

無線式振動モニタリングシステム Swing Minder の開発

(株)四国総合研究所 土木技術部	天野雄一郎
(株)四国総合研究所 電子技術部	中西 美一
(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	岡田 将敏
四国電力(株) 土木建築部	木戸 智之

キーワード : 加速度モニタリング
振動
無線式
多点同期
MEMS

Key Words : Acceleration Monitoring
Vibration
Wireless Type
Multipoint Synchronization
Micro Electro Mechanical Systems

Development of the structural vibration multipoint synchronization monitoring system "Swing Minder"

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuichiro Amano, Takahiro Yamasaki

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Shikoku Electric Power Co., Civil & Architectural Engineering Department

Masatoshi Okada, Tomoyuki Kido

Abstract

Newly developed low cost MEMS based acceleration sensors have enough accuracy and stability to monitor shaking of facilities caused by earthquake and analyze damages of facilities after strong shaking. We have developed a practical shaking monitoring system using the MEMS based acceleration sensors and the 920MHz multi-hop radio communication technique that can offer reliable radio wave communication even in large scale facilities. It is required to install an acceleration sensor unit on each floor to evaluate damages of facilities due to earthquake. In this kind of system, each sensor unit's base clock has to be highly synchronized to the master clock to minimize acceleration phase synchronization error. In the developed system, the acceleration phase synchronization error among multiple sensor units could be contained three milliseconds based on our patent-pending technology.

1. はじめに

大規模な地震発生時においては、建物の安全性を迅速に判断する必要があり、判断手法の一つとして応急危険度判定士による危険度判定制度が整備されている。この方法は判定士が現地で建物を確認し、損傷具合や傾きなどから総合的に判断するもので、非常時であるため人的確保の観点から被害対象建物が多数に亘る場合は、たとえ防災拠点などの重要性の高い建物であったとしても迅速な診断を行い災害復旧拠点としての安全性を判断できるとは言い難い。

昨今、橋梁などの構造物や高層建物を対象とした加速度センサや変位計などを用いた多点同時計測による振動モニタリングシステムが普及しはじめている。このシステムを利用することにより地震直後に瞬時に地震時の構造物や建物の挙動を解析し被害状況を推定できる他、場合によっては避難警報等を情報発信することや遠方に被災状況を発報することが可能となってきている。これらのシステムを導入することで、これまでの応急危険度判定の課題解決が可能と考えられるものの、これらのシステムは計測センサやロガーなどの計測機器が有線式のもので構成されることが多く、機器本体や機器の設置にかかるコストが高いこともあり、いまだに導入が進んでいないのが現状である。

近年、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による超小型、低価格、高性能の加速度センサの開発や従来から使用されている 2.4GHz 帯に加え、障害物の透過性、伝達性に優れた 920MHz 帯の高性能通信モジュールの開発・普及、高性能 MCU (Micro Controller Unit) の汎用化および省電力化を背景に、配線が不要な無線式で電池でも長期間計測が可能なモニタリングシステムの構築が可能となっている。しかし、多点同時計測による振動モニタリングで最も重要とされているセンサ間の時刻同期については、時間軸を高精度で合わせる必要があり、GPS 時刻同期のように高精度であるが屋外でのみ使用できる同期手法だけでなく、GPS 電波の届かないような屋内でも使用できる同期手法の確立が必須である。

既往の研究では、澤田ら¹⁾が 1250MHz 帯の特定小電力無線を使いブロードキャストタイムス

ランプを用いた時刻同期手法を提案しており、RC 造の実建物での同期精度の実証がなされているが、1つのセンサで2つのMCUを使用しているなど機器の構成や制御プログラムがやや煩雑となっている。また、高瀬ら²⁾が橋梁を対象とし透過性、伝達性に優れた 920MHz 帯の通信による加速度やひずみの計測システムを構築しているが、同期手法としては屋外のため GPS 同期手法を採用している。

このような背景から本研究では、より安価で施工性の高い無線式の振動多点同期モニタリングシステムの開発に併せ、耐震壁などの障害物の多い建物内での使用を考慮した 920MHz 帯の通信モジュールによる高精度の時刻同期手法を確立することを目的としている。

2. システム概要

本研究で開発している無線式振動モニタリングシステム (以降, Swing Minder) は、中西^{3) 4)}が開発に取り組んできたオンデマンド・モニタリング技術 openATOMS[®]を応用した計測システムを用いている。これまでは ZigBee などに代表される 2.4GHz 帯を利用していたが、920MHz 帯を利用することで、屋外での 1 ホップの通信距離が電波出力 20mW で最大 1,000m 程度と長距離対応ができ、30 ホップ程度までのマルチホップ機能を活用し自動的に無線通信経路の構築も可能となる。また、無線ネットワーク全体を間欠動作させることにより、無線通信デバイスを低消費電力動作させることができるため、電源確保の困難な場合でも大規模な無線通信ネットワークを構築し易いという特徴を持つ。しかし、連続動作時の通信速度は 100kbps と比較的高速であるが、低消費電力化の為に間欠動作とした場合は通信速度が低下する。

Swing Minder は図 1, 2 に示すように、データ収集ユニット: NC (Network Computer) と複数のセンサユニット: NICE (Networked Intelligent Cell) で構成しており、NICE から通信されたデータは NC に集約し、3G/LTE などのインターネット回線を経由して、外部の遠隔監視端末などにデータを送信する仕組みとした。データは csv 等の汎用データ形式に変換でき、遠隔での解析が可能である。NICE は 32bit の MCU を

搭載しており加速度データを収集し逐次記録媒体（microSD）に保存しながら、リアルタイムFFT演算処理などが可能な仕様とした。ネットワーク上の通信速度の制約上、単位時間あたりに送信できるデータ量が制限されるが、あらかじめNICEでデータ処理して必要なデータのみ送信することで解決を図った。また、記録開始となる加速度の閾値は各NICEで設定することができ、必要なデータのみ取得することで前述のデータ送信制限に対応できる。

地震時や災害時には、長時間の停電が発生すると懸念されるが、NICEには常用のコンセント給電に加えバックアップ用の電源としてリチウムイオン電池を備えており、数日間は電池のみで作動できる。また、NCは無停電電源装置から給電を行うことで、停電時にも継続的に稼働できる。加速度センサは、安価で高精度なMEMSの3軸加速度センサを採用し、加速度は0.1~8000 gal、水平傾斜角は0.01°単位での計測が可能である。

計測開始のトリガー機能として、各NICEで設定する閾値の他、トリガーとなるNICEからの信号や外部入力による計測開始を設定することができる。初期微動などを計測するため、計測開始より以前の10秒間のデータと、トリガーの閾値を下回った後、任意の時間のデータが計測可能な設定にした。各設定はmicroSD内の設定ファイルを書き換えることで簡単にできる。また、試作型NICEは175×125×60(mm)の樹脂製の箱体に納め、狭い場所でも設置できる寸法とした。

地震時における建物の安全性を評価する指標としては一般的に層間変形角が使用されている。本システムでも層間変形角を指標として建物の構造を評価する。また、NICEを設置した各階の加速度から天井などの内装材や建築設備などの2次部材の評価を実施する。層間変形角は、地震を受けている間の加速度データをもとに加速度を2回時間積分することにより時刻歴の変位量を算出し、この結果に建物の階高などの情報を加えて算出する。この層間変形角をクライテリアと比較し、建物の安全性を評価する。

3. 時刻同期手法と同期精度

MEMS加速度センサが標準で装備しているRC発信器では、発信周波数精度が悪く100ms単位での時刻同期は可能であっても、地震波の計測に必要とされる10ms以下の同期は困難であった。そこで、各MEMS加速度センサに高精度なプログラマブルMEMS発信器（誤差0.002%以下）を導入することにより任意の間隔で正確に時刻を刻むことが可能となった。また、NCとNICEの間では、1分おきに定期的な無線通信によるタイムスタンプを発信することで正確な時刻同期を行い、これらを組み合わせることで、当初目標としていた時刻同期精度である±5ms以下を達成することができた。時刻同期精度を確認するために、複数台のNICEを、同一の加振台で同時に加振する試験を実施し、同期誤差が±5ms以下となることを確認している（図3）。

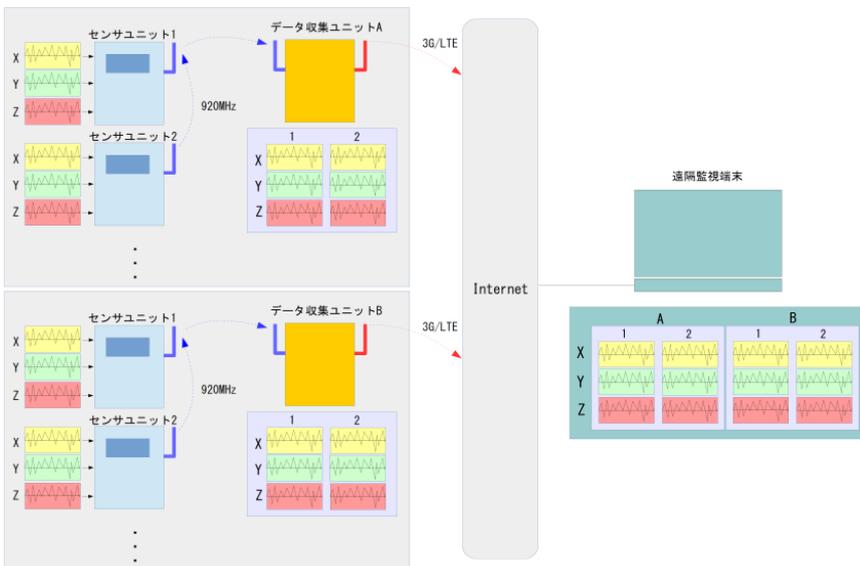


図1 Swing Minder のシステム構成図

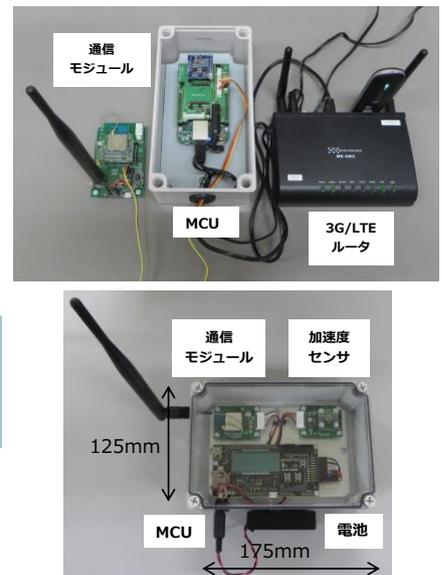


図2 機器外観(上図: NC 下図: NICE)

4. 加振試験の概要

Swing Minder の計測精度検証のために、モックアップや実大試験体を用いた加振試験を行い、各層の加速度時刻歴を計測した。

4.1 モックアップを用いた加振試験

図 4 に示す高さ 595mm、重量 20.77kg のモックアップに 1 個 580g の加速度計 NICE を振動台面、3 層目、5 層目の計 3 台を乗せ、図 5 の小型振動台で加振試験を行った。なお、本試験では基準加速度計を設置せずに、NICE と同位置にワイヤー変位計を設置し、変位を基準値とした。入力波は、El-Centro 波の NS 成分で、加振方向は X 軸方向である。

4.2 実大試験体を用いた加振試験

図 6 に示す高さ 2,512.5mm、重量 1,524kg のヒノキの実大試験体に 506kg のおもりを乗せ、図 7 の大型振動台で加振試験を行った。

振動台面と梁上に NICE を設置し、基準加速度計として ARS-200S001（東京測器研究所製）を設置した。入力波は、試験体の固有振動数 2.3Hz を含む Sweep 波 2~3Hz で、加速度を 10gal と 50gal の 2 パターンとし、加振方向は X 軸方向とした。

5. 加振試験の結果

5.1 モックアップを用いた加振試験結果

モックアップを用いた加振試験では、変位を比較するため、等時間間隔 Δt ごとに、得られた加速度の時刻歴 $\dot{y}(t)$ を積分して速度 $\dot{y}(t)$ 、変位 $y(t)$ を求める。時刻 $t + \Delta t$ における速度および変位は式(1)、(2)、求めた変位を基線補正した修正値 $\hat{y}(t)$ は式(3)~(5)で表される⁵⁾。ここで、 T は継続時間とした。計測した加速度の時刻歴から式(1)~(5)を用いて応答変位を算出し、各層ごとにワイヤー変位計の値と一致するか検証した。

NICE の加速度を積分して求めた応答変位とワイヤー変位計の値を比較して図 8 に示す。振動台面では最大 0.21cm、3 層目では最大 0.29cm、5 層目では最大 0.30cm、NICE で計測した加速度を用いて算出した応答変位の方が大きくなったが、最大変位が約 3cm であることから精度良く計測、解析ができていると考えられる。また、高層になるにつれて誤差が若干大きくなったが、ワイヤー変位計で計測した値と概ね一致した。

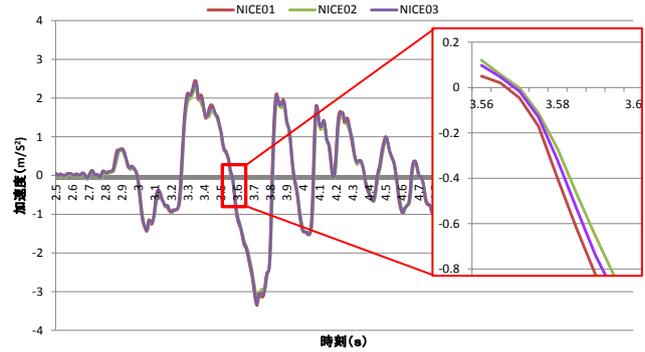


図 3 NICE 同期試験結果

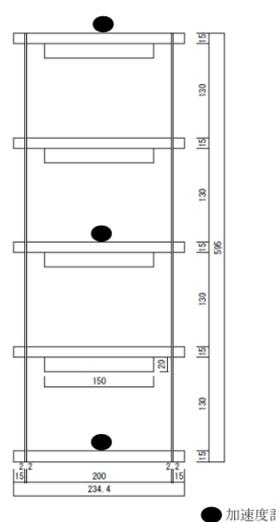


図 4 モックアップ立面

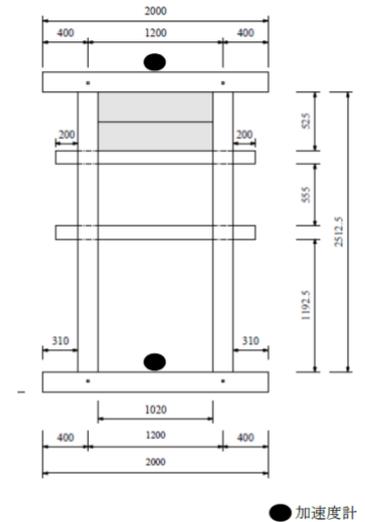


図 6 実大試験体立面



図 5 小型加振台外観



図 7 加振試験状況

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \dot{y}_t + (\dot{y}_t + \dot{y}_{t+\Delta t}) \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + \dot{y}_t \Delta t + \left(\frac{\dot{y}_t}{3} + \frac{\dot{y}_{t+\Delta t}}{6} \right) (\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$\hat{y}(t) = y(t) - \left(\frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} a_1 t^3 \right) \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{\dot{y}(T) - a_1 T^2 / 2}{T} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{28}{13} \cdot \frac{1}{T} \left[2\dot{y}(T) - \frac{15}{T^5} \int_0^T y(t)(3Tt^2 - 2t^3) dt \right] \quad (5)$$

5.2 実大試験体

実大試験体を用いた加振試験では、NICE の加速度と基準加速度計で計測した値が一致するか検証した。NICE の加速度と基準加速度計の値を比較した結果を図 9, 10 に示す。Sweep 波 10gal の場合、振動台面では最大 4cm/s^2 、梁上では最大 5cm/s^2 、NICE で計測した加速度の方が大きくなった (図 9)。Sweep 波 50gal の場合、振動台面では最大 5cm/s^2 、梁上では最大 17cm/s^2 、NICE で計測した加速度の方が大きくなった (図 10)。梁上の方が振動台面より誤差が大きくなったが、基準加速度計の値と概ね一致した。

6. 実建物でのシステム検証

これまでの加振試験等で、NICE 間の同期精度や計測精度については有線式の加速度計測システムと比べて、遜色無く計測に使用することができる仕様であることを確認した。

Swing Minder を建物に設置する場合には、伝送の障害となるコンクリート耐震壁や床スラブ等の影響を考慮する必要がある。今回、RC 造や鉄骨造を対象とした実証試験として T ビル (徳島市、RC 造：8 階建+PH)、K ビル (高知市、RC 造：8 階建+PH)、N ビル (四万十市、鉄骨造：

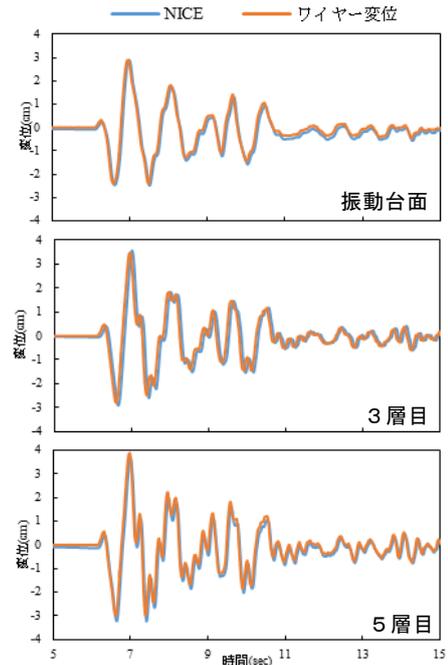


図 8 時刻歴変位の比較

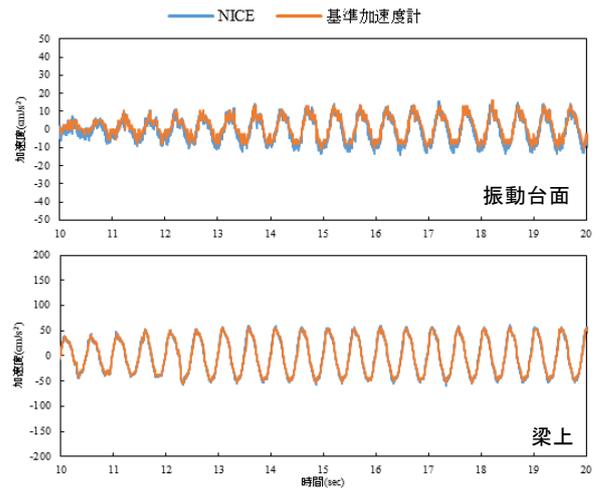


図 9 時刻歴加速度の比較 (Sweep 波 10gal)

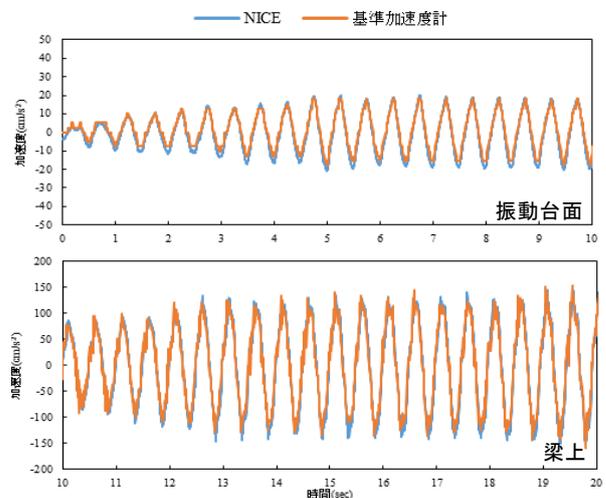


図 10 時刻歴加速度の比較 (Sweep 波 50gal)



図 11 N ビル設置状況図

(左図：ビル外観 右上図：NC, NICE 設置状況 (最上階)
右下図：NICE 設置状況 (5 階シャフト))

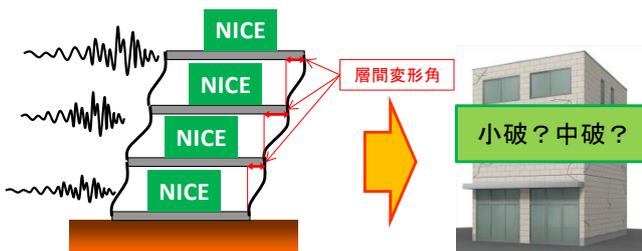


図 12 層間変形角の解析イメージ

7 階建+PH) の 3 建物の各階に Swing Minder を設置し実証試験を行っている。N ビルにおける設置状況を図 11 に、解析イメージを図 12 に示す。

地震等の発生などにより 5gal 以上の有意な振動を感知すると、各 NICE は計測を始め x, y, z 方向の 3 軸の 200Hz, 10 秒間のデータを作成し microSD に保存すると同時に NC へと送信する。設置前に電波強度を確認しているが、高知支店ビルでは、中央コアの空調シャフトに置いた 1 階と 5 階の NICE の間で良好な通信が可能であった。RC 造の建物において、ある程度の距離や障害物があったとしても、電波到達が可能であることを確認した。計測は平成 30 年 5 月から開始し、現在、遠隔からデータ収集を行っている。遠隔からのデータ表示画面例 (10 秒データ情報) を図 13 に示す。NICE に設定されているトリガーを超えずに計測状態にならない場合でも、10 秒間の平均加速度や最大加速度、平均加速度から求まる傾斜角度などの情報を NC に蓄積する。

平成 30 年 6 月の大阪府北部地震では約 400km 離れた四万十市は震度 1 以下であったが、N ビルの上階に設置していた NICE6~8 (6, 7, PH 階) で 5gal 以上の有意な振動を 40 秒間計測していた (図 14)。

今後も引き続き長期計測を行うことで機器動作および通信状況の確認に加え、地震動を観測した場合には、各階の加速度を積分して変位に換算し、層間変形角等を概ね自動的に解析する仕組みを構築する予定である。

7. センサユニット NICE の改良

7.1 改良型センサユニット NICE の開発

実証試験では、ある程度空間的に自由である空調シャフトなどに設置することができた。しかし、そのようなスペースが確保できない場合には、執務室のフリーアクセスフロア内などの限られた狭いスペースに設置する必要がある。これらの背景より、センサユニット NICE の更なる小型化と通信機能の更なる向上に取り組むこととした。

新しく開発した Swing Minder の新型 NICE の外観を図 15 に示す。小型化に際し、専用基板を設計し MEMS 加速度センサを基板上に配置することにより、機器の影響によるモーメントや電気ノイズなどを軽減することができた。併せて同

Swing Minder

sm170001 1 : 2018/10/04 13:24:30

センサー名	データ	単位
日時	2018/10/04 13:24:30	date
X軸平均加速度	0.106	m/s ²
Y軸平均加速度	-0.362	m/s ²
Z軸平均加速度	9.891	m/s ²
X軸最大加速度	0.004	m/s ²
Y軸最大加速度	0.004	m/s ²
Z軸最大加速度	0.006	m/s ²
X軸傾斜角度	0.61	deg
Y軸傾斜角度	-2.09	deg

図 13 データ表示画面の例

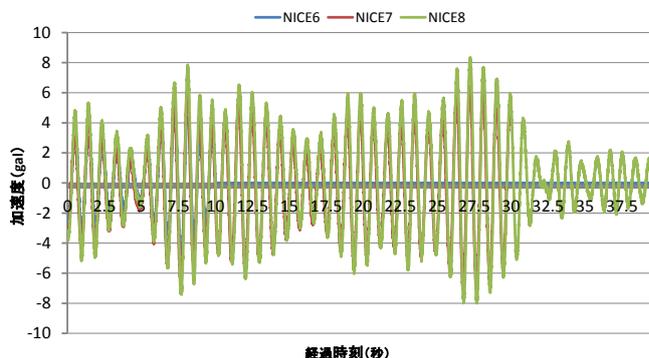


図 14 N ビル加速度時刻歴

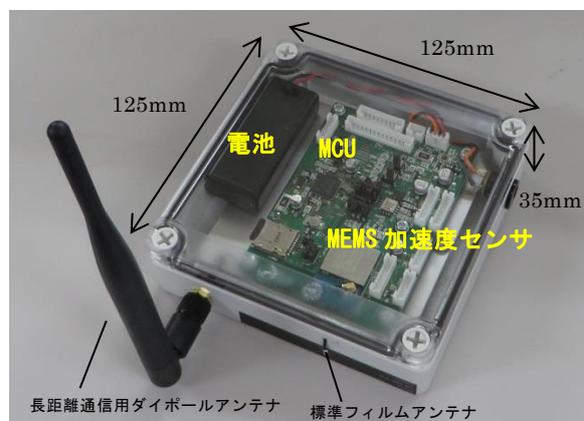


図 15 新型 NICE の外観

期精度も差異が±3ms 以下に向上した。また、ダイポールアンテナの他、薄型のフィルムアンテナも設置状況に併せて選択できるようにした。これらにより、外形寸法は 125mm×125mm×35mm と大幅に小型化することに成功した。

7.2 ゲイン補正手法の検討

Swing Minder に採用している MEMS 加速度センサ (Analog Devices 製 : ADXL355) は出荷時において内蔵しているスプリング等の固有誤差があることが分かっており、初期補正としてゲイン補正などを実施する必要がある。初期補正

を実施しない場合には、10%程の誤差を生じる可能性があることが分かっている⁸⁾。このことをふまえて、新型 NICE ではゲイン補正を実施することとした。ゲイン補正には、x、y、z 軸方向にそれぞれセンサを回転させ、重力加速度を利用して補正する方法がある。本研究では、アクリル製の正方形の箱の底面に新型 NICE を設置し、高性能加速度計を使って水平にした面上を回転させることで、ゲイン補正を実施した。補正式を (6)、(7) に示す。求めた係数で補正した新型 NICE の表示値の例を図 16 に示す。x、y 方向の平均加速度は概ね 0 となり、z 方向に対しては高松における重力加速度とほぼ一致する結果になった。

今後はこの補正手法により出荷時における初期補正を実施する。また、設置後の差異も同様の手法で補正できるパラメータを設け、設置後においても補正ができるようにした。

$$AX0 = -((X1+X2) / 2a) \quad \dots (6)$$

$$AX1 = -2g / (X1 - X2) \times b \quad \dots (7)$$

AX0 : 機器オフセット補正係数

AX1 : 機器ゲイン補正係数

X1 : x 軸を上面にに向けた x 軸方向の加速度計測値

X2 : x 軸を下面にに向けた x 軸方向の加速度計測値

a : 計測分解能(=0.0006125m/s²)

b : 整数化係数 (=10000)

g : 重力加速度 (=9.79698m/s² : 高松)

※y および z 方向においても同様の手法で補正

7.3 固定方法の違いによる影響の検証

実建物に設置する際には、設置場所や設置方法等の制限を受ける可能性が考えられる。NICE を床に堅牢に固定する必要があるため、異なる設置方法での計測結果の差異を、加振試験により確認をした。加振台に固定方式毎に両面テープ (厚) (NICE01~03)、木ねじ (NICE04~06)、コンクリート用接着剤 (NICE07~09)、両面テープ (薄) (NICE00) によって固定した。試験の状況を図 17 に、sin 波を入力した場合の計測結果を図 18 に示す。

固定方法による明確な差異を確認することはできなかった。この検証結果により、堅牢に固定できれば固定方法による差異は概ねないという結果を得ることができた。

Swing Minder		
sm170005 0 : 2018/12/04 17:05:20		
センサー名	データ	単位
日時	2018/12/04 17:05:20	date
X軸S平均加速度	-0.004	m/s ²
Y軸S平均加速度	0.003	m/s ²
Z軸S平均加速度	9.798	m/s ²
X軸V最大加速度	0.006	m/s ²
Y軸V最大加速度	0.004	m/s ²
Z軸V最大加速度	0.006	m/s ²
X軸傾斜角度	-0.02	deg
Y軸傾斜角度	0.02	deg
電源電圧	2940	mV
気温	0.0	°C
湿度	0.0	%

図 16 補正後の新型 NICE の表示値の例

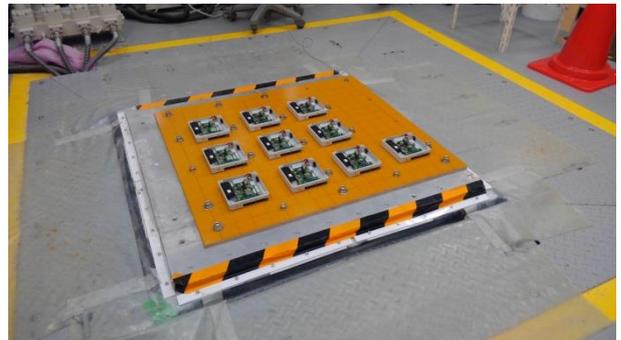


図 17 固定方法の違いによる差異の確認

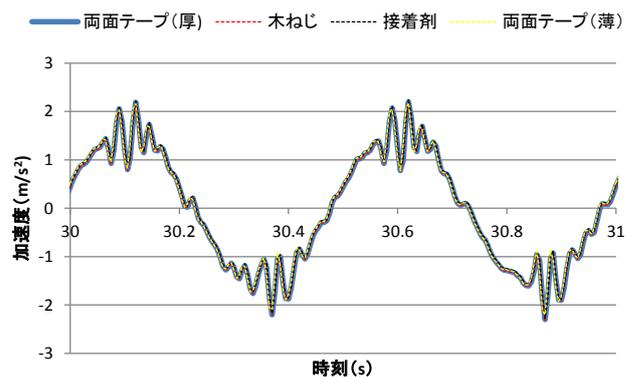


図 18 固定方法の差異による比較結果
(sin 波 2Hz 振幅 5mm)

7.4 新型 NICE の同期精度確認

補正を行った新型 NICE を加振台に 10 台設置し同期精度の確認を行った。入力波は sin 波 (2Hz および 5Hz)、sweep 波 (0.1~20Hz) で行った。sin 波 2Hz の場合における測定結果を図 19 に示す。この結果により、新型 NICE においては、各機器間の同期誤差が目標としていた ±3ms 以内

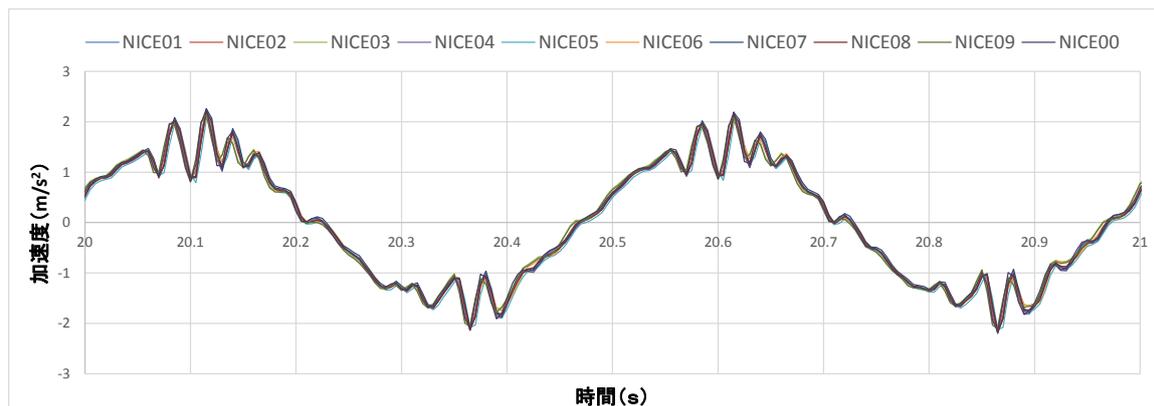


図 19 新型 NICE 同期精度試験結果
(sin 波 2Hz 振幅 5mm, 新型 NICE10 台)

となることを確認できた。また、新型 NICE10 台で取得した 40 秒の地震データを通信時間 3 分程度で NC にデータ集約できることを確認した。

8. まとめ

本研究では、無線式の振動モニタリングシステム Swing Minder を開発し、加振試験等による精度検証の結果、変位計や基準加速度計などの計測値と概ね一致することを確認した。

今後も引き続き更なる精度向上に向けた検討と共に、改良を行った Swing Minder を実建物に導入し、長期的な実証試験を通して最適な設置方法や解析手法等についての検討を行う予定である。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受けた「地震発生後の建物被害推定に関する研究(その2)」において実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

また、Swing Minder の開発にあたって、香川大学創造工学部の宮本慎宏准教授、大田佳奈氏、福田隆晟氏にご協力頂きました。

加振試験の実施にあたって、高知工業高等専門学校池田雄一准教授、奈良女子大学の瀧野敦夫講師、近畿職業能力開発大学校の藤村悦生特任教授、宇都宮直樹准教授、香川工業高等専門学校の小竹望教授にご協力頂きました。ここに謹んで深甚なる謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 澤田他: 加速度計測のための無線センサネットワークの実用的な時刻同期手法の開発, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2010
- 2) 高瀬他: 省電力化を図ったワイアレスセンサによる橋梁の継続的遠隔モニタリングシステムの概要, コンクリート工学 Vol56 No.1, 2018
- 3) 中西美一: openATOMS を活用した各種フィールドモニタリングシステムの開発と運用, 電気学会全国大会論文集 (C 部門), 2011
- 4) 中西美一: 高性能かつ安価な農業用環境モニタリングシステム (HaPPiMinder) の開発, 電気学会全国大会論文集 (C 部門), 2013.1
- 5) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 2011.1, pp133-138
- 6) 天野雄一朗他: 無線式振動モニタリングシステムの開発 (その 1) 開発目的とシステム概要, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9
- 7) 大田佳奈他: 無線式振動モニタリングシステムの開発 (その 2) 加振試験と解析結果, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9
- 8) 岡田敬一他: 建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 2) 大型振動台実験に適用する各種無線型加速度センサー性能の検証, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9