

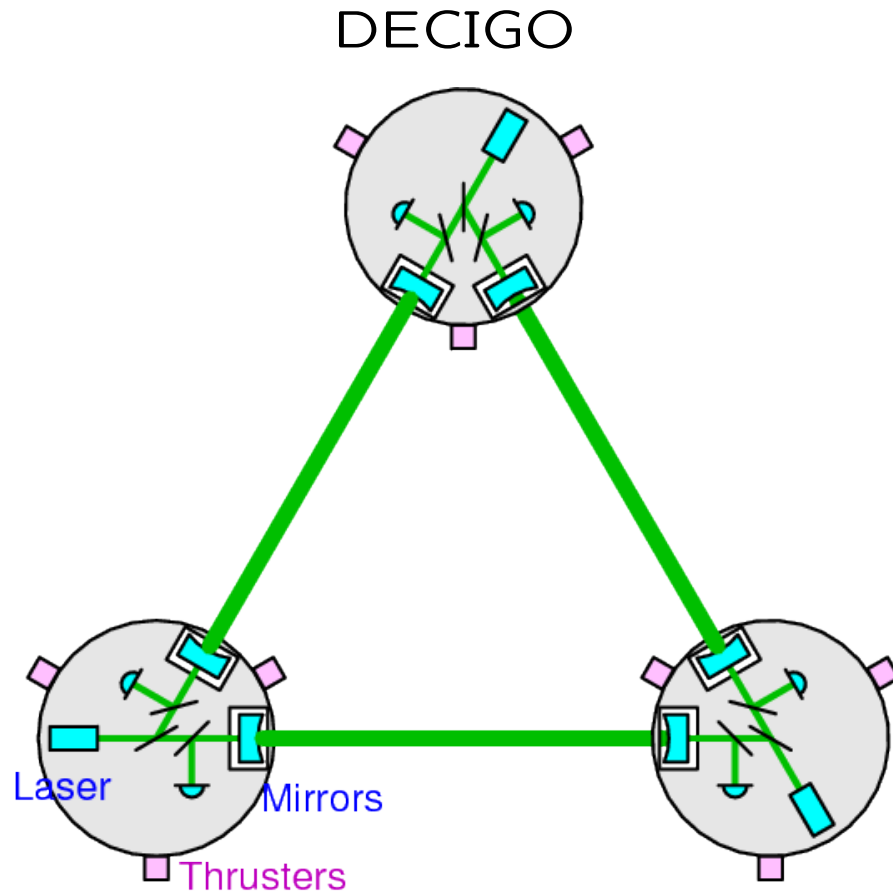
[ドラッグフリー制御]

ドラッグフリーの可能性

東京大学 新領域創成科学研究科

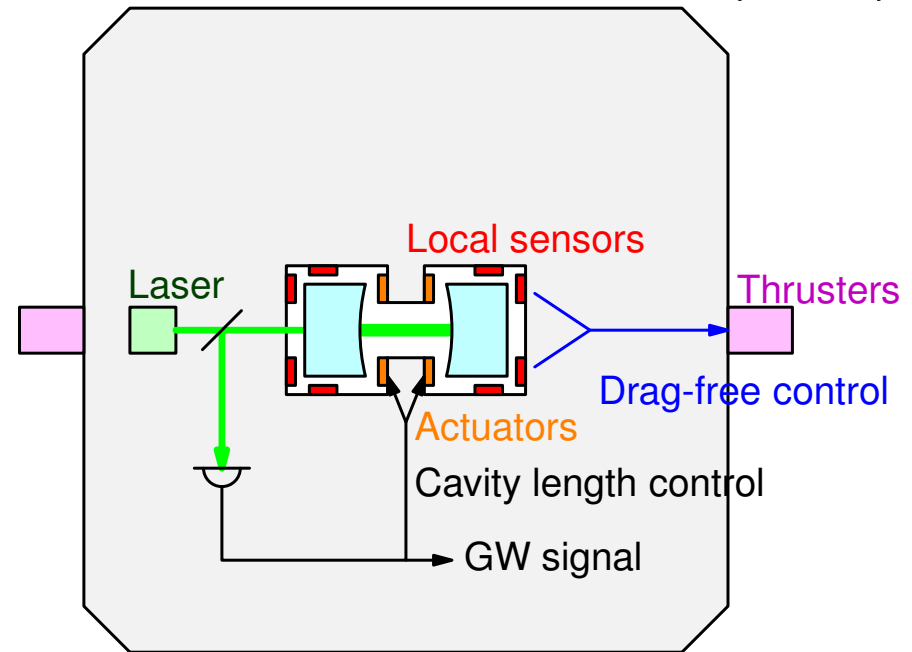
森脇 成典

ドラッグフリー制御の概念図



- 複数の衛星の間で光干渉計を構成する。
- 鏡と衛星の距離が一定となるようにスラスタを制御する。

DECIGO パスファインダー (DPF)



- 単一の衛星内に光干渉計を構成する。
- ローカルセンサの信号をスラスタに帰還し、ハウジングとプルーフマスの距離を一定に保つことでドラッグフリーが実現される。

DECIGO と DPF で想定される外乱

太陽輻射圧と太陽風

- 太陽輻射圧 (=光の圧力) 1.36 kW/m^2
6000 度の黒体輻射にだいたい合致。
軌道高度 500 km で大気抵抗と同程度の圧力
輻射電磁波を全波長で積分したものは時間変動が小さく、太陽活動にほとんど
依らない
- 太陽風 (=電離した水素のプラズマ風)
数密度 $\simeq 10/\text{cm}^3$
質量密度: 10^{-20} kg/m^3
太陽輻射圧に比べると 4 桁小さい
太陽活動に応じて大きく変動する
地球周辺では磁気圏の存在のためあまり影響がない (極付近で強?)

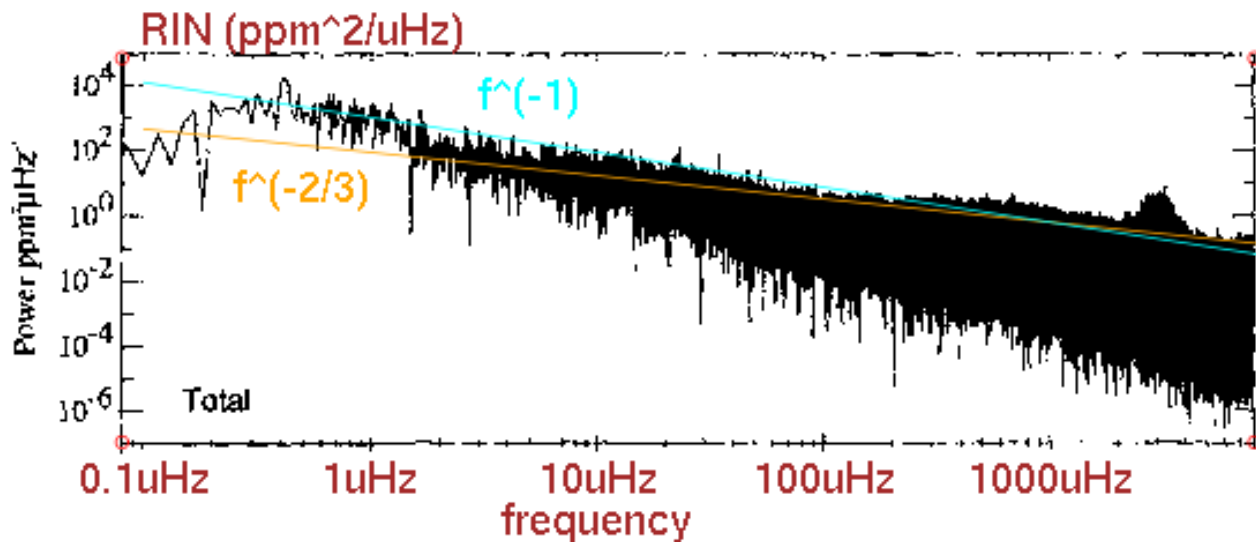
秒～分スケールでの時間変動についてはよく分かっていない。

太陽輻射圧のゆらぎ

SOHOの観測データ (Pap et al., Adv. Space Res. 24, p.215, 1999)

スペクトル (振幅) $\simeq f^{-1/3}$ モデルの出典

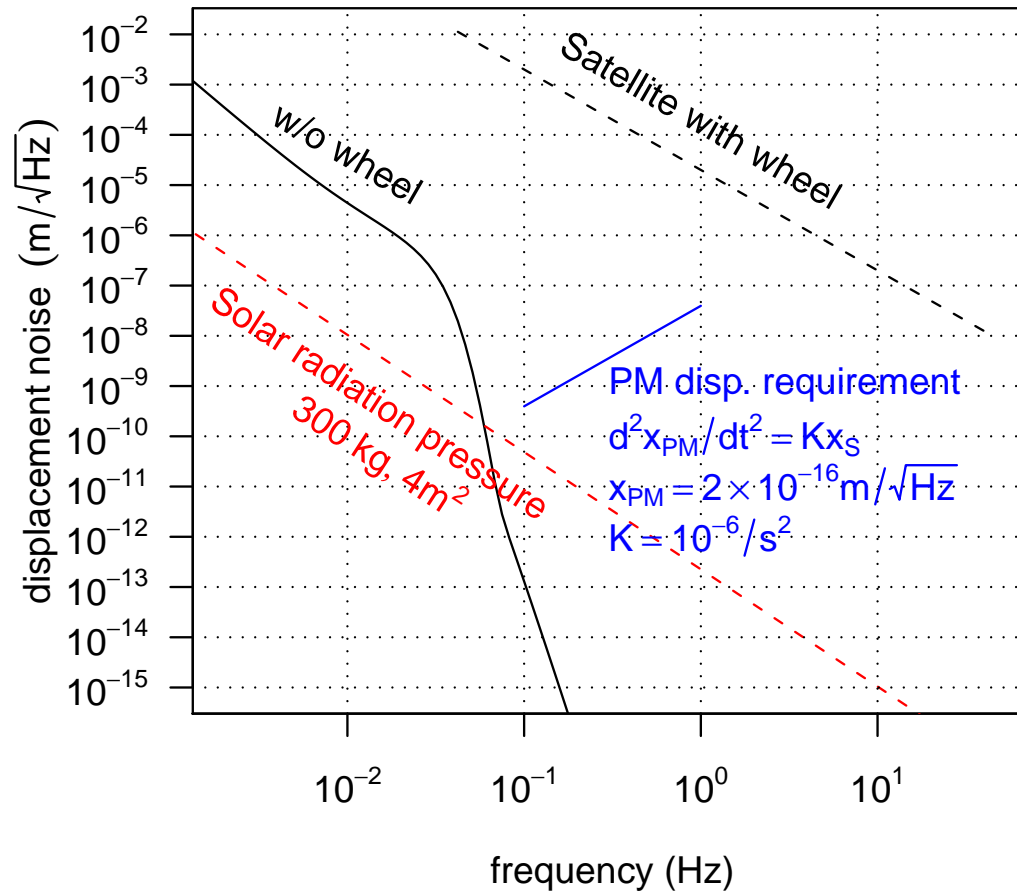
400-860nm に感度のある光熱量計測, 10 mHz まで .



LISA の帯域はカバーしているが DPF の帯域でのレベルは不明
紫外側に太陽活動に応じて大きく変動する成分

DPF で要求される衛星の振動環境

衛星の振動雑音スペクトル



- 地球重力ポテンシャルに対してプルーフマス配置方位を一定にしたい
- 低雑音のスラスタでドラッグフリー制御を行いたい
- ホイールを搭載すると DPF で要求される振動環境が満たされなくなる可能性がある



- 太陽同期軌道
- 重力傾度安定

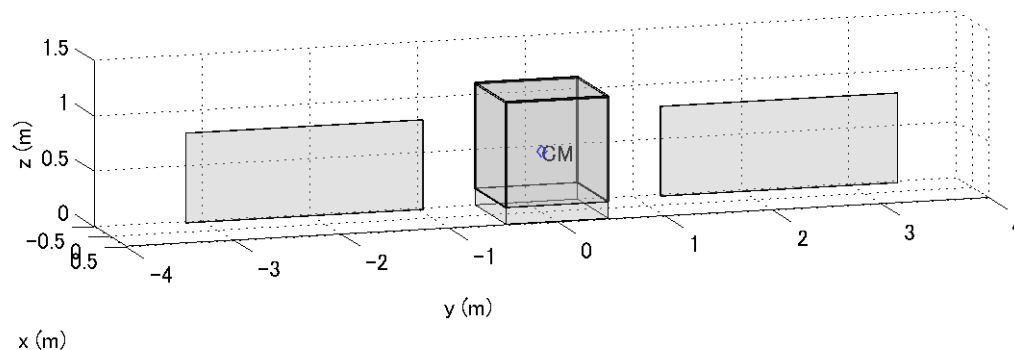
重力傾度安定化 (1)

ISAS/JAXA の小型科学衛星標準バスを利用

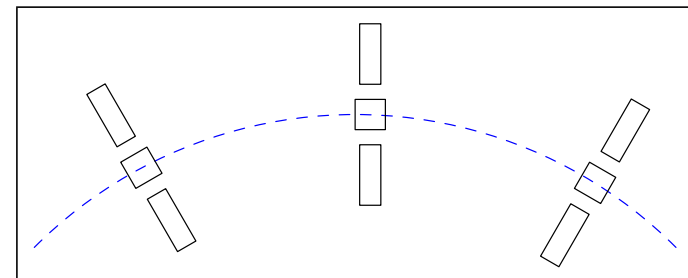
total mass [kg]: 190.2

center of mass [m]: 0, 0, 0.54371

moment of inertia [kg m²]: 181.45, 37.996, 180.63



仮にバス系単体を円軌道に投入すると...
→ 右図の姿勢, 大気ドラッグがやや大きい



重力傾度安定化 (2)

バス + 94 kg ミッション系ユニット + 30 kg マスト

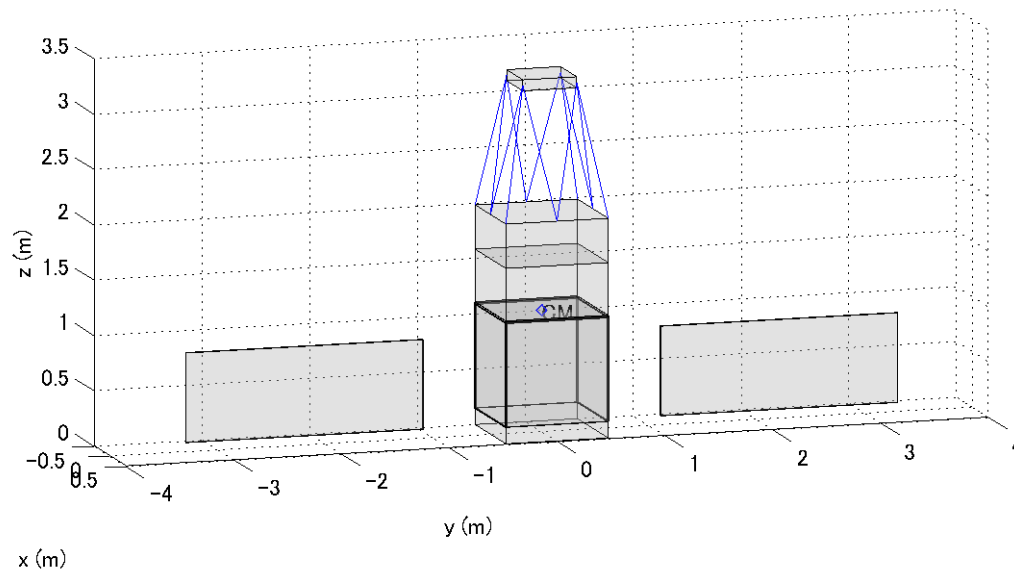
total mass [kg]: 314.27

center of mass [m]: 0, 0, 1.0952

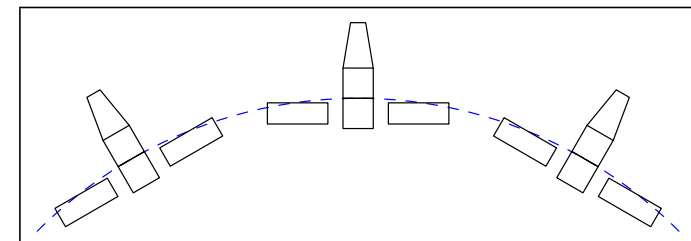
moment of inertia [kg m²]: 403.34, 259.88, 196.03

mission mass [kg]: 124.07

center of mass of mission mass [m]: 0, 0, 1.9406

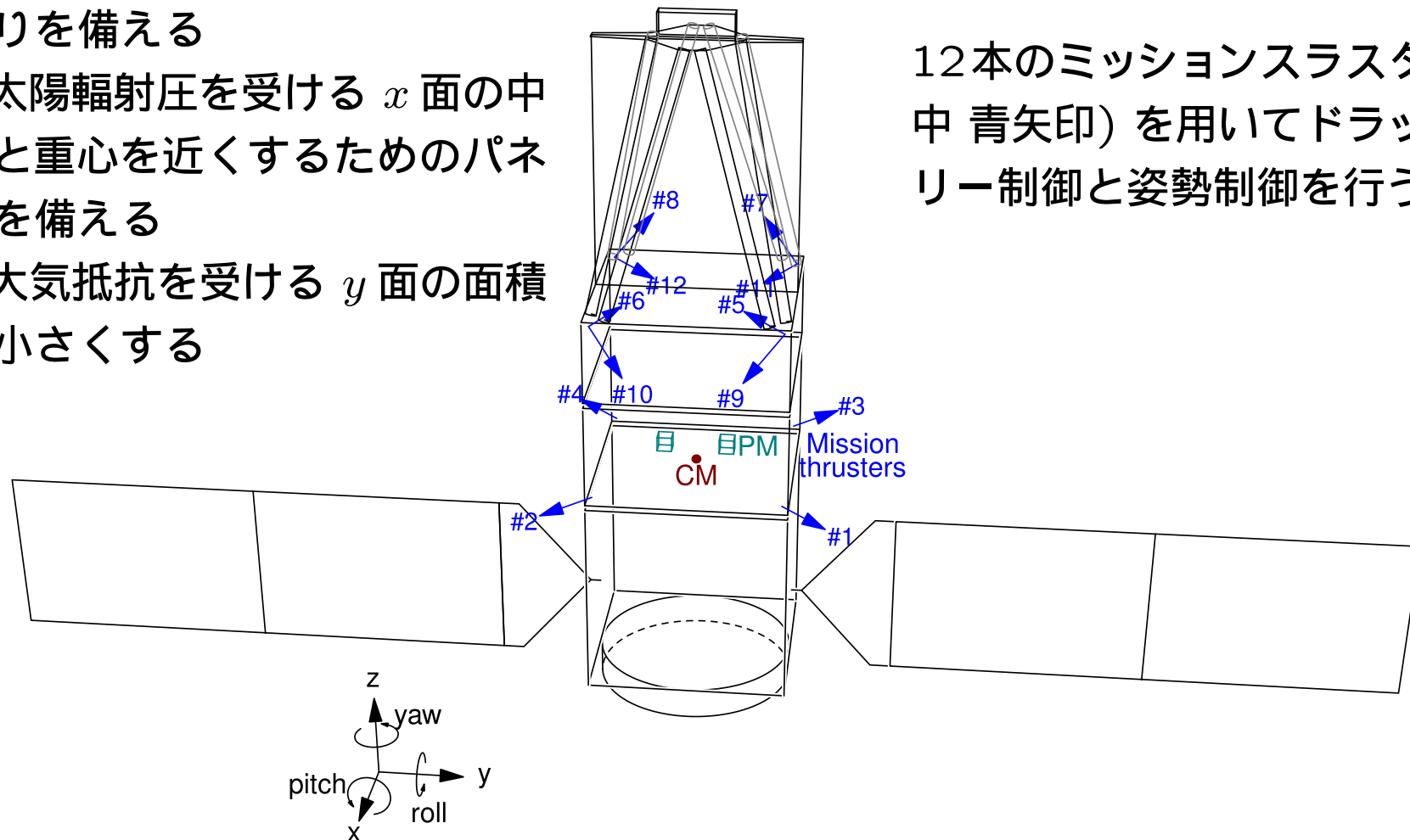


太陽同期極軌道にうまくあう



質量分布・構造・スラスタの配置

- z 方向を地心方向とする重力傾度安定となるようマストとおもりを備える
- 太陽輻射圧を受ける x 面の中心と重心を近くするためのパネルを備える
- 大気抵抗を受ける y 面の面積を小さくする



12本のミッションスラスタ (図中 青矢印) を用いてドラッグフリー制御と姿勢制御を行う。

重力傾度安定姿勢の章動

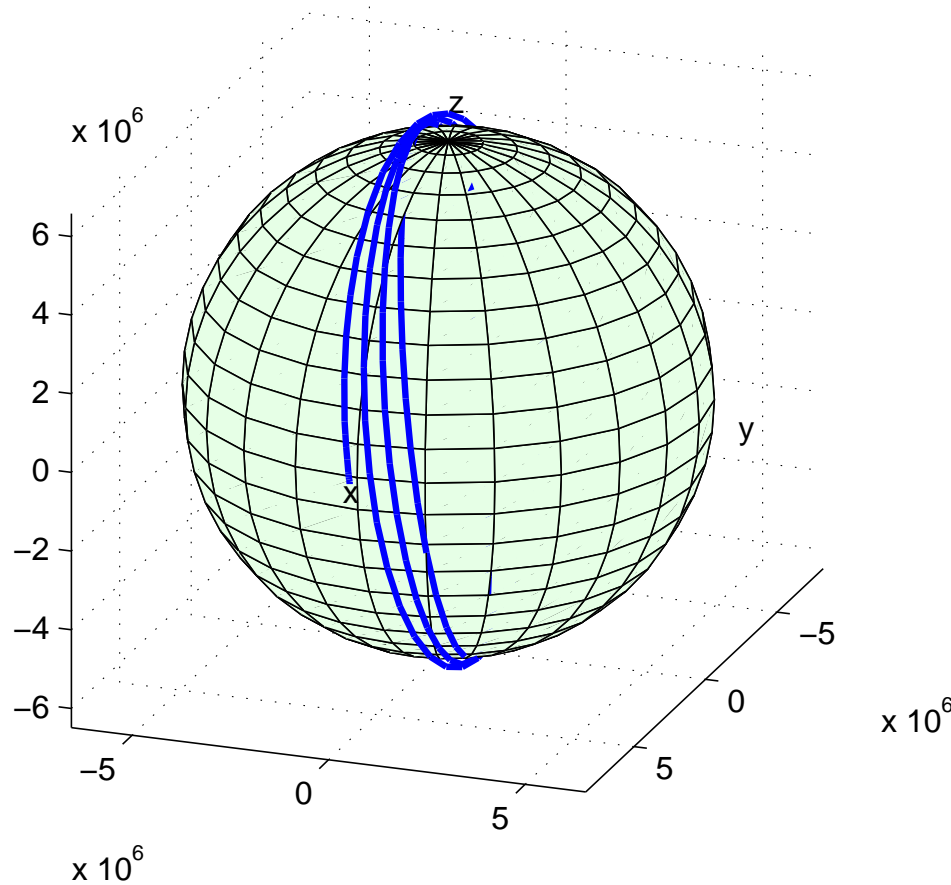
軌道高度 500 km を仮定 .

- 公転周期: 95 分 (0.175 mHz)
- ピッチ章動周期: 117 分 (0.142 mHz)
- ロール・ヨー章動周期: 52 分 (0.321 mHz), 112 分 (0.149 mHz)

重力波の観測帯域 0.1~1 Hz より十分低い周波数となることを確認 .

復元力が弱いため , 太陽輻射圧の受光アンバランスのトルクによりヨーのオフセットが数度のオーダーで現れることが懸念される

重力ポテンシャルの高次項と太陽同期極軌道



地球の形状が扁平なため、軌道面の向きが一定でなくなる。軌道傾斜角の微調整で昇交点のずれのレートと地球公転のレートを一致させることができ、太陽同期極軌道となる。

重力源を3個の質点で近似し、カルテシアン座標を変数にして常微分方程式を数値的に解いた例。誤差が大きく揺らぎの評価に使うのは厳しい。

- 軌道高度 500 km
- 軌道傾斜角 97.4 度
- 重力ポテンシャルの二次の係数 $J_2 = 2 \times 10^{-2}$
(実際は $J_2 = 1.08 \times 10^{-3}$ だが見やすさのため 20倍で描画)

大気抵抗・太陽輻射圧からくるスラストのレンジ要求

$$\text{大気抵抗ドラッグ } F_a = (1/2)\rho v_o^2 AC_d = 27 \mu\text{N}$$

$$\text{大気抵抗トルク } t_a = 1.1 \mu\text{Nm}$$

(高度 500 km で軌道速度 $v_o=7.61$ km, 大気密度 $\rho=2 \times 10^{-13}$ kg/m³, y 面 断面積 $A=2$ m², 抵抗係数 $C_d=2$ を使用, 大気密度は 0.1~10 倍の不定性あり)

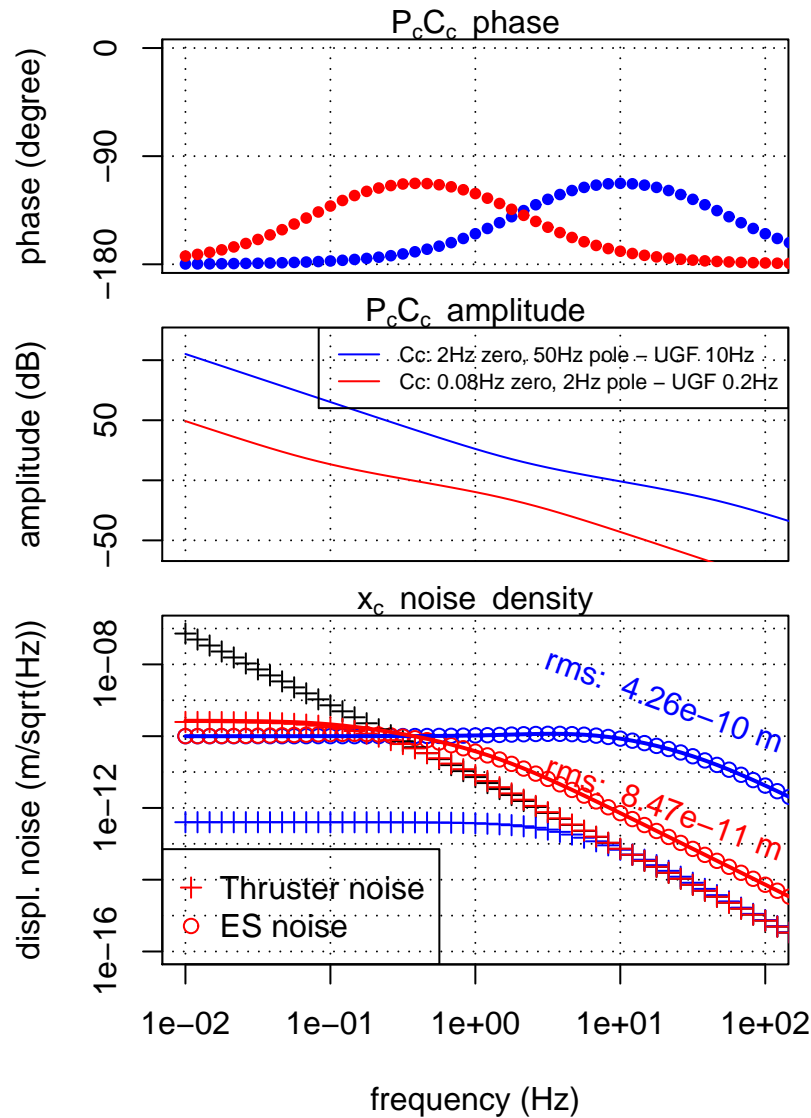
$$\text{太陽輻射圧ドラッグ } F_s = (1 + \kappa)AS/c = 43 \mu\text{N}$$

$$\text{太陽輻射圧トルク } t_s = 1.7 \mu\text{Nm}$$

(輻射束 $S=1.35$ kW/m², x面の断面積 $A=3.5$ or 3.0 m², 反射率 $\kappa=0$ or 1 (太陽電池 or Al))

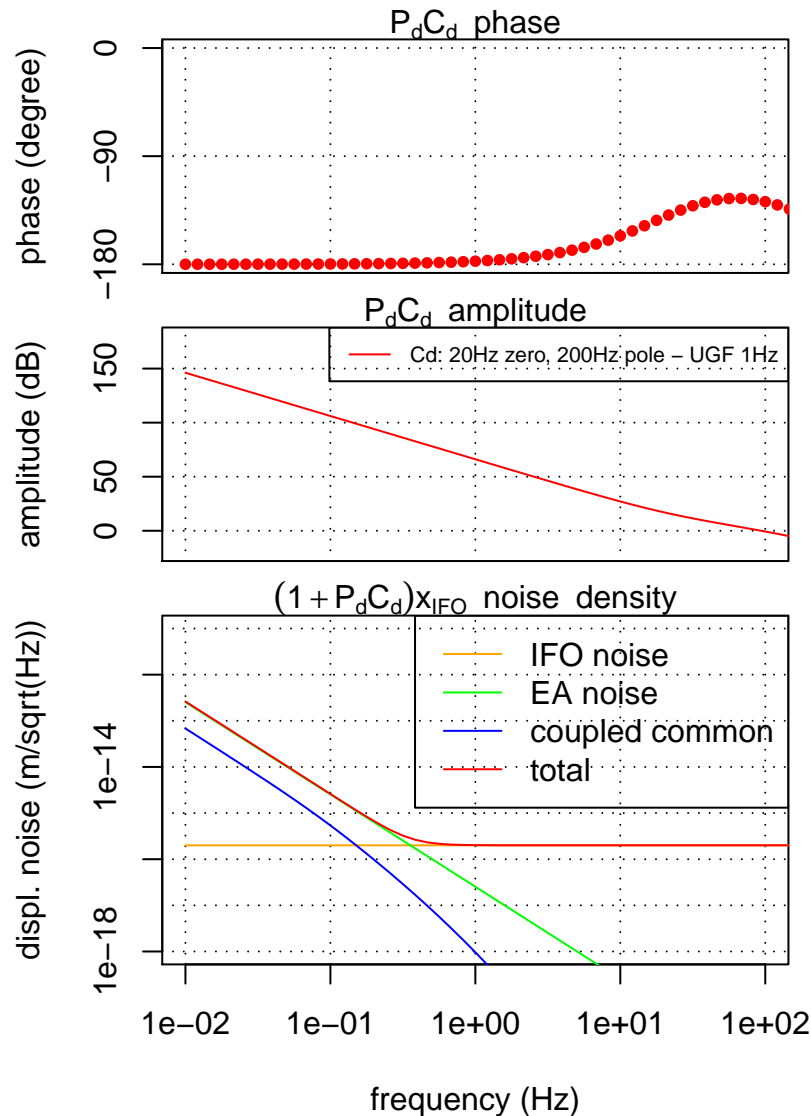
前者の大気抵抗は太陽活動によって桁が変わる可能性あり。
太陽輻射圧の雑音密度は文献値があるが, 大気抵抗の雑音密度は得られていない。

加速度雑音見積りのための光軸方向のドラッグフリー制御の評価



初めに，ドラッグフリーの制御として UGF が 10 Hz になるような制御フィルタ（青線）を使い，スラスト雑音と静電センサ雑音の同相変位（前ページ x_c ）での抑圧を評価した．
 静電センサの雑音のため，ゲインを上げると rms 変位が増加する領域にあったため，UGF を 0.2 Hz に変更（赤線）．
 0.1 Hz での開ループゲインは約 12 dB（振幅 4 倍）．

ドラッグフリー制御の残留雑音の影響の例



左図上中段は長さ制御の開ループ応答関数の Bode 線図．下段は(キャリブレーションした)変位雑音スペクトルの内訳．静電センサの雑音 10^{-10} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ が達成できれば，ドラッグフリー制御の残留雑音からのカップリングによる加速度雑音の影響はなくせる．この自由度については，スラスト雑音の要求値にはかなりのマージンがある．

まとめ

- 通常の標準バスに搭載される姿勢制御ホイールを，DPF では積まず，重力傾度安定を
- ミッション側に低雑音スラスタを搭載し，ドラッグフリー制御と姿勢制御の両方を行う．→ 100 μ N レンジの低雑音スラスタの開発
- いくつかの外乱について，スラスタ・静電アクチュエータに対するレンジ要求を見積り，センサ・アクチュエータに対する要求値の確認を行った．

DPF ドラッグフリーで期待されるサイエンス

- **太陽輻射圧**の秒～分スケールの変動スペクトルが分かる (DECIGO で必要)
- **大気密度**の km スケールの空間スペクトルが分かる (DECIGO では不要)
- (上記二つがドラッグフリーで取り除けたとして) **地球重力場の高次項**が分かる