

坪野研究室

現在三鷹に建設中の300m基線長レーザー干渉計重力波検出器(TAMA300)は、順調に作業が進んでおり一部の光学系が既に動き始めている。これらを完成させて来年よりいよいよ観測を開始することになる [14]。

重力波の検出は物理学の大きな課題の一つとして残されている。連星パルサーの公転周期減少を観測することにより重力波の存在は間接的に証明されたが(テイラー(J. Taylor) & ハルス(R. Hulse) 1993年ノーベル物理学賞受賞)、重力波を直接検出し新しい天文学を創成することが、本研究室の現在の中心テーマである。重力波をとおして宇宙を見る「重力波天文学」は、われわれに全く新しい目を与えるものとして期待されている。これまでの電磁波を用いた伝統的な観測によって得られる情報と、「重力波天文学」によって明らかにされるであろう宇宙の姿は完全に相補的な関係にある。つまり透過性が非常によいという重力波の特性により、超新星爆発や連星中性子星の合体等の激しい天体現象に際して、中心核付近の内部の情報を知ることが可能になる。重力波検出を困難にしている主な理由は技術的な問題である。重力波検出のためには21桁の相対精度で2点間の距離を測る必要があり、レーザー、防振、熱雑音等において極限的技術を必要とする。

将来は国際的な観測ネットワークを用いて重力波観測をする必要があるが、干渉計の指向性を考慮すると、地形的に見て日本にもkmクラスの重力波検出器を建設することが必要である。さらには、advanced interferometerとよばれる次世代干渉計を作り、世界に先駆けて重力波検出をめざそうという計画も進んでいる [22]。

1 レーザー干渉計重力波検出器

1.1 300m レーザー干渉計重力波検出器計画(TAMA300)

1995年度より文部省科学研究費「新プログラム方式による研究(創成的基礎研究)」のテーマとして「高感度レーザー干渉計を用いた重力波天文学の研究」が5年間の計画で(1995-1999)スタートした。本計画の中心課題は片腕300mのL字型のレーザー干渉計を建設しそれを運転することである。これが300mレーザー干渉計重力波検出器TAMA300であり、欧米のLIGO, VIRGO, GEO検出器に先駆けて運転を開始する。研究目的のひとつは、これにより将来のkmクラス干渉計に必要な技術を確認することであり、もうひとつはこれを実証型検出器として機能させることにより実際に重力波検出のチャンスを狙うことである。目標は $h = 3 \times 10^{-21}$ の重力波を検出する感度を達成することである。例えばアンドロメダ星雲($r \sim 700\text{kpc}$)で超新星爆発や中性子連星の合体がおこれば、この程度の振幅の重力波が地上に到達すると予想される。いくつかの大学(東大、電通大、京大等)や研究所(国立天文台、東大宇宙線研、KEK等)が研究開発項目を分担する研究組織になっており、3年間で建設を終え4年目からの観測開始を予定している。現在3年目を終了したところであるが、既に片腕300mの光共振器が完成し、動作確認を兼ねたテストラン等が行われている [3, 6, 14, 21, 23, 24, 15]。

1.2 TAMA300の300m Fabry-Perot 共振器の制御

レーザー干渉計型重力波検出器を構成する鏡は自由質点の実現と防振という二つの事情から懸架装置に吊るされている。干渉計が観測帯域で目標感度を達成しそれを維持するには、これらの鏡の位置制御が不可欠である。この制御機構の開発として様々な実験がテーブルトップやプロトタイプ干渉計を用いて行われている。それらの成果をもとに、国立天文台三鷹キャンパスで進めら

れている基線長300m Fabry-Perot-Michelson(FPM) レーザー干渉計型重力波検出器(TAMA300)の建設の一段階として、FPM干渉計の片腕のFabry-Perot(FP)共振器の制御実験を行った。

今回行った実験は大きく分けて光路長制御とアラインメント制御とに分けられる。まず前者について述べる。干渉計型重力波検出器では目標とする重力波の周波数に対し最も適当な光路長(数10~100km程度)を実現する為に、二枚の鏡の間を光を往復させて光路長を稼ぐという手段をとっている。その為にTAMA300ではMichelson干渉計の両腕をFP共振器にしているわけだが、常にこのFP共振器が入射光に対して共振しているように共振器長やレーザーの発振周波数を制御する必要がある。ここでは信号検出法としてPound-Drever法を用いて、共振器をTEM00モードに制御する(ロックする)ことに成功した。次に後者について述べる。レーザー干渉計を構成する鏡から決まる光軸と入射光軸との間のずれ(ミスアラインメント)はFP共振器のロックを不安定にし、また干渉計の感度を劣化させることが知られている。ここではアラインメント制御の為に信号検出法としてwave front sensingという方法を用いて、共振器の安定なロックに成功し、4日間のFP共振器の稼動に対しunlockの時間は数秒程度という運転を実現した。

300mという規模のFabry-Perot共振器は現在世界最長であり、今回の実験はこのクラスのFP共振器の運転に初めて成功した例である。この成果を踏まえ98年度から両腕を用いたFPMIの運転を行う予定になっている[8, 18, 30, 31, 43, 53, 2, 43, 36]。

1.3 TAMA300 懸架システムの開発および防振特性

干渉計重力波検出器の鏡は観測帯域で重力波に対し自由質点として振る舞うよう、振り子に吊り下げられている。本研究室ではTAMA300で用いる光学部品懸架システムの開発を行っている[9, 29]。これは2段振り子に防振された磁石によるダンピングを施したもので、今年度は鏡の並進、回転各々の自由度の防振特性の詳細な検討を行った[41, 45]。

鏡の並進運動に関しては、加振実験における測定方法の改良により、30Hzで 10^{-5} の防振比を測定できた。また、30Hzまでの低周波域において剛体をワイヤーで結合したモデルと一致することを確認した[27, 34]。回転運動に関しては、理論、実験の両面に渡って研究を行なった。理論的アプローチとして懸架システムの運動を記述する力学モデルを構築し、回転防振の検証を行なった。また、加振実験を行ない、モデルの妥当性を明らかにすると同時に、実際の懸架システムの回転防振特性を明らかにした。その上で、実際にTAMA300サイトに設置した鏡の回転を実測したところ、懸架システムを設置する除振台の悪影響により、TAMA300の要求値($0.5\mu\text{rad RMS}$)を満たさないことが判明した[46]。しかし、除振台の特性に合わせて懸架システムのパラメータを最適化することによって改善が可能であることを力学モデルから予測し、実際に懸架システムに改造を施したところ、要求を満たす $0.2\mu\text{rad}$ という値を得ることができた[19]。

以上のような特性試験を経て、TAMA300の4つの鏡、ビームスプリッター、2枚のビームサンプラーのための懸架システム実機を製作し、それぞれを懸架した状態でTAMA300真空槽内への設置を完了した。また、回転防振特性の研究を通じて、広帯域傾斜計の開発も行なった[40][19]。

1.4 TAMA300 懸架システムの真空特性

TAMA300においては、基線長300mの間でのレーザー光往復時の屈折率変化による光路長ゆらぎを防ぐため、干渉計は 10^{-7}Torr 台の高真空中に置かれる。したがってTAMA300の真空中で用いられる部品には優れた真空特性が求められる。

本研究室では上の要求に沿って干渉計の光学素子を懸架するためのシステムを設計してきたが、今回実際にその真空特性を測定した。その結果、懸架システム全体および各コンポーネント別の

脱ガス量を得、それから懸架システムの脱ガスの内訳を見積もることが出来た [51] .

1.5 3m Fabry-Perot 型重力波検出器のパワーリサイクリング

現在世界各国で建設が進められているレーザー干渉計重力波検出器においては、パワーリサイクリング (power recycling) と呼ばれる技術が用いられることになっている . これは、レーザー光源と主干渉計の間に鏡 (recycling mirror) を入れ、主干渉計と共振器を構成することによって干渉計に入射する光の強度を実効的に高め、検出器の散射雑音レベル (shot noise level) を向上させる技術である .

しかし、TAMA300のように両腕に Fabry-Perot 共振器を持つ重力波検出器においてパワーリサイクリングを行なうことは容易ではない . レーザー干渉計重力波検出器を構成する光学素子は振り子によって吊られているため、その共振周波数付近で大きく変動し、動作点への引き込みは困難になる . また、パワーリサイクリングを行うことにより干渉計の応答が複雑になるため、干渉計を安定に動作させることは容易ではなくなる .

本研究室では、基線長 3m のプロトタイプ干渉計を用いて、これらの問題点の研究を進めている . その結果、光学素子が振り子によって懸架された Fabry-Perot-Michelson 干渉計としては世界で初めてパワーリサイクリングを行なうことに成功した [16, 35, 47, 58] . また、独自の制御信号分離法 [1, 7, 28] を用いた干渉計の安定な動作を実現し、パワーリサイクリングによる干渉計感度の向上を確認した .

1.6 3m Fabry-Perot 型重力波検出器の雑音特性

3m 干渉計におけるパワーリサイクリング実験の最終目標は、リサイクリングによる干渉計内の光パワーの増大にともなうショット雑音レベルの低減を確認することである . 今回、リサイクリング下での 3m プロトタイプ干渉計の雑音源を検討し、5kHz 付近において $2 \times 10^{-17} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ の変位感度を得た [44] . これは、リサイクリングを行う前の感度 $5 \times 10^{-17} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ よりも向上している .

現状では、リサイクリング時のショット雑音レベル $5 \times 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ までには到達していない . 感度を制限しているのは、100Hz 以下では地面振動、1kHz までが制御による雑音の混入、10kHz から 100kHz までは周波数雑音である . 1kHz から 10kHz の雑音源は正確には不明であるが、10kHz 以上の領域に存在する Q 値の低い機械共振の影響が示唆されている .

1.7 レーザー干渉計の RF 復調システムの開発

TAMA300 のような干渉計の制御には、4 自由度の光路長変化信号の取得が必要である . Pre-Modulation 法、Ando 法を用いれば 4 つの信号を精度良く分離して取り出せる . しかし、温度変化により復調用参照信号の位相が最適値からずれると、本来分離されるべき光路長信号が混合してしまう . Ando 法がうまくいっているという条件では、位相ずれは安全率 100 で 0.09deg 以下の必要がある . 更に安全率 10、光路長変動 $\delta l_{\text{RMS}} = 10^{-13} \text{ m}$ として位相雑音は $10^{-15} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}} @ 300 \text{ Hz}$ の値が要求される .

そこで実際に位相同期ループ (PLL) を用いて温度安定、低雑音の正弦波 RF 復調用信号源を作った . その結果、自作した RF 復調信号源は TAMA の要求を満たすことが分かった . この結果を参考にし、現在は TAMA における RF 復調系の製作を業者に依頼している [48] .

1.8 レーザー干渉計のビームセンタリングの研究

干渉計を構成する鏡の角度が揺らぐと鏡の重心と光軸に比例した光路長の揺らぎが生じる。これは重力波検出器にとっては雑音である。このため鏡の重心と光軸の距離を測定し、さらに重心が光軸上になるように鏡を移動させる必要がある。これをビームセンタリングと呼ぶ。センタリングの具体的な方法として観測帯域付近の周波数のトルクを鏡に加える、もしくは軸対称でない鏡の弾性振動モードを励起すると、重心と光軸の距離に比例した干渉計の信号が現われることを利用することが考えられる。そこでtable topのMichelson干渉計を用いてこれらの方法によりビームセンタリングを行なうことが可能かどうかを検証した。その結果一部問題があるものの必要な精度でセンタリングを行なうことが可能であることがわかった。さらに弾性振動の共鳴周波数は(おそらく温度変化により)時間がたつと変化することや、観測帯域の角度揺らぎが問題でセンタリングを行なうことから実際のセンタリングの方法としては鏡にトルクを加える方法を採用することにした。

今後の課題はTAMA300への導入方法の検討である [37, 49]。

1.9 レーザー干渉計制御系の研究

一般に制御系は必ず雑音を持ち、制御系が被制御量に付加する雑音振幅は、制御系と被制御系の結合の強さに比例している。TAMA300干渉計のような高感度干渉計を実現するためには、干渉計の制御系が付加する雑音を最小化するために結合の強さを必要最低限に保ち、なおかつ制御回路のもつ雑音を技術的な限界まで小さく抑えることが必要になる。当研究室では、TAMA300干渉計のために必要な制御量を $50\mu\text{m}_{\text{pp}}$ と見積もり、これに応じて光軸方向の制御系の設計を行った。制御に使用するアクチュエータの最適カップリングを決定し、実際にアクチュエータを製作した [12]。

また、TAMA300干渉計では、300m先の鏡に制御信号を伝達するため、信号はADCを通した後光ファイバーで300mの距離を伝送し、伝送後にDACでアナログ信号を復元する方式をとることにした。制御に必要な制御帯域、振幅、周波数特性、雑音特性から、ADC/DACの分解能とサンプリング周波数は16bitで11kHzと決定された。この仕様にそってADC/光信号/DACの変換回路を製作し、その特性を測定したところ、ほぼ理論どおりの周波数特性、雑音特性が得られた [32]。この装置はすでにTAMA300干渉計に組み込まれ動作している。今後、量子化誤差の、干渉計の観測周波数帯域における影響をより小さくするために、入力信号を低周波側であらかじめ小さくするようなフィルタをかける(プレホワイトニング)予定である。

2 共振型重力波検出器

2.1 銀河系内モニター用検出器の開発

東京大学宇宙線研究所において、銀河系内重力波発生源からの重力波を検出するための共振型重力波検出器(ディスクタイプアンテナ:直径2m、厚さ20cm、Al合金5052製、質量1.7t、共振周波数1.2kHz)が開発された。特に重力波がアンテナを通過することによって励起されるアンテナの微小振動を検出するためのFabry-Perot型微小振動検出器(レーザートランスデューサー、TRD)の開発を中心に進めた。TRDはアンテナの共振周波数1.2kHzにおいて $2 \times 10^{-17}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という高感度を達成することができた。また、TRDを含めたアンテナシステムを長時間安定に運転することが可能となり、今回開発された検出器の実用性が実証された [13, 17, 57]。

3 熱雑音の研究

3.1 レーザー干渉計ミラーの熱雑音測定

前年に引き続き TAMA 計画での熱雑音を推定するために [10, 11, 26, 42]、TAMA で用いられる直径 10cm、高さ 6cm の円筒形をした熔融石英鏡の機械共振の Q 値測定を行った。昨年度は主に素材の Q を測るという目的で測定を行い、Q 値 1×10^6 を得たが [25]、今年度はより実際に使用されるのに近い状態での Q 値の測定を行った。具体的には、鏡に制御用の磁石を 4 つ接着し、かつ振り子の Q 値を上げるためにスタンドオフと呼ばれる小さなアルミの棒をワイヤが鏡から離れる位置に接着して Q 値の測定を行った。その結果、スタンドオフを接着した場合は鏡の Q はあまり下がらなかったが [38]、磁石は 10^3 台まで Q を下げる得ることが分かった。そこで、より小さな磁石を使用することにし、磁石を貼った場合でも 1.5×10^5 程度の Q を得られるようになった [50]。しかし、このままでは TAMA の目標感度を熱雑音が 1 桁近く上回るようになってしまう。また、今までの推定方法はモデルに依存する部分があるので、今後は直接機械インピーダンスを測る方向で、更に熱雑音の研究を進めていく予定である [55, 56]。

3.2 懸架系の熱雑音

熱振動の振幅は、エネルギーの散逸のパラメータである散逸角、またはその共振周波数における逆数である Quality-factor (Q 値) によるので、懸架系の Q 値を測定することは、干渉計型重力波検出器の性能を見積もる上で欠かせない作業である。当研究室では、昨年度に引き続き、懸架系の熱雑音を見積もるために主に二つの実験を行った。まず、ワイヤ材質の Q 値とその周波数依存性を直接測定するために、片端を固定し、他端は自由端とした直径 $100 \mu\text{m}$ のワイヤの固有振動の Q 値を様々な周波数で測定したところ、タングステンの内部損失による Q 値は従来どおり $4 \sim 7 \times 10^3$ の値を得た。さらに、様々なワイヤの長さおよびモードの Q 値を測定することで、さまざまな周波数 (24 種) での Q 値の周波数依存性を測定したところ、10Hz から 800Hz 程度までの範囲で周波数依存性は極めて弱く、いわゆる Saulson の structure damping model が良く成立している事が確認された。Q 値を測定するため振り子の振動モードを励起すると、振り子の反作用で振り子の支点が微少な距離だけ移動する。これによってエネルギーが散逸すると、振り子の減衰が速くなり、Q 値が見かけ上小さく測定されるので (リコイルロス)、懸架装置の真の Q 値を評価することが難しくなる。しかし、二本のワイヤでつるされた振子のねじれ振動を測定することを考えると、リコイルの影響は通常の振子の場合と異なり、ワイヤ間隔とプラットフォームの特徴的なサイズの比だけ低減される。このような変形ねじれ振子を制作し、測定を行った。得られた Q 値は TAMA の懸架系に換算すると 1.3×10^5 程度であった ($100 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤの場合)。TAMA300 での要求値は 5×10^5 程度であり、これは何とか実現可能な値である。

これらの実験は四年生 (沼田健司) の 97 年度前期学生実験として行われた [39]。

4 精密計測の研究

4.1 レーザー干渉計を用いた角加速度計と、レーザーダイオードを用いた光源の開発

地面振動の回転成分を正確に評価するために、レーザー干渉計を用いたサーボ型の角加速度計を試作し、その基本性能を評価した。この角加速度計の原理は、ワイヤ両端を固定した撓振動子の振動を Michelson 干渉計を用いて測定し、振動子が地面に対して固定されるようにサーボをか

けることで、サーボの制御信号から地面の角加速度を得る、というものである。干渉計の光源にはHe-Neレーザーを使用した。この角加速度計を用いて、光学定盤上の水平面内回転を測定した。この測定では、100Hz以上の周波数帯において、市販流体角加速度計を上回る感度を有することが示され、また散射雑音による検出限界は $1.3 \times 10^{-13} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。

また、この角加速度計に使用するための光源として、波長635nmのレーザーダイオードを使用することを考え、その準備段階としてレーザーダイオードの強度安定化を行った。出力光の一部をビームスプリッターで分割してモニタするか、あるいはレーザーダイオードのモニタ出力を使用し、その強度変化を打ち消すように励起電流を制御した。いずれの方法でも、出力光の強度は制御回路の制御ゲイン分だけ安定化された。しかし、モニタ光の強度がモニタ光強度で決まるショットノイズレベルまで安定化された場合でも、出力光の強度はそのレベルまで安定化されないという結果を得た。制御回路の雑音は全く問題ないほど低レベルであることが分かっている。その他の原因として、温度変化によるモード遷移や偏光の変化が影響している可能性や、何らかの原因でモニタ光と出力光に（散射雑音以外の）相関の無い強度揺らぎが分配されている可能性が考えられるが、真の原因はまだ分かっていない。

これらの実験は4年生（松尾友和、杉保昌彦）の97年度後期特別実験のテーマとして行われた[52]。

4.2 広帯域傾斜計の開発

本研究室で行なったTAMA300で用いる懸架システムの鏡の回転特性の研究により、実際の鏡の回転運動は、系に加わる地面の並進振動からのカップリングだけでは十分に説明できないことが明らかとなった。すなわち、地面の回転運動も影響している可能性が示唆されたのだが、回転量の見積もりを正確に行なうことは困難であった。地面の回転そのものが極めて小さなことと、従来の回転センサーはDC的な地面の回転を測定するためのものがほとんどであり、懸架システムに重要なAC帯域での測定例が稀であったからである。そこで、懸架システムの研究から得た知見を生かし、単純な振り子を用いて広帯域(1~10Hz)の地面の回転(傾斜)を高感度に測定する傾斜計の開発を行なった。これは、懸架され目的の帯域で慣性系に静止したリファレンスと地面との相対角度を高精度に読みとることにより地面の傾斜を測定するというものである。この傾斜計によって、所期の帯域で市販のセンサーを上回る $10^{-8} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度を達成し、TAMA300で用いる除振台の傾斜スペクトルを得ることができた。また、その結果を懸架システムの開発にフィードバックし、回転防振のパラメータ決定に用いることができた[40][19]。

4.3 光学結晶の特性評価

レーザー干渉計の検出限界は、原理的にはレーザーのショット雑音によって決まる。この雑音を下げるためには高出力レーザーを用いてレーザーパワーを稼ぐしかない。レーザー干渉計の位相変調には通常LiNbO₃が使われるが、ハイパワーに対して光損傷が起こるという問題が指摘されている。そこで光損傷が少ないといわれる、KTiOPO₄とRbTiOAsO₄という2つの結晶について、Pockels係数およびロスタンジェントを測定した。また、これらを用いて15MHz共振型位相変調器を製作し実用性を確認した[20, 54]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono: Signal Separation Technique for a Power-Recycled Interferometric Gravitational Wave Detector, *Phys. Lett. A* **237**-12 (1997) 13-20.
- [2] V. N. Rudenko, K. Tochikubo and K. Tsubono: Position Control of Mirrors in a Laser Gravitational-Wave Interferometer with Radiation Recycling, *Quantum Electronics* **27**-9 (1997) 835-839.

(會議抄録)

- [3] K. Tsubono: 300-m Laser Interferometer Gravitational Wave Detector in Japan, *Proc. International Workshop on Gravitation and Cosmology*, Hsinchu(Taiwan), December 1995 (National Tsing Hua University , 1997) p.239-p.240.
- [4] W.-T. Ni, S.-K. King, H.-W. Cheng, J.-T. Shy, N. Mio, K. Tsubono and T. C. P. Chui: Test of Quantum Electrodynamics and Search for Light Scalar/Pseudoscalar Particles Using Ultra-High Sensitive Interferometers, *Proc. International Workshop on Gravitation and Cosmology*, Hsinchu(Taiwan), December 1995 (National Tsing Hua University , 1997) p.183-p.185.
- [5] H.-W. Cheng, W.-T. Ni, N. Mio, K. Tsubono, K. Kawabe, J.-T. Shy, J.-S. Wu and T.-T. Liu: Measurement of Birefringence of the Suspended Fabry-Perot Cavity, *Proc. International Workshop on Gravitation and Cosmology*, Hsinchu(Taiwan), December 1995 (National Tsing Hua University , 1997) p.190-p.199.
- [6] K. Arai and the TAMA collaboration: Current Status of the TAMA Project, *Proc. International Baksan School "Particles and Cosmology"*, Baksan Valley, Russian Federation, April 1997 (World Scientific, in press).
- [7] M. Ando, Ying. Li, K. Kawabe, and K. Tsubono: Study of Power Recycling of a Fabry-Perot-Michelson Interferometer, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.341-p.344.
- [8] K. Tochikubo, A. Sasaki, K. Kawabe, and K. Tsubono: Automatic Alignment Control for TAMA Interferometer, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.365-p.367.
- [9] K. Arai, A. Takamori, Y. Naito, K. Kawabe, and K. Tsubono: Vibration Isolation of TAMA Suspension System, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.361-p.363.
- [10] K. Yamamoto, K. Kawabe, and K. Tsubono: Thermal Noise Study of the TAMA Interferometer, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.373-p.376.
- [11] N. Ohishi, K. Kawabe, and K. Tsubono: Measurements of Quality Factors of a Fused Silica Mirror, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.369-p.371.
- [12] K. Kawabe and the TAMA collaboration: Control System of TAMA300 Interferometer, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.249-p.257.
- [13] N. Kondo, K. Tsubono, N. Mio, N. Kanda and K. Kuroda: Development of a Laser Transducer for a Resonant Antenna, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.377-p.379.
- [14] K. Tsubono and the TAMA collaboration: TAMA Project, *Gravitational Wave Detection*, (Universal Academy Press, 1997) p.183-p.191.
- [15] K. Kawabe and the TAMA collaboration: Status of TAMA project, *Proc. First International LISA Symposium*, *Class. Quantum Grav.* **14** (1997)1477.
- [16] M. Ando, K. Arai, K. Kawabe and K. Tsubono: Demonstration of Power Recycling on a Fabry-Perot-type Prototype Gravitational Wave Detector *The proceedings of the International Workshop on Gravitation and Astrophysics* (in press).

(学位論文)

- [17] 近藤尚人：Disk-type resonant antenna with a laser transducer for monitoring gravitational waves (博士論文)
- [18] 佐々木愛一郎：TAMA300における300m Fabry-Perot 共振器の開発 (修士論文)
- [19] 高森昭光：振り子を用いた広帯域傾斜計の開発とTAMA300用懸架システムの研究 (修士論文)
- [20] 内藤豊：高出力レーザー用電気光学結晶の特性評価 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [21] K. Arai and the TAMA collaboration: Current Status of the TAMA Project, International Baksan School “Particles and Cosmology”, (Baksan Valley, Russian Federation, Apr. 1997).
- [22] K. Tsubono: Technical Strategy for Future Detectors, Directors Meeting for Future Interferometers for Gravitational Wave Detection(Paris, Nov. 1997).

招待講演

- [23] K. Tsubono and the TAMA collaboration: TAMA300 Project, 2nd Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves(CERN, Jul. 1997).

(国内会議)

一般講演

- [24] 坪野公夫：TAMA300 現状報告 II、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [25] 大石奈緒子：鏡の Q 値測定、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [26] 山元一広、朽久保邦治、大石奈緒子、河邊径太、坪野公夫：TAMA300detector の熱雑音の推定、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [27] 新井宏二、高森昭光、内藤豊、新谷昌人、河邊径太、坪野公夫：TAMA300 用懸架システムの防振特性、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [28] 安東正樹、河邊径太、坪野公夫：パワーリサイクリングの新しい信号分離技術、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [29] 新谷昌人、新井宏二、内藤豊、高森昭光、大石奈緒子、山元一広、安東正樹、朽久保邦治、河邊径太、坪野公夫：懸架サブグループ報告 I、重力波検出に関するシンポジウム (東大宇宙線研、1997 年 6 月)
- [30] 朽久保邦治、坪野公夫、藤本眞克、大橋正健、河邊径太、寺田聡一、佐々木愛一郎：干渉計型重力波検出器におけるアラインメントの自動制御 V、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [31] 佐々木愛一郎、朽久保邦治、坪野公夫、藤本眞克、大橋正健、河邊径太、寺田聡一：干渉計型重力波検出器におけるアラインメントの自動制御 VI、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [32] 谷口信介、河邊径太、坪野公夫：TAMA300 におけるアナログ信号光伝送システムの性能評価、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [33] 寺田聡一、朽久保邦治、桑原文彦、大橋正健、末廣晃也、佐藤修一、高橋竜太郎、藤本眞克、山崎利孝、福嶋美津広、新谷昌人：重力波検出器用モードクリーナーの開発 V、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)

- [34] 新井宏二、高森昭光、内藤豊、大塚茂巳、新谷昌人、河邊径太、坪野公夫：TAMA300 干渉計の懸架システムの防振特性、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大、1997 年 9 月)
- [35] 安東正樹、新井宏二、河邊径太、坪野公夫：3m Fabry-Perot-Michelson 型重力波検出器のパワーリサイクリング III、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大、1997 年 9 月)
- [36] 内藤豊、松村純宏、新井宏二、三尾典克、神田展行、河邊径太、坪野公夫：TAMA300 における散乱光の評価、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大、1997 年 9 月)
- [37] 山元一広、河邊径太、坪野公夫：干渉計型重力波検出器のビームのセンタリング、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大、1997 年 9 月)
- [38] 大石奈緒子、山元一広、大塚茂巳、河邊径太、坪野公夫：干渉計型重力波検出器に用いる石英鏡の Q 値測定 III、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [39] 河邊径太、沼田健司、坪野公夫：干渉計型重力波検出器の懸架系の熱雑音、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [40] 高森昭光、大塚茂巳、河邊径太、坪野公夫：振り子を用いた傾斜計の開発、日本物理学会 1997 年秋の分科会 (東京都立大学、1997 年 9 月)
- [41] 高橋竜太郎、Mark Barton、黒田和明、内山隆、桑原文彦、坪野公夫、新井宏二、高森昭光、新谷昌人：重力波検出器 TAMA300 の防振系評価、日本天文学会秋季年会 (宇都宮大学、1997 年 9 月)
- [42] 山元一広：LCGT の鏡の熱雑音の見積り、重力波将来計画のための神岡廃鉱調査・研究会 (東大宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設、1998 年 2 月)
- [43] 朽久保邦治、佐々木愛一郎、谷口信介、坪野公夫、藤本眞克、川村静児、大橋正健、高橋竜太郎、河邊径太、寺田聡一、山崎利孝、福島美津広：TAMA300 における 300mFabry-Perot 共振器の制御 II、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [44] 新井宏二、安東正樹、河邊径太、坪野公夫：3m Fabry-Perot 型重力波検出器のパワーリサイクリング V、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [45] 辰巳大輔、内山隆、桑原文彦、加久保孝志、佐川知之、山端日出之、石塚秀喜、黒田和明、高橋竜太郎、新井宏二、新谷昌人：TAMA 用 X-pendulum 防振装置の開発 III、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [46] 高森昭光、新井宏二、内藤豊、大塚茂巳、朽久保邦治、高橋竜太郎、新谷昌人、河邊径太、坪野公夫：干渉計懸架システムの防振特性 VI、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [47] 安東正樹、新井宏二、河邊径太、坪野公夫：3m Fabry-Perot-Michelson 型重力波検出器のパワーリサイクリング IV、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [48] 上田晃三、河邊径太、坪野公夫：干渉系型重力波検出器における RF 復調システム、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [49] 山元一広、河邊径太、坪野公夫：干渉計型重力波検出器のビームのセンタリング II、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [50] 大石奈緒子、山元一広、大塚茂巳、河邊径太、坪野公夫：TAMA レーザー干渉計に用いる石英鏡及び振り子の Q 値測定、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [51] 堀越一雄、高森昭光、新井宏二、高橋竜太郎、新谷昌人、河邊径太、坪野公夫：TAMA300 用懸架システムの真空特性、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [52] 河邊径太、松尾友和、杉保昌彦、坪野公夫：レーザー干渉計を用いた角加速度計の開発と地面の角度振動の評価、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [53] 谷口信介、朽久保邦治、佐々木愛一郎、坪野公夫、藤本眞克、大橋正健、高橋竜太郎、福島美津広、山崎利孝、谷口信介、寺田聡一、川村静児：TAMA300 における 300mFabry-Perot 共振器の制御 I、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)
- [54] 内藤豊、森脇成典、三尾典克、河邊径太、坪野公夫：高出力レーザー用電気光学結晶の特性評価、日本物理学会第 53 回年会 (東邦大学、1998 年 4 月)

- [55] M. Tobar、内山隆、都丸隆行、辰巳大輔、黒田和明、鈴木敏一、山本明、春山富義、佐藤伸明、新富孝和、三代木伸二、大橋正健、坪野公夫：Consideration of the Contamination Problem for Cryogenic Mirrors in Laser Interferometer Gravitational Wave Detectors、日本物理学会第53回年会(東邦大学、1998年4月)
- [56] 内山隆、M. Tobar、都丸隆行、辰巳大輔、黒田和明、鈴木敏一、山本明、春山富義、佐藤伸明、新富孝和、三代木伸二、大橋正健、坪野公夫：重力波レーザー干渉計用低温鏡の開発II、日本物理学会第53回年会(東邦大学、1998年4月)
- [57] 宮川治、辰巳大輔、黒田和明、神田展行、近藤尚人：共鳴型重力波検出器による長期観測実験、日本物理学会第53回年会(東邦大学、1998年4月)

(セミナー)

- [58] M. Ando, *Signal-separation technique for a power-recycled Fabry-Perot-Michelson interferometer*, LIGO scientific seminar, California Institute of Technology (California, Jul. 1997).