

論文内容の要旨

Active Vibration Isolation for a Laser Interferometric Gravitational Wave Detector using a Suspension Point Interferometer

(懸架点干渉計を用いたレーザー干渉計型重力波検出器の能動防振)

氏名 麻生 洋一

重力波とは、時空の歪みが波のように伝わっていく現象である。この現象は、一般相対性理論の帰結として、アインシュタインによって約 90 年前に予言された [1]。また、重力波の存在に対する間接的な証明は、Taylor と Hulse によってなされた [2]。彼らは、片方がパルサーである連星中性子星系を発見したのである。長期間にわたるパルサー周期の精密な観測から、軌道周期の減少率が重力波の放出による理論的な予言と一致することがわかった。この発見によって、彼らは 1993 年のノーベル物理学賞を受賞した。しかし、現在までのところ、誰も重力波の直接検出には成功していない。これは、重力波と物質との相互作用があまりにも弱いためである。

重力波を検出する方法として最も有力視されているのが、レーザー干渉計を用いる方法である。これは、干渉計によって自由質点と見なせるように懸架された鏡の間の距離をモニターし、重力波によって誘起される変化を検出するというものである。現在世界中に干渉計型重力波検出器のネットワークが完成しつつある。重力波の直接検出は宇宙を見る新しい窓を開くとともに、中性子星の合体やそれに伴うブラックホールの形成、星のコアの重力崩壊、さらには宇宙開闢直後のインフレーションからの重力波など、ダイナミックな天体現象に関する情報を我々にもたらしてくれる。このような情報は、従来の電磁波による観測では得ることができない。

重力波の直接検出が可能な高感度の干渉計を作るには、様々な雑音を低減しなければならない。その中でも、地面振動は低周波に於いて最も深刻な雑音源の一つである。観測帯域に於いて地面振動を減衰させるために、干渉計の鏡はワイヤーに吊られている。これは受動的な防振方法であり、大型干渉計は全てこの方法を用いている。しかし、次世代干渉計のためには単純な振り子による防振では不十分である。そこで、よりよい防振方法、特に低周波で高性能なものが必要となる。

Suspension Point Interferometer (SPI) は、Drever によって考案された能動防振方法で [3]、低周波に於いても高い性能を発揮する。SPI の基本的な構成は、図 1 に示したようなものである (Fabry-Perot 干渉計の場合)。重力波の検出を目的とする主干渉計の懸架点 (=Suspension Point) に、補助的な干渉計 (SPI) が構築さ

れる。ワイヤーを伝わってきた地面振動は、まずこの SPI によって検出される。SPI の制御システムは、この振動を打ち消すような力を SPI の鏡に加える。これによって、主干渉計の鏡への振動伝達はブロックされる。この方法が、加速度計などをセンサーとして使った他の能動防振法と比べて優れているのは、センサーとして干涉計を用いている点である。加速度計は低周波で感度が悪化するが、変位センサーである干涉計は DC 付近まで感度が保たれる。また、SPI に於いて、補助干涉計は重力波検出に使われる主干渉計と原理的に同じ感度を持ち得る。従ってセンサーの雑音が観測帯域で主干渉計の感度を悪化させることもない。

SPI を用いることで、地面振動雑音が抑えられるのはもちろんのことであるが、そのほかにも利点が存在する。まず、日本の次世代干涉計計画である LCGT [4] に於ける、ヒートリンクの防振への応用が挙げられる。LCGT では鏡を低温に冷やすために、ヒートリンクを懸架系の一部に取り付け、排熱を行うが、その際にヒートリンクから逆に振動が混入してしまうという問題が存在する。SPI を用いると、このヒートリンクからの振動を能動的に抑えることができる。また、この際 SPI は主干渉計の鏡から近い場所に置かれるため、その低雑音性も重要となる。さらに、SPI は低周波まで防振性能を持つので、干涉計鏡の残留振動を大幅に抑えることができる。これは、干涉計の安定化につながり、動作点への引き込みが容易になったり、制御系からの雑音混入を低減できるなどの利点を生む。

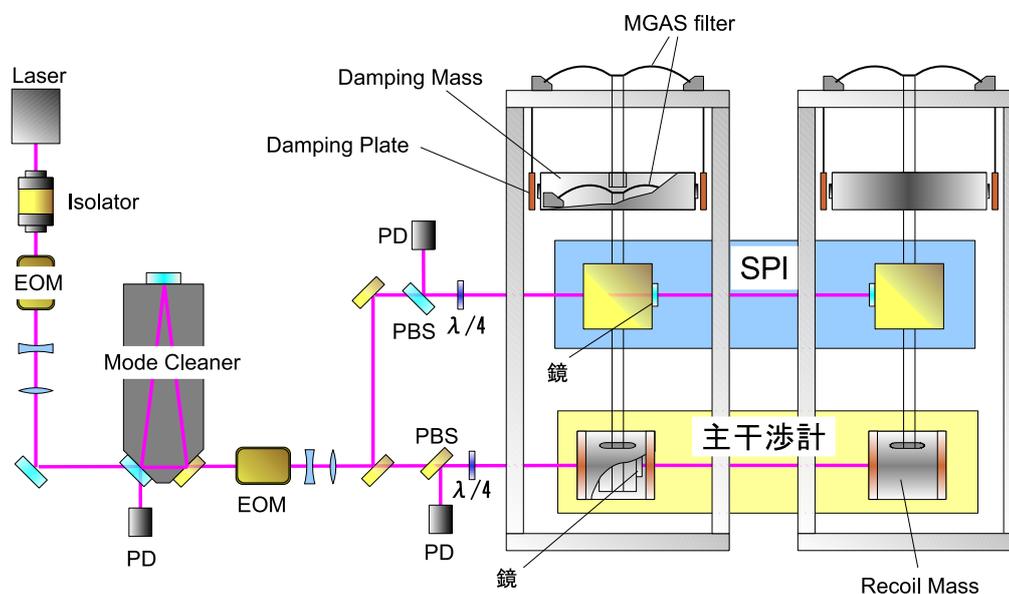


図 1: 実験装置の概要

SPI の原理の確認と、その実際の性能を調べるために、プロトタイプ実験を行った。実験装置は基本的に SPI を備えた、長さ 1.5 m の Fabry-Perot 干涉計である。実験装置の概要を図 1 に示す。レーザーとしては 200 mW の Nd:YAG レーザーを用いた。まず、40 MHz の位相変調がレーザー光にかけられ、その後モードクリーナー (MC) に入射される。MC ではレーザーの空間モードが整形されるとともに、MC の長さを基準としてレーザーの周波数安定化が図られる。MC の長さとしてレーザー周波数の差は 40 MHz の位相変調を用いた Pound-Drever-Hall 法によって取得される [5]。MC は長さ約 20 cm のリング共振器で、スペーサーとしては低熱膨張素材である SuperInvar を用いた。

MC を透過した光は、15 MHz の位相変調をかけた後にビームスプリッターで二つの光に分割される。分割された光はそれぞれ、主干渉計と SPI に入射される。主干渉計と SPI は 15 MHz の位相変調を用いた Pound-Drever-Hall 法によって制御され、動作点に保たれる。

主干渉計の鏡は 3 段振り子として懸架されている。懸架系の一段目はダンピングマスと呼ばれ、渦電流ダンピングによって、振り子の Q 値を下げ、共振周波数に於ける大きな振動を抑制している。二段目には SPI が構成される。最終段は、主干渉計用の鏡と、それをくるむように配置されるリコイルマスからなる。リコイルマスは主干渉計鏡と同様に、SPI の段から懸架される。また、主干渉計の制御は、リコイルマスから鏡をアクチュエートすることで行われる。この懸架系では、縦方向の防振を実現するために、MGAS Filter (Monolithic Geometric Anti-Spring) と呼ばれる低周波防振ばねを用いている [6]。MGAS Filter はサスペンションの最上部と、ダンピングマスに内蔵され、それぞれ共振周波数は 0.2 Hz 以下にチューニングされている。また、MGAS Filter の動作点は温度変化によってドリフトしてしまうので、動作点を常に監視して、それを保つような制御がかけられている。

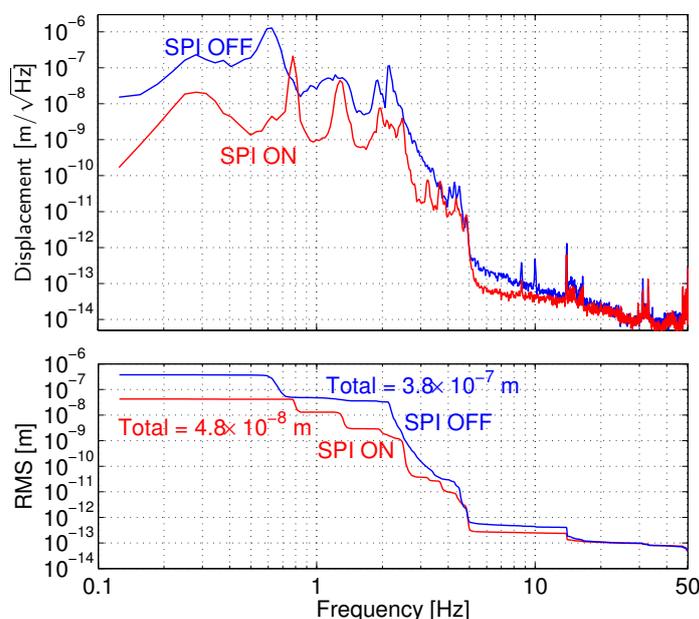


図 2: 主干渉計の変位換算雑音スペクトル

この実験の結果を要約すると以下ようになる。図 2 の上段は、主干渉計の変位換算雑音スペクトルを示している。青いスペクトルは SPI を制御しない場合で、赤いスペクトルは SPI を制御した場合である。SPI を用いることで、10 Hz 以下で雑音下がっていることがわかる。雑音抑制比率は最大で 100 倍程度であり、低周波まで防振ができていることがわかる。10 Hz 以上では、干涉計の雑音が地面振動以外の雑音に支配されているので、SPI の効果が確認できない。図 2 の下段は、上段のスペクトルを積分して、RMS (root mean square) を計算したものである。SPI を用いると、用いない場合に比べて RMS が約 1/9 に低減されている。

図 3 は、地面振動から主干渉計の鏡までの伝達関数を、ダンピングマスに備えられたアクチュエータを用

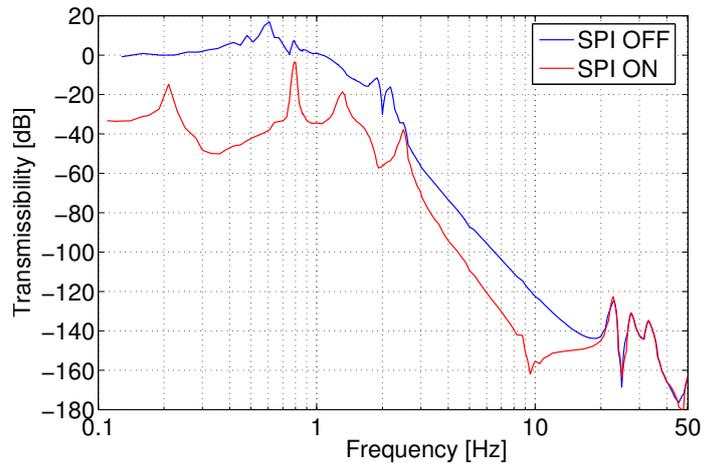


図 3: 伝達関数の比較

いて測定したものである。この場合も青い線は SPI を用いないときの伝達関数を表し、赤い線は SPI を用いた場合の伝達関数である。2.5 Hz のピーク (Pitch 方向の共振) を除くと、20 Hz 以下で防振比に大きな改善が見られる。20 Hz 以上は、測定装置の電気的なクロストークによって防振比が制限されている。

以上の結果から、SPI の原理的な動作が確認された。また、この実験で得られた防振性能の改善は、最大で 100 倍程度であった。SPI の性能を制限しているのは、水平方向以外の自由度に於ける振動からのカップリング及び、地面振動以外の雑音であった。この実験で得られた結果は、SPI を次世代大型干渉計に組み込むために重要なものである。

参考文献

- [1] A. Einstein, *Ann. der Phys.* **49** (1916) 769
- [2] J. H. Taylor, J.M. Weisberg, *Ap. J.* **345** (1989) 435
- [3] R. W. P. Drever, LIGO Document T870001-00-R(1987)
- [4] K. Kuroda, et. al., *Int. J. Mod. Phys.D*, **8** (1999) 557
- [5] R. W. P. Drever, J.L.Hall, et al, *Appl. Phys. B* **31**, (1983) 97
- [6] G. Cella, V. Sannibale, R. DeSalvo, S. Márka, A. Takamori, *Nucl. Instrum. Meth. A* **540** (2005) 502.