

建設機械・クレーン「プロセス・施工編」*



山中 伸好**

Construction Equipment, Crane (Process & Construction)*

by YAMANAKA Nobuyoshi**

キーワード 建設機械, 溶接ロボット, 高能率溶接, タンデム溶接, 裏波狭間先

1. はじめに

建設機械とは、河川や道路などの土木工事やビルなどの建築工事に使われる機械である。第二次世界大戦でブルドーザが活躍した後、日本では戦後の復興から高度経済成長期に工事の機械化が国を挙げて進められ、国産のブルドーザや油圧ショベルなどが次々と開発されて導入された。その後、安定成長期になり公共工事が減少すると、ビル解体で発生したコンクリートのガラを現場で破碎して再利用する新しい機械の開発や建設工事以外の分野への展開も図られ、油圧ショベルの作業機を変えた機械が製鉄所や産業廃棄物の処理、災害救助用の作業車として使用されている。

また日本での需要が頭打ちになるため早くから海外に活路を求めて進出し、中国やロシアなど新興国のインフラ整備や中近東の不動産開発に導入された。リーマンショックや中国での金融引き締めによりインフラ需要は一時的に減少しているが、新興国の経済成長に伴う活発な資源開発が今後も継続することで、建設機械を大型化した鉱山機械の長期的な需要が見込まれている。

海外の需要増加に伴い現地生産の体制も進んでいる。国内の生産活動が空洞化すると言われていたが、国内工場は製品の生産性と品質を向上させるためのマザー工場という重要な位置付けにあり、最先端の製造技術を開発して、海外工場に展開して利益を上げることが求められている。また建設機械のキーコンポーネントであるエンジンや油圧機器は高度な製造技術と品質管理が必要で、このような付加価値の高い部品を安定して海外に供給することも国内工場の重要な役割になっている。

2. 製品と工法

図1のグラフは日本国内での建設機械の種類別生産金額である。河川や道路の維持管理、都市の工事で使われる油圧ショベルやミニショベルが最も多く、次に建築工事で使われるクレーンが続く。土砂を押し出し、盛土や整地作業を行うブルドーザや土砂、碎石のダンプトラックへの積載や除雪作業に使われるホイールローダは全体では少ない。欧米では日本ではほとんど見られない畜産などにも使用されるスキッドステアローダやホイールローダの後方に掘削用の作業機が付いたバックホーローダが多く、米国ではスキッドステアローダが需要の3割近くを占めている。道路機械としては、車体中央にブレード（排土板）を吊り下げて道路の整地を行うモータグレーダや舗装路を固めるローラ、アスファルトフィニッシャーなどがある。

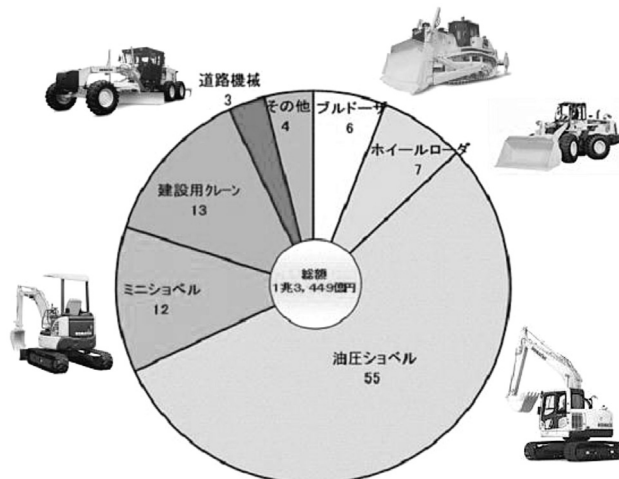


図1 平成22年度国内建設機械生産高構成比
出典：建機工自主統計

*原稿受付 平成24年1月5日

**正員 コマツ 生産技術開発センタ

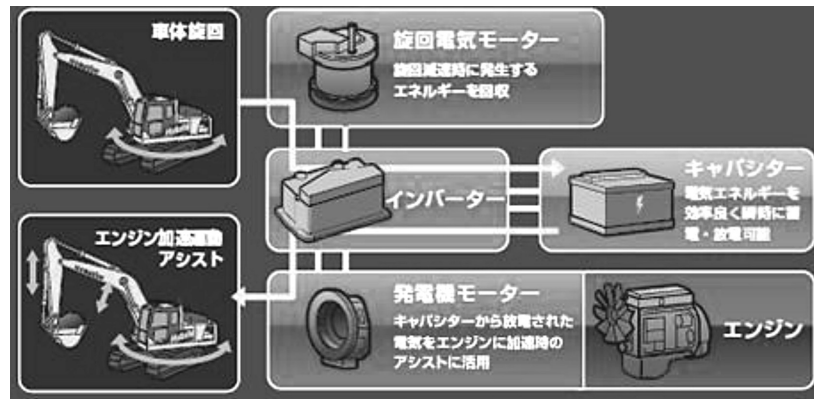


図2 ハイブリッド油圧ショベルの構成

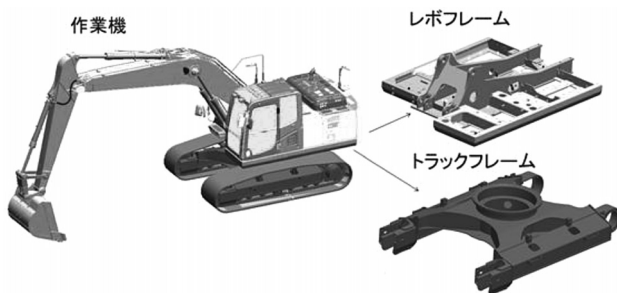


図3 油圧ショベルの主要構成部品

本稿では、世界的にも需要の最も多い油圧ショベルを対象に製品紹介と製造方法、溶接プロセスについて説明する。

2.1 油圧ショベルの製品紹介

油圧ショベルは油圧駆動する複数の軸の先端に作業に合わせて各種アタッチメントを取り付け、整地や運搬、積み込み、掘削だけでなく、アタッチメントを交換することでスクラップ処理や林業、砕石、鉱山、道路整備・管理、ブロック運搬、草刈りなど多岐に使用できる自走式の建設機械である。都市では、建物を造るための掘削や積み込み、人が暮らすために必要な上下水道やガス管の敷設、建物の解体が必要で、油圧ショベルは欠かせないものになっている。狭い場所でも工事できる車体質量が6t未満のミニショベルや車体幅内で旋回する後方超小旋回型、低騒音型などが街でよく見られる。

一般的な油圧ショベルはディーゼルエンジンを動力にして油圧ポンプを駆動して、油圧によって走行、旋回、作業アームを操作している。エンジンと油圧ポンプは電子制御化されており、エンジンの出力が最大限に油圧ポンプに伝達されるように制御することで作業性と燃費を向上している。この技術が海外に進出する日本メーカーの強みになっている。

油圧ショベルの最大市場である中国では、油圧ショベルの年間の稼働時間が欧米の2倍以上あり、人件費は安いですが、燃料代は比較的高いため、燃費の向上が大きな課題であり、自動車と同じようにエンジンと電気モーターによるハイブリッド油圧ショベルが開発されている⁹⁾。定常運転時はエンジンによって発電モーターが回り、蓄えられた電気で車体旋回部に付いている電気モーターを回しているが、頻度

の高い旋回動作の減速では逆に回生エネルギーを旋回電気モーターで回収して蓄電し、加速時に必要な油圧ポンプの出力を発電機モーターでアシストする機構になっており、これで燃費を向上させている(図2)。最高の効率で駆動するための制御方法がキー技術になっている。また燃費だけでなく、CO2削減や騒音の低減のためにエンジンがなくバッテリーのみで駆動する油圧ショベルも実用化されている⁹⁾。

2.2 油圧ショベルの構成部品

油圧ショベルは大きく3つの部位に分かれる(図3)。一つ目は作業機と呼ばれる部分で、本体から順にブーム、アーム、土砂を掘削するバケットがあり、各部には油圧で駆動するためのシリンダが取り付けられている。ブームとアームは鋼板で箱型に組み立てた溶接構造物でボス穴部には鋳物が使われている。油圧シリンダはロッドとチューブで構成され、作業機に取り付け部になるロッド側のヘッド部とロッド、チューブのボトム側とキャップは溶接される。

二つ目はレボフレーム(上部旋回体)と呼ばれる部分で、キャブ(運転席)やエンジン、油圧ポンプ、燃料タンク、作動油タンク、作業機とのバランスをとるためのカウンタウエイトといった主要な機能部品が搭載されている。建設機械のディーゼルエンジンにも厳しい排ガス規制があるため、最新型はトラックやバス同じようにエンジンから排出される粒子状物質(PM)を捕集するDPF(ディーゼルパーティキュレートフィルタ)が搭載され、ハイブリッドのモーターもあるため、レボフレーム上にはそれらの機器が隙間なく配置されている。レボフレームの下面にはスイングサークル(旋回軸)が取り付けられており、下のトラックフレームに対して回転する機構になっている。

三つ目はトラックフレーム(下部走行体)と呼ばれる部分で、油圧ショベルが移動するための走行機能がある。左右の油圧モーターがスプロケット(駆動輪)を回転させ、左右に巻き付いたクローラが回転して走行する力を生み出す。クローラは多数のシュー(履板)と呼ばれる滑り止めがある部品数十個で構成されている。

2.3 油圧ショベルの製造工程

油圧ショベルの本体組立工場では、大型の溶接構造物であるブーム、アーム、レボフレーム、トラックフレームを製作している。切断した鋼板と鋳物を仮組みして、GMAWで溶接線の90%以上をロボットで溶接している。ロボッ

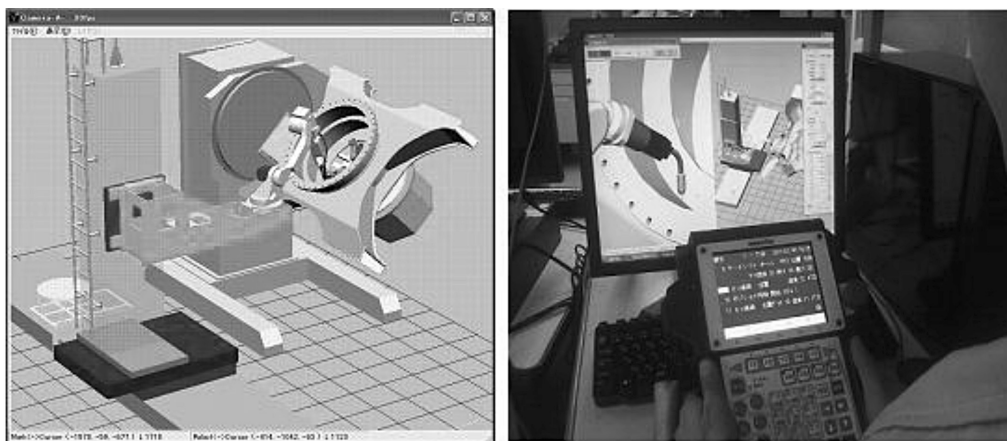


図4 建設機械の溶接ロボットシステムとオフラインティーチング

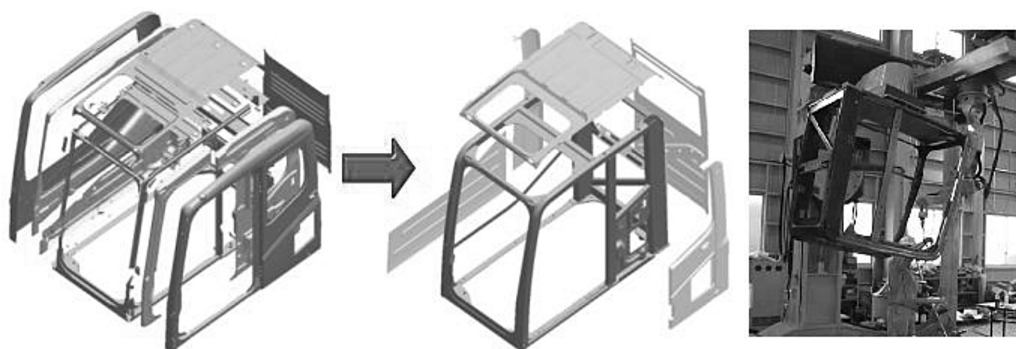


図5 従来キャブ（左）とROPS（右）

トで溶接する理由は、ポジションによりワークを溶接に最適な姿勢にでき、高いレベルの溶接品質を維持できると作業による半自動溶接より高能率な溶接ができることである。大型の構造物のために、XYZ方向に動く走行装置の上に6軸の多関節ロボットを置き、回転する2軸のポジション上にワークを載せて油圧クランプで把持している。

1 ワークの溶接時間が1～3時間と長時間で、以前は工場の溶接ロボットの生産を止めて、膨大なロボットプログラムをティーチング作業で作成していたが、現在はパソコンを使用したオフラインティーチング³⁾が普及して、生産とティーチングを並行してできるようになった。(図4)。

近年、生産量が急激に増加した新興国の工場では、安い人件費で生産コストを低減できるが、溶接品質を維持するために多くの熟練した溶接作業を集めることは難しい。そこで生産コストは割高にはなるが、溶接品質を安定させるためにロボット化を進めている。ロボットで溶接できない部分は作業者が溶接しており、ロボット化が進んでも熟練溶接作業者は必要で、この作業者はロボットの溶接を管理、監視する上でも欠かせない。

溶接後はワークのスパッタ除去などの仕上げ作業を作業者がする。GMAWのシールドガスをCO₂にするとスパッタが多く付着して仕上げ作業に時間がかかり、MAG(Ar:80%, CO₂:20%)にすると減少するが、新興国では人件費が安いのでCO₂が選ばれている。次に溶接部を超音波探傷試験で検査し、合格後、ショットブラスト処理で下地加

工をして塗装して乾燥させ、組立工程に送る。

油圧ショベルの機能部品であるキャブやエンジン、油圧ポンプ、燃料/作動油タンク、油圧シリンダは外部のメーカーが製作している。キャブは車体転倒時に運転者の保護をするために転倒安全規格(ROPS)に対応している。以前はプレス成型した鋼板をスポット溶接していたものから、パイプを骨格にして鋼板をGMAWする工法に変更している(図5)。溶接姿勢をとるために2軸の回転ポジションに2方向に移動する走行装置を付けた溶接ロボットシステムを開発している。

燃料/作動油タンクもキャブと同様にプレス成型した鋼板をロボットでGMAWしている。タンクは内部の清浄度を落とさず、油漏れが発生しないように部材の精度を上げて隙間をなくして仮組み、溶接することが重要である。

3. 溶接接合プロセスおよび施工

3.1 高能率 GMAW

ブーム、アーム、レボフレーム、トラックフレームの溶接で使用されるロボットシステムは大型で軸数も多く高額な設備で、台数を低減するために高能率化の要求が高い。鋼板は一般構造用圧延鋼材SS400がほとんどで、バケットなどで耐摩耗鋼板が使用されている。溶接継手としては、ほとんどが隅肉で一部レ型開先になっており、厚板を使用しているため脚長が大きく、ワイヤ使用量が多い。ワイヤは軟鋼および高張力鋼用マグ溶接ソリッドワイヤの

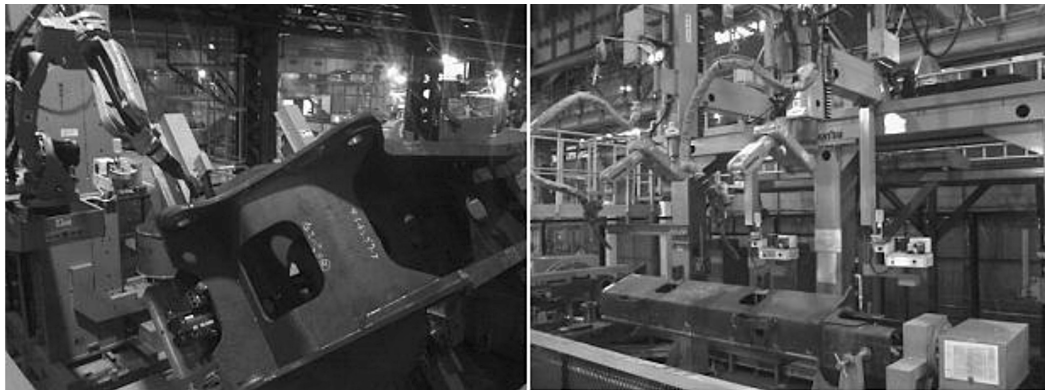


図6 レボフレーム(左)とクローラ(右)の溶接ロボットシステム

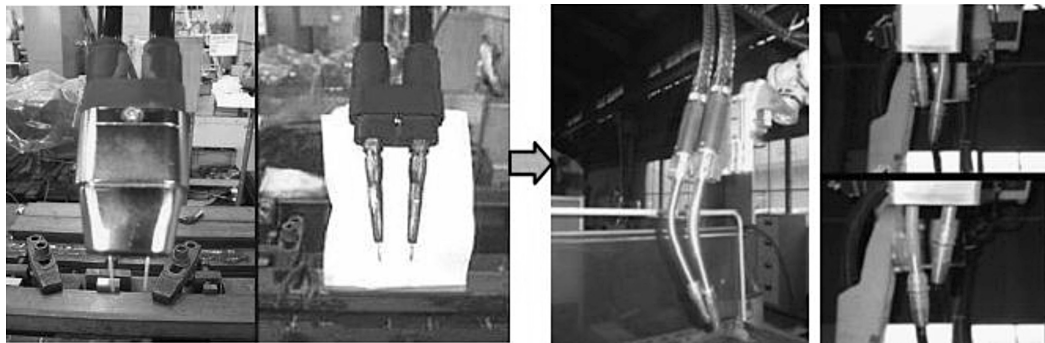


図7 タンデム GMAW トーチの初期型(左)と改善型(右)

高電流用 YGW11 (CO₂), または YGW15 (Ar: 80%, CO₂: 20%) を使用している。高い電流の高効率溶接を行うために、隅肉継手を水平ではなく下向き姿勢にしている。そのため溶接ロボットシステムのポジションは2軸にして隅肉継手が下向き姿勢になるように回転させて溶接している。また走行装置にロボットを複数台乗せて同時に溶接するシステムも多い(図6)。

建設機械の溶接では、ロボットに2本の溶接トーチを持たせ、2台の溶接電源に接続して2本同時にアークを出して溶接するタンデム GMAW が実用化され、2001年ごろから量産に適用されて溶接時間は従来の1/2以下に短縮している⁹⁾。初期のタンデム GMAW 用のトーチは1ノズル内に2本のコンタクトチップがある特殊品である。これは通常の1ノズル1コンタクトチップのトーチよりシールドガスの流れが悪く、またノズル自体が大きいためワークとの干渉が発生して溶接できない箇所が増加する問題があった。そこで一般的なトーチを2本取り付け、ワークとの干渉を避けるために各トーチがロボットの指令で上下に動く機構を追加したものを開発している(図7)⁹⁾。

厚板の溶接では入熱量が大きいため溶接中にワークが熱歪みで変形するので、ウィーピングしながら溶接電流の変化を検出して位置を補正するアークセンサを使用している。コンタクトチップから母材までの距離は20mm以上になるため、送り出されるワイヤの曲りで狙い位置が変化するので、アークセンサは熱歪みとワイヤの曲りを補正していることになる。タンデム GMAW では各トーチから送り出されるワイヤの曲りが同じではないため、先行するトーチの狙い位置を正しく補正しても、後行のトーチは

ワイヤ曲りで位置がずれる場合がある。そこで2本のトーチの溶接電流を検出して、それぞれが正しい狙い位置にするアークセンサが開発されている⁹⁾。

タンデム GMAW では2本のトーチを近づけて2つのアークで1つの溶融池を形成し、先行アークが溶融地を後ろに押し上げる力を後行アークが止めて溶融池を両側に広げているので凸ビードになり難い。また先行アークは電圧を下げて短くする埋もれアークにすることで安定する。これで余盛りの少ない、止端形状の良好なビード形状で、先行トーチの埋もれアークにより溶け込みの深い溶接ができる(図8)。

しかし2つのアークが、発生する磁場によって干渉する問題やアーク力によって溶融池が2か所で押されて中央部に湯だまり(図9)が発生するが、この位置を安定させるように溶接電流と電圧を調整する必要がある、また精度の高いワイヤ送給装置や高品質なワイヤも必要で、1トーチの溶接より溶接品質を維持することが難しい。

さらに溶着量を上げようと電流を上げると、強いアーク力で湯だまりが不安定になることがわかっており、タンデム GMAW では溶融池を安定させることが課題になっている。

高能率 GMAW の別の方法として従来の1本トーチの溶接で高速でワイヤを送り、高い電流で溶接する大電流 GMAW がある。溶接ワイヤの送り量を上げると電流は上がるが、ワイヤ径1.4mmでは200A近辺まではワイヤが母材と短絡して溶融して母材に流れる短絡移行になる。ここから300A付近まではワイヤ先端から溶滴になりアーク中を通過して落下するが、ワイヤ径より大きな溶滴が発

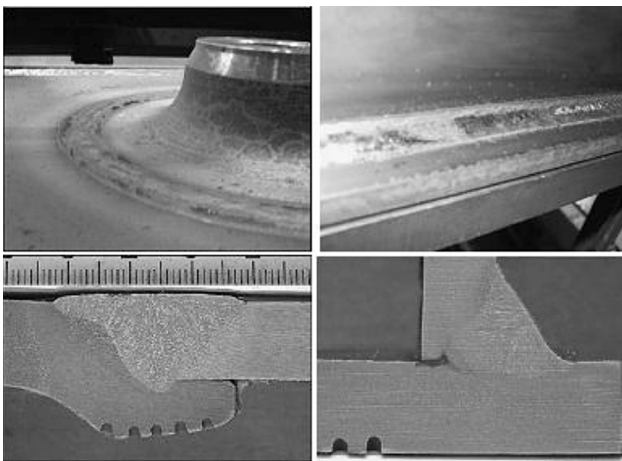


図8 タンデム GMAW のビード外観と溶け込み

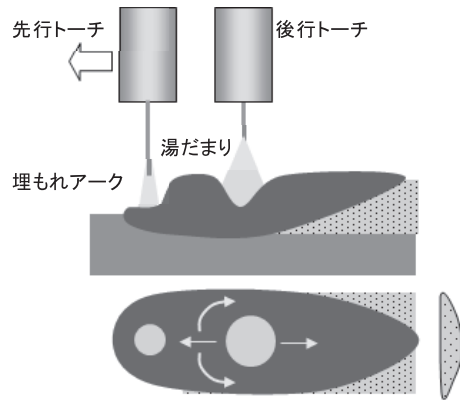


図9 タンデム GMAW の溶融池の状態

移行形態	短絡移行	グローブ移行		スプレー移行		
		反飛移行(CO ₂)	ドロップ移行(MAG)	プロジェクト移行	ストリーミング移行	ローテーティング移行
移行状況						
電流	小	小	小	中	中〜大	大
スパッタ	小さいスパッタが多い	スパッタ量大	スパッタ量少ない	スパッタ量極少	スパッタ量中	スパッタ量大、NG

図10 GMAW の溶滴移行形態

生するために落下の際の飛散やアークの反力によって落下する前に飛散することで大量のスパッタが発生して不安定なグローブ移行になる。さらに電流を上げると溶滴が小さくなるプロジェクト移行になり、スパッタが発生しない安定した状態になる。従来は、スパッタの除去作業が少ないので、この領域を狙って溶接していた。さらに溶着量を上げるために、500Aを越えると小さな溶滴が繋がったストリーミング移行になる。安定した状態では直下の溶け込みが深い溶接ができる。さらに電流を上げ、ビード形状を調整するために電圧を上げてアーク長を伸ばすと、左右に大きく振れて回転するローテーティング移行になり、溶けたワイヤが振られて大量のスパッタが発生する(図10)。

大電流 GMAW には高速、高トルクでワイヤを送れる送給装置が必要である。建設機械を溶接するロボットシステムは、溶接ワイヤのバックから溶接トーチまでの距離が非常に長く、10m 近くになり、曲がりくねった経路を通過するため、ケーブル内での摩擦が大きく、またロボットが動くことによって摩擦が変化する。古い溶接電源はワイヤを送る力が弱く、送り量を上げて電流 500A 近くになると摩擦によって送り速度が変動してストリーミングやローテーティング移行になる前にアークが不安定になる。

500A 以上の大電流 GMAW が可能な GMAW 用溶接電源は、日本国内にはほとんど販売されていないが、パワー部を 2 個内蔵したものが海外では存在する。ワイヤを高速で送って摩擦が変化しても瞬時にモータ電流を変化させて速度を安定させる性能のよい速度制御を持ったワイヤ送給装置が付いている。

溶接の移行状態はワイヤ径や電圧によって変化するが、

ワイヤ断面の単位面積当たりの電気量である電流密度 (A/mm²) が高いほど大量のスパッタが発生するローテーティング移行になる。溶接ロボットで使われるワイヤ径 1.2/1.4/1.6 mm の適正な電圧では、電流密度の違いで 1.2mm は 400A を越えた辺りでローテーティング移行になるが、1.6mm は 600A を越えてもローテーティングは発生しない。ローテーティング移行直前までを使用可能な電流域とすると、1.6mm が最も溶着量が多いが、300A 以下の低電流での溶接が安定しないため、低電流から使う場合には 1.4mm のワイヤが良い (図11)。

溶接電源やワイヤ、シールドガスを変えることで、高電流域でスパッタを発生させない移行状態にできる。ワイヤの成分を変えて、通常の極性と逆の棒マイナス溶接で安定化させる方法が開発されている。

大電流 GMAW は溶接時間を短縮するだけではなく、強いアーク力で溶け込みが深くなることを利用して、K 型開先や X 型開先の突合せ溶接で実施している作業員による裏はつり作業を廃止できる。通常は、片面からの溶接し、反転して作業員がガウジングで開先を作る裏はつりを行い溶接しないと融合不良が発生する。大電流 GMAW では深い溶け込みの溶接が可能なので、裏はつりをしなくても融合不良のない溶接ができる(図12)。ワークの反転装置があれば、溶接ロボットで自動化することも可能である。

大電流による強いアーク力は良い面ばかりではなく、吹き抜けが発生しやすく、またビード面が波打つように荒れた形状になる不利な面があり、さらに大電流化を進めるためにはアーク力を抑制する技術が必要である。

3.2 片面溶接による板継ぎ

建設機械のブームやアームの側板は軽量化と材料コス

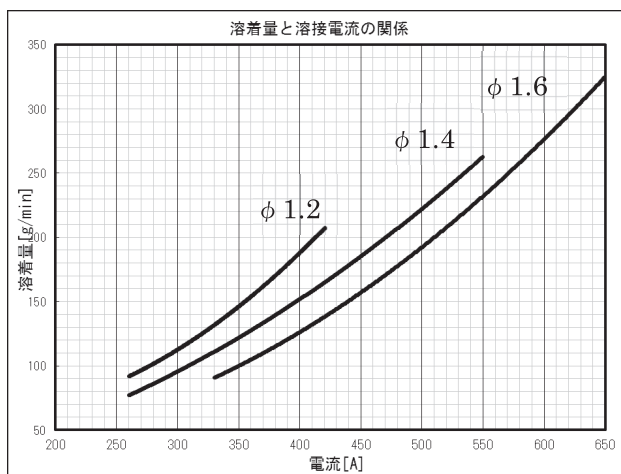


図11 溶接ワイヤ径別の使用可能電流範囲と溶着量

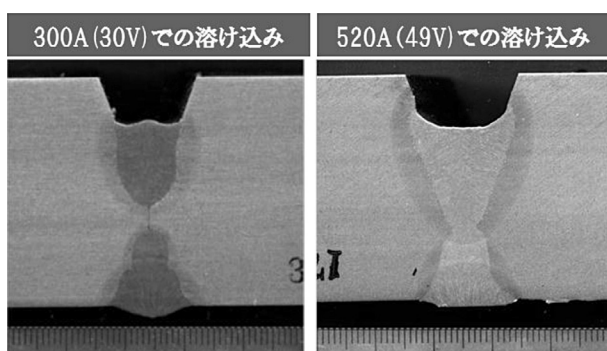


図12 X型開先の溶け込み比較

ト低減のために3分割して、板厚の異なる板を突合せ溶接をしている。両面溶接にするほど厚板ではないためレ型開先でギャップを付け、水冷した銅板を裏あてにして、溶接ロボットを使用した片面裏波溶接を行っている。溶接ロボットは正確なウィーピング動作と溶接中の電流、電圧を一定にして溶接できるため、最適な溶接条件に設定すればフラックスワイヤを使わずにソリッドワイヤでも銅板の焼き付きがなく、品質の良い裏ビードで溶接できる(図13)。また切断精度のバラツキで開先幅がテーパ状に変化するが、溶接前にロボットのタッチセンサで開始部と終了部の開先幅を測定して、ウィーピング幅と速度を開先幅に合わせて制御して対応している。

ワークの拘束力を上げても溶接中に溶接部が縮んで開先幅が小さくなるが、溶接の電流から実際の開先幅を検出して溶接条件を制御するアークセンサも開発している(図14)。

片面溶接は角変形が大きいため、逆歪みを付けて仮組みしているが、ワークごとに開先幅にバラツキがあると、歪量に変化する問題が残っており、今後改善する必要がある。

3.3 シリンダロッドの溶接

シリンダロッドのヘッド部とロッド部は径によって異なる溶接法を使用しているため紹介する。ミニショベルで使用する小径のシリンダロッドは摩擦圧接で接合している。摩擦圧接機は、ロッド側を高速で回転させてヘッド側に押し当てて発生した摩擦熱で軟化させ接合している。圧

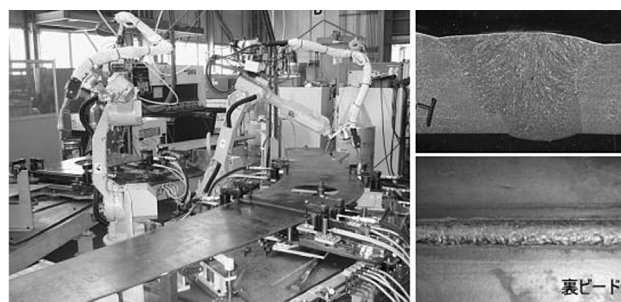


図13 板継ぎ溶接ロボットと溶接品質

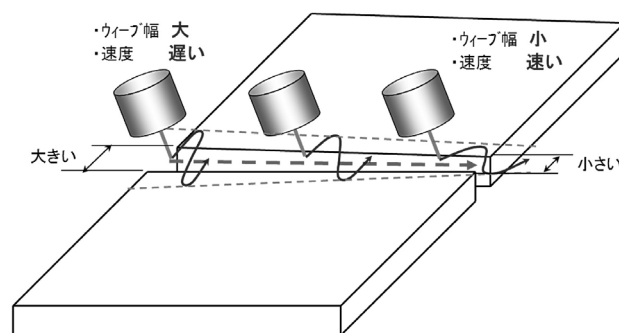


図14 開先幅のアークセンサ補正

力を加えるため圧接した部分は短くなり、外周部にバリが発生するため、バリを切削する機能も備わっている(図15)。

ミニショベルよりバケット容量が大きく掘削力の高い油圧ショベルは、シリンダロッドの径が大きくなり、小径用の摩擦圧接機では接合できない。大型の摩擦圧接機が必要で圧力の制御も難しくなる。そこで径が大きいシリンダロッドは接合部にV型の開先を付けてGMAW専用機で溶接している。

開先角度は10度以下で多層盛り溶接を行っている。シールドガスはCO₂でソリッドワイヤを使用しており、専用機は各層の回転速度と狙い位置、溶接電流、電圧、ウィーピング振幅、周波数を指定できるので、凝固割れ防止や入熱量を制御した最適な条件に調整できる。ただ全層を自動溶接できるが、スラグ巻き込みの可能性があるため、途中で停止して手作業でスラグ除去する必要があり能率が悪く、開先内ではシールドガスに乱流が発生しやすく、特にビード幅の差が大きい初層や最終層でブローホールが発生しやすい問題がある。また全体の入熱量を少なくしてシリンダロッドヘッド部の歪みを低減する課題もある。

そこで溶接時間の短縮と入熱量低減を狙って溶接ロボットを使用した狭開先化を進めており、開先角度を0度することで溶接時間と入熱量を30~50%低減している。スラグ巻き込みは狭開先でも発生するが、ほとんどが開先壁面付近の融合不良で発生するため、パルスMAG溶接法とウィーピング動作の両端でトーチを傾ける動きを入れて溶け込みを深くすることでスラグ除去なしで溶接している。また全層でビード幅が同じなのでシールドガスの調整が容易で、最終層のみ流量を変えることでブローホールのない溶接をしている。ウィーピングでトーチ(ワイヤ)を傾ける動作は専用機でも可能だが、ロボットを導入するこ



図15 摩擦圧接と切削

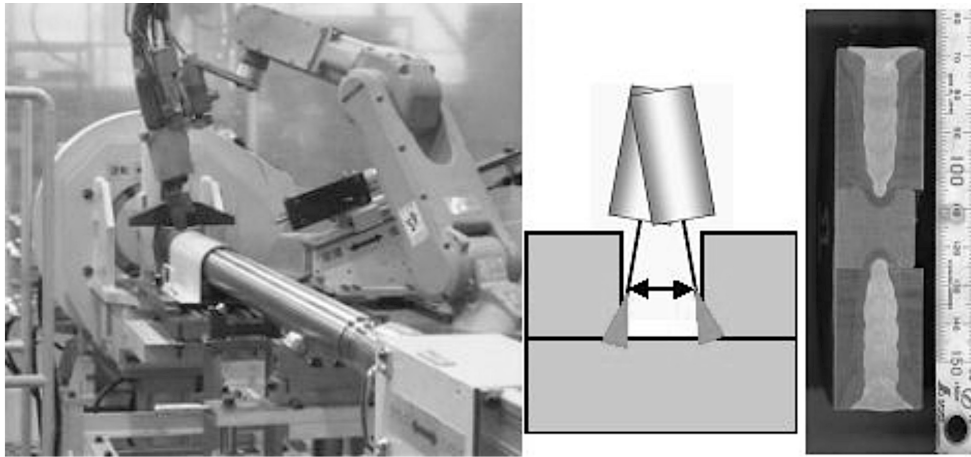


図16 シリンダロッド PGMAW ロボット

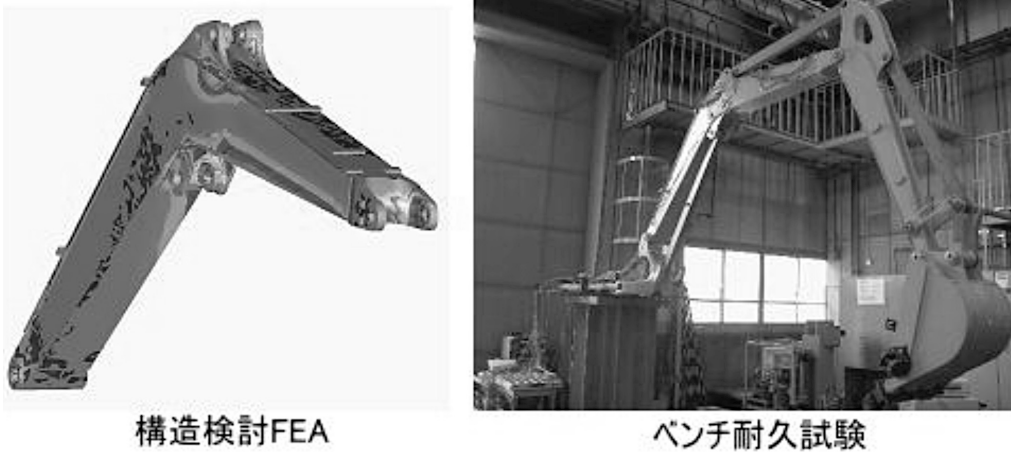


図17 作業機の構造検討とベンチ試験

とで、トーチに前進角をつけることやワイヤ曲りのずれをアークセンサで補正することも可能になり、溶接品質を向上できる（図16）。

4. 検査および品質管理

4.1 溶接構造物の設計

建設機械の溶接部の強度は疲労強度が律速となることが多く、設計段階にFEA（有限要素解析）を活用した溶接

部の品質設計と、要求を満たす構造の立案と応力の照査を実施している。さらに、実体試作機を用いて実車での応力試験とベンチ耐久試験を実施して疲労強度のバラツキを考慮した品質確認を行っている（図17）。

4.2 溶接部の検査

製造工程のロボット溶接、作業による溶接、仕上げ作業の後に溶接部の外部および内部品質の検査を行っている。溶接ビード外観は作業者が仕上げ作業のときに脚長や余盛りをJIS規格に準拠した社内規格に基づいて確認し

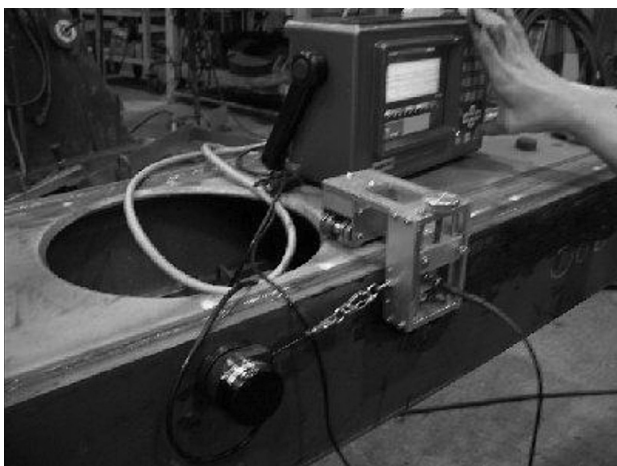


図18 半自動の UT 溶け込み深さ検査装置

ている。ロボットによる溶接が進んでいるため、最新のロボットや溶接電源を使用すれば、溶着量がワークによって変化することがないため品質は安定しており、規格外になることはほとんどない。

溶接内部の品質は、非破壊の超音波探傷検査 (UT) で行っている。溶接内部の欠陥を検査するにはビードを避けられる斜角探傷を使用している。また垂直探傷は一部の隅肉や開先の溶け込み深さの検査に使用している。超音波探傷検査は作業者が行っているが、検査時間の短縮と作業者によるバラツキをなくすために自動化も行っている。ボックス形状の角継手の溶け込み深さを、垂直探傷を使用して連続して短時間で測定する半自動の測定器を開発している (図18)。

溶接内部の品質を検査することは重要だが、検査結果を溶接工程にフィードバックすることや溶接工程で品質を管理することも必要である。

4.3 溶接工程の品質向上

特にロボットの溶接品質をチェックする機能が必要になっている。建設機械は量産品のため、同じ機種種の溶接時の電流や電圧を比較することで溶接品質を判定する機器

があるが、判定基準が曖昧なため、まだ量産では適用していない。現在は溶接中に溶接ワイヤの送給が不安定になり発生するアーク切れやアークセンサの溶接線外れを記録するのみにとどまっている。今後はワイヤ送給系やコンタクトチップの安定性を高める技術や交換を自動的に判断する機能の開発が必要になると考える。

5. おわりに

建設機械の生産はグローバル化が進んでおり、国内のマザー工場は生産性や品質を向上させる最先端の製造技術を開発しなければならない。そのため海外で適用可能な溶接工程の自動化や高能率化の技術開発は、これから益々必要になってくる。

また溶接工程には作業者の経験や技能で行われている個々の設備ごとの調整作業やメンテナンス、異常の判断がある。国内で普段実施していた、これらの作業が海外では実施されない場合があり、最新技術の導入が進まない状況もある。そこで ICT 技術を活用して設備の調整作業の自動化や明確に指示する機能、メンテナンス間隔を延ばす技術、異常を自動的に判定する機能を今後、開発して海外工場へ展開する必要があると考える。

参考文献

- 1) 井上宏昭：PC200-8 ハイブリッド油圧ショベルの紹介，コマツ技報，Vol.54，No.116 (2008)。
- 2) 柴田，須藤：リチウムイオン電池による電池電源ソリューション，日立評論，Vol.92，No.12 (2010)，908-909。
- 3) 山中伸好：IT による溶接ロボットの稼働率向上，溶接学会誌，Vol.77，No.1 (2008)，70-73。
- 4) 横田，木幡，中尾：タンデムアーク溶接システム，神戸製鋼技報，Vol.54，No.2 (2004)，81-85。
- 5) 森，浅田フレキシブルタンデム溶接システム，コマツ技報，Vol.50，No.154 (2004)，19-22。
- 6) 重吉，西村：アーク溶接ロボットのデュアルアークセンサ，神戸製鋼技報，Vol.59，No.2 (2009)，12-16。
- 7) 片岡，中川，石井：「J-STAR® Welding」を用いた高能率溶接技術の開発，JFE 技報，No.18 (2007)，41-46。