

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)  
日本－米国共同研究  
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「冷却原子分子の先端量子制御をリードする次世代研究者の国際共同研究」
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	増田孝彦	特任准教授	岡山大学	計画立案、実験
研究参加者	平本綾美	学術振興会 特別研究員 PD	岡山大学	渡航する研究者
研究期間中の全参加研究者数			2名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Gerald Gabrielse	Professor	Northwestern University	ThO実験
主たる 共同研究者	Nicholas R. Hutzler	Assistant Professor	California Institute of Technology	YbOH実験
研究期間中の全参加研究者数			2名	

#### 4. 国際共同研究の概要

近年、特に北米では冷却原子分子の量子制御を活用した各種精密計測が急速に発展している。特に基礎物理分野では時間反転対称性を破るパラメータである電気双極子能率の測定や、空間反転対称性を破るアナポールモーメントの測定、冷却原子干渉計による微細構造定数の精密測定など精力的に進められている。

本研究の目的は冷却原子分子の量子制御技術の開発・応用を進めている海外研究室に渡航する研究者と研究代表者を派遣し、その技術習得や将来の共同研究の可能性を議論することである。最先端技術を有する米国の複数の研究室を訪問することで、冷却原子分子の量子制御を基礎物理に応用した実験的研究を、我が国でも促進することが期待できる。

研究代表者と渡航する研究者がカリフォルニア工科大学に 1 週間滞在し、YbOH 三原子分子の冷却実験に立ち会い、装置組み立てなどを共同で行なった。ノースウェスタン大学では ThO 分子のビーム初観測を実施し、その基礎特性評価を開始することができた。国内では ThO 分子の量子制御に関するシミュレーションを実施し、特に電子の電気双極子能率探索で重要となるレーザーとの相互作用によるスピン状態の過渡応答を計算した。

#### 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

研究代表者と渡航する研究者がカリフォルニア工科大学に 1 週間滞在し、YbOH 三原子分子の冷却実験に立ち会い、装置組み立てなどを共同で行なった。設計の重要な部分や試行錯誤の詳細を直接現物を見ながら教えていただき、同様の研究を行う際の貴重なノウハウを入手することができた。

ノースウェスタン大学ではレーザーや電磁場を用いた冷却分子の量子制御のさまざまなノウハウを蓄積しつつ、電子の電気双極子能率測定に用いる ThO 分子のビーム初観測を実

施し、その基礎特性評価を開始することができた。特に重要な装置開発動機であった検出光子数レートを実測し、ほぼ設計通り 5 年前の 25 倍の検出レートを達成できていることを実証し、重要なマイルストーンとなった。

同時に国内で ThO 分子の量子制御に関するシミュレーションを実装した。特に電子の電気双極子能率探索で重要となるレーザーとの相互作用によるスピン状態の過渡応答を計算した。レーザーの偏光の楕円率が空間的に変動し、かつシュタルクシフトが存在する場合に、ある特定のレーザー強度、つまりラビ振動数の時にスピンの回転が示された。

## 5-2 国際共同研究による相乗効果

冷却分子の基礎科学研究の最先端を研究代表者と渡航する研究者が実地で経験しつつ、国内で進めている研究の紹介などを通じて、国際交流がはかれた。渡航した研究者は 2024 年 4 月より相手側 PI の元で海外特別研究員として着任しており、今後の継続的な共同研究活動もできるようになった。またカリフォルニア工科大学訪問で新たに知り合った研究者を 2024 年 3 月に岡山大学で開催した国際ワークショップに招聘し、新たな関係構築の発展にもつながった。

## 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

冷却分子の量子制御は回転や振動など冷却原子にはない内部量子状態の多彩さがあり、冷却原子の次の新たな量子系として注目を集めている。具体的には量子シミュレーションや量子コンピュータとしての更なる応用から、超低温衝突、量子化学、生体分子のキラリティ、超精密基礎物理計測など、広範な分野にまたがる幅広い応用が期待されている。

現状では国内で実験的な研究を行っている研究者は欧米に比べて極めて少ないが、本課題のような取り組みを継続して国際的なネットワークを構築し、若手研究者が活躍する機会を増やすことができれば、国内でも大きく研究が進展すると期待できる。

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

1. Project title : 「International Collaboration of Next-Generation Researchers leading Advanced Quantum Control of Cold Atoms and Molecules」
2. Research period : February 2022 ~ March 2024
3. Main participants :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Takahiko Masuda	Project associate professor	Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University	Planning, Experiment
Collaborator	Ayami Hiramoto	JSPS PD	Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University	Visiting researcher
Total number of participants throughout the research period: 2				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Gerald Gabrielse	Board of Trustees Professor	Center for Fundamental Physics, Northwestern University	ThO experiment
Co-PI	Nicholas R. Hutzler	Assistant Professor	The Division of Physics, California Institute of Technology	YbOH experiment
Total number of participants throughout the research period: 2				

4. Summary of the international joint research

In recent years, especially in North America, various precision measurements utilizing quantum control of cold atoms and molecules have been developed rapidly. In particular, in the field of fundamental physics, the measurement of electric dipole moment which is a parameter that breaks time-reversal symmetry, the measurement of anapole moments which breaks space-reversal symmetry, and the precision measurement of the fine structure constant using atom interferometry are being vigorously pursued.

This project aims to let young researchers visit laboratories in the USA that are researching and applying quantum control of cold atoms and molecules and to discuss possible future collaborative research. By visiting several US laboratories who have state-of-the-art techniques, experimental research on the quantum control of cold atoms and molecules to fundamental physics is expected to be promoted in Japan.

The principal investigator and a visiting researcher spent a week at the California Institute of Technology, witnessing the experiment of YbOH triatomic molecules. We took part in the construction of the experimental apparatus. At Northwestern University, the first beam observation of ThO molecules was carried out and the basic characterization of the beam

has been started.

The Japanese team also carried out simulations on quantum control of the ThO molecules and calculated the transient response of the spin state due to the interaction with the laser, which is particularly important in the search for the electric dipole moment of electrons.

## 5. Outcomes of the international joint research

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

The principal investigator and a visiting researcher stayed at California Institute of Technology for a week to witness the cold YbOH triatomic molecule experiment and to take part in the construction of the apparatus. We learned important points of the design and details of the development process while participating the actual experiment, and have obtained valuable know-how for conducting similar researches.

At Northwestern University, while accumulating various know-hows on quantum control of cold molecules using lasers and electromagnetic fields, we did make the first beam of ThO molecular beam for the measurement of the electric dipole moment of electrons, and to start basic characterization of the properties. The actual measurements of the photon detection rate, which is an important point of development, demonstrated that the factor of 25 times higher detection rate than that of five years ago as designed. That is an important milestone of the project.

Besides that, the Japanese team has implemented numerical simulations on the quantum state of a ThO molecule. In particular, we calculated the transient response of the spin state due to the interaction with an imperfect laser, which is important in the search for the electric dipole moment of electrons. It was shown that the spin rotates at a certain laser intensity, i.e., at a certain Rabi oscillation frequency, when the ellipticity of the laser polarization spatially deviates and there is a Stark shift due to a non-negligible electric field.

### 5-2 Synergistic effects of the joint research

The PI and the visiting researcher have experienced the state-of-the-art of fundamental science research on cold molecules. Also, international exchange was promoted through the introduction of research being conducted in Japan. The visiting researcher has been appointed as a Postdoctoral fellow under the PI in Northwestern University from April 2024, which will accelerate the collaborative research activities. In addition, a researcher who newly met during the visit to CalTech attended an international workshop held at Okayama University in March 2024, leading to the development of a new research connection.

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

Quantum control of cold molecules, which has a variety of internal quantum states such as rotation and vibration, is attracting attention as the next new quantum system successive to the cold atoms. Specifically, it is expected to have a wide range of applications across a broad spectrum of fields, from further applications such as quantum simulations and quantum computers to ultralow temperature collisions, quantum chemistry, the chirality of biomolecules, and high-precision fundamental physics measurements.

Currently, there are a limited number of researchers conducting experimental research in Japan compared to those in Europe and the US. Efforts such as this project can be continued to build an international network to play an active role, and we can expect significant research progress in Japan.

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 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 0 件

\* 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 1 件

1. 増田孝彦、平本綾美、笹尾登、植竹智、吉村浩司、Daniel G. Ang, John M. Doyle, Zack Lasner, Cole Meisenhelder, David P. DeMille, Zhen Han, Peiran Hu, Xing Wu, Collin Diver, Xing Fan, Gerald Gabrielse, Siyuan Liu, Maya Watt, Nicholas R. Hutzler, Cristian Panda, ThO ビームを用いた電子の永久電気双極子能率とそれに用いる光検出モジュール, 日本電気学会電子回路研究会、ECT-23-053、2023

\* 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 6 件（うち招待講演：3 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 3 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 0 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. The 15th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2024)、主催者：Y. Ichikawa（九州大、准教授）、M. Tanaka（大阪大、助教）、K. Sugiyama（京都大、准教授）、Y. Takasu（京都大、准教授）、H. Shimizu（名古屋大、教授）、M. Kitaguchi（名古屋大、准教授）、K. Shimomura（高エネ研、教授）、T. Mibe（高エネ研、教授）、Y. Sakemi（東京大、教授）、A. Ishida（東京大、助教）、T. Masuda（岡山大、准教授）、A. Yoshimi（岡山大、准教授）、N. Sasao（岡山大、教授）、K. Yoshimura（岡山大、教授）、岡山大学津島キャンパス、岡山、日本、2024 年 3 月 14 日～15 日、参加人数 90 名程（うち現地参加者 50 人程）

**4. 研究交流の実績（主要な実績）**

【定例ミーティング】

- ・両国のチームメンバーを交えて zoom ミーティングを週 1 回開催した。

【研究者の派遣、受入】

- ・2023 年 7 月～8 月：日本から研究者 2 名が、合計 79 日相手研究機関に滞在し、最先端の冷却分子の量子制御技術を取得した。
- ・2024 年 3 月：カリフォルニア工科大学の若手研究者を 2 日間岡山大学に受け入れた。

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

なし

7. その他

なし