国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

DOI	10.11501/10314919
論題 Title	テラヘルツ波応用のベンチマーク
他言語論題 Title in other language	The Benchmark of Terahertz Wave Applications
著者 / 所属 Author(s)	大谷　知行（Chiko OTANI） / 理化学研究所光量子工学研究領域グループディレクター 寶迫　巌（Iwao HOSAKO） / 情報通信研究機構未来 ICT 研究所　研究所長
書名 Title of Book	冷戦後の科学技術政策の変容 : 科学技術に関する調査プロジェクト報告書（Transformation of Science and Technology Policies in the Post-Cold War Era）
シリーズ Series	調査資料 ; 2016-4
出版者 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2017-03-16
ページ Page	121-142
ISBN	978-4-87582-796-2
本文の言語 Language	日本語（Japanese）
摘要 Abstract	電波と光の境界領域であるテラヘルツ波は、その技術が近年急速に発展した。本報告では、テラヘルツ波のセンシング・超高速無線通信への技術開発動向を俯瞰し、近未来の展望について述べる。

*掲載論文等のうち、意見にわたる部分は、それぞれ筆者の個人的見解であることをお断りしておきます。

国立国会図書館
National Diet Library, Japan

テラヘルツ波応用のベンチマーク

理化学研究所光量子工学研究領域グループディレクター
大谷　知行
情報通信研究機構未来 ICT 研究所　研究所長
寶迫　巌

目　　次

はじめに
Ⅰ　テラヘルツ波を用いた検査・分析
　1　テラヘルツ波による安全・安心の確保
　2　テラヘルツ波の産業利用
　3　テラヘルツ波による地球環境の高精度観測
　4　テラヘルツ波を用いた検査・分析技術の現状と課題
Ⅱ　テラヘルツ波を用いた高速大容量無線通信
　1　テラヘルツ波の無線通信への適用
　2　テラヘルツ波による高速無線通信の応用例
　3　テラヘルツ波を用いた高速無線通信の現状と課題
Ⅲ　テラヘルツ波による物質改変の可能性と照射影響
　1　高強度テラヘルツパルスによる物質改変
　2　テラヘルツ波の生体照射影響
おわりに

【要　旨】
電波と光の境界領域であるテラヘルツ波は、その技術が21世紀に入って急速に発展し、非破壊検査・情報通信などを中心に様々な利用に強い期待が寄せられている。本報告では、テラヘルツ波のセンシング・超高速無線通信への利用可能性と技術開発動向を俯瞰（ふかん）する。特に、この新技術によって社会課題の解決や新たな応用・展開が期待される、検査・分析分野と無線通信分野での利活用を中心に、具体的な利用シーンを交えながら紹介するとともに、近未来の展望についても述べる。

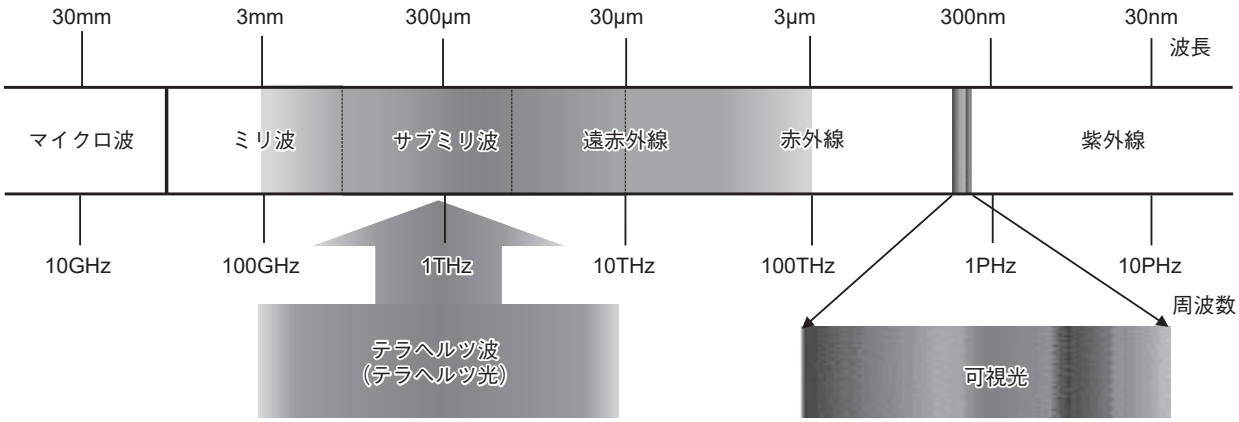
はじめに

周波数が0.1～10テラヘルツの光（電磁波）は、テラヘルツ波（テラヘルツ光）と呼ばれる（図1）。テラは1兆（10^{12}）、ヘルツは振動の周波数単位であり、1テラヘルツの光は1秒間に1兆回振動する。その波長は、0.1テラヘルツ（100ギガヘルツ）で3ミリメートル、10テラヘルツで30ミクロン(1)である。また、範囲を広げて周波数100テラヘルツ（波長3ミクロン）までをテラヘルツ波と呼ぶこともある。なお、短縮する場合の表記は、テラヘルツがTHz、ギガヘルツがGHzである。

テラヘルツ波は電波であるミリ波とサブミリ波を含み、さらに光として扱われる遠赤外線～赤外線まで広がるため、電波と光の境界領域にあると言われ、実際に、低周波数側（図1の左側）では電波として、高周波数側（同右側）では光として取り扱われることが多い。テラヘルツ波は、長らく発光や検出のためのデバイス（装置、部品等）の開発が遅れ、電磁波の中でも最後のフロンティア領域とされてきた。しかし、21世紀に入る頃からレーザー技術を基盤とした研究開発が飛躍的に進み、また、半導体等を用いたデバイスや技術も着実な進展を遂げて、その優れた特性を活かした様々な応用が提案され、その一部は現実のものになりつつある(2)。

テラヘルツ波の電波的な性質には、プラスチック、セラミックスなどの非金属物質に対する

図1　電磁波におけるテラヘルツ波の位置



（注）1mm＝1,000μm, 1μm＝1,000nm, 1PHz＝1,000THz, 1THz＝1,000GHz
（出典）筆者作成。

＊　本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、2017年1月10日である。
(1)　1ミクロン（1μm）は1ミリメートルの千分の一の長さである。
(2)　Masayoshi Tonouchi, “Cutting-edge terahertz technology,” *Nature Photonics*, vol.1 no.2, 2007.2, pp.97-105.

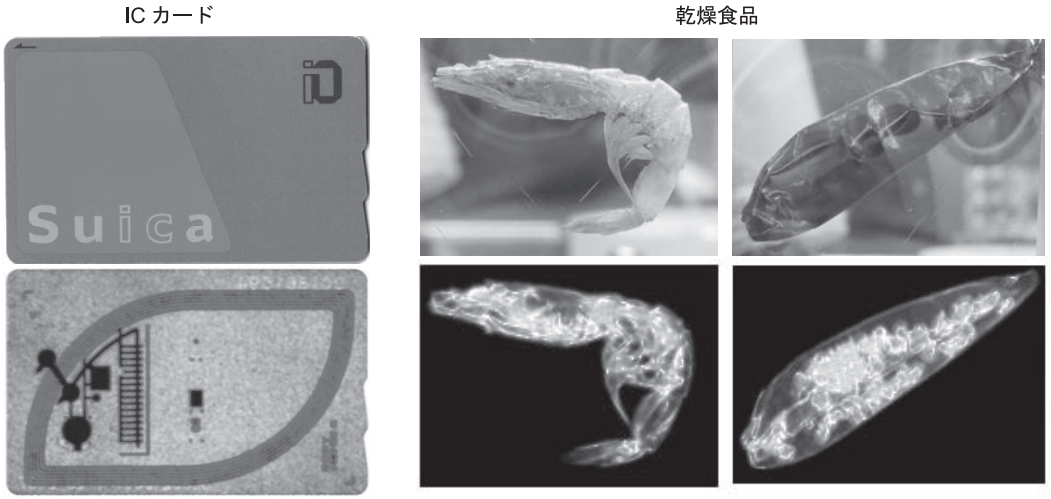
透過性があり、非破壊・非接触・非侵襲で透過画像を得て内部を検査（イメージング検査）することが可能である（図2）。マイクロ波と比較すると、水分によって減衰しやすい性質がある一方、より解像度の高いイメージ（画像）が得られるという利点がある。

また、物質に様々な波長のテラヘルツ波を当てると、特定の波長のテラヘルツ波だけが吸収され（吸収スペクトル）、その波長が物質によって異なるという特性があり、これを利用して物質の種類を特定することができる（分光による物質弁別）。テラヘルツ波を用いたセンシング（測定・計測）はしばしばテラヘルツセンシングと呼ばれ、従来技術で見えなかったものを透視するなど、人類の新たな「目」として期待されている。このようなセンシング利用に加えて、無線通信においてテラヘルツ波を用いることで、広い帯域幅（周波数の範囲）の活用が期待でき、無線通信の拡大による電波利用の飽和状態を打開する新たな超高速無線通信の手段として研究開発や環境整備が着々と進められている。

このように、テラヘルツ波は、センシングと超高速無線通信の分野において、関連論文数が指数関数的に伸びるなど、非常に速いスピードで研究開発や応用が進められている。さらに近年は、高強度のテラヘルツ波光源の開発が進展しており、テラヘルツ波を照射することによって物質の構造や機能を変質させるような新たな活用法の研究も始められ、さらなる応用展開も期待されている。

本報告では、このような性質を有するテラヘルツ波の様々な利用可能性や新技術を俯瞰（ふかん）し、テラヘルツ波の活用によってどのような世界が実現できるのか、また、どのようなイノベーションが期待されるかについて述べる。

図2　可視光による画像（上段）とテラヘルツ波による透過画像（下段）



（注）解像度は約0.5ミリメートル。

（出典）Adrian Dobroiu et al., “Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator,” *Applied Optics*, vol.43 issue 30, October 2004, p.5637; Kodo Kawase, “Terahertz Imaging For Drug Detection And Large-Scale Integrated Circuit Inspection ,” *Optics and Photonics News*, vol.15 issue 10, October 2004, p.34.

Ⅰ　テラヘルツ波を用いた検査・分析

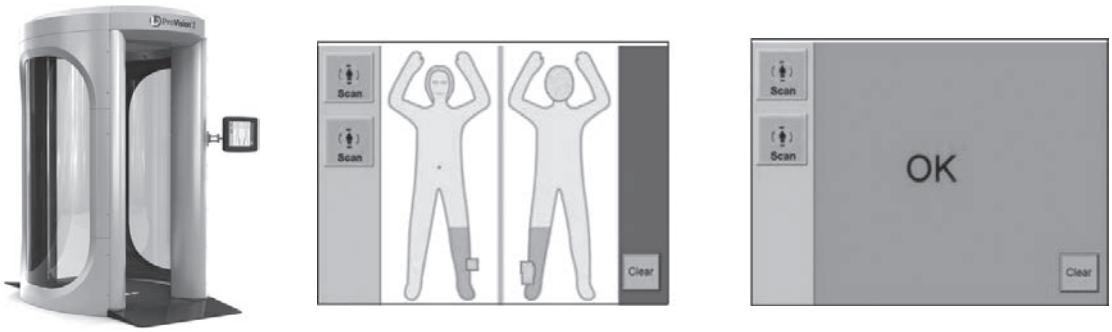
1　テラヘルツ波による安全・安心の確保

（1）テロ対策等のためのセキュリティチェック

2001年の米国同時多発テロの発生後、航空機搭乗者などに対する厳格なセキュリティチェックが実施されるようになった。2009年には米国デルタ航空機爆破テロ未遂事件が発生し、プラスチック爆弾や非金属の凶器の持込みを防ぐには従来の金属探知機による検査だけでは不十分であるとの認識が広がった。これらを契機に、非金属の検知が可能なボディスキャナによる透視検査の必要性が高まり、ミリ波・テラヘルツ波やX線（後方散乱法(3)）を用いたボディスキャナが開発された。ミリ波・テラヘルツ波検査は、X線のような放射線被曝がなく安全性が高いとされ、海外の空港で広く使われている。米国L3セキュリティ＆ディテクションシステムズ（L3 Security & Detection Systems）社のミリ波ボディスキャナ（図3左図）は、空港ゲートなどで乗客を静止状態にして撮像する。ミリ波・テラヘルツ波は衣服を透過するが体は透過しないので、衣服を着たまま体の表面が透けて見え、衣服の下に隠蔽された危険物等を検知できる。ただし、ミリ波・テラヘルツ波の検査装置に限らず、一般にこのようなボディスキャナは被験者の体のラインが見えるため、プライバシーの保護が問題となる。これに対しては、デフォルメされた画像だけを表示するといった工夫がなされている（図3中図）。

国内でも、平成18（2006）年に国土交通省航空局が成田空港でボディスキャナの運用試験を行い、プライバシーの問題に関するアンケート調査等も行われた。その後、「イスラム国（IS）」によるテロ事件の多発、邦人殺害テロ事件、パリ連続テロ事件、2020年東京オリンピックの開催決定などを受けてテロ対策強化が決定された(4)。これを受けて、平成27（2015）年10～12月、関西・成田・羽田空港で延べ17,765名に対するボディスキャナの運用評価試験が実施され、平成28（2016）年度から全国主要空港にミリ波ボディスキャナを導入することが決定した(5)。

図3　米国L3セキュリティ＆ディテクションシステムズ社のミリ波ボディスキャナ



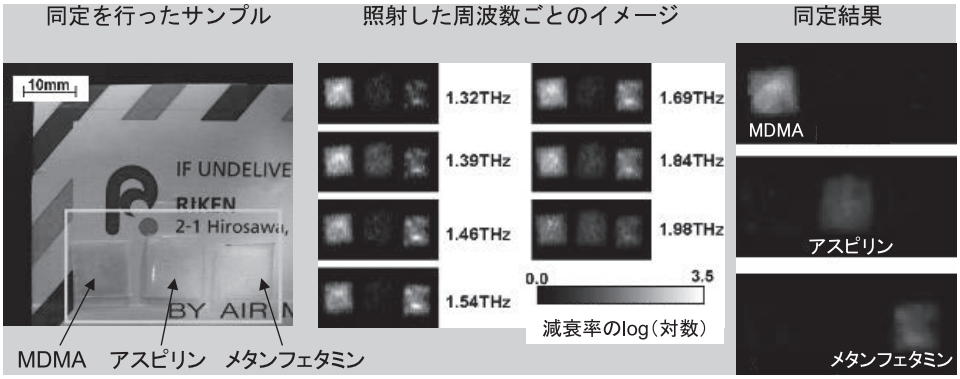
（注）左図は装置の外観、中図は異常検知時の表示像、右図は異常なしの場合の表示像。
（出典）日本エアロスペース株式会社提供。

(3)　対象物を透過したX線ではなく、照射した対象物から跳ね返ってくるX線（後方散乱線）により検出する方法。
(4)　「邦人殺害テロ事件等を受けたテロ対策の強化について」（平成27年5月29日国際組織犯罪等・国際テロ対策推進本部決定）p.1. 首相官邸ウェブサイト <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/sosikihanzai/20150529honbun.pdf>
(5)　「先進的なボディスキャナー運用評価試験　結果概要―平成28年度から全国の主要空港へ順次導入していきます―」2016.3.29. 国土交通省ウェブサイト <http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku09_hh_000078.html>

（2）禁止薬物・爆発物等の同定検査

インターネットを通じた商品の購入が日常化する中、禁止薬物等が海外から輸入される事件が起きている。特に、個人宛の封書郵便物を開封して検査するには原則として捜査令状が必要となるため、内封された違法薬物の検査は容易でない。しかし、封筒などに対してテラヘルツ波を照射し吸収スペクトルを測定（分光による物質弁別）すると、開封せずに中の違法薬物や爆発物を同定できる（図4）。国内ではこの原理を活用した封筒の検査装置が開発され、税関での同定試験も行われた[6]が実用化には至っておらず、市販品の販売は海外が先行している。

図4　封筒に入れた違法薬物等の同定例

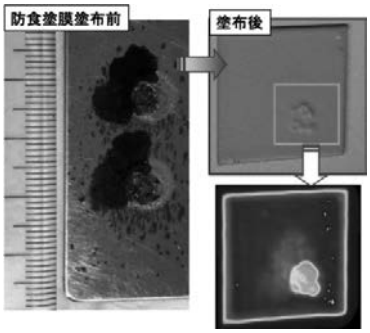


（注）MDMAは合成麻薬、アスピリンは解熱鎮痛剤、メタンフェタミンは覚せい剤である。
（出典）名古屋大学大学院工学研究科・川瀬晃道教授及び理化学研究所提供。

（3）建築物・大型機器の劣化診断等

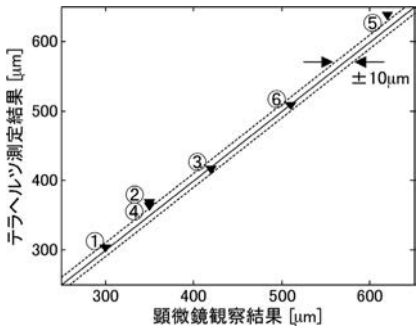
その他の利用例では、塗装下の見えないサビの検出（図5）、耐火建築物のタイル壁の内部診断、火力発電等に用いるタービン翼の遮熱コーティング検査（図6）、風力発電の回転翼の損傷検査、航空機材料の検査、潤滑油の特性評価、災害現場での煙の奥の透視や危険ガスの検知などが提案されている。これらは、測定対象が非金属のためX線等の従来技術では検査が困難なものも多く、テラヘルツ波を用いた課題の解決が模索されている。

図5　防食塗膜下のサビの検出



（出典）布施則一ほか「テラヘルツ波による塗膜下鋼材発錆の検出」『電力中央研究所報告研究報告』H11002, 2011.10, pp.iii.

図6　タービンの遮熱コーティングの厚さ検査



（注）丸数字はサンプル番号。
（出典）福地哲生ほか「テラヘルツ波を用いたガスタービン用遮熱コーティングの非破壊検査技術の開発―トップコート膜厚測定への適用―」『電力中央研究所報告』H10003, 2011.1, p.8.

(6) Hiromichi Hoshina et al., “Non-invasive Mail Inspection System with Terahertz Radiation,” *Applied Spectroscopy*, vol.63 issue 1, January 2009, pp.81-86.

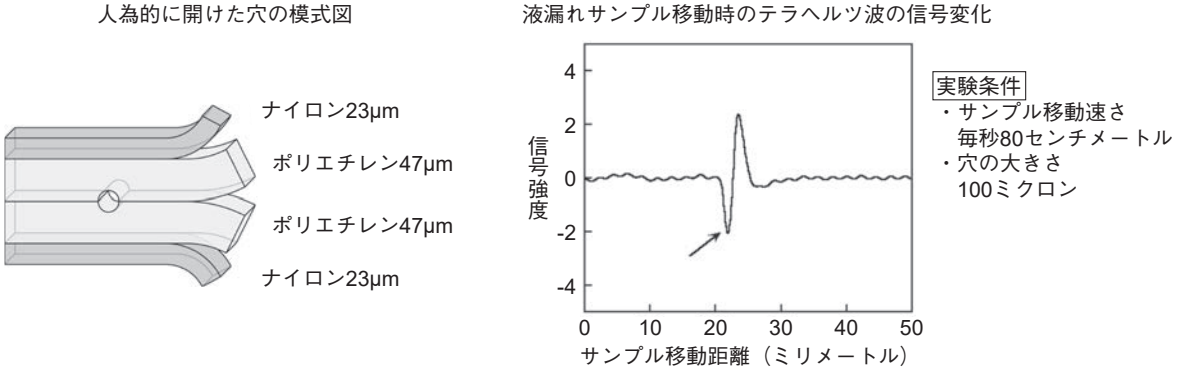
2　テラヘルツ波の産業利用

（1）テラヘルツ波による工業製品等の検査・分析

テラヘルツ波で最も広範な利用可能性が期待されるのが透過性を活かした非破壊検査である。その目的は、前述した安全・安心の確保にとどまらず、工業材料・製品の品質評価、食品の異物検査、プラスチック複合材料の透視検査から美術品・文化財調査に至るまで多岐にわたる。ここでは、いくつかの実例を紹介する。

食料品包装の液漏れは食品の腐食につながるため、その検知は非常に重要である。図7は、食料品を入れたプラスチック製包装袋のシール部における微量の液漏れ検査を想定した実験の結果である。実験では、包装袋に人為的に穴を開けて水を通したサンプルを用意し、これにテラヘルツ波を照射して透過後の信号を測定した。サンプルを移動させながら測定すると、テラヘルツ波の照射位置が液漏れ部を通過した際に信号強度が大きく変化し（図7右図の矢印）、明瞭に欠陥が検知されていることが分かる。不透明なプラスチック包装袋や、食品用に限らず医療用のプラスチック容器など漏れが問題となる製品にも適用可能である。

図7　食料品用プラスチック製包装袋の液漏れ検査を想定した実験の結果



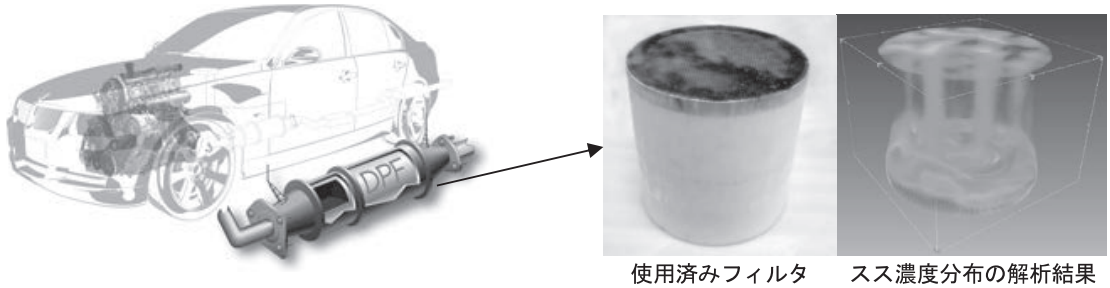
（出典）Yasuyuki Morita et al., “A real-time inspection system using a terahertz technique to detect microleak defects in the seal of flexible plastic packages,” *Journal of Food Protection*, 68(4), April 2005, pp.834-835を基に筆者作成。

このほか、ディーゼルエンジンの排ガス用フィルタの内部診断、プラスチック製品の透視検査、食品の異物検査にも適用できる（図8～図10）。

テラヘルツ波の代表的な発生・検出方法の一つに、テラヘルツ時間領域分光法と呼ばれる方法がある。これは、100フェムト秒（十兆分の一秒）程度の非常に短い時間幅で照射するパルス(7)レーザー（フェムト秒レーザー）を用いて極めて短時間で繰り返し発生させたテラヘルツ波（テラヘルツ超短パルス）を対象物に照射し、反射したパルスを測定することにより、物質の奥行き方向の断層像が得られる。この方法は、薄膜などの診断のほか文化財の診断にも利用可能である。特に文化財の修復前診断は、その文化財の目に見えない部分がどのように作られ、どのようなダメージを受けているかによって修復方法が変わるため重要である。高松塚古墳の壁画における修復前診断では、X線による測定には向かないとされる薄い漆喰層の内部を画像化することに成功している(8)。

(7)　パルスとは、短時間の幅で生じる電波や光のことである。

図8　ディーゼルエンジン排ガス用フィルタのスス診断の例

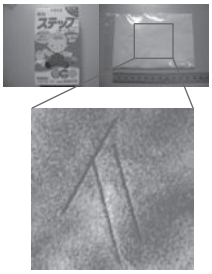


（出典）株式会社アドバンテスト提供。

図9　プラスチック製品の透視検査の例

（出典）理化学研究所提供。

図10　粉ミルクの異物検査の例



（出典）理化学研究所提供。詳細は、Seiichiro Ariyoshi et al., “Terahertz imaging with a direct detector based on superconducting tunnel junctions,” *Applied Physics Letters*, 88(20), May 2006, p.120を参照のこと。

半導体の分野でもいくつかの応用が試みられている。例えば、半導体にテラヘルツ波を照射した時の反射を測定することで、基板面の不均一性の検査等が可能である。同様の検査は導電性高分子[(9)]の薄膜でも試みられている。また、駆動中の大規模集積回路（LSI）にフェムト秒レーザーを照射してテラヘルツ波を発生させると、回路上の電圧の状況が高い解像度で得られ、LSIの故障解析に利用できる[(10)]。LSIの製造工程は非常に複雑かつ微細化しており、作製だけでなくトラブルシューティングにも時間がかかるため、異常が生じた位置の同定は非常に重要である。テラヘルツ波を利用することで、その異常箇所を非破壊・非接触で同定できる。

このように、テラヘルツ波による非破壊検査の例は枚挙にいとまがない。これは、我々の生活において多種多様なプラスチックや非金属の製品・食品などが普及する中で、これらに対してテラヘルツ波が優れた透過特性を持つからである。製造ラインへの導入も進みつつあり、建材プラスチックシートの厚み管理、紙の製造工程の水分量・厚み・塗工量管理、医薬品への異物混入の検出などへの導入例が報告されている。このような製造ラインでの利用は、テラヘルツ波の光源・検出器等のデバイスの小型化・廉価化が進むにつれてさらに広がると予想される。

(8)　福永香ほか「テラヘルツイメージングを用いた壁画・屏風の非破壊調査」『応用物理』18巻4号, 2012.4, p.331; 高妻洋成「新しい「光」」2013.8. <https://www.nabunken.go.jp/nabunkenblog/2013/08/20130801-1.html>

(9)　電気を通す高分子（ポリマー）のことである。ノーベル化学賞を受賞した白川英樹博士が発見した。電池、コンデンサ、有機ELディスプレイなどに利用されている。

(10)　Masatsugu Yamashita et al., “Imaging of large-scale integrated circuits using laser-terahertz emission microscopy,” *Optics Express*, vol.13 issue 1, January 2005, p.119.

（2）医薬品・バイオメディカルへの応用

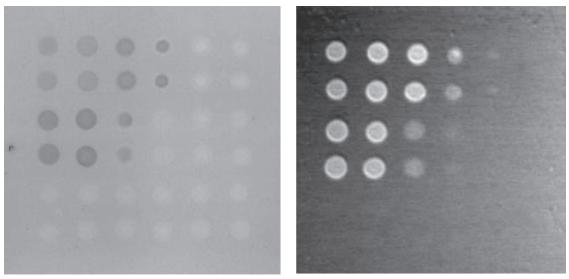
テラヘルツ波の透過性を用いた医薬品・バイオメディカルへの応用としては、医薬品錠剤のコーティングの厚みの検査、医療用消耗品類の欠陥検査、さらには、がん診断や内耳診断などが提案されている。このうち、錠剤のコーティング膜厚検査は、前述した工業製品等の薄膜検査でも活用されるテラヘルツ超短パルスを用いた断層イメージング（画像診断）を用いて検証されており[11]、その奥行方向の分解能を10ミクロン以下とすることが可能である。コーティングの状態は、服用後に薬剤が体内のどこで溶解、吸収されるかに影響するため、薬剤の品質管理上、その厳密な制御が求められている。

医薬品の開発・製造・品質保証に関しては、米国食品医薬品局（FDA）が、製造工程の中で製品の品質をリアルタイムに計測して品質管理に活かすという「プロセス分析テクノロジー（PAT）」の活用を新たな枠組みとして提唱しており[12]、今後、国内外の医薬品メーカーがこれに追従していくものと考えられる。そこで求められる製品全数検査において、テラヘルツ技術を用いてこそ実現可能な検査技術の適用が期待される。

PATにも関連するが、錠剤等の成分分析も非常に重要である。特に医薬品は同一の物質でも結晶構造が異なると効能も異なるため、同じ分子式でも結晶構造が異なる分子を弁別する必要がある。テラヘルツ波を用いると、結晶構造の判別や分子と結びついた水分子（水和水）の有無、さらには結晶と非結晶の割合などが評価できる。また、テラヘルツ波は不透明なプラスチックの包装や薬包紙などを透過するので、包装がなされたあとでの検査も可能である。

また、テラヘルツ波の帯域は、生体に含まれる分子（生体分子）を計測するのに適していることから、バイオメディカル分野への応用が期待されている。例えば、免疫やアレルギーなど（抗原抗体反応）の検査では、従来のように蛍光物質などの標識物質を使わず、テラヘルツ帯の分光測定を利用した非標識の診断方法が提案されている。高価な標識物質を用いずに短時間での検査が可能であり、蛍光による計測と遜色のない結果が得られている（図11）。

図11　抗原抗体反応の計測結果の比較



蛍光物質を使用　　テラヘルツ波を使用（標識なし）

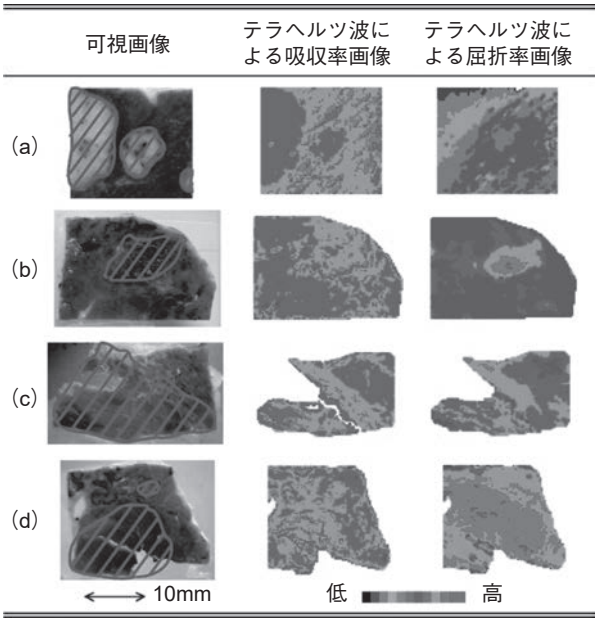
（出典）京都大学大学院農学研究科・小川雄一准教授提供。

⑾　Yao-Chun Shen and Philip F. Taday, “Development and Application of Terahertz Pulsed Imaging for Nondestructive Inspection of Pharmaceutical Tablet,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.14 no.2, 2008.4, p.412.

⑿　“OPS Process Analytical Technology - (PAT) Initiative.” U.S. Food and Drug Administration website <http://www.fda.gov/AboutFDA/CentersOffices/OfficeofMedicalProductsandTobacco/CDER/ucm088828.htm>

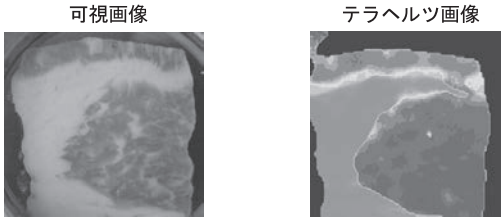
このほか、テラヘルツ波を用いたがんの画像診断について多数の報告がある。例えば、皮膚がんでは、病変した部分が皮膚の表面近くにあるため、体内の水分によりテラヘルツ波が吸収される影響を受けずに検査できる。また、テラヘルツ波は、がんの病理診断（患者から採取した組織や細胞を観察して行う診断）にも有用である（図12）。通常の病理診断では、患者から採取した病理試料を脱水・脱脂処理してからパラフィンで固め、厚さ数ミクロンの非常に薄い切片に切り分け、脱パラフィン処理と染色を施した上で、病理医がその1枚1枚を顕微鏡で観察する必要があるため、病理診断には数日程度を要する。これに対し、テラヘルツ波による診断では、脱水・脱脂処理後にパラフィンで固めたサンプルを厚さ1ミリメートル程度にスライスすれば測定できるため、短期間での簡易診断が可能である。さらには、採取した病理試料を冷凍することにより、脱水・脱脂処理をせずに試料の取得からわずか数時間での簡易診断を可能にする新たな手法が研究されており、実用化が期待されている（図13）。

図12　肝がんの病理診断例



（注）テラヘルツ波の周波数は1.7テラヘルツである。吸収率又は屈折率の違いによりがんの部位を識別可能である。
（出典）Sachiko Nakajima et al., “Terahertz imaging diagnostics of the cancer tissues with Chemometrics technique,” *Applied Physics Letters*, 90(4), January 2007, p.041102(2) を基に筆者作成。

図13　冷凍状態の生体サンプルの診断



（注）冷凍サンプル（豚肉）の脂肪と肉の部分がテラヘルツ画像でも識別可能である。
（出典）Hiromichi Hoshina et al., “Terahertz pulsed imaging of frozen biological tissues,” *Applied Physics Letters*, 94(12), March 2009, pp.123901(1)-123901(2).

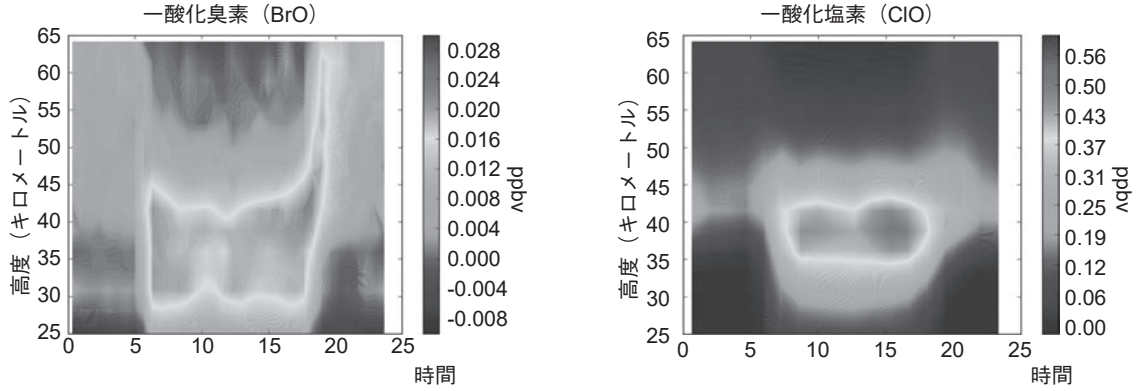
3　テラヘルツ波による地球環境の高精度観測

（1）テラヘルツ波による大気汚染の観測

人間活動に伴い大気中に放出された臭素（Br）や塩素（Cl）などの微量分子が大気高層における化学反応に大きな影響を与え、それがオゾン層[13]破壊や地球温暖化につながっている可能性が指摘されてきた。これらの分子は、オゾンと反応して一酸化臭素（BrO）や一酸化塩素（ClO）などの酸化物を生成することにより、オゾンを枯渇させる要因になると考えられている。図14は、シミュレーションによって得られた各高度における24時間のBrOとClOの予想濃度分布である。これを観測によって確かめ、そのデータに基づいて予測の精度を向上させることにより、大気環境の理解を深め、的確な対策を講じていくことが重要な課題となっている。

人工衛星による地球観測データは、地上や大気の様々な情報を含んでおり、気象予報、資源探査、作付予想などに用いられている。一般に、人工衛星による地球観測ではこうした多様な用途に応じてマイクロ波から紫外線までのあらゆる波長帯が用いられているが、大気中の気体については、テラヘルツ波の領域を観測すれば、分光によって容易に気体の種類を見分けることができるため、大気高層における微量化学物質や水の大気循環などの地球環境計測では、テラヘルツ波による観測が有効とされている。（2）では、具体的な観測事例を紹介する。

図14　シミュレーションから得られた一酸化臭素（BrO）と一酸化塩素（ClO）の予想濃度分布



（注）ppbv（parts per billion by volume）は濃度を体積の比率で表したもの。1ppbvは10億分の1。
（出典）情報通信研究機構テラヘルツ研究センター・笠井康子上席研究員の提供資料を基に筆者作成。

（2）テラヘルツ波を用いた大気観測の動向

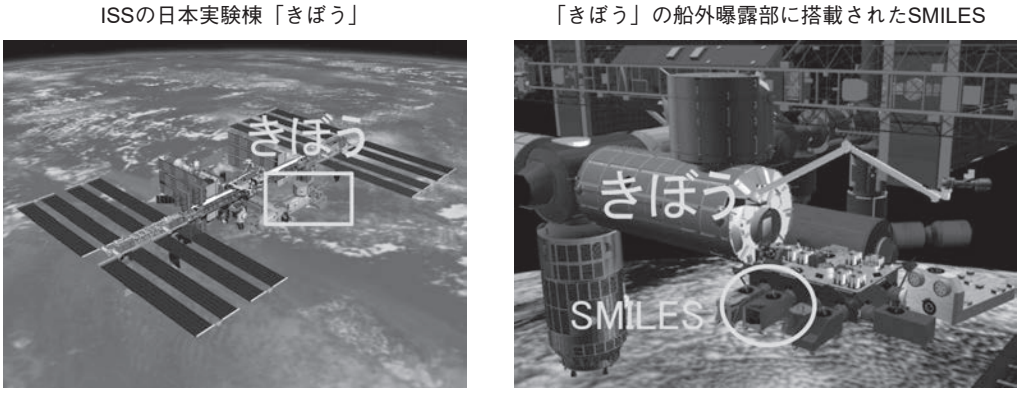
大気の観測機器である超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）[14]は、2009年に国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）の日本実験棟「きぼう」の船外曝露部に取り付けられ、「きぼう」として初めての地球環境観測を行い、大気中の微量分子（オゾン、一酸化臭素、一酸化塩素等）を測定した（図15）。測定の感度については、SMILESのセンサ雑音温度[15]は300Kであり、NASAの地球観測衛星「オーラ（Aura）」に搭載されたマイクロ波リムサウンダ（MLS、センサ雑音温度12,000K）や、スウェーデンの地球観測衛星「オーディン（Odin）」に搭載された

⑬　大気中のオゾン濃度の高い層。太陽からの有害な紫外線を吸収し、陸上生物を紫外線から守っている。
⑭　Superconducting Sub-Millimeter-wave Limb-Emission Sounder. 気体から放射されるサブミリ波（テラヘルツ波）を受信し、微量の気体分子を観測する。受信機は、ISSから地球の大気の縁（リム）に向けられている。
⑮　衛星通信等で生じる小さな雑音の大きさを絶対温度（K）で表したもの。数値が小さいほど低雑音である。

サブミリ波ラジオメータ（SMR、センサ雑音温度3,000K）よりもはるかに高感度であり、得られたデータの質が高いことから、地球環境対策への貢献が期待できる（図16）。観測データは公開され、世界の科学者が利用可能である。

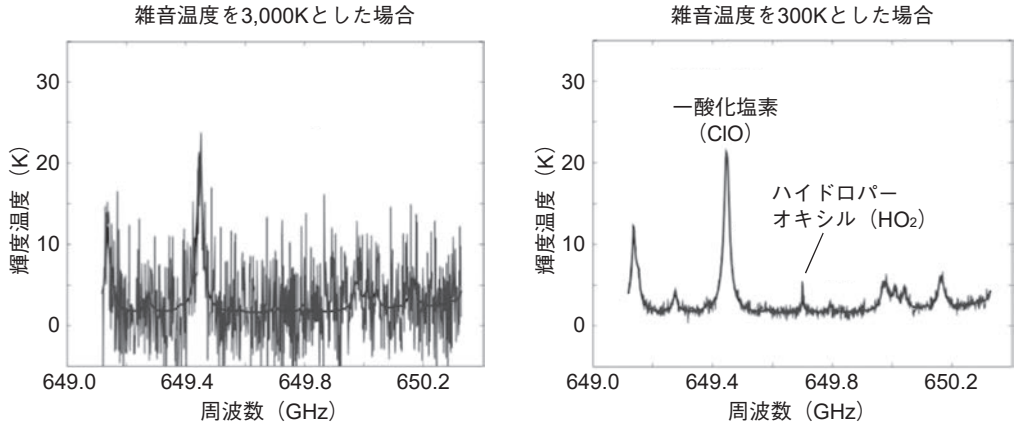
多数の小型観測衛星からなる衛星群（コンステレーション）により、地球全体を高精度かつ高頻度に観測し、環境負荷物質の複数同時把握を行う計画が様々な機関で検討されるようになってきた。観測波長帯はマイクロ波から紫外線まで様々であるが、テラヘルツ帯もその候補となっている。計画では、衛星群から得られたデータをリアルタイム解析し、局所的水害や健康リスクのアセスメントに利用することで被害リスクを最小限に留めることなどを目指している。テラヘルツ帯での観測では、対流圏の中部～上部における氷雲・水蒸気や汚染物質の実態を把握できるとされ、例えば、局所的な水害を高い精度で予測できる可能性がある。

図15　ISSにおけるテラヘルツ波を用いた大気観測



（出典）“What Is the International Space Station?” Dec. 1, 2011. NASA website <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-the-iss-k4.html> 等を基に筆者作成。

図16　サブミリ波の大気分光観測で得られると予想される結果のシミュレーション



（注）雑音温度が低いことで大気の成分（例えば、ClO）の検出精度が飛躍的に向上することを表している。輝度温度とは、放射される電波や光の輝度の大きさを絶対温度（K）で表したもの。ハイドロパーオキシルは、上部成層圏においてオゾン破壊に関与する物質である。

（出典）情報通信研究機構テラヘルツ研究センター・笠井康子上席研究員の提供資料を基に筆者作成。

4　テラヘルツ波を用いた検査・分析技術の現状と課題

（1）光源・検出技術

テラヘルツ波を利用するためには、テラヘルツ波を発生させる光源とテラヘルツ波を受けて信号として検出する器械や方法を確立する必要がある。テラヘルツ波の光源と検出技術としては以下に示す多様なものが開発されつつある。

（i）エレクトロニクス技術

トランジスタやダイオードなどを用いて電荷を高い周波数で振動させることにより、テラヘルツ波を発生させる技術である。その周波数は100ギガヘルツから1テラヘルツ程度で、一般に連続して発生させることが可能でありノイズも小さいため、センシング（各種計測）に適している。既存の電波技術を活用してガンダイオード[16]を始めとする各種のダイオードが開発されてきたが、テラヘルツ波を発生させるには低温環境等が必要であった。しかし近年、共鳴トンネルダイオードなど常温環境でも高出力のテラヘルツ波を発生できるデバイスが研究・開発されている。また、同様の技術を用いた検出法も研究開発が進みつつある。最近では、実用的な高速無線通信を目指した光源・検出器[17]も盛んに研究・開発され、低価格化が進みつつある。

（ii）フォトニクス技術

レーザーを波長変換して異なる波長の光を発生させることにより、テラヘルツ波を発生させる技術である。具体的には、主に可視光や近赤外線のパルスを発光するレーザーを非線形光学結晶（光の波長を変化させる性質を持つ結晶）などの波長変換素子に入射してテラヘルツ波を発生させる。入射するパルスの出力最大値が高いほど高強度のテラヘルツ波出力が得られる。また、周波数の異なる2つのレーザー光を非線形光学結晶に入射すると両者の差に相当する周波数が発生する現象を利用して、様々な周波数のテラヘルツ波を容易に発生させる技術なども開発されている。この分野は近年飛躍的な技術進歩があり、光源の高強度化が進んでいる。

（iii）フェムト秒レーザー

最も一般的なテラヘルツ波パルスの発生法である。フェムト秒レーザー[18]から近赤外線の光を極めて短時間で繰り返し発生させ、これを光伝導アンテナ[19]や非線形光学結晶などに入射して、ピコ秒（一兆分の一秒）程度の時間幅のテラヘルツ波を得る技術である。この方式では、同じレーザーを活用してテラヘルツ波を検出することも可能であるため、テラヘルツ時間領域分光法[20]などに利用されている。近年では、テラヘルツ波の出射を一方向に集中させることで強度を高めた「チェレンコフ光源」が開発され、光源の強度は約5桁も増強されている。

（iv）量子カスケードレーザー

量子カスケードレーザー（Quantum Cascade Laser: QCL）と呼ばれる光源によりテラヘルツ光を発生させる技術である。従来とは異なる新しいタイプの半導体レーザーであり、発生させる光の波長が自由に設計でき、発光効率も高いなどの特徴がある。半導体にはガリウムヒ素（GaAs）が使われるが、日本では窒化ガリウム（GaN）も利用されている。前者は絶対温度200度以下に

---

⑯　ガリウム砒素（GaAs）の半導体に高電圧をかけたときに振動電流が発生する「ガン効果」を利用した発振素子。基本的にはマイクロ波を発生させる技術。

⑰　例えば、デジタル情報の無線伝送を可能とする集積回路などの技術開発が進められている。

⑱　千兆分の一秒程度の非常に短い時間幅で照射するレーザー。「Ⅰ 2　テラヘルツ波の産業利用」を参照。

⑲　フェムト秒レーザーを照射することでテラヘルツ波を発生させることができる半導体素子。

⑳　「Ⅰ 2　テラヘルツ波の産業利用」を参照。

冷却しないと発光しないが、後者では常温に近い温度での発光が期待されている。

（2）分光技術

分光とは、光を色に分ける（スペクトル）ように、周波数別に測定することを言う。テラヘルツ波（光）の分光により物体の性質などを分析できる。次のような技術が開発されている。

（i）フーリエ変換分光器

試料に赤外線の光を照射し、透過・反射した光量を測定し、これを数学的に解析（フーリエ変換）して波長ごとのスペクトルを得ることによって、物質の同定等に利用する装置である。光源には高温の水銀ランプからの熱放射が用いられ、0.5〜10テラヘルツという広い周波数帯域のスペクトルを得ることができる。

（ii）テラヘルツ時間領域分光法

（1）（iii）のフェムト秒レーザーを用いた分光技術である。広帯域のテラヘルツ波パルスを試料に入射し、透過又は反射の波形を得る。この波形は、測定対象のスペクトル情報に応じて変形を受けるため、その変形の様子からテラヘルツ帯のスペクトルが得られる。典型的な帯域は、一般にフーリエ変換分光器よりノイズが少ないとされる0.1〜3テラヘルツ程度である。

また、前述したように[21]、発生するパルスの時間幅が非常に小さいため、薄膜などの奥行き情報を画像化する断層イメージングにも適している。

（3）テラヘルツセンシングの展望

既に述べたように、テラヘルツ波によるセンシングの用途は幅広く、テラヘルツ波でしか得られない情報を利用するものも多い。産業利用においても、個別の非破壊検査のみならず、企業の製造ラインでの利用が期待できるものも多い。テラヘルツ波の利用はまだ発展途上にあるが、前述した技術の鍵となるような機器が実用化されれば、いわゆるテラヘルツ・イノベーションが一気に開花する可能性がある。

鍵となる技術の一つとして注目されるのが、進行波管増幅器（TWTA[22]）を用いた増幅器である。衛星通信では、地上から受信した電波を中継して地上に送り返す際に、電波の出力を増幅する必要があり、高効率で信頼性の高い増幅器が求められている。TWTAは、衛星通信に用いられてきた高出力の増幅器をテラヘルツ波に近い周波数でも利用できるように改良したものである。NECネットワーク・センサ株式会社は情報通信研究機構と共同で、テラヘルツ帯TWTAの開発に必要となる微細加工をMEMS[23]技術によって実現し、300ギガヘルツにおいて、2017年度中に従来を大幅に上回る増幅後出力を達成することを目指している[24]。

もう一つの鍵となる技術は多数の検出器を配列（アレイ）させたアレイ型検出器により、テラヘルツ波の高感度検出や、短時間でのイメージング（画像化）を目指す技術である。アレイ型検出器は、近年、特に欧州で開発が進み、販売も始まっている。国内でも日本電信電話（NTT）ほかのグループが、高感度のアレイ型検出器の開発を急ピッチで進めている。

⑵1 「Ⅰ２　テラヘルツ波の産業利用」を参照。

⑵2 Traveling Wave Tube Amplifier

⑵3 Micro Electro Mechanical Systems. 機械的な部品を電子回路とともに微細加工し基板上に集積した機器。

⑵4 Norio Masuda et al., “Development Activity of Terahertz Power Amplifiers: W-band to 300GHz,” *6th Japan-EU Symposiun on ICT Research and Innovation,* Oct.7, 2016. <https://www.nict.go.jp/info/topics/2016/11/4otfsk000036g6qf-att/Beyond-5G_Norio_Masuda.pdf>

Ⅱ　テラヘルツ波を用いた高速大容量無線通信

1　テラヘルツ波の無線通信への適用

（1）無線通信環境の現状と課題

モバイル環境での無線通信データ量の伸びは非常に大きく、2020年には2015年の8倍にも達するとされる。また、2015年に携帯型端末によるデータ利用量の55%を占めていたビデオ視聴は、2020年には75%に達すると予想されている[25]。これは、携帯電話に高精細カメラが搭載され、ユーザーが次々と動画データを生成し、クラウドにアップロードすることに加え、短時間動画がSNSにおけるコミュニケーション手段の中核となってきたためである。

このように、携帯型端末によるデータ利用は、携帯電話ネットワーク[26]だけでは収容できなくなってきており、携帯電話ネットワーク以外のネットワーク通路であるWi-Fi[27]を使うことにより辛うじて収容できている状況である。しかしながら、多くの人が集まる繁華街等では、多数ユーザーの同時接続によりWi-Fiでさえもつながりにくい状態が生じている。このため、大容量の無線通信データのための新たな周波数資源の開発が強く求められている。

（2）無線通信応用におけるテラヘルツ波の特徴

（i）超高速（大容量）

第4世代移動通信（4G）[28]の実効速度（実測値）が各社ホームページ等で公表されており2015年末の時点で、下りで毎秒60～70メガビット程度、上りで毎秒6～20メガビット程度である。次世代の第5世代移動通信（5G）では、平均的な実効伝送速度で毎秒0.1～1ギガビット（100～1,000メガビット）、最大で毎秒20ギガビット（20,000メガビット）が目標値とされている[29]。テラヘルツ波を用いると、これらと比べてはるかに高速な光ファイバー通信並みの超高速（毎秒100ギガビット級）の無線通信が実現可能となる。実効速度は4Gの約1,000倍、5Gと比べても5～100倍程度に高速化されることから、新たな応用分野の開拓が期待される。

（ii）局所性、非干渉性

テラヘルツ波は、電波領域にあっても周波数が高くなるとその性質は光と似てくる。電波のような物体の陰への回り込みがなくなるので、送受信機は互いに直接見通せる位置に置かれる必要がある。送信機からレーザー光のように直線的にテラヘルツ波が進む様子を想像すると分かりやすい。また、テラヘルツ波は大気吸収[30]の影響を受けるため離れると減衰する。これらの物理的性質から、マイクロ波等と比べてテラヘルツ波には局所性があり、また干渉しにく

⑵⑸　“Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020,” 2016.2.3, pp.2-3. Cisco Systems, Inc. website <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf>

⑵⑹　国際電気通信連合の無線通信部門（ITU-R）が定める移動通信（携帯電話）の規格に基づく通信網。具体的には、IMT-2000規格、IMT-Advanced規格などがあり、これらに基づく無線通信技術は、それぞれ第3世代移動通信（3G）、第4世代移動通信（4G）などと呼ばれている。

⑵⑺　米国電気電子学会（Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE）が定める無線LANの通信規格に基づく通信方式。

⑵⑻　現在利用されている携帯電話ネットワークの無線通信技術で最新のもの。2010年以降に普及が始まった。

⑵⑼　“IMT Vision: Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015.9, p.14. International Telecommunication Union website <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf>

⑶⑽　テラヘルツ波は、大気に含まれる水分（水蒸気）等に吸収される。

いと言える。このことは、マイクロ波帯とは異なり、テラヘルツ波帯では1人のユーザーが数十ギガヘルツ程度の広帯域を独占的に使用できることを意味し、超高速通信が可能となる[31]。

（iii）アンテナが小さい

アンテナの直径は、同等のアンテナ性能（アンテナ利得）を持つ場合、電波の波長に比例する（周波数に反比例）。60ギガヘルツ帯と比較して、テラヘルツ波の領域である300ギガヘルツ帯では、同じアンテナ利得を得られるアンテナの直径は1/5、面積では1/25となる。小さいアンテナほど設置が容易なため、システム設計上、非常に有利となる。

（3）電波資源の割当て

電磁波は、広く情報通信（無線通信、放送、光ファイバー通信等）の手段として用いられるだけでなく、様々な画像取得（可視光、X線、赤外線等）や照明の手段として用いられている。電磁波の中で、周波数が3,000ギガヘルツ（3テラヘルツ）以下の電磁波は、電波法（昭和25年法律第131号）により「電波」と定められ、その用途は国内のみならず国際的にも周波数帯ごとに割り当てて管理されている。電波には、波長の長いものから順に、長波、中波、短波、マイクロ波、ミリ波、サブミリ波等がある。中でも275ギガヘルツ以下[32]の周波数帯は全て特定の用途に割り当てられている。一方で、テラヘルツ波の領域である275ギガヘルツ以上の周波数帯（275～3,000ギガヘルツ）は、まだ特定の用途への割当てはなされていない。国際連合の専門機関である国際電気通信連合の無線通信部門（International Telecommunication Union Radiocommunications Sector: ITU-R）において、今後、割当て等の議論が進む予定である。

（4）国際標準化動向

ITU-Rでは3～4年に一度、世界無線通信会議（World Radio Conference: WRC）が開催され、無線通信規則（Radio Regulations: RR）[33]の改正等が議論される。2015年のWRC-15でもRRの改正に向けた議論が行われ、2019年のWRC-19における議題が正式決定された。WRC-19では、275～450ギガヘルツにおける陸上移動通信及び固定通信サービスに関して、周波数帯を特定する検討を行うことになり[34]、RRの周波数分配表を見直すための環境が整った。一方、民間の標準化については、IEEE802[35]において、300ギガヘルツ帯を用いた毎秒100ギガビット級の無線通信の標準化作業が、2017年末～2018年初頭の完了を目指して進められている。したがって、2020年までには実用化を目指した一通りの標準化作業がひとまず終了する見込みである。なお、ITU-R、IEEE802の活動では日本及びドイツが主導的な役割を果たしている。

⑶1 高い周波数帯ほど広い帯域を確保しやすい。また、帯域幅と通信速度は比例する。

⑶2 テラヘルツ帯（100～275ギガヘルツ）も一部含まれる。

⑶3 無線通信に関する国際的な取決め。ITU加盟国を法的に拘束する規則として位置付けられている。

⑶4 “RESOLUTION 767 (WRC-15): Studies towards an identification for use by administrations for land-mobile and fixed services applications operating in the frequency range 275-450 GHz,” 2015. International Telecommunication Union website <http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000C0016PDFE.pdf>

⑶5 IEEEにおいて1980年2月に設置された「802委員会」を指す。2014年5月、毎秒100ギガビット級無線通信の標準化作業を行うグループ（IEEE 802.15.3d）が設置された。なお、国際標準化機関であるITUがデジュール標準（公的規格）を策定するのに対し、民間団体であるIEEEはデファクト標準（事実上の規格）を策定する。

2　テラヘルツ波による高速無線通信の応用例

テラヘルツ波の特徴を生かし、毎秒100ギガビットのデータ転送量を持つ無線通信の研究開発が日本やドイツを中心に進展しており、次のような利用形態が想定されている。(1)と(3)～(5)はIEEE 802でも標準化の対象（ユースケース）として議論されている。

(1) キオスクダウンロード（タッチ・アンド・ゲット）

毎秒100ギガビットの伝送速度が実現すると、約0.5秒でDVD 1枚分のデータ（4.7ギガバイト）を伝送でき、コンビニエンスストア等に設置された端末機（キオスク端末）に1秒ほど携帯電話等をかざすだけでデータを取得できる。さらに、キオスク端末を鉄道駅や空港等の自動改札機に組み込むと、改札での「タッチ」動作の際に予約済の映画等の大容量データを手元の端末に取得（ゲット）できる（図17）。マイクロ波を用いたサービスは既に実用化され、コンサート後にコンビニエンスストアのキオスク端末に携帯電話をかざすとコンサートのビデオクリップが入手でき、長蛇の列ができている。また、ロンドンの空港では、キオスク端末から映画、雑誌、新聞のデータを1分程度で取得できるサービスの試験が実施された[36]。いずれも通信速度が遅くデータ量の制限があるが、将来の大容量化には高い需要が見込まれる。

図17　キオスク端末（左）、自動改札におけるタッチ・アンド・ゲット（右）のイメージ

（出典）株式会社富士通研究所提供。（左）; 情報通信研究機構作成。（右）

(2) インテリジェント手術室内の無線化

外科手術のIT化が進む中、手術室内には多数のIT機器（コンピュータ、データ端末、映像機器）が持ち込まれており、さらに術中MRIや手術ナビゲーションなどを行うインテリジェント手術室においては、機器間や外部指令室との間で遅延のないデータ共有が求められている。現状では各機器は主に有線で接続されているが、手術室内の配線は体液等で汚れ、その全てを術後に完全に清掃・滅菌することが極めて困難なため、感染予防の観点から大きな問題となっている。これらの配線を無線化すれば感染対策は可能となるが、高精細な映像の伝送には、遅延を1フレーム（約0.02秒）以内とするデータ伝送が必要なため、データの圧縮・解凍をせずに大容量データを直接伝送できるテラヘルツ無線への期待が大きい。

---

(36)　“Summer blockbusters now ready take off at Terminal 5,” 25 May, 2016. Heathrow Media Centre website <http://mediacentre.heathrow.com/pressrelease/details/81/Brand-News-22/6375>

（3）チップ間・ボード間通信の無線化

現在のコンピュータのCPU（中央処理装置）、メモリ、各種コントローラ等の各装置は有線接続されているが、これを光ファイバー通信並みに高速化することを目的としてチップ間・ボード間通信の無線化が検討されている。これが実現すると、高速化だけでなく、チップやボードのレイアウトを自由にでき、さらに物理的な配線がなくなるため軽量化にも大きく寄与する。

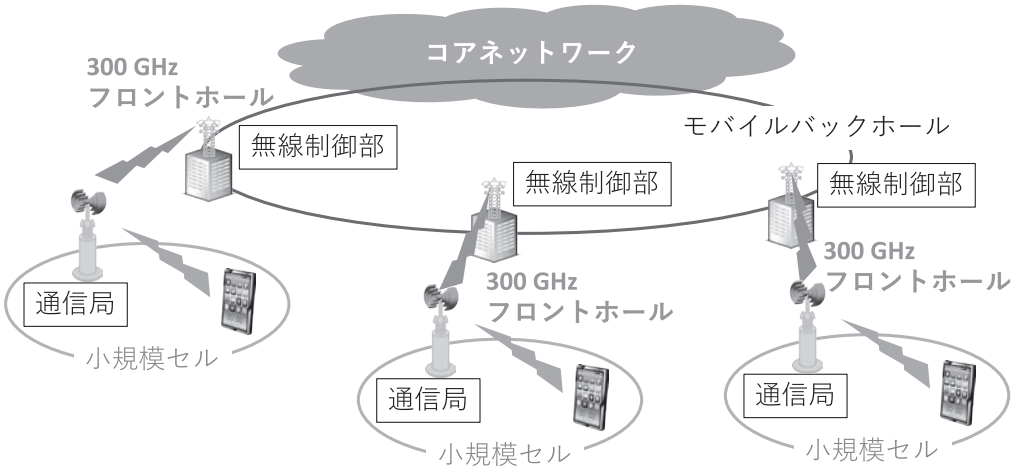
（4）データセンターの無線化（ラック間等通信の無線化）

データセンターやスーパーコンピュータでは、サーバが碁盤の目状に並べられ、サーバ間の配線も碁盤の目に引かれる。その配線数は膨大であり総延長距離も長大である。このため、配線全体の重量が大きく、空間も占有するため機器の冷却効率も悪化する。これを無線化すると、重量が軽くなり占有体積が減らせる上、冷却効率も向上する。また、最短距離でサーバ間を接続できるため、データ送受信にかかる遅延時間を最小化でき計算効率が向上する。さらに、有線接続では配線の接続方法を変更することは困難であるが、無線接続では計算の目的に合わせて接続方法を最適化することも可能になる。

（5）移動体通信のフロントホール回線の無線化

次世代の第5世代移動通信（5G）では、一つの通信局がカバーする範囲（セル）の直径を100メートル程度と小さくして、セル内で発生する多量のデータを収容することを目指している。この場合、東京都世田谷区をモデルとした試算[37]では、セル内で毎秒120ギガビット程度のデータが発生する。現状では、通信局と無線制御部との間（フロントホール）でこれだけのデータ伝送を行うのは無線では難しく、有線（光ファイバー）に頼る以外に方法はないが、セル直径が小さくなるためセル数が膨大になり、全てのセルを光ファイバーでつなごうとすると、費用や工事期間等で問題が生じる。これを補完する技術としてテラヘルツ波による大容量無線通信（300ギガヘルツ帯、毎秒約100ギガビット、数百メートル伝送）が提案されている（図18）。

図18　次世代携帯電話網における無線化したフロントホールの概念図



（注）モバイルバックホールは拠点施設（無線制御部）間を結びコアネットワークを構成する。フロントホールは、拠点施設（無線制御部）と末端施設（通信局）との間を結ぶ。
（出典）情報通信研究機構作成。

[37]　5Gの仕様を基に筆者が試算した。

3　テラヘルツ波を用いた高速無線通信の現状と課題

（1）国内の研究開発動向

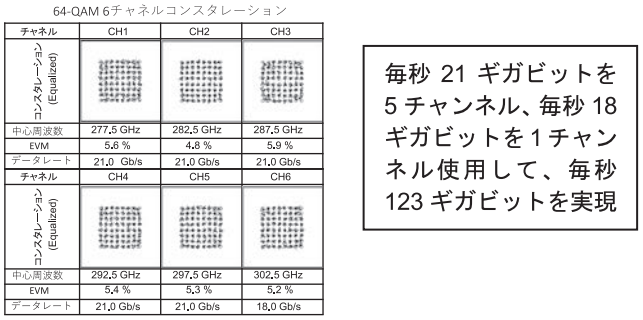
周波数120ギガヘルツ帯では、2008年の北京五輪で日本電信電話（NTT）とフジテレビジョンが高精細テレビ映像を圧縮せずに毎秒10ギガビットで伝送する検証実験を行った(38)。

周波数300ギガヘルツ帯では、総務省が「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」(39)を進めており、大手民間企業が参画して基盤技術の研究開発（デバイス開発～通信の検証）を進めている(40)。同研究開発では、2015年度に化合物半導体デバイスを用いた毎秒約20ギガビットの送受信機を開発し、キオスクダウンロードのデモ（検証）を行った（図19）。また、低価格化に向くシリコン回路の開発では毎秒123ギガビット相当の送信を実現した(41)（図20）。このように、実験室レベルでは既に毎秒100ギガビットを超える伝送が実現している。今後は製品化を進め、国内技術の優位性をイノベーション創出や戦略的技術につなげていくことになる。

図19　キオスクダウンロードのデモ

（出典）日本電信電話（NTT）作成。

図20　シリコン回路を用いた毎秒123ギガビット送信



（出典）広島大学大学院先端物質科学研究科・藤島実教授提供。

（2）米国の研究開発動向

米国では国防総省の国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）が中心となり、「テラヘルツ・エレクトロニクス（Terahertz Electronics）」(42)という研究プログラムで無線通信の基盤技術を開発し、2014年には1.03テラヘルツで動作する化合物半導体の増幅器の製作に成功した(43)。また、「毎秒100ギガビット無線バックボーン（100 Gb/s RF backbone）」(44)という研究プログラムでは、光ファイバー等の設備がない戦場での高速無線通信を目指している(45)（図21）。具体的には、空対空では200キロメートル、空対地では100キロメートルの範囲で、

---

(38)　日本電信電話・フジテレビジョン「北京オリンピックで非圧縮ハイビジョン映像のミリ波無線伝送トライアルを実施―世界に先駆けて120ギガヘルツ帯ミリ波無線伝送を放送現場で使用―」2008.8.8. <http://www.ntt.co.jp/news/news08/0808/080808a.html>

(39)　2011～2018年度の予定。総額約24億円。

(40)　総務省総合通信基盤局電波部電波政策課「電波資源拡大のための研究開発　研究開発課題便覧」2016.10, p.10. <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/28kenkyukaihatsu.pdf>

(41)　総務省の「「電波資源拡大のための研究開発」第9回成果発表会（平成28年12月2日開催）」にて報告された。

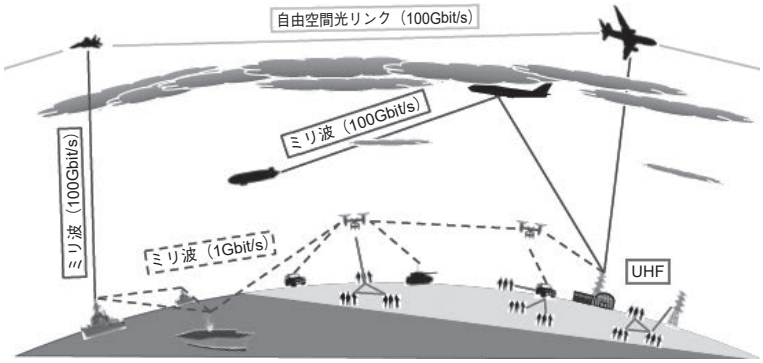
(42)　Dev Palmer, “THz Electronics.” DARPA website <http://www.darpa.mil/program/thz-electronics> 2009～2014年。第1期（18か月）のみで総額3700万ドル（約45億円）。なお、円換算は2015年の年平均為替レート1ドル121円によった（以下同様）。OECD, “Exchange rates.” <https://data.oecd.org/conversion/exchange-rates.htm>

(43)　“DARPA Circuit Achieves Speeds of 1 Trillion Cycles per Second, Earns Guinness World Record,” 2014.10.28. DARPA website <http://www.darpa.mil/news-events/2014-10-28> 化合物半導体の増幅器が動作する周波数は、従来0.85テラヘルツが上限であったが、この研究により初めて1.03テラヘルツでの動作が実現した。

(44)　2013～2017年で総額1830万ドル（約22億円）。

全天候における毎秒100ギガビット通信の実現を目指している。周波数は、プログラム開始時にはテラヘルツ帯も候補であったが、第1期終了後に80ギガヘルツ帯に決定した。

図21　米国のDARPAが想定する戦場における無線ネットワーク（100Gbps RF backbone）



（出典）筆者作成。

（3）欧州の研究開発動向

欧州では、欧州連合（EU）の第7次欧州研究開発フレームワーク計画（FP7）[46]、FPの後継プログラムであるホライズン2020（Horizon 2020）[47]、さらにはドイツなど各国で研究開発が進められている。アイブロー（iBROW）[48]と呼ばれるプロジェクトでは、毎秒数十ギガビットの短距離通信を行うシステムの研究開発を行っている。ドイツ連邦教育研究省（Bundesministerium für Bildung und Forschung: BMBF）のTERAPANプロジェクト[49]では、マイクロ波集積回路により毎秒100ギガビットの短距離通信を行う目標を掲げ、研究開発を行っている。ドイツ研究振興協会（Deutsche Forschungsgemeinschaft: DFG）は、要素技術からシステム研究まで毎秒100ギガビット通信に係る10以上のプロジェクト（2012～2018年）を進めている[50]。

（4）アジアの研究開発動向

中国、台湾、韓国では、主に大学を中心にデバイス技術の開発が進められているが、組織的な研究開発は実施されていない。シンガポール科学技術研究庁（Agency for Science, Technology and Research: A*STAR）では、2011年頃に小規模なプロジェクトが実施されていたが現在は継続されていない。しかしながら、高速無線通信ネットワークが実現すれば圧倒的な技術的優位性を獲得する可能性もあることから、今後の各国の研究開発状況を注視していく必要があろう。

---

(45) Ted Woodward, “100 Gb/s RF Backbone (100G).” DARPA website <http://www.darpa.mil/program/100-gb-s-rf-backbone>

(46) “FP7.” European Commission website <https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm>

(47) “HORIZON 2020.” European Commission website <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>

(48) “iBROW: Innovative ultra-BROadband ubiquitous Wireless communications through terahertz transceivers.” iBROW website <http://ibrow-project.eu/wp-content/uploads/2015/01/iBROW-Project-fact-sheet.pdf> ホライズン2020のプロジェクトであり、グラスゴー大学を中心にフィンランドのノキア（Nokia）社ほか11機関が参画している。2015～2017年で総額約400万ユーロ（約5.4億円）。なお、円換算は2015年の年平均為替レート1ユーロ134円によった（以下同様）。OECD, *op.cit.*(41)

(49) “In a Nutshell.” Project TERAPAN website <http://www.terapan.de/en/project-overview/in-a-nutshell.html>; “Ultra High-Speed Wireless Communication Links Using Terahertz Frequencies.” Project TERAPAN website <http://www.terapan.de/> フラウンフォファー応用研究促進協会応用固体物理学研究所（Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik）等が実施。2013～2016年で総額約150万ユーロ（約2.0億円）。

(50) “Project.” DFG SPP 1655- Wireless 100 Gb/s and beyond website <http://www.wireless100gb.de/project_en.html>

Ⅲ　テラヘルツ波による物質改変の可能性と照射影響

1　高強度テラヘルツパルスによる物質改変

冒頭で述べたように、テラヘルツ波には非破壊・非接触・非侵襲といった特徴がある。しかしながら、ここ数年の飛躍的な技術革新によって、瞬間的な強いテラヘルツ波（高強度テラヘルツパルス）を生成することが可能になっており、これを活用して、熱を使わずに物質を改変しようという試みが始まっている。テラヘルツ波には、高分子の構造を変化させる可能性があり、プラスチック、ゴム、セルロース、タンパク質などの高分子に高強度テラヘルツパルスを照射することにより、分子構造を変化させて分子の働きを人為的に制御できるようになる可能性がある。例えば、プラスチックの結晶化度を変えて硬さや透明性を変化させたり、タンパク質の構造を変えて生体への作用を変化させたりすることなどが想定される。

このような高強度テラヘルツパルスによって、物質構造を不可逆的に変化させた事例がいくつか報告されている。例えば、電気を通さない絶縁体の特性を示す二酸化バナジウム（VO_2）の薄膜上に金の電極を設け、高強度テラヘルツパルスを加えた結果、電極と電極の間の隙間で二酸化バナジウムが変質した様子が観測され、テラヘルツ波によって物質が変質することが示された[51]。

さらに興味深いのは、皮膚細胞に照射した事例である。皮膚細胞に数十分間高強度テラヘルツパルスを照射した例では、p53というタンパク質の発現が確認された[52]。このp53は、細胞活動を正常化し、腫瘍の形成を抑制する機能を持つとされており、将来的にテラヘルツ波の照射によってがんを抑制するような効果が期待される。ただし、このような現象が起こるメカニズムは全く分かっておらず、研究を継続していく必要がある。

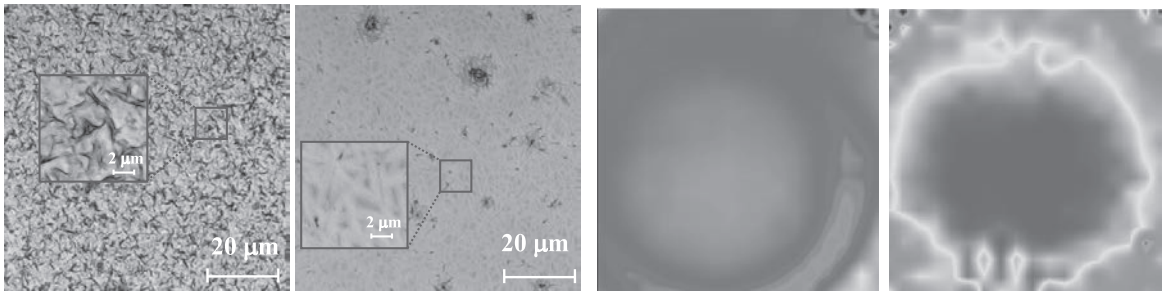
また、高分子（ポリマー）に高強度テラヘルツパルスを照射した場合には、さらにはっきりとした変化の様子が観測されている。図22は、高強度テラヘルツパルス照射によって生分解性ポリマー（ポリヒドロキシ酪酸）の結晶化度が高まることを示した実験結果である。顕微鏡で見ると高強度テラヘルツパルスの照射の有無による差が明瞭であり、照射したサンプルにおいて単結晶に似たニードル状（針状）の構造が折り重なって生成されている様子が確認されている（図22の顕微鏡像）。また、照射の有無による結晶化度を調べると、テラヘルツ波を照射した場所で結晶化度が向上していることも確認された（図22の結晶化度）。生分解性ポリマーは、結晶化度が向上すると耐熱性の向上につながるなどとされ、結晶化度はプラスチック材料の特性に関わる重要な指標である。この事例も、現象のメカニズムは明らかになっていないものの、高強度テラヘルツパルスを用いて結晶化の位置等を自由に制御し、新たな機能性材料を生み出すことや、これまで実現が困難であった極めて高い結晶性を持つプラスチックの実現などが期待される。

⑸1　Mengkun Liu et al., “Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial,” *Nature*, vol. 487 no.7407, July 2012, pp.345-348.

⑸2　Lyubov V. Titova et al., “Intense THz pulses cause H2AX phosphorylation and activate DNA damage response in human skin tissue,” *Biomedical Optics Express*, vol.4 issue 4, April 2013, p.566

図22　生分解性ポリマー（ポリヒドロキシ酪酸）に高強度テラヘルツパルスを照射した結果

顕微鏡像（右図に単結晶に似た針状の構造）　　結晶化度（右図中央部の結晶化度が高い）



テラヘルツ波の照射なし　テラヘルツ波の照射あり　テラヘルツ波の照射なし　テラヘルツ波の照射あり

（出典）Hiromichi Hoshina et al., “Polymer Morphological Change Induced by Terahertz Irradiation,” *Scientific Reports*, vol.6, no.27180, June 2016, pp.1-6.

2　テラヘルツ波の生体照射影響

以上のような高強度テラヘルツパルスの研究とは別に、将来のテラヘルツ無線通信の活用や普及を想定して、低強度のテラヘルツ波が人体に照射された場合の影響を調べる研究が総務省のプログラムで行われている。このプログラムは2016年末現在も実施中であるが、これまでのところ有意な影響は観測されていない。また、我々の身の回りに自然由来の熱放射テラヘルツ波がふんだんに存在することも併せて考えると、テラヘルツ波の照射による人体への影響は非常に小さいことが予想される。いずれにしても、将来の本格的な産業利用を視野に入れて、人体への影響が非常に小さいことの確証を得るためにさらなる研究と検証を継続して進めるべきであろう。

おわりに

電波と光の境界領域であるテラヘルツ波は、未開拓の周波数帯域と呼ばれていたが、2000年以降、技術が急速に発展し、盛んに研究開発や応用可能性の開拓がなされており、今なおその活用範囲は拡大し続けている。これまでにも想定されていた透過性を用いた非破壊検査への利用に加え、超高速の大容量無線通信、さらには高強度テラヘルツパルスによる物質改変の可能性など、研究開発の進展のスピードは従来の予想を超えており、新たなイノベーションの種となり得る新技術が開拓され続けている。それでもまだ、テラヘルツ波の領域は十分に開拓されておらず、研究開発の面でも、産業応用の面でも広大な開拓可能領域が広がっている。

本報告では、紙面の都合上、多くの研究開発について割愛せざるを得なかったが、より詳しい内容については下記の参考文献を参照されたい。これまでに開拓されてきた光の領域で有効に活用されていない周波数帯域はほとんどない。今後、取扱いのしやすさから考えると、テラヘルツ波の利用が身近になるのは時間の問題と考えられており、そのポイントとなる機器の開発は日々進展している。国際的な規格の検討スケジュールもほぼ決まり、それを契機として開発は一気に進むことになると予想される。テラヘルツ波が我々の新たな「目」や「声」となって実社会で活用される日は間もなくであろう。

本稿は、公益社団法人日本工学アカデミーへの委託調査の成果として執筆されたものである。

参考文献

・テラヘルツテクノロジーフォーラム編『テラヘルツ技術総覧』エヌジーティー, 2007.
・斗内政吉監修、テラヘルツテクノロジー動向調査委員会編『テラヘルツ技術』オーム社, 2006.
・深澤亮一『分析・センシングのためのテラヘルツ波技術』日刊工業新聞社, 2013.
・総務省委託『テラヘルツ波帯の有効利用に資する無線通信技術に関する調査検討報告書』テレコム先端技術研究支援センター, 2013.

（おおたに　ちこう）
（ほうさこ　いわお）