

積層造形と AFP の非破壊評価

選択的レーザー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

(国研) 物質・材料研究機構 伊藤 海太 草野 正大 出村 雅彦 渡邊 誠

AE Monitoring of Micro-defects Occurrence during Selective Laser Melting Method of Metals

National Institute for Materials Science Kaita ITO, Masahiro KUSANO, Masahiko DEMURA and Makoto WATANABE

キーワード 選択的レーザー溶融法, 3Dプリンタ, アコースティック・エミッション法, 無線計測

1. はじめに

付加製造 (Additive Manufacturing) 法は CAD データを取り込み、切削加工を要せずに複雑形状でも作製できるため、少量多品種のパーツの作製法として近年注目されている。本手法は日本語で積層造形、英語で Rapid prototyping とも通称されてきたが、2009年に米国材料試験協会 (ASTM) の国際標準化会議において「材料を付着することによって物体を三次元形状の数値表現から作製するプロセス」を Additive Manufacturing と呼ぶことが定まり (ISO/ASTM FDIS 52900)、日本語では「付加製造」(JIS B 9441:2020) と呼ぶこととなった¹⁾。付加製造には光重合 (光造形)、材料押出堆積 (Fused Deposition Modeling) など様々な手法が含まれるが、本稿で紹介する選択的レーザー溶融 (Selective Laser Melting) 法は、粉末を敷き詰めたパウダーベッドに対し、レーザーを熱源として溶融凝固を繰り返しながら造形を行う手法であり、金属材料も使用できることが大きな特長の一つである。そのため、航空宇宙分野向けの高強度難加工材料である、Ni 基合金パーツの製造に対しても積極的な研究開発が進められている。しかし、金属が溶融と凝固を繰り返すというプロセスのため、造形中に材料内部に微小欠陥を生じやすいことが、部材の性能と信頼性を損なう問題である。

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission) 法は、この造形中の微小欠陥発生について、in-situ の実測情報を提供できることが期待できる数少ない手法である。SLM 法に対する AE 法の適用にはいくつか先行事例があり、Shevchik ら^{2) - 4)} はニューラルネットワークを用いて、AE 波形のウェーブレット変換結果 (時間一周波数特性) から造形品質を推定できることを示した。また、造形中の微小欠陥の生成過程を高速 X 線観察で捉え、前述のウェーブレット変換結果と対照し、微小欠陥生成時の AE 波の周波数成分の差異を示した。Eschner ら⁵⁾ は、AE 波形の時間-周波数特性から、造形物の密度を推定している。これらの例では造形条件に対する造形品質を評価するには有用であるが、AE を事象単位では処理しておらず、AE 発生源すなわち微小欠陥の位置標定の情報は含んでいない。SLM 法で AE 位置標定まで行われた事例はほとんどないが、SLM 法と同じくレーザーを材料加工に用いるレーザークラッキング法では、Wang ら⁶⁾ が 2 個の圧電センサを使用し、加工線に沿って発生した AE 事象とクラックを対応させた例がある。しかし、SLM は不活性ガスで置換されたチャンバ内で行われるため、AE 計測のため

に多数の電源線や信号線でチャンバの内外をつなぐことは容易ではなく、現場では何らかの無線計測へのニーズが高い。先行研究ではマイクロフォンなどを用いた事例⁷⁾ もあるが、これは位置標定が行えない。無線で AE 位置標定が可能な手法としては、我々の研究グループでは過去にヘテロダイン干渉計を用いたレーザー AE 計測装置を開発し^{8), 9)}、セラミックコーティングの溶射などの積層プロセスでの微小欠陥の検出にも成功したが^{10), 11)}、安定的に光路を維持することが容易ではないので、造形の現場では有線ケーブルの接続以上に難易度が高いと思われる。そこで、センサ自体の無線化とは別のアプローチとして、圧電センサと AE 計測機をバッテリー駆動の小型装置にまとめ、計測結果のデータのみを無線送信する方法があり、既に市販もされている¹²⁾。しかし、その多くはバッテリー駆動の計測機の計算能力に限られるため、得られるデータは AE 事象のパラメータのみとなり、ノイズフィルタリングや、AE 発生メカニズムの分析に有用な波形データの取得に十分対応することは困難である。

そこで本研究では、AE センサを接続し、連続的にサンプリングした波形データを無線送信できるバッテリー駆動のセンサノードを開発し、波形解析はチャンバ外に設置した PC で行える独自開発の「無線 Continuous Wave Memory」¹³⁾ を利用した。なお、本研究は SLM プロセスを無線 CWM でモニタリングし、造形中の微小欠陥を検出してその発生時刻と位置が得られることを示すことが目的であるため、単層の造形で素過程を詳細に評価することとした。ただし、本手法は積層造形においても同様に適用できることが十分期待できるし、我々の研究グループでも現在手法を開発中である。

2. 方法

長さ 30mm の直線 1 本のみレーザーを照射するシングルトラック試験 (1D 造形) と、10mm × 10mm の領域内をジグザグに照射するマルチトラック試験 (2D 造形) を行った。図 1 に基材上の造形位置とセンサ位置を示す。造形には SLM Solutions 社製 SLM280HL を用いた。基材と粉末の材料は Hastelloy X、基材は幅 100mm × 奥行 100mm × 厚さ 2.0mm の平板を用いた。この基材上に厚さ 50 μ m のパウダーベッドをつくり、シングルトラックでは表 1 の条件で図中の右から左へ造形した。マルチトラックでは表 2 の条件で造形範囲の右下を起点として左右方向に走査しながら、少しずつ上へ向かって範囲を広

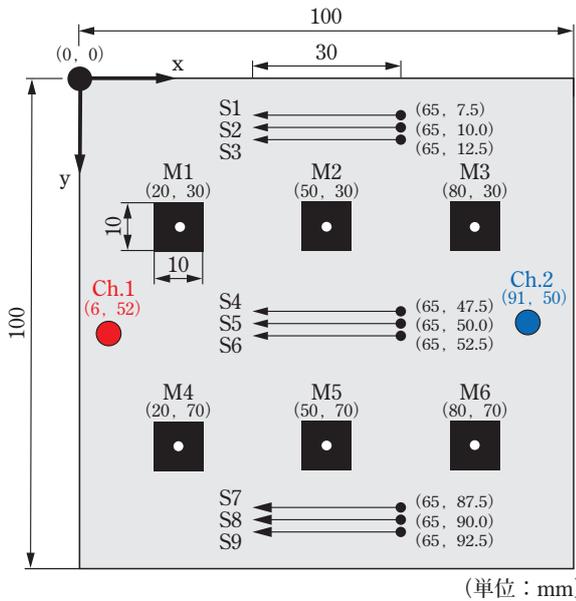


図1 基材上の造形位置と AE センサ位置

表1 シングルトラック試験の造形条件

試験番号	レーザー出力 (W)	走査速度 (mm・s ⁻¹)
S1, S4, S7	700	250
S2, S5, S8	700	900
S3, S6, S9	300	900

表2 マルチトラック試験の造形条件

試験番号	レーザー出力 (W)	トラック間隔 (μm)	走査速度 (mm・s ⁻¹)
M1	540	100	900
M2	360		
M3	180		
M4	540	25	
M5	360		
M6	180		

げるように造形を行った。このうち、入射エネルギー密度が最低の M3 が実用的な造形条件に近く、ほとんど割れが発生しないことが経験的に分かっている条件であり、これ以外は割れを誘発するために取って入射エネルギーを高くした試験である。

マルチトラック試験では長時間のレーザー照射で基材が高温になるおそれがあったため、AE センサに 450K 耐熱の富士セラミックス製 AE254-SMH0177 を使用した（ただし、実際には耐熱温度を超えることはなかった）。今回は一層のみ造形するため、センサは簡単のため基材表面の一部で粉末層を除去し、瞬間接着剤（東亜合成製アロンアルファ®）で接着する方法を用いた。当然、積層（3D）造形のモニタリングを行う際は、リコータに接触しないよう、センサを基材側面や裏面に設置する必要がある。センサと無線 CWM のセンサノードはローノイズ同軸ケーブルで直結し、アンプは使用しなかった。今回センサノードとして用いた RedPitaya STEMLab 125-14 は計測電圧レンジ ±1V、解像度 14bit であるため、計測電圧の分解能は約 120μV (2000mV/2¹⁴) と高精細であり、アンプなしでも十分な計測が行えた。STEMLab 125-14 では非標準のファームウェア

を使用して、高速連続サンプリングを可能にした。センサノードの消費電力は約 4W であり、市販のスマートフォン用モバイルバッテリーから USB で +5V DC 給電される。本実験では最初の実験である S1 の開始前から、最後の試験 M6 の終了後数分まで連続的に 1.95MHz でサンプリングを行った。各試験の間には 2 分程度のインターバルをおいた。波形データは無加工でセンサノード内蔵の microSDXC メモリカードに記録され、同時に IEEE 802.11ac 仕様の Wi-Fi で、チャンパ外の PC へ全部がリアルタイムに転送され、そこで解析が行われた。

波形解析では、まずカットオフ 50kHz のハイパスフィルタを連続波形に適用し、造形装置の振動などによる低周波ノイズの除去を行った。造形装置ではサーボなどからパルス状の電気的ノイズも発生しているが、本実験ではセンサノードがバッテリー給電であるため、サーボ → 造形装置 → センサ → センサノード（計測機）→ 電源線という経路でのノイズ侵入がほとんど見られなかった。ノイズフィルタは周波数領域で適用した。つまり、連続波形に対して順に短時間フーリエ変換（Short time Fourier transform）・カットオフ周波数以下の強度値を 0 に書き換え（Spectrum subtraction）、逆短時間フーリエ変換を適用した¹⁴⁾。

次に、しきい値交差法で AE 事象を検出した。AE 事象は 4 段階のしきい値電圧（±2.5mV, ±5mV, ±10mV, ±20mV）で検出された事象の和集合を用いた。今回、基材は厚さ 2mm で AE 波の波長（センサの共振周波数 250kHz では、音速にもよるが 10 ~ 20mm 程度）より薄い板であることから、AE 源とセンサが基材の同一面上であることから、本実験では Lamb 波の S₀ モードと A₀ モードが検出されると推定し、実測した音速 5.1 × 10³ m/s と 2.9 × 10³ m/s で発生位置を標定した。

3. シングルトラック（1D）造形の結果と考察

3.1 結果

シングルトラック試験では、入射エネルギー密度が最も高い試験 S1, S4, S7 でのみ AE 事象が多数検出された。図 2 にその典型として試験 S4 における AE 事象の発生時刻（レーザー照射開始を 0ms とする）と、AE 事象の標定位置とその時刻のレーザー照射位置との差を示す。この差が正であることは、AE 事象がレーザースポットの通過後に発生したことを意味する。図中のバブルは AE 事象に対応し、色と大きさで最大振幅を表している。なお、0dB はセンサノード入力端で 100μV である。全 289 事象のうち、64 事象で波形の立ち上がりが明確に検出でき、位置標定が行えた。位置標定には ch.1, 2 への波形の立ち上がり時刻の差と、前述の Lamb 波 S₀, A₀ モードの音速を用いた。なお、原則として立ち上がり時刻は Sedlak らの手法¹⁵⁾ に基づいて CWM が自動的に算出した値を用い、10μs 以内に立ち上がりが二つ検出された場合はそれらが S₀, A₀ モードに対応し、一つのみ検出された場合は比較的振幅が大きくなる A₀ モードのみが検出されたものとした¹⁶⁾。ただし、自動判定結果は目視確認し、立ち上がり時刻やモードに明らかな誤認があった場合は、手動で修正を行った。その結果、標定位置と照射位置の差は平均 -0.062mm と、ほとんどゼロであった。差の絶対値の平均は 2.2mm、標準偏差は 1.6mm であった。なお、レーザーの照射前はもちろん、照射終了後も AE 事象は検出されなかった。

3.2 考察

シングルトラック試験では前述のとおりレーザー照射とほぼ

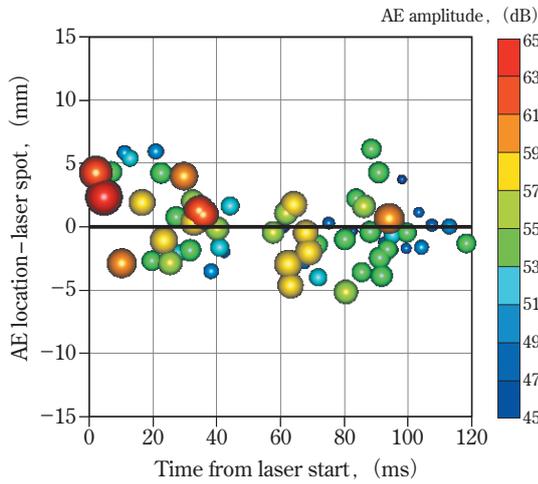


図2 試験 S4 の AE 標定位置とレーザスポットの位置の差

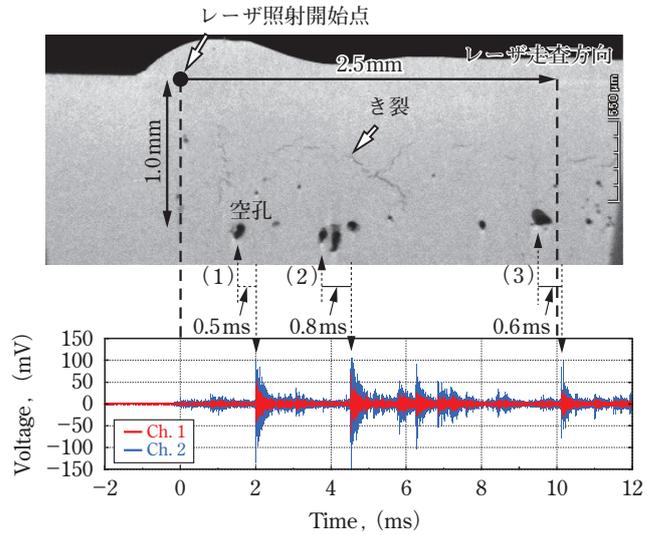


図3 実験 S4 の試料断面の X 線 CT 画像と AE 波形の関係

同時かつ同位置で AE が発生していた。標定誤差も波長の数分の一であり、高精度の位置標定ができたと言える。このことから、AE はレーザ照射の通過によって粉末と基材が短時間だけ溶融する過程で発生したものと推定できる。

この結果をさらに検証すべく、試験後の試料を X 線 CT で観察して、観察される微小欠陥と AE の関係を調べた。図3は、図2と同じ試験 S4 の始端部付近の試料断面を捉えた画像と、ここをレーザで照射したときの AE 波形を示している。レーザの走査速度は 250mm/s であったため、図3では CT 画像の 2.5mm と波形の 10ms を同じ横幅で表示している。本試験は通常の造形条件（試験 M3 と同程度）と比べて非常に大きな入射エネルギー密度であったため、溶融池は最大で約 1mm の深さとなり、その最深部にキーホール型の空孔が並んでいた。また、これより浅い位置には多数のき裂も確認された。特に大きな空孔 (1) ~ (3) を見ると、それぞれレーザが直上を通過し、すなわち空孔が生成してから 1ms 以内に大きな AE 事象が見られた。これ以外にも AE 事象も多数認められたが、これらも

含めて、微小欠陥は凝固直後に溶融池およびその周辺での微小欠陥の発生または進展を検出したものと考えられる。

この結果から、今回のように微小欠陥がレーザ照射とほぼ同時かつ同位置に発生したと見なせる場合は、AE 事象の発生時刻におけるレーザの照射位置を微小欠陥の位置と見なすことができ、これによって位置標定の精度を高める（誤差 1mm 未満）ことができる。

4. マルチトラック (2D) 造形の結果と考察

4.1 結果

マルチトラック試験でも、入射エネルギーの高い（レーザ出力が高くトラックピッチの狭い）試験ほど多数の AE 事象が検出された。ここでは、シングルトラック造形の知見に基づき、AE がレーザ照射と同時かつ同位置に発生したものと見なして、発生タイミングによる位置標定を行った。図4に試

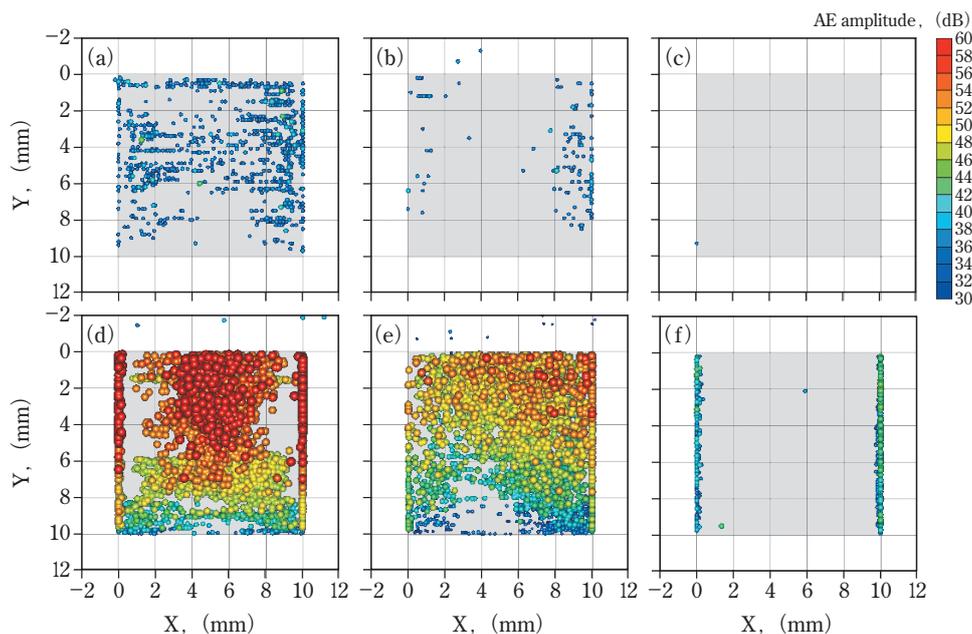


図4 マルチトラック実験での AE 位置標定結果
(a) M1, (b) M2, (c) M3, (d) M4, (e) M5, (f) M6

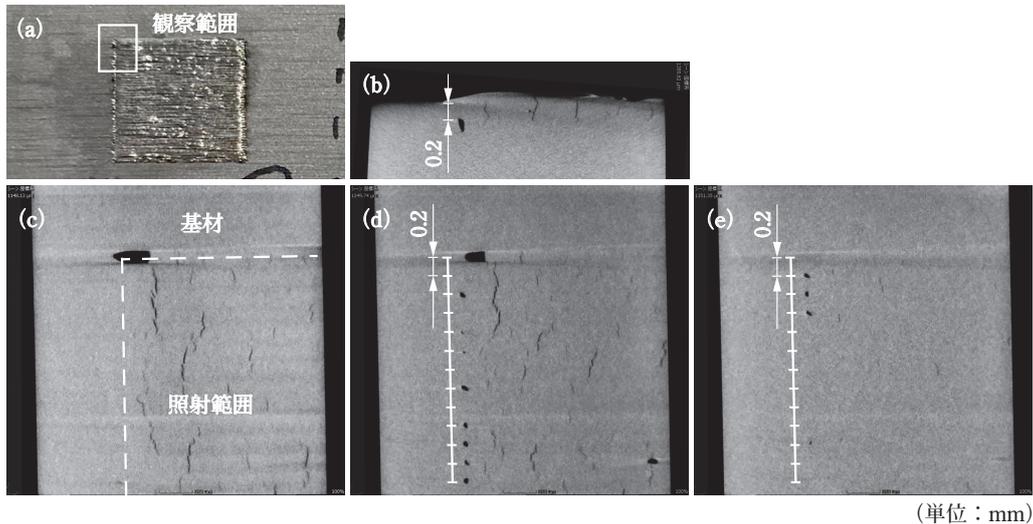


図5 試験 M1 の折返し部付近の X 線 CT 画像

(a) 造形部全体の中での観察領域, (b) トラックに沿った断面, (c) 深さ 0.1mm, (d) 0.2mm, (e) 0.3mm の断面

験 M1 ~ M6 の AE 検出結果を示す。欠陥が発生しにくいと事前に予想されていた実験 M3 のみ AE 事象がほとんど検出されず、他の造形条件ではいずれも多数の AE 事象が検出された。折返し部付近では AE 事象が集中的に検出されたが、これらはすべてがトラックの開始時に発生したものであり、終了時に発生したものはなかった。なお、実験 M4 は AE 信号の活動度が高すぎ、すべての AE 事象を正常に検出できていない可能性が高い点に留意が必要である。

4.2 考察

シングルトラック試験の AE 挙動の理解をもとに、マルチトラック試験でトラック開始時（折返し部）に AE 事象が集中的に検出された現象も説明できる。折返し部は前のトラックの造形のため加熱された直後に次のトラックの造形が始まるため、局所的に入射エネルギーが高いこと等しくなり、他の部分よりも AE が発生しやすい、すなわち微小欠陥が発生しやすいものと推定できる。これを観察した例として、図 5 に試験 M1 の折返し部付近の X 線 CT 画像を示す。(a) に示すように、造形の終盤である試料の左上隅を観察した。(b) はトラックに沿った断面で、折返し部の深さ 0.2 ~ 0.3mm に空孔があり、それ以外の部分でも表面から深さ 0.2mm 付近まで数本のき裂が見られた。(c) ~ (e) は表面から深さ 0.1, 0.2, 0.3mm の断面を見たもので、(b) で確認された空孔やき裂が、他のトラックでも同様に発生していたことが確認できた。空孔の間隔がトラックピッチの 2 倍である 0.2mm 間隔であることも、ジグザグに照射が行われたことから説明できる。このほかの試料でも、AE が多数検出された試料では多数のき裂が見られ、M3 では欠陥はほとんど確認できず、M6 では折返し部付近のみ欠陥が見られた。

5. おわりに

AE 波形の連続計測と無線転送が行えるバッテリー駆動の独自開発装置「無線 CWM」を用い、SLM 造形装置のチャンバにケーブルを貫通させるような改造を加えない簡便な手法で、造形中の微小欠陥の発生をリアルタイムにモニタリングできることが示された。その結果、レーザ強度が高い条件ないし部分において、レーザ照射とほぼ同時かつ同位置で微小欠陥が生じ、

これに伴う AE 事象を検出することができた。マルチトラック試験では、折返し部に AE が集中する様子が確認された。本手法はこのまま積層造形にも利用可能と考えられ、SLM プロセスのモニタリング手法として有効であると言える。

謝辞

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 (SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(管理法人: JST) によって実施されました。

参考文献

- 1) 蒲生秀典: デジタルファブリケーションの最近の動向—3D プリンタを利用した新しいものづくりの可能性—, 科学技術動向 2013 年 8 月号, (2013)
- 2) S. A. Shevchik, C. Kenel, C. Leinenbach and K. Wasmer : Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks, *Additive Manufacturing*, 21, pp.598-604, (2018) <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.012>
- 3) S. A. Shevchik, G. Masinelli, C. Kenel, C. Leinenbach and K. Wasmer : Deep learning for in situ and real-time quality monitoring in additive manufacturing using acoustic emission, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, 15, pp.5194-5203, (2019) <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2910524>
- 4) S. A. Shevchik, T. Le-Quang, B. Meylan, F. V. Farahani, M. P. Olbinado, A. Rack, G. Masinelli, C. Leinenbach and K. Wasmer : Supervised deep learning for real-time quality monitoring of laser welding with X-ray radiographic guidance, *Sci. Rep.*, 10, 3389, (2020) <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60294-x>
- 5) N. Eschner, L. Weiser, B. Häfner and G. Lanza : Classification of specimen density in Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) using in-process structure-borne acoustic process emissions, *Additive Manufacturing*, 34, 101324, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101324>
- 6) F. Wang, H. Mao, D. Zhang, X. Zhao and Y. Shen : Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis, *Appl. Surf. Sci.*,

- 255(5), pp.3267-3275, (2008)
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.09.039>
- 7) D. Kouprianoff, N. Luwes, E. Newby, L. Yadroitsava and I. Yadroitsev : On-line monitoring of laser powder bed fusion by acoustic emission: Acoustic emission for inspection of single tracks under different powder layer thickness, 2017 Pattern recognition association of South Africa and robotics and mechatronics international conference (PRASA-RobMech), pp.203-207
- 8) M. Enoki, M. Watanabe, P. Chivavibul and T. Kishi : Non-contact measurement of acoustic emission in materials by laser interferometry, Sci. Tech. Adv. Mater., 1, pp.157-165, (2000)
[https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(00\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(00)00017-6)
- 9) M. Watanabe, M. Enoki and T. Kishi : Fracture behavior of ceramic coatings during thermal cycling evaluated by acoustic emission method using laser interferometers, Mater. Sci. Eng. A, 359, pp.368-374, (2003)
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00394-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00394-0)
- 10) K. Ito, H. Kuriki, M. Watanabe, S. Kuroda and M. Enoki : Detection of AE events due to cracks in TBC during spraying process, Mater. Trans., 53, pp.671-675, (2012)
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MBW201118>
- 11) 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, Sci. Tech. Adv. Mater., 15, 035007, (2015)
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/035007>
- 12) (たとえば) Á. Lédeczi, T. Hay, P. Volgyesi, D. R. Hay, A. Nádas and S. Jayaraman : Wireless acoustic emission sensor network for structural monitoring, IEEE Sensors J., 9, pp.1370-1377, (2009)
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2019315>
- 13) K. Ito, K. Takahashi and M. Enoki : Noise tolerant and wireless AE measurement system for process monitoring, J. Acoustic Emission, 36, S23-S26, (2019)
- 14) D. L. Donoho : De-noising by soft-thresholding, IEEE trans. on information theory, 41, pp.613-627, (1995)
<https://doi.org/10.1109/18.382009>
- 15) P. Sedlak, Y. Hirose, S. A. Khan, M. enoki and J. Sikula : New automatic localization technique of acoustic emission signals in thinmetal plates, Ultrasonics, 49, pp.254-262, (2009)
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.09.005>
- 16) K. Ito and M. Enoki : High-precision source location of AE event using automatic error correction of signal rising time, J. Acoustic Emission, 34, S46-S49, (2017)



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) 統合型材料開発・情報基盤部門 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)



草野 正大 (国研) 物質・材料研究機構 (305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1) 構造材料研究拠点 研究員
 2016年3月に東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻博士課程を修了後、物質・材料研究機構に着任。超音波の研究開発に携わる傍ら、積層造形の研究にも従事。博士 (工学)



出村 雅彦 (国研) 物質・材料研究機構 (305-0044 茨城県つくば市並木 1-1) 統合型材料開発・情報基盤部門 部門長
 1995年金属材料技術研究所 (現在の NIMS) に入所, 日本金属学会代議員。専門はデータ駆動構造材料。博士 (工学)



渡邊 誠 (国研) 物質・材料研究機構 (305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1) 構造材料研究拠点 接合・造型分野 分野長
 2004年物質・材料研究機構に入所, 溶射学会理事, 金属学会編集委員を歴任。専門は 3D 積層造形, 破壊力学。博士 (工学)