高輝度 X 線透過システムを用いた摩擦攪拌接合における欠陥形成機構の解明*

森貞 好昭**, 今泉 拓也***, 藤井 英俊**

Clarification of Defect Formation Mechanism in Friction Stir Welding by X-ray Radiography*

by MORISADA Yoshiaki**, IMAIZUMI Takuya*** and FUJII Hidetoshi**

Defect formation mechanism during friction stir welding (FSW) was investigated by three-dimensional visualization of material flow around a tool. The three-dimensional flow patterns in various FSW conditions were obtained using two pairs of x-ray transmission real-time imaging systems. It revealed that the tilt of the horizontal material flow around the tool and the stagnation of the material flow at retreating side of the tool were tightly connected with the defect formation mechanism. Additionally, the material flow rates during FSW were directly calculated by the results of the three-dimensional visualization. The material flow rate at advancing side was obviously decreased in the defect formation process conditions.

Key Words: Friction stir welding, Defect formation mechanism, X-ray radiography, Material flow, Material flow rate

1. 緒 言

摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) は、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 (場合によっては接合部のほうが母材よりも高強度化される) のが特徴で、発明されてから約20年の間に急速に実用化が進んでいる¹⁻⁴⁾。しかしながら、塑性流動が適切に制御されていない場合は攪拌部にトンネル状や溝状の欠陥が生じ、継手の機械的特性が著しく低下してしまう^{5, 6)}。つまり、良好な FSW 継手を得るために最も重要な現象は塑性流動であり、塑性流動挙動と欠陥形成機構の関係を明らかにすることが、FSW を普遍的な技術とする本質的な課題である。これまでも、FSW 前後におけるトレーサ位置の変化及び異材継手攪拌部における各材料の混合状態等の観察⁷⁻¹⁵⁾や、攪拌部集合組織の EBSD 解析¹⁶⁻¹⁸⁾によって塑性流動挙動の解明が試みられてきたが、観察されるのは FSW 後の最終状態であり、経時的な塑性流動挙動の理解に関しては推測によるところが大きい。また、コンピュータシミュレーションによって塑性流動が推測されているが、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¹⁹⁻²⁶⁾。また、スポット FSW の塑性流動挙動については T.H. North らの研究グループがトレ

ーサー法等を用いて詳細な検討を行っているが^{27, 28)}、スポット FSW とツールが前進する FSW とでは、塑性流動挙動に差異が生じるものと考えられる。

これに対し、筆者らは高輝度 X 線透過システムと当該装置専用設計した FSW 装置を用い、FSW 中の塑性流動挙動を 3 次元可視化することに成功している²⁹⁾。当該手法によれば、塑性流動挙動を直接的に観察することが可能となり、塑性流動挙動に及ぼす FSW 条件の影響を詳細に検討することができる。そこで本研究では、FSW における欠陥形成機構を明らかにすることを目的とし、攪拌部に欠陥が形成される場合と形成されない場合における塑性流動挙動を 3 次元可視化し、攪拌部の断面観察結果と合わせて詳細な比較検討を行った。

2. 高輝度 X 線透過システムを用いた塑性流動の 3 次元可視化

2.1 高輝度 X 線透過システム

図 1 に本研究で用いた高輝度 X 線透過システム及び FSW 装置の外観写真を示す。高輝度 X 線透過システムは、X 線発生装置と高速応答 X 線イメージインテンシファイア (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関心物体 (例えば、金属球及び球状ポロシティ等) の空間上の位置を三次

*受付日 平成25年12月9日 受理日 平成26年2月4日

**正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and welding research institute, Osaka university

***正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka university

Fig. 1 Appearance of the equipment for the X-ray radiography.

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。なお、X 線発生装置は、高い解像度を得ることができるマイクロフォーカス X 線発生装置及び高い透過能力を得ることができるミニフォーカス X 線発生装置を採用し、マイクロフォーカス X 線発生装置、ミニフォーカス X 線発生装置共に、口径 6" の X 線 I.I. を組み合わせている。

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。また、高輝度 X 線透過システムと共に X 線検査室内に設置する必要があるため、可能な限りコンパクトな設計となっている。

2.2 FSW 中の X 線透視画像観察

図 2 に X 線透視画像を得るための装置配置図を示す。供試材には板厚 5 mm の A1050 アルミニウム板を用いた。また、FSW 用の裏板には鋼板を用いるのが一般的であるが、本研究では X 線の透過性及び裏板としての剛性を考慮して、板厚 5 mm の A2017 アルミニウム合金板を用いた。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。ツール形状はシールド径及びプローブ径をそれぞれ 15 mm 及び 6 mm とし、プローブ長は 3.0 mm とした。尚、プローブはネジの無い円筒形状をしている³⁰⁾。また、本研究の FSW においては、ツールの前進角は 3° とした。

X 線発生装置と X 線 I.I. から構成される 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 W トレーサー（直径 300 μ m）の動きを観察した。なお、W トレーサーは供試材の表面から深さ 2 mm の位置に埋設し、プローブ進行方向の軸芯が通過する線上に W トレーサーが位置するように、ツールの位置を設定した。FSW 条件はツールの移動速度を 400 mm/min で固定し、回転速度を 200～1000 rpm の範囲で変化させた。なお、摩擦攪拌接合は位置制御方式で行っ

Fig. 2 A schematic drawing of the experimental setup for the X-ray radiography during the FSW.

Fig. 3 X-ray transmission images obtained by the x-ray transmission real-time imaging systems.

た。

マイクロフォーカス X 線発生装置は管電圧 180 kV 及び管電流 1 mA、ミニフォーカス X 線発生装置は管電圧 100 kV 及び管電流 8 mA の条件で X 線を発生させ、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。図 3 に X 線透視画像を示す。供試材の上方から撮影された画像がミニフォーカス X 線発生装置、下方から撮影された画像がマイクロフォーカス X 線発生装置を用いて得られたものであるが、どちらの 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。ここで、ミニフォーカス X 線発生装置を用いた場合は透過性に優れているが画質が粗いのに対し、マイクロフォーカス X 線発生装置を用いた場合は若干暗いが高画質となっている。

2.3 塑性流動の 3 次元可視化

同期した上下 2 方向からの X 線透視画像の W トレーサー位置を比較し、W トレーサー位置のずれを用いて奥行き位置を補正することで、W トレーサーの軌跡を正確に示す 3 次元グラフを得ることができる。図 4 (a) にツール回転速度 1000 rpm の場合の 3 次元グラフを示す。W トレーサーは

Fig. 4 Three-dimensional graphs of the tracer coordinates. (a): 1000 rpm, (b): 800 rpm, (c): 600 rpm, (d): 400 rpm, (e): 300 rpm

Fig. 5 Two-dimensional graphs of the tracer coordinates on TD-WD plane.

プローブの周囲を何周も回転しており、同心円状の軌跡を描いていることが分かる。従来の可視化手法から導かれる塑性流動挙動においては、軟化した材料がツールの前進側 (AS: Advancing Side) から後退側 (RS: Retreating Side) に流れ、十分な熱量が投入される摩擦攪拌接合条件においては当該流動が AS に到達すると結論付けられるものが多かった。しかしながら、塑性流動の 3 次元可視化により、摩擦攪拌接合中はプローブの周囲に一定の幅を持つ同心円状の塑性流動領域が形成されるということが明瞭に示された。

3. ツール回転速度が塑性流動挙動に及ぼす影響

ツール回転速度を 200~1000 rpm と変化した場合の塑性流動挙動の 3 次元グラフを図 4 に示す。600~1000 rpm の

場合はほぼ同様の塑性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、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。また、300 rpm の場合は W トレーサーがプローブの周囲を回転することなく、プローブの後方に排出され、200 rpm の場合は、ツールが破損した。

塑性流動挙動をより詳細に検討するために、W トレーサーの軌跡の 2 次元グラフを作成した。ツール回転速度が 600~1000 rpm の場合の TD-WD 面の軌跡を図 5 に、ND-WD 面及び ND-TD 面の軌跡を図 6 にそれぞれ示す。図 5 において、塑性流動領域の形状はほぼ同一であるが、ツールの回転速度が増加するほど、また、プローブからの距離が大きくなるほど、プロット間隔が大きくなっている (塑性

Fig. 6 Two-dimensional graphs of the tracer coordinates on ND-WD or ND-TD plane.

Fig. 7 A schematic drawing of the material flow.

流動速度が大きくなっている）。また、図 6 において、600 rpm では塑性流動領域がプローブの周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ことが分かる。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、ツールの前進角が原因であるとは考え難い。これに対し、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塑性流動の傾きに影響している可能性がある¹²⁾。回転するツールが被接合材中に圧入されて移動する場合、プローブの通過によって形成されるプローブ後方の低圧領域に攪拌された材料が流入することになる。この場合、図 7 に示すとおり、ショルダ直下の材料はショルダの回転方向（RS から AS）に沿って

移動し、その一部分は AS の壁（低温領域）の影響で下側の流れとなる。その後、当該流れは RS の壁（低温領域）に沿って上方に押し出されることになり、これによって上下の塑性流動が形成されるものと思われる。また、当該上下の塑性流動とプローブ周囲に形成される水平方向の塑性流動の合成により、プローブの前後左右に少し傾斜した塑性流動が形成される。つまり、プローブ周囲の塑性流動の傾きは、ショルダの影響が塑性流動に現れる程に攪拌部への入熱が十分であり、円滑な塑性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。

4. 攪拌部における欠陥形成機構

4.1 塑性流動形状が欠陥形成に及ぼす影響

ツール回転速度 400 rpm における TD-WD 面のトレーサー軌跡を図 8 に示す。ツール回転速度が 600～1000 rpm の場合と異なり、プローブ周囲の塑性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、AS でプロット間隔が極端に短くなっており、当該領域における塑性流動のよどみが観察される。この摩擦攪拌接合条件で得られた攪拌部の断面マクロ写真を図 9 に示す。攪拌部の AS 下部に小さな欠陥が存在しており、図 8 の塑性流動停滞領域と欠陥発生領域とがほぼ一致している。なお、トレーサーは表面から 2 mm の位置に埋設されており、欠陥が形成している深さと一致する。ここで、欠陥が形成しているのは攪拌部下部であり、攪拌部上部には欠陥が認められない。そこで、トレーサーを表面から 1 mm の位置に埋設し、当該深さにおける塑性流動挙動を観察した。ND-WD 面のトレー

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

Fig. 9 Cross sectional image of the stir zone formed at 400 rpm.

Fig. 10 Two-dimensional graphs of the tracer coordinates on TD-WD plane at 1 mm and 2 mm from the surface.

サー軌跡を図10に示す。欠陥が形成した深さ 2 mm では入熱不足によりショルダによる上下方向の塑性流動が明瞭に現れず、プローブ周囲の塑性流動が傾斜していないのに対し、欠陥が認められない深さ 1 mm では塑性流動が明瞭に傾斜しており、ショルダによる上下方向の塑性流動が生じる領域においては欠陥が形成され難いことが示唆される。

図11に種々のツール回転速度で得られた攪拌部の断面マ

Fig. 11 Cross sectional images of the stir zone formed at various tool rotation speed.

Fig. 12 Relationship between the velocity of the tracer and distance from center of the probe.

クロ写真を示す。ツール回転速度が 600 rpm の場合は攪拌部に欠陥が認められないが、上述のとおり、400 rpm になると AS 下部に小さな欠陥が形成されている。また、ツール回転速度の低下に伴い、前進側を起点に、より大きな欠陥が形成されている。当該欠陥形成は、塑性流動不足により AS 下部に金属が流れ込んでこないことが原因であると考えられる。200 rpm の欠陥に注目すると、欠陥の下部は板面にほぼ水平であるのに対し、上部は AS から RS に上向きに傾斜している。当該傾斜は 3 次元可視化によって明らかとなったプローブ周囲の塑性流動の傾きと一致しており、欠陥の形状と塑性流動挙動が密接に関連していることが分かる。

4.2 塑性流動速度が欠陥形成に及ぼす影響

本研究では摩擦攪拌接合中の W 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 W トレーサーの移動距離を計測することによって塑性流動速度を求めることができる。ツール回転速度が 1000 rpm の場合の塑性流

Fig. 13 Relationship between the material flow rate and tool rotation speed.

動速度を図12に示す。塑性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ており、角速度はほぼ一定となっている。攪拌部の上方にはショルダが存在しており、当該ショルダの影響を受けてプローブ周囲に角速度一定の塑性流動領域が形成されるものと考えられる。ここで、プローブ中心から W トレーサまでの距離を考慮して得られる塑性流動速度は約 550 rpm となっており（図12に 550 rpm に対応する線を示している）、ツール回転速度 1000 rpm の 55% に留まっている。なお、ツールの回転に伴い、塑性流動領域には材料が連続的に流入及び流出していると思われるが、当該流入及び流出挙動の把握は今後の課題である。

図13にツール回転速度と塑性流動速度率（（塑性流動速度：rpm / ツール回転速度：rpm）× 100）の関係を示す。なお、○は AS 以外の塑性流動速度率を、×は AS のみの塑性流動速度率を示している。ツール回転速度が 600 rpm の場合に塑性流動速度率が 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塑性流動速度率は低下している。当該塑性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 以外の塑性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塑性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塑性流動速度率がほぼ一定であるが、欠陥発生条件では AS の塑性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、塑性流動による動き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塑性流動領域を形成することが重要であることを示している。

5. 結 言

本研究では、摩擦攪拌接合中の欠陥形成メカニズムを明らかにするために、高輝度 X 線透過システムを用いて種々の摩擦攪拌接合条件における塑性流動を 3 次元可視化した。得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 欠陥の形成しない適切な摩擦攪拌接合条件では、プローブの周囲に同心円状の塑性流動領域が形成される。当該塑性流動領域はショルダの影響により、ツールの後方から前方に向けて下向きに、また、RS から AS に向けて下向きに傾斜する。
- 2) 入熱不足により攪拌部に欠陥が生じる摩擦攪拌接合条件では、プローブの周囲に形成される塑性流動領域がツールの進行方向に押し潰される。また、塑性流動に及ぼすショルダの影響が比較的小さくなり、水平な塑性流動領域が形成される。
- 3) 欠陥の形成しない適切な摩擦攪拌条件では、塑性流動速度がプローブの全方位においてほぼ均一であり、角速度が一定となる。また、当該角速度はツールの角速度よりも小さくなり、A1050 に対して窒化珪素製のツールを用いる場合は、塑性流動速度率は最高でも約 75% 程度となる。
- 4) 入熱不足により攪拌部に欠陥が生じる摩擦攪拌接合条件では、AS の塑性流動速度のみが極端に低下する。
- 5) 攪拌部の AS 下部において欠陥が形成する主な原因は、ショルダによる上下方向の塑性流動不足及びプローブ周囲における塑性流動速度のアンバランスであると考えられる。

謝 辞

本研究は、（独）科学技術振興機構（JST）による産学共創基礎基盤研究「ヘテロ構造制御」の支援を受けて行われたものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needhan, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C.J. Dawes: PCT/GB92/02203, December 6, 1991.
- 2) 摩擦攪拌接合－FSW のすべて－, 溶接学会編, (2006) 産報出版.
- 3) R.S. Mishra, Z.Y. Ma, *Mater. Sci. Eng. R*, 50, 1-78 (2005).
- 4) R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D. Bhadeshia: *Prog. Mater. Sci.*, 53, 980-1023 (2008).
- 5) 高井ら：摩擦攪拌溶接の鉄道車両への適用, 軽金属溶接, 39 (2001) pp. 29-31.
- 6) Y.G. Kim, H. Fujii, T. Komazaki, T. Tsumura, and K. Nakata, *Mater. Sci. Eng. A*, 415, 250-254 (2006).
- 7) K. Colligan, *Weld. J.*, 78, 229-237 (1999).

- 8) A.P. Reynolds, *Sci. Tech. Weld. Join.*, 5, 120-124 (2000).
 - 9) Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan, T. Hashimoto, *Metal. Mater. Trans. A*, 32A, 941-948 (2001).
 - 10) S. Xu, X. Deng, A.P. Reynolds, T.U. Seidel, *Sci. Tech. Weld. Join.*, 6, 191-193 (2001).
 - 11) M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, *Mater. Character.*, 49, 95-101 (2003).
 - 12) Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, K. Nogi, M. Fukusumi, *Composites A*, 38, 2097-2101 (2007).
 - 13) H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, *Acta Mater.* 54, 1199-1209 (2006).
 - 14) R. Zettler, T. Donath, J.F. dos Santos, F. Beckman, D. Lohwasser, *Adv. Eng. Mater.*, 8, 487-490 (2006).
 - 15) B.C. Liechty, B.W. Webb, *J. Mater. Process. Technol.*, 184, 240-250 (2007).
 - 16) D.P. Field, T.W. Nelson, Y. Hovanski, K.V. Jata, *Metal. Mater. Trans. A*, 32A, 2869-2876 (2001).
 - 17) 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) pp. 55-72.
 - 18) K. Kumar, S.V. Kailas, *Mater. Sci. Eng. A*, 485, 367-373 (2008).
 - 19) 富村ら：AlとNiのスポット摩擦攪拌接合における非定常熱移動プロセスの数値解析，溶接学会全国大会講演概要，75(2004) pp. 32-33.
 - 20) 平澤ら：摩擦攪拌接合(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) pp. 39-40.
 - 21) G. Yoshikawa, F. Miyasaka, Y. Hirata, Y. Katayama, T. Fuse, *Sci. Tech. Weld. Join.*, 17, 255-263 (2012).
 - 22) P. Ulysse, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42, 1549-1557 (2002).
 - 23) M. Song, R. Kovacevic, *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.*, 217, 73-85 (2002).
 - 24) H. Atharifar, D. Lin, R. Kovacevic, *J. Mater. Eng. Perform.*, 18, 339-350 (2009).
 - 25) H. Schmidt, J. Hattel, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 13, 77-93 (2005).
 - 26) R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert, T. Debroy, *Acta Mater.*, 55, 883-895 (2007).
 - 27) N. Sun, H. Zhou, T.H. North, Y.H. Yin, *Sci. Tech. Weld. Join.*, 15, 239-241 (2010).
 - 28) S. Horie, K. Shinozaki, M. Yamamoto, T.H. North, *Sci. Tech. Weld. Join.*, 15, 666-670 (2010).
 - 29) Y. Morisada, H. Fujii, Y. Kawahito, K. Nakata, M. Tanaka, *Scripta Mater.*, 65, 1085-1088 (2011).
 - 30) H. Fujii, L. Cui, M. Maeda, K. Nogi, *Mater. Sci. Eng. A*, 419, 25-31 (2006).
- ~~~~~