

摩擦攪拌接合の異種材接合への応用（第2報）

水谷 予志生、足立 隆浩

Application of friction stir welding to dissimilar material joining (II)

Yoshiki Mizutani and Takahiro Adachi

摩擦攪拌接合（FSW）による異種材接合として、それぞれ板厚 3mm のアルミニウム展伸材（A6061-T6）と鋼板（SS400）またはステンレス板材（SUS304）との突き合わせ接合を行った。前報では、ツールのショルダー一部も鋼板に若干侵入し、表面を少し削るような位置で FSW を行ったところ、板厚の半分程度しか接合されなかった¹⁾。この鋼材への侵入を無くしたところ、ツールのプローブ長さと同程度の深さまでアルミニウム展伸材と鋼材またはステンレス材とを接合させることができた。引張試験による破断位置は、接合界面ではなくアルミニウム合金母材側であり、十分な接合強度が得られたものと考えられる。ツールの回転数、移動速度を変化させたところ、鋼材よりステンレス材との接合の方が良好な接合が得られる加工条件範囲が狭い傾向にあった。ただし、ツールプローブの鋼材への食い込み量が重要であり、ツールの移動位置を高精度で制御することが課題である。

1. はじめに

自動車等輸送機器の軽量化のため、鉄鋼材料からより軽量の素材への変更が盛んに行われており、場所によって最適な素材を使い分けるマルチマテリアル化がトレンドとなっている。種々の軽量材料の中でもアルミニウム合金は有力な代替材料であり、自動車 1 台あたりの使用量が年々増加している。それに伴い、アルミニウム合金同士、あるいはアルミと鉄等の接合の要望が増えており、さまざまな手法が開発・実用化されつつある。

その一つである摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：以降 FSW）技術²⁻³⁾は、従来溶接が困難であったアルミニウム合金同士の接合を容易にし、かつ優れた機械的特性を有した接合法であることから、電車車両・自動車等の構造材に急速に実用化が進んできている⁴⁻¹⁰⁾。この FSW を用いて、アルミニウム合金とマグネシウム合金や鉄、銅、チタンといった異種材料との接合¹¹⁻¹⁶⁾や、鉄同士のような高融点材料の接合¹⁷⁻²⁰⁾といった研究開発も進んでおり、注目されている技術である。また、本来の FSW とは方式が異なり、上下に重ね合わせて接合する手法で鋼材とアルミニウム合金材との異種接合を実用化した例がある⁹⁻¹⁰⁾。

しかし、FSW の突き合わせ接合による異種材接合については、研究室レベルでの報告例⁹⁻¹²⁾はあるが、実用化には至っていない。本研究では、特に要望の高いアルミニウム合金板と鋼板またはステンレス板との突き合わせ接合に着目し、接合条件と強度について調査することを目的とした。

2. 実験方法

本実験では、それぞれ 50×250×3mm のアルミニウム展伸材（A6061-T6）、鋼板（SS400）、ステンレス板材（SUS304）を接合用試料とした。図 1 のように、ツ

ール進行方向の右側（RS 側）にアルミニウムを、左側（AS 側）には鋼またはステンレスを配して FSW による異種材接合を行った。FSW には、位置制御方式である自動摩擦溶接機（㈱日立設備エンジニアリング社製、SHH204-718 型）を使用した。FSW ツールにはハイス鋼を用いており、φ12mm のショルダー先端に M5 の逆ネジ状プローブ（長さ 2.5mm）が付いた形状となっている。昨年度と異なり本年は、ツールのショルダー部は侵入させないこととした。ツール挿入位置は前報¹⁾と同様で、突き合わせ面よりアルミ側とし、プローブ側面が約 0.2mm だけ鋼板あるいはステンレス板の側面に食い込むように調整している。ツールの回転数と移動速度を変化させ、接合強度への影響を調査した。

接合後の試料は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置（東芝 IT コントロールシステム（株）製、TOSCANER-32300μFD）により CT 像を観察し、アルミへの鉄片の分散状況や欠陥の有無を観察した。また、前報同様¹⁾ワイヤーカットを用いて引張試験片を作製し、万能試験機（Instron Corporation 製、5985 型）にて引張強度を測定した。比較として、アルミ（A6061-T6）同士を FSW した試料についても同様に引張強度を測定した。また、接合断面のマクロ・ミクロ組織観察も行った。

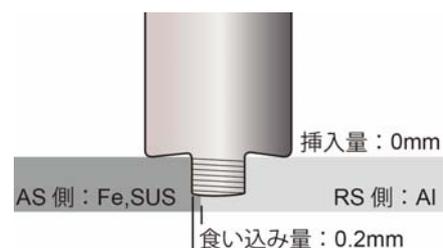


図 1 FSW におけるワークとツールの配置図
（ツールの移動方向は紙面手前から奥方向）

3. 結果及び考察

長さ 230mm の FSW を行った接合試料から、前報¹⁾と同様に 8 本の引張試験片を切り出し、万能試験機にて引張試験を行った。図 2 に、FSW の開始点を原点とした引張試験片の採取位置による引張強度をプロットした。比較としてアルミ同士を回転数 2000rpm、移動速度 200mm/min で FSW した試料についてもそれぞれ示した。この場合、接合初期段階では強度が低いものの、70mm 以上では安定して 800MPa 近い強度が得られた。これに対し、図 2 (a) のアルミ (A6061-T6) -鉄 (SS400) の接合では、接合条件によっては接合初期から 600~700MPa の強度で安定しているものもあれば、変動の大きいものもあった。図 2 (b) のアルミ-ステンレス (SUS304) の接合では、さらに大きく変動しており、移動速度を 500mm/min と速くしたものや、回転数を 1500rpm と大きくしたものでは強度が大きく低下していた。

これらの引張試験後の鉄あるいはステンレス側の代表的な破面について、実体顕微鏡によるマクロ写真を図 3 に示す。比較として、アルミ同士の破面も図 3 (a) に示す。いずれも FSW 全接合長のうち、中心の安定した位置の破面を示している。アルミ同士の場合、板厚 3mm の全領域で接合されており、引張試験による伸びの影響で断面積が収縮したのが分かる。この試料の破断位置は、継手外側の母材部 (熱影響部) であった。一方、アルミ-鉄の接合で強度の高かった回転数 800rpm、移動速度 200mm/min の試料 (図 3 (b)) では、接合下面側から 0.6mm 程度で鋼板素地が観察され、この部分ではツールプローブが接触しておらず、ほとんど接合されていないと考えられる。その上部ではアルミが付着していたことから、十分な接合がなされた部分では、アルミの母材破断が起こることが分かった。断面積中 2 割程度が接合強度に寄与していないことを考えると、アルミ同士の 800MPa に対し 700MPa 程度の強度が得られたことは妥当な結果だと考えられる。次に、図 3 (c) はアルミ-ステンレスで強度の高かった移動速度 200mm/min、回転数 800rpm の試料を、図 3 (d) は低かった 1500rpm、200mm/min の試料の破面を示す。図 3 (c) の強度が高かったものでは、図 3 (b) のアルミ-鉄の場合と同様であったが、図 3 (d) の低かったものではアルミの付着が少なく、また、ほぼ全面にわたって筋状の痕跡が存在していた。これは、プローブのネジ山で削られた痕跡だと思われる。

FSW 後の試料の断面について、図 4 にアルミ-鉄、図 5 にアルミ-ステンレスのマクロ組織を示す。この図でも全接合長の中心部の断面であり、ツールの移動方向は紙面手前から奥となっている。図 4 は、アルミの A6061 部は 5%HF 水溶液で、鉄の SS400 部は 5%ナイトールでエッチング後、光学顕微鏡の暗視野像で観察し、図 5 はアルミ部のみエッチングして明視野像で観察した

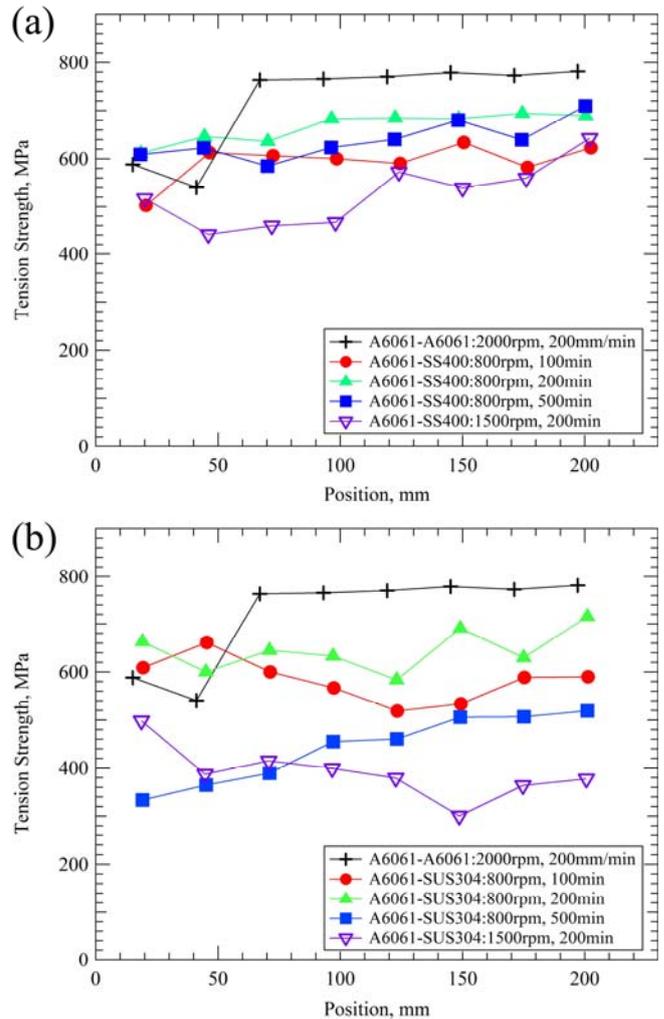


図 2 FSW 後の引張試験片採取位置と引張強度の関係 (a)アルミ-鉄, (b)アルミ-ステンレス

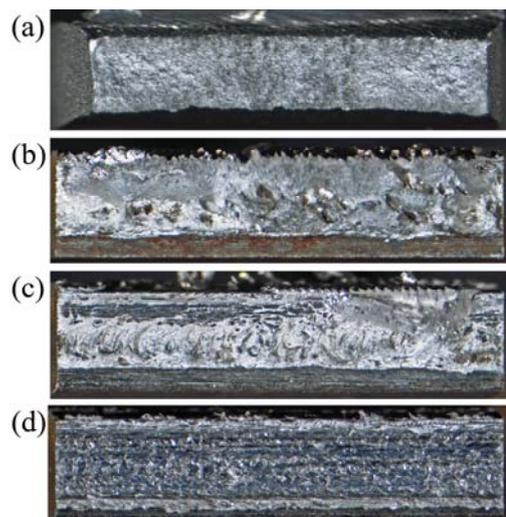


図 3 引張試験後の破面 (鉄またはステンレス側) (a)アルミ同士(2000rpm-200mm/min), (b)アルミ-鉄(800rpm-200mm/min), (c)アルミ-ステンレス(800rpm-200mm/min), (d) アルミ-ステンレス(1500rpm-200mm/min)

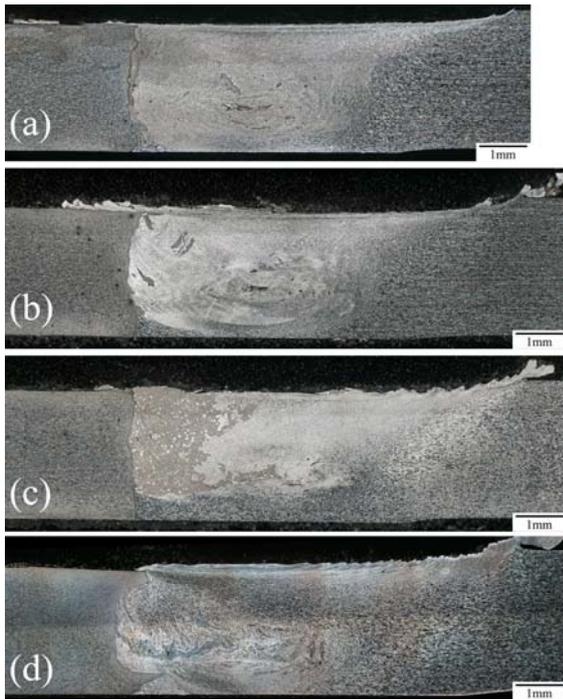


図4 アルミー鉄のFSW後の断面マクロ組織
(a)800rpm-100mm/min, (b)800rpm-200mm/min,
(c)800rpm-500mm/min, (d)1500rpm-200mm/min

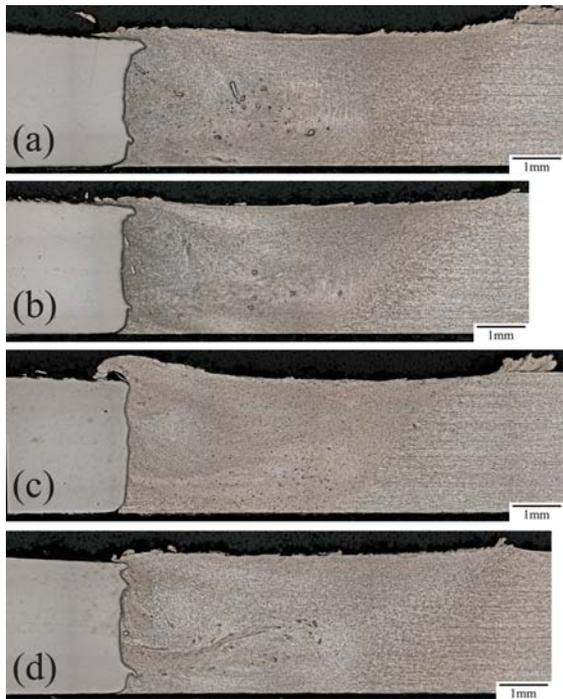


図5 アルミステンレスのFSW後の断面マクロ組織
(a)800rpm-100mm/min, (b)800rpm-200mm/min,
(c)800rpm-500mm/min, (d)1500rpm-200mm/min

ものである。それぞれ、鉄あるいはステンレス板の側面は、ツールのプローブが当たったことによる変形と、それにより削られた鉄片がアルミ攪拌部に点在しているのが確認できた。ツールショルダー部の侵入をなくしたこ

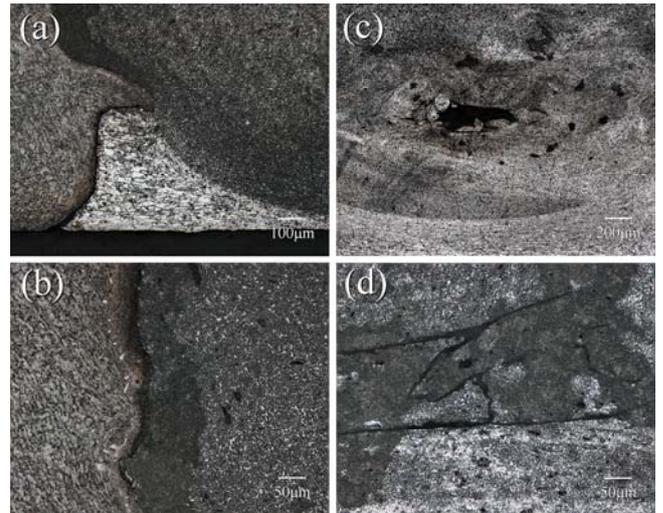


図6 アルミー鉄のFSW断面のマイクロ組織
(a)(b)800rpm-100mm/min, (c)800rpm-200mm/min,
(d)800rpm-500mm/min

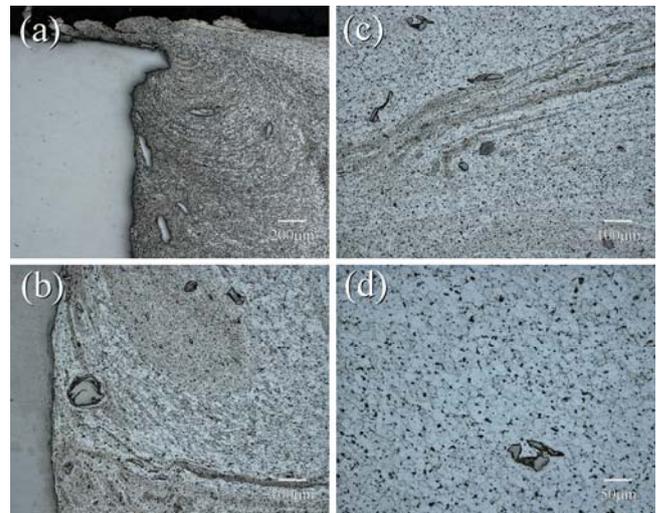


図7 アルミステンレスのFSW断面のマイクロ組織
(a)800rpm-200mm/min, (b)(c)(d)1500rpm-200mm/min

とで、前報¹⁾よりも深い位置まで鋼板の側面を削ることができた。これが、前報より高強度が得られた原因であると考えられる。また、FSW特有の攪拌の痕跡(オニオンリング)が攪拌域中央に見られるもの(図4(a)(b), 図5(d))もあれば、左上の境界部に見られるもの(図5(a)(b))もあった。AS側の鋼板またはステンレス板がほとんど塑性流動しないため、通常アルミ同士のFSWとは異なる塑性流動が起こったためと考えられる。

これらの断面のマイクロ組織を、図6, 図7に示す。接合境界下面側には、鉄・ステンレスいずれの場合でも図6(a)のような未攪拌のアルミ部が存在していた。また、アルミと鉄をFSWした場合、鉄の境界近傍およびアルミ攪拌部に点在する削られた鉄片内に、図6(b)のような微小な白い点が存在していた。これはFSWの

摩擦熱で炭化物が析出した可能性が考えられる。また、攪拌域には鉄片だけでなく図6(c)のような空洞状の内部欠陥や、図6(d)のような界面の巻き込みのような欠陥も存在していた。アルミとステンレスをFSWした場合、図7(a)のように、オニオンリングがステンレスとの境界角部から広がっているように存在していた。また、回転数を1500rpmとした試料では、図7(b)(c)のように結晶粒の粗い領域と細かい領域が攪拌域に混在していた。供試材のA6061-T6は展伸材であることから、結晶粒が圧延方向に伸びた形状をしているはずであるが、結晶粒の粗い部分では図7(d)のように10~20μm程度の等方的な結晶粒となっていた。回転数が大きくなったことで発熱量が増加し、再結晶が起こったためではないかと考えられる。

ワイヤーカットで引張試験片を切り出した残りの部分である幅約13mmの試料について、X線CTによる断面観察を行った結果を図8に示す。これらは、アルミと鉄をFSWした試料を上から見た断面図であり、図中左から右にツールが移動している。測定条件は、管電圧90kV、管電流360μAである。図中白色がFe、灰色がAl、黒色は空洞を示している。プローブで削られた鉄片が、ツールの回転軌跡に沿って分布しているのが分かる。この鉄片は数十μmから数百μmオーダーのものであり、粗大なものは境界面に近い位置に存在していた。また、図8(b)(c)では、この回転軌跡に沿って空洞状の欠陥も存在していた。アルミとステンレスをFSWした試料でも、同様の結果が得られている。このCT像からFe部のみを抜き出し、三次元形状を表示させたものを図9、10に示す。これらの図はいずれも、図4、5のマクロ断面図と同じ方向から見たものであり、奥行き方向に多数の鉄片が分布している。鉄片の分布は、大きく分けて攪拌中心部と最表面部の2つに分けられる。アルミとステンレスをFSWした図2(b)で強度の低かった条件である800rpm, 500mm/minの図10(c)では鉄片が極度に少なく、ステンレス側面への食い込み量が少なかった可能性がある。また、同様に強度の低かった1500rpm, 200mm/minの図10(d)では、比較的鉄片の広がりが少なく、大きな鉄片が凝集して存在しているように見える。こちらは十分な量の鉄片がアルミ中に分散していることから、食い込み量の問題ではなく、ツール回転数の影響ではないかと考えられる。アルミ-鉄の接合では同条件でも高い強度が得られていることから、ステンレスとの接合では良好な接合が得られる加工条件範囲が狭いと考えられる。しかし、プローブの鋼材への食い込み量も重要であり、これが変動することで接合強度に大きく影響していると考えられる。この食い込み量の変動の結果、図2(a)(b)のように接合位置によって強度が変動したのではないかと考えられる。食い込み量が変動する要因として、ツールの摩耗や鉄の凝着によるプローブ径の変動、ワークやツールの熱膨張、装置の剛

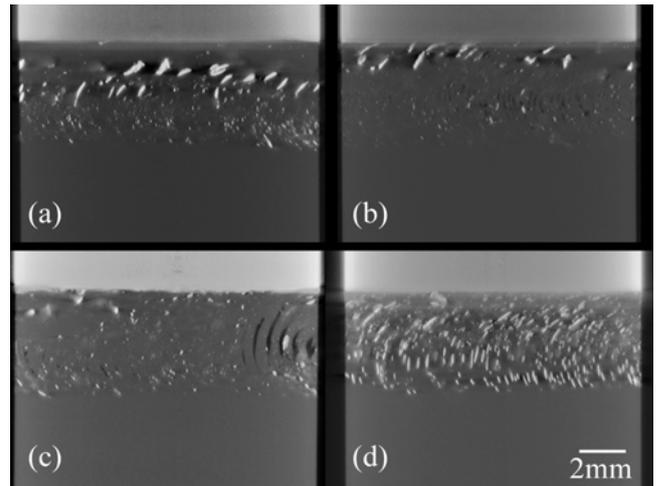


図8 アルミ-鉄をFSWした試料のCT断面図
(a)800rpm-100mm/min, (b)800rpm-200mm/min,
(c)800rpm-500mm/min, (d)1500rpm-200mm/min

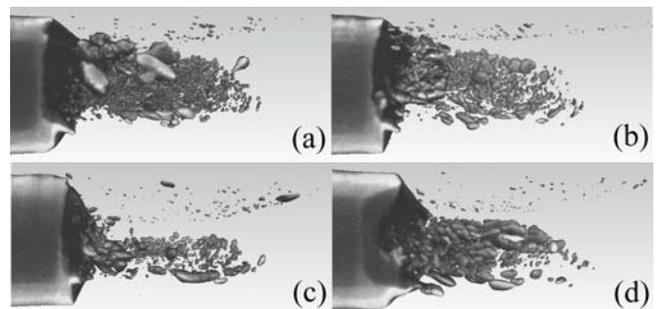


図9 アルミ-鉄をFSWした試料の三次元形状
(a)800rpm-100mm/min, (b)800rpm-200mm/min,
(c)800rpm-500mm/min, (d)1500rpm-200mm/min

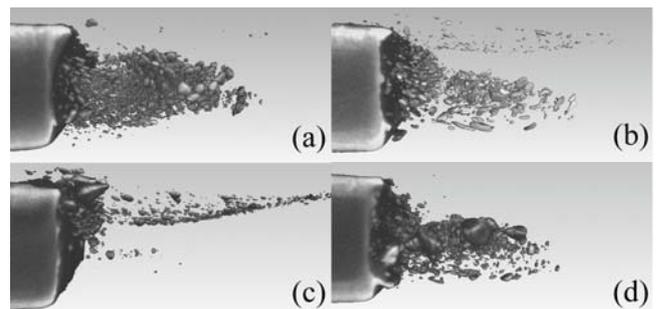


図10 アルミ-SUSをFSWした試料の三次元形状
(a)800rpm-100mm/min, (b)800rpm-200mm/min,
(c)800rpm-500mm/min, (d)1500rpm-200mm/min

性等が考えられる。ツールの移動位置を高精度で制御することが重要であり、大きな課題である。

4. まとめ

FSWによる異種材接合として、板厚3mmのアルミニウム展伸材(A6061-T6)と鋼板(SS400)およびステンレス板材(SUS304)との突き合わせ接合を行った。そ

の結果、以下のような知見が得られた。

- 1) ツールショルダー部の侵入量をなくしたところ、プローブ長さと同程度の深さまでアルミニウム展伸材と鋼材またはステンレス材とを接合させることができた。引張試験による破断位置はアルミ母材側であり、十分な接合強度が得られた。
- 2) アルミとの接合の場合、鉄よりステンレスの方が良好な接合が得られる加工条件範囲が狭い傾向であった。
- 3) プローブの食い込み量や FSW 条件により、鉄片の分散状況が変化し、これが接合強度に影響を与えていると考えられる。

【参考文献】

- 1) 水谷ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告, 3, pp24-27, 2015
- 2) 佐藤ら, まてりあ, 42, pp214-220, 2003
- 3) 藤井, 金属, 83, pp5-10, 2013
- 4) 福田, 金属, 73, pp330-335, 2003
- 5) 酒井, 軽金属, 56, pp584-587, 2006
- 6) 玄道ら, 日本金属学会誌, 70, pp870-873, 2006
- 7) 江角ら, 金属, 83, pp25-33, 2013
- 8) 篠田, 軽金属, 64, pp196-202, 2014
- 9) 宮原ら, Honda R&D Technical Review, 25, pp71-77, 2013
- 10) 佐山, 特殊鋼, 64, pp31-35, 2015
- 11) 福本ら, 溶接学会論文集, 22, pp309-314, 2004
- 12) 安井ら, 溶接学会論文集, 23, pp469-475, 2005
- 13) 時末ら, FSW の基礎と応用, 日刊工業新聞社, pp40-44, 2005
- 14) 宮川ら, 溶接学会論文集, 26, pp42-47, 2008
- 15) 青沼ら, 塑性と加工, 53, pp869-873, 2012
- 16) 安井, 溶接技術, 62, pp51-54, 2014
- 17) 中田, 溶接学会誌, 74, pp148-151, 2005
- 18) R.Ueji, et. al, Mater. Sci. Eng. A, 423, pp324-330, 2006
- 19) 松下ら, 溶接学会論文集, 27, pp360-370, 2009
- 20) Y.D.Chung, et. al, Scripta Mater., 63, pp223-226, 2010