

LCGT RSEのためのR&Dの現状について

2010/5/10 RSE loadmap meeting 宮川

LCGTでRSEが導入される予定であるが、そこに至るまでにはまだまだやらなければならないR&Dは数多くある。日本一カ国でやるにはあまりに多くの課題があるため、必然的に海外との国際協力で進めていかなければならないものも多数あると考えられる。現在までに、どのようなR&Dがなされてきて、今後どのようなR&Dが必要になるかを、日本の場合と、海外(主にLIGOの情報)に分けてまとめてみた。

RSEと言った時のR&Dには大きく分けて、LSC(length sensing and control)と呼ばれる光路長制御に関するものと、ASC(alignment sensing control)と呼ばれるものに分けられるが、ここではそれらに加え、ハイパワーレーザーを使うために必要なR&D、その他補足、付随的なR&Dもまとめておいた。

LSCにおいては、TAMAなどのPRFPIMI方式に加えダークポート側にもう一枚鏡が追加されるため、制御構造は非常に複雑になってくる。Caltech 40mプロトタイプではデジタル制御を使いRSEのロックに成功しているが、デジタル無しではかなり困難になることが分かっているため、デジタル制御はもはや必須の技術と言っていいたい。これまでの日本のTAMA、CLIOまではフルアナログもしくは非常に限定されたデジタル制御の利用しかしてこなかったため、早急な整備が必要である。現在CLIOにおいてデジタル制御の導入とその試験を重ねているところであるが、iLIGO等で完成されたシステムから見ると、まだまだかなりの差があると言わざるを得ない。

RSEのR&Dとしては直接は関係ないのかもしれないが、低周波防振に関しては、防振装置の出来、不出来でロックアクイジション、ノイズパフォーマンスにおいて大きな差が出るので、ここでも検討項目の一つとして挙げておいた。

ASC及び、ハイパワーレーザーを用いたR&Dはほとんど手つかずと言ってよい。少なくともASCに関するモデル化は実験的なこと無しにでき、かつLCGTのデザインにも大きく関わることなので、早急に検討する必要がある。特に、リサイクリングキャビティを曲げて共振器モードの縮退を解くfoldingと呼ばれる技術が必要かどうか、今後の真空などのデザインにも大きく関わってくるので、最優先で取り組む必要があるだろう。レーザーに関しては光学素子は三尾研の努力もありかなり整備されつつあるが、これらを使ったLCGTにむけてのR&Dが今後必要となってくるだろう。

今回まとめた表を見ると分かるのだが、海外の研究、特にaLIGOのR&Dと比べると、RSEに限って言ってもLCGT実現までにまだまだ準備不足な感は否めないであろう。この資料が、どの程度までのR&Dを実行すべきなのか、貴重なマンパワーをどのように配分するか、国際協力はどうするか等の議論のきっかけ、参考になってくれればありがたい。

RSEのためのR&D状況(日本及び海外)

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

真空場のスクイーズ	NAO(予)[13]	2	LASTI(予)	3	
DC readout					
OMC 制御	未定	1	40m(済)[14],eLIGO(済),GEO(済)	5	OMCはDRSE下では必須
OMC technical noise	未定	1	eLIGO(済),GEO(済)	5	
ホモダイン検波	未定	1	未定	1	

日本と海外(主にLIGO)とのR&Dに対する圧倒的な差は否めない。特にRSEのプロトタイプとして開発されてきた40mの存在がやはり大きい。また、4年後にはaLIGOが走り出すため、かなりのことが実機レベルでテストされてる状態になることが期待できる。日本での実績は本番と約3桁違う4mでのプロトタイプ実験と、これから予定されているTAMAでの実験がある程度である。ただし、先進的なスクイーズなどの実験はR&Dの難しさも手伝ってか、海外でも余りきちんと計画されていない。モデル化に関しては日本も前年度の検討もあり、だいぶ進んでいるが、これも多くはLIGOのソフトを使っていることを明記しておく。モデル化のみならずプロトタイプ実験に関しても、圧倒的なマンパワー不足は否めないため、R&D全てを日本独自でやるというのは、このまとめからも現実的でない読み取れる。むしろ国際協力を推進し、日本側に技術が流れ込むような体制をとらなければ、活路はないのではないかと。

ASC (alignment sensing and control)

	日本		海外		備考
制御モデル(含む輻射圧)	検討開始	2	済	5	
折り返しキャビティ	検討開始	2	済	5	必要かどうかを検討開始
ノイズモデル	未定	1	済	4	
制御実験	TAMA(予)	2	未定(iLIGOで実績あり)	3	アナログではTAMAで実績あり、ただしノイズ大
感度向上実験	未定	1	未定(iLIGOで実績あり)	3	
熱補償	未定	1	検討中(iLIGOで実績あり)	3	

日本はモデルも含め、ほとんど手つかずである。早急な手配が必要。実験に関してはTAMAでのアナログの実験があるが、長期観測、ノイズまで含めて考えると、RSEでの実績はないにしろ、すぐにRSEに応用できるくらいの実績がiLIGOである。

ハイパワー

	日本	進展度	海外	進展度	備考
光路長制御の不安定性	未定	1	40m(済)[7]	5	
角度制御の不安定性	関連:天文台QND[15]	2	iLIGO(済)[16]	4	
鏡の共振モードによる不安定性	未定	1	未定	1	
レーザーの開発	三尾研(済)[17,18,19]	4	LZH, AEI(済)[20,21]	4	
FIの開発	市販品を使う		Florida(済)	4	
EOMの開発	三尾研(済)[22]	4	Florida(済)	4	AM,PM任意に出せるものを開発
PDの開発	三尾研(予)[23]	3	Stanford	3	500mW受けれるものを開発
段階的にパワーをコントロール	未定	1	iLIGO(済)	5	

ハイパワー用光学素子に関しては三尾研が検討しているといえる。ただし、干渉計自身のハイパワーに対する不安定性などのR&Dは、高出力レーザー及び長基線長等が必要なことを考えると、実機を待つしかないと思われる。

その他

	日本	進展度	海外	進展度	備考
時系列でのロックモデル					
cavity	西田(予)[24]	2	Matt, 宮川(済)[25]	5	
RSE	西田(予)[24]	1	Lisa(済?)	4	
補助ロック	未定	1	40m(予)	2	必要かどうかはまだ不明、ただしあれば有利
振り子の6自由度応答モデル	高橋[12]、麻生	2	Mark(済)[26]	5	
CADによる光学素子の配置	未定	1	作業中(iLIGOで実績有り)	3	
ローカルセンサーの開発	斎藤[27]	3	改良型OSEM (AOSEM)[28]	4	CLIOでLSPIが実験中、LCGTに使えるかは要検討
アクチュエーターの開発	coil-magnet?	2	coil-magnet & ESD[29]	4	

RSEに補助的なR&Dはマンパワーの差が顕著にでてくるところである。これも海外との協力は不可欠であろう。

進展度の基準

1	手つかず
2	検討開始もしくは、原理、計画のみ
3	検証中もしくは、実験中
4	検証もしくは実験的にデモ完了
5	終了もしくは、導入準備完了

Reference

- [1] M. Ando et al, "Study report on LCGT interferometer observation band", JGW-T1000065 (2010)
- [2] P. Fritschel et al., "AdvLIGO Interferometer Sensing and Control Conceptual Design", LIGO-T070247*
- [3] <http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/ifo/ISC/TaskList/CoreIFOModel>
- [4] O.Miyakawa et al., "Development of a suspended-mass RSE interferometer using third harmonic demodulation", Class. Quantum Grav. 19 1555 (2002)
- [5] K. Somiya et al. "Development of a frequency-detuned interferometer as a prototype experiment for next-generation gravitational-wave detectors", Applied Optics IP, vol. 44, Issue 16, pp.3179-3191 (2005)
- [6] Fumiko Kawazoe et al., "Experimental investigation of a control scheme for a zero-detuning resonant sideband extraction interferometer for next-generation gravitational-wave detectors", Class. Quantum Grav. 25 195008 (2008)
- [7] O.Miyakawa et al., "Measurement of optical response of a detuned resonant sideband extraction gravitational wave detector", Phys. Rev. D 74, 022001 (2006)
- [8] O.Miyakawa, "Digital systemの現状", JGW-G1000076 (2010)
- [9] 麻生洋一他, "Revisiting TAMA300", <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tatsu/TAMA/Revisiting-TAMA/Revisiting-TAMA.pdf>
- [10] A Takamori et al., "Mirror suspension system for the TAMA SAS", Class. Quantum Grav. 19 1615 (2002)
- [11] R. Takahashi et al., "Operational status of TAMA300 with the seismic attenuation system (SAS)", Class. Quantum Grav. 25 (2008) 114036 (8pp)
- [12] <http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/vis>
- [13] 阪田紫帆里, 博士論文 (2008)
- [14] R. Ward et al., "DC Readout Experiment at the Caltech 40m Prototype Interferometer", LIGO-P070125*
- [15] S. Sakata et al., "Measurement of angular antispring effect in optical cavity by radiation pressure", Phys. Rev. D, 81, 064023 (2010)
- [16] E. Hirose et al., "Angular instability due to radiation pressure in the LIGO gravitational wave detector", arXiv:0909.0010
- [17] K. Takeno et al., Opt. Lett., 30, 16, 2110 (2005)
- [18] N. Mio et al., Jpn. J. Appl. Phys., 46, 8A, 5338 (2007)
- [19] N. Ohmae et al., Appl. Phys. Express., 1, 8, 092601 (2008)
- [20] B. Willke, "Advanced LIGO PSL - Final Design Review Presentation", LIGO-G1000106*
- [21] F. Seifert et al., Opt. Lett., 31, 13, 2000 (2006)
- [22] N. Ohmae et al., Appl. Phys. Express., 1, 1, 012005 (2008)
- [23] N. Mio et al., J. Phys. Conf. 122, 012014 (2008)
- [24] 西田恵里奈他, "重力波検出用レーザー干渉計のロックアクイジション", 日本物理学会 第65回年次大会
- [25] O. Miyakawa and H Yamamoto, "Lock acquisition studies for advanced interferometers", J. Phys.: Conf. Ser. 122 012024 (2008)
- [26] <http://www.ligo.caltech.edu/~e2e/SUSmodels/>
- [27] 齋藤陽紀, "低温レーザー干渉計CLIO(29) LSPIの導入(II)", JGW-G1000077
- [28] J. Romie et al., "Advanced LIGO OSEM Redesign Overview", LIGO-G0900526*
- [29] "Delivery of Electrostatic Drivers from UK", LIGO-M0900293*

* LIGOのドキュメントの多くはパスワードがかかっている、LSCメンバーなどにならないと読めない。

プロトタイプを用いた場合のR&Dの展望(スケジュールは考慮せず)

LSC (length sensing and control)

	現在	新プロトタイプ無し、TAMA RSE無し	新プロトタイプ無し+TAMA RSE	新プロトタイプ無し+TAMA RSE+海外	近郊研究室プロトタイプ+TAMA RSE	神岡坑内プロトタイプ+TAMA RSE	独立したR&D	備考
感度最適化	5	5	5	5	5	5		
制御モデル	4	5	5	5	5	5		
ノイズモデル								
ループノイズモデル	5	5	5	5	5	5		
変位雑音モデル	3	5	5	5	5	5		
制御実験								
二重変調	3	3	5	5	5	5		
二重複調	2	2	5	5	5	5		
BRSE	4	4	5	5	5	5		
DRSE	3	3	3	4	5	5		TAMAはBRSE
VRSE	2	2	2	2	5	5		TAMAはBRSE
キャリブレーション	1	1	5	5	5	5		プロトタイプがあれば難しくはない
デジタル制御	3	3	3	4	5	5		CLIOで構築
ローノイズ化	3	5	5	5	5	5		CLIOで構築
アラインメント等のスクリプト	3	4	4	4	5	5		CLIOで構築
noise budget	1	4	4	4	5	5		CLIOで構築
低周波防振								
振り子デザイン	2	5	5	5	5	5	*	
新防振装置プロトタイプ	2	4	4	4	4	4	*	ノイズモデルではないとのこと、ノイズパフォーマンスは必須では?
新振り子でのロックのデモ	1?	?	?	?	?	?	*	LOGTで試すしかない?
信号増幅	3	3	5	5	5	5		

感度向上実験(散乱雑音領域)	1	1	5	5	5	5		
感度向上実験(輻射圧雑音領域)	1	1	1	1	1	4		要ハイパワー or LCGTで試すしかない
輻射圧雑音の観測	3	5	5	5	5	5*		要軽量鏡(NAO)
真空場のスクイーズ	2	4	4	4	4	4*		要軽量鏡(NAO)
DC readout								LCGTでは必須
OMC 制御	1	1	1	4	5	5*		
OMC technical noise	1	1	1	4	5	5*		
ホモダイン検波	1	1	1	1	1	3		LCGTで試すしかない

ASC (alignment sensing and control)

	現在	新プロトタイプ無し (TAMA)	新プロトタイプ無し (TAMA)	プロトタイプ無し+海外	近郊研究室プロトタイプ	神岡坑内プロトタイプ	独立したR&D	備考
制御モデル(含む輻射圧)	2	5	5	5	5	5		
折り返しキャビティ	2	5	5	5	5	5		
ノイズモデル	1	5	5	5	5	5		最低一年、もしくは数年かかる
制御実験	2	2	5	5	5	5		
感度向上実験	1	1	1	3	1	5		
熱補償	1?	?		3?	?			要ハイパワー or LCGTで試すしかない

ハイパワー

	現在	新プロトタイプ無し (TAMA)	新プロトタイプ無し (TAMA)	プロトタイプ無し+海外	近郊研究室プロトタイプ	神岡坑内プロトタイプ	独立したR&D	備考
光路長制御の不安定性	1	1	1	4	5	5		要ハイパワー
角度制御の不安定性	2	2	4	4	4	4		要ハイパワー or LCGTで試すしかない
鏡の共振モードによる不安定性	1?	?	?	?	?	?		要ハイパワー or LCGTで試すしかない
レーザーの開発	4	5	5	5	5	5*		
FIの開発		5	5	5	5	5*		

EOMの開発	4	5	5	5	5	5	5*	
PDの開発	3	5	5	5	5	5	5*	
段階的にパワーをコントロール	1	5	5	5	5	5	5	要ハイパワー、要デジタル

その他

	現在	新プロトタイプ無し (TAMA)	新プロトタイプ無し (TAMA)	プロトタイプ無し+海外	近郊研究室プロトタイプ	神岡坑内プロトタイプ	独立したR&D	備考
時系列でのロックモデル							*	
cavity	2	5	5	5	5	5	5*	
RSE	1	4	4	4	4	4	4*	難しい、実用的に間に合うか?
補助ロック	1	1	1	4?	?	?	*	R&Dを立ち上げない限りは輸入か?
振子子の6自由度応答モデル	2	5	5	5	5	5	5*	早いうちにやらないとe2eが進まない
CADによる光学素子の配置	1?	?	?	?	?	?	*	LCGTIには必須、輸入は意味がない
ローカルセンサーの開発	3?	?	?	3?	?	?	*	OSEM? LSPI? 新デザイン?
アクチュエーターの開発	2?	?	?	4?	?	?	*	ESDはいらないか?

- * スケジュールを無視して、完成すればどこまで確かめれるかに重点を置いた。
- * TAMAでRSEをすることは前提
- * **赤字**は干渉計のプロトタイプを作る場合と作らない場合に大きな差が出る項目
- * モデルは全てR&Dを終えなければならない(期間内に可能か?)
- * 干渉計プロトタイプを作る場合、神岡坑内とそれ以外では、低周波に関するR&Dに大きな違いあり。キーとなる部分なので外せないのでは?
 - 低周波防振
 - ASCを入れての感度実験
 - 輻射圧雑音
- * 逆に言えば、神岡坑内以外に作った場合旧天文台4m実験に散射雑音領域の感度向上が試せる位で、インパクトがない
- * さらに言えば、首都圏近郊に作ろうが神岡研究棟に作ろうが、10mだろうが、100mクラスだろうがあまり変わらない。
- * 神岡坑内にプロトタイプを作らないなら、海外のR&Dの結果を流用するのは有限のマンパワーを考えるとコストパフォーマンスが高い。特に2013年にはaLIGOが動いている可能性があるので流用できる技術は今より増えているはず。それでも、流用する際に国内でマンパワーを消費して自分たちのものにするという努力がないと流用することさえ出来ない。またさらに、たとえうまく流用できたとしてもaLIGOよりいくらかは遅れて導入されることも考慮しておく必要がある。
- * プロトタイプでもハイパワーレーザーが使えるかどうかが重要。1Wクラス、10Wクラス、100Wクラスでできることが違ってくる。
- * それでもLCGTでないと出来ないことは存在する
- * プロトタイプ干渉計とは独立にR&Dをやった方がいいと思われるもの
 - レーザー及びinput optics(三尾研)
 - 振り子プロトタイプ(NAO)
 - 振り子プロトタイプロック
 - 輻射圧雑音プロトタイプ(NAO)
 - OMCプロトタイプ(未定)
 - 補助ロックプロトタイプ(未定)
 - ローカルセンサープロトタイプ(未定)
 - ESDプロトタイプ(未定)
 - CAD導入の可能性(未定)

神岡坑内にプロトタイプ干渉計を建設した際のR&Dのスケジュール(2013年末終了)

2010/5/31 宮川



がプロトタイプ干渉計に関連したもの

プロトタイプ建設

項目(必要人数)	2010												2011												2012												2013												2014								
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3											
デザイン(光学1+振り子1+真空1)	■												■																																												
穴掘り													■																																												
真空槽設置																									■																																
光学素子配置(2)																									■																																
制御実験(2+回路2)																																					■																				
感度向上実験(2)																																																	■								

LSC (length sensing and control)

感度最適化																																																									
制御モデル(1)	■																																																								
ノイズモデル(1)																																																									
ループノイズモデル																																																									
変位雑音モデル													■																																												
制御実験(2+回路2)																																					■																				
二重変調																																					■																				
二重復調																																					■																				
BRSE																																																									
DRSE																																					■			■																	
VRSE																																					■			■																	
キャリブレーション																																					■			■																	
デジタル制御(2)	■												■												■												■																				
ローノイズ化	■												■												■												■																				

FIの開発(1)																																															
EOMの開発(1)	■	■	■	■																																											
PDの開発(1)																																															
段階的にパワーをコントロール(1)																																											■	■	■	■	

その他

時系列でのロックモデル(1)																																																						
cavity	■	■	■																																																			
RSE																																																						
補助ロック(1)																																																				???		
振り子の6自由度応答モデル(1)				■	■	■																																																
CADによる光学素子の配置(1)																																																						
ローカルセンサーの開発(1)																																																						???
アクチュエーターの開発(1)																																																						???

- * スケジュール的、マンパワー的にかなり無理がある。予算の目処も全く立っていない。
- * 2014年末を目処にした方がまだ現実的だが、これはLCGT5年目にRSEは入らないことを意味する
- * 神岡坑内に大きな部屋を掘り、10m規模が限界か?40m程度が理想的だが、穴掘りなども大変になってくる。
- * LCGTの建設自身がおろそかになりそうで、文末転倒かもしれない
- * ただし新プロトタイプ干渉計が実行できれば日本のグループの底力がかなり強化されることも事実

- * CLIOをRSEに使うと低温プロトタイプの研究はかなりの期間止まる
- * 現在のTAMAはRSEをやることになっているが、三鷹でやっている限り重要なR&Dの大部分は出来ない
- * 新規にプロトタイプを作ると、国内に3つのプロトタイプが存在することになる。

- 第1案 新規プロトタイプは作らず、海外からの技術を流用する
- 第2案 神岡坑内に10m規模のプロトタイプを作る
- 第3案 TAMAを神岡坑内に移設する
- 第4案 CLIOにRSEを入れる
- 第5案 近郊研究室に10m以下の規模のプロトタイプを作る