

1.1 坪野研究室

重力と相対論に関する実験的研究を進めている。特にその中でも、重力波検出は一貫して私達の研究室の中心テーマとなっている。

今、重力波研究は最もエキサイティングなフェーズを迎えようとしている。日本を含めた世界各地で、大型レーザー干渉計を用いた重力波検出器の建設が進み、装置の完成と観測開始が近づいている。これらが本格的に動き始めれば、「重力波天文学」の幕開けは近いと確信している。これらの大型装置の中でも日本のTAMA300は、他に先駆けて2000年から観測を開始する予定である。欧米の装置が完成するまでの数年の間、TAMA300は唯一の高感度重力波検出器として貴重な観測データを提供するだろう。

1.1.1 レーザー干渉計重力波検出器

TAMA プロジェクトの現状

TAMAは、アメリカのLIGO、フランス・イタリアのVIRGO、ドイツ・イギリスのGEOにならぶ、日本の大型重力波検出器計画であり、国立天文台三鷹キャンパスにおいて300m基線長のレーザー干渉計(TAMA300)の建設が進められている。干渉計の設置は予定通りに終了しており、現在は、観測開始に向けて装置の技術的調整をおこなっている段階である。2000年からは、世界に先駆けて重力波の本格的観測を始める予定である。

現在は、2つの腕から戻ってきた光を、もう一度ビームスプリッターをとおして再結合・干渉させる、リコンバイン実験が行われている。これは、パワーリサイクリングを除くと、最終的な光学系のセッティングと同じものである。すでに連続5時間程度のリコンバイン動作には成功しているため、長期的な運転にこぎつけるのもそう遠くないであろう。また、様々な部分を調整して、雑音を下げ、干渉計としての感度を向上させる努力も同時に行われている。

現在までのTAMAの進行状況はおおむね順調であり、2000年からの本格的観測に向けて準備が進んでいる。[2, 3, 5, 14, 31, 41]

TAMA300 レーザー干渉計の開発

TAMA300の様な大型干渉計においては干渉計の光路長のみならず、鏡のアライメントについても制御する必要がある。しかしながら、鏡が実際に懸架されたFabry-Perot-Michelson干渉計において光路長とアライメント、全自由度制御された例は無く、TAMA300における実験が世界で初めての例である。本年度は700mW Nd:YAG laserを光源に使いmode cleanerを用いない状態で300m Fabry-Perot-Michelson干渉計を制御する事を目標に実験を行った。その結果、干渉計の光路長およびアライメントについて全自由度制御することに成功した。さらに、長時間安定に干渉計が動作することを目的に実験を行い、干渉計の制御が落ちることなく5時間干渉計を動作し続けることに成功した。

干渉計のコントラストとCMRRについてもアライメント制御を入れる事によって向上が見られた。アライメント制御がないときコントラストは80%程度で、CMRRは30程度であるが、アライメント制御を入れたとき、コントラストは $97.3 \pm 0.1\%$ を実現し、CMRRについても約90を実現した。

今後は10W laserを光源に使いmode cleaner出射光を用いて300m Fabry-Perot-Michelson干渉計を制御し、さらにはrecycling mirrorをインストールしてpower-recyclingを導入する予定である。[9, 11, 15, 29]

TAMA300 レーザー干渉計のアライメント制御

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。(TAMA300では主干渉計を構成する鏡は入射光軸に対して、その傾きが 5×10^{-7} rad以下に抑えられなければならないという計算がこれまでに得られている。)角度揺れは基本的には防振技術によって抑えられる訳だが、懸架系には低周波での共振が存在し、共振周波数付近よりも下の周波数では角度揺れの抑制効果は期待できない。従って低周波数域で何らかの制御が必要であると考えられる。ここではアライメント制御の為に信号検出法としてwave front sensingという方法(位相変調光を共振器に入射し、反射光を分割型のディテクタで受けて、その2面の復調信号の差をとることで、入射光のミスアライメントによるキャビティの高次モードとのカップリングを検出する方法)を用いて、共振器の安定なロックに成功した。[16]

TAMA300における10mリング型レーザーモードクリーナーのアライメント制御

レーザー干渉計型重力波検出器では、レーザー光のモード整形と重力波観測周波数帯域での方向揺らぎの除去を行うための、モードクリーナーと呼ばれる光学系が必要となる。

TAMA300では、3枚の振り子状に吊された鏡による、長さ10mの三角形リング型共振器を用いている。鏡を懸架しているため、懸架装置の共振と、低周波での鏡のドリフトが起こりうる。これらを除去するために、鏡の傾き(アライメント)の制御が必要となる。そこで、Wavefront Sensingと呼ばれる手法を用いて、TAMA300のモードクリーナーのアライメント制御をするための、基礎実験を行った。

その結果、数Hzより高い周波数帯でのアライメント制御は必要ないことが分かった。また、実際に制御を試みたところ、1自由度ずつの制御はできたが複数自由度の同時制御は困難であった。これは異なる自由度の誤差信号間に混入があるためである。現在、この原因解明と、長期運転用の制御系の開発が進められている。[30]

TAMA300の制御系設計と制御回路製作

干渉計型重力波検出器において、光路長制御系は、散射雑音や熱雑音などで決まる検出器の変位感度を悪化させないほど低雑音であることが求められる。一方、干渉計の懸架された鏡は地面振動により大きな振幅で揺らされるので、光路長制御系はこの揺れを押さえ込める程度の大きな制御範囲を持たねばならない。前年度までの研究で、TAMA300建設地の地面振動のデータ等から、光路長制御系に必要な制御範囲が推定されており、これから制御系に許容される雑音の上限が求められた。このデータをもとに、実際の光路長制御系が設計および製作され、実機での測定に使用されている。

一方、アラインメント制御系は、鏡の角度やレーザービームの鏡の中心からのずれなどを適正な範囲に保ち、これによってリサイクリングゲインの低下を防ぎ、また懸架系による鏡の回転熱振動の影響を最小限に保つための制御系である。こちらも光路長制御と同様に、TAMA300建設地での鏡の回転振動の測定などの基礎データから、鏡の角度ずれとビームのミスセンタリングを長期にわたって同時に抑えるための制御機構が考案された。鏡の回転振動を抑制するための制御系については、実際に制御回路が製作され、使用されている。ビームのセンタリングについては今後実装される予定である。

今後は、このような実機から得られたデータをもとに、制御系のさらなる最適化と低雑音化を進めていく。[18, 10]

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。[1, 4, 42] また、干渉計の光学パラメータを調整することによる制御信号分離法を考案、評価し、制御信号の分離比が約2桁改善されることを実験的に確かめた。さ

らに、干渉計の感度の向上をはかり、パワーリサイクリングによって干渉計感度が向上することを確認した。[7, 6]

パワーリサイクリングのための新しい制御信号取得法

当研究室では、Fabry-Peort-Michelson (FPM) 干渉計のパワーリサイクリングに関し、新しい制御信号取得法 (高調波復調法) を考案し、現在、3m FPM 干渉計を使って検証実験を進めている。[20, 32]

この方法では、干渉計からの反射光を変調の3倍の周波数で復調することで、干渉計の制御のための信号を取得する。この場合、信号は2次の変調側帯波光の効果により発生する。通常はこのような高次光の効果は小さいため考慮の対象にならないのであるが、我々は、変調指数が1 rad程度であり、かつ、パワーリサイクリングを行う場合には高次光が有意な効果を持つことを見出した。

この方法は、元来は取得が困難であるリサイクリング用鏡の位置情報が、従来の復調法より分離度よく得られること、信号の大きさの干渉計構成に対する依存性が緩やかであること、復調回路の付加だけで干渉計への実装が行えることなどの特長を持ち、大型干渉計での使用に適した手法である。

我々は現在までに、高調波復調法を用いて3m干渉計を安定に動作することに成功し、リサイクリング用鏡の位置情報が従来の復調法より約20倍良く他の自由度から分離されることなどの、原理的な検証を終えている。

Caltech 40m レーザー干渉計のパワーリサイクリング実験

California 工科大の基線長40m FPM型プロトタイプ重力波検出器における光リサイクリング実験に当研究室のメンバーを派遣し、干渉計制御の不安定性の研究を行った。40m干渉計には、片腕の終端鏡を正しい向きから傾けないと安定に制御できないという問題があったが、共同実験によって不安定性の原因が制御信号の1つが消失するためであることを究明した。そして、解決法として上記の高調波復調法を提示した。高調波復調法を用いることで問題は解消され、現在では40m干渉計は安定に動作している。[44]

1.1.2 宇宙空間重力波検出実験

宇宙空間レーザー干渉計の研究

21世紀の重力波天文学を考えた場合、宇宙空間が実験観測の重要な舞台になることは必然である。NASA/ESAによるLISA計画では、2010年前後に、宇宙空間に巨大なレーザー干渉計を作り、低周波での重力波観測を開始する。低周波において、もっとも興味深いのは、宇宙論的な起源をもつ背景重力波放射である。ビッグバンがマイクロ波の背景放射を残したように、重力波の背景放射も残っているはずである。ビッグバン後 10^{-25} sに生じた重力波が、ス

トカスティックな背景放射として、今でも残っている可能性がある。このほかにも、インフレーションに起因するものや、宇宙紐などのトポロジ的欠陥から生じる背景放射が考えられている。

スペース実験は長期的視野にたつ必要があるが、実り豊かな重力波天文学の実現には宇宙空間実験は不可欠である。しかし残念ながら、これまで日本には、宇宙空間での重力波実験の基盤はまったくなかった。このような観点から、理論的、実験的な基礎研究を開始するため、今年の2月に「スペース重力波実験研究会」を発足し、最初の研究会を本郷で開催した。今後は宇宙研などに働きかけて、スペース実験の具体化を進めていく予定である。[27, 28]

1.1.3 相対論の基礎実験

空間の異方性測定

Michelson-Morley やそれに続く数々の実験によって、空間の等方性は精度良く確かめられている。しかし、空間の等方性は、特殊相対論の基礎をなす物理の基本原則であるがゆえに、更なる高精度の検証は重要である。

本研究室では、直交する2方向の計量の比にして 10^{-16} の超高精度を目標とした空間の等方性測定の実験を進めている。

今回行う実験は、回転するFP(Fabry-Perot)共振器と参照用の静止したFP共振器にそれぞれロックした2台のレーザーの間のビート周波数の変化を測定し、空間の異方性を調べるといったものである。

高精度の異方性測定のために、FP共振器は高安定でなければならない。そのために本実験は3つの大きな特徴をもつ。1つは傾き制御機構である。重力場に対し共振器が傾くと共振器長は変化する。そこで、油に浮いた鏡の反射を利用して共振器の傾きを検出し、PZTで制御する。2つめは特殊な回転機構である。共振器が光源と一緒に離散的に ± 180 度に正回転する回転機構により、回転速度の変化などの雑音の影響をなくすることができる。最後は、Clearceramの温度制御である。共振器材料 Clearceram 55 の熱膨張率がゼロとなる温度に制御して、温度変化による共振器長変化を抑制する。

現在は、異方性測定に組みこむ各種要素の開発と評価を行っている。傾き制御のための傾き検出機構の開発、真空中での共振器の温度制御実験、共振状態へのレーザーの制御実験をこれまでにを行い、それらを異方性測定に利用するめどを立てることができた。

今後、2台のレーザーの間のビートをとり共振器の安定性の評価を行った後、実際に異方性の長期測定に入る予定である。[8, 21, 33]

1.1.4 熱雑音の研究

レーザー干渉計ミラーの熱雑音推定法

共振周波数から離れた周波数での熱雑音の新しい推定方法として、機械系の反共振周波数での伝達関

数の虚部を測定し、揺動散逸定理を適用する方法を考案し、簡単な機械系で測定を行った。

揺動散逸定理によると、変位雑音のスペクトル密度 $x^2(\omega)$ は機械系に加えた力 f から変位 x への伝達関数 $H(\omega)$ の虚部を用いて、次の式のように表される。

$$x^2(\omega) = -\frac{4k_B T}{\omega} \text{Im}[H(\omega)] \quad (1.4.1)$$

この式から、実際に機械系の伝達関数を直接測定することが出来れば、熱雑音を推定出来ることが分かる。

しかし、共振から離れた周波数では、伝達関数には虚部のQ値倍以上の実部が存在し、測定系の僅かな位相遅れなどによって、実部が混入するため、虚部の測定は困難である。そこで、反共振周波数では実部が消失して虚部のみが残ることに着目し、簡単な機械振動子を作成して反共振周波数での伝達関数の虚部の測定を行った。測定の結果、27Hz付近の反共振周波数では、実部が小さくなって虚部を良く分離して測定出来ることを確認した。また、測定された虚部の値は、共振周波数でのQ値の測定とモード展開から推定される値と良く一致しており、この推定方法の有用性が確認された。[22, 34, 13]

非一様な散逸による熱雑音の研究

懸架系や鏡の熱雑音は干渉計型重力波検出器の原理的な雑音の1つであるので、この大きさを推定することは重要なことである。従来は懸架系や鏡の振動モードは独立と仮定して熱雑音の見積もりを行ってきた。しかしこの仮定は散逸が非一様に分布している場合には成立しない。そこでこのような場合の熱雑音の振る舞いについての研究を行なった。

まず最初に散逸分布と熱雑音の関係について計算を行なった。最近散逸が非一様に分布している場合の熱雑音を計算する方法がいくつか開発されている(当研究室で開発されたものも含む)。これらの方法を用いて非一様な散逸を持つ簡単なモデルの熱雑音を計算したところ、結果は全ての方法で一致した。つまりこれらの方法のconsistencyが確認された。さらに様々な散逸分布を持つ系の熱雑音の計算を行なった。その結果、新しく開発された方法による結果と従来通りにモードが独立と仮定したときの結果の違いには上限が存在することがわかった。[23]

さらにこれらの計算の妥当性を検証するために、既知の散逸分布を持つ系の熱雑音を測定し、その結果と上記の計算方法から得られた結果を比較する実験を現在進めている。既知の散逸分布をもつ系としては強い永久磁石によるeddy current dampingを一部分のみにかけた板バネを候補として考えている。[35, 12]

低損失材料のintrinsic Q値測定

TAMA300の最終感度を定める鏡の熱雑音の推定のためには鏡のQ値の測定が不可欠であるため、鏡のような低損失の材料のintrinsic Qを直接知るための実験を行った。

そのため、材料を懸架せず、材料の不動点を支持し測定物質内部のみで散逸が起こるようにしてQ値

を測定するという手法を取った．円柱状の材料の平面の中心が多く固有振動の不動点になることを利用し，そこでの不動点支持を行うことを目標にした．

今回，二つの方法で実験を行った．石英の材料をDISK型アンテナ上に加工し，その平面内四重極振動モードのQ値を測定する方法 [24] と，鏡形状の材料の上下の中心をルビンの小球で支持し，数多くの振動モードのQ値を測定する方法 [36] である．

このうち，特に後者の方法で良好な結果が得られた．この方法では，TAMA300で使われる鏡と同じ大きさのいくつかの材料について測定を行った．この結果，常温のシリコンのQ値として 1×10^8 を得た．これはこれまでに知られていた常温でのシリコンのQ値を大きく上回る値であり，この方法の有用性が示された．また，TAMA300で使われる熔融石英についてもこの方法でQ値を測定したが，最高値は 1×10^6 を少し上回る程度であった．この値は，TAMA300の要求感度を満たすためには一桁低く，TAMAの鏡材料に改良が必要であることも明らかにした．

1.1.5 精密計測の研究

低周波防振装置の開発

次世代重力波検出器の要素技術R&Dとして，本研究室では低周波防振装置に取り組んでいる．

TAMA300の防振装置は本研究室で開発されたが，その防振特性は本来直交する自由度間のカップリングで決定されている．特に，鉛直方向と光学素子の水平，回転自由度間のカップリングが支配的である．これは，鉛直方向には，防振系によって光学素子を防振するだけでなく，素子の支持も行わなくてはならず，防振に必要な低周波共振を持つ機械系を実現することが困難だからである．

この問題については，米国のカリフォルニア工科大学 (Caltech) でも取り組まれており，低周波の鉛直防振系の研究が行われている．本研究室では本年度末にCaltechにメンバーを派遣し，次世代の低周波防振装置の共同開発を開始した．これまでの研究成果を生かして，全自由度の低周波防振の実現，共振によるRMS振幅の増大を防ぐための能動防振系の組み込みを主な目標としている．これによって，干渉計の低周波での感度を大幅に改善し，安定動作を実現することが可能になると期待できる． [38, 45]

非接触支持装置の開発

機械共振のQ値の高い系ほど熱雑音が小さくなるため，重力波検出器では，光学素子にQ値の高い材質を用い，できるだけ材質のQ値を損なわない方法によって素子を支持しなくてはならない． [24, 36] 実際，本研究室でのこれまでの研究でも，素子を懸架，支持するワイヤーによってQ値が損なわれていることが示唆されている．そこで，高いQ値を損なわずに光学素子を支持する方法として，電磁力などを用いた非接触支持法が考案されている．

本研究室ではこの技術の可能性を検証するために，永久磁石と電磁石による制御系を用いて，テストマ

スを浮上，支持する実験を行い，実際にマスを一ヶ月以上の長期にわたって安定に浮上させることに成功した． [25] 今後の課題としては，永久磁石の接着などによってQ値が損なわれることを防止する手法の開発や，制御系を最適化し，低ゲインによる制御を実現することなどが残されている．

なお，この実験は本年度前期の特別実験として行われた．

レーザー干渉計を用いた高感度傾斜計の開発

'98年後期学生実験の課題としてレーザーを用いた高感度傾斜計の開発を行った．

当研究室では，空間の異方性の測定が行われており，その測定目標感度を達成するためには，周波数帯域～数10Hzでの傾きを 10^{-7} rad以下に抑えることが要求されている．そのために，高感度で傾斜を測定する装置が必要であったが，市販のファイバージャイロなどの傾斜計では，感度が足りないことが分かった．そこで，新たにレーザーを用いた高感度の傾斜計の作成，試験を行った．

今回開発した傾斜計の原理は，光源にレーザーを用いた光でこで，油に浮かせた鏡を水平面として参照し，4分割フォトディテクターで光の位置を検出するものである．傾斜計が傾くと，フォトディテクター上での光の位置がずれ，傾きが検出される．

これまでに，製作した傾斜計の校正を行い，周波数応答，過渡応答，水平，鉛直振動に対するカップリング等を調べた．その結果，傾斜計が数十Hz以下で正しく傾きを検出していること，階段入力に対する過渡応答は，1/10秒程度で出力が安定すること等を確認した．更に，空気揺らぎを抑えることにより， 3×10^{-9} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hzと従来のもの比べて，100倍以上の感度を達成した． [37]

楕型電極静電アクチュエーターの開発

重力波検出器で用いる誘電体の鏡を非接触制御するためのコイル-マグネットアクチュエータに替わる装置として，楕形の電極を組み合わせた静電アクチュエータを考案し，理論計算と基礎性能実験を行った．

アクチュエーター-鏡系の静電容量をブリッジ回路で測定し，距離変化に対する容量変化から力を計算した．これにより，電極間の電位差，電極面積，電極-誘電体距離等のパラメータ依存性に関して，理論計算に沿うことが確認できた．

しかし，電子天秤を用いて，発生する力を直接測定したところ，理論値より1桁ほど大きな値が観測された．また，測定値に再現性がなく，不安定であった．これは，表面の帯電による影響と思われるが，確認はされていない．

直接測定値の不安定性の解明，理論計算精度の向上，交流特性の評価などが，今後の研究課題である． [17]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ando, K. Arai, K. Kawabe, and K. Tsubono, *Physics Letters A* **248** (1998) 145.
- [2] A. Araya, S. Telada, K. Tochikubo, S. Taniguchi, R. Takahashi, K. Kawabe, D. Tatsumi, T. Yamazaki, S. Kawamura, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagno, M.-K. Fujimoto, K. Horikoshi, N. Mio, Y. Naito, A. Takamori, and K. Yamamoto, *Appl. Opt.* (1999, in press).

(会議抄録)

- [3] 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 (INR, Russian Academy of Sciences, 1998)p.160-p.171.
- [4] M. Ando, K. Arai, K. Kawabe and K. Tsubono: Demonstration of Power Recycling on a Fabry-Perot-type Prototype Gravitational Wave Detector *Proc. International Workshop on Gravitation and Astrophysics* (ICRR, 1998) W7.

(国内雑誌)

- [5] 坪野公夫:21世紀の重力波天文学 - TAMA プロジェクトの現状 -, *日本物理学会誌* **54-5** (1999) 328-336.

(学位論文)

- [6] 河邊径太: Development of a 3-meter Fabry-Perot-Michelson Interferometer for Gravitational Wave Detection, 博士論文, 1998年12月.
- [7] 安東正樹: Power Recycling for an Interferometric Gravitational Wave Detector, 博士論文, 1998年12月.
- [8] 上田晃三: 2台のFabry-Perot共振器を用いた空間の異方性の測定, 修士論文, 1999年1月.
- [9] 谷口信介: TAMA300 レーザー干渉計型重力波検出器の制御実験, 修士論文, 1999年1月.

(著書)

- [10] 河邊径太: 「重力波をとらえる」(中村卓史, 三尾典克, 大橋正健 編著, 京都大学学術出版会, 1998) pp.248-286.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [11] S. Taniguchi: Operations of 300m Fabry-Perot-Michelson Interferometer in TAMA, LIGO Scientific collaboration meeting, (University of Florida, March 1999).
- [12] K. Yamamoto: The estimation of thermal noise of the TAMA interferometer, Thermal noise and low frequency noise sources in gravitational wave detectors, (Perugia, Italy, Jun. 1998).

- [13] N. Ohishi: Quality-Factors Measurement of the TAMA Mirror and its Suspension, International Workshop on Thermal Noise and Low Frequency Noise Sources in Gravitational Wave Detectors(Perugia, Italy, Jun. 1998)

招待講演

- [14] K. Tsubono and the TAMA collaboration: Status of TAMA300 Project, the 2nd LISA meeting(Caltech, Jul. 1998).

(国内会議)

一般講演

- [15] 谷口信介, 安東正樹, 朽久保邦治, 高橋竜太郎, 新井宏二, 高森昭光, 河邊径太, 森脇成典, 三尾典克, 新谷昌人, 大橋正健, 大石奈緒子, 山元一広, 上田晃三, 沼田健司, 関谷淳, 大塚茂巳, 福嶋美津広, 藤本真克, 川村静児, 神田展行, 坪野公夫, 三代木伸二, 山崎利孝, 辰巳大輔, 寺田聡一, 長野重夫, 他 TAMA collaborations: レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 I, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [16] 朽久保邦治, 佐々木愛一郎, 谷口信介, 坪野公夫, 藤本真克, 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, 福嶋美津広: TAMA300における300mFabry-Perot共振器の制御III, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [17] 関谷淳, 沼田健司, 大石奈緒子, 河邊径太, 坪野公夫: 楕型電極静電アクチュエータの開発, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [18] 河邊径太 and the TAMA collaboration: TAMA300干渉計の制御系, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [19] 安東正樹, 新井宏二, 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VI, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [20] 新井宏二, 安東正樹, 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VII, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [21] 上田晃三, 高森昭光 河邊径太, 坪野公夫: 2台のFabry-Perot共振器を用いた空間の等方性の測定, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [22] 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 坪野公夫: loss angle の測定による干渉計型重力波検出器における熱雑音の推定日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [23] 山元一広, 河邊径太, 坪野公夫: 非一様な散逸による熱雑音の研究, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)
- [24] 沼田健司, 関谷淳, 大石奈緒子, 河邊径太, 鈴木敏一, 坪野公夫: 石英材料のQ値測定, 日本物理学会 1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月)

- [25] 高森昭光, 河野能知, 古徳純一, 河邊径太, 坪野公夫: 重力波検出器用非接触支持技術の開発 I, 日本物理学会 1998 年秋の分科会 (秋田大学, 1998 年 10 月)
- [26] 神田展行, 宮川治, 山端日出之, 辰巳大輔, 三代木伸二, 黒田和明, 岡田淳, 坪野公夫: 重力波アンテナの宇宙線バックグラウンド測定 (II), 日本物理学会 1998 年秋の分科会 (秋田大学, 1998 年 10 月)
- [27] 坪野公夫: スペース重力波実験の可能性, 第 1 回「スペース重力波実験研究会」(東大本郷, 1999 年 2 月)
- [28] 関谷淳: LISA の技術 I, 第 1 回「スペース重力波実験研究会」(東大本郷, 1999 年 2 月)
- [29] 谷口信介, 安東正樹, 長野重夫, 寺田聡一, 関谷淳, 川村静児, 高橋竜太郎, 森脇成典, 河邊径太, 新谷昌人, 朽久保邦治, 高森昭光, 山元一広, 新井宏二, 大石奈緒子, 三尾典克, 大橋正健, 山崎利孝, 福嶋美津広, 辰巳大輔, 上田晃三, 沼田健司, 大塚茂巳, 神田展行 E, 三代木伸二, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, TAMA collaborations: レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 II, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [30] 関谷淳, 寺田聡一, 長野重夫, 高橋竜太郎, 川村静児, 藤本眞克, 河邊径太, 坪野公夫: TAMA300 におけるリング型レーザーモードクリーナーのアラインメント制御, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [31] 安東正樹, 谷口信介, 長野重夫, 寺田聡一, 関谷淳, 川村静児, 高橋竜太郎, 森脇成典, 河邊径太, 新谷昌人, 朽久保邦治, 高森昭光, 山元一広, 新井宏二, 大石奈緒子, 三尾典克, 大橋正健, 山崎利孝, 福嶋美津広, 辰巳大輔, 上田晃三, 沼田健司, 大塚茂巳, 神田展行, 三代木伸二, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, TAMA collaboration: レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 III, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [32] 新井宏二, 安東正樹, 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 VIII, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [33] 上田晃三, 高森昭光, 河邊径太, 坪野公夫: 2 台の Fabry-Perot 共振器を用いた空間の異方性の測定, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [34] 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 坪野公夫: loss angle の測定による干渉計型重力波検出器における熱雑音の推定 II, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [35] 山元一広, 河邊径太, 坪野公夫: 非一様な散逸による熱雑音の研究 II, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [36] 沼田健司, 関谷淳, 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 坪野公夫: 低損失材料の intrinsic Q 値測定, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [37] 坪野公夫, 大石奈緒子, 上田晃三, 依田達夫, 大塚茂巳, 河邊径太: レーザーを用いた高感度傾斜計の開発, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [38] 高森昭光, 河邊径太, 坪野公夫: 重力波検出器用低周波防振技術の開発, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [39] 長野重夫, 谷口信介, 安東正樹, 寺田聡一, 高橋竜太郎, 福嶋美津広, 山崎利孝, 大橋正健, 坪野公夫, 黒田和明, 三尾典克, 植田憲一, 川村静児, 藤本眞克: 重力波検出器 TAMA300 のためのレーザー周波数安定化 III, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [40] 高橋竜太郎, 安東正樹, 谷口信介: 温調による TAMA300 の光路長制御, 日本物理学会第 54 回年会 (広島大学, 1999 年 3 月)
- [41] 安東正樹, 及び TAMA グループ: TAMA300 の現状 (5), 日本天文学会 (京都大学, 1999 年 3 月)
- (セミナー)
- [42] M. Ando: *Demonstration of power recycling on a 3-m Fabry-Perot-Michelson interferometer*, LAL (Orsay, France, Nov. 1998).
- [43] 安東正樹: TAMA300 の現状, 重力波解析研究会, 神岡宇宙素粒子研究施設 (神岡, 1999 年 4 月).
- [44] K. Arai: *Recent Progress of TAMA300 and Japanese Prototype Interferometers*, LIGO scientific seminar, (California Institute of Technology, California, Dec. 1998).
- [45] A. Takamori: *Latest Results in Low Frequency GAS Mechanical Filters*, LIGO scientific seminar, (California Institute of Technology, California, Mar. 1999).