

溶接技術を利用した特殊金属接合技術の開発

堀之内悠介*, 瀬戸口正和*

Development of the Special Metal Jointing Technology Using a Welding Technology

Yusuke HORINOUCI and Masakazu SETOGUCHI

ニッケル基合金の1つであるINCONEL alloy 600と低炭素鋼の1つであるSS400の異種金属接合において、TIG自動溶接システムを用いて接合条件の検討を行った。TIG自動溶接システムの構築により、溶接速度やワイヤ送給速度、電極母材間距離の調整及び溶接の再現性が高くなり、安定した溶接が可能となった。その結果、同種金属接合や異種金属接合において、溶接作業者の技能レベルを問うことなく、最適な同種金属接合及び異種金属接合の突き合わせ接合条件が確認された。

Keyword : TIG溶接, ニッケル基合金, 異種金属接合, 溶接システム

1. 緒言

製造業では様々な材種の金属を使用した製品が開発・製造されている。溶接業において、低炭素鋼やステンレス鋼、アルミニウム合金といった従来から多く使用されてきた材料以外で高強度や軽量化、熱膨張や耐食性などの特徴を有する材料を活用することが多くなっている。しかし、それらの金属材料は一般的な金属と比べ溶接の際、注意すべき事項や困難である場合も多い。また、材料そのものが高価であるため、溶接練習や欠陥のない製品を製造するのは容易でなく、作業者が溶接条件等を確立しにくいのが現状である。

それらの1つにINCONEL alloy 600 (以下、インコネル)がある。インコネルは、高耐食性や高温での強度低下が少ないという特徴を持った材料である。用途としては、焼却炉や原子炉の構造部品、化学薬品タンク等に使用されている。インコネルは、SS400と材料価格を比較すると約70倍も高価であり、製品のすべてをインコネルで作ることは現実的ではない。そのため、異材接合の有用性があることから、溶接に関する注意点についても多数の報告がある^{1)~7)}。県内企業でも、製品全体のコスト削減のため、高価な材料と安価な材料の異種金属接合を行う必要がある。

インコネルの溶接における注意点をまとめると、以下のとおりである。

- ① 油や汚れ及び切断における酸化物を除去して、清浄な状態で溶接を行う。
- ② 炭素鋼に比べて、湯流れが悪いため、炭素鋼よりも開先角度を広くして溶接する必要がある。
- ③ 裏波溶接時には、バックシールドが必要である。

- ④ TIG溶接の場合、直流・正極性を用い、電極形状の先端部は、鋭角で行う。
- ⑤ 溶接部が長時間高温に加熱されるほど、溶接割れ(高温割れ)が発生しやすくなるため、予熱は行わず、パス間温度は150℃以下で溶接を行う。
- ⑥ 溶接変形が生じやすいため、拘束等変形防止対策が必要である。
- ⑦ クレーター割れが発生しやすいため、クレーター処理を行う必要がある。
- ⑧ 多層溶接の場合、前層のスケール等を除去してから溶接を行う。その際、ステンレス製のワイヤブラシを使用する。
- ⑨ 溶接後の熱処理は行わず、溶接残留応力除去が必要な場合は、約1,000℃で焼きなましを行う。

しかし、現場レベルで使用できる溶接条件は、同種金属の場合が多く、異種金属の突き合わせ溶接に使用できる溶接条件を例示した文献はない。

そこで、安定して高品質な溶接が可能なレーザ溶接やアルゴン雰囲気内で溶接を行う手法などの高価な装置を使用せずに、一般的な溶接法であるTIG溶接を使用した自動溶接システムを構築し、工場内で使用可能な溶接条件の検討を行った。溶接実験は、工場内で使用頻度が高い下向き突き合わせ完全溶け込み溶接を対象として実験を行った。

2. 実験装置及び試験形状

2.1 実験装置

図1にTIG自動溶接システムを示す。

このシステムは、難燃性マグネシウム合金のTIG溶接実験^{8) 9)}で用いた実験装置である。溶接に用いた溶接機は、松下溶接システム(株)製のインバータ制御交直両用TIG溶

*生産技術部

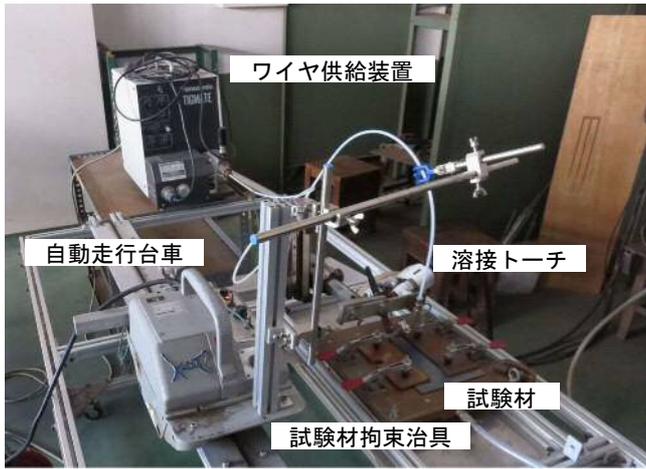


図1 TIG自動溶接システム

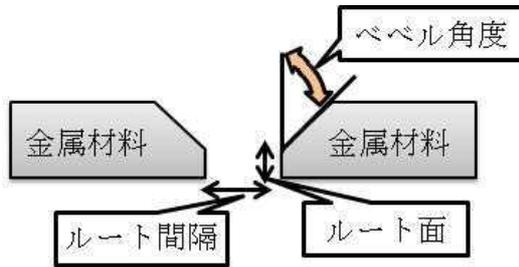


図2 フライス盤による開先加工

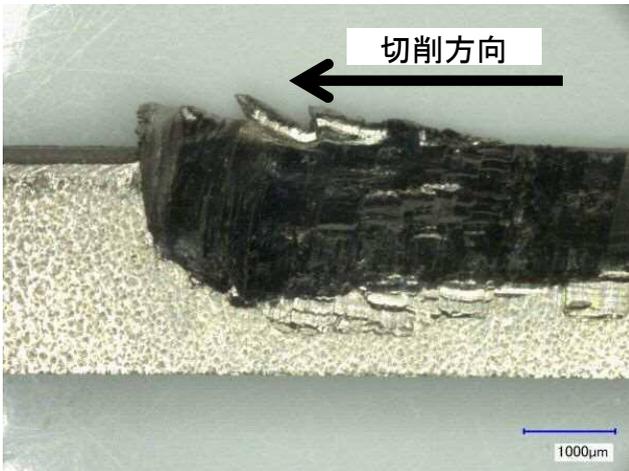


図3 切削加工により変形した試験材

接機 (YC-300WX4) , ワイヤ供給装置は、松下電気産業 (株) 製のTIG-MATE (YJ-1051TUF) , 溶接速度の調整は、GULLCOINTERNATIONAL社製の自動走行台車 (Flex KAT) を使用した。溶接トーチ及びワイヤ供給ノズルは、自動走行台車にアームを取り付けて固定し、それぞれ溶接トーチ角度とワイヤ供給角度を任意に設定できるようにした。また、試験材治具は、銅板を使用し、裏側からバックシールドガスを流せるようにした。本溶接は拘束治具を使用し、クランプ4点で拘束した。

2. 2 試験材の形状

試験材料は、SS400の板厚3.2mmとインコネルの板厚3.0mmを用いた。各試験材の寸法は、幅100mm、長さ150mmとした。開先形状は、I型及びV型開先とし、V型開先のベベル角度は45°で、試験材の開先加工はフライス盤による切削加工を行った。開先形状について図2に示す。切削加工を行うと難削材であるインコネルは、粘りが強く試験片や工具のエンドミルが変形してしまい、加工を行うことができなかった。フライス盤の切削加工により変形したインコネルを図3に示す。

フライス加工以外での開先加工を検討し、各手法での加工を行った。シャーリングによるせん断加工や帯のこ盤・高速切断機での切断加工では、加工面が粗くなりすぎしまった。また、ワイヤーカット放電加工やウォーターカットによる加工は、加工面が綺麗に仕上がり溶接可能な表面状態となった。なお、本実験では県内企業に使用できる条件を目標にするため、導入率が高いワイヤーカット放電加工による開先加工を行った。

3. 実験方法及び結果

3. 1 SS400の突き合わせ溶接

構築したTIG自動溶接システムが正常に溶接可能かの確認を行うために溶接が容易なSS400の板厚3.2mmの同種金属での溶接を行った。溶接施工条件は、ルート間隔を取らずに1パスで行い裏ビードが形成される溶接条件(ルート面、溶接電流、溶接速度)を求めた。ワイヤ供給なし、シールドガス流量 (10L/min) , バックシールドなし、アーク長 (2.0 mm) , 溶接速度 (15cm/min) は固定条件とした。シールドガスには、アルゴンガス (純度99.99%) を使用した。使用電極は、直径2.4mmのトリウム入りタングステン (Th₂O₂, 2.0%) を鋭角形状で使用した。仮付けは、試験片の目違いを防ぐために拘束状態で行い、両端部に裏側から仮付けした。仮付け後の試験材を図1の試験材拘束治具へ取り付け、前進法にて仮付け部から溶接を行った。溶接後にコムスキャンテクノ (株) 製のScanXmate-D1300SS105Dualを用いて、X線透過試験を行い、溶け込み不良やブローホールといった欠陥の有無を確認した。表1に溶接条件とX線透過

表1 SS400の突き合わせ溶接条件及びX線透過試験結果

ルート面 (mm)	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	X線透過試験
0.0	50	9.8	欠陥あり
0.0	70	9.5	欠陥あり
1.0	80	9.3	欠陥なし
1.0	90	9.4	欠陥なし
1.6	100	8.3	欠陥なし
1.6	110	8.4	欠陥なし
2.0	120	9.3	欠陥なし
2.0	130	9.5	欠陥あり
3.2	140	9.7	欠陥あり
3.2	160	9.8	欠陥あり

試験結果、図4にX線透過試験における欠陥あり及び欠陥なしの一例、図5にルート面と溶接電流の関係を示す。

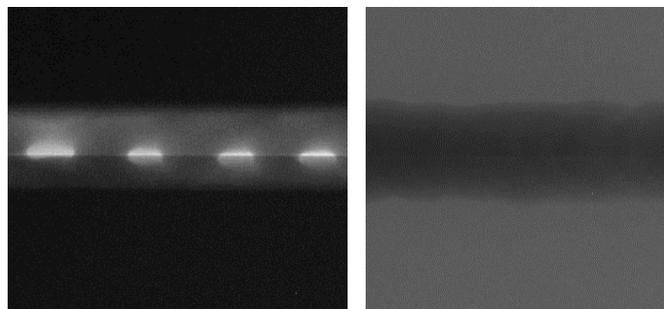
以上の結果から、SS400の板厚3.2mmのTIG下向き突き合わせ溶接は、溶接速度15cm/minにおいてルート面1.0~2.0mm、溶接電流80~120Aが良好な条件とわかる。開先条件にもよるが、溶接電流が低い(50A)と開先が溶けきらず溶け込み不良となり、溶接電流が高い(160A)と溶け落ちてしまうことがわかった。

3.2 インコネルの突き合わせ溶接

構築したシステムを使用して実験が可能であることを確認できたので、次の段階としてインコネルの溶接を行った。溶接施工条件は、SS400の突き合わせ溶接と同様に行い、バックシールドガスにアルゴンガス(15L/min)を流した。また、ワイヤーカット放電加工時の水分等の付着成分を十分に洗浄したあと溶接を行った。表2にインコネルの突き合わせ溶接条件及びX線透過試験結果を示す。図6にX線透過試験における欠陥あり及び欠陥なしの一例を示す。

SS400の溶接条件と比較すると、同じ下向き突き合わせであってもインコネルの方が欠陥なしとなる適正な溶接条件域が狭いことがわかる。また、ルート面が1.0mm時の条件を比較するとインコネルは、溶接電流を高くし、溶接速度を遅くして入熱量を多くする必要があった。

次にワイヤー供給装置により、初層溶接後にワイヤを入れ



(a) 欠陥あり (b) 欠陥なし

図4 X線透過試験の一例

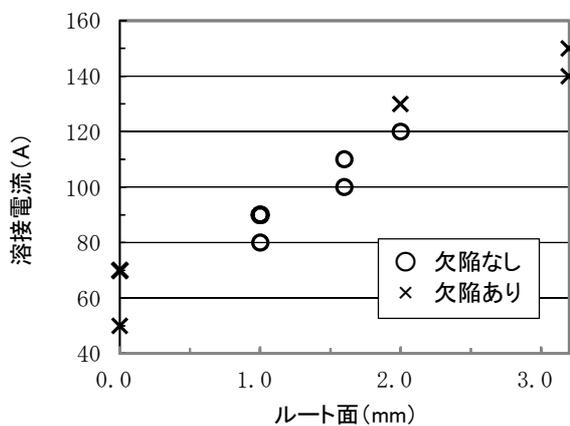


図5 ルート面と溶接電流の関係

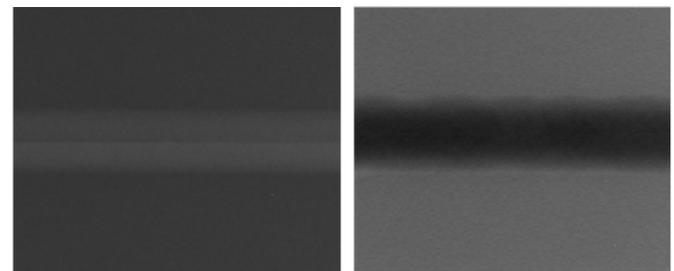
溶接の最終層仕上げを行った。使用するワイヤは、日本ウェルディングロッド(株)製のWEL AUTO TIG82 (1.2mm)を使用した。溶接電流、溶接速度及びワイヤ供給速度をビードオンプレートにより条件を確認した。溶接電流(100~160A)、溶接速度(10cm/min, 15cm/min)、ワイヤ供給速度(30~60cm/min)の条件で比較したところ、本実験の板厚、ルート面及びルートギャップでは、表3に示す条件が最適であった。図7にインコネルの突き合わせ溶接の表ビード及び裏ビードの一例を示す。

3.3 インコネルとSS400の異種突き合わせ溶接

インコネルの溶接も可能であることが確認できたので、インコネルとSS400の異種金属の組合せで溶接条件を検討した。同種金属の突き合わせ溶接により得られた、溶接条

表2 インコネルの突き合わせ溶接条件及びX線透過試験結果

ルート面 (mm)	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	X線透過試験
0.5	80	8.0	15	欠陥あり
1.0	100	8.5	10	欠陥なし
1.0	100	8.8	13	欠陥あり
1.0	100	7.8	15	欠陥あり
1.5	120	8.2	10	欠陥なし
1.5	120	8.0	15	欠陥あり

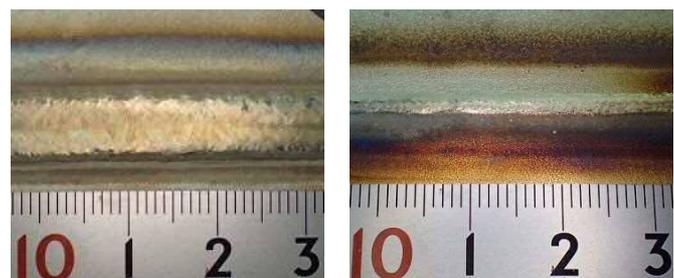


(a) 欠陥あり (b) 欠陥なし

図6 X線透過試験の一例

表3 最終層の溶接条件

溶接電流 (A)	溶接速度 (cm/min)	ワイヤ供給速度 (cm/min)
120	10	45



(a) 表ビード (b) 裏ビード

図7 溶接ビードの一例

表4 インコネルとSS400の突き合わせ溶接条件及びX線透過試験の欠陥の有無

ルート面 (mm)	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	X線透過試験
0.5	100	9.2	10	欠陥あり
0.5	120	9.4		欠陥なし
1.0	130	9.5		欠陥なし
1.5	120	9.1		欠陥あり
1.5	140	8.6		欠陥なし

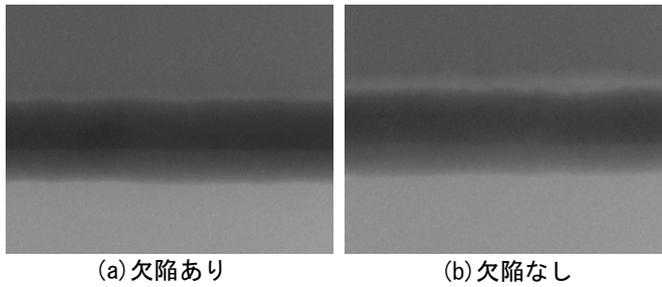


図8 X線透過試験の一例

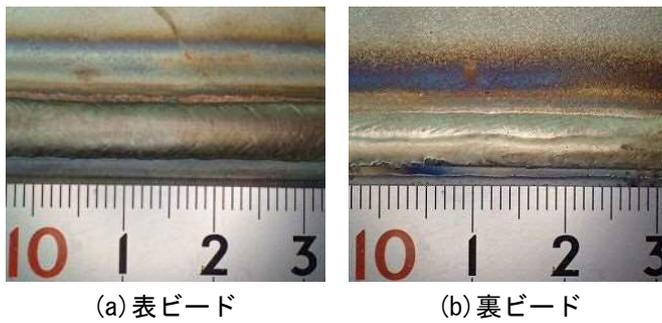


図9 溶接ビードの一例

件を参考に溶接を行った。溶接電流及び溶接速度は、入熱を多く必要とするインコネルに合わせた。

表4にインコネルとSS400の突き合わせ溶接条件及びX線透過試験結果を示す。図8にX線透過試験における欠陥あり及び欠陥なしの一例を示す。インコネルの突き合わせ溶接の条件(ルート面1.5mm, 溶接電流120A, 溶接速度10cm/minの時)と比較してみると同種金属の溶接時は、欠陥が入ることなく溶接できたが、異種金属の場合は欠陥が生じたが、溶接電流を高くすることで欠陥が入らない溶接ができた。このことから異種金属の溶接は、高い入熱が必要であることがわかった。

インコネルの突き合わせ溶接と同様に初層溶接後に最終層仕上げを行った。図9にインコネルとSS400の突き合わせ溶接の表ビード及び裏ビードの一例を示す。

3. 4 金属ごとの入熱量の関係

インコネルの溶接には入熱量を管理することが大切であることがわかった。入熱量の計算式を(1)に示す。入熱量

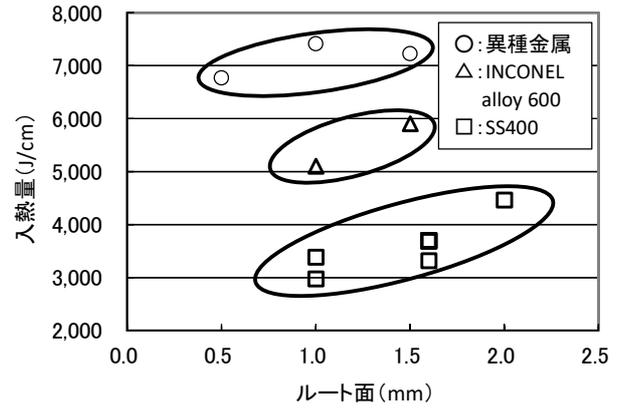


図10 金属ごとの入熱量の関係

をJ (J/cm) とし、電圧値をE (V), 電流値をI (A), 溶接速度 (cm/min) をVとしている。

$$J = (60 E I) / V \quad (1)$$

図10に良好な結果が得られたSS400, インコネル及びインコネルとSS400の突き合わせ溶接時の入熱量の関係を示す。

インコネルの突き合わせ溶接では、SS400と比べて入熱を高くする必要があることがわかった。SS400とインコネルの異種金属の突き合わせ溶接では、インコネルの突き合わせ溶接よりも高い入熱になる条件で溶接を行う必要があることがわかった。また、今回の溶接では板厚3.0mmと3.2mmを対象に行ったが、板厚が変更された場合でも今回得られた図10の入熱量の関係を参考にするこゝで、使用すべき溶接条件を割り出すことが可能であることが示された。

4. 結 言

TIG自動溶接システムを構築し、SS400とインコネル及び異種金属の突き合わせ溶接を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) TIG自動溶接システムを使用して、再現性が高い溶接が可能となった。
- (2) 本装置使用時のSS400の突き合わせ溶接条件は、ルート面1.0~2.0mm, 溶接電流80~120A, 溶接速度15cm/minが適正であった。
- (3) インコネルの突き合わせ溶接は、SS400の入熱量よりも高くなる溶接条件で行う必要があった。
- (4) インコネルとSS400の異種金属の溶接は、インコネルの突き合わせ溶接の入熱よりも高くなる溶接条件で行う必要があった。

参 考 文 献

- 1) 古賀次次：溶接技術，産報出版(株)，58(8)，48-51(2010)
- 2) 篠崎賢二：溶接技術，産報出版(株)，59(5)，44-50(2011)
- 3) (株)神戸製鋼所 溶接カンパニー 営業部 技術サー

- ビス室 大阪：溶接100番，インコネルの溶接について
- 4) 独立行政法人 産業技術総合研究所：「加工技術データベース」インコネル合金とインコネル合金のティグ溶接，43-43-T
 - 5) 中田一博：溶接技術，産報出版(株)，62(5)，71-76(2014)
 - 6) 山根國秀：溶接技術，産報出版(株)，58(4)，74-78(2010)
 - 7) 葛西省五：溶接技術，産報出版(株)，62(6)，125-130(2014)
 - 8) 平成17年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「難燃性マグネシウム合金の高機能組織制御と鉄道車両用部材の開発」成果報告書，41-48(2006)
 - 9) 森田春美，瀬戸口正和，南晃，岩本竜一：鹿児島県工業技術センター研究報告，20，51-55(2006)