

# 摩擦攪拌接合

Friction Stir Welding

藤井英俊 Hidetoshi Fujii 大阪大学 接合科学研究所 教授

し はじめに

FSW (摩擦攪拌接合:Friction Stir Welding)では、従来の 溶接法とは異なり、材料が固相状態で接合が行われる。この ため、従来の溶接法にない種々の優れた特徴を有し、開発さ れて20年程度の比較的新しい手法<sup>1)</sup>であるにもかかわらず、 Al合金に関しては、既に種々の分野で実用化されている<sup>2-9)</sup>。

FSWは、図1 (a) に示すように、ツール (Tool) と呼ばれ るΦ10 ~ 20程度の棒状の工具を高速で回転させながら材料 と接触させ、材料との摩擦熱を利用して接合する接合法であ る<sup>4)</sup>。最高到達温度が融点に達せず、固相状態で接合するた め、接合部における強度低下がこれまでの溶融溶接に比べて 小さいのが特長で、場合によっては接合部の方が母材より高 強度化される。特に鉄鋼材料の場合には、高張力鋼板<sup>10,11)</sup> な どの一部の材料を除いて、熱影響部での軟化はほとんど生じ ず、100%の継手効率が得られる<sup>12-19)</sup>。

この手法の実用化例を紹介すると、図2に示す、つくばエ クスプレスや700系のぞみとした鉄道車輛、図3に示す高速 船、図4に示す土木構造物、さらには自動車などが挙げられ る。しかしながら、現状で実用化された構造物のほとんどは AI合金であり、鉄鋼材料をはじめとした比較的融点の高い材 料の摩擦攪拌接合技術の確立が望まれている。

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合技術の開発が、Al合金などと比



図1 FSWの原理とツールの形状



図2 つくばエクスプレス



図3 テクノスーパーライナー



図4 JR川棚駅広場自由通路橋

較して大幅に遅れている理由の一つとして、ツール材料に必 要とされる条件が厳しいことが挙げられる。鉄鋼材料の接合 に用いるツールには、高い高温強度、耐摩耗性、非反応性な どの特性が求められる。従来のツールは耐摩耗性、靭性が大 きな問題とされていたが、後述するように、ツールに対する 種々の検討により、これらの問題点は以前より大幅に改善さ れてきた。

これにより、最近では、厚さ12mmの鋼材の摩擦攪拌接合 が可能となり<sup>20)</sup>、北米におけるパイプラインについて具体的 に実用化が検討されていることや、毎分1mを超えるステン レスの摩擦攪拌接合<sup>21,22)</sup>が報告されるなど、実用化が現実味 を帯びている。また、鉄鋼材料より1000℃以上高い2620℃の 融点を有するMoの接合も可能となっており<sup>23)</sup>、鉄鋼材料の FSWに対するハードルはかなり低くなっていると言える。

このような現状のもと、本稿では、すでに豊富に存在する Al合金のデータを交えながら、FSWの原理について解説す るとともに、鉄鋼材料特有の現象を併せて紹介し、今後の展 望ついて述べる。

2 回転ツール

回転ツールは接合部に発熱と攪拌を生じさせる工具であ り、接合品質を左右する重要な要素である。図1 (b) に示すよ うに、ツールは径の大きいショルダ (Shoulder) 部とその先端 にあるプローブ (Probe) 部からなる。接合中はプローブのみ が材料中に押し入れられ、接合すべき突合せ面に沿って移動 させる。この時、材料は裏当て板に拘束され、固体の状態を維 持しながら、ツールによる塑性流動によって接合が行われる。

プローブには、通常ネジがきってあり、右ネジの場合には 左回転、左ネジの場合には右回転で用いる。プローブの長さ は、板厚とほぼ等しく、裏あての板と接触しないように0.05 ~ 0.1mm程度短いのが普通であるが、熱伝導率が低い材料 を接合する際には、この長さをより板厚に近づける必要があ る。直径に関しては、例えば、5mm厚の板材を接合する際に は、ショルダが15mm程度、プローブがM5~6が標準であ る<sup>4)</sup>。これらの値は、一般に板厚が大きければ増加し、小さけ れば減少する。また、回転ツールはプローブ先端が先行する ように進行逆方向に1~5度程度傾け、回転速度は1分間に 数百から数千回転、接合速度は数十mm/min~数m/minが 一般的である。

アルミニウム合金を接合する際には、回転ツールにSKD61 等のSKあるいはSKD工具鋼を使うのが一般的である。一 方、鉄鋼材料のFSWにおいては、ツール材料に高温におけ る高い強度と靭性、耐摩耗性、非反応性などの特性が要求さ れる。研究初期においては、ツール材料にW合金<sup>12,13</sup>、Mo合 金<sup>13</sup>などが用いられたが、その後、多結晶立方晶窒化ホウ素 (PCBN) ツール<sup>24,25)</sup>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ツールにコーティングした素材<sup>26)</sup> を始めとしたセラミックス材料や超硬合金<sup>15-17,19)</sup>が用いられ ている。最近、日本で高強度、長寿命なCo合金ツール<sup>27,28)</sup>や Ir合金ツール<sup>29,30)</sup>なども開発されており、実用化に向けて大 きく前進している。尚、超硬合金は、1000℃以上の接合には 適さないが、650℃~850℃程度まで低温での接合に向いて おり、Ac1点以下での接合を可能にしている<sup>15-17)</sup>。このよう に、接合する素材や接合温度によってツール素材を適切に選 択するのが望ましい。

# 3 FSWの特徴

FSWは、従来の溶接法とは異なり、左右非対称な接合法で ある。図1に示すように、ツールの回転方向と接合方向が一 致する側を前進側 (Advancing side)、反対を向いている側を 後退側 (Retreating side) という<sup>4)</sup>。

接合部の断面組織の一例として、図5に1080アルミニウム 合金の断面図とそれぞれの組織<sup>4,31)</sup>を示す。これらを模式的 に書くと図6のようになり、接合部中央には、攪拌部と言わ れる数µmの等軸晶からなる再結晶組織が存在する。攪拌部 の外側には、塑性変形により結晶粒が伸びた形状を持つ熱加 工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、そ



図5 1080 アルミニウム合金摩擦攪拌接合部の(a) 断面写真、(b) 光 学顕微鏡写真とTEM写真



図6 断面組織の模式図

の外側には、塑性変形は受けていないが、熱の影響を受けた 熱影響部 (Heat Affected Zone, HAZ) が存在する。

FSWの特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 固相接合である。したがって、接合部における結晶粒の粗大化が抑制され、強度低下が小さい。また、回転ツールによる攪拌効果のため、結晶粒を微細化することも可能で、母材より強度が向上する場合もある。
- (2) 鉄鋼材料では、高張力鋼など一部の材料を除いて HAZ軟化が生じにくい。
- (3) 変形が小さい。アーク溶接 (ミグ)の数分の1以下である。
- (4) 異種材料の接合に適している。
- (5) 開先加工や接合時の前処理が不要である。
- (6) 接合中にヒューム、スパッタ、紫外線等の発生がない。
- (7) 気孔、割れなどが発生しにくい。
- (8) アルミニウム合金の接合の場合には、シールドガスが 不要である。鉄鋼材料の場合も必須ではないが、接合 表面の酸化を防ぐために、シールドガスの使用が望 ましい。
- (9) 原則、フィラーが不要である。
- (10) 接合部から合金成分の蒸発がほとんどない。
- (11) 熟練技術が不要である。(ただし、今後は、FSWオペレータの認証を受ける必要が出てくる。)
- (12) 鉄鋼材料をAci以下で接合することが可能で、その場合、鋼材の炭素量に依存することなく、接合できる。

- 一方、以下のような問題点がある。
- (1) 剛性のある拘束治具が必要である。
- (2) ギャップの許容範囲が狭く、接合部の目違い、ギャッ プの制御が必要である。
- (3) 接合終端部に穴が残る。
- (4) 裏面にキッシングボンドといわれる接合不良が生成し やすい。
- (5) すみ肉継手などの複雑形状の部材の接合が困難である。
- (6) 高融点金属の材料に対しては、ツールの寿命等の課題 が残る。

しかし、これらの問題点に関しても、これまでにさまざま な角度から検討され、解決の方向にある。特に、(6) に関し ては、鋼のFSWが可能となり、大幅に改善した。詳細につい ては、専門書<sup>4)</sup>や解説<sup>32)</sup>を参照して頂きたい。問題点の(2)、 (3)、(4) も改善のためのいくつかの提案が行われている。

(2) に関しては、図7に示すように、FSWでは、約1mm程度 のギャップ尤度しかなく、ギャップが2mm以上になると欠 陥が発生するが、ギャップに粉末を充填しながらFSWを行 うことにより、3mm程度まで尤度が広がる<sup>33)</sup>。(3)、(4) に関 しては、ツールのプローブとショルダが別々に駆動する複動 式ツールが有効である<sup>34)</sup>。

図8<sup>35)</sup>はFSWで接合可能と考えられる継手形式である。突 合せ継手 (a)や重ね継手 (c)また、その組み合わせ (b)。T継 手 (e)、(f)、へり継手 (g)、などが可能である。また、(h) に 示すように、継手構造の工夫により、すみ肉継手も可能とさ



図8 継手形式

れている。特に、最近TWIから発表された、プローブのみを 回転させて接合する方法は、すみ肉溶接には有効である<sup>36</sup>。

## **4** 適正接合条件範囲

図9は代表的なアルミニウム合金である2024T6、5083-O、6061-T6、7075-T5材(いずれも板厚4mm、ショルダ径 15mm)について、ツールの回転速度と接合速度の適正範囲 を示した例である<sup>4,37)</sup>。それぞれの材料によって適正条件範 囲が異なることがわかる。高回転速度、低接合速度領域では、 接合部に過剰な熱を与えるため、バリが発生しやすくなり、 外観は著しく悪くなる。一方、低回転速度、高接合速度領域 では、入熱不足のため材料の塑性流動が不完全となり、図10 に示すように、入熱量が不足するに従い、トンネル状の欠陥 (Tunnel hole)、溝状の欠陥 (Groove like defect)、プローブ の欠損につながる。

2024-T6、5083-O、7075-T5材は6061-T6材に比べて、はる かに適正条件範囲が狭く、接合しにくいことがわかる。接合 のしやすさは、接合温度における塑性流動のしやすさで決定 される。2024-T6、5083-O、7075-T5などの材料は、塑性流動 性が悪いため、低回転速度、低接合速度でないと健全な継手 は得られない。接合のしやすさは、接合温度における材料の 耐力を比較してもある程度予測できる。図11に各種アルミ ニウム合金の370℃での耐力<sup>38)</sup>を示すが、6000系の高温での 耐力が低いことがわかる。一方、2000系、5000系、7000系は 高温での耐力が高く、FSWしにくいと言える。

しかしながら、2000系や7000系は適正条件範囲が狭くて も、従来の溶融溶接法では接合が不可能であったことを考え ると、FSWが有効な接合法であることには変わりない。尚、 厳密には接合のしやすさは、接合温度における高温変形抵抗 で比較するとより正確に推定できる<sup>4)</sup>。

荷重一定制御の場合の適正接合範囲はADC12を例にとる と、図12<sup>39)</sup>のようになる。荷重が大きくなるにつれて、適正 条件範囲が大きくなり、荷重も重要な接合条件の一つである ことがわかる。しかし、ある程度荷重が大きくなると、欠陥 の発生が起こりにくくなり、荷重依存性は小さくなる。荷重 一定制御の場合、十分な荷重を与えると、位置一定制御に比 べ、内部欠陥が発生しにくい特徴がある一方で、位置制御と







図11 370℃における種々のアルミニウム合金の耐力



図10 入熱量が不足の場合の欠陥の種類

比較して、入熱過多の場合に、よりバリの発生が顕著になる。 荷重一定制御の場合には、一旦、温度が上昇し材料の軟化が 始まると、よりツールが押し込まれる傾向になるため、適正 な荷重の設定が重要である。

### ∼5、接合条件と入熱量の関係

Frigaard ら<sup>40</sup> によると、FSW 中に材料に投入される熱量 Q(W)は、

 $Q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu PNR^3 \dots (1)$ 

と表せる。ここで、µ:摩擦係数、P:攪拌部の圧力 (N/m<sup>3</sup>)、 N:ツール回転速度 (s<sup>-1</sup>)、R:ショルダ径 (m) である。この 式では、回転ツールのショルダ部と接合金属の間のみで発熱 すると仮定している。ここで、攪拌部の圧力Pとはショルダ 部を押圧する単位面積あたりの荷重である。式 (1) より発熱 量Qは、圧力Pおよび回転速度Nに比例し、ショルダ部の直 径Rの3乗に比例することになる。したがって、ショルダ径 の小さいマイクロ接合等を考える場合には、1分間に10000 回以上の高速回転が必要となる<sup>41</sup>。

一方で、式 (1) を圧力でなく、荷重L (N) を用いて表現すると、

$$Q = \frac{16}{3} \pi \,\mu \, LNR \, \cdots$$

となり、数式上では、入熱は荷重、ツール回転速度、ショルダ 径のいずれにも比例することがわかる。

式(1)および(2)は、回転ツールを移動させない場合の



図12 荷重一定制御の場合の適正接合範囲(ADC12、厚さ4mm)

モデルである。回転ツールを移動させる場合には、接合速 度Vをツールの回転速度Nで割った回転ピッチ (Revolution Pitch) が一つの指標となる。

回転ピッチ = V/N (3)

回転ピッチはツールが1回転する間に移動する距離で、FSW 後に接合部表面に形成する筋の間隔に相当する。回転ピッチ が大きいということは、筋の間隔が大きい、すなわち1回転 の間に移動する距離が大きいことに相当するため、入熱が減 少すると言える<sup>42)</sup>。

以上を、板厚tを含めてまとめると、単位体積当たりの入 熱量は、式(4)に示すように荷重、ツール回転速度、ショル ダ径に比例し、移動速度、板厚に反比例すると言える。

$$Q \propto \mu \frac{LNR}{Vt}$$
 ......(4)

### (6) 炭素鋼の摩擦攪拌接合

1999年にThomasら<sup>43)</sup>が12%Cr鋼および低炭素鋼に摩 擦攪拌接合を実施し、鉄鋼材料における摩擦攪拌接合の可 能性を示して以来、炭素鋼<sup>12-20,44</sup>、純鉄、IF鋼(極低炭素 鋼)<sup>15,45-47)</sup>、ステンレス鋼<sup>21,22,48-59)</sup>などの鉄鋼材料への摩擦攪 拌接合の適用例がいくつか報告されている。

図13<sup>43</sup> はThomasらが行った(a) 低炭素鋼および(b) 低 炭素鋼と12%Cr鋼の組み合わせに対する摩擦攪拌継手の断 面マクロ写真である。いずれも接合欠陥はなく、良好に接合 されていることがわかる。

しかしながら、炭素鋼の摩擦攪拌接合はAl合金やオース



図13 両面接合した (a) 低炭素鋼および (b) 低炭素鋼/12% Cr鋼の断面マクロ写真

テナイト系ステンレス鋼等と異なり、接合中に変態を伴う。 したがって、接合中の変態を如何に制御するかで、大きく継 手強度が変化し、AI合金では観察されない多くの現象も起 こり得る。したがって、逆に摩擦攪拌接合中の変態を制御 することで、接合中に継手を高強度化することが可能であ る<sup>15-17,44,45</sup>。

その手法では、接合温度がA<sub>1</sub>点以下のフェライト( $\alpha$ ) + セメンタイト領域( $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C)、A<sub>1</sub>点とA<sub>3</sub>点の間にあるフェ ライト( $\alpha$ ) +オーステナイト( $\gamma$ ) 2相領域、A<sub>3</sub>点以上のオー ステナイト単相( $\gamma$ )領域のいずれの領域で接合するかによっ て組織が大きく変化し、得られる継手強度も極めて大きく変 化する。例えば、S12C(0.12%C)では、パーライトをフェラ イト基地中に分散できるA<sub>1</sub>点以下のフェライト( $\alpha$ ) +セメ ンタイト領域( $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C) 点以下が望ましいのに対し、S35C (0.35%C)等の中炭素鋼などでは、フェライト+オーステナ イト 2相領域で摩擦攪拌接合すると、得られる組織が最も微 細化され、最高強度が得られる<sup>15-17)</sup>。

図14 (a) <sup>60)</sup> はSK85鋼 (0.85%C) をAc1点以下 (100rpm、 100mm/min) で接合した時の硬度の分布である。過共析の組 成の高炭素鋼において、1.5mmの板厚の表面から裏面におい て、硬度の上昇のほとんどない接合が可能となっている。こ のような材料を通常の溶融溶接を行うと、ほぼ全面にマルテ ンサイトが生成するため、継手が極めて脆くなり、接合は困 難である。もちろん、FSWを用いても、Ac1点以上 (400rpm、 200mm/min) で接合すると、マルテンサイトの形成により、 図14 (b) のように大幅に硬度が上昇し、脆くなる。

図15<sup>61)</sup>は、これらの継手のシャルピー吸収エネルギーを示している。Ac1点以下で接合を行うと、Ac1点以上で接合を行うた場合と比較して、吸収エネルギーが3倍程度になることがわかる。また、破断面も大きく変化する。

図16<sup>62)</sup>は、レーザとFSWを組み合わせて組織制御した例 を示している。この場合には、接合ではなく、表面改質とし て、SKD11 (C:1.48%)の工具鋼にFSW (FSP)を適用して いる。FSPのみでは、結晶粒は微細化できるものの、炭化物 のサイズを小さくするのにあまり効果的できない。この方法 を解決するために、工具鋼をレーザで一旦溶融、凝固させる ことにより、炭化物を粒界に偏析させ、FSP後に微細に分布 させる手法が採られている<sup>620</sup>。この場合、基地の組織(結晶 粒)および炭化物の両方が微細化し、刃物としては、より理 想的な組織が得られる。図16では粒径が200nm以下、炭化物 が100nm以下と極めて微細になっていることがわかる。こ



図14 SK85 (C:0.85%) FSW 継手断面の硬度分布 (a) Ac1以下で接合した場合、(b) Ac1以上で接合した場合



図15 SK85 (C: 0.85%) FSW 継手のシャルピ吸収エネルギーの比較

670

の場合、切れ味も良く、刃欠けも極めて少ないことが実証されている<sup>62)</sup>。

# **乙** まとめ

以上のように、摩擦攪拌接合に関しては、開発後20年が経 過したが、まだまだ新技術がどんどん開発されている。鉄鋼 材料に対しても、近い将来、実用化されることが望まれる。 AI合金と比較して、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合の実用化が遅れ ている背景には、その接合が困難であるだけでなく、鉄鋼材 料は従来の溶接法でも比較的十分に接合可能であったことが 影響している。しかしながら、摩擦攪拌接合の継手特性が他 の手法と比べて優れていることに関しては異論はなく、変態 を伴わない接合や、第2相を利用した極めて微細な組織の形 成など、摩擦攪拌接合特有の現象をうまく活用できれば、今 後、大きく発展する可能性もある。

#### 参考文献

- W.M.Thomas, E.D.Nicholas, J.C.Needhan, M.G.Murch, P.Temple- Smith and C.J.Dawes : International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, (1991)
- R.Nandan, T.DebRoy and H.K.D.H.Bhadeshia : Prog. Mater. Sci., 53 (2008) 980-1023.
- R.S.Mishra and Z.Y.Ma : Mater. Sci. Eng., R 50 (2005) 1-78.
- 「摩擦攪拌接合-FSWのすべて-,溶接学会編,産報出版, (2006)
- 5) H.Okamura, K.Aota and M.Ezumi <sup>:</sup> J. Jpn. Inst. Light Met., 50 (2000) , 166-171.
- 6) G.Campbell and T.Stotler : Welding J., 78 (1999), 45-47.
- 7) M.R.Johnsen : Weld. J., 78 (1999) , 35-39.
- K.E.Knipstron and B.Pekkari : Weld. J., 76 (1997) , 55-57.

- 9) C.J.Dawes and W.M.Thomas : Weld. J., 75 (1996), 41-45.
- 10) 松下宗生,木谷靖,池田倫正,小野守章,藤井英俊,鄭永 東:溶接学会論文集,27,4 (2009) 360-370.
- M.Matsushita, Y.Kitani, R.Ikeda, M.Ono, H.Fujii and Y.D.Chung : Sci. Tech. Weld. Join., 16 (2011) 181.
- 12) T.J.Lienert, W.L.Stellwag, Jr., B.B.Grimmett and R.W.Warke : Weld. J., 82 (2003) , 1-S.
- A.P.Reynolds, W.Tang, M.Posada and J.DeLoach : Sci. Technol. Weld. Join., 8 (2003), 455.
- 14) A.Ozekcin, H.W.Jin, J.Y.Koo, N.V.Bangaru and R.Ayer : Intern. J. Offshore Polar Eng., 14 (2004), 284.
- 15) H.Fujii, L.Cui, N.Tsuji, M.Maeda, K.Nakata and K.Nogi: Mater. Sci. Eng., A 429 (2006), 50-57.
- 16) L.Cui, H.Fujii, N.Tsuji and K.Nogi : Scripta Mater., 56 (2007), 637-640.
- L.Cui, H.Fujii, N.Tsuji, K.Nakata, K.Nogi, R.Ikeda and M.Matsushita : ISIJ Int., 47-2 (2007) 299-306.
- Y.S.Sato, H.Yamanoi, H.Kokawa and T.Furuhara : ISIJ Int., 48 (2008) 71-76.
- 19) T.Saeid, A.Abdollah-zadeh, H.Assadi and F.Malek Ghaini : Mater. Sci. Eng., A 496 (2008) 262-268.
- 20) R.Ayer, D.P.Fairchild, S.J.Ford, N.E.Nissley and
   A.Ozekcin : Proc. 7<sup>th</sup> Int. FSW Symp., Awaji, Japan, 20-22 May, (2008) , CD-ROM, 9B-1.
- 石川武,藤井英俊,玄地一夫,松岡茂樹,野城清:鉄と鋼, 94 (2008) 539-544.
- 22) T.Ishikawa, H.Fujii, K.Genchi, S.Iwaki, S.Matsuoka and K.Nogi : ISIJ Int., 49 (2009) 897-901.
- 23) H.Fujii, Y.S.Sun and H.Kato : Scripta Mater., 64 (2011) 657-660.
- 24) C.D.Sorensen, T.W.Nelson and S.M.Packer : Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Kobe, Japan, (2001) , CD-ROM.
- 25) M.Collier, R.Steel, T.W.Nelson, C.Sorensen and S.Packer:



図16 レーザ+FSP混合プロセスを行ったSKD11の微細組織
 (a) 光学顕微鏡像、(b),(c) TEM明視野像

Mater. Sci. Forum, 426 (2003), 3011.

- 26) R.Ohashi, M.Fujimoto, S.Koga, R.Ikeda and M.Ono :
   Proc. 7<sup>th</sup> Int. FSW Symp., Awaji, Japan, 20-22 May, (2008) , CD-ROM, 2-2.
- 27) 東北大学 2010年3月26日プレスリリース Webサイト http://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/ 20100326\_01.pdf
- 28) 佐藤裕, 粉川博之: 溶接技術, 59 (2011) 96-100.
- 29) 宮澤智明, 岩木祐一, 丸子智弘, 藤井英俊: 溶接学会論文 集, 28, 2 (2010) 203-207.
- 30) 宮澤智明, 岩木祐一, 丸子智弘, 藤井英俊: 溶接学会論文 集, 29,1 (2011) 24-28.
- 31) Y.S.Sato, S.H.C.Park and H.Kokawa : Metall. Mater. Trans., 32A (2001) 3033.
- 32) 藤井英俊:溶接学会誌, 77 (2008) 731-744.
- 33) K.Inada, H.Fujii, Y.S.Ji, Y.F.Sun and Y.Morisada : Sci. Tech. Weld. Join., 15 (2010) 131-136.
- 34) R.J.Ding and P.A.Oelgoetz : Proc. 1st Int. Symp. on FSW, (1999) , CD-ROM.
- 35) 福田哲夫:溶接学会誌, 69 (2000) 560-564.
- 36) Jonathan Martin:溶接技術, 59 (2011) 54-58.
- 37) K.Nakata, S.Inoki, Y.Nagano and M.Ushio : Mater. Sci. Forum, 426-432 (2003) 2873-2878.
- 38)高井英夫, 戸取征二郎, 福寄一成, 江角昌邦, 川崎健, 松 永徹也:軽金属溶接, 39-1 (2001) 29.
- 39) Y.G.Kim, H.Fujii, T.Tsumura, T.Komazaki and K.Nakata: Mater. Sci. Eng., A 415 (2006) 250-254.
- 40) Proc. Ist Int. Symp. FSW, Frigaard et al., Thousand Oaks, USA, 14-16 June, (1999), 8-2.
- 41) 青田欣也:溶接学会誌, 72-3 (2003) 185-188.
- 42) H.J.Liu, H.Fujii, M.Maeda and K.Nogi : J. Mater. Proc. Tech., 142 (2003) 692-696.
- 43) W.M.Thomas, P.L.Threadgill and E.D.Nicholas : Sci. Technol. Weld. Join., 4 (1999), 365-371.
- 44) R.Ueji, H.Fujii, L.Cui, A.Nishioka, K.Kunishige and K.Nogi : Mater. Sci. Eng., A 423 (2006), 324-330.
- 45) H.Fujii, R.Ueji, Y.Takada, H.Kitahara, N.Tsuji, K.Nakata and K.Nogi : Mater. Trans., 47 (2006) , 239-242.
- 46) S.Mironov, Y.S.Sato and H.Kokawa : Acta Mater., 56

(2008) 2602-2614.

- 47) M.Mehranfara and K.Dehghanib : Materials Science and Engineering, A 528 (2011) 3404–3408
- 48) S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki : Scripta Mater., 49 (2003), 1175.
- 49) 石川武,藤井英俊,玄地一夫,崔霊,松岡茂樹,野城清: 溶接学会論文集,24 (2006) 174-180.
- 50) A.P.Reynolds, W.Tang, T.Gnaupel-Herold and H.Prask : Scripta Mater., 48 (2003), 1289.
- 51) S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki : Scripta Mater., 51 (2004), 101.
- 52) Y.S.Sato, T.W.Nelson and C.J.Sterling : Acta Mater., 53 (2005), 637.
- 53) S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki : Sci. Tech. Weld. Join., 10-5 (2005), 550-556.
- 54) Y.S.Sato, M.Muraguchi and H.Kokawa : Friction Stir Welding and Processing IV, ed by R.S.Mishra, M.W.Mahoney, T.Lienert and K.V.Jata, TMS, (2007), 261-268.
- 55) X.K.Zhu and Y.J.Chao : J.Mater. Process. Technol., 146 (2004) , 263.
- 56) S.H.C.Park, T.Kumagai, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki : Proc. 15th ISOPE, Seoul, (2005) ,IV-6.
- 57) Y.S.Sato, T.W.Nelson, C.J.Sterling, R.J.Steel and C. -O. Pettersson : Mater. Sci. Eng., A 397 (2005), 376.
- 58) Y.S.Sato, N.Harayama, H.Kokawa, H.Inoue, Y.Tadokoro and S.Tsuge : Sci. Eng. Weld. Join., 14 (2009), 202-209.
- 59) A.Chabok and K.Dehghani : Materials Science and Engineering, A 528 (2010), 309–313.
- Y.D.Chung, H.Fujii, R.Ueji and K.Nogi : Sci. Eng. Weld. Join., 14 (2009), 233-238.
- 61) Y.D.Chung, H.Fujii, R.Ueji and N.Tsuji : Scripta Mater.,63 (2010) , 223-226.
- 62) Y.Morisada, H.Fujii, M.Mizuno, G.Abe, T.Nagaoka and M.Fukuzumi : Mater. Sci. Eng., A505 (2009) , 157-162.

(2011年8月2日受付)