

振動波形解析とMTシステムによる 摩擦攪拌接合の状態監視技術

Condition Monitoring for Friction Stir Welding System by Using
Vibration Waveform Analysis and MT system

河田直樹 Naoki KAWADA
橋本健司 Kenji HASHIMOTO
吉澤正皓 Masaaki YOSHIZAWA

石川 武 Takeshi ISHIKAWA
藤井英俊 Hidetoshi FUJII

摩擦攪拌接合は、接合ツールを回転させながら材料中に挿入し、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。摩擦攪拌接合の品質管理は、溶接の立場では接合条件の管理に通ずる状態監視が重要と考えられているが、機器構成に着目すると工作機械の立場での状態監視も必要と考えられる。

そこで、工作機械にみられる振動による状態監視方法に着目し、摩擦攪拌接合システムへの適用を検討した。検討の結果、時刻歴の振動波形で接合条件の変化が確認できた。この変化を波形解析とMTシステムを組み合わせ、接合不良に起因する接合システムの異常検知の可能性を確認できたので報告する。

Friction stir welding (FSW) is a solid phase process which can produce high-quality and defect-free aluminum joints using a frictional heat generated by the welding tool rotation. The FSW system has a configuration similar to a machine tool. Therefore, the quality of the FSW should be controlled using a welding condition monitoring and welding joint inspection. In this study, a monitoring system was constructed, based on the Taguchi method and in-process measurement of vibration during the FSW. As a result, it was possible to monitor the system by detecting the change in FSW conditions for an aluminum alloy.

1 はじめに

摩擦攪拌接合は、接合ツールを回転させながら材料中に挿入し、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(図1)。この接合方法は、アーク溶接やレーザ溶接のような熔融溶接と比較して被接合材料への入熱量が小さいため、高品質な継手を得ることが可能であり、主に融点の低いアルミニウム合金などの製品に適用されている。

摩擦攪拌接合の品質管理は、溶接の立場では接合条件の管理が重要であるが、機器構成に着目すると工作機械の立場での管理も必要と考えられる。

そこで、工作機械の品質管理手法として導入が進んでいる状態監視法¹⁾の中で特に振動計測による異常検知方法に着目し、摩擦攪拌接合システムへの適用を検討した。

検討の結果、工作機械のように振動加速度の周波数特性による明確な差異が得られなかったが、時刻歴の振動波形の波形解析では明確な差異が得られたため、多変量解析手法の一つであるMTシステムと組み合わせることで、接合不良に起因する接合システムの異常検知の可能性を確認できたので報告する。

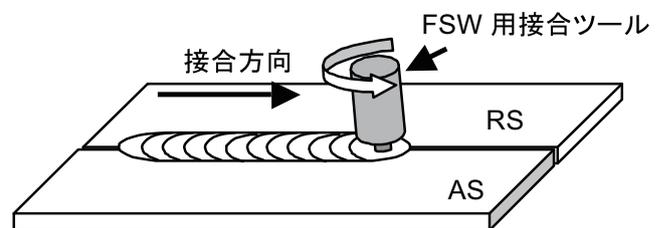


図1 摩擦攪拌接合 (突合せ接合の例)

2 状態監視システム概要

摩擦攪拌接合の接合条件の管理は、主に接合荷重、ツールの回転速度、被接合物とツールの相対的な移動速度(接合速度)の3項目で行なわれている。さらに、より多くの状態監視を行なう手段として画像データによる判定²⁾やAEセンサによる判定³⁾がある。一方、工作機械の状態監視では、電力、切削抵抗、振動などが用いられている。

本開発では、早い段階での異常発生を検出するためにリアルタイム処理での状態監視システムを考える。リアルタイム処理ではデータ数の大きさが負荷となるため、できるだけ測定手段の簡略化を考慮し、状態を監視するための物理量として振動データを用いた検討を行なった。振動加速度データは、時刻歴波形として表すこと

ができるが、このことは後述する波形解析が適用できることを示す。また、一般的な解析として、周波数解析（FFTなど）があり、特徴的な周波数成分を抽出して変化を捉える期待ができる。

本稿では、これらのことを考慮し、振動加速度による状態監視手法として図2に示すアルゴリズムを検討した。このアルゴリズムには、MTシステムをベースとして採用している。MTシステムは品質工学の手法の一つで、多変量解析の特徴である「データの縮約」と「予測」の役割の他にパターン変化の検出に有効な成分を抽出することによって、様々なシステムの状態監視に適用されている⁴⁾。

このMTシステムを中心に多数の情報から接合条件の変化を検知できる摩擦攪拌接合の状態監視システムの構築をめざす。

3 振動波形による状態監視アルゴリズムの構築

FSWの状態監視には、工作機械のように主軸周りの振動を計測し、時刻歴波形を基にした波形パターンの変化を捉えることが重要である。

まず、接合プロセス中の振動加速度を取得し、図2の波形解析またはフィルタ処理を経て、接合プロセスごとに行列を構成する。これによって、接合プロセス間の違いが強調され、良否判定がしやすくなる。

次に、FSW装置の初期状態、または接合品質が良好な装置の状態の振動データを多数取得し、これらを状態監視のための基準データ群とする。基準データ群は、状態監視における正常、異常を判断するための比較対象となり、行列で構成される。

最後に、基準データ群と接合プロセスの行列を用いてマハラノビスの距離MDを算出する。これら一連の流れで構成されたアルゴリズムによって状態監視を行なう。

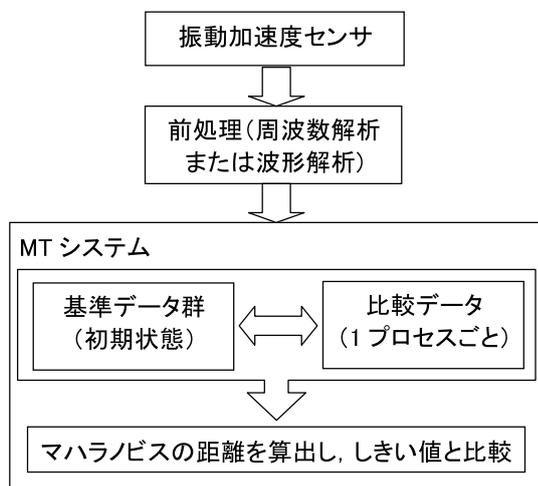


図2 状態監視アルゴリズム

4 実験結果

本稿では、アルミニウム合金6N01の摩擦攪拌接合における状態監視を行なった。検討した接合形態は、FSWで一般的な突合せ継手である。

まず接合が良好に行なわれる条件を正常と定め、次に接合荷重または接合速度を意図的に変えて接合不良が発生する条件を異常と定め、それぞれの接合中の振動を測定した。

表1に下線部で示すように、異常1は接合速度を変化させ、異常2は接合荷重を変化させて、それぞれ接合条件の異常とした。いずれも接合に必要な入熱量が不足する方向に条件をシフトしており、実用上では深刻な異常となるレベルである。

なお、振動加速度センサはツール回転部（主軸）の直上に設置し、データを取得した。測定条件を表2に示す。

A、B、Cのそれぞれの接合条件で接合した試験片の状況を表3、表4に示す。

まず、表3に接合試験片の外観を示す。Aは正常な接合条件のため、おもて、うらとも表面状態は良好である。Bは接合速度が速いため、入熱が減少し攪拌不足の状態である。このため、ビードが脈動しており、接合が不安定であることが確認できる。Cは接合荷重が不足しており、ツールがワークに十分に接触していない状態である。このため、ビードの状態を見てもツールの接触状況が十分でないことが確認できる。

表1 検証試験条件（荷重制御方式のFSW装置を使用）

	接合条件		
	接合速度	回転速度	接合荷重
A(正常)	1.0m/min	900rpm	1.0MPa
B(異常1)	<u>1.8m/min</u>	900rpm	1.0MPa
C(異常2)	1.0m/min	900rpm	<u>0.5MPa</u>

表2 振動加速度測定条件

加速度センサ検出範囲	$\pm 700\text{m/s}^2$
加速度センサ応答周波数範囲	3Hz～8kHz
加速度センサ出力（電圧）	$\pm 5\text{V}$
加速度センサ軸数	1軸（上下方向）
データサンプリング周波数	10kHz

表3 6N01のFSW外観

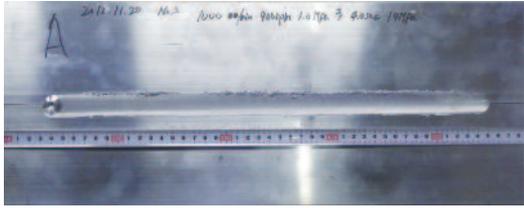
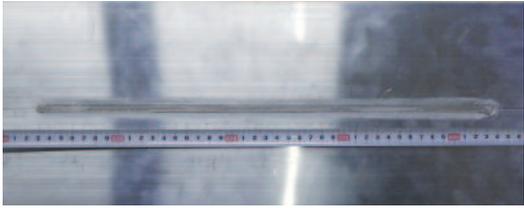
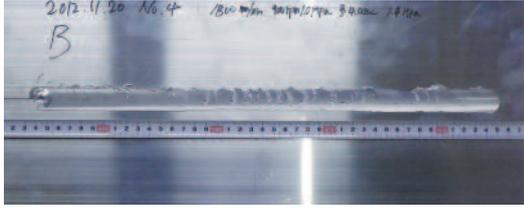
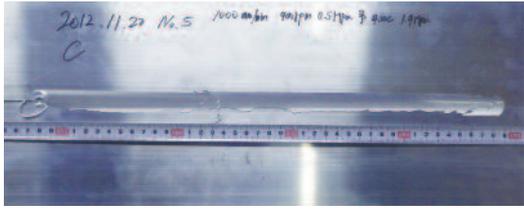
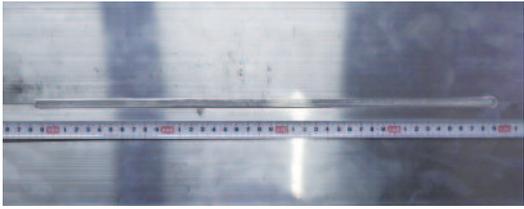
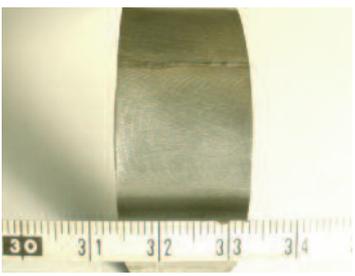
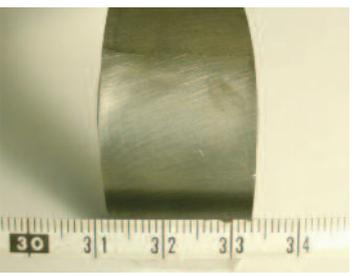
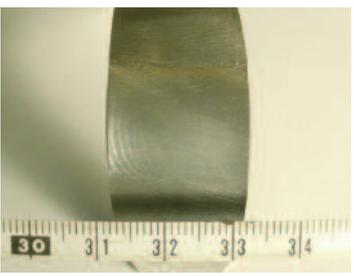
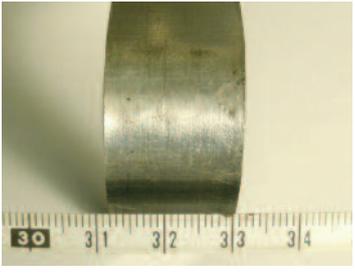
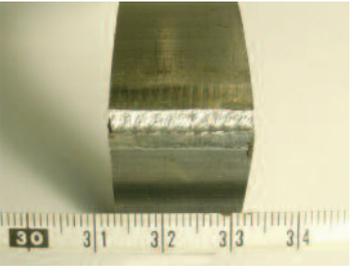
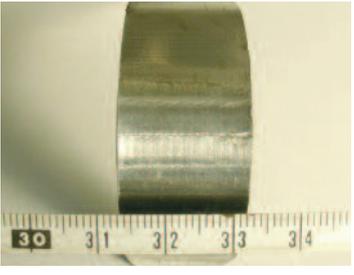
接合条件	接合部外観 (おもて面)	接合部外観 (うら面)
A (正常)		
B (接合速度異常)		
C (接合荷重異常)		

表4 破壊試験結果 (曲げ・断面観察・引張試験)

接合条件	A (正常)	B (接合速度異常)	C (接合荷重異常)
曲げ試験 (おもて曲げ)			
曲げ試験 (うら曲げ)			
断面観察			
引張試験結果	214.70N/mm ²	48.56N/mm ²	79.45N/mm ²

次に、それぞれの接合条件によって作製されたFSW継手の評価として破壊試験を行なった。結果を表4に示す。

正常な接合条件としたAの継手は曲げ試験、断面観察、静的強度試験（以下、引張試験）とも、接合欠陥またはそれに起因した強度低下は認められず、結果は良好であった。接合速度異常で接合したBの試験片は、うら曲げ試験の結果で大きな亀裂が生じており、断面観察でも接合部の下部に欠陥が生じている。この結果が、引張強度の著しい低下につながっている。接合荷重異常で接合したCの試験片も、Bと同様、うら曲げ、断面観察、引張試験とも接合不良であることを示す結果が得られている。

これら3条件の接合中に得られた振動加速度データを解析し、状態監視手法の妥当性確認を行なう。

4. 1 周波数解析とMT法の組み合わせによる状態監視

まず、時刻歴の振動加速度波形での比較を実施した。図3が接合条件A～Cの時刻歴波形を重ねて表示した結果である。サンプリングが10kHzであるため、目視では差異を確認しにくい。図4は図3を35sから36sの表示に拡大した結果である（図3を10倍に拡大している）。この結果からも、差異を確認することは困難である。これは、振動波形に機械振動、電気振動、各種ノイズなど様々な成分を含んでいるためで、状態監視に不要な情報である。

このため、有効な成分を抽出するフィルタを導入する必要がある。

そこで、取得した接合中の時刻歴の振動波形を、FFTによって周波数に対する分布として捉えて、各接合条件における分布の変化を確認した。正常および異常1、異常2の3パターンの振動加速度を測定し、時間領域の周波数解析を行なった。

結果を図5に示す。この結果からA（正常）およびB（異常1）は100Hz、C（異常2）は150Hz付近にピークを確認できるため、A～Cの振動加速度データにそれぞれ70Hz～200Hzのバンドパスフィルタ処理を行ない、MT法によって、Aに対するBまたはCの変化を、マハラノビスの距離（以下、MD）として算出した。

その結果を図6、7、8に示す。横軸は時間、縦軸はMT法によって算出されたMDである。図6が正常状態のMDであるから、図7、8は図6との差異があれば速度異常や荷重異常を検出できることになる。

しかしながら、図6、7、8に大きな差異が認められず、この手法では、十分に異常を検知できていないことがわかる。

このことは、図5に示されているFFTの結果のうち、特にAとBの間に差異がなく、またCもピーク周波数に差があるとはいえ、全体的に似た傾向であることが原因である。

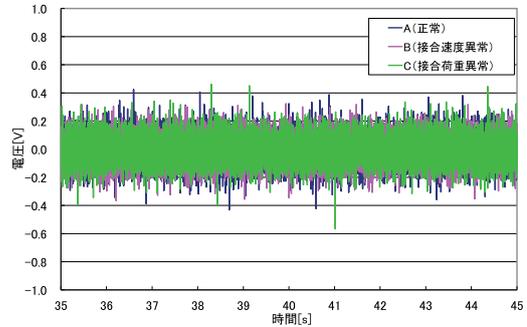


図3 振動加速度データによる比較

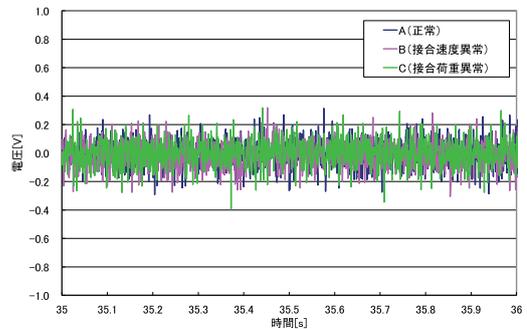


図4 振動加速度データによる比較（時間軸を拡大）

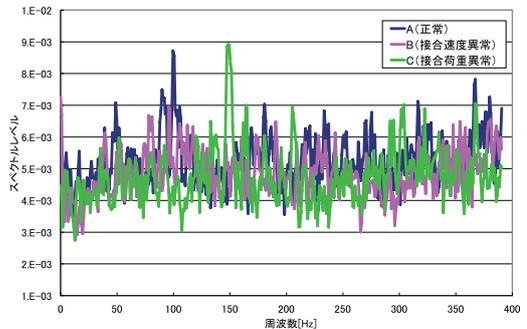


図5 6N01のFSWにおける周波数解析結果

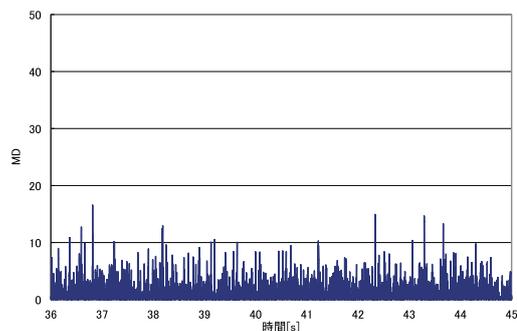


図6 A（正常）のMD

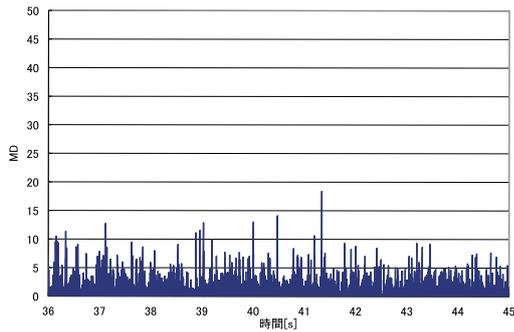


図7 B (異常1：接合速度異常) のMD

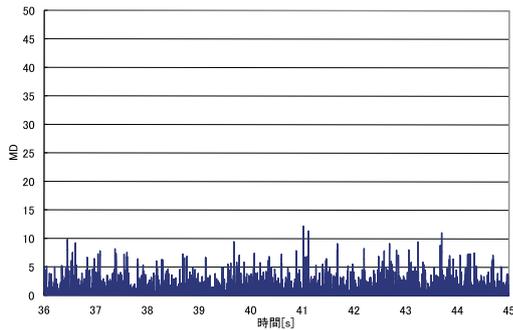


図8 C (異常2：接合荷重異常) のMD

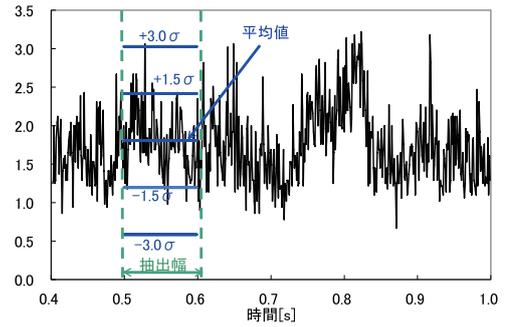


図9 標本線と波形解析概要

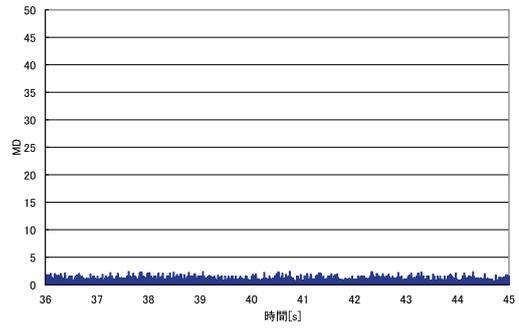


図10 A (正常) のMD

4. 2 波形解析とMT法の組み合わせによる状態監視

FFTとMT法の組み合わせでは明確な差異が捉えられなかったため、フィルタ処理を行わずに波形を形状としてパターン化する波形解析による異常検知を試みた。図9に波形解析手法の概要を示す。時刻歴波形に一定間隔（例えば 1.5σ ）で時間軸に平行線（標本線と定義）を引き、特徴量を算出するための時間軸上の区間（抽出幅と定義）を設定する。抽出幅の区間内で標本線と交差する回数を変化量とし、標本線よりも上に分布しているデータの合計を存在量とする。変化量と存在量の算出を波形データの全区間で実施することで、波形全体の特徴化を行なうことができる。波形解析の結果からMDをもとめた。その結果を図10, 11, 12に示す。図10と図11, 図10と図12を比較することでこのアルゴリズムの検出能力を確認することができる。

まず、Aに対するBの状態変化であるが、図10と11を比較すると、全区間に渡って図11の方でMDが大きく、その変動パターンも大きく異なっている。次に図10と図12を比較すると、こちらも同様の差が検出でき、さらにMDのレベルは全区間で図10の値を大きく上回っている。また、図11と図12のMDにも差がみられる。このことは、AとB、AとCの状態変化だけでなく、BとCの状態変化も見極めることができることを示している。

つまり、正常と異常という区別だけでなく、異常の種類も見分けられる可能性があるということである。

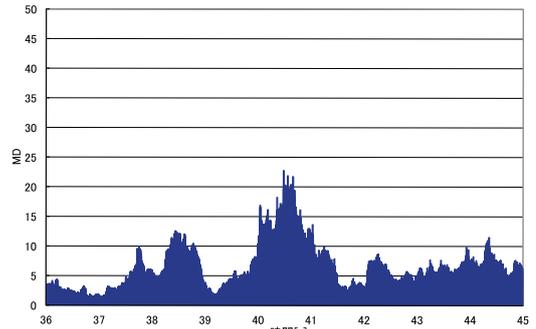


図11 B (異常1：接合速度異常) のMD

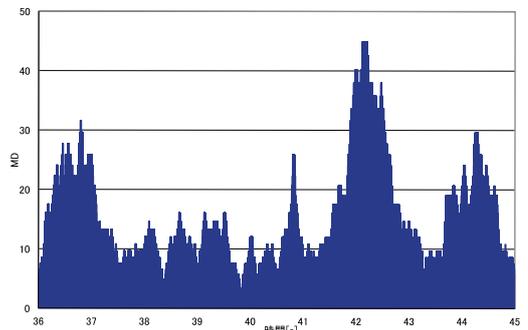


図12 C (異常2：接合荷重異常) のMD

5 まとめ

摩擦攪拌接合システムの状態監視技術の開発として、接合条件の異常を振動加速度の時刻歴波形を波形解析し、MTシステムのマハラノビスの距離にて異常検知の可能性を確認した。

しかしながら、接合条件が異常になる要因には、治具やワークの状態を監視する必要がある。

つまり、他の溶接方法と同様に、接合品質は接合中の異常発生だけでなく、接合前の被接合材料の状態（段取り）の監視、接合後の接合システムや接合物の状態の監視など、接合に関わる全プロセスの監視が重要であると考える⁵⁾。

今後は接合前後のプロセスも含めた異常検知技術の開発と、接合ツールの状態監視技術の開発が課題である。

参考文献

- (1) E.Kuljanic, et al. : Development of an intelligent multi sensor chatter detection system in milling, Mechanical System and Signal Processing, Vol.23, No.5, 1704, (2009), Elsevier Ltd.
- (2) P.Sinha, et al. : Condition monitoring of first mode of metal transfer in friction stir welding by image processing techniques, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.36, 484-489, (2008), Springer London Ltd.
- (3) C.Chen,, et al. : Wavelet Transform Analysis of Acoustic Emission in Monitoring Friction Stir Welding of 6061 Aluminum, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.43, No.13, 1383-1390, (2003), Elsevier Ltd.
- (4) 手島昌一, 他: MTシステム法を適用したリアルタイム監視・診断システムの開発, 第11回品質工学研究発表大会論文集, pp226-229, (2003), 品質工学会
- (5) 河田直樹, 他: ステンレス鋼板のレーザ溶接システムに関する異常検知技術の開発 (第7報) -溶接品質の管理に寄与する状態監視システムの構築-, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 619-620, (2009), (公社) 精密工学会

著者紹介



河田直樹
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 主査



橋本健司
生産本部
技術部 (接合技術センター)



吉澤正皓
生産本部
技術部 (接合技術センター)



石川 武
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 課長



藤井英俊
博士 (工学)
大阪大学
接合科学研究所 教授