# AE応用技術の最近の動向と今後の展望

Recent Trend of AE Technology : Its Application and Future Prospects

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授 Manabu Enoki

# C ししまします。

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission、 AE) 法とは、構造物において損傷が発生する際に放出される 弾性波を検出して、発生した損傷の程度を推定する手法であ る。構造物における"地震"を計測・解析する手法と考える ことができる。そのためリアルタイムのモニタリングが可能 であり、いつ損傷が発生したかがわかる。これは他の非破壊 検査手法にはない利点である。また、損傷の発生をとらえる ため損傷の検出感度も比較的高く、計測に用いる弾性波の周 波数も超音波探傷と比べると低いので、センサから比較的遠 くの損傷も見つけることができる。そのため、ひとつのセン サで広い範囲の観測が可能である点も特徴のひとつである。 雑音と損傷による信号の区別が難しい場合も多いという欠点 も有しているものの、このような利点から材料・機械分野を はじめとして土木・建築分野などで広く用いられている。

AE法は、超音波探傷と同様に超音波を用いて物体内の欠 陥や損傷を見つける手法である。しかし、超音波探傷が発信 した超音波の反射や透過の仕方を調べて、欠陥の有無を検出 するのに対して、AEは欠陥自体が発生する弾性波を測定し て欠陥を評価するところに大きな違いがある。材料からの AEとしては、錫を曲げたときに双晶変形を起こして鳴る「錫 鳴り」がよく知られている。多くの金属材料において、微視 破壊、塑性変形、相変態等により、最終破断以前の多くのAE が発生し、破壊過程の解析や最終破断時期の予測などに用い ることができる。あるいは、複合材料のように、繊維破断、母 材割れ、界面はく離等の多数の損傷発生源を有する場合にも AE法は有効であり、さらにはく離した面の接触等による二 次的なAEも重要な情報を与えることがある。

ー般的な装置の構成としては、圧電素子を用いて表面の振 動を電圧に変換するセンサ、センサから出力を増幅するプリ アンプ、周波数フィルタ、パラメータ処理・波形収録・波形 東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 助教 Kaita Ito

解析を行うAE解析装置が用いられる。波形信号から得られ るパラメータを用いて、損傷の程度の推定が可能である。さ らに、多チャンネルの計測を行うことにより、それらのセン サに到達した波形の時間差を用いてAE源の発生位置すなわ ち"震源"を特定することができる。さらに、検出された信号 の大きさすなわち"震度"の解析を行うことにより、欠陥発 生の程度を知ることができる。さらに、弾性波の伝播特性を 考慮して逆解析を行うことにより、発生源の定量的な大きさ すなわち"マグニチュード"の評価も可能である。これらの 解析は原波形解析とか逆問題解析と呼ばれている。実験室レ ベルではこのような精緻な解析が行われており、種々の材料 の破壊過程についての詳細な解析が可能となっている<sup>1-12</sup>。

一方、製造された材料中の欠陥を発見し、信頼性を評価す る技術としても、非破壊検査は重要な役割を担っており、特 に直接観察ができない材料内部の微小欠陥を発見できる超音 波探傷法やX線探傷法が広く利用されている。しかし、より 優れた特性を持つ材料の開発、あるいはプロセス自体の開発 に際しては、これを監視し評価する技術、すなわちプロセス モニタリングが必要となる。一般的な非破壊検査手法は、材 料を走査して既存の欠陥を発見する ex-situ な手法であるた め、欠陥がいつ発生したかがわからず、適用が難しい。そこ で、プロセスモニタリングのための in-situ である AE 法の応 用が望まれている<sup>13,14</sup>。

しかし、AE法で一般的に用いられる圧電センサは使用で きる環境が限られているため、プロセスモニタリングに対応 しにくい。キュリー温度以上では圧電性を喪失し、電気ノイ ズの影響も強く受けてしまう。また、プロセス中では材料に 接着剤やグリスを利用してセンサを取り付けることも困難 な場合も多い。そこで上記のようなAE計測上の困難を克服 するために、レーザ干渉計をAEセンサとして用いる非接触 レーザAE法が有効である<sup>15-22)</sup>。この手法では、試料表面で のAE波を非接触で計測するために、従来の圧電素子センサ が抱えていた多くの問題点を解決できる。すなわち、レーザ 光の反射が十分な表面であれば、試験環境の温度よらず計測 が可能である。さらに液体中の試料表面でのAE計測も可能 である。また、レーザのスポットサイズを小さくすることに より、従来のAEセンサに比べてはるかに小さい領域での点 計測が可能である。また、従来のAEセンサの出力が必ずし も明確な物理量でなかったのに比べて、レーザ干渉計からは 速度あるいは変位といった定量的な物理量を得ることができ る。しかし、レーザAE法は感度や安定性が圧電センサより 低いことが課題とされており、一般にプロセス中はノイズの ため計測が困難である。

著者らのグループではレーザAE法の持つ感度や安定性の 問題を解決し、より広範な条件においてAE法を用いた非接 触プロセスモニタリングを可能にすることを目的として、新 たにAE波形の計測及び解析システムの開発を進めている。 また、構造物の健全性をリアルタイムで計測する手法とし て、構造ヘルスモニタリングという概念が注目されており、 ひずみや温度の連続監視が可能となっているが、より直接的 な損傷の検出にはAE法がますます重要になっていくものと 期待されている。本稿では、従来から用いられてきた圧電変 換子に代わるセンサとして、最近開発されている各種の光 ファイバセンサや非接触レーザ干渉計を用いた計測について 述べるとともに、AE法によるマテリアルの種々のモニタリ ングの例を紹介する。

# C2 最近のAE計測技術

#### 2.1 レーザを用いたAE計測

#### 2.1.1 光ファイバによる接触式 AE 計測

従来のAEセンサは主に圧電素子を用いたものであった。 これは非常に感度の良いセンサであり、微小な振動も高感度 で検出可能である。しかし、最近光ファイバを利用したAE センサの開発が進められている<sup>23-27)</sup>。これは、元々ひずみを 測定するために研究が始まったのであるが、超音波計測さら にはAE計測と適用が進んできている。通信用の光ファイバ を用いるのでファイバ自体は比較的安価であり、電気式のも のと比較してより小型・軽量である。計測原理としては、光 軸ずれ、光干渉、ドップラー効果、FBG (ファイバ・ブラッ グ・グレーティング) などを用いたものがある。また、電磁 波障害などを受けずに計測可能であり、異なる波長を用いて 多重化することにより一本のファイバで複数箇所のセンシ ングが可能という特徴を有している。ドップラー効果を用い たセンサでは、従来のAEセンサに匹敵するような計測感度 が得られており、またセンサ自体は比較的高温でも使用可能 であり、従来AEが測定困難であった対象においてもAE法が 利用可能となるものと期待される。また、FBGを用いたもの では、静的なひずみと超音波信号の両方が同時に測定可能で あり、構造ヘルスモニタリングのためのセンサとして非常に 有望といえる。センサが引張ひずみを受けるとブラッグ波長 が長波長側にシフトし、フィルタ透過光強度が減少する。逆 に圧縮を受けると透過光強度は増加する。この光強度変化を 光電変換することにより、超音波振動を取り出すことができ る。この手法で得られる擬似音源からの信号は、圧電素子の センサのものと同程度であることが示されている。

# 2.1.2 レーザ干渉計による非接触式 AE 計測

光ファイバセンサを用いる場合でも、試験対象との接着の 問題が生じる。最近、AEをレーザ干渉計を用いて非接触で 計測するレーザAE法の研究が進められており、比較的安定 してAEが計測できるようになってきている (Fig.1)<sup>15-22)</sup>。光 のヘテロダイン干渉を用いることにより、表面振動を周波数 シフトとして検出することができ、AEによる表面振動速度 を計測することができる。この手法では、通常のセンサの大 きさ (~ cm) に比べて小さな試験対象においてもAE計測が 可能である。また、従来の圧電素子を用いたAEセンサで得 られる信号は、必ずしも明確な物理量ではないという問題が あったが、レーザ干渉を用いることにより対象物の表面速 度や変位などの定量的な量を計測可能であるという利点を 有している。さらに、液体中を伝わる光を用いても計測可能 であるため、液体中に埋没した試料中に発生したAEも非接 触で検出できる可能性がある。さらに、非接触計測である利 点を活かすことにより従来はAE測定が不可能な環境におい てもAE信号の計測が可能であり、例えば測定表面の温度が 1000℃を超えるような環境においてもAEが検出できること が示されている。セラミックスコーティング材料の熱サイク ル試験や、セラミックス繊維で強化した金属材料の熱変形試 験において、材料中に発生した微視割れやはく離を検出でき



Fig. 1. Acoustic emission (AE) measurement with four channel laser interferometers for process monitoring of plasma spraying

ることが確かめられている。また、この手法は材料プロセス にも応用されており、溶射によるセラミックスコーティング した材料で冷却中に損傷が発生する過程が、レーザAEを用 いることにより計測されている。具体的な適用例については 後述する。

### 2.2 連続AE波形計測解析装置の開発

一般的なAE 計測装置は、材料表面に設置した圧電センサ でAE波を電気信号に変換し、その電圧がしきい値を超過し た時刻をAE事象の発生とみなす方法を採っている。このAE 事象ごとに、前後数十µs ~数msの波形と、それを解析して 得られる数種類のパラメータが記録される。この方法は、AE 波形に含まれるノイズ(雑音)が少なく、かつAE事象の発 生頻度が低い場合には有効であるが、ノイズが多いあるい はAE事象の発生頻度が高い場合には有効に機能しにくくな る。このことは、AE法をより広汎な分野で使用することを 目指すうえでは課題となっている。そこで、著者らはAE波 形を事象単位ではなく、全計測時間に渡って連続的に記録す るという新しい方式の計測装置Continuous Wave Memory (CWM)を開発した (Fig.2)<sup>28,29)</sup>。このCWM は連続波形を内 蔵のソフトウェアで処理し、AE事象を検出する機能を持っ ている。例えば、連続波形を再生してノイズの周波数特性や 強度を予め把握した上で、これを効果的に除去できるフィル タを作成し、フィルタ適用後の連続波形に対してしきい値と いくつかの付加条件を設定し、AE事象を検出するという処 理が可能である。

CWMは一般的なAE計測装置とは異なり、ノイズフィル タとしきい値電圧を計測開始前に設定する必要がないため、 計測に失敗する可能性が低く、また従来は適用が難しかった 対象でもAE評価が行いやすくなっている。そのひとつが、 材料プロセスのモニタリングである。先進材料の研究開発の 現場においては、しばしば温度、圧力、雰囲気などの条件が シビアな環境下で精密にプロセスを実施し、またこれを最 適化していくことが実用化の成否に密接に関係するため、プ ロセスモニタリング技術への期待が大きい。しかし、材料の プロセスは非常にダイナミックなものであるため、その非破 壊モニタリング手法はin-situなものでなくてはならない。 だ が、超音波探傷法やX線探傷法をはじめとする多くの非破壊 評価手法は、材料中に既に存在している微小欠陥を発見する ex-situな探傷法であるため、欠陥の位置情報は得られても発 生時刻の情報は得られず、プロセスモニタリングには利用し 難い。一方、AE法も前述の原理によって微小欠陥の発生を in-situに検出することはできるが、一般的なAE計測装置で はプロセスにともなう雑音や振動が激しいノイズとなり、ま たそのノイズの周波数特性や強度がプロセス中に変化する 場合が多いため、実際に対応することは困難である。CWM は連続波形を計測、解析することで、このようなノイジー な環境でのプロセスモニタリングも可能としたものである。 CWMはAE波形を連続的に記録しているため、AE事象が検 出されたときのみ波形を記録する一般的な装置よりも、自由 度の高い解析が可能である。

## 2.3 AE波形解析の新しいアプローチ

# 2.3.1 ウェーブレットによる波形解析

AE波形には、異なるAE源に由来する数種類のAE事象 やノイズの成分が含まれている場合がある。また、一つの AE事象内の数µsの時間範囲においても、AE源から直接伝 播する表面波や縦波及び横波に加え、反射波など複数の成 分が含まれる。AE波形に含まれるこのような複数の成分を 区別するため、波形の時間一周波数解析を行い、その周波 数的な特徴からAE源の推定が可能な場合がある。時間一周 波数変換手法としては、短時間フーリエ変換(Short Time



Fig. 2. Schematic diagram of hardware and software of continuous wave memory (CWM) for acquisition and analysis of acoustic emission waveform

Fourier Transform、STFT) とウェーブレット変換 (Wavelet Transform、WT)が広く知られているが、両者は解像度や 計算量の面で互いに長所と短所がある。STFTは波形を短い 固定長の区間に分割し、各区間を高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform、FFT) して求めた周波数特性を用いてス ペクトログラムを作る方法である。このため、比較的少ない 計算量で高い周波数解像度が得られるが、FFT区間内の時間 情報が失われるため時間領域の解像度は低い。一方、WTは 元の波形を、マザーウェーブレットと呼ぶ単一の短波形を拡 大縮小あるいは時間移動させて作られた複数のドータウェー ブレットの重ね合わせで再現する方法であるため、STFTよ り時間解像度に優れるが、十分な解像度のデータを得るため に必要な計算量は多くなるが、局所的なAE波形の周波数的 な特徴を抽出可能である。CWM ではこの両者の特徴を踏ま え、連続波形の解析には高速なSTFTを、各AE事象の短時 間波形の解析にはWTを用いている。WTのマザーウェーブ レットは、一般的なGaborウェーブレットを選択している。 AE事象の周波数的な特徴の解析が可能となるため、AE源の 推定に応用できる。

## 2.3.2 高雑音下でのAE事象検出

AE法では、必要に応じて、AE事象の検出前にノイズ除去 のための波形のフィルタリングを行う。一般的なAE計測装 置では、AE事象の検出時刻前後の、フィルタ済みの波形し か記録しないため、フィルタ条件が不適切であった場合の修 正は非常に難しい。一方、CWMはフィルタなしの波形を全 て連続的に記録するため、計測と同時のリアルタイム解析で 使用したフィルタの条件が不適切であった場合も、計測終了 後に条件を再設定し、計測時と同等の再解析が一切の制限な しに行える。またCWMのフィルタは連続波形をいったん短 時間フーリエ変換して得られた時間一周波数一強度の3次元 データに対して適用される周波数ドメインにおけるものであ るため、一般的な装置よりも周波数フィルタのカットオフが 急峻にできるほか、Soft-thresholding法によるバックグラウ ンドノイズフィルタなど、時間ドメインでは不可能なフィル タも使用できる。

AE事象の検出は通常しきい値交差法により行う。この 方法は、波形が立ち上がってしきい値電圧Vtを最初に超過 した時刻をAE事象の開始時刻、減衰する信号が持続時間 (duration)を経て最後にVtを下回った時刻をAE事象の終了 時刻と判定する。しきい値交差法では、しきい値電圧Vtが適 切に設定されていなければ、AE事象を正しく検出できない。 ノイズレベルに対してVtが低すぎると、しきい値交差が断 続的に発生し続けることになるため、AE事象が検出されな くなる。一方、Vtが高すぎると、しきい値交差が発生しなく なるため、やはりAE事象が検出されなくなる。一般的なAE 計測装置では、計測の開始前に、単一の固定値しか設定でき ないことが多い。しかし、これでは、ノイズレベルが高いた めダイナミックレンジが狭い環境や、プロセスモニタリング のように計測中にノイズの強度や周波数特性が変化する環 境では、AE事象を的確に検出することが困難である。一方、 CWMでは波形が連続的に記録されているため、Vtを複数指 定することが可能としている。すなわち、十分高いものから 低いものまでVtを数段階設定し、そのそれぞれのVtで検出 されたAE事象の重複を取り除くことにより、ノイズの特性 が変動する場合であっても、常にノイズレベルより若干高め の最適なしきい値電圧によってAE事象を検出した場合の結 果が得られる。これは、AE法を用いてプロセスモニタリング を行う際には非常に有効である。

#### 2.3.3 波形立ち上がりの自動決定を用いた位置標定

非破壊検査による材料の信頼性評価には、材料中に発生し た微小欠陥の位置を求めることが不可欠である。AE法では、 複数のセンサにAE波が到達した時刻の差を利用して位置標 定を行うため、この到達時刻すなわち波形の立ち上がり時刻 を正確に決める必要が生じる。ノイズが少なく立ち上がりが 急峻な波形であれば、しきい値交差時刻を立ち上がりと見な しても誤差は小さいが、ノイズが多いあるいは立ち上がりが 緩慢な波形の場合には、この方法は不適当である。また、多 数のAE事象の位置標定を行う場合には、目視で波形を観察 して立ち上がりを決定する方法は現実的ではない。したがっ て、効率的な解析のためには、波形の立ち上がりを自動的 に決定できる方法が求められる。赤池情報量基準 (Akaike's Information Criterion、AIC)<sup>30)</sup>は、この波形の立ち上がりを 決定するピッカーとしての利用が可能である。波形から特性 関数を算出しそのAICが最小となる時刻を波形の立ち上がり と判定するという効果的な方法が提案されている<sup>31)</sup>。波形の 立ち上がりが極めてわかりにくい波形に対しては、最初から しきい値交差法を用いず、連続波形に直接AICピッカーを適 用して、立ち上がりを発見するという使い方も有効である。 しかし、波形によっては単純なAICピッカーでは不十分な 場合があり、著者らはAICピッカーを2回利用するTwo-step AIC Pickerという手法を考案して、立ち上がり時刻の判定精 度を高めた (Fig.3)<sup>32)</sup>。CWM はこのTwo-step AIC Picker を 搭載することで、AEの自動位置標定の精度を高めている。



以下では、種々の試験やプロセスにAE法を適用して変形・



Fig. 3. Visual description of our two-step AIC picker: (a) characteristic function, (b) definition of new time interval, (c) determination of first estimation of arrival time and focus on its neighborhood, (d) determination of final arrival time and (e) result

破壊機構の解析を試みた最近の結果のいくつかを示す。

#### 3.1 Mg合金の双晶変形の計測

近年多種にわたる分野で代替材料としてMg合金の利用が 増えている。優れた構造材料として期待されているMgの結 晶構造は、六方最密充填構造であり、変形機構は大きく分け てすべり変形と双晶変形に分かれる。室温では、すべりは底 面すべりが支配的であるので、連続を保ったまま任意形状に 変形するために必要となる独立な5つの変形モードを与える には、双晶変形が重要な役割を果たす。また、発生した双晶 は応力の除荷及び逆方向への応力の負荷などにより消滅する ことが報告されている。これらすべり変形、双晶変形、双晶 の消滅は重要なアコースティック・エミッション (AE)の発 生源である<sup>33)</sup>。著者らはこれらの変形機構に対してAE法に よる評価を行ってきた<sup>34-39)</sup>。Mgの変形において重要な役割 を果たす双晶変形機構、双晶消滅機構をAE法及びEBSDを 用いて定量的評価を行った例を紹介する。

AZ31 Mg 合金押出材の引張試験中に測定したAE事象に



Fig. 4. Relationship between average Schmid factor for twin and cumulative AE energy

ウェーブレット変換を施し、AE事象ごとにピーク周波数及 びエネルギーを求めた。得られたエネルギーを時間-周波数 ごとにz軸方向に足し合わせた。いずれの試料においても、 降伏付近で大きなAEエネルギーが生じ、 押出方向と引張方 向の間の角度が大きくなるほどAEエネルギーが大きくなる ことがわかった。変形前及びひずみ2%を与えた後の組織に おいて、EBSDによる結晶方位解析を行った。EBSDにより 得た結晶方位の情報から、全粒のうち、双晶変形したと考え られる領域の面積率及び双晶に対する平均シュミット因子を 導出した。その結果、押出方向と引張方向の間の角度が大き くなるほど平均シュミット因子が大きくなり、双晶面積率も 上昇した。得られたAEのうち、高いピーク周波数をもつAE エネルギーを合計した。各引張双晶に対する平均シュミット 因子との関係をFig.4に示す。平均シュミット因子が大きく、 双晶面積率が高いほど大きな高周波AEエネルギーが発生し た。双晶の発生量とAEのエネルギーには定量的な関係があ ると言える。

AZ31 Mg 合金押出材から、押出方向に平行に引張試験片 を作製し、その後試験片に双晶を導入するため、押出方向と 平行に最大応力100MPaまで圧縮応力を加えた。双晶を導入 した試料において、逆方向に引張試験を行うことで導入した 双晶を消滅させ、試験中のAEを計測・解析した。引張試験 中に観測したAEのウェーブレット変換による解析結果を、 応力ひずみ曲線とともに、Fig.5に示した。また、変形中の双 晶の状態を調べるため、EBSDによる結晶方位解析を行っ た。集合組織の情報から、導入した双晶の多くは降伏地点で 縮小を開始し、ひずみ硬化率が大きく上昇する地点において 消滅することがわかった。これらの結果より、先ほどAEの 結果より分割した3つの領域を、それぞれ、双晶の境界が移 動しはじめる領域、双晶の領域が減少する領域、双晶が消滅 する領域と考えた。次に、各領域で発生したAEエネルギー の周波数分布を求めた (Fig.6)。AE信号の周波数は事象の



Fig. 5. Plots of AE events in the gage section during the tensile test of Mg alloy specimen after once compressed



Fig. 6. Relationship between cumulative AE energy and WT peak frequency in both the first stage (less than 0.7% strain) and the third stage (between 1.5 and 3.5% strain) of Fig.5

生成時間によって決まり、高速に起こる事象ほど高いピーク 周波数をもつことが知られている。AEエネルギーの周波数 分布より、双晶の境界の移動開始は大きなエネルギーを発生 し、比較的高速で起こることがわかった(領域I)。次に、双 晶が縮小する際には、AEエネルギーをほとんど検出できな いことがわかった(領域I)。最後に、双晶が消滅は、大きな AEエネルギーを発生し、比較的低速で起こることがわかっ た(領域II)。マグネシウム押出材における双晶の変形機構及 び双晶の消滅機構をAE法及びEBSDによる結晶方位解析を 用いることで、定量的に評価することができた。

#### 3.2 応力腐食割れの計測

応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking, SCC)は、金 属材料の主要な破壊要因のひとつとして従来から知られて いるが、その発生メカニズムには未解明の部分も多い。この SCCはインフラの高経年化にともなう劣化の主要因のひと つであるため、モニタリング技術の改良は発生メカニズム解

明の基礎的なデータを得るために重要な意味を持つ。AE法 を用いたSCCのモニタリングも精力的に研究などが進めら れてきたが<sup>40-42)</sup>、SCCが進展する際に発生するAEは極めて 微弱な信号であるため、その計測は必ずしも容易ではなかっ た。そこで、CWMを用いてSCCのAEのモニタリングを行 い、取得した連続波形からノイズの周波数特性及び強度を求 め、適切なノイズフィルタの条件としきい値電圧を決定する ことで、センサの計測感度を十分発揮できる計測が行えるよ う試みた43-45)。試験片にはSUS304薄平板を用い、弾性限度 に近い曲げ負荷を与えた。この試験片は従来のU-bend試験 片よりも薄く加工が容易であるほか、塑性変形をともなわな いため、試験後の試験片も取り外せば平板に戻り、SEM観察 などを容易に行えるという特長がある。この状態で、試験片 上面、つまり引っ張り負荷面の中央に濃度25%のMgCl2水溶 液を3µL滴下した。 試験片は恒温槽で70℃、 湿度30%を保持 し、計測中は液滴の濃度が一定に保たれるようにした。また、 液滴を置かない試験片のモニタリングも行った。実験後、液 滴なしの試験片の連続波形の振幅分布をみると、実験が静か な環境で試験片を放置するものであったためか、ノイズの強 度は計測中に大きな変化を見せなかった。そこで、最大振幅 であった約15mVをノイズレベルとみなし、液滴有りの試験 片から得られた連続波形に対して、これより若干高い20mV のしきい値電圧を設定したが、Fig.7 (a) のように7個しか AE事象を検出できなかった。連続波形のSTFTからバック グラウンドノイズの周波数特性はAE信号とは異なる周波数 特性であることがわかった。そこで、ノイズを除去するため に100~300kHzの帯域通過フィルタを適用したところしき い値電圧は4mVまで下げられることができた。液滴ありの 試験片の連続波形からは、Fig.7 (b) のように200個を超える AE事象を検出できた。このように、CWMを用いれば、微弱 な信号しか発生しない環境のAEモニタリングも、非常に合 理的、かつセンサの性能を十分に発揮しながら行えることが 示された。

#### 3.3 溶射の際のセラミック皮膜の損傷の計測

セラミックコーティングは、金属材料表面の耐熱性、耐摩 耗性、耐食性などを向上させる目的で広く行われている表面 加工の一種である。この皮膜は厚さ数百µmという厚膜であ るため、その成膜には、高温で溶融させたセラミックを吹き 付けることによって速い堆積速度を実現できるプラズマ溶射 法が一般的に利用される。しかし、プラズマ溶射は激しい温 度変化をともなうプロセスであるため、脆性材料であるセラ ミックコーティングの内部には成膜中に割れなどの欠陥が 発生し、皮膜自体のみならず、皮膜を使用する構造物全体の 信頼性にも影響を及ぼす可能性がある。このため、プラズマ 溶射はAE法を用いてモニタリングを行う必要性が高いプロ セスであると言える。しかし、溶射中の試料は最高700℃と、 PZTのキュリー点である約300℃を大きく超える高温に曝さ れ、電気的なノイズも激しい環境におかれるため、一般的な AEセンサの使用は困難である。そこで、PZT素子ではなく レーザ干渉計をAEセンサとして用いる非接触のAE計測を 行うため、Fig.8のような装置を組み立て、治具の工夫で防振 と防音につとめ、耐熱コーティングのプラズマ溶射プロセス のAEモニタリングを試みた<sup>19-22)</sup>。

最初に、プラズマ溶射後の冷却中に発生するAEの計測を 行った。基材として直径30mm、厚さ5mmであるSUS304円 板試料を用いた。トップコートの材料として、ホワイトア ルミナを用いた。溶射後の冷却中に発生したAE波形の計測 を行った。コーティング厚さ525µmを超えた試験では全て の試料でAEが計測された。予熱を500℃までかけた場合、 450µmの試験でもAEが観察され、はく離が生じていること がわかった。予熱をかけた場合、最高温度は上昇したが、AE の発生温度で見るとほぼ全ての実験で100℃前後にAEが発 生したことがわかった。4チャンネルでの計測を行うことに よりAE源の位置標定を試みた。Fig.9に膜厚600µmの実験 条件の結果を示している。冷却が進むとAEが多数発生した が、予熱なしにおける同膜厚の結果と異なり、AEは断続的 に発生するのではなく、ごく短い時間で集中して発生したこ とがわかる。また、複数回に分けて集中してAEが発生して いる様子も観察された。多チャンネル計測を行うことで、ア ルミナ皮膜の割れの位置を評価することができた。特にAE が発生し始める初期の位置は、端部に多く発生していること がわかった。また、時刻と位置及び大きさの情報により、割 れのプロセスを視覚的に表現することができた。有限要素法 により最大主応力の評価を行った。最高温度からの温度差と 膜厚により実験値と解析値を整理すると、同じ予熱温度で あればほぼ一定の応力でAEが発生していることがわかった (Fig.10)。また、予熱温度を上昇させると、AEが発生する応 力値も上昇することがわかった。これは、アルミナコーティ ングの破壊のクライテリアや予熱の効果を示すものである。

次に、プラズマ照射中の加熱中に発生するAE計測を行った。ノイズ環境は冷却中と異なり非常に厳しいため、市販の AE計測装置を用いた計測では、有効なAE信号の検出はほぼ



Fig. 7. AE events during SCC Monitoring of chloride droplets on thin SUS304 plate specimens, (a) without frequency filter and (b) with frequency filter from 100 to 300 kHz



Fig. 8. Schematic diagram of noncontact AE monitoring for plasma spraying process. AE signals during spraying and cooling were detected by multi-channel laser interferometers and analyzed by CMM system



Fig. 9. (a) AE behavior and (b) the location analysis results for the specimen with a thickness of 600 mm and 150°C preheating. Symbol ◆, event occurred at ~700 s; △, events at ~1100 s. The superscript indicates the order of the event

15



Fig. 10. Variation of temperature difference ∆T needed to induce the given maximum principal stress as a function of the coating thickness. The symbols stand for the experimental data corresponding to the first AE detection in each condition

不可能である。試験片は、SUS304にアルミナをコーティン グしたものと、Inconel®601ニッケル基超合金にイットリア 安定化ジルコニア粉末を溶射したものを用いた。CWM が記 録した波形はノイズを低減させるために100kHz以下の成分 を除去し、さらにSoft-thresholding法でバックグラウンドノ イズも除去した。これらの信号処理でノイズを低減しても、 なお溶射中にはトーチと試料の位置関係などによってノイズ レベルが大きく変動していたため、AE検出のしきい値電圧 Vtには50~150mVの値を指定して、前述の複数しきい値を 用いたAE事象検出を行った。また、AE波形と同時に、トー チの移動履歴と試験片表面付近を熱電対で計測した温度も 記録した。検出されたAE事象をFig.11に示す((a) ジルコ ニア、(b) アルミナ)。まず、両方の試料において溶射中にも AEが発生していること、すなわち損傷が導入されることが わかった。これは溶射後の試験片の断面観察において多数の き裂が観察ことと対応していた。一方、基材とコーティング 層の熱膨張係数差が大きいアルミナコーティング材では冷 却中にも再度AEが検出されるものの、ジルコニアコーティ ングでは冷却中にはAEが発生しないことがわかった。この ことから、試験後のトップコートの断面に多数見られる割れ は、溶射中に発生したことが確認され、耐熱コーティングの 内部の損傷に理解するうえで興味深い知見が得られた。



AEは構造物の検査に広く用いられており、製油所、化学プ ラント、製鉄所、原子力発電所、土木構造物、建築物、宇宙・



Fig. 11. AE events and temperature history curves of the specimen during plasma spraying, (a) zirconia coating and (b) alumina coating. AE events were detected in both spraying and cooling period in the case of alumina coating while events were only detected in spraying period in the case of zirconia coating

航空構造物、工場の機械装置などに適用されている。また、 金属、複合材料、コンクリートあるいは岩盤といった種々の 材料からなる構造物に用いられている。また、実際に検出さ れる信号の要因の種類も様々であり、単純な割れ、疲労き裂 進展、腐食き裂、繊維の破断、はく離、こすれ、板厚の減肉、 液体のリーク、気体のリーク、反応生成物の破壊、粒子衝突、 気泡など、多種多様であり、直接的な破壊に起因する一次AE と、間接的な要因による二次AEを含む。

材料試験のように小さな試験片を用いて、AEの計測を行 う場合には、前述のように明確な波形が得られるので、波形 の解析による定量的な損傷の評価が可能である。しかし、大 型構造物の場合は弾性波の伝播過程が複雑となり、また減衰 も大きくなるため、定量的な評価は必ずしも容易ではない。 AEで用いられるセンサの周波数特性は数十から数百kHzで あり、超音波探傷の数MHzに比べるとかなり低いが、それで も大きな構造物においては弾性波の減衰が大きくなり、雑音 に対する信号の比 (S/N比) が十分な波形を検出することは、 必ずしも容易ではない。また、多くの場合外来からの雑音が 存在するので、それらの雑音への対処を十分行うことが必要 である。例えば機械構造物においては、モーターや回路から の電気的パルス、機械的な振動が問題となることが多い。ま た、野外の構造物においては、降雨や降雪あるいは風など、 また昼と夜の温度差による膨張・収縮に起因する雑音を考 慮する必要がある。したがって、AEを用いて構造物の検査を 行う際には十分な知識・トレーニング・経験が必要である。 AE法が多くの分野において検査方法として注目されても、 応用分野が必ずしも広がっていかない理由はこのあたりにあ ると思われる。そのため、AEの装置メーカーにおいても、従 来の単に機器を販売するというよりは、サービスあるいはノ ウハウを提供するコンサルティング的な方向で事業を進めて いる。

AE法で得られる情報で重要なものに、損傷の位置の評価 があるが、伝播経路が複雑な場合は、正確な位置標定を行う ことが難しい。したがって、実際の構造物の損傷評価にあ たっては、比較的簡単なパラメータである、AEが何個発生し たかを示すAE発生事象数を使って、このAE発生パターンか ら損傷の程度を大まかに類推する手法が用いられることが多 い。例えば、欧米ではデータベースをもととする鋼構造物の AE試験に関するASME規格が作成されており、AE試験が日 常的な検査業務として広く行われている。一方、AE 試験の適 用はなされてきたものの、法的規制等による制限のため、AE 試験は広く一般的に用いられる試験方法とはなっていないの が実情である。最近我が国においても、石油タンクの底板の 腐食を対象としてAEによるモニタリングの研究が精力的に 行われている<sup>46-52)</sup>。AE源は腐食そのものからではなく、腐食 生成物の生成・成長にともない腐食皮膜が破壊されることに より発生し、比較的大きなAE信号として検出される。底板 の強度特性に直接的に関係するのは減肉している位置及び その量である。位置標定を正確に行うためには、波動の伝播 過程を考慮した解析が不可欠であり、鋼板中を伝播するラム 波の分散特性 (伝播速度の周波数依存性) や液中を伝播する 波の速度を十分考慮する必要がある。このような解析を行え ば、タンク直径の数%程度の誤差でAE源の位置標定が可能 であることが示されている。AEが多く観察された部分では、 厚さ計で測定された減肉の大きさがやはり大きかったこと が示されている。また、AEカウントが多いなどAE活動度の 高い場合は、腐食速度が大きい傾向にあることも報告されて いる。このように注意深くAE法を用いることにより、大型 構造物の腐食損傷の程度を類推することが可能である。しか し、この場合の主要なAE源が腐食そのものではなく、二次 的な腐食皮膜の破壊によるものであるので、腐食量そのもの とAEデータを直接的に対応させるのは必ずしも容易ではな いが、AEデータをものに"危険度"あるいは"損傷度"のクラ スの分類行っていくことは、有効な方法となるであろう。

AE法を用いることにより構造物の連続監視が可能であ る。これまでリモートモニタリング(遠隔監視)と言えば、監 視対象から少し離れた地点での、例えば無線を用いたものや モデルを用いたものを指すことが多かった53-55)。しかし、近 年のインターネット通信環境の劇的な発展にともない、世界 各地のAEデータのリモートモニタリングが容易となってき ている<sup>56)</sup>。Webサイト用いて、AEデータの現状や警報発生 の有無など、調べるサービスが始まっている。もちろん通信 速度の限界等があるので、リアルタイムでの波形解析などは 現実的ではないが、日常的な監視には十分であろう。例えば、 米国においては多くの橋梁において補修が必要となるような 時期を迎えており、その安全性の確保と維持コストの低減が 求められている。様々なセンサを用いて状況の監視を行う構 造ヘルスモニタリング手法が求められているが、AE法も重 要な監視手法として用いられている。ニューヨーク市のBen Franklin橋は2本のケーブルで構成されるつり橋であるが、 ケーブルに既に損傷が生じていることが判明しており、56 チャンネルのシステムを用いてケーブルの破断状況の監視が 行われており、自立的に収集されたAEデータは他のセンサ 情報とともにインターネットを経由して閲覧可能であり、ま た危険な場合は警報を発するシステムにもなっている。

# 5 今後の展望

AE法は材料・構造物における損傷の発生をオンラインで 検出できる手法であり、それらの健全性を評価する上で有用 な手法である。一つのセンサで広範囲の領域での監視が可能 な点に特徴があり、構造ヘルスモニタリングのために不可欠 な技術と考えられる。高感度の圧電素子を用いることにより 損傷に対する検出感度が非常に高く、大きな構造物であって も比較的容易に内部を含めた全体の状況の監視 (グローバル 監視) ができるという特徴を有している。しかし一方、常に 雑音と有効な信号の分別が必ずしも容易ではないという課題 もある。同時に、AEで検出できるのは変形・破壊に関連する ものの間接的な力学的情報に過ぎず、直接的な損傷の観察で はないことにも留意する必要がある。そのため、過度の期待 の反動として、AE法は構造物の診断には必ずしも役に立た ない手法であるという印象を持っている方も少なくないか もしれない。しかし、欧米を中心にこれまでに各種の構造物 に対する膨大な計測データが得られており、それらのデータ ベースをもとに最新の情報技術を援用することにより比較的 低コストで構造物全体の状況を把握できる手法として今後の さらなる発展が期待される。

また、発生したAEをもとに、途中経路の音速を求めるこ とにより、構造物全体の損傷評価を行う試みが始まってい る<sup>57,58)</sup>。AEトモグラフィと呼ばれることの方法では、構造物 全体の損傷の程度の評価を目的としている。AEを用いる限り は、AE計測開始後に発生した損傷だけしか評価できないが、 AE波の音速の変化に注目することにより、音速分布の解析に より既に存在している損傷の評価も期待できる。音速分布の 導出にあたっては、AEだけではなく超音波発生源として打音 等による人為的な音源を用いることもできる。今後複雑な構 造物に対する有効性が確かめられることが期待される。

本稿では、材料内部で発生した微視欠陥の時刻、位置、規 模、破壊モードを非接触に検出できる非破壊評価法である レーザAE法や、高温や高ノイズ環境を含む広汎なプロセス モニタリングに利用可能なプロセス中の全時間に渡ってAE 波形を連続的に記録できるAEシステムCWMの開発につい て紹介を行った。このCWMで得られた全時間の連続AE波 形の時間-周波数解析を行うことで、AE事象やノイズの特 性を明らかにでき、従来のように事前にAE事象やノイズの 特性を予測する必要がなく、ノイズ低減やAE事象の抽出条 件を決定できるようになっている。これまで、圧電素子セン サのもつ計測上の制限のため、その適用範囲も必然的に制限 されてきた。しかし、ここで紹介したレーザAEセンシング がひとつのブレークスルーとして、AE法の適用範囲が広が り新たな分野を開拓できるものと考えられる。特に、従来は 計測不可能だった環境における変形・破壊現象の理解の解明 に役に立っていくものと期待される。本稿で紹介した以外に も溶接も含む種々の材料作製プロセス、ピーニング等の表面 処理プロセス、加工プロセスにおいて、プロセス中に発生す る損傷をその場で検出・解析するというプロセスモニタリン グを試みており、より高信頼性を有するものづくりに貢献が できるものと考えている。

### 参考文献

- H.N.G.Wadley, C.B.Scruby and G.Shrimpton : Acta Metallurgica, 29 (1981), 399-414.
- T.Ohira and T.Kishi : Journal of the Japan Institute of Metals, 46 (1982) , 518-525.
- 3) T.Ohira and T.Kishi : Tetsu to Hagané-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 70 (1984) , 2188-2195.
- 4) M.Ohtsu and Materials : Evaluation, 45 (1987), 1070-&.
- 5) M.Ohtsu and S.Yuyama : Journal of the Acoustical Society of America, 82 (1987) , 506-512.
- 6) M.Enoki and T.Kishi : International Journal of Fracture, 38 (1988), 295-310.
- M.Enoki, T.Kishi, and J.Kihara : Journal of the Japan Institute of Metals, 52 (1988), 405-413.
- T.Kishi, M.Enoki and H.Tsuda : Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 143 (1991), 103-110.

- 9) M.Ohtsu : Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets, 96 (1991), 6211-6221.
- M.Enoki, S.Fujikawa and T.Kishi : Journal of the Japan Institute of Metals, 58 (1994), 418-423.
- M.Ohtsu : Research in Nondestructive Evaluation, 6 (1995) , 169-184.
- 12) A.Rabiei, M.Enoki and T.Kishi : Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 293 (2000), 81-87.
- H.N.G.Wadley, R.Mehrabian and Materials : Science and Engineering, 65 (1984), 245-263.
- 14) T.Kasuya, Y.Hashiba, H.Inoue, T.Nose, K.Ito and M.Enoki : Welding in the World, 56 (2012), 76-84.
- 15) M.Watanabe, M.Enoki and T.Kishi : Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 359 (2003), 368-374.
- M.Watanabe, M.Enoki and T.Kishi : Journal of Materials Science Letters, 22 (2003), 1091-1093.
- 17) S.Nishinoiri, M.Enoki, T.Mochizuki and H.Asanuma : Materials Transactions, 45 (2004) , 257-263.
- S.Nishinoiri, M.Enoki and K.Tomita : Materials Transactions, 45 (2004), 92-101.
- 19) K.Ito, M.Enoki, M.Watanabe and S.Kuroda : Modern Physics Letters B, 22 (2008), 977-982.
- 20) K.Taniguchi, M.Enoki, M.Watanabe, S.Kuroda and K.Ito : Journal of Materials Research, 24 (2009), 3182-3189.
- K.Ito, S.Ohmata, K.Kobayashi, M.Watanabe, S.Kuroda and M.Enoki : Materials Transactions, 51 (2010), 1272-1276.
- 22) K.Ito, H.Kuriki, M.Watanabe, S.Kuroda and M.Enoki : Materials Transactions, 53 (2012), 671-675.
- 23) K.Kageyama, I.Kimpara, T.Suzuki, I.Ohsawa, H.Murayama and K.Ito : Smart Materials & Structures, 7 (1998), 472-478.
- 24) J.R.Lee and H.Tsuda : Optics Letters, 30 (2005) , 3293-3295.
- 25) T.Matsuo, H.Cho and M.Takemoto : Science and Technology of Advanced Materials, 7 (2006) , 104-110.
- 26) H.Tsuda : Composites Science and Technology, 66 (2006), 676-683.
- 27) T.Matsuo, N.Yokoi, H.Cho and M.Takemoto : Materials Transactions, 48 (2007), 1208-1214.
- 28) K.Ito and M.Enoki : Journal of the Japan Institute of Metals, 71 (2007) , 1061-1065.

18

- 29) K.Ito and M.Enoki : Materials Transactions, 48 (2007) , 1221-1226.
- 30) H.Akaike : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd international symposium on information theory, ed. by F.C. B.N. Petrov Akademiai Kiado, Budapest, (1973), 267-281.
- 31) N.Maeda : Zisin=Jishin, 38 (1985) , 365-379.
- 32) P.Sedlak, Y.Hirose, S.A.Khan, M.Enoki and J.Sikula : Ultrasonics, 49 (2009) , 254-262.
- 33) S.H.Carpenter and M.Kleine : Experimental Mechanics, 19 (1979), N42-N42.
- 34) Y.Li and M.Enoki : Advanced Nondestructuve Evaluation I, Pts 1 and 2, Proceedings, ed. by S.S.Lee, J.H.Lee, I.K.Park, S.J.Song, M.Y.Choi, (2006) , 1340-1343.
- 35) Y.Li and M.Enoki : Materials Transactions, 48 (2007) , 2343-2348.
- 36) Y.Li and M.Enoki : Materials Transactions, 48 (2007) , 1215-1220.
- 37) Y.Li and M.Enoki : Materials Transactions, 49 (2008) , 1800-1805.
- 38) Y.Li and M.Enoki : Journal of Materials Research, 26 (2011), 3098-3106.
- 39) Y.Li and M.Enoki : Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 536 (2012), 8-13.
- M.Takemoto, T.Terasawa and Y.Hayashi : Journal of Chemical Engineering of Japan, 24 (1991), 778-783.
- 41) A.Yonezu, H.Cho and M.Takemoto : Measurement Science & Technology, 17 (2006), 2447-2454.
- 42) S.Yuyama, M.Yamada, K.Sekine and S.Kitsukawa : Materials Evaluation, 65 (2007), 888-892.
- 43) K.Ito, H.Yamawaki, H.Masuda, M.Shiwa and M.Enoki : Materials Transactions, 51 (2010) , 1409-1413.

- 44) M.Shiwa, K.Ito, H.Masuda, H.Yamawaki, Y.Adachi, M.Ojima and M.Enoki : Journal of the Japan Institute of Metals, 74 (2010), 559-564.
- 45) M.Shiwa, H.Masuda, H.Yamawaki, K.Ito and M.Enoki : Materials Transactions, 53 (2012) , 1069-1074.
- 46) R.M.Koerner, A.E.Lord and J.N.Deisher : Materials Evaluation, 35 (1977), S8-S8.
- 47) S.Shimizu and M.Ishikawa : Materials Evaluation, 37 (1979) , 64-64.
- 48) P.Tscheliesnig and H.Theiretzbacher : Materials Evaluation, 43 (1985), 1342-1342.
- 49) C.Lefloch : Ndt International, 19 (1986) , 259-262.
- 50) T.J.Fowler : Materials Evaluation, 50 (1992) , 875-882.
- 51) S.Yuyama, M.Yamada, K.Sekine and S.Kitsukawa : Materials Evaluation, 65 (2007) , 929-934.
- 52) S.Yuyama, K.Yokoyama, K.Niitani, M.Ohtsu and T.Uomoto : Construction and Building Materials, 21 (2007), 491-500.
- 53) C.S.Leem and D.A.Dornfeld : Mechanical Systems and Signal Processing, 10 (1996) , 439-458.
- 54) K.M.Holford, A.W.Davies, R.Pullin and D.C.Carter : Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 12 (2001), 567-576.
- 55) C.U.Grosse, S.D.Glaser and M.Knueger : Smart Structures and Systems, 6 (2010), 197-209.
- 56) Physical Acoustics Corporation Web サイト http://www.pacndt.com/products/Remote%20 Monitoring/Civil\_Structures.pdf.
- 57) D.G.Aggelis, N.Tsimpris, H.K.Chai, T.Shiotani and Y.Kobayashi : Construction and Building Materials 25 (2011), 1503-1512.
- 58) D.G.Aggelis, T.Shiotani, A.Papacharalampopoulos and D.Polyzos : Structural Health Monitoring-an International Journal, 11 (2012), 359-366.

(2012年11月19日受付)