FSW プロセス制御と 4 次元 X 線観察

Process Control of Friction Stir Welding and Four-dimensional X-ray Visualization

森 貞 好 昭*・藤 井 英 俊*

Yoshiaki MORISADA and Hidetoshi FUJII

Key Words: Friction Stir Welding, Welding Condition, Material Flow, X-ray Visualization

1. はじめに

摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) は、Fig.1 に示すように、先端部にプローブと呼ばれる小突起を有する円柱状の金具 (ツール) を高速回転させながら被接合領域に圧入し、材料との間で発生する摩擦熱及びツールの強力な攪拌効果を利用して、接合を達成する固相接合法である^{1)~4)}。接合中の最高到達温度が被接合材の融点に達せず、接合部における強度低下が従来の溶融溶接と比較して小さいことが特徴である。

このため、FSW は開発されてから約 20 年の間に、Al 合金では既に定着した技術となっており^{4)~13)}、特に輸送用機器においては急ピッチで実用化が進んでいる。Al 合金以外にも、Mg 合金及び Cu 合金等は既に実用化されており、銅や Ti、更には融点が 2620 °C の Mo 等の FSW も可能である¹⁴⁾。しかしながら、最適な接合条件は被接合材及び部材形状に応じて多数の実験を遂行することで決定されており、接合原理の解明及びプロセス制御の指針を得ること等が喫緊の課題となっている。

そこで本稿では、FSW プロセス制御と密接に関係する FSW 中の材料流動挙動について、これまでの研究の流れを概説すると共に、4 次元 X 線観察を用いた著者らの研究について紹介する。

2. 各種アプローチによる材料流動挙動の検討

材料流動挙動を検討する代表的な手法としては、マーカー法を挙げることができる。マーカー法は種々のマーカーを試料に埋め込み、FSW 前後におけるマーカーの位置から材料流動を推測する手法であり^{15)~22)}、Colligan は微小な鋼球を試料 (A6061-T6 および A7075-T6) 中の 14 箇所に配置し、当該鋼球が FSW 後にどのように分布するかについて調査している¹⁵⁾。その結果、プローブの前進側にある鋼球は FSW 時にプローブの回転方向に沿って移動し、最終的に再度前進側まで達するものもあるが、後退側ではプローブの回転の影響をあまり受けず、単に後ろに押し出される傾向が強いと結論付けられている。

著者らも材料流動に及ぼすマーカーの影響を極力排除するために、直径約 1 nm の極めて微細な球状分子であるフラーレンをトレーサーとして用い、A5083 に FSW を施した場合の材料流動の軌跡を可視化している¹⁹⁾。Fig.2 に示すフラーレンによって描かれた線の形状や間隔から、ショルダによる Convective flow の形成が推測され、特に接合温度が十分に高い場合に当該現象が顕著であることが示されている。

また、攪拌部の集合組織を EBSD 等によって解析し、材料流動挙動及び組織形成メカニズムを推測する手法も多く

Fig.1 Schematic drawing of FSW.

Fig.2 OM images of the lateral sections for the stir zone with fullerene at various rotating speeds.

* 大阪大学 接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)
Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

検討されている²³⁾⁻²⁵⁾。例えば、FieldらはA1100、A6061およびC458について、攪拌部の上部、中部、下部における集合組織を解析し、主要せん断方向はどの位置でも回転ツールの接線方向であることを明らかにしている²³⁾。

ここで、上述のマーカー法や組織解析によるアプローチはFSW後の状況証拠から材料流動挙動を推測するものであり、最終的なマーカーの位置や集合組織に至る経緯（正確な材料流動挙動）を明らかにすることは困難である。これに対し、コンピュータシミュレーションを用いた検討も進められている²⁶⁾⁻³³⁾。例えば、Xuらは2種類のモデル(Slipping interface model と frictional contact model)を提案し、有限要素法を用いてプローブの周囲における材料流動のシミュレーションを行い、プローブ前方の材料は前進側からのみプローブの後方に流れ込むと報告している²⁶⁾。

3. 材料流動挙動の4次元X線観察

コンピュータシミュレーションは材料流動の途中経過を推測する効果的な手法であるが、使用するモデルや設定条件等によって得られる結果が異なり、実現象との乖離を把握することは困難である。また、樹脂等の透明材料にFSWを施し、材料流動を直接観察する方法³⁴⁾も提案されているが、金属材料との挙動の差異を担保することが課題となる。

これらの従来法における問題点を克服するために、著者らは2組の高輝度X線透過装置と当該装置専用に設計したFSW装置を用い、金属材の材料流動挙動を4次元可視化する手法を提案している³⁵⁾⁻³⁸⁾。なお、材料流動を3次的に直接観察することに加え、経時的な変化を把握することから、「4次元可視化」と称している。

Fig.3に4次元可視化装置の外観写真を示す。4次元可視化装置は、X線発生装置と高速応答X線イメージンシファイア（以下、「X線I.I.」）から構成される結像系を2組有し、X線発生装置及びX線I.I.は自在に位置を制御できる4台の多関節ロボットに担持されている。これにより、自由度の高い透視位置設定が可能となり、水平方向と垂直方向の斜め透視を行うことができる。フレーム同期した異なる2方向からの透視画像は高速度カメラに記録され、得られたステレオ画像をデータ処理することによって微小トレーサーの空間上の位置を3次元に把握し、当該位置を高速度の時間間隔で画像化することができる。また、FSW装置は高輝度X線透過システム用に設計されており、例えば、被接合材を固定するステージはX線の透過を考慮して中空構造となっている。

Fig.4にX線透視画像を得るための装置配置図を示す。FSW用の裏板には鋼板を用いるのが一般的であるが、X線の透過性及び裏板としての剛性を考慮して、アルミニウム合金板や窒化珪素板を用いている。更に、X線はツールも透過する必要があるため、軽元素で構成される窒化珪素製のツールを使用した。X線発生装置とX線I.I.から構成さ

Fig.3 Appearance of the equipment for the X-ray radiography.

Fig.4 A schematic drawing of the experimental setup for the X-ray radiography during the FSW.

Fig.5 X-ray transmission images obtained by the x-ray transmission real-time imaging systems.

れる2組の結像系は、透視点が攪拌部の中心となるように、それぞれ供試材の上下30°の位置に固定し、FSW中のトレーサー（直径300 μmのW球又は直径500 μmの超硬合金球）の動きを観察することができる。なお、得られたX線透視画像はフレームレート500 fpsで高速度カメラに記録した。

Fig.5に代表的なX線透視画像（供試材：A1050、トレーサー：W球）を示す³⁵⁾。上下どちらの方向から得られたX線透視画像においても、Wトレーサーの位置が明瞭に確認できる。以下、材料流動挙動の4次元可視化によって明らかとなった、FSWプロセス条件と材料流動挙動との関係について詳述する。

4. 材料流動挙動に及ぼすツール回転速度の影響

ツール移動速度を 400 mm/min とし、ツール回転速度を 400 ~ 1000 rpm と変化させた場合の A1050 の材料流動挙動の 3 次元グラフを Fig.6 に示す³⁷⁾。

良好な攪拌部が形成される 600 ~ 1000 rpm の場合は、ほぼ同様の材料流動挙動を示しており、W トレーサーの軌跡はプローブの周囲に同心円を描いている。これに対し、攪拌部に微小な欠陥が形成される 400 rpm の場合はプローブ周囲の軌跡が歪んでおり、プロット間隔もツールに対する方位によって粗密が存在する。適切条件であるツール回転速度が 600 ~ 1000 rpm の場合の ND-WD 面及び ND-TD 面の軌跡を Fig.7 に示す³⁷⁾。

これらの FSW 条件では、材料流動領域がプローブの周

Fig.6 Three-dimensional graphs of the tracer coordinates.

Fig.7 Two-dimensional graphs of the tracer coordinates on ND-WD or ND-TD plane.

囲に水平に形成されるのではなく、プローブの前後左右方向に対して傾斜している。前後方向の傾きはツールの前進角から予想される傾きとは逆であり、ショルダの影響によってプローブ後方で生じる上下方向の流れが影響していると考えられる¹⁹⁾。つまり、プローブ周囲の材料流動の傾きは、ショルダの影響が全体的な材料流動に現れる程に攪拌部への入熱が十分であり、円滑な材料流動が実現していることを示唆する現象であると言える。

5. 攪拌部における欠陥形成機構

欠陥形成条件であるツール回転速度 400 rpm に関し、TD-WD 面のトレーサー軌跡を Fig.8 に示す³⁷⁾。適切条件であるツール回転速度が 600 ~ 1000 rpm の場合と異なり、プローブ周囲の材料流動領域がツールの進行方向に潰れた形状となっている。加えて、ツールの回転方向と移動方向が一致する前進側 (AS: Advancing side) でプロット間隔が極端に短くなっており、当該領域における材料流動のよどみが認められる。なお、欠陥は表面から深さ約 2 mm の位置に形成されており、トレーサーを埋設した位置と一致する。ここで、ショルダの影響を強く受ける攪拌部上部には欠陥が認められないことから、トレーサーを表面から 1 mm の位置に埋設したところ、適切条件の場合と同様の材料流動が観察された。

本研究では FSW 中のトレーサーの位置を 500 fps で記録しているため、1 フレーム毎のトレーサーの移動距離を計測することによって材料流動速度を求めることができる。例えば、ツール回転速度を 1000 rpm とした場合、材料流動速度はプローブの側面(攪拌部内側)から攪拌部外側へと直線的に増加し、角速度はほぼ一定となる。当該結果からは、被接合材が所謂剛体のようにプローブの周囲で回転している状況を想起することができる。なお、プローブ中心

Fig.8 Two-dimensional graph of the tracer coordinate on TD-WD plane at 400 rpm.

Fig.9 Relationship between the material flow rate and tool rotation speed.

からトレーサーまでの距離を考慮して得られる材料流動速度は約 550 rpm となり、適切条件においてもツール回転速度 1000 rpm の 55 % に留まっている。

Fig.9 にツール回転速度と材料流動速度率（(材料流動速度: rpm / ツール回転速度: rpm) × 100）の関係を示す³⁷⁾。なお、○は AS 以外の材料流動速度率を、×は AS のみの材料流動速度率を示している。

ツール回転速度が 600 rpm の場合に材料流動速度率が 70 % を超えているが、ツール回転速度が 600 rpm から増加しても低下しても材料流動速度率は低下している。当該材料流動速度率の低下はツール表面／材料間の滑りに起因すると考えられ、800 rpm 及び 1000 rpm では大きなツール回転速度が、400 rpm 及び 300 rpm では材料の軟化不足が主な原因であると思われる。ここで、欠陥発生有無の境界は 400 rpm と 600 rpm の間に存在するが、AS 以外の材料流動速度率は大部分が重複している。これに対し、欠陥発生条件と欠陥が発生しない条件における材料流動速度率の差異は AS に明瞭に認められる。欠陥が発生しない条件では AS も含めてプローブの全方位で材料流動速度率がほぼ一定であるが、欠陥発生条件では AS の材料流動速度率が極端に低下している。プローブが形成する空間に材料が容易に流入できるツール後方から、ツールの移動方向とツールの回転方向が一致し、高圧となるツール前方へと流動する必要がある AS においては、材料流動によどみが生じやすいものと推察される。当該結果は、摩擦攪拌接合によって欠陥のない良好な継手を得るためには、プローブの周囲に流動速度が一定の材料流動領域を安定的に形成するプロセス条件を選定することが重要であることを示している。

6. おわりに

近年注目されている FSW に関し、プロセス制御と密接に関連する材料流動挙動及びその可視化手法について紹介

した。FSW の基本特許は 2015 年 1 月に存続期間の満了により消滅しており、今後は様々な産業分野における加速的な実用化が期待される。

高融点材料や厚板の接合に関しては、ツールの性能及び寿命等の解決すべき課題も残っているが、FSW は比較的単純なプロセス制御に基づく技術であり、良好な攪拌部を得るために最も重要な現象である材料流動挙動を正確に把握・制御することで、汎用性の高い普遍的な接合技術として確立されるものと思われる。

引用文献

- 1) W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needhan, M.G. Murch, P. Temple-Smith and C.J. Dawes: PCT/GB92/02203, December 6, 1991.
- 2) C.J. Dawes: Weld. Metal Fab., **63** (1995) 13-16.
- 3) C.J. Dawes and W.M. Thomas: Weld. J., **75** (1996) 41-45.
- 4) 溶接学会編：摩擦攪拌接合－FSW のすべて－、産報出版、2006.
- 5) R. Nandan, T. DebRoy and H.K.D. Bhadeshia: Prog. Mater. Sci., **53** (2008) 980-1023.
- 6) R.S. Mishra and Z.Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R, **50** (2005) 1-78.
- 7) Y.S. Sato, S.H.C. Park and H. Kokawa: Metall. Mater. Trans., **32A** (2001) 3033-3042.
- 8) H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi: J. Mater. Proc. Tech., **142** (2003) 692-696.
- 9) H. Okamura, K. Aota and M. Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., **50** (2000) 166-172.
- 10) G. Gampbell and T. Stotler: Weld. J., **78** (1999) 45-47.
- 11) M.R. Johnsen: Weld. J., **78** (1999) 35-39.
- 12) K.E. Knipstron and B. Pekkari: Weld. J., **76** (1997) 55-58.
- 13) C.J. Dawes and W.M. Thomas: Weld. J., **75** (1996) 41-45.
- 14) H. Fujii, Y.F. Sun and H. Kato: Scripta Mater., **64** (2011) 657-660.
- 15) K. Colligan: Weld. J., **78** (1999) 229-237.
- 16) A.P. Reynolds: Sci. Tech. Weld. Join., **5** (2000) 120-124.
- 17) Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto: Metal. Mater. Trans. A, **32A** (2001) 941-948.
- 18) M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr and A.C. Nunes: Mater. Character., **49** (2003) 95-101.
- 19) Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, K. Nogi and M. Fukusumi: Composites A, **38** (2007) 2097- 2101.
- 20) H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson and J.H. Hattel: Acta Mater. **54** (2006) 1199-1209.
- 21) R. Zettler, T. Donath, J.F. dos Santos, F. Beckman and D. Lohwasser: Adv. Eng. Mater., **8** (2006) 487-490.
- 22) B.C. Liechty and B.W. Webb: J. Mater. Process. Technol., **184** (2007) 240-250.
- 23) D.P. Field, T.W. Nelson, Y. Hovanski and K.V. Jata: Metal. Mater. Trans. A, **32A** (2001) 2869-2876.
- 24) 柴柳：FSW の塑性流動と結晶方位分布、軽金属学会研究部会報告書、**56** (2011) 55-72.
- 25) K. Kumar and S.V. Kailas: Mater. Sci. Eng. A, **485** (2008) 367-373.

- 26) S. Xu, X. Deng, A.P. Reynolds and T.U. Seidel: *Sci. Tech. Weld. Join.*, **6** (2001) 191-193.
- 27) 平澤ら：摩擦撹拌接合 (FSW) の塑性流動混合解析、日本金属学会 2004 年度年次大会講演論文集、2004, p. 39-40.
- 28) G. Yoshikawa, F. Miyasaka, Y. Hirata, Y. Katayama and T. Fuse: *Sci. Tech. Weld. Join.*, **17** (2012) 255-263.
- 29) P. Ulysse: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **42** (2002) 1549-1557.
- 30) M. Song and R. Kovacevic: *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.*, **217** (2002) 73-85.
- 31) H. Atharifar, D. Lin and R. Kovacevic: *J. Mater. Eng. Perform.*, **18** (2009) 339-350.
- 32) H. Schmidt and J. Hattel: *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **13** (2005) 77-93.
- 33) R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert and T. Debroy: *Acta Mater.*, **55** (2007) 883-895.
- 34) 下田ら：摩擦撹拌作用によるアルミニウムと鉄鋼材料の接合を模擬した材料内部流動の定量評価、溶接学会全国大会講演概要、**87** (2010) 252-253.
- 35) Y. Morisada, H. Fujii, Y. Kawahito, K. Nakata and M. Tanaka: *Scripta Mater.*, **65** (2011) 1085-1088.
- 36) Y. Morisada, T. Imaizumi, H. Fujii, M. Matsushita and R. Ikeda: *J. Mater. Eng. and Perform.*, **23** (2014) 4143-4147.
- 37) Y. Morisada, T. Imaizumi and H. Fujii: *Sci. Tech. Weld. Join.*, **20** (2015) 130-137.
- 38) Y. Morisada, T. Imaizumi and H. Fujii: *Scripta Mater.*, **106** (2015) 57-60.