

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01457

研究課題名（和文）セシウム原子を用いたマイクロ波およびテラヘルツ波の精密計測技術に関する研究

研究課題名（英文）Research on precise measurement of microwave and terahertz wave using cesium atom

研究代表者

木下 基 (Kinoshita, Moto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：00415671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：セシウム原子との相互作用を利用した電磁波の量子センサに関する研究を行う。これまでの研究において、セシウム原子のラビ周波数を用いたマイクロ波強度測定を実現し、SIトレーサブルかつ高速で空間分解能も高い電磁波センサを開発してきた。本研究では、具体的にはゼーマン効果を利用した被測定電磁波の任意周波数化およびミリ波・テラヘルツ波計測に向けた要素技術開発、多重共鳴に伴うセシウム原子の蛍光を利用した電磁波の可視化技術の開発、光学走査による自由空間や回路基板上における電磁波の局所的な測定方法の開発に注力する。本研究によって、電磁波強度の量子測定という新しい分野の開拓を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、マイクロ波を中心とした電磁波計測において従来なかった原子を用いた量子センサを開発する。これによって電磁波強度等の精密測定を実現し、高速・高品質な通信技術の発展を支援する。また、電磁波の可視化や局所的な電磁波強度の絶対値測定を実現することで、電子機器の設計開発や品質管理に貢献する。さらに、マイクロ波の新たな測定方法を利用した非破壊検査の進歩によって、建築物や構造物の欠陥、材料や製品の品質管理などへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Research on quantum sensors of electromagnetic waves based on the interaction with cesium atoms is performed. In previous studies, we have realized microwave intensity measurement using the Rabi frequency of cesium atoms and developed an electromagnetic wave sensor that is SI-traceable, fast, and has high spatial resolution. In this research, we will specifically focus on (1) development to arbitrary frequency of electromagnetic wave to be measured using Zeeman effect and elemental technologies for millimeter wave and terahertz wave measurement, (2) development of visualization technology of electromagnetic wave using fluorescence of cesium atoms associated with multiple resonance, (3) development of local measurement method of electromagnetic wave in free space and on circuit boards using optical scanning. Through this research, we aim to open up a new field of quantum measurement of electromagnetic wave intensity.

研究分野：電磁波計測

キーワード：計量標準 マイクロ波 ミリ波 テラヘルツ波 セシウム原子 ラビ周波数 可視化 高周波電力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波などの電磁波はテレビやラジオなどの放送、携帯電話や無線LANなどの通信、レーダーや電波天文などの探査、非破壊検査やスペクトル分析などの診断、または加工や調理といった幅広い分野で利用されている。この汎用的な電磁波を公共利用するためには、互いの機器やシステムもしくは人体などへの影響を防ぎ、両立性を保つため、使用される電磁波のパワーを精密に測る必要がある。従って我が国では、産業技術総合研究所(産総研)が所有するカロリメータを特定標準器と定め、電磁波のパワー(高周波電力)の計量トレーサビリティを確立している。カロリメータは電磁波を吸収することで熱量に変換し、それと同等の熱量を発生する直流電力を基準に電磁波のパワーを測る装置である。カロリメータは精度や汎用性の高さから、長年世界各国において電磁波パワーの一次標準器として用いられてきた。

一方で、計量標準分野においては原子や電子といった量子を利用して高感度、高精度、普遍的な標準である量子標準を実現する試みが活発に行われている。電磁波強度についても、原子のラビ周波数を用いたパワーもしくは電磁界強度測定が、研究代表者をはじめいくつかのグループから提唱されている。例えば原子と GHz 帯のマイクロ波との相互作用において生じるラビ振動の周波数(ラビ周波数)は、照射したマイクロ波の磁場強度に比例することが知られている。従って、従来熱測定を基に測定されてきた電磁波強度を、周波数測定に置き換えることができる。本技術によって熱型測定に比べ、高速、高感度、高精度、普遍的な計量標準の実現が期待されている。また、原子を用いた量子測定は計量標準の他にも、蛍光を利用した電磁波の可視化や自由空間における任意点でのワイヤレス測定、または量子状態を適切に選ぶことで周波数の広帯域化も可能である。近年、このように様々な応用が期待される電磁波強度の量子測定に関する研究が研究代表者等をはじめ世界各国で開始され、注目を集めている。

## 2. 研究の目的

本研究ではセシウム原子を用いた電磁波の精密測定技術の確立を目指し、主に(1)ラビ周波数を用いた電磁波強度測定における周波数可変性の検証、(2)セシウム原子の蛍光を利用したマイクロ波の可視化技術の開発、(3)ラビ周波数による空間の任意点におけるマイクロ波強度測定の実現を目的とする。

### (1) 周波数可変性の検証

ラビ周波数を用いた電磁波強度測定では、原子の共鳴周波数を用いるため測定できる電磁波の周波数が限定されるという課題がある。本研究では、ゼーマン効果によって共鳴周波数を任意化し、ラビ周波数測定を実施する。同時に、セシウム原子のリュードベリ状態等を用いれば、原理上ミリ波・テラヘルツ波にも対応可能なため、将来的な測定システム構築を目指した予備実験としてテラヘルツ波計測技術の開発を行う。

### (2) 電磁波の可視化

不可視の電磁波を可視化する技術は、かねてから需要が高い。特にマイクロ波は指向性が低く、回折や干渉などの影響を顕著に示すため、空間分布を瞬時に正確に把握することが困難である。小型センサの掃査やアレイアンテナを用いる従来の可視化技術には掃査時間や空間分解能に課題があった。本研究では、マイクロ波とレーザーによる二重共鳴によって、マイクロ波の強度を近赤外レーザーの吸収に対応させ、可視化するという新しいイメージング技術の開発を行う。本方法では、近赤外光学測定を用いるため、マイクロ波の強度分布を高解像度かつリアルタイムに測定可能である。

### (3) 任意点における測定

電磁波強度の計量標準は、同軸や導波管の中を伝送するパワー測定を基準となる。これを自由空間または平面回路における電磁波強度に適應するためには、伝送線路やアンテナまたは高周波プローブによる損失や反射、アンテナ係数や利得、平面回路のインピーダンスなどを考慮して補正する必要がある。一方、気体原子を電磁波量子センサとして用いる場合、アンテナやそれに付随する金属ケーブルを用いず非侵襲的に空間の電磁波強度を直接測定可能である。原子センサによる任意点におけるワイヤレス測定には、小型ガラスセルを機械的に走査する方法などもあるが、光学走査の方が高精度、高速、高分解能の期待が高い。従って本研究では、原子を電磁波センサとして用いて光学測定を行い、任意点におけるワイヤレス測定を実現する。

## 3. 研究の方法

(1) セシウム原子気体とバッファガスとして窒素を封入したガラスセルを X バンド導波管に挿入し、その中でラビ周波数測定を行う。ラビ周波数の測定には、アトミックキャンドルと呼ばれる手法を用いる。ガラスセル内における原子集団のラビ振動を同期するために、マイクロ波に変調を加え、パラメトリック励振させることでラビ周波数が得られる。本研究では導波管の脇に電磁石を取り付け、セシウム原子に調整可能な静磁場を印加する。ゼーマン効果によって、共鳴周波数を変化させ、無磁場の場合である 9.1926 GHz 以外のマイクロ波につ

いてもラビ周波数による強度測定が可能であることを実証する。

- (2) マイクロ波・近赤外レーザーの二重共鳴において、マイクロ波の強度が強いほどセシウム原子が発する蛍光も強まる。従って、セシウム原子の二重共鳴による蛍光を用いて 9.2 GHz のマイクロ波強度を 852 nm の近赤外光にアップコンバートすることができる。CCD カメラ等で蛍光を撮影すれば、マイクロ波の強度分布が得られる。本研究では、外寸 110 mm × 110 mm × 20mm の大型ガラスセルを用いて平面回路等に分布するマイクロ波強度の可視化イメージングを行った。
- (3) 自由空間や平面回路上など任意点においてラビ周波数を用いたマイクロ波強度測定を実現するために、光学測定に用いるレーザーを 2 本とし、それらの交点において測定を行う。2 本のレーザーのうち一方は従来通りプローブレーザーとして用い、他方をポンプレーザーとして光チョッパーで強度変調を加える。ポンプレーザーの変調がアトミックキャンドルにおけるマイクロ波の変調に相当する役目を果たすため、本方法でも同様のラビ周波数測定が可能となる。この方法ではレーザーの交点のみにおける局所的な測定が実現できるため、光学走査により測定の分解能や自由度が飛躍的に向上することが期待される。さらに、測定対象であるマイクロ波に変調を加えるという従来のアトミックキャンドル法と比べて、本方式はマイクロ波に影響を与えず純粋な測定が実現できる。本研究では、マイクロ波平面回路で作製したパッチアンテナの直上にガラスセルを配置し、ガラスセル内部でプローブレーザーとポンプレーザーを交差させ、ラビ周波数測定を行った。

#### 4. 研究成果

- (1) ラビ周波数を用いた電磁波強度測定における周波数可変性の検証

ゼーマン効果によるセシウム原子の共鳴周波数シフトの様子を文献 1. の Fig.5 より引用した。共鳴周波数は二重共鳴信号のピークから得られた。本実験では、100 mT までの静磁場をかけることで、8.2 GHz から 11.5 GHz までの周波数可変性を示した。ただし、下限の 8.2 GHz は使用した X バンド導波管のカットオフ周波数で制限されたもので、セシウム原子が持つ理論的な限界ではない。また、本研究では下限周波数である 8.2 GHz において、アトミックキャンドルによるラビ周波数測定を行い、両者が線形関係にあることを確かめた。従って、ラビ周波数による 8.2 GHz のマイクロ波強度測定の実現性が実証された。以上は、原子を用いたマイクロ波測定における周波数可変性の課題解決に向けた重要な結果である。

リユードベリ原子を用いたミリ波・テラヘルツ波計測のためには、信号源や受信器の開発が必要である。現状ではミリ波・テラヘルツ波帯において、数マイクロワット程度の微弱な信号源が多いため、その検出技術や評価技術の開発が課題である。本研究では、フーリエ変換赤外分光法を基礎とした分光器を開発し、ミリ波・テラヘルツ波帯における光源評価に応用可能であることを示した<sup>3</sup>。さらに、スペクトル分析において、縦軸を校正する線形性（減衰量）評価も重要である。本研究では、光音響素子を用いることで、高周波減衰量の国家標準でもある誘導分圧器と直接比較可能なミリ波・テラヘルツ波減衰量測定方法を開発した<sup>6</sup>。

- (2) セシウム原子の蛍光を用いたマイクロ波の可視化

本研究では、マイクロ波可視化の実証実験として単純な直線上のマイクロストリップライン回路を作成し、その上に大型ガラスセルを配置した。9.2 GHz のマイクロ波と 852 nm の近赤外レーザーを同時に照射し、二重共鳴による蛍光をガラスセル直上においた CCD カメラで撮影した。CCD カメラで捉えた蛍光分布は、マイクロストリップライン上のマイクロ波磁場強度を反映するため、レーザーの散乱光やマイクロ波未入力時の蛍光ノイズ等を差し引くことで、マイクロ波可視化画像が得られた。得られた可視化画像の明度は、マイクロストリップラインに入射した

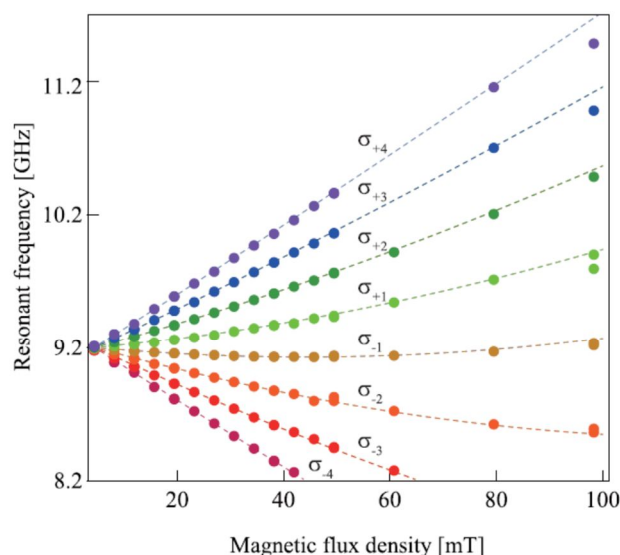


Fig. 5. Resonant frequency as a function of static magnetic flux density. The frequencies measured from the double-resonance spectra and calculated from the Breit-Rabi formula are represented as circles and broken lines, respectively.

静磁場による二重共鳴信号ピークのシフトの様子。X バンド導波管の下限である 8.2 GHz から 11.5 GHz までの周波数可変性が確認された。

文献 1.より引用

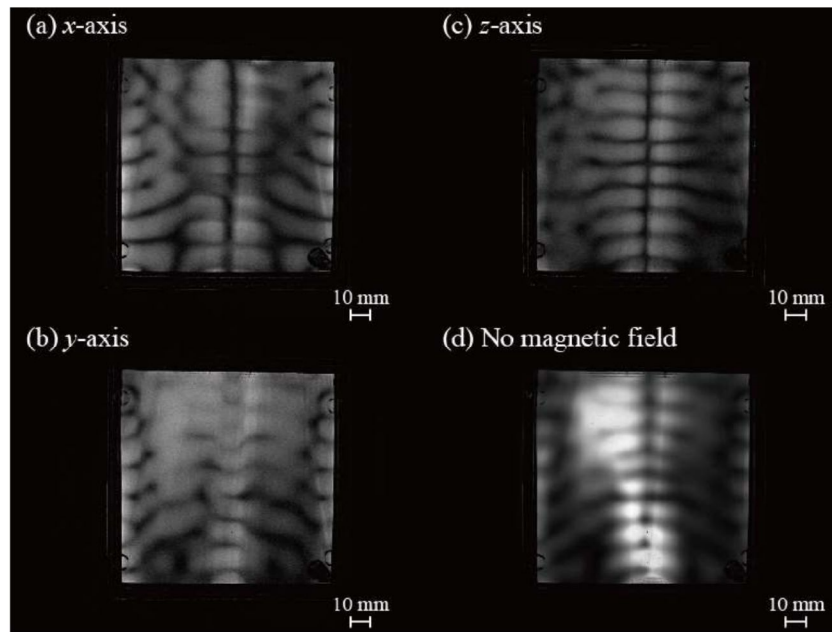


Fig. 5. Visualized 2-D polarimetry of RF waves on MSL. RF waves visualized with the dc magnetic field along the (a)  $x$ -, (b)  $y$ -, or (c)  $z$ -axis or (d) not at all are shown. There are continuous nodes above the MSL in (a) and (c), while there are alternate patterns of loops and nodes in (b).

マイクロストリップライン上において、静磁場と平行な偏波方向を持つマイクロ波を選択的に可視化した様子。それぞれ直交する  $xyz$  方向およびそれらの合成成分それぞれについて可視化した。

文献 5.より引用

マイクロ波強度に従って高まる様子や、マイクロストリップラインの終端インピーダンスを変化させることでマイクロ波が作る定在波が変化する様子などを確かめ、本可視化方法の有効性を示した<sup>2</sup>。また、動画でも十分な S/N 比を有し、本可視化方法が従来難しかったリアルタイム測定の実現が可能であることも示した<sup>4</sup>。さらに、本方法はセシウム原子に印加する静磁場の方向によって、マイクロ波の偏波方向を選択的に可視化することもできる。直線偏波のマイクロ波と相互作用する量子状態を選び、静磁場によって量子化軸を定義することで、静磁場と平行な偏波方向を持つマイクロ波のみを可視化した様子を文献 5. の Fig.5 より引用した。本実験の結果、マイクロストリップライン上において、それぞれ直交する  $xyz$  軸の直線偏波を分離して可視化することに成功した。また静磁場を切ること、これらの3軸成分を合成した画像も取得できた。これらの画像と電磁界シミュレータによる強度分布を比較した結果は定性的に一致していた。本研究は、原子の蛍光を用いたマイクロ波の可視化の有効性を示す重要な結果である。今後は、マイクロ波の可視化技術をさらに応用したマイクロ波カメラやそれを用いた新しいマイクロ波イメージングによる解析技術の開発を行う。

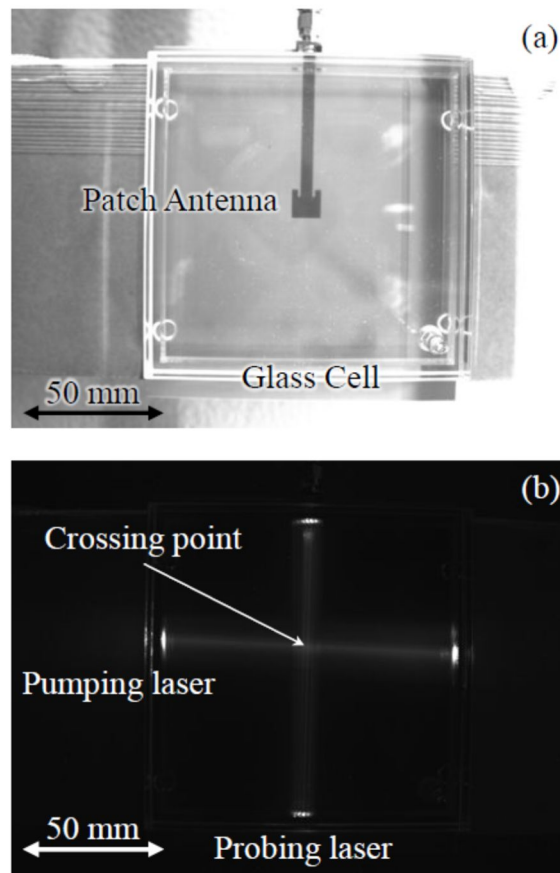


Fig. 3. Photograph of the patch antenna and glass cell (a) and infrared photograph of two laser light paths (b).

パッチアンテナとガラスセルの写真(a)および2本のレーザーの交点(b)の様子。レーザーの交点はパッチアンテナの直上に配置した。

文献 7.より引用

### (3) 任意点におけるラビ周波数測定に関する検証

本研究で提唱したポンプレーザーの変調によるラビ周波数測定は、従来方法とは原理的に異なるため、ポンプレーザーの変調によるセシウム原子の基底状態の振る舞いを定式化する必要がある。二準位原子とマイクロ波の相互作用に変調された緩和効果を導入したモデルについて密度行列方程式を解くことで、本原理を定式化した。この結果、ラビ周波数はポンプレーザーの振幅変調周波数とパラメトリック励振するため、変調周波数を基準として空間の任意点におけるラビ周波数測定が実現可能であることがわかった。

上記原理を実証するため、パッチアンテナ直上に置いたガラスセル内でプローブレーザーとポンプレーザーを交差させることでセシウム原子のラビ周波数測定を行った。文献 7. の Fig.3 より実験の様子を引用した。写真(a)はパッチアンテナとガラスセルの可視光画像を示す。(b)は可視光照明を消灯することで、赤外線レーザーの光路を強調したものである。両者からわかる通り、レーザーの交点はほぼパッチアンテナの直上に配置した。本研究では、独自に定式化したラビ周波数とレーザーの変調周波数の関係から、パッチアンテナ直上でのラビ周波数を得た。その結果、ラビ周波数はパッチアンテナへのマイクロ波の入力強度に対して線形に変化していることが確認できた。本研究から、原子を用いたマイクロ波強度測定について、高分解能かつ任意点での測定を可能とする新しい測定方法を提唱する重要な結果が得られた。今後は、レーザーの交点位置の走査による絶対強度マッピングや、(2)の可視化技術と組み合わせた絶対強度イメージングの実現などに応用する。

### 引用文献

1. M. Kinoshita, Y. Tojima and H. Iida, "Frequency Extension of Atomic Measurement of Microwave Strength Using Zeeman Effect," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, pp. 2274-2279, June 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2886869.
2. Moto Kinoshita and Masanori Ishii, "Visualization of radio-frequency waves via double resonance spectroscopy of cesium atoms," 2019 Jpn. J. Appl. Phys. 58 052004, DOI 10.7567/1347-4065/ab10aa.
3. Iida, H., Kinoshita, M. & Tojima, Y. Terahertz Spectrum Analyzer Based on Fourier Transform Interferometry. J Infrared Milli Terahz Waves 40, 952-961 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00620-1>.
4. Ishii, M, Kinoshita, M. A feasibility study of a real-time visualization method for electromagnetic fields. Microw Opt Technol Lett. 2021; 63: 399- 403. <https://doi.org/10.1002/mop.32608>.
5. M. Kinoshita, Y. Tojima and H. Iida, "2-D Polarimetry of Visualized Radio Frequency Waves Using Cesium Vapor Atoms," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-7, 2021, Art no. 1502407, doi: 10.1109/TIM.2021.3052543.
6. H. Iida and M. Kinoshita, "Photoacoustic Substitution Method for Calibrating Subterahertz Attenuation in Free Space," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-6, 2021, Art no. 1005106, doi: 10.1109/TIM.2021.3060577.
7. M. Kinoshita, Y. Tojima, M. J. Yamamoto and H. Iida, "Rabi Oscillation of Cesium Atoms with Modulated Optical Pumping for Measuring Radio-Frequency Field Strength," to be published in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 10.1109/TIM.2023.3279884.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kinoshita Moto, Tojima Yuya, Yamamoto Masahiro J., Iida Hitoshi	4. 巻 72
2. 論文標題 Rabi Oscillation of Cesium Atoms With Modulated Optical Pumping for Measuring Radio Frequency Field Strength	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2023.3279884	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 Masanori Ishii, Moto Kinoshita	4. 巻 63
2. 論文標題 A feasibility study of a real time visualization method for electromagnetic fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS	6. 最初と最後の頁 399, 403
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mop.32608	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 H. Iida, M. Kinoshita	4. 巻 70, 1005106
2. 論文標題 Photoacoustic Substitution Method for Calibrating Subterahertz Attenuation in Free Space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1, 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2021.3060577	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. Kinoshita, Y. Tojima, H. Iida	4. 巻 70, 1502407
2. 論文標題 2-D Polarimetry of Visualized Radio Frequency Waves Using Cesium Vapor Atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2021.3052543	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 Hitoshi Iida, Moto Kinoshita & Yuya Tojima	4. 巻 40
2. 論文標題 Terahertz Spectrum Analyzer Based on Fourier Transform Interferometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 952-961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-019-00620-1	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 Kinoshita Moto, Ishii Masanori	4. 巻 58
2. 論文標題 Visualization of radio-frequency waves via double resonance spectroscopy of cesium atoms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 052004 ~ 052004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab10aa	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 Kinoshita Moto, Tojima Yuya, Iida Hitoshi	4. 巻 68
2. 論文標題 Frequency Extension of Atomic Measurement of Microwave Strength Using Zeeman Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 2274 ~ 2279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2018.2886869	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Moto Kinoshita, Yuya Tojima, and Hitoshi Iida
2. 発表標題 Rabi oscillation observation for microwave field strength measurement at two-laser crossing point
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro J. Yamamoto, Yuya Tojima, and Moto Kinoshita
2. 発表標題 Feasibility Study on Quantum Measurement of Radio-Frequency Attenuation based on Atomic Resonance
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Tojima, Moto Kinoshita, and Masahiro J. Yamamoto
2. 発表標題 Real-Time Distribution Measurement of Microwave Magnetic Fields Emitted from Horn Antennas using Cesium Vapor Atoms
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下 基
2. 発表標題 ミリ波・テラヘルツ波パワーの計量・計測技術
3. 学会等名 学振182委員会第49回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 真大
2. 発表標題 原子のラビ周波数に基づく高周波減衰量の量子計測
3. 学会等名 2022年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 木下 基、東島 侑矢
2. 発表標題 セシウム原子の蛍光による電磁波の二次元偏波分離イメージング
3. 学会等名 NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下 基、東島 侑矢、飯田仁志
2. 発表標題 セシウム原子気体を用いた電磁波の二次元偏波分離イメージング
3. 学会等名 電気学会・計測研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Iida, M. Kinoshita
2. 発表標題 Measurement of Terahertz Attenuation using a Photo-Acoustic Substitution Method
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kinoshita, Y. Tojima, H. Iida
2. 発表標題 Two-Dimensional Visualization of Radio-Frequency Waves using Cesium Vapor Atoms
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田 仁志, 木下 基
2. 発表標題 テラヘルツ波空間ビームの高信頼定量計測技術の開発
3. 学会等名 2020年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下 基, 東島 侑矢, 飯田 仁志
2. 発表標題 セシウム原子の蛍光を利用したマイクロ波の二次元可視化イメージング
3. 学会等名 2020年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東島 侑矢
2. 発表標題 原子の共鳴現象を用いたパッチアンテナの放射磁界分布リアルタイムイメージング
3. 学会等名 2020年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東島 侑矢, 木下 基, 飯田 仁志
2. 発表標題 セシウム蒸気セルを用いたパッチアンテナからの放射磁界分布のリアルタイムイメージング
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下基、東島侑矢、飯田仁志
2. 発表標題 二重共鳴分光のマイクロ波リアルタイムイメージングとしての応用
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Moto Kinoshita, Yuya Tojima, Hitoshi Iida
2. 発表標題 Two-Dimensional Visualization of Radio-Frequency Waves using Cesium Vapor Atoms
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Iida, Moto Kinoshita
2. 発表標題 Measurement of Terahertz Attenuation using a Photo-Acoustic Substitution Method
3. 学会等名 Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下 基、東島 侑矢、飯田 仁志
2. 発表標題 セシウム原子による電磁波計測の任意周波数化に向けた研究
3. 学会等名 2018年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木下 基
2. 発表標題 リユードベリ原子を使ったテラヘルツ計測技術の開発
3. 学会等名 産総研・NEDO合同フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Moto Kinoshita
2. 発表標題 Feasibility Study for Atomic Measurement of Microwave Strength at Arbitrary Frequencies within the Full X-Band
3. 学会等名 2018 CONFERENCE ON PRECISION ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木下 基
2. 発表標題 量子効果を使った電磁波の可視化に関する検討
3. 学会等名 テクノブリッジフェア2018 in つくば
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電磁波測定装置	発明者 木下 基、石居 正 典、飯田 仁志、東島 侑矢	権利者 産業技術総合研 究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-184784	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 電磁波測定装置	発明者 木下 基、石居 正 典、飯田 仁志、東 島 侑矢	権利者 国立研究開発法 人産業技術総合 研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特許7034485	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

任意の振動方向のマイクロ波をイメージングする技術を開発  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2021/pr20210121/pr20210121.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2021/pr20210121/pr20210121.html)

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
研究分担者	東島 侑矢  (Tojima Yuya)  (20805147)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員   (82626)	
研究分担者	山本 真大  (Yamamoto Masahiro)  (20909874)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員   (82626)	Masahiro J. Yamamoto
研究分担者	飯田 仁志  (Iida Hitoshi)  (40392584)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員   (82626)	

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