

# テラヘルツ波の利用技術の進展

川瀬 晃道<sup>\*,\*\*</sup>・渋谷 孝幸<sup>\*</sup>・林 伸一郎<sup>\*</sup>・大谷 知行<sup>\*</sup>

## Developments of Terahertz-Wave Applications

Kodo KAWASE<sup>\*,\*\*</sup>, Takayuki SHIBUYA<sup>\*</sup>, Shin'ichiro HAYASHI<sup>\*</sup> and Chiko OTANI<sup>\*</sup>

After more than a dozen years of basic research into the submillimeter and far infrared range, THz wave research has finally come into its own, and is recognized by the world scientific community as a new frontier. While femtosecond laser pumped THz wave sources have opened up a new vista in applied research, the ideal THz wave source will likely require high temporal and spatial coherence. When this level of quality is finally made available in a user-friendly device, there is little doubt that applied research efforts into the THz region will enjoy a true renaissance. In this direction we have developed widely tunable compact THz-wave parametric sources. In our laboratory, THz waves continue to broaden their range of applications. Here, we review the progress of terahertz technique.

**Key words:** terahertz wave, spectroscopy, imaging, nonlinear optics, parametric generation

### 1. テラヘルツ波の応用可能性

近年、テラヘルツ (THz) 波とよばれる約 0.3~10 THz (波長 1 mm~30  $\mu\text{m}$ ) の電磁周波数帯の光源開発とその応用開拓が進んでいる。この帯域は電波と光波の中間に位置しており、電波のように紙、プラスチック、ビニール、繊維、半導体、脂肪、粉体、氷などさまざまな物質を透過するとともに、光波のようにレンズやミラーで空間を自在に取り回すことができる。また、電波に比べて波長が短いため、多くのイメージング用途にとって必要十分な適度な空間分解能を有している。さらに近年、ビタミンや糖、医薬品、農薬などさまざまな試薬類に固有の吸収スペクトル (指紋スペクトル) がテラヘルツ帯で見いだされ、その応用可能性が広がりつつある。

先日、このテラヘルツ波を用いた計測・分析技術が「今後 10 年以内の開発を目指す国家基幹技術」として文部科学省の諮問機関である科学技術・学術審議会から発表されたが、テラヘルツテクノロジー動向調査委員会の報告によればテラヘルツ波の応用が見込まれる分野は実に広範囲にわたる。それは、テラヘルツ波が物質を透過し、数百  $\mu\text{m}$

の空間分解能を有し、人体に安全で、試薬類の指紋スペクトルを有し、さらには DNA の 1 本鎖と 2 本鎖の識別、水と氷の吸収差、半導体不純物への感度、ラセミ体の判別、などといった他の電磁周波数帯にないユニークな特長を有しているためである。

他の手法よりもテラヘルツ波に適していると期待される産業応用可能性の一部を列挙すると；LSI チップの故障解析、郵便物中の危険物検査、空港やビルのゲートにおける爆弾・セラミックナイフなどの危険物検査、地雷探査、セラミックスやプラスチック製品の内部欠陥検査、スペースシャトルの外壁タイルの検査、遮蔽空間内の高感度有毒ガス検出、壁内部の腐食や亀裂などの診断、インク濃度検査、バイオチップの蛍光ラベルフリー診断、病理サンプルのオンサイト診断、皮膚がんの早期診断、美肌 (角質層) 診断、車の塗装検査、フレキシブルなテラヘルツ導波路を用いた内視鏡などへの応用、医薬錠剤の多層コートなどの品質検査、病院で渡される包装薬の誤成分チェック、薬品工場での異種錠剤混入検査、半導体ウェハのドーパント密度の分布計測、ナノコンポジット材料の解析、小袋包装

\* 理化学研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1) E-mail: kodo@riken.jp

\*\* 名古屋大学 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

のヒートシール部欠陥検査，青果物の選果時の内部品質評価，植物工場の灌水自動制御，冷凍食品などの凍結解凍サイクルの最適化，凍結路面診断，粉ミルクなど粉体中の異物検出，卵の鮮度検査，胡麻やタバコなどの水分含有量検査，油類の水分混入検査，等々すでに論文や研究会などで公表されている応用可能性の一部分を挙げるだけでもこれだけの多岐にわたる。上述の応用可能性以外にも，さまざまなテラヘルツ波利用技術に関するアイデアが企業サイドあるいは研究サイドから提案されているが，特許に配慮してここでは記さない。

最近まで，テラヘルツ研究はレーザー研究者の“趣味的”な世界であったため産業応用にあまり目が向いていなかったが，テラヘルツテクノロジーフォーラムなどの産官学連携が結成され，企業と研究者の橋渡しを進めつつあり，上記のような新たな産業応用可能性が次々に生まれつつある。筆者もまた，学生時代の趣味的な興味からテラヘルツ波研究に入った一人であり，恩師の稲場文男先生が日本に紹介した細胞膜のテラヘルツ帯共鳴振動仮説<sup>1)</sup>の“検証道具”として，細胞照射用広帯域波長可変テラヘルツ光源を1992年から伊藤弘昌先生のもとで開発してきたが，今日のようにさまざまなテラヘルツ波利用技術の可能性が開けてくるとは13年前には想像もできなかった。当時，テラヘルツ波のイロハを私に手ほどきしてくださった東北大通研水野研の先生方でさえ，最近のテラヘルツ波研究の盛り上がりには驚いておられるのではと拝察する。なお，その後2000年に光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器の開発に成功した直後に，西澤潤一先生に理研仙台のセンター長室によばれてはじめて会話をさせていただき，先生が光注入方式の線幅や出力などの特性に感心して下さったことを思い出す。このように，われわれのテラヘルツ光源研究は，東北大学電気通信研究所の偉大な先達に導かれている。

テラヘルツ波利用技術開発の分野では，産業界のニーズに盲目なわれわれ研究者が依然として主導権を握っている状況であるため，ニーズの掘り起こしが不十分であることは否めない。人類はかつてニーズのあるところ必ずそれを実現する技術を発展させてきたが，テラヘルツ応用もいずれは光源と検出側の技術が飛躍的に高まり，種々の非破壊検査などが実用化されてゆくと確信している。さらにいえば，X線，紫外，可視，赤外，ミリ波，マイクロ波，電波帯…とそれぞれの周波数域に固有の画期的な用途が開拓されてきたように，テラヘルツ波においても画期的な応用が見つかることを期待している。私見であるが，近い将来，産業用途に応えうる性能の小型高出力テラヘルツ光源

や高感度テラヘルツカメラなどが開発され，それに伴って応用分野の飛躍的な拡大がもたらされるであろう。産業界の方からはしばしば「テラヘルツ波のシステムのコストは幾らか」という問いを頂戴し返答に窮するが，研究段階では高コストでも，少し量産効果が働けば急激に価格は下がることは自明であるので，現状でのシステムのコストは大した意味をもたない。例えば，衝突防止用ミリ波レーダーシステムがトヨタ，ホンダなどの一部の高級車に数十万円のオプションで搭載されているが，10年前まで実験室で組めば2000万円ほどかかっていたシステムであり，当時知人のミリ波の専門家ですら「こんな高価なシステムは車には絶対に載らない」と断言しておられた。また，よく知られた話であるが，CDプレーヤーのピックアップ部はいまや200円程度であるが，実験室で光学系システムを組めばいまでも500万円ほどかかる。かように光学分野のシステムは，もともとがきわめて高コスト体質なだけに，量産化によって劇的なコストダウンが可能である。我田引水で恐縮であるが，筆者らの開発しているテラヘルツ光源は，Nd:YAGレーザー以外はほぼ手作りなので比較的安価であるが，さらにマイクロチップレーザーなどの導入によって，近い将来大幅な低コスト化が見込める。

さて本稿では，テラヘルツ波利用技術に関する背景に重点を置いて解説したい。昨今のテラヘルツ波研究の急速な広がりに伴い，他所におけるテラヘルツ波利用技術をいくつか選んで紹介することがもはや“焼け石に水”となりつつあり，本稿ではページ数の制約もあるため，当所の利用技術を紹介するにとどめる。なお，テラヘルツ波利用技術に関する秀逸な解説記事や著書が多数出ているので，それらを参照されたい<sup>2-10)</sup>。

## 2. 欧米のテラヘルツ技術開発動向

テラヘルツ波を用いた新しい分光/イメージング技術に関するプロジェクト研究がここ数年欧米で強力に推進されており，わが国でもこの分野の推進は急務と考えられる。ここでは，欧米のテラヘルツ波技術開発動向に関して主要なプロジェクトを紹介する。個々の研究者レベルでのテラヘルツ研究開発も世界的に急速な広がりをみせているが，ここでは紹介しきれない。なお，テラヘルツ研究の多くは国際会議IRMMW-THz2005（米国Williamsburgにて9月開催）において発表されるので，プログラムをチェックするだけでも研究の趨勢を把握することができる。

さて，米国では過去10年あまり大学レベルでテラヘルツ研究を強力に推進してきたが，昨今政府や企業もテラヘルツ波の有用性に着目するところとなり，以下に挙げるよ

うな活発な展開がみられる。まず、米国防総省の研究機関である国防高等研究計画庁 (DARPA) は、テラヘルツイメージング技術に関するプロジェクト (TIFT: Terahertz Imaging Focal-plane-array Technology) を最近開始した。開発目標は、高出力テラヘルツ光源、小型高感度テラヘルツカメラ、およびそれらを用いたイメージングシステムで、例えばカメラに関しての要求性能は、テラヘルツ波の回折限界の空間分解能が得られる小型センサーアレイで極低温を必要とせず、かつビデオレートでの撮像が可能なこと、などとなっている。プロジェクトのねらいのひとつは自爆テロリスト (suicide bomber) の摘発にあるようで、爆薬を服の下などに隠していないかどうかを安全距離である 30 m 程度手前から、テラヘルツ波の高出力光源と高感度カメラを組み合わせた空間分解能 2~3 cm のリモートセンシングシステムで判別するとのことである。

他方、NASA は、スペースシャトルの外壁タイル内部の欠陥検査用に、テラヘルツイメージング技術を用いた検査システム 5 台を米国テラヘルツ関連のベンチャー企業である Picometrix 社から購入し、すでに実用に供している。今後スペースシャトルの外壁に貼り付けられるタイルは、すべてこの装置で欠陥検査されるとのことである。NASA がこの目的でさまざまな数十種類の非破壊検査技術を公平にテストした結果、テラヘルツイメージングが最も高精度でタイル内部の欠陥を検出したため、急遽採用された。同様の目的で、米国レンセラー工科大学の X.C. Zhang 教授のグループは、200 GHz の連続波光源とショットキーバリアダイオード検出器の組み合わせによる高速かつ高感度なラスタースキャンイメージングシステムを開発している。参考までに、同大学のテラヘルツ研究センター (Center for Terahertz Research) では、MURI (Multi University Research: 日本の科研費特定領域研究に近い) から年間予算約 400 万ドルを得て、博士課程の学生約 20 人がテラヘルツ研究に従事し、ポスドク約 10 人程度も加えて一大プロジェクトチームを形成しているとのこと。これは、テラヘルツ技術者の数が世の中のニーズに対して絶対的に不足しているという認識から、MURI が後押ししてテラヘルツ研究者の育成を図っているものである。わが国でも、現在テラヘルツ波技術を有する研究者の数はかなり不足しており、テラヘルツ研究のためのポスドク研究員ポストが大学や国研で多く空席となっている。

米国におけるテラヘルツ関連企業をいくつか挙げると、上記 Picometrix 社は数年前からテラヘルツ分光システム・イメージングシステムを開発・販売している。バージ

ニア大学発のベンチャーである Virginia Diode 社は、数百 GHz の領域を得意としており、マイクロ波の通倍技術を用いた高出力テラヘルツ光源や高感度ショットキーバリアダイオード検出器を製品化している。Coherent-DEOS 社は堅牢な炭酸ガスレーザー励起テラヘルツレーザーを開発し、昨年宇宙への打ち上げにも成功した。PSI 社 (Physical Sciences, Inc.) は 2 波長のテラヘルツ波光源を用いた爆薬検出システムを開発中である。これら以外のベンチャーを合わせると、10 社前後がテラヘルツ関連の製品開発を進めている。他方、航空関連の NGST (Northrop Grumman Space Technology) 社、Boeing 社、Lockheed Martin 社などで、テラヘルツ波のセキュリティ分野への応用開発を進めているとのことである。

EU では、テラヘルツ技術開発に関するいくつかの国際共同プロジェクトが走っている。まず 2000 年から 2003 年まで、医療応用目的のテラヘルツイメージング技術開発に関する 5 か国共同プロジェクト “TERAVISION” が行われ、その後 2004 年から “TERANOVA” という 5 か年計画の新プロジェクトに発展している。TERANOVA においては、量子カスケードレーザーなどの固体光源や広帯域波長可変光源、さらに高感度検出器の開発を行い、並行して開発するイメージングシステムに供する。また、TERANOVA で注目すべき課題のひとつは、RWTH Aachen 大学主導で進められているテラヘルツ導波路上の共振器構造による蛍光ラベルフリー DNA チップ開発である<sup>11)</sup>。現在数十個のチップのアレイ化を達成しているが、今後どのようにして各チップでテラヘルツ波を発生/検出し、かつ高速に読み出すかが課題であると、中心人物の Nagel 博士は語っていた。一方、2001 年から 2004 年までテラヘルツ波と生体の相互作用の解明、人体への安全性の確認などを目的とする 5 か国共同プロジェクト “THz-BRIDGE” が行われた。このプロジェクトの結果、人体へのテラヘルツ波の安全性は確認されたこととなる。他方、2002 年には、ラザフォード・アップルトン研究所を中心に、期間限定のプロジェクト “StarTiger” が行われ、世界から研究者を募って 300 GHz 付近での黒体輻射によるパッシブイメージング技術が集中的に開発された。その結果、衣服の下の凶器や、本の裏側に隠した手などが見事に画像化された。

EU のテラヘルツ関連企業といえば、英国東芝ケンブリッジからのスピノフ企業である Teraview 社が有名である。時間領域分光法による分光器およびイメージングシステムを、皮膚がんなどの医学診断用や医薬品検査用に精力的に開発しており、分光器で定評のある Bruker 社とも提携している。

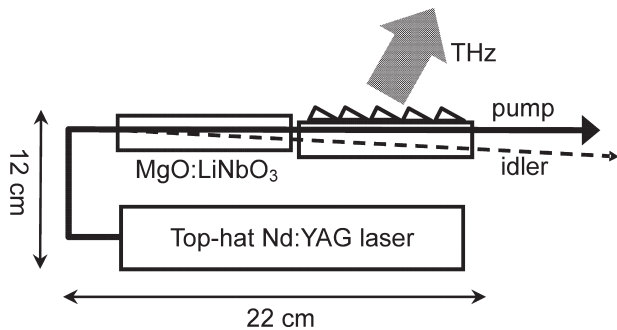


図1 トップハット Nd:YAG レーザー励起 TPG の実験系。

### 3. テラヘルツ波利用技術に関する筆者らの最近の進展

筆者らは、レーザー光の波長変換技術を用いて、既存の自由電子レーザーなどに比べはるかに小型簡便な広帯域波長可変テラヘルツ光源を開発し、さらなる高性能化、小型化などに関する研究を進めている。光注入型テラヘルツパラメトリック発生器は、パルス幅のフーリエ限界の狭線化 ( $0.003 \text{ cm}^{-1}$ , 100 MHz) を達成した。最近では、マイクロチップ Nd:YAG レーザーを励起光源とした超小型光注入型テラヘルツパラメトリック発生器の開発、あるいはトップハットビーム形状の Nd:YAG を励起光源として変換効率の増大などを進めている。

また、次のようなテラヘルツ波利用技術に関する研究を継続中である。まず、広帯域波長可変テラヘルツ光源を用いたテラヘルツ分光イメージング技術の研究開発を行った。これは、複数の試薬が混ざったサンプル中の特定試薬の分布密度を画像化する技術で、光源の広帯域波長可変性、および 3 THz 以下の低周波域で次々見だされている試薬類の指紋スペクトルを生かした成果である。この技術を用いて、郵便物検査、覚醒剤・爆発物所持検査、医薬品検査、病理組織診断、などへの応用が期待される。また、テラヘルツ波の散乱光モニタリングにより隠された粉体の摘発が可能であることを示し、大量に流通する郵便物の中から迅速に疑わしい郵便を抽出する実験を進めている。また、本特集で山下将嗣が別途報告するが、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡という新しい非破壊非接触の計測診断技術を阪大と共同で開発し、半導体チップ (LSI) の故障解析への応用を展開している<sup>12)</sup>。さらに、さまざまなテラヘルツ技術やミリ波技術を用いて、病理組織診断、DNA/タンパクチップ診断、凍結解凍モニタリング、農作物の鮮度や水分情報のモニタリング、各種非破壊検査、などへの応用展開を図っている<sup>13-17)</sup>。以下では、いくつかの最新の研究成果について要点を報告する。

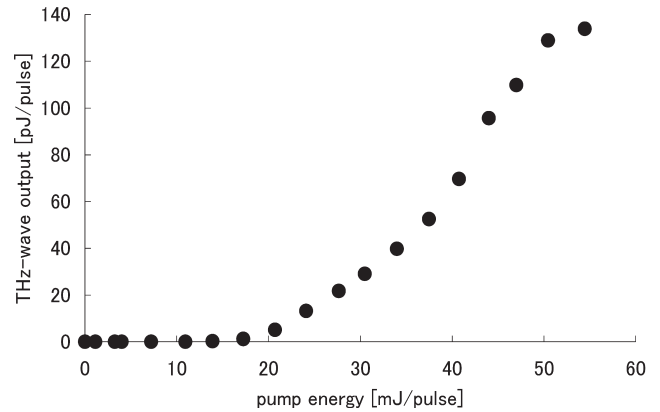


図2 トップハット Nd:YAG レーザー励起 TPG の入出力特性。従来型 TPG 比で約 100 倍の高出力を得た。

#### 3.1 トップハット Nd:YAG レーザー励起 TPG

筆者らは、テラヘルツ波を利用した応用研究において、幅広く利用可能なテラヘルツパラメトリック発生器 (THz parametric generator: TPG) の小型高出力化に関する研究を進めている。これまでのテラヘルツ波発生器の出力は、励起光による非線形結晶 ( $\text{MgO:LiNbO}_3$ ) の損傷閾値によって制限されていた。これを緩和するために、OPO 用に開発されたトップハット型のビームプロファイルを有する短パルス (7 ns) の Nd:YAG レーザー (BIGSKY 社製、18 cm 長) を使用した。図 1 に実験系を示す。コリメートされた励起光 (1064 nm) は、パラメトリックゲインを稼ぐために 2 本縦に並べた  $\text{MgO:LiNbO}_3$  結晶 ( $4 \times 5 \times 65 \text{ mm}$ ) に入射し、ノンコリニア位相整合条件に従い近赤外域のアイドラー光およびテラヘルツ波を発生させる。発生したテラヘルツ波は Si プリズムカップラーによって結晶外に取り出し、ボロメーターで検出した。共振器構造をもたないため小型化が容易であり、励起光源を含めた発生器全体は手のひらサイズ ( $12 \times 22 \text{ cm}$ ) である<sup>18)</sup>。図 2 にテラヘルツ波の入出力特性を示す。励起光エネルギーが 55 mJ/pulse のとき、130 pJ/pulse のテラヘルツ波の出力を観測した。これは、励起光がガウシアンビームの従来型 TPG<sup>19-21)</sup> に比べて 100 倍程度の出力増大となる。その要因は、トップハットビームであるためガウシアンビームの場合よりも結晶の損傷閾値が向上し、励起光強度を増大できたこと、および結晶 Y 面 (テラヘルツ波出射面) にポンプ光すなわち相互作用体積をより近づけることができたこと、の 2 点である。また、図 3 において、上下の線はそれぞれ結晶入射前後のポンプ光の時間波形であるが、これまでの筆者らの研究において最大となる 70% ものポンプデプレッションが観測され、結晶中では Manley-Rowe 限界に近いフォトンからフォトンへの変換効率が達成されてい

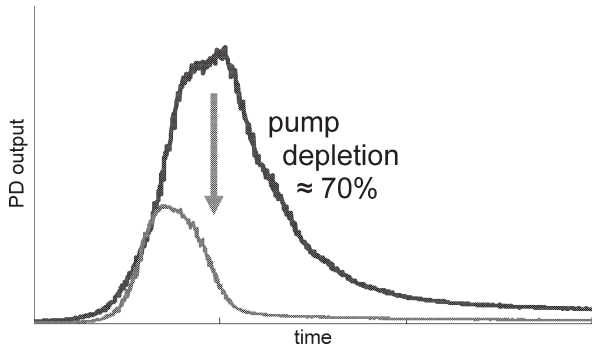


図3 トップハットNd:YAGレーザー励起TPGのポンプデプリジョン。筆者らの研究上最大の70%のデプリジョンを観測した。

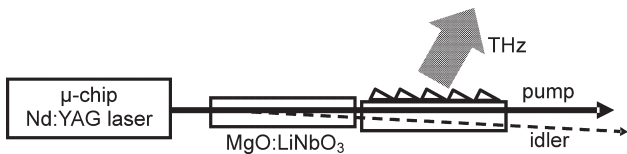


図4 マイクロチップNd:YAGレーザー励起TPGの実験系。レーザーは単一縦モード発振でありながら $10 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の超小型サイズである。

ることが示唆される。しかしながら、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶のテラヘルツ波に対する吸収係数が大きいこと、結晶中で発生したテラヘルツ波のほとんどは結晶外に取り出す前に吸収され熱に変まっているのが現状であり、今後ロスのない結合方式の検討および吸収係数の小さい半導体結晶などの導入が重要である。さらに、別の連続波レーザーを種光として注入することにより、線幅の狭窄化とともに数倍程度の出力向上が観測された。

### 3.2 マイクロチップNd:YAGレーザー励起TPG

筆者らは、テラヘルツ波を利用した応用研究において幅広く利用可能な、小型で単色性にすぐれた波長可変テラヘルツ波パラメトリック発生器に関する研究を進めている。最近、分子研および浜ホトと共同で、超小型Nd:YAGマイクロチップレーザー励起によるテラヘルツ波パラメトリック発生について検討を行い、良好な基礎的発生特性を得た<sup>22)</sup>。LD励起受動QスイッチNd:YAGマイクロチップレーザーは、バッテリー駆動も可能な低消費電力かつ手のひらサイズ ( $10 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ ) の超小型構成でありながら、単一縦・横モードで尖頭値は最大で1.7 MWに達する<sup>23)</sup>。この値は、従来筆者らが光注入型テラヘルツパラメトリック発生器に用いていた<sup>24,25)</sup> 1.5 mサイズの単一縦モードNd:YAGレーザー (Spectron社製) と同程度であるため、発生システムの飛躍的な小型化が期待できる。本実験では図4に示すように、マイクロチップレーザーからの出射励起光を、縦に2本並べた $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶

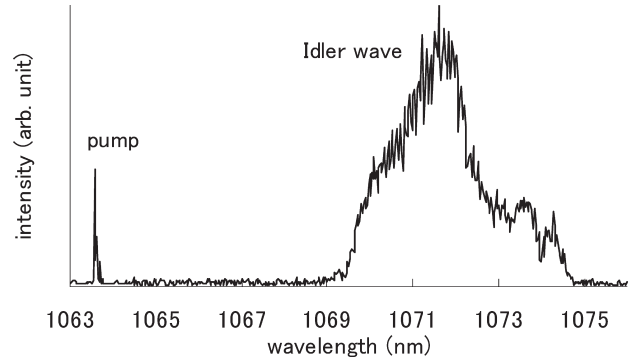


図5 マイクロチップNd:YAGレーザー励起TPGのアイドラー光スペクトル。1.5~2.7 THzのテラヘルツ波が発生していることに相当するが、励起光強度の増大に伴い、パラメトリックゲインが従来のTPGよりも高周波側にシフトしている。

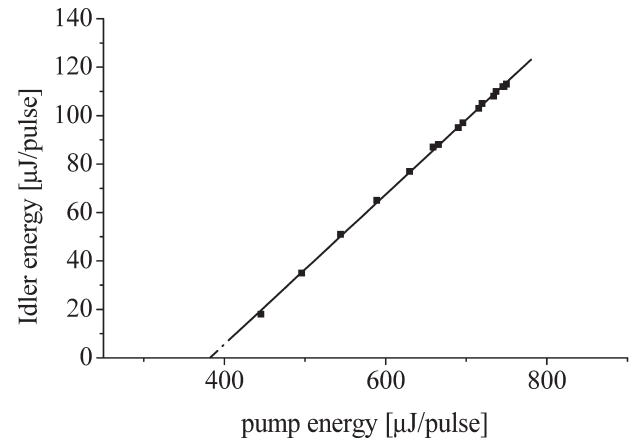


図6 マイクロチップNd:YAGレーザー励起TPGの入出力特性。単一縦モードのNd:YAGレーザーを用いた従来型TPG比で、発振閾値エネルギーは約100分の1に、損傷閾値は約6倍にそれぞれ改善された。

( $4 \times 5 \times 65 \text{ mm}^3$ ) に入射する構成とした。このとき、アイドラー光とテラヘルツ波が同時にパラメトリック発生するため、アイドラー光を観察することでテラヘルツ波の確認とした。図5に発生したアイドラー光のスペクトルを示す。1064 nmの励起光 ( $750 \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) に対して、1069~1075 nmのアイドラー光 ( $110 \mu\text{J}/\text{pulse}$ ) が観測された。これは、筆者らの従来型パラメトリック光源よりも高周波側にシフトした1.5~2.7 THzのテラヘルツ波が発生していることに相当するが、励起光強度の増大に伴いパラメトリックゲインが高周波側にシフトするという計算結果<sup>19)</sup> が裏づけられた。次に、入出力特性を図6に示す。パルス幅が450 psと短いため、従来の単一縦モードNd:YAGレーザー (パルス幅15 ns) 使用時に比べて非線形光学結晶 ( $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ) の損傷閾値が $450 \text{ MW}/\text{cm}^2$  から $2.9 \text{ GW}/\text{cm}^2$  へと約6倍も向上し、さらに発振閾値は $40 \text{ mJ}/$

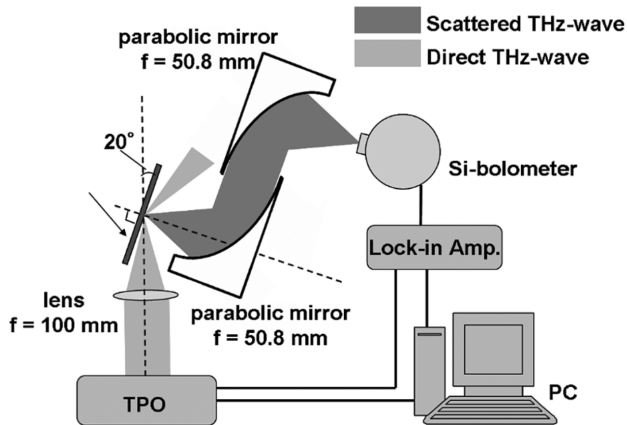


図7 テラヘルツ波の散乱光による郵便物内の粉体検出の実験系。

pulse から今回  $400 \mu\text{J}/\text{pulse}$  へと 100 分の 1 にまで低減し、安定発振領域の大幅な拡大が可能となった。テラヘルツ波の入出力特性は現在確認中であるが、今後のテラヘルツ波パラメトリック光源の超小型化に向けて期待が高まっている。

### 3.3 テラヘルツ波の散乱光による郵便物内の禁止薬物検査

海外から流入する郵便物は 1 日に数十万通といわれ、現状では全数検査はもちろんのこと、禁止薬物の違法流通を食い止める決定的手法はない。そこで筆者らは、テラヘルツ波を用いた非破壊診断法を新たに提案している<sup>26-28</sup>。本報では特に、実用において多数の郵便物処理が必要であることを考慮し、検査を 2 段階に大別した検査法を提案する。その第 1 段階では、テラヘルツ波の散乱光を利用した封筒内粉体の新たな検出法により疑わしい封書をスクリーニングし、さらに第 2 段階では疑わしい封書について分光スペクトル測定あるいは分光イメージングを行うことにより、封書内の内容物が禁止薬物か否かを効果的・効率的に判定を図ることが可能となる<sup>29</sup>。

おもな禁止薬物は粉体の状態で輸送されることが多く、その粒径はテラヘルツ波の波長と同程度の場合が多い。この際、テラヘルツ波にとって紙は十分に平坦かつ透明、粉体は散乱体とみなすことができる。ちなみに、通常のコピー用紙 2 枚でテラヘルツ波のエタロン効果が明瞭に確認できるほど、紙はテラヘルツ波にとっては鏡面なのである。郵便物中に粉体が存在する場合、テラヘルツ波を照射した際に発生する散乱光によって、未開封のままに粉体の有無が判別可能である。その際、周波数掃引や分光が不要であるため、迅速な検査が可能で、全数検査への道を開くものと期待される。

図 7 に構築した実験系を示す。テラヘルツ波光源には、

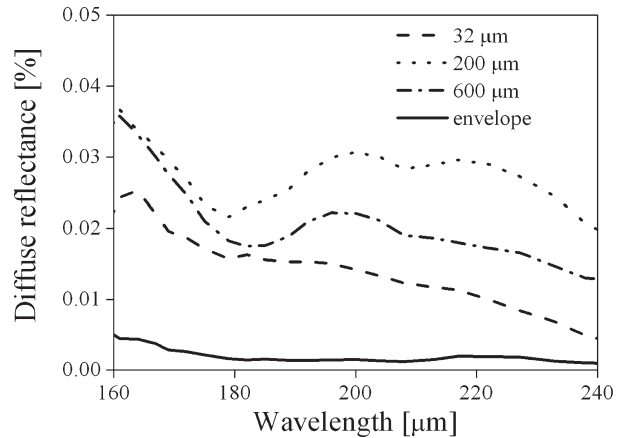


図8 テラヘルツ波の拡散反射率を、封筒のみの場合、および封筒中に異なる粒径 (32, 200, 600  $\mu\text{m}\phi$ ) のフルクトース粉末を封入した場合で比較した結果。封筒のみの場合 (envelope) に比べ、封筒中に粉体がある場合のほうが波長によらず拡散反射率が高く、強く散乱されていることがわかる。

1~2 THz の領域で波長可変なテラヘルツ波パラメトリック発振器 (THz-wave parametric oscillator: TPO)<sup>25</sup> を用いた。実験時のテラヘルツ波のピーク値出力とパルス幅は、それぞれ約 10 mW と約 10 ns である。サンプルはテラヘルツ波の出射方向に対して約  $20^\circ$  傾けて配置し、直接反射光を避けるように、サンプル上方に放物面鏡を設置して散乱光のみを検出器に導入した。したがって、サンプル表面で反射する正反射光成分は放物面鏡には達さず、検出されない配置となっている。測定試料として、ふるいによって粒径を 3 段階 (32, 200, 600  $\mu\text{m}$ ) に分けたフルクトース結晶粉末を、封筒に封入した場合と封筒のみの場合を比較しながら測定を行った。実験結果を図 8 に示す。横軸はテラヘルツ波の波長、縦軸は拡散反射率 (diffuse reflectance)  $I_s/I_0$  で、 $I_0$  はリファレンスとしてサンプルに照射されるテラヘルツ波強度、 $I_s$  は検出器で検出されるテラヘルツ波強度である。図で明らかなように、封筒のみの場合 (envelope) に比べ、封筒中に粉体がある場合のほうが拡散反射率が高く、強く散乱されていることがわかる。以上の結果から、今回用いたような反射・拡散光学系を用いて適切な波長を選択したテラヘルツ波を封筒に照射することで、内容物に粉体が入っているか否かを明瞭に判別できることが確認できた。

## 4. ま と め

本稿では紹介しきれなかったが、筆者らは、テラヘルツ波を用いた透過型非破壊水分モニタリングシステムを構築し、既存技術では測定困難とされていた葉の水分変化をリアルタイムで明瞭に計測できることを確認した。さらに、

テラヘルツイメージングシステムにより水分分布の可視化も行った<sup>17)</sup>。これらの手法は、植物生理学にとって有益な新ツールとして発展すると考えている。

さらに、プラスチックフィルム製の小袋の漏れ（マイクロリーク）の欠陥検出に、テラヘルツ波を用いた非破壊検査システムの開発を行い有効性を実証した<sup>15)</sup>。このような小袋生産ラインの高速スキャンに対応しうる欠陥検出システムの報告は筆者らの知る限りなく、今回開発したテラヘルツ波による非破壊非接触の検査システムは、実際に産業応用できる可能性を十分有しているといえる。

以上2つのようなテラヘルツ波の基本的な特性を応用した非破壊検査は基礎研究とは一線を画する“ローテク”ではあるが、今後予想されるテラヘルツ波の各種産業応用のおそらく主翼を担うものであり、軽視できない分野である。なお、本稿で紹介したTPGは、波長可変性はなく、発振線幅も1 THz以上あるが、上記の植物生理学計測や、シンプルな非破壊計測などの目的には適するため、今後もテラヘルツパラメトリック光源シリーズの一形態としてパームトップ化、堅牢化などの開発を進めていきたい。

既述してきたように、テラヘルツ波のユニークな特性はX線のように物質を“透視”でき、多くの目的に必要な数百 $\mu\text{m}$ の空間分解能を有し、かつ指紋スペクトルで試薬類を識別できる、というものであるが、実はこの能力を有するのはテラヘルツ波の中でも0.5~2.5 THzの狭い範囲に限られる。なぜならば、多くの物質は約2.5 THz以下の周波数帯のみ透過し、他方、試薬類が指紋スペクトルを有するのは約0.5 THz以上の周波数帯だからである。私見で恐縮であるが、X線~可視~赤外~電波と、あらゆる電磁周波数帯で、この“透視識別能力”を有するのは0.5~2.5 THzだけであるということができ、テラヘルツ波のこの特性こそが、今後の産業応用にとって重要であると考えている。幸いなことに、筆者らが開発中のテラヘルツパラメトリック光源、および世界的に広く用いられているTHz-TDS（時間領域分光法）は、この周波数領域をちょうどカバーしている。近年、テラヘルツ波を発生可能な量子カスケードレーザー（QCL）が急速に発展し、近い将来のテラヘルツ産業応用の本命という意見が強いが、QCLは原理的に前述の0.5~2.5 THz以下の低周波数域を発生することが得意でないため、上述したテラヘルツ波ならではの“能力”を活用するには開発要素が多く残されている。例えば、数年内に米英が実現しようと注力している可搬型テラヘルツ分光イメージングシステムによる自爆テロリストの摘発という目的に関しても、いくつかの研究グループはQCLを用いて開発を進めている。しか

しながら、服を透視して爆薬の指紋スペクトルを観測可能な0.5~2 THzの領域で、20~30 m先の分光イメージングが可能なほど十分な出力を可搬型装置上のQCLで発生させることは相当なチャレンジであることは間違いない。非線形光学が専門の筆者ゆえ臆目なのかもしれないが、70年代に広く研究されていた差周波光混合による半導体結晶からの広帯域波長可変テラヘルツ波発生をリバイバルし、最近のレーザー技術、波長変換技術を動員して高出力波長可変テラヘルツ光源を実現することが、実は上記のような目的にとって近道なのではないかと感じている。非線形光学効果を用いた光の波長変換の分野で世界の中心的役割を果たしてきたスタンフォード大Fejer研では、昨年、半導体結晶を用いた差周波光混合によるテラヘルツ波発生に関する研究を開始した。すなわち、2 $\mu\text{m}$ 帯の近赤外ナノ秒パルス光二波長を励起光源とし、擬似位相整合GaAs結晶中のコリニア位相整合条件での差周波光混合により、テラヘルツ波を高効率に発生させることをねらっている。かつて70年代に、米国のAggarwalら<sup>30,31)</sup>が2台の炭酸ガスレーザーからの10 $\mu\text{m}$ 帯のパルス光二波長を光源として、GaAs結晶中のノンコリニア位相整合によりManley-Rowe限界に迫る変換効率でサブミリ波を発生したが、そのリバイバルといえなくもない。むしろ、どの光源が本命かといひ争う必要は毛頭なく、例えば光波帯においては、半導体レーザーの登場後もパラメトリック光源は基礎研究のツールとして今日まで製品として立派に生き残っている。そのように、テラヘルツ波においても、QCLなどすぐれた光源の登場後も、非線形光学効果を用いた広帯域波長可変テラヘルツ光源は存在意義をアピールしつづけると筆者らは信じている。

本研究の遂行に関し、東北大学の小川雄一助手、エスアイ精工の山下雅弘共同研究員、東京理科大の進藤賢治研修生に感謝いたします。禁止薬物測定にご協力くださった科学警察研究所の井上博之室長、金森達之研究員に感謝いたします。テラヘルツ光源の開発に関し、理化学研究所フォトダイナミクスセンターの西澤潤一元センター長、伊藤弘昌チームリーダー、南出泰重研究員、碓智文研究員に感謝いたします。東北大学電気通信研究所田久長一技官にはミラーや結晶の特殊コーティングを、庄子鉄雄氏には結晶の研磨をそれぞれご協力いただいております。

## 文 献

- 1) 稲場文男：“新しい応用と展開”，応用物理，51（1982）397-403.

- 2) 萩行正憲, 谷 正彦, 長島 健: “テラヘルツ波応用技術”, 応用物理, **74** (2005) 709-717.
- 3) 阪井清美, 谷 正彦: “テラヘルツ光エレクトロニクス”, 応用物理, **70** (2001) 149-155.
- 4) 萩行正憲ほか: “テラヘルツ電磁波とその応用解説小特集号”, レーザー研究, **30** (2002) 352-390.
- 5) 阪井清美ほか: “テラヘルツ・遠赤外分光講座”, 分光研究, **54** (2005) no. 1-5.
- 6) 西澤潤一編: テラヘルツ波の基礎と応用 (工業調査会, 2005).
- 7) K. Sakai (ed.): *Terahertz Optoelectronics* (Springer, 2005).
- 8) D. Mittleman (ed.): *Sensing with Terahertz Radiation* (Springer, 2003).
- 9) D. L. Woolard (ed.): *Terahertz Sensing Technology* (World Scientific, 2004).
- 10) B. Ferguson and X. C. Zhang: “Materials for terahertz science and technology,” *Nat. Mater.*, **1** (2002) 26-33.
- 11) M. Nagel, P. H. Bolivar, M. Brucherseifer, H. Kurz *et al.*: “Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics,” *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 154-156.
- 12) M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa and M. Tonouchi: “Imaging of large-scale integrated circuits using laser-terahertz emission microscopy,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 115-120.
- 13) K. Kawase: “THz-imaging for drug detection and LSI inspection,” *Opt. Photonics News*, **15** (2004) 34-39.
- 14) A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase: “Terahertz imaging system based on a backward wave oscillator,” *Appl. Opt.*, **43** (2004) 5637-5646.
- 15) Y. Morita, A. Dobroiu, K. Kawase and C. Otani: “Terahertz technique for detection of micro-leaks in the seal of flexible plastic packages,” *Opt. Eng.*, **44** (2005) 019001-1-6.
- 16) 水野麻弥, 進藤賢治, 小川雄一, 大谷知行, 川瀬晃道: “ミリ波の吸収特性を利用した含水量および凍結状態のモニタリング”, 電気学会論文誌 E, **125-E** (2005) 229-233.
- 17) 小川雄一, 川瀬晃道, 水野麻弥, 山下将嗣, 大谷知行: “植物内水分の非破壊リアルタイム計測”, 電気学会論文誌 C, **124** (2004) 1672-1677.
- 18) 林伸一郎, 南出泰亜, 碓 智文, 伊藤弘昌, 小川雄一, 川瀬晃道: “テラヘルツ波パラメトリック発生器の高出力化”, 平成 17 年春季応用物理学関係連合講演会, 30pW2.
- 19) J. Shikata, K. Kawase, K. Karino, T. Taniuchi and H. Ito: “Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO<sub>3</sub> and MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **48** (2000) 653-661.
- 20) A. Sato, K. Kawase, H. Minamide, S. Wada and H. Ito: “Tabletop terahertz-wave parametric generator using a compact, diode-pumped Nd:YAG laser,” *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001) 3501-3504.
- 21) J. Shikata, K. Kawase, T. Taniuchi and H. Ito: “Fourier transform spectrometer with a terahertz-wave parametric generator,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 134-138.
- 22) 進藤賢治, 林伸一郎, 酒井 博, 中嶋和利, 菅 博文, 平等拓範, 川瀬晃道: “Nd:YAG マイクロチップレーザー励起テラヘルツ波パラメトリック発生器”, 平成 17 年春季応用物理学関係連合講演会, 30pW3.
- 23) 酒井 博, 曾根明弘, 菅 博文, 平等拓範: “LD 励起受動 Q スイッチマイクロチップレーザーの高輝度化”, 電子情報通信学会技術研究報告, **104** (2004) 23-27.
- 24) K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata and H. Ito: “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability,” *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 195-197.
- 25) K. Kawase, J. Shikata and H. Ito: “Terahertz wave parametric source,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35** (2002) R1-R14.
- 26) Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa and H. Minamide: “Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging,” *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 800-802.
- 27) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue: “Non destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints,” *Opt. Exp.*, **11** (2003) 2549-2554.
- 28) M. Usami, M. Yamashita, K. Fukushima, C. Otani and K. Kawase: “Terahertz wideband spectroscopic imaging based on 2D electro-optic sampling technique,” *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 141109-1-3.
- 29) 渋谷孝幸, 山下雅弘, 小川雄一, 大谷知行, 井上博之, 金森達之, 川瀬晃道: “テラヘルツ波の散乱およびスペクトルを用いた禁止薬物の非破壊検査技術”, 電気学会論文誌 C, **125-C** (2005) 545-550.
- 30) R. L. Aggarwal, B. Lax, H. R. Fetterman, P. E. Tannenwald and B. H. Clifton: “cw generation of tunable narrow-band far-infrared radiation,” *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) 3972-3974.
- 31) R. L. Aggarwal, B. Lax and G. Favrot: “Noncollinear phase matching in GaAs,” *Appl. Phys. Lett.*, **22** (1973) 329-330.

(2005 年 5 月 10 日受理)