

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540266

研究課題名（和文） 重力波検出器における熱雑音低減の研究

研究課題名（英文） Study of the thermal noise in gravitational wave detectors

研究代表者

坪野 公夫 (TSUBONO KIMIO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号 10125271

研究成果の概要：

各種の石英材料を円盤形状に加工し、低周波領域で機械損失を測定した。測定された Q 値は、数 100Hz から数 kHz において 10^7 程度であった。鏡として用いるために施されるコーティングの影響を調べるため、試料にコーティングした後の損失測定を行った。その結果、コーティングの損失角 $=2 \times 10^{-3}$ という値を得た。また、損失が非一様に分布している場合でも正しい熱雑音を与えるような解析方法を提案した。この解析方法により熱雑音に対する物理的考察が可能になった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：熱雑音、重力波、石英、鏡、揺動散逸定理

1. 研究開始当初の背景

熱雑音の大きさは久保等によって定式化された揺動散逸定理を用いて求めることができる。これによると、物体に働く熱雑音の力の大きさの二乗は、 T/Q に比例する。ここで T は物体の温度であり、 Q は物体の損失の大きさをあらわす（ Q が大きいほど損失が小さい）量である。温度 T を下げれば雑音力は小さくなるが、レーザー干渉計の場合レーザー光の照射による発熱があるため、吊り下げられた鏡を外乱を与えずに冷却することは容易ではない。現在計画中の低温利用重力波検

出器 LCGT では、冷凍機利用で鏡を 30K まで冷却する予定である。しかし揺動散逸定理が示すように、鏡の損失を表す Q 値（ $1/Q$ は損失角とよばれ、損失の大きさを表す量である）が一桁大きな材質を見つければ、温度を $1/10$ に下げたのと同じ効果をもつ。しかも高 Q 材料の場合は、そのような材質を使っている限り、何の工夫もメンテナンスもなしに低雑音状態を維持できるので好都合である。

本研究は、過去におこなった科研費基盤研究 (B) (H11 H12) の研究、およびその後の研究の

成果に基づいている。科研費基盤研究(B)では、まず材質の固有のQを正確に測定する手法を開発した(不動点支持Q値測定法)。これにより従来困難であった高Q値測定が可能となり、材質の損失を系統的に調べることが可能になった。われわれは様々な種類の石英の損失測定をおこない、その組成や熱処理によってQが大きく異なり、ある種の材料ではQが 10^8 近くに達することを初めて明らかにした(Numata 2001, Phys. Lett. A)。

2. 研究の目的

レーザー干渉計重力波検出器の主要な原理的雑音はレーザー光のショットノイズと熱雑音である。通常、高周波側ではショット雑音が、低周波側では熱雑音が検出器の感度を制限する。本計画はレーザー干渉計の鏡の熱雑音を低減する新たな方策を提案し、それを実証しようとする研究である。

本研究の主目的は、これまでの研究で得られた予測を確認し、さらなる低雑音材料を見出すことである。地上の重力波検出器で重要となる周波数帯は1kHz以下であるため、当初は1kHzから10Hz程度までを重点的に研究する。また、日本の将来計画である宇宙空間重力波検出器DECIGOにおいても鏡の熱雑音は重要な問題であり、この場合1Hzから0.1mHz程度の周波数帯における特性が重要になる。このためこのような低周波数領域におけるQ値の知見を得るべく、揺動散逸定理にもとづくコンプライアンス測定法(Ohishi, 1999, Phys. Lett. A)による損失予測法を開発する。これは材質に力を与えてその応答からコンプライアンスの虚数部分を求め、これを揺動散逸定理にあてはめて損失を計算するやり方である。この方法の有効性を示し、低周波における損失の知見を得ることも本研究で行う。

3. 研究の方法

定装置のデザイン、製作

不動点接触法でサンプルを支持するためのシステムの設計、製作をおこなった。今回は、測定周波数帯域を低周波数側にのばすため、従来より大きいサンプル(直径200mm程度まで)を支持、測定できるような装置を開発、製作した。

真空系、光学系、データ取得系の整備

空気による損失を回避するため、サンプルは真空中に置かれた。このための真空槽を新たに製作した。サンプルの機械振動を読み取るには、サンプルの側面にレーザーを照射しその反射波と、参照鏡からの反射波を干渉させるマイケルソン干渉計を用いた。レーザー干

渉計の感度を上げるために、低雑音のレーザーが必要であり、既存の出力10mWのNd:YAGレーザーを用いた。また、レーザーに反射波が戻らないようにAOM周波数シフタを使用する。サンプルの損失測定は、固有モードを励起しその自由減衰をロックインアンプ(既存)でモニターしてQ値を求めた。

サンプルの取得と加工

石英とシリコンについて数社のメーカーからサンプルを購入した。サンプルを一定の形状(直径100mm、高さ60mm)に加工し、さらに表面研磨をほどこした。シリコンを測定した理由は、シリコンが低損失、比較的安価、加工が容易、などの特徴をもつため、石英との比較対照の標準材料として利用できるためである。

石英、シリコンの損失測定

サンプルを測定装置にセッティングしてQ値の測定をおこなった。何回かの測定を実施し、データの再現性を確認した。また、シリコンは高Q値($Q>10^8$)であることを確認しているため、不動点支持部のルビーボール(直径2mm)の材質をサファイアに変えたり、先端形状を変えたりしてQ値測定の最適化をはかった。同時に、測定Q値と真空度の関係を実測する。 $p \sim 10^{-7}$ torrまでQ値を測定し、 $Q>10^8$ のような高Q値測定に必要な真空度を外挿により求めた。

表面研磨法の最適化

鏡の表面にはダメージ層とよばれる損失の比較的大きな部分が存在することが知られている。この層の厚さおよび損失の大きさは表面研磨のやり方およびその精度に依存すると思われるので、研磨の条件を様々に変えてQ値との関係を求めた。

熱処理とその評価

高Q値のための熱処理の最適な温度、アニリング時間、冷却速度などを求めるため様々な条件を組み合わせる処理をおこない、その後のQ値の変化を測定した。熱処理の履歴も重要であるため、いくつかのパラメータの組み合わせにおいては2-4回程度の繰り返し熱処理を試みて、Q値の変化を追った。

コンプライアンス測定法による低周波数領域の損失の評価

この方法は測定物に力を加えその応答を調べるもので、共振を利用しないため低周波でも損失が測定可能となる。ただこの場合極めて応答が小さいため、改良された装置を用いてデータを得る。周波数帯域としては、1Hzから0.1mHzまでの範囲を測定した。

測定結果の検討

各種の測定結果を検討して最適な鏡材料の結論を出した。また、どのような要素が損失を

決めているのかを検討し、それに対する対策（たとえば表面精度をもっと上げる等）をたてた。

材料および処理についての結果の整理

それぞれの試料の材料の組成と熱処理についても一度検討し、損失との関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1)室温の干渉計において最も有望視されている鏡材料は、熔融石英である。そのため、国内外で製造されている十数種の熔融石英のQ値を測定した。結果、 10^6 から 10^7 にわたる、種類によって大きく異なるQ値が測定された。TAMA300の最終感度のためには鏡のQ値が少なくとも 2×10^7 必要であることが計算されており、従来これは非常に困難と考えられてきた。しかし、我々の測定で、バルクの熔融石英としては報告例のない高いQ値、 3×10^7 を示す石英がいくつか見出されている。また、アニーリングによってQ値が増加する石英もあった。このような各石英の差は、おのおのが含有しているOH基の量や熱履歴に起因すると理解されている。さらに、多くの石英には、周波数が低くなると損失が小さくなる傾向があることが分かった。干渉計型重力波検出器の観測帯域は機械損失の測定の周波数よりも数桁低い。機械損失が観測帯域でさらに小さくなるならば、熱雑音はこれまでに予測されている以上に低減されることになり、今後の重力波研究にとって本知見は重要な成果をあげることができた。

(2)石英材料を円盤形状に加工し、周波数の低い領域で機械損失を測定することを行った。測定されたQ値は、数100Hzから数kHzにおいて 10^7 程度であり、モードの形状に応じて増減した。これは、試料表面における損失が測定に影響を与えていると考えられている。また、鏡として用いるために施されるコーティングの影響を調べるため、試料にコーティングを行い測定を行った。その結果、Q値は約2桁低下し、コーティングの損失角 $=2 \times 10^{-3}$ という値を得た。

その他、石英以外の鏡として有望視されている材質、シリコンやサファイアについても測定を行った。

(3)熱雑音推定のため従来使われてきたモード展開法に改良を加え、損失が非一様に分布している場合でも正しい熱雑音を与えるよ

うな解析方法を提案した。この新モード解析法では、従来考慮されてこなかった固有モード間の相関を取り入れることにより損失の分布に関わらず正しい熱雑音の値を得ることができる。この解析方法により熱雑音に対する物理的考察が可能になった。また、この方法の妥当性は、損失が非一様に分布した試験体の熱雑音を実際に測定することにより検証された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

(1) S Kawamura, M Ando, T Nakamura, K Tsubono, T Tanaka, I Funaki, N Seto, K Numata, S Sato, K Ioka, N Kanda, T Takashima, K Agatsuma, T Akutsu, T Akutsu, Koh-Suke Aoyanagi, K Arai, Y Arase, A Araya, H Asada, Y Aso, T Chiba, T Ebisuzaki, M Enoki, Y Eriguchi, M K Fujimoto, R Fujita, M Fukushima, T Futamase, K Ganzu, T Harada, T Hashimoto, K Hayama, W Hikida, Y Himemoto, H Hirabayashi, T Hiramatsu, F L Hong, H Horisawa, M Hosokawa, K Ichiki, T Ikegami, K T Inoue, K Ishidoshiro, H Ishihara, T Ishikawa, H Ishizaki, H Ito, Y Itoh, S Kamagasaki, N Kawashima, F Kawazoe, H Kirihara, N Kishimoto, K Kiuchi, S Kobayashi, K Kohri, H Koizumi, Y Kojima, K Kokeyama, W Kokuyama, K Kotake, Y Kozai, H Kudoh, H Kunimori, H Kuninaka, K Kuroda, K-i Maeda, H Matsuhara, Y Mino, O Miyakawa, S Miyoki, M Y Morimoto, T Morioka, T Morisawa, S Moriwaki, S Mukohyama, M Musha, S Nagano, I Naito, N Nakagawa, K Nakamura, H Nakano, K Nakao, S Nakasuka, Y Nakayama, E Nishida, K Nishiyama, A Nishizawa, Y Niwa, M Ohashi, N Ohishi, M Ohkawa, A Okutomi, K Onozato, K Oohara, N Sago, M Saijo, M Sakagami, S-i Sakai, S Sakata, M Sasaki, T Sato, M Shibata, H Shinkai, K Somiya, H Sotani, N Sugiyama, Y Suwa, H Tagoshi, K Takahashi, K Takahashi, T Takahashi, H Takahashi, R Takahashi, R Takahashi, A Takamori, T Takano, K Taniguchi, A Taruya, H Tashiro, M Tokuda, M Tokunari, M Toyoshima, S Tsujikawa, Y Tsunesada, K-i Ueda, M Utashima, H Yamakawa, K Yamamoto, T Yamazaki, J Yokoyama, C M Yoo, S Yoshida and T Yoshino, The Japanese space gravitational wave antenna - DECIGO, Journal of Physics: Conference Series 122 (2008) 012006. 査読有

(2) Kakeru Takahashi, Masaki Ando and Kimio

Tsubono, Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, Journal of Physics: Conference Series 122 (2008) 012016. 査読有

(3) M Ando, S Kawamura, T Nakamura, K Tsubono, T Tanaka, I Funaki, N Seto, K Numata, S Sato, K Ioka, N Kanda, T Takashima, K Agatsuma, T Akutsu, T Akutsu, K Aoyanagi, K Arai, Y Arase, A Araya, H Asada, Y Aso, T Chiba, T Ebisuzaki, M Enoki, Y Eriguchi, M K Fujimoto, R Fujita, M Fukushima, T Futamase, K Ganzu, T Harada, T Hashimoto, K Hayama, W Hikida, Y Himemoto, H Hirabayashi, T Hiramatsu, F L Hong, H Horisawa, M Hosokawa, K Ichiki, T Ikegami, K T Inoue, K Ishidoshiro, H Ishihara, T Ishikawa, H Ishizaki, H Ito, Y Itoh, S Kamagasaki, N Kawashima, F Kawazoe, H Kirihara, N Kishimoto, K Kiuchi, S Kobayashi, K Kohri, H Koizumi, Y Koima, K Kokeyama, W Kokuyama, K Kotake, Y Kozai, H Kudoh, H Kunimori, H Kuninaka, K Kuroda, K I Maeda, H Matsuhara, Y Mino, O Miyakawa, S Miyoki, M Y Morimoto, T Morioka, T Morisawa, S Moriwaki, S Mukohyama, M Musha, S Nagano, I Naito, N Nakagawa, K Nakamura, H Nakano, K Nakao, S Nakasuka, Y Nakayama, E Nishida, K Nishiyama, A Nishizawa, Y Niwa, M Ohashi, N Ohishi, M Ohkawa, A Okutomi, K Onozato, K Oohara, N Sago, M Saijo, M Sakagami, S I Sakai, S Sakata, M Sasaki, T Sato, M Shibata, H Shinkai, K Somiya, H Sotani, N Sugiyama, Y Suwa, H Tagoshi, K Takahashi, K Takahashi, T Takahashi, H Takahashi, R Takahashi, R Takahashi, A Takamori, T Takano, K Taniguchi, A Taruya, H Tashiro, M Tokuda, M Tokunari, M Toyoshima, S Tsujikawa, Y Tsunesada, K I Ueda, M Utashima, H Yamakawa, K Yamamoto, T Yamazaki, J Yokoyama, C M Yoo, S Yoshida and T Yoshino, DECIGO pathfinder, Journal of Physics: Conference Series 120 (2008) 032005. 査読有

(4) K. Ishidoshiro, M. Ando, K. Tsubono, N. Kanda, H. Takahashi, and the TAMA Collaboration: Systematical veto by all monitor signals in a gravitational wave detector, Class. Quantum Grav. 24 (2007) S405-S413. 査読有

(5) D. Tatsumi, R. Takahashi, K. Arai, N. Nakagawa, K. Agatsuma, T. Yamazaki, M. Fukushima, M. Fujimoto, A. Takamori, A. Bertolini, V. Sannibale, R. DeSalvo, S. Marka, M. Ando, K. Tsubono, T. Akutsu, K.

Yamamoto, H. Ishitsuka, T. Uchiyama, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, N. Awaya, N. Kanda, A. Araya, S. Telada, T. Tomaru, T. Haruyama, A. Yamamoto, N. Sato, T. Suzuki and T. Shintomi: Current status of Japanese detectors, Class. Quantum Grav. 24 (2007) S399-S403. 査読有

(6) Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono: Theoretical approach to thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss: Physical insight by the advanced modal expansion, Phys. Rev. D 75-8 (2007) 082002. 査読有

[学会発表](計 1件)

(1) K. Tsubono, Thermal Noise in Gravitational Wave experiments, The 21st COE International Symposium on the Linear Response Theory, Nov. 6, 2007, Univ. Tokyo, Koshiba hall

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪野 公夫 (TSUBONO KIMIO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号 10125271

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者