摩擦攪拌接合による薄板オーステナイト系ステンレス鋼の継手特性*

石川 武**, 藤井 英俊***, 玄地 一夫****, 崔 霊*****, 松岡 茂樹****, 野城 清***

Joint Properties of Friction Stir Welded Austenitic Stainless Steels*

By ISHIKAWA Takeshi**, FUJII Hidetoshi***, GENCHI Kazuo****, CUI Ling*****, MATSUOKA Shigeki****
and NOGI Kiyoshi***

Mechanical properties of friction stir welded joints of austenitic stainless steels, SUS301L-1/4H and SUS304, under different heat input conditions were studied. The tool rotation speed was set at 600rpm and the welding speed was changed from 60 to 540mm/min. The tensile strength of the SUS301L-1/4H welded joints is equivalent to that of the base material at the welding speeds of 120 to 300 mm/min. The proper welding condition range is smaller than that for SUS304 which is a typical austenitic stainless steel. This result should be related with the difference in the strengths between SUS301L and SUS304 at a high temperature.

Key Words: Friction stir welding, Austenitic stainless steel, Tensile strength, Vickers hardness, Macrostructure

1. 緒 言

摩擦攪拌接合(FSW)は 1991 年に英国の The Welding Institute により発明・開発された接合技術¹⁾で、接合ツールによる摩擦熱で軟化させた母材同士を塑性流動により一体化させる固相接合方法である。入熱量が少ないため、接合継手は歪みが少なく、組織の微細化による高強度化が可能であることが特長である。これまではアルミニウム合金などの軽合金に関する研究²⁾³⁾が主体に行われ、鉄道車両、船舶および飛行機の軽合金製の構体などに実用化されている^{4) -6)}。

一方、高融点材料の摩擦攪拌接合は、材料が塑性流動可能な高温において物理的・化学的に耐えられるツール材質の検討が必要不可欠であり極めて困難であるといえる⁷⁾。これらの高融点材料の摩擦攪拌接合は IF 鋼⁸⁾や炭素鋼⁹⁾また、オーステナイト系ステンレス鋼に関しては、SUS304^{10) 11)}の主に腐食に関する研究があるが、SUS304 以

外の塑性流動しにくい材質の継手強度に及ぼす接合条件の影響等は全く報告されていない。さらに、これまで報告されているオーステナイト系ステンレス鋼の摩擦攪拌接合の適正接合速度は半自動アーク溶接と比較して非常に遅く、実用化に程遠いといえる。

そこで、本研究では鉄道車両用ステンレス鋼材として開発され、鉄道車両構体に多く利用されている SUS301L-1/4H (-DLT)の摩擦攪拌接合を行った。接合はツール回転数を一定とし、接合速度を変化させることにより入熱を変化させて行い、その継手部について検討を行った。

SUS301L-1/4H は粒界腐食に対する耐食性を保持し、SUS301Lを硬化させるために低い圧延率で調質圧延したオーステナイト系ステンレス鋼である。この材料は高温での 0.2%耐力が大きく、SUS304 と比較して高温領域で塑性流動しにくいため、摩擦攪拌接合しにくい材料であることが特徴である。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は厚さ 1.5mm の SUS304 および SUS301L-1/4H の板で、その化学成分と機械的特性を Table1 に示す。いずれの供試材も $330\text{mm}^{\text{L}} \times 35\text{mm}^{\text{W}} \times 1.5\text{mm}^{\text{T}}$ の大きさで突き合わせ面を機械加工した。

*原稿受付 平成17年11月11日 平成17年度春季全国大会で発表

**正 員 東急車輛製造(株) Member, Tokyu Car Corporation
***正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University
**** 東急車輛製造(株) Tokyu Car Corporation
*****学 生 員 大阪大学接合科学研究所 Student Member, JWRI, Osaka University

Table1 Mechanical properties and chemical compositions of stainless steels.(JIS G 4305, JIS E 4049)

	C	S i	M n	P	S	N i	C r	others	0.2%proof strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SUS301L -1/4H	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	6.00 ~8.00	16.00 ~18.00	N ≤0.20	345≤	690≤	40≤
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	—	205≤	520≤	40≤

2.2 接合方法

最初に供試材を脱脂した後、ツールの押し込み荷重を制御した FSW 装置を使い、突き合わせ接合を行った。接合時のツール傾斜角は進行方向に向かって 3 度とした。接合時は接合ツールおよび接合部の酸化防止のためにシールドガスとしてアルゴンガスを 30l/min の流量で使用し、接合ツールおよび接合装置の冷却のために水冷のクーリングホルダーを装着した。

接合に使用したツールの寸法を Table2 に示す。ツールの形状はプローブの先端が球面形である。接合条件はツール回転速度を 600rpm に一定とし、接合速度を 60~540mm/min の範囲で変化させた。一般に、ツール回転速度を大きくすると入熱量が増加するため、接合速度も大きくすることが可能になるが、回転速度が大きすぎる場合にはショルダーが接触する供試材表面への入熱が攪拌内部と比較して多く

なりすぎて塑性流動のバランスが悪くなり欠陥が発生する¹²⁾。

2.3 接合継手評価方法

母材への入熱を評価するため、接合中の温度測定を実施した。測定位置は、Fig.1 に示す通り、裏面の接合中央でツール直下に熱電対を接触固定させて測定した。

接合継手の評価は接合外観、引張試験、硬さ試験および断面マクロ観察により行った。

引張試験片の形状および寸法は JIS Z 2201 の 14B 号試験片を参考としたが、板厚は最小となる箇所を測定して断面積を計算した。引張速度は 1mm/min で室温にて実施した。

ビッカース硬さ分布は溶接方向に垂直な断面において、攪拌部、熱影響部および母材にまたがって測定した。マイクロビッカース硬度計を用いて、0.98N で 10 秒保持とし、試験片の板厚中心に沿って 1mm 間隔で測定した。また、溶接方向に垂直な断面をアルミナ研磨剤で研磨し、シュウ酸 10% 溶液で腐食してから光学顕微鏡により組織観察した。

Table2 Designated parameters of welding tool

Shoulder diameter (mm)	Probe diameter (mm)	Probe length (mm)
15	5	1.4

Fig.1 Temperature measurement position during friction stir welding

3. 実験結果および考察

3.1 摩擦攪拌接合時の試料温度測定結果

接合時の入熱の違いを確認する目的で接合速度 60mm/min および 420mm/min での接合中の SUS304 供試材温度を測定した。Fig.2 は接合中のツール直下の温度を測定した結果である。60mm/min の接合で最高到達温度は 983℃ (1256K), 420mm/min の接合で最高到達温度は 775℃ (1048K) であった。岡本らの研究によると板厚 6mm の SUS304 を Polycrystalline Cubic Boron Nitride(PCBN)ツールによりツール回転速度 550rpm で摩擦攪拌接合した場合、攪拌部とツール接触部の温度は約 1200℃(1473K)になることが分かっている¹³⁾。本研究においても、攪拌部内部の温度は測定位置や測定方法を考慮すると測定値より高くなることが予想されるが、接合速度が大きいくほど接合入熱は小さくなり、接合温度が低くなる傾向であることがわかる。

なお、Fig.2 に見られるようにピーク温度が2ヶ所あるのは、一つ目のピークがプローブ前側と母材との摩擦による温度上昇点であり、二つ目のピークはプローブ後ろ側と母材との摩擦による温度上昇点の温度結果と考えられる。これは、プローブの直下においては、プローブ底面近傍からの摩擦熱が温度に大きく影響し、周速度が減少するプローブ中心部に測定点があった場合には、温度が低下することを示している。したがって、二つのピークの間隔が接合速度によって変化する。

3.2 SUS301L-1/4H の摩擦攪拌接合部

SUS301L-1/4H は接合速度 60~540mm/min の条件で接合した。SUS301L-1/4H の接合速度 300mm/min の接合外観を Fig.3 に示す。外観は 60~300mm/min の条件で表裏面ともに欠陥や酸化はみられなかったが、420mm/min ではほぼ接合部全長に渡って表面に溝状の欠陥が発生し、540mm/min ではこの欠陥が大きく現れて接合が不可能となった。

Fig.2 Change in temperature during friction stir welding of SUS304.

Fig.3 Appearance of SUS301L-1/4H joint at 300mm/min.

Fig.4 に SUS301L-1/4H を摩擦攪拌接合した継手の引張強さおよび 0.2%耐力を示す。継手は 120~300mm/min の間で母材と同等以上の引張強さが得られたが、60mm/min および 420mm/min では引張強さが低下した。0.2%耐力は 120~420mm/min で母材とほぼ同等の強度が得られた。

Fig.5 に示すように、母材部と攪拌部との伸びはほぼ均等であった。これは後に示す攪拌部の硬度が母材部と攪拌部とで同等であったことと一致する。

Fig.4 Tensile strength of SUS301L-1/4H joint.

Fig.5 Appearance of joints after tensile test (a) SUS 301L-1/4H (300mm/min) and (b) SUS304 (300mm/min).

SUS301L-1/4H の接合方向に垂直な断面の継手部板厚中心を 1mm 間隔で測定した硬さ試験の結果を Fig.6 に示す。攪拌部は母材と同等の硬度を示したが、接合速度が大きいほど硬度も高くなる傾向を示した。これらは接合速度が大きいほど入熱が少なくなることにより、攪拌部の結晶粒がより小さくなることに起因すると考えられる。Fig.7 には攪拌部(SZ)の光学顕微鏡による組織観察結果を示すが、60mm/min では結晶粒径が $20 \sim 30 \mu\text{m}$ であるが、420mm/min では $10 \mu\text{m}$ 以下であることがわかる。

Fig.6 Hardness distribution of friction stir welded SUS301L-1/4H joints.

Fig.8 の断面マクロ観察写真に示すように、接合速度が速くなるにつれて攪拌部(SZ)の領域は狭くなり、120～300mm/min では良好な継手が得られた。

Fig.9 に示すように 60mm/min では攪拌部の前進側(AS)の端部に裏面からの太い線状の欠陥が認められ、引張強さが大幅に低下した。一方、420mm/min では Fig.10 に示すように前進側(AS)の表面に入熱不足に伴う攪拌不良による溝状の欠陥が認められた。この欠陥の発生はツール荷重を増加しても防止することはできなかった。

60mm/min の低速度で接合を行った場合に、裏面で欠陥が発生する理由は明らかになっていない。しかしながら、この条件における欠陥を防止するために、塑性流動を制御

する目的でプローブ先端が円錐形状のツールを使用した結果、欠陥発生を抑制できることが分かった。しかし、円錐形状ツールも 420mm/min では入熱不足に伴う攪拌不良による溝状の欠陥に対しては有効でなかった。したがって、この場合 60mm/min で裏面に欠陥が発生しなかったのは、円錐形状が裏面近傍の攪拌部温度の低下と攪拌の抵抗力減少に寄与したためと考えられる。

Fig.7 Microstructure of SUS301L-1/4H stir zone by different welding speed (a) 60mm/min and (b) 420mm/min.

Fig.8 Cross section of SUS301L-1/4H joints.

Fig.9 Defect formed in SUS301L-1/4H joint at a low welding speed of 60mm/min.

Fig.10 Cross section of SUS301L-1/4H joint welded at 420mm/min.

3.3 SUS304 の摩擦攪拌接合部

SUS304 は接合速度 60～540mm/min で 120mm/min 間隔の条件で接合した。60～540mm/min の全ての条件で表裏面の

欠陥や接合表面の酸化もみられず、良好な外観が得られた。

Fig.11 に SUS304 を摩擦攪拌接合した継手の引張強さおよび 0.2%耐力を示す。継手部は 420mm/min まで母材と同等の引張強さが得られ、540mm/min では母材の約 80%まで引張強さが低下した。0.2%耐力は 60～540mm/min で母材と同等の強度が得られた。これらの結果は半自動アーク溶接と比較して同等の接合速度であり、継手強度は上回っている。また、引張試験片の伸びは Fig.5 に示すように母材部の伸びがビード部よりも大きい傾向が見られた。これは後に示す攪拌部の硬度上昇と一致する。

SUS304 の継手部板厚中心を 1mm 間隔で測定した硬さ試験の結果を Fig.12 に示す。攪拌部およびその近傍ではわずかに母材よりも硬度が上がっている。接合速度が大きいほど攪拌部およびその近傍での硬度が高くなる傾向がある。これらは接合速度が大きいほど入熱が少なく、SUS301L-1/4H と同様に攪拌部の結晶粒がより小さくなっていることに起因すると考えられる。

Fig.13 の断面マクロ観察写真に示す通り、60～420mm/min では良好な継手が得られたが、接合速度が大きくなるにつれて攪拌部の領域は狭くなった。また、540mm/min では Fig.14 の拡大写真で示すように、前進側 (AS) の攪拌部 (SZ) と母材部 (BM) との間に入熱不足が原因と考えられる空洞状の欠陥が確認できた。これにより、引張試験での破断の起点となり引張強さが低下した。攪拌部の白い部分はクロム炭化物や σ 相などの析出物が増加していることが推測され、腐食しやすい領域となっている^{10) 11)}。

Fig.11 Tensile strength of SUS304 joint.

Fig.12 Hardness distribution of friction stir welded joints SUS304.

Fig.14 Cross section of SUS304 joint welded at 540mm/min.

3.4 摩擦攪拌接合部特性の比較

SUS301L-1/4H でも摩擦攪拌接合により、母材と同等の継手強度を得ることができた。しかし、Fig.11 に示すように、SUS304 の適正接合速度は 60~420mm/min であるのに対し、SUS301L-1/4H の適正接合速度は Fig.4 に示すように 120~300mm/min と狭い範囲に限定された。

Fig.15 に示すように、SUS301L-1/4H は高温での 0.2%耐力が大きいことが特徴である。前述のように、摩擦攪拌接合時の攪拌部の温度は約 1000℃(1273K)であるが、この温度での SUS304 は 0.2%耐力が 30MPa と低く塑性流動しやすい材料であるのに対し、SUS301L-1/4H は 350MPa 程度と高く塑性流動しにくい材料であるために、適正条件範囲が狭い範囲に限定されたと考えられる。このような現象はアルミニウム合金でも同様に、押出型材に使用されるように塑性流動しやすい 6000 系に比べて、5000 系は健全な継手部が得られる条件範囲が極めて狭いことが分かっている⁵⁾。

特に、420mm/min のような速い接合速度域では SUS304 は母材と同等の継手強度が得られたが、SUS301L-1/4H は塑性流動しにくいというえに入熱が不足するため、継手に欠陥が発生し強度が上がらないことが検証できた。

Fig.13 Cross section of SUS304 joints.

Fig.15 Relationship between 0.2% proof strength and temperature.

4. 結 論

- (1) オーステナイト系ステンレス鋼で、調質により高強度が得られている SUS301L-1/4H 薄板の摩擦攪拌接合が実施可能であり、ツール回転速度 600rpm の時 120～300mm/min の接合速度範囲で母材強度と同等以上の接合強度が得られる。
- (2) SUS301L-1/4H は SUS304 と比較して、良好な継手強度を得ることができる適正接合条件範囲が狭く、これは接合温度における塑性変形抵抗と関連する。
- (3) SUS304 薄板は半自動アーク溶接と同等の速度で接合可能であり、母材強度と同等の接合強度が得られる。

参 考 文 献

- 1) W.M.Thomas et al. : International Patent Appl.No.PCT/GB92/02203.
- 2) H. Okamura, K. Aota, Y. Sakamoto, M. Esumi and K. Ikeuti : Behavior of oxide during friction stir welding of aluminum alloy and its influence on mechanical properties, Quarterly Journal of the Japan welding Society, 19-3 (2001), 446-456. (in Japanese)
- 3) M. Enomoto : Application of friction stir welding for aluminum alloys, Journal of light metal welding & construction, 36-2 (1998) 75-79. (in Japanese)
- 4) M. Kumagai and S. Tanaka : Application of friction stir welding to welded construction of aluminum alloys, Journal of light metal welding & construction, 39-1 (2001), 22-28. (in Japanese)
- 5) H. Okamura : Character of friction stir welding and application in Japan, Journal of the Japan welding society, 69-7 (2000), 565-571. (in Japanese)
- 6) M. Enomoto : Mass production of Al suspension parts using FSW for automotive industry, 3rd International Symposium Friction Stir Welding, 27-28 September 2001.
- 7) M. Inagaki, S. Hirano, K. Okamoto, T. Odakura and K. Masutomi : Recent trend of friction stir welding, Fuseramu, 7-10 (2002) 773-776. (in Japanese)
- 8) H. Fujii, R. Ueji, Y. Takada, N. Tsuji, K. Nakata and K. Nogi : Friction stir welding of ultrafine grained interstitial free steels, Materials Transactions, 47 (2006) 239-242.
- 9) W. M. Thomas : Friction Stir Welding of ferrous materials ; A feasibility study : 1st International Symposium Friction Stir Welding, 14-16 June 1999.
- 10) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki : Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding , Scripta Materialia, 49 (2003) 1175-1180.
- 11) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki : Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel, Scripta Materialia, 51 (2004) 101-105.
- 12) Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki and K. Nakata : Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, Materials Science Engineering, A415 (2006) 250-254.
- 13) K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki, S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, T. W. Nelson and C. D. Sorensen : Metallurgical and mechanical properties of friction stir welded stainless steels, 4th International Symposium Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.