

境界・遷移領域としてのテラヘルツ ——テラヘルツ波技術の更なる発展のために——

The Terahertz as a Boundary and Transition Region :
Some Proposals toward Practical THz Technologies

水野皓司

Abstract

テラヘルツ波は、電波と光の境界 (boundary) 領域であると言われる。この領域は、単にスペクトルの境界ということだけではなく、また種々の物理現象が変化していく遷移 (transition) 領域にも当たっている。本稿では、テラヘルツ波帯にある境界あるいは遷移現象について幾つかの事例を挙げ考察する。

テラヘルツ波は、時に特殊な領域であると言われることがある。しかし、遷移領域であることの基礎の意味を把握することで、この領域のデバイス、応用などの研究・開発にとって新しい考察が生まれることが期待される。

キーワード：テラヘルツ、ミリ波イメージング、電子デバイス動作の高周波限界、熱放射

1. 光と電波の境界領域

テラヘルツ波 (THz) は、電波と光の境界 (boundary) 領域と言われる。そしてまた、この領域は単にスペクトルの境界ということだけではなく、種々の物理現象が変化していく遷移 (transition) 領域にも当たっている。例えば、多くのマイクロ波帯電子デバイスにとって、動作の高周波限界はテラヘルツ波領域にある。トランジスタの動作は走行時間効果によって、またクライストロン電子管の動作は量子効果によって、共に高周波限界はテラヘルツ波帯に存在する。アンテナはマイクロ波帯では不可欠のものであるが、テラヘルツ波帯、特にその高い周波数領域では「アンテナ」という言葉自体余り聞かれない。一方、広くは知られていないことであるが、我々の周りのあらゆる物体は、実は常時テラヘルツ波を熱放射という形で出している。太古の昔からである。あわせて熱放射に関する幾つかの現象はテラヘルツ波帯に遷移領域が存在する。

本稿では、これらテラヘルツ波帯にある境界あるいは遷移現象について幾つかの事例を挙げ考察してみよう。テラヘルツ波は、時に特殊な領域であると言われることがある。しかし、遷移領域であることの真の意味を

把握することで、特殊と言われる理由が理解され、この領域のデバイス、応用などの研究・開発にとって新しい考察が生まれるように思う^(注1)。

2. 現象論的な事例

(1) 炎を透視するミリ波カメラ

まず現象的にテラヘルツが境界になっている事例を一つ示そう。図1上段の3枚の写真は、人物を3種類のカメラを使って写したもので、左から、可視光、赤外光 (波長 $10\mu\text{m}$ 帯)、ミリ波 (波長 8.6mm 帯) のカメラ画像である⁽¹⁾。赤外及びミリ波のカメラ⁽²⁾は受動モード動作で、物体自身が放射している熱放射を画像化するものである。一見して、ミリ波画像の分解能が悪いことが分かるが、これは波長が赤外に比べて900倍近く大きいことによる。

さて図1の下段は、カメラの前に炎を立て、炎を通して見た人物である。これらの画像から分かるように、可視、赤外光では炎しか見えないが、ミリ波カメラでは炎を透して人物を見ることができる。なぜミリ波カメラでは炎を透視できるのだろうか？ また、透視できる境界を

水野皓司 正員：フェロー
E-mail: koji@riec.tohoku.ac.jp
Koji MIZUNO, Fellow.
電子情報通信学会誌 Vol.99 No.7 pp.684-690 2016年7月
©電子情報通信学会 2016

(注1) 本稿の一部は、次の研究会にて発表した：水野皓司、2010年2月25日、研究討論会「テラヘルツ電子デバイスの新展開」、応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会、電子情報通信学会ESテラヘルツ応用システム時限研究会共催。水野皓司、2015年12月22日、電子情報通信学会電子デバイス研究会「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム」。

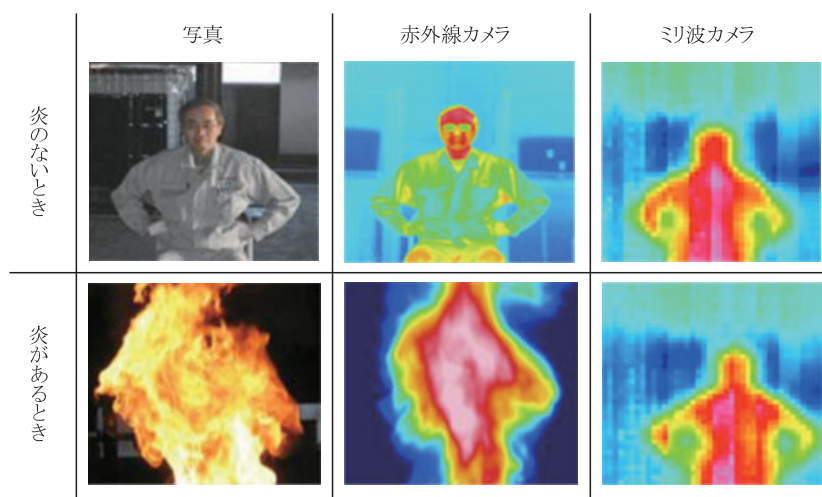


図1 可視、赤外、ミリ波カメラによる人物像（左から）の比較 上段：炎がないとき、下段：カメラと人物との間に炎を立てたとき（炎は、試験火災等に標準火災として使用される n-ヘプタンによる）。

この結果から推測すると赤外とミリ波との間、つまりテラヘルツ領域にあることが考えられるが、どうなのだろう？

（2）なぜミリ波カメラは炎を透視できるのか？

ミリ波を使うと炎を透視できる。この理由について考察しよう。最初に炎はミリ波を放射しない理由について検討し、次いで炎はミリ波を透過させることについて考える。この際、炎の主な成分は、プラズマ、高温の炭素粒子及び高温の水蒸気であることに注目する。

■ 用語解説

レイリー散乱 電磁波の散乱で、波長よりも小さい粒子によるものを言う。空が青いのは、太陽光が大気分子によってレイリー散乱されることによる。

テラヘルツ TDS テラヘルツ時間領域分光法のこと（TDSは Time Domain Spectroscopy）。フェムト秒レーザーパルス为非線形素子に照射し発生する電磁波パルスを利用する分光法。本稿の例の場合、アンテナの中央部分を半導体素子で作成し、そこに時間幅 100 fs 程度のレーザーパルスを当てるとアンテナから電磁波パルスが発生する。それに対する試料のインパルス応答を時間領域で測定し（同じアンテナ構造が受信用にも使える）、フーリエ変換を用いて周波数スペクトルに直す。

バンチング、バンチ 電子ビーム（電子群）と高周波電磁波とがほぼ同じ速度で進むとき、高周波の減速電界位相を見ながら進む電子に、加速電界を見る電子が追いつき、電子群に高周波と同じ周期を持つ疎密波が生じる。密な部分をバンチ（bunch, 集団）といい、バンチが生じる作用をバンチング（bunching, 集団作用）という。

フォトンカウンティング 光を計測する方法の一つで、光が粒子性も持つことを利用して、光子（フォトン）を計数（カウント）する検出方法。検出器としては光電子増倍管などが用いられる。

（3）炎はミリ波を出さないこと

まず、炎の中の炭素粒子からの放射はどの程度だろう。炎の温度を 1,500℃ 程度とすると、粒子からの熱放射のピークは波長 $1\mu\text{m}$ 程度の赤外域にある。また水蒸気は、赤外域に多くの共鳴線を持っていることが知られており、炎に含まれる高温の水蒸気からは輝線スペクトルが観測されることが予想される。これらのことから図1下段左の図のように、赤外、可視域のカメラでは炎が観測されることが理解できる。

一方、波長 8.6 mm (35 GHz) のミリ波帯には水蒸気の共鳴スペクトルは存在しない。大気成分で 100 GHz 以下に吸収を持つのは酸素だけである（60 GHz 帯）。更に、図1下段右の図のようにミリ波では炭素粒子からの熱放射も観測されないが、これは検出器の感度に対して粒子数が少ないためと思われる。

（4）炎はミリ波を透過させること

次に、炎はなぜミリ波を透過させるのかを考えよう。通常炎のプラズマ密度はただだか 10^{12}cm^{-3} 程度であると言われている。この密度はプラズマ周波数で 10 GHz に対応し、ミリ波はこのプラズマを透過できることになる。また、炭素粒子によるレイリー散乱^{（用語）}は、粒子の直径を d 、ミリ波の波長を λ とすると $d^6 \cdot \lambda^{-4}$ に比例する。今の場合炭素粒子の直径はおよそ $1\mu\text{m}$ 、ミリ波波長は 8.6 mm であるので、散乱は極めて小さくミリ波の伝搬を妨げない。更に上に述べたように水蒸気による吸収はこの波長帯には存在しない。したがってミリ波カメラは人体からの熱放射を観測でき、図1下段右の図のような画像が得られることが理解できる。

(5) テラヘルツ波カメラは炎を透視できるか？

テラヘルツ波域には水蒸気による共鳴線が多く、300 GHz（波長 1 mm）より高い周波数領域ではおよそ 90 GHz 間隔で存在する⁽³⁾。したがって、テラヘルツ波帯を用いるカメラを設計する場合は、水蒸気共鳴線の間隙を狙うか、あるいは水蒸気吸収の少ない 300 GHz より低い周波数領域が有効と思われる。このときもちろん被写体からの熱放射強度を観測できる感度が必要であり、その強度については(15)節で触れる。

3. カメラの検出機構について

(6) アンテナはテラヘルツでも使用できるのか？

上の赤外、ミリ波カメラについて、検出器の構成を考察してみよう。いずれも基本構成は、前段にアンテナがありそれに続いて検出素子がある。アンテナは、空間の電波を効率良く受信素子へ導くもので、今の場合赤外カメラではレンズと反射防止膜、ミリ波カメラでは平面アンテナ⁽⁴⁾から成っている。このアンテナ形の違いは受信素子形態の違いに基づくものである。

マイクロ波から赤外領域まで同じ形のアンテナが使われている例がある。ダイオード検出器に使われているウィスカアンテナである。ダイオード（MIM、ショットキーバリア）は、常温で高速（広帯域）動作が可能という実用上の利点と更に高次の非線形性を有するという長所を持っている。高速、高次の非線形は逓倍器、高調波ミキサ等に必要性能である。これらの長所、性能を利用するために、ウィスカアンテナの特性が広い周波数帯域で調べられ、マイクロ波帯だけではなくサブミリ波領域（波長：337 μm ）また赤外域（波長：3.39 μm ）でも動作することが実験的に確認されている^{(5), (6)}。このときウィスカ長は受信波長に従ってスケールされている。

微細加工技術が進歩している現在、マイクロ波帯で開発された種々のアンテナ技術をテラヘルツ帯へ応用していくことは、デバイス性能向上に大いに役立つと思われる。

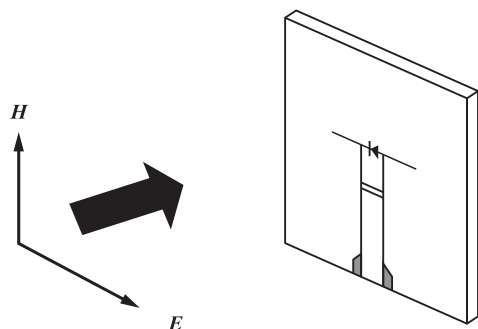


図2 誘電体基板上平面形ダイポールアンテナの構造 ダイポールアンテナの中心にダイオードが装荷され、そこから信号取り出し用のリードが出ている⁽⁸⁾。

る。この際、金属製アンテナのデザインはマイクロ波帯のスケールダウンのみでよいことはメリットの一つである。金属のプラズマ周波数は可視光以上の周波数領域にあり、波長短縮率の考慮は必要ないからである。

(7) アンテナ動作の実例

テラヘルツ波帯で現在有効に使われているアンテナの実例について考察してみよう。アンテナの基本的な役割を理解し、今後新しいデザインを設計する上で参考になると思われる。例は、現在テラヘルツ TDS（時間領域分光法）^(用語)によく使われているボウタイアンテナと半球状レンズの組合せである。このアンテナの原点は、1970 年代に遡り、使いやすい検出器の開発を目的に提案された誘電体基板上の半波長アンテナとダイオード検出器の組合せにある⁽⁷⁾。この論文は、基板厚さ、誘電率に対してアンテナ長を議論しているもので、提案時の構造と指向性を、それぞれ図2と図3に示す。

この平面アンテナは遠赤外域の物性研究などに実際に使用された⁽⁸⁾が、一方図3の指向性に注目した二つのグループがあった。注目したのは、E面で空気側に比べて誘電体側の指向性が大きくなっていること、またH面で指向性にへこみができていることである。彼らは、このへこみは誘電体中に励起される表面波の影響によることを見つけ、表面波を除くために半球状レンズの使用を提案した^{(9), (10)}。それが現在テラヘルツ TDS の分野で広く使われているものである。半球レンズの効果は送信アンテナとして考えると理解しやすい。つまり、このレンズの平面部中心（アンテナがあるところ）からレンズ内へ放射された電波は、半球面上では垂直入射になり横方面には反射されない。そのためにレンズ内での伝搬モードが抑えられ^(注2)、アンテナ利得が上がることになる。アンテナの相反性によって受信アンテナでも同様の効果が得られる。なお、E面指向性に関しては、現在信号波は通常レンズつまり誘電体側から入射されている。この方向が図3に示されているように利得が大きいからである。

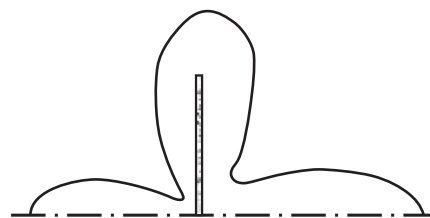


図3 基板上平面形ダイポールアンテナのH面指向性 誘電体基板の断面が見える⁽⁸⁾。

(注2) 斜めに入射すると誘電率の差によって全反射が生じる条件があり、誘電体中に伝搬モードが存在する。これが表面波で、光ファイバはこれを利用したものである。なお、表面波とは表面だけにエネルギーがある波ということではなく、表面にエバネセント波が存在するという意味である。

(8) 検出素子の動作に遷移領域はあるか？

次に検出素子に関して考えてみよう。テラヘルツ波領域では、種々の原理に基づく素子が使われており、現在開発中のものも幾つかある⁽¹¹⁾。素子の種類はマイクロ波・ミリ波帯に比べて多い。この理由は、マイクロ波に比べて光子エネルギーが大きいこと、テラヘルツの応用範囲が多岐にわたっていること、更にいまだ実用性を含め決定的な性能を持つ素子が現れていないということもあるのだろう。当然のことながら、各素子は感度、雑音等の周波数特性に関して異なるパフォーマンスを持っており、使用条件によって選択が必要である。

検出手法に関して、テラヘルツ波領域ではヘテロダイン法、つまり使いやすいミキサの開発が望まれる。この領域ではまだRF（高周波）増幅器が手に入らないからである。また任意の周波数を持つLO（局部発振器）としての光源も手に入りづらいことを考慮すると高調波ミクシングの技術が有用で、高速、高次の非線形性を持つミキサの開発が待たれる。なお、使い方によっては、ゴーレイセルもミキサとして動作するが、ただ可能なIF（中間周波数）は低く、また高調波ミキサとしては使用できない。

電波の検出には雑音に対する考慮が不可欠であるが、ここで雑音のごく基本的なものに触れておこう。熱雑音と光量子雑音（光子のショット雑音）である。大きさはそれぞれ kTB 、 $h\nu B$ で、また k 、 T 、 B はボルツマン定数、温度（K）、周波数帯域を表し、 h 、 ν はプランク定数、周波数である。今温度を常温（290 K）とし、これら2種類の雑音の周波数特性を考えると、6 THzでその強度が入れ替わる（(16)節）。このとき、テラヘルツ領域は正しく遷移領域になっている。なお、検出器選択の際、雑音特性の評価が往々にしておろそかになるが、感度より重要な場合が多い。雑音が少なければ、後は増幅器によって信号を大きくすることが可能だからである。

熱雑音つまり熱放射にはテラヘルツ波帯に特有の現象が幾つか存在する。（14）節以降で詳しく検討する。

4. 能動素子の動作に関して境界領域はあるか？

(9) クライストロンと進行波管について考えよう

テラヘルツ波帯が境界領域になっている典型的な例は、能動デバイスに見られる。本章では、実際のデバイスを例に考察してみよう。取り上げるデバイスは、マイクロ波・ミリ波帯の電子管であるクライストロンと進行波管（TWT、後進波管も）である。この両者とも今は主役の座を降りているが、しかし真空中の電子ビームの振舞いはデバイス動作の基本であり、それに関する考察はきっと他のデバイス開発に対しても多くの示唆を含んでいるものと考えられる。なお、TWTは広帯域、高出

力、信頼性などの点で半導体素子に比べて優れているところもあり、通信分野などでは現在も使用されている。

クライストロン、TWT共に動作の基本は、電磁波とそれによって生成される電子ビームの波（疎密波）との相互作用である。この相互作用の効率が動作の限界を決めていて、実はクライストロン、TWT共に高周波限界はテラヘルツ波帯に来る。原因はいずれの場合とも電子ビームの疎密波（バンチング^(用語)）生成の効率が下がることによるが、以下に見るように、クライストロンの場合には量子論による制限が、TWTでは古典論的な制限が効いてくる。

(10) クライストロン動作の量子効果による制限

クライストロン動作の基本は、クライストロン共振器の間隙（微小ギャップ）に生ずる高周波電圧 V と電子ビームとの相互作用にある。そして、この V の値には、微小ギャップでの放電の発生、及び実現できる共振器の Q 値などによって実際的な上限がある。つまり、電子の電荷を e とすると、 eV の値つまり電子と高周波とのエネルギーのやり取りに制限が生じることになる。

この高周波のエネルギー eV は、量子論の要請によって $n \cdot h\nu$ というディスクリートな値（ n は整数）を取る。ここで n は電子が相互作用する光子の数であり、その値は

$$eV = n \cdot h\nu$$

で求まる。したがって、周波数 ν が高くなると相互作用する光子の数 n が減少することになる。

Senitzkyはクライストロン動作を量子論を用いて解析し、高周波上限を求めている⁽¹²⁾。解析では、動作のSN（信号対雑音）比を計算しているが、信号 S としては古典論で計算した電子速度の値を、また雑音 N としては量子論で計算した速度と古典論による速度との差を使っている。共振器損などを実際に則して仮定し、SN比が1になる周波数を計算して、クライストロンの高周波限界は3 THz近辺にあると結論している。このとき電子と相互作用する光子の数 n は $n \approx 1$ となる。 n が小さいことは、不確定性原理（近似的に $\Delta n \cdot \Delta \phi \geq 1/2$ 、 ϕ は位相）より、位相が定まらないことになる⁽¹³⁾。それで、この場合に対する物理像は、電子が相互作用する光子の数 n が小さくなる結果、電磁波の位相が不確定になって、電子の疎密波が効率的に生成されなくなるため、と理解することができる。なお、この n のような「量子の数」は、一般に量子論を使用する必要性の判断にしばしば用いられる基準である。

(11) ダイオードの検波機構は電波の位相を見る

(6)節で触れたダイオード検波器の基本動作は、 $I-V$

(電流—電圧)特性の非線形性を用いた整流作用である。感度の周波数特性は通常ダイオードの時定数を用いて評価されるが、一方、より本質的な動作の限界にはバリヤを通過する電子の走行時間が効いてきて、MIMでは赤外域、半導体ダイオードではテラヘルツ波領域が高周波動作の限界と見積もられている⁽¹⁴⁾。

一方、その整流作用は電波の位相を感じることによって行われることに注目してみよう。この基本のメカニズムには、前の(10)節で述べたクライストロンの高周波動作と同じ制限が効く。つまり信号の位相情報が必要であり、したがってダイオード検波器では、ダイオード雑音(ショット雑音が主)の大小に関する議論はさておき、本質的にフォトンカウンティング^(用語)の手法は不可能であると考えられる。

(12) TWTでは量子効果は効くか？

前で見たとようにクライストロンの動作は量子論による制限を受ける。対して、TWTの場合はどうであろうか？実はこの場合、電子ビームと電磁波とは、回路上でお互いに進行波相互作用を行い、その相互作用はクライストロンとは違い比較的長時間にわたって行われる。結果的に、電子は多くの光子と相互作用することになり、量子効果は表には現れない。

(13) TWTではデバイ距離に関する考察が必要

それではTWTには高周波限界はないのだろうか？実は今度は、古典論的なものが動作を制限する要因となる。

電子ビームにできる密度疎密波の周期は相互作用する高周波と同じである。高い周波数になるに従って周期は短くなり、疎密の密の部分、つまり各バンチ(集群、塊)に含まれる電子の数は少なくなる。一方、各バンチに含まれる個々の電子は熱エネルギーで勝手に運動していて、自らその塊を崩そうとする。それに抵抗するのは、これも自ら作るポテンシャルである。低い周波数帯では電子数が多いため各バンチのポテンシャルは高く、電子は隣のバンチに入り込むことができない。この熱エネルギーとポテンシャルエネルギーの大小が、バンチが保たれるかどうかの限界を決めることになる。限界のバンチの大きさを表す値はデバイ距離と呼ばれているものである⁽¹⁵⁾。バンチの大きさがデバイ距離より大きいと、ポテンシャルが高くなり、バンチは熱エネルギーによって崩されないことになる。

実際の種々のデバイスで使われている電子ビームの密度を参考に、TWTがCW(連続)動作すると思われる上限を見積もると⁽¹⁶⁾、それはテラヘルツ波領域に来る。ここでもテラヘルツ波は境界領域である。なお、TWTと同様な動作に基づく自由電子レーザは更に高い周波数領域で動作している。実はそこで使われているのは加速

器で生成された電子ビームで、高密度にバンチングされたものである。したがって、自由電子レーザの動作はCWではなく、加速器を駆動している高周波の周期によるパルス動作である。

なお、最近のテラヘルツ高出力光源の動向については文献(17)に詳しい。

5. 熱放射とテラヘルツ

(14) 常温物体からはテラヘルツ波が熱放射されている

さて、もう一度図1に戻ろう。この図のミリ波像、また上段中央の赤外像は、いずれも人物からの熱放射(プランクの放射)を受信し画像化したものである。熱放射は、あらゆる物質から自然に放射されているものであるが、ここにテラヘルツ波領域で遷移する現象が幾つかある。

1900年プランク(M. Planck)は熱放射強度を理論的に説明できる法則を見つけ、よく知られているようにこれが量子論展開の口火を切った。熱放射強度(輝度)は周波数特性を持っていて、常温(標準温度20℃)物体の場合、17 THz(波長18 μm)の赤外域にピークがある。輝度(brightness)とは、放射面の単位面積当り単位立体角に放射される電力(単位:W)である。輝度はこのピークを境に短波長側(可視光側)では急激に低下するので、常温熱放射の大部分は赤外からテラヘルツ波にわたる領域にある⁽¹⁸⁾ことになる。

(15) なぜ、熱放射輝度はピークを持つのか？

プランクの放射法則の導出は、周波数空間における各状態密度に対して“プランクの平均エネルギー P_{th} ”が分配されるとしてなされる。この際、状態密度は周波数 ν の二乗で増加するが、一方一つの状態(単位帯域当り)に割り当てられる平均エネルギー P_{th} は周波数 ν に対して次式のように減少する。

$$P_{th} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1)$$

この P_{th} の減少と状態密度の増加との両者の兼ね合いで、熱放射の輝度には周波数に関してピークが存在することになる。ピークに対応する周波数は上述のように常温の物体に対しては17 THzという赤外域にある。

式(1)は、 $h\nu/kT$ の値が小さいところ、あるいは日常よく使う周波数の低いところでは kT となり、帯域B(Hz)当りを考えると、電子回路の雑音電力を表す見慣れた値の kTB になる。また、 $h\nu/kT$ の値が大きいたころは、プランク定数 h が表面に現れてきて、量子論で記述される領域ということになる。この平均エネルギー

の変化が様々な事象の取扱いで古典論と量子論とを分ける一つの境を示している。ちなみに、 $\nu=1$ THzでは、式(1)の値は $0.92kT$ ($T=290$ K)となり、この周波数で古典論の値 kT から外れ始めていることが分かる。

なお、図1のミリ波イメージングの場合、カメラの個々の受信素子に入る熱放射電力の値は kTB になり、カメラレンズの口径によらない⁽²⁾。これは、結像光学系が回折限界の分解能を得るように設計されているためである。信号源は、ミリ波カメラの場合は人体からの、また赤外域では衣服からの熱放射である。ミリ波は衣服を透過し、赤外線は透過しないことによる（(18)節を参照）。

(16) 常温の熱エネルギーはテラヘルツ波の光子エネルギーに等しい

上で触れた $h\nu/kT$ は光子エネルギーと熱エネルギーの大小を比較しているものであるが、常温のときこの両者が等しくなる周波数（ $h\nu=kT$ ）は、 $\nu=6.1$ THzとなる。つまり、常温の熱エネルギーはテラヘルツ波光子のエネルギーに等しく、テラヘルツ波と常温との結び付きが示唆される。またこのとき、式(1)のプランクの平均エネルギーは、 $0.59kT$ と古典論の値 kT の約6割になっていて、この周波数では量子論と古典論との差がはっきり現れている。

なお、この周波数6.1 THzが、(8)節で述べた光子（ショット）雑音と熱雑音との入れ替わりの境界になる周波数である。

(17) 熱放射はどういう物理で発生するのか？

物体からの熱放射の源について、物理的なイメージを考えてみよう。熱放射は物体の基本的な性質によることが分かる。有限温度の物体中に、ある確率で存在する自由電子は平均自由時間（寿命） τ を持って散乱運動を行っている。この運動によって外部回路に時間幅 τ の誘導電流が流れるが、それが熱放射の古典論的イメージである。このとき放射のスペクトル（周波数成分）は、基本的に τ を時間幅とするパルス波のそれになり、更に τ と電子の速度に関して平均化操作を施すことによって、熱放射のスペクトル分布が得られる⁽¹⁹⁾。常温における τ の値は、一般的に $10^{-13}\sim 10^{-14}$ sのオーダーであり、観測される常温熱放射のスペクトルと一致する。この古典論的に考えた放射のイメージは、 $\nu \ll 1/\tau$ の領域で有効で、あたかも自由電子の寿命が種々の現象における古典論と量子論の取扱いの境界を示しているように思える。

なお、同じ温度でも物質によって熱放射強度は異なる（スペクトル分布は同じ）が、これは放射率 ϵ ($1 \geq \epsilon \geq 0$)の違いによって表現される。放射率は物質の複素誘電率より求めることができ、金属の放射率は通常およそ0、また人体はミリ波帯ではほぼ0.9である。

(18) 我々はテラヘルツ波帯の熱放射に囲まれているあらゆる物体は熱放射している。(14)節で見たように、常温の場合その放射スペクトルの大部分はテラヘルツから赤外にわたる範囲である。つまり、我々はテラヘルツ波に囲まれていて、そしてそれは(17)節で考察したように物質というものが生成された太古の昔からである。

科学技術的には特殊なこのスペクトル領域が、自然界ではありふれたものなのである。熱放射の強度は普通の感覚では大きいものではない。しかし図1に示されているように、人体が発するその強度はミリ波帯受動モードカメラで受信できるほどで、それを利用してこのカメラは衣服下の危険物を探知するセキュリティチェック用として使用されている⁽²⁰⁾。(15)節でも述べたようにミリ波は衣服を透過するからである。ちなみに、0.8 THzより高い周波数のテラヘルツ波は、リネン、デニムなどの衣服材の透過率が悪く、この用途には適しない⁽²¹⁾。

6. まとめ

——テラヘルツ波帯の開発に際して——

テラヘルツという言葉が、電波と光の境界領域を示す用語として我が国で使われ出してから30年近くたつ⁽²²⁾。今やこの言葉が示す周波数（あるいは波長）領域は広く、サブミリ波はもちろん、時にミリ波から赤外線までも含む。

分光の分野では、この広い周波数領域が有効に使われている^{(23)~(25)}。一方、通信技術の分野などでは、テラヘルツ波は大容量通信用デバイス開発のターゲットであり、この分野で研究を進める技術者にとっては、Sパラメータ⁽²⁶⁾あるいはスミスチャートという分光の分野とは異なる技術が必要とされる。テラヘルツの研究者間に、今やおのずとこれら応用分野の違いによって研究方法に境界ができつつあるように感じる。

テラヘルツ波帯技術が今後社会的要求に応え真に実用に耐えるものに発展していくためには⁽²⁷⁾、二つの行き方があるように思う。一つは従来からの遠赤外分子分光の流れに沿うテラヘルツ帯独自の技術を進めていく方向^{(23)~(25), (28)}、今一つは、この帯域の両側にあって現在既に実用化技術を持っている領域、つまりマイクロ波・ミリ波あるいは光領域における技術を延長していく方向である。“Sパラメータ”を用いた技術開発などは正しくこの後者の方向にあるのであろう。また、前者の分光の方向は、現在かなり実用に耐える技術ができてきていると考える^{(29), (30)}。

前述の(7)節で、現在広く使用されているアンテナ構造の原点が1970年代に遡ることを述べた。この年代は、それ以前の遠赤外分子分光の流れから離れ、サブミリ波技術の開発・応用が世界的に盛り上がりを見せ始めたときである。1970年には、ニューヨークで世界最初の国

際会議「サブミリ波に関するシンポジウム」^(注3)が開催され、1974年には、現在サブミリ波・テラヘルツ波の国際会議で一番長い歴史を有する「赤外・ミリ波・テラヘルツ波に関する国際会議 (IRMMW-THz)」の第1回が開催されている^(注4)。その後、この領域の研究は、核融合研究用プラズマの計測、また加熱という具体的な応用をてこに1980年代へと活発化していく。サブミリ波、テラヘルツ波領域の研究・開発が最初の盛り上がりを見せた時代だった。

この1970年頃に始まった技術開発は、そろそろ50年の歴史を持つことになる。半世紀前に始動した流れが今後どういう進歩を遂げていくのか、人類は電磁波スペクトルを切れ目なく使っていくことができるのか、楽しみに見守っていきたい。

謝辞 本稿をまとめるに際し、次の方々より貴重な御意見・御議論を頂いた。お名前を記させて頂き、心からの感謝の意を表する：国立天文台・稲谷順司名誉教授、東北大学・沢田康治名誉教授（現東北大学国際高等研究教育院シニアメンター）、平川一彦教授（東京大学）、尾辻泰一教授（東北大学）、南出泰亜博士（理化学研究所チームリーダー）。

文 献

- (1) K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, and Y. Yamanaka, "New applications of millimeter-wave incoherent imaging (Invited)," IEEE MTT-S International Symposium digest, 2005, vol. 2, pp. 629-632, June 2005.
- (2) 水野皓司, "ミリ波を用いたイメージング," 信学誌, vol. 91, no. 12, pp. 1047-1053, Dec. 2008.
- (3) 国立天文台 (編), "水蒸気回転スペクトル線の波数," 理科年表(物理/化学部), 丸善, 東京, 2015.
- (4) S. Sugawara, Y. Maita, K. Adachi, and K. Mizuno, "A MM-wave tapered slot antenna with improved radiation pattern," IEEE MTT-S International Symposium digest, 1997, vol. 2, pp. 959-962, June 1997.
- (5) L.M. Matarrese and K.M. Evenson, "Improved coupling to infrared whisker diodes by use of antenna theory," Appl. Phys. Lett., vol. 17, no. 17, pp. 8-10, July 1970.
- (6) K. Mizuno, R. Kuwahara, and S. Ono, "Submillimeter detection using a Schottky diode with a long-wire antenna," Appl. Phys. Lett., vol. 26, no. 11, pp. 605-607, June 1975.
- (7) K. Mizuno, Y. Daiiku, and S. Ono, "Design of printed resonant antennas for monolithic-diode detectors," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-25, no. 6, pp. 470-472, June 1977. (なお、当号の IEEE Trans. は、次の学会の Proceedings にもなっている: Second International Conference and Winter School on Submillimeter Waves and their Applications.)
- (8) W.C. Danchi, F. Habbal, and M. Tinkham, "ac Josephson effect in small-area superconducting tunnel junctions at 604 GHz," Appl. Phys. Lett., vol. 41, no. 9, pp. 883-885, Nov. 1982.

(注3) この国際会議で発表されたものの中には、コヒーレントテラヘルツ波の光源として一時期一世を風びした光 (CO₂ レーザ) 励起型サブミリ波レーザの最初の発表 (T.Y. Chang and T.J. Bridges), また半導体発振器 (IMPATT diode, T. Misawa and L.P. Marinaccio), 新型電子管の発表 (K. Mizuno, S. Ono, and Y. Shibata) もあった。

(注4) 1979年の第4回まで (当初は隔年開催) この会議の名称は次のように応用を強く意識したものであった: International Conference on Submillimeter Waves and Their Applications.

- (9) C.R. Brewitt-Taylor, D.J. Gunton, and H.D. Rees, "Planar antennas on a dielectric surface," Electron. Lett., vol. 17, no. 20, pp. 729-731, Oct. 1981.
- (10) D.P. Neikirk, M.S. Muha, H. Park, C.X. Xu, and D.B. Rutledge, "Progress in millimeter-wave integrated-circuit imaging arrays," SPIE Conf. on Integrated Optics and Millimeter and Microwave Integrated Circuits, Huntsville, Alabama, Nov. 1981.
- (11) 尾辻泰一, "テラヘルツ波検出技術の動向," 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 931-937, Nov. 2014.
- (12) I.R. Senitzky, "Quantum effects in the interaction between electrons and high-frequency fields. I," Phys. Rev., vol. 95, no. 4, pp. 904-911, Aug. 1954.
- (13) K. Mizuno and S. Ono, "Optical klystron," Proc. IEEE (Letters), vol. 63, no. 7, p. 1075, July 1975.
- (14) A. van der Ziel, "Infrared detection and mixing in heavily doped Schottky barrier diodes," J. Appl. Phys., vol. 47, no. 5, pp. 2059-2068, May 1976.
- (15) 八田古典, 気体放電 3.3, 近代科学社, 1968.
- (16) K. Mizuno and S. Ono, "Comment on "Traveling wave oscillation in the optical region: A theoretical examination",," J. Appl. Phys., vol. 46, no. 4, p. 1849, April 1975.
- (17) 南出泰亜, "高出力テラヘルツ波光源の最先端と広がる応用," 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 924-930, Nov. 2014.
- (18) 永妻忠夫, "実用化に向けて加速するテラヘルツ技術," 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 918-923, Nov. 2014.
- (19) 例えば, A. Yariv, Introduction to optical electronics, 10.5, Holt McDougal, New York, 1977. 熱放射に関して, 量子論と古典論両方の取扱いが紹介されていて, 結果として放射電力に関する両者の結果が一致するのは興味深い。
- (20) 水野皓司, "人を守る電波センシング技術について," 計測技術, vol. 38, no. 12, pp. 1-5, Nov. 2010.
- (21) J.E. Bjarnason, T.L.J. Chan, A.W.M. Lee, M.A. Celis, and E.R. Brown, "Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing," Appl. Phys. Lett., vol. 85, no. 4, pp. 519-521, July 2004.
- (22) 西澤テラヘルツプロジェクト (JST, ERATO, 1987.10~1992.9), http://www.jst.go.jp/erato/project/nth_P/nth_P.html
- (23) 川瀬晃道, "波長可変テラヘルツ光源を用いた分光技術の進展," 応用物理, vol. 81, no. 4, pp. 304-307, April 2012.
- (24) 保科宏道, 鈴木 晴, 山本茂樹, 矢嶋祺子, "テラヘルツ振動分光から見えるソフトマテリアルの構造と水素結合," 応用物理, vol. 84, no. 6, pp. 525-529, June 2015.
- (25) 田畑 仁, "テラヘルツ波技術のバイオ・メディカル利用," 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 971-979, Nov. 2014.
- (26) 例えば, 藤島 実, 天川修平, "電気計測(高周波測定)のコツ," 応用物理, vol. 84, no. 5, pp. 453-457, May 2015.
- (27) 次の記事は, テラヘルツ技術に関して率直な意見を述べている: C. Armstrong, "The truth about terahertz," IEEE Spectr., no. 9, pp. 36-41, Sept. 2012, <http://spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-truth-about-terahertz>
- (28) 福永 香, "有害物質を含む古典絵画材料のテラヘルツ分光・イメージング," 計測と制御, vol. 48, no. 10, pp. 773-778, Nov. 2009.
- (29) 特集: 最新テラヘルツ技術と実用化に向けた取組み, 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 917-1005, Nov. 2014.
- (30) 西名繁樹, "高速掃引分光技術がひらくテラヘルツの産業展開," 信学誌, vol. 97, no. 11, pp. 987-993, Nov. 2014.

(平成 28 年 1 月 8 日受付 平成 28 年 2 月 25 日最終受付)



水野 皓司 (正員: フェロー)

昭 38 東北大・工・電子卒, 工博. 昭 43 東北大助手, その後助教授, 教授を経て, 平 16 東北大名誉教授. 平 2~10 理化学研究所チームリーダーを兼務. この間, ミリ波, テラヘルツ波帯デバイスの研究開発に従事. 平 5 IEEE フェロー, 平 15 文部科学大臣賞 (研究功績者), 平 17 IEEE MTT-S Distinguished Educator Award など各受賞.