

コミッショニングの諸問題

Koji Arai (Caltech)

Prologue: Death march senario

201X年: iKAGRAのコミッショニングはサチュレーションを迎えていた

@神岡

「先月までやっていた観測でへとへと」

「東京からは人が来ないし。物も送られてこないし。」

「なのに計画ではもうすぐbKAGRAにアップグレードするんだって」

「それでそれは誰がやるわけ？ また現場任せ？」（現場の平均年齢35歳）

「そもそも低温化してもメリットがある感度まで達していないのに？」

「さらに感度上げるとか無理筋。ネタも尽き気味なのに・・・」

そのころKAGRA Head Quarter@東京では

「インストールは責任を持ってやったので、あとは現場に託すしか」

「現場では何がおこっているんだろうねえ・・・」

「最近、感度よくなってないけど、きっと現場の人たちが装置を一番わかっているのだから任せた方がよいのだろうね。」

「うーん。やることがないから第3世代干渉計のR&Dをして将来に備えましょう。」

Introduction: コミッショニング

- お題：
「どうすればみんなが意欲をもってbKAGRAまでやっていけるか（何が起こるとiKAGRAではてて、bKAGRAまで行き着けなくなるか）」
- Key: 「コミッショニング」

1. コミッショニングの特殊性

2. コミッショニングの加速

3. コミッショニングのメンタリティ

Introduction: コミッショニング

- コミッショニング？

「最終的な性能」を出すまでのプロセスは

設計 -> 製作 -> インストール -> **性能出し**

- で、なぜそれが問題に？

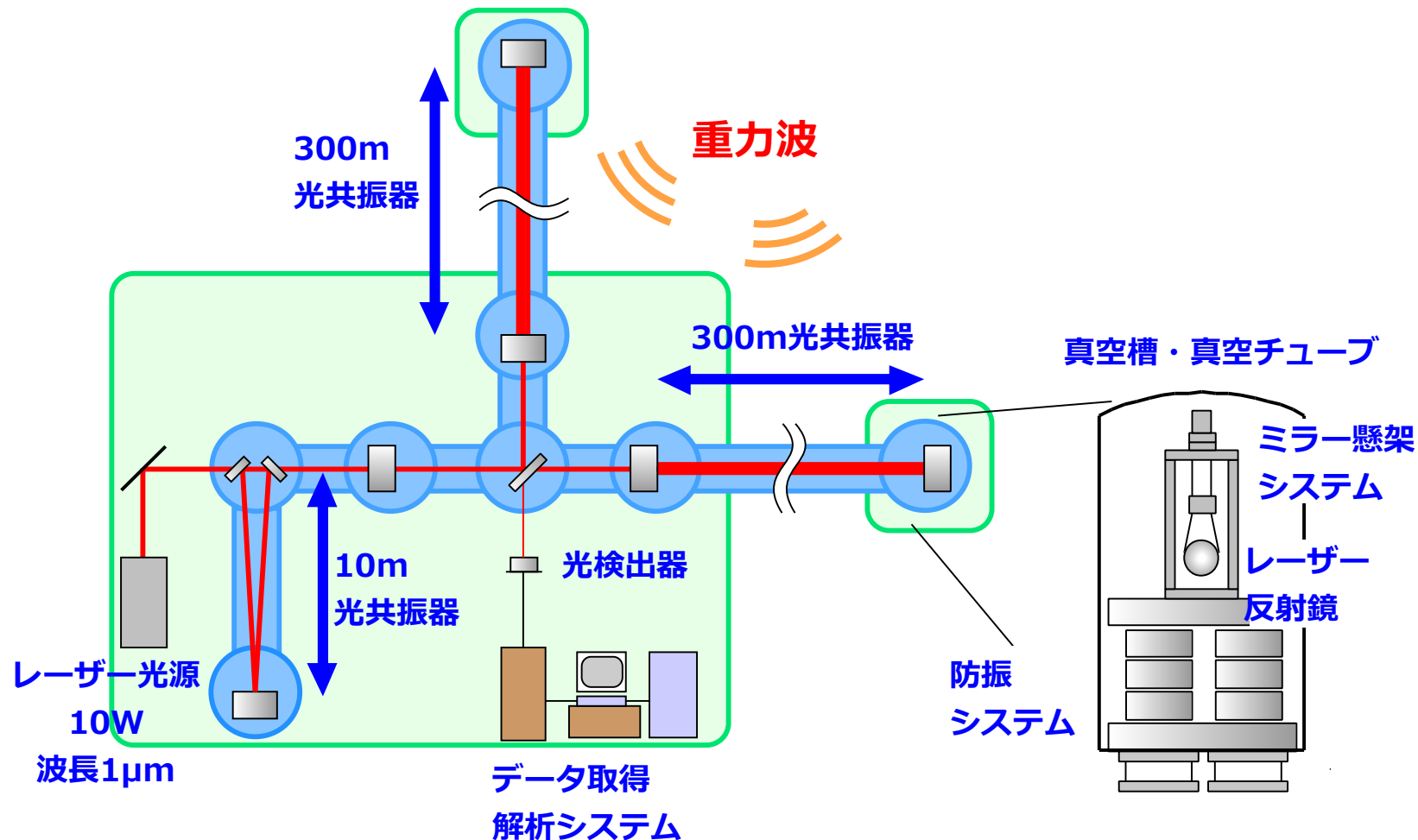
コミッショニングは

- 計画を立てにくい
- いっぺんに働ける人数も、コミッショニング出来る人も限定される
- それゆえに、すごく時間がかかりがち
- 結果として、もくろみ通りに進んだ例がほとんどない(重力波業界では)
- 精神的にもタフ

コミッショニングの特殊性

コミッショニングの特殊性

■ 装置を設置する・・・



■ だけではうごかない!!!

コミッショニングの特殊性 ～スケーリング問題

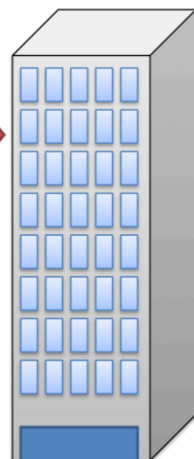
- テーブルトップ等研究室レベル実験でも同様のプロセスを経る
設計 -> 製作 -> インストール -> 性能出し
- **なのに大きな装置になると、なぜわかりにくいのか？**
 - テーブルトップだったら簡単にできるはずのことが全然簡単じゃない
真空容器の中 x 吊られた大きな鏡 x クリーン環境 x 長い共振器
 - 装置が複雑になりすぎて簡単なはずの事同士が絡み合って複雑
技術的にだけじゃなく、行程的にも
道具の準備 x 作業場の確保 x 人員の配置 x スケジューリング
 - 要求がいちいち厳しい
 - テーブルトップではあっという間に出来てしまうので、
意識する必要のないことまで考える必要がある

スケーリング問題

コミッショニングの特殊性 ～スケーリング問題

建物を建てる

超高層ビル



同じ方法論は
通用しない！



犬小屋



“規模や問題が目に見えにくい”
ので自分が大破綻に向かってまっ
しぐらなことを全く自覚せずに、問
題が表面化してどうにもならなくな
るまで作業を進めることができまし
まうのがソフトウェア開発の恐ろし
い所なのです

From: 「ゲーム開発プロジェクトマネジメント講座」

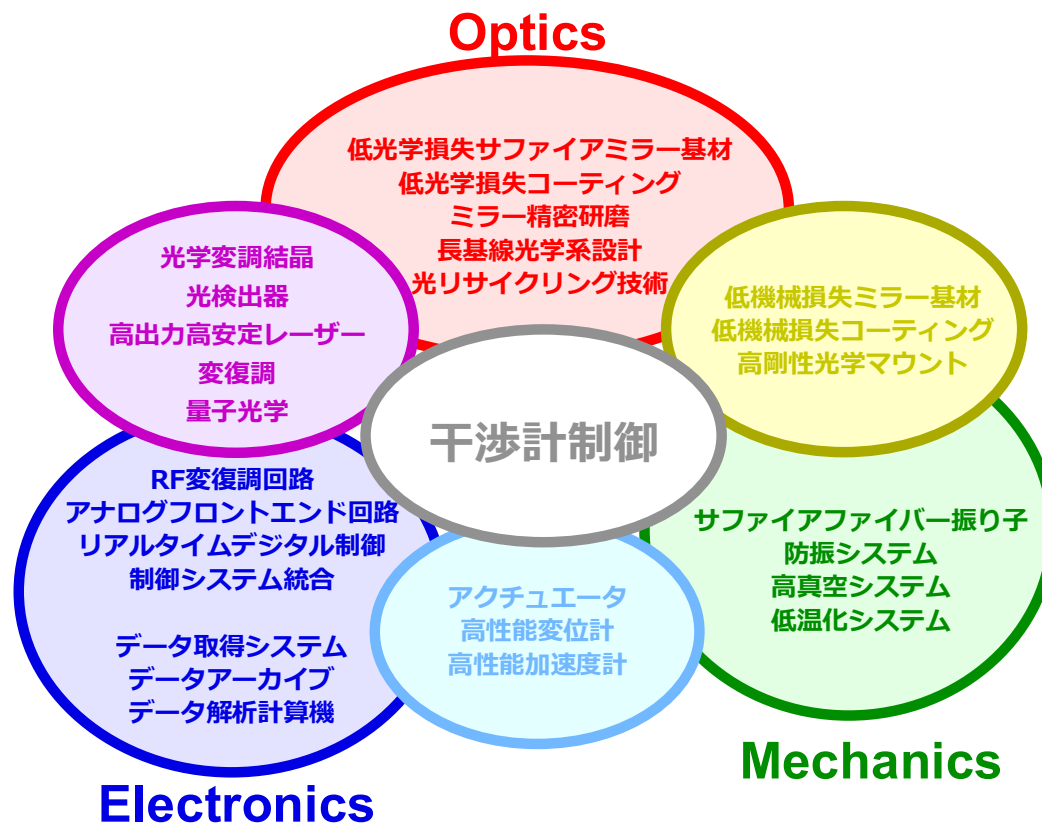
(株)スクウェア・エニックス CTO 橋本 善久

スケーリング問題以外にも、なかなか参考になります

<http://www.square-enix.com/jp/info/library/dldata/PM/PM.pdf>

コミッショニングの特殊性 ～スケーリング問題

■ 干渉計型重力波検出器の三大技術要素



各サブシステムは個別の開発が可能

しかしサブシステムを干渉計にくみ上げる経験は
テーブルトップでは培えない

コミッショニングの特殊性 ～スケーリング問題

- プロトタイプ干渉計は「コミッショナー育成機」
(世界的に & 多少の例外を除き)
- 日本はかつて (今も?) プロトタイプ大国
 - UT 3mFPMI, NAOJ 20m (LISM), ISAS 10m/100m DL, CLIK, NAOJ 4mRSE, TAMA300, CLIO
- しかしプロトタイプはリソース食い(人・金・時間)
- だからプロトタイプでの作業は直接「本体」の
コミッショニングに適用可能になっていなければならない
(=プロトタイプのアクティビティはマネージメントの管轄)

コミッショニングの加速

コミッショニングの加速～定量化問題

- コミッショニングは思っている以上に時間がかかる
 - でもどれくらい？
- コミッショニングは建設プランの中で議論の俎上に載りにくい
- なぜか？
 - 具体的になんの作業を指しているのか分からない
 - 何が起こるのかよく分からない
 - どこがコスト・時間・人を投入すべきポイントかわかりにくい
- なのでどうしても
「XXXのコミッショニングには、ざっくり半年」
とかいう言い方になってしまう

コミッショニングの定量化問題

TAMA-SASコミッショニングの例

from JGW-G1101138-v1

Category			Work Load (Person*Day)	Work Load (Person*Day)	Explanation of the category	
R&D	3mSAS		95.0 (4.5%)	317.2 (15.0%)	R&D at Univ of Tokyo	
	Aux Sensors		125.5 (5.9%)		Development of photo sensors and optical levers that were not included in the initial plan	
	Whitening Filter		96.8 (4.6%)		Development of circuits that were not included in the initial plan	
Preparation	Logistics / Cleaning		115.9 (5.5%)	753.1 (35.6%)	Delivery and cleaning of the parts	
	Sensor/Actuator/Cable		190.5 (9.0%)		Sensors (Accelerometers/LVDT), Coils (Platform/Testmass), <u>Cables</u>	
	Digital control		164.3 (7.8%)		Digital Control (Hardware / Software incl. coding)	
Assembly	Inverted Pendulum		82.5 (3.9%)		Assembly & Initial Tuning	
	MGAS Filters		82.5 (3.9%)		Assembly & Initial Tuning	
	Payload		117.4 (5.6%)		= Platform + Recoil mass + Test mass	
Installation	EM1		59.2 (2.8%)	99.1 (4.7%)	Installation of the 1st SAS	
	NM1		20.5 (1.0%)		Installation of the 2nd SAS	
	NM2		16.0 (0.8%)		Installation of the 3rd SAS	
	EM2		3.5 (0.2%)		Installation of the 4th SAS	
Commissioning (SAS)	EM1	IP	107.2 (5.1%)	789.4 (37.4%)	Tuning of IP, Diagonalization of the sensors (ACC/LVDT), Control test, <u>Sensor trouble shooting</u>	
		Payload	28.8 (1.4%)		Transfer function measurement, <u>Trouble shooting (Platform touching)</u>	
		Aux Sensors	146.3 (6.9%)		Optical lever setup & measurements, Torsion sensor (photo sensor) setup & measurements	
	NM1	IP	114.5 (5.4%)		209.2 (9.9%)	定量化は可能 Elogやweekly meetingの minutesを駆使して 定量化した例
		Payload	24.3 (1.1%)		158.3 (7.5%)	
		Aux Sensors	70.4 (3.3%)			
	NM2	IP	89.7 (4.2%)			
		Payload	14.0 (0.7%)			
		Aux Sensors	54.7 (2.6%)			
	EM2	IP	52.7 (2.5%)			
		Payload	33.0 (1.6%)			
		Aux Sensors	53.8 (2.5%)			
Commissioning (IFO)	Single SAS test		43.5 (2.1%)	154.2 (7.3%)	Performance evaluation of EM1 SAS using the 300m cavity	
	One arm test		30.2 (1.4%)		Performance evaluation of a pair of SASs using the 300m cavity	
	Two arm test		28.8 (1.4%)		Performance evaluation of four SASs using the two 300m cavities	
	Full IFO test		51.6 (2.4%)		Sensitivity tuning of the whole interferometer (SAS related only)	
Total Work Load (Person*Day)			2113.0	4台導入=2000人日		

13

定量化は可能

Elogやweekly meetingの
minutesを駆使して
定量化した例

4台導入=2000人日

コミッショニングの加速～定量化問題

■ Remarks

- SASの例は事後の定量化なので高精度
- 実際の定量化作業は非常にマネージメントコストがかかる。そもそも個々まで出来る人が世の中に存在しない。
(by 某大企業管理職)
- 少し進めて、あとからチェック。フィードバック制御
(先ほどのゲーム開発の人)
- グローバルの最適化はあきらめて、ローカルの最適化をしろ
(Rana)
- スケジュールや予算に非常用の予備をもたせる(LIGO)

コミッショニングの加速

XXXの導入に
「YYY人・日」の工数がかかる

- 導入にかかる日数をどうやって減らすか?
 - A) 工数を減らす
 - B) 人数を増やす
 - C) 一日の総労働時間を増やす

コミッショニングの加速

- **A) どうやって工数を減らす？**
- **その0 もちろん各サブシステムの品質が高いことが前提**
- **その1 コミッショニングの自動化**
 - アラインメント調整（WFSのことではありません！）
 - キャビティ自動ロッカー(PMC/IMC/Arm/OMC)
 - 各種制御設計(SAS/LSC)
 - カップリング調整(SAS対角化, Suspension Angle-2-Length, Length-to-Angle, MICH->DARM, PRC->DARM, etc…)
 - Seismic Adaptive Feedforward
 - ロックアクイジション・スクリプト
 - サイエンスモード・スクリプト
 - 干渉計各種設定記録
 - **ノイズバジェット**
 - 他

コミッショニングの加速

■ 具体例：アラインメント調整の例

- 手動で共振器の鏡の向きを調整（30分でできるとする）
- これを毎日一回おこなうとする
- => 180時間消費 (= $360 \times 30 / 60$ 時間)
- Ditheringを使用した計算機スクリプトによる調整（5分）
- その間カップラーメンを食べて良し
- => 30時間消費 (= $360 \times 5 / 60$ 時間)
- 差し引き：
150時間 ~ 20日(=1月)をコード開発に回しても1年でペイする
しかもカップメンを食べる余裕すらあり
(たぶん、まだ差を過小評価している)
- さらに、このスクリプトは多数の共振器にコピーして使える

コミッショニングの加速

もし、アラインメントを手動で
調整している人がいたら
多大なリソースをムダにしていることに
気づかないとダメです

コミッショニングの加速

- A) どうやって工数を減らす？
- その2 システムの冗長化
 - 必要不可欠ではないが、あると便利なセンサーやアクチュエータ
 - DAQシステム
 - SAS・鏡の位置・姿勢センサー
 - 各種光ポートでのCCDセンサー
 - 真空チューブ内散乱光センサー
 - 設計上必要ではないががあると有用なRF光検出ダイオード
 - 他
 - これらを使ってコミッショニングのしやすさを改善
 - 「今はテストだから後でインストールすればいいや」と言うことはない

**働けば働くほど楽になる
コミッショニング！**

コミッショニングの加速

- B) 人数を増やす
- その1 干渉計作業に従事できる実質人数を増やす
- えてして干渉計には一人のエキスパートがとりついてその他の人が手を出せない状態になることがある

コミッショニングのスーパーマン問題

しかしこれはダメです
メインのエキスパートは
周りの人を駆動しなければいけません
(Job Delegation)

コミッショニングの加速の例

- スーパーマンが1人で実験した場合 総仕事量 1
- 1人子分を取って実験した場合 総仕事量 1.3
 - スーパーマンの効率が落ちる 0.8
 - 子分が仕事をする分 0.5
- 2人子分を取って実験した場合 総仕事量 1.6
 - スーパーマンの効率が落ちる 0.6
 - 子分が仕事をする分 0.5×2
- 「スーパーマン」自身は自分の効率が落ちるから不満
- だが全体での仕事量は増えているということに注意
- プロジェクトが大きくなるほど各個人の効率が落ちるのは自然
- 全体の仕事量を増やす観点が大事

コミッショニングの加速

- **B) 人数を増やす**
- **その2 オフサイトでの開発比率を増やす (Offloading)**
- 回路・メカの開発を現地で行わない。
- オプティクスをモジュール化してインストール
- 干渉計制御のコード・スクリーン・スクリプトを可能な限りオフサイトで開発し、現場にコピーする。

サスペンションや干渉計の挙動をデジタル制御システム内で
エミュレートすることが潜在的には可能

(GWADW2010 Simulated Plant Approach (LIGO Document G1000546)

<https://dcc.ligo.org/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=11804> (public)

コミッショニングの加速

- C) 一日の総労働時間を増やす
- 干渉計作業のリモート化・無人化
- 神岡坑内での作業は時間が制限されている(8:30-16:30)
- 坑外作業のコミッショニング作業を可能にし
一日により多くの作業時間をとれるようにする
- 自動化と組み合わせた深夜の自動測定
- もちろん、
チームを組んで仕事を並列化すること、
タスクの交通整理をすること
が必要

コミッショニングのメンタリティ

コミットショニングのメンタリティ

- システムティック・コミットショニング
- コミットショニング先鋭化問題

コミッショニングのメンタリティ

- システムティック・コミッショニング
- コミッショニングの計画を立てにくいのは事実
- いかにコミッショニングをsystematicに進めるか
- コミッショニングでもっとも不確定な作業
 - 干渉計のロック => deterministic lock
 - ノイズハンティング => noise budget

Deterministic Lock

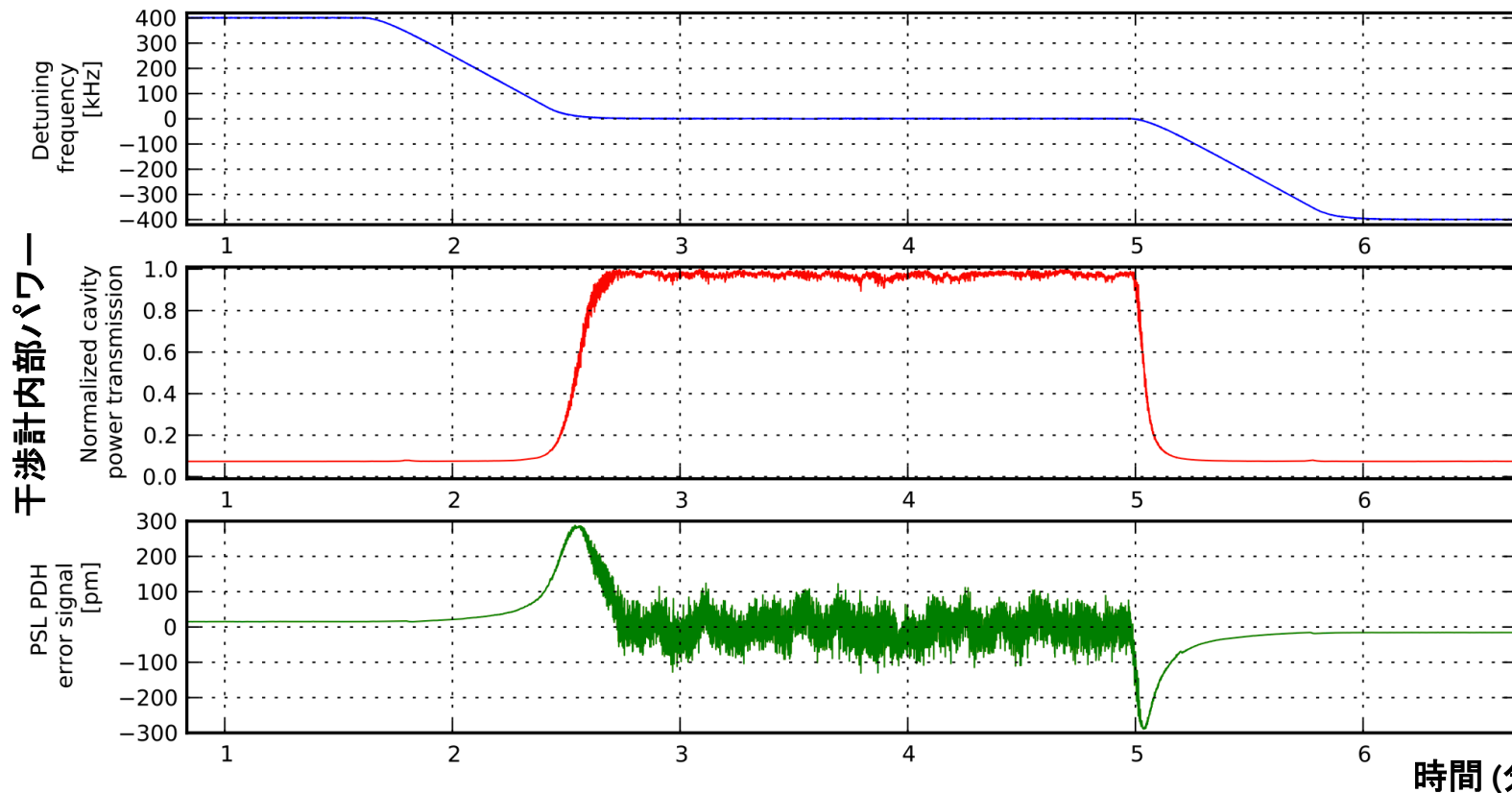
■ いままでの干渉計 (Probabilistic lock)

制御をオンにして干渉計がロックするのを待つ

ロックしないと制御系の診断ができない

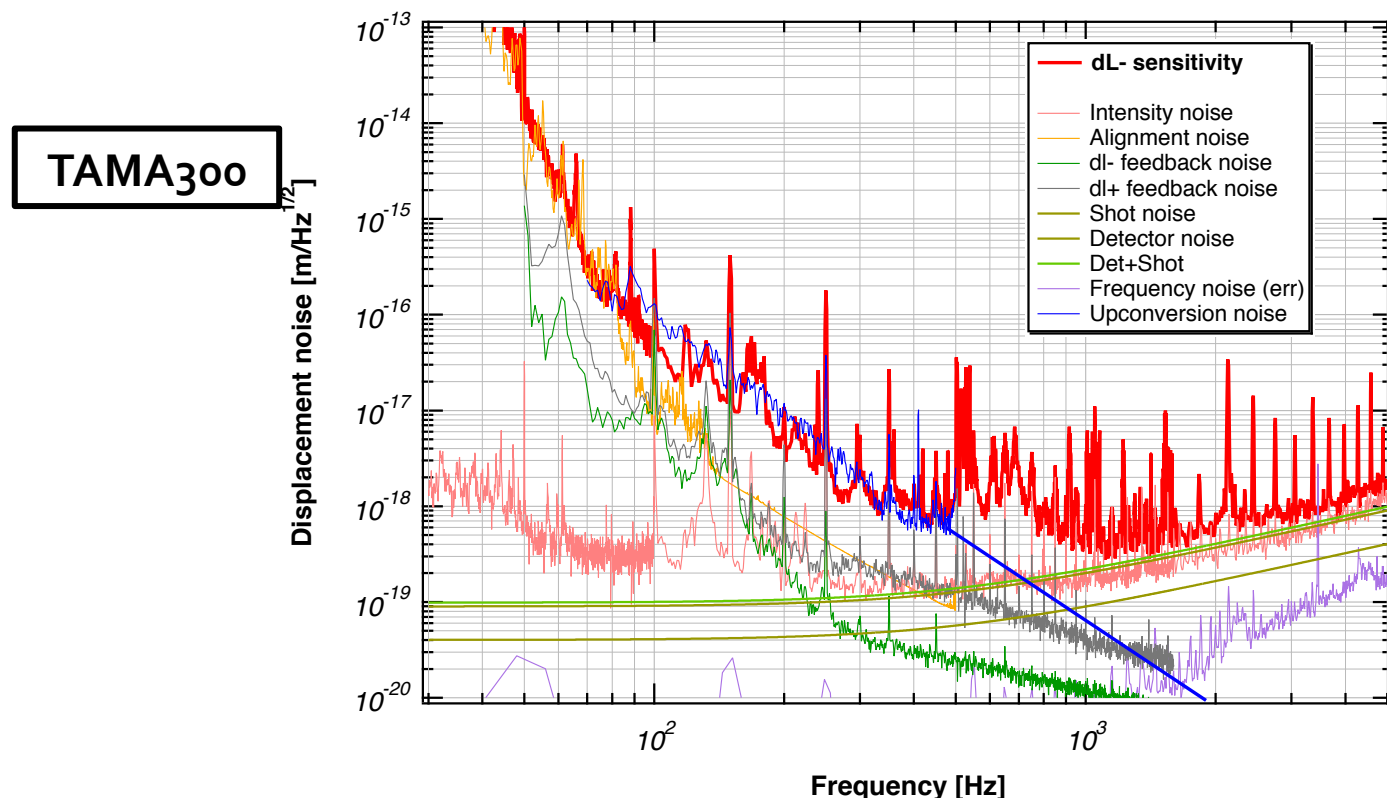
■ これからの干渉計 (Deterministic lock)

例: 外部2倍波レーザーを用いたarm length stabilization (40m cavity)



Noise Budget

- 考え得る雑音をすべてノイズバジェットのプロットに載せる
- 推定しにくい雑音「どうしたらプロット出来るか」頭を使う
- ハードウェアもノイズバジェットに対応できるように工夫
- **ノイズバジェットの自動化**



ノイズバジェット原理主義!!!

コミッショニングのメンタリティ

コミッショニング先鋭化問題

- **コミッショニングが複雑化してくると**
 - コミッショニングの内容が、
本人たち以外には理解できなくなってくる
 - マネージメントはもとより、
サブシステムをインストールした人たちにもわからない
 - 前線の孤立
 - ちなみに、前線の負担が増してくると、
本人たちにも分からなくなってくる

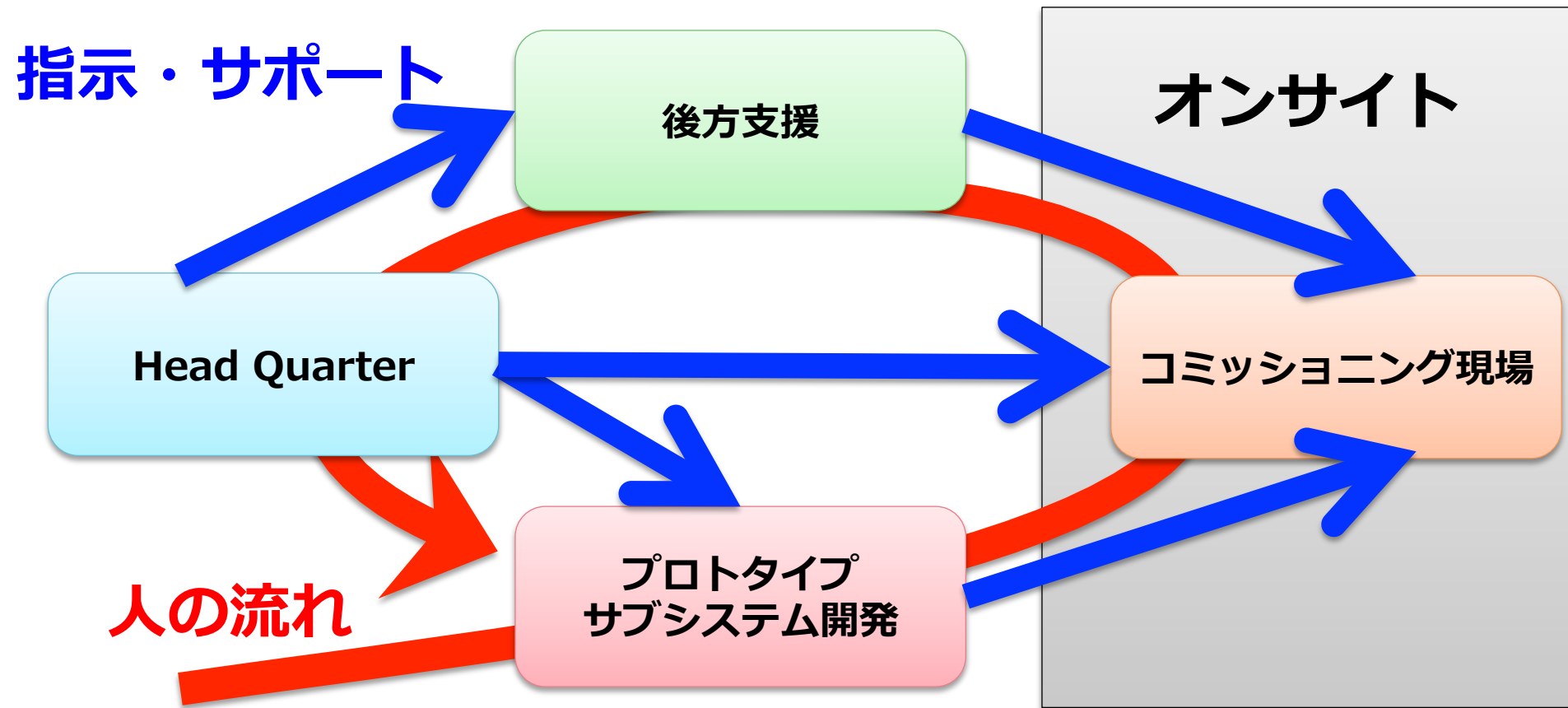
コミッショニングのメンタリティ

- **先鋭化の防止：「後方支援」の重要性**
- オフサイトの現場への関与を維持する
- HQは現場での進展に責任を持たなければならない。
(自分のこととしてとらえる)
- 後方から新しい「武器」が供給され続けなければならない
- インストールしてもタスクは終わらない
感度が設計値に達するまでアップグレードは続く

無限の奉仕とも思える努力が必要

コミッショニングのメンタリティ

- 先鋭化の防止：現場の新陳代謝問題
- デジタル制御時代：計算機中心のコミッショニング
計算機に強い若手の中堅処が後方支援する構造



まとめ

まとめ

- コミッショニング：やっかいなもの
- コミッショニングの特殊性
 - コミッショニングの定量化
- コミッショニングの加速法
 - コミッショニングの定量化
 - 自動化・冗長化・delegation・offloading・リモート化
- コミッショニングのメンタリティ
 - システマティック・コミッショニング
 - Deterministic lock・ノイズバジェット
 - コミッショニング先鋭化問題

Epilogue: Happy senario

201X年: iKAGRAのコミッショニングが着々と進行していた

@神岡:

各種自動化が進行して、多くのことが無人でこなせるようになっている
よって実際の観測も各機関から派遣されてきた学生たちでこなした

コミッショニングは日中と日没後の2シフト制

夕方4pm-5pmにオーバーラップがあり、毎日ミーティング

自動で生成したノイズバジェットをにらみながら次の一手を考える

3ヶ月前に海外から来たビジターがデジタル系で新しい手法を実証
それに対応する回路がまもなく東京から到着

bKAGRAへのアップグレードのタスクの暫定算出が出ている。

忙しくなりそうだが、東京組と現場若手が中心になってインストールして
くれる予定で、中堅処としては精神的余裕がある。

HQ@東京では

bKAGRA計画進行の最終調整で大わらわ

現場の報告でSASの加速度計の感度が防振をリミットしている件

R&Dした新しい加速度計の生産計画が進行中。半年後に投入予定。

スクイズド光の実験をすすめているが、計画にはなかったが、先んじてbKAGRA
に投入して限界感度を押し下げるもくろみ

おわり