

溶融池磁気制御による高能率横向溶接法の開発

Development of High-Deposition Rate Horizontal Welding Process with Electromagnetically Controlled Molten Pool

技術本部 真鍋幸男*1 広本悦己*2
 銭谷哲*3
 広島製作所 橋本安之*4 石井元悦*5

煙突、橋梁等の大型鋼構造物の組立に不可欠な横向溶接では、重力による溶融金属の垂れ下がりにより溶接欠陥が発生しやすく高能率化が困難である。そこで高溶着速度施工が可能な新溶接法を開発した。本法は2本の添加ワイヤを溶融池の前・後方に挿入し同ワイヤに通電する。ここに磁界を付与して溶融池内に上向きの電磁力を発生させ、ビードの垂れ下がり防止する。ワイヤの通電抵抗加熱により溶着速度の増加も図る。本報では溶融池内に発生する電磁力分布を試算するとともに、実験によりビード形状改善と高溶着速度化100 g/min (HOT TIG法の約3倍)が可能なことを確認し、さらに開発手法を実構造物へ適用し良好な結果が得られたことを報告する。

Horizontal welding used in large-scale steel structures causes welding beads to drop due to gravity, which makes horizontal high-deposition welding difficult. We developed high-deposition welding in which 2 filler wires are inserted in the front and back of a molten pool and current conducted between them. A magnetic field applied to the pool generates an upward electromagnetic force that improves welding bead shape. Joule heating increases wire deposition rate. We show calculation of electromagnetic force in the pool and weld test results. We found that bead shape was dramatically improved enabling high-deposition. The process was applied to a large scale steel structure and its practicality confirmed.

1. ま え が き

煙突、橋梁、压力容器等の大型鋼構造物の組立工程等で必要となる横向姿勢溶接においては、重力により溶融金属が意図せぬ方向に流動して不整なビードを形成するため、アングカットやオーバラップ等の溶接欠陥が発生したり、積層溶接では次パス施工時に融合不良等の溶接欠陥が発生することがある^{(1)~(4)}。このため溶接入熱や溶着速度を制限し低能率な施工を余儀なくされたり、施工条件が限定されるなど実用上の大きい問題となっている。

これに対し、これまでに筆者らは添加ワイヤ通電による溶融池内の電流経路制御と磁場の付与により、溶融池内に上向電磁力を発生させ溶融金属の垂れ下がり防止する新高能率溶接法(溶融池磁気制御溶接法)を開発し、従来のHOT TIG法に比べ約2倍

の高溶着速度化が可能なことを確認している⁽⁵⁾。

本研究では溶融池磁気制御技術を最大限に生かすことを考えてさらなる高能率化をねらい、下向溶接と同レベルの高溶着速度100 g/min(従来のHOT TIG法の約3倍)を目標に、2本の添加ワイヤの挿入・通電により溶着速度の増加と上向電磁力発生範囲の拡大を図った方法を開発・実用化したので報告する。なお、本研究では主に高品質継手が要求されるステンレス鋼、ステンレスクラッド鋼の横向姿勢TIG溶接を対象とした。

2. 原理及び発生電磁力の試算

2.1 原理

図1に開発した新溶接法の原理を示す。本法は2本の添加ワイヤを溶融池の前方、後方に挿入する。同添加ワイヤをワイヤ加熱

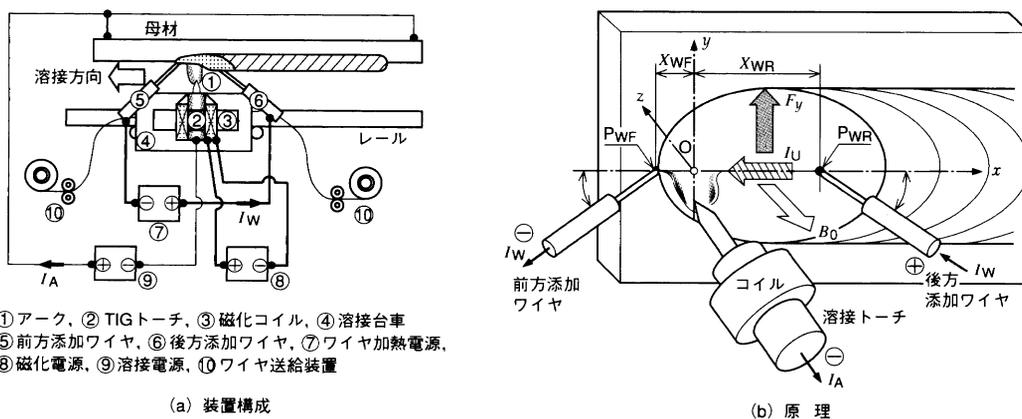


図1 2ワイヤ式溶融池磁気制御横向TIG溶接法の構成と原理 2本の添加ワイヤへの通電による溶融池内の電流経路制御と磁場付与により発生する電磁力を用いて、ビード形状制御と高溶着速度化を同時に行う方法である。
 Principle of horizontal TIG welding process using 2 filler wires with electromagnetically controlled molten pool

*1 広島研究所工作機械研究推進室主席
 *2 広島研究所工作機械研究推進室主席
 *3 広島研究所工作機械研究推進室

*4 副所長, 鉄構工作部長
 *5 鉄構技術部鉄構装置設計課長

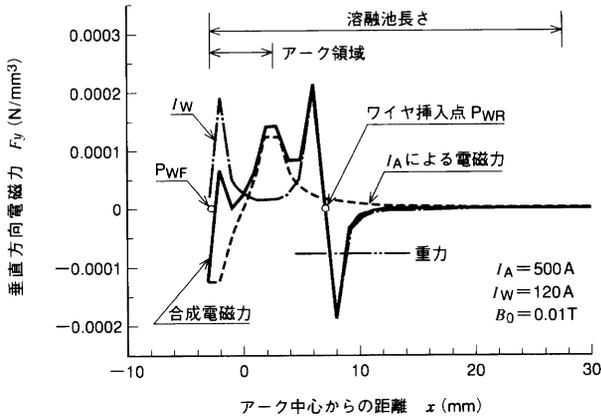


図2 溶融池内の電磁力分布 各種電流成分と磁場の相互作用により溶融池内に発生する電磁力を計算した結果を示す。
Distribution of electromagnetic force in molten pool

電源の陽極側と陰極側にそれぞれ接続し通電する。このとき溶融池においてワイヤ挿入点間の溶融金属中に一方向電流 I_0 が幅広く形成される。ここに母材表面に対して垂直方向の磁場を付与することにより、溶融池内に上向きの電磁力を幅広く発生させビードの垂れ下がりや防止する。また、2本の添加ワイヤを通電抵抗加熱することで溶着速度の増加も図る。

2.2 発生電磁力の試算結果

計算条件として、母材は三次元半無限板とし、溶融池におけるアーク電流とワイヤ電流の集電・給電はアークの広がり及びワイヤ径を考慮した集電・給電領域を設定した。また溶融池に作用する磁束密度 B_0 は溶融池表面、内部にわたって一様とし、ワイヤ電流 I_w は後方ワイヤの挿入点 P_{WR} から給電され、前方ワイヤで集電されるとし、アーク電流 I_A は母材の無限遠から供給されアーク部で集電されるとした。

アーク電流 500 A、ワイヤ電流 120 A、磁束密度 0.01 T として計算したときの垂直方向電磁力 F_y の分布を図2に示す。

なお、図2にはアーク電流により発生する電磁力、添加ワイヤ電流により発生する電磁力とそれらの合成電磁力を示す。

添加ワイヤ電流による電磁力の分布を見ると、給電部及び集電部に起因する2個の持ち上げ力のピークがあり、これにより合成電磁力の分布は添加ワイヤ挿入点間において幅広く持ち上げとなっている。従来の1ワイヤ式溶融池磁気制御法は、添加ワイヤ電流による持ち上げ電磁力のピークがアーク後方の1個しかなく、合成電磁力もアーク後方でしか持ち上げとなっていないが、開発手法では持ち上げ電磁力の発生範囲が大きく拡大されている。

本法での溶接現象を考えると、まずアークと溶融池の幾何学的な関係から前方ワイヤは溶融池のほぼ先端部に挿入ようになるため、その前方は固体の母材であり引下げ力はビード形状に影響しない。一方、後方の添加ワイヤ挿入点の後部では溶融金属の温度が相対的に低く、粘性が高いため溶融金属が流動しにくい状態であると考えられ、引下げ効果は現れにくい。これに対し、添加ワイヤ挿入点間では高温で粘性の低い溶融金属が多量に存在しており、この部分に重力とほぼ同等レベルの持ち上げ力が作用するため、溶融池全体としては持ち上げ効果が強く現れることが予想される。

3. 実験方法

実験装置は図1(a)に示すように直流定電流特性の溶接電源、添

加ワイヤに通電するためのワイヤ加熱電源、溶融池に対して母材板厚方向の磁場を付与するための励磁装置から構成される。磁場を発生させるコイルは水冷 TIG トーチ先端に取付けた。

供試材は突合継手溶接試験を除き、板厚 10 mm のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 を用いた。突合溶接試験では後述の大型構造物への適用を考慮し、板厚 11 mm の耐候性鋼 SMA 400 AP と板厚 1.5 mm のオーステナイトステンレス鋼 SUS 316 L を接合したクラッド鋼 (全板厚 12.5 mm) を使用した。添加ワイヤはいずれの母材に対しても 1.2 mm 径の SUS 309 MoL ソリッドワイヤを使用した。

4. 実験結果及び考察

4.1 添加ワイヤの溶融特性・ビード形成現象

本法ではワイヤ電流のみならず前方ワイヤの送給速度 V_{Ff} と後方ワイヤの送給速度 V_{Fr} の比がワイヤ溶融・ビード形成の安定性に及ぼす影響が大きいと考えられる。

そこで総ワイヤ送給速度を $\Sigma V_f = V_{Ff} + V_{Fr} = 100 \text{ g/min}$ と一定にし、前方ワイヤの送給速度 V_{Ff} と総ワイヤ送給速度 ΣV_f との比 ($V_{Ff}/\Sigma V_f$) を変化させた場合の添加ワイヤ溶融特性を磁場なしの条件下で調べた。結果を図3に示す。

$V_{Ff}/\Sigma V_f$ が 0.3 以下の領域では、ワイヤ電流 60 A 以上において前方ワイヤが溶融池に挿入される前にワイヤ先端よりアークが発生するアーキング状態となった。また点線より下部の領域では後方ワイヤが未溶融となった。図3中のハッチング領域ではワイヤ電流が 60~140 A の広範囲において前・後のワイヤ送給速度とワイヤ溶融速度がバランスし、安定溶融・ビード形成が可能となった。 $V_{Ff}/\Sigma V_f$ が 0.9 以上では送給速度の低い後方ワイヤでアーキングが発生した。

図3での安定溶融条件 A とアーキング条件 B でのアーク・ワイヤ溶融状況とワイヤ電流波形及び溶接ビード外観例を図4に示す。条件 A ではアーク・ワイヤ電流共安定であるため溶接ビードも安定しているが、条件 B では後方ワイヤのアーキングによりワイヤ電流は激しく変化し不連続なビードが形成されている。

以上の結果及び磁気制御を行う場合ワイヤ電流に比例して大きい電磁力が得られることを考慮して、A 条件が本溶接法の施工に適していると考え以後の実験の標準条件とした。

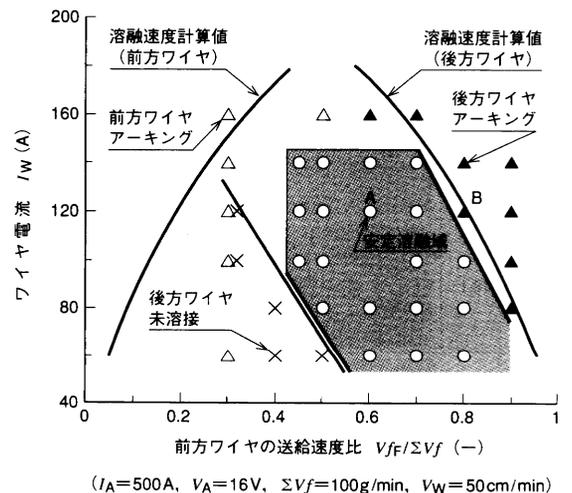


図3 ワイヤ溶融特性とビード形成特性 ワイヤ通電電流、前後ワイヤ送給速度比とワイヤ溶融特性、ビード形成特性との関係を示す。
Characteristics of wire melting and bead forming

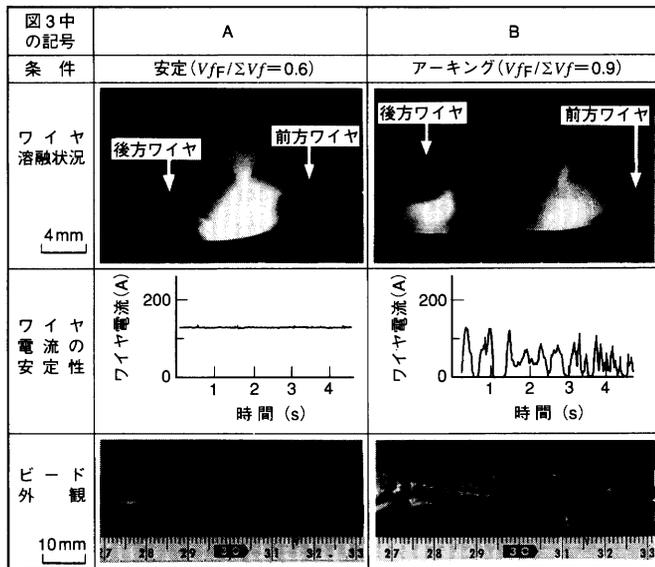


図4 ワイヤ溶融・ビード形成現象 図3中のA点及びB点の条件におけるワイヤ溶融・ビード形成現象の例を示す。
Phenomenon of wire melting and bead forming

4.2 磁気制御時の溶接現象と溶接結果

4.2.1 平板溶接時の現象

(1) ビード形成現象

図5に磁束密度を変化させた場合の溶接ビード外観と断面形状を示す。 $B_0=0$ Tでは垂れ下がりHaによりビード形状の上下非対称化が著しいが、 $B_0=0.01$ Tの磁場を付与すると上向電磁力の押し上げ効果と重力がバランスし、ビードは上下対称の良好な形状が得られる。 $B_0=0.015$ Tまで磁束密度が増加すると、過大な上向電磁力により溶融金属は上方に押し上げられ、ビード上端の接触角は著しく増大するとともにビード下方に浅いアングカッタUcが現れる。またビード下端がやや蛇行する現象が発生し、安定ビード形成が可能な磁束密度の限界が現れる。さら

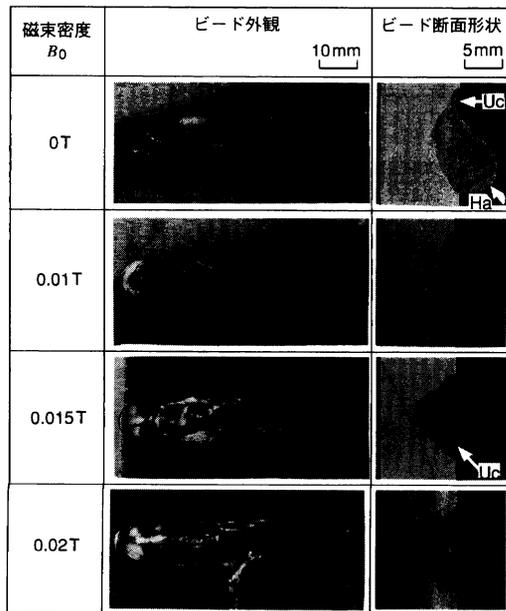


図5 磁束密度とビード外観、断面形状の関係 磁束密度の増加に伴い溶融金属の持ち上げ効果が顕著となる。
Appearance and cross section of weld bead under various magnetic flux density

に $B_0=0.02$ Tまで磁束密度が強くなると、過大な上向電磁力によりビード下部の溶融金属は上方に飛散し、ビード形成が困難な状況となった。

(2) ビード形状の改善効果

図6に余盛形状の改善効果の指標としてオーバラップビードなどの溶接品質面で問題となる接触角と磁束密度の関係を示すが、磁束密度の増加に伴い接触角は減少し、溶接ビード形成が安定で最大の形状改善効果が得られる磁束密度 $B_0=0.01$ Tでは、0 Tの場合に比べ接触角は約1/3に減少している。

4.2.2 開先溶接結果

(1) モデル開先での溶接試験

上述の高溶着速度条件での継手溶接の可能性検討と磁気制御によるビード形状制御効果を確認するため、初層溶接完了後の継手状態を想定したモデル開先試験片(開先角度50°、開先底部幅7mm、開先深さ5mm)にて、1パス溶接を実施した結果を図7に示す。

磁場を付与せず総ワイヤ送給速度 $\Sigma V_f=100$ g/minの高溶着速度溶接を行った場合、断面写真から分かるように溶融金属は重力により下方に垂れ下がり開先上部に深いアングカッタUcが

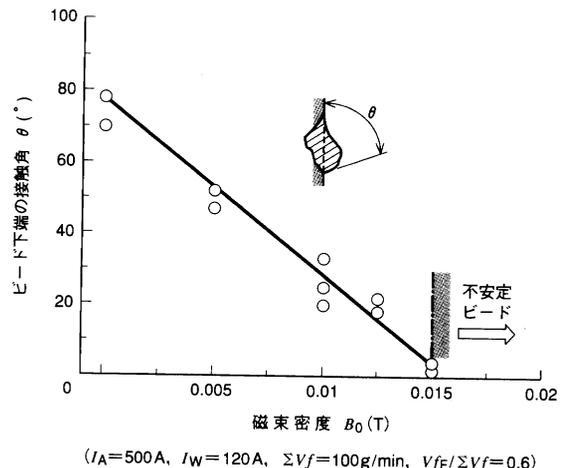


図6 磁束密度と溶接ビード接触角の関係 磁束密度を増加させることで溶融金属の持ち上げ効果が顕著になりビードの接触角は減少する。
Contact angle of bead in various magnetic flux density

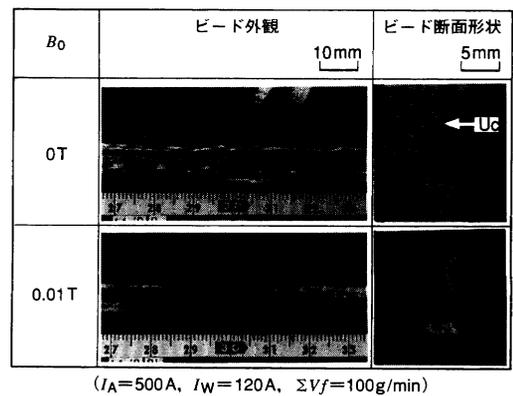


図7 モデル開先でのビード外観と断面形状 開先内においてもビード改善効果が得られることが基礎的に確認できた。
Appearance and cross section of weld bead in model groove

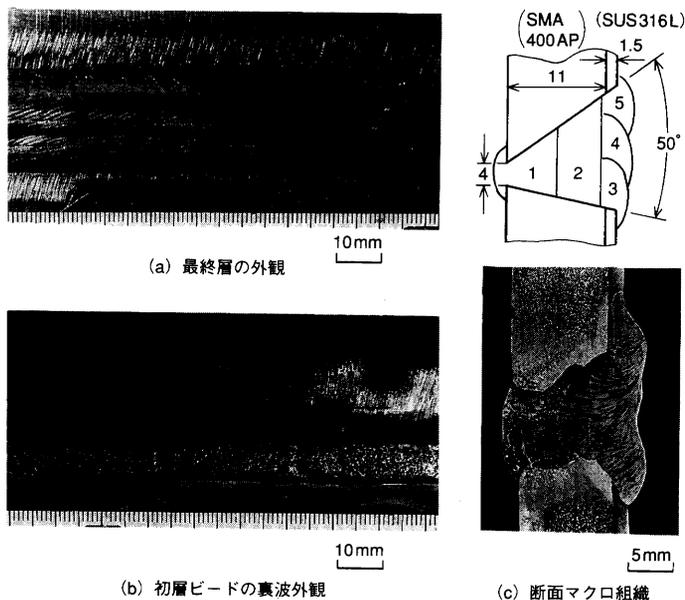


図8 V開先継手の多層溶接試験結果 オーバラップ、アングカット等の形状欠陥のない良好な溶接結果が得られた。
Weld result of V groove joint

発生するとともに下部がオーバラップ気味となっている、外観写真から分かるようにビード幅の変動も著しい。このため本ビードの上に次パスを施工する場合、融合不良を発生しやすい問題がある。

一方、磁束密度が $B_0=0.01\text{ T}$ の場合は上述の不整ビードは防止され、上下対称の溶込み・表面形状のビードが安定して得られている。このことより開先内においても電磁力によるビード形状制御効果が有効であることが確認できた。

(2) 継手溶接試験

大型構造物への本溶接法の実機適用をねらって、ステンレスクラッド鋼板のV開先継手で横向姿勢多層溶接試験を行った。溶接後の表ビード・裏ビード外観・断面マクロ写真を図8に示す。溶接条件は初層では裏波形成の安定化と過度の希釈を防止するためアーク電流 $I_A=320\text{ A}$ 、総ワイヤ送給速度 $\Sigma Vf=40\text{ g/min}$ で施工しているが、第2パス以降は $I_A=450\sim 500\text{ A}$ 、 $\Sigma Vf=90\sim 100\text{ g/min}$ の高溶着速度施工を行っている。上述の電磁力のビード形状制御効果により安定な施工が行え、滑らかなビード形状で継手内部の溶接欠陥や最終層におけるオーバラップ・アングカットなどの形状欠陥も認められない良好な溶接結果が得られている。積層パス数も従来の炭酸ガス溶接法の8パスに対して5パスに低減でき付帯工数も減少した。また継手引張試験、表・裏曲げ試験においても十分な強度と曲げ延性を有する良好な結果が得られた。

5. 大型鋼構造物への適用

これまでの基礎試験結果を基に、図8に示した板厚・開先形状のステンレスクラッド鋼材で構成される大型鋼構造物のブロック接合に適用した。単体ブロックの直径は5 m、高さ3 mの円筒形で、ブロック継ぎの横向姿勢周溶接を行った。適用状況を図9に示すが、図8に示した継手溶接試験と同様に最大100 g/minの高溶着速度施工を安定に行うことができ、実構造物においても本溶



図9 大型鋼構造物への適用状況 図8の継手溶接試験と同等の良好な溶接結果が得られた。
State of practical use for large-scale steel structure

接法により従来のホットワイヤ TIG 溶接法の約3倍の高効率施工が可能であることを確認した。

6. あとがき

横向 TIG 溶接の高効率化、高品質化を目的として、ワイヤ通電抵抗加熱と電磁力を利用した新溶接法を開発し、以下の結果を得た。

- (1) 2ワイヤ式の溶融池磁気制御横向 TIG 溶接法を開発し、添加ワイヤ間の通電による溶融池内の電流経路制御により発生する上向電磁力を用いて、ビード形状改善効果及び溶着量増大効果が著しいことを確認した。
- (2) ステンレスクラッド鋼の継手溶接では従来法（ホットワイヤ TIG 法）の約3倍の高溶着速度施工を行い、良好な継手性能が得られることを確認した。
- (3) 本溶接法をステンレスクラッド鋼製の大型鋼構造物のブロック接合（横向姿勢周溶接）に適用し、ねらいどおりの高溶着速度で高品質な結果を得ることができ、本方法の実用性が確認された。

今後、さらに高溶着速度をねらった研究を続け、適用範囲（材質、板厚等）を広げていく予定である。

参考文献

- (1) 和田ほか、溶接ロボットによる建設現場の施工能率向上に関する研究、経営工学実践研究論文集 No.5 (1998) p.78~87
- (2) 大石ほか、SS-Arc 溶接法の横向き溶接への適用について、第5回溶接法研究委員資料 SW-598-73 (1973)
- (3) 有川ほか、厚板用全姿勢自動 TIG 溶接法の研究、第45回溶接法研究委員会 SW-595-73 (1973)
- (4) 荒田ほか、現代溶接技術大系第2巻一溶接法と基礎一、産報 (1980) p.106~108
- (5) 真鍋ほか、溶融池磁気制御による高効率・高品質横向 TIG 溶接法の開発、三菱重工技報 Vol.35 No.3 (1998) p.226~229