

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「量子制御を用いたオプトメカ結合型調和
振動子のマニピュレーション」

研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者：宗宮 健太郎
(東京工業大学 理学院 准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1)実施概要

【2018】

2018 年度の研究成果は、東京工業大学で実施している信号リサイクル干渉計実験において、非線形光学素子による信号増幅効果を確認したことと、単共振器実験において、伝達関数測定による光ばねの観測に成功したことである。また、東大先端研と京都大学で実施している、電気機械光学結合を用いた核磁気共鳴実験において、薄膜の光学損失と機械損失を改善するために、フランス LKB で開発中のフォトニック結晶薄膜を導入する新しい手法を提案したことである。

【2019】

2019 年度の研究成果の一つ目は、東京大学で実施しているねじれ振り子を用いた量子計測実験で、ミリグラムスケールのマスのトルク測定としては世界最高感度を実現したこと、二つ目は、同じく東京大学の光学浮上実験において、水平方向の復元力を検出し、安定性を確認したこと、三つ目は東工大で実施している反磁性体浮上実験で、1mg の石英ガラスを永久磁石を用いて浮上させることに成功したこと。これら 3 つの成果は、どれもマクロな物体の量子計測を実現させるための新技術であり、着実に前進していると言える。四つ目の成果は、東工大の単共振器実験で、閾値を超えるキャリア光の増幅を確認したことである。本来の目的は信号成分の増幅であるが、ファブリーペロー共振器内にアクティブフィルタを導入しているため、キャリアと信号が同時に増幅され、キャリア光が先に閾値を超えてしまったものである。光バネの高硬度化は観測できておらず、装置の安定化が今後の課題である。五つ目の成果は、核磁気共鳴装置に用いるフォトニック結晶の製作に成功したことである。これまでは薄膜にアルミを蒸着させて鏡にしていたが、それだと反射率、Q 値ともに低いため、薄膜を加工してフォトニック結晶を構成するものがある。

【2020】

2020 年度の研究成果の一つ目は、東工大の単共振器実験でパラメトリック信号増幅した状態で光バネの観測に成功したことである。光バネの共振周波数シフトを観測する一步手前の状態まで来ている。二つ目は、反磁性浮上のために質量 2mg の平坦軽量鏡を製作、浮上に成功したことである。熱散逸測定の準備を進める。三つ目は、東工大の重力波望遠鏡試験実験機でパラメトリック信号増幅技術の制御に成功したことである。安定化を進めている。

【2021】

2021 年度の研究成果は、カスケード非線形効果(光カー効果)を用いて光バネの実部の操作が可能であることを示したことである。パラメトリック増幅は倍波生成損失で増幅率が頭打ちになることを発見し、新しい方法を提案・開発したものである。同実験で非線形結晶内部における光熱効果が光バネ虚部を変化させることも実験的に実証した。光カー効果と光熱効果を組み合わせることで光バネを安定操作する。応用研究では、石英反磁性浮上実験で Q 値測定を実施し、目標より 1 桁低い 10 の 5 乗という結果を得たことである。また、LKB の実験では、フォニック結晶薄膜の端部構造を改良し、Q 値と共振周波数の積である Qfm を 1 桁改善した。東工大の重力波望遠鏡試験実験機では、デジタル制御システムを駆使して 5 自由度同時制御に成功した。JAXA では長基線信号増幅干渉計実験を構築した。核磁気共鳴観測については、日仏共同研究の産物であるフォトニック結晶と電極を対向配置したハイブリッド薄膜を用いて、キャパシタの振動を光検出する技術の開発に成功した。さらに狭帯域検出器に対応した新規 MRI 撮像手法も開発した。

【2022】

2022 年度の研究成果の一つ目は、東工大の単共振器実験で、光カー効果により光共振器の応答を増加させられることを実験で示したことである。二つ目は、東工大の重力波望遠鏡試験実験機では、信号リサイクル干渉計として世界で初めて光バネの観測に成功したことである。三つ目は、京大の電気機械光学結合型核磁気共鳴観測実験において、フィードバック冷却を実現し、観測帯域を広げること成功したことである。三つの成果とも、本研究において最重要な課題で成功を収めたことになる。

【2023】

2023 年度の研究成果の一つ目は、東工大の重力波望遠鏡試験実験機で、パラメトリック信号増幅による光バネ硬化を確認できたことである。応用研究の一つに本研究の技術を適用することに成功しただけでなく、単共振器を用いた原理検証実験で実現できなかったパラメトリック信号増幅方式での光バネ硬化を検証できたことで、発足当初の提案を実験的に検証できたことになる。二つ目は、信号増幅技術を適用した干渉計の感度に対する光損失の影響を計算し、論文にまとめたことである。信号取得位相を回転させることで狭帯域の感度改善を目論むと光損失に対して脆弱となることと、信号リサイクル鏡の反射率を上げることで光損失の影響を減らせることなどを定量的に示した。三つ目の成果は、豪州の研究グループと研究交流を開始したことである。豪州グループは本研究と独立に単共振器を用いた信号増幅実験を実施しており、競合関係にあったが、それぞれの実験がひと段落したので、情報を交換し、次年度以降の共同研究について話し合うことができた。

(2)顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. 信号増幅干渉計の全自由度同時制御と光バネシフトの観測

概要: 重力波望遠鏡の高周波感度はレーザーの散乱雑音で制限されており、感度向上のためには光量の増加もしくはスクイーズ場の導入が有効であることが分かっているが、すでにどちらも導入済みで技術的限界に近いところまで来ている。本研究で提案する信号増幅技術は、干渉計の暗縞側で非線形光学効果で信号増幅するため、高出力化の問題を回避しつつポンプ光という外部エネルギー源からエネルギーを注入して感度を向上するという新しい発想に基づく技術となっている。単純に信号増幅を施すと信号と雑音が同時に増幅されてしまうが、共振器を離調し、光バネを形成した状態で信号増幅を施すと、信号増幅が干渉計のダイナミクスの変化をもたらし、信号増幅を担う光バネの共振周波数が高周波にシフトすることで感度向上を実現できる。本研究では信号増幅技術の第一段階として、伝達関数測定による光バネ周波数シフトの検証を行い、成功した。次の段階としては、光バネをキロヘルツ帯までシフトさせ、さらに量子雑音感度が実際に改善していることを検証する必要がある。最終的には、ドイツの GEO600 望遠鏡か、豪州で計画されている NEMO 望遠鏡への導入を目論んでおり、双方の関係者と議論をしている。

2. 周波数依存スクイーズ実験の成功

概要: 現在稼働中の重力波望遠鏡の感度はほぼ全ての帯域で光の量子雑音で制限されている。散乱雑音を減少させるための技術としてスクイーズ技術が提案され、すでに実機に導入済みであるが、位相スクイーズを導入すると、散乱雑音が軽減する一方で輻射圧雑音は増加することが知られている。狭帯域の光共振器を離調し、スクイーズ場をこのフィルタ共振器に入射すると、特定の周波数でスクイーズ角が回転し、全帯域で重力波望遠鏡の量子雑音感度を向上するような周波数依存スクイーズ場を用意することが可能である。周波数依存スクイーズの提案は 20 年前になされ、10 年ほど前から各国で技術実証が行われているが、本研究では日本とフランスで開発中のフィルタ共振器実験の開発の一部を担った。

3. ねじれ振りでミリグラムスケールの世界最高トルク感度を達成

概要: 巨視的量子力学検証において質量の目安となるのがプランク質量(およそ 22 μ g)である。プランク質量を有意に上回るミリグラムスケールの物体の量子計測実験はいまだに成功していない。測定対象の質量の平方根に反比例して量子限界が上がってしまうからである。また、グラムスケールであれば、振子を使うことで、重力希釈効果による熱散逸の減少を利用することも可能であるが、ミリグラムスケールだと希釈効果が弱くなることも分かっている。本研究ではそのような事情を鑑みて、通常の振子ではなくねじれ振子を使い、振動子の周波数を低くしつつ熱散逸の小さな系を実現した。本研究で実現した 20aNm/rtHz というトルク感度はミリグラムスケールの物体の測定における世界記録である。

4. ミリグラムスケールの石英鏡の反磁性浮上に成功

概要: 前項で述べたようにミリグラムスケールの物体の量子測定には、機械振動子だと熱散逸が問題となり、振り子を用いるには軽すぎるという難点がある。そこで第三の懸架方法として、何かしらの方法で物体を浮上させてしまう、というものが有効である。本研究では永久磁石を巧みに配列し、反磁性浮上を利用して石英鏡を安定浮上させることに成功した。

5. フォノンニック結晶薄膜を用いた振動子で標準量子限界に到達する条件を達成

概要: フランス LKB ではフォトニック結晶およびフォノンニック結晶を応用して機械損失が小さく光学応答に優れた薄膜を開発している。どちらも SiN 薄膜にパターンをつけて形成するが、フォトニック結晶は光格子で反射率を上げる効果を持ち、フォノンニック結晶は特定のモードについて熱散逸を減らす効果を持つ。LKB で開発したフォノンニック結晶は常温の Q 値測定で量子限界到達の要求値を超え、中心部にフォトニック結晶構造を施して低温化すれば量子限界に到達することが分かった。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 光カー効果と光熱効果による光バネの操作性の向上

概要: 共振器を離調して光バネを形成し微小信号計測に用いる技術は広く使われているが、光バネの不安定性や光量に対する硬度の限界など実用化に際して制限がついた。本研究では単共振器の内部に非線形光学結晶を導入し、光カー効果で光バネを硬化し、光熱効果で光バネを安定化する手法を確立した。光バネの利便性が大きく向上した。

2. 光検出核磁気共鳴観測において振動子冷却による観測帯域の拡張

概要: 電気機械光学結合を利用した核磁気共鳴観測では、観測帯域の狭さが課題であったが、制御により振動子を冷却することで観測帯域を拡張することができる。本研究ではドライブ電圧にフィードバックすることで冷却に成功した。冷却方法を改善することでさらなる感度向上も期待できる。

< 代表的な論文 >

1. Yusuke Tominaga, Kentaro Nagasaka, Koji Usami and Kazuyuki Takeda, "Studies on NMR-signal up-conversion from radio-frequency to optical regimes using a lightweight nanomembrane transducer", Journal of Magnetic Resonance, vol. 298, pp. 6-15 (2019)

概要: NMR 信号の光変換の効率を劇的に向上することに成功したもので、本研究における電気機械光学変換方式の核磁気共鳴観測実験の最初の論文である。

2. Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Catano-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Keiichi Edamatsu, "Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements," Phys. Rev. Lett. 122, 071101 (2019)

概要: 重力を介した相互作用を測定するのに十分な変位感度を持つ 7 mg の懸架鏡の開発に成功したもので、これにより重力の量子的な側面に迫ることができると期待され、本研究における巨視的量子力学検証研究にとって重要な論文である。

3. Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Ching Pin Ooi, Yuki Miyazaki, Nobuyuki Matsumoto, Vivishek Sudhir, Yuta Michimura, and Masaki Ando, "Atto-Nm Torque Sensing with a Macroscopic Optomechanical Torsion Pendulum," Phys. Rev. A 101, 011802(R) (2019)

概要: 光バネを用いた実験でミリグラムスケールで世界記録となるトルク感度を実現したことを発表した論文であり、本研究の巨視的量子力学検証における低損失機械振動子開発の代表的な論文である。

4. Seth B. Cataño-Lopez, Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, and Nobuyuki Matsumoto, "High-Q Milligram-Scale Monolithic Pendulum for Quantum-Limited Gravity Measurements" Phys. Rev. Lett. 124, 221102 (2020)

概要: ミリグラムスケールの鏡をモノリシックな振り子に懸架し、その Q 値が量子的な重力相互作用を検証するために要求される値を超えたことを示す論文で、本研究における巨視的量子力学検証研究にとって重要な論文である。

5. Ryosuke Nakashima, "Diamagnetic levitation of a milligram-scale silica using permanent magnets for the use in a macroscopic quantum measurement," Physics Letters A, 384, 126592 (2020)

概要: 磁場を集中させ磁場勾配を大きくすることで永久磁石を用いたコンパクトなシステムで 1mg の石英片を反磁性浮上させることができることを示した論文で、本研究の巨視的量子力学検証における重要な論文である。

6. Kentaro Komori, Takuya Kawasaki, Sotatsu Otabe, Yutaro Enomoto, Yuta Michimura, and Masaki Ando, "Improving force sensitivity by amplitude measurements of light reflected from a detuned optomechanical cavity," Phys. Rev. A, 104, L031501 (2021)

概要: 離調した光共振器においてレーザーの振幅雑音を狭帯域で減少させることに実験的に成功したことを示した論文で、光バネを用いて量子雑音を軽減するのと同じ原理を用いており、本研究で提案する光バネを用いた精密測定を部分的に実証した重要な論文である。

7. Yusuke Tominaga and Kazuyuki Takeda, "An electro-mechano-optical NMR probe for ^1H - ^{13}C double resonance in a superconducting magnet," Analyst, 147, 1847 (2022)

概要: ^{13}C 炭素原子の核磁気共鳴を電気機械光学方式で観測したことを示した論文。従来の手法で観測したものと比較し、観測帯域が狭いことが確認され、その解決策を提示している。本論文で示した、薄膜振動を冷却するおとで観測帯域を広げる手法については、このあとの実験で検証に成功している。

8. Takuya Kawasaki, Kentaro Komori, Hiroki Fujimoto, Yuta Michimura, and Masaki Ando, "Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring," Phys. Rev. A, 106, 013514 (2022)

概要: 光共振器における鏡のねじれモードが光バネによって変化することを実験的に示した論文で、g-factor を負にすることでレーザーの出力を上げても安定性を保つことができる。負の g-factor を実現するには光共振器の両端の鏡に曲率をつける必要があり、ミリグラムスケールの光学系では困難であったが、新たに製作した曲率つき軽量鏡で安定性問題を解決したものである。

9. Yusuke Tominaga, Atsushi Mikami, Akiya Iwamura, Koji Usami, and Kazuyuki Takeda, "Heating-free, room-temperature operation of a radiofrequency-to-light signal transducer with a membrane oscillator and a built-in metasurface mirror," Appl. Phys. Express, 15, 012003 (2022)

概要: 本研究で開発したフォトニック結晶薄膜を組み込んだ電気機械光学結合方式の核磁気共鳴観測装置で電気パルス信号を光学的に計測することに成功したことを示す論文である。

以前は薄膜に蒸着したアルミ電極を鏡として使用していたが、光学利得が低いことと熱吸収が高いことが課題となっていた。本実験ではアルミ電極とフォトニック結晶をそれぞれ対向する 2 か所に配置する 2x2 構造でこの問題を解決している。本研究にとって重要なマイルストーンとなった論文である。

10. Sotatsu Otabe, Kentaro Komori, Ken-ichi Harada, Kaido Suzuki, Yuta Michimura, and Kentaro Somiya, "Photothermal effect in macroscopic optomechanical systems with an intracavity nonlinear optical crystal," *Opt. Express.*, 30, 42579 (2022)

概要: 光共振器に非線形光学結晶を導入した際に生じる光熱効果で光バネの虚部が変化し、それを利用して光バネを安定化することができる。本論文では光バネの測定から光熱パラメータを高精度で推測する手法を開発した。このあと実施した、光カー効果による信号増幅実験において光熱効果の影響を除去するのに有効な手段であり、本研究にとって重要なマイルストーンとなった論文である。

11. M. Croquette, S. Deléglise, T. Kawasaki K. Komori, M. Kuribayashi, A. Lartaux-Vollard, N. Matsumoto, Y. Michimura, M. Andia, N. Aritomi, R. Braive, T. Briant, S. Briaudeau, S. B. Cataño-Lopez, S. Chua, J. Degallaix, M. Fujimoto, K. Gerashchenko, F. Glotin, P. Gruning, K. Harada, A. Heidmann, D. Hofman, P.-E. Jacquet, T. Jacqmin, O. Kozlova, N. Leroy, V. Lorient, F. Loubar, T. Martel, R. Metzдорff, A. Mikami, L. Najera, L. Neuhaus, S. Otabe, L. Pinard, K. Suzuki, H. Takahashi, K. Takeda, Y. Tominaga, A. van de Walle, N. Yamamoto, K. Somiya, and P.-F. Cohadon, "Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics," *AVS Quantum Sci.*, 5, 014403 (2023)

概要: 本研究ではさまざまな質量スケールで量子計測を実現することを目指しており、日本側ではねじれ振り子、モノシク振り子、光学浮上、反磁性浮上技術を開発し、フランス側ではマイクロピラーとフォノン結晶薄膜技術を開発した。本論文ではそれらの測定結果をまとめ、比較している。日仏共同で執筆した論文で、本研究にとって重要な論文である。

12. Kentaro Somiya, Kaido Suzuki, Sotatsu Otabe, and Ken-ichi Harada, "Intracavity signal amplification system for next-generation gravitational-wave detectors," *Phys. Rev. D* 107, 122005 (2023)

概要: パラメトリック増幅による光バネ硬化技術を重力波望遠鏡に導入した場合の量子雑音感度を詳細に解析した論文である。特に、干渉計内部の光学損失について、パラメトリック増幅で閾値を超えると真空場よりも雑音楕円の面積が大きくなる原理を説明している。その上で損失の影響を最小化する条件を示し、望遠鏡設計において重要な役割を担う論文となっている。

13. Sotatsu Otabe, Wataru Usukura, Kaido Suzuki, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Ken-ichi Harada, Kentaro Somiya, "Kerr-Enhanced Optical Spring," *Phys. Rev. Lett.* 132, 143602 (2024); accepted in Feb, printed in Apr 2024

概要: 光共振器に PPKTP 結晶を挿入し位相不整合状態で制御するとカスケード型の光カー効果が生じ、光バネを硬化させることが可能となる。その原理検証実験に世界で初めて成功したという内容を紹介した論文である。東工大と JST からプレスリリースを実施し、世界中から反響があった。論文は PRL の Editor's suggestion に選ばれ、Physics 誌にも feature 論文として掲載された。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

発足当初は、日本側は、東工大、東大、先端研、京大、東北大の 5 研究機関であったが、主たる共同研究者の異動に伴い、最終年度の体制は、東工大、京大、OIST、学習院大、東大の 5 研究機関となった。また、本研究は日仏共同提案となっており、フランス側はカスラーブロッセル研究所(代表: Antoine Heidmann 教授)と先端物質研究所の 2 か所となっている。

東工大: 全体総括・原理検証実験・量子計測実験(反磁性浮上実験)・重力波望遠鏡(光学実験)

東大(道村): 量子計測実験(ねじれ振子、光学浮上)・重力波望遠鏡(周波数依存スクイーズ)

先端研: 核磁気共鳴(フォトニック結晶(→京大へ)、光学系開発、ファイバ共振器(→OIST へ))

東北大・学習院大: 量子計測実験(モノリシック振子、制御理論)

京大: 核磁気共鳴(観測実験、フォトニック結晶(←先端研から))

阪大・OIST: 核磁気共鳴(ファイバ共振器(←先端研から))

東大(小森): 重力波望遠鏡(LSRC 実験)

LKB: 原理検証実験(マイクロ振動子開発)・量子計測実験(フォノン結晶薄膜)・重力波望遠鏡(周波数依存スクイーズ)・フォトニック結晶開発

LMA: 高品質光学素子開発

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・ 量子制御理論に関して、中部大学の小澤教授と議論をした。2022 年のシンポジウムで交流し、2023 年に中部大学を訪問、知見の共有を図ると共に、小澤氏の提案する測定法と現在提案されている手法の比較などを行った。

- ・ 信号増幅技術および高周波重力波望遠鏡開発に関して、オーストラリアグループと交流した。本研究の原理検証実験で実施した OPA を用いた光バネ硬化実験を UWA 大学でも実施している。我々と比較すると増幅率も低く測定結果の解析も雑なものであったが、直面した問題など共通する部分も多く、有意義な交流となった。また、ANU 大学では、重力波望遠鏡のための LSRC 効果の検証実験も実施しており、本研究で JAXA にて実施している検証実験と比較検討するなど、こちらも有意義な交流となった。2024 年度以降のさらなる交流を模索している。