

衛星搭載型加速度計開発の現状

Development status of an accelerometer for the satellite gravity mission

新谷 昌人^{*1}, 高森 昭光^{*1}, 大久保 修平^{*1}, 大竹 雄次^{*2}

A. Araya^{*1}, A. Takamori^{*1}, S. Okubo^{*1}, Y. Otake^{*2}

^{*1} 東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

^{*2} 理化学研究所播磨研究所, RIKEN Harima Institute

Email: araya@eri.u-tokyo.ac.jp^{*1}

Abstract:

Satellite gravity mission requires an accelerometer to remove any non-gravity force applied to the satellites. The accelerometer must have enough sensitivity (10^{-11} m/s²) and measurement range ($\sim 10^{-5}$ m/s²). To attain these requirements, we applied a laser interferometer as a position sensor in the accelerometer. Laser interferometers have several advantages such as high resolution, low-drift performance, and in-situ calibration referred to the wavelength of light. In this paper, we report the development of an optical accelerometer for the satellite gravity mission.

1. はじめに

高度約 1000 km 以下の LEO 衛星は、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、大気ドラッグや太陽輻射圧は衛星に対して $10^{-6} \sim 10^{-7}$ m/s² 程度、地球輻射圧は 10^{-8} m/s² 程度の加速度擾乱を生じさせる。ナノ gal(10^{-11} m/s²)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。このように、微細な重力場を求めるためには、加速度計は高感度であるとともに、低ドリフトであることが要求される。同時に衛星軌道が低いところほど大気ドラッグの影響が増大するので広いレンジ特性も必要になる。

すでに海外の重力衛星に加速度計は搭載されているが、静電容量センサーを用いており、精度の限界が指摘されている。本計画で提案するのは光技術の加速度計への応用である(図1)。波長安定化されたレーザー光源と干渉計測を組み合わせることで、

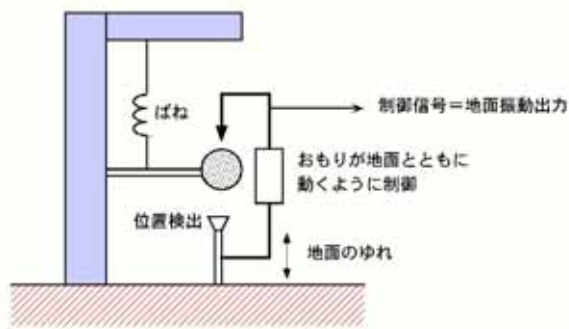
ドリフト・分解能等の精度が高められる

光波長を基準とした厳密な校正が観測中に実行できる

参照おもりの相互作用(輻射圧)が小さく原理的な誤差を著しく低減できる

加速度センサー部分を無電源化(passive)できるため、発熱によるドリフト・電気系ノイズ等のトラブルを避けることができる

などのメリットがある。



サーボ型地震計

図1 加速度計の概念図。位置検出にレーザー干渉計を用いる

科学技術振興調整費「精密衛星測位による地球環境監視技術の開発」(H14～H16年度)では、将来の重力衛星用加速度計をめざして、光干渉技術を利用した加速度計の基礎研究がテーマの1つとなっている[1]。本稿では加速度計の必要性能や開発状況について報告する。

2. 加速度計の必要性能

加速度計に必要な性能として、測定レンジ(最大加速度)、自己ノイズ、周波数帯域、の3つを考慮する。測定レンジを不必要に大きく取りすぎるとダイナミックレンジの関係から、自己ノイズが増大する。衛星重力ミッション用加速度計はきわめて小さい加速度を検知するため、想定される最大の加速度外乱の大きさ程度に測定レンジを抑えることがのぞましい。以下に、各性能についての検討結果を示す。

2.1 測定レンジ

前述のように、高度数百 km の小型クラスの人工衛星には大気ドラッグ($10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ m/s}^2$)や太陽輻射圧($\sim 10^{-7} \text{ m/s}^2$)、地球輻射圧($\sim 10^{-8} \text{ m/s}^2$)の加速度擾乱が加わる。大気ドラッグは衛星の軌道方向にほぼ一定であるのに対して、輻射圧は太陽からの照射方向が衛星の運動に応じて変化したり地球の影に入ったりすることから、たとえば軌道方向成分では図2のようになると予想される。高度 500km 程度では周回に約 90 分を要し、この周期で輻射圧が変化する。このほか、大気ドラッグによる擾乱がほぼ一定値で加わる。

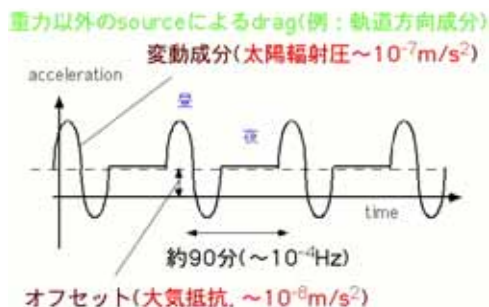


図2 非重力起源の擾乱



図3 加速度計の雑音の性質

低軌道衛星の場合、大気抵抗が増大することを考慮すると、加速度計の測定レンジとして 10^{-5} m/s^2 程度とするのが妥当と考えられる。この場合、加速度計に必要な精度 10^{-11} m/s^2 から 120dB のダイナミックレンジが必要となるが、電気回路的にも実現可能な範囲内である。

2.2 自己ノイズ

加速度計自身のもつノイズは、その起源・性質により以下の3つに大別できる(図3)。

環境依存 error : おもに気温等の変化により出力が変動するものである。レーザー干渉計を用いた加速度計の場合は、1.干渉計光源の温度ドリフト、2.機械部分の熱膨張・収縮、3.参照おもりを支持している potential(ばね構造等)の温度ドリフト、が考えられる。

1.はレーザー波長が温度に依存することによるが、光源の温度制御や干渉計の対称性をよくすることで、 10^{-15} m/s^2 程度の寄与にできる。2.は材質の温度係数を $10^{-5}/\text{K}$ 程度とすると、1K の温度変動に対して 10^{-12} m/s^2 程度になる。ただし、熱膨張・収縮の効果を加速度に換算するときに、振り子の周期を $\sim 10^4$ 秒と仮定しなければならない。逆に言うと、振り子の周期がこれより短いと、 10^{-11} m/s^2 という仕様を満たすことが難しくなる。これは大きな拘束条件になっている。3.については、恒弾性ばね(ばね定数変動 $\sim 10^{-5}/\text{K}$)で参照おもりを支持してはじめて $10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{K}$ の加速度誤差に抑えられる。

random noise : 電気回路のランダム雑音や振り子の熱雑音などが原因で現われる白色雑音である。電気回路の雑音は適切に設計すればダイナミックレンジからは問題にならないと考えられる。熱雑音は参照振り子のパラメーターを、おもりの質量 0.1kg、振り子 Q 値 10、損失係数 0.1、温度 300K、とすると $\sim 10^{-12} \text{ m/s}^2$ となる。ただし、ここでも振り子の周期を $\sim 10^4$ 秒と仮定しなければならない。

static error : 加速度計から出力される一定のオフセットおよび時間的に一定の割合・比率で起こる出力変化である。原因は電気的なものや、加速度計の機械的構造物のクリープなどが考えられるが、原因を特定し制御する(完全にゼロにする)のは困難である。時間の一次関数や指数関数で近似すれば、その係数を衛星軌道と非重力擾乱モデルから推定することができる。

以上の考察からわかることは、

- 1.加速度計の温度は 300K 以下で、1K 以内での温度制御が必要
 - 2.参照振り子の周期は少なくとも 10^4 秒が必要
- ということになる。

2.3 周波数帯域

加速度計の出力は印加された加速度に対して DC からほぼ平坦な特性が想定されている。前節の考察から、加速度計には static error が避けられず、軌道情報と非重力擾乱のモデルからドリフト係数等を推定する必要がある。static error は時間とともに軌道を drag させる効果と等価であるから、実際の衛星軌道と加速度計出力から計算される軌道を、非重力擾乱を考慮の上、一定時間毎に比較すれば補正することができる。衛星に GPS が搭載してあれば、少なくとも 1 日に数回はこのような軌道決定からの比較が行えるであろう。static error が大きい場合は、加速度計の低周波側の帯域を制限することも考えられる。その場合の cut-off 周波数は軌道比較の頻度を考慮すれば $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ Hz}$ で良いと思われる。

加速度計の軌道方向成分からは上層大気の空間的な密度ゆらぎを検知することができる。衛星は 8km/s 程度の軌道速度を持っているので、たとえば加速度計の高周波側の cut-off 周波数を 100Hz とすると見たい密度ゆらぎのスケールは最小 80m 程度となる。加速度計の性能的には問題の無い周波数であ

るが、データの通信レートや見たい空間スケールで決定することになるであろう。

3. 開発状況

衛星重力ミッション用加速度計は高感度でしかも測定レンジが 10^{-5} m/s^2 と小さい。また、参照振り子の周期として 10^4 秒以上が求められている。1Gの重力加速度(測定レンジの 10^6 倍)の条件下でしかも外乱の大きい地上環境での実験はきわめて困難である。そこで、加速度計の要素を(1)干渉計測・制御系、(2)長周期振り子の制御、の2つに分けて、それぞれで技術的問題・特性を評価し、結果を総合して衛星搭載型加速度計の設計をすることとした[2, 3]。

(1)としては参照おもりの位置をレーザー干渉計測し、制御回路と組み合わせ、地上動作可能な加速度計(光干渉型加速度計)を試作し性能を評価する。つまり振り子の部分以外は衛星搭載型とおなじ構成の加速度計を地上で性能評価する。(2)については、周期 10^4 秒以上の振り子はいかなる機械的束縛も長周期を損なう要因と考えられるので、実際の衛星搭載型では束縛の無い無重力状態で浮遊したおもりを制御することになるであろう。そこで、地上実験では、超伝導磁場で磁気浮上させたおもりの位置を複数の自由度で制御する研究を行い、束縛の無い参照おもりを無重力状態で制御する状況を simulate する。

以下にそれぞれの要素についての進捗状況を記す。

3.1 光干渉型加速度計

図4、図5は光干渉型加速度計(センサー部)の写真である。静穏な観測井内で雑音レベルを評価するために、外径140mmのケーシングに収められている。センサー部のほかに光源・制御部の筐体があり、センサー部は観測井内に、筐体は地上に設置される。両者は光ファイバー複合ケーブルで結ばれる。半導体レーザー光源からの光をセンサー部に光ファイバーで導入し、干渉計測された信号を光のまま筐体の受光部・制御部にやはり光ファイバー経由で戻される。この信号をもとに、センサー部のおもりの位置を電磁アクチュエーターで制御し、加速度信号を得る。



図4 センサー部外観



図5 加振台上のセンサー部(ケーシング内)

図6は加振台で測定された加速度計の周波数応答である。20Hz までほぼ平坦な特性が得られている。干渉計部分を極力小型化するために、複数の光学部品をユニット化したものを用いた(図7)。

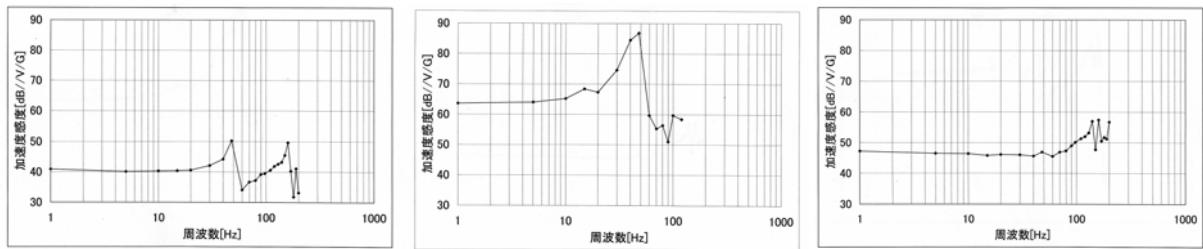


図6 加速度計の周波数特性(20Hz 以下でほぼ平坦)。左から X,Y,Z 成分

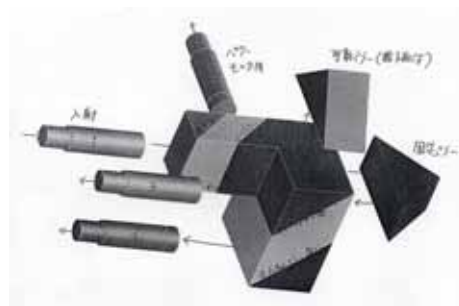


図7 振り子の位置検出用干渉計ユニット(左)とその構造(右)

現在、地震研究所富士川観測所奥山観測室に掘削された観測井(図8、深さ 10m)を用いて、雑音レベルの測定を行っている。光干渉型加速度計の信号と同観測所の STS 地震計の記録はほぼ一致し、地面振動雑音を正しく検知していることがわかっている。今後、2つの観測井に同じ光干渉型加速度計を設置し、両者の信号の相関から自己ノイズの評価を行う予定である。

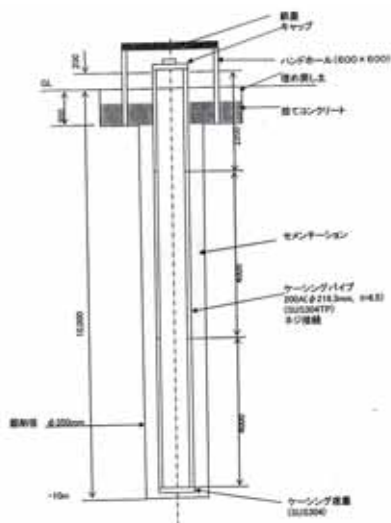


図8 地震研究所富士川観測所奥山観測室に掘削された観測井(深さ 10m x 2 本)

3.2 磁気浮上試験

機械的束縛のない浮遊状態のおもりを実現するために、高温超伝導磁石から発生する磁場を用いて、図9のように永久磁石を浮上させる。実際の各自由度の固有振動数はZ軸まわりの回転以外は数 Hz のオーダーであり、周期 10^4 秒とはいかないが、無重力浮遊状態のような機械的束縛のない系を制御する研究を行う点ではこの装置で十分に目的を達せられる。

衛星搭載型ではおもりの位置・姿勢を干渉計で検出するが、ここでは簡単のために、図10のような光検出を用いた。おもりへ加える力は静電場によるアクチュエーターを用いる。電圧を低くすれば非常に弱い力も発生できるため、衛星搭載型でも使用できる方法である。

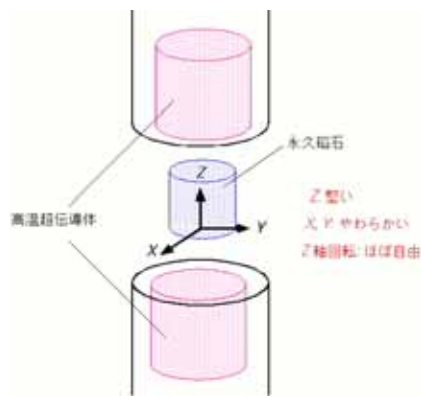


図9 高温超伝導磁場によるおもりの磁気浮上

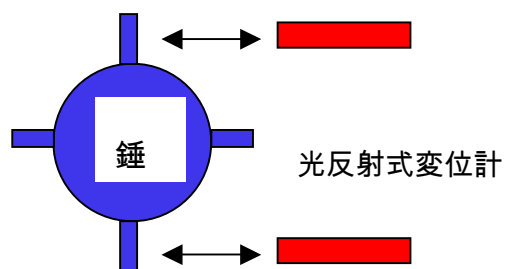


図10 おもりの位置・姿勢の光検出

図11はリング状磁石を浮上させたものである。磁石のサイズ、重量、超伝導体への着磁条件等をいろいろ変えて、なるべく弱い potential 中で浮上させる条件を見つけた。次に、おもりの位置検出・制御ができるように、永久磁石を取り囲むように図12のようなケースを付け、表面に光検出用鏡と静電場制御用極板を取り付けたものを作成した。これを図13の磁場発生装置の上のテストベンチで浮上させる。これまでの実験で、1自由度の制御には成功した。今後、やわらかい3自由度の制御を試みて、制御信号から加速度が得られることを確認する予定である。



図11 永久磁石の浮上

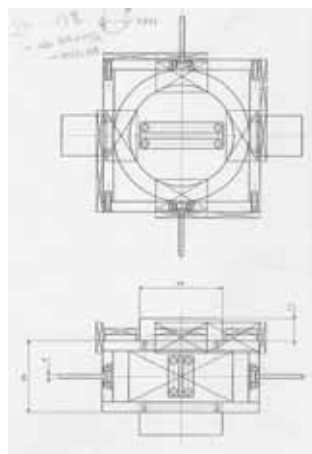


図12 浮上おもり

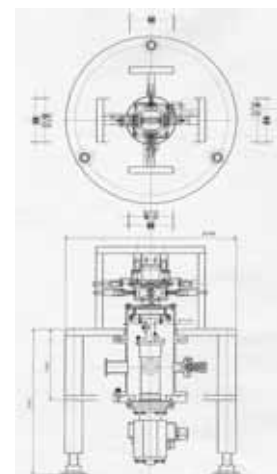


図13 磁気浮上装置

4. まとめ

本稿では衛星搭載型加速度計の必要性能や開発状況について簡単に報告した。現段階では実験結果は出揃っていないものもあるが、平成 16 年度末の研究計画終了時には、衛星搭載型加速度計の設計指針がまとめられる予定である。

参考文献

- [1] 新谷昌人・大久保修平・大竹雄次, 衛星重力ミッション用加速度計開発の現状, 精密衛星測位:衛星重力観測による地球のダイナミクス研究へのブレーク・スルー集録, Tokyo, 11-12 November 2003, 東京大学地震研究所, 178-186, 2004.
- [2] 新谷昌人, レーザー干渉計を用いた地震/地殻変動観測, 第 33 回光波センシング技術研究会, Tokyo, 3-4 June 2004, (社)応用物理学会・光波センシング技術研究会, 117-121, 2004.
- [3] Yuji Otake, Akito Araya and Kazuo Hidano, Development of an Astatic Rotational Pendulum using Magnetic Levitation for a Highly-sensitive/Broad-band Seismometer, 7th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Fukuoka, Japan, Oct. 27-30, 15-22, 2003.