

Acceleration of Process Condition Optimization by Continuous AE Waveform Measurement

National Institute for Materials Science Kaita ITO

キーワード アコースティック・エミッション法, プロセスモニタリング, AE ストリーミング

1. はじめに

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission) 法は材料の微視損傷の発生や拡大が「いつ・どこで」起きたかを検出できる、ユニークな非破壊評価手法である。また、少数のセンサによる「点」の測定で、弾性波 (AE 波) が検出できる数十センチから数メートルの範囲をカバーでき、弾性波が伝搬さえすれば複雑形状でも問題ない。これらの特長のため、AE 法の適用は材料試験にとどまらず、社会インフラや機械部品の供用中のヘルスマニタリングにも広がっている。

微視損傷の発生や拡大を検出できる能力は、材料や構造物の供用前の段階、すなわち製造や加工のプロセスモニタリングでも有用であることは言うまでもない。しかし、これらのプロセス環境は振動・騒音・電気パルスなど、AE 計測にとって厄介なノイズのために計測の難易度が高いことがしばしばである。それでも、特に機械加工の分野では様々な工夫でノイズを除去し AE 法によるプロセスモニタリングが行われてきた^{1), 2)} が、これらは製品 (被加工物) 中の欠陥よりも工具の破損や劣化の検出を目的とする事例が多い。本稿は工具を対象にしないわけではないが、どちらかといえば製品の不良検出に重きをおく。

さて、AE 法によるプロセスモニタリングではノイズ対策が大切であることは既に述べたが、ノイズの要因や強度は様々であり、プロセスの段階や周辺環境によっても大きく変化する。特に初見の環境ではノイズの変化を予測できないために熟練の技術者でもノイズフィルタや AE 事象検出のしきい値電圧を適切に設定できずノイズを十分除去できない、しきい値電圧が高すぎて AE 事象が全く検出されないか低すぎてノイズばかり拾ってしまうなどの失敗が起こりえる。この難しさが AE 法のプロセスモニタリングへの適用を阻害してきた一大要因である。

筆者は AE 計測を波形の連続計測 (ストリーミング) と、デジタルデータになった連続波形の解析という処理にすることでこの問題を克服し、AE 法によるプロセスモニタリングを容易にすることを目的の一つとして、Continuous Wave Memory (CWM) と名付けた独自の AE 計測装置の開発に取り組んできた。CWM という名前は和訳すれば「連続波形メモリ」であり、その名の通り連続波形をすべて記録する。CWM は電気回路による周波数フィルタを使わず、センサが出力した増幅しただけの「生」の波形を記録する。この生波形に対し、計測中・計測後のどちらでもフィルタリングや AE 事象の検出などの解析が行える。計測開始と同時に事前設定した条件で解析も開始すれば、一般的な AE 計測装置と同様に

リアルタイムに結果が得られる。一方、もしこの解析条件が不適切であった場合は、計測途中ないし計測完了後であっても記録済の連続波形を再生し直して、修正された条件で再解析ができる。これにより、AE 計測の失敗による再試験や試行錯誤を大きく削減できる。

こうして AE 法で製造や加工のプロセスモニタリングができ、微視損傷が「いつ・どこで」起きたかが分かれば、プロセスの問題箇所を実験的に示し、条件の最適化を迅速に進めることができる。本稿では、CWM を用いたプロセスモニタリングの実例をいくつか示し、その後それらに通底する要点を説明する。

2. プラズマ溶射

発電用ガスタービンでは高効率化のため、特に高温に曝されるタービンブレードの表面には遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating) を施しており、そのうちセラミックスのトップコートはプラズマ溶射法で成膜されている³⁾。このときトップコートに割れが生じることがあるが、ブレードをくまなく検査することは大きな工数を要してしまう。また、遮熱性の向上を企図して厚膜化すると離れのリスクも高まるなど、高性能化を進めようとするればプロセス条件の最適化がよりシビアになってくる⁴⁾。

そこで AE 法によるプロセスモニタリングを行い、溶射中のセラミックトップコートの割れの検出を目指すのであるが、プラズマ溶射はブースに防音性が求められるような極めて大騒音のプロセスであり、その環境で厚さ 1mm 前後の皮膜が割れる「音」を検出することは、通常は困難である。ただし、そのノイズは噴射に伴う音響と振動であり、セラミックスの割れに合わせたセンサの共振周波数 (一般的には 150 ~ 300kHz) よりも低い場合、フィルタで除去できる。CWM では連続波形を短時間フーリエ変換した時間一周波数-強度データの任意の範囲を書き換えてから逆短時間フーリエ変換で波形に戻す、周波数ドメインのフィルタ⁵⁾ が利用できる。この溶射の例では 100kHz 以下の強度値をゼロに書き換えるハイパスフィルタと、100kHz 以上の強度値も一定値を差し引くバックグラウンドノイズフィルタを併用してノイズを除去した^{6), 7)}。図 1 にノイズフィルタの適用前後のスペクトログラムと RMS 電圧の変化を示す。フィルタリングで低周波のノイズが大幅に低下した一方、AE に伴う高周波の有効成分は残されていることが分かる。さらに、複数センサがほぼ同時にヒット (試料の大きさと音速によるが、数十 μ s 以内の時間差で各センサがしきい値

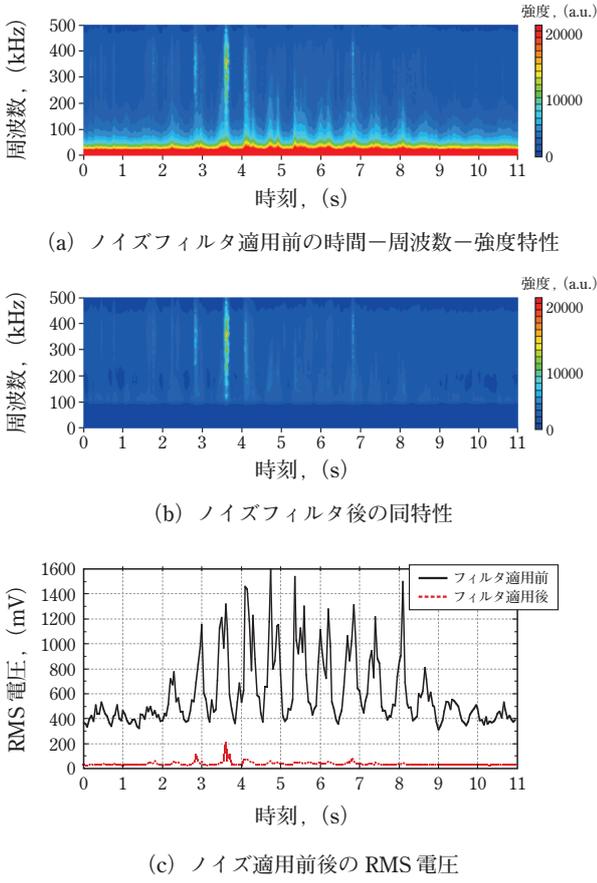


図1 溶射中に計測した AE 連続波形⁵⁾

電圧を超過)した場合のみ AE 事象と認めることで、成膜中にリアルタイムで AE を検出することができた。

こうして検出された AE 事象がトップコートの割れに起因するものであることは、いくつか溶射条件を変えて AE 計測と断面観察を行い、AE が検出された試料では割れも観察され、検出されない試料では割れもほぼ観察されないことを確認することで検証した。さらに、検出された AE のエネルギーの総和と割れの密度に相関があることも確認できた^{6), 7)}。

成膜の目標が割れのないトップコートである場合は、単純に成膜中に AE が検出されたかどうかで成膜の良否が判定できる⁴⁾。しかし、高密度な縦割れ (Dense Vertical Crack, DVC) を許容するトップコートを成膜する場合は、縦割れと横割れの AE を識別できることが必要となる^{6), 7)}。本事例では感度重視で共振型センサを使ったため、縦割れと横割れを周波数では識別できなかった。そこで、AE 事象を検出したタイミングで識別を試み、縦割れのみを起こす条件と、縦割れと横割れの両方を起こす条件とで溶射し、検出された AE の発生時刻におけるプラズマトーチの位置情報を比較した。すると、図2に示すように、縦割れのみでは AE 事象が試料の加熱中のみ検出されたが、縦割れと横割れの条件では試料の加熱中と冷却中の両方で検出された^{6), 7)}。この実験結果から、DVC の成膜では試料の冷却中に AE 事象が検出されたかどうかで良否を判定できることが示された。

このように、一度 AE と他の観察や計測と結果を突き合わせ、可能であれば理論や応力計算との整合性を確認できれば、以降は AE の検出結果のみからその要因を推定できるようになり、プロセスの良否を判定することが可能となった。

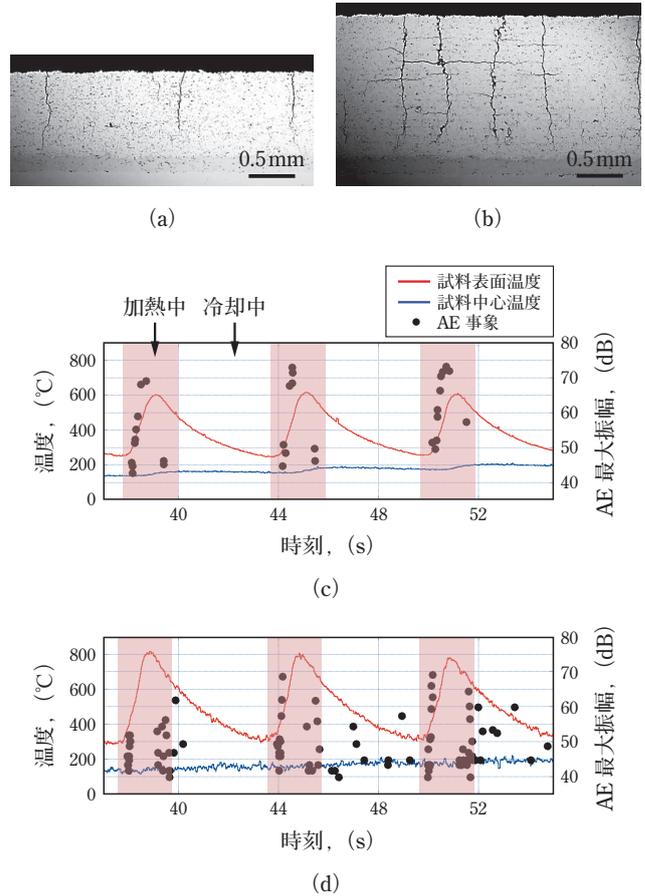


図2 (a) 縦割れのみが観察された試料断面、(b) 縦割れと横割れが観察された試料断面、(c) 縦割れのみが観察された試料の温度と AE 事象検出履歴、(d) 縦割れと横割れが観察された試料の温度と AE 事象検出履歴⁶⁾

3. 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) は固相接合法の一種であり、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材料の突合せ部に押し込み、摩擦熱で融点以下に加熱して塑性流動を起こして接合を行う手法である。FSW は溶融溶接よりも熱影響による材料劣化が少ない、シールドガス・溶接棒・ワイヤが不要、接合部の仕上がりが美しい、余盛り除去などの後加工もほぼ不要など多くの利点があり、アルミニウム合金やマグネシウム合金のような比較的融点の軽金属で広く利用されている。ただし、入熱の過剰や不足で接合不良が発生するため、良好な接合が行える条件範囲を求める必要があった。

これも、多数の試験体で接合部をすべて観察することは多大な手間を要するため、AE 法を用いたプロセスモニタリングで接合欠陥を簡便かつリアルタイムに検出できることが有用であった。FSW もプラズマ溶射と同様に大きなノイズが発生するが、やはりカットオフ周波数 50 ~ 100kHz のハイパスフィルタを適用し、複数チャンネルの同時ヒットのみ AE 事象とみなす処理によって、正常時には AE が検出されず、異常時には多数の大振幅 AE が検出されるという明確な良否判定が可能となった。

一方、FSW では大型部材を接合する事例も多く、長大な接合線に沿って AE センサを多数配置することは現実的ではないため、新たな工夫も求められた。そこで、図3のように接

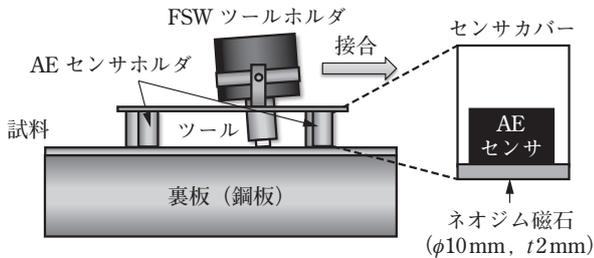


図3 摩擦攪拌接合モニタリング用の可動式 AE センサ治具

合装置と AE センサを一体にして、接合中は AE センサが板の表面に接触したまま移動して計測できる機構を用いた⁸⁾。このケースでは裏当てが銅板であることを利用して、AE センサをネオジウム磁石で吸着させる方法を採用したが、必ずしもマグネットを使用する必要はなく、バネなどで板に押しつける形でも構わない。

AE 事象は各センサへの弾性波の到達時間差を用いる一般的な方法で位置標定した。図4に横軸を時刻、縦軸を接合線上の位置として、AE 事象の標定位置をバブルで示す⁸⁾。バブルの色と大きさは AE 事象の最大振幅、図中の黒い太線は接合位置を示している。まず入熱不足となる条件で実施したところ、図4(a)のように AE が多数検出され、特に図中(1)で示したように接合位置周辺に集中していた。これは入熱不足による板表面のカジリ痕と符合していた。また、接合後も図中(2)のように始端部付近で AE が検出されており、ここでは短い割れが確認された。一方、やや入熱過剰の条件で接合すると、摩擦攪拌による可聴音ノイズは前回同様に発生していたが、一転して接合中は AE が検出されなかった。この結果から、ノイズフィルタが有効に機能したことが示された。試験後には図中(3)、(4)のように接合線の途中と終端部か

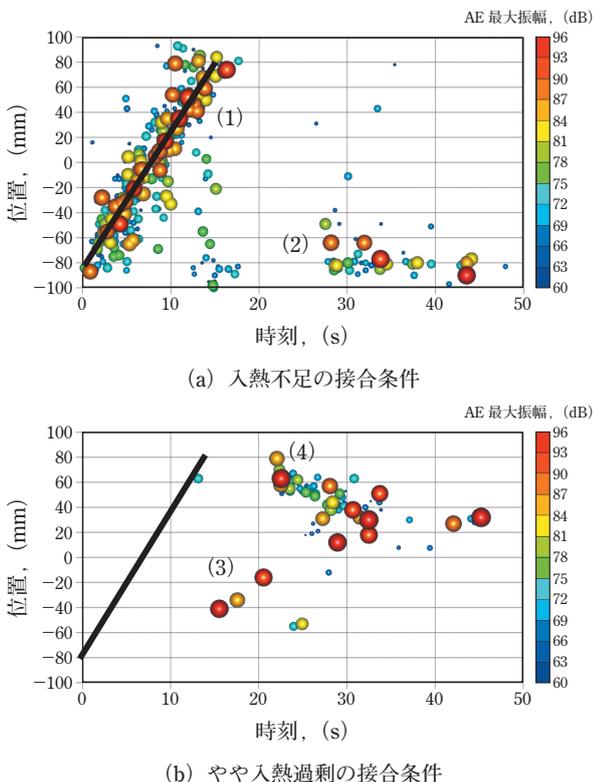


図4 摩擦攪拌接合で検出された AE 事象の位置標定結果

ら発する AE 事象の列が見られ、試験体からは符合する割れが確認された。

摩擦攪拌接合では表面から見えないワームホールや、それを起点とするクラックも発生するが、AE プロセスモニタリングで欠陥が「いつ・どこに」発生したかが分かれば全数全範囲の観察は不要になり、接合条件の迅速な最適化に有効であることが示された。

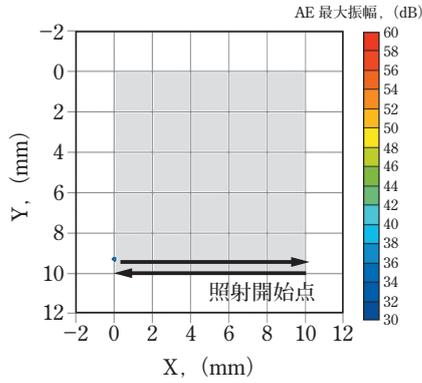
4. 積層造形

金属材料の積層造形として最も広く用いられている手法は、粉末を敷き詰めたパウダーベッドにレーザーの焦点を合わせて走査して必要な部分だけ熔融凝固させ、これを各層繰り返しながら造形するレーザー粉末床熔融結合 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 法である。LPBF に限らず積層造形は一般に金型や切削加工を要せずに複雑形状のパーツを作製できるため、少量多品種の製造に有利である。しかし、金属が熔融と凝固を繰り返すプロセスは微視損傷を生じさせやすいのに対し、一点物を含む少量多品種で複雑形状の製品は探傷が難しく、長時間の造形後に不良を発見した場合は大きなロスとなることが問題である。

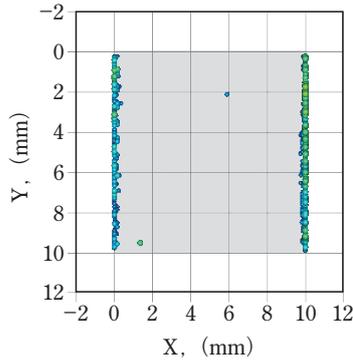
この LPBF 法でも AE 法が造形条件の迅速な最適化に有効であり、一つの基材上に異なるレーザー照射条件で同時に造形し、この過程を基材上の AE センサで検出できる。筆者らによって、LPBF 法ではレーザースポットが直上を通過してから 1ms 前後で AE が発生することがほとんどだと分かっているため、AE 事象の位置標定は各センサへの弾性波の到達時間差を用いるより、AE 事象の検出時刻におけるレーザースポットの位置を使用した方が正確になる^{9), 10)}。

図5は、10×10mm の範囲へのレーザーのジグザグ照射で検出された AE 事象をこの方法でマッピングした結果である。造形中は基材も高温になるため、AE センサは 450K 耐熱のものを用いた。各造形体は右下角を起点に左右方向に走査しながら、少しずつ上へ向かって造形を進めた。まず実操業を模擬した欠陥が発生しない想定 (レーザー出力 180W, 走査間隔 100 μ m) の結果を図5(a)に示す。想定通り、造形後の X 線 CT で欠陥は観察されず、AE もほとんど検出されなかった。次に、走査間隔を 25 μ m に狭め、レーザーの折返点付近が短時間に 2 回照射を受けるため局所的に入熱過剰となる条件の結果を図5(b)に示す。すると、AE 事象はほぼ折返しタイミングのみで検出され、X 線 CT ではこの部分に空洞が検出された。さらにレーザー出力を 360W に高め、造形範囲全体に欠陥が発生する想定で造形した結果を図5(c)に示す。検出された AE は造形後半ほど大振幅になっており、基材が加熱されて欠陥が発生しやすくなったことと一致する結果が得られた。この結果から、レーザー照射直後に欠陥が発生するという LPBF の特徴も利用して、複数条件の同時造形でもどの造形体のどの部分に欠陥が生じたかを示すことができた。

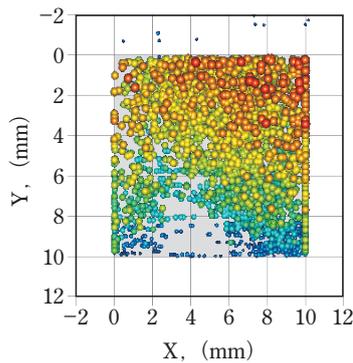
実験室レベルではこれで十分だが、製造現場では基材ごとに AE センサの接着・取り外しを繰り返すことは実用的ではなく、接着剤や露出したケーブルが粉末のコンタミネーションの原因となりえることを解決する必要がある。そこで、図6のように、AE 計測を造形装置と基材の間に挟む金属製の箱の中で行えるようにした。箱の内側の天面に耐熱型 AE センサ 2 個を取り付け、このほかに、連続波形のサンプリングと Wi-Fi



(a) 180W, 100 μ m ピッチ



(b) 180W, 25 μ m ピッチ



(c) 360W, 25 μ m ピッチ

図5 マルチトラック試験の AE 位置標定結果

送信が可能な IoT 機器とバッテリーを格納した。AE 波は造形体 → サポート → 基材 → 箱の天板 → センサと伝搬するが、すべて金属で接続ないし接触しているため減衰は小さく、AE 事象の検出に問題はなかった。

ただし、バッテリー駆動の無線装置はケーブル敷設がないため試験導入では簡便でメリットがあるが、Wi-Fi 通信速度が不足するとデータがリアルタイムに取り出せなくなる、造形条件が IoT 機器やバッテリーの耐熱温度に制限される、計測時間がバッテリー容量に依存するなどの問題があるため、プロセスモニタリングを常設化する場合耐熱型センサのみを箱に組み込み、センサケーブルを隙間から造形装置外に伸ばす有線式が望ましい。

5. AE 法によるプロセスモニタリングの要点

AE 法によるプロセスモニタリングの事例をいくつか挙げたが、これらに通底する要点は「単純な基準で良否を明確に

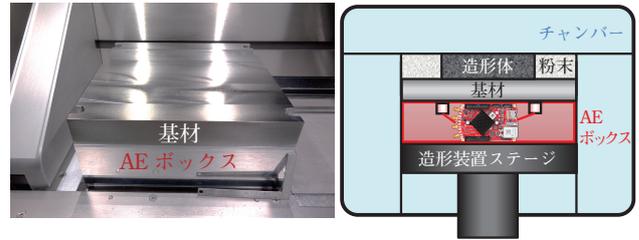


図6 箱形 AE 計測装置を造形装置と基材の間に挟んだ写真と模式図

判断できるような AE 計測を行うこと」である。理想的には、正常時には AE が全く検出されず、異常時には大振幅の AE が多数検出されることが望ましい。

これを実現するために、多くのプロセスモニタリング環境では高度なノイズ対策が必要になる。ノイズは振動などによる低周波の連続信号と、電気パルスによる高周波 (AE センサの共振周波数と同程度) の突発信号が主である。前者は金属・セラミックス・複合材料から発せられる AE 信号よりも低周波であるので、カットオフ周波数 20 ~ 100kHz のハイパスフィルタで除去できる。ただし、時間ドメインのアナログフィルタではカットオフが急峻でないため、ノイズがカットオフ周波数に近いときは除去しきれないことがある。そこで、連続波形データから周波数ドメインでノイズをカットする意義がある。ノイズが強い場合はフィルタ適用後の波形のひずみが大きくなるため波形の詳細評価は難しくなるが、AE 事象の有無で良否判定を行う程度ならば問題とはならない。一方、電気ノイズは電子制御装置や工場のような環境では電源線や信号線から侵入しやすい。対処法としては、電気ノイズの侵入を防ぐため AE センサを電氣的に絶縁すること、電源をバッテリー・ノイズフィルタトランス・常時インバータ接続型無停電電源装置から得ることが一般的である。さらに、侵入した電気ノイズを AE として誤検出することを避けるため、複数チャンネルで立ち上がり時刻が全く同一の事象や、継続時間が極端に短い事象を無視するなどの方法も有効である。

未経験のモニタリング対象では、ノイズフィルタの条件や AE 事象検出のしきい値電圧が事前には予測できないことがある。ここでも連続波形計測でフィルタ適用前の生波形を記録していれば、事後にノイズや有効信号の特徴を把握したうえで最適な解析条件を設定し、再解析できる。プロセス中にノイズや信号のレベルが変化する場合も、複数条件で解析すれば対応が可能である。

さらに、AE 波形だけを見てもその要因を推定することは困難であるため、他の観察・計測手法と結果と比較して検証する必要がある。断面観察や非破壊探傷で AE 事象の標定位置に欠陥があり、AE が検出されなかった部分には同種の欠陥が存在しないという事例を積み重ねた後は、タイミング・振幅・周波数特性などの AE 事象の特徴で、どこに何が起きたのかを推定し、プロセスの良否を AE モニタリングのみで簡便に判定することが可能となる。

6. おわりに

AE 法による微視損傷の検出は、材料試験や構造物ヘルスマニタリングだけでなく、それらの製造時や加工時のプロセスモニタリングでも利用できる。AE 計測は大型部材や複雑形状

でも適用しやすく、微視損傷の発生タイミングだけでなく位置情報も得られるため、プロセスの問題点を把握するために有用である。

ただし、プロセス中はノイズレベルが高く、不安定であることも多いため、事前に設定した固定のノイズフィルタやしきい値電圧ではAE事象の検出が困難であることも多い。そのため、連続波形を記録してノイズや信号の状況を把握してから解析を修正できる方法を採用することで、プロセスモニタリングの確度を高めることができる。

最終的に、正常時にはAEが検出されず、異常時には大振幅のAE事象が多数検出されるような明確な違いのある計測を実現することで、検査コストを大幅に下げ、迅速にプロセス条件の最適化を進めることができる。

謝辞

本稿で紹介した各研究は共同研究者の協力によって実現されました。溶射は（国研）物質・材料研究機構の黒田聖治様、摩擦攪拌接合は茨城県産業技術イノベーションセンターの行武栄太郎様、積層造形は（国研）物質・材料研究機構の草野正大様、渡邊 誠様、金属技研（株）の増尾大慈様、（株）神戸工業試験場の高田知樹様に特に多大なご協力を頂きました。AE計測装置の開発では東京大学の榎 学教授にご指導を頂きました。深く御礼を申し上げます。また、本研究の一部は内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（管理人：JST）で実施されたほか、JSPS 科研費17K14820、23K04442の助成を受けました。

参考文献

- 1) I. Inasaki : Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes, *Ultrasonics*, 36(1-5), pp.273-281, (1998)
- 2) H. V. Ravindra, Y. G. Srinivasa and R. Krishnamurthy : Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting, *Wear*, 212(1), pp.78-84, (1997)
- 3) 高橋 智：溶射による遮熱コーティング, *表面技術*, 63(5), pp.17-21, (2012)
- 4) K. Takeno, Y. Okajima, T. Torigoe, S. Kuroda and K. Ito : Advanced Techniques for Evaluation of Thermal Shock Durability of Thermal Barrier Coating, *Thermal Spray 2023: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, pp.683-688, (2023)
- 5) D. L. Donoho : De-noising by soft-thresholding, *IEEE Transaction on Information Theory*, 41, pp.613-627, (1995)
- 6) K. Ito, H. Kuriki, H. Araki, S. Kuroda and M. Enoki : Detection of segmentation cracks in top coat of thermal barrier coatings during plasma spraying by non-contact acoustic emission method, *Science and Technology of Advanced Materials*, 15(3), 035007, (2014)
- 7) 伊藤海太, 黒田聖治, 榎 学 : AEを用いた溶射プロセス計測, *溶射*, 53(4), pp.160-164, (2016)
- 8) 伊藤海太, 行武栄太郎 : AE法による難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合中のリアルタイム欠陥検出, 第127回軽金属学会春期大会講演概要, pp.241-242, (2014)
- 9) K. Ito, M. Kusano, M. Demura and M. Watanabe : Detection and location of microdefects during selective laser melting by wireless acoustic emission measurement, *Additive Manufacturing*, 40, 101915, (2021)
- 10) 伊藤海太, 草野正大, 出村雅彦, 渡邊 誠 : 選択的レーザ溶融法による金属材料造形中に発生する微小欠陥のAEモニタリング, *非破壊検査*, 70(7), pp.267-271, (2021)



伊藤 海太（国研）物質・材料研究機構
(305-0044 茨城県つくば市並木 1-1)
マテリアル基盤研究センター 材料モデリンググループ 主任研究員
東京大学助教・特任講師などを歴任後、
2017年 物質・材料研究機構に入所。日本非破壊検査協会 AE 部門幹事, 新素材部門幹事。
専門は AE 法。博士（工学）
URL : https://samurai.nims.go.jp/profiles/ito_kaita