

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)
日本－フランス共同研究
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「量子制御で切り拓くスマート社会のための精密測定」
2. 研究期間：令和4年2月～令和6年3月
3. 主な参加研究者名：
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	宗宮健太郎	准教授	東京工業大学	全体総括
研究参加者	原田健一	特任講師	東京工業大学	光バネ実験・磁場計開発
研究参加者	鈴木海堂	大学院生	東京工業大学	光バネ実験・デジタル制御・薄膜生成
研究参加者	臼倉航	大学院生	東京工業大学	光熱効果実験
研究参加者	竹口浩太郎	大学院生	東京工業大学	反磁性浮上実験
研究参加者	武田紗貴乃	大学院生	東京工業大学	熱雑音理論
研究期間中の全参加研究者数			6名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Antoine Heidmann	教授	Laboratoire Kastler Brossel	フランス側総括
研究参加者	Pierre-Francois Cohadon	准教授	Laboratoire Kastler Brossel	光バネ実験・薄膜実験
研究参加者	Tristan Briant	准教授	Laboratoire Kastler Brossel	光バネ実験
研究参加者	Samuel Déglise	准教授	Laboratoire Kastler Brossel	量子計測実験
研究参加者	Michael Croquette	大学院生	Laboratoire Kastler Brossel	光バネ実験
研究参加者	Pierre-Edouard Jacquet	大学院生	Laboratoire Kastler Brossel	光バネ実験
研究参加者	Emile Ferreux	大学院生	Laboratoire Kastler Brossel	光バネ実験
研究参加者	Himanshu Patange	大学院生	Laboratoire Kastler Brossel	薄膜実験
研究参加者	Jerome Degallaix	研究員	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique	成膜実験
研究参加者	Pierre Gruning	研究員	Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire	量子光学実験
研究期間中の全参加研究者数			10名	

4. 国際共同研究の概要

熱揺らぎの小さい良質な光バネを生成するために、軽量で機械損失の少ないフォノニック結晶薄膜を開発することが本研究の目的である。光バネはさまざまな微小信号計測実験で有用であり、我々は特に重力波望遠鏡の高感度化に利用することを提案している。それ以外にも磁気センサや慣性センサなど身の回りにあるさまざまなものに応用することで、スマート社会の実現に貢献できると考えている。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

フランスのカスラーブロッセル研究所は、フォノニック結晶開発および光バネの制御実験に実績がある。東工大の大学院生（鈴木氏）を2.5ヶ月派遣し、フォノニック結晶の生成方法を学び、帰国後に国内生産できるレベルまで技術を習得することを目指した。また、光バネの制御実験において RedPitaya というシングルボード計算機を用いたデジタル制御系は、東工大でも同じシステムを用いているので、互いの知見を交換し、制御技術を成熟させることも目標とした。

鈴木氏は2023年4月に渡航し、5月半ばの一週間はイタリアで開催された重力波望遠鏡の国際会議に出席し、さらに観測サイトを訪問して現地の研究者と交流するなどして研鑽を深めた。その後またフランスに戻り、6月末まで延べ2.5ヶ月の滞在をし、研究者として一回り成長して帰ってきた。フランス滞在中はカスラーブロッセル研究所の大学院生と有効な関係を構築し、研究だけでなく課外活動も積極的に行っていたようである。帰国後は後輩の面倒をよく見るようになり、干涉計実験においても私が指示する前に自ら計画して改良を実施するようになった。

帰国後もフランス側とやりとりをし、11月にはカスラーブロッセル研究所の研究者3名が来日、沖縄の OIST でワークショップをした後、東工大で共同実験をするなどして交流を深めた。また、東工大のナノ構造造形支援施設を利用してフォノニック結晶の自作に挑み、エッチング加工できるところまで開発を進めた。若手人材育成、国際交流、研究促進の全ての点において有用な共同研究であった。

5-2 国際共同研究による相乗効果

巨視的な量子力学の検証という観点において、東工大では反磁性浮上技術を開発してきた。反磁性浮上とフォノニック結晶薄膜を比べると、低機械損失であるという点は共通しているが、実効質量と共振周波数はそれぞれ何桁も異なる。反磁性浮上とフォノニック結晶を組み合わせた実験へと展開させることが可能となる。例えば、フォノニック結晶を非縮退型パラメトリック増幅フィルタとして用い、反磁性浮上させた試験質量の反跳雑音を広帯域で打ち消したり、逆に反磁性浮上を周波数依存型スクイーズ素子として用いてフォノニック結晶に対してシュレディンガーの猫状態を実現することもできるだろう。本研究における当初からの目標である、異なる質量の物体を対象にして巨視的量子力学を検証するという研究も詳細に実施することができるだろう。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

2024年2月から JST の ASPIRE プログラムに採択され、日豪の国際交流を促進することになった。フランスからオーストラリアに相手国が変わったが、このプログラムは ReNewMAP からの展開である。重力波望遠鏡の高周波の感度改善を実現するには、信号リサイクル干渉計に何かしらの量子制御を導入するのが有効である。光バネ、フォノニック結晶、遅延線、あるいはそれらを組み合わせたものを信号リサイクル共振器に導入する。その技術開発を行うのが ASPIRE 計画である。日仏の共同研究については、また来年度か

ら何か別のスキームで再開させたいと考えている。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
Japan – France Joint Research Program
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Development of Quantum Control for Precise Measurements to Realize Super-Smart Society」
2. Research period : Feb 2022 ~ Mar 2024
3. Main participants :
Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Kentaro Somiya	Associate Professor	Tokyo Institute of Technology	Project Integration Manager
Collaborator	Ken-ichi Harada	Lecturer	Tokyo Institute of Technology	Optical spring experiment, Magnetometer
Collaborator	Kaido Suzuki	PhD student	Tokyo Institute of Technology	Optical spring experiment, Digital control, Membrane fabrication
Collaborator	Wataru Usukura	Master student	Tokyo Institute of Technology	Photo-thermal effect experiment
Collaborator	Kotaro Takeguchi	Master student	Tokyo Institute of Technology	Diamagnetic levitation experiment
Collaborator	Sakino Takeda	Master student	Tokyo Institute of Technology	Thermal noise theory
Total number of participants throughout the research period: 6				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Antoine Heidmann	Professor	Laboratoire Kastler Brossel	French-side manager
Collaborator	Pierre-Francois Cohadon	Associate Professor	Laboratoire Kastler Brossel	Optical spring experiment, Membrane experiment
Collaborator	Tristan Briant	Associate Professor	Laboratoire Kastler Brossel	Optical spring experiment
Collaborator	Samuel Déglise	Associate Professor	Laboratoire Kastler Brossel	Quantum measurement
Collaborator	Michael Croquette	PhD student	Laboratoire Kastler Brossel	Optical spring experiment
Collaborator	Pierre-Edouard Jacquet	PhD student	Laboratoire Kastler Brossel	Optical spring experiment
Collaborator	Emile Ferreux	PhD student	Laboratoire Kastler Brossel	Optical spring experiment

Collaborator	Himanshu Patange	PhD student	Laboratoire Kastler Brossel	Membrane fabrication
Collaborator	Jerome Degallaix	Researcher	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique	Mirror coating
Collaborator	Pierre Gruning	Researcher	Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire	Squeezing experiment
Total number of participants throughout the research period:				10

4. Summary of the international joint research

The aim of this research is to develop a lightweight phononic crystal membrane with low mechanical loss to generate high-quality optical springs with minimal thermal fluctuation. Optical springs are useful in various high-precision measurements, and we specifically propose their application to enhance the sensitivity of gravitational wave telescopes. Additionally, we believe that by applying this technology to various devices around us, such as magnetic sensors and inertial sensors, we can contribute to the realization of a smart society.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

The LKB (Laboratoire Kastler Brossel) in France has a proven track record in the development of phononic crystals and the control experiments of optical springs. We aimed to dispatch a graduate student from Tokyo Tech (Mr. Suzuki) for 2.5 to 3 months to learn the methods of generating phononic crystals, with the goal of mastering the technology to the extent that it can be produced domestically upon his return. Additionally, in the optical spring control experiments, we aimed to mature the control technology by exchanging knowledge between both parties, as both LKB and Tokyo Institute of Technology use the same digital control system employing the single-board computer, RedPitaya.

Mr. Suzuki traveled to France in April 2023. During one week in mid-May, he attended an international conference on gravitational wave telescopes held in Italy, visited observation sites, and deepened his expertise by interacting with local researchers. He then returned to France, stayed for a total of 2.5 months until the end of June, and came back having grown significantly as a researcher. During his stay in France, he built effective relationships with graduate students at LKB, and he was actively involved in extracurricular activities as well as research. After returning to Japan, he started taking good care of his juniors and began planning and implementing improvements in the interferometer experiments proactively before I even gave instructions.

Even after returning to Japan, he continued to communicate with the French side. In November, three researchers from LKB visited Japan, conducted a workshop at OIST in Okinawa, and deepened their exchange through joint experiments at Tokyo Institute of Technology. Furthermore, he started producing phononic crystals using the Nano Fabrication Facility at Tokyo Tech and advanced the development to the point where etching processing was possible. This collaborative research proved to be valuable in terms of nurturing young talent, promoting international exchange, and advancing research.

5-2 Synergistic effects of the joint research

Aiming at a verification of macroscopic quantum mechanics, Tokyo Tech has developed diamagnetic levitation technology. Comparing diamagnetic levitation with phononic crystal thin films, they share the common feature of low mechanical loss, but their effective mass

and resonant frequencies differ significantly by several orders of magnitude. It becomes possible to expand experiments by combining diamagnetic levitation with phononic crystals. For instance, phononic crystals can be used as non-degenerate parametric amplification filters to cancel out the broadband back-action noise of the levitated test mass. Conversely, diamagnetic levitation can be used as a frequency-dependent squeezing element to achieve Schrödinger's cat-like states for phononic crystals. It would also be possible to meticulously conduct the initial research goal of verifying macroscopic quantum mechanics by targeting objects with different masses.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

We were selected for JST's ASPIRE program starting February 2024, which aims to promote international exchanges between Japan and Australia. Although the partner country has changed from France to Australia, this program is an extension of the ReNewMAP initiative. To achieve improvements in the high-frequency sensitivity of gravitational wave telescopes, it is effective to introduce some form of quantum control into the signal-recycling interferometer. This involves introducing optical springs, phononic crystals, delay lines, or combinations thereof into the signal-recycling resonator. The ASPIRE project aims to develop this technology. Regarding the French-Japanese collaboration, we also plan to resume it under a different scheme starting from the next fiscal year.

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

＊原著論文（相手側研究チームとの共著論文）発表件数：計 1 件

・査読有り：計 1 件

[1] 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. Lorette, F. Loubat, T. Martel, R. Metzdrorf, 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)

・査読無し：計 0 件

＊原著論文（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文）発表件数：計 2 件

・査読有り：計 1 件

[2] K.Somiya, K.Suzuki, S.Otabe, and K.Harada, "Intracavity signal amplification system for next-generation gravitational-wave detectors" Phys.Rev.D 107, 122005 (2023)

・査読無し：計 1 件

[3] Sotatsu Otabe, Wataru Usukura, Kaido Suzuki, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Ken-ichi Harada, Kentaro Somiya, "Kerr-Enhanced Optical Spring" arxiv:2310.18828
※ 2024 年 2 月にアクセプトされ、4 月に出版されました；Phys.Rev.Lett. 132, 143602 (2024)

＊その他の著作物（相手側研究チームとの共著総説、書籍など）発表件数：計 0 件

＊その他の著作物（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など）発表件数：計 0 件

2. 学会発表

＊口頭発表（相手側研究チームとの連名発表）発表件数：計 0 件（うち招待講演：0 件）

＊口頭発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）発表件数：計 6 件（うち招待講演：2 件）

＊ポスター発表（相手側研究チームとの連名発表）発表件数：計 0 件

＊ポスター発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）発表件数：計 2 件

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

[1] 5th QFilter workshop, 日本、沖縄、OIST, 2023/11/12-14

[2] 3rd Future Working Group Meeting, 日本、東京、国立天文台, 2023/12/7

4. 研究交流の実績（主要な実績）

【学生・研究者の派遣】

2023/4/19-6/28 鈴木海堂（東京工業大学・大学院生 M2），フランス・パリのカスラーブ
ロッセル研究所にて共同実験

2023/5/20-5/27 鈴木海堂（東京工業大学・大学院生 M2），イタリア・エルバ島のエルミ
タージュホテルにて国際学会出席、講演

2023/5/29-5/31 鈴木海堂（東京工業大学・大学院生 M2），イタリア・ピサの Virgo 重力
波望遠鏡施設を見学

2023/5/20-5/29 宗宮健太郎（東京工業大学・准教授），イタリア・エルバ島のエルミター
ージュホテルにて国際学会出席、講演

【学生・研究者の受け入れ】

2023/3/1-3/2 COHADON, Pierre-Francois（LKB・准教授），日本・東京・東京工業大
学にて打ち合わせ

2023/11/11-11/15 COHADON, Pierre-Francois（LKB・准教授），日本・沖縄・OIST にてワ
ークショップ

2023/11/11-11/18 DEGALLAIX, Jerome（LMA・研究員），日本・沖縄・OIST にてワークシ
ョップ，東京・東京工業大学および国立天文台にて打ち合わせ

2023/11/11-11/15 FERREUX, Emile（LKB・大学院生），日本・沖縄・OIST にてワークシ
ョップ

2023/11/11-11/15 JACQUET, Pierre-Edouard（LKB・大学院生），日本・沖縄・OIST にて
ワークショップ

2023/11/17 JACQUET, Pierre-Edouard（LKB・大学院生），日本・東京・東京工業大
学にて共同実験

2023/11/29 FERREUX, Emile（LKB・大学院生），日本・東京・東京工業大学にて共
同実験

5. 特許出願

研究期間累積出願件数：0 件

6. 受賞・新聞報道等

2024/4/5 東京工業大学・JST 共同プレスリリース，「量子光学で光バネの硬化に成功」
※プレスリリースの日付は 2024 年度になりましたが論文自体は 2023 年度にアクセプトさ
れました。

7. その他

特になし