

KAGRA ビームスプリッタ防振系のインストール

平田直篤

(国立天文台 重力波プロジェクト推進室)

概要

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は現在岐阜県に建設中の一辺 3 km のレーザー干渉計である。極めて感度が高い一方、防振装置なしでは地面振動などで感度が悪化するため、各ミラーは多段の防振フィルターを介して真空チャンバー内に懸架されている。国立天文台は防振系の設計、量産、組立設置を担当しており、9月にビームスプリッタおよびその防振系の設置作業を完了した。本稿では防振装置の概要とその設置作業について紹介する。

1. KAGRA の概要

現在稼働している重力波望遠鏡はアメリカの LIGO、イタリアの VIRGO などがあるが、KAGRA は東京大学宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構、そして国立天文台の3つの機関がホストになり、国内外の様々な研究機関が協力して岐阜県神岡市の山中に建造を進めている大型低温重力波望遠鏡である。現在主流のレーザー干渉計型の重力波望遠鏡で、一辺 3km の腕がビームスプリッタを中心としてXY方向に延びている。KAGRA には日本独自のノイズを低減する工夫がある。1 つ目は非常に硬い地盤の岐阜県神岡のトンネル内に

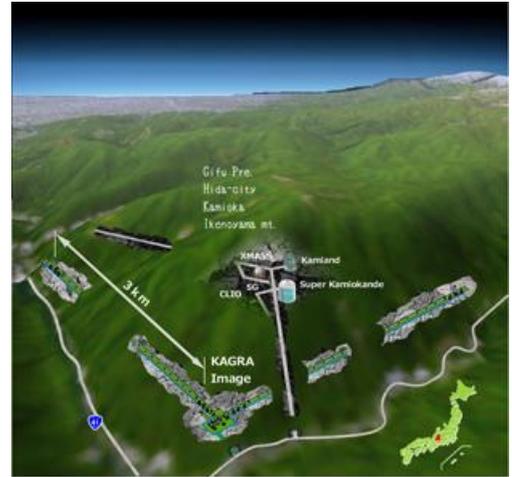


図 1. KAGRA 概要

設置することで、地面振動を地上の 100 分の 1 にすること、次に鏡を低温にすることでノイズ源の一つである熱雑音を減らすこと、そしてこの効果を最大限引き出すため鏡の材質をサファイアとしたことである。図 2 は実際のトンネル内写真である。鏡が設置される真空チャンバーはクリーンブースに囲まれており、インストール作業はクリーン環境で行われる。各真空チャンバーは空気のゆらぎの影響をなくすために 10 の⁻⁷ 乗パスカルの超高真空に引いた直径 800mm のパイプでつながられる。



図 2. トンネル内部

2. ビームスプリッタ防振系の概要

防振系は重力波望遠鏡にとって非常に重要な要素である。重力波の信号が非常に弱いため、観測帯域での地面振動を 100 億分の 1 まで低減させなければならない。図 3 は神岡のトンネル内に設置されてい

るビームスプリッタ（以下 BS）用の真空チャンバーである。このチャンバー内に鏡が上から吊り下げられる。KAGRA は様々なグループに分かれて建造されているが、防振系は国立天文台が設計、製作、組立設置を担当している。防振系は種類の異なる 4 つのタイプがあるが、BS 用防振系は TypeB と呼ばれ Mark Barton 特任研究員がリーダーとなり最大 7 名で作業が進められた。昨年夏から金属のダミーミラーでインストール手順の確認が行われていたが、今年の 7 月中旬から実際の BS のインストール作業が開始され、9 月に完了した。

図 4 の左側は BS 用真空チャンバーの断面図である。その右側に防振系のみを抜き出した。



図 3.BS 用真空チャンバー

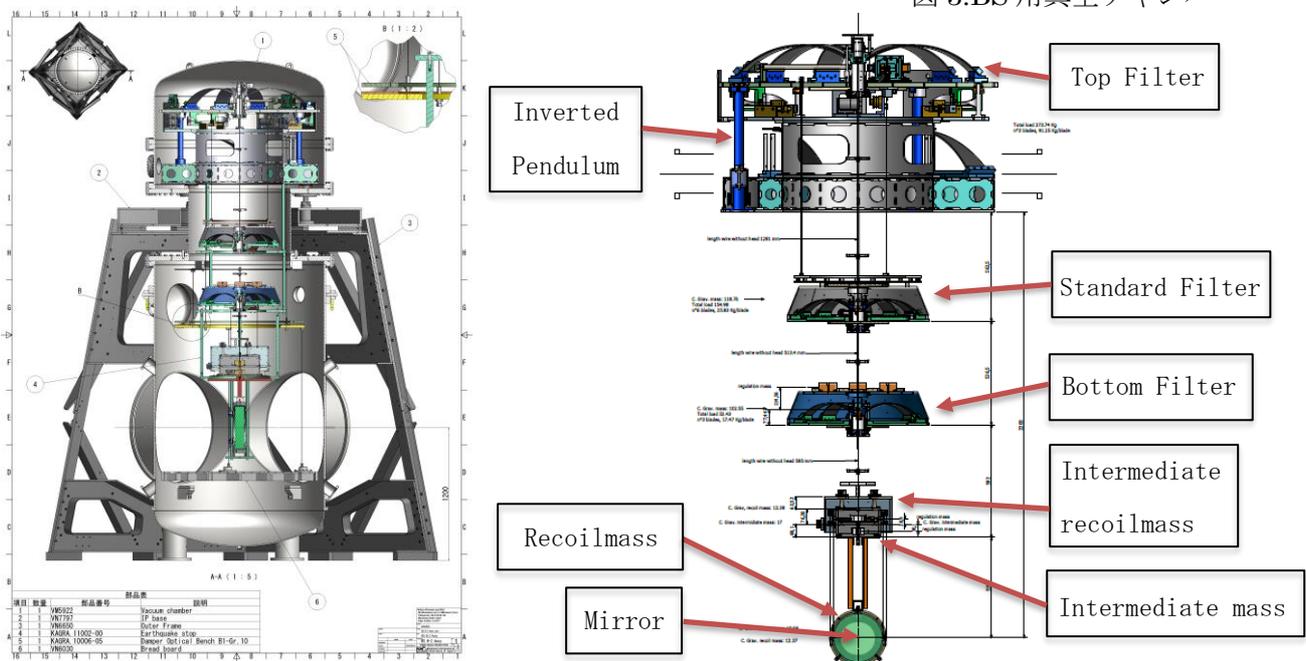


図 4.TypeB 防振系概要

ミラーは上から吊り下げられており、途中に防振フィルターを多段に組み込んでいる。Top Filter、Standard Filter、Bottom Filter は縦方向の振動を低減させるフィルターで、Inverted Pendulum とワイヤーで吊っていることによって全体で構成されている振り子が横方向防振機構となっている。縦方向の振動低減は、GAS フィルターと呼ばれる板バネを用いた機構が現在の主流となっている。GAS とは Geometric Anti Spring の略で、数枚の板バネが押し合う力を使って上下方向に非常に低い共振周波数を持つ一つのバネとして働くフィルターのことである。バネを使った防振では、共振周波数を境にして、高周波側に対して振動を低減する効果がある。防振の効果を高めるためには、この共振周波数を低くすることが



図 5.Bottom Filter

重要である。Bottom Filter は国立天文台で製作、組立、調整が行われた。板バネはマルエージング鋼でできており、国立天文台先端技術センターにてワイヤーカットで切り出している。Bottom Filter の垂直方向の共振周波数は 0.3Hz から 0.4Hz の間に調整されているが、このように低い共振周波数を実現することはとても難しく、例えばコイルばねでは、自然長から延びる長さが 2m 近くないと同じ性能をだすことはできない。

3. インストール作業

続いて BS 防振系インストール作業について報告する。

1) BS 準備作業

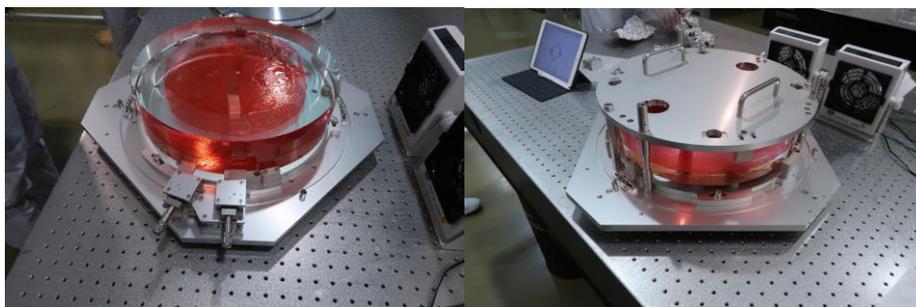


図 6.BS とミラーボックス

KAGRA の BS は直径 370mm の熔融石英でできている。表面はホコリなどから保護するための膜をつけているため赤く見えている。懸架作業に入る前に、鏡をつるす際にワイヤーが接触する部分となるサファイア製の部品や、鏡の姿勢を制御する際に使用する磁石を Masterbond 社の EP-30 で接着した。これらの作業は東京大学宇宙線研究所柏キャンパス内にあるクリーンルーム内で行われた。部品がきちんと接着されていることが確認された後、ミラーボックスに固定、梱包し神岡へ発送した。



図 7.梱包後の BS

2) アセンブリフレーム上での組立

防振系の組立ては、チャンバーの外に設置した図 8 に示す 80mm 角のアルミフレーム上で行う。各ステージには防振フィルターを上下に動かせるようにジャッキが設置されている。最下段は BS を組み込む際に使用する懸架用治具がセットされている。この治具は 2 本のスライドレールによりミラーボックスとミラーを囲むチタン製の Recoilmass を前後方向にスムーズにスライドできるように構造になっており、BS を安全に組み立てることができるように設計されている。BS は $300\mu\text{m}$ のピアノ線 2 本で、Recoilmass は $650\mu\text{m}$ のタングステン線 2 本でそれぞれ

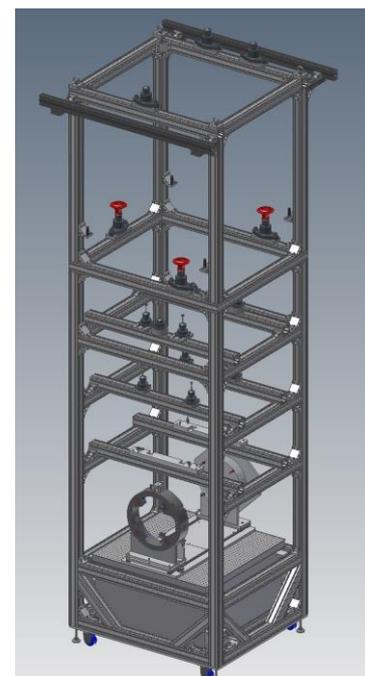


図 8.アセンブリフレーム

Intermediate mass から吊り下げられる。懸架の際は国立天文台先端技術センターにて製作、テストされたワイヤーを巻き上げるウィンチシステムが使用された。

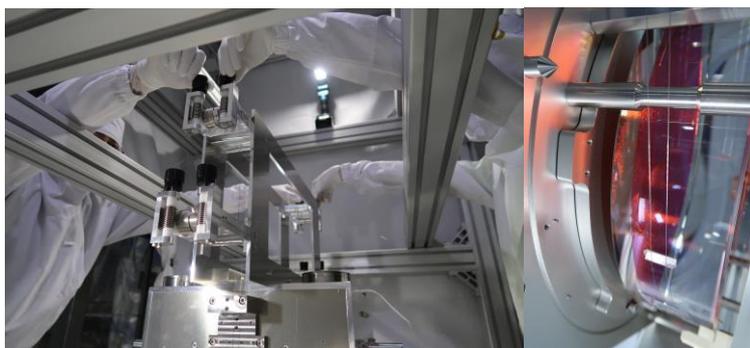


図 9. ウィンチシステムと懸架された BS

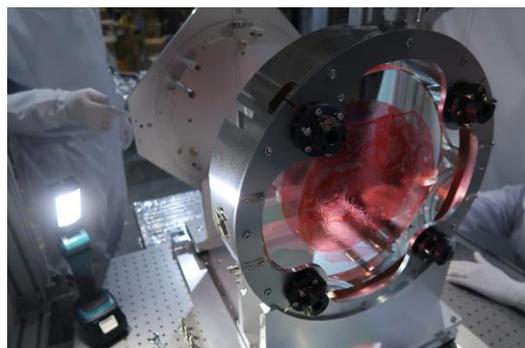


図 10. BS と Recoilmass の組立て

Recoilmass の懸架が終わると、上段の Bottom Filter の設置、Intermediate Recoilmass の組立と懸架、そしてその上の Standard Filter の設置と Bottom Filter の懸架というように、順番に組立てを進める。これらはマルエージング鋼製のロッドで懸架される。

3) 真空チャンバーへの移動

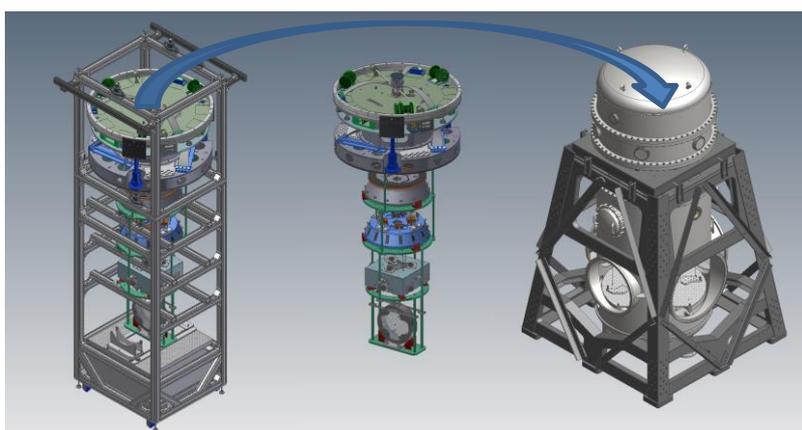


図 11. アセンブリフレームからの移動

アセンブリフレーム内で組み上がった防振系は、図 11 のように全体をクレーンで吊り上げて真空チャンバーへ移動させる。移動前にはほぼ全ての防振フィルターは、ステンレス製の枠に固定される。総重量は約 1.5t になる。クリーンブース天井を開き、天井クレーンで慎重に吊り上げチャンバー内に設置した。



図 12. 移動中の BS 用防振系

4. 今後の予定

現在 BS 用防振系は制御の最適化作業中である。今回と同型の防振系のインストールはあと 3 台予定されており、2018 年の 10 月末の完了を目指し現在準備作業を開始している。