

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820302

研究課題名(和文)リアルタイム損傷モニタリングによる接合・表面加工のプロセスコントロール

研究課題名(英文)Controlling of Welding and Surface Treatment Processes by Real Time Fracture Monitoring

研究代表者

伊藤 海太(Ito, Kaita)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30554381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高ノイズ環境である材料加工プロセス中のモニタリングをアコースティック・エミッション(AE)法で行うため、GPGPUによる多並列計算を利用した新たな波形解析手法を搭載した計測装置を開発した。これにより、ノイズ除去とAE事象検出はパラメータ設定が不要になり、自動的かつリアルタイムに行えるようになった。さらに、このAE計測装置を用いて摩擦攪拌接合や懸濁液プラズマ溶射のプロセスモニタリングを行い、リアルタイムに欠陥生成を検出し、この結果を利用したプロセスコントロールの有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：An acoustic emission (AE) measurement system which includes a novel waveform analysis method with parallel processing by GPGPU was developed for monitoring of materials working processes under noisy environment. Herewith, parameter settings are no longer needed for noise reduction and AE event detection. The whole analysis is done in real time and automatically. Furthermore, friction stir welding (FSW) and suspension plasma spraying (SPS) processes were monitored by the developed AE measurement system. Defects were detected in real-time and the effectiveness of process controlling which is based on this result was shown.

研究分野：非破壊評価

キーワード：アコースティック・エミッション法 非破壊評価 波形解析 摩擦攪拌接合 懸濁液プラズマ溶射

1. 研究開始当初の背景

アコースティック・エミッション法 (AE 法) は、材料中の微視破壊の発生を、同時に放出される弾性波によって検出する非破壊評価手法の一種である。従来、本手法は材料や構造物の力学試験やヘルスマonitoring への適用が一般的であったが、微視破壊の生成を in-situ に検出できるという特徴のため、近年は材料加工プロセスの Monitoring への適用拡大も期待されている。

しかし、このような環境での AE 計測は機械振動や電氣的ノイズによる妨害を受けやすいため、従来型装置では対応が困難であった。そこで、申請者は Continuous Wave Memory (CWM) と名付けた新たな AE 計測装置を開発し、センサの出力する波形をそのまま全時間 HDD へ記録することを可能にした。これによって、従来は計測開始前にノイズフィルタや AE 事象検出のしきい値電圧などのパラメータ設定が必要であったのに対し、CWM では計測終了後もパラメータを変えた再解析が可能になり、パラメータ設定の不備が原因の AE 計測失敗が無くなった。しかし、パラメータを適切に設定するには経験と試行錯誤が要求される点は従来通りであったため、AE 計測の難しさを根本的に解決するには至らなかった。また、AE Monitoring の結果をフィードバックしてプロセス制御に利用するには、波形解析をリアルタイムに行う必要があるため、計測終了後の再解析では対応できない点も問題となっていた。

2. 研究の目的

接合や表面加工のプロセスは、材料を高温や高圧などの環境下において急激に変化させるため、非破壊 Monitoring で材料内部の状況を把握しながら行う意義が大きい。しかし、これの有力な選択肢のひとつである AE 法は振動や電気ノイズの影響を受けやすいことがプロセス Monitoring への適用を妨げる要因となっている。そこで本研究は、波形解析を自動化して煩雑なパラメータ指定を廃止しつつ、リアルタイムにノイズを除去して AE 事象を検出できるように波形解析を改善した計測装置を開発することで AE 法による材料プロセス Monitoring を実用化することを目的とする。さらに、この Monitoring 結果に基づいてプロセス条件をフィードバック制御することで、プロセスの高度化に貢献することも目指すものである。

3. 研究の方法

(1) AE 波形のノイズフィルタと AE 事象検出のパラメータフリー化

AE 連続波形のノイズフィルタと AE 事象検出を全自動化しようとするものである。

申請者が開発してきた連続波形記録型 AE 計測装置「CWM」のノイズフィルタ機能は、連続波形を時間-周波数-強度の 3 次元データに変換してから適用する周波数ドメインで

あるため、高ノイズの波形に対しても良好な性能を発揮できる。そこで、このノイズを前述の 3 次元データ上でのパターン認識によって自動的に識別し、これを除去するフィルタ条件を決定するアルゴリズムを開発する。

一方、接合や表面加工のプロセスでは、プロセスの段階ごとにノイズと有効 AE 信号の周波数特性や強度が変化する場合がある。このように変化する波形から常に的確に AE 事象を検出するには一つのしきい値では対応できない。そこで、しきい値を多段階設定し、各しきい値で独立に検出した AE 事象の和集合を取る方法の有効性が申請者の研究で示されている。¹⁾ そこで、本研究ではこの処理も自動化するため、センサのダイナミックレンジ全体に数 dB 間隔でしきい値を設定する方法を採る。

(2) 多並列演算による AE 連続波形解析のリアルタイム化

前項で述べた波形解析を AE 連続波形に対してリアルタイムに行うために必要な演算能力を多並列演算によって達成しようとするものである。

AE Monitoring 結果をプロセス制御に利用するためには、波形解析をリアルタイムかつ低遅延に行う必要がある。しかし、AE 波は最高 1 MHz 程度の成分を含むため、数 MHz のサンプリング周波数が必要となり、数 ch の計測では波形データの総量が数十 MB/s に達する。このような大量なデータをリモートコンピュータへ送信し続けることは困難であるため、必然的に波形処理は AE 計測装置の内部で行う必要が生じる。しかし、AE 計測は試験装置やプラントが密集した狭い場所で行われる事例が多いため、AE 計測装置は小型が強く望まれる。したがって、本研究で開発する AE 計測装置は内蔵の小型コンピュータで大量の波形解析をリアルタイムに行うことが要求される。

これに対し、通常の PC 用 CPU の演算能力は高々数十 GFLOPS で不十分である。しかし、波形解析の大部分はノイズフィルタであり、これは時間的な依存関係のないデータ列に対してフーリエ変換や逆フーリエ変換を行う SIMD (Single Instruction Multiple Data) 型の処理であるため GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Unit) による多並列計算による時間短縮が期待できる。そこで本研究では「CWM」の波形解析ソフトウェアを GPGPU 用に移植する。

(1), (2) の改良を経た CWM による AE 連続波形の解析の流れを図 1 に示す。図中で青色部分は CPU、緑色部分は GPU による処理を表している。AE 検出前のノイズフィルタ部分とその前後の短時間フーリエ変換 (STFT)、逆 STFT が GPU 化されている。

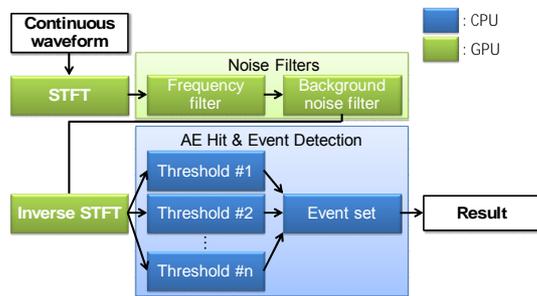


図1 改良した AE 連続波形解析の流れ

(3) 摩擦攪拌接合のプロセスモニタリング

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding) は固相接合法の一種であり、先端に突起を有する円筒状のツールを回転させながら対象の金属材料の突合せ部に押し込み、摩擦熱で融点以下に加熱して母材を軟化させながら塑性流動を引き起こすものである。FSW は溶融溶接法よりも熱影響による材料劣化が少なく、シールドガス・溶接ワイヤも不要であり、閃光・粉塵・悪臭も発生せず、接合部の仕上がりが美しく余盛り除去などの後加工もほぼ不要であるなど、施工上の利点を多く有する。このため FSW はアルミニウム、マグネシウムなど比較的低融点の軽金属への適用が広がっているが、近年は鋼材の接合に対しても適用を拡大すべく研究が進められている。

しかし、ツールの回転数や移動速度の設定、接合中のツール挿入量などの接合条件のコントロールには比較的シビアであり、不適切な条件では表面の溝状欠陥やクラック、裏面のキッシングボンドのほか、内部に空孔やトンネル状欠陥が生じる可能性がある。だが、FSW は比較的新しいプロセスのため、損傷発生メカニズムをモニタリング結果から明らかにした例は少ない。そこで、本研究では FSW について、開発した装置でプロセスモニタリングを行って、接合条件と欠陥生成の関係性を明らかにする。

(4) 懸濁液プラズマ溶射プロセスのモニタリングおよびコントロール

懸濁液プラズマ溶射 (Suspension Plasma Spraying) 法によって成膜された遮熱コーティングのセラミックトップコートは、成膜中に縦割れを生じさせることで供用中の熱疲労破壊を軽減させている。申請者らは以前の研究で、この縦割れが溶射時の急加熱にともなう熱応力によって発生することを AE プロセスモニタリングで確認したが、波形の S/N 比が低いため解析は手動に頼る部分が大きく、リアルタイムには行えなかった。²⁾ そこで本研究では、改良した CWM を用いて溶射中の AE 検出を自動かつリアルタイム化し、トップコートに高密度で縦割れが導入され、かつ横割れが生じないような条件を維持できるように、AE 検出結果に基づいたプロセス制御が行える情報を取得することを目指す。具体的にはプラズマ出力やタッチ速度を制御するほか、溶射直後に縦割れ密度を確認しながらポストヒーティングを行うなどの方

法が考えられる。

以上の研究は装置開発に関しては申請者単独で行うが、実験補助を学生 1~2 名にお願いする。このほか、FSW は茨城県工業技術センターの行武栄太郎氏、大阪大学の藤井英俊教授、上路林太郎准教授、SPS は物質・材料研究機構の黒田聖治氏、荒木弘氏に、それぞれ装置使用に関してご協力を頂く。

1) K. Ito et al., Progress in Acoustic Emission XVI (2012) 55-60.

2) K. Ito et al., Sci. Tech. Adv. Mater., 15 (2014) 035007.

4. 研究成果

(1) AE 波形のノイズフィルタと AE 事象検出のパラメータフリー化

AE 波形に含まれるノイズは連続的なものと突発的なものに大別され、さらに前者は機械的振動に起因する低周波ノイズと、それ以外の高周波を含んだバックグラウンドノイズに、後者は電氣的ノイズと外来の機械的ノイズに分類できた。このうち突発的ノイズは立ち上がりを検出できるため、通常の AE 事象検出過程で一旦検出させた後、電氣的ノイズは全 AE センサで完全に同時刻で立ち上がりが見られるという特徴によって、機械的ノイズは位置標定結果によって、それぞれ無効なものとして自動的に除去できた。一方、連続的なノイズは連続波形のフーリエ変換結果から周波数-強度特性が判明するため、自動的に除去すべき周波数ドメインフィルタの特性を決定できた。

AE 事象の検出については、しきい値の段数によって検出精度と計算量が変化するが、経験的に 6 dB 間隔のしきい値で良好な結果が得られることが分かった。本研究で使用した AE センサでは最大 60 dB 程度の S/N 比であったため、設定されるしきい値は 10 段程度となり、さほど大きな演算量は必要となかった。

(2) 多並列演算による AE 連続波形解析のリアルタイム化

GPGPU プラットフォームには最も普及している NVIDIA 社の CUDA を選択し、バージョンは 5.5 を用いた。GPU は CPU と比較して演算コアあたりのパフォーマンスは低いものの、コア数が数百~数千と多いため、演算処理を並列性の高いコードにすることが求められる。

本研究では表 1 に示した 2 種類の GPU と性能比較用 CPU を用いた。図 2 は CPU と GPU #1 で同一の連続波形を処理させた際のスループットを比較したものである。GPU #1 は CPU の最大 6 倍程度の処理能力が得られ、AE 連続波形のリアルタイムノイズフィルタの実現に十分な性能を示した。ここで、計算パイプラインを長くして並列度を高めるほど演算性能も高められたが、ある程度で飽和す

る現象が見られた。これは、CPU に直結された PC のメインメモリから GPU の専用メモリにデータを転送する際に通るバスの帯域が半二重 4 GB/s と低いためであることが分かった。CPU と GPU で交互に処理を行わせると、データが何度もこのバスを往復して性能上のボトルネックになりやすくなるため、図 1 に示したように CPU と GPU 間の往復を 1 回のみとした。また、FFT 処理を複素数-複素数で行う cufftexecC2C 関数に比べ、実数-複素数で行うためデータ転送量が半分となる cufftexecR2C および同 C2R 関数を使用した方が高いスループットが得られた。

さらに、CPU-GPU のバス幅が全二重 8 GB/s と CPU #1 の 4 倍近い GPU #2 で同一のテストを行うと、図 3 のように更に並列度を上げてスループットを高めることができ、最終的に CPU の 25 倍程度である 10 億サンプル/s 程度の処理能力が得られた。このことから、FFT と逆 FFT のような比較的単純な計算では GPU の計算能力ではなく、CPU-GPU 間のバス帯域がボトルネックとなることが確かめられた。また、安価な GPU #1 でも CWM に必要な処理能力が得られたため、エラー訂正機能の有無を除けば安価な GPU で十分であることが示された。

表 1 CPU と GPU のスペック

	CPU Intel Core i5 3570K	GPU #1 NVIDIA GeForce GT 640	GPU #2 NVIDIA Tesla C2050
Cores	4	384	448
Frequency	3.40 GHz	0.90 GHz	1.15 GHz
Operations/clock*	8 Flops/Clock	1 Flops/Clock	1 Flops/Clock
Performance*	109 GFlops	345 GFlops	515 GFlops
CPU-GPU memory bandwidth	-	4 GB/s Half-duplex	8 GB/s Full-duplex

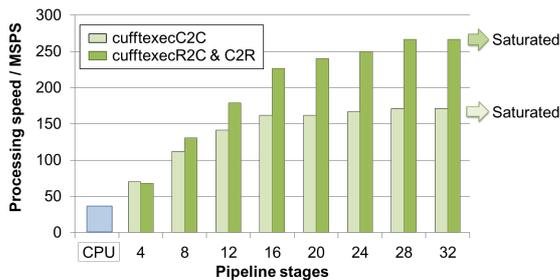


図 2 CPU と GPU #1 の処理能力の比較

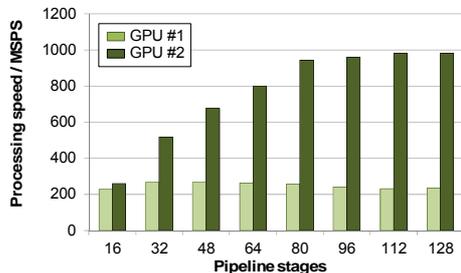


図 3 GPU #1 と GPU #2 の処理能力の比較

(3) 摩擦攪拌接合のプロセスモニタリング

接合部を取り囲むようにマグネシウムの薄板試験片上に 4~6 個の AE センサを設置し、接合開始前から終了後まで AE を検出した。

前項までに述べた波形処理の改善を行った CWM を使用したため、ノイズ除去と AE 事象抽出は自動化できた。さらに位置標定を高精度化したことにより、図 4 に示すように検出された AE 事象をその発生時刻と発生位置の標定結果による散布図としてプロットすると、接合位置との関係によって、AE を発生させた欠陥の要因を分類することができた。図中黒線で示した接合線の周囲である(1)は接合と同時に生じる溝状欠陥やワームホールの生成、接合中の接合済み部分に生じている(2)はキッキングボンドの摩擦、接合後の(3)は接合端部から進展するクラックに対応していることが観察結果との比較で確かめられた。また、鋼材試験片でも同様の試験を行ったところ、マルテンサイト変態の有無および量に関する情報が得られた。これらの結果は、試験片ごとに煩雑な浸透探傷試験や X 線探傷試験を行わなくても接合欠陥や変態がリアルタイムに検出できることを示したものとと言える。

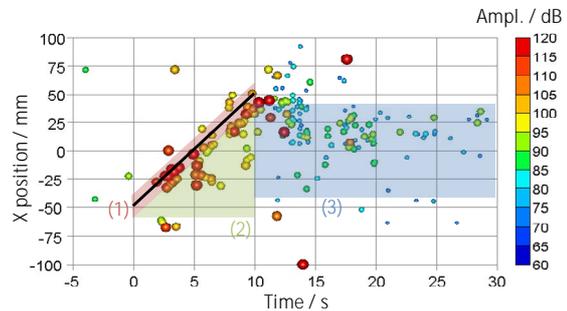


図 4 マグネシウム FSW 中の AE 検出結果

(4) 懸濁液プラズマ溶射プロセスのモニタリングおよびコントロール

溶射試験片の治具裏面に AE センサを取り付け、表面を 100 回溶射したときの AE 計測結果を図 5 に示す。溶射は約 10 秒間隔で短時間のみ行われ、このときだけ試料は加熱され、残りの時間は自然放熱により冷却されることを繰り返すものである。すると、縦割れのみが観察された試料では AE が加熱中のみ集中して発生していたのに対し、縦割れと横割れの両方が観察された試料では AE が加熱中と冷却中の両方で発生していた。また、入熱量が不足している条件では、き裂は縦・横とも発生しなかったが、入熱量を高めていくと先に縦割れが発生し始め、次第にその密度が高まり、さらに高めると横割れが発生するという関係も実験的に確かめられた。ただし、横割れが発生し始める入熱量は皮膜の厚さなどにも依存し一定ではないものと推定される。

このことから、縦割れ密度を最大化し、横割れの起こらないトップコートを成膜するためには、この AE のリアルタイム検出結果に基づいて溶射中に溶射距離やタッチ速度をコントロールすることが有効であることが示された。たとえば、縦割れにともなう

AE が一定頻度を超えない範囲で入熱量を高める、横割れの AE が検出されたら入熱量を下げるなどの制御が有効であるものと思われる。

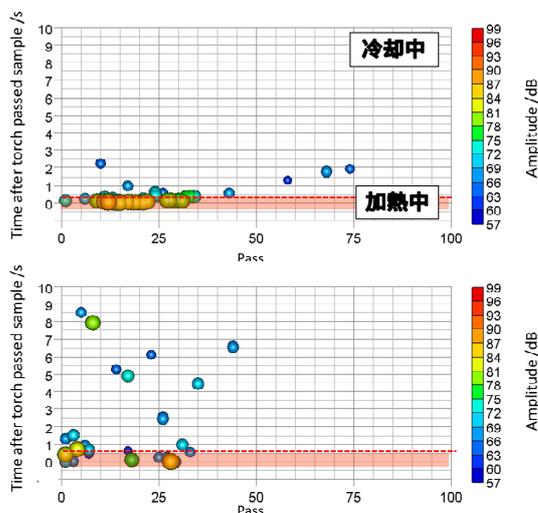


図 5 SPS による成膜後に縦割れのみ観察された試料(上)と縦・横両方の割れが観察された試料(下)の AE 検出結果の比較

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 0 件)

～現在執筆中～

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 伊藤 海太, 連続計測 AE 波形の解析による接合および表面加工プロセスのモニタリング, 日本鉄鋼協会【研究奨励賞受賞講演】, 2016 年 3 月 24 日, 東京理科大学(東京都葛飾区)

(2) 伊藤 海太, AE 法を用いた難燃性マグネシウム合金摩擦攪拌接合中の欠陥種の識別, 軽金属学会, 2015 年 11 月 22 日, 日本大学(千葉県習志野市)

(3) 伊藤 海太, 多段階 AIC ピッカーを用いた高ノイズ環境における AE 位置標定の高精度化, AE 総合コンファレンス, 2015 年 11 月 19 日, ウィンクあいち・愛知県産業労働センター (名古屋市中村区)

(4) 伊藤 海太, アコースティック・エミッション法を利用した鋼材溶接時の温度履歴の推定, 2015 年 9 月 16 日, 九州大学 (福岡県糸島市)

(5) 伊藤 海太, 炭素鋼板材の摩擦攪拌接合中のアコースティック・エミッション計測, 日本鉄鋼協会, 2015 年 3 月 19 日, 東京大学 (東京都目黒区)

(6) Kaita Ito, Development of advanced AE equipment and its application to friction stir welding, KRIS-U.Tokyo Joint Workshop on Structural Health Monitoring, 2015 年 3 月 14 日,

韓国標準科学研究所 (大韓民国 大田広域市)
(7) 伊藤 海太, AE 法による難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合中のリアルタイム欠陥検出, 軽金属学会, 2014 年 11 月 16 日, 東京工業大学 (東京都目黒区)

(8) Kaita Ito, Real-time Noise Reduction of Continuously Recorded AE Waveforms using GPU Based Parallel Computing Technique, International Acoustic Emission Symposium, 2014 年 11 月 14 日, 東北大学(仙台市青葉区)

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://rme.mm.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 海太 (KAITA ITO)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師
研究者番号：30554381

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし