

建物モニタリング診断システムの開発と防災への適用

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT HEALTH MONITORING SYSTEMS AND PRACTICAL IMPLEMENTATIONS ON EARTHQUAKE PREVENTION

保井美敏^{*1}, 渡壁守正^{*2}, 稲井慎介^{*3}, 成田修英^{*3}, 山本健史^{*3}
 Mitoshi YASUI, Morimasa WATAKABE, Shinsuke INAI, Nobuhide NARITA and Takeshi YAMAMOTO

The intelligent health monitoring systems with soundness diagnosis are applicable to disaster prevention major earthquake. The systems are plainly display for the visualization of safety and security. The information contents are seismic intensity for building, maximum acceleration, maximum story deformation angle during earthquake, comments about the building security just after earthquake. For low cost systems, A IT smart sensor is MEMS type accelerometer of low cost. The sensor is enough accuracy as with servo type accelerometer. Practical implementations of systems on earthquake prevention and maintenances are applied to high-rise building in the downtown area. The intelligent health monitoring systems are admitted as valid for people who are unable to return home after disasters and Business Continuity Plan. For various type structures, The display devices are interphone, portable telephone, smartphone.

Keywords : Structural Health Monitoring, Building Diagnosis, Earthquake, Disaster Prevention, IT smart sensor
 構造ヘルスモニタリング, 建物診断, 地震, 防災, IT スマートセンサ

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方までの広範囲で被害が発生し、建築構造物の応急被害度判定や被害調査に多くの人手や時間を要した。東京都心では、躯体構造が十分安全であるにも関わらず建物から外へ避難したため混乱が生じたり、多くの帰宅困難者が発生した。このような状況を背景に東京都では帰宅困難者対策条例¹⁾が定められている。そのガイドラインでは首都直下地震等大規模災害が発生した場合、施設にとどまれるかを発生3時間後までに判断するように指導している。また、「高層ビル耐震診断に基づく帰宅困難者行動支援システム構築」プロジェクトが実施され、大震災発生直後の安全性の確認のために構造ヘルスモニタリングの利用も検討されている²⁾。

このような背景を基に、建物診断機能を有し、地震時に情報発信できる「建物モニタリング診断システム」^{3),4)}を開発した。システムは巨大地震時の防災要求にこたえられるように「建物の安全・安心情報の見える化」を図り、管理者・使用者に分かり易く情報を伝達できるようにした。本報では、システムの概要、帰宅困難者対策やBCP対応としての建物防災へ適用事例⁵⁾および本システムをより広い範囲で適用するための機能拡張⁶⁾について紹介する。

2. 建物モニタリング診断システムの開発

2.1 システムの概要

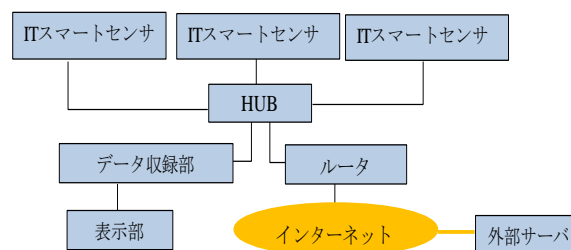


図 - 1 建物モニタリング診断システムのネットワーク構成

建物モニタリング診断システムのネットワーク構成を図-1に、ハードの仕様を表-1に示す。システムは、IT スマートセンサ、データ収録部および表示部から構成される。

IT スマートセンサは MEMS を用いたローコストなセンサで、1台で3方向の加速度を測定できる。地震感知後は、ネットワークを介して自動的にデータ収録部へデータを送信する仕様となっている。データ収録部はIT スマートセンサからの加速度計測値を受信後、内部のメモリにデータを記録するとともに、受信したデータから2.5秒ごとに計測震度を算出して、ネットワークを介して表示部へ送信する。また、インターネットを介して外部サーバと接続可能で、外部のデータベースやプログラムを利用した処理が可能となる。更に、各IT スマートセンサの時刻同期をとるための、時刻サーバ機能を持つ仕様となっている。表示部は、データ収録部から受信した計測震

*1 戸田建設開発センター 工学修士
 *2 戸田建設開発センター 工学博士
 *3 戸田建設開発センター 修士(工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.
 Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.
 Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

度、震度階級、および建物診断情報を表示するモニタである。表示部の詳細を図-2に示す。画面は、地震発生後にデータ収録部で計算されたセンサ設置階の最大建物震度（建物震度は、IT スマートセンサから得られる建物の計測震度相当値）と建物健全度についての建物診断情報（1次診断）を表示する。診断情報は、震度階に応じて色分けされ、建物使用者・監視者が瞬時に状況を把握できる仕様となっている。

表-1 ハード仕様一覧

名称	項目	仕様
IT スマートセンサ	検出方向	3成分(x, y, z)
	測定範囲	±2000cm/s ²
	サンプリング周波数	200Hz
	センサ間時刻同期	1msec 以下
データ収録部	メモリ	フラッシュメモリ
	計算機能	計測震度
	時刻サーバ	センサ時刻マスタ
表示部	市販モニタ	ビデオ端子接続

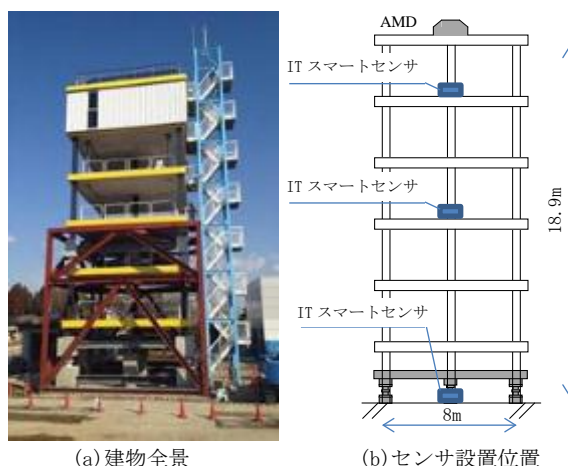


図-3 建物概要

システムの動作状況、表示状況および IT スマートセンサの精度を実大の鉄骨造建物により検証した⁷⁾。建物概要を図-3、表-2に示す。6階建てで屋上階にAMD（アクティブマスダンパー）を設置、AMDにより様々な地震の揺れを再現できる。平面は各階 8m×8mで、高さは各階約 3m、最高高さ約 19mである。IT スマートセンサは1F(地盤)、3Fおよび6Fに設置した。

表-2 建物の諸元

構造	S造(免震)
階数	6
最高高さ	18.9m
平面寸法	8m×8m
建物総重量	4800kN

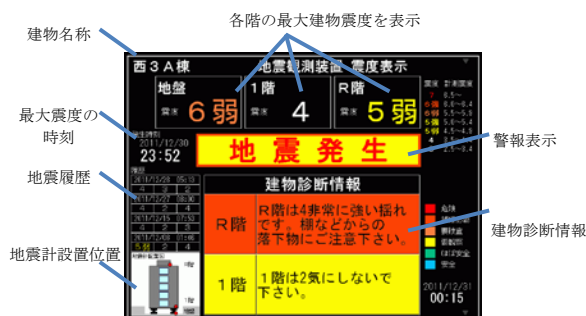


図-2 表示部の表示画面の一例

本システムは設備機器、防災管理情報など様々な住環境に関わるモニタリングとの連動を可能とし、巨大地震発生時の減災対策から常時の経年劣化による構造躯体の建物健全度を診断でき、以下の特長がある。

- ① 建物設計条件に基づいて最適配置した IT スマートセンサにより、建物の揺れをその場で計測し、リアルタイムに揺れの震度を表示するとともに、地震直後に建物健全度を判定し表示できる。
- ② ビル管理システム（防犯・ライフライン監視など）と組み合わせることが可能となっている。
- ③ インターネット経由で専用の詳細診断サーバと接続し、地震直後の1次診断に対し、さらに詳細に建物健全度を診断すること可能である。
- ④ IT スマートセンサ自体が点検機能を有しているため、定期的に点検を省略できる。

2.2 検証実験

(1) 実験方法

加振は 0.4Hz、0.7Hz、1.5Hz のサイン波、6種の地震波（エルセントロ、八戸、BCJ と 2011年4/7、3/16、3/11の3回の観測地震）を用いた。IT スマートセンサの精度検証は、同時に設置・測定した2台の高感度サーボ型加速度計記録との比較を行った。また、IT スマートセンサ加速度記録の二重積分による変位値の精度についてもレーザ変位計との比較を行った。検討は加振方向(X方向)の記録を用いた。

サーボ型A： 型番 LS-10C (リオン)

サーボ型B： 型番 VP-5122 (IMV)

レーザ変位計：型番 IL-100 (キーエンス)

また、検証実験期間中に発生した地震についても、同様に観測結果を比較した。動作・表示とも想定どおりの結果であったので、ここでは、IT スマートセンサの精度検証の結果について述べる。

(2) IT スマートセンサ精度に関する実験結果

結果の一例として、サイン波 0.7Hz で加振した場合の6階の IT スマートセンサとサーボ型(以降「サーボ」と称す)2台それぞれの加速度時刻歴波形を図-4に、それぞれのフーリエ振幅を図-5に、サーボAを基準とした IT スマートセンサ、サーボBのフーリエ振幅の比を図-6に示す。

図 - 4 の加速度時刻歴波形比較では 3 センサとも位相および振幅の大きさとも良く一致している。図 - 5 の振動数特性を確認するため求めたフーリエ振幅でも 3 センサ間では 0.2Hz 以下と 10Hz 以上の周期で多少の差が出る程度で、サイン波加振した 0.7Hz 前後の振動数帯域では 3 センサとも良く一致している。さらに振動数とサーボ A に対する振幅比の関係にした図 - 6 では、IT スマートセンサ、サーボ B ともフーリエ振幅比はほぼ 1 前後で概ね一致が見られるが、IT スマートセンサではフーリエ振幅でわずかに 1 からずれていた 0.2Hz 以下と 10Hz 以上の振動数で振幅比 1 と多少の差が見られる。10Hz 以上の振動数での振幅比 1 との差はサーボ B でも生じている。

そこで、長周期側の 0.2Hz 以下の振動数での振幅比 1 との差を検討するため、図 - 7 に示すように、0.2Hz 以下のみ、および 0.2~10Hz の成分のそれぞれの波形を切り出して比較した。同図にはフィルタなし（記録された原波）の波形も併記している。加速度レベルは、0.2~10Hz の成分はフィルタなしとほぼ同じで最大 6.5cm/s² 程度の振幅に対し、0.2Hz 以下のみの振幅は最大 0.37 m/s² であった。このように、0.2Hz 以下では加速度の信号成分が小さいためノイズの影響が現れたと考えられる。また、10Hz 以上

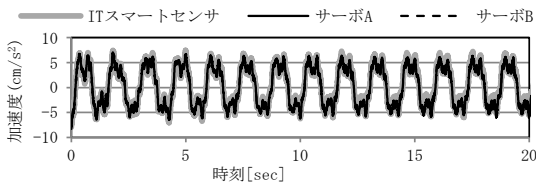


図 - 4 加速度時刻歴波形 (サイン波加振)

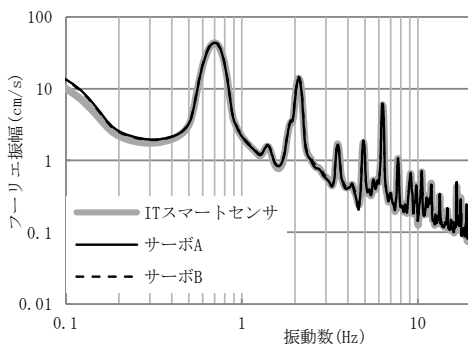


図 - 5 フーリエ振幅 (サイン波加振)

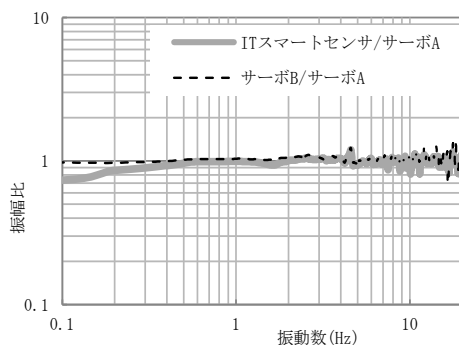


図 - 6 振幅比 (サーボ A 基準: サイン波加振)

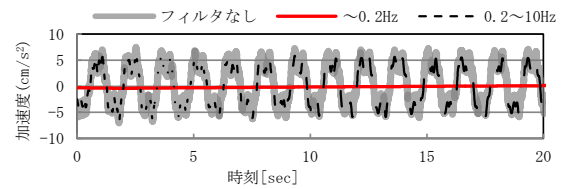


図 - 7 IT スマートセンサ波形比較 (サイン波加振)

でも図 - 5 に示すようにフーリエ振幅が小さくノイズの影響が現れたと考えられる。

次に、地震波の例として、2011 年 3 月 16 日に実験建物が建つ敷地内（つくば）で観測された加速度記録によって加振実験を行った結果を図 - 8~10 に示す。サイン波加振と同様 6 階の記録を用いている。図 - 8 は IT スマートセンサとサーボ 2 台による加速度時刻歴波形、図 - 9 はそれぞれのフーリエ振幅、図 - 10 はサーボ A を基準とした IT スマートセンサ、サーボ B のフーリエ振幅の比を示す。

図 - 8 の加速度波形はサイン波加振と同様 3 センサとも位相および振幅の大きさとも良く一致している。図 - 9 のフーリエ振幅もサイン波加振と同様 0.2Hz 以下でわずかに差が生じるのと 10Hz 以上で多少の差が出る程度で良く一致している。振動数と

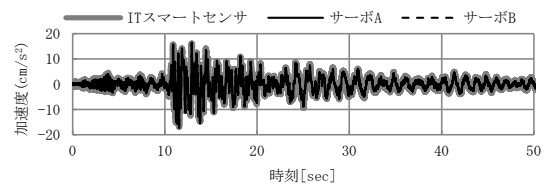


図 - 8 加速度時刻歴波形 (3/16 地震波加振)

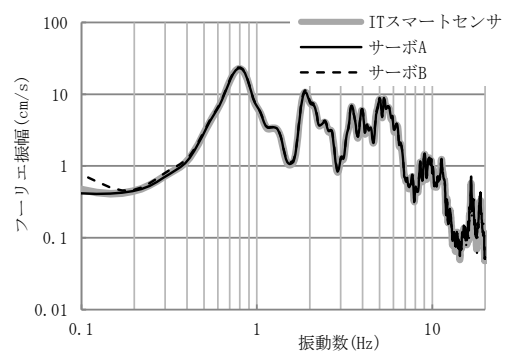


図 - 9 フーリエ振幅 (3/16 地震波加振)

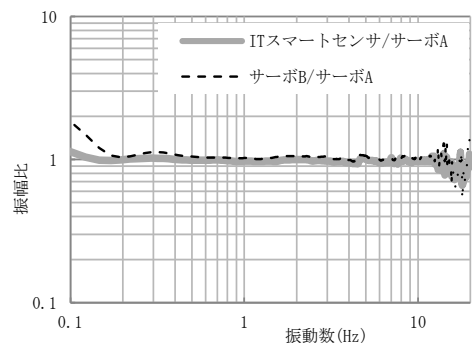


図 - 10 振幅比 (サーボ A 基準: 3/16 地震波加振)

サーボ A に対する振幅比の関係にした図 - 10 では、0.2Hz 以下の振動数で、サイン波加振と同様 IT スマートセンサに振幅比 1 と多少の差がみられる。しかし、図 - 10 ではサーボ B でも 0.2Hz 以下に振幅比 1 と差が生じている。フーリエ振幅の大きさで見てみると 0.2Hz 以下は信号成分が小さくノイズが影響していることが推測される。信号成分が小さくノイズの影響による振幅比 1 との差は、10Hz 以上の短周期でも、サイン波加振と同様に IT スマートセンサ、サーボ B ともに生じている。以上から、サイン波及び地震波を用いた加振実験でのセンサ精度の比較では、IT スマートセンサは、サーボ型加速度計と同等の性能が確保されていることがわかった。

3. 建物モニタリング診断システムの防災への適用

3.1 防災へ適用したシステムの概要

都心に建設される 21 階鉄骨造超高層建物防災へ適用したシステムの概略を図 - 11 に示す。適用したシステムは IT スマートセンサ、データ収録部、解析部及び表示部から構成されており、ハードの仕様は前述した表 - 1 と同じである。IT スマートセンサは 5 台設置しており、ネットワークを介してデータ収録部へ自動送信する仕様となっている。

解析部は、設定建物計測震度を超えた時に地震発生として表示開始の信号を送り、また、健全度診断のため、予め解析により予測したモード形状を利用してセンサ記録を基に得られる各階の最大加速度と最大層間変形角を求める解析を行う。本システムは放送施設とも連携しており、いずれかの IT スマートセンサが設定した建物計測震度を超えた時に注意喚起のメッセージを放送するようになっており、誤報防止対策として設定値は 2 つの IT スマートセンサの AND 判定としている。事前の地震波入力による応答解

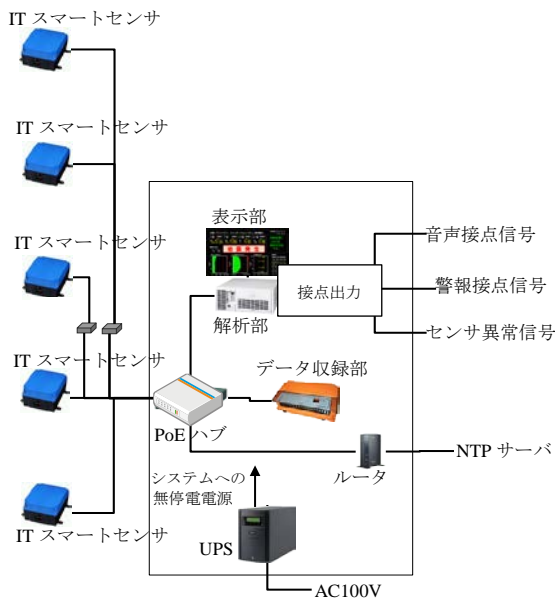


図 - 11 システム概要

析計算結果によれば、建物上階では地表面の計測震度より大きな建物計測震度となること、また、使用者が感じる揺れの大きさは使用者が在席する建物計測震度で判定することが妥当と考えられることから、気象庁が震度として用いている地表面の計測震度でなく、建物計測震度により放送を流すかどうかの判定を行っている。

今回の超高層建物での表示内容を図 - 12 に示す。超高層建物用画面として図 - 2 の表示内容を各階の健全度状況も分かり易さも含め図 - 12 のように修正した。建物計測震度として、2.5 秒ごとに求めたリアルタイムの建物震度とその地震中に発生している最大建物震度を表示する他、最大建物震度の分布図も表示し、建物の震度状況が一目でわかるようになっている。さらに、解析部で求めた最大加速度値と最大層間変形角の分布と建物で設定している健全度閾値に対する診断結果のコメントを表示する。本内容の表示は 1F の防災センタ内であるが、他の場所にモニタを設置して表示することも可能である。

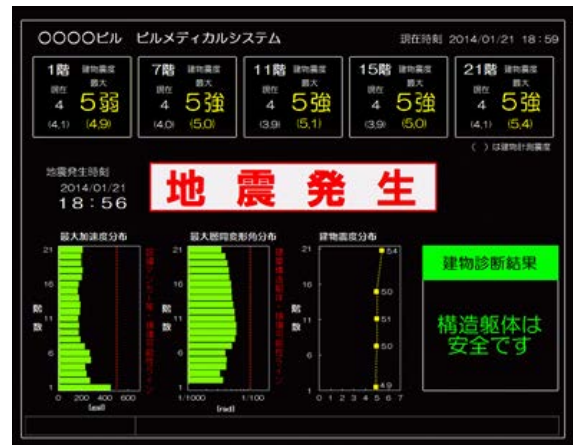


図 - 12 表示画面例

3.2 常時微動記録と地震観測記録

常時微動(以降「微動」と称す)を IT スマートセンサとサーボ型の高精度センサで同じ位置で同時に計測して、建物特性を確認した。微動から求めたフーリエスペクトルを本センサとサーボ型と一緒にして図 - 13 に示す。1 次固有振動数は X:0.48Hz(長辺方向), Y:0.43Hz(短辺方向)で、本センサの結果は高精度センサと振動数および振幅ともに差がない。これより、IT スマートセンサにより微動計測が十分な精度で可能なことがわかった。2014 年 3 月 12 日千葉県北西部で発生した地震(Mj4.4)の観測記録例を図 - 14 に示す、最大 3cm/s² 程度の小振幅地震であるが、きれいな観測記録波形が、得られている。図 - 15 には観測記録の 21F/1F のフーリエスペクトル比を微動結果と一緒にして示す。卓越振動数は X, Y 両方向とも観測結果と微動結果は良く対応しており、小振幅地震も十分な精度で記録されていた。

一連の結果より、本システムは、大地震時の防災への適用とともに建物維持管理を想定した常時微動計測を利用することも十分可能なことがわかった。

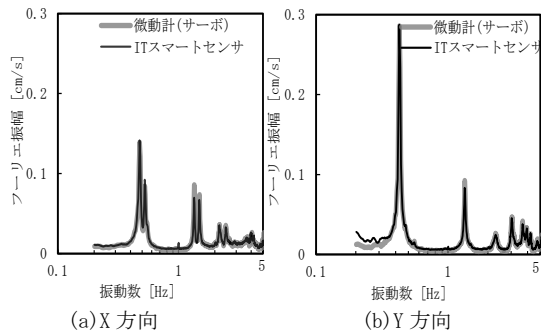


図 - 13 常時微動のフーリエスペクトル(21F)

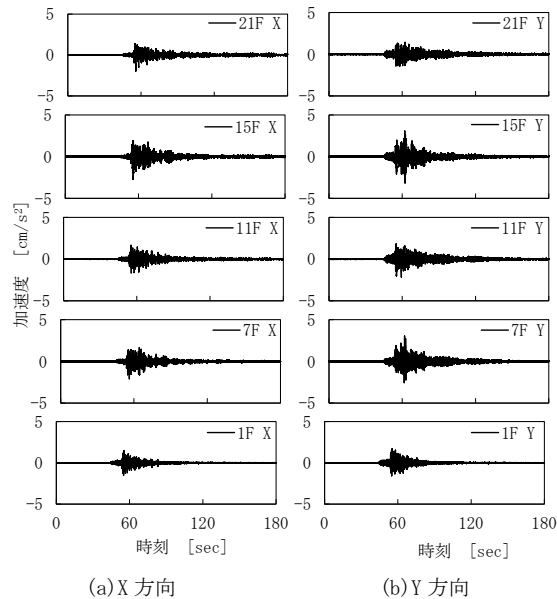


図 - 14 地震記録時刻歴波形(2014. 3. 12, Mj4. 4)

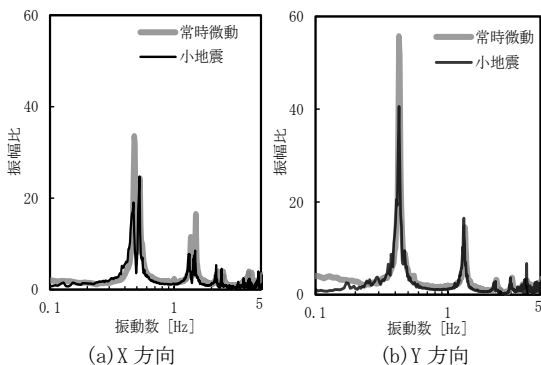


図 - 15 地震と常時微動のフーリエスペクトル比(21F/1F)

4. 情報伝送系の活用したシステムの機能拡張

4.1 機能拡張へのシステム構成

システムの機能拡張を行うため、主にインターホンでの表示、携帯電話やスマートフォンへの送信を目的とし、図 - 1 に示したシステム構成を図 - 16 に示すように改良し、加振実験を行った。3 台の IT スマートセンサで計測した加速度データをデータ収録部で収集し、ここで建物計測震度などを計算し、結果をコンテンツサーバ(以降「サーバ」と称す)に送る。サーバでは、建物計測震度のレベルをトリガとして解析が始まり、加速度記録から建物健全度を判定し、建物震度情報と共にモニタに結果を表示す

る。通常、このモニタは管理人室、防災センタなどに設置され、まず管理者への情報提供を図る。モニタへは、地震を検知した時点で地震発生を表示し、必要に応じ音声放送などとの連動も可能である。地震の揺れに応じて建物震度情報もリアルタイムに更新する。サーバでは、平常時には居住者向けの生活情報などを扱い、発災時に自動的に防災情報に切替えるなどの処理も可能である。

居住者など一般の利用者に対しては、得られた結果の中から伝達すべき項目を選定する。その伝達手段としては ICT 情報伝送系が有効であるが、今回は二つの系統、(a)集合住宅内に設置されたインターホンへの表示、(b)インターネット経由でのメール配信による表示を実施した。

インターホンには、来訪者のカメラによる画像確認、音声での会話といった従来機能の他に、LAN に接続してブラウザソフトウェアによってサーバ情報をモニタ表示する機能を有する機種がある⁸⁾。インターホンのモニタは通常消灯しており、地震発生時にその情報を表示すれば、居住者は各住戸内に居ながらその地震に関する情報が得られる。

サーバには WEB サーバとしての機能を持たせ、建物震度情報、健全度情報などから必要な情報を取捨選択して、居住者向けの WEB 画面を生成する。インターホンとサーバを同一 LAN に接続し、サーバの URL にインターホンからリンクを張る、という設定により、インターホンの画面に地震情報がリアルタイムに表示可能となる。この構成では、高層階と低層階など、居住ブロックごとに個別の画面を表示することも可能である。

サーバを外部インターネットに接続し、地震の際の情報をメール配信により通知する。外出中の居住者、遠隔地にいるオーナー、管理会社などに対し、第一報としての通知が可能である。通知先は予め登録し、通知先ごとに送信情報を選択、設定することで、携帯電話であれば文字情報主体、スマートフォンには画像情報も添付、といった利用が考えられる。

なおメール配信には時間遅れがあるため、リアルタイムでの表示は困難であり、また運用上その必要性も少ない。送信のタイミングは、地震が収束し、その地震の最大建物震度が確定し、健全度判定の結果が出た時点とする。

4.2 拡張機能のシステム試験

前述の鉄骨造建物に上記のシステムを構築し、過去の観測波等により屋上に設置のアクティブマスターバで実験棟を加振し、一連の動作確認を行った。用いた波形は、JMA 神戸、3. 11 東北地震、関東大震災想定波の 3 波である。インターホンは、アイホン(株)製 VIXUS システムの玄関子機(室外機)、住宅情報盤(室内機)、メールは、設置したサーバにモバイルルータを接続し、(株)NTT ドコモ 3G 回線経由で実

験者の携帯電話，スマートフォンに送信した。

結果例として図 - 17 に 3.11 東北地震での 6F の加速度波形，図 - 18 に，サーバ表示画面，インターホン表示画面，携帯電話とスマートフォンの受信画面を示す。インターホンには，ほぼリアルタイムに情報が表示され，メールは地震検知から数分後には着信し，必要な情報伝達の実用性を確認した。

5. まとめ

建物診断機能を有し，地震時に情報発信できる「建物モニタリング診断システム」を開発し，都心に建設される 21 階建鉄骨造超高層建物の防災へ適用した事例を紹介した。東海・東南海・南海の 3 連動の南海トラフ地震や首都直下地震など巨大地震への減災を想定すると，本システムを利用し，すみやかに健全度診断を行い情報配信することが，帰宅困難者対策から各家庭の我が家の地震対策までの広い範囲に有効と考えている。今回は広い範囲への地震情報と建物健全度診断結果の情報伝達手段として，インターホン，メールの有効性が確認できた。実運用のためには，インターホンについては，画面切替タイミングの検討や停電時対策，メール配信については，大地震などの際の回線網輻輳対策，運用費賦課方法などの検討が必要と考えている。災害時の回線網については各種研究されており⁹⁾，特に公共性の高い用途の場合には，これらとの連携を検討することが大切である。また，技術的な課題とともに，情報の表現方法など運用面での条件整備を進め，実用化につなげたいと考えている。

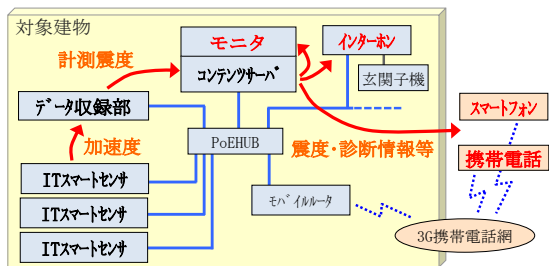


図 - 16 実験システムの構成

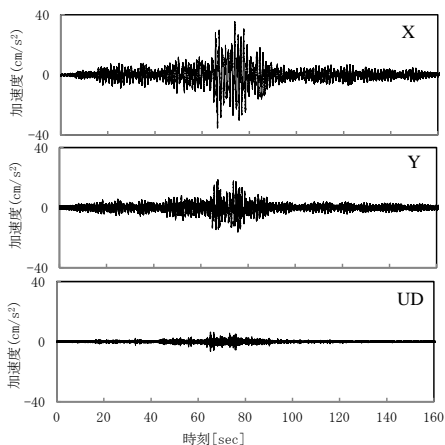


図 - 17 6F の加速度波形



(a) サーバ画面 (管理室)



(b) インターホン (c) 携帯電話とスマートフォン

図 - 18 表示結果

さらに，情報を一括管理し情報の有効活用を広く行うべくクラウドシステムの利用も視野に入れてより広い適用方法について検討している。

謝辞

本建物モニタリング診断システムは富士電機株式会社と共同開発の成果である。関係各位に謝意を表す。本システムの適用には森トラスト株式会社相場様をはじめ多くの関係者に協力頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/kitakujorei.html>
- 2) <http://www.jst.go.jp/pr/info/info988/besshi1.html>
- 3) 稲井，渡壁，保井他：建物診断機能を有する簡易型地震情報発信システムの開発(その1)，建築学会大会梗概，構造Ⅱ,pp613-614,2012.9
- 4) 木代，矢尾，篠田他：建物診断機能を有する簡易型地震情報発信システムの開発(その2)，建築学会大会梗概，構造Ⅱ,pp615-616,2012.9
- 5) 保井，渡壁，成田他：建物モニタリング診断システムの防災への適用，建築学会大会梗概，情報システム技術，pp71-72,2014.9
- 6) 篠田，北川，矢尾他：情報伝送系を活用した建物モニタリング診断システム，情報システム技術，pp69-70,2014.9
- 7) 渡部他：AMDを加振装置として利用した実大振動実験その1，築学会大会梗概，構造Ⅱ,pp1079-1080,2012.9
- 8) <http://www.aiphone.co.jp/products/complex/system/vixus/>
- 9) <http://www.nict.go.jp/video/nervenet.html>