

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

木下 基 石居正典

産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: moto-kinoshita@aist.go.jp, masanori-ishii@aist.go.jp

あらまし 従来、マイクロ波の強さは、カロリメータ等による熱測定に基づく電力測定やマクスウェル方程式に基づく電流電圧測定によって行われてきた。これに対して近年、量子力学に基づいた原子との相互作用を利用した測定方法が提唱されている。この方法は、原子とマイクロ波の結合度合いを示すラビ周波数がマイクロ波強度に比例するという性質を利用したものであり、測定の高精度化と高安定化が期待できる。また、光検出により金属アンテナを用いないため、メタルレスかつワイヤレスな低侵襲性センサの実現についても期待されている。本研究では、ガラスセルに封入されたセシウム原子気体と 9.2 GHz のマイクロ波の間の相互作用としてのラビ周波数を基に、マイクロ波の強度測定を行った。ここでは、はじめに導波管内を伝搬するマイクロ波の電力測定について解説し、次にホーンアンテナによって照射されたマイクロ波磁場強度の空間分布測定について解説する。

キーワード マイクロ波, ラビ周波数, 磁場強度, セシウム

Microwave Sensor Using the Rabi Frequency Measurement of Cs Atom with Optical Pumping

Moto KINOSHITA and Masanori ISHII

Research Institute for Physical Measurement, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563 Japan

E-mail: moto-kinoshita@aist.go.jp, masanori-ishii@aist.go.jp

Abstract While strengths of microwave have been measured as the power consumption based on the calorimetric method and as the current or voltage based on Maxwell's equations, the quantum-based measurement using an atomic interaction is recently being suggested. The quantum-based measurement utilizes the fact that the Rabi frequency, which shows a degree of combination between atoms and microwaves, is proportional to the field strength of the microwaves interacting with the atoms. This new method is expected to achieve a minimally invasive sensor which is characterized by metal-free and wireless using a laser probe, as well as to be accurate and stable. In this study, the strength of the microwave at a frequency of 9.2 GHz was measured based on the Rabi frequency of 133 cesium atoms enclosed in a glass cell. The measurement of the microwave power transmitting in a waveguide is firstly explained. Next, the measurement of the microwave field strength in space, which is radiated from a horn antenna, is shown.

Keyword microwaves, Rabi frequency, magnetic field strength, cesium

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

産業技術総合研究所
物理計測標準研究部門

木下 基、石居正典

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 1

電磁波の電力測定

出力=? 影響は?

規制 電磁波 生体 電子機器 通信システム

法令、規格

マイクロ波の公共利用において電力標準は不可欠!

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 2

高周波電力の一次標準器

カロリメータ

ブロック図

カロリメータ及び制御器の写真

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 3

カロリメータの動作原理

高周波 OFF

高周波 ON

温度基準ブロック

測定端子

ヒーター

冷却

温度差検出

$\Delta T = 0$ のとき、消費電力のつり合いから

$(1 - g_1)P_{h1} = KP$

g_1 : 外部への漏洩

$\Delta T = 0$ のとき、消費電力のつり合いから

$(1 - g_2)P_{h2} + (1 - g_2)(1 - |\Gamma_s|^2 + \frac{q\alpha}{1 - \alpha})P_i = KP$

g_2 : 外部への漏洩

α : 測定端子前での減衰係数

q : 熱伝導による超過加熱

Γ : 測定端子の反射係数

$P_i = \frac{k}{1 - |\Gamma_s|^2} \left(\frac{1 - q\alpha}{1 - \alpha} \right) (P_{h1} - P_{h2})$

$k = \frac{1 - g_1}{1 - g_2}$

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 4

カロリメータの不確かさ

$$P_i = \frac{k}{1 - |\Gamma_s|^2} \left(\frac{1 - q\alpha}{1 - \alpha} \right) (P_{h1} - P_{h2})$$

量	不確かさ u_i	感度係数 c_i		$ u_i \times c_i $		
		値	単位	値	単位	値
直流電力の差 $(P_{h1} - P_{h2})$	0.00016	mW	1.05	1	0.00017	mW
反射係数 Γ_s	0.00300	1	0.04	mW	0.00013	mW
直流置換係数 k	0.00111	1	1.05	mW	0.00117	mW
超過加熱係数 q	0.01700	1	-0.06	mW	0.00103	mW
断熱線路での損失 α	0.00035	1	0.20	mW	0.00007	mW
実験標準偏差 σ	0.00014	mW	1.00	1	0.00014	mW
合成不確かさ					0.00158	mW

$P_i = 1 \text{ mW}$ に対して 0.16%

実際の校正では被校正器との比較の不確かさが加算され、0.5%程になる。

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 5

各種カロリメータ (高周波)

(0.01 GHz ~ 40 GHz) 同軸 2.9 mm

(50 GHz ~ 75 GHz) Wバンド導波管

(0.01 GHz ~ 18 GHz) 同軸 7 mm

Wバンド導波管 (75 GHz ~ 110 GHz)

Dバンド導波管 (110 GHz ~ 170 GHz)

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 6

周波数測定による電力標準

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 7

新方式のトレーサビリティ

周波数

量子ホール抵抗 ジョセフソン効果

↓ ↓

直流抵抗 + 直流電圧 熱

現行方式 (カロリメータ型) 新方式 (原子共鳴型)

マイクロ波電力

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 8

ラビ周波数の利用

上下方向角運動量: $|a_{1 \rightarrow 2}(t)|^2 = \sin^2 \frac{\Omega t}{2}$

マイクロ波 原子

↑↑ ↓↓

電子スピンのラビ周波数で振動する。

$$\Omega = \frac{\mu_0 \mu_B g_J \langle \uparrow | J | \downarrow \rangle}{\hbar} H$$

ラビ周波数はマイクロ波磁場強度に比例!

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 9

光でマイクロ波スペクトルを測定

wavelength 852 nm

frequency 9.2 GHz

Isolator ECDL Stabilization PD

Cs Cell Cs Cell PD

WR90 Waveguide System 3 dB Directional Couplers 20 dB Directional Couplers Tuner Helmholtz coils Reference Detector Isolators

SG PC DVM

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 11

マイクロ波スペクトル

Cs原子のエネルギー準位

Double Resonance Signal (a.u.)

microwave frequency

Quantum axis Propagation π pulse

15 peaks

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 12

ラビ周波数の誘起

原子集団のラビ振動

マイクロ波 原子 減衰振動

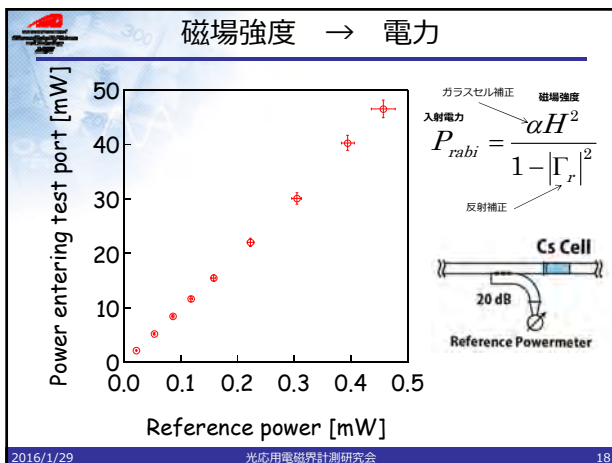
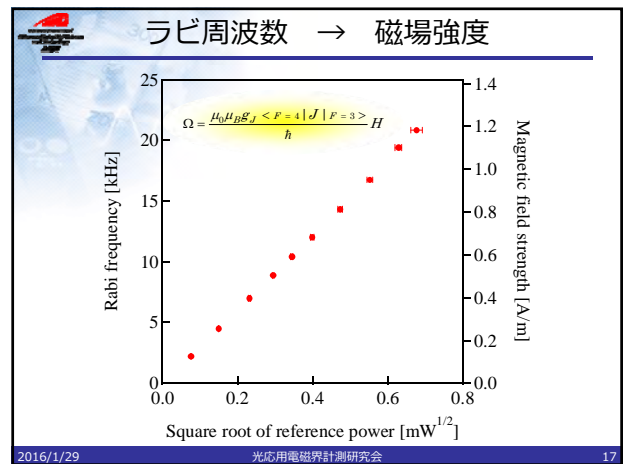
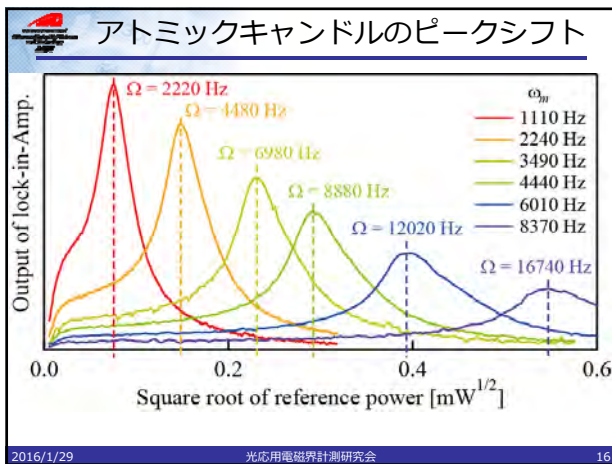
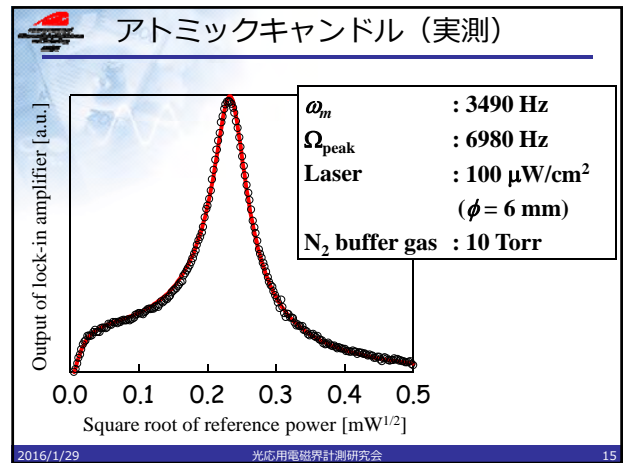
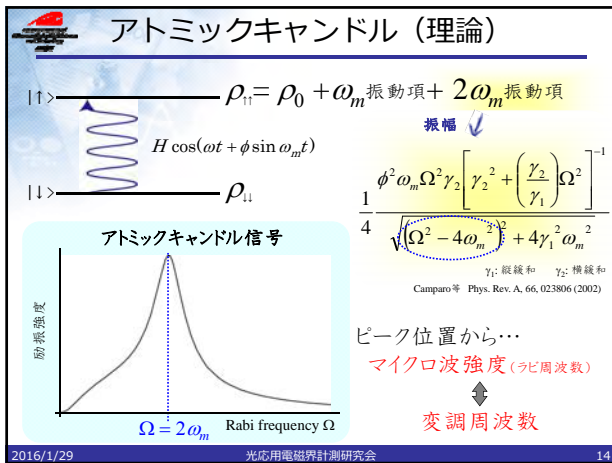
セル中の個々の原子で位相がバラバラ

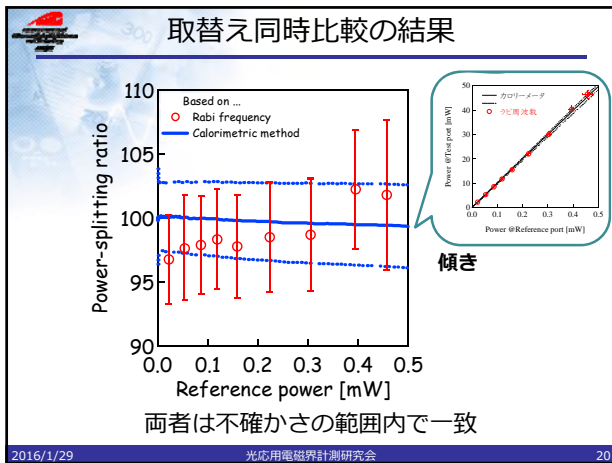
パラメトリック励振

レーザー Cs原子 強制振動

マイクロ波 位相変調 二重共鳴信号

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 13





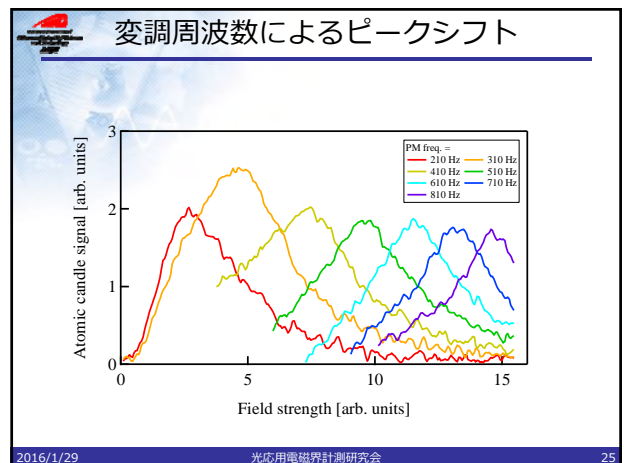
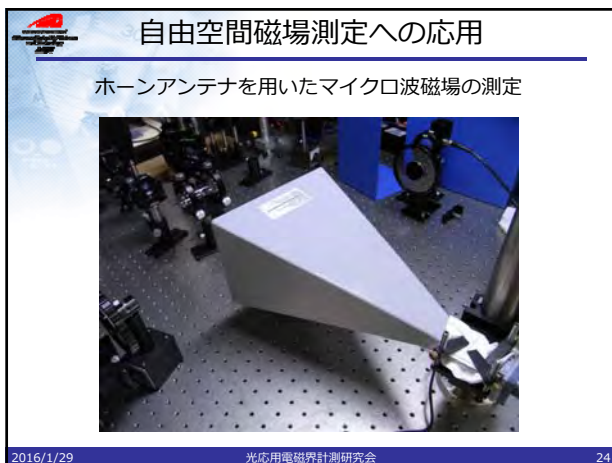
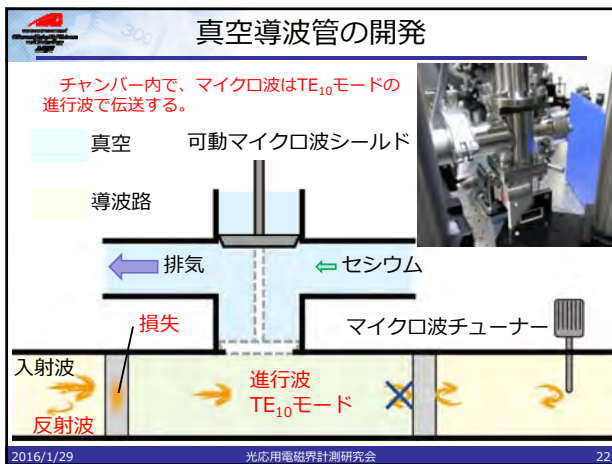
不確かさの内訳

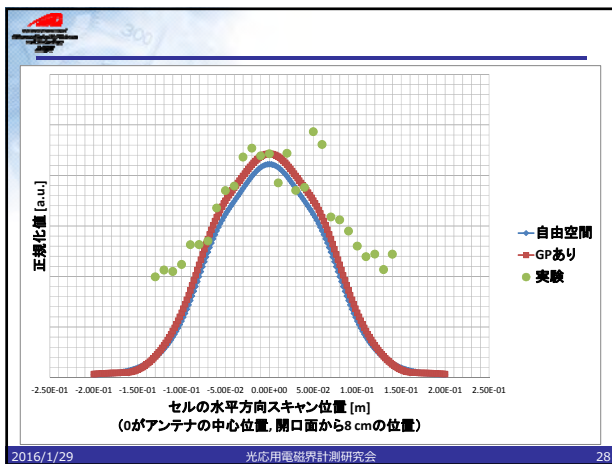
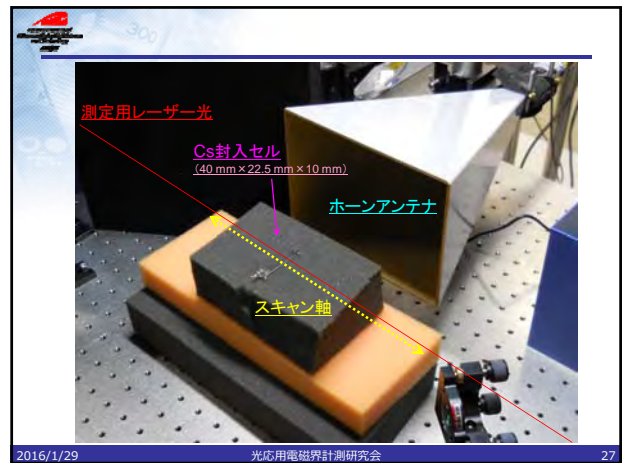
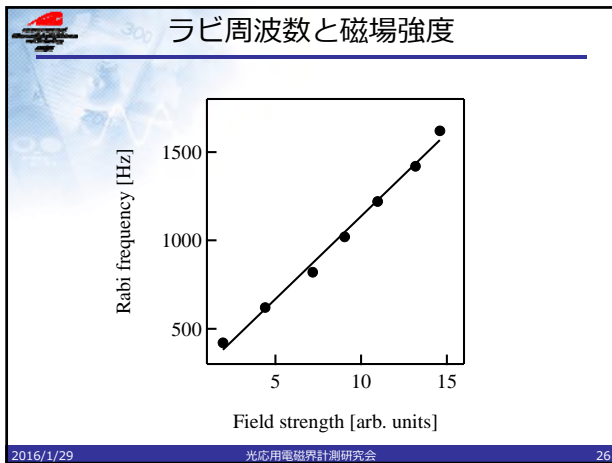
@ 11.7 mW

Rabi frequency	0.15 %	ラビ周波数の読み取り
Magnetic field strength	0.0006 %	磁場強度へ変換
Transmitted power	1.64 %	セル内の伝送電力へ変換
Reflection coefficient	0.60 %	セルへの入射電力へ変換
Statistical uncertainty	0.08 %	ばらつき
Microwave Power	1.75 %	合成標準不確かさ

不確かさの大部分は
マイクロ波の磁場強度から伝送電力への変換に起因する。

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 21





まとめ

従来型高周波電力標準
カロリメータ方式で直流電力が基準

ラビ周波数方式の現状
ラビ周波数を利用して周波数が基準
磁場強度→電力への変換で不確かさ増大

ラビ周波数方式の展望
空間磁場強度測定へ特化することで高精度化
金属を使用しないことで低侵襲性センサを実現
レーザーによる空間磁場のワイヤレス測定を実現

※ 本研究の一部はJSPS科研費26630117の助成を受けて実施された。

2016/1/29 光応用電磁界計測研究会 29