

# スマート工場，スマートコンビナート，および 社会基盤構造物におけるIoT，ビッグデータ， AI 適用の現状

湯山 茂徳

工学博士，博士（学術） 京都大学経営管理大学院 特命教授  
（日本フィジカルアコースティクス㈱ 代表取締役会長：〒150-0011 東京都渋谷区東 2-17-10）  
E-mail: yuyama@pacjapan.com

バブル経済の崩壊後，経済成長がほとんど停止し，さらに少子高齢化に直面する日本にとって，21世紀型製造業の創生，そしてサービス業の効率化は避けて通れない課題である。21世紀型製造業とは，品質の良い製品を大量生産し，市場に絶え間なく供給するというような従来型製造業ではなく，IoT，ビッグデータ，AIなどの先進技術を駆使し，産業の基礎となる「素材+機械+電気・電子+通信+情報+ソフトウェアアプリケーション+デザイン+エンタテインメント」を融合し，共通化した信頼性の高い部品モジュールを設計・製造し，グローバル市場で様々な異なる消費者，すなわち市場の嗜好に合わせて付加価値（例えば，自動車なら自動運転などのAI機能や，好みのデザイン，仕様など）を創造・創作し，少量・大量に関わらず低コストで生産して，可能な限り高価格で購入してもらえるシステムを築ける企業のことを言う。現在起こりつつある急速な市場の変化を見れば，地球規模の大競争において勝者になるのは，こうした企業のみであることが，容易に推測される。IoT，ビッグデータ，AIを基礎におく第4次産業革命は，最近大いに注目を浴びている外来語である。しかし，類似の，あるいはより先進的な概念は，一部の日本企業において，2000年代初頭には既に存在していた。本稿では，国内外の工場，コンビナート，インフラ構造物などに対するIoT，ビッグデータ，AIの適用実例を紹介し，21世紀型製造/サービス業における国内企業のグローバル競争力を考察し，今後進むべき方向について検討する。

*Key words: AI, big data, infrastructure, IoT, smart complex, smart factory.*

## 1. はじめに

IoT（もののインターネット），ビッグデータ，AI（人工知能）などの用語が，大きな注目を浴びている。2016年4月19日，政府が主催する産業競争力会議は，成長戦略の概要をまとめた。2016年4月時点において500兆円の名目GDPを，600兆円に高めるために，成長戦略としてIoT，ビッグデータ，AIなどの先進技術により新たな市場を創出し，第4次産業革命（Industry 4.0）を起こすことを一つの柱にしている。少子高齢化に苦しむ日本にとって，世界の主要プレイヤーとして生き残るために，こうした

施策の実行が極めて重要で，必要欠くべからざるものと考えられる。

現在，「ビッグデータ」は必ずしも定義がはっきりせず，曖昧な意味を含んだまま，個々の都合や状況に合わせ，大量のデータを取扱い解析する方法を表す概念として使用されている。物理学，化学，生物学，気象学，地震学，宇宙科学，材料科学，機械工学，電気・電子工学，情報工学，土木工学，医学，農学など，科学技術の分野で扱うのは，まぎれもなく大量のデータ，すなわちビッグデータの解析・評価である。

一方，経済，経営，金融，マーケティングなどの分野で，ビッグデータという用語が近年頻りに使用され

るようになった。古くから大量のデータを取り扱ってきた科学技術において、専門用語として「ビッグデータ」が用いられることはほとんどない。しかし、経済、経営、マーケティングなどで、今まであまり注意が払われてこなかった、例えば IT (サイバー空間) で得られる様々な大量のデータから、何らかの有意な情報を得るために、統計的処理を施して特徴を抽出 (Feature extraction) し分析するなど、科学的手法 (データサイエンス) の適用が進みつつある。ビッグデータは、ほぼ同時進行の形で、加速度的に発展を続ける IoT, AI とともに、時代を代表する用語になっている。

2016 年の初頭、文部科学省、総務省、経済産業省の連携により、AI を核とした IoT の社会・ビジネスへの実装に向けた研究開発・実証が進められつつあることが報道された。これは、3 省連携による研究開発成果を関係省庁にも提供し、政府全体として更なる新産業・イノベーション創出や国際競争力強化を牽引することを目的としたものとされる。

我が国で、最初にスマート工場の原型をなす IoT の適用が行われたのは、およそ 15 年前の自動車、及び自動車部品工場においてである<sup>1)</sup>。データ採取には、100kHz~1MHz に高感度を有するアコースティックエミッション (AE) センサーが用いられ、自動車部品の成型、プレス加工、研削などの製造・生産プロセスにおいて、不良品検出、製品管理の目的で連続的にデータが採取され、工場内 LAN を通して工場管理のスマート化が試みられた。

一方、欧米諸国において、加齢化する橋梁などインフラ構造物のヘルスマニタリングとして、数多くの IoT が実施されている<sup>2)</sup>。我が国では、2000 年代初頭に、IoT による構造物の健全性評価の実用化をめざし、高速道路橋で AE による連続モニタリングの基礎実験が行われた<sup>3)</sup>。しかし、その後実質的進展の見られないうちに、欧米諸国での成果が広く知られるところとなった。

化学コンビナートには、各種タンクなどの貯蔵施設、配管、反応容器、ポンプなど多種・多様な機器が存在する。それらを操業停止することなく、安全性を確保したうえで効率的なメンテナンスを実施することが、最重要課題となっている<sup>4)</sup>。そのための方法として、プラント各所に様々なセンサーを取り付け、常時監視によるスマート化 (IoT 化, AI 化) が、世界各地で行われようとしている。

本稿では、国内外における工場、コンビナート、インフラ構造物などの IoT 適用状況を、紹介する。続いて、圧力容器の加圧試験時に検出された AE 計測データで形成されるビッグデータの解析例を示し、さらに自動車工場における AI 化、そしてプラントメンテナンスにおける AI 化について検討する。これらを基に、21 世紀型製造/サービス業における国内企業のグローバル競争力について考察し、今後進むべき方向について提言する。

## 2. IoT, ビッグデータ, および AI

既に多くの分野で、IoT が利用され、種々のセンサーを用いた連続モニタリングが実施されつつある。ここでデータ採取速度を考えると、例えばコンビニチェーンの POS (販売時点情報管理) システムにおいて、一店舗に 3 台の端末レジがあると仮定する。いま、チェーン総店舗数が 10 万店で、各レジ当たり 10 秒に一回のデータ入力 (サンプリング周波数:  $10^{-1}$ Hz) が行われるとするなら、全システムで採取されるデータセット数は、毎秒  $3 \times 10^5 \times 10^{-1}$ 、すなわち  $10^4$  程度のオーダーとなる。

また、健康状態管理のために体温計あるいは血圧計などを体に取り付け、スマートフォンを用い、10 秒に 1 回の頻度で体温や血圧を測定し、データ化するために必要なサンプリング周波数は、 $10^{-1}$ Hz (1 サンプル/10 秒) である。もし 1 時間に 1 回測定するなら、1 時間は 3,600 秒なので基本的に  $1/3,600$  サンプル/秒のデータ採取能力があればよい。したがって、サンプリング周波数は  $10^{-3}$  Hz より小さくても十分な精度が出せる。いま、 $10^{-1}$ Hz のサンプリング周波数で 100 万人分のデータを採取するなら、1 秒あたりに入力されるデータセット数は、 $10^5$  ( $10^6 \times 10^{-1}$ ) 程度となる。

一方、構造物のモニタリングに使用されるセンサーにおいては、扱われる周波数帯域が 1MHz を超える場合があり、この時十分精度の高い計測を行うために必要なサンプリング周波数は、10MHz ( $10^7$ Hz) となり、センサー 1 個あたりで採取されるデータ量は、前述した POS システムや、体温あるいは血圧測定を 10 秒に 1 回行う場合に比べ、 $10^2 \sim 10^3$  倍になる。

とりわけ、被計測ユニット (計測が具体的に実施される部材やロボット) 数が数百を超える大型構造物や、工場設置機械システムにおいて、使用されるセンサー数は各ユニット当たり最低 2 個程度必要なため、シス

テムに入力する全データセット数は、 $10^{10}$ /秒のオーダーに至り、POS システムや、健康管理システムの場合に比べ、採取されるデータセット数は  $10^5 \sim 10^6$  倍程度大きくなる。したがって、回線が持つデータ転送能力の限界を超えることで起こるデータ転送遅延や採取エラーを防ぐための対策として、端末とシステム間に十分な容量を持つバッファメモリを置くことに加え、データ入力後のなるべく早い時期に適切な信号処理を施すことが必須となる。さらに、ビッグデータ解析に適用される手法（特徴抽出機能）を用いて予め初期解析を行い、分散設置された AI ローカルプロセッサ（モジュール）などで高度な解析を実施し、転送されるデータ量を圧縮することにより、システム障害の発生を防ぐ必要がある。

最新の AI では、ニューラルネットワークの多層化により、情報が第 1 層から 2 層、3 層と深く伝達される過程で学習が繰り返され、特徴量が自動的に計算されるディープラーニングが用いられる。これは、人間の脳の構造をソフトウェア的に模倣し、人間が関与せずに機械が自ら特徴を抽出し、事象を認識して分類することにより学習を進める方法で、画像認識や音声認識などの分野で広く用いられている。初期段階で開発されたものは、層が直列におかれた単純な構造をしていたが、現在用いられるアルゴリズムでは、複数に分岐し、ループ構造を持つなど構造が複雑化している。ディープラーニングで訓練された AI が、現在最強と言われる囲碁棋士と対戦して勝利したことがニュースで報じられ、その発展の速さと能力に、驚きが広がった。

今日一般的に用いられる AI は、ビッグデータからディープラーニングを用いて特徴抽出を行い、画像認識、音声認識、状況把握・予測、自動車など機械装置の自動運転・制御・自己診断、医療診断など、人間が決して扱えないほど大量のデータを、瞬時に処理して学習・行動するという、コンピュータが機械として本来持つ機能を、最大限活用するものである。

利用範囲がこの程度で、AI がヒトの手助けとなる作業を実施するだけの存在なら、倫理的問題は、特に発生しない。しかし、最近マイクロソフト社が行った AI の公開学習において、悪意を持った情報が恣意的に入力されることにより、機械が無分別にそれらを学習してしまい、AI がヒトラー崇拜発言や、様々な差別的発言をするようになり、直ちにこの実験は取りやめられ

たとの報道があった。このように、誤った情報や悪意に基づく情報が意識的に入力され、機械が無分別にそうした情報を学習してしまう場合には、倫理的に大きな問題を起こす可能性のあることが懸念材料となっている。

アニメや SF の世界では、鉄腕アトムを筆頭に、様々なヒト型ロボット（アンドロイド）が大活躍している。こうしたロボットは例外なく、ヒトをはるかに凌駕する身体的・頭脳的超能力に加え、ヒトと同じような感情や判断能力を持ち、日々の生活の中で、喜び、悲しみ、悩み、そして苦しんだりすることを繰り返している。こうしたアンドロイドが、近い将来登場することは可能なのであろうか。

真のヒト型ロボットには、人間、そしてロボット同士で互いにコミュニケーションし、他者の心を思い計るなど、ヒトのみが持つ認知・非認知による心の働きを導入する必要がある。それは、ヒトの脳と全く同じ機能を持つ、極めて高度で複雑な脳と長期の学習からもたらされる。現時点で、ヒトの脳が持つ機能や働き、そしてその仕組みがすべて解明されているわけではなく、それが可能になるには、今後も多くの試行錯誤と長い道のりを経た研究が必要と考えられている。したがって、真の意味でヒト型ロボットが近い将来登場するとは考えにくいというのが、多くの見解である。

### 3. IoT の適用事例

#### 3.1 IoT に用いられるセンシング技術

スマート工場やスマートコンビナート、また様々なインフラ構造物に設置されるセンサーで採取されるデータは、ひずみ、変位、応力、振動、温度、圧力、流量、電力量、AE などが一般的である。ほとんどの場合、サンプリング周波数として  $10^1 \sim 10\text{Hz}$  の帯域で測定が行われ、データ採取量がそれほど大きくないため、通常ならデータ転送、解析に問題は生じない。しかし、振動（加速度）計測では  $10^2 \sim 10^5\text{Hz}$  が、また AE 計測では  $10^3 \sim 10^6\text{Hz}$  の周波数帯域が対象となるため、低周波数帯域での測定とは異なる方法が要求される。とりわけ、AE 計測においては、有効な波形・周波数データを採取するために、入力する信号を  $10^7\text{Hz}$  程度のサンプリング周波数（16 ビットの分解能）でデジタル化するのが一般的で、極めて大量のデータを扱うことになる。したがって、円滑なデータ転送やデータ解析を行う目的で、アナログ時代（1970

年代) から数十年に渡り開発・確定された, AE 計測専用の信号処理方法に基づく, ビッグデータ処理が適用される. AE 法を用いることにより, 環境雑音 (通常  $10^4\text{Hz}$  以下の周波数帯域) に影響されない計測が行えるため, スマート工場, スマートコンビナート, そして各種インフラ構造物の連続モニタリングを実施するための切り札になると期待されている.

本来的な AE 発生源は, 固体内部で局所的に発生する微小な変化に起因する. たとえば, 微小な欠陥 (クラック) の発生や成長, 相変態, 双晶変形, 転移の運動などがこれにあたり, 一次 AE 源と呼ばれ, 材料評価や構造物の健全性診断の際に検出される重要な AE 発生源である. 寸法が  $10^7\sim 10^{10}$  倍程度異なるが, AE 発生と地震の発生は, 固体内部で生ずる急激な変化に起因する弾性波の発生という点で全く等価であり, AE 発生の理論式として, 地震発生を記述する式がそのまま適用される. したがって, AE は極めて微小な地震であり, 逆に地震は極めて巨大な AE であるといっても差し支えない.

一方, 二次 AE 発生源と呼ばれるものに, 機械振動や, 摩擦, あるいは漏洩に起因する音源がある. これらは, 回転装置の異常診断, 弁の漏洩検出などプラントの状態監視や, 工場における設備診断に広く適用されている.

AE センサーで検出され, 内蔵のアンプで増幅後 AE 計測装置に入力された AE 信号は, 解析のために信号処理が行われる. AE 信号には, 図-1 に示されるように, 計測装置の持つ熱雑音や, 周りの環境雑音に起因する背景雑音が必ず存在する. したがって, 有効信号のみを検出・解析するために, 背景雑音に比べ十分 (通常は  $6\text{dB}$  (2倍) 程度) 大きな振幅値にしきい値を設定し, それを超えた信号のみを識別して取り出し, 信号処理を行う.

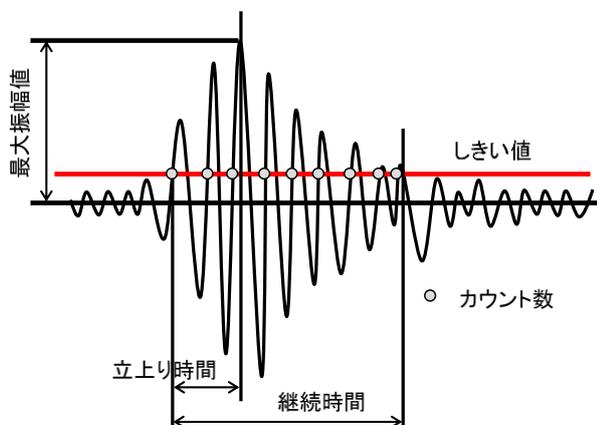


図-1 検出された AE 波形の信号処理方法

定し, それを超えた信号のみを識別して取り出し, 信号処理を行う.

信号処理法として, 一般的にヒット処理が適用される. この場合, 図-1 に与えられる検出 AE 波形を包絡線検波してできる, 波形の一かたまりを一個の信号 (ヒット) と定義する. 解析・評価は, その個数や最大振幅値, カウント数 (振動の回数) あるいは面積で表される相対的エネルギーなど, 抽出された AE 特徴パラメータの大きさや発生頻度などを比較することにより実施される. これは, ちょうど微弱な初期微動から始まり, やがて大きな主振動につながる一連のゆれを 1 回の地震と数え, その発生回数や大きさ (マグニチュード) を基に, 地震活動の程度を評価することに類似している.

また, 複数の AE センサーへの信号到着時間差を基に, AE 波の発生位置を評価する位置標定がしばしば行われる. この方法は, 地震波において各計測地点への到着時刻の差を利用することにより, 震源位置を決定するのと全く同じである.

## 3.2 スマート工場における機械・装置の状態診断<sup>1)</sup>

### 3.2.1 背景

自動車業界をはじめ各製造メーカーでは, 製造コストを低減するために, 製造ラインの自動化を推進し, さまざまな取り組みを行っている. ラインの自動化を進める場合に最も大きな障壁になるのは検査工程で, 人間による検査工程をいかに自動化できるかがライン自動化の要となる. また, 自動化が進むと, 安価な部品製造過程で, 不良品が 1 個発生した場合であっても, それが後工程に流れると最終的に大きな損失を生むことになる. したがって, 各工程における信頼性の高い製品検査が, 非常に重要となる. さらに, 市場の製品に対する安全性への要求は年々増加し, 企業として製品の品質確保が, 喫緊の課題となっている. ここでは, 製品検査手法として, 近年急激に導入が進んでいる AE 法をとりあげ, 実施例を示すことにより, その応用方法と有用性を紹介する.

### 3.2.2 絞り加工

金型を用いる絞り加工は, 自動車や鉄鋼業界, また家電業界をはじめ, さまざまな分野で使用されている. 絞り加工は, 他の加工方法と同様に生産性を向上させるために加工速度の改善が行われている. しかし, そ



写真-1 金型絞り加工中に製品で発生した亀裂

の反面、加工により製品に欠陥が発生すると、大量の不良品を発生させる危険性がある。現状では、絞り加工後の製品検査は、検査面が広範囲であることや、製品の形状が複雑なものが多いことから、人間による目視検査が中心となり自動化が遅れている。以下に、自動車ボディーの絞り加工における製品の亀裂検出に AE 法を適用し、加工後の自動化を成功させた事例を紹介する。

写真 1 に、加工後の製品形状と発生した亀裂の例を示す。図中に示すような形状の変化部に亀裂が発生しやすいが、常に決まった位置に発生するとは限らない。ここでは、一例として大きな亀裂発生を示したが、通常は目視では認識が困難な、小さな亀裂の場合が多い。

AE センサーは、亀裂が製品中で発生するため、製品に直接取り付けることが最良であるが、通常は製品にセンサーを設置するような治具や、機構の追加加工は難しい。そこで、製品と直接接する金型にセンサーを設置し、金型中を伝搬する AE 信号を検出する。また、上金型は上下に稼働してノイズを発生しやすいので、下金型に AE センサーを設置するほうが良好な結果が得られる。

図-2 上部に、加工中に検出された AE の包絡線検波波形を示す。加工中には各種の AE が発生するが、これらは加工状態が一定であれば常に同一パターンで発生する。同図下部に、製品に亀裂が発生した際に検出された AE 信号の包絡線検波波形を示す。正常な加工の場合と比較して、異なる AE 発生が観察され、亀裂の発生を評価できる。

図-2 の Gate で示す範囲中で発生する AE のエネルギーを算出し、生産開始直後からの変化を解析した結果を図-3 に示す。亀裂発生時に AE のエネルギーが増加し、製品の亀裂発生を検知できることがわかる。

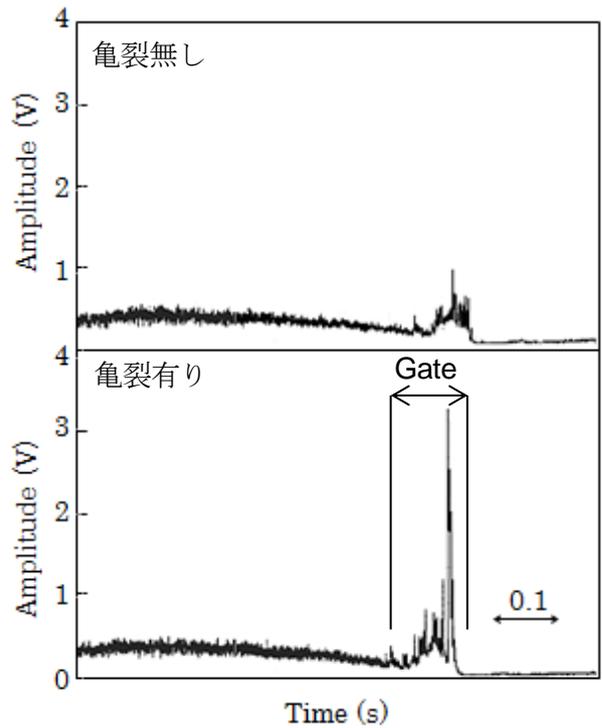


図-2 絞り加工中に観察される包絡線検波波形

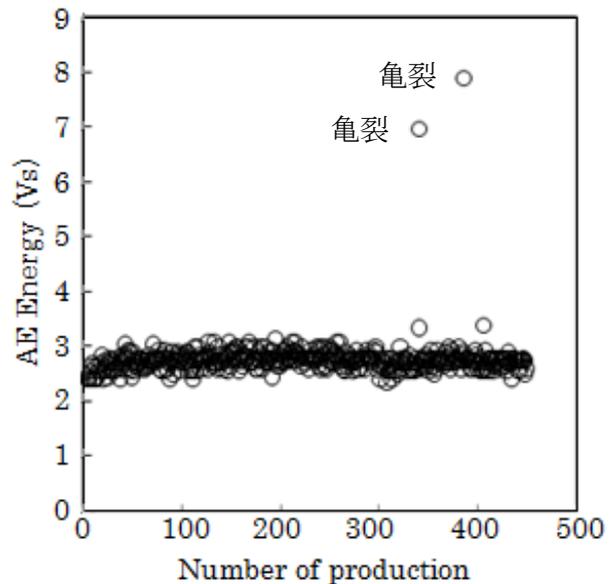


図-3 検出される AE エネルギーの時間履歴

### 3.2.3 研削加工

研削加工は、切削加工と並び製品加工の最も基本的な加工方法で、さまざまな分野で使用されている。研削加工における製品不良は、主に砥石の切れ刃の低下や、目づまりによって発生するが、これらを直接測定することは困難で、ラインの連続加工においては、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

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)する方法がとられている。しかし、この方法では、砥石がまだ使用できる状態でもドレッシング作業を行うので生産コストが高くなり、さらに突発的な目づ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。そこで、クランクシャフトの研削加工にAE法を適用し、研削状態を評価した例を紹介する。

研削時に発生するAEを検出するために、クランクシャフト内を伝搬するAEの減衰と、ノイズの評価を行った結果、金属シューにAEセンサーを取り付けるのが有効と確認された。図-4に、ドレッシング直後のAEの包絡線検波波形と、目づまりが発生した場合の波形、さらに研削焼けが発生した場合の波形を示す。研削加工において、砥石の接触面は一種の摩擦摩耗現象が生じていると考えられ、目づまりが発生すると摩擦が増加する。これを裏付けるように、目づまり発生時にAE振幅値が上昇することが観察される。また、研削焼け発生時に振幅値が著しく上昇し、研削焼けの発生を検知できる。従来、研削焼けの検出には、研削後に磁粉探傷などが実施されているが、AE法を利用することにより、加工中に判断することができる。

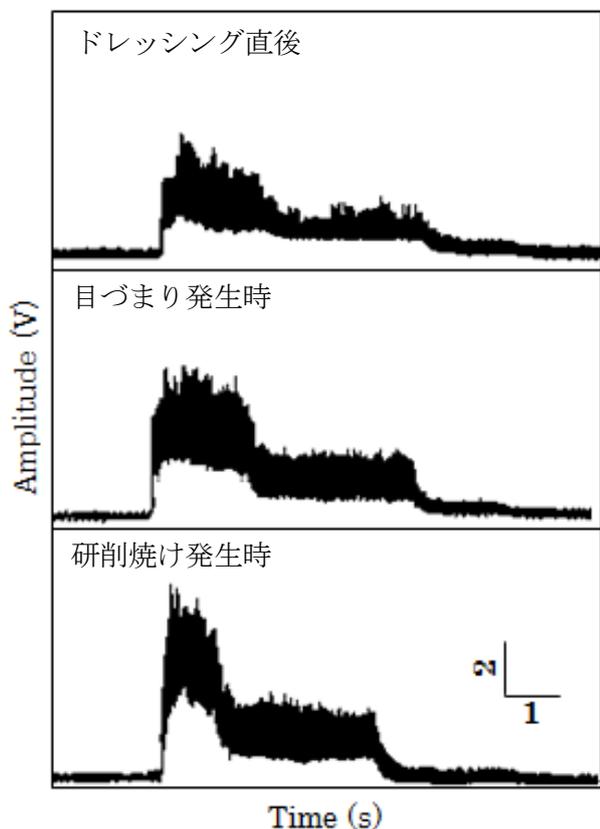


図-4 研削加工中に観察される各種包絡線検波波形

### 3.2.4 特殊材料

近年、金属材料だけでなく、様々な材料が使用されるようになり、あらたな検査方法が求められるようになった。そこで、最近特に生産量が急増し、精度の高い欠陥検査需要が急増する太陽光発電用ソーラーパネルの欠陥検査に、AEを適用した事例を紹介する。

ソーラーパネルの材料となるシリコンは、金属に比べ吸収係数が低いことに加え、検出対象のクラックは、X線透過厚の差が生じにくくコントラストが得にくいのために、X線検査は適用されていない。またシリコンパネルの生産ラインでは、スループットやコストなど生産性の面から、超音波探傷やX線検査は適用されていないとされる。したがって、ソーラーパネルの製造工程において、シリコンに存在する欠陥の検出は、最終の発電試験工程で、所定の発電力が得られないことにより初めて認識される。しかし、この時点ではパネルは最終製品に近く、手直しに多大な工数を要する。さらに、ソーラーパネルのコストは、その材料であるシリコンの材料費が大半をしめるため、コストダウンとしてシリコンの厚みの薄肉化が進んでいる。しかし、シリコンの厚みが薄くなるほど亀裂の発生する確率が高まり、シリコンパネルの欠陥検査の重要性がますます増加している。

写真-2に、AEによるシリコンパネルの欠陥検査装置を示す。シリコンパネルを両端から支持し、支持後に揺動指示部(B)を傾けることにより、パネルにねじり力を加える。もちろん、ねじりの大きさは、パネルの設計強度に対して十分に小さい。

図-5に、検出されたAE振幅値と、信号発生数の履歴を示す。亀裂が存在すると、ソーラーパネルにねじ

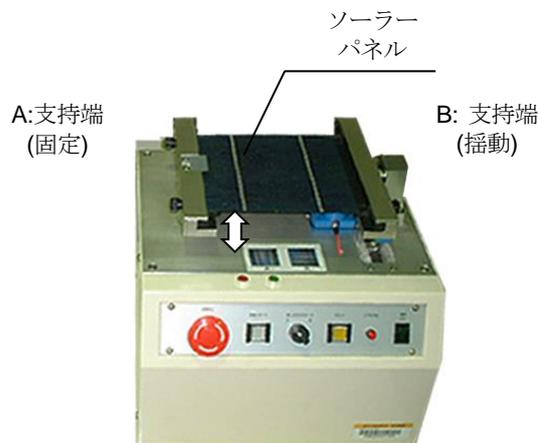


写真-2 ソーラーパネル検査装置

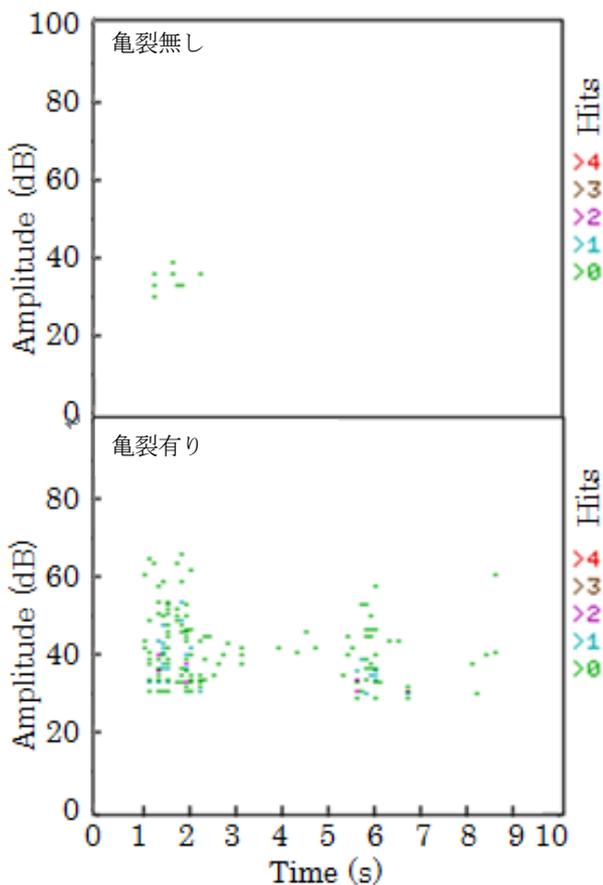


図-5 AE 振幅値の履歴

りを加えることにより、亀裂面同士で摩擦が生じて AE が発生する。図中に示されるように、亀裂が存在する場合には、亀裂のないパネルと比較して検出される振幅値が大きく、より多くの AE 信号が観察される。

図-6 に、検出された AE エネルギーと、それに対応して発生した AE 信号数の分布、すなわちエネルギー分布を示す。亀裂のあるパネル (□) と亀裂のないパネル (○) で AE の発生分布が異なり、図中に示すように亀裂の有無を、領域分けすることにより、両者を識別できる。

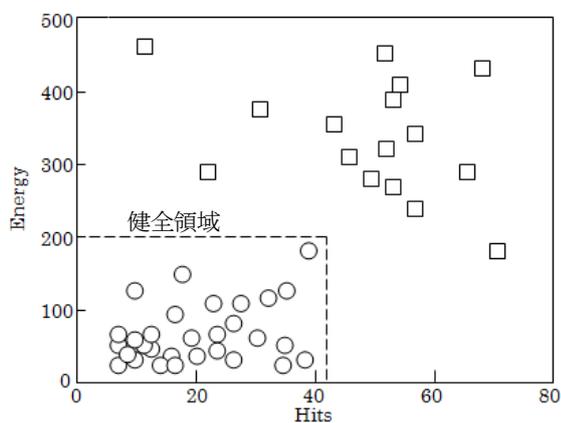


図-6 検出された AE エネルギーの分布

### 3.2.5 まとめ

製品検査として、AE 計測を実施する際にしばしば問題となるのは、製造現場と管理者のいる制御室が離れている場合が多く、検査・管理のために、往復に多くの時間を費やさなければならないことがある。この問題は、LAN を通じて構築されるネットワーク監視 AE システムを導入することにより、容易に解決できる。すなわち、端末となる AE 計測システムを各製造装置近くに設置し、それらとホスト コンピュータを LAN によって接続することにより、中央制御室で、刻々変化する現場の AE 発生状況をモニターできる。異なる複数の装置が並列で稼働している場合には、それぞれの過程ごとグループ化し、グループごとにモニタリングを実施する。

既にこのようなネットワーク監視 AE システムが市販され、現場で活用されている。こうした装置では、標準ネットワーク用ソフトウェアを利用することにより、製造現場に置かれた端末 AE 装置と全く同じディスプレイ画面を、制御室のホストコンピュータ上で、実時間でモニターし、AE 計測条件の変更や、データ管理、アラーム信号の出力などが行える。

製造現場における自動化によるコストダウン、品質管理の高度化、そして省エネルギー化への要求は、ますます高まっている。こうした要求を満たすためのオンライン検査方法として、IoT に基づく AE 法の製品検査への応用は、今後ますます増加していくものと考えられる。

## 3.3 スマートコンビナートにおける状態監視

### 3.3.1 はじめに

欧米において、構造物の設計・維持管理は従来から自主保安が原則として適用されている。こうした性能規定方式を実現し、化学コンビナートなどのプラント装置で実用化するために、多くの年月をかけてデータベースが作成されてきた。例えば API (American Petroleum Institute) により、RBI (Risk Based Inspection<sup>5)</sup>)、FFS (Fitness For Service) として、データベースに基づく、試験手順、データ解析方法、評価方法等が提示されている。

我が国においても、効率的なメンテナンスの実施、安全性の確保などの観点から、対象設備の構造などについて、詳細な仕様や満たすべき特定の数値、特定の試験等を細かく規定する仕様規定から、性能規定へと

変更の取り組みが進みつつある。

AE 法は元来、構造物のグローバル診断を実施し、その健全性の程度を判定し、問題部の存在位置をおおまかに評価するのに適した検査技法である。したがって、こうした特性を利用し、維持管理における性能規定化、すなわち RBI や FFS を導入していく際に、大きな役割を担うことが期待されている。

現在稼動中の大部分の石油・石化プラントは高度成長時代に建設され、すでに稼動開始後 30 年を越えたものも多い。今後安定型の経済成長と高齢化社会が生み出す成熟型社会への移行が進むにつれ、これら産業基盤となる構造物の効率的な維持・管理技術確立の必要性が高まりつつある。

欧米では、多数のプラント所有者からなる AE ユーザーズグループが結成され、AE 試験結果のデータベース化が実施されて来た<sup>4)</sup>。例えば、各種プラントの圧力容器、反応塔、球型タンク等の試験方法およびデータ評価・判定法を規定した「MONPAC」や、円筒型貯蔵タンク底板の腐食損傷診断のために開発された「TANKPAC」、そして各種バルブの漏えい量を定量的に評価する「VPAC」データベースなどである。これらを基に、石油・石化プラントで実構造物の損傷診断法や状態監視法として AE 法が用いられ、維持・管理経費節約の手段として、IoT が適用されつつある。

我が国でも、構造物の維持管理方法が、仕様規定から性能規定へと移行されるのに伴い、構造物のグローバル診断技術、そして状態監視方法として AE 法の有

効性が認識されるようになり、各種実構造物で適用が始まろうとしている。以下、適用実例を紹介する。

### 3.3.2 ステンレス製円筒容器の加圧試験

MONPAC データベース・評価判定法を適用したのもとして、直径 4m、高さ 3.8m のステンレス製容器に対して、操業一時停止時に窒素ガスを用いた加圧により AE 試験を実施した例がある。図-7 の TEST 1 に示されるように、加圧時に容器下部鏡板近くにグレード E (最も劣化の進んだ状態と判定) の AE 源が検出され、後に行われた浸透探傷 (PT) 試験により、保温材下に外面より生じた貫通 SCC クラックの存在することが確認された。その部分は、直ちに一時補修がなされ、後に実施された操業停止時に本格的な補修が行われた。その後容器は酸洗いされ、再び保温材が取り付けられた。2 年後に再度 AE 試験を行うと図-7 の TEST 2 に示されるごとく前回とは異なる部位にグレード D (E より劣化度は 1 ランク小) の AE 源が検出された。引き続き行われた非破壊検査により、これは容器下部の溶接熱影響部に生じた、内面ナイフライン腐食によるものであることが確認された。

### 3.3.3 球形ホルダーの加圧試験

欧米において、供用中に球形ホルダーの健全性を評価する試験法として、AE 試験が汎用されている。ホルダーの球面上に図-8 に示されるように、均等に AE センサーを配置し、ホルダーが直近の半年あるいは一

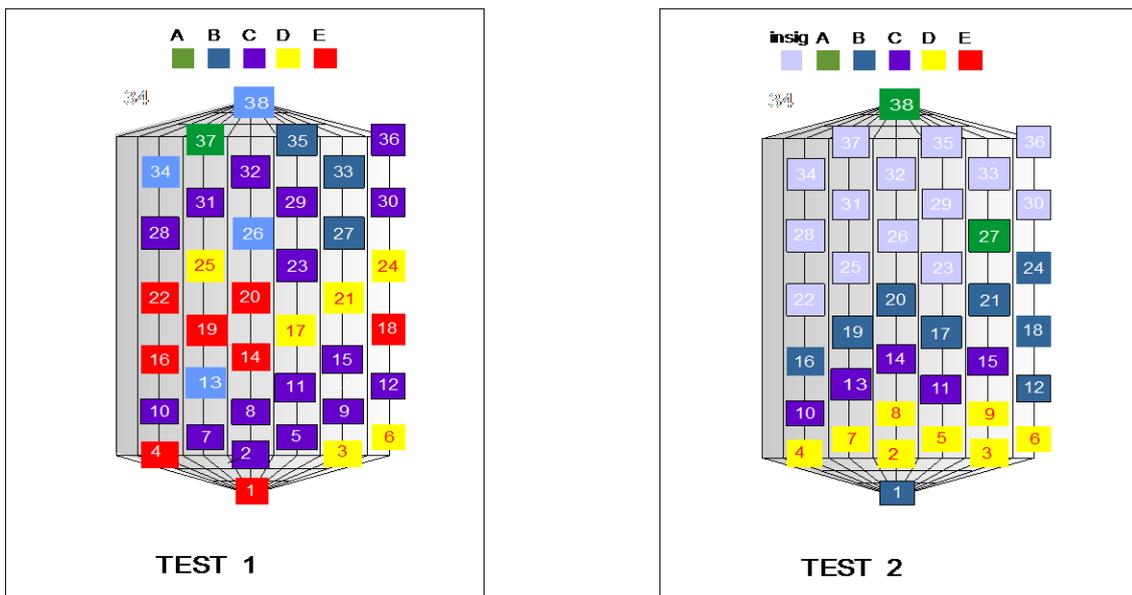


図 7 AE 試験でステンレス製円筒容器に発見された SCC クラック (TEST 1 において赤色で示されるグレード E) とナイフライン腐食 (TEST 2 において黄色で示されるグレード D)

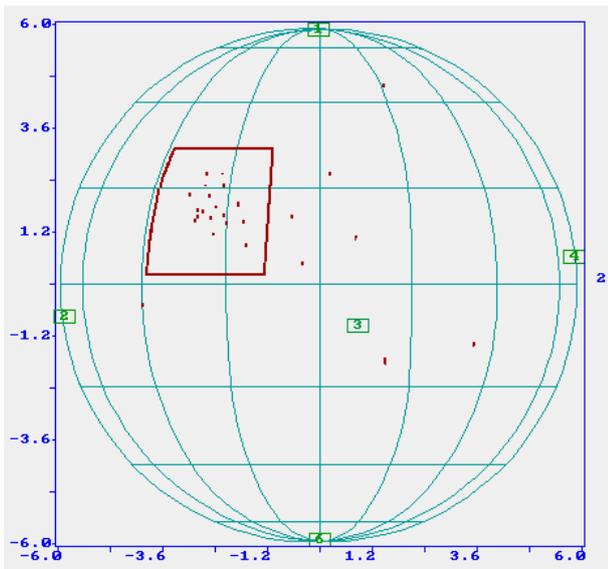


図-8 球形ホルダーのAE試験時に観察されたAE発生集中源

年間の操業中に経験した最大圧力より5%程度大きい負荷を与え、その時のAE活動度を調査する。もし問題となる部分があれば、図-8中に示されるように、AE集中源と判定され、そのデータは既存のデータベースに参照され、自動的にグレード分けされる。こうした場合、追認試験として超音波探傷(UT)や浸透探傷(PT)試験など他の非破壊試験が適用され、詳細な評価が行われる。一方、AE試験結果に問題がなければ、ホルダーは開放されることなく操業が続けられる。

イギリスにおいては、AE試験を適用することにより、30年以上開放検査を行わず、全く問題なく連続操業を継続している例が報告されている。

### 3.3.4 地下埋設配管の腐食損傷診断

製油所の防油堤貫通配管などの地下埋設配管は、埋設部分に直接接触することが不可能なため、超音波探傷(UT)、放射線探傷(RT)あるいは目視検査(VT)など通常の非破壊検査方法を適用し、腐食損傷状態の診断など構造物の健全性評価を供用中に実施することは困難である。

こうした配管にAE法を適用し、腐食に起因するAEの発生特性や、配管におけるAE波の伝播特性を調べ、さらに実配管で得たAE試験結果とUT、VTなどの試験結果を比較・対照するなど、組織的な調査を実施することにより、埋設配管におけるAE法の腐食損傷診断への適用性が検討された。

製油所において、写真-3に示されるように供用中の

13本の実配管に対してAE計測を実施し、その後UT厚み測定、およびVT検査を実施し、AE計測結果と比較・対照することにより、両者の間に良好な相関のあることが確認された。したがって、埋設された配管の腐食損傷診断を供用中に行う有力な検査方法として、AE法の有効性は大きい。こうした基礎データをもとに、もし漏えい事故等により操業が停止した場合には、重大な損害を与える可能性があり、プラントの連続操業に極めて重要な役割を担う配管部を、IoTにより連続監視する計画が進行している。

### 3.3.5 地上置タンク底板の腐食損傷診断

円筒型貯蔵タンクの底板は、操業中には観察することができない。我が国では、消防法により1000klを越えた貯蔵能力を持つタンクは、その容量に応じて周期が定められ、定期的な内部開放検査を実施することが義務付けられている。タンクの開放検査に伴う操業停止、清浄、さらに検査などにかかる経費は、大型タンクの場合、数千万円を越えることも珍しくない。

欧州で開発された「TANKPAC」は、これまでに構築された膨大なデータベースを参照し、活性な腐食の進行で生ずるAEを感度の高いAEセンサーを用いて検出することにより、タンク底板のグローバルな損傷診断を行う試験法である。AEセンサーを底板から高さ1~1.5mの側板上に、円周方向に対して等間隔に設置し、各センサーの感度校正の後計測が行われる。AEデータは、雨や風などに起因する環境雑音がない状態で、防油堤の外に置いた計測車内に設置したAE計測装置を用い、経験を積んだ技術者により採取される。



写真-3 AE計測を実施した製油所の配管群

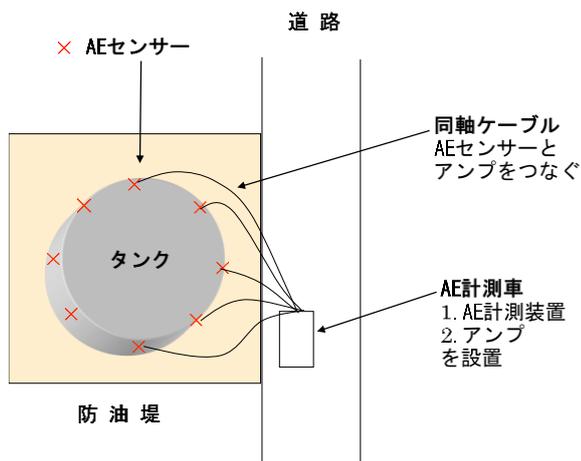


図-9 タンク底板の AE 試験実施模式図

我が国においても、AE 試験のデータベース化が行われ、我が国固有の維持管理体制、および法体系に即した AE 試験手順、そして評価・判定基準を策定する作業が進められた。タンクを開放することなく、AE 法によって短時間でタンク底部の腐食損傷を評価・診断することができれば、危険な状態にあるものはすぐに検査・修理・補強を施し、そうでないものは開放検査を先送りにするなどの、いわゆるスクリーニングにより、効率的な検査体制を確立することができる。ここで検出される AE 波は、比較的腐食が進行した領域から発生すると考えられている。これまでに構築された 200 基余りのタンクに対する試験結果から得られたデータベースを基に、地上タンクの AE 法によるグローバル診断が広まりつつある。図-9 に、この試験の実施状況が模式的に示されている。

### 3.3.6 圧力容器のオンラインモニタリング

図-10 に、英国で実施された、圧力容器の操業中におけるオンラインモニタリングの実施状況と、AE データの解析結果が示されている。図中左側には、モニタリングされた圧力容器と、その上に設置されたセンサーが観察される。右側に、検出された AE 信号の位置標定結果が示され、UT など他の非破壊検査方法による追認試験の結果、AE 信号が集中的に発生している部位 (AE クラスタ) に、重大事故を導く可能性のある欠陥の存在することが確認された。

プラントに多く存在するこうした機器に対して、AE 法などによる状態監視を適用することにより、操業中の安全が確保され、また効率的なメンテナンスプ



図-10 14 個の AE センサーを用い、圧力容器のオンラインモニタリングを実施 (AE 発生集中箇所危険度の高い欠陥を発見)

ログラムを計画できることから、欧米各国において、プラント内の重要な装置を中心に、オンラインモニタリング化、すなわち IoT 化が進められている。

### 3.3.7 まとめ

世界的規模の経済的一体化、そしてグローバル競争の激化が進んでいる。こうした中で、我が国は少子高齢化の進行、その結果として熟練技術者・労働者の急激な減少、そして工場に配置される人員の大幅な減少という厳しい状況に直面している。それにもかかわらず、操業時に従来以上の安全性および信頼性を担保することがますます強く要求され、経済性を高めた新しい維持管理方法の開発が強く望まれている。この難問を解決する有力な方法として、IoT を全面的に採用・実施し、プラント全体を状態監視することが、避けて通れない道である。

現在、各分野で規制緩和および撤廃の動きが急速に進められている。さらに経済の低成長下のもと、維持・管理費削減の要求はますます強まると考えられる。こうした中で適切な判断を下し、不必要な経費を削減するために、欧米の場合と同様、我が国でも化学コンビナートにおいて、合理的に IoT を適用することが、大いに期待されている。

## 3.4 社会基盤構造物の AE 連続モニタリング<sup>2)</sup>

### 3.4.1 はじめに

橋梁やトンネル、発電所、各種プラントなど、社会基盤を構成する構造物の加齢化が進み、適切な維持管

理技術の開発と適用が大きな問題となっている。世界的な社会・経済構造変革の中で、これまでのような経済的成長が期待できない状況にあつて、既存構造物の信頼性確保、および長寿命化を図ることが、焦眉の課題となりつつある。

構造物の状態を監視し、健全性を評価するモニタリング手法として、温度測定、湿度測定、ひずみ測定、変位測定、腐食モニタリング、振動測定、赤外線サーモグラフィ、音響診断、AE 計測など、様々な方法が実用化されている。この中で、構造物が供用中にある動的条件下で、グローバル検査、およびモニタリング技術として有効な AE 法は、橋梁や岩盤斜面などの土木構造物、海洋構造物、発電・送電施設、また宇宙・航空構造物など、様々な社会基盤構造物において、状態監視用 IoT を実現していくうえで、主要な役割を担うことが期待されている。AE 法の適用は、最新の通信技術を基に、インターネット・イントラネットを利用し、構造物の状態監視と運転管理を実施するためのヘルスマニタリング技術として、欧米において広く実施されている。

ここでは、社会基盤構造物のヘルスマニタリング技術の一環として、国内外で行われている、遠隔通信／インターネット技術 (IoT) を利用した、AE 連続モニタリングの適用事例について紹介する。

### 3.4.2 岩盤斜面のモデム通信による遠隔連続モニタリング

平成 8 年 2 月 10 日、北海道の豊浜トンネルで、体積約 1 万 m<sup>3</sup>、重量 27,000 トンにもものぼる巨大岩盤のすべり破壊に起因した崩落事故が発生し、通過中のバスと乗用車が巻き込まれ、20 名の尊い人命が失われた。この事故の後、こうした岩盤崩落を未然に予知し、事故発生を防ぐ監視技術の一つとして AE 法が注目され、全国各地のおよそ 10 箇所にも余る現場で連続 AE モニタリングが実施され、基礎データが集められた。

これらの現場は、都市から離れた山間の遠隔地にあるため、連続監視を効率よく実施し、データ採集、および解析を容易に行うために、モデム通信を用いた遠隔監視用 AE システムが使用された。通常のデータ解析には、AE 波形を信号処理した特性パラメータが用いられるが、そのデータ容量はそれ程大きなものではなく、電話回線を用いたモデム通信で、ほとんど問題は生じなかった。しかしながら、検出した波形データ

を記録するとデータ容量が膨大になる場合があり、ホストコンピュータへ転送中に、問題がしばしば生じた。この問題は、光ケーブルなど大容量の通信回線を準備し、また適切なソフトウェアを開発し、最新通信機能を有する装置を導入することで解決された。

### 3.4.3 吊り橋のインターネット モニタリング

アメリカやイギリスにおいて、吊り橋を支えるケーブルの、AE による連続モニタリングが実施されている。フィラデルフィア (ペンシルベニア州) と対岸のニュージャージー州を結ぶベン・フランクリン橋は、デラウェア川に 1922~1926 年にかけて建設された。我が国で言えばちょうど東京湾に架かる、レインボーブリッジやベイブリッジの役割を果しており、交通量の多い極めて重要な橋である。1972 年以降、適切な維持・管理 (ケーブルのオイリングなど) を中断したため、近年になり、ケーブルを構成する鋼線ストランドの 10% 近くが破断しているのが、目視検査により確認された。こうしたケーブルの補修には多額の費用が掛り、さらに深刻な交通障害を引き起こすなどの問題の生ずることが予想された。このため橋を管理する港湾当局は、補修を行わず、AE 法を利用して鋼線の破断状況を連続監視し、橋の安全を確保することにより、そのまま供用し続けることを決定した。

AE モニタリングを実施するために、既存のデジタルシステムを拡張し、新たに 56 チャンネルの AE システム (センサー ハイウェー システム) が開発された。さらに、モニタリングを開始する前に、基礎試験として実際のケーブルを利用して AE 波の減衰特性を調べ、また人工的に鋼線を破断して AE を発生させ、それが AE センサーで検出可能かどうか調査し、使用するセンサーの周波数特性やセンサー間距離を決定



写真-4 ケーブル上への AE センサーの取り付け状況

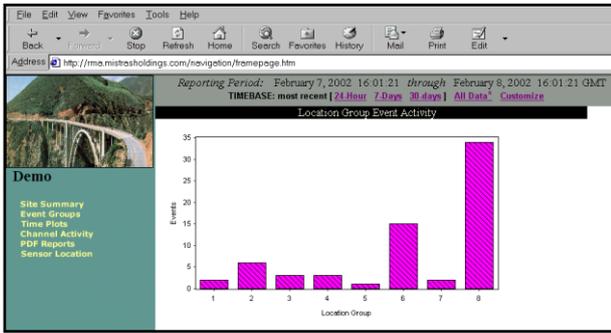


図-11 インターネット画面上に示された AE イベント検出数

した。写真-4 に、AE センサーのケーブル上への、取り付け作業状況が示されている。

この AE モニタリングにおける目的と概要は、以下の通りである。

- ① AE 信号を検出することにより、鋼線の破断を検知し、その位置を特定・確認する。
- ② 光ファイバーネットワークの利用により、膨大な量の測定データからなる大量の情報を短時間で転送、収録可能な遠隔監視システムを確立する。
- ③ 現場で稼働可能な、完全自立型システムを開発する。
- ④ インターネット利用による、遠隔モニタリング／サービス システムを開発・確立する。

この計測において、遠隔インターネット モニタリングを実施することにより、パスワード所有者のみが計測システムへログイン可能であり、システムの状態や AE データの発生状況とその解析結果に関する情報を、任意の場所で知ることができる。

必要な情報は、ログイン後直ちに現れるサマリーページのメインメニューから選択する。図-11 に、一例としてイベントの発生状況を示す活動度グラフが与えられている。位置標定が行えたイベント発生状況を

表示したもので、計測時間帯を変更し、また別のグラフに任意に移動可能である。

写真-5 に、現在構造物ヘルスマニタリングの一環として、AE 連続モニタリングを実施中の、マンハッタン橋が示されている。この橋は、ニューヨーク市のマンハッタンとニュージャージー州を結ぶために、1883 年に完成した主スパン長さ 483m の吊り橋である。近年主ケーブルに、腐食に起因する深刻な問題が発見され、AE 連続モニタリングが実施されることとなった。中央主スパン部に設置された、新規開発のセンサーハイウェーシステムにより、AE、光ファイバーひずみ、局部 PH、気温、湿度、腐食電位、そして気候変化などのデータが採取され、インターネットを介して中央監視室に送られ、実時間解析・評価が行われる。

これら、現在稼働中のインターネット利用による構造物の遠隔モニタリング サービスの特徴として、次の内容が挙げられる。

- ① インターネットの利用により、AE データ、さらにひずみや振動データなどを遠隔操作で採集し、必要に応じて警報を発生する。
- ② Web サイトの利用により、パスワード所有者が自由に状況を閲覧でき、AE データの現状、および警報発生の有無などを任意に知ることができる。
- ③ 採集された元データを閲覧するだけでなく、専門技術者により実施された AE データの解析・評価結果の確認などのサービスを、自由に選択して利用できる。

現在このようなインターネットを利用した AE 連続モニタリングは、全米にある 10 数ヶ所の橋梁、さらにイギリスにある 10 ヶ所近くの橋梁において実施されている。



写真-5 マンハッタン橋における構造物ヘルスマニタリング



写真-6 AE連続モニタリングを実施したPC高架橋

### 3.4.4 PC（プレストレスト）橋のAE連続モニタリング<sup>3)</sup>

我が国で、暗（交通）騒音、振動などのある供用中の実橋において、PC鋼材の破断を検出するため、数カ月にわたりAE連続モニタリングが行われた。写真-6は、モニタリングを実施した長さ25mのPC高架橋である。主に60kHz共振型プリアンプ内蔵AEセンサーをおよそ6m間隔で配置し、実際の鋼線破断を再現するため、実桁に接着した小型モデル供試体中の鋼線を、腐食により破断させ、その時発生するAE信号を検出した。このモニタリングでは、AEによる鋼線破断検出数の実際の鋼線破断確認数に対する比率は、約86%であった。しかしながら、実桁の破断モニタリングにおいては、破断が起こるPC桁にAEセンサーを直接取り付けることから、検出率はこの値を上

回るものと考えられる。

このモニタリングにおいて、周波数特性の異なる3種のAEセンサー（30kHz共振、60kHz共振、および150kHz共振）を、同一条件で計測に用いることにより、検出されるAE信号の周波数特性を調べた。その結果、実橋におけるモニタリングには、AE波の伝播減衰が比較的小さく、低周波雑音の影響を受けにくい60kHz共振型センサー（計測周波数帯域:30~100kHz）を使用するのが最も実用的であることが示された。

検出されるAEデータの大部分を占める交通雑音は、車両の移動に伴い、AE信号を検出するセンサーの設置位置が移動するという特徴を持つことが確認された。この場合、PC桁上を車両が通過する時間(1~2秒間)に、数10~100を越えるAE信号で構成されるAE信号セットが形成される。車種により検出される信号数や振幅値は異なるが、車両通過に起因するAE信号セットの特徴は保たれるため、鋼材破断による有意なAE信号との識別は容易であった。

本モニタリングにより、鋼材破断に起因するAE信号を、交通雑音から識別し、解析・評価可能なことが証明された。例えば、横桁で区切られる一区間に対して、直線位置標定を実施するには2個の、また平面位置標定を実施するには4個のAEセンサーを、それぞれ横桁近くに桁を挟むように配置すれば、問題なく鋼材破断をモニタリングできる。したがって、30~35m程度の長さを持つPC桁の場合、横桁により5個程度

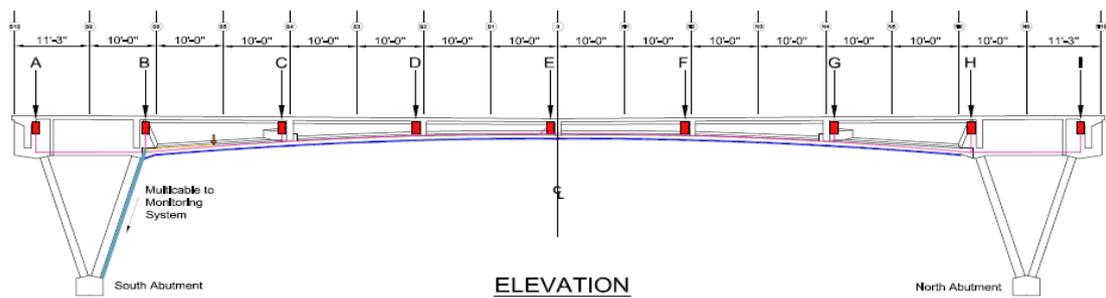


写真-7 テムズ川に架かるPC橋の鋼線破断モニタリングシステム

の区間に分割されることから、全体をモニターするには 10 個（直線位置標定のみ）、あるいは 20 個（平面位置標定も可能）のセンサーを適切に配置すればよいことが確認された。

こうして得られた基礎データを基に、英国でインターネット利用による、AE 連続モニタリングが実施されている。英国ハイウェー庁が施主となり、写真-7 に示されるテムズ川に架る全長 50m（PC 桁 12 個）の PC 橋で実施されているもので、施工不良に起因する鋼線破断の検知を目的としている。モニタリングは、変位データの入力が可能で、108 チャンネル AE システムを、全天候型計測小屋に設置して行われている。

### 3.4.5 送電施設の連続モニタリング

各国において、発電・送電・配電の効率化、省エネルギー化、そして安定化を実現するため、スマートグリッドシステムの開発が行われている。こうした技術開発の一環として、送電スイッチやブレイカー、そして変圧器など送電施設の主要部をなす機器の AE 連続監視が、無線 AE モニタリングシステムを用いて実施されている。

こうした装置に要求される仕様として、長時間安定的に稼働可能なバッテリー、容易なバッテリー交換性、そして無線でのデータ転送が挙げられ、これらを満たすシステムが開発されている。耐水バッテリーケースに収納されたバッテリーにより、無交換で 3 ヶ月程度

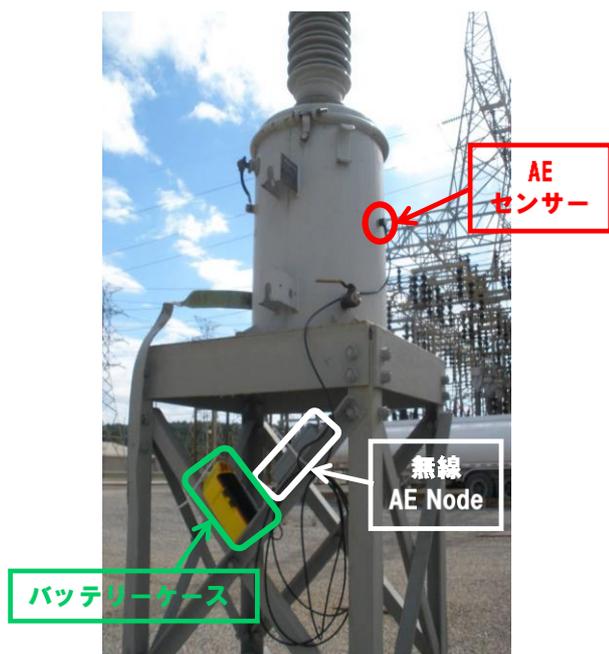


写真-8 送電スイッチの AE 連続モニタリング

の連続計測が可能であり、AE ヒット信号とバッテリー電圧を、無線を通じてモニタリングする。合計 12 チャンネルの無線システムを、送電施設のスイッチヤードに据付け、送電スイッチ、ブレイカー、および変圧器の部分放電や欠陥を、連続的にモニタリングしている。実際にこのシステムを送電スイッチに取り付け、モニターを実施している状況が、写真-8 に示されている。

### 3.4.6 無線 AE システム

無線通信によりシステムを作動させ、データを転送可能な無線 AE システムは、AE センサーとホスト PC 部の距離が大きい場合や、対象となる構造物が複雑な形状を持ち、ケーブル配線が困難な場合に AE 連続モニタリングを実施する際、必須の技術である。

利用可能な無線方式には様々なものがあるが、データ転送速度、通信距離、法的規制などの諸条件を考慮し、AE モニタリングが適用される現場の状況に合わせて、最適な方式が採用される。

写真-9 に、最も汎用される方式の一つである無線 LAN を用いた、無線 AE センサーノード/USB ベースステーションで構成される、最新型無線 AE システム

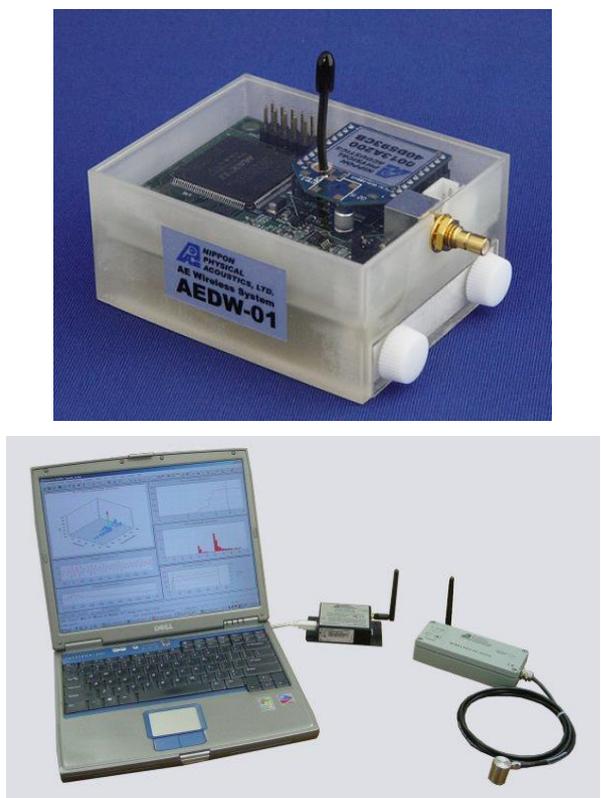


写真-9 無線 AE センサーノード、および USB ベースステーションで構成される無線 LAN AE 連続モニタリングシステム

ムが示されている。ここで、ASL（平均信号レベル）/RMS（実効値電圧）センサーノードでは、一定時間ごとに ASL/RMS データを採取しベースステーションに転送するが、その他の時間帯では消費電力節約のため、スリープモードに維持される。この装置は、採取される信号データが限定されるために、回転機器や漏洩検出専用モニタリング装置として用いられる。一方、無線 AE センサーノードは、低消費電力用パーツで構成されているため、バッテリー無交換で3ヶ月程度の連続作動が可能であり、通常用いられる全ての AE 特性パラメータとともに、波形信号を採取し、ベースステーションに転送できる。したがって、汎用システムと同等の能力を有する、遠隔モニタリングシステムとして利用される。

こうした無線 AE システムの必要性は、AE 連続モニタリングの適用に際し今後ますます大きくなり、様々な分野で広く利用されるものと考えられる。

### 3.4.7 まとめ

国内外における、遠隔通信／インターネットを利用した、構造物の AE 連続モニタリングの実例を紹介した。これらは、今後ますます必要性が増すと考えられる構造物のヘルスマニタリングを実行していく上で、モデルとなるもので、IoT による AE 連続モニタリングが、既に実用段階に入ったことを示している。

情報通信、そしてそれに関連するエレクトロニクス／ソフトウェア技術の発達には目覚ましいものがある。携帯電話などの端末装置を利用することにより、随時、

任意の場所で構造物の状態を確認し、安全を確保しながら運転状況を管理できるようになる日は、現実のものとしてすぐ近くまで来ている。

## 4. ビッグデータと AI

### 4.1 ビッグデータの解析例

IoT をスマート工場、スマートコンビナート、あるいはインフラ構造物に適用する際、様々なセンサーを用いるが、その中で最も周波数の高い領域を担当するのが AE 計測である。この場合、デジタル信号のサンプリング周波数は 10<sup>7</sup>Hz、そして分解能は 16 ビットとなるため、極めて大量のデータを採取して解析する。したがって、いわゆるビッグデータ解析が適用される。

図-12 (a)～(c) に、圧力機器の加圧試験時に検出された AE 信号の解析結果を示す。加圧はおよそ1時間にわたって行われ、その際全部で 583,696 個のデータセットが、原信号として検出された。このデータに対して、図-1 に示される信号特徴抽出パラメータの中で、横軸に振幅値、また縦軸に信号継続時間をとり、両者の相関をプロットしたものが、図-12 (a)～(c) に与えられている。図-12 (a) は、試験時に検出されたすべての原データから得られた結果である。図-12 (b) は、カウント数の極めて小さい（通常は3カウント以下）電気雑音と、信号継続時間の長い（通常は2ms以上）機械的雑音を除去したデータを示したもので、この作業により、データセット数は4,711個まで減少している。さらに、図-12 (c) には、AE 計測で特徴的

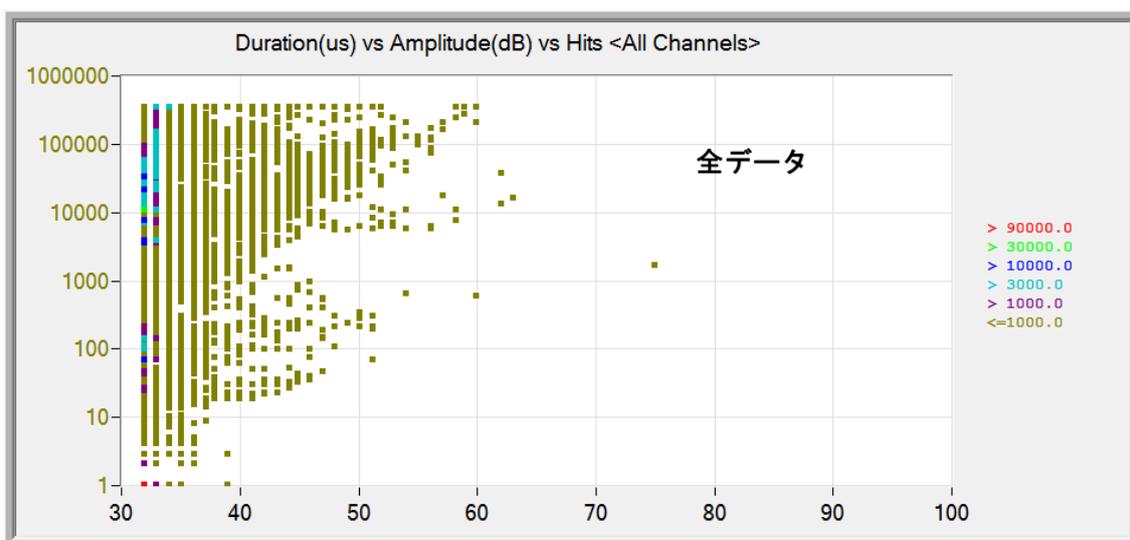


図 12(a) 振幅値 (Amplitude) と信号継続時間 (Duration) の相関  
(原データ、583,696 ヒットが検出された)

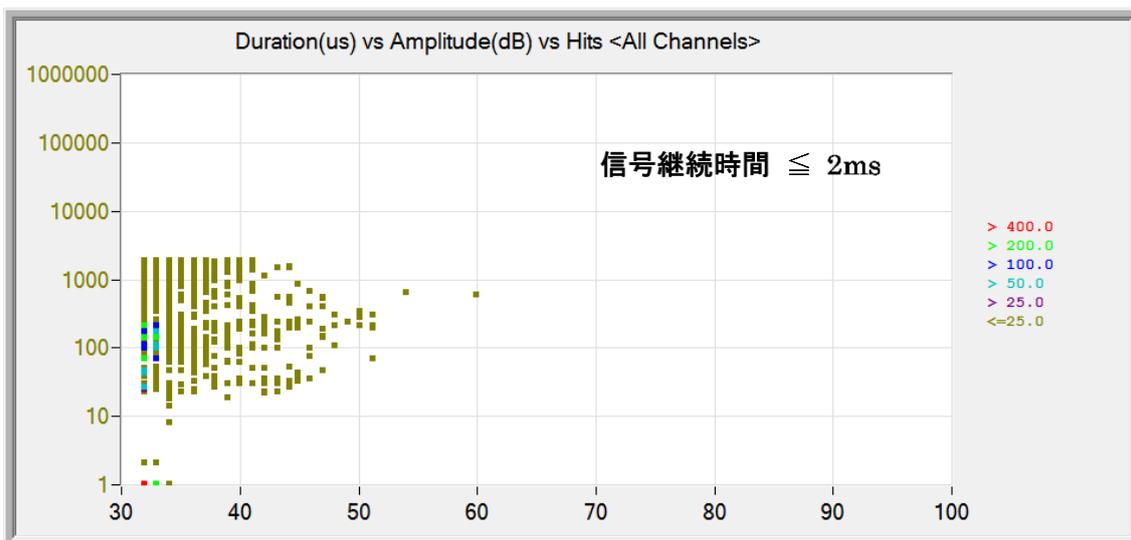


図 12(b) 振幅値 (Amplitude) と信号継続時間 (Duration) の相関  
(電気雑音、及び機械雑音を除去したデータ、4,711 ヒットが検出された)

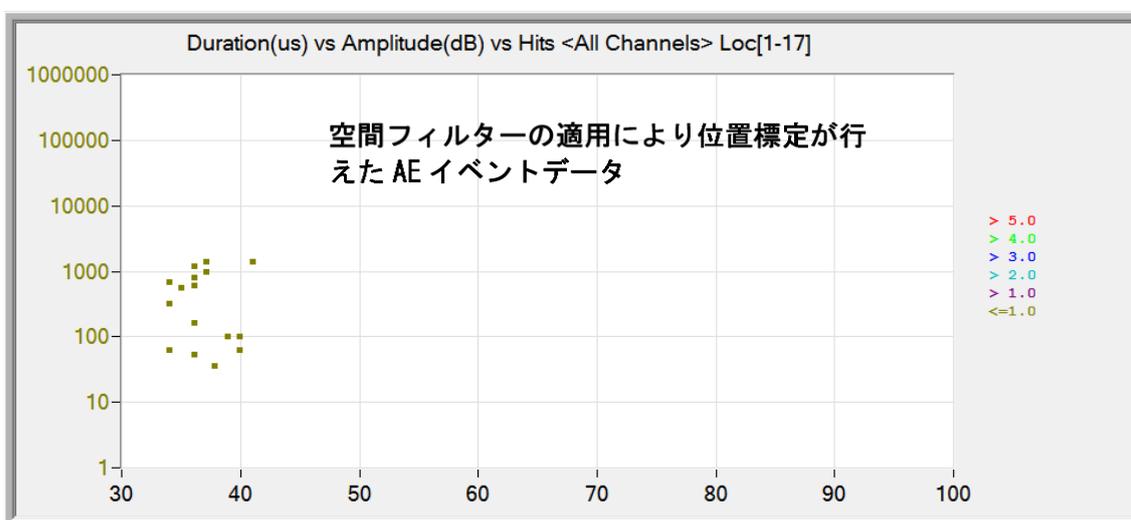


図 12(c) 振幅値 (Amplitude) と信号時継続時間 (Duration) の相関  
(雑音除去後に空間フィルターを適用したデータ：16 イベントが検出された)

な位置標定機能を用いて、外部から入力した機械的雑音を除去した場合のデータをプロットしてあり、この処理により、16 個のデータセット (イベント) が有意な信号として評価された。IoT において、極めて大量のデータが採取される場合には、このように相関解析や、振幅分布解析、エネルギー分布解析、パターン認識など、ビッグデータ解析に特徴的な信号処理やデータ解析法が適用される。

#### 4.2 スマート工場の AI 化

図-13 に、スマート工場における機器構成の一例を示す。こうしたスマート工場には、数 100 台にも上る様々なロボットが設置され、それらを統一的に管理、

運営する必要がある。各ロボットには、最低 2 個程度の (AE) センサーが取り付けられ、最重要部となるアーム結節部にある回転部 (ベアリング部) などを連続的にモニタリングする。この場合、使用するデータサンプリング周波数は、 $10^7\text{Hz}$  程度であることから、工場内の全ロボット数を 500 台と仮定するならば、1 秒あたりに全工場内で採取されるデータセット数は、 $10^7 \times 2 \times 500 = 10^{10}$  にまで到達する。これだけのデータセット数を、工場内にある基本回線に入力・転送して管理し、データ解析を行うのは、事実上不可能に近い。したがって、センサーで発生する信号は、センサー近くに設置された AI 機能を持つ信号処理・AI ローカルプロセッサに入力し、初期信号処理と AI 解析を行い、

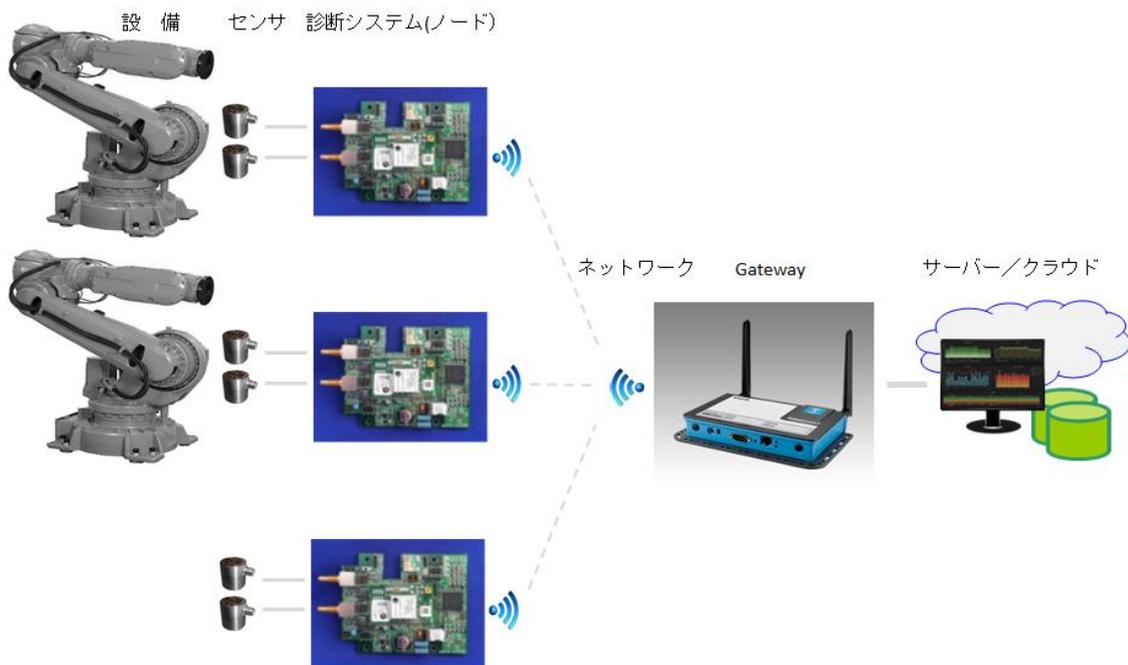


図-13 スマート工場における機器の構成

無線により主回線を通してサーバ/クラウドに入力するシステムとなっている。

図-14に、IoTによる「ものの管理」と、企業・工場の「経営・運営管理」を統合して一体化し、最大限効率を高めたスマート工場概念図が示されている。IoTで取得した「ものの情報」を制御系ネットワークに取り込み、経営・運営層に関連する情報系ネットワークと結び付け、工場の運営・管理を企業経営の一部として全体統合する状況が、模式的に与えられている。

こうした工場では、工場自身がAI機能を持つ超大型ロボットとみなされ、企業全体の運営・管理を制御するAIと有機的に統合することで、企業経営の中で主要システムの一部を構成し、最高の効能が得られるように設計されている。

#### 4.3 化学プラントにおけるデータマネジメントシステム

化学プラントを安全、かつ効率的に操業するために、

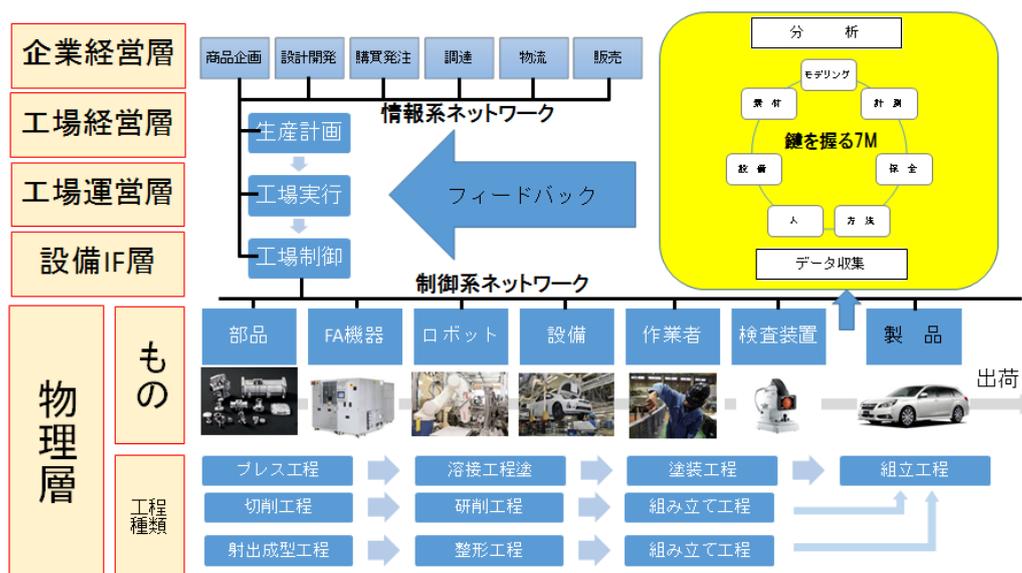


図-14 スマート工場におけるIoTによるAI化

# Upstream Data Management

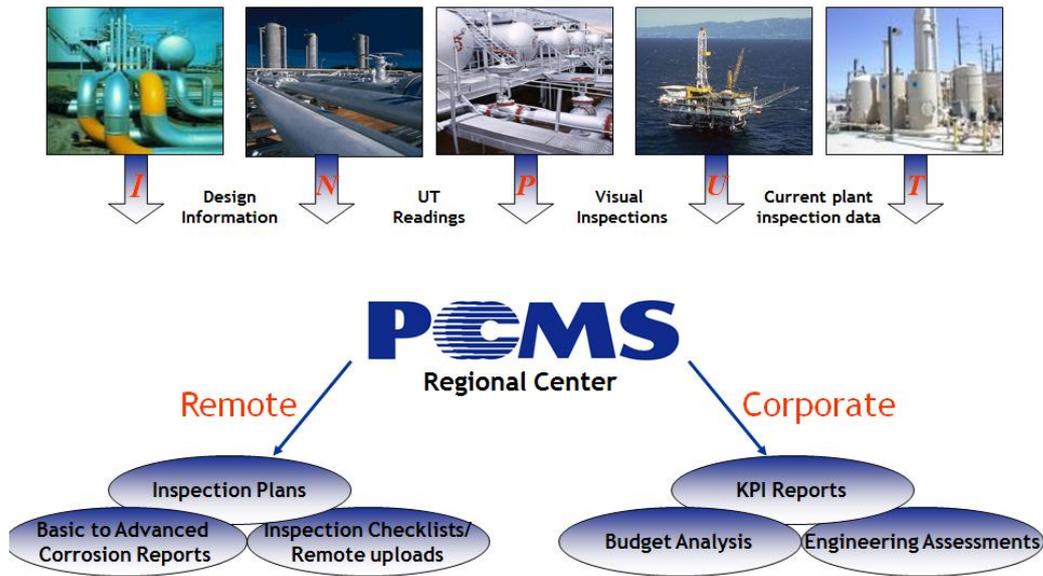


図 15 スマートコンビナートにおけるデータマネジメントシステム

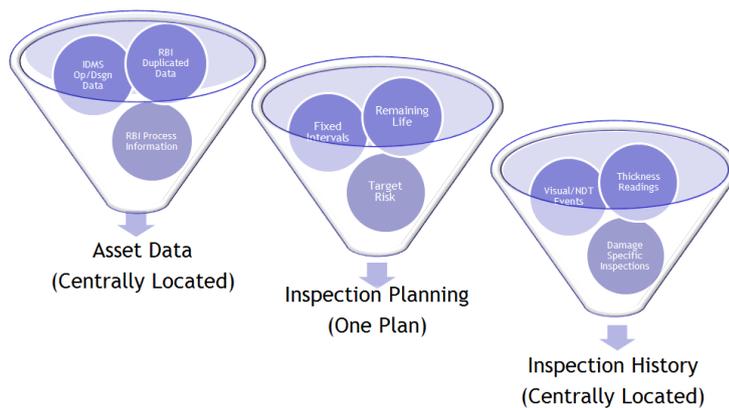


図 16 スマートコンビナートのアセット、試験計画、試験履歴データの統合による AI 化

温度、圧力、ひずみ、応力、振動、流量、電力使用量、漏えい、腐食、音響、AE などのセンサーが各所に設置され、オフライン、あるいはオンラインのデータ採取・解析が行われている。これまで、我が国のプラントでは、多くの経験を持ち、プラントの状況を知り尽くした優秀な技術員が管理に当たり、人手を比較的多くかけることにより、極めて緻密で精度の高いメンテナンスを実施して安全性を確保し、稼働率を上げる作業が一般的であった。しかしながら、少子高齢化が急速に進む中で、技術員の中核をなした団塊の世代が退職年齢を過ぎ、十分な経験を積んだ技術員不足が大きな問

題になりつつある。したがって、省人化が急速に進む中で、プラントの状態を正確に把握・管理し、安全を担保可能な IoT の適用が、喫緊の課題となっている。プラントにおいて IoT を進めるには、様々なセンサーで採取されるデータを、正確に管理し、正しく解析するために、膨大なデータ量で構成されるデータベースが必要である。さらに、それを最大限効率的に処理・解析可能な AI 機能が要求される。

化学プラントにおける各種センサーなどのデータベース化は、1980 年代半ばより、アメリカで精力的に行われてきた。図-15 にその概念図が示されている。

プラントの設計情報、UT（超音波試験）などによる非破壊検査結果、目視検査結果、腐食状況などの様々な基本データを、PCMS（Plant Condition Management System）と呼ばれるソフトウェアに入力してデータベース化し、毎年繰り返される同様の作業で採取されるデータをさらに積み重ねて、データベースを継続的に充実させる。この作業を何十年も実施することにより、対象となるプラント自身が持つ特徴が明らかになり、より安全で効率の高い操業が可能となる。さらに、AI機能を取り入れるために、プラント内にある装置の資産としてのデータ、検査計画、検査履歴をソフトウェア内に組み入れる。そして、図-16に示されるように、IoTを基本に、オンライン、オフラインで得られたプラントの現状を表すセンサーデータ、資産としての価値、検査履歴などを評価用データとして活用して、プラント全体の操業マネジメントを実行する。アメリカで開発されたPCMSシステムは、データベース、及びAI機能を付加した形で、既に世界各地に存在する数百以上のプラントで適用されている。

## 5. 日本の優位性と課題

日本には、長い伝統と高い技術力に裏打ちされた数多くのソフト／ハードウェアコンテンツが存在する。これらは、戦略さえ正しければ、世界市場に打って出ても十分な競争力を持ち、世界中の人々から求められ、愛される価値を発揮できるものである。残念ながら、これまで日本では、工業国として欧米に追い付き、発展していくために必要な既存産業に対する戦略のみを重んじる傾向が強く、新しく付加価値を発見・創生したとしても、それを尊重することが少なく、具体的な物品ではなくソフトウェア製品に重きを置く産業の育成や振興に、あまり努力を払って来なかった。それが、21世紀の初頭に表出した日本産業全体の沈滞感、出遅れ感を生んだ一つの原因とも思われる。こうした状況の中で、IoT、ビッグデータ、AI技術の開発、応用に関するグローバルな大競争が起こっている。そこで、日本の立ち位置と、今後の戦略的方向性を考えるために、日本が持つ優位性と課題について、簡単な考察を試みる。

日本は、近代科学技術のほとんどを、欧米先進国と共有する先進工業国である。それにもかかわらず、文化や社会的制度は、欧米諸国と異なる、極めてハイコンテクストな日本の特徴を持つ国・地域である。以下、

IoT、ビッグデータ、AI技術の開発、応用を行っていくうえで、筆者が個人的に考える、日本のハイコンテクスト社会に基づく優位性と、課題を列挙してみる。

### (1) 優位性：

現場主義、緻密性、進取性、先進性、好奇心、潔癖主義、完全主義、職人気質、豊かな感性と勘、オタク精神、和の心（チームワーク）、おもてなしの心、教育重視の精神

日本の持つ優れた特徴は、上述した言葉に象徴される、真摯な探究心と協調心に裏付けされた完璧なモノづくり、そしてサービスの精神である。日本人の持つ職人気質は、どの国にも見られない緻密で美しいモノを造り続けている。また、「おもてなしの心」に代表される、和の精神は、日本の持つ美德であり、今後経済的に極めて重要性の増すインバウンドビジネスを発展させていくうえで、世界からの旅行者を引き寄せるための貴重な資源である。

### (2) 課題：

- ① 少子高齢化
- ② 合理性の欠如：非合理的精神主義の蔓延、客観性の欠如、データベースの軽視（資産として正当な評価の欠如）、エビデンス軽視、経験主義、実績主義、技術優位主義、ソフトウェア軽視
- ③ マネジメントシステムの軽視：組織の硬直性、形式的権威主義（形式的権威の尊重）、視野狭窄（専門主義、たこつぼ主義）、標準化の軽視（ISOなど一般化・標準化の遅れ）、戦略性の欠如、ネットワーク化の遅れ、自前・身内主義、フルライン主義
- ④ 舶来信仰（自己否定、欧米への妄信、自己・他者評価力の欠如）
- ⑤ 個人主義の欠如
- ⑥ 教育軽視：情勢変化への機敏な対応の欠如
- ⑦ 情緒的・感情的
- ⑧ 異端の排除

「データベースの軽視、実績主義、技術優位主義、ソフトウェア軽視」などで代表される合理性の欠如、そして「標準化の軽視、戦略性の欠如、ネットワーク化の遅れ、自前・身内主義」などマネジメントシステムの軽視は、IoT、ビッグデータ、AIなどの新しい革新的技術を開発、実用化していくうえで、大きな障害となり得る。かつて、携帯電話でメールを送るという革

新的技術 (iモード) を生み出したにもかかわらず、その後の展開を誤ったため、携帯電話ビジネスの世界で、日本市場のみが完全に孤立 (ガラパゴス) 化してしまい、日本製電話機の世界市場における存在感が、全く消失してしまったのは、つい最近の出来事である。

現在注目を浴びる IoT, ビッグデータ, AI 技術においても、一歩対応を誤るなら、全く同様の結果を生みかねない状況にあることを、肝に銘じておくべきである。先進国、新興国が入り混じり大競争が展開されるグローバル市場において、20 世紀型の製造業が生き残れる機会はほとんどないと言ってよいであろう。21 世紀に繁栄し、成長を続けられるのは、かつての製造業とサービス業、そして合理的なマネジメントを融合させた製造/サービス業であることを忘れてはならない。

明治の開国以来、日本人の心に深く植え付けられた舶来信仰は、日本発の革新的技術を世界標準化するうえで、大きな障害となっている。現在ドイツ発とされる Industry 4.0 が大きな注目を浴び、日本において官民を問わず、その内容の消化・吸収に躍起である。しかし、本稿で述べているように、類似、あるいはより進歩した概念 (スマート工場) は、十数年前から日本の企業で提示されていた。また、英国で実用化されたインフラ構造物 (プレストレストコンクリート橋) の連続モニタリングで基礎となった技術は、日本で研究開発され、英国の専門誌に掲載された理論と技法に基づいている。このように、日本生まれで世界標準にもなり得る革新的技術やアイデアの芽が、かつてそして現在でも多く存在する。それにもかかわらず、こうした機会を活かせず、舶来の技術や概念を尊重するばかりで、自己のオリジナル性を認めようとしないうる日本の後進性は、製造業の在り方を一変させる力を持つ IoT, ビッグデータ, AI の適用において、後追いにより 2 重投資を生みかねず、非常に投資効率の悪い状況を起こす危険性をはらんでいる。

日本は、教育を重んじる国である。1980 年代前後、大学の技術者 (工学) 教育に大きな問題を抱えていたフランスや、初等、および中等教育の改革を迫られたイギリス、アメリカは、日本の教育制度を参考にして、本国制度の刷新を図った。今日、日本の教育制度が揺れている。2015 年に起こった、文系・理系騒動はその典型的なものである。21 世紀型製造/サービス業において必要とされるのは、単に理系あるいは文系のみ

知識を持つだけでは全く不十分で、プログラミングなど IT に関連して有効な科学技術的知識や素養を持ち、優れたマネジメント能力を有する文理融合型人才である。このことを理解しない限り、無益な論争に時間を費やすばかりで、実質的な解決策を導き出すことは困難になる。

日本は、エネルギー資源など、天然資源をほとんど産出しない無資源国である。産業を発展させるための資源と言えるものは、優れた人材しかないと言っても過言ではない。適切な教育で育つ人材が、IoT, ビッグデータ、そして AI を基礎とする 21 世紀型産業を支える最大の力となることを忘れてはならない。

## 6. おわりに

スマート工場、スマートコンビナート、社会基盤構造物における IoT, ビッグデータ, AI 適用の現状についてまとめてみた。

現在、自動車工場、部品工場、ロボット製作工場、半導体製造工場などで、高周波 (10MHz) で信号採取を行う AE 法を用いた、工場のスマート (IoT) 化が急速に進行している。この概念は、十数年前に日本の企業で提示されたものであるが、その後注目を浴びることなく、現在欧米諸国が主導する (例えばドイツの Industry 4.0) 形で、日本への再導入が図られようとしている。工場のスマート化は、単なる IoT 化で完結するものではなく、採取されるビッグデータの解析・評価、さらにすべての手順を自動化するための AI 化を同時進行的に開発して初めて成立するものである。この分野のグローバル競争は、つい最近始まったと言ってよい状況にある。今後の対応と展開さえ誤らなければ、21 世紀型製造/サービス業の分野で日本が主導的役割を果たし、経済全体の活性化と成長を促す起爆剤の一つになる可能性を秘めている。

化学プラントのメンテナンスにおいて、状態を把握するために、様々なセンサーで採取されるビッグデータが、解析・評価される。こうしたデータで構成されるデータベースが、1980 年代半ばより欧米で構築され、安全性を十分に確保しながら効率的なプラント操業を行うための OS (オペレーティングシステム) として活用されている。現在、センサーで採取されるデータの IoT 化が急速に進みつつあり、さらにプラントの状態マネジメントシステムと、企業の経営システムを統合し AI 化することにより、最も安全性が高く効

率的な操業を目指す試みが進行中である。こうしたプラント管理・操業に関するマネジメントシステムは、世界各地の数百を超えるプラントで適用されており、日々採取されるビッグデータを逐次データベースに組み入れることで、システム全体の信頼性を高める作業が続いている。

社会基盤（橋梁などのインフラ）構造物の加齢化が、世界の先進国で大きな問題となっている。日本でも、数年前にトンネル内の天井板が落下する事故が発生し、人々の生活基盤を支える構造物の加齢・劣化の問題が、大きな注目を集めた。これを契機に、インフラ構造物の安全性確保のために劣化評価・モニタリング技術の開発が、焦眉の急となっている。既に欧米において、こうした構造物のモニタリング方法として、IoT が広く適用されている。例えば、アメリカにおいて加齢化した大型吊り橋の AE 法による連続モニタリングが、2,000 年代初頭から実施され、現時点でアメリカ、イギリスの 20 を超える吊り橋がモニターされている。また、PC（プレストレスト）コンクリート橋に関しては、日本で開発された基礎技術を基に、イギリスで数年以上前にモニタリングが始まり、現在も継続している。このほかに、電力輸送に関するスマートグリッドや原子力発電所、海洋構造物、風力発電施設において IoT が適用され、安全性の確保と運転状況のモニタリングが実施されている。近い将来、日本においても、こうした構造物のモニタリングに関して、IoT が重要な役割を果たすようになると考えられる。

日本は、欧米と異なり、極めてハイコンテクストな文化で構成された社会である。そこで培われた緻密性、進取性、先進性、潔癖主義、完全主義、職人気質、豊かな感性と勘、和の心（チームワーク）、おもてなしの心などは、今後経済的に重要度の増すインバウンドビジネスを発展させていくうえで、世界からの旅行者を引き付けるための貴重な資源になると考えられる。

しかしながら、日本社会が特徴的に持つ、合理性の

欠如（非合理的精神主義の蔓延、客観性の欠如、データベースの軽視、実績主義、技術優位主義、ソフトウェア軽視）やマネジメントシステムの軽視（視野狭窄（専門主義、たこつぼ主義）、標準化の軽視（ISO など一般化・標準化の遅れ）、戦略性の欠如、ネットワーク化の遅れ、自前・身内主義）、そして舶来信仰（欧米への妄信、自己・他者評価力の欠如）などは、IoT 化を進め、ビッグデータの解析・評価方法を開発し、それらを統合したデータと評価に基づく AI 化を進めていくうえで、様々な障害を発生させる危険性がある。これらの最新技術を速やかに導入・発展させて活用し、グローバルな大競争に勝ち残るには、こうした日本的コンテクストが持つ特性を十分に知り、課題を解決可能なシステムを予め準備・構築しておく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 西本重人, 湯山茂徳: AE 法の製品検査への応用, 非破壊検査, Vol. 57 (10), pp. 474-477, (2008)
- [2] 湯山茂徳: 社会基盤構造物の AE 連続モニタリング, 非破壊検査, Vo. 60 (No. 3), pp. 165-171, (2011)
- [3] S. Yuyama, K. Yokoyama, K. Niitani, M. Ohtsu and T. Uomoto: Detection and Evaluation of Failures in High-strength Tendon of Prestressed Concrete Bridges by Acoustic Emission, Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 491-500, (2007).
- [4] 湯山茂徳: アコースティックエミッション (AE) に関する最近の面白い話題, 実構造物の腐食損傷評価, 検査技術, 第 2 巻, 第 6 号, 日本工業出版, pp. 58-63, 1997 年 5 月
- [5] 湯山茂徳: 第 8 章 リスク評価, 実践 インフラ資産のアセットマネジメントの方法, 小林潔司, 田村敬一編著, 理工図書株式会社, 2015 年 11 月 30 日発行

## CURRENT STATUS OF IoT, BIG DATA, AND AI APPLICATIONS IN SMART FACTORIES, SMART COMPLEXES, AND INFRASTRUCTURES

Shigenori YUYAMA

Terms “IoT (Internet of Things), big data, and AI (Artificial Intelligence)” have drawn great attention in industry and business. IoT has been applied to process monitoring in factories of a

Japanese auto-parts manufacturer since early 2,000, proposing a concept of smart factory. However, its activity has been limited to small areas in Japan for the last decade. Instead, a term “Industry 4.0” has been introduced and become quite general in Japan recently, related to a new industrial evolution with regard to IT applications in manufacturing. Although the term “big data” is seldom used in science and technology, it has become very common in economics, finance, accounting and management in dealing with a large quantity of data for statistical analysis to mine quantitative and meaningful information in the data acquired from transactions. IoT has been widely used for condition monitoring of machine systems and infrastructures as bridges, chemical plants, power distribution systems, offshore structures, nuclear power plants, wind power systems and so forth, producing big data acquired by different types of sensors. Data analysis based on such methods as feature extraction, pattern recognition, neural network, and multivariate calculus are widely applied to the big data. AI is an essential technology to integrate IoT and big data in order to automatically lead to effective and meaningful solutions, covering the whole technologies. This paper reviews the current status of IoT, big data, and AI applications in smart factories, complexes and infrastructures in Japan and other countries.