

# 論文の内容の要旨

論文題目

アトミックキャンドルによるセシウム原子のラビ周波数測定に基づくマイクロ波絶対電力の計量標準  
(Metrology Standard of Absolute Microwave Power Based on  
Measurement of the Rabi Frequency of Cesium using an Atomic Candle)

氏名 木下 基

他者と物の程度や数量を共有することは、人類の社会生活において重要であり、まして知性を集合させることで物事の理を追求する科学技術分野においてその必要性は明らかである。今日においてこれは、SI と呼ばれる 7 つの基本単位とそれらの組立単位から成る世界共通の単位系を設けることで実現されている。この中で、それぞれの単位を実用するために、それらの定義を忠実に具現化した測定標準が用いられる。従って測定標準は確度、精度、安定度において常に最高の性能が求められる。高精度で安定な測定は量子力学との相性が非常に良い。この最たる例が時間・周波数標準であり、その精度は電磁波と原子の相互作用を利用して  $10^{-16}$  台にも達している。同時に、長さ標準や直流電圧標準は周波数測定を参照することで高精度化も実現されている。これらに倣って、他の単位においても量子標準を目指す傾向が生じるのは必然と言える。測定標準は実用されるすべての物理量に対して必要であり、マイクロ波電力もその中の 1 つである。マイクロ波は現在、無線通信などに応用され人々の高度化された生活基盤を支え、特に近年において、携帯電話、無線 LAN、テレビ放送に対する需要の拡大に鑑みて、その重要性に疑いは無い。またマイクロ波の特徴の 1 つに指向性が乏しいことが挙げられるが、これは、マイクロ波が他の装置や生体に対して安全に使用できるように管理されるべきことを示している。このために最重要となる項目が、マイクロ波の強度を示す電力である。マイクロ波電力の測定標準は 50 年以上にわたってカロリーメータを始めとする熱測定を基本原理として実現されてきた。しかし近年、マイクロ波電力においても量子標準を目指す動向が生じた。すなわち、原子のラビ周波数測定を基準としてマイクロ波強度を測定するという着想である。このラビ周波数によるマイクロ波強度測定には 3 件の先行研究が存在する。ルビジウム原子のアトミックキャンドルによる Camparo 氏等の研究、ルビジウム原子のレーザ

一冷却による Michaud 氏等の研究、セシウム原子のレーザー冷却による Crowley 氏等の研究である。しかし、レーザー冷却を用いた Michaud 氏等や Crowley 氏等の研究では実験系が複雑化するため今のところ高精度測定には至っていない。従って、アトミックキャンドル方式が有望であると考えられるが、Camparo 氏等の研究においては未だ絶対電力の測定は達成されていない。これは彼等が用いたガラスセルやマイクロ波導波管の特性評価が課題となっていると考えられる。つまり 3 例の先行研究における課題は、原子との相互作用するマイクロ波の振る舞いが複雑化することに集約される。そこで本研究では、マイクロ波の特性を単純化するために導波管内に嵌合するガラスセルを用いたアトミックキャンドル方式を採用した。また使用できる導波管の汎用が高いセシウムを用いることでマイクロ波特性の解析や調整を可能とした。

本論文において、世界初となるセシウム原子のアトミックキャンドルを用いたマイクロ波電力標準について述べる。本論文は 10 章から成る 4 部で構成された本文と後付けで成り立っている。

第 I 部は序論として第 1 章および第 2 章を含む。第 1 章では、背景として上述のような計量標準の仕組みとマイクロ波電力標準の現状について記載した。第 2 章ではラビ周波数を用いたマイクロ波電力標準の原理や上述のような先行研究とそれらを踏まえた本研究の特色などを述べた。まず、二準位原子とマイクロ波のコヒーレント相互作用に対する理論的解析を行い、ラビ周波数がマイクロ波の磁場強度に比例することを示した。これとセシウム原子における比例定数を併せて、ラビ周波数によるマイクロ波の絶対電力測定が可能であることを述べた。次に Camparo 氏等、Michaud 氏等、

Crowley 氏等の研究を紹介し、上記のような、それぞれの課題とそれらを踏まえた本研究の特色を記した。ここで本研究の新規性としては、セシウム原子を用いたアトミックキャンドルを初めて実行すること、アトミックキャンドル方式によって初めてマイクロ波電力の絶対値を測定すること、ラビ周波数を用いたマイクロ波電力測定として最高精度を目指すことなどを挙げた。

第 II 部はアトミックキャンドル方式によるラビ周波数測定の実験について記述し、第 3 章、第 4 章、第 5 章から成る。第 3 章では、アトミックキャンドルを実行するための予備実験として行われたレーザーとマイクロ波による二重共鳴分光について述べた。これは、セシウム原子とマイクロ波による微弱な相互作用をレーザーとの強力な相互作用に変換して観測するためのものである。図 1 に得られた二重共鳴スペクトルを示す。二重共鳴分光自体は一般的に用いられる方法であるが本実験における特色は以下の通りである。まず、嵌合するガラスセルを用いて導波管内において

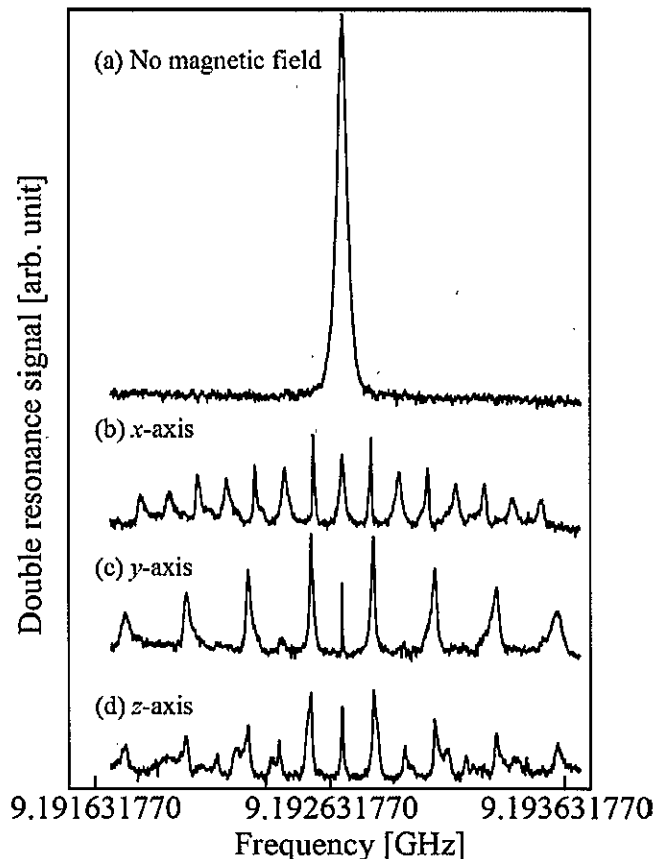


図 1 セシウム原子の二重共鳴スペクトル

二重共鳴分光を実行したことである。次に、セシウム原子と作用するマイクロ波の磁場成分を特定することがその後の電力測定において重要となるため、量子化軸や Zeeman 副準位によってこの磁場成分を選別可能にしたことも特徴である。図 1 においても量子化軸によるスペクトルの違い(a-d)が顕著に現れている。そして、ラビ振動を検出するためには十分な相互作用時間が必要になるため、バッファガスをを用いたことなども挙げられる。第 4 章では理論解析を含めたアトミックキャンドルの原理について説明し、二重共鳴分光においてマイクロ波に位相変調を加えることでアトミックキャンドル信号が得られることを示した。ここで、アトミックキャ

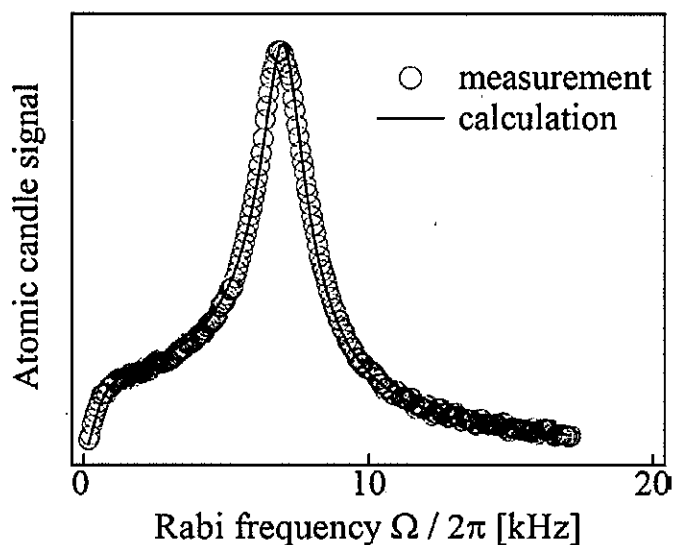


図 2 アトミックキャンドル信号

ンドル信号のピークにおいて位相変調周波数 $\omega_m$ とラビ周波数 $\Omega$ の間に $\Omega = 2\omega_m$ という関係式が成り立つことから $\omega_m$ によって $\Omega$ が特定可能であることに触れた。つまりこれは、印加する位相変調周波数を選ぶことで任意のラビ周波数を発生可能であることを意味する。本章において、実際に得られたアトミックキャンドル信号のピークに注目することで、マイクロ波強度とラビ周波数が比例関係にあることを実証した。セシウム原子を用いたアトミックキャンドルはこの実験が初となる。第 5 章にはアトミックキャンドルをマイクロ波の電力測定に特化させるために施した最適化について記した。ここで、アトミックキャンドル信号のピークの振る舞い、線幅、信号雑音比を指標として、量子化軸を決定する直流磁場の強度、位相変調の深さ、ガラスセル内のマイクロ波の様子、レーザーでの検出位置とビーム径、レーザーの強度およびバッファガスの圧力など様々なパラメータについて最適化を行った。その結果、ラビ周波数測定の精度を向上させると共に、理論と合致する信号が得られた。これを図 2 に示す。アトミックキャンドルに対してこのような理論通りの結果が得られたことはこれが初めてである。この図の横軸はマイクロ波強度を、信号のピークにおいて $\Omega = 2\omega_m$ という条件から見積もったラビ周波数で書き換えたものである。つまり本実験で得られたアトミックキャンドル信号がマイクロ波強度と周波数を仲介したことになる。

第 III 部は第 6 章、第 7 章、第 8 章で構成され、上述のようにアトミックキャンドル信号から得られたラビ周波数を基準としたマイクロ波電力測定の様子とその結果の検証について記載した。第 6 章では約 4 kHz から 21 kHz のラビ周波数を発生させ、理論式や文献値を用いてそれぞれに相当するマイクロ波の磁場強度を求めた。この磁場強度に対して、電磁界シミュレータを用いてガラスセルに起因するマイクロ波伝送モードの乱れを補正することで、ガラスセル内の伝送電力を得た。さらに、ネットワークアナライザで測定した反射係数を補正することによって、ガラスセル内を伝送する電力から、ガラスセルへの入射電力に変換した。アトミックキャンドル方式によるマイクロ波の絶対値測定はこの実験が世界初となる。第 7 章ではこの入射電力を、熱測定に基づく従来方式で測定し、両者の比較を行うことで本結果の妥当性を検討した。この測定は、我が国の特定標準器であるカロリメータによって校正された仲介器に、同軸-導波管アダプタを付加することで行われた。電力の比較には、マイクロ波信号源の安定度を補正するために別途モニター電力計を設けて、それとの比を測

定する取替え同時比較方法を採用した。また他にも、同軸-導波管アダプタの影響や、マイクロ波の分岐回路の特性を意味する等価信号源反射係数の補正も加えることで、両者の直接比較を行った。ラビ周波数方式および熱方式によって測定した電力とモニター電力との比をそれぞれ求めた結果を図3に示す。この結果、両者は不確かさの範囲内で一致していることが確認された。従ってこれは、従来方法に矛盾無く、ラビ周波数を基準とした新しい測定方法が実現されたことを意味する。ここで図示されている不確かさの見積もりについては、続く第8章で解説した。考え得るすべての要素についてそれぞれ不確かさを見積もり、それらを合成した結果、ラビ周波数方式についての相対標準不確かさは2.0%であった。これは、Michaud氏等や Crowley氏等によって報告された不確か

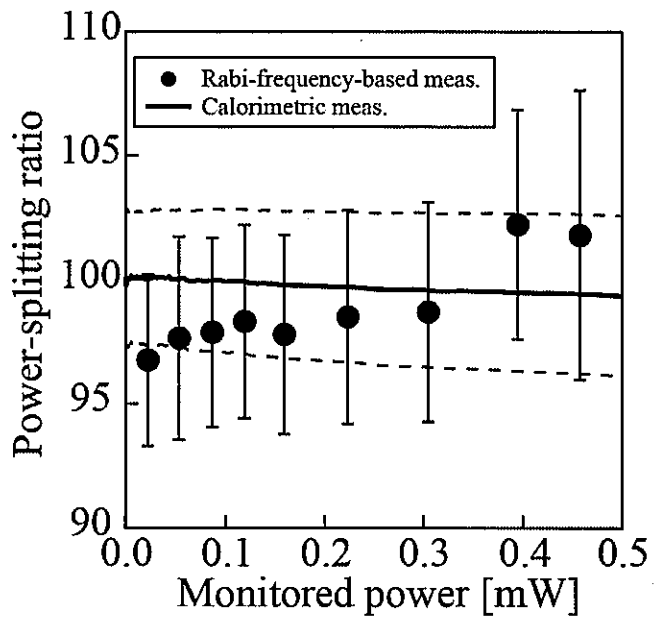


図3 ラビ周波数方式と熱方式の比較

さよりも小さい。つまり現時点において、ラビ周波数方式では世界で最高精度を記録したことになる。また不確かさの要素の検証において、電磁界シミュレータを用いたガラスセル特性の補正による不確かさが最終結果に対して支配的に寄与していることを突き止めた。これは今後の研究において当該の補正精度を向上させることが、全体の不確かさの改善に効果的であることを示唆している。

第IV部の第9章には各章毎のまとめと全体についてのまとめを簡潔に記した。さらに第10章には今後の展望として以下の3点を挙げた。1つ目は不確かさの改善に関する計画であり、電磁界シミュレータに頼ることなく、磁場強度から伝送電力への変換において解析的な計算を可能とする導波管の構造を紹介した。これはガラスセルを用いた方式とは異なり、導波管自体を真空チャンバーと化すことでガラス壁面の影響を除去するという発想である。これによって断面に誘電体を含まない一般的な導波管の伝送モードが適用できるため、計算における不確かさの要素の劇的な軽減が可能となる。従って、最大の不確かさ要因であった電磁界シミュレータの計算を排除し、1%以下の不確かさの実現が期待される。2つ目は同原理を、導波管内部の電力測定だけでなく、自由空間における磁場強度測定に展開するという計画である。今までに磁場強度の測定は比較的に低い周波数領域において一般的に行われてきたが、マイクロ波帯における例は少ない。また不確かさの解析において、マイクロ波の磁場強度から電力への変換において不確かさが増大することを述べたが、これは裏を返せばマイクロ波の磁場強度であれば高精度に測定可能であることを示唆している。従って、ラビ周波数を用いた自由空間磁場強度測定に関する研究は非常に興味深い。3つ目は周波数拡張に関する見解である。本論文で述べた方式は、セシウム原子の共鳴周波数のみへの適用に限られるが、セシウム原子の中にも多数存在する共鳴周波数を上手く選ぶことで周波数拡張が可能であることについて言及した。

第V部は後付けである。ここには、付録として本論文の内容に関連する高周波測定やセシウム原子についての一般的な知識を記した。続けて、謝辞、関連発表および参考文献の一覧を記載した。