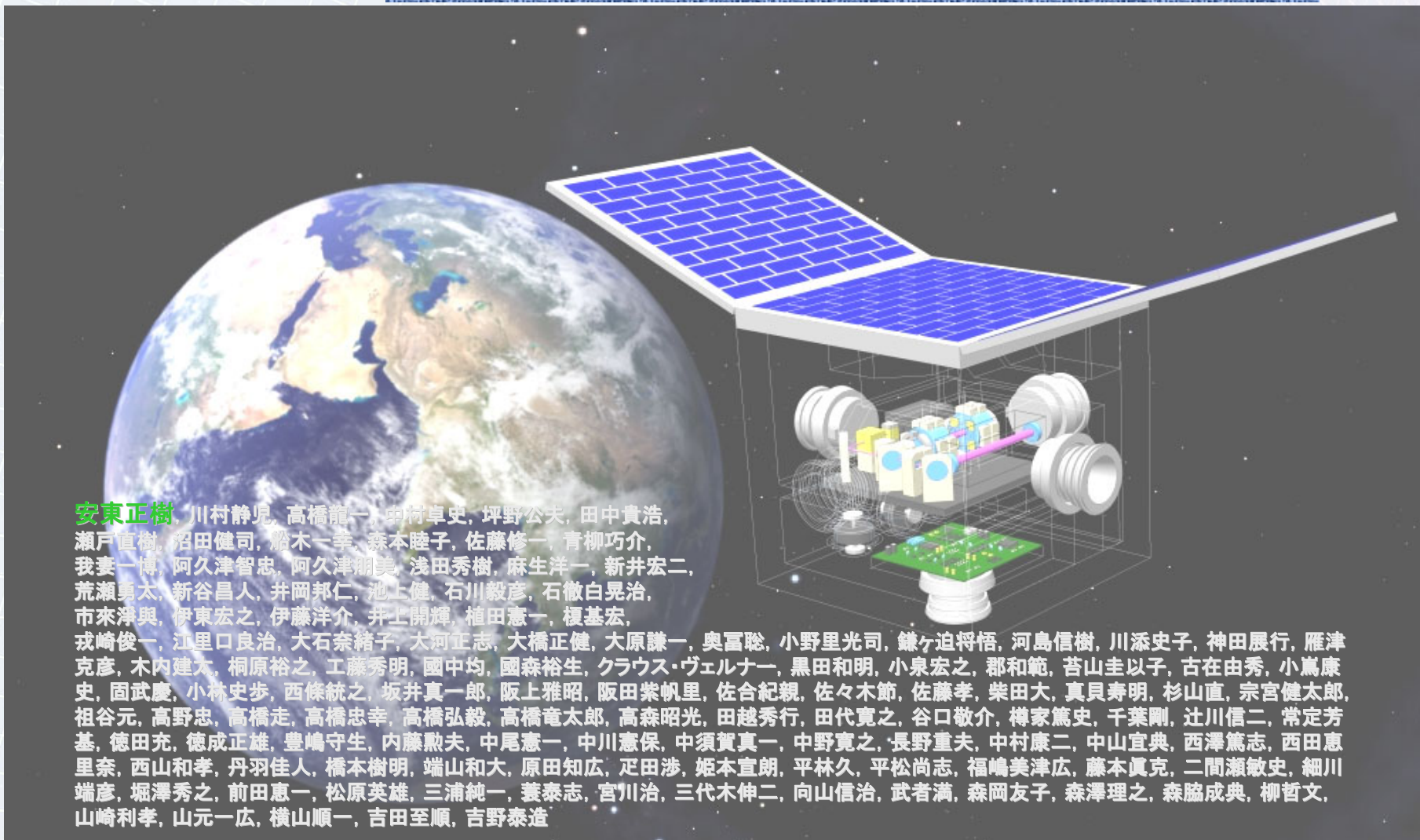


スペース重力波アンテナDECIGO計画 IX (DECIGOパスファインダー)



安東正樹, 川村静児, 高橋龍一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩,
瀬戸直樹, 沼田健司, 船木一幸, 森本睦子, 佐藤修一, 青柳巧介,
我妻一博, 阿久津智忠, 阿久津朋美, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二,
荒瀬勇太, 新谷昌人, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石徹白晃治,
市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 櫻基宏,
戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 奥富聡, 小野里光司, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 川添史子, 神田展行, 雁津
克彦, 木内建太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國中均, 國森裕生, クラウス・ヴェルナー, 黒田和明, 小泉宏之, 郡和範, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康
史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎,
祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳
基, 徳田充, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵
里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川
端彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 養泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森岡友子, 森澤理之, 森脇成典, 柳哲文,
山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造

概要・目次

DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGOパズファインダー (DPF)

の概要紹介

DPFの位置づけ・概要

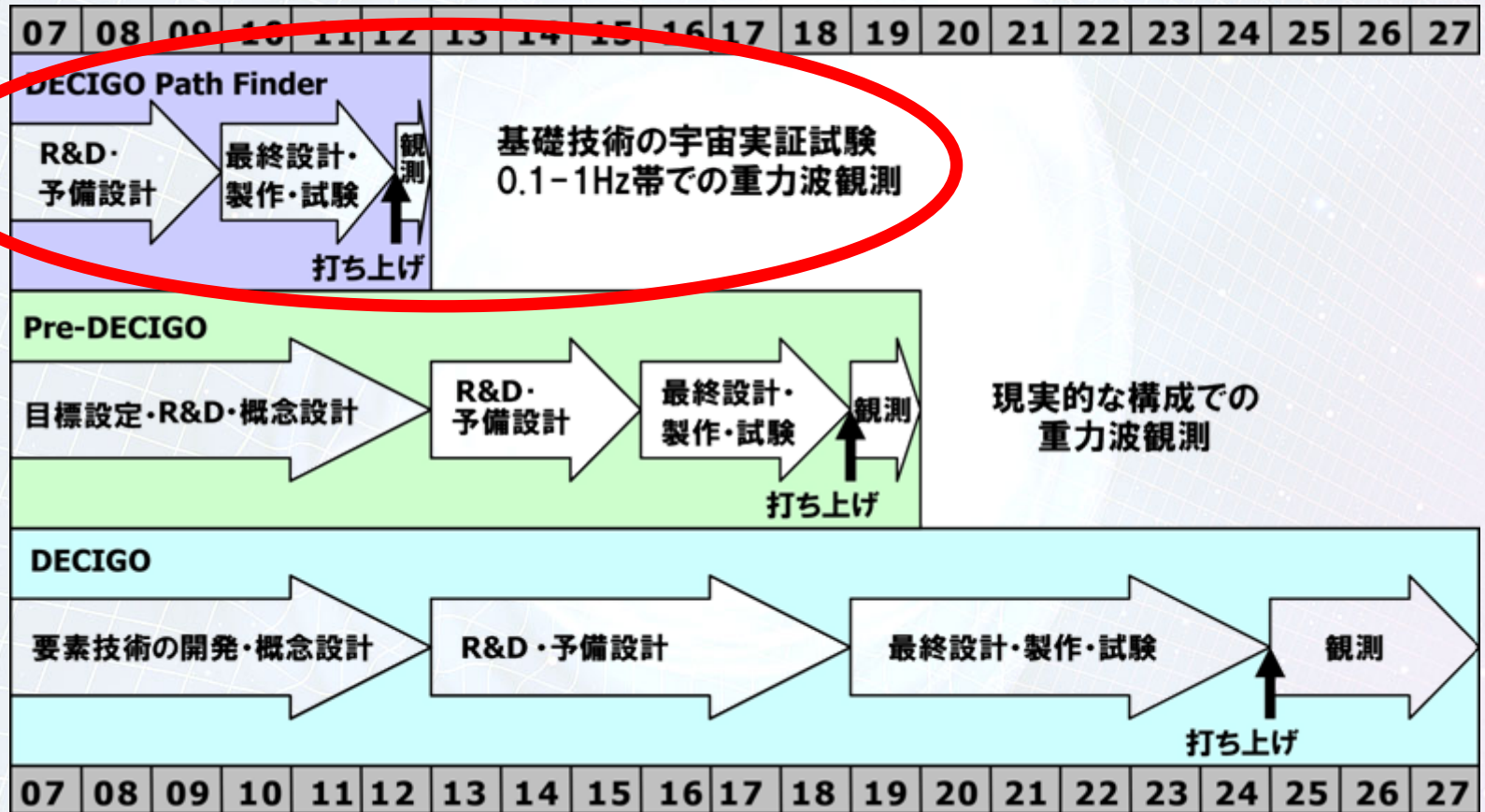
DPFの感度と期待できる成果

実現に向けての取り組み

まとめ

DECIGO-PF (1)

DECIGOのロードマップ



LPF

LISA

Ad. LIGO
LCGT

DECIGO-PF (2)

● DECIGO-PF

DECIGO実現のためには、各要素技術の地上での入念な試験は不可欠
その一方で、実際に宇宙空間でなければ試験できない項目もある



最初の前哨衛星: DECIGO パスファインダー (DPF)
(DECIGOの1つの腕を1台の衛星内に搭載)



DECIGO-PF (3)

● DECIGO-PFの概要

DECIGO-PF

衛星：70cm立方, 100kg級, 1機, 地球周回軌道

ドラッグ・フリーの組み込み

レーザー光源とその安定化システム

フリーマスで構成された基線長10cmのFP共振器

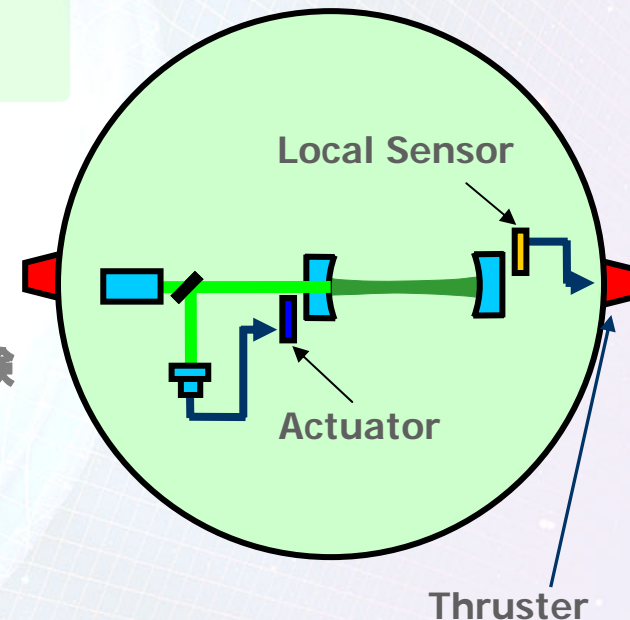


DECIGOのための宇宙実証試験

- (1) 衛星のドラッグフリー制御の実証試験
- (2) レーザー光源とその安定化システムの宇宙実証試験
- (3) レーザー干渉計(FP共振器)制御の宇宙実証
- (4) クランプ・リリース機構の宇宙実証試験

半年間の重力波観測

- (5) 小型重力波検出器による低周波数の重力波の観測
地上での観測が困難な 0.1-10Hzの重力波を観測
実際に検出されない場合
→ これまでに無い周波数帯で, 上限値を与える



DECIGO-PF (4)

● DPF概念設計

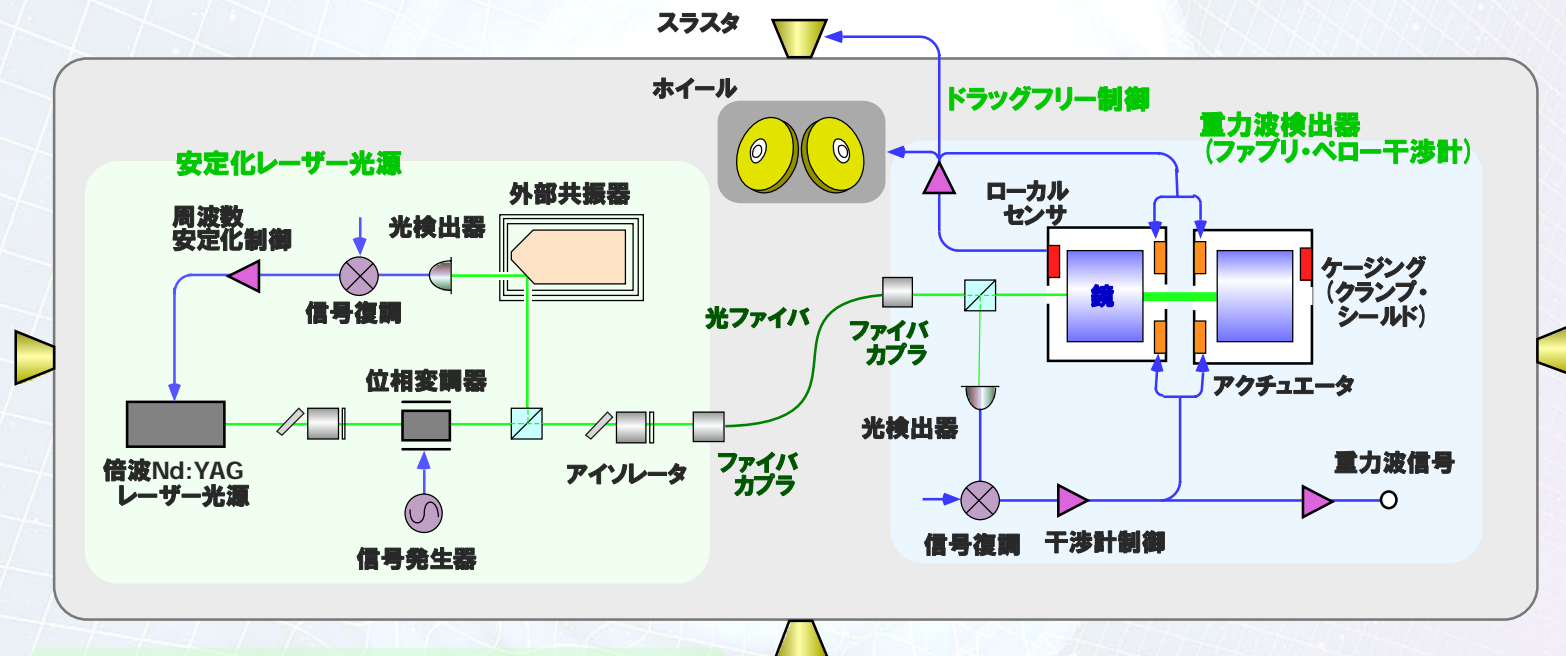
ミッション機器重量 : 20kg

ミッション機器空間 : 400x400x400 mm

ドラッグフリー

ローカルセンサで相対変動検出

→ スラスト・ホイールにフィードバック



レーザー光源

倍波Nd:YAGレーザー
(NPRO + 高調波変換)

出力 100mW

外部共振器による周波数安定化

ファブリ・ペロー共振器

フィネス : 100

基線長 : 10cm

テストマス : 質量 1kg

PDH法により信号取得・制御

DECIGO-PF (5)

● DPF軌道

軌道を選択

- 実現性の高さ (コスト, 打ち上げ機会)
- 運用のやり易さ (電力の供給, 通信)
- 地球重力場などによる雑音

⇒ 太陽同期極軌道
高度 750km

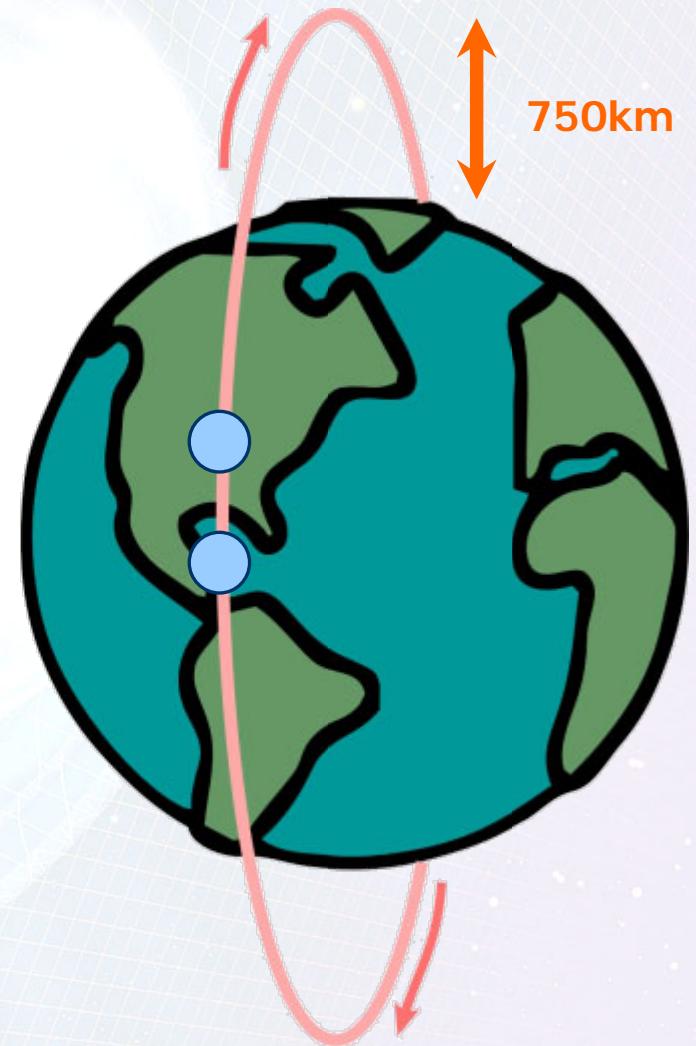


メリット

- ピギーバックによる打ち上げ機会が期待できる
→ コスト面で実現性が高い
- 地球の影に入らない
→ 連続的な電力供給
- 運用のやり易さ (電力の供給, 通信)

デメリット

- 地球の影響を十分に検討する必要がある
(重力場, 地磁気, 残留大気)

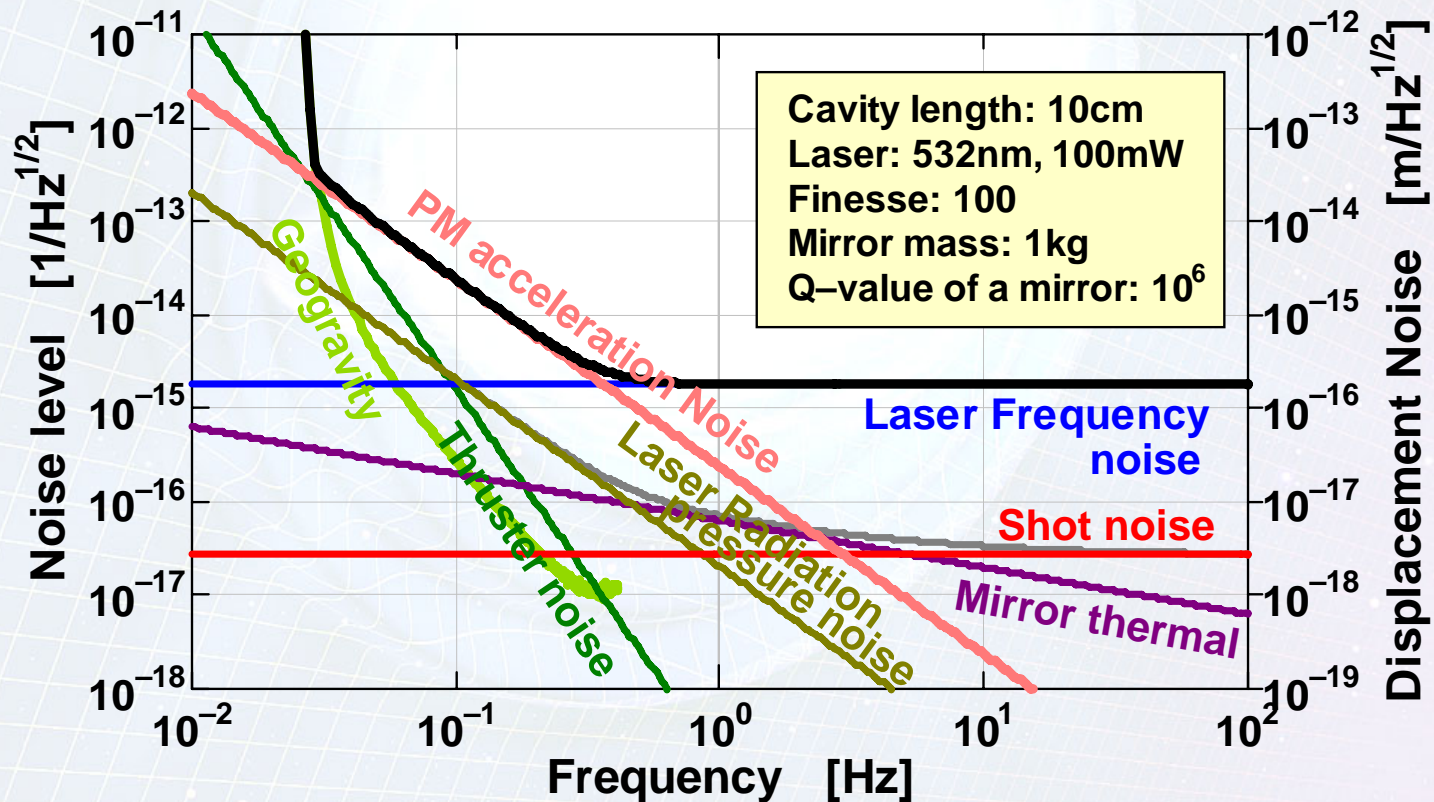


DECIGO-PF (6)

● 重力波に対する感度

光源 : 532nm, 100mW
共振器長 : 10cm
フィネス : 100, 鏡質量 : 1kg
鏡Q値 : 10^5 , 基材: 熔融石英
温度 : 293K

衛星重量 : 100kg, 衛星実効面積 : 1m^2
衛星高度: 750km
スラスト雑音: $0.1 \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$



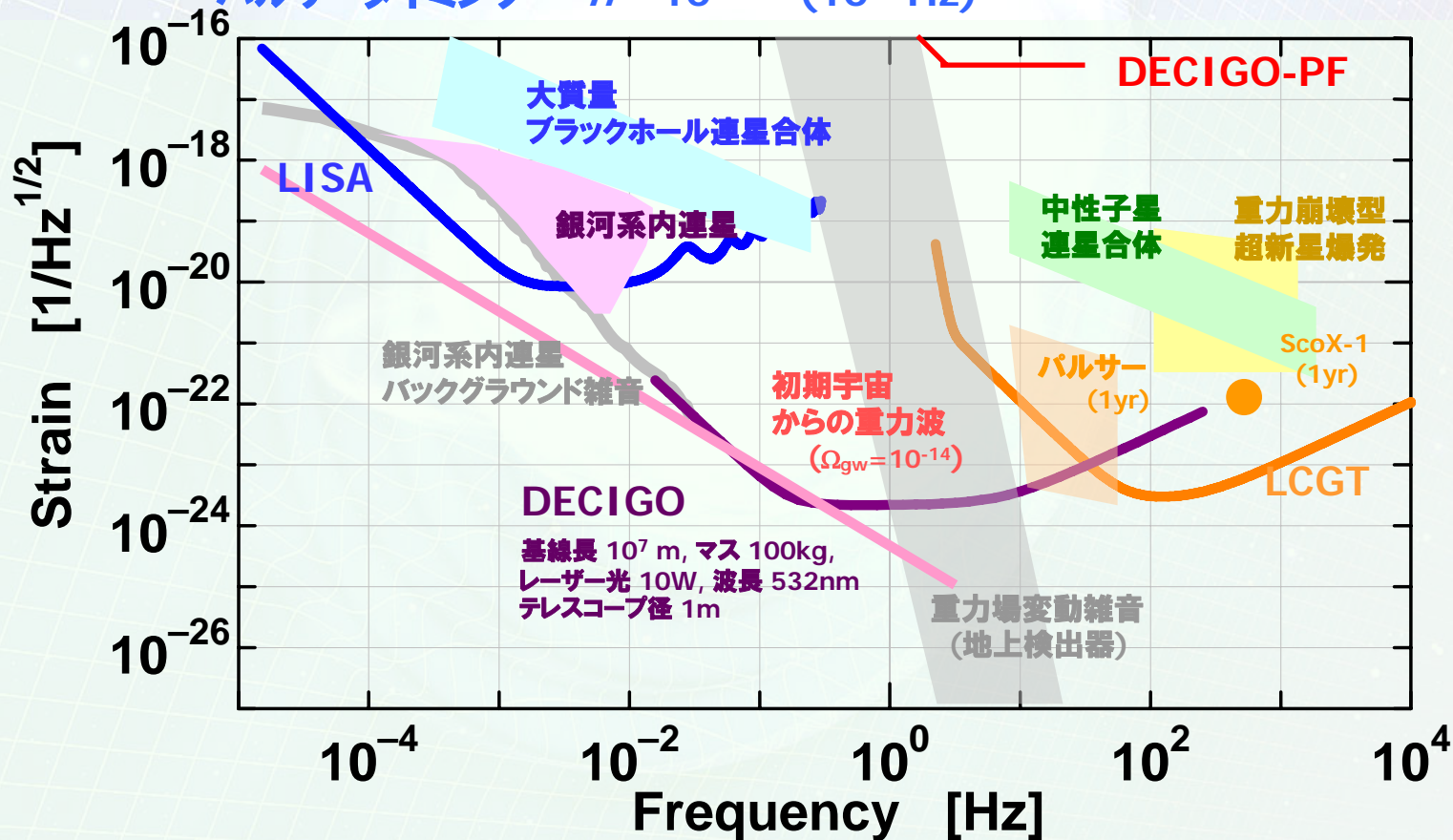
DECIGO-PF (7)

●他の重力波検出器との比較

本格的な将来計画と比較すると見劣りするが、この周波数帯での観測はない

ドップラートラッキング $h \sim 10^{-15}$ (10^{-4} - 10^{-2} Hz)

パルサータイミング $h \sim 10^{-14}$ (10^{-8} Hz)



DECIGO-PF (8)

● DPFで期待できる重力波源

BH準固有振動からの重力波

$$h \sim 10^{-15} \left(\frac{m}{10^8 M_{\odot}} \right) \left(\frac{1 \text{Gpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 3 \times 10^{-4} \left(\frac{10^8 M_{\odot}}{m} \right) \text{ [Hz]}$$

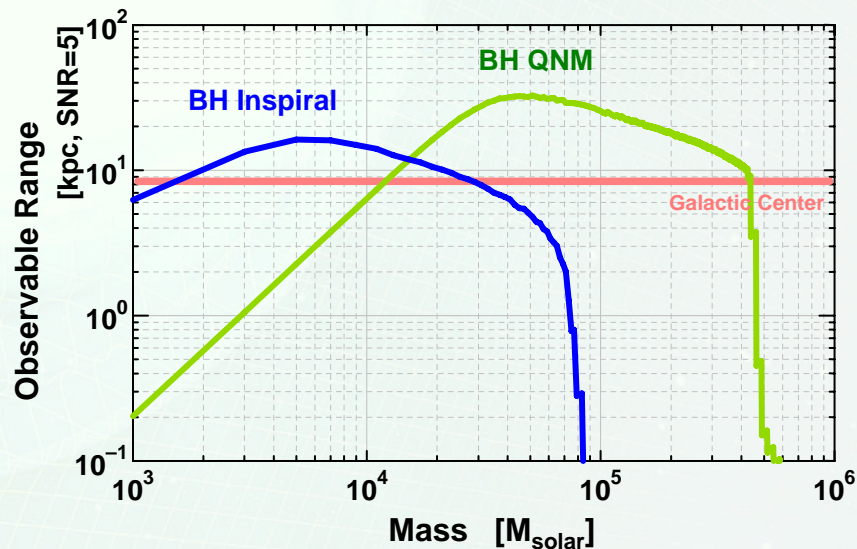
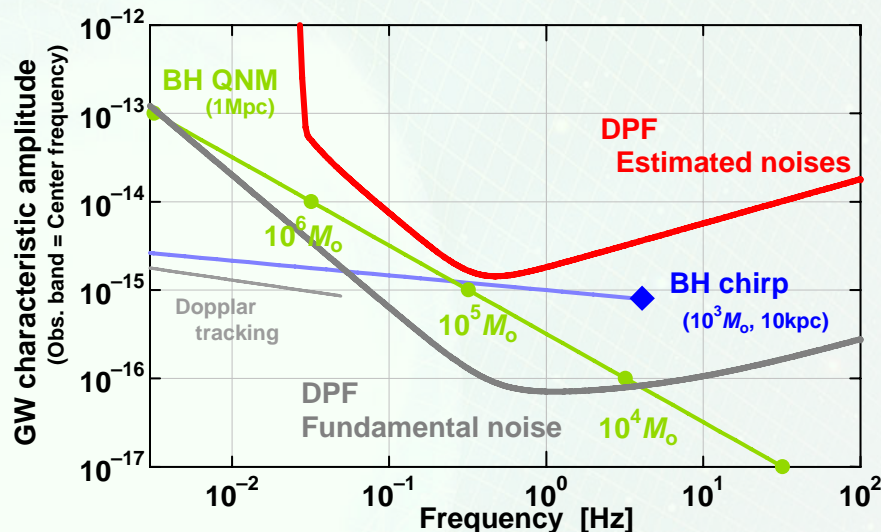
$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 0.3 \text{ Hz}$
 距離 1Mpc, $m = 10^5 M_{\text{sun}}$

中間質量ブラックホール合体

$$h \sim 10^{-15} \left(\frac{m_c}{10^3 M_{\odot}} \right)^{5/6} \left(\frac{1 \text{Hz}}{f} \right)^{1/6} \left(\frac{10 \text{kpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 4 \times \left(\frac{10^3 M_{\odot}}{m_t} \right) \text{ [Hz]}$$

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4 \text{ Hz}$
 距離 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$



DECIGO-PF (9)

● 研究計画

1年目： 概念設計およびブレッドボードモデルの開発

ブレッドボードモデルを作製し、その動作を行なう。衛星本体とインターフェース部の基本設計を取りまとめ、それら結果を元に、DECIGOパスファインダーの基本設計を固める。

2年目： ブレッドボードモデルの性能評価とエンジニアリングモデルの設計

ブレッドボードモデルの性能の評価と感度の向上実験を行い、雑音に関して所定の要求値を満たすよう改良を行う (歪み感度で $10^{-16}/\text{Hz}^{1/2}$)。また、それらを元にエンジニアリングモデルの設計に取り掛かる。

3年目： エンジニアリングモデルの製作

他の開発要素 (ドラッグフリー制御技術、Nd:YAGレーザー光源、外部共振器による周波数安定化) の開発成果の供与を受けて、重力波観測装置部のエンジニアリングモデルを製作し、各種試験を行う。それらの結果を踏まえて、実際に打ち上げる衛星全体の詳細設計を完成させる。

4年目： プリ・フライトモデルの開発

実際に打ち上げる仕様での試験機 (プリ・フライトモデル) の製作と試験を行う。

5年目： フライトモデルの製作と試験

フライトモデルの振動試験・宇宙環境試験を行なう。

6年目： 打ち上げと動作

打ち上げと軌道上の宇宙実証試験を行う。さらに、半年間の重力波観測を行なう。

DECIGO-PF (10)

● DPF研究体制・開発コスト

開発期間 : 5年半

開発コスト : 8億円

を見込む

(打上げ費用は含まず)

さまざまな機関から **59名** が参加

取り組み

平成18年度 文部科学省科学研究費
特定領域研究 の柱として申請中

JAXA/ISAS 宇宙理学委員会 から
小型科学衛星計画ワーキンググループ
の1つとしての承認を得た

現時点での基本概念設計をまとめる
ため「DPFミッション提案書」を作成

東京大学 理学系研究科

安東 正樹, 坪野 公夫, 石徹白 晃治,
高橋 走, 小野里 光司, 沼田 健司,
穀山 涉, 樽家 篤史, 姫本 宣朗

国立天文台 重力波プロジェクト推進室

川村 静児, 新井 宏二, 佐藤 修一,
森本 睦子, 苔山 圭以子, 高橋 龍一,
森岡 友子, 固武 慶, 山崎 利孝,
川添 史子

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

高橋 忠幸, 高島 健, 坂井 真一郎,
船木 一幸, 西山 和孝, 國中 均

大阪市立大学 理学研究科

神田 展行, 石原 秀樹, 中尾 憲一,
徳田 充

電気通信大学 レーザー新世代研究センター

武者 満, 植田 憲一

東京大学 新領域創成科学研究科

森脇 成典, 川浪 徹

カリフォルニア大学

瀬戸 直樹

新潟大学 自然科学系

佐藤 孝

京都大学 生存圏研究所

山川 宏

東海大学 工学部

堀澤 秀行

東京大学 工学系研究科

小泉 宏之

コロンビア大学

麻生 洋一

東京大学 総合文化研究科

柴田 大

マックスプランク重力物理研究所

(アルバートアインシュタイン研究所)

高橋 弘毅, 宗宮 健太郎

産業技術総合研究所 計測標準研究部門

大苗 敦, 池上 健

大阪大学 理学研究科

田越 秀行

弘前大学 理工学部

浅田 秀樹

東京大学 宇宙線研究所

三代木 伸二, 徳成 正雄, 阿久津 朋美

テキサス大学 重力波天文学センター

端山 和大, 中野 寛之

情報通信研究機構

新世代ネットワーク研究センター

細川 瑞彦, 長野 重夫

京都大学 理学研究科

中村 卓史, 田中 貴浩, 井岡 邦仁

東京大学

ビッグバン宇宙国際研究センター

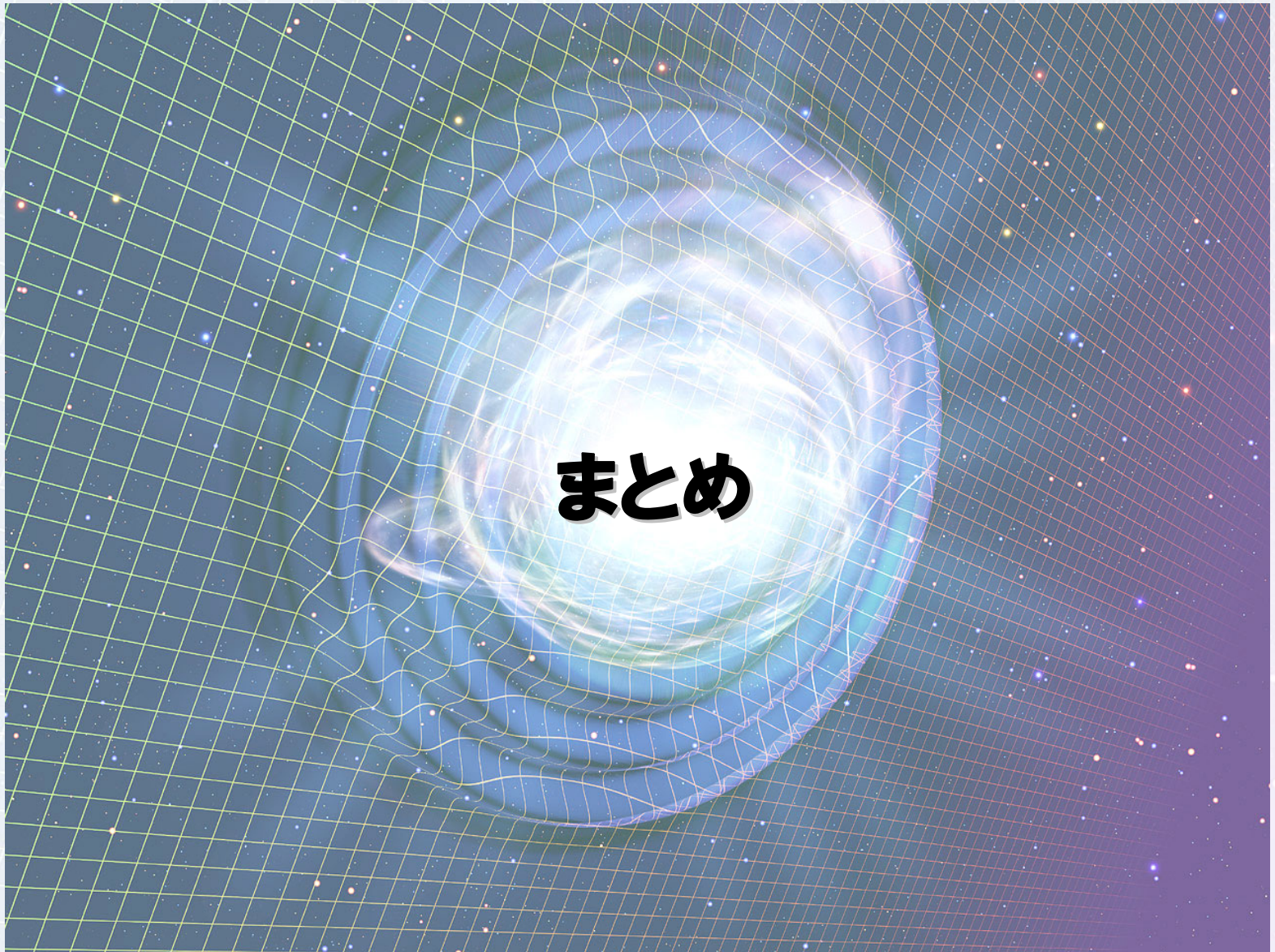
横山 順一

京都大学 大学院 人間・環境学研究科

阪上 雅昭

カリフォルニア工科大学

宮川 治



まとめ

● 重力波天文学にむけて

DECIGO実現のためには、

入念な地上試験 と **宇宙空間での実証試験** が不可欠



小型衛星を利用した実証試験

小型衛星搭載の重力波検出器 DPF を上げる

技術試験だけではない....

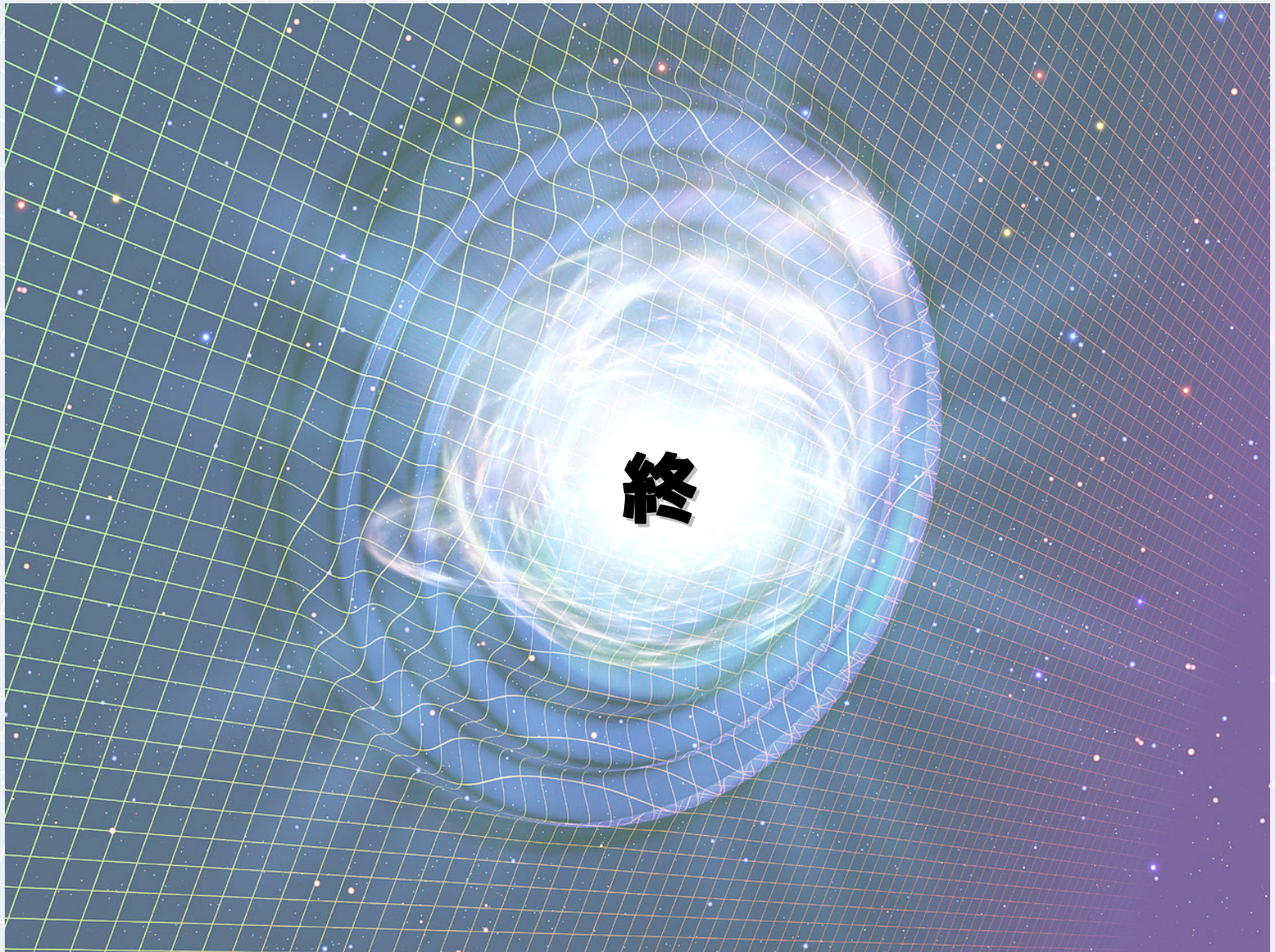
実際に**宇宙で重力波観測**を行なう世界で初めての検出器になる
これまで重力波観測が行なわれていない

0.1-1 Hz周波数帯での重力波観測が期待できる

重力波観測以外への発展

安定な宇宙環境 (微小重力, 大気の影響・地面振動が無い) と、
精密計測・制御技術の組み合わせ

➡ **基礎物理実験** (重力逆二乗則, 空間の等方性, 等価原理),
物性計測 (機械的損失・熱振動の測定), **地球重力場観測, 衛星環境測定**



DECIGO-PF (12)

● DPF雑音源の見積り

外乱・雑音要因	力の大きさ [N]	鏡の相対加速度 [m/s ²]	干渉計加速度雑音 [m/s ² /√Hz]	干渉計変位雑音 [m/√Hz]
試験質量に直接働く外乱				
重力	太陽	6.0×10^{-3}	7.9×10^{-15}	
	月	3.3×10^{-5}	1.7×10^{-14}	
	衛星	1.5×10^{-9}	9.9×10^{-10}	
	地球	7.8	3.3×10^{-12}	3.0×10^{-16}
電磁力	衛星磁場	1.2×10^{-14}		1.5×10^{-16}
	ローレンツ力	3.5×10^{-14}		6.9×10^{-18}
その他	残留気体分子			8.6×10^{-16}
	宇宙線の衝突	1.1×10^{-17}		1.8×10^{-18}
	熱輻射			1.5×10^{-16}
衛星に働く外乱				
	太陽輻射圧	1×10^{-5}		1.6×10^{-18}
	地球大気の摩擦	7×10^{-6}		
	衛星スラスタ	1×10^{-4}		6.3×10^{-17}
干渉計の雑音				
	散射雑音			2.7×10^{-18}
	レーザー輻射圧	5×10^{-8}	8.2×10^{-17}	
	鏡の熱雑音			2.0×10^{-17}
	光源周波数雑音			1.8×10^{-16}
合計 (2乗和の平行根)			9.4×10^{-16}	1.8×10^{-16}

DECIGO-PF (6)

● 地球重力場の影響

地球重力場モデル

地球重力場観測衛星(GRACE)のデータ
球面調和関数 180次まで使用

衛星の運動 (5km/sec)

→ スペクトルを計算

0.02%の縦横カップリングを仮定

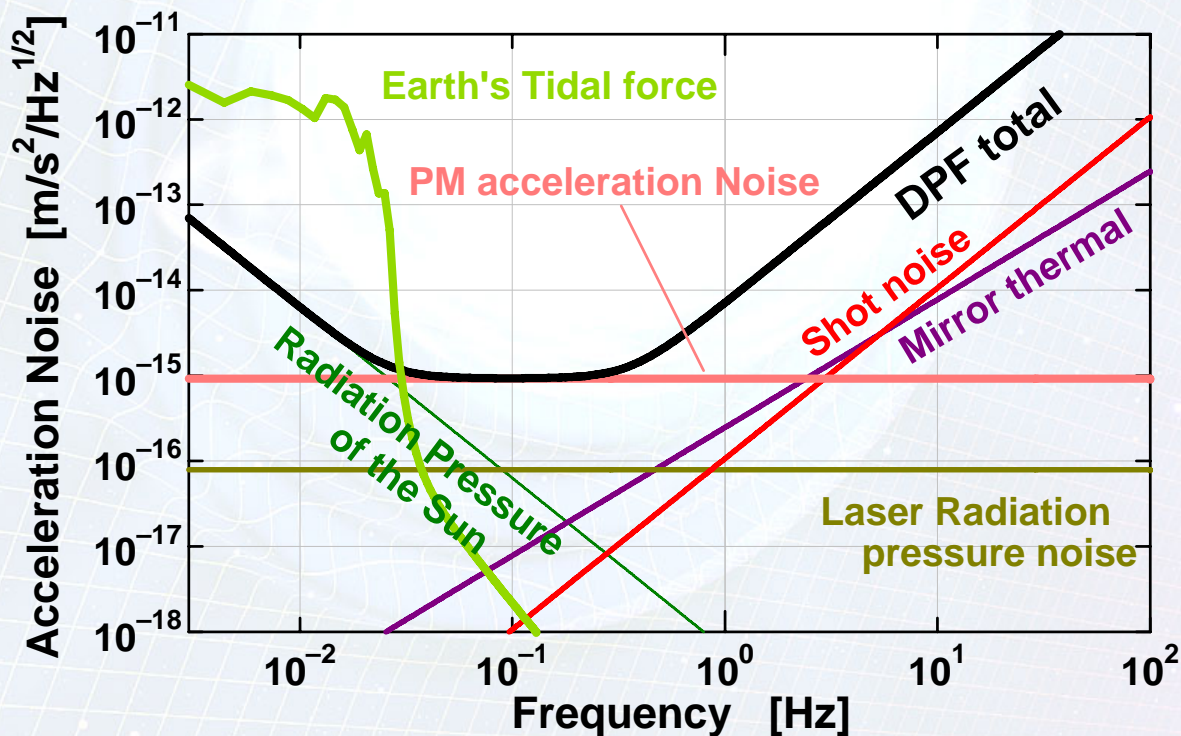
0.03Hzのカットオフ:

球面調和関数180次に対応

→ それより高い周波数では不明

重力ポテンシャルの影響は $(R_e/r)^n$ で効いてくる
ので高次の効果は無視できる

高次の重力場を観測できたら立派な成果



DECIGO-PF (12)

● 加速度雑音

磁気的な効果

衛星の持つ磁気-テストマス帯磁率: A_1

惑星間磁気-テストマス帯磁率: A_2

電荷の揺らぎによるローレンツ力揺らぎ: A_3

惑星間磁気揺らぎによるローレンツ力揺らぎ: A_4

衝突による効果

宇宙線の衝突による反跳: A_5

残留ガスの衝突による反跳(熱雑音): A_6

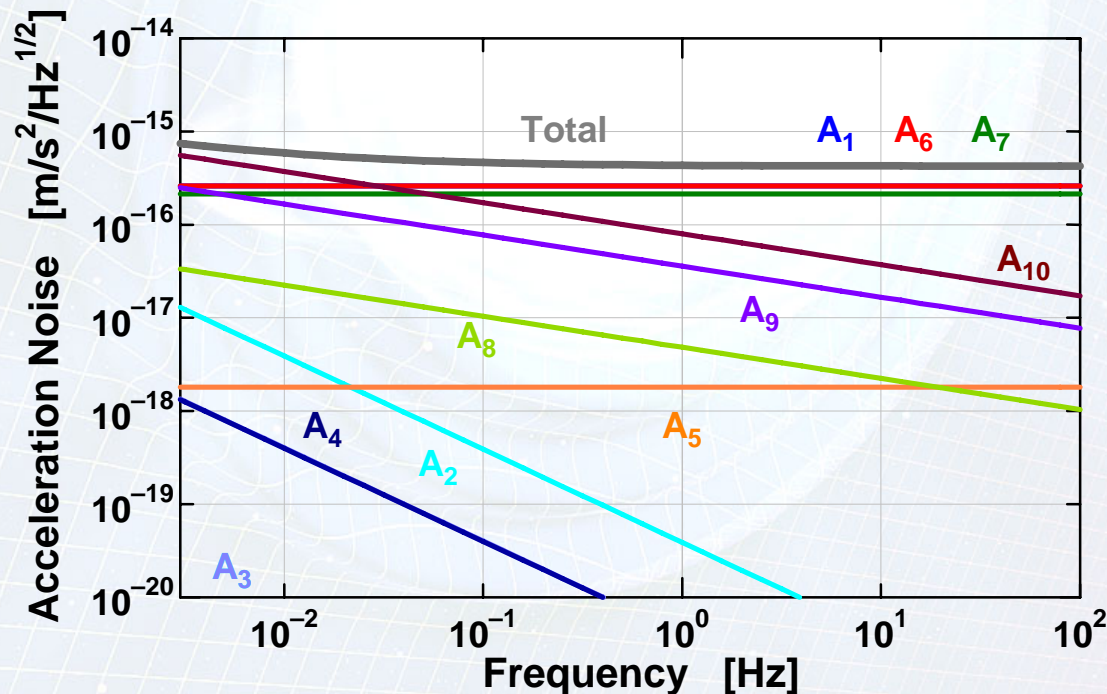
光子の衝突による反跳(光輻射圧雑音): A_7 (古典的)

温度による効果

ハウジングの差動温度揺らぎ-残留ガス気圧変化: A_8

ハウジングの温度揺らぎ-熱輻射圧変化: A_9

衛星の熱変形-重力場変化: A_{10}



DECIGO-PF (6)

● DPF ドラッグフリー・スラスタに対する要求

仕様決定要素

衛星にかかるDC的な力(太陽輻射圧 $10 \mu\text{N}$)の影響
を十分に打ち消すことができるだけの最大推力
ドラッグフリー制御の結果, 衛星にかかる外乱
(太陽輻射圧雑音 $2.5 \times 10^{-9} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$) よりも
衛星変動を安定化できるだけの, スラスタ雑音レベル
 10 Hz のドラッグフリー制御帯域が確保できるだけの応答特性
半年間の運用ができるだけの寿命と総推力



スラスタに対する要求値

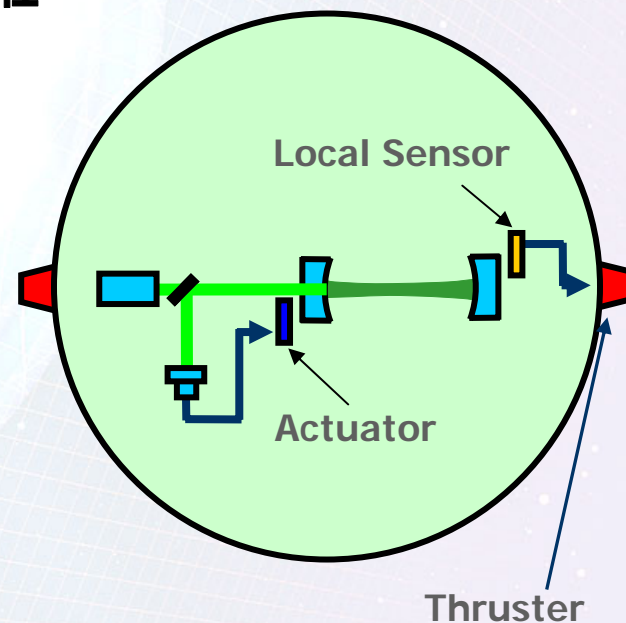
最大推力 $100 \mu\text{N}$ (安全係数10, 推力可変であること)
推力雑音 $\delta F_{\text{thruster}} < 10^{-7} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ (0.1 Hzでの値)
応答速度 10 Hz 以上
半年以上の運用寿命 (平均推力 $30 \mu\text{N}$, 安全係数3)

ドラッグフリー制御に対する要求

0.1 Hzでの制御ゲイン $K > 40$
制御帯域 10 Hz 以上

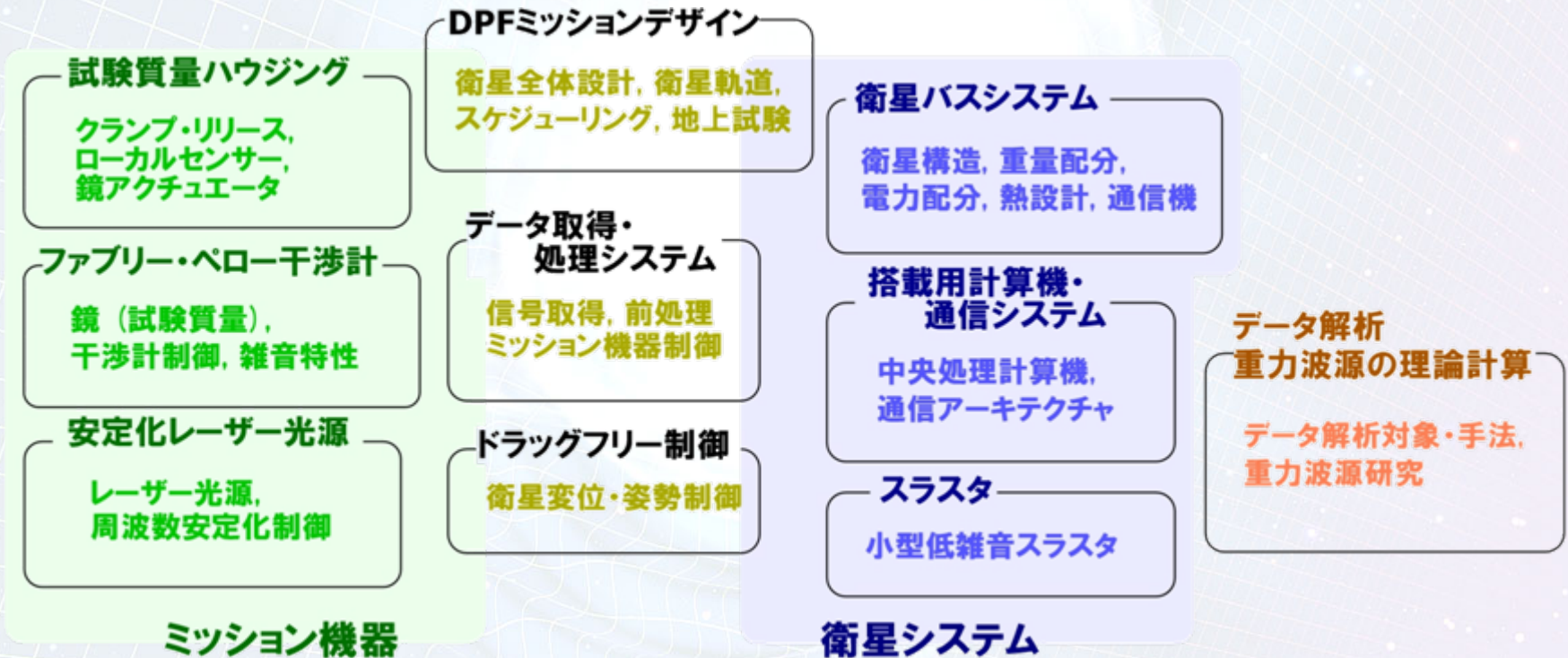
衛星-試験質量間カップリングに対する要求

0.1 Hzでのカップリング係数 $K < 10^{-6}$ 以下 (安全係数 8)



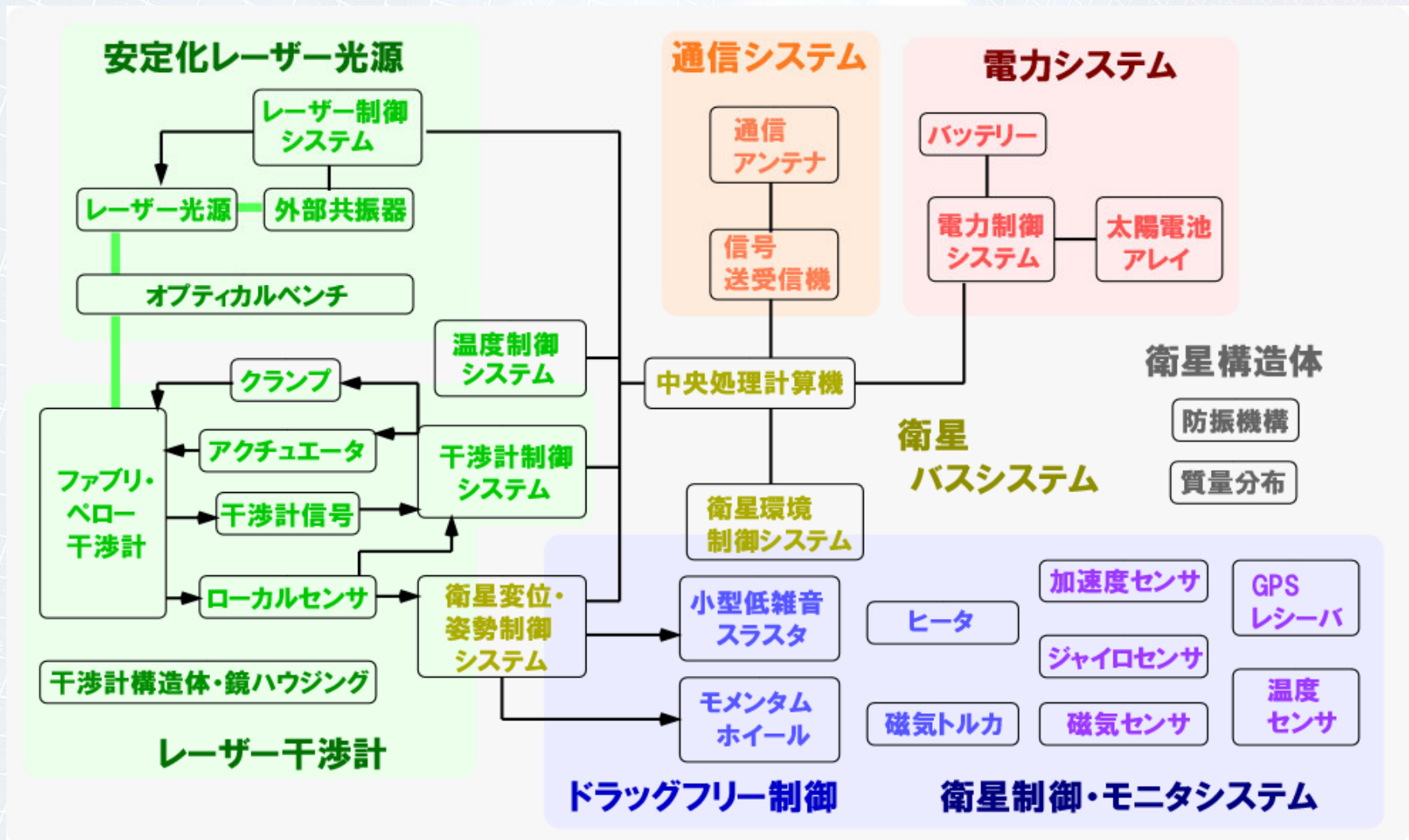
DECIGO-PF (5)

● DPFサブシステム構成



DECIGO-PF (5)

● DPFサブシステム構成



DECIGO-PF (11)

● DPFの主要パラメータ

表 2: DECIGO パスファインダーの主要緒元

全体	打上げ時期	2012 年ごろ
	重量:	100 kg
	サイズ	700 × 700 × 700 mm
	軌道:	高度 750 km, 太陽同期極軌道, 3 軸姿勢制御
	その他:	衛星中央部の 400 mm 立方をミッション機器スペースとする
仕様	電源電圧	± 15 V, +5 V, +3.3 V
	消費電力:	バス系 60 W (INDEX の最大値 54.5 W(日陰時) より) ミッション系 50 W 推進系 50 W
	推力	0-100 μ N 可変, 低雑音
	姿勢制御	360deg / 1rev. (常に y - z 面を太陽, x - y 面を地球に向ける.)
	データレート	5 kbps
	動作温度範囲	-40 - +80 °C
	耐振動	25 G
	残留磁気	0.5 Gauss 以下
	アウトガス	TML 1%以下

DECIGO-PF (12)

● DPF重量配分案

	DPF	参考：INDEX
電源系	16.5	16.5
通信系	2.4	2.4
データ処理系	4.1	4.1
姿勢制御 ^a	7.6	8.4
構造系 ^b	23.6	12.0
電気計装系	5.1	5.1
機械計装系	8.4	8.4
熱計装系	0.3	0.3
推進系	12.0	0.0
ミッション系	20.0	11.4
合計	100.0	68.6

^a STT を除く + α

^b INDEX サイズ 500 mm より, $(700/500)^2$ 倍

DECIGO-PF (13)

● DPF費用見積もり

項目	細目	費用	備考
ミッション機器			予備部品も含む
	レーザー光源	20	
	干渉計用鏡	20	
	周波数安定化光学系	20	
	干渉計鏡ハウジング	30	
	その他光学系	30	熱シールド・温度安定化を含む
	干渉計制御回路	40	
	ドラッグフリー用センサ	20	
	コンピュータ・インターフェース	40	
小計		220	
衛星バス系			
	電源ユニット	40	太陽電池パネルを含む
	衛星制御回路	20	
	衛星姿勢制御装置	50	スラスタを含む
	データ通信装置	30	地上でのデータ取得・解析装置
	コンピュータユニット	40	
小計		180	
開発費			
	プリ・フライトモデル	80	
	ブレッドボードモデル	80	
	試験費用	70	
	測定機器	70	
	人件費	100	
小計		400	
衛星開発費計		800	(単位: 百万円)

DECIGO-PF (13)

●平成19年度 特定領域研究

DECIGOのための基礎研究 + DECIGO Path Finder + PTA で申請する
総額 20 億円

DPFの開発

レーザー光源 + 安定化システムの開発

スラストの開発

ドラッグフリー制御の研究

地上試験用シミュレーター

大口徑ミラーの開発

DPF で 8億円 (本体 6億円 + 各要素の供給 2億円)

打ち上げは、JAXAで公募されているものに申請する

各計画研究の目的・スコープ

	題目	目的・スコープ
DECIGO	バスファインダー1	DPF1の開発、製作、打ち上げ、運用
	地上シミュレーター	地上シミュレーターによる力の雑音の測定と低減化 クランプリリース機構の開発 DPF用クランプリリースシステムの製作 DFI、QNDによる力の雑音の低減化の可能性
	測距技術	光学素子の開発 測距技術の開発および測距雑音の低減化
	ドラッグフリー	ドラッグフリーシステムの開発 DPF用ドラッグフリーシステムの製作
	スラスタ	スラスタの開発 DPF用スラスタの製作
	光源	光源の開発 DPF用光源(周波数安定化を含む)の製作
	周波数安定化	周波数安定化システムの開発
PTA	那須	PTA建設および運用
	鹿島	既存のアンテナの運用
理論・解析	理論	DECIGO(DPF)、PTAのための重力波源の理論的研究
	シミュレーション	DECIGO(DPF)、PTAのための重力波源のシミュレーションによる研究
	解析	DPF、PTAのデータ解析 DPFのデータ解析システムの開発

DECIGO-PF (2)

● DECIGO-PF

DECIGO実現のためには、各要素技術の地上での入念な試験は不可欠
その一方で、実際に**宇宙空間でなければ試験できない項目**もある

小型実験衛星 (DECIGO-PF) で試験

衛星のサイズ：70cm立方, 100kg級, 1機

地球周回軌道 (ピギーバック打ち上げ)

開発期間： 6年



宇宙空間における基礎技術の**総合的な宇宙実証試験**
宇宙空間の安定な環境・レーザー干渉計
を利用した**重力波観測実験**

DECIGO-PF (3)

● DECIGO-PFの目標

DECIGOのための宇宙実証試験

- (1) 衛星のドラッグフリー制御の実証試験
- (2) レーザー光源とその安定化システムの実証試験
- (3) レーザー干渉計(FP共振器)制御の実証試験
- (4) クランプ・リリース機構の実証試験

科学的成果

- (5) 小型重力波検出器による低周波数の重力波の観測



DECIGO-PF

衛星：70cm立方, 100kg級, 1機, 地球周回軌道

ドラッグ・フリーの組み込み

レーザー光源とその安定化システム

フリーマスで構成された基線長10cmのFP共振器

→ 実証試験と, 半年間の重力波観測

地上での観測が困難な 0.1-10Hzの重力波を観測

実際に検出されない場合

→ これまでに無い周波数帯で, 上限値を与える

まとめ

小型衛星 (DECIGO-PF) によって,

宇宙空間における基礎技術の総合的な宇宙実証試験
ドラッグフリー技術, レーザー光源と安定化システム,
干渉計を用いた計測システム, クランプシステム

宇宙空間の安定な環境・レーザー干渉計
を利用した重力波観測実験 を行なう

現状

体制を整える

各サブシステムでの仕様・要求値策定