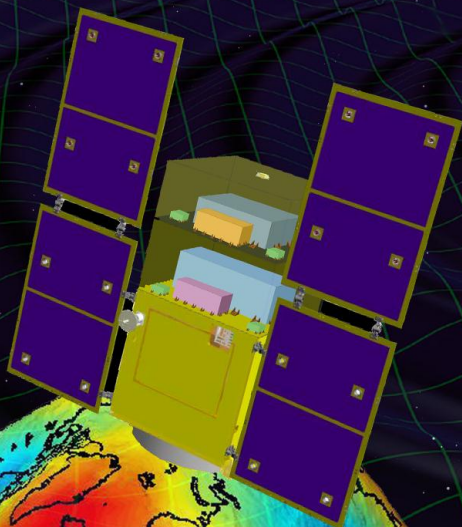


# 小型重力波観測衛星 DECIGOパスファインダー



Original  
Picture : Sora



Earth Image: ESA

**安東 正樹** (京都大学 理学研究科)

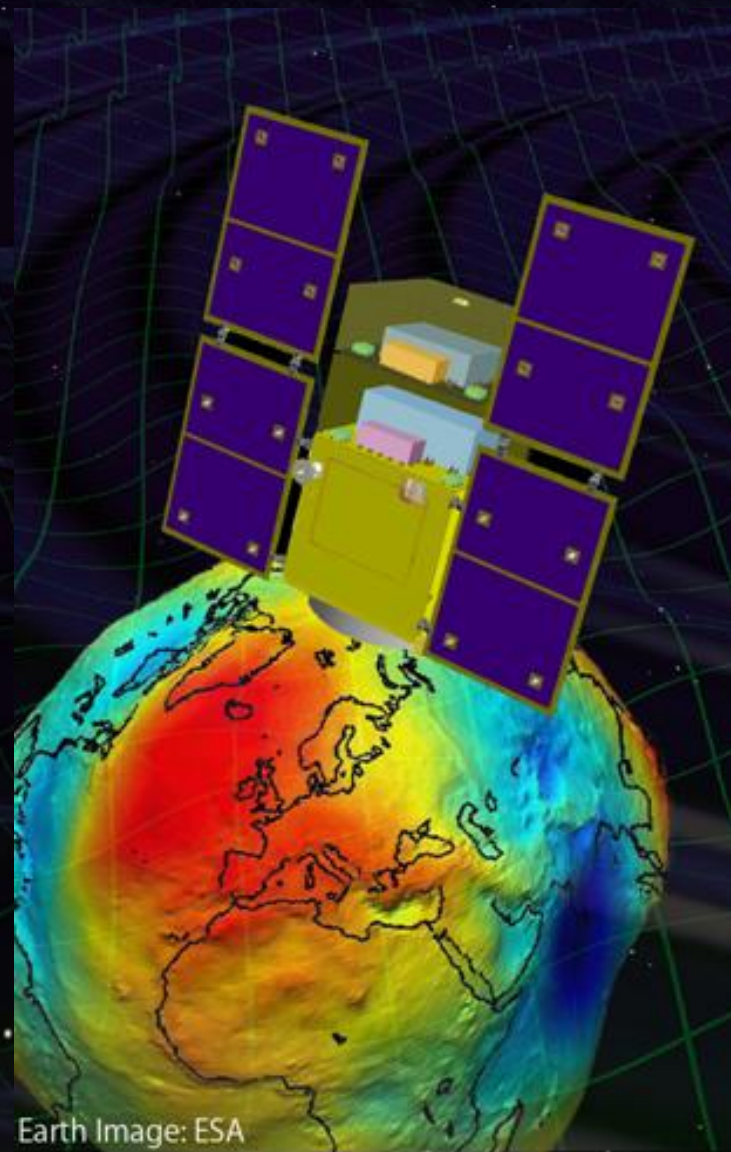
DECIGO/DPF collaboration



# DPF WG members



青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 安東正樹, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 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, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 川村静児, 神田展行, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小薫康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤修一, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 瀬戸直樹, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高島健, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中貴浩, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 坪野公夫, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中村卓史, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 沼田健司, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 正田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 二間瀬敏史, 船木一幸, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 柳哲文, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 若林野花, 阿久津智忠, 松本伸之, 正田亜八香, 道村唯太, 田中伸幸, 黒柳幸子, 陳たん, 江口智士, 権藤里奈



Earth Image: ESA



# サポート・協力体制



- **LISAとの協力関係**

LISA/LPFの技術情報や経験の提供, LISA-DECIGO workshop (2008.11)

- **スタンフォード大グループとの協力**

DPFの帯電制御, DPFドラッグフリーへの協力

- **NASA/GSFCとの協力**

光源の開発

GRACEとの共同観測検討

- **JAXA研究開発本部・軌道・航法グループとの協力**

→ 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)**

DECIGO/DPF 実験装置製作などのサポート



## DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡のための前哨衛星

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 としての実現を目指す

Earth Image: ESA



光共振型マイケルソン干渉計  
アーム長: 1000 km  
レーザーパワー: 10 W  
レーザー波長: 532 nm  
ミラー直径: 1 m

## DECIGO (DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)

→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見

インフレーションの直接観測

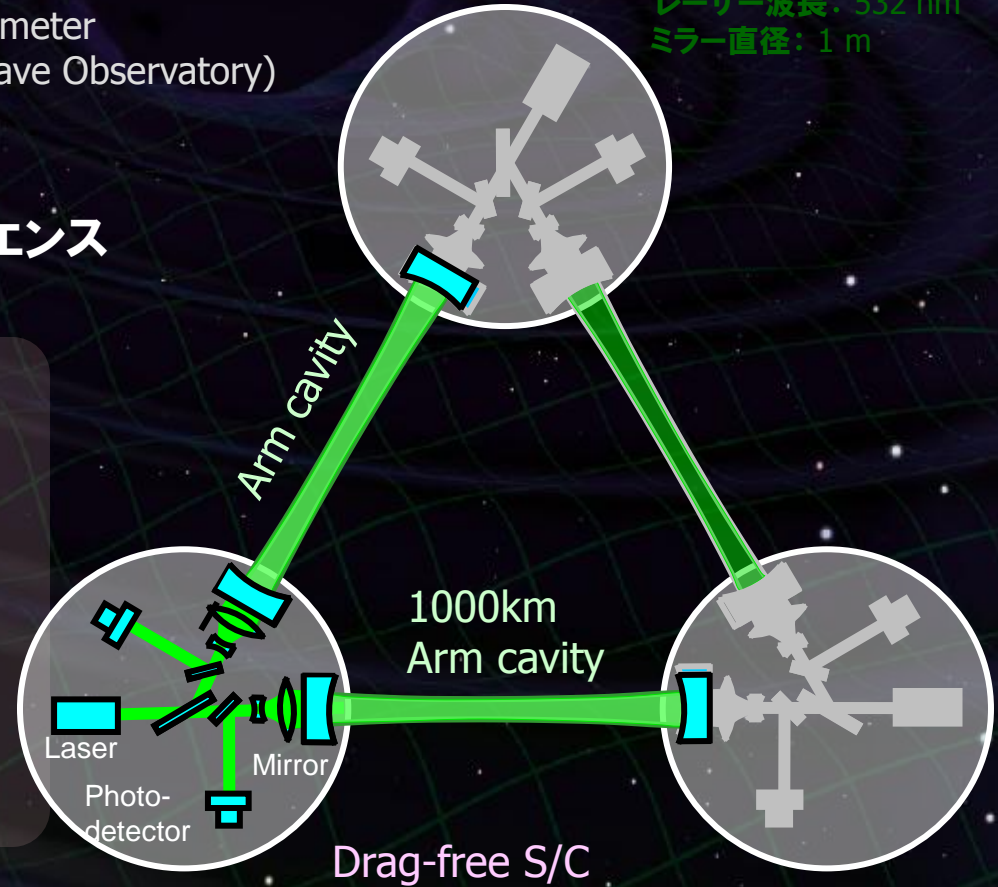
ダークエネルギーの性質

ダークマターの探査

銀河形成に関する知見

ブラックホール連星の観測

宇宙の基本法則に関する知見



互いに1000km離れた3機のS/C  
非接触保持された鏡間距離を  
レーザー干渉計によって精密測距

太陽公転軌道

最大4ユニットで相関をとる



# 初期宇宙の観測



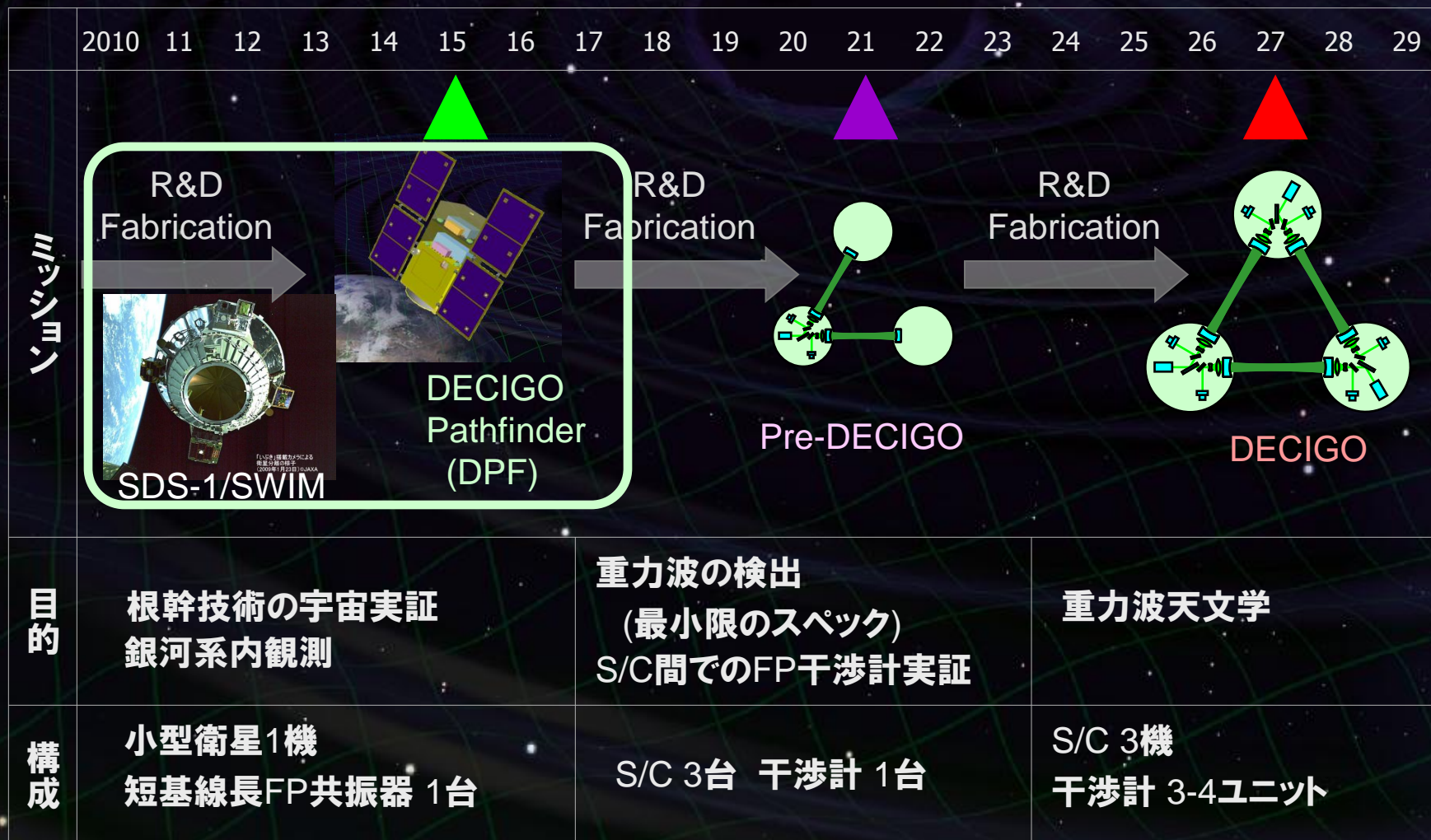
Background:  
original figure by  
NASA/WMAP Science Team



# DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



# DECIGOパスファインダー



## 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)

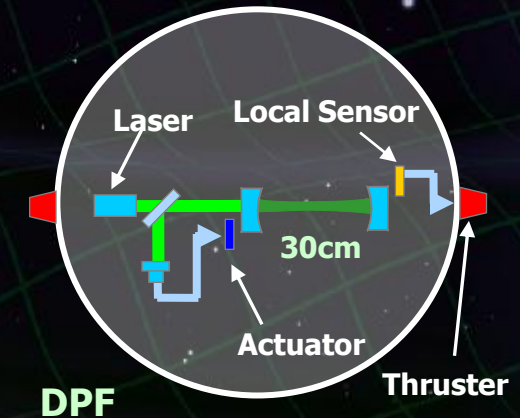
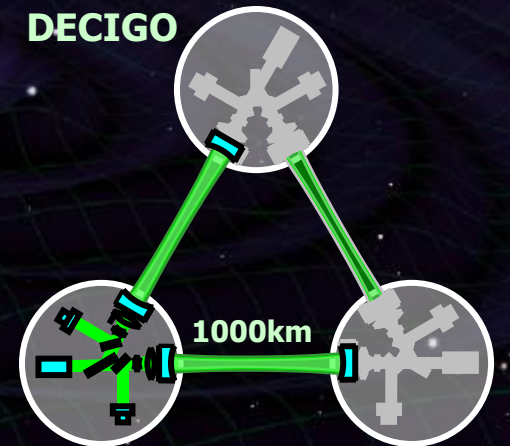
350kg級 小型衛星

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





# DECIGOのための根幹技術実証



## DPFで実証される技術

## DECIGOで必要 とされる主要技術

FP干渉計の  
動作実証



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

$4 \times 10^{-18}$  m/Hz<sup>1/2</sup>  
の変位感度

$10^{-15}$  N/Hz<sup>1/2</sup>  
の外力雑音

$10^{-17}$  N/Hz<sup>1/2</sup>  
の外力雑音

基線長1000kmのFP干渉計  
宇宙における干渉計制御  
試験マスに対する外乱抑圧  
大型光学系の製作・制御

安定化レーザー  
光源の動作実証

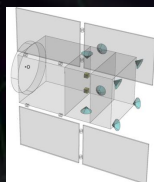


$0.5$  Hz/Hz<sup>1/2</sup>  
の周波数安定度

$0.5$  Hz/Hz<sup>1/2</sup>  
の周波数安定度

安定化レーザー光源による精密計測  
光源の周波数・強度安定化  
長基線長を利用した安定化制御

ドラッグフリー  
制御の実現

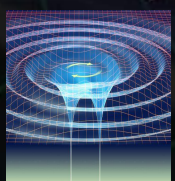


衛星変動安定度  
 $10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup>

スラスト雑音  
 $10^{-7}$  N/Hz<sup>1/2</sup>

フォーメーションフライト  
安定な軌道の実現  
宇宙機間の距離制御  
ドラッグフリー制御  
低雑音スラスト

重力・  
重力波の観測



0.1 Hz以下での連続  
観測とデータ解析

観測運用  
時系列連続データの処理  
データの解析  
理論予測・他の観測との比較



# DPFシステム概要



## DPF Payload

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

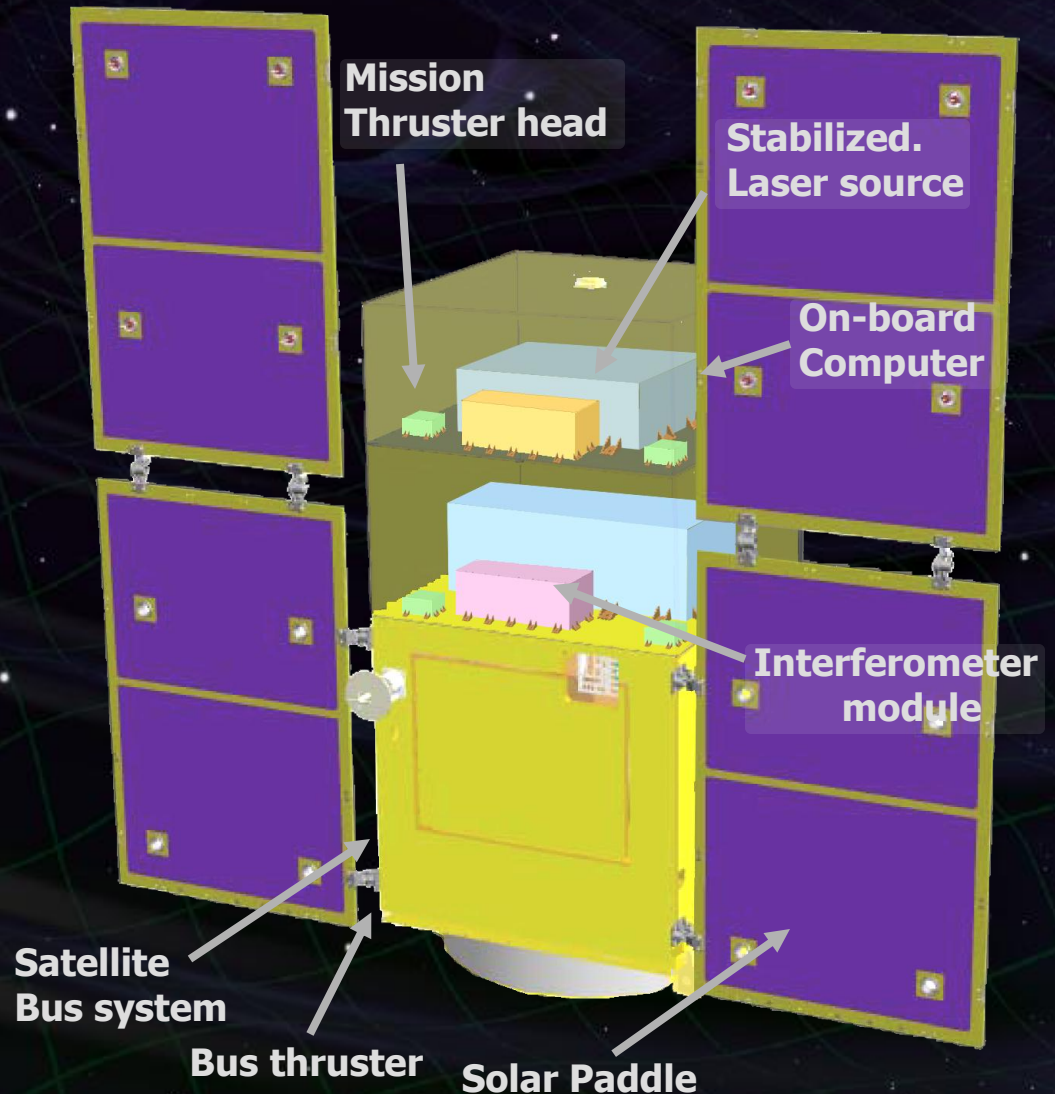
Power Supply  
SpW Comm.



## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

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



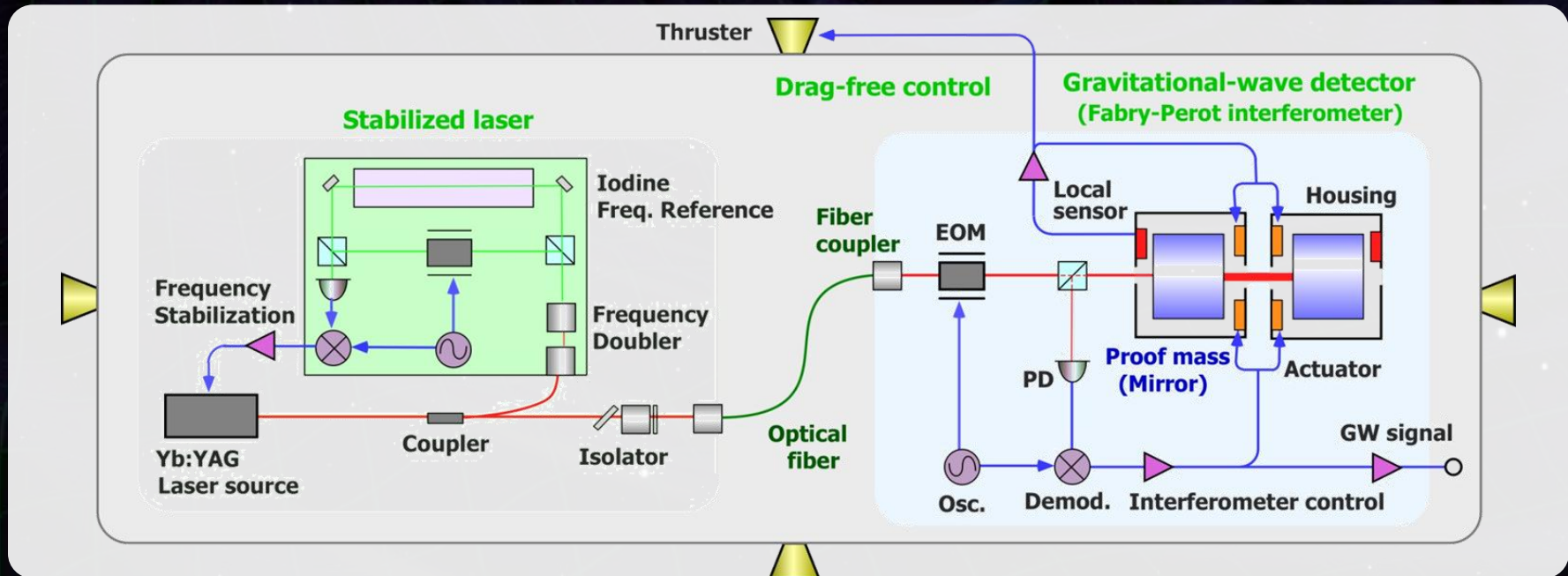


# DPFミッション機器構成

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



## 安定化レーザー光源

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

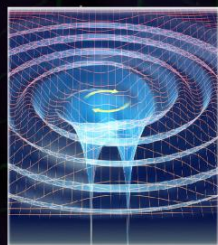
PDH法により信号取得・制御



# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

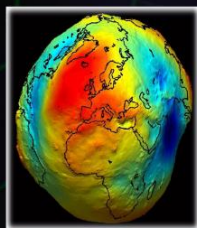
### 重力波観測



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。

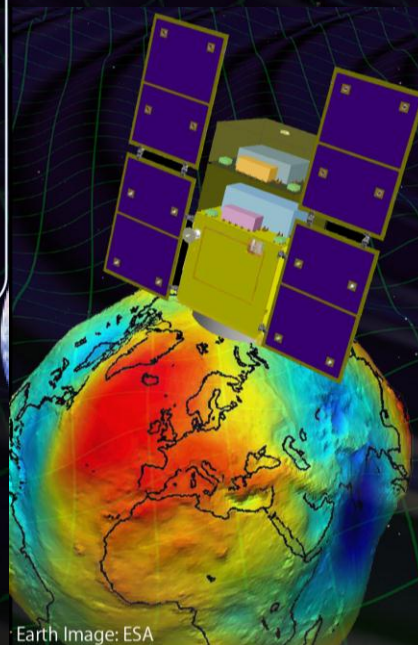
⇒ 銀河形成への知見

### 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

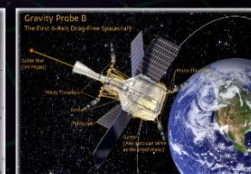
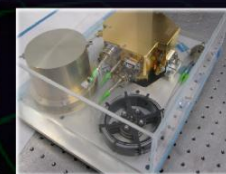
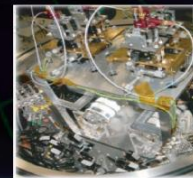


Earth Image: ESA

## 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



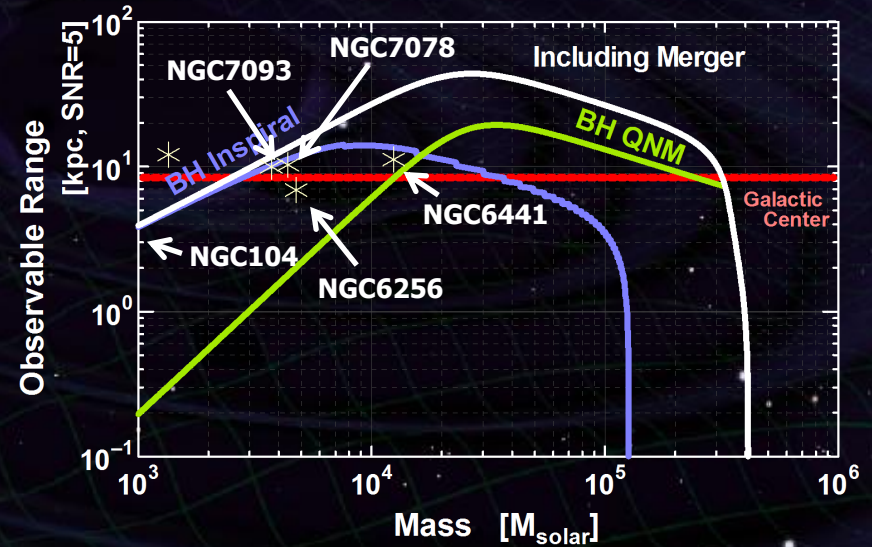
⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性



# DPFの観測目標

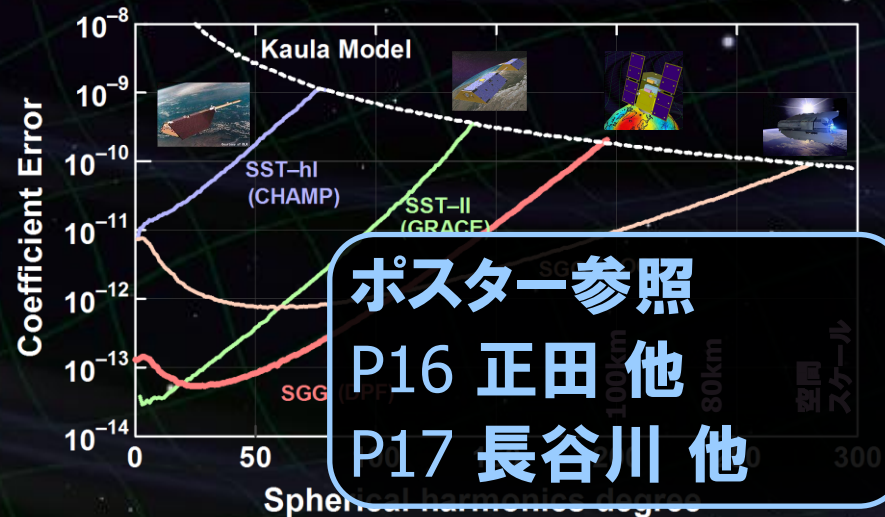
重力波により宇宙を見る  
銀河系内のBH連星合体  
→ 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では  
~30個の球状星団を観測可能



重力で地球を見る  
地球重力場の観測  
地球形状の計測  
地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度  
国際観測網への貢献, 独自の観測  
(2012-2016に国際観測網にギャップ)





# 地球重力場の観測

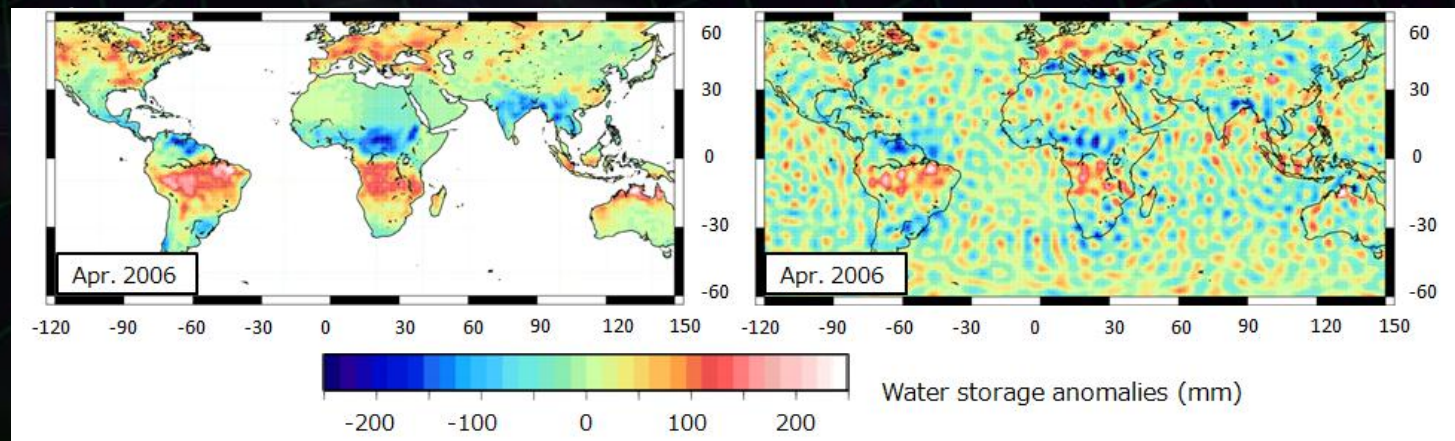
- NASA/GSFC GRACEチームとの共同研究

- GRACE用に開発されたシミュレーションツールを改良  
→ DPFの構成で時系列シミュレーション.
- DPFの感度(+安全係数)で陸水変動の情報が得られることを確認.

⇒ ポスター参照 P17 長谷川 他

- 今後

- パラメータサーベイと要求値の確定.
- GRACEとの同時観測によるエリアシング除去の研究.





# DPFシステム概要



## DPF Payload

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

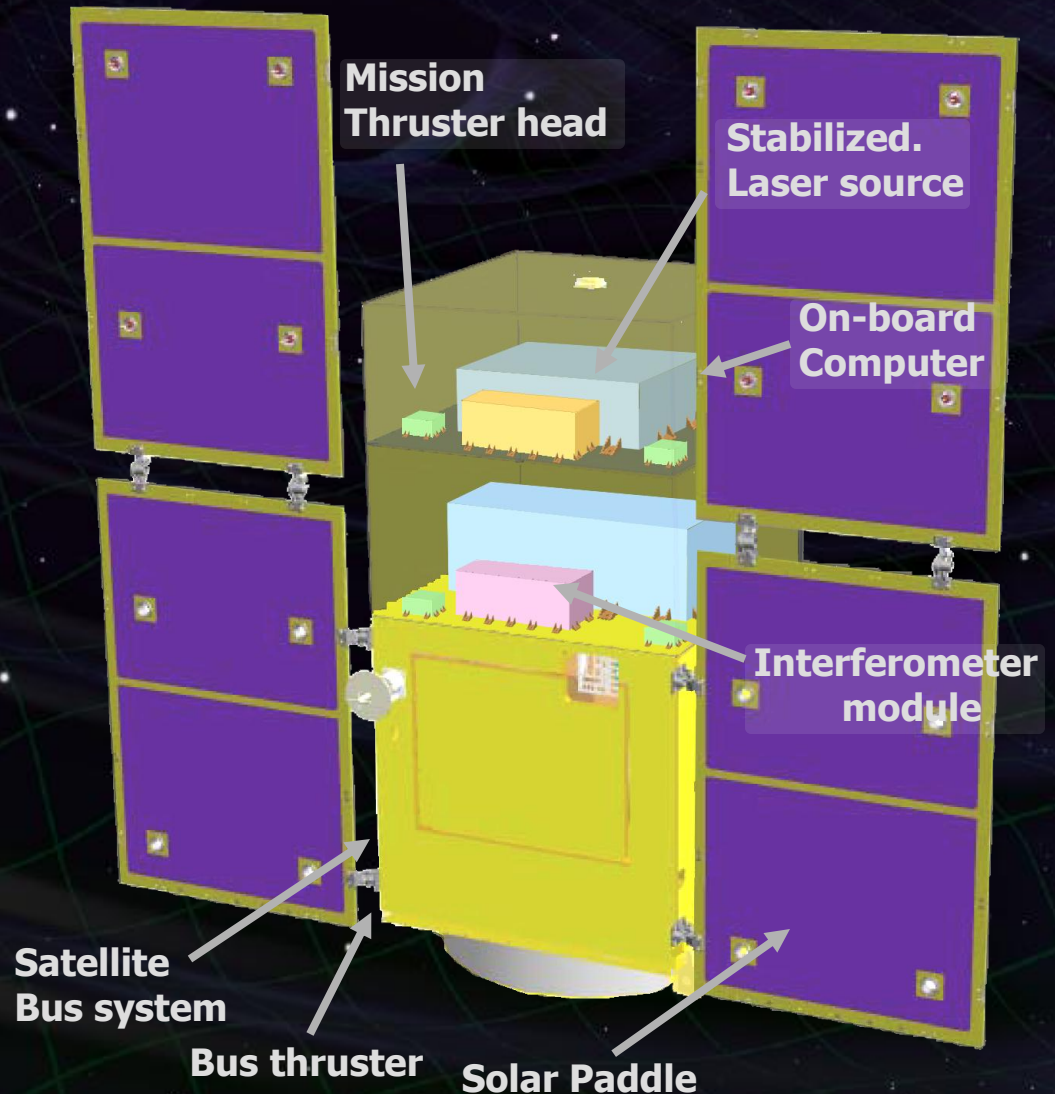
Power Supply  
SpW Comm.



## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

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

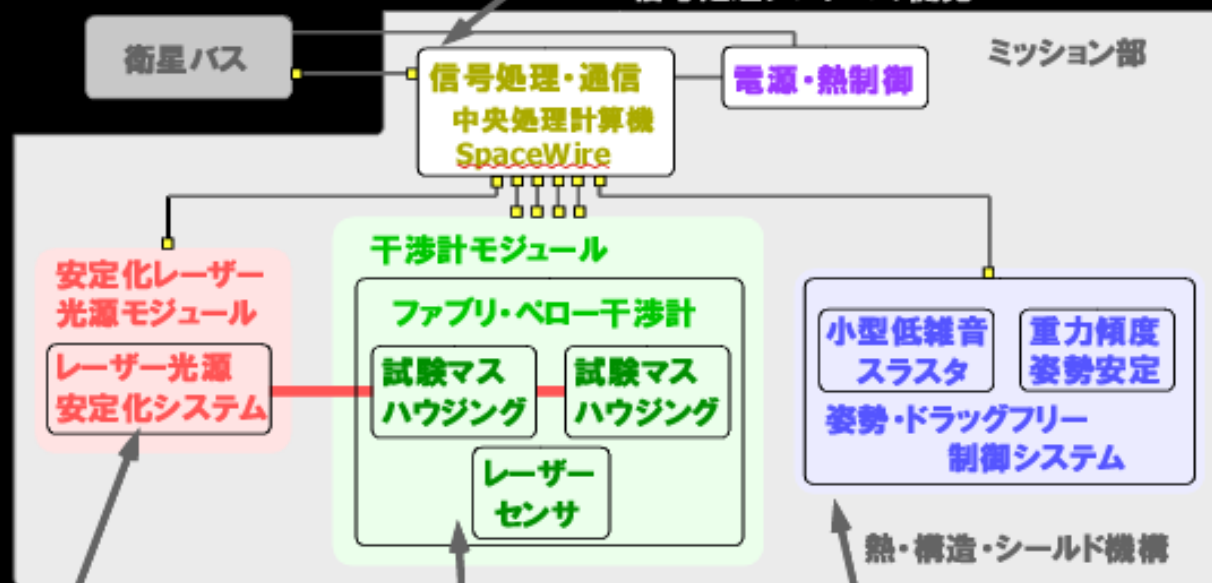




# 推進体制

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

阿久津 (国立天文台),  
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  
101名  
DECIGO  
145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), 阿久津,  
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

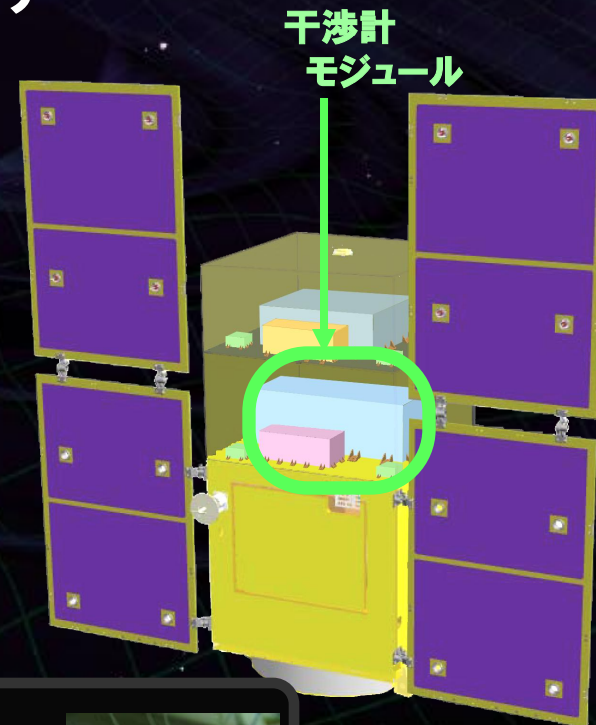
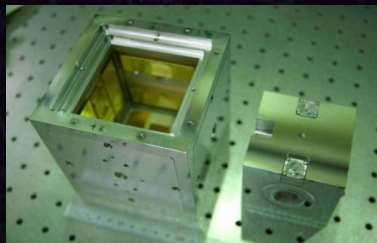
## レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

### 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 of Module, Sensor, Actuator, Clump/Release
- $\mu$ -Grav. Exp.

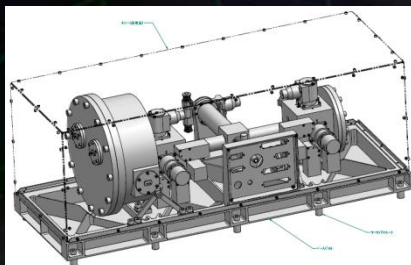
法政大, 国立天文台,  
お茶大, スタンフォード大



### 干渉計モジュール

→ 重力波観測, 重力勾配計

- 30cm IFO BBM
- Packaging
- Digital control
- Monolithic Opt.



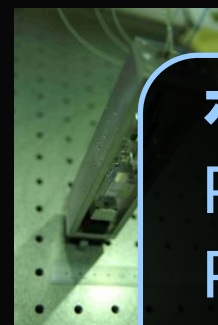
国立天文台, 東大

### レーザーセンサ

→ 加速度計センサ

- BBM test
- Sensitivity meas.

東大地震研, 東大理



### ポスター参照

P18 阿久津 他

P19 道村 他

P22 陳たん 他



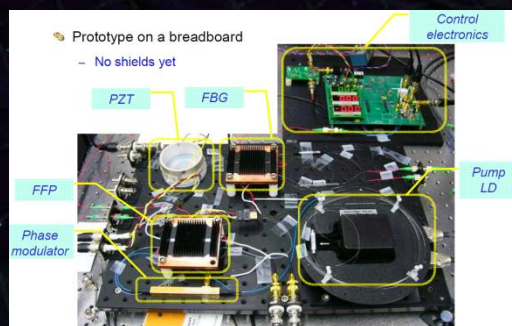
# 安定化レーザー光源

安定化レーザー光源：光源 + 安定化システム

Yb:YAG (NPRO or Fiber laser) 光源

→ 小型・軽量化, 耐振動性

•BBM development



電通大, NASA/GSFC

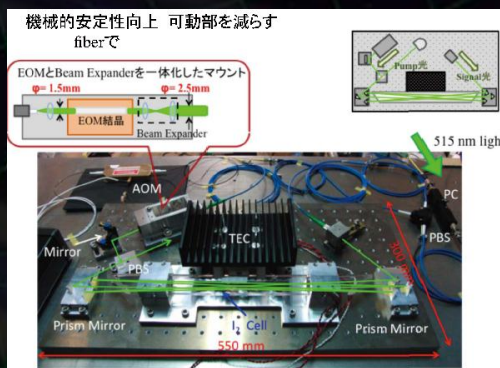
ヨウ素飽和吸収

による安定化制御

→ 周波数基準  
擾乱耐性

•BBM development  
•Stability meas.

電通大, NICT



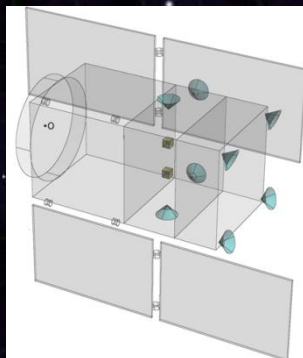
安定化  
レーザー光源

ポスター参照  
P20 武者 他

# 姿勢・ドラッグフリー制御

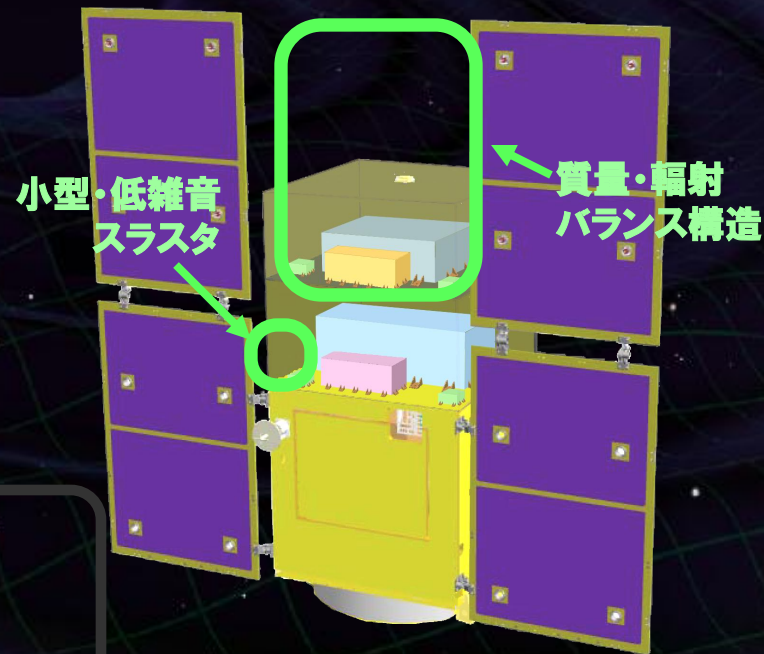
## 姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

### 衛星構成，熱・構造検討



- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA

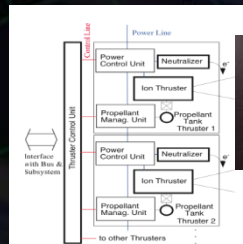


小型・低雑音スラスタ

質量・輻射  
バランス構造

### 小型低雑音スラスタ

→ Actuators for satellite control



•BBM and system design

JAXA, 東海大, 防衛大

ポスター参照  
P21 佐藤 他



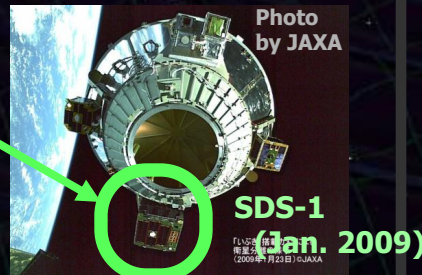
# 信号処理・制御システム

## 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

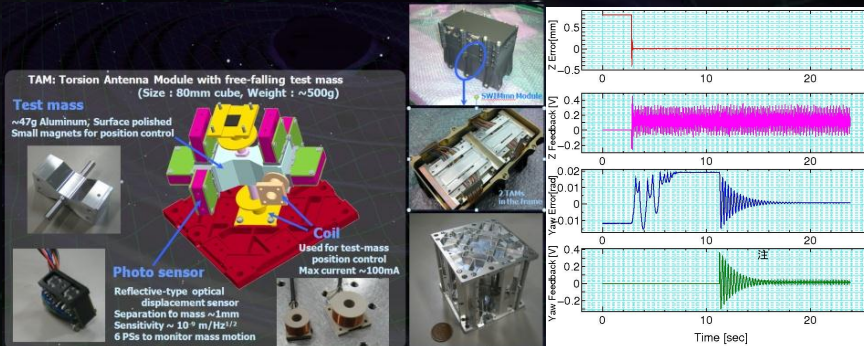


Space demonstration  
 by SDS-1/SWIM

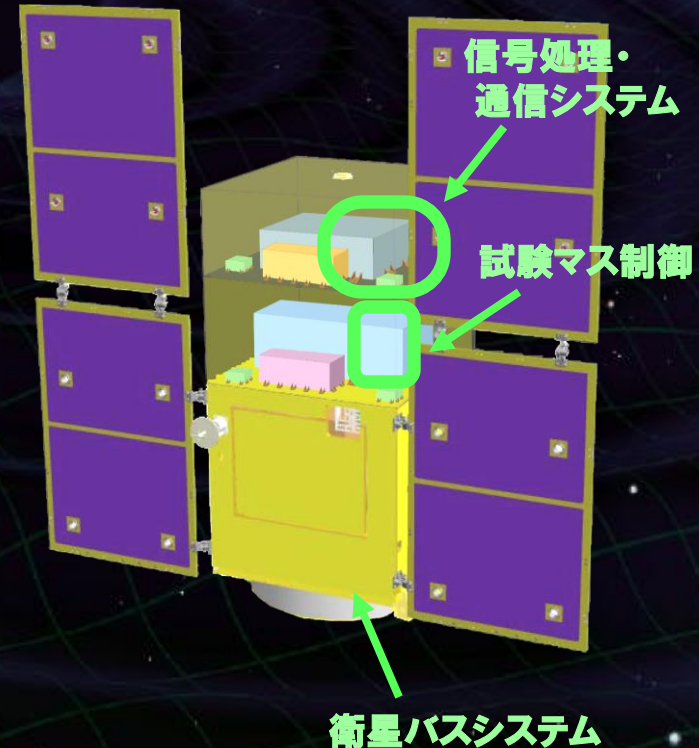


JAXA, 東大, 京大

試験マスの非接触制御と精密計測  
 → SWIMによる宇宙実証



JAXA, 東大, 京大

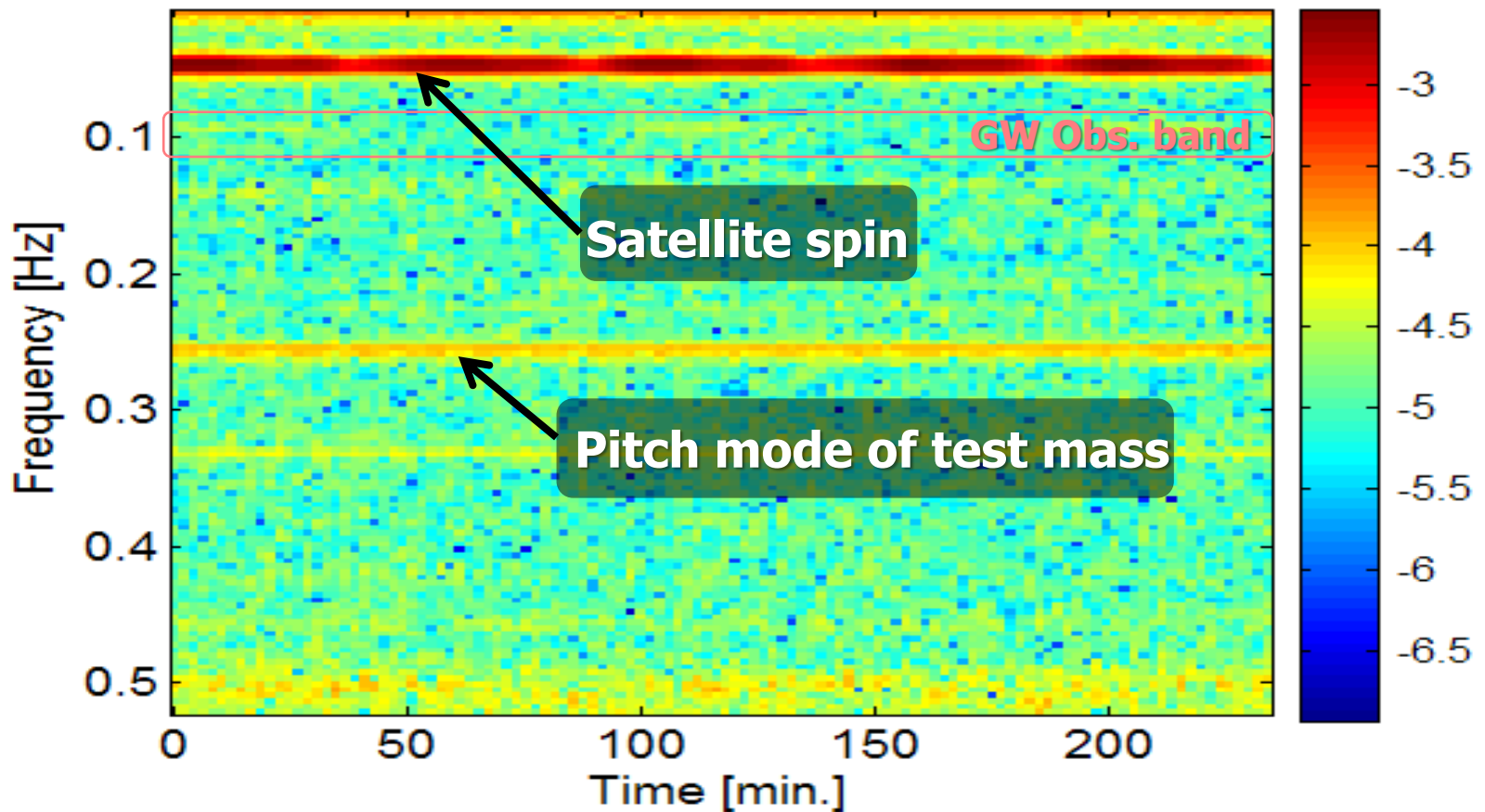


ポスター参照  
 P15 穀山 他  
 P18 阿久津 他

# SWIM観測運用

SWIM observation (2<sup>nd</sup> run on July 15, 2010 ~240 min.)

⇒ 背景重力波に対する上限値 (P15 穀山 他)







# まとめ



# DECIGO Pathfinder



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



宇宙・地球の観測

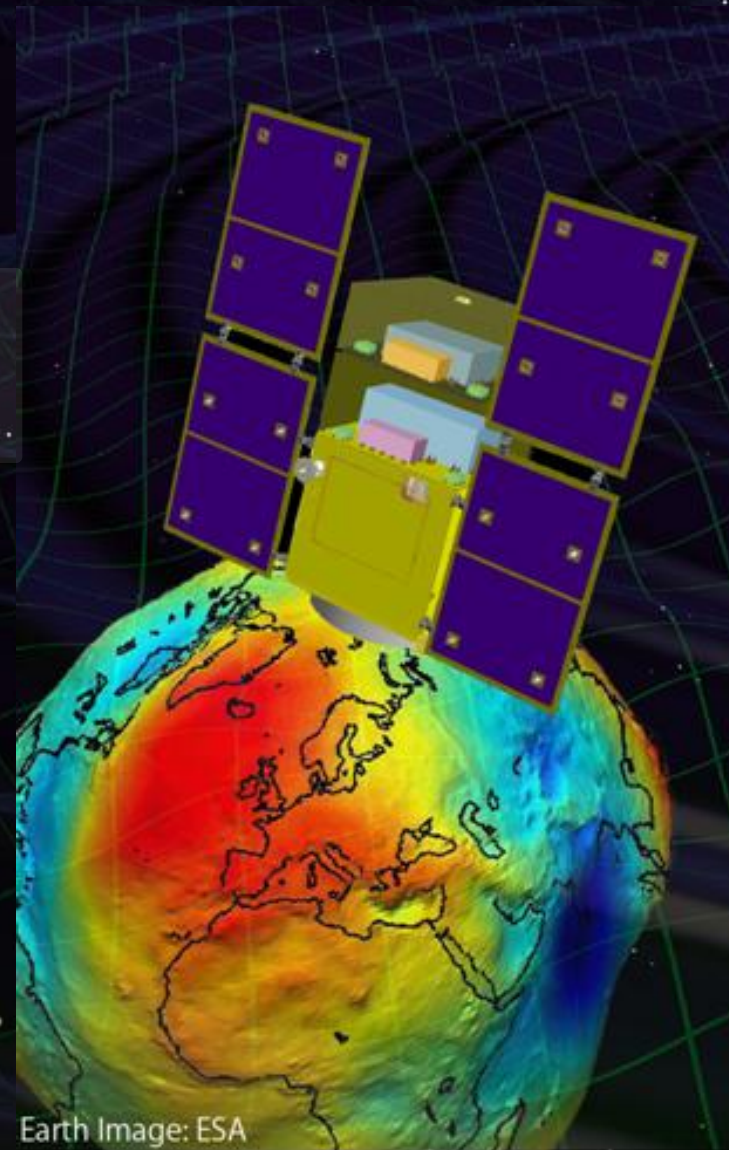
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

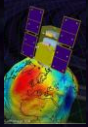
→ 無重力環境利用の新しい可能性

BBM試作・試験が進行中

SDS-1/SWIMによる宇宙実証







# 小型重力波観測衛星DPF



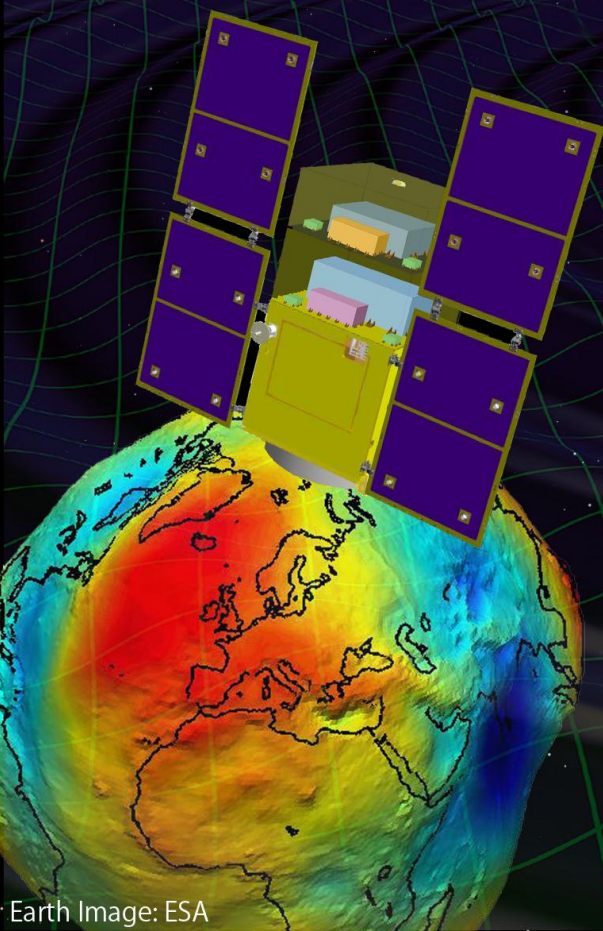
## • DPFのサイエンス 重力波観測・地球重力場観測

- P15 SDS-1/SWIMによる重力波観測とDPF要素技術の宇宙実証 穀山渉 (東大理)
- P16 DECIGO pathfinderにおける重力場測定 of 感度評価 正田亜八香 (東大理)
- P17 DECIGO Pathfinderによる地球重力場観測のシミュレーション 長谷川崇 (京大理)

## • DPFのミッション検討と根幹技術開発

- P18 DPF衛星の干渉計部および信号取得系の開発 阿久津智忠 (国立天文台)
- P19 DECIGO Pathfinder向けプロトタイプ干渉計実験 道村唯太 (東大理)
- P22 DECIGO pathfinderの試験マス制御系の開発(2) 陳たん (東大天文)
- P20 DPFのための衛星搭載用高安定化光源の開発 武者 満 (電気通信大学)
- P21 DPFのドラッグフリー制御系の開発 佐藤修一 (法政大理工)





Earth Image: ESA

終わり