

# スマート工場における AE 適用の現状

日本フィジカルアコースティクス株式会社 西本重人

## Current State of AE Application in Smart Factory

Shigeto Nishimoto : Nippon Physical Acoustics, Ltd.

Keywords : Acoustic emission, Smart factory, Robot, Press machine

### 1.はじめに

インダストリー4.0 は、日本では第4次産業革命とも言われ、この第4次産業革命に対応した工場をスマート工場という。このスマート工場とは、具体的には部品調達から生産工程、出荷工程までをコンピュータネットワークで接続してIoT化を図り、生産性を高めることを目標とした工場を指す。スマート工場により、市場ニーズに合った製品を柔軟に生産できるようになり、そして生産効率は最大に高めることができる。

しかし、このような工場を具体的に構築するためには、品質や設備の稼働状況を「見える化」して、すなわち生産に影響する前に設備の故障の兆候をセンシングして設備の健全性を明らかにし、この結果を保全にフィードバックして生産への影響をできるだけ小さくする必要がある。ここで、目的を達成するための要となるのは設備状況の「見える化」である。よく「振動や温度や電流など、いろいろなデータを集めてきてビックデータを作成すれば設備の健全性を把握できる」などと言われるが、本当にビックデータで設備の健全性を評価できるであろうか？例えば、振動が上昇するという事は、半導体製造装置のような微細な加工ではすでに製品の品質に影響を与えていることになるし、緊急修理の為にラインを予定外に停止することが必要となる。すなわち、このような末期現象のデータをたくさん集めても、予知ではなく末期の状況しか把握できない。必要なのは、設備の振動や温度などの変化を生じる原因、すなわち設備に生じる亀裂や摩耗を検出しなければ健全性の評価はできない。

このような状況下、最近、AE(Acoustic Emission)法が注目を集めるようになってきた。AE法については、解説が多数出ているので本論では説明は省略するが、AE法の基本原理である亀裂や摩耗をリアルタイムに検出できる特徴がスマート工場のセンシング技術として非常に有効で、さまざまな分野のさまざまな工程へ導入が進んでいる。本論では、市場で注目を浴びているこのAE法について、スマート工場への適用例について解説していく。

### 2.スマート工場向け AE システム

AEの計測は、今まではFig.1にあるような計測ボードをコンピュータに組み込んだ大型のシステムが主流であった。価格も数百万円以上し、工場で何百台と使用するのは困難であった。しかし、ここ数年で、Fig.2に示すような、検出されたAEをFPGA(Field-programmable gate array)と呼ばれる「電子回路をプログラムで構築できる技術」により処理して評価し、評価結果をネットワークへ転送したり、Edgeで処理ができる小型の機器が開発されるようになってきた。その結果、Fig.3に示すような設備と接続してデータを収集したり、アラーム信号を発報することができる製品も提供されている。また、Fig.4に示すようなZigBeeやWi-Fiなどのデータの無線転送可能なシステムも提供されるようになってきた。

これらのシステムは、小型、低価格と言うのはもちろんであるが、さらに処理するAEのパラメータを最小限に絞っているところにも特徴がある。AEのパラメータは振幅、エネルギー、RMS、発生数、持続時間、立ち上がり時間、周波数・・・等があるが、設備の健全性を評価する場合には、後述するように振幅、エネルギー、RMSの3パラメータで評価できることが多い。したがって、上記のシステムではこの3パラメータだけを処理している。このように、処理するパラメータを3つに絞ることは、単にシステムを簡略化できるというメリットだけでなく、IoTで重要となるネットワークへの負荷も小さくすることができる。ビックデータとよく言われるが、工場の何千、何万と言う設備をネットワークで接続することを考えると、転送されるデータ量は莫大なものになるので、ネットワークにも容量の限界があることを十分に理解し、今からネットワークへの負荷をできるだけ小さくしておく努力が必要である。ネットワークへの負荷を考えても、AEは上記のように有利であると言える。

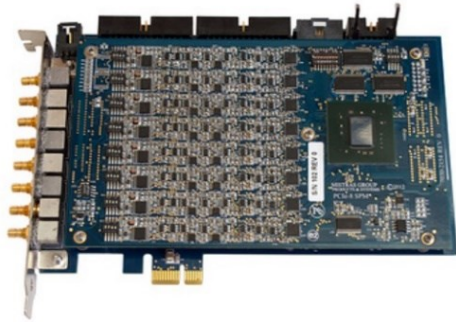


Fig.1 8CH AE 計測ボード

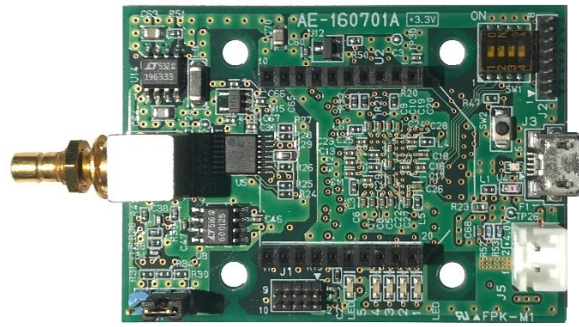


Fig.2 スマート工場向け AE 処理ボード



Fig.3 スマート工場向け AE システム



Fig.4 ZigBee 無線送信 AE システム

### 3. 適用事例

#### 3.1 ロボット

現在、生産工場の主役は人間からロボットに変わろうとしている。工場の自動化を考えた場合、ロボットの需要は益々増加すると考えられ、これに伴いロボットの故障診断の重要性は大きくなっている。ロボットの故障を考えると、主要な故障は、配線の断線、フレームの亀裂、軸受の摩耗、焼き付き、ギヤーの摩耗、焼き付き、モータの断線、放電である。これらの故障の中で、故障頻度や故障時に発生するラインの停止時間に最も影響が大きいのは、軸受やギヤーの故障である。従来は、これらの故障はモータのトルクや電流を管理することにより判断されてきた。しかし、モータのトルクが大きくなった時にはすでに設備としては故障の状態と考えられ、予定していた定期点検まで稼働させることは危険を伴うことになるので、緊急修理を行うために予定外のラインの停止が要求される。ある自動車メーカーでは、塗装工場のロボットが1台が故障するだけで、ライン停止時間1時間で1千万円以上の損失が生じる場合がある。

ロボットの軸受やギヤーの故障原因は、主に転がり摩耗が原因である。停止、起動を繰り返すロボットでは、起動時や停止時には、転がり部の油膜形成が悪くなって摩耗が進行しやすく、さらに回転数も遅いので、より油膜形成が困難で摩耗が生じやすい。AE法では、AEのエネルギー値は、摩擦現象が生じる場合には摩耗体積と相関があることから、このエネルギー値の変化からロボットの健全性を評価できる。まず、AEの検出方法であるが、Fig.5に示すように、軸受や減速機が組み込まれているロボットの関節部に取り付ける。Fig.6にロボットから検出されたAEのエネルギー値の変化を示す。ここでエネルギー値はロボットの動作1周期分の積算エネルギー値を示す。使用に伴いエネルギー値が増加し、摩耗が進行していることが把握できる。ここで重要なのが、補修するタイミングである。Fig.6のエネルギー値の増加をよく観察すると、寿命の後半にエネルギー値の増加量が変動するのが観察される。軸受や歯車の摩耗が進行すると、転がり面のすき間が増加して潤滑状態が不安定となり、また、発生した摩耗粉を転がり面に噛み込むために摩耗量が増加すると考えられ、これがAEのエネルギー値の変化として観察されていると考えられる。このように、AEのエネルギー値の変動を管理しておけば、ロボットを停止することなく、寿命後半の適切な時期に異常を判断して補修期間を確保できる。なお、AEセンサの取り付けであるが、全ての関節部にAEセンサを取り付けるのが理想であるが、コストを考えると大きな負担となる。ロボットの稼働条件により故障頻度が高い関節は特定されるので、AEで常時監視するのはこの故障頻度の高い関節に絞り、他の部分は定期点検時にAE装置で診断することによりコストを抑えることができる。

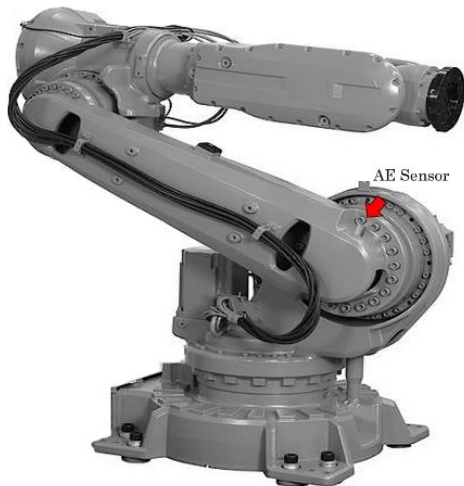


Fig.5 AE センサ取り付け位置

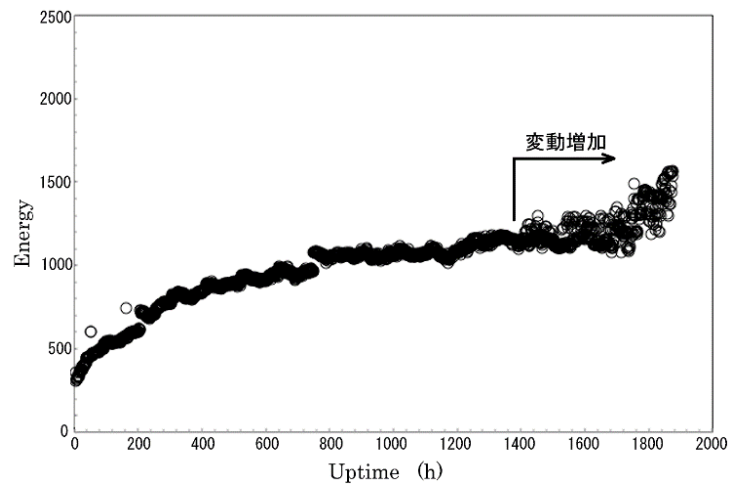


Fig.6 稼働に伴う AE のエネルギー値の変化

### 3.2 プレス機

プレス機は、工場設備の中で核となる設備である。例えば、自動車メーカーではフレームやドアの製作、電気機器メーカーではテレビや冷蔵庫の部品、電子部品メーカーでは IC フレームなどの製作に使用されている。プレス機の故障を考えた場合、主要な故障部位は、主軸の亀裂、軸受の摩耗、焼き付き、フレームの亀裂等である。プレス機は大型になると、故障発生時には部品の調達や部品交換に時間を要し、自動車のドアなどをプレスする 6000ton クラスのプレス機が故障した場合には、部品の調達も含めるとラインの停止は最悪で数か月となる。

Fig.7 に 6000ton クラスのプレス機の主軸の亀裂を評価した結果を示す。AE センサは主軸を支える両軸受に取り付けている。Fig.7 は横軸が時間経過を示し、縦軸は振幅値を示す。AE が 1 個発生すると 1 個点をプロットしている。プレス中には材料の変形や各部の動作でさまざまな AE が発生がするが、常に同一の動作をするので、プレスごとに類似した AE が発生する。しかし、主軸に亀裂が生じた場合、上記の AE に亀裂の進行や破面の摩擦により発生した AE がプラスされることになる。エネルギー値は亀裂が進展する場合には進展面積と相関があり、摩耗進行時には摩耗体積と相関がある。Fig.8 に亀裂の発生した主軸と発生していない主軸のエネルギー分布を示す。亀裂が発生すると、亀裂から発生した AE の量だけ分布が増大している。停止時に主軸の亀裂の状況を確認して AE のエネルギー分布を求めておき、図中の点線で示すようなしきい値を設定すれば、亀裂の進行を判断できる。亀裂の位置は、AE の位置標定機能を使用してもよいし、超音波探傷等の非破壊検査で確認してもよい。上記のように、本論では主軸の亀裂の評価方法を解説したが、もちろん軸受の摩耗や焼き付き、フレームの亀裂なども評価ができる。

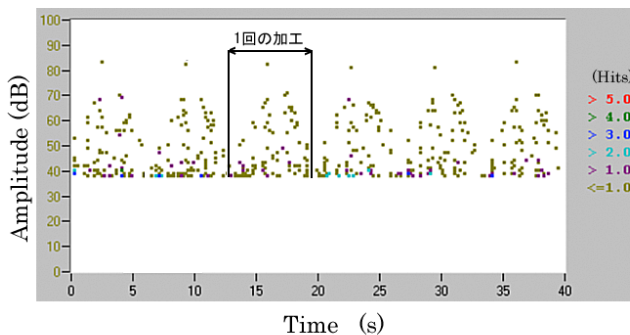


Fig.7 加工中の AE 挙動

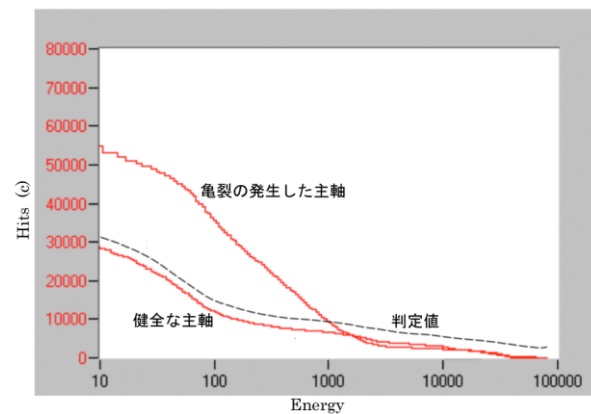


Fig.8 エネルギー分布

### 3.3 射出成型機

樹脂製品の生産工程で欠かせない設備が射出成型機である。日用品などにも樹脂成型品が多く使用され、大きなものでは自動車のバンパーなども樹脂成型品であり、身近なさまざまな製品の生産に使用されている。Fig.9 に典型的な射出成型機の構造を示す。ホップから投入されたペレット状の樹脂原料は、ホットチャンバー内で熱せられて固体から液体に変わる。この液状に変化した樹脂はスクリーにより金型内に射出され、金型内で充填・冷却して固化される。固化後、金型が解放され製品を取り出して成型が完了する。射出成型機の故障としては、樹脂を金型に注入するスクリーの摩耗、金型を支持するタイバーの亀裂、金型の亀裂、押し出しロットやエジェクティブの折損などがあげられる。それぞれ、どれも AE により評価が可能であるが、最も需要の多いスクリーの摩耗の評価について解説する。

スクリーが接触する現象を考えると、現象は転がり摩耗と類似することから、AE の挙動も転がり摩耗時の AE の挙動に類似するものと考えられる。転がり摩耗時、転がり面の粗さは AE の RMS 値と相関があることが報告されている<sup>1)</sup>。そこで、Fig.10 にスクリーが接触した時の AE の RMS 値の挙動を示す。スクリー接触時に、RMS 値の上昇と、さらに変動するのが観察され、この変化量からスクリーの接触を評価できる。秘密保持の関係でデータを示すことはできないが、スクリーの摩耗量と発生した AE のエネルギー総量の間に関係があり、逆に AE のエネルギー総量からスクリーの摩耗量を判定してスクリーの交換時期を判断できる。

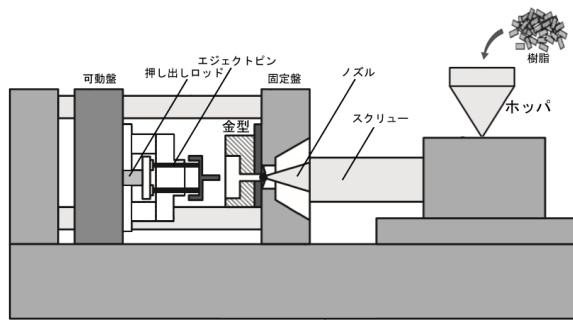


Fig.9 射出成型機

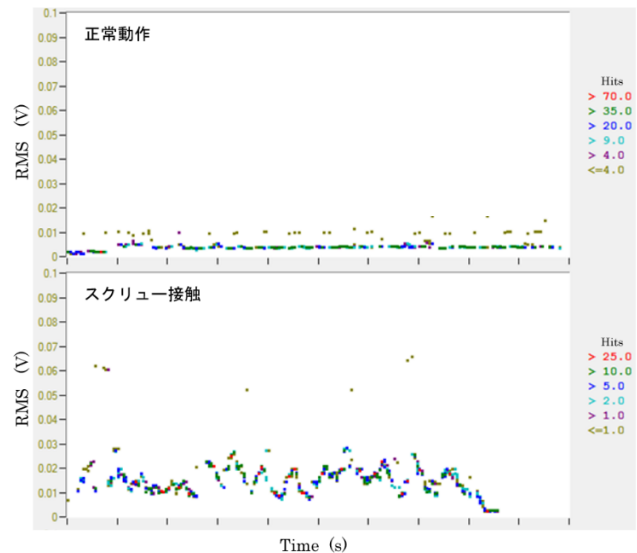


Fig.10 スクリュー接触時の RMS 値の変化

### 3.4 加工 (研削)

研削加工は、切削加工とともに製品加工のもっとも基本的な加工法であり、さまざまな分野で使用されている。研削加工は切れ刃となる砥粒の集まった砥石で製品の表面を加工する技術である。研削の不具合は、研削して発生した加工粉が砥石の砥粒間に付着して、いわゆる目詰まりが発生する。目詰まりが生じると、目詰まりした加工粉が製品表面を摩擦することになり、また研削液が流れにくくなるので摩擦熱が発生し、研削焼けと言う不具合を生じるようになる。この砥石の目詰まりや切れ刃の役目である砥粒の脱落を、加工中に直接測定することは困難であるので、ラインにおける連続加工では、一般的に定期的に砥石表面をドレッシング（ダイヤモンドの刃物で砥石表面を削って新しい研削面を生成させる）する方法が行われている。しかし、この方法ではドレッシング回数が多くなるのでライン停止時間が増加し、突発的な目詰まりが発生して研削焼けが発生すると大量に不良品が発生する。

研削状態と AE のパラメータの間に相関があることは報告されていて<sup>2)</sup>、研削焼けの検出には非常に有効な手段である。Fig.11 に示すようなクランクシャフトを加工した時の目詰まり状態と AE の振幅の関係を Fig.12 に示す。目詰まりが発生し、さらに研削焼けが発生すると振幅が増大していることがわかる。したがって、設備は、振幅値を監視することにより研削焼けを検知し、加工条件の変更や、適切なドレッシング間隔を確保することができる。

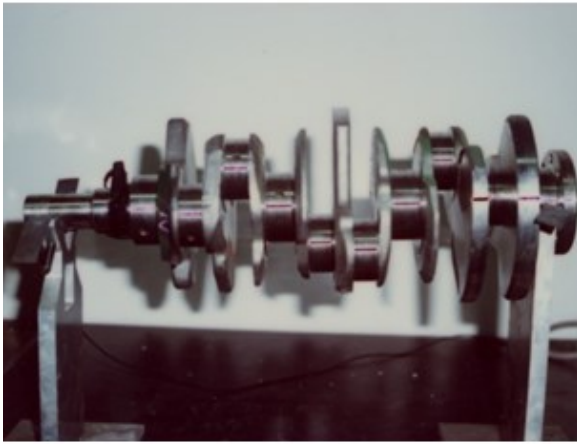


Fig.11 クランクシャフト

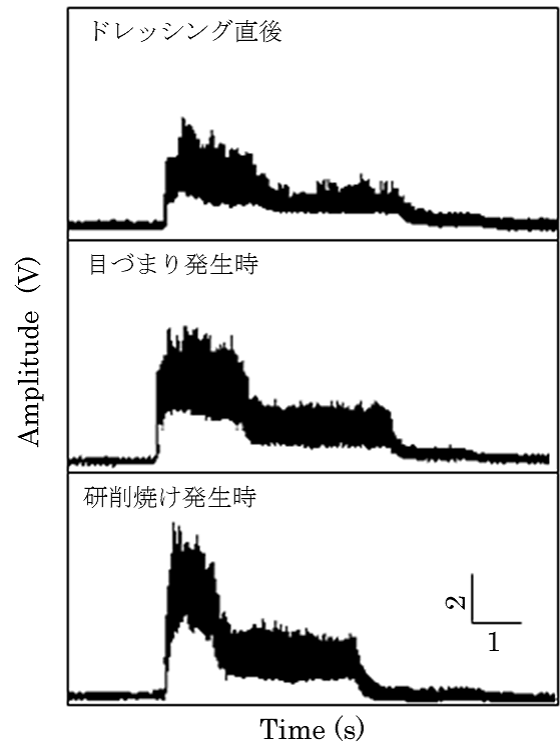


Fig.12 研削状態とAEの振幅の関係

### 3.5 溶接

溶接加工は、切削、研削、プレス加工などについて用途の多い加工方法である。溶接は、アーク溶接、ガス溶接、プラズマ溶接、レーザー溶接、抵抗溶接などさまざまな方法があるが、この中で、特にレーザー溶接は需要が年々増加している。しかし、レーザー溶接はレンズの汚れやレーザーの焦点など管理が難しく、溶接状況を把握して不良発生を防止する技術が望まれている。

Fig.13 は、レーザー溶接において、溶接不良が発生した場合の検出波形を示す。本データはスポット溶接のデータであるが、溶接不良によりAEのエネルギー（波形の面積に相当）が異なることがわかる。Fig.14 にレーザー溶接時の溶け込み量とAEのエネルギー値の関係を示す。AEのエネルギー値と溶け込み量がよい相関を示している。溶接機の不具合や、製品の位置決め装置不良などが発生すると溶け込み量が変わる。溶接の品質はもちろん、溶け込み量の変化をAEのエネルギー値で把握することにより、間接的に設備の異常を評価できる。

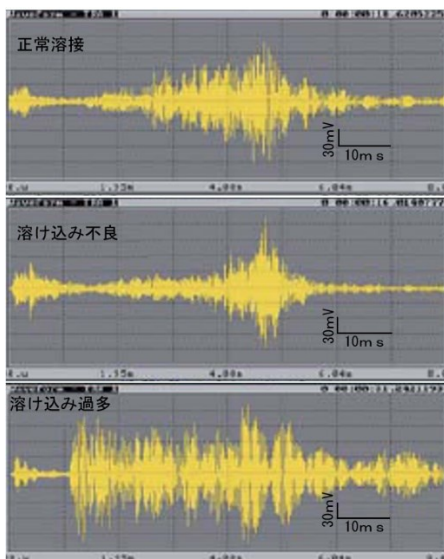


Fig.13 溶接不良時のAE信号

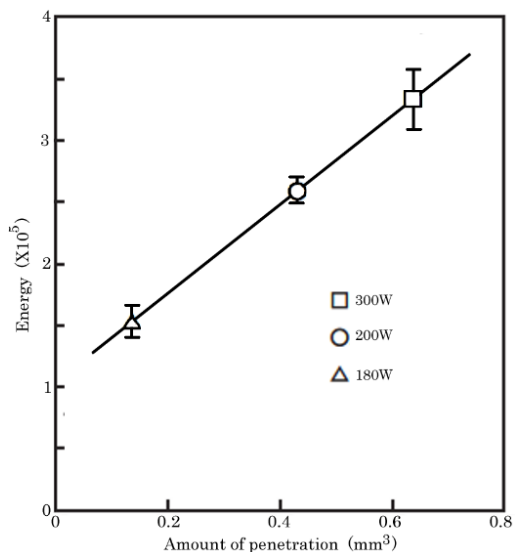


Fig.14 溶け込み量とAEエネルギーの関係

#### 4.おわりに

スマート工場を稼働していくために、設備の健全性を評価するセンシングが最も重要な技術となる。AE 法は、上述のように設備の異常の起点となる亀裂や摩耗を検出する手段として非常に有用な手段である。また、評価に必要な情報も少なく、通信量の点でもネットワークに優しい技術であり、今後、センシング技術の中心となると考える。ただし、AE は扱う周波数帯が高く（例えば軸受鋼では 100kHz～300kHz）、また信号も微弱であるので、検出や信号処理には十分注意が必要である。また、本解説の事例は、3 件以上／事例の実績がある AE 事例を紹介したが、機器の運転ノイズ、作動状況等により評価に問題が発生する場合もある。AE の導入に関しては、AE メーカーと連携し、事前試験等を実施して適用することを推奨する。

なお、本解説では、データ評価後のネットワークとクラウドなどの処理には触れなかった。ネットワーク技術は日々進歩しており、多様な方法が選択できることや、ネットワーク技術は他に詳細な解説が多数出ているので、本論では省略させて頂いた。「センシング技術」、これがスマート工場の肝である。

#### 参考文献

- (1) Alan Hase, Hiroshi Mishina, Masaki Wada: Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique, Wear, 139, 346-347 (2016)
- (2) 江田弘、貴志浩三、臼井信之、垣野義明、藤原彰彦：アコースティックエミッションを用いた研削焼けのインプロセス検出、精密機械、49 巻、9 号、103-108（1983）