

低周波防振装置 SAS の開発

高 森 昭 光

〈東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 / California Institute of Technology〉
e-mail: takamori@granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp / takamori@ligo.caltech.edu

現在および近い将来稼動するレーザー干渉計型重力波検出器は、そのほとんどが重力波検出の実証に主眼を置いた設計がなされている。これに対して、将来的に重力波を天文学の手段として用いるためには、より良いレーザー光源、鏡の材質や冷却などといった新しい技術の開発、導入が必要であり、すでにこれらの技術開発が世界的に進められている。ここで紹介する SAS も次世代の重力波検出器に用いるための低周波防振装置である。

1. はじめに

SAS (Seismic Attenuation System) は、重力波検出器に用いるための低周波防振装置である。SAS は日本の TAMA とアメリカの LIGO, ヨーロッパの研究機関と共同で開発が進められており、現在東京大学理学部の 3 m プロトタイプ干渉計において最終的な試験が行われている。ここでは、低周波防振の一般論と SAS の持つユニークな特徴について述べる。

2. なぜ低周波防振をするのか？

現在世界各国で稼動している (TAMA300), あるいは建設が進められているレーザー干渉計型重力波検出器 (LIGO, GEO600, Virgo) は、フランス・イタリアの Virgo を除くといずれも 100 Hz 以上の帯域で重力波をとらえることを目的としている*。これは、この帯域には連星中性子星の合体のように、その存在が確実視されていて重力波波形の見積もりがしやすい (かつ比較的大きな振幅を持つ) 重力波源があるからである。

つまり、各検出器とも現在のところ重力波の観

測そのものを主な動機として開発されている段階である。

さて、これら現在の世代の検出器によって重力波の存在が確かめられた後には**、重力波の特異性を利用した新しい天文学が拓かれる段階が訪れるはずである。その際に観測できる帯域が広いということには、より多様な天体現象を観測できるということのほか、時間によって周波数の変化するようなイベントをより長期にわたって、精度良く観測できるというメリットがある。大雑把に言うと、観測帯域を高周波側に拡大するためには主にレーザーの性能を向上させたり、干渉計の方式を変更する必要がある。対して、低周波側に拡大するために必要なことは、熱雑音の低減と地面振動の防振である。特に 100 Hz 以下の低周波側に観測帯域を広げることは、予想される重力波イベントの多様性からも重要視されているし、宇宙に置かれる干渉計 (LISA) と地上の干渉計との観測帯域のギャップをうめるという科学的な動機もあるのでいずれの将来計画 (Advanced TAMA, LIGO II, LCGT など) にも盛り込まれている。

ところで、熱雑音を低減するためにはより高品

* Virgo は 100 Hz 以下にも高い感度を持つ計画であるが、稼動時期は他の検出器より数年ほど遅くなる見込みである。

** 楽観的な見通しであるが、そもそもこの分野には楽観性が必要である。

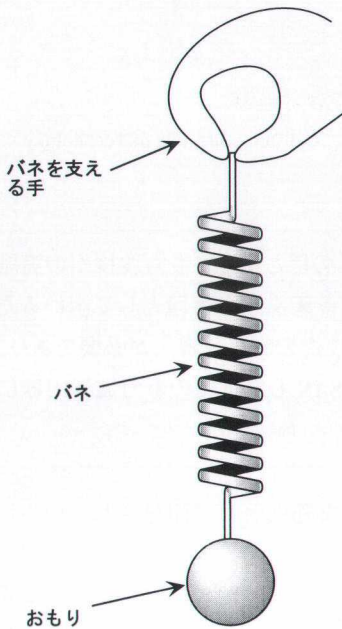
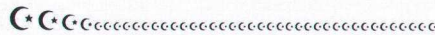


図1 受動防振装置の例: バネ振り子

質な鏡とその支持系を用いればよい。また、それらを冷却することももちろん低雑音化に有効である。そのために現在、熱雑音源の発生メカニズムに関する詳細な研究、高品質材料や加工技術、また冷却技術の開発など、さまざまな研究が活発におこなわれている。

さて、このような研究の成果によって低熱雑音の光学系が完成したとすると、その性能を引き出すためには干渉計の防振装置にも非常に性能の高いものを用いる必要が生じる。地面振動によって干渉計の鏡が、せっかく低くなった熱雑音を上回って振動してしまえば意味がないからである。

また、地面振動には低周波でより大きくゆれるという性質があるため、低周波で働く防振装置を用いることによって、干渉計をより外乱に強くし、安定に動作させることができる。重力波による天文学を進める上では、干渉計の連続運転が欠かせないから、これも非常に重要なことである。

(おもりの振動) ÷ (バネ支点の振動)

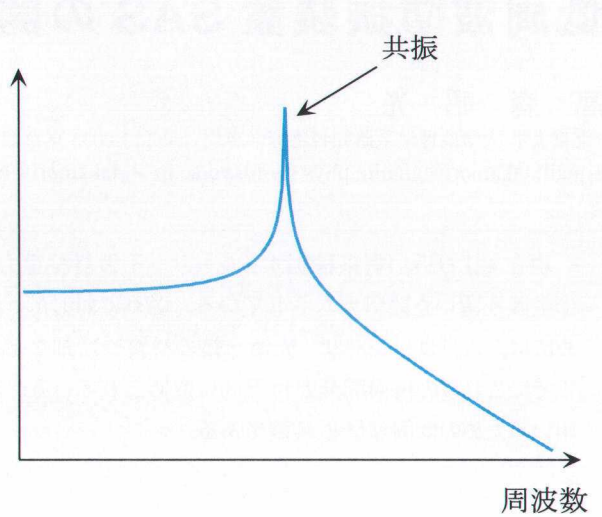


図2 受動防振装置の周波数特性

3. どう低周波防振をするのか?

では、具体的には低周波で働く防振系とはどのようなものか。現在のところ、2通りのアプローチが考えられている。ひとつは受動防振と呼ばれる方法であり、もうひとつが能動防振法である。

受動防振法は、振動に対する機械系の応答を利用して防振性能を得る方法である。身近な例としては乗り物のサスペンションなどがある。ここでは例として図1に示すようなばね振り子を取り上げる。この場合、ばねによってつられたおもりを防振したいとする。

ばねの支点を手を持ち、ごくゆっくりと上下させてみると、おもりは手の動きについてくる。つまり支点の振動がそのままおもりに伝わっていることになり、まったく防振できていないことになる。徐々に手を上下させる速さを増加させると、次第におもりの動きが大きくなり、手の動きと一対一に対応しなくなってくる。特におもりの動きが最大になる状態を共振状態という。共振状態を過ぎてどんどん手の動きを速くしていくと、やがておもりの動きは鈍くなり、そのうちに手をいくら動かしてもお

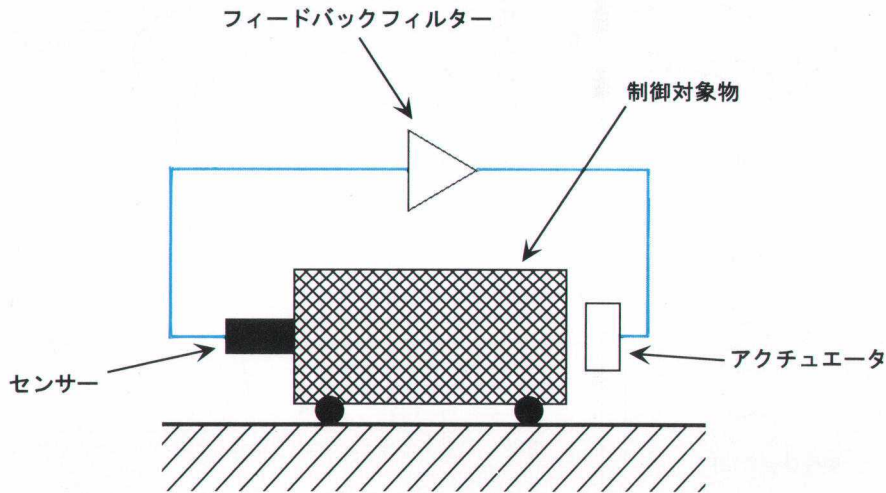


図3 能動防振装置の例

もりは動かなくなる。この現象をグラフにあらわしたものが図2である。グラフの横軸は手の動きの速さ（周波数）、縦軸は手の動きとおもりの動きの比をとったものである。共振を起こす周波数（共振周波数）よりも高い周波数では、手の振動とおもりの振動の比が1以下になる。また、この比は周波数の2乗に比例してどんどん小さくなる、たとえば周波数が2倍になると振動の比は1/4になる。つまり、受動防振装置は機械の共振周波数よりも高い周波数で防振性能を発揮する。

受動防振装置の利点としては、まず信頼性の高さがあげられる。動作原理が非常に単純なので、一度作ってしまえばずっと安定に働くことができる。逆に不利な点としては、純粋に機械的な応答だけを利用しているので、作った後で防振特性を変更することが困難なことなどがある。

これに対して、能動防振法は図3に示すように防振したい対象の運動を位置や加速度センサーによって検出し、これを打ち消すように制御をかけることによって実現される。利点としては、必要に応じて系の防振特性を変更できることがあげられる。たとえば、干渉計を動作状態に持ち込むため

に広い帯域で制御をおこない、干渉計が動作している最中は低い帯域でのみ防振するという柔軟性のある防振装置を作ることが可能である。しかしながら、能動防振技術を重力波検出のような超高精度実験に用いるには技術的な困難がある。能動防振ではセンサーによって対象物の運動を測定し、それを打ち消すような制御をおこなう。ところが、対象物の運動がセンサーの分解能よりも小さな場合には、逆に制御によってより対象物の振動を増大させてしまう可能性がある。同様に、制御に用いられるアクチュエータ（対象物を動かす装置）の性能が不十分だと対象物の振動を抑制することができない。能動防振の性能は、用いるセンサーやアクチュエータの性能そのものといってよく、海外の重力波関連の研究機関でもこれらの研究開発をおこなっている。

現在開発中の重力波検出器用低周波防振装置では、いずれも受動防振と能動防振を組み合わせるような設計がなされている。SASも例外ではない。しかしながら、SASでは、その防振性能はほとんど受動防振によってまかなわれている点が特徴的である。

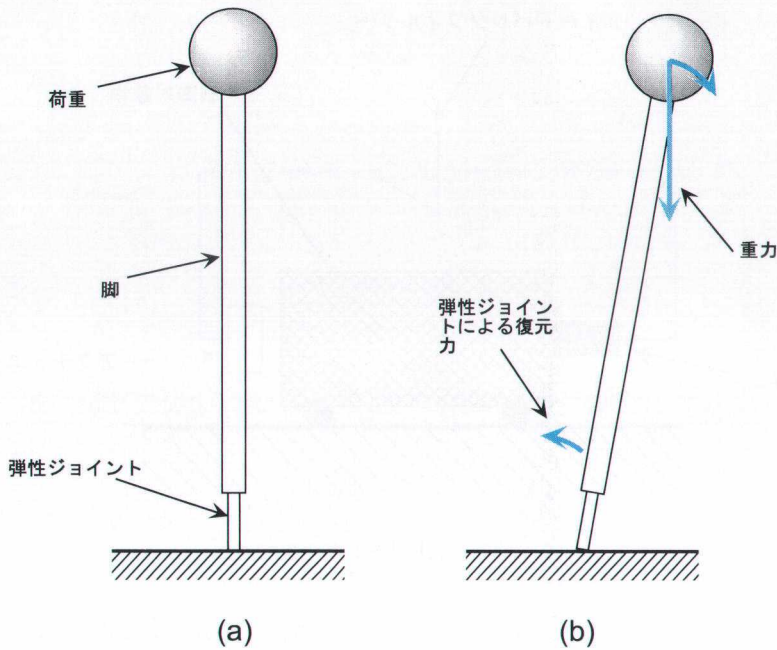
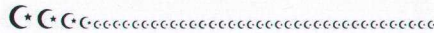


図4 倒立振り子 (a) 模式図 (b) 重力による反バネ効果

4. SAS とは？

SASの主な特徴として、

1. 倒立振り子や GAS (Geometric Anti-Spring) によって、純受動的、機械的低周波防振を実現している。
2. 機械系の共振を抑制するために能動防振を用いている。

の2点があげられる***。以下、これらの特徴を中心にSASとはどのような装置なのか解説する。

先に述べたように、受動的な防振装置で技術的に困難なのは、低周波で働く装置を作るためには、より低周波に共振を持つ機械系を作らなくてはならない点である。これは一見簡単なことに思えるが、実は技術的には困難なことである。たとえば、1 Hz で 1/1000 ほどの防振性能を得るためには、機

械系の共振周波数は 0.03 Hz 程度になくてはならない。これを単純な振り子で実現しようとする、振り子の長さは 300 m 以上となってしまい、現実に用いることは不可能である。この問題を解決するために、SAS では倒立振り子を用いている。図4に示したのが倒立振り子の模式図である。倒立振り子とは、地面に固定された弾性ジョイントの上に梃となる棒を取り付け、この棒の上端に荷重をかけた装置である。この荷重が防振対象である。振り子が矢印1の方向に傾くと、弾性ジョイントには復元力が働き、振り子を鉛直に立てようとする。このままでは振り子の共振は弾性ジョイントのバネ定数によって決まってしまうが、荷重が重力に引っ張られるために振り子の傾きが大きくなる方向にも力が働く。つまり、重力によってバネ

*** SAS は Virgo の SA(Super Attenuator)の発展改良版であるが、機械系のみによって低周波防振を実現しているところが主な違いである。

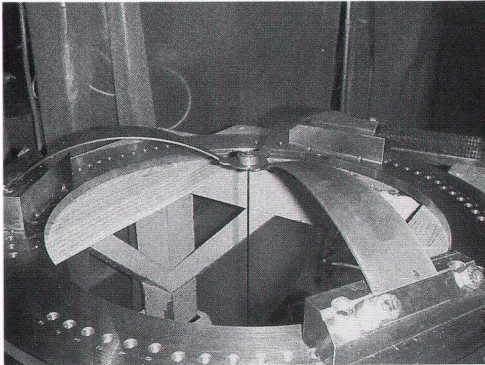


図5 鉛直防振装置 GAS: いたバネを特定の形状に曲げることによって反バネ力を得る

の力が部分的に打ち消されることになる。したがって全体としてみると弱いバネによって振り子が支えられているのと等価である。このように、バネの力を打ち消す機構のことを反バネ (Anti-Spring) という。倒立振り子の場合、棒の先端の荷重を増減することにより、反バネ力を調整することが可能である。理屈の上では完全にバネの力を打ち消すことも可能であるが、荷重をかけすぎるとごくわずかな振動が加わったときにバネの力では反バネ力を支えきれなくなり振り子が倒れてしまうので、現実的には 10 mHz 程度の共振周波数を実現するのが限界である。SAS では高さわずか 2 m 程度の倒立振り子を用いることによって 30 mHz というきわめて低い共振周波数、つまり非常に高い低周波防振性能を実現している。

鉛直方向の防振に関しても、倒立振り子と同様に反バネ力を発生する機構を用いている。板バネを特殊な形状に変形させることによって発生する反バネ力を利用して、高さわずか 10 cm 程度の装置で共振周波数 300 mHz を実現する GAS という装置も SAS に組み込まれている (図5)。通常のバネでこのような周波数を実現しようとすると、バネの伸びだけで 3 m 近くになってしまう。

さて、倒立振り子や GAS のような非常に低い共振周波数をもつ装置を利用すれば数 Hz の帯域で高

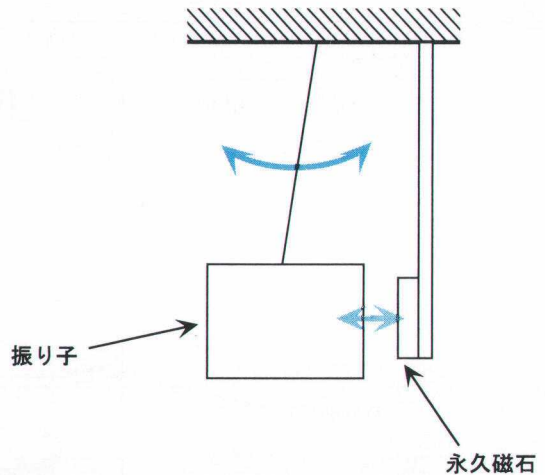


図6 永久磁石による受動ダンピング: 振り子と磁石の間にダンピング力が働く

い防振性能を得ることができるが、実はそのままでは防振系としては不完全である。というのは、図2を見ればわかるが、共振を持つ機械系を用いると、確かに共振周波数より高い周波数帯では地面の振動はよく防振されるが、共振周波数では逆に地面よりも防振対象物の振動の方が大きくなってしまふからである。レーザー干渉計を安定に動作させるには、最悪でも鏡の変位がレーザーの波長 ($1 \mu\text{m}$) の 1/10 程度に収まっていなくてはならない。機械系の共振によって鏡が大きく揺れているようだと重力波の検出はおろか干渉計を動作させることすら不可能である。したがって、機械系の共振を押さえ込むこと (ダンピング) が必要である。

共振では、機械系には大きな運動エネルギーが蓄えられているので、このエネルギーを何らかの方法で吸い出すことができれば共振をダンピングすることができる。たとえば、現在 TAMA300 の鏡を吊っている振り子では、振り子共振をダンピングするのに渦電流を用いている。図6が渦電流を用いたダンピングの模式図である。銅やアルミニウムなどの導電性の良い金属を振り子状に吊り、その近くに永久磁石を配置する。振り子が共振周波数で大きく揺れると、金属表面の磁場の分布が変化する

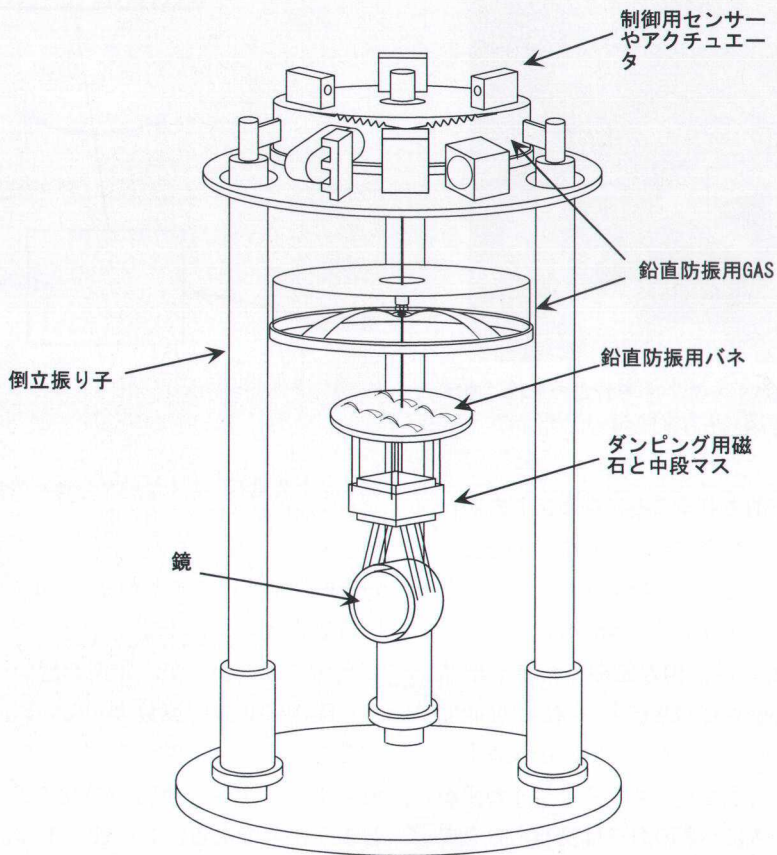
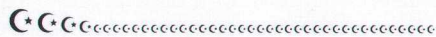


図7 TAMA SAS の模式図

ので振り子の表面には渦電流が誘起される。この渦電流は金属の抵抗によって熱として捨てられる。すると振り子の振動は徐々に小さくなる。つまり、振り子の運動エネルギーを熱に変換して取り出すことによってダンピングすることが可能である。受動的機構の常として、信頼性が高いことが利点であるが、ダンピング用の磁石の振動が逆に振り子にもれてしまい、振り子本来の防振性能を損なうという問題もある。

このような永久磁石を用いたダンピング機構は、何らセンサーやアクチュエータなどを必要としない受動的ダンピングの例である。これに対して、防振対象物の振動をセンサーで検出して、その振動を

弱めるように制御をかけることによって実現される、能動的ダンピングという技術がある。これは基本的には能動防振の一種であるが、広い帯域で機械系の受動的防振特性を上回る性能を目指すのではなく、共振周波数付近に限って制御をおこなうという点が特徴である。もともと共振周波数では機械系は大きく揺れており、これを検出すればよいわけだからセンサーの性能も能動防振の場合に比べて緩和され、技術的な困難も解消される。その上で制御系の利点であるダンピング特性の変更などの柔軟性を生かすことができるという優位性がある。

SAS では、倒立振り子などの機械系の共振を位置センサーや加速度センサーによって検出し、ダ

ンピングするという方法をとっている。つまり、超低周波の共振を持つ受動的防振装置の性能を損なうことなく、共振のみをダンピングできる能動系の利点を取り込んでいるわけである。また、これらのセンサーを利用することにより、低周波共振を持つ機械系に特有の問題である温度ドリフトなどを補正することも可能である。

5. 実際の SAS はどんなものか？

SAS では倒立振り子と GAS による低周波防振と、能動的な共振のダンピングをおこなうことを説明したが、ここではより具体的に SAS の各部について解説する。

SAS 全体の構造を図 7 に示した。3本の脚からなる倒立振り子の上に GAS を利用した鉛直防振装置が取り付けられ、さらにそこからもう一台の鉛直防振装置が振り子状に吊られている。この第二の鉛直防振装置からは3段の振り子が吊られている。振り子の最下段が干渉計の鏡である。この振り子の最上段にはやはり鉛直防振用のバネが取り付けられている。さらに、最上段と鏡の間に位置するアルミニウムブロックの周りには受動ダンピング用の永久磁石が配置されている。

能動的なダンピングにかかわる部品としては、倒立振り子の位置を測定するための LVDT 位置センサーと加速度計が倒立振り子に取り付けられている。さらに、これらのセンサーの信号はデジタル処理され、制御に必要な信号はやはり倒立振り子に取り付けられたアクチュエータに送り込まれ、機械系のダンピングをおこなうことができる。シミュレーションによれば、能動的ダンピングによって鏡の揺れは100分の1 μm から10分の1 μm まで押さえ込まれる。

さらに、防振特性という点では1 Hz で地面振動が1000分の1まで防振され、10 Hz では1億分の1のさらに1000分の1まで防振される設計である。機械系には予期せぬ内部共振などが存在するので実際には設計どおりの性能が出ることはまれであ

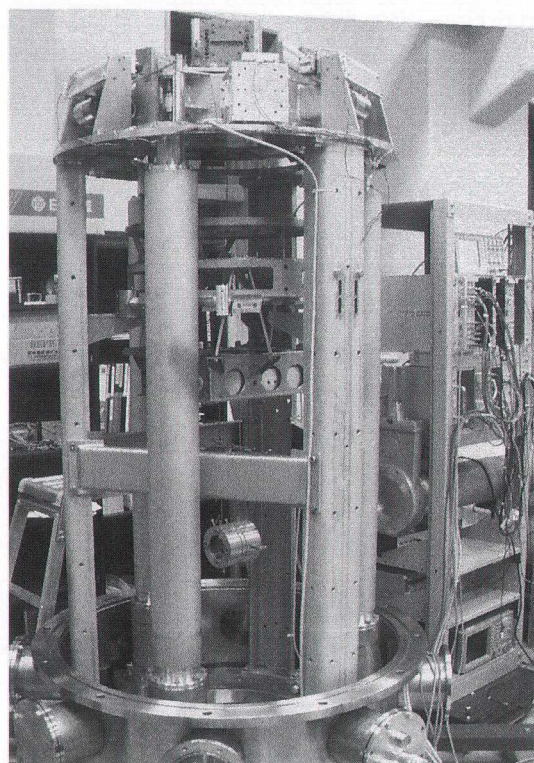


図8 3m プロトタイプ干渉計に組み込まれた TAMA SAS

るが、たとえ実際の性能が1000倍ほど悪化しても、LCGTのような検出器では重力波の観測帯域を10 Hz から20 Hz 程度にまで広げることが可能である。

6. SAS 開発の現状は？

冒頭に述べたような国際協力のもとで SAS の開発が精力的におこなわれている。1999年には TAMA300 で実際に用いることのできる SAS (TAMA SAS) の設計をするために必要な各要素(加速度計や GAS など)の開発をイタリアのピサ大学やアメリカのカリフォルニア工科大学でおこなった。2000年にはカリフォルニア工科大学で最初の TAMA SAS プロトタイプが製作され、各要素の機械的な整合性の調整や、倒立振り子の防振特性などの基本的性能の検証、さらに位置センサー

による能動ダンピングも試験した。これらの作業と並行して、鏡を吊る振り子部分の設計、製作もおこなわれた。

これらの結果を受けて今年はじめに2台のTAMA SAS プロトタイプが製作された。これらは2月に東京大学理学部物理学科にある3 m プロトタイプ干渉計に組み込まれ、実際に干渉計を運転しSASの特性を評価するための実験が始まった。現在は鏡も含めてすべての要素が組み込まれ、位置センサーだけでなく、加速度センサーも用いたダンピングの試験が行われている(図8)。

順調に行けば3 m 干渉計での試験の後にTAMA300にSASを組み込み低周波での感度の向上を目指すことになる。

7. 終わりに

重力波の直接検出が実証された後、重力波天文学の発展のためには低周波で重力波を連続的に観測することが欠かせない。そのための技術的な土台としてSASのような低周波防振装置を開発することはLCGTやLIGO IIに代表される次世代重力波検出器にとって非常に重要である。また、海外のグループとの協力によってこのような研究がおこなわれていることは人材やノウハウの交換を通してこの分野の活性化にも役立っている。

SAS: Low Frequency Seismic Attenuation System

Akiteru TAKAMORI

Department of Physics, University of Tokyo 113-0033 Japan / California Institute of Technology

Abstract: Currently there are various R&D programs available for the next generation of the interferometric gravitational wave detectors. To achieve the goal of a superior sensitivity desired for refined astronomical observations by these detectors, much sophisticated technologies and detail are required for the advanced laser interferometer components. One of the major obstacles for such a ground-based interferometer is the seismic disturbance. In order to obtain a wide observation band around low frequencies, the seismic noise at the level of optics needs to be attenuated. The SAS (Seismic Attenuation System) has been developed with an international collaboration between TAMA, LIGO and some European institutes, with the main objective of achieving sufficient low frequency seismic attenuation. The system, not only suppresses the seismic noise well below the other noise levels present at very low frequencies around few Hz, but it also in turn reduces the residual motion of the optics to well below one micron, which is necessary for a stable operation of the interferometer. The SAS, basically a passive mechanical filter, constitutes of ultra low frequency mechanical isolators, an inverted pendulum and GAS (Geometric Anti-Sprig) filters. Additionally, the SAS is implemented with an active damping on the mechanical filters. Here we discuss the basics of passive isolation and main features employed by the SAS.