

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だろう。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)	3	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	
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)[]	3	40m(済)、GEO(済)	5	4mでDRSEはできたのか?
感度向上実験(散乱雑音領域)	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場所である。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。