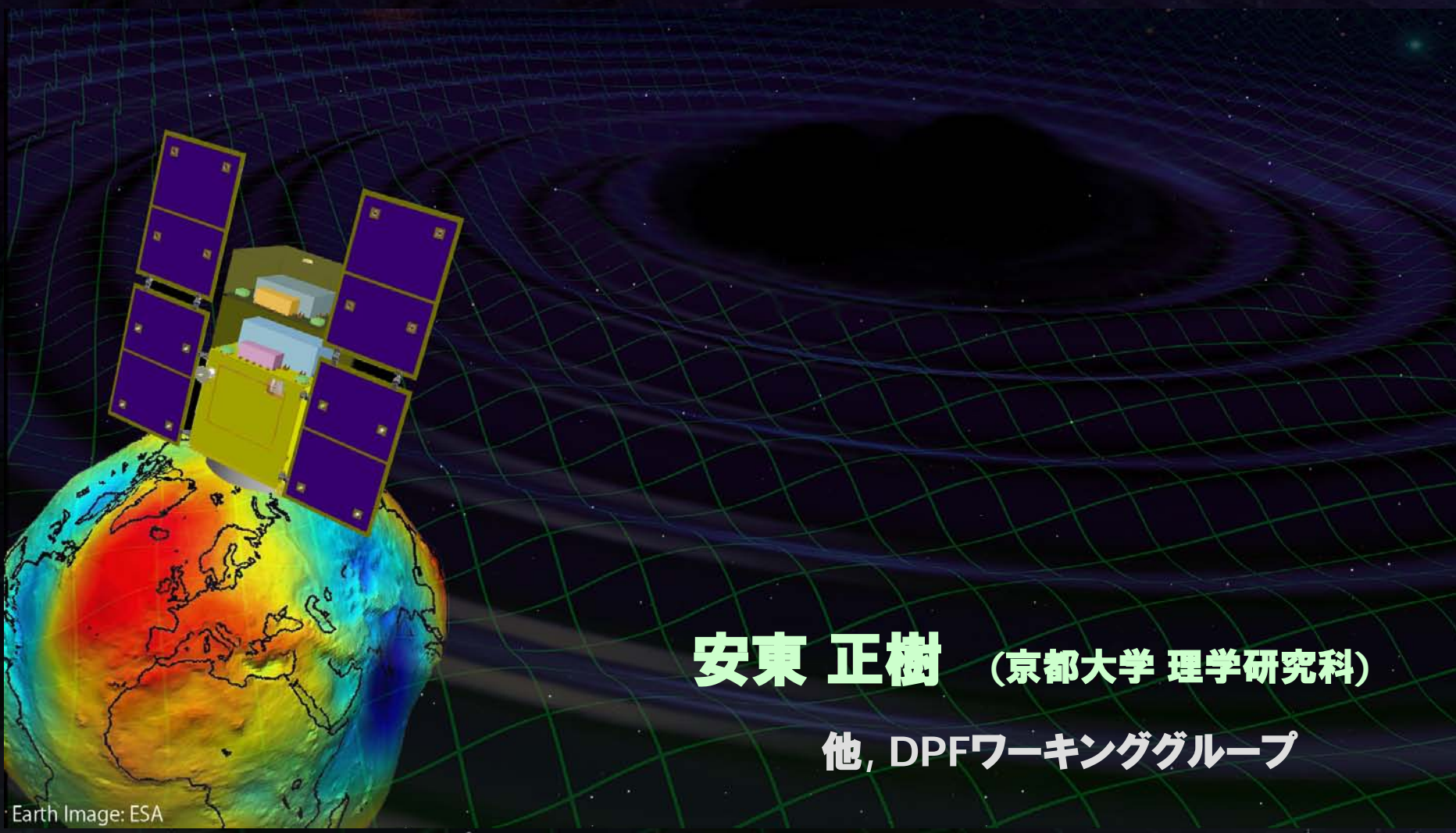


DECIGOパスファインダーによる地球重力場観測



安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

他, DPFワーキンググループ

Earth Image: ESA

DPFワーキンググループメンバー

(2010年3月時点)

- ・弘前大学 理工学部
浅田 秀樹
- ・東北大学 理学研究科
郡 和範, 吉田 至順
- ・高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
井岡 邦仁
- ・お茶の水女子大学
人間文化創成科学研究科
若林 野花, 江尻 悠美子,
鈴木 理恵子
- ・国立天文台
重力波プロジェクト推進室
石崎 秀晴, 上田 暁俊, 川村 静児,
高橋 竜太郎, 鳥居 泰男, 端山 和大
先端技術センター
大淵 喜之, 岡田 則夫, 福嶋 美津広
理論研究部
西澤 篤志
- ・産業技術総合研究所
計測標準研究部門
池上 健, 洪 鋒雷
- ・情報通信研究機構
新世代ワイヤレス研究センター
國森 裕生
新世代ネットワーク研究センター
長野 重夫, 細川 瑞彦
- ・電気通信大学
レーザー新世代研究センター
植田 憲一, 堀内 慎也, 武者 満
- ・日本大学
文理学部
千葉 剛
理工学部
高野 忠
- ・県立ぐんま天文台
古在 由秀
- ・防衛大学校 システム工学群
中山 宣典
- ・東京大学
宇宙線研究所
黒田 和明, 平松 尚志, 宮川 治,
三代木 伸二
工学系研究科
能見 大河
数物連携宇宙研究機構
高橋 史宣
地震研究所
新谷 昌人
新領域創成科学研究科
森脇 成典
ビッグバン宇宙国際研究センター
横山 順一
理学系研究科
麻生 洋一, 和泉 究, 石徹白 晃治,
岡田 健志, 穀山 涉, 正田 亜八香,
高橋 走, 榑家 篤史, 坪野 公夫,
中澤 知洋, 道村 唯太
- ・東京理科大学 理学部
辻川 信二
- ・法政大学 工学部
佐藤 修一
- ・立教大学 理学部
西條 統之
- ・早稲田大学理工学部
前田 恵一
- ・宇宙航空研究開発機構
研究開発本部
河野 功
宇宙科学研究本部
石川 毅彦, 坂井 真一郎, 高島 健,
高橋 忠幸, 船木 一幸, 小泉 宏之,
松原 英雄
- ・新潟大学
工学部
大河 正志, 佐藤 孝
自然科学研究科
大原 謙一
- ・東海大学 工学部
堀澤 秀之
- ・名古屋大学 理学研究科
杉山 直, 高橋 慶太郎
- ・京都大学
基礎物理学研究所
佐々木 節, 佐合 紀親, 柴田 大,
田中 貴浩
生存圏研究所
山川 宏
総合人間学部・人間環境学研究科
丹羽 佳人
理学研究科
安東 正樹, 瀬戸 直樹, 中村 卓史,
八木 絢外
- ・大阪大学 理学研究科
田越 秀行
- ・大阪市立大学 理学研究科
神田 展行, 石原 秀樹, 中尾 憲一
- ・近畿大学
河島 信樹
- ・カリフォルニア工科大学
新井 宏二
- ・チュービンゲン大学
祖谷 元
- ・NASAゴダード宇宙飛行センター
沼田 健司
- ・バーミンガム大学
若山 圭以子
- ・マックスプランク重力物理研究所
(A. アインシュタイン研究所)
川添 史子, 山元 一広
- ・リバプール・ジョン・ムーア大学
小林 史歩
- ・アジア太平洋理論物理学センター
柳 哲文
- ・ニース天文台
阪田 紫帆里
- ・無所属
内藤 勲夫, 平林 久, 吉野 泰造

DECIGOパスファインダー (DPF)

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

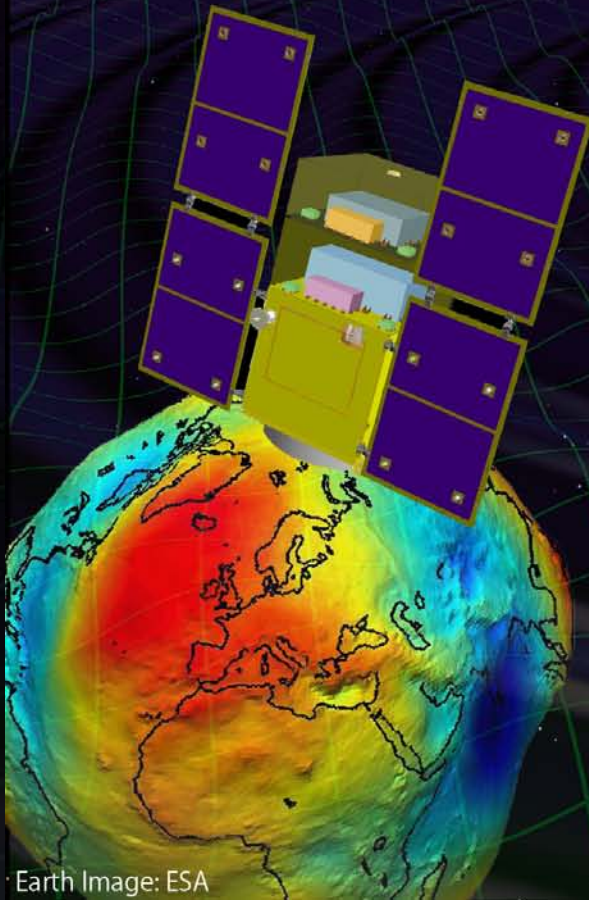
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

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

JAXA小型科学衛星シリーズ

3号機 (~2015年) を目指す。



Earth Image: ESA

目次

イントロダクション

DPFによる地球重力場観測

衛星概要と開発状況

まとめ

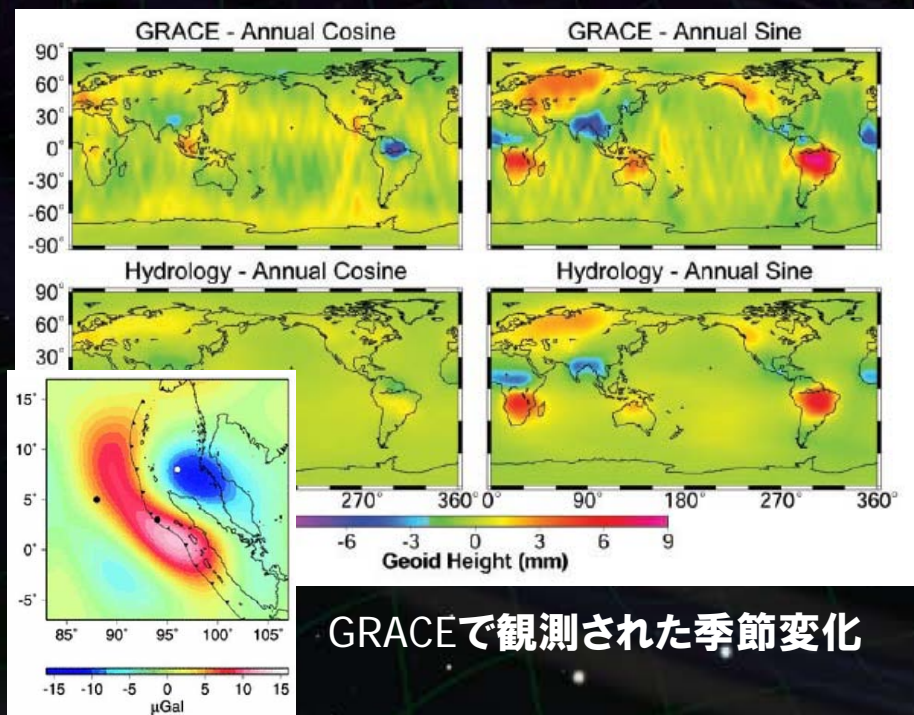


イントロダクション

衛星による地球重力場観測

人工衛星から地球重力ポテンシャルを観測

⇒ 全地球に対して、網羅的・均質な観測データ



グローバルな重力ポテンシャルの決定

→ 地球形状の基準 (ジオイド)

時間変動のモニター

→ 地球ダイナミクスの総体

地球規模の水の監視

(海洋・陸水・氷床等)

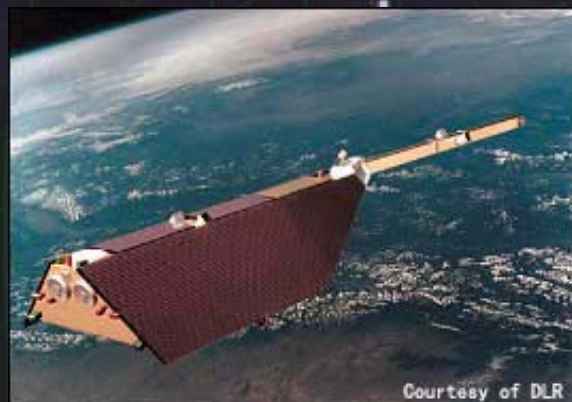
地震・火山噴火にともなう

地殻変動の検知・予測

3種類の観測手法, 衛星ミッション

高軌道-低軌道衛星追跡 (SST High-Low)

- GPSなどの測位システムで衛星軌道を連続測定
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く

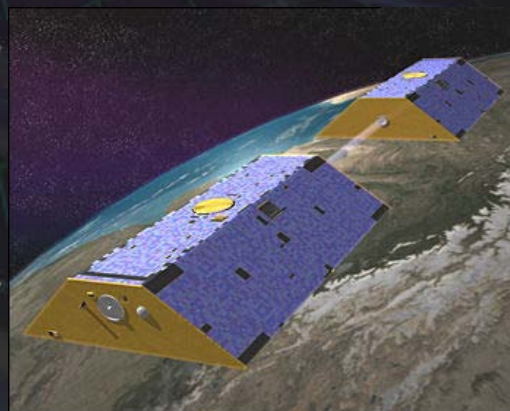


Courtesy of DLR

CHAMP (GFZ, 2000-)

低軌道-低軌道衛星追跡 (SST Low-Low)

- 2機の衛星間の距離変動から、重力場を観測
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



GRACE (NASA, 2002-)

衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

- 衛星搭載の**重力勾配計**により、重力場を観測
- 衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う



GOCE (ESA, 2009-)

地球重力ポテンシャルを 球面調和関数展開で表現

$$U(r, \lambda, \phi) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^l P_{lm}(\sin \phi) \times [C_{lm} \cos(m\lambda) + S_{lm} \sin(m\lambda)]$$

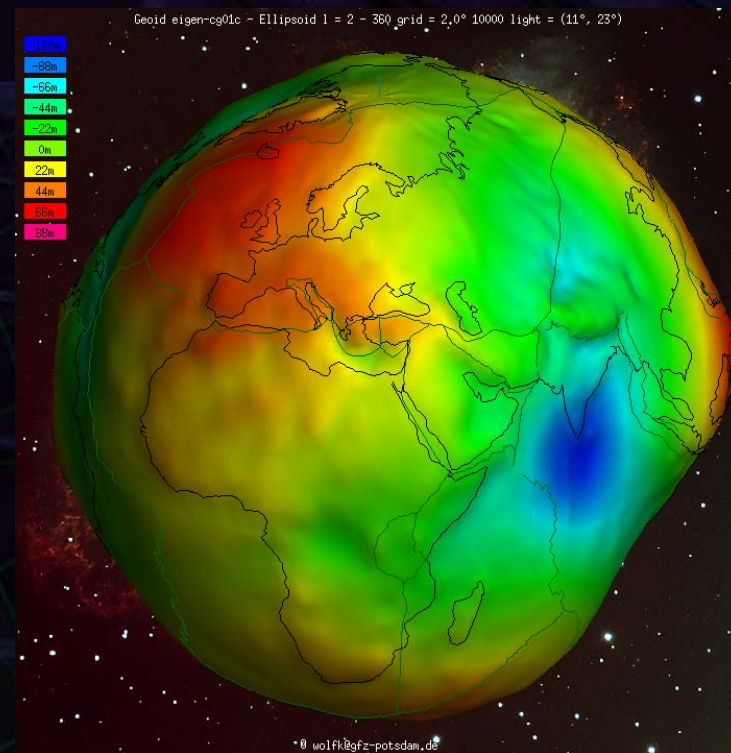
G, M, R : 重力定数, 地球質量, 地球半径

r, λ, ϕ : 軌道半径, 経度, 緯度

P_{lm} : Legendre 陪関数

係数 C_{lm}, S_{lm} :

地球内部の質量分布に依存する
衛星による測定などの観測から求める

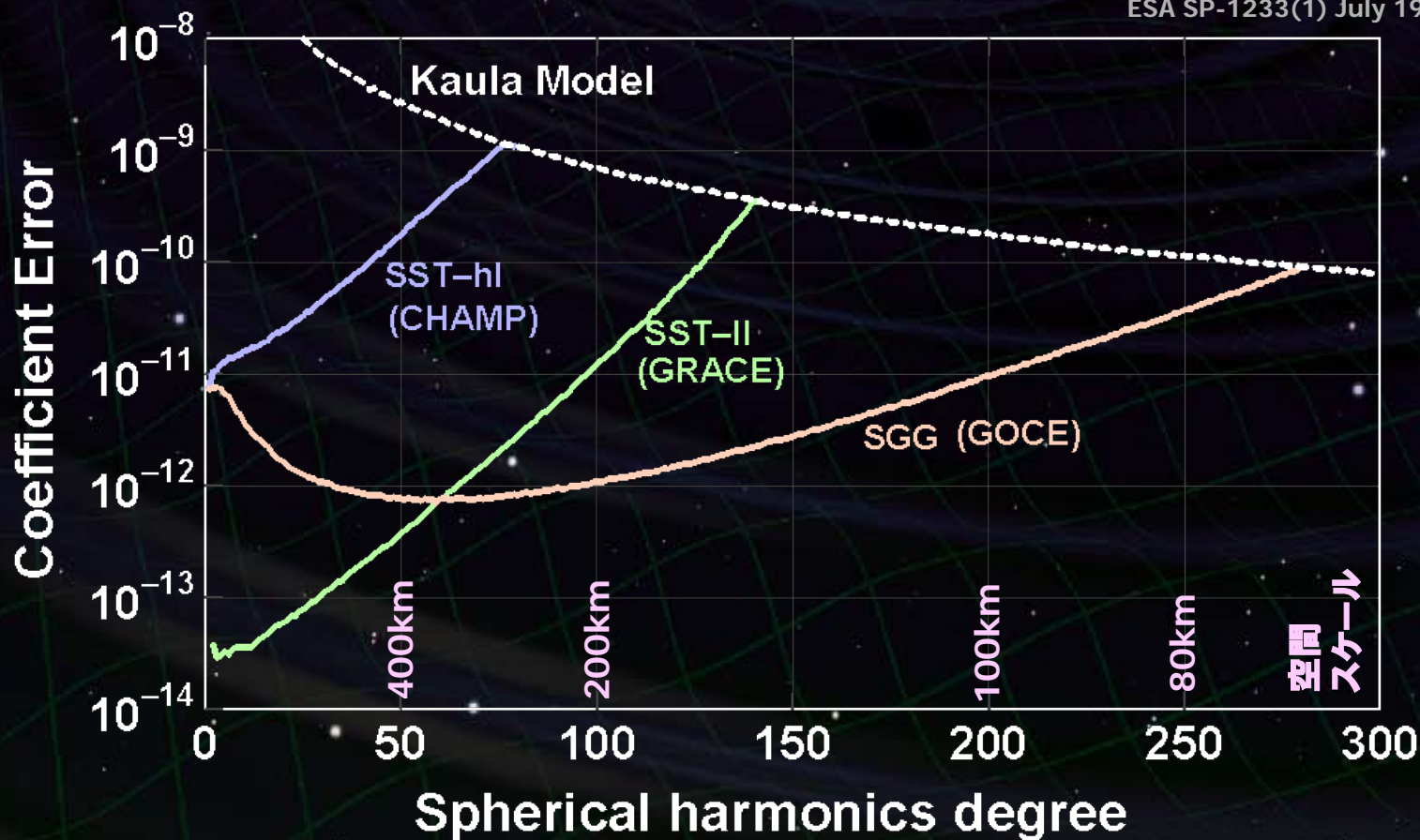


International Centre for Global Earth Models (ICGEM)
<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>

衛星重力ミッションによる観測性能の比較

(球面調和関数展開係数の観測精度)

Report for Mission Selection
Gravity Field and Steady-State
Ocean Circulation Mission
ESA SP-1233(1) July 1999.



地球重力場観測の現状

CHAMP, GRACE, GOCEが稼働中

•地球形状

2190次までの係数データ
(GRACEなど, 2008)

⇒ 高精度・高分解能な地球形状基準

•時間変動

アマゾン流域, ヒマラヤなどの
陸水季節変動の観測データ
地震による地殻変形の観測
(スマトラ沖地震 2004年)

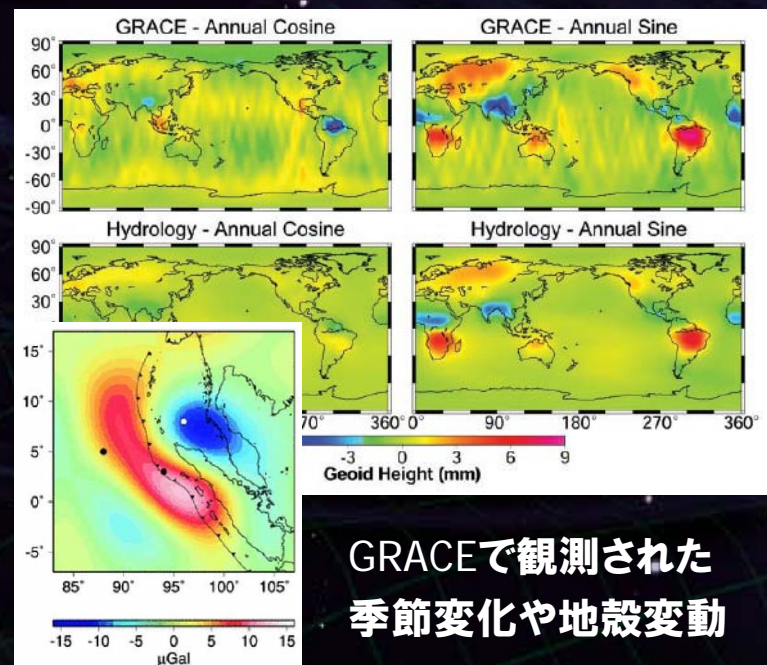
⇒ 2012年頃には運用寿命を迎える見込み

GRACE-FOが採択 (NASA)

GRACEをベース, レーザー測距を追加
2016年打ち上げ見込み



DPFによる国際観測網の補完
国際共同観測



GRACEで観測された
季節変化や地殻変動



DPFによる地球重力場観測

DPFによる地球重力場観測

• 重力勾配計による観測

(SGG: Satellite Gravity-Gradiometry)

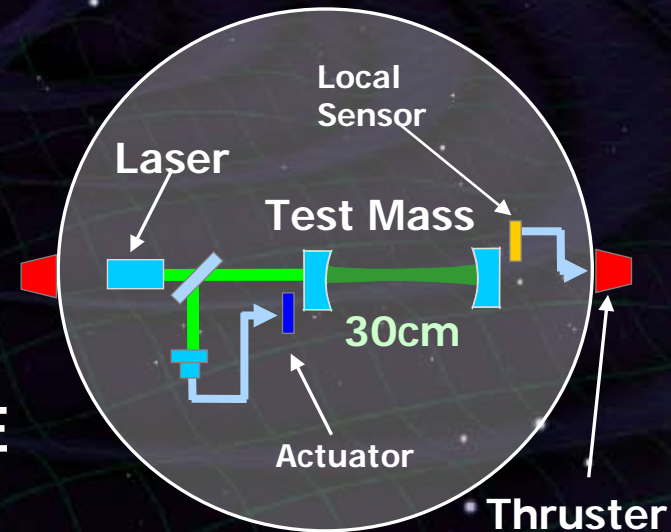
2つの試験質量を衛星内に非接触保持

相対変動をレーザー干渉計で計測

→ 高感度重力勾配計

衛星のドラッグフリー制御

→ 外力(大気・太陽輻射圧)の影響を抑圧



• 衛星軌道追跡

(SST H-L: Satellite-to-Satellite Tracking, High-Low)

衛星軌道から地球重力場を計測

試験質量と衛星の相対加速度を計測

→ 大気ドラッグの影響などを差し引く

同じ観測方式：衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

GOCE

(ESA, 2009-)



衛星搭載の重力勾配計により、重力場を観測
衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う

高度 295km, 3軸の重力勾配計

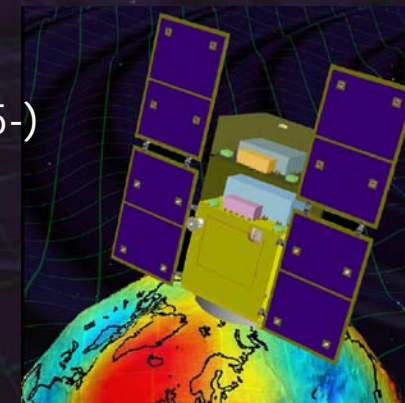
感度 5×10^{-12} m/s²/Hz^{1/2}

基線長 0.5m

重量 1,200 kg

DPF

(JAXA, 2015-)



高度 500km, 1軸の重力勾配計

感度 9×10^{-15} m/s²/Hz^{1/2}

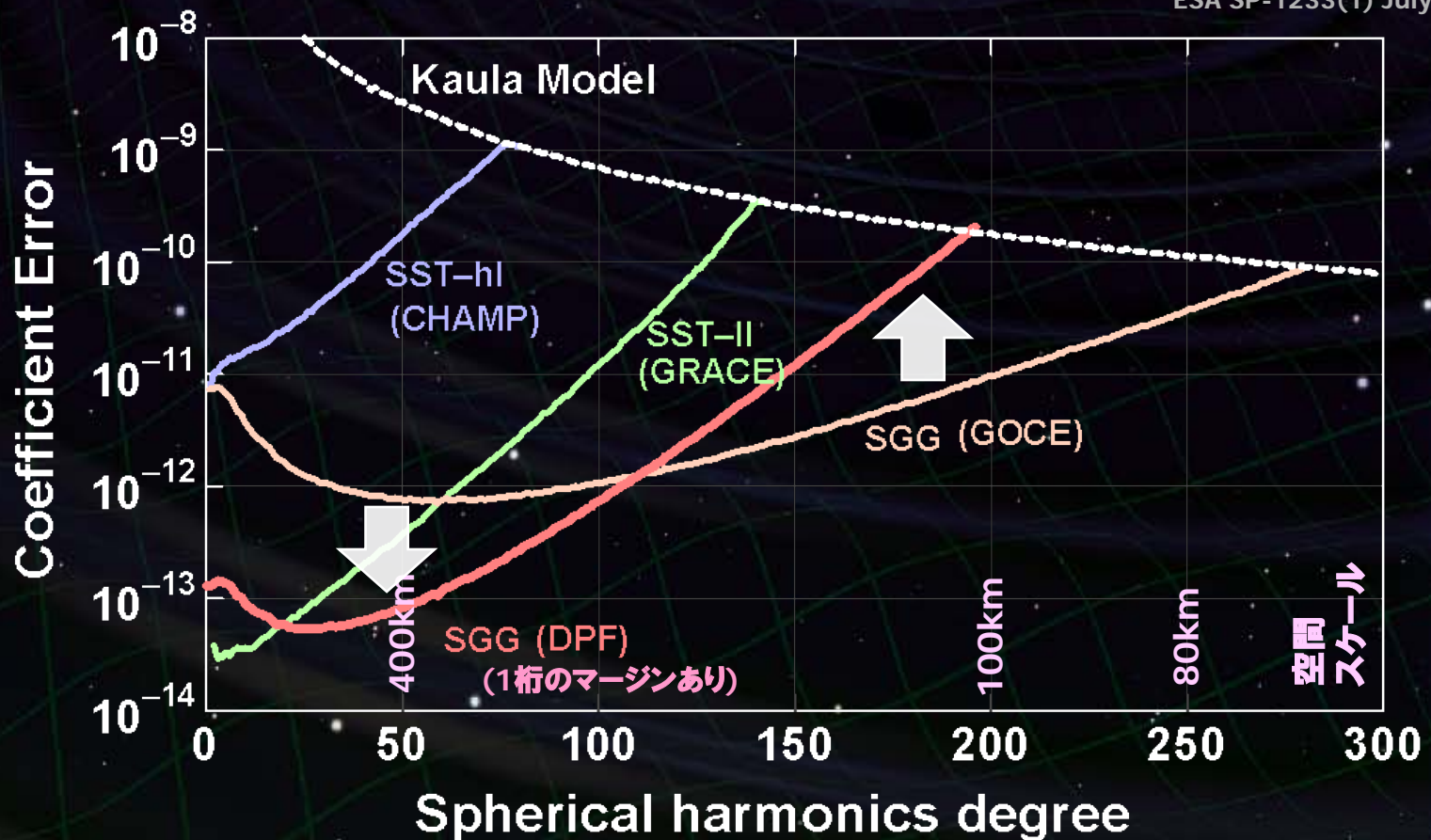
基線長 0.3m

重量 350 kg

DPFの観測精度

低次係数 (大スケール) で良い感度 ← 高いセンサ感度
高次係数 (小スケール) で悪化 ← 高い軌道高度

Report for Mission Selection
Gravity Field and Steady-State
Ocean Circulation Mission
ESA SP-1233(1) July 1999.



相対加速度スペクトル

地球重力場の計算

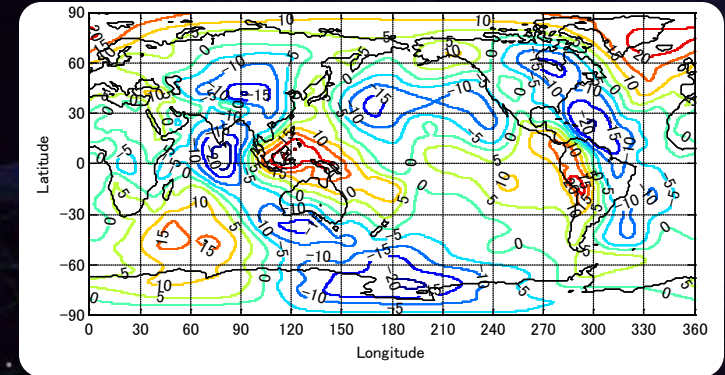
EGM2008 (2190次)の係数データ

→ 地球重力場を計算

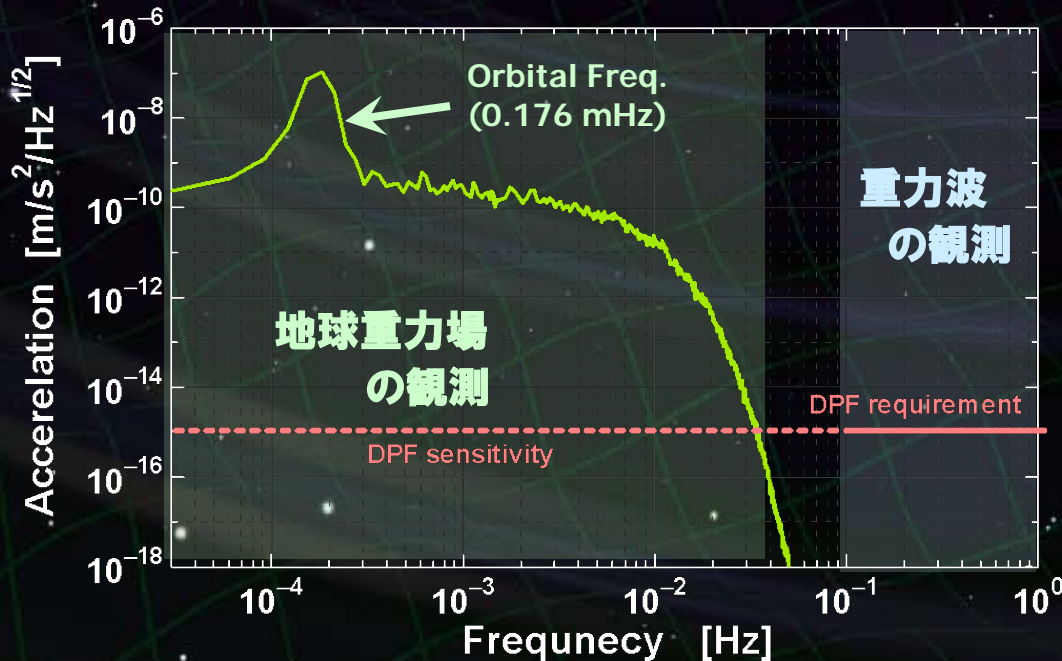
DPF軌道高度 500km, 極軌道

→ 軌道運動による加速度変動

時系列データ → フーリエ変換



重力加速度 単位: mgal (l>2 高度500km)





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

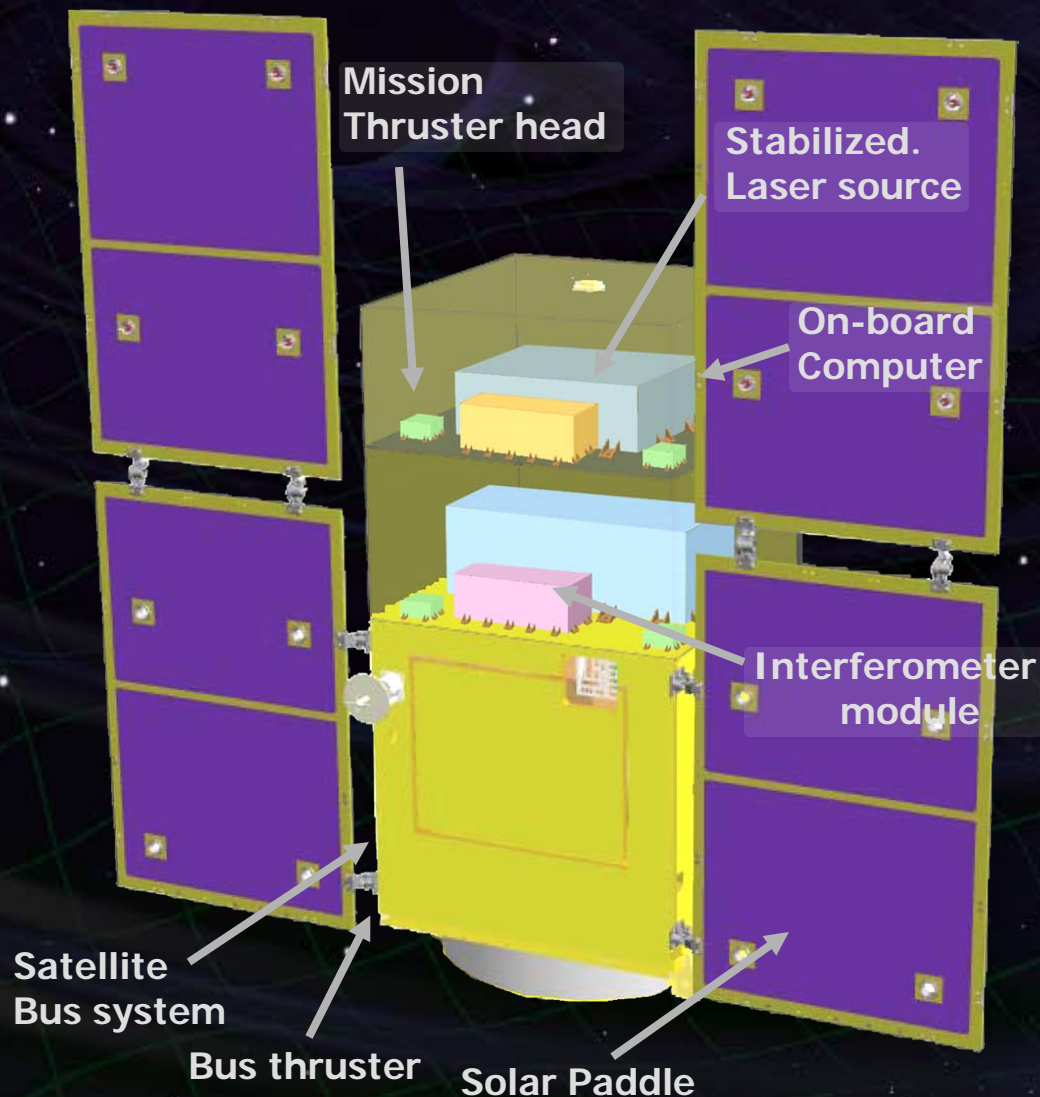
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

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

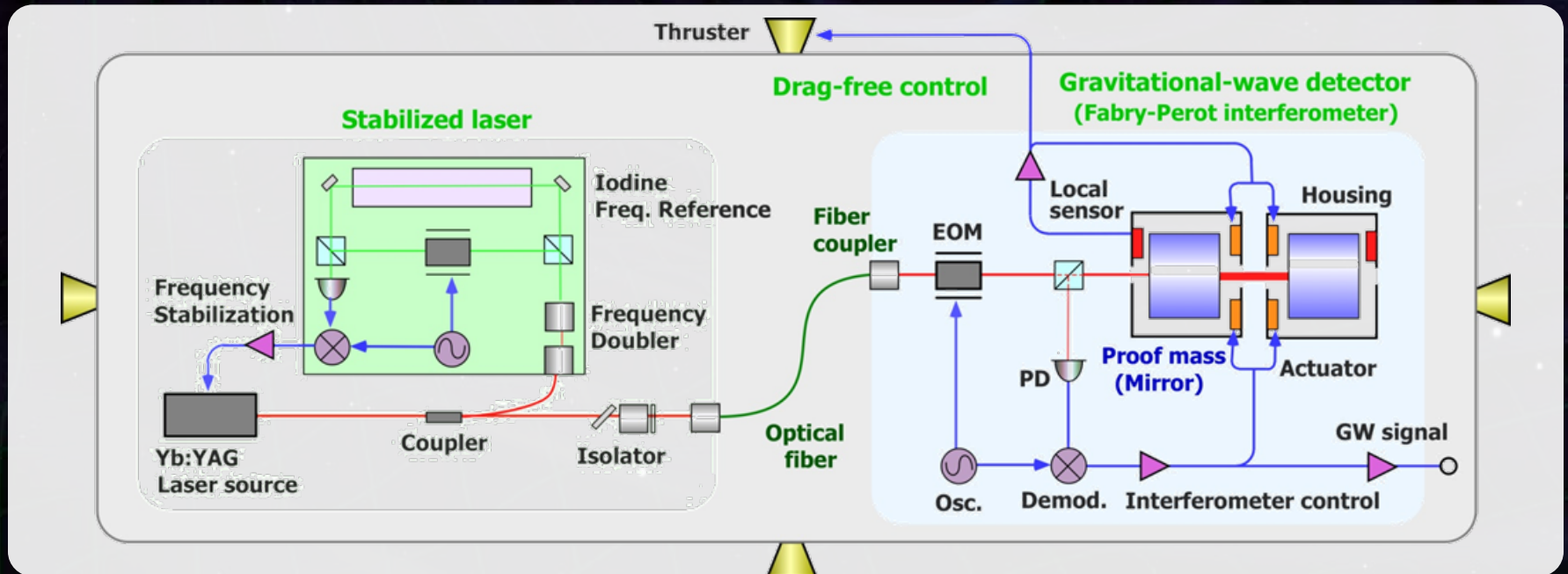


DPFミッション機器構成

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



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

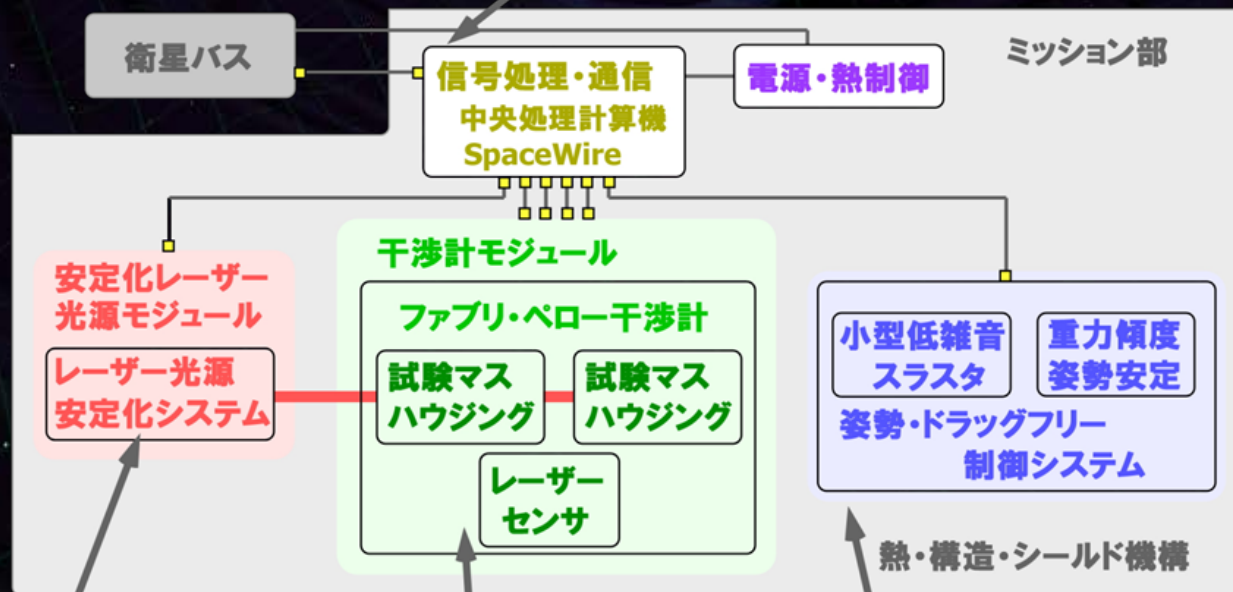
試験マス : 質量 数kg

PDH法により信号取得・制御

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

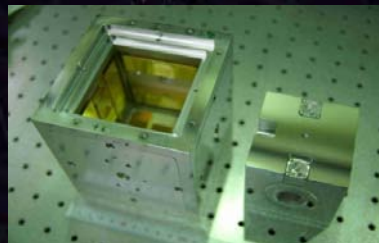
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

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
- μ -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.



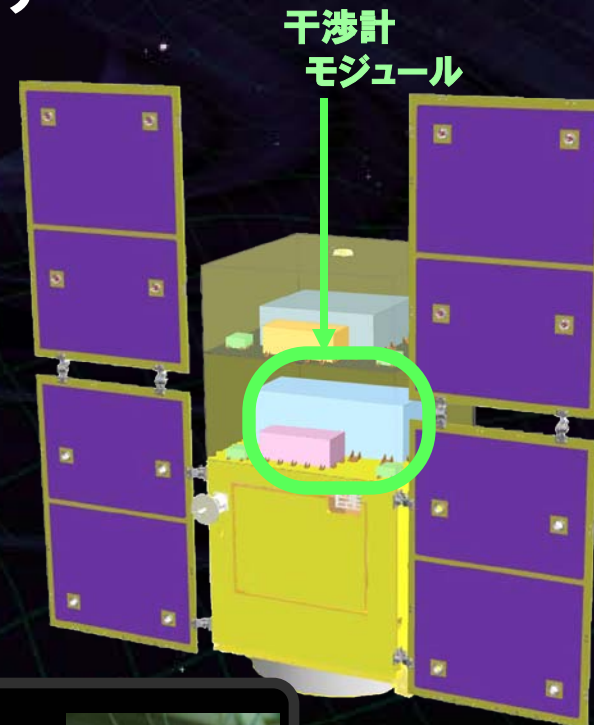
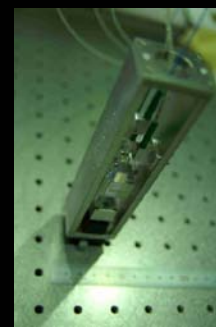
国立天文台, 東大

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



安定化レーザー光源

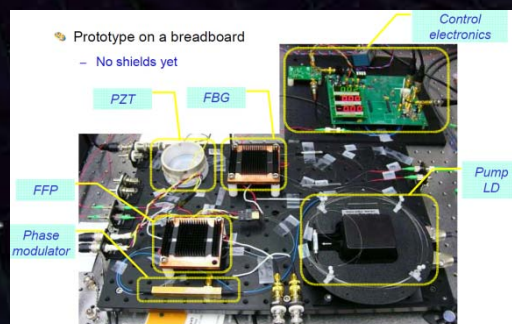
安定化レーザー光源：光源 + 安定化システム

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

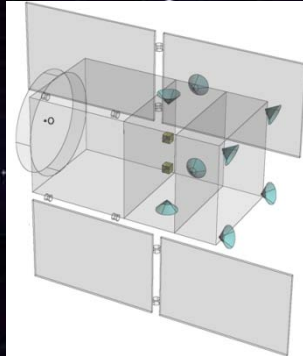


安定化
レーザー光源

姿勢・ドラッグフリー制御

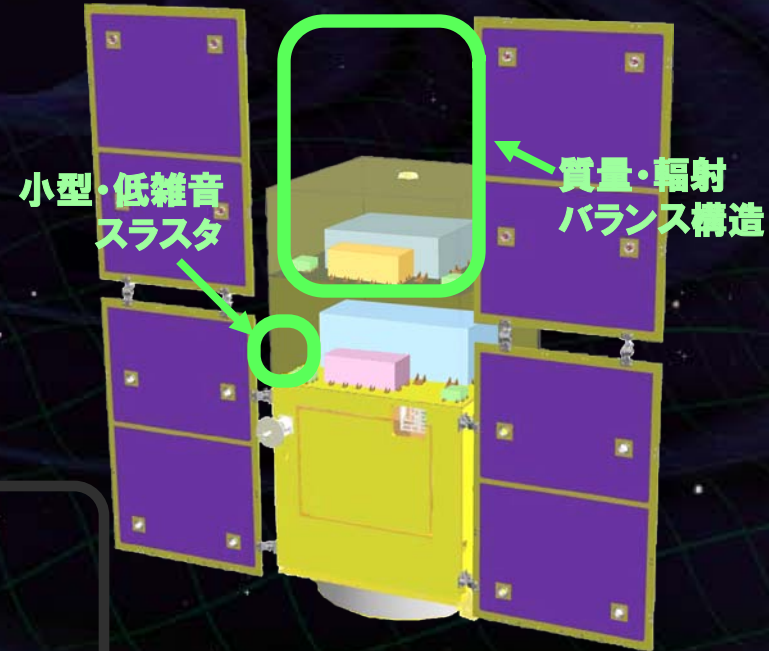
姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

衛星構成，熱・構造検討



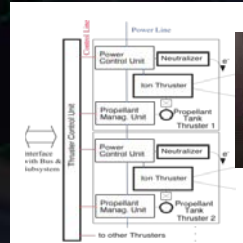
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



低雑音スラスタ

→ 衛星の姿勢・位置制御 (ドラッグフリー制御)



- BBM and system design

JAXA, 東海大, 防衛大

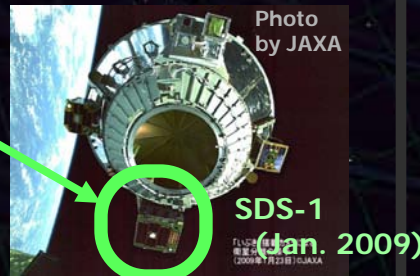
信号処理・制御システム

信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

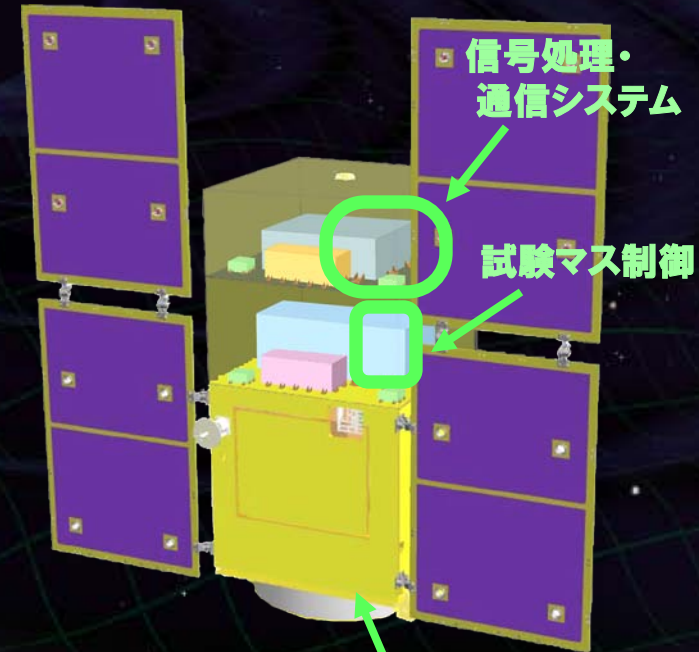
SpC2 + SpW信号処理システム
→ SDS-1/SWIMによる宇宙実証



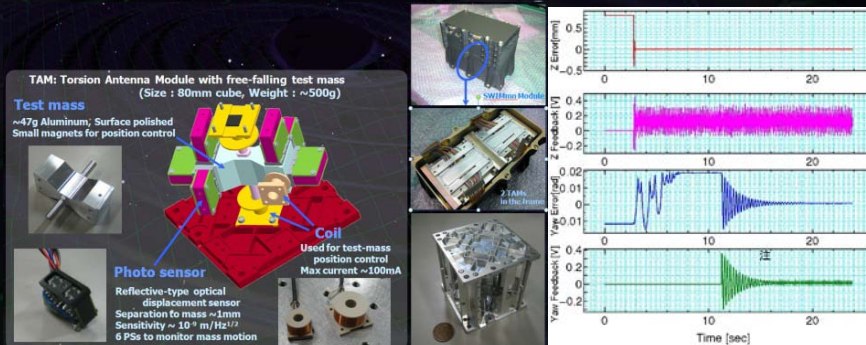
Space demonstration
by SDS-1/SWIM



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

超小型宇宙重力波検出器

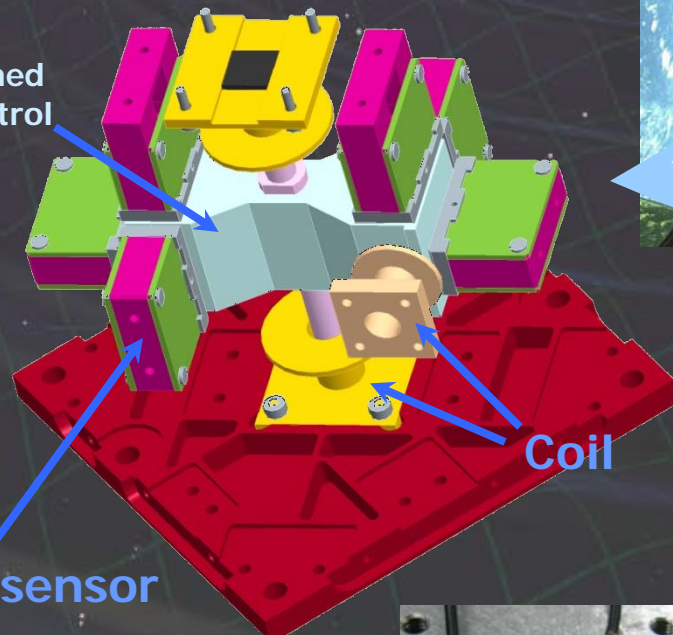
SDS-1衛星 (2009年1月- 2010年9月)

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control



Coil

Photo sensor

Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion

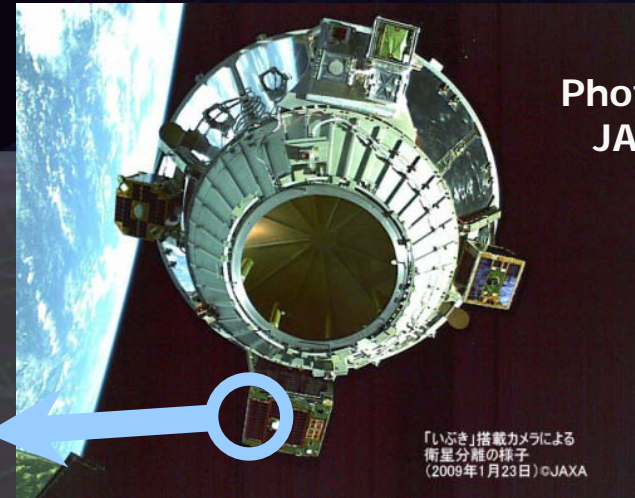
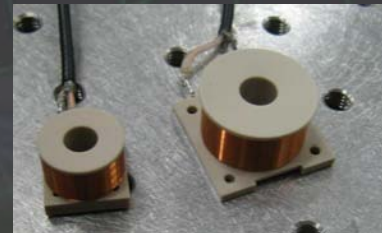


Photo:
JAXA

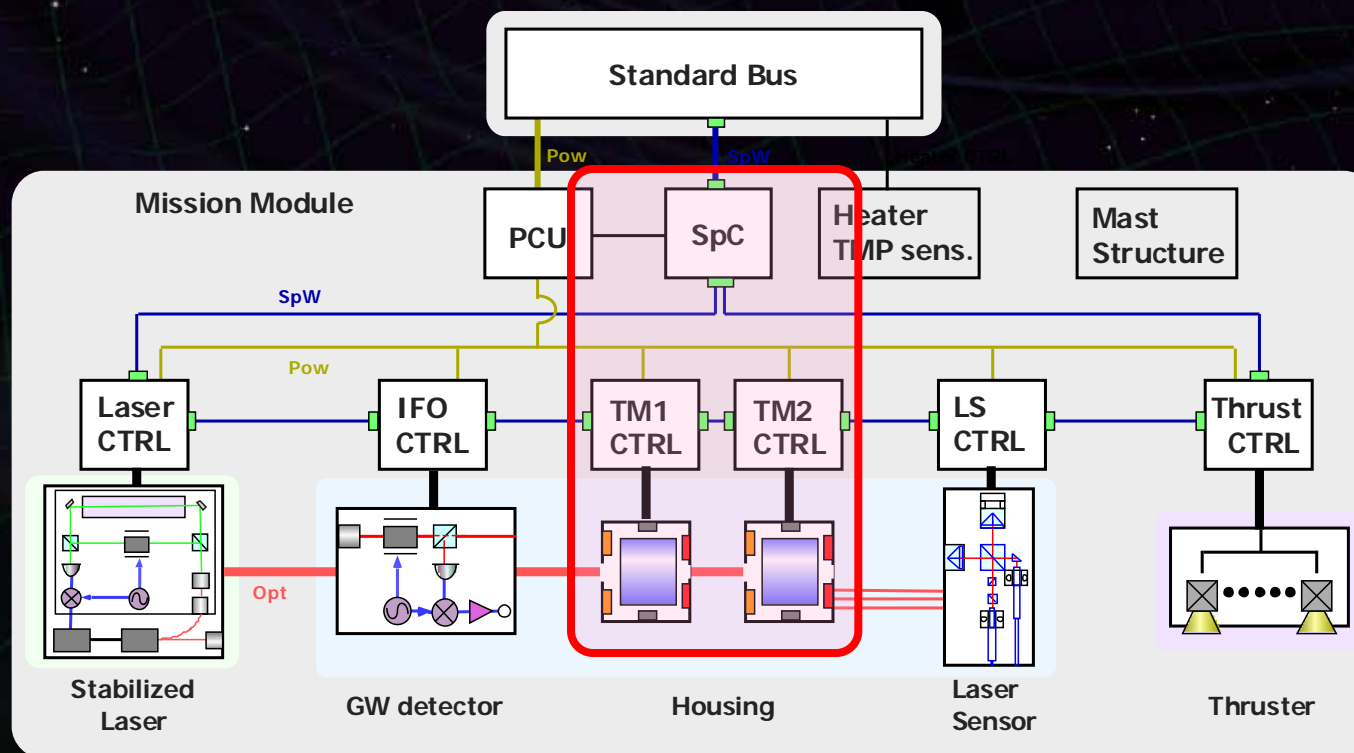
「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

SWIMによる実証とDPF

DPFミッション部 信号処理・搭載機器のプロトタイプとしての役割

SpC2 中央処理計算機
デジタルボード 機器制御デジタルボード
AD/DAボード 信号取得, 制御用アナログボード
センサモジュール 試験マスモジュール, センサ/アクチュエータ

SWIM – 動作実証が主な目的
信号処理・制御系の実証
センサ感度は重要視していない



SWIM による観測運転

DECIGO

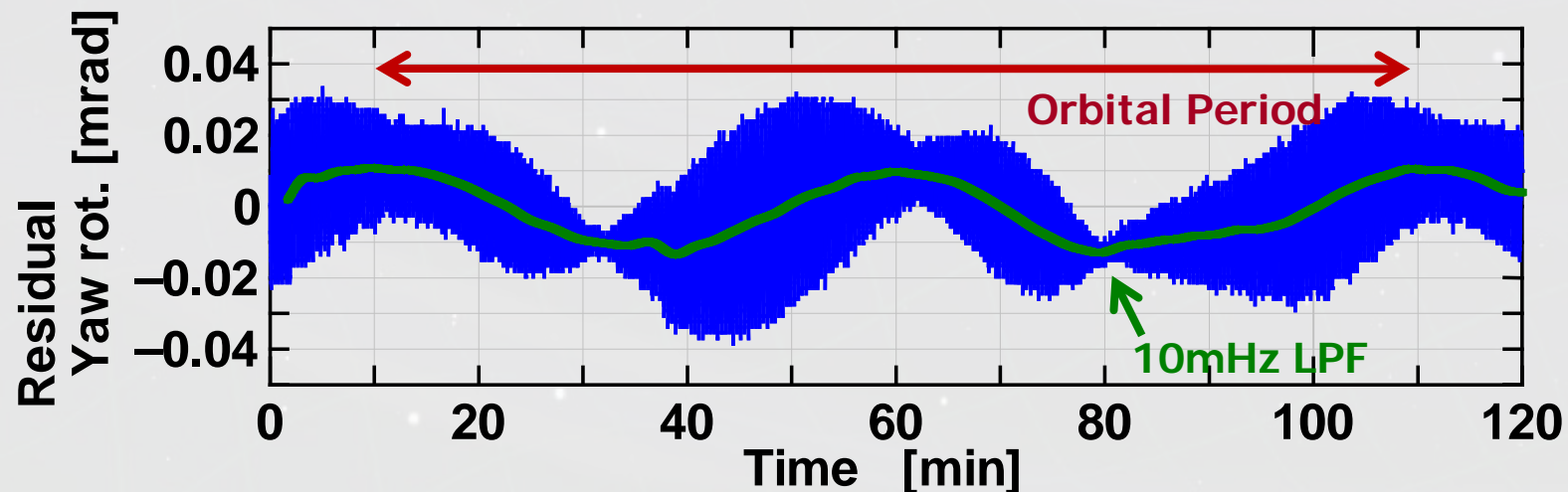
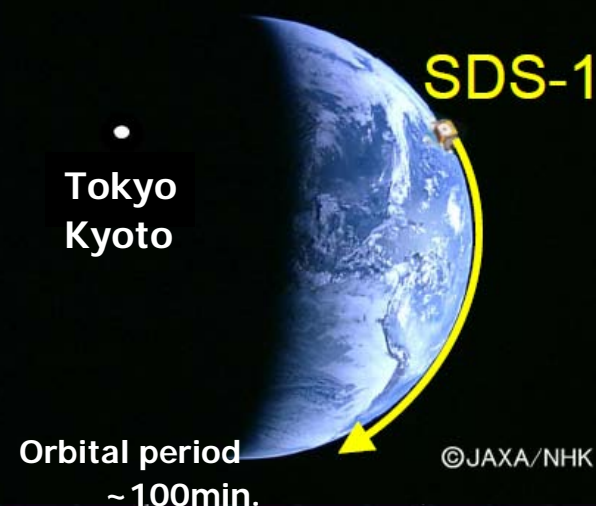
長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.

地上重力波検出器との同時観測運転

⇒ データ解析進行中





ミッションの現状

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



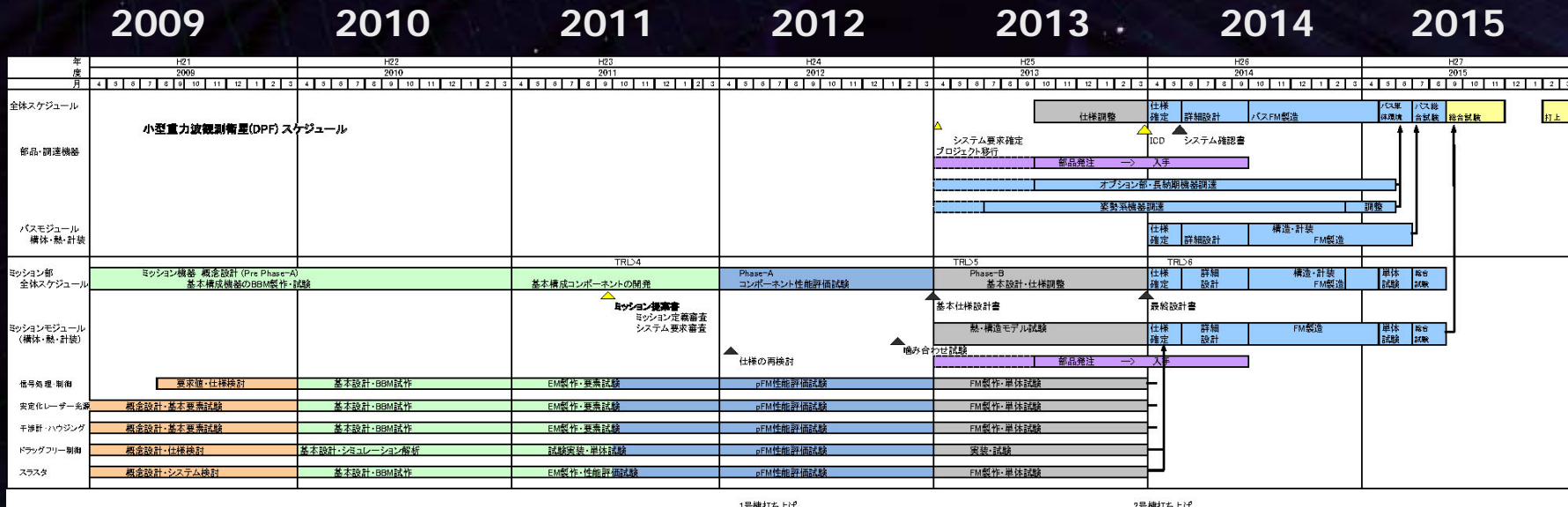
SPRINT-A/EXCEED 想像図(池下章裕氏作)

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

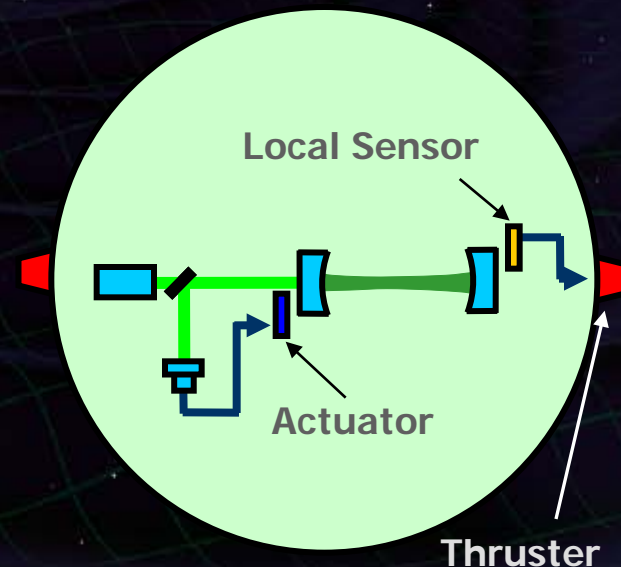
DECIGOパズファインダー (DPF) DECIGOのための最初の前哨衛星

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 の成功



11/17

1B06 中山, 船木, 堀澤

「FEOPスラスタの重力波観測衛星への適用検討」

1B03 與那, 堀澤, 船木

「微小推力測定装置の開発」

1I12 川村

「スペース重力波アンテナDECIGO」

1I13 安東, DPF ワーキンググループ

「DECIGOパスファインダーによる地球重力場観測」

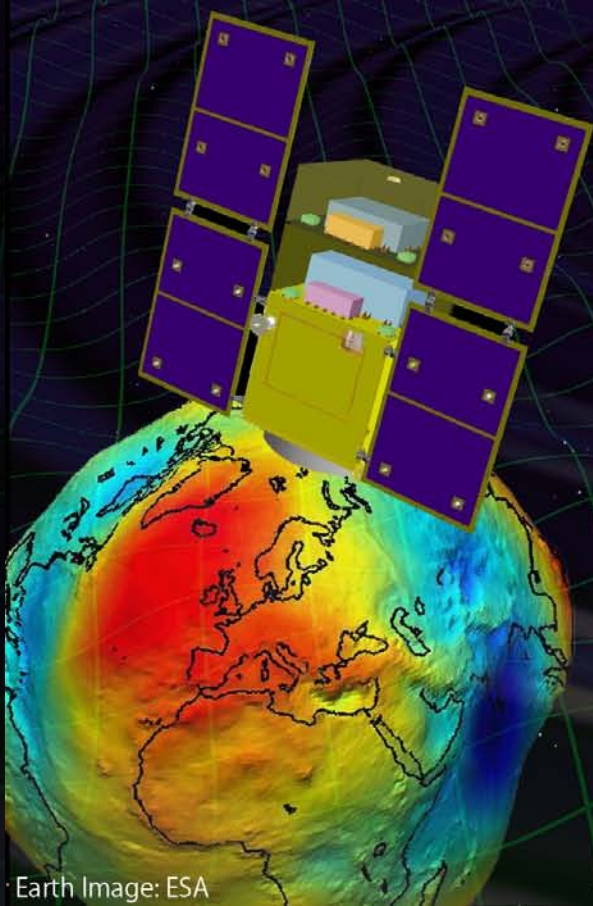
11/19

3G10 武者, 堀内, 中川, 植田

「DECIGO/DPF用安定化光源の開発」

3G11 佐藤, 阿久津, 新谷, 上田, 麻生, 安東, 川村

「重力波観測衛星DPFのための干渉計モジュールの開発」



Earth Image: ESA

終わり