

# 技術紹介

## 2 構造物ヘルスモニタリング向け加速度計 JA-70SA の開発

### Development of JA-70SA MEMS Accelerometer for Structural Health Monitoring

市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター 主任
松崎 政彦	Masahiko Matsusaki	商品開発センター
田村 博規	Hironori Tamura	商品開発センター
富岡 昭浩	Akihiro Tomioka	商品開発センター シニアマネージャー

キーワード: 加速度計、MEMS、構造物ヘルスモニタリング、変位推定

Keywords: accelerometer, MEMS, Structural Health Monitoring, displacement estimation

#### 要 旨

航空電子ではサーボ型加速度計を慣性航法装置や地震・防災機器、油田掘削など高い精度が要求される用途に提供していますが、サーボ型加速度計は比較的高価であり、構造物ヘルスモニタリングなど加速度計の設置数が多い用途では、より低価格であることが要求されます。そこで、航空電子の特徴である高精度と小型・低価格を特徴とする MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる半導体技術を融合し、構造物ヘルスモニタリング用途向けに高精度 MEMS 加速度計 JA-70SA を開発してきました。

本稿では JA-70SA の仕様と構造を紹介し、JA-70SA が変位推定へ応用可能か実験を行いましたのでご報告します。

#### SUMMARY

JAE has the high-accuracy servo accelerometer product which originated from inertial navigation system for aircraft, seismic and oil drilling. In structural health monitoring, it is difficult to use many high-accuracy accelerometers since a servo accelerometer is generally expensive.

Therefore JAE is developing the high-accuracy MEMS accelerometer "JA-70SA" for structural health monitoring by taking the high accuracy which is the feature of JAE, and the budget prices which are the features of MEMS.

In this paper, we introduce the specification and structure of JA-70SA, report confirming applicability of displacement estimation.

## 1. まえがき

近年、センサを利用して構造物（橋梁、高架道路、トンネル、プラント、建築物等）の老朽化や地震の影響等による特性変化を的確に捉えて診断を行い、構造物の保全活動につなげる構造物ヘルスモニタリングへのニーズが急速に高まりつつあります。構造物の振動状態を監視するような用途ではセンサの設置数が多いため、小型・低価格を特徴とする MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる半導体技術を用いた加速度計が注目を集めています。しかし、MEMS 加速度計は精度が低く構造物ヘルスモニタリングに適用する上で様々な課題があります。

1 つはノイズの問題です。構造物ヘルスモニタリングでは定期的に構造物の状態を監視する必要があるため、偶発的に起こる地震や風による構造物への強い加振が期待できない環境にあってもモニタリングを実施しなければなりません。しかし、一般的な MEMS 加速度計はノイズが大きく有感地震程度の振動が印加される環境でなければ正しいデータを得ることができません。

2 つ目は温度特性の問題です。橋梁のひずみ等を加速度計の出力から算出する用途では、センサの感度やバイアスの変動すると計算結果に大きな誤差を生じさせます。従来の MEMS 加速度計は温度による出力変動が大きいため変位計測の用途での使用は不向きでした。

そこで、MEMS 技術によるセンサ素子に高精度加速度計で培われた回路・実装技術を応用することでノイズと温度特性の問題を改善し、構造物ヘルスモニタリング用途向けに高精度 MEMS 加速度計 JA-70SA (図 1) を開発してきました。本報告では今回開発した JA-70SA のノイズ性能と温度特性についてご紹介し、変位推定へ応用した結果について報告します。



図 1. JA-70SA の外観

## 2. JA-70SA 概要

### 2.1 仕様

JA-70SAの主な仕様を表 1 に示します。特筆すべきはノイズ性能であり、低ノイズを実現するためセンサ素子の静電容量感度が大きくなるよう電極構造を工夫し、回路自身が発するノイズの影響を低く抑えるため検出回路の各段の増幅率を1に設定する構成としました。この結果、自己ノイズはサーボ型加速度計JA-5 シリーズと同程度の  $9.8 \times 10^{-6}$  (m/s<sup>2</sup>) rms/√Hzを達成することができました。

バイアス温度係数についても一般的に高精度といわれる  $\pm 1961 \mu$  (m/s<sup>2</sup>)/°Cを達成することができました。温度変化によってパッケージから受ける応力を緩和させる実装技術を用いることで温度特性を向上させました。これら2つの性能については詳細を次項に記載します。

JA-70SA はビルなどの建築物の挙動を容易にモニタリングできるよう3軸一体型のパッケージにしました。3軸方向の加速度を計測するために最新の実装技術を用い3個の独立したセンシング素子を小型のアルミダイキャスト筐体にパッケージングすることで小型化を実現しました。更に実使用環境を考慮してケーブルの引き出し部には IP67 のケーブルクランプを用い防塵・防水性能を向上させました。

表 1. JA-70SA の主な仕様 (25 °C、電源電圧:  $\pm 5$  VDC)

感度	V/(m/s <sup>2</sup> )	2.0 $\pm 5\%$ 以内
バイアス	m/s <sup>2</sup>	X, Y 軸: $\pm 0.98$ 以内 Z 軸: $-9.81 \pm 0.98$
アライメント	mrاد	$\pm 20$ 以内
計測範囲	m/s <sup>2</sup>	X, Y 軸: $\pm 19.6$ 以上 Z 軸: $-9.8 \sim +29.4$
感度温度係数	ppm/°C	$\pm 200$ 以内
バイアス温度係数	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )/°C	$\pm 1961$ 以内
自己ノイズ	(m/s <sup>2</sup> )rms/√Hz	$9.8 \times 10^{-6}$ 以下
周波数特性	Hz	200 以上
電源電圧	V(DC)	$\pm 5$
消費電流	mA	17 以下

## 2.2 ノイズと温度特性

図 2 はダイナミックシグナルアナライザを使い、除振台の上に設置したJA-70SAのノイズ密度を計測した結果です。1 Hz付近でノイズ密度が  $9.8 \mu (\text{m/s}^2)\text{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$  を下回っていることが分かります。従来のMEMS加速度計では常時微動といわれる風や河川の流れなどの自然現象や、交通振動など人工的な要因による地盤の僅かな揺れは計測できませんでしたが、常時微動が観測できれば従来はノイズに埋もれていた情報を構造物の応答データとして使用することでモニタリングと診断のサイクルが増え、構造物診断の精度向上に寄与すると考えられます。今回開発したJA-70SAはそうした常時微動の検出を可能とし、従来計測ができなかった微弱振動の検出により今までにない活用が期待されます。また、加振に対する応答を観測するような用途においても大がかりな加振装置を必要としない為点検の効率化、省力化も期待できます。

図 3 は 10 台 (30 軸分) の  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  でのバイアス変動量 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  のバイアスを基準としたとき) を示したデータで、このデータを1次近似したものがバイアス温度係数になります。全温度範囲でバイアスの変動が  $\pm 10\text{ mG}$  以下と非常に小さく、安定性に優れていることがわかります。橋梁のひずみ等を加速度計の出力から算出する用途では、センサの感度やバイアス変動すると計算結果に大きな誤差を生じさせるため、温度による出力変動が小さいことは非常に重要です。JA-70SA は温度によるバイアス変動が小さく、変位計測の用途に加えて従来のMEMS加速度計では不可能であった傾斜センサや地滑りセンサといった長期間の観測が必要な分野への応用も可能であると考えています。

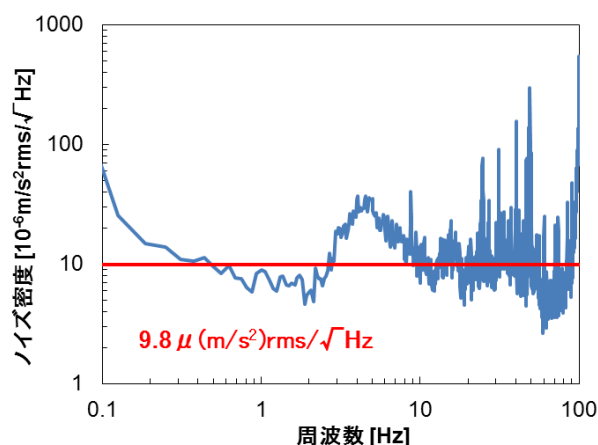


図 2. JA-70SA の自己ノイズ

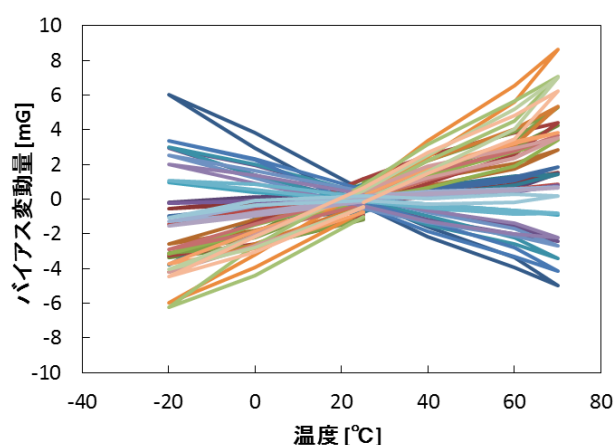


図 3. 温度に対するバイアス変動量

## 3. 変位推定への応用

### 3.1 加速度計による変位推定への期待

トラックが通過したときの橋梁のひずみや地震時のビルの振動振幅などは、構造物の健全性を評価する上で有効な指標となる可能性があります。現在は変位計測にレーザ変位計を用いることが多いですが、川幅の広い河川や海峡に架かるスパンの長い橋桁などは計測対象点近くに設置スペースがない為、計測対象点までの距離によって精度が変わるレーザ変位計は巨大構造物の高精度計測に課題がありました。

そこで、設置環境に左右されない加速度計を用いた変位推定が期待されています。しかし、加速度計を時間積分して変位を推定する場合、加速度計のもつ僅かな出力変動でも積分値が大きく変わってしまうため、バイアスの安定性が非常に重要となります。JA-70SA はバイアス温度係数が低いためバイアスの安定性があり変位推定への応用が期待できます。本章では、JA-70SA が変位推定へ応用可能か検証した実験について報告します。

### 3.2 実験結果

橋桁を模した長さ 600 mm 幅 50 mm のプラスチック製の板の中心に加速度計を固定し、おもりを載せたときの板のたわみ量を推定する実験を行いました(図 4)。たわみ量は振動のない計測開始から 2 秒間の加速度データの平均値からバイアスを補正し、出力を線形加速度法によって時間積分することで算出します。バイアス補正と線形加速度法のみで変位を算出することができれば、計測終了後にフーリエ変換等の処理を必要としないのでリアルタイムで変位の計測が可能になり、計測現場で即座に構造物診断の結果を知ることができます。

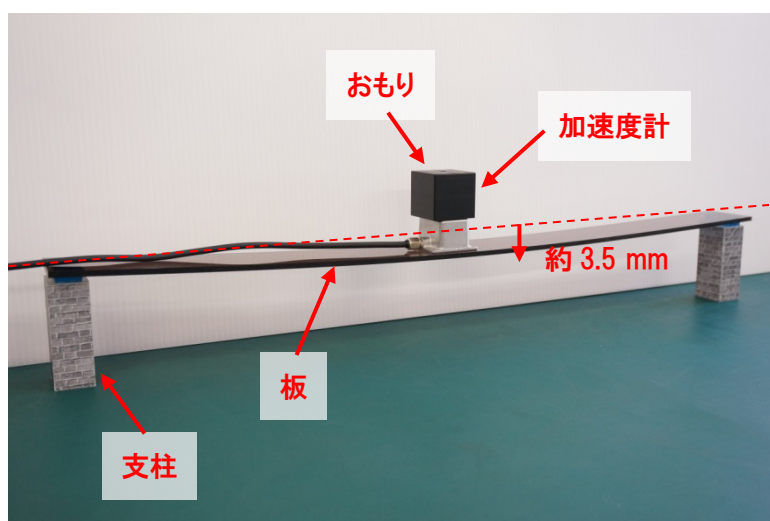


図 4. 変位推定実験のセッティング

JA-70SA で計測した加速度の時系列データを図 5 に、時間積分による変位推定結果を図 6 に示します。おもりを載せた時に変位が 3.5 mm 下がり、おもりを取り除いた時に再び変位が 0 に戻っていることがわかります。線形加速度法を用いて板のたわみ量を推定した値が実際に計測したときの値 3.5 mm と一致しており、JA-70SA が変位推定に応用可能であることがわかりました。

今回の実験はおもりを載せるという単発的な加速度入力であり、実際の構造物では振動の振幅、周波数も様々でバイアス補正と線形加速度法のみでの変位推定の実用化にはまだ課題がありますが、図 6 では微小な変位が明瞭に読み取れており、変位の分解能が非常に高いことが予想できます。あらゆる振動に対応できる積分手法を見出すことで、JA-70SA はあらゆる橋梁に対し精密な変位計測を提供できるものと考えています。

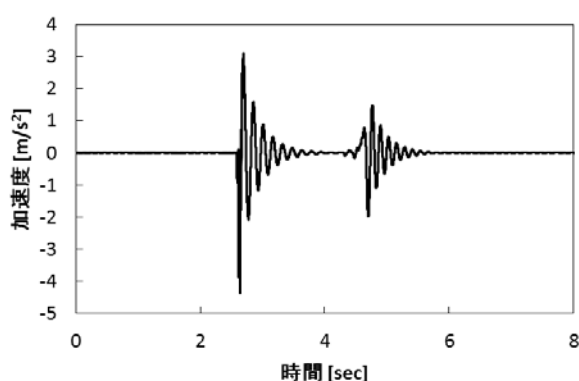


図 5. 加速度の計測結果

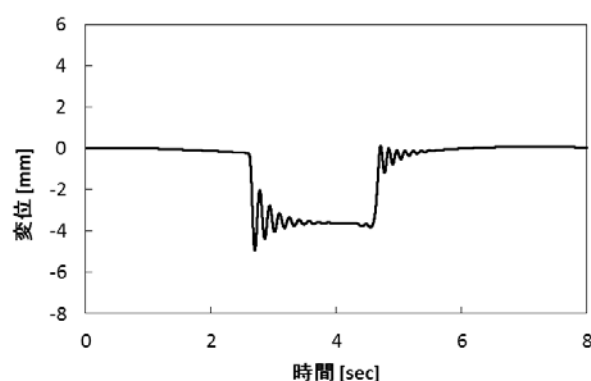


図 6. 変位の推定結果

## 4. むすび

今回の実験では、JA-70SA で計測した加速度データにバイアス補正と線形加速度計法による時間積分を行うことで正確に変位を求めることができました。これは JA-70SA が従来なかった精度の高いリアルタイム変位計測に応用できる可能性を示しています。今後も、航空電子が長年培ってきた高精度加速度計の技術と MEMS 技術の特徴である量産性を生かし、精度の高い振動計測や変位計測を可能にすることで構造物ヘルスマニタリング分野に貢献していきます。