

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14820

研究課題名(和文)自律型AEセンサネットワークの開発と難計測環境への応用

研究課題名(英文) Development of autonomous AE sensor network and application to difficult-to-measure environments

研究代表者

伊藤 海太 (ITO, Kaita)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・統合型材料開発・情報基盤部門・主任研究員

研究者番号：30554381

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：小型軽量・バッテリー駆動・無線で連続波形計測が可能なアコースティック・エミッション(AE)計測装置を開発し、材料の製造加工プロセスのように、高ノイズ・大型・密閉・回転などの計測が困難な環境でもモニタリング可能とした。また、開発した装置の社会実装を目指した応用研究も行った。鉄道車両構体の摩擦攪拌接合(FSW)プロセスのモニタリングや、金属材料の積層造形(いわゆる3Dプリンタ)で、プロセス中に微小き裂の発生をリアルタイムに検出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来のAE法の応用範囲はもちろん、材料の製造加工プロセスなどの従来では計測困難であった環境でも利用でき、かつ簡便なアコースティック・エミッション計測装置が開発された。これは材料の開発や製造の現場でリアルタイムのモニタリングで得られるデータを大きく増強するものであり、材料研究の加速やコスト低減に貢献できるものである。さらには、AEのデータをトリガとしたプロセスの制御も可能であり、これは構造材料の特性向上にも有用な効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：An acoustic emission (AE) measurement device which is compact, lightweight, battery-powered, wireless and capable of continuous waveform measurement was developed. It enabled to monitor even in difficult-to-measure environments such as high noise, large size, air-tighten and rotating, such as the material manufacturing processes. In addition, application research aiming at social implementation of the developed device was also conducted. Microcrack generation was monitored in real-time during friction stir welding (FSW) process of railway car body structure and additive manufacturing process (so-called "3D printer") of metals.

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 Internet of Things リモートセンシング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

材料・機械・土木などの分野において、微視損傷や劣化のモニタリングは、信頼性確保・開発加速・コスト低減に大きなメリットがあり、高付加価値やミッションクリティカルな部分から利用が進んでいる。アコースティック・エミッション(AE)法は、その原理からこの目的に適した数少ない非破壊評価手法のひとつであるが、検出や解析の難度の高さのために、注目度の高さと比較して応用が進んでこなかった。

AE法の発展は計測装置に付随するコンピュータの能力の進化に依存してきたと言っても過言ではなく、また、逆の見方をすれば、コンピュータの能力が限られていた時代には、計測と解析の多くの部分を人間の経験的判断に依存してきたとも言える。本研究の計画立案を行っていた当時(2016年)は、ICT(情報通信技術)の急速な発達によって、低消費電力の小型装置でも巨大なデータを高速にハンドリングできるようになり、この能力を生かすことで、計測装置の可能性が大きく上げられる可能性が見えてきたところであった。

本研究の代表研究者は、これまでも、従来のAE計測装置がノイズフィルタやイベント検出のしきい値など、多くの検出条件を事前に適切に設定しなければ計測に失敗してしまう点が、AE計測を不確実で難しいものにしていてと考え、波形を連続的にHDDへ記録できるContinuous Wave Memory(CWM)¹⁾という計測装置を開発するなど、AE計測の改良に関する研究開発を行っていた。CWMが開発されたことで、計測終了後にも「生の連続波形」を再生しながら検出条件を調整できるようになり、事前設定の不備による計測失敗を防止できるようになった。また、ノイズの正確な除去も可能となったため、高ノイズ環境での計測も容易となった。これにより、プラズマ溶射・アーク溶接・摩擦攪拌接合・レーザピーニングなどの材料加工のプロセスモニタリングや、供用中の機械のヘルスマニタリングなど、既存の装置は適用が難しかった環境でも、実用的なAE計測ができるようになった²⁾。

しかし一方で、計測装置の進化によって新たな課題も生じていた。まず、データ量は数~数十TBまで増大している。また、プロセスモニタリングやヘルスマニタリングのターゲットは、真空や高圧の密閉環境、機械の回転部など、ケーブルの取り回しが困難な箇所も多いが、これを避けてセンサを設置すると、AE波の伝播経路が軸受・ベアリング・薄板などを介した複雑なものになり、波形解析が難しくなるとともに、結果の精度も低下してしまう。

そこで、本研究の代表研究者はまた、このような課題の解決もコンピュータの発展、特にIoT(モノのインターネット)の普及に後押しされたSoC(System on Chip)の急速な能力向上と、IEEE 802.11acなどのネットワークの速度向上に依ることができると考え、AE計測装置の無線化と自律制御化が有効であると考えた。また、そのような機器がバッテリー駆動できることが、社会実装を見ずえるうえで重要であると考え、本研究を企画し、申請した。

2. 研究の目的

AE法は、材料加工のプロセスモニタリングや、機械・構造物のヘルスマニタリングに適用することで、信頼性確保・開発加速・コスト低減に大きく寄与できる手法である。しかし、既存の有線計測装置は密閉部や回転部などの重要なターゲットを直接計測できないこと、波形解析に高度な経験や知識が要求されることなどの技術課題が普及の妨げとなっている。

そこで、本研究では、連続波形計測に対応してノイズ耐性が高く、かつ無線で結果を送信できバッテリーで動作するAEセンサノードを開発し、さらに実際の材料および材料の製造加工プロセス(難計測環境)で実証試験を行う。

3. 研究の方法

「AE波形の連続計測と無線送信」を実現するために必要なスペックを定め、これを実現でき

るシステム構成を設計した。その結果、バッテリー駆動とする部分は、サイズと消費電力の両面で大きな制約を課され、内蔵コンピュータの処理能力も限定されるため、波形情報の取得と一次加工のみを担当するセンサノードとした。従来の CWM と同等の高度なノイズ除去処理や AE 事象の検出処理は外部のコンピュータで行うこととし、センサノードとの間で全波形を無線転送する仕様とした。

AE 波形を連続的にサンプリングし、全波形を無線転送するための小型のセンサノードは、市販の IoT 機器から必要な性能を満たしているものを選択し、これに必要な改良を加えて利用することとした。AE は有効周波数が最高で 1 MHz 程度であるため、センサノードに求められるサンプリング周波数は 2 MHz 以上と見積もられた。また、センサノードは 2 ch 以上の同時計測ができることが実用上の利便性が高いと考えられた。さらに、連続計測時間は、材料の製造加工プロセスを収録しきるために、概ね 8 時間以上の連続稼働ができることが求められた。

さらに、開発した装置の実証環境として、無線で連続計測をする意義が大きい材料の製造加工プロセスを複数選択した。具体的には、大型構造材の摩擦攪拌接合プロセスと、密閉環境で行われる金属材料の積層造形プロセスについて、いずれも AE モニタリングを行い、加工中の微小欠陥をリアルタイムに検出することを目指した。

4. 研究成果

平成 29 年度は、本研究の基盤要素となる「連続波形の計測と解析に対応する無線 AE センサノード」の開発を行い、動作の実証として、単一のセンサノードの AE 計測による損傷評価を行うと予定していた。前者のセンサノード開発については、市販の IoT 用センサボードから研究目的を達成できる機種を RedPitaya STEMLab 125-14 と選択し、そのハードウェア仕様に合わせて具体的な機能設計を行って、必要なソフトウェアを実装した。単一ノードの動作テストの結果、安定的な計測が行えることが確認された。後者の実証評価については、当初想定していたいくつかの計測環境のうち、摩擦攪拌接合 (FSW) を中心にテストを繰り返し、支障なく計測できることが示された。また、試験的にではあるが密閉環境や回転装置上での計測も行った。図 1 に RedPitaya STEMLab 125-14 と、それをセンサノードとして利用するときのスペックを示す。

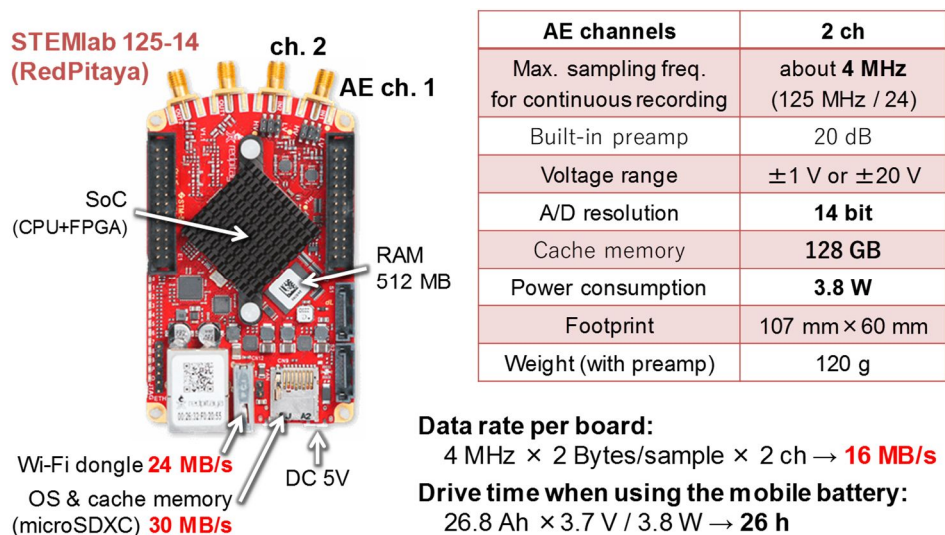


図 1 RedPitaya STEMLab125-14 と無線 AE センサノードとしてのスペック

平成 30 年度は「圧電素子を発振器として利用するセンサノード間の同期・感度チェック機能の追加」に着手するとしていた。このため、センサノード (Red Pitaya STEMLab 125-14) の DA (デジタル アナログ) 変換機能を利用して、AE センサに電圧を印加して十分な振幅の波形を発振させ、この疑似 AE 波を数十 cm 離れた別のノードで検出することができた。しかし、同ボ

ードの仕様により、高速 AD (アナログ デジタル) 変換を利用する AE 計測と、DA 変換を利用する発振が同時に行えず、短時間の切り換えもできないことが分かり、別の方法で対応する必要が生じた。一方、開発した装置の難計測環境への適用については、密閉環境内に置いた無線センサノードで AE を計測し、これを装置外部に Wi-Fi (IEEE 802.11ac) の 5 GHz 帯の電波で十分な帯域を確保しつつ送信することができた。図 2 に無線センサノード (AE ストリーミングのサーバ) と外部の解析用コンピュータ (同クライアント) とを繋ぐデータフローの図を示す。

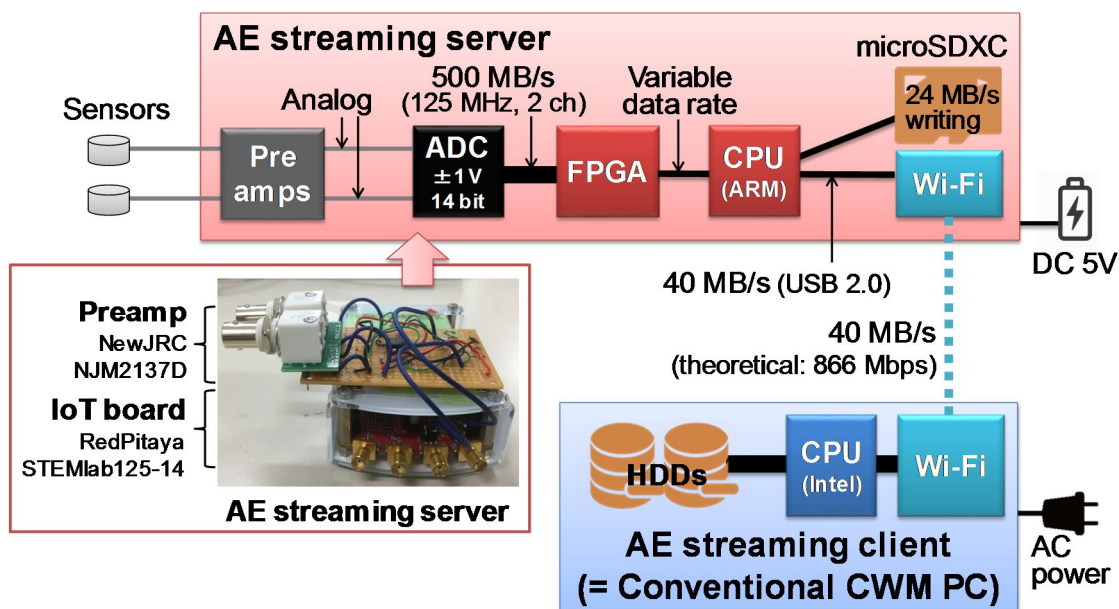


図 2 開発した装置のデータフローブロック図

令和元年度は、前年度に明らかになった AE 計測と同期用信号の発振が同時に行えない問題に対して、発振をシリアル (デジタル) 出力ポートを使って行うことにより、AE 計測と同時に行えるようにした。また、センサノード間を同期用ケーブルで接続する方法でも、実用的には問題無いことが分かった。また、センサノードの計測安定性の向上・Wi-Fi 障害時のリカバリー・消費電力の低減など、計測装置としての基本性能のブラッシュアップも行い、計測装置として完成させることができた。また、鉄道車両構体の摩擦攪拌接合プロセスのモニタリングを目的として、接合装置に AE 計測を組み込んで、大がかりな計測準備無しに、微小な接合欠陥を検出することに成功した。これとは別に、密閉環境プロセスの例として、レーザー照射による金属材料の積層造形 (いわゆる 3D プリント) で、アルゴンガス置換が必要なチャンパー内に開発した AE 計測装置を置くだけで、チャンパーの内外にケーブルを通さず、リアルタイムに造形欠陥を検出することにも成功した。

本研究により、小型・軽量・バッテリー駆動・無線で、連続波形計測に対応して耐ノイズ性に優れた AE 計測装置が完成したことで、大型構造物・密閉環境・回転体のように従来は AE プロセスモニタリングが困難とされてきた環境でも微小欠陥の発生・進展や摩擦にも応用の拡大を可能にした。他の手法では得られないリアルタイムの微小欠陥検出が行える AE プロセスモニタリングが材料の開発や製造の現場で利用しやすくなったことは、材料研究の加速に有用であると期待される。

1) K. Ito and M. Enoki, *Mater. Trans.* **48** (2007) 1221-1226.

2) 例えば K. Ito, H. Kuriki, H. Araki, S. Kuroda and M. Enoki, *Science and Technology of Advanced Materials*, **15** (2014) 035007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kaita Ito, Kazuki Takahashi, Manabu Enoki	4. 巻 36
2. 論文標題 Noise Tolerant and Wireless AE Measurement System for Process Monitoring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Acoustic Emission	6. 最初と最後の頁 S23-S26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kazuki Takahashi, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Kaita Ito, Eitaro Yukutake	4. 巻 36
2. 論文標題 AE measurement during friction stir welding of flame-resistant magnesium alloy with simulated inclusions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Acoustic Emission	6. 最初と最後の頁 S103-S106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kaita ITO, Manabu Enoki
2. 発表標題 Continuous recording and wireless transmission of AE waveforms by battery powered sensor nodes
3. 学会等名 33rd European conference on acoustic emission testing（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 一輝, 白岩 隆行, 榎 学, 伊藤 海太, 行武 栄太郎
2. 発表標題 マグネシウム合金のFSW中のAE信号の高感度無線計測
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kaita Ito, Kazuki Takahashi, Manabu Enoki
2. 発表標題 Development of wireless AE streaming server for monitoring of materials manufacturing processes
3. 学会等名 24th International acoustic emission symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Takahashi, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Kaita Ito, Eitaro Yukutake
2. 発表標題 Wireless AE measurement during friction stir welding of flame-resistant magnesium alloy
3. 学会等名 24th International acoustic emission symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 一輝, 白岩 隆行, 榎 学, 伊藤 海太, 行武 栄太郎
2. 発表標題 Mg合金の摩擦攪拌接合中における介在物起因のAEの無線計測
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季(第164回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 海太, 高橋 一輝, 行武 栄太郎, 榎 学
2. 発表標題 AE波形の連続無線転送による難燃性マグネシウムFSW中の欠陥モニタリング
3. 学会等名 軽金属学会 第133回秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤 海太, 榎 学
2. 発表標題 AE波形の連続無線転送が可能な独立センサノードの開発
3. 学会等名 第21回 アコースティック・エミッション総合コンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋 一輝, 白岩 隆行, 榎 学, 伊藤 海太, 行武 栄太郎
2. 発表標題 難燃性マグネシウム合金のFSW中のAE信号の無線計測
3. 学会等名 日本金属学会 2018年春期(第162回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤海太, 高橋一輝, 行武栄太郎, 榎学
2. 発表標題 ワイヤレスAE計測による難燃性マグネシウム合金接合品質のリアルタイム評価
3. 学会等名 軽金属学会第138回春期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤海太
2. 発表標題 AE連続波形計測による材料加工中の欠陥発生と相変態のリアルタイムモニタリング
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第180回秋期講演大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaita Ito
2. 発表標題 In-situ crack monitoring by acoustic emission method during selective laser melting process
3. 学会等名 SIP additive manufacturing international workshop (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤海太, 榎学
2. 発表標題 AE連続波形の無線伝送とリモート解析による診断システムの開発
3. 学会等名 第22回アコースティック・エミッション総合コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaita Ito, Kazuki Takahashi, Manabu Enoki
2. 発表標題 Noise tolerant and wireless AE measurement system for process monitoring
3. 学会等名 The 61st acoustic emission working group (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤海太, 高橋一輝, 行武栄太郎, 榎学
2. 発表標題 無線AEモニタリングを用いた難燃性マグネシウム合金FSW中の接合欠陥のリアルタイム検出と要因判別
3. 学会等名 軽金属学会第136回春期講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----