

技術紹介

4

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

The Development History and Technology Feature of JAE Servo Accelerometers

安藤 芳之

Yoshiyuki Ando

航機事業部 第二技術部 シニアマネージャー

倉本 健次

Kenji Kuramoto

航機事業部 第二技術部 シニアマネージャー

キーワード： サーボ型加速度計, クローズドループ, 石英ガラス

Keywords: servo accelerometer, closed loop, fused quartz

要 旨

航空電子のサーボ型加速度計には航空機の慣性航法装置用から発展した高精度のJA-5シリーズと産業機器向けに普及を図った製品シリーズがあります。それぞれその高い安定性や低価格のメリットを活かして進化を続け、30年近いロングセラーの製品群となっています。

本稿では航空電子のサーボ型加速度計における各製品群の歴史と特長、および今後の取組みを紹介します。

SUMMARY

JAE has two groups in servo accelerometer product line. One is the high-accuracy JA-5 series which originated from inertial navigation system for aircraft and the other is the low-cost product series which was developed for industrial instruments. Both groups have evolved into thirty-years long-selling products by taking advantage of their merits such as excellent stability or reasonable price.

This report describes the development history, the main feature and future plan of JAE servo accelerometer product groups.

1. まえがき

航空電子のサーボ型加速度計には大きく分けて2タイプあります。高精度のJA-5シリーズは1982年に航空機の慣性航法装置用⁽¹⁾として販売を開始して以来、傾斜・振動計測、地震・防災機器、油田掘削などの高い安定性を要求される様々な用途で派生製品を生み、累計販売台数が10万台以上のロングセラーの製品となっています。一方、サーボ型加速度計のメリットをより低価格で実現したMA-101をはじめとした製品シリーズも振動、傾斜計測、地震・防災などの産業機器分野で累計5万台以上の販売台数を数えています。

本稿では航空電子のサーボ型加速度計の特長と、そこで使われているキー技術について述べ、さらに今後の製品化への取り組みを紹介します。

2. サーボ型加速度計の特長と原理

サーボ型加速度計の特長は以下のとおりです。

- (1) 直線性、分解能が優れ、高精度です。また、広いダイナミックレンジを有しています。
- (2) 感度温度係数及びバイアス温度係数が小さく、性能の安定性に優れています。
- (3) DC成分あるいは低周波数領域の特性が優れています。
- (4) 自己診断可能なセルフテスト機能を有しているものもあり、外部より簡単に作動確認が行えます。

サーボ型加速度計の動作原理を整理すると次のとおりです。(図-1参照)

- (1) 加速度計に加速度(重力加速度も含む)が加わり、慣性力により、振子の変位します。(図の①~②)
- (2) この振子の変位を変位検出部が検出し、電気信号としてアンプで増幅してトルカ部のコイルにフィードバック電流として流します。電流と磁界により発生した駆動力で振子を元の位置に戻して保持しつづけます。(サーボ機能、図の③~⑤)
- (3) 加速度により振り子に生じる力と駆動力を釣り合わせるためにトルカに流れる電流の大きさが加速度に比例するため、この電流を加速度計の出力信号として読み取ります。(図の⑥)
(既知の一定加速度印加時に流れる電流が加速度計の感度[mA/(m/s²)] となります。)

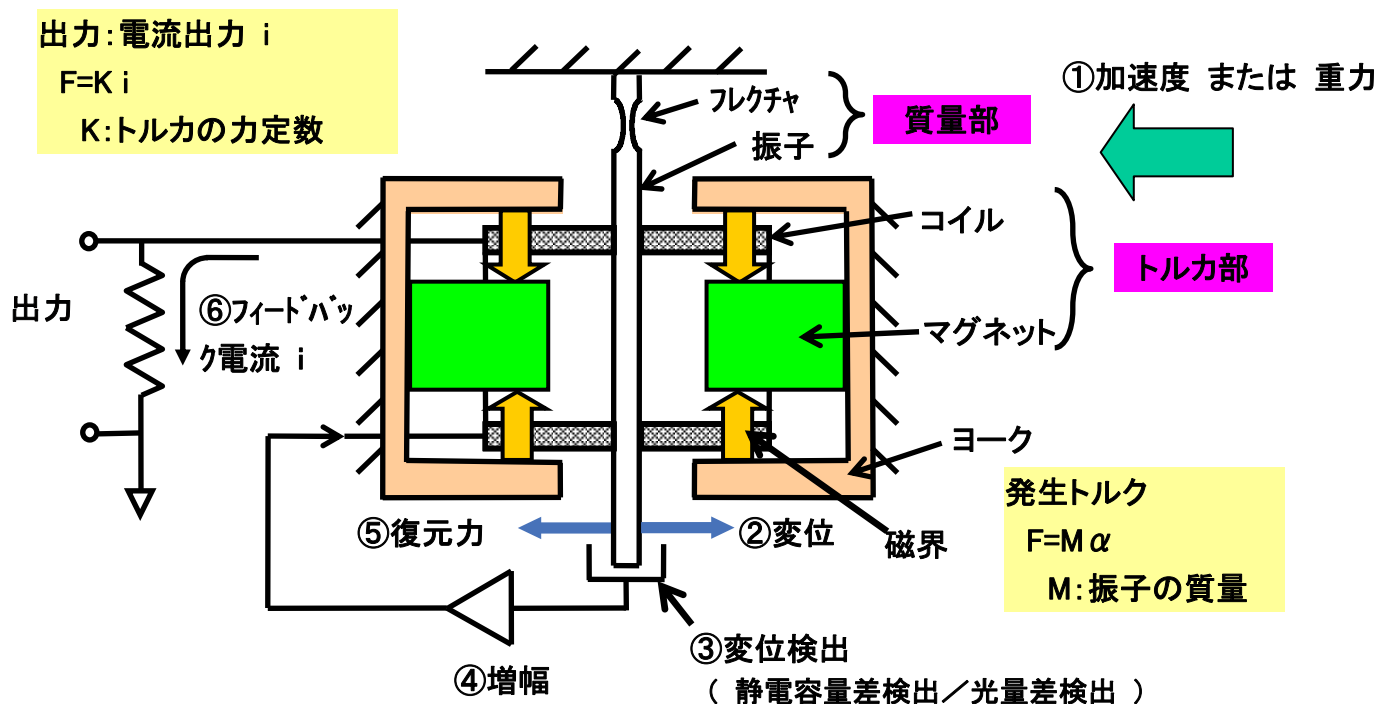


図-1 サーボ型加速度計の原理

3. 航空電子のサーボ型加速度計

3.1 航空電子サーボ型加速度計の歴史

本項では航空電子の加速度計の製品群を振り返りたいと思います。

図-2に航空電子のサーボ型加速度計の開発経緯を示します。

航空電子は今まで、次のような加速度計の開発を行なってきました。

まず、高精度・高耐環境用途として、高い加工精度を有した振子一体型の石英ガラスフレクチャを採用し、その低い線膨張係数を活かす周辺部品の材料や精度にも配慮した加速度計を次のように製品化してきました。

- 慣性航法装置を始めとする極めて高い精度と安定性を追及した加速度計：
 - 応用例 : 航空・宇宙用機器等における位置や速度の計測
 - JA-5V、JA-5Ⅲシリーズ
- 温度変化に対する安定性を維持しつつ、低周波領域の低ノイズ化を図った加速度計：
 - 応用例 : 地下に埋設された地震観測網^(2,3)における地震計測
 - JA-40GAシリーズ
- 過酷な振動・衝撃や高温環境における計測に特化した加速度計⁽⁴⁾：
 - 応用例 : 油田掘削における掘削方向の計測

温度 175℃ 衝撃 1,000G 振動 20Grms JA-5H175シリーズ

- 前出の過酷な環境における計測でさらに小型化を迫った加速度計⁽⁵⁾：

応用例 : 油田掘削におけるドリル近傍の振動計測や掘削方向の計測
JA-25GAシリーズ

また、ローコストタイプの金属フレクチャを用いた加速度計としては、次のような加速度計も製品化してきました。

- 振動計測や制御用として廉価性を迫った加速度計：

応用例 : 震度計測、振動計測

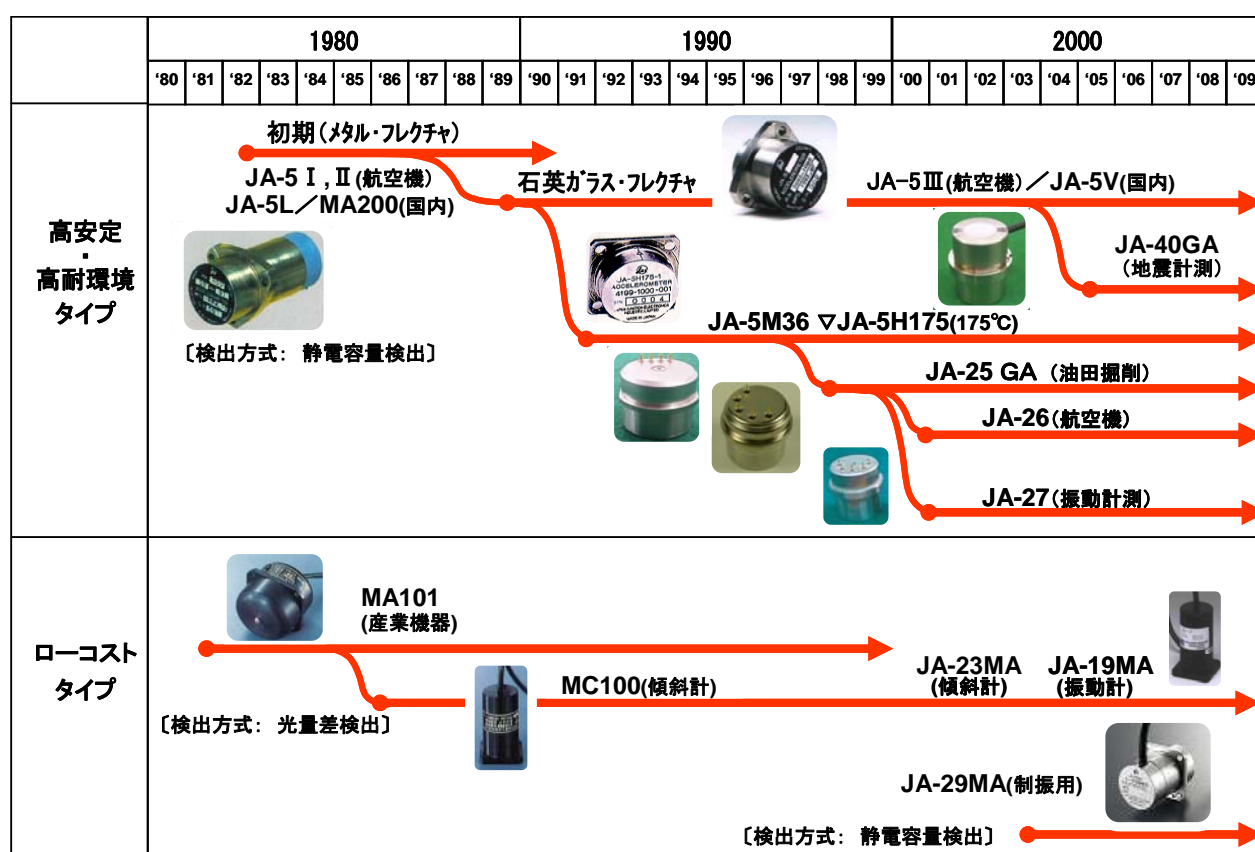
JA-19MAシリーズ

- 比較的安定した温度環境での使用を前提に、低周波領域の低ノイズ化と平坦な周波数特性を迫った加速度計：

応用例 : 露光装置等の制振台制御用センサ

JA-29GA⁽⁶⁾シリーズ

このように、航空電子は過去来、お客様のニーズに同期して製品開発を行なってきました。




●印: 販売開始時期

図-2 航空電子のサーボ型加速度計開発経緯

3.2 サーボ型加速度計製品ラインナップ

以下の表－1に航空電子のサーボ型加速度計の主な製品のラインナップ(仕様一覧)を示します。

表－1 航空電子の主なサーボ型加速度計の仕様一覧

			高精度・高安定用			高耐環境用		ローコスト用	
			JA-5V	JA-5Ⅲ	JA-40GA	JA-5H175	JA-25GA	JA-19MA80	JA-29MA
項目	単位								
機能	出力形態		電圧	電流	電圧	電流	電流	電圧	電圧
計測範囲	± m/s ²		0.981～147.1	196	19.6～78.4	39.2	39.2	39.2	19.6
	[± G]		[0.1～15]	[20]	[2～8]	[4]	[4]	[4]	[2]
感度 (ノミナル値)	1/(m/s ²)		10.2～0.041 V	0.136 mA	0.51～0.102 V	0.306 mA	0.133 mA	0.2039 V	0.51 V
	[1/G]		[100～0.4 V]	[1.33mA]	[5～1 V]	[3.0 mA]	[1.3 mA]	[2V]	[5V]
バイアス温度係数		± μ(m/s ²)/°C [± μG/°C]	686～1471 [70～150]	98.1～294 [10～30]	981 [100]	1471.5 [150]	981 [100]	2940 [300]	9810 [1000]
周波数応答		Hz	DC～500	DC～300	DC～200	DC～500	DC～600	DC～120	DC～300
分解能		± μm/s ² [± μG]	9.81 [1]	9.81 [1]	6.9 [0.7] (注 3)	9.81 [1]	9.81 [1]	49 [5]	6.9 [0.7] (注 3)
耐環境性	温度	°C	－20～75	－54～96	－20～70	－40～175	－40～175	－25～70	0～60
	衝撃	m/s ² × ms	981 × 11	981 × 11	981 × 11	14710 × 0.5	14710 × 0.5	981 × 11	981 × 11
	(注 1)	[G × ms]	[100 × 11]	[100 × 11]	[100 × 11]	[1500 × 0.5]	[1500 × 0.5]	[100 × 11]	[100 × 11]
電源電圧		± V(DC)	12～18	15±5%	15	12～18	12～18	15	15
外形寸法 (注 2)		mm	Φ25.5 × 40	Φ25.5 × 29.7	Φ25.4 × 33.2	Φ25.4 × 21.6	Φ19.0 × 15.5	Φ25.0 × 39.0	Φ25.0 × 40.0
質量		g	75 (注 4)	80	115 (注 5)	50	20	60	190 (注 6)
セルフテスト機能		-----	有	有	有	有	無	有	有
フレクチャタイプ		-----	石英ガラス					金属	
特徴			バイアスの経年変化が少ない 耐振動/衝撃性に優れ、高温対応も可能					安価	
主な用途			高精度加速度計測 高精度振動・傾斜計測		地震計測	油田掘削用傾斜計測		地震計測	振動制御

注 1. 衝撃は半正弦波とする。

注 2. フランジ寸法を除く。

注 3. JA-40GA 及び JA-29MA の単位は、 $(\text{ m/s}^2)/\sqrt{\text{ Hz}}$ [G/ $\sqrt{\text{ Hz}}$]で示す。

注 4. ホッティング及びケーブルを除く。

注 5. 1m標準ケーブル付

注 6. 4m標準ケーブル付

4. 製品に応用されている設計技術

航空電子のサーボ型加速度計に応用されている技術のキーポイントについて述べます。

4.1 フレクチャ設計技術

航空電子のサーボ型加速度計は用途によって2種類のフレクチャを用いています。一つは石英ガラスで高安定・高耐環境タイプ用です。もう一つはメタル(金属)でローコストタイプ用です。

ここで、加速度計にとって理想的な振子とは・・・、振子がバネ定数ゼロの状態を支えられることといえます。

しかし、現実的にバネ定数ゼロの状態で保持することは不可能なため、あるバネ定数で振子を保持することになり、これを実現するのはフレクチャの部分となります。

加速度計の原理から分かるとおり、このフレクチャ部分の変形等による変化は、振子の位置変化をもたらし、加速度計の性能に直接影響を与えます。したがって、このフレクチャの部分の変化を如何に少なくするかが技術的なキーポイントといえます。

先に述べたとおり高安定高耐環境タイプ用ではフレクチャに石英ガラスを使用しています。石英ガラスは非晶質のため、多結晶の金属バネ材のようにクリープと呼ばれる結晶同士のズレによる微小変形が発生せず、また、金属より1桁小さい線膨張係数を持つ優れたバネ材です。そのため加速度計に用いるとバイアス(零点不平衡)の安定性や温度係数などの性能が格段に向上します。

ただし、石英ガラスは加工しにくい素材であり、所望のバネ定数を維持するために、設計どおりに均一な寸法で生産する必要があり、フレクチャの設計ノウハウや安定した生産技術がキーポイントとなっています。

また、高安定・高耐環境タイプと異なるローコストタイプには、フレクチャに加工し易い一般的な金属のバネ材料を用いており、ここでも金属固有の微小変形や線膨張係数を軽減するためのフレクチャ設計技術が生かされています。

4.2 磁気回路設計技術

2項で述べたとおり、サーボ型加速度計は、加速度が印加された場合に振子を元の位置に戻すため、トルカに加速度と釣り合う駆動力を発生させなければなりません。その駆動力の大きさは磁気回路の空隙に生じる磁界の強さと、その空隙に配置されたコイルに流れるフィードバック電流の大きさで決定されます。既知の一定加速度と釣り合うための電流の大きさが加速度計の感度となりますので、感度を安定させるためには磁界の強さを安定させる必要があります。特に高温になると、磁気回路を構成するマグネットとヨークに用いられる磁性材料の磁気特性が急激に低下するため、材料の磁気特性が低下しても磁界の変化をできるだけ少なくするように磁気回路を設計しています。

実例として、2009年度に取り組んだ高温用加速度計の感度温度特性の改善について紹介します。図-3(上段)は高温用加速度計の感度温度特性を示しており、縦軸は25℃を基準とした感度の変化量(%)を示します。感度の変化率が175℃以上で大きくなっていることが分かります。通常感度の温度変化については必要に応じて、コンピュータで温度補正し精度を上げて使用しますが、特性が急峻である場合は補正が十分に行えない可能性があるため、比較的緩やかな変化であることが必要となります。図-3(下段)に3次曲線で補正した後に残る誤差(温度補正残差)を示します。改善前は感度変化が175℃以上で大きくなっているために、3次曲線では十分な補正ができず、温度補正残差が2,000ppmありました。そこで、高温で磁束がヨークを飽和しないように磁気回路を改善しました。その結果、高温における感度の変化曲線が緩やかになり、200℃における感度の変化量も改善前に比べ、0.7%(3.2%から2.5%へ)低減されていることが分かります。また、下段の図では、変化曲線が緩やかになったことにより、3次曲線でも補正が十分に可能となり、温度補正誤差も改善前の2,000ppmから改善後は500ppmに低減されています。このことは、200℃までの高温における傾斜の計測精度が最大1,500ppm改善されることを意味しています。

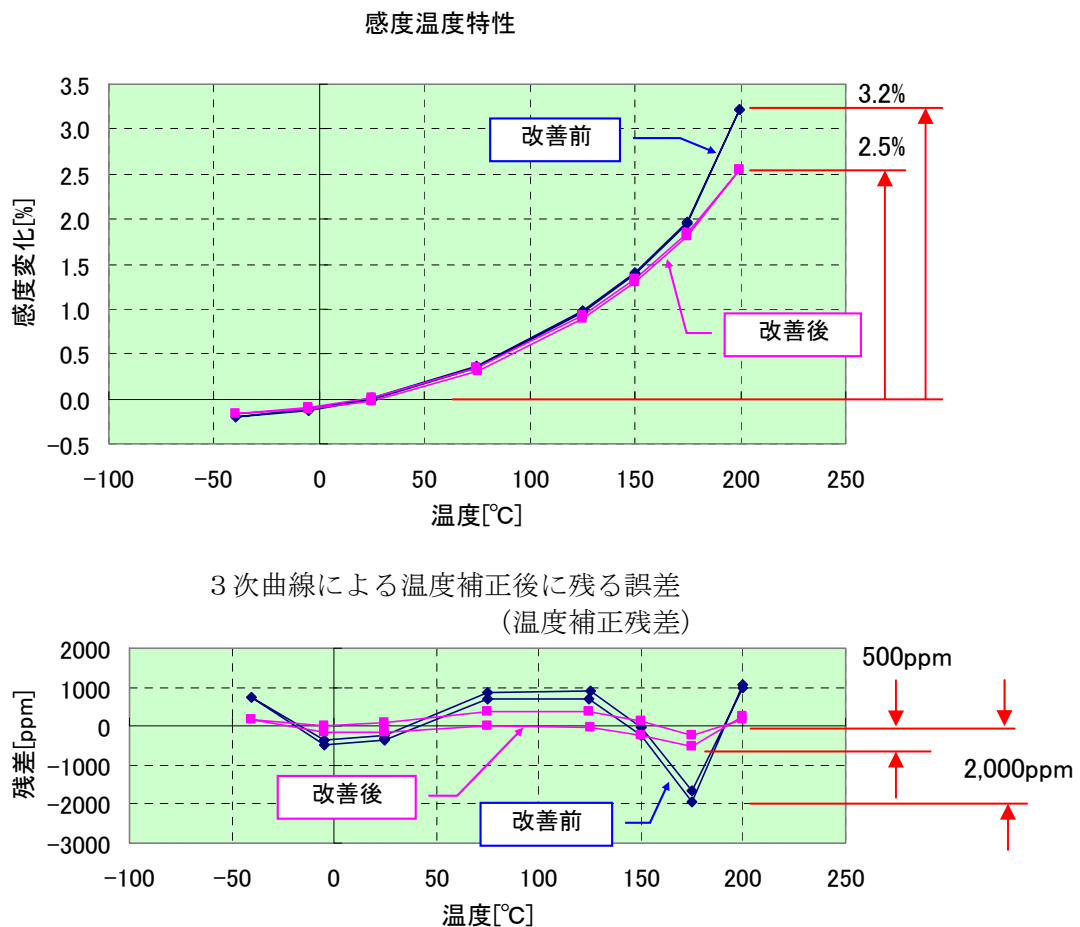


図-3 高温用加速度計の感度温度特性の改善結果

4.3 回路設計技術

航空機、油田掘削、その他、産業機器でも厳しい環境下で使用される加速度計については耐環境性、信頼性、小型化を達成するため、サーボアンプとしてアナログASICを使用した自社製ハイブリッドIC^(7,8)を開発し、採用しています。

一方、温度が比較的安定している環境で使用される微小振動計測用には、回路設計を工夫して超低ノイズ化を図ったディスクリートアンプ⁽⁹⁾を用いるなど、用途に応じた回路設計により最適かつ信頼性の高い電気回路を実現しています。

超低ノイズの加速度計の例として、地震観測用加速度計(JA-40GA)の自己ノイズ評価結果を図-4に示します。自己ノイズ評価については、地動ノイズの非常に小さい地盤上に加速度計2台を設置し、鉛直方向の振動を計測して各加速度計の振動スペクトルを評価しました。図-4から明らかなように、1Hz～30Hzの周波数帯域でJA-40GA加速度計の振動スペクトルは $0.1 \mu G_{O-P} / \sqrt{Hz}$ 程度を示していることから、自己ノイズの実力値は $0.1 \mu G_{O-P} / \sqrt{Hz}$ 以下であると推測しています。

JA-40GAでは前述の石英ガラスのフレクチャを使用していますので、バイアス(零点不平衡)の安定性に優れているため、大きな地震の前後の地層のズレに関わる情報も得られます。また、クリーンルームなど温度が安定した環境で微振動に特化した計測を低コストで行う場合は、メタルフレクチャを用いた制振用加速度計(JA-29MA)も低ノイズ設計のディスクリートアンプを搭載し、JA-40GAと同等の低ノイズ計測が可能です。

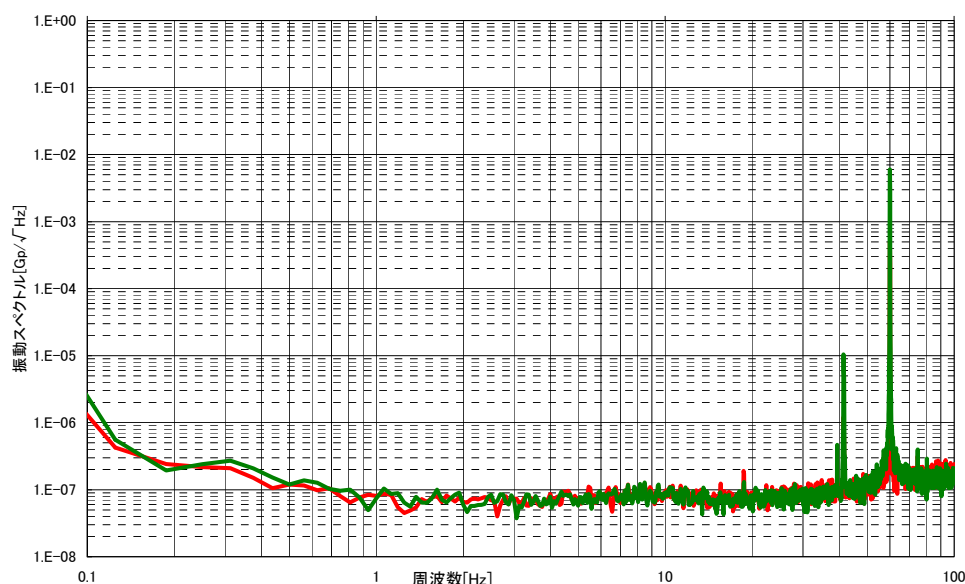


図-4 地震観測用加速度計(JA-40GA)の自己ノイズ評価結果

4.4 実装技術

小型化に対応するために独自のハイブリッドIC実装技術を応用し、時代のニーズにあった製品化を行なうほか、特に200℃という高温で使用される油田掘削用では、高温環境下でも安定した特性を実現するために、内部構造の固定方法や電氣的接続など、過去来蓄積されたノウハウを含んだ様々な実装技術が採用されています。

5. むすび

航空電子のサーボ型加速度計は高安定・高耐環境とローコストの2つのタイプがそれぞれの特長を活かしつつ進化して来ました。今後も幅広い経験とノウハウを生かし、

- ・小型化 ・低消費電力化 ・ローコスト化
- ・低ノイズ ・高温特性改善 ・更なる高温への挑戦

などの市場要求に応えた製品として進化を続け、タイムリーに市場に提供を行なっていく所存です。

[参考文献]

- 1) Shintani et. al.: “1983, Development of a low cost high performance accelerometer,” DOGON symposium Gyro Technology. Stuttgart, (1983)
- 2) 片尾 浩 ほか: “航空機用加速度計による地震観測,” 東京大学 地震研究所彙報 Vol. 65(1990) pp.633-648
- 3) 藤原広行 ほか: “新型 K-NET: 強震動データリアルタイムシステムの構築,” 日本地震工学会論文集 第 7 巻, 第 2 号(特集号), (2007)
- 4) 新野暁: “耐高温性能向上型高環境用加速度計(JA-5H175),” 航空電子技報 NO.18 (1995)
- 5) 安藤芳之 ほか: “油田掘削用小型加速度計の開発(JA-25GA),” 航空電子技報 NO.23 (2000)
- 6) 富岡達也 ほか: “制振用加速度計 JA-29MA の開発,” 航空電子技報 NO.27 (2004)
- 7) 近藤健治 ほか: “ハイブリッド IC(高温用/高電力用)の開発,” 航空電子技報 NO.18 (1995)
- 8) 相座明俊 ほか: “低消費電力型(加速度計用)ハイブリッド IC の開発,” 航空電子技報 NO.21 (1998)
- 9) 富岡達也 ほか: “加速度計 JA-40 の開発,” 航空電子技報 NO.29 (2006)