

テラヘルツ波技術の現状と展望

斗 内 政 吉^{*,**}

近年の光・ナノ技術の進歩により、テラヘルツ分野における技術革新が進んでいる。テラヘルツ時間領域分光法、テラヘルツ量子カスケードレーザー、サブテラヘルツ無線通信、サブテラヘルツ電気信号処理技術およびテラヘルツデバイスなどさまざまなテラヘルツ関連研究成果が広がっており、新しい科学技術分野として、また、新規産業の開拓を担うものとして、大いに期待されている。そのような中、具体的な将来展望を明らかにするため、テラヘルツ技術に関する動向調査が実施された。本稿では、同動向調査の結果を踏まえて、テラヘルツ波技術の現状と展望について解説し、次世代キーテクノロジー創製を目指した、テラヘルツ電磁波・テラヘルツフォトンクス・テラヘルツエレクトロニクス三研究分野の総合的推進を提案する。

Keywords : terahertz waves, terahertz photonics, terahertz electronics, time domain spectroscopy, THz sensing, THz imaging, THz wireless communications

1. ま え が き

テラヘルツ波工学は、近年の光・ナノ技術の発展により技術革新がもたらされ、新しい分野を開拓するものとして注目を集めている。テラヘルツ波は、電波天文や分析科学の分野において、広く研究・利用されてきたが、その対象は限定的なものであった。そのテラヘルツ波技術に、今、新しいセンシング機能が付加され、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなどさまざまな分野における応用が期待されている。また、情報通信分野においては、利用電磁波のますますの高周波化が進んでおり、数百 GHz の無線通信が実現される時期も遠くはない。さらに、テラヘルツデバイスの開発も急速に進展し、超高速信号処理技術も利用可能になりつつある。すなわち、テラヘルツ波技術は、基礎科学分野のみならず、新機能センシング・情報通信・エレクトロニクス分野において、新規産業の開拓に大きな役割を果たすことが期待され、次世代に不可欠な科学技術と位置づけることができる。

テラヘルツ帯(図 1)における技術革新は、①テラヘルツ電磁波、②テラヘルツフォトンクス、③テラヘルツエレクトロニクスの三つの主要分野で進んでいる。テラヘルツ電磁波分野においては、フェムト秒レーザーの発展によりテラヘルツ時間領域分光法¹⁾が開発され、フーリエ成分が数十 GHz から百 THz を超える超ブロードバンド極短電磁波パルスの発生と時間領域計測²⁾により、新しいテラヘルツ分光・イメージング技術³⁾が誕生してきた。フォトンクス

からのアプローチとして、フォトミキシングによる光・電磁波変換により、120 GHz 帯の無線通信技術が開発され⁴⁾、数十 Gbps の情報伝達を実現可能となっている⁵⁾。また、ナノ技術の進展により、高精度に制御された半導体量子井戸構造の作製が可能となり、量子カスケードレーザー (QCL) のテラヘルツ帯発振が実現された⁶⁾。現在では 1.9 THz 程度までの低周波化が進んでいる⁷⁾。エレクトロニクス研究分野では、化合物半導体集積回路による、MMIC や高速 AD 変換器の開発も進んでおり、また、超伝導単一磁束量子 (SFQ) 論理回路の開発により、120 GHz で動作するシフトレジスター⁸⁾ や 40 GHz × 4 = 160 Gbps の光パケットスイッチも実現可能である⁹⁾。今まさに、テラヘルツデジタル信号処理技術を利用できる環境が整い、無線・計測応用な

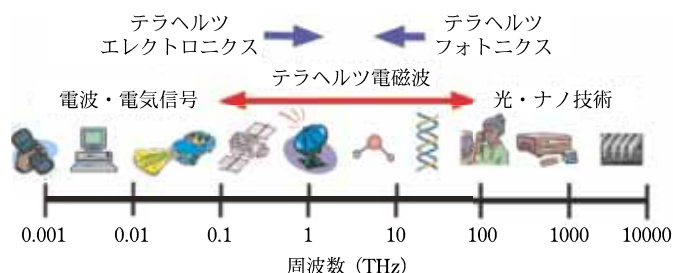


図 1 周波数によるさまざまな基礎・応用分野とテラヘルツ電磁波、テラヘルツフォトンクス、テラヘルツエレクトロニクスの関係。

* テラヘルツテクノロジー動向調査委員会 〒160-0022 東京都新宿区新宿 1-20-2 小池ビル (財)テレコム先端技術研究支援センター内。

分類番号 12.6, 7.1

** 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 〒565-0871 吹田市山田丘 2-6, e-mail: tonouchi@ile.osaka-u.ac.jp

Current status and future prospects of terahertz technology. Masayoshi TONOUCHI. *Research Committee on the Current Status and Future Prospect of Terahertz Technology (1-20-2 Shinjuku Shinjuku-ku, Tokyo 160-0022)

**Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamadaoka, Suita 565-0871)

さまざまな産業基盤が構築されつつある。

以上のように、さまざまな研究が、テラヘルツ帯の利用へと方向性を同じくしている。しかしながら、これまでそれらは、個々に進められてきており、早期の利活用実現のためには、テラヘルツ関連研究を統合的に推進し、産学官連携のもと、研究開発を加速させる必要がある。そのためには、テラヘルツ技術の現状と課題を整理し、将来展望を明らかにすることが急務である。その目的のため、2004年にテラヘルツテクノロジー動向調査委員会が設置され、同調査を実施した。本稿では、その調査報告から、テラヘルツ波工学の進展、基盤技術、応用に向けた取り組みと将来展望、ならびに解決すべき課題などについて、紙面の都合上ごく一部となってしまうが、抜粋して紹介させていただく。

2. テラヘルツ波工学の発展

1893年米国物理学会誌“The Physical Review”が創刊された。その第1巻第1ページは“A STUDY OF THE TRANSMISSION SPECTRA OF CERTAIN SUBSTANCES IN THE INFRA-RED”と題する論文¹⁰⁾から始まっている。赤外からミリ波にかけたテラヘルツ帯には、固体中の光学フォノン散乱・プラズマ周波数、イオン分極・配向分極などの誘電性、超伝導体エネルギーギャップ、分子・固体中の各種振動／分子間相互作用など興味深い物性が存在し、また、バイオ・生体・薬品などの分析には欠かせない領域でもあることから、サイエンスの宝庫として、長年研究されてきた。

国内で本格的なテラヘルツ帯分析研究が始まったのは、1952年、吉永らが遠赤外回折分光装置を開発したことによる¹¹⁾。その後フーリエ分光器などへと発展し、現在の分析技術が構築された。しかしながら、計測は容易なものではなく、さまざまな障害が現在でも存在する。例えば、計測において、テラヘルツ帯の低周波側では、測定時に液体ヘリウム冷却を必要とするボロメーターを用いるなど、困難を伴うことが多い。そのような中、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波の発生・検出法が開発された^{12,13)}。これは、フェムト秒レーザーにより、パルス幅の狭い電磁波パルス（広帯域電磁波）を発生させ、光パルスと連動させることで、時間領域の計測を可能としたもので、テラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）と呼ばれる。

THz-TDSは、クラマース・クローニッヒ変換が不要であり、かつ、計測が高速・簡便であることから、広く利用され始めた。また、テラヘルツ波をビームとして取り扱うことで、分光イメージングなどへの期待が高まり、テラヘルツ研究ブームを引き起こした。現在では、時間領域分光だけでなく、テラヘルツ帯高出力光源の開発により、さまざまな分析機器の開発、情報通信技術への融合、セキュリティ応用などさまざまな方向に展開を始めている。それに伴い、テラヘルツデバイスなど、基盤技術開発にも活気が出てきたところである。

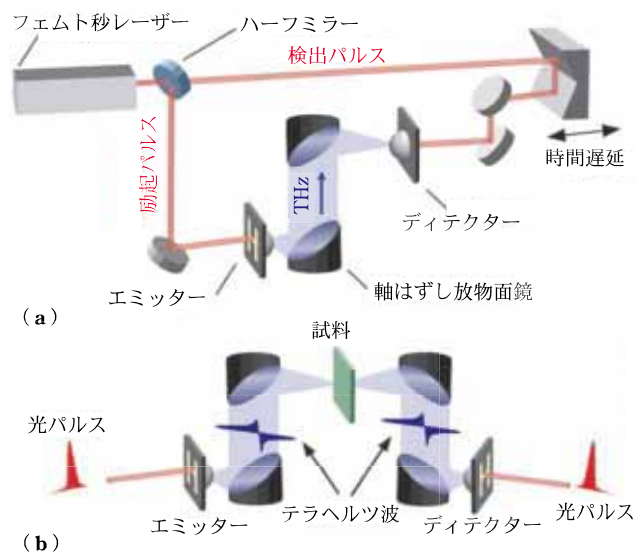


図2 (a)テラヘルツ時間領域分光システムの模式図。(b)テラヘルツイメージングの構成。

3. テラヘルツ基盤技術の現状

3.1 テラヘルツ分光・イメージング分析技術

テラヘルツ電磁波を用いた分光・イメージング技術が急速に進歩している。まず、注目すべき新技術は時間領域分光法である。詳細は、専門書・参考文献^{14~19)}を参照していただくとして、基本的な概念を簡単に説明する。

THz-TDSシステムの概念図を図2に示す。主要要素は、フェムト秒レーザー、テラヘルツ波発生要素子、テラヘルツ波検出要素子、時間遅延ステージである。テラヘルツ波発生光源として、半導体光伝導スイッチ、半導体基板、非線形光学結晶などが利用されている。テラヘルツ波発生機構はそれぞれ異なるが、フェムト秒レーザーが入射することで、テラヘルツ電磁パルスが放射され、空間を伝搬して、検出器に到達する。光が到達したときだけ動作する検出器には、分岐された検出パルスが導かれ、その光に時間遅延を与えることで、時間領域波形をとらえることができる。検出方法として、代表的には、光伝導スイッチおよび電気光学(EO)結晶の2通りが利用され、それぞれに特徴がある。

開発要素としては、光源の高出力化²⁰⁾、広帯域化²¹⁾、全反射分光(ATR)²¹⁾、1.5 μm フェムト秒レーザー利用²²⁾、ダイナミック分光システム開発²³⁾などがある。最近の成果の例として、光スイッチを用いた超広帯域テラヘルツ波の発生がある。図3に、厚さ30 μmのGaSe結晶を使った光整流による発生と電極ギャップ5 μmのダイポール型光伝導アンテナによる検出の組合せによって実現された電磁波特性を示す²⁴⁾。カギとなったのは、河野らによる検出器の光励起光源とTHz波を同じ方向から光スイッチに導くというアイデアである²⁵⁾。また、コンパクト性・可搬性・安定性

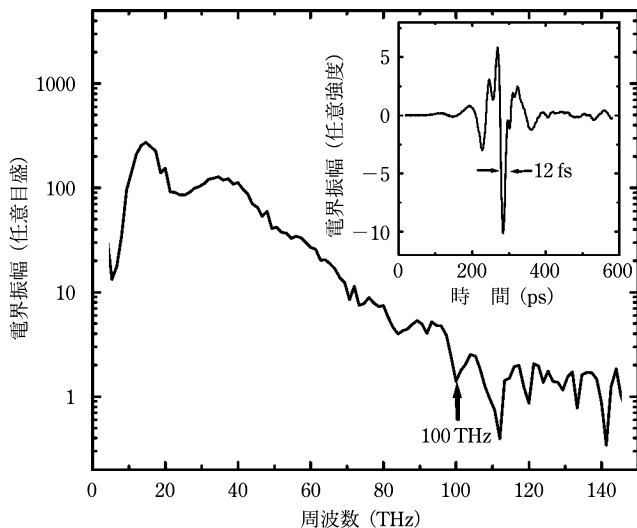


図 3 光伝導アンテナによる超広帯域テラヘルツ電磁波検出例。パルス幅 10 fs のチタンサファイアレーザーを光源として、厚さ $30\mu\text{m}$ の GaSe 結晶を使った光整流によりテラヘルツ波を発生し、電極ギャップ $5\mu\text{m}$ のダイポール型光伝導アンテナを用いて検出した例。挿入図は、時間領域波形で、半幅幅は約 12 fs を観測している。

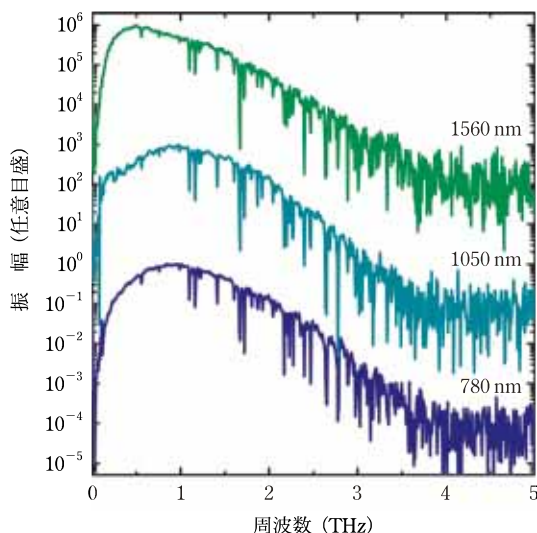


図 4 波長 780, 1050, 1560 nm のフェムト秒レーザーを用いて、p-InAs 基板表面からテラヘルツ波を発生し、低温成長 GaAs 光伝導スイッチにより測定した例。

などの観点から、 $1.5\mu\text{m}$ 帯フェムト秒ファイバーレーザーの利用が期待されている。図 4 に p-InAs 基板から放射されるテラヘルツ波スペクトルの励起波長依存性を示す。検出器励起用にも同じ波長を用いており、 $1.5\mu\text{m}$ 帯レーザーを用いて約 4 THz までの帯域を有する THz-TDS のシステム開発が可能であることを示している²⁶⁾。

水分を含む試料を評価するためには、透過型 TDS では、吸収が大きすぎるために困難である。その問題を解決する方法として、テラヘルツ時間領域全反射減衰分光 (THz-ATR) 法が開発された。テラヘルツエバネッセント波を用



図 5 THz-TDS システムを用いて観測した唐辛子・えびの透過イメージ。

いるもので、バイオ系試料の評価にブレークスルーを与えるものとして、開発が進められている。ATR を含めて、THz-TDS の詳細は本特集号で解説されている。

THz-TDS は分光法として有用であるのみならず、イメージング技術としても期待されている。図 2 (b) においてテラヘルツビームを走査することで、イメージング分光が可能であり、開発が精力的に進められている。開発要素には、高画質化、高速化、コンパクト化、高分解能化などがあげられる。図 5 に、THz-TDS イメージング装置による観測例を示す²⁷⁾。乾燥した唐辛子とえびの透過像で、内部の種など明瞭に観測されており、初期のものに比べて格段に進歩している。さらなる高分解能化のアプローチとしては、SPM (走査型プローブ顕微鏡) と融合させることで、ニアフィールド型 THz イメージングシステムの開発も精力的に取り組まれている^{28,29)}。

THz-TDS とは別に、テラヘルツ高出力光源の開発も進んでおり、分光・イメージングシステムへの応用が進められている。テラヘルツ波発生の機構としては、パラメトリック発生と差周波発生がある。

パラメトリック光源では、ニオブ酸リチウム結晶などの非線形結晶に光強度の強いパルス励起光を入射させ、光学活性フォノンとの相互作用により、テラヘルツ光とアイドラ光に分離される原理を用いている。最近開発された光注入型 THz 波パラメトリック発生器 (IS-TPG) の実験系を図 6 に示す³⁰⁾。これは、フーリエ限界の単色性を有する常温動作の広帯域波長可変 THz 波光源であり、ピーク出力も数百 mW (エネルギー出力: 1 nJ 以上) を有しており、今後種々の応用が期待される。また、最近では、マイクロチップ

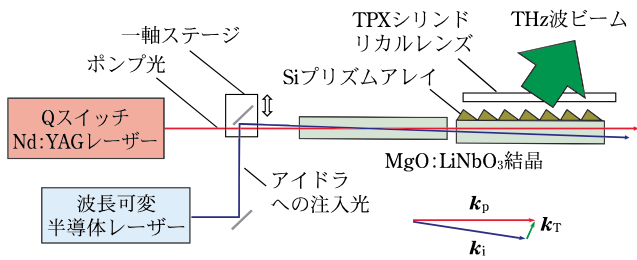


図 6 光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器のブロック図。

プレーザーとの組み合わせが提案されており、イメージング分析システムへの応用開発が急ピッチで進められている。TPGの詳細は本特集号に掲載されているので参照していただきたい。

差周波発生原理は、波長の少し異なる光源を非線形結晶に導入し、その二次の非線形効果を通して励起される差周波の項がテラヘルツ光源となるもので、最近では、(財)半導体研究所が、GaP半導体基板を用いて、高出力テラヘルツ光源の開発に成功している³¹⁾。フェムト秒レーザー光源を用いた場合、パルス自身の波長の広がりから、差周波に対応するテラヘルツ波の発生も可能であり、THz-TDS光源として広く用いられている。代表的なものに、ZnTe, GaSb, GaAs, GaP, DASTなどがある。テラヘルツ光源として、まだ探索的要素が大きく、新たな誘電体結晶・有機結晶光源が誕生する可能性は大きい。

3.2 テラヘルツ波フォトニクス・エレクトロニクス

テラヘルツ光源として、電子デバイスからのアプローチも精力的に進められている。NTTの石橋らが開発した単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)⁴⁾は、光応答がきわめて高速で、フォトミキシングにより高出力テラヘルツ波発生が可能となっている。UTP-PDとその応用については、本特集号で報告されている。

注目されているデバイスとして、テラヘルツ帯量子カスケードレーザーがある。図7に示すような複雑な量子井戸構造を作製し、ミニバンド間の遷移を利用するもので、緩和エネルギーが数meVと、テラヘルツ帯の発振が可能である⁶⁾。図8に2.12 THz発振している様子を示す⁷⁾。開発課題は、低しきい値化、発振の低周波化、高温動作化など

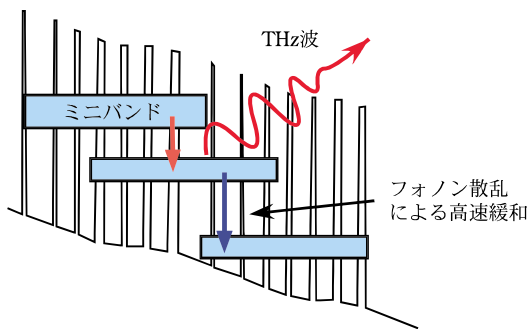


図 7 テラヘルツ量子カスケードレーザーの動作原理。

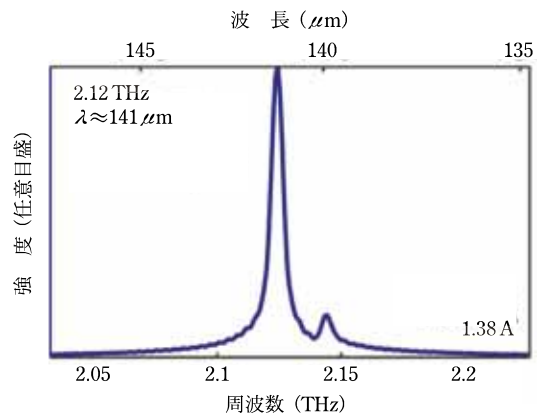


図 8 テラヘルツ量子カスケードレーザーからの 2.12 THz 発振の様子。

があげられ、欧米で精力的に研究されている。東北大学の 大谷らは短波長 QCL で世界をリードしている。一方、THz-QCL の開発は欧米が中心となっており、早急に取り組むべきである。

その他、共鳴トンネルダイオード(RTD)³²⁾、タンネットダイオード³³⁾、静電誘導トランジスタ³⁴⁾、二次元プラズモン共鳴型フォトミキサー³⁵⁾、p-Ge レーザー³⁶⁾ などさまざまなテラヘルツ波デバイスが研究されている。最近、浅田らは、RTD 発振の 3 倍波を取り出し、1.02 THz の光源開発に成功した(図 9)。これは、単体電子デバイスの室温発振としては、最高周波数である。GaInAs/AlAs 量子井戸を用いた RTD に、微細スロットアンテナを集積化したもので、今後の展開が期待されている。また、平川らは光励起のプロト振動を観測しており³⁷⁾、今後のテラヘルツ発振デバイスへの展開が期待される。

一方、テラヘルツ波の検出技術としては、時間領域用として、低温成長 GaAs, EO 効果などが用いられており、材料探索を含んだ高感度・広帯域化が課題となっている。また、非時間領域に対しては、さまざまなデバイスがある中、

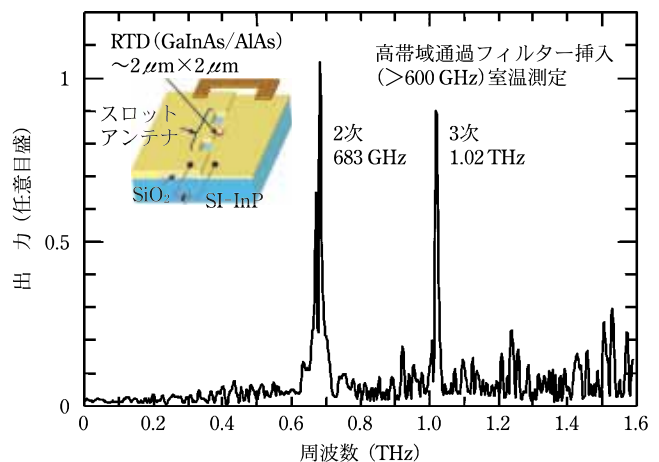


図 9 GaInAs/AlAs 構造共鳴トンネルダイオードによる発振。600 GHz 以上の高周波通過フィルターを入れており、二次の 683 GHz および三次の 1.02 THz の発振が観測されている。

ポロメーター、焦電素子、超伝導検出器、ならびにテラヘルツ帯単一光子検出器などが重要なデバイスである。また、テラヘルツカメラの開発も急ピッチで進んでいるが、民生用としては、わが国の研究開発は遅れており、早急な対応が必要である。

そのような中、究極の検出器として、THz フォトンカウンティング装置の開発がある³⁸⁾。単一電子トランジスタを用いた量子ドット型検出器で、波長100~200 μm 程度の THz 電磁波に対して、単一光子検出が実現されている。テラヘルツ科学の探求ならびにそれを支える技術開発につながる重要な成果として、その実用化が期待される。同検出器についても、本特集号で解説されている。

3.3 テラヘルツ周辺技術

光テラヘルツ波変換用光源に用いられるレーザーも重要な開発要素である。フェムト秒レーザーとしては、コンパクト・高安定性の観点から、ファイバーレーザーの性能が急速に進歩しており、テラヘルツ波発生用として期待されている。また、チタンサファイア系フェムト秒レーザーでは、短パルス化が研究課題であり、時間領域法における超広帯域化の基盤技術となっている。

テラヘルツ無線やテラヘルツ計測応用の基盤技術として、テラヘルツ信号処理デバイス開発が重要である。InP 系化合物半導体では、遮断周波数が 500 GHz を超え、その集積化も試みられており、さまざまな高速回路が試作されている³⁹⁾。図 10 に 120 GHz 無線通信用 MMIC の概観を示す⁴⁰⁾。現在、無線開発では、フォトミキシング技術が用いられており、全電気テラヘルツ無線実現に向けた開発が進められている。

超高速集積回路の発熱問題を解決するものとして、超伝導単一磁束量子論理回路の開発もキューピッチで進められている。図 11 に動作周波数 120 GHz を実現した 8 ビットシフトレジスタの概観を示す⁸⁾。Nb 系ジョセフソン接合 338 個を用いている。そのほかにも、7220 個の接合を用いたマイクロプロセッサは 21 GHz での完全動作が達成されているなど⁴¹⁾、サブテラヘルツ領域の電気信号処理・計測技術・無線システムなどへの応用が展開可能となってきた。

4. テラヘルツ波応用研究開発の現状

4.1 応用が見込まれる分野

テラヘルツ技術が切り拓く応用分野として、主要 3 分野、テラヘルツ波・テラヘルツフォトニクス・テラヘルツエレクトロニクスの融合により、情報通信・生命・医療・安全・健康・産業・環境・宇宙・科学など幅広い展開が期待され、主な応用は、分光分析分野と情報通信分野に大別できる。

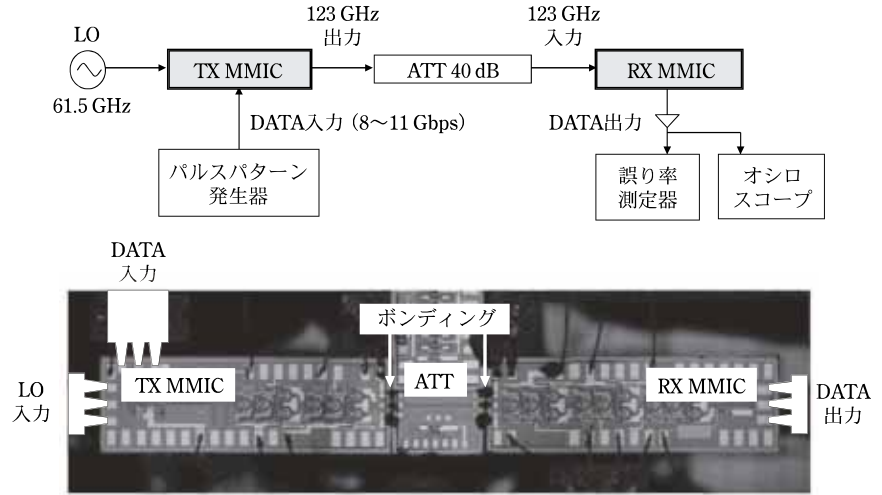


図 10 120GHz帯無線リンク用 MMIC 写真と 120GHz帯受信送信 MMIC による 10GbE 無線リンク伝送実験のシステムブロック図。

分析応用の観点から、テラヘルツ波は、さまざまな物質を透過し、X 線・レーザー光などと比較して安全であり、物質固有の透過・吸収・反射特性（指紋スペクトル）を示すなど、さまざまな利点を有している。分析分野では、生体・高分子・電子材料などさまざまな物質の分光分析、ならびにイメージング技術と組み合わせた医療診断・隠匿物検査・バイオメトリクスなどへの応用が研究されている。IT 分野では、今後ますます発展が要望されるユビキタスネットワーク社会における主要技術として、無線技術や周辺の高速 MMIC や論理回路などが不可欠な存在となる。以下それぞれの分野における応用研究の現状と展望を紹介する。

4.2 分光分析・イメージング応用

THz-TDS の実現により、テラヘルツ帯における複素屈折率・複素誘電率・複素導電率などが容易に計測・評価できるようになり、さまざまな物質におけるテラヘルツ帯固有の物性が明らかになりつつある^{42~44)}。最近では、米英国とわが国において、相次いで THz-TDS システム、テラヘルツ分光装置、イメージングシステムの商品化が始まっており、ますます普及する環境が整いつつある。

分析応用として、まず電子材料・工業材料評価への応用があげられる。例として、図 12 に、THz-TDS とイメージングを組み合わせたシステムによるイオン注入量の違い

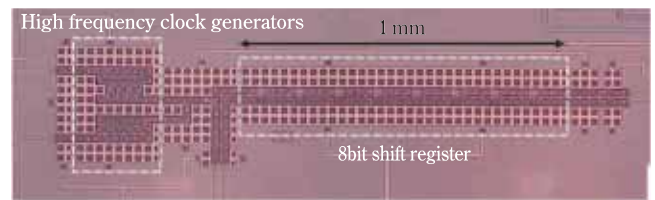


図 11 120GHz動作を実現した超伝導単一磁束量子論理回路による 8 ビットシフトレジスタ。128 個のジョセフソン接合で構成され、消費電力は 41 μW。

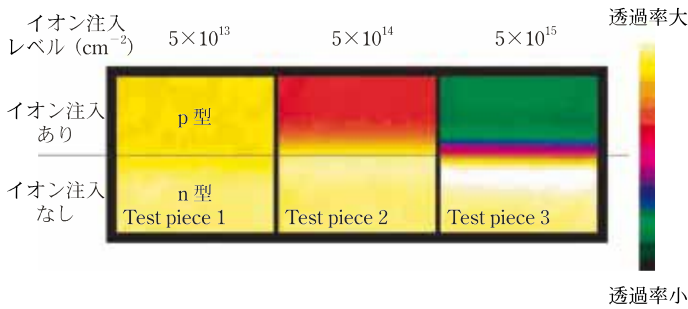


図 12 n型シリコンウエハー (矩形) の右半分にはボロンイオンを注入したウエハー切片的のテラヘルツ透過イメージ。

をマッピングした結果を示す¹⁷⁾。半導体の電子密度、移動度、導電率、キャリア寿命などを非接触で評価することができ⁴⁵⁾、ウエハー評価装置への応用が期待される。さまざまな電子材料の評価においても新しい物性が次々と明らかになっている。また、工業用材料の例として、ナノコンポジットなどの分子間相互作用の研究に用いることができ、波長を超えたナノ材料の分析にも威力が発揮されることが明らかとなっている。

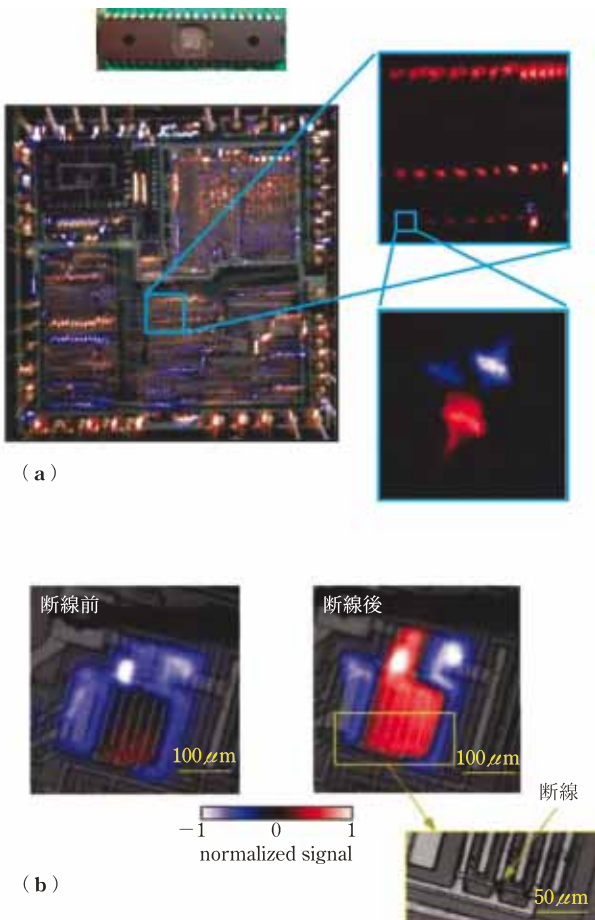


図 13 (a)レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) によるマイクロプロセッサ (MPU 6502) の観測例。分解能は約 $3\mu\text{m}$ 。(b) 回路の一部を断線したときのオペアンプの LTEM 像。断線によりイメージが大きく異なることが見て取れる。

その他、産業分析応用が期待される例として、レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡 (LTEM) を用いた LSI 不良箇所特定装置がある^{46,47)}。LTEM はフェムト秒照射によりさまざまな物質からテラヘルツ波が放射されることを利用して、物質のテラヘルツ波放射イメージングを得るもので、分解能は光のビーム径で決まるため、数百 nm の構造体まで評価できることが期待される。この LTEM を用いて、例えば LSI の良品と不良品のイメージを比べることで、TEM 分析時に必要な不良箇所の特定などを行うことができると期待されている。図 13 に LSI (MPU 6502) の LTEM イメージを示す。現在の分解能は、約 $3\mu\text{m}$ である。図 13 には、オペアンプの一部を意図的に断線させたときの LTEM イメージを示す。明らかな違いが観測されており、今後の展開が期待される。

次いで、医療・バイオ・医薬品分析などへの応用も積極的に研究されている^{48,49)}。テラヘルツ帯の情報には水素結合状態や分子間相互作用が含まれることが指摘されており、さまざまな分子の識別に利用できる可能性がある。例えば DNA の一本鎖/二本鎖の判別ができることが報告されており、現在では DNA チップへの応用研究が進められている。また、生細胞の水分量にも敏感であることから、がん細胞イメージングへの応用も広く研究されている。特に、皮膚がん検査への有用性が議論されており、将来的にはがん細胞のオンサイト診断などへの応用も期待されている。また、アミノ酸、糖、塩基など生体関連物質はテラヘルツ帯で特徴的な吸収を示すことが知られており、医薬品分析応用も期待されている。図 14 に医薬品バルビタールを加熱した場合の、テラヘルツ帯吸収係数の変化を示す⁵⁰⁾。この違いは、成分には変化はなく、結晶多形によるもので、それらの同定/定量に用いることができる。すなわち、これまでの分析ツールでは困難な多形分析が可能であり、また、異物検査や錠剤のコーティング評価などさまざまな応

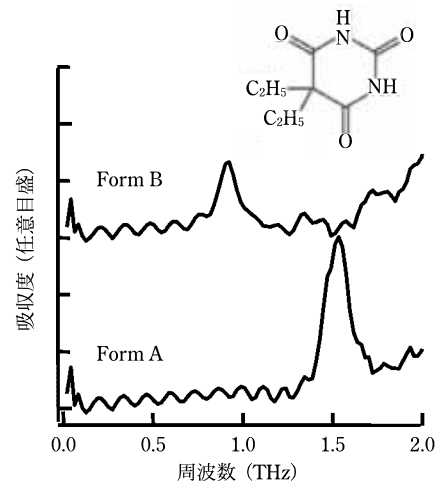


図 14 医薬品バルビタールの結晶多形によるテラヘルツ吸収スペクトルの変化。Form A は室温にてアセトン/水から再結晶したもの。Form B は、160 °C にて 30 分加熱処理したもの。中赤外スペクトルにはほとんど変化が見られていない。

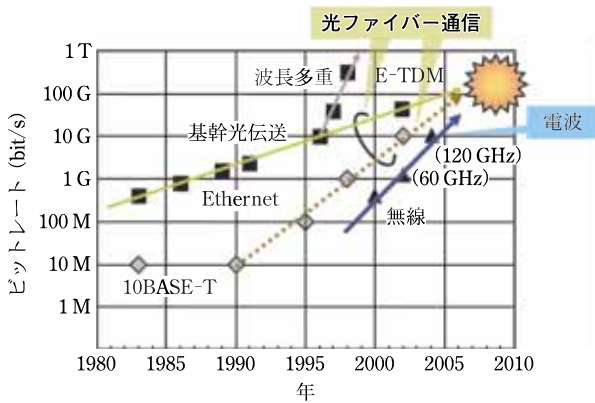


図 15 各種通信におけるビットレートの進展.

用研究も進められている。

テラヘルツ波は、安全・安心社会へのキーテクノロジーとしても不可欠である。まず、本特集号でも報告されているように、禁止薬物・危険物などの非破壊・非侵襲検査応用が期待されている⁵¹⁾。封筒内に入れられたコカインなどの検出が可能であり、郵便物検査の開発などが取り組まれている。また、水関連検査にも威力を発揮し、食品や農作物の管理にも応用が検討されている⁵²⁾。欧米においては、THz-TDS やテラヘルツカメラによる、空港での隠匿物検査、屋外での危険物探知、個人照合技術の開発も精力的に行われている。

THz-QCL の応用としては、短距離通信やイメージングシステムへの展開が期待されるが、身近な応用として、ガス分析なども、今後の環境計測技術として、重要なものとなるであろう。ライス大の河野らは、THz-QCL を用いて半導体の磁気共鳴物性を明らかにしており、研究用光源としても有用である⁵³⁾。

4.3 情報通信応用

より高速で、より大容量で、より自由な情報通信環境実現に向けて多くの努力がなされている。無線 LAN は UWB (Ultra-Wide Band) や 60 GHz 無線などにより 1 Gbps の通信速度が実現されようとしており、10 Gbps 無線開発に向けた研究開発も開始されている。図 15 に示すように、将来、光ファイバー基幹ネットワークと無線通信システムのシームレスに連結されるような環境へと向かいつつあり、新しい応用分野 (図 16) を開拓するものと期待される。例えば、ファイバー敷設が困難なビル間通信、災害時の移動大容量無線、遠隔医療用高画質伝送

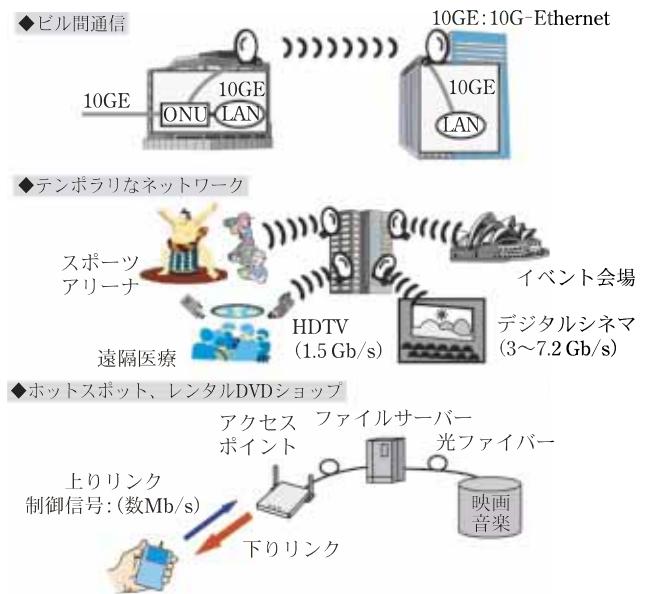


図 16 ミリ波固定無線、ストレージエリアネットワークなどへの応用展開例.

用無線通信、映画などのダウンロード用ホットスポットなどの実用化が望まれる⁵⁾。テラヘルツ無線開発に障害となるのは、水蒸気による電磁波の吸収である。図 17 に示すように 400 GHz から 10 THz 程度までは、大きな吸収帯があり、中長距離無線には適さない。現在までに、UTC-PD とフォトミキシング技術を用いて、120 GHz 帯無線のフィールド実験 (図 18 (a)) を始めており、10 Gbps の無線開発が進んでいる。図 18 (b) に示すように、アイパターンから 10 Gbps 無線通信が可能であることが示されている。屋外の短距離の無線では、300 GHz 程度までが現実的な無線通信帯であり、40 Gbps 程度までは実現される可能性が高い。一方、屋内の短距離無線などでは、THz-QCL の出現により、

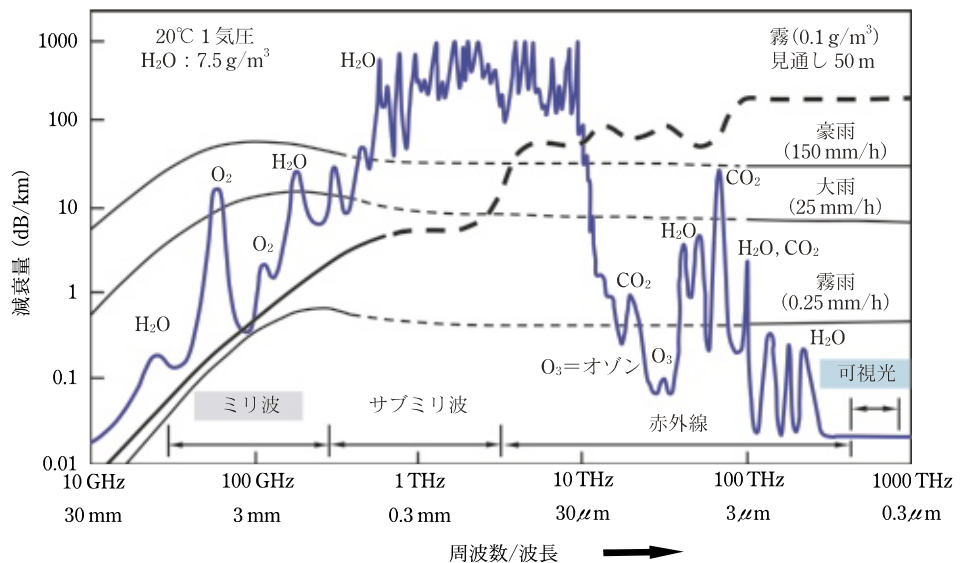


図 17 電磁波の伝搬時の大気減衰の様子.

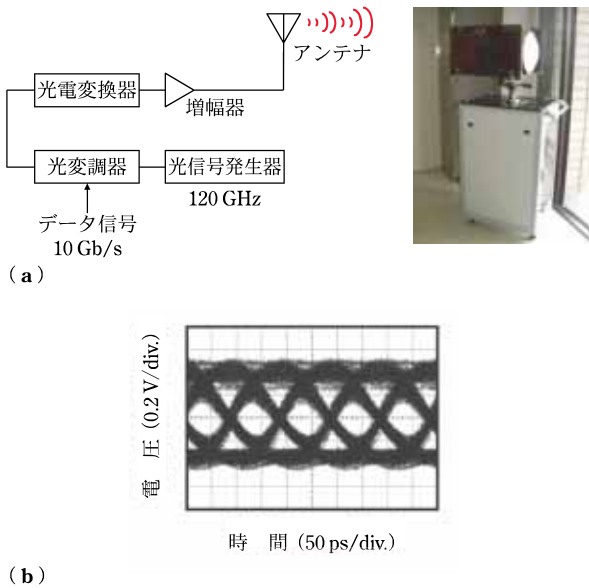


図 18 (a) 120GHz帯無線送信機の構成と外観。(b) アイパターン。10Gbit/sの伝送が実現されている。

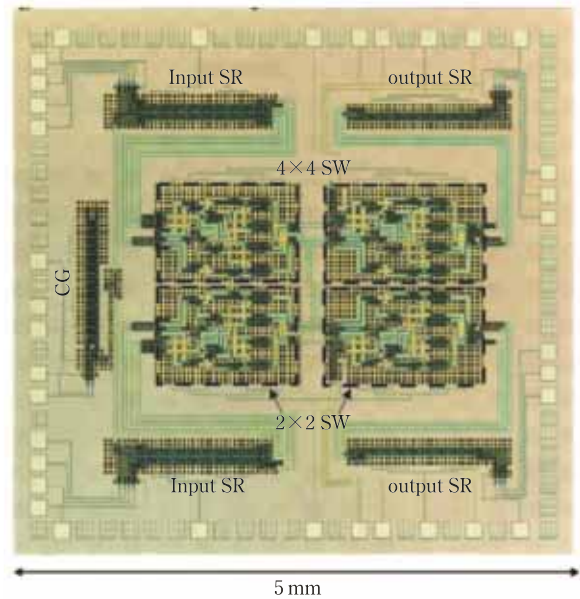


図 20 SFQ回路による 40GHz x 4光パケットスイッチ。

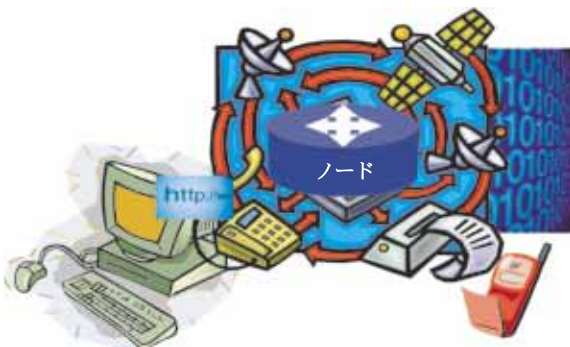


図 19 インターネットとノードの関係。

あまり制限を受けずに利用可能範囲が広がる可能性がある。

光通信の分野では、10 Gbps の Ethernet が有線系 LAN として普及が始まっており、それらの進展に伴って、基幹ネットワークでは、毎秒数百 Gb の伝送量実現を目指して、開発が進んでいる。近い将来、基幹ネットワークノードやサーバーにおける大容量情報処理が不可欠であり(図 19, そのためにはテラヘルツデバイス・集積回路の実現が重要なカギを握る。現在では、そのような開発に向けて、化合物、半導体集積回路による高速 ADC⁵⁴⁾ や、SFQ 回路による光パケットスイッチ⁹⁾ の開発が進められている。

図 20 に 40 GHz x 4 = 160 Gbps の SFQ 光パケットスイッチの概観を示す。SFQ による光パケットスイッチは半導体を用いるより低消費電力であり、システムとしての大きさも気分けてコンパクトに仕上げることができる。また、半導体論理回路では対応が難しいとされる 160 GHz x 1 の開発も視野に入ってきた。最終的にはそのような超伝導デバイスと化合物半導体デバイスのハイブリッド化システム(図 21)が、次世代の光情報通信を支えるものとなるであろう。

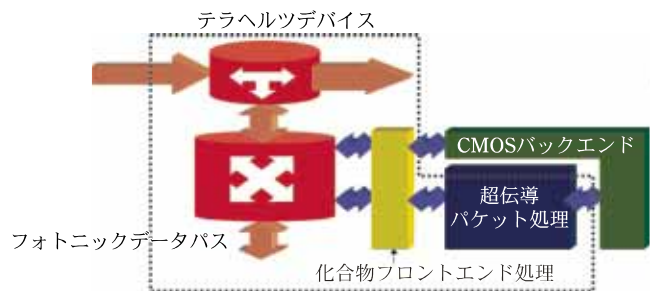


図 21 テラヘルツデバイスを用いた大容量ノードのイメージ。

4.4 その他基礎科学応用やシナジー効果など

古くからテラヘルツ研究をけん引してきた分野として、宇宙・天文研究におけるテラヘルツ技術がある。ALMA 計画におけるテラヘルツ検出器の開発は、世界的課題であり、着々と進められている。SMILES プロジェクトにおける衛星からのテラヘルツ帯地球環境計測、ならびに ASFRO-F におけるテラヘルツイメージングアレーの開発など、大きなプロジェクトが推進されている。天文・宇宙研究におけるテラヘルツ応用は、国内では産業分野とは認識されていないが、世界的に見ると、すでに巨大なマーケットが存在する産業基盤である。また、テラヘルツ情報通信との融合による新しい研究開発分野の創成も期待され、センシングと無線を組み合わせたバイオメトリクス技術や、センサーネットワークの新しい構築など分野融合によるシナジー効果も生まれるであろう。

5. 展望と課題

5.1 テラヘルツ技術が拓く未来像

テラヘルツ技術が拓く応用はきわめて広範囲であり、さまざまな学問のうえに成り立つ。図 22 に展望のイメージを

まとめる。重要な点は、テラヘルツ波技術は、ナノ技術と同じように、さまざまな分野を横断的に結ぶ技術であり、さまざまな分野で新しい科学と産業を創製すると期待される。例として、分光分析技術が展開すると期待される分野のロードマップを図 23 に示す。応用分野は、研究機器・セキュリティ・バイオメディカル・農業／食品・半導体産業・環境応用などの分野で、それぞれのアプリケーションに適した機器を開発することで、新しい産業応用が開拓される。ここでは割愛するが、同じように、情報通信分野においても、無線通信や計測機器などの開発に関するロードマップも策定することができる。これらの実現のためには、デバイス開発など基盤技術の進展が必要である。

5.2 取り組むべき課題

テラヘルツ産業を展開するに当たっては、さまざまな研

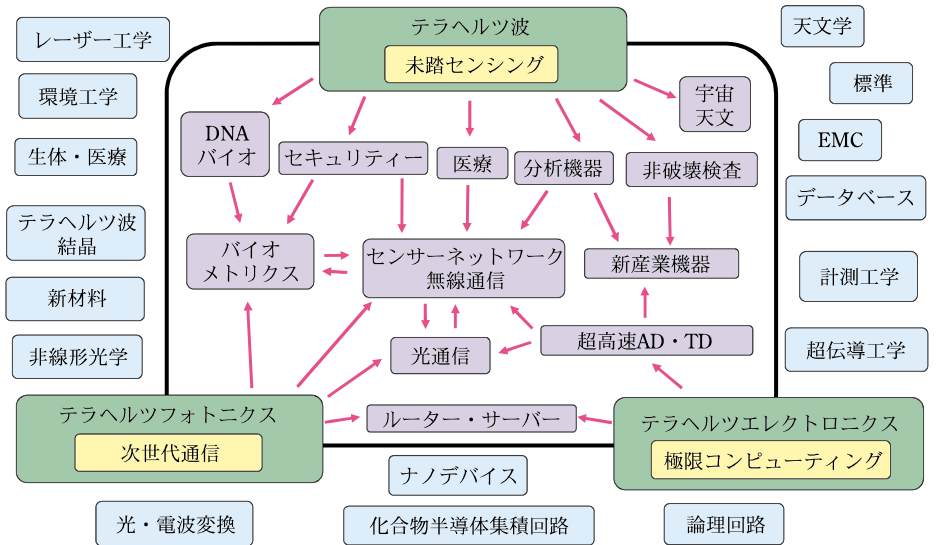


図 22 テラヘルツテクノロジーが目指すもの。

究課題が存在する。一例として、CW 光源に関する周波数と各種デバイスの出力をまとめたものを図 24 に示す。電氣的発生では、低周波から高周波に向かって周波数の -2 乗に比例し減少し、光デバイスでは、高周波から低周波に向

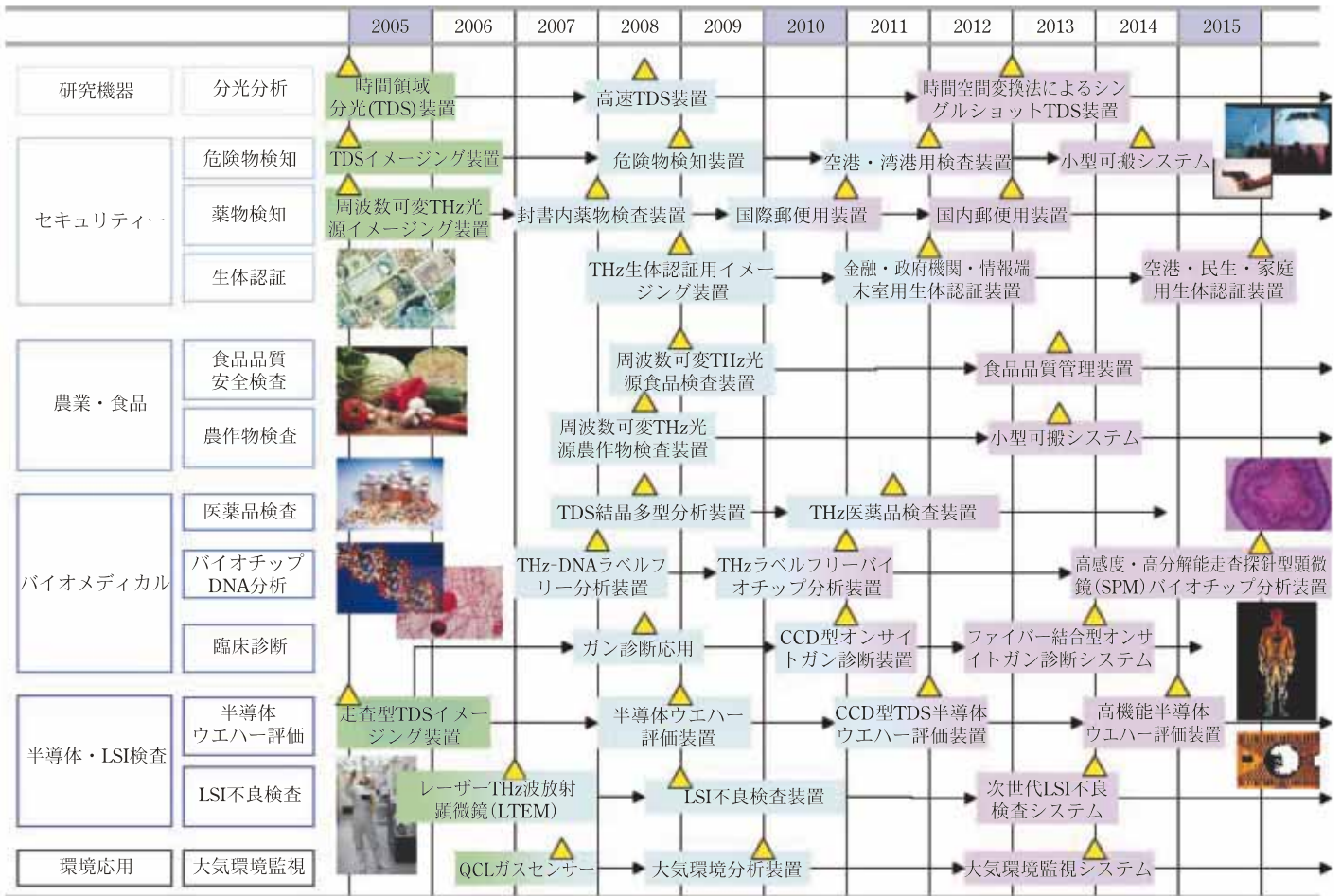


図 23 テラヘルツ分光・イメージング応用技術のロードマップイメージ。

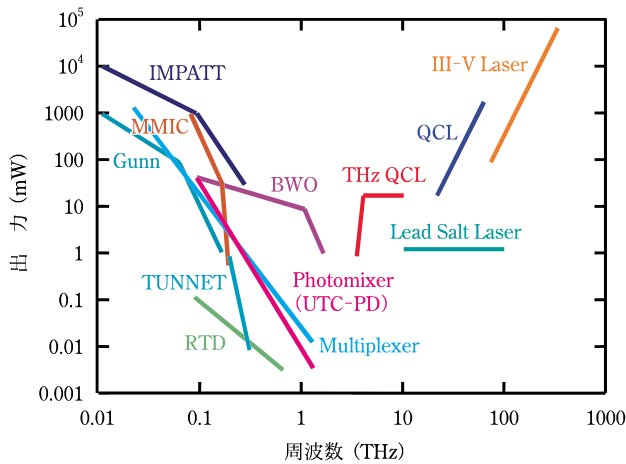


図 24 テラヘルツ帯 CW光源の出力。

かって同様に、周波数の2乗に比例して減少しており、特に0.5~30 THz帯域の高周波デバイスの開発が重要である。一方、テラヘルツ帯の計測機器の開発は、国内ではほとんど実施されていないことから、テラヘルツ波工学の発展には、計測機器開発への投資が欠かせない。また、通信応用やセンシング・セキュリティー応用にはテラヘルツ電磁環境両立性 (EMC) 研究や標準化が不可欠であり、早期の着手が望まれる。さらに、テラヘルツ帯における分子間相互作用など、これまで明らかにされていない物理現象に関する情報が秘められており、応用展開に向けてさまざまな物質のテラヘルツ物性データベースを構築することも必要不可欠である。その他、重要な課題としては、高感度テラヘルツ検出デバイス・テラヘルツカメラなどの開発、量子カスケードレーザーのチューナブル化・高出力化・低しきい値化・高温動作化、集積回路の高密度・低消費電力化、などがあげられる。各応用分野における重要課題の具体例を表1に紹介する。

以上のような課題の解決により、ロードマップに従った研究開発も可能となり、加えて、さまざまなシナジー効果から、新しい応用の誕生も大いに期待される。欧米に比べて進んでいる研究課題も多く、また、テラヘルツ波・テラヘルツフォトニクス・テラヘルツエレクトロニクス分野を総合的に推進するアイディアは日本独自のものであり、世界をリードする研究分野を構築できる環境にある。しかしながら、テラヘルツ研究分野は未成熟な分野でもあり、探索的・挑戦的要素も多く含むことから、基礎科学・基盤技術育成と応用分野開拓のため、産学官が協調して研究開発プロジェクトを進めることが重要である。

6. む す び

テラヘルツテクノロジーの新しい枠組みとそれに基づく展望を紹介した。テラヘルツ波工学、テラヘルツフォトニクス、テラヘルツエレクトロニクスの3分野が融合することによる、情報通信・生命・医療・安全・健康・産業・環

テラヘルツ波技術の現状と展望 (斗内)

表 1 取り組むべき課題例

分野	課題
情報通信	テラヘルツ帯無線・光通信, 超高速情報処理システム, テラヘルツ IT デバイス, 高周波計測機器, テラヘルツセンサー・カメラ, センサーネットワーク, バイオメトリクス, 衛星間通信, 移動無線通信システム, 器機 EMC
バイオ・生体・医療・薬品	ガン診断・イムノアッセイ・結晶多形検査など各種専用分析・計測機器, バイオ・生体・医薬品データベース, 分子構造解析, 医療現場オンサイトイメージング分析システム, EMC, 医療応用のためのテラヘルツ-FEL
セキュリティー・環境・社会基盤	危険物・郵便物検査システム, セキュリティー関連物質データベース, テラヘルツセンサー・カメラ, バイオメトリクス, 環境分析システムならびに環境物質データベース, 衝突防止車載センサー・道路環境モニタリングなどの交通安全技術, 車載 IT 基地局, 災害時の移動無線通信システム, QCL を用いたガス分析技術
産業応用・標準	産業応用分析・イメージング装置, テラヘルツカメラ, ナノ工業材料分析装置, 半導体・電子材料評価装置, LSI 不良解析システム, 農作物育成管理システム, 食品検査・管理機器開発, 食品・植物関連データベース, パワー・周波数など各種テラヘルツ標準, EMC
基礎科学・宇宙	高機能テラヘルツ分光イメージング装置, テラヘルツデバイス, 高機能テラヘルツ-FEL 開発, 量子雑音級テラヘルツセンサー・イメージャー, テラヘルツ局発振器, 分子構造解析応用, 探索的応用研究, 各種データベース

境・宇宙・科学など幅広い分野での展開が期待され、テラヘルツ波技術は、重点研究分野に対して、横断的に展開される基盤技術であり、次世代のキーテクノロジーといえる。さまざまな分野における新産業実現に向けた課題の解決にあたり、分野にとらわれないボーダレスな取り組みが必要であることから、さまざまな関係者の横断的な連携のもと、産学官による効果的な研究開発プロジェクトが推進されることが重要である。

謝 辞

本解説は、テラヘルツ動向調査委員会が取りまとめた調査報告書から概要を抜粋したのもので、60名を超える調査委員会メンバー、(財)テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) の皆様、ならびに総務省情報通信政策局技術政策課・研究推進室の方々に、大変ご尽力いただいた。また、本稿を作成するにあたり、東京工業大学浅田教授、名古屋大学藤巻・川瀬教授、大阪大学芦田助教授、静岡大学廣本教授、NEC 萬博士、NICT 寶迫博士、栃木ニコン深澤博士、東レリサーチセンター熊沢博士、NTT 永妻博士、MIT Qing Hu 教授をはじめ多くの方に、図面をご提供していただくなどご協力いただき、また、村上博成助教授をはじめ当研究室スタッフ・学生諸君にも日ごろよりさまざまにサポートしていただいている。ここに記して謝意を表

する。

文 献

- 1) D. H. Auston, K. P. Cheung and P. R. Smith : Appl. Phys. Lett. **45** 713 (1984).
- 2) C. Kubler, R. Huber, S. Tubel and A. Leitenstorfer : Appl. Phys. Lett. **85** 3360 (2004).
- 3) B. B. Hu and M. C. Nuss : Opt. Lett. **20** 1716 (1995).
- 4) 石橋忠夫, 伊藤 弘 : 応用物理 **70** 1304 (2001).
- 5) 永妻忠夫, 枚田明彦 : NTT 技術ジャーナル **9** 36 (2004).
- 6) R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere[†], E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti and F. Rossi : Nature **417** 156 (2002).
- 7) B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu and J. L. Reno : Electron. Lett. **40** 431 (2004).
- 8) H. Akaike, T. Yamada, A. Fujimaki, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, Y. Kitagawa and M. Hidaka : submitted to Supercond. Sci. & Technol.
- 9) S. Yorozu, Y. Hashimoto, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki and N. Yoshikawa : Proc. IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2004) p. 20.
- 10) E. F. Nicols : Phys. Rev. **1** 1 (1893).
- 11) H. Yoshinaga, S. Fujita, S. Minami, A. Mitsuishi, R. A. Oetjen and Y. Yamada : J. Opt. Soc. Am. **48** 315 (1958).
- 12) P. R. Smith, D. H. Auston and M. C. Nuss : IEEE J. Quant. Electron. **24** 255 (1988).
- 13) M. van Exter, Ch. Fattinger and D. Grischkowsky : Appl. Phys. Lett. **55** 337 (1989).
- 14) 阪井清美, 谷 正彦 : 応用物理 **70** 149 (2001).
- 15) B. Ferguson and X.-C. Zhang : Nature Mat. **1** 26 (2002).
- 16) D. Middleman (ed.) : Sensing with Terahertz Radiation (Springer, Berlin 2003).
- 17) K. Sakai (ed.) : Terahertz Optoelectronics, (Springer, Berlin, 2005).
- 18) R. E. Miles, P. Harrison and D. Lippen (eds.) : Terahertz Sources and Systems (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2001).
- 19) 西澤潤一 : テラヘルツ波の基礎と応用 (工業調査会, 2005年).
- 20) N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida and Z. L. Liu : J. Appl. Phys. **84** 654 (1998).
- 21) H. Hirori, K. Yamashita and M. Nagai, K. Tanaka : Jpn. J. Appl. Phys. **43** L1287 (2004).
- 22) M. Nagai, K. Tanaka, H. Ohtake, T. Bessho, T. Sugiura, T. Hirosumi and M. Yoshida : Appl. Phys. Lett. **85** 3974 (2004).
- 23) R. Huber, C. Kübler, S. Tübel, A. Leitenstorfer, Q. T. Vu, H. Haug, F. Köhler and M.-C. Amann : Phys. Rev. Lett. **94** 027401 (2005).
- 24) M. Ashida, A. Doi, H. Shimosato, S. Saito, K. Sakai and T. Itoh : presented at IQEC & CLEO-PR 2005 JFH1-2.
- 25) S. Kono, M. Tani, P. Gu and K. Sakai : Appl. Phys. Lett. **77** 4104 (2000).
- 26) M. Suzuki, H. Ohtake, T. Hirosumi and M. Tonouchi : presented at IRMMW2005, Williamsburg, Virginia USA, 2005.
- 27) K. Kawase : Optics & Photonics News, **35** (2004).
- 28) B. Knoll and F. Keilmann : Appl. Phys. Lett. **77** 3980 (2000).
- 29) H.-T. Chen, R. Kersting and G. Cho : Appl. Phys. Lett. **83** 3009 (2003).
- 30) 川瀬晃道, 伊藤弘昌 : 応用物理 **71** 167 (2002).
- 31) T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa, T. Kimura and K. Saito : Appl. Phys. Lett. **93** 4610 (2003).
- 32) N. Orihashi, S. Suzuki and M. Asada : presented at IRMMW-THz 2005, MC5-30, Williamsburg, USA, 2005.
- 33) P. Plotka, J. Nishizawa, T. Kurabayashi and H. Makabe : IEEE Tran. Electron. Dev. **50** 867 (2003).
- 34) J. Nishizawa, P. Plotka and T. Kurabayashi : IEEE Tran. Electron. Dev. **49** 1102 (2002).
- 35) T. Otsuji et al. : presented at IRMMW/THz Conf. '2004, Karlsruhe, Germany, 2004.
- 36) I. Hosako : APPLIED OPTICS **44** 3769 (2005).
- 37) N. Sekine and K. Hirakawa : Phys. Rev. Lett. **94** 057408 (2005).
- 38) K. Ikushima, H. Sakuma, S. Komiyama and K. Hirakawa : Phys. Rev. Lett. **93** 146804 (2004).
- 39) K. Ishii, K. Sano, K. Murata, M. Ida, K. Kurishima, T. Shibata, T. Enoki and H. Sugahara : Electron. Lett. **40** 1020 (2004).
- 40) T. Kosugi, M. Tokumitsu, T. Enoki, M. Muraguchi, A. Hirata and T. Nagatsuma : Tech. Dig. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp. 171-174, 2004.
- 41) M. Tanaka, T. Kondo, T. Kawamoto, Y. Kamiya, A. Fujimaki, H. Hayakawa, N. Nakajima, Y. Yamanashi, A. Akimoto, N. Yoshikawa, H. Terai, Y. Hashimoto and S. Yorozu : IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** 400 (2005).
- 42) 斗内政吉 : オプトロニクス, No.11, 165 (2005).
- 43) 永井直人 : 光学 (2005) 印刷中.
- 44) 永井直人 : レーザー研究 **848** (2005).
- 45) S. Nashima, O. Morikawa, K. Takata and M. Hangyo, J. Appl. Phys., **90** 837 (2001).
- 46) T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita and K. Kawase : Opt. Lett. **28** 2058 (2003).
- 47) M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa and M. Tonouchi : Opt. Express **13** 115 (2005).
- 48) R. M. Woodward et al. : Phys. Med. Biol. **47** 3853 (2002).
- 49) B. M. Fischer, M. Walther and P. Uhd Jepsen : Phys. Med. Biol. **47** 3807 (2002).
- 50) 熊沢亮一, 鳥海美晴, 永井直人, 茂本 勇, 深澤亮一 : 第66回応用物理学学会学術講演会, 9a-P6-34, 徳島, 2005.
- 51) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue : OPTICS EXPRESS **11** 2549 (2003).
- 52) Y. Morita, A. Dobroiu, C. Otani and K. Kawase : J. Food Protection **68** 833 (2005).
- 53) D. C. Larrabee et al. : Opt. Lett. **29** 122 (2004).
- 54) H. Nosaka, M. Nakamura, M. Ida, K. Kurishima, T. Shibata, M. Tokumitsu and M. Murakguchi : "A 24-Gbps 3-bit Nyquist ADC using InP HBTs for electronic dispersion compensation," Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International Volume **1** (2004) 101.

(2005年10月12日 受理)



斗内 政吉

1988年大阪大学基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学基礎工学部助手, 九州工業大学情報工学部助手, 通信総合研究所主任研究官, 大阪大学助教授を経て, 00年大阪大学教授(超伝導フォトニクス研究センター)。04年7月より現職。超伝導デバイス, 強相関電子系型酸化物薄膜の作製と光・テラヘルツ波機能の探索, テラヘルツ応用システムの開発などを行っている。