

MEMS 加速度センサーADXL355 のノイズ・振動特性の基礎的検討

長岡技術科学大学 非会員 ツォグトバヤル ニヤムトヤ

長岡技術科学大学 正会員 志賀 正崇

群馬工業高等専門学校 正会員 井上 和真

長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明

1. 概要

構造物ヘルスマモニタリングに利用可能な安価かつ小型の加速度センサーの需要が高まっている。本稿では、ADXL355 について地震計としての適用可能性の検証を行った。簡易的な計測の結果では、無加振時の ADXL355 のノイズの標準偏差は 2.79 cm/s^2 程度であり、速度計との比は約 10 倍であった。

2. 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。また現地に行けたとしても、崩壊した建物や構造物の周辺での作業は安全上のリスクが伴い、二次被害が生じる可能性がある。さらに地震被害の範囲が広大な場合、インフラ構造物の損傷状況を確認するためには多大な時間がかかる。こうした理由から、遠隔で構造物の変状が監視可能なヘルスマモニタリングシステムの開発が進められてきた。

従来のヘルスマモニタリングシステムは、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モニタリング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 センサーの精度やヘルスマモニタリングシステムの適切な管理・運用に関連するいくつかの重要な課題も存在する。

Schwenck et al.¹⁾は流体式静電容量式センサーとの比較の過程で、複数の民生用 MEMS 加速度センサーの精度も比較している。この中で Analog Devices 社製の ADXL355 は他の 2 製品と比較して低いアラン

分散を示した。ADXL355 は AD 変換器と MEMS 加速度モジュールがパッケージ化されたセンサーであり、AD 変換器が搭載されていないバージョンとして ADXL354 が存在する。栗田²⁾は同社製の ADXL354 を用いた地震計を開発し、低周波数側の性能は従来の地震計と比較して性能が劣る点を指摘した。このように民生用 MEMS 加速度センサーに関する精度検証はある程度なされているが、以下の点において検討が不足している。

1 つ目は MEMS 加速度センサーの計測精度である。これは、対象とする振動の大きさに対して MEMS 加速度センサーと既存の高精度の振動計を比較した場合に、どのような特性の振動が検知できるかの検討を指す。2 つ目はインフラ構造物の変状予測である。MEMS 加速度センサーの観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、適切なフィルタ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。ここでの外的環境の変化とは、日射量や温度、湿度、風速、交通振動等を指し、これらの要因がシステムの計測安定性に与える影響を検討する必要がある。

本稿では上記の 3 つの検討すべき課題のうち、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簡易的な実験による、ADXL355 の振動特性について検討を行い、結果を報告する。

3. 実験方法

この実験は小型振動台を使用し、加速度計と速度計で振動を測定する。実験に用いた装置を図-1 に示す。装置の仕様は以下の通りである。

3.1 実験装置³⁾⁴⁾⁵⁾

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 MEMS 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 (ADC) 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。Arduino MKR WAN 1310 は寸法が奥行き 67.6 mm × 幅 25 mm と小型であり、動作周波数が 48 MHz である SAMD21 Cortex-M0 のマイコンチップを有する。SPI と I2C 通信を用いた外部との有線通信や、LoRaWAN を用いた長距離低消費電流による無線通信が可能である。本稿では無線通信機能は使わずに、速度計と同方向の成分の加速度を 100 Hz でサンプリングしたものを使用する。以後 ADXL355 と Arduino MKR WAN 1310 を含めて単に加速度計と呼称する。

MEMS 加速度センサーとの比較対象用の振動計としては速度計 VSE-15D 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 $0.2 \sim 70 \text{ Hz}$ に対応しており、測定可能レンジは $\pm 0.1 \text{ m/s}$ である。しかし、実際に加振を行ったところ $\pm 0.03 \text{ m/s}$ 以上で鋭いスパイク波形が観測されるようになったため、今回の実験ケースでは $\pm 0.03 \text{ m/s}$ を上限として加振条件を設定した。また分解能は 10^{-7} m/s^2 程度であり、サンプリングは 1000 Hz で行った。

また今回用いた小型振動台の寸法は横 40 cm 、幅 25 cm であり、最大加速度 1000 cm/s^2 、最大片振幅変位 3 cm まで加振可能な装置である。

3.2 実験手順

実験は次の手順で行った。まず、テーブル上に小型振動台をしっかりと固定する。次に小型振動台に、加速度計と速度計を軸が平行になる配置で設置する(図-1)。この際コネクタやケーブルが加速度計や速度計に干渉しないように注意する。また速度計の

GPS アンテナを GPS 信号を正確に受信できる窓際等の場所に設置する。速度計を記録用パソコンにコネクタで接続し、記録用ソフト SPC-52 を起動する。また、加速度計にメモ리카ードを挿入し、電源を入れる。電源投入直後から記録が始まるが、加速度計は時刻同期されておらず、同一時刻での比較ができない。このため、電源投入後から 10 秒後にハンマーで軽く小型振動台を叩きトリガー波を記録させる。このトリガー波が観測された時刻を 0 秒として以後のデータ整理を行う。

実験ケースは加振 8 ケースと無加振 1 ケースの計 9 ケース実施した。加振条件は表-1 のように設定した。目標速度は速度計の実際の最大レンジ 3.0 cm/s として、周波数は対数スケールで表現した場合に等間隔となるように設定した。また加振時間は全てのステップで 20 秒として、周波数と変位を小型振動台の制御用ソフトに入力した。ケース 1~4 とケース 5~8 をまとめて実施した。

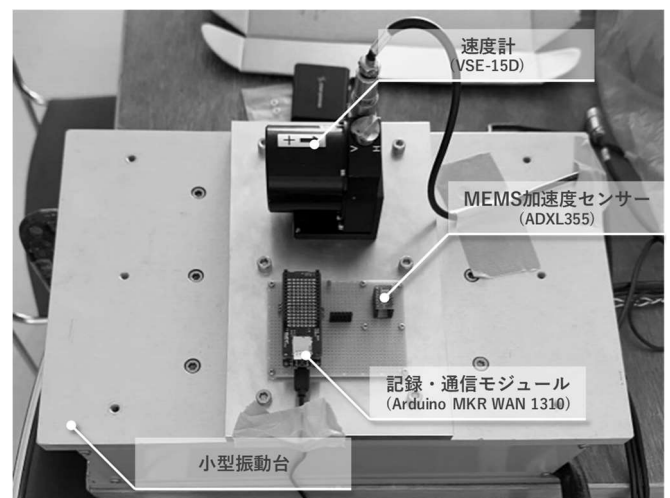


図-1 小型振動台上に設置した速度計と加速度計

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 ²)	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	

4. 実験結果

図-2 と図-3 に無加振時(ケース 9)の観測記録を示す。図-2 は加速度の時刻歴波形, 図-3 に速度計の時刻歴波形を取ったものである。なお図-3 の速度計の波形は1階微分を行うことで縦軸を加速度に変換している。周波数領域でのフィルタなどは用いていない。速度計による加速度の平均値は $-2.48 \times 10^{-6} \text{ cm/s}^2$ であり, 標準偏差は 0.28 cm/s^2 であった一方, 加速度計による加速度の平均値は -2.73 cm/s^2 で, 標準偏差は 2.79 cm/s^2 であった。このように速度計と比較した場合に加速度計は, 原点からのドリフト値と標準偏差の両方の観点から, 性能が悪いと言える。

図-4(a)と(b)にケース1~4の速度計と加速度計で観測された加速度の時刻歴波形を示す。まず図-4(b)に着目すると, 表-1 で目標とした加速度とほぼ同等の大きさの加速度が速度計でも観測されている点が見て取れる。一方で加速度計は全てのケースで $\pm 1000 \text{ cm/s}^2$ 程度の加速度が計測されており, ケース間ではそれほど明確ではない(図-4(a))。

図-5(a)と(b)にケース1における速度計と加速度計で観測されたフーリエ加速度スペクトルを示す。速度計の記録は振動台で与えた周波数 0.63 Hz 付近で明瞭なピークが出ている一方で, 加速度計の記録はピークは見られない。また速度計の記録では 4 Hz 以上の高振動数領域において, スペクトルの振幅が大きくなる傾向が見られる。この理由としてパルス波によるステップモーターの制御が考えられる。

このように加速度計が正しく加速度を計測できていない理由としては, 1. MEMS 加速度センサーと基板がしっかりと固定されていない, 2. 今回与えた 100 cm/s^2 未満の揺れが小さすぎる, などが考えられるため, 今後より詳細な検討を行っていく。

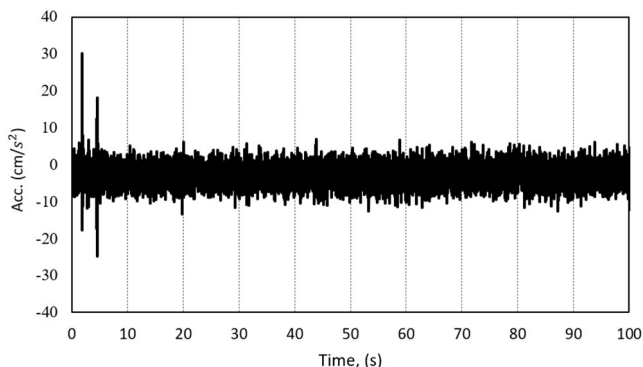


図-2 加速度計による無加振時の加速度時刻歴波形

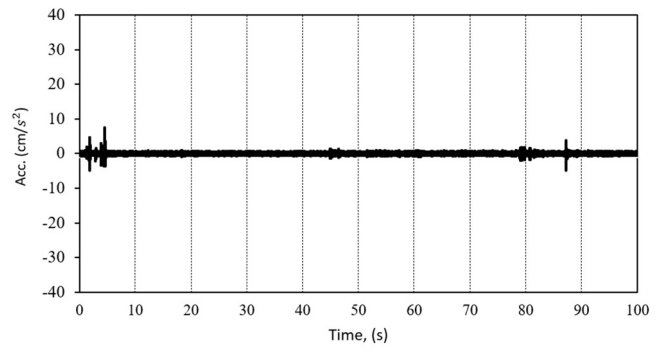


図-3 速度計による無加振時の加速度時刻歴波形

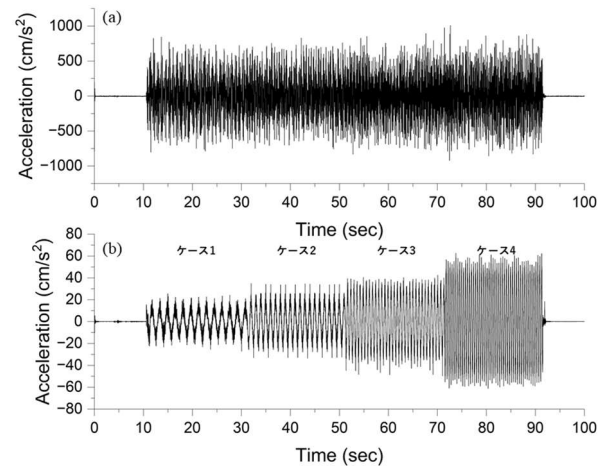


図-4 ケース1からケース4にかけての加速度時刻歴波形 (a) 加速度計 (b) 速度計

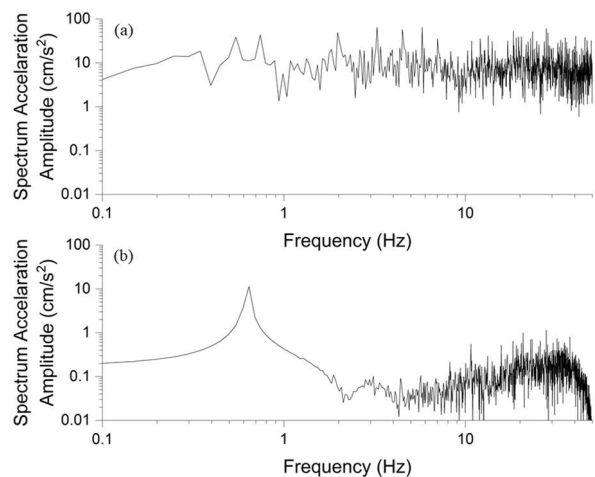


図-5 ケース1のフーリエ加速度スペクトル (a) 加速度計 (b) 速度計

5. 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ニタリング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による、ADXL355 の振動特性について検討を行った。結果として、無加振時のノイズは ADXL355 が既存の速度計と比較して 10 倍程度大きい結果となった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、エルスピーナヴェインズ株式会社青谷浩二様を始め多くの方のご協力をいただきました。深甚の謝意を表します。

引用文献

- 1) Schwenck A, Guenther T, Zimmermann A: Characterization and Benchmark of a Novel Capacitive and Fluidic Inclination Sensor. 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 巻) , I_1657-I_666, 2019.
- 3) Analog Devices: ADXL355, <https://www.analog.com/jp/products/adx1355.html#product-overview> (2023/10/09 閲覧)
- 4) Arduino, LLC: MKR WAN 1310 (Tech Specs), <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310> (2023/10/09 閲覧)
- 5) 株式会社 東京測振: 小型サーボ型速度計 VSE-15D, <https://www.tosoku.co.jp/products/servo/pdf/vse15d.pdf> (2023/10/09 閲覧)