

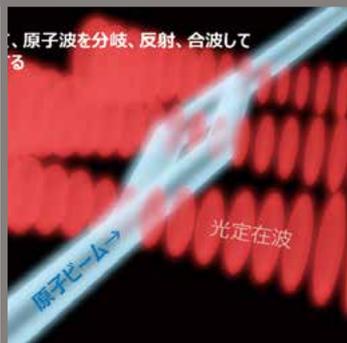
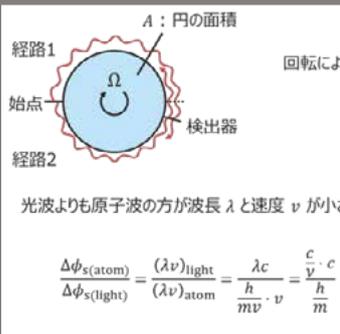


## 大規模プロジェクト型

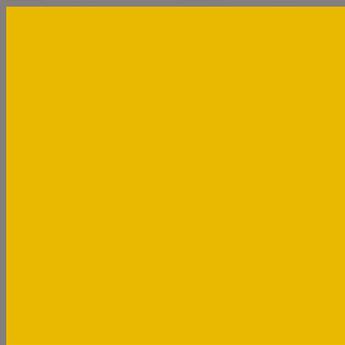
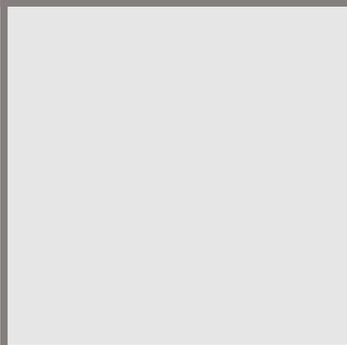
自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術

新たな時代をひらく  
高精度量子ジャイロ

自己位置  
推定機器



高精度化  
小型化



研究開発代表者  
上妻 幹旺  
東京科学大学  
総合研究院  
量子航法研究  
センター長／教授

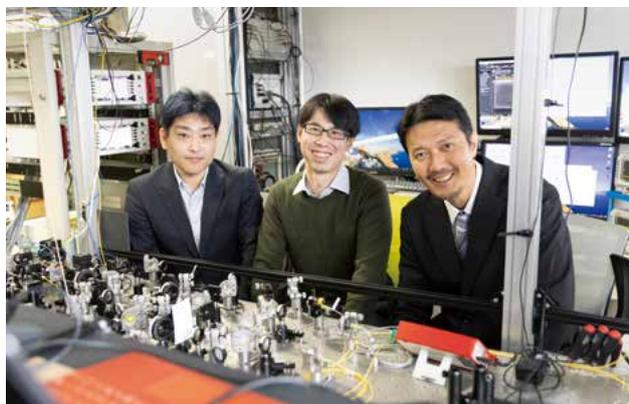
## CONTENTS

01  
未来社会創造事業とは

03  
プロジェクト概要

05  
研究開発成果の紹介

09  
今後の展望



未	来	社	会
創	造	事	業
と	は		

研究開発を実施します。その研究開発において、斬新なアイデアの取り込み、事業化へのジャンプアップ等を柔軟かつ迅速に実施可能とするような研究開発運営を採用します。

未来社会創造事業では、社会・産業ニーズ(潜在的なニーズを含む)を踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット(出口)を明確に見据えた技術的にチャレンジングな目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化が可能かどうか見極められる段階(概念実証/POC:Proof of Concept)を目指した

本事業は異なる2つのアプローチ「探索加速型」と「大規模プロジェクト型」で構成されます。

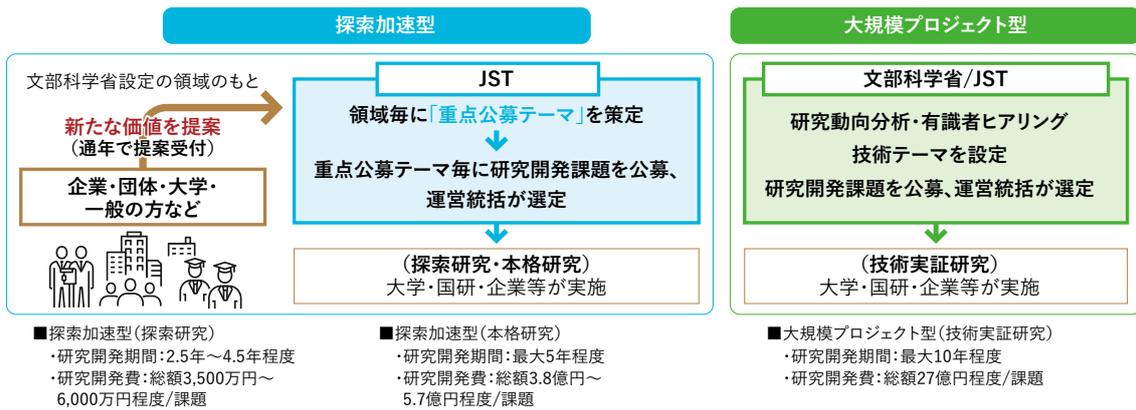
### 【探索加速型】

比較的少額の課題を多数採択(スモールスタート)する探索研究から、それらの課題を絞り込み、集中投資する本格研究へと段階的に研究開発を進めます。探索研究では、多くの斬新なアイデアを公募して取り入れ、本格研究に向けてアイデアの実現可能性を見極めるための研究開発を行います。探索研究から本格研究への移行時や、本格研究実施期間中において、ステージゲート評価を実施し研究開発課題を絞り込むことで、最適な研究開発課題を編成します。

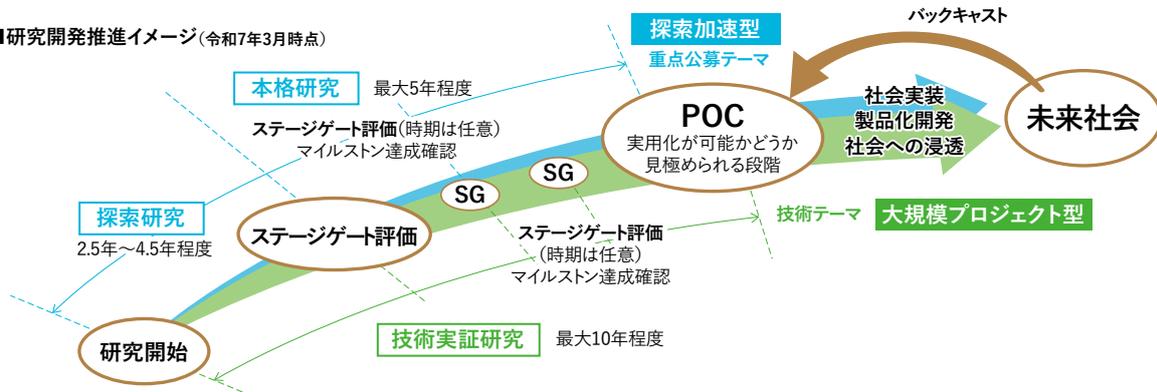
### 【大規模プロジェクト型】

科学技術イノベーションに関する情報を収集・分析し、現在の技術体系を変え、将来の基盤技術となるよう文部科学省が特定した「技術テーマ」に係る研究開発課題を公募し、集中的に投資します。

■事業概要図(令和7年3月時点)



■研究開発推進イメージ(令和7年3月時点)



## 大規模プロジェクト型

大規模プロジェクト型では、現在の技術体系を変え、将来の基盤技術となるよう文部科学省が特定した「技術テーマ」に係る研究開発課題に対して集中的に投資を行います。

### 技術テーマ

## 自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術

自己位置推定は、物・人の測位、機器等の自動化・自律化に適用され、例えば全球測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)による航空機のオートパイロットや、携帯型移動端末等による周辺情報発信といった各種サービスなど、その活用が急激に広がり、社会の身近な分野で役立っています。GNSSは衛星からの電波受信が必須であり、地下や屋内、海中といった電波の届かない遮蔽空間や電波の届きにくい状況では、移動体

の角速度等を高精度に計測してどの位置でどの方向に進んでいるかを推定する慣性センサー装置で代替・補完等活用することが有効です。また、精度の高い慣性センサーの創出は人工衛星やロボット等の姿勢制御など応用範囲が広いことが特徴です。近年、自己位置推定機器の革新的な高精度化および小型化につながる量子効果を用いた慣性センサーの研究が進展しており、将来的に高精度な慣性センサーを実現する一手法として期待されています。

# 新たな時代をひらく 高精度量子ジャイロ

東京科学大学の研究グループが、原子を操り、回転を測り、従来のジャイロスコープを超える精度を実現。小型化への先鞭をつけることで、量子ジャイロスコープを用いた高性能慣性航法装置の実現に向けて大きく前進した。この技術は、高精度な位置情報が求められる海底資源探査や宇宙探査などへの活用や、われわれの身近な生活を支える自動運転、カーボンニュートラルなどへの貢献が期待される。

## 上妻 幹旺 Mikio KOZUMA

### Profile

東京科学大学 総合研究院 量子航法研究センター長／教授  
2017年より未来社会創造事業プログラムマネージャー



### 背景

衛星を用いた測位、すなわち全地球測位システム(GPS: Global Positioning System)航法が登場したことで、地上交通システムの運航から地球物理学研究に至るまで、様々な分野に革命がもたらされた。と同時に、衛星からの電波が届かない地中や海中においても精密な位置推定が可能になると、どのような利益がもたらされるのかも明らかになってきた。さらに皮肉なことではあるが、地表付近の交通システムである船舶

や航空機までがGPSに依存するようになったことから、電波妨害や悪意のある攻撃者によって運行上の安全が脅かされる可能性が指摘されるようになってきた。一方で、GPSに依存せず自己位置を推定する慣性航法は、位置精度が回転の速さ(角速度)を計測するジャイロスコープの性能によって律速されており、GPSの位置精度には遠く及ばないのが実情だ。



### 実現したい未来社会

慣性航法における精度向上の鍵を握るジャイロスコープの性能を向上させることで、「自動運転車の多重安全性確保」、「海洋資源探査の効率化」、「無人機による海底インフラの点検」、さらには「慣性航法装置とGPSとを用いたジオイド(等重力ポテンシャル面)の変動測定による大規模地震や水害のリスク評価」など、様々な分野への貢献を目指す。また開発したジャイロスコープを振動や加速を伴う多様な実使用環境下でも機能す

るセンサーとして実装し、さらに小型化技術を醸成することで、様々な乗り物への搭載を可能にする。ジャイロスコープの性能が桁で向上すると、重力が働く方向のブレが慣性航法の精度に与える影響が無視できなくなるが、この影響を補正する重力勾配計の開発も並行して実施することで、究極の超精密慣性航法装置の実現に寄与する。

高精度な位置推定	自律走行車やドローンなど、高精度な位置情報が必要な分野において、より正確な位置推定が可能に	
小型化	小型軽量のセンサーの開発が可能になり、様々な乗り物への搭載が容易に	
新たな産業の創出	高精度なセンサー開発は、新たな産業の創出につながる可能性も	
応用	自律型無人潜水艇(AUV)	海洋資源探査においてGPSが届かない海底での正確な位置を把握 海底インフラの監視、点検
	宇宙探査	人工衛星の姿勢制御や、惑星探査機の高精度な航法に利用
	無人海上輸送	無人運転船でより安全な海上輸送



## 研究概要

量子力学は、原子が粒ではなく波として振る舞うことを教えてくれる。原子の波を干渉させることで高性能のジャイロスコープを実現するため、中性原子とイオンの2つを対象として検証を進めた。中性原子を用いた研究については、自律型無人潜水艇(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)への搭載に必要な仕様を満たすことに成功し、小型化への

先鞭もつけ、ノートパソコン程度のサイズに収まる装置の開発の可能性が見え始めている。イオンを対象とした研究では、冷却・トラップされた単一イオンを対象としたジャイロ動作に世界で初めて成功した。重力勾配計については、航法誤差をもたらすレベルの重力勾配を検知可能な装置の開発に成功した。

## 研究開発体制

代表研究グループ  
東京科学大 上妻研究室  
原子ビーム型ジャイロ  
上妻 幹旺 (教授・PM)  
佐藤 智哉 (特任准教授・PI)



共同研究グループ  
東京科学大 向山研究室  
イオントラップ型ジャイロ  
向山 敬 (教授・PI)  
齋藤 了一 (助教)



共同研究グループ  
日本航空電子工業  
重力勾配計  
吉良 敦史  
(技術シニアマネージャー・PI)



**POC1:** 原子ビームジャイロを利用した慣性航法装置の実証

- ① アルカリ原子ジャイロの試作
- ② アルカリ土類様原子ジャイロの試作

**POC2:** イオントラップジャイロを利用した慣性航法装置の実証

- ③ イオントラップジャイロの原理実証



研	究	Introduction of research and development results	
開	発	成	果
の	紹	介	



上妻 幹旺  
Mikio KOZUMA

東京科学大学  
総合研究院  
量子航法研究センター長／教授

2017年より未来社会創造事業プログラムマネージャー

## 量子の性質を用いた高感度センサー

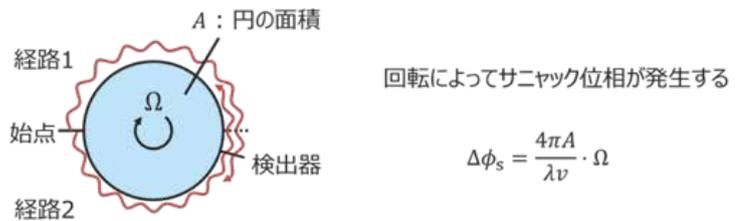
本プロジェクトは、従来の光のかわりに原子やイオンを用いることで高精度のジャイロスコープを開発し、従来よりも遥かに高精度で小型な慣性航法装置を実現することを目指している。ジャイロスコープとは、物体の回転速度(角速度)を検出するセンサーのことで、われわれの身近なところでは、スマートフォンにも搭載され、画面の向きを感知し、ゲームのコントローラーとしても使われている。

原子・イオン・素粒子といったミクロな世界の動きを記述する物理学の理論を量子力学とよぶ。量子力学の世界では、粒子が波としての性質を持ち、また波が粒子としての性質を持つなど、われわれの直感とは異なる不思議な現象が起こる。原子やイオンを古典的な粒ではなく量子力学的な波として利用することで、非常に高感度なセンサーを実現できるという。

## GPSに頼らない高精度な自己位置推定技術

東京科学大学総合研究院量子航法研究センター長である上妻幹旺教授率いる研究グループは、GPSに頼らず、より高精度な自己位置推定を実現するため、「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」という革新的な研究を進めている。現在、最高性能のジャイロスコープはレーザー光の干渉を利用しているが、本プロジェクトでは原子やイオンという極めて小さな粒子が波として干渉する性質に注目している。原子やイオンの物質波は、光に比べて波長も速度も桁で小さいため、角速度計測の精度が上がるという。本プロジェクトの最終目標は、自動運転車の安全性向上、海洋資源探査の効率化、自動運船の安全性確保など、GPSに依存しない高精度な自己位置推定技術の実現だ。

現時点では基礎的な段階にあるものの、すでにいくつかの成果を収めている。中性原子を用いたジャイロスコープでは、AUVへの搭載に必要な仕様を全て満たすことに世界で初めて成功し、資源の乏しい日本で海洋資源探査の効率化に貢献できる可能性を示した。また冷却された単一イオンを用いたイオントラップ方式についても、世界で初めてジャイロ動作を確認するという快挙を成し遂げた。



光波よりも原子波の方が波長  $\lambda$  と速度  $v$  が小さいため**圧倒的に有利**

$$\frac{\Delta\phi_{s(\text{atom})}}{\Delta\phi_{s(\text{light})}} = \frac{(\lambda v)_{\text{light}}}{(\lambda v)_{\text{atom}}} = \frac{\lambda c}{\frac{h}{mv} \cdot v} = \frac{c}{\frac{v}{h} \cdot c} = \frac{mc^2}{hv} \sim 10^{10}$$

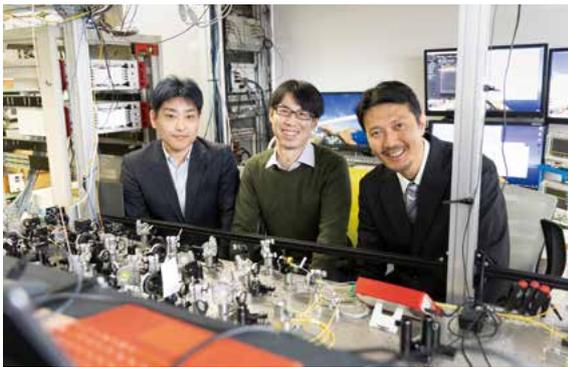
↑ 原子の静止エネルギー  
↓ 光子のエネルギー

## GPSの利点と課題

GPSは、人工衛星が発する電波をキャッチすることで、自分がどこにいるかを正確に把握するシステムだ。数メートルの精度で位置が分かり、電波の位相まで検知すればセンチメートルレベルまで細かく測ることも可能だ。しかし海中、地中、建物内では電波が遮断され自己位置推定が破綻し、樹木の近くや高層ビル街では、電波の多重反射により大きな誤差が発生するといった課題もある。

セキュリティ面では、妨害電波によって測位を不能にする「ジャミング」と呼ばれる攻撃が課題となっている。悪意を持った第三者が信号を偽装し、位置情報を操作する「スプーフィング」と呼ばれる攻撃もある。これは受信機に対して偽の信号を送信し、誤った位置情報を表示させる攻撃手法で、受信機を「だます」行為だ。

こうした観点から、GPSに頼らない非GPS航法の研究が世界中で行われている。非GPS航法の中でも最も重要な手法が、加速度計とジャイロ스코ープを用いる慣性航法だ。

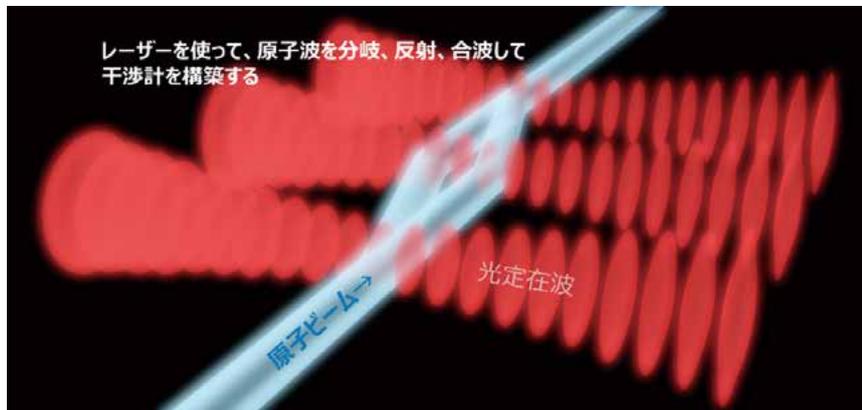


## 乗り物にのせても機能する量子ジャイロを実現

加速度計は物体の加速度を、ジャイロ스코ープは角速度（回転の速さ）を測るセンサーだ。両者の情報を組み合わせて自身の位置を推定し、目的地へ移動する方法が慣性航法である。慣性航法の最大の特徴は、外部からの信号に頼らないことだ。GPSのように衛星からの電波を受信する必要がないため、宇宙空間や海底、地下、建物内など、GPSが使えない環境でも利用できる。

一方、慣性航法装置は、物体の動きを感知するセンサーを組み合わせる自らの位置や姿勢を推定する装置であり、初期値からの変位を積分して位置を推定するため、長時間の航行では大きな誤差が発生するという問題をもつ。欧米、中国は慣性航法技術の重要性を認識し、国を挙げて研究開発を進めてきた。一方、日本では非GPS技術である慣性航法技術の重要性が、つい最近まで認識されておらず、そのため他国との間に大きな技術格差が生まれていた。

上妻教授は、国内で最も性能が高い慣性航法装置を大幅に上回る装置のプロトタイプを開発し、実証実験を進めている。原子時計が古典的な時計（振動子）とセットとなって動くように、量子ジャイロも古典的なジャイロとセットとなって機能すると考えた上妻教授は、量子だけでなく、古典技術についても研究を進め、現時点で世界最高性能を実現している。さらに従来は実験室でしか機能しなかった量子ジャイロを乗り物の中でも動作させる新原理を発見し、実際にその原理に基づく全く新しい量子ジャイロの実験デモンストラーションに世界で初めて成功した。





佐藤 智哉  
Tomoya  
SATO

東京科学大学  
科学技術創成研究院  
特任准教授

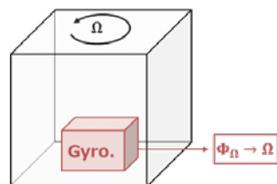
2017年より未来社会創造  
事業共同開発研究者

上妻研究室で現場の指揮やアイデアの提案を行ってきたのが東京科学大学科学技術創成研究院の佐藤智哉特任准教授である。佐藤特任准教授は、「乗り物にのせられる現場で使える量子ジャイロ」を実現するため、数多くの革新的な発明を行ってきた。アイデアの提案、理論計算、シミュレーション、実験というプロセスを何度も繰り返してきた研究者だ。佐藤特任准教授は、量子技術ではなく光ファイバージャイロなどの古典技術で用いられている、「クローズドループ方式」を、量子ジャイロを制御する新たな手法として提案した。この方式は、佐藤特任准教授がこれまで開発してきた複雑な量子ジャイロを一気にシンプルなものにし、かつ現場での使用に耐えるものにする革新的なものであった。

佐藤特任准教授はクローズドループ方式を用いた量子ジャイロを実際に構築し、従来の量子ジャイロでは到底実現できなかった高いダイナミックレンジと感度とを同時に実現することに成功した。従来の量子ジャイロでは振動や傾きがある環境下での測定が不可能であったが、この問題を見事に解決し、シンプルであるがゆえに小型化につながる新方式を確立した。

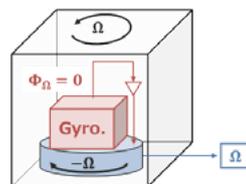
現在、中性原子を利用したジャイロスコープの小型化を進めており、AUVや人工衛星など、高精度な姿勢制御が求められる分野への応用を目指している。既にノートパソコン程度のサイズに収まる装置の開発の可能性が見え始めているとのことである。

オープンループ測定



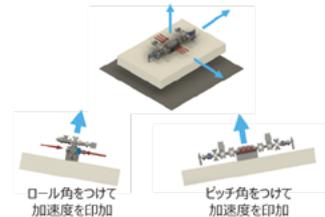
回転座標系に乗っている  
→原子の速度分布に起因して  
コントラストが低下  
=ダイナミックレンジが制限される

クローズドループ測定



実効的に静止系に乗っている  
→回転による位相シフト  $\Phi_{\Omega}$  が生じないので  
コントラストが維持される  
=ダイナミックレンジが拡張される

3軸モーションシミュレーター上に量子ジャイロ



世界で初めて乗り物に載せられる  
量子ジャイロの原理を発明し、実験実証に成功

主な論文

- Tomoya Sato, Naoki Nishimura, Naoki Kaku, Sotatsu Otabe, Takuya Kawasaki, Toshiyuki Hosoya and Mikio Kozuma, Closed-loop measurement in atom interferometer gyroscope with velocity-dependent phase dispersion compensation, Physical Review Applied, in press (2025). [arXiv:2407.05696]
- R. Saito and T. Mukaiyama, Sensing Aharonov-Bohm phase using a multiply-orbiting-ion interferometer, Phys. Rev. Lett. 133, 143402, 2024/10, doi: 10.1103/PhysRevLett.133.143402
- Toshiyuki Hosoya, Ryotaro Inoue, Tomoya Sato and Mikio Kozuma, High-Flux Cold Ytterbium Atomic Beam Source Using Two-dimensional Laser Cooling with Intercombination Transition, Optics Communications 528, 129048, 2023/02, doi: 10.1016/j.optcom.2022.129048

主な特許

- 田中敦史、細谷俊之、井上遼太郎、上妻幹旺「ジノイド測定方法、ジノイド測定装置、ジノイド推定装置、ジノイド計算用データ収集装置」特許第6600778号
- 神納祐一郎、田中敦史、吉岡和範、森元誠一、田中歌子、向山敬、井上遼太郎、上妻幹旺「ジャイロ、角度計測方法」特許第6860155号
- 田中敦史、細谷俊之、上妻幹旺、西村尚輝、川崎拓也、佐藤智哉「慣性センサ」特開2025-022116

## イオンを使った量子ジャイロの開発に成功



向山 敬  
Takashi  
MUKAIYAMA

東京科学大学  
理学院  
教授

2017年より未来社会創造  
事業共同開発研究者

東京科学大学理学院の向山敬教授は、冷却イオンを用いた量子ジャイロを世界で初めて実現した研究者だ。従来のジャイロスコープとは異なり、イオンをレーザーで冷却し、量子力学的な重ね合わせを作り干渉させることで、高精度な角速度計測を実現する。イオントラップ技術を用いることで量子ジャイロが実現できるとする理論提案は存在していたが、イオンの回転運動を精密に制御することが難しく、これまで世界中の誰も実現できていなかった。イオントラップ自体は、原子時計や量子計算などに古くから応用されているため、素性が十分にわかっていると思われていたが、実際には「トラップ中でイオンを回転運動させる実験例」は存在せず、これまで誰も実現したことのない新しい技術の開発が必須であることが判明した。向山教授は Model Based Systems Engineering (MBSE) を駆使してイオンの軌道を安定化させる手法を開発し、見事、イオントラップによる量子ジャイロ動作を世界で初めて実現した。

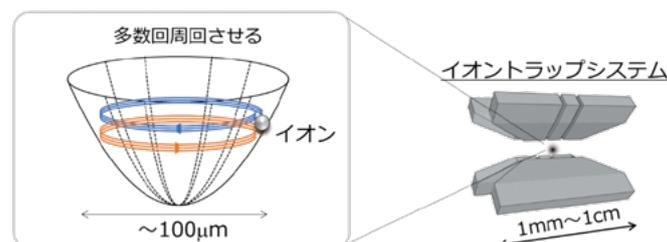
向山教授の研究は、1個の冷却イオンに注目し、その量子的な性質を利用して回転を検出する革新的な量子ジャイロだ。高精度、小型化といった点で大きなメリットがあり、今後に期待が持てる。まず電場を用いてイオンを真空中に固定する。次にレーザー光を照射してイオンを極低温に冷却し、マイクロ波を照射することでスピンの同時に上向きでも下向きでもある量子力学的な重ね合わせを作る。パルスレーザーを照射することでスピンの向きに依存した運動量を与え、スピンの重ね合わせ状態から、イオンが時計回り

に回転する状態と反時計回りに回転する状態の重ね合わせに移行する。複数回、イオンを回転させた後で、これら時計回りと反時計回りの状態を干渉させ、位相のずれを検出することで角速度を精密に計測する。この方式のメリットは、中性原子ビーム方式に比べ加速度の影響を受けないことや、イオンを1か所に閉じ込めているため小型化が期待できることだ。

## AUVの位置推定精度に期待

日本航空電子工業株式会社は、高精度なサーボ型加速度計、リングレーザージャイロスコープなどの慣性センサー、慣性航法装置の開発、製造販売を手がけている。本プロジェクトでは、開発された冷却原子やイオンを用いた量子ジャイロスコープを次世代の慣性航法装置として構築し、実際にAUVなどへの搭載を見据え共同研究を進めている。

また、同社は本プロジェクトにて重力勾配計の開発を担当した。慣性航法では正確な位置を把握するため加速度と角速度の測定が必須だが、精度が高くなると重力加速度の変化を正確に把握する必要が生じてくる。重力加速度は周囲の物体の質量分布によってその方向がわずかに変化するため、高精度な位置推定には、いわゆる重力勾配を測定するセンサーが必要不可欠だ。本プロジェクトで開発した高精度の重力勾配計は、慣性航法装置の位置推定精度を大幅に向上させると期待される。



# 今 後 の 展 望

## 宇宙から防災まで幅広い応用に期待

原子・イオンを用いた高性能ジャイロ스코ープは、その極めて高い精度と小型化の可能性とから、宇宙探査、海洋探査、航空、自動車、さらにはカーボンニュートラル実現など、幅広い分野での応用が期待される。宇宙分野においては、人工衛星の姿勢制御、惑星探査機や深宇宙探査機の航法に活用することで、高精度な天体観測・地球観測や長距離航行を可能にする。海洋探査では、AUVによる海洋インフラ施設の海底保守点検などへの貢献が期待される。

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みにおいても、CCS(CO<sub>2</sub>貯留)や洋上風力発電などの海底インフラの保守点検は特に重要である。航空輸送分野や海洋輸送分野では、オートパイロットシステムの精度向上に貢献し、省人化や無人化に繋がるであろう。また光格子時計を使った定点での

高精度なジオイド計測と、東京科学大学の高精度慣性航法装置とGPSの組み合わせによる、移動型ジオイド計測装置とを組み合わせることで、リアルタイムかつ空間連続なジオイド推定を行うシステムが実現可能であることが上妻教授によって提案されている。

既の上妻教授は空間連続的なジオイド測定の初期的な実験デモンストレーションにも成功しており、高精度なジオイド計測が実現すれば、大規模地震後の標高変化をいち早く提供することで洪水危険の予測を行う新しい防災につながるだろう。地震後の水害リスクマップをリアルタイムで見直すことは、我が国だけでなく洪水被害の多い東南アジアにとっても重要な情報となる。



### 上妻研究開発代表者より

本プロジェクトでは、中性原子を利用した小型化が可能なジャイロ스코ープの原理実証や、冷却された単一イオンを用いたイオントラップ方式による量子ジャイロの動作実証など、従来のジャイロ技術の限界を超えた新たな可能性を示すことができましたと考えています。この他にも様々な成果が出ており、展開先も多岐にわたります。未来社会創造事業のプロジェクトは終了しますが、今後も社会実装に向け邁進していきます。

上妻プロジェクトはこちら

<http://www.mirai.qnav.iir.titech.ac.jp>

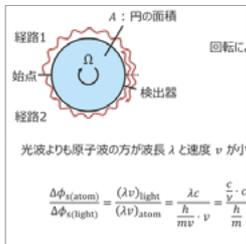
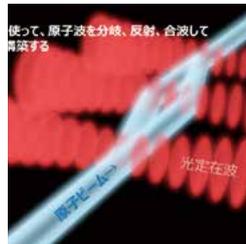
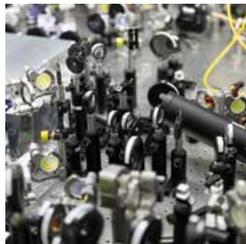


### 今後に期待すること



### 大石 善啓運営統括より

GPSに依存しない高精度なナビゲーション技術は、経済安全保障の観点からも重要視され、世界中で研究開発が活発化しています。本プロジェクトは、未来社会創造事業/大規模プロジェクト型の初年度に採択され、上妻リーダーの下で原子・イオンの物質波を利用した量子ジャイロに関する研究開発を推進しました。その結果、量子ジャイロの高精度化、小型化などに関して卓越した研究成果を多数創出しました。本研究で獲得した世界トップレベルの成果は、量子ジャイロの実用化を大きく前進させると確信します。今後、後継プロジェクトで社会実装を加速し、宇宙・海洋探査にとどまらず日常生活や産業に様々な革新をもたらすことを期待しています。





国立研究開発法人科学技術振興機構  
未来創造研究開発推進部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

TEL : 03-6272-4004

E-mail : [kaikaku\\_mirai@jst.go.jp](mailto:kaikaku_mirai@jst.go.jp)

 <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>



 [https://x.com/JST\\_mirai](https://x.com/JST_mirai)

