

特集

加工と計測

重力波観測用レーザー干渉計 における光学設計

カリフォルニア工科大学 ライゴ研究所
山本 博章

1. 序章

キロメートル級のレーザー干渉計を使った重力波観測実験は、1980年代後半から世界各地で始まった¹⁾。まだ重力波信号は観測されていないが、第一世代の製作運転経験を基に、信号観測頻度を千倍改良した第二世代の干渉計の設計建設が世界中で始まっている²⁾。日本のKAGRA^{*1,3)}、2台の干渉計を有する米国のadvanced LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, 以下aLIGOと略す)⁴⁾、イギリス・ドイツ共同開発のGEO600HF (German-English Gravity Wave Detector)⁵⁾、フランス・イタリア共同開発のAdvanced Virgo⁶⁾、そしてaLIGOの1台分の部品をそっくりインドに持つて作る予定のLIGO-India⁷⁾である。

本稿では、実際に建設が始まり、来年には試運転が開始される予定のaLIGOの光学設計の説明をする。非常に良い干渉計の感度を達成するための光学基材に対する要求は、種々の原因で引き起こされるレーザー光形状の変形とパワーの損失が非常に小さいことである。さらに、運転中に鏡がレーザーによって加熱されるが、その影響を測定、補正してできるだけ熱変形による機能劣化を抑える制御が必要になってくる。

次章で干渉計の原理を説明し、その後の章で、重力波干渉計特有の問題とそれを満たすための光学基材への要

請を説明する。以下の説明の中で、T（鏡の名前）は鏡のHR（High Reflection：高反射）面の透過率を表す。

2. 重力波観測の原理と光学設計

図1はaLIGOの模式図である。基本は、Input Test Mass (ITM) とEnd Test Mass (ETM) の2枚の鏡で形成されるFabri-Perot (FP) 共振器^{*2}の腕をもつMichelson干渉計である。表1は鏡の仕様と各鏡の場所でのビーム径^{*3}をまとめてある。透過率は、ITMとETMに関しては532nmと1064nmで指定されており（4.1章参照）、他の鏡は1064nm波長での値である。

重力波は4重極特性を持つ空間の歪みが波動として伝播するものと捉えることができる。LIGOの検出器を振幅hの重力波が通過する時、腕の長さをL_armとすると、腕の内部のレーザー光から見て、片腕はh×L_arm/2だけ伸び、逆の腕は同じだけ縮むことになる。これによって生じる位相差を検出するのが重力波検出の原理である。

入射光（波長1064nmのYAGレーザー、最大125W）はBeam Splitter (BS) で2方向に分かれ、2本のFPに入射される。この2本のFPからの反射光はBSでまとめられる。FPはレーザーに共振するように、また2つの反射光の差分がでるダークポートの出力はゼロになるよう

やまもと ひろあき

*1 日本の低温技術を使った干渉計は、Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT) という名称を持っていたが、2010年6月に建設予算がついたことを機に、呼びやすい名前をということで愛称を公募し、KAGRAという名前が選ばれた。

*2 FP共振器は、腕の実効長を伸ばすために使われる。FPの長さをレーザーで共振するように制御すると、ITMから入射したレーザーはFPの中を概ね1/T (ITM) 回往復した後、ITMから戻ってくる。aLIGOの場合、T (ITM) が1.4%であるので、4kmの基線長を持つ腕が300kmの実効長を持つことになる。

*3 干渉計内での理想的なレーザーの空間分布は $\exp(-r^2/w^2 + i \cdot 2\pi r^2 / \lambda \cdot R)$ の軸対称分布をしている。 λ はレーザーの波長で、 r は進行方向に直交する面内での距離。分布の広がりを決めるwをビーム径、位相の空間変化を表すRをビームの曲率半径と呼ぶ。

にFPの2枚の鏡とBSの位置を制御する。重力波が干渉計を通過すると、2つのFPの実効長が変わるので、ダークポートから光が漏れることになり、この信号を使って重力波を検出する。

レーザーを有効利用するために2つのRecycling cavity

(RC) が置かれている。Power Recycling Mirror (PRM) は、BSのブライトポートから帰ってくるレーザーを反射してBSに再入射することにより、入射レーザーの実効パワーを上げることができる。ITMとPRMで形成されるキャビティをPower Recycling Cavity (PRC) と呼ぶ。

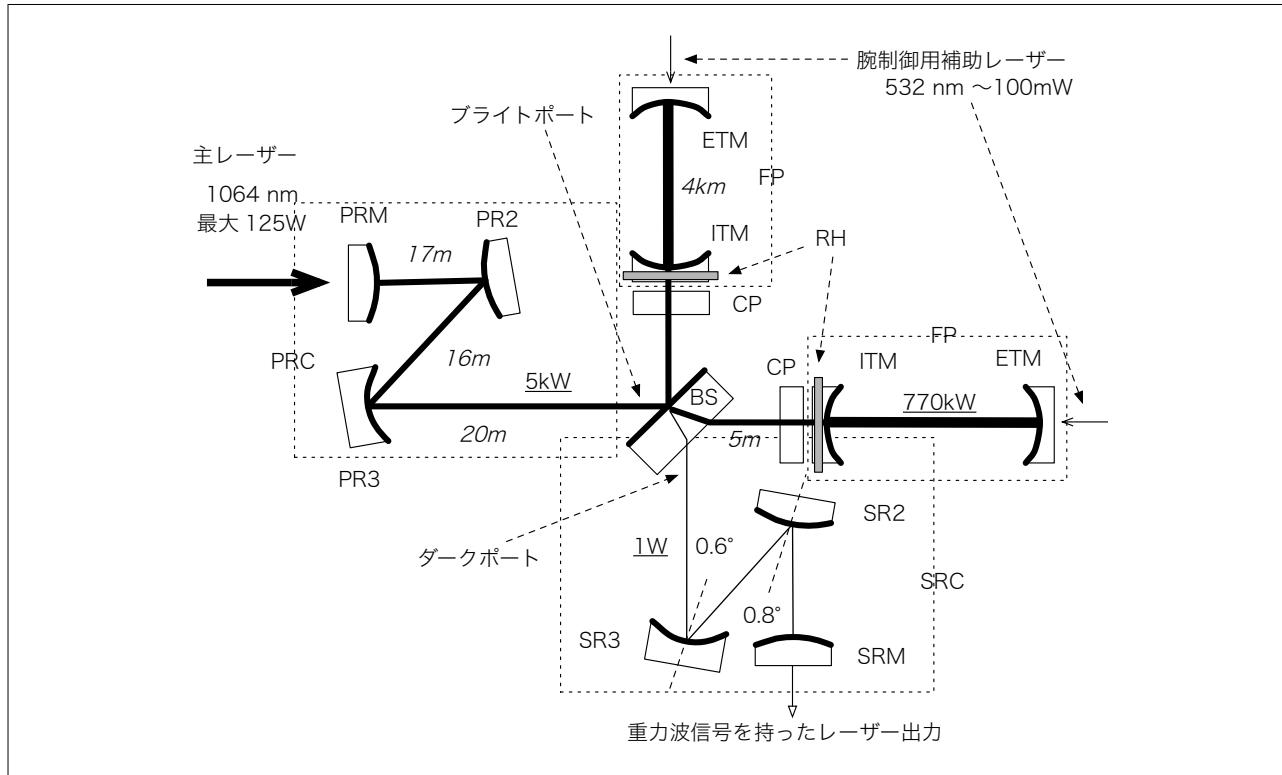


図1 Advanced LIGOの重力波干渉計の光学模式図

図中の13個の光学部品は全て高品質結晶石英の鏡である。太線で書かれた面が高反射面で、反対側は低反射蒸着が施されている。BSは高反射面の反射率は50%で、CPは両面低反射蒸着が施されている。これらの鏡は全て、地震動による雑音を低減するために高性能の防振系の上に置かれた多段振り子に吊るされている。斜字体は鏡間の距離で、下線のついた数字は125W入力時の共振器内のレーザーパワーである。

表1 鏡の大きさと高反射面の仕様

鏡	直径, 厚さ	ビーム径	高反射面曲率半径	高反射面透過率
ETM	340mm, 200mm	62mm	2245m	$5\pm1\text{ppm}$ (1064nm) 0.05 (532nm)
ITM	340mm, 200mm	53mm	1934m	$0.014\pm7\times10^{-5}$ (1064nm) <0.001 (532nm)
CP	340mm, 100mm	53mm	平面	1
BS	370mm, 60mm	53mm	平面	0.5
PRM	150mm, 75mm	2.2mm	-10.997m	3%
PRM2	150mm, 75mm	6.2mm	-4.555m	0
PRM3	265mm, 100mm	54mm	36m	0
SRM	150mm, 75mm	2.1mm	-5.6938m	20~50%
SRM2	150mm, 75mm	8.2mm	-6.427m	0
SRM3	265mm, 100mm	54mm	36m	0

ぶ。aLIGOでは各種の損失を考慮した上での実効入力を40倍上げるように設計されている。Signal Recycling Mirror (SRM) は、その場所を微調設することにより(1) BSのダークポートから来る重力波信号のみを選択的に通過させるか、(2) 重力波信号をSRMとITMで作られるSignal Recycling Mirror (SRC) で共振させて増幅する目的に使われる。

2つのRC内にある4つの鏡、PR2, PR3, SR2, SR3, は、レーザーのビーム径と曲率を変えることによってRMとITMの間のGouy Phase (グイ位相)^{*4}を増やしてRCを安定化することにある(4.3章参照)。この安定化により、干渉計内のレーザー光の空間分布が、鏡の熱変形や表面形状の粗さに影響されにくくなる。Compensation Plate (CP) とRing Heater (RH) は運転中に起こる鏡の熱変形を補正するためのものである(4.2章参照)。

図2はaLIGOの感度を表す曲線で、検出器の雑音を重力波による空間歪みの振幅スペクトル密度で表したものである。例えば、中性子星連星合体 (Neutron Star-Neutron Start Binary Coalescence) の信号が来た場合、その強度がtotalで示された線よりも上にあれば、その信号の振幅が検出器の雑音よりも大きいので感知することができる。例えば、100Hzでは、腕の相対変化が 5×10^{-24} よりも大きな重力波信号が来れば観測できる。4kmの基線長を持つaLIGOの場合、これは腕の長さの $2 \times 10^{-20} \text{m}$ の変化に相当し、陽子の大きさの10万分の1の変動を測定することになる。

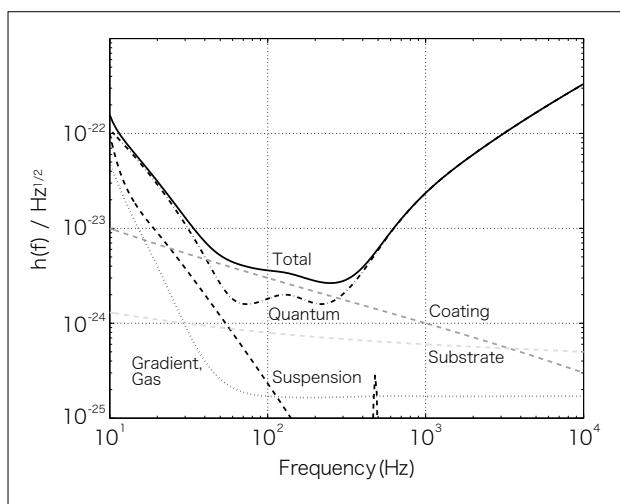


図2 Advanced LIGO感度曲線

観測感度を決める雑音源は、光量子が鏡で反跳する時や測定される時の量子的振る舞いによる雑音(Quantum), 鏡の蒸着膜の熱振動(Coating), 基材の熱振動(Substrate), そして鏡を吊るす懸架系の熱振動(Suspension)による雑音源がある。

3. 腕共振器の設計と鏡の散乱損失

光量子の測定時の量子揺らぎによる雑音を下げるためには、干渉計内のパワーを上げなければならない。そのために、腕を形成するFPのFinesse (F)^{*5}を大きくとる。しかし、大きくとりすぎると、4.1章で述べる共鳴点への引き込みが困難になると、干渉計の機能において鏡の損失への依存性が強くなりすぎるので、aLIGOでは腕の F を450とし、そのためITMの透過率を1.4%に設定している。ETMの透過率は、レーザーのETM上で情報を見後に抜けた光で検知するのに必要な最小限の5ppmを選択した。

大きな F を持ったFP内の損失 L^{*6} は、腕とPRCが結合光共振器になっているため影響が増幅され、腕にたまるパワーが $8L/(T(\text{PRM}) T(\text{ITM}))$ だけ減少する。表1のaLIGOの値を使うと、全体としてのパワーの損失は2万倍大きくなる。例えば、腕で10ppm 損失が増えると、パワーが2割落ちてしまう。パワー損失だけの問題なら、入力パワーをその分上げれば良いが、この損失は腕で生成される重力波信号の損失にも同様に影響し、それは信号対雑音比の悪化につながる。また、2つの腕の損失やビーム形状が異なると、2つの腕からのレーザーの差を使って重力波信号を見ることが困難になる。このため、曲率がそろった低損失の鏡を作ることが非常に重要になる。

まずITM, ETMの高反射面の曲率半径に関しては、絶対値で規定値(表1参照)の-5m, +15mの範囲で、相対的なばらつきは3m(0.15%)以内と定められた。素材の一様性に関しては、低反射面から入射した光を使って測定した高反射面の曲率半径が規定値から15m以

*4 パワーの空間分布がGauss型をした電磁場が伝搬する時、平面波の伝搬に比べて位相がずれてくる。この差をGouy Phaseと呼ぶ。この値が大きいほど、異なるビーム形状を区別しやすくなる。

*5 $F \approx 2\pi/T(\text{ITM})$ 。FP内のパワーは、入射パワーに比べて F に比例して増幅され、共振線幅は F に逆比例して狭くなる。

*6 例えば、鏡の表面散乱や吸収によりレーザーがFP内を一周する間に失う量。

上づれない、という形で規定されている。

曲率誤差によるビームの変形の他に、鏡による損失には大きく分けて3種類ある。1つは、(長波長型) 空間波長にして数cmより長い鏡の表面形状の歪みによる干渉計内のビーム形状の変形、2つには、(短波長型) それより短い空間波長の鏡面粗さでレーザーが鏡の外に散乱されることによる損失、そして(点状散乱型) 多層膜蒸着の過程で発生する点状欠陥による大角度散乱でのレーザーの損失である^{*7}。

干渉計全体の設計を考慮し、これらを合わせた鏡1枚当たりの損失の上限が35ppmと設定された。

表面粗さについては、空間波長1mmより長い成分に関するRMSが0.3nm以下、それより短い成分に関するRMSが0.16nm以下である^{*8}。1mmを区切りとしたのは、定量的な損失評価の方法からくる。空間波長1mm以下の成分で散乱されたレーザーは100%腕キャビティから弾き出されて損失となるので、損失は $(4\pi \text{ RMS/laser 波長})^2$ の式を使って求められる。しかし数mmより長い成分による散乱損失やビーム形状の変形の影響は、数値計算で厳密に求めなければいけない。長波長でのRMS=0.3nmの要請は、数値計算に基づきこの波長領域での損失が20ppm以下になるように設定

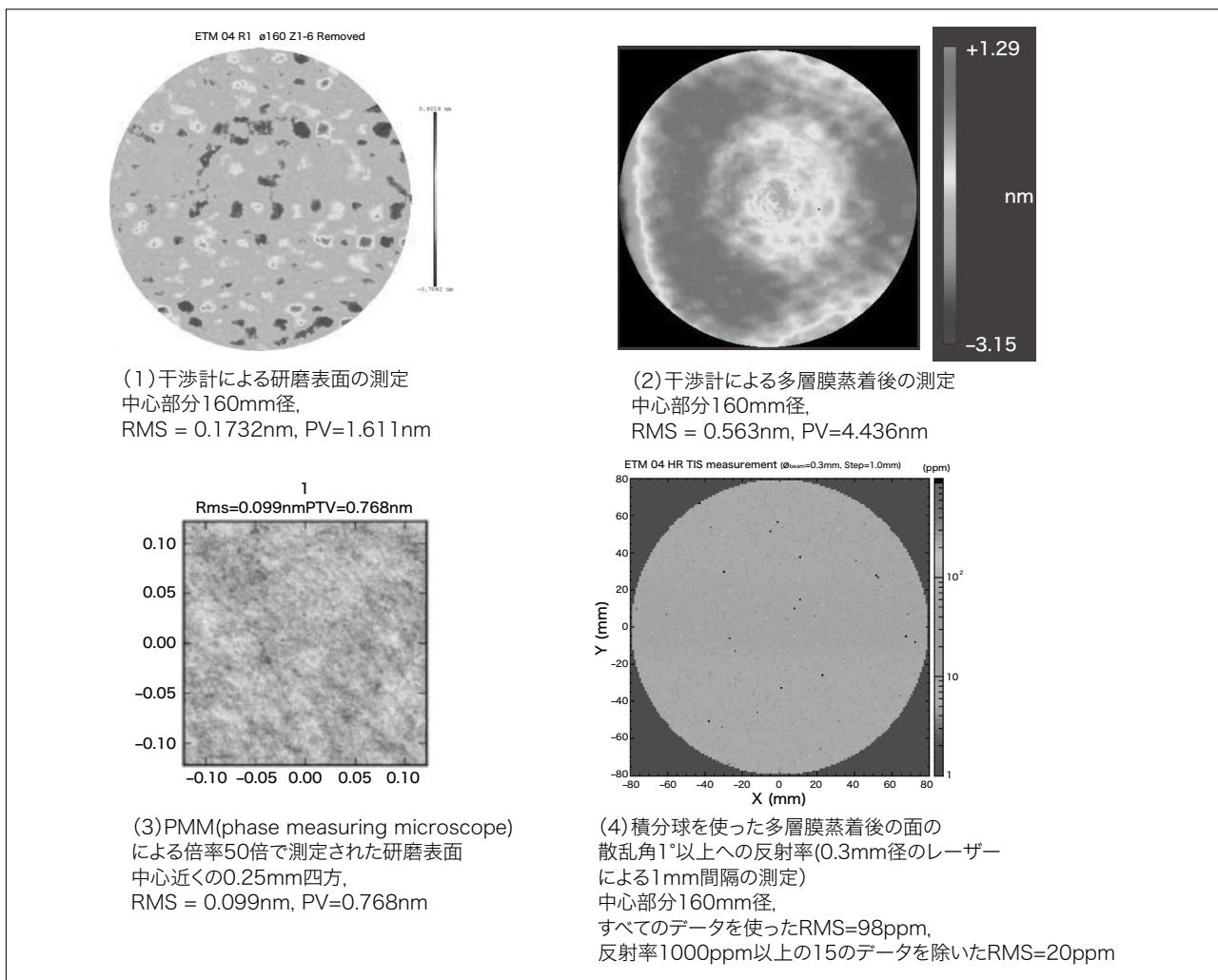


図3 各種の測定による鏡の表面。(1)と(3)は多層膜蒸着前の研磨面のZygo社EPOによる測定、(2)と(4)は蒸着後の面のCaltechでの測定。

*7 空間波長を Λ 、FP共振器の長さをL、レーザー波長を λ 、鏡の半径をDとするとき、レーザーが外に散乱される条件は大雑把に $(\lambda/\Lambda) \cdot L > D$ と書ける。よって $\Lambda = (\lambda \cdot L) / D = (10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^3) / 0.17 = 0.023 \text{ m}$ =数cmが境界の空間波長の目安となる。

*8 これらの要求は、Gauss型のレーザーエネルギーが集中している中心部の160mm径の中での値で、その外ではゆるい要求値になる。

された。実際には、研磨や多層膜蒸着の過程で、0.2mm間隔で計った鏡全体の表面形状データ（図3(1)や(2)）を使って個々の善し悪しを判断し、必要な改良を重ねた。

これらの要求を満足する研磨をするために、ITMとETMの研磨は2段階に分けて行われた。まずCoastline社が表面の短波長（数mm以下）成分を落とすsuper polishを行い、Zygo社EPO（Extreme Precision Optics）部門（以前はASML社所属）がこの短波長成分の質を落とさずに長波長のうねりを下げるIon Beam Figuringによる研磨を行った。その結果、曲率半径の相対誤差が1m以下、長波長のRMSが0.15nmの研磨ができた。この鏡面から予測される長波長成分による損失は5ppm以下となる。

ITMとETMの多層膜蒸着は、フランスのLMA研究所（The Laboratoire des Matériaux Avancés）でIon Beam Sputteringを使って行われている。膜厚の変動についての要求は、本質的に研磨表面の質を損なわないことであった。LMAで蒸着された鏡はLIGOの中心であるカリフォルニア工科大学（Caltech）に送られ、そこでFizeau干渉計を使っての表面形状測定や、積分球を使った損失測定等が行われる。ITMに関しては良い蒸着ができるが、膜数が2倍以上の40層位になるETMに関しては、いまだ改良中である⁹⁾。

点状散乱による損失を抑えるために、目に見える傷などの分布に制限をつけ、また蒸着した鏡による大角度散乱を直接測定して、その損失の合計が15ppm位の十分小さい値であることを確認している。

図3は、aLIGO仕様のETMの測定結果である。(2)が長波長型、(3)が短波長型、(4)が点状散乱型の損失を引き起こす。

図3(2)の多層膜蒸着後の鏡面形状は、(1)の研磨後の表面形状に比べて数倍悪化している。(2)の鏡を使うと、損失は100ppmを越して、仕様の20ppmを遙かに上回ってしまう。この図の蒸着は約1年前の結果で、その後改良が重ねられ、やっと仕様を満たすめどがついてきた。

ちなみに、日本のKAGRAのように鏡を冷却して熱雑

音を下げる方式の干渉計にとって、大角度散乱によるレーザーの損失は、信号の減少だけの問題ではない。この大角度に散乱されたレーザーは、鏡を囲んでいる冷却槽を中から熱を加えることになるので、冷却能力を上げなければならなくなる。

4. 重力波検出器特有の光学設計

4.1. グリーンレーザーを使ったFPの長さの制御⁸⁾

2つのRCを持ち、高いFinesseの長いFPの腕を持つた光学系を制御することは非常に困難である。その中でも最初にすべての鏡が勝手に揺れている状態から、すべてのキャビティー長が共鳴点に近い所まで持っていく「共鳴点への引き込み」という制御は特に困難である¹⁰⁾。

第一世代の干渉計はSRCが無かったので制御が楽であったが、それでも地震動で揺れている鏡が、たまたま動作点に近づいた時にしか引き込みができなかつた。同じ手法を第二世代で使う試みもされたが、実用になるものはできなかつた。

現在、いくつかの干渉計で計画されているのが、主レーザーとは別のレーザーをETMの後ろから入射し、2つのFPの腕を独立に制御して、次にPRCとSRCを制御し、全体が引き込み点に近づいた後、主レーザーのみによる運転に移行する方式である。この方式を採用するため、FPを形成する2枚の鏡の多層膜蒸着は、2つの波長についておのとの用途にあった透過率になるように設計されている。

ITMの主レーザー波長（1064nm）での透過率は0.014であるが、腕の後ろから入射される補助レーザー波長（532nm）での透過率は0.001以下と設定された。これは補助レーザーから見ると、ITMがFP共振器の後ろの鏡に相当するからである。またETMの1064nmでの透過率は5ppmと非常に小さいが、532nmの波長では、こちらが前鏡になるので0.05となつてゐる。このようにして、使用目的に応じて、ITMとETMの役割を交換している。

4.2. 熱変形⁹⁾

aLIGOの設計では、BSから2.5kWのパワーのレーザ

*9 大雑把に言って、一枚あたりの蒸着膜厚の変動が直径20cmの円内で1万分の1より小さくなくてはならない。

*10 制御の無い状態での鏡は1μm位揺れているが、引き込み制御は、共振器を形成する鏡の間の相対距離の揺らぎを、その100万分の1まで小さくする。

ーがITMに向い、770kWが両腕の中に蓄えられる。レーザーがITMを通過する時の基材による吸収や、腕の中の高パワーのレーザーがITMとETMの高反射面で反射される時の吸収がITMとETMを加熱し、熱変形を起こす。

その熱変形を抑えるため、ITMは吸収率0.1ppm/cm以下の低吸収結晶石英を使い、鏡の蒸着膜による吸収は0.5ppm以下と要求した。実際の測定では、蒸着膜での吸収は0.3ppm程度まで抑えられるが、それでも0.25Wの吸収がある。これらの吸収を仮定した場合、ITMとETMの表面に数10nmの隆起が形成され、ITMの中に焦点距離数10kmのレンズが形成される。

これらの熱変形があると、干渉計内でのビーム形状が変形し感度が低下してしまう。これに対処するためにThermal Compensation System (TCS)が導入された。TCSの目的は、運転中に熱変形の度合いを監視し、その変形に応じて鏡の曲率や基材中にできたレンズを補正して、熱変形による機能低下を抑えることである。

第一世代の干渉計では、この熱変形に対処するためにCO₂レーザーを鏡の周辺部に照射し、主レーザーによる中心付近の加熱を一様化して解決しようとした。しかし、第二世代の高感度干渉計では、このCO₂レーザーが直接鏡を照射する時に引き起こす雑音が無視できないため、RHとCPを使った方法が採られる。

鏡の中央に隆起があると、腕で共鳴するレーザーの鏡上での実効曲率半径が数10m大きくなる。鏡の低反射面の側に設置された環状のRHを使ってITMとETMを加熱することにより、鏡が反って腕の中の高反射面の実効曲率半径を小さくなるように補正できる。

ITMの中にできるレンズはCPに作るレンズで補正する。TCS用の低パワーレーザーをBSの方からCPを通してITMに当て、その反射光の波面を熱変形が無かつた場合の測定と比べ、必要なだけCPをCO₂レーザーで加熱して、BS側から観測したCP+ITMの光路長に熱レンズがないようにする。この方法だと、腕の長さに直接関係するITMをCO₂レーザーで加熱しないので、CO₂による雑音は導入されない。

4.3. 安定化されたリサイクリングキャビティー¹⁰⁾

PRMとBSの間に反射鏡を置かない形のPRCは第一世代から使われていたが、大きな問題があった。それは、数kmのRayleigh長に比べ、RCの長さが15mと短いのでグイ位相がほとんどゼロで、RCが空間モード（ビーム径や波面の曲率）に関し縮退し、鏡の熱変形でサイドバンド^{*10} (SB)がひどく変形され、運転に支障を来すことが分かった。

それを回避するために、第二世代では図1に示すような折り返したRCが使われる。RM3とRM2は、BSから来るビーム径5.3cm、Rayleigh長200mのレーザーのビーム径を6mmに絞りRayleigh長を5mにする。そうすることによって、17mと短いRMとRM2間の距離でも十分グイ位相を稼ぐことができ、全体としてRCを安定にし、SBの空間モードを特定のものだけに限ることができる。

しかし、RCの空間モードを特定させるため、そのモードが腕のモードと合わないと、新たな損失源となる。また、RCの鏡の配置がZ字型になるため、RM2とRM3への入射角は0.8°弱になり非点収差を引き起こしてしまう。また、鏡は真空槽内の精密な懸架系に吊されているので、研磨された曲率が設計値からずれていっても、鏡の場所を自由に動かしてRC内のモードを調節することはできない。これらのこと考慮して、RCの鏡の曲率半径は表1のように設計された。この設計でも、各種の損失を許容内に抑えるためには、研磨されたPRM/SRMの曲率半径は1%の精度で、他のRMの曲率半径は0.5%の精度で、設計値と合う必要がある。

大きなPR3/SR3の研磨はZygo社EPOが、多層膜蒸着はCSIRO社が行い、他の小さな鏡の研磨はREO社が、多層膜蒸着はATF社が行い、すべて要求精度を満足する鏡を入手することができた。

4.4. 热雑音¹¹⁾

図2からも分かるように、重力波干渉計の感度に大きく影響する雑音源の1つが热雑音である。鏡を懸架系、基材そして蒸着膜の熱振動である。揺動散逸定理により、機械損失^{*12}が大きいと热雑音が大きくなってしまう。

*11 鏡の位置や角度を制御するために、主レーザーに位相変調をかけて、主レーザーから数10MHz離れた成分を追加する。これらのSBは腕では共鳴しないように変調周波数が選ばれている。

*12 摩擦や分子構造の変位等、各種の原因による外圧に対するエネルギーの損失。

う。干渉計の高いフィネスを実現するには、多層膜蒸着が必要になり、この多層膜による機械損失が熱雑音の大きさを左右する。

第一世代の干渉計では、標準的な二酸化ケイ素 (SiO_2) と五酸化タンタル (Ta_2O_5) を $1/4$ 波長づつ積み重ねた多層膜蒸着が主であったが、 Ta_2O_5 による機械損失が大きいことが分かってきた。それを回避するために、チタン (Ti) を混合した Ta_2O_5 を使い、さらに Ta_2O_5 の膜の光学厚さを $1/4$ 波長より薄くする設計によって熱雑音を下げる努力がされている。LMA 研究所がITMとETMの蒸着を任せられたのは、aLIGOの多層膜蒸着の入札で、ただ1社このTiを混入した Ta_2O_5 を膜素材として使うことに同意したからである。

実際に使われる蒸着膜の材質は企業秘密なので、膜厚の指定をすることは無意味である。そのため、蒸着の指定書には、どのような原理で蒸着膜の厚さを決めれば熱雑音が小さくなるかが説明され、実際の膜厚の設計はLMA 研究所に任せられている。

5. 最後に

レーザー干渉計を使った重力波検出器にとって、光学素子は非常に重要である。核子の10万分の1の精度で距離を測定するには、広い鏡の面全体の一様性が要求される。すべての損失は感度の低下につながるので、研磨、コーティングの会社と情報を交換し合いながら、品質を高める努力をしている。高反射面の膜厚の一様性がETMに関しては充分でないことなど、まだ解決すべき問題は残っている。

しかし、第一世代の経験に基づいて改良を重ね、いろいろなことを理解し、品質は遙かに良くなっている。第三世代の議論が始まっているが、今、培っている知識はその設計に大きく役立っている。

謝辞

本稿を作成するにあたり、LIGO Hanfordの河邊径太氏とCaltechのGariLynn Bilingsley 女史には、LIGO 内規によるレビュアとして多大なご協力をいたいたことを感謝する。LIGOはNational Science Foundation (NSF) の予算でカリフォルニア工科大学 (Caltech) とマサチューセッツ工科大学 (MIT) により建設され、NSFとの協約 (cooperative agreement) PHY-0107417 に則り運営されている。本稿のLIGO Document NumberはLIGO-P1200071である。

参考文献

- 1) 黒田和明, 河邊径太：“重力波観測の現状と将来の展望”，日本物理学会誌, Vol. 62, No.9, p. 659 (2007)
- 2) D. G. Blair, E. J. Howell, L. Ju, and C. Zhao : *Advanced Gravitational Wave Detectors*, Cambridge University Press (2012)
- 3) <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 4) <http://www.ligo.caltech.edu/>, <https://www.advancedligo.mit.edu/>
- 5) <http://www.geo600.org/>
- 6) <https://wwwcascina.virgo.infn.it/>
- 7) <http://gw-indigo.org/ligo-india>
- 8) K. Izumi, K. Arai, B. Barr, J. Betzwieser, A. Brooks, K. Dahl, S. Doravari, J. C. Driggers, W. Z. Korth, H. Miao, J. Rollins, S. Vass, D. Y-Massey, and R. X. Adhikari : “Multi-color Cavity Metrology,” *astro-ph.IM*, arXiv : 1205.1257v2(2012)
- 9) R. Lawrence, M. Zucker, P. Fritscher, P. Marfuta, and D. Shoemaker : “Adaptive thermal compensation of test masses in advanced LIGO,” *Class. Quantum Grav*, vol. 19, p. 1803 (2002)
- 10) M. A. Arain, and G. Mueller : “Design of the Advanced LIGO recycling cavities,” *Optics Express*, Vol. 16, No. 14, pp. 10018~10032 (2008)
- 11) G. Harry, T. P. Bodiya, and R. DeSalvo : *Optical Coatings and Thermal Noise in Precision Measurement*, Cambridge University Press (2012)