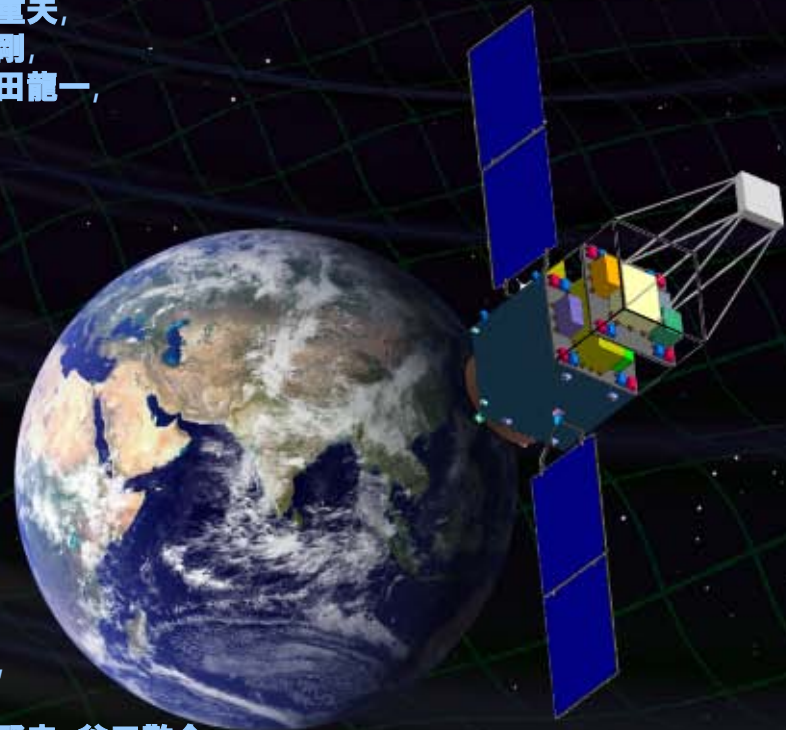


# スペース重力波アンテナDECIGO計画 (26) パスファインダー

**安東正樹 (京都大学・大学院理学研究科),**

川村静児, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 新谷昌人,  
船木一幸, 井岡邦仁, 神田辰行, 森脇成典, 武者満, 中澤知洋,  
沼田健司, 坂井真一郎, 瀬戸直樹, 高島健, 田中貴浩, 長野重夫,  
我妻一博, 青柳巧介, 新井宏二, 浅田秀樹, 麻生洋一, 千葉剛,  
戎崎俊一, 江尻悠美子, 榎基宏, 江里口良治, 藤本真克, 藤田龍一,  
福嶋美津広, 二間瀬敏史, 雁津克彦, 原田知広, 橋本樹明,  
端山和大, 足田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 洪鋒雷,  
堀澤秀之, 細川瑞彦, 市來淨興, 池上健, 井上開輝,  
石徹白晃治, 石原秀樹, 石川毅彦, 石崎秀晴, 伊東宏之,  
伊藤洋介, 河島信樹, 川添史子, 岸本直子, 木内建太,  
小林史歩, 郡和範, 小泉宏之, 小嵐康史, 苔山圭以子,  
毅山渉, 固武慶, 古在由秀, 工藤秀明, 國森裕生,  
國中均, 黒田和明, 前田恵一, 松原英雄, 養泰志,  
宮川治, 三代木伸二, 森本陸子, 森岡友子, 森澤理之,  
向山信治, 内藤勲夫, 中村康二, 中野寛之, 中尾憲一,  
中須賀真一, 中山宜典, 西田恵里奈, 西山和孝, 西澤篤志,  
丹羽佳人, 能見大河, 大湖喜之, 大橋正健, 大石奈緒子,  
大河正志, 岡田則夫, 小野里光司, 大原謙一, 佐合紀親,  
西條統之, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐々木節, 佐藤孝,  
柴田大, 真貝寿明, 宗宮健太郎, 祖谷元, 杉山直, 諏訪雄大,  
鈴木理恵子, 田越秀行, 高橋史宜, 高橋走, 高橋慶太郎,  
高橋竜太郎, 高橋龍一, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高森昭光, 高野忠, 谷口敬介,  
樽家篤史, 田代寛之, 鳥居泰男, 豊嶋守生, 辻川信二, 常定芳基, 上田曉俊, 植田憲一,  
歌島昌由, 若林野花, 山川宏, 山元一広, 山崎利孝, 横山順一, 柳哲文, 吉田至順, 吉野泰造



## DECIGOパスファインダー (DPF)

### DECIGOのための最初の前哨衛星

**小型衛星 1 機 (重量 350kg)**

**地球周回軌道 (高度 500km)**

非接触保持された試験マスの変動を  
レーザー干渉計を用いて精密計測



**宇宙・地球の観測**

→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

**先端科学技術の確立**

→ 宇宙・無重力環境利用の新しい可能性

**小型科学衛星3号機 (~2015年) を目指す**

## 目次

**イントロダクション - DECIGO計画 -**

**DPFの科学的意義**

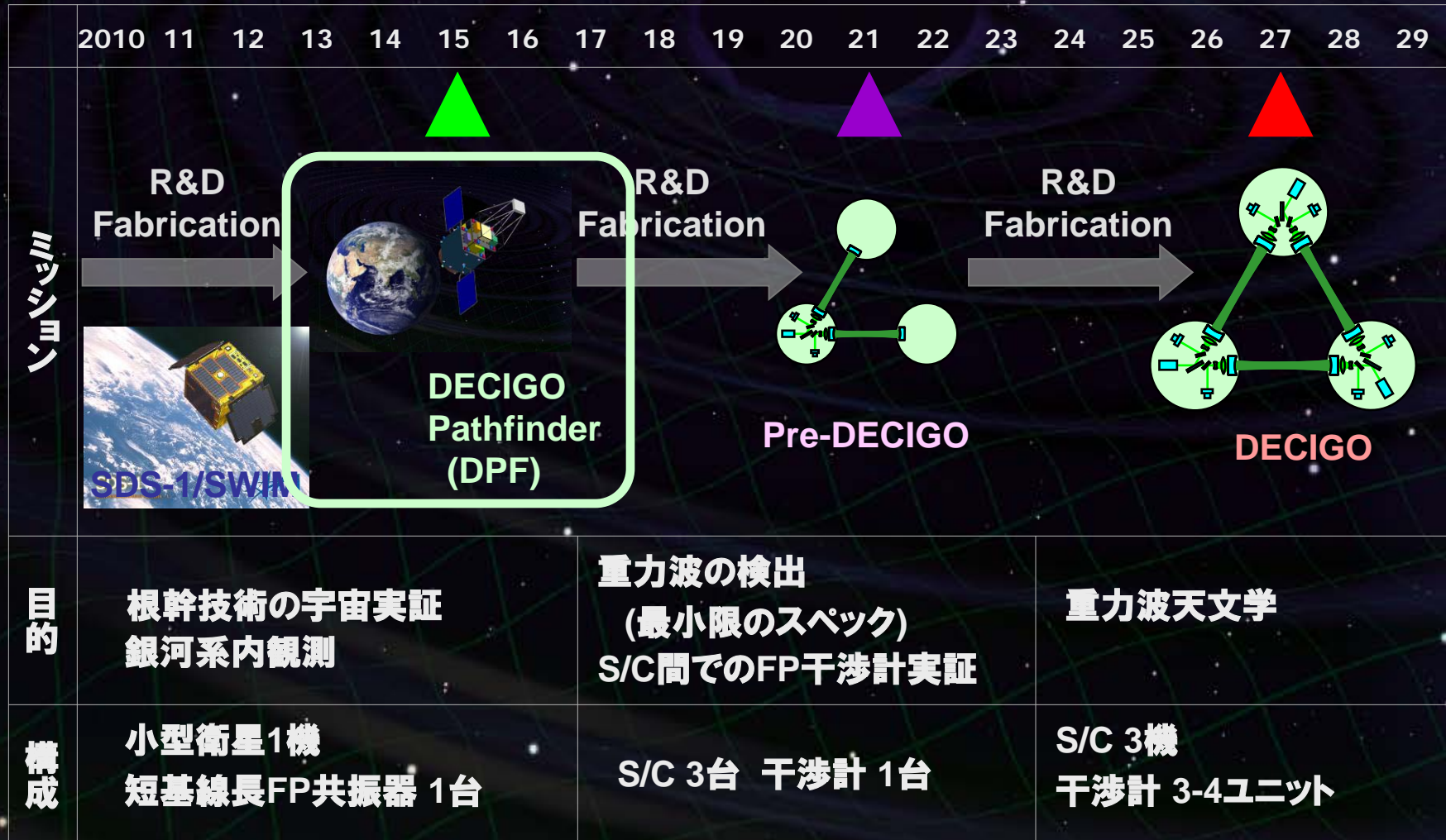
**衛星概要と開発状況**

**まとめ**

# DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



## DECIGOパスファインダー (DPF)

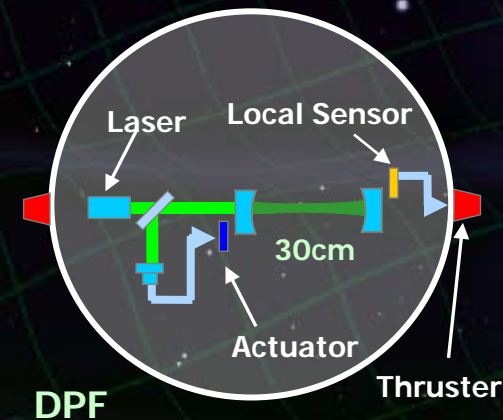
DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGO : 基線長 1000kmの編隊飛行

→ DPF 1機の衛星 (基線長30cm干渉計)

350kg級 小型衛星

地球周回軌道 (高度 500km)



DECIGOの主要技術の宇宙実証

レーザー干渉計, 安定化レーザー光源,

ドラッグフリーシステム、データ取得と解析

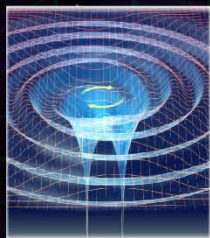


# DPFの科学的意義

# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

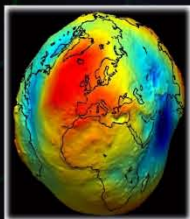
### 重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体現象を観測。

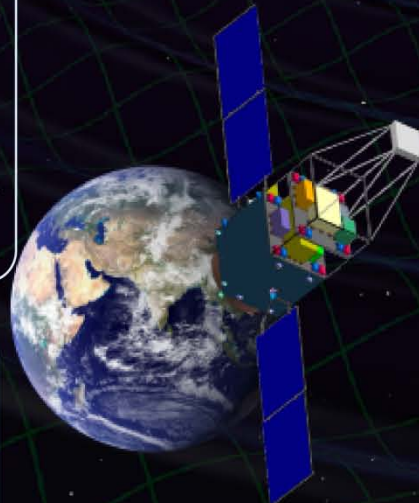
⇒ 銀河形成への知見

### 地球重力場観測



1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

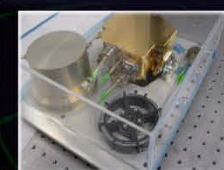
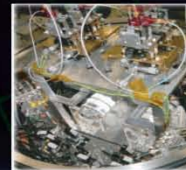
⇒ 地球環境モニタ



## 先端科学技術の確立

### 無重力精密実験プラットフォーム

- ・干渉計による精密変動計測
- ・安定化レーザー光源の実現
- ・ドラッグフリーによる低振動環境



⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性

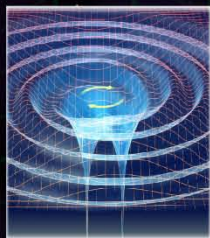
DPF単独で期待  
できる科学的成果

「小型科学衛星」  
としての意義も持つ

# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

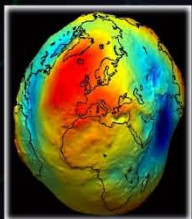
### 重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体現象を観測。

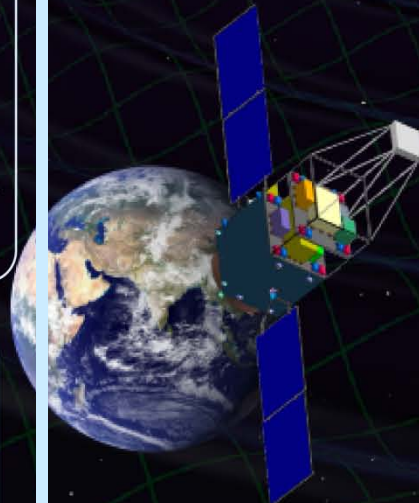
⇒ 銀河形成への知見

### 地球重力場観測



1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

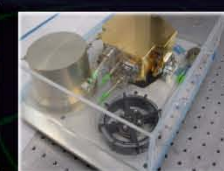
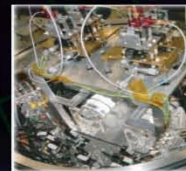
⇒ 地球環境モニタ



## 先端科学技術の確立

### 無重力精密実験プラットフォーム

- ・干渉計による精密変動計測
- ・安定化レーザー光源の実現
- ・ドラッグフリーによる低振動環境



⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性



# DPFの観測対象

我々の銀河系内の  
ブラックホール 合体現象からの重力波

DPFの観測周波数 (0.1-1Hz)

中間質量ブラックホール

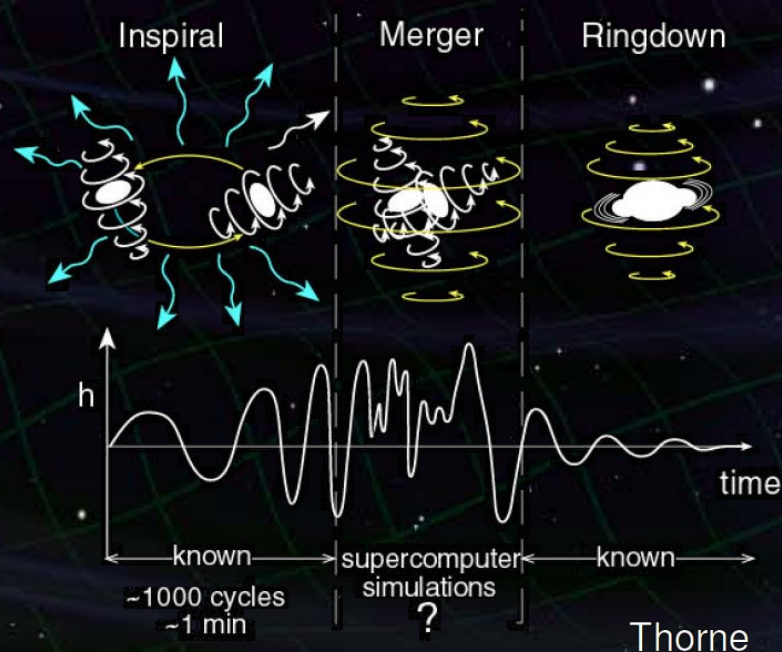
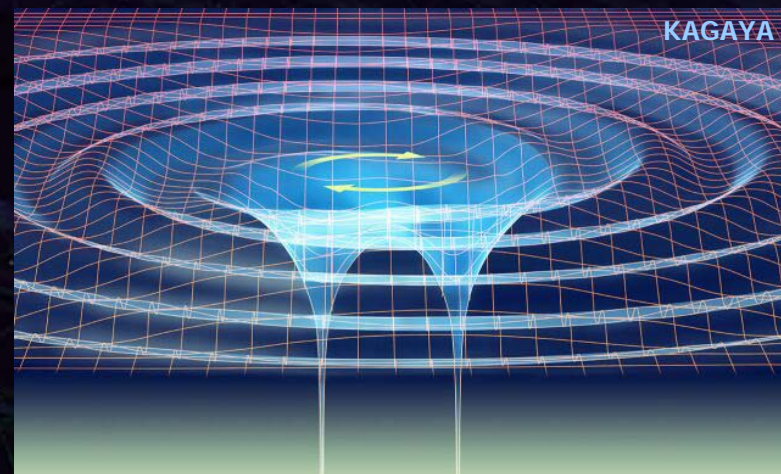
(質量  $10^3 - 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$ ) が対象

最大100kpcの距離まで観測可能

⇒ 銀河中心BH, 球状星団中のBH  
の形成メカニズムに対する知見

他の手段では観測が困難

→ これまでにない観測結果となる

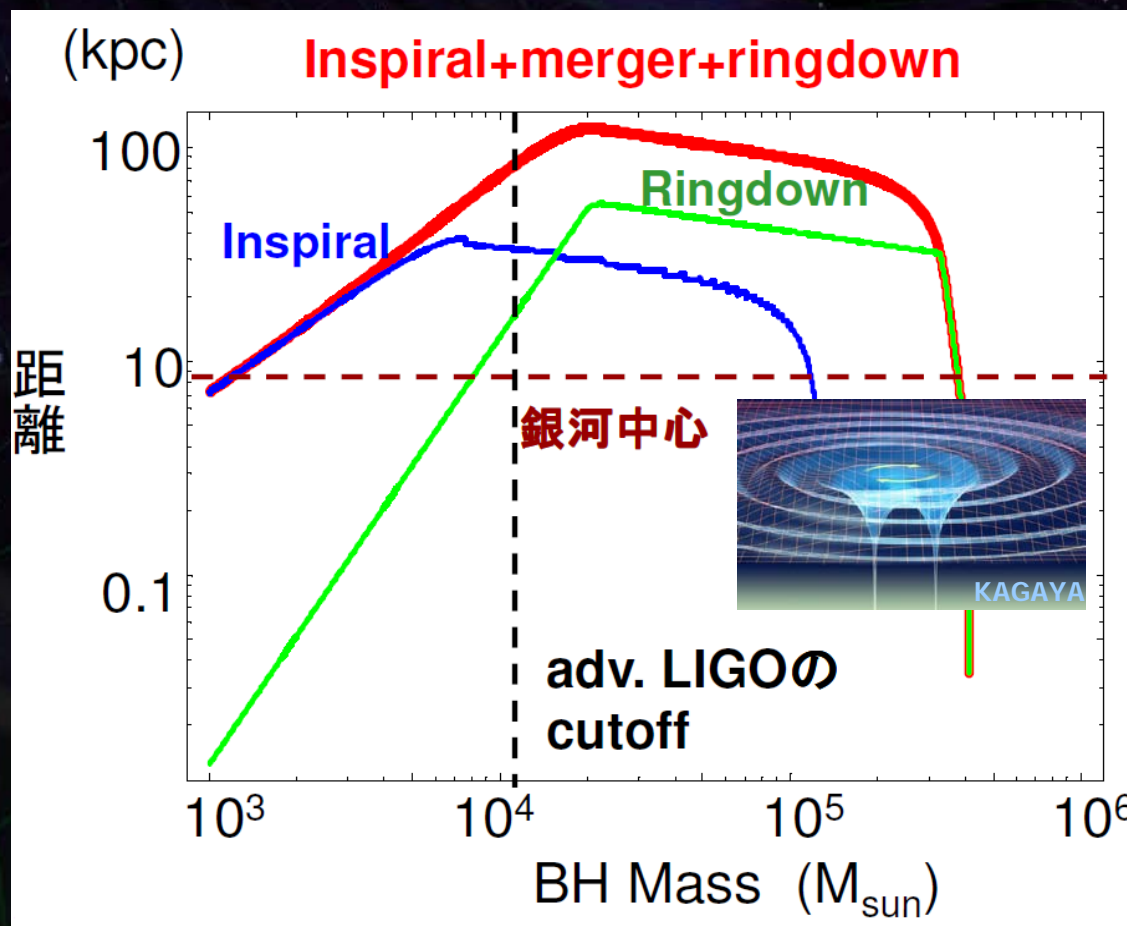


# DPFの観測対象

DPFのブラックホール  
合体現象 への観測可能距離



DPFの観測可能距離  
～ 銀河中心をカバー  
(100kpc, SNR>5)



八木 (京大理)

# 地球重力場観測

人工衛星の軌道から地球重力ポテンシャルを検知  
軌道検知用GPS受信機, および加速度計で構成

参照  
坪野氏講演

GRACE, GOCEが稼働中  
次世代計画 GRACE-FO  
GRACEと同等 (マイクロ波測距)

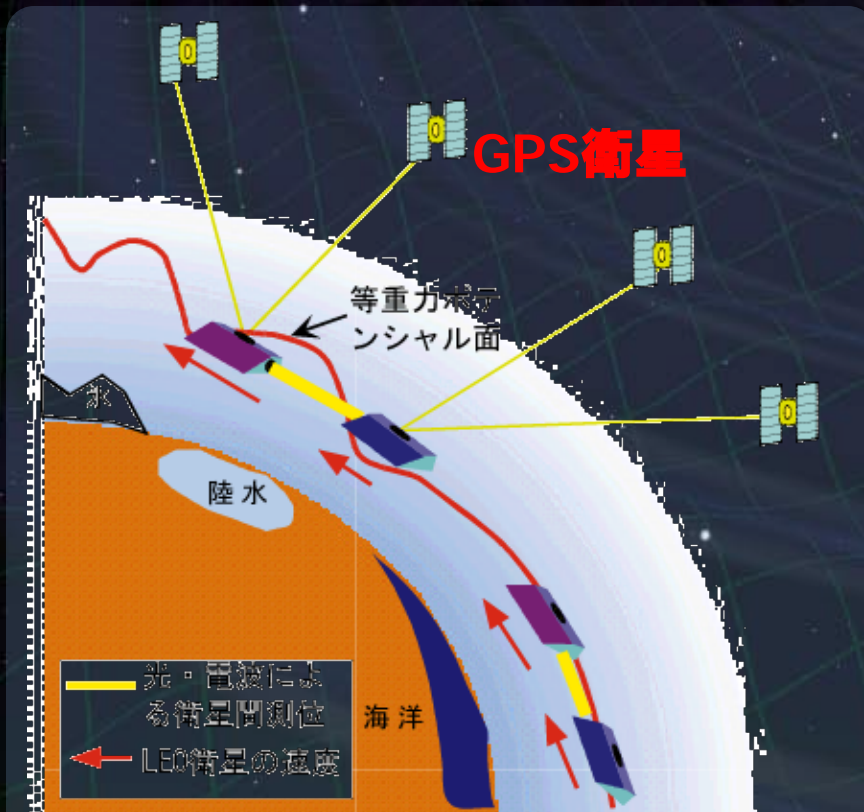
GRACE

$L \sim 220\text{km}, \Delta L \sim 5\mu\text{m}$   
 $\rightarrow \Delta L/L \sim 2 \times 10^{-11}$

DPF

$L \sim 0.3\text{m}, \Delta L \sim 10^{-11}\text{m}$   
 $\rightarrow \Delta L/L \sim 3 \times 10^{-11}$

GRACEとGRACE-FOの間の期間  
2012-16年を埋める可能性  
 $\rightarrow$  独自の成果, 国際貢献

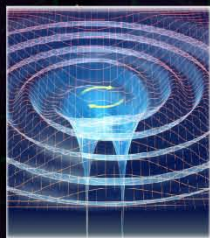


東京大学地震研・新谷氏、  
京都大学・福田氏の資料/情報提供

# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

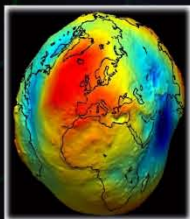
### 重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体現象を観測。

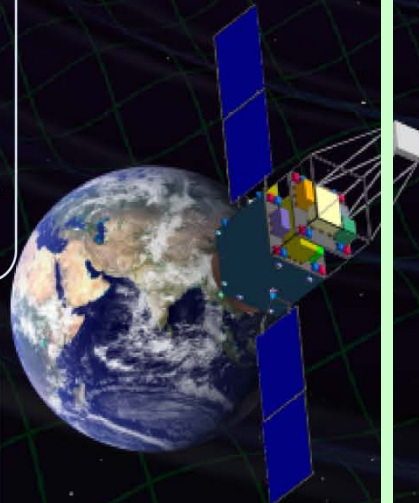
⇒ 銀河形成への知見

### 地球重力場観測



1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

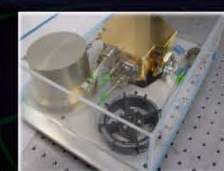
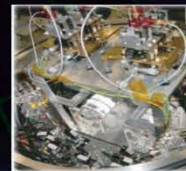
⇒ 地球環境モニタ



## 先端科学技術の確立

### 無重力精密実験プラットフォーム

- ・干渉計による精密変動計測
- ・安定化レーザー光源の実現
- ・ドラッグフリーによる低振動環境



⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性

# DPFで実証される科学技術

## DPFで実証される技術

宇宙干渉計  
による  
精密計測



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$   
の変位感度

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$   
の外力雑音

安定化レーザー  
の宇宙実証



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$   
の周波数安定度

ドラッグフリー  
制御の実現



衛星変動安定度  
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスタ雑音  
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

## 意義・波及効果

基礎物理学実験  
無重力環境下での精密計測  
宇宙・衛星内環境の理解

宇宙空間で、高い安定度の実現  
さまざまな応用

地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),  
基礎物理学実験, マイクロ波標準, 通信  
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測  
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,  
GRACE-follow-on)

長時間安定な無重力環境  
→宇宙環境利用の新しい可能性  
基礎物理学実験, 材料工学  
フォーメーションフライト  
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)  
小型低雑音スラスタ



# 衛星概要と開発状況

# DPFシステム概要

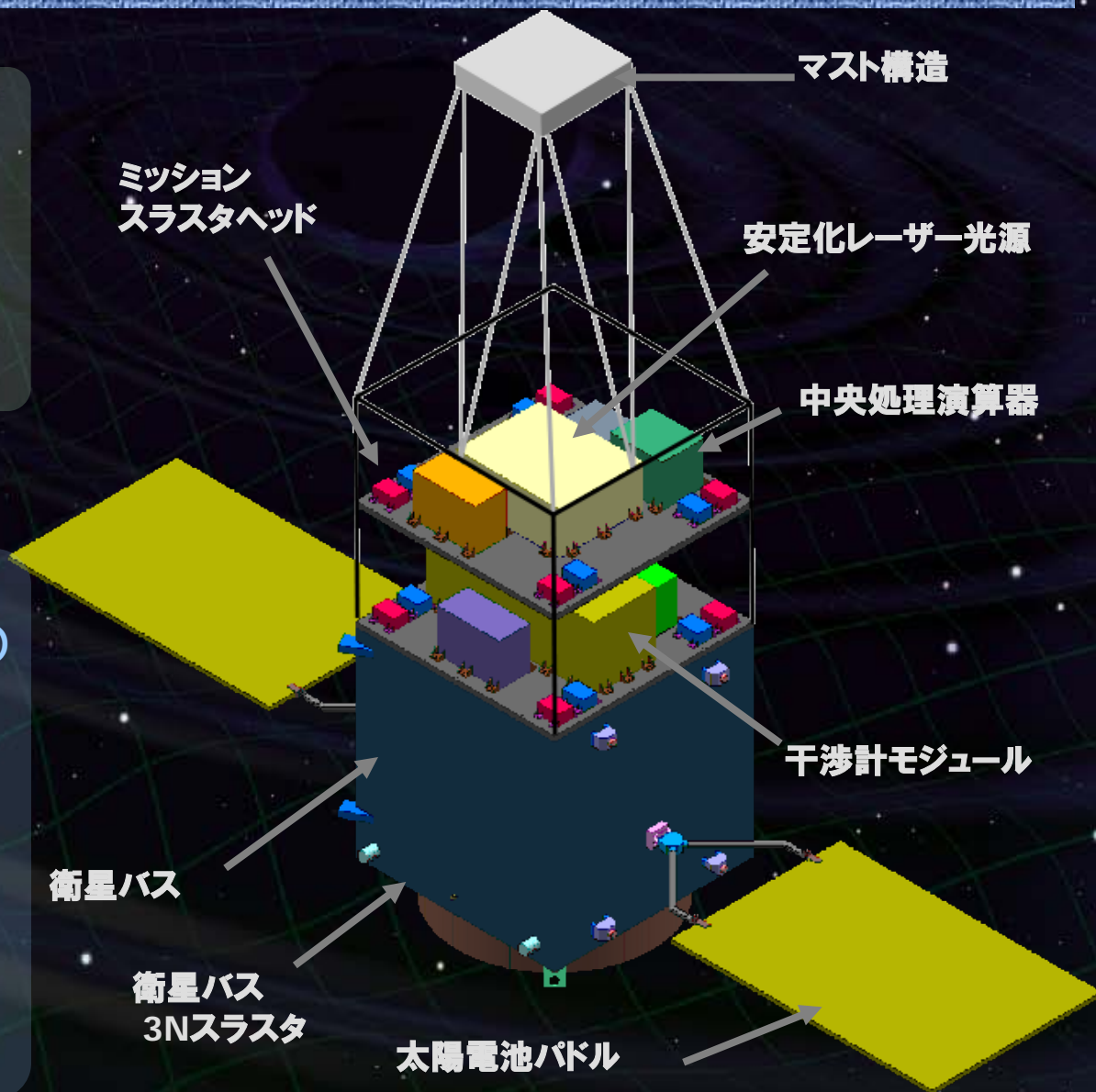
## DPF Payload

Size : 950mm cube  
Weight : 150kg  
Power : 130W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x12

Power Supply  
SpW Comm.

## Satellite Bus (‘Standard bus’ system)

Size :  
950x950x1100mm  
Weight : 200kg  
SAP : 960W  
Battery: 50AH  
Downlink : 2Mbps  
DR: 1GByte  
3N Thrusters x 4

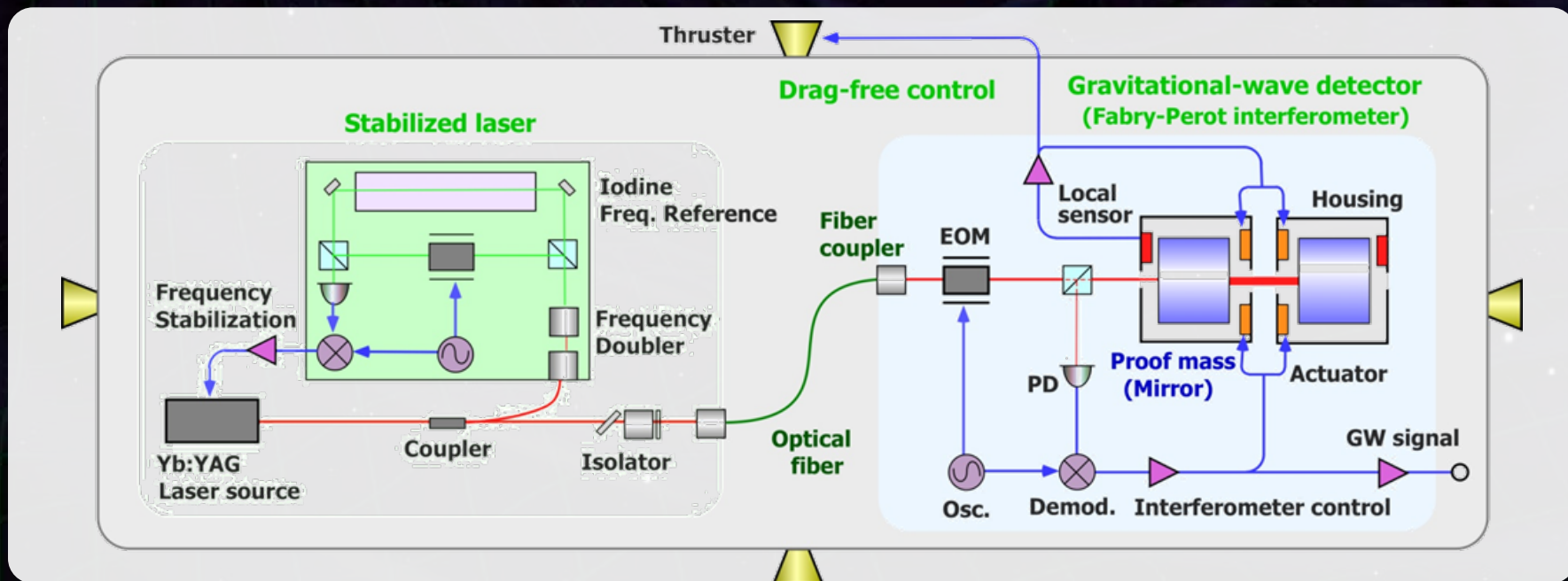


# DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : 150kg  
ミッション機器空間 : 95 cm立方

ドラッグフリー

ローカルセンサで相対変動検出  
→ スラスタにフィードバック



## レーザー光源

Yb:YAGレーザー  
出力 25mW  
ヨウ素飽和吸収による  
周波数安定化

## ファブリー・ペロー共振器

フィネス : 100  
基線長 : 30cm  
試験マス : 質量 数kg  
PDH法により信号取得・制御

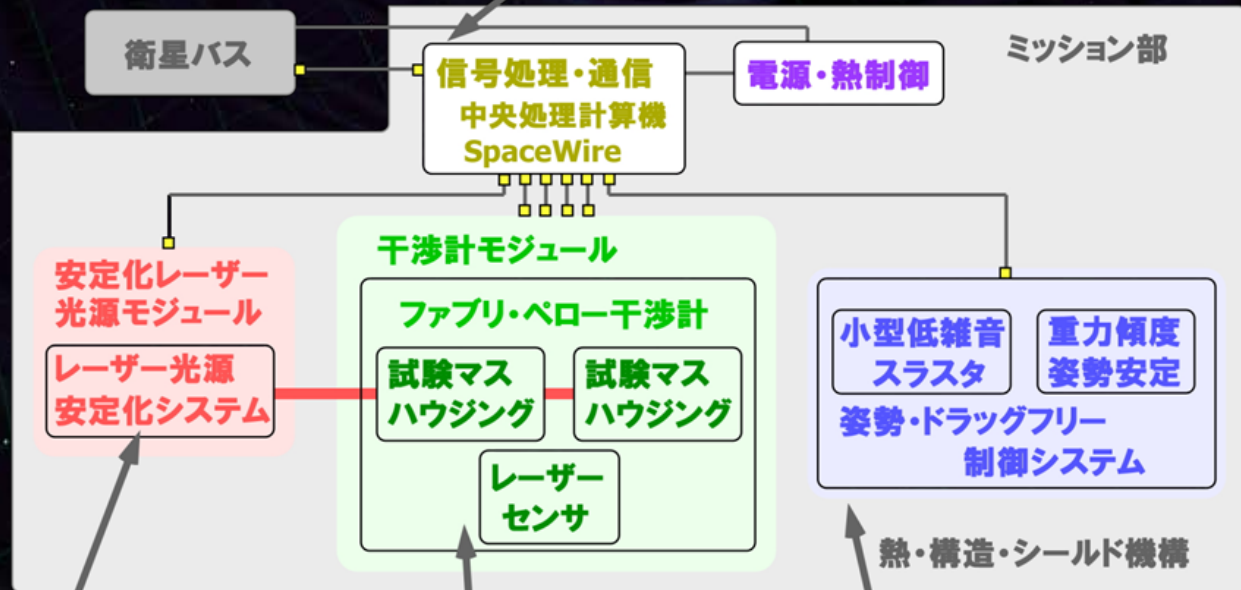


# 推進体制



神田 (大阪市大)  
中村, 田中, 瀬戸 (京都大学)  
井岡 (KEK), 横山 (東京大学)  
データ解析、理論研究

高島, 坂井 (宇宙科学研究本部)  
安東 (京都大学), 中澤 (東京大学)  
ミッション検討  
バスとのインターフェース  
信号処理システムの開発



DPF-WG  
84名  
DECIGO  
137名

沼田 (NASA/GSFC)  
レーザー光源の開発  
武者 (電気通信大学)  
安定化レーザーの開発  
長野 (情報通信研究機構)  
光源安定度の評価

佐藤 (法政大学)  
上田, 川村, ATC (国立天文台)  
干渉計・ハウジングの開発  
麻生 (東京大学)  
干渉計の開発  
新谷 (東大地震研究所)  
地球重力場観測部の開発

船木, 小泉 (宇宙科学研究本部)  
堀澤 (東海大学), 中山 (防衛大)  
スラスタの開発  
森脇 (東京大学)  
坂井, 河野 (JAXA)  
姿勢制御・ドラッグフリー  
システムの開発

# 干渉計モジュール

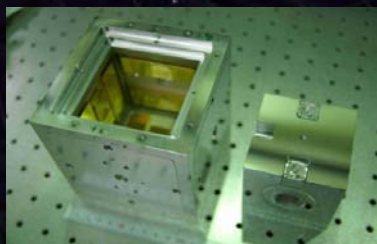
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ をモジュール化

## 試験マスモジュール

重力・重力波を観測するための基準

BBM開発

佐藤, 鳥居, 若林,  
江尻, 鈴木, 川村, Sun  
(法政大, NAO,  
お茶大, Stanford大)



## 干渉計モジュール

→ 重力波観測, 重力勾配計

BBM開発

上田, 麻生, 道村  
(NAO, 東大理)



## レーザーセンサ

重力観測用の  
高感度変位センサ

BBM開発

新谷, 麻生, 道村  
(東大地震研, 東大理)



干渉計  
モジュール



参照

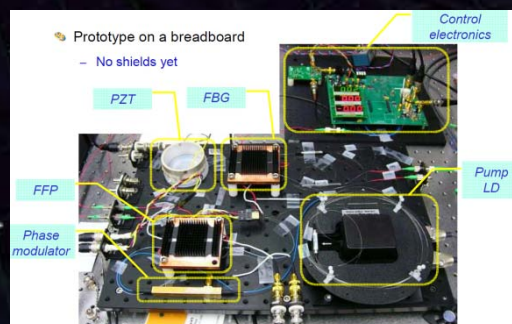
佐藤, 若林, 正田,  
道村, 鳥居  
各氏の講演

# 安定化レーザー光源

安定化レーザー光源：光源 + 安定化システムをモジュール化

Yb:YAG 光源 (ファイバーレーザー)

→ 小型・軽量化, 耐振動性



BBM開発

沼田 (NASA/GSFC)

ヨウ素飽和吸収

による安定化制御

→ 周波数基準

擾乱耐性

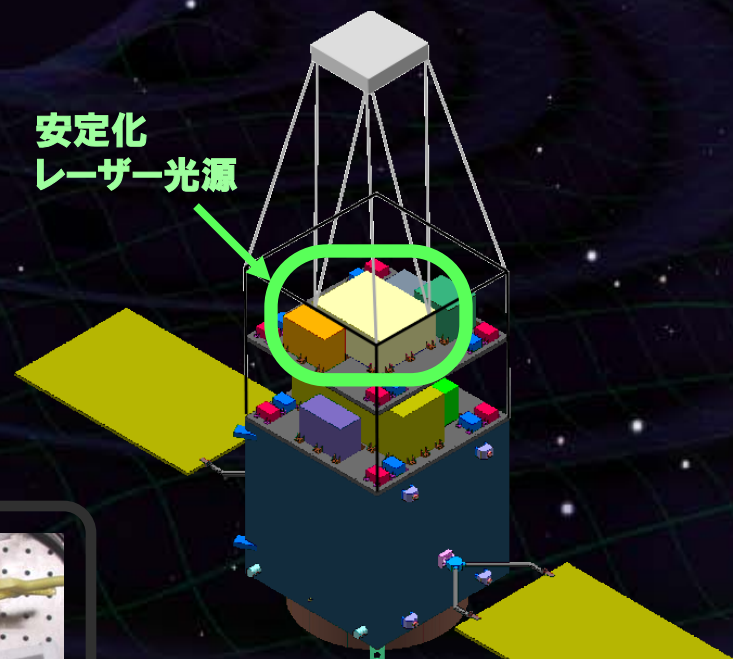
BBM開発

武者, 中村(電気通信大)

長野 (NICT)



安定化  
レーザー光源



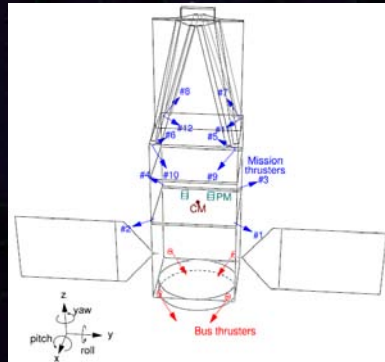
参照

堀内氏講演

# 姿勢・ドラッグフリー制御

## 姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

### 衛星構成，熱・構造検討

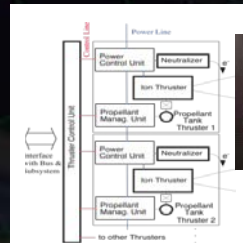


重力傾度安定  
衛星外乱評価  
ドラッグフリー制御則

衛星・スラスタ構成検討

森脇，坂井，河野  
(東大・新領域，JAXA)

### 小型・低雑音スラスタシステム スラスタ開発，推力雑音測定装置 スラスタシステム検討



船木，中川，堀澤，小泉 (JAXA，防衛大，東海大)



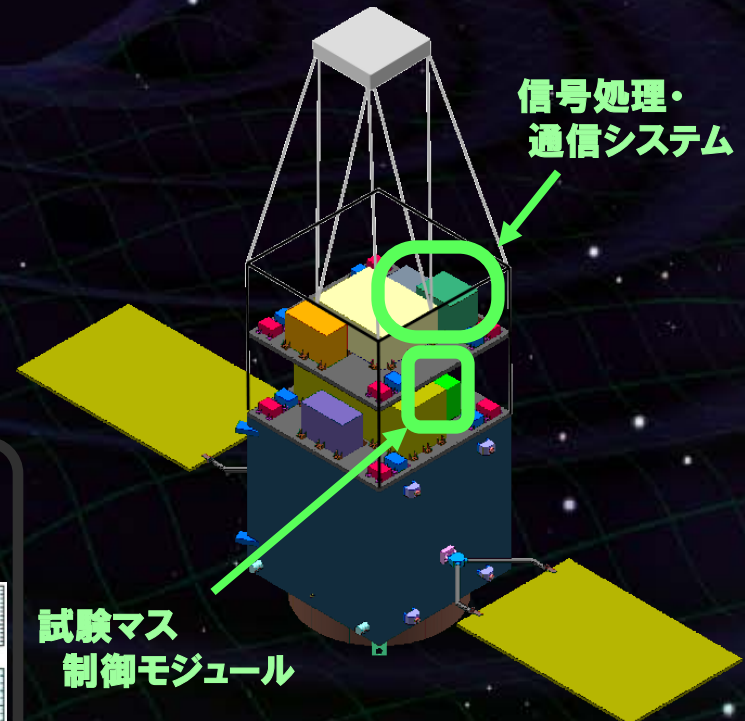
## 信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

SpC2 + SpW信号処理システム  
 → SDS-1/SWIMによる宇宙実証

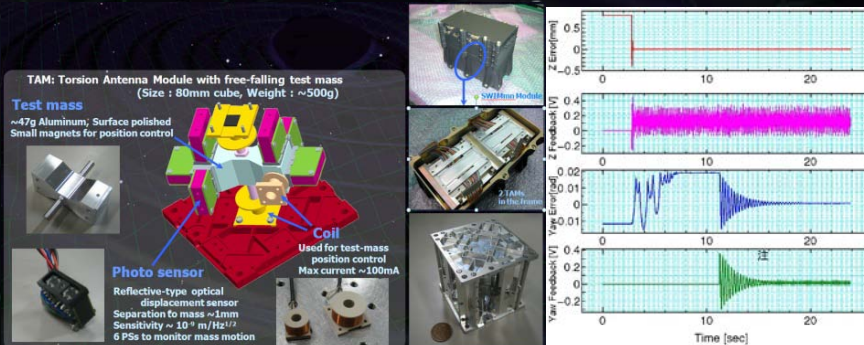
運用中



高島, 毅山, 安東, 石徹白, 湯浅  
 (JAXA, 東大, 京大)



試験マスの非接触制御と精密計測  
 → SWIMによる宇宙実証



運用中 高島, 毅山, 安東, ... (JAXA, 東大, 京大)

DPF構造 :仕様を満たす構成は検討済

## 問題点

衛星重心位置が

干渉計中心より10cmほど低い

機械的インターフェース条件ぎりぎり

太陽電池パドルの変動周期が

観測帯域(0.1-1Hz)内に入る恐れ

問題点は、

標準バスに手を加えない

という要請に大きく起因している



バス(太陽電池パドル)の構成を

変更した構成での検討を進める



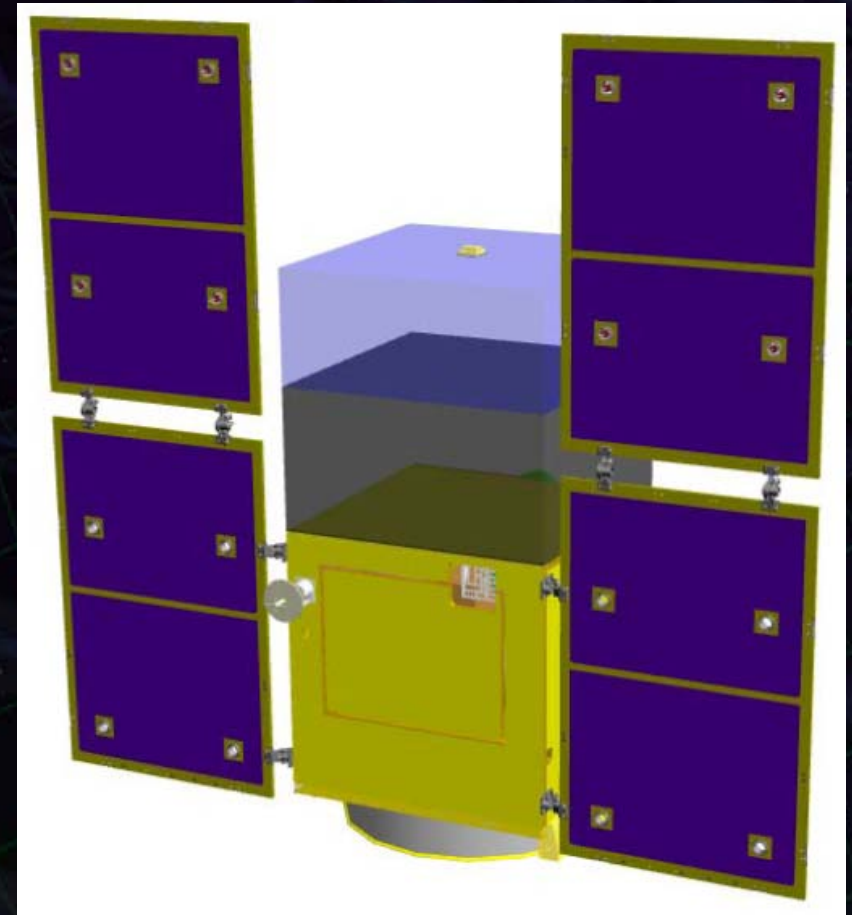
## DPF構造 改良案検討結果

太陽電池パドルの展開機構  
標準構成部品の  
組み合わせの変更で対応可能。  
新規開発部品はない。

姿勢・ドラッグフリー制御  
剛性・重心位置など特性向上。  
マスト構造が簡略化できる。

## 要検討事項

スラスト噴射との干渉  
GPS取り付け, 放熱面の干渉...

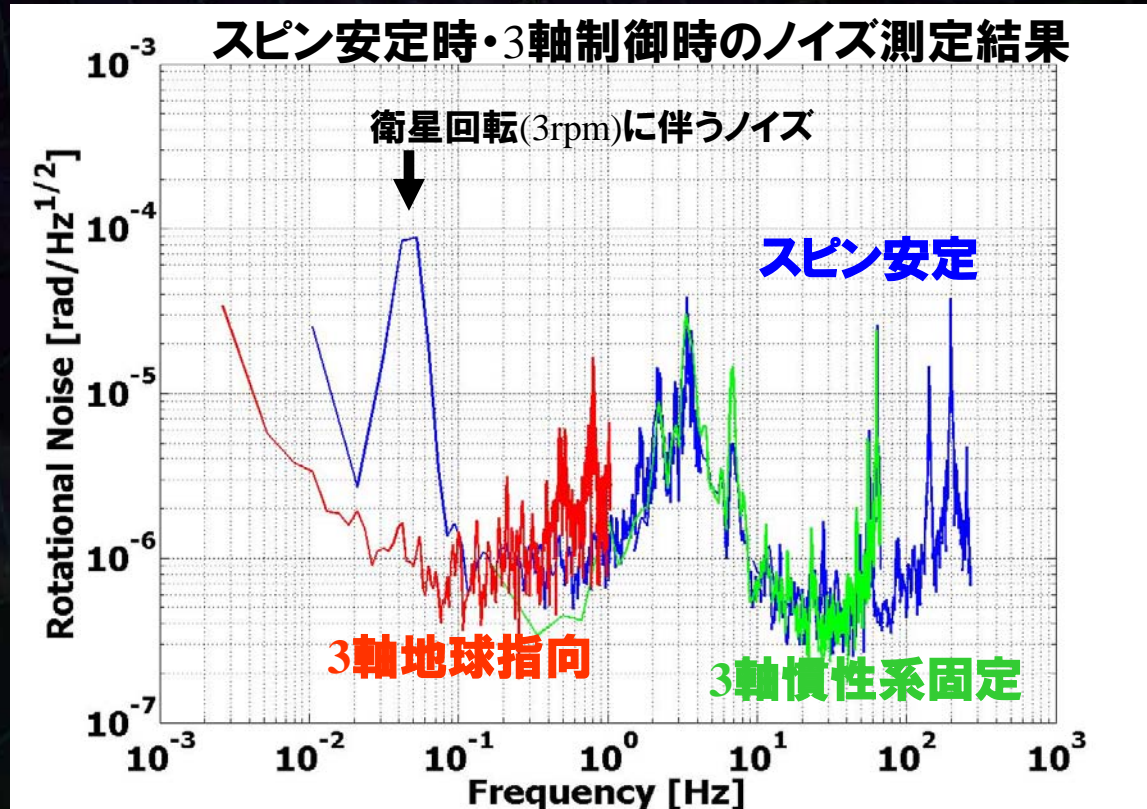


月1回のペースで順調に運用中

伝達関数測定, DC gain測定  
衛星3軸制御時のスペクトル測定



4月より観測を計画中





# サポート・協力体制



- **LISAとの協力関係**

LISA/LPFの技術情報や経験, サポートレターの提供  
LISA-DECIGO workshop (2008.11)

- **スタンフォード大グループとの協力**

Dan Debra: **ドラッグフリー衛星の創始者**, Gravity Probe Bの副PI  
DPFの帯電制御,  
DPFドラッグフリーへの協力

- **JAXA研究開発本部・誘導制御グループとの協力**

→ DECIGOのフォーメーションフライト, DPFのドラッグフリー制御への協力

- **東京大学ビッグバンセンター (RESCEU)**

DECIGOを主要プロジェクトとしてサポート (2009.4-)

- **地球重力場観測グループ (京大理, 東大地震研, 地球研, NAOJ)**

DPFでの観測, データ解析, 得られる科学的成果の検討

- **国立天文台 先端技術センター (ATC)**

中核機関としての DECIGO/DPFサポート 議論開始

# 小型科学衛星シリーズ

DECIGO

## JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

標準衛星バス + 次期固体ロケットを利用して  
最低 **3機**の小型科学衛星 を打ち上げる計画

1号機 SPRINT-A/EXCEED (~2012年)

UV望遠鏡による惑星観測

2号機 SPRINT-B/ ERG (~2013年)

地球周辺の磁気圏観測



DPF: **小型科学衛星3号機** を目指す  
宇宙分野における新しいサイエンスの  
可能性として評価を受けている

**打ち上げ目標：2015年度**

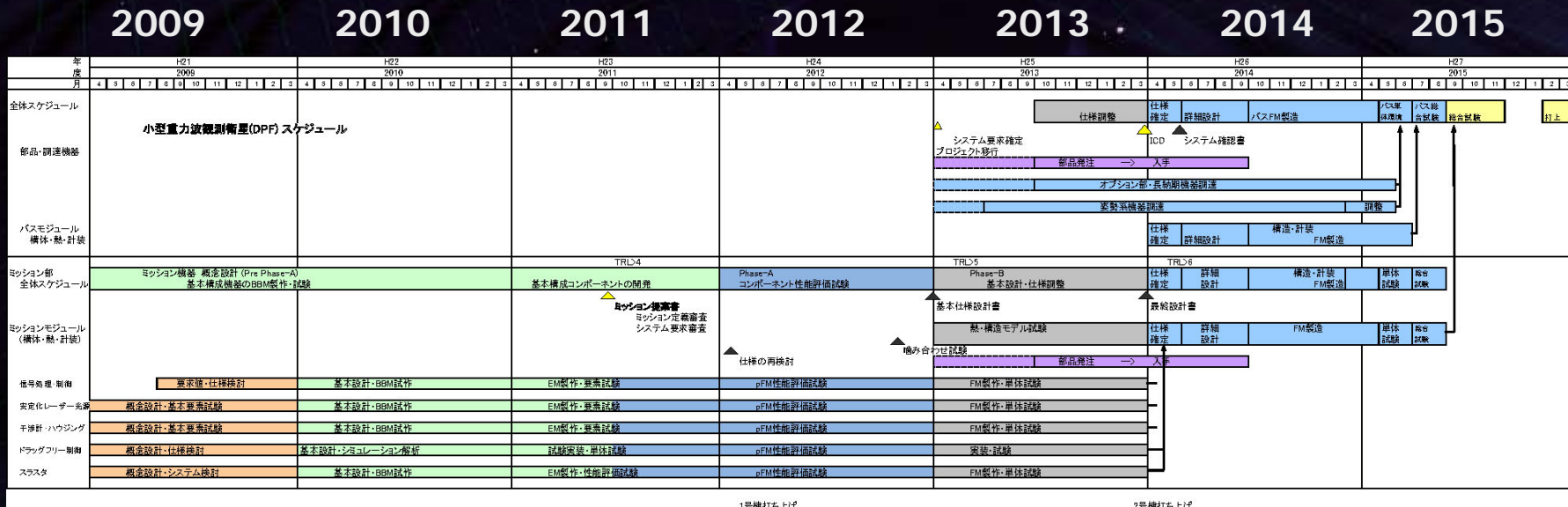


小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



Next-generation  
Solid rocket booster (M-V FO)  
Fig. by JAXA

# DPF スケジュール



概念設計

BBM

EM / pFM

FM

衛星FM

総合試験

↑  
ミッション提案

TRL 4以上が必要

‘基本技術要素が同時に動作し、  
実証モデルとして性能を発揮し  
ていること’

↑  
コンポーネントFM完成

仕様を満たす  
各種環境試験に合格



# まとめ

## DECIGOパズファインダー (DPF) DECIGOのための最初の前哨衛星

小型衛星 1機 (95cm立方x2, 350kg)  
地球周回軌道 (高度 500km, 太陽同期軌道)

試験マス x2 → 基線長30cmのFP共振器  
安定化レーザー光源, ドラッグ・フリー制御



宇宙・地球の観測

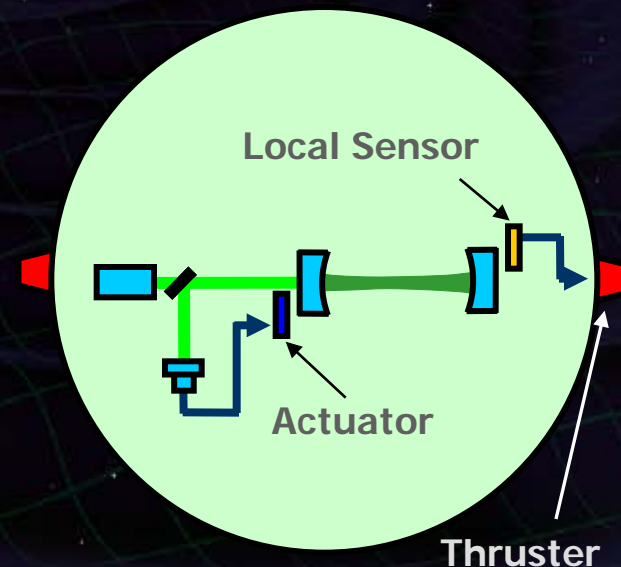
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

→ 無重力環境利用の新しい可能性

BBM試作・試験

SDS-1/SWIMによる宇宙実証 が進行中



終わり

