

# LCGT RSE ロードマップ特別作業班

## 目的

LCGTにおけるRSE実現計画を策定し、提案する。  
技術レベルの現状把握をし、LCGT完成形までの工程の見通しを整合性ある形で取りまとめ、提案すること。  
(設計・技術 開発とプロタイプテスト・組み込み手順など)

## 経緯

### 観測帯域特別作業班

→ LCGT RSE方式の決定

### 「5年目のかたち」特別作業班

→ LCGTロードマップの方向性

RSEの実現に関しては、別途より深い議論が必要

### PLUS

→ 今後1年程度の研究開発方針の議論

# 特別作業班 会合

第1回 4月21日 (水) 17:00-19:00

第2回 5月12日 (水) 17:00-19:00

第3回 6月 2日 (水) 17:00-19:40

参加 (順不同):

黒田, 三代木, 大橋, 梶田, 三尾, 森脇, 齊藤, 大前, 森,  
藤本, 辰巳, 高橋(竜), 我妻, 川村, 上田, ちんたん, 麻生,  
宮川, 安東, 神田, 鈴木, 斎藤, 宗宮, 苔山, 西田, 田越,  
山元, 和泉

# 報告内容

ロードマップ策定には至っていないが、  
主要な方針が定められた → 今回報告し、承認を得る。  
今後の方針を説明

## 内容

- (0) 前置き  
大前提条件、議論の方針, RSE技術について復習
- (1) 到達目標設定 --- 何をいつまでに?
- (2) RSE技術のまとめ --- 技術の現状と今後の見通し
- (3) ロードマップの策定 --- 具体的な計画策定

# 報告内容



## (0) 前置き

大前提条件、議論の方針, RSE技術について復習

- (1) 到達目標設定 --- 何をいつまでに?
- (2) RSE技術のまとめ --- 技術の現状と今後の見通し
- (3) ロードマップの策定 --- 具体的な計画策定

# LCGT基本方針

「LCGTの推進について：基本的な考え方」

梶田先生 (2009.11.30)

•基本方針1: LCGTをR&Dマシンとはしない。

これはあくまで観測のマシンであるので、R&Dは例えばCLIOなどで行う。  
R&Dの結果十分LCGTに入れて効果で出ると分かったもののみを入れる。

•基本方針1.5: 上記基本方針1は8年目からの運転についてもあてはめる。  
十分なR&D成果が出ているもののみ入れる。つまり、full LCGTで入れる  
となっても、R&Dの成果が十分でなければいけない。

•基本方針2:

上記を踏まえて、LCGT, CLIO, ...を用いた8年目当初までのロードマップ  
を作成する必要あり。

# 作業部会検討事項

## (1) 到達目標設定

RSEを中心に 干渉計(光学系, 制御系)を含めて考える。  
LCGTに組み込むための準備完了時期。  
何を持ってRSE 技術が完成した、と言えるのか?

## (2) RSE技術のまとめ

RSE各要素に関して技術レベルのとりまとめ

基本原理, 光学設計, 信号取得・制御法 (光路長, アライメント),  
制御機器ハードウェア・ソフトウェア, 光学素子, 熱,  
雑音評価, 長期間安定性, キャリブレーション,  
(入射光学系, 変調器, 出射光学系)

国内外のR&Dの現状, 今後5-8年間の見通し

## (3) ロードマップの策定

RSE各要素に関して開発計画を立てる。

技術開発の方針提案。

人員, 開発経費などの制約/要求をまとめる。

# RSE技術の復習

RSE (Resonant-Sideband Extraction) :

腕共振器に大光量を蓄えつつ、  
信号成分のキャンセルを抑える干渉計技術

(J.Mizuno 199x ??)

出力ポートに鏡を追加

(SEM: Signal Extraction Mirror)

腕共振器:

重力波の効果 (時空の歪み)を  
光の位相変化(信号サイドバンド)に変換

→ 信号は 内部光振幅・滞在時間に比例

共振器のフィネスが高い方がよい  
(光の平均往復回数を増やす)



信号成分の滞在時間も増加し、  
信号のキャンセルが起こる

SEMにより信号成分だけ取り出す



# RSE技術の復習

マイケルソン干渉計部 --- 検出ポートで暗縞になるように制御

信号成分 : 検出ポートで強めあう → SECで滞在時間が決まる

他の光成分 : 光源方向で強めあう → PRCで滞在時間が決まる



光を蓄えつつ、信号はすぐに出すことが可能。



## ・大光量を蓄えやすい

蓄えられる光量 --- 鏡の光損失で決まる.

RSEは、腕共振器部で大きな光ゲインを持つため、基材の透過損失、マイケルソン部の干渉損失の影響を避けやすい。

## ・鏡の冷却が容易になる

ITMの光透過量を抑えることが可能

→ 光吸収による熱を小さく抑えることが可能。

## ・信号成分の周波数応答

SECの共振条件・鏡の透過率により、取り出す信号の周波数・周波数幅を調整可能。



# 報告内容

## (0) 前置き

大前提条件、議論の方針, RSE技術について復習

- ⇒ (1) 到達目標設定 --- 何をいつまでに?
- (2) RSE技術のまとめ --- 技術の現状と今後の見通し
- (3) ロードマップの策定 --- 具体的な計画策定

# (1) 到達目標設定 – 完成時期

LCGTに組み込むための準備完了時期

⇒ 4年目(2014年度)末までに準備を完了する。

LCGT全体スケジュールが不確定であるが、考えられるどのスケジュールにも対応できるようにするため。

1年目

2年目

3年目

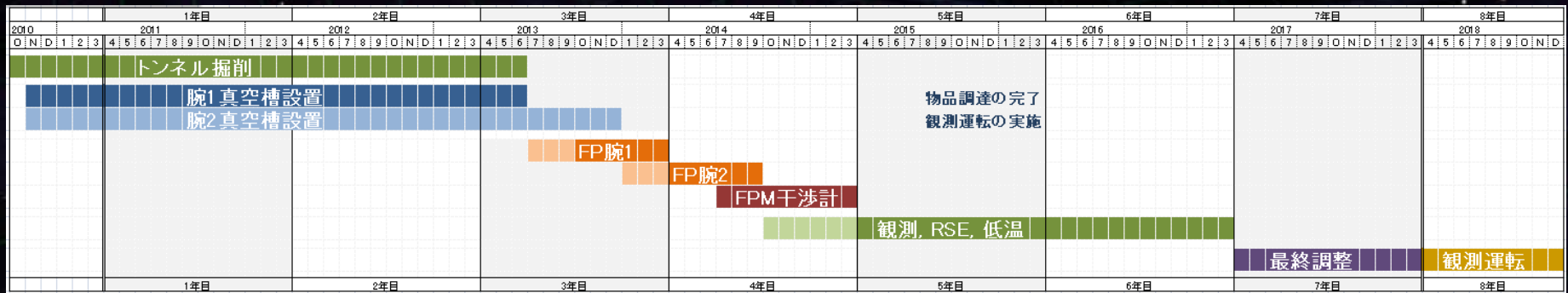
4年目

5年目

6年目

7年目

8年目



トンネル掘削  
真空槽設置



4年目末までに  
RSEの準備を  
完了する



試験観測の実施  
物品調達の完了



最終調整  
観測運転

合意事項:

- (1) 5年目に試験観測を行う。
- (2) 8年目最初からは full LCGTでの観測運転。

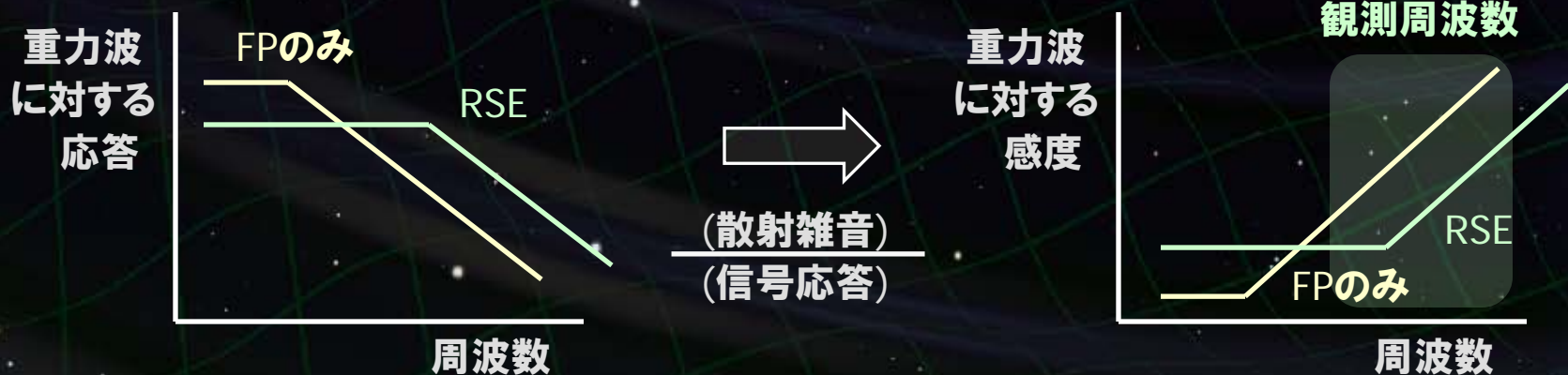
# (1) 到達目標設定 – 達成技術

何を持ってRSE 技術が完成した、と言えるのか？



プロトタイプ干渉計において

- RSE干渉計を安定に動作させること.
- 重力波に対する応答(伝達関数)がRSEによって向上すること.
- RSE導入によって、光量子雑音レベルの低減を確認することが望ましいが、実機に匹敵する労力を要し、困難.
- RSEの効果は伝達関数に集約されている.
- (• RSEは低温化のための技術であり、感度は問わない.)



# 報告内容

## (0) 前置き

大前提条件、議論の方針, RSE技術について復習

(1) 到達目標設定 --- 何をいつまでに?

⇒ (2) RSE技術のまとめ --- 技術の現状と今後の見通し

(3) ロードマップの策定 --- 具体的な計画策定

## (2) RSE技術のまとめ

### RSE技術の現状, 今後の見通し

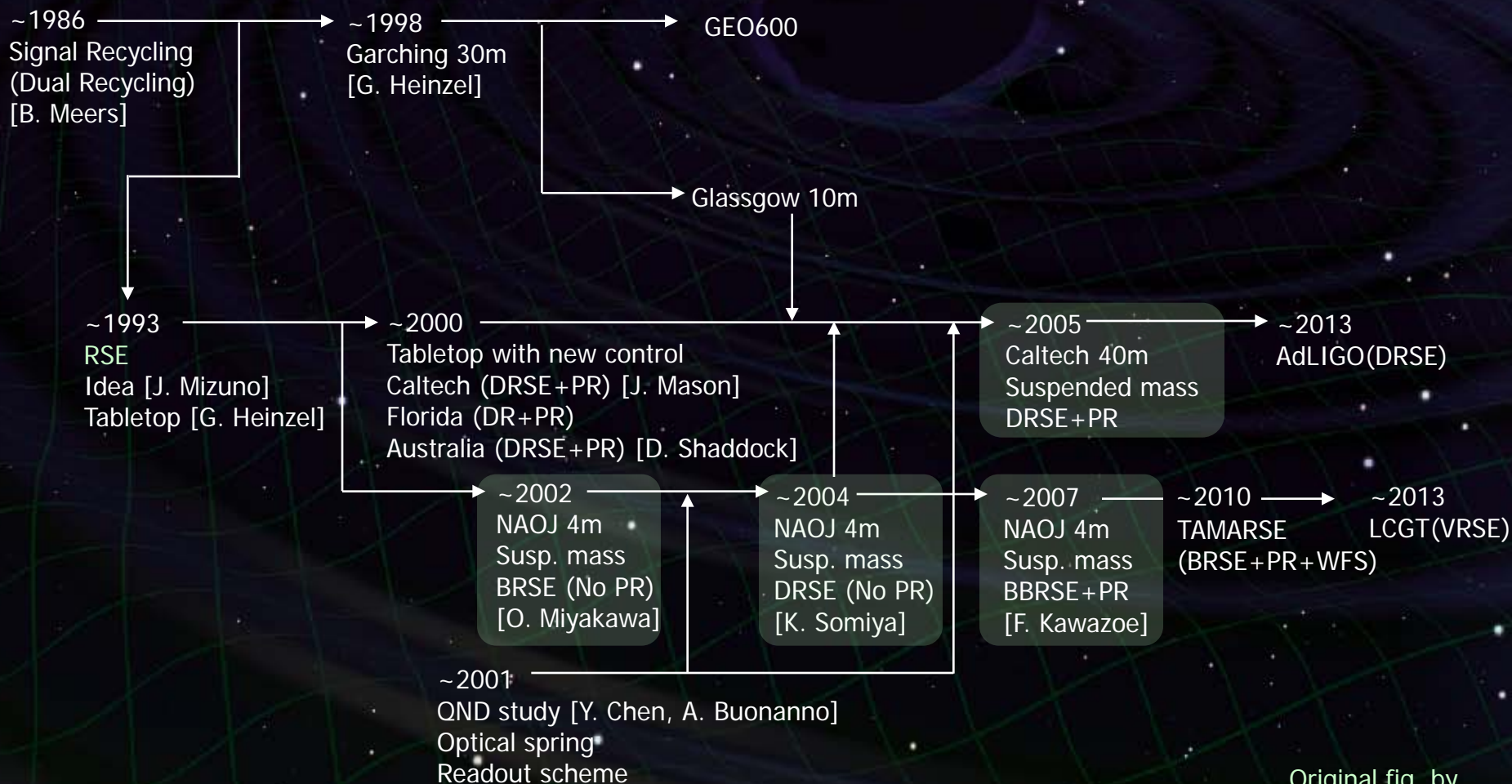
⇒ プロトタイプ試験により, 概念実証は完了している

- RSE干渉計の安定動作が実現されている.
- 重力波に対する応答の向上も確認できている.
- RSE技術においては, 日本のメンバーが世界を牽引している.

詳細・具体的な設計と製作実機の性能評価は必要.

- 光路長・アラインメント制御信号取得.
- 制御系設計と制御雑音, アクチュエータ.
- 制御システムハードウェア.
- DC readout (ホモダイン検波, OMC)
- 高出力光への対応.
- ロックアクイジション.
- シミュレーション検討

# RSE/SRプロトタイプ試験

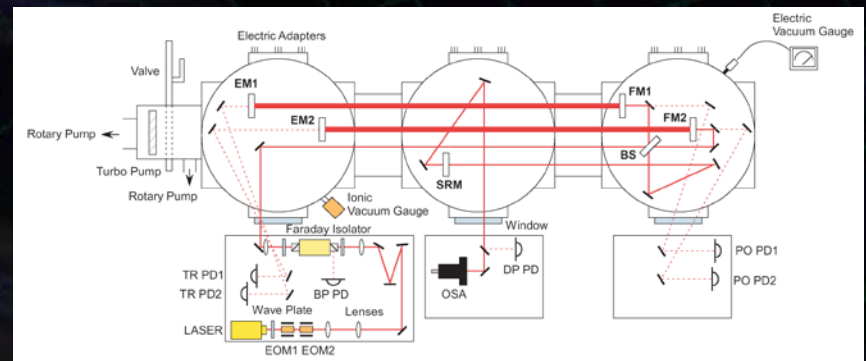
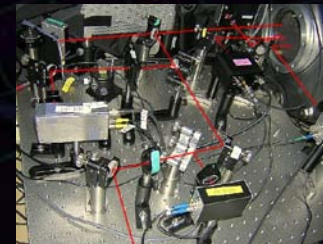
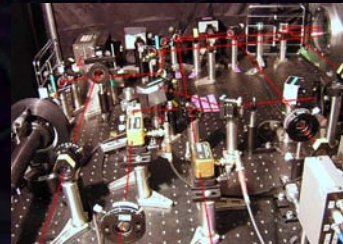


Original fig. by  
O.Miyakawa

# NAOJ 4m プロトタイプ

## RSE開発のために製作された、 懸架された鏡によるプロトタイプ干渉計

- ~2002 BRSE w/o PR (宮川ら) 干渉計動作, 応答関数
- ~2004 DRSE w/o PR (宗宮ら) 干渉計動作, 応答関数 (Two bumps)
- ~2007 BRSE + PR (川添ら) 干渉計動作, 制御信号分離度測定



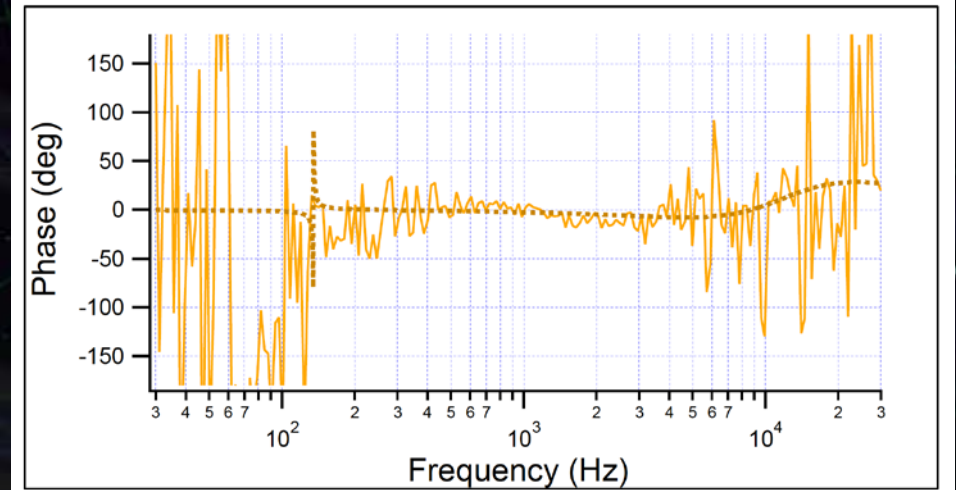
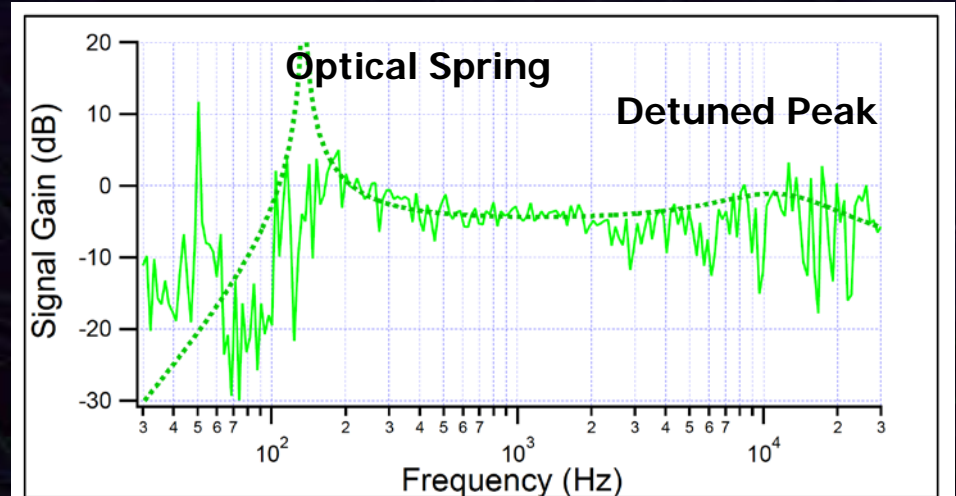
# DRSE 干渉計応答関数 (NAOJ 4m IFO)

DRSE実験 (2004 宗宮ら)

干渉計の動作

Detuningの効果の確認

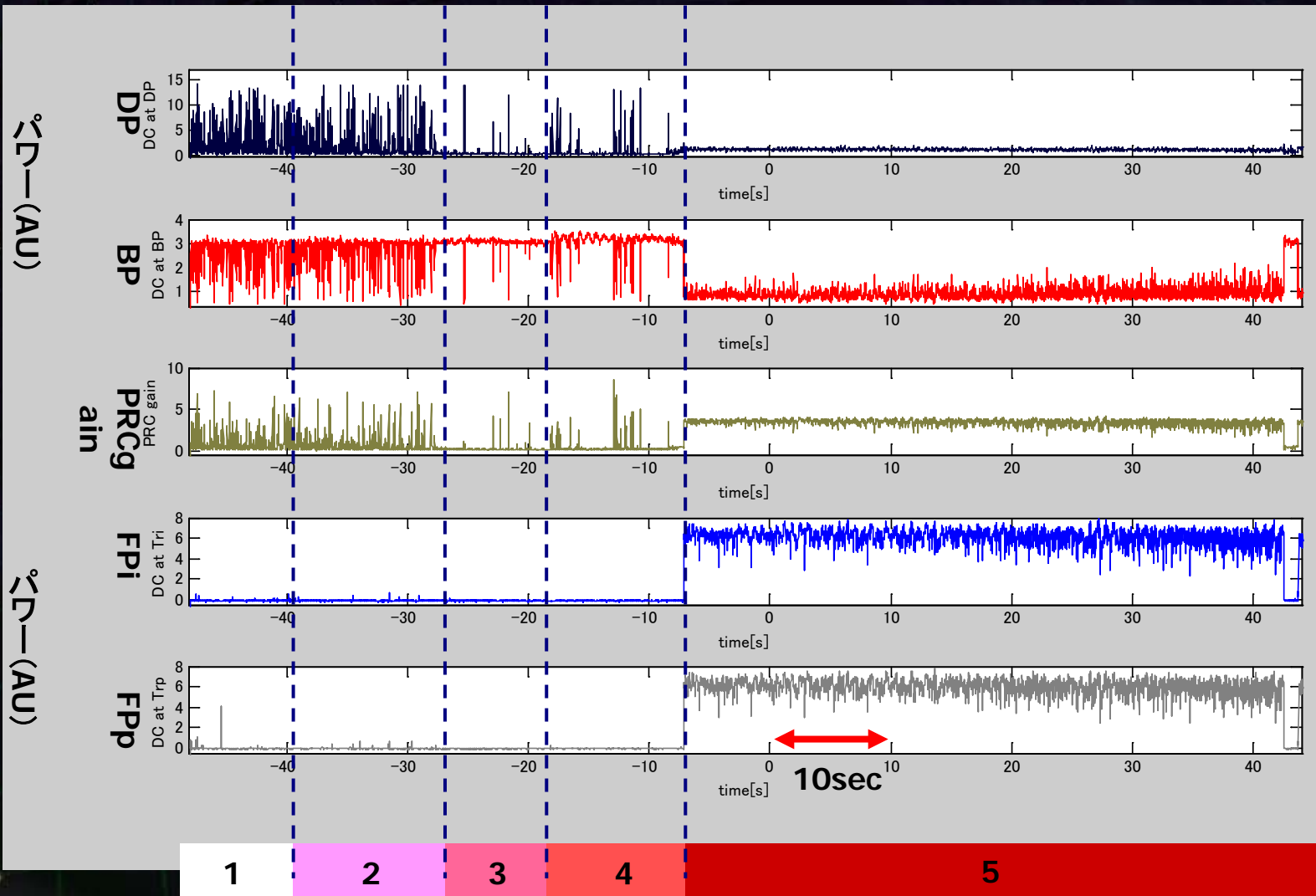
Optical Springの世界初観測





# RSE 干渉計の動作 (Caltech 40m IFO)

PR-BRSE実験 (2007 川添ら)

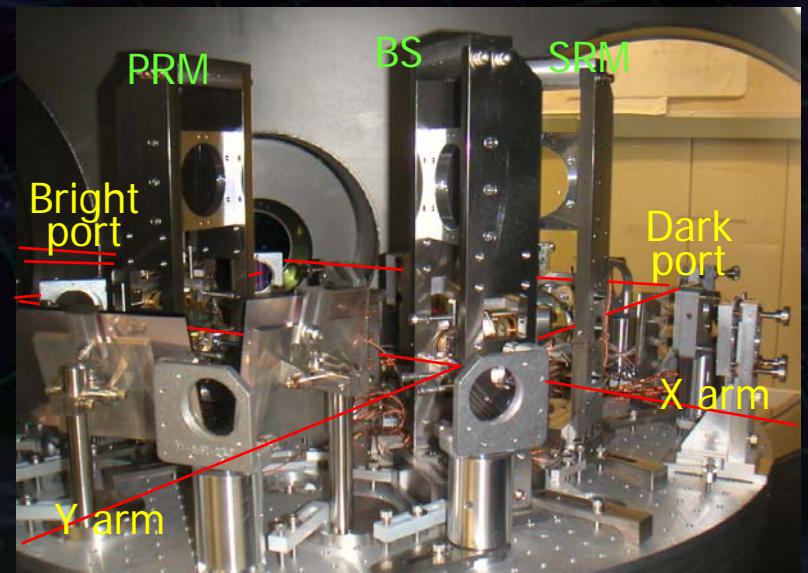
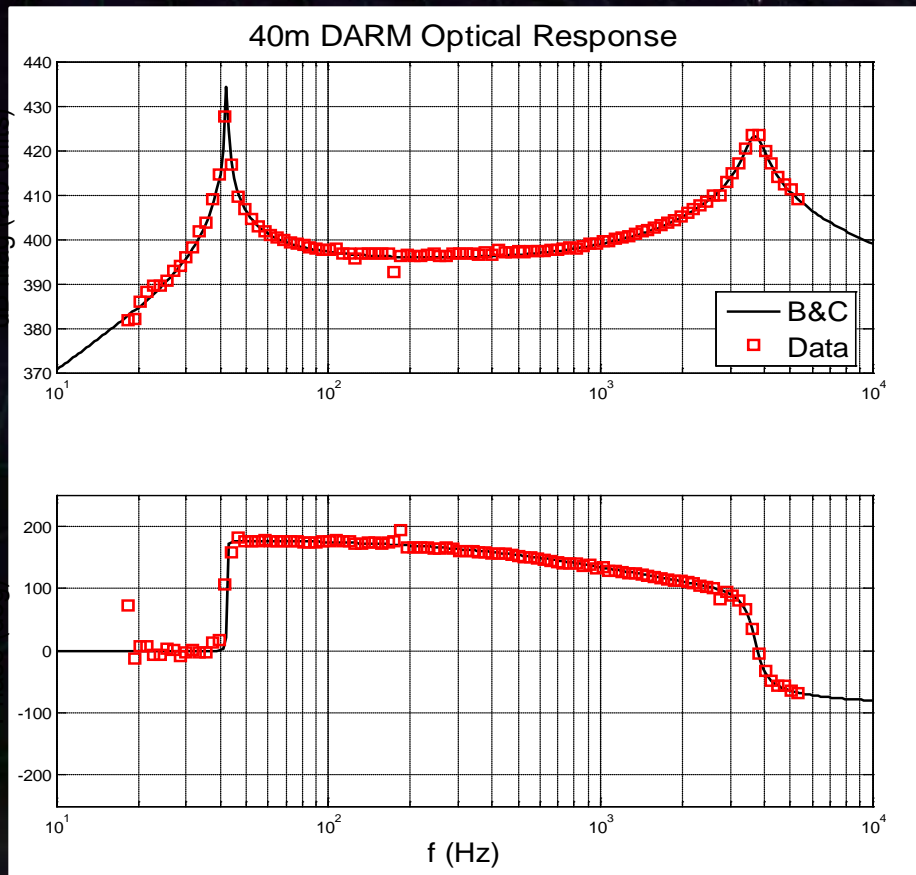


1 2 3 4 5  
1: 無制御 2: MI 3: PRMI 4: CIFO 5: RSE

# PR-RSE 干渉計の動作 (NAOJ 4m IFO)

PR-DRSE実験 (2005 宮川ら)

干渉計動作  
応答関数測定



# RSE技術の現状評価と今後の見通し

## 宮川資料

### LSC (length sensing and control)

	日本	進展度	海外	進展度	備考
感度最適化	済[1]	5	済[2]	5	干渉計帯域幅会議でかなり検討
制御モデル	ほぼ済[1]	4	済	5	最適化はすんでないが、少なくとも解はある
ノイズモデル					
ループノイズモデル	済[1,3]	5	済[2]	5	
変位雑音モデル	一部済[3]	3	済[2]	5	各鏡の地面振動、熱雑音とか
制御実験	4m(済)[4,5,6],TAMA(予)		40m(済)[7]		
二重変調	4m(済)[6],TAMA(予)	3	40m(済)[7]	5	4mではAMを使ったので入射パワーの半分が無駄
二重復調	TAMA(予)	2	40m(済)[7]	5	4mでは差動復調のみ、RFPD応答の最適化もまだ
BRSE	4m(済)[4,6],TAMA(予)	4	40m(予)	2	aLIGOは最初DRSEで、後にBRSEになった
DRSE	未定(4m?[5])	2	40m(済)[7]	5	
VRSE	未定(モデルのみ)[1]	2	未定(モデルのみ)、GEO(済)	2	モデルはできているが、実験はまだ
キャリブレーション	未定	1	40m(済)	5	干渉計があればそれほど難しくはない
デジタル制御	CLIO(構築中)[3]	3	40m(済), LIGO(済)、GEO(済)、VIRGO(済)	5	
ローノイズ化	CLIO(構築中)	3	同上	5	
アラインメント等のスクリプト	CLIO(構築中)[3]	3	同上	5	
noise budget	未定	1	同上	5	アナログではTAMA,CLIOで実績有り[9]
低周波防振	SAS, IP(済)[10,11]	4	eLIGO(済)、VIRGO(済)	5	低ノイズ環境でのテストが必要
振り子デザイン	高橋[12]	2	LASTIでテスト中(済)	5	
新防振装置プロトタイプ	未定	1	LASTIでテスト中(済)	4	
新振り子でのロックのデモ	未定	1	LASTI(予)、VIRGO(済)	3	aLIGO用はまだロックしていない?
信号増幅	4m(済)[4,5,6]	3	40m(済)、GEO(済)	5	4mでDRSEはできたのか?
感度向上実験(散射雑音領域)	未定	1	40m(済)、GEO(済)	5	
感度向上実験(輻射圧雑音領域)	未定	1	未定	1	
輻射圧雑音の観測	NAO(予)[13]	3	LASTI(予)	3	共に超軽量鏡を使った実験

# 報告内容

## (0) 前置き

大前提条件、議論の方針, RSE技術について復習

(1) 到達目標設定 --- 何をいつまでに?

(2) RSE技術のまとめ --- 技術の現状と今後の見通し

⇒ (3) ロードマップの策定 --- 具体的な計画策定

## (3) ロードマップの策定

### 作業部会で決定された方針

- 高感度なRSEプロトタイプ干渉計開発は必要ない。
- 具体的な設計, シミュレーション検証,  
LCGT本体での作業に労力を割くべき。
- 国外の研究者の招聘は必要。
- 国際協力で進めることは不可欠。

# 今後の方針

## 具体的なロードマップ策定を進める

1年目

2年目

3年目

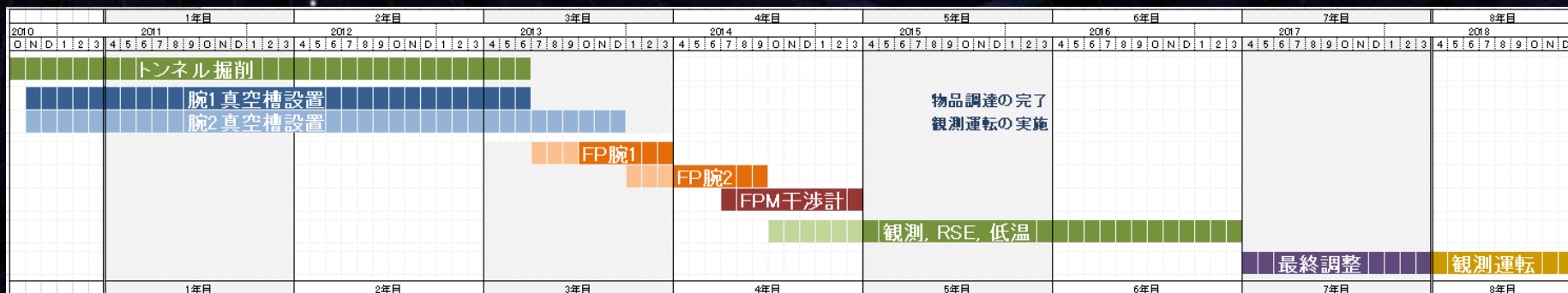
4年目

5年目

6年目

7年目

8年目

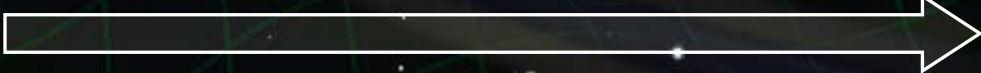


↑  
トンネル掘削  
真空槽設置

↑  
4年目末までに  
RSEの準備を  
完了する

↑  
試験観測の実施  
物品調達の完了

↑  
成速に最終  
観測



この間の開発スケジュール,  
LCGTコミッシング手順を策定する.

# ロードマップの策定：制約条件

## ・時間的制約

7年目で建設・目標感度実現 → 8年目から観測開始

5年目で主要機器の手配完了

最初の2年半は、掘削・真空槽設置

⇨ 現地インストール、シェイクダウン作業：4年半で行う

(安定化光源、入出射光学系、防振系、干渉計、  
信号取得・制御系、低温系、ノイズハンティング、  
長期安定度、観測体制、試験/中間観測)

## ・経費の制約

LCGT経費は、ほぼ建設費 → 研究開発費に制約

他の要素を圧縮することで捻出は可能。

## ・人的制約

## ・地理的制約

利便性と静寂環境のトレードオフ

LCGT環境整備との兼ね合い

# コミッショニングについての注意事項

## • 時間的制約が厳しい

→ 実地での作業時間短縮を強く意識する。

• インターフェース (機械的, 光学的, 電氣的)  
の確認と仕様策定。

• 単体での性能評価試験。 → **性能評価設備は必須。**

• インストール手順の事前確認, リハーサル。

## • 干渉計のインストール, シェイクダウン, 試験観測

最終段階で目標感度を実現することが第一優先。

(途中段階での高感度化のための廻り道は想定しない, 状況次第?)

片腕 → 両腕 → FPM → RSE の段階を経て進める。

PRM + SEMはセットでインストールするべき。

低温技術をいつ, どのように導入するかはTBD。

次の段階に進むための基準を明確にしておく。

各段階で連続動作(試験観測運転)を実施。

5年目終了時までには解析可能な観測データを得る。



# 検討事項

## 要検討事項

- RSE(+干渉計)技術タスクリストと開発計画.
- コミッショニング方針と順序の策定.  
低温技術, 試験観測との兼ね合い.  
途中段階での感度・観測についての方針.  
コミッショニングを容易にするための予備機器の準備.
- 技術的リスクマネジメントとしてのオプション検討.
- プロトタイプで得るものもある → リソースとの兼ね合いで検討.

# まとめ

## (1) 到達目標設定

RSE技術は 4年目(2014年度)末までに準備を完了する。

RSE 技術到達目標

プロトタイプ干渉計において

- ・RSE干渉計を安定に動作させること。
- ・重力波に対する応答(伝達関数)がRSEによって向上すること。

## (2) RSE技術のまとめ

プロトタイプ試験により、概念実証は完了している

詳細・具体的な設計と製作実機の性能評価は必要。

## (3) ロードマップの策定

RSE各要素に関して開発計画

- ・高感度なRSEプロトタイプ干渉計開発は必要ない。
- ・具体的な設計, シミュレーション検証, LCGT本体作業に労力を割く。
- ・国際協力で進めることは不可欠。

技術開発の方針・ロードマップの策定。

人員, 開発経費などの制約/要求をまとめる。

終

# 参考:「5年目のかたち」 作業班のまとめ

## 「5年目のかたち」特別作業班まとめ (2010.1.30)

大橋、麻生、安東、川村、神田、宗宮、三尾、宮川、三代木、山元、山本、(梶田)

### 1. LCGT7年計画での位置づけ(5年目)

7年目に地下、低温の高感度(RSE)レーザー干渉計を完成させる。その間のどこかで、常温干渉計を運転し、解析グループへのデータ提供が可能な数ヶ月の観測を行う。ここでは、その実行時期として、4年半から(5年目)を想定している。トンネル掘削完了後1年間でインストール可能なシステム構成をとるのが妥当である。その後、RSE、低温についても段階を追って組み込んでいくことになる。

### 2. 5年目の干渉計 configuration は?

今のところ、この段階ではRSEを組み込まないという想定であるが、R&Dが予想より早く進めば、この時点で組み込むことも可能である。パワーリサイクリングだけを組み込むことは想定外とする。もし、高出力レーザーが調達できれば、それを組み込むことは可能である。

### 3. RSEをどうやって実現するか?

LCGT本体ではなくプロトタイプ干渉計を用いたR&Dを想定するが、この作業部会の範囲を超えており、LCGT全体で議論すべきである。

### 4. 5年目の観測とは?

単なる試験観測ではないものを想定する。ただし、重要な前提条件として、5年目から7年目へのつながりを阻害しないことをあげる。(つまり、この段階で感度の最適化は考えないという意味である)

# 参考: 「PLUS」作業班のまとめ

## 「PLUS」特別作業班まとめ 取りまとめ: 三代木 (2010.4.4)

(基本方針) LCGT用デザインに沿ったR&Dを行う。

(継続実験について)

2010年は、

•CLIO – Degital (宮川)

CLIO-低温関係 (LSPI, Heat Link防振、データ評価など)(三代木・内山)

•TAMA - RSE Alignment (辰巳)

•SAS開発 (主に、センサー系)(高橋)を行う。

SASは完全に人員不足なので、人員の明確な配分を行う。さらにエフォート設定で増やす。TAMA-RSEにも人員を補給する必要がある。あるいはエフォート設定。

•サファイア基材開発(三尾) 基材開発そのものは難しい。なので、宇宙線研共同利用を原資に我々自身が、提供された基材の性能評価を行えるために、吸収測定装置の開発と測定を最優先で継続する。

•サファイア懸架(鈴木) 現状、情報収集、試行錯誤を行うしか対処できず。

(LCGT準備について)

LCGT用デザイン用デザインの早急な構築に関して

•RSE信号取得の最終設計。

•一番最初に構築されると思われる入射光学系

(MC, R-cavityの構成、その防振系)の設計。

が緊急課題なので、特別作業班を作ってもらい、議論する。

