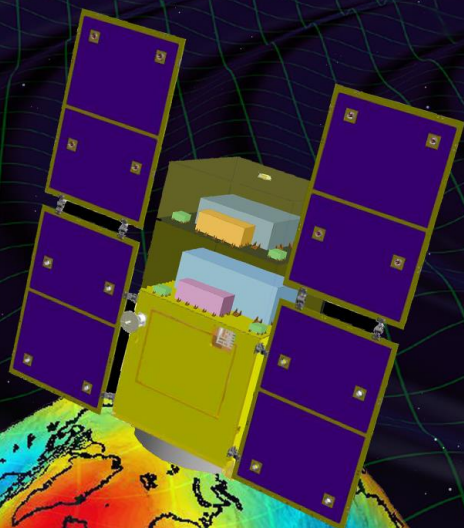


スペース重力波アンテナDECIGO計画(44): DECIGO/DPFの概要



Earth Image: ESA



Original
Picture : Sora

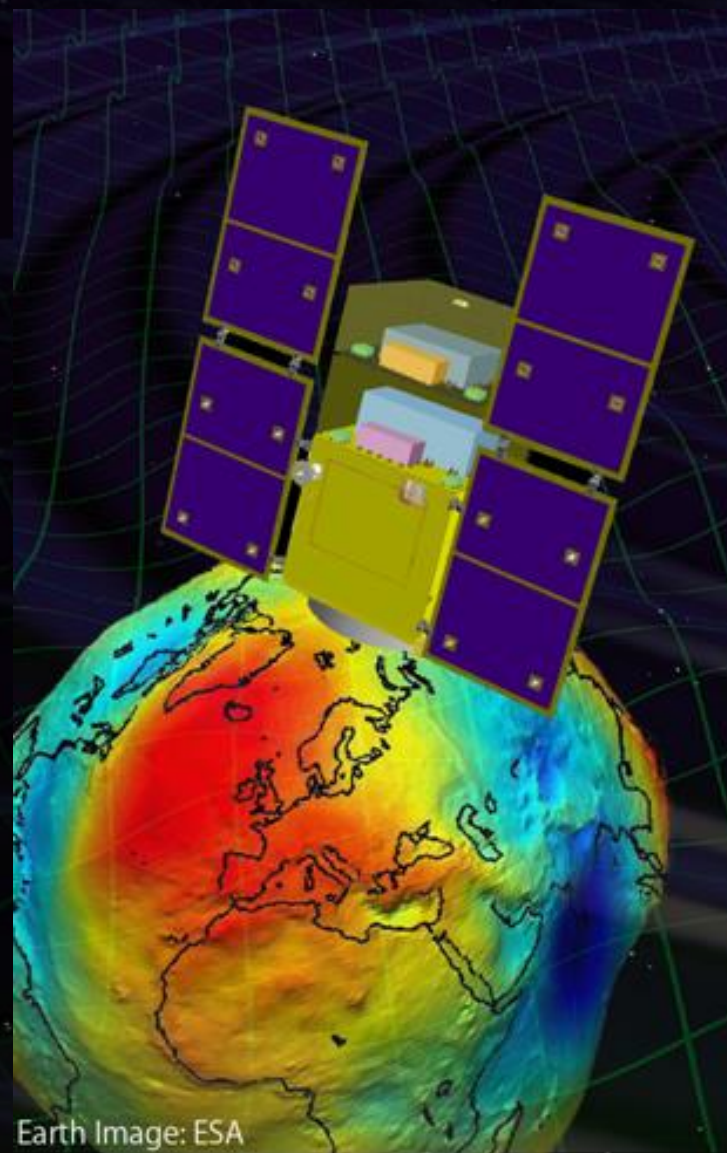
安東 正樹 (東京大学)

DECIGO/DPF collaboration

DECIGO 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, 川村静兒, 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



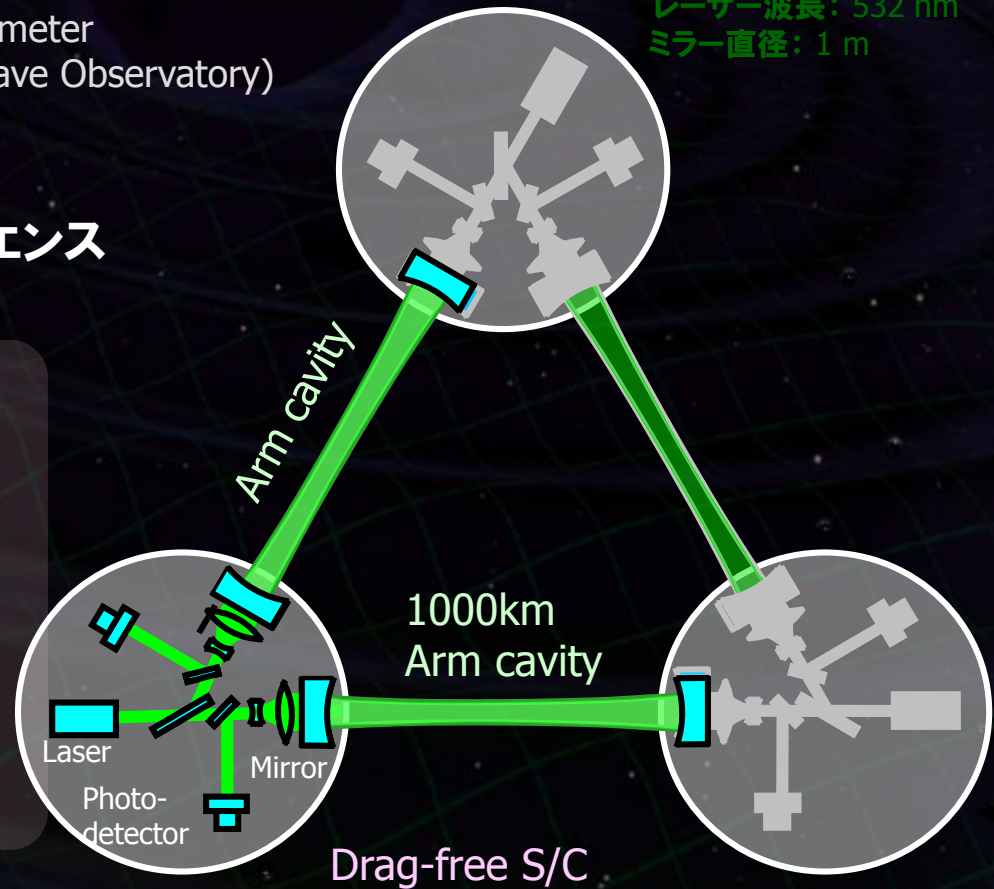
Earth Image: ESA

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

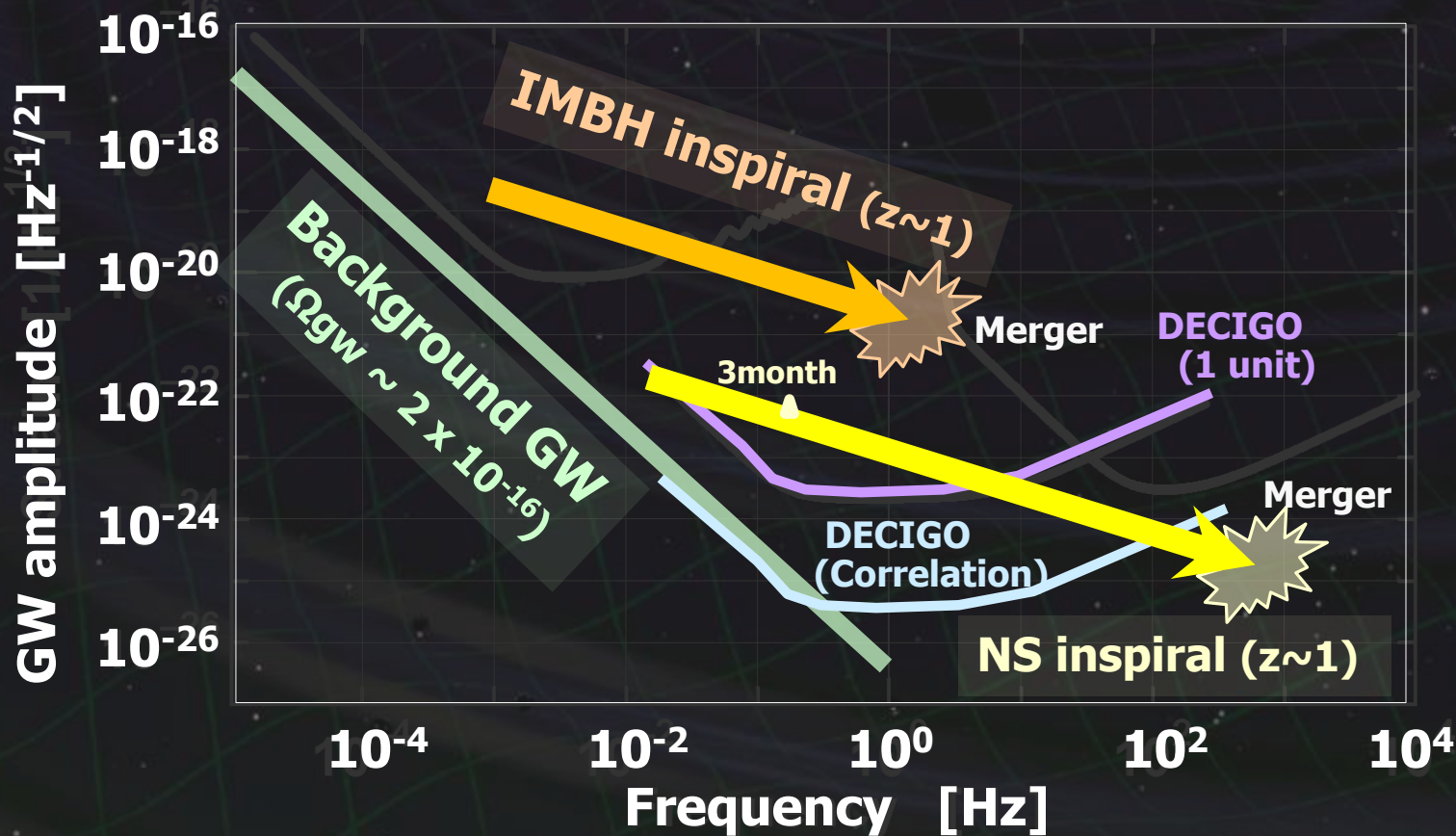
太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる

DECIGOの観測対象

中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波



宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



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 (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 400kg)

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

JAXA・小型科学衛星3号機 としての実現を目指す

Earth Image: ESA

重力波により宇宙を見る

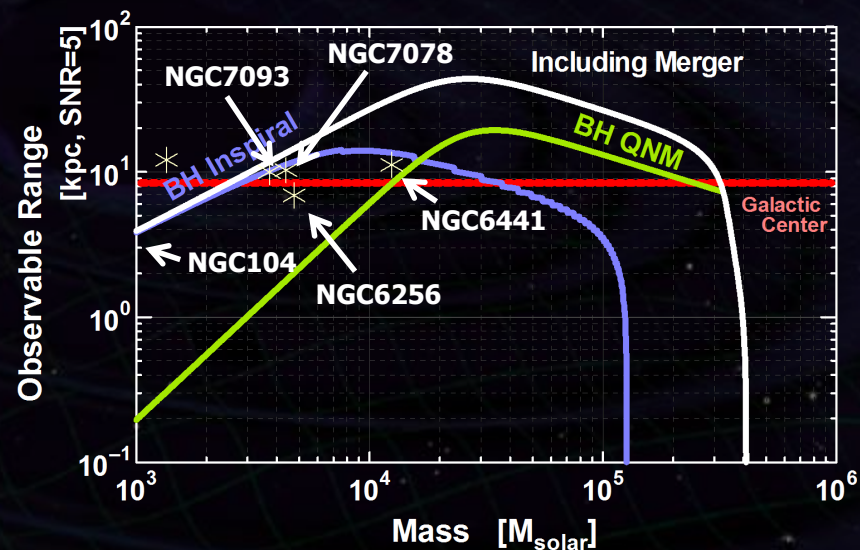
銀河系内のBH連星合体

→ 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

独自・野心的なサイエンス



重力で地球を見る

地球重力場の観測

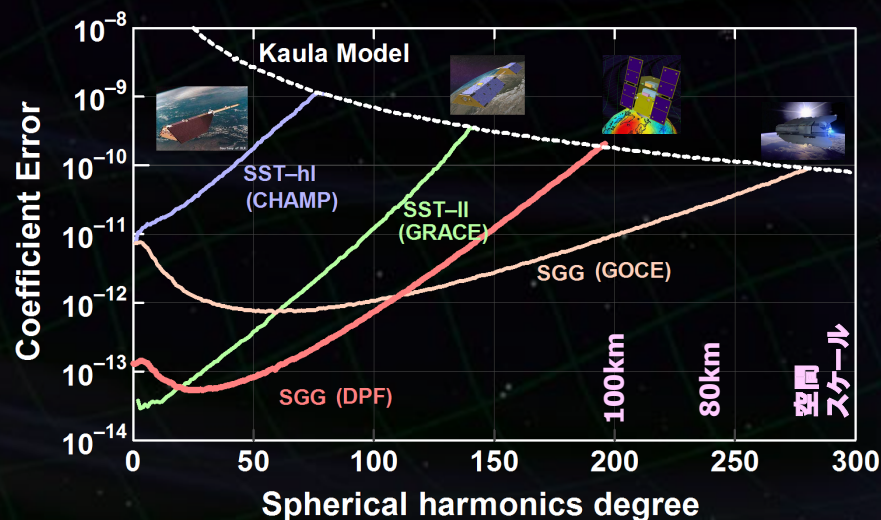
→ 地球形状・地球環境モニタ

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)

確実なサイエンス・国際貢献

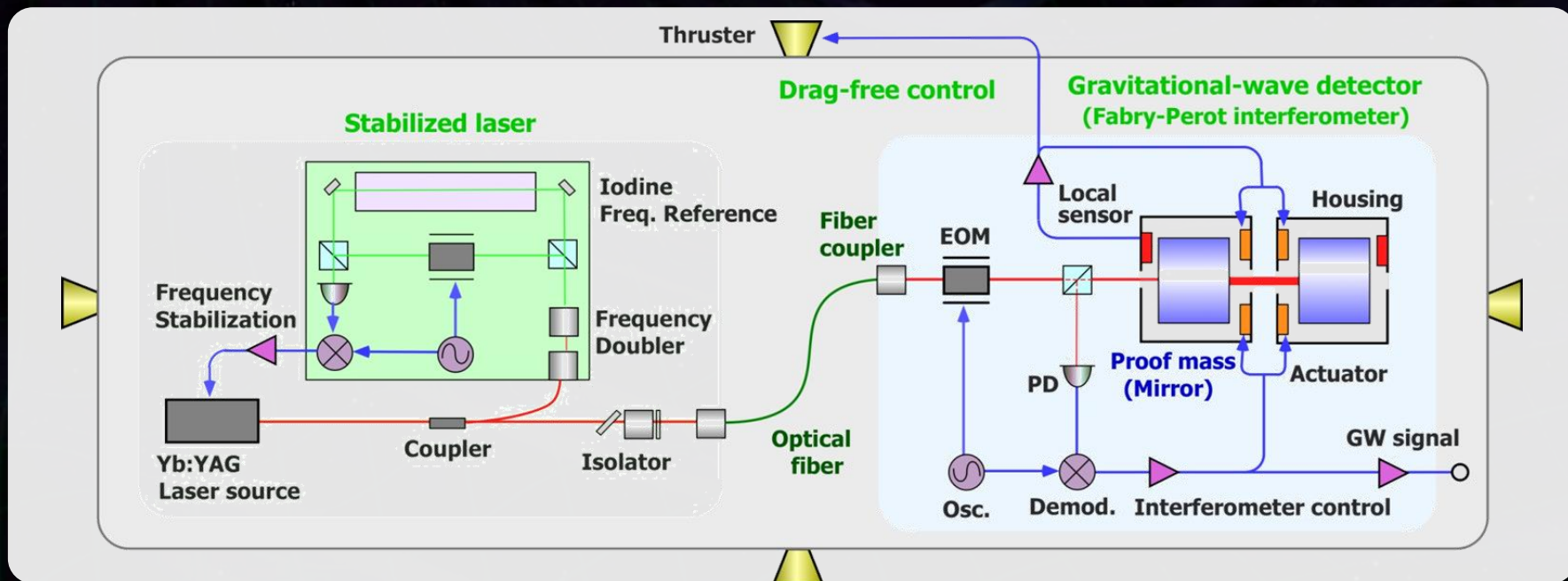


DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : ~200kg
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システム概要

DPF Payload

Size : 950mm cube
Weight : 220kg
Power : 150W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x10

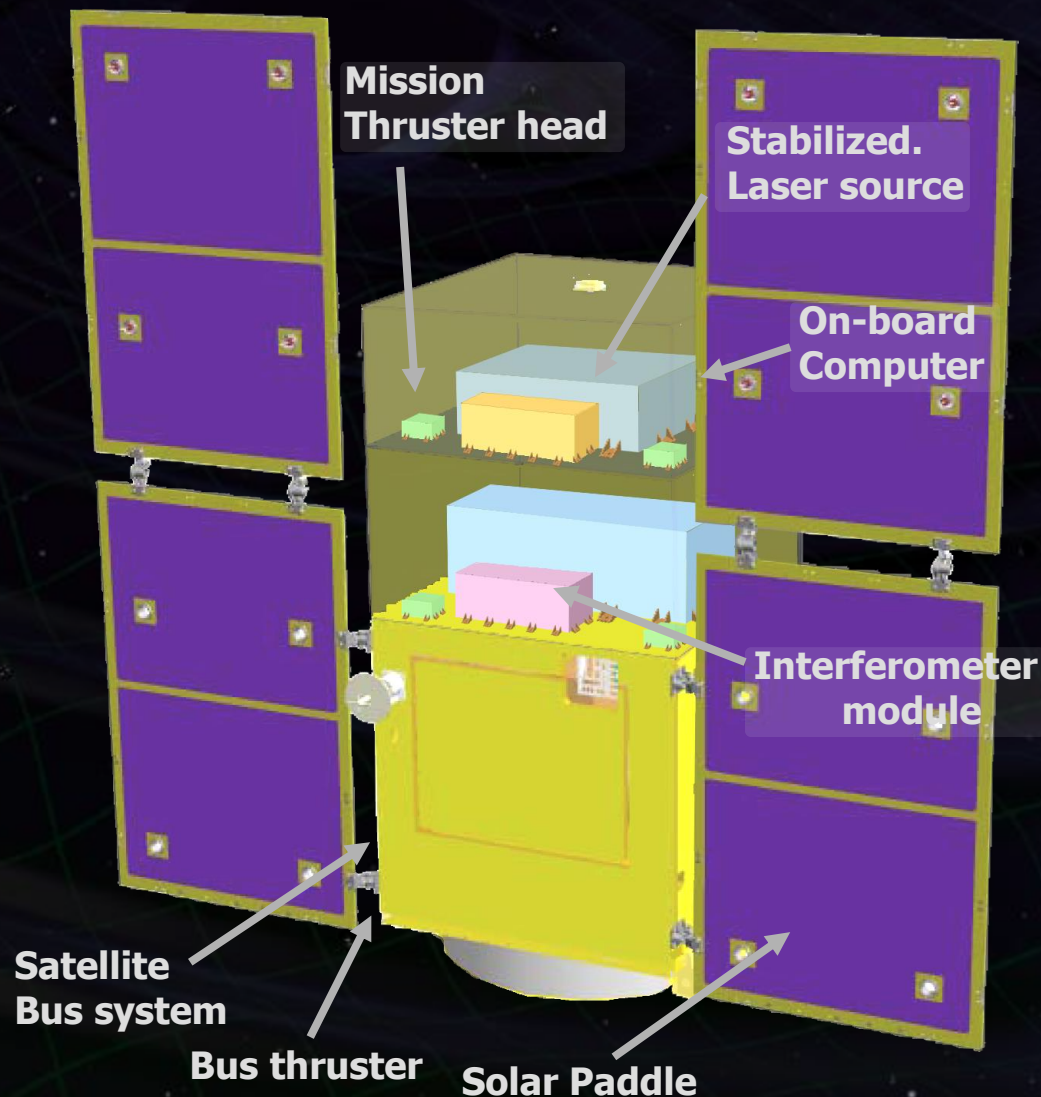
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

Size :
950x950x1100mm
Weight : 230kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
1N Thrusters x 4



DPF質量検討



衛星質量 450kg (WET) (ミッション部バランスウエイト 46kgを含む)

DPF 機器構成	略号	台数	単体質量 (/台) [kg]	合計質量 (/台) [kg]
ミッション部				
ミッション系 (1階層)				
46.00				
干渉計モジュール		1	30.00	30.00
干渉計制御モジュール		1	5.00	5.00
ハウジング制御モジュール		1	5.00	5.00
レーザセンサー制御モジュール		1	5.00	5.00
ミッション系 (2階層)				
70.00				
安定化レーザ光源モジュール		1	15.00	15.00
電源・制御モジュール		1	5.00	5.00
信号処理モジュール		1	5.00	5.00
ドラッグフリー・スラスター制御モジュール		1	5.00	5.00
スラスターヘッド・制御モジュール (大2,小4)		1式	40.00	40.00
ミッション機体系				
106.20				
ミッション機体	M-STR	1式	36.57	36.57
ミッション部熱計装	M-TINT	1式	5.00	5.00
ミッション部電気計装	M-EINT	1式	3.00	3.00
ミッション部機械計装	M-MINT	1式	0.00	0.00
ミッション部フィン	M-FIN±X	2	3.27	6.54
ミッション部フィン	M-FIN±Y	2	4.43	8.87
バランスウエイト		1式	46.22	46.22
バスシステム				
衛星マネジメント系				
SMU				
システムマネジメントユニット	SMU	1	2.00	2.00
テレメトリコマンドインタフェースモジュール	TCIM	1	2.14	2.14
スバースワイヤルータ	SWR1, SWR2	2	1.72	3.44
アーダレコーダ	DR	1	2.05	2.05
測位系				
RF				
Sバンドアンテナ(±X方向)	S-ANT1, S-ANT2	2	0.18	0.35
Sバンドアンテナ(±Z方向)	S-ANT3	1	0.18	0.18
Sバンドアイブレイクサ	S-DIP1, S-DIP2	2	0.41	0.82
Sバンドスイッチ	S-SW	1	0.10	0.10
Sバンドハイブリッド	S-HYB	1	0.05	0.05
Sバンドトランスポンダ	S-TRP-A, S-TRP-B	2	3.35	6.70

電源系	EPF				1E.6D
太陽電池パドル	SAP1, SAP2 (C'部)	1式	31.10	31.10	
	(セル部)		↑	↑	
	(TCM)		↑	↑	
パドル駆動モータ	SADM1, SADM2	0	0.00	0.00	
電力制御器	PCU	1	5.00	5.00	
アレイパワーレギュレータ	APR	1	4.00	4.00	
SAPプロセッサゲイタイオーダ	SBD1, SBD2	2	0.40	0.80	
バッテリー(50Ah)	BAT (BAT_L)	1	25.70	25.70	
	(BAT_U)	1	↑	↑	
姿勢制御機構					
AGDB					
1E.6D					
姿勢制御用計算機	ACCP-A, ACCP-B	2	2.00	4.00	
リアクションホイールアセンブリ	RWA1, RWA2, RWA3, RWA4	0	0.00	0.00	
慣性トルク	MT0-X, MT0-Y, MT0-Z	0	0.00	0.00	
慣性センサ	ITT	1	3.28	3.28	
電圧調整装置					
FOG (Rg)					
相対湿度センサ	CSAS1, CSAS2	2	0.04	0.08	
サンプリゼンセンサ	SPSH1, SPSH2	0	—	—	
地磁気センサ	MAS	0	0.00	0.00	
AGCSインタフェースモジュールMT0ZAFM	ACMDZ	0	0.00	0.00	
AGCSインタフェースモジュールRWA/RWA/RWA/RWA	ACSMH	0	0.00	0.00	
AGCSインタフェースモジュールSTTSOCERN	ACSTS	1	1.48	1.48	
AGCSインタフェースモジュールSACMWRITS	ACSDN	0	0.00	0.00	
AGCSインタフェースモジュールAnalogRNTS	ACANA	1	2.13	2.13	
AGCSインタフェースモジュールRLUMPC	ACIRJ	1	2.80	2.80	
AGCSインタフェースモジュールVDRG/1A	ACMDI	1	2.50	2.50	
推進系					
RCS					
14.2					
推進系	RCS	1式	14.2	14.20	
注排弁モジュール	RFV, QFD		↑	↑	
バルブモジュール	LAU, FLT, PFC		↑	↑	
推進タンク	TKM		↑	↑	
配管	PIPE		↑	↑	
配管ブラケット	—		↑	↑	
インキフェースコネクタブラケット	—		↑	↑	
4Nスラスターモジュール	4N-TRN	4	↑	↑	
推進系					
16.00					
推進		1	15.00	15.00	
電気計装					
E-INT					
28.60					
ハーネスおよび中継コネクタブラケット	HN	1式	26.00	26.00	
観測機系					
TGS					
14.50					
ヒータ制御装置	HCE	1	4.50	4.50	
熱計装	T-INT	1式	10.00	10.00	
機体系					
STR					
60.80					
機体	STR	1式	50.11	50.11	
機械計装(バランスウエイト含まず)	M-INT	1式	1.58	1.58	
機械計装(バランスウエイト)		1式	0.00	0.00	
ミッション部合計					
223.20					
バス部合計 (DRY)					
215.31					
215.31					
推進系					
15.00					
16.00					
推進系合計 (WET)					
230.31					
230.31					
合計 (DRY)					
438.51					
438.51					
合計 (WET)					
453.51					
453.51					

DPF電力検討

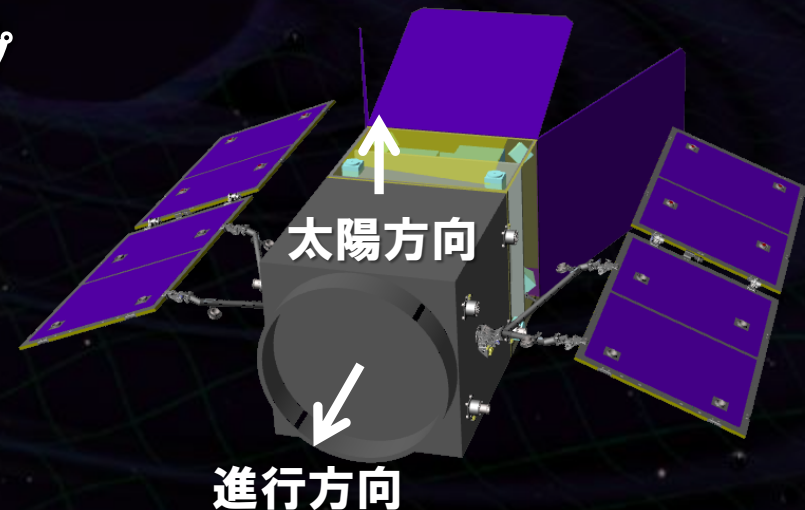


観測+地上伝送時 415W (ミッション部予備・ヒータ電力 50W)

DPF衛星 (2012.03.23)	略号	台数	消費電力[W]	モード別消費電力[W]				備考
				観測		観測+伝送(地上)		
				日照	日陰	日照	日陰	
ミッション機器								
100.0								
干渉計モジュール		1	3.0	3.0	3.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
干渉計制御モジュール		1	4.0	4.0	4.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
ハウジング制御モジュール		1	10.0	10.0	10.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
レーザセンサ制御モジュール		1	8.0	8.0	8.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
安定化レーザ光源モジュール		1	23.0	23.0	23.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
電圧・励磁制御モジュール		1	10.0	10.0	10.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
標準処理モジュール		1	12.0	12.0	12.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
Fラックアリア・スラスタ制御モジュール		1	3.0	3.0	3.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
スラスタ電力		1	20.0	20.0	20.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
(予備)		1	33.0	33.0	33.0		ミッション合計が150Wとなるように調整	
システム								
衛星システムソフトウェア								
システムマネジメントユニット								
SMU		1	12.8	12.8	12.8		SPPRNT-Aベース	
データレコーダ	DR	1	13.9	13.9	13.9		SPPRNT-Aベース	
テレメトリコマンド・インタフェースモジュール	TCIM	1	14.0	14.0	14.0		SPPRNT-Aベース	
スペースワイヤルータ	SWR	1	5.1	5.1	5.1		SPPRNT-Aベース	
通信系								
3バンドトランスポンダ								
S-TRP		1	13.0(待機)/30.4	13.0	30.4		SPPRNT-Aベース	
電源系								
電力制御系								
PCU		1	10.0	10.0	10.0		SPPRNT-Aベース	
アレイワイヤルレーザ	AWR	1	1.8(日陰時のみ)	1.8	0.0	1.8	0.0	SPPRNT-Aベース
姿勢制御系								
姿勢制御計算機								
ADCP		1	12.8	12.8	12.8		SPPRNT-Aベース	
姿勢制御サーボモータ	SMA	△					消費/スズは24台で80W(一定回転時)	
線形アクチュエータ	MEG	△					消費/スズは2台で20W	
慣性センサ	SIT	1	7.2	7.2	7.2		SPPRNT-Aベース	
復性基準装置	IRU	3	2.2	8.8	8.8		*OCROS搭載品(JAE製) *消費/スズは20W程度(MPC製TDG)	
AOC3インテグフェースモジュールFWA	ACFWH	△					消費/スズは14W	
AOC3インテグフェースモジュールAWG	ACMGE	△					消費/スズは15W程度	
AOC3インテグフェースモジュールRCS	ACVDI	1	11.0	11.0	11.0		A9HARDベース(BTBYモード)	
AOC3インテグフェースモジュールSTT	ACSTB	1	7.0	7.0	7.0		SPPRNT-Aベース	
AOC3インテグフェースモジュールAnalog	ACANA	1	10.0	10.0	10.0		SPPRNT-Aベース	
AOC3インテグフェースモジュールRFU	ACRFU	1	20.0	20.0	20.0		SPPRNT-Aベースで9.5Wに60%への二次電源供給 消費追加で約20Wと想定	
熱制御系								
ヒータ制御装置								
HCE		1	10.5	10.5	10.5		SPPRNT-Aベース	
ヒータ		1台	50.0	50.0	50.0		システム 動作要求実施のため詳細は不明、 未検討では衛星負電力の給電変化要因としての パラメータ假とした。	
衛星負電力合計(ノミナル)				355.4 W	353.9 W	372.8 W	371.3 W	
衛星負電力合計				355.4 W	353.9 W	372.8 W	371.3 W	
地上への電力伝送ロス				10.2 W	2.9 W	10.9 W	3.2 W	
APR受機ロス(日陰負荷分)				30.9 W	0.0 W	32.4 W	0.0 W	
日陰/日陰消費				396.5 W	356.8 W	418.1 W	374.5 W	

・衛星構造・姿勢検討

- ドラッグフリー制御のバックアップ
- ミッションスラストの運用寿命
- ⇒ 受動安定となる衛星構造.
SAP傾斜, フィン構造.

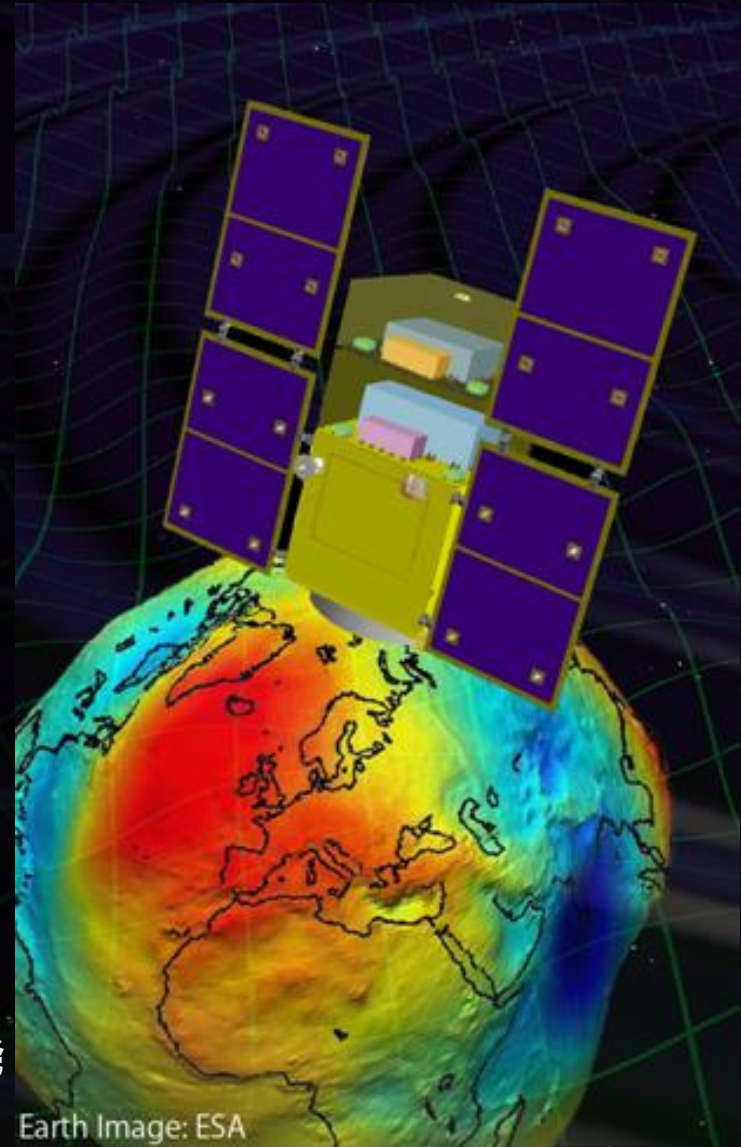


・初期姿勢捕捉・セーフホールド

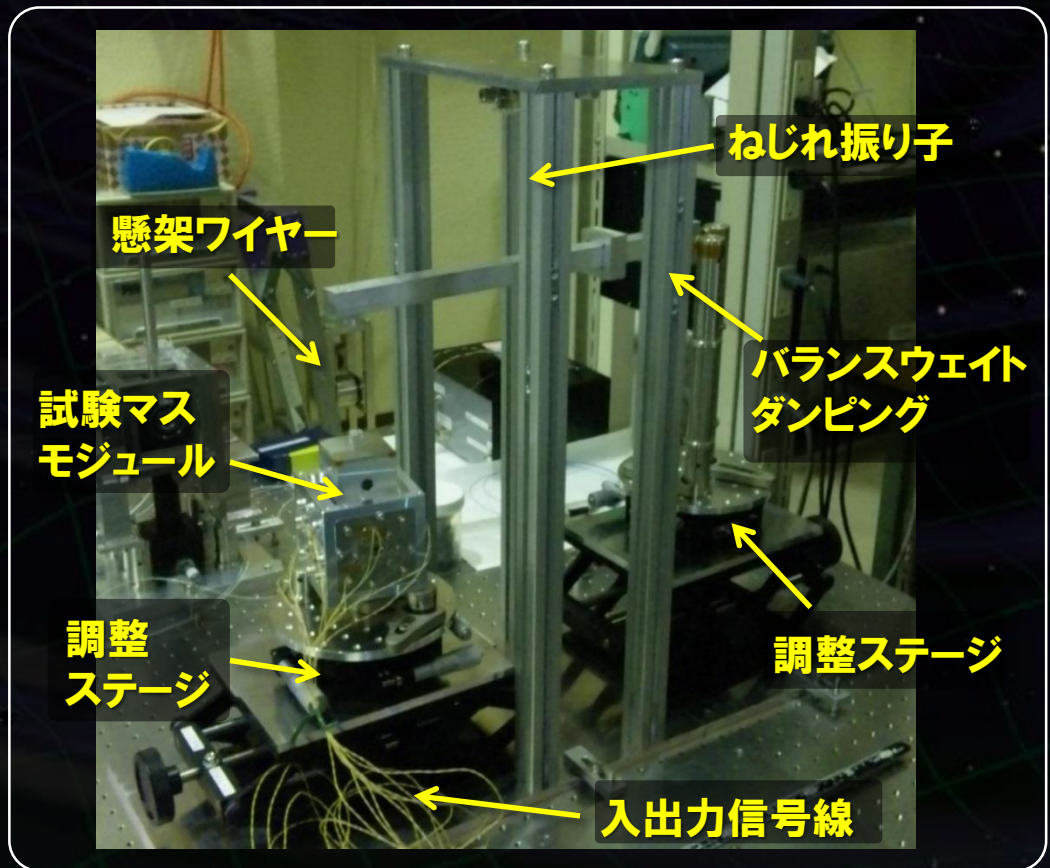
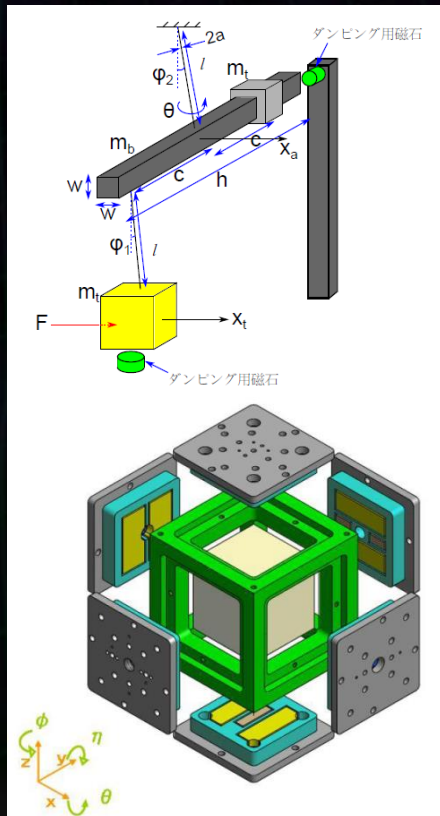
- バス部に RCS 搭載
コールドガスジェットスラスト (窒素, 1N)
- 計10回の姿勢捕捉, 日陰時姿勢保持 → 推薬量 3.3 kg
- 残留レート < 0.01 deg/s

搭載機器開発 衛星システム検討

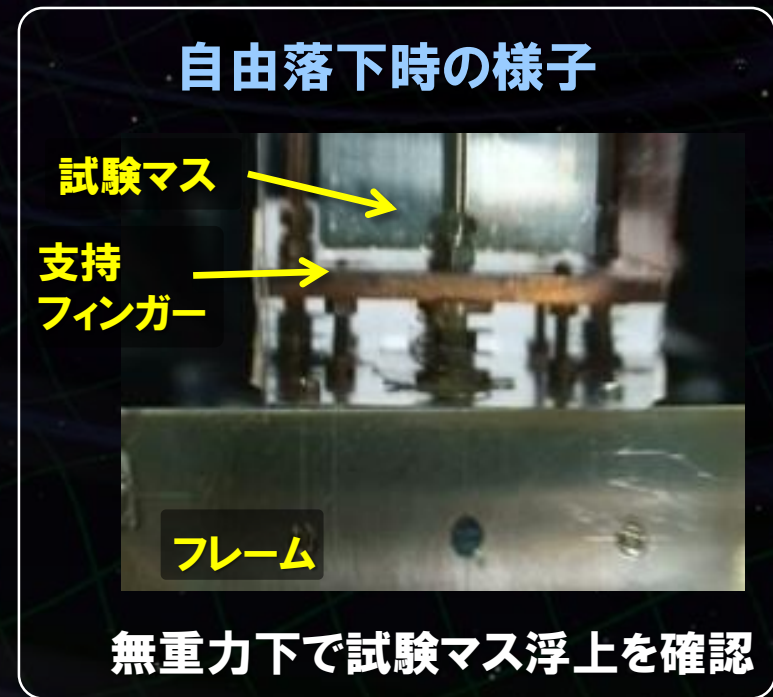
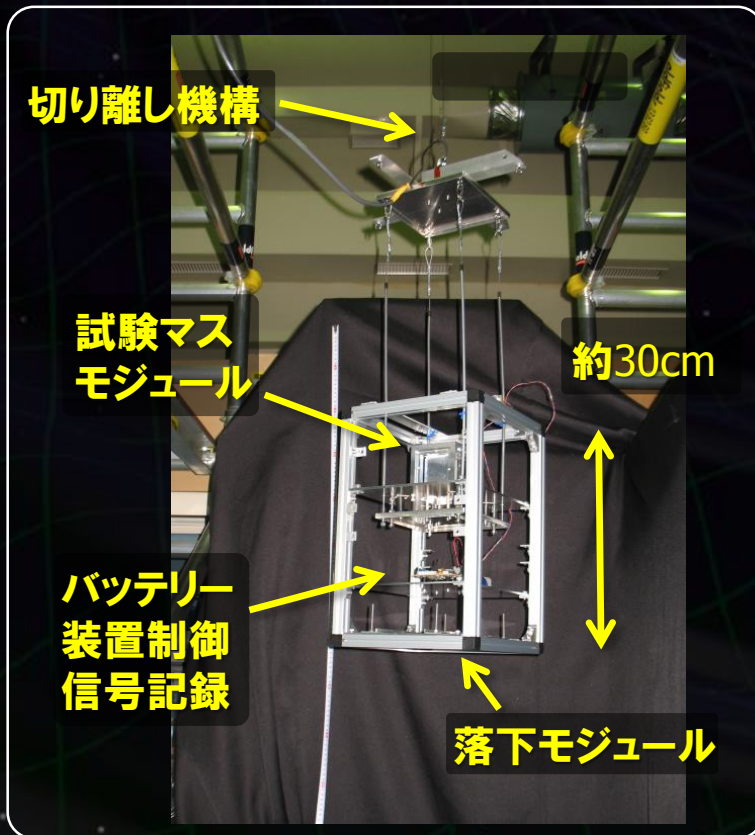
- 9 **スペース重力波アンテナDECIGO計画 (45) :**
安定化光源
武者満 (電通大レーザー研), 他
- 10 **スペース重力波アンテナDECIGO計画 (46) :**
干渉計・信号処理
阿久津智忠 (国立天文台), 他
- 11 **スペース重力波アンテナDECIGO計画 (47) :**
試験マスモジュール
奥富弘基 (総研大), 他
- 12 **スペース重力波アンテナDECIGO計画 (48) :**
ドラッグフリー制御
佐藤修一 (法政大理工), 他
- 13 **スペース重力波アンテナDECIGO計画 (49) :**
DPFに向けた超低推力ノイズ計測スタンドの開発
東浦孝典 (法政大工), 他



- 試験マスモジュール2自由度制御実験 (国立天文台)
 - 試験マスをねじれ振り子で懸架
 - 静電センサ・アクチュエータを用い, 回転・位置を制御



- 無重力下での試験マス制御デモンストレーション (国立天文台)
 - 落下モジュール (構造, 電源, センサ, ロガーなど)
 - ~3m落下設備 (足場, 切り離し機構, クッションなど)

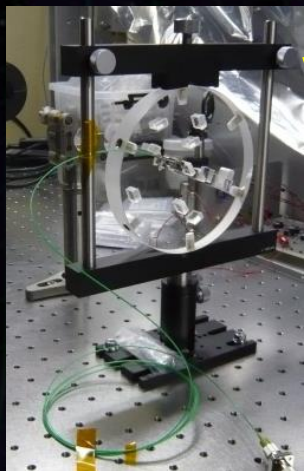


今後, 静電S/Aによる制御をめざす.

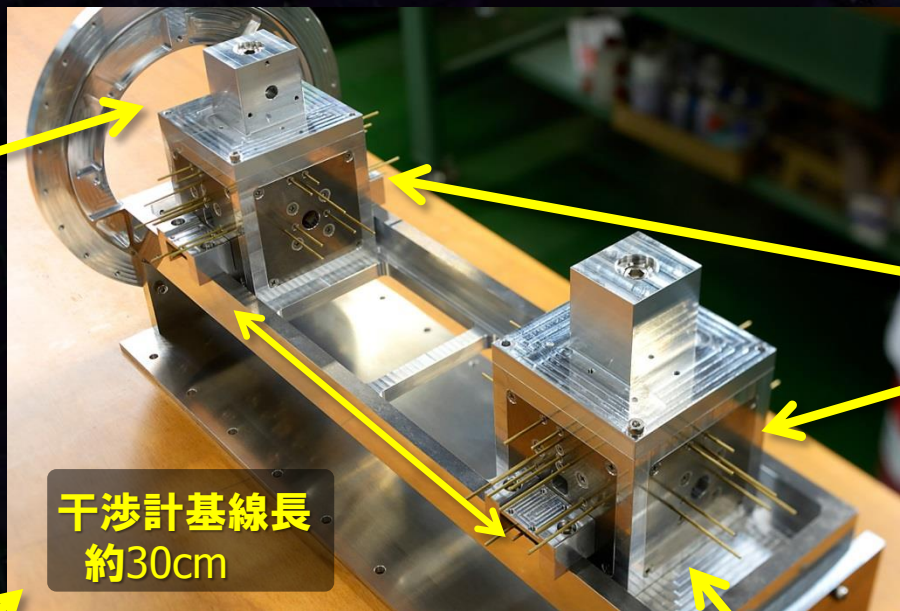
干渉計モジュールEM

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



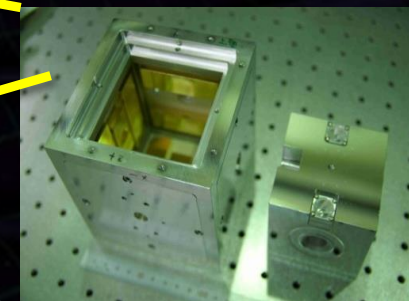
干渉計モジュール



干渉計基線長
約30cm

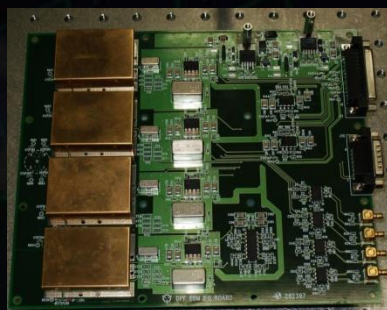
試験マスモジュール

試験マス、静電センサ・アクチュエータ、ローンチロック



4分割RF フォトディテクタ

4分割PD + 復調回路
干渉計基線長・角度の
変動を取得



SpW信号処理・ 制御ボード

SpW FPGA +
16bit AD/DA
干渉計の制御



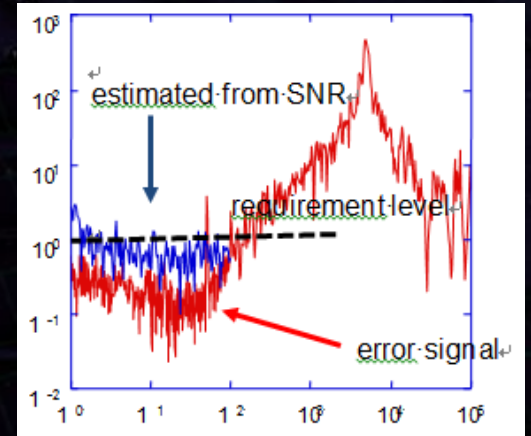
周波数安定化モジュール

・周波数安定化モジュールBBM1 (電通大)

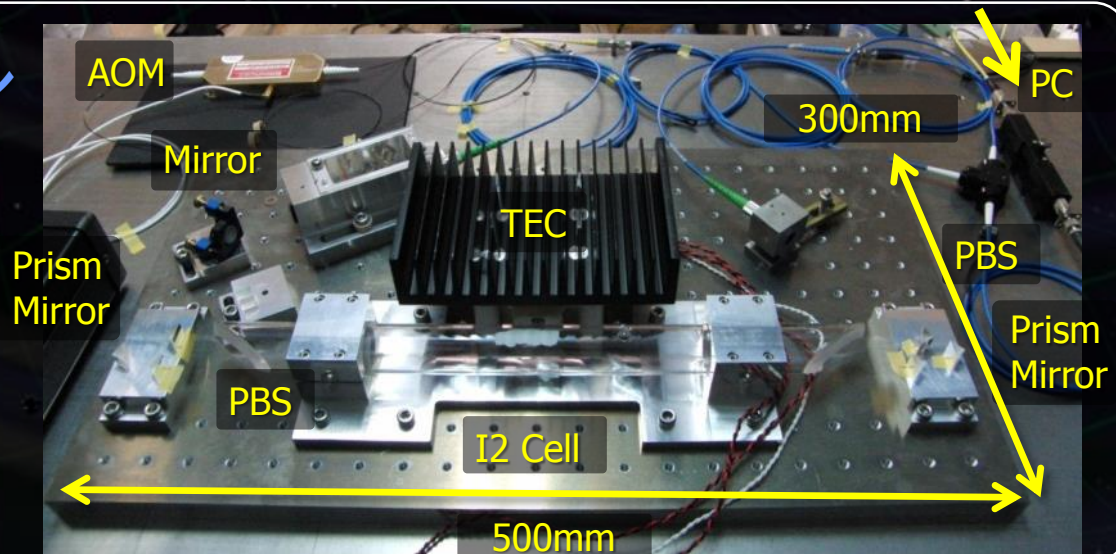
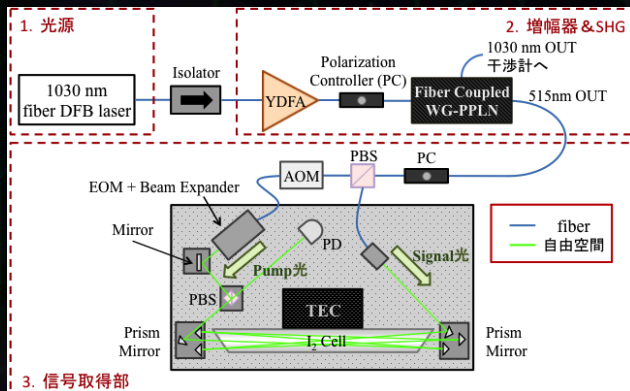
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ($0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$)を満たす.

・周波数安定化モジュールBBM2 (電通大)

- ファイバ素子を用い,小型・軽量・堅牢化.
- SpWデジタル制御ボードによる動作.



レーザー周波数安定化モジュール

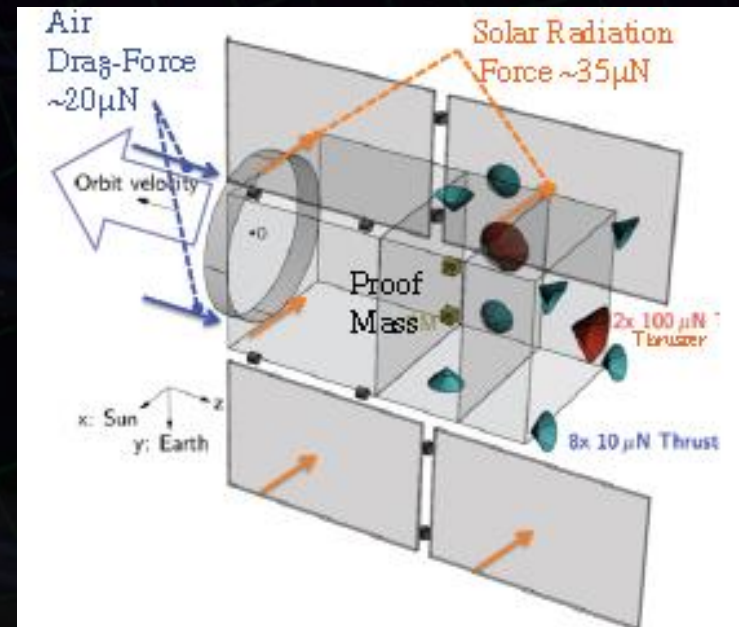


・ミッションスラスト構成

- 準定常成分 **100 μN スラスト 2台**
大気ドラッグ, 太陽輻射圧
- 変動成分 **10 μN スラスト 8台**
大気圧変動, 太陽輻射変動

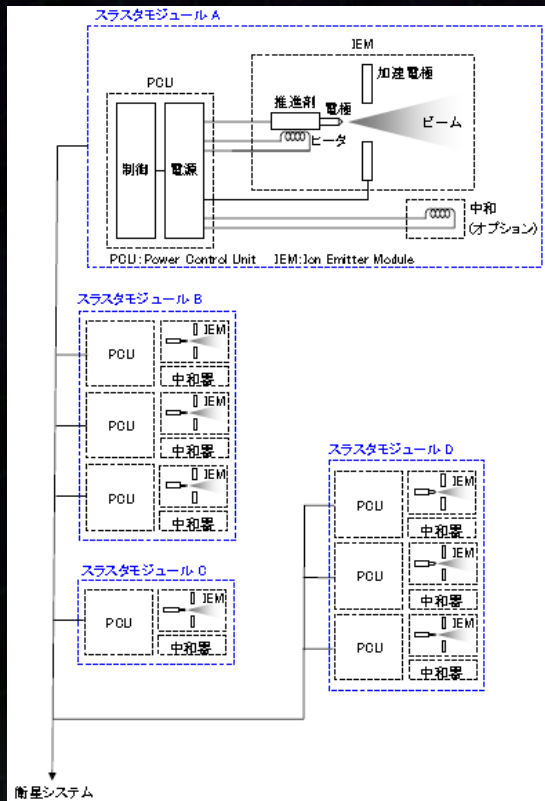
ミッションスラスト仕様

推力	0.5-100 μN x2 (可変)
	0.5-10 μN x 8 (可変)
分解能	0.1 μN
推力雑音	0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$
制御応答	>10Hz
Isp	TBD
電力・質量	<40W, <40kg
運用寿命	4,300 時間



・ミッションスラスタ検討・開発 (ISAS/JAXA) 既存技術を利用 → FEEDスラスタ

スラスタシステム構成

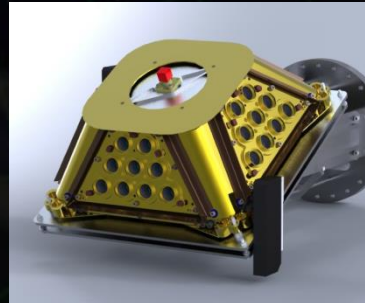


AIT FEED (10 μ N)



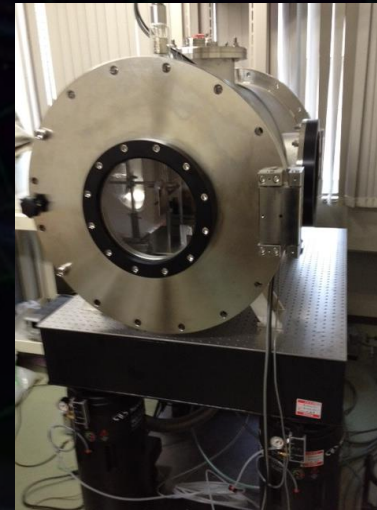
※ Flight Proven

Cluster Type FEED (100 μ N)



スラスタスタンド

微小推力雑音の測定装置。
0.1 μ Nの測定分解能を実現。



SWIMによる宇宙実証

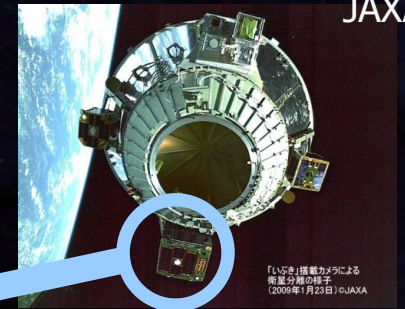


Photo:
JAXA

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器



「いぶき」搭載カメラによる
衛星分解の様子
(2009年1月23日) ©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



Photo by JAXA

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

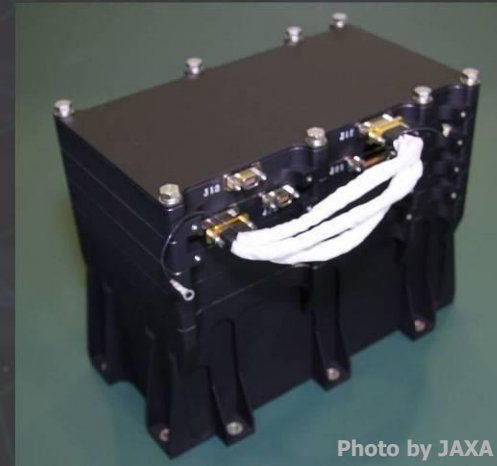


Photo by JAXA

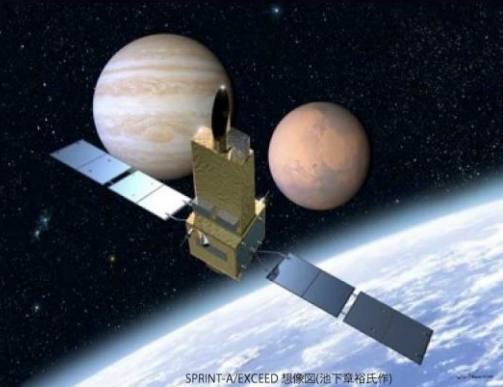
SDS-1
Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

標準衛星バス + イプシロンロケットを利用して
比較的高頻度で 小型科学衛星 を打ち上げる計画



SPRINT-A/EXCEED 想像図(池下尊裕氏作)

小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED

1号機 ひさき (SPRINT-A) (2013年)

UV望遠鏡による惑星観測

2号機 ERG (SPRINT-B) (~2015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: ~2017年度



Epsilon Rocket Booster
Photo by JAXA

まとめ