

IHI におけるアルミ構造物とその溶接技術

Development of Aluminum Structures and Applied Welding Technologies in IHI

三村大樹	社会基盤・海洋事業領域 F-LNGSBU 愛知工場工作部
田部井康	社会基盤・海洋事業領域 F-LNGSBU 愛知工場工作部
西見昭浩	社会基盤・海洋事業領域 F-LNGSBU 愛知工場工作部 課長
齋藤浩	技術開発本部総合開発センター機械技術開発部 主幹
上野光	技術開発本部総合開発センターロボット技術開発部 主幹
山岡弘人	技術開発本部生産技術センター 所長 博士(工学)

大形のアルミ溶接構造物を製作する場合、通常の鋼構造物と比較して特に溶接部の品質確保に留意する必要がある。当社では、そのために、溶接部可視化技術による溶接工の技量維持や、新技術適用による高品質化、自動化による品質安定化に取り組んできた。本稿では、これまでに開発してきた各種アルミ溶接構造物とそこに適用してきた溶接関連技術を概説するとともに、現在進めている LNG 貯蔵タンクの建造に適用しているロボット溶接技術の詳細を紹介する。

Quality assurance of welded parts for aluminum large structures is quite stringent compared to that of conventional steel structures. Therefore, IHI has promoted technologies in order to maintain the welding procedure technology by utilizing visual technology of the welding area in order to achieve high quality by applying brand new welding methods and stabilize the welding quality by utilizing automation technology. This paper reviews several aluminum structures and applies welding-related technologies that IHI has developed, and describes new robot welding technologies which apply the LNG storage tanks under construction.

1. 緒 言

当社では、社会インフラを中心に、アルミニウム材料の特性を活かしたアルミ溶接構造物の展開を進めてきた。

本稿では、これまでに製作してきたアルミ溶接構造物の例を紹介するとともに、それらを支える溶接技術について述べる。

2. 各種アルミ溶接構造物の製作と溶接技術開発

まず、アルミニウム材料の軽量・耐食性の特長を活かした、各種橋梁の製作実績を紹介する。泥炭地で重車両を走行させるための組立式渡橋、国内初の道路橋で芦有ドライブウェイ（兵庫県）に架かる「金慶橋」（第1図）。また、アルミ製歩道橋、山間部での湖の浮き橋（西京ダム（鹿児島県）浮き栈橋など）、ヨットハーバの浮き栈橋（ポンツーン型浮き栈橋）、最近では、既設橋へのアルミ

(a) 「金慶橋」外観（アルミ合金製高欄）



(b) アルミ合金製主桁



第1図 「金慶橋」（アルミ製道路橋）
Fig. 1 “Kinkei Bridge”

製歩道の拡幅工事（「小高川橋」（福島県）側道橋）などに積極的に展開が図られている。

また、軽量化の要求で、フェリーや高速船への展開が図られる一方、化学的安定性を利用した過酸化水素タンク、優れた低温特性を利用した LPG（液化石油ガス）や LNG（液化天然ガス）地上低温タンクを多く建造し、さらに、これらの液化ガス運搬船用の極低温タンクも造り上げている。

物理学の分野では、表面特性をコントロールすることによる加速器などの超高真空分野（SPring-8）への適用、さらに、質量が小さいことを利用した超伝導型粒子検出器などの高度なアルミ溶接構造物も製作している。

これらの製作に当たっては、おのおののアルミ構造物に対応した溶接の新技术開発と自動化技術が並行して進められてきた。

LNG タンクの建造では、① 簡易台車を用いた全姿勢の

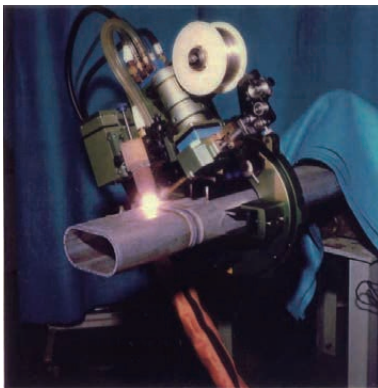
MIG 溶接 ② 厚さ 80 mm の厚板を能率良く溶接する大電流 MIG 溶接 ③ 底板の突合せ継手のひずみを低減する自動 DCEN（直流棒マイナス）TIG 片面溶接の適用、などの各溶接技術の実構造物への適用を他社に先駆けて行ってきた。

加速器のビームパイプの突合せ溶接では、狭あい部で溶接士が対応できないため、異形管（レーストラック）に対応した全姿勢のコンピュータ制御の溶接機（DCEN TIG）を国内で初めて開発適用された。第 2 図にビームパイプ突合せ溶接用全自動溶接機を示す。

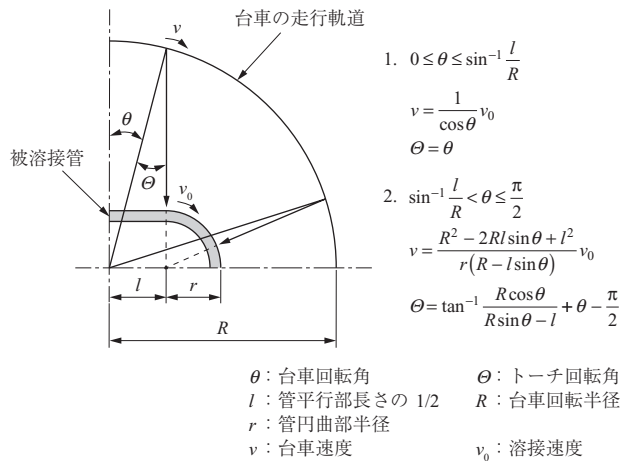
また、高度な取付け精度や真空信頼性を必要とするアルミ溶接構造物のビーム位置モニタ／ビームパイプの取付け溶接に、レーザ溶接を初めて適用している。

歩道拡幅工事では、歩道床版のひずみを抑え、強度を確保するために、摩擦攪拌接合（FSW）の実構造物への適用を進めた。第 3 図に「小高川橋」側道橋の拡幅工事を示す。

(a) 異形管全自動溶接機



(b) 溶接機の制御シーケンス



第 2 図 ビームパイプ突合せ溶接用全自動溶接機
 Fig. 2 Full automatic welding equipment for beam pipe

(a) 側道橋の外観（アルミ合金製高欄）



(b) アルミ合金製歩道用床版（FSW 継手）



第 3 図 「小高川橋」側道橋の拡幅工事（アルミ製歩道用床版）
 Fig. 3 “Odakagawa Bridge” — Side road

大型の極低温タンクの溶接においてはロボットを用いた溶接を多用し、従来、表裏からの溶接を行っていた板継の突合せ溶接を大きなワークの反転作業の危険性を考慮して、片面からの3電極裏波溶接法へと変更している。第4図に3電極MIG板継溶接装置を示す。

3. アルミ溶接の課題と施工技術に関する取組み

良好な品質のアルミ溶接を行うには、特に、以下の点に留意し、対応策を図る必要がある。

- (1) 酸化しやすく、かつ、ポロシティ源の水素を固溶しやすいため、シールドガスの流れと露点の厳密な管理を必要とする。
- (2) 融点は低いが熱拡散が大きいいため、融合不良や溶込み不良が発生しやすい。また、大きな電流で集中したアークを維持することが必要である。
- (3) 溶融潜熱が大きく、集中したアークを必要とする一方、溶融池の比熱、粘性が小さいことから、溶融池の揺動や溶落ちや垂れ下りが生じやすく、適正溶接条件範囲が狭い。
- (4) MIG溶接では、ワイヤの突出し長さによる抵抗変化が少ないため、アーク長の安定に注意を必要とする。
- (5) 交流TIG溶接との共存環境となる場合が多く、溶接の制御器には高周波対策をあらかじめ講じる必要がある。

特に(2)は、溶接施工技術に関する項目であり、最終的な製品の品質に影響するが、同時に溶接士の技量に大きく依存する点である。これに対して、筆者らは溶接部の可視化技術により技能レベルの維持を図っている。

アルミ溶接はアーク光の散乱や金属蒸気の発光量が多いことから、遮光ガラスを用いても溶融池およびその近傍を視認することが困難である。そこで、各種バンドパス

フィルタやダイナミックレンジの高いCCDカメラ、また最新の高速カメラなどを利用することで、鮮明な溶接部画像を取得することを可能とし、その動画を用いて溶接士に技能教育を実施している。良好な溶接ができていない動画と、融合不良や溶込み不良などの溶接欠陥が発生している動画、さらに自ら溶接を行った動画を溶接士が見比べることで、第5図に示すような施工のポイントを容易に理解することが可能となる。

溶接部可視化技術は、画像処理と組み合わせることで、自動溶接における品質安定化にも利用可能であることから、こちらの開発も鋭意進めている。

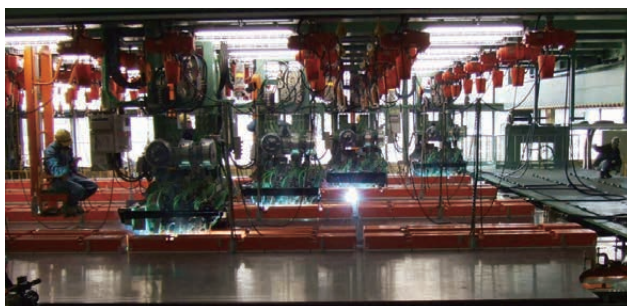
4. 溶接自動化に関する取組み

ロボット溶接は人が溶接を行う場合と比較して、以下のようなメリットがある。

- (1) 溶接士の技能に依存せず、高品質の溶接が安定して実施できる(高品質、手直しコストダウン)。
- (2) 人では作業しにくい狭あい部の溶接もロボットが行うため、溶接品質が一定に保たれる(高品質、手直しコストダウン)。
- (3) 1名の作業員が一度に複数台のロボットを使用できるため、大幅な工数(作業量を表す数値)削減が可能である(作業人数および作業工数削減、コストダウン)。

これらのメリットは、MIG溶接用アルミニウムワイヤに代表される溶加材やインバータ溶接電源などが次々と開発され、安定・連続した溶接が実現できるようになり、初めて得られるようになった。さらにレーザや電子ビームを熱源として利用し、熱源を自在に動かせるマニピュレータやガイドレールなどと組み合わせることで、半自動溶接から自動溶接へと進歩した。さらにその後、発展してきたコンピュータ制御やセンシング技術と溶接熱源を組み合わせ

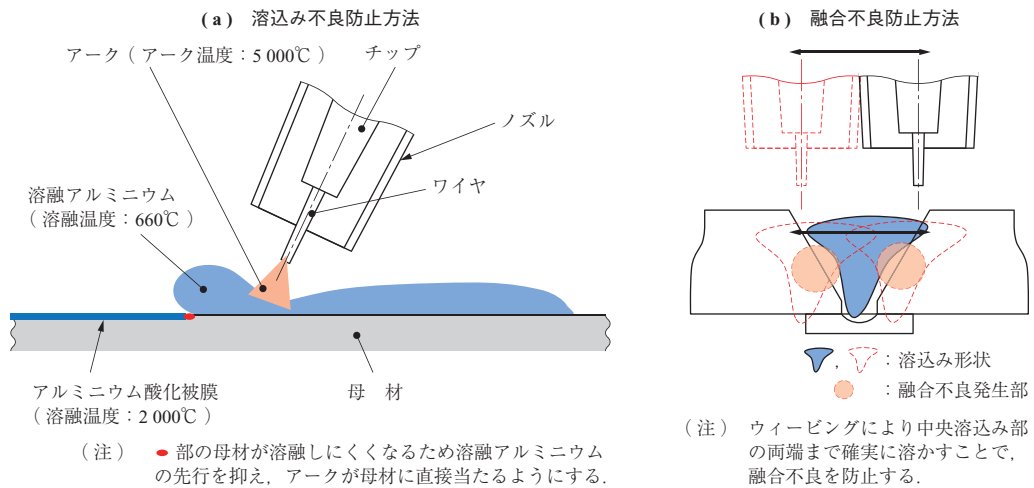
(a) 3電極MIG溶接による板継



(b) 3電極MIG溶接機のヘッド部



第4図 3電極MIG板継溶接装置
Fig. 4 3 electrodes MIG one side welding equipment



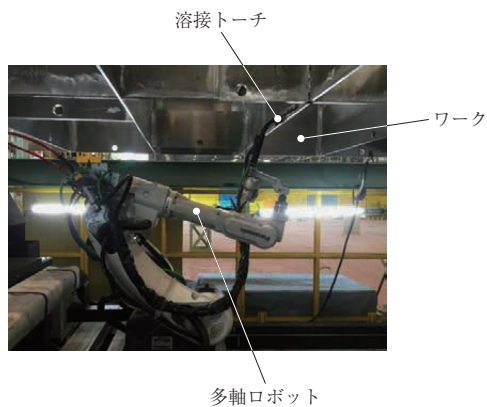
第 5 図 アルミ溶接欠陥防止方法
Fig. 5 Methods for protecting against aluminum welding defects

た溶接ロボットで、メリットが最大限に活かせるようになってきている。

ここでは、アルミ構造物の製作に溶接ロボットを適用した事例について詳細に紹介する。

4.1 枠組み溶接ロボットと桁目溶接ロボット概要

枠組み溶接ロボットとは、ロンジとトランスから成る枠組み構造の交差部における縦向き溶接を自動で行うロボットである。第 6 図に枠組みロボット外観を、第 7 図に枠組みロボット溶接を示す。トランス 1 本につき 1 台の



第 6 図 枠組みロボット外観
Fig. 6 Appearance of framework robot



第 7 図 枠組みロボット溶接
Fig. 7 Framework robot welding

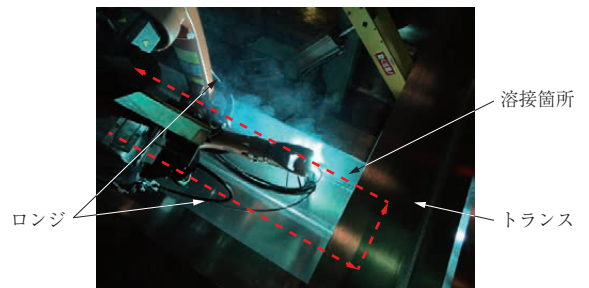
6 軸の汎用多関節ロボット（多軸ロボット）に対応する。

枠組みロボットは一人で複数台の使用が可能であるため、枠組みロボットの適用によって、人が溶接する場合と比較して、① 段取り時間 ② 溶接時間 ③ 手直し時間、の総計でみて 2 倍以上の効率で処理できる。

桁目溶接ロボットとは、上記で製作された枠組み構造をタンク外板に載せた際のロンジ・トランス部材と外板とを隅肉溶接する 6 軸の汎用多関節ロボットである。第 8 図に桁目ロボット外観を、第 9 図に桁目ロボット溶接を示す。溶接を行う箇所が長方形の桁の形をしていることから桁目ロボットと呼ばれている。桁目ロボットは専用ガーダ



第 8 図 桁目ロボット外観
Fig. 8 Appearance of lattice assembly robot



第 9 図 桁目ロボット溶接
Fig. 9 Lattice assembly robot welding

に吊り下げられており、溶接対象ワークがロボットエリアに搬送（第10図）されてきた後、桁目ロボットを設置（第11図）する。

桁目ロボットも一人で複数台の使用が可能であるため、桁目ロボットの適用によって、人が溶接する場合と比較して、① 段取り時間 ② 溶接時間 ③ 手直し時間、を総計でみて約12倍以上の効率で処理できる。

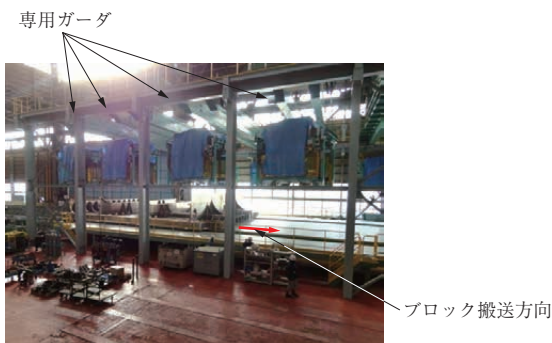
4.2 溶接ロボット適用の課題と対策

4章ではロボットのメリットを示してきたが、ロボットを案件に適用するまでには種々の課題があった。本節では構造が複雑な桁目ロボットの事例を二つ挙げ、その課題と対策について述べる。

4.2.1 位置決めシリンダ展開機能の改善

桁目ロボットは、ロボット四辺に設置されている位置決めシリンダを展開してワークに押し当てることで、物理的に溶接対象部の中央にロボットがセットされる仕組みを取っている。第12図に初期の位置決めシリンダ展開時の状態を示す。

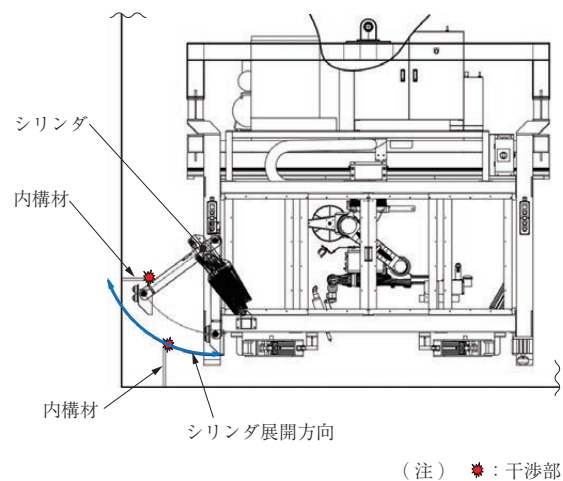
初期の位置決めシリンダは、ワークの構造が簡素で干渉物が存在しないことを前提に作製した。しかし、実際の



第10図 桁目ロボットエリアへのブロック搬送状態
Fig. 10 Transportation of block to lattice assembly robot working area



第11図 桁目ロボットの設置状態
Fig. 11 Installation conditions for lattice assembly robot on the block



第12図 桁目ロボット 位置決めシリンダ展開状態（初期）
Fig. 12 The state that the cylinder which decides the location developed at lattice assembly robot (old style)

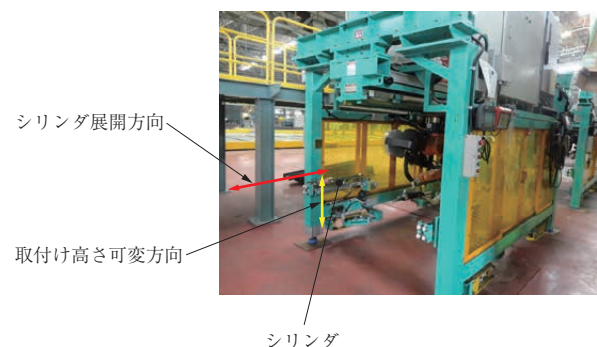
ワークの構造は、第12図に示す円弧展開式の位置決めシリンダではロボットをセットすることが困難で、複雑な構造であることが判明した。そこで、位置決めシリンダの構造を円弧展開式から水平直動式へ変更し、さらに位置決めシリンダの取付け高さも可変できるように構造変更を行った。構造変更後の状態を第13図に示す。

これにより複雑な構造のワークに対しても、ロボット設置が可能となり自動化率が大幅に向上した。

4.2.2 溶接品質の改善

前述したように、ロボット溶接は溶接士の技能に依存せず、高品質の溶接が実現可能であるが、安定した溶接を実現するためには細かな溶接条件の設定が必要である。本項では、桁目ロボットの溶接ビードが偏脚長になる事象が発生した際の原因と対策を示す。

ロボットにはそれぞれTCP (Tool Center Point) と呼ばれる溶接トーチ先端の座標値が存在する。6軸多関節ロボットは人の腕と同様の動きが取れるように回転軸が



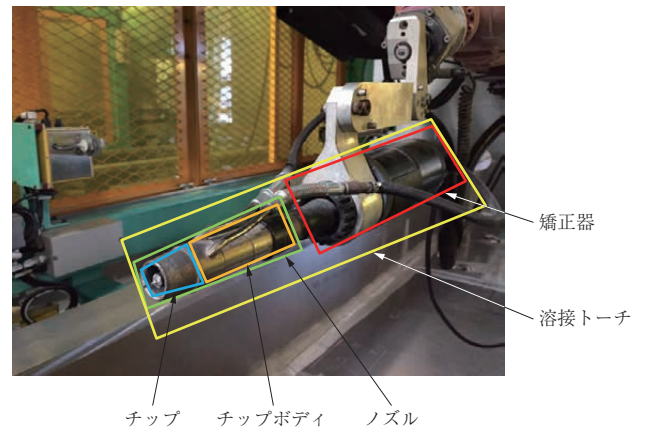
第13図 桁目ロボット 水平直動式位置決めシリンダ変更
Fig. 13 Changed cylinder which moves straight levelly at lattice assembly robot

6 か所存在するが、姿勢を変更する際に各軸で微細な誤差が生じ、累積として TCP の値が計画値から最大 3 mm 程度のズレが生じる。また、ワーク自体も数 mm の製作誤差が生じている場合がある。そのため、ロボット溶接を行う前にタッチセンシングと呼ばれる、ワークの状態を確認する作業を組み込んでいる。タッチセンシングを行うことで、溶接する際の狙い位置を補正し、現物ワークの形状に沿った適切な位置を溶接できるようになる。

タッチセンシングは、ワークに対してロボットがワイヤで接触（タッチ）し、位置を認識することで確認している。ここで、ワイヤは真っ直ぐに溶接トーチと一直線になっているという想定でタッチセンシング結果を認識・狙い位置を補正する。このとき、第 14 図に示すように、溶接トーチ先端から飛び出しているワイヤが曲がっていた場合、溶接箇所を誤って認識してしまい、結果として適切な位置に溶接ビードを置くことができず、溶接が偏脚長となってしまう。

ワイヤは円形リールに巻かれており、そこから必要量を送り出す仕組みとなっているが、金属が長期間一定形状のまま保持されると、その形状に曲がる癖がついたままとになってしまう。第 15 図に柵目ロボット溶接トーチ内部状態を示す。溶接トーチ内部には矯正器が付いておりワイヤを送り出す際に曲がりの矯正をかけているが、それだけでは十分に矯正できず、チップ先端から突き出たワイヤは、ワイヤの突出量に応じた曲がりが発生し、位置の誤認を招いた。

以上より、チップ先端からのワイヤの突出量を少なく



第 15 図 柵目ロボット 溶接トーチ内部の状態
Fig. 15 The state inside the torch at lattice assembly robot

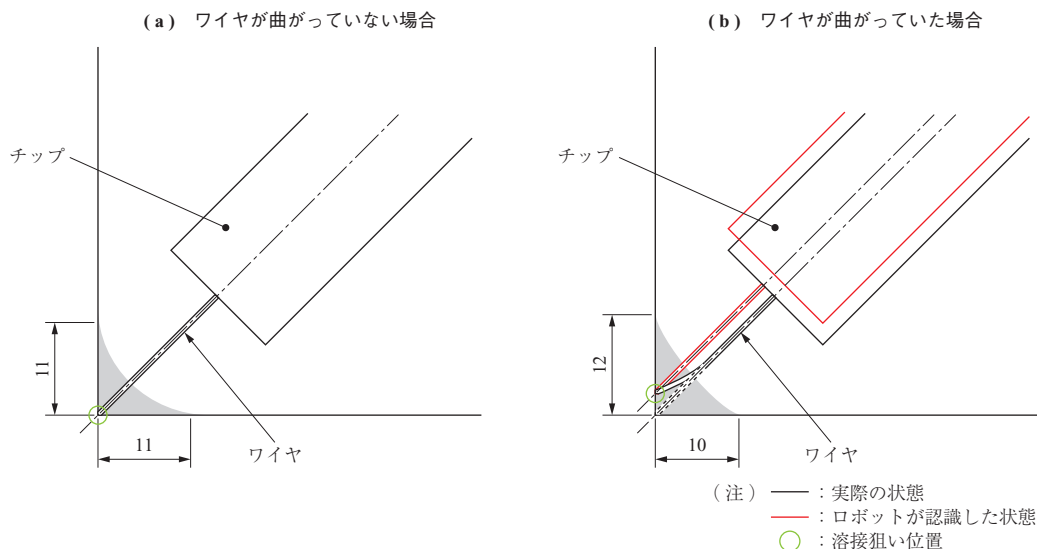
することが偏脚長を防止する最も有効な対策と推定された。そこで、第 16 図に示すようにチップ先端からノズル先端までのワイヤ突出量を従来の 6 mm から 1 mm に変更し、かつバーンバック（ワイヤの送給不安定によって給電チップが溶けて溶接ができなくなる現象）が発生しにくいように溶接条件を変更した。併せて、第 17 図に示すように、ノズル先端からのワイヤ突出量を、指示脚長が小さい溶接条件については 15 mm に変更した。

この結果、偏脚長の発生確率は激減し、安定した溶接品質を確保することができた。

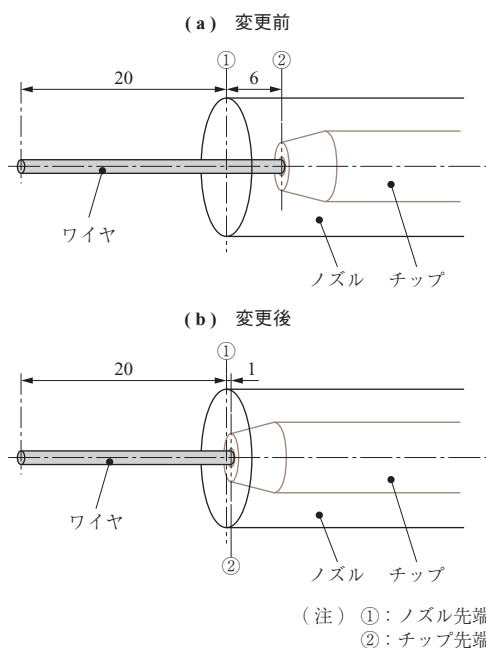
5. 結 言

本稿では、これまでに当社が携わってきたアルミ溶接構造物の例とこれらを支える溶接技術について紹介した。

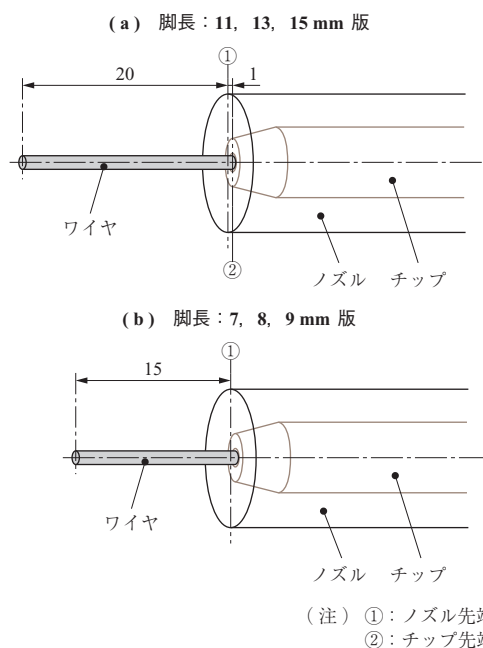
より良い品質を造り込む溶接技術の開発においては、単



第 14 図 ワイヤ曲がり有無に伴う狙い位置のズレ（単位：mm）
Fig. 14 Difference in the aim locations with the bent presence of a wire (unit : mm)



第 16 図 チップ先端からのワイヤ突出し量変更 (単位: mm)
Fig. 16 A wire from a chip point changed the amount which sticks out (unit: mm)



第 17 図 ノズル先端からのワイヤ突出し量変更 (単位: mm)
Fig. 17 A wire from a nozzle point changed the amount which sticks out (unit: mm)

に新しい溶接法の開発や自動溶接装置の開発だけでなく、使用する素材や溶接材料への高い品質要求が基盤となっている。高能率化のための厳しい溶接条件に適合するような素材の組織コントロールや溶加材の成分コントロールをはじめとして、ブローホールなどの溶接欠陥を防ぐシールドガスの露点管理、溶接材料の表面管理、素材の前処理など細かい注意が必要とされる。

また、鉄鋼材料に比べて適正溶接条件範囲が狭いことから、自動化に当たっては、溶接前の開先部の精度管理に配慮することが重要となる。

今後も、アルミニウム材料を用いた構造物は、優れた材料特性とリサイクル性を活かして、各種分野に広がっていくことが期待され、構造物の特性に見合った新しい溶接法の開発と自動化技術を展開していく。