

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630117

研究課題名(和文)量子力学に基づいた高周波磁界測定

研究課題名(英文)Magnetic field measurement based on a quantum phenomena in high frequency

研究代表者

石居 正典 (ISHII, MASANORI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50356432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の電磁界センサでは、センサの部分に金属製のアンテナが利用される。この場合、測定対象となる電磁界に対して、金属製エレメントがじょう乱を与えるという問題があった。

そこで最近、金属製のアンテナを利用せずに量子現象を動作原理のベースとする、新しいタイプの電磁界センサに関する研究を開始した。この新しいタイプの電磁界センサでは、センサの部分にセシウム(Cs-133)の気体原子を封入したガラスセルを使用する。本センサは非金属であるため、測定対象となる電磁界に与えるじょう乱を低く抑えられる事が期待できる。

本研究では、この量子現象を利用した新しいタイプの電磁界センサの動作原理に関して、初期検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Sensors of electromagnetic fields traditionally consist of antenna elements that are made of metal. A common concern of this type sensor is perturbation of the electromagnetic field by the measurements.

We have recently studied a new type of electromagnetic-field sensor based on quantum phenomena, in which metal antenna elements are not employed. This new sensor has a glass cell that holds a gas of cesium-133 atoms instead of the metal antenna elements ordinarily required by electromagnetic-field sensors. The perturbation of an electromagnetic field being measured by the 133Cs-based sensor is thus expected to be lower than that by a metal-antenna-based sensor.

We studied on an initial examination of a new type electromagnetic field meter based on quantum phenomena without any metal antenna element.

研究分野：電磁環境工学、アンテナ、計測

キーワード：電磁界測定 磁界センサ ラビ周波数 セシウム

1. 研究開始当初の背景

従来の電磁界センサのアンテナは金属で構成されているため、電磁界を測定する際には、アンテナ自身が測定対象である電磁界を大きく乱すという問題(じょう乱)があった。このため、測定対象である電磁界のじょう乱を抑えながら電磁界の測定が常温において可能な技術の開発が求められていた。

これまでも、量子力学に基づいた電磁界センサ(特に磁界センサ)の研究は盛んに行われている。測定対象となる磁界強度により形式等が異なるが、例えば、原子や分子の核磁気共鳴を利用した NMR 磁界センサ、量子ホール効果を利用した量子ホール磁界センサ、ジョセフソン接合を用いた素子からなる超伝導量子干渉計を利用した高感度な磁気センサである SQUID 磁界センサなどがある。

これらの量子現象を利用した磁界センサは高精度であり、ppm から % の精度で実現されているが、しかし、これらは主に DC 磁界に対する磁界センサである。そこで、これらの技術では、MHz 帯以上の例えば GHz の周波数帯などの高周波での利用は難しい。

一方、高周波電磁界センサには、これまで量子現象を利用したタイプの物は無く、アンテナ素子として金属体を用いたアンテナ型の物が一般的である。また、アンテナ測定では dB の単位が通常用いられる事からも分かるように、このようなアンテナ型の磁界センサの精度は、良くても 1/10 dB オーダであるのが一般的である。本研究で対象としている磁界センサは、AC の高周波領域の磁界に対する物であり、金属体で構成されるアンテナに代えて量子現象を利用する事で、高周波領域においても高精度で高安定な磁界センサを実現できないだろうか? という点が研究背景と着想の原点となっている。

2. 研究の目的

従来、高周波の電磁波を測定または観測する際には、金属製のアンテナを利用した電磁界センサが用いられてきた。通常、電磁界センサのアンテナ部分は金属体で構成され、目的や用途によって形状や特性は様々であるが、それらの動作原理は最終的にはマクスウェルの方程式に帰着される。本研究では、従来のように幾何寸法と古典電磁気学による物ではなく、量子現象を利用し、原子の構造と基礎物理定数に基づいた高周波電磁界センサの実現可能性に関する研究を行った。

量子現象に基づく高周波磁界センサは、高精度、高安定である事が期待され、さらに従来問題となっていた金属体から成る電磁界センサのアンテナ自身が測定すべき磁界を乱すといった「じょう乱」を軽減する事も期待される。このため、従来の様に金属製アンテナを使用した電磁界センサに代わり、金属を使用せずに量子現象を利用して、原子の構造と基礎物理定数に基づいた高周波電磁界

センサの実現に関する基礎的な検討が本研究の目的であった。

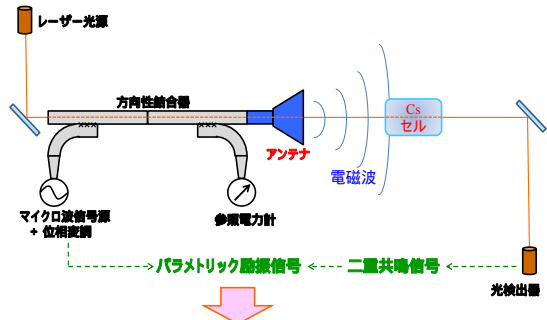
なお、電磁界センサには電界用と磁界用の両者が考えられるが、本研究では初期検討として、磁界を観測する磁界センサを対象とした。

3. 研究の方法

本研究の実施者らが行っていたこれまでの先行研究として、導波路内の高周波電力の測定についての実現に関する研究がある。しかし、これは高周波電力の測定を目的としたシステムであったため、伝送線路としての導波路内での検証となっていた。一方、これを更に空間中の高周波磁界の測定システムに応用する際には、空間中の電磁波における実現可能性の検証の必要であった。このため、空間中を伝搬する電磁波に対しても、導波路内における場合と同様にラビ振動の観測が可能であるかの検証を第一の目標とした。

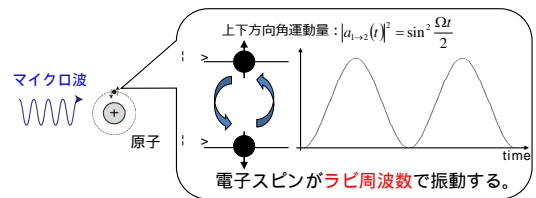
先行研究における測定システムは、導波路内の閉ざされた空間内の電磁波に対する物であったため、同様のシステムを高周波磁界センサに適用するためには、まずは空間中の電磁波に対しても実現可能であるか否かを検証する必要があった。そこで、アンテナ実際に放射された電磁界に対して検証実験を行った。

なお、原子としてはセシウム原子(<sup>133</sup>Cs)の気体を用いた。また、開発する検証用測定システムの概要と研究目標について、次の図 1 に示す。



空間中の電磁波に対してラビ振動周波数を観測することを目標

図 1. 検証用測定システムの概要と研究目標



$$\Omega = \frac{\mu_0 \mu_B g J}{\hbar} \langle |J| \rangle H$$

ラビ周波数はマイクロ波磁場強度に比例!

図 2. ラビ周波数と電磁波の磁界強度の関係

セシウム原子( $^{133}\text{Cs}$ )のようなアルカリ金属類の気体に対し、特定の二準位原子に共鳴する特定の周波数の電磁波を照射すると、2つの量子準位間に分布する原子数密度が振動を起こす。この振動周波数はラビ周波数と呼ばれる。なおこれは、図2に示すように、照射する電磁波の磁界成分の強度との比例関係がある。

気体状態の $^{133}\text{Cs}$ に対して、レーザーとマイクロ波の二重共鳴分光を実現中にマイクロ波に位相変調を加えると、位相変調周波数との共鳴により、ラビ周波数が測定可能となるが、これをアトミックキャンドルと呼び、気体状態の $^{133}\text{Cs}$ に対して二重共鳴スペクトルを検出し、それをパラメトリック励振することでアトミックキャンドル信号を得ることができる。さらに、このアトミックキャンドル信号のピークとアンテナから照射した電磁波によるセシウム原子のラビ振動周波数とを結び付けて観測することができるため、アトミックキャンドル信号の観測システムを構築する。なおここで、電磁界とスピン磁気モーメントによるラビ振動周波数は電磁波の中の磁界成分の強度と比例関係にある。セシウム原子の気体が封入されたセルに対して、アンテナから照射する高周波電磁波の磁界成分の強度をラビ振動周波数に変換する事で、アンテナから放射された空間中の高周波電磁波の磁界強度成分の測定を実現する事ができる。

このシステムが実現できれば、将来、量子物理現象を利用した高精度かつ高安定な高周波磁界強度計測技術の確立への貢献が期待できる。

#### 4. 研究成果

まずは、図1の様なシステムを構築した。特に完成したシステムの中で、電磁波を照射するアンテナと気体のセシウム原子を封入するガラス製セルの部分を図3に示す。

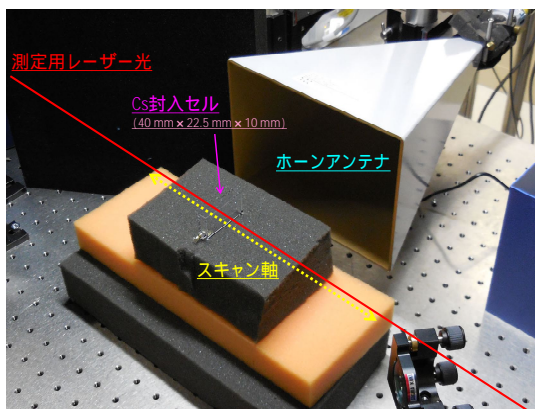


図3. 実験装置

ここで、レーザー光については図1に示すように導波路やホーンアンテナの内部を通過させると、機器の配置やアンテナから放射する電磁波の分布の観測に制限が生じるた

め、図3に示すようにホーンアンテナの開口面に対して平行に通過するように設置した。

この実験システムを用いて、空間中において、前述のアトミックキャンドル信号のピークシフトを得た結果が図4であり、さらにこれを基に、ラビ周波数と電磁波の磁界成分の強度の比例関係を確認した結果が図5である。

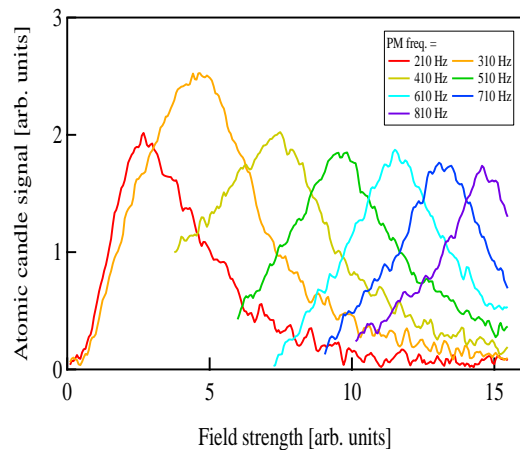


図4. アトミックキャンドル信号

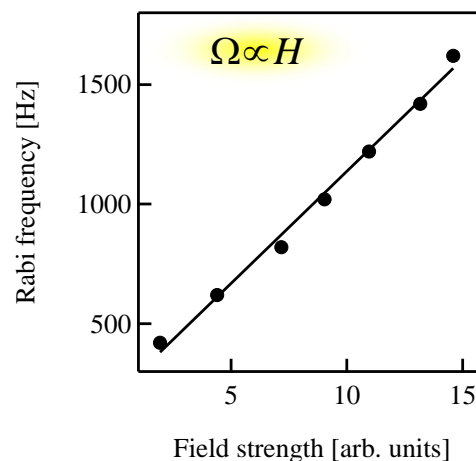


図5. ラビ周波数と電磁波の磁界強度

図4から分るように、二重共鳴スペクトルに対し、位相変調によるパラメトリック励振を施すことで、アトミックキャンドル信号が観測でき、また、位相変調周波数を変えることで信号のピーク位置が変位する様子が確認できる。また、それぞれのピークにおいて、ラビ周波数は位相変調周波数の2倍となり、図中の枠内には、信号ピーク上方に対応するそれぞれのラビ振動周波数を記載した。これにより、各グラフのピーク位置における横軸のマイクロ波強度の値とラビ周波数を結び付けることができる。

また、図2でも示した様に、ラビ周波数と電磁波の磁界強度には比例関係が成立するが、図5から実験からも比例関係が成立していることが確認できる。そこで、空間中の高周波電磁波の磁界強度に対しても、このラビ振動周波数が観測できれば、セシウム原子が

受けている電磁波の磁界強度が観測できることがわかる。

これらの研究成果は、セシウム原子の気体を封入したガラスセルを、ホーンアンテナの開口面の中心位置の軸上の数 cm の位置で得た結果である。一方、図 3 に示すように、このガラスセルを、ホーンアンテナの開口面に平行な方向にスキャンした場合、ホーンアンテナから放射される電磁波の磁界強度の近傍界分布を簡易的に得ることが可能である。そこで、ホーンアンテナの開口面から 8 cm の距離にて、中心の高さにおいて、約 1 cm の間隔でセルを移動させて得られた磁界の近傍界分布を図 6 に示す。また合わせて、境界要素法 (モーメント法) で計算した磁界強度分布の計算結果も合わせて示す。なお、計算結果については、光学定盤を模擬したグランドプレーン (GP) の有無による差異も確認するため、それらの結果も合わせて表示した。

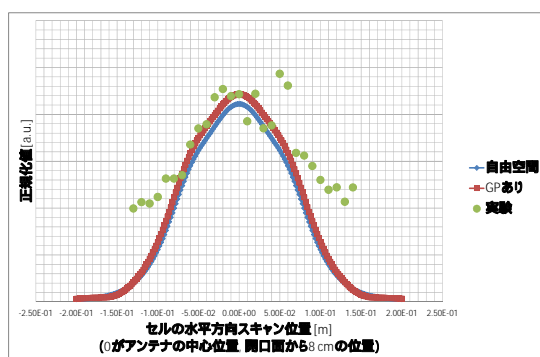


図 6. 近傍磁界強度分布の測定結果と境界要素法による計算結果の相对比较

図 6 の結果からわかるように、簡易的な測定にも関わらず、分布が得られている事がわかる。なお、今回は簡易的な測定であったため、計算結果に比べて実験結果のグラフは滑らかではない。これは、さらに測定システムの最適化が必要であるのと、測定に使用した光学定盤上には多くの光学機器があるため、測定対象の電磁界のそれらによる反射の影響があると考えられる。以上の点については、今後も追加実験や検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

木下 基、原子分光を利用した電磁波の強度測定、分光研究、日本分光学会、査読有、64 巻 2 号、2015、364-367  
[http://www.bunkou.or.jp/prints/print\\_s\\_6402.html](http://www.bunkou.or.jp/prints/print_s_6402.html)

[学会発表](計 11 件)

木下 基、電磁波の計量標準、物性異分野交流研究会、2014 年 11 月 22 日、東京大学(千葉県・柏市)

木下 基、ラビ周波数測定に基づくマイクロ波強度測定の自由空間展開、第 6 回光領域および精密周波数発生回路技術調査専門委員会、2014 年 12 月 11 日、情報通信研究機構(東京都・小金井市)

木下 基、石居正典、島田洋蔵、ラビ周波数を用いた自由空間磁場測定に関する基礎検討、2014 年度計量標準成果発表会、2015 年 01 月 23 日、産業技術総合研究所(茨城県・つくば市)

木下 基、石居正典、島田洋蔵、セシウム原子を用いた磁場強度測定の自由空間への応用、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 03 月 24 日、早稲田大学(東京都・新宿区)

石居 正典、木下 基、量子現象に基づく次世代電磁界センサの初期検討、電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会、2015 年 09 月 09 日、東北大学(宮城県・仙台市)

Masanori Ishii、Moto Kinoshita、Electromagnetic measurement based on the Rabi frequency in free space、Eighth 2015 Korea-Japan Joint Conference on EMT/EMC/BE (KJJC-2015) (国際学会)、2015 年 11 月 23 日、Sendai International Center(宮城県・仙台市)

木下 基、石居 正典、光ポンピングを用いたセシウム原子のラビ周波数測定に基づくマイクロ波強度センサ、電子情報通信学会 光応用電磁界計測研究会(招待講演)、2016 年 01 月 29 日、神戸市産業振興センター(兵庫県・神戸市)

木下 基、石居 正典、空間中におけるラビ周波数に基づく電磁場測定、2015 年度計量標準総合センター成果発表会、2016 年 02 月 10 日、産業技術総合研究所(茨城県・つくば市)

石居 正典、木下 基、量子現象に基づく電磁界センサにおけるガラス製 Cs セルの侵襲性に関する一検討、電子情報通信学会 2016 年総合大会、2016 年 03 月 17 日、九州大学(福岡県・福岡市)

Masanori Ishii、Moto Kinoshita、Perturbation by glass-encased Cs cell of electromagnetic-field sensor based on quantum phenomena、European Electromagnetics Symposium 2016 (EUROEM2016) (国際学会)、2016 年 07 月 11 日、ロンドン(イギリス)

Moto Kinoshita、Masanori Ishii、Measurement of microwave magnetic field in free space using the Rabi frequency、Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016) (国際学会)、2016 年 07 月 13 日、オタワ(カナダ)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石居 正典 (ISHII, Masanori)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物  
理計測研究部門・主任研究員  
研究者番号：50356432

### (2) 研究分担者

木下 基 (KINOSHITA, Moto)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物  
理計測研究部門・主任研究員  
研究者番号：00415671