

重力波観測のためのジャグリング干渉計の開発

西村良太

装置開発技術支援室 研究機器開発技術グループ

概要

ジャグリング干渉計とは、ミラーを繰り返し自由落下（ジャグリング）させることにより、地面振動や懸架系の熱といった低周波雑音を取り除くことのできる重力波検出器である。これまでの地上レーザー干渉計では観測が難しかった0.1~10Hzの重力波観測を目標としており、新たな重力波イベントの観測が期待される。

ジャグリング干渉計の試験機製作の依頼があり、設計・製作・組み立てを進めている。その進捗について報告する。

1 背景

1.1 重力波

重力波は、アインシュタイン博士が導き出した一般相対性理論から予測される物理現象である。重さを持つ物体は、重力で周囲の時空を歪めている。その物体が運動し、周りの歪んだ時空が波のように宇宙空間に広がってゆく現象が重力波である。

重力波の観測により、アインシュタインの一般相対性理論の検証、宇宙誕生のより初期の情報の取得、非常に強い重力場での物理現象の観察などが可能になると期待されている。

1.2 重力波の検出

重力波の検出には主にマイケルソン干渉計が用いられる。重力波によるミラーとビームスプリッター間の距離の変化を光検出器でとらえる。

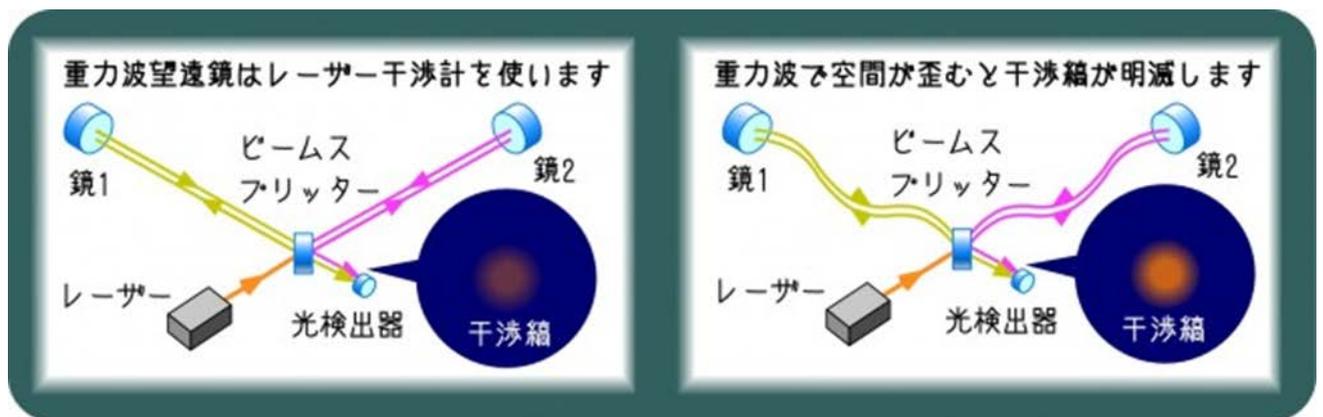


図1. マイケルソン干渉計 [1]

これまでに重力波の検出に成功した地上大型マイケルソン干渉計はビームスプリッターとミラーを懸架しているが、懸架系からの熱・地面振動ノイズのため、周波数の低い重力波に対しては感度が低い。

1.3 ジャグリング干渉計

ジャグリング干渉計は、ビームスプリッターとミラーを繰り返し自由落下させるマイケルソン干渉計である。懸架による熱・地面振動ノイズを受けないため低い周波数での感度が高く、新たな重力波イベントの観測が期待される。

また、宇宙重力波望遠鏡のテストベッドとしての意味合いがある。

2 依頼内容・要求仕様

ジャグリング干渉計の発案者である Uxg 研の川村静児教授より、試作機製作の依頼があった。

リニアステージで真空タンクを上下に運動させることで、真空タンクに対して固定されていないビームスプリッターとミラーを繰り返し自由落下させるというアイデアで、リニアステージは研究室で調達済みであったため、他の構成要素の設計・製作の依頼を受けた。主な構成要素と要求仕様は以下の通り。

- リニアステージ固定フレーム
リニアステージを鉛直に固定
- 真空タンク
真空度 $<1000\text{Pa}$ 、総重量 $<4\text{kg}$ (リニアステージ最大負荷質量)、なるべく大きく(内部に干渉計)、中が見えるよう透明な材料を使用
- ジャグリング機構
ミラーとビームスプリッターが自由落下、実験中のミラーの角度変化の標準偏差 $<0.057^\circ$

3 ジャグリング干渉計試作機

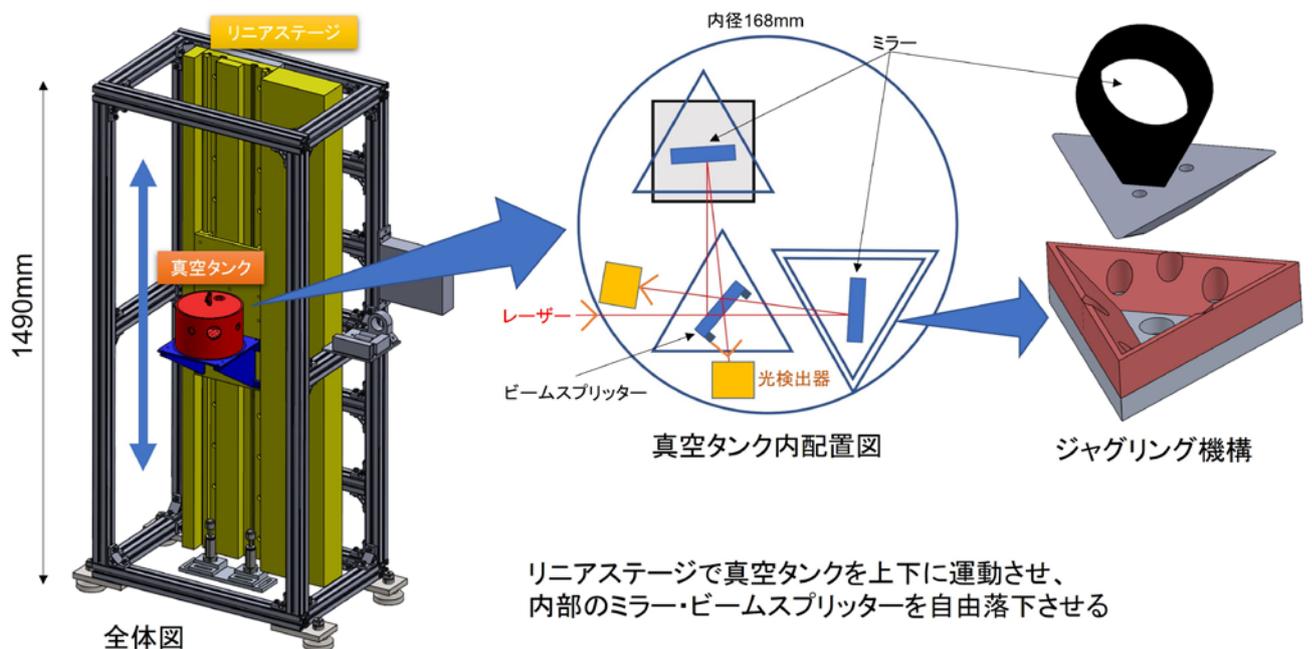


図2. 試作機概要

3.1 リニアステージ固定フレーム

十分な強度、平面度の A2017 板にリニアステージを取り付け、全体を 45mm 角アルミフレームの枠内に固定することとした。下側 4 か所に高さ調整ねじを設置し、角度調整・実験室床への固定を可能にした。

SolidWorks で FEM 解析を行い、十分な安全率が確保されていることを確認した。

リニアステージのガイドレールが鉛直になるようレーザー墨出し器を用いて調整した。動作試験を行い、顕著な変形、振動が起こらないことを確認した。

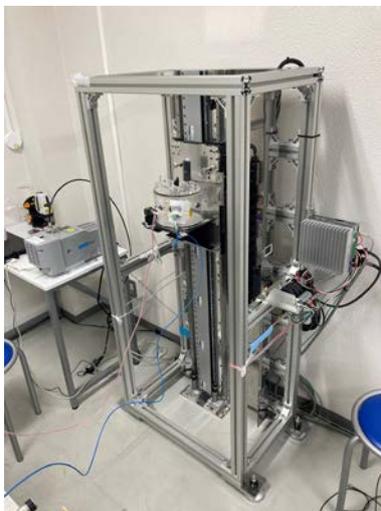


図 3. リニアステージ固定フレーム

3.2 真空タンク

上板と円筒部は透明・軽量の亚克力を使用した。底板は高強度・軽量の A7075 を用いて光学定盤を兼ねることとした。リニアガイドに固定するための台は高強度・軽量の CFRP を用いた。また、軽量化のため、外付け部品は、小型ボールバルブ、ハーメチックシール、レーザー透過ミラー、小型真空計をエポキシ系接着剤で固定した。重量は 4kg 以内で内径は 168mm となり、干渉計を構成可能なサイズとなった。

リークテストを行ったところ、真空用途ではないボールバルブからリークがあったが、真空グリス(アピエゾン M)を塗布することで解消した。100Pa まで真空引きした後ボールバルブを閉じて真空度を測定し、真空度 1000Pa 以下を 2 日以上維持できることを確認した。

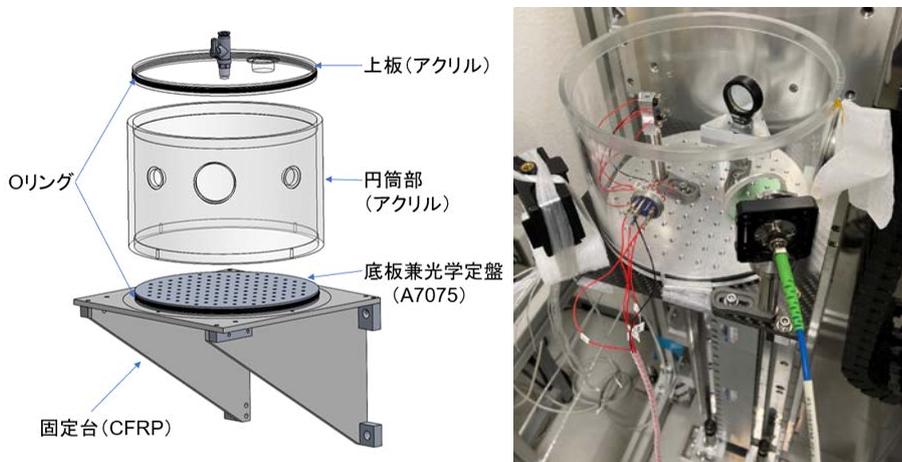


図 4. 真空タンク

3.3 ジャグリング機構

いくつか形状を試し、着地時の位置決め精度の再現性が高かった三角錐形状を採用した。位置決め部分は5軸加工機でつかみかえ無しで加工した。

下部の位置決め部分はエンジニアリングプラスチックのTX PET-Pを用いた。摩擦が小さい、摩耗しにくい、吸水率が低く寸法安定性が高い、加工性が良いなどの利点がある。

A5052とTX PET-Pをねじ止めし、A5052部分のみを治具に固定して加工することで、加工時の固定力による変形を抑制した。

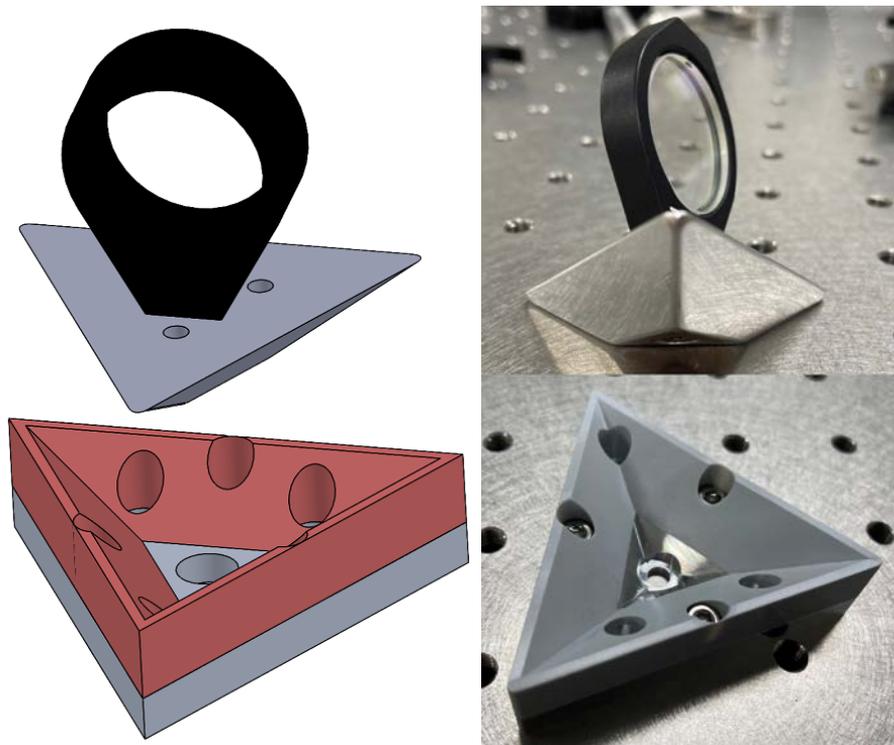


図5. ジャグリング機構

着地時の位置決め精度の試験が研究室で行われ、ミラーから500mmの距離におけるレーザーポイントの位置の変位の標準偏差は $60\mu\text{m}$ となり、ミラーの角度変化の標準偏差は 0.057° 以下(変位の標準偏差 $500\mu\text{m}$ 以下)であった。

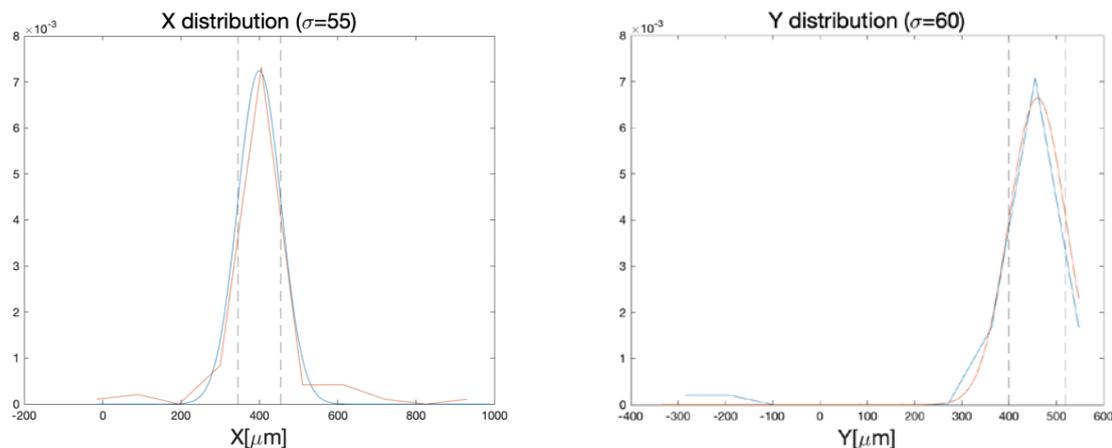


図6. 着地時位置決め試験の結果

ミラーを自由落下させ、傾きを映像で確認する試験が行われた。上方向への運動中に、重力加速度より大きい加速度でリニアステージを減速し、ミラーを宙に浮かせたところ(図7左)、ミラーの傾きが確認され、その角度も一定ではなかった。要因として、重力や慣性力による部材の変形、リニアステージのリニアガイドの隙間による毎回の運動の誤差が考えられた。次に、静止後、重力加速度より大きい加速度でリニアステージを下向きに加速し、ミラーを宙に浮かせたところ(図7右)、目視でわかる傾きは確認されなかった。



図7. 自由落下試験の様子

4 まとめ

ジャグリング干渉計の試作機製作の依頼を受け、各構成要素を設計・製作した。リニアステージ固定フレーム、真空タンク、ジャグリング機構の着地時のミラーの傾きは要求仕様を満たすことを確認した。

今後はジャグリング機構の自由落下時のミラーの傾きを定量的に評価し、必要に応じて改良を行っていく。

ご依頼いただきました先生と研究室の方々、設計・組み立て・試験で多大なるお力添えをいただいた装置開発技術支援室の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] KAGRA 大型低温重力波望遠鏡, (<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>)
- [2] Bin Wu et al. “Conceptual design and science cases of a juggled interferometer for gravitational wave detection” PHYSICAL REVIEW D 106, 042007 (2022)