

# AE法と数値解析による 材料の微視変形解析

白岩 隆行\*

## 1. はじめに

この度、日本金属学会奨励賞をいただいた。これまでにご指導ご鞭撻いただいた先生方や企業・研究機関の研究者、学会関係者の方々、研究室の学生諸君に深く感謝申し上げます。今後の研究活動の励みにしたいと思う。それと同時に、本賞はきちんと研究に向き合うようにとの先生方からの厳しい叱咤激励であると受け止めている。一層身を引き締めて、研究に取り組もうと思う。本受賞は、アコースティック・エミッション(AE)法と数値解析によるものであった。数値解析については優れた論文がいくつもあり、本稿の著者はほとんどそれらを利用しているに過ぎない。本稿では著者が最近取り組んでいるAE法を用いた材料評価について紹介するのが適切であると思った。AE法はそのユニークな特徴から魅力的な計測手法であると認識されながらも、計測や解析にノウハウが多く存在し、手を出しにくいと思われる材料研究者も多いようである。浅学の著者がこのような題目で執筆することはおこがましいことであると思いつつも、AE法の有用性や今後の材料研究における使い道について議論するきっかけになればと思う。以下では著者が最近取り組んできた研究例を2, 3取り上げた後に、現在取り組んでいる数値解析とAE法の融合研究について述べる。個々の研究の詳細については著者らの原著論文<sup>(1)-(3)</sup>を参照いただければ幸いである。

## 2. 高強度鋼の水素脆化割れのクライテリオン導出

非破壊検査法としてのAE法は、欠陥の生成や変形・破壊といった動的な現象を検出する手法として利用される。材料

中で欠陥や微視的な変形が生じると、弾性波が生じる。その弾性波が材料中を伝わって表面に設置された圧電素子等のセンサにより電気信号に変換されたものがAE信号である。そのような異常を検出する手法としてAE法を利用した例が、本章で述べる高強度鋼の水素脆化割れの評価である。

近年、鋼構造物や輸送機器の軽量化のために高強度鋼の需要が高まっているが、高強度鋼の溶接においては信頼性の観点で大きく二つの課題が残されている。ひとつは溶接継手の疲労強度が母材よりも著しく低いこと、もうひとつは水素感受性が高く溶接部において低温割れが起きうることである。疲労に関しては有限要素法(FEM)やマイクロメカニクスを用いた数値解析により溶接継手の疲労性能を予測する枠組みを提案した<sup>(4)(5)</sup>。開発した計算モジュールはMIIntシステム<sup>(6)</sup>において稼働中である。一方で、低温割れに対する実用的な予防策は、溶接前に予熱を与えることで水素拡散を促進させ、局所的な水素の集積を防ぐことである。過剰な予熱は製造コストや微視組織への影響の観点から望ましくないため、低温割れを防ぐための限界予熱温度の予測が必要である。炭素当量(Pcm, CEN等)を用いた限界予熱温度決定法では十分な予測精度が得られないため、近年、数値解析手法により溶接部の伝熱・応力場・水素拡散挙動を計算する試みが行われている<sup>(7)</sup>。さらに低温割れを予測するためには、有効なき裂発生クライテリオンの導出が求められる。そこで著者らは、高強度鋼の水素脆化割れをAE法を用いて検出し、き裂生成のクライテリオンを導出することを試みた<sup>(1)</sup>。図1は980 MPa級鋼について、熱処理条件や初期水素量を変化させて、SSRT(Slow Strain Rate Test)試験中のAE測定を行ったものの一例である。図に示すように、試験片中央に導入したノッチ近傍で振幅の大きなAE信号が検出され、矢印

\* 東京大学大学院工学系研究科；講師(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Microscopic Deformation Analysis of Materials by AE Method and Numerical Analysis; Takayuki Shiraiwa (School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: Acoustic emission, fracture, finite element analysis, machine learning, inverse analysis, hydrogen embrittlement, composite, dislocation, data assimilation

2022年6月6日受理[doi:10.2320/materia.61.488]

で示すようにき裂発生応力( $\sigma_{AE}$ )を推定できた。き裂発生応力は初期水素濃度の増加とともに減少することを確認した。さらに、FEMによりSSRT試験中の局所水素濃度を計算することで、き裂生成の限界条件を局所水素濃度と最大主応力の関数として整理した。関数の形は津崎らのグループが提案しているもの<sup>(8)</sup>を利用した。導出されたクライテリオンが有効であるか確認するために、実際にy形溶接割れ試験を行い、溶接直後から48時間AE計測を行った。AEセンサはマグネット式のものをを用いることで、溶接後に簡便に取り付けることができた。溶接後の累積AEエネルギー及びエネルギーレートの例を図2に示す。低温割れが生じた条件では、いずれの条件でもAEエネルギーレートに明らかなピークが見られ、き裂発生時刻を推定することができた。FEMにより溶接ルート部における最大主応力と局所水素濃度の変化を求め、SSRT試験から得られたクライテリオンに代入したところ、き裂発生時刻は最大主応力-局所水素濃度曲線がき裂生成限度曲線を越える時刻と概ね一致し、SSRT試験から導出されたき裂発生クライテリオンの有効性が示された。さらにその結果をもとに、溶接継手の割れ率や限界予熱温度を予測する手法を提案した。

以上のようにAE法を用いることで材料内部の破壊を検知し、数値解析により応力や水素濃度といった状態量を計算することで、破壊のクライテリオンを導出することができた。低温割れに関連する計測技術として、X線回折や中性子回折による残留応力測定、y割れ試験後の割れ率計測、昇温脱

離ガス分析法(TDS)や二次イオン質量分析法(SIMS)による水素分析技術があるが、いずれも基本的には静的な計測手法である。これらの計測ではいつ・どこで事象が発生したか特定することが容易ではない。一方、AE法では現象を直接見ることができないが、いつ事象が起きたか知ることができ、ある程度の位置標定もできる。上記のような計測とAE法を組み合わせることで相補的な解析を行うことで破壊現象の全容がわかるのではないかと思う。

### 3. LPSO型Mg合金の変形機構解析

前章の研究では、AE信号の発生タイミングのみに注目して解析を行った。我々が音を聞いて、その音の高低や強弱を感じ取るように、AE信号にも周波数特性や強弱の時間変化の情報が含まれる。これらAE波形の特徴は、AE波を放出する現象と関係しているはずである。従って、AE波形の周波数特性や波形の形状を解析することで、AEを放出する現象(AE源)の分類ができると考えられる。このような考えのもとに、材料試験中に発生するAE信号の周波数スペクトラムを教師なしクラスタリング手法(k-means法等)に適用することでAE信号を分類することがよく行われる。このような手法は簡便であり何も考えずに実施できるという利点があるが、一般に時系列データの解析においてk-means法による分類自体が失敗することはよくある<sup>(9)</sup>。それに気づかずAE信号をクラスタリングした結果だけを採用して、研究者の直感や判断によって都合のよい解釈をすることもあってはならないかと懸念する。AE法は間接的な手法であるので、他の観測手法により各AEクラスタの物理的意味を注意深く考える必要があるだろう。また計測される周波数特性は、AEセンサの種類や試験片形状によって変化することにも注意が必要である。以上のことから、多くの材料研究において、AE信号を教師なし学習により分類することに対して、疑問に思うところがあった。そのような中、近年熊本大学で開発されたLPSO型Mg合金の変形機構解析に取り組む機会に恵まれた。この合金では、従来のMg合金とは異なり、キンク変形が生じることにより強化されると言われている<sup>(10)</sup>。高強度を示すMg<sub>89</sub>Zn<sub>4</sub>Y<sub>7</sub>押出材は $\alpha$ -Mg相とLPSO相の二相から構成される。そこで著者らは、 $\alpha$ -Mg単相とLPSO単相の材料をそれぞれ準備し、圧縮試験中にAEを放出する現象を超高速度カメラにより直接観察し、得られたデータを教師データとして「教師あり」学習することで、二相の押出材中のAE信号を分類することを検討した。

圧縮試験装置の計測系を図3に示す。AE波形を連続的に取得するために、伊藤らの開発したCWM<sup>(11)</sup>を用いた。前述の水素脆化割れの実験を含め、著者らのAE計測ではもっぱらこの装置を利用させていただいている。高速度カメラは島津製作所のHPV-X2を使用した。一般的な高速度カメラは画像を記録するメモリがイメージセンサの外部にあるため、撮影速度は信号線による制約を受ける。ここで使用した高速度カメラは、イメージセンサにメモリを内蔵させ、撮影中はチップ内部に映像信号を記録し、撮影後に外部に読み出

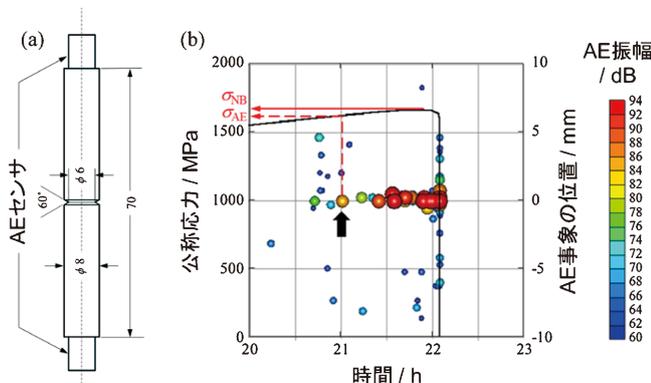


図1 (a) SSRT試験片の形状, (b) AE位置標定の結果。(オンラインカラー)

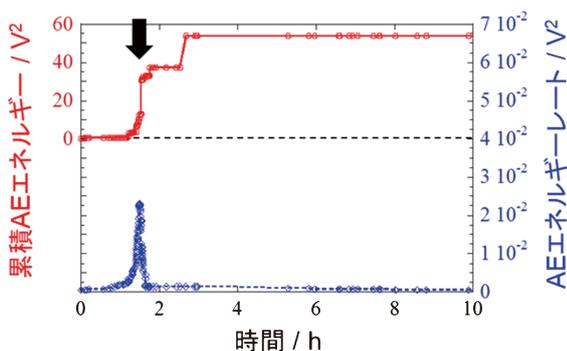


図2 y形溶接割れ試験中のAEエネルギーの変化。(オンラインカラー)

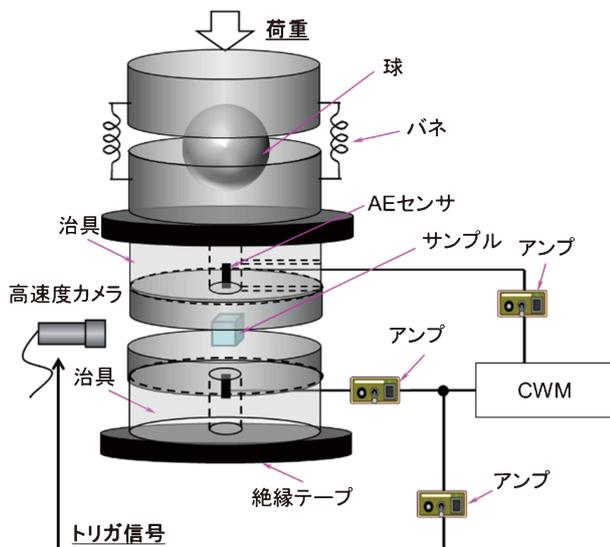


図3 AE センサと高速度カメラを備えた圧縮試験装置. (オンラインカラー)

すことにより1000万FPSの超高速撮影を実現したものである<sup>(12)</sup>. AE信号の周波数帯は通常100kHz-数MHzであり10MHz程度のサンプリングレートで計測するため、AE計測と同様の時間分解能を持つことになる. ただし、その構成上、記録可能な画像枚数が限られるという欠点がある(高解像度モードで256枚). そこで試験中に得られるAE信号を増幅し、高速度カメラに撮影のトリガとして入力することとした. AEは発生からセンサ表面への伝播、センサによる圧電変換、アンプによる増幅を経て高速度カメラに入力される. ここから高速度カメラ内部のディレイを差し引くと、一連の動作に10 $\mu$ s程度かかることを確認した. したがって、AE信号をトリガ入力することで、高速度カメラの内蔵メモリに格納されている画像を取り出せば、AE発生の約10 $\mu$ s前から25.6 $\mu$ s間の映像を0.1 $\mu$ sの時間分解能で撮影できる. 実際に撮影した画像を図4に示す.  $\alpha$ -Mg相の双晶変形と、LPSO相のキンク変形を明瞭に観察することができた. 双晶は瞬時に生成した後に幅方向に成長するのに対し、キンク帯はくちばしの先端から生成し、数 $\mu$ sかけて長手方向と幅方向の両方に成長した. 同様の観察を繰り返すことで、AE波形と双晶/キンク変形を1対1に結びつけたデータを収集した. 双晶によるAEは特定の周波数帯にピークを持つが、キンクによるAEはブロードな周波数特性を持つことがわかった. 双晶またはキンクにラベル付けされたAE波形を教師データとして、機械学習によりAE信号を分類する分類器を作成した. オーバーフィッティングに注意しつつ、いくつかの機械学習手法を比較したところ、サポートベクトルマシン(SVM)が最も分類性能が高いことがわかった. 機械学習の手順を図5に示す. このような分類器を用いて、高強度を示すMg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub>押出材及びMg<sub>89</sub>Zn<sub>4</sub>Y<sub>7</sub>押出材の圧縮試験中のAE信号を分類した. 分類結果は、途中止め試験においてSEM-EBSD解析によりキンク帯や双晶の観察をした結果と矛盾しないものであった. したがってAE法により試験中の双晶・キンク発生挙動を連続的に捉えることができた

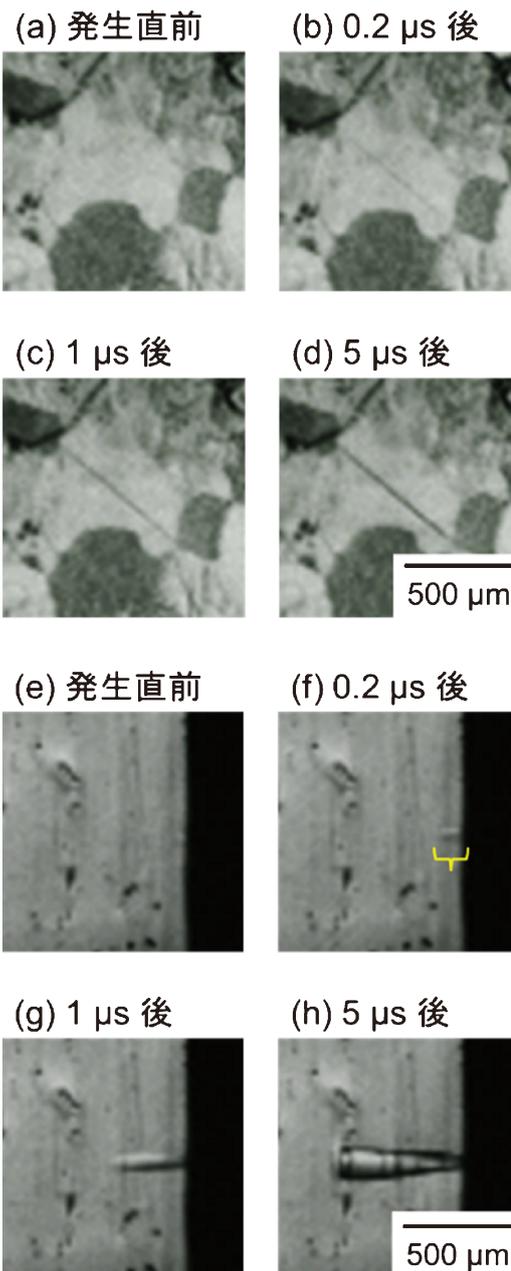


図4 (a)-(d) 純Mgにおける双晶変形, (e)-(h) LPSO相におけるキンク変形の高速度撮影結果. (オンラインカラー)

言える. また各クラスターのAE事象の発生時刻を点過程モデルにより解析したところ、双晶・キンク変形ともに非ポアソン過程であることがわかった. すなわち、各AE事象は独立ランダムに発生しているのではなく、過去の事象に何らかの影響を受けていることを示唆するものであった. 最近地震学で用いられる点過程モデルを用いて、各事象間の相互作用をより詳しく解析している<sup>(13)</sup>. 以上のように、光学的な観察手法により材料表面においてAE源を特定し、それを教師データとして用いることで材料内部を含めて試験片全体で発生したAE事象を分類することを提案した. AEと物理現象を紐付けられるという点で強力な手法である.

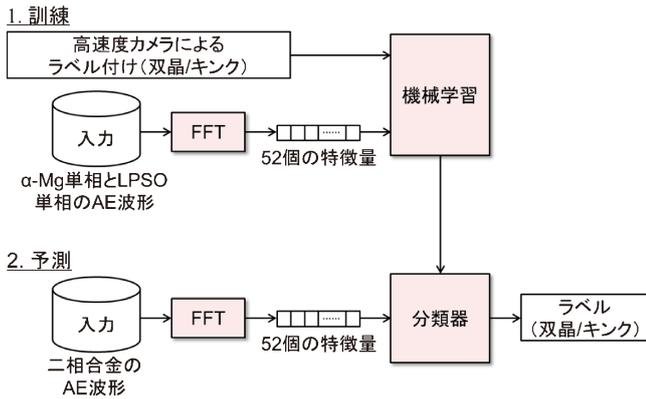


図5 教師あり学習による AE 信号の分類。(オンラインカラー)

#### 4. SiC/SiC 複合材料の破壊機構解析

前章のように AE 源を直接観察できるケースはまれである。実際に高速度カメラによる撮影と AE 信号を対応づける作業は大変なものであった。計測される AE 信号の多くは材料の内部の現象により発生するので、高速度カメラによる表面観察は空振りすることの方が多かった。1回の圧縮試験で数百回のトリガ撮影が行われるように調整すると、表面にキックや双晶が出てくれるのが数回という程度の成功率であった。そこで本章で述べる研究では AE 以外の観測データがない状態で、観測者によらず AE のデータを分類するにはどのようにすればよいか考えた。

SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料は、従来の耐熱合金(Ni 基合金)の限界使用温度よりも約 200°C 高い耐熱性を示し、重量は約 1/3 である。航空機エンジンの高温部用材料として期待されている。一方で、材料の信頼性確保と検査技術確立のためには、その複雑な破壊挙動を定量的に評価することが必要である。そこで SiC/SiC 引張試験中に発生した AE について、累積 AE イベント数を以下の混合ガウス分布及び混合ワイブル分布で表現した。

$$G_K(\sigma) = \sum_{i=1}^K \frac{a_{Ki}}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\sigma - b_{Ki}}{\sqrt{2c_{Ki}^2}} \right) \right\},$$

$$W_K(\sigma) = \sum_{i=1}^K p_{Ki} \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{\sigma}{q_{Ki}} \right)^{r_{Ki}} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで  $\sigma$  は正規化応力、 $K$  は混合分布の要素数、 $a_{Ki}$ ,  $b_{Ki}$ ,  $c_{Ki}$  は  $K$  個のガウス分布から構成される混合分布の定数、 $p_{Ki}$ ,  $q_{Ki}$ ,  $r_{Ki}$  は  $K$  個のワイブル分布から構成される混合分布の定数である。解析者によらず、観測データから  $K$  を決めるために、要素数が  $K=1$  から 8 の場合について、各パラメータの推定をマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法により行った。パラメータ数が多いため、局所解へトラップされることを避けるために、逆温度を導入したレプリカ交換 (RE) MCMC 法<sup>(14)</sup>を用いた。また解析後に各パラメータの事後分布から確率的複雑さ<sup>(15)</sup>を算出しモデル選択を行った。RE-MCMC による解析とモデル選択を 100 回行った結果を図 6 に示す。要素数 2 の混合ワイブル分布が適切なモデルであることが示唆された。一方で、各応力において試験を中断し

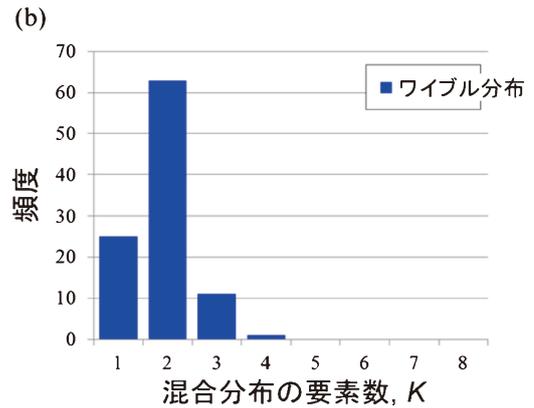
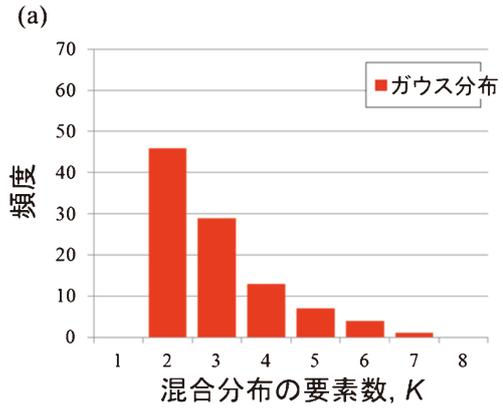


図6 SiC/SiC 複合材料の引張試験において計測された AE 信号のモデル選択結果(試行回数100回)。(オンラインカラー)

た試験片について、断面のき裂を観察したところ、き裂は縦方向繊維束内のき裂、横方向繊維束内のき裂、マトリックス割れの 3 種類に大別された。各き裂の増加傾向と比較することで、混合ワイブル分布の 2 つの要素分布のうち、ひとつはマトリックス割れと横方向繊維束内のき裂、もうひとつは縦方向繊維の破断に対応することが示された。以上のように、教師データとなる AE 信号がない場合にも、情報量規準を適用することで、AE イベントを複数の分布に分類できることが示された。しかしながら、各要素分布がどのような現象に対応するかを検討するためには断面観察などの他の計測が必要であることが課題である。最近鉄鋼材料や Mg 合金の疲労き裂進展にも同様の解析手法を適用している<sup>(16)</sup>。

#### 5. AE 信号と数値解析モデルのデータ同化

前章では、AE 信号と結びつく観測データがない場合について考えた。この場合、得られる結論は定性的なものに限られる。一方で、著者らは近年、マテリアルズ・インテグレーションの開発というテーマにおいて、疲労破壊や延性破壊の数値解析を行ってきた。数値解析は定量的な結果を出すことができるが、境界条件や構成則の選択、パラメータ較正が解析結果に大きく影響を与えることを勉強した。最近計算機性能が著しく向上しており、複雑な数値解析モデルを用いることはそれほど難しくないので、モデルが複雑になるほど、モ

