



スマートセンサと無線ネットワークを用いた 構造ヘルスマニタリングシステムの開発

圓 幸史朗¹⁾、池ヶ谷 靖²⁾、中村 充³⁾、柳瀬高仁⁴⁾

1) 大林組原子力本部技術部、グループ長 博(工)

e-mail : en.koshiro@obayashi.co.jp

2) ジャスト仙台営業所

e-mail : ikegaya@just-ltd.co.jp

3) 大林組技術研究所、グループ長 博(工)

e-mail : nakamura.mitsuru@obayashi.co.jp

4) 正会員 ジャスト調査診断第二部、部長

e-mail : yanase@just-ltd.co.jp

要 約

地震後のRC建物、構造物の確実な損傷検出を目的とした実用的な構造ヘルスマニタリングシステムを提案する。ここでは個々の低コストセンサで計測したデータをセンサ内で簡単な指標に変換し、転送処理する情報量を最小限に抑えることにより、多数のセンサを配した信頼性の高いシステムを実現した。モニタリング用に開発したスマートAE (acoustic emission) センサとスマートVA (vibration analyzing) センサはそれぞれ、コンクリートのひび割れを検知するローカルモニタリングと、構造物全体の振動性状の変化を捉えるグローバルモニタリングに供する。前者はひび割れに伴い発生するAE信号を計測する。後者は加速度時刻歴から、ゼロクロス点数と最大値および振幅絶対値の累積値を求め、それらの変動履歴から異常を検出する。センサと親局間の通信には、比較的低速ではあるが消費電力の小さい無線規格 ZigBee を採用する。現時点で全ての通信を無線化することは難しいが、今後は、センサ同士の情報伝達が可能なマルチホップ対応のシステムを指向する。

キーワード： 構造ヘルスマニタリング、スマートセンサ、無線ネットワーク、損傷検知

1. はじめに

1990年代以降わが国では被害地震が頻発している。地震後の二次災害を軽減する上で、被災地域での病院・学校など防災拠点の確保および道路や橋梁、水道等ライフラインの迅速な復旧が最優先事項であることは言うまでもない。住宅や事務所、工場などを含めた建物、構造物の健全性を把握する手段として、現状では、検査員による目視点検が実施される。しかし数多くの対象構造物と部位を検査するのに長い時間とコストを要する。地震が起こる前から建物・構造物を常時モニタリングし、地震直後に迅速な損傷検知を行うことができれば、人命の安全確保と減災にかかる労力や時間の削減が期待できる。構造ヘルスマニタリングとは、構造物に配したセンサから得られる情報に基づき、構造物の損傷を検出したり、その構造健全性を監視したりする技術を指す^{1),2)}。

建物、構造物をシステムと捉え、その構成要素あるいは要素群の損傷検知を目的とするローカルモニタリングでは、損傷位置があらかじめ予測可能であり、その位置にセンサを設置できることが前提である。しかし建物規模が大きく複雑になると、損傷発生位置を正確に予測することが困難となり、建物全体の損傷状態を把握するには多くのセンサと多大なコストを要する。建物全体としての損傷に着目するグローバルモニタリングは、比較的少数のセンサを配置することにより、労力をあまりかけずに低コストで損傷状態を推定できるという利点がある^{以上、例えば³⁾}が、損傷位置を特定するために別途手段を必要とする。実際のモニタリングでは、両手法の利点を活かした総合的なモニタリングが望まれる。

現在、モニタリングのためのセンサ開発や損傷同定に関する解析的手法の検討は進められているが、実建物・構造物におけるモニタリングはまだ実用化の域には達していない⁴⁾。最近のセンサ開発では、光ファイバーセンサを用いて、従来は不可能であった数 cm レベルの位置分解能と動的計測が可能となり高精度化を目指した研究⁵⁾が見られる。また既存のセンサとは全く異なる原理で損傷を検出する新しいセンサの開発^{例えば⁶⁾}も試みられている。一方、低コストのセンサとして半導体加速度計を活用した廉価版の強震計を試作し、その性能評価を行っている研究⁷⁾もある。このようなセンサ開発と共に、構造ヘルスモニタリングの実用化にとって重要な要素技術として、センサで得た情報を如何に「判断する部分」まで伝えるかという、情報伝達手段があげられる。これに関しては今後「無線」技術の進歩に期待されるところが大きいと思われる。近年注目されている公開規格 MOTE MICA による無線センサシステムを用いた、独自のセンサモジュールによるモニタリングのための実験的研究^{8),9)}も進められている。

構造物のヘルスモニタリングで重要なことは、対象とする構造物が地震により、その機能や性能を大きく低下させるような損傷を受けているかどうかを地震直後に検知することである。このような損傷の有無、損傷程度や損傷発生の大まかな部位についての的確かつ迅速な判断がここでいうヘルスモニタリングの主目的である。モニタリング技術を実用化するためには、損傷検出を確実に行うことのできる信頼性の高いシステム作りが不可欠である。ここで提案するシステムでは、センサ上で損傷の有無を判定する指標を計算し（すなわちセンサをスマート化し）、中継局あるいは親局に設置したパソコン（PC）にはその指標のみを送信する。センサ上で簡単な指標に変換し、転送処理する情報量を最小限に抑えることにより、多数のセンサを配した信頼性の高いシステムを可能とした。このように負荷が軽減されたデータ通信には、比較的低速ではあるが、低消費電力、低コストの無線規格 ZigBee を採用することとした。これは近距離で少量のデータを送受信するシステムに適した手段である。

2. 実用的なモニタリングシステムの提案

2.1 損傷検出モニタリングの基本方針

構造ヘルスモニタリングの普及には、地震直後に、対象とする建物や構造物の損傷検出を確実に行うことのできる信頼性の高い技術と実用的な損傷判定システムが不可欠であると考えられる。

本研究で提案するスマートセンサを用いたモニタリングでは、センサが計測したデータをセンサと同一基板上に搭載した CPU で処理し、損傷判定に有効な指標に変換して転送することにより、処理する情報量を最小限にする。またセンサそのものの価格を抑えてシステム全体の低コスト化をはかる。「スマートセンサ」という名称は、単にセンサ部で加速度やひずみなどの物理量を計測するだけでなく、センサ内で損傷の有無や損傷程度を判定する指標に変換する処理を行い、そのデータを送信する機能を有するところからきている。そのためには、計測には必要以上に精度を求めないこと、個々のセンサからモニタリングを行う親局に伝達する情報は極力低減することが望ましい。但し情報を提供するセンサの数は可能な限り多くし、建物や構造物の損傷に関する情報を洩れなく捉える必要があると考えている。センサ数を確保することにより、一部のセンサの誤作動による謝った判断・判定が避けられること、万一故障したセンサがあっても、システム全体としてはフェールセーフ機能を有することといった利点がある。このような発想は、前節で紹介したセンサの高精度化を目指す研究の方向とはある意味で対極に位置するものであるが、損傷検出を目的としている点ではなんら変わりがあるものではない。

モニタリングで計測すべき項目には、構造物各部の変位、加速度、ひずみやA E（acoustic emission）等が挙げられる。A Eとは材料の破壊によるエネルギー放出が波動となって伝播する現象をいう。

主にRC構造物を対象としてここで提案するシステムでは、図1に示すように、設計資料等をふまえてひび割れなどの損傷が最も生じやすい部位にスマートA Eセンサ¹⁰⁾を取り付け、ローカルモニタリングを行う。さらに構造物全体の損傷状態を監視する目的で、最上階や最下階などには後述するスマートVAセンサを設置しグローバルモニタリングを実施する。これは損傷によって生じた構造物の振動特性の変化を、応答加速度に基づく指標の変動から検出しようとするものである。両者は相補的な関係にある¹¹⁾。スマートA Eセンサが検知するひび割れは局所的なものであり、構造物がその振動性状に明確な変化をきたす以前に発生することが常である。下層階の柱脚や耐震壁の隅角部に配したセンサは、このようなローカルな損傷検知に役立つ^{12), 13)}。しかしこれらのセンサは万能ではない。仕上げ材や防火材がひび割れ検知の妨げとなることも想定される。そのような場合には、構造物の変状をグローバルに捉えるスマートVAセンサが有効である。建物の供用期間にわたっては、その経時変化を追跡する上でもグローバルなモニタリングは不可欠である^{14), 15)}。2つの方法を併用することによって、信頼性の高いヘルスマモニタリングが可能になるものと考えられる。なおここでは、2つのタイプのセンサに同一の基本仕様をもたせて、データ収録方法を統一することにより、簡便で信頼性の高いシステムを構成するねらいがある。

中継局および親局のモニタリング用PCとスマートセンサを接続し、建物全体の損傷状態をモニタリングするイメージを図2に示す。各階のスマートセンサからの情報は、階ごとに設けた中継局を経由して親局に送信される。前述したように、個々のセンサから送信される情報は必要最小限のデータである。よって比較的低速度の通信手段でも充分であることから、ここではシステムが簡便で消費電力の小さな無線規格 ZigBee の採用を試みる。親局では、建物や構造物各部のセンサから得た情報に基づき、地震前の健全な状態と地震後の状態を容易に比較し確実な判断を下すことが可能となる。

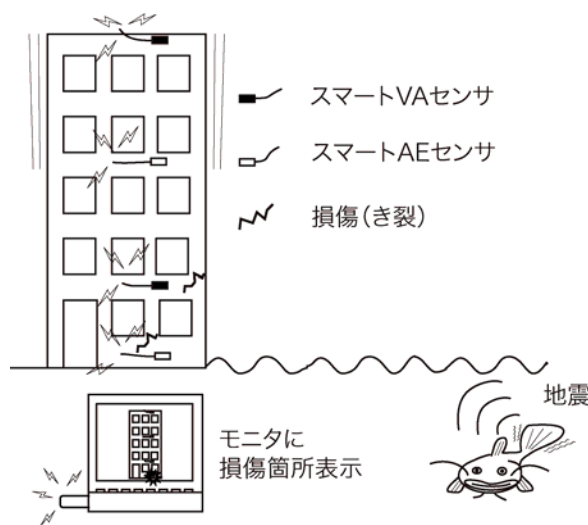


図1 ヘルスマモニタリングシステムの概念図

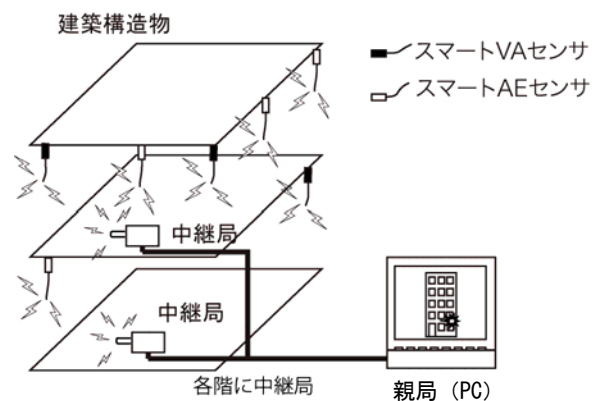


図2 建物全体のモニタリングのイメージ

2.2 モニタリングシステムにおけるデータ処理方法

従来の加速度計を用いた地震観測システムでは、複数のセンサで計測した時系列値をデータロガーで収集し、PC等に転送後、解析を行う。このようなシステムを構造物のヘルスマモニタリングに適用する場合（ここでは第1世代のセンサシステムと呼ぶ）の問題点を図3に示す。その一つは、センサからの微弱な信号を遠方まで伝達させる必要があることである。そのためには、プリアンプの搭載や十分なノイズ対策が必要となり、小さなセンサを実現することは困難である。もう一つの問題点はデータロガーを

介した通信量である。サンプリング時間間隔を 10 ミリ秒とし複数のセンサを用いた場合、10 分間あたりのデータ容量が数 MB にもなる。複数のセンサから集められる膨大な量のデータ処理は容易ではない。さらに PC に転送された後の解析段階でも、データ量が多いとセンサ数の増加に伴いデータ処理に時間を要することになる。このデータ量の問題は、ヘルスマonitoringの実用化を考える上で非常に重要である。大地震時に殺到する膨大な情報は、処理や判断の遅延と混乱を招きかねず、システム全体にかかる負荷はその信頼度を脅かす危険性もはらんでいると考えられる。

以上の問題点を解決するため、図 4 に示すような損傷検出（ここでは第 2 世代のセンサシステムと呼ぶ）システムを考案した。このシステムは、例えばセンサとして加速度計を用いる場合には、センサで測定した 10 ミリ秒毎の加速度を、センサと同一基板上の CPU で損傷指標に変換し、通信回路からデジタル信号で外部に出力するものである。この損傷指標には、後述の加速度のゼロクロス点数と最大値および振幅絶対値の累積値を用いる。またこれらの指標の計算は、加速度がある閾値（たとえば 10Gal）を超えた時のみ実施する。構造物に損傷を与える可能性のある大きさの加速度を検知した場合にのみ損傷指標の計算と外部への出力を行うため、転送するデータ量を大幅に削減することができる。PC に転送されたチャンネル毎・時間毎のゼロクロス点等の情報について、過去に測定したデータとの比較を行う。なお次節で詳述する AE センサを用いる場合にも、センサ内で損傷を表す簡単な指標に変換するのは同じである。

このように個々のセンサにおいて、計測したデータを指標に変換することにより、転送処理する情報量を最小限に抑えることができる。また通信に関する負荷が軽減され、システム全体のコスト削減も期待できる。一方、情報源となるセンサの数は可能な限り多くし、建物や構造物の損傷に関する情報を洩れなく捉えることが可能となる。センサ数を確保することにより、一部のセンサの誤作動による謝った判断・判定が避けられること、万一故障したセンサがあっても、システム全体としてはフェールセーフ機能を有することといった利点もある。このことは信頼性の高いシステムにつながる。

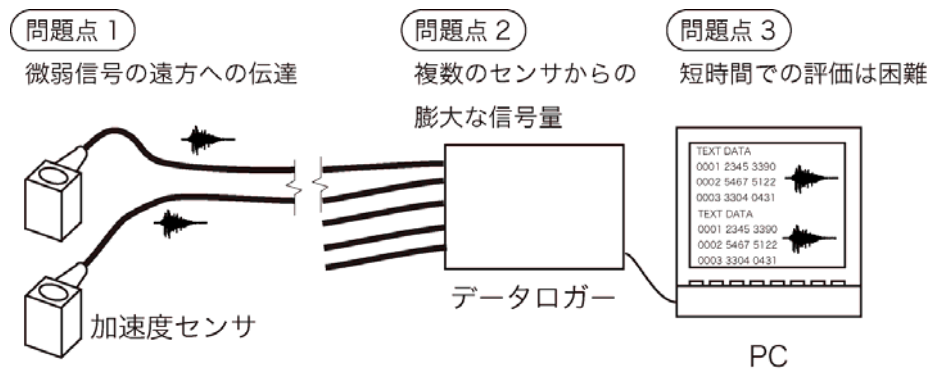


図 3 従来の加速度センサによる第 1 世代センサシステムの問題点

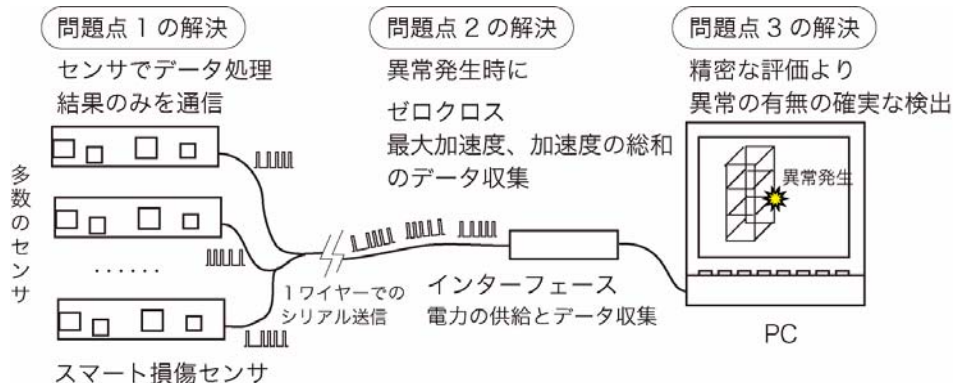


図 4 スマートセンサを用いた第 2 世代センサシステム概念

3. スマートAEセンサによるローカルモニタリング

3.1 スマートAEセンサの開発

従来のAE法によるRC造構造物の損傷検出は、部材に取り付けた複数のセンサで亀裂発生時の超音波を検出し、それらのデータをコンピュータで解析して損傷位置を正確に同定するものであった。但しモニタリングで目的とする構造物の健全性評価では、損傷の発生位置を正確に特定することより、損傷の発生を確実に検出できること、さらに損傷程度を合理的に把握し定量化できることが重要である。またこれまでのAEセンサは、信号の大きさやその周波数成分、信号の発生頻度や各センサへの到達時間の差を測定し、亀裂発生時のエネルギーや損傷のタイプ、損傷の進展状況や発生箇所を推定するため、外来ノイズとAE信号の弁別や損傷位置の同定には、かなり高価で複雑なシステムを必要とした。

本研究で採用するスマートAEセンサ¹⁰⁾は、ある閾値を超える信号の頻度だけで評価を行う簡易なセンサである。センサの外観を写真1,2に示す。同センサは1枚の基板上にセンサ部、データ処理部及び通信部を集約し、大きさが約20mm×90mmのジュラルミン製のケースに入れたものである。センサ部には、小型化と感度の確保を目的として、従来のセラミック振動子ではなくコンポジット振動子を使用する。損傷検知はセンサ周囲の領域に限定されるが、AE波が閾値を超える単位時間当たりの頻度をカウントし、損傷程度の指標とする。閾値については、対象とする部材の厚さや配筋状況、想定する地震力などを考慮し、4段階に設定しノイズと信号の弁別を行う。サンプリング時間は100マイクロ秒とし、0.1秒あるいは1秒毎の頻度を計数することにより、処理するデータ量を最小に抑えて高速で信頼性の高いシステムを形成する。

スマートAEセンサはデータ処理の機能を内蔵しているため、記録装置へのデータ通信には種々の方法が考えられる。本稿で報告する例においては、記録装置と通信媒体にそれぞれPCとUSBを用いるタイプやメモリとツイストペア線を用いるタイプを使用しているが、最終的には、後述する無線システムと組み合わせることを目指している。



写真1 スマートAEセンサ外観
(ハードケースタイプ)

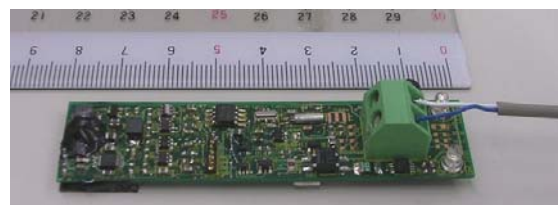


写真2 スマートAEセンサ外観
(露出タイプ)

3.2 AE損傷指標の有効性

コンクリート構造物の損傷検出のためのローカルモニタリングに供するAE損傷指標について検討する。以下では、防災科学技術研究所の大都市大震災軽減化特別(大大特)プロジェクト(文部科学省委託)の一環で実施したRC4層建物模型振動台実験¹⁶⁾から、損傷判定に寄与するAE計数について検討した結果を示す。AE計数とは、スマートAEセンサの反応度合いを意味し、センシング位置(点)で受信したAE信号が単位時間あたりに予め設定した閾値を超えた回数で表される。

試験体は写真3に示すように、1×3スパンRC4層建物で開口耐震壁や袖壁、腰壁部分を有する現実的なモデルである。実規模の1/4スケールであり、1スパン1.5m、各層階高0.75mで、試験体有効重量は約320kNである。この模型を3次元振動台に載せ、実地震波入力により破壊に至る過程を観察した。実験では兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台(JMA神戸)で観測された記録を入力とし、加速度計や変位計、ロードセルやひずみゲージなどを用いて各部の物理量を計測した。スマートAEセンサは、事前解析によりひび割れが多く発生すると予想された最下層開口壁および柱脚部に配置し、構造ヘルスマニタリングへの適用を念頭に健全な初期状態からの継続的なデータ取得を行った。センサ設置箇所を図5

に示す。データ収録するA E 頻度はセンサにより 0.1 秒間（図 5 の青丸印）あるいは 1 秒間（同赤丸印）毎のカウント数として出力した。図 6 に入力地震波の加速度波形とその平面内軌跡を示す。

図 5 の隅角柱に位置するセンサ A（腰壁側）およびセンサ E（有開口壁）の検知結果を、加振レベルを段階的に上げた実験ケース（RUN2～9）毎に図 7 に示す。入力とした兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波に対する倍率は、RUN2 から RUN9 までそれぞれ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.25, 1.25, 1.25 倍である。加振ケース一覧を表 1 に示す。図中の凡例は 4 段階の感度を表し TH4 から TH1 へ閾値が高くなる。縦軸の A E 頻度は加振レベルの上昇に応じて RUN6～RUN7 までは増加するが、大きな亀裂が多数生じるそれ以降のケースではカウントが減少する。これは、ひび割れの進展により新たな応力波の発生が抑制されることや、大きな亀裂により A E 波の伝播が遮断されることが要因と考えられる。実験データの分析で求められた最下層の層間変形角は重心位置において RUN6, RUN7 でそれぞれ約 1/40, 1/44 であった。実験終了時におけるセンサ設置周辺のひび割れ状況を写真 4 に示す。なおセンサ A 及びセンサ E 共に、各閾値での A E 計数は概ね相似形を示しておりノイズの影響は見られない。

加振レベルに応じたセンサ設置位置による反応の違いを図 8 に示す。ひび割れが早期に生じた腰壁・短柱フレームの柱脚部（A, B）では、RUN5 までの早期の段階で他の部位より A E 頻度が高い。加振が進み変形・損傷の進展する RUN4 あたりから、開口壁（E）での反応が顕著になり RUN7 でピークを迎える。一方、センサ B の頻度は既に RUN5 以降で低減の傾向を示す。これらに対して損傷が比較的少ない袖壁フレーム（C, F）では頻度が小さく、両者は同程度の結果を示す。ヘルスマonitoring の観点からは、加振レベルの小さい RUN2・RUN3 あたりでも、センサの位置に応じた反応の違いが出ている点は注目に値する。そこで初期ひび割れ発生段階での A E センサの反応に着目した分析を行った。

まず RUN1（5% 入力）では試験体外観に変状は見られず、A E センサにも反応はなかった。RUN2（20% 入力）では、最下層腰壁および袖壁に微小なひび割れが目視で僅かに認められ、腰壁・短柱位置での短辺方向最大層間変形角は約 1/1,540 であった。この加振時のセンサ A（腰壁部）およびセンサ E（有開口壁部）が捉えた A E 計数の時間的変化を、センサ設置位置における層間変位絶対値と比較し図 9 に示す。凡例（TH1～TH4）は図 7 と同様に閾値を示す。両センサ共、層間変位が増大する時刻に A E 計数が大きく、最も感度の高い（閾値の小さい）場合（TH1）には変形角が約 1/2,000 以上で初期ひび割れを検知している。このことから、処理するデータ量を最小限に抑えたスマート A E センサでも、ひずみレベルの小さな損傷の発生を充分かつ的確に検知できることが確認できる。

以上の結果から、コンクリートの初期ひび割れしか発生しない小さな地震入力レベルにおいても、スマート A E センサによる損傷検知が効果的であること、同センサを用いたシステムの地震前後におけるローカルモニタリングへの適用が十分に可能であることを確認した。なおひび割れと A E 頻度との定量的関係について、本稿に示した実験例で確認できた範囲外においては不明な点もあり、今後、さらに実験や観測を通じた定量的評価の検討が必要であると認識している。



写真 3 RC建物模型振動台実験とスマート A E センサ

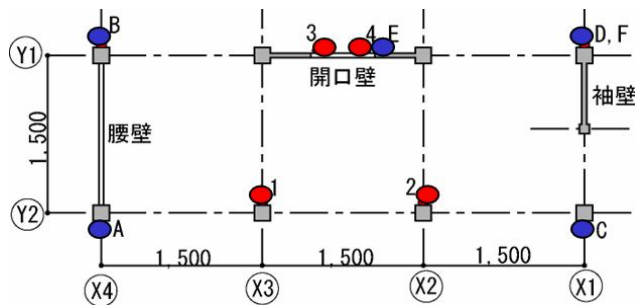


図5 スマートAEセンサの設置箇所

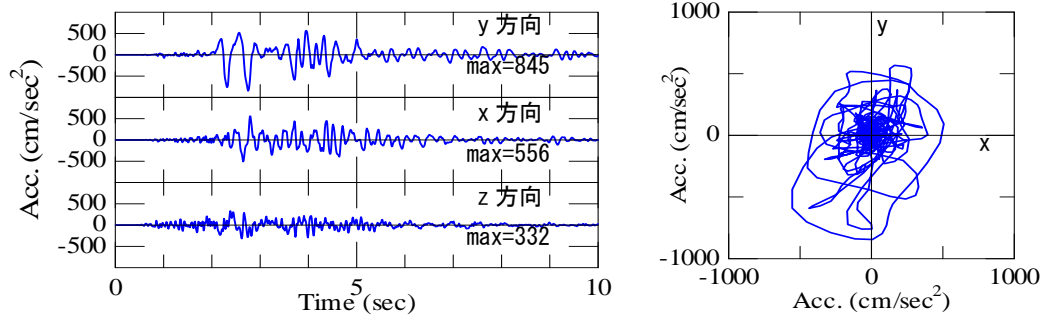


図6 入力波時刻歴とオービット

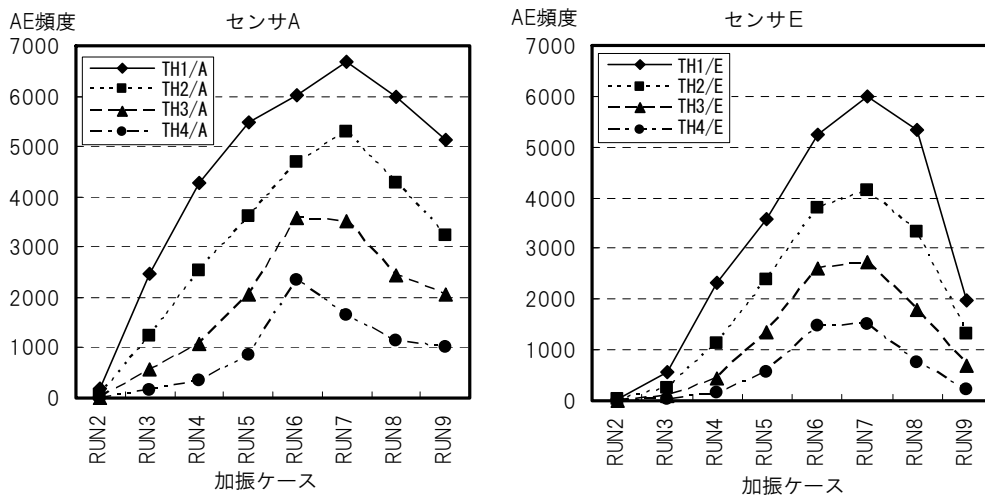


図7 入力レベルに応じたAE頻度の推移
(左：センサA、右：センサE)



写真4 センサ設置周辺の模型ひび割れ状況
(左：センサA、右：センサE)

AE頻度

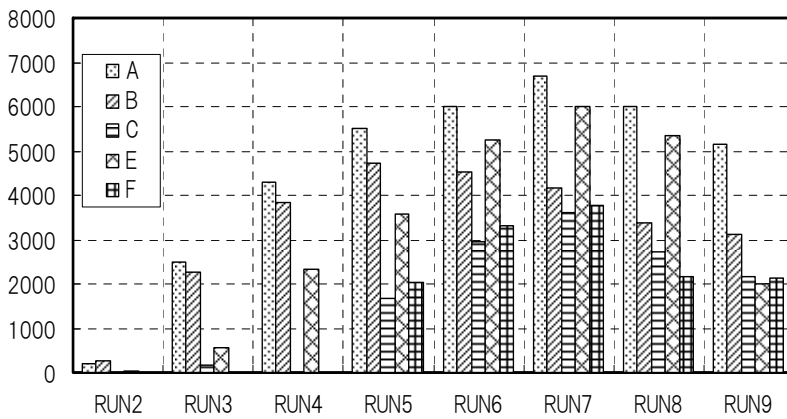


図8 入力レベルに応じたA E頻度の推移
(スマートA Eセンサ貼付位置の違いによる反応)
閾値 TH1 の計測結果を示す

表1 加振ケース一覧

地震波 2軸加振 ケース	y方向 最大入力 加速度	1層腰壁 y方向 最大層間 変形角
RUN1	約40 Gal	1/3,710
RUN2	170	1/1,540
RUN3	340	1/472
RUN4	510	1/155
RUN5	680	1/71
RUN6	845	1/22
RUN7	1060	1/23
RUN8	1060	1/21
RUN9	1060	1/26

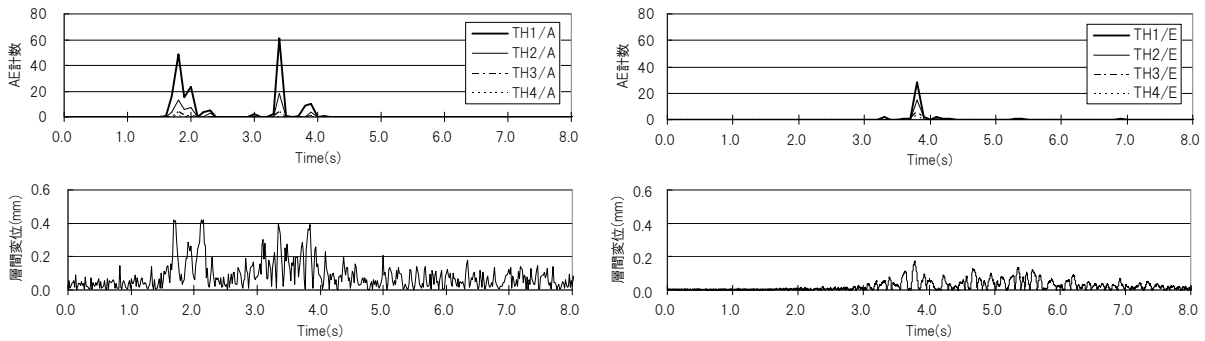


図9 A E頻度と層間変位絶対値の比較 (RUN2, 20%入力)
(左: センサA(腰壁)、右: センサE(有開口壁))

4. スマートVAセンサによるグローバルモニタリング

4.1 応答加速度に基づく損傷指標の検討

前項と同じ振動台実験におけるデータを分析し、応答加速度に基づく指標に関する検討を実施した。建物模型試験体と各階に設けた加速度計測点を図10に示す。評価対象部位は、損傷の進行した腰壁側隅角部 (y15~y45) と損傷が比較的小さかった袖壁側隅角部 (y14~y44) で、前述のようにコンクリートのひび割れや鉄筋降伏などによる損傷はy方向に顕著に現れた。

応答の絶対値指標としての最大加速度と、周波数特性を表現する特性周期 $1/f_2$ を求めプロットした結果を図11に示す。特性周波数 f_2 はスペクトル密度関数を用いて求めた重心周波数に相当する。同図は各階毎に、地震入力レベルによる変動を表し、袖壁側隅角部とその対角の腰壁側で比較したものである。最終的に破壊が顕著に現れた腰壁側では、小さな入力レベルでも下層階ほど特性周期がのびる(長周期の振幅成分が増大する)傾向が顕著に見られ、早期のひび割れ発生および損傷の進展と対応する結果を示す。またRUN3からRUN4あたりでそののびが抑制され、その後、腰壁端部にコンクリートの圧壊が見られた1, 2層部では、周期の戻りと共に最大応答加速度の増加がやや鈍る傾向が現れている。一方、全加振ケースを通じてあまり損傷を受けなかった袖壁側では、腰壁側に比べて最大加速度が小さめであり、周期の延長も腰壁側ほどではない。以上の結果から、構造物の損傷程度をとらえる上で、その振動

特性を表現する周期的な指標と最大応答値を併せて評価すべきと考えられる。

ここで開発したシステムでは、対象とする建物や構造物が損傷を受けた場合に生ずる上述のような振動性状の変化を、加速度計測から得られる情報に基づき捉えるグローバルなモニタリングを有効な手段と考える。但し、先に示した特性周波数 f_2 は、サンプリング時間刻み毎に計測した加速度時刻歴を一旦収録し、FFTなどにより周波数領域での指標に変換する必要があるため、センサ内で行う処理は簡単ではない。そこで、周期的な変動を簡便に抽出できる指標として、ある一定時間間隔におけるゼロクロス点数の利用を考案した。これはRC部のひび割れなどの損傷に起因する剛性低下¹⁷⁾を想定し、それによって生ずる応答波形の変化を捉えようとするものである。建物・構造物の固有振動数の低下から、応答が長周期化することにより、ゼロクロス点数が減少する傾向があると考えられる。

応答波形のゼロクロス点数には、構造物の振動性状だけでなく、入力地震波の周期特性も反映される。震源が比較的遠い遠地震に対しては、主要動の後に表面波後続動の影響を受け、周期の長い応答波形を呈する場合が見られる。損傷検知を目的としたモニタリングでは、単に周期の変動だけでなく、応答振幅の絶対値を併せて判定することが不可欠である。また応答振幅を評価する際には、その最大値のみならず、エネルギー的な指標として振幅絶対値和を採用する。これらの指標は、センサで計測された加速度データから、単純な和・積算とだけで求めることができる利点がある。

袖壁側と腰壁側それぞれの屋上から第1層におけるy方向ゼロクロス点数の推移を重ねがきして図12左に示す。これは応答加速度時系列データから、主要動部を含む20秒間でゼロ軸を切る回数を求めたものである。RUN2から入力が増大に伴いゼロクロス点数が減少し、長周期化する傾向が認められる。またRUN4での急激な低下が建物の異変を知らせていると考えられる。一方、加速度振幅の絶対値和を図12右に示す。同指標は最大加速度と似た傾向を示し、RUN3から腰壁側と袖壁側で差が明らかとなるが、RUN4における腰壁側の増大が顕著である。RUN5では逆に一旦低下するが、その後微増の傾向を示す。次にゼロクロス点数と加速度振幅絶対値和の関係から、振幅による周期の変動を評価し構造損傷検出の可能性を検討する。加速度振幅絶対値和を横軸、ゼロクロス点数を縦軸にとり、腰壁側隅角部と袖壁側隅角部それぞれのy方向成分について、地震波加振レベルを段階的に大きくした(RUN2⇒RUN7)結果のプロットを図13に示す。全体的にグラフは右下がりとなり、応答振幅が大きくなるにつれて周期が長くなる傾向は共通している。腰壁側では袖壁側に比べて階による差が見られる。上階ほど加速度振幅が大きく応答増幅が認められることがわかる。また図中赤丸で示すように、2F以上のy成分において、腰壁側の変状がRUN3～RUN4で明瞭に現れ、その後、RUN5～RUN7でプロットが停留する傾向にある。これは損傷の進行により応答加速度が頭打ちし、周期の伸びも抑制される結果と考えられる。

以上の分析例をふまえて、加速度センサ出力のゼロクロス点数と振幅絶対値和を組み合わせ、振幅による周期の変動を把握して構造損傷を検出する方法の概念を図14に示す。図中の太実線とその変動幅を示すゾーンは、対象構造物に固有の振動性状を表し、固有周期の応答振幅依存性を示す。固有周期が閾値を下回らない領域と、加速度振幅絶対値和がその閾値以下の領域は損傷なしと判定される。閾値以上の振幅絶対値和を示し、かつゼロクロス回数が閾値を下回るか、あるいは固有の傾向から逸脱する領域が損傷の可能性を知らせる。

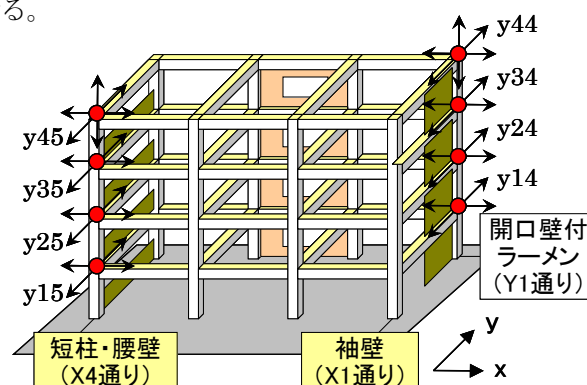


図10 建物模型試験体と加速度計測点（試験体の床スラブは省略して表示）

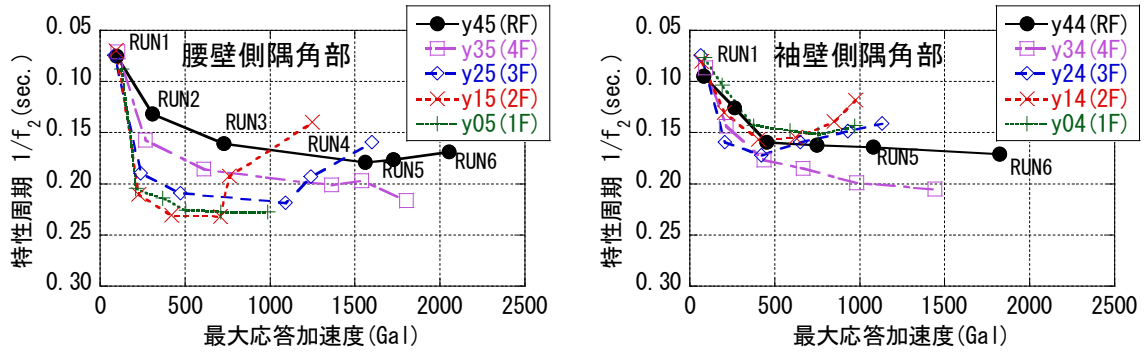


図 11 最大応答加速度と特性周期 $1/f_2$ (左図：袖壁側隅角部、右図：腰壁側隅角部)

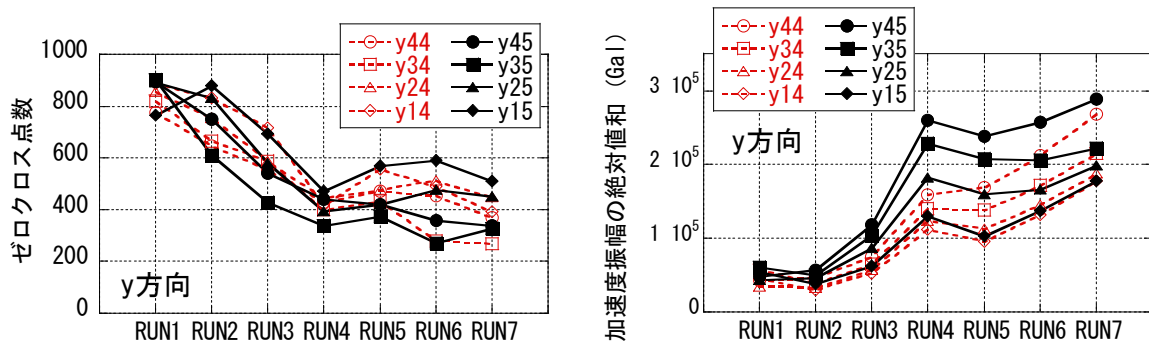


図 12 加速度損傷指標の推移 (左：ゼロクロス点数、右：加速度振幅絶対値和)

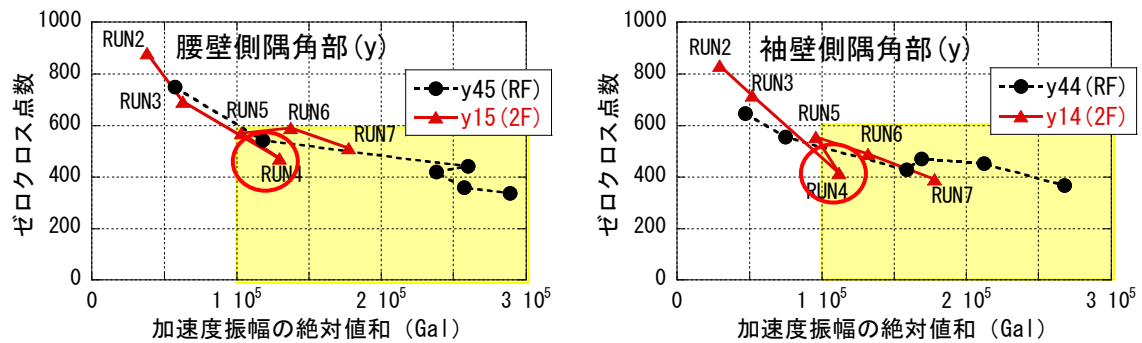


図 13 試験体各計測点でのゼロクロス点数と加速度振幅絶対値和の関係 (左図：損傷の進行した腰壁側隅角部、右図：損傷が比較的小さかった袖壁側隅角部)

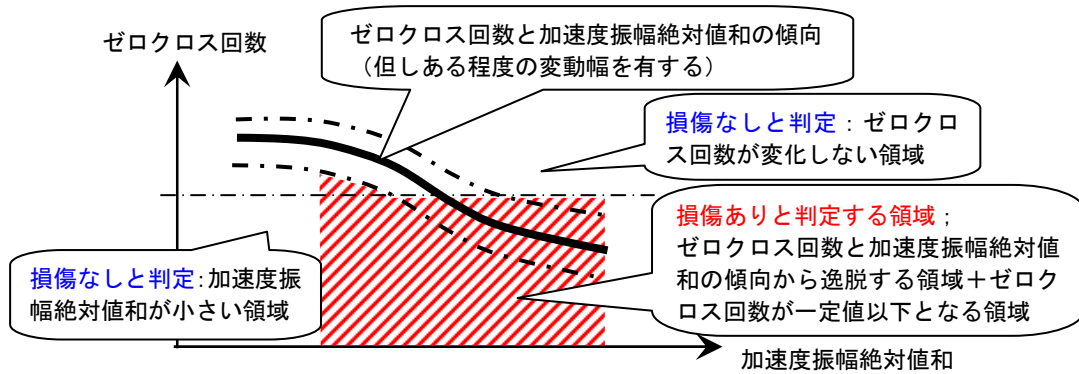


図 14 損傷指標を用いた判定の概念図

4.2 スマートVAセンサの仕様

前項で考案した損傷検出システムを実現するために、同一基板上に加速度計、CPU および通信回路を有するセンサを試作しスマートVA (vibration analyzing) センサと名付けた。そのブロック図と外観を図15および写真5に示す。大きさが2×6cmの基板上に小型の静電容量型三軸加速度センサ、CPU、メモリを搭載し、無線用のモジュールおよび電源(単三電池)を接続している。静電容量型の加速度センサの仕様は以下の通りである。

- ①測定軸 直交三軸
- ②測定範囲 ±1.5G
- ③計測繰返 100Hz
- ④非直線性 最大1.5%、
標準0.5%以下
- ⑤温度特性 0.5mG/°C以下

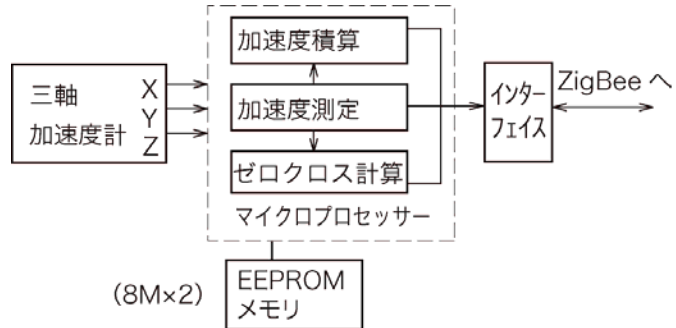


図15 スマートVAセンサのブロック図

自動トリガモードにより閾値を超える加速度が計測されるとサンプリングを開始し、約6分間(370秒)測定を行い、10秒毎のゼロクロス数・加速度絶対値和・最大加速度を保存・出力する。また同時に、動作開始からの0.01秒毎の加速度時刻歴データを保存し、PCからの要求にもとづいて出力することができる。なお今後CPUが高速化されれば、FFTなどの高度な処理も可能になると期待できる。

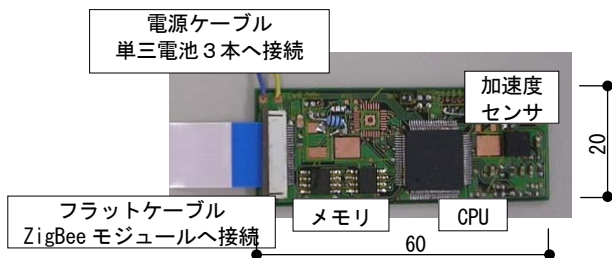


写真5 スマートVAセンサの外観

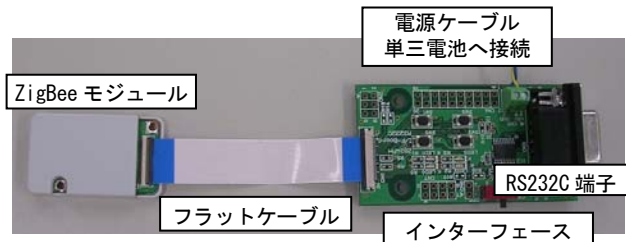


写真6 ZigBee外観(PC接続側)

5. 無線を用いたデータ通信方法

スマートセンサと親局となるモニタリング用PCとのデータ通信方法には、有線または無線が考えられる。有線による通信の特長は、センサに電源を供給するにあたってデータ通信のケーブルを併用でき、連続的な計測が可能であること、データ送信速度が速く信頼性が高いことなどである。しかしケーブルを敷設する必要があり、配線の困難な部位にはセンサを設置できないことや、初期段階で配線に伴う工事が発生することなどの短所を有している。

これに対し無線を用いれば、電波の届く範囲において配線せずにデータ通信ができ、配線経路を考慮することなくセンサおよびモニタリング用PCを設置することができる。但しそのために解決すべき課題として、供給電源の問題がある。高速で信頼性の高い無線通信を用いる場合は、AC電源や容量の大きな電池を要する。センサおよび無線用モジュールの消費電力と通信速度、通信データ量に応じた適切な電源を確保する必要があると考えられる。

本システムで採用するスマートVAセンサは、100Hzでサンプリングした加速度データを3つの損傷指標に変換し、モニタリング用PCに送信するため、データ通信量は加速度の時刻歴データに比べて非常に少ない。スマートAEセンサについても同様である。また、CPU、メモリ等を含むセンサの消費電

力は 5~15mA 程度と非常に小さい。そこで開発したシステムの通信手段には、通信速度は遅いが消費電力の少ない無線規格 ZigBee を採用することとした。無線規格 ZigBee の特徴を以下に示す。

- ・低電力、低速、低価格の無線通信技術
- ・マルチホップ通信が可能
- ・2.4GHz 帯を使用（無線 LAN との干渉はチャンネルの設定により可能）
- ・データレート（伝送速度）：250kbps
- ・通信距離：100m 程度まで

ZigBee の消費電力は現時点で 50mA 程度であるが、通信時間が短いため、例えば単三電池 3 本で数日間の計測が可能である。単三電池では実用的な計測期間を達成できないが、後述するように、大容量の電池を用いることで数ヶ月の連続計測が可能となる。また今後は、電池の高性能化ならびにセンサおよび無線ユニットの省電力化により、さらに長期の連続計測を実現できると考えている。

本システムに採用した ZigBee 無線モジュールは、写真 5 に示すようにスマートセンサとフラットケーブルで接続される。また親局側モニタリング用 PC とは、写真 6 のようにインターフェースを介して RS232C 端子で接続される。無線規格 ZigBee では PHS より微弱な電波を用いるため、実構造物に設置した場合、RC 造の壁や床等の透過が難しい場合が少なくない。そこで必要に応じて中継局を設け、無線の届かない範囲では有線を併用することによって、ZigBee の長所を生かしたセンサネットワークを形成する。親局あるいは中継局 PC とセンサとの通信は、1 対多のスター型のほかに、センサを経由してさらに遠いセンサへのリレー通信が可能なメッシュ型マルチホップ対応も将来的には可能である。マルチホップ機能を用いれば、無線通信で問題となる障害物による遮蔽も回避することができる。バッテリー電源を用いた無線ネットワークの概念図を図 16 に示す。

スマート AE およびスマート VA センサは電源を自ら持ち長時間動作する必要がある。そのためには、常時通信を行うのではなく、通信機会を必要最小限とする。すなわち通常は、通信機能をスリープさせてセンサ自身のメモリにデータを書き込み、何らかのイベントが発生した場合にのみ、そのイベントが発生した時刻から例えば 1 分後までのデータを送信する。スマートセンサのセンシング部および CPU はスリープすることなく動作を行い、センサ自身で閾値を超えるイベントを検出するため常に監視を行う。なおスリープからの起動を無線によった場合には、スリープ中も電力消費は無視できない。そこでセンサ自身の電力でその通信機能を起動することにより省電力を実現する。自己放電が少なく、大容量の電池（一次電池、二次電池）を用いることによって、バッテリー駆動による 1 ヶ月から 3 ヶ月の連続測定を実現することが可能である。

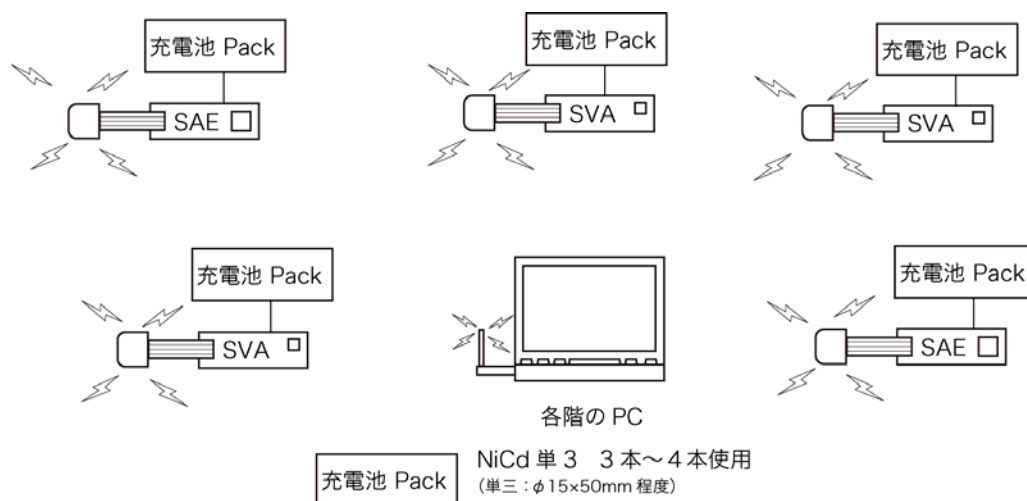


図 16 バッテリー電源を用いた無線ネットワークの概念図

6. まとめ

地震後のRC構造物の確実な損傷検出を目的とし、損傷程度や損傷発生の大まかな部位についての確かつ迅速な判断が可能となるような、実用的な構造ヘルスマニタリングシステムを開発した。提案するモニタリングでは、個々の低コストセンサで計測したデータをセンサ内で簡単な指標に変換し、転送・処理する情報量を最小限に抑えることにより、多数のセンサを配した信頼性の高いシステムとした。

モニタリング用に開発した2種類のセンサ(スマートAEセンサ、スマートVAセンサ)はそれぞれ、コンクリートのひび割れを検知するローカルモニタリングと、構造物全体の振動性状の変化を捉えるグローバルモニタリングに供する。前者はひび割れに伴い発生するAE信号を100マイクロ秒毎に測定し、4段階に設定した閾値を超える単位時間あたりの頻度として計測する。後者は10ミリ秒毎にサンプリングした加速度時刻歴から、一定時間間隔におけるゼロクロス点数と最大値および振幅絶対値の累積値を求め、変動の履歴から異常を検出する。これらの損傷指標はセンサと同一基板上のCPUで処理し送信される。通信には、有線と併せて、比較的低速度ではあるが消費電力の小さい無線規格ZigBeeを用いることとした。現時点では全ての通信を無線化することは難しいが、今後は、センサ同士の情報伝達を可能にするマルチホップ対応の通信技術の進歩が期待される。ここで提案した、スマートセンサの採用によるデータ量の削減とバッテリー駆動を可能にしたシステムは、地震時のヘルスマニタリング技術の信頼性向上に寄与するものと考えている。

なお本論では、システム全体によるモニタリングの有効性を十分に実証するには至っていない。対象とする建物や構造物について、ひび割れの発生と振動性状の変化に関する基礎的なデータベースを備えていることが、より効果的なモニタリングを可能にすることは言うまでもない。そのためには、システムの実用化と実装によるデータの蓄積、解析的検討による損傷指標の高度化が今後の課題である。

謝辞

本研究では、防災科研大大特プロジェクトの一環で実施されたRC建物模型振動台実験のデータを使わせていただきました。快くデータを提供して下さった大林組技術研究所の勝俣英雄氏、白井和貴氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本鎮男編著：ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視ー，共立出版，1999.
- 2) 中村 充：建築構造物のヘルスマニタリング，計測と制御，第41巻，第11号，2002，pp.819-824.
- 3) 濱本卓司：性能評価のためのヘルスマニタリング技術，建築防災，2004，pp.9-15.
- 4) 中村 充：構造ヘルスマニタリングと地震観測，建築学会大会 PD「建築物の地震時挙動を知るために」資料，2006，pp.9-16.
- 5) 今井道男・酒向裕司ほか：BOCDA方式計測型光ファイバセンサによる損傷モニタリング（その1）（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2003，pp.1007-1010.
- 6) 稲田 裕・鈴木 誠・岩城英朗ほか：自己診断材料を用いた損傷検知手法のRC造建築物への適用（その1）～（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2005，pp.29-34.
- 7) 福和伸夫ほか：建物観測用の普及型低コスト地震計の試作，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2003，pp.871-872.
- 8) KURATA Narito et al.：A building Risk Monitoring using Wireless Sensor MICA Mote，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2003，pp.993-994.
- 9) 西谷 章・川田 慶ほか：スマートセンサ MOTE MICAによる構造モニタリングシステム（その1）（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2004，pp.779-782.
- 10) 柳瀬高仁・池ヶ谷 靖・林 静雄ほか：スマートAEセンサを用いた損傷検出システムの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，2004，pp.195-196.

- 11)池ヶ谷 靖・圓 幸史朗：スマート損傷センサによるモニタリング，計測と制御，第48巻，第8号，2007，pp.632-636.
- 12)圓 幸史朗・池ヶ谷 靖・米山健一郎ほか：スマートAEセンサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング実用化研究（1/3）～（3/3），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2005，pp.23-28.
- 13)柳瀬高仁・米山健一郎・白井和貴ほか：スマートAEセンサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング（その1）～（その3），日本地震工学会大会梗概集，2005，pp.406-411.
- 14)圓 幸史朗・米山健一郎・柳瀬高仁ほか：RC構造物を対象とした損傷検出のためのモニタリングシステムの提案（1/3）～（3/3），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2006，pp.877-882.
- 15)圓 幸史朗・柳瀬高仁・中村 充ほか：RC構造物を対象とした構造ヘルスマニタリングシステムの開発（その1）～（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，2007，pp.59-64.
- 16)白井和貴・壁谷澤寿一・勝俣英雄・壁谷澤寿海：RC造4層壁フレーム構造の多方向入力振動台実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，2006，pp.379-384.
- 17)金子佳生・三田彰・三橋博三・金指成昭：鉄筋コンクリート造架構の層剛性と柱脚回転角を利用した損傷評価ー有限要素法解析による損傷評価とその活用ー，日本建築学会構造系論文集，562，2002，pp.91-98.

（受理：2007年7月13日）

（掲載決定：2007年10月12日）

Development of Structural Health Monitoring System with Smart Sensors and Wireless Network

EN Koshiro¹⁾, IKEGAYA Sei²⁾, NAKAMURA Mitsuru³⁾, YANASE Takahito⁴⁾

1) Group Leader, Obayashi Corporation, Dr.Eng.

2) Manager, Just Co.Ltd.

3) Group Leader, Obayashi Corporation, Dr.Eng.

4) Member, Manager, Just Co.Ltd.

ABSTRACT

The practical structural health monitoring system is suggested aiming to detect certainly the occurrence of damage and to identify the portion with the degree of damage. Our system is highly reliable and simple of low cost adopting new sensors which translate the measurements to the damage indices and transmit in the minimum amount of data. The developed smart AE(acoustic emission) sensor is useful for local monitoring detecting the crack of concrete, and new smart VA(vibration analyzing) sensor is used for global monitoring by arresting the change in dynamic properties of the building structure. The wireless network using the standard ZigBee provides with the reduced consumption of electricity, and is expected to realize multi-hop transmission and mutual communication of sensors in the near future.

Key Words: Structural Health Monitoring, Smart Sensor, Wireless Network, Damage Detection