

失敗しない超高周波パワー測定の実践ノウハウ

Practical Know-How for Extremely High Frequency Power Measurement

木下 基

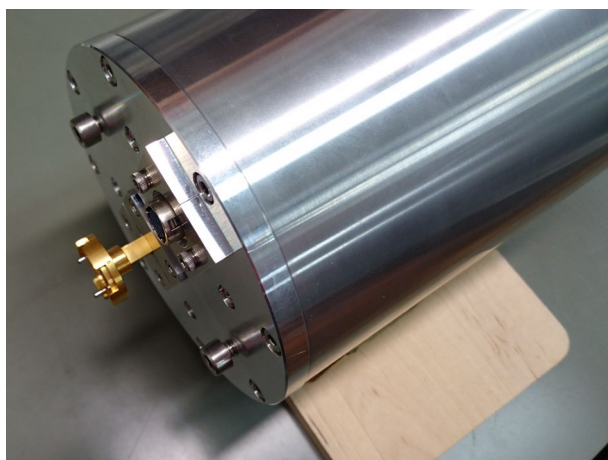
Kinoshita Moto

国立研究開発法人産業技術総合研究所

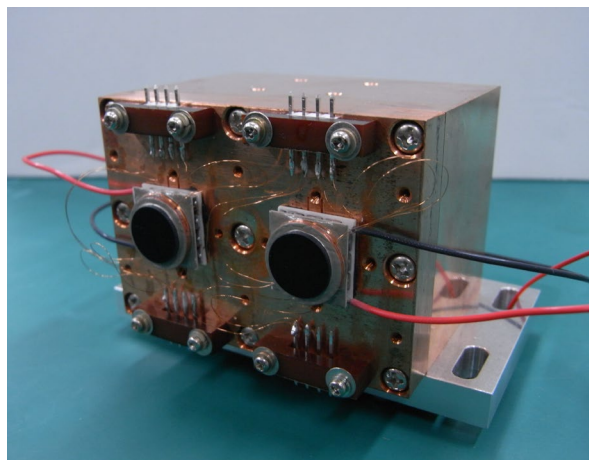
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

概要

携帯電話、無線 LAN、放送などに代表されるように、電磁波を用いた通信は現代社会を支える基盤技術として必要不可欠である。また、近年使用される電磁波は高周波化し、5G/6G システムではミリ波・テラヘルツ波といった超高周波帯の電磁波の使用が見込まれている。一方、超高周波化に伴って伝送線路が小型化したり、使用可能なパワーが微弱に限られたりすることで、電磁波の利用者には高度な技術が求められる。そこで、本稿ではミリ波・テラヘルツ波帯におけるパワー測定を例に、超高周波帯におけるノウハウを含めた測定技術について解説する。下の2つの図はミリ波およびテラヘルツ波のパワーを精密に測定するために開発されたカロリメータの写真である。今回は特にこれらのカロリメータに関する補正や測定の事例を通じて、超高周波帯電磁波の取り扱いの難しさや注意点などについて紹介する。



ミリ波用導波管型カロリメータ



テラヘルツ波用空間ビーム型カロリメータ

Abstract

As represented by mobile phones, wireless LAN and broadcasting, wireless communication using electromagnetic waves is essential as a basic technology to support the modern society. In recent years, the frequency of electromagnetic waves used for the communication has been increasing. For example, millimeter and terahertz waves are expected to be used in 5G/6G systems. On the other hand, users of the ultrahigh frequencies are required to have advanced technology. In this paper, the measurement technology including the know-how in the ultrahigh frequencies is described by taking the power measurement in the millimeter and terahertz waves as an example.

1. はじめに

1864年にJ. C. Maxwellは電磁気学を定式化し、そこから光速で伝搬する波、つまり電磁波の存在を予測した[1]。その正当性は1888年のH. R. Hertzをはじめとする後の研究によって明らかにされていく。その後さらに、G. Marconiは電磁波を無線通信に応用し、1895年に約2 kmの通信に成功したことを皮切りに次第に距離を伸ばし、1901年には3000 km以上離れた大西洋間通信に成功した。その他にも多数の先人の知恵と探求によって、電磁波は現代社会を支える基盤技術として必要不可欠となった。携帯電話、無線LAN、放送などの通信技術などは、最たる例である。また、C. E. Shannonの情報理論[2]によれば信号帯域が広いほど多くの情報を伝送できることから、無線通信における電磁波の周波数は上昇し続け、近年ついにミリ波・テラヘルツ波と呼ばれる領域に達している。第5世代(5G)移動通信システムではすでにミリ波帯が使用され、その先の第6世代(6G)移動通信システムではテラヘルツ波の使用が検討されて始めている。

一言で電磁波と言っても様々である。広い意味では、電波、可視光、X線などは周波数が異なるだけですべて電磁波である。同じ電波という括りの中でも、一般的に周波数が低い電波は回折が強く伝送距離が長く、反対に周波数が高い電波は直進性が強く伝送距離は短いという特徴を持つ。ただし、電離層や地上における反射や、様々な構造物による回折、空気中の水蒸気による吸収などによって実際の伝搬距離は大きく左右されるため、これらの特徴に合わせた用途が選ばれている。本稿では、ミリ波・テラヘルツ波帯のパワー測定について解説するが、汎用的なマイクロ波帯との比較をできる限り交えるつもりである。先に可視光なども電磁波であると述べたが、以下では便宜的に、マイクロ波、ミリ波を含むテラヘルツ波以下の周波数帯を電磁波と総称する。

電磁波に関連する物理量は振幅、周波数、位相が基本と言える。これに変調パラメータを付加することでどんな波でも記述できる。さらに伝送線路の減衰量やインピーダンス、アンテナの係数や利得などのパラメータが関係する。本稿では、電磁波に関するパラメータの中で最も基本的な、振幅つまりパワー測定に絞って解説したい。電磁波のパワー測定の原理や特徴は、表1の通り様々である。熱型測定は、電磁波を熱に変えて測定する方式で、帯域が広く、実用的で多くのパワーメータに用いられているが、測定時間が長く、周囲温度の影響も大きい。電圧型

測定は、電磁波の電圧を直接測定するため、低周波帯域では広く実用されている。整流型測定は、ダイオード等による整流作用を用い、高速で高感度であるが、電磁波の波形に敏感なためスプリアス等の影響を受けやすい。また、その他電磁波の放射圧測定や、原子との共鳴現象を利用した測定方法[3,4]なども研究されている。これらは様々な可能性を秘めているが、まだ開発の途中である。本稿では電磁波のパワー測定の中でも特に、熱型パワー測定を中心に解説する。ただし、その中に含まれるノウハウは多岐に渡るため、他の方式のパワー測定方法はもちろん、電磁波技術全体に共通する話題も多い。例えば、パワー測定は他のインピーダンスや減衰量の様なパラメータとも深く関連するため、それらに関する技術にも触れる。

2. パワー測定

前節で電磁波の振幅と表現したが、実際の測定量としてはパワーを用いるのが一般的である。これは電磁波の波長が回路のサイズ以下となる分布定数回路では、電流や電圧は目まぐるしく変化するため実用性が低くなるためである。

電磁波のユーザーにとって、自身が使用する電磁波のパワーを把握することは極めて重要である。これは電磁波デバイスの研究開発において性能を理解する上で必要であるだけでなく、電磁波デバイスから放射される電磁波が他の機器や生体へ影響を及ぼすことが無いよう注意する必要があるためである。そのため、電磁波のパワーは法令や規定において規制されることが多い。例えば無線局を運用する場合、電波法によって定められた範囲内でのパワーしか用いることができず、また無線設備の点検にあたっては所定の校正を受けたパワーメータを用いることとされている。

型	例	特徴
熱	カロリメータ ボロメータ サーミスタ	実用的 広帯域 長時間
電圧	交直変換器 真空管	実用的 低周波数向き
整流	ダイオード	高速 高感度 スプリアスやインピーダンスに敏感
その他	放射圧 原子共鳴	高精度化の可能性 はあるが、開発途上

表1 各種のパワー測定方法

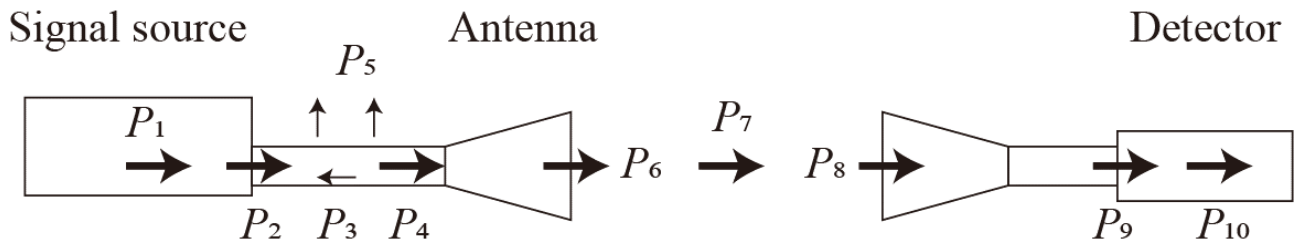


図1 様々なパワー。信号源が発するパワー P_1 、信号源の出力パワー P_2 、反射波のパワー P_3 、伝送線を伝搬するパワー P_4 、伝送中に消費されるパワー P_5 、アンテナから出力されるパワー P_6 、空間を伝播するパワー P_7 、アンテナで受けられるパワー P_8 、検出器への入力パワー P_9 、検出可能なパワー P_{10} など測定すべきパワーの見極めが必要である。

2.1. どのパワーを測るのか？

反射や回折を伴う電磁波の挙動は、よほど慣れた技術者でない限り、直感的に想像し難い。そのため、測定すべき量については注意深く考える必要がある。パワー測定においても、図1の様に信号源が発するパワー P_1 、信号源の出力パワー P_2 、反射波のパワー P_3 、伝送線を伝搬するパワー P_4 、伝送中に消費されるパワー P_5 、アンテナから出力されるパワー P_6 、空間を伝播するパワー P_7 、アンテナで受けられるパワー P_8 、検出器への入力パワー P_9 、検出可能なパワー P_{10} などを区別して取り扱う必要がある。これらは非常に基本的なことだが、しばしば混乱を招くことがある。非常に単純な一例として、図2の様に信号源とパワーメータを直結しただけの測定系を示す。このときパワーメータは適切に校正され、周波数等の設定も正しいとする。もしパワーメータによる測定値が1 mWと表示された場合、信号源の出力は1 mWと言えるだろうか？

わざわざこの様な出題をしたことから大方予想できたかもしれないが、答えは「否」である。しかし、

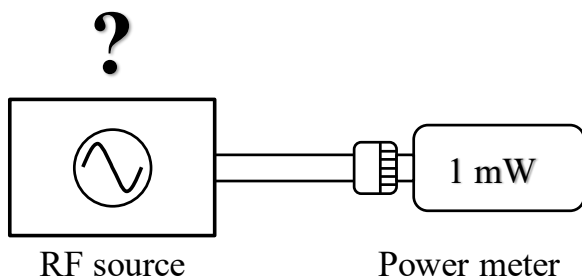


図2 信号源とパワーメータを直結した場合。もしパワーメータによる測定値が1 mWだったとすると信号源の出力は1 mWと言えるか？

「デバイスの出力を測定する」という課題に対して図1の様な測定を行う場合は少なくないのではないだろうか。この場合、何を測定しているのかを解説したい。実は図2において、反射係数に関する情報が欠けている。電磁波の伝送線路内ではインピーダンスの不整合によって反射が生じる。インピーダンスの不整合は伝送線路の僅かな構造の差が影響し、特にコネクタなどの接続面で生じやすい。ここで、信号源およびパワーメータの反射係数をそれぞれ Γ_G および Γ_m とし、信号源の出力およびパワーメータへの入力パワーをそれぞれ P_G および P_{in} とすると、それらの関係は、

$$P_{in} = \frac{P_G}{|1 - \Gamma_G \Gamma_m|^2} \quad (1)$$

となる。パワーメータで測定できる量は、パワーメータへの入射パワーであって、ある端子からの出力ではないということは、見落としがちかもしれない。式(1)によると、信号源またはパワーメータの反射係数がゼロの場合にのみ $P_G = P_{in}$ となり、信号源を直接パワーメータで測定できる。もちろん多くのパワーメータは反射係数がゼロ近くになるよう設計されているが、 $|\Gamma_G|^2$ および $|\Gamma_m|^2$ がそれぞれ0.01、つまりパワーに対して1%の反射で抑えられた場合であっても、 P_G と P_{in} の差は最大で2%程度となる。 Γ_G および Γ_m が既知であれば P_{in} と P_G の関係は明らかであるが、 Γ_G の測定は信号源が駆動している状態で反射係数を測定しなければならないため、簡単ではない。その代わりに、信号源自体の反射係数を無視できるように、アイソレーターや減衰器を用いることも多い。

2.2. パワーメータの校正係数

先ほど、「パワーメータで測定できる量は、パワーメータへの入射パワーである」と述べた。通常、パワーメータには、入射パワー P_{in} に対する表示パワー

P_d の比を示す校正係数

$$K_u = \frac{P_d}{P_{in}} \quad (2)$$

が付与されている。従って、パワーメータに表示された値を校正係数で除すことで、パワーメータへの入射パワーを得ることができる。校正係数は計測器メーカーや校正事業者によって付与されるが、それらの大本を辿れば、国家標準に行き当たる。なお、この校正の連鎖は、計量のトレーサビリティと呼ばれている。

2.3. カロリーメータ

我が国の電磁波パワーの国家標準は、産業技術総

合研究所（産総研）が保有するカロリーメータが指定されている。カロリーメータは電磁波を熱に変換し、それと同等の熱を発する直流電力と比較することで、電磁波のパワーを測定する装置である。直流電力は直流の抵抗と電圧から高精度に算出することができる。カロリーメータの構造の概略と測定原理を図3に示す。カロリーメータは電磁波を熱に変える吸収体、直流ヒーター、直流クーラー、温度検出器、温度基準ブロックで構成されている。カロリーメータの動作原理は下記の通りである。まず、直流クーラーで冷却しつつ、温度検出器で測定された温度基準ブロックとの温度差を直流クーラーにフィードバックすることで、電磁波の吸収体を常に等温に制御する[図3(a)]。ここで、電磁波が吸収体に入射すると[図3(b)]、吸収体の発熱が加わるため、直流ヒーターの出力を下げることで温度バランスを取り直す。この間クーラーの冷却パワーが一定に保たれていれば、図3(a)と(b)における直流ヒーターの出力差が電磁波のパワーと等価とみなせる。

ただし、カロリーメータへ入射する電磁波のパワーと直流ヒーターの出力差は厳密には異なるため、以下の補正を考慮する必要がある。

(a) 反射

吸収体によって測定すべき電磁波をすべて熱に変えられることが理想だが、2.1節でも述べた通り電磁波はインピーダンス不整合によって電磁波の一部を反射する。従って、その反射係数を測定し、補正する必要がある。

(b) 断熱性

熱型測定では、外部との熱の出入りに大きく影響される。測定すべき熱を外部へ漏らさないだけでなく、外から流入する熱を排除する必要がある。ここで、同軸や導波管の様な有線回路のカロリーメータにおいてこの問題が顕著に現れる。周囲環境の温度変動だけでなく、信号源の発熱などが伝送線路から伝導するためである。これらは、断熱ジャケットや断熱線路、または温度補償回路などを使うことで除去している。しかし、断熱線路内の電磁波損失によって発生した熱は排除が難しいため、厳密に評価して補正する必要がある。

(c) 直流等価性

図3は概略図であるため実際の構造を厳密に示してはいないが、電磁波の吸収体と直流ヒーターは物理的に異なる位置に設置されている。そのため、それぞれの位置で発生した熱が温度検出器へ伝わる割合は僅かに異なる。この補正量はカロリーメータの構造に大きく

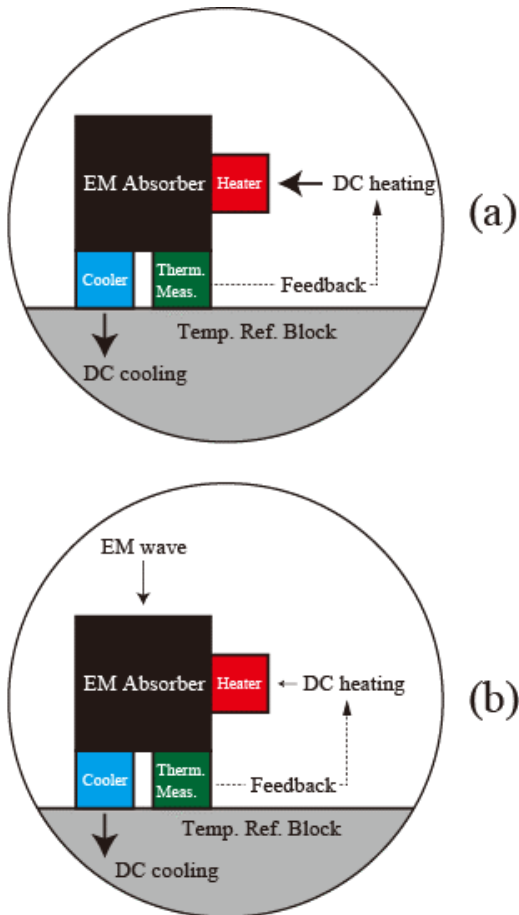


図3 カロリーメータの測定原理。(a)では直流ヒーターと直流クーラーのパワーが釣り合っている。(b)では直流ヒーターおよび電磁波のパワーの和と直流クーラーのパワーが釣り合っている。(a)と(b)の比較から、電磁波のパワーは直流ヒーターの出力差として導くことができる。

依存する。同軸線路で構成されたカロリメータであれば、電磁波の吸収体に直流を印加することで直接吸収体とヒーターとの熱伝導の比を測定できるが、それ以外の場合、実測は難しい。

カロリメータは熱に変換することができれば、周波数の制限はないため、電波帯に限らず、光波帯におけるパワー測定にも上記の原理と補正が用いられている。電磁波においては、比較的low周波数のマ

イクロ波帯では同軸線路で構成されたカロリメータが用いられている。より周波数が高いミリ波では主に導波管カロリメータが用いられている。図4に同軸(a)および導波管(b)の寸法と基本モードで使用可能な周波数の関係を図示した。それぞれの寸法は挿入図の通り、同軸の外部導体直径および導波管の長辺で定義した。薄く色づけされた帯域は、比較的汎用されている領域である。図4の通り、同軸に比べて導波管は単純な構造であるため、小さい寸法に耐え、より高い周波数領域でも実用されている。しかし、両者とも1 THzを超えるとそれらの寸法は0.1 mm程度まで下がり、性能を維持することが困難となる。従って、テラヘルツ波領域では、導波路を用いない空間を伝搬するビームを対象としたカロリメータが開発されている。

2.4. 導波管型カロリメータによるミリ波パワー測定

産総研では、50 GHz から 330 GHz までの周波数に対応した導波管カロリメータを保有している[5,6]。対応する導波管規格は、WR-15、WR-10、WR-6、WR-5、WR-3 となる。導波管のサイズは異なるが、基本的には前節の原理に基づき、5種のカロリメータはほぼ同型である。代表例として図5と図6に220 GHz から330 GHz までに対応したWR-3 導波管カロリ

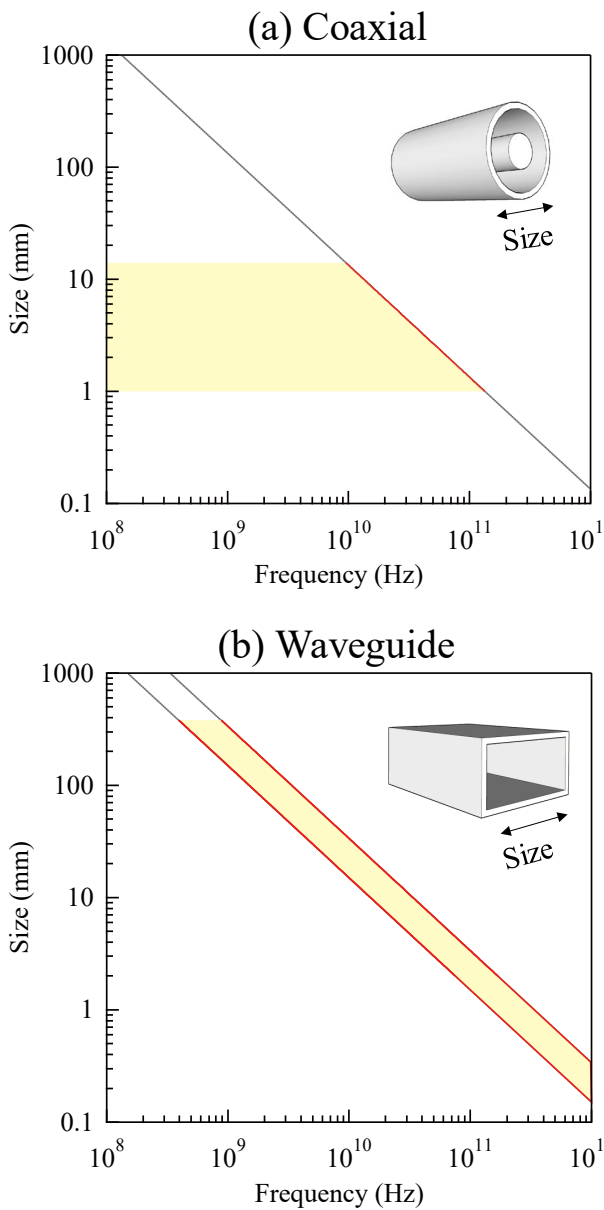


図4 同軸(a)と導波管(b)の適応周波数。それぞれの寸法と基本モードで使用可能な周波数範囲の関係を示す。黄色く塗られた範囲は比較的汎用性の高い領域である。

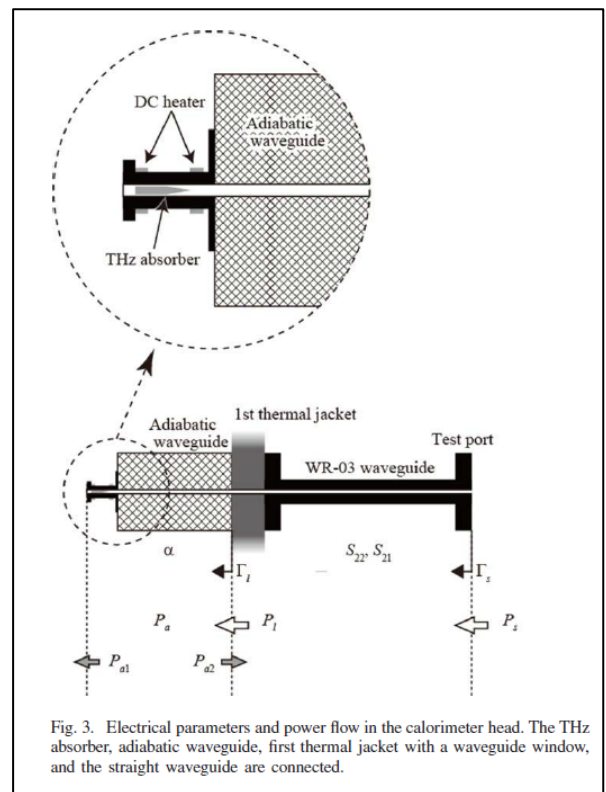


Fig. 3. Electrical parameters and power flow in the calorimeter head. The THz absorber, adiabatic waveguide, first thermal jacket with a waveguide window, and the straight waveguide are connected.

図5 [6] Fig. 3 より引用した導波管カロリメータの構造。

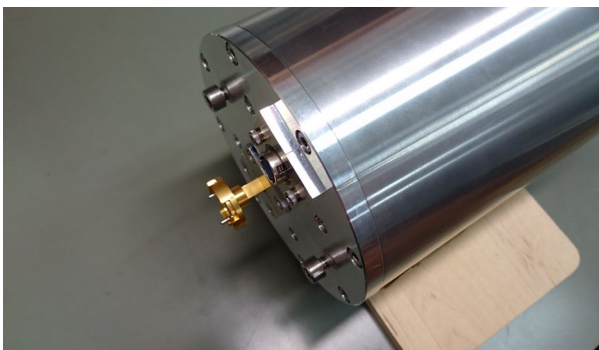


図6 WR-3 導波管カロリメータの写真。

メータの構造と写真を示す。なお、図5は文献[6]の Fig. 3 より引用した。この導波管型カロリメータは、電磁波の吸収体、直流ヒーター、断熱導波管、断熱ジャケットと一体になった入力ポートで構成されている。また図5では省略されているが、吸収体は図の左側で温度検出器および直流クーラーと接している。ミリ波の吸収体は磁性材料を添加したエポキシ樹脂をピラミッド型に成形したものを用いた。考慮すべき補正や不確かさの要因は前節で述べた通り、(a)反射(b)断熱性(c)直流等価性である。

(a) 導波管カロリメータの反射補正

反射については、吸収体をピラミッド型にするなど極力反射係数を小さくする工夫を凝らしているが、完全ではない。従って、ある程度の反射係数があったとしてもそれを適切に測定し、補正することが肝心である。断熱導波管を含む吸収体の反射係数 Γ はベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)で測定し、その不確かさは導波管の構造に対する加工精度やコネクタの接続精度などから見積もった。またこの導波管カロリメータでは、入力端子(Test port)から断熱導波管までの導波管における損失や多重反射もそれぞれ VNA で測定して、補正した。同軸や導波管などの伝送線路内におけるパワー測定では多重反射による波の干渉効果が強く影響する。また特にミリ波導波管では、伝送損失も大きく、カロリメータに入射した信号が検出部へ届くまでの減衰も無視できない。

(b) 導波管カロリメータの断熱補正

導波管カロリメータでは断熱ジャケットおよび吸収体の直前に挿入された断熱導波管によってミリ波吸収体と外界との断熱性を高めている。また、産総研のカロリメータでは双子型のカロリメータ構造を採用している。双子型とは、物理的に同じ構造のカロリメ

ータを2つ並べ、温度検出器の電気極性を逆に接続したものである。この場合、周囲温度の変化に対して、感度は同等だが正負を逆に反応する。従ってこれらを直列に接続すれば周囲温度の変化をキャンセルすることができる。上記の様に、断熱性を高める構造をとってはいるが完璧ではない。特に断熱導波管の内部で発生した熱については補正が必要である。上述の通りミリ波導波管内では伝送損失が大きく、発熱量も多いため、この補正の評価が重要となる。断熱導波管の中で発生した熱は、温度検出器に伝わるものと外部へ漏れるものがあり、これらの割合を補正する必要がある。測定には、吸収体と断熱導波管の間に金箔等を挿入することで、電磁波を遮断して熱だけを測定するホールショート法がよく用いられる。

(c) 導波管カロリメータの直流等価性

図5の通り、導波管カロリメータにおける吸収体と直流ヒーターの位置は僅かに異なる。従って、これを補正する必要があるのだが、実はこれが容易でない。これが同軸カロリメータであれば、電磁波吸収体に同軸の内部導体が接続されているため、直流を印加することが可能である。吸収体と直流ヒーターの両者に等しい直流電力を与え、それぞれ温度検出器がどれだけ反応するかを調べれば、直流等価性を定量的に評価することができる。しかし、導波管の場合は吸収体に直流を印加することができないため、直流ヒーターの位置を変化させた場合の影響から推定する方法、熱シミュレータで熱流を推定する方法、ミリ波吸収体にヒーターやサーミスタなどを埋め込んで評価する方法などが試されている。

帯域によって異なるが、ミリ波帯の導波管カロリメータでは上記の(a)から(c)がそれぞれ最大で数パーセント程度ずつ寄与する。また、導波管のサイズが小さいほどフランジの接続再現性が低くなる傾向にあり、300 GHz 付近でのパワー測定の再現性は1%を超える場合もある。図7の様に、合わせピンの他にフランジを囲うリンクを用いたり、接続面を水平につまり導波管を垂直に立てたりすることで導波管の接続再現性を高めている。導波管カロリメータの測定不確かさは、周波数が高いほど大きい傾向にあり、50 GHz 付近でおよそ3%、300 GHz 付近では7%程である。



図7 導波管の接続例

2.5. 空間ビーム型カロリメータによるテラヘルツ波パワー測定

300 GHz を超える周波数帯では空間ビーム型のカロリメータが用いられる[7,8]。図8に空間ビーム型のテラヘルツ波カロリメータの写真を示す。空間ビーム型のカロリメータは、同軸や導波管のカロリメータと異なり、吸収体が開放されている点の特徴である。この場合、伝送線路を伝う熱の漏洩が無い場合、同軸や導波管と比べて断熱性は高いが、密閉されていない分、周囲の放射や迷光などのノイ

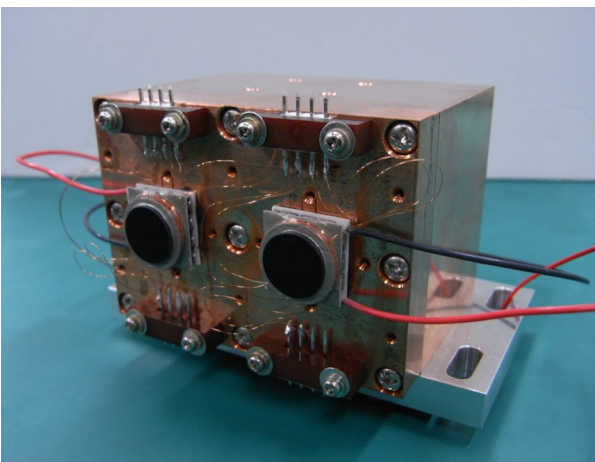


図8 空間ビーム型テラヘルツ波カロリメータの写真。温度補償用に双子型の構造になっている。

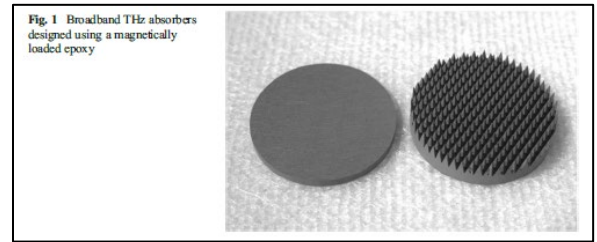


図9 空間ビーム型テラヘルツ波カロリメータの吸収体の例。本図は[8]Fig.1 より引用した。

ズの影響を受けやすい。空間ビーム型カロリメータについても同様に(a)反射(b)断熱性(c)直流等価性を考慮する。

(a) 空間ビーム型カロリメータの反射補正

テラヘルツ波カロリメータの吸収体には赤外吸収ガラスやミリ波カロリメータ同様のエポキシ樹脂などが用いられている。形状はテラヘルツ波を受ける面を平面にしたディスク状のものや、ピラミッド構造を敷き詰めたものなどがある。ピラミッド構造の方が反射は小さいが、平面の方が反射の精密測定には有利である。図9に[8]より引用したテラヘルツ波カロリメータの吸収体の例を示す。テラヘルツ波の反射は、テラヘルツ波時間領域分光装置で測定した。同軸や導波管と異なり、空間を伝搬するビームの場合は、フィルター等の光学系に角度を付けることで多重反射を除去することができる。従って、反射の補正は比較的単純に済ませることができる。

(b) 空間ビーム型カロリメータの断熱補正

同軸や導波管の場合と異なり、金属でできた伝送線路から逃げる熱が無い場合、空間ビーム型カロリメータの断熱性は高い。ただし、ビームを受ける吸収体が開放されているため、対流や輻射などには弱く、周囲環境を整える必要がある。図8のカロリメータは、断熱や迷光の遮断のため、測定時には多重のアルミ製ジャケットに囲われる。

(c) 空間ビーム型カロリメータの直流等価性

空間ビーム型のカロリメータもテラヘルツ波の吸収体に直接直流を印加することができないため、テラヘルツ波と直流ヒーターによる発熱の差を解析する必要がある。図8のカロリメータでは直流ヒーターは、テラヘルツ波吸収体の裏側に設置されている。上述のように空間ビーム型カロリメータは断熱性が高いため、直流等価性も比較的良く、1%以下の不確かさとなる。

産総研では、空間ビーム型テラヘルツ波カロリメータによって、およそ300 GHzから1 THzまで、6%前後の不確かさで測定できる。

2.6. 微小パワーの測定

テラヘルツ波は長らく、電波と光波の狭間にある未開の領域と呼ばれてきた様に、信号源等が開発途上にある。そのため、微弱な信号を扱わざるを得ない場合が多い。本節では、その様な微小パワー測定における注意点等を解説する。ここでは、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)を信号源として、テラヘルツ波カロリメータによるパワー測定を例示する。まず、図10はテラヘルツ波カロリメータのノイズフロアの時間変動を図示したものである。図10の(a)は図8の様にカロリメータをほぼむき出しのまま実験室環境に晒した状態のもので、(b)は断熱ジャケットで覆ったものである。ただし、(a)の場合も照明や空調の風は直接当たらないような最低限の囲いは設けている。(a)の場合、数時間の間に最

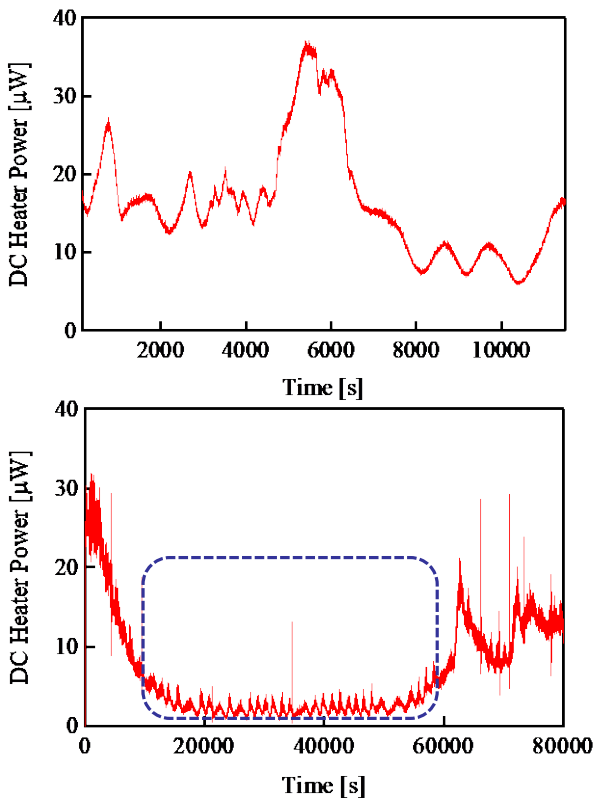


図10 断熱ジャケットが無い場合(a)とある場合(b)のテラヘルツ波カロリメータノイズフロア。(b)の点線部分は夜間を示す。夜間は空調制御による周期的な変動が観測できる。

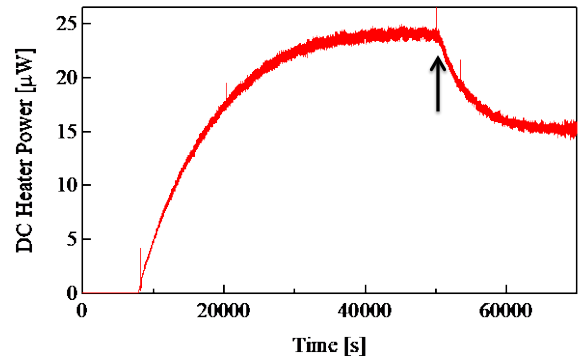


図11 UTC-PDを駆動したときのカロリメータのノイズフロアのドリフト。テラヘルツ波は遮断され、カロリメータには入射していない。

大20 μW程の変動が見られた。(b)の場合、特に点線で示した期間は夜間を示し、数 μW の変動に落ち着いている。夜間は消灯し、周囲における人の活動も無いことから安定していると考えられる。ただし夜間においても空調制御による周期的な変動が確認できることから、例えば1 μW レベルの微小パワー測定を想定した場合はさらに断熱を徹底する必要がある。

測定装置のウォーミングアップも測定に大きな影響を与える。本測定で想定している UTC-PD は波長の異なる2本のレーザーで駆動させるが、それぞれ10 mW レベルのレーザーを用いるためこれらの発熱も大きな影響を及ぼす。以下では、断熱ジャケットを装着したカロリメータと UTC-PD をさらに一回り大きいアルミ製の箱に入れて実験室環境から断熱した系について紹介する。図11は、カロリメータの等温制御を開始してから約50,000秒後に安定したところで UTC-PC を駆動した場合のカロリメータのノイズフロアのドリフトの様子を示したものである。ただし、このときテラヘルツ波は遮断され、カロリメータには入射していない。UTC-PD の駆動によって10 μW 程度のドリフトしたことが確認できる。

UTC-PD のようにレーザーで駆動するテラヘルツ波光源は数多いが、そのときの迷光の処理も重要である。この場合、光学フィルターが有効ではあるが、その使用方法についても注意が必要である。図12は UTC-PC とカロリメータの間に、UTC-PD の駆動レーザーの波長に合わせた光学フィルターを挿入したときのカロリメータの応答である。ただし、このときテラヘルツ波は発信させず、レーザーの迷光のみを照射している。レーザーの迷光のパワーに対して十分な減衰量のフィルターを使用しているにも関わらず、カロリメータは0.5 μW 程度の応答を示している。これは、レーザーが光学フィルターに

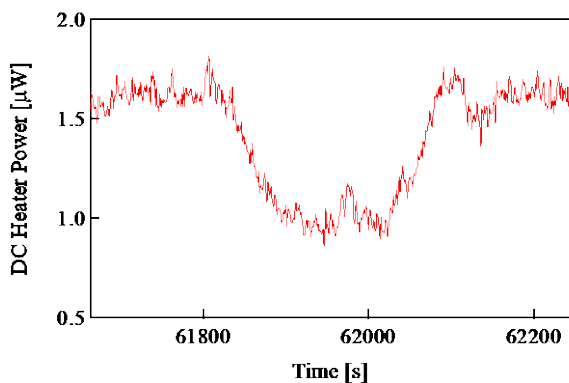


図 1 2 レーザーの迷光を遮断したときのカロリメータの応答。迷光に対して十分なフィルターを用いてもカロリメータにはフィルターからの熱放射によるノイズが観測される。

吸収されたことで光学フィルターの温度が上昇し、そこからさらに近赤外光の熱放射が起きたことが原因と考えられる。従って、レーザーの迷光を除去する場合は、レーザーの波長に合わせた可視や近赤外光フィルターの他に遠赤外フィルター等も必要となる。

以上のようなノイズを注意深く除去することで、図 1 3 に示す様な $1 \mu\text{W}$ 以下の微小パワー測定が可能になる。図 1 3 の縦軸はカロリメータの直流ヒーター出力を示すため、テラヘルツ波が入射した場合にはその発熱分だけ減少し、その落差がテラヘルツ波の入力パワーとして測定される。図 1 3 では横軸のおよそ 200~500 秒の間テラヘルツ波が入射している。この測定では、カロリメータの応答として約 580 nW という結果が得られた。

3. まとめ

近年、ミリ波・テラヘルツ波などの超高周波技術が発展する中、その基本技術と言えるパワー測定に関して、ノウハウを含めて解説した。パワー測定の方式としては、世界各国で国家標準に採用されているカロリメータについて、導波管型および空間ビーム型の 2 種類を取り上げた。カロリメータに関する補正や不確かさの要因を、反射、断熱、直流等価性に分けて、導波管型および空間ビーム型についてそれぞれ述べた。最後に、テラヘルツ波帯の課題として微小パワー測定を行う場合に特に注意すべき点を紹介した。

文 献

[1] 出版は 1865 年である。J. C. Maxwell. "A dynamical theory of the electromagnetic field". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 155, No. The Royal Society, pp. 459–512, Jan. 1865.

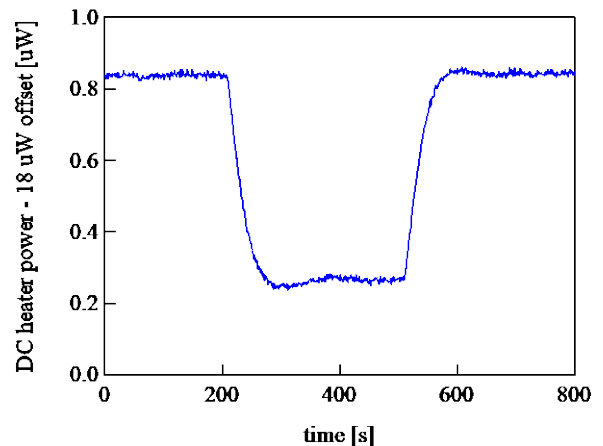


図 1 3 テラヘルツ波カロリメータによる $1 \mu\text{W}$ 以下の微小パワー測定。テラヘルツ波の ON/OFF による縦軸の直流ヒーター出力の落差がテラヘルツ波の入射パワーに相当する。

[2] C. E. Shannon. "A mathematical theory of communication". *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, Jul., Oct. 1948.

[3] M. Kinoshita, K. Shimaoka and K. Komiyama, "Atomic Microwave Power Standard Based on the Rabi Frequency," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 7, pp. 2696–2701, July 2011, doi: 10.1109/TIM.2010.2091299.

[4] 木下基. "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." 東京大学博士論文(2014), doi/10.15083/00007527.

[5] K. Shimaoka, M. Kinoshita and T. Inoue, "A Broadband Waveguide Calorimeter in the Frequency Range From 50 to 110 GHz," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 6, pp. 1828–1833, June 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2225956.

[6] M. Kinoshita, T. Inoue, K. Shimaoka and K. Fujii, "Precise Power Measurement With a Single-Mode Waveguide Calorimeter in the 220–330 GHz Frequency Range," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 6, pp. 1451–1460, June 2018, doi: 10.1109/TIM.2018.2795878.

[7] Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, Kuniaki Amemiya, and Yozo Shimada, "Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level," *Opt. Lett.* Vol. 39, no. 6, pp. 1609–1612 (2014) <https://doi.org/10.1364/OL.39.001609>

[8] Iida, H., Kinoshita, M. & Amemiya, K. Accurate Measurement of Absolute Terahertz Power Using Broadband Calorimeter. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39, 409–421 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0477-3>

著者紹介

木下 基

産業技術総合研究所, 主任研究員,
moto-kinoshita@aist.go.jp