

TIG-MIG 複合溶接法の開発

— 純不活性シールド MIG による高品質・高能率溶接の実現 —

大陽日酸株式会社 開発・エンジニアリング本部
金丸 周平

1. はじめに

ガスシールドアーク溶接法は、能率と作業性に優れ、安定な溶接品質を確保できる実用的な溶接プロセスとして、現在、あらゆる産業において利用されている。その代表的なものとして、ティグ（以下、TIG）溶接とマグ（以下、MAG）溶接があり、TIG 溶接は高品質プロセス、MAG 溶接は高能率プロセスと位置付けられ、各々棲み分けられた施工対象において、プロセスの選択および適用がなされている。

近年では、材料や構造物の高度化に伴い、溶接法への要求も高まる中で、TIG 溶接には高能率化が、MAG 溶接には高品質化が求められている。なかでも、特徴的な要求のひとつに、純不活性シールドガスでも安定な溶接を可能とし、“高品質”と“高能率”の両立が可能なミグ（以下、MIG）溶接の実現への要望が挙げられる¹⁾。

我々は、簡便かつ実用的でクリーンな MIG 溶接を実現する手段として、TIG-MIG 複合溶接法の開発を行った（図1）^{2, 3)}。本稿では、TIG-MIG 複合溶接の概要と実用継手への適用例、従来法との比較について紹介する。

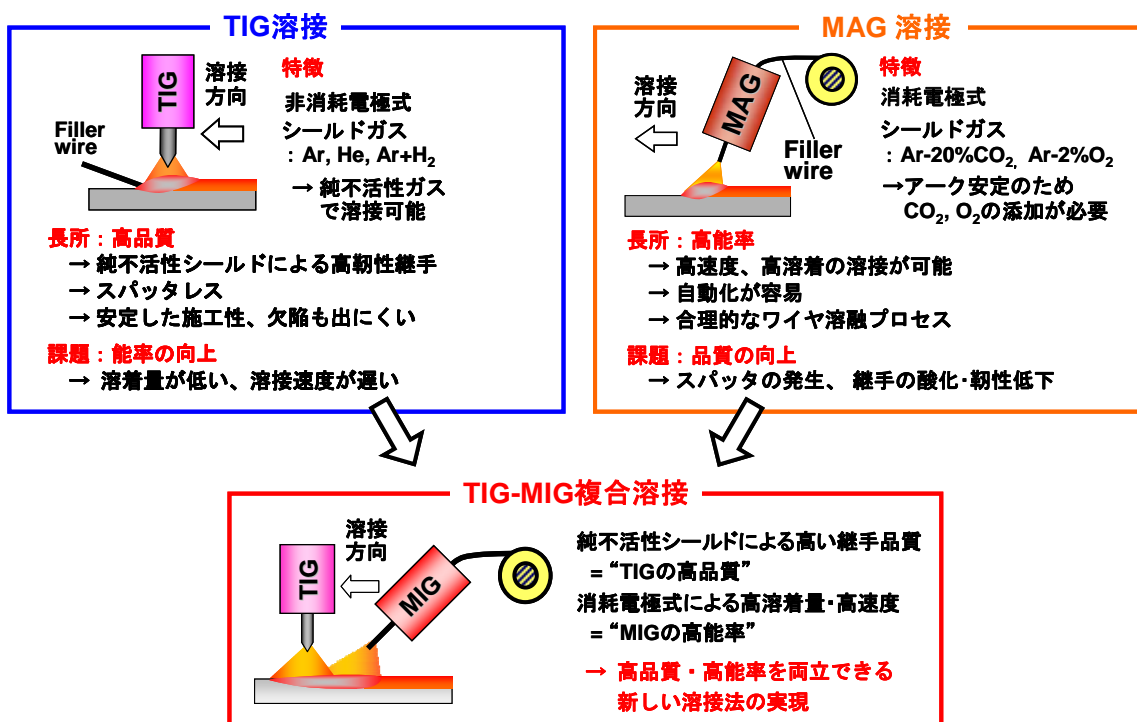


図1 TIG 溶接及び MAG 溶接の特徴と TIG-MIG 複合溶接法のコンセプト

2. MIG 溶接における問題点

炭素鋼やステンレス鋼をはじめとする、鉄系材料におけるガスシールドメタルアーク溶接では、従来はシールドガスとして、Ar と O₂、あるいは Ar と CO₂ の混合ガスが使用される。これは、純不活性シールドガスを用いた MIG 溶接では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ため、ビードの蛇行やシールド不良といった問題を引き起こし、適正な溶接施工が困難となるためである (図 2)。

これに対して、シールドガスに O₂ あるいは CO₂ の O 元素を持つ活性ガスを添加すると、陰極点が安定に発生し良好な溶接が可能となる (図 3)。活性ガスの添加によって陰極点が安定化する理由は、母材表面で酸化物が形成することによると言われている^{4, 5)}。しかしながら、シールドガス中の O 元素によるビード表面の酸化は避けられず、また溶接金属中への酸素固溶量についても、母材と比較して多量となり、低温じん性や酸化防止といった品質の観点からは望ましくない。

純不活性シールドガスでの施工が可能なガスシールドアーク溶接法は、基本的に TIG 溶接に限られ、高品質・高能率化の両立が課題となっている。

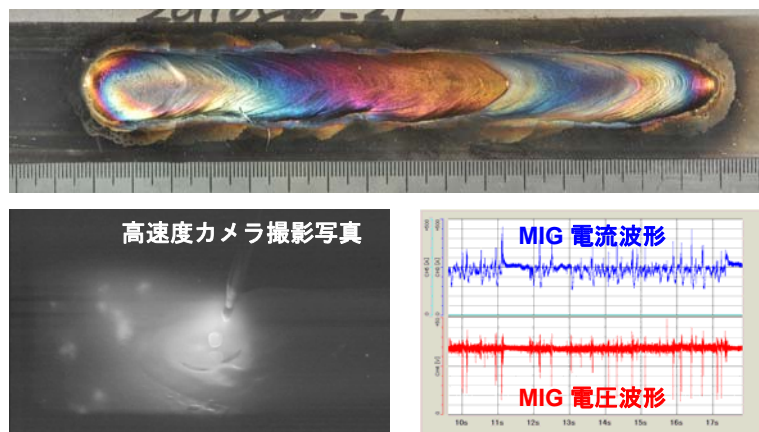


図 2 純 Ar シールドガスによる MIG 溶接
—陰極点が不安定となりビードが蛇行する

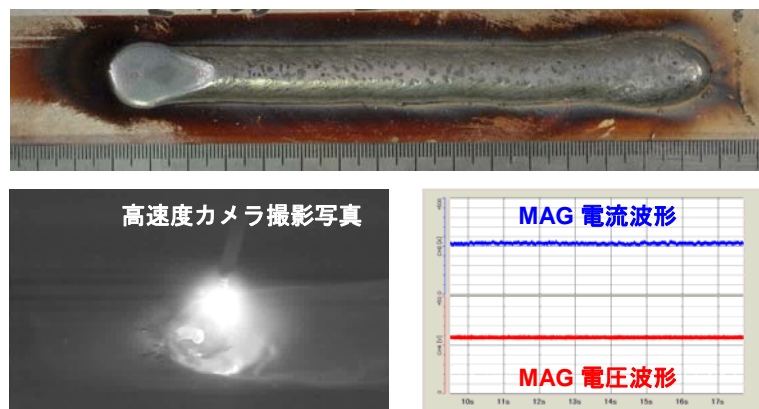


図 3 Ar+2%O₂ シールドガスによる MAG 溶接
—陰極点は安定するが、ビードが酸化する

3. TIG-MIG 溶接の概要

3.1 TIG-MIG 複合溶接の基本条件

TIG アークと MIG アークを近接し向き合わせ複合化すると、純不活性シールド条件下でも陰極点の不安定挙動が解消し、十分な MIG アーク安定性が得られ良好な溶接が可能となる (図 4)。これによって、純不活性シールド条件下でも安定なクリーンな MIG 溶接プロセス、すなわち“TIG 溶接の高品質”と“MAG 溶接の高効率”を両立した新しい溶接プロセスの実現が期待できる。

図 5 に、TIG-MIG 複合溶接におけるシステム構成および高速度カメラ観察写真、専用トーチの外観写真を示す。システムは汎用の TIG 溶接電源、MIG 溶接電源、および両電極を一体化した専用トーチで構成される。専用トーチにおいては、TIG 溶接と MIG 溶接の両電極をひとつのノズル内に固定した一体型構造とし、すみ肉や多パスなどの傾斜姿勢を含む溶接において良好な溶接性およびシールド性が得られるようにした (図 5 (b))。近接して発生した両アークは異なる極性を持つため反発作用が働く。このとき、前進角で配置された MIG アークには、硬直性の作用によりアークプラズマを前方へ指向する力と、TIG アークとの反発作用による前方からの斥力が働く。この両方の力が平衡することで適正な複合アーク状態が得られる (図 5 (c))。

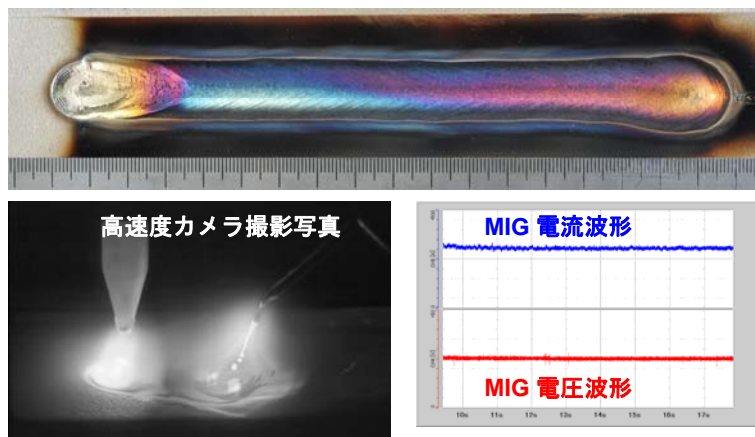


図 4 純 Ar シールドガスによる TIG-MIG 複合溶接
—陰極点安定し、良好なビードが得られる

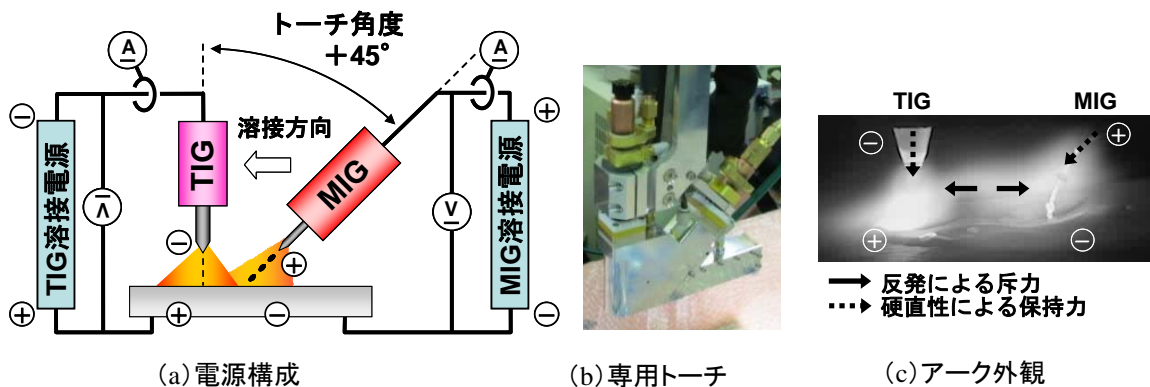


図 5 TIG-MIG 複合溶接システムの概略

3.2 TIG 電流によるアークの安定化と溶込みの制御

TIG-MIG 複合溶接におけるアークの安定化条件として、TIG 溶接電流が MIG 溶接電流以上に大きい関係 ($TIG \geq MIG$) であることが必要となる。TIG 溶接電流が MIG 溶接電流よりも小さい関係 ($TIG < MIG$) となる条件では、従来の MIG 溶接と同様に不安定な溶接となってしまふ。図 6 に各 TIG 溶接電流におけるビード外観を示す。MIG 溶接電流 300A に対して、TIG 溶接電流 250A では、単独の MIG 溶接と同様に陰極点不安定の形跡であるクリーニング領域の広がり認められ、ビード外観が蛇行した不良な結果となっている。一方、TIG 溶接電流 350A、500A では、止端の揃った良好なビード外観が得られ、周辺にクリーニング領域の広がりは見られない。陰極点が不安定化することなくアークが安定に発生したことがわかる。

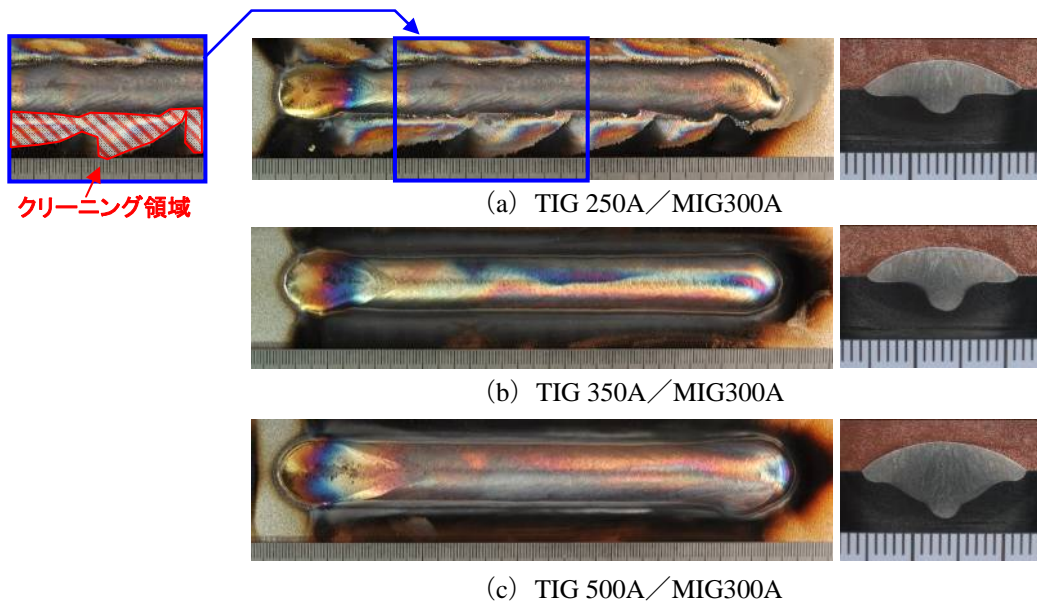


図 6 各 TIG 溶接電流におけるビード外観と断面マクロ
[SUS304 t12mm ビードオン 溶接速度 30cm/min]

図 7 に先行 TIG 溶接電流と溶込み深さの関係を示す。安定領域において、溶込み深さは TIG 溶接電流に比例して増加している。この結果は、TIG アークは MIG アークを安定化するだけでなく、その入熱によって更なる溶込みを与えることができることを示している。すなわち、溶着量を MIG 溶接電流で決定し、TIG 溶接電流で溶込みを調整することができる。溶込みと溶着量に関する幅広い条件調整が可能な溶接法でもあると言える。

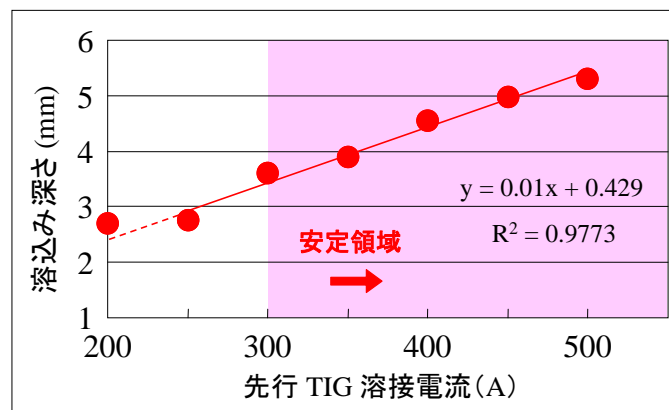


図 7 TIG 溶接電流と溶込み深さの関係
[溶接条件: 図 6 と同じ]

3.3 MIG 溶接電流による溶滴移行形態の変化

TIG-MIG 複合溶接における溶滴移行形態については、従来の MAG 溶接と同様の理解に基づいて、溶接条件を調整することができる⁶⁾。溶滴移行形態はワイヤを流れる MIG 溶接電流に応じて、ドロップ移行、スプレー移行、ローターティング移行へと遷移する。したがって、MIG 溶接電流を決定後、MIG アーク電圧によって、MIG アーク長および短絡の程度を調整する手順は従来の MAG 溶接法と同様となる。

図 8 に各 MIG 溶接電流における溶滴移行形態を示す。MIG 溶接電流 200A 前後ではドロップ移行となり、250A 以上ではスプレー移行、350A 以上ではローターティング移行となっている。

前述の通り、本溶接法ではアーク間の反発作用力と、MIG アークの硬直性による作用力との平衡において、安定な MIG アークの指向性が得られる。したがって、溶滴移行としては、MIG アークに大きな硬直性が得られる、スプレー移行あるいはローターティング移行となる条件、すなわち MIG 溶接電流としては 250A 以上の領域が、裕度の広い条件として基本的に推奨される。

ドロップ移行では、適正速度が低下する傾向となる。図 9 (a) に示した溶接速度は 15cm/min であり、従来の MAG 溶接並みに高能率な溶接を目指すには不十分と言える。これについては、MIG 溶接電流のパルス化が有効となる。パルス化によって、200A 前後の溶接電流においても MIG アークの硬直性が高まり、従来の MIG 溶接と同等の速度条件において溶接が可能となる (図 9 (b))。



図 8 各 MIG 溶接電流における溶滴移行形態の変化(t12mm SUS304 ビードオン)

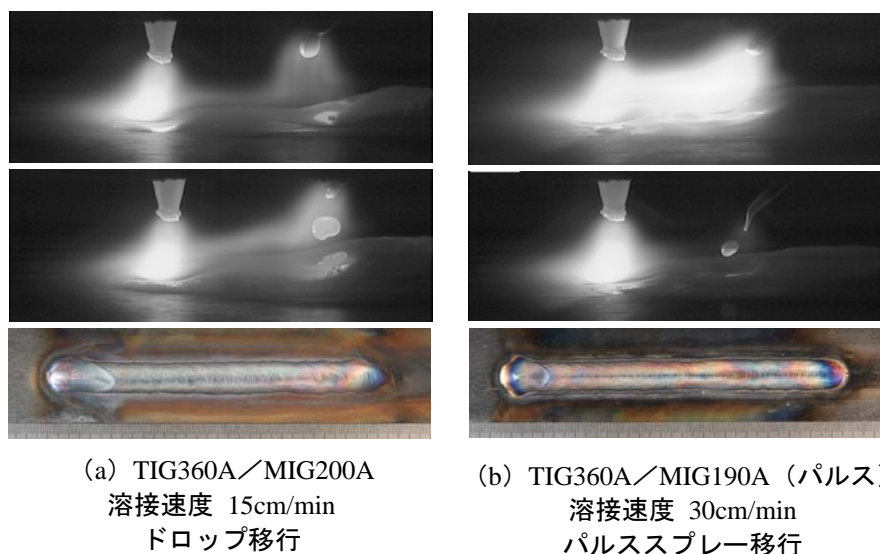


図 9 MIG 溶接電流 190~200A における MIG パルス適用の効果(t12mm SM490 ビードオン)

4. TIG-MIG 複合溶接法の数値計算シミュレーション

4.1 TIG-MIG 複合溶接現象の三次元モデル化

TIG-MIG 複合溶接のアーク現象では何が起きているのか、アーク物理の法則に基づいた理解を深めるため、三次元数値解析モデルを用いて計算を行った^{7, 8)}。本溶接法のように、電極配置が非対称で立体的となるハイブリッド溶接現象に対しては、二次元や軸対象ではなく、三次元でのモデル化が必要となる。三次元温度分布の計算結果を図 10 に示す。

TIG-MIG 複合アークとの比較のため、TIG および MIG の単独アークについても計算を行い、その結果を比較した。各々の結果における y-z 平面 (x=0) での二次元温度分布を図 11 に示す。単独の各アークでは、硬直性を有したアークが電極軸の方向に沿って真っ直ぐに発生しているのに対し、複合アークでは、各々のアークは離れ合う方向へと発生している。これは、互いに逆方向の電流が流れる TIG と MIG のアークの間には、磁場の作用によって反発し合う力が働くためである。

以上の結果では、三次元モデルを用いたシミュレーションによって、非対称かつ立体的な TIG アークと MIG アークとの間に働くアーク干渉挙動と空間温度分布が適切に再現されており、このモデルを用いた計算結果に基づいて信頼性のある現象考察が可能であることを示している。

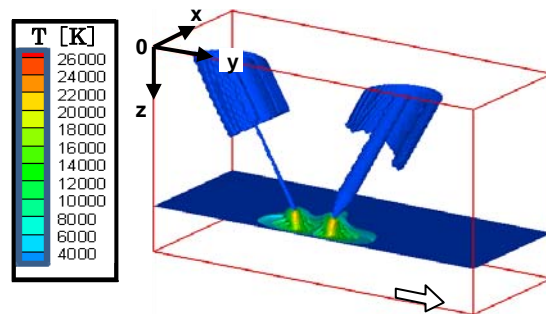


図 10 TIG-MIG 複合溶接の三次元温度分布のシミュレーション結果

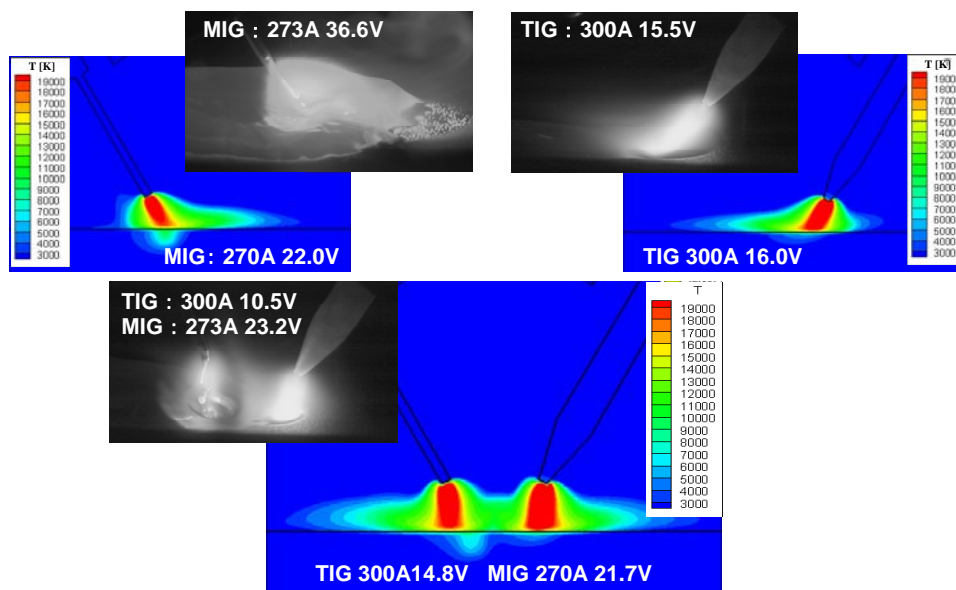


図 11 各単独アークと TIG-MIG 複合アークにおけるシミュレーションと実験の結果比較

4.2 電極間電流経路の形成

計算結果より得られた電流密度の二次元分布を図 12 に示す。また、モデル内の電流の流れをその経路によって次の通り分類し、電流値とともに図中に示す。

- I_{TIG} : TIG 電極内部
- I_{M-B} : 母材表面～MIG ワイヤ表面の間
- I_{T-B} : TIG 電極表面～母材表面の間
- I_{MIG} : MIG ワイヤ内部
- I_{T-M} : TIG 電極表面～MIG ワイヤ表面の間

計算の結果、MIG 溶接電流の一部 30A の電流が母材表面には流れ込まず、TIG 電極と MIG ワイヤの間を直接通電する結果となった。これは、両アークの中央部分に発生した高温のアークプラズマ領域が導電性を有することから、両電極の電位差による電流経路が形成されたためである。

実験結果との比較として、同一条件での TIG-MIG 複合溶接および TIG 単独溶接の、高速カメラ観察写真を図 13 に示し、各々の電流・電圧計測値を図中に示す。TIG 単独のアーク電圧 15.5V に対し、TIG-MIG 複合の TIG アーク電圧が約 5V 低い値となっている。3.1 で述べた TIG 単独アークと複合アークとの計算結果の比較においても、同様の傾向がみられている。この傾向の一致は、実際の TIG-MIG 複合溶接においても、TIG 溶接電流の一部が TIG-MIG 電極間の電流経路を直接流れる現象が起きている可能性を強く示している。

純 Ar シールド MIG 溶接での不安定溶接においては、母材上の陰極点が定まらずに定常的な電流経路が確保されず、アーク電圧が不安定となることが適正な溶接を困難とする一因となっている。TIG-MIG 複合溶接では、この電極間での電流経路形成が、MIG アーク安定性の一因として寄与している可能性が高いと考えられる。

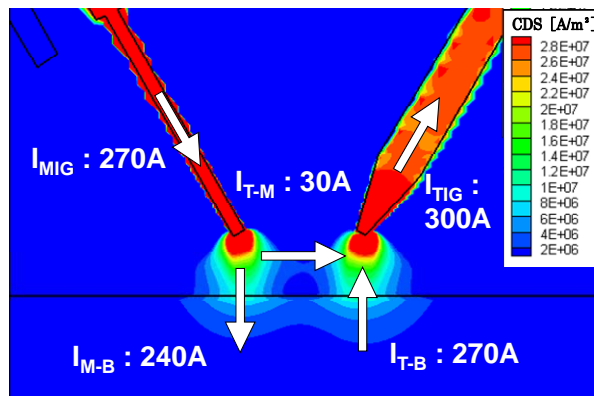


図 12 シミュレーションにより得られた TIG-MIG 複合溶接における電流密度及び電流経路



図 13 実験結果における TIG-MIG 複合アークと TIG 単独アークの TIG アーク電圧比較

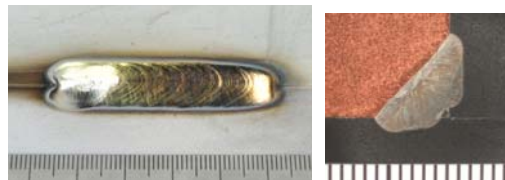
5. 実用継手への適用と従来法との比較

TIG-MIG 複合溶接では、TIG 溶接と同等の高品質を維持したまま、MAG 溶接並みの高能率溶接ができる溶接法を目指し開発を行った。実際の継手溶接における溶接性を確認し、その品質と能率について従来の溶接法と比較するため、すみ肉や突合せの実用継手への適用を行った。

5.1 すみ肉継手への適用

図 14 に T 字すみ肉溶接への適用例を示す。ワイヤ送給量及び溶接速度の増大により、同一アーク時間 20 秒において、従来 TIG 溶接と比べて約 3 倍の溶接長が得られた (表 1)。また、溶込みについても、TIG 溶接では、限界まで溶着量を増大した結果、ルート部に融合不良が残っているのに対し、TIG-MIG 複合溶接では、ルート部まで十分な溶込みが得られた。

図 15 に T 字隅肉の多層溶接における、ビード外観および断面マクロを示す。種々の角度の傾斜姿勢を含む隅肉の多層溶接においても、一体化した専用トーチによって、良好な溶接性とシールド性が確保でき、良好なビード外観及び断面マクロの結果が得られた。



(a) 従来 TIG (速度 15cm/min)



(b) TIG-MIG 複合溶接 (速度 40cm/min)

図 14 T 字すみ肉溶接における適用例 (t6mm SUS304)

表 1 同一溶接時間 (20 秒) における溶接長さの比較 (図 14)

	TIG	TIG-MIG
ワイヤ送給量	3 m/min	12 m/min
溶接速度	15 cm/min	55 cm/min
溶接長さ	40 mm	150 mm



図 15 T 字隅肉継手の多パス溶接における適用例
[SUS304 t6mm 溶接速度 30cm/min シールドガス : Ar 3 パス]

5.2 突合せ継手への適用

開先突合せ継手への TIG-MIG 複合溶接適用例として、**図 16** に、板厚 12mm の SUS304 の 2 層 3 パス、および板厚 6mm の SUS304 の 1 パスの開先突合せ溶接におけるビード外観および断面マクロを示す。**表 2** に、ステンレス鋼における TIG 溶接の標準条件⁹⁾ と TIG-MIG 複合溶接条件との溶接時間の比較結果を示す。溶接時間については、溶接速度とパス数のみを考慮し、“溶接長 1m あたりを溶接するのに必要な時間”を溶接時間とした。

以上より得られた溶接長 1m あたりの時間（溶接工程のみを考えた場合）について、試験片での比較ではあるが、TIG-MIG 複合溶接では溶接速度の増大とパス数の削減によって、TIG 溶接の標準条件と比べて約 25～44%の時間へ溶接時間を短縮できる結果が得られた。

表 3 および**表 4** に板厚 12mm の開先突合せ継手における、溶接金属の酸素量およびシャルピー衝撃値を示す。シャルピー衝撃試験は、板厚 12mm の SUS304 開先突合せ溶接継手よりフルサイズシャルピー衝撃片（ノッチは溶接金属中央）を採取し、JIS Z 2242 に準拠して行った。酸素量 30ppm 未満となる母材と同等の低酸素含有の溶接金属が得られ、シャルピー衝撃値についても、試験温度 -20℃において 200J 前後の値が得られ、TIG 溶接と同等の高いじん性が示された¹⁰⁾。

以上 5.1 および 5.2 より、実用継手への適用において、MIG 溶接と同等の高効率と TIG 溶接と同等の品質の両立が可能であることが確認できた。

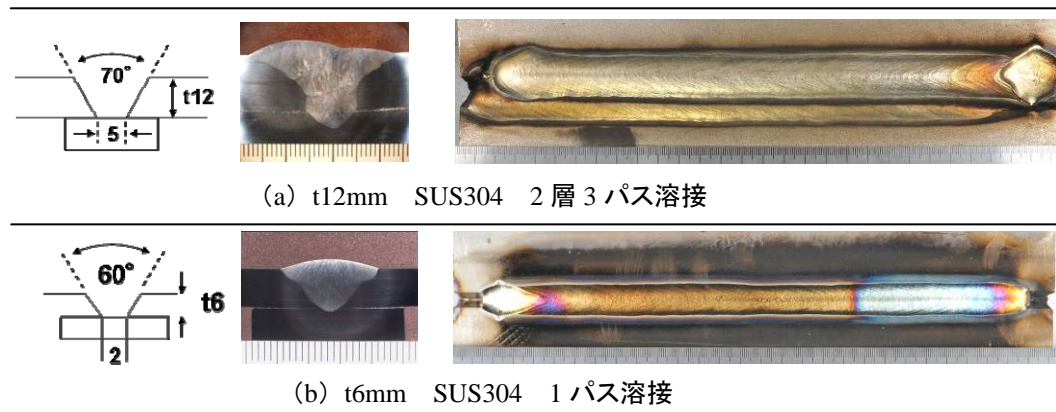


図 16 開先突合せ継手における適用例

表 2 開先突合せ溶接における溶接時間(1m あたり)の比較 (図 16)

	溶接法	(a) t12mm	(b) t6mm
溶接速度 (cm/min)	TIG	5~20	10~15
	TIG-MIG	30	30
パス数	TIG	6	2
	TIG-MIG	4	1
1m あたり 溶接時間 (min/m) [Ratio of time]	TIG	30	13.3
	TIG-MIG	13.3 [44%]	3.3 [25%]

表3 継手(a)における試料
金属中の酸素量 (図16)

Sample	O [ppm]
Weld metal	25
Base metal	46
Wire	34

表4 継手(a)における溶接金属部のシャルピー
衝撃試験結果(試験温度-20°C)(図16)

試験片 No.	吸収エネルギー(J)	
	個別	平均
1	197	
2	190	195
3	199	

6. おわりに

TIG-MIG 複合溶接技術について、概要と特徴、継手適用例について述べた。TIG 溶接と MIG 溶接という比較的ありふれた汎用性の高い熱源の簡便な複合化によって、安定な MIG 溶接の実現という画期的な効果が得られる本溶接法は、非常に高い可能性を持つと考えている。

直近の適用対象としては、じん性、耐食性、成分歩留りなどの点で、純不活性シールドガスを用いた溶接と同等の品質を必要とする材料の溶接が挙げられ、溶着量向上による溶接施工の高効率化に貢献できると考えられる。

本溶接法が実用的な溶接法として認知され、多くの産業において利用されることで、溶接の高効率化・高品質化の実現への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 平岡ら, 「TIG 溶接並みの高品質溶接を可能とする次世代 MIG 溶接プロセスの開発・実用化」溶接学会誌, vol.78, No.5, p.497-498 (2009).
- 2) 金丸ら, 「TIG-MIG 複合溶接法の基礎的検討」溶接学会論文集, vol.30, No.3, p.29-34 (2012).
- 3) 金丸, 「TIG-MIG 複合溶接」溶接学会誌, vol.82, No.3, p.163-165 (2013).
- 4) 松田ら, 「9%Ni 鋼の共金溶接のための GMA 溶接に関する研究」,溶接学会誌, vol.52 (1983) , No.3, pp66-73.
- 5) 安藤ら, 「溶接アーク現象 6 版」産報, pp94-95 (1976).
- 6) 金丸ら, 「TIG-MIG 複合溶接技術の開発」溶接技術, 2012 年 12 月号, p.105-109.
- 7) 金丸ら, 「TIG-MIG 複合溶接法の三次元モデル数値解析」溶接学会論文集, vol.30, No.4, p.306-312 (2012).
- 8) 金丸ら, 「三次元モデル数値解析による TIG-MIG 複合溶接法のアーク現象の考察」溶接学会論文集, vol.30, No.4, p.323-330 (2012).
- 9) ステンレス協会, 「改正 SAS 801 ステンレス鋼溶接施工基準」,平成 12 年 12 月 1 日改正, 33-72.
- 10) 三五ら, 「ステンレス鋼建築構造用溶接材料の動向」溶接技術, vol.52, No.7, p.67-72 (2004).

<略歴>

2007 年 横浜国立大学大学院 工学府 機能発現工学専攻 修了
 2007 年 大陽日酸株式会社 開発・エンジニアリング本部 配属
 2013 年 大阪大学 博士(工学)取得