

やさしい地震計・加速度計

Introduction to seismometers and accelerometers

新谷 昌人

A. Araya

東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Email: araya@eri.u-tokyo.ac.jp

Abstract:

Satellite gravity mission requires accelerometers to remove any non-gravity force applied to the satellites. In this paper, principles of an accelerometer and a seismometer are described. To attain required performance for the gravity mission, mechanical properties and feedback configuration should be carefully designed.

1. はじめに

衛星重力ミッションでは地球周回軌道を自由落下している衛星の軌道から重力分布を検知する。この場合、衛星に重力以外の力が加わってしまうと軌道が変化してしまうために、大きい誤差となる。このような非重力起源の力は衛星内に加速度計を搭載することで検出することができる。非重力の外力は衛星に加速度を生じさせ加速度計で検知できるが、重力は自由落下系では原理的に加速度としては検知されない。このように加速度計を使えば、重力と非重力外乱は容易に区別できる。高度約 1000 km以下の人工衛星には、非重力起源の外乱として大気摩擦による減速効果(大気ドラッグ)ならびに太陽・地球からの輻射圧の影響が存在する。小型衛星の場合、大気摩擦や太陽輻射圧は衛星に対して $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m/s}^2$ 程度、地球輻射圧は 10^{-8} m/s^2 程度の加速度擾乱を生じさせる。ナノgal(10^{-11} m/s^2)程度の精度の高い重力場決定を目指すには衛星に搭載された加速度計で加速度擾乱を精密に測定し、それによる衛星軌道擾乱成分を補正する必要がある。

本稿では、このような用途を想定して、加速度計・地震計の原理やその特性について説明する。要点は

加速度計と地震計は本質的には同じもの。応答特性の違いである

応答特性は帰還回路のパラメーターにより自由に設定できる

加速度計の自己ノイズを低減させるには、周期の長い振子の動きを低雑音センサで検知するのである。

2. 単純な地震計・加速度計

基本的な加速度計の構成を図 1 に示す。ばねとおもりで構成される振り子、そしておもりの位置を検出する位置センサーが必要である。この場合、運動方程式は

$$m\ddot{x} = -k(x-y) - \frac{m\omega_0}{Q}(\dot{x}-\dot{y})$$

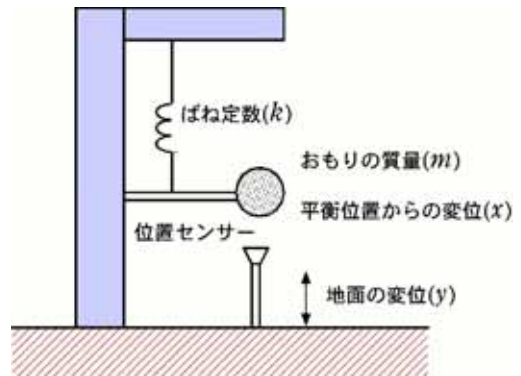
となり、周波数領域(フーリエ変換)で考えると、センサー出力から

$$d(\omega) = \frac{-\omega^2 y(\omega)}{-\omega^2 + i\frac{\omega_0}{Q}\omega + \omega_0^2}$$

と地面振動の加速度が得られる。ここで、振り子の固有振動数は

$$\frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

である。入力を地面振動加速度、出力を位置センサー出力とすると、力学系の伝達関数は図2のように表わされる。



位置センサーの出力($d = y - x$)

図1 基本的な加速度計

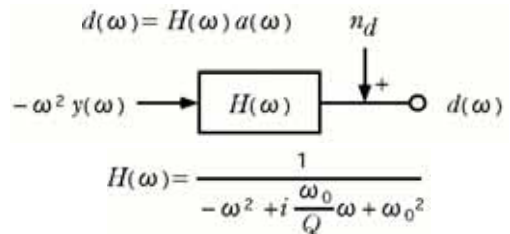


図2 力学系の伝達関数

この場合の高周波極限

$$\omega \gg \omega_0 \quad d(\omega) \sim y(\omega)$$

は地面振動変位に対して応答し、変位計として動作する。このとき、おもりはいわゆる「不動点」として機能し、これが基本的な地震計の原理である。地面振動をより忠実に検知するには、振り子の減衰定数(Q値)が適当($Q=1/\sqrt{2}$, critical damping)であり、振り子の固有振動数になるべく低いこと、が望ましい。この関係を図3、図4に示す。

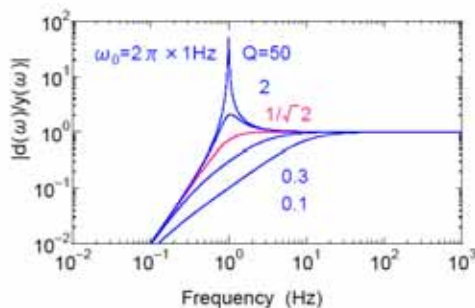


図3 減衰定数による応答の違い

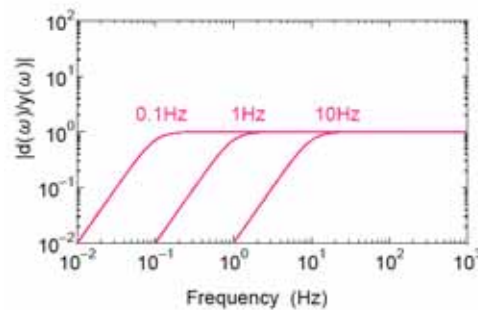


図4 固有振動数による応答の違い

逆に、低周波極限

$$\omega \ll \omega_0 \quad d(\omega) \sim a(\omega) / \omega_0^2$$

は地面振動加速度に対して応答するが、図5のように、帯域を広く取るうとと感度が低下するという問題があり、一部の例をのぞいては加速度計としての使い方はあまりされていない。

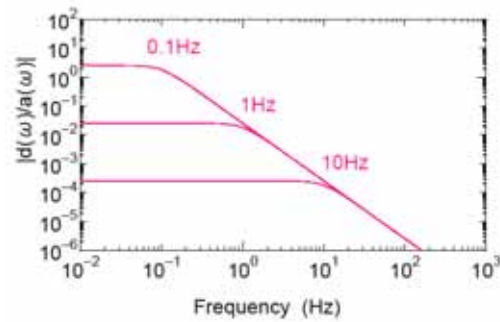


図5 加速度計としての応答特性

3. サーボ型地震計・加速度計

高感度・広帯域にするには、振り子の固有振動数を下げる必要があるが、たとえば手にもてるくらいの大きさで0.1Hz以下にするのはかなり困難である。0.1Hzの振り子の実効的な振り子の長さは2.5mであり、いろいろな工夫である程度小さくすることができるが[1]、たとえば0.01Hz(実効長250m)を小型にするのは絶望的である。

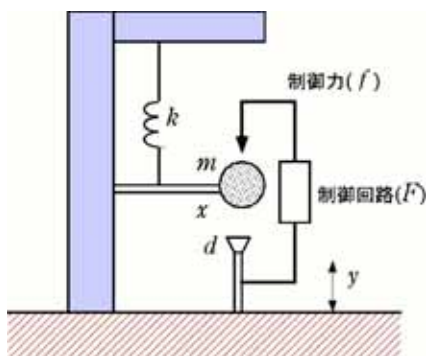


図6 サーボ型加速度計

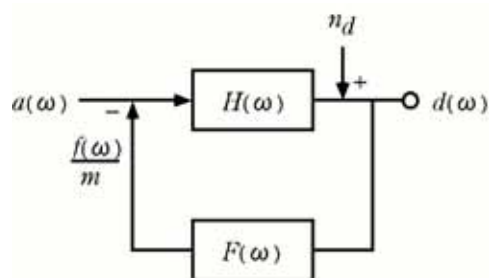


図7 サーボ型加速度計の制御系

そこで、サーボ型地震計・加速度計が登場した。図6がその構成であり、図1と比べるとおもりに制御力が加わっているだけである。しかし、これにより振り子の応答特性は大きく変化する。図7のように制御系を図示すると、制御条件

$$d(\omega) = H(\omega) \{a(\omega) - F(\omega) d(\omega)\}$$

より、センサー出力は

$$d(\omega) = \frac{H(\omega)}{1 + H(\omega)F(\omega)} a(\omega)$$

になり、制御力は

$$\frac{f(\omega)}{m} = F(\omega) d(\omega) = \frac{H(\omega) F(\omega)}{1 + H(\omega) F(\omega)} a(\omega)$$

と表される。制御回路の利得をある程度大きく取ると、力学系の特性が無視できるようになり、振り子の応答特性は制御回路のパラメーターで決定される。適当な制御回路を用いれば、センサー出力あるいは制御力から必要な特性の加速度信号を得ることができる。

4. 地震計・加速度計の雑音

地震計・加速度計それ自身が持つ雑音は当然小さいほうが望ましい。図1の場合では、センサーの雑音により変位感度が決まることが直感的にわかるが、サーボ型の場合はどうであろうか。図7のようにセンサーの雑音(n_d)を加えたものを考える。すると、検出される信号は、

$$d(\omega) = \frac{H(\omega)}{1 + H(\omega) F(\omega)} \left\{ a(\omega) + \frac{n_d}{H(\omega)} \right\}$$

$$\frac{f(\omega)}{m} = \frac{H(\omega) F(\omega)}{1 + H(\omega) F(\omega)} \left\{ a(\omega) + \frac{n_d}{H(\omega)} \right\}$$

のようになり、つねに入力加速度に対してセンサー雑音が

$$a_{\min} = \frac{n_d}{H(\omega)} = (-\omega^2 + i \frac{\omega_0}{Q} \omega + \omega_0^2) n_d$$

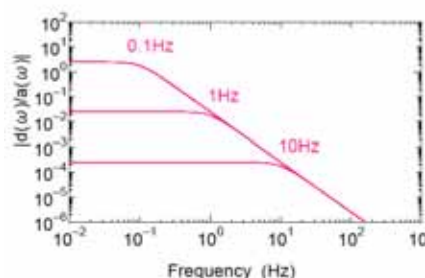


図8 自己ノイズの評価(a_{\min} の分母)

のように混入する。これが最小検出加速度を決める。センサー雑音が一定の場合、いくつかの振り子の固有振動数で a_{\min} の分母、すなわち $H(\omega)$ をplotすると図8(実は図5と同じ)のようになり、長周期の振り子ほど低周波の雑音レベルを小さくできることがわかる。つまり、地面加速度に対する地震計・加速度計の応答はサーボ回路により、振り子の固有振動数によらず、自由に設定できるが、雑音レベルは長周期振り子を用いなければ低く抑えることはできない、ということになる。応答特性と雑音レベルは別物であることに留意する必要がある。

5. STS地震計

ここでは、広帯域地震観測で広く使われている STS 地震計を紹介する[2]。サーボ型地震計であり、図6、図7と同じ構成である。振り子は図9のような構造をしており、ヒンジで接続された枠の先端におもりを配置し、上下動の振り子を構成している。ばねは板状の leaf spring を用いている。図のような形状に曲げることにより、安定・不安定の境界領域に近くなり、さらにおもりのバランス調整によって長周期化(理想的には周期無限大)できる。板バネはばね定数の温度係数が正のものと負のものを組み合わせ、温度変化によるドリフトを最小にするように工夫されている(図10)。

STS 地震計の特長はその制御回路である。図 11 のような回路で、位置センサー出力の比例値(Proportional)、積分値(Integral)、微分値(Derivative)の3つを同時におもりに帰還する。一般に、このような制御方法を PID 制御といい、3つの値の帰還量を適当に設定することでさまざまな特性を実現できる。

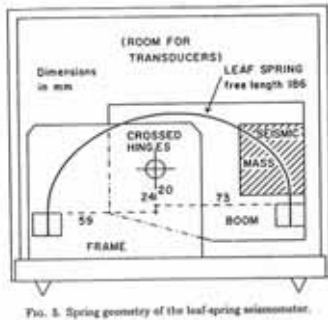


図9 STS 地震計の振り子の構造



図10 STS 地震計で使われている leaf spring

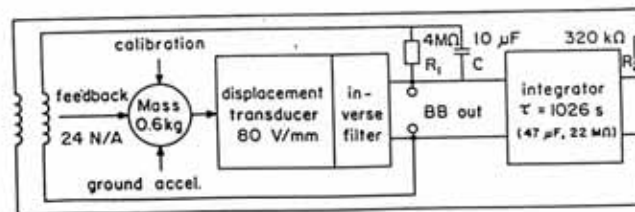


Figure 3
Block diagram of the modified feedback circuit. Compare figure 6 of Wielandt and Streckeisen (1982).

図11 STS 地震計の制御回路

STS 地震計の制御回路は図7で

$$F(\omega) = A + \frac{B}{i\omega} + i\omega C$$

のようにあらわすことができる。これをセンサー出力

$$d(\omega) = \frac{H(\omega)}{1 + H(\omega)F(\omega)} a(\omega) = \frac{-\omega^2 y(\omega)}{-\omega^2 + i\frac{\omega_0}{Q}\omega + \omega_0^2 + F(\omega)}$$

に代入すると、

$$d(\omega) = \frac{-i\omega^3 y(\omega)}{-i\omega^3 - \left(\frac{\omega_0}{Q} + C\right)\omega^2 + i(\omega_0^2 + A)\omega + B}$$

となる。A,B,Cをある程度の大きさ以上に取ると、本来の振り子のパラメーター(ω_0 やQ)は無視できるようになり、さらに適当に値を決めると、

$$d(\omega) = \frac{-\omega^2 \quad i\omega y(\omega)}{-i\omega^3 - (\sqrt{2}\omega_1 - \omega_2)\omega^2 + i(\omega_1^2 - \sqrt{2}\omega_1\omega_2)\omega - \omega_1^2\omega_2}$$

$$d(\omega) = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + \sqrt{2}i\omega_1\omega + \omega_1^2} \frac{1}{i\omega - \omega_2} v(\omega) \quad v(\omega) = i\omega y(\omega)$$

のようにできる(ただし、 $v(\)$ は速度)。これは図12のような特性であり、3mHz～10Hzまでほぼ平坦な速度出力がSTSから得られる。

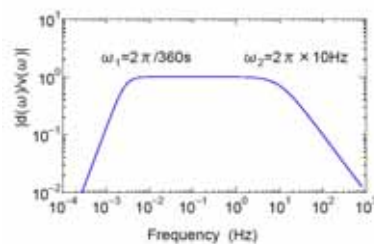


図12 STS地震計の応答特性



図13 磁気シールド



図14 減圧ガラス容器

STS-1型では、このような出力特性だけでなく自己ノイズも低減させるために、振り子を長周期化するバランス調整がしやすい特別なサーボ回路に切り替えができるようになっている。また、外来磁場や外気温の変動の影響を低減させるために、磁気シールド(図13)や減圧(図14)をほどこしている。これらの結果、他の地震計にはない抜群の安定性と低い雑音レベルを実現し、地球内部構造の研究など Global seismology に大きく貢献している[3]。

6. まとめ

地震計・加速度計の原理やその特性について基本的な部分を説明した。冒頭にも記したが、要点をまとめると以下のようなになる。

- 加速度計と地震計は本質的には同じで、地面の加速度を検知する。応答特性により呼び方が変わる
- サーボ型地震計・加速度計の応答特性は、振り子の特性によらず、サーボ回路のパラメーターでかなり自由に設定できる
- 自己ノイズを低減させるには、長周期振り子の動きを低雑音センサーで検知する

参考文献

- [1] 友田好文、鈴木弘道、土屋 淳編，“地球観測ハンドブック” (東京大学出版会, 1985).
- [2] E. Wielandt and G. Streckeisen, “The leaf spring seismometer: Design and performance,” Bull. Seis. Soc. Am. 72, 2349-2367, 1982.
- [3] T. Lay and T. C. Wallace, “Modern Global Seismology” (Academic Press, 1995).