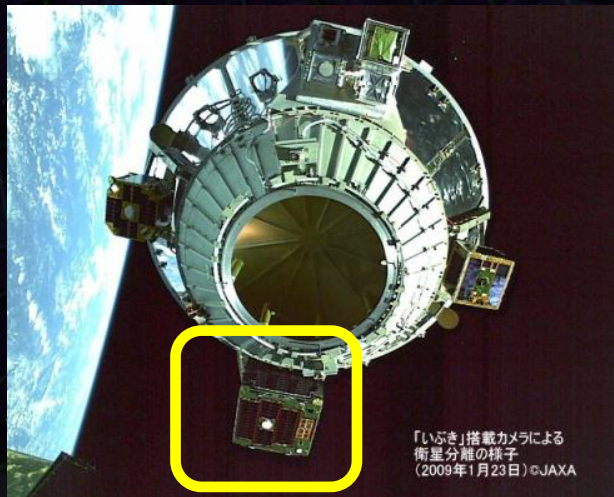
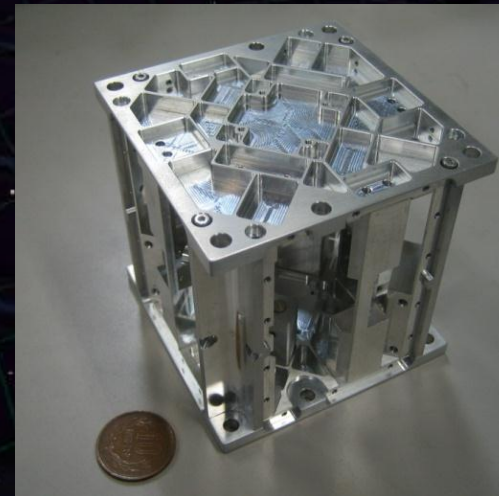


SWIM μ v/SDS-1による重力波観測

「いぶき」搭載カメラによるSDS-1写真 (by JAXA)



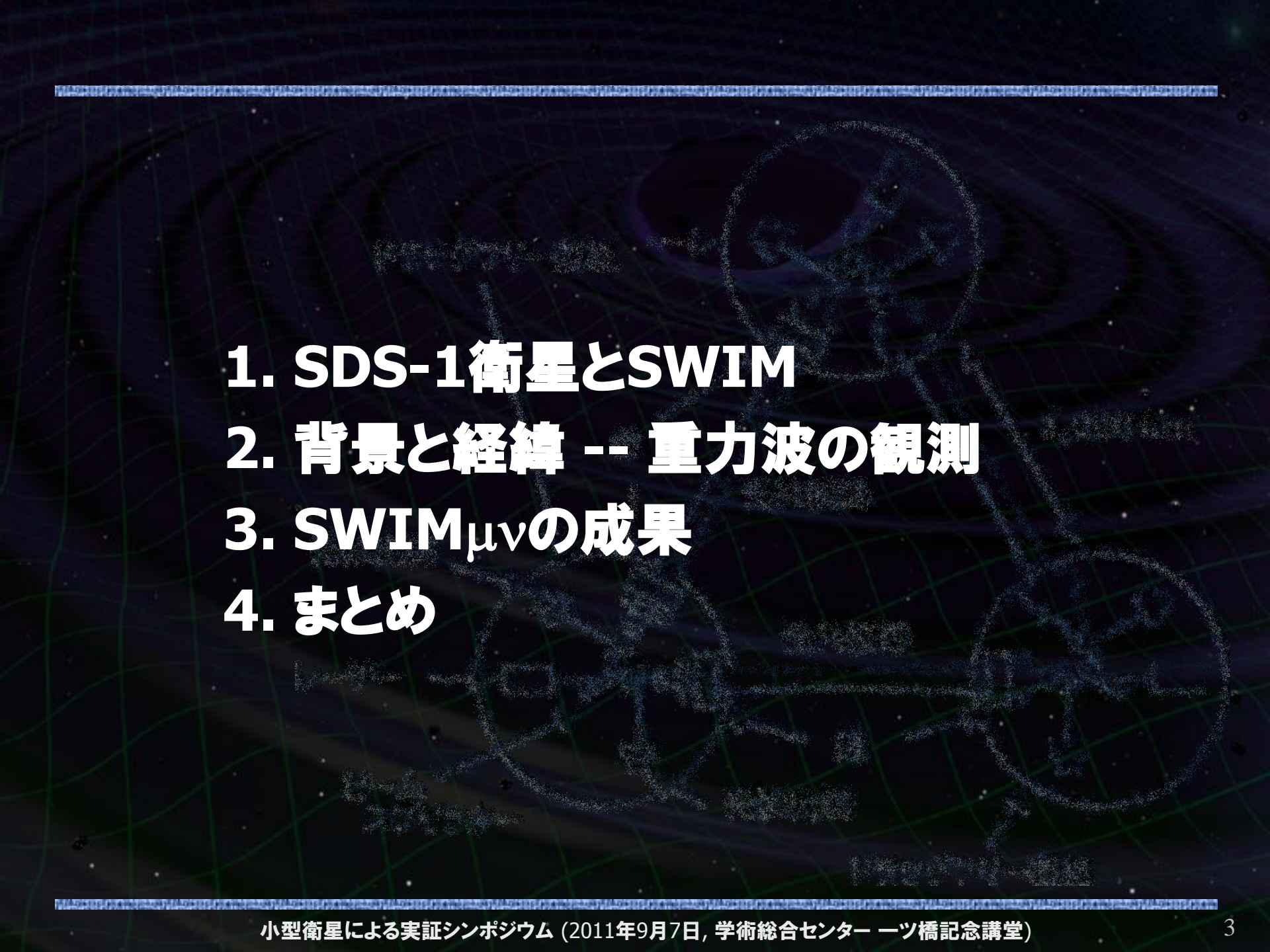
試験マスモジュール

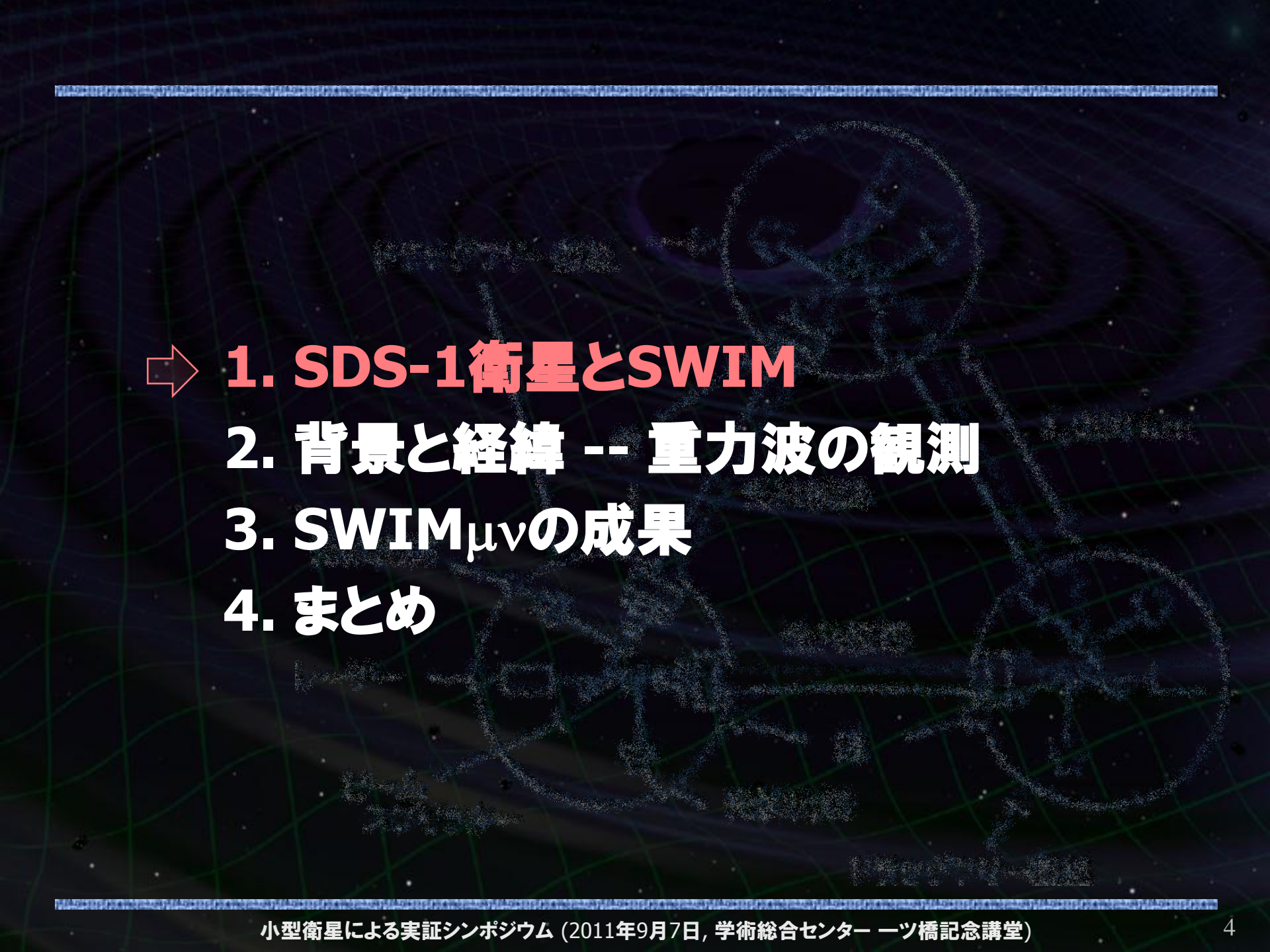


安東 正樹 (京都大), 穀山 渉 (東京大), 高島 健 (JAXA), 他 SWIMチーム

概要

- 小型実証衛星SDS-1には、大学研究室が中心となって開発した、**超小型重力波観測モジュール SWIM μ v** も搭載されていた。
- SWIM μ vでは、当初設定された成功基準を大きく上回り、軌道上での**長時間観測**を行うという科学的成果も得られた。
- SWIM μ vは、これまで宇宙機器開発の経験はないが、本格的な**将来計画**を持っている**重力波天文学**分野において、宇宙への**最初の一步**となった。
- 本講演では、SWIM μ vの概要と意義、経緯と成果をお話します。

- 
1. SDS-1衛星とSWIM
 2. 背景と経緯 -- 重力波の観測
 3. SWIM $\mu\nu$ の成果
 4. まとめ

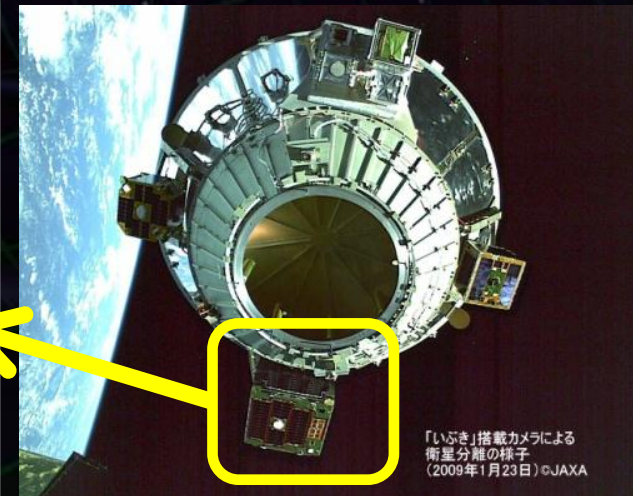
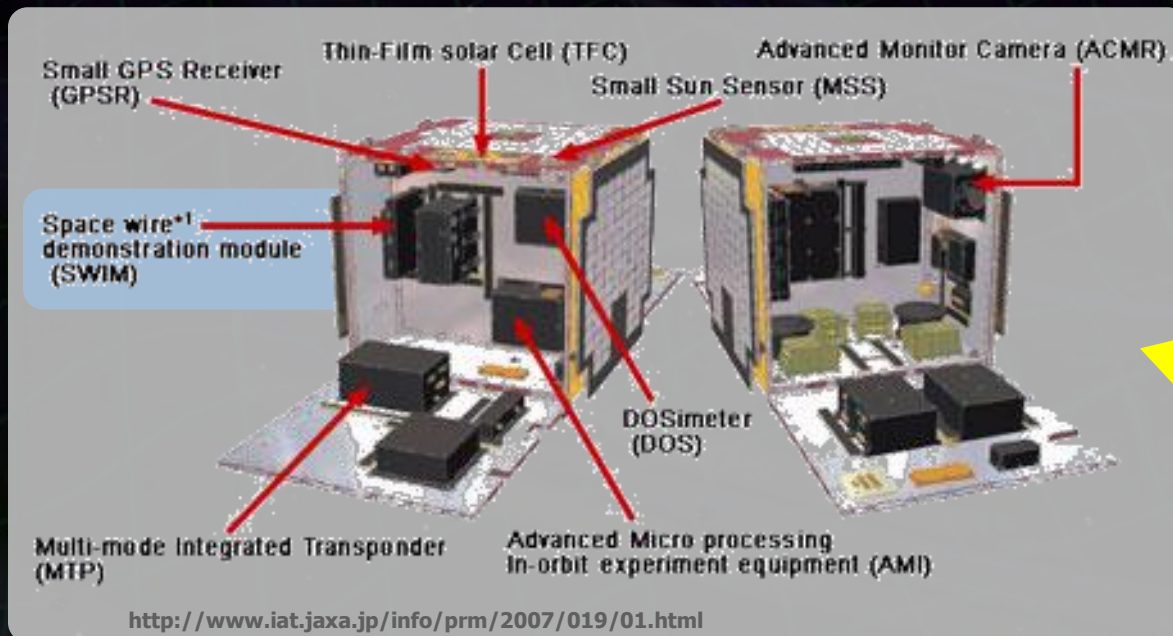
- 
- ⇒ **1. SDS-1衛星とSWIM**
- 2. 背景と経緯 -- 重力波の観測**
- 3. SWIM $\mu\nu$ の成果**
- 4. まとめ**

SDS-1衛星とSWIM

SDS-1 (Small Demonstration Satellite - 1)

- JAXA開発による100kg級の技術実証衛星.
- 相乗り衛星として2009年1月打ち上げ, 2010年9月 停波.
- いくつかの宇宙実証モジュール.

⇒ そのうち1つが SWIM (SpaceWire Interface Demonstration Module)



「いぶき」搭載カメラによる SDS-1写真 (by JAXA)

スペースワイヤ実証モジュール SWIM

SWIM (SpaceWire Interface Demonstration Module)

- 次世代通信・信号処理規格 スペースワイヤ の宇宙実証モジュール。
SpaceCube2 : 宇宙用計算機 (ISAS/JAXAとNECの共同開発)
SWIM_{μv} : SpaceWire通信ターゲットとなる観測装置。
→ 重力波観測モジュールを搭載。
- 大きさ 約200mm立方, 重量 約5kg.
- ISAS/JAXA, NEC, MHIの共同研究開発によって実現.

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

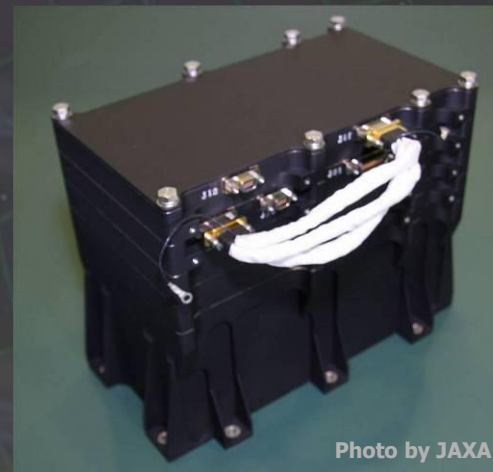
~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W



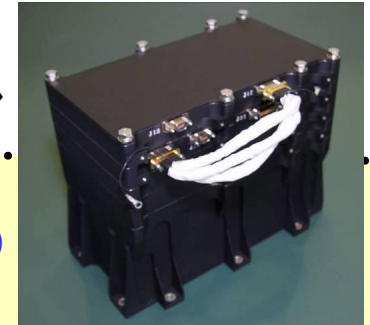
SWIMの構成

SpaceCube2: 信号処理計算機



SpC2-SWIMmn 間で
SpaceWire通信。
通信速度:~1Mbps

SWIM_{μv} : 重力波検出器モジュール



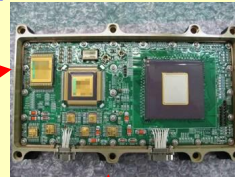
試験マスモジュール×2



フィードバック信号

エラー信号

SpaceWire検証基板



アナログ回路(DAC類)

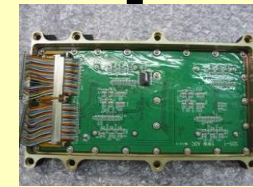


SpW



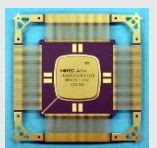
デジタルボード

アナログ回路(ADC類)

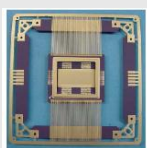


- PSU + CPUボード + DataRecordボードからなる
- JAXA開発のHR5000(CPU), Burst-SRAMを搭載。OSにはTRONベースのeT-kernelを採用。
- SpaceWire I/Fは3ポート備えており、SWIMmnとは2ポートで接続し、冗長通信機能を実証。
- ミッションデータの一時保存を目的としたデータレコーダ(1GB)を持ち、フレキシブルな運用を実施。

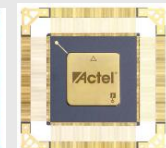
宇宙用部品



HR5000
33MHz



Burst
SRAM



Actel RTAX2000
(SpaceWire I/F)



Test mass

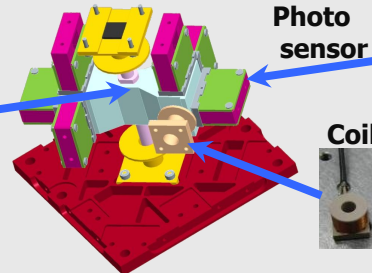
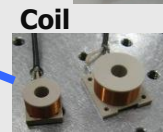


Photo sensor



Coil

試験マスモジュール

- 47gの試験マスを内蔵。
- フォトセンサで変動を測定し、コイルにフィードバックすることで非接触制御。
→ 重力波検出器/加速度計。
- 信号はデジタルボードに蓄えられ、SpW通信によってSpC2へ送られる。

SWIMの目的と成果

目的

JAXAが宇宙用に開発した高速MPUを用い、新しい国際標準の一つになりつつあるスペースワイヤ規格を発展させた次世代ネットワーク型データ処理技術の実証と、そのデータ処理技術を活用した超高感度加速度計による重力波計測装置の動作実証試験。

成果（計画以上の成果を達成）

- スペースワイヤを標準サポートする宇宙用計算機SpaceCube2の宇宙機への適用のめどを得た。
- 将来の科学衛星のミッション達成のために重力波検出器の動作原理・性能評価の成果を得た。
- 宇宙-地上同時の重力波観測運転を実施し、世界に例のない観測手法の成立性を確認した。

1. SDS-1衛星とSWIM

⇒ 2. 背景と経緯

- 重力波の観測と宇宙ミッション

3. SWIM $\mu\nu$ の成果

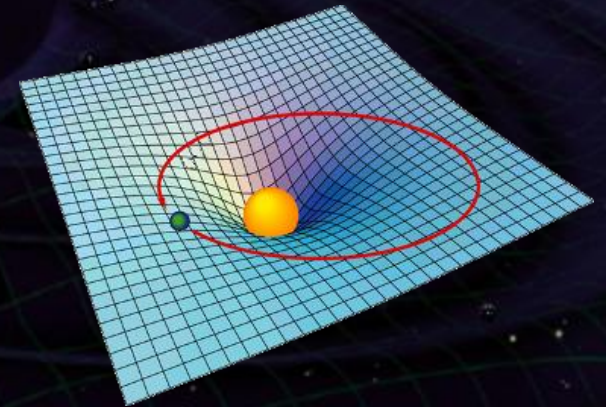
4. まとめ

重力波とその観測

重力波

時空の歪み(重力場)が波として伝わるもの。
質量の加速度運動で生成される。

(高エネルギー天体現象, 初期宇宙)



重力波による天文学

非常に強い透過力 → 天体現象内部, 初期宇宙の直接観測。
電磁波による観測とは異なった情報

→ 重力波独自の観測, 電磁波と相補的な観測。



宇宙の起源・進化と成り立ちに迫るための新しい目

初期宇宙の観測



重力波観測の現状

地上重力波望遠鏡

10Hz – 1kHzの高い周波数帯で観測.

→ コンパクト・高エネルギー天体現象が観測対象.

連星の合体, 超新星爆発, 恒星質量ブラックホール
本格的な観測 2000年頃から世界各地で実施されている.
欧米・日本などで次世代望遠鏡へのアップグレード進行中

→ 約5年後には稼働, 年間10回以上の**重力波検出が予想される.**

宇宙重力波望遠鏡

欧州のLISA, 日本のDECIGOなど計画進行中.

長基線長が可能, 地面振動の影響がない

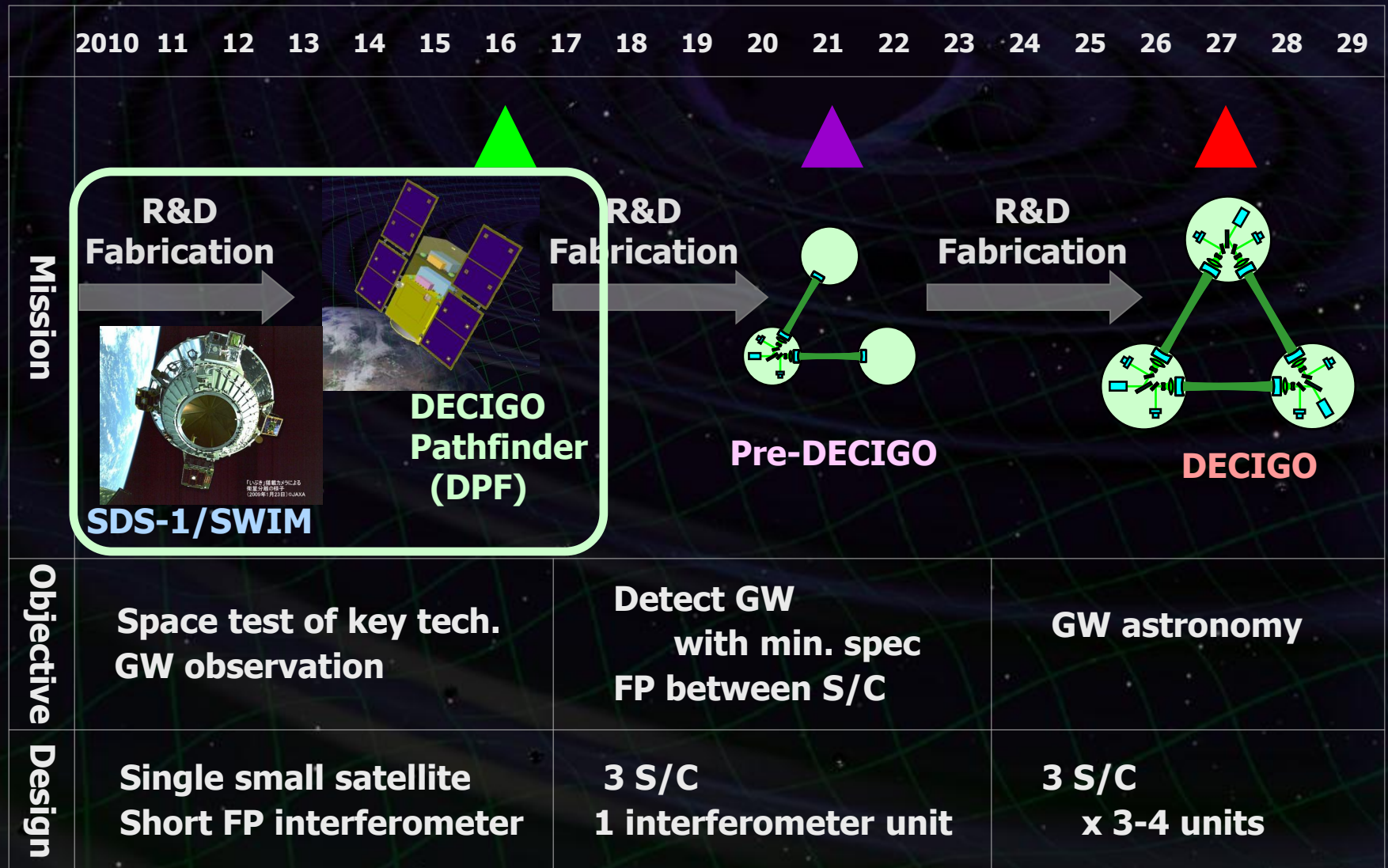
→ 1Hz以下の**低周波数の重力波観測が可能.**

→ 巨大ブラックホール, 初期宇宙が主な観測対象.

他の手段では得ることができない**豊富な科学的知見**が期待できる.

DECIGO計画のロードマップ

Figure: S.Kawamura



経緯と体制

・経緯

2005年頃, JAXA/ISASで、SWIMの検討がはじめられた。

- 小規模実験から本格的な衛星ミッションまでスケラブルなシステム。
- USB機器のように手軽に接続・使用できる信号処理システム。
 - スペースワイヤ通信の相手となる観測機器を、これまでに宇宙機器開発を経験したことが無いグループが開発する「社会実験」として重力波分野に声をかけて頂いた。

・体制

- SWIM全体は, JAXA/ISAS, NEC株式会社, 三菱重工業株式会社の3者の共同開発研究。
- SWIM μ vセンサ部, 信号処理・制御ソフトウェア部は, JAXA/ISASの取りまとめと日本SpaceWireユーザー会, 関係企業の協力のもと、重力波グループで開発。
 - 東京大, 京都大, お茶の水女子大, 国立天文台, 法政大など。

1. SDS-1衛星とSWIM

2. 背景と経緯 -- 重力波の観測

⇒ 3. SWIM $_{\mu\nu}$ の成果

4. まとめ

SWIM μ v センサーモジュール

超小型重力波検出器 (ねじれ型検出器)

SpW 通信の宇宙実証のためのセンサーモジュール

将来の宇宙重力波望遠鏡のための最初のステップ

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

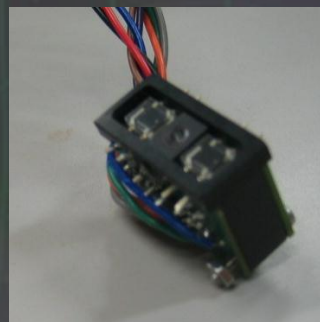
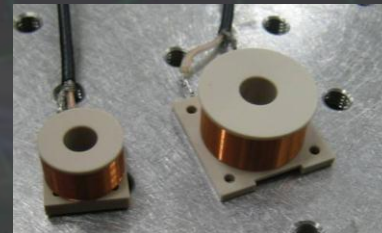


Coil

Used for test-mass position control
Max current ~100mA

Photo sensor

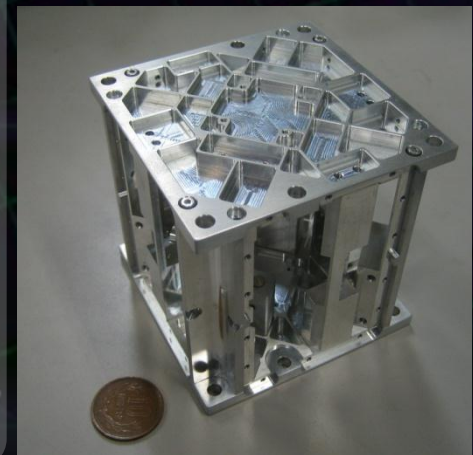
Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz $^{1/2}$
6 PSs to monitor mass motion



SWIMmn Module

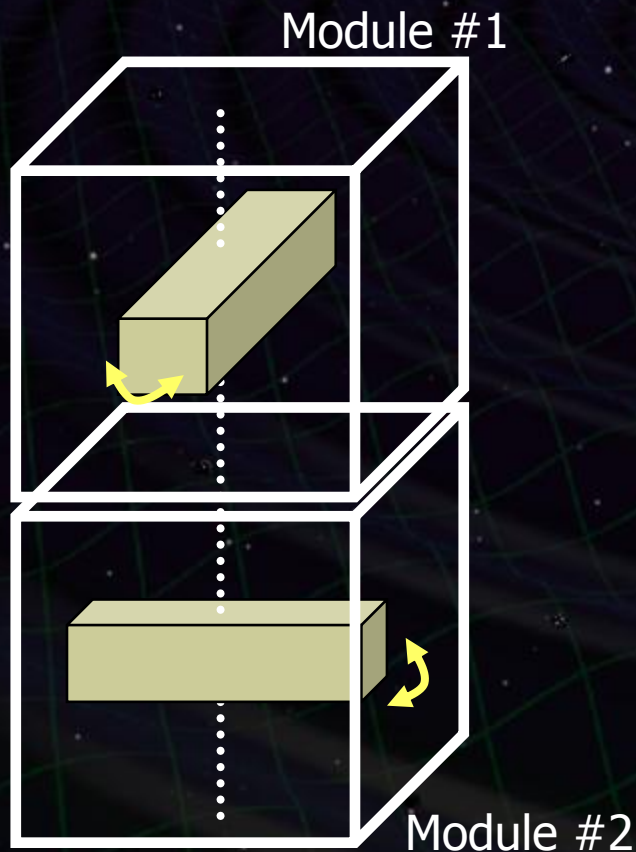


2 TAMs in the frame



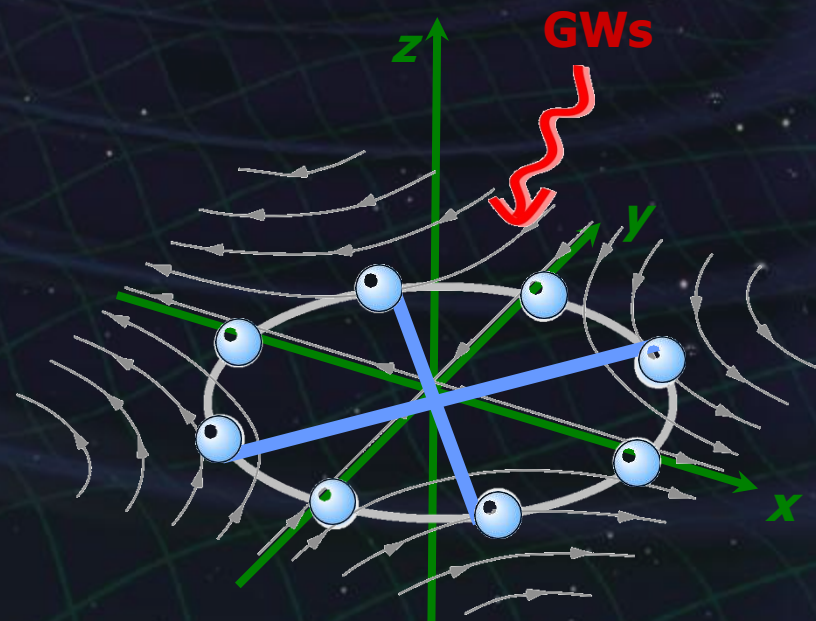
振じれ型重力波望遠鏡

重力波による潮汐力変動を観測



SWIMmn : Two floating test masses placed orthogonal to each other

Torsion Detector
Detect differential rotation



差動振じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

SWIM_{μν}の目的と成功基準

・目的

スペースワイヤ規格を用いたデータ処理技術を活用した
超高感度加速度計による重力波計測装置の動作実証試験。

・成功基準

- ミニマム・サクセス

スペースワイヤ通信機能動作の確認。

- フル・サクセス

重力波センサモジュールの制御およびデータ取得機能の確認。

- エクストラ・サクセス

衛星3軸姿勢制御時とスピン姿勢安定時それぞれにおいて、
重力波センサモジュールにより微小振動環境データの取得。
センサの特性・性能の軌道上評価、軌道上劣化など、将来
計画へ向けた実証データの取得。

SWIM_{μv}の運用実績

・運用実績

定常運用 (2009.2 - 2009.9)

データの取得, 試験マスの制御動作, 制御特性の評価.

後期運用 (2009.10 - 2010.3)

試験マスの制御特性・雑音特性の評価とチューニング.

観測運用 (2010.4 - 2010.9)

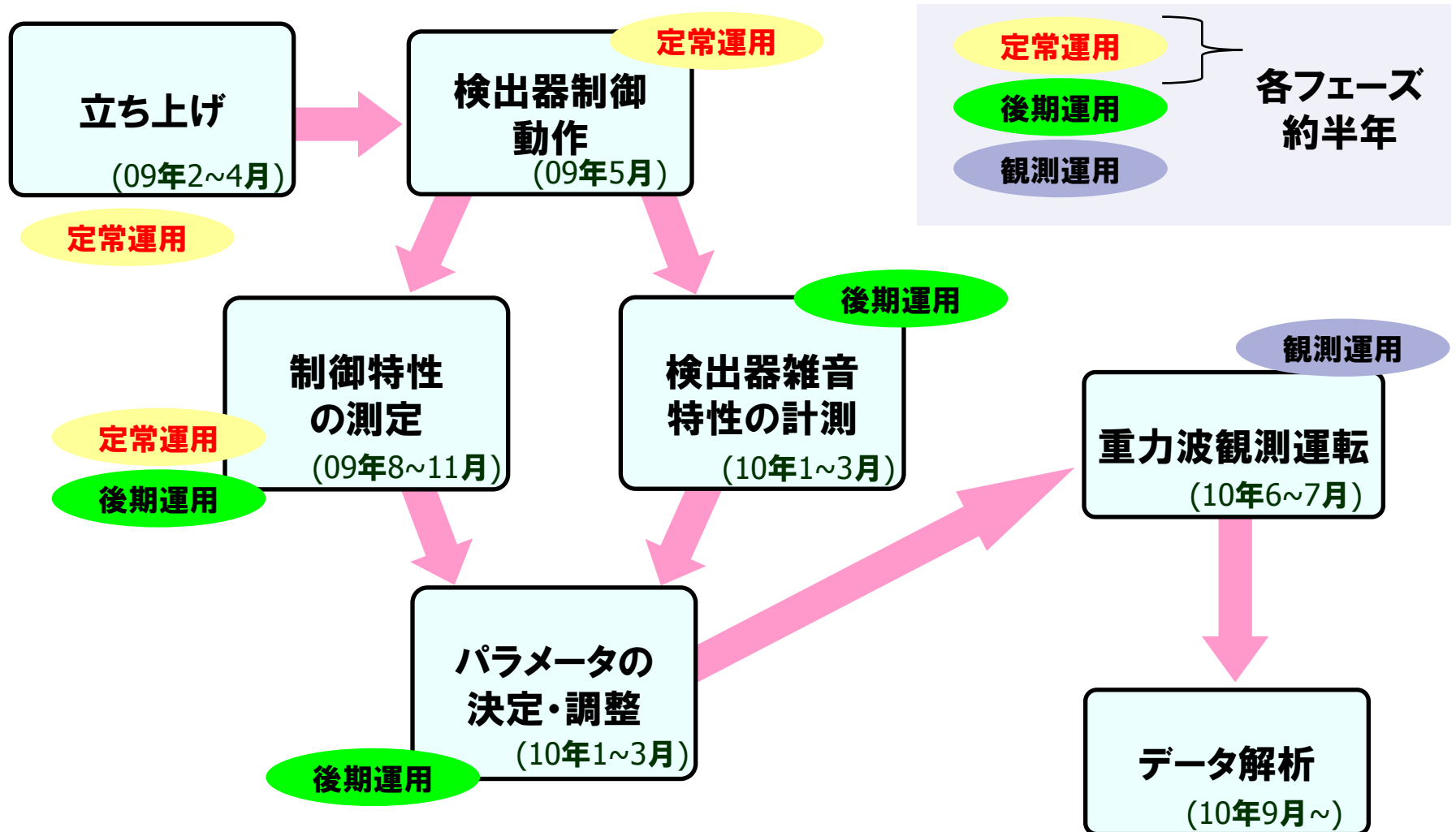
長時間連続観測運用.

・合計運用実績 (2009年2月~2010年9月)

- CMD運用 : 41回
- SWIM ON : 計57.4時間, SpW アクセス : 約240万回、約2GB以上
- SWIM_{μv}マス制御 : **約15.1時間**, データダウンリンク : **約20MB以上**

⇒ **当初設定した成功基準を上回る成果**

SWIM運用の流れ



SWIM運用サマリ

SWIM運用実績		20100907 運用終了時		概算・推定					
月	CMD運用	SWIM ON	SpW回数	SpWデータ量	mnON	LED ON	マス制御	DL量	
単位	回	Hrs	回	Mbyte	sec	sec	sec	Mbyte	
2	8	8.3	78192	18	未集計	未集計	50	0.43	
3	3	1.4	21344	11	未集計	未集計	100	0.96	
4	6	2.8	189120	165	未集計	未集計	400	2.57	
5	2	15.8	137312	23	未集計	未集計	50	1.1	
8	5	3	124000	100	未集計	未集計	1939	1	
定常運用	24	31.3	549968	317	0	0	2539	6.06	
10	5	3.42	124443	100.89	11851	11449	2858	1.33	
11	2	1.86	62111	49.19	6525	6465	1200	1.32	
12	2	2.58	52957	35.26	9300	6228	2028	1.86	
1	2	2.03	88606	74.29	7145	7085	2885	1.57	
2	2	2.93	242121	220.40	10381	10321	6111	1.58	
3	2	3.54	224528	198.78	12575	12515	8315	2.69	
後期運用	15	16.35	794766	678.81	57777	54063	23397	10.35	
6	1	3.69	363128	335.07	13195	13165	10640	1.27	
7	1	6.10	717267	669.76	21895	21865	17840	2.99	
観測運用	2	9.79	1080395	1004.83	35090	35030	28480	4.26	
合計	41	57.4	2.4	2001	25.8	24.7	15.1	20.7	
	回	Hrs	× 10 ⁶ 回	Mbyte	hours	hours	hours	Mbyte	
			(程度)		(以上)	(以上)	(程度)	(以上)	

SWIM μ vの成果と意義

・重力波検出器の安定動作

延べ15時間以上の制御動作。

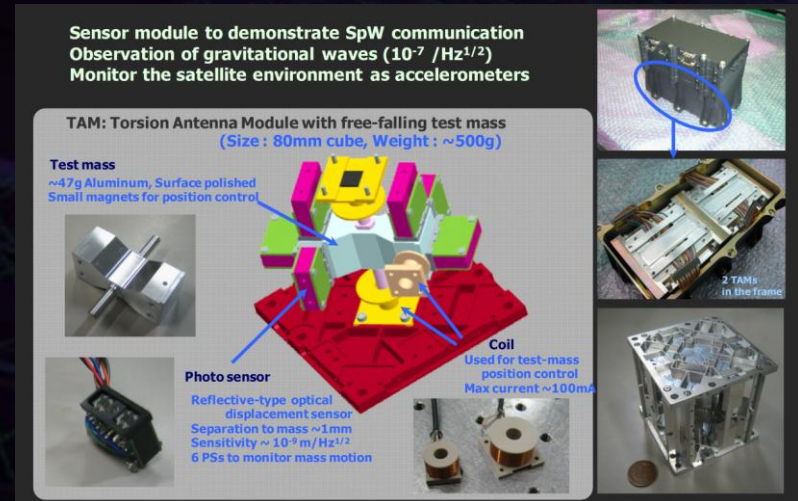
装置特性: 制御特性, 雑音特性, 校正値。

衛星環境評価: 振動・スピン, 温度変動。

→ 世界で初めての宇宙重力波検出器

重力波検出器の根幹技術の実証。

- ・微小重力下での非接触制御。
- ・宇宙環境での低雑音計測 (μ radの精度)。



・重力波検出器による観測運転

延べ 地球3周回分以上の長時間観測。

地上観測装置との同時観測。

→ 衛星による初めての観測データ。

将来計画に必要な基礎データ。
データ解析手法の確立に貢献。

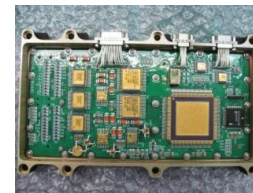
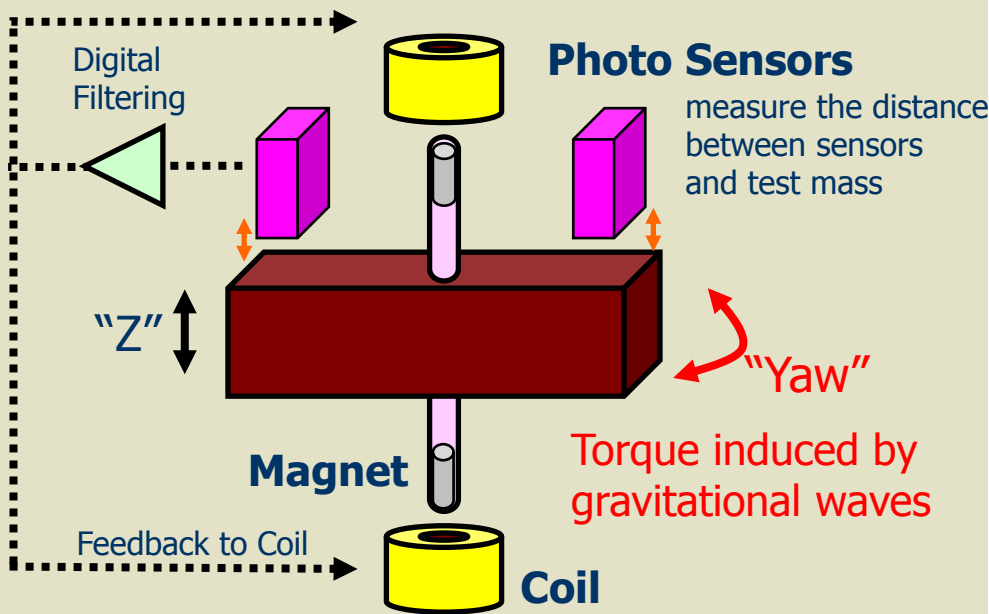
- ・衛星の軌道・姿勢運動の効果。
- ・地上観測装置との相関解析。

	ねじれ型重力波検出器A (地球周回軌道, 2009年-)	ねじれ型重力波検出器B (東京大学, 2008年-)	ねじれ型重力波検出器C (京都大学, 2010年-)
試験マス			
変動検出 位置・姿勢	質量 50g, 長さ 5cm 無重力浮上 + 制御 反射型フォトセンサ スピン + 軌道運動	質量 150g, 長さ 20cm 超電導磁気浮上 + 制御 レーザー干渉計 地上静電観測	質量 340g, 長さ 25cm 超電導磁気浮上 + 制御 レーザー干渉計 地上静電観測

試験マスの非接触制御

Vertical ("Z") and rotational ("Yaw") DoF: feedback-controlled
The rest four DoF: passively stabilized by magnetic potential
Feedback system with digital PID filter implemented on FPGA

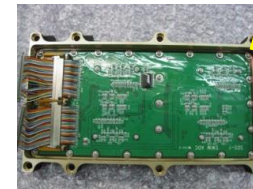
Schematic View of "Z" Control



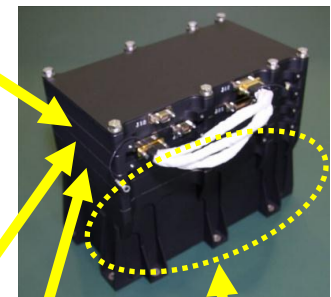
FPGA (Digital Filter) and SpaceWire I/F



DACs and Coil drivers



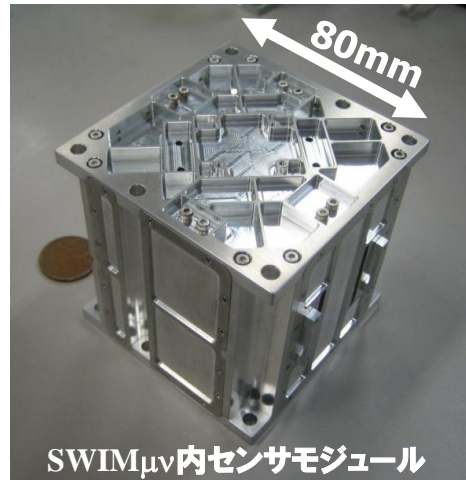
ADCs and Multiplexers



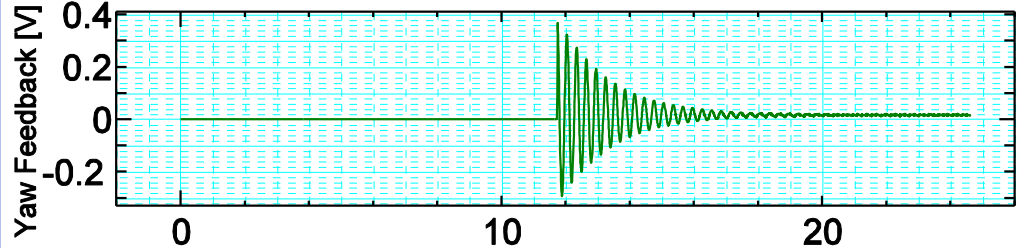
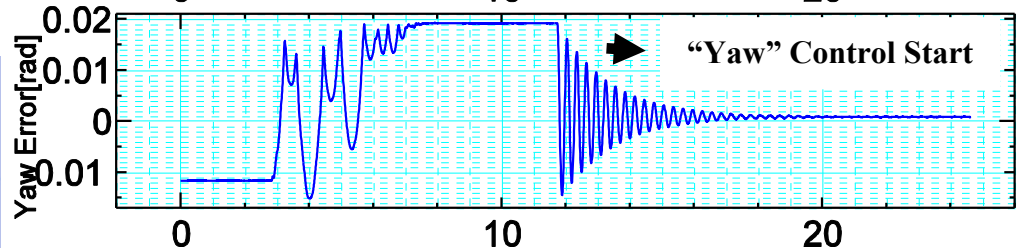
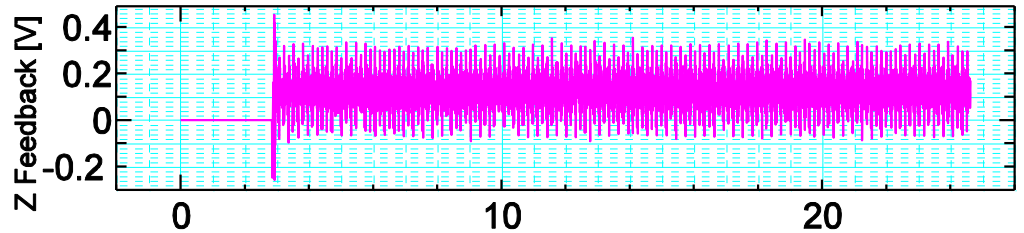
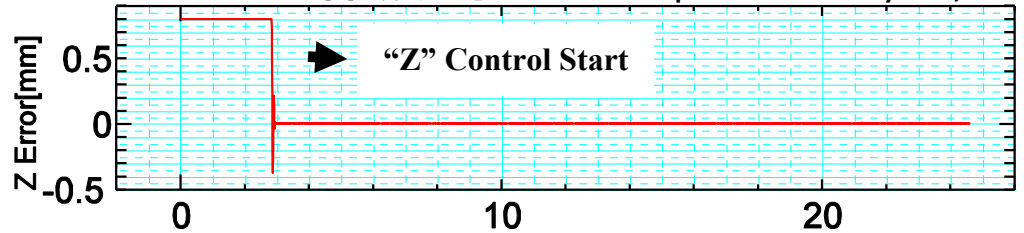
Two Torsion Antenna Modules assembled

試験マス制御動作

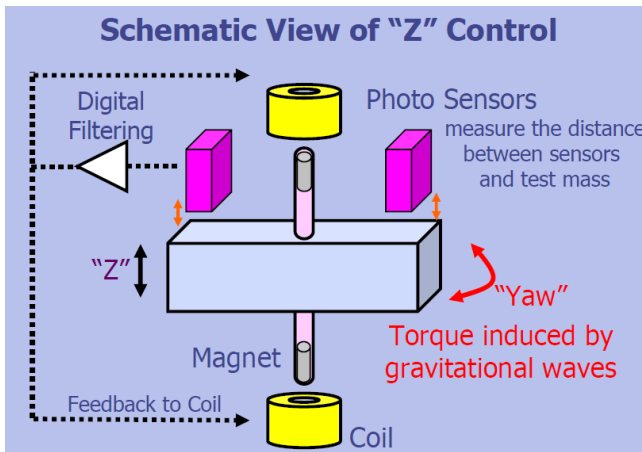
衛星打ち上げ: 09年1月23日、衛星停波: 10年9月8日



制御成功時のデータ Operation: May 12, 2009



Time [sec]



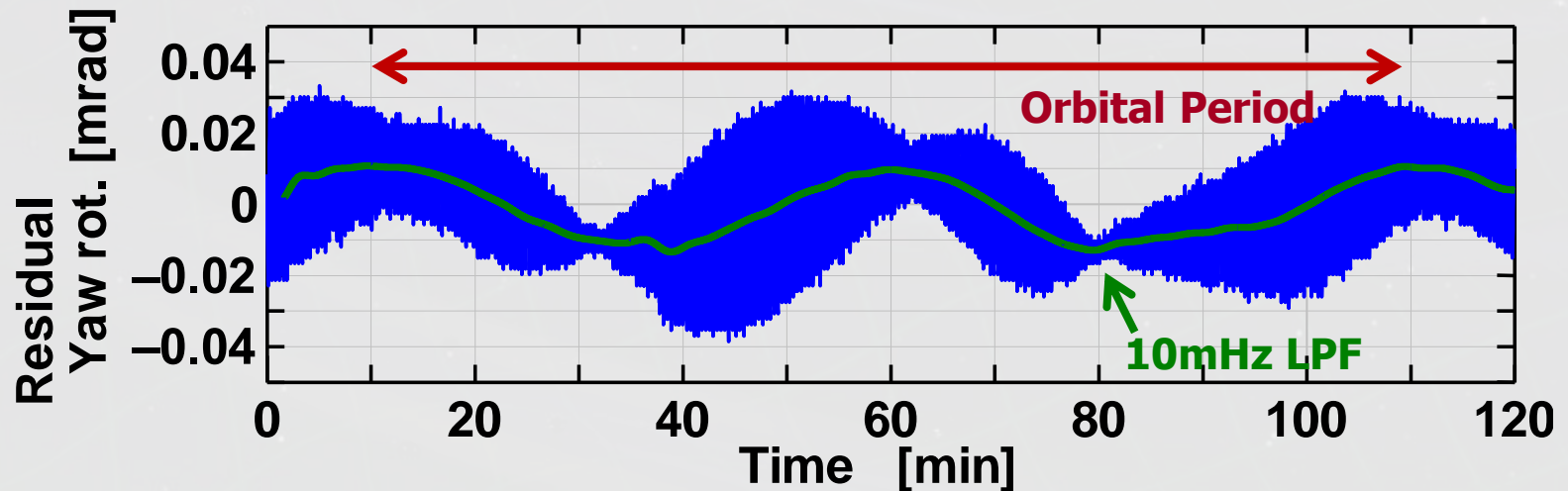
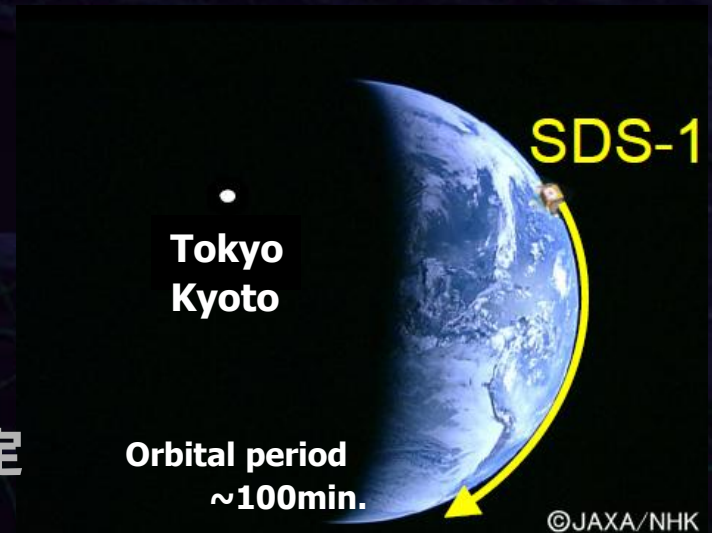
SWIM による観測運転

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
銀河中心方向に感度を持つよう姿勢決定



観測運用は「平成22年度 飛翔体による宇宙科学観測支援経費」の支援を受けて実施されました。

観測データの異常

観測データを地上へ回収したとき、本来センサ出力にはない異常信号が混入。
→ 重力波観測にとって致命的な、データの汚れが発生。

・原因

(1) オンボードソフトウェアのバグ

データレート低減のための平均化処理部において
数値のフォーマットを間違えた計算をしていた。

(2) 衛星通信における転送エラー

衛星-地上局間の通信時のビットエラー
観測データパケットには誤り訂正等の対策をしていなかった。

データ異常のクリーニング

・対処

(1) オンボードソフトウェアのバグ

データの異常状態が地上で推定できる

→ 地上での解析により、真のデータを復元処理。

(2) 衛星通信における転送エラー

同じデータを2回衛星から転送。

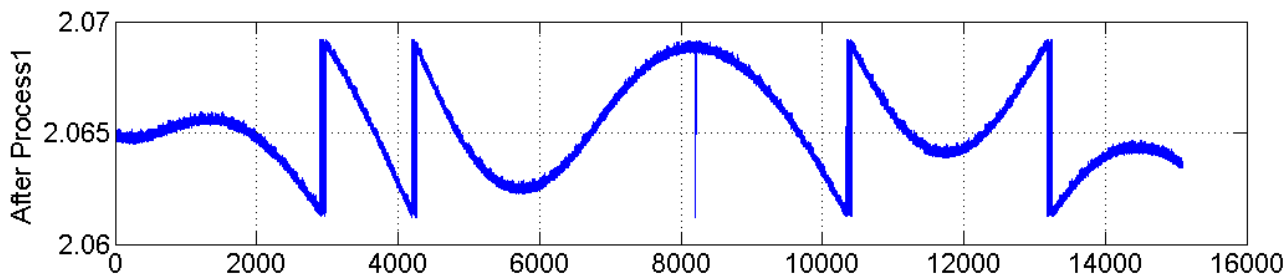
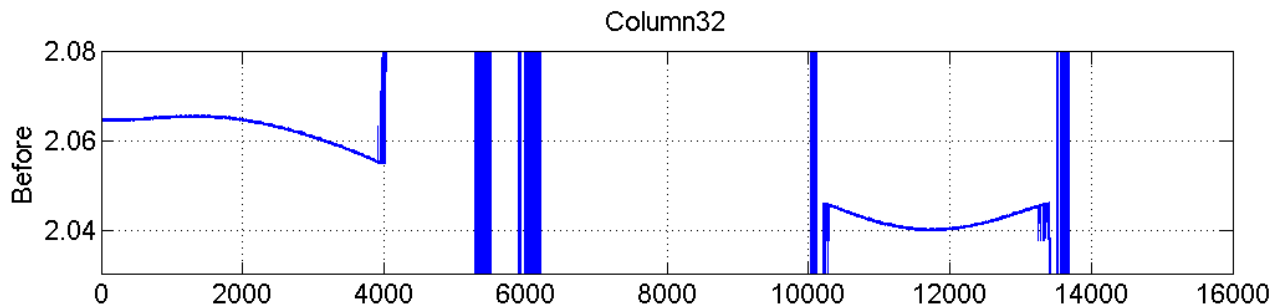
→ 互いに比較し、エラー部を復元。

(3回転送して多数決、のほうが簡単だが、転送の回数を減らして観測データ量をなるべく多くすることを狙った)

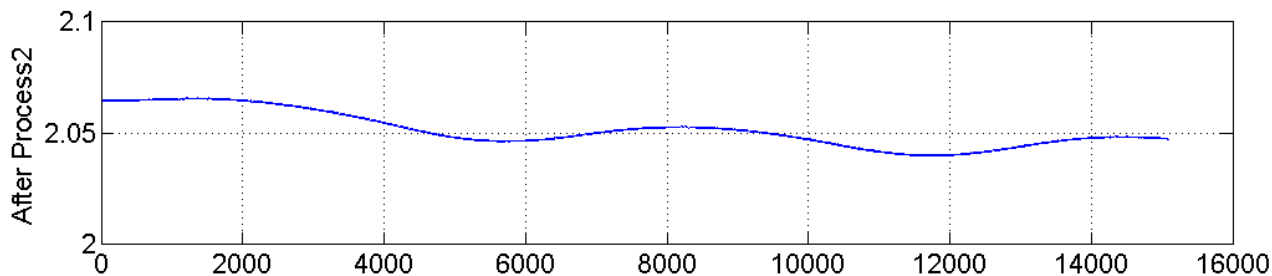
(1) オンボードソフトウェアのバグ

約2時間分の時系列データ

生データ



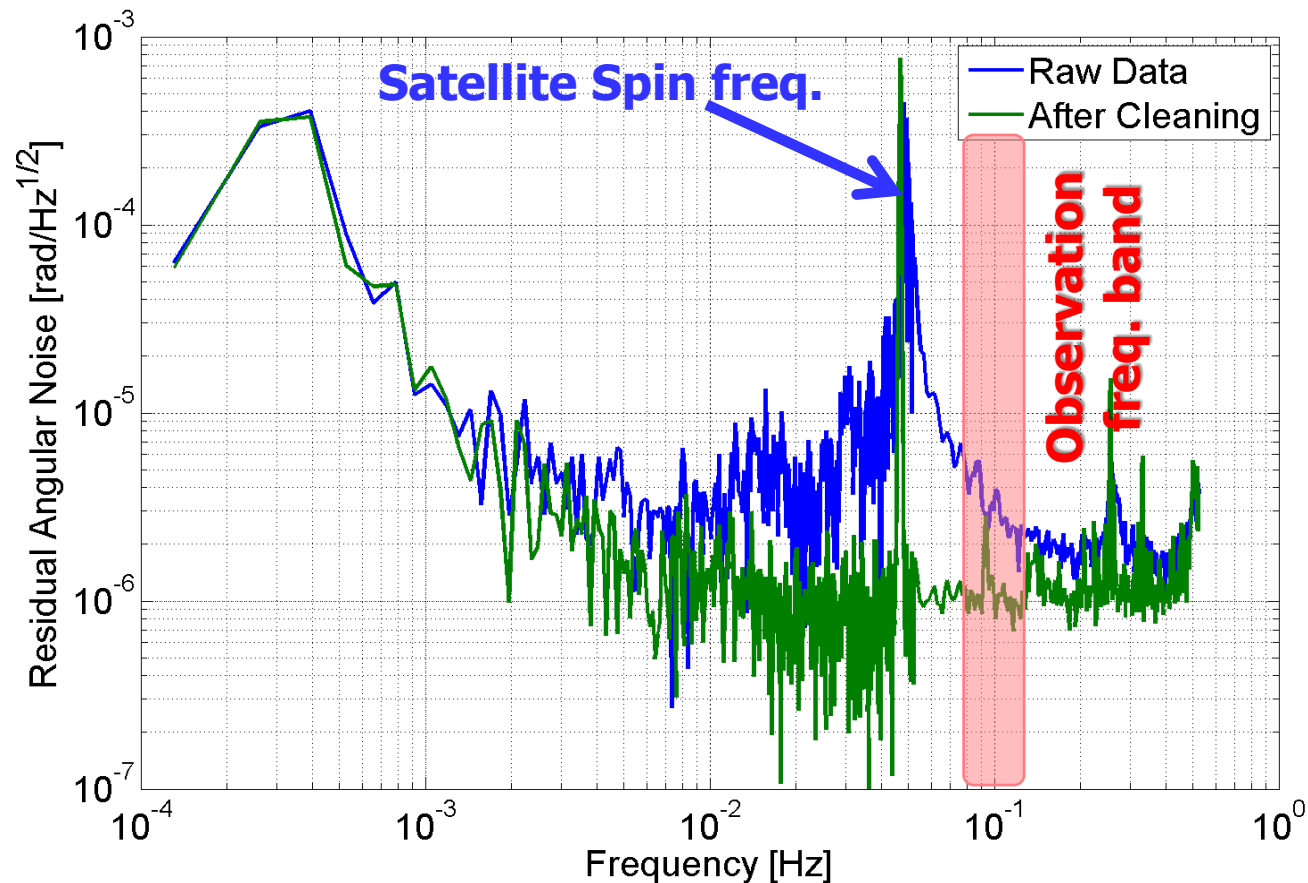
修復後



時間 [arb. unit]

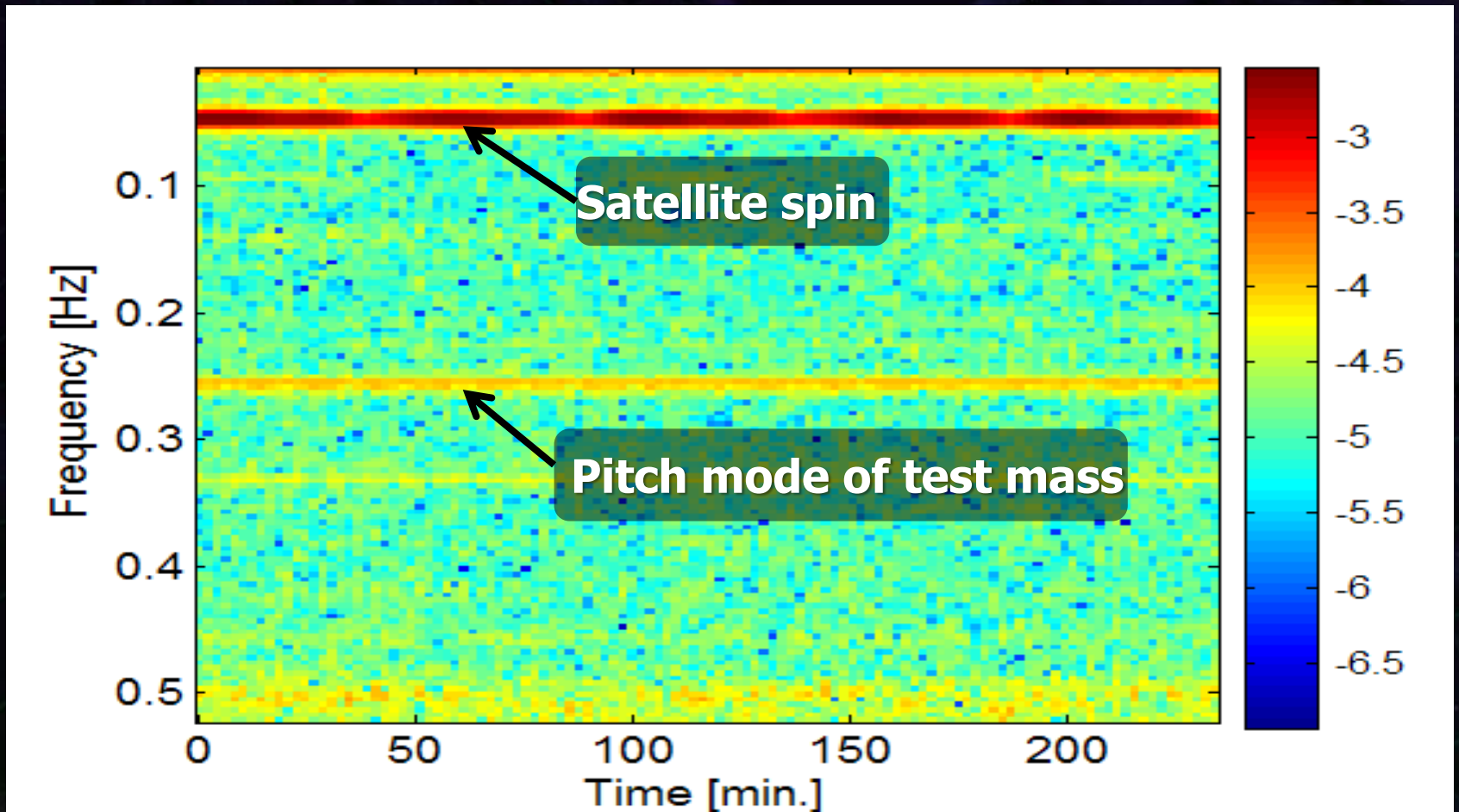
(2) 衛星通信における転送エラー

データ修復により、観測周波数帯での感度が向上。



SWIM観測運用

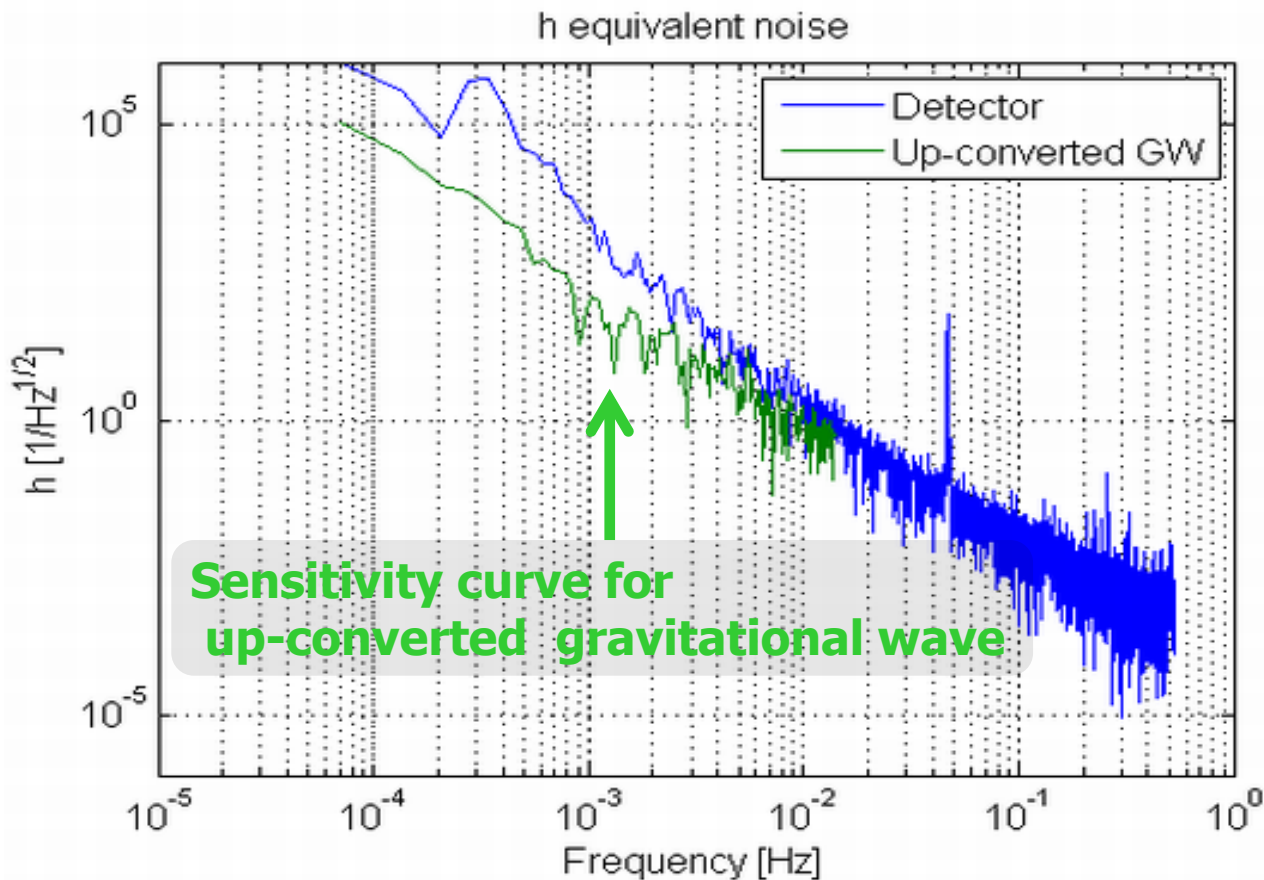
SWIM observation (2nd run on July 15, 2010 ~240 min.)



低周波重力波に対する感度

衛星スピンを利用した低周波観測

→ 独自の新しい観測手法(回転TOBA)の実証.



1. SDS-1衛星とSWIM
2. 背景と経緯 -- 重力波の観測
3. SWIM $\mu\nu$ の成果
- ⇒ 4. まとめ

SWIM $_{\mu\nu}$ の意義

初めての宇宙重力波観測器

重力波分野では、宇宙ミッションへの強い動機付けがあるにも関わらず、これまで宇宙機器開発の経験が無かった。

→ SWIM $_{\mu\nu}$ で、経験を積むのみならず、
初めて軌道上で重力波の観測運用が行われた。
将来計画 (DPF, DECIGO) へ向けての貴重な第一歩。

※安東, 他, 日本物理学会誌 65, 987-990 (2010).

新しい独自の手法による重力波観測の実証

「ねじれ型検出器」の実証 (回転TOBA).

→ 衛星スピン回転を利用した極低周波重力波の観測。
衛星-地上での同時観測運転の実施と」手法の確立。

※M.Ando et al., Phys. Rev. Lett 105, 161101 (2010).

まとめ

- SDS-1衛星ではJAXA内部だけでなく、それまで宇宙機器開発の経験を持たない、大学研究室を中心としたグループも参加した、挑戦的なモジュール SWIM_{μv}も搭載されていた。

⇒ 当初設定された成功基準を上回る成果を得た。

- SWIM_{μv}の成果は、機器や部品の技術実証だけに留まらない。
 - 観測データの取得と科学的成果。
 - その評価による将来計画における観測成立性への知見。
 - 宇宙機器開発未経験グループ参入の「社会実験」と実証。

⇒ 広い意味での「宇宙実証」の可能性。

参考文献

- **SWIM $_{\mu\nu}$ の開発**
日本物理学会誌 65, 987-990 (2010).
- **ねじれ型重力波望遠鏡(TOBA)の原理や可能性**
M.Ando et al., Phys. Rev. Lett 105, 161101 (2010).
- **地上観測装置での背景重力波観測結果**
K.Ishidoshiro et al., Phys. Rev. Lett. 161101 (2011).
- **SWIMによる観測結果**
W. Kokuyama et al., in preparation.

終わり

<謝辞>

SWIM は、JAXA、NEC 株式会社、三菱重工業株式会社の共同研究として行われた。また、観測運用は、JAXA・宇宙実証グループ、および、JAXA・「飛翔体による宇宙科学観測支援経費」の支援を受けて実施された。計画の立案から実現まで支援して頂いた高橋忠幸氏(JAXA)、設計から運用まで全ての段階で方向を示してくれた高島健氏(JAXA)をはじめ、国分紀秀氏(JAXA)、中澤知洋氏(東京大)、森國城氏、JAXA・宇宙実証研究共同センター、X線衛星グループ、高高度気球による微小重力実験機グループなど経験豊富な方々の導きと、有限会社ワイエスデザイン、アイデアシステム株式会社の設計・製作協力、財団法人日本宇宙フォーラム、ダイヤモンドエアサービス株式会社などの協力、および、日本SpaceWireユーザー会、国内の重力波実験グループの協力に感謝する。

バックアップ

スペースワイヤ実証モジュール(SWIM)

目的

JAXAが宇宙用に開発した高速MPUを用い、新しい国際標準の一つになりつつあるスペースワイヤ規格を発展させた次世代ネットワーク型データ処理技術の実証と、そのデータ処理技術を活用した超高感度加速度計による重力波計測装置の動作実証試験。

SpaceCube2の機能

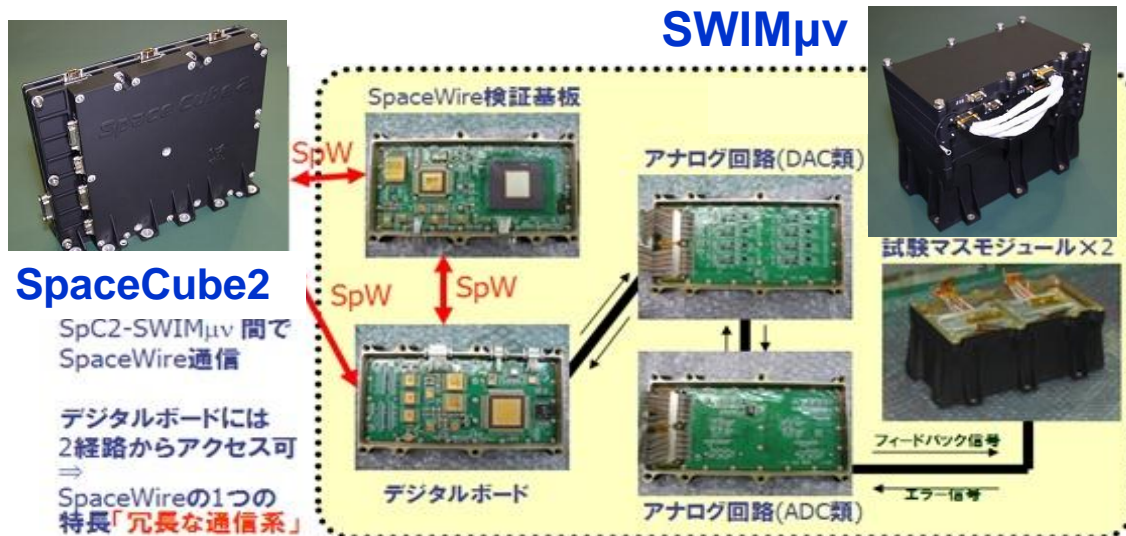
スペースワイヤ標準規格の新たな機能であるスペースワイヤ・リモートメモリアクセス機能(CPUを持たない通信相手の内部メモリへの直接アクセス機能)

超高感度加速度計(SWIM μ v)の機能

マスを磁気浮上させて相対位置を制御し、制御信号の変化から微小加速度変動を検出する機能。

成果(計画以上の成果を達成)

- ・スペースワイヤを標準サポートする宇宙用計算機SpaceCube2の宇宙機への適用のめどを得た。
- ・将来の科学衛星のミッション達成のために重力波検出の動作原理・性能評価の成果を得た。
- ・宇宙-地上同時の重力波観測運転を実施し、世界に例のない観測手法の成立性を確認した。



SWIMの構成 (SpaceCube2とSWIM μ v) 38

SWIM構成

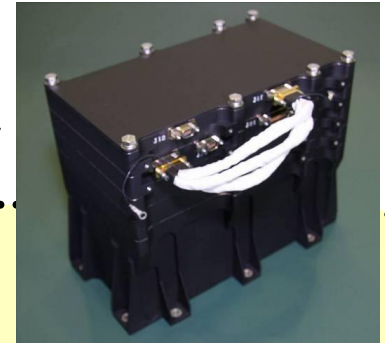
SpaceCube2: 信号処理計算機



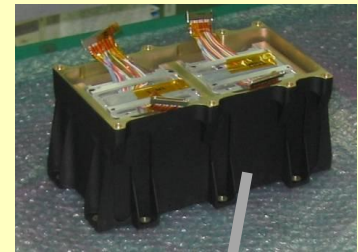
- ・PSU+CPUボード+DataRecordボードからなる
- ・JAXA開発のHR5000(CPU),Burst-SRAMを搭載。OSにはTRONベースのeT-kernelを採用。
- ・SpaceWire I/Fは3ポート備えており、SWIM μ vとの接続に2ポートを使用して、冗長通信機能を実証。
- ・ミッションデータの一時保存を目的としたデータレコード部(1GB)を持ち、フレキシブルな運用を実施。

SpC2-SWIM μ v 間で
SpaceWire通信。
通信速度:~1Mbps

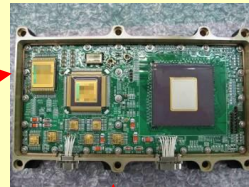
SWIM μ v : 重力波検出器モジュール



試験マスモジュール×2



SpaceWire検証基板



アナログ回路(DAC類)



SpW



デジタルボード

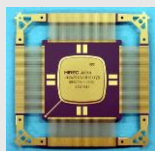


アナログ回路(ADC類)

フィードバック信号

エラー信号

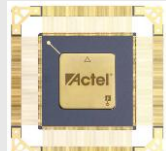
宇宙用部品



HR5000
33MHz



Burst
SRAM



Actel RTAX2000
(SpaceWire I/F)



Test mass

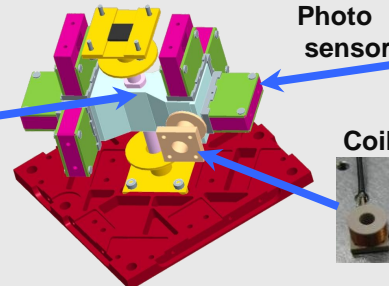


Photo sensor

Coil

試験マスモジュール

- ・47gの試験マスを内蔵。
- ・フォトセンサで変動を測定し、コイルにフィードバックすることで非接触制御。
→ 重力波検出器/加速度計として働く。
- ・信号はデジタルボードに蓄えられ、SpW通信によってSpC2へ送られる。

総合成果(1): 次世代ネットワーク型データ処理技術の実証

SpaceCube2/SpaceWire通信による成果

SpaceCube2の宇宙実証

50回のCMD運用, 延べ動作時間 58時間以上の正常動作.
1年半以上の軌道上運用.

→ 信号処理モジュールの宇宙実証.

(宇宙部品, OS, ミドルウェア, アプリケーション)

SpaceWire通信による信号処理システムの宇宙実証

SpaceWire通信回数 2.4百万回程度.

総通信データ量 2GByte以上,

そのうち17.7MByte以上を地上へDL.

SpaceWire/RMAPを

もちいたルーティングに成功

→ 軌道上における世界初実証.

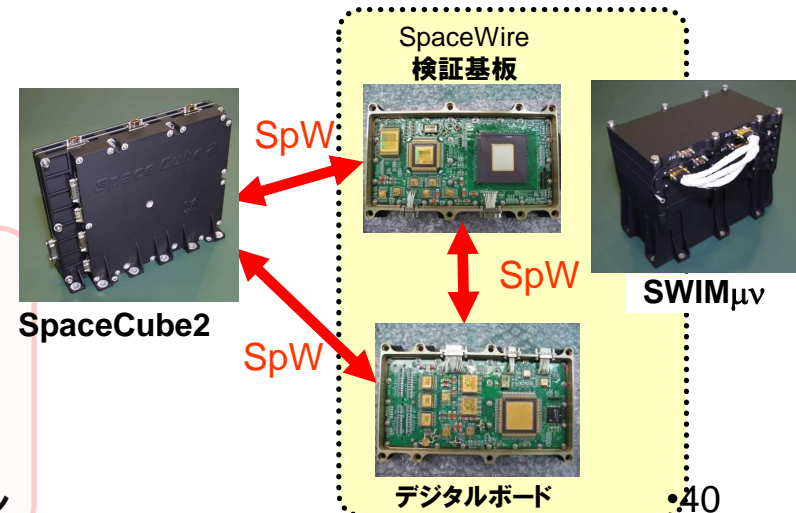
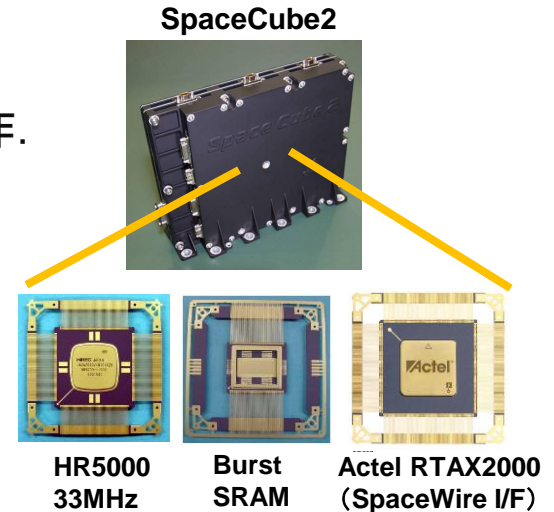
SpC2/SpW 信号処理システムの宇宙実証.

・次世代データ処理系のコンセプト.

(MMO, ASTRO-H, 小型科学衛星標準バスなどで採用)

・JAXA開発MIPS CPUなどの宇宙部品.

・リアルタイムOS, ミドルウェア, アプリケーション.



総合成果(2): 重力波検出器の動作実証と観測運用

SWIM μ vの運用による成果

重力波検出器の安定動作

延べ15時間以上の制御動作。

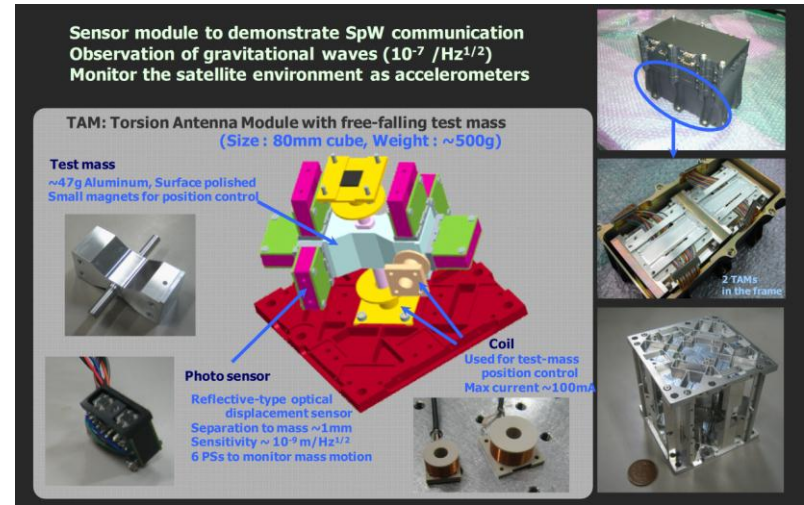
装置特性: 制御特性, 雑音特性, 校正値。

衛星環境評価: 振動・スピン, 温度変動。

→ **世界で初めての重力波検出器。**

重力波検出器の根幹技術の実証。

- ・微小重力下での非接触制御。
- ・宇宙環境での低雑音計測 (μ radの精度)。



重力波検出器による観測運転

延べ 地球3周回分以上の長時間観測。

地上観測装置との同時観測。

→ **衛星による初めての観測データ。**

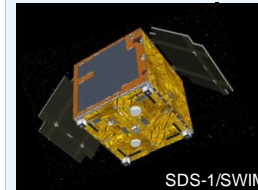
将来計画に必要な基礎データ。

データ解析手法の確立に貢献。

- ・衛星の軌道・姿勢運動の効果。
- ・地上観測装置との相関解析。

ねじれ型重力波検出器A

(地球周回軌道, 2009年-)



質量 50g, 長さ 5cm
無重力浮上 + 制御
反射型フォトセンサ
スピン + 軌道運動

試験マス
変動検出
位置・姿勢

ねじれ型重力波検出器B

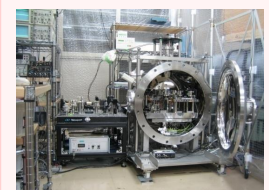
(東京大学, 2008年-)



質量 150g, 長さ 20cm
超電導磁気浮上 + 制御
レーザー干渉計
地上静置観測

ねじれ型重力波検出器C

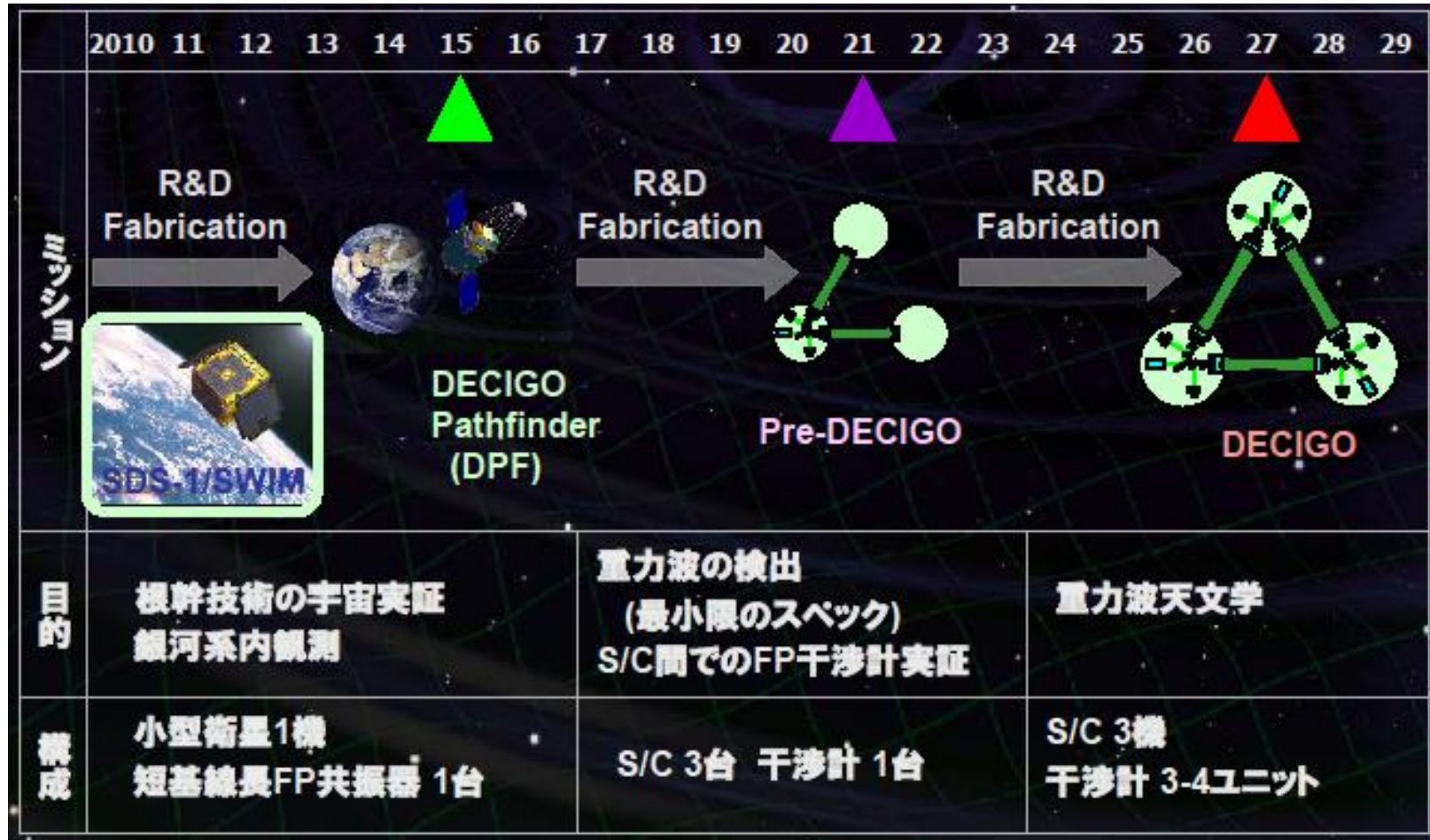
(京都大学, 2010年-)



質量 340g, 長さ 25cm
超電導磁気浮上 + 制御
レーザー干渉計
地上静置観測

参考資料: 宇宙重力波観測プロジェクト

宇宙重力波望遠鏡: DECIGO計画 → 宇宙誕生直後の様子の直接観測



SDS-1/SWIM: DECIGO計画にむけての最初の宇宙重力波検出器.

当初計画の達成状況

2010年3月末までの後期利用フェーズで、全エクストラサクセスを達成

	衛星バス	マルチモード統合トランスポンダ	スペースワイヤ実証モジュール	先端マイクロプロセッサ 軌道上実験装置
ミニマム サクセス	<ul style="list-style-type: none"> 軌道上での動作が確認されること。 	<ul style="list-style-type: none"> マルチモード統合トランスポンダの送受信機能／性能、レンジング信号中継機能／性能確認ができること。 	<ul style="list-style-type: none"> JAXA開発CPUを搭載したデータ処理モジュールの動作が確認出来ること。 新規規格のスペースワイヤ通信機能動作が確認出来ること。 	<ul style="list-style-type: none"> 搭載されているJAXA開発部品であるMPU、バーストSRAM、DC/DCコンバータの軌道上での動作が確認出来ること。
フル サクセス	<ul style="list-style-type: none"> それぞれのミッション機器の実証データが得られること。 	<ul style="list-style-type: none"> アップリンク信号の種類に応じた動作モードの自動切替機能が確認できること。 コヒーレント／インコヒーレントモードの切替機能が確認できること。 新GN、DRTS とのRF 適合性評価ができること。 QPSK、CDMA 運用を行うことによる運用性評価ができること。 	<ul style="list-style-type: none"> 最新の規格に基づくスペースワイヤ通信のプロトコルの実証が出来ること。 宇宙におけるTRONベースのリアルタイムOSの動作実証が出来ること。 上記OSで動作する標準ミドルウェア、アプリケーションの実証が出来ること。 スペースワイヤ通信の機能を用いて超高感度加速度センサの制御ならびにデータ取得機能が確認できること。 	<ul style="list-style-type: none"> MPU(キャッシュメモリ、ロジック回路部)及びバーストSRAMの耐放射線性(SEE耐性)が評価できること。 DC/DCコンバータ出力の電圧・電流データが評価できること。 動作中のJAXA開発部品の温度データを確認出来ること。また、その温度データから、当該開発部品を高負荷状態で使用する際に問題となる排熱の問題について、講じた熱対策設計の有効性を評価出来ること。
エクストラ サクセス	<ul style="list-style-type: none"> 運用期間(6ヶ月)を上回る有効なデータが取得できること。 	<ul style="list-style-type: none"> KSAT局においてQPSKデータを受信できること。 CDMA機能において、耐RF干渉性評価が出来ること。 	<ul style="list-style-type: none"> 超高感度加速度センサにより、衛星スピン状態と3軸制御状態における衛星の微小振動環境データを取得すること。 超高感度加速度センサの特性・性能評価を軌道上で実施できること。 光学機器の軌道上劣化評価データが取得でき、小型科学衛星3号機への提案に向けた実証データを取得できること。 	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙環境におけるエラー発生頻度の評価が出来ること。

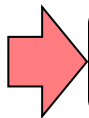
SDS-1の総合評価と今後の方針案

- M T P 実験 : 当初計画以上の実験を実施.
- S W I M 実験 : SDS-1で実施可能なことは全て実施.
- A M I 実験 : 計画した実験を全て実施し、十分な統計的データを取得した.
- 衛星バス : 100kg級スピン衛星のバス技術を獲得できた.
- 運用研修 : 実験運用の合間を有効活用して実施.
受講者全員が有意義と回答.

衛星の状況: スピンレート制御終了判断をマニュアルで行い定常運用実施中.
他は劣化傾向はなく安定して飛翔. (ジャイロ系統が1軸故障のため)

【総合評価】

- 当初計画した3つの実験ミッションの**全てでエクストラサクセス以上を達成**.
- バス機器として、1.5年以上の動作実績を得た.
- 設計から運用までをJAXA若手職員主体でインハウスで行うことで、人材育成に貢献した. (システム設計解析・インテグレーション・試験、一部機器の設計・製作・試験、運用をインハウスで実施)



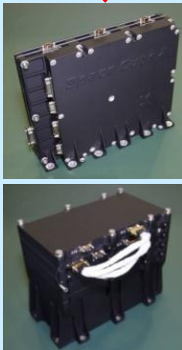
SDS-1として実施する項目を全て実施し、当初計画以上の成果を得た.

(参考1) SDS-1の概要(2/2) 搭載実験機器

スペースワイヤ実証モジュール(SWIM)

- ・スペースワイヤ規格を発展させた次世代ネットワーク型データ処理技術の実証
- ・そのデータ処理技術を活用した超高感度加速度計による重力波計測装置の動作実証試験

宇宙科学研究所

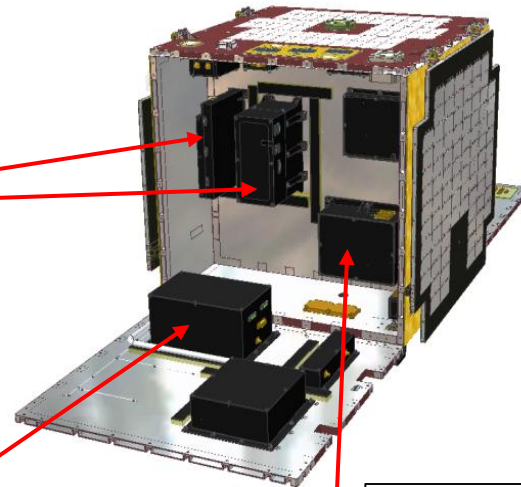
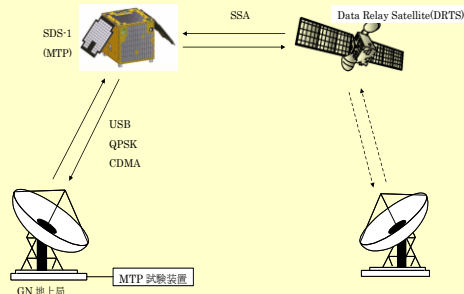


マルチモード統合トランスポンダ(MTP)

従来の2つの通信機能の他に、新たに2つの通信機能を追加し、小型化を目指した次世代トランスポンダの技術実証

- USB機能(従来技術の継承)
- SSA機能(従来技術の継承)
- QPSK機能(高速通信化)
- CDMA機能(複数衛星同時運用)

研究開発本部



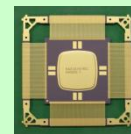
研究開発本部

先端マイクロプロセッサ 軌道上実験装置(AMI)

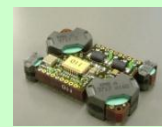
JAXA開発の

- 320MIPS級64ビットMPU
- SRAM
- DC/DCコンバータ

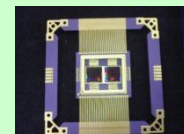
などの部品で構成した高性能計算機ボードの軌道上での動作実験



320MIPS 64bit MPU



DC/DC Converter



Burst SRAM
・45

(A) SDS-1/SWIM地上同時観測実験(1/3)

目的

宇宙-地上同時の重力波観測手法の成立性を確認すること。

(1) 地上検出器との同時観測

(2) 観測点の一つとして衛星の軌道運動を利用

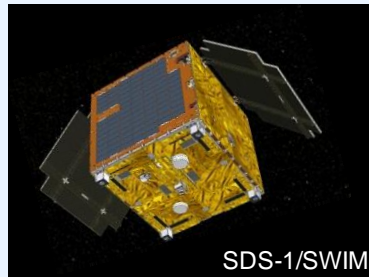
(1) 地上検出器との同時観測

重力波観測においては、複数台同時運転が重要。

- 重力波信号と検出器雑音の区別、擾乱の除去。
- 波源の方向、偏波の情報。

ねじれ型重力波検出器A

(地球周回軌道, 2009年-)



SDS-1/SWIM

試験マス

質量 50g, 長さ 5cm

無重力浮上 + 制御

変動検出

反射型フォトセンサ

位置・姿勢

スピン + 軌道運動

ねじれ型重力波検出器B

(東京大学, 2008年-)



質量 150g, 長さ 20cm

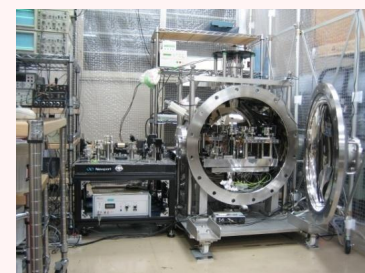
超電導磁気浮上 + 制御

レーザー干渉計

地上静置観測

ねじれ型重力波検出器C

(京都大学, 2010年-)



質量 340g, 長さ 25cm

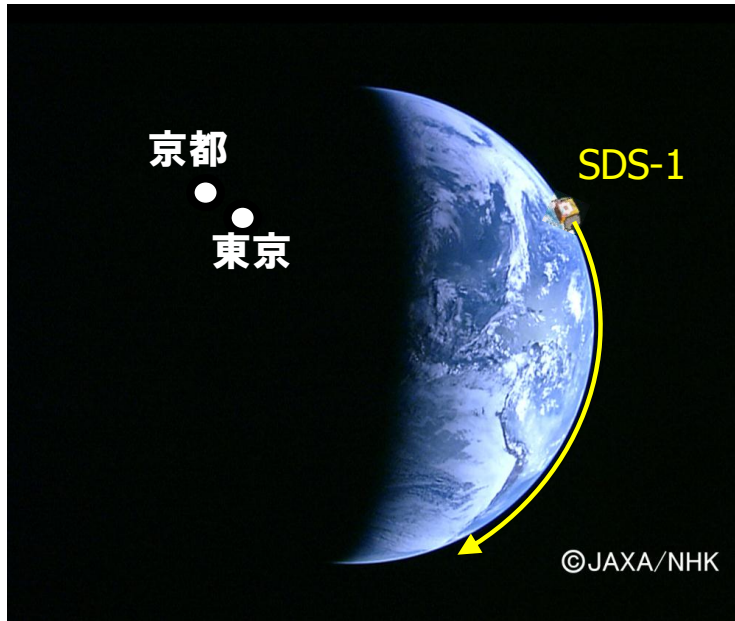
超電導磁気浮上 + 制御

レーザー干渉計

地上静置観測

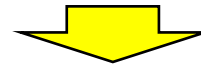
(A) SDS-1 / SWIM地上同時観測実験(2/3)

(2) 観測点の一つとして衛星の軌道運動を利用

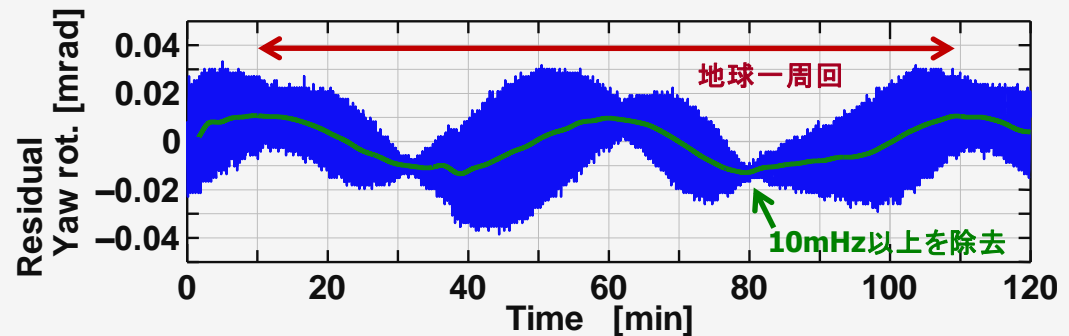


地上検出器－SWIM μ v を結ぶベクトルの長さ・方向が時間変化 → 重力波信号成分に変調.

地上検出器のみでは困難.
衛星検出器の大きな特徴を生かす.



今までに例がない観測で、
独自の解析手法を確立.



例

- 宇宙背景重力波の方向依存性のマッピング.
- 連星合体由来重力波の方向決定.

同様の観測・解析手法は DECIGO Pathfinder でも必要.

(A) SDS-1 / SWIM地上同時観測実験(3/3)

宇宙-地上同時の重力波観測手法の成立性を確認した.

・世界初の成果.

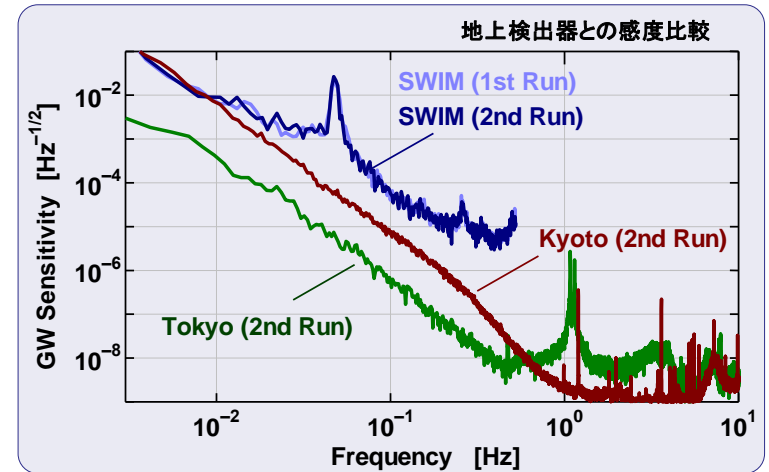
・初期解析

→

必要なデータは全て得られたことを確認.

(期待通りの感度・安定度,

衛星軌道・姿勢情報, 時刻同期など)



SDS-1/SWIMを用いた実験として, 可能なことは全て達成.

- 計画開始時の超過成功基準

「地球1周回程度の宇宙-地上同時の重力波観測運転を実施し、
世界に例のない観測手法の成立性」を確認.

- 必要なデータ・情報は全て取得済.

→ 今後, 地上検出器データとの相関解析を進める.

オフライン解析により解析手法の確立と科学的成果を目指す.

- 観測・解析手法は、今後の衛星計画に生かされる.

SWIM運用の流れ (全パス情報)

初期運用							
年	月	No.	Pass ID	運用目的	CMD運用	運用結果	取得データのチェック結果/コメント
2009	2	1	0209_0326	起動	SWIM ON	正常	OK
		2	0209_1122		SWIMmn 起動	正常	OK
		3	0210_0535		SpWボード動作・ルーティング(1)	非正常	Rmap Open コマンド忘れ通信不確立
		4	0210_1154		TAM1.2 コイル運送試験	正常	OK
		5	0211_0446		TAM1.2 マス駆動(1)	正常	TAM2動いていない
		6	0211_1227		TAM1 制御試験	運用中止	Avanet異常が発生
		7	0212_0501		TAM1 制御試験	正常	TAM1 制御成功
		8	0212_1121		SpWボード動作・ルーティング(2)	正常	ルーティング音め赤紫に動作
	3	9	0314_0518	TAM1: 制御・ 伝送開断 TAM2: 駆動試験	TAM1 制御試験	正常	
		10	0315_0159		TAM1 伝送開断測定(1)	正常	
		11	0315_0051		TAM2 マス駆動(2)	正常	TAM2やっばり動かない
		12	0413_0326		TAM1 制御試験	正常	データ量が少(MNT発生?)
		13	0413_1120		TAM2 マス駆動(3)	正常	TAM2やっばり動かない
		14	0414_0353		TAM1 伝送開断測定(2)	正常	データ量が少(MNT発生?)
		15	0415_0427		TAM1 長時間計測	正常	
		16	0415_1048		TAM1 制御試験	運用中止	通信キャリアアップせず
		17	0416_0323		TAM1 伝送開断測定(3)	正常	
		18	0512_0216		TAM1 制御試験	正常	
	5	19	0512_1047	長期電源 ON試験 (SWIM(自立 余いなし))	TAM2 マス駆動(4)	運用中止	きれいなロック時データを取得 衛星テレメ送信でまず(他衛星との干渉?)
		①	0525_0323		SWIM長期ラン(1) 開始	ON	---
		②	0525_1257		SWIM長期ラン(2)	MNT→OFF	BurstSRAM2bitエラー (SAA通過時に発生を確認)
		③	0526_0532		SWIM長期ラン(3)	ON	---
		④	0526_1152		SWIM長期ラン(4)	MNT→OFF	BurstSRAM2bitエラー
		⑤	0527_0248		SWIM長期ラン(5)	ON	---
⑥		0527_1224	SWIM長期ラン(6)		MNT→OFF	BurstSRAM2bitエラー (SAA通過時に発生を確認)	
⑦		0529_0355	SWIM長期ラン(7)		ON	---	
⑧		0529_1449	SWIM長期ラン(8) OFF予定		OFF(予定外)	NML→SID DIS まで送信	
⑨		0530_1046	SWIM長期ラン(9) OFF		OFF	---	
8	20	0624_0528	TAM1 伝送開断	SWIM 電源ON	正常		
	21	0825_0035		TAM1 伝送開断 (Yaw, Z)	正常		
	22	0825_0121		TAM1 DC測定 (DCオフセット)	正常	「データ抜け」発生	
	23	0827_0154		TAM1 DC測定 (ショット信号)	正常		
24	0828_0035	TAM1 伝送開断 (Yaw, Z)	正常	「データ抜け」発生			
後期運用							
年	月	No.	Pass ID		CMD運用 (以下TAM1のみ)	運用結果	取得データのチェック結果
2009	10	25	1019_0453	伝送開断 DCレベル	2. SpC+SpW ON チェック	正常	OK
		26	1020_0151		7. mn-DC測定	正常	OK/観折中
		27	1021_0419		7. mn-DC測定	正常	OK/観折中
		28	1022_0453		7. mn-DC測定	正常	OK/観折中
		29	1023_0151		6. mn伝送開断測定	正常	OK/観折中
		30	1118_0316		6. mn伝送開断測定	正常	OK/観折中
	11	31	1119_0347	ノイズレベ ル取得	7. mn-DC測定	正常	OK/観折中
		32	1209_0451		3. mn短時間計測	正常	OK/衛星スピンの効果を確認
		33	1210_0345		3. mn短時間計測 (非可視)	正常	OK
		34	1210_0345		4. mn長時間計測	運用中止	AOS時 SWIM OFF (SID DIS されずと推定)
2010	1	35	0120_0236	ノイズレベ ル取得	4. mn短時間計測 (3軸 慣性系指向)	正常	OK
		36	0121_0145		4. mn長時間計測 (3軸 地球指向)	正常	OK
	37	0224_0409	4. mn短時間計測 (3軸 慣性系指向)		正常	OK	
	38	0225_0443	4. mn短時間計測 (3軸 地球指向)		正常	OK/少しSpW由来のノイズが強い?	
	39	0325_0337	4. mn短時間計測 (スピン 銀河中心逆)		正常	OK	
39	0326_0406	4. mn長時間計測 (スピン 銀河中心逆)	正常	OK/センサに衛星のスピン変動?			
延長(観測)運用							
年	月	No.	Pass ID		CMD運用 (以下TAM1のみ)	運用結果	取得データのチェック結果
2010	7	40	0617_0800A	観測	電力監視(スピン 銀河中心逆 120分 1Hz)	正常	OK
		42	0715_0730A		電力監視(スピン 銀河中心逆 240分 1Hz)	正常	OK/データDL中

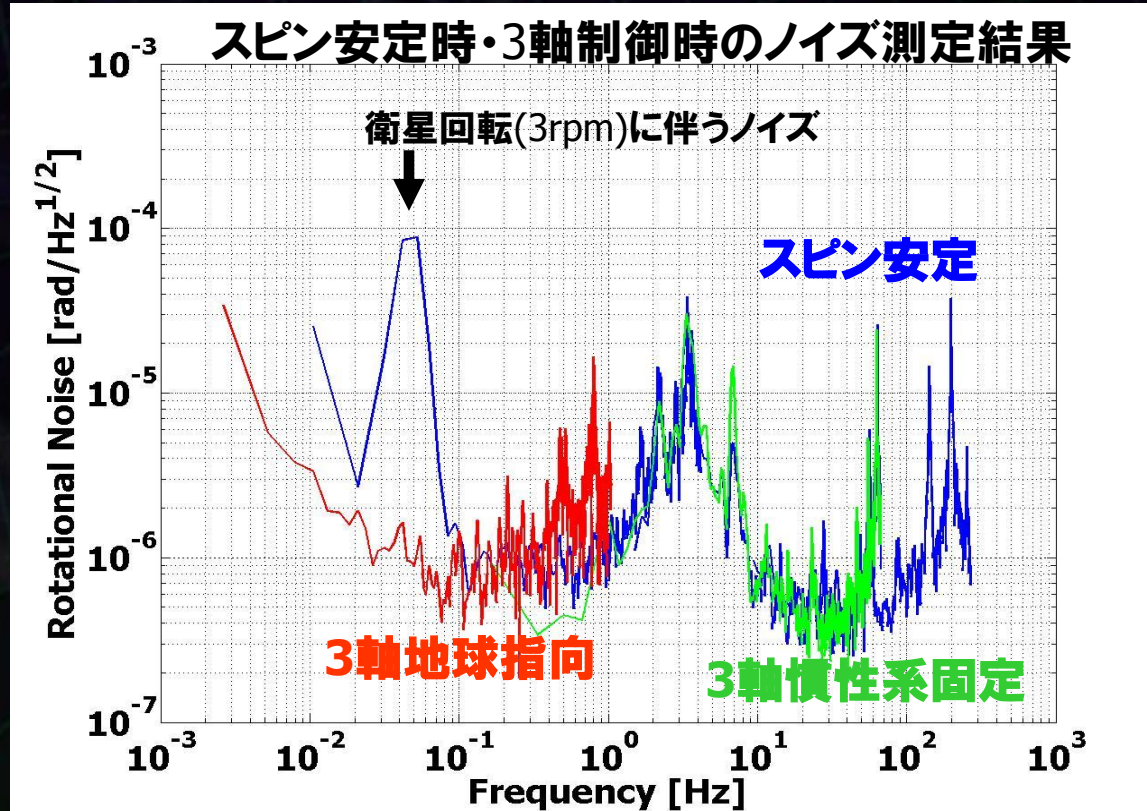
SWIM運用

月1回のペースで運用

特性評価.

衛星姿勢(スピン安定/3軸制御)それぞれでの感度測定.

連続観測運転.



SWIM_{μν} 軌道上実証

SWIM

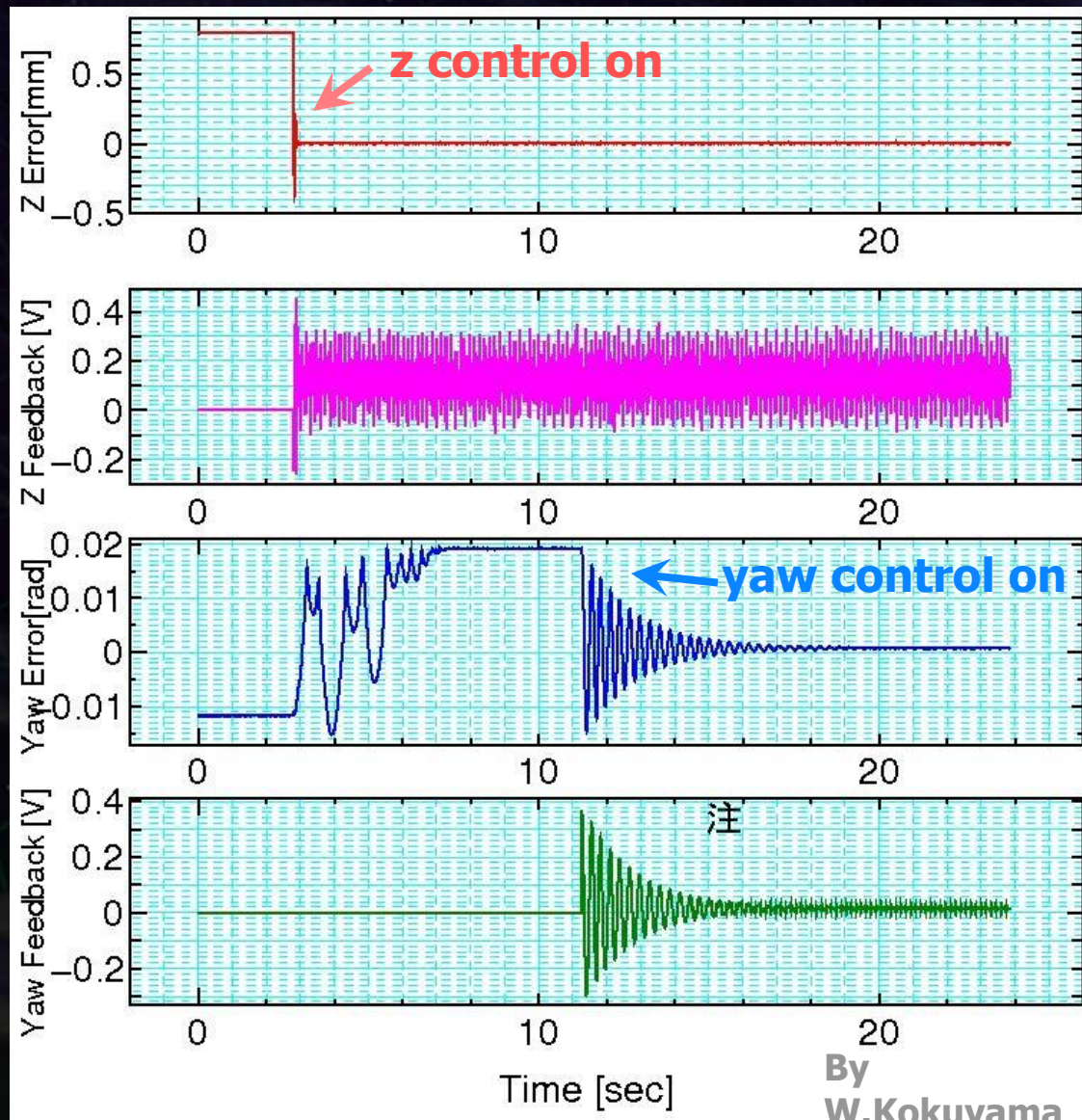
In-orbit operation

Test mass controlled

Error signal → zero
Damped oscillation
(in pitch DoF)
Free oscillation
in x and y DoF
Signal injection
→ OL trans. Fn.

Operation: May 12, 2009

Downlink: ~ a week



By
W.Kokuyama

SDS-1衛星での実証

SDS-1 (Small Demonstration Satellite - 1)

JAXA開発による100kg級の技術実証衛星

Size : 70x70x60cm, Weight : 100kg

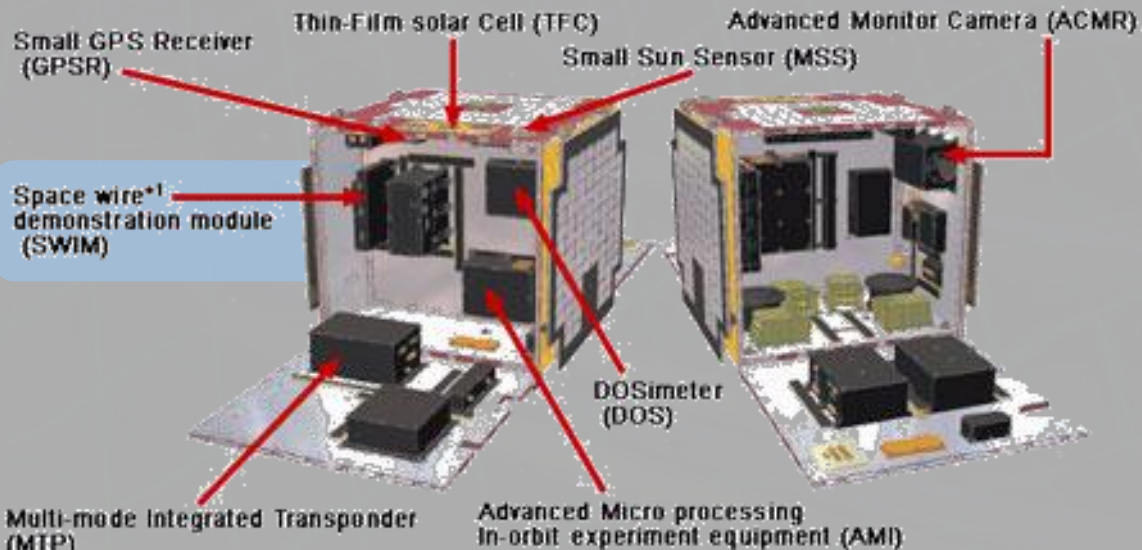
Power : >100W, Downlink : ~5kbps

Orbit : SSO (~660km)

Spin stabilization and 3-axis attitude control

Mission Lifetime : ~Half year (nominal)

SDS-1 and GOSAT
(Press Release, November 4, 2008)
Photo from Nainich Newspaper Web



<http://www.iat.jaxa.jp/info/prm/2007/019/01.html>



SDS-1/SWIM

SDS-1/SWIM

2005年 検討・開発開始.
2009年 1月23日 打上げ.
2011年 9月 運用停止.
全ての機器で
full success以上を達成.

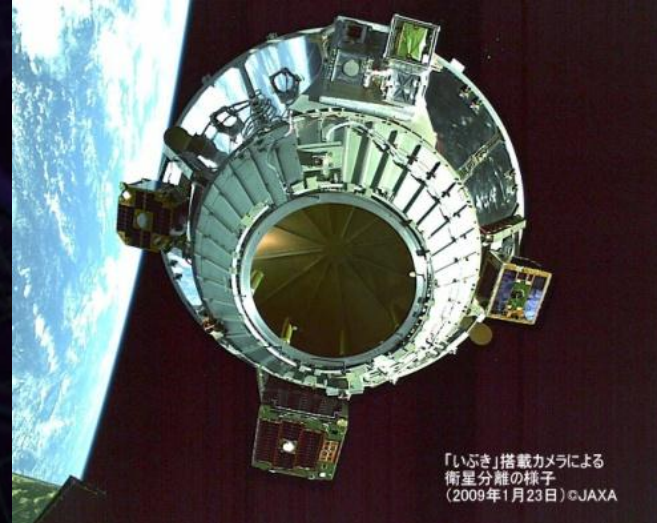


写真:
JAXA

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

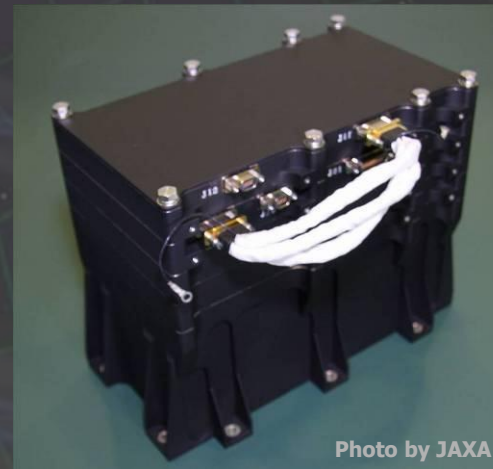
~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W



SWIM長時間観測運転

地上装置も同時に観測運転を実施

・2回実施

2010年 6月17日 データ長 SWIM地球1周回分 (100分強)
SWIM + 地上装置 (東京)

7月15日 データ長 SWIM地球2周回分 (200分強)
SWIM + 地上装置2台 (東京・京都)

・衛星姿勢：スピン安定, 銀河中心方向を指向

→ 回転TOBAとしての観測.

銀河中心方向からの背景重力波に指向.

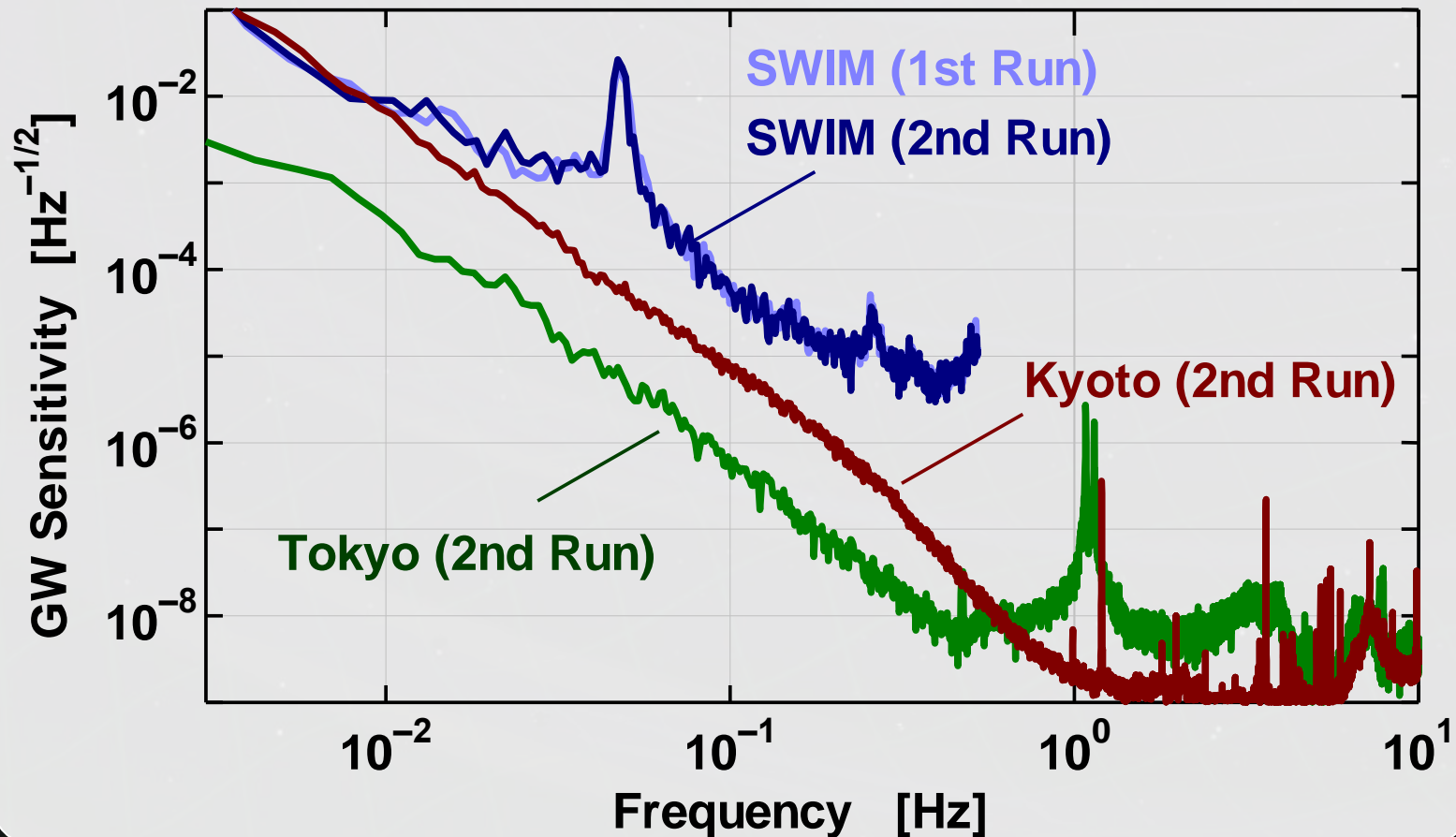
・検出器間の相対位置・姿勢が時間変化する系での観測.

・SWIMのデータも無事DL済み.

同時観測運転

2010年 6月17日, 7月15日

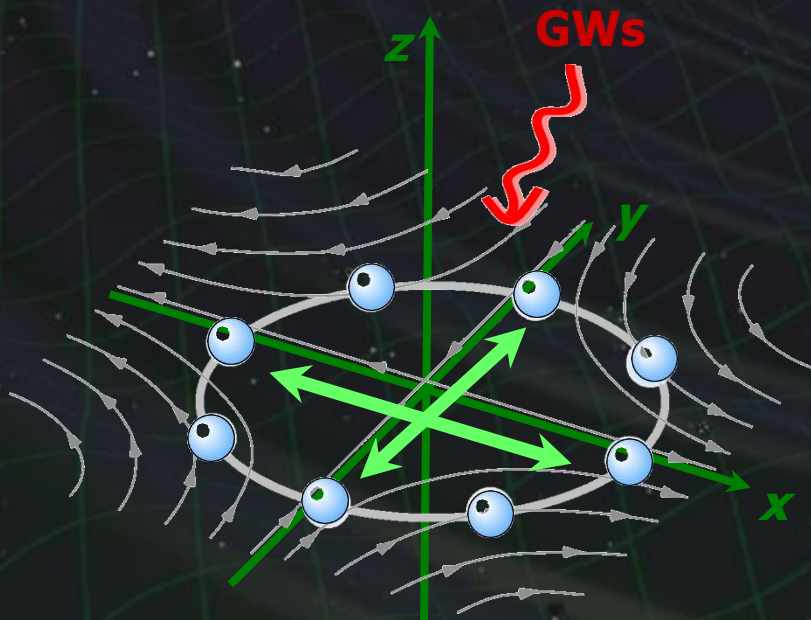
衛星搭載のSWIM と 地上装置 の同時観測



歪み観測と捩じれ観測

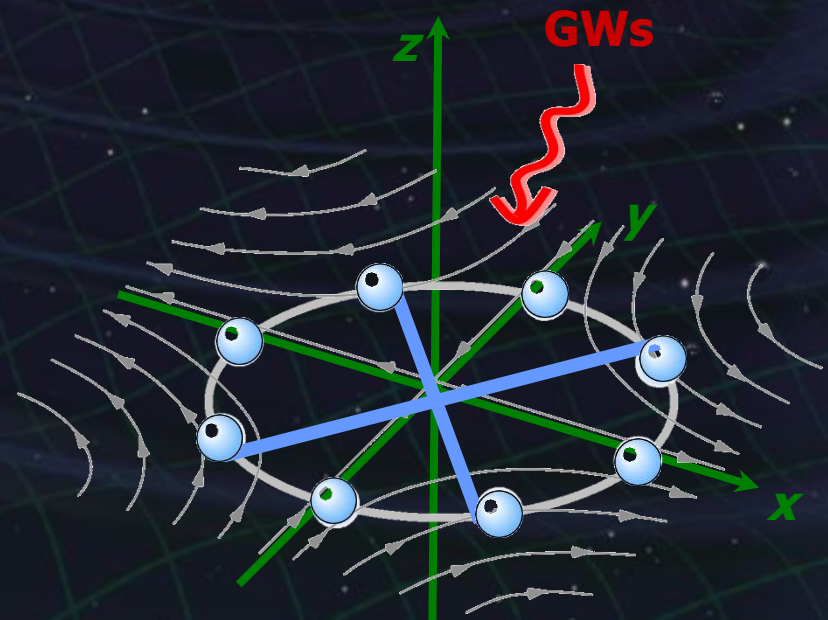
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector
Detect differential length change



差動歪み変動 $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector
Detect differential rotation



差動捩じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

プロトタイプ

2つの地上装置, 1つの衛星搭載モジュール

ねじれ型重力波検出器A

(地球周回軌道, 2009年-)



SDS-1/SWIM

質量 50g, 長さ 5cm

無重力浮上 + 制御

反射型フォトセンサ

スピン + 軌道運動

試験マス

変動検出

位置・姿勢

ねじれ型重力波検出器B

(東京大学, 2008年-)

JAXAのSDS-1衛星に搭載されたSWIM

超小型重力波観測モジュール

DECIGO/DPFのための宇宙実証試験.

SpaceWire信号処理系の宇宙実証.

回転TOBAのプロトタイプ.

質量 150g, 長さ 20cm

超電導磁気浮上 + 制御

レーザー干渉計

地上静置観測

ねじれ型重力波検出器C

(京都大学, 2010年-)

質量 340g, 長さ 25cm

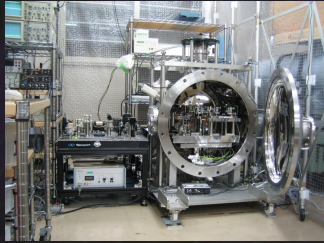
超電導磁気浮上 + 制御

※物理学会誌2010年12月号

地上静置観測

研究の背景

Gravity (2009~)
Test of gravity ISL



LCGT (2017~)
Terrestrial Detector
→ High freq. events



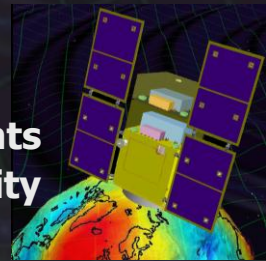
DECIGO (2027~)
Space observatory
→ Low freq. sources
Cosmology



TOBA (2005~)
Novel Detector
configuration



DPF (2015~)
Small Satellite
Galactic events
Earth's gravity

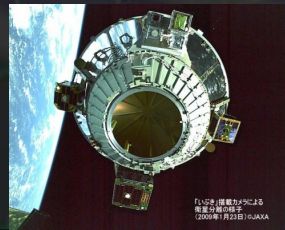


Pre-DECIGO (2021~)

Satellite Gravity (?~)
Space observatory
→ Earth environment

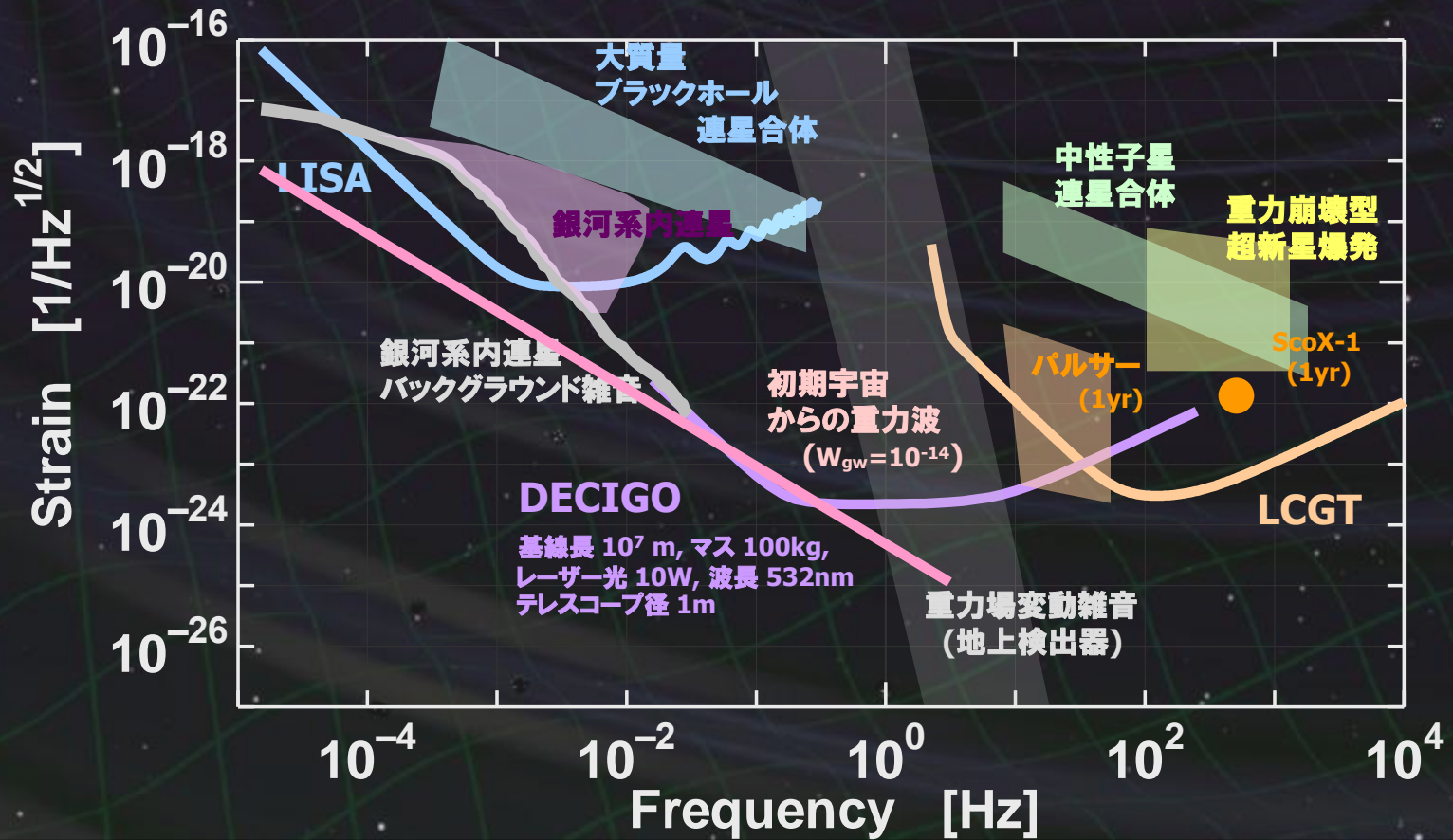


SWIM (2009~)
First module in orbit



観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
 DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
 LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど



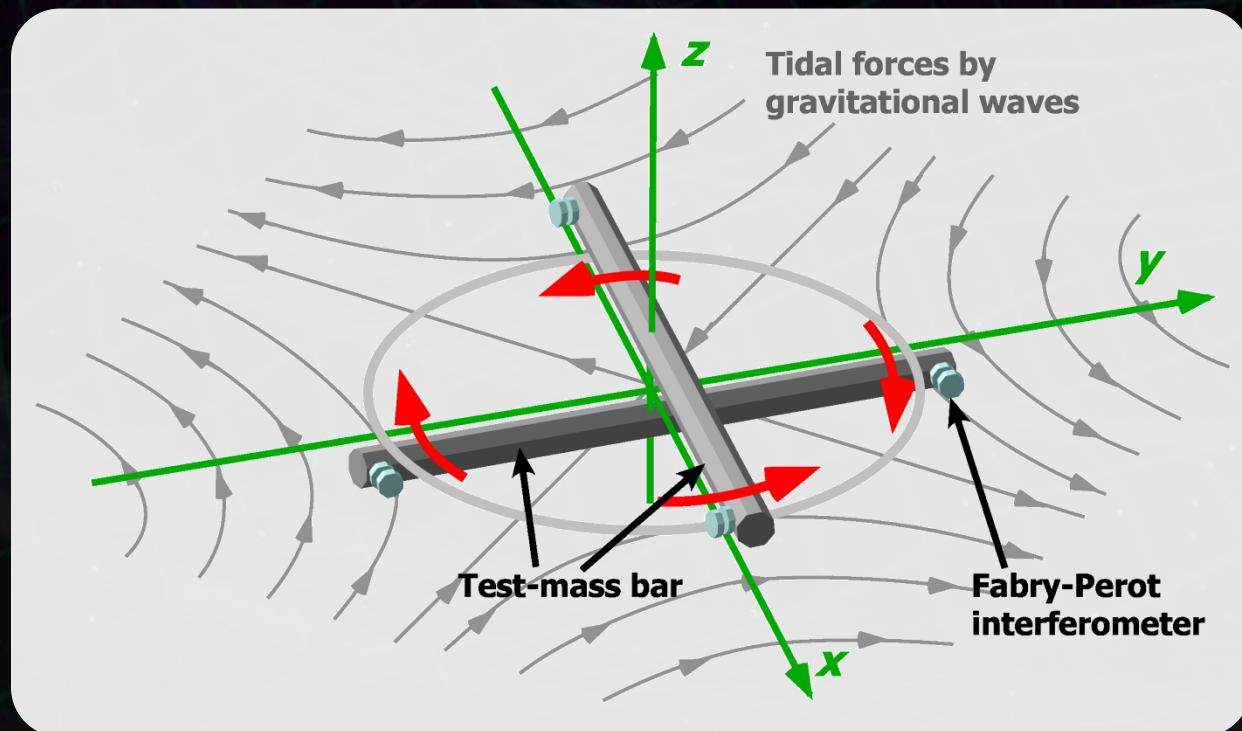
振り型アンテナ

振り型重力波望遠鏡 (TOBA: Torsion-Bar Antenna)

2つの棒状試験マスを配置
レーザー干渉計によって
差動回転変動を検出



地上でも低周波数重力波を観測可能。
宇宙では、さらなる
感度の向上が期待できる。



背景と動機

重力波の周波数：

波源の運動の時間スケールを反映

→ **さまざまな周波数帯での観測が望ましい。**

特に低周波数帯では

大きな重力波振幅, 定常的な重力波源 が期待できる。

地上望遠鏡では、低周波数帯の重力波観測は困難

- ・ 検出器の原理的な限界。
- ・ 地面振動などの環境雑音。

宇宙に行くのは、**多大なリソースが必要。**



新しい観測方式を提案する

地上でも低周波重力波を観測。

宇宙望遠鏡で独自の周波数帯を観測。

方式の比較

歪み観測 (通常のレーザー干渉計)

試験マス間の 基線長変動
観測周波数 10Hz-1kHz



試験マス: 振子で懸架
(共振周波数 $\sim 1\text{Hz}$)

長い基線長が取れる
→ 信号の増大, 高い感度

振じれ観測 (TOBA)

試験マスの振じれ変動
観測周波数 10mHz-1Hz



試験マス: 振じれ振子で懸架
(共振周波数 $\sim 1\text{mHz}$)

長基線は必要ない
→ シンプルな構成, 外乱除去

重力波に対する応答

棒状試験マス回転の運動方程式

$$I \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta \right) = \frac{1}{4} q^{ij} \cdot \ddot{h}_{ij}(t)$$

I : Moment of Inertia

q^{ij} : Dynamic quadrupole moment



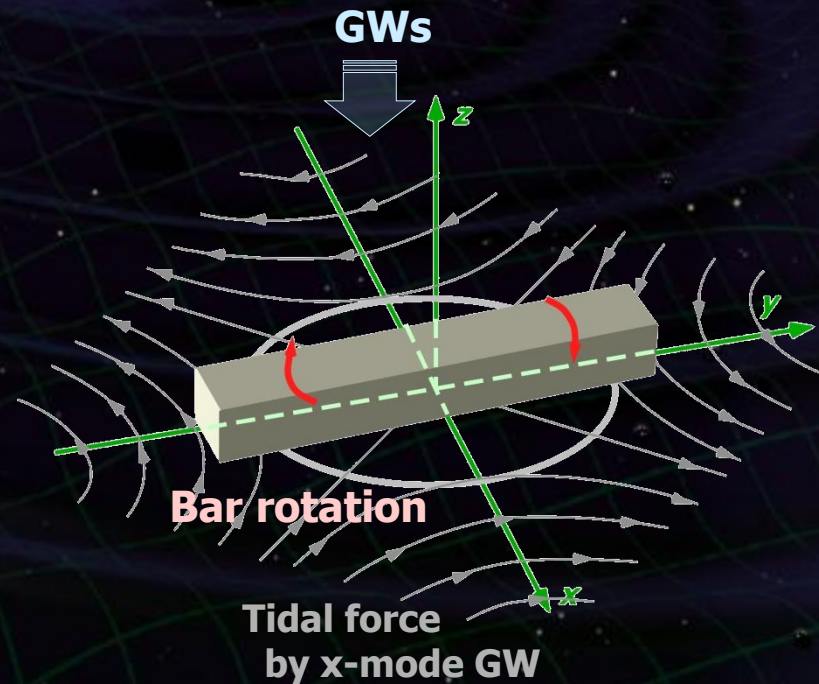
$$\tilde{\theta}(\omega) = \frac{1}{2} \alpha \tilde{h}_\times(\omega) \quad (\omega \gg \omega_0)$$

α : shape factor, between 0 to 1

Dumbbell $\rightarrow \alpha = 1$

Dimension less,

Independent of matter density

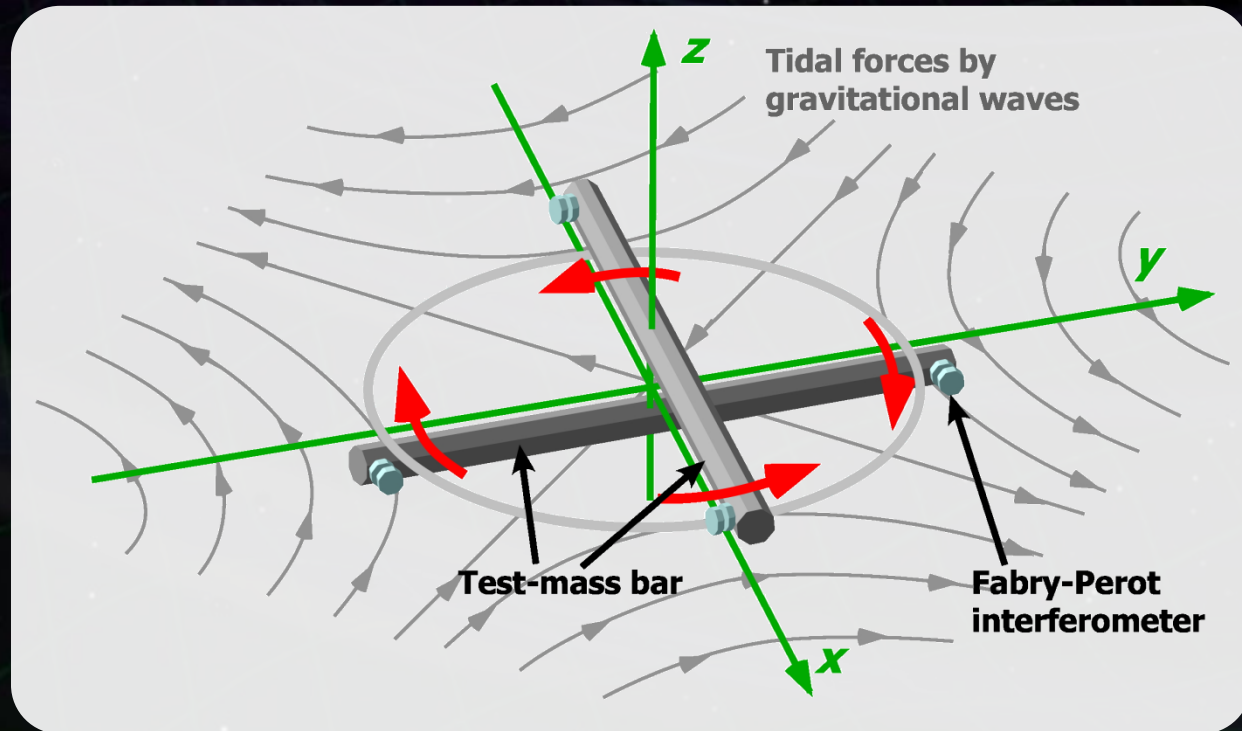


回転TOBA

超低周波数帯 ($\sim 10^{-8} - 10^{-4}$ Hz) を狙う

Detector全体を回転させる

→ 重力波信号の変調観測



重力波に対する応答

棒状試験マス回転の運動方程式

$$I \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta \right) = \frac{1}{4} q^{ij} \cdot \ddot{h}_{ij}(t)$$

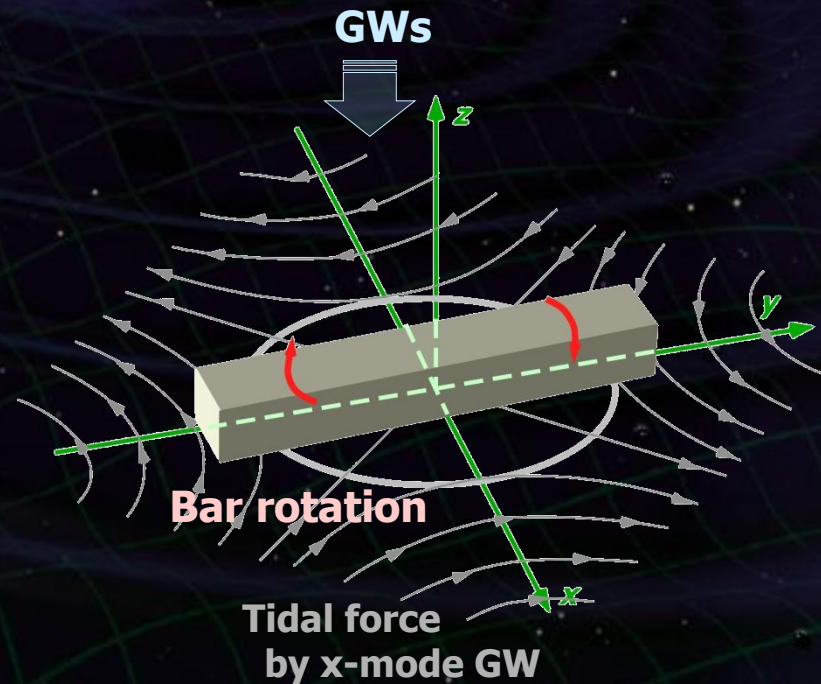
I : Moment of Inertia

q^{ij} : Dynamic quadrupole moment

⇒
$$\tilde{\theta}(\omega) = \frac{1}{2} \alpha \tilde{h}_\times(\omega) \quad (\omega \gg \omega_0)$$

α : shape factor, between 0 to 1
Dumbbell → $\alpha = 1$

Dimension less,
Independent of matter density



重力波に対する応答

棒状試験マス回転の運動方程式

$$I \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta \right) = \frac{1}{4} q^{ij} \cdot \ddot{h}_{ij}(t)$$

I : Moment of Inertia
 q^{ij} : Dynamic quadrupole moment

全体を
回転



$$\theta_{\text{diff}} \simeq \alpha \left(\frac{\omega_g}{2\omega_{\text{rot}}} \right)^2 \left[h_{\times} \cos(2\omega_{\text{rot}} t) + h_{+} \sin(2\omega_{\text{rot}} t) \right],$$

超低周波数 (ω_g) の重力波が

高い周波数 ($2\omega_{\text{rot}}$) 帯の信号にアップコンバートされる。

利点:

- 2つの偏波成分が分離できる。
- 高い周波数で観測可能 → 雑音・ドリフトの影響を避けやすい。
- 連続的な観測でなくとも良い。

DPFシステム概要

DPF Payload

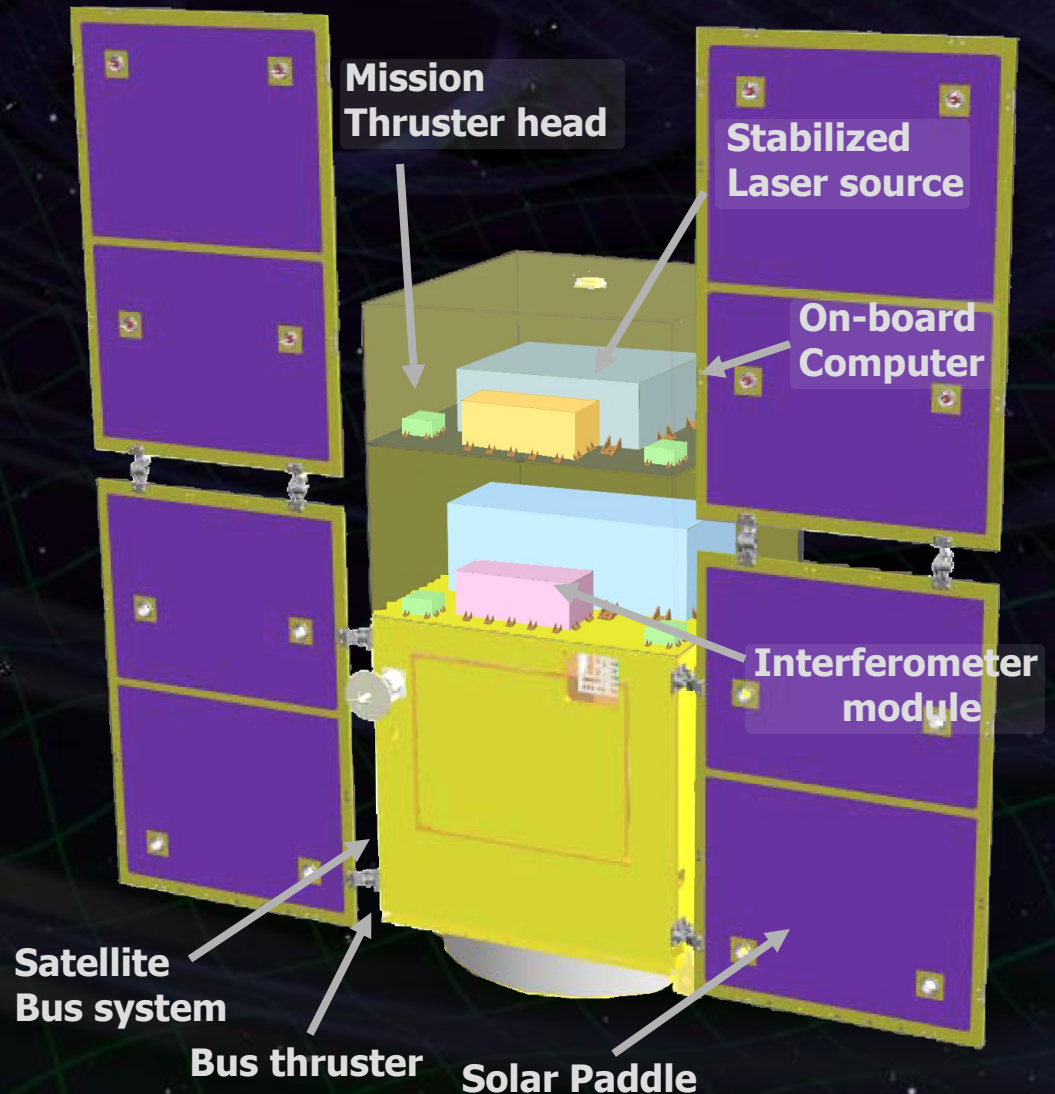
Size : 950mm cube
Weight : 150kg
Power : 130W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x8

Power Supply
SpW Comm.

Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

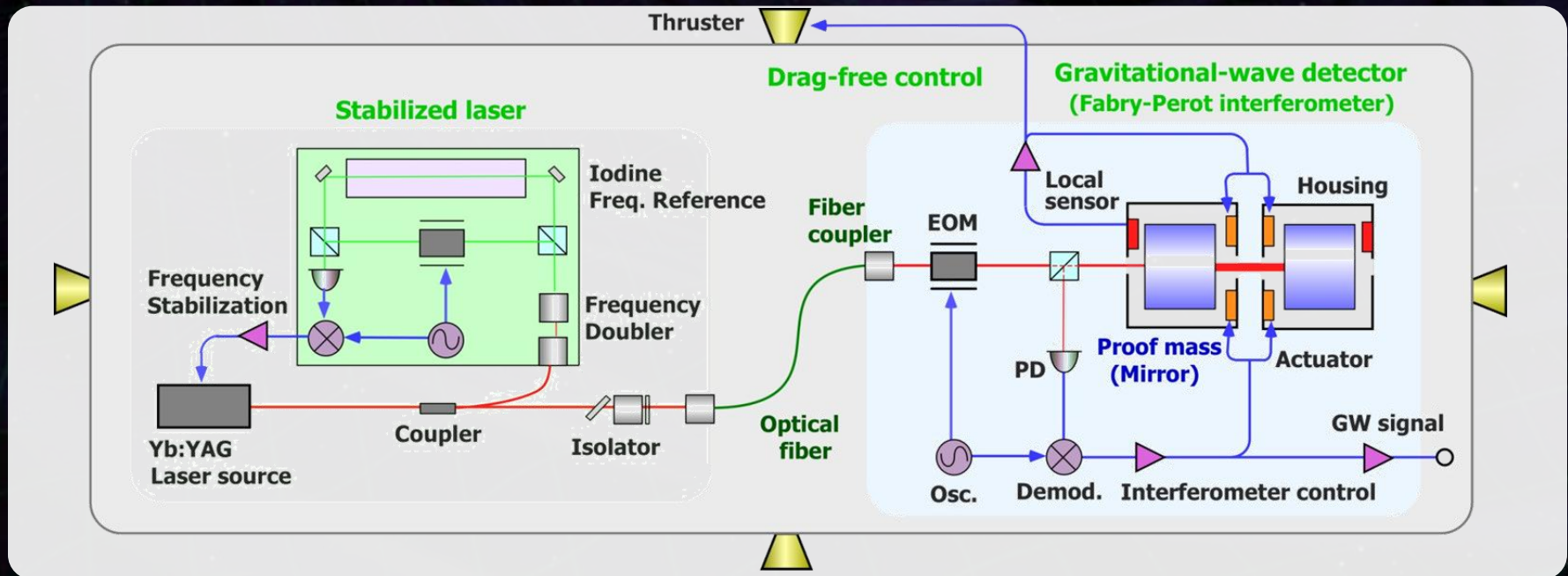
Size :
950x950x1100mm
Weight : 200kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
3N Thrusters x 4



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

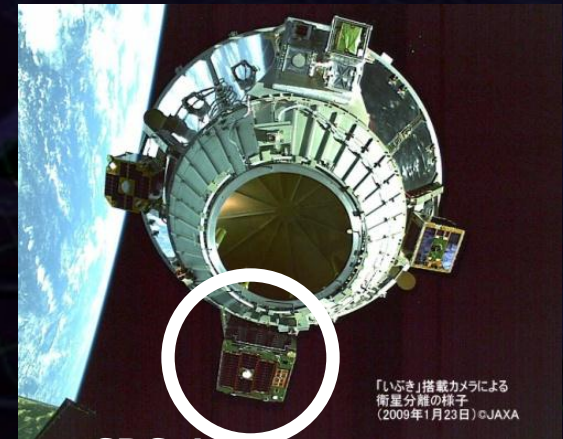
ファブリー・ペロー共振器
フィネス : 100
基線長 : 30cm
試験マス : 質量 数kg
PDH法により信号取得・制御

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



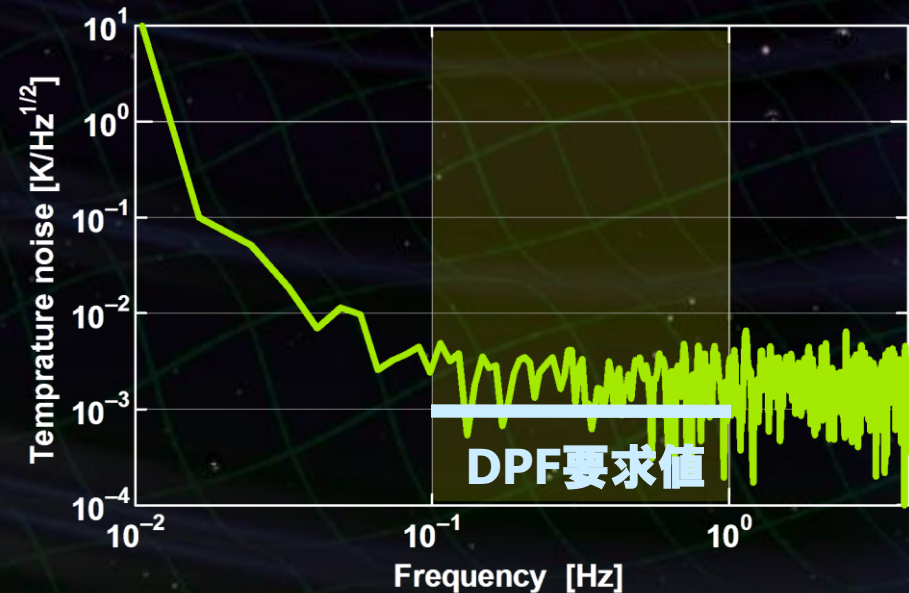
SDS-1

「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)



SWIMによる実証とDPF

DPF衛星のプロトタイプとしての役割

SpC2 制御・信号処理 (通信・信号処理, 電源制御)

Snm DPFミッションペイロード (デジタル制御ボード, AD/DAコンバータ, センサモジュール)

