

技術紹介

3

高精度 MEMS 加速度計の開発

Development of High Accuracy MEMS Accelerometer

市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター
林 泰之	Yasuyuki Hayashi	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, 常時微動

Keywords: Accelerometer, MEMS, Structural Health Monitoring, Microtremor

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の多い用途では、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 MEMS の特徴である低価格を融合し、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-M シリーズを開発してきました。

本稿では試作品の温度特性とノイズ密度を評価し、実際の橋梁で常時微動を測定することで構造物ヘルスモニタリングへの適正を確認しましたので紹介します。

SUMMARY

JAE has a series of high-accuracy servo accelerometer products, which originated from inertial navigation system for aircraft, providing the system of seismic and oil drilling, as well. Considering the extension to other applications of the system, it is predicted that the high-accuracy accelerometers has some difficulties due mainly to a cost problem. Therefore, we have been concentrating our efforts on developing the high-accuracy MEMS accelerometer "JA-M" for structural health monitoring by taking the high accuracy that is our technology of features in JAE, and the budget price that is one of the excellences of the MEMS.

In this report, we enclose that JA-M has been found to be effective for the structural health monitoring by a measurement of microtremor on an actual bridge, through the evaluation of a scalefactor temperature coefficient, a bias coefficient, and a noise density.

1. まえがき

近年、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる半導体技術により小型で低価格な加速度計が製品化され、エアバッグ用の衝撃検知、携帯電話や小型ゲーム機の姿勢検知など様々な用途で使用されています。一方、航空電子では石英ガラスフレクチャを採用したサーボ型加速度計JA-5シリーズ⁽¹⁾が製品化されて以来、慣性航法装置や地震・防災機器、油田掘削などの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、構造物ヘルスマ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MEMSの特徴である低価格を融合し、構造物ヘルスマモニタリング用途向けに高精度MEMS加速度計JA-Mシリーズを開発してきました。

本報告では今回開発したJA-Mシリーズの加速度検出原理と構造の特徴、試作品の評価結果について報告します。

2. 目標性能

試作品の目標性能を表1に示します。サーボ型加速度計JA-5シリーズと同程度の性能を目標とし、 ± 15 Vであった電源電圧を ± 5 Vに下げ消費電力の削減を目指しました。

表1 試作品の目標性能

感度	V/g	2.0 $\pm 5\%$ 以内
バイアス	mg	± 10 以内
アライメント	°	± 1 以内
感度温度係数	ppm/°C	± 200 以内
バイアス温度係数	$\mu\text{g}/^{\circ}\text{C}$	± 100 以内
自己ノイズ	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	1 以下
周波数特性	Hz	200 以上
電源電圧	V	± 5
消費電流	mA	10 以下

3. 構成

3.1 検出原理

一般に精度の高い加速度計では、可動部と固定部の間隔が加速度により変化することで対向電極の容量を変化させる図1のような構造が採用されています。この構造で感度を上げるためには間隔 d を小さくするのが最も効率的ですが、間隔を小さくするとエアダンピングの影響が大きくなり周波数特性が悪化します。本開発品ではダンピングの影響がない検出方式を採用しました。検出原理を図2に示します。対向面積が変化して容量を検出するタイプの加速度計は一般によく知られていますが、試作品は可動電極と固定電極を分割させて感度を上げることができます。この構造では分割数 n を上げることで感度を上げられるので、周波数特性と感度がトレードオフになることはありません。

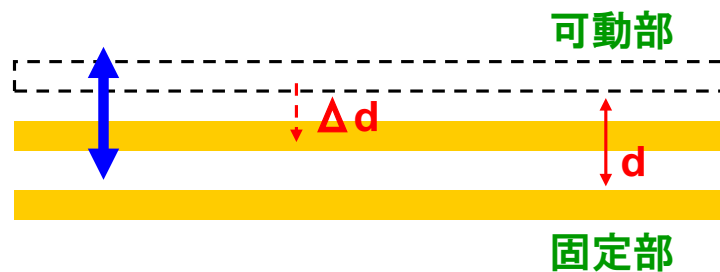


図1 一般的な加速度計の検出原理

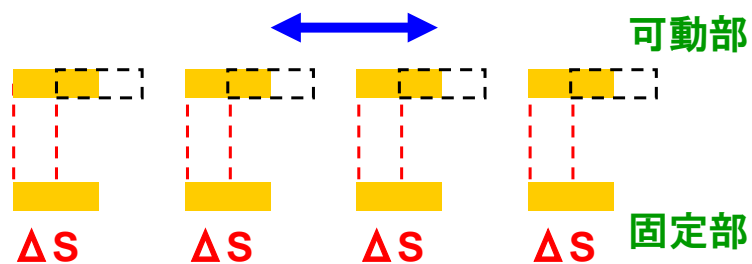


図2 試作品の検出原理

3.2 素子の構造

図3にSOI(Silicon On Insulator)ウェハを加工して作製した素子の詳細図を示します。SOIウェハはギャップとなる酸化膜を両面からシリコンで挟んだ構造をしており、左図には可動電極が形成されるシリコンの層を、右図には固定電極が形成されるシリコンの層を図示しています。可動電極は2つの支持部からそれぞれ2本ずつ設けられた計4本のヒンジで支えられ、矢印の方向に可動します。固定電極は、可動電極が動いたとき容量が増える電極と減る電極で半分に分け差動の電極としました。可動電極と固定電極は感度を稼ぐために100分割以上しています。また、セルフテスト機能を持たせるため可動部両端が櫛歯形状になっており、電圧を印加することで可動電極を駆動することができます。本構造は、ウェハを両面からエッチングし一括作製できるので低コストを実現しています。

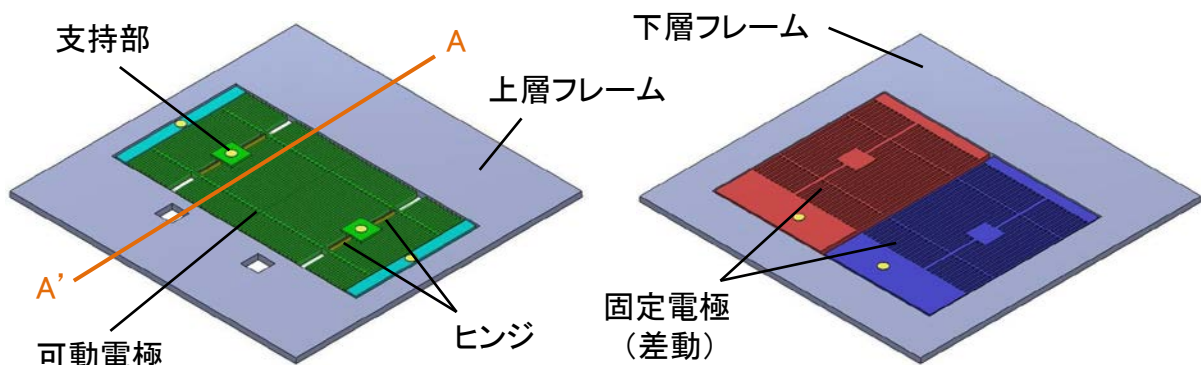


図3 素子の詳細図

本構造の大きな特徴は、温度変化によって受ける応力の影響を最小限に抑えたことにあります。図4に図3の断面図を示します。素子は下層フレームを接着することでパッケージに実装します。したがって、外部から加わる応力は下層フレームに影響を与えます。一方可動電極は下層フレームと直接繋がっていないので、外部応力の影響を受けにくいことがわかります。外部応力の影響を受けにくい構造にすることで、温度特性への効果が期待できます。構造物ヘルスマモニタリングにおいて、長大橋のように周期が数十秒⁽²⁾もある橋の振動を測定する場合、振動による出力変化と温度に対する出力変化を区別するため、温度に対して出力の変動が小さいことが望まれます。

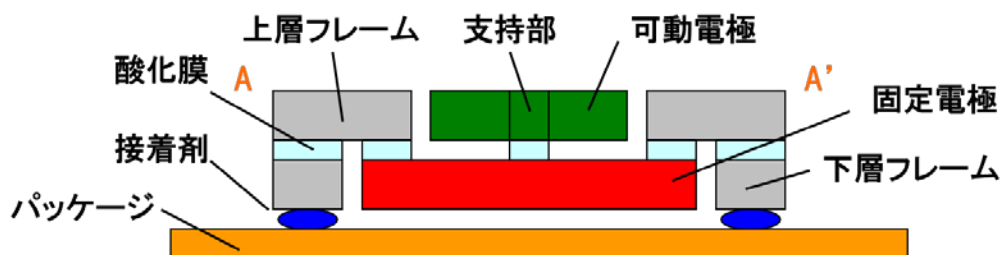


図4 素子の断面図

3.3 検出回路

図5に試作品の検出回路のブロック図を示します。センサ容量にあたるのは第1, 2微分部に含まれるキャパシタで、この2つの容量差を電圧に変換します。低ノイズを実現するため、大きい容量感度を活かして各段の増幅率を1に設定し、温度係数を回路で補正しない構成としました。また、積分部と差動増幅、最終段以外はノイズ源となるオペアンプを使わず、使用を最小限に抑えました。制御部ではマイコンを使用して各種調整を行っています。

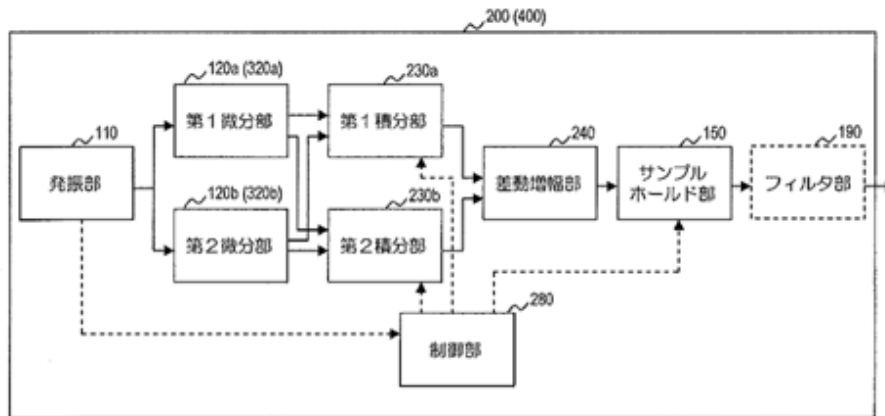


図5 検出回路のブロック図

4. 評価結果

4.1 目標性能の評価

試作品の外観を写真1に示します。サイズは35 mm×30 mmで、素子は金属パッケージに封止されています。

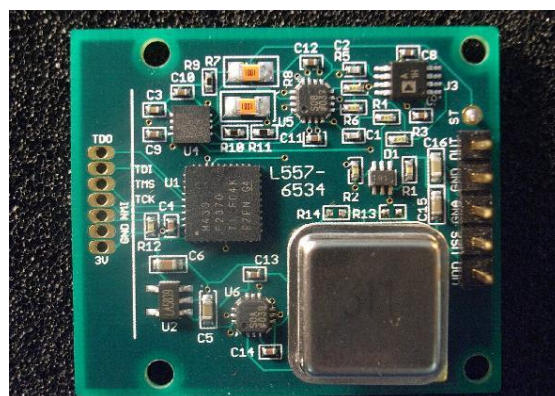


写真1 試作品の外観

設定した目標性能と試作品(S/N:13108)の評価結果を表2に示します。評価の結果、全項目で目標性能を満足することを確認しました。

表2 目標性能と評価結果

項目	単位	目標性能	評価結果
感度	V/g	2.0 ±5% 以内	2.03
バイアス	mg	±10 以内	2.1
アライメント	°	±1 以内	-0.11
感度温度係数	ppm/°C	±200 以内	-51.5
バイアス温度係数	μg/°C	±100 以内	-25.8
自己ノイズ	μg/√Hz	1 以下	0.78
周波数特性	Hz	200 以上	267
電源電圧	V	±5	±5
消費電流	mA	10 以下	5.4

代表的な性能として感度温度係数(図6)、バイアス温度係数(図7)、自己ノイズ(図8)を示します。

図6は、25 °Cを基準とした-10 °C~80 °Cにおける感度の変化をプロットしたデータです。このデータを1次近似したものが感度温度係数で-51.5 ppm/°Cとなります。全温度範囲でも感度の変化は±0.3%以内であるので、温度変化の激しい環境でも誤差の少ない測定が可能です。

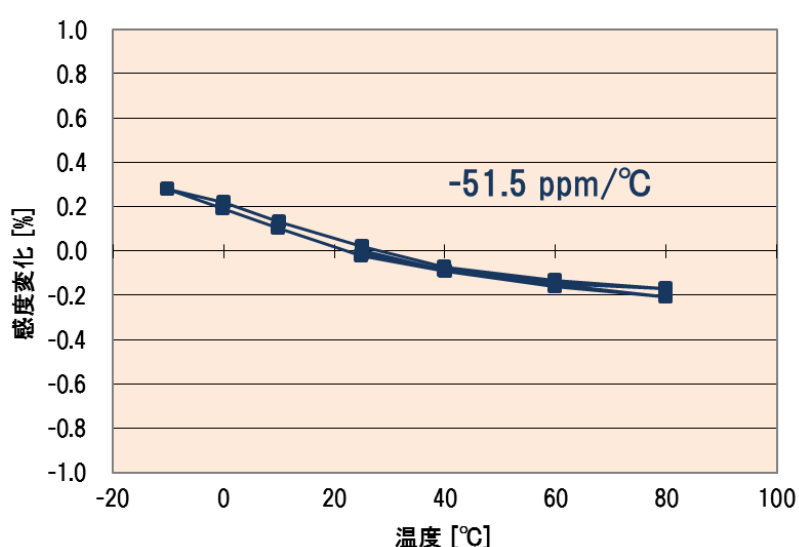


図6 温度に対する感度変化

図7は、25 °Cのバイアスを0としたときの-10 °C~80 °Cでのバイアス変化量を示したデータです。このデータを1次近似したものがバイアス温度係数で $-25.8 \mu\text{g}/^{\circ}\text{C}$ となります。各温度での誤差が非常に小さく、安定性に優れていることがわかります。

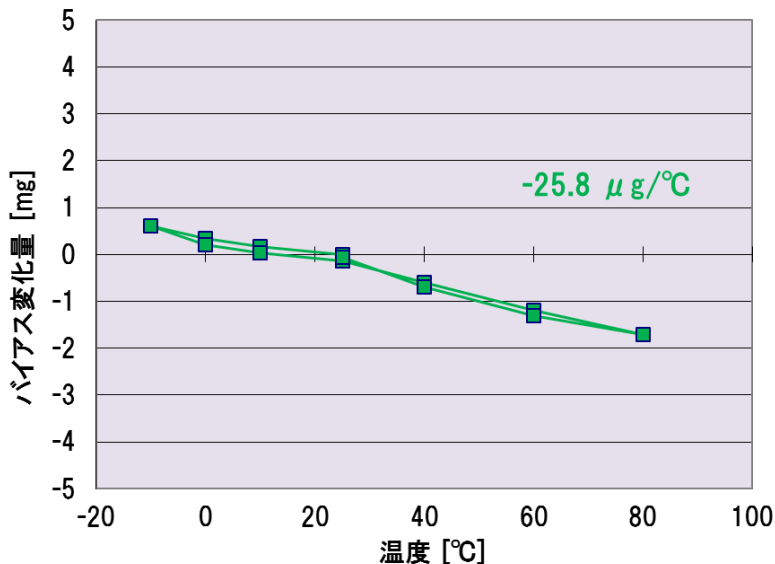


図7 温度に対するバイアス変化量

図8はノイズの低いサーボ型加速度計をリファレンスとして試作品のコヒーレンスを測定した結果です。コヒーレンスとは、リファレンスとの波形の相似性を表しています。青線は開発品のノイズスペクトルで、赤線はサーボ型加速度計のノイズ、黄線はコヒーレンスです。2.8 Hzより低域はコヒーレンスが0.8以下で両者の相関がとれなくなっています。このとき試作品のノイズ密度は $0.79 \mu\text{grms}/\sqrt{\text{Hz}}$ でこれを自己ノイズと言います。試作品は自己ノイズが低く常時微動のような微小な振動でも高精度に検出することができます。

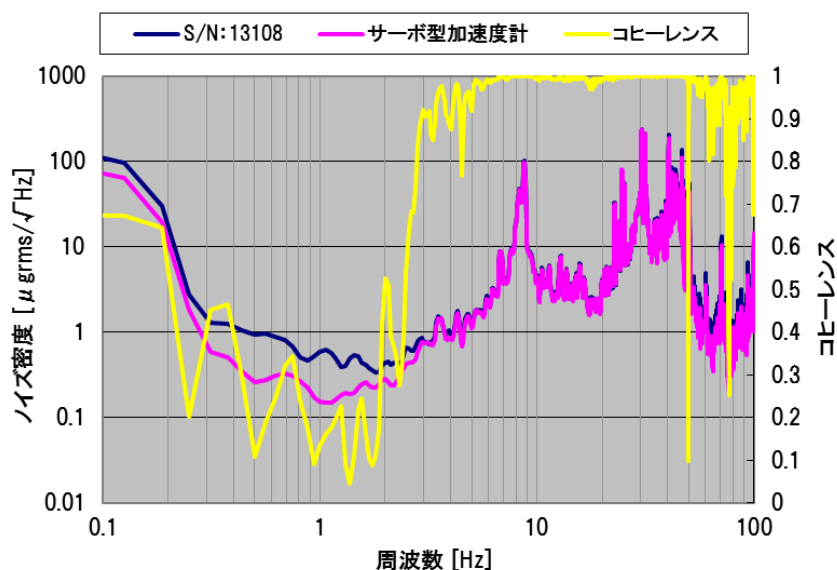


図8 自己ノイズの測定結果

4.2 常時微動の計測

図9は実際の橋梁(桁長約30 m)の振動をフーリエ解析しスペクトルを観測した例です。10 μg 程度のピークでも明瞭に判定することができ、高次モードの卓越振動数を容易に得ることができます。

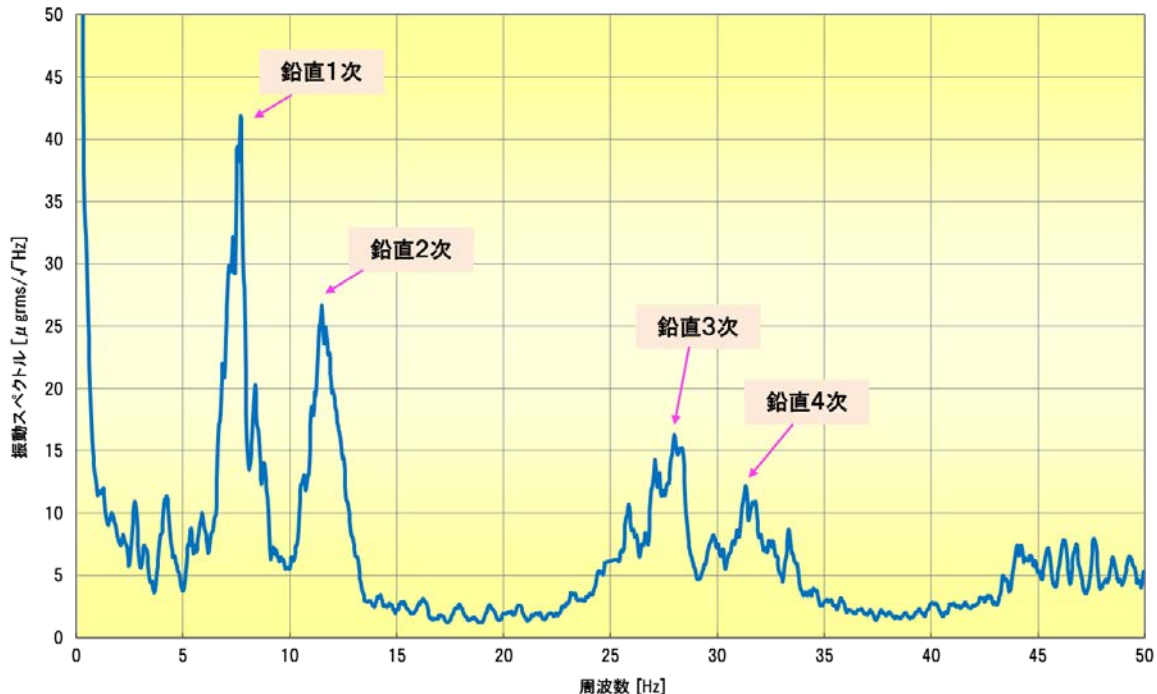


図9 常時微動の振動スペクトル

5. むすび

今回、MEMS 技術と低ノイズ回路技術で高精度 MEMS 加速度計を開発し、構造物ヘルスマonitoringに応用可能であることが実証できました。今後は、製品化に向けて耐環境性の向上とともに使用温度範囲の拡大を図ります。

最後に、橋梁の常時微動測定において助言を頂きました(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センターの皆様に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 安藤芳之、倉本健次:“航空電子の加速度計製品群と使われている技術について,”航空電子技報 NO.33(2010)
- 2) 宮田利雄 ほか:“明石海峡大橋常時微動データからの振動特性同定,”土木学会第 58 回 年次学術講演会,p.1283-1284(2003)