

論文の内容の要旨

論文題目 プロセスモニタリングのための
非接触高感度 AE システムの開発

氏 名 伊 藤 海 太

プロセスモニタリングは、材料の製造プロセス自体を非破壊評価 (Non Destructive Evaluation, NDE) の手法を用いて監視するものである。これを実施することでプロセス自体や製造された材料の良否を判定することができ、プロセス制御に必要な情報を得たり、製造された材料の健全性を担保したりすることが可能になるため、特に先進的な材料の開発と生産のためには非常に有用な技術である。

プロセスモニタリングに用いる NDE 手法には、一般的な供用前試験や供用中試験 (定期検査) で必要とされる、材料中の「どこに」「どのような」欠陥が発生しているかという情報に加えて、プロセス中の「いつ」欠陥が発生したかという情報も提供できることが要求される。このため、プロセスモニタリングには AE 法のような in-situ な NDE 手法が必要となる。特に、レーザ AE 法はレーザ干渉計をセンサとして用いることで AE の非接触計測を実現しており、高温や真空のように材料のプロセッシングでは頻繁に用いられるが、PZT センサによる接触式計測は困難という環境であっても、プロセス中の材料に影響を及ぼさないような計測が可能であるため、プロセスモニタリングの手法として非常に有用である。しかし、レーザ AE 法はレーザ干渉計の感度や安定性が PZT センサよりも低いため、現在まで広く利用されるには至っていない。

本論文は、レーザ AE 法が抱えているこの感度と安定性の問題を解消し、これを実用的なプロセスモニタリング手法とすることを目的として、非接触と高感度を両立できる新たな AE 計測システムを開発した。

第 1 章の序論で本論文の基礎となる諸事項について紹介した後、第 2 章では従来型の AE 計測システムがレーザ AE 法やプロセスモニタリングに使用されることを想定していないという現状を受け、これらに対応するよう新たに開発した AE 計測および解析システム “Continuous Wave Memory” (CWM) について詳しく述べた。従来型の AE 計測システムは、ノイズフィルタや AE 事象検出のためのしきい値電圧など、複数のパラメータを計測前に設定する必要があるため、また設定された条件に合致した AE 事象のみが記録対象であった。

この方法はノイズが多いレーザ AE 法や、プロセスの段階によって AE 信号とノイズの種類やレベルが変化するプロセスモニタリングに対して使用することは適当とは言えないものである。このような環境においても適切な計測を行うためには、実測波形の解析結果に基づいて有効な AE 信号だけを選択できるノイズフィルタや AE 事象の検出条件を設定できることが望ましい。そこで、CWM では AE センサから入手可能な全情報、すなわち計測開始から終了までの全波形を連続的に記録するようにした。

AE 法で全波形を処理するためには、10 MHz 以上の周波数でサンプリングした数チャンネルの波形を連続的に記録でき、さらにこの入力データ量を上回る処理が行えるコンピュータが必要である。また、柔軟な解析を行うためには、波形処理が専用の回路ではなく、ソフトウェアで行える必要がある。そこで CWM は CPU、メモリ、ハードディスク、AD 変換ボードなどのハードウェアを並列化することで高速化を図った。さらに、波形データの入出力や解析など複数の処理の優先度を自動的に判断しながら並行して行える波形処理ソフトウェアを独自に開発した。また、CWM の内蔵ソフトウェアには従来型の AE 計測システムと同様の AE 事象検出と AE パラメータ算出の機能に加え、連続 AE 波形を処理する機能を搭載した。例えば、連続波形の時間-周波数解析、周波数ドメインのノイズフィルタなどである。

第 2 章の後半では、こうして開発された CWM の性能を検証するため、まずセラミック繊維マットの圧縮試験のモニタリングを行った。この試験では極めて高頻度に AE が発生するため、AE 事象を逐次処理する従来型の AE 計測システムではデッドタイムのため計測漏れを起こしてしまうが、波形を連続的に記録する CWM ではデッドタイムが存在せず計測漏れも起こらなかった。次に、パルスレーザによる微小振幅の擬似 AE 信号をレーザ AE 法で検出する試験を行った。CWM は従来型の AE 計測システムではノイズに埋没しているため検出できない微小振幅の AE 信号を、まず連続波形の時間-周波数解析によって発見し、次に周波数ドメインのノイズフィルタを適用することで検出することに成功した。

第 3 章では、この CWM を用いて従来型の AE 計測システムでは困難な大気圧プラズマ溶射 (Atmospheric Plasma Spray, APS) によるセラミック皮膜の成膜プロセスのモニタリングを行った。計測された連続 AE 波形に含まれていた数種類のノイズは CWM によって原因を特定して除去することができた。まず、プラズマジェットによる振動のノイズは、有効 AE 信号の成分よりも低い周波数帯にあったため Pruning による周波数フィルタの適用で除去できた。続いて、レーザ AE 計測系自体が持っているバックグラウンドノイズは、有効 AE 信号の成分と同じ周波数帯にあったが有効 AE 信号より弱かったため、Soft-thresholding によって除去できた。さらに、レーザの散乱による持続時間が異なる 2 種類のノイズ事象は、それぞれ持続時間が 10 μ s 以上のものは試料の鏡面研磨で残された傷が、10 μ s 未満のものはレーザ干渉計の焦点付近を浮遊する粉末が原因であると特定できたため、それぞれ試料の準備工程と治具を改善することでまず発生を抑え、残ったノイズも有効 AE 事象と誤認されないよう自動的に処理することができた。また、一時的に大きなノ

イズに見舞われることが多いレーザー AE 計測中により多くの AE 事象を検出するため、ノイズの多い 1 つのチャンネルを自動的に無視できる AE 事象の検出法を実装した。

このように CWM とレーザー AE 法を利用することで、APS の溶射中も含めた非接触高感度プロセスモニタリングが実現された。その結果、セラミックスのトップコート (TC) 内では溶射後だけではなく溶射中にもき裂が発生することが分かった。そこで、予熱条件や TC の溶射条件を変えた試験を行い、これらのパラメータが TC の微視割れ発生に与える影響を評価した。従来、溶射中の AE 計測が行えなかったときには、溶射終了後に AE 事象が検出されない条件でも断面を観察するとき裂が見られる場合があった。しかし、本研究によって溶射中にも AE を計測できるようになったところ、き裂と対応するような AE が溶射中に発生していることが分かった。また、以前の報告では、溶射後の冷却過程で検出される AE は、セラミックスの TC と金属の BC および基材との熱膨張係数の差のために、試料の温度低下にともなって試料側面の TC/BC 界面付近に熱応力が集中して生じたき裂によるものと示されていた。しかし、本研究で溶射中の AE 計測を行ったところ、溶射中には TC の一部が局所的にプラズマ流を受けることによる TC 内部の大きな温度差のため熱応力が発生し、TC のラメラ界面のうち最も弱い部分がはく離するというメカニズムが推定された。さらに、CWM による波形解析と有限要素法による波形シミュレーションの結果の比較から、本試験で検出可能な溶射中の TC はく離は最小で半径 0.5mm 程度と見積もられた。

このように CWM とレーザー AE 法を用いることで、非接触かつ高感度のプロセスモニタリングが可能になった。本研究の成果をもとに様々な材料や環境のプロセスモニタリングが行われるようになることを期待する次第である。■