テラヘルツ波の計測標準技術

藤井 勝巳
（ふじい かつみ）

テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
主任研究員

大学院修了後、2001年東北大・電気通信研究所・助手。2006年NICT入所。無線用測定器等の較正に関する研究及びサービス、電磁環境に関する研究に従事。博士（工学）。

熊谷 基弘
（くまがい もとひろ）

テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
主任研究員

大学院修了後、2000年独立行政法人通信総合研究所（現NICT）入所。原子泉型一次周波数標準器開発や光ファイバ経由での基準周波数伝送に関する研究に従事。博士（理学）。

テラヘルツ波を使った通信やセンシングの実用化が進むと、電波の強さや周波数を、正確に計測することが必要になります。NICTでは、電波の強さや周波数に対して、正確な目盛りを与える、テラヘルツ波を計測するための研究開発を行っています。

■NICTがテラヘルツ波を計測するワケ

NICTでは、70年にわたって、我が国で無線免許を受けるために必要な試験や検査に使う測定器について、NICTが維持管理する標準器との関係を明らかにする「較正サービス」（有償）を行っています。中でも、電波の特徴を決める基本となる量である「高周波電力計」と「周波数標準器」の較正は、最も注力しているサービスです。テラヘルツ波が広く利用される時代を見越して、テラヘルツ波の『電波の強さ（高周波電力）』を高精度に計測する技術、『周波数』を高精度に発生させるための技術についての研究開発を進めています*。

■電波の強さを計測する技術

無線機からアンテナに供給される電波の強さを計測するためには、高周波電力計を使います。2007年から行っている0.11 THz（110 GHz）までの高周波電力計較正サービスに続いて、2011年からは産業技術総合研究所と共同で、テラヘルツ波のための高周波電力の基準値を与えることができるカロリーメータと呼ばれる装置の研究開発を開始しました。また、お客様からお預かりした高周波電力計を較正し、正確な値を利用していただくため較正サービスに関する研究開発も、併せて開始しました。

現在までに図1に示すような電力計較正装置を開発し、0.33 THz（330 GHz）までの高周波電力計を較正するサービスを行っています。電波利用技術の発展に合わせて、低い周波数帯から高い周波数帯へと、較正サービスの周波数範囲を拡張しています。まだ、テラヘルツ帯の入口ではありますが、これまで拠り所となる値が何もなかったテラヘルツ帯に、ようやく、電波の強さの基準値となる『一里塚』を立てることができました。

今後、正しい目盛りが与えられた電力計を使えば、テラヘルツ波の強さは、数値を使って表現できます。例えば、研究論文で「今回開発した発生装置は、従来よりも強い電波を発射できるようになった」という定性的な表現は、「今回開発した発生装置は、従来の28 %増となる0.484 mW±0.041 mWの電波を発射できるようになった」と数値を加えた定量的な表現になるはずです。これは、物差しで測った1 mが世界中どこででも1 mであり、離れた場所にいてもお互いの長さを比べられるように、電波の強さも比べられるようになることを意味します。研究成果である発生装置を、同じ場所に持ち寄って比べ合う必要はなくなります。

ところで、高周波電力計は、導波管を伝わる電波の強さを測定します。空間を飛んでいる電波の強さを計測するためには、アンテナが必要です。アンテナは、空間に飛んでいる電波を、導波管を伝わる電波に変換し高周波電力計での測定を可能にする「変換装置」とみなすことができますが、このときの変換率が分から

なければなりません。そこで、我々は、様々なアンテナの基準となる標準ゲインホーンアンテナの較正や、障害物を検知するIoTセンサーへの利用が期待される円偏波ホーンアンテナの較正に関する研究開発も行っています（図2）。

■周波数を計測する技術

NICTは、前述の較正サービスを行うだけでなく、周波数の国家標準を定める公的機関であり、定義に基づいた周波数標準の供給を、業務の一つとして行っています。今後、実生活の様々な場面での利用が広がるであろうテラヘルツ領域においても、周波数資源を有効に活用するには、テラヘルツ波の周波数計測も、電波の強さの計測と同様、高精度に実施することが必要となります。ここでは、高精度な周波数計測を目的とした、光コムをベースとしたテラヘルツ波周波数計測と、テラヘルツ基準周波数発生とその計測応用について紹介します。

光コムは、発振モードの周波数間隔が一定の超短パルスレーザであり、光の周波数の高精度計測でも活躍しています。この光コムと光伝導アンテナを組み合わせたテラヘルツ波の周波数計測システム（図３）は、ある条件下のテラヘルツ波に対して、我々が有する周波数国家標準と同レベルの精度で絶対周波数計測が可能であることが確認できました。また、光ファイバの非線形効果により光コムから取り出した2つの発振モードの光ミキシングによりテラヘルツ波を発生させる方法でも、周波数国家標準と同じ精度の基準信号を任意のテラヘルツ周波数で発生させることができます。超伝導体の周波数ミキサ（本号pp.8-9参照）と併用することで高感度の周波数計測が可能となり、図4にあるような光ファイバ接続先にある被測定テラヘルツ波（本号pp.4-5で紹介されている狭線幅化した3 THz量子カスケードレーザ）の周波数計測にも成功しています。

我々は、テラヘルツ波の絶対周波数計測以外にも、遠隔較正や周波数比較への応用が期待されるテラヘルツ基準周波数伝送や、テラヘルツ帯における独立した周波数基準となり得る原子・分子の量子遷移を基準とした周波数標準器の開発など、多岐にわたるテラヘルツ周波数標準の研究を進めています。

■今後の展望

いよいよ５Ｇのサービスが始まり、Beyond 5Gに向けた次世代移動体通信システムの研究開発も開始されつつあります。近い将来、テラヘルツ波を使った、全く新しいサービスやアプリケーションが生まれることが予想されます。今後も、テラヘルツ波を利用するうえで基盤となる『電波の強さ』と『周波数』の精密計測技術に関して、世界の研究開発をリードするとともに、NICTの重要なミッションの一つである「較正サービス」を通じたテラヘルツ技術の社会展開を進めていきます。

＊「高精度に発生できること」と「高精度に計測できること」は同義であり、どちらを高精度化するかは、物理量によって異なります。

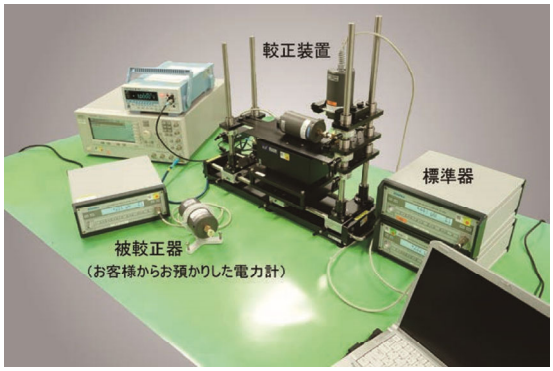
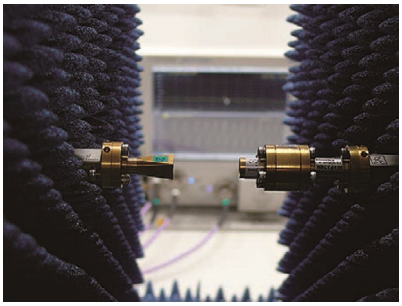


図1　高周波電力計較正装置
較正依頼者（お客様）からお預かりしたテラヘルツ波用の電力計を較正するための装置です。導波管の寸法に応じて装置を整備し、サービスを行っています。



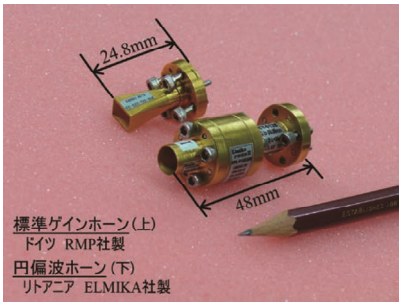


図2　アンテナの較正に関する研究
空間を伝わるテラヘルツ波の強さを測定するために必要なアンテナの動作利得を決定するための研究開発も行っています。

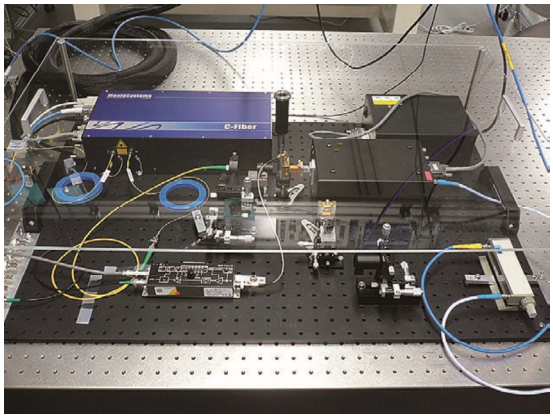


図3　光コムと光伝導アンテナを用いたテラヘルツ周波数計測システム

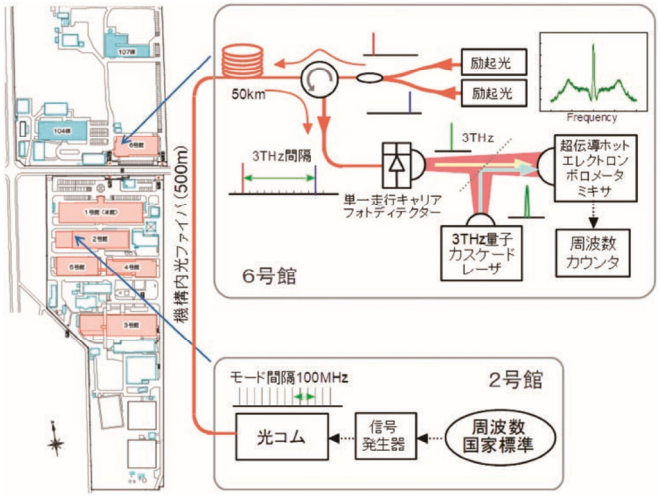


図4　NICT本部内光ファイバを利用したテラヘルツ基準周波数伝送と光ファイバ接続先での周波数計測応用