

第6章 結論

6.1 本論文の総括

本研究では、建築鉄骨溶接の工場内溶接で広く用いられている裏当金方式の35度レ形開先のロボット溶接における高能率化と溶接品質の向上ならびに溶接作業における環境負荷低減を目的とし、開先角度を小さくするに当たっての溶接施工性に関する調査、実験、解析を行った。以下に、本研究の結果をまとめる。

第1章では、本研究の背景、建築鉄骨製作における溶接ロボットの現状、および、本研究の目的を記し、狭開先溶接に関する既往の研究について概観するとともに、建築鉄骨における狭開先化の課題とそれに対するロボット溶接の特長について述べた。

第2章では、現在、実際に溶接ロボットを適用している鉄骨ファブリーケータにて、開先角度35度における実物件でのルートギャップを調査した。

この結果、開先角度35度における角形鋼管と通しダイアフラム接合部のルートギャップは4mm～10mm程度で組み立てられていることが分かった。このばらつきの要因が各部材および加工精度の誤差を吸収するためであることから、狭開先化した場合においてもルートギャップ精度は同等になるものと推測され、狭開先化の効果を発揮するためにはルートギャップ範囲4mm～10mmをカバーする必要があると考え、これを適応範囲の目標とした。

第3章では、狭開先溶接において最も重要視すべき初層の高温割れの防止と溶込み深さの確保を主眼として、開先角度を20度から30度に設定した裏当て金方式レ形開先の直線の試験体を用い、ロボット溶接を想定した初層の施工条件範囲に関する実験を行った。

実験は継手の拘束度と開先の収縮に着目して行い、当該継手の高温割れ発生は継手の拘束度が大きく影響し、溶接ひずみによる開先の収縮および変形度合いにより適切な溶接が行える範囲に違いがあることを確認し、継手形状と開先角度に応じた施工条件範囲を示した。また、その施工条件範囲が目標となるルートギャップ範囲(4mm～10mm)の全域において適用可能であることを示した。

さらに、本章の一連の実験において、次のことを確認した。

- ① 一般に割れ発生の判断基準として、溶込み形状係数(H/W)がよく用いられるが、対象となる継手は、拘束度とそれに起因する開先の収縮と密接な関係があり、この継手のように収縮を期待できる場合においては、溶込み形状係数(H/W)で判断すべきではなく、比較的入熱量が大きい溶接条件を用いた方が開先の収縮が促され、割れが発生を抑制できる。

- ② 狭隘部での溶接を行うにあたり、従来のトーチ姿勢を変えない平行ウィービングから振り子状にトーチを傾けらならウィービングさせることで、開先角度が小さくなった場合でも、トーチと開先の干渉を回避しつつ、適切な溶接が行えることを示した。
- ③ 溶込み深さの確保には、高めの溶接電流と溶接速度を速くした組合せが有利であるが、高温割れ防止の観点では低めの溶接電流と溶接速度を遅くし、かつ入熱量が大きい組合せが有利な結果が得られることが分かり、適切な溶接のためには相反する条件範囲の両面を満足する条件の選定が必要である。

第4章では、前章で行った直線継手の試験体で得られた知見を踏まえ、ロボット溶接が最も多く用いられている角形鋼管と通しダイアフラム接合部の周溶接の狭開先化を目的とし、同継手を模した試験体を用いて初層溶接条件の実験を行い、角形鋼管と通しダイアフラム接合部の周溶接における適正な施工条件範囲や、角形鋼管の平行部とコーナ部の違いについて確認した。また、実験結果に対応する部材の変形状況をFEMにて検証した。この結果、同継手は比較的拘束度が小さく、角形鋼管と通しダイアフラム接合部のコーナ部は直線部と比べて高温割れが生じにくいことが分かり、狭開先化に有利な継手であることが分かった。

第5章では、第4章までの結果を踏まえ、開先角度30度および開先角度25度について、角形鋼管と通しダイアフラム接合部を模した中間ダイアフラム方式の試験体を用い、実際に起こりうる数種の溶接順序にて全層溶接を行い、内部欠陥の発生状況、溶接継手の機械的性能、および化学成分分析から、いずれも十分な継手品質が得られることを示した。

また、開先角度の違いや溶接順序の違いが継手の軸方向の収縮へ及ぼす影響／効果についても確認し、角形鋼管と通しダイアフラム接合部の溶接において、開先角度の違いによる柱の軸方向の収縮に大きな違いはなく、収缩量はルートギャップに依存する傾向が見られることが分かった。さらに、ダイアフラムを挟んだ2継手を、同時に溶接する場合と順番に溶接する場合で、最終的に柱の軸方向に生じる総収缩量には違いがなく、順番に溶接する場合、先行継手の軸方向の収缩量は小さいが、後から溶接した継手において大きく収縮し、その収缩量の合計値は、2継手を同時に溶接した場合と同等になることが分かった。

6. 2 今後の課題

最後に、本論文で示した溶接ロボットを用いた狭開先溶接の施工条件の適用に関する今後の課題を以下に記す。

- (1) 本研究では本溶接部のロボット溶接を対象として検討したが、実施工で普及させるためには、組立工程における狭開先継手の取り扱いについて明らかにしていく必要がある。また、組立工程の難易度、作業効率、本溶接における歩留まりなど、総合的な効果を確認した上で、効果的な開先角度の選定が必要と考える。
- (2) 開先角度 25 度の溶接においては、振り子ウィーピングを用いてもトーチと母材の隙間が小さいため、特に仕口部の溶接ビードが存在するダイアフラムの設計ディテールとの取り合いを検討する必要があると考える。
- (3) 今回は、400N/mm²、490N/mm² 級鋼材における溶接施工性を確認したが、最近では 550N/mm² 級や 590N/mm² 級の極厚の鋼板や角形鋼管が用いられるケースも出てきており、狭開先化の効果が大きいそれらへの対応のニーズは高いと考える。高強度の溶接ワイヤとの組合せにおける高温割れの確認が必要である。
- (4) 今回の研究では、ルートギャップ 10mm/角形鋼管径 600 mm□までの確認を行ったが、鋼材メーカー仕様では最大 1000mm□まで存在する。また、最近、少しずつ用いられるようになってきている 550N/mm² 級や 590N/mm² 級級冷間プレス成形角形鋼管においては、最大 1400mm□まで製作可能となっており、近い将来、1 パスの連続溶接時間はさらに長くなることが予想される。一方、狭開先溶接においては溶接ワイヤと母材が接近しやすく、シールドノズルへのスパッタ付着が懸念される。よって、健全な施工を実現するためには、この溶接における 1 パス当たりの連続溶接の限界の把握と、それを長くする新たな手法も必要になると考える。

以上、溶接ロボットを用いた建築鉄骨の溶接の狭開先化に関する実験に基づく検討結果について述べた。建築鉄骨のロボット溶接の狭開先化に関する研究はこれまでほとんどされていなかったが、本研究結果は広く用いられている建築鉄骨溶接用ロボットの単なる高能率化に留まらず、溶接の高品質化と鉄骨造の建築コスト低減、さらには環境負荷低減に寄与できるものと考えられる。

2011 年 3 月 11 日、我が国は東日本大震災という大地震と巨大な津波により未曾有の被害に遭遇した。今後、復興事業や沿岸地区の災害対策など、鉄骨建築の重要性は益々高まるものと予想され、低コストで高品質な溶接を提供することで、少しでも貢献できればと思う。

参考文献

- 1) (株) 鋼構造出版：月刊鉄構技術，2006. 11， p. 26
- 2) (財) 日本建築センター：2008年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル，全国官報販売共同組合，2008
- 3) 竹内直記、菅哲男：大型構造物ロボット溶接教本—建築鉄骨・造船・橋梁—，株式会社新生社，pp. 101-115，1998. 10. 28
- 4) Hiroshi. Matsumura, Hirofumi. Aoki, Tadao. Nakagomi, Naoki. Takeuchi, Shigeru. Nakayama：Certification Scheme for Welding Robot Operators and Types for Building Structures in Japan, International Institute of Welding Croatia 2007 Commission XV, XV -1251-07, 2007
- 5) 曾賀光郎，定廣健次，横田順弘，松村浩史，脇中秀人：鉄骨コラムにおける2継手同時溶接技術の開発，溶接学会全国大会講演概要，第74集，pp. 184-185，2004. 3. 21
- 6) H. Matsumura：DEVELOPMENT OF THE TWO-JOINT SYNCHRONIZED ROBOTIC ARC WELDING SYSTEM FOR ARCHITECTURAL STEEL STRUCTURE BOX COLUMNS, International Institute of Welding OSAKA 2004 Commission XII, XII-1819-04, 2004
- 7) 高田篤人，松村浩史，曾賀光郎：鉄骨コラムにおけるNBFW法への溶接ロボット適用技術の開発，溶接学会全国大会講演概要，第81集，pp. 380-381，2007. 9. 1
- 8) (社) 溶接学会溶接法研究委員会，溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開—アーク溶接はどこまで進むか—，p. I-97，2008. 1. 15
- 9) (社) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事，丸善，2007. 2. 15
- 10) (社) 溶接学会：溶接・接合工学の基礎，丸善，pp. 83-89，1993
- 11) 竹内直記、菅哲男：大型構造物ロボット溶接教本—建築鉄骨・造船・橋梁—，株式会社新生社，pp. 44-50，1998. 10. 28
- 12) (社) 溶接学会溶接法研究委員会，溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開—アーク溶接はどこまで進むか—，p. I-98，2008. 1. 15
- 13) (株) 鋼構造出版，月刊「鉄構技術」，pp. 82-85，2004. 10
- 14) 堀勝義，羽田光明，狭間先アーク溶接，溶接学会誌第68巻第3号，(社) 溶接学会，pp. 41-62，1999
- 15) 竹内直記、菅哲男：大型構造物ロボット溶接教本—建築鉄骨・造船・橋梁—，新生社，pp. 68-69，1998. 10. 28
- 16) (社) 溶接学会／(社) 日本溶接協会：溶接・接合技術データブック，pp. 77-80，2007. 7. 11
- 17) Minoru KAWAHARA, Isao ASNO, BHK Type Narrow Gap GMA Welding Process, NARROW GAP WELDING, The Japan Welding Society, pp. 39-45, 1986

- 18) Susumu SHONO, Osa MATSUMOTO, Hiromasa KAMEI, Development and Application of Narrow-Gap GMA Welding Process with corrugated Wire, NARROW GAP WELDING, The Japan Welding Society, pp.54-59, 1986
- 19) Naoki OKUDA, Minoru YAMADA, Takashi WADA, Yoshizou HASHIMOTO, Kazuo TANAKA, Narrow Gap Submerged Arc Welding Process “KNS Process”、NARROW GAP WELDING, The Japan Welding Society, pp.171-176, 1986
- 20) 産報出版(株), 鉄骨・橋梁製作の溶接自動化・ロボット化マニュアル, P. 48, 1994. 1. 20
- 21) (社) 溶接学会溶接法研究委員会, アーク溶接の自動化技術, p. I-61, 1995. 6. 1
- 22) (社) 溶接学会溶接法研究委員会, 溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開ーアーク溶接はどこまで進むかー, p. I-95, 2008. 1. 15
- 23) 一宮清孝, 長澤二郎, 波川智明, 下川弘海, 森田耕治: 狭開先溶接施工技術の開発ー溶接施工実験(1)ー, 溶接学会全国大会講演概要, 第 81 集, pp. 382-383, 2007. 9. 1
- 24) 波川智明, 下川弘海, 森田耕治: 狭開先溶接施工技術の開発ーその 2 溶接施工実験(2)ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ, pp. 669-670, 2008. 9
- 25) 高野昭市, 伊藤一美, 伊藤清, 千代一郎, 青野弘毅, 森田耕治: 建築鉄骨における 25 度レ形開先に関する溶接施工試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ, pp. 671-672, 2008. 9
- 26) (社) 全国鐵構工業協会・技術委員会: 25レ形開先溶接施工マニュアル, 2006. 10
- 27) (社) 日本建築学会: 建築工事技術指針ー工場製作編, pp. 268-288, 丸善, 2007. 2. 15
- 28) (社) 日本溶接協会溶接棒部会: マグ・ミグ溶接の欠陥と防止対策, 産報出版, 1991. 4, 71-84
- 29) (財) 日本規格協会: JIS ハンドブック 40-1 溶接 I (基本), pp. 756-758/ pp. 766-767, 2008. 1. 30
- 30) 西村利彦, 湊達治, 松村浩史: アーク溶接ロボットおよびそのウィービング方法並びにそのウィービングプログラム, 公開特許広報(A): 特開 2005-21971
- 31) 産報出版(株): 新版 JIS 半自動溶接受験の手引, pp. 122-123, 2006. 4. 30
- 32) (社) 日本ロボット工業会ホームページ: 建築鉄骨溶接ロボット型式認証機種, http://www.jara.jp/x5_att/index.html, (参照 2011. 3. 3 参照)
- 33) 百合丘信孝, 大北茂, 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, pp. 71-73, 1999. 11
- 34) 百合丘信孝, 大北茂, 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, pp. 160-162, 1999. 11
- 35) 日本溶接協会: マグ・ミグ溶接 Q & A, 産報出版株式会社, pp. 169-170, 1999. 4. 1
- 36) 日本溶接協会: マグ・ミグ溶接 Q & A, 産報出版株式会社, pp. 86-89, 1999. 4. 1
- 37) 大西清, JIS にもとづく機械設計製図便覧 (第 10 版), 2003. 12, 13-14
- 38) (社) 日本溶接協会溶接棒部会: マグ・ミグ溶接の欠陥と防止対策, 産報出版, 1991. 4, p. 14
- 39) 溶接学会: 新版溶接・接合技術特論 4 版, 産報出版, p24, 2010

- 40) 小林紘二郎、西本和俊、池内健二：材料接合工学の基礎，産報出版，pp.122-125，2000.3.10
- 41) 難波尚，若間靖志，小森直樹，田淵基嗣：通しダイアフラムの溶接変形に関する計測試験，JSSC 鋼構造論文集，第 13 卷，第 52 号，pp.17-24，2006.12
- 42) (社) 日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説，丸善，2008

<付録> 炭酸ガスを用いたパルス溶接の適用による ガスシールド性および連続運転性向上に向けた検討

1. はじめに

対象としている角形鋼管と通しダイアフラム接合部の溶接は、1000mm□まで存在し、その周長は4000mm近い。また、590N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管においては最大1400mm□まで製作可能となっており、1パスの連続溶接時間は非常に長くなる。一方、狭開先化においては、開先内で溶接ワイヤと母材が接近しやすく、その角度も小さくなるため、微妙なずれによるアークの駆け上がりなどが発生しやすくなる。一方、この溶接で用いられている炭酸ガス溶接はそもそもスパッタの発生しやすい溶接法であり、シールドノズルへスパッタ飛散は多い。よって、狭開先溶接において、ガスシールド性の確保はこの施工法を実用化するために必要不可欠なクリアすべき課題である。

そこで、本研究にて提案した振り子状のウィービングパターンにより、使用した試験体におけるガスシールド性が確保されていることは確認できたが、さらに長時間の連続溶接時間を実現するため、振り子状のウィービングパターンと、最近、35度開先溶接において提案されている炭酸ガスを用いたパルス溶接¹⁾の適用により、シールドノズルへのスパッタ付着量低減に向けた効果を確認する。

なお、本実験は5.4節の実験に加えて行ったものであり、従来法の溶接は5.4節と同じものである。

2. 炭酸ガスを用いたパルス溶接について

炭酸ガスアーク溶接法は、通常、溶接電流の増加に伴い、大粒の溶滴が不規則に移行するグローブール移行形態となり、スパッタ発生量が著しく増加する。これに対し、パルス電流波形を用いた新たな溶滴移行制御では、規則的な溶滴形成と溶滴離脱を行わせることで低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法を実現している。

通常の炭酸ガス溶接では大きく成長した溶滴(図1)がアーク反力に反発しながら離脱する際、溶滴が溶融池と短絡し、アークが再発生した瞬間、溶滴や溶融池の一部が吹き飛ばされたり(図2)、大きく成長した溶滴がアーク反力によって押し上げられながら離脱し、その溶滴自体が回転を伴いながら飛散する(図3)。また、溶滴離脱後、アークが溶滴下部からワイヤ先端に移動する過程において、ワイヤ側に残留した融液が吹き飛ばされる。これに対し、提案の方法は、溶滴形成後、パルスピーク電流によって、その溶滴上部にくびれを形成し(図4)、ベース期間の低電流時に溶滴を離脱させる(図5)。したがって、離脱後の溶滴は静かに溶融池に吸収されると同時に、ベース期間の低電流アークが溶滴からワ

ワイヤ先端に移動するため、ワイヤ側の残留融液を吹き飛ばすことが極めて少ない。溶滴形成・離脱過程の各タイミングにおいて、最適なパルス電流を出力することにより、一定サイズの溶滴を規則正しく移行させることができ、短絡および溶滴変形も抑制することができる。



図1 大きく成長した溶滴

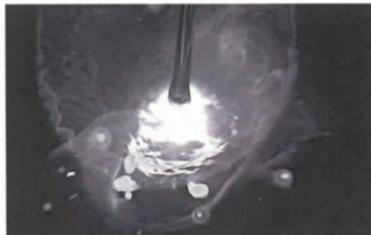


図2 再アークによるスパッタ飛散



図3 溶滴の飛散



図4 小さな溶滴でくびれを形成



図5 小さな溶滴のまま離脱

3. 実験方法

実験は、通常の炭酸ガス溶接法とパルス電流波形を用いた新たな溶接法の2種について、従来の各パス終了後にノズルに付着したスパッタを重量の変化で測定するとともに、目視にて付着状況を確認・比較し、このときの溶接金属の窒素含有量およびその他化学成分を測定した。

開先角度は適応性が確認できている30度、25度の2種とし、試験体は、大きめの角形鋼管として600mm□を使用し、形状は通しダイアフラムを挟んで左右にA/B2継手を設け、それぞれ独立に溶接した。また、ルートギャップは溶接時間が長くなるよう最大の10mmとした。供試鋼材はいずれも角形鋼管にBCP325/板厚22mmを用い、通しダイアフラムおよび裏当て金にはSN490Bを使用した。

溶接条件の一覧を表1~4に示す。パルス溶接を適用した溶接条件は、従来の溶接法と同じ積層パターンおよび溶着量になるように電流値を設定した。なお、パルス溶接を適用した場合の溶着速度は、従来法より速いため、設定する溶接電流は従来法より低い値となっている。いずれの施工法についても、初層のウィービングには振り角度3度の振り子ウィービングを用い、ウィービング幅はルートギャップに対して2mm狭くし、ウィービング

周波数は 2Hz とした。なおルートギャップは溶接時間をできるだけ長くするため、最大の 10mm とした。

溶接結果に対しては、超音波探傷試験、断面マクロ試験による深さ方向の溶込み測定、継手の機械的性能の確認として、A 側/B 側の直線部の溶接金属の引張試験、A 側/B 側の直線部/コーナ部のシャルピー衝撃試験を行い、同衝撃試験片 (N 数 3 個) のうち最も低い衝撃値のものから切粉を採取して窒素分析を行った。また、マクロ試験片から発光分光分析にてその他の化学成分を確認した。引張試験は直線部中央の板厚中央部の溶接金属から JIS-Z-3111 A2 号で実施し、シャルピー衝撃試験は直線部の中央付近およびコーナ部の 45 度方向について板厚表面下 2mm のビード中央部から試験片を採取して実施した。

実験装置は、6 軸多関節型の溶接ロボットとインバータ制御式直流電源を用い、シールドノズルについては、内径 17mmφ のものを使用し、ワイヤ突き出し長さ 25mm、ノズル母材間距離 35mm とした。シールドガスは炭酸ガス (流量:25ℓ /min) を使用し、溶接ワイヤはソリッドワイヤ/ワイヤ径 1.2mmφ/YGW18 (MG-56R: 株式会社神戸製鋼所製) を用いた。

表 1 従来法による開先角度 30 度/ルートギャップ 10mm の溶接条件

パス No.	直線部				コーナ部			
	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)
1	310	34.0	19.7	32.1	280	32.5	16.0	34.1
2	300	33.5	20.5	29.4	260	31.5	16.2	30.3
3	300	33.5	20.1	30.0	260	31.5	16.1	30.5
4	290	33.0	19.2	29.9	260	31.5	14.9	33.0
5	310	34.0	28.2	22.4	280	32.5	23.3	23.4
6	300	33.5	23.4	25.8	290	33.0	19.1	30.1
7	300	33.5	26.7	22.6	280	32.5	23.1	23.6

表 2 従来法による開先角度 25 度/ルートギャップ 10mm の溶接条件

パス No.	直線部				コーナ部			
	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)
1	310	34.0	22.0	28.7	280	32.5	17.3	31.6
2	310	34.0	21.5	29.4	260	31.5	16.9	29.1
3	310	34.0	21.1	30.0	260	31.5	16.9	29.1
4	300	33.5	20.3	29.7	270	32.0	15.9	32.6
5	300	33.5	27.7	21.8	280	32.5	22.6	24.2
6	300	33.5	24.5	24.6	280	32.5	22.0	27.3
7	290	33.0	26.2	21.9	270	32.0	22.4	23.1

表 3 パルス電流を用いた場合の開先角度 30 度／ルートギャップ 10mm の溶接条件

パス No.	直線部				コーナ部			
	溶接 電流 (A)	アーク 電圧 (V)	溶接 速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	溶接 電流 (A)	アーク 電圧 (V)	溶接 速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)
1	297	37.4	20.3	32.8	275	36.3	17.2	34.8
2	299	37.8	20.0	33.9	281	36.6	17.6	35.1
3	300	37.8	20.6	33.0	280	36.8	17.9	34.5
4	308	37.4	19.1	36.2	287	36.5	17.0	37.0
5	277	37.1	29.4	21.0	284	36.6	28.1	22.2
6	280	36.9	25.7	24.1	281	36.7	24.4	25.4
7	278	37.0	28.2	21.9	284	36.5	26.7	23.3

表 4 パルス電流を用いた場合の開先角度 25 度／ルートギャップ 10mm の溶接条件

パス No.	直線部				コーナ部			
	溶接 電流 (A)	アーク 電圧 (V)	溶接 速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	溶接 電流 (A)	アーク 電圧 (V)	溶接 速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)
1	298	36.5	22.6	28.9	278	35.5	19.9	29.8
2	301	37.0	22.2	30.1	282	36.0	19.7	30.9
3	301	37.2	22.1	30.4	277	36.3	19.3	31.3
4	302	37.0	21.6	31.0	278	36.1	18.5	32.5
5	283	36.3	28.9	21.3	287	36.0	28.2	22.0
6	286	35.9	26.5	23.2	280	35.9	25.8	23.4
7	275	36.7	29.9	20.3	275	36.1	29.0	20.5

4. 実験結果

(1) ノズルへのスパッタ付着量

各パス終了時のシールドノズルへのスパッタ付着重量と累積のスパッタ重量を図 6 および図 7 に示す。また、そのときの A 継手でのスパッタ付着状況を図 8 に示す。この結果から、従来法に対してパルス溶接を用いた溶接法では、開先角度 30 度および 25 度の両方について、ノズルへのスパッタ付着量は半減することが確認できた。また、溶接終了後の付着状況も小粒のスパッタがほとんどで良好な溶接が行えていることが分かる。

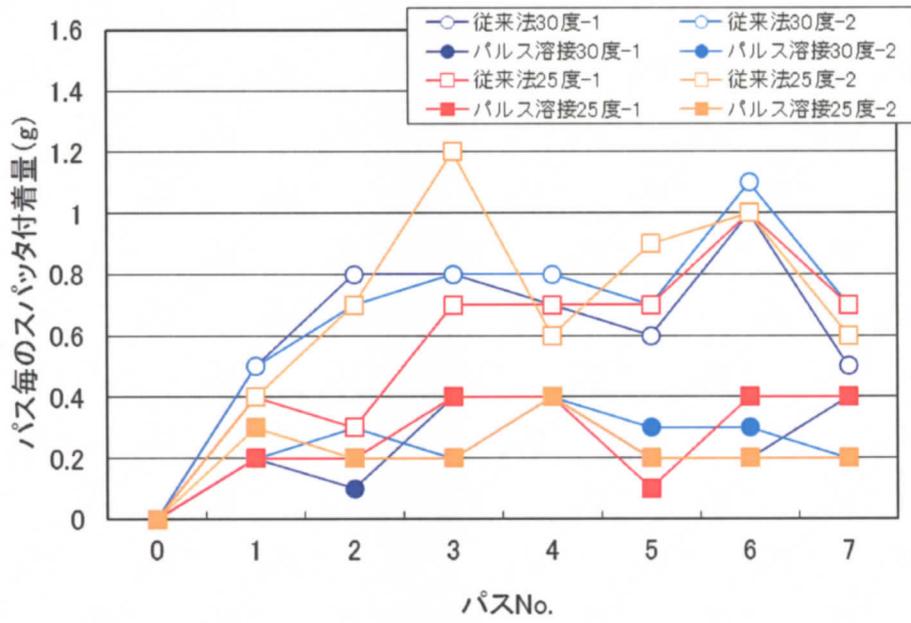


図6 各パス終了時のシールドノズルへのスパッタ付着重量

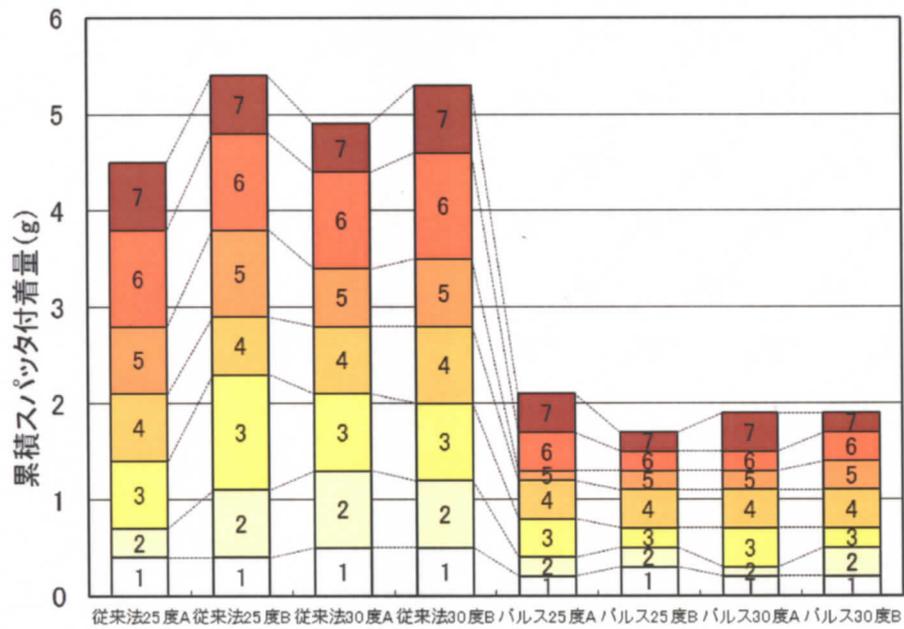


図7 各パス終了時のシールドノズルへのスパッタ付着重量

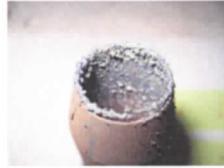
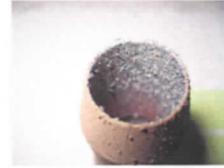
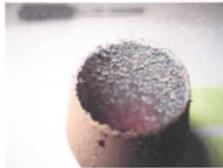
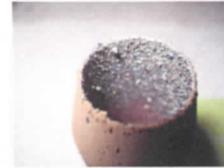
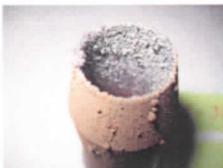
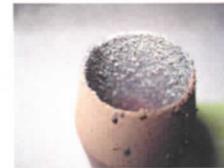
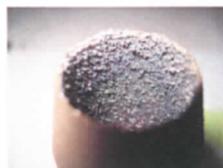
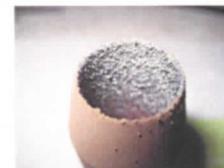
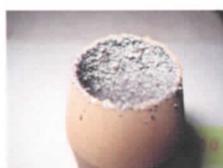
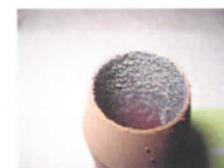
パス No.	開先角度 30 度		開先角度 25 度	
	従来法	パルス溶接	従来法	パルス溶接
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

図 8 A 継手における各パス終了時のシールドノズルへのスパッタ付着状況

(2) 溶接欠陥の確認

各パス終了後の母材温度は、いずれのパスも管理温度とした 250℃より低く、これによる待ち時間は生じなかった。また、超音波探傷試験についても、基準感度調整後、10dB 感度を高めて実施したが、すべての試験体について記録すべきエコーは検出されなかった。さらに、直線部/コーナ部から各 1箇所採取した断面マクロ試験片からも割れやその他欠陥は観察されなかった。深さ方向への溶込みについても各試験体とも 2mm 以上の溶込みが得られている。各継手の母材温度測定結果、および溶込み深さの一覧を表 5、表 6 に、断面マクロ試験結果を図 9 に示す。

(3) 機械的性能と化学成分

表 7 と表 8 に各開先角度について確認した溶接金属の機械的性能と化学成分を示す。いずれの溶接法および開先角度においても、機械的性能は十分確保されている。また、窒素量についてもすべての試験体について 100ppm に満たない健全な値となっている。従来法とパルス溶接法の比較では、パルス溶接を用いた試験体の方が若干少ない結果となった。

表 5 従来法による母材温度測定結果と溶込み深さ

開先 角度 (deg)	パス No.	継手(A)			継手(B)		
		溶接後の 母材温度 (°C)	溶込み深さ(mm)		溶接後の 母材温度 (°C)	溶込み深さ(mm)	
			直線部	コーナ部		直線部	コーナ部
30	1	64	2.8	3.0	51	2.2	4.2
	2	111			102		
	3	156			161		
	4	180			167		
	5	145			162		
	6	138			177		
	7	157			174		
25	1	71	3.0	2.7	58	2.6	3.4
	2	84			89		
	3	146			125		
	4	171			141		
	5	172			147		
	6	187			160		
	7	185			166		

表 6 パルス電流を用いた場合の母材温度測定結果と溶込み深さ

開先 角度 (deg)	パス No.	継手(A)			継手(B)		
		溶接後の 母材温度 (°C)	溶込み深さ(mm)		溶接後の 母材温度 (°C)	溶込み深さ(mm)	
			直線部	コーナ部		直線部	コーナ部
30	1	72	2.0	3.4	50	2.0	3.0
	2	136			107		
	3	178			165		
	4	201			198		
	5	188			186		
	6	199			200		
	7	210			230		
25	1	85	3.8	4.1	94	3.0	3.8
	2	106			114		
	3	154			152		
	4	164			143		
	5	175			166		
	6	185			174		
	7	205			185		

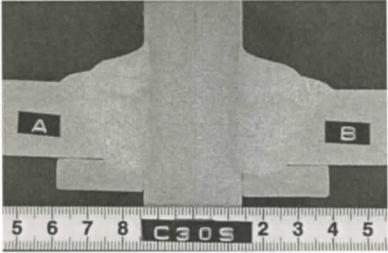
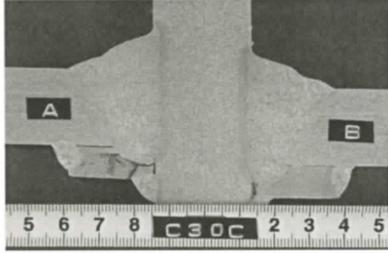
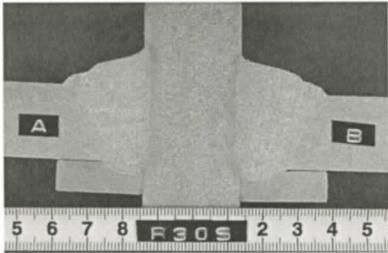
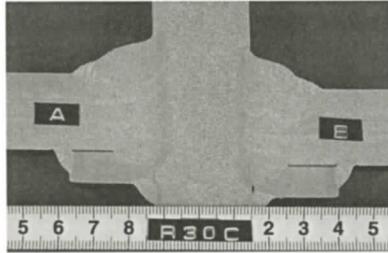
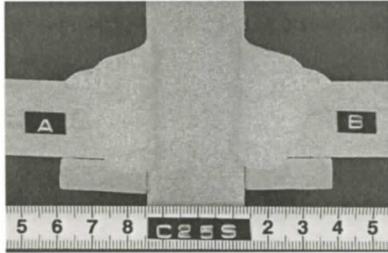
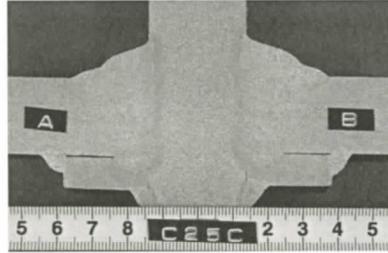
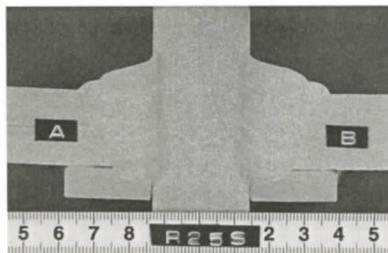
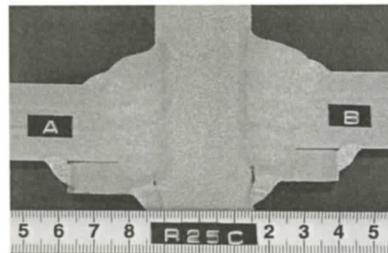
溶接方法	開先 角度	部位	
		直線部	コーナ部
従来法	30		
			
従来法	25		
			

図9 各試験体および部位での断面マクロ試験結果

表 7 溶接金属の機械的性能

溶接方法	開先角度	部位		引張試験			シャルピー試験
				引張強さ	0.2%耐力	伸び	√E ₀ (J)
				N/mm ²	N/mm ²	%	
従来法	30	直線	A	589	508	31	136,132,128
			B	602	514	31	113,112,101
		コーナ	A	—	—	—	133,140,141
			B	—	—	—	135,138,132
パルス溶接		直線	A	577	483	32	103,93,110
			B	582	488	32	99,84,108
		コーナ	A	—	—	—	110,123,106
			B	—	—	—	126,129,126
従来法	25	直線	A	594	509	31	147,121,128
			B	590	505	31	105,125,112
		コーナ	A	—	—	—	111,134,114
			B	—	—	—	72,118,124
パルス溶接		直線	A	592	515	31	135,133,120
			B	605	524	31	133,115,95
		コーナ	A	—	—	—	129,122,119
			B	—	—	—	126,122,132

表 8 溶接金属の化学成分

溶接方法	開先角度	採取位置		化学成分(wt%)							
				C	Si	Mn	P	S	N	Ceq	Pcm
従来法	30	直線	A	0.079	0.60	1.18	0.011	0.003	0.0081	0.308	0.179
			B	0.080	0.60	1.17	0.011	0.003	0.0082	0.307	0.180
		コーナ	A	0.079	0.58	1.15	0.011	0.003	0.0085	0.302	0.178
			B	0.076	0.59	1.17	0.011	0.003	0.0076	0.303	0.176
パルス溶接		直線	A	0.083	0.58	1.12	0.011	0.003	0.0069	0.301	0.180
			B	0.081	0.57	1.11	0.011	0.003	0.0087	0.296	0.177
		コーナ	A	0.082	0.56	1.11	0.011	0.003	0.0062	0.298	0.177
			B	0.088	0.58	1.13	0.011	0.003	0.0074	0.306	0.184
従来法	25	直線	A	0.078	0.57	1.15	0.011	0.003	0.0081	0.301	0.176
			B	0.075	0.57	1.14	0.011	0.003	0.0077	0.296	0.172
		コーナ	A	0.080	0.58	1.16	0.011	0.003	0.0077	0.305	0.179
			B	0.076	0.58	1.15	0.011	0.003	0.0068	0.299	0.174
パルス溶接		直線	A	0.081	0.59	1.14	0.011	0.003	0.0069	0.302	0.179
			B	0.080	0.58	1.14	0.011	0.003	0.0067	0.301	0.178
		コーナ	A	0.083	0.59	1.13	0.011	0.003	0.0066	0.303	0.181
			B	0.083	0.58	1.12	0.011	0.003	0.0058	0.301	0.180

5. まとめ

振り子ウィービングとの組合せにより、炭酸ガス溶接においてパルス電流を用いた溶接方法が狭開先溶接にも適用可能であることが分かった。

また、この溶接では、従来の定電圧特性を用いた施工法と比べ、シールドノズルに付着するスパッタ量を半減できることから、1パスあたりのアーク発生時間が長い継手に対して効果が期待できる。

参考文献

- 1) 山崎圭，鈴木励一，松村浩史：低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法『REGARC』について，溶接技術，産報出版，pp.80-84，2010.5.1

謝 辞

信州大学工学部建築学科 教授 中込 忠男 博士には、入学の機会を与えていただくとともに、本研究の遂行と論文を取りまとめるにあたり、大変お忙しくされているにもかかわらず、終始、懇切丁寧なご指導と多くのアドバイスを賜りました。ここに謹んで厚く御礼申し上げます。

信州大学工学部建築学科 教授 高木 直樹 博士、同准教授 田守 伸一郎 博士、同准教授 五十田 博 博士、千葉工業大学工学部建築都市環境学科 教授 山田 文富 博士には、論文をまとめるにあたり、貴重なご助言をいただき、また、論文審査の際には、大変お忙しい中、お時間を割いていただきました。心より感謝し御礼を申し上げます。

(社)日本溶接協会 技術アドバイザー 竹内 直記 氏 (元(株)神戸製鋼所溶接カンパニー溶接システム部 顧問)には、熱心に入學を進めていただくとともに社内への理解獲得にもご尽力いただきました。このきっかけがなければ、このような機会は得られませんでした。また、(株)神戸製鋼所溶接事業部門営業部 部長 中村 寿宏 氏 (前 同社 溶接カンパニー溶接システム部 部長)、同社 溶接事業部門開発部システム開発室 部長 永田 学 氏、同 次長 中西 紀晶 氏には、入学をご承認いただくとともに、勤務の傍ら本研究を遂行することを暖かく見守っていただきました。ここに深く感謝し御礼申し上げます。

(株)角藤 鉄構事業部 事業部長補佐 石田 常夫 氏には、実施工における現状把握と課題抽出などにおいて多大なご助力をいただきました。心より感謝し御礼申し上げます。

(株)トーキン 代表取締役 竹内 有三 氏には、試験体製作にあたり、特殊な加工・製作にも関わらず、製作方法について一緒になってご検討いただくなど、多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

(株)コベルコロボットサービス 脇中 秀人 氏、(株)神戸製鋼所溶接事業部門開発部システム開発室 主任部員 高田 篤人 氏、同 溶接開発室 山崎 圭 氏には、一連のロボット溶接実験、および実験用ソフトウェアの試作など、多大なご助力をいただきました。また、実験の遂行と取りまとめにおいては、筆者の所属する鉄骨専用機グループの方々をはじめ、多くの方々にご協力いただきました。ここに深く感謝するとともに御礼申し上げます。

最後に、筆者が社会人として(株)神戸製鋼所に勤務する傍ら、長期間に渡る大学院生活を送ることにおいて、負担をかけてしまっている中でも支えてくれた妻と2人の息子に心より感謝いたします。

2011年9月

松村 浩史