

## テラヘルツ波計測技術に関する調査研究

東島侑矢\*

(2018年1月31日受理)

## A survey on terahertz wave measurement technology

Yuya TOJIMA

## Abstract

This report surveys measurement technologies for terahertz (THz) power. Recent international trends for extending radio frequency power standards are introduced, which are brought about by the rapid growth of THz applications. For the precision measurement of absolute THz power, the principle of calorimetric measurement is described for a waveguide calorimeter in detail. A calibration technique for THz power meter is also presented based on direct comparison. Furthermore, some studies for validation of THz measurement systems are reported. A novel detection technique based on quantum phenomena are introduced as well.

## 1. 序論

電磁波の存在は19世紀後半にJ. C. Maxwell<sup>1)</sup>によって予測され、H. R. Hertz<sup>2)</sup>によって実験検証されている。その後、G. Marconi<sup>3)</sup>によって今日の無線通信の原点となる電波の実用化がなされている。こと無線通信に関しては、スマートフォンに代表される無線通信端末の爆発的な普及や、小型かつ低消費電力なワイヤレスセンサーの開発がIoT (Internet of Things) と呼ばれるビックデータを利活用する社会環境を生み出すなど、現代社会で電波の利用がもたらした恩恵は非常に大きい<sup>4)</sup>。ここで、電波とは日本国内において電波法第2条第1号により「三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波」と定義されている<sup>5)</sup>。

100 GHz から10 THz 程度の周波数範囲のテラヘルツ波 (THz: Terahertz Wave) は、これまで発生と検出が困難で高価な機器が必要であったことから、主に学術的利用が中心であった。しかしここ数年、基礎研究の成熟に伴って新たな光源や検出器が開発され、社会普及に向けた応用研究が盛んに行われている<sup>6),7)</sup>。我が国では、

テラヘルツ波を含む電波の無線通信利用において、送信電力や高調波などの目的外の不要放射強度の規制が存在する。そのため、テラヘルツ波帯における正確な電力測定技術の確立は、他の機器や生体に対する安全性を考慮し公共利用するため必要不可欠である。また多様な光源や検出器の特性を定量的に評価するため、計量標準の確立が重要である。

本調査研究では、テラヘルツ波応用の動向調査から、テラヘルツ波帯における精密計測と電力標準確立の必要性について述べる。まず、すでに供給が行われているマイクロ波・ミリ波帯までの電力標準とトレーサビリティ体系について概説し、テラヘルツ波帯への標準拡張へ向けた最新の研究動向を調査する。さらに、新規電磁波強度計測技術について、量子現象を用いる電磁波検出の仕組みと研究動向を調査し、将来的な計量標準や応用展開への展望を述べる。

## 2. テラヘルツ波応用研究の動向

表1に電磁波の周波数別の分類と産業応用例を示す。電磁波は、ある空間中の電場と磁場の振動が伝搬することで形成される波であり、電波と呼ばれる領域から、赤

\*物理計測標準研究部門高周波標準研究グループ

表1 電磁波の分類と利用用途

分類	周波数	波長	代表的な周波数利用	
電波 <sup>5)</sup>	極超長波	0.03 - 3 kHz	100 km - 100 Gm	海中通信 地中探査
	超長波	3 - 30 kHz	10 - 100 km	海底探査
	長波	30 - 300 kHz	1 - 10 km	ラジオ放送 標準周波数局
	中波	0.3 - 3 MHz	100 - 1000 m	AMラジオ
	短波	3 - 30 MHz	10 - 100 m	船舶通信 アマチュア無線
	超短波	30 - 300 MHz	1 - 10 m	FMラジオ 業務用移動通信
	極超短波	0.3 - 3 GHz	10 cm - 1 m	携帯電話 電子レンジ
	マイクロ波	3 - 30 GHz	1 - 10 cm	衛星通信 無線LAN 気象レーダ
	ミリ波	30 - 300 GHz	1 - 10 mm	電波望遠鏡 車載レーダ
	赤外線 <sup>6)</sup>	サブミリ波	0.3 - 3 THz	0.1 - 1 mm
テラヘルツ波		0.3 - 7.5 THz	4 μm - 1 mm	光通信 防犯機器 レーザー加工
中赤外線		7.5 - 150 THz	2 - 4 μm	
近赤外線		150 - 384 THz	0.78 - 2 μm	
可視光線 <sup>9)</sup>	361 - 833 THz	360 - 830 nm	測量機器 照明	
紫外線 <sup>10)</sup>	832 THz - 30 PHz	10 - 400 nm	フォトリソグラフィ 殺菌機器	
X線 <sup>10)</sup>	30 PHz - 300 EHz	1 pm - 10 nm	X線写真, CT	
ガンマ線 <sup>10)</sup>	300 EHz - 30 ZHz	10 fm - 1 pm	透過写真撮影	

外線、可視光、紫外線そしてX線、ガンマ線と呼ばれる領域までも含んでいる。それぞれの分類における周波数範囲は、明確な定義はないが概ね表1のような範囲とみなされる<sup>5), 8)-10)</sup>。テラヘルツ波はミリ波から中赤外の一部の範囲の総称である。テラヘルツ波に関する研究は、1960年ごろのレーザーに関する研究開発が盛んな時期に行われ始め、当時日本では東北大学の西澤らによってテラヘルツ波帯でのレーザー発振に関する研究が先駆的に行われていた<sup>11), 12)</sup>。当時より、テラヘルツ波帯はエレクトロニクスとフォトニクス両面の技術から研究が行われていたものの、高強度な光源や高感度検出器がなく、一般には普及せず電波天文などの特定用途のみで使用されていた。1980年代になると、D. H. Auston らによって超短パルスレーザーを用いたピコ秒オーダーのパルス発生と時間波形の計測が報告され、常温でテラヘルツ波の発生と検出が可能となった<sup>13)</sup>。この原理を分光法へ

表2 テラヘルツ波応用の分類

分野	応用例
学術的応用	電波天文(衛星、望遠鏡), 分子ダイナミクスの解明, 電子材料開発, 新規領域開拓
イメージング 応用	非破壊検査(建造物内部欠陥, 文化財の状態・修復診断) 半導体デバイス評価(欠陥特定, 移動度測定), 医薬品開発(膜厚, 薬品分布)
分光 成分分析応用	バイオ計測(水分量, 農産物, 食品), 医薬品開発(結晶多形), セキュリティ(禁止薬物・爆発物診断)
情報通信応用	短距離無線通信(ビル間, サーバー間, 短エリア間)

と応用することで広帯域なテラヘルツ波の振幅と位相情報が短時間の測定で得られるようになり、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS: Terahertz Time Domain Spectroscopy)として注目された。THz-TDSは、測定試料を透過・反射したテラヘルツ波の電場の時間応答を観測し、それをフーリエ変換することによってテラヘルツ波のスペクトル情報を得る分光法である。この技術が確立すると、2000年代以降、産業応用へ向けた研究が盛んに行われはじめた<sup>14)-18)</sup>。表2にテラヘルツ波における応用展開の動向を示す。テラヘルツ波応用分野を大別すると、学術的応用、イメージング応用、分光・成分分析応用、情報通信応用に分類される<sup>19)</sup>。それらの研究動向について概要を以下に述べる。

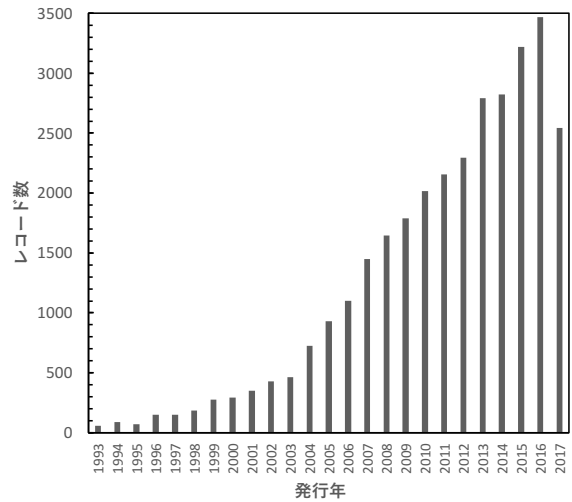
学術的応用では、古くから天文観測の分野においてテラヘルツ波帯が使用されており、近年ではアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)で使用される受信器の開発が行われている<sup>20)</sup>。また、テラヘルツ波帯センサを衛星に取り付け、深宇宙の大気中分子を観測する取り組みが計画されている<sup>21)</sup>。電子デバイスの開発では、微細加工や半導体作成技術の成熟に伴い、半導体で高速動作が可能になったことで、テラヘルツ波の発振や検出が可能な新規デバイスが開発されている。例として、共鳴トンネル効果に基づく負性抵抗により発振を可能とした共鳴トンネルダイオード(RTD: Resonant Tunneling Diode)<sup>22)-24)</sup>や、速度の速い電子のみによって素子の応答を決定するように工夫された単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD: Uni-Travelling-Carrier Photo Diode)<sup>25), 26)</sup>などが挙げられる。ここで、現在の研究動向についてトムソンロイター社の文献データベース

(WEB OF SCIENCE)<sup>27)</sup>を用いて、トピックスに“terahertz”を含む論文や雑誌について検索し調査した。図1(a)に出版年度別の登録レコード数(収録数)の結果を、図1(b)に国別のレコード数の結果を示す。25年分の出版年度別のレコード数の推移を見てみると、国際的にテラヘルツ研究活動が年々活発化していることが確認できる。また国別の論文数では、日本はアメリカや中国に次いで3位のレコード数を誇る事がわかる。我が国ではテラヘルツ研究が積極的に行われており、同時にここ数年テラヘルツ分野の研究が活発化していることが動向として確認できる。

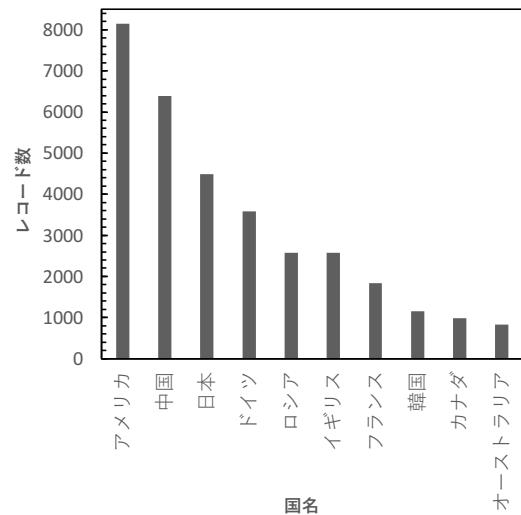
テラヘルツ波の顕著な特性として、光波のような高い直進性を持つとともに、光波は透過しないゴムやプラスチック、紙、木材などの物質に透過する点が挙げられる。その特徴を活用し、テラヘルツ波による非破壊・非侵襲な検査を目的としたイメージング応用が盛んに行われている<sup>28)-33)</sup>。代表的な例として、絵画や壁画といった重要文化財の修復<sup>34)</sup>、塗装や塗膜の検査<sup>35)</sup>、防振材などのゴムの劣化診断<sup>36)</sup>や集積回路の故障診断<sup>37)</sup>などが注目されている。近年では、実用化に向けた測定系の高速化や簡易化、信号処理による高分解能化に関する取り組みなども行われている<sup>38)-40)</sup>。

分光・成分分析応用では、テラヘルツ領域で分子間の水素結合やファンデルワールス力など弱い分子間相互作用により、物質固有の吸収や透過特性を示す指紋スペクトルが確認できる。その特徴を利用して、医薬品における結晶多形<sup>41), 42)</sup>や危険薬物の検出<sup>43), 44)</sup>などへの応用が行われている。このような応用には、物質の同定に用いるための指紋スペクトルのデータベース構築が重要である。理化学研究所(RIKEN)と情報通信研究機構(NICT: National Institute of Communication Technology)は共同でテラヘルツ波帯のデータベースの整備に取り組んでいる<sup>45), 46)</sup>。

情報通信応用では、テラヘルツ波は既存の無線通信よりも高い周波数帯にあるため、広い帯域を使用しより多くのデータ伝送が可能である。そのため、近年の情報通信社会における通信データトラフィックの増大といった課題の解決にむけ、テラヘルツ波帯で動作可能なデバイスや通信利用に向けた研究開発が盛んに行われている<sup>47)-51)</sup>。特に、テラヘルツ波帯はマイクロ波やミリ波帯に比べて大気減衰量<sup>52), 53)</sup>が大きい為、近距離での高速無線通信への利用が着目されている。国内では総務省が主導する「電波資源拡大のための研究開発の実施」において、「300 GHz帯無線信号の広帯域・高感度測定技術の研究開発」や「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究



(a) 登録レコード数の出版年数別推移



(b) 登録レコード数の国別発行数

図1 文献データベース(WEB OF SCIENCE)によるトピックス“terahertz”の文献調査

開発」が行われている<sup>54)</sup>。

一方で、通信利用の際には周波数の割り当てが必要となるが、日本国内における周波数割り当て上限<sup>55)</sup>は現状275 GHzまでであり、国際的にも通信利用における275 GHz以上の周波数割当はまだなされていない。国際的な周波数割り当てについては、国際電気通信連合(ITU: International Telecommunication Union)の無線通信部門(ITU-R: ITU Radiocommunication Sector)<sup>56)</sup>において、3~4年に一度開催されるITU世界無線通信会議(WRC: World Radiocommunication Conference)<sup>57)</sup>によって議論

されている。近年では、275 GHz-450 GHz における能動業務を目的とした周波数割り当ての議論が2019年開催のWRC-19で行われる予定である<sup>58), 59)</sup>。

テラヘルツ波応用展開の動向調査から、多くの応用分野において社会普及を念頭とした研究が増加していることがわかった。特に、情報通信応用では周波数割り当てを見据えて実用化目前である。しかし、今後の社会普及を目指すためには、まだ課題が残されている。それは、テラヘルツ波が公共利用される場合に他の電子機器や生体に対しての影響を正確に評価する技術、計量標準の確立である。そこで、テラヘルツ波強度を正しく評価するのに不可欠な電力計測技術について、まず基盤となる高周波電力標準とそのトレーサビリティ体系について述べる。

### 3. 高周波電力標準とトレーサビリティ

本節では、はじめに、高周波電力とトレーサビリティ体系を説明する。次に、各国の計量標準機関（NMI: National Metrology Institute）の高周波電力の標準供給状況について調査した結果を示す。その後、テラヘルツ波帯における電力測定技術の詳細を報告する。

計量法<sup>60)</sup>に基づく国内の高周波電力標準供給範囲では、下限周波数は10 MHzである。一方、電気・電子機器の国際標準化機関である国際電気標準会議（IEC:

International Electrotechnical Commission）では、規格として9 kHzを超える周波数を高周波としている<sup>61)</sup>。そこで、本論では9 kHzより高い周波数を高周波と表現する。電気回路の測定では、一般に電流や電圧測定が基本測定量として利用される。しかし高周波領域では、物理的な伝送線路長に対して波長が小さくなるため、伝送線路上において定在波が発生し、測定箇所に応じて計測される電流や電圧の値が異なってしまう<sup>62)</sup>。このため、高周波領域では電流や電圧ではなく電力（単位時間当たりに消費される電気エネルギー  $[W=J/s]$ ）が基本測定量となる。例えば、送信電力や不要放射強度を正しく評価するには、電力を正確に測定する必要があり、電波法や電波防護指針<sup>63)</sup>で規制されている。このような規制においては、トレーサビリティの確立が重要である。

図2に国内のトレーサビリティ体系を示す。トレーサビリティとは、「不確かさがすべて表記された、切れ目のない比較の連鎖を通じて、通常は国家標準又は国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の値の性質」<sup>64)</sup>である。国家標準は、各国のNMIにより国際比較やピアレビューが行われ、国際整合性を満たす証明として国際度量衡局（BIPM: Bureau International des Poids et Mesures）<sup>65)</sup>が管理するデータベース（KCDB Appendix-C）に校正・測定能力（CMC: Calibration and Measurement Capability）として登録される。メートル条約の主要加盟国間では、貿易障壁の撤

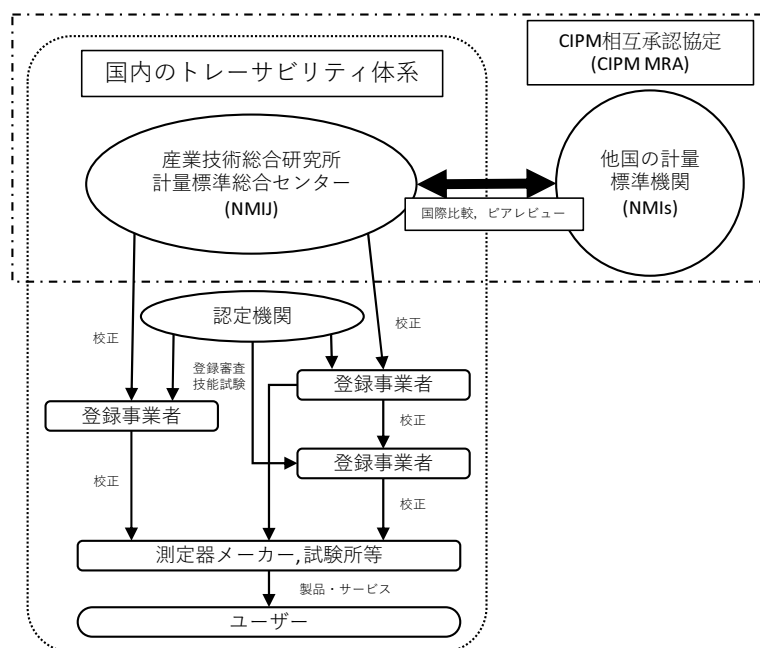


図2 国内のトレーサビリティ体系

廃を目的として相互承認協定 (MRA: Mutual Recognition Arrangement) により, 試験データの同等性を認め合う取り組みがある<sup>66), 67)</sup>. 図3にNMIJの高周波電力標準のトレーサビリティ体系を示す. 高周波電力は, 後述する測定方式により直流電力に置換して測定される. また, 高周波電力は伝送路のインピーダンスに大きく依存する. 従って, ジョセフソン効果による電圧標準<sup>68)</sup>, 量子ホール効果による抵抗標準<sup>69)</sup>, インピーダンス標準<sup>70)</sup>へのトレーサビリティが要求される.

高周波電力の校正対象となる計測器は, 一般に終端型の高周波電力計 (パワーメータ) である. 高周波電力計は, 検出素子が搭載されたセンサ部と, 測定した電力を処理して表示する指示計からなる. 市販されている高周波電力計は, 熱電対などによる熱的計測と, ダイオードによる整流計測が主流である<sup>71)</sup>. 通常, 高周波電力計は様々な要因からなる不確かさを含んでいるため, それらの指示値と実際の入射電力との間には若干の差が生まれる. これを補正するため, 高周波電力計は上位の標準器によって校正される. 校正のパラメータとしては校正係数, 実効効率のいずれかが用いられる. 校正係数および実効効率について以下に説明する<sup>72)</sup>. 図4のように, ある信号源から被校正電力計 (以下, DUT: Device

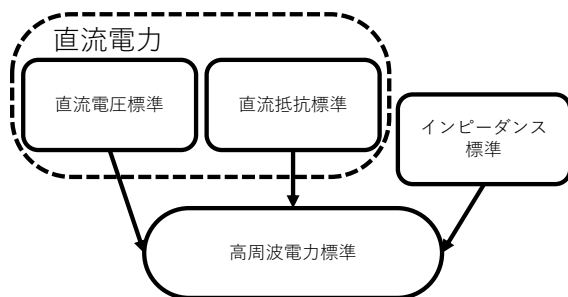


図3 高周波電力標準のトレーサビリティ体系

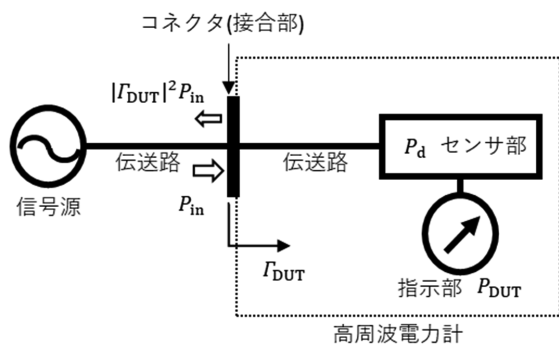


図4 高周波電力計の指示電力及び入射・吸収電力

Under Test) へ伝送線路を介して接続した線路と DUT の間にはインピーダンスのミスマッチが発生する. そのため信号源から発生した入射電力がそのまま DUT で吸収される電力とはならず, 結合部にて反射電力が発生する. DUT への入射電力を  $P_{in}$  とし, そのときの電力計の指示値を  $P_{DUT}$  とすると, 校正係数  $K_u$  は

$$K_u = \frac{P_{DUT}}{P_{in}} \quad (1)$$

で定義される. 従って, 指示値を校正係数で割ることで入射電力の正確な値を求めることができる. また, 指示値  $P_{DUT}$  とセンサ部が吸収する電力  $P_d$  との比が実効効率  $\eta_e$  として次式で定義される.

$$\eta_e = \frac{P_{DUT}}{P_d} \quad (2)$$

ここで, センサ部が吸収する電力は DUT への入射電力のうち信号源に反射する電力を引いた電力を表しており, 高周波電力計の入力端における反射係数を  $\Gamma_{DUT}$  とすると

$$P_d = (1 - |\Gamma_{DUT}|^2) P_{in} \quad (3)$$

である. 式 (1) から式 (3) より, 実効効率  $\eta_e$  と校正係数  $K_u$  の間には

$$\eta_e = \frac{K_u}{1 - |\Gamma_{DUT}|^2} \quad (4)$$

という関係がある. 実用上は入射電力  $P_{in}$  を必要とすることが多い. そのため, 校正係数が広く一般的に使用されており, 近年の標準供給体制において主流となっている.

### 3.1 諸外国の高周波電力標準の供給状況

本節では NMIJ と諸外国の高周波電力に関する計量標準供給の現状について, 登録されている CMC (2017年12月現在) を調査した結果を示す. 調査項目として, 校正対象で用いる伝送線路の同軸コネクタと導波管フランジ規格, 周波数範囲, 電力レベル及び不確かさ (包含係数  $k=2$ ) をまとめた結果を表3に示す<sup>73)-81)</sup>.

調査した9カ国の NMI では, 電力レベルや周波数範囲, コネクタタイプ, 不確かさは異なるものの, 概ね 100 GHz 前後までの電力標準が確立している. また, 不確かさの観点では日本も他国と同等以上の水準を維持していることがわかる.

今後の動向として, テラヘルツ波帯の通信利用ニーズに追従する形で, 300 GHz 帯までの周波数範囲の標準供給の拡張が予想される. NIM, PTB などでは, 日本と同様に 300 GHz 帯までを目標とした電力標準の供給に

表3 3.1. 諸外国の高周波電力標準の供給状況

NMI	伝送線路	コネクタ フランジ	周波数 [GHz]	電力レベル [mW]	相対拡張 不確かさ[%]
日本 NMIJ <sup>73)</sup>	同軸	PC-7, Type N PC-2.92	0.01 - 18 0.01 - 40	1 - 10	0.34 - 1.20 0.6 - 2.4
中国 NIM <sup>75)</sup>	同軸	Type N	0.01 - 18	1 - 10	1
	導波管	R100, R320, R400, R620	8.2, 8.6, 9.37, 10, 11, 12.4, 26.5 - 75	1 - 10	0.4 - 3
韓国 KRISS <sup>74)</sup>	同軸	PC-7, Type N	0.001 - 1 0.0001 - 18	0.001 - 50000 (0.001 - 1 GHz)	1 - 1.5
	導波管	WR90, WR62, WR42, WR28	8.2 - 40	N.A	1 - 1.5
ドイツ PTB <sup>76)</sup>	同軸	GR900(50, 75 Ω), Type N, PC-7, PC-3.5, PC-2.92, PC-2.4	DC - 2 (GR900(50, 75 Ω), Type N, PC-3.5), 0.01 - 50 (PC-3.5, PC-2.92, PC-2.4)	1 - 10	0.1 - 2
	導波管	R100, R140, R220, R320, R400, R620, R900	8.2 - 110	0.5 - 10	0.15 - 2.6
イギリス NPL <sup>78)</sup>	同軸	14 mm, GPC7, Type N, 3.5 mm, 2.4 mm	0.0001 - 8 (14 mm), 0.0001 - 18 (GPC-7, Type N), 0.05 - 26.5 (3.5mm), 0.05 - 50 (2.4 mm)	0.1 - 10	0.2 - 5
	導波管	R100, R140, R220, R320, R400, R620, R900	8.2 - 110	0.1 - 10	0.4 - 1.6
フランス LNE <sup>77)</sup>	同軸	PC-7, Type N, K, PC3.5	0.05 0.0005 - 40 0.000009 - 40 (PC-7, Type N, K, PC3.5)	10 - 100000 0.000001 - 100000	0.2 - 2.2 0.36 - 9.6
	導波管	R100, R140, R220, R320, R500, R740, R900	8 - 95, 8.2 - 96	0.01 - 100000	0.26 - 3.4 0.4 - 8
アメリカ NIST <sup>79)</sup>	同軸	GPC-7, Type N, 3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm	0.0001 - 18 (GPC-7, Type N), 0.05 - 40 (3.5 mm, 2.92 mm, 2.4 mm)	1 - 10	0.28 - 3.1
	導波管	WR90, WR62, WR42, WR28, WR22, WR15, WR10	8.2 - 75, 92 - 98	10	1.08 - 2.06
ロシア VNIIFTRI <sup>80)</sup>	同軸	Type N, BNC (75 Ω), 16/4.6 mm (75 Ω), 16/6.95 mm, SMA	0.01 - 18 (Type N), 0.05 - 2 (BNC), 0.033 - 3 (16/4.6 mm), 0.03 - 7 (16/6.95 mm), 0.01 - 26 (SMA)	0.000000001 - 100000	0.8 - 12 0.4 - 1.8
	導波管	72/34 mm, 58/25 mm, 48/24 mm, 35/15mm, 23/10 mm, 16/8 mm, 11/5.5 mm, 7.2/3.4 mm, 5.2/2.6 mm, 3.6/1.8 mm	5.64 - 37.5 (5/15 mm, 23/10 mm, 16/8 mm, 11/5.5 mm, 7.2/3.4 mm), 2.59 - 12.05 (72/34 mm, 48/24 mm, 35/15 mm, 23/10 mm), 3.2 - 4.8 (58/25 mm), 5.64 - 17.44 (35/15 mm, 23/10 mm, 16/8 mm), 37.5 - 53 (5.2/2.6 mm), 53 - 78 (3.6/1.8 mm)	0.000000001 - 100000	0.8 - 12 0.5 - 2
ウクライナ NSC <sup>81)</sup>	同軸	III GOST R13317	0.03 - 18	1 - 10	0.011
	導波管	GOST R13317 (5.2×2.6 mm) - (1.6×0.8 mm)	37.5 - 178.6	1 - 10	1.1 - 1.5

表4 テラヘルツ波帯検出器の分類

検出手法	検出器及び原理の概要		
熱型計測手法	カロリメータ	テラヘルツ波を吸収体で吸収しその温度上昇により電力を測定	
	ボロメータ	バレッタ型	バレッタ素子の抵抗変化を測定
		サーミスタ型	サーミスタ素子の抵抗変化を測定
	ゴーレイセル	電磁波の吸収により膨脹する気体を光学検出	
	熱電対型検出器	熱電対に直接又は間接的に電力を吸収させ温度上昇による起電力で測定	
	焦電型検出器	分極による表面電荷の変化を検出	
超伝導ボロメータ	光子吸収による熱変化を常伝導への相転移で検出動作には冷却が必要		
量子型計測手法	超格子半導体検出器	量子準位間遷移により発生する電子励起などの応答を検出動作には冷却が必要	
	超伝導体検出器	トンネル効果による検出動作には冷却が必要	
	Rydberg原子	原子の量子準位に応じた電磁波の吸収と放出により検出	
電磁気型計測手法	ショットキーバリアダイオード	半導体ダイオードによる検波電流を利用	
	光伝導アンテナ	フェムト秒レーザーでアンテナ部の微小ギャップ間を光励起することで、テラヘルツ波の電界強度をアンテナ間で発生する瞬時電流によって検出	
	電気光学結晶	テラヘルツ波の電界強度を、プローブ光の複屈折に置き換えて検出	
	非線形光学結晶	波長変換によりテラヘルツ波を可視光などに変えて検出	

向け、100 GHz 以上の電力標準の研究開発を行っていることが確認できる<sup>82)-90)</sup>。

### 3.2 テラヘルツ波電力計測技術の動向

電力標準の周波数範囲をテラヘルツ波帯に拡張するには、基本となる検出器の特徴を把握することが重要となる。本節では、テラヘルツ波検出器の動向について報告する。

近年知られているテラヘルツ波帯での検出器についての分類を表4に示す。ここでは、1. テラヘルツ波のエネルギーを熱に変えて計測する手法、2. 量子力学に基づいて計測する手法、3. テラヘルツ波の電磁場応答を計測する手法で分類する。

#### 3.2.1 熱型計測手法

一般によく使用されている手法であり、カロリメータ<sup>91)</sup>やボロメータ<sup>92)</sup>などが挙げられる<sup>93),94)</sup>。電磁波の検出手法としては古くより研究されてきた検出手法であり、電磁波の持つエネルギーを熱変換して検出を行う。カロリメータでは、高精度な絶対値測定が原理的に可能である。後述する量子型と比べて波長依存性が少なく広帯域動作が可能である。短所としては、熱応答の時定

数が長い点や検出効率が小さい点が挙げられている。テラヘルツ波帯は取り扱う信号が微弱なため、効率のよい検出器が必要である。そのため、極低温で動作する超伝導ボロメータが天文分野などで広く利用されている<sup>95)</sup>。

#### 3.2.2 量子型計測手法

量子型計測手法の代表的な検出素子は、半導体中の電子や正孔の量子準位間遷移を利用する超格子半導体検出器<sup>96),97)</sup>や超伝導体によって発生するトンネル電流効果を用いた超伝導体-絶縁体-超伝導体検出器 (SIS: Superconductor Insulator Superconductor)<sup>98),99)</sup>などが挙げられる。これらの検出素子は、数百 mK 以下の極低温への冷却が必要なものの、高感度検出が可能であり、エネルギーの小さいテラヘルツ波帯の光子を検出するために使用される<sup>100)</sup>。従って、産業応用よりも天文観測などの学術分野における利用が一般的である。装置の開発や維持にはコストがかかるものの、学術上非常に多くの意味を持つのでこれからも研究開発が期待される。

#### 3.2.3 電磁場計測手法

代表的な検出器として、ショットキー接合によって発生する I-V 特性の非線形性を用いることで整流検出できるショットキーバリアダイオードがある<sup>101)</sup>。さらに THz-TDS で広く使用される検出器として、フェムト秒レーザーでアンテナ部の微小ギャップ間を光励起することで、テラヘルツ波の電場強度をアンテナ間で発生する瞬時電流によって検出する光伝導アンテナ (PCA: Photo Conductive Antenna)<sup>102)</sup>やテラヘルツ波の電場強度を、プローブ光の複屈折に置き換えて検出する電気光学結晶<sup>103)</sup>などが挙げられる<sup>104)</sup>。これらの検出器は、無線通信や分光利用の研究によく利用されており、産業応用に向けて低コスト化やアレーによる高感度化が求められている。

### 3.3 テラヘルツ波カロリメータ

テラヘルツ波の絶対電力を定めるには、黒体放射などの放射源標準やカロリメータなどの熱的計測に基づく検出器標準が不可欠である。前者は分光分布を持つうえテラヘルツ帯の放射パワーが極微弱であるため現状では精密な利用には課題が残る。一方、カロリメータでは微小な熱的变化を高感度に検出することが可能なため、小さな不確かさで測定することが期待できる。そのため、多くの NMI では一次標準としてカロリメータを採用している<sup>105)</sup>。ここではカロリメータの動作原理について、NMIJ で開発を進めているテラヘルツ波帯導波管カロリメータ<sup>88)</sup>を例に説明をする。

カロリメータでは、テラヘルツ波の吸収によって発

生ずる熱と直流電力によって発生する熱を比較することでテラヘルツ波絶対電力が測定される。図5にカロリメータの動作原理を示す。本カロリメータは等温制御機構により測定を行っている。この機構は、検温部と温度基準ブロックの温度差を検温し、両者が常に等温となるようフィードバック制御することで実現される。ここで、吸収体にテラヘルツ波が入射され熱バランスが崩れると、フィードバック制御によりヒーターの電力を下げ、再度等温制御が行われる。このとき、ヒーターの消費電力の減少を測定することで、テラヘルツ波電力を直流電力に置換して決定することができる。受信部は金属製のジャケットによって2重に密閉されている。本カロリメータでは、双子型を採用している。双子型の特徴として同じ構造のテラヘルツ受信部を二つ作製し、一方を測定用としもう一方を温度補償用として利用する。各検温部から出力される電気信号を逆極性に直列接続することで、環境温度変動の影響を低減することが可能である<sup>106)</sup>。

次に、カロリメータによって測定される入射電力のモデル式を導出する。図6にカロリメータのテストポートから吸収体部分までにおける各コンポーネントと、モデル式で用いる測定パラメータについての模式図を示す。ストレート導波管の入射開口（テストポート）及び出射開口をそれぞれ開口1及び開口2と定義し、そのSパラメータを $S_{ij}$  ( $i, j=1, 2$ )と表す。Sパラメータの詳細は参考文献<sup>107)</sup>に譲るが、ここではその意味を簡単に説明する。Sパラメータは多開口素子の特性を、各開口の入射波と出射波の振幅と位相に基づいて定義するものであり、複素量となる。例えば、ストレート導波管のような2開口素子の場合、開口1での反射係数は

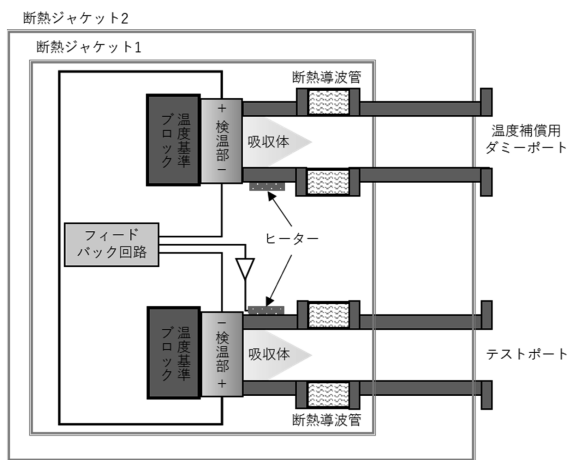


図5 カロリメータの動作原理

$S_{11}$ 、開口2での反射係数は $S_{22}$ で表される。さらに、開口1から開口2への透過係数は $S_{21}$ 、開口2から開口1への透過係数は $S_{12}$ で表わされる。図6において、開口1の入射波の波振幅を $a_1$ 、開口2の入射波と出射波の波振幅をそれぞれ $a_2$ 、 $b_2$ とすると、Sパラメータの定義より次式が得られる。

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \tag{5}$$

$$a_2 = \Gamma_{aw}b_2 \tag{6}$$

ここで、 $\Gamma_{aw}$ は開口2から断熱導波管を見た反射係数である。式(5)、式(6)より、

$$a_1 = \frac{1 - S_{22}\Gamma_{aw}}{S_{21}} b_2 \tag{7}$$

となる。テストポートへ入射するテラヘルツ波電力を $P_{STD}$ 、断熱導波管に入射する電力を $P_{aw}$ とすると、 $P_{STD} = |a_1|^2$ 、 $P_{aw} = |b_2|^2$ であるから次式が成り立つ。

$$P_{STD} = \left| \frac{1 - S_{22}\Gamma_{aw}}{S_{21}} \right|^2 P_{aw} \tag{8}$$

ここで、 $P_{aw}$ は吸収体と断熱導波管で消費される電力 $P_t$ と、開口2で反射してテストポート側に戻る電力との割合から

$$P_{aw} = \frac{1}{1 - |\Gamma_{aw}|^2} P_t \tag{9}$$

と書き換えることができる。このとき $P_t$ は、検温部で検出される電力 $P_{abs}$ と、断熱導波管で吸収される電力のうち熱漏洩によって外部に漏洩してしまう電力に相当する $P_{leak}$ の和である。

$$P_t = P_{abs} + P_{leak} \tag{10}$$

ここで、 $P_{abs}$ はテラヘルツ波の入射の有無によるヒーターの消費電力変化 $P_{DC}$ と直流置換係数 $K$ より次式で表される。

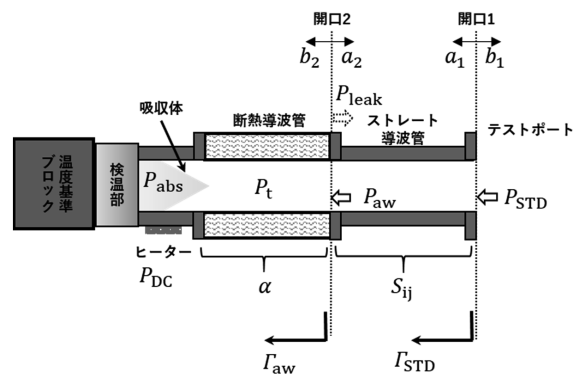


図6 導波管型カロリメータの入射電力モデル



$$P_{\text{abs}} = K \cdot P_{\text{DC}} \quad (11)$$

直流置換係数とは、吸収された実際のテラヘルツ波電力と置換する直流電力との比である。実際に測定される直流電力は、テラヘルツ波が入射していないときにヒーターに印加される電圧  $V_{\text{OFF}}$  と、テラヘルツ波が入射しているときに印加される電圧  $V_{\text{ON}}$ 、ヒーターの抵抗値  $R$  から

$$P_{\text{DC}} = \frac{V_{\text{OFF}}^2 - V_{\text{ON}}^2}{R} \quad (12)$$

となる。ところで、断熱導波管の損失を  $\alpha$  とすると、断熱導波管では  $\alpha P_{\text{aw}}$  の電力が消費される。いま、断熱導波管からストレート導波管側へ漏洩する電力の割合を  $q$  とすると、

$$P_{\text{leak}} = \alpha \cdot q \cdot P_{\text{aw}} \quad (13)$$

である。したがって、式 (9)、式 (13) より、

$$P_{\text{leak}} = \alpha \cdot q \cdot \frac{1}{1 - |\Gamma_{\text{aw}}|^2} P_{\text{t}} \quad (14)$$

と表される。式 (10)、式 (11)、式 (14) から  $P_{\text{t}}$  は次式で書き換えられる。

$$P_{\text{t}} = \frac{1 - |\Gamma_{\text{aw}}|^2}{1 - |\Gamma_{\text{aw}}|^2 - \alpha \cdot q} K \cdot P_{\text{DC}} \quad (15)$$

式 (8)、式 (9)、式 (15) からカロリメータによって測定される入射電力  $P_{\text{STD}}$  のモデル式は

$$P_{\text{STD}} = \frac{K}{1 - |\Gamma_{\text{aw}}|^2 - \alpha \cdot q} \cdot \left| \frac{1 - S_{22}\Gamma_{\text{aw}}}{S_{21}} \right|^2 P_{\text{DC}} \quad (16)$$

と書ける。このモデル式に基づき、カロリメータの主要な不確かさ要因である断熱性、伝送線路特性、直流置換係数について説明する。

理想的な測定では、入射したテラヘルツ波がすべて吸収体で発生する熱に変換され、検温部で検出されることが望ましい。しかし実際には、発生した熱の一部がストレート導波管に漏れてしまう。さらに、導波管カロリメータ特有の問題として、信号源から吸収体までの伝送線路が金属製の導波管で接続されるため、信号源からの熱も吸収体に伝わってしまう。したがって、検温部の断熱性能は非常に重要である。そのため、本カロリメータでは吸収体の前面に断熱導波管を使用し、上記の影響を低減している。これらに起因する不確かさは、断熱導波管と吸収体の間に金属薄膜を挿入し、テラヘルツ波の入射により吸収体で発生する熱と断熱導波管の損失で発生する熱を分離して定量的に評価している。

カロリメータを構成する各コンポーネントの反射特性や伝搬損失特性はベクトルネットワークアナライザ (VNA: Vector Network Analyzer) を用いて評価する。

100 GHz 以上の周波数バンドを持つ導波管は、構造が微細なため取り扱いが難しく、マイクロ波帯の導波管に比べて伝搬損失が大きくなる傾向があるので、大きな不確かさの要因となり得る<sup>108)</sup>。

直流置換係数は、前述のとおりテラヘルツ波電力とヒーターの直流電力の比である。その値はおおむね 1 となるが、熱伝導の経路差により、わずかなずれが生じる。この影響は、ヒーターの位置を変更したときの検温部の応答変化を解析することで見積もられる。

### 3.4 比較校正手順<sup>109)</sup>

カロリメータでは、入射電力  $P_{\text{STD}}$  を正確に求めることができる。これを用いて、実際に DUT に校正係数を値づけするための手法を説明する。校正係数は、式 (1) より入射電力と DUT の指示値との比として定められる。DUT の校正では、信号源の反射係数を考慮しなければならない。通常、信号源のような能動素子の反射係数を求めることは難しいが、図 7 に示す取り換え同時比較を用いることで、信号源の反射係数を無視することができる。図 7 に示すとおり、3 開口の方向性結合器に対して開口 1 に信号源、開口 2 にモニター用パワーメータ、開口 3 に標準器のカロリメータと DUT を付け替えて測定を行う。このとき、方向性結合器の S パラメータを  $\sigma_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) とし、各開口における入射波及び出射波の波振幅をそれぞれ  $a_i, b_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) で表す。S パラメータの定義より、以下の関係が得られる。

$$b_2 = \sigma_{21}a_1 + \sigma_{22}a_2 + \sigma_{23}a_3 \quad (17)$$

$$b_3 = \sigma_{31}a_1 + \sigma_{32}a_2 + \sigma_{33}a_3 \quad (18)$$

$$a_2 = \Gamma_m b_2 \quad (19)$$

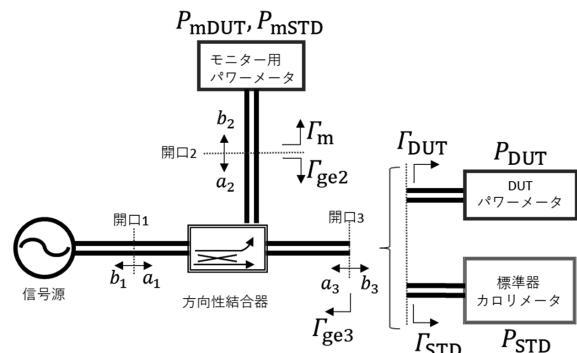


図 7 取り換え同時比較の測定系

$$a_3 = \Gamma_{\text{STD}} b_3 \quad (20)$$

ここで、 $\Gamma_m$  はモニター用パワーメータの反射係数、 $\Gamma_{\text{STD}}$  はカロリメータの反射係数である。式 (17) から式 (20) より、

$$\frac{b_3}{b_2} = \left( \frac{\sigma_{31}}{\sigma_{21}} \right) \frac{1 - \Gamma_{\text{ge}2} \Gamma_m}{1 - \Gamma_{\text{ge}3} \Gamma_{\text{STD}}} \quad (21)$$

と導かれる。 $\Gamma_{\text{ge}2}$  と  $\Gamma_{\text{ge}3}$  は、それぞれ開口 2 と開口 3 における等価信号源反射係数と呼ばれ、

$$\Gamma_{\text{ge}2} = \sigma_{22} - \frac{\sigma_{21} \sigma_{32}}{\sigma_{31}} \quad (22)$$

$$\Gamma_{\text{ge}3} = \sigma_{33} - \frac{\sigma_{31} \sigma_{23}}{\sigma_{21}} \quad (23)$$

と表わすことができる。

カロリメータによって測定される入射電力  $P_{\text{STD}}$  とモニター電力  $P_{\text{mSTD}}$  はそれぞれ  $|b_3|^2$ 、 $|b_2|^2$  で表されるので、次式が成り立つ。

$$\frac{P_{\text{STD}}}{P_{\text{mSTD}}} = \left| \frac{\sigma_{31}}{\sigma_{21}} \right|^2 \cdot \left| \frac{1 - \Gamma_{\text{ge}2} \Gamma_m}{1 - \Gamma_{\text{ge}3} \Gamma_{\text{STD}}} \right|^2 \quad (24)$$

同様に、DUT によって測定される入射電力  $P_{\text{DUT}}$  とモニター電力  $P_{\text{mDUT}}$  の比は

$$K_u \cdot \frac{P_{\text{mDUT}}}{P_{\text{DUT}}} = \left| \frac{\sigma_{21}}{\sigma_{31}} \right|^2 \cdot \left| \frac{1 - \Gamma_{\text{ge}3} \Gamma_{\text{DUT}}}{1 - \Gamma_{\text{ge}2} \Gamma_m} \right|^2 \quad (25)$$

となる。従って、取り換え同時比較により求められる校正係数  $K_u$  は式 (24) と式 (25) から、

$$K_u = \frac{P_{\text{DUT}} P_{\text{mSTD}}}{P_{\text{STD}} P_{\text{mDUT}}} \cdot \left| \frac{1 - \Gamma_{\text{ge}3} \Gamma_{\text{DUT}}}{1 - \Gamma_{\text{ge}3} \Gamma_{\text{STD}}} \right|^2 \quad (26)$$

と書ける。

#### 4. テラヘルツ波計測の妥当性評価技術動向

本節では、基本となるテラヘルツ波電力の精密測定に基づき、様々なテラヘルツ波計測における測定結果の妥当性検証に関する NMI の取り組みについて調査する。

NMIJ では、3.3. 節で説明した導波管型カロリメータだけでなく、空間ビームの測定にも適した自由空間型カロリメータを開発した<sup>110)</sup>。現在は、1 THz における常温での数十 nW の測定を可能とした<sup>91)</sup>。THz-TDS に対する取り組みとしては、精度評価の技術として独自に開発した薄膜減衰器を用いる手法<sup>111), 112)</sup> や重ね合わせ法による振幅校正技術<sup>113)</sup> を開発した。また、近赤外光とテラヘルツ波の双方で利用可能なファブリ・ペロー共振器 (エタロン) を開発し<sup>114)</sup>、THz-TDS の周波数精度を検証した。本手法では、エタロンの共振周波数を波長が

既知の近赤外光で高精度に校正し、テラヘルツ帯にも拡張して適用することができる。さらに、THz-TDS の測定結果の同等性を検証するため、NICT, NMIJ, RIKEN による 3 機関比較試験を実施した<sup>115)</sup>。この比較試験においては、ポリエステルフィルムに金属膜を蒸着した薄膜減衰器、テラヘルツ波帯において高い屈折率を持つ高抵抗シリコン、テラヘルツ波帯に特徴的な吸収スペクトルを持つアズライト (藍銅鉱) ペレットをサンプルとして透過率の測定比較を実施した。それぞれ特徴の異なるサンプルの測定結果を解析することで、THz-TDS の光学系に依存した不確かさ要因を明確にした。

NPL でも、M. Naftaly らによって THz-TDS 同等性を保証するため、大学研究室や、THz-TDS の開発メーカー、国立研究機関を含んだ 9 カ国 18 機関による巡回比較を実施した<sup>116)</sup>。比較には高抵抗シリコンや z カットクオーツなどの複数の試料が使用された。巡回比較の結果から周波数や振幅の校正が非常に重要であることが示唆されている。また、THz-TDS の振幅線形性を定量的に評価するため、高抵抗シリコン板を用いた線形性校正手法を提案した<sup>117)</sup>。NMIJ や NPL の比較試験の取り組みから、THz-TDS の評価技術の確立が国際的な課題となっていることがわかる<sup>118)</sup>。

PTB ではガスレーザーを用いたテラヘルツ波電力標準の研究が先駆的に行われた<sup>119), 120)</sup>。2.52 THz において極低温放射計を用いたテラヘルツ波電力の絶対測定を実現した<sup>121)</sup>。吸収体の吸収率を正確に評価することで、ヘリウム・ネオンレーザーを用いた可視光のレーザーパワー標準から、テラヘルツ波帯の電力標準の周波数範囲を拡張する技術を開発した。さらに PTB, NIST, NIM において、2.52 THz と 0.762 THz のテラヘルツ波電力の比較測定が行われた<sup>122)</sup>。非公式であるが、NMI 間におけるテラヘルツ波電力測定の比較が初めて実施された。

NIM では、電力標準であるカロリメータの開発<sup>123)-125)</sup>に加えて、テラヘルツ分光器やテラヘルツラジオメータに関する標準の研究<sup>126)</sup>を行っている。テラヘルツ分光器の校正では、一酸化炭素ガスなどを用いた周波数軸の校正手法と、0.25 THz から 2.0 THz まで安定した特性の吸収体を開発し、テラヘルツ波電力を校正する手法を提案した<sup>127)</sup>。

NIST では、テラヘルツ波帯の電力計測技術として、垂直に配向したカーボンナノチューブアレイを用いたサーモパイル検出器を開発<sup>128)-131)</sup>し、これを使用して PTB 及び NIM との比較測定に参加した<sup>122)</sup>。また非公式ではあるが、NIST, NIM, PTB, シンガポールの計量標準機関である (NMC/A\*STAR: National Metrology

Centre/Agency for Science, Technology and Research) によって WR-15 (50 GHz-75 GHz) 導波管での電力比較測定が行われた<sup>132)</sup>。これにより参加研究機関での電力測定の同等性が検証された。

その他には、テラヘルツ波帯の周波数標準の確立に向けた取り組み<sup>133)-136)</sup>や、黒体輻射に基づいてテラヘルツ波絶対電力を計測する研究<sup>137)-139)</sup>、量子カスケードレーザー (QCL: Quantum Cascade Laser) の強度評価技術<sup>140)</sup>などが行われている。また、テラヘルツ波の社会普及を見据えて、計量標準の必要性が指摘されている<sup>141)-145)</sup>。

これらの調査から、現在の計量標準ニーズとして THz-TDS における標準化された測定手法やデータ分析手順の確立と、SI (International System of Units) トレーサブルなテラヘルツ波帯の電力標準などの枠組みを確立することが特に必要と考えられる。

### 5. 次世代電磁波計測技術の研究動向

本節では、基礎研究の視点から、次世代の電磁波計測技術として近年研究がされている原子の量子現象を用いた電磁波計測研究について調査した結果を述べる。

レーザーに代表される、原子や分子の量子状態に基づく電磁波との相互作用についてはこれまで多くの研究がなされており、これらは 20 世紀において多くのノーベル賞受賞者を生むなど非常に重要な物理現象である。現在最も不確かさの小さい時間標準で用いられる秒の定義は、「秒 (s) は時間の単位である。その大きさは、単位  $s^{-1}$  (Hz に等しい) による表現で、非摂動・基底状態にあるセシウム 133 原子の超微細構造の周波数  $\Delta\nu_{Cs}$  の数値を正確に 9 192 631 770 と定めることによって設定される。」である<sup>146)</sup>。原子の量子的性質を利用した量子標準は、測定精度の向上が期待できるため、計量標準の分野において重要な研究テーマである。量子現象に基づく計測技術を応用した他の物理量としては、量子ホール効果による抵抗標準やジョセフソン効果による電圧標準などがある。高周波分野においても、原子の性質を直接利用することで、きわめて高い精度で電磁波計測を可能とする手法が近年模索されている。本調査研究では、原子が吸収する電磁波の強度を計測する手法として、ラビ周波数に基づく電磁波計測に関する研究について調査し報告する。

量子力学では、2 単位系原子に対して共鳴電磁波を照射した際の遷移確率は次式となる<sup>147), 148)</sup>。

$$|c(t)|^2 = \sin^2 \frac{|\Omega|t}{2} \quad (27)$$

ここで、 $t$  は原子と電磁波の相互作用時間、 $\Omega$  はラビ周波数と呼ばれる遷移確率の時間的応答を表す。ラビ周波数とは、電磁波との共鳴によって誘起される原子振動の周波数である。ラビ周波数は相互作用する電磁波の電場や磁場に比例することから、ラビ周波数の測定により電磁波の強度を測定できる。上記の計測手法の先行研究として、これまでにマイクロ波帯での空間の磁場や電場計測、高周波電力計測への応用が行われた<sup>149)-158)</sup>。本技術における測定では選択する量子単位に応じて、周波数範囲が限定されるが、近年テラヘルツ波帯での測定も提案されている。そこで、本原理に基づく最近の動向を紹介する。

Durham 大学の C. G. Wade らは、Rydberg 原子のラビ周波数を用いて、テラヘルツ波の計測をはじめて実証した<sup>159), 160)</sup>。C. G. Wade らは、3 段階励起法を用いてガラスセル中の Cs 原子の Rydberg 状態  $21P_{3/2} \rightarrow 21S_{1/2}$  間の遷移に対応するテラヘルツ波強度 (0.634 THz) を測定した。ラビ周波数は、3 光子での電磁誘起透明化 (EIT: Electromagnetically Induced Transparency) による Autler-Townes 分裂から測定される<sup>161)</sup>。図 8 にこの実験での Cs 原子のエネルギー単位図を示す。基底単位  $6S_{1/2}$  からレーザーにより 3 段階励起され Cs 原子はガラスセルに照射されたテラヘルツ波と相互作用し、誘導ラマン遷移により  $21S_{1/2}$  に遷移する。 $21S_{1/2}$  に遷移した Cs 原子は蛍光を伴う自然放出により、基底状態へ移る。このとき電磁誘起透明化した状態の Cs 原子は、AC シュタルク効果によりテラヘルツ波の電場強度に比例して電磁誘起透明化のピーク分裂がシフトする。その周波数シフトはラビ周波数に等しく、電場強度の比例関係から絶対値検出が可能となる。また、テラヘルツ波をトリガーと

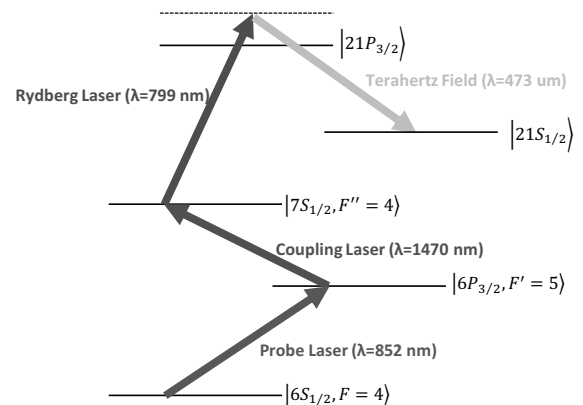


図 8 Cs 原子のエネルギー単位図

した  $21\text{S}_{1/2}$  からの自然放出に伴う蛍光をカメラで観測することで、リアルタイムイメージングが可能となる。本手法によるイメージングは、これまでのテラヘルツ波イメージング手法と比較し、高分解能であり、電磁界強度の絶対値を同時に測定することができる。そのため、新しいイメージング技術としての応用も期待できる。

今後の課題として、さらに検出感度の向上を目指すにはガスセル温度の高安定化が必要である。また計量標準へ応用には、Cs 原子を封入するセル媒質により検出するテラヘルツ波の空間分布が乱れてしまう点など、不確かさとなる要因を定量的に評価する必要がある。

## 6. まとめ

本調査研究では、テラヘルツ波帯の電力精密計測に関し、基礎や国際的な動向を調査した。テラヘルツ波の応用研究動向については、テラヘルツ分光やイメージング応用への実用化に向けた取り組みと共に、無線通信応用への取り組みが活発化していることが確認できた。今後、テラヘルツ波帯の計量標準の供給ニーズは重要性を増していくと考えられる。

テラヘルツ波電力標準については、主要な NMI は、100 GHz 程度までの高周波電力の標準供給を行っているものの、それ以上の周波数帯では未整備の国が多い。しかし、NMIJ, NIM, PTB では 300 GHz 帯までの電力標準の確立に向けた取り組みを行っている。テラヘルツ波電力の精密計測では、熱的計測手法が最も適していることがわかった。熱的計測の例として、NMIJ で開発したカロリメータについて動作原理や校正手法を紹介した。このような計測技術は、THz-TDS の精度評価や、テラヘルツ無線通信の普及のためにも重要である。次世代の電磁波強度計測技術について量子現象を用いた計測手法に関する研究動向を調査した。近年、ラビ周波数を用いてテラヘルツ波の強度測定が実証されている。今後、新しい電磁波計測手法としての確立と計量標準への応用が期待される。

## 7. 謝辞

本調査研究では、高周波標準研究グループ 飯田仁志グループ長 木下基主任研究員 及び井上武海氏には貴重なアドバイスを頂きました。また高周波標準研究グループの皆様にも、日ごろから親切なご指導、ご助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) J. C. Maxwell: A dynamical theory of the electromagnetic field, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, (1865), pp. 459-512.
- 2) H. R. Hertz: Ueber sehr schnelle elektrische schwingungen. *Annalen der physik*, vol. 267, no. 7, (1887), pp. 421-448.
- 3) S. G. Marconi: Radio telegraphy, *Proc. IRE*, vol. 50, no. 8, (1962), pp. 1748-1757.
- 4) 情報通信白書 2017 : <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/index.html>>, Last access Jan. 2018
- 5) 「電波法」(昭和二十五年法律第三百一十一号) 施行日平成二十九年十月一日 : <[http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws\\_search/lsg0500/detail?lawId=325AC000000131&openerCode=1](http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=325AC000000131&openerCode=1)>, Last access Jan. 2018
- 6) S. S. Dhillon, et al.: The 2017 terahertz science and technology roadmap, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, no. 4, (2017), pp. 043001.
- 7) M. Tonouchi.: Cutting-edge terahertz technology, *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, (2007), pp. 97-105.
- 8) JIS Z 8117 : 2002 遠赤外線用語 - 日本工業規格の簡易閲覧 : <<http://kikakurui.com/z8/Z8117-2002-01.html>>, Last access Jan. 2018
- 9) JIS Z 8120 : 2001 光学用語 - 日本工業規格の簡易閲覧 : <<http://kikakurui.com/z8/Z8120-2001-01.html>>, Last access Jan. 2018
- 10) ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories: <[http://www.spacewx.com/pdf/SET\\_21348\\_2004.pdf](http://www.spacewx.com/pdf/SET_21348_2004.pdf)>, Last access Jan. 2018
- 11) 伊藤弘昌 : テラヘルツ波の課題と展望, *信学誌*, vol. 89, no. 6, (2006), pp. 450-455.
- 12) 西澤潤一 : エサキダイオードと長波長レーザー, *電子技術*, vol. 7, no. 3, (1965), pp. 102-106.
- 13) D. H. Auston, et al.: Picosecond optoelectronic detection, sampling and correlation measurements in amorphous semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 37, no. 4, (1980), pp. 371-373.
- 14) 寶迫巖 : テラヘルツ技術の産業応用展開, *精密工学会誌*, 82 巻, 3 号, (2016), pp. 209-212.
- 15) 北岸恵子 : テラヘルツ分光システムの現状と応用用途, *応用物理*, 81 巻, 4 号, (2012), pp. 312-316.
- 16) W. Withayachumnankul, et al.: T-ray sensing and im-

- aging, Proc. IEEE, vol. 95, no. 8, (2007), pp. 1528-1558.
- 17) K. Kawase, et al.: Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints, Opt. Express, vol. 11, no. 20, (2003), pp. 2549-2554.
  - 18) 阪井清美, 萩行正憲: テラヘルツ時間領域分光法とイメージング, レーザー研究, 30 巻, 7 号, (2002), pp. 376-384.
  - 19) 斗内政吉: テラヘルツ波新産業 (シーエムシー出版 2011).
  - 20) 藤井泰範: Development and improvement of ALMA Band 10 receiver, Diss. Osaka Prefecture University, (2017)
  - 21) 笠井康子: プロジェクト紹介: テラヘルツ波リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 36 巻, 3 号, (2016), pp. 251-255.
  - 22) R. Tsu, et al.: Tunneling in a finite superlattice, Appl. Phys. Lett., vol. 22, no. 11, (1973), pp. 562-564.
  - 23) M. Asada, et al.: Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, no. 6R, (2008), pp. 4375-4384.
  - 24) R. Izumi, et al.: 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode Infrared, 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2017), pp. 1-2.
  - 25) T. Ishibashi, et al.: Uni-traveling-carrier photodiodes, Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Optical Society of America, (1997), pp. 166-168.
  - 26) 伊藤弘: 単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) を用いたミリ波・テラヘルツ波の発生と応用, 応用物理, 75 巻, 2 号, (2006), pp.223-226.
  - 27) WEB OF SCIENCE: <<https://clarivate.jp/products/web-of-science/>> Last access Jan. 2018
  - 28) T. Mochizuki, et al.: Probing the surface potential of oxidized silicon by assessing terahertz emission, Appl. Phys. Lett, vol. 110, no. 16, (2017), pp. 163502-1-5.
  - 29) 内田裕久, 他: テラヘルツ波時間領域全反射減衰分光法による結晶育成の in-situ 分析. 千葉工業大学研究報告, vol. 63, (2016), pp. 15-21.
  - 30) S. P. Pratyush, et al.: An introduction to terahertz technology, its history, Properties and Application, International conference on computing and communication (2015), < [https://www.researchgate.net/profile/Prabira\\_Sethy/publication/272175730\\_An\\_Introduction\\_to\\_Terahertz\\_Technology\\_Its\\_History\\_Properties\\_and\\_Application/links/54de01ff0cf23bf204397151/An-Introduction-to-Terahertz-Technology-Its-History-Properties-and-Application.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Prabira_Sethy/publication/272175730_An_Introduction_to_Terahertz_Technology_Its_History_Properties_and_Application/links/54de01ff0cf23bf204397151/An-Introduction-to-Terahertz-Technology-Its-History-Properties-and-Application.pdf)>, Last access Jan. 2018
  - 31) J. P. Guillet, et al.: Review of terahertz tomography techniques, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, vol. 35, no. 4, (2014), pp. 382-411.
  - 32) A. Rahman: Terahertz spectrometry and reflectometry: a new frontier for noninvasive picoscale investigations, Spectroscopy, vol. 28, no. 2, (2013), pp. 44-53.
  - 33) C. Jansen, et al.: Terahertz imaging: applications and perspectives, Appl. Opt., vol. 49, no. 19, (2010), pp. E48-E57.
  - 34) J. B. Jackson et al.: A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 1, no. 1, (2011), pp. 220-231.
  - 35) 布施則一, 梶原優介: テラヘルツ波によるコーティング金属材料の非破壊検査, 精密工学会誌, 82 巻, 3 号, (2016), pp. 205-208.
  - 36) A. Moriwaki, et al.: Internal triaxial strain imaging of visibly opaque black rubbers with terahertz polarization spectroscopy, APL Photonics, vol. 2, no. 10, (2017), pp. 106101-1-8.
  - 37) 山下将嗣, 他: レーザー励起テラヘルツ放射イメージングを利用した LSI 故障解析, 精密工学会誌, 82 巻, 3 号, (2016), pp. 225-229.
  - 38) B. Baccouche, et al.: Three-dimensional Terahertz imaging with sparse multistatic line arrays, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 23, no. 4, (2017), pp. 1-11.
  - 39) T. Ryo, et al.: Terahertz pulse reflection imaging using the time-domain correlating synthesis method, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 7, no. 4, (2017), pp. 385-392.
  - 40) K. Murano, et al.: Low-profile terahertz radar based on broadband leaky-wave beam steering, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 7, no. 1, (2017), pp. 60-69.
  - 41) 久積仁: テラヘルツ分光法の製剤開発への適用, 薬剤学, 75 巻, 6 号, (2015), pp. 358-363.
  - 42) 小山裕: 高精度コヒーレント・テラヘルツ分光装置を用いた新しい有機結晶評価法 (<小特集> 結晶評価技術の新展開), 日本結晶成長学会誌, 34 巻, 3 号, (2007), pp. 116-123.
  - 43) X. Tan, et al.: Detection and identification of flammable and explosive liquids using THz time-domain spectroscopy with principal component analysis algorithm,

- 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), (2017), pp. 1-4.
- 44) 山崎良, 他: 郵便物内の違法薬物の非破壊検査. 精密工学会誌, vol. 82, no. 3, (2016), pp. 217-220.
- 45) THz Databasse: <<http://thzdb.org/>>, Last access Jan. 2018
- 46) K. Fukunaga, et al.: Terahertz spectral database for expanding applications, 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2009), pp. 1-3.
- 47) D. He, et al.: Stochastic channel modeling for kiosk applications in the terahertz band, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 7, no. 5, (2017), pp. 502-513.
- 48) H. Sawada, et al.: Path loss model at 300 GHz for indoor mobile service applications, ComEX, vol. 5, no. 11, (2016), pp. 424-428.
- 49) I. Hosako: Promising new wireless communication technology—100Gbit/s by 300 GHz band, 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2017), pp. 1-2.
- 50) T. Nagatsuma, et al.: Advances in terahertz communications accelerated by photonics, Nat. Photonics, vol. 10, no. 6, (2016), pp. 371-379.
- 51) T. Kleine-Ostmann, and T. Nagatsuma.: A review on terahertz communications research, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, vol. 32, no. 2, (2011), pp. 143-171.
- 52) The Electromagnetic Spectrum Website: <<http://envisat.esa.int/support-docs/em-spectrum/em-spectrum.html>>, Last access Jan. 2018
- 53) E. D. Palik: Handbook of optical constants of solids, vol. 3, (Academic press, 1st Edition, 1998)
- 54) 総務省 電波利用ホームページ | 電波資源拡大のための研究開発の実施: <<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>>, Last access Jan. 2018
- 55) 総務省総合通信基盤局. 「周波数割当表」. 電波利用ホームページ: <<http://www.tele.soumu.go.jp/>>, Last access Jan. 2018
- 56) ITU-R website: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx>>, Last access Jan. 2018
- 57) 総務省 電波利用ホームページ | 世界無線通信会議とは: <<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/inter/wrc/wrcsum/>>, Last access Jan. 2018
- 58) RESOLUTION 767 (WRC-15) Studies towards an identification for use by administrations for land-mobile and fixed services applications operating in the frequency range 275-450 GHz: <[http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000C0016PDFE.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000C0016PDFE.pdf)>, Last access Jan. 2018
- 59) 笠松章史, 他: テラヘルツ分野の最近の標準化動向について. ITU ジャーナル, vol. 44, no. 12, (2014), <[https://www.ituaj.jp/wp-content/uploads/2014/12/2014\\_12-4\\_sl\\_tera.pdf](https://www.ituaj.jp/wp-content/uploads/2014/12/2014_12-4_sl_tera.pdf)>, Last access Jan. 2018
- 60) 「計量法」(平成四年法律第五十一号) 施行日 平成二十八年四月一日: <[http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws\\_search/lsg0500/detail?lawId=404AC000000051](http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=404AC000000051)>, Last access Jan. 2018
- 61) JIS C 61000-4-6:2006 本文 01 電磁両立性-第4-6部: 試験及び測定技術-無線周波電磁界によって誘導する伝導妨害に対するイミュニティ: <[kikakurui.com/c6/C61000-4-6-2006-01.html](http://kikakurui.com/c6/C61000-4-6-2006-01.html)>, Last access Jan. 2018
- 62) 大森俊一: 高周波基礎測定 (コロナ社 1970)
- 63) 総務省 電波利用ホームページ | 電波防護指針: <<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/medical/protect/>>, Last access Jan. 2018
- 64) International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition) JCGM 200: 2012: <[https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2012.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf)>, Last access Jan. 2018
- 65) BIPM Website: <<https://www.bipm.org/en/about-us/>>, Last access Jan. 2018
- 66) 産業技術総合研究所計量標準総合センター, 製品評価技術基盤機構認定センター訳編: 計量学-早わかり. 第3版 (2009).
- 67) 産業技術総合研究所計量標準総合センター, メートル条約に基づく組織と活動のあらまし: <[https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/nmijico/metric/aramashi\\_2019.pdf](https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/nmijico/metric/aramashi_2019.pdf)>, Last access Oct. 2019
- 68) 丸山道隆: ジョセフソン電圧標準の現状, 産総研計量標準報告, vol. 8, no. 2, (2011), pp. 263-278.
- 69) 岡崎雄馬: 量子メトロロジートライアングルの現状と基盤技術, 産総研計量標準報告, vol. 9, no. 3, (2016), pp. 323-340.
- 70) 岸川涼子: 高周波インピーダンスの標準と計測方法に関する調査研究, 産総研計量標準報告, vol. 8, no. 3, (2011), pp. 333-347.
- 71) パワー測定の基礎 -Keysight: <<http://literature.cdn>

- keysight.com/litweb/pdf/00-2566.pdf>, Last access Jan. 2018
- 72) 木下基：高周波電力標準に関する調査研究，産総研計量標準報告，vol. 4, no. 3, (2006), pp. 189-200
- 73) 計量標準総合センター (NMIJ) Website: <https://www.nmij.jp/>, Last access Jan. 2018
- 74) 韓国計量標準機関 (KRIS) Website: <http://www.kriss.re.kr/>, Last access Jan. 2018
- 75) 中国計量標準機関 (NIM) Website: <http://en.nim.ac.cn/>, Last access Jan. 2018
- 76) ドイツ計量標準機関 (PTB) Website: <https://www.ptb.de/cms/>, Last access Jan. 2018
- 77) フランス計量標準機関 (LNE) Website: <https://www.lne.fr/>, Last access Jan. 2018
- 78) イギリス計量標準機関 (NPL) Website: <http://www.npl.co.uk/>, Last access Jan. 2018
- 79) アメリカ計量標準機関 (NIST) Website: <https://www.nist.gov/>, Last access Jan. 2018
- 80) ロシア計量標準機関 (VNIIFTRI) Website: <http://www.vniiftri.ru/index.php/en/>, Last access Jan. 2018
- 81) ウクライナ計量標準機関 (NSC) Website: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=1&L=2>, Last access Jan. 2018
- 82) H. Wei, et al.: Design of a 110 GHz to 170 GHz calorimeter, 2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, (2017), pp. 71-73.
- 83) J. Y. Kwon, et al.: V-Band waveguide microcalorimeter for millimeter-wave power standards, IEEE trans. instrum. meas., vol. 66, no. 6, (2017), pp. 1598-1604.
- 84) D. B. Adamson, et al.: Recent and future developments in millimeter and sub-millimeter wavelength measurement standards, NPL 5th ESA Workshop on millimeter Wave Technology and Applications & 31st ESA Antenna Workshop, (2009).
- 85) J. A. Mallat, et al.: 110-170 GHz millimeter wave power standard, 2006 European Microwave Conference, (2006), pp. 482-585.
- 86) A. N. Akhiezer, et al. Millimeter wave power standards, IEEE trans. instrum. meas., vol. 46, no. 2, (1997), pp. 495-498.
- 87) PTB Website Extension of measurement capabilities into the sub-mm range (THz metrology): <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221/research-activities/extension-of-measurement-capabilities-into-the-sub-mm-range-thz-metrology.html>, Last access Jan. 2018
- 88) K. Shimaoka, et al.: Calibration of mm-wave power meters using a broadband calorimeter in the frequency range from 110 GHz to 170 GHz, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2013), pp. 1-2.
- 89) K. Shimaoka, et al.: A broadband waveguide calorimeter in the frequency range from 50 to 110 GHz, IEEE trans. instrum. meas., vol. 62, no. 6, (2013), pp. 1828-1833.
- 90) N. S. Nishioka, et al.: Composite bolometers for submillimeter wavelengths, Appl. Opt., vol. 17, no. 10, (1978), pp. 1562-1567.
- 91) H. Iida, et al.: Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level, Opt. Lett., vol. 39, no. 6, (2014), pp. 1609-1612.
- 92) S. Bevilacqua and S. Cherednichenko: Fast room temperature THz bolometers, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2013), pp. 1-2.
- 93) TYDEX Website Golay Detectors: <http://www.tydexoptics.com/products/thz\_devices/golay\_cell/>, Last access Jan. 2018
- 94) Ophir Website Pyrocam IIIHR Beam Profiling Camera: <http://www.ophiropt.com/laser-measurement/beam-profilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/Pyrocam-IIIHR>, Last access Jan. 2018
- 95) S. Cherednichenko, et al.: Hot-electron bolometer terahertz mixers for the Herschel Space Observatory, Rev. Sci. Instrum., vol. 79, no. 3, (2008), pp. 034501-1-10.
- 96) M. Graf, et al.: Terahertz range quantum well infrared photodetector, Appl. Phys. Lett., vol. 84, no. 4, (2004), pp. 475-477.
- 97) S. Komiyama, et al.: A single-photon detector in the far-infrared range, Nature, vol. 403, no. 6768, (2000), pp. 405-407.
- 98) J. Li, et al.: Low-noise 0.5 THz all-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer for submillimeter wave astronomy, Appl. Phys. Lett., vol. 92, no. 22, (2008), pp. 222504-1-3.
- 99) B. D. Jackson, et al.: Low-noise 1 THz superconductor-insulator-superconductor mixer incorporating a

- NbTiN/SiO<sub>2</sub>/Al tuning circuit, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 3, (2001), pp. 436-438.
- 100) 河野行雄：テラヘルツ光子の検出とその応用．日本光学会誌「光学」, vol. 41, no. 10, (2012), pp. 521-528.
- 101) H. Ito, et al.: InP-based planar-antenna-integrated Schottky-barrier diode for millimeter-and sub-millimeter-wave detection, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 8R, (2008), pp. 6256-6261.
- 102) M. C. Nuss, and J. Orenstein: Millimeter and sub-millimeter wave spectroscopy of solids, Sec.2 Terahertz time-domain spectroscopy, (Springer Berlin Heidelberg 1998), pp. 7-50.
- 103) T. Löffler, et al.: Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters, *Opt. Express*, vol. 13, no. 14, (2005), pp. 5353-5362.
- 104) A. Schneider, et al.: Generation of terahertz pulses through optical rectification in organic DAST crystals: theory and experiment, *JOSA B*, vol. 23, no. 9, (2006), pp. 1822-1835.
- 105) 小見山耕司, 他：電磁波計測分野の計量標準の現状と未来（特集 計量標準整備計画の達成点と今後(3)）. 計測標準と計量管理, vol. 61, no. 1, (2011), pp. 12-28.
- 106) 岩崎俊：電磁波計測技術ガイドブック 高周波・マイクロ波・レーザ 計測技術者のためのマニュアル, (安全問題研究会 1995), pp. 161-213.
- 107) 横島一郎：高周波測定技術の基礎 Sパラメータ入門, (サイベック株式会社 1992)
- 108) 堀部雅弘：ミリ波・テラヘルツ領域におけるベクトルネットワークアナライザの測定精度評価, *信学論 C*, vol. 97, no. 2, (2014), pp. 51-60.
- 109) 木下基, 他：高周波電力計の比較校正方法とその不確かさの評価．産総研計量標準報告, 6巻, 3号, (2007), pp. 145-150.
- 110) H. Iida, et al.: Calibration of a terahertz attenuator by a DC power substitution method, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 66, no. 6, (2017), pp. 1586-1591.
- 111) H. Iida, and M. Kinoshita: Amplitude calibration in terahertz time-domain spectroscopy using attenuation standards, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 39, no. 1, (2018), pp. 120-129.
- 112) H. Iida, et al.: Improvement of transmission characteristics of a THz step attenuator, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2013), Mo-P1-35.
- 113) M. Kinoshita, and H. Iida: Non-linearity measurement of THz power meter by superposition method, *MTSA 2017&TeraNano-8*, (2017), P2.
- 114) M. Kinoshita, et al.: Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometer using air-gap etalon, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 4, no. 6, (2014), pp. 756-759.
- 115) M. Mizuno, et al.: Classification of terahertz spectrometer for transmittance measurements of refractive materials, *ELEX*, vol. 13, no. 18 20160532, (2016), pp. 1-12.
- 116) M. Naftaly.: An international intercomparison of THz time-domain spectrometers, 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2016), pp. 1-2.
- 117) M. Naftaly, and D. Richard: Linearity calibration of amplitude and power measurements in terahertz systems and detectors, *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 5, (2009), pp. 674-676.
- 118) M. Naftaly: THz metrology for active electronic devices: state of the art and challenges, *Third International Conference on Applications of Optics and Photonics, proceedings vol. 10453*, (2017).
- 119) A. Steiger, et al.: Optical methods for power measurement of terahertz radiation, *Opt. Express*, vol. 18, no. 21, (2010), pp. 21804-21814.
- 120) A. Steiger, et al.: Traceable terahertz power measurement by using optical methods, *Proc. SPIE*, vol. 7485, (2009).
- 121) A. Steiger, et al.: Traceable terahertz power measurement from 1 THz to 5 THz, *Opt. Express*, vol. 21, no. 12, (2013), pp. 14466-14473.
- 122) A. Steiger, et al.: Terahertz laser power measurement comparison, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 6, no. 5, (2016), pp. 664-669.
- 123) C. Xiaohai, et al.: An improved design and simplified evaluation technique for waveguide microcalorimeter, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 65, no. 6, (2016), pp. 1450-1455.
- 124) C. Xiaohai, et al.: New trends and developments in metrology, Chapter 1. Microwave power measurements: Standards and transfer techniques, (*IntechOpen* 2016).
- 125) D. Yuqiang, et al.: Absolute intensity measurements



- of CW GHz and THz radiation using electro-optic sampling, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 64, no. 6, (2015), pp. 1734–1740.
- 126) D. Yuqiang, et al.: Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry. *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, (2013), pp. 5737–5742.
- 127) Q. Sun, et al.: Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometers using absorption lines of carbon monoxide, *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011, Proceedings Vol. 8195*, (2011).
- 128) J. Lehman, et al.: Planar hyperblack absolute radiometer, *Opt. Express*, vol. 24, no. 23, (2016), pp. 25911–25921.
- 129) M. G. White, et al.: Traceable terahertz power metrology at NIST, 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), (2014), pp. 1–1.
- 130) J. Lehman, et al.: Laser power-meter comparison at far-infrared wavelengths and terahertz frequencies, *Metrologia*, vol. 49, no. 4, (2012), pp. 583–587.
- 131) J. Lehman, et al.: Far infrared thermal detectors for laser radiometry using a carbon nanotube array, *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 21, (2011), pp. 4099–4104.
- 132) C. Xiaohai, et al.: International comparison of WR15 (50 to 75 GHz) power measurements among NIST, NIM, PTB and NMC, A\* STAR, 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016), (2016), pp. 1–2.
- 133) T. Ogura, et al.: Real-time absolute frequency measurement of CW-THz radiation based on a free-running THz comb, in 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, (2015), pp. 27B1\_5.
- 134) Y. Hsieh, et al.: Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, (2013), pp. 322–330.
- 135) T. Yasui, et al.: Terahertz frequency metrology based on frequency comb, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 1, (2011), pp. 191–201.
- 136) S. Yokoyama, et al.: Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb, *Opt. Express*, vol. 16, no. 17, (2008), pp. 13052–13061.
- 137) 柴直孝, 他.: 黒体放射光源に基づくテラヘルツ検出器の感度と雑音等価電力の較正法, *レーザー研究*, 42巻, 11号, (2014), pp. 838–843.
- 138) C. Monte, et al.: A terahertz blackbody radiation standard based on emissivity measurements and a monte-Carlo simulation, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, no. 8, (2014), pp. 649–658.
- 139) D. Charles, et al.: Aqueous blackbody calibration source for millimeter-wave/terahertz metrology, *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 30, (2008), pp. 5604–5615.
- 140) F. Destic, et al.: THz absolute power measurement: A simple and reliable method, 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (2012), pp. 1–2.
- 141) L. Werner, et al.: Towards traceable radiometry in the terahertz region, *Metrologia*, vol. 46, no. 4, (2009), pp. S160–164.
- 142) Supplementary, Region Key CCEM strategic plan 2013: <<https://www.bipm.org/utills/en/pdf/CCEM-strategy-document.pdf>>, Last access Jan. 2018
- 143) Y. Shimada, et al.: Recent research trends of terahertz measurement standards. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, (2015), pp. 1166–1172.
- 144) Z. Popovic, and E. N. Grossman.: THz metrology and instrumentation, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, (2011), pp. 133–144.
- 145) M. Naftaly: Terahertz metrology (Artech House 2015)
- 146) BIPM Website: <<https://www.bipm.org/utills/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>>, Last access Sep. 2019
- 147) 霜田光一, 他.: 量子エレクトロニクス (上), (裳華房 1972)
- 148) 平野功: 原子・光・磁気の解析 – その成り立ちと発展の軌跡 – (技報堂出版 2004)
- 149) M. Kinoshita, and M. Ishii: Electromagnetic field sensor based on atomic candle, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 66, no. 6, (2017), pp.1592–1597.
- 150) D. A. Anderson, et al.: Optical measurements of strong microwave fields with Rydberg atoms in a vapor cell, *Phys. Rev. Applied*, vol. 5, no. 3, (2016), pp. 034003–1–7.
- 151) M. T. Simons, et al.: Simultaneous use of Cs and Rb Rydberg atoms for dipole moment assessment and RF electric field measurements via electromagnetically induced transparency, *J. Appl. Phys.*, vol. 120, no. 12, (2016), pp. 123103–1–9.
- 152) H. Fan, et al.: Effect of vapor-cell geometry on

- rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields, *Phys. Rev. Applied*, vol. 4, no. 4, (2015), pp. 044015-1-7.
- 153) C. L. Holloway, et al.: Sub-wavelength imaging and field mapping via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 24, (2014), pp. 244102-1-5.
- 154) M. Kinoshita, et al.: Atomic microwave power standard based on the Rabi frequency, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 60, no. 7, (2011), pp.2696-2701.
- 155) D.C. Paulusse, et al.: Accuracy of an atomic microwave power standard, *IEEE trans. instrum. meas.*, vol. 54, no. 2, (2005), pp. 692-695.
- 156) T. P. Crowley, et al.: Quantum-based microwave power measurements: Proof-of-concept experiment, *Review of scientific instruments*, vol. 75, no. 8, (2004), pp. 2575-2580.
- 157) M. Brune, et al.: Quantum rabi oscillation: A direct test of field quantization in a cavity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 11, (1996), pp. 1800-1803.
- 158) J. C. Camparo: Atomic stabilization of electromagnetic field strength using Rabi resonances, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 2, (1998), pp. 222-225.
- 159) C. G. Wade: Terahertz wave detection and imaging with a hot rydberg vapour, *Diss. Durham University*, (2017).
- 160) C. G. Wade, et al.: Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence, *Nat. Photonics*, vol. 11, no. 1, (2017), pp. 40-43.
- 161) C. N. Cohen-Tannoudji: *The Autler-Townes effect revisited Amazing Light*, (Springer-Verlag New York 1996), pp. 109-123.