

## 2 総論：NICT テラヘルツ技術開発の位置付け及び展望

### 2 *General Discussion: Position and Prospect of Research and Developments for the Terahertz Technology in National Institute of Information and Communications Technology (NICT)*

寶迫 巖

HOSAKO Iwao

#### 要旨

テラヘルツ帯と呼ばれる電磁波の利用技術に関する研究開発が活性化し、大学、国立研究所、ベンチャー企業だけでなく、今や大手企業も研究開発に参入しつつある。テラヘルツ帯電磁波を用いたセンシングやイメージングが産業や社会生活の様々な場面で役に立つということを示す実施例は枚挙にいとまがない。また、テラヘルツ帯の超高周波特性を生かした高ビットレートの極短距離無線技術に関する議論も始まろうとしている。今やテラヘルツ帯技術応用のすべてを網羅しようとする試みは不完全なものに終わるであろう。2005年3月総務省の「テラヘルツテクノロジー動向調査報告書」や2007年8月Fuji-Keizai USA Inc.の「21世紀テラヘルツ波技術に関する調査」によると、規模の差こそあれ、テラヘルツ技術の市場規模は右肩上がりで見ると上昇すると予測されている。このような背景の下、情報通信研究機構では2006年4月より「テラヘルツプロジェクト」をスタートした。テラヘルツプロジェクトでは、様々な分野への応用が広がりつつあるテラヘルツ技術の国レベルの基盤技術を作り出すことを目的としている。基盤技術としては、小型高性能デバイス及び計測システム、高精度光源、大気伝搬モデル構築、材料分光データベース構築、測定手順の標準化等を含む。本特集では、半導体デバイス技術、システム技術、データベース、大気伝搬など情報通信研究機構が自ら行っている研究開発や、委託研究として外部機関が実施している研究開発について、現在までに得られた成果を報告する。これにより、今後のテラヘルツ技術の発展にとって何が重要かといった視点から、当該プロジェクトの目指す方向を示す。

Active research and development are now progressing on the application of electromagnetic waves known as terahertz waves. Universities, national research institutions, venture companies, and even major corporations are now beginning research and development in this area. Many examples demonstrate the usefulness of sensing and imaging with terahertz waves in various aspects of industry and society. Discussions have also begun on new high-bit-rate ultra-short-distance wireless technology that takes advantage of the ultra-high-frequency characteristics of terahertz waves. At this stage we cannot even imagine the eventual number and kinds of terahertz applications that will emerge. According to the March 2005 “Terahertz Technology Trend Report” of the Ministry of Internal Affairs and Communications and the “Terahertz Technologies, R&D, Commercial Implication and Market Forecast” of Fuji-Keizai USA Inc. issued in August 2007, the question is not whether the market for terahertz technology will increase—it inevitably will—but by how much. Given this background, the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) launched its “Terahertz Project” in April 2006. The Terahertz Project aims to develop fundamental terahertz technologies at the national level for expanding applications in diverse fields. These fundamental technologies include those incorporated in small high-performance devices and measurement systems and high-precision

light sources, as well as those required in the construction of an atmospheric propagation model, the construction of spectral databases of materials, and the standardization of measurement procedures. This special issue reports on the achievements obtained to date in independent research and development conducted directly by NICT (including semiconductor device technology, system technology, databases, and atmospheric propagation) as well as in contract research undertaken by external organizations. In this discussion, we indicate the direction in which each project is heading, in view of the important benchmarks in the future development of terahertz technology.

[キーワード]

テラヘルツ帯電磁波, 半導体デバイス, テラヘルツ時間領域分光法, 分光データベース, 大気伝搬モデル

Terahertz-wave, Semiconductor device, Terahertz time domain spectroscopy, Spectral database, Atmospheric propagation model

1 まえがき

電波法では、電波を、“「電波」とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。”と定義している。すなわち、3 THz (=三百万メガヘルツ)を境にして、これ以下の周波数の電磁波を電波と言い、3 THz 以上の電磁波は慣用的に「光」と呼んでいる。テラヘルツ帯電磁波の定義に定まったものではなく、人によって多少の違いがあるが、おおむね 0.1~10 THz の周波数範囲で2けたにわたる電磁波としてよい。すなわちテラヘルツ波は、ミリ波 (~300 GHz (波長  $\lambda = 1$  mm)) をその下端に含み、従来はサブミリ波と呼ばれていた電波の上限周波数領域 (300 GHz~3000 GHz (= 3 THz、波長  $\lambda = 0.1$  mm))、光の下端領域 (3 THz~10 THz (波長  $\lambda = 30 \mu\text{m}$ )) を含む電波と光の境界領域を指している。

法が定める人為的な電波と光の境界にテラヘルツ帯はあるが、自然が定める電磁波の境界もテラヘルツ帯にあるように思われる。例えば、半導体デバイスによる発振器の最高出力と周波数の関係を図示すると図1のようになる。図の左側はトランジスタや、各種2端子素子(ガンダイオード、共鳴トンネルダイオード、...)など、半古典論的な電子の輸送現象に基づく電子デバイス発振器の発振周波数と出力の関係であり、高周波になるに従って、急激にその出力が低下している。一方、図の右側は、量子論的な電子の光学遷移に基づく半導体レーザーの出力と周波数の関係であり、周波数(光のエネルギー)が下がるに従ってその出力が

低下している。この図を見ると両者の境界はちょうど 1.5 THz 付近にあるように見え、この境付近では半導体デバイス(テラヘルツ帯量子カスケードレーザを除き)による発振器の出力は著しく小さい。このように物理法則の定める現象もテラヘルツ帯を境にして古典論と量子論が入れ替わっているように見え、それが原因となって、テラヘルツ帯では高出力の発振器がなかったと考えられる。この領域は“テラヘルツギャップ”と言われており、このギャップを解消する光源デバイスの出現がテラヘルツ帯開発の鍵になると考えられる。

また、このテラヘルツ帯のエネルギーは、固体物質の様々な素励起、分子の回転モード、巨大分子の内部振動モード、水素結合・ファンデルワール

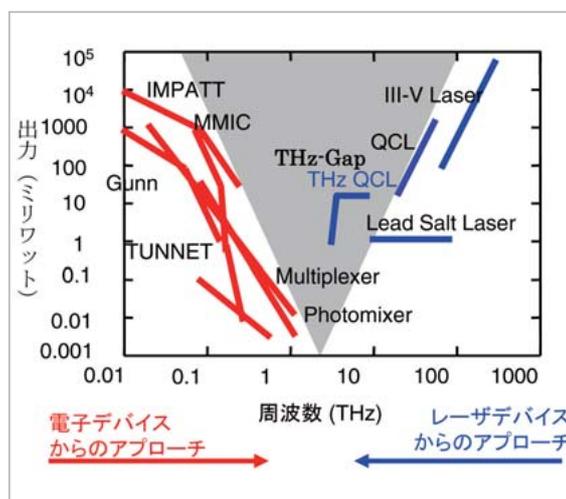


図1 半導体素子の連続波出力と周波数の関係

2 THz を中心にして、いわゆる“THz-Gap”が存在し、高出力デバイスを実現するのが困難。

ルス結合などのエネルギーに相当するため、様々な物質・材料がこの領域で特有のスペクトル(いわゆる指紋スペクトル)を持つ。さらに室温の熱エネルギーはテラヘルツ帯にある。したがって、工学応用上重要な分光分析技術として、また、サイエンスとして非常に興味深い領域でもある。

近年、新しい分光手法としてテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) が開発され、非線形光学による単色チューナブルなテラヘルツ帯光源、さらに、高輝度な小型半導体光源 (テラヘルツ帯量子カスケードレーザ) が実現したことにより、従来は科学研究だけに用いられていたテラヘルツ帯電磁波を、身近な分野での様々な応用に活用できる可能性が見えてきた。これら新技術の開発に伴い、様々な分野 (材料分析、セキュリティ、医療、医薬、バイオ、農業、工業、通信、科学計測) での応用デモンストレーションも実施されてきている。様々な分野への応用が広がりつつあるテラヘルツ技術の国レベルの基盤技術を作り出すことを目的として、小型高性能デバイス及び計測システム、高精度光源、大気伝搬モデル構築、材料分光データベース構築、測定手順の標準化等の研究開発を情報通信研究機構の自ら研究で実施している。いずれもテラヘルツ技術の普及に不可欠の要素と考えられるが、大学や企業においては実施が困難なものである。また、委託研究においては、自ら研究との緊密な連携の下、災害時などに有用なスタンドオフ (リモート) 分光センシングシステムやカメラシステムの開発を実施している。本特集においては、現在までに得られた自ら研究、委託研究の成果を報告する。3章以下の各論に先立ち、本稿では、各章に記述されている技術の研究開発項目の位置付けを述べたい。これにより、今後のテラヘルツ技術の発展にとって何が重要かといった視点から、当該プロジェクトの目指す方向を示す。

## 2 各研究開発項目の位置付け

現在までに、様々なテラヘルツ帯技術応用を目指した研究開発・デモンストレーションが行われてきている。数年以内に実用化が期待されるものとしては、例えばセキュリティ関連では、空港や重要施設における旅客スクリーニング、国際郵

便物検査などが挙げられる。ここに挙げた例は、測定にかかるコスト (機器の価格や測定時間) が高くても、実用化が見込まれる例であるが、測定機器の価格、使い勝手などが改善されれば、このほかにも様々な領域で用いられる可能性がある。そのためには、テラヘルツ帯機器の低価格化、小型化、ロバスト化 (フィールド利用可) といった点や、テラヘルツ帯での分光分析を可能にする分光データベースの整備、機器仕様を定めるときに重要となる大気伝搬モデル構築、測定値の絶対値や精度を保証するための測定手順整備やトレーザビリティの確保などが今後ますます重要となってくる。NICT においては、このような点を踏まえ、以下に示す項目の研究開発を実施している。

### 2.1 半導体デバイス

半導体デバイスの一般的な特徴は、小型で適度なパワーを扱え、量産によって著しく価格を下げられる可能性があるという点にある。多種多様なテラヘルツ帯の光源の中でも、このような特性を持つものはテラヘルツ帯量子カスケードレーザにおいてほかになく、このレーザの開発が、テラヘルツ技術の普及という点で重要であると言える。テラヘルツ帯量子カスケードレーザの研究開発において日本は後発であるが、日本国内においては NICT が先発し開発に成功した。半導体をエピ成長で十数ミクロンさせる必要があることや、高感度な発振特性測定には従来の液体寒剤冷却型検出器が必要であることなど、技術やコストの面で困難な点が多くあり、また、テラヘルツ技術の市場規模がまだ確実には見えてこないといった状況であったため、大学や企業での研究開発には不向きで困難な点が多くあった。したがって国研での研究開発が重要となる項目であると言える。

一方、テラヘルツ帯の検出器開発も重要な項目であるが、こちらに関しても大学や企業での研究開発はあまり盛んではない。検出器の中でも応用上重要と思われるものは、常温動作 ( $\sim 300$  K) ・高感度 (雑音等価入力 NEP  $\sim 10^{-14}$  W/Hz $^{1/2}$ ) ・大規模アレイ (素子数  $> 100 \times 100$ ) 検出器である。この検出器があると、常温物体 ( $\sim 300$  K) からの黒体放射のテラヘルツ帯成分をとらえ瞬時に映像化できる“テラヘルツカメラ”を実現できる。このようなカメラの実現には、素子集積化技術に優れる半

導体技術が重要である。しかしながら、上記仕様の実現は大変困難であると思われるため、自ら研究においては常温動作をあきらめ、高感度(雑音等価入力 NEP $\sim 10^{-14}$ W/Hz $^{1/2}$ )・大規模アレイ(素子数 $>100\times 100$ )検出器によるテラヘルツカメラを目指した半導体量子井戸型検出器の開発を実施している。また、委託研究においては、中赤外帯で実績がある非冷却マイクロボロメータアレイ検出器をテラヘルツ帯向けに改良することによって、照明用補助光源を用いた常温動作・スタンドオフカメラシステムの開発を目標として研究を進めている。照明用補助光源としては自ら研究で開発しているテラヘルツ帯量子カスケードレーザを用いることも検討中である。

## 2.2 分光・イメージングシステム

テラヘルツ帯の分光・イメージングを著しく簡易に、しかも良い S/N 比で得られるようになったのは、テラヘルツ帯時間領域分光法が発明・開発されたためである。特に従来のフーリエ分光法では良い S/N 比を得ることが難しかった帯域(数百 GHz $\sim$ 数 THz)において、液体寒剤を用いる高感度検出器を用いることなく、短時間でダイナミックレンジが大きい測定をできるようになった意義は大きい。また、複素誘電率を求める際にフーリエ分光法では必要であったクラマース・クロネック変換を用いることなく、測定された振幅と位相情報から複素誘電率を直接導き出せるといった点も、この方式の持つ有利な特徴として挙げられる。日本国内においては、通信総合研究所(CRL:NICTの前身)の関西先端研究センター(KARC)においてテラヘルツ帯時間領域分光法の研究開発が1990年代に開始され、そこで開発された技術を基に大学や企業におけるテラヘルツ帯時間領域分光法の研究開発へと波及した。

テラヘルツ帯時間領域分光法の帯域は、励起パルスレーザのパルス幅によっており、短いパルスの励起レーザを用いると広帯域のテラヘルツ信号を得ることができる。現在、NICTにおいては、広帯域特性を維持しつつ安定な動作が期待できる帯域十数 THz のテラヘルツ帯時間領域分光システムの開発を行っている。また、帯域は2 THz程度と狭いが、測定対象に合わせて柔軟にシステムを構成できるテラヘルツ帯時間領域分光技術の

確立を目指して、光通信帯のデバイス技術を用いた超短パルス光源の開発を行っている。この光源を用いたテラヘルツ帯時間領域分光は、高精度・安定・小型といった特徴を備えられると考えており、テラヘルツ帯時間領域分光装置を研究室から持ち出しフィールドで使えるものになると期待している。

ミリ波帯イメージング技術の発展が近年著しい。通信や車載レーダを主な応用と考えていたミリ波技術が新たな活路を見出した結果であるとも言え、セキュリティ分野では特に期待されている。上記に示したようなパルス状テラヘルツ波技術ではなく、ミリ波技術の素直な延長(=高周波化)としてのテラヘルツ技術も大きな可能性を秘めている。高周波化により、見えるレンジ(距離)は大気吸収などのために短くなるが、空間分解能は高くなる。したがってシステム研究をミリ波帯で実施しておき、デバイス技術の高周波化を待ってテラヘルツ帯イメージング技術として利用を進めるという方策も可能である。このような観点からNICTにおいては既存のテラヘルツ帯への拡張が期待できる近接場を用いたミリ波イメージング技術の開発を行っている。

## 2.3 材料-分光データベース

様々な物質に特有の“指紋スペクトル”がテラヘルツ帯にあるという点が、この帯域の大きな特徴である。既に分光分析技術が成熟し様々な用途に用いられている X 線 $\sim$ 中間赤外の領域では、分光データベースが整備されており、産業や利用分野ごとに仕分けされ、必要に応じて入手できる状態にある。一方、テラヘルツ帯においては、純粋物質に関しては昔からの蓄積があるが、様々な分野に対応した材料の分光データベースは無く、テラヘルツ帯の研究開発にかかわる個別の機関がそれぞれの目的に応じてデータの蓄積を行っている段階である。NICTにおいては、ある特定分野(西洋古典絵画材料)にかかわる分光データベースを整備し、このデータベースを用いてできる分析例を示すことによって、テラヘルツ帯分光データベースの有効性を示した。さらにデータベースを公開し、このデータベースへの参加を世界に呼びかけている。データ収集の過程においては、データの“精度”などが問題となってくる。“精度”を保

証しデータベースの信頼性を上げるためには、測定手順や校正用試料の標準化などが必要となる。データベースを通じたネットワークを世界中に広げ、その中で測定手順の標準化に関する議論を進めていくことで、テラヘルツ帯分光技術の利用価値を高めることができると考えている。

## 2.4 電磁波伝搬モデル構築

テラヘルツ帯電磁波の大気伝搬モデル構築は、テラヘルツ帯電磁波が大気中を通過する様々なテラヘルツ帯計測システムの設計に必須な重要項目である。電磁波の大気透過特性を見ると、ちょうどテラヘルツ帯に非常に大きな吸収があり、この吸収のためテラヘルツ帯は通信等には使えない電磁波であるとの認識が一般的であった。テラヘルツ帯における大気吸収は水分子による吸収線と“コンティニューム”と呼ばれる大きな山から成っている。これらの吸収も自然が示す電波と光の間にある“テラヘルツギャップ”の一つである。これらの特性を精度良く模擬する伝搬モデルは現状で存在しない。電波伝搬モデルや光伝搬モデルのテラヘルツ帯への拡張がよく用いられているが、それぞれのモデルが示すテラヘルツ帯での伝搬特性は、互いに一致せず、また実測値とも一致していない。これまでテラヘルツ帯での光源・検出器技術が未成熟であったために、吸収線に関する精度の良い測定がなされてこなかったこと、“コンティニューム”に関しては測定自体が困難であったことが原因で、大気伝搬に関する理解が進んでいなかった。このため上記のように伝搬モデルがないという事態になっている。以上の問題点を解決して、どの帯域であれば、どのくらいの距離を伝搬するのかといった点を明らかにすることが重要である。完成したテラヘルツ帯大気伝搬モデルは、テラヘルツ帯を一まとめにして「利用できない領域」とする一般常識を打破し、「用途によっては利用できる帯域もある」というように常識を改めることに役立つと期待している。NICTにおいてはモデル構築のためのデータ収集として、テラヘルツ帯時間領域分光法を用いた大気透過率測定を実施している。

## 2.5 リモートセンシング

地球環境計測の手段として、また危険物質やガ

スの遠隔検出手段として、テラヘルツ帯のリモートセンシング技術に期待が寄せられている。地上で利用できるリモートセンサーとして、被災現場などに発生する有毒ガスを離れた地点から検知できるテラヘルツ帯リモートセンサシステムの研究開発が委託研究において行われている。光ファイバ通信に開発されてきたデバイス・システム技術やその周辺技術を用いて、連続波のテラヘルツ電磁波(<1 THz)を発生させ、反射波を高感度検出器によって検出することで、電磁波の経路にある有毒ガスを検知する。テラヘルツ電磁波の周波数は原理的に可変であるため、このリモートセンサシステムは、有毒ガス検知以外にも様々な危険物質の検知、分光分析、イメージングなど応用範囲が広い技術である。

一方、デバイスや計測システム技術が未成熟であったため、テラヘルツ帯を用いた地球環境計測はこれからの課題である。そのため、現状もしくは将来に開発が期待できるデバイスや計測システム技術を基にした観測システムを構築するため、放射伝達モデルや宇宙ステーションからの観測フィジビリティ研究を行っている段階にある。また、伝搬特性モデル構築のために取得したデータは、地球以外の惑星大気シミュレーションにも利用でき、実際の観測データなどから、テラヘルツ帯を用いた惑星観測の重要性なども浮かび上がりつつある。このような目的に利用されるリモートセンサーの実現には、局部発振器としてのテラヘルツ帯量子カスケードレーザの開発とともに超伝導ミキサの開発が重要であり、未来 ICT 研究センターとの協力の下にその開発を実施している。

## 3 まとめ

NICT では今後の技術発展や応用のための基盤となる技術や研究：テラヘルツ帯量子カスケードレーザ技術、テラヘルツ帯量子井戸型検出器技術、テラヘルツ帯時間領域分光システム技術、ミリ波イメージング技術、テラヘルツ帯材料データベース、テラヘルツ帯大気伝搬モデル、テラヘルツ帯地球環境計測へのフィジビリティ研究、超伝導ミキサ研究、などを自ら研究として行っている。また、委託研究では汎用性の高い技術として、非

冷却マイクロボロメータアレイ検出器を用いたテラヘルツ帯カメラシステムや有毒ガス検知が可能となるリモートセンサシステムの開発を行っている。テラヘルツ帯技術は日々進歩しつつあるが、いずれの項目も今後のテラヘルツ技術応用の基盤や種となる技術と位置付けられる。

ミリ波帯では応用としてまず通信があり、その後レーダ技術に展開し、さらに新たな活路としてイメージング技術が出てきた。ミリ波より更に高周波のテラヘルツ帯ではまず分光分析技術応用が先行し、その後イメージング技術に展開した。二つの電磁波帯域を持つ物理的な性質の違いが明らかに出てきたものである。ミリ波帯にはいわゆる“指紋スペクトル”が少ないため、ミリ波帯を分光分析に用いることはあまりなさそうである。一方、

テラヘルツ帯を用いた通信技術が出てくるかといえば、それは「市場がそういったものを求めているかどうかによる」としか言い様がない。しかしながら、半導体デバイス技術や光ファイバ通信技術のテラヘルツ帯への適用などによって、テラヘルツ帯機器の小型・高性能化が進展することは間違いなく、そのような展開の先にテラヘルツ帯通信があるかもしれない。近距離無線の標準化を進める米国の IEEE802.15 WPAN 委員会が新たな検討部会として“Terahertz Interest Group (IGthz)”を 2008 年 1 月に立ち上げたことは注目に値する。

NICT が進める研究開発項目に関しては以降の章で詳細が述べられている。ご一読いただきご興味を持っていただければ幸いである。



岩野 眞人

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ 研究マネージャー 博士(理学)  
テラヘルツ帯半導体素子とその計測応用