

地震時における建物挙動解析ツール(SwingAnalyzer)の開発

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	中西 美一
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	仲田 誉
(株)四国総合研究所 土木技術部	山崎 崇寛
四国電力(株) 土木建築部	天野 雄一郎

キーワード： 地震動
自動解析
可視化

Key Words : Earthquake Vibration
Automatic Analysis
Visualization

Development of the earthquake vibration analysis system.

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agri-Technology Department

Yoshikazu Nakanishi, Homare Nakata

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Takahiro Yamasaki

Shikoku Electric Co., Civil & Architectural Engineering Department

Yuichiro Amano

Abstract

Operators of important infrastructure such as electric companies owe responsibility to re-start devastated infrastructure after big earthquake as soon as possible. Automated facility damage evaluation technology is essential to re-start various facilities affected by big earthquake smoothly to keep our society to be safe.

We have been developing modern earthquake vibration monitoring system which is called SwingMinder, and already installed them on more than 20 buildings mainly in Shikoku Island.

If mega-scale earthquake happens, each SwingMinder sends large volume measurement data to the cloud server within approximately five minutes. Highly automated data analysis system is required to evaluate many facilities' damage quickly. In this article, we describe newly developed earthquake vibration analysis software system which is called SwingAnalyzer.

1. はじめに

電力事業者の様に地域住民の生命にも関わる重要なインフラの運用を担う企業は、巨大地震被災後のインフラ復旧を迅速に進めるため、強い地震動による各種施設の被害状況を短期間かつ高精度に判定する必要がある。

著者らは、中高層建物の地震による加速度を高精度かつ簡易に計測することのできる無線式加速度多点同期モニタリングシステム(SwingMinder)の開発を行い¹⁾、これまでに四国内を中心に約20棟の建物への実配備を完了している。

SwingMinderは従来の加速度計とは異なり、無線通信の利便性を生かして、建物の全てのフロアに加速度センサを設置することを基本としているため²⁾、10階建ての建物での60秒間の加速度データ量は36万点となる。また、巨大地震発生時には多数の建物から大量の加速度データがクラウドサーバに送信・蓄積されるため、この大量の加速度データを迅速に解析し、被災した建物の被害度を診断するための自動解析システムが不可欠である。

本稿では、地震時における建物被害の自動解析システム(以下、自動解析システム)の構築に必要な各種データ処理メカニズムを、開発・検証するためのツール(機能検証プロトタイプ)として開発したSwingAnalyzerの概要、ならびに、それを用いて、実際の地震時において建物で計測された加速度データを解析した事例について報告する。

2. SwingAnalyzerの概要

SwingAnalyzerの開発目的は、実際の建物で地震時に計測された加速度データを様々なデータ処理メカニズムで解析・評価することにより、適用したメカニズムの妥当性を検証すると共に、より高精度で高効率な解析メカニズムの開発を行うことにある。

SwingAnalyzerは、地震時に計測された加速度データ蓄積用のクラウドサーバから、建物単位で任意の期間の加速度データを時間軸の揃ったCSV形式で抽出する加速度データ抽出ソフトウェア、ならびに、抽出した加速度データを数値演算処理し、時刻歴変位など建物の挙動状況を2Dおよび3Dアニメーション表示により可視化するソフトウェアで構成されている。

2.1 クラウドサーバからのデータ抽出

SwingMinderでは無線通信による高精度な時刻同期メカニズムにより、同一建物内では、各フロアに設置した加速度センサユニットの内部時計はおおよそ±0.1msec以内に同期しており、また、加速度データのタイムスタンプは±3msec以内に同期しているが、計測自体は個々のセンサで独立して行われるため、加速度データの収録の開始と終了の時刻は各フロアで10秒の倍数で異なることがある。

クラウドサーバから解析対象期間の加速度データをCSV抽出する際は、バイナリ形式で保存されたフロア別の加速度データファイルからデータを読み込み、時間軸を共有する建物全体のデータを含む1つのCSVデータとして抽出する必要がある。抽出処理の高速化のため、SwingMinderのデータ構造を効率よく処理できるソフトウェアをJava言語で開発し、クラウドサーバ上で実行させている。

また、インターネット経由で上記ソフトウェアを操作するため、PHPおよびJavaScript言語で記述したWEBインターフェースを開発しており、CSVデータの抽出はWEBブラウザからの簡単な操作で行えるようになっている。

2.2 データ処理と可視化

クラウドサーバから抽出した加速度データの解析および可視化は手元のPCで行っており、オープンソースの優れた数値解析パッケージであり、解析結果の可視化機能も充実しているScilabを使用している。

データ処理の基本は単純な数値積分であるが、大量の行列演算を高速に実行するため、PCにはある程度のCPU性能と8GB程度のメモリが必要である。

加速度計測データには様々なノイズが含まれているため、適切な数値フィルタ処理によるノイズ除去が必要である。SwingMinderで使用しているMEMS型加速度センサには、電気的な高周波ノイズとシリコンばねのヒステリシスに起因すると思われる低周波ノイズが大きいという欠点がある。高周波ノイズは積分処理により除去されるため変位の計算値には大きな影響を与えないが、低周波ノイズは適切なハイパスフィルタにより十分に除去

しておかないと、変位の基準線が時間経過と共にドリフトする基線ドリフトと呼ばれる現象が発生する。

ハイパスフィルタを通して基線ドリフトが残る場合は、ローパスフィルタで基線ドリフト成分を抽出した上で高次式に近似し、変位の計算値からドリフト成分を除去する基線補正と呼ばれる操作を行う。

現時点では適切な数値フィルタを完全自動で生成することは難しく、高精度な(確からしい)解析結果を得るためには解析結果を評価しながらフィルタ種別を選択し、フィルタ定数を微調整することが必要となっている。

解析ソフトウェアは Scilab のスクリプト形式で記述しており、現時点では解析結果の妥当性を評価して、都度手作業でスクリプトを修正ながら解析を行っているが、解析例を積み重ねることにより、現在手作業で行っている修正を順次自動化できる見通しである。

加速度データは東西(EW)/南北(NS)/上下(UD)の3軸で計測されるため、各軸の単純な時刻歴グラフを見ただけでは建物全体の振動状況を直観的に把握することが難しく、また、建物の構造破壊が発生した場合に予測される時刻歴変位の不連続性を見つけることは非常に難しい。

そこで、加速度から算出された各フロアの時刻歴変位を EW/NS 平面、および、EW/NS/UD 空間上にマップし、アニメーション表示により可視化することとした。

直観的に理解し易いように、各フロアの加速度センサが上下方向に直線的に配置されていると仮定し、センサ間を結んだ直線(仮想中心軸)の平面的および空間的曲がり具合を時刻歴描画することで、建物全体の時刻歴変位を表現する可視化手法を開発した。可視化処理においては、Scilab の高度な 2D および 3D グラフィクス機能が大いに役立っている。

2.3 自動解析システムへの発展

SwingAnalyzer では、クラウドサーバからダウンロードした加速度データを、手元の PC 上で動作させるソフトウェアで処理・可視化する2段階の方式としているが、自動解析システムではデータ処理と可視化データの生成もクラウドサーバ上で

行えるようにする予定である。

そうすることで、地震発生後 10 分以内に自動解析を完了し、手元のスマホやタブレット端末で解析結果を参照できるようになるため、建物の被害度判定の大幅な迅速化が期待される。

3. SwingAnalyzer によるデータ解析事例

SwingMinder の実運用を開始して約 2 年が経過しており、これまでに複数の実建物における加速度の計測に成功している。

ここでは、平成 31 年 3 月 13 日の紀伊水道を震源地とする M5.2 の地震発生時に、徳島市内の 9 階建の建物で計測された加速度データの SwingAnalyzer による解析例を示す。

SwingMinder のセンサユニットは 3 軸(EW/NS/UD)の加速度データを常時 200Hz で計測しているが、データ送信を低速の 920MHz_MultiHop 無線通信に依存しているため、その全てをクラウドサーバへ送信することはできない。そこで、10 秒毎に過去 10 秒間の計測データを評価し、有意な加速度が含まれない場合は、その 10 秒間の最大加速度、平均加速度、ならびに、重力加速度の計測値から算出される EW/NS 方向への水平傾斜角のみを 10 秒間代表データとしてクラウドサーバへ送信する仕様としている。

このデータ評価中も加速度計測は高い時刻同期精度を維持して継続する必要があるため、センサユニットには高効率で時間揺らぎの小さな並列データ処理メカニズムを独自開発し搭載している。

3.1 10 秒間代表データの評価

図 1 は地震発生当日の上記代表データの推移を示したグラフである。

午前 8 時頃から各軸の 10 秒間最大加速度が大きくなっているのは、空調機の稼働により床面に設置したポリカーボネート製のセンサユニットボックスが振動したためであると思われる。

13 時 48 分に地震が発生したことを示す大きな加速度が記録されている。地震発生中に計測された加速度データは 5 分以内に高松市内に設置されているクラウドサーバへ送信・蓄積されるようになっている。

水平傾斜角の算出分解能は 0.01° と高く、微かな床面の傾きを高精度に計測可能である。有意な

加速度を含まない場合でも、前述の空調機の稼働による振動など、計測した加速度には様々なノイズが含まれるため、水平傾斜角は 10 秒間の加速度計測値の平均値(2,000 データの平均値)から算出することで 0.01° という高分解能を得ることに成功している。



図 1. 10 秒間代表データの推移

3.2 加速度データの解析と評価

図 2 は地震発生中に記録された各フロアの EW および NS 方向の加速度データである。

加速度データは 4～9 階では 60 秒間記録されていたが、1～3 階では 10 秒間の最大加速度が加速度記録のトリガレベルを下回った時点から、予め設定したポストトリガ時間の経過後に順次記録が停止している。本解析事例では、ポストトリガ時間を 10 秒としていたため、記録の停止が早すぎたと考えられたことから、現在はポストトリガ時間を 30 秒としている。一方、加速度の記録は最初のトリガ検知が発生した 10 秒間の 10 秒前から始まり、この最初の 10 秒間をプレトリガ時間と呼んでいる。プレトリガ時間はセンサユニットのメモリ容量の制限により 10 秒間固定となっている。

従来の加速度計測システムは有線接続方式であるため、加速度センサを既設の建物の全フロアに設置することは困難であり、無線式の加速度計で実際の地震時において建物の 9 フロアで加速度を同時計測した例は少なく、以下に示す解析結果についても解析事例が非常に少ないものである。

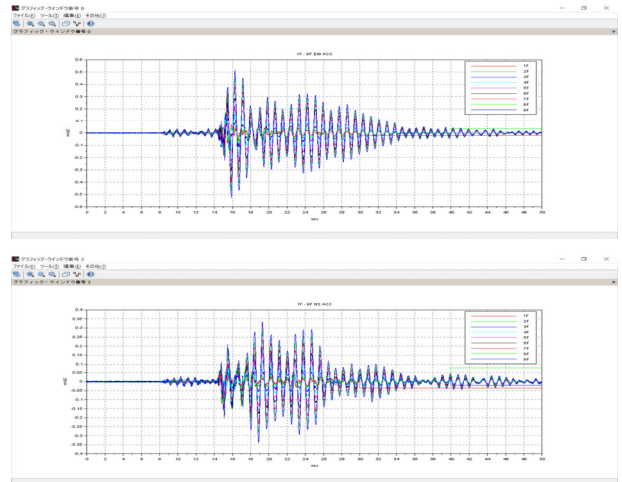


図 2. 地震時に計測された加速度(EW:上,NS:下)

図 3 は記録された EW 方向の加速度の 14～20 秒の間を時間軸に拡大したものであるが、各フロアで記録された加速度の位相がきれいに揃っていることから、各フロアに設置した SwingMinder センサユニットの内部時計は高精度に同期できていたことが分かる。時刻同期の精度が悪いと後述する層間変形角の計算誤差が大きくなり、地震動が建物に与えたダメージの判定精度が低下するため、時刻同期精度を常に高精度に維持できることは極めて重要である。

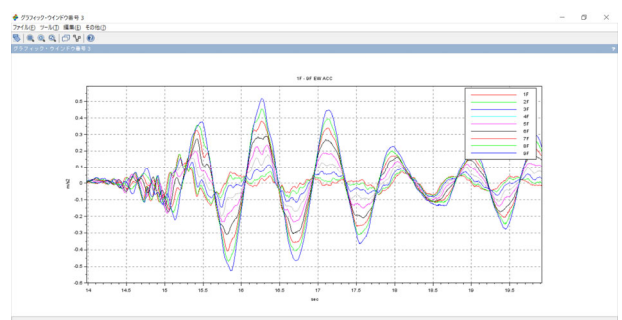


図 3. EW 方向加速度の時間軸拡大(14～20 秒)

3.3 変位データの評価

図 4 は、計測された加速度を 2 回積分することで得られた、各フロアの EW 方向の時刻歴変位である。加速度から変位を算出する場合、加速度データに混入している低周波ノイズを適切に除去しないと、誤差が蓄積され地震後に変位がゼロに戻らない基線ドリフトが発生するが、図 4 では地震後に全てのフロアで変位がゼロに収束しており、フィルタ処理が適切であったことが伺える。

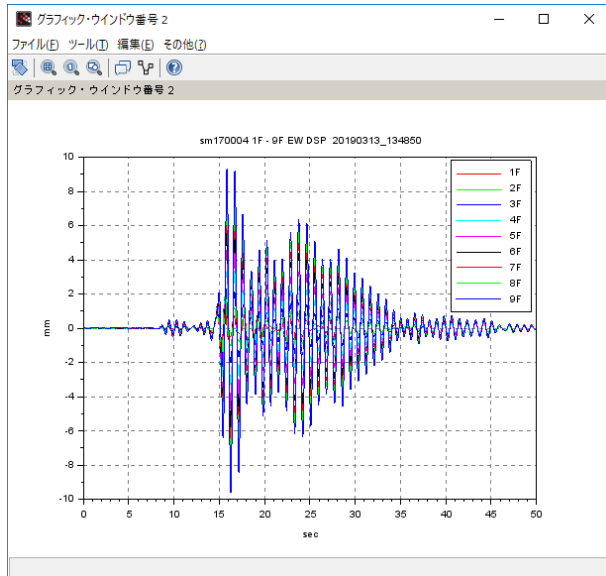


図 4. 各フロアの EW 方向の時刻歴変位

図 5 は、各フロアの EW 方向の時刻歴変位を仮想中心軸上にマップし、建物中心軸の EW 方向への変位の様子を時刻歴表示(時間の前半と後半が分かり易いように、時刻歴を逆にして描画)したものである。水平方向のスケールの単位は mm で上下方向は m であるので、水平方向の変位は 1,400 倍程度誇張して表現されている。

図 5 は図 4 と同じデータから生成された図であるが、建物全体が弓なりに変形している様子が伺え、加速度波形記録の開始から約 16 秒後に 9 階フロアで最大変位の -9.6mm を記録したことが分かる。

なお、加速度から算出した変位の精度については、SwingMinder の開発時に繰り返し実施したモックアップによる加振試験において、加速度から算出した変位とワイヤ変位計、レーザ変位計による変位計測値が必要十分な精度で一致していることを確認している²⁾。

図 6 は各フロア間の EW 方向の変位差(層間変位)を時刻歴表示したものである。図 5 同様に水平方向の変位差は 3,800 倍程度誇張されて表現されている。

変位差の最大値は 5 階と 6 階の間で記録されており、その値は 1.6mm であったことが分かる。この建物の階高は 4,000mm であり、最大層間変形角は $1/2,500\text{rad}$ となる。一般に、地震被災後の建物の安全性は層間変形角が設計上の安全限界を超えたかどうかで判定されることが多いため、変位差

0 点の両側に安全限界を示す垂線を引けば、損傷の可能性のあるフロア間構造を自動判定可能になると思われる。

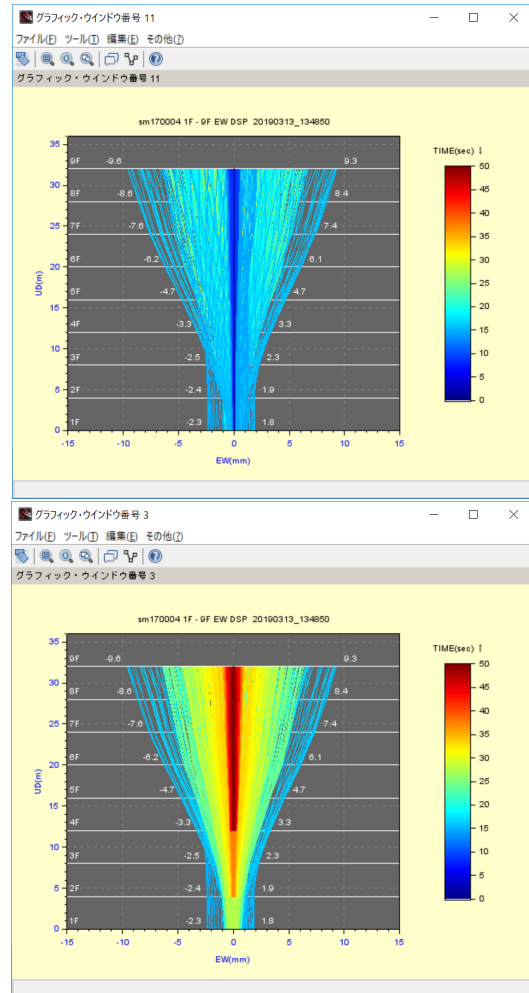


図 5. EW 方向仮想中心軸の時刻歴変位

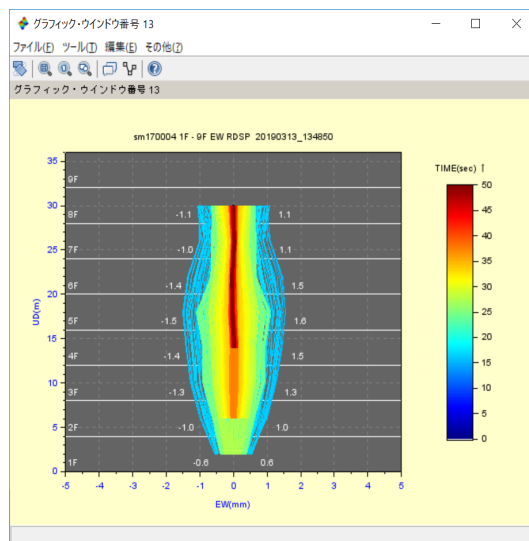


図 6. EW 方向の時刻歴層間変位

図 7 は EW/NS/UD 各軸の時刻歴変位である。図 8 はそれを 3D 空間中に配置した仮想中心軸上にマップし、建物の空間的変位の様子を時刻歴表示したものである。図 5 と同様に水平方向のスケールの単位は mm で上下方向は m である。

図 7 からは建物全体の時刻歴変位を直観的に読み取することは困難であるが、図 8 からは地震発生中に建物が時間経過と共にどのように振動したかを容易に把握できる。また、図 8 は 3D 描画であるので、PC 画面上でマウス操作により自由に回転・拡大でき、図 9 は上方から見た様子である。

図 8 および図 9 から、建物の上層部が楕円状に回転しつつ、さらに、時間経過とともに楕円の軸が回転している様子が伺える。

建物全体が終始滑らかに変位していることから、建物の骨格構造が弾性を維持できており、構造破壊が発生しなかったことが示唆される。変位の連続性から構造破壊の有無を判定できる可能性があると思われるが、現時点では変位の連続性と構造破壊の関係を示す十分なデータがなく今後の研究課題である。

変位量が最上階においても中心軸から 10mm 以内と小さかったにも拘わらず、建物全体の時刻歴変位に不自然さは見られない。これは、各フロアに設置した加速度センサの精度が必要十分に確保されており、また、内部時計も高精度に同期していたためであると考えられる。

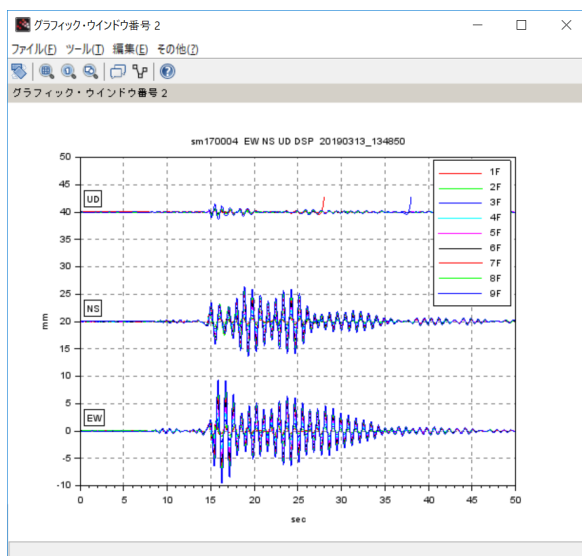


図 7. 3 軸(EW/NS/UD)の時刻歴変位

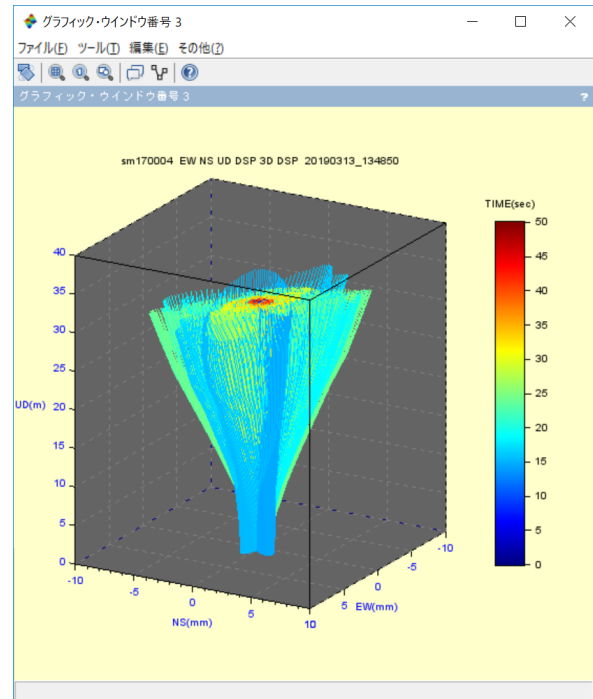


図 8. 仮想中心軸の空間的時刻歴変位

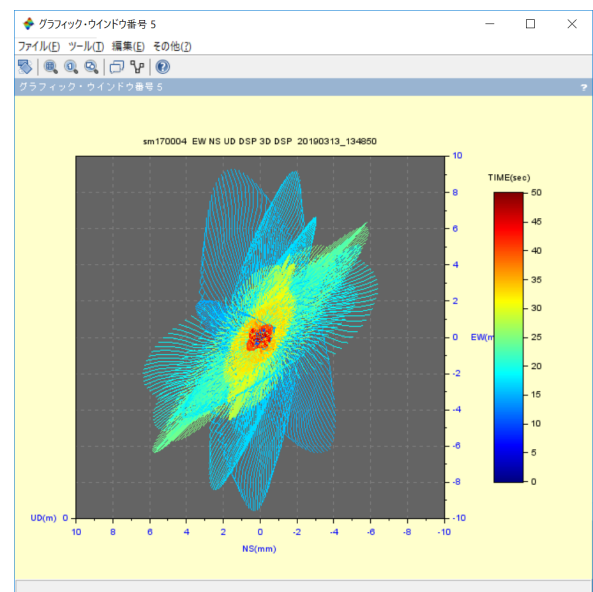


図 9. 上方から見た仮想中心軸の時刻歴変位

なお、SwingMinder で使用している MEMS 型加速度センサのゲイン誤差は±5%程度と大きいので、センサユニット毎に各計測軸の正負方向で重力加速度(9.8m/s^2)を正確に計測できるように、ソフトウェアによるゲイン補正値を設定している。²⁾

一方、MEMS 型センサには初期値のばらつきは大きいものの、感知部の質量が非常に小さく、長期間の重力暴露による経年変化が少ないという優れ

た特性もあり，地震時における建物の加速度計測のように，初期精度よりも経年変化の小ささが重要な用途にはその低コスト性も併せて適している。

4. まとめ

開発した SwingAnalyzer は機能検証用プロトタイプという位置づけながら，地震時に実建物で計測された加速度の解析結果から，被災建物の被害度判定にある程度有効であることが確認できた。

今後は，より少ない労力でより高精度な解析結果が得られるように，SwingAnalyzer に搭載した解析メカニズムを洗練するとともに，その成果をベースに自動解析システムの構築を進める予定である。

【謝辞】

本研究は，四国電力(株)土木建築部殿，ならびに，新規事業部殿より委託を受け実施したものである。

最後に，本研究の推進に多大なるご協力を頂いた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 天野雄一郎他：無線式振動モニタリングシステム SwingMinder の開発, 四国電力・四国総合研究所研究期報 NO.109 , 2018
- 2) 山崎崇寛他：構造ヘルスモニタリングへの適用を目的とした無線式加速度計測システムの開発－既存建物への導入に向けた検討－, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84 No.765, 1389-1399, 2019.11