

# ADXL355 による地震時損傷検知を目的とした振動・傾斜計測に関する検討

長岡技術科学大学 地震工学研究室 ツォグトバヤル ニヤムトヤ  
志賀正崇  
池田隆明

## 1. 研究背景と研究目的

地震発生時にインフラ構造物の損傷程度を把握するには、現地に赴き確認する必要がある。しかし、地震により損傷した構造物までのアクセスが失われ、現地に到達することが不可能な場合がある。このような理由から、遠隔で構造物の変状が監視可能なヘルスマonitoringシステムの開発が進められてきた。また従来のヘルスマonitoringシステムは、高価な振動計を使用していたが、近年の半導体技術の進歩により、小型かつ安価なMEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 加速度センサーが市場に出回るようになった。このセンサーをヘルスマonitoringシステムに導入することで、広範囲に分布する構造物において複数箇所での振動観測が容易になる。しかし、MEMS 加速度センサーの適用性に関する検証は行われているものの<sup>1)2)</sup>、検討課題が残されている。

1 つ目は高精度振動計に対する MEMS 加速度センサーの計測精度の定量化である。2 つ目はインフラ構造物の変状予測への適用性である。MEMS 加速度センサーの計測記録にはある程度のノイズが含まれる。このノイズが速度や変位の計算に与える影響や、ノイズを除去するための適切なフィルタの選定や設置位置の選択が変状予測には必須である。3 つ目に、外的環境の変化が MEMS 加速度センサーを含む地震計システム全体に与える影響の評価と管理である。

本稿では上記の検討課題のうち、1 つ目のMEMS 加速度センサーの計測精度に焦点を当て、小型振動台を用いた振動実験によりMEMS 加速度センサーの振動特性について検討を行った。また、MEMS 加速度センサ

一の傾斜計測への適用性を検討した。

## 2. 実験装置<sup>3)4)5)</sup>

### 2. 1 計測センサー

MEMS 加速度センサーは Analog Devices 社の ADXL355 を用いた。ADXL355 は、待機時で 21  $\mu\text{A}$ 、稼働時でも 200  $\mu\text{A}$  の低消費電流を特徴とする 3 軸の加速度計である。またデジタル出力が可能であり、20 ビットの AD コンバータを搭載している。さらに、25  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  の低ノイズスペクトル密度を有する。加速度計からデータを記録し送信するモジュールとしては Arduino MKR WAN 1310 を用いた。

ADXL355 との比較対象用の振動計としては速度計 VSE-15D と加速度計 ASW-5A を用いた。VSE-15D は寸法が幅 69.5 mm、奥行き 55 mm、高さ 72 mm の小型サーボ型速度計である。周波数レンジは 0.2~70 Hz に対応しており、測定可能レンジは  $\pm 0.03 \text{ m/s}$ 、分解能は  $10^{-7} \text{ m/s}^2$  程度である。ASW-5A は防水型加速度計であり、寸法は幅 18mm、奥行き 24mm、高さ 18mm でケーブルを含まずに約 40g の重量を持つ。

### 2. 2 振動計測実験

使用した小型振動台の寸法は横 40 cm、幅 25 cm であり、最大加速度  $1,000 \text{ cm/s}^2$ 、最大片振幅変位 3 cm まで加振可能な装置である。計測振動数は 100 Hz とした。加振条件を表-1 に示す。なお、オリジナルパターン P1 ではノイズが多すぎたため、ノイズ低減のために様々な改良を加えて追加実験（実験パターン P2~P7）を行った。表-2 に改良内容を示す。

## 2. 3 傾斜計測実験

振動計測実験で最も精度が高かった P7 の MEMS 加速度センサーを用いて傾斜計測実験を行った。傾斜装置は分度器と下げ振りを組み合わせて自作した。図-1 に実験装置を示す。

表-1 加振条件

加振ケース	周波数 (Hz)	繰り返し回数	目標速度 (cm/s)	目標加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	目標変位 (mm)
1	0.63	13	3.0	11.9	7.57
2	1.00	20	3.0	18.8	4.77
3	1.58	32	3.0	29.9	3.01
4	2.51	50	3.0	47.3	1.90
5	3.98	80	3.0	75.0	1.20
6	6.31	126	3.0	118.9	0.76
7	10.00	200	3.0	188.5	0.48
8	15.85	317	3.0	298.7	0.30
9			無加振		

表-2 実験パターン  
(MEMS 加速度センサーの改良)

パターン	パターン条件
P1	MEMS 加速度センサー, 加速度計, 速度計のいずれも初期状態 (以後, オリジナルモデル)
P2	MEMS 加速度センサーを交換
P3	MEMS 加速度センサーの汎用電子基板の足の高さを3倍
P4	MEMS 加速度センサーの汎用電子基板の足をナットからプラスチックスペーサーに変える
P5	ASW-5A を MEMS 加速度センサーの汎用電子基板上に設置する
P6	MEMS 加速度センサーのピンヘッダを短くする
P7	Arduino と ADXL355 の基板を分離する

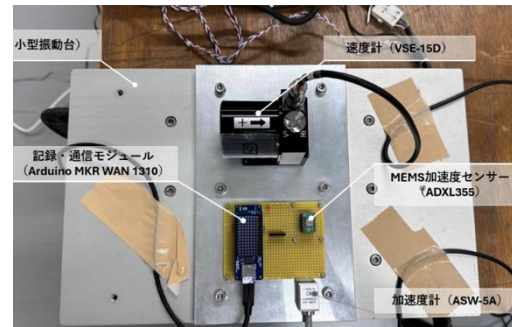


図-1 実験装置の全体写真

## 3. 実験結果

### 3.1 無加振時

無加振時における ADXL355, VSE-15D, ASW-5A のそれぞれについてノイズレベルの比較を行い, 上記の検討を実施した。加速度時刻歴波形の図では上から下に, VSE-15D, ASW-5A, ADXL355 で, 縦軸は加速度(cm/s<sup>2</sup>), 横軸は時間(sec)である。無加振時 (C9)のそれぞれの加速度時刻歴波形を図-2 のようになった。加速度時刻歴波形では P2 から P5 にかけては ADXL355 の時刻歴波形に大きな差異は見られない。これらのパターンはいずれも, マイコンと ADXL355 が搭載されている共通の汎用電子基板の設置方法を変えたものであったことから, その設置方法はノイズに大きな影響を与えていないと言える。一方で, P6 と P7 に関しては明らかに ADXL355 の時刻歴波形の振幅が小さくなっている。これらのパターンは ADXL355 のピンヘッダの高さを変更したり, ADXL355 とマイコンを別の基盤に分離するなど, ADXL355 と汎用電子基板の接続方法を変化させている。そのため, こうした接続方法の違いにより, ADXL355 が有する加速度波形に対するノイズが大きく変化したことが示唆される。

また, P1 の標準偏差を 1 としたときの各パターンにおける標準偏差の比を図-3 に示す。P7 における加速度波形の標準偏差は P1 におけるその 0.05 倍となっており, ノイズの低減効果が高かった点が確認できる。その結果, 小さい値であるほど, 無加振時のノイズが小さかったことを明らかになった。

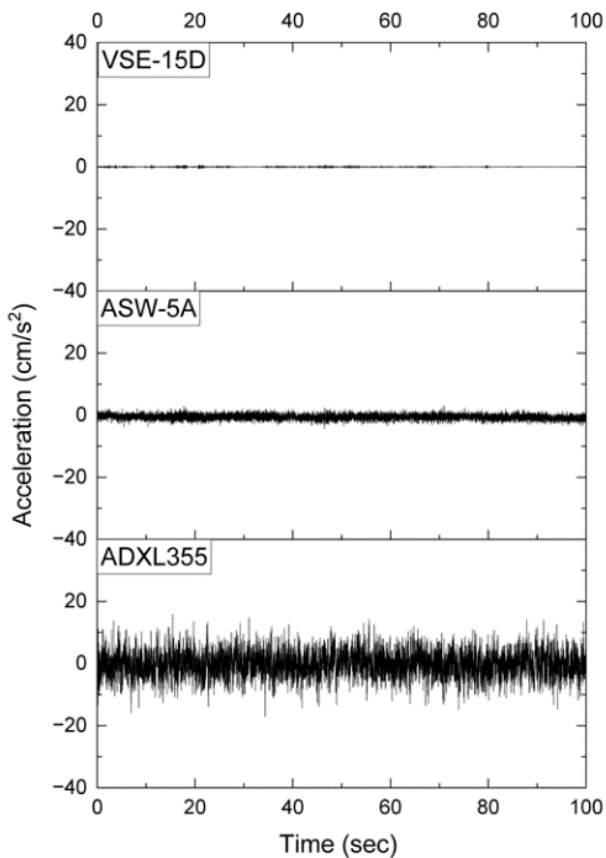


図-2 オリジナルモデルの加速度時刻歴波形 (P1-C9)

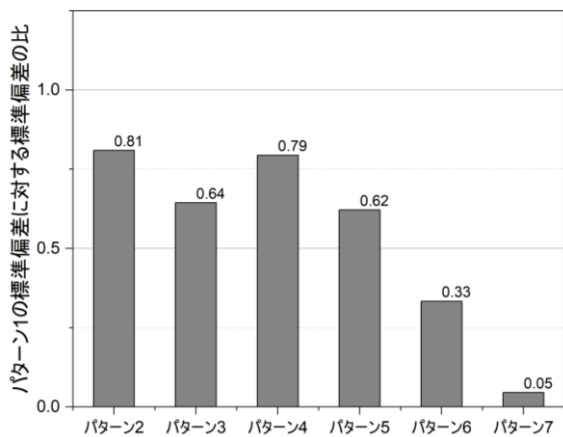


図-3 P1の標準偏差に対する全パターンでの標準偏差の比

### 3. 2 振動計測実験

実験パターン P2~P5 では ADXL355 の計測波形に見られたノイズは P1 と同程度であり改良効果は見られなかった。一方、ADXL355 のピンヘッダの高さや接続方法を

改良した P6 と P7 ではノイズは大幅に改善された。そのため、これらがノイズに大きく影響することが分かった。また、図-4、図-5 に ADXL355 の波形が最も明瞭であった P7 での加速度波形と加速度フーリエスペクトルを VSE-15D と比較して示す。また、図-6 に P7 での加速度フーリエスペクトルを示す。

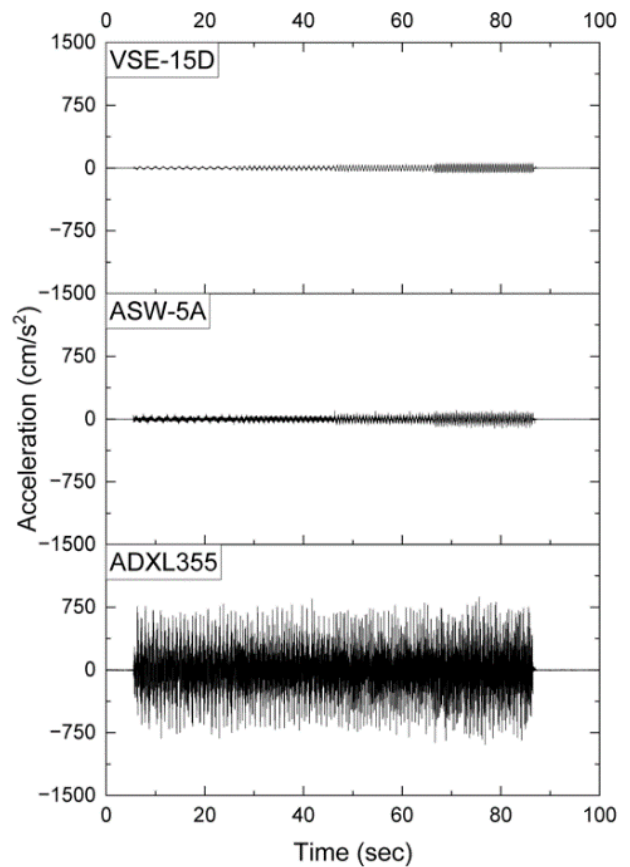


図-4 P4-C1~C4の加速度時刻歴波形

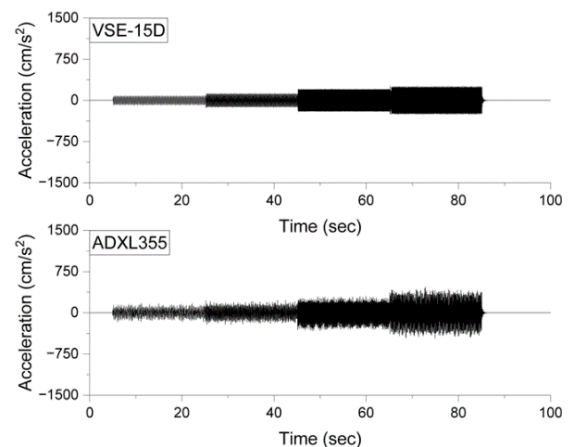


図-5 P7-C5~C8の加速度時刻歴波形

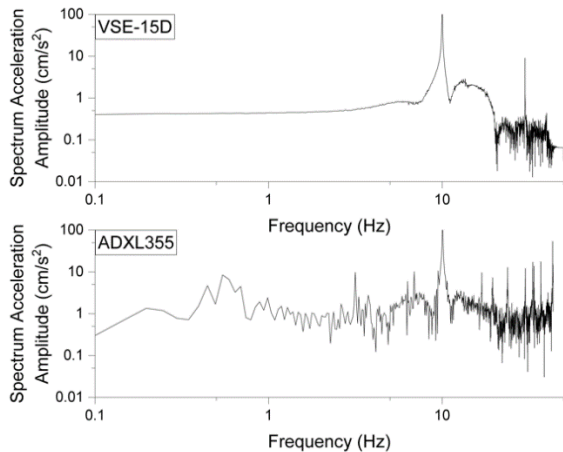


図-6 加速度フーリエスペクトル (P7-C7)

### 3. 3 傾斜計測実験

ADXL355 は 3 軸の加速度センサーであるため、加速度ベクトルの方向が重力ベクトルと一致することを利用して、現在のモジュールの接地面の傾斜角を求めることができる。以下に 3 方向の加速度値から ADXL355 の傾斜角を求める際の式を示す。

$$a_h = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad 3-2$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \left| \frac{a_h}{a_z} \right| \right) \quad 3-1$$

$$\theta = \phi \times \frac{180}{\pi} \quad 3-2$$

ここで  $a_x, a_y, a_z$  はそれぞれ ADXL355 から得られた  $x, y, z$  方向の加速度値、 $a_h$  は水平方向の絶対加速度、 $\phi$  は傾斜角 (rad)、 $\theta$  は傾斜角 ( $^{\circ}$ ) である。

実験は  $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$  それぞれに実施し、ヒストグラムを作成した。与えた傾斜角が  $45^{\circ}$  度での実験装置の状態を図-7 の通りである。全体を通して、ヒストグラムの形は中央付近で多くのデータが集まり、中央から離れるほど度数が少なくなるという釣り鐘型の形状をしている。図-8 に与えた計測傾斜角  $45^{\circ}$  の時のヒストグラムで、縦軸はデータ数、横軸は観測値から求めた傾斜角を示す。

また、与えた傾斜角での観測による傾斜角の平均値と標準偏差を計算した。平均値は最も大きい差が  $90^{\circ}$  の  $1.56^{\circ}$  で、最も小さい差が  $30^{\circ}$  の  $0.04^{\circ}$  であった。標準偏差は平均値との差が最も小さかった  $30^{\circ}$  度の標準偏差が最大値  $0.33$  だった。

図-9 に傾斜角と ADXL355 から得られた傾斜角の関係を示す。なお傾斜装置を使って ADXL355 を傾斜させ、水平 2 成分・鉛直 1 成分の計測記録から傾斜角を算出した。計測時間は 120 秒として各時間ステップで傾斜角を求め平均している。二つの関係はよく一致しており、計測時間を長くして平均化することにより傾斜角を適切に評価できることが分かった。

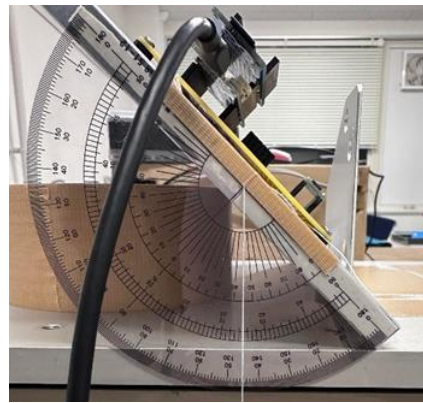


図-7 傾斜計測装置

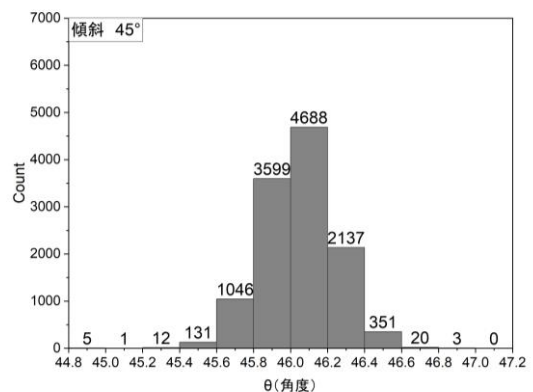


図-8 与えた傾斜角が  $45^{\circ}$  の時の計測傾斜角のヒストグラム

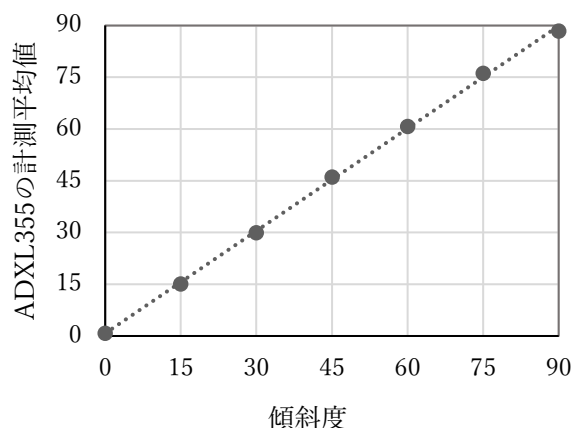


図-9 与えた傾斜角と計測傾斜角の分布

#### 4. 結論

本稿では小型かつ安価な MEMS 加速度センサーを用いた遠隔ヘルスマonitoringシステムの構築を目的として、ADXL355 の計測精度に焦点を当て、小型振動台を用いた簡易的な実験と傾斜実験を行った。

その結果、加振条件での無加振時時刻歴波形について、ADXL355 とマイコンを別の基盤に分離する改良を行ったパターンについては、オリジナルモデルと比較した場合に ADXL355 の加速度波形の標準偏差が小さくなった。また、加振時時刻歴波形についても 2.51 Hz 以上の実験ケースにおいて、ケース間の波形の違いを観測できた。

MEMS 加速度センサーの計測精度は各モジュールの配置・配線に影響を受けることが分かった。また計測時間を長くして平均化することにより傾斜計測が可能であることが分かった。

#### 引用文献

- 1) Schwenck A, Guenther T, Zimmermann. Sensors. 2021; 21(23):8030. <https://doi.org/10.3390/s21238030>
- 2) 栗田哲史: 実測値に基づく MEMS チップの地盤震動観測への適用性検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学, Vol.75, No.4 (地震工学論文集第 38 卷) , I\_1657-I\_666, 2019.
- 3) Analog Devices: ADXL355. (2023/10/09 閲覧)

- 4) Arduino, LLC: MKR WAN 1310 (Tech Specs).
- 5) 株式会社 東京測振: 小型サーボ型速度計 VSE-15D (2023/10/09 閲覧)