

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246124

研究課題名(和文)高信頼性ものづくりのための材料プロセスの損傷モニタリング

研究課題名(英文)Damage monitoring of material processs for reliable material processing

研究代表者

榎学(ENOKI, MANABU)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70201960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：アコースティック・エミッション(AE)法は材料や構造物における損傷や衝撃を監視する大変有効な手法である。材料プロセスの制御においてもこのAE法は適応可能である。しかし過酷な環境下でのAEの計測は大変困難であった。そこで本研究ではレーザー干渉計を用いた非接触計測および波形の連続計測のためのシステムの開発を行い、様々な材料プロセスに応用した。大気プラズマ溶射などのコーティングやピーニングの際のAE信号の計測および解析に成功した。この新たなAE計測手法は材料プロセスの状態監視を行うことにより、材料の信頼性を向上させる有効な手法として期待される。

研究成果の概要(英文)：Acoustic emission (AE) is a powerful tool to monitor the damage and impact in materials and structures. Process control is also one of the applications of AE measurement. However, it was very difficult to detect and analyze AE signals during material processing because of severe environment. Recently new technique to record AE signals such as laser AE and continuous waveform recording have been developed to apply to material processing. AE signals were successfully detected and analyzed in surface treatment such atmospheric plasma spraying, high velocity oxy-fuel coating process and shot peening. Condition monitoring of material processing using AE will be promising to improve the reliability of materials and structures.

研究分野：信頼性材料工学

キーワード：アコースティック・エミッション ものづくり 非破壊検査 表面処理 コーティング ピーニング

1. 研究開始当初の背景

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, AE) 法は、材料中に生じた微視破壊の発生および進展を、それに伴う弾性波の検出によってリアルタイムに評価できることを特徴とする非破壊評価法である。AE は材料内に発生した微視破壊による弾性波を、材料表面に取り付けた圧電変換子により検出し、その微視破壊の特徴を同定する手法であり、種々の材料の破壊過程の研究に用いられている。しかし、キュリー点以下でしか動作しない圧電素子を試験片表面に取り付けなければならないため、その高温での適用には限界があり、使用環境が制限される。また、その大きさも通常数 mm 以上あり、大きさおよび重量の点から、例えば現在開発が進められているデバイスやマイクロマシンなどのサブミリの大きさのものには取り付けることができないため、AE 法を用いた解析が困難であった。この一般的なセンサとして圧電素子を用いる接触式 AE 法においては、感度に優れる一方で、高温や腐食性雰囲気など圧電素子が機能できない極限環境や、試験片特性やシステム運用上の問題によりセンサの着脱ができない状況では制限も多い。

そこで申請者の研究グループでは、レーザー干渉計を用いて非接触に AE を検出することにより悪条件下でも利用できるレーザー AE 法の開発を進めてきた。この手法は、高温などの極限環境下においても AE 計測を可能とする画期的な手法である。種々の高温材料試験や材料作製プロセスにこの手法を適用し、新たな知見を得てきた。しかし問題点としては、計測点 (レーザー反射面) をはじめとするレーザーの光路の僅かな変化に大きく影響されてしまうため、接触式 AE 法と比較して感度や安定性に劣り、現状では実験室レベルを超えて現場等で実用的に用いるまでには至っていない。

また一方、繊維や複合材料など AE が高頻度に発生する材料では、しきい値電圧を開始トリガとして各 AE 事象をリアルタイムに逐次処理する従来型の計測装置を利用すると、ある事象の解析中に次の事象の信号が到着してしまい計測漏れが発生するという問題があった。このため、申請者らは全試験時間を通じて AE センサの出力波形を連続的に記録できる装置 Continuous Wave Memory (CWM) を開発し、さらに事象を単位とせず連続波形を直接周波数解析する方法により、セラミック繊維マットの繰り返し圧縮によって起こる繊維の損傷を明確に評価することに成功している。そこで本研究では、具体的にレーザー干渉計から表面速度信号を全試験時間にわたって連続的に計測・収録し、また収録しながら短時間フーリエ変換やウェーブレット解析などの周波数解析を行うことにより、瞬間的な AE 信号であってもノイズ信号を除去して有効な AE 信号を分離す

るシステムの開発を行う。こうして開発したシステムを用いて、これまでの AE 計測法では計測不可能であった対象、高温下のマテリアルプロセッシング中における AE 信号の計測を試み、その損傷過程を定量的に解明する。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに別々に開発を行ってきたレーザー AE 法と連続波形収録システムである CWM を組み合わせて用いることにより、従来の PZT 変換子を用いた AE 法とほぼ同感度で、しかも極限環境においても適用可能な新たな高感度レーザー AE システムの開発を目指す。従来、AE 法において信号処理とは AE 事象を検出した後に事象単位の波形に対して行うものであり、事象の検出自体については周波数フィルタを AE 計測装置の手前に設置する程度の措置しかできなかったため、ノイズの多いレーザー AE 法では困難を伴っていた。本研究ではレーザー干渉計の出力に対する直接信号処理を実現することで、従来ではノイズに埋もれて検出不可能とされていた AE 信号を高精度に抽出する。また、その結果をリアルタイムに光学系にフィードバックする機構を開発することでレーザー AE 法の感度と安定性を向上させる。さらに、上記のように改良されたレーザー AE システムを用い、マテリアルプロセッシングの際の AE 計測を行い、材料やデバイスの信頼性確保へフィードバックすることを研究目標とする。

3. 研究の方法

(1) 高感度化のための波形解析プログラムの開発

周波数解析手法を用いた高感度化

連続波形収録装置をもとに周波数解析を行うことにより AE システムの高感度化を進める。このシステムは、レーザー干渉計を用いた非接触での AE 計測システムと、対象物の表面振動を連続に収録するシステムからなる。バックグラウンドノイズ大きいレーザー干渉計の出力から、有効な AE 信号を分別するために、新たに雑音除去のための周波数解析プログラムを導入することにより、計測システムの高感度化を図る。

連続波形収録システムの改良

従来の AE システムでは、AE 信号の計測のためにはしきい値を設定して、その値を超えた信号のみを計測していた。高帯域の AE 信号の解析にあたっては、有効な AE 信号の抽出のためには、このように信号を切り出す必要があった。しかし、レーザー AE システムにおいては、バックグラウンドノイズが大きい場合、このようなしきい値を用いた計測では有効な AE 信号を検出できない可能性が高い。上記の連続波形計測と周波数解析を組み合わせることにより、雑音に埋もれた AE 信号の抽出が可能となる。過酷な雑音環境が想定されるマテリアルプロセスにおけるインプ

口セス計測を行うために、現有の装置にさらなる改良を加え、計測のS/N比の向上を図る。(2) 実際の材料試験に対する高感度 AE システムの適用

セラミックスコーティング中の損傷の素過程評価

種々の作製条件のセラミックスコーティング材料の熱サイクル試験を行い、その際に発生する AE を本レーザー-AE システムを用いて測定して、従来では得られないコーティング層内での破壊の素過程を解明する。多チャンネル計測した AE 波形を用いて波形の可視化および逆問題解析を行うことにより、材料特性を表現できるような波形処理プログラムの開発を行う。またそうして得られた材料特性と他の手法で得られた特性との比較を行い、解析手法の有効性を検証する。

レーザーピーニング中の損傷の素過程評価

ピーニングの際の AE をシステムを用いて計測して、その際の力学的挙動の解析を行う。観察と同時にそのときに発生する微視割れの速度や大きさに関する力学特性を、開発した AE 装置を用いて評価し、母材の残留応力やボールの損傷を AE 特性の関係の解明を行い、最適なピーニング条件へのフィードバックの可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 遮熱コーティングのリアルタイム AE モニタリング

大気圧プラズマ溶射法 (Atmospheric Plasma Spraying, APS) は、ガスタービンエンジンなどの高温部を保護する遮熱コーティングの成膜に広く用いられている。溶射による成膜にはさまざまなパラメータが関係しているが、皮膜内にき裂が多く入った熱疲労に強い遮熱コーティングの成膜が望ましい。そこでき裂を評価するために、本研究室ではレーザーを用いた AE (Acoustic Emission) 計測及び連続 AE 波形計測装置 (Continuous Wave Memory, CWM) による溶射中のき裂発生のモニタリングが行われている。しかし、従来のレーザー-AE 法ではノイズが多く計測精度が低いことが課題となっており、また CWM の性能上の問題から、AE 波形の解析をリアルタイムに行うことができなかった。そこで本研究では、演算性能の高い GPU を波形処理に用いることでリアルタイムの波形解析を可能にするとともに、圧電素子を用いてより感度の高い AE 計測を行うことで、APS 中の皮膜内のき裂発生をリアルタイムに検出することを目的とした。

リアルタイム AE 計測：コンピュータ言語として C 言語、GPU 演算の開発環境として NVIDIA CUDA を用いて開発を行った。従来波形解析でボトルネックとなっていた短時間フーリエ変換及びノイズ処理を GPU により代替した。これを CWM に組み込み、波形解析を行い実時間と処理時間を比較した。また、波形解析を並列化させることによる処理時間

の違いについても調べた。

大気圧プラズマ溶射中の AE 計測：基材は直径 30 mm、厚さ 5 mm の Inconel 601 及びスーパーインバー円板を使用し、溶射材はボンドコートとして CoNiCrAlY、トップコートとして YSZ を使用した。溶射中には、CWM を用いて皮膜内部で発生する AE のモニタリングを行い、また熱電対を試料中心部および表面に設置することで温度履歴計測を行った。この実験をプラズマ出力 (500、800、1200 A)、粉末供給量 (7.5、15、30 g/min)、予熱 (予熱なし、100、200) と基板材料 (Inconel 601、スーパーインバー) を変化させて行った。また皮膜断面の SEM 観察も行い、AE 事象との関係性を調べた。

CPU と GPU それぞれの CWM による 4 ch、10M Hz の波形処理速度の違いを評価できた。GPU を用いた CWM では処理速度の改善が見られ、リアルタイムな波形処理が可能となった。また、並列度を上げることで更なる性能の向上ができた。図 1 に APS 中の温度履歴と AE 事象の分布を示す。試料温度の上昇中に AE が多く検出されるが、プラズマ出力が高い場合には降下中にも AE が検出された。温度降下中に AE が検出された試料では横割れが確認された。このことから、皮膜内の縦割れは温度上昇中、横割れは降下中に発生することがわかった。また、基板材料が Inconel 601 の時は縦割れ、横割れともに発生するのに対し、スーパーインバーでは縦割れのみで横割れは見られなかった。これは材料間の熱膨張率の差による温度降下時の皮膜内応力の違いによるものだと考えられる。

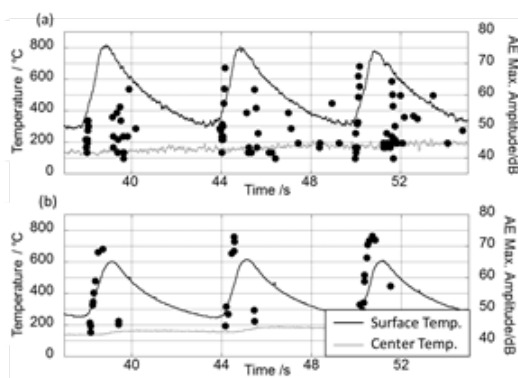


図 1 APS 中の温度履歴と AE 事象の分布

(2) 懸濁液プラズマ溶射による遮熱コーティングプロセスの AE モニタリング

イットリア安定化ジルコニア (YSZ) を使用した遮熱コーティング (TBC) の成膜には大気圧プラズマ溶射 (APS) および電子ビーム物理蒸着が広く用いられてきたが、近年新たな手法として懸濁液プラズマ溶射 (SPS) が注目されている。この手法は APS より成膜速度が低いものの、より細かな粒子を均一に供給し、溶射条件によって緻密縦割れ (DVC) や羽毛状柱状 (FC) といった異なる構造を形成し、熱サイクル寿命に優れ熱伝導率が低い皮膜

を成膜できるという特徴がある。そのためき裂発生や粒子衝突の検出が成膜機構の評価に重要である。本研究ではアコースティック・エミッション(AE)法を用いたAPSのモニタリング手法の、SPS中の縦割れや横割れの発生および粒子衝突の識別への応用を試みた。

溶射原料はYSZ粉末(D50 = 0.65 μm)を25 wt%エタノール中に分散した懸濁液を使用した。基材は50 mm × 100 mm × 5 mmのSUS304を使用し、表面処理としてグリットブラストを行った。通常の実験では試料全体をジグザグに溶射するが、本実験では試料中央の同一直線上のみを数秒間隔で繰り返し溶射した。1回の溶射を1パスとし、100パス強の溶射を行う間、試料保持治具に接着させた圧電センサでAE、試料表面と治具裏面に設置した熱電対で温度をそれぞれモニタリングした。この試験をプラズマ出力 w 、トーチ移動速度 v を変化させて複数行った。一部試料では前方に幅5 mmのスリットを設け、溶射スポットの中央部のみ、外縁部のみを選択的に成膜させた。また皮膜断面のSEM観察も行い、AE事象との関係を調べた。

中央部のみを $w = 45 \text{ kW}$ 、 $v = 500 \text{ mm/s}$ の条件で溶射した試料の、溶射方向に垂直な断面の写真から、試料中央付近では縦割れと横割れが見られ、外縁部付近ではのようにDVC構造からFC構造へ連続的に変化する様子が見られた。この試料の溶射中の表面温度履歴とAE事象の検出結果が得られた。ここでは各パスにおいて溶射材が試料に衝突し始めた時刻を起点としている。AEは皮膜が薄い溶射初期には試料の冷却中でも検出されたが、次第に加熱中のみを検出されるようになった。 w 、 v を変えて行ったすべての溶射条件におけるAEの検出タイミング図2に示す。

横割れは皮膜の下部にのみに、縦割れは皮膜を上部から下部まで貫通するように見られた。冷却中のAEが溶射初期のみに検出され、溶射が進んでからは加熱中のAEのみ検出されたことから、冷却中のAEはく離(横割れ)、加熱中のAEが縦割れにともなうものと推定できた。これはAPSのモニタリング結果と同様であった。SPSにおいて溶射初期はく離が生じて成膜が進みにくいが、一度膜ができれば以降はく離が生じず、安定して堆積が進むことが分かった。これは溶射条件に関わらず同様であった。

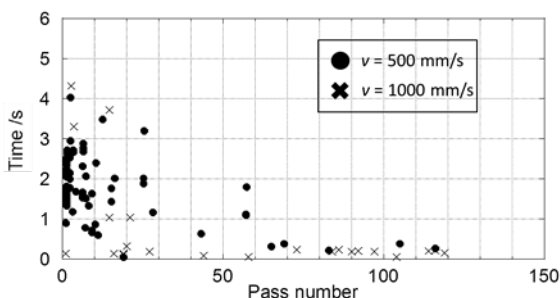


図2 溶射中のAE検出タイミング

(3) AEモニタリングとシミュレーションによるレーザーピーニングの高度化

ピーニング処理は金属の疲労強度を向上させる表面改質技術の一つである。レーザーピーニングは金属粒子の投射を用いるショットピーニングと異なり、レーザーの照射によって金属を塑性変形させ、残留圧縮応力を付加させる。レーザーピーニングの利点として、ショットピーニングすることが難しい筒状などの複雑な形状の材料に対しても利用できることが挙げられる。しかし、レーザーなどの加工条件が材料に与える影響やピーニング中に起きる現象への影響の関係は必ずしも明らかでない。さらにピーニング加工の信頼性を高めるためには、加工後に評価するだけでなく、表面加工中にもプロセスのモニタリングによって加工状況をリアルタイムに把握し、状況に応じて加工機器を制御することが必要となる。これまでの研究では、AE法をレーザーピーニングに適用することにより、レーザー照射時のAE波を検出し、それを逆解析することによってレーザー照射時の衝撃力を求めた。加えて、水中を伝播してくるピーニングによるAE波を捉えることで、試料のサイズや形には依存しないAE波形を検出できた。本研究では、ピーニング中の現象を調べるために、レーザーピーニング時の試料伝播AEおよび水中伝播AEのモニタリングと解析を行うとともに、高速度カメラによるピーニング箇所の表面観察を行う。また水中伝播AE計測における適切なAEセンサの設置位置を求めるために、レーザーピーニングのシミュレーションを行うことで、ピーニング中のAE伝播の様子を調べる。これらの研究から、検出したAE波の解析結果をピーニング加工機器の制御にフィードバックし効果的な表面処理を行うことができるシステムについて検討する。

QスイッチNd:YAGレーザーを用いて、水中に治具で固定した試料にレーザーを照射できるレーザーピーニング装置を組み立て、ピーニングの実験を行った。実験では、照射位置に対して試料の反対側に取り付けたAEセンサとレーザー側の水層中に設置したセンサによってレーザー照射時に発生するAE波を計測した。同時に、高速度カメラによるレーザー照射時の試料表面の観察を行った。AEの計測及び解析には当研究室で開発した連続AE波形計測装置CWMを用いた。

試料に取り付けたセンサと水層中に設置したAEセンサを用いて、レーザーを照射して際の試料伝播AE波と水中伝播AE波を計測して比較した。また、水中のセンサの位置を変えレーザーピーニングを行い、得られた水中伝播AEを比較することで、試料表面の高速度カメラによる観察結果と合わせて、AE源となっている現象を調べた。

水中におけるAE波の伝播をシミュレーションによって求めることで、水中伝播AEを計測するための適切なセンサ位置を調べる。

シミュレーションは Abaqus を用いて行い、実際の実験装置と同様の条件下で 2 次元対称シミュレーションを行った。

レーザーアブレーション時に検出した試料伝播 AE 波と水中伝播 AE 波には違いが見られた。試料のセンサからは大きな振幅の AE 波の検出以前にはノイズの反応しか見られない。一方で、水層中のセンサは、先に小さな振幅の AE 波を検出し、その後大きな振幅の波を検出している。センサ位置 - レーザー照射点間の距離と AE 波の伝播速度から AE 波の推定到達時間を計算した。実験結果と計算結果を比較すると、いずれのセンサ位置でも実験での大きな振幅の波の到達時間は水中の最短距離を AE 波が伝播したと仮定したときの計算結果と一致した。このことから、大振幅 AE 波はレーザーアブレーションを AE 源とし、水中を伝播した AE 波であることが確かめられた(図3)。また、高速度カメラによるレーザーピーニング時の試料表面観察結果からレーザー照射後にレーザー経路上に黒い影が発生することが分かった。この影は絶縁破壊によって発生したバブル雲であり、このことからレーザー照射時にレーザー経路上で絶縁破壊が発生し、それによる AE 波が水中のセンサまで到達したと考えられる。これらから、水中伝播 AE の計測によって、レーザーアブレーションを AE 源として水中のみを伝播した AE 波以外に、試料表面を伝播した後水中を伝わる AE 波や絶縁破壊を AE 源とした AE 波を検出していることが分かった。

水中伝播 AE の計測によってレーザーピーニング時のレーザーアブレーションからの水中のみを伝播した AE 波だけでなく、試料の表面弾性波を経由した AE 波や照射時にレーザー経路上で起こる絶縁破壊による AE 波を検出していることが分かった。レーザーピーニング時の AE 伝播のシミュレーションすることにより、レーザー照射箇所だけでなく試料表面からも弾性波が水中に伝播していることが分かった。

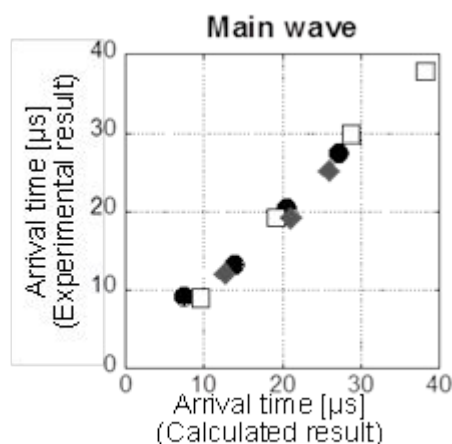


図3 水中伝播した AE 波の到達時間

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 21 件)

- 1 Y. Li, M. Enoki, Anelastic recovery of pure magnesium quantitatively evaluated by acoustic emission, Journal of Materials Research, 26(2011)3098-3106、査読有
- 2 P. Chivavibul, M. Enoki, S. Konda, Y. Inada, T. Tomizawa, A. Toda, Reduction of core loss in non-oriented (NO) electrical steel by electroless-plated magnetic coating, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 323(2011) 306-310、査読有
- 3 T. Yasutomi, M. Enoki, In-Situ Evaluation of Detwinning Behavior in Extruded AZ31 Mg Alloy by AE, Materials Transactions, 53(2012) 1611-1616、査読有
- 4 M. Shiwa, H. Masuda, H. Yamawaki, K. Ito, M. Enoki, In-Situ Observation and Acoustic Emission Analysis for Corrosion Pitting of MgCl₂ Droplet in SUS304 Stainless Steel, Journal of the Japan Institute of Metals, 76(2012) 122-128、査読有
- 5 M. Shiwa, H. Masuda, H. Yamawaki, K. Ito, M. Enoki, In-Situ Observation and Acoustic Emission Analysis for Corrosion Pitting of MgCl₂ Droplet in SUS304 Stainless Steel, Materials Transactions, 53(2012) 1069-1074、査読有
- 6 M. Shiwa, H. Masuda, H. Yamawaki, K. Ito, M. Enoki, In-Situ Observation and Acoustic Emission Analysis for SCC of MgCl₂ Droplet in SUS304 Stainless Steel, , Journal of the Japan Institute of Metals, , 76(2012) 535-540、査読有
- 7 Y. Li, M. Enoki, Twinning behavior of pure magnesium quantitatively investigated by acoustic emission, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 536(2012) 8-13、査読有
- 8 T. Kasuya, Y. Hashiba, H. Inoue, T. Nose, K. Ito, M. Enoki COLD CRACKING SUSCEPTIBILITY OF AUSTENITIC AND MARTENSITIC WELD METALS, Welding in the World, 56(2012)76-84、査読有
- 9 K. Ito, H. Kuriki, M. Watanabe, S. Kuroda, M. Enoki, Detection of AE Events due to Cracks in TBC during Spraying Process, Materials Transactions, 53(2012)671-675、査読有
- 10 H. Nakatani, T. Hajzargarbashi, K. Ito, T. Kundu and N. Takeda, Locating Point of Impact on an Anisotropic Cylindrical Surface Using Acoustic Beamforming Technique, Key Engineering Materials, 558(2013) 331-340、査読有

11 池田 翔, 伊藤 海太, 南部 将一, 榎 学, レーザ誘起超音波を用いた薄板中の内部き裂の非破壊評価, 日本金属学会誌, 77(2013) 402-407、査読有

12 M. Shiwa, H. Masuda, H. Yamawaki, K. Ito and M. Enoki, In-Situ Observation and Acoustic Emission Analysis for SCC of MgCl₂ Droplet in SUS304 Stainless Steel, Material Transactions, 55(2014) 285-289、査読有

13 K. Ito, H. Kuriki, H. Araki, S. Kuroda and M. Enoki, Estimation of thermal cracking stress during spraying of thermal barrier coatings by laser AE method, AIP Conf. Proc., 1581(2014)479-485、査読有

14 M. Shiwa, H. Masuda, H. Yamawaki, K. Ito and M. Enoki, AE sources of droplet SCC testing in type 304 stainless steel, AIP Conf. Proc., 1581(2014)486-491、査読有

15 Shiraiwa, Takayuki; Enoki, Manabu, Effect of Specimen Shape on Fatigue Behavior in Thin Pure Copper Sheet for Smart Stress-memory Patch, ISIJ INTERNATIONAL, 54(2014) 2342-2348、査読有

16 Ohashi, Nariaki; Shiraiwa, Takayuki; Enoki, Manabu, Detection of Fracture in Structural Adhesive Using RFID Tags, MATERIALS TRANSACTIONS, 55(2014) 1722-1726、査読有

17 Shiwa, Mitsuharu; Masuda, Hiroyuki; Yamawaki, Hisashi; et al., InSitu Observation and Acoustic Emission Analysis, MATERIALS TRANSACTIONS, 55(2014) 285-289、査読有

18 Ito, Kaita; Kuriki, Hitoshi; Araki, Hiroshi; et al., SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS, 15(2014) 035007

19 Yuan, Fang; Shiraiwa, Takayuki; Enoki, Manabu, Effects of Fabrication Method, Shape, Strain and Temperature on Conductive Properties of Smart Stress Memory Patch, MATERIALS TRANSACTIONS, 55 (2014) 1464-1470、査読有

20 Tsuchiya, Takashi; Ito, Kaita; Miyoshi, Shogo; et al. InSitu Monitoring of Oxide Ion Induced Breakdown in Amorphous Tantalum Oxide Thin Film Using Acoustic Emission Measurement, MATERIALS TRANSACTIONS, 55(2014)1553-1556、査読有

21 Muto, Yuki; Matsumoto, Kousuke; Shiraiwa, Takayuki; et al., Detection of Crack Propagation by AE and Evaluation of Fracture Toughness in Various Mg Alloys, JOURNAL OF THE JAPAN INSTITUTE OF METALS, 78(2014)381-387、査読有

[学会発表](計 62 件)

1 Hitoshi Kuriki, Kaita Ito, Seiji Kuroda, Manabu Enoki, Laser AE Monitoring and

Thermal Stress Analysis during Plasma Spraying of Thermal Barrier Coatings, NIMS Conference 2012, 2012/6/4-6, Epochal Tsukuba

2 栗木 仁之, 伊藤 海太, 榎 学, 荒木 弘, 黒田 聖治, プラズマ溶射中に発生するセラミック皮膜のき裂評価 - 有限要素法による弾塑性解析 -, 日本溶射学会第 9 5 回 (2012 年度春季) 全国講演大会, 2012/6/18-19, 鯉城会館

3 伊藤 海太, 栗木 仁之, 荒木 弘, 黒田 聖治, 榎 学, プラズマ溶射中に発生するセラミック皮膜のき裂評価 - レーザ AE 法による計測 -, 日本溶射学会第 9 5 回 (2012 年度春季) 全国講演大会, 2012/6/18-19, 鯉城会館

4 Manabu ENOKI, Kazutaka KOBAYASHI, Tomoki TAKATA, Akira MATSUI, Yuji KOBAYASHI, Quantitative Acoustic Emission Measurement of Laser Peening, 7th International Conference on Acoustic Emission, 2012/9/12-15, Granada, Spain

5 Kaita ITO, Hitoshi KURIKI, Hiroshi ARAKI, Seiji KURODA, Manabu ENOKI, AE Event Detection under Noisy Environment with Continuous Waveform Recording and Multiple Thresholds, 7th International Conference on Acoustic Emission, 2012/9/12-15, Granada, Spain

6 榎学, 白岩隆行, ワイヤレスネットワークによるグローバル損傷評価, 第 56 回材料強度と破壊総合シンポジウム, 2013 年 4 月 10 日, 東京大学 (東京都)

7 M. Enoki, T. Shiraiwa, Advanced Industrial Security System Project, The 3rd Asia-Arab Sustainable Energy Forum & the 5th Int. Workshop on SSB, 2013 年 5 月 5 日, 弘前大学 (青森県)

8 Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Near-threshold Fatigue Crack Behavior of Thin Copper Sheet and its Application for Structural Health Monitoring, The 13th International Conference on Fracture, 2013 年 6 月 18 日, Beijing, China など

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎 学 (ENOKI, Manabu)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 70201960

(2) 連携研究者

伊藤 海太 (ITO, Kaita)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 30554381