

# TAMA300 重力波アンテナ・世界最高感度達成

川村 静児

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: seiji.kawamura@nao.ac.jp

日本の重力波アンテナ TAMA300 が、ついに世界最高感度を更新した。1995 年に開始された TAMA 計画は、世界初の重力波検出をめざして、300 m のアーム長をもつ巨大マイケルソンレーザー干渉計の開発を行ってきた。そして 2000 年夏、ついにレーザー干渉計型重力波アンテナとして世界最高感度を達成したのである。今後は、さらに感度を高め、重力波検出をめざして長期観測を行っていく。

## 1. はじめに

重力波は 80 年以上も前に、アインシュタインの一般相対性理論によりその存在を予言されたが、いまだ直接には検出されていない。重力波検出実験は、1960 年代の Weber による共鳴型検出器を用いた実験<sup>1)</sup>によりスタートし、その後 1970 年代から始まったレーザー干渉計型検出器のプロトタイプ実験による感度の向上の結果<sup>2), 3)</sup>、1990 年代に入って世界各地で数 100 m から数 km のサイズの大規模干渉計アンテナの建設が開始されるに至った。現在、建設中あるいは稼働中の大型重力波アンテナとしては、アメリカの LIGO 計画<sup>4)</sup>、フランス・イタリアの VIRGO 計画<sup>5)</sup>、ドイツ・イギリスの GEO 計画<sup>6)</sup>、そして日本の TAMA 計画<sup>7)</sup>がある。LIGO 計画は、4 km のアーム長を持つ干渉計を、重力波信号の相関を取るため離れた場所に 2 台造るといふ、総予算約 500 億円の大型計画であり、現在予備用の 2 km の干渉計が動き始めたところである。VIRGO 計画は、超高性能の防振装置を用いて低周波まで感度の伸びた 3 km の干渉計を造る 100 億円規模の計画であり、現在までに防振装置と光学系の一部が組み込まれている。また GEO 計画は、帯域をずらして干渉計の感度を特定の周波数で上げるタイプの干渉計（アーム長 600 m）を用いており、現在干渉計の一部が動作している。

これら諸外国の計画に対して、TAMA 計画で開発中の重力波検出器 TAMA300 は、アーム長 300 m と最も小型であり予算規模もはるかに小さいが、その開発のスピードに関しては他を大きく引き離している。1995 年に他の計画より一歩遅れてスタートした TAMA プロジェクトは<sup>8)</sup>、1999 年に世界に先駆けて重力波アンテナとして動き始め<sup>9)</sup>、その後も調整・改良を続け<sup>10)</sup>、2000 年夏には世界最高感度を達成し、カリフォルニア工科大学で 1994 年にプロトタイプ干渉計を用いて達成された記録を、6 年ぶりに打ち破ったのである<sup>11)</sup>。現在、TAMA300 は世界の大規模干渉計の中では唯一有為な感度で稼働中のアンテナである。

## 2. TAMA300 とは？

TAMA 計画は 1995 年に文部省の創成的基礎研究の 1 つのテーマとして 5 年計画で発足し、その後 2000 年から 2 年間の延長が認められている。プロジェクトの目的は、将来の日本の大型低温重力波アンテナ計画（LCGT 計画）<sup>12)</sup>のための技術確立および、可能性としては低い人類初の重力波検出をめざすことであり、ホスト機関である国立天文台をはじめ、東京大学、東京大学宇宙線研究所、京都大学基礎物理学研究所、高エネルギー加速器研究機構、電気通信大学レーザー極限技術研究センター、宮城教育大学、大阪大学、新潟大学など



図1 国立天文台の三鷹キャンパス内にある TAMA300 重力波アンテナ

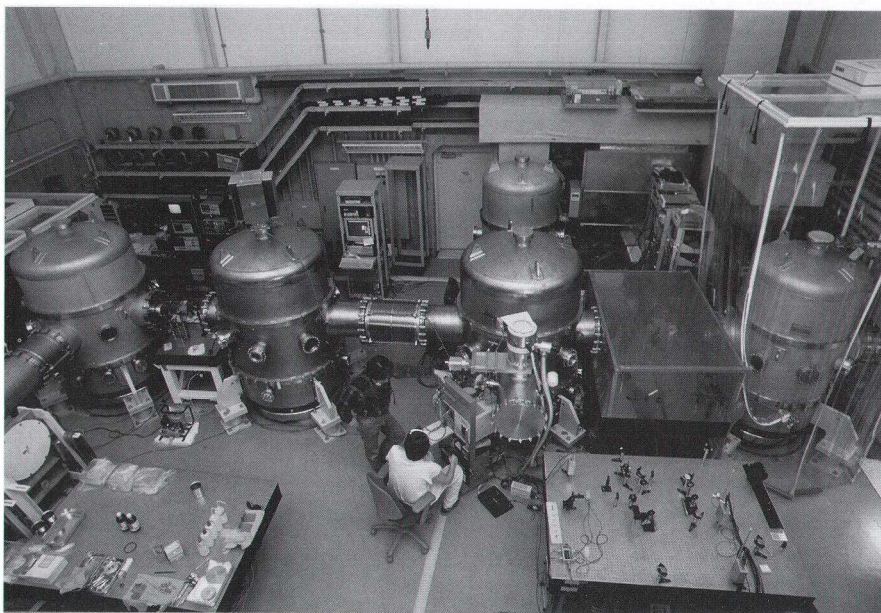


図2 TAMA300 重力波アンテナの中央棟の内観

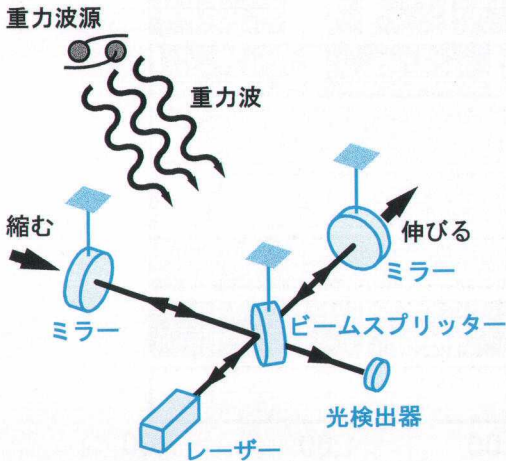


図3 TAMA300 マイケルソンレーザー干渉計による重力波検出の原理

が共同で、実験・理論の両面で研究を進めている。

このTAMA計画の中心をなす研究が、国立天文台の敷地内に建設された重力波検出器TAMA300(図1, 図2参照)の開発である。これは基本的にはアーム長300mのマイケルソン型レーザー干渉計である。図3に示すように、潮汐力の波である重力波がやってくると、干渉計の片方の腕の長さが伸び、もう一方の腕の長さが縮み、両腕の長さの差に変化が生じ干渉光の明暗が変化し、これを光検出器で測定することにより重力波が検出できる。なお、干渉計が重力波に対して感度を持つように、それぞれのミラー及びビームスプリッターはワイヤーで吊り下げられ、その振り子の共振周波数(1 Hz程度)より十分高い周波数領域では、水平方向に自由落下している、つまり余分な力が働いていないとみなすことができるようになっている。

重力波は空間のひずみとして伝わってくるので、ある程度までは腕の長さが長いほど、重力波によって引き起こされる腕の長さの変化量、すなわち干渉計の重力波信号も大きくなる。このためTAMA300は300mものアーム長を持つのである

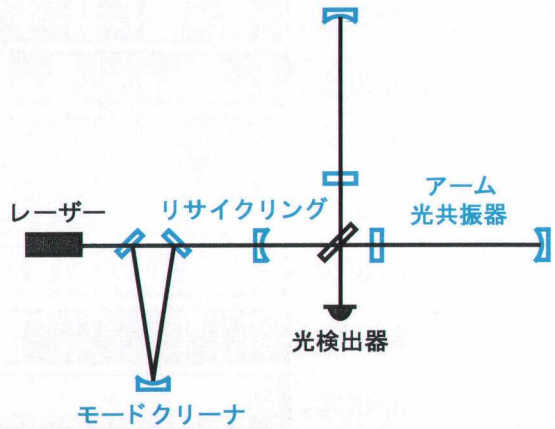


図4 TAMA300の干渉計の構成。感度をあげるため、アーム光共振器、モードクリーナ、リサイクリングが組み込まれている。

が、これを実効的にさらに長くするためアーム光共振器が組み込まれている(図4参照)。ビームスプリッターの近くにミラーをつり下げ、遠方のミラーとの間で光共振器を構成し、実効的に光をミラー間で多重反射させ、重力波信号を増幅するのである。干渉計の検出に伴うノイズは、通常光の折り返し回数によらず一定だと考えられるので、結果としてシグナル・ノイズ比が改善される。ただしミラーを直接揺らす雑音は重力波信号と同様に増幅されるので、その種の雑音に対するシグナル・ノイズ比はアーム光共振器を用いても良くならない。

TAMA300にはまた、モードクリーナと呼ばれる光学装置が組み込まれている(図4参照)。レーザーから出てくる光には通常、ビームの横揺れ、角度揺れ、径の脈動などが存在し、これらは干渉計の幾何学的な非対称性と結びついて、干渉計の出力段でノイズとなって現れる。そこでレーザー光を干渉計に入射する前に、光共振器を通すことによりビームの整形をし、結果としてビームの揺れを抑える。この共振器がモードクリーナーである。

さらに感度を上げるためにリサイクリングの技術が使われる。干渉計の基本的ノイズの一つである

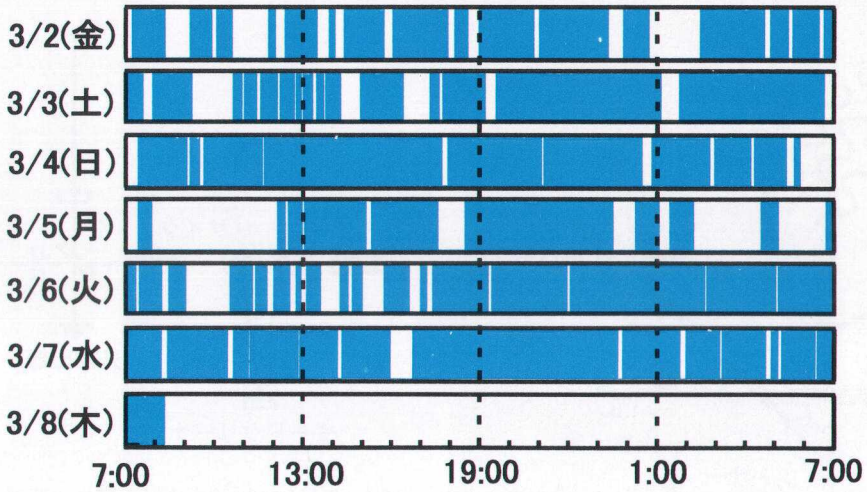


図5 2001年春に行なわれた1週間の観測中の干渉計稼働時間帯

ショットノイズに対する要請から、干渉計の検出器側ポートの干渉光が常にダークフリンジになるように、両腕の光路長差は制御されている。したがって全ての光はレーザー側のポートに返っていく。ところで、ショットノイズに対するシグナル・ノイズ比は入射光のパワーが高いほど良くなる。そこでこのレーザー側に返っていく光を再利用して実効的にレーザーパワーを高め、ショットノイズに対するシグナル・ノイズ比を改善する方法が、リサイクリングである。実際には干渉計の前にミラーを吊り下げ、干渉計から戻ってくる光を、もう一度干渉計の方にコヒーレントに打ち返すのである(図4参照)。このリサイクリングは2001年秋からTAMA300に組み込まれる予定である。

TAMA300が重力波アンテナとして適切に動作するためには、干渉計の制御が必要である。上に述べた、モードクリーナー、両腕の共振器、およびリサイクリング共振器で光が共振し、なおかつマイケルソン干渉計の検出器側のポートが暗くなるように光の周波数、あるいはそれぞれの共振器の長さを制御する必要がある。制御信号は、光に10MHz程度で位相変調を加え、検出器からの信号

を復調することによって得られる。通常の干渉計の検出ポートの他に、リサイクリングミラーの前後からも光をピックアップし、それらを通常の復調及び位相を90度ずらした復調をすることにより、干渉計の長さに関するさまざまな信号が独立に取り出せる。得られた信号は適当なフィルターアンプを通してミラーにフィードバックされる。ミラーの駆動はミラーに貼り付けられた磁石と外部コイルとの間の相互作用を利用して行なわれる。またミラーのアラインメントの制御も必要である。アラインメント信号を得るためには、ウエーブ・フロント・センシングと呼ばれる、干渉する2つのビームの波面の傾きを4分割フォト・ダイオードで検出する方法が用いられる。この信号を用いてミラーの姿勢制御用マグネット・コイル・アクチュエーターを通してフィードバックをかけるのである。

観測に関しては、2000年夏に2週間の連続観測が行なわれ、総観測時間160時間以上を記録した。装置の最長連続運転時間は12時間以上と、干渉計型重力波アンテナとしては抜群の安定度を示した。この観測期間中は平日の昼間は地面振動が大きいいため干渉計がうまく動作しないという問題が

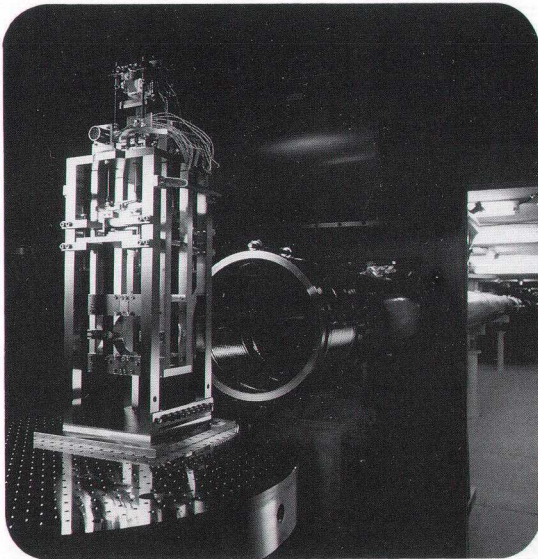


図6 TAMA300 重力波アンテナで用いられるミラーつり下げシステム

あったが、この状況を改善するため能動的防振システムを4つのミラーに導入し、低周波領域での振動を引き下げること成功、昼間でも安定に動作させることが可能となった。これにより2001年春に行なわれた観測では、図5に示すように7日間で110時間の観測を行ない、装置稼働率も75%を記録した。さらに、その後のテストランでは平日に25時間近くの連続運転に成功し、装置の安定度が著しく改善したことを証明した。また、干渉計のオペレーションに関しても、以前は非常に高度な技術が要求されたが、各種制御の自動化によって簡単な講習により誰でもオペレーションができる程度の状態になった。

### 3. 感度

TAMA300の3つの基本的な雑音は、ショットノイズ、地面振動による雑音、熱雑音である。光はフォトンの集まりであるため検出時に統計的な揺らぎが生ずる。これをショットノイズという。ショットノイズに対するシグナル・ノイズ比は入射光のパワ

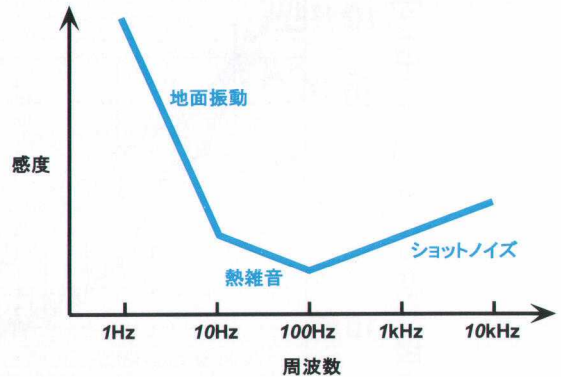


図7 重力波検出用レーザー干渉計における典型的なノイズ曲線

ーが高いほど良くなる。もっともパワーが高すぎると今度は、輻射圧の揺らぎが大きくなり、光がミラーを直接揺らしてしまふ。したがって、ショットノイズと輻射圧の揺らぎの雑音を等しくする最適な光のパワーが存在し、このとき2つのノイズの和は最小となる。実はこれが不確定性原理で与えられる量子限界である。TAMA300で使っているレーザーは出力10Wであり、現在のところ輻射圧によるノイズは無視できる。

地面の揺れは直接ミラーを揺らすので、高精度の防振装置が必要となる。TAMA300の防振機構としては金属板と弾性体を組み合わせたスタックと呼ばれるものとミラーを2段につり下げた懸架システム(図6参照)で構成される。また低周波では、それら全体をアクティブに防振している。

熱力学によると物体は温度で決まるエネルギーを持ってブラウン運動をしている。したがってミラーもブラウン運動を行なっている。これを抑制するためには、ミラーの振り子としてのモードと内部モードの機械的ロスを低くして熱運動を共振周波数付近に集中させ、結果として測定周波数領域でのミラーの揺らぎを小さくする必要がある。したがってTAMA300ではミラーの材質にQ値の高い

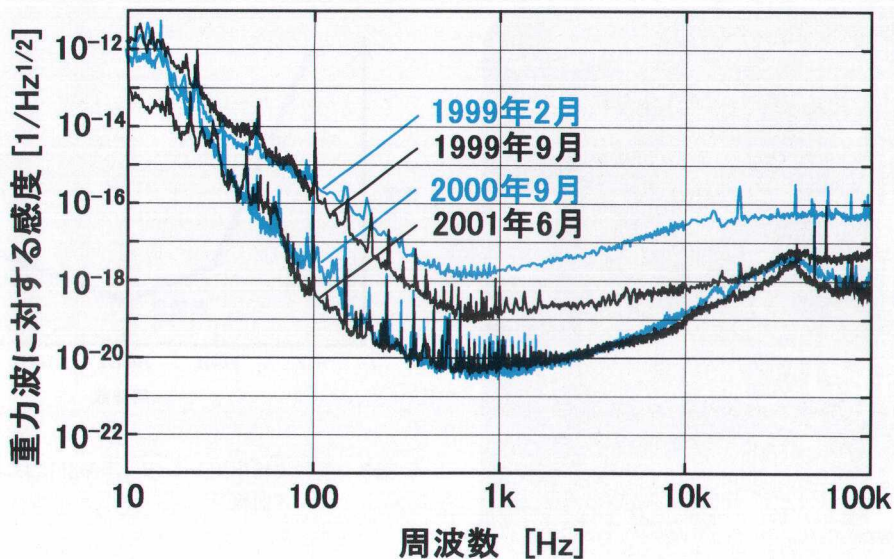


図8 TAMA300の感度の変遷

溶融石英を使い、ミラーをつるワイヤーには細い径のタングステンを用いて、熱雑音を抑えている。

一般に干渉計の感度はこれら3つのノイズで制限される。図7に示すように低周波領域では地面振動が、高周波領域ではショットノイズが、そして中間領域では熱雑音が干渉計の感度を決める。

図8にTAMA300の感度向上の経過を示す。1999年2月に予備レーザーを用いた干渉計の動作確認がなされて以来、感度は順調に改善され、ついに2000年夏にレーザー干渉計型重力波アンテナとして世界最高感度を達成したのである。この感度は重力波の引き起こす空間のひずみに対して、1 kHz付近で  $5 \times 10^{-21} \text{Hz}^{-1/2}$  であり、これは我々の銀河の中心でおこる連星中性子星の合体から放出される重力波を S/N 比 30 ~ 40 で検出できる性能である。その後も引き続き徐々にではあるが感度の改善がなされている。

世界最高感度を出すまでの道のりは決して平坦ではなかった。思うようにノイズが落ちず、このままの感度で止まってしまうのではないかと心配された時期もあった。ところが2000年夏、たてつけに2つの雑音が同定され抑えられ、感度の向上に

つながった。1つめのノイズは「レーザーの3 MHz 付近の強度雑音が、モードクリーナを制御するために用いられる、12 MHzの位相変調に伴って現れる12 MHzの強度変調により、15 MHzにアップコンバートされ、それがモードクリーナを透過し、干渉計のアームの長さ信号を取得するための15 MHzの復調によって信号帯域のノイズとなって現れる」という非常に複雑なメカニズムによって生じるノイズであり、「12 MHzの位相変調信号を弱めてやり、15 MHzへのアップコンバートを抑える」ことによりこのノイズを小さくすることに成功した。もう1つのノイズは散乱光の雑音であった。モードクリーナからでてきた光は干渉計の腕の共振器へのモードの結合をよくするためにテレスコープレンズで整形されている。詳しい実験の結果、干渉計から返ってきた光がこのテレスコープレンズの表面で反射されそれがメインビームと干渉し雑音となっていることが分かった。そこでこのレンズを少し傾け、その反射光をできるだけメインビームから遠ざけたところ、この散乱光のノイズを抑えることに成功した。これらのノイズ退治により感度は改善し、世界最高感度が実現されたのである。現在もさらに感度

を改善するために、各種ノイズの同定と低減は引き続き行なわれている。

#### 4. 今後の予定と TAMA 以降の計画

TAMA300 の今後の計画の3つの柱は、感度・安定度のさらなる改善、長期観測、そしてリサイクリングの組み込みである。現在の感度は、アラインメントの制御雑音や散乱光ノイズなどの実際的な雑音で制限されており、これらの雑音を引き下げ、最終的には3つの基本的雑音、ショットノイズ、地面振動による雑音、及び熱雑音で制限される感度を実現することをめざす。その上でリサイクリングを組み込むことによりショットノイズのさらなる低減による感度の向上を目指していく。長期観測としては、まず2ヶ月間1000時間レベルの観測を行なう予定であり、さらに感度の改善に応じて半年間程度の観測も計画されている。

このように TAMA300 は今後も順調に重力波検出器として成熟していくことが予想されるが、現在の重力波源の頻度の予測によると TAMA300 で重力波を検出することはかなり難しいと考えられている。その理由の一つは TAMA300 のアーム長が 300 m しかないことにある。地面振動や熱雑音などのミラーを直接揺さぶるノイズはアーム光共振器による重力波信号の増幅では抑えることができないので、アーム長をできるだけ長くする必要がある。また熱雑音自体に関して言えば、雑音を下げるのに最も有効な方法は温度を下げることである。さらに装置の安定度などの点から地面振動は小さいほうがよい。ということで、TAMA の次の日本の将来計画として現在考えられているのが、神岡のトンネル内に 3 km の低温重力波アンテナを作る LCGT 計画（宇宙線研究所がホスト機関）である。我々は今後、LCGT の 2005 年スタートをめざして、TAMA による高感度レベルでの観測と、LCGT のための技術開発を平行して行なっていく予定である。

#### 参考文献

- 1) Weber J., 1969, Phys. Rev. Lett. 22, 1320
- 2) Shoemaker D., et al., 1988, Phys. Rev. D 38, 423
- 3) Abramovici A., et al., 1996, Phys. Lett. A 218, 157
- 4) Abramovici A., et al., 1992, Science 256, 325
- 5) Virgo, 1992, CNRS-INFN
- 6) The GEO600 Team, 1994, MPQ Report 190, 18
- 7) Tsubono K., 1997, Proc. of the TAMA Workshop, 183
- 8) Kawamura S. and the TAMA collaboration, 1999, Proc. of 8th Workshop on General Relativity and Gravitation, 123
- 9) Kawamura S. and the TAMA collaboration, 2000, Proc. of 9th Workshop on General Relativity and Gravitation, 148
- 10) Kawamura S. and the TAMA collaboration, 2000, Proc. of 9th Yukawa International seminar on Black Holes and Gravitational Waves, 72
- 11) Ando M., et al., 2001, Phys. Rev. Lett. 86, 3950
- 12) Kuroda K., et al., 1999, Int. J. Mod. Phys. D 5, 557

#### TAMA300 Gravitational Wave Antenna - Achievement of the World-Best Sensitivity

Seiji KAWAMURA

National Astronomical Observatory 2-21-1 Osawa,  
Mitaka-shi, Tokyo, 181-8588, Japan

Abstract: The Japanese gravitational wave antenna, TAMA300, has finally achieved the world-best sensitivity. The TAMA project, which started in 1995, has been developing a Michelson interferometer with 300m arm lengths for the world's first detection of gravitational waves. Finally in the summer of 2000, the world-best sensitivity for a laser interferometric gravitational wave antenna was realized. We will further improve the sensitivity of TAMA300 and will have a long-term observation run, aiming at the detection of gravitational waves.