

< 報 文 >

TIG溶接における作業者と機械の協調溶接

TIG welding by cooperation of welder and machine

八幡職業能力開発促進センター	塚	本	文	彦
佐賀職業能力開発促進センター	福	本	秀	樹
職業能力開発総合大学校	安	田	克	彦

TIG溶接における作業者と機械の協調溶接

八幡職業能力開発促進センター 塚本文彦
佐賀職業能力開発促進センター 福本秀樹
職業能力開発総合大学校 安田克彦*

TIG welding by cooperation of welder and machine

Fumihiko TSUKAMOTO, Hideki FUKUMOTO, Katsuhiko YASUDA

要約 作業者と機械の協調溶接とは、溶接中のトーチや溶加材の制御操作において、作業者と機械のそれぞれの特長を組み合わせる溶接方法であり、溶接に未熟練な作業者が高付加価値製品のものづくりに対応できる手法として期待できる。本稿では、作業者と機械の協調TIG溶接システムを試作し、ステンレス鋼のTIG溶接における協調溶接条件を検討するとともに、溶接に未熟練な作業者への適用を試みた。L型継手の水平すみ肉溶接や下向きのメルトラン溶接を協調TIG溶接で行った結果、作業者は目標とする溶融池の形状が得られる溶接電流と溶接速度を設定し、アーク長及びトーチ角ならびにタングステン電極の狙い位置と溶加材の添加位置の制御操作だけに留意することで溶接線全長に亘った連続したビード形成が可能となることがわかった。また、溶接に未熟練な作業者に対して、溶接線が溶接の開始部と終了部で5mmずれるように設定した下向きのメルトラン溶接で協調TIG溶接時に必要な電極狙い位置のずれに対する修正能力を調査し、 $9.7 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (581.8mm/min) の溶接速度でも適正に修正できることを確認した。さらに、協調TIG溶接システムを用いてL型継手の水平すみ肉溶接と十字継手管の全周溶接を行い、能力開発セミナーにおけるTIG溶接技能クリニックを担当している職業訓練指導員（溶接科）の免許を有する作業者によるビード形状とほぼ同等な溶接が可能であることがわかった。

I はじめに

現在、我が国では少子高齢化が進展して人口減少に歯止めがかからず、企業においては団塊の世代の定年も始まっている。このような情勢から、経済発展の持続には不可欠であるものづくり製造部門では、熟練技能の継承や若年者の確保・育成、労働生産性向上のための能力開発、正社員以外の働き手の能力開発や活用などが課題^①とされる。

我々は、溶接に未熟練な作業者が高付加価値製品のものづくりに対応できる手法として、人と機械の協調作業^②に着目し、作業者と機械の協調溶接を提案している。本稿では、試作した作業者と機械の協調TIG溶接システム（後述）を使用して協調溶接条件を検討するとともに、溶接に未熟練な作業者への適用を試みた。

II 使用材料及び実験方法

母材は、板厚2mm及び3mmのステンレス鋼SUS304と肉厚2mmで外径34mmのステンレス鋼管SUS304TPを用いた。溶加材には、直径0.8mm及び1.6mmのY308を用いた。シールドガスには純アルゴンを使用し、電極棒には直径2.4mmの2%酸化セリウム入りタングステンを使用した。

図1は実験で用いた二種類の試験片形状である。

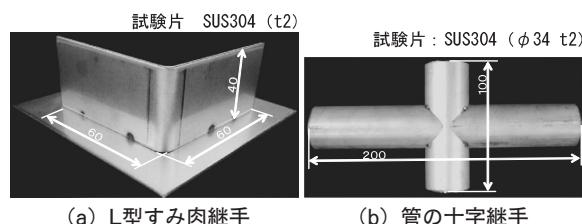


図1 試験片の継手形状

(a) は板材をL型に加工した垂直材と平板を組み合わせたすみ肉溶接継手（以下、L型すみ肉継手という）、(b) は管材を十字継手として管の全周溶接を検討するのに使用した。そして、試作した協調TIG溶接システムを用いて職業訓練指導員（溶接科）免許を有する作業員（以下、溶接科指導員という）と職業能力開発大学校専門課程における機械工作実習を修了し、その後3日間程度のTIG溶接実習を行った溶接経験の少ない作業員（以下、未熟練作業員という）のトーチ操作や溶接結果などの比較検討を行った。なお、本稿における溶接科指導員は能力開発セミナーであるTIG溶接技能クリニックを担当できる者である。

Ⅲ 作業員と機械の協調TIG溶接

1 協調溶接の概要

表1は手動のTIG溶接に必要な制御操作項目とこれらの操作を作業員または機械が行う場合の優劣を比較したものである。表からもわかるように、作業員は五感を介した制御能力に優れており、機械は安定した高速運動に優れている。なお、この場合の機械とは、アー

表1 TIG溶接に必要な制御操作を作業員と機械が行う場合の特徴比較

制御操作項目		作業員	機械
溶接トーチ	安定な移動	×	○
	高速移動	×	○
	電極狙い位置制御	○	×
	アーク長さ制御	○	×
溶加材	安定な送給	×	○
	添加位置制御	○	×

○：優 ×：劣

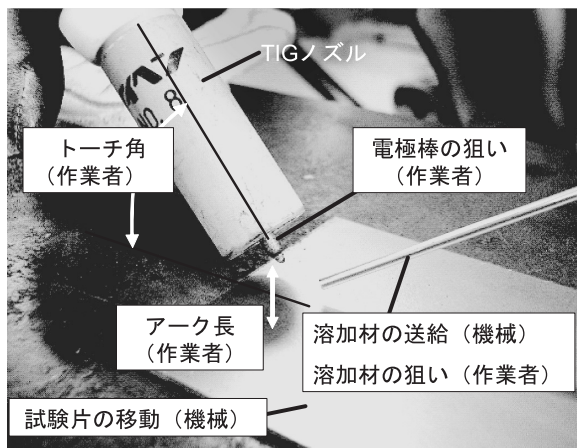


図2 作業員と機械の協調TIG溶接における制御操作の分担 ※ () 内に分担を示す

クセンサや溶融池周辺の画像などによりアーク長さや電極の狙い位置などを制御する機能を有さない機械である。

作業員と機械の協調溶接とは、作業員と機械のそれぞれの特長を組み合わせるで行う溶接方法である。図2に本協調TIG溶接で作業員と機械が行う制御操作の分担を示す。機械は試験片の移動とワイヤ送給を行い、作業員はトーチを保持してトーチ角やアーク長、電極棒と溶加材の狙い位置の制御操作だけを行う。

2 協調TIG溶接システム

図1に示したL型すみ肉継手や管の十字継手の協調TIG溶接を市販の溶接用ポジションナを利用して行う場合、作業員は前述した制御操作に加えて、回転する試験片に合わせてトーチを移動させる必要がある。そこで、継手の形状にかかわらず、目的とする協調TIG溶接を可能とするシステムを試作した。図3にシステムの外観を示す。システムはポジションナ、ワイヤ送給装置及び市販の溶接機、そしてこれらの装置を制御する制御装置ならびにポジションナの動作パラメータを設定するパーソナルコンピュータで構成される。ポジションナは二軸の直交テーブルと回転テーブルで構成され、

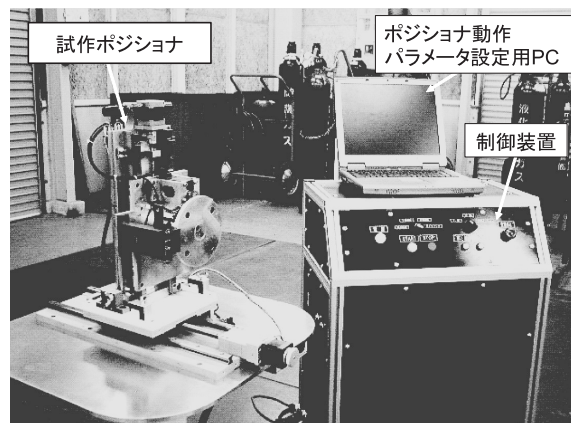
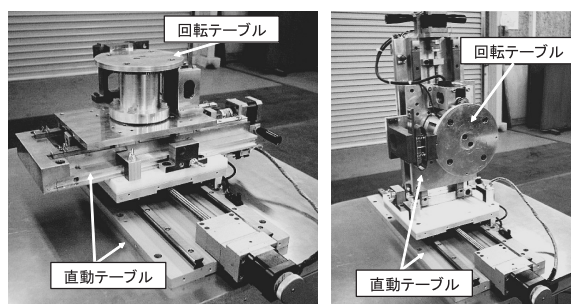
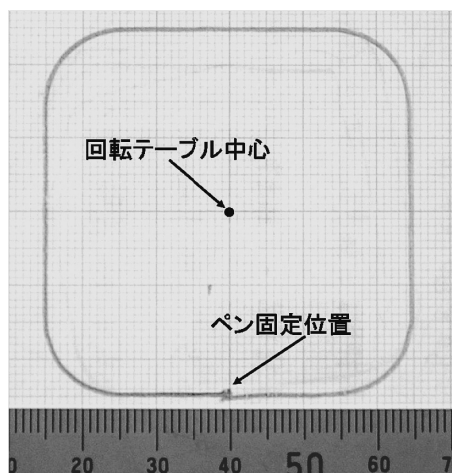


図3 協調TIG溶接システム



(a) L型すみ肉継手の場合 (b) 管の十字継手の場合

図4 ポジショナの設定



直線部速度: $3.3 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (200mm/min)

角(R)部速度: $6.7 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (400mm/min)

図5 ポジショナの動作軌跡例

各テーブルの組み合わせ方を変えることで各種の溶接継手形状に対応が可能である。図4 (a) はL型継手のすみ肉溶接、同図 (b) は管の十字継手の全周溶接に対応したポジショナである。

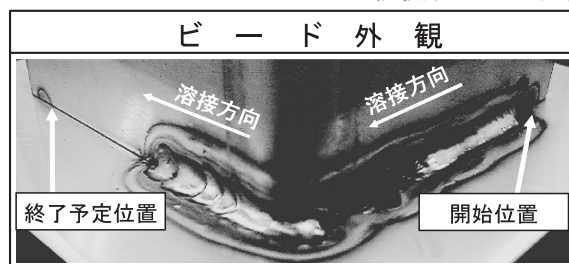
図5はポジショナの動作を検討した結果である。測定は、ポジショナが一边の長さが50mmでコーナー部がR10の四角形状で動作するプログラムを作成した後、回転テーブルの表面に貼った用紙に、溶接開始位置に固定したペンでポジショナの動作を記録する方法で行った。図から、軌跡の形状は目的の形状に対して $\pm 0.5 \text{mm}$ 以内の精度で作図されている。そして、溶接方向が変化する溶接継手の場合においても、作業者は溶接線に沿ってトーチを移動させる必要がないことがわかる。

IV 実験結果及び考察

1 協調TIG溶接条件

図6は、溶接科指導員が溶加材を使用せずにL型すみ肉継手の水平すみ肉溶接を協調TIG溶接で行ったときに形成されたビードの外観写真である。図から、溶接部には融合不良を含む不連続なビードが認められる。本システムにおけるポジショナの動作は、溶接機のクレータ制御を有とした状態において、初期電流から溶接電流に切り替えることで開始し、溶接電流からクレータ電流に切り替えることで終了する。そして、各テーブルの動作時間は溶接速度から算出している。溶接の開始位置から角部の間に認められる融合不良は、溶接が角部まで到達する以前に時間制御したポジショナが

試験片: SUS304 (t2)



作業者: 職業訓練指導員(溶接科)

図6 協調TIG溶接で形成された不連続ビード

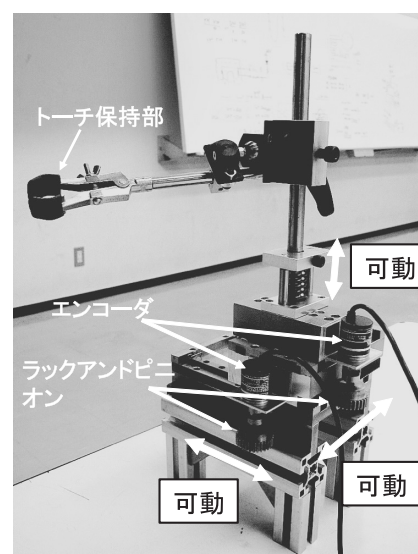


図7 トーチ操作モニタリング装置

次の動作に移行し、作業者がこのポジショナの動作にあわせてトーチを角部に移動させたことで生じた。そして、その後は安定な溶融池が形成されずに不連続なビードが形成されたと考えられる。この原因として、溶接科指導員が溶接中にトーチを後退させたことが推察される。しかし、トーチ操作について確認したところ、指導員本人にはトーチを後退させたという認識は無かった。

そこで、溶接中に行われるトーチ操作について詳細に調べた。図7は、溶接中のトーチ動作を測定するために試作したトーチ操作モニタリング装置である。モニタリング装置は、三軸可動テーブルとラックアンドピニオン及びエンコーダで構成されており、図中のトーチ保持部にトーチを固定し、プログラマブルロジックコントローラ (PLC) でトーチの動作状態を記録した。

図8は、協調TIG溶接システムで下向きのメルトラソ溶接を行い、その時のトーチ動作軌跡を測定した結果である。溶接は、溶接科指導員が板厚3mmのSUS

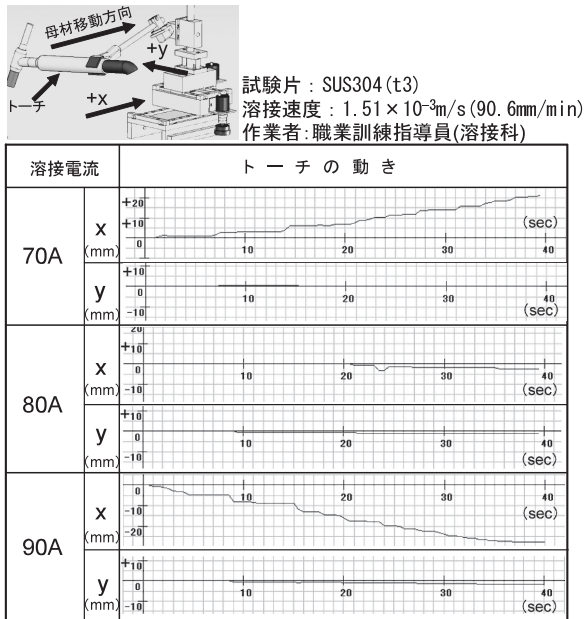


図8 トーチ操作に及ぼす溶接電流の影響

304材を用いて溶接電流を70A、80A、90Aとし、溶接速度を $1.51 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (90.6mm/min) に設定して行った。また、溶接の長さを60mmとしたことからアークタイムは39.7secとした。図中の横軸はアーク発生後の経過時間、縦軸は溶接開始後のトーチの移動量をそれぞれ示している。トーチの移動方向は、図8上部の3D図に表示したが、試験片は+X方向に移動させた。図から、溶接電流80Aの条件ではXとY方向の移動量が極めて小さく、指導員はトーチをほとんど動かすことなく溶接を行ったことがわかる。一方、70Aと90Aの条件ではY方向への移動はほとんど認められないものの、前者では指導員は移動する試験片を追いかける方向に、後者では試験片の移動方向とは反対方向へトーチをほぼ連続的に操作していることがわかる。

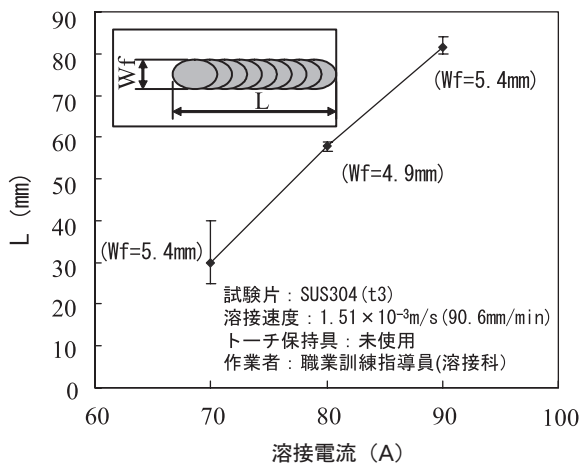


図9 溶接電流とビード長さとの関係

図9は、同様の検討を形成されたビードの幅と長さに着目して整理した結果である。ビード幅はいずれの溶接電流でも概ね5mmであるが、ビード長さは溶接電流の増加とともに長くなる傾向が認められ、70Aでは25~40mm、80Aでは約60mm、90Aでは約80mmであった。一般に手動TIG溶接において一定な幅のビードを形成するためには、溶接作業者は溶接開始位置で形成される溶融池の大きさを維持するようにトーチを操作する必要がある。これより、実験においても指導員は形成した5mm径の溶融池を持続させるような溶接を行っていたと推測される。そして、溶接電流70Aの条件では入熱不足により、5mm径の溶融池を維持することが困難なために、指導員は移動する試験片を追うようにトーチを操作することで必要な入熱量を確保し、その結果、ビード長さが短くなったと考えられる。一方、溶接電流90Aでは5mm径の溶融池を形成するための入熱量が過大で、指導員はトーチを試験片の移動方向とは反対の方向に操作した。そして、相対的に溶接速度を増加させて入熱量を減少させたことで、ビード長さが長くなったと考えられる。しかし、溶接電流80Aの条件では、溶接長さが設定値の60mmとほぼ一致しており、トーチの移動量も少なく、協調溶接を行うのに適正な入熱量であったことがわかる。

これらの結果より、協調TIG溶接では作業者は目標とする溶融池の形状が得られる溶接電流と溶接速度を設定するとともに、溶融池の形状に影響を与えるアーク長などの変化にも留意する必要があることがわかった。そこで、溶接電流と溶接速度を再設定し、L型すみ肉継手の協調TIG溶接を行った。図10に新たに設定した協調溶接条件で形成されたビード外観を示す。継

試験片：SUS304 (t2)
溶接棒：Y308 (φ1.6)
作業員：職業訓練指導員(溶接科)

溶加材	ビード外観
無	
有	

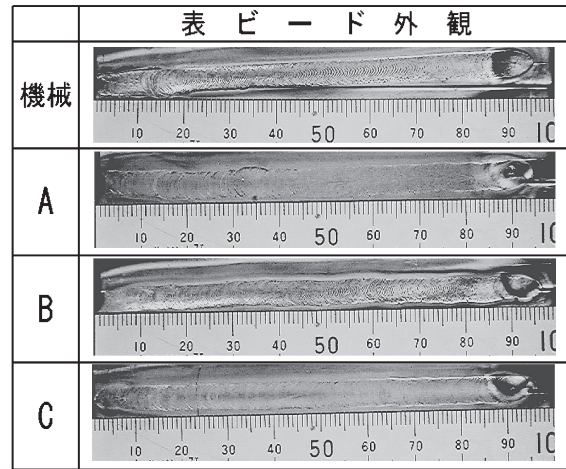
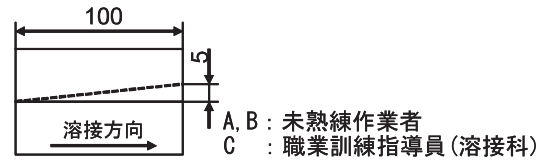
溶接電流：70~80-65A
溶接速度(直線部)： $1.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (100mm/min)
(角部)： $6.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (400mm/min)

図10 再設定した協調溶接条件で形成されたビード外観

手の直線部と角部で溶接条件を変えることで、指導員が目標とした溶融池の大きさの維持が可能となり、溶加材の添加の有無にかかわらず融合不良のないビード形成が可能となった。

2 未熟練溶接作業への適用

未熟練作業者に協調TIG溶接を適用するため、このような作業者が協調溶接で必要となるトーチ操作を適正に行うことの可能性について検討した。図11は、未熟練作業者が行うアーク長制御について検討した結果である。実験は、2名の未熟練作業者が協調システムを用いて、図中の溶接条件で下向きのメルラン溶接を行った。結果は、いずれの作業者のビードも不定形な蛇行した形状となった。これは、作業者のトーチを把持する腕が不安定で、溶接中のアーク長を一定に維持できないことが原因と考えられる。そこで、図12に示すように、未熟練作業者による協調TIG溶接ではトーチを把持する腕を支える台を用いることとした。



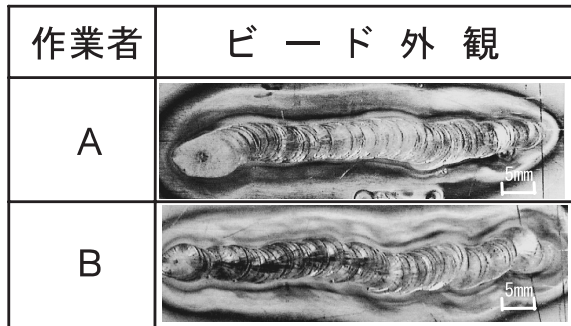
試験片 : SUS304 (t3)
溶接電流 : 80A
溶接速度 : $1.51 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (90.6mm/min)

図13 作業者の電極狙い位置制御に関する検討結果

図13は作業者による電極狙い位置の制御に関して検討した結果である。実験は、板厚3mmのSUS304材を突合せ継手とし、その溶接線が溶接の開始部と終了部で5mmずれるように傾けてポジションの直動テーブルに固定し、トーチを図7に示したトーチモニタリング装置に取り付けて協調溶接を行った。なお、作業者には溶接線が傾いていることは提示していない。作業者には、2名の未熟練作業者と1名の溶接科指導員を選定した。また、比較のために電極狙い位置の制御機能の無い機械装置でも行った。機械装置を用いた溶接では図に示すように、溶接線のずれに対応した電極狙い位置の制御が行われないため、継手の中央部から終了部まで融合不良が発生している。一方、協調TIG溶接ではいずれの作業者も融合不良の無い良好なビードを形成しており、未熟練作業者でも適正に電極狙い位置の操作を行うことができることがわかった。さらに、溶接速度を $9.7 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (581.8mm/min) に増加した条件で検討を行ったが、この条件でもいずれの作業者も適正に電極狙い位置操作が行えることを確認した。

このように、良好な協調TIG溶接結果が期待できない溶接経験の少ない未熟練作業者には、安定なアーク長を維持するための支持台を用いることが有効であり、電極狙い位置の制御操作は容易であることがわかった。

試験片 : SUS304 (t3)



溶接電流 : 80A
溶接速度 : $1.51 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (90.6mm/min)

図11 未熟練作業者による協調TIG溶接で形成されたビードの外観

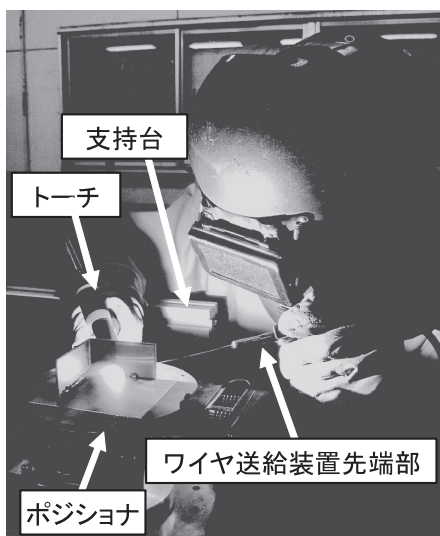
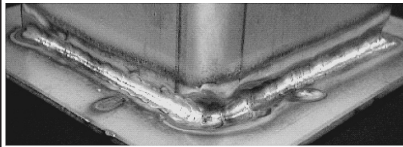
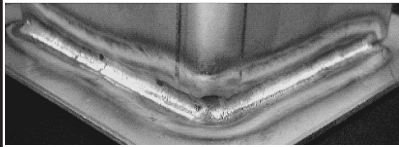
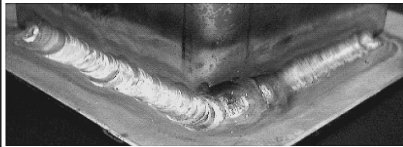
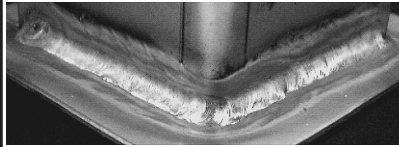


図12 協調TIG溶接中の状態

試験片 : SUS304 (t2)
 溶接棒 (手動溶接) : Y308 (φ1.6)
 ワイヤ (協調溶接) : Y308 (φ0.8)

溶加材	ビード外観	
	手動溶接	協調溶接
無		
有		

溶接電流 : 70~80-65A
 溶接速度 (直線部) : $1.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (100mm/min)
 (角部) : $6.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (400mm/min)
 ワイヤ送給速度 : $13.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (812mm/min)

図14 未熟練作業による手溶接と協調TIG溶接で形成されたビード外観の比較

図14は、未熟練作業者がL型すみ肉継手の水平すみ肉溶接をTIG溶接による協調溶接と手溶接で行い、形成されたビード外観を比較したものである。手溶接では継手の角部において、アークを一度切り、その直後に再度アークを発生させるビード継ぎが行われている。この溶接ではトーチ操作と同時に溶加材を安定に添加する必要があるが、未熟練作業者ではこれら一連の操作が困難なため、ビード表面に波形の乱れやアンダカットの発生が認められる。これに対して協調TIG溶接では、継手の角部におけるビード継ぎ操作も無く、良好な連続したビードが形成されている。また、アンダカットや不等脚長も認められないことから、適正な電極狙い操作が行われていたことがわかる。さらに、溶加材の添加にはワイヤ送給装置を利用しているが、形成されたビードの外観より、ワイヤ狙い位置の操作も適性に行われていたことがわかる。

図15は、十字継手の管を協調システムで全周TIG溶接する場合の作業者が制御すべきトーチ操作を示したものである。(a) は、管の回転に伴う溶接線の変化であり、(b) は溶接面に対するトーチ角 θ_T の変化をそれぞれ示している。(a) に示すように、作業者は管の回転に伴い図中の3D図に示したy方向にトーチを移動させるとともに、トーチの進行方向が(a)に示した矢印の向きとなるような操作をする必要がある。さらに、管の回転に伴い継手形状が重ね継手からすみ肉継手へと変化することから、 θ_T を 90° から 45° まで連続的に変化させる必要がある。本システムでは溶接線の変化はプログラムで制御されたポジションで再現することから、作業者は電極の狙い位置とトーチ角の制御操作だけで溶接を行うことが可能となる。

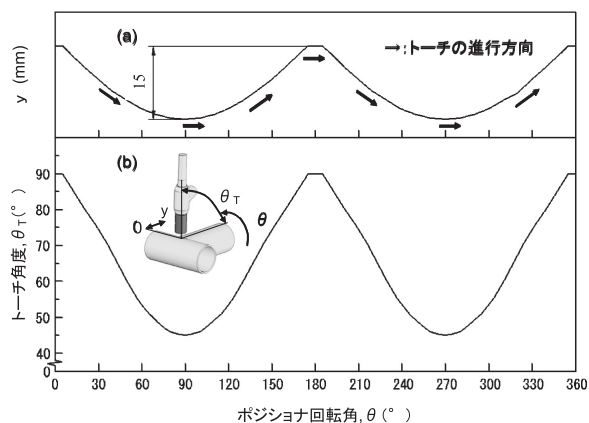
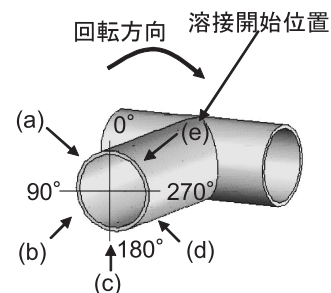
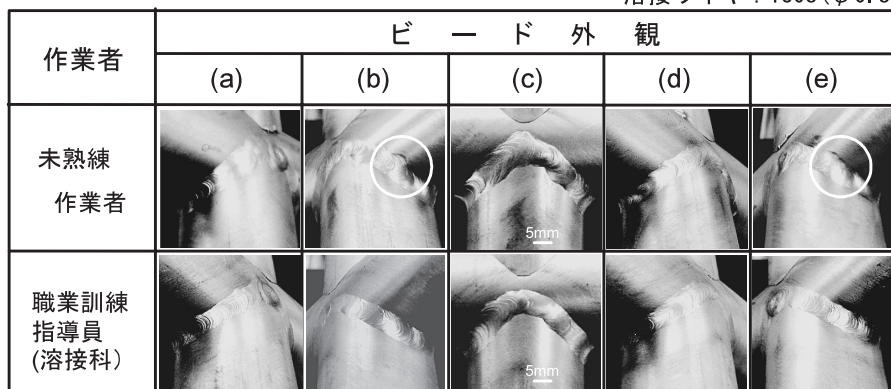


図15 十字継手管の全周溶接に必要なトーチ操作

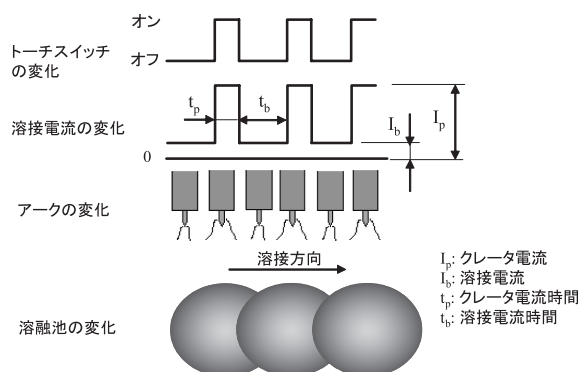
図16は未熟練作業者と溶接科指導員が行った協調TIG溶接による十字継手管の全周溶接の結果である。溶接は、溶接中の継手形状が変化することと溶接速度を一定としたことから、感覚的パルス電流制御溶接⁽³⁾で行った。図17に感覚的パルス電流制御溶接の原理を示す。この溶接法は、クレータ反復機能を利用したもので、溶接作業者の溶融池の観察に基づくトーチスイッチのオン・オフ操作によって、あらかじめ設定した二種の大きさの溶接電流 (溶接電流及びクレータ電流) を切り替えて出力するとともに、それぞれの電流の出力時間も変化させることができる。このため、一定な溶接速度においても母材の溶融制御が可能となる。十字継手管の溶接条件は、溶接電流70A及びクレータ電流85Aとし、溶接速度は $1.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (100mm/min)

試験片：SUS304 (φ34, t2)
溶接ワイヤ：Y308 (φ0.8)



溶接電流：85-70A 溶接速度： $1.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (100mm/min) ○：アンダカット
ワイヤ送給速度： $13.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (812mm/min)

図16 協調TIG溶接で形成された十字継手管のビード外観



とした。また、溶加材には直径0.8mmのワイヤを用い、 $13.5 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (812mm/min) の速度で連続送給した。図に示す未熟練作業者が行ったビードの外観写真は12回目の結果であり、溶接科指導員の場合は2回目の結果である。未熟練作業者の場合、(b) 及び (e) の領域において小さなアンダカットが認められるが、概ね溶接科指導員が行ったビード外観と同等な外観が得られている。このことから、協調TIG溶接では、溶接経験を要する複雑な継手形状の溶接においても、未熟練作業者は良好な溶接ビードを形成できることがわかった。

V おわりに

溶接の経験が少ない未熟練作業者が高付加価値製品のものづくりに対応できる手法として作業者と機械の協調作業に着目し、試作したシステムを用いて協調TIG溶接条件を検討するとともに、未熟練作業者への適用の可能性について検討した。その結果、以下のこ

とが明らかとなった。

- 1) 協調TIG溶接では、作業者は目標とする溶融池の形状が得られる溶接電流及び溶接速度を設定すれば、作業者は電極狙い位置及びアーク長ならびにトーチ角のトーチ操作と溶加材の狙い位置だけを適正に行うことで比較的に良好な溶接が可能である。
- 2) 協調TIG溶接に必要な作業者による電極狙い位置とワイヤ添加位置の操作は、溶接に未熟練な作業者でも容易に適正な制御が可能である。
- 3) アーク長を安定に維持するトーチ操作を行うためには、トーチを把持する腕を支える台を用いた溶接方法が有効である。
- 4) 協調TIG溶接では、溶接に未熟練な作業者が容易に良好なビード形成を行うことができる。

【参考文献】

- (1) 経済産業省・厚生労働省・文部科学省編：ものづくり白書 (2006)
- (2) 指宿宏文、安田克彦：ガスマタルアーク溶接における人と機械の協調溶接、溶接学会全国大会講演概要No.77 (2005)、p68-69
- (3) 日向輝彦、安田克彦：アルミニウム薄板のティグ溶接における溶融域の制御方法、軽金属溶接、Vol.22 (1984)、No.12、p551-557