

構造ヘルスモニタリングにおける有線・無線センシングシステムの開発

岡田 敬一 森井 雄史

(技術研究所) (技術研究所)

Development of Wired and Wireless Sensing Systems for Structural Health Monitoring

Keiichi Okada and Takeshi Morii

近年、地震の頻発と都市化により、建物の安全性がますます重要になっている。地震による建物の損傷は、人的被害や経済的損失を引き起こすため、地震直後に建物の健全性を評価し、適切な対策を講じることが求められている。構造ヘルスモニタリング(SHM)は、特に地震多発地域での建物の状態をリアルタイムに評価する重要な技術である。従来の有線システムは高コストであり、無線システムは信頼性に課題があった。本論文では、有線と無線の両システムの利点を融合し、最適な構築コスト、優れたセンサ性能、高い利便性を兼ね備えた新しいアプローチを提案し、実構造物での長期間観測を通じてその有効性を検証した結果を報告する。

In recent years, frequent earthquakes and urbanization have made building safety increasingly important. Earthquake-induced building damage can cause significant human and economic losses, necessitating preemptive evaluation and measures. Structural Health Monitoring (SHM) is a crucial technology for real-time assessment of building conditions, especially in earthquake-prone areas. Traditional wired systems are costly, while wireless systems face reliability issues. This paper proposes a new approach that combines the advantages of both systems and validates its effectiveness through observations on actual structures.

1. はじめに

近年、地震の頻発や都市化の進展に伴い、建物の安全性がますます重要視されている。地震による建物の損傷は、人的被害や経済的損失を引き起こすため、地震直後に建物の健全性を評価し、適切な対策を講じることが求められている。構造ヘルスモニタリング(SHM : Structural Health Monitoring)は、構造物の状態をリアルタイムに監視・評価する技術である。この技術は、構造物の健全性を継続的にモニタリングし、早期に問題を検出することで、予防保全や維持管理コストの削減に貢献する。特に地震の多い地域においては、SHM が地震防災、地震後の建物の健全性判定や耐震性能の評価において極めて重要な役割を果たす。これにより、二次災害の防止や初動対応の迅速化が図られ、その重要性が一層増している。

これまで我々は、地震防災における建物の初動対応を支援する SHM システムの開発¹⁾⁻³⁾を行つ

てきた。本システムの前身は、定常時および非常時のデータ収集を中心としたセンシング技術であり、非常時における建物の即時情報判断に繋げることを目指していた。SHM の実現には、センサによるデータ収集だけでなく、様々な信号処理や解析を通じて、構造物の損傷や耐震性能の評価、診断が不可欠である。

従来の有線センシング技術は、高い信頼性と精度を持つ一方で、設置やメンテナンスにおける労力とコストが大きな課題となっている。一方、無線センシング技術は、設置方法の柔軟性やコスト面での優位性があるものの、データの信頼性や通信の安定性に関する課題が残されていた。

本論文では、これらの課題を解決した有線および無線センシング技術に関する研究開発を行った。具体的には、両センシング技術のメリットを最大限に活かしつつ、デメリットを最小限に抑えるための新しいアプローチでセンシング技術を改良し、SHM システムに導入する。この SHM システムは

情報提供のサービス事業を展開することを念頭に構築したセンシング技術であり、併せて、複数建物に導入した SHM システムの状態を監視可能な統合監視システムも構築する。最後に、実構造物を対象とした長期間の地震観測を通じて、新しく開発した有線・無線センシング技術の有効性と実用性を検証する。

2. 構造ヘルスモニタリングシステム

2.1 システムの構成

SHM システムは、構造物に設置されたセンサで構造物の状態を検知し、そのデータを評価・解析するシステムである。データの取得から分析、評価、通知までを一貫して自動化しており、情報技術を活用することで、構造物の状況をリアルタイムに把握できる事から、特に非常時には迅速な対応が可能となる。SHM システムの構成は、「センサ」、「データ」、「評価」という一連の流れを基盤とするものであり、一連の流れを自動化することで、建物の被災状況に関する客観的な情報を迅速に提供し、その後の意思決定や行動を支援する。

開発した SHM システムの構成例を図-1 に示す。構造物の例として、建物を想定したシステム構成を例示しているが、開発した SHM システムは、構造物の全体的な振動特性を見ることで、構造物の状態を把握することが主な目的である。一般的に、構造物の耐震性能を見る上では、加速度計や変位計などのセンサなどを設置して動的観測を行う。センサから動的な振動データを取得する場合には、必要とするセンサ性能の分解能と感度が重要であり、分析に用いる出力についてノイズ・カットやフィルタ処理をする必要がある。コンピュータ（PC）でデータを数値化する A/D 変換器の分解能を考慮したロガーの機能を備える必要もある。

2.2 データの記録方法

次に、データの記録方法については、常時と非常時の状態把握の観点をから、図-2 に示すような、収録フローの機能を持たせている。以下に、実装している 4 つの機能を列記する。

- (1) 定常状態記録(常時:波形の統計情報、最大値、平均値など)
- (2) 定時波形記録（常時：常時微動記録）

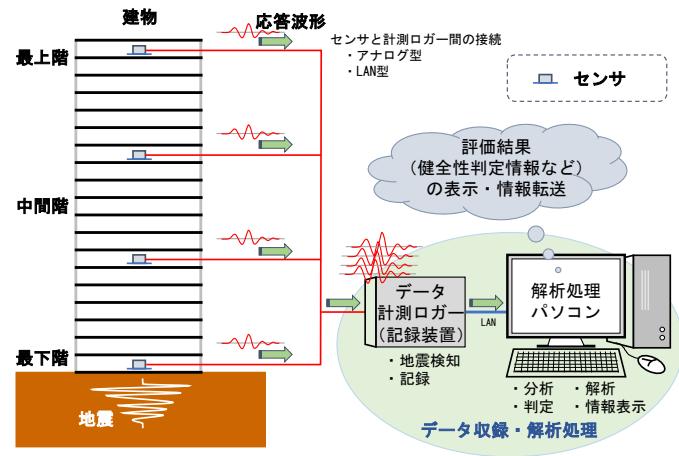


図-1 構造ヘルスモニタリングのシステム構成

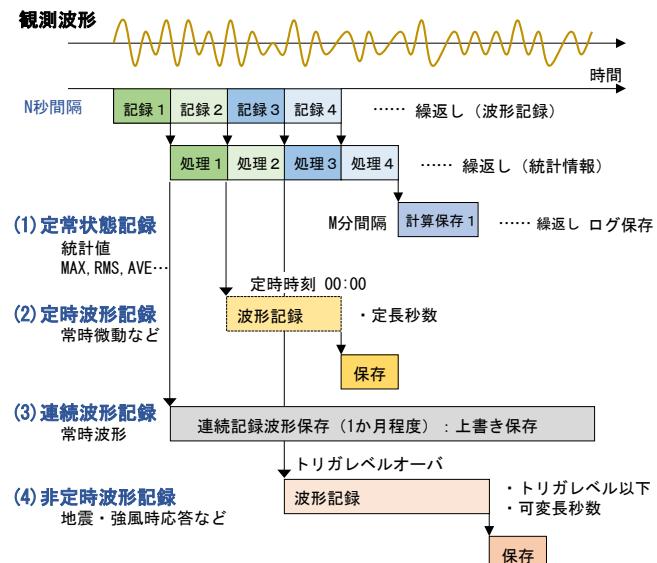


図-2 SHM システムにおけるデータ収録機能

(3) 連続波形記録（常時：一定期間の波形記録）

(4) 非定時波形記録（非常時：地震・台風時、トリガ記録）

以上の(1)～(3)は、年月日の経時的な変化を知るためのもので、地震時による構造特性の変化と劣化などの要因を分離して考えるためのデータ収録^{4),5)}である。また、こうした定時波形データを記録しておくことで、常時稼働におけるセンサや機器の不具合などをチェックすることも可能で、システム稼働の信頼性を高めることができる。近年では PC の性能、HDD の容量も向上したことによって、(3)の 24 時間の連続記録を 1 か月程度保存しておくことも可能となった。(4)の非定時波形記録は、プレトリガ機能によりトリガレベルを超える時刻の 20 秒前から波形が保存さ

れる。現状では、計測 PC からネットワーク（モバイル回線、光回線など）を介してインターネットサーバにデータ転送して情報管理することが可能である。

2.3 建物の地震時健全性判定の機能

開発した SHM システムの標準機能として、地震発生に伴う建物の被災状態を把握し、建物の健全性を判定するシステム（健全度モニタリング）⁶⁾⁻⁸⁾が、2011 年東日本大震災の発生以降、多くの建物に実装されてきている。健全度モニタリングでは地震時の建物の全体的な挙動に着目して健全度評価を行うため、建物の局所的な振動応答（水平方向のねじれ振動や、床の振動など）の影響を極力排除できる位置へ加速度計を設置している。健全度モニタリングの機能においては、図-2 の(4)に示した非定常波形記録データを用いて解析・評価する。主に少数センサの観測記録により建物全体の挙動を推定して応答を評価する。図-3 に建物に設置した SHM システム（情報機器ラック）の外観を示す。地震発生時には情報機器が自動的にデータ収録と解析処理を行い、建物健全性を判定する。建物管理者は健全度判定結果（図-4）をディスプレイ表示などにより確認できる。地震時には停電発生も想定されるため、システムには非常用電源装置（UPS）を装備しており、健全度判定が終了するまで動作をする。なお、システムを外部ネットワークに接続することで健全度判定結果の Web 確認や電子メール等による通知が可能となり、建物管理者が防災センター内に不在の場合でも、地震発生直後に建物健全度に関する情報を入手することができる。

2.4 複数建物の統合監視システム

近年では、複数の建物に SHM システムが設置されつつあり、非常時における地震発生時の建物の健全性判定結果を広域で確認するだけでなく、SHM システムが安定的に運用できているかを確認する必要が出てきている。複数の建物に設置した SHM システムの管理を省力化することを目的として、ネットワークで常時接続された監視システムを構築した。開発した統合監視システムの表示画面を図-5 に示す。全国にある SHM システムの管理を日常的に行

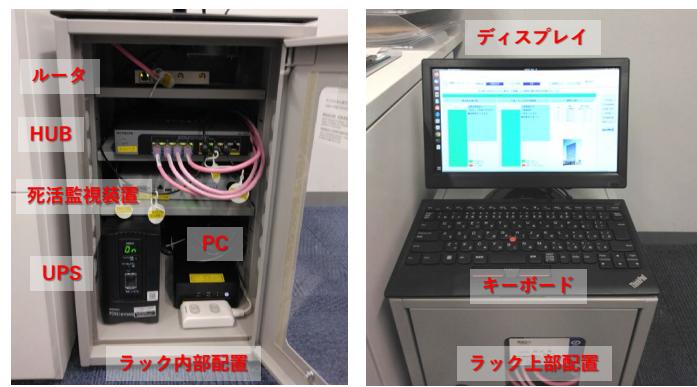


図-3 SHM システムの設置例



図-4 建物の健全度判定結果の画面表示例
(Web ブラウザ：上段には現在のシステム稼働状態表示)

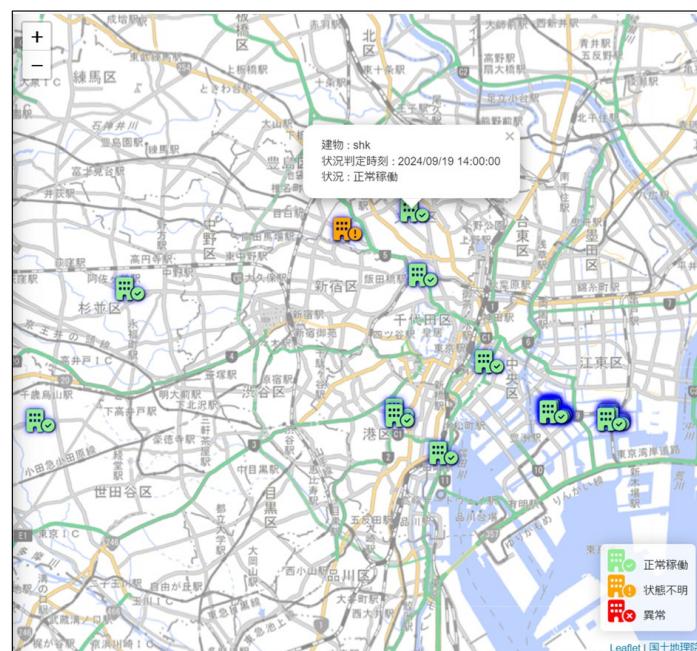


図-5 統合監視システムの画面表示例
(Web ブラウザ：観測機器ステータス)

えるようにするため、地図上で、10 分間隔で更新される SHM システムの稼働状態および地震後の建物

表-1 システムで使用する有線・無線式のセンサ仕様

仕様項目／センサ名	SENS0（基準）	SENS1	SENS2	SENS3
センサ外観				
配線・通信方式	有線アナログ配線	有線LAN配線	有線LAN配線	無線通信方式 (920MHz帯)
電源駆動方式	有線DC電源給電	LAN-PoE給電	LAN-PoE給電	ACアダプタ給電・乾電池
センサ形式	サーボ型2G-3軸加速度計	MEMS型2G-3軸加速度計	MEMS型2G-3軸加速度計	MEMS型2G-3軸加速度計
最小分解能	0.001cm/s/s	X軸: 0.02cm/s/s Z軸: 0.07cm/s/s	0.05cm/s/s	0.05cm/s/s
サンプリング周波数*	100Hz	200Hz	100Hz	100Hz
筐体サイズ	130×80×60 mm	113×114×60 mm	90×62×35 mm	125×125×35 mm
適用可能な建物階数／最大センサ台数	制限なし／20台	制限なし／15台	10階建程度／10台	5階建程度／5台

注) * サンプリング周波数は、実観測における設定値

の健全度モニタリングの判定情報を Web ブラウザから確認できる。地震発生情報については、気象庁が発表する地震情報（VXSE53：震源・震度に関する情報）を入手しており、観測記録と地震発生情報をマッチングさせて情報表示を行っている。

3. 開発したセンシング技術

3.1 センシング技術の比較

従来のセンシング技術では、アナログ出力のセンサを利用して動的応答のデータ収録を行っていた。高感度なサーボ型の加速度計を利用し、アナログ/デジタル (A/D) 変換器によりデータを数値化し PC に記録をした。現在の健全度モニタリングシステムでは、LAN 型の有線や無線の加速度計が用いられるようになり、従来に比べてセンサのコストを低く抑えることができ、かつ配線コストも大幅に下げることが可能になっている。表-1 に、従来の技術と比較整理しつつ、新たに開発した 3 種類のセンシング技術の仕様をまとめた。呼称として、SENS0 は従来のサーボ型加速度計（後述：基準センサ）、SENS1 と SENS2 は LAN 型の有線接続による加速度計、SENS3 は無線接続の加速度計である。以下に、新たに開発した各センシング技術の特長を述べる。

(1) SENS1 : 有線

センサ⁹⁾は、MEMS 技術を応用しメーカー独自に開発された加速度計で、低周波数・低加速度領域の感度を持つ 3 軸加速度計（±2G）で強振動から微振動を高分解能（XY 軸: 0.02cm/s/s、Z 軸 0.07cm/s/s）で測定できる。周波数応答は 0.1Hz から 50Hz の範囲の性能があり、複数センサ間の時刻同期性能は 0.005s 以内である。電源は、LAN 接続の PoE (Power of Ethernet) 給電により動作する。計測データは、

LAN を通じて独自フォーマットのパケットで、送信周期 0.5s (サンプリング周波数 200Hz) の間隔で送信される。有線の加速度計では、図-2 に示した常時・非常時での収録フロー機能の定常状態記録、非定時波形記録、定時波形記録および連続記録のデータ取得が行える。

(2) SENS2 : 有線

センサ¹⁰⁾は、カードサイズの Linux コンピュータ Raspberry Pi に MEMS 技術で作られた汎用の 3 軸加速度 (Analog Devices ADXL355) モジュールを組み合わせ、安価で柔軟性のある LAN 型である。微小地震観測には向いていないが、強震計としては十分な性能を持っており ±2G (分解能 0.05cm/s/s) のレンジでサンプリング周波数 100Hz の計測ができる。システムでは WIN システムを利用（多チャネルの地震波形データを取り扱うための処理システム）し、LAN 上のサーバヘリアルタイムに 3 成分の波形データが WIN フォーマット（データ仕様）を用いて転送される。通信・電源は、LAN 型の PoE 給電により動作する。設置する建物としては、センサ性能から 10 階建程度を目安にする。

(3) SENS3 : 無線

センサの接続には、配線が不要で設置が簡便な無線のセンシング技術¹¹⁾を採用して、SHM システム用に改良した。これは、有線のセンシング技術に変わるものである。開発にあたりシステム基本性能を確認するため E-Defense^{12,13)}の振動台試験の動的計測にも利用した。無線通信を利用して、マルホップでの通信が可能な無線センサ (NICE) と無線収集ユニット (NC) の機器構成でデータが収録される。これらに観測 PC と NC を LAN 接続してデータ処理し記録を保存する。センサデバイスには、SENS2 と同じく ADXL355 が用いられている。NICE のセ

ンサ電源は個別にAC100Vが必要で、筐体には停電に対応した乾電池によるバックアップ機能を備えている。設置する建物としては、センサ性能から5階建程度を目安とする。

3.2 地震応答波形を用いたセンサ特性の比較

開発したセンシング技術は、東京都江東区にある研究施設の5階建物（S造）にて検証¹⁴⁾を行っている。図-6に建物における加速度計の配置を示す。従来から設置したアナログのセンサSENS0に加えて、建物の1階、2階、4階、5階の4箇所に新たに3種センサ（SENS1からSENS3）の有線・無線センシングシステムを配置している。検証する3種センサは、2024年2月に観測を始め、震度3以上の地震を検知し6か月の期間中に4地震を観測した。表-2に観測された地震記録一覧を示す。観測地震記録（EQ1からEQ4）の値はSENS0で得られた値で、1階で10cm/s/s以下、震度2程度の建物入力となる応答である。

これらの地震記録は、別々のシステムで記録されているため波形のトリガ開始時刻および記録長が完全に一致していない。また、サンプリング周波数の違いもあり、SENS1の波形はダウンサンプリング処理をして、すべて100Hzサンプリングのデータとした。

これらのデータから、応答波形の比較では、SENS0の記録を基準として、各センサとの時系列波形における相互相関関数を計算して時刻ずれを補正した応答波形を用いる。なお波形の時刻ずれ計算に用いたセンサ点は、センサ応答が建物の配置位置関係で最も影響が小さいと思われる5階のX方向（建物長辺方向：5F-X）を用いて、地震記録の時刻を合わせている。図-7には、時刻同期した地震記

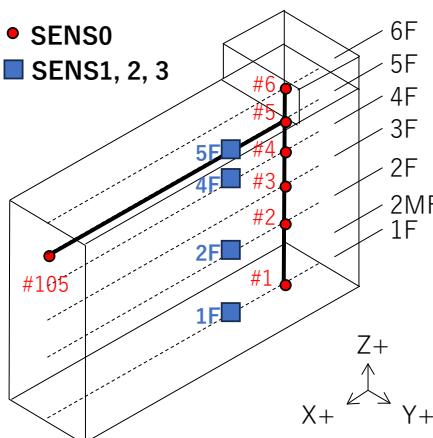


図-6 5階建てS造建物での各種センサ配置

表-2 観測した地震記録（4地震）とセンサSENS0の最大値

地震発生日時	2024/05/26 00:55	2024/07/04 12:12	2024/08/09 19:57	2024/08/28 02:05
震源地名	茨城県南部	千葉県東方沖	神奈川県西部	神奈川県東部
マグニチュード	4.6	5.4	5.3	4.1
FLOOR	地震No	EQ1	EQ2	EQ3
5F	Vect Max	16.9	17.9	16.3
	SI	3.1	3.0	2.9
4F	Vect Max	15.0	11.7	13.8
	SI	2.9	2.8	2.7
2F	Vect Max	8.4	9.5	10.5
	SI	2.2	2.3	2.3
1F	Vect Max	6.6	9.2	8.6
	SI	2.1	2.1	2.1

注) Vect Max : 加速度3成分最大ベクトル値 (cm/s/s), SI : 計測震度相当

録EQ2の5階における各センサ（SENS0からSENS3）の応答波形（加速度）を重ね描いて比較する。X方向の波形を見ると、各センサの応答波形はほぼ完全に一致しており、センサの応答波形に違いは見られない。Y方向（建物短辺方向）においては、建物のセンサ配置が、軸上で離れた位置関係にあるため、ねじれ応答の影響を受けており、SENS0とは若干の波形応答の違いが見られる。またZ方向では、位置関係の影響以外に各センサの分解能の違いで若干の最大値のばらつきが見られたと思われる。図-8は、図-7で示す波形を用いて計算された速度応答スペクトル（減衰定数:0.05）を示す。応答波形の比較と同様に、X方向およびY方向の応答スペクトルでは良い対応を示している。Z方向では波形最大値の若干の違いもあったことから、応答スペクトルでの比較においても各センサに若干の違いが見られるが、実用的には問題がない感度と周波数特性を有していると考える。

図-9および図-10では、表-2に示す4つの地震応答記録から時刻同期された各階に配置された各センサ3成分の応答波形について、加速度最大値および時刻歴波形の相似を表す相関係数を示す。同図は、基準センサとするSENS0の加速度応答の最大値を横軸に、有線・無線センサ(SENS1からSENS3)を縦軸にとり、加速度最大値と相関係数を比較する。加速度最大値の比較では、X方向において非常に良い対応が見られた。また、相関係数もほぼ1であり波形は相似であることが分かる。Y方向においては地震によってセンサ位置の違いの影響が出ているが、概ね最大値および相関係数は良い結果となっている。Z方向については、波形の切り出しで述べたように位置関係の影響以外に各センサ特性の違いがあるため、波形相似を示す相関係数が大きくばらつく結果

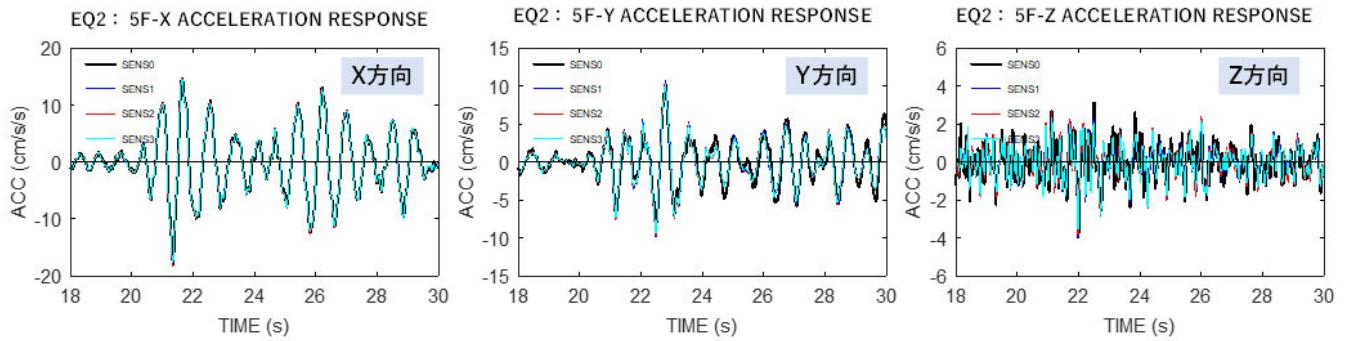


図-7 EQ2 の地震応答（加速度）波形の重ね描き（5 階）

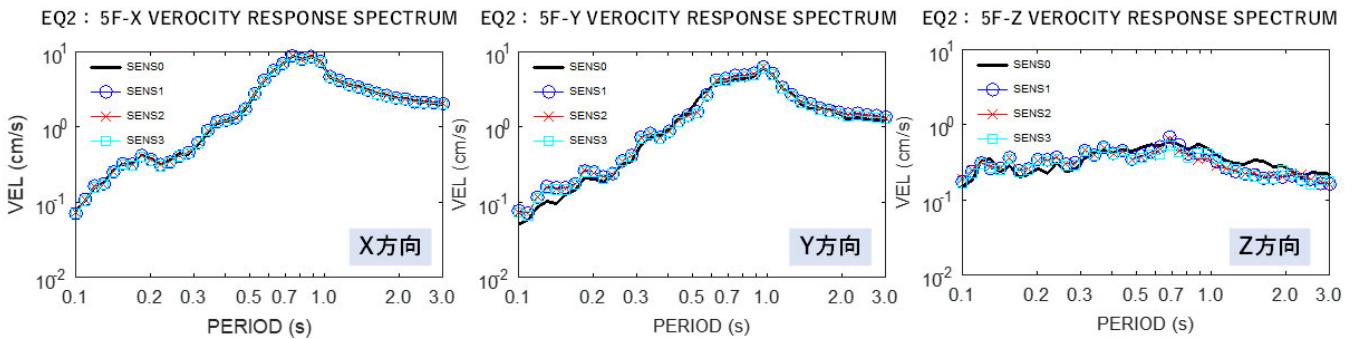


図-8 速度応答スペクトルの比較（5 階、減衰定数：0.05）

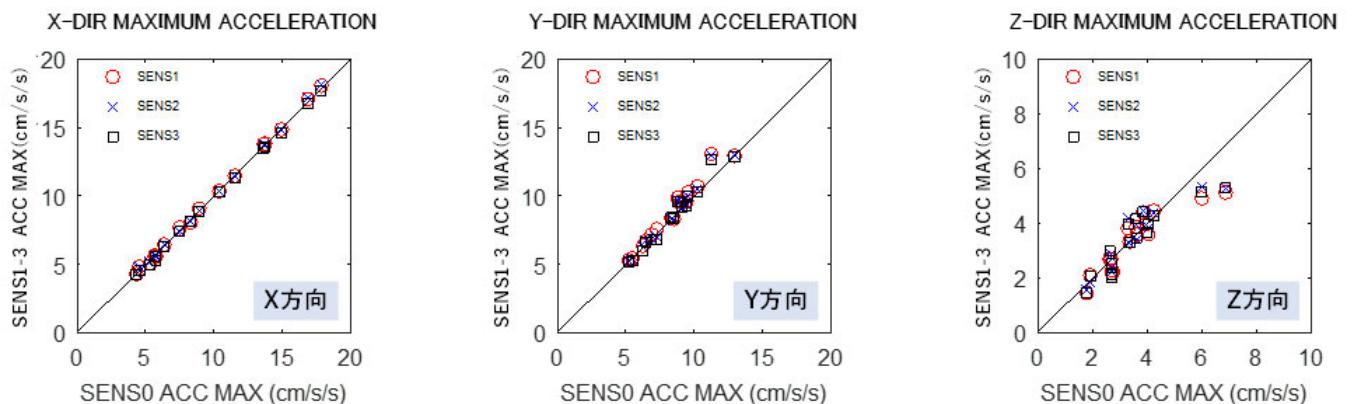


図-9 各センサにおける加速度最大値の比較

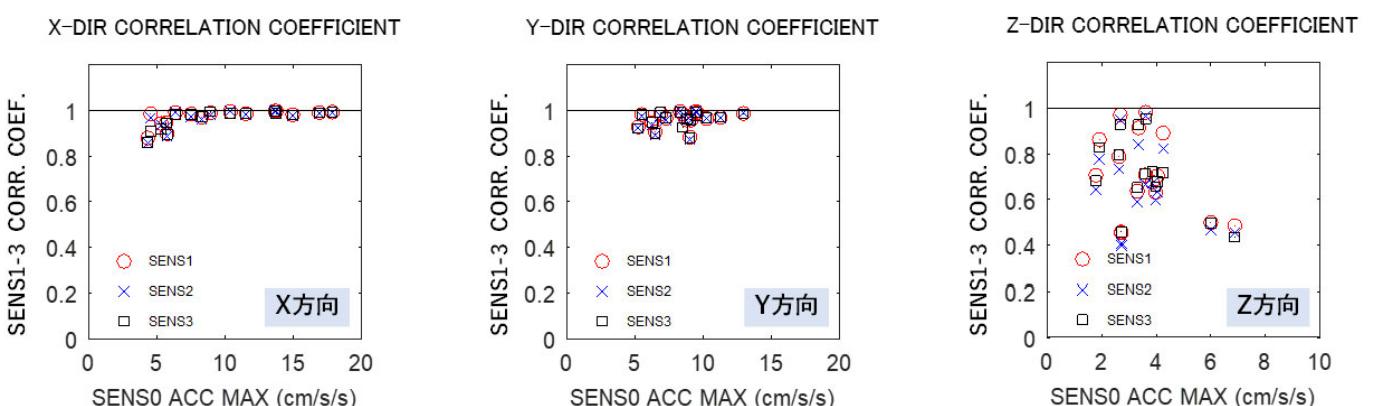


図-10 各センサにおける相関係数の比較

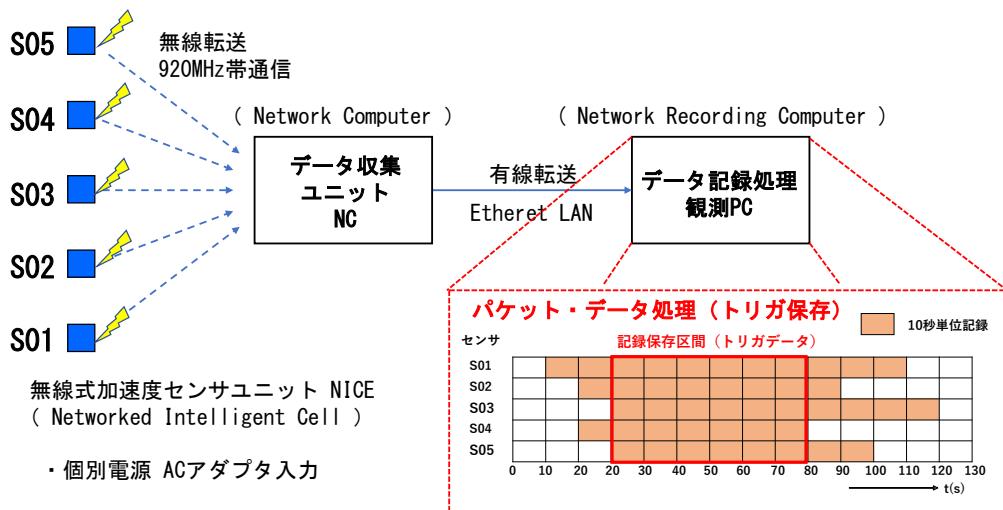


図-11 無線センシング技術のデータ収集・処理

となった。しかし、最大値は同程度であることから実用上は問題ないと考える。

以上により地震トリガ記録による波形データ取得、加速度最大値や波形相似性から、センシングシステムとしての機能を十分に満たしていると考えている。

4. 無線センシング技術を活用した SHM システム

ここでは、無線センシング技術(SENS3)を活用した SHM システムに関して、データ収集機能の特徴とともに、建物の振動特性評価、応答推定を行った結果を示す。

4.1 無線センシング技術のデータ収集機能

無線センシング技術データ収集・記録処理のイメージを図-11 に示す。計測のサンプリング間隔を 0.01s (100 Hz)、記録開始のトリガレベル (加速度閾値) を 5cm/s/s として設定し、計測時間 10 秒を 1 ブロック単位として記録して、無線転送により NC にデータを集める。その後、観測 PC に有線転送

(LAN) でデータを集め、各センサで記録されたデータの記録開始・終了時刻を揃えるなどの処理を行った上で、すべてのセンサで同時刻に記録がある区間をトリガデータとして保存する。そのため無線システムでは、非定時波形記録 (トリガ記録) の機能のみ利用できる。

4.2 建物の振動特性評価

4 つの地震記録 (EQ1 から EQ4) について、水平方向の応答波形を用いて伝達関数から建物振動特性を評価する。伝達関数は、1 階と 4 階の地震応答波

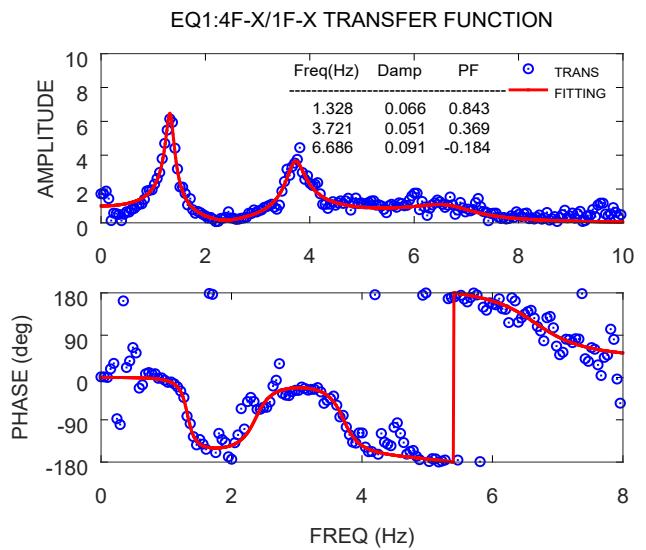


図-12 EQ1 記録による振動特性評価
(伝達関数カーブフィット)

形の FFT (N=2048point) によるアンサンブル平均 (200point オーバラップ) により入出力関係の伝達関数を求めた。計算では 5 階のデータを用いることが良いが、高次のモード形の節が入ることから、影響が小さい 4 階を計算に用いた。振動特性評価では伝達関数のカーブフィット (非線形最小二乗法) により固有振動数、減衰定数を求めており、図-12 に SENS3 の地震 EQ1 応答データによって得られた伝達関数 (4F-X/1F-X) の評価結果を示す。カーブフィットによる同定は、良く評価できている。以上の方法で、すべての地震について評価した結果を図

図-13に示す。水平2方向の1次の固有振動数は1.3Hz付近、2次は4Hz付近、3次は8Hz付近にばらついている。減衰定数は、1次モードにおいて大きくなる傾向を示し、その値は0.04から0.1の範囲で変動する。

4.3 建物健全性判定の評価

健全度モニタリングシステムでは、地震記録取得直後に水平方向の応答波形を用いて、加速度計の設置階以外の階における応答加速度波形を推定している⁸⁾。図-14は、地震EQ3におけるSENS3の無線センシング技術で評価した応答推定結果を示す。本建物では、加速度計が4点(1F、2F、4F、5F)に設置(□点)されており、3点の他階(2MF、3F、PRF)の加速度応答を推定している。推定された各階応答を数値積分することにより変位応答を計算して、上下階で差分することで層間変位応答を求め、階高で除することで層間変形角を計算している。これらの計算結果から、設定された判定閾値を基に建物健全性判定を行っている。検討を行った期間中に観測された4つの地震においては、リアルタイムに健全性判定が行えたことを確認した。

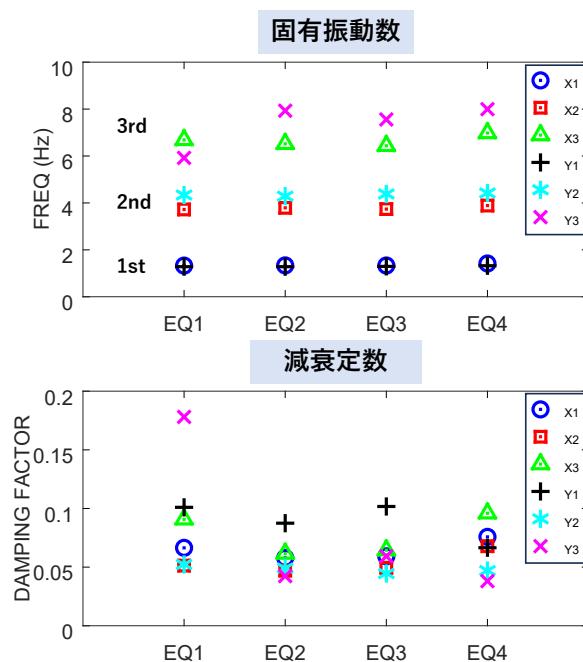


図-13 水平2方向の固有振動数と減衰定数の評価

5. まとめ

本論文では、地震多発地域における建物の安全確保の重要性を背景に、構造ヘルスモニタリング(SHM)システムの開発と検証について報告している。従来の有線システムが高コストである点、無線システムが信頼性に課題を抱える点に着目し、これらの課題を解決する新しい有線・無線センシング技術を提案している。

開発されたSHMシステムは、「センサ」、「データ」、「評価」の一連の流れを自動化し、情報技術を活用することで、構造物の状態をリアルタイムに把握することを可能としている。データの記録方法としては、定常状態記録、定時波形記録、連続波形記録といった常時監視機能に加え、地震や台風時に作動する非定時波形記録(トリガ記録)機能を備えている。また、地震発生時には建物の健全性を自動で判定する機能や、複数のSHMシステムを一元的に監視できる統合監視システムも構築されている。

無線センシング技術(SENS3)を活用したSHMシステムでは、トリガ記録によるデータ収集機能が特徴であり、有線センシング技術(SENS1、SENS2)

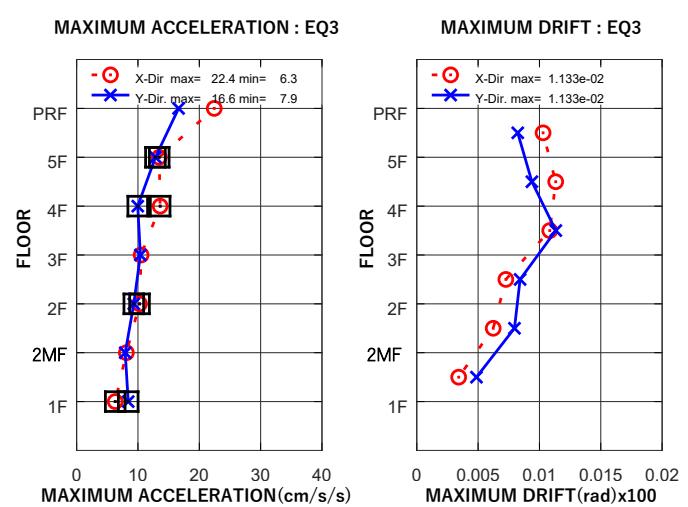


図-14 地震EQ3の応答推定結果
(左:最大加速度、右:最大層間変形角)

と同様に、センサ設置階以外の応答加速度波形を推定することで全階の層間変形角を計算し、リアルタイムでの建物健全性判定が可能であることが確認されている。

本研究で開発された有線・無線センシング技術は、建物階数に応じた最適なセンサ選択を可能にし、特に無線センサの活用は配線コストの大幅な低減に寄与するものである。これらの技術は、建物における地震防災対策に大きく貢献することが期待される。

謝辞

無線式振動モニタリングシステム（Swing Minder）の利用にあたっては、四国総合研究所の山崎崇寛氏（現：四国電力）、天野雄一朗氏（現：四国電力）、中西美一氏に多大なるご支援を頂きました。ここに謹んで深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 岡田敬一, 白石理人ほか: 構造モニタリングにおける情報化システムの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 構造II 11040, pp. 521-522, 2002.8.
- 2) 岡田敬一, 白石理人: 免震建物に導入した構造モニタリングシステム その1:システム概要と観測記録, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造II 21388, pp. 775-776, 2004.8.
- 3) 白石理人, 岡田敬一: 免震建物に導入した構造モニタリングシステム その2:対象建物の動特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造II 21389, pp. 777-778, 2004.8.
- 4) 岡田敬一, 白石理人: 構造モニタリングシステムを導入した建物の長期観測による振動特性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造II 21128, pp. 255-256, 2008.9.
- 5) 白石理人, 岡田敬一ほか: 施工期間中の鉄骨高層建物の振動特性評価 その1:継続的な微動計測による振動特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造II 21284, pp. 567-568, 2009.8.
- 6) 岡田敬一, 森井雄史ほか: 少数センサによる建物全層の地震応答推定手法の大型震動台実験データを用いた検証, 日本建築学会技術報告集, 第23卷 第53号, pp. 77-82, 2017.2.
- 7) 岡田敬一, 森井雄史ほか: RC造6層建物試験体の大型振動台実験における地震時建物健全性判定支援システムの適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 構造II 21513, pp. 1025-1026, 2016.8.
- 8) 佐々木仁志, 岡田敬一ほか: 地震時における建物の健全性判定支援システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 構造II 21512, pp. 1023-1024, 2016.8.
- 9) 感振センサ, 富士電機HP,
https://www.fujielectric.co.jp/products/sensor/shm/product_detail/micro_vibration_sensor.html
- 10) Telemetra-1, テレメトラ HP, <https://telemetra.jp/>
- 11) Swing Minder/スイングマイダー, 四国総合研究所HP,
<https://www.ssken.co.jp/service/Swing.html>
- 12) 岡田敬一, 森井雄史ほか: 構造物の被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用に関する研究 その3: 3層木造住宅の大型震動台実験による無線加速度センシングシステムの性能検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造II 21058, pp. 1009-1010, 2020.9.
- 13) 岡田敬一, 森井雄史ほか: 構造物の被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用に関する研究 その5: S造試験体の大型震動台実験による無線加速度センシングシステムによる計測と振動評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造II 21058, pp. 115-116, 2021.9.
- 14) 岡田敬一, 片岡俊一: 2ヶ所に設置したセンサによる地震記録を用いた建物全層応答推定手法の適用, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第3号(特集号), pp. 95-113, 2016.