

**第 23 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス**

(株) 富士セラミックス 山本 伊織

## 1. アコースティック・エミッション総合コンファレンスの概要

当該コンファレンスは 1977 年に第 1 回が開催され、2 年ごとに開催され、2021 年 11 月 4、5 日の開催で第 23 回を迎えている。主催は(一社)日本非破壊検査協会アコースティック・エミッション部門で、多くの学会が協賛している。開催方法はオンラインのみである。

プログラム案序文に「アコースティック・エミッション(AE)法は、破壊音の発生に伴って材料内部を伝搬する弾性波を検出する技術です。この特長を生かし、金属やセラミックス材料等の非破壊検査をはじめ、コンクリートや木材、各種構造物の内部で発生する破壊現象の解明や健全性評価、地熱開発での貯留計測、鉱山内岩盤の健全性モニタリングなど、様々な分野で用いられています。AE 法とその関連技術は、幅広い分野で多くの研究実績を挙げていることからわかるように、今後ますます重要度を増していくと考えられます。さらに、AE 法と近年急速な進歩を続けている情報通信・処理技術である IoT (Internet of Things)や AI (Artificial Intelligence)等との組み合わせにより、様々な分野でのブレークスルーが期待されます。」との記載(第 22 回と同文)があり、今回のコンファレンスでは、【金属材料】、【生産工学, 材料加工】、【複合材料, 高分子材料】、【医療】、【社会インフラ①②】、【波形解析・信号処理】、【計測システム】の 8 セッション、26 編の発表があった。

今回の第 23 回の発表内容について筆者が興味を持った 3 編の発表を紹介したい。なお、講演概要内の図表は著作権の関係で省略する。

## 2. 発表内容紹介

## 【金属材料】

相対湿度変化時における腐食した炭素鋼の AE 発生挙動

(株)東芝 上野 佳祐

本研究は、乾湿の変化が大きな大気中を模擬した環境下において、鋼の腐食によって生成した錆箇所からの AE 発生挙動について明らかにすることを目的としたものである。予め一部を腐食させた SS400 炭素鋼板を恒湿恒温槽に設置し、相対湿度を変化させた状態における AE を測定した。相対湿度を 90%で 2h 保持したのち、50%へ一定の速さで降下させ、その後 2h 保持させた。湿度を降下させる途中のタイミングにおいて AE の発生頻度が急増し、再び湿度が一定となった後、緩やかに発生頻度が減少する特徴がみられた。腐食面の材料分析結果を踏まえ、AE 発生頻度が急増するメカニズムについても考察した。

キーワード：AE, 炭素鋼, 腐食, 相対湿度

## 1 実験方法

図 1 に実験概要を示す。試験体は炭素鋼板 SS400(250mm×250mm×7.5mm)を用いた。鋼板は、事前

に 3mass% 塩水 3ml と 1ml を 2 か所中央付近に滴下し、その後室内環境(25~30℃、50~70%)で放置した。3ml 滴下した方は、約一日経過後に鋼板表面に軟質の黄褐色腐食物が形成されたが、この腐食物をプラスチックのヘラを用いて削り除去した。最初の滴下後から約 7 か月経過するまで錆を形成させた。以下、形成された錆のうち 3ml 滴下してできた錆を錆 a、1ml 滴下してできた方の錆を b とした。

図 1 実験セットアップ

鋼板は恒湿恒温槽内に設置した。鋼板の 4 隅に AE センサを設置し、AE 信号は、プリアンプで 40dB 増幅させた。温湿度のプログラム運転により、槽内の温度は 35℃一定とし、相対湿度は開始時に 90% で 2hour 保持させた後、50%へと低下させ、その後は 50%で 2hour 以上保持させた。降下時間を 4 条件と変えて行った。

## 2 実験結果

図 3 に、条件別における、AE 振幅(dB)(0dB=1 $\mu$ V)と相対湿度の時間変化を示す。

図 3 AE 振幅と相対湿度

赤点は錆 b 側、黒点は錆 a 側に位置標定された AE を示している。

錆 b の方は、相対湿度が下限の 50%に到達しても AE の発生は持続し、しばらくして緩やかに発生頻度が減少している。一方、錆 a は 50%RH に到達した時点では AE 発生頻度は減少しており、以後ほぼ発生しなかった。この結果について、以下に腐食面の分析結果と合わせて考察した。

図 5 は錆 b 断面の EPMA 分析結果であり、反射電子像と CI 分布の結果である。断面には数  $\mu$ m 幅の目立った水平方向のき裂が確認された。CI については、表面の付近の他、内部にも高濃度の領域がみられた。また、XRD 分析を行った結果、4 つの化合物が同定された。

図 5 錆 b 断面の反射電子像 (上段) と CI 分布 (下段)

腐食生成物と内部の塩化物が吸湿性を示すことで、錆中に水分が取り込まれ腐食が進む。乾湿繰り返しの過程では、腐食部における水分量の変化が起こることで、特に湿潤あるいは乾燥状態への移行過程において腐食速度が増大することが示されている。本実験における湿度下降時における AE 発生頻度の増加は、一時的な腐食速度の増大に起因していると考えられる。また、錆の体積が厚く、塩化物の濃度が高い錆 b は、相対湿度下限値(50%)に達した直後は水分が残存しているため腐食反応が持続しており、錆が乾燥するにつれ腐食発生が緩やかに減少していったと考えられる。

### 【生産工学, 材料加工】

AE 法によるニッケル基超合金のレーザ積層造形中の欠陥評価

東京大学大学院 小椋 莉菜子

Selective Laser Melting (SLM)は、航空宇宙産業において需要が高まっているニッケル基合金部材の製造プロセスとして有望であるが、高速なレーザスキャンによる溶接凝固を繰り返すプロセスであり、プロセス中に欠陥がどこで発生しているのかの評価が課題である。そのため本研究では金属積層造形中に発生する AE 信号を計測・解析した。AE 事象の発生タイミングとレーザの照射位置を結びつけることで位置評定を行った。さらに積層造形後の試料を X 線 CT で観察し、微小欠陥と AE 解析結果を比較することで、AE 法でニッケル基合金の SLM における微小欠陥の検出や全体的な造形良否を評価することを本研究の目的とする。

キーワード : Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, Process monitoring

Reliability estimation

## 1. 実験方法

本研究では試料としてニッケル基超合金 Inconel738L を使用し、造形には SLM ソリューションズ社製 SLM280 型装置を用いた。反りによるエラーを抑制するために基材と造形物を繋ぐよう造形したサポートの上に、レーザの走査速度と出力を変化させて 10mm×10mm×10mm のサンプルを複数造形し、結果を比較した。Fig.1 に造形条件を示す。レーザの走査速度は 100  $\mu$  m、層の厚さは 30  $\mu$  m とし、レーザを縦横交互に繰り返し動かしながら一度に 8 つの試料を造形した。(Fig.2)

Figure.1 Scan speed and laser power

Figure.2 Illustration of the used exposure strategy

(a) odd-numbered layers, (b) even-numbered layers

本研究グループで開発した CWM(Continuous Wave Memory)で積層造形中に発生する AE 信号を計測・解析した。AE センサは富士セラミックス製共振型の M304A を 4 つ使用し、基板の側面に設置した。Fig.3 において試料の上を示した番号は Fig.1 の造形条件と対応している。AE 事象は 10,40,80,160,320,640mV のしきい値を用いて得られたものの和集合として抽出した。AE 事象はレーザの照射位置で発生しているとし、レーザの照射位置と AE 事象の発生タイミングを結び付けることで位置評定を行った。積層造形後の試料の欠陥観察は X 線 CT を用いて行った。

Figure.3 The position of AE sensors

## 2. 実験結果

各試料で検出された AE エネルギーの合計をプロットした結果を Fig.4 に示す。横軸はスキャン速度、縦軸はレーザの出力を示す。試料 4 と 7 は途中で表面に凸凹ができてしまい、パウダーベッドをリコートする際にリコーターが試料に引っかかってしまう恐れがあったため、試料 4 は 35 層目、試料 7 は 113 層目で造形を停止した。造形停止する前の試料 4、7 の AE エネルギーの合計は他の試料に比べると大きい傾向にあった(Fig.4(a),(b))。また造形停止までには至らなかった試料 6 も他の試料と比べると AE エネルギーが大きい傾向にあった(Fig.4(c))。試料 4、7 は入熱過多のため造形不良を起こしやすい条件であり、試料 6 もそれに近い条件であったため、AE 法によって試料の造形不良をモニタリングできる可能性が示された。

Figure.4 AE energy of each sample

(a) 1-35<sup>th</sup> layer, (b) 1-113<sup>th</sup> layer, (c) 1-333<sup>th</sup> layer

試料 1、試料 6 の造形後 Z = 5mm ~ 7mm の範囲の位置評定の結果を Fig.5 に示す。横軸、縦軸は造形範囲を示す。試料 1 では造形範囲の四隅に AE が集中していた(Fig.5(a))。一方で試料 6 ではレーザの折り返し部分に AE が集中していた(Fig.5(b))。また試料 1、試料 6 の Fig.5 で四角く示した部分の Z = 6mm の X 線 CT の結果を Fig.6 に示す。試料 6 では多数のき裂や空孔が見られた(Fig.6(b))。一方で試料 1 でも赤い丸で示した部分にき裂が見られた。

Figure.5 Source location of AE events (Z=5 mm ~ 7 mm)

(a) sample 1, (b) sample 6

Figure.6 The observation by X-ray CT

(a) sample 1, (b) sample 6

## 【計測システム】

### AE センシングのボールペン書き味評価への応用

#### —インキ種別によるトライボロジー特性評価—

埼玉工業大学 長谷 亜蘭

ボールペンの書き味は、主に先端部チップとインキによって決まる。そこには、トライボロジー現象が大きく関わり複雑である。本研究では、ボールペン書き味評価への AE センシングの応用を試みた。ボールペンのインキに関しては、一般的な油性染料、書き味が優れた油性染料、水性染料、ゲルインキの 4 種類で比較実験を行った。その結果、筆記時の摩擦抵抗の変化では捉えられない摩擦現象を AE センシングでは捉えられることが確認できた。また、AE 信号振幅の変化のみならず AE 信号周波数成分の割合から、ボールペンインキ種別によるトライボロジー特性を評価・解析できる可能性があることが分かった。

キーワード：トライボロジー、ボールペン、インキ、書き味評価、AE 周波数

#### 1. 実験方法および AE 計測条件

図 1 は、本研究で使用した実験装置および AE 計測システム構成の概略図である。ピン・オン・フラット型の往復摩擦試験機を用いて、ボールペンのリフィル(替芯)がピンに固定できるようにした。試験紙は、フラット側(ステージ上)に固定した。本実験では、ボールペンの外装品を外し、チップ(先端ボール径：0.7mm)とリフィルのみを使用し、リフィルは紙面と垂直に固定した。AE センサは広帯域型センサを使用し、図 2 に示すようにチップ近傍の側面に設置した。また、ピン試験片固定部の板ばねにひずみゲージを貼り付け、筆記抵抗(摩擦抵抗)を計測した。

評価するボールペンは、一般的な油性ボールペンと書き味が優れたボールペン、水性染料、ゲルインキで比較実験を行った。

AE 計測条件は、増幅率 100dB とし、50kHz ハイパスフィルタを用いた。AE 信号評価には、AE 平均値電圧(AE 信号振幅)および AE 信号源波形を用いた。

図 1 実験装置概観および AE 計測システム構成の概略図

図 2 摩擦系の概略図

#### 2. 実験結果および考察

##### 2.1 インキ種別による AE 信号周波数特性変化

本実験の結果、摩擦抵抗の変化にあらわれないインキ性能の差を AE センシングで捉えられることを確認した。これは、チップにおける微視的な摩擦現象を捉えているためである。図 3 は、各ボールペンでの筆記中に検出された AE 信号源波形の周波数スペクトルの経時変化である。

AE 信号強度は、(c)水性染料、(d)ゲルインキ、(a)油性染料の順で大きくなっている。これは一般的な書き味の良さの順列と一致する。潤滑下のすべり摩擦実験における AE 信号計測から、膜厚比による摩擦状態の変化を高感度に検出できることが分かっている。したがって、インキの粘度及び滲出量の変化によるボール・受座間の摩擦状態を捉えていると言える。

図 3 インキ種別による AE 信号原波形の周波数スペクトルの経時変化

##### 2.2 AE センシングを用いたボールペン書き味評価

ボールペンの書き味を左右する原因を追究するため、AE 信号源波形の周波数解析結果を活用してみる。ここでは、図 3 の周波数スペクトル平均から、周波数成分ごとの信号割合を算出した。先行研究で得られた知見から、0~0.2MHz は摩擦現象、0.2~0.5MHz は表面突起および表面下の塑性変形・き

裂進展、0.5～1.0MHz はアブレイブ摩擦、1.0～1.5MHz は凝着摩擦のように分類している。図 5 は、その分類した周波数成分ごとの信号割合で AE 平均値電圧を整理した結果である。これより、水性染料およびゲルインキの摩擦に関する周波数成分割合は、油性染料に比べ大きいことが分かった。この結果は、実際のインキ種別によるボール受座の摩擦量の実測値と傾向が一致する。したがって、本手法を用いてボールペンの書き味や寿命を左右する因子を特定できると考えられる。

図 5 インキ種別による周波数成分ごとの AE 信号割合の比較