タンデムアーク・MAG 溶接法による高速すみ肉溶接法の研究*

奥井 信之**, 大賀 進**, 斉藤 忠雄**, 鈴木 友幸***, 真木 成美***, 本間 弘之***

Study on High Speed Fillet Welding by Tandem Arc MAG Process*

by Nobuyuki OKUI**, Susumu OHGA**, Tadao SAITOH**, Tomoyuki SUZUKI***, Shigeyoshi MAKI***
and Hiroyuki HONMA***

Welded structures are composed of a large amount of the horizontal fillet joint whereby high speed fillet welding significantly influences on improvement of productivity. The "Tandem Arc MAG Process" here referred to is a newly developed process which realizes high speed horizontal fillet welding without any undercut by means of holding a stagnant molten metal formed between two electrodes. The authors have prepared the model of a molten metal pool, and researched relations among the displacement of molten metal and solidification point along a toe of weld metal. This research has been accompanied by studies on a distance between electrodes where stagnant molten metal is stably maintained as well as on current distribution to the leading and trailing electrodes. At the same time, a welding wire has been developed, that has excellent blowhole resistance in high speed welding. As a result, high quality welds have been obtained in a welding speed about 3 times as high as that of the conventional process.

The system is being applied to field work and proved that a process capability is improved to a great extent, thus the system is contributing greatly to productivity.

Key Words: High speed welding, Horizontal fillet welding, Tandem arc MAG processes, Stagnant molten metal, Electrodes distance, Welding current distribution to electrodes, Blowhole resistance wire, Displacement of molten metal, Solidification point of molten pool

1. 緒 言

船体や橋梁などの溶接構造物は板・骨構造により構成されており、殆どの場合、脚長5~8mm程度のすみ肉溶接が採用されている。これらの溶接の高速化を図ることは、単に溶接の能率を向上させるばかりではなく、部材が製造ラインに滞留する時間を短縮することになり、生産性の向上に大きく貢献する。最近では製造ラインへ各種の自動化装置が取り入れられる傾向にあり、溶接時間の短縮はますます重要な課題になってきている。

溶接速度を増していくと、アンダーカットやハンピングビード、ブローホールなどの発生が問題となることは良く知られている。そこで、水平すみ肉溶接の高速化における欠陥の発生機構とそれらの防止方法について溶融池モデルを用いて検討した。タンデムアーク・MAG 溶接法において、2電極間に溶融金属の溜りを安定に保持するための溶接条件を求めるとともに、耐ブローホール性の高い溶接ワ

イヤを開発した^{9,10)}。

これらにより、アンダーカットやブローホールがなく、スムーズなビード形状が得られる溶接法を開発し、実工事に適用した。簡便な装置によって高品質の溶接が高速で得られる実用性の高い溶接法であり、大幅な生産性の向上が認められた。

2. 高速溶接に関する考察

ここでは、溶接の高効率化や高速化を図る上で直面する種々の問題点について述べる。

2.1 グラビティ溶接

グラビティ溶接は、大変簡素な装置を用いて、一人の溶接士が複数台を同時に操作できるため、高効率の溶接法として最近まで広範囲に使用されてきた。しかしこの方法では、棒継ぎ箇所や溶接残し部などが多く発生し、後がかり作業が多い。また、溶接速度が遅いなどの欠点があり、現状以上の高効率は得難い。例えば、15 mm/s以上の溶接速度であれば、グラビティ溶接より高効率が得られるという試算がある。

*原稿受付 平成12年1月19日

**正 員 石川島播磨重工業(株) Member, Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co., Ltd.

***正 員 日鐵溶接工業(株) Member, Nippon Steel Welding Products & Engineering Co., Ltd.

2.2 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接において、楕円形の熱源形状を用いることにより高速化を達成している報告^{1,2)}がある。しかしサブマージアーク溶接は、大型のフラックス供給、回収装置が必要であり、ここで目的としている水平すみ肉溶接における 5~6 mm 程度の脚長は得難い。

2.3 ガスシールドアーク溶接

ワイヤを高速で回転させて熱源形状を拡大することにより高速化を図った報告^{3,4)}や、3本のワイヤを使用して同様の効果を得た報告⁵⁾がある。これらはいずれの場合も大型装置となり、複雑な制御が必要である。また、2セットの通常の CO₂ 溶接トーチを自動走行台車に搭載した簡単なプロセスによる方法も多く見受けられる。このプロセスは装置の構造が簡単であることが大きい利点であるが、溶融プールが二つに別れているため、6 mm 以下の脚長が得られないこと、溶接速度は 17 mm/s 程度が限界であることなどが欠点である。ここでは、この従来型の CO₂ タンデム溶接法の簡易性を失わずに前述の問題点を解決すべく、溶接の高速化について種々の検討を行った。

2.4 ガスシールドアーク溶接による高速水平すみ肉溶接

水平すみ肉溶接の高速化を図る場合、要求される脚長に見合った溶着量を得るために、より多くのワイヤ溶着量が必要となる。換言すれば、溶接速度が大きければ大きいほど、より高い溶接電流（入熱）が要求されることになる。一方、高速溶接においてはビード形成において次の問題が生じてくる。

- (1) 溶接速度を増して行くと、溶融プールの止端部に生じる凝固開始点： X_s （溶融池先端部を基準としたクレタ幅が最大となる位置）が前方へ移動し、同時に溶融金属の後退距離： X_m を大きくする。この様子を Fig. 1 に模式的に示す。 $X_s < X_m$ のときにアンダーカットが発生する¹⁾。
- (2) 高電流により溶融プールに作用するアーク力（プラ

Fig. 1 Conceptual figure of molten metal pool.

ズマ気流）が強くなり、溶融金属を不規則に変化させる。このため、高速溶接において正常なビード形状が形成され難くなる。すなわち高電流、高速溶接では、この溶融金属の挙動を改善する必要がある。

- (3) ショッププライマが塗布された鋼板にすみ肉溶接を施工する時、プライマが分解してガスが発生する。このガスが原因となり、ピットやブローホールを発生させる。

これらに対して何らかの対策が必要である。本研究では、これら問題の対策を検討した。

3. ガスシールドアーク溶接における高速水平すみ肉溶接の研究

3.1 高速溶接プロセスの検討と試験要領

前述のごとく溶接の高速化を達成する手段としては熱源形状を拡大する方法もあるが、簡便な方法で高速化を図ろうとする本研究には適していない。本研究の目的とするものには、従来のタンデム方式を改良して溶融金属を 1 プールとする方法が最適であると考えられた。本プロセスにおける二つの電極と溶融金属の状態を Fig. 2 に模式的に示す。狙いを下記に置いて検討した。

- (1) タンデム方式において、電極間に溶融金属を安定に保持できるように 2 本のワイヤを配置すること。
- (2) 熱源を二つの電極に分散して、溶融金属プールの止端部の凝固位置（ X_s ）が前方へ移動する距離を抑制すること。
- (3) 先行電極によるアーク力を電極間に安定に保持された溶融金属（以降湯溜りと呼ぶ）によって吸収させて、溶融金属の後退（ X_m ）を抑制すること。
- (4) FCW によるスラグは、水平すみ肉溶接のビード形成を容易にする効果が期待される。また FCW は高い溶着率が得られるため、比較的低電流の溶接条件を設定できる。

この実験で用いた CO₂ ガスシールドアーク溶接用の FCW はシームレスタイプで、フラックスの組成は主として TiO₂ である。SM-50B の鋼板、板厚：12.7 mm を用いて、逆 T 字型継手を組み立てた。また、一般に市販されている無機ジंकプライマ塗布鋼板（膜厚：20 μ m）も使用した。

水平すみ肉溶接のビード形状・形成能力は横断面のマクロ組織から計測した余盛率およびアンダーカットの有無により評価した。余盛率の模式図を Fig. 3 に示す。溶接品質の目標を脚長：5~6 mm、余盛率：20% 以下、溶接速度：20 mm/s 以上とした。

Fig. 2 Model of molten metal pool in 2-electrode welding (single pool).

Fig. 3 Rate of reinforcement in horizontal fillet welding.

3.2 高速溶接条件の検討

3.2.1 溶接ワイヤ (FCW) の溶着率

Fig. 4 は、本実験に用いた FCW の溶着率を 1 電極および 2 電極溶接について示したものである。この図から、目標とする溶接速度：20 mm/s 以上では溶着率：2.1 g/s 以上が必要であることがわかる。単電極が使用される場合にはより高い電流が必要となり、強いアーク力がビード形成に悪影響を与える。この実験においても単電極の場合は、溶接速度が 13.3 mm/s 以上で顕著な凸型ビードが認められた。これに反してタンデム・2 電極の場合は同じ溶着率を得るための合計電流は 1 電極の場合より高いが、2 電極に分散させることができる。すなわち、ビード形成に影響を与える後行極の電流を 1 電極の場合より大幅に低く設定できるので、タンデム方式が有利である。さらに、同じ電流による溶着率は、大径ワイヤより小径ワイヤの方が多く、言い換えると同じ溶着率を得るためには小径ワイヤの方が各電極の電流を低く設定できる。すなわち、大径ワイヤの組合せにより、より小径のワイヤの組合せが有利である。本実験では溶接電源と溶接条件の範囲を考慮して、1.6 mm 径の FCW を用いた。

3.2.2 2 電極溶接条件の検討

溶接条件が溶融金属の形状、および水平すみ肉溶接ビー

Fig. 4 Relationship between wire diameter, welding current and welding speed.

Fig. 5 Relations between power source polarity and bead formation.

ドに与える影響について実験を行った。

(1) 溶接電源特性の組み合わせ

溶接アークの方向によってビード形状が影響を受けることは良く知られている^{1,6)}ので、溶接電源の組合せ：DC-DC と DC-AC についてビード形状を比較した。ビード横断面のマクロ組織から余盛率を計測した結果を Fig. 5 に示す。同図から、DC-AC の組み合わせでは凸形ビードになり易く、DC-DC の方がビード形状が優れていることがわかる。また DC-DC の方が、アークが安定している。そのため以降の実験はすべて、DC-DC の組合せで行った。

(2) 電極間距離

電極間距離を変化させて溶接試験を行った。Table 1 に溶接条件と溶接結果をまとめて示す。この表から、2 電極水平すみ肉溶接における最適な極間距離は20~40 mm の範囲にあることがわかる。この範囲内では湯溜りが電極間に安定して形成され、熔融金属の後退 (X_m) は小さく、そのため良好なビード形状が得られている。極間距離が10 mm 以下では湯溜りが形成されず、アークの相互作用によってスパッタが頻繁に発生している。これらが良好なビード形成を阻害している。反対に、極間距離が50 mm 以上の場合は熔融金属が二つに分かれ、凸型ビードや部分的なアンダーカットが生じる。

(3) 先行極と後行極の電圧

Table 1 に示す溶接条件で、先行極の電圧のみを変化させて溶接試験を行った。先行極の電圧とアンダーカットとの関係を Fig. 6 に示す。アーク電圧の低い領域ではアンダーカットの発生が少ない。低いアーク電圧ではアーク力が影響する範囲が狭いために電極間に湯溜りを安定して保持し易い。先行極の電圧が高い場合は、電極間の湯溜りが安定しないため、不規則なビードとなる。反対に、後行極の電圧が低すぎた場合はアークの広がりがなくなり、湯溜りが後方に流れて凸形ビードになり易い。後行極のアーク

圧力が湯溜りの幅全体に及ぶ必要があるため、後行極の電圧はやや高めに設定する必要がある^{6,10)}。

(4) 先行電極と後行電極の電流配分

後行電極の電流 (I_T) を先行電極の電流 (I_L) に比べて極度に小さくすると、後行電極のアーク圧力が不足するため2電極間に湯溜りが形成され難くなる。また逆に、 I_T を I_L より大きくすると、後行極のアーク圧力が大きくなり、熔融プールの後退 (X_m) を大きくする。野村らは⁷⁾、2電極タンデム・サブマージアーク溶接における熔融池現象の検討から、 I_T/I_L が0.7付近で高速溶接限界速度が最も拡大され、この条件の下では先行電極によるくぼみと後行電極による

Fig. 6 Influence of arc voltage of the leading electrode on undercut.

Table 1 Effect of distance between electrodes on bead formation (DC-DC, 20 mm/s).

Wire diameter	Welding parameter					Arc Condition	Formation of stagnant molten metal	Bead shape	Rate of reinforcement of weld %
	Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Distance between electrode (mm)				
1.6 × 1.6	L	380	24	20	10	×	— (Not formed)	△ (Undercut)	23
					20	○	○ (Stable)	○	10
					40	○	○	○	16
	T	300	26		70	○	△ (Unstable, 2 pools)	△ (Undercut, convex bead)	38

○ : good △ : poor × : bad

くぼみの深さが等しくなると述べている。更に、 I_T が増加してゆくと後行アーク力の一部が先行電極にも及ぶようになり、先行電極アークは抑制され、溶鋼に対して作用する実行的なアーク力は減少すると述べている。タンデムアークMAG溶接においても同様のことが言えると考えられ、2電極間に湯溜りを安定して保持するためには I_L は、この作用による減少分だけ I_T より大きく設定する必要がある。本溶接法の場合においても、 I_T/I_L が0.7~0.9の範囲で最も安定した湯溜りが形成された。 I_T/I_L :0.8~0.9の場合について、合計電流と溶接速度を変化させて溶接し、ビード形状と脚長を調査した。その結果をFig.7に示す。例えば、溶接速度:25 mm/s, 脚長:5 mmを目標とした場合は、合計電流:680 A, I_T/I_L が0.8程度が適正溶接条件であろうことがこの図からわかる。

Fig.8に本プロセスによるビード横断面のマクロ組織の一例を示す。

Fig. 7 Relations between welding conditions and welding results.

Fig. 8 Cross sectional macro structure of horizontal fillet welding (2-electrode, 20 mm/s).

3.3 溶接試験結果の考察

(1) 電源特性の組合せ

溶接電源の組合せで、DC-DCの方がDC-ACより良好なビード形状が得られる理由は次のごとく考えられる。すなわち、各電極のアークは電流の流れる方向によって相互に吸引あるいは反撥する。一方の電極がACの場合はこの吸引・反撥を繰り返していると考えられ、反撥の時間は溶融金属の後退を助長している。これに対して、両方ともDCの場合は常に吸引されており、溶融池後方に向かう後行極によるアーク圧力が小さくなる¹⁾。すなわち、後行極のアークは溶融金属の後退を抑制する方向に一定して働いている。さらに、ACの場合は電流値が時間的に変化しており、その電磁圧力も時間的に変化している。これに対してDCは電流の脈動がなく、常に一定の電磁圧力が溶融金属に作用している。このため、電極間に湯溜りを安定に保持し易い。この結果は、伊藤らによる電極特性とビード形状に関する実験結果⁶⁾と一致している。

(2) アンダーカットの防止

アンダーカットを防止するためには、溶融金属の後退(X_m)を抑制すると同時に、凝固開始位置(X_s)の前方への移動を抑制し、 $X_m < X_s$ を満足させることが必要である。タンデム2電極における1プールが形成される場合では、この凝固開始位置は極間距離を差し引いた値で評価すべきである。Fig.9に、デカンティション試験から計測した凝固開始位置(溶融金属の前端から凝固点までの距離): X'_s , 電極間距離: D , 先行極の電圧, 溶接速度の関係を示す。ここに $X'_s = X_s - D$ である。極間距離:20~40 mmで X'_s が大きくなり、良好なビード形状が得られている。 X'_s がこれより短くなるとアンダーカットや凸型ビードを生じさせる。さらに、先行極のアーク電圧が高い場合も X'_s が短くなり、西らの報告¹⁾と同じ傾向を示している。溶接速度がさらに増大し30 mm/sを越えると、 X'_s が短くなり溶接ビードは悪化している。

一方溶融金属の後退は、溶融金属の温度差による表面張力対流⁸⁾や溶融池後方に向かうアーク圧力¹⁾によって生じると言われている。本溶接法の場合は、先行極のアーク圧力が2電極間に形成される湯溜りによって吸収されるので、 X_m は先行極には影響されず、後行極の特性によってのみ支配されると考えてよい。高速溶接における高電流は2電極に分散されるため、後行極によるアーク圧力を小さく抑えることができる。また、後行極を前進角とすること、及び2電極のアークが互いに吸引する方向に傾斜することにより溶融池後方に向かうアーク圧力が軽減される¹⁾。これらにより、本溶接法における X_m の増大は十分な範囲に抑制されており、アンダーカットを防止できる条件: $X_m < X_s$ を満足していると考えられる。

これまでの検討結果をもとに、ワイヤの狙い位置、トーチ角度、極間距離、先行電極のアーク電圧、先行電極と後

Fig. 9 Influence of welding conditions on solidification point along a toe of weld pool.

行電極の電流比などを最適値に設定した。これにより、溶接速度：20 mm/s 以上で、脚長：5～6 mm の良好なビード形状が確保されている。

3.4 耐ブローホール性の高い溶接ワイヤの開発

ショッププライマが塗布された鋼板が水平すみ肉溶接される場合、プライマが分解してガスを発生させ、ピットやウォームホールなどの欠陥の原因となる。このため従来の方法では、プライマを除去するかまたは溶接速度を下げる必要があった。プライマ塗布鋼板におけるこれらの欠陥防止を目的として、耐ブローホール性の高いワイヤを開発した。

(1) 溶接ワイヤの選定

ルチール系のフラックス入りワイヤはスラグ生成量が多く、スラグ被包性に優れているため平滑なビード形状を得る上で適している。本溶接法では、後行電極でビードを形成せしめるので、少なくとも後行電極にはこのワイヤを用いる。これに反して、後行電極にメタルフラックス入りワイヤやソリッドワイヤを用いると、スラグの被包性が悪くなり、スラグによるビードの平滑化は期待できない。また先行極にもルチール系ワイヤを用いると、スラグの生成量がさらに多くなり、平滑なビード形成に有利である。なお、この場合はスラグが過多となって、スラグの巻き込みやビード表面にガス圧痕が発生しやすくなるので、スラグ生成成分である TiO_2 の含有量を調整している。

(2) 耐ブローホール性の向上策

ショッププライマ塗布鋼板の溶接において問題となるブ

Fig. 10 Comparison of primer resistance between the developed wire and a conventional wire at welding speed of 20 mm/s (primer: inorganic zinc primer).

ローホールやピットなどの欠陥を防止するために、ルチール系フラックス入りワイヤの構成成分を改良した。これらを以下に列記する。

- (A) 金属弗化物及び金属炭酸塩など高温において分解しやすい成分を添加することによってアークの吹き付け力を増加させ、熔融金属の攪拌を促して熔融金属に取り込まれたプライマー熱分解ガスの放出を容易にする。これらの化合物をそれぞれ適正な範囲で添加した。
- (B) 金属弗化物の添加量を調整してスラグの融点、粘度を低く抑えることによって、スラグが熔融金属を覆うまでの時間を遅らせ、プライマー分解ガスの放出を促進する。
- (C) FCW の拡散性水素を非常に低いレベルに制御し、フラックス組成とスラグ量を最適化する。

無機ジンクプライマ塗布鋼板における耐ブローホール性について、今回開発した FCW を用いる 2 電極高速すみ肉溶接と従来型の FCW の場合を比較した。結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 から溶接速度：20 mm/s において、今回開発した FCW は従来の FCW に比べてピットおよびウォールホールが大幅に減少していることがわかる。この新しく開発した FCW：1.6 mm 径は、水平すみ肉溶接の高速化に大きく貢献している。

4. 高速すみ肉溶接の実工事への適用

4.1 溶接装置

船体構造のロンジ材は逆 T 字型継手であり、この両側のすみ肉溶接を同時に行うために片側 2 トーチ（両側で 4 トーチ）を搭載した溶接装置を開発した。この装置はロン

ジ材に沿って、自走台車を部材に倣わせる所謂斜交倣いで走行させ、同時にトーチを溶接線に倣わせる方式を採用している。非常に簡単な構造であり、操作も大変簡単である。

4.2 実工事への適用

この溶接装置は、船体構造のアッセンブリ工程におけるロンジ材の溶接やビルトアップ H 型材の製造工程に使用されている。今日まで 30,000 m 以上の継手に適用された。実工事への適用状況を Fig. 11 に示す。これまで片側単電極の溶接プロセスがロンジ材の溶接に長く適用されてきた。また、2 プール方式のタンデム溶接法も試験的に適用された。Table 2 に、今回開発した 2 電極 1 プール溶接プロ

Fig. 11 Application of the “Twin Arc MAG Process” to field works.

Table 2 Comparison of characteristics among three kinds of twin arc processes.

Process Properties	Single Twin Arc Process	Tandem Twin Arc Process	
		Conventional Process	New Process
Layout of welding torches			
Formation of molten metal pool	One-pool	2-pool	One-pool
welding parameters	Right : 1.2 φ / 280 A	Right L ₁ : 1.6 φ / 400 A T ₁ : 1.2 φ / 270 A	Right L ₁ : 1.6 φ / 400 A T ₁ : 1.6 φ / 310 A
	Left : 1.2 φ / 280 A	Left L ₂ : 1.6 φ / 400 A T ₂ : 1.2 φ / 270 A	Left L ₂ : 1.6 φ / 400 A T ₂ : 1.6 φ / 310 A
Leg length	Minimum 5 mm	Minimum 6.5 mm	Minimum 5.5 mm
welding speed	6.7 mm/s	15 mm/s	20 mm/s
Process capability	500 m/d	—	1 400 m/d

セスの特徴を従来法と比較して示す。単電極、および従来型のタンデム溶接法に比べて、溶接速度のみならず1日当たりの溶接量も3倍に向上している。一方この溶接法は、従来型のタンデム溶接（2プール方式）に比べてより小さい脚長が得られ、さらにピットやウォームホール、アンダーカットの発生を1/3～1/4に減少させることができ、実用性に優れた溶接プロセスであると言える。このプロセスを導入することにより、高品質、高能率の溶接が得られ、生産性を大幅に向上させることができる。

5. 結 言

船体や橋梁などの溶接構造物はすみ肉継手が多い。このすみ肉溶接の高能率化と生産性の向上を目的として、タンデムアーク・MAG 溶接法をベースとした溶接の高速化について研究した。高速溶接で問題となるアンダーカットの防止方法として、2電極間に湯溜りを安定に保持する方法が有効であることを明らかにした。同時に、無機ジンク・ショッププライマ塗布鋼板の高速溶接において、優れた耐ブローホール性を有する溶接ワイヤを開発した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高速溶接では熔融金属の止端部に生じる凝固開始位置 (X_s) が前方へ移動し、同時に熔融金属の後退 (X_m) が大きくなる。 $X_m > X_s$ の時にアンダーカットが発生する。
- (2) 2電極間に湯溜りを安定して保持させて、先行極のアーク力をこの湯溜りに吸収させることによって、 X_m の後退及び X_s の前進を防止できる。湯溜りは次の方法によって電極間に安定して保持させた。
 - ・極間距離：15～40 mm をキープする。
 - ・先行極の電流 (I_L) と後行極の電流 (I_T) の比 (I_T/I_L) を0.7～0.9程度とする。
 - ・先行極のアーク電圧を比較的低い電圧とする。

これらにより溶接速度：20 mm/s 以上で、アンダーカットの発生がない条件である $X_m < X_s$ を満たすことができた。

- (3) 耐ブローホール性に優れた溶接ワイヤを開発した。スラグ被包性の確保、熔融金属の攪拌作用の付加、スラグ粘性の調整、拡散性水素の低減などに重点を置いた。
- (4) このプロセスは実工事に適用され、溶接欠陥の減少、高能率、生産性の向上に大きく貢献している。

謝 辞

本研究は、新日本製鐵株式会社、新日鐵溶接工業株式会社、石川島播磨重工業株式会社の三社による共同研究として実施され、関係各位から多大のご協力を頂きました。また本稿をまとめるにあたり、大阪大学工学部教授 豊田政男工学博士に多くの貴重な助言を頂きました。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 西, 藤田, 長谷場, 小原：高速サブマージアーク溶接法の研究(第1報), 本誌, 51-10 (1982) 68-74.
- 2) 小原, 藤田, 長谷場, 西：高速サブマージアーク溶接法の研究(第2報), 本会論文集, 1-2 (1983) 31-36.
- 3) 野村, 杉谷, 村山：高速回転アーク隅肉溶接法の開発, 本会論文集 4-3 (1986) 18-23.
- 4) 杉谷, 小林, 村山, 中野, 溝渕：高速回転アーク多電極隅肉自動溶接装置の開発, NKK 技報, No.124 (1988) 93-100.
- 5) 藤村, 井手, 井上：高速アーク溶接法の開発, 三菱重工技報, Vol. 26 No. 3 (1989) 223-228.
- 6) 伊藤, 池田, 山内：サブマージアーク・タンデム方式におけるビード形成に関する研究, 本誌, 39-10 (1970) 101-108.
- 7) 野村, 杉谷, 辻：サブマージアーク溶接溶融池現象, 本誌, 51-9 (1982) 43-51.
- 8) 安藤, 西川, 井上：高電流・高速 MIG 溶接における溶融池現象に関する研究, 本誌, 40-4 (1971) 51-55.
- 9) Okui, Ohga, Saitoh, Suzuki, Maki, Homma: Study of High Speed Fillet Welding by Tandem Arc MAG Process, EVAL-MAT 89, Nov. 1989 803-810.
- 10) 鎌田, 鈴木, 奥井：高速水平すみ肉溶接法 (HS-MAG 法), ガイドブック『アーク溶接の自動化技術』本会, 溶接法研究委員会編, June, 1995 II-92-II-96.