

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32606

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00671

研究課題名(和文) 冷却機械振動子を用いた微小重力の測定

研究課題名(英文) Measurement of gravity using feedback-cooled mechanical oscillators

研究代表者

松本 伸之 (Matsumoto, Nobuyuki)

学習院大学・理学部・准教授

研究者番号：30750294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：微小重力の測定を目指して、下記4項目を達成した。(1)Q値>100万の2本吊懸架鏡の開発、(2)周回長が5倍短い光共振器の開発、(3) $3 \times 10^{-18}$  m/sqrt(Hz)@500Hzが可能な安定化光源の開発、(4)真空対応低周波防振装置(>0.5Hz)の開発。(1)により熱雑音を十分に低減でき、さらに懸架線を2本としたことで(2)の周波数雑音に対して不感な小型共振器を実現できた。(3)、(4)により、光源雑音と地面振動を十分に除去できた。さらに、巨視的物体の量子制御に向け、下記2項目を達成した。(5)条件付き量子制御を実現するための量子フィルタの開発、(6)光ばねによるQ値向上の限界を解明。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却振動子を用いることで従来よりも微小なスケールで重力測定を実現すれば、度量衡分野で大きな問題となっている重力定数の系統誤差の低減が期待されるほか、近年、基礎物理学の分野で大きな注目を集めている重力相互作用の量子的性質の解明につながることも期待される。重力は極めて弱いため、これらの目標を実現するためには、種々の雑音を極限まで低減するための地道な技術開発を進めるほかはない。本研究では、熱雑音、光源雑音、地面振動という3つの重要な雑音の低減に成功した。また、重力の量子性解明に向けて、巨視的な物体を量子制御するための新たな手法を開発することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Aiming to measure microgravity using mechanical oscillators under feedback cooling, the following four objectives were achieved: (1) development of a suspended mirror by two wires, with a Q value greater than 1 million, (2) development of an optical cavity with five times shorter length, (3) development of a stabilized light source capable of  $3 \times 10^{-18}$  m/sqrt(Hz) @ 500 Hz, and (4) development of vacuum-compatible low-frequency vibration isolation devices (>0.5 Hz). Objective (1) sufficiently reduced thermal noise, and the use of two suspension wires enabled the realization of a compact cavity insensitive to frequency noise as in (2). With (3) and (4), both laser noise and ground vibration were adequately mitigated.

Furthermore, toward achieving quantum control of massive oscillators, the following two objectives were accomplished: (5) development of quantum filters for realizing conditional quantum control, and (6) elucidation of the limits of Q-value enhancement by optical springs.

研究分野：量子制御

キーワード：光計測 光共振器 低散逸振動子 重力定数 量子制御 光ばね フィードバック冷却

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2017年に重力相互作用の量子性を検証する新たな手法が提案された [1,2]。即ち、物体間に重力相互作用を介して量子もつれが生成可能かどうかを検証するのである。量子もつれが生じれば、重力相互作用を記述するハミルトニアンは量子力学における演算子となり、量子的だと言える。量子もつれが生じなければ、重力を記述するハミルトニアンはc数であり古典的だと考えられる。重力相互作用の量子性を実証することは、量子重力理論の実験的検証に向けた第一歩となる。

このような実験を実現するための一つの方法は、基底状態まで冷却された量子的な物体を隣り合わせて設置し、物体間に生じる重力が他の相互作用よりも大きくなるようにすればよい。しかし、重力は極めて小さいため、一般に、隣り合う物体間に働く相互作用で支配的なものは電磁気相互作用となる。これまで、1グラムよりも軽い物体から生じる重力は観測されたことがなかった [3]。一方、冷却実験に関して言えば、基底状態まで冷却された最も重たい物体はナノグラム程度であった [4]。物体の質量が大きくなるとゼロ点振動振幅は小さくなるため、巨視的な物体の基底状態を実現することもまた困難である。量子もつれの生成に関しても、巨視的な物体では実現された例がない。

以上のことから、重力の量子性を検証するためには、重力が観測可能なスケールと量子制御が可能なスケールの間にあるギャップを埋めるための研究を進めることが重要である。

### 2. 研究の目的

微小な重力を観測できる精密変位測定系を実現し、さらに巨視的な物体間に量子もつれを生成するための技術開発と理論研究を進めることが本研究の目的である。

重力定数の測定という観点から言えば、軽い物体から生じる微小な重力を測定することができれば、物体の大きさに起因した系統的な不確かさを低減できる。重力定数の測定精度は他の物理定数の測定精度と比較して著しく低い。さらに、いくつもの測定結果がそれぞれの不確かさの範囲内で一致しておらず、系統的な不確かさが小さな新しい測定手法を確立することが極めて重要である [5]。

量子制御の観点からは、重たい物体間に量子もつれが生成されたことはこれまで一度もない。重力の量子性検証を実現するためには、まず初めに、重力が測定可能なほど巨視的な系においても量子制御が可能であることを実証する必要がある。重力相互作用は極めて弱いため、その実証のためには、相互作用が大きい光の輻射圧を利用した量子もつれ生成手法を開発する。先行研究により、レーザー光で二つの自由質点の同相・差動変位を量子限界感度で測定すれば、測定結果に条件付けられた条件付き量子状態は量子もつれとなることが知られていた [6]。これを一般化することで、本研究で使用する光学的にトラップされた巨視的機械振動子(懸架された鏡)の間に量子もつれを生成するための理論を確立し、実験的に検証することを目指す。条件付き量子状態の制御においても、微小な重力を測定するために必須となる精密変位計測系が利用されるため、本研究の二つの目的を実現するための実験技術は全く同じものとなる。さらに、重力の量子性を検証する場合でも、条件付き量子もつれが生成されるかどうかを検証すれば良い。

### 3. 研究の方法

エネルギー散逸の小さい懸架鏡を一端とする離調共振器を開発する。離調共振器で生じる光ばね効果によって光学トラップされた懸架鏡(プローブ)の重心振動を、フィードバック冷却によって基底状態近くまで冷却し、重力源となる別の機械振動子をその隣に設置する。重力源の共振周波数と一致する周波数でプローブは大きく変位し、それに伴って生じる光共振器反射光量の強度変動を読み取ることで重力が測定される。

精密に測定された振動子の変位信号は、フィルタ処理によって、振動子の速度に比例するように加工される。これを負帰還することで振動子の運動エネルギーを低減し、振動モードの実効温度を冷やすことをフィードバック冷却という。フィードバック冷却の限界は、変位計測の精度で定まる。基底状態まで冷却するためには、振動子と環境の結合で定まる熱デコヒーレンス率よりも高効率な測定を実現すればよい。そのためには、エネルギー散逸の小さな振動子を一端とした光共振器を開発し、高い光量の安定化レーザーを入射し、光共振器を離調状態に制御すればよい。懸架鏡のQ値は向上させるために懸架鏡は光ばねでトラップされ、その結果、熱デコヒーレンスはさらに低減される。

変位信号は上述のようにフィードバック冷却に利用されるのみならず、懸架鏡の量子状態を最適推定するために量子フィルタで処理される。推定結果と真値との差で特徴づけられる条件付き分散を解析することで、振動子の条件付き量子もつれが生成されたかがわかる。先行研究では、懸架鏡を含んだパワーリサイクルファブリーペローマイケルソン干渉計の2つの出力を自由質点領域(測定周波数>>共振周波数)で解析することで、量子もつれ生成の条件を得た。本研究では、光ばねで共振周波数を高められ、かつフィードバック冷却を含んだ実験系において、2つの懸架鏡の重心振動間に量子もつれを生成するための条件を解析する。

#### 4. 研究成果

下記の6項目に成功した [7, 8, 9, 10]。

- (1) Q 値が 100 万の 2 本吊低散逸懸架鏡の開発(図 1)
- (2) 共振器長が従来よりも 5 倍短い (周回長=2cm) 光共振器の開発(図 2)
- (3) 変位感度が  $3 \times 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 500 \text{ Hz}$  を実現可能な安定化光源の開発(図 3)
- (4) 真空対応の低周波防振装置 (>0.5Hz) の開発(図 4)
- (5) 条件付き量子制御を実現するための量子フィルタの開発(図 5)
- (6) 光ばねによる Q 値向上に対する normal mode splitting による制限を解明(図 6)

研究期間内に光共振器を動作させることはできなかったため、重力測定実験には未だ着手できていないが、上記の(1)~(4)から、微小重力の測定に向けて、着実に精密変位計測系の開発を進められた。実験セットアップの全体像は図 7 のとおりである。

項目(1)により、変位計測の原理雑音の一種である熱雑音を十分に低減できた。さらに、懸架線を従来の 1 本から 2 本に変更することで、懸架鏡の回転方向 (yaw) の共振周波数を十分に高めることができたため、項目(2)の共振器長の短い、つまり光源の周波数雑音に対して不感な共振器が実現できた。1 本の懸架線の場合、光圧トルクによる不安定性を除去するためには共振器形状を三角形にする必要があったため、共振器長は 10cm までしか短くできなかった。二本線で懸架した新たなシステムでは、機械的な復元力が光圧トルクによる復元力より大きいため、2 枚の合わせ鏡からなる周回長の短い光共振器が利用できる。項目(3)により、光源の雑音も十分に除去できた。周波数雑音に関してはインルーブ評価による雑音の推定結果ではあるものの、項目(2)により、先行研究よりも 5 倍周波数雑音を低減できることは間違いない。項目(4)によって、新たな実験環境で観測された建物の固有振動 (~1Hz) の影響を十分に除去できる見込みである。よって、以上の 4 項目の達成により、微小重力の観測に向けた精密変位計測系の改良は着実に進んでいると言える。

項目(5)では、図 5(左)のパワーリサイクルファブリーペローマイケルソン干渉計の両腕に低散逸懸架鏡を設置した実験系において、干渉計の 2 つの出力 (振動子の差動振動と同相振動) によって条件付けられた量子状態を詳細に解析した。先行研究とは異なり、それぞれの光共振器は離調され、懸架鏡は光ばねによって光学的にトラップされており、自由質点近似をしていない。この系において、既に我々が達成している実験パラメータ (振動子自体の Q 値>100 万など) では、振動子間の条件付き量子もつれが生成可能であることが分かった。即ち、干渉計出力から得られる共分散行列を解析して得られる logarithmic negativity と呼ばれる指標が、量子もつれ生成のための条件を満たすことが分かった(図 5 右の黒色の点)。項目(6)では、光ばねによる懸架鏡の重心振動の Q 値向上に対する回転振動モードの影響を明らかにした。重心振動と回転振動の間のカップリングのため、光ばねは両モードに作用する。両モードは一種の連成振動子を形成し、normal mode splitting が生じる。さらに回転振動モードは比較的散逸が大きいことから、Q 値の向上には制限が課せられることを明らかにした(図 6)。



図 1 低散逸  
2 本吊懸架鏡



図 2 懸架鏡を含んだ小  
型線型光共振器

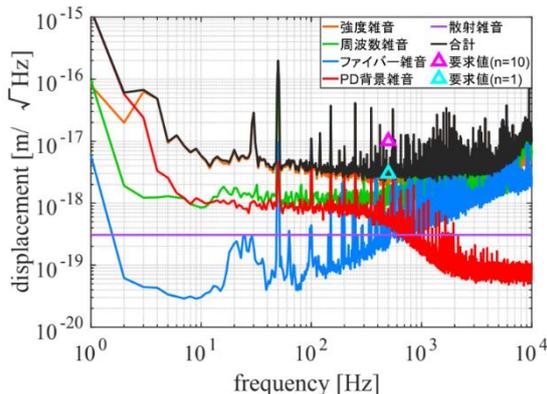


図 3 技術雑音を変位換算した結果。レーザー光の強度雑音、周波数雑音、光ファイバ雑音 (非制御時の雑音レベルとの比較は図 8)、光検出器の背景雑音をそれぞれ示す。これらの雑音の総和が黒線であり、基底状態実現のための要求値を概ね満たした。50 Hz の高調波成分の雑音は交流電源に由来したものであり、現在はこれらの雑音の除去に取り組んでいる (現状は図 9)。

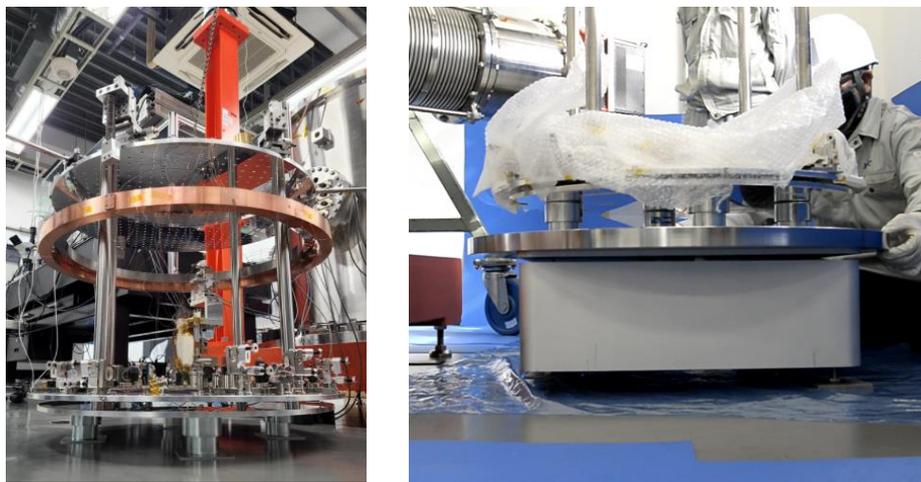


図4 これまでに開発を終えていた多段防振装置(左)と新たに開発した低周波防振(右)。低周波防振装置の上に多段防振装置を設置することで、0.5 Hzより高い周波数成分を防振することができる。すべて真空対応であり、これらの装置全てを設置した真空槽内部の到達真空度は10 uPa未満である。

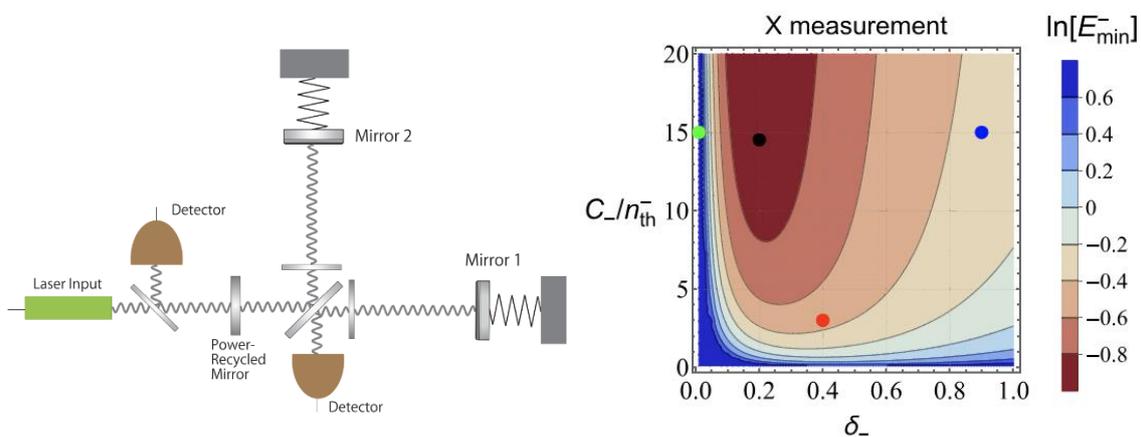


図5 パワーリサイクルファブリーペローマイケルソン干渉計(左)と条件付き量子もつれの生成(右)。右図において、黒の点で示されるものは、既実現可能な実験パラメータに対応する logarithmic negativity の値である。縦軸は量子協同性であり、横軸は離調の大きさである。

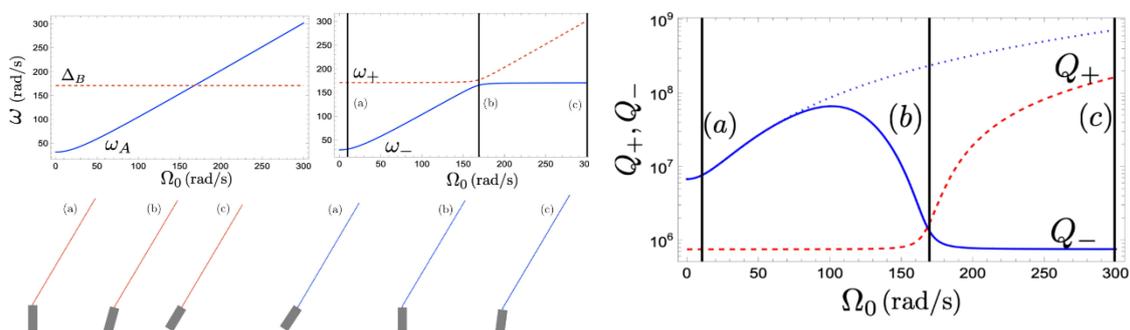


図6 重心振動と回転振動が normal mode splitting する様子(左)。これらの2つのモードが光ばねを介して影響しあうことから、Q値の向上には制限が生じる(右)。横軸はすべて光ばねの強さを表す。

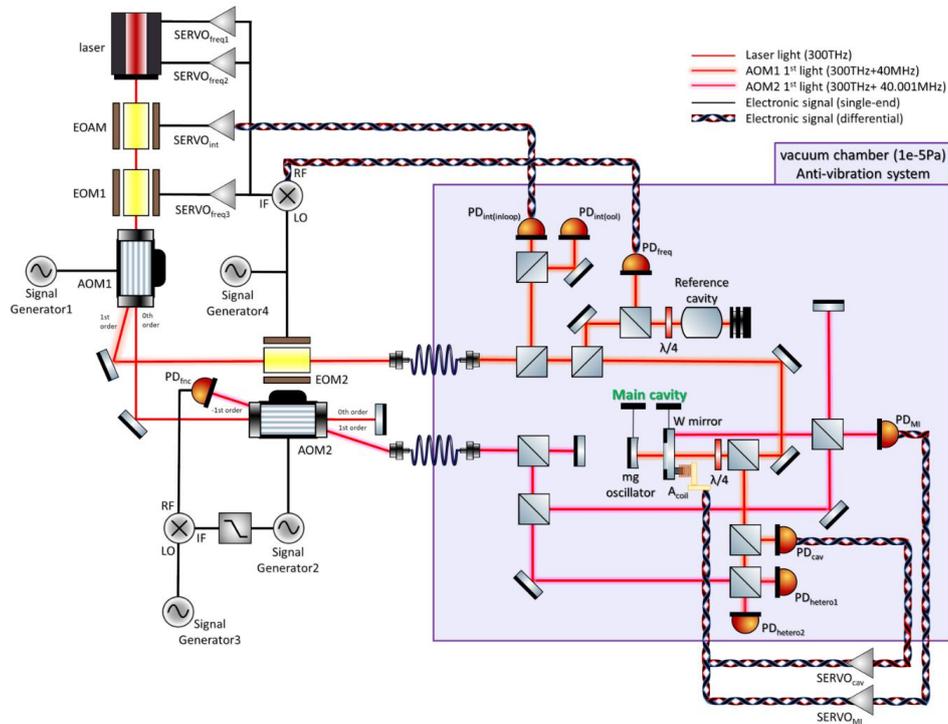


図7 実験セットアップ。レーザー光は強度・位相変調器、周波数シフターで加工されたのち、2つの光ファイバを介して真空槽内に導入される。一方は強度・周波数安定化、光共振器へ入射され、他方はヘテロダイン測定のためのLO光として利用される。LO光で生じるファイバ雑音はファイバーノイズキャンセルによって除去される。光源と変調器以外の全ての装置は、真空槽内に設置された多段防振装置の最終段の上に設置されている。

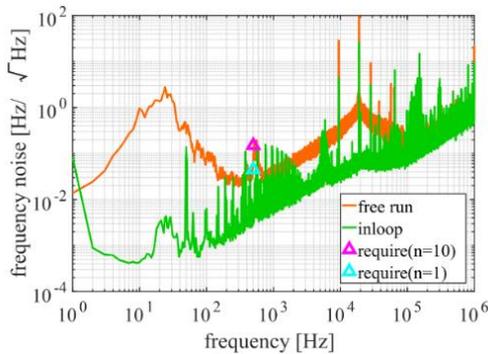


図8 ノイズキャンセリングの結果

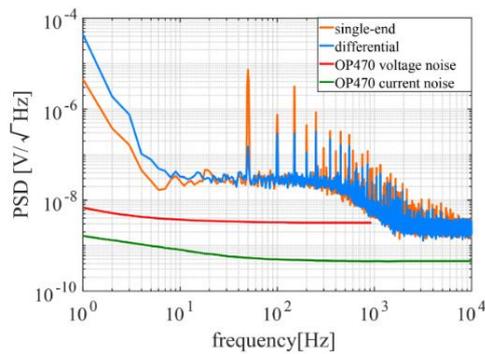


図9 交流電源雑音の低減。差動(青)のときとシングルエンド方式(オレンジ)の場合

#### 引用文献

- [1] Sougato Bose, et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 240401 (2017).
- [2] C. Marletto and V. Vedral, Phys. Rev. Lett. **119**, 240402 (2017).
- [3] G. T. Gillies and C. S. Unnikrishnan, Phil. Trans. R. Soc. A, **372**, 20140022 (2014).
- [4] R. W. Peterson, et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 063601 (2016).
- [5] C. Rothleitner and S. Schlamminger, G, Rev. Sci. Instrum. **88**, 111101 (2017).
- [6] Helge Müller-Ebhardt, Henning Rehbein, Roman Schnabel, Karsten Danzmann, and Yanbei Chen, Phys. Rev. Lett. **100**, 013601 (2008).
- [7] S. B. Cataño-Lopez, J. G. Santiago-Condori, K. Edamatsu, and N. Matsumoto, Phys. Rev. Lett. **124**, 221102 (2020).
- [8] 狩野寛知、学習院大学理学部物理学科修士論文(2024).
- [9] Y. Sugiyama, T. Shichijo, N. Matsumoto, A. Matsumura, D. Miki, and K. Yamamoto, Phys. Rev. A **107**, 033515 (2023).
- [10] D. Miki, N. Matsumoto, A. Matsumura, T. Shichijo, Y. Sugiyama, K. Yamamoto, and N. Yamamoto, Phys. Rev. A **107**, 032410 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuuki Sugiyama, Tomoya Shichijo, Nobuyuki Matsumoto, Akira Matsumura, Daisuke Miki, and Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 107
2. 論文標題 Effective description of a suspended mirror coupled to cavity light: Limitations of Q enhancement due to normal-mode splitting by an optical spring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 33515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.107.033515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Daisuke Miki, Nobuyuki Matsumoto, Akira Matsumura, Tomoya Shichijo, Yuuki Sugiyama, Kazuhiro Yamamoto, and Naoki Yamamoto	4. 巻 107
2. 論文標題 Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous measurement and feedback control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 32410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.107.032410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Croquette, S. Deleglise, T. Kawasaki, K. Komori, M. Kuribayashi, A. Lartaux-Vollard, N. Matsumoto, Y. Michimura, et al.	4. 巻 5
2. 論文標題 Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AVS Quantum Sci.	6. 最初と最後の頁 14403
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1116/5.0128487	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seth B. Catano-Lopez, Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, and Nobuyuki Matsumoto	4. 巻 123
2. 論文標題 High-Q Milligram-Scale Monolithic Pendulum for Quantum-Limited Gravity Measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 221102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.221102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 17件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 精密変位計測に基づく低散逸振動子の重力/量子実験への応用
3. 学会等名 レーザー学会第43回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Quantum control and gravity sensing by using low-dissipative pendulum
3. 学会等名 QUP workshop: toward Project Q（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Conditional squeezing of a macroscopic pendulum near quantum regimes
3. 学会等名 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15)（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 力の精密計測が拓く物理学
3. 学会等名 KEK WPI研究所（QUP）プロジェクト検討会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 巨視的振り子の条件付き位置スクイーズ状態の生成
3. 学会等名 光応用工学特別研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Towards quantum sensing with table-top scale pendulum
3. 学会等名 Quantum sensors of magnetic and inertial forces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Towards quantum sensing with table-top scale pendulum
3. 学会等名 WHERE QUANTUM INFORMATION & QUANTUM TECHNOLOGIES MEET GRAVITY IN LABORATORY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 High Q mg-scale monolithic pendulum for quantum-limited force sensing
3. 学会等名 XI International Symposium on Modern Problems of Laser Physics and School for young scientists (MPLP-2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 量子振り子の開発と応用
3. 学会等名 KEK物構研コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 微小な重力の観測に向けた低散逸振動子の量子計測
3. 学会等名 巨視的量子現象と量子重力 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 光計測による巨視的物体の量子制御
3. 学会等名 量子エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Demonstration of conditional mechanical squeezing of a massive pendulum
3. 学会等名 KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Towards quantum sensing with table-top scale pendulum
3. 学会等名 Quantum sensors of magnetic and inertial forces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Towards quantum sensing with table-top scale pendulum
3. 学会等名 WHERE QUANTUM INFORMATION & QUANTUM TECHNOLOGIES MEET GRAVITY IN LABORATORY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本伸之
2. 発表標題 微小重力センシングを目指したメカニカルレーザークーリング
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Displacement sensing of a pendulum for gravity measurements
3. 学会等名 International Conference on Quantum Metrology and Sensing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuyuki Matsumoto
2. 発表標題 Considerations with specific architectures: suspended pendulums
3. 学会等名 Quantum Optomechanical Architectures for Dark Matter Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松本伸之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 166
3. 書名 物理科学この一年 2020 (担当範囲: 機械振動子の量子制御と低雑音重力センサー)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>学習院大学 松本研究室  <a href="https://sites.google.com/view/matsumotolab-gakushuin/home">https://sites.google.com/view/matsumotolab-gakushuin/home</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------