TIG-MIG 複合溶接法の基礎的検討*

金丸 周平**, 佐々木智章***, 佐藤 豊幸**, 田中 学****

Basic Study on TIG-MIG Hybrid Welding Process*

by KANEMARU Shuhei**, SASAKI Tomoaki***, SATO Toyoyuki** and TANAKA Manabu****

TIG and MIG welding are most popular gas shielded arc welding processes used on many industrial fields. MIG welding is high efficiency process compared to TIG welding, however it is needed to improve the quality about spatter and weld metal toughness for advanced GMA process. Although pure Ar shielding gas is desirable for weld metal toughness, MIG arc is unstable in pure Ar shielded condition due to the irregularly behavior of cathode spot on plate surface and suitable welding execution is difficult. We found that MIG arc becomes stable even though in pure Ar shielded condition by simple hybridization of TIG and MIG. Therefore, this process has high possibility as new type of high quality and high efficiency welding process. In this study, we investigated the influence of hybridization condition such as TIG-MIG current balance, distance between the both arcs and torch angles on stabilization of the process and confirmed the suitable range of the condition. The main results are as follows: (1) TIG current is needed to be larger than MIG current for stabilization of MIG arc. (2) According to increase of the distance between the both arcs, MIG arc shows high arc voltage and becomes unstable. (3) On the condition of small angle between the both torches, as thirty degree, MIG arc is deflected toward back by repulsion with TIG arc and bead shape becomes convex.

Key Words: TIG welding, MIG welding, Pure Argon shielding gas, Hybridization, High efficiency, High quality

1. 緒 言

現代産業において広く利用されるガスシールドアーク溶接法として、代表的なものの中に TIG 溶接と MIG (MAG) 溶接がある。TIG 溶接は、純 Ar シールドかつ非消耗電極式のノンスパッタ溶接により、高品質な溶接部が得られるのが特徴であるが、溶着効率と溶接速度が小さいため、能率向上が課題とされる。一方、MIG 溶接は、電極ワイヤ自体がジュール熱とアーク熱によって溶着する、消耗電極式の高エネルギープロセスであるが、スパッタの発生や、ビードの表面酸化および溶接金属中の酸素量増加に伴う靱性劣化（これらはアーク安定化の為にシールドガス中に添加される酸化性ガスに起因する）といった、品質面での課題を有する¹⁾。

ところで、鉄系材料における MIG 溶接では、純 Ar シールドで溶接を行うと、アークの母材側通電点である陰極点が不安定となり、アークのふらつきやアーク長の不規則変動が起きる為、ビード不整やブローホール等の欠陥発生を引き起こし、良好な溶接が困難となる²⁻⁴⁾。Fig. 1 (a) に、純 Ar シールド

で MIG 溶接の不良ビードの一例を示す。陰極点ふらつきの形跡として、ビード周辺に広がったクリーニング領域が認められ、ビード止端が揃わず蛇行した不良ビードとなっている。

これに対して、シールドガスに O_2 あるいは CO_2 といった O 元素を含む酸化性ガスを添加すると、陰極点が安定に発生して良好な溶接が可能となる。このため、従来 MIG 溶接のシールドガスには、Ar と O_2 、あるいは Ar と CO_2 の混合ガスが使用されてきた。酸化性ガスの添加によってアーク陰極点が安定する理由は、母材表面で酸化物が生成することによると言われている³⁻⁵⁾。Fig. 1 (b) に、シールドガスとして Ar-2% O_2 を使用した従来 MIG 溶接によるビード外観の一例を示す。

(a) MIG (100%Ar Shielding gas)

(b) MIG (Ar-2% O_2 Shielding gas)

Fig. 1 Bead appearance of conventional MIG welding

*受付日 平成23年9月28日 受理日 平成24年1月13日 平成22年度秋季全国大会で発表、平成23年5月溶接法研究委員会で発表
**正 員 大陽日酸株式会社 Member, TAIYO NIPPON SANSO Corporation
*** 大陽日酸株式会社 TAIYO NIPPON SANSO Corporation
****正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute Osaka University

陰極点ふらつきの形跡はなく、ビード止端が揃った良好なビードが形成されている。しかしながら、シールドガス中の O 成分によるビード表面の酸化は避けられず、また溶接金属中の酸素固溶量についても、母材と比較して多量となる¹⁻³⁾。

以上に述べた通り、溶接品質の観点からは純 Ar シールドでの溶接が望ましいものの、MIG 溶接への適用には技術的な課題がある。このため、近年の溶接業界では、純 Ar シールド条件下でも安定な接合プロセスが可能なクリーン MIG 溶接実現への要望が高まっている⁶⁾。

著者らは、この純 Ar シールド条件下での MIG アーク陰極点の不安定挙動に対し、TIG と MIG のアークを向き合わせてアーク間距離や電流バランスの各複合化条件を調整するのみの簡便な複合化によって、陰極点ふらつきが解消し十分な MIG アーク安定性が得られ、溶込み・形状ともに良好なビードが得られることを見出した。したがって、TIG-MIG 複合化により純 Ar シールド条件下でも安定なクリーン MIG 溶接プロセス、すなわち TIG の高品質と MIG の高能率を両立した新しい溶接プロセスの実現が期待できる。また、先行 TIG-後行 MIG の電極配置により、先行 TIG による溶込み制御と、後行 MIG による溶着量制御を独立に行うことができる特徴も見込まれる。

TIG と MIG の複合化プロセスについては、過去にいくつかの実施例があり、その中で既に、シールドガスとして純 Ar シールドガスを用いた TIG と MIG の複合溶接で、良好な結果が得られることが報告されている⁸⁻¹²⁾。しかし、これらの報告では、多電極のアーク溶接において生じるアーク干渉を排除するために両電極の溶接電流を交互に切り替える手法^{8, 10, 11)}や、アークに磁場を付加すること^{9, 12)}によって干渉を制御する手法がとられている。これは、TIG-MIG 複合化においては両アークに互いに逆向きの電流が流れて反発作用が働き、溶接が不安定化すると考えられてきたことによる⁷⁻⁹⁾。しかしこれらの手法では、特殊な電源や磁場付加の設備を必要とするため、装置としては大掛かりとなり、幅広く実用性に優れた溶接法として使用されるには、より簡便な手法によるプロセスであるのが望ましい。

そこで本研究では、実用性に優れた TIG-MIG 複合溶接法の確立を目指し、電流バランス、アーク間距離、トーチ角度といった基本的な複合化条件の調整のみによって純 Ar シールド MIG のアークが安定化できるよう、各条件値が溶接に及ぼす影響を評価し、適正な条件範囲について検討した。

2. 実験方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を、Table 1 に基本溶接条件を示す。TIG 電源として日立製デジタルベアティグ電源（型式：AD-DG 500 A）、MIG 電源としてダイヘン製ターボパルス 500（型式：CPVP-500）を使用した。溶接においては、先行 TIG および後行 MIG のアーク配置とし、まず TIG アークを起動し、溶融池が形成した後、MIG アークを起動した。オシ

Fig. 2 Experimental set up

Table 1 Welding condition for TIG-MIG welding

	Range of condition	Basic condition
Base metal	SUS304 t12mm	
Joint	Bead on plate	
Current	Leading TIG : 150~500A	TIG : 350A
	Trailing MIG : 230~270A	MIG : 230~270A
Welding speed	30cm/min	
Wire feed speed	9~10m/min	
Distance between the arc	0~16mm	4mm
TIG electrode	2%La ₂ O ₃ φ 4.0 tip angle 30°	
TIG arc length	5mm	
MIG wire	Y308 φ 1.2	
MIG wire extension	25mm	
Torch angle (TIG/MIG)	-15~-60° / +15~+60°	-30° / +30°
Shielding gas	TIG : 15 L/min	
	MIG : 30 L/min Shielding BOX : 80 L/min	

ロスコーブにより、TIG および MIG の電流・電圧波形およびその実測値を測定し、溶接入熱と溶接安定性（主に短絡有無）を確認した。また、溶接現象観察のため、高速カメラを使用して溶滴移行・アーク状態を観察した。

はじめにビードオンにて、Table 1 右の基本条件で溶接を行い、アーク現象およびビード外観・形状といった結果について観察した。

次に、TIG と MIG の電流バランスおよび、アーク間距離、トーチ角度の各条件を変更し、同様の観察によりその影響を評価した。

各条件における後行 MIG 電圧の調整にあたっては、一定のワイヤ送給量に対して、ワイヤ短絡が起きず溶滴が自由移行となる下限近く、あるいは微小短絡が起きる程度の電圧値を適正として、溶接時に調整を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 ビードオン基本条件における溶接挙動観察

Fig. 3 (a)~(d) に、ステンレス鋼におけるビード外観、高速カメラ観察写真、MIG 溶接の電流電圧波形、断面マクロを示す。溶接条件は Table 1 右の基本条件である。

1) ビード外観・断面マクロ

止端が揃った良好なビード外観が得られた (Fig. 3 (a))。ビ

ード周辺にクリーニング作用の形跡がないことが、陰極点がふらつくことなく MIG アークが安定に発生したことを示している。また純 Ar シールドによって、表面酸化が少なく光沢あるビード外観が得られた。

溶込み深さは 4.1 mm であり十分な溶込みが得られた。Ar ベースのシールドガスによる MIG 溶接特有の中央が深く溶け込んだ溶込み形状となった (Fig. 3 (b))。

2) アーク挙動・溶滴移行観察・電流電圧波形

TIG と MIG の両アークが電磁作用によって互いに反発し、離れ合う方向へと曲がって発生する様子が観察された (Fig. 3 (c))。高速カメラ観察において、純 Ar シールド MIG 溶接でみられる陰極点のふらつきは、発生していなかった。MIG ワイヤの溶滴移行としては、先端が細長く伸びたストリーミング移行となり、スパッタの発生は無く、短絡のない安定した溶接挙動が認められた。また、後行 MIG の電流電圧波形においても短絡箇所は認められず、安定した溶滴移行であったことを裏付けている (Fig. 3 (d))。

3.2 電流バランスの影響

プロセス安定化に適した TIG-MIG 電流バランスの条件について検討するため、電流バランスが及ぼすビード形状およびアーク安定性への影響を評価した。MIG 電流の入力値を 270 A (ワイヤ送給量 10 m/min) で一定とし、TIG 電流を 150 ~ 500 A の範囲で変更した。ここで、MIG 電流を一定としたのは、MIG 溶接では電流・ワイヤ送給量によって溶滴移行形態が変化して複雑に溶接現象に作用するため、溶滴移行形

態としてはスプレー移行となる条件で MIG 側の電流を固定し、TIG 電流変化による影響を検討したことによる。なお、TIG 電流以外の条件は Table 1 右の基本条件とした。

Fig. 4 に、一定の後行 MIG 電流に対して TIG 電流を変化させたビード外観・断面マクロを示す。また参考までに、TIG 電流がゼロ、すなわち MIG 溶接単体の場合の結果も併せて示す。

電流値が $TIG \geq MIG$ の関係となる TIG 250 ~ 500 A においては、基本条件と同様の安定なアーク挙動・ビード形成が認められた。一方、 $TIG < MIG$ となる TIG 150 ~ 200 A においては、MIG アーク陰極側において広範囲に渡るクリーニング作用がみられ、スパッタも多量に発生した。また高速カメラ観察において陰極点のふらつきが確認された。しかしながら、ビード形状としては先行 TIG 無しの条件と比べると、蛇行は軽減され、相対的には良好な結果が得られた。このことから、母材表面上の陰極点ふらつきを解消し、安定にアークを発生させるための TIG 電流値としては不十分な量であっても、先行 TIG アークの存在は、後行 MIG アークに対して、ある程度の安定化効果を与えていると考える。また、TIG 200 A において TIG 電圧が 1.4 V と通常のアーク溶接では考えられない値を示しており、TIG による MIG 安定化効果の要因を示唆している。これに関する考察については後述する。

Fig. 5 に、先行 TIG 電流値に対する、溶込み深さの変化を示す。基本的な傾向として、電流が大きくなるほど溶込み深さは大きくなった。電流バランスが $TIG \geq MIG$ となる TIG 電流 250 A から 500 A の範囲においては、電流増加に対する溶込み深さの増加率は、TIG 電流値の増加率とほぼ一致した。一方、 $TIG \geq MIG$ の関係が成立しない TIG 200 A 以下の範

(a) Bead appearance

(b) Cross section

(c) Image of high speed camera

(d) Current-Voltage wave of trailing MIG

Fig. 3 Experimental data of TIG-MIG welding on basic condition

TIG (A) [TIG/MIG voltage]	Bead Appearance	Cross Section
500 [17V/19V]		
400 [14V/23V]		
300 [13V/23V]		
200 [1.4V/34V]		
0 [-/38V]		

Fig. 4 Influence of leading TIG current on bead appearance and penetration shape

Fig. 5 Influence of leading TIG current on penetration depth

Distance (mm) [TIG/MIG voltage]	Bead appearance	Cross section	Image of High speed camera
16 [16V/29V]			
12 [15V/28V]			
8 [15V/25V]			
4 [16V/21V]			
0 [15V/22V]			
0 [15V/13V]			

Fig. 6 Influence of distance between TIG and MIG arc on bead appearance and penetration shape

囲では、溶込み深さは TIG 電流の変化に相関せずにはほぼ一定値となる傾向がみられた。

以上より、MIG アーク陰極点安定化のためには $TIG \geq MIG$ の電流バランスが必要となり、その条件を満たす領域では先行 TIG 電流に依存して溶込みが増加することがわかった。

3.3 アーク間距離の影響

アーク間距離によるアーク現象・溶接結果への影響評価を行った。アーク間距離を 0～16 mm の間で変更し溶接を行った。アーク間距離 0 mm の条件においては、MIG 電圧が高い条件と低い条件の 2 通りを実施した。なお、板厚および距離以外の条件は Table 1 右の基本条件とした。ビード外観および断面マクロを Fig. 6 に示す。

ここで、純 Ar シールド条件にも拘らずビード表面に酸化

が認められるが、これは 3.1 および 3.2 においてはアーク発生部分を覆うシールドボックス内で溶接を行っているのに対し、3.3 および 3.4 のアーク間距離・トーチ角度の実験では距離・角度が大きい条件において 2 本のトーチがシールドボックス内に収まらない構造上の制約から、いずれの条件でもシールドボックスなしで溶接を行ったためである。ビード表面に酸化がみられるもののアーク直下の溶融部は各トーチからのシールドガスによって覆われているため、純 Ar シールド中のアーク溶接としての評価はできていると考えるが、本実験の結果はトーチ間およびトーチ外周からの大気巻き込み等の要素については、前記のシールドボックス内での溶接とは異なる条件下で、距離および角度の影響を比較した結果である。

距離 0 mm の条件においては、MIG 電圧を低減してワイヤ先端が溶融池に接触する状態であっても、安定な微小短絡を伴う溶滴移行となり、大きなスパッタは発生せず安定な溶接が可能であった。これは、距離 0 mm では、MIG ワイヤ先端が TIG アーク直下に挿入される配置となるため、先端は常に溶融された状態となり、短絡によってワイヤ先端が弾け飛ぶ現象が小規模になったことが原因と考える。MIG 電圧値を増大すると、短絡のない自由移行となった。

距離が大きくなるほど MIG の適性電圧値が増大した。これは、距離の増大により先行 TIG によるワイヤへの加熱効果が減少したことによって、ワイヤを溶融しスプレー移行とするために必要な電圧が、より大きい値となったと考える。

ビード形状としては、距離が大きいくほどビード幅は広くなり、一方、近距離ではビード幅が狭い凸形状となった。特に距離 0 mm の近接した条件においてビード形状は凸となった。一方、溶込み深さについては距離に依存した顕著な変化はみられなかった。

距離によるビード形状の変化については、MIG アークの前進角に依存した結果であると考えられる。従来の MIG 溶接においては、トーチ前進角が大きいほど、ビード形状は幅広で平坦となり、溶込み深さが小さくなるのが一般的に知られている。距離が小さくなるほど反発が大きくなり、MIG アークが後方へ吹かれた結果、アークの前進角としては後退角へと近づき、ビード幅が狭くなったと考える。アーク間距離 0 mm において、ビード形状が顕著に凸化したのは、MIG 電圧が高い条件においては、近距離において MIG アーク前進角がより大きく変化した為と考える。一方 MIG 電圧が低い条件においては、アーク長が短くなり、母材へのアークによる加熱範囲が狭まった為と考える。

3.4 トーチ角度の影響

トーチ角度の変化によるアーク現象・ビード外観への影響評価を行った。トーチ角度を次の 4 つの条件で溶接を行った。(1) $-15^\circ/+15^\circ$, (2) $-30^\circ/+30^\circ$, (3) $-45^\circ/+45^\circ$, (4) $-60^\circ/+60^\circ$ 。トーチ角度以外の条件は、Table 1 右の基本条件とした。結果を Fig. 7 に示す。

Torch angle (degree) [TIG/MIG voltage]	Bead appearance	
	Cross section	Image of High speed camera
-15/+15 [14V/22V]
-30/+30 [14V/24V]
-45/+45 [15V/26V]
-60/+60 [15V/31V]

Fig. 7 Comparison of torch angles of TIG and MIG

角度が大きいほど、MIG 適正電圧が増大し、かつビード幅は大きくなり形状として平坦なビードが得られた。角度 90° , 120° では、アークフレームが中央で干渉し上方へと吹き上がる様子が観察された。一方、角度 30° においては、MIG のアークフレームは反発により垂直下方よりも後方へ発生し、これに伴ってワイヤ先端および溶滴も後方へと落下した。

トーチ角度によるビード幅の変化については、3.3 で述べた考察と同様に、MIG アークの前進角に依存すると考えられ、トーチ角度に依存したビード幅の変化が結果に現われたものと考えられる。

一方、溶込み深さについては、トーチ角度が変化したにも関わらず、実験結果では顕著な差はみられなかった。従来 MIG 溶接において前進角増大により溶込み深さが小さくなる理由は、溶融池が先行することによってアーク力による母材の掘り下げが低減するためとされている。しかし、TIG-MIG 複合溶接においては、いずれの角度においても先行 TIG により溶融池が形成されているため、いずれの角度においても溶融池先行の度合いがほぼ等しく、そのため溶込み深さの顕著な差は現れなかったと考える。

3.5 TIG-MIG 複合溶接における純 Ar-MIG アーク現象に関する一考察

TIG-MIG 複合溶接においては、純 Ar シールドにおいても、母材表面上における MIG アークの陰極点がふらつくことなく、良好な溶接が可能となる。このアーク安定化は、TIG との複合化によるものと考えられ、次の 2 つの寄与が考えられる。

ひとつには、先行する TIG による母材表面の加熱による影響が挙げられる。熱陰極表面における電子放出は、材質の仕事関数と温度によって決まり¹³⁾、母材表面が溶融し高温になることで熱電子放出が促されアーク安定化に寄与する可能性があると考えられる。一方、熱電子放出のみで十分な電流密度を得るには、理論上 3000 K 以上の表面温度となる必要がある。MIG 電流 280 A の一般的な MIG 溶接条件において、溶融池の表面温度は 1800 K 付近との計測結果が報告されており¹⁴⁾、更には、鉄の沸点は 3023 K であるが、現象観察においていずれの条件でも溶融池表面が沸騰するような現象はみられなかった。しかしながら、TIG 溶接のタングステン電極に比べて溶融池は表面積が圧倒的に大きく、3000 K 以下の温度域でも熱電子放出によって比較的に大きな電流値を賄うことが可能であると推察される。

さらに、溶融池温度の上昇に伴い、溶融池からの金属蒸気の発生量が増加すると考えられる。金属蒸気存在によって、アークプラズマの電気伝導性が高まり、電流経路をはじめとするアーク諸特性に大きな影響を与える可能性がある^{15, 16)}。

そのひとつとして、TIG-MIG 電極間の電流経路の形成が考えられる。TIG 溶接におけるタングステン電極は、熱陰極としての電子放出機構が確立されており、熱電子放出のみで十分な電流密度を得ることができる。両電極が近接した本実験の条件下において、TIG 電極を陰極、MIG 電極を陽極とするアークが安定に発生できる可能性は高い。

3.2 において、TIG < MIG の条件では TIG 電流に関わらず溶込みは一定となり、TIG 200 A において TIG 電圧が 1.4 V と測定され、母材との電位差がほとんどない状態となった。この条件では、TIG 電流はほぼ TIG-MIG 電極間の電流経路を形成し、母材にはほとんど流れ込んでおらず、TIG $\geq$ MIG の条件において、余剰の TIG 電流が母材に流れることで溶込み深さが大きくなっていると考えられる。

しかしながら、TIG < MIG の電流バランスとなる TIG 200 A の条件であっても、TIG と MIG それぞれのアークフレームは電極に沿って母材へと発生し、両アークが電磁力により反発しあう様子が確認された。また TIG-MIG 電極間のアーク放電のみの現象であれば、MIG ワイヤからの溶滴は TIG 電極に向かって移行するはずであるが、TIG 電流が MIG 電流とほぼ等しくなる TIG 250 A の条件においても、そのような現象はみられなかった。よって、完全なる TIG-MIG 電極間のアークが形成されている訳ではないと考える。

以上より、TIG との複合化による純 Ar MIG アーク安定化への作用として、表面加熱による熱電子放出の促進と、TIG～MIG 電極間の電流経路形成による TIG 電極からの電子供給が挙げられ、いずれの機構によっても十分な説明には至らないものの、これらの因子は深く影響しているものと考察する。

4. 結 言

TIG-MIG 複合化による純 Ar シールドでも安定な、高品質・高能率な溶接プロセスについて検討した。電流バランス、アーク間距離、トーチ角度がプロセスに及ぼす影響を検討し、以下に示す実験結果、考察を得た。

- (1) 電流バランスは、 $TIG \geq MIG$ の関係であることが、MIG アーク安定化に必要であり、先行 TIG 電流が MIG 電流よりも小さくなると、陰極点のふらつきが発生し、MIG アークは不安定化することがわかった。
- (2) 電流バランスが $TIG \geq MIG$ の関係を満たす条件では、先行 TIG 電流値に依存して溶込みが増加し、一方 $TIG < MIG$ の関係となる条件では、溶込みは TIG 電流値と関連しなかった。
- (3) アーク間距離について、距離が大きいほど MIG 適正電圧の増大およびビード幅の広がりがみられ、一方距離が小さいほどビード幅は狭くなり、ビード形状は凸となった。
- (4) トーチ角度について、角度が大きいほど MIG 適正電圧は増大した。向き合い角度大の条件 (90° , 120°) では、アークフレームの上方への吹き上がりが顕著となり、向き合い角度小の条件 (30°) では、MIG アークが後方へ吹かれた。
- (5) アーク間距離およびトーチ角度は、小さいほどビード幅が狭くなり形状は凸となり、大きいほどビード幅は広くなり平坦な形状となった。これは、MIG アーク側の前進角に依存してビード形状が決まると考えられる。
- (6) TIG-MIG 複合化における純 Ar シールド MIG アークの安定化に寄与する作用として、TIG の母材表面加熱による熱電子放出増加と、TIG～MIG 電極間の電流経路形成が考えられる。

参 考 文 献

- 1) O. Kamiya, H. Fujita, T. Enjo, Y. Kikkuchi: Oxygen Content and Fracture Toughness on MIG Weld Metal of SUS 304 Steel, Quarterly Journal of Japan Welding Society Vol.3, No.3 (1985),

- pp138-145. (in Japanese)
- 2) 松田福久, 牛尾誠夫, 才川至孝, 丸山裕, 荒谷雄: 純 Ar・MIG 溶接アーク現象について - アークの安定性とクリーニング域 -, 溶接学会全国大会講演概要第28集 (1981), pp150-151.
- 3) F. Matsuda, M. Ushio, S. Saikawa, Y. Maruyama, T. Araya: Study on GMA Welding for 9% Ni Steel with Similarly Composed Nickel Alloy Wire, Journal of Japan Welding Society Vol.82 (1983), No.3, pp66-73. (in Japanese)
- 4) S. Zenitani, T. Nakamura, K. Hiraoka, K. Shinozaki: Ar-MIG Arc Behavior in Local Addition of Small Amount of Oxygen into Shielding Gas, Quarterly Journal of Japan Welding Society Vol.25, No.1 (2007), pp187-195. (in Japanese)
- 5) 安藤弘平, 長谷川光雄: 溶接アーク現象 6 版, 産報 (1976), pp94-95.
- 6) Y. Komizo: An outline of NEDO project "Fundamental Studies on Technologies for Steel Materials with Enhanced Strength and Functions", Journal of Japan Welding Society Vol.78 (2009), No.6, pp11-14. (in Japanese)
- 7) Y. Ito, M. Ikeda, N. Yamanouchi: The Studies of Bead Formation in Submerged Arc Tandem Method, Journal of Japan Welding Society Vol.39 (1970), No.10, pp101-108. (in Japanese)
- 8) S. Kokura, M. Nihei, E. Ashida, F. Taguchi, I. Sejima: Studies on Twin Electrode Switching Arc Welding Method (Report 5) Journal of Japan Welding Society Vol.52 (1983), No.3, pp42-46. (in Japanese)
- 9) H. Kobayashi, Y. Nakamura: Arc Phenomena and Bead Formation in TIG-MIG Arc Welding, Journal of Mechanical Engineering Laboratory Vol.37 (1983), No.2, pp49-59. (in Japanese)
- 10) S. Kokura, M. Nihei, E. Ashida, A. Shida, F. Taguchi: Studies on Twin Electrode Switching Arc Welding Method (Report 6) Quarterly Journal of Japan Welding Society Vol.1 (1983), No.3, pp28-33. (in Japanese)
- 11) S. Kokura, M. Nihei, E. Ashida, F. Taguchi: Studies on Twin Electrode Switching Arc Welding Method (Report 7) Preprints of The National Meeting of Japan Welding Society, Vol.34 (1984), pp48-49. (in Japanese)
- 12) H. Kobayashi, Y. Nakamura, S. Nakahara: Studies on TIG-MIG Arc Welding (II), Journal of Mechanical Engineering Laboratory Vol.38 (1984), No.3, pp117-128. (in Japanese)
- 13) J. F. ランカスター: 溶接アークの物理初版, 社団法人溶接学会溶接アーク物理研究委員会 (1990), pp133-135.
- 14) K. Yamasaki, E. Yamamoto, K. Suzuki, K. Suzuki, F. Koshiishi, S. Miyazako, S. Tashiro, M. Tanaka, K. Nakata: The Surface Temperature Measurement of Weld Pool by Infrared Two-Color Pyrometry, Quarterly Journal of Japan Welding Society Vol.27 (2009), No.1, pp34-40. (in Japanese)
- 15) K. Yamamoto, M. Tanaka, S. Tashiro, K. Nakata, K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki: Numerical Simulation of Metal Vapor Behavior in Gas Tungsten Arc Welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society Vol.25 (2007), No.3, pp443-449. (in Japanese)
- 16) J. J. Lowke, M. Tanaka, A. B. Murphy: Metal Vapor in MIG Arcs can cause (1) minima in central Arc Temperatures and (2) Increased Arc Voltages, Welding in the World, Vol.54 (2010), No.9/10, ppR292-R297.