

F-MAG溶接法を用いた多層盛り溶接の高効率化の検討

Study of High Efficiency Multi-layer Pass Welding using F-MAG Welding Method

津山 忠久 *1
Tadahisa Tsuyama

栗山 晋 *2
Susumu Kuriyama

湯田 誠*3
Makoto Yuda

極厚鋼構造物継手の多層盛り溶接の高効率化を目的に、F-MAG溶接法を考案した。本溶接法はMAG溶接法にフィラーワイヤを組み合わせたハイブリッド溶接法であり、先行するMAG溶接電極による溶融プール中に後方より通電加熱したフィラーワイヤを挿入し、入熱量増加を低く抑えながら高溶着量化を達成するものである。本報告はF-MAG溶接法の概要と基礎実験結果として、電流値とワイヤ送給速度をパラメータとしてフィラーワイヤ溶融範囲の確認結果、および平継手試験体を用いたフィラーワイヤの有無における溶接金属部機械的性能の比較試験結果を示す。

キーワード：MAG溶接、フィラーワイヤ、高効率化、入熱量、溶接金属部機械的性能

1. はじめに

ガスシールドアーク溶接法は鋼構造物の製作に広く用いられている溶接法であり、シールドガスにArとCO₂の混合ガスもしくはCO₂100%を用いるMAG溶接法が主流となっている。中でもローコストなCO₂100%のガスシールドアーク溶接法（以下CO₂溶接法）の使用率は日本の産業界において70%程度を占めており、特に建築鉄骨業界における使用率はほぼ100%であるというアンケート結果も得られている¹⁾等非常にニーズが高い。

建築鉄骨業界では建築物の高層化に伴う板厚の増大に対して、サブマージアーク溶接法やエレクトロスラグ溶接法等の大入熱量・大溶着量の溶接法を用いることで高効率化・低コスト化を図ってきた。しかしながら近年の溶接部への高い機械的性能要求（0℃吸収エネルギー $\geq 70\text{J}$ 等）からこれら溶接法が適用しにくくなっており、例えば極厚ボックス柱の角溶接や内ダイアフラムの周溶接に溶接部の機械的性能が比較的良好なCO₂溶接法を適用せざるを得なくなる場合が頻繁に生じている。これは主としてマンパワーに頼った施工法で能率が低いために、高性能で高効率、かつ低入熱化が可能な新たな溶接法が強く求められている。

この「高性能・高効率・低入熱量」というキーワードに対してCO₂溶接法が欠けているのは明らかに「高効率」である。これは溶接部の機械的性能を維持するために、用

いる鋼材や溶接材料に応じて入熱量とパス間温度の厳しい管理がほぼ義務づけられているためである。入熱量は電流・電圧に比例し溶接速度に反比例する。高効率化（高溶着量化）のためには高電流化が一つの手段となるが、単純に電流（＝ワイヤ送給速度）を上げると入熱量が上昇することになる。溶接速度も同様である。つまり現状の入熱量制限下では高効率化は不可能であると言わざるを得ない。なお開先角度が15度以下の狭開先溶接は高効率化の一つのアプローチではあるが、主として組立・開先に高い精度が必要なことや低スパッタで安定した溶込みを条件とする溶接法の選択が課題となる。現在の経済状況の中で溶接前加工や新規溶接法への新たな設備投資は難しい。従って現状の設備を可能な限り生かしながら最小限の設備投資により高効率化を目指すのが最善と考えている。

この現状を改善するために、新たな溶接法としてF-MAG溶接法を考案した。本報告はF-MAG溶接法の概要と施工条件範囲確認結果²⁾、継手性能確認試験結果³⁾についてまとめたものである。

2. F-MAG溶接法について

F-MAG溶接法とはMAG溶接法とフィラーワイヤを組み合わせたハイブリッド溶接法である。先行するMAG溶接電極による溶融プール中に後方より通電加熱したフィラーワイヤを挿入、フィラーワイヤ自身の抵抗発熱と溶融プール熱によりワイヤを溶融させ、溶着量を増す手法

*1 川田工業株式会社技術研究所生産技術研究室 係長

*2 川田工業株式会社生産本部栃木工場工務課 課長

*3 川田工業株式会社技術研究所生産技術研究室 室長



図1 F-MAG溶接法搭載自動溶接機

である。溶着量はフィラーワイヤの送給量に依存するが、入熱量の増加分以上に溶着量向上が可能である。これは後行電極のフィラーワイヤにはアークが生じないように溶接電源による制御を行うことで、電圧が最大で10V程度に抑えられるためである。

自動溶接機に組み合わせた例を図1に示す。フィラーワイヤ用のトーチと専用溶接電源のみの追加設備で適用が可能で、現有設備を使用できる。フィラーワイヤの制御は送給 ON/OFF やワイヤ送給速度、電流値等を自動溶接機の溶接条件プログラムに追加することでコントロールされるため、オペレータはこれまでと全く同じ操作で自動溶接機を扱うことができる。なお半自動溶接への適用はトーチの重量増加が懸念されるが、不可能ではないと考える。

以上のような溶接法であるが、先行電極のアークに近接した位置に電極を追加することによるアーク不安定や、フィラーワイヤの施工条件（ワイヤ突き出し長さ・挿入位置・電流値・送給速度等）が適正でない場合にフィラーワイヤの未溶融が生じて溶接欠陥が発生する等が懸念される。また、フィラーワイヤ電極側でアークによる合金元素の酸化消費が生じないため、ワイヤ成分がほぼそのまま溶接金属中に歩留まることによる溶接金属部機械的性能変化の把握も必要である。これらを確認するために基礎実験を行った結果を以下に示す。

3. 標準施工条件の検討

(1) 実験目的

フィラーワイヤの送給速度と電流値をパラメータに、フィラーワイヤの溶融範囲を確認する。

(2) 実験方法

表1に溶接条件を示す。シールドガスはCO₂100%を用い、先行電極には直径1.6mmのワイヤにて溶接電流・電圧

表1 溶接条件表

| | | |
|---------------------|---------|---------|
| 溶接速度 (m/min) | 0.30 | |
| 先行電極 | 電流値 (A) | 420 |
| | 電圧値 (V) | 40 |
| 後行電極 | 電流値 (A) | 150~350 |
| フィラーワイヤ送給速度 (m/min) | 2~18 | |
| 溶接材料 | YGW11 | |

| 送給速度 m/min | フィラーワイヤ電流 | | | | |
|---------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 6 | △ | ○ | — | — | — |
| 8 | △ | ○ | ○ | — | — |
| 10 | | △ | ○ | ○ | — |
| 11 | | | △ | ○ | — |
| 12 | | | × | ○ | — |
| 13 | | | | ○ | ○ |
| 14 | | | | △ | ○ |
| 15 | | | | | ○ |
| 16 | | | | | ○ |
| 17 | | | | | ○ |
| 17.5 | | | | | △ |

(a) 溶接状態

| 送給速度 m/min | フィラーワイヤ電流 | | | | |
|---------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 6 | × | ○ | — | — | — |
| 8 | × | × | ○ | — | — |
| 10 | | × | ○ | ○ | — |
| 11 | | | × | ○ | — |
| 12 | | | × | ○ | — |
| 13 | | | | ○ | ○ |
| 14 | | | | × | ○ |
| 15 | | | | | ○ |
| 16 | | | | | ○ |
| 17 | | | | | ○ |
| 17.5 | | | | | ○ |

(b) 溶融状態

図2 溶融範囲確認結果

は一定とし、フィラー側電極は直径1.2mmのワイヤを用いてビードオンプレート溶接を行った。溶接材料は先行・後行ともYGW11である。フィラー側電極に用いた溶接電源はワイヤ送給速度と溶接電流を個別にコントロールできるため、溶接電流を150~350Aの範囲で50Aずつ上げながらフィラーワイヤの送給速度を2~18m/minの範囲で変化させた。溶融状態はプレート中心から採取した断面マクロ試験片により確認した。

(3) 実験結果

図2にフィラーワイヤ送給速度6m/min以上の溶接状態と溶融範囲の確認結果を示す。溶接状態とは溶接の安定度を示し、安定して溶接ができていない状態を○、フィラーワイヤが溶融せずに溶融池底、つまり母材を突くことで電極が上下に振動するスティッキングと言われる現象が時折生じる状態を△、スティッキングが頻発する状態を×と評価している。溶融状態は断面マクロ試験片において溶接欠陥などがなく完全に溶融しているものを○、未溶融部分が存在している状態を×と評価した。表中のグレーの部分はワイヤ送給速度が低すぎて電流値が安定しない領域で、白



(a) フィラーワイヤなし



(b) フィラーワイヤ17m/min

図3 ビードオンプレート溶接断面マクロ試験結果

色部分はスティッキングが頻発するために実験を行わなかった領域である。

図2より、安定した溶接状態が得られ、かつ良好な溶融状態が得られる最大条件はフィラーワイヤ送給速度17m/min、電流値350Aであった。この条件のマクロ試験片をフィラーワイヤなしのものと比較したのが図3である。溶着断面積を比較すると1.89倍(108/57 mm²)となり、これに対して入熱量は1.18倍(3.95/3.36 kJ/mm)で入熱量の増加率に比べて溶着量の増加率が非常に大きい。言い換えれば同じ溶着量を得るための入熱量は小さくできることになり、F-MAG溶接法は小入熱化と能率向上を同時に達成できる施工法であると言える。なお、溶込み深さがF-MAG溶接法の方が浅くなっているのは、溶着量が多いために溶接金属が先行したことが主因であり、溶着量管理は溶接欠陥防止の点から重要と考えられる。

また、溶接状態が不安定もしくはやや不安定である場合に溶接金属部が未溶融となっている場合がほとんどであることが分かる。未溶融状態の例を図4に示すが、溶接金属中にフィラーワイヤの溶け残りが確認できる。フィラーワイヤをきちんと溶融させるにはワイヤ突き出し部先端的温度を抵抗発熱により上昇させることが必要と考えられ、抵抗発熱に影響する因子である電流密度、ワイヤ突き出し長さ、ワイヤ送給速度等⁴⁾の最適化が重要である。先行電極アークへのフィラーワイヤ電極の干渉については、電極間距離(ワイヤ先端間距離)の適正值範囲を見いだすことで安定したアーク状態を得ることが可能で、スパッタ量も通常のCO₂溶接法とほぼ同等である。



図4 フィラーワイヤ未溶融状態

4. 溶接金属部機械的性能確認実験

(1) 実験目的

F-MAG溶接法で突き合わせ溶接継手を作成し、溶接金属部の機械的性能を確認する。

(2) 実験方法

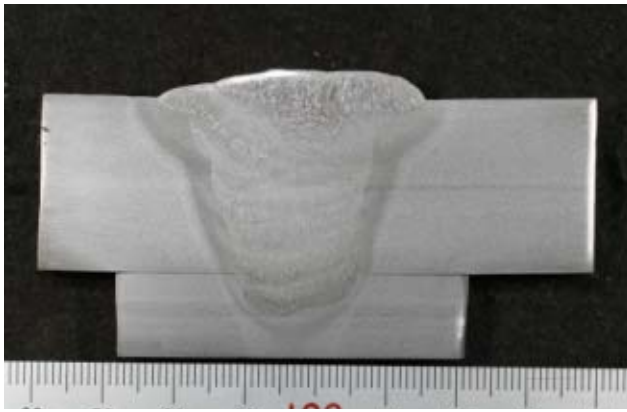
試験体は4体作成、各試験体の溶接条件を表2に示す。No.1,3は通常のCO₂溶接法、No.2,4がF-MAG溶接法である。試験体は板厚25mmのSN490Bを用いた溶接線長280mmの平継手形状で、開先形状はルートギャップ13mm、開先角度30°のV型とした。各電極のワイヤ径は前実験と同じである。溶接材料は試験体No.1,2がYGW18、試験体No.3,4がYGW11で、No.2,4は先行・後行とも同種のワイヤとした。入熱量・パス間温度管理値はJIS Z 3312解説における各溶接材料の上限値を適用した。溶接条件は機械試験片採取位置で入熱量を一定にするため、全てのパスに対し等しく設定した入熱量で施工し、フィラーワイヤの有無による性能比較を試みた。機械試験は全て溶接金属部を対象に、丸棒引張試験、シャルピー衝撃試験、化学成分分析、マクロ試験、ミクロ組織観察、ビッカース硬さ測定を行った。丸棒引張試験片及びシャルピー衝撃試験片の採取位置、化学成分分析位置、ミクロ組織観察位置は溶接金属中央か

表2 溶接条件表

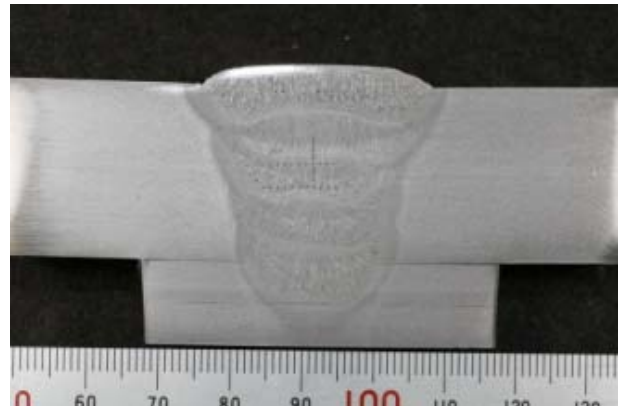
| No. | 溶接材料 | フィラーワイヤ送給速度 (m/min) | 入熱量 (kJ/mm) | パス間温度 (°C) |
|-----|-------|---------------------|-------------|------------|
| 1 | YGW18 | — | ≤4.0 | 350 |
| 2 | | 16 | | |
| 3 | YGW11 | — | ≤3.0 | 250 |
| 4 | | 10 | | |

表3 引張試験・シャルピー衝撃試験結果

| No. | 0.2%耐力 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び (%) | 0°C吸収エネルギー (J) |
|-------|-----------------------------|---------------------------|--------|----------------|
| 1 | 390 | 495 | 36 | 197 |
| 2 | 504 | 604 | 27 | 85 |
| 3 | 398 | 506 | 35 | 197 |
| 4 | 482 | 587 | 33 | 106 |
| 母材規格値 | ≥325 | ≥490 | ≥21 | ≥27 |

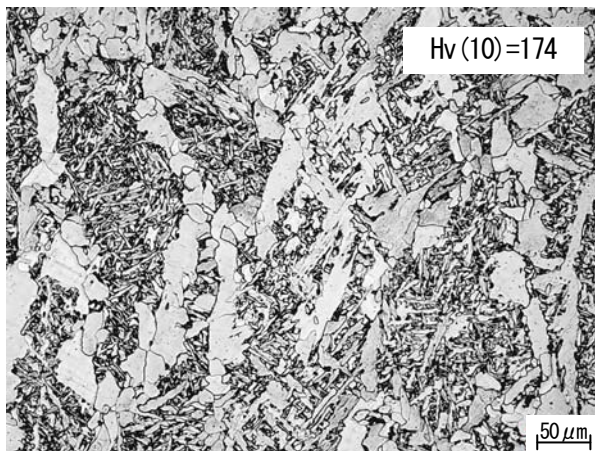


(a) No. 1 フィラーワイヤなし

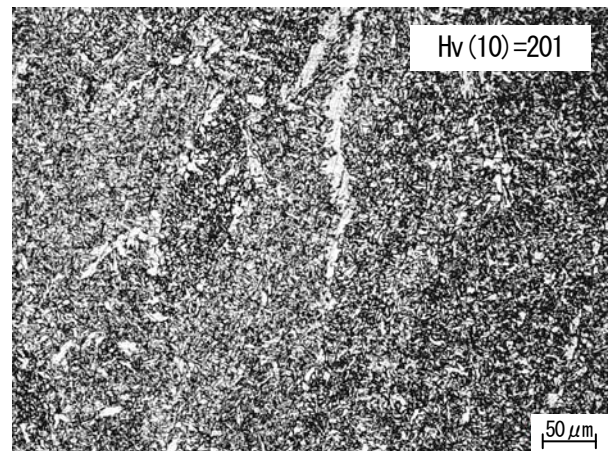


(b) No. 2 フィラーワイヤ有り

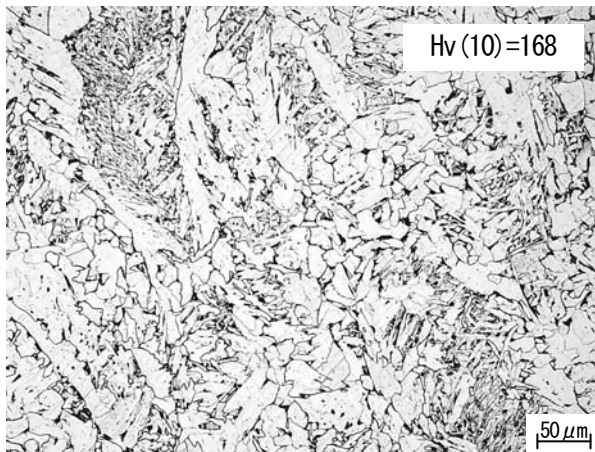
図5 マクロ試験結果



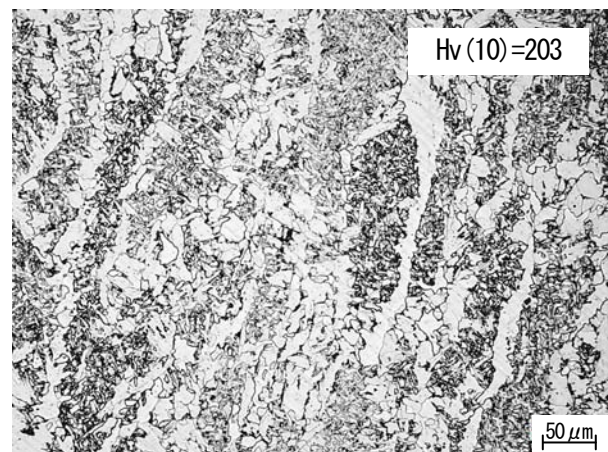
(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3



(d) No. 4

図6 溶接金属原質部マイクロ組織と硬さ測定結果

つ板厚中央である。

(3) 実験結果

図5にNo. 1, 2のマクロ試験結果を示す。No. 1の7層8パス仕上げに対してNo. 2は5層5パス仕上げとなり、同じ入熱量管理値であってもF-MAG溶接法を用いることで1パス当たりの溶着量が増加しパス数が低減した。1パス当たりの溶着断面積を比較すると1.58倍 ($120/76 \text{ mm}^2$)、また溶接速度は1.18倍 ($0.30/0.255 \text{ m/min}$)であり、これらを乗じてトータル1.86倍の能率向上となる。さらにパス数減

はパス間温度低下待ち時間も削減できるため、施工時間の大幅短縮が可能になる。なおNo. 3は7層9パス、No. 4は6層6パスとなり、こちらも3パス減であった。

表3に丸棒引張試験とシャルピー衝撃試験の結果を示す。溶接金属部強度はフィラーワイヤを用いることで溶接材料種類に関わらず0.2%耐力、引張強さともに大幅に上昇した。本実験で適用した入熱量とパス間温度の管理値はそれぞれの溶接材料における上限条件であることに加え、試験体が小さいために熱履歴的に非常に厳しい条件であっ

表4 溶接金属部化学成分測定結果

| No. | C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Mo (%) | Ti (%) | B (%) | N (%) | O (%) |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| No. 1 | 0.09 | 0.42 | 0.93 | 0.012 | 0.008 | 0.17 | 0.038 | 0.0022 | 0.0047 | 0.0416 |
| No. 2 | 0.08 | 0.56 | 1.20 | 0.012 | 0.010 | 0.18 | 0.063 | 0.0030 | 0.0049 | 0.0371 |
| No. 3 | 0.10 | 0.40 | 1.00 | 0.020 | 0.009 | 0.01 | 0.050 | 0.0003 | 0.0048 | 0.0406 |
| No. 4 | 0.09 | 0.50 | 1.16 | 0.016 | 0.010 | 0.01 | 0.078 | 0.0003 | 0.0068 | 0.0354 |
| YGW18 | 0.06 | 0.81 | 1.63 | 0.010 | 0.012 | 0.23 | 0.22 | — | — | — |
| YGW11 | 0.06 | 0.72 | 1.60 | 0.021 | 0.011 | — | 0.23 | — | — | — |
| 鋼板 | 0.16 | 0.40 | 1.35 | 0.015 | 0.004 | 0.01 | — | — | — | — |

たことが母材規格値をぎりぎりでも満足したNo. 1, 3の結果より推察されるが、そのような条件においてもNo. 2, 4は高い強度が得られており、このことはF-MAG溶接法の大きなメリットの一つと言える。一方で0℃吸収エネルギーは大きく低下したが、建築鉄骨で一つの指標とされる $\geq 70\text{J}$ を満足する結果であった。

溶接金属原質部のミクロ組織観察結果及び硬さ測定結果(10点平均値)を図6に示す。No. 1, 3に比べてNo. 2, 4は粒界フェライトが少なく、粒内に微細なアシキュラーフェライトが確認され、一見して微細化しているように見える。一般に組織微細化は破面単位が小さくなるために韌性に有利とされており、特にYGW18はTi, B添加により粒界フェライトの生成を抑制して粒内に微細な高韌性組織であるアシキュラーフェライトを生成させる成分設計がされている。しかしながらほぼ全面アシキュラーフェライトと思われるNo. 2においてもその0℃吸収エネルギーは低値で、通常のCO₂溶接法で得られる同等組織に比べて低韌性であった。原質部の硬さは引張強さとよく対応した結果が得られ、単純には強度が上がって韌性が低下したと判断することもできるが、組織微細化による韌性向上分を打ち消すだけの何らかの要因が働いていると想像される。例えばアシキュラーフェライト間に韌性を低下させるような微細硬化組織が存在している可能性もあり、より詳細な観察が必要と考えている。

表4には溶接金属部の化学成分分析結果を示す。No. 2, 4においてSi, Mn, Ti, Bが増加、酸素量が低下している。前述したようにF-MAG溶接法はフィラーワイヤの合金元素が酸化消費されずにほぼそのまま溶接金属中に歩留まるため、Si, Mn等の強度及び脱酸素素、アーク安定化等に寄与するTiが増加したと考えられる。これら合金元素の歩留まり増加がミクロ組織変化や強度上昇、韌性低下の主因と考えられ、今後、より高性能な溶接金属を得るためにはミクロ組織への各合金元素の影響調査も必要となる。

溶接金属中の酸素については一般に溶滴移行中に酸化物として混入するのが支配的と考えられるため、アークの発生しないフィラーワイヤ側電極での酸素混入が少なくなった結果、平均として酸素量が低下したと考えられる。アシキュラーフェライトは介在物を核として生成するこ

とはよく知られており⁵⁾、介在物の成分としてはTi, Mn等を含んだ複合酸化物が主体であるとの報告がある^{6), 7)}。F-MAG溶接法におけるTi, Mn量の増加と酸素量の減少は酸化物の形成に少なからず影響を与えていると推測され、介在物の形状・組成・分布率・微細組織との関係等の詳細な調査が韌性向上には欠かせないであろう。

以上のように溶接金属部の機械的性能変化は合金元素量の変化が主たる要因と考えられるが、これはフィラーワイヤを用いることで溶接材料メーカーが想定した成分範囲を逸脱してしまったためであろう。従って、具体的にはフィラーワイヤ送給量を低下させれば合金元素量を低減でき、韌性が向上すると予想されるが、それは同時に溶着量が低下することになるため、必要な機械的性能と能率とがバランスするワイヤ送給量を見いだすことが実施工上は重要となる。

溶接金属部強度に関し、溶接材料の面から強度を上げるには、主に溶接材料中の合金元素量を増加させる手法が用いられるが、溶接材料コストの上昇や予後熱・パス間温度管理、ワイヤ送給性の悪化等デメリットが多くなるのが一般的である。これに対してF-MAG溶接法は条件によっては鋼材強度に対して1ランク下の溶接材料の適用が可能と考えられ、上記点が改善できることになる。また、フィラーワイヤ側電極に溶接金属の必要性能に応じて先行電極と異なる溶接材料を用いることも可能である。今後はF-MAG溶接法の実用化と同時に、メリットを最大限生かせるような開発を行っていく予定である。

5. まとめ

F-MAG溶接法の概略と基礎実験結果について報告した。本溶接法の適用により小入熱化と能率向上を同時に達成させることが可能となり、さらに若干の設備投資のみで現状の設備を流用できる利点がある。溶接金属部の機械的性能は通常のCO₂溶接法に比べて強度上昇・韌性低下が生じているが、必要十分な性能は得られている。本溶接法は2012年の実用化を計画しており、今後はさらに深く検討を進める。

参考文献

- 1) 溶接法研究委員会アンケート調査委員会:溶接学会溶接法研究委

員会 溶接法ガイドブック6, I-91, 2008.

2) 津山：ホットワイヤを用いた高能率CO₂溶接法の開発【第1報】，溶接学会全国大会講演概要，第86集，144-145，2010.

3) 津山：ホットワイヤを用いた高能率CO₂溶接法の開発【第2報】，溶接学会全国大会講演概要，第87集，148-149，2010.

4) 平田：溶接アークプロセスの物理Ⅲ，溶接学会誌，63巻，6-10，1994.

5) 森，本間，大北，若林：Ti-B系溶接金属における靱性向上機構，溶接学会誌，50(2)，174-181，1981.

6) 岡崎，石田，末永，日高：高強度溶接金属の組織及び靱性に及ぼす酸化物系介在物組成の影響，溶接学会論文集，27巻，131-138，2009.

7) 山田，寺崎，小溝：Ti-B系低炭素鋼溶接金属の組織形成に関与した介在物の微視的観察，鉄と鋼，vol. 95，65-70，2009.