

米国における重力波検出計画 LIGO の現状と将来

山本博章

Present Status and Future Plan of LIGO

Hiroaki YAMAMOTO

The Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) project in the United State is nearing the completion of the commissioning phase of its 3 interferometers. Their sensitivity is very close to the design in the most of the detection frequency range, and several papers have been published reporting significant improvements of upper limits of various kinds of gravitational wave signals. In this article, the status of LIGO, including achievements and still-to-be solved problems, and the future plans for the positive detection of the gravitational signal are discussed.

Key words: gravitational waves, laser interferometer, LIGO, advanced LIGO, astronomy, precise measurement

1. LIGO の歴史

LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) 計画は、レーザー干渉計による重力波検出実験として、カリフォルニア工科大学 (CIT) とマサチューセッツ工科大学 (MIT) が共同で推進している計画であり、1989 年に国立科学財団 (NSF) に計画書を提出した。干渉計は、4 km の長さのファブリー・ペロー共振器 (FP) の腕をもつパワーリサイクリングミラー (PRM) を追加したマイケルソン干渉計 (PRMI) である¹⁾ (図 1)。

1994 年に、大幅に書き換えられた計画が認可され、本格的な建設が始まった。新しい予算は、建設、予備運転、および 2001 年度までの運転費用まで含めて 3.6 億ドルであった。干渉計は、3000 km 離れたワシントン州のハンフォードとルイジアナ州のリヴィングストンに建設された²⁾。ハンフォードでは、直径 1.2 m の真空筒にレーザーを 2 本通して、4 km と 2 km の基線長の 2 基の干渉計を、リヴィングストンには 4 km の干渉計を 1 基作った。干渉計は各 LHO4k, LHO2k, LLO4k とよばれている。

施設が順次作られていく中で、大きな成果は 2000 年末に、LHO2k を動作点に引きこむこと (ロック) に成功したことである³⁾。その後、LLO4k と LHO4k の引き込みにも成功し、干渉計の調整を目的とした 1 週間程度の運転を数

回繰り返した後、物理観測を目的とした最初の運転 (S1) が 2002 年 8 月に 17 日間行われた。図 2 は、2005 年 2 月 22 日から 4 週間行われた 4 回目の観測運転 (S4) のときの実際の感度と設計感度である。2005 年 6 月の時点において、3 基の干渉計ともに、ほぼ全観測周波数帯で、観測感度が設計感度⁴⁾ の 2 分の 1 のところまで近づいている。

2. LIGO の基本設計

主レーザーは波長 1.064 μm の Nd:YAG レーザーを使っている。設計ではレーザーの出力は 10 W で、主要干渉計に入るまでにビームの形を軸対称のガウス分布にするための光学系を通過し、主要干渉計に入るパワーは 6 W になる。

主要干渉計を構成する鏡は熔融石英で、ビームスプリッター (BS) は厚さ 4 cm, 直径 25 cm, 重さ 4 kg で、外の 5 個の鏡は厚さ 10 cm で重さ 10 kg である。鏡の片面は高反射 (HR) コーティングが、もう片面は反射率 0.1% 以下の低反射 (AR) コーティングが施されている。鏡の内面での反射による不必要な干渉を防ぐため、AR 面に $0.6^\circ \sim 2.5^\circ$ の傾きをもたせている。鏡の表面の粗さは干渉計の感度に影響するので、サンプルを使っての測定や詳しい数値計算を繰り返して、要求精度が決められた⁵⁾。

LIGO の FP のフィネスは 200 で、腕の実効長を 200 km

LIGO Lab., California Institute of Technology (MC 18-34, Pasadena, CA 91125, USA) E-mail: hiro@ligo.caltech.edu

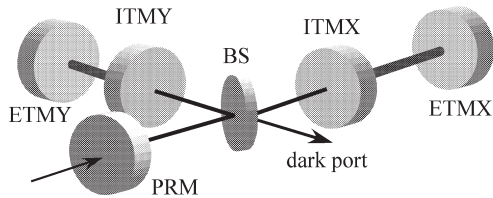


図1 パワーリサイクリングを施したファブリー・ペロー・マイケルソン干渉計。

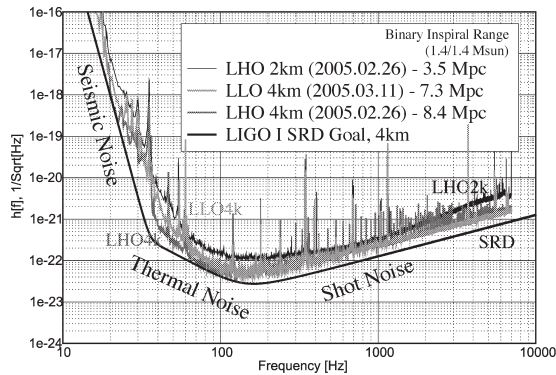


図2 S4 運転時の感度と設計感度。

程度にしている。PRM の透過率は 3% 弱で、入射搬送波電力の増幅率（パワーリサイクリングゲイン）の測定値は LHO4k と LLO4k で 45 程度、LHO2k で 70 を超している。

地面振動による雑音を除くために、各鏡は能動的に制御された防振系の上に置かれた枠に、1 本の金属の紐で吊されている。鏡は、振り子の共振周波数 (0.75 Hz) より十分上では自由運動をする。10 Hz 以上の地面振動の周波数依存性は f^{-2} で、防振系の伝達関数は f^{-9} であるので、10~50 Hz での鏡の雑音の周波数依存性は大体 f^{-13} になる。

マイケルソン干渉計を使って重力波の信号に比例する 2 つの腕の長さの時間変動を検出するためには、まずすべての鏡を共振状態にもっていかなければならない。LIGO においては、地面振動のために、鏡はおのおの独立に $1\mu\text{m}$ ほど揺れている。観測を行うためには、この鏡の相対運動を 100 万分の 1 程度に抑えなければならない。この過程を動作点への引き込みとよんでいる。このための制御系の設計は、時間領域におけるシミュレーションソフトを使って成された⁶⁾。

図 2 が、LIGO の設計感度の周波数特性である。感度は雑音をどこまで抑えられるかで決まる。低周波数領域 (< 50 Hz) ではおもに地面振動による雑音が、中間周波数領域 (< 150 Hz) では振り子の熱雑音が、そしてそれ以上の高周波数領域では光の量子効果による雑音が感度の限界を決めている⁴⁾。

これらの雑音を抑える方法は以前からいろいろ考えられ

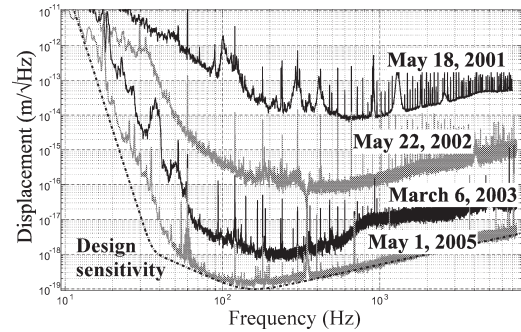


図3 LLO4k の感度の改良。

表1 観測運転 S4 における各干渉計の動作状況。

干渉計	LHO4k	LHO2k	LLO4k
運転効率 (%)	80	81	75
観測距離 (Mpc)	8.5	3.5	7.0

運転効率は干渉計が安定に有意義な時間動作した時間の割合で、観測距離は 1.4 太陽質量の連星中性子星の合体を S/N 比 8 以上で観測できる距離である。

ているが、LIGO の設計では、保守的な方法がとられている。より高度な技術は、4 章で述べる LIGO の将来計画で取り入れられている。

3. LIGO の現状

図 3 は LLO4k の感度の改良の状況を示している⁷⁾。1 年ごとに感度は 1 桁ずつ改良されている。LHO2k が最初にロックされてから、4 年経って 3 つの干渉計がほぼ予定通りの感度を達成するまでに調節されたことになる。表 1 に、S4 での、各干渉計の動作状況をまとめる。すべての干渉計が同時に観測状況にあったのは、S4 の 4 週間の観測時間の 56% にあたる 403 時間であった。

運転状況を改善して、感度を上げるためにいろいろな改良がなされた^{7,8)}。

LLO4k の観測は、昼間の地面振動の悪さにより、夜間に限られていた。その夜間の運転も、近くの鉄橋を列車が 2 度通過するたびに測定が中断された。そのため、昨年 S3 の運転時間は平均 25% であった。この状況を改善するため、将来計画用に開発されていた油圧防振系を現在ある防振系の下に履かせ、低周波の地面振動の効果を予測して補正する制御回路を追加した。この改良により、LLO4k の平均運転時間が 75% までに改善された。

レーザーが鏡を通過するとき、エネルギーが吸収され、鏡の中心部が周辺部に比べて温度が高くなる。その非一様性により、鏡を通過したり反射されるレーザーの形が変形する（熱レンズ効果）。この効果が一番大きいのは、FP の入射側の鏡（図 1 の ITMX と ITMY）である。LIGO

の鏡の曲率や入射光の曲率の設計は、レーザー光の吸収率を 5 ppm/cm と仮定して熱レンズ効果を計算して決められた。

しかし、試験運転で、入射レーザーのパワーを上げると、あるところから機能の低下がみられ、制御系が不安定になることがわかった。設計で仮定したより複雑な熱レンズ効果を補正するために、将来計画用に開発されていた熱補正装置を使うことになった。CO₂ レーザーをいろいろなパターンで鏡に照射することにより、Nd:YAG レーザーによる熱変形を補正することができ、高入力運転の状況が漸次改善されている。しかしまだ、どのような熱レンズ効果が起こり、どのように制御すればよいのか定量的にわかっているとはいえ、経験的に制御系を模索しているのが現状である。

さらに調整を重ねることで、LIGO の感度は近い将来、設計感度に達するであろう。しかし、将来計画にとって理解しなければならない問題が、熱レンズ効果のほかにもある。そのひとつが、FP の腕の中でのパワーの損失である。搬送波のリサイクリングゲインから計算すると、4 km の FP の腕の中での損失は 100 ppm くらいとなるが、説明しうる損失は 50 ppm 以下である。これは、高品質の鏡を作り、設置し、長時間使用する過程において、何か大切な損失がわかっていない証拠である。将来計画においては、この問題の理解は非常に大切なことである。

4. LIGO の将来計画

現在存在する重力測定器は、LIGO も含めて、実際に重力波を検出することは非常に困難である。各国ですでに、感度が現在の干渉計の 1 桁高い改良型の設計が始まっている。感度を 1 桁あげることにより、信号の数が千倍になり、重力波信号を検出できる可能性が著しく高くなる。

LIGO 研究所は、2003 年春に、Advanced LIGO とよばれる、改良型の干渉計の計画（建設費 1.85 億ドル）を NSF に提出した⁹⁾。英国、ドイツの重力波研究グループも参加しており、0.25 億ドルの貢献を予定している。米国科学委員会（NSB）は、この計画を 2004 年 10 月に承認した。2008 年度から予算が下りる予定である。

Advanced LIGO の大きな改良点は、(1) 防振系、懸架系の改良による低周波領域の改良、(2) 鏡を大きく重くし、吊り下げるワイヤーを石英の帯を使うことにより中間周波数領域での熱雑音を下げる、(3) レーザーのパワーを上げることによって高周波領域での光雑音を下げる、(4) 干渉計にシグナルリサイクリングミラーをダークポートに追加して、重力波信号を効果的に増幅する、などである。

一部の技術は、すでに他の干渉計で使われている。ここ

数年の研究開発をあわせて、大枠では採用する技術は決まっているものの、設計が終わっているというには、いまだ程遠いのが現状である。

最初の例は、鏡に使う素材の選択である。数年前には、熱伝導率や機械的損失等の違いから、いま使われている石英よりもサファイアのほうが適していると思われていた。しかし、最近、熱弾性雑音の問題が指摘され、また今までより機械的損失の小さな石英の鏡が作れることがわかり、2 年ほどかけて 2 つの素材を比較した結果、石英を使うことになった。この選択も、石英がすぐれていて問題がない、というよりも、石英のもっている問題のほうが、経験上処理しやすいという希望的観測によるものである。

もう 1 つの例は、鏡に加える力の強さである。雑音を許容範囲に抑えるために、FP の鏡に加える力は 1 nN 以下にしなければならない。しかし、四重振り子でできた光学系を、この力でロックできるかどうか、いまだ証明されていない。

Advanced LIGO が実際に動き出すのは非常に先になるので、現在の LIGO を 150 万ドルくらいの安い予算で小規模の改良をして、感度を上げる可能性が議論されている。この計画では、レーザーのパワーを数倍にあげることや、出力モードクリーナーを追加することなどが議論されている。この計画では、感度を 2 倍程度上げることのほか、Advanced LIGO で採用する技術の段階的検証も大きな目的である。

この記事の作成は NSF との共同契約 PHY-0107417 の援助によります。LIGO, LSC メンバーの協力に感謝します。この記事の LOGO 文献番号は LIGO-P050027-00-E です。

文 献

- 1) 安東正樹：光学，**30** 511-515 (2001)。
- 2) B. Abbott *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **617** (2004) 154-179。
- 3) M. Evans *et al.*: Opt. Lett., **27** (2002) 598-600。
- 4) K. Blackburn: *Proc. of the Banach Center Mini-semester Mathematical Aspects of Theories of Gravitation*, **41**, Part II (Warsaw, Poland, 1997) pp. 95-135。
- 5) J. B. Camp *et al.*: *Gravitational Wave Detection II, Frontiers Science Series No. 32*, eds. S. Kawamura and N. Mio (2000) pp. 279-288。
- 6) H. Yamamoto: *Proc. IEEE NSS*, LIGO-P040046-E. (Rome, Oct. 2004)。
- 7) R. Adhikari: "Noise reductions in the last year," to be published in the *Amaldi 6 Conference* (June 2005)。
- 8) D. Sigg: "Status of the LIGO detectors," to be published in the *Amaldi 6 Conference* (June 2005)。
- 9) D. Shoemaker: "Advanced LIGO: Context and Overview" (*Proposal to the NSF*), LIGO M030023-00M (2003)。

(2005 年 7 月 11 日受理)