

アコースティック・エミッション法による 難燃性マグネシウム合金摩擦攪拌接合中の 微小欠陥検出

伊藤 海太, 行武 栄太郎, 榎 学

材料の製造加工プロセスのような高ノイズ環境でのモニタリングに対応したアコースティック・エミッション(AE)計測装置を用いることで、難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合(FSW)中の接合欠陥を検出し、接合品質を評価することができた。さらに、センサを直接試料に貼り付けずに可動型とし、AE計測を無線化・バッテリー駆動化することで、大型材を接合する産業の現場でも利用しやすい計測手法として完成度を高めることができた。

緒言

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding)は、先端に突起を有する円筒状のツールを回転させながら金属板材の突き合わせ部に押し込み、摩擦熱で融点以下に加熱して塑性流動を引き起こして接合する手法である。一般的な溶融溶接と比較すると、材料が溶融しないために熱影響による材料の劣化が少ない、シールドガス・溶接棒・ワイヤなどの消耗品が不要である、閃光・粉塵・悪臭が発生しにくい、余盛りの除去が不要である、などの長所を有している。

FSWは融点の低い軽金属に適用しやすく、特にアルミニウム合金では広く使われている。マグネシウム合金でもFSWは利用できるが、今回紹介するカルシウム添加型の難燃性マグネシウム合金では、良好に接合できる条件が狭く、欠陥生成に関する知見も不十分であるなどの課題があった(その後の研究開発でこの問題は解決されており、最近ではJR東日本の新幹線試験車両AlfaXにも難燃性マグネシウム合金のFSW材が使用された¹⁾)。そこで、この問題に対して実験的な知見を与えるため、非破壊評価の一種であるアコースティック・エミッション(Acoustic Emission, AE)法を用いた欠陥生成のモニタリング手法を開発した。

AE法は微小欠陥が発生する瞬間を検出する*in-situ*な非破壊評価法である。X線や超音波を用い

る一般的な非破壊評価法は、多くが材料中の既存の亀裂などを発見する探傷法であり、欠陥の位置は得られるが、発生時刻は分からない。これに対しAE法では微小欠陥が「いつ」「どこで」発生したのかが両方分かり、発生のタイミングが分かることは、欠陥が生じた要因の手がかりにもなる。

AE法の原理を簡単に紹介する。そもそも「AE」とは、材料中に欠陥が発生した際に、エネルギーの一部が弾性波(AE波)として放出される物理現象である。この弾性波は材料中を伝播して材料表面に達すると、圧電センサで検出できる振動となる。こうして得られた振動の波形からAE源となった微小欠陥を理解しようとするのが、非破壊検査であるAE「法」である。AE法も超音波を扱うが、一般的な超音波探傷法とは異なり、超音波を発射してエコーを見る手法ではない。むしろ、これはちょうど地震観測と似ている。地震は地球の内部で断層が動くことで発生する。地表に伝播した地震波は地震計で記録でき、複数の地震計の波形を解析すれば、震源や地震の規模(マグニチュード)も分かる。これと同じことをずっと小さなスケールで見ているのがAE法であり、いわばAEは「材料中の地震」だと言える。

ただし、AE計測には地震計測にはない難しさもある。まず、金属材料中の微小欠陥で発するAE波は数百kHzの超音波であり、数Hzの地震波よりデータ量が桁も大きい。また、AE計測は地震観測よりノイズの影響が大きく、ノイズが有効信

号より強いことすらある。FSWも金属に回転するツールを押しつける加工プロセスであるため、騒音は大きい。このときに接合部周辺で小さな亀裂が生じる音を聞き分けねばならないと言え、難しさが推測できるだろう。ただし、軟化した金属材料の摩擦や振動によるノイズは、AEよりも周波数が低く、周波数フィルタで除去できることが期待はできる。

AE計測は1970年代から本格的に使われ始め²⁾、計測装置も多数市販されている。しかし、そのほとんどは社会産業インフラのヘルスマonitoringや材料試験のMonitoringなど、低ノイズの環境での計測を主用途としており、FSWを含む材料の製造加工プロセスのような高ノイズの環境では使いにくい。一般的なAE計測装置ではノイズフィルタやAE事象検出のしきい値(波形の振幅がこの値を超えると「AE事象が開始した」と見なす値)を事前に設定させている。そして、事象を検出するたびに波形を記録して振幅や持続時間などの特徴量(パラメータ)を算出している。これは低ノイズ環境では安定して機能するが、高ノイズ環境ではノイズフィルタやしきい値の設定がシビアになり、少しでも設定が不適切であるとAE事象を検出できずに計測に失敗してしまう。

そこで筆者はAEを事象単位で計測せずに、波形を連続的に記録する「Continuous Wave Memory」(CWM)を開発した³⁾。連続波形を記録してあるために、当初設定したノイズフィルタやしきい値が不相当であった場合でも、実測結果に基づいて事後に最適な条件に修正して再解析ができるため、高ノイズ環境のAE計測も容易となった。今回はCWMのFSWへの適用のみを紹介するが、CWMは溶射⁴⁾や積層造形⁵⁾など様々なプロセスのMonitoringにも有効であり、成果を挙げている。

FSWのノイズ対策と位置標定精度の高度化

最も簡単なFSW中のAE計測の設定を図1に示す。この例では、難燃性マグネシウム合金の薄

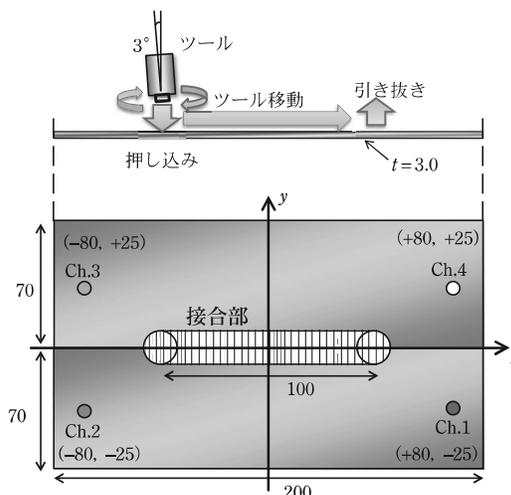


図1 FSWのAEモニタリングの模式図。

板の突き合わせ部分を接合し、周囲に4個のAEセンサを取り付けた。試料は長さ200 mm×幅70 mm×厚さ3.0 mmのAZX611である。このA, Z, Xはそれぞれアルミニウム、亜鉛、カルシウムのことであり、数字は各元素の添加量が重量で約6%, 1%, 1%であることを示している。センサはヘッドアンプを内蔵した高感度な共振型センサ(富士セラミックスM304A)を用いた。センサはシアノアクリレート系瞬間接着剤(東亜合成アロンアルフア)を用いて試料に直接貼り付けた。

AE波は伝播距離が長すぎると減衰し過ぎてセンサで検出できなくなる。一方、センサが接合部に近すぎると、センサの温度が耐熱限度を超えてしまう。環境によって限界は異なるが、接合線から25 mmという今回の距離ではセンサが一時的に100℃を超えたため、ほぼ下限だと言える。一方、AE波を検出できる最長距離はおおよそ1 m程度であった。これを超える大型構造物での実用的なAE計測では工夫が必要になるが、これについては後述する。

FSW装置は日東制機FF-20IV-FSW、ツールは茨城県産業技術イノベーションセンターの内製でショルダ直径20 mm、プローブ直径6 mm、プローブ高さ2.8 mmで右回りにネジを切ったものを利用した。ツールの前進角は3°とした。ツールの押込

量は変位制御とした。ツールは x 軸方向に移動させない状態でゆっくり押し込み、規定の押込量に達してから 5 s ほどその場で攪拌を続けて試料を十分軟化させてから接合を開始した。接合条件は、移動速度 800 mm/min、回転数 1000 rpm とし、突き合わせ部の中央の 100 mm を接合した。

センサの出力電圧は、センサ内蔵ヘッドアンプと外付プリアンプ(富士セラミックス A1002)で合計 86 dB 増幅させた。その後、前述の AE 計測装置「CWM」に入力し、電圧レンジ ± 5 V、サンプリング周波数 10 MHz、解像度 12 bit の条件で連続的にデジタル化して、全波形をハードディスクに記録した。

記録された AE 波形の時間-周波数-強度特性を評価して、ノイズフィルタや AE 事象検出のしきい値を決めた。CWM 内蔵の連続波形の STFT (Short Time Fourier Transform, 短時間フーリエ変換) では、ツールが試料に接触している間は 100 kHz 以下の成分が見られたため、これをノイズと判断し、連続波形にカットオフ周波数 100 kHz のハイパスフィルタを適用した。このフィルタ適用後の連続波形の RMS (Root Mean Square, 二乗平均平方根) を算出すると、接合時には接合条件によっても異なるが最高 200 mV 程度、非接合時には 20 mV 程度と変動が大きかった。このため、しきい値は $\pm 100, \pm 200, \pm 400, \pm 800$ mV の 4 段階に設定して、各しきい値で独立に AE 事象を検出し、最後に重複を排除した。これにより、ノイズレベルが低いとき(低いしきい値が有効に機能し、高いしきい値を超える事象はほとんど検出されない)でも高いとき(低いしきい値は定常的に超過するため機能しないが、高いしきい値が機能する)でも AE 事象が検出できた。

AE 事象の位置標定では、AE 波が到達して波形が立ち上がった時刻を正確に求める必要がある。図 2 に FSW 中に検出された AE 事象の開始時の波形の例を示す。AE 計測装置では波形がしきい値電圧を初めて超えた時刻を「トリガタイム」として記録しているが、波の真の到達時刻はこれより若干(数~数十 μ s)前であり、トリガタイムをそのま

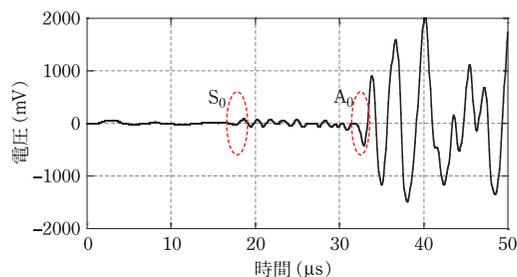


図 2 FSW 中に検出される AE 波形の例 (S_0, A_0 は各モードの波の到達時刻を示す)。

ま AE 波の到達時刻とは見なせない。CWM では Sedlak らが提案した Two-step AIC ピッカー⁶⁾を用いて立ち上がりを自動的に検出している。

固体中の弾性波は、音速の異なる複数のモードを含み、検出した立ち上がりかどのモード(音速)の波であったかを識別する必要がある。今回は試料の板厚が波長より短いため、波は板波のラム波であると推定した。試料の材質が AZX611、波の周波数が 300 kHz (実測の強度ピークと AE センサの共振周波数がほぼ一致)、板厚が 3.0 mm という条件から算出すると、ラム波の音速は高速な S_0 モードが 5200 m/s、低速だが振幅が大きくなりやすい A_0 モードが 3100 m/s となった。ちなみに、300 kHz の波の波長は、音速 5200 m/s では約 17 mm、3100 m/s では約 10 mm となり、板厚よりも確かに長くなっている。

FSW では入熱が不足すると材料の軟化が不十分で接合欠陥が生じやすい⁷⁾。今回設定した条件は故意に低入熱にしていたため、接合部には開始端から終了端まで溝状欠陥が観察され、AE 事象も多数検出された。この AE の位置標定結果を図 3 に示す。本図の縦軸は試料中央を 0 mm とした接合線上の位置、横軸は接合開始を 0 s とした時刻である。各 AE 事象は発生時刻・標定位置・事象内の最大振幅が分かるようにバブルでプロットしている。AE 事象の最大振幅は大きく異なるため、ここでは 0.1 mV を 0 dB とするデシベル値で示している。デシベル値は振幅 10 倍で 20 dB 上がるため、80 dB は 1 V に相当する。

図 3(a) は、単純に Two-step AIC で検出した立

ち上がり時刻を使用し、音速は全て S_0 モードの 5200 m/s として、各センサでの立ち上がり時刻の差から伝播距離の差を計算して標定した結果である。今回はツールが試料を「削りながら」進んだため、AE は接合と同時に発生したものと見なせる。よって、標定結果は図中に斜めの線で示した接合

位置と一致することが期待されるが、図 3(a) の標定精度は必ずしも高くなかった。こうなった理由は、ノイズフィルタの適用後でも残存したノイズがなお強く、 S_0 モードがノイズに埋もれて Two-step AIC ピッカーで第一候補として検出できなかったことが考えられる。そこで、Two-step AIC ピッカーで立ち上がり時刻の候補を 3 つまで探し、立ち上がりが A_0 モードの到達であった(音速 3100 m/s であった)可能性も含めるという改善を行った。すると、図 3 (b) のように標定結果が接合線付近に集中し、位置標定の精度を高めることができた。

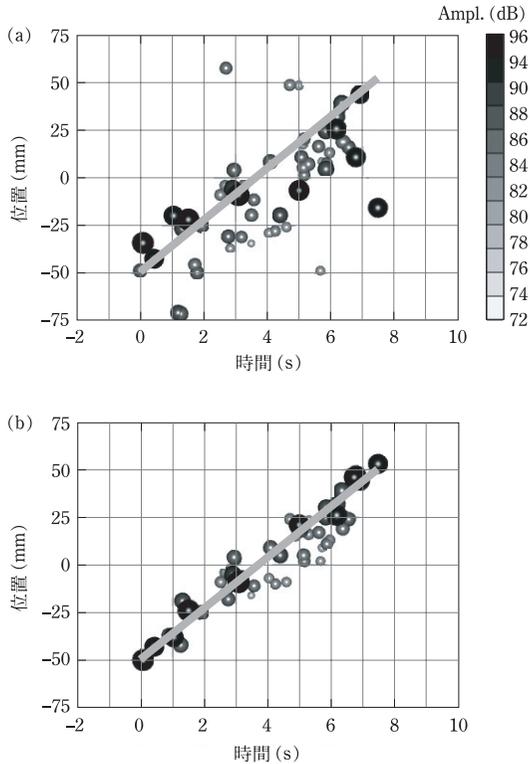


図 3 FSW 中の AE 位置標定結果. (a) 従来法, (b) 位置精度改善後.

AE モニタリングによる接合品質の評価

AE 事象を検出して発生時刻と位置が分かると、AE を発生させた要因となった微小欠陥の種類や、接合の良否を判断することができる。

接合速度 600mm/min、ツール回転数 500 rpm で行った FSW 試験で検出された AE 事象の時間と位置の分布を図 4 に示す。AE 事象は図 3 (b) と同様に接合位置付近で発生したもの(図 4 に (1) で示した範囲)だけでなく、(2) FSW 中に接合済の部分で発生したもの、(3) FSW 終了後に発生したものも見られた。このように発生した位置やタイミングが異なる AE 事象は、要因が異なっている可能性があるため、他の試験や観察で得られた情報

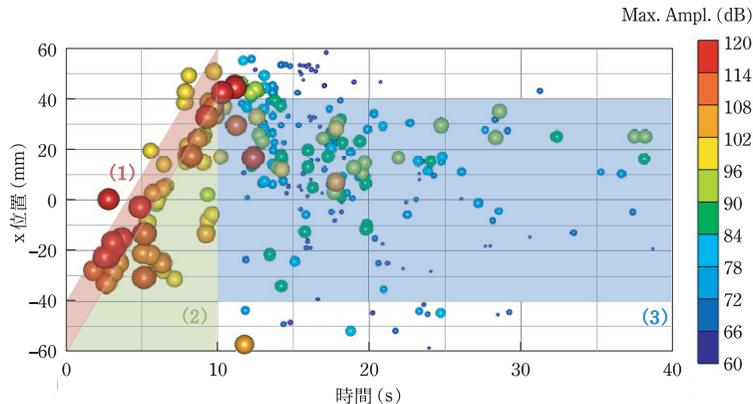


図 4 FSW 中および直後の AE 事象の標定結果.

と対比しながら推定していく必要がある。今回は試験後の試料内部の欠陥を X 線 CT や断面観察で観察した結果と AE 法の結果を比較した。すると、範囲 (1) の AE が見られた試料では、表面に現れる溝状欠陥だけでなく、表面に現れないワームホール (板の内部に、接合線に沿ったその名の通り「虫食い穴」のようなトンネルができたもの) が見られた。範囲 (3) の AE が見られた試料では、接合の始点や終点から進展した割れが見られた。接合の始点や終点は前後の未接合部によって、ちょうど板にノッチが入ったのと同じ状況になっているため、接合後に試料温度が低下して板がひずむと、このノッチの先端から亀裂が進展しやすいが、これを検出したものである。今回は接合終了直後から約 10 s 程度で、接合終端部から割れが進展したように見える。範囲 (2) の AE は観察から直接的な証拠を見つけられなかったが、比較的広い範囲で AE が一斉に発生する (図中で縦に AE 事象が並ぶ) 傾向が見られたので、板の裏面に残ったキッシングボンド (未接合部) が接合後の板の変形で開閉することとの関係が推定された。

いずれにせよ、AE 事象は何らかの欠陥に関係しており、良好な接合では AE 事象はほとんど検出されなかった。そのため、1 回の接合試験中に検出された AE 事象のエネルギーの総和を求めると、接合良好ではエネルギーが小さく、接合不良ではエネルギーが大きくなる関係が見られ、AE エネルギーで接合の良否判定を行うことができた。

可動センサと無線計測による実用的な計測

プロセスモニタリングに適した CWM のような計測装置があれば、高ノイズ環境の FSW でも AE モニタリングが可能であり、接合の良否も判定できることが分かった。しかし、実験室レベルで計測に成功しても、現場で実用的に利用できるモニタリングを達成するには、いくつか現実的な課題を解決する必要がある。

まず、モニタリングはセットアップが簡単であ

ること、プロセスの妨げになってはいけないことが必要である。具体的な事例で考えてみる。鉄道車両構体の側面の長さ 25 m の接合を行う場合、AE 波の伝播距離が 1 m とすると、試料に直接 AE センサを貼り付ける従来の方式では、接合線に沿って 2 m おきにセンサを設置する必要がある。これでは多数のセンサが必要で、プリアンプや計測装置と接続するケーブルも長大かつ多数になってしまう。また、そもそも製造中の車両構体にセンサを接着剤で取り付けることは認められにくい。センサの付け外しに時間が掛かることも問題となるだろう。

そこで、製品に影響を与えず簡単に開始できるよう、CWM を FSW の装置に組み込んで製品に影響を与えないようにし、さらに CWM を無線化してリモートからデータを取れるよう開発を行った。

図 5 に「無線 CWM」の模式図、図 6 に実験室で無線 CWM をセットアップした写真を示す。センサは FSW ツールの周辺に取り付けた治具に取り付けて、試料表面を擦りながら計測できるようにしたものである。今回は AE センサをネオジウム磁石の磁力で裏板に吸着させて試料に密着させたが、機械的な方法で試料にセンサを押し付ける設定でも構わない。AE 計測の無線化はレーザー干渉計をセンサとして用いる非接触手法¹⁾⁸⁾もあるが、現場では、圧電センサと計測装置をバッテリー駆動の小型装置にまとめ、計測結果のみを無線送信する方法⁹⁾が扱いやすく、このような装置はすでに市販もされている。しかし、バッテリー駆動のコンピュータでは演算能力が限られるため、多くの市販装置では AE 事象のパラメータのみが得られ、詳細なノイズフィルタの設定や、連続波形の取得には対応しておらず、FSW のモニタリングでは使いにくい。そこで「無線 CWM」では、連続的にサンプリングした波形データを無加工のまま無線送信し、波形解析は受信側 PC で行う方式とした。通信量は多くなってしまいが、既存の CWM と同じ波形処理を行うことができる。

無線 CWM には、高速 AD 変換器を搭載した IoT ボードである RedPitaya STEMLab 125-14 を使

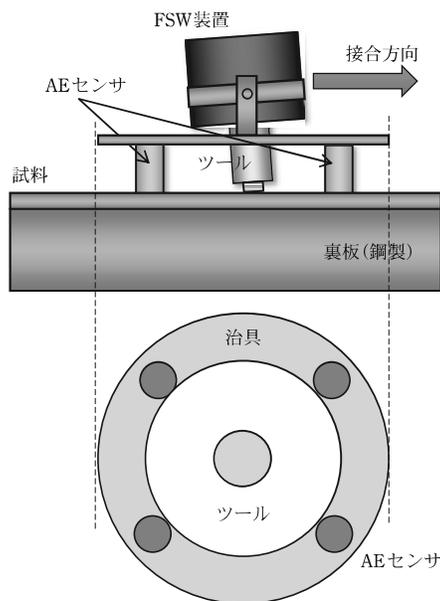


図5 無線CWMを使ったFSWモニタリングの模式図。

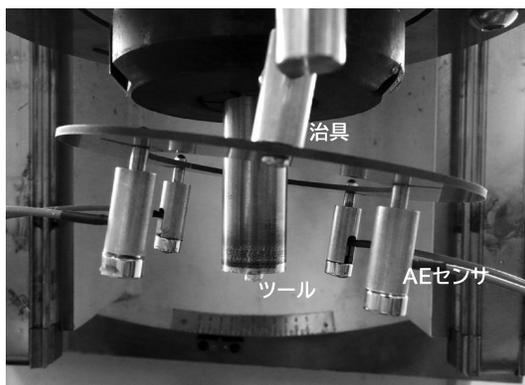


図6 可動式AEセンサとFSW装置への固定治具。

用した。このボードの処理能力 (ARM Cortex-A9, 1 GHz, 2 コア) と通信速度 (Wi-Fi 6, 最大 433 Mbps) に制限されて、AE 波形のサンプリング周波数は 2 MHz, 2 ch になったが、計測対象は 200~300 kHz の信号であるため問題にはならなかった。センサは耐熱温度が 450 K の富士セラミックス AE254-SMH0177 を使用し、FSW による高温に対応した。プリアンプは使用せず、センサを直接 STEMlab 125-14 に接続して出力電圧を測定した。波形受信後は、有線 CWM と同じソフトウェアで波形を解

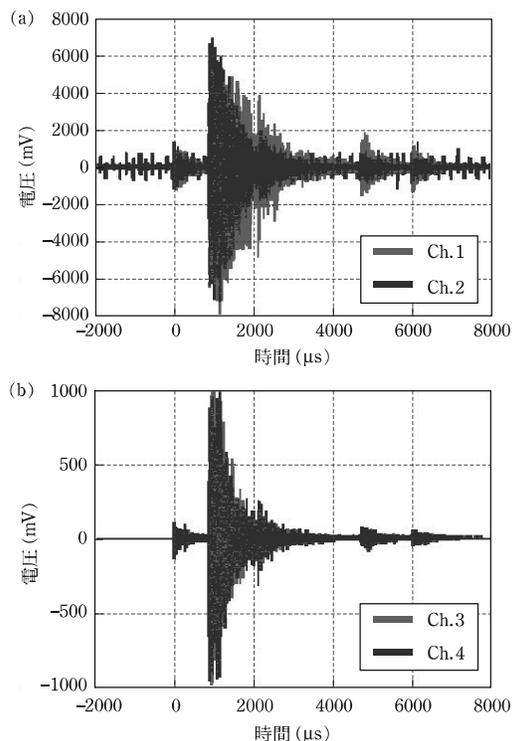


図7 同一のAE事象を(a)有線CWMと(b)無線CWMで計測した波形。

析した。

可動式センサと無線CWMを開発したことで、現場でも利用しやすい簡便で実用的なAEモニタリングが可能になった。さらに、バッテリー駆動と無線通信により、電気的なノイズの影響が小さくなるというメリットも得られた。図7は同一のAE事象を有線CWMと無線CWMで計測したものである。Ch.1とCh.2は増幅20dBのプリアンプを経由して有線CWMに接続し、Ch.3とCh.4はプリアンプを使わず無線CWMに直結したものである。このため、有線側の振幅は無線側より20dB(10倍)大きくなっているが、無線の方は断続的なパルス状のノイズが見られず、S/N (Signal to Noise) 比が高くなっていることが分かる。これは、有線計測ではセンサやCWM本体とFSW装置が同じ商用電源に接続されて電気的に導通しているため、外来の電気的ノイズが圧電素子であるセンサを振動させてしまったり、CWMのADコンバータ(アナ

ログ電圧信号をデジタイズする変換器)に影響をあたえたりしたものである。これらは真のAEと同程度の周波数帯の信号を引き起こすため、ノイズフィルタで除去しにくい。一方、無線CWMではセンサノードを通過する電氣的経路が存在しないため(絶縁されているため)、電氣的なノイズは見られなかった。

可動式センサにはデメリットもあった。まず、接合位置周囲に設置したセンサに囲まれた範囲しかAE事象の位置標定が行えず、より後方で発生したAE事象は、発生時刻は分かるが位置は標定できなくなった。また、接合後はツールと一緒にセンサも試料から離れてしまうため、AEを計測できなくなった。しかし、これまでにFSWでは接合位置の周辺数十mmでほとんどのAEが発生することが分かっていたため、これらのデメリットは大きな問題にはならなかった。

まとめ

プロセスモニタリングに対応した連続波形計測型のAE計測装置「CWM」を用いることで、難燃性マグネシウムのFSW中の微小な接合欠陥を検出し、接合品質を評価することができた。さらに、センサを直接試料に貼り付けず可動型とし、AE計測を無線化することで、大型材を含めて産業の現場でも利用しやすい計測手法として完成度を高めることができた。

謝辞

この成果は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14014)の結果得られたものである。また、東京大学榎研の皆様には共同研究者として多大なご助力をいただいた。合わせて深謝申し上げる。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 新構造材料技術研究組合(ISMA)プレスリリース, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101528.html
- 2) A. M. Hamstad: *Experimental mechanics*, **26** (1), (1986), 7-13.
- 3) K. Ito and M. Enoki: *Materials transactions*, **48** (6) (2007), 1221-1226.
- 4) K. Ito, H. Kuriki, H. Araki, S. Kuroda and M. Enoki: *Science and Technology of Advanced Materials*, **15** (3) (2014), 035007.
- 5) K. Ito, M. Kusano, M. Demua and M. Watanabe: *Additive Manufacturing*, **40** (2021), 101915.
- 6) P. Sedlak, Y. Hirose, S. A. Khan, M. Enoki and J. Sikula: *Ultrasonics*, **49** (2) (2009), 254-262.
- 7) 植松美彦, 重松一典, 山本優一郎, 今井尚樹, 野村孝彦, 福田敏彦, 柿内利文, 近藤英介: *溶接学会論文集*, **30** (3) (2012), 220-227.
- 8) M. Enoki, M. Watanabe, P. Chivavibul and T. Kishi: *Science and Technology of Advanced Materials*, **1** (3) (2001), 157-165.
- 9) A. Lédeczi, T. Hay, P. Volgyesi, D. R. Hay, A. Nádas and S. Jayaraman: *IEEE Sensors Journal*, **9** (11) (2009), 1370-1377.

いとう・かいた ITO Kaita

2009 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻修了, 博士(工学)。同専攻の助教・特任講師などを歴任後、2017 物質・材料研究機構入所。現在に至る。専門はアコースティック・エミッション(AE)法。AE法の計測装置を改良し、プロセスモニタリングへの適用拡大に注力。

ゆくたけ・えいたろう YUKUTAKE Eitaro

2005 日本大学大学院生産工学研究科機械工学専攻修了, 博士(工学)。茨城県工業技術センター任期付き研究員を歴任後、2009 茨城県へ入庁。現在に至る。専門はマグネシウム合金の加工技術であり塑性加工(プレス加工, 鍛造), 接合(固相接合), 鋳造(ダイカスト)等の広域分野。マグネシウム合金の用途拡大に注力。

えのき・まなぶ ENOKI Manabu

東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻教授。(詳細 p.18)