

# 社会基盤構造物の AE 連続モニタリング

日本フィジカルアコースティクス(株) 湯山 茂徳

## On-line AE Monitoring of Infrastructures

Nippon Physical Acoustics, Ltd. Shigenori YUYAMA

**キーワード** AE, 連続モニタリング, インターネット, 社会基盤構造物

### 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って, 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。

構造物が供用中にある動的な条件下で, 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, 健全性を評価し, 連続モニタリングを実施する手段として利用されている。

これらは, 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, 今後の発展が期待されている。

本稿では, 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。

### 2. AE 連続モニタリングの実例

#### 2.1 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 ヶ所に余る現場で連続 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<sup>1)</sup>。図 1 に一例として, システムの系統図が模式的に示されている。AE 監視用として 6~12 チャンネル程度が用意され, さらに必要に応じて, ひずみや変形などの, アナログデータの入力が可能になっている。

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。

#### 2.2 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

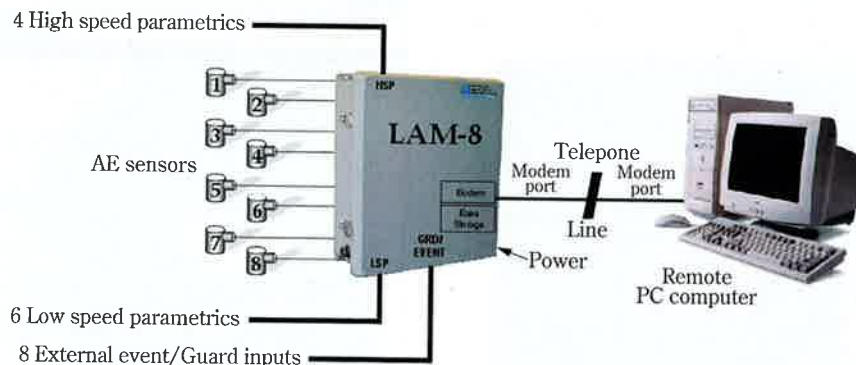


図 1 モデム監視システムの模式図

(ここで, High speed parametrics は, 1kHz~10kHz のアナログデータ採取用, また Low speed parametrics は, 1kHz 以下のアナログデータ採取に適用。一方, Event/Guard 入力, は, 外部雑音識別信号の入力端子として使用)

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推定された。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（センサーハイウェイシステム）が開発された。そのシステム概観が、図2に与えられている。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した。図3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。

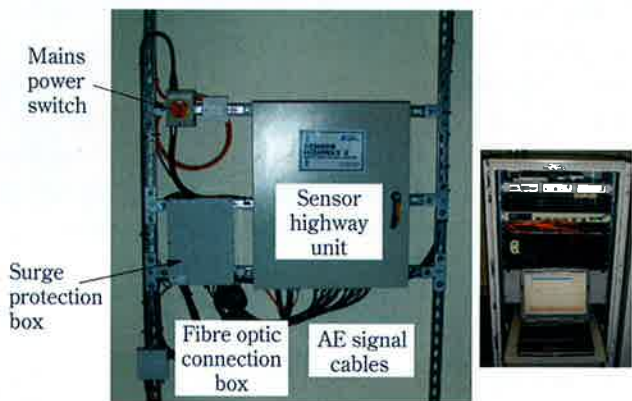


図2 6台のセンサーハイウェイシステムとベースステーションで構成されるモニタリングシステムのうち1台を例示



図3 ケーブル上へのAEセンサーの取り付け状況

- 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4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。図5は、センサー位置を表す図である。対象となる構造物（2本のケーブル）上におけるAEセンサー位置を示し、AEイベントが発生した位置との関係が、画面上で確認できる。この他にも、各チャンネルで検出されたヒット数や平均信号レベル（ASL）などのAE活動度とその履歴、および別の2種のパラメータ（例えばひずみ、変位など）を、計測時間帯を任意に設定して観察することができる。

図6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。

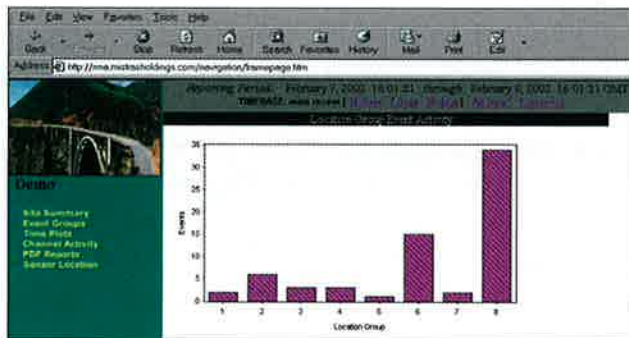


図4 インターネット画面上に示されたAEイベント検出数

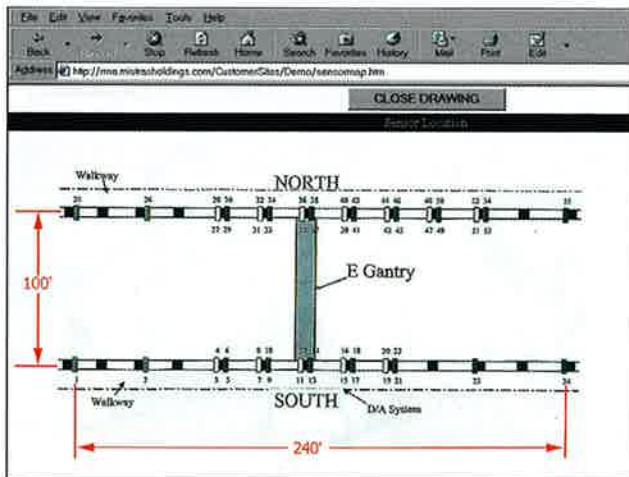


図5 吊り橋のケーブル上におけるセンサー配置図（各数字がセンサー番号に、またその位置がセンサー取り付け位置に対応）





図6 マンハッタン橋における構造物ヘルスマニタリング

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。
- ②Web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、全米にある数カ所の橋梁、さらにイギリスにある10カ所近くの橋梁において実施されている<sup>2)</sup>。

### 2.3 PC (プレストレスト) 橋のAE連続モニタリング

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<sup>3)</sup>。図7は、モニタリングを



図7 AE連続モニタリングを実施したPC高架橋

実施した長さ25mのPC高架橋である。主に60kHz共振型リアンプ内蔵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间に対して、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<sup>2)</sup>。英国ハイウェー庁が施主となり、図8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

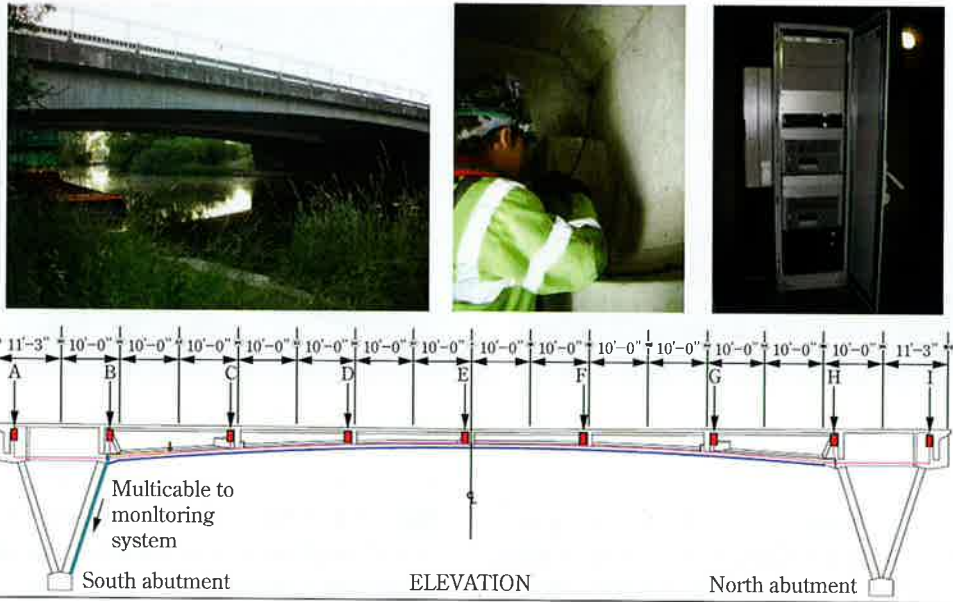


図8 テムズ川に架かるPC橋の鋼線破断モニタリングシステム

タリングは、変位計データの入力可能な、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。

#### 2.4 ロケットモーターケースの無線による連続モニタリング

アメリカにおいて、図9に示されるグラファイト/エポキシ製ロケットモーターケース（GEM）の、無線通信によるAE連続モニタリングが実施されている。これは、光ファイバーひずみゲージと併用してAEを測定し、製造から輸送、組み立て、打ち上げまでの異なる段階において、GEMのヘルスマニタリングを一貫して行うことを目指したものである。モニタリングは、インパクト損傷を検出し、その位置を特定し、また損傷の大きさを定量化するために行われる。さらに、様々な段階にある複数のGEMに対して並列的に連続モニタリングを実施し、全てのデータを一括管理するデータベースを作成することにより、インターネットを通じて、任意のGEMの状態を、任意の場所で監視できるシステムを構築することが最終目的となっている。

この計測を実施するために、新たにGEM Nodeと呼ばれる、移動通信型AEシステムが開発された。これはGEM本体に常時設置された端末装置として機能し、8チャンネルのデジタルAE計測が可能である。インパクト損傷で発生したAEはGEM

に取り付けられたAEセンサーで検出され、GEM Nodeで信号処理が行われた後、無線LANを通じて基本AEデータとして、近くのベースステーションに転送される。ベースステーションは、常に近在する複数のGEM Nodeと交信し、データ転送などの指令を出して既存情報を最新情報に更新する。さらにデータ解析後、必要に応じて警報を発生する。もしGEM Nodeがベースステーションと交信不能状態にある場合、GEM Nodeは自立型データロガーとして動作するため、データは自動的に記録媒体に収録され、交信可能になった時点で記録データとしてステーションに転送される。全てのAEデータは標準フォーマットにしたがってデータベース化され、ベースステーションを統括するマスターステーションの管理により、インターネットを通じて任意の場所で閲覧することができるシステムとなっている。こうしたデータの基本流れ図が、図10に与えられている。

このシステムの開発は、インパクト損傷に起因するロケット打ち上げの失敗で被る損失と、全GEMをモニターするのに必要なシステム一式の費用を算出し、システム設置の方が、費用的に比較優位状態にあることが確認されたため可能になったものである。こうした実績は、今後構造物のヘルスマニタリングを実施していく上で、貴重な参考資料になると考えられる。

#### 2.5 海洋構造物の連続モニタリング

海底油田の石油掘削用構造物などの海洋構造物において、古くから腐食疲労き裂モニタリングのために、AEが用いられている。今日では、衛星通信を利用し、インターネットを介してAE連続モニタリングが実施されている。

例えば、図11に示される構造物において、危険回避のために早期警報を発生する目的で、連続モニタリングを実施している。初期腐食疲労き裂発生が懸念される、8ヵ所の潜在的問題部に、5個の防爆型AEセンサーで構成される8組のAEセンサーセットを配置し、同時に4本の支柱の4ヵ所で合計16個の歪ゲージからデータを検出し、AEデータとの相関が確認される。

使用されるAE装置は、標準型システムを改良したもので、構造物のプラットフォームネットワークに接続し、さらにデータ記録・保存の安全性確保のために、衛星通信システムを利用して遠隔モニタリングを行っている。



図9 AEモニタリングを行うGEM  
(グラファイト/エポキシ製ロケットモーターケース)



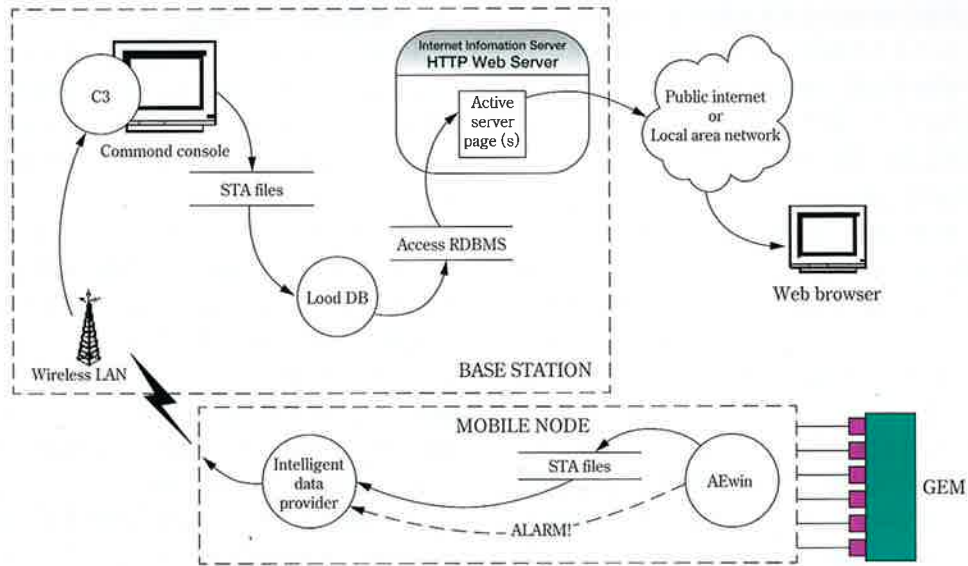


図 10 GEM の無線/インターネット AE モニタリングのデータ流れ図

( 図中略記の説明：STA files (Stand Alone Files), RDBMS (Readable Database of Master Station), AEwin (AE データ採取、解析用ソフトウェアの名称)

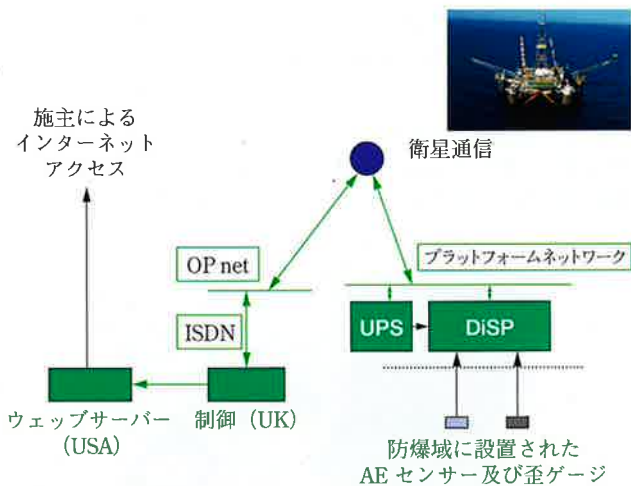


図 11 海洋構造物のモニタリングシステム模式図 (但し、図中の DiSP は、Digital Signal Processing の略記)



図 12 PWR 原子力発電所の AE 連続モニタリング

## 2.6 原子力発電所の連続モニタリング

図 12 に示す PWR 原子力発電所において、AE 連続モニタリングが実施されている。これは、一次系熱交換器において SCC (応力腐食割れ) が発見され、適切な NDT (非破壊検査) が要求されたが、それには多くの作業員と時間が必要とされるため、作業に関連して予想される多量の放射線被曝を防ぐ目的で行われている。実際、モニタリングにより、放射線汚染区域への作業員立ち入りの回数と時間が大幅に削減可能となったため、総被曝量を大きく減少させることができた。

図 13 に、このモニタリングの状況を示すブロック図が与えられている。端末装置として、汚染域に AE ボードを組み込んだノード PC が設置され、所内のネットワークに接続して、イントラネットを通じて計測を行っている。最初のシステムが、2002 年に導入されたのち、2008 年にはさらに 4 基の格納容器に対して同様のモニタリングが開始され、この発電所の安全・状態監視の重要な手段として活用されている。

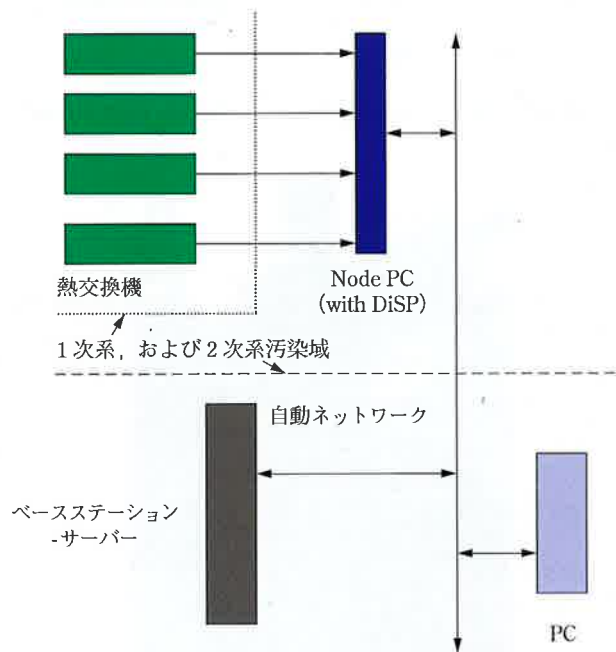


図 13 PWR 一次系熱交換器のモニタリング (但し、図中の DiSP は、Digital Signal Processing の略記)

解説

この他にも、1次系、および2次系配管やバルブのリーク検出・モニタリング、さらに配管システム全体におけるルースパーツの発生や位置を検知・確定するためのルースパーツモニタリングの手段として、世界各国の原子力発電所で、AEシステムによる連続監視が実施されている。

### 2.7 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ーカー、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。

図14に、この目的で開発されたシステムが示されている。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として開発されたものである。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ヵ月程度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、ブレーカー、および変圧器の部分放電や欠陥を連続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、図15に示されている。



耐水バッテリー納入ケース

図14 送電スイッチの連続モニタリング用無線AEシステム



図15 送電スイッチのAE連続モニタリング

### 3. 無線AEシステム

無線通信によりシステムを動作させ、データを転送可能な無線AEシステムは、AEセンサー（端末部）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、最適な方式が採用される。

図16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ヵ月程度の連続動作が可能であり、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。



無線LAN AE計測システム一式



図16 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

### 4. 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、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技術の

発達には目覚しいものがある。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が、現実のものとしてすぐ近くまで来ていることは、間違いないと考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) T. Shiotani, S. Yuyama, M. Carlos and S. J. Vahaviolos :  
"Continuous Monitoring of Rock Failure by a Remote AE

- System," Acoustic Emission Group, Journal of Acoustic Emission, 18, pp.248-257, (2000)
- 2) P. T. Cole, S. J. Vahaviolos, M. F. Carlos, A. Nunez, P. Feres and J. C. Lenain : On-line Asset Monitoring, Progress in AE XIV, Proc. of 19th Intern. AE Symp., December 9-12, 2008, Kyoto, Japan, pp.439-444, (2008)
- 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, 21, pp.491-500, (2007)



湯山 茂徳 日本フィジカルアコースティクス(株)

1976年東京大学工学部卒業。1982年工学博士。1983年、現 MISTRAS グループ (2009年ニューヨーク証券取引所上場) の日本人である、日本フィジカルアコースティクス株式会社を設立、代表取締役役に就任。以後、AE法の適用による材料評価試験や、金属製、コンクリート製、また複合材料製構造物のAE試験を多数行う。1999年熊本大学より、コンクリート診断学で博士(学術)を授与される。さらに2000年、技術士(建設部門)。現在は、各種構造物のAE試験をはじめ、加齢化が進むインフラストラクチャーの、AEによる連続モニタリング適用に大きな興味を持つ。趣味、溪流釣り、ダンス、クラシック音楽鑑賞、経営学の勉強