

DPF ドラッグフリー制御システムの開発

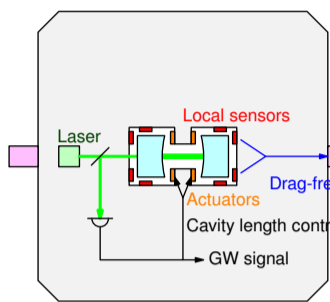
SSS11
P3-156

○ 森脇成典 (東大新領域), 船木一幸, 坂井真一郎, 河野功 (JAXA), 安東正樹 (京大理)

概要

DPF (DECIGO Pathfinder) は、重力波観測衛星 DECIGO の技術実証を目的とした衛星で、JAXA の小型科学衛星シリーズへの適合を目指して開発が進められている。DPF のサイエンス面には**重力波**のモニタと**地球重力場**の観測の二つがあるが、いずれも重力場による微小潮汐力の測定であるため、外乱加速度を抑圧するドラッグフリー制御技術が重要な開発要素となる。

ドラッグフリー制御とは



重力の勾配を計測するには、離れた位置にある二つの**試験マス**に重力だけが働く状態を作り、その間の距離の変化を測ればよい。試験マスに外部から粒子の衝突などにより運動量が持ち込まれると、重力計測の外乱となるので、試験マスに覆いをつけ、覆いと試験マスの距離が一定になるよう**スラスタ**で運動量を排出すると外乱がキャンセルできる。これをドラッグフリー制御と呼ぶ。

主要な雑音源

外乱:

- 太陽輻射圧揺らぎ ● 大気抵抗
- 重力勾配 (軌道離心率, 地球重力場高次項, 月の重力, ...)

内部雑音:

- アクチュエータ雑音 (スラスタ, 静電アクチュエータ, ...)
- 機構部品の熱雑音 (試験マス, ハウジング, ...)
- センサ雑音 (レーザー光源, 静電センサ電気雑音, ...)

スラスタ

スラスタシステムへの要求:

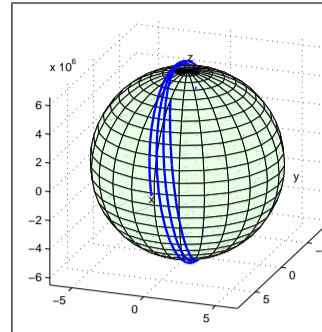
- 100 μN の**推力** (20-40 μN の太陽輻射圧に加えて 10-100 μN の大気抵抗ドラッグがあるため)
- 100 $\mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の**推力雑音** (予想される太陽輻射圧の揺らぎの大きさより)
- 10 Hz 以上の**応答速度** (ドラッグフリー制御の要請)
- 10⁴ Ns の**トータルインパルス** (半年以上の観測期間)

スラスタはリソースの制約により、100 μN 2本, 10 μN 8本の予定。バス部には振動源となる姿勢制御用ホイールを搭載しない予定なので、観測中はミッション部のスラスタで姿勢制御も行う必要がある。

スラスタの候補:

- イオンスラスタ ● FEED スラスタ ● コールドガスジェット

軌道



- 高度 500 km の太陽同期極軌道
→ 軌道周期 95 分, 軌道傾斜角 98.4° (夏季・冬季に最大約 25 分の日陰期間あり)
- 半年以上の観測期間を目指す
- 離心率が大きくなると姿勢の外乱となるが $e \approx 3 \times 10^{-4}$ で地球重力高次項と同程度となる

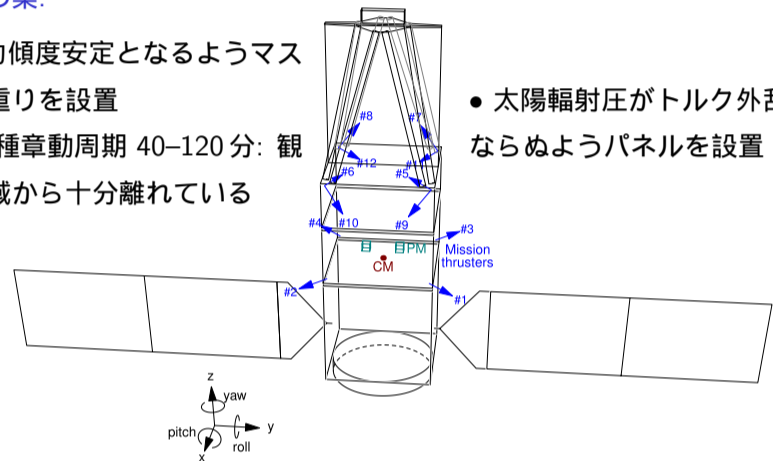
形状と質量分布の設計

- **衛星重心の位置**を試験マスの位置に近づける設計が必要
- **太陽輻射圧・大気抵抗ドラッグ**が外乱トルクに転換されにくい形状が求められる

姿勢形態とスラスタ配置

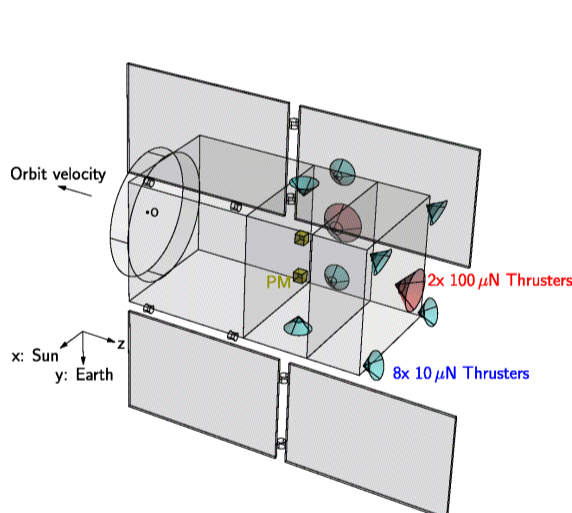
初期の案:

- 重力傾度安定となるようマスと重りを設置
→ 各種章動周期 40-120 分: 観測帯域から十分離れている



- 太陽輻射圧がトルク外乱にならぬようパネルを設置

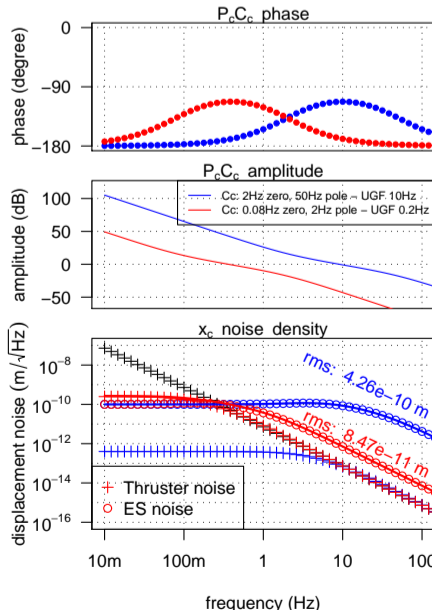
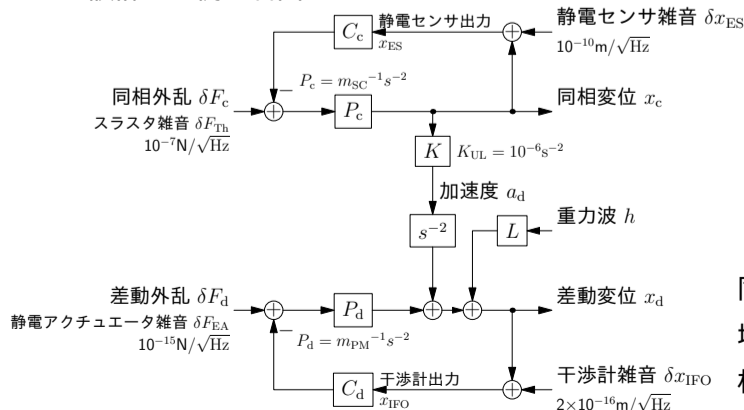
現在の案:



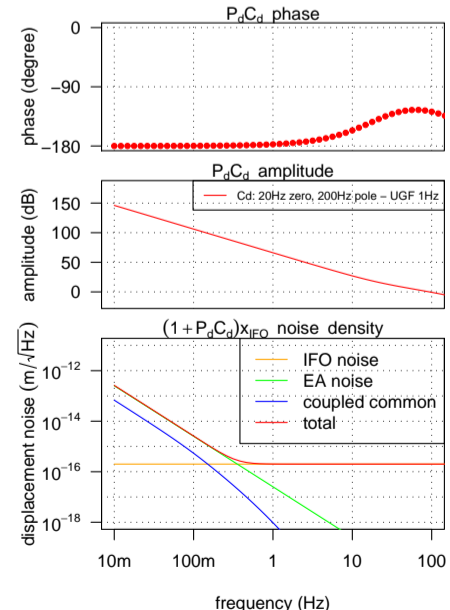
- 重心位置の試験マスに近づけ、剛性を増すために太陽電池パドルの展開方式を変更する
→ 最低振動モード 2.4 Hz
→ 軽量化
- 姿勢制御用低推力スラスタを用意してリソース制約を緩和
- 重力傾度安定は諦める
- 試験マス位置保持に DC 力が必要

制御フィルタと加速度雑音の例

二つの試験マスは干渉計の光軸方向に同相で動くモードと差動で動くモードを有しているが、同相変位をドラッグフリー制御で抑え込んだ上で、作動モードから重力波信号を取得する。このとき、衛星の質量分布の非対称性等から、同相から差動への**カップリング**が起きることが予想され、感度悪化の懸念材料となっている (下図モデルでの係数 K)。観測帯域 0.1-1 Hz で信号の汚染が少なくなるような制御フィルタを設計した例が右図。



同相ループの開ループ伝達関数と雑音。制御帯域を広げすぎると (赤 → 青) センサの雑音が同相残留雑音を増やしてしまう例になっている。



差動ループの開ループ伝達関数と雑音。制御フィルタ選択により、カップリング雑音の重力波信号への混入量を要求値以下に抑えられる。