

B-DECIGO技術サーベイ

技術打ち合わせの活動報告

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

B-DECIGO技術打ち合わせ

- 2019年10月よりほぼ月一ペースで実施
 - 2019年12月まで対面+オンライン
 - 2020年6月よりオンライン
- 2020年8月より技術サーベイを実施
 - 開発項目のリストアップ
 - 項目ごとに要求値を仮置きし、その実現方法ができるだけ網羅的にサーベイ
 - 毎月の打ち合わせで担当者が1つの項目のサーベイ結果を報告
 - これまでに11回実施
- 下記にログあり(IDとPWは聞いてください)
<https://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/decigo/?InternalMeetings>

サーベイ項目1/2

報告月	カテゴリ	番号	サーベイ項目	担当案
2020年9月	1	1	干渉計方式, 制御トポロジー	長野・和泉
	1	2	光学系実装	佐藤
	1	3	光学設計	
2020年8月	2	1	レーザー光源	武者
2020年8月	2	2	光源安定化方式	武者
2021年2月	3	1	鏡・テストマスモジュール	阿久津
2021年2月	3	2	ローカルセンサ・アクチュエータ	阿久津・長野
2021年5月	3	3	帯電除去	和泉
2021年7月	3	4	ローンチロック・クランプリリース	和泉
	3	5	真空系・脱ガス対策	外部エキスパート?
	3	6	熱変動・勾配・温度安定化	外部エキスパート?
2021年4月	4	1	ドラッグフリー・衛星変動抑圧	佐藤
2021年4月	4	2	スラスト	佐藤
2021年6月	5	1	電気-光学コンポーネント	小森・和泉
2021年6月	5	2	変復調・位相検波回路	小森・和泉
	5	3	デジタル/アナログIF (ADC/DAC)	???
	5	3	制御系実装	???

サーベイ項目2/2

報告月	カテゴリ	番号	サーベイ項目	担当案
2020年10-11月	6	1	初期捕捉方式	道村・和泉・佐藤・五十里
	6	2	展開	五十里・伊藤
2020年12月	6	3	リンクアクイジション	和泉・武者（五十里・伊藤）
2020年12月-2021年1月	6	4	共振器ロックアクイジション	長野（道村）
	6		姿勢制御方式・コンポーネント	初期補足の一部
	7	1	軌道選択	佐藤
次回予定	8	1	衛星取り付け・輸送方式	五十里・伊藤 + 勧誘
次回予定	9	1	熱設計	五十里・伊藤 + 勧誘
	10	1	システム設計	
	11	1	運用方式・地上とのデータ通信・衛星間通信	和泉・五十里・伊藤 + 勧誘
2021年9月	12	1	衛星地上試験・検証	伊藤・五十里・長野
	13		冗長性の考え方、宇宙コンポーネントの知識	すごい賢い人(JAXAの人?)
	14		重力波検出器としての絶対キャリブレーション方法の検討	和泉（阿久津）

技術サーベイの現状

- ミッション機器に関連する項目の各論はそれなりにやった
 - 干渉計方式
 - 初期捕捉
 - レーザー光源
 - テストマスモジュール周り
 - ドラッグフリーとスラスト
 - 電気-光学系
 - 地上試験
- 設計・実装関係、真空系、熱、軌道、輸送などはこれから

光源・安定化方式

- 衛星搭載光源、高出力化、波長変換方式、周波数安定化方式などについて、LISAをはじめ先行例をサーベイ
- DECIGOではLISA(やSILVIA)とは波長が異なり、周波数帯も異なり、別途の技術開発が必要

DECIGO/B-DECIGO光源

衛星搭載光源の場合

なるべく自由空間系、固体レーザー・増幅器は避けたい

アラインメントのずれ
光学損傷による出力低下（特に共振器）

DECIGO光源の基本設計



武者さんスライドより

干渉計方式・制御トポロジー

- FPMI(地上)、光トランスポンダー(LISA, TianQin, Taiji, SAGEなどSagnac含む)、Michelson干渉計(TianGO)、FP干渉計(DECIGO)に分類
- 特にFP干渉計については双方向差動方式(長野博論)とBack-linked方式(和泉案)を比較

表 2.7: Fabry-Perot 方式の比較。

方式	DPDFPI	Back-linked
利点	<ul style="list-style-type: none">• シンプルな構成 (=テクニカル雑音の導入経路が少ない)。• ショット雑音レベルの感度が既存の技術で達成可能。	<ul style="list-style-type: none">• 3本の共振器が独立に扱える。• 試験質量の(長さの)制御が不要。
課題	<ul style="list-style-type: none">• 信号取得のために共振器の基線長を調整する必要がある。• 低雑音試験質量アクチュエータが必要である。• 3本の共振器が同相に制御される必要がある。	<ul style="list-style-type: none">• ショット雑音レベルの感度を達成するために、新しい低雑音測定技術の開発が必要。• レーザー光源の数(とそのため必要なリソース)が倍になる。

執筆中のDECIGO White Paperより

初期捕捉(展開、リンク、ロック)

- 初期捕捉要求値を設定し、各段階の
- 打ち上げ展開方式: 他のミッションの例
- リンクアクイジション: 基準・手順の検討
- ロックアクイジション: 要求値を満たすためのアクチュエータ・センサのサーベイ

表 7.7: DECIGO 初期捕捉の精度要求値まとめ。

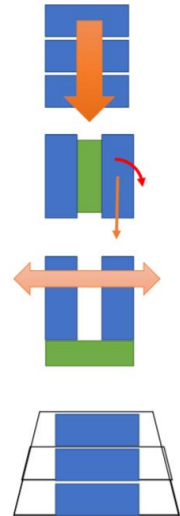
	鏡間の距離の差	鏡間の相対距離変動	鏡間の相対速度	干渉計ビーム打ち出し方向	鏡の姿勢
展開	2 km	-	-	3 mrad	-
リンクアクイジション	同上	-	13 cm/sec	0.46 μ rad	0.23 μ rad
干渉計制御信号を得る	同上	34 cm	1.2 μ m/sec	同上	同上
ロックアクイジション	同上	0.5 nm	23 nm/sec	-	0.035 nrad

表 7.8: B-DECIGO 初期捕捉の精度要求値まとめ。

	鏡間の距離の差	鏡間の相対距離変動	鏡間の相対速度	干渉計ビーム打ち出し方向	鏡の姿勢
展開	40 m	-	-	3 mrad	-
リンクアクイジション	同上	-	1.3 cm/sec	1.5 μ rad	0.73 μ rad
干渉計制御信号を得る	同上	3.4 cm	0.12 μ m/sec	同上	同上
ロックアクイジション	同上	0.1 nm	23 nm/sec	-	0.35 nrad

打ち上げ方式の考察

- 上下スタック
 - 下の衛星に大きな荷重がかかる
- 支柱横付け
 - 接合部でロケット機軸方向の荷重による剪断力をもつ必要がある
- パフに複数結合
 - 衛星間の接触の可能性?
- パフを多段にする
 - 構造的には安全
 - パフ自体の重量が大きくなる
 - パフ分離失敗の可能性?



五十里さんスライドより

執筆中の
DECIGO White Paper
より

ローカルセンサ・アクチュエータ

- 分野で使われるものをかなり網羅的に調査
- リンクアクイジションで達成される 1 mm & 1 urad 程度の精度から、観測に必要な 0.1 nm & 0.1 prad に大きなギャップがあり、間をつなぐセンサーが必要そう(FPまで2段階で進める必要)

センサー (あるいはセンシング手法)

- PDH (L)
 - 規格化PDH (L)
 - FSR測定 (L)
 - 補助レーザーロック (L/A)
 - WFS (A)
 - ADS (A)
 - 透過光WFS (A)
 - 直交位相干渉計 (L)
 - ヘテロダイン干渉計 (L)
 - Phase meter (L)
 - Tilt sensor (A)
 - Phase camera (A)
 - 静電容量 (L) 地上GW検出器
LISA
 - フォトセンサー (L)
 - 光てこ (A/L)
 - シャドーセンサー (L)
 - ToF(レーザー)測定 (L)
 - 武者AOD (A)
 - CCD (L/A)
 - マイケルソン干渉計 (L/A)
 - LVDT (L)
 - Geophone (L)
 - Bragg fiber (L)
 - SH sensor (A)
- L: Length
A: Angle

B-DECIGO技術打ち合わせ (Zoom、2021年1月27日)

6

アクチュエータ

- 静電容量
- コイル磁石
- コイルコイル
- ピエゾ素子
- MEMS
- 熱膨張
- レーザー輻射圧
- 熱輻射
- 重力
- モーター
- AOM (レーザー周波数)
- EOM (レーザー周波数)
- 熱レンズ

B-DECIGO技術打ち合わせ (Zoom、2021年1月27日)

30

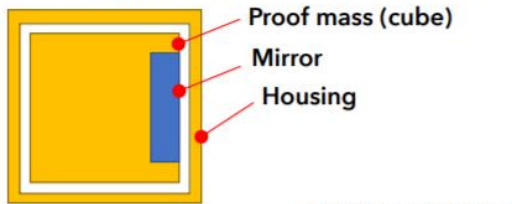
テストマスモジュール

- LISA(2 kgキューブ)とB-DECIGO(30 kg円盤)はテストマスの形がかなり違うため、異なる技術が必要
- 真空系、静電センサなど全て大きくなってしまおう

B-DECIGO (の検出器部の) 技術検討定例会 (仮) 2019年11月の再演
<https://paper.dropbox.com/doc/B-DECIGO--BDFIOsDAY5AbyNpyX0FFfRn7Ag-pV0uTcegXYa5S0EqKkCWM>

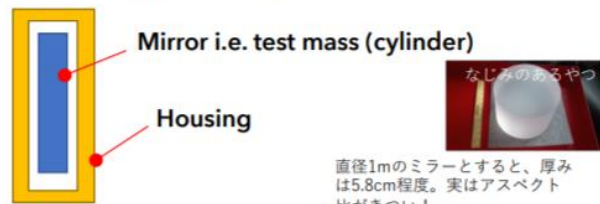
GW検出器部の概念設計を自由に出してもらった結果、慣性センサー部分は大きく分けて次の2タイプに分けられた。
 まずはこのあたりを踏まえつつサーベイしていくのがよさそう？

LISA型から拡張(?)したタイプ (or DPF)



試験マス: **100kg**、直方体 (立方体?)
 - 素材: 非磁性金属 (LPFなら密度20 g/cm³くらい)
 - ミラーを複合でとりつけ
 → ミラー直径が小さい → telescopeをcavity内に?
メリット: LISAの技術で転用できるものが多い、かもしれない (質量が全然違う: LISAは2kgなので、だめかも)。ミラーの曲率はある意味自由に選べると言える。除電機能やロンチロックもスケールアップすればできるかも。
デメリット: Intra-cavity telescopeはお話にならない気がする? ミラーを複合することによる熱雑音?

よくDECIGOの絵でみかけるタイプ



試験マス: **100kg**、円柱
 素材: ガラス (ふつうに合成石英か。密度2.2 g/cm³)
メリット: 地上GW屋としてはこちらのほうが馴染み深いといえる。Telescopeはcavityの外にだせる。
デメリット: **ほぼ全てを完全新規開発**とっておいた方がよい。つまりLISAの慣性センサー技術をそのまま応用はむずかしい (ロンチロックなど: ガラスだから。)。あからさまにLISAのと別物なのでJAXAへの説明時に、全部新規開発と言って正面突破するだけのTRLを稼いでおく必要がある。あと、ミラーの曲率を1000kmオーダーにする必要があり、Sagittaがきつい。

これらの比較とは別に、共通の技術開発要素 (そもそもLISAよりDECIGOできついものは
 - 残留ガス/イオンの低減方法 (LISA Pathfinderはそもそも真空槽を積んでる!)
 - 100kgからの質量を制御しうる低雑音アクチュエータ (たぶん組み合わせになる)
 - 磁気シールド、温度制御

2021年1月13日 (水) B-DECIGO 技術サーベイ・カテゴリ3分科会

阿久津さんスライドより

ドラッグフリー

- TRIAD, MICROSCOPEなどの先行例を詳細に調査
- 実はどれも静電センサを使っていたり、スラスタのタイプも似ていることがわかった

ダイジェスト

佐藤修一さんスライドより

Mission (Related mission)	TM (Size, Material, Weight)	Discharge	Sensor	Dragfree control DoF	Thruster Control type	Sensor noise	ES actuator noise
TRIAD (TIP) (Transit, Oscar, NOVA)	Sphere φ 22mm, Au-Pt, 111g	None?	Capacitance bridge (Electro-static)	3 Translation	Cold gas on-off	-	-
MicroSCOPE (MiniSTEP, STEP)	Cylindrical ?, Pt-Ti(Rh)/Pt-Pt,? 0.47/1.6kg	Wire (Gold, 5um)	Capacitance bridge (Electro-static)	3 Translation 3 Attitude	Cold gas continuous?	4e-11 m/Hz0.5 @1e-2Hz for Int.mass 2.5e-11 m/Hz0.5 @1e-2Hz for Ext. mass	2e-14 N/Hz-0.5 @1e-2Hz for Int.mass 5.2e-14 N/Hz-0.5 @1e-2Hz for Ext. mass
Gravity Probe-B	Sphere φ 33mm, Fused Sillica+NB- coat, 111g	UV	Capacitance bridge (Electro-static)	3 Translation	Cold gas (He) continuous?	1.2e-19 m/s ² /Hz0.5 @ 0.1Hz	-
GOCE (LAGEOS, GEOS3, CHAMP, GRACE, GRACE-FO)	Rectangular 40x40x10mm, Rh-Pt, 320g	Wire (Gold, 5um) (Gold/Pt, 7um for GOCE-FO)	Capacitance bridge (Electro-static)	1+2 Translation 3 Attitude	Ion (Xe)/Cold gas? +MT continuous?	2e-12 m/s ² /Hz0.5 @1e-2Hz for GOCE (1e-10 m/s ² /Hz0.5 @1e-2Hz for GRACE- FO)	-
LISA pathfinder (LISA)	Cube 47x47x47mm, Au-Pt, ?g	UV	Capacitance bridge (Electro-static)		Colloidal/FEFP continuous	~1e-9 m/Hz1/2 @ mHz	~2e-7 N/Hz1/2 @ mHz
TianQin-1 (TianQin)	Rectangular 40x40x10mm, Ti-arroy, 72g	?	Capacitance bridge (Electro-static)	1 Translation	Cold gas continuous?	5e-12 m/s ² /Hz1/2 @ 0.1Hz	
B-DECIGO (DECIGO)	?	UV?	?	3 Translation 3 Attitude	Cold gas? Continuous	?	?

帯電除去

- 先行例を調べた結果、手法は細線かUV光(水銀灯かUV LED)であることがわかった
- LPF(水銀灯)でどうやったかを中心に紹介し、B-DECIGOではどうなるか議論
- 石英鏡の場合は地上望遠鏡での帯電除去の方が参考になる可能性

Design not easy

Several key points

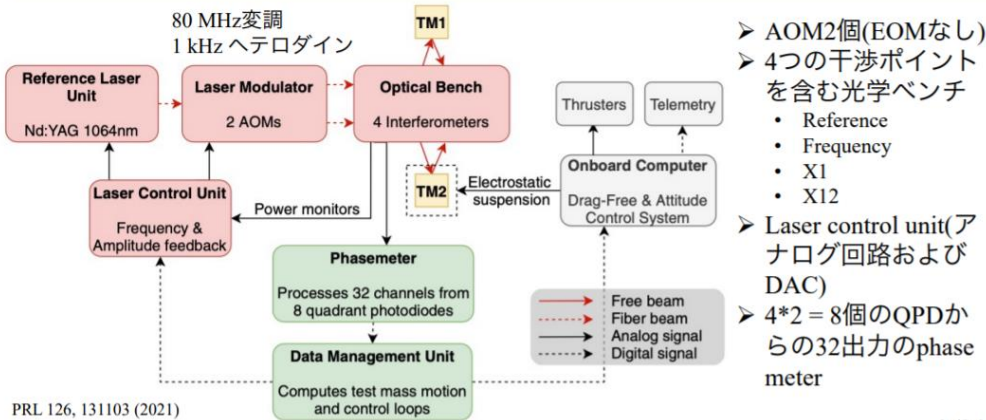
- **Work functions**
 - Vary depending on the surface contamination
 - Pure gold work function (5.2 eV) => 4.2 eV due to adsorbates
 - Observe that the LPF UV lamp (4.89 eV) is not strong enough for the pure gold.
- **Quantum yield**
 - Varies 10^{-6} to 10^{-4} in the presence of surface contamination
- **Apparent yield**
 - Varies depending on the geometry
 - Reflection of UV light, and bias voltage.

和泉さんスライドより

電気・光学コンポーネント

- LPF, GRACE-FO, TianQin-1での変調器、光検出器などについてサーベイ

LISA Path Finder



PRL 126, 131103 (2021)

3/34

宇宙での課題

- 広帯域
 - Phase meterでビートを取得する場合、ドップラーで周波数が変化
- 小サイズ、低消費電力の要求
 - 限られた宇宙対応部品
 - 宇宙実績のある低雑音、高性能素子は限られる
 - リソース、および温度安定性の観点から、低消費電力が求められる
- 低電流雑音、低電圧雑音の両立
 - 低パワーの場合は特に顕著
 - 大口径との両立

小森くんスライドより

24/34

ローンチロック・クランプリリース

- LPFの例を中心にサーベイ
- 材質、真空系とのかねあい、磁性への要求、繰り返し動作の必要性などで設計が変わってくる

ローンチロックまとめ

- Shock Response Spectrum に制限がなければいろいろ使える
 - 爆薬系
 - その他ヘビサイド関数的な機構
- Shock Response に要求がある場合
 - 直動のみ
 - 直動-直動
 - 直動-回転
- LPFでは直動-回転が選択
- 設計を左右する重要なファクタ（衝撃以外）
 - ロンチロックモジュールを真空容器に入れる・入れない
 - 磁性体を許容する・しない
 - 繰り返し操作を要求する・しない

※このほか、ロックしないあるいは揮発性緩衝材を挿入するなどの考え方もある

クランプ・リリースまとめ

- 複数の機能がてんこ盛り
- リリースだけに限って言えば、以下が鍵に見える。
 - 物質の粘着力
 - 機構の機械安定度（ミスアラインメント；摩擦由来）
- 機構
 - 小型で非磁性というと、ピエゾ系しか思いつかない。
 - レンジが必要な場面では、ピエゾモータがまず思い浮かぶ。
 - （普通のAC・DCモータは磁性体が使われる）

※ローカルアクチュエータを高ゲインにするという考え方もあり

Slide 31

和泉さんスライドより

地上試験

- 宇宙開発において開発計画をどう立てていくか、各種試験をどう位置づけるかについて先行の具体例を見つつ報告

B-DECIGOの必要十分な試験とは？（私案）

1. Introduction
2. SS-520-4/5
3. PRISMA
4. SILVIA/B-DECIGO

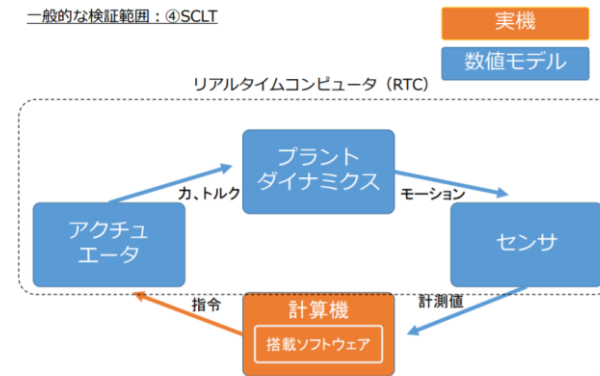
N O.	分類	試験	内容
1	コンポ/サブシステム	コンポ/サブシステム試験	<ul style="list-style-type: none"> 基本的に全ての機能性能を確認したい。立証対照表には全て○がつくことを目指す(システム試験では確認できない部分:事前識別し該当箇所の検証充実化) 性能確認のために特殊な試験系が必要なならば、早めに識別しておく
2	システム	原理検証	<ul style="list-style-type: none"> MATLAB等を用いて、設計、広範囲(1000ケース以上のモンテカルロ解析)な検証作業として実施。
3		SWシミュレータ	典型ケース(～数十ケース)の他、広範囲(1000ケース以上のモンテカルロ解析)な検証作業として実施。
4		SCLT	典型ケース(～数十ケース)のみ実施。
5		DCLT	B-DECIGOでは、EM～FM品に対してDCLTを行うことは不可能と思われる:スケールモデルを用いて典型ケース(～数十ケース)のみ実施。

SILVIAと違い、浮遊鏡周りの計測制御、FP共振器等の性能はコンポ試験までの結果を振りどころにするしかない可能性が高い:充実したコンポ試験計画を立てることは出来るか?または、システム試験できるようにするには?

試験による検証 (GNC性能)

1. Introduction
2. SS-520-4/5
3. PRISMA
4. SILVIA/B-DECIGO

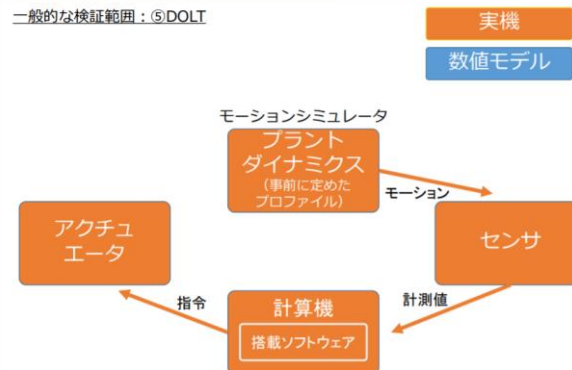
一般的な検証範囲: ④SCLT



試験による検証 (GNC性能)

1. Introduction
2. SS-520-4/5
3. PRISMA
4. SILVIA/B-DECIGO

一般的な検証範囲: ⑤DCLT



まとめと今後

- 技術サーベイを通じて他のミッションでどうしているなどの調査が進んでいる
- B-DECIGOで困難な点も明確化されてきている
- サーベイ結果を技術検討書としてまとめたい
 - 「勉強会」より一歩進めたい
 - 要求値に沿った技術の比較
 - 提案書作成時にも役に立つはず
- 初期捕捉・干渉計方式・
テストモジュールあたり
からそれぞれ書き始めています

DECIGO / B-DECIGO 技術検討書

DECIGO ワーキンググループ

2021 年 12 月 11 日