

橋梁モニタリングシステム構築における安価な加速度計の計測性能 温度、温度履歴依存性の評価に関する研究

長岡技術科学大学 地震工学研究室 学生 北園 和磨
長岡技術科学大学 地震工学研究室 教授 池田 隆明
長岡技術科学大学 地震工学研究室 助教 志賀 正崇

1. 序論

大規模な地震発生直後にはインフラ構造物の安全性の確認を目的とした緊急点検が行われる。従来の点検方法では、実際に調査員が現地に赴き、インフラ構造物の損傷程度を確認している。しかし、地震直後は情報が錯綜するとともに、道路閉塞などの影響により点検箇所には到達できない問題や、山間地域における点検作業の移動負担、被災範囲が広大な場合は点検に時間を要する問題がある。この例として、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震が挙げられる。当時のインフラ緊急点検は「くしの歯」作戦と呼ばれる道路啓開が行われた（図1-1）。このように大災害下では、現在も多く点検作業が人手に頼らざるを得ない状況である。インフラ構造物の早期復旧は、人命に大きく関わることから効率的かつ迅速に損傷評価を行う重要性は極めて高いといえる。

インフラ構造物には、平常時の場合にも問題が指摘されている。我が国の社会基盤構造物のほとんどは高度経済成長期に集中的に整備され、今後急速に老朽化する。この問題を解決しない場合平常時であっても経年により使用できなくなることが危惧されている。緊急点検・平常時の維持管理ともに「人」による点検が行われているのが現状であり、我が国の少子高齢化による技術者の不足のなかで、十分な点検、維持管理を行うことは困難な状況に直面している。地震などの自然災害と経年劣化に対して構造物の安全性、健全性を維持管理する方法が求められている。



図1-1 くしの歯作戦 道路啓開の様子（東北地方整備局くしの歯作戦より）

こうした問題の解決策の一つとして、インフラ構造物のモニタリングシステムの構築が有効である。一般的に構造モニタリングシステム (Structural Health Monitoring, SHM) とは、構造物にセンサを設置して振動等の物理量を観測し、様々な信号処理手法を用いて、蓄積された損傷や劣化

の発生箇所及び度合いについて動的に診断し、今後の進展状況について予測する技術（診断・予測）である。

橋梁モニタリングシステムの構築は、緊急点検の効率化や平常時の健全性評価といった役割が期待されている。安価な加速度センサ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つ目は安価な加速度センサの計測精度である。これは、対象とする振動の大きさに対して安価な加速度センサ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。安価な加速度センサ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、適切なフィルターや設置位置の選択が変状予測には必須である。3つ目に、外的環境の変化が安価なセンサ自身や安価なセンサ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、日射量や温度履歴、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。

本研究では上記の3つの検討すべき課題のうち、1つ目と3つ目の安価な加速度センサ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を行った。3つ目の外的環境の変化では、計測精度に最も影響を与える温度履歴、温度依存性に着目して、安価な加速度センサの振動特性、温度履歴、温度依存性による振動特性について検討を行い、結果を報告する。

2. 実験手法

初めに ASW-5A の記録を開始し、VSE-15D のスイッチをオンにする。この 2 つの装置の登録が確認できた場合、MEMS 加速度センサの電源を入れる。電源投入直後から記録が始まるが、3 つの装置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。これは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。トリガー波を検知してから 10 秒後に各周波数の条件で振動台から加振を行った。また台車による振動実験は、最新モデル（基板と加速度計を分離）での振動台実験を行っている。（図 2-1）

温度影響実験では、発泡スチロール内から2つのASW-5Aを取り出し、温度が一定になるまで1時間程度放置する。小型振動台に温度履歴を与えていない残りの2つのASW-5Aと温度履歴の影響がある2つのASW-5Aを並べる。すべてのASW-5Aを両面テープで固定し、ケーブルは計測結果に影響を与えないように緩く振動台に固定した。また、ASW-5A同士互いに接触しない用に間隔を開けて固定する（図2-2）。

加振実験を行う場合は、ASW-5Aの記録を開始し、センサ同士の時刻同期の確認と計測確認のためハンマーで軽く小型振動台を叩く。計測中は極力移動を行わず静かに待つことで、ノイズ軽減に務めた。実験後は、任意のファイルにCSV形式でデータを保存する。

温度依存性実験は、発泡スチロールから加速度計（ASW-5A）を取り出しできる限り素早く加振実験を行う。



図2-1 台車における加振実験の固定方法

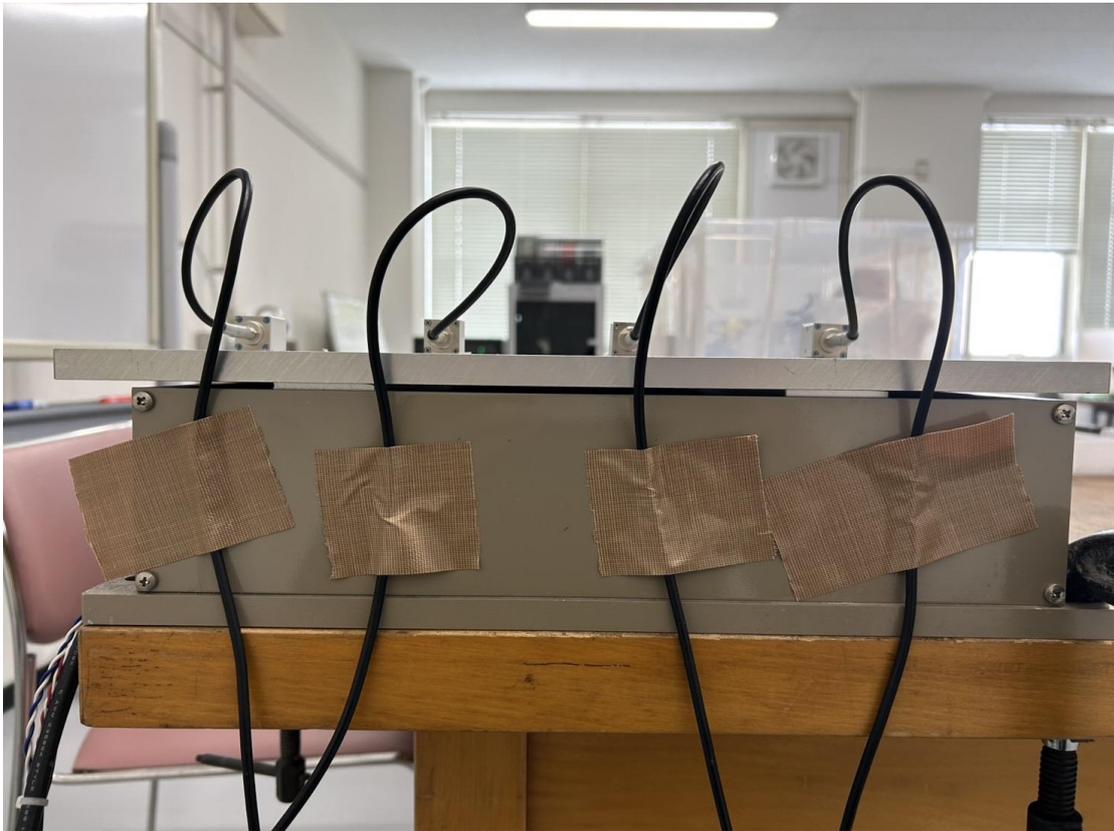


図2-2 ASW-5Aの固定方法

本研究で設定した加振条件は、地震発生直後に実施される橋梁の緊急点検時の震度を参考に決定した。緊急点検基準は一般的に三段階に分けられ、必要に応じて点検が実施されている（表2-1）。震度から加速度への換算に関しては、気象庁が提供する周期および加速度と震度（理論値）の関係を基に決定した。

また、道路橋示方書における地震動の特性値に基づき、橋の設計供用期間中にしばしば発生す

る地震動を「レベル1地震動」と呼び、設計供用期間中に極めて稀に発生するものの、一旦生じれば橋梁に甚大な影響を及ぼすとされる地震動を「レベル2地震動」と定義している。橋梁の設計は、これらの地震動を適切に考慮して行われている。

本研究では、このレベル 1 およびレベル 2 地震動を参考に加振条件を設定しており。具体的には、レベル 1 地震動は 200 gal～300 gal、レベル 2 地震動は 700 gal～1000 gal とされている。なお、本研究の加振条件は、小型振動台の性能限界を考慮して設定した。また、実験ケースは、加振 6 ケースと無加振 1 ケースの計 7 ケース（以降 V1 等と呼称する）実施した（表 2-2）。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 30 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。なお1回の加振ではV1からV3まで、V4からV6までをまとめて実施した。

表2-1 地震発生後の緊急点検基準

震度5強以上	直ちにに応じて点検を検討
震度5弱	必要に応じて点検を検討
震度4以下	通常は緊急点検を実施しないが、異常が報告された場合は対応

表2-2 温度履歴依存性の加振条件

加振ケース	周波数 (Hz)	繰り返し回数	加速度 (gal)
V1		30	
V2	1	48	60
V3		75	
V4		47	
V5	1.58		250
V6	2.51	75	630
V7		無加振	

3. 安価な加速度計の全般に振動特性に関する検討

オリジナルモデルにおける加速度計の計測性能では、仕様を超えるノイズが観測された。この原因は、ピンヘッドの高さに起因していると考えられた。そのため、ピンヘッドの高さや基板の変更によるノイズの低減を試みた。その結果、最も効果的なノイズ低減を実現したのは、基板と加速度計を分離したモデルであった。したがって、本研究では、基板と加速度計を分離した最新モデルを作成し、台車を用いた簡易的な振動実験を実施した。本稿では、その実験結果について示す。

図 3-1 に、無加振状態での時刻歴加速度波形とフーリエ加速度振幅スペクトルを示す。時刻歴波形のグラフでは、縦軸は加速度 (cm/s^2)、横軸は時間 (s) を表している。一方、加速度フーリエ振幅スペクトルのグラフでは、縦軸は対数スケールで表された加速度フーリエ振幅、横軸は振動数 (Hz) である。加速度の標準偏差は、ASW-5A で 0.78 cm/s^2 、ADXL355 で 0.40 cm/s^2 であり、長周期の脈動やドリフトなどは確認できなかった。また、フーリエ振幅スペクトルは 0.05 Hz から 50Hz の振動数帯域においても、ADXL355 振幅の方が 1/2 程度小さい結果となった。

次に、加振条件状態での時刻歴波形とフーリエ加速度振幅スペクトルの比較図を  に示す。そ

それぞれのグラフとも縦軸，横軸は，図 3-1 同様の見方である．時刻歴波形の図に着目すると，位相ずれや振幅の大きさ差異は見られなかった（図 3-1 a,b）．また，加速度フーリエスペクトル（ cm/s^2 ）においても手動で振動を与えた 0.8 Hz 付近は卓越振動数の位置や大きさは概ね一致している．

これらの結果から，少なくとも実験を行った室内環境においては，開発機は既存のひずみゲージ式加速度計と同程度の振動特性を有することが判明した．一方，一部観測時においては，周辺機器からの電氣的ノイズによって，IoT 地震計の波形にノイズが混入することが確認された．このため，実際の IoT 地震計設置の際は，周辺機器やセンサを可能な限り遠くに配置するなどのノイズ対策を十分に講じる必要がある．

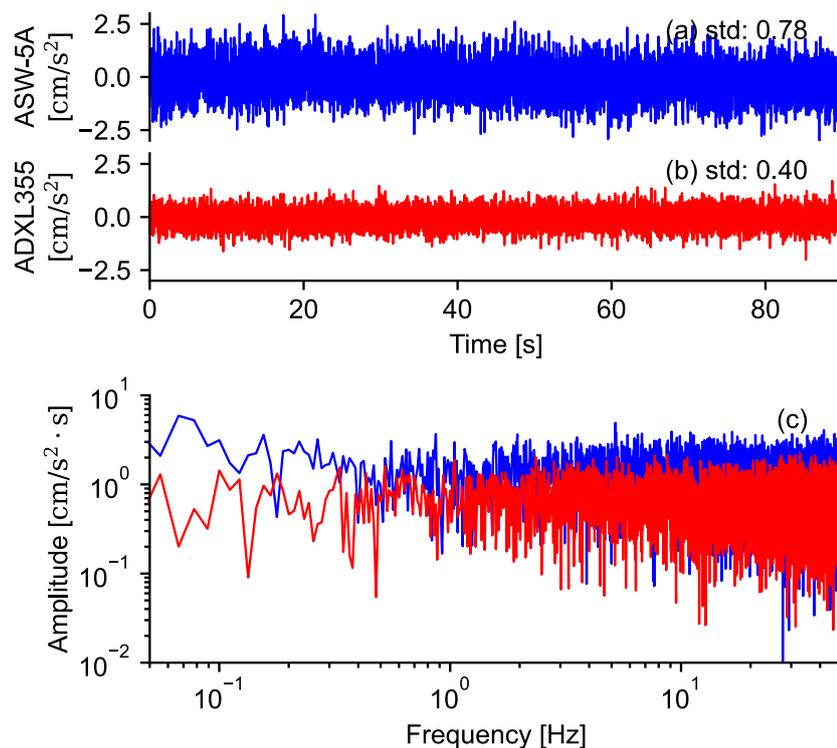


図 3-1 無加振状態での時刻歴加速度波形とフーリエ加速度振幅スペクトルの比較
(a) ASW-5A 時刻歴波形 (b) ADXL355 時刻歴波形 (c) フーリエ加速度振幅スペクトル

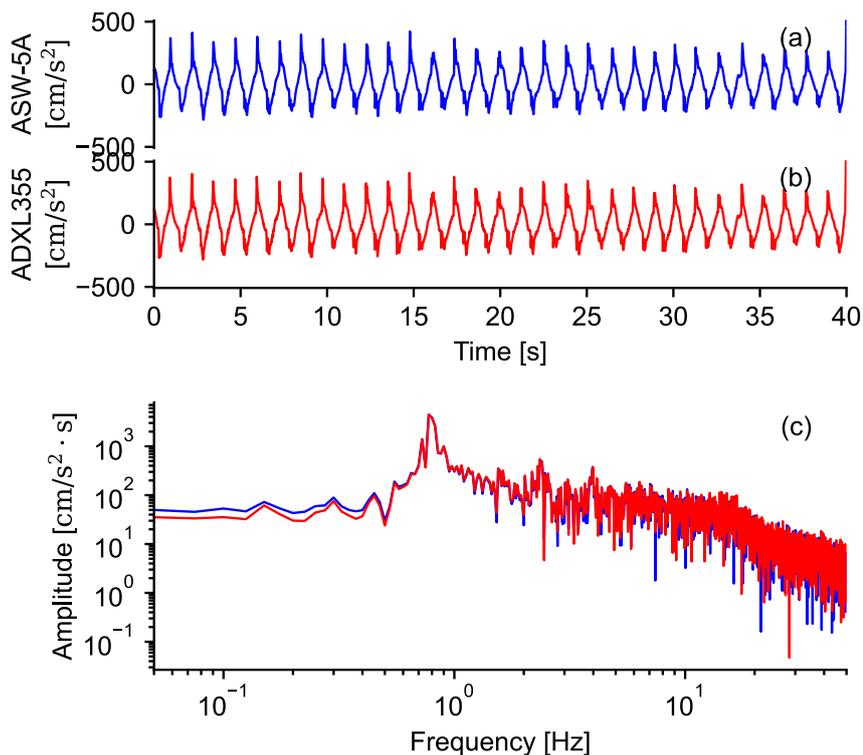


図 3-2 加振状態での時刻歴加速度波形とフーリエ加速度振幅スペクトルの比較
 (a) ASW-5A 時刻歴波形 (b) ADXL355 時刻歴波形 (c) フーリエ加速度振幅スペクトル

4. 安価な加速度センサ全般の温度・温度履歴依存性に関する検討

本稿では、温度実験の代表として温度依存性に関する実験結果を示す。(図 4-1,4-2,4-3,4-4) 加速度センサ全般の温度・温度履歴依存性の結果として、無加振時の時刻歴波形において温度の影響によるドリフト現象が顕著に現れた。一方で、その他の温度履歴依存性実験および温度依存性実験における、無加振時および加振時の時刻歴波形や加速度フーリエスペクトルにおいては、計測結果に有意な影響を与えるほどの変化は確認されなかった。

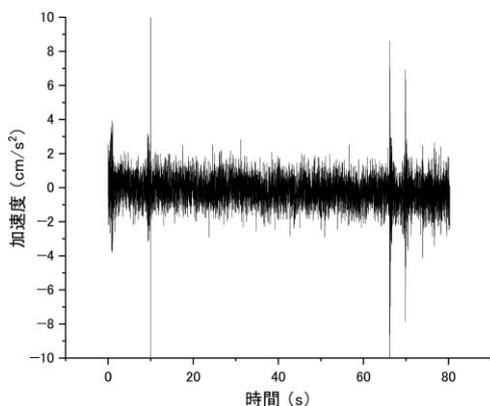


図 4-1 無加振の加速度時刻歴波形 2 日目
 温度なし (加速度計 1)

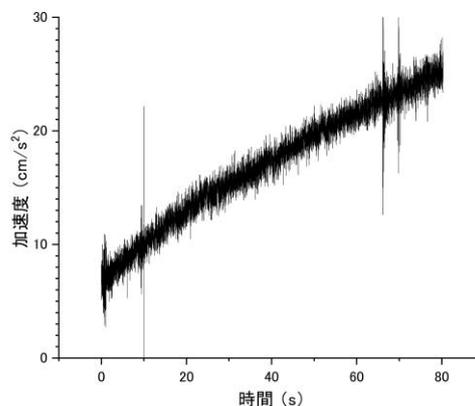


図 4-2 無加振の加速度時刻歴波形 2 日目
 温度あり (加速度計 2)

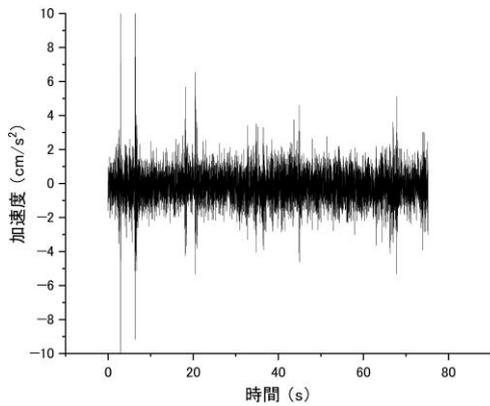


図 4-3 無加振の加速度時刻歴波形 14 日目
温度なし（加速度計 1）

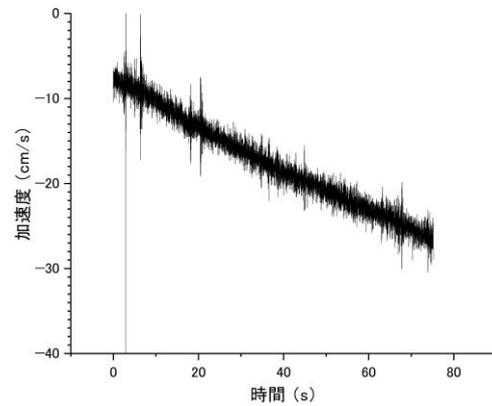


図 4-4 無加振の加速度時刻歴波形 14 日目
温度あり（加速度計 3）

5. 結論

本研究では、橋梁モニタリングシステムの構築を前提にした安価な加速度センサの計測性能、温度履歴依存性及び温度依存性の評価を検討した。安価な加速度計代表として、MEMS 加速度センサ（Analog Devices 社製の ADXL355）とひずみゲージ式加速度計（株式会社共和電業社製の ASW-5A）を使用した。振動特性と傾斜特性実験には、MEMS 加速度センサを使用しており、外的環境変化のひとつである温度履歴依存性及び温度依存性実験では、ひずみゲージ式加速度計を使用した。これらの実験から得られた結果を示す。

振動特性と傾斜特性には、従来の加速度計と比較して安価で小型な MEMS 加速度センサ（Analog Devices 社の ADXL355）を使用した。振動特性の実験は小型振動台を使用して実験を行い、ADXL355 と従来の加速度計と速度計とを比較した。実験条件としては、無加振条件と加振条件に分け、加振条件では異なる加速度や周波数の振動を小型振動台から入力することで、ADXL355 の振動計測能力を評価した。一方、傾斜特性の傾斜特性については、分度器を貼った金属板を 15°間隔で傾斜させていくことで、傾斜量のばらつきを評価した。

温度履歴依存性および温度依存性の評価には、ひずみゲージ式加速度計（株式会社共和電業社製 ASW-5A）を使用した。これらの実験では、小型振動台を用い、温度履歴や温度影響を加えた加速度計と、加えなかった加速度計を比較して計測性能への影響を検討した。温度条件として、発泡スチロール内に USB ヒーター、ファン、加速度計、温度計を設置し、約 50°C まで加熱した環境で計測性能を評価した。具体的な結論を下記に示す。

- MEMS 加速度センサの振動特性と傾斜特性
- 1. 無加振条件での時刻歴波形について、オリジナルモデルにおける VSE-15D, ASW-5A, ADXL355 それぞれの加速度計測値の標準偏差は 0.11 cm/s², 0.89 cm/s², 3.99 cm/s² であり、ADXL355 は VSE-15D, ASW-5A それぞれに対して、36.3 倍、4.48 倍の標準偏差が観測されている。

2. 無加振条件での時刻歴波形について、ADXL355のピンヘッド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。
 3. 加振条件での時刻歴波形について、全体としてVSE-15D、ASW-5A、ADXL355の順で加速度波形は振幅のばらつきが多くなり、ノイズの割合が増加した。また、オリジナルモデルにおける時刻歴波形は、与えた振幅の大小によらず、 750 cm/s^2 程度の加速度が観測された。また異なる周波数や入力加速度条件での波形の差異はほとんど見られなかった。
 4. 加振条件での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では、 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
 5. 18.8 cm/s^2 の加振条件での加速度フーリエスペクトルについて、ADXL355に関してオリジナルモデルでは、 1 Hz 近傍で概ね 80 cm/s^2 程度の加速度フーリエスペクトルが観測されており、目標加速度の4倍以上の値となった。また 1 Hz 以外の周波数成分においても、数 cm/s^2 から 20 cm/s^2 程度の加速度フーリエスペクトルが観測されており、この値はVSE-15Dの同じ領域と比較すると少なくとも100倍大きい。
 6. 18.8 cm/s^2 の加振条件での加速度フーリエスペクトルについて、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関して、 1 Hz 近傍での加速度フーリエスペクトルは 20 cm/s^2 程度となった。また、 1 Hz 以外の周波数帯での加速度フーリエスペクトルの大きさも数 cm/s^2 程度となっており、他の改良モデルと比較して大きく改善した。しかし、VSE-15Dの結果と比較すると、 1 Hz 以外の周波数帯でのスペクトルが依然として10倍以上大きく、この点は改善の余地がある。
 7. ADXL355とマイコンを別の基板に分離した改良パターンの結果、無加振時の時刻歴波形の標準偏差は、ASW-5Aでは 0.78 gal 、ADXL355では 0.40 gal となり、ADXL355の方がひずみゲージ式加速度計よりも良好な結果を示した。また、加振時の加速度フーリエスペクトルにおいて、振動数 0.05 Hz から 50 Hz の範囲で、ADXL355はひずみゲージ式加速度計に比べてノイズが $1/2$ から $1/3$ 程度になった。このことから、今回開発した振動計は、ひずみゲージ式加速度計と同程度の性能があるといえる。
- ひずみゲージ式加速度センサの温度履歴依存性および温度依存性
 1. 無加振条件での時刻歴波形について、温度履歴の影響を与えた加速度計の差分標準偏差の値は、2日目、8日目、14日目それぞれ 1.17 cm/s^2 、 1.15 cm/s^2 、 1.26 cm/s^2 であった。一方温度履歴の影響を与えていない加速度計の差分標準偏差の値は、 1.15 cm/s^2 、 1.15 cm/s^2 、 1.12 cm/s^2 と観測されている。
 2. 無加振条件での時刻歴波形について、温度履歴の影響を与えた加速度計と与えていない加速度計の波形形状は概ね一致していた。ただし、14日目の時刻歴波形ではドリフトが観測されたものの、大部分の波形形状は一致していたため、無加振の時刻歴波形において温度履歴依存性の影響は確認されなかったといえる。
 3. 加振条件での時刻歴波形について、温度履歴の影響を与えた加速度計の差分標準偏差の値は、加速度 60 gal の時刻歴波形で2日目、8日目、14日目それぞれ 2.35 cm/s^2 、 3.13 cm/s^2 、 2.82 cm/s^2

であり、加速度250gal,630galの時刻歴波形では2日目, 8日目, 14日目それぞれ 4.34 cm/s^2 , 5.83 cm/s^2 , 5.40 cm/s^2 であった。一方温度履歴の影響を与えていない加速度計の差分標準偏差の値は,, 加速度60galの時刻歴波形でそれぞれ 2.74 cm/s^2 , 1.49 cm/s^2 , 1.88 cm/s^2 であり, 加速度250gal, 630galの時刻歴波形では, 4.72 cm/s^2 , 2.01 cm/s^2 , 2.89 cm/s^2 観測されている。加速度60galの時刻歴波形の場合は差分標準偏差の値は概ね一致しているが, 温度の影響を与えた加速度計の差分標準偏差は, 温度影響のない加速度計に比べて2倍程度高い値を示した。

4. 加振条件での時刻歴波形について, 温度履歴の影響を与えた加速度計と与えていない加速度計の波形形状は概ね一致していた。14日目の無加振時刻歴波形ではドリフトが観測されていたが, 加振時にはドリフトなどの温度履歴の影響を確認することが出来なかった。差分標準偏差の値が同程度を示したことから, 加振の時刻歴波形において温度履歴依存性の影響は確認されなかったといえる。
5. 加振時の加速度フーリエ振幅スペクトルについて, 加振実験日が異なるフーリエ振幅スペクトルでは, 卓越振動数の裾野の部分に違いが見られた。これは, 加速度フーリエスペクトル振幅比から温度履歴の影響ではなく, 小型振動台は同一加振条件を入力できていない要因である可能性が高い。
6. 無加振条件での時刻歴波形について, 温度の影響を与えた加速度計の差分標準偏差の値は, 2日目, 14日目それぞれ 12.47 cm/s^2 , 8.75 cm/s^2 であった。一方温度履歴の影響を与えていない加速度計の差分標準偏差の値は, どちらも 1.12 cm/s^2 と観測されている。温度の影響を与えた加速度計の差分標準偏差は, 温度影響のない加速度計に比べて8倍から12倍程度高い値を示した。
7. 無加振条件での時刻歴波形について, 温度の影響を与えた加速度計全てにドリフト現象が生じた。
8. 加振条件での時刻歴波形について, 温度の影響を与えた加速度計の差分標準偏差の値は, 加速度60galの時刻歴波形で2日目, 14日目それぞれ 5.76 cm/s^2 , 2.40 cm/s^2 , であり, 加速度250gal,630galの時刻歴波形では2日目, 14日目それぞれ 4.17 cm/s^2 , 6.25 cm/s^2 であった。一方温度履歴の影響を与えていない加速度計の差分標準偏差の値は, 加速度60galの時刻歴波形でそれぞれ 1.43 cm/s^2 , 1.45 cm/s^2 であり, 加速度250gal, 630galの時刻歴波形では, 2.06 cm/s^2 , 2.06 cm/s^2 観測されている。差分標準偏差の値が同程度を示したことから, 加振の時刻歴波形において温度依存性の影響は確認されなかったといえる。
9. 加振時の加速度フーリエ振幅スペクトルについて, 無加振条件時に確認されたドリフトなどの温度特有影響は加振条件時には, 観測されなかった。
10. 本実験環境, 実験条件下では, 観測記録に有意な差を与えるほどの温度履歴や温度影響は確認されなかった。

全体を通して, 新たに振動計を開発する際には, 加速度計とマイコンを別基板で構成することで, 加速度計が本来のスペックどおりの性能を発揮できることが明らかとなった温度特性については本実験条件において, 橋梁モニタリングシステムに適用可能な性能を有していることが確認された。