

スペース重力波アンテナDECIGO計画 (23)

DECIGO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, 足田涉, 姫本直朗, 平林久, 平松尚志, 洪鋒雷,
堀澤秀之, 細川瑞彦, 市來淨與, 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,
穀山涉, 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, 森本睦子, 森网友子, 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, 頭防雄大,
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, 上田暁俊, 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,



概要

DPF (DECIGO Pathfinder)

DECIGOのための前哨衛星

JAXA 小型科学衛星シリーズ 2号機の候補

→ 最終候補まで残るも 落選

本講演の内容

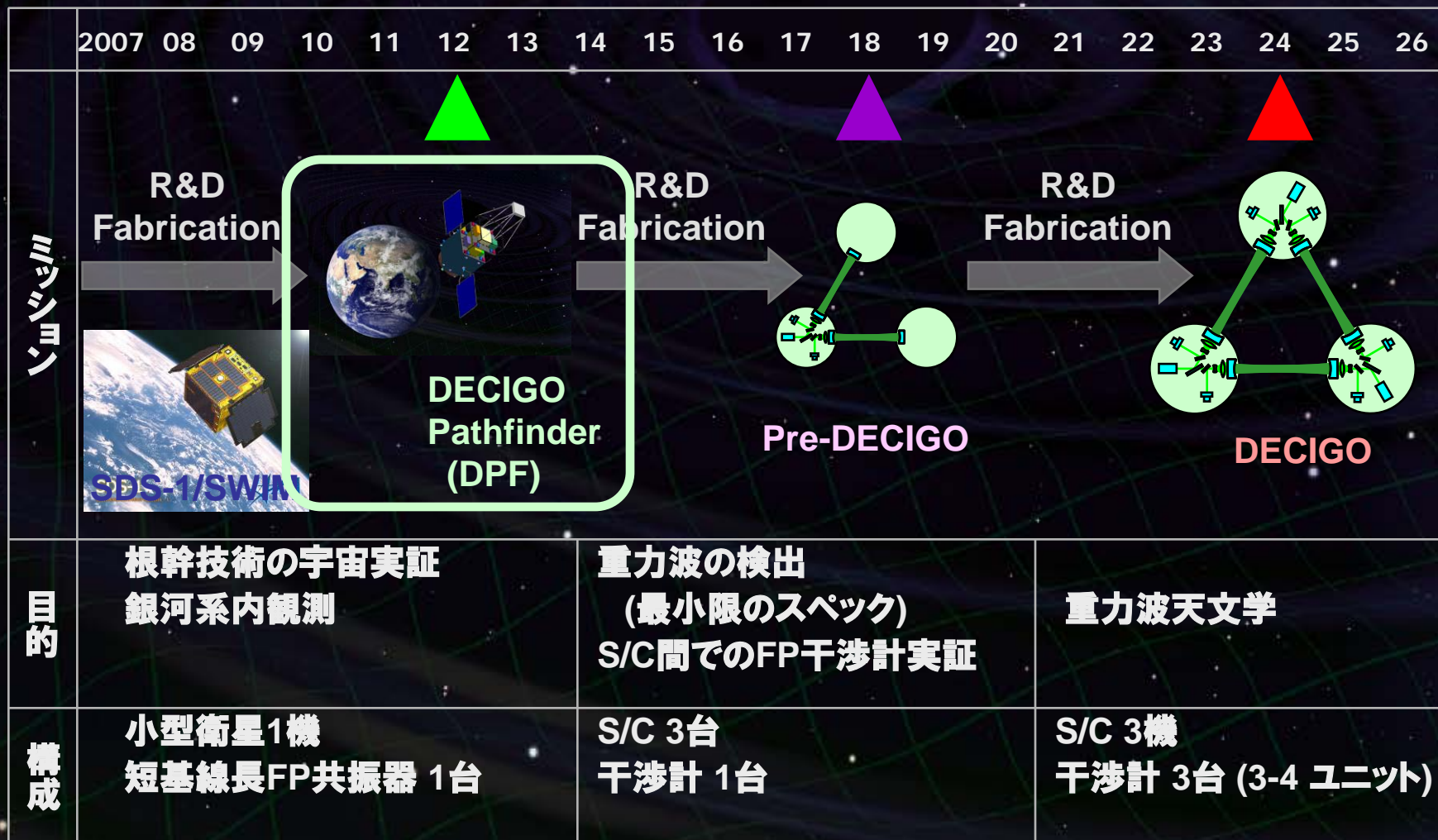
DPFの概要

審査における論点

結果・評価と今後の方針

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DPF概要

DECIGOのための前哨衛星

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



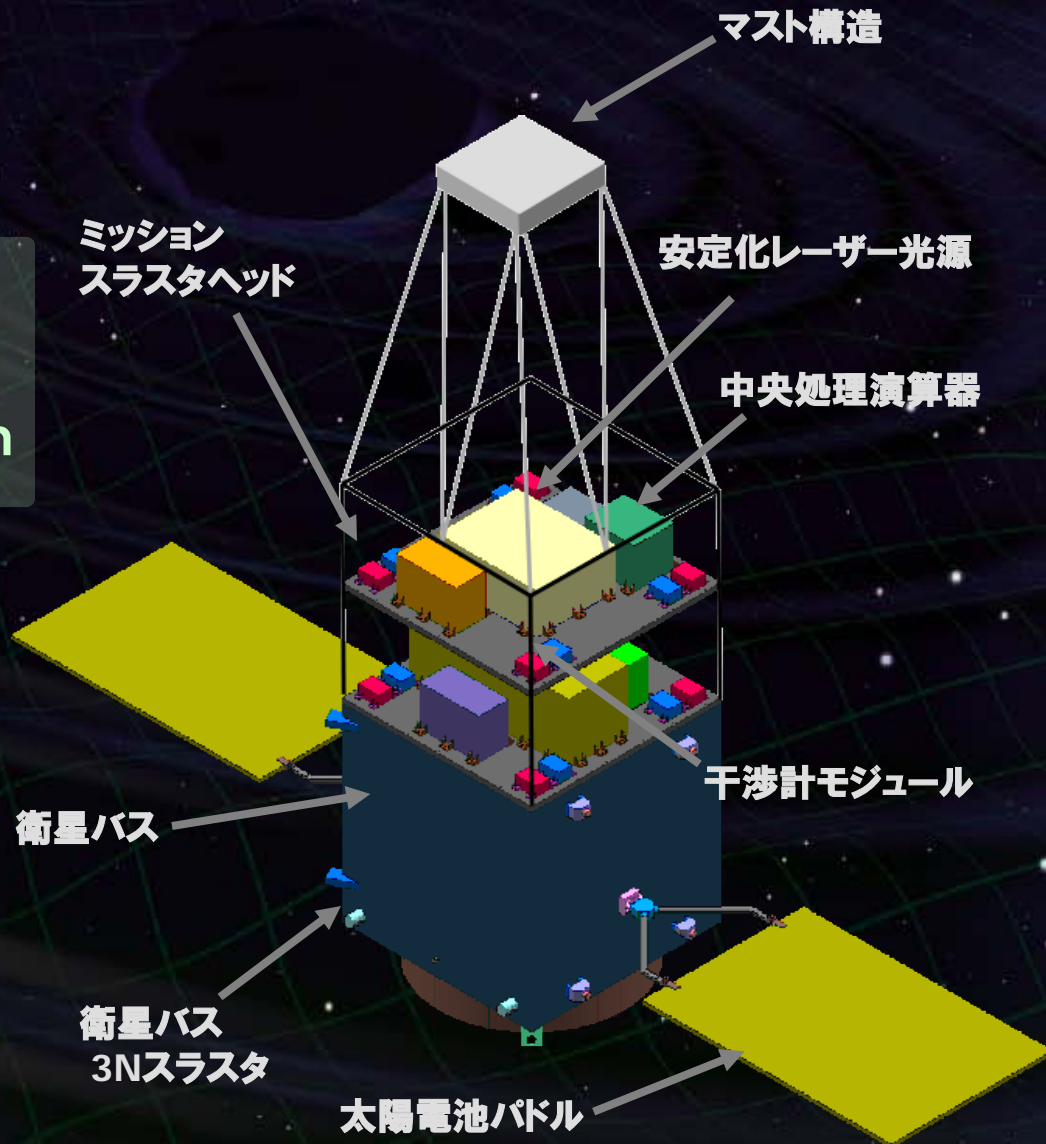
DECIGOのための宇宙実証

科学技術の確立

宇宙・地球の観測

重力波の観測

地球重力場の観測

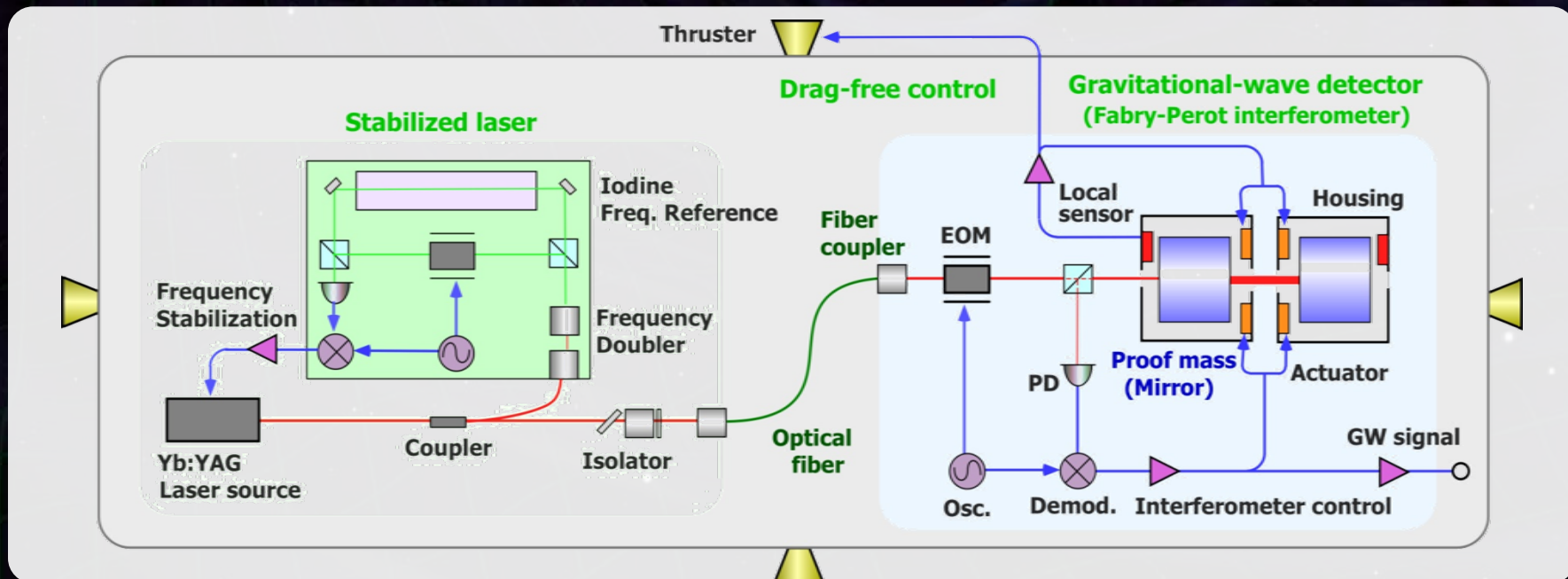


DPFミッション機器構成

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
テストマス : 質量 1kg
PDH法により信号取得・制御

小型科学衛星シリーズ選定

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号機ミッション (~2012年)

SPRINT-A/EXCEED

2号機ミッション (~2013) : 今年度選定

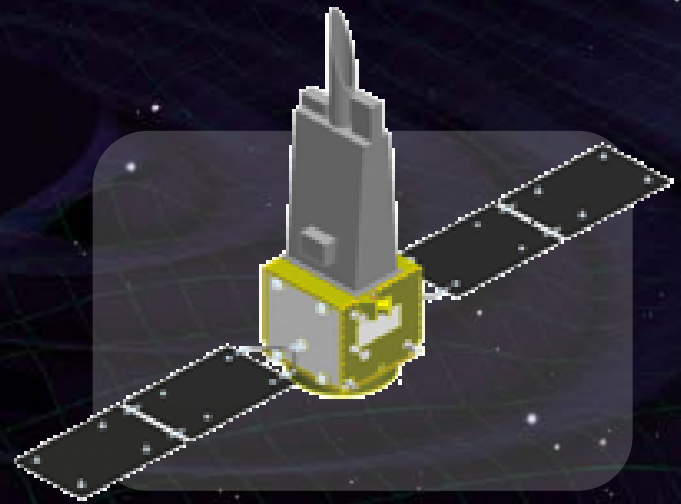
2008年9月 ミッション提案書募集 → 決定せず

2009年3月 2号機ミッション再募集

候補: ERG, **DPF**, FFAST など 5ミッション

2009年5月 ヒアリング審査 (ERG, **DPF**)

2009年8月 2号機ミッション ERGに決定



小型科学衛星1号機 SPRINT-A (旧TOPS)



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

ミッション選定時の論点

1. 科学的価値
2. 衛星バスへの要求と実現可能性
3. 衛星搭載に起因する固有の問題
4. 実施体制
5. コスト評価について

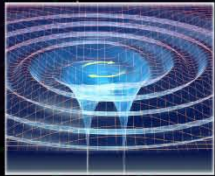
論点

- ⇒ **1. 科学的価値**
- 2. 衛星バスへの要求と実現可能性**
- 3. 衛星搭載に起因する固有の問題**
- 4. 実施体制**
- 5. コスト評価について**

DPFが目指す科学的成果

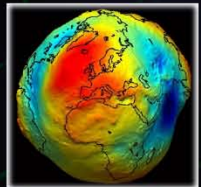
宇宙・地球の観測

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や振動現象を観測。

地球重力場観測

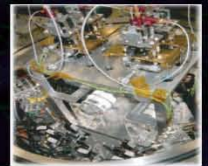


1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

科学技術の確立

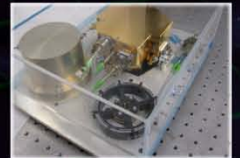
宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。



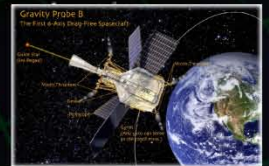
安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。



ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、ドラッグフリー制御の実現。

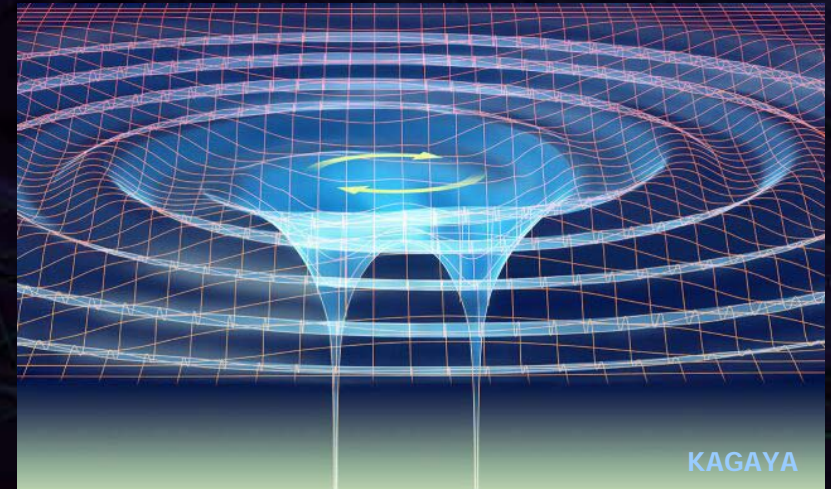


DPFの観測対象

我々の銀河中心付近の
ブラックホールに関連する現象

中間質量ブラックホール合体

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4$ Hz
Distance 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$
観測時間(~数千秒)

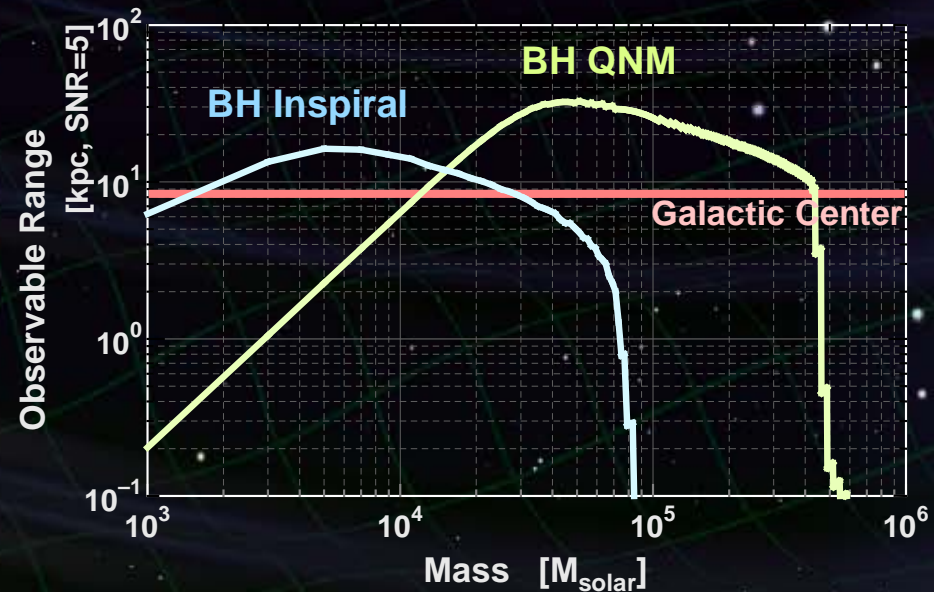


BH準固有振動からの重力波

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

DPFの観測可能距離
~ 銀河中心をカバー (SNR>5)

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による重力波の観測

球状星団中のBH

中心付近の星の運動から BH質量を推定

⇒ BH同士の合体からの重力波で期待できるSNR
等質量, 質量比1:1/3, 100Msun BHが落下の場合

Globular clusters known
to have black holes



Credit: NASA, STScI

NGC#	BH質量 [Msun]	距離 [kpc]	SNR (同質量)	SNR (1:1/3)	SNR +100Msun	速度分散 [km/sec]
6441	12,424	11.2	36.4	22.2	3.7	19.5
6256	4,754	6.9	26.6	16.2	4.3	15.4
7078	4,388	10.3	16.6	10.2	2.8	15.1
6093	3,720	10.0	14.9	9.1	2.7	14.5
104	820	4.5	9.4	5.7	3.6	10
1851	1,348	12.1	5.3	3.2	1.6	11.3
6681	820	9.0	4.7	2.9	1.8	10
6293	366	8.8	2.5	1.5	1.4	8.2
5286	444	11.0	2.3	1.4	1.2	8.6
6522	228	7.8	1.9	1.1	1.3	7.3
5904	142	7.5	1.3	0.8	1.1	6.5
6325	133	8.0	1.2	0.7	1.0	6.4
6752	45	4.0	0.9	0.6	1.3	4.9
7099	89	8.0	0.8	0.5	0.9	5.8
6284	171	15.3	0.7	0.5	0.6	6.8
5272	41	10.4	0.3	0.2	0.5	4.8

(我々の銀河内に約150の球状星団)

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

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

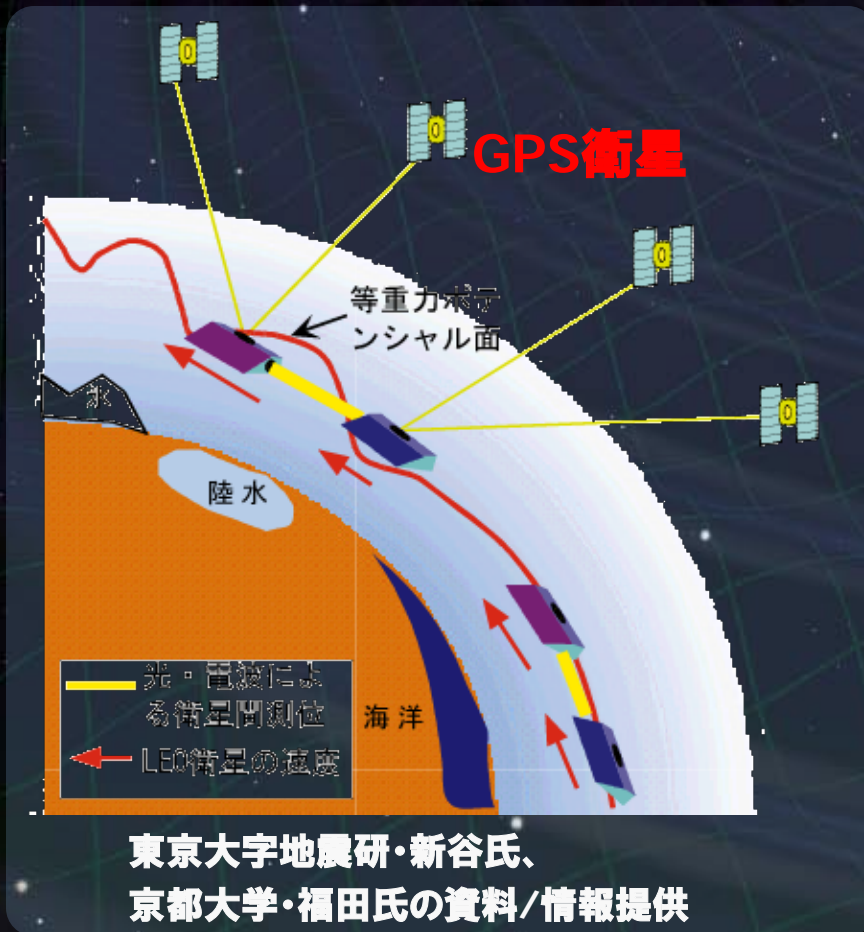
GRACE

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

DPF

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

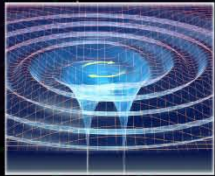
GRACEとGRACE-FOの間の期間
2012-16年を埋める可能性
 \rightarrow 独自の成果, 国際貢献



DPFが目指す科学的成果

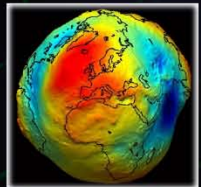
宇宙・地球の観測

重力波観測

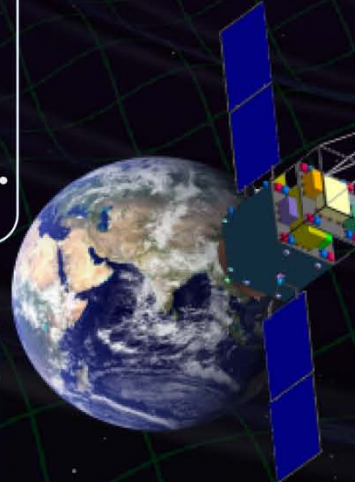


銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測。

地球重力場観測



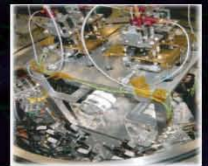
1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。



科学技術の確立

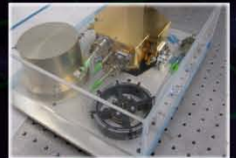
宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。



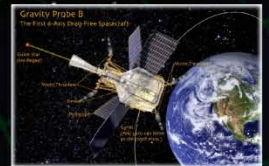
安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。



ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、ドラッグフリー制御の実現。



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

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

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

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)

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
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

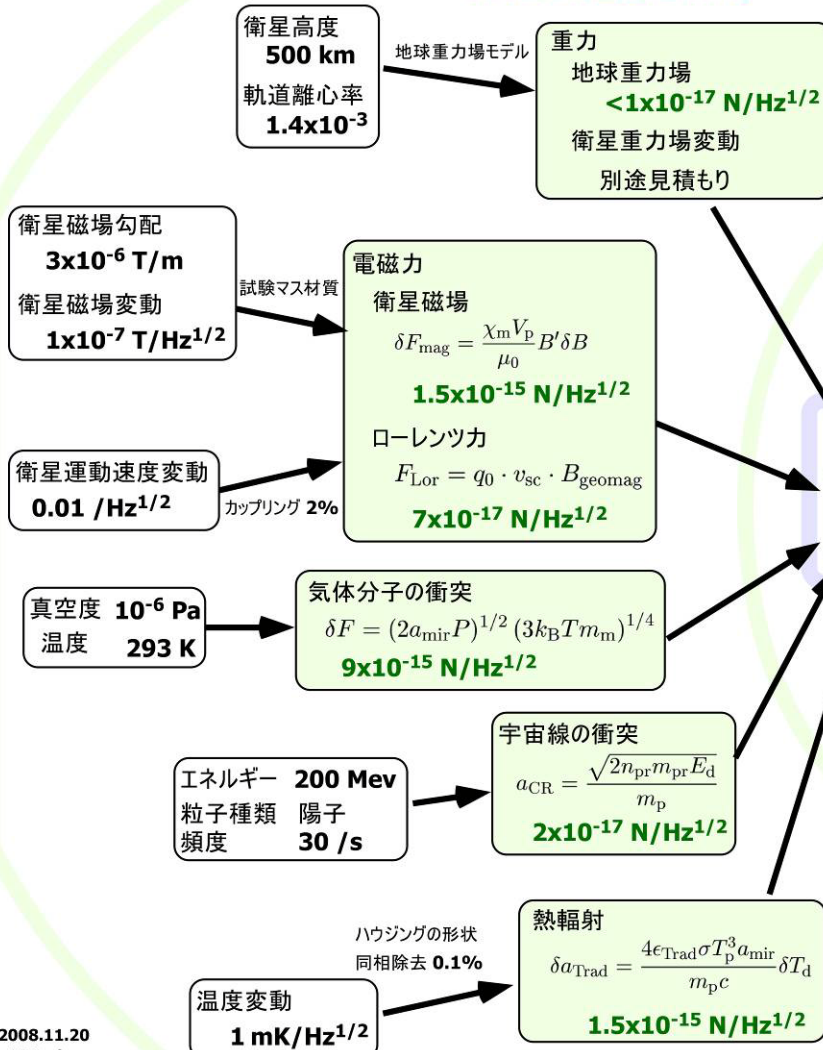
長時間安定な無重力環境
→宇宙環境利用の新しい可能性
基礎物理学実験, 材料工学
フォーメーションフライト
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)
小型低雑音スラスタ

論点

1. 科学的価値
- ➔ 2. 衛星バスへの要求と実現可能性
- ➔ 3. 衛星搭載に起因する固有の問題
4. 実施体制
5. コスト評価について

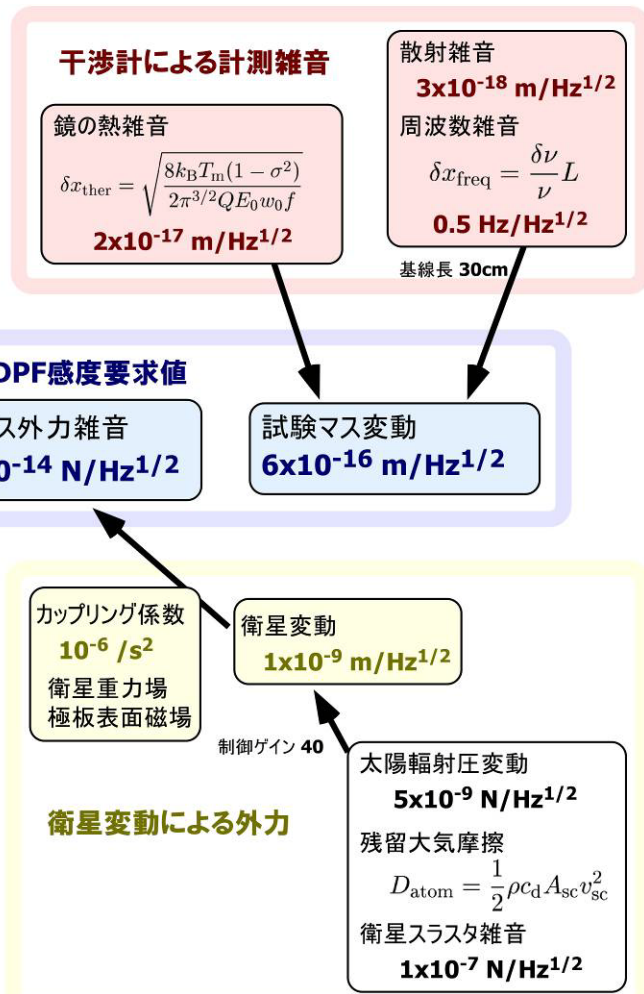
DPFシステム要求値

試験マスに直接働く外力



DPF要求値検討図

0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり



2008.11.20
M.Ando

衛星への要求

観測帯域 (0.1-1 Hz) での
変動成分 (スペクトル) が重要

機械的振動

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

重力などによる
試験マス変動へのカップリング

磁場

磁場変動 $1 \times 10^{-7} \text{ T/Hz}^{1/2}$

磁場勾配 $3 \times 10^{-6} \text{ T/m}$

磁場勾配途地場変動による
試験マス変動

温度

温度変動 $1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$

熱輻射揺らぎによる試験マス変動
(ハウジング内面での要求値)

衛星変動

衛星の機械的変動要求値

$$1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$$

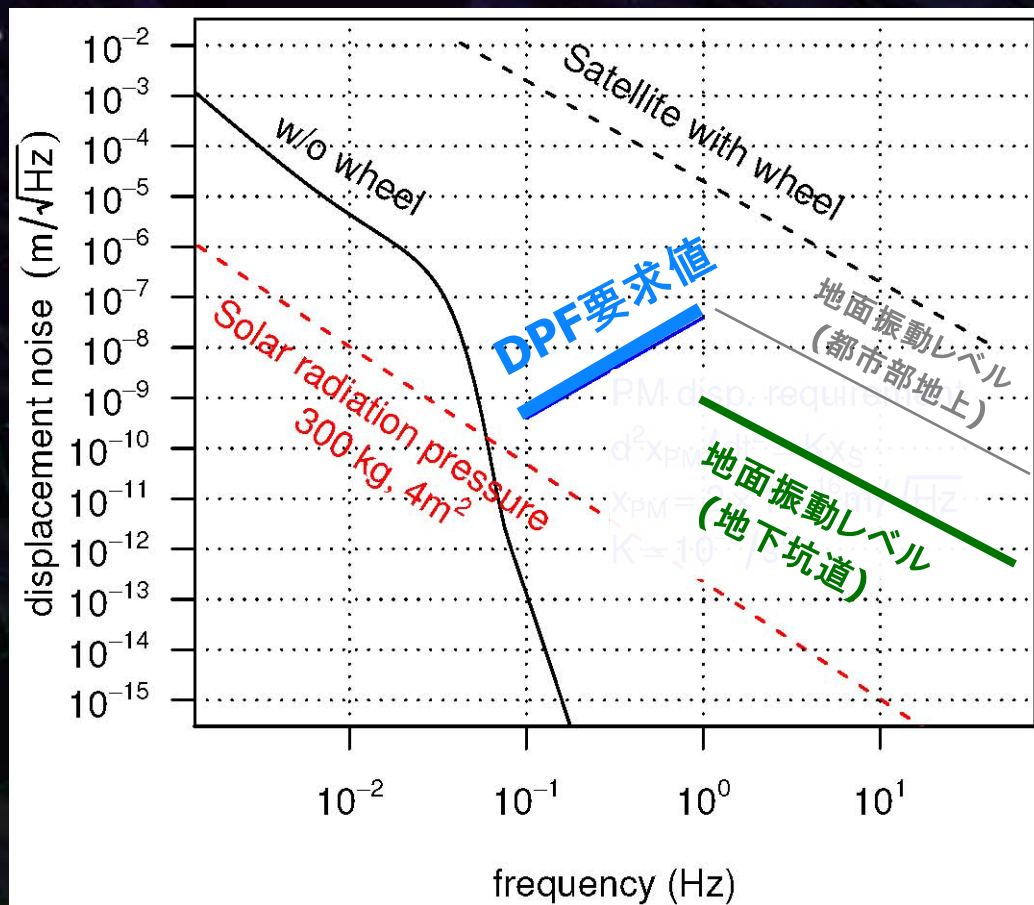
⇒ 機械変動を排除した
衛星で実現可能

(静寂環境での
地面振動程度の安定度)

DPF構成：機械変動部は無い

モメンタムホイールは非搭載
リングレーザージャイロ

→ FOG に変更

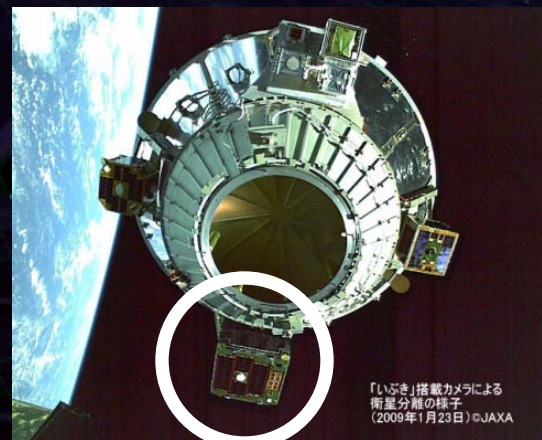


温度変動

試験マス周囲の温度変動要求値

$$1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$$

- ⇒ 多重の輻射シールド
大きな熱浴, 熱伝導の良い材質

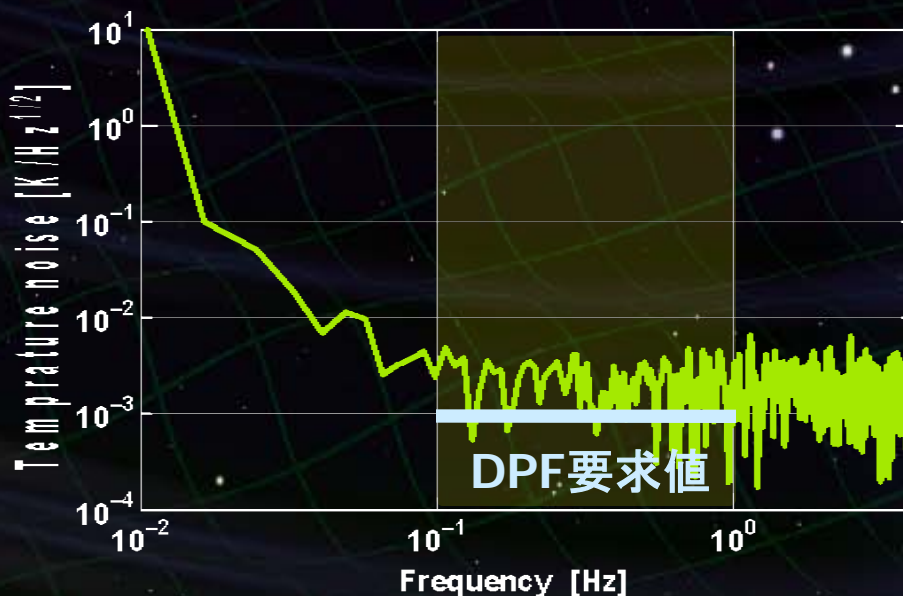


SDS-1

SWIMモジュール (SDS-1搭載)
での温度変動実測結果

サバイバルヒータでのON/OFF制御
SWIMでは温度制御はしていない

- ⇒ DPFの要求値を
ほぼ満たす結果
(ADC雑音による測定限界)



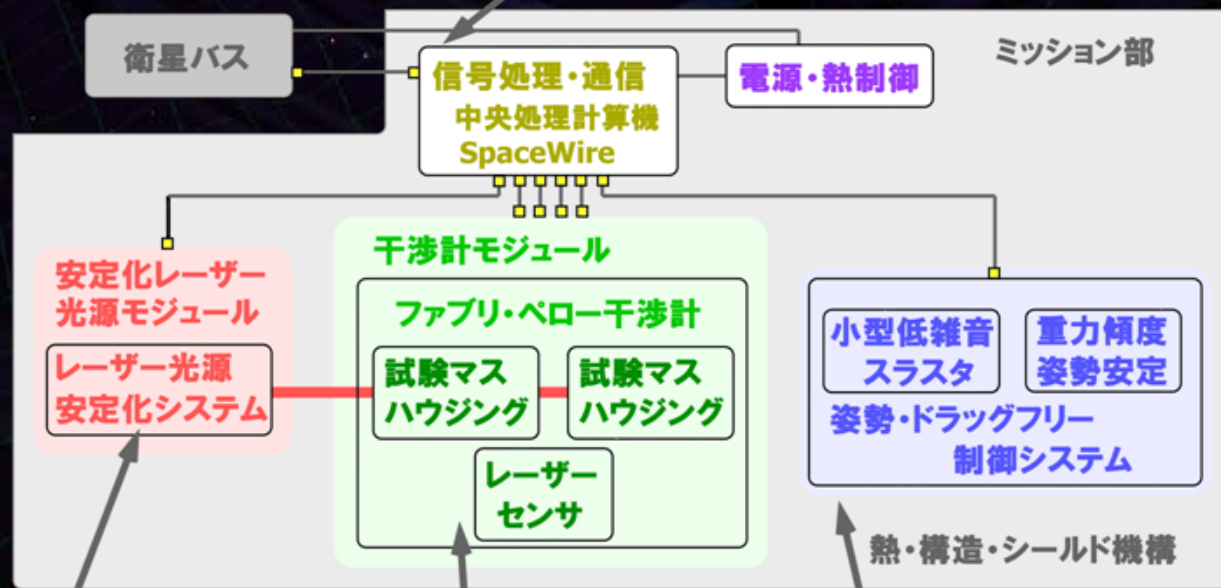
論点

1. 科学的価値
2. 衛星バスへの要求と実現可能性
3. 衛星搭載に起因する固有の問題
- 4. 実施体制
5. コスト評価について

推進体制

神田 (大阪市大)
中村, 田中, 瀬戸 (京都大学)
井岡 (KEK)
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

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)
川村, ATC (国立天文台)
干渉計・ハウジングの開発
新谷 (東大地震研究所)
地球重力場観測用
レーザーセンサの開発

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

坂井 (宇宙科学研究本部)
森脇 (東京大学)
姿勢制御・ドラッグフリー
システムの開発

DPF技術開発

安定化レーザー光源

Yb:YAG (NPRO) 光源

ヨウ素飽和吸収による安定化制御

→ 安定度向上, パッケージ化

- ⇒ 電気通信大学
情報通信研究機構 (NICT)
NASAゴダード

中村氏講演



武者氏
資料より

干渉計・ハウジング

プロトタイプ的设计・製作

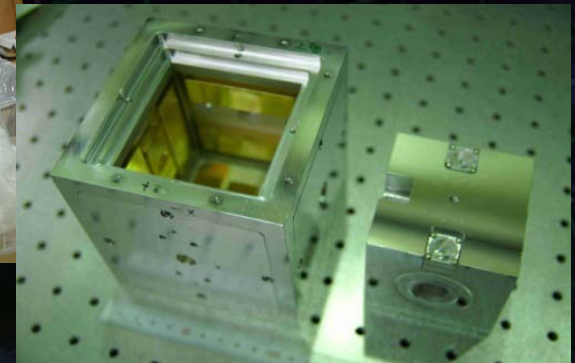
地球重力場観測用センサの試作

- ⇒ 国立天文台 (NAOJ)
東京大学・東大地震研究所
スタンフォード大

→ 佐藤・若林・
江尻・正田 氏講演



新谷氏
資料より



佐藤氏
資料より

DPF技術開発

姿勢制御・ドラッグフリー

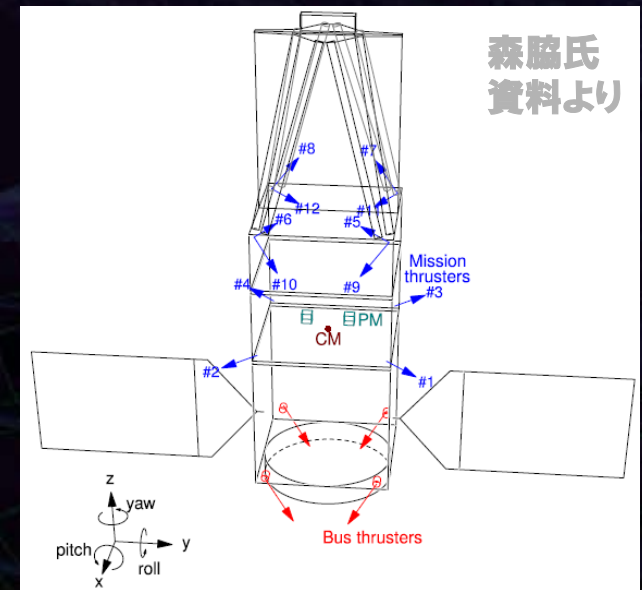
構成 (構造・制御則) の検討

重力傾度安定による受動安定化

衛星にマスト構造を取り付ける

ミッション部スラスタによるドラッグフリー制御

⇒ 東京大学・新領域創成科学研究科
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)



スラスタ

既存技術のシステム化検討

推力雑音評価装置

(スラスタスタンド) 製作

スリット型FEFPの試作

⇒ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
東海大学, 防衛大学



DPF技術開発

信号処理・制御

SpaceWire/SpaceCube

SDS-1/SWIM

1/23打上げ → 宇宙実証試験

⇒ 東京大学, 京都大学
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

殺山氏講演

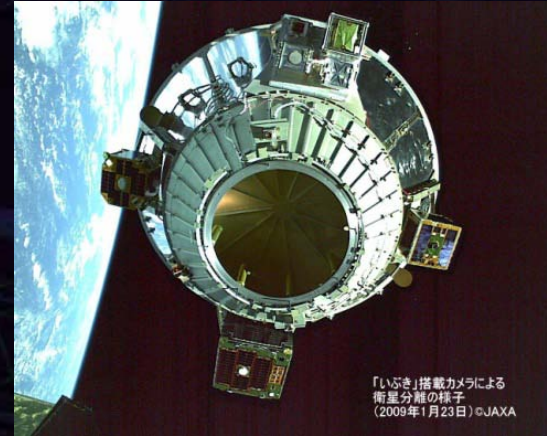


写真:
JAXA

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000
(64bit, 33MHz)

System Memory:
2MB Flash Memory
4MB Burst SRAM
4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:
1GB SDRAM
1GB Flash Memory
SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171

Weight: 1.9 kg

Power: 7W



SWIM_μv : User Module

Processor test board.
GW+Acc. sensor

FPGA board

DAC 16bit x 8 ch

ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX

Torsion Antenna x2

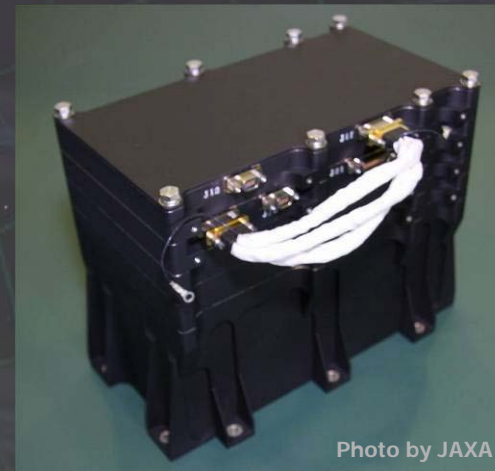
~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W



協力・サポート体制

- **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-)

- **大学の工学系研究室との協力**

UNISEC (University Space Engineering Consortium) への呼びかけ

工学系研究者 → 衛星システム 搭載機器製作

ミッション選定の結果

DPFに対する 小型科学衛星専門委員会 のコメント

高い評価

- 重力波検出という極めて重要な 課題への明確な位置付け
- LISA計画とは異なる 独自性(ファブリ・ペロー干渉計)
- 宇宙実験としては新しいグループだが、
地上実験では十分な実績をもち、
SDS衛星など宇宙への参入に積極的にとりこんでいる点

問題点

- DPFの意義・目標について、 小型科学衛星単独として不十分
- 実現可能性について、その実現性が判断できるレベル
まで検討が進んでいない
- 提案されたコストの見積り精度が高くない

今後の方針

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

JAXA小型科学衛星 戦略的開発経費

→ 加速ミッションとして採択

次ミッションの有力候補の1つになっている



小型科学衛星3号機 を目指して再スタート

課題 実現性を高める

工学面を含めた体制の強化

より具体的な衛星構成検討

技術性成熟度の更なる向上・分かり易い実績

説得力のある科学的成果の検討

打ち上げ目標：2015年

他の可能性の検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	相乗り衛星 (Cube sat.)
衛星 サイズ [m]	1 - 10	1 - 3	0.5 - 1	0.1-0.5
衛星重量 [kg]	~ 2000	~ 400	~ 100	~ 10
開発期間 [年]	~ 10	~ 6	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 70	~ 5	~ 0.1
期待できる 成果	(Pre-DECIGO) 重力波の検出 フォーメーション フライト	(DPF) 重力波の観測 根幹技術の 総合試験	(SWIM) 根幹技術の 個別試験 (×Drag-free)	動作試験 原理実証

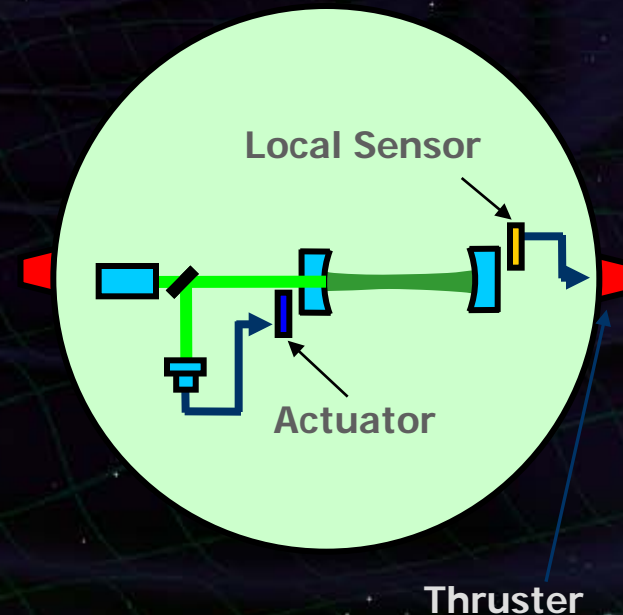
まとめ

DECIGO-PF

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)
フリーマス x2 → 基線長30cmのFP共振器
レーザー光源とその安定化システム
ドラッグ・フリーの組み込み



DECIGOなどのための**科学技術の確立**

宇宙・地球の観測

小型科学衛星3号機 (~2015年)を目指して再スタート

