

# 宇宙実験実証プラットフォーム(SWIM)を用いた 超小型重力波検出器の開発 I (概要)



**安東 正樹**

(東京大学理学系研究科)

森脇 成典, 石徹白 晃治, 穀山 涉, 新谷 昌人,  
麻生 洋一, 高島 健, 中澤 知洋, 高橋 忠幸,  
国分 紀秀, 吉光 徹雄, 小高 裕和, 湯浅 孝行,  
石川 毅彦, 榎戸 輝揚, 川浪 徹, 苔山 圭以子,  
坂井 真一郎, 佐藤 修一, 高森 昭光, 坪野 公夫,  
戸田 知朗, 橋本 樹明, 松岡 彩子

# 概要

## ● 衛星搭載用 超小型重力波検出器

(DECIGO-PFのさらに前段階)

小型のセンサーモジュールを衛星に搭載する機会

→ 超小型重力波検出器

試験マスの重力波による差動回転をフォトセンサーによって検出

80mm立方 x 2つ, 約1kg

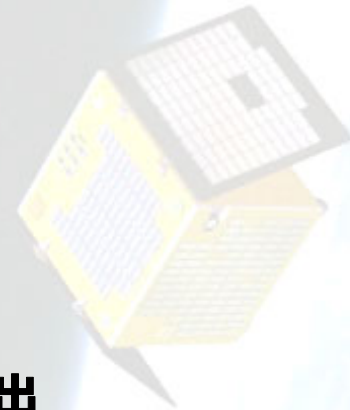
### 目的

宇宙空間での重力波観測とそのデータの解析

宇宙空間でのアンテナ制御技術の検証実験

人工衛星内の振動・温度環境の計測

一連の計画の遂行に伴う経験と実績の蓄積



# 目次

**搭載衛星, SWIM**

**超小型重力波検出器 (SWIM $\mu\nu$ ) 概要**

原理, 構成

**構成要素**

フォトセンサー

アクチュエータ

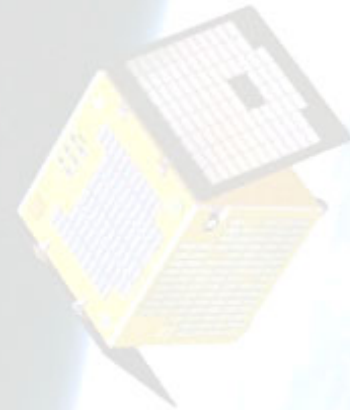
制御・信号処理

**環境試験**

振動試験

放射線照射試験

**まとめ**



# 衛星搭載重力波検出器 (1)

## ● 搭載予定衛星

SDS-I :

100kg級の小型実証衛星  
複数の技術試験  
モジュールを搭載

高度670km

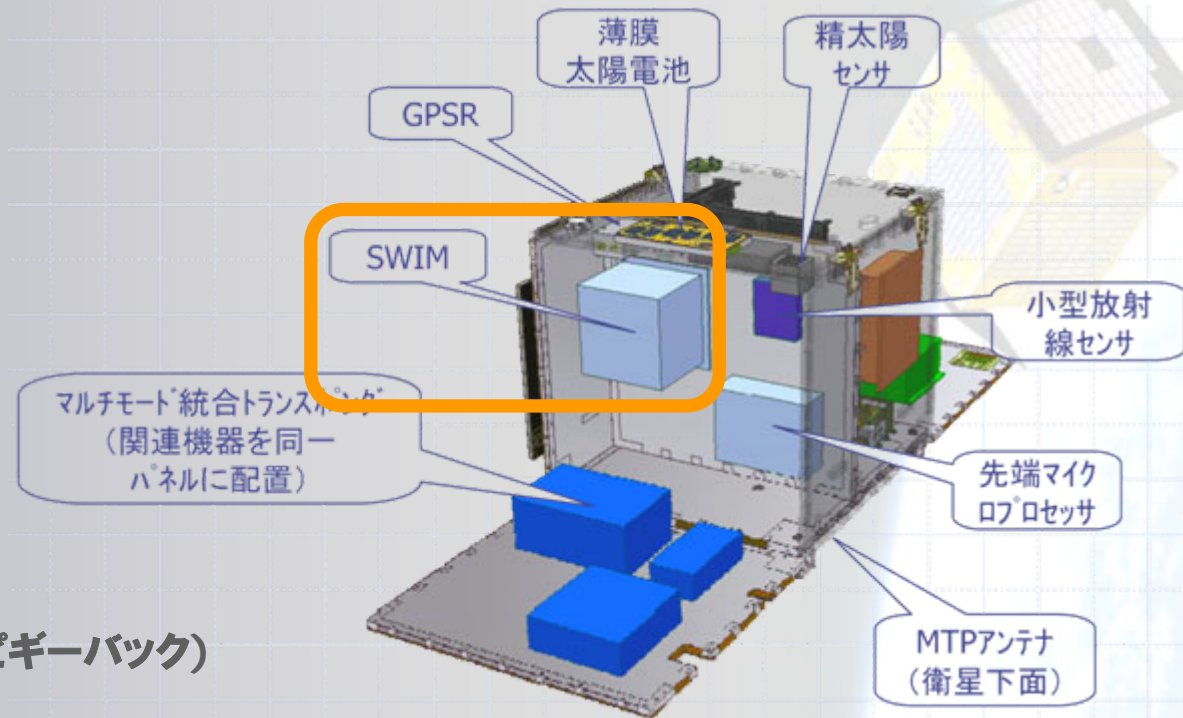
太陽同期極軌道

(軌道傾斜角  $98.06^\circ$ )

スピン安定/3軸制御

2008年夏打上げ予定

(H-IIA, GOSAT衛星のピギーバック)



## SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module)

SpaceWire 規格に基づいた

次世代データ処理系の実証試験モジュール

開発する超小型重力波検出器は、  
SWIMだけに接続される (電力, 通信)



SWIMの汎用性、  
スケーラビリティの試験

# 衛星搭載重力波検出器 (2)

## ● SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module)

目的:

SpaceWire規格に基づく  
次世代データ処理系のコンセプトの実証

寸法: 220 x 200 x 180 mm

質量: 5.6kg

消費電力: 20W

データレート: 256~2560bps (TBD)

運用時要求

スロースピン状態での計測

可能な限りの連続観測

SpaceCube II

JAXA/HIREC 64bit MIPS CPU

I/F: SpaceWire規格, RS422

User Module Controller

Xilinx FPGA XQVR300/600 (耐放射線品)

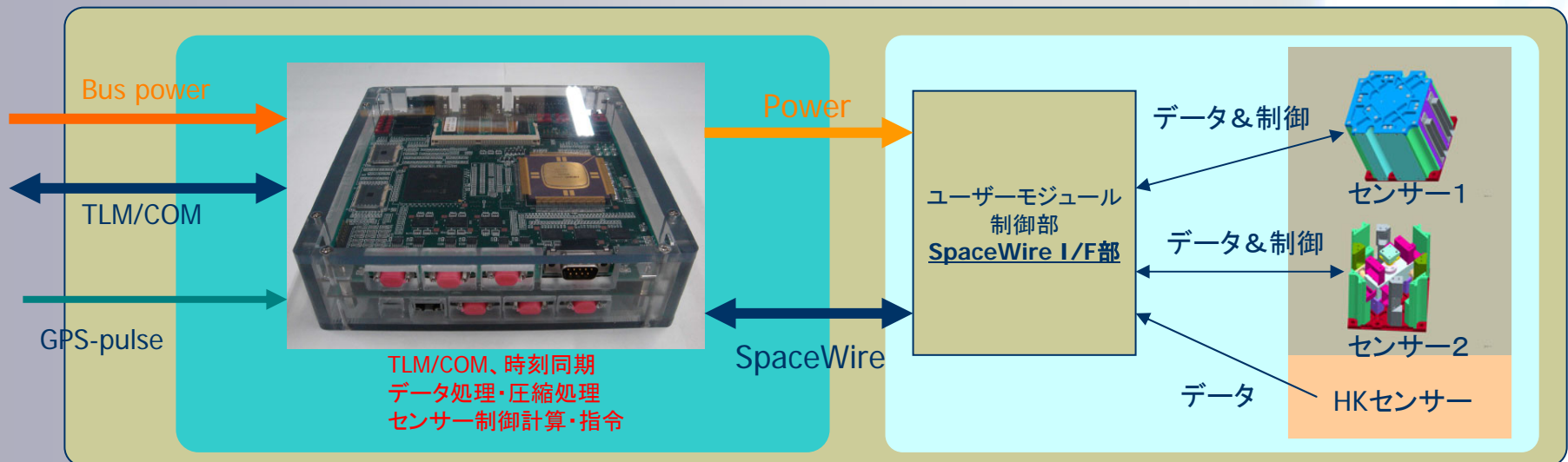
SWIM<sub>μ</sub>v

超小型重力波検出器 (高感度加速度計)

FPGA による制御, 信号処理, SpW通信

HKセンサ

SWIM内環境モニタセンサ

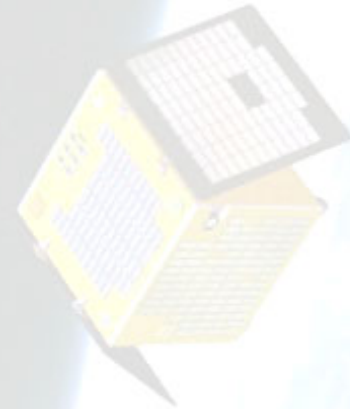


# SWIM $\mu\nu$ 概要

概要

検出原理

構成





# 衛星搭載重力波検出器 (3)

## ● 超小型重力波検出器 SWIM $\mu$ v

アルミニウム製の

**試験マス (50x20x20mm)**

を衛星内に**非接触支持**したものを**2セット**用いる

→ 重力波によるマスの  
差動回転を**フォトセンサー**  
によって検出

**全自由度の加速度計**になる

**非接触支持**されている

→ 摩擦・復元力の影響を受けない

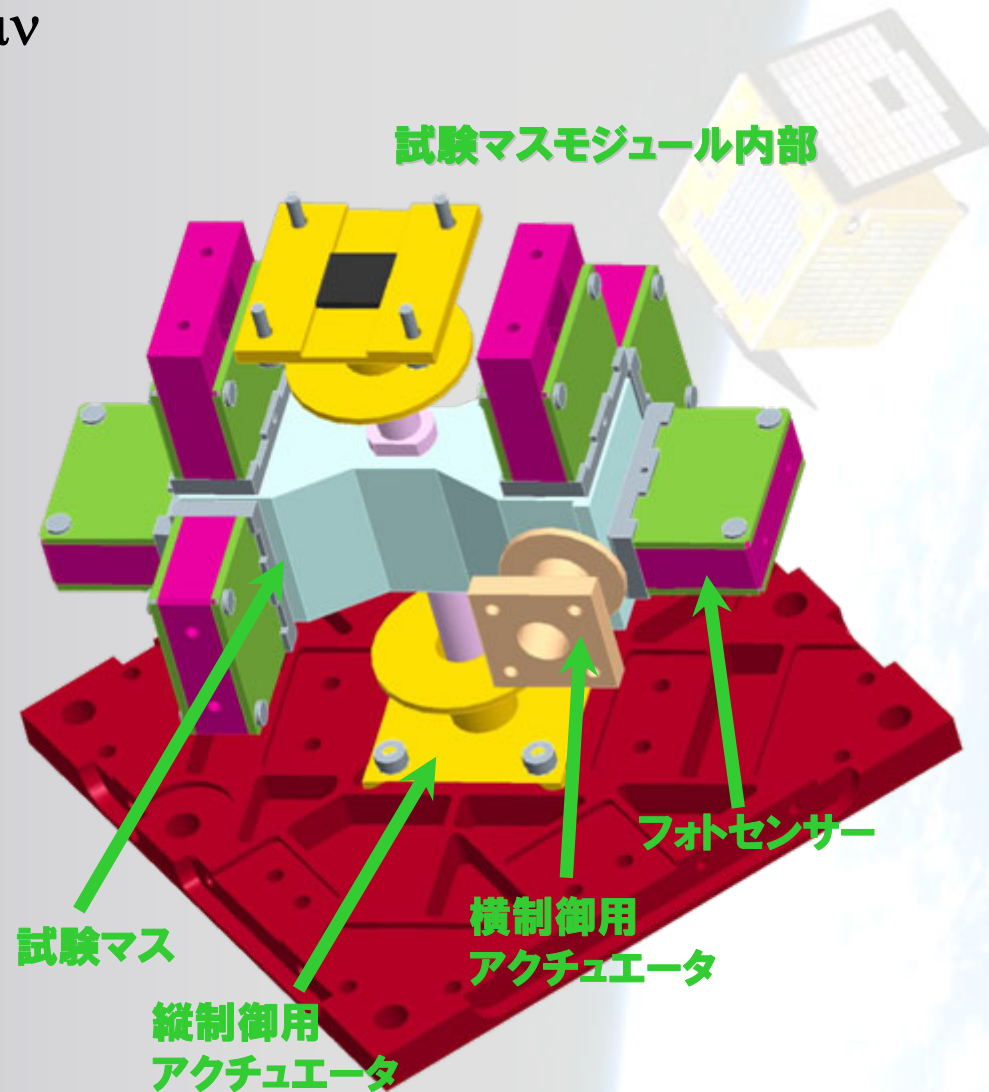
**低周波数の重力波**や**微小な力**を検出

回転方向の自由度を測定する

→ 外乱の影響を受けにくくなる

永久磁石の引力を利用して支持

→ **2自由度の制御**だけでマスを保持

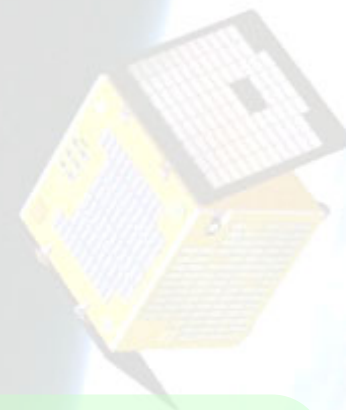


# 衛星搭載重力波検出器 (4)

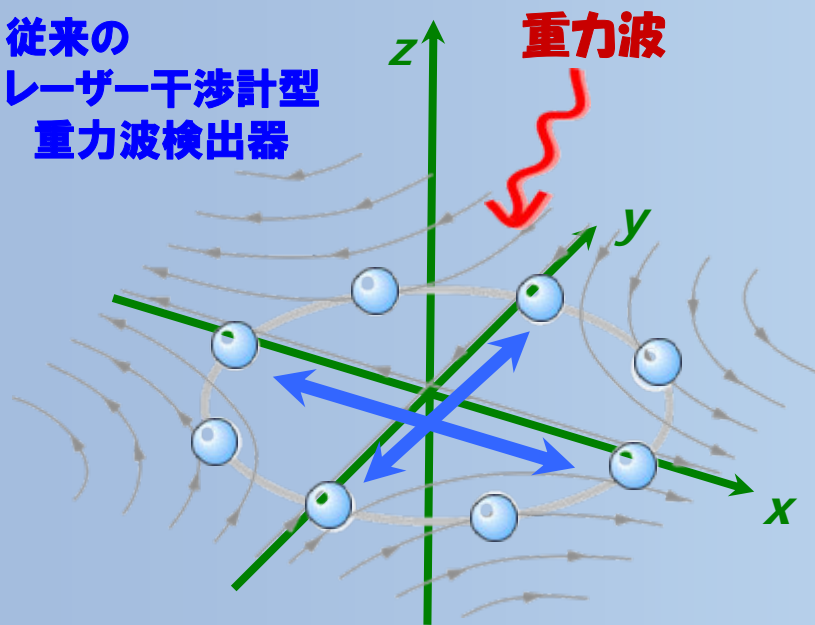
## ● 重力波検出原理

### 重力波の効果

自由質点間の距離の変化, 物体への潮汐力  
横波, 四重極特性 (直交する方向で差動に変動)  
2つの偏光 (+モード, xモード)

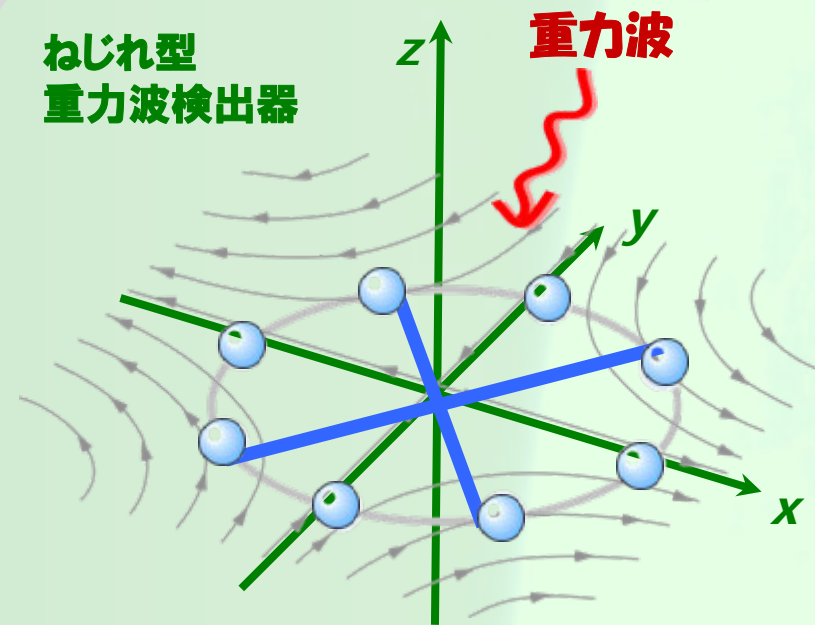


従来の  
レーザー干渉計型  
重力波検出器



直交する2方向の  
差動距離変化を検出

ねじれ型  
重力波検出器

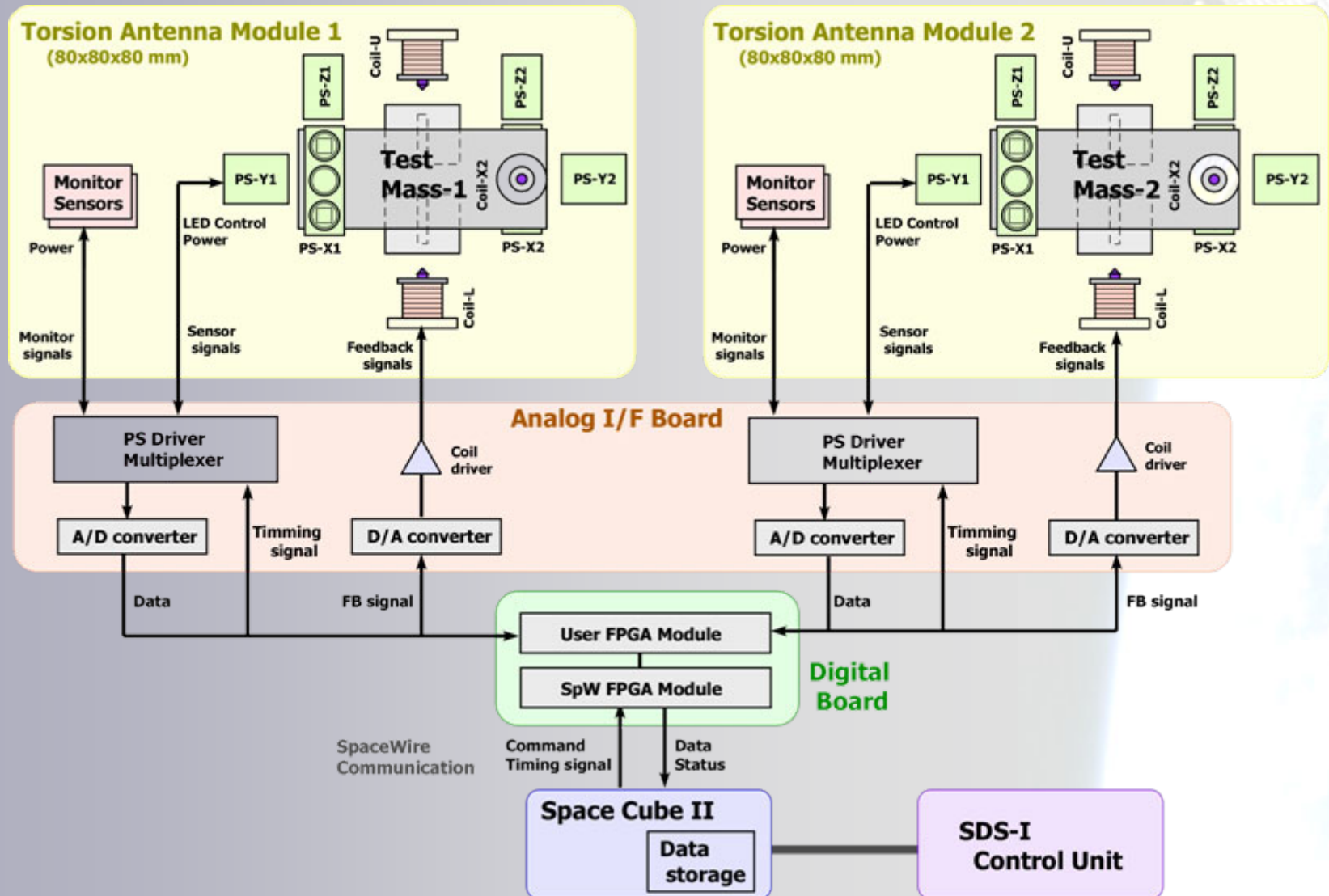


直交する2方向の  
角度変化を検出



# 衛星搭載重力波検出器 (5)

## ● SWIM $\mu$ v 構成図



# 構成要素

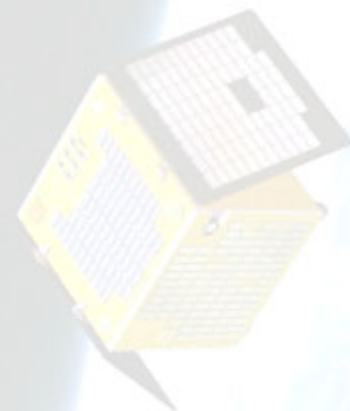
## 試験マスモジュール

フォトセンサー → 穀山氏 講演

アクチュエータ

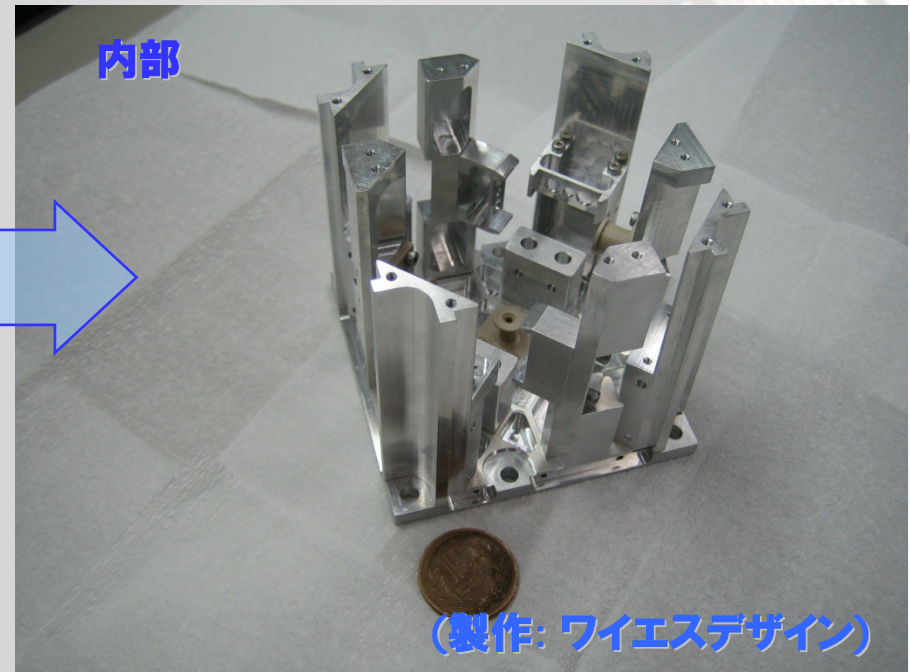
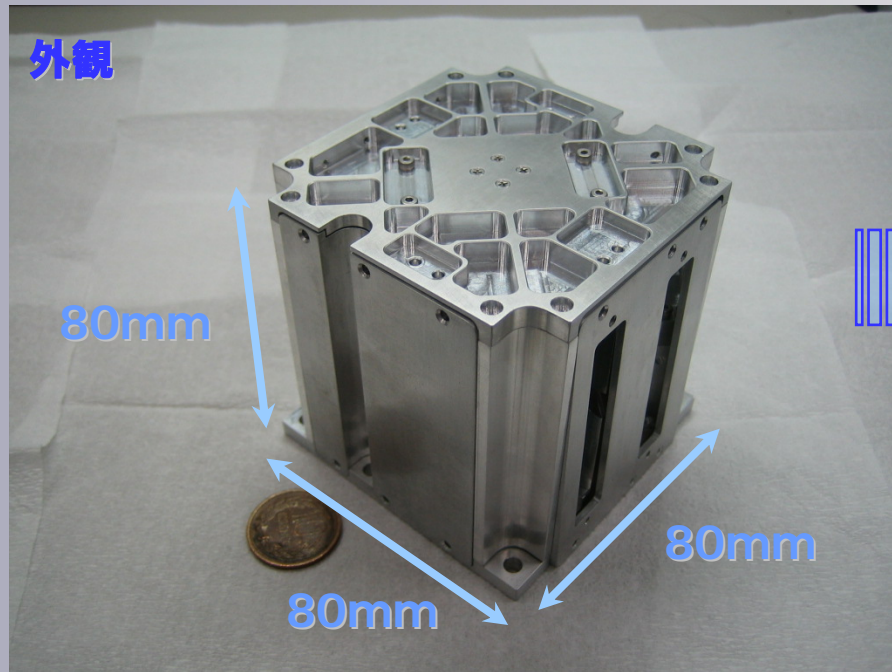
制御・信号処理 → 石徹白氏 講演

モニタセンサ



# 構成要素 (1)

## ● 試験マスモジュール 構造体



外形 : 80mm立方 x 2つ  
重量 : 2つ合わせて 約1kg  
材質 : 主にアルミニウム

試験マス:  
アルミニウム製, 表面鏡面仕上げ  
50x20x20mm, ~50g  
制御用磁石を取り付け  
可動範囲  $\pm 1$ mm

フレーム:  
コイル軽量化のための肉抜き

# 構成要素(2)

## ● 振動試験

(ISAS/JAXA D棟 振動試験装置)

打ち上げ時の衝撃に耐えられるかの試験  
フレームの強度の確認  
試験マスの保持方法の検証

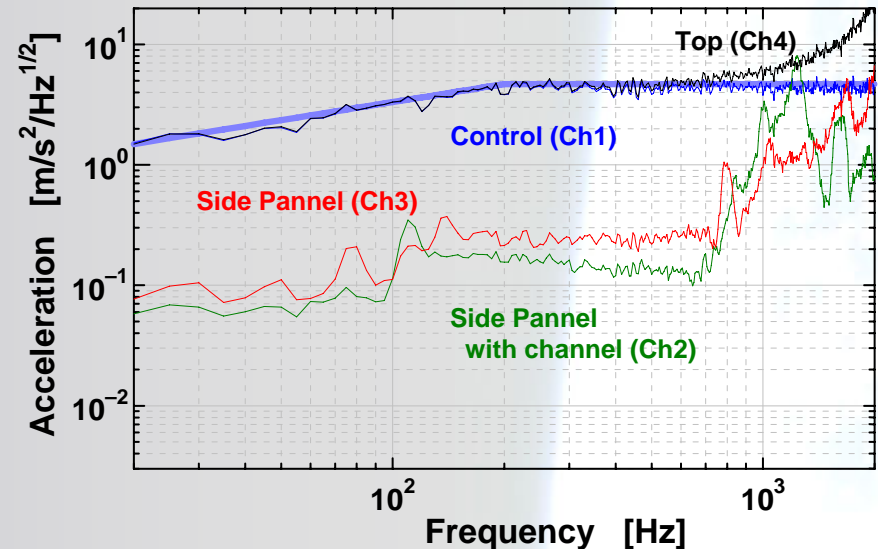
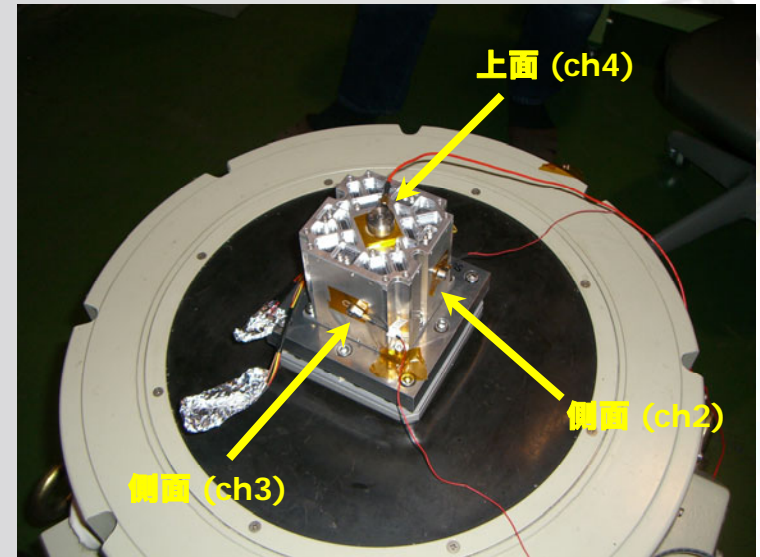
### 試験条件

衛星側仕様が未定 → 暫定値で試験  
縦振動のみ 最大 20Grms  
20-2kHzのランダム振動  
プロトタイプ機を使用  
試験マス, モニタセンサ内蔵

### 試験結果

#### 良好な結果

破損・緩みは特に無かった  
共振周波数 ~ 1kHz  
→ 側面パネル: 補強するよう改良  
試験マスストッパー, マス表面:  
ダメージ -- ほとんど無い  
制御用磁石の破損無し (φ2 Nd磁石)  
モニタセンサ: 特性に変化無し





# 構成要素 (3)

## ● フォトセンサー

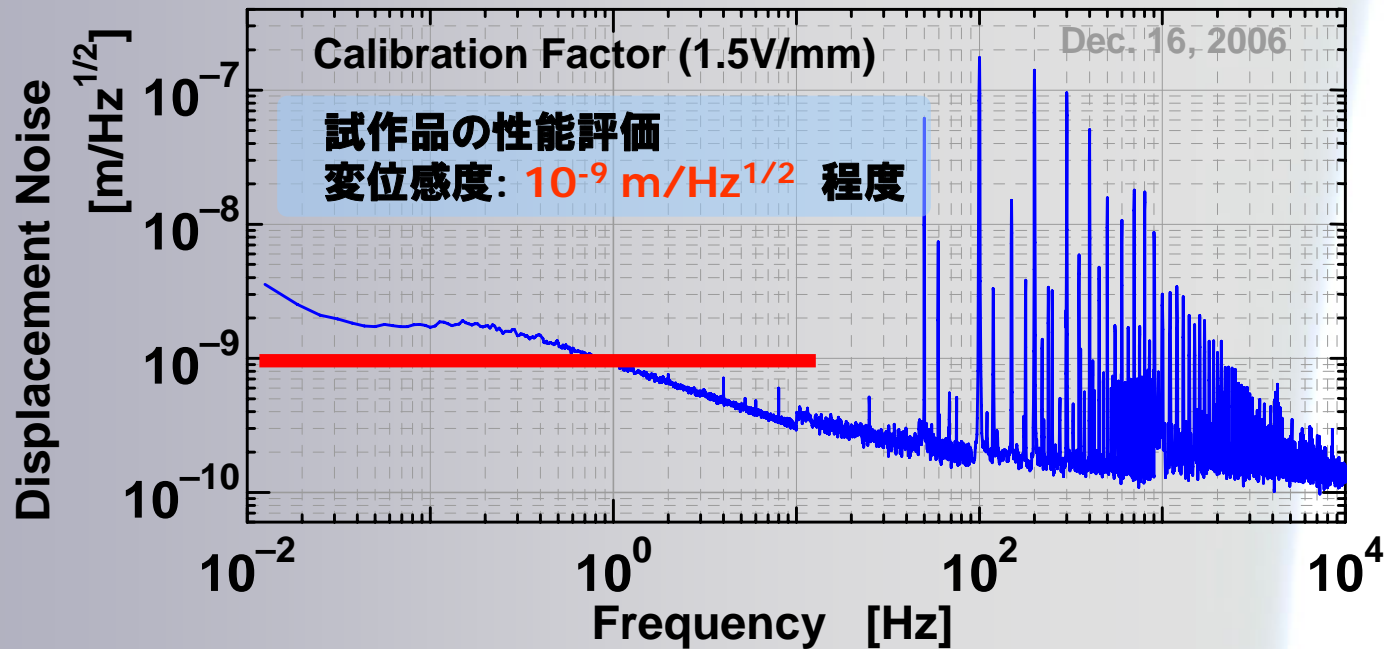
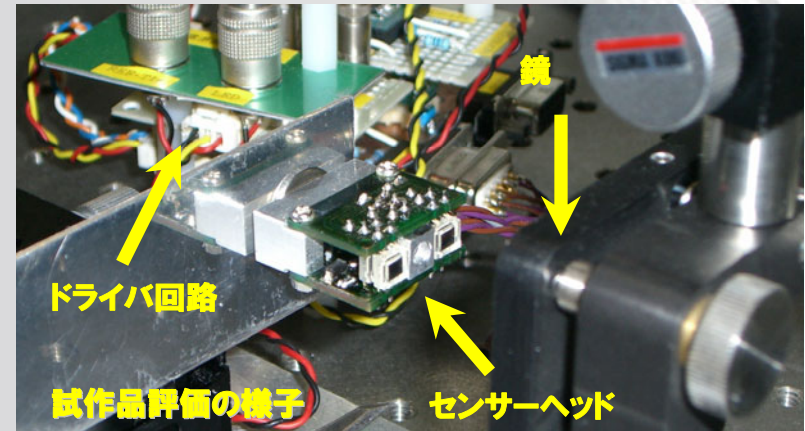
マスの変動を検出するための**反射型センサー**  
マスの周りに6個配置され、

**全自由度の変動を検出**

LEDとPD, 回路系で構成される

**非接触**で変位を計測できる

表面実装素子を使用 → 小型化



詳細  
→ 穀山氏  
講演



# 構成要素 (4)

## 放射線照射試験 (東京大学アイソトープ総合センター 協力: 東大理 物理 牧島研)

宇宙放射線の影響での故障・劣化の試験  
特に樹脂モールドされた LED, PD の劣化  
モニタセンサ用 IC が使用可能かの確認

トータルドーズ量 ~2 krad/yr  
(SDS-I仕様書より, シールド厚 1mm)

### 試験条件

使用装置:

東京大学 工学系研究科

原子力国際専攻 共用装置 生物用照射装置

線源:  $^{137}\text{Cs}$  からの  $\gamma$  線 (662 keV)

線源強度: 59.1 TBq = 1.60 kCi

→ 距離 20cm, 45min 照射で 10krad

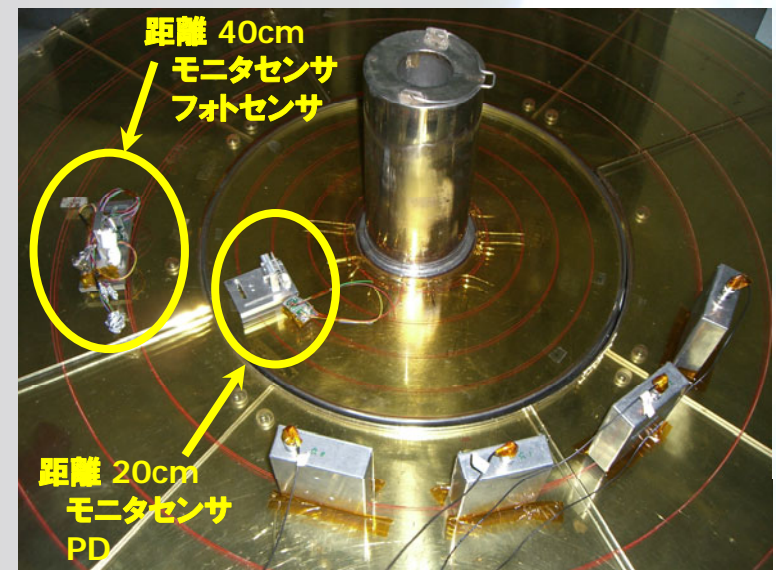
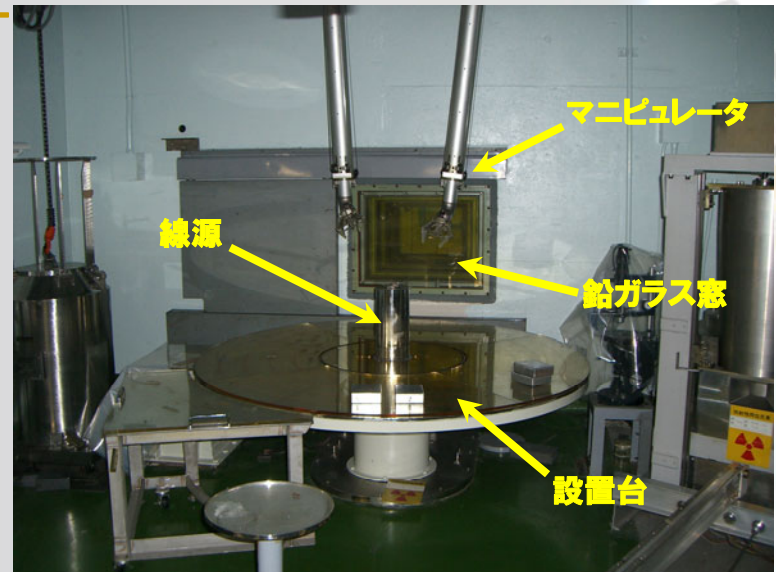
### 結果

目視確認 → 樹脂に劣化は無い  
動作試験

PD, LED: 特に劣化無し

モニタセンサ: 特に劣化無し

詳細  
→ 穀山氏  
講演



# 構成要素 (5)

## ● アクチュエータ

マスの位置を制御するために使用する  
十分な力が出せることを優先 → コイル-磁石アクチュエータ  
上下方向制御用, 回転方向制御用の2種類

### 上下アクチュエータ

要求: 縦方向の位置制御

可動範囲  $\pm 1\text{mm}$

回転軸変動の保持

← 衛星のスピンによる遠心力

~  $1.5\text{mN}$

スタックしない

(磁石を引き離せない等の状態にならない)

⇒ コア付 コイル-磁石 アクチュエータ

### 左右アクチュエータ

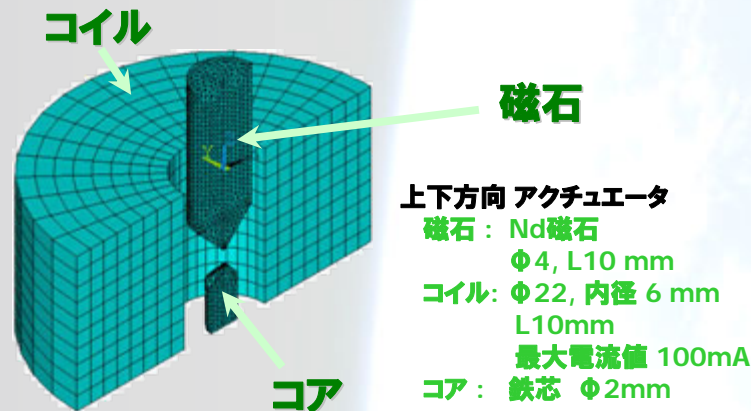
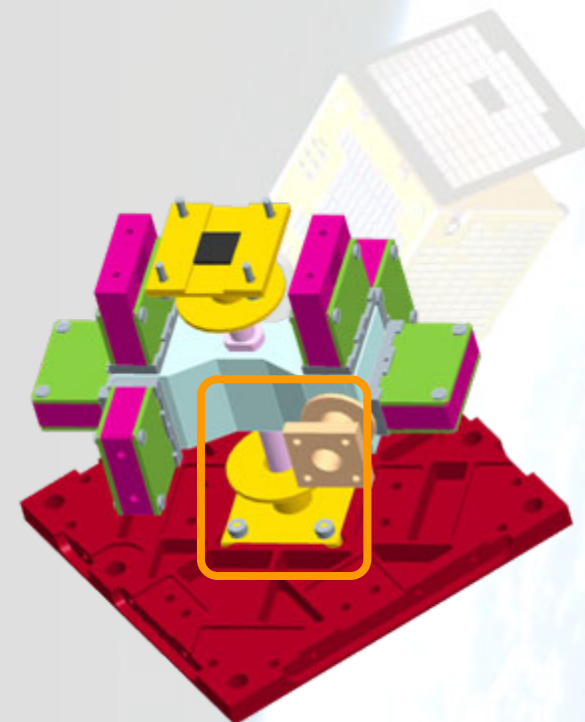
要求: 回転方向の位置制御

可動範囲  $\pm 1\text{mm}$

外乱に対して十分な力

← 衛星自身による外乱力 ~  $0.1\text{mN}$

⇒ コイル-磁石 アクチュエータ



# 構成要素 (6)

## ● アクチュエーター試験

### コイル

(株)セルコに製作依頼

コイル線 : EIW線 (ポリエステルイミド銅線)

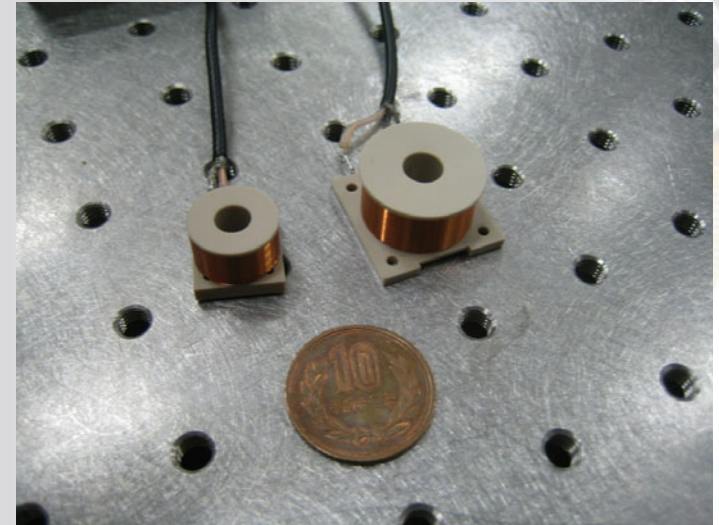
φ0.2, 耐熱180℃

上下コイル 1300巻 35Ω, 17mH

側面コイル 540巻 10Ω, 2.8mH

コイルボビン : PEEK製

コイル端で負荷がかかりにくいよう配慮



### 上下アクチュエータ

x方向:

コアによる復元力の測定値 7.3N/m

→ 遠心力による回転軸ずれ 0.1 mm

z方向:

100mN 程度 (100mA)

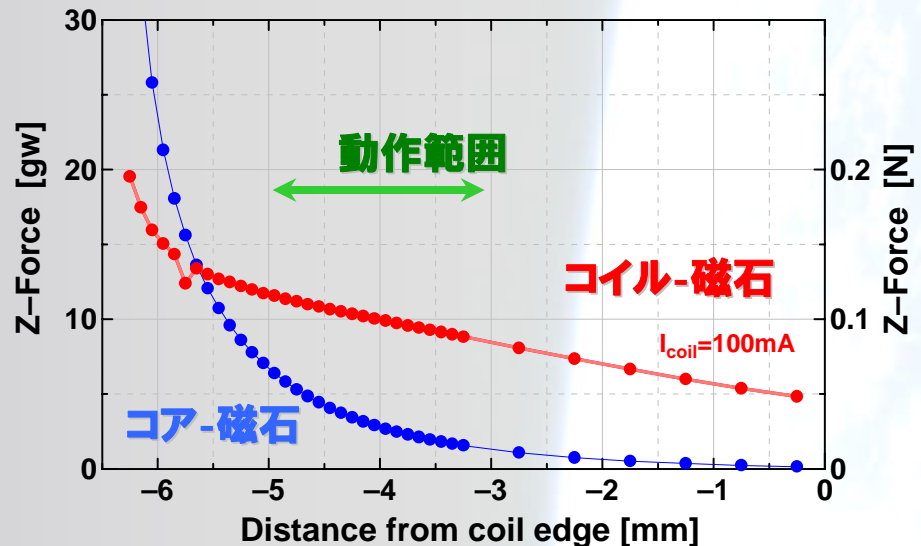
→ 動作範囲で十分なコイル力

(コアの吸引力 ~ 3mN)

### 左右アクチュエータ

測定値 10mN (100mA)

→ 予想外乱の100倍の力





# 構成要素 (7)

## ● 制御・信号処理

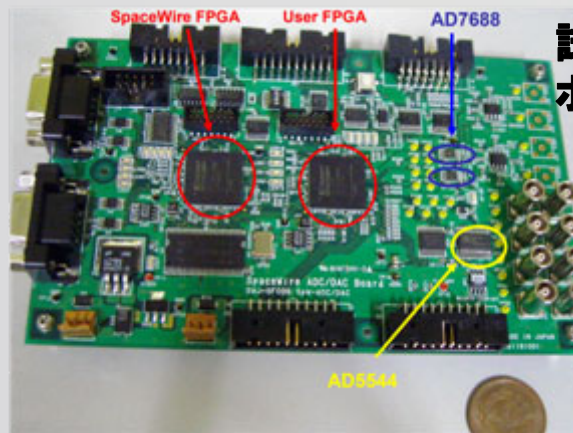
マスの位置制御と信号処理

フォトセンサー出力などを ADC で取得

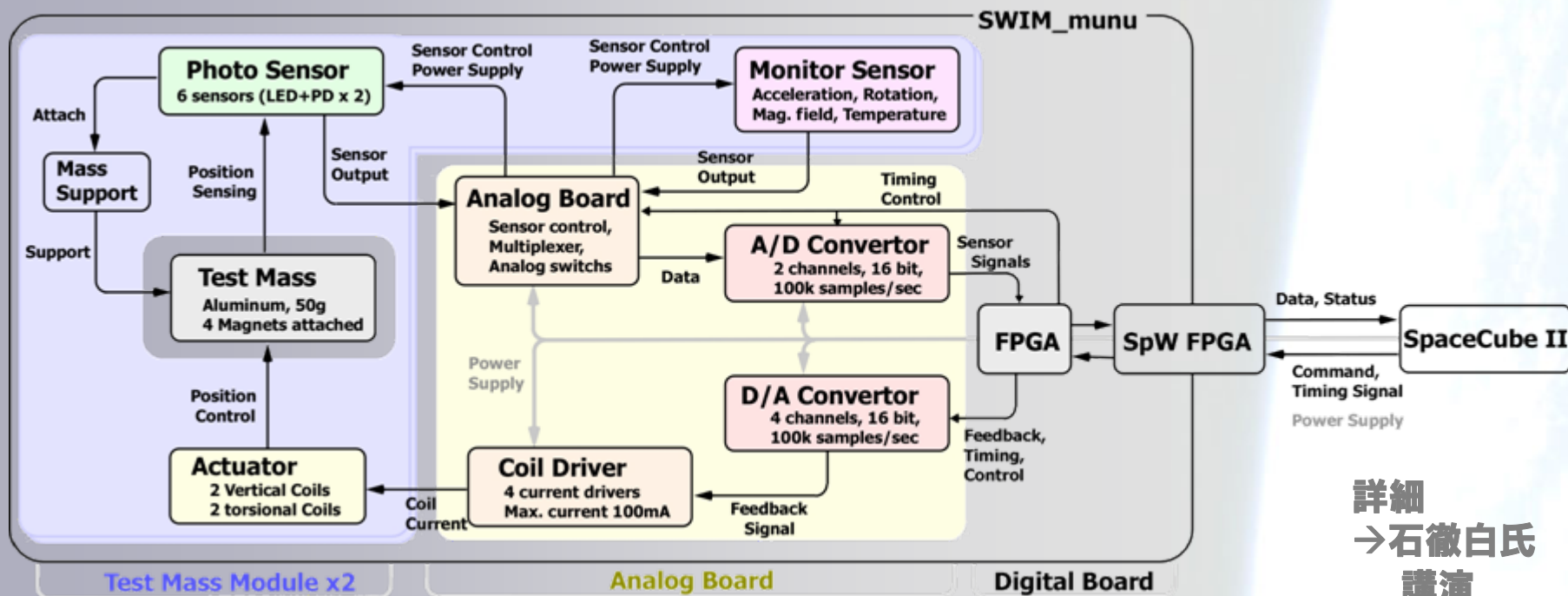
→ FPGA で信号処理 (制御フィルター)

→ DAC で信号出力 → コイルドライバー

SpW規格による SpaceCube II との通信



試験用  
ボード



詳細  
→石徹白氏  
講演

# 構成要素 (8)

## ● モニタセンサ

環境をモニタするためのセンサー

加速度センサ・ジャイロ・温度センサ

1チップICを使用

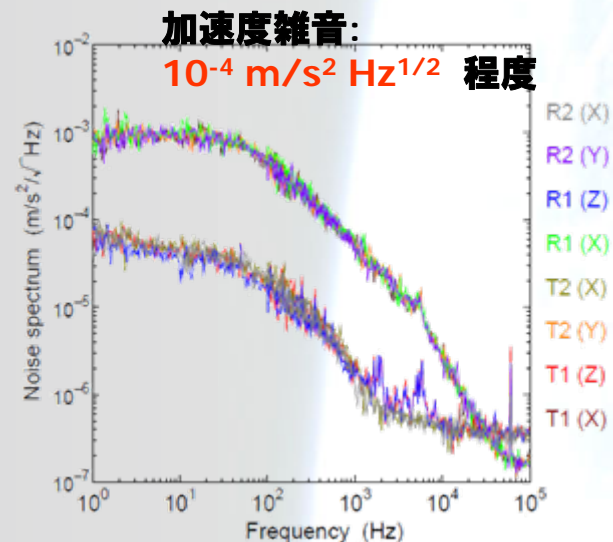
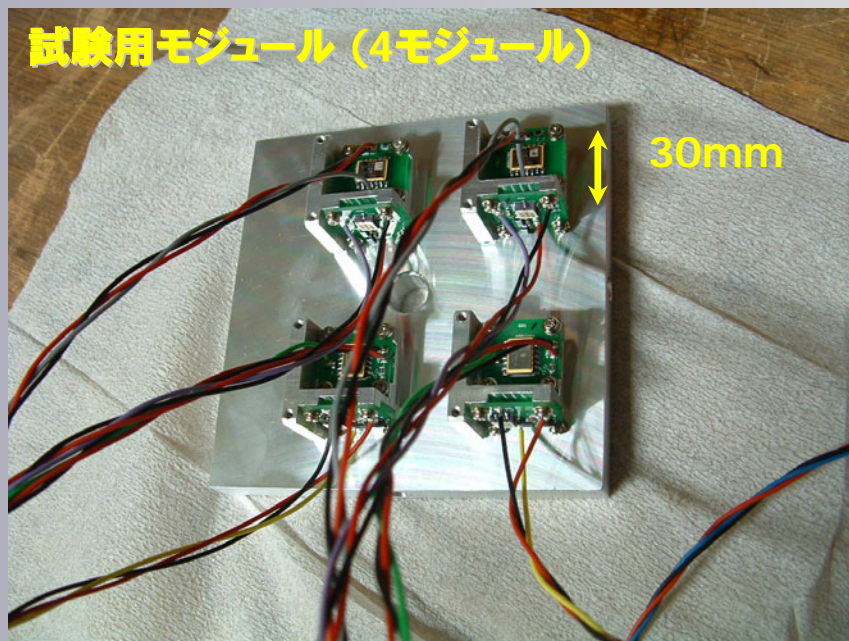
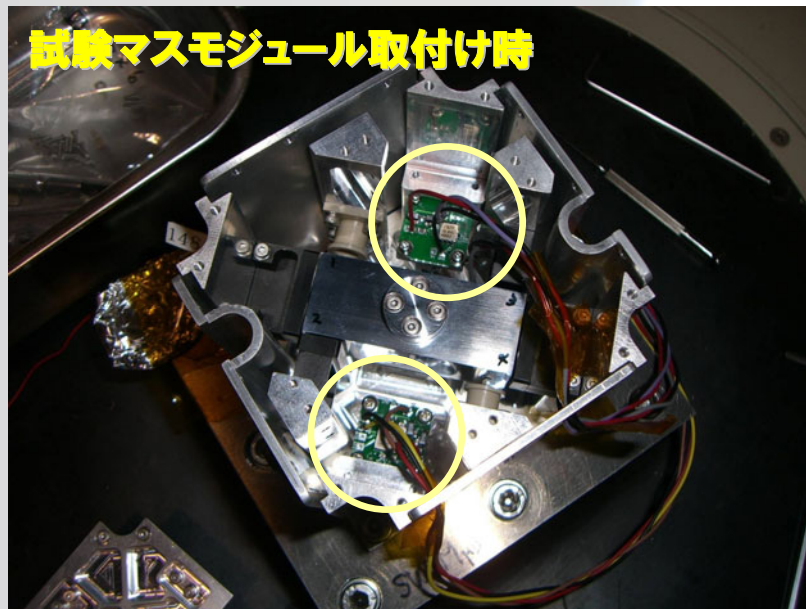
加速度計: ADXL103, AGS11151

回転加速度計: ADXRS401, ADXRS150

大きさ ~ 30mm立方,

試験マスモジュール内に取付ける

振動試験, 放射線照射試験 → 特に劣化無し





# まとめ

DECIGOなど宇宙重力波検出器の実現のためには、  
**入念な地上試験**と **宇宙空間での実証試験** が不可欠



衛星搭載用の超小型重力波検出器を開発中

技術実証衛星 SDS-I (2008年夏打上げ) に搭載予定

**設計-製作-試験-打上げ-運用**

という一連の作業に対する **経験と実績の蓄積**

SWIMモジュールの動作試験に貢献

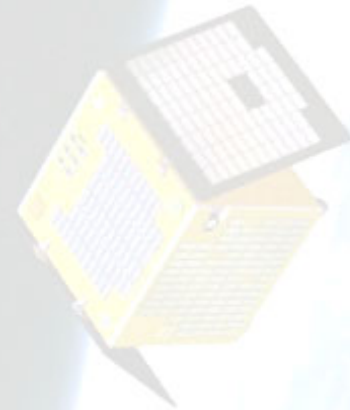
高感度加速度計 → 衛星環境データの取得

**重力波の観測** (感度  $h \sim 10^{-7} / \text{Hz}^{1/2}$  程度)

## 現状

各要素の動作試験, 振動耐性試験, 放射線耐性試験

**FM品**の製作が始められつつある



A yellow satellite with solar panels is shown in space, orbiting Earth. The Earth's blue and white clouds are visible on the right side of the frame. The background is a dark field of stars and distant galaxies. The Japanese text '続<' is centered in the image.

続<

# 衛星搭載重力波検出器 (5)

## ● 共振周波数など

アクチュエータによる復元力を元に計算

コア付 コイル-マグネット アクチュエータ  
磁石 : Nd磁石  $\Phi 4\text{mm}$ , L10mm  
コア : 鉄芯  $\Phi 2\text{mm}$

⇒ X方向: コア-磁石 7.3 N/m の復元力

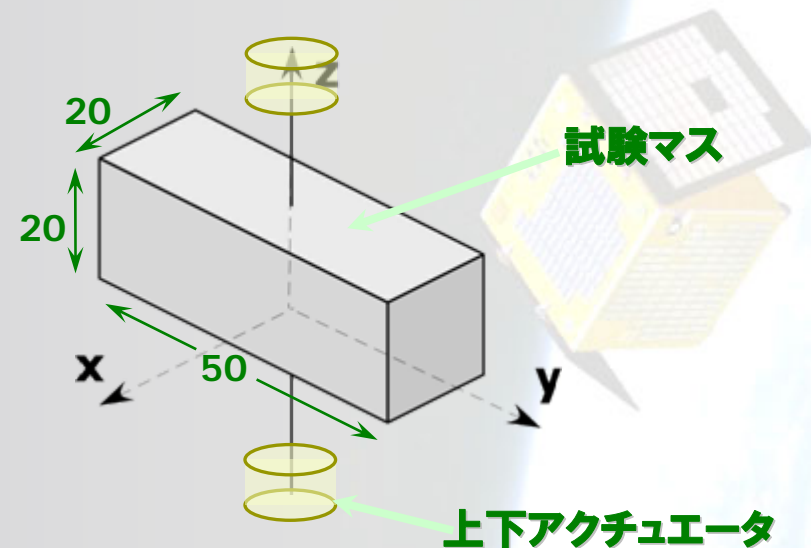
試験マスのパラメータ

質量: 54g

慣性モーメント: x軸周り  $1.3 \times 10^{-5}$  [kg m<sup>2</sup>]  
y軸周り  $3.6 \times 10^{-6}$  [kg m<sup>2</sup>]

衛星のスピン 3rpm, 回転軸からの距離 0.3m  
⇒ 遠心力  $1.5 \times 10^{-3}$  [N]

地磁気 最大  $4.6 \times 10^{-5}$  [T] (高度750km)  
磁石 双極子モーメント  $5 \times 10^{-8}$  [Wb m]  
上下磁石磁力の非対称性 10%



x, y方向 共振周波数 : 2.6 Hz  
x軸周り 共振周波数 : 4.1 Hz  
y軸周り 共振周波数 : 8.0 Hz

⇒ 遠心力による軸のずれ 0.1 mm

地磁気トルクによる軸の傾き:  
 $2.0 \times 10^{-5}$  rad

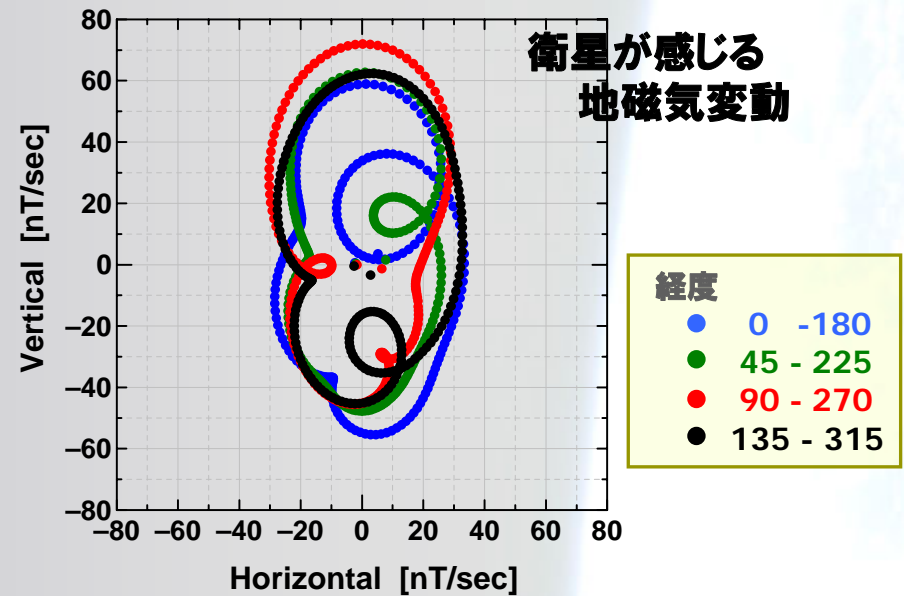
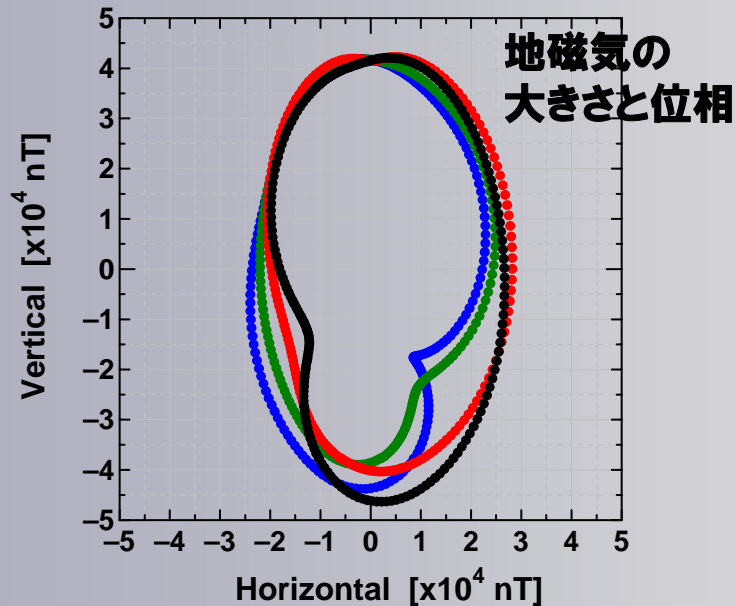
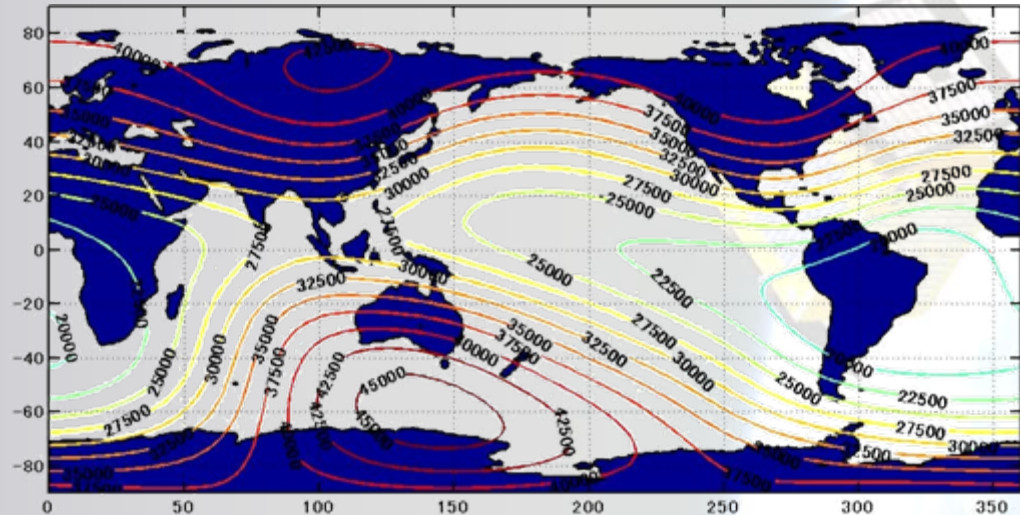
# 衛星搭載重力波検出器 (6)

## ● 地磁気の大ささ

IGRF-10モデル ( $n \leq 13$ )  
Matlabのルーチンを作成

太陽同期極軌道, 高度 750km  
→ 公転周期 99.7 min  
軌道上移動角  $6.0 \times 10^2$  [deg/s]

人工衛星の局所座標系で調べる  
水平方向 (移動方向) → X軸  
鉛直方向 (下向き) → Z軸



# 衛星搭載重力波検出器 (7)

## ●人工衛星軌道

### 太陽同期極軌道

高度750km, 軌道傾斜角 98度

→ 公転周期 99.7 min

軌道上移動角  $6.0 \times 10^2$  [deg/s]

衛星スピン ~3 rpm

間欠的に3軸制御

スピン時にはリアクションホイールは停止

スピン軸：太陽方向

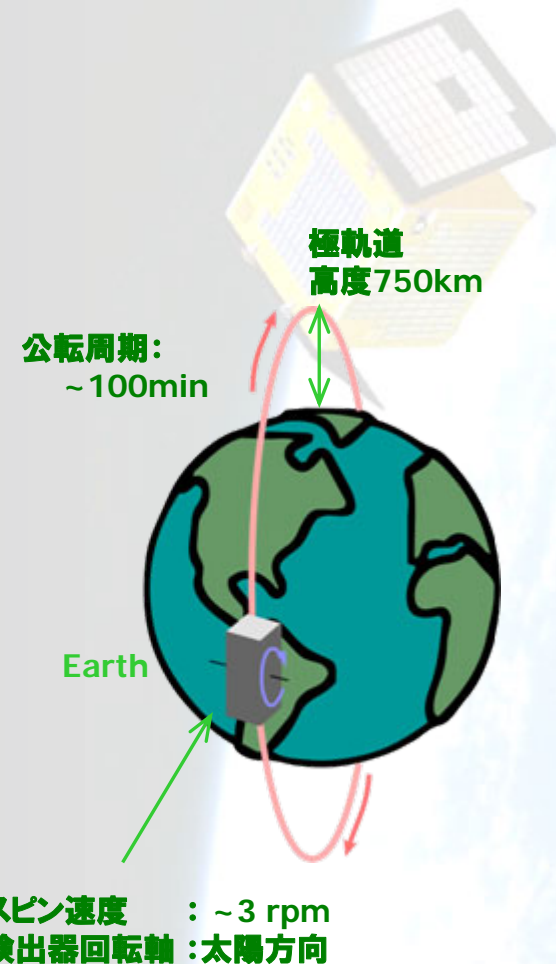
検出器の回転軸は衛星スピン軸と平行

衛星スピン軸からの距離：30cm

データのダウンリンク：

~8bpsを目安

(86kByte/day, 2.6MByte/month)





# 極小重力波検出器 (5)

## ● マスの非接触支持

上下コイルとマスの永久磁石間に引力を働かせる  
→ マスの左右方向の並進, ピッチ(2自由度)  
に対する復元力として働く

上下変動: 不安定な自由度

→ フォトセンサーとアクチュエータを用いて制御

回転方向:

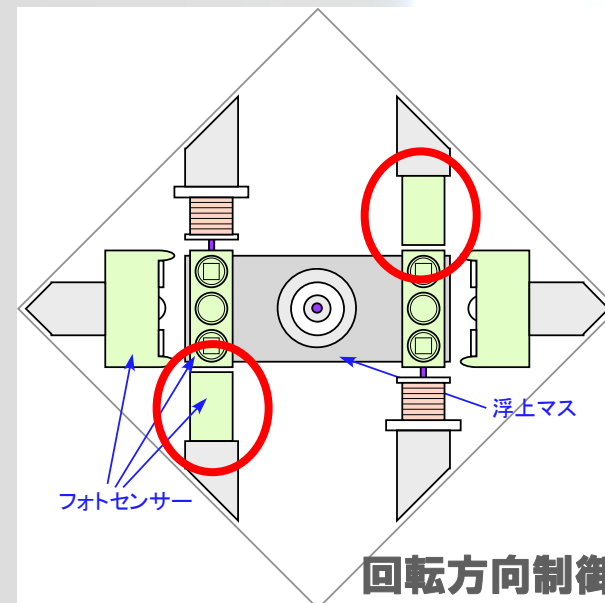
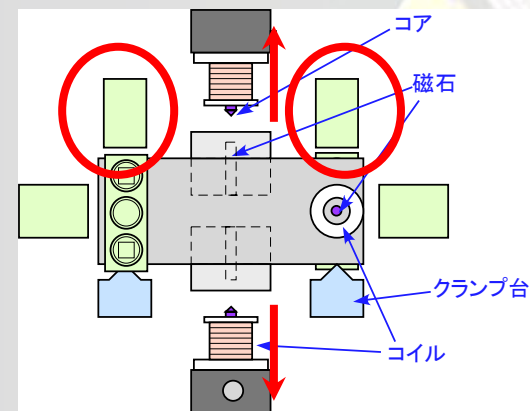
フォトセンサーとアクチュエータを用いて制御

→ フィードバック信号から回転力を読み取る

制御系は、コンピュータ, AD/DAを用いた  
デジタル制御として実装する

→ 軌道上でのチューニングを可能にする

マス保持・  
上下方向制御



回転方向制御