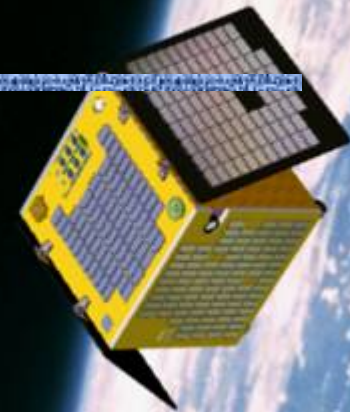


宇宙実験実証プラットフォーム(SWIM)を用いた 超小型重力波検出器の開発



安東 正樹

(東京大学理学系研究科)

高島 健, 森脇 成典, 石徹白 晃治, 穀山 涉,
新谷 昌人, 麻生 洋一, 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

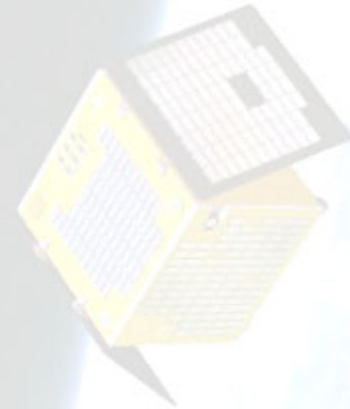
概要

● 衛星搭載用 超小型重力波検出器：SWIM μ v

衛星内に非接触保持された試験マスの
重力波による差動変動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

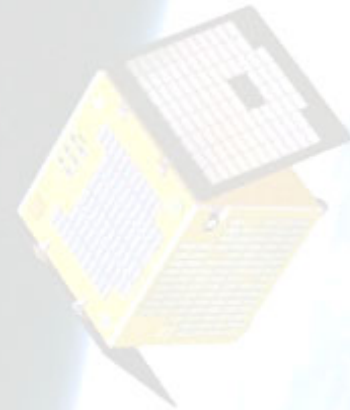
重力波, 搭載衛星, SWIM 超小型重力波検出器 (SWIM $\mu\nu$) 概要 構成要素

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



重力波とその観測 (1)

● 重力波 (時空のさざなみ)

重力波

A. Einstein

光速で伝播する時空の歪み
一般相対性理論から導かれる
(アインシュタイン方程式の波動解)

1916年: アインシュタインが予言
1989年: 連星パルサーの観測
によって存在を証明

質量の加速度運動により生成
強い透過力
(物質との相互作用が小さい)



「重力波天文学」

電磁波による天文学とは質の異なった情報
天体内部のダイナミックな運動の観測
電磁波では見ることのできない初期宇宙

電磁波

J.C. Maxwell

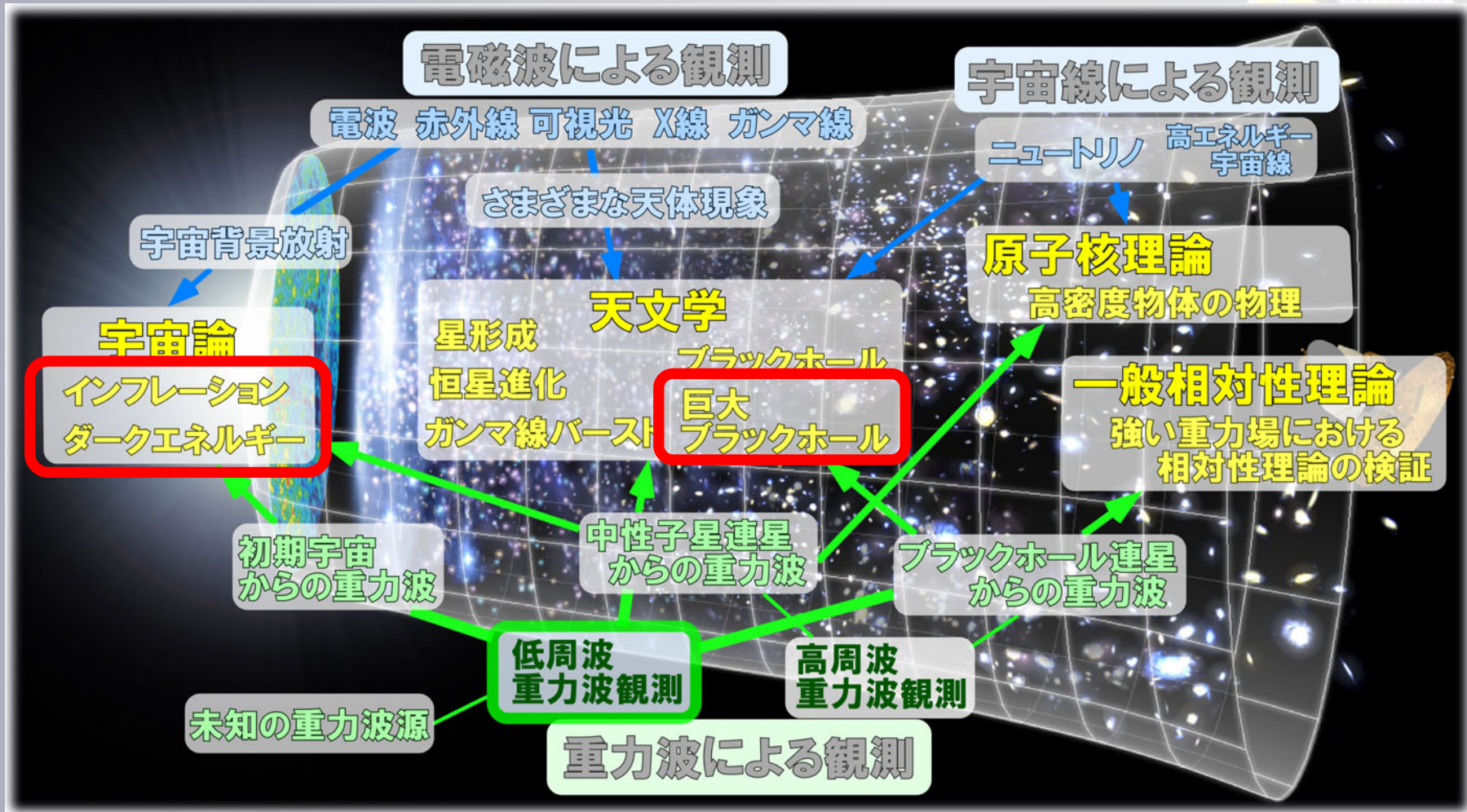
光速で伝播する電磁場の変動
電磁気学から導かれる
(マクスウェル方程式の波動解)

1864年: マクスウェルが予言
1888年: ヘルツの実験で発見

電荷の加速度運動により生成
通信・観測などで広く利用されている

重力波とその観測 (2)

● 重力波による天文学



重力波とその観測 (3)

● 重力波の検出

重力波の効果

自由質点間の距離の変化

大きさを持った物体への潮汐力

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)



これらの性質を利用して検出

共振型検出器

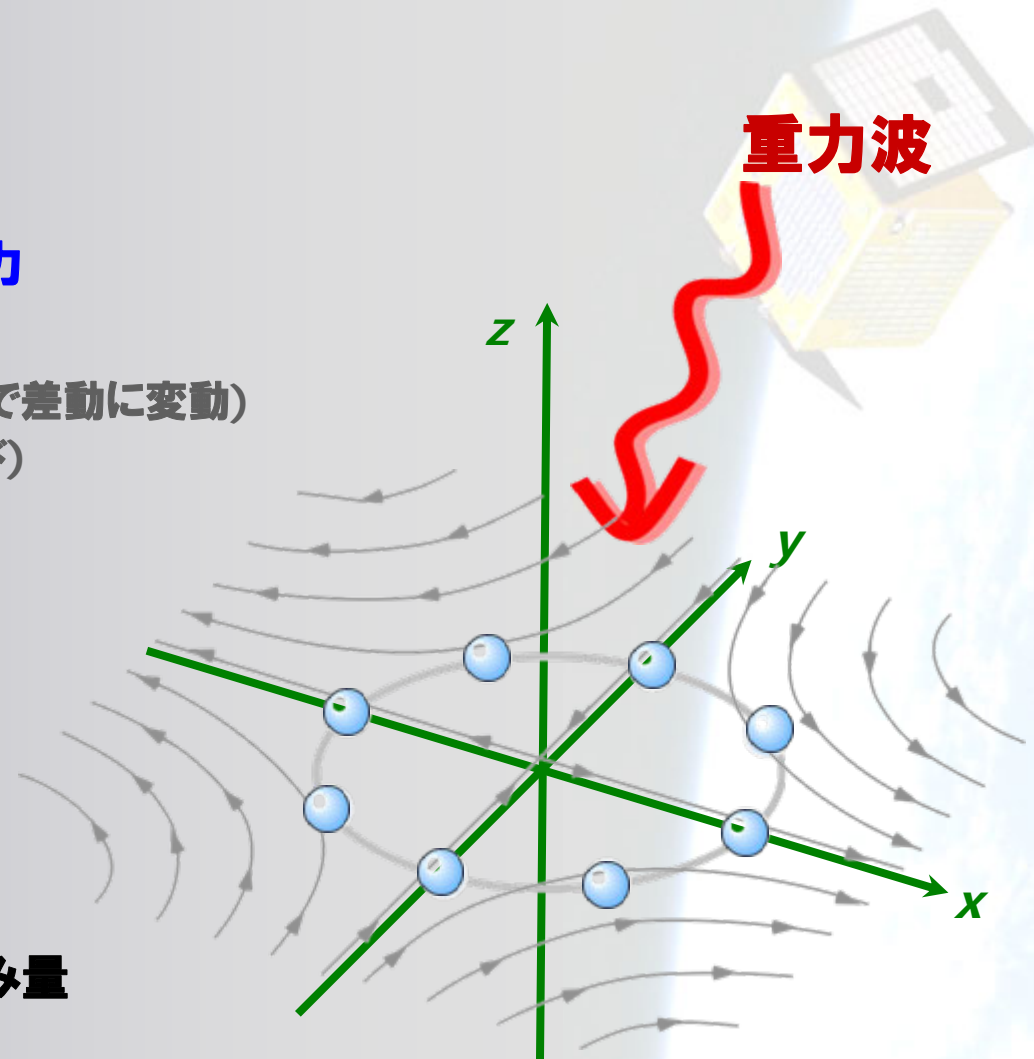
自由質点型検出器

(レーザー干渉計型)

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

$$h = 10^{-21}$$

→ 1mの距離が 10^{-21} m 伸縮する



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

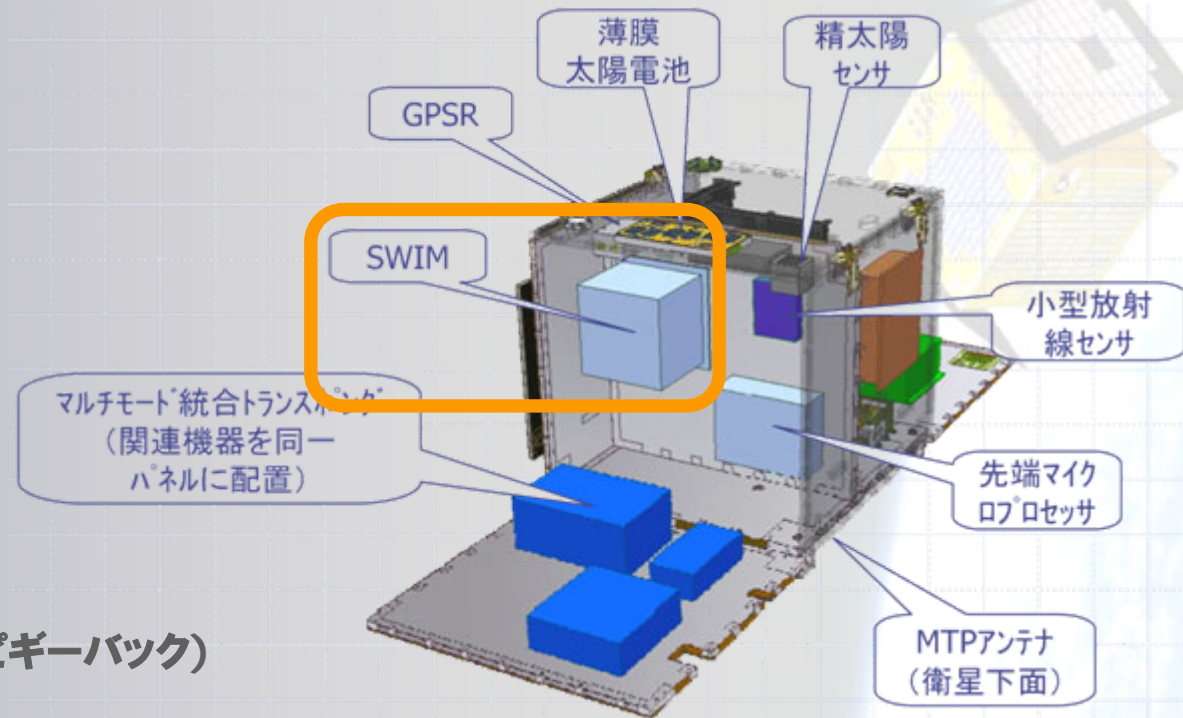
太陽同期極軌道

(軌道傾斜角 98.06°)

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)

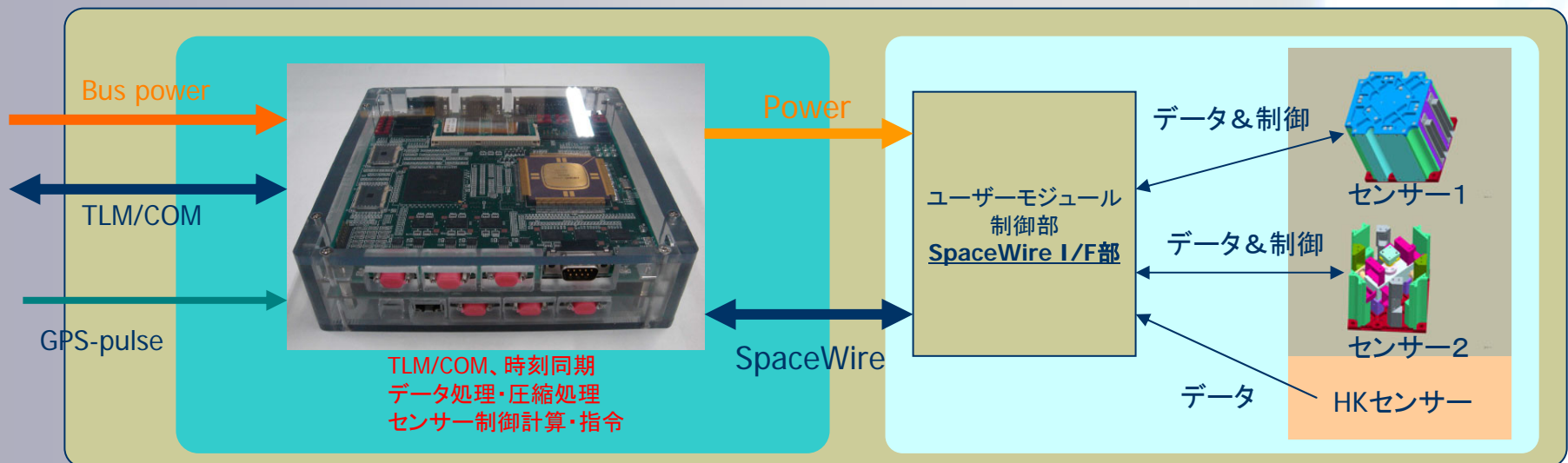
SWIM_μv

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

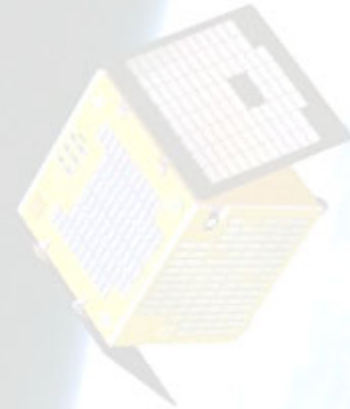


SWIM $\mu\nu$ 概要

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 μ 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

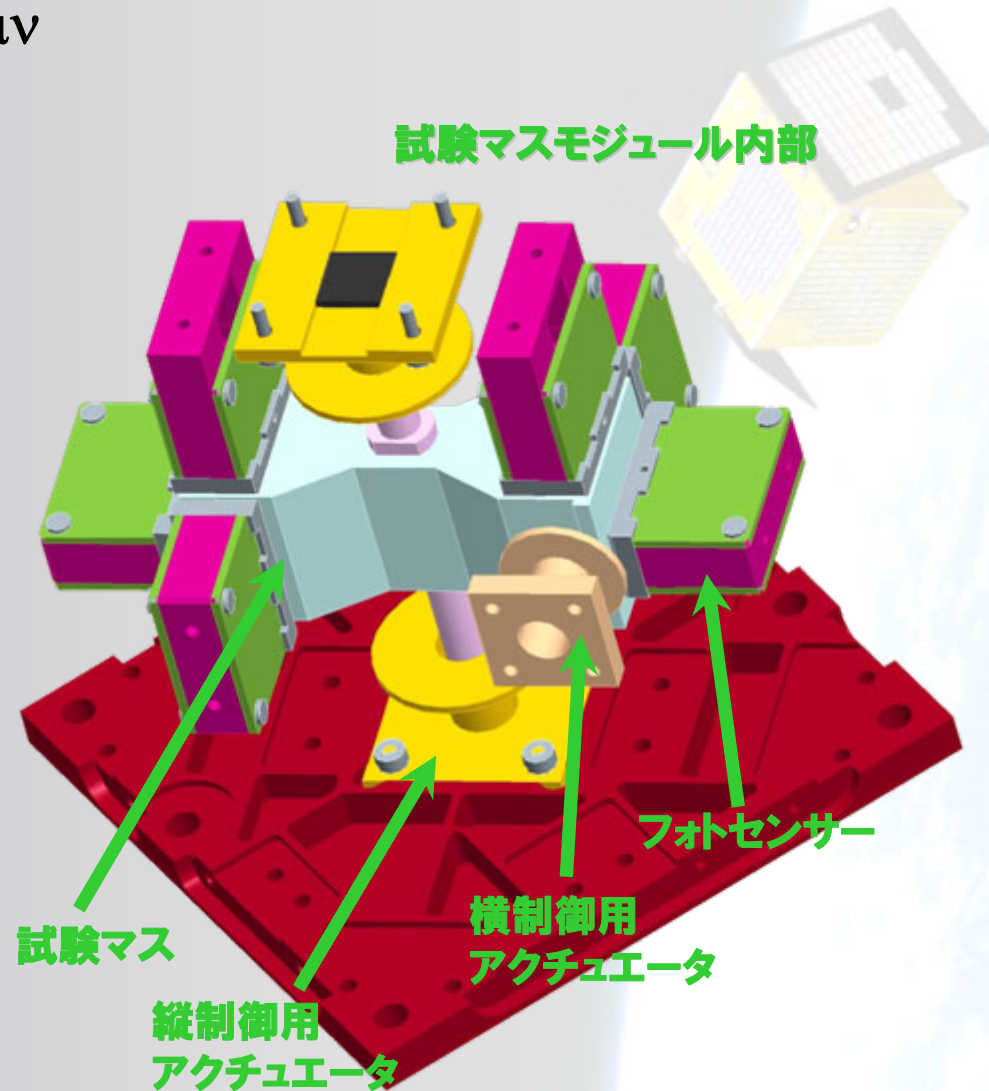
低周波数の重力波や**微小な力**を検出

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

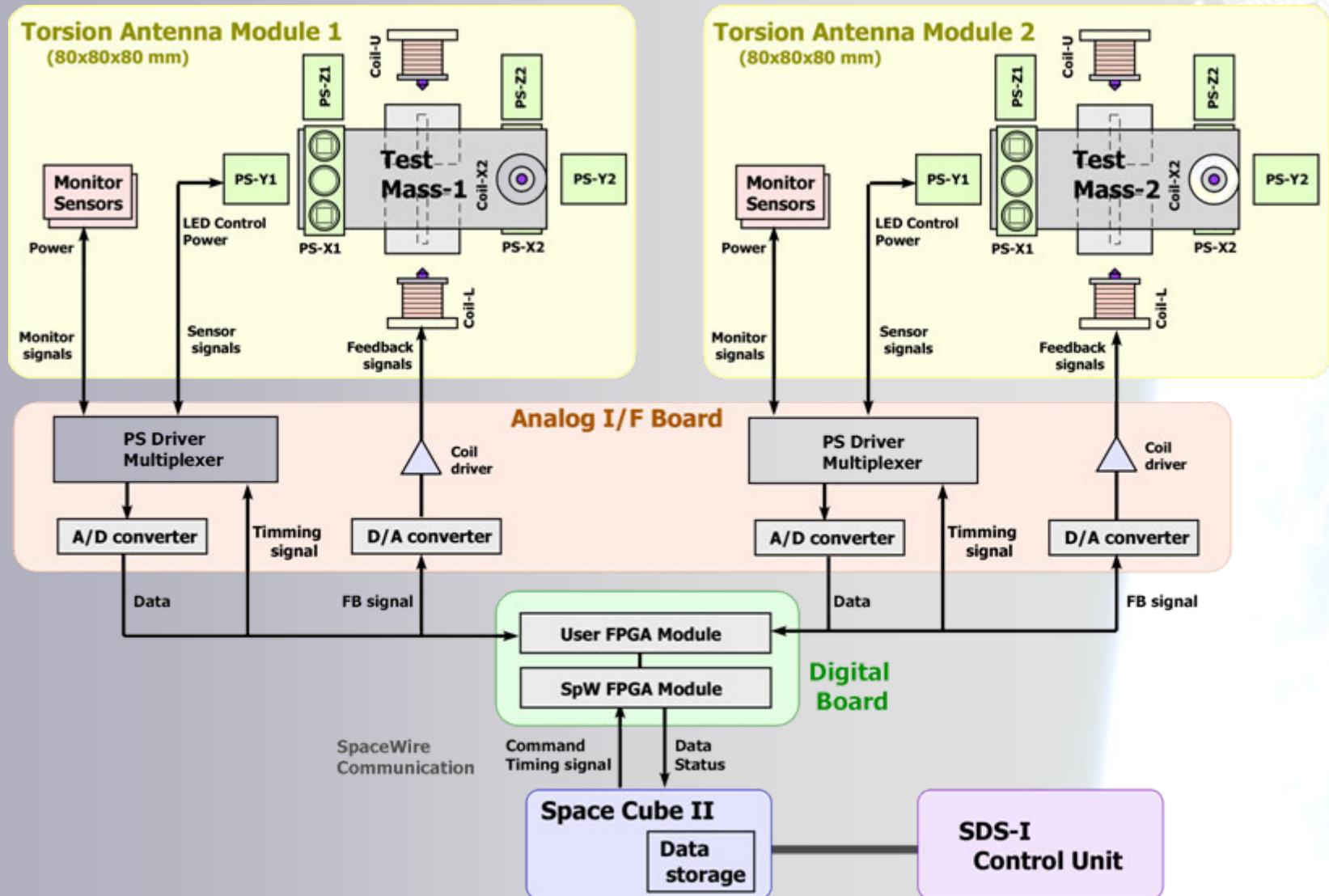
永久磁石の引力を利用して支持

→ **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)

● SWIM μ v 構成図



構成要素

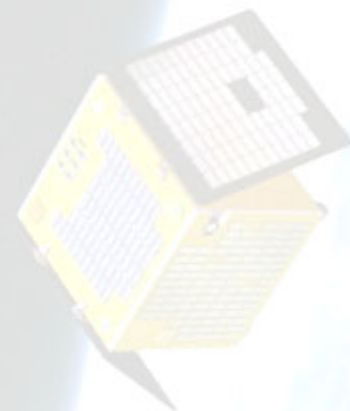
試験マスモジュール

フォトセンサー

アクチュエータ

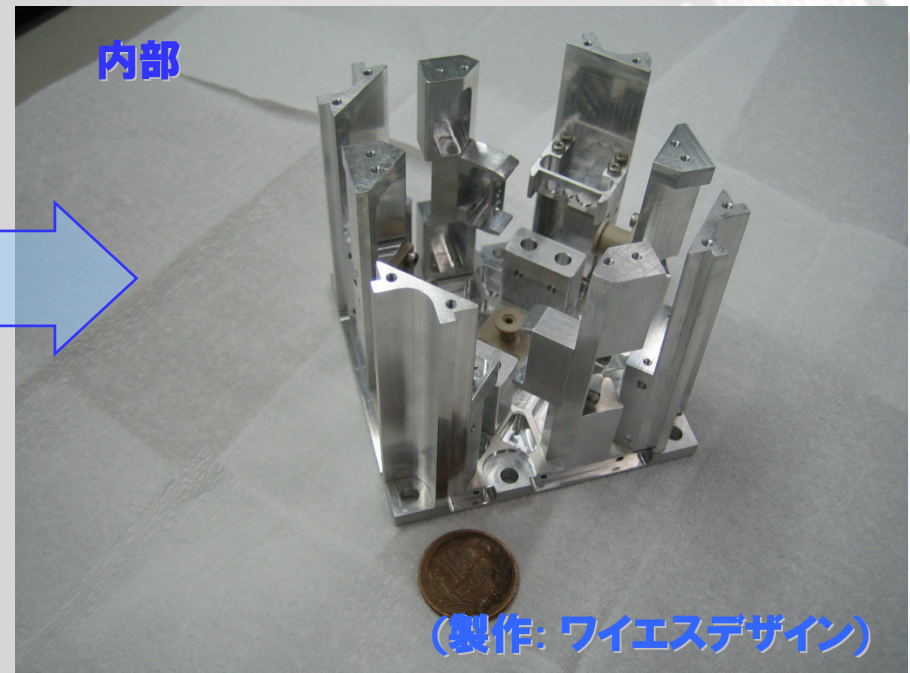
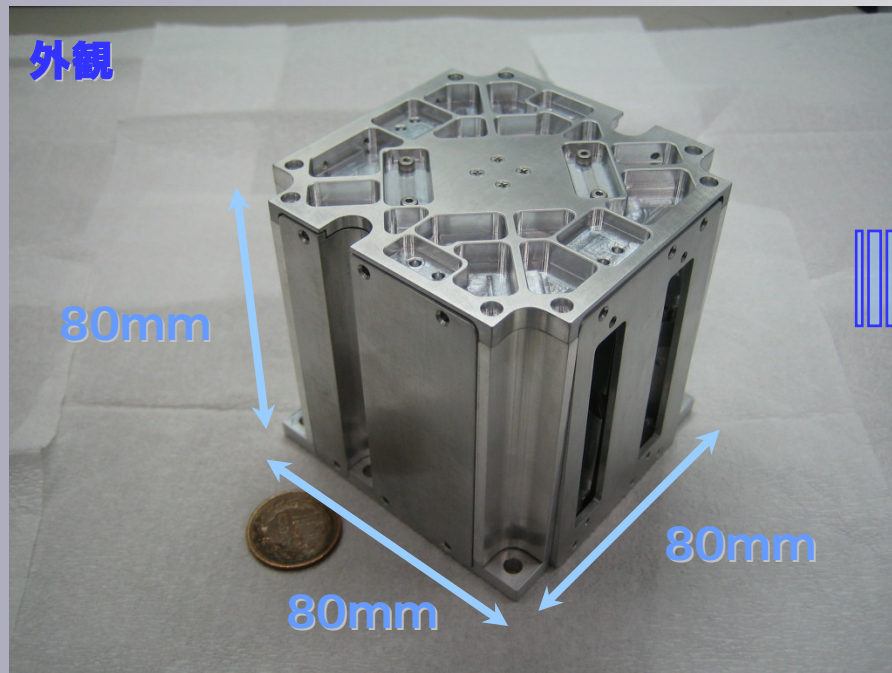
制御・信号処理

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 ± 1 mm

フレーム:
コイル軽量化のための肉抜き

構成要素 (3)

● フォトセンサー

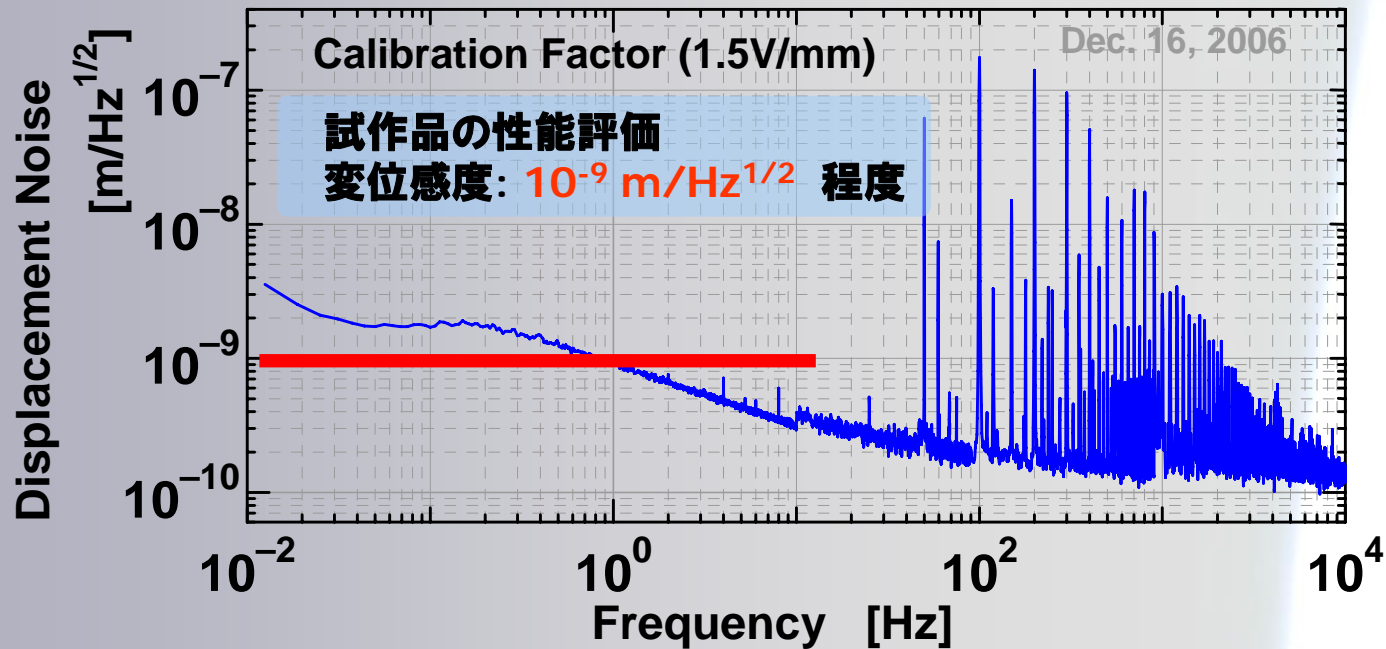
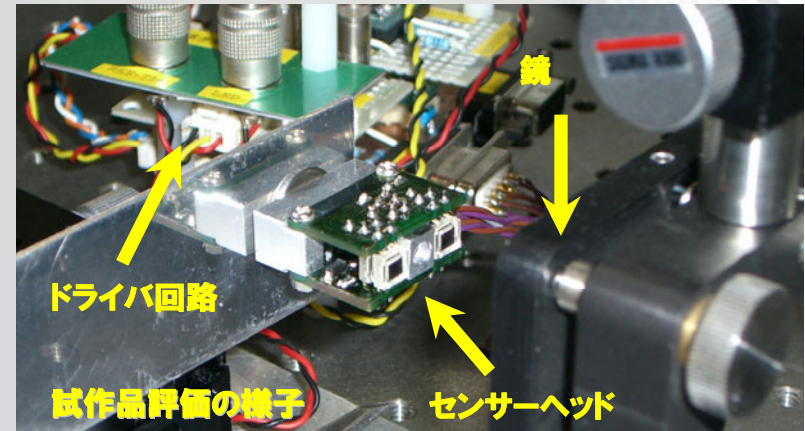
マスの変動を検出するための**反射型センサー**
マスの周りに6個配置され、

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 (約9g, 22x20x10mm)



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

~ 1.5mN

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

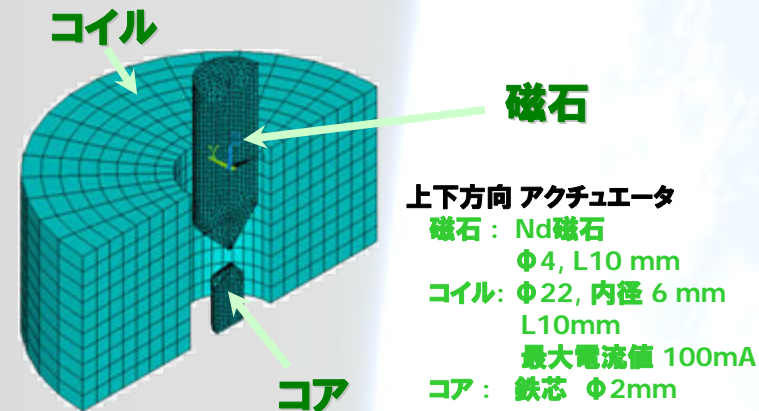
要求: 回転方向の位置制御

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 ~ 0.1mN

⇒ 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)

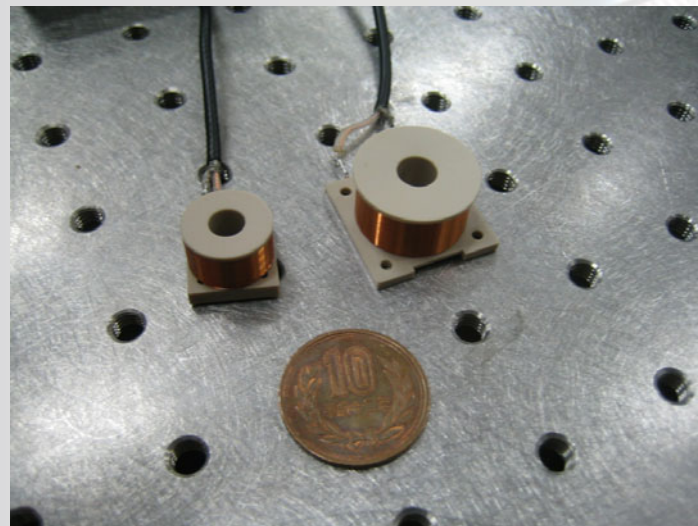
φ0.2, 耐熱180℃

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)

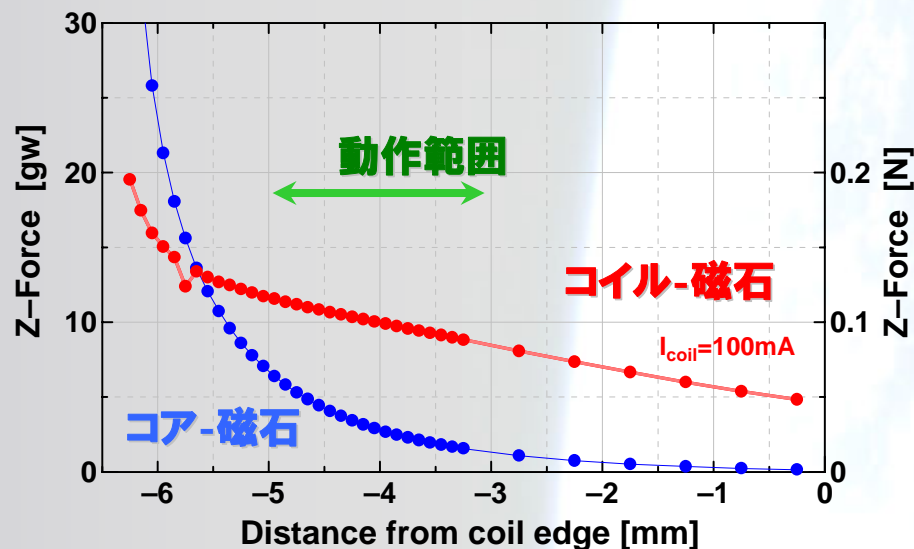
→ 動作範囲で十分なコイル力

(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

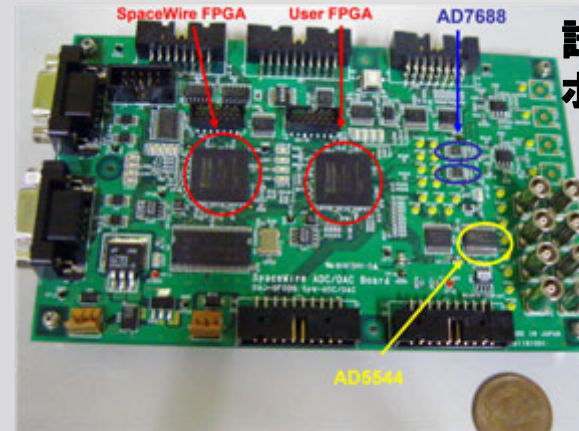
マスの位置制御と信号処理

フォトセンサー出力などを ADC で取得

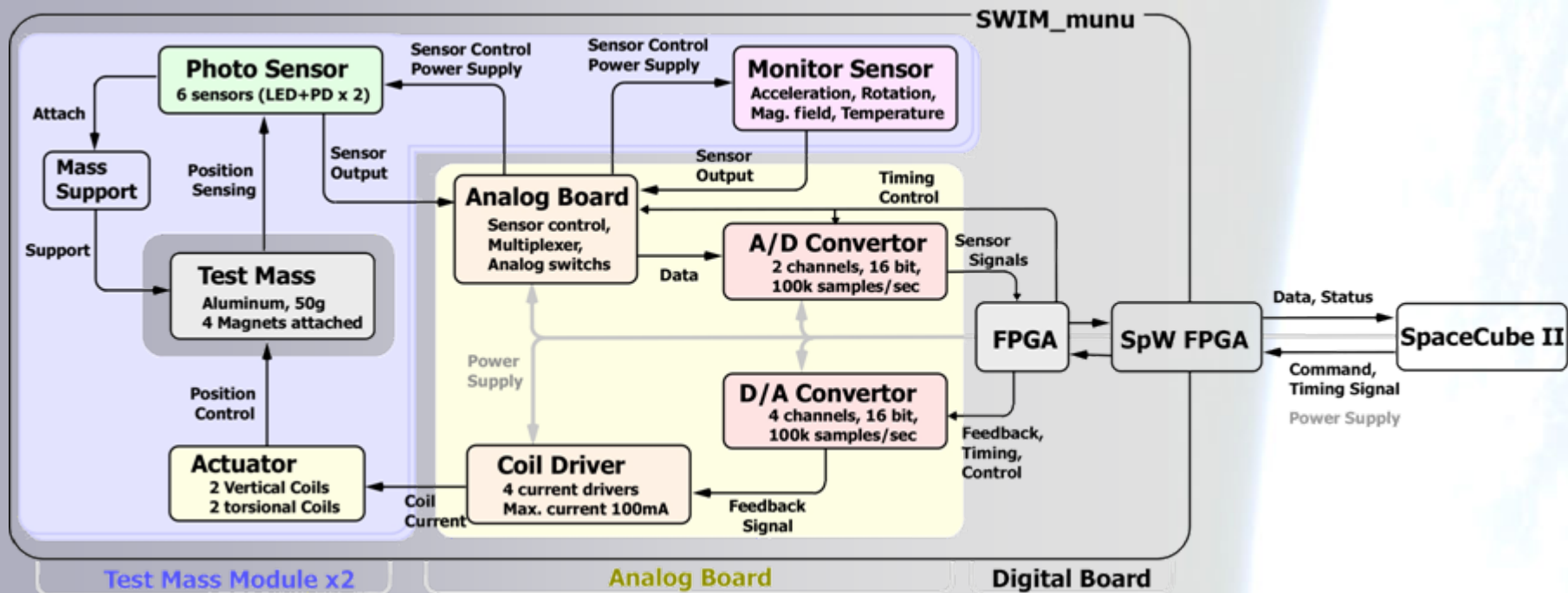
→ FPGA で信号処理 (制御フィルター)

→ 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



まとめ

将来の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

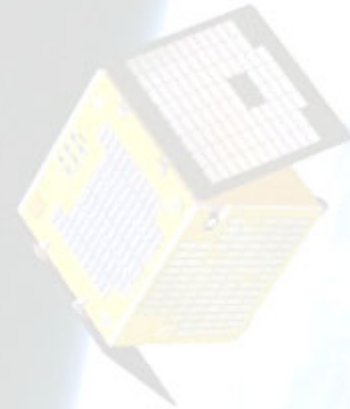
高感度加速度計 → 衛星環境データの取得

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ている



A yellow satellite with solar panels is positioned in the upper right corner, orbiting Earth. The Earth's blue and white surface is visible on the right side. The rest of the image is a dark space filled with numerous small, glowing particles of varying colors (yellow, orange, white) and sizes, representing space debris or meteoroids. The Japanese character '終' (End) is centered in the dark space.

終