5083合金と 6N01 合金の異材質の FSW 接合における材料配置の影響*

田中 直**, 熊谷 正樹***

Effect of welding direction on joining dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 by friction stir welding*

by TANAKA Sunao** and KUMAGAI Masaki***

Friction Stir Welding (FSW) succeeded in producing high quality dissimilar welds with AA5083 and A6N01 by evaluation of the microstructure and the root bend testing. A6N01 with a wide optimum range of welding condition should be placed on the retreating side to weld sound joint between AA5083 and A6N01. The optimum welding condition of FSW for the dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 was wider than that of AA5083. In the opposite orientation, A6N01 on the advancing side can hardly flow into AA5083 on the retreating side in front of the tool. As the pores on inappropriate welding condition were observed, large pores on a lower tool rotation speed were different from small discontinuous pores on a higher tool rotation speed.

Key Words: Friction Stir Welding, Dissimilar alloys, 5083, 6N01, welding condition

1. 緒 言

FSW (Friction Stir Welding の略, 以下 FSW とする) は 1991年に The Welding Institute が開発¹⁾して以来, 従来の溶融溶接に比べて接合部の欠陥が少なく, 入熱が少ないことから, 画期的な接合方法として注目を浴び, 研究が盛んに行われた²⁾. それらの成果により, FSW が5000系合金や6000系合金で構成されている鉄道車両^{3, 4)}, 船舶, 航空機等の多くの輸送機材に適用されてきた. 輸送機材の部位により要求される特性が異なるため, 材質は要求特性に合ったものを選定して用いられている. 各部位で材質が異なる場合があるため, 各種材質の組み合わせで接合の可否を調査する必要がある. FSW も異材質間の接合可否を調査した研究は多くある^{5, 6)}. しかし, FSW の条件である工具回転数や接合速度が, 異材質間の接合に及ぼす影響を調査したものは少ない⁷⁾. 本研究では, 次の材質を選定し, 接合条件である工具回転数や接合速度が異材質間の接合可否に及ぼす影響を調査した. 材質は, 高強度の5083合金と, 押出し良好で溶接構造用合金として代表的な 6N01 合金を選定した. 異材質の接合しやすさを調査するため, 異材質と同材質同士の接合可能範囲を比較した. また, FSW のメタルフローは非対称なため, 材料配置によって接合しやすさが異なることが想定されるため, 材料配置による接合しやすさを調査した. 欠陥の発生メカニズムを調査するため, FSW 中の

メタルフローを観察し, 異材質での欠陥発生メカニズムを調査した.

2. 実 験 条 件

供試材の材質は, Al-0.6mass%Si-0.54mass%Mg-0.27mass%Mn の 6N01-T5 および Al-4.0mass%Mg-0.86mass%Mn-0.11mass%Si の 5083-H112 の押出材とした. 押出材の寸法は, 幅 75 mm, 長さ 400 mm, 厚さ 4 mm とし, 突合せ端面を面削したものを用いた. 接合条件の調査は, 同一形状の回転工具 (ショルダー径: $\phi 15$ mm, プループ径: $\phi 4$ mm) を用い, 工具回転数は 400 rpm $\sim$ 3600 rpm, 接合速度は 250 mm/min (4.2 mm/s) $\sim$ 800 mm/min (13.3 mm/s) の範囲とした.

接合部の調査は, 表ビードの外観観察, 接合部断面組織観察および曲げ試験を実施した. 接合部の評価は, 断面観察で接合判定困難な接合部でも, 接合判定可能な曲げ試験にて実施した. 曲げ試験の評価判定は, 曲げ加工後の裏ビードに亀裂の有無および断面欠陥の有無からとした. 評価結果の指標は, ○が欠陥なし, △が局部的な欠陥, ▲が試験片全幅に渡るき裂, ×が破断もしくはき裂深さ 1 mm 以上と

Root bend test: $2r=25$

○: no defect

△: partial crack

▲: crack

×: fracture

●: no defect on the root surface, some defects on the cross section.

Fig. 1 Schematic root bend test.

*受付日 平成20年2月14日 受理日 平成20年7月2日
Third International Symposium on Friction stir Welding
にて一部発表

** 住友軽金属工業(株) Sumitomo Light Metal Ind., LTD.

***正 員 住友軽金属工業(株) Member, Sumitomo Light Metal Ind., LTD.

した。●は曲げ試験ではき裂がないものの、接合部の断面組織において欠陥があるものとした。曲げ試験片の成形は、接合直角方向に接合材を切断し、幅15mm、長さ150mmの試験片とした。曲げ試験の方法は、Fig. 1のように裏ビードを下に向け、上から直径25mmの半円の治具で押し、2点の受け治具で試験片を保持し、180°に曲げた。Fig. 2～Fig. 5までの断面組織は、曲げ試験前に5%フッ酸にてエッチングした後、接合直角方向の断面を接合開始部から観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 同材質同士での接合可能範囲

5083合金同士のFSW可能範囲を曲げ試験により評価した結果をFig. 2に示す。接合速度250mm/minの低速で、工具回転数を1000rpm～3600rpmの範囲で変化させても曲げ試験において接合部は欠陥なく、健全に曲がった。しかし、工具回転数600rpmの低回転では、Advancing sideと底部に粗大な欠陥が観察された。接合速度を上げた400mm/minで

Fig. 2 Optimum welding condition of FSW for 5083.

Fig. 3 Optimum welding condition of FSW for 6N01.

は、工具回転数3000rpmの接合部断面に多くの小さな欠陥が観察された。この欠陥の形態は、低回転で発生した粗大な欠陥と形態が異なっていた。

6N01合金同士のFSW可能範囲を曲げ試験により評価した結果をFig. 3に示す。接合速度250mm/minの低速で、工具回転数を1000rpm～3600rpmの範囲で変化させても曲げ試験において接合部は欠陥なく、健全に曲がった。接合速度を上げた500mm/minでは、工具回転数3000rpmでも欠陥はなく健全であった。さらに接合速度を上げた800mm/minでも、工具回転数を2000rpmや3000rpmで、健全な接合部であった。

以上の結果より、同材質同士のFSW可能領域は、6N01合金が5083合金よりも広いことが分かった。

3.2 異材質の材料配置が接合しやすさに及ぼす影響

FSWのメタルフローは接合線に対して非対称なため、材料配置によって接合しやすさが異なることが想定される。そこで、材料配置による接合しやすさを調査した。

3.2.1 5083合金を Retreating side に配置

5083合金をRetreating side、6N01合金をAdvancing sideに配置しFSWし曲げ試験により評価した結果をFig. 4に示す。接合速度250mm/minの低速で、回転数800rpm以下の条件において裏曲げ試験で破断し、回転数900rpm～1500rpmの条件においては、試験片全幅にき裂が発生した。工具回転数を2000rpmに上げるにより、搅拌部は5083合金および6N01合金が交互に入り組む欠陥のない接合部となった。さらに、工具回転数を3000rpmに上げると、欠陥が認められ、曲げ試験では破断した。接合速度を400mm/min、500mm/minに上げて接合部の欠陥は抑制されず、むしろ欠陥が粗大化する傾向にあった。接合可能な条件は、低速100mm/min及び250mm/minであることが分かった。

3.2.2 5083合金を Advancing side に配置

6N01合金をRetreating side、5083合金をAdvancing sideに配置し、FSWし曲げ試験により評価した結果をFig. 5に示

Fig. 4 Optimum welding condition of FSW for the dissimilar alloys.

Fig. 5 Optimum welding condition of FSW for the dissimilar alloys.

Fig. 6 Effect of the arrangement on metal flow.

す。接合速度 250 mm/分の低速で、工具回転数 700 rpm 以下の条件において、裏曲げ試験により局部的なき裂が発生した。工具回転数を 800 rpm 以上により健全な接合部となった。接合速度を上げた 高速度 800 mm/min でも、工具回転数 2000 rpm では健全な接合部であった。

以上の結果から、同材質（6N01 同士、5083 同士）接合において FSW 可能領域の広い材料を Retreating Side, FSW 可能領域の狭い材料を Advancing Side に配置することにより、FSW 可能領域が広がることが分かった。最適な材料配置により、異材質の接合が同材質同士の狭い接合可能領域よりも、広い範囲になることが分かった。不適当な材料配置での欠陥の発生原因は、表面から 1 mm 及び 3 mm のメタルフローを観察した Fig. 6 において、回転工具前方（矢印部）では、Advancing side の材料が Retreating Side に流れにくくなったため、回転工具の跡をメタルが埋めることができないメタル不足の状態になったと考えられる。

Fig. 7 Effect of the low tool rotation speed on metal flow. Welding condition: 600rpm, 250mm/min. (a) macrostructure of the cross section. (b) microstructure of inner pore. A.S. 6N01, R.S. 5083

Fig. 8 Effect of the tool rotation speed on metal flow. Welding condition: 3000rpm, 250mm/min. (a) macrostructure of the cross section. (b) microstructure of inner pore. (c) depth of 1mm from the surface. (d) depth of 3mm from the surface. A.S. 5083, R.S. 6N01

3.3 不適当な回転数による欠陥発生メカニズム

良好な材料配置で、回転数による欠陥発生メカニズムを調査するため、Retreating Side に 6N01 合金、Advancing Side に 5083 合金の配置にて、回転数を変化させた。工具回転数が 600 rpm の低い場合は、Fig. 7 のように接合部に粗大な欠陥が発生した。さらに工具回転数を下げることにより、表ビードは形成せず、工具によって切削されたようなもの

となる。工具回転数が少ないことにより、健全な接合部を得るのに必要な攪拌エネルギーが不足していることが考えられる⁸⁾。

工具回転数を上げた3000 rpmでは、無数の微小な欠陥が発生した。接合表面から3 mmの位置組織 Fig. 8にて、微小な欠陥が断続的に観察された。回転数を上げることにより、表ビードの形状および表面から見た攪拌組織が断続的になっていることから、攪拌過多により攪拌が不安定となり、断続的に空孔ができやすい傾向にあることが分かった。

4. 結 論

- (1) 6N01合金と5083合金の異材質間で広い接合可能範囲である最適な材料配置は、Retreating Sideに6N01合金を、Advancing Sideに5083合金を配置した場合であることが分かった。
- (2) 同材質同士でFSW可能範囲は、6N01合金同士が5083合金同士よりも広いことが分かった。FSW可能範囲は、接合速度250 mm/minの低速でほぼ同等であったが、接

合速度を上げた500 mm/minでは差が認められた。

- (3) FSW可能範囲は、最適な材料配置での異材質間(Retreating Sideに6N01合金を、Advancing Sideに5083合金を配置)が、5083合金同士よりも広いことが分かった。

参 考 文 献

- 1) Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, Murch M G, Temple-Smith P and Dawes C J, European Patent Specification 0615480B1.
- 2) K. Colligan: Welding Research, 78-7 (1999) 229-237
- 3) H. Hori, S. Makita, and H. Hino: 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Rockwell Science Center, June (1999), CD-ROM.
- 4) T. Kawasaki and T. Makino: 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, June (2000), CD-ROM.
- 5) H. Larsson and L. Karlsson: 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, June (2000), CD-ROM.
- 6) T. Hashimoto, N. Nishikawa, S. Tazaki and M. Enomoto: INALCO, Cambridge, April (1998).
- 7) 柴柳敏哉, 前田将克: 軽金属溶接 46 (2008) 1, 14-22.
- 8) Frigaard OG, Midling OT: Met. Mater. Trans 32A (2001) 1189-200.