

7.1. 測定器

7.1.1. 周波数・波長測定

1. はじめに

電磁波の計測において、周波数（あるいは波長）は最も基本的な測定量の1つである。光波や電波領域では確立された技術である周波数・波長測定も、長らく未開拓な電磁波領域とされてきたテラヘルツ領域では十分に成熟した計測技術とは言えなかった。しかしながら、近年のテラヘルツテクノロジーの急速な発展に伴い、テラヘルツ領域における周波数・波長測定の重要性が増している。テラヘルツ領域の周波数・波長測定は、電気的手法を高周波側へ、あるいは光学的手法を長波長側（低周波側）へ拡張することにより可能である。

2. 電気的手法^{1,2)}

電気的な周波数計測法としてよく用いられるのがヘテロダイン法である（図1）。ヘテロダイン法では、アンテナで検出された被測定信号（周波数 f_s ）と局部発振器からの参照信号（周波数 f_L ）をミキサーで混合することにより（あるいはハーモニックミキサーを用いて参照信号の高調波と混合することにより）、その差周波信号（ $f_{IF} = |f_s - f_L|$ ）を生成し、その周波数を測定する。マイクロ波帯の測定では一般にアンテナ出力を低雑音の初段増幅器で増幅した後にミキサーに接続するが、テラヘルツ領域には適当な増幅器がないのでアンテナ出力をミキサーに直接接続する。したがって、ミキサーには低

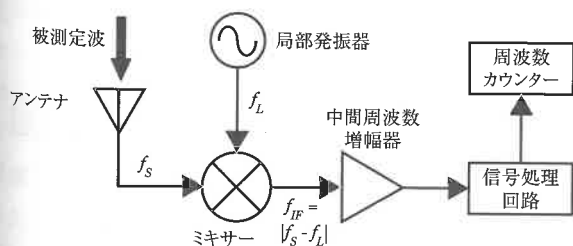


図1 ヘテロダイン法

雑音性が強く求められる。低雑音ミキサーとして、ショットキーバリアダイオード、ホットエレクトロンボロメーター、超伝導トンネル型（SIS）ミキサーなどが使われる。ヘテロダイン法の最大の利点は、直接測定が困難なテラヘルツ周波数帯の信号を、高精度な周波数計測機器（周波数カウンター、スペクトラムアナライザーなど）が利用可能なマイクロ波帯まで正確にダウンコンバートできる点である。その結果、周波数を高精度に決定できる。周波数分解能は、基準信号源となる局部発振器の発振周波数揺らぎ（発振線幅）とミキサー出力信号処理系の分解能で制限される。

3. 光学的手法

3.1 水蒸気の吸収線を利用した較正³⁾

最も単純な光学的手法は、既知の吸収線スペクトルを有する標準物質を用いて周波数較正を行う手法である。テラヘルツ領域の標準物質として一般に用いられるのが水蒸気である。非対称コマ型の強い極性分子である水蒸気は、純回転遷移に伴う強い吸収線スペクトルをテラヘルツ領域に数多く示す。また、水蒸気標準サンプルは準備や取り扱いが極めて容易である。水蒸気の吸収スペクトル線のデータベースは、アメリカ航空宇宙局（NASA）より公開されている⁴⁾。図2は、NASAのデータベースを基に描かれた水蒸気の吸収線スペクトルを

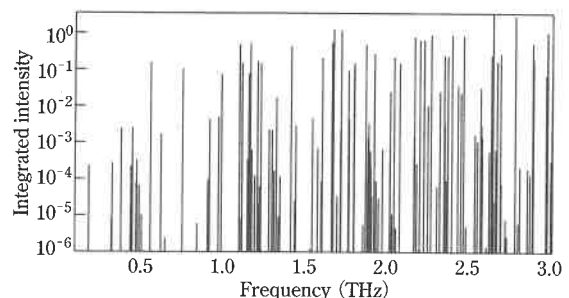


図2 水蒸気の吸収スペクトル（NASAデータベースより）

示している。数多くの吸収線がテラヘルツ領域に存在しているのが確認できる。これらの吸収線に基づいて較正を行うことにより、周波数計測が可能である。ただし、常圧水蒸気では圧力拡がりによりスペクトル幅がブロードになっているため、高精度計測のためには低圧水蒸気を利用する必要がある。また、簡易計測の場合には、テラヘルツ帯バンドパスフィルターとして利用可能なメタル・ホール・アレイ⁵⁾を用いた較正も可能である。

3.2 干渉計測⁶⁾

干渉計測は光波領域でよく用いられる技術であるが、テラヘルツ波の波長測定にも利用可能である。ここでは、代表的なマイケルソン干渉計とファブリペロー干渉計に関して紹介する。

マイケルソン干渉計の構成図を図3に示す。被測定波はビームスプリッターで2つに分割され、固定ミラー及び移動ミラーに向けられる。固定ミラー及び移動ミラーでそれぞれ反射された被測定波は、再びビームスプリッターで空間的に重ね合わせられた後、二乗検出される。移動ミラーが半波長移動する毎に、両者の波が干渉によって強め合い、干渉縞が観測される。干渉縞の数(N)とミラー移動量(ΔL)には以下のような関係がある。

$$\Delta L = (\lambda/2) * N \quad (1)$$

ここで、λは被測定波の波長である。したがって、干渉縞の数(N)とミラー移動量(ΔL)を測定することにより、式(1)から波長を決定できる。さらに高精度が必要な場合には、波長が既知の基準波を別途準備し、被測定波と基準波それぞれの干渉縞を発生させ、干渉縞の数の比から被測定波の波長を高精度に決定することがで

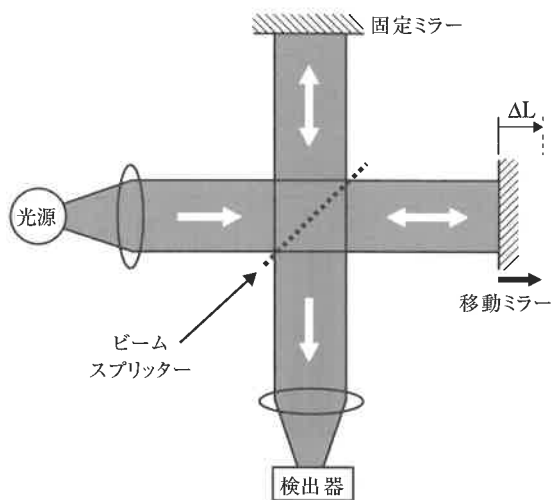


図3 マイケルソン干渉計

きる。

一方、ファブリペロー干渉計の場合、電磁波の多重干渉を利用する。ファブリペロー干渉計は、高反射率・低透過率のビームスプリッター(例えば、メタルメッシュプレート)を2枚用意し、両者がある間隔で完全に平行となるように配置した構成となっている(図4)。このようなファブリペロー干渉計に対して被測定波を入射すると、各々のビームスプリッターで大部分が反射し一部が透過するので、ビームスプリッターで挟まれた空気間隔で多重反射が起こる。その結果、検出器側のビームスプリッターを各反射毎に透過した成分が互いに干渉しあう。すなわち、2つのビームスプリッターは一種の共振器を構成することになる。そして、片方のビームスプリッターを連続的に移動させると、ビームスプリッター間隔が半波長の整数倍に等しくなった時に鋭い共振ピークを示す。したがって、移動量ΔLと共振ピーク数Nから、式(1)を用いて波長を決定することができる。また、共振器フィネスが十分に高い場合には、その共振ピーク形状から被測定波のスペクトル解析も可能である⁷⁾。ファブリペロー干渉計では被測定波の波長に比べてミラーの間隔が十分に大きいので干渉波の次数が大きくなるので、高分解能測定が可能である。

3.3 周波数コム計測^{8,9)}

最近、光周波数領域における新しい高精度周波数計測法として、周波数コムを基準にした手法が目まぐるしく注目されている。周波数コムとは、周波数領域において多数の周波数モード列が一定の周波数間隔で櫛(コム)状に並んだ離散スペクトルのことである。光波領域の周波数コムの発生方法として、①電気光学変調器を光共振器の内部に設置し外部からシングルモードのCWレーザー光を入力することで変調周波数の整数倍の多数の側波帯を発生させる『受動型』¹⁰⁾と、②モード同期レーザーから出力された超短パルス光が周波数領域において一定の周波数間隔(=モード同期周波数)で位相同期された多数の縦モード光によって実現されていることを利用した『能

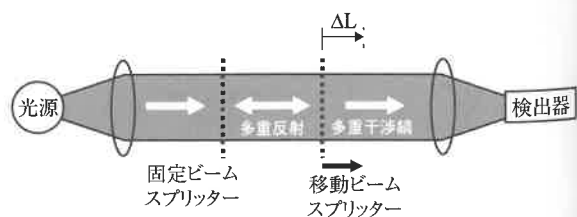
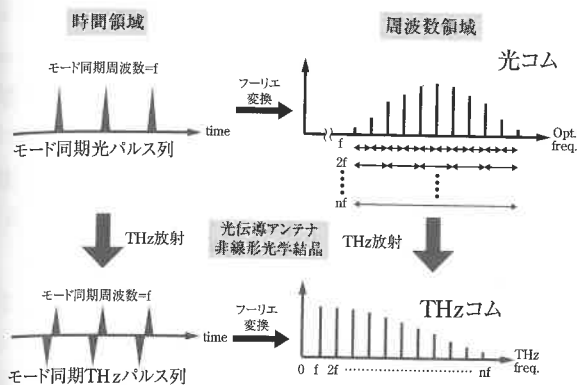
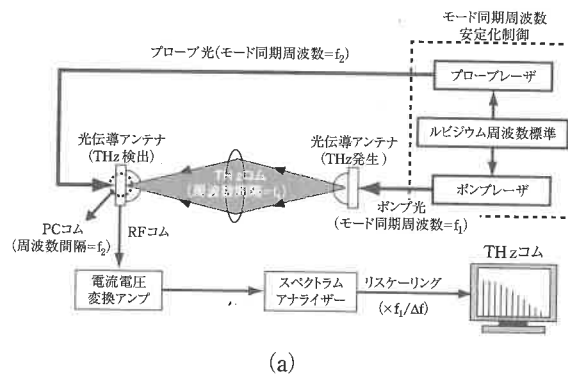


図4 ファブリペロー干渉計

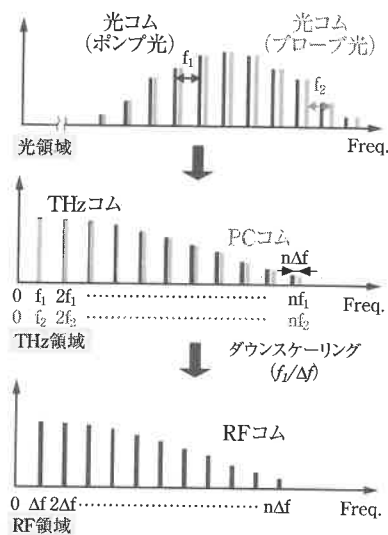
図5 光コムとテラヘルツコム⁹⁾

動型¹¹⁾があり、いずれも市販されている^{12, 13)}。ここでは、特にテラヘルツ領域の周波数コムを直接発生可能な後者を用いた周波数コム計測を紹介する。

フェムト秒モード同期レーザーから出力されるレーザー光は、時間領域において非常に安定した高繰返しモード同期光パルス列(モード同期周波数= f)を示す(図5)。一方、フーリエ変換の関係にある周波数領域では、あるオフセット周波数を中心として多数の安定な光周波数モード列がモード同期周波数($=f$)の間隔で規則的に櫛(コム)状で並んだ離散スペクトル構造を有している。このようなスペクトル構造を周波数コムと言い、特に光領域の周波数コムを光コムと呼ぶ。近年、この光コムの間隔及びオフセット周波数を超精密レーザー制御により高度に安定化し、光コムを『光周波数の超精密物差し』と見立てた分光計測や周波数標準に関する研究が非常に注目されている¹¹⁾。2005年には関連技術を開発した研究者がノーベル物理学賞を受賞している。このようなフェムト秒モード同期レーザー光を光伝導アンテナ(または非線形光学結晶)に入射すると広帯域コヒーレントなテラヘルツ波が発生し、時間領域ではフェムト秒レーザー光に同期したテラヘルツ領域のモード同期パルス列(モード同期周波数= f)が観測される。一方、周波数領域におけるテラヘルツ放射は、光伝導アンテナを介した光コムを超広帯域復調と見なすことができる。その結果、モード同期周波数の基本波成分($=f$)と多数の高調波成分($=2f, 3f, \dots, nf$)が等間隔で立ち並んだ高調波コムがテラヘルツ領域に生成される。このテラヘルツ領域に展開された周波数コムである『テラヘルツコム(THzコム)』は、広い周波数選択性・非常に高いスペクトル純度・直接的絶対周波数較正・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有している。したがって、このTHzコム



(a)



(b)

図6 多周波ヘテロダイン光伝導検出法^{8, 9)}。(a) 測定装置と(b) 測定原理

を高度に安定化して『テラヘルツ領域で正確に値付けされた絶対周波数の物差し』として利用できれば、これを基準とすることにより高精度な周波数計測が可能になる。

THzコムの検出には多周波ヘテロダイン光伝導検出法が利用可能である。多周波ヘテロダイン光伝導検出法の装置図及び測定原理を図6に示す。この方法では、THzコム発生用ポンプレーザー及びTHzコム検出用プローブレーザーとして、2台の独立したフェムト秒モード同期レーザーを光源として用いる。さらに、両レーザーのモード同期周波数(f_1, f_2)及び差周波($\Delta f = f_1 - f_2$)が、ルビジウム周波数標準(確度 $5 \cdot 10^{-11}$, 安定度 $2 \cdot 10^{-11}$)を参照信号源としたレーザー制御システムにより安定化される。その結果、光周波数領域ではコム間隔が異なる値(f_1, f_2)で安定化された2つの光コムが生成されることになる。ポンプレーザー光をテラヘルツ発生用光

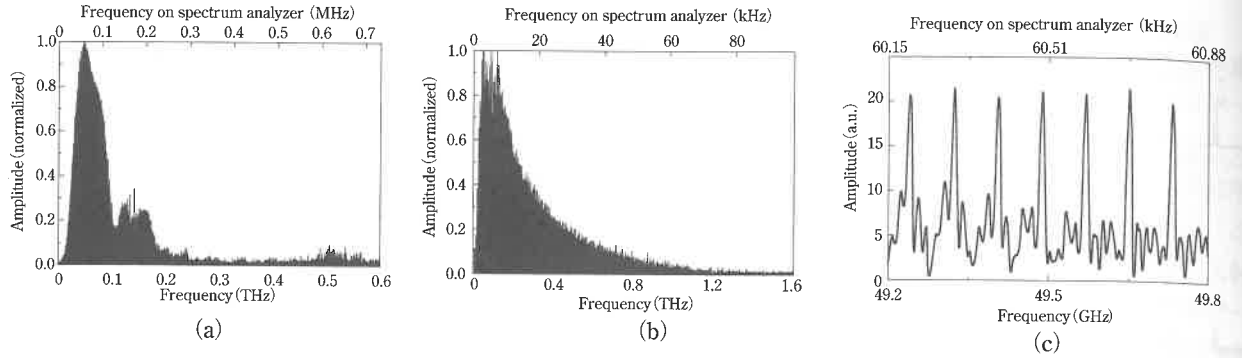


図7 (a) サブTHzコム, (b) THzコム, (c) コム・モード^{8, 9)}

伝導アンテナに入射すると、ルビジウム周波数標準と同等の安定性を有するTHzコム（周波数間隔 = f_1 ）が自由空間に放射される。一方、プローブレーザー光をテラヘルツ検出用光伝導アンテナに入射すると、光伝導膜中にフォトキャリアの周波数コム（PCコム, 周波数間隔 = f_2 ）が生成される。このPCコムもまたTHzコムと同じ周波数帯域を持つ高調波コムであるので、このようなPCコムが誘起された光伝導アンテナにTHzコムが入射されると、両者の相互作用（多周波ヘテロダイン光伝導検出）により掛算が行われ、両コム間隔の差周波数（ $=\Delta f = f_1 - f_2$ ）をコム間隔とする2次的な周波数コムがRF領域の微弱電流信号として出力される。ここで、ゼロ付近の周波数成分（ $\Delta f, 2\Delta f, 3\Delta f, \dots, n\Delta f$ ）のみを抽出すると、THzコムと同様な高調波コムが観測される（RFコム）。このRFコムの周波数スケールは、THzコムの周波数スケールをある周波数縮小比率（ $= f_1/\Delta f$ ）でダウンスケールしたものであるので、このRFコムを電流-電圧変換後にスペクトラム・アナライザで直接観測し、周波数軸を周波数縮小比率でリスケールすることにより、THzコムの再現が可能になる。このようにして再現されたTHzコムの確度はコム間隔（安定度 10^{-11} ）及び周波数縮小比率（安定度 2.5×10^{-7} ）の両安定性に依存するが、実質的には周波数縮小比率によって制限される。

図7 (a) 及び (b) は、スペクトラム・アナライザで実際に測定されたRFコムであり、グラフの上側水平座標はスペクトラム・アナライザのスケール（RFスケール）を示している。RF領域に周波数コム（RFコム）が存在しているのを確認できるが、これを周波数縮小比率 [図7 (a) は818,000, 図7 (b) は16,360,000] でリスケールされたテラヘルツスケールを下側水平座標に示す。サブテラヘルツ及びテラヘルツ領域の周波数コ

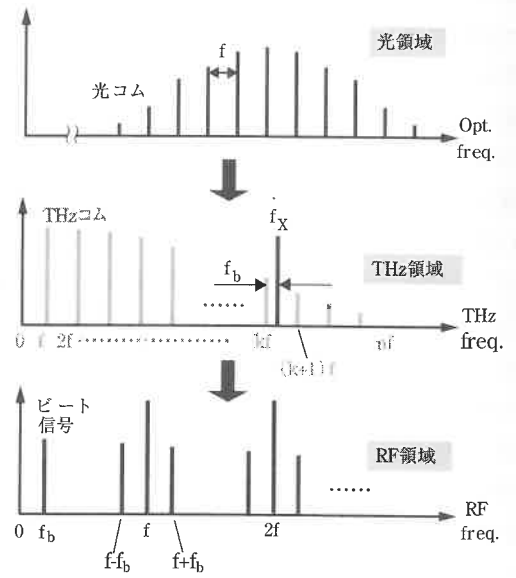
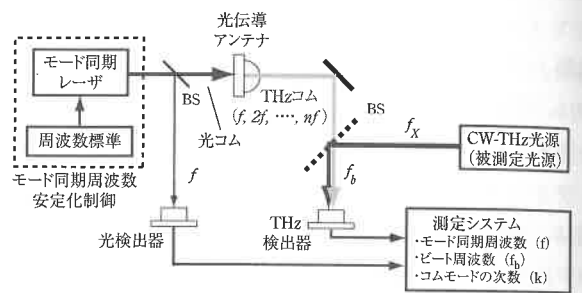


図8 THzコムを用いたCW-THz波の周波数測定. (a) 測定装置と (b) 測定原理

ム・スペクトルがそれぞれ確認できる。また、これらのコム・スペクトル内部が塗りつぶされているのは、この中に数千本以上のTHzコム・モードが密集しているからである。例えば、図7 (a) の0.0462-0.0468THzの領域を周波数的に拡大したものが図7 (c) である。モー

ド同期周波数 ($f_1=81.8\text{MHz}$) で等間隔に並んだ7本のコム・モードが確認できる。ここで、各コム・モードの絶対周波数の確度は、周波数縮小比率の安定性から 2.5×10^{-7} である。すなわち、これらの各コム・モードは、精度 2.5×10^{-7} 及び分解能 81.8MHz という性能を有する『絶対周波数の目盛り』として利用できる。

十分に狭いスペクトル幅を有する CW-THz 波 (例えば、量子カスケードレーザ) の周波数計測も THz コムを用いて可能である (図8)。まず、モード同期周波数 (f) が安定化されたモード同期レーザ光を光伝導アンテナに入射することにより THz コム [周波数 $f, 2f, \dots, kf, (k+1)f, \dots, nf$] を発生させる。この THz コムと被測定 CW-THz 波をビームスプリッターで空間的に重ね合わせて検出すると、最隣接コム・モード (周波数 kf) と被測定 CW-THz 波 (周波数 f_x) のビート信号 (周波数 f_b) が観測される。ここで、コム間隔 ($=f$) が周波数標準と同程度に高安定化されているとすると、被測定 CW-THz 波の周波数 f_x は以下のように示すことができる。

$$f_x = kf + f_b \quad (2)$$

ここで、 k は最隣接コム・モードの次数である。したがって、 f と f_b を周波数カウンターで計測し、さらに k を決定することにより、絶対周波数が測定できる。

【安井 武史】

[参考文献]

- 1) 大森豊明監修：テラヘルツテクノロジー (NTS出版, 東京, 2005) p.151.
- 2) 手代木扶, 米山務編著：新ミリ波技術 (オーム社, 東京, 1999) p.197.
- 3) K.D.Möller and W.G.Rothschild : Far-Infrared Spectroscopy (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1971) p.46.
- 4) <http://spec.jpl.nasa.gov/>
- 5) F.Miyamaru and M.Hangyo : Appl. Phys. Lett. 84, 2742 (2004).
- 6) 吉永弘編：ミリ波と赤外線 (オーム社, 東京, 1962) p.104.
- 7) K.Kawase, J.Shikata, and H.Ito : J.Phys.D 35, R1 (2002).
- 8) T.Yasui, Y.Kabetani, E.Saneyoshi, S.Yokoyama, and T.Araki : Appl. Phys. Lett. 88, 241104 (2006).
- 9) 安井武史：レーザ研究 35, 627 (2007).
- 10) M.Kourogi, K.Nakagawa, and M.Ohtsu : IEEE J. Quantum Electronics 29, 2693 (1993).
- 11) Th.Udem, R.Holzwarth, and T.W.Hänsch : Nature 416, 233 (2002).

- 12) <http://www.optocomb.com/>
- 13) <http://www.menlosystems.com/>