テラヘルツ波技術が拓く新産業
―― その課題と展望 ――

斗内政吉

Terahertz Technology Opens New Markets: Challenges and Prospects

Masayoshi TONOUCHI

Research into terahertz (THz) technology is now receiving increasing attention and a number of applications are expected to break out soon. We give an overview of the status of the THz technology and its future prospects. In addition, recent milestone achievements are explained.

Key words: terahertz technology, inductrial applications, novel sensing and imaging, wireless communications

1. テラヘルツ波工学の新展開

テラヘルツ光・電磁波の利用は将来の重要技術として，注目を浴びている[1–3]．テラヘルツ波は，周波数では約300 GHz～30 THz程度の領域を指し，これまでも未開拓電磁波領域として，基礎科学において長年，研究開発が進められてきた．そのおもな研究対象は，赤外・遠赤外領域における物性科学（化学物質の結合状態の科学や物質同定など），電波天文などにおける宇宙観測（新星・銀河の誕生や宇宙生命科学）ならびに環境計測（ガス分析やオゾンホール観測）などであった．その長年の研究開発において，1980年代中盤からさまざまなブレークスルーがもたらされ，それが引き金となって，新しいテラヘルツ科学と技術開発が誕生してきている．そのようなテラヘルツ技術の進展やそれらから生まれる未来への展望は，わが国において2004年，動向調査“テラヘルツ技術が拓く未来”によって明らかにされた．その後，その調査報告が世界を牽引する形で，大きな研究開発のムーブメントを起こしつつある[1]．

テラヘルツ技術とは，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を包括する幅広い技術を指し，さまざまな研究開発分野を結ぶ横糸として位置付けることができる．それら3分野の融合により，生命・医療・健康・工業・宇宙・環境・安全/安心・情報通信・基礎科学など，広範な領域において，新規科学技術・応用分野を切り拓き，大きな波及効果をもたらすことが期待される．テラヘルツ技術が必要とされる理由としては，

1）テラヘルツ分光・イメージングなどによる新しいセンシング技術の創製
2）大容量情報通信を目指した技術革新基盤を提供
3）新しいサイエンスの創成
4）先進国としての社会貢献技術基盤の形成

が挙げられる．

1）では，テラヘルツエネルギーが生体の“ゆらぎ”エネルギーに近く，X線などに比べて安全という観点と，テラヘルツ帯においてさまざまな有機分子が識別可能な特徴的吸収を有する点などから，バイオ・生体・セキュリティー・非破壊検査への展開が期待されている．2）では，極限デバイス・電子回路の開発には次世代電子材料のテラヘルツ波物性評価が不可欠であること，ならびにさまざまなデバイス開発に伴い，10 Gbpsを超える無線技術や100 GHzを超える周波数で動作可能な論理回路が実現されたことなどを受けて，次世代電子デバイスのテラヘルツ動作を目指した研究開発が加速している．3）では，フェムト秒レーザーの進展により，超高速現象の過渡的観測が可能

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

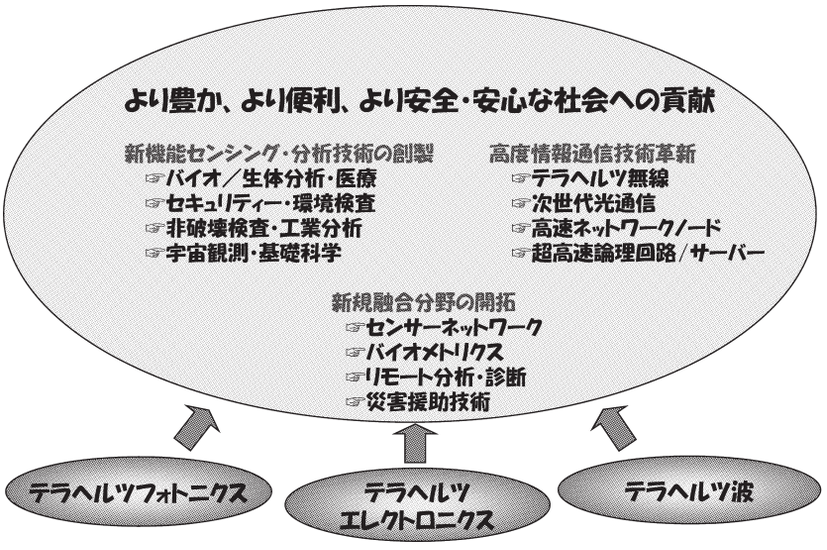


図1　テラヘルツ技術が拓く産業応用．

となり，高輝度テラヘルツパルスの実現とあいまって，固体物理学における本質的電荷相互作用の解明など新しい物理現象を露わにできるようになってきた．4）としては，まだ商業応用に割り当てられていない電磁波（275 GHz〜3 THz）の利用にあたって，標準化，EMC（electro-magnetic compatibility）などの検討が早急に必要であること，ならびに環境計測や電波天文での応用が期待されている．以上のような観点から，テラヘルツ研究は次世代基盤技術として必要不可欠であり，取り組むべき研究開発分野である．

テラヘルツ帯は光と電波の未開拓領域に位置することから，古くから科学者興味の対象となってきた．しかしながら，本稿で紹介する産業分野の開拓は最近の技術革新が引き金となったもので，過去の研究とは大きく異なることを認識すべきである．すなわち，次のようなブレークスルーから新しいテラヘルツ研究が始まった．それらは，ⅰ）テラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）の誕生・イメージング技術への応用[4−5]，ⅱ）テラヘルツ量子カスケードレーザー（THz QCL）の誕生[6]，ⅲ）高輝度テラヘルツ光源の誕生，ⅳ）電子デバイスの進展であり，ⅰ）により複素光学定数が“簡単に”分析でき，分析イメージングも可能となったこと[7]，ⅱ）により小型テラヘルツ光源の可能性が出てきたこと，ⅲ）ではパラメトリック発生[8]やチェレンコフ放射[9]により，高輝度テラヘルツビームの利用が可能になりつつあること，ⅳ）により将来の全個体テラヘルツ光源やテラヘルツ電子デバイスの実現の可能性が出てきた点である．このような革新技術の開発が新しいテラヘルツ研究の創成を可能としつつある．本稿では，テラヘルツ技術が拓く新しい科学技術の中でも新産業展開に的を絞り，将来展望と研究開発課題を明らかにした後，先の動向調査以降に新たに発展してきた重要な技術進展と応用について紹介する．

2.　テラヘルツ技術が拓く新産業とその課題

テラヘルツ技術とは，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最先端研究の融合技術であり，幅広い応用展開が期待される．その中で産業化イメージを明確にもてるのが，新機能センシング分野と高度情報通信技術分野である（図1）．センシング応用では，バイオ/生体分析・医療，セキュリティー・環境検査，非破壊検査・工業分析，宇宙観測・基礎科学などへの展開が期待される．一方，通信応用では，すでに 120 GHz 無線を用いた非圧縮 10 Gbps システムが完成しており，さらなる高周波化によるテラヘルツ無線開発研究（275 GHz 以上の非割り当て領域の利用）がスタートしている．次世代光通信も Tpbs 信号処理能力が開発されてきており，その他インターネットの利用の増大によるバックボーンの高速ネットワークノードなどの開発も相まって，テラヘルツ帯域の利用が目前に迫ってきている．将来的にはそれらの融合により，大容量を必要とするセンサーネットワークや，テラヘルツカメラによるバイオメトリックス，リモートセンシング・診断，火災現場などにおけるアクティブ分析救助援助システムなど新規利用へと展開していくであろう．

表1に，研究開発が期待される応用例を紹介した．ここでは各応用例の解説は省略するが，幅広い産業応用が実現されるであろう．応用に関しては，文献 1）でロードマッ

表1　テラヘルツ技術が拓く新産業分野の例.

分　野	適用例
分析機器	電子材料/工業材料開発・バイオ/医薬品開発・農作物分析・環境計測
診断・検査技術	膚癌（皮膚癌分布・癌細胞分析）・セラミックス（内部欠陥・劣化検査）・美術品（絵画修復検査・真贋検査）・半導体デバイス/材料（動作不良・欠陥個所特定・high-k 材料分析）・医薬品検査（薬品分布・異物混入）・建物（建材劣化・破損診断）・断熱材料検査（スペースシャトルなど）・印刷物検査・コピー商品検査
安全・安心技術	禁止薬物（郵便物検査）・危険物（爆薬，有毒ガス）・セキュリティー（テラヘルツカメラ・空港検査）・災害救助支援（火災現場など）・指紋（劣化指紋の検査）・食品検査（異物混入，変性，変成，汚染）
情報通信	サブテラヘルツ無線（マルチチャンネルハイビジョン TV・スーパーハイビジョン TV・ビル間通信・ホットスポット・遠隔医療）・超高速エレクトロニクス（光ルーターなど）
基礎科学	電波天文・分子/電荷ダイナミクス観測・光科学・電子材料開発・新領域開拓

表2　研究開発課題例.

項　目	取り組むべき課題
テラヘルツ光源	高変換効率非線形効果材料開発（新型有機結晶など），高変換効率機能の開発（チェレンコフ効果・プラズマ光源など），新型 THz-QCL，アレイ型 RTD，コンパクトパラメトリック光源
検出器	新型検出器（カーボンナノチューブ・量子効果応用など），テラヘルツ適合型ボロメーター材料・デバイス構造開発，高感度テラヘルツカメラ，アクティブテラヘルツカメラ，テラヘルツ検査チップ
システム化	非同期光サンプリング，ファイバーシステム，近接場顕微鏡，近接場 LTEM，高周波に適合した通信システム
基盤技術開発	メタマテリアル，ファーバーレーザー，周辺エレクトロニクス，テラヘルツ伝送ファイバー，超小型光源・検出チップ，新型 UTC-PD
その他	データベース整備，標準化，EMC，成分分析応用例の拡大

プが提案されている．現在までそれに沿った研究開発が進められており，本分野への研究開発資金の投資が少ないにもかかわらず，その予想からは大きく外れておらず，研究者の努力が実りつつある．しかしながら，産業展開に向けての研究開発課題も多く，今後の産学連携の強化が不可欠である．

特に取り組むべき課題の例を表2に示した．テラヘルツ光源開発は急速な展開をみせているが，CW およびパルス光源ともその輝度はまだ不十分である．検出素子に関しては，世界的にみても活動は少ない．これまで，ショットキーダイオードを用いたミリ波検出器の開発と，ボロメーターを用いた遠赤外検出器の開発が長年続けられてきたが，テラヘルツ研究が注目を浴びる中で，検出素子・材料の開発プロジェクトは少ない．しかしながら，そのような中でも従来の素子を用いたものや改良したものを用いて，セキュリティー応用の観点からテラヘルツカメラの開発が進められている．その他検出器として，テラヘルツチップの開発なども重要である．

光源・検出器に加えてシステム化技術開発が重要である．THz-TDS については，産業応用に向けて，高速化，ロバスト化，および低価格化が不可欠である．現在，フェムト秒ファイバーレーザーを用いた小型システムの販売が開始されており，また，高速化には2台のレーザーを用いた非同期光サンプリング法も提案され，開発が進められている[9]．

その他，テラヘルツ波の伝送用ファイバーの開発や，さまざまな基盤技術にも取り組むべき必要がある．また，特に分析には多くのデータの取得が必要とされ，計測の標準化ならびに公開データベース構築も不可欠である．データベース構築については，情報通信研究機構と理化学研究所が共同で整備を始めており，世界をリードする発展に期待したい．詳しくは http://www.thzdb.org を参照されたい．

3.　新しい技術展開

3.1　光源開発（非線形・デバイス）

光源開発は，低周波側からは電子デバイス光源，高周波側からは THz-QCL，また光・テラヘルツ波変換による直接発生のアプローチがある．電子デバイス開発では，東工大の浅田らが RTD（resonant tunneling diode）開発をリードしており，テラヘルツを超える発生に成功している[10]．また，東北大の尾辻らは，二次元プラズモンを用いたテラヘルツ波のブロードバンド光源の開発にも成功しており，注目を浴びている[11]．QCL については本特集で解説されているので，そちらを参照されたい．ここでは，急速に展開を始めた非線形効果による光テラヘルツ波変換の研究開発例を紹介する．

最近，テーブルトップテラヘルツ光源開発における次の3つの技術革新が報告されている．

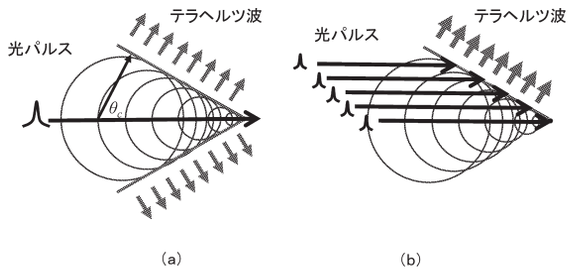


図2　チェレンコフ放射と逐次励起による増幅効果．

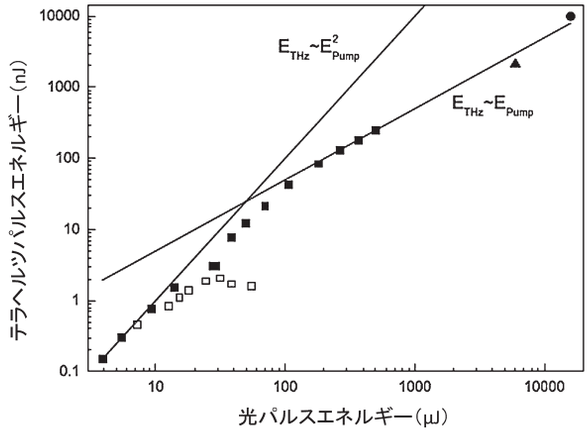


図3　チェレンコフ放射による光パルスエネルギーとテラヘルツ波エネルギーの関係．

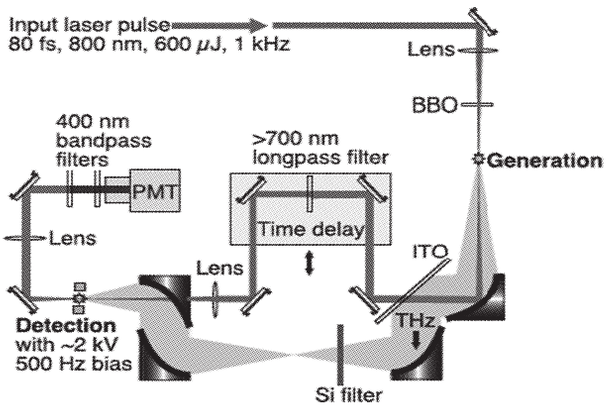


図4　エアープラズマによるテラヘルツ波の発生とプラズマの非線形効果を利用した検出法．

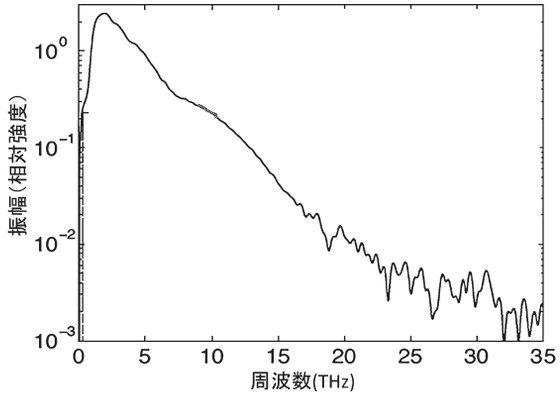


図5　エアープラズマからの放射テラヘルツ波スペクトル．

ⅰ）チェレンコフ放射[9]

フェムト秒レーザーを非線形結晶 $LiNbO_3$ に入射した場合，テラヘルツ波がパラメトリック蛍光で発生する．しかしながら，図2に示すように，パルスの進行とともに，テラヘルツ波は θ_c の確度をもって伝搬する．ここで，

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{n_g}{n_{THz}}\right)$$

で，n_g，n_{THz} は光とテラヘルツ波の屈折率である．時間の進行とともに，パラメトリック蛍光によりテラヘルツ波がチェレンコフ放射され，結晶中を伝搬する．このとき，大きな誘電率をもつ結晶では，テラヘルツ波は吸収され，減衰してしまう．すなわち，$LiNbO_3$ など大きな変換効率をもつ結晶の利点が損なわれていることになる．

この減衰を補うために，Hebling らはフェムト秒光パルスの波面を制御し，図2 (b) に示すように，発生するテラヘルツ波の伝搬面に合わせて，フェムト秒光パルス波面を制御することで逐次増幅を行い，結果として，高強度テラヘルツ波の発生に成功している．励起光と発生テラヘルツ波エネルギーの関係を図3に示す．20 mJ の励起で 10 μJ (600 kV/cm) に達している．発生されるテラヘルツ波の周波数主成分は数 100 GHz～3 THz 程度である．

ⅱ）ガスプラズマからの発生[12]

空気あるいはガス中に，フェムト秒レーザーの二倍波と基本波を同時に集光すればテラヘルツが発生する．その関係は

$$E_{THz}(t) \propto \chi^{(3)} E_{2\omega}(t) E^*_{\omega}(t) E^*_{\omega}(t) e^{j\varphi}$$

で示され，図4のような実験系で，大きな $\chi^{(3)}$ を有する物質（ガス）から高輝度テラヘルツ波が発生できる．発生電界強度は 200 kV/cm，最大周波数成分は 40 THz に達している（図5）．

ⅲ）擬似位相整合 GaAs[13]

光整流によるテラヘルツ波の発生は，非線形効果を利用するため，高強度レーザー光源が必要であり，大きな変換効率を実現することは難しいとされてきた．スタンフォード大の Vodopyanov らは，GaAs の周期反転結晶成長技術を用いて，高品質の擬似位相整合結晶を開発し，ピコ秒レーザーで励起することで，比較的小さな励起パワー (2.3 μJ) において 3×10^{-4} の光-テラヘルツ波変換効率（フォトン変換効率 3.3%）を達成した．

以上のように光源開発も急速に進展しており，これまで

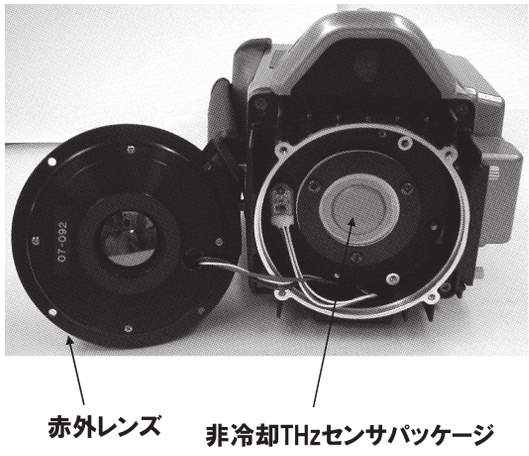


図6　テラヘルツ用に改良中の遠赤外線カメラ．

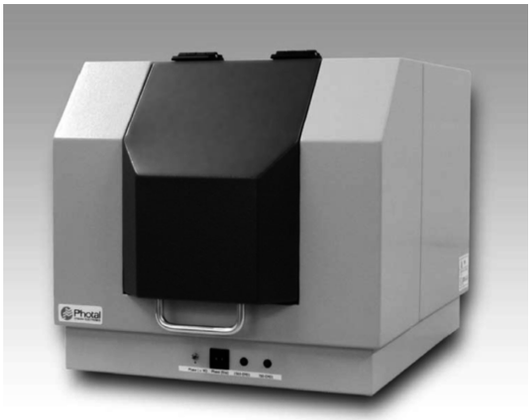


図7　小型ファイバーレーザーとDAST結晶を用いたコンパクトTHz-TDS．

制限されてきたイメージング応用や，テラヘルツ励起による非線形効果化の研究など，さまざまな広がりをみせることが予想される．

3.2　センサー・カメラ開発

検出デバイス・材料の開発は現在のところ大きな進展はなく，ミリ波と遠赤外用のカメラをテラヘルツ帯用に改良する方向で進んでいる．そのような中，理化学研究所の河野・石橋らは，量子ホール素子・カーボンナノチューブなどを用いた検出器の開発に取り組んでおり，オンチップ検出器の開発など新しい展開も始まっている[14]．

欧米ではセキュリティー応用に絡み多額の開発費がついているが，システム開発の方向を向いている．低周波側からのテラヘルツカメラの開発に関しては，ミリ波用を改良したカメラ（500 GHz）をThruVision社が開発し，空港への配備が始まっている．しかしながら感度・分解能は不十分である．高周波側からは遠赤外線カメラの流用が取り組まれているが，実情は公表されていない．

NECは現在市販している赤外線カメラをベースに，材料の最適化を行い（図6），窓材をGeからSi（反射防止膜あり）に変更することで，テラヘルツ帯での感度を大きく改善してきている[15]．テラヘルツ波吸収材の抵抗値の制御と窓材の改良で，約3 THzの信号に対してNEP（ノイズ等価パワー）が50 pWと10 μm帯のNEPに近づいてきている．テラヘルツ用の新規吸収材の開発や構造の最適化は，取り組みが難しいが，大きく感度を改善できる可能性があり，今後の展開を期待したい．

3.3　通 信 基 盤

サブテラヘルツ無線の開発は，120 GHzシステムが完成し（次節参照），さらなる高周波化が検討されている．このとき基盤技術となるのが，UTC-PD（単一走行キャリヤー・フォトダイオード）を用いたフォトミキシング光源である．伊藤らはこれまでに，1 THzで10 μW以上の放射を実現しており，短距離通信への利用が可能になってきた[16]．

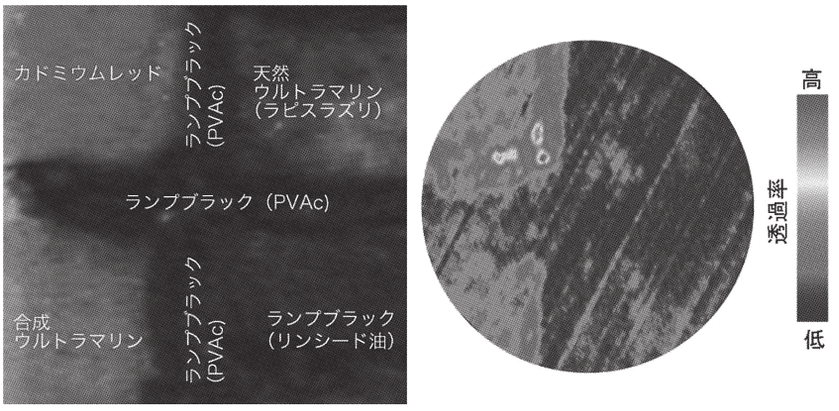
電子回路開発では，InP-HEMTによる増幅器を用いることで，120 GHz帯の全電気無線通信システムが完成した．これにより，バッテリー駆動が可能であり，フィールドテスト成功につながった．InP系HEMTは，雑音指数，素子あたりの出力がGaAsに比べて優れており，無線に応用されたものは，ゲート長0.1 m，f_T 170 GHz，f_{max} 350 GHzの特性を有している．今後は，200〜400 GHz帯の利用に向けた高周波回路の実現が望まれる．

4.　応用展開の現状

4.1　分析機器開発

THz-TDS装置は，2000年初期からピコメトリック社，テラビュー社，栃木ニコンが販売を始めており，さまざまな応用への基盤が構築されつつある．最近の動向としては，Zomega社（http://www.zomega-terahertz.com/）がコンパクト・可搬TDS装置の販売を開始した．わが国では，大阪大学と大塚電子が共同で，新しい光源を用いたTDSシステムの販売を始めている（図7）．そこでは，有機結晶DAST[17]による，1.5帯フェムト秒レーザーの光整流効果を利用したもので，広帯域テラヘルツ波光源とコンパクト性を実現した[18]．このように分光システムの開発もより使いやすく発展してきている．

また，分光装置とは異なる応用として，レーザーテラヘルツ放射顕微鏡（LTEM）の開発が挙げられる[19,20]．LTEMは，フェムト秒レーザー励起により放射されるテラヘルツ波を検出することで，ダイナミックな応答を可視化する顕



(a)　　(b)

図 8　絵の観測例．(a) 可視画像，(b) テラヘルツイメージ（3.1 THz）．(巻頭カラー口絵参照)

微鏡である．フェムト秒レーザーを照射することで，さまざまな物質からテラヘルツ電磁波を放射することができる．これは，内部電界やフォトデンバー効果による光電流の発生，局所非線形効果などによって発生するためで，レーザービームを対象物上で走査することで，放射特性のイメージングが可能である．すなわち，上記のような光応答を可視化でき，たとえば強誘電体中の強誘電ドメインのイメージングなどに利用できる[21]．分解能はレーザービーム径で決まるため，近接場を用いると数 10 nm 程度まで実現可能であり，これまでに分解能は 0.6 μm まで到達している．現在これらを用いたイメージング例の抽出や，LSI の不良個所特定装置への応用などが検討されている[22,23]．

4.2　非破壊検査・分析応用

THz-TDS やテラヘルツパラメトリック光源を用いた，さまざまな非破壊検査や分析応用が期待されている．その中で，世界的にもユニークでありかつ重要な取り組みを 1 例紹介する．

情報通信研究機構の福永らは，テラヘルツ分光を絵画・壁画などの分析・保存への応用を提唱している．絵画・壁画保存には，修復・原色などの分析が不可欠である．絵の具はテラヘルツ帯でそれぞれ特徴的な吸収特性を示すことから，その応用の可能性が指摘されている[24]．図 8 では，NICT で開発された QCL（3.1 THz）を光源とし，先に紹介した NEC のテラヘルツカメラを用いて，リアルタイムで絵の一部を観測した例を示す[25]．カドミウムレッドや合成ウルトラマリンは透過率が高い．同じウルトラマリンでも天然のラピスラズリは透過率が低いため，肉眼では同じ青でも，テラヘルツ帯で見るとその違いが明らかである．ランプブラックは PVAc（ポリビニルアセテート）を展色材としたほうがリンシード油の場合よりも透過率が低いようにみえるが，定量的な評価のためには，試料の厚みを一定にした試料等を用いてさらに検討する必要がある．このような応用においてもデータベース整備が重要である．

同システムは絵画の分析だけでなく，非破壊検査システムとしても大きな可能性を有している．小型で経済的なシステムは，単一周波数であっても，食品等，さまざまな対象のスクリーニング等に利用できるものと考えられる．さらに複数の周波数を用いることにより，データベースに基づいた物質の同定が可能となるものと期待できる．

4.3　センターチップとケミカル顕微鏡

テラヘルツ波を用いたバイオ計測の多くでは，計測対象となる生体関連物質とテラヘルツ波との相互作用の結果変化するテラヘルツ波の周波数スペクトルを計測する，いわゆる分光手法が行われる．これらの手法では，生体関連物質の機能解明に重要となる分子間結合の評価や，微少量検出に有効であると考えられ，実際にこれらをターゲットとしたテラヘルツ波システムの研究開発が取り組まれている．その代表的なアプローチとして，センサーチップがある．広島大学の角屋らは，マイクロストリップラインを用いたテラヘルツ分析チップを開発し，さまざまな応用への検討を行っている[26]．その中で，水中で用いることによりさまざまな溶液やその反応をとらえる試みもなされており，応用への期待は大きい．

水溶液中の物質の測定では，テラヘルツ波周波数帯域における水分子の吸収により，信号雑音比が大きく低下する点，周波数スペクトル計測では，時間領域あるいは周波数領域での掃引が必要であり，リアルタイムに化学反応を計測することが困難である点などの課題がある．そのような問題を解決するために，岡山大学の紀和らは，テラヘルツ波ケミカル顕微鏡（TCM）を開発している[27,28]．TCM は，

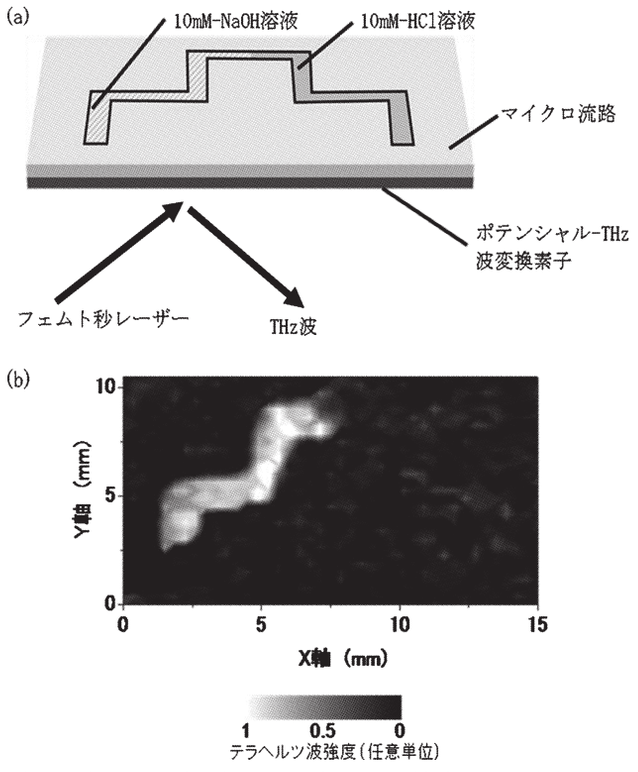


図9 (a) THz素子組み込み型マイクロ流路，および (b) そのTCM画像．

生体関連物質が反応したときの化学ポテンシャルの変化をテラヘルツ波発生強度の変化に変換する新規な半導体素子を組み込むことで，水溶液中にある生体関連物質の相互作用のリアルタイム計測を可能にしたものである．素子裏面よりフェムト秒レーザーを照射することで，テラヘルツ波を放射させることができる．このとき，表面で生体関連物質の反応による化学ポテンシャルの変化が発生すると，素子内部の半導体エネルギーバンド構造に変化が生じ，これに伴って，放射するテラヘルツ波の強度も変化する．照射するレーザーを素子裏面で走査することで，素子表面の化学ポテンシャル分布を可視化することが可能である．

ポテンシャル・テラヘルツ波変換素子上にマイクロ流路を形成し，流路内の物質を計測した結果を図9に示す．図9 (a) に示すように流路の床面が素子の検出面となっている．流路内は10 mMのNaOHおよびHCl溶液で満たした後，レーザーを走査しながらテラヘルツ波の強度を検出している．図9 (b) は計測の結果得られたTCM画像である．ここでは特にアルカリ性溶液の部分が強調表示されるようにしている．このように，ポテンシャル・テラヘルツ波変換素子を用いることで，従来の分光手法では困難であった水溶液中水素イオン濃度分布などをとらえることに成功している．このシステムの空間分解能はレーザーの波長によって決定されるため，LTEMと同様にサブミクロンの分解能が可能である．そのため，従来の表面プラズモンセンサーと比較し安価かつ物質の集積化が容易な素子として，医薬品のスクリーニング検出素子としても期待されている．

4.4 安全・安心への基盤技術

テラヘルツの応用として大いに期待されているのが，安全・安心分野である．実用化されている事例としては，パッシブカメラによるセキュリティー検査システムで，100〜500 GHzの検出器を用いている．一部は空港に配備されており，実際の観測に使用されている．わが国でも，先に示したNECのボロメーターアレイの開発が進んでおり，応用展開が期待される[16]．

分光装置の安全・安心応用展開として，郵便物中の禁止薬物検査・爆発物検査装置の開発も進んでいる．名大・理研グループは，郵便物中の禁止薬物高速検査装置のプロトタイプを完成させており，国際郵便局配備に向けて準備が進められている[29]．その他，食の安全などへの応用も大いに期待されている．ここでも，応用事例の抽出が課題である．

4.5 テラヘルツ無線に向けて

NTTは，昨年開催された北京オリンピックでフジテレビジョンの協力を得て，開発を続けてきた120 GHz無線の実用化テストを実施した．120 GHz無線では，10 Gbpsの通信速度が実現され，非圧縮でマルチチャネルとハイビジョン信号伝送が1 kmほど可能である．非圧縮の効果は大きく，通常みられる時間遅れを感じさせないことが実証された．期間中にはトータルで2時間40分の放映があり，問題なく動作した．このことから，10 Gpbs無線通信技術はほぼ完成しており，ホットスポットなどさまざまなアプリケーションへの展開が期待される．また，次の研究開発対象としては，300 GHz以上の電磁波を用いることで，次世代のスーパーハイビジョンを視野に入れた無線開発に移行することが予想される．その課題としては，フォトミキサー光源および固体MMIC (microwave monolithic IC) の開発ならびに計測・テスト技術の開発などが挙げられる．また低価格化に対しては，Si系MMICの開発も望まれる．以上，情報通信分野においてテラヘルツ技術革新は，大きなマーケットを創成する最重要テーマのひとつである．

5. まとめと展望

テラヘルツ技術の産業展開に向けた課題と展望について概説した．テラヘルツ技術開発は，まだ途についたばかり

であり，さらなる高輝度光源・高感度検出器・テラヘルツカメラ・周辺技術の開発が重要である．今後は，産業応用の課題別に特化した産学連携により，多くの応用分野が開けるものと期待される．そのためにも，多くの研究者にテラヘルツ研究に従事し，または，関連技術を利用した研究に取り組んでいただければと願っている．

本稿ではまた，最近の基盤技術開発と応用に向けた取り組みについていくつかのトピックスを紹介した．絵画分析，無線応用，LTEM，郵便物禁止薬物検査装置，データベース構築など世界をリードする研究も多くあり，早急に産業展開に向けた対応が重要である．

本稿を執筆するにあたり，ご協力いただいた大塚電子泉谷氏，NEC 小田氏，NICT 福永氏，岡山大学紀和氏に感謝いたします．

文　献

1) 斗内政吉：テラヘルツ技術（オーム社，2006）.
2) 斗内政吉：“テラヘルツ波技術の現状と展望”，応用物理，**75**（2006）160–168.
3) M. Tonouchi: “Cutting-edge terahertz technology,” Nat. Photonics, **1**（2007）97–105.
4) D. Mittleman: *Sensing with Terhaertz Radiation* (Springer, Berlin, 2003).
5) 斗内政吉：光物性の基礎と応用（オプトロニクス社，2006）pp. 325–342.
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: “Terahertz semiconductor-heterostructure laser,” Nature, **417**（2002）156–159.
7) K. Kawase, J. Shikata and H. Ito: “Terahertz wave parametric source,” J. Phys. D, **35**（2001）R1–R14.
8) J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, B. Bartal and K. A. Nelson: “Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities,” J. Opt. Soc. Am. B, **25**（2008）B6–B19.
9) A. Bartels, R. Cerna, C. Kistner, A. Thoma, F. Hudert, C. Janke and T. Dekorsy: “Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling,” Rev. Sci. Instrum., **78**（2007）035107.
10) M. Asada, S. Suzuki and N. Kishimoto: “Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators,” Jpn. J. Appl. Phys., **47**（2008）4375–4384.
11) Y. M. Meziani, H. Handa, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano, V. V. Popov, G. M. Tsymbalov, D. Coquillat and F. Teppe: “Room temperature terahertz emission from grating coupled two-dimensional plasmons,” Appl. Phys. Lett., **92**（2008）201108.
12) N. Karpowicz, J. Dai, X. Lu, Y. Chen, M. Yamaguchi, H. Zhao, X.-C. Zhang, L. Zhang, C. Zhang, M. Price-Gallagher and C. Fletcher: “Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire “terahertz gap”,” Appl. Phys. Lett., **92**（2008）011131.
13) K. L. Vodopyanov, M. M. Fejer, X. Yu, J. S. Harris, Y.-S. Lee, W. C. Hurlbut and V. G. Kozlov: “Terahertz-wave generation in quasi-phase-matched GaAs,” App. Phys. Lett., **89**（2006）141119.
14) Y. Kawano and K. Ishibashi: “An on-chip near-field terahertz probe and detector,” Nat. Photonics, **2**（2008）618–621.
15) N. Oda, H. Yoneyama, T. Sasaki, M. Sano, S. Kurashina, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudoh and T. Irie: “Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays,” Proc. SPIE, **6940**（2008）69402Y.
16) F. Nakajima, T. Furuta and H. Ito: “High-power continuous-terahertz-wave generation using resonant-antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiode,” Electron. Lett., **40**（2004）1297–1299.
17) 加藤政雄，中西八郎：有機非線形光学材料（シーエムシー，1985）.
18) M.Tonouchi, *et al.*: “Performance of THz-TDS using 1.5 μm femto-second fiber laser with InP Schottky and DAST emitters,” presented at CLEO 2008, CMM1 (San Jose, 2008).
19) S. Kim, H. Murakami and M. Tonouchi: “Transmission-type laser THz emission microscope using a solid immersion lens”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **14**（2008）498–504.
20) R. Inoue R, N. Uchida and M. Tonouchi: “Scanning probe laser terahertz emission microscopy system”, Jpn. J. Appl. Phys., **45**（2006）L824–L826.
21) K. Takahashi, N. Kida and M. Tonouchi: “Terahertz radiation by an ultrafast spontaneous polarization modulation of multiferroic $BiFeO_3$ thin films”, Phys. Rev. Lett., **96**（2006）117402.
22) T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita and K. Kawase: “Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits,” Opt. Lett., **28**（2003）2058–2060.
23) M. Yamashita, C. Otani, K. Kawase, K. Nikawa and M. Tonouchi: “Noncontact inspection technique for electrical failures in semiconductor devices using a laser terahertz emission microscope,” Appl. Phys. Lett., **93**（2008）041117.
24) K. Fukunaga, Y. Ogawa, S. Hayashi and I. Hosako: “Terahertzspectroscopy for art conservation,” IEICE Electron. Exp., **4**（2007）258–263.
25) K. Fukunaga, N. Sekine, I. Hosako, N. Oda, H. Yoneyama and T. Sudou: “Real-time terahertz imaging for art conservation science,” J. Euro. Opt. Soc., **3**（2008）08030.
26) S. Yanagi, M. Onuma, J. Kitagawa and Y. Kadoya: “Propagation of terahertz pulses on coplanar strip-lines on low permittivity substrates and a spectroscopy application,” Appl. Phys. Exp., **1**（2008）012009.
27) T. Kiwa, S. Oka, J. Kondo, I. Kawayama, H. Yamada, M. Tonouchi and K. Tsukada: “A terahertz chemical microscope to visualize chemical concentrations in microfluidic chips,” Jpn. J. Appl. Phys., **46**（2007）L1052–L1054.
28) T. Kiwa, J. Kondo, S. Oka, I. Kawayama, H. Yamada, M. Tonouchi and K. Tsukada: “Chemical sensing plate with a laser-terahertz monitoring system,” Appl. Opt., **47**（2008）3324–3327.
29) A. Dobroiu, Y. Sasaki, T. Shibuya, C. Otani and K. Kawase: “THz-wave spectroscopy applied to the detection of illicit drugs in mail,” Proc. IEEE, **95**（2007）1566–1575.

（2008 年 10 月 27 日受理）