実 用 講 座

ステンレス鋼うす板溶接の実際(1) ステンレス鋼うす板のアーカ溶接と抵抗溶接*

Practical Welding for Thin Plate of Stainless Steel (1) Various Processes for Welding Thin Stainless steel Plates Using Arc Welding and Resistance Welding*

野 田 卓 継**

by Takushi Noda**

キーワード：ステンレス鋼，ティグ溶接，パルスティグ溶接，プラズマ溶接，
短絡移行形ミグ溶接，パルスミグ溶接，フラックス入りワイヤに
よるマグ溶接，スポット溶接，シーム溶接

1. は じ め に

ステンレス鋼は耐食性，耐久性及び機械的諸特性などが優れた素材として，多くの産業分野で幅広く利用されており，我が国のステンレス鋼熱間圧延鋼材の年間生産実績によると，平成4年は264万トン（ニッケル系約70%）で，10年前の約1.5倍となっている。また，この間に溶接加工性を改善した鋼種，溶接材料及び機器の開発がされてきた。

本稿では板厚が3.0 mm以下のうす板を対象に主要なアーカ溶接と抵抗溶接による溶接施工上の特徴と留意点について説明し，それらの施工例を幾つか紹介することにした。

2. 主要な溶接法の種類と特徴

ステンレス鋼は鉄に12%以上のクロムを含有させて，さびにくくした鋼であり，クロム系とニッケル系に大別される。その用途から，クロム量を変えたり，ニッケル成分を加えるなどの工夫がされて，数多くのステンレス鋼が生産されている。これらのステンレス鋼に適用する溶接方法の難易度は，ほぼ表1のように分けられる。本稿では表中，自動溶接

に関連の薄い被覆アーカ溶接を除いた各種溶接法を採り上げて記述する。

2.1 ティグ溶接

ステンレス鋼のうす板溶接に使われる溶接法のなかでも，ティグ溶接は，高品質で安定した溶接が可能で，原子力から生活用品に至る幅広い分野で使用されている。

ティグ溶接は，一定の溶接電流を使用する通常の直流ティグ溶接とパルス電流を用いるパルスティグ溶接に分けられ，パルスティグ溶接はパルス周波数により表2のような作用効果と利用目的が異なった特徴を持っている。

(1) 通常の直流ティグ溶接

この溶接法は，溶接機器が安価で，取扱操作が簡便であり，溶接現象が他の溶接法に比べて安定していることから，各種溶接姿勢に対する適応性が高く，裏波溶接が容易で，手動溶接，自動溶接ともに広く採用されている。しかし，単電極トーチでは溶接速度が比較的遅いという欠点があり，これを改善するために，突合せ直線溶接，電縫管などの限定された継手では，高速溶接に伴うアンダーカットや不連続ビード防止方策として，高周波予熱や1本のトーチ内に2～4本の電極を備えた多電極トーチが使われている。また，単電極トーチにおいても，タングステン電極先端形状，トーチ角度，ワーククランプ間

*原稿受付 平成5年3月19日

**正 員 ナストーア(株) Member, Nas Toa CO.

表 1 ステンレス鋼の各種溶接方法に対する適用の難易¹⁾

項 目 溶接方法	適用板厚 mm	鋼 種				
		SUS 410 (13 Cr)	SUS 430 (18 Cr)	SUS 304 (18 Cr-8 Ni)	SUS 309 S (22 Cr-12 Ni)	SUS 310 S (25 Cr-20 Ni)
被覆アーク溶接	$t > 0.8$	2	2	1	1	1
ティ グ 溶 接	$0.5 < t < 3$	3	3	1	1	1
ミ グ 溶 接	$t > 3$	3	3	1	1	1
プラズマ溶接	≥ 3	2	2	1	1	2
スポット溶接	$0.15 < t < 3$	3	3	2	2	2
シ ー ム 溶 接	$0.15 < t < 3$	3	3	2	2	2

備考 上表の数値は、大体の目安を示したものであって、数字の意味は次のとおりである。

1. 最も推奨される。2. 普通に用いられるが制限を受けることがある。3. 特定の場合に用いられる。4. あまり用いない。

図 1 流し台のティグ溶接ロボット (ナスステンレス株式会社提供)

表 2 パルスティグ溶接の周波数による分類

分 類	周波数 (Hz)	作用、目的
低周波 パルスティグ溶接	0.5~15	溶融池制御、アーク安定化
中周波 パルスティグ溶接	15~500	溶込制御、アーク安定化
高周波 パルスティグ溶接	5k~20k	高速溶接、アーク安定化

距離などによる高速化の研究²⁾がされている。

図 1 は、流し台のシンクとトップの溶接にティグ溶接ロボットを用いたもので、熱歪みによる変形を避けるため、ビード巾を狭く高速溶接し、クランプ部に工夫をした実施例である。

(2) パルスティグ溶接

前述の表 2 に示す低周波パルスティグ溶接と中周波パルスティグ溶接は、最近、普及しているインバータ制御直流ティグ溶接機の場合、標準装備されているので、容易にその効果を利用できるようになった。

低周波パルスティグ溶接では、パルス電流で溶融

図 2 電流変化とビード形状³⁾

池を拡大し、ベース電流で凝固される。これを図 2 のように周期的に繰り返して溶接する方法で、溶融金属の垂れ落ち、溶け落ちなどの防止に役立つので、全姿勢溶接、裏波溶接に有効である。このような効果を利用したステンレス小径管全姿勢溶接 (固定管の溶接) に関する研究^{4,5)}や、溶接金属の微細化による凝固割れ抵抗を高める研究⁶⁾などが行なわれている。

また、厚みに極端な差のある板の突合せ溶接や、図 3 のような熱伝導率の違うステンレス鋼と銅の異種金属の溶接にも有効である。

図 3 異種金属の溶接 (銅とステンレス鋼 1.2 mm)

中周波パルスティグ溶接では、15~100 Hz 程度の領域と 100~500 Hz ではパルスアーカの作用が異なり、前者では溶融池の攪拌を盛んにし、溶接金属の微細化やブローホールの防止に有効に働く。後者の周波数帯ではパルス電流のアーカ力によるアーカの指向性が高められ、小電流でのアーカの安定性が増し、高速溶接が可能になる。

高周波パルスティグ溶接では、パルス周波数が 5 k~20 kHz でアーカの指向性・集中性が更に向上し、図 4 に示すように板厚 3.0 mm 以下のうす板において、多電極ティグ溶接に近い高速溶接が得られる。特に 1.0 mm 以下のうす板では平均電流として小電流であるが、短時間大電流のパルス電流の安定

図 4 高周波パルスティグ溶接の高速溶接性⁷⁾

性とアーカの指向性・集中性で高速溶接に適した特性が得られ、通常の直流ティグ溶接では困難な 0.2 mm 程度のうす板まで溶接することができる。

2.2 プラズマ溶接

プラズマアーカは水冷銅ノズル、Ar を主としたプラズマ動作ガス、Ar に数パーセントの H₂ を混合したシールドガスなどの作用によりアーカ柱を細く絞り、エネルギー密度を高くし、指向性に優れたアーカにして、裏波溶接や高速溶接に適した特性を持たせている。

プラズマ流の発生方式には、プラズマアーカ方式、プラズマジェット方式及び中間形があり⁸⁾金属の溶接にはプラズマアーカ方式と中間形が使用されている。前者はプラズマ気流を溶融池の前方に貫通させるキーホール形で 1.6~10 mm 程度の板厚の溶接に用いることが多く、後者はキーホールを発生させることなく、ティグ的な使用をする小電流プラズマ形（マイクロプラズマ形とも呼ばれている）で 0.05~2.0 mm 程度の極うす板からうす板の溶接に適用されている。

溶接条件は溶接電流、動作ガス流量、溶接速度などを適正に選定する必要があり、同一溶接電流であっても、動作ガス流量、溶接速度、ノズル径の要素により、溶接可能条件域が限定される。

表 3 は、うす板突合せ溶接の条件例で、溶接電流によって適正な水冷銅ノズル径を選定し、動作ガス流量と溶接速度の条件により、キーホール形プラズマまたは、非キーホール形プラズマになる。

表 3 ステンレス鋼薄板突合せプラズマ溶接条件例⁹⁾

種別	板厚 (mm)	溶接電流 (A)	溶接速度 (cpm)	ノズル径 (mm)	動作ガス流量 (l/min)	シールドガス流量 (l/min)
非キーホール溶接	0.8	25	25	0.8	Ar 0.2	Ar+1% H ₂ 12
	1.6	46	25	1.3	Ar 0.5	Ar+5% H ₂ 12
	2.4	90	25	2.2	Ar 0.7	Ar+5% H ₂ 12
	3.2	100	20	2.2	Ar 0.7	Ar+5% H ₂ 12
キーホール溶接	1.6	25	10~15	0.8	Ar 0.4	Ar 9.5
	2.4	50		1.3	Ar 0.7	Ar 9.5
	3.2	75		1.3	Ar 0.9~1.4	Ar 9.5
	4.8	100		1.8	Ar 2.4~3.8	Ar 9.5

キーホール形プラズマ溶接では、バックシールドガスが適正溶接条件域の拡大に影響し、Ar または N_2 を単独で使用するよりも、 O_2 または CO_2 のような酸化性ガスを混合すると適正溶接速度の範囲が拡大される¹⁰⁾。

キーホール形プラズマ溶接は裏波溶接に適していることから、ステンレス鋼溶接管の製造に広く採用されており、単トーチのプラズマ溶接からティグとプラズマの複合トーチ、予熱源とプラズマの組合せなどを用いた高速化が試みられており、図 5 (a) はプラズマ溶接とティグ溶接の併用、図 5 (b) は高周

(a) プラズマ溶接とティグ溶接

(b) HF 予熱とプラズマ溶接¹¹⁾

図 5 SUS 304 3.0 mm 溶接管の溶接部断面

波予熱とプラズマ溶接を組合せた場合の断面マクロ組織を示したもので、両者とも、単トーチで溶接した場合の約 2 倍の高速溶接を可能にしている。

小電流プラズマ溶接は細線やペローズなどの溶接に利用されており、表 4 に溶接条件例を示す。

2.3 消耗電極式ガスシールドアーク溶接

消耗電極式ガスシールドアーク溶接では、前述のティグ溶接やプラズマ溶接と比べると、溶接ビードの外観(表面のスラグを含む)、スパッタの発生、ブローホールの発生などで、溶接品質がやや劣るが、溶加ワイヤ付きティグ溶接に対して、溶接速度が極めて高く、高能率であり、ロボット溶接・自動溶接の主流をなしている溶接法である。

本項では、0.8~3.0 mm 程度の板厚を対象にした短絡移行形のミグ溶接、パルスミグ溶接、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接などの特徴と実施例を示す。

(1) ミグ溶接

ミグ溶接における溶滴移行形態は、短絡移行、グローピュール移行およびスプレー移行の三種類であるが、うす板には短絡移行領域の溶接が使われる。

シールドガスには Ar に 1~5% 程度の O_2 を混合したガスを用いて、アークを安定させている。うす板の溶接には Ar に 10% 前後の CO_2 を入れた混合ガスを使用することもあるが、溶接金属中の炭素量が増加する傾向があるので、低炭素ステンレス鋼の溶接や腐食環境で使用するものには適当でない。

短絡移行溶接では、0.8~1.2 mm のうす板に対して 0.8 mm または 1.0 mm の細径ワイヤを用い、1.5~3.0 mm のうす板には 1.0 mm、または 1.2 mm のワイヤを用いて、図 6 に示すように 200 A 以下の電

表 4 ステンレス鋼極薄板小電流プラズマ溶接条件例⁹⁾

継手種類	板厚 (mm)	溶接電流 (A)	溶接速度 (cpm)	ノズル径 (mm)	動作ガス流量 (l/min)	シールドガス流量 (l/min)	備 考
突合せ継手	0.025	0.3	125	0.8	Ar 0.2	Ar+1% H_2 9.5	へり付突合せ
	0.075	1.6	150				
	0.125	2.4	125				
	0.255	6.0	200				
	0.760	10.0	125				
へり継手	0.025	0.3	125	0.8	Ar 0.2	Ar+1% H_2 9.5	
	0.125	1.6	380				
	0.255	4.0	125				

流で溶接することが多い。溶接中は軟鋼のマグ溶接と同様にスパッタが発生するが、近年、著しい普及が見られるインバータ制御の電源で、特にスパッタ軽減対策の電流波形制御をした電源を用いるとスパッタ発生量が、従来のサイリスタ式の約1/2以下に低減される。

ステンレス鋼うす板にミグ溶接を多用しているのは、自動車の排気系部品で、特に、1970年代後半の排ガス浄化対策からステンレス鋼の使用量が急増している。近年の小型乗用車に使用されている1台当たりのステンレス部品重量は、大衆車で15 kg、上級車で約30 kgである¹²⁾。

図7(a)はフェライト系ステンレス鋼(SUS 409 L, SUS 410 L, SUS 430 など)を使用した排気管で、同図(b)は排気マニホールドに直付けされるステンレス製メタル担体触媒コンバータを示す。

(2) パルスミグ溶接

パルスミグ溶接は、アーカの安定性、溶け込み形状の改善、スパッタの低減など溶接の安定化と高品質化を目的として、パルス電流を周期的に加えて電磁ピンチ力を利用して溶滴移行させる溶接法であり、200 A以下の小電流域においても電極は母材に短絡することなく安定した溶滴移行となる。

この溶滴移行の様式には、パルススプレー移行、1パルス1溶滴移行、パルスドロップ移行の三種があり、溶滴の詳しい挙動が観察されている¹³⁾。

近年は、1パルス1溶滴移行形の溶接法が広く使用されており、パルスアーカ溶接法については、本学会誌VOL. 53, No. 6に詳しく解説されている¹⁴⁾。

図8は、2.0 mm厚の平板、突合せ溶接において、短絡移行溶接とパルスミグ溶接のビード断面を比較したもので、両者の溶接電流を同一にし、裏波ビード幅が同一になるように溶接速度を調整したものである。その結果、パルスミグ溶接の方が表ビード高さで、0.78倍と低く、表ビード幅で1.35倍と広がっている。また表5では、溶接電流、裏ビード幅を同一にした条件で溶接し、各板厚に対して、比較すると、パルスミグ溶接が全般に高速になっており、両者の溶接速度比(V_p/V_s)が板厚が厚い方で大きくなっている。

(3) フラックス入りワイヤによるマグ溶接

フラックス入りワイヤによるマグ溶接は、ミグ溶接に比べて、ヒュームの発生量が多く、溶着金属の衝撃試験値が低いなどの短所があるものの、ビード外観が良く、適正電流電圧範囲が図9に示すように

図6 突合せ溶接条件範囲例 (ミグ、短絡移行、自動溶接)

(a) 排気管

(b) マニホールドコンバータ

図7 自動車排気系部品のミグ溶接例 (トヨタ自動車株式会社殿提供)

(a) 短絡移行溶接 (150 A, 15 V, 80 cm/min)

(b) パルスミグ溶接 (150 A, 21 V, 110 cm/min)

(単位:mm)

	短絡	パルス
F	4.3	5.8
B	1.7	1.7
H	1.1	0.8

SUS304, 2.0t
シールドガス: Ar+2%O₂

図8 突合せ溶接のビード断面の比較

表 5 突合せ溶接における溶接速度比較 (SUS 304)

板 厚 (mm)	溶接電流 (A)	裏 波 巾 (mm)	溶接速度 (cm/min)		Vp/Vs
			短絡 (Vs)	パルス (Vp)	
0.8	100	1.0	200	240	1.2
2.0	150	1.7	80	110	1.4
3.0	150	2.5	30	60	2.0

図 9 フラックス入りワイヤの適正電流・電圧範囲¹⁵⁾ (図中の数字はワイヤ径を示す)

広く、アークの安定性に優れ、全姿勢溶接が容易で、X線品質が良好であるという溶接作業性と溶接品質で、優れている点を多く持っている。また、溶接機は通常のミグ溶接機、CO₂溶接機のいずれも使用可能であることも、この溶接が普及している要因の一つである。

近年、これらの特徴を評価されて、フラックス入りワイヤが飛躍的な伸びを示している。

現在市販されているワイヤは、主としてオーステナイト系で、一部フェライト系もあり、ワイヤ径の種類は1.2 mmから3.2 mmまで規格化されている (JISZ 3323)。しかし、2.0 mm以下のものが主として使用されており、近年0.8 mm、0.9 mmの極細径のものがうす板用として市販されている。

図10はビードオンプレート溶接をした際のビード断面形状の一例で、ミグ溶接よりもフラットでなじみ性の優れたビード形状になっている。同図は100% CO₂でシールドした場合であるが、スパッタの発生や肉盛溶接で母材の希釈率をおさえたい場合は、Ar+20% CO₂の混合ガスを使用するのが望ましい¹⁷⁾。

フラックス入りワイヤによる溶接のうす板への実施例は、現状では多くないが、全姿勢用ワイヤやメ

ワイヤ: YF308LC 1.2mm
溶接速度: 30cm/min
シールドガス: CO₂ 20ℓ/min
ワイヤ突出し長さ: 20mm

図10 ビード断面の形状¹⁶⁾

タルタイプワイヤの実用化により、うす板への適応範囲が拡大されるものと思われる¹⁸⁾。

本溶接については「フラックス入りワイヤによるステンレス鋼溶接の実際」(溶接学会誌, VOL. 61 (1992) No. 7) に詳しく説明されている¹⁹⁾。

2.4 抵抗溶接

ステンレス鋼のうす板は鉄道車両を初め、大形建造物の屋根、家庭用流し台、電子レンジから、計器用センサー部品に至るまで、利用分野は広く、いずれも抵抗溶接が用いられている。これらのうす板は、1.0 mm厚以下のものが多く、スポット溶接、シーム溶接、プロジェクション溶接などが使われている。

(1) スポット溶接

ステンレス鋼と軟鋼の物性を比較すると、固有電気抵抗が軟鋼の4~10倍、熱伝導率が軟鋼の1/3~1/2倍と小さく、熱膨張率がオーステナイト系で軟鋼の1.5~2倍、高温での引張り強度がオーステナイト系で軟鋼の約2倍と高くなっている。

従って、ステンレス鋼の溶接条件は、軟鋼より低

電流、高加圧力にするのが通常で、スポット溶接作業標準(ステンレス鋼) WES 7303 が規格化されている。また、電極材料(JIS Z 3234)は軟鋼用より硬度の高いジルコニウム銅、低ベリウム銅などが適用されている。

ステンレス鋼の表面は強固で安定した酸化皮膜があり、電極と板、板と板間の接触抵抗は比較的大きいが、バラツキが小さく安定しているので、スポット溶接をするには容易な材料である。しかし、一般にステンレス鋼板を用いた場合の溶接品質は高く設定され、強度は当然のこと、焼け、くぼみ、歪みなどが目立たないようにする必要がある。これは溶接機の種類によって異なり、コンデンサスポットを用いた高電流密度・短時間通電方式²⁰⁾やコンデンサの直接放電による衝撃電流圧接法²¹⁾などが研究され、一部実施されているが、装置が大きく、実用的にはインバータ制御抵抗溶接^{22,23)}が広く使用されている。

図 11 は 0.8 mm のステンレス鋼板をインバータ制御直流スポットと交流スポットで通電時間を変えて溶接した時のナゲット径とくぼみ深さの関係を調べたもので、インバータ制御直流スポットの方が短時間でナゲット生成し、同径ナゲットに対して、くぼみ深さも浅くなっている。

マルテンサイト系のステンレス鋼については、説明を省略したが、溶接部の硬化に対しては、テンパ処理をする必要がある²⁴⁾。

(2) シーム溶接

シーム溶接は耐密性を目的にした溶接で、溶接入熱が連続して加えられることから、ワークの歪みや伸びに注意して、溶接部のクランプや冷却対策が必要である。

溶接条件はスポット溶接の場合と同様に、軟鋼に比べて、低電流、高加圧力に設定し、ナゲットの重なりがナゲット径の 10~25% になるように溶接速度を調整するのがよい。

一般的な溶接条件選定の考え方については、板厚とナゲット幅、電極幅、加圧力および溶接速度について検討し、最適条件を設定する手順が提案されている²⁵⁾。また、実際に使われている溶接条件は溶接機メーカーが作成した条件表²⁶⁾を参考にして具体的な製品に見合った適正值に修正されている。特に、溶接の自動化に伴い、ワークの位置決め治具やクランプ治具を使用すると、溶接部の熱バランスが汎用シーム溶接機の場合と異なることが多く、熱バランスに

図 11 インバータ直流スポットと交流スポットによるナゲット生成とくぼみ深さの比較

図 12 屋根用自走式シーム溶接機による溶接施工例 (日本冶金工業株式会社提供)

留意した治具設計が大切である。

図 12 は屋根用自走式シーム溶接機で 0.4 mm 程度のうす板を用い、約 2 m/min の速度で連続溶接する実施例を示す。

3. 各種ステンレス鋼を溶接する際の留意点

3.1 オーステナイト系ステンレス鋼

溶接性は最も良い鋼種であるが、溶接熱影響部で耐粒界腐食性を劣化させることがあるので、強い腐食環境で使用する場合は注意が必要である。

〈溶接上の留意点〉

- ① 溶接金属中に、数%のフェライト相を生成するように溶接材料を選択する。(高温割れ、結晶粒の粗大化防止)
- ② 極力共金を用いる。
- ③ アーク長は短くし、窒素、酸素の吸収を防止する。
- ④ 溶接後、熱処理できない時は、低炭素あるいはチタンやニオブで炭素を固定した安定化ステンレス鋼母材、溶接材を用いる。

3.2 フェライト系ステンレス鋼

焼き入れ性がなく、溶接熱影響が硬化することはないが、結晶粒が粗大化して、ぜい化するので注意が必要である。

〈溶接化の留意点〉

- ① 可能な限り溶接入熱を下げる。
- ② 開先部をクリーニングし、溶接金属への炭素吸収を防止する。また Nb 入り溶接材を使い、炭素を固定する。
- ③ 475°C ぜい化を防止するため 350~550°C の間で除冷することを避ける。
- ④ シールド性を確実にする。
- ⑤ アーク長を短くする。

3.3 マルテンサイト系ステンレス鋼

焼き入れ性があり、冷却後に割れを生じやすい。

〈溶接上の留意点〉

- ① 200~300°C の予熱をする。
- ② 溶接後冷却しないうちに 700~800°C で後熱による焼き戻し処理をする。
- ③ 予熱、後熱が不可能な場合、非自硬性ステンレス鋼 405 の溶接材料を用いる。

近年、溶接構造用低 C, N マルテンサイト系ステンレス鋼が開発され、従来の溶接施工上の問題点が改善されている²⁷⁾。

4. お わ り に

ステンレス鋼のうす板を溶接するにあたり、主要なアーク溶接法と抵抗溶接法の特徴と一部の施工例について述べ、溶接施工上の留意点については、鋼種別に簡単に記した。

ステンレス鋼の溶接は、現状では素材、溶材及び機器のいずれをとって見ても、それぞれに長所と短所があり、使用目的により、適切な組合せ、選択をして、使い分けることが必要であるが、今後は素材から溶接施工法まで、全体を溶接システムとして、開発、更に溶接加工が容易で、確実なものに改良して行く必要がある。

最後に本稿執筆にあたり、貴重な助言と資料を提供して戴いた、トヨタ自動車株式会社 松井仁志氏、日本冶金工業株式会社 天野景博氏、日本精線株式会社 楠瀬 暉氏の諸氏に、記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) ステンレス協会：改訂増補 ステンレス鋼溶接施工基準

- 2) 安田, 神馬, 恩沢：ティグ溶接によるステンレス薄板鋼板の高速片面溶接, 溶論 3 (3), 28
- 3) 日本溶接協会編：新版ティグ溶接法の基礎と実際
- 4) 小園, 小倉, 梶原, 小沼：SUS 薄板低周波パルス TIG 溶接部の表面温度と裏波ビード幅の関係, 本誌 52 (1), 45
- 5) 小園, 小倉, 梶原, 小沼：SUS 小径管全姿勢 TIG 溶接部の表面温度と裏波ビード幅の関係, 溶論 4 (2), 53
- 6) 益本, 篠田, 上野：オーステナイトステンレス鋼溶接金属の凝固割れにおよぼすパルス電流の効果, 溶論 7 (2), 79
- 7) 庵地, 丸山：各種溶接法による薄板アーク溶接, 本誌 57 (3), 38
- 8) 荒田, 西口：溶接法の基礎, 溶接全書 I, 52
- 9) 吉武, 中村：ステンレス鋼の溶接, 溶接全書 12, 134
- 10) 篠原, 杉本, 中尾：ステンレス鋼のプラズマアーク溶接におけるバックシールドガスの影響, 本誌 49 (10), 55
- 11) 三谷ら：SUS 304 鋼管のプラズマ溶接速度に及ぼす高周波予熱の影響, 溶論, 10 (2), 15
- 12) 松井：自動車におけるステンレス鋼の溶接, ステンレス 1992 年 2 月号, 3 月号
- 13) 溶接アーク物理研究委員会編：パルスアーク溶接, 1986
- 14) 松縄, 山本, 平本：パルスアーク溶接法, 本誌 53 (6), 20
- 15) 日本精線㈱：NAS 溶接材料ハンドブック
- 16) 日本精線㈱：NAS ステンレス鋼フラックス入りワイヤ, 技術資料 No. 2-402-1
- 17) 乾：最近のステンレス鋼用フラックス入りワイヤについて, ステンレス鋼の溶接講習会テキスト, 日本溶接協会, 平成 4 年
- 18) 田中：ステンレス鋼溶接の実際, 溶接法研究委員会 SW-2213-92
- 19) 相原：フラックス入りワイヤによるステンレス鋼溶接の実際, 本誌 61 (7), 18
- 20) 仲田ら：高電流密度・短時間通電方式スポット溶接の研究, 溶論 2 (1), 137, 溶論 4 (3), 97
- 21) 奥田ら：衝撃電流圧接法の開発と圧痕レス接合の実現, 溶接技術 34 (3), 25
- 22) 小林：インバータ制御抵抗溶接機, 溶接技術 33 (3), 28
- 23) 野田ら：インバータ制御溶接機の開発とステンレス鋼の溶接, 日本冶金技報 No. 2, 1993
- 24) 溶接学会抵抗溶接研究委員会：抵抗溶接現象とその応用 (I), 溶接学会技術資料 No. 8
- 25) 溶接学会抵抗溶接研究委員会：抵抗溶接現象とその応用 (III), 溶接学会技術資料 No. 10
- 26) 中村, 小林, 森本：抵抗溶接溶接全書 8, 146
- 27) 吉岡：溶接構造用マルテンサイト系ステンレス鋼, 本誌 57 (6), 33