

論文内容の要旨

論文題目: Low Frequency Seismic Isolation for Gravitational Wave Detectors

(重力波検出器における低周波防振)

氏名: 高森 昭光

重力波は光速で伝播する時空のひずみであり、一般相対性理論の帰結として1916年にA. Einsteinによって理論的に導出された。その後、TaylorとHulseによって1975年から観測された連星パルサーPSR1913+16の公転周期変化が、重力波の放出によるものであることが示された。現在、重力波の存在を示す実験的証明はこの間接的なものにとどまっているが、重力波を直接検出することによって一般相対性理論を検証するための試みは古くから行われてきた。

重力波の重要な特徴として、そのきわめて弱い物質との相互作用があげられる。この特徴のために、現実的に観測可能な時空のひずみを発生する現象は、大質量の急激な加速運動、すなわち天文学的現象に限定される。Taylorらによって示された連星パルサーのほかにも、超新星爆発、連星中性子星や連星ブラックホールの生成、合体などさまざまな重力波源が理論的に予想されている。

重力波のきわめて弱い相互作用はその検出を困難なものにしているが、天文学的な利点を生み出している。従来の電磁波観測による天文学では、高密度な天体の内部における現象や、きわめて遠い天体を観測することは不可能である。これは電磁波が高密度天体や星間物質を透過することができないためであるが、重力波はこれらの物質を透過して地球に直接到達することが可能であると考えられる。これらの重力波を検出することによって、従来の天文学では不可能だった観測が可能になることが期待されている。

以上の物理学的、天文学的な動機を背景に、また近年の精密観測技術の発展を受けて、レーザー干渉計を利用した重力波検出器の研究開発が、世界各国で強力に推し進められている。現在は日本のTAMA300をはじめとした第1世代の装置が順調に稼働、建設されている段階であるが、より良い感度を持つ次世代の検出器の研究開発が進められている。

地上に建設された重力波検出器の主要な雑音源のひとつに地面振動がある。地面は、地球物理学的な現象(地震、海洋の波、大気の流動)や人為的な活動のため、常時 10^{-6} m程振動している。このような常時微動の振幅は重力波の観測帯域(100 Hz程度)において減少し、 10^{-10} から 10^{-8} m程度になるが、重力波による鏡の変動(10^{-19} m程度)に比べてきわめて大き

な量である。したがって、重力波検出器には地面振動が鏡に伝播するのを抑制するための防振装置が不可欠である。また、干渉計を正常に動作させるためには鏡の位置を制御して一定の範囲におさめる必要がある。この制御系のゲインは有限なので、元々の鏡の変動がある量を超えると干渉計の動作状態を保つことができなくなり、干渉計の安定性が悪化する。特に、鏡の変動の絶対量は低周波の地面振動成分によって決定される。この理由からも干渉計を構成する光学素子は高性能な防振装置によって支持されなくてはならない。

本研究のテーマは、次世代検出器において必要とされる防振特性を、重力波の観測帯域においては受動的な機械系で実現し、低周波における鏡の変動は能動的な制御によって抑制する低周波防振装置 SAS (Seismic Attenuation System) の開発である(図 1)。

受動防振装置は、振り子やバネなどの機械で構成される。これらの機械系は、その共振周波数以上で振動の伝達を抑制する特性があるので、防振系の共振周波数は、重力波の観測帯域よりも充分低い必要がある。また、これらの機械系を直列に連結すること(多段化)によって、防振性能を高めることが可能である。現在稼動中または建設中の重力波検出器は、主に 100 Hz 以上の重力波を観測することを目的としているため、防振装置もそれに見合ったものを用いているものがほとんどである。

これに対し、次世代の干渉計では数~10 Hz 程度の低周波側に観測帯域を広げることを目標としているので、次世代の防振系は 100 mHz 程度の共振周波数を持たなくてはならない。また、機械系の他自由度間の干渉の影響を避けるために、このような低周波共振は干渉計の光軸方向だけでなく、すべての自由度に対して実現される必要がある。

SAS では、水平方向に 100 mHz 以下の共振周波数を持つ倒立振り子、鉛直および全自由度にわたって 100 mHz~1 Hz の共振を持つ MGASF (Monolithic Geometric Anti-Spring Filter) をもちいる。倒立振り子は低周波の防振特性の改善および、後述する能動ダンピングに利用する。1 Hz で-50 dB 程度の防振比を実現することは、本実験で検証された。

また、MGASF は、従来困難であった鉛直方向の低共振周波数化を、非線形バネを用いて純受動的な機械系で実現するという点に大きな特徴がある。MGASF をワイヤーで懸架することにより、全自由度にわたって 100~400 mHz の共振周波数を得、10 Hz で-60 dB ほどの防振特性を得ることを、理論的、実験的に示した。

また、干渉計の光学素子を直接懸架するミラーサスペンションシステムの開発を行った。これは従来 TAMA300 で用いられていた、受動ダンピング機構をもった 2 段振り子に、鏡と等価な振り子で懸架されたリコイルマスを追加することにより、倒立振り子や MGASF との親和性を向上させたものである。リコイルマスに組み込んだアクチュエータから鏡の制御を行うことにより、鏡の制御系を単純化できることを実証した。

倒立振り子、MGASF、ミラーサスペンションを直列に接続することにより、低周波防振系を構築し、TAMA300 の感度を改善できることを示した。具体的には、地面振動の典型値と、力学モデルから予想される SAS の防振特性を掛け合わせたものが数 Hz で干渉計の熱雑音を下回ることを示した。従来の防振系では、地面振動は数十 Hz まで TAMA300 の感度を規定する雑音であったので、大幅な改善が見込まれる。

機械系の共振を利用した受動防振装置では、共振周波数で装置の振動が増幅されてしまう効果がある。このため、観測帯域では鏡の振動が抑制されても低周波での振幅が増大し、干渉計を安定状態に保つことが困難になる。SAS には、機械系の共振モードが倒立振り子に反跳することを利用して、共振を抑制する能動ダンピング機構を導入した。具体的には、倒立振り子に加速度計を組み込み、下部からの反跳を検出し、デジタル制御系で処理した信号を、倒立振り子に組み込んだ非接触型アクチュエータにフィードバックすることによって、倒立振り子を慣性系に対して静止させ、下部の鏡の振動も抑制することを行っている。図 2 は、制御に用いる加速度計の信号を、制御の有無で比較したもので、制御をかけることによって倒立振り子の振動が共振部で数十分の一に抑制されていることを示している。これによって干渉計の安定性を向上させることが可能である。

本研究では、上記のような要素技術を組み合わせて、TAMA300 の低周波での性能を改善するための装置、TAMA SAS の試作、評価も行った。TAMA SAS による干渉計の動作を

実証するために2台のTAMA SAS プロトタイプを東京大学理学部に設置し、それらから吊られた鏡によって構成される3mのFabry-Perot光共振器を実際に動作させる実験を行い、SASに吊られた鏡に制御を加えることによって光共振器を安定に動作させることが可能であることを実証した。

また、Fabry-Perot共振器の制御信号から、SASに吊られた鏡の変動量を取得し、評価した。得られた結果と設計から予想される変動量とを比較したのが図3である。この結果から、1 Hz~10 Hzの帯域では、従来のTAMA300の感度を100倍から1000倍程度改善することが可能であることを実証することに成功した。3 Hz以上の信号は、実験に用いた電気回路やレーザーの周波数安定度などにより制限を受けているものであり、SASの性能を反映していないことを確認した。

Fabry-Perot共振器を共振させた状態で、TAMA SASの能動ダンピング機構を動作させ、0.1 Hz以上での鏡の変動量の積分値が $0.2 \mu\text{m}$ (レーザー波長の1/5程度)まで抑制されることを示すことができた。これは、従来の1~数 μm という値に比べて大きな改善である。このような改善は、倒立振り子による受動的な防振特性の向上と、能動ダンピングによって機械系の共振を抑制することによって可能となった。また、同様に能動ダンピングを用いることによって鏡の平均速度は $0.3 \mu\text{m/s}$ まで抑制された(非制御時には $1.2 \mu\text{m/s}$)。これらの結果から、SASを用いることによって干渉計の安定性、制御性を改善することが可能であることが実証された。

本研究の成果をうけて、TAMA SASをTAMA300に組み込む計画が進展している。

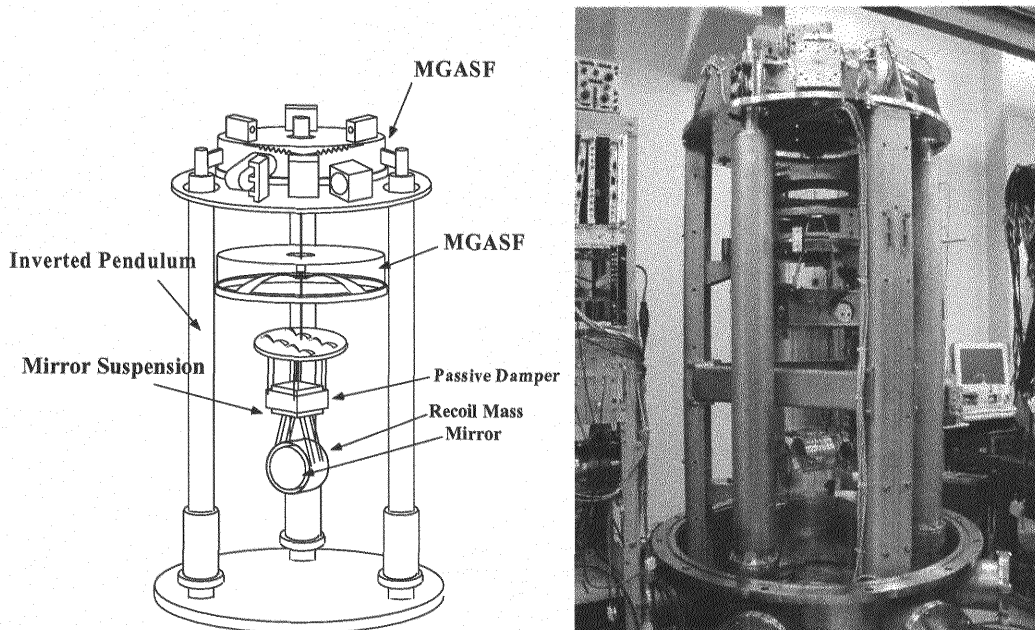


図 1: SAS の概要(左)と東大の SAS プロトタイプ(右)

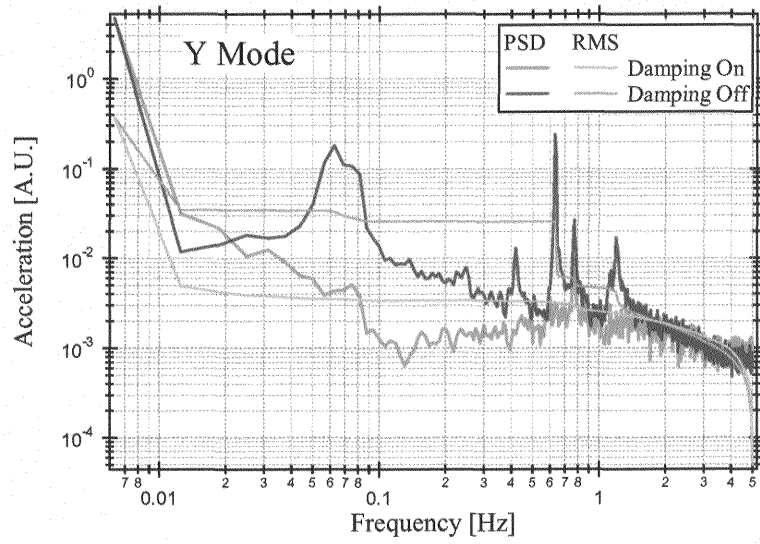


図 2: 能動ダンピングあり(赤)、なし(青)での倒立振り子の加速度。ダンピングによって機械系の共振が抑制されていることがわかる。

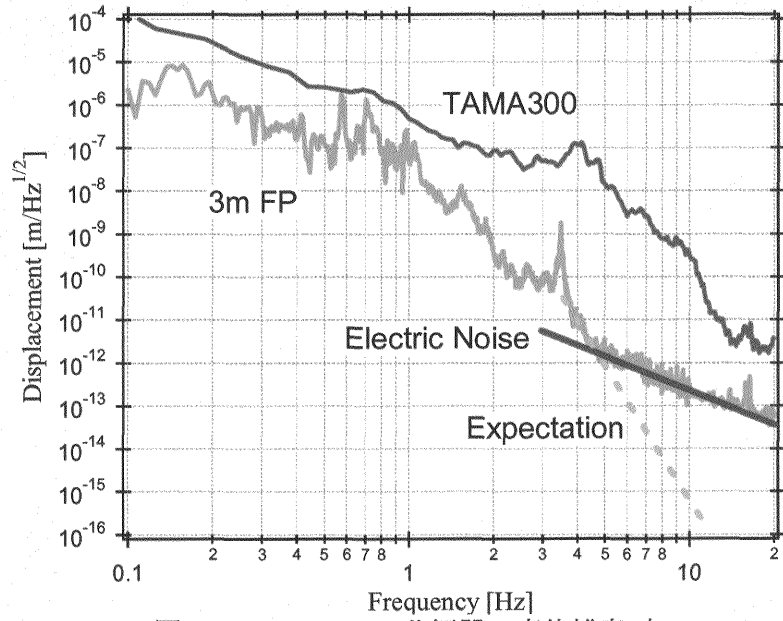


図 3: 3m Fabry-Perot 共振器の変位雑音(赤), TAMA300 の変位雑音(青), 3m Fabry-Perot 共振器の電気系雑音(緑), 期待される 3m Fabry-Perot 共振器の変位雑音(黄)。