣製鋼, 78 (2007), 97.
- 10) 堀尾浩次, 冷水孝夫, 沓名宗春, 雀麗: 溶接学会全国大会講演概要, 82 (2008), S-26.
- 11) W.M.Thomas, E.D.Nicholas, J.C.Needhan, M.G.Murch, P.Temple-Smith, and C.J.Dawes: International Patent Application PCT/GM92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, (1991) .
- 12) 宮道知典: 電氣製鋼, 78 (2007), 141.
- 13) 藤井英俊: 溶接技術, 53 (2005), 12, 60.
- 14) 藤井英俊: 溶接学会全国大会講演概要, 82 (2008), S-32.
- 15) K. Bobzin, F. Ernst, J. Zwick, T. Schlaefler, D. Cook, K. Kowalsky, K. Bird, D. H. Gerke, R. E. Sharp, K. R. Raab, S. Lindon :Thermal spraying of cylinder bores with the PTWA internal coating system, Proceedings of ASME internal Combustion Engine Division Fall, (2007), ICEFF07-1745.
- 16) 乾保之, 沖幸男, 上野和夫, 杉江他曾宏, 袖岡賢, 高谷泰之, 富田友樹: 溶射技術入門, (2006), 1.
- 17) 北村純也, 佐藤和人, 青木功, 榊和彦, 高畑宗晃, 清水保雄: 溶射協会全国講演大会講演論文集, (2007), 10.
- 18) 蓮井 淳:「新版 溶射工学」, 産報出版, (1996), 20.
- 19) 山田龍三, 上仲明郎, 加藤徹: 電氣製鋼, 78 (2008), 115.