

DECIGO pathfinderの試験 マスモジュールの構造解析

鈴木理恵子, 江尻悠美子, 権藤理奈, 川村静児,
阿久津智忠, 鳥居泰男, 上田暁俊, 田中伸幸,
大淵喜之, 岡田則夫, 新谷昌人, 安東正樹,
佐藤修一, 菅本晶夫

目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

概要

DPF試験マスモジュールの Engineering Model(EM) を設計する上で、今まで検討されてこなかった電気的面からの設計行い、要求値に見合うか検証した。

目次

- 概要
- **DPF試験マスモジュール概要**
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

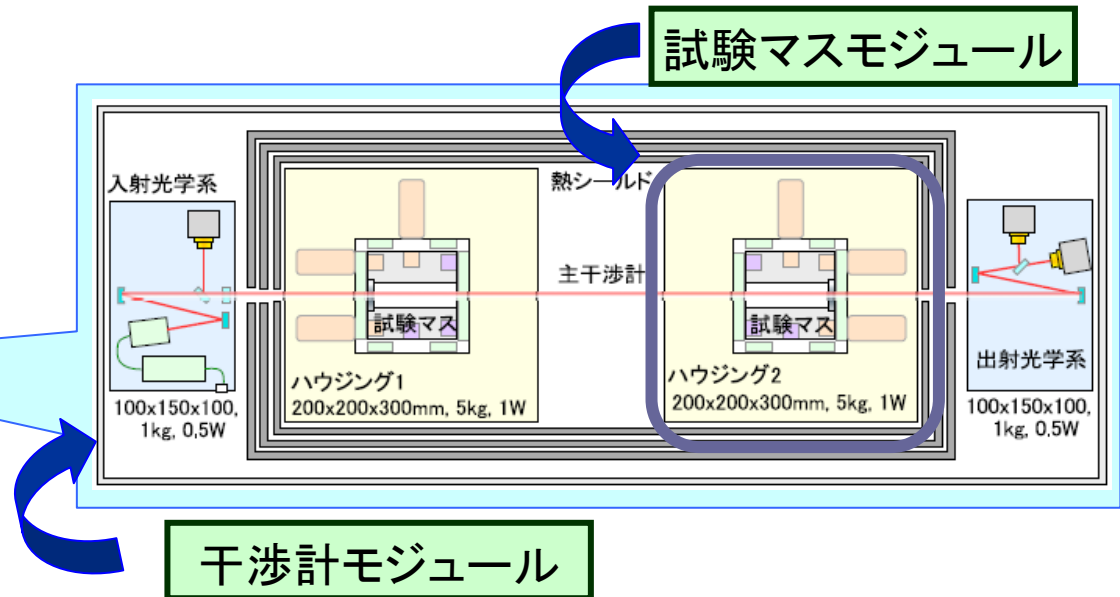
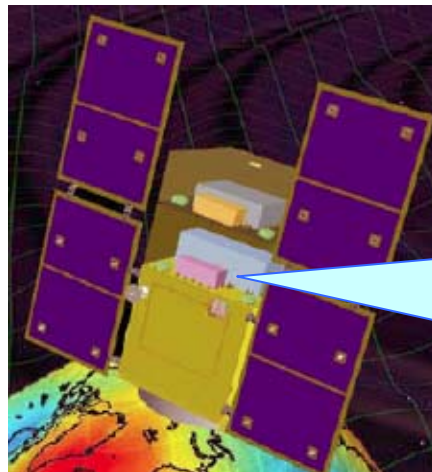
DPF試験マスモジュール概要

■ DPFとは？

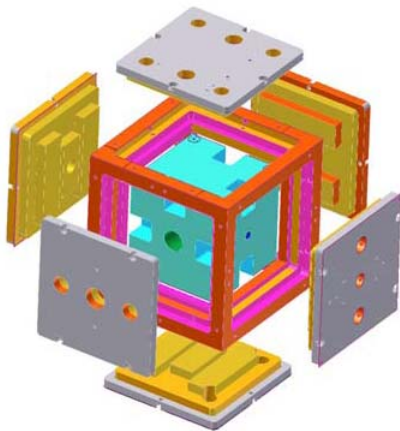
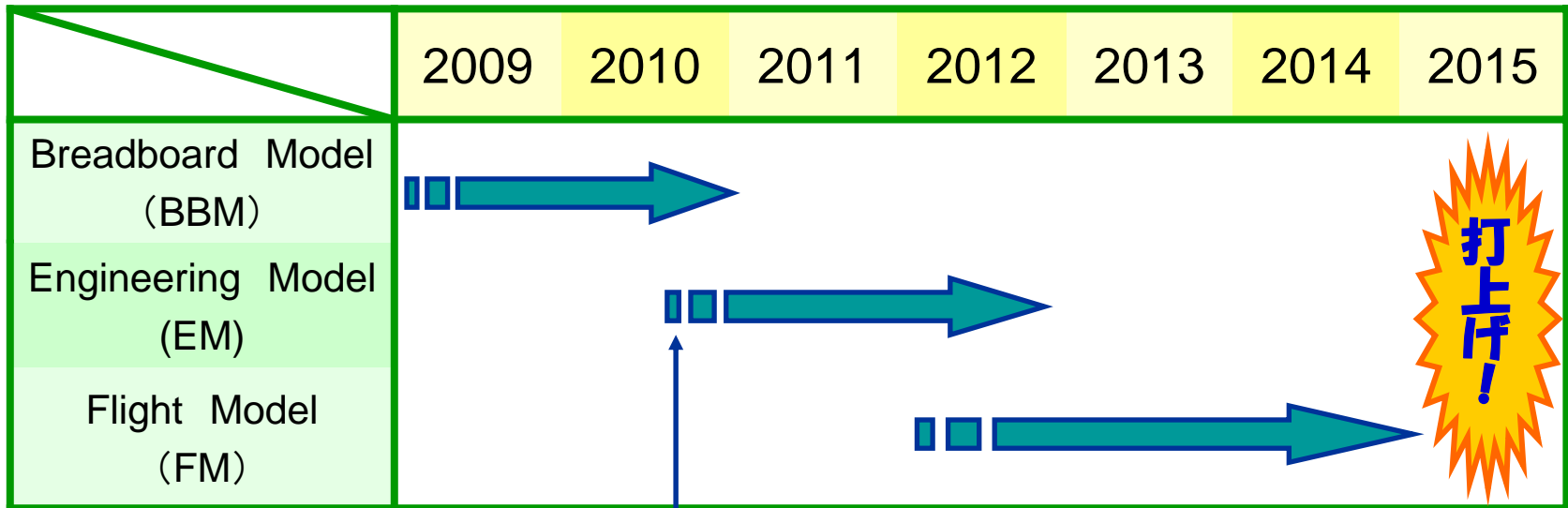
宇宙重力波検出器DECIGOの前哨衛星

■ DPF試験マスモジュールとは？

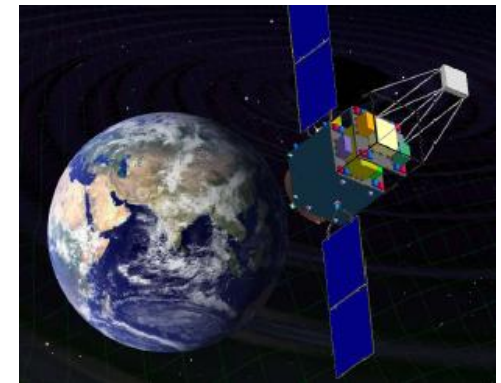
フレーム、静電センサ・アクチュエータ、レーザーセンサ、ローンチロック・クランプリリース機構、及び試験マスからなる、干渉計の鏡と試験マスを非接触制御する機構



試験マスモジュール開発ステップ



現在EMの設計中



目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

EM開発検討事項

BBM検証実験より、EMを設計する上で解析が必要な項目

- 電気系解析: センサ感度・雑音レベルが要求を満たすか解析する
- 構造・熱解析: 打上げ時・運用に支障をきたさないか解析する

この際考慮すべき項目

- テストマス(TM)
 - ・形状
 - ・素材
 - ・ミラーのマウント
 - ・ミラーの素材
- ハウジング
 - ・素材
- 極板
 - ・形状
 - ・素材
 - ・コネクタの設置
 - ・Guard ringの設置
- アセンブリ

目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- **電気系解析によるEMの設計**
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

電気系解析の目的

DPF制御マスモジュールへの要求

静電センサ感度	$1 \times 10^{-10} \text{ m/Hz}^{1/2}$ 以下
Stiffness	$1 \times 10^{-6} \text{ 1/s}^2$ 以下
アクチュエータレンジ	$1 \times 10^{-4} \text{ N}$ 以上
アクチュエータ雑音	$1 \times 10^{-15} \text{ N/Hz}^{1/2}$ 以下

これらの値は、主に極板、テストマスの形に依存する

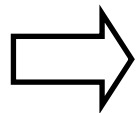
目標

これを満たすようにEM極板の設計をする

EM設計

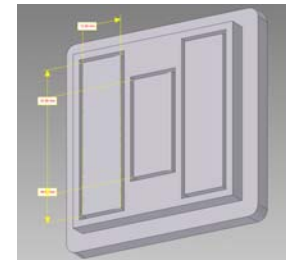
EM設計予定値

	BBM	EM(予定値)
テストマスサイズ	70mm × 70mm × 70mm	50mm × 50mm × 50mm
テストマスー極板ギャップ	1mm	4mm
極板サイズ	18mm × 62mm	未定
インジェクションサイズ	18mm × 40mm	未定



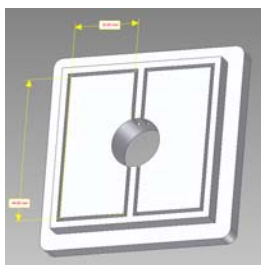
BBMの値を参考に、要求値に見合うように
極板サイズ、インジェクションサイズを設計

要求値よりEMモデルを設計



色々なモデルを想定して、計算してみた

x面		①	②	③
センサ・アクチュエータ極板	TM一極板間距離 (mm)	4	2	3.5
	縦 (mm)	44	44	44
	横 (mm)	12	20	20
y,z面				
センサ・アクチュエータ極板	TM一極板間距離 (mm)	4	2	2.5
	縦 (mm)	44	44	44
	横 (mm)	12	12	12
インジェクション極板	TM一極板間距離 (mm)	4	2	3
	縦 (mm)	12	12	12
	横 (mm)	20	20	20

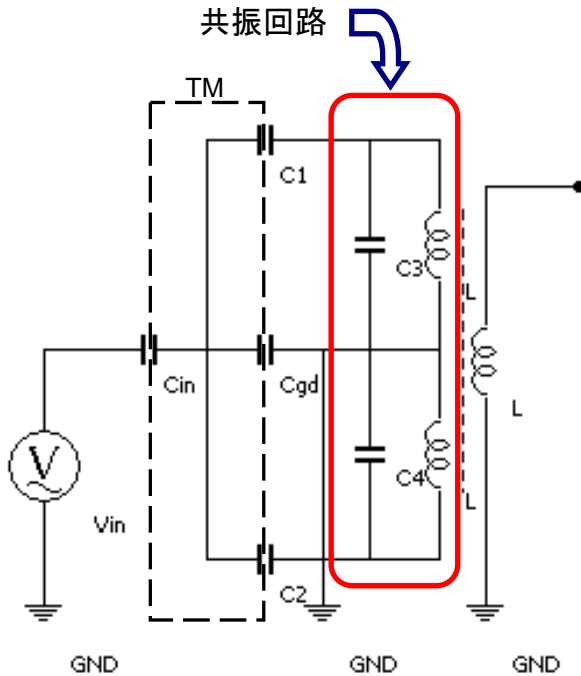


目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

静電センサ感度(1)

静電センサの感度は、主に共振回路部分の熱雑音とテストマスの電位によって決まる



$$\text{センサ熱雑音} : \frac{1}{V_m} \sqrt{\frac{8k_B T}{\omega_0^3 L Q}} \quad [\text{F/Hz}^{1/2}] \quad \dots (1)$$

ω_0 : センサ回路共振周波数 L : インダクタンス
 Q : Q値 V_m : テストマス電位

テストマス電位の求め方

$$V_m = V_{in} \frac{C_{in(total)}}{C_{total}} \quad \dots (2)$$

$C_{in(total)}$: インジェクション電気容量合計 V_{in} : インジェクション電圧

C_{total} : total電気容量

静電センサ感度(2)

熱雑音をセンサ感度に変換すると

EMセンサ感度

	①	②	③
X方向	$1.9 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$0.2 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$0.097 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$
Y方向	$1.9 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$0.3 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$
Z方向	$1.9 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$0.3 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$



②、③が要求値 $1 \times 10^{-10} \text{ m/Hz}^{1/2}$ をクリア!

目次

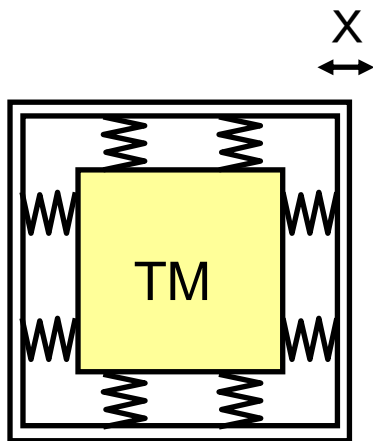
- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・**stiffness**
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

Stiffness (1)

Stiffnessとは？

テストマスとテストマスを囲む極板間に働く静電的な弾性力のバネ定数

$$F = -m\omega_p^2 x \quad [\text{N}] \quad \dots (5)$$



Stiffnessは、センサ・アクチュエート、インジェクション極板に常かけている電圧により発生する。

Stiffnessはテストマス加速度雑音に影響する

$$a_{\text{noise}} = \underbrace{\frac{f_{\text{int}}^{\text{IS}}}{m} + \omega_p^2 X_n}_{\text{試験マスモジュールが原因の雑音}} + \underbrace{\frac{f_{\text{int}}^{\text{OUT}}}{m} + \omega_p^2 \frac{F_{\text{S/C}}}{M \omega_{\text{fb}}^2}}_{\text{試験マスモジュール外部より発生する雑音}} \quad [\text{m/S}^2] \quad \dots (6)$$

試験マスモジュールが原因の雑音

試験マスモジュール外部より発生する雑音

$f_{\text{int}}^{\text{IS}}$: 試験マスモジュール内部起因雑音

$f_{\text{int}}^{\text{OUT}}$: 試験マスモジュール外部起因雑音

ω_p^2 : Stiffness

X_n : 試験マス変位雑音

$F_{\text{S/C}}$: S/C雑音

$M \omega_{\text{fb}}^2$: ドラッグフリーオープンループゲイン

Stiffness (2)

EMの値からStiffnessを求めると

	①	②	③
X方向	$0.27 \times 10^{-6} / s^2$	$0.58 \times 10^{-6} / s^2$	$0.37 \times 10^{-6} / s^2$
Y方向	$0.40 \times 10^{-6} / s^2$	$1.6 \times 10^{-6} / s^2$	$0.59 \times 10^{-6} / s^2$
Z方向	$0.40 \times 10^{-6} / s^2$	$1.6 \times 10^{-6} / s^2$	$0.59 \times 10^{-6} / s^2$



①、③が目標値 $1 \times 10^{-6} / s^2$ 以下クリア！

目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

静電アクチュエータレンジ

静電アクチュエータのレンジは、主にドラッグフリー時の姿勢制御に使う値から要求値が決まっており、 $1 \times 10^{-4} \text{ N}$ 以上の出力が求められる。

静電アクチュエータレンジは以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \frac{N_x}{2} \left(\frac{\partial C_x}{\partial x} \right) V_{\text{MAX}}^2 \\ &= \frac{N_x}{2} \frac{C_x}{d_x} V_{\text{MAX}}^2 \quad \dots (7) \end{aligned}$$

N_x : x軸方向の極板枚数

アクチュエータレンジ

EMの値からアクチュエータレンジを求めると

	①	②	③
X方向	$2.9 \times 10^{-6} / N$	$17.5 \times 10^{-6} / N$	$7.7 \times 10^{-6} N$
Y方向	$2.9 \times 10^{-6} / N$	$11.7 \times 10^{-6} / N$	$7.5 \times 10^{-6} N$
Z方向	$2.9 \times 10^{-6} / N$	$11.7 \times 10^{-6} / N$	$7.5 \times 10^{-6} N$

⇒ $10 \times 10^{-4} N$ 以上 不達成

※

BBMアクチュエータレンジ

X方向	$98.8 \mu N$
Y方向	$98.8 \mu N$
Z方向	$95.3 \mu N$

参考までに、EMより極板サイズが大きく、
TM一極板間の距離が短いBBMでも、
ギリギリレンジが足りなかった。

→解決法を模索中

目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- **結果・考察**
- まとめ

結果・考察

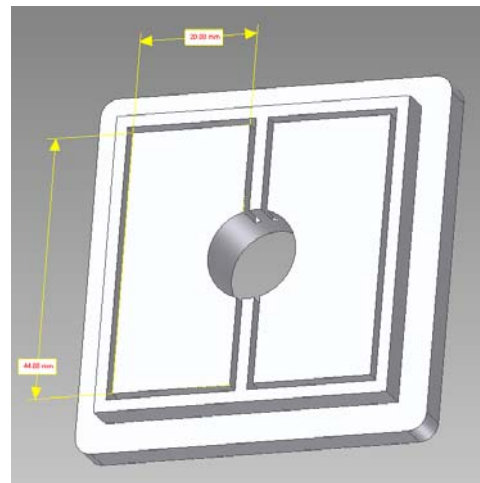
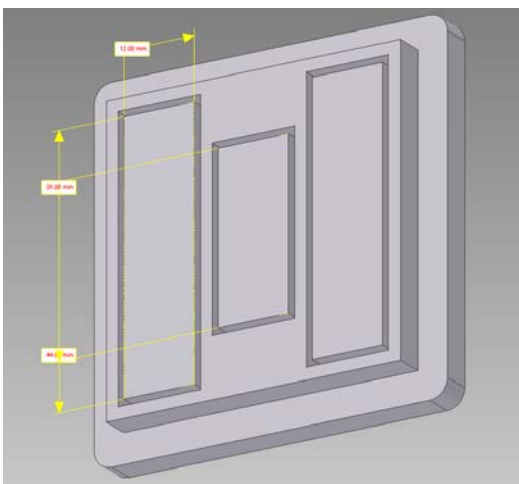
以上結果より、このようにEMモデルの設計をした

X面

TM一極板間の距離: 3.5mm

センサ・アクチュエータ極板

縦: 44mm 横: 20mm



YZ面

センサ・アクチュエータ極板

TM一極板間の距離: 2.5mm

縦: 44mm 横: 12mm

インジェクション極板

TM一極板間の距離: 3.0mm

縦: 20mm 横: 12mm

→アクチュエータレンジに関しては解決策を模索中

目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール概要
- EM設計における検討事項
- 電気系解析によるEMの設計
 - ・静電センサ感度
 - ・stiffness
 - ・静電アクチュエータレンジ
- 結果・考察
- まとめ

EM設計・まとめ

今回行ったこと

- BBMから得られた情報を元にEMを設計した
- 電気系面からの設計

今後の予定

- 今回は容量計算を無限平面近似で行ったが、より正確な解析を行うためにCOMSOL等のソフトを導入予定
- 解析結果を元に、各コンポーネントの最適化を行う