

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06253

研究課題名(和文) Cs原子を用いたMHz帯量子磁界センサの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of a magnetic field sensor based on a quantum phenomena of Cs-133 in MHz-band

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・計量標準総合センター・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、交流磁界とセシウム原子の相互作用を利用する次世代型の交流磁界センサの実現に関する研究を行っている。対象周波数帯の低周波化に向けてセシウム原子のゼーマン副準位間のエネルギー差に着目し、低周波帯用の磁界センサの実現に向けた研究開発に関する初期検討を行い、その実現可能性の検証を行った。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擾乱を低く抑えられる事が期待でき、また、量子物理現象を動作原理のベースとしているため、高精度な磁界センサの実現も期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、量子物理現象を利用した電磁界強度計測技術の確立への礎となる事が期待できる。従来よりも飛躍的に高精度でかつ高安定な電磁界センサの実現の可能性が期待できる。またさらには、電磁界を測定する際に問題となる電磁界センサの金属アンテナ部分による侵襲性の問題の解決、実際のアンテナは有限の大きさを有する事に起因した電磁界の計測位置の曖昧さの解決、アンテナを使用した電磁界の測定時に使用するケーブルの不要化などへの貢献も将来期待できる。

研究成果の概要(英文)：We are researching and developing a new type of AC magnetic field (m-field) sensor based on quantum phenomena. In this study, in order to realize the new type of m-field sensor in the low frequency bands, we use Zeeman components in the energy levels of a cesium-133 atom. As the new type of m-field sensor is a nonmetal type and based on a quantum phenomena, it is expected that the new type of m-field sensor has low perturbation to electromagnetic fields and high accuracy for m-field measurements.

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 セシウム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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(擾乱)があった。このため、測定対象である電磁界の擾乱を抑えながら電磁界の高精度な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。これらの量子物理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 から数 kHz までの周波数帯の磁界に対する磁界センサである。

一方、申請者らは X バンド帯(9.2 GHz)の高周波帯において、量子物理現象を利用したタイプの磁界センサの研究を行い、導波路としての導波管内の磁界の測定からスタートし、これまでにホーンアンテナを用いて空間中へ放射した磁界分布の測定に成功している。

しかし、上記の DC ~ 数 kHz の周波数帯と GHz の周波数帯に対して、これらの中間周波数帯域である数十 kHz ~ MHz 帯センサについては、これまでのところ量子物理現象を利用したタイプの物の検討は少なく、研究未開拓の周波数帯域となっている。この周波数帯域の電磁波と言えば、古くからの AM ラジオ、航空や船舶の航法用通信機器、FM ラジオなどの他、最近では IH 電磁調理機器、鉄道の電子乗車券や電子マネー、電波時計、ワイヤレス電力伝送などの様々な用途で利用されるようになり、重要性が増している。そこで、この未開拓の周波数帯域においても、金属体で構成されるアンテナに代えて量子物理現象を利用した、高精度で高安定な磁界センサの実現可能性についての研究を行う必要がある。なお最近、NMR 磁界センサなどでも強磁界への対応により MHz 帯の電磁波を利用する事があるが、この場合の測定対象は直流磁界である。一方、本研究は数十 kHz ~ MHz 帯の交流磁界自身が測定の対象となる磁界センサに関する研究である。

2. 研究の目的

従来、電磁界センサと言えば目的や用途によって形状や特性は様々であるが、通常、アンテナ部分は金属体で構成され、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。本研究は、従来のような幾何寸法と古典電磁気学による電磁界センサではなく、原子の構造と基礎物理定数に基づいた量子物理現象を利用する、次世代型電磁界センサの実現に関する研究である。量子物理現象に基づく電磁界センサは、従来問題となっている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擾乱を軽減する事が期待できる。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、本研究では磁界を観測する磁界センサを対象とした。また、同型の電磁界センサ研究が未開拓である数十 kHz ~ MHz 帯を研究対象の周波数帯域とした。本研究の目的は、提案する量子物理現象を利用する次世代型電磁界センサの初期検討を行い、その実現可能性に関する検討を実施する事である。

3. 研究の方法

これまで、本研究の実施者らが行っていた先行研究には、X バンド帯を研究対象とした、導波路内の高周波電力の測定のために導波管内の電磁波の磁界成分の測定による量子物理現象を利用した高周波電力計に関する研究と、アンテナから実際に放射された電磁波の磁界成分を空間中で測定するための量子物理現象を利用した高周波磁界センサに関する研究があった。一方、本研究では、これまでに実施してきた研究課題から得られた研究技術をベースに、未開拓である低周波帯である数十 kHz ~ MHz 帯センサの実現可能性に関する研究を新たに行った。

そこで最初に、数十 kHz ~ MHz 帯低周波帯の磁界に対して理論的に原子の吸収スペクトルの観測が可能な、低いエネルギー遷移領域を検討するため、図 1 の模式図に示すようなシステムを新たに構築した。

この構築された実験システムを用いて、提案する研究課題の実現可能性に関する検討を実施した。これまでの我々による先行研究では、周波数が 9.2 GHz 付近の X バンド帯に限定されていた。これは、セシウム原子の基底準位の超微細構造間のエネルギー差のみに注目していたためであった。そこで本研究では、対象周波数帯の低周波化に向けて、図 2 に示す様にゼーマン副準位間のエネルギー差に着目する事にした。

先行研究で得られている基底準位の超微細構造間における原子の吸収スペクトル(二重共鳴)を観測した場合、そのスペクトル分裂幅はゼーマン副準位間のエネルギー差に該当するため、この分裂幅が測定の対象となる低周波交流磁界の周波数となる。またここで、セシウム原子が封入されたガラスセルが中心に配置される様に設置した直流磁界に対するシールド BOX とコイルにより、外部から印加する静磁界を調整することで、測定対象となる交流磁界の周波数を、数十 kHz ~ MHz 帯の範囲で任意に選択することが可能であると考えられる。

提案する研究課題の実現可能性に関する検討を実施する上で、図 1 に示す様な実験システム

を用いて、ホーンアンテナにて 9.2 GHz の電磁波(MW)の他、測定の対象となる数十 kHz ~ MHz 帯の磁界(RF)をコイルから発生させ、 ^{133}Cs の気体原子が封入されたガラスセルに同時に照射する。またこの時、852 nm のレーザーをガラスセルに透過させて、フォトディテクタ(PD)でレーザー強度を観測できるようにしておく。PD からの DC 出力電圧値を観測すると、原子、電磁波(MW 及び RF)、レーザーの間の「相互作用」として、照射された MW と RF の磁界による気体原子における吸収スペクトルを観測する事ができる。この時、RF の有無によって、レーザーの強度を観測している PD からの DC 出力電圧値が変化することが期待されるため、RF の有無の場合により得られる 2 つのスペクトルの間の差を観測する。

この観測に成功すれば、将来、量子物理現象を利用した高精度かつ高安定な磁界強度計測技術の確立への礎となる事が期待できる。

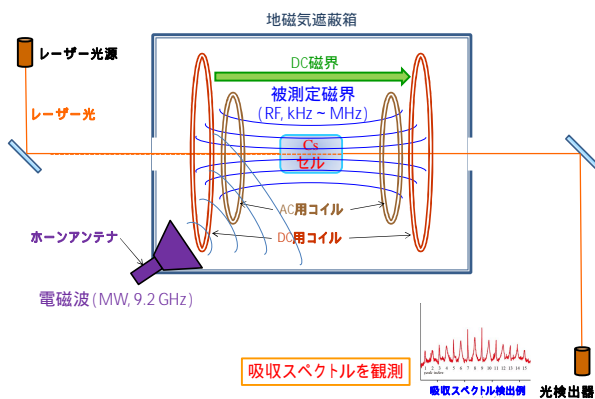


図 1. 測定システムの概要

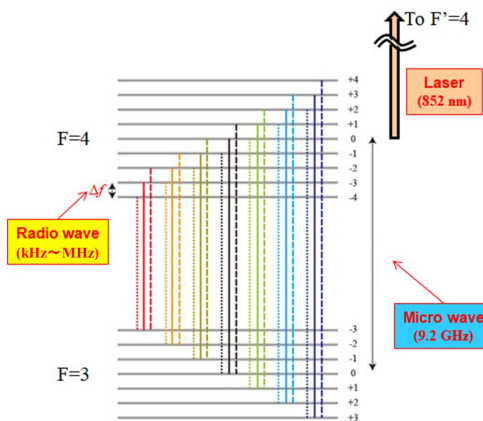


図 2. セシウム原子の基底準位の超微細構造間のエネルギー差とゼーマン副準位間のエネルギー差におけるレーザーと電磁波の遷移の概略図

4. 研究成果

本研究では、ホーンアンテナから放射される 9.2 GHz の磁界(MW)とコイルから発生させる被測定対象となる数十 kHz ~ MHz 帯の磁界(RF)を同時に ^{133}Cs の気体原子が封入されたガラスセルに照射する。一方これまで、金属体から成る電磁界センサのアンテナ自身が無いため、測定すべき電磁界を乱すという擾乱を軽減する事が期待できると謳って来た。そこで、実際にガラスセルの内外における電磁界の状況が、どのようになっているかに関する検証を行った。

本研究では、X バンド帯用の WR90 導波管の内部に収まるサイズに設計したガラス製のセルを空間中の電磁界計測用に転用しているため、 ^{133}Cs の気体ガスの封入用ガラス製セルの外寸は 40 mm × 10 mm × 22.5 mm であり、ガラス壁の厚さは 1.5 mm である。実際に、このようなガラス製セルが、被測定電磁界に対してどの程度の侵襲性を与えているかに関する検討は実験では困難であるため、電磁界シミュレータによる数値解析が必要となる。図 3 に電磁界シミュレータによる計算設定の模式図を示す。その結果、セルの外寸が 40 mm × 10 mm × 20 mm、ガラス壁の厚さは 2 mm として数値解析を行った場合、図 4 に示すように、セルの内部ではガラス製セルが無い場合と比較して 2 倍以上もの磁界強度になることが分かった。なお、周波数は 9.2 GHz(MW)、ガラス製セル壁の比誘電率は 3.575、比透磁率は 1.0 である。

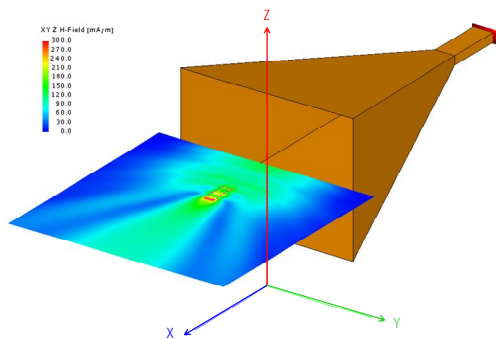


図 3. 電磁界シミュレータによる計算の設定状況 (磁界強度分布図内の赤色点線がガラス製セルの断面位置)

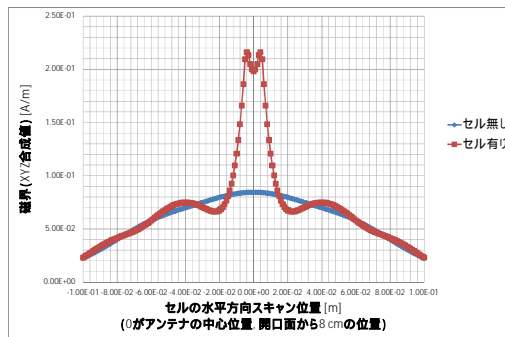


図 4. 近傍磁界強度分布の計算結果の比較 (アンテナ中心高, 開口部からの距離 80 mm)

なお、数値解析の手法にはモーメント法を用いており、また図3では自由空間中において、8.2 GHz ~ 12.4 GHz で動作する標準ホーンアンテナの開口面からボアサイト方向の距離 80 mm の位置に、ガラスセルを配置している。図4の結果からは、ガラス壁の位置での磁界強度分布が最大になることが分かった。このため、ガラス壁の厚さを 2 mm ~ 0.1 mm の間で変化させた場合の検討を次に行った。

図5には、ガラス製セルが無い場合、2 mm または 0.1 mm の壁のガラス製セルがある場合の3種類の磁界強度分布の2D図(xy面)を示す。また図6には、標準ホーンアンテナの開口部から80 mmの位置(ガラス製セルの中心を貫く位置 $x=80$ mm)におけるアンテナ開口に平行な方向(y軸方向)での磁界強度分布の比較結果を示す。これらの結果から分かるように、ガラス壁が薄いほど、擾乱が軽減される事がわかる。一方、この大きさのセルを 0.1 mm の厚さのガラスで製作することは困難である事が予想される。そこで将来は、ガラス製セルの大きさと形状についての検討も行い、ガラス製セルの詳細な設計が必要であると言える。なお、被測定対象となる数十 kHz ~ MHz 帯の磁界(RF)に対しての擾乱は、波長がはるかに長いために少ない事が予想できる。

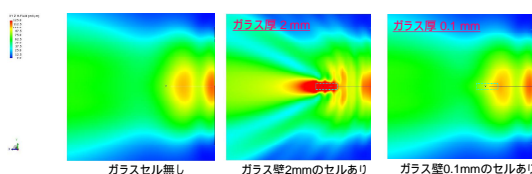


図5. 磁界強度 2D 分布の比較 (各磁界強度分布図内の水色点線がガラス製セルの断面位置, 各図の右端がホーンアンテナの開口面の位置であり左に向かう方向がホーンアンテナからのボアサイト方向)

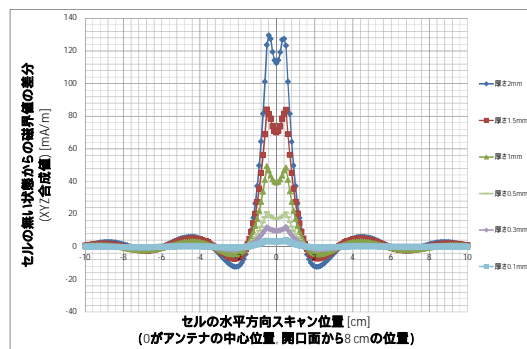


図6. 磁界強度分布の計算結果の比較(セル無からの差分)(ホーンアンテナ開口部からの距離が 80 mm の位置で, アンテナ開口面に平行でセルの中心を貫く軸上の分布)

次に、図2に示したゼーマン副準位間のエネルギー差に着目し、未開拓である数十 kHz ~ MHz の低周波帯の磁界センサの実現可能性に関する検討を実施した。まず、基底準位の超微細構造間における原子の二重共鳴を観測した場合、そのスペクトル分裂幅はゼーマン副準位間のエネルギー差に該当する。そのため、この分裂幅が測定の対象となる低周波交流磁界の周波数となる。またここで、セシウム原子が封入されたガラスセルが中心に配置される様に設置した3軸のヘルムホルツコイル等により、外部から印加する DC 磁界を調整することで、測定対象となる交流磁界の周波数を任意に選択することが可能である。そこで今回は、kHz 帯の周波数を目標として、18.2 kHz または 101 kHz となる様に外部から印加する DC 磁界の強度を調整した。

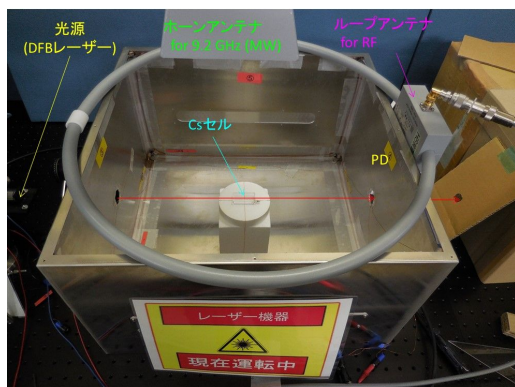


図7. 測定のセットアップ

前述のガラス製セル(外寸法 40 mm × 10 mm × 22.5 mm、ガラス壁の厚さ 1.5 mm)に ^{133}Cs 気体を封入し、そこを透過させた 852 nm のレーザー強度を PD で観測できるようにしておき、この状態において 9.2 GHz の磁界 (MW) とゼーマン副準位間のエネルギー差に該当する周波数に相当する 18.2 kHz または 101 kHz の磁界 (RF) を同時に照射する。この時、この測定対象となる RF の磁界の有無によって、レーザーの強度を観測している PD からの DC 電圧の出力値が変化する。実際の測定のセットアップを図7に示す。

また、照射する MW の周波数を 9.192632 GHz を中心に 1 kHz ステップで ± 0.25 MHz のスパンで掃引する。この時、RF の有無により得られる2つのスペクトルを比較し、それらの振幅大きさに差を見る事に成功した。測定対象となる RF の周波数が 18.2 kHz と 101 kHz に関して、それぞれ得られた結果を図8と図9に示す。それぞれの差異を利用すれば、量子物理現象に基づく低周波帯における次世代型の交流磁界センサの実現の可能性が見えて来るため、検証実験に成功したと言える。

なお、外部から印加する DC 磁界の強度を調整し、ゼーマン副準位間のエネルギー差をさら

に広げる事で、被測定交流磁界の周波数を MHz 帯の周波数帯で選択する事も可能である。

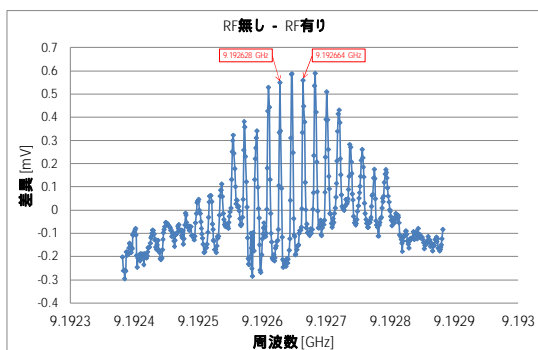


図 8. RF 無しと RF 有りのスペクトルの差異 (18.2 kHz) (差分後のグラフの例として)

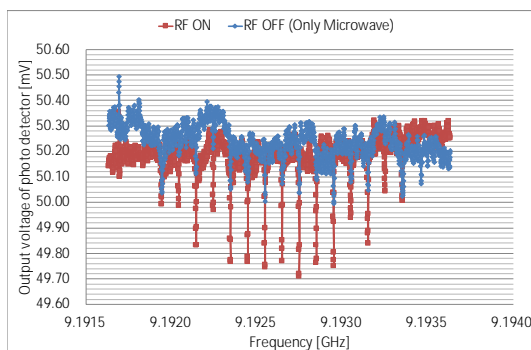


図 9. RF 無しと RF 有りの 2 種類のスペクトル (101 kHz) (差分前のグラフの例として)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Moto Kinoshita, Masanori Ishii, Electromagnetic Field Sensor Based on Atomic Candle, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 6, 2017, pp. 1592-1597.

DOI: 10.1109 / TIM. 2017. 2661618

Moto Kinoshita, Yuya Tojima, Hitoshi Iida, Frequency Extension of Atomic Measurement of Microwave Strength Using Zeeman Effect, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, 2019, pp. 2274-2279.

DOI: 10.1109 / TIM. 2018. 2886869

Moto Kinoshita, Masanori Ishii, Visualization of radio-frequency waves via double resonance spectroscopy of cesium atoms, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 052004, 2019, pp. 052004-1-5.

<https://orcid.org/0000-0002-8878-1942>

〔学会発表〕(計 10 件)

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)

石居 正典, 木下 基, 高周波電磁界中におけるガラス製セルの擾乱の軽減, 電子情報通信学会 2016年ソサイエティ大会, 2016年09月22日, 北海道大学 (北海道・札幌市)

石居 正典, 木下 基, 量子現象に基づく電磁波可視化技術の初期検討, 電子情報通信学会 2017年ソサイエティ大会, 2017年09月14日, 東京都市大学 (東京都・世田谷区)

Masanori Ishii, Moto Kinoshita, A feasibility study of visualization method of electromagnetic field by a quantum phenomenon, Progress in Electromagnetics Research Symposium 2017 (PIERS2017), (国際学会), 2017年11月22日, シンガポール (シンガポール)

石居 正典, 50-60Hz における磁界センサの校正のための計量標準, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018年03月14日, 九州大学 (福岡県・福岡市)

Masanori Ishii, AC Magnetometer Calibrations from 50 Hz up to 100 kHz at NMIJ, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2018 (CPEM2018) (国際学会), 2018年07月11日, パリ (フランス)

Moto Kinoshita, Feasibility Study for Atomic Measurement of Microwave Strength at Arbitrary Frequencies within the Full X-Band, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2018 (CPEM2018) (国際学会), 2018年07月11日, パリ (フランス)

石居 正典, 交流磁界センサ校正用標準磁界発生システムの適用範囲, 電子情報通信学会 2018年ソサイエティ大会, 2018年09月13日, 金沢大学 (石川県・金沢市)

石居 正典, セシウム原子の多重共鳴を利用した低周波帯用交流磁界センサの初期検討, 電子情報通信学会 2019年総合大会, 2019年03月20日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称： -
発明者： -
権利者： -
種類： -
番号： -
出願年： -
国内外の別： -

取得状況(計 1 件)

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
種類：特許
番号：2018-184784
取得年：2018 年
国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等
セシウム原子の共鳴を利用した新たな電磁波計測技術を開発
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20160711/pr20160711.html

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：木下 基
ローマ字氏名：(KINOSHITA, Moto)
所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所
部局名：物理計測研究部門
職名：主任研究員
研究者番号(8桁)：00415671

(2)研究協力者

研究協力者氏名： -
ローマ字氏名： -

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、研究者個人に帰属されます。