

## PRESS RELEASE

配付先：宇宙線研究所 広報室メーリングリスト

2024年2月5日  
東京大学宇宙線研究所

### 2024年1月1日能登半島地震による KAGRA の被災状況について

#### 1. 発表概要：

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、2023年5月に LIGO-Virgo-KAGRA の第4期観測運転(O4)に参加し、予定通り1ヶ月間の観測運転を行なったのち観測運転を終了し、感度向上作業を行なっていましたが、2024年1月1日に発生した能登半島地震により、鏡を吊るす懸架装置の一部に損傷を受けました。

東京大学宇宙線研究所は、KAGRA の被災状況について更に調査を進めましたが、その結果被災の範囲がさらに拡大することが分かりました。

KAGRA には、主に4種類、総数20基の鏡を吊るす防振懸架装置がありますが、そのうち、少なくとも9基に、手で調整しなければならない不具合や、いくつかの部品の脱落が確認されました。レーザー干渉計の両腕(片側3km)の、レーザーを共振させる役割を担う4つのサファイヤ鏡のうち3つでは、鏡を制御するために装着された磁石が多数脱落していることがわかりました。それらの修理と調整のためには、装置が格納されている真空タンクの大気開放及び、修理後の真空の再排気が必要になります。サファイヤ鏡は地震発生時およそ摂氏マイナス188度の低温に冷却されており、修理のために一旦、常温に戻す必要があります。防振懸架装置の残り11基についても、できることから調査を進めていますが、不具合の有無の判定はできていません。

以上により、今年3月に予定していた LIGO-Virgo-KAGRA の第4期観測運転後半(O4b)への参加が遅れることは確実な状況となりました。観測運転への参加までどの程度の期間が必要かはまだ判明していませんが、O4b が終了する2025年1月までには参加したいと考えています。

被災の詳細については以下をご覧ください。

#### 2. 発表内容：

##### ■ KAGRA 坑内の震度：

マグニチュード7.6の地震の際の、重力波望遠鏡が設置されているトンネル坑内での震度は3でした。一方で、トンネル坑外には地震計が設置されていないため、KAGRA のごく近辺の地表での正確な震度は不明ですが、周辺地域では震度4程度の場所が多く、KAGRA のある飛騨市での最大震度は震度5弱でした。

##### ■ KAGRA 施設及び大型装置関連への影響について：

地震直後には、地震の専門家による、一週間程度は最大震度 7 程度の地震に注意が必要という情報に従って、1 月 8 日頃まではトンネルへの入坑調査は最小限にしながら、主に遠隔からの調査を行いました。1 月 2 日の段階で真空ダクトや各種真空タンクには顕著な真空漏れがないことが確認されています。1 月 4 日には、アクセストンネル、3km の 2 本のトンネル、中央エリア、2 つのエンドステーションでの吹き付けコンクリート、鋼製支保に損傷がないことが確認されました。1 月 4 日から 5 日にかけては、送風・給排水・酸素/一酸化炭素モニター・高電圧・低電圧・火災・漏電・通信の各装置に異常がないことが確認されました。棚等からの落下物もないことが確認されました。一方で、鏡を冷却する極低温装置については、地震直後は正常に運転していたものの、1 月 13 日に X (エックス) エンド用の給水ポンプが停止し、それが原因で冷凍装置 4 台が停止し、2 台の冷凍機用コンプレッサーやフレキチューブに異常が発生し修理が必要な状況となっています。

#### ■重力波望遠鏡の鏡防振懸架装置：

レーザー干渉計型重力波望遠鏡は、重力波の伝搬により引き起こされる極めて微小な鏡の動きを、レーザー干渉計によって検出する装置です。時空のゆがみである重力波を検出するためには、レーザー干渉計の主要な 4 つの鏡(図 1 の ITMX、ITMY、ETMX、ETMY)は自由に動ける状態になっていることが必要です。地面に固定されていると重力波を検出することは出来ません。そのため、KAGRA などの地上重力波望遠鏡では、鏡を振り子によって吊すことで、上下方向には自由に動けないが光軸方向には自由に動ける状態にして重力波を検出します。微小な重力波を検出するためには地面の震動の影響を出来る限り少なくする必要があります。鏡は振り子構造の防振装置にとりつけられ、振り子自体の構造にも工夫が施されて地面振動の影響を抑えています。それ以外の鏡についても、鏡を地面に対して固定すると、地面振動によって揺らされてそれが雑音となるため、それを抑えるために、鏡は振り子構造の防振装置にとりつけられ、地面振動の影響が抑えられています。これらの防振装置によって、地面で常時発生しているマイクロレベルの振動を 100 億分の 1 に減衰させることができます。また、時々発生する小さな地震が発生した場合には、鏡が揺らされて一時的にレーザー干渉計が機能しなくなり重力波の検出は出来なくなりますが、その場合は鏡の揺れが収まるのを待って観測を再開するという設計になっています。

しかしながら、今回の地震のように突発的で大きな振動を受けた場合は事情が少し異なります。大きな地震が起きると、振り子を吊す装置自体が通常よりも遙かに大きく揺らされることとなります。また、その揺れの周波数は、検出対象の重力波の周波数帯よりかなり低い帯域となっています。そのため、その揺れをこれらの振り子によって防振することは出来ません。従って、振り子が平時より大きく揺らされることとなります。KAGRA では、そのような地震による揺れへの対策として、鏡が大きく動きすぎないように鏡の周辺にストッパーを装備しており、鏡と振り子の過剰な揺れを防いでいます。万が一、鏡がワイヤーからはずれても、鏡はそのストッパーによって受け止められてそれ以上落下しない仕組みとなっています。今回の地震でもそのストッパーのおかげで、鏡が落下するといった事態は防ぐことができました。しかしながら、振り子が平時よりも大きく揺さぶられることで、様々な不具合が発生する可能性があります。

## ■鏡防振懸架装置への影響の調査状況：

防振系のほとんどは真空タンクに格納されているため、外部から目視によってその不具合を確認することはできません。従って、以下の項目の確認によって防振系の不具合の有無を判定しています。

- ◇ 防振系に装着されている各部位の位置や向きを検出するための数多くのセンサーからの値が、地震発生前の状況と大きく異なっていないか、かつ、内部のモーターや非接触力で地震の前の値に戻せないかを確認する。
- ◇ 各部位の位置や姿勢を駆動する駆動装置の入力信号に対し、その駆動される側の位置の相対変位関係が、地震前の健全な状態のデータや理論的予想と異なっていないかを確認する。

これらは時間がかかる作業のため、不具合の判定には時間がかかりますが、作業の結果、1月30日までの調査で以下のことが判明しています。

KAGRAには、主に4種類、総数20基の鏡防振懸架装置がありますが、そのうち、少なくとも9基に、手動で調整しなおさなければならない不具合や、いくつかの部品の脱落が確認されました。それらの修理と調整のためには、それらが格納されている真空タンクを大気開放し、修理後の真空の再排気も必要になります。

残り11基についても、できるところから調査は行っていますが、不具合の判定調査は完了できていません。以下に各鏡防振懸架装置の調査状況について説明します。

不具合が分かっている鏡防振懸架装置は、レーザー光を成形するインプットモードクリナー (IMC) の3つの鏡 (MCo、MCE、MCI) の防振装置3基、レーザー光を再利用するためのパワーリサイクリングのための3つの鏡 (PRM、PR2、PR3) の防振装置3基、両腕の3kmの長さの共振器を構成するサファイア鏡の防振装置3基 (ITMX、ETMX、ETMY) です。

IMCの防振装置3基のうち1基は姿勢をリモート操作で戻せず、鏡の位置と姿勢を精密に制御するのに必要な鏡駆動装置の一部をなす、鏡に接着していた磁石が脱落しており、2基は姿勢をリモートで戻せましたが、そのうちの一つの鏡は、同様に鏡に装着していた磁石が脱落していました。さらに、防振装置の一部が接触してはならない部位に接触していることが分かりました。

PRMは、地震直後から鏡の姿勢についての情報が得られない状態でしたが、目視で内部の構成物の姿勢が大きく変位していることがわかりました。PR2とPR3は姿勢が崩れており、リモート操作で元に戻せなくなっています。

これら6基の不具合を直すには、大気開放して真空タンクを開け不具合を確認し、姿勢を直し磁石をつけなおす必要があります。すでに、大気開放と状況確認を行い、IMCに関してはすでに修正作業を始めていますが、数カ月程度の工程を要すると見積もられています。

また、PRMの防振装置の不具合により、レーザー光を共振器へ入射できる形に成形するための鏡 (IMMT1、IMMT2) についても大気開放して光軸チェックを行う必要があります。約1ヶ月の工程を要すると見積もられています。

さらに、レーザー干渉計の両腕の3kmの長さの共振器を構成する4つのサファイア鏡のうちの3つ (ITMX、ETMX、ETMY) に装着されていた磁石も多数脱落していることが分

かりました。また一部の加速度計の信号も断絶していることがわかりました。これらの鏡はすでに約摂氏マイナス 188 度の低温に冷却されていたため、温度を常温に戻し真空タンクを開けて修理を行い、再び真空に戻し、低温に冷却する必要があります。これらの作業には数ヶ月が必要であると考えられます。

その他の鏡防振懸架装置の調査は現在進行中です。

■略語について：

**IMC : Input Mode Cleaner (インプットモードクリーナ)**

光源から入射するレーザー光の形を綺麗に成形し、干渉計側にする装置。3つの鏡で構成される (MCo : Mode Cleaner Output mirror、MCe : Mode Cleaner End mirror、MCi : Mode Cleaner Input mirror)。

**PR : Power Recycling (パワーリサイクリング)**

レーザーパワーを干渉計内で再利用して感度を上げる技術。3つの鏡で構成される (PRM : Power Recycling Mirror、PR2、PR3)。

**IMMT : Input Mode Matching Telescope(インプットモードマッチングテレスコープ)**

IMC で成型されたレーザーを干渉計の共振器のもつ固有の形へ成形する装置。2つの鏡で構成される (IMMT1、IMMT2)。

**SR : Signal Recycling (シグナルリサイクリング)**

重力波信号を再利用して感度を上げる技術。3つの鏡で構成される (SRM : Signal Recycling Mirror、SR2、SR3)。

**OMC : Output Mode Cleaner (アウトプットモードクリーナー)**

出射レーザーの形を綺麗に成形する装置。

**OMMT : Output Mode Matching Telescope (アウトプットマッチングテレスコープ)**

SRM を通過したレーザーを OMC の固有の形へ整形する装置。2つの鏡で構成される (OMMT1、OMMT2)。

**OSM : Output Steering Mirror (アウトプットステアリングミラー)**

出射レーザーの方向を変え、OMC に送るための鏡。

3. 参考資料：

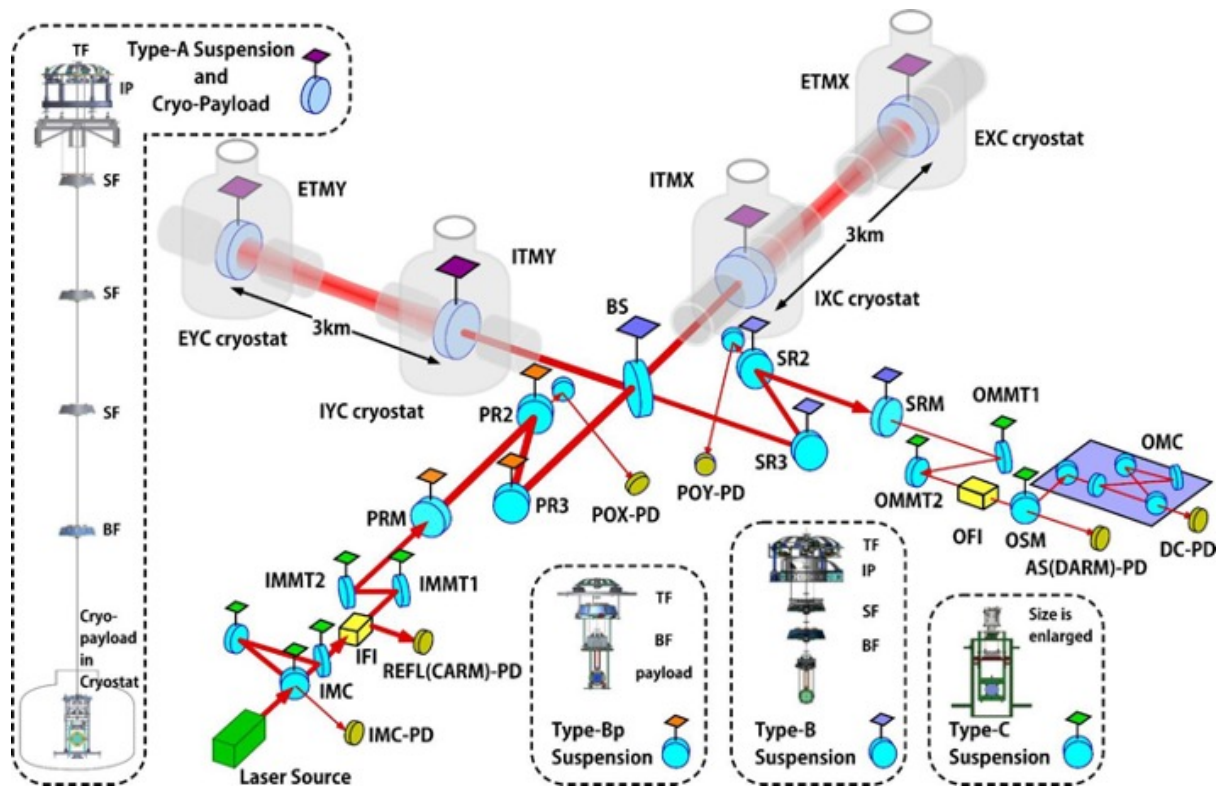


図 1：重力波望遠鏡 KAGRA の鏡や防振懸架装置の全体の概略図