

# 光発生・計測研究チーム

## Laboratory for Tera-Photonics

チームリーダー 伊藤 弘 昌  
ITO, Hiromasa

電波と光波の境界領域にある 0.1–100 THz の周波数領域（波長が 3 mm–3  $\mu$ m）は、未開拓な電磁波スペクトル空間であり情報通信にとって重要であるとともに、物性物理学、応用物理学、生命科学等の研究分野において新たな現象の発見をもたらす可能性がきわめて高い。

我々は、光領域の技術を基礎にサブ THz–100 THz（テラフォトンクス領域）における広帯域波長可変光源の開発を第一目的としている。具体的には、近年ますます発展を遂げつつある各種レーザーを励起光とし、非線形光学効果を用いた波長変換技術によってサブ THz–100 THz をカバーするテラフォトンクス光源を実現する。また、コンピュータ制御されたユーザーフレンドリーな光源とすることで、物性・生体等への応用研究の門戸を広く研究者に開放する。

さらに、周辺技術である検出や制御技術およびその応用システムまでの一連の研究を展開し、この電磁波スペクトル空間により生み出される新しい科学技術分野である「テラフォトンクス」の確立と体系化をはかる。研究の内容は、テラフォトンクス用の光源、検出制御素子およびテラフォトンクス応用システムの研究の 2 つに大きく分けることができる。

テラフォトンクス用広帯域周波数可変光源に関する研究では、研究対象となる各周波数領域固有の手法で周波数可変光源を開発する。これまでに、0.7–3 THz をカバーする LiNbO<sub>3</sub> 結晶のポラリトンによるパラメトリック発振を用いたテーブルトップサイズの簡便なコヒーレント光源を開発し、高く評価されている。また、光注入法によりテラヘルツ波の発振線幅をパルス波のほぼフーリエ変換限界（100 MHz 以下）に狭窄化を行うことに成功し、ますます本発振器の応用分光が期待される。並行して励起光源として LD 励起固体レーザーの開発を進めており、一体化することでより小型で実用的な全固体化 THz 波発振器を目指している。検出・制御素子に関する研究では、光波による電界検出素子の開発、および誘電体ドメイン超格子を用いた変調デバイスの開発を目指す。

テラフォトンクス応用システムに関する研究では、コヒーレント光源を用いた分光システム、およびイメージングシステムの開発を行う。今年度は、ユーザーフレンドリーな THz 分光システム（Tera-photonics Spectroscopic System: TSS-1）を企業に開発委託し完成させた。これにより、THz 分光システムを研究者が容易に操作できるようになった。さらに今後、それらのシステムを発展させ、情報通信や物性、生体などの幅広い分野へ展開をはかり、「テラフォトンクス」を確立していく。

国内外の研究動向として、THz 帯は発生、検出ともに困難であり、技術的に未発達な領域であるが、なかでも広帯域波長可変光源は、従来数種類の大規模装置に限られ、簡

便な光源の開発が求められている。THz 帯で任意の波長を発生し得る光源は、自由電子レーザーおよび光電変換型光源のみである。前者はカリフォルニア大学（サンタバーバラ校）の有する大規模装置でのみ可能であり、利用できる研究者は少数である。後者はフォトミキサー上で光波帯レーザーを光混合し、差周波に相当する THz 波を発生する方式であり、MIT や関西通総研で研究されているが、フォトミキサーの破壊限界のために出力が極めて小さいことが課題となる。他方、フェムト秒レーザーパルスを用いて、数百 GHz ~ 数 THz に跨る白色雑音に近い THz 電磁波の発生が近年盛んに行われており、その高い時間分解能を利用した時間領域分光法等への応用研究も盛んに進められているが、コヒーレントな相互作用には適さない。

このような背景の下、当研究チームは非線形光学効果を用いたコヒーレンシーの高い広帯域波長可変 THz 波光源の開発・応用を進めており、フェムト秒パルスによる手法とは全く異なる THz 波領域へのアプローチを行っている。

### 1. 光注入型 THz 波パラメトリック発生器に関する研究（川瀬）

我々は THz 波パラメトリック発振器（THz-wave Parametric Oscillator: TPO）および THz 波パラメトリック発生器（THz-wave Parametric Generator: TPG）に関する研究を進めてきた。TPO は広帯域波長可変 THz 波光源で、約 100–300  $\mu$ m（1–3 THz）で連続波長可変であり出力ピーク強度は数十 mW である。それに対して TPG は共振器を有さないため、発生する THz 波線幅は 1 THz 以上あり、出力も TPO よりはるかに小さかった。

TPG および TPO はナノ秒パルスレーザーを励起光源として動作するため、原理的にはフーリエ限界 100 MHz 以下のスペクトル線幅が可能である。光パラメトリック発振器の線幅狭窄化において用いられる光注入法は、分散素子を共振器中に挿入する方法と比較して挿入損失が無く、発振閾値を上げずにフーリエ変換限界までの線幅狭窄化が可能である。我々はこの光注入による線幅狭窄化を TPG に応用し、テラヘルツ波線幅の狭窄化に世界で初めて成功した。

TPG は、パラメトリック波長変換の過程でテラヘルツ波と同時に、ポンプ光よりわずかに周波数の低いアイドラ光を発生している。テラヘルツ波のスペクトル線幅を狭くするためには、ポンプ光とアイドラ光の発振スペクトル線幅狭窄化を同時に行う必要がある。そこでポンプ光として線幅狭窄化がなされている Q スイッチ Nd:YAG レーザ（波長 1.064  $\mu$ m、パルス幅 16 ns、発振スペクトル線幅約 30 MHz）を励起用に使い、連続発振の波長可変半導体レーザー（波長 1.066–1.074  $\mu$ m、スペクトル線幅 10 MHz 以下）の出力を TPG へ注入し、アイドラ光の狭窄化を行った。

この結果、THz 波の線幅が数百 GHz からフーリエ限界の約 100 MHz へ、出力が数 mW から数百 mW へ（エネルギー出力：数 pJ から 1 nJ 以上へ）と大幅に性能向上し、さらに波長可変性も 116–460  $\mu\text{m}$ （周波数：0.65–2.6 THz、波数：22–86  $\text{cm}^{-1}$ ）の広範囲で確認された。これにより、光注入型 TPG は今後自由電子レーザーや p-Ge レーザーに代わる常温動作のテーブルトップ光源として実用化が進むと期待される。

## 2. THz 波パラメトリック発生器励起用半導体レーザー励起固体レーザーの開発（佐藤）

TPO 励起光源には、従来フラッシュランプ励起固体レーザーが用いられてきた。このレーザーは、容易に高エネルギーのレーザー・パルスが得られる反面、フラッシュランプの動作寿命が短く、また高電圧を供給するための大型電源を必要とすることなどから実用上の制約を抱えていた。一方、近年の半導体レーザー（LD）技術の進展は、固体レーザー励起用 LD の高出力化を促進し、LD 励起固体レーザー（DPSSL）においてもフラッシュランプ励起レーザーに匹敵する高エネルギー・パルスの発生が可能となった。そこで、本研究では、TPO の実用化を目指し、小型でかつメンテナンス・フリーである新しい TPO 励起光源として Q スイッチ DPSSL の開発を行った。

レーザー装置の設計は、パルス・エネルギー 30 mJ、パルス幅 30 ns、繰り返し周波数 30 Hz を目標として行い、レーザー・ヘッド部は、2 個のパルス動作 LD により Nd:YAG ロッドを両側面から励起するサイドポンプ型構成とした。さらにレーザー・ロッド側面をセラミック製リフレクターで覆うことにより、LD 光をリフレクター内部に閉じ込め、これによって励起エネルギーの均一化および励起効率の向上を達成した。また、長パルス動作（ $\sim 30$  ns）に必要な共振器長を確保するため、 $\lambda/4$  波長板と偏光ビームスプリッターを組み合わせ、偏光を利用した共振器内光路長の増大を図った。この結果、共振器長 1.3 m を有するレーザーを 20 cm  $\times$  30 cm の小型サイズで構成することが可能となった。

Q スイッチ動作実験の結果、入射励起エネルギー 0.3 J に対し、出力エネルギー 33 mJ およびパルス幅 25 ns の Q スイッチ・パルスが得られた。繰り返し周波数は励起用 LD の動作条件により制限されるが、現状において 25 Hz 以上のパルス動作が可能である。さらに、本 DPSSL と一体化したテーブルトップサイズの TPG システムを構築し、THz 波の発生を確認した。

## 3. THz 波パラメトリック発生器を用いた分光システムの開発（南出）

テラヘルツ（THz）帯における小型でかつ簡便な分光システムは、生命科学、物性物理学、THz 帯の材料評価や新規デバイスの開発等にとって重要である。我々が研究・開発を行っている TPO は、小型で取り扱いも容易な広帯域周波数可変発振器として期待されている。本研究では、これまでに TPO の優れた特徴を利用し、周波数 0.95–2.65 THz（波長 113–315  $\mu\text{m}$ ）の THz 帯分光システムの開発に成功した。

本分光システムにおける TPO には非線形光学結晶として  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  を用いることで THz 波強度の増大および波長

可変域の拡大を図った。励起光源には、Q スイッチ Nd:YAG レーザー（発振波長：1.064  $\mu\text{m}$ 、繰り返し周波数：50 Hz、出力パルス半値幅：25 ns）を使用した。THz 波の発振周波数の可変操作は、励起光の結晶への入射角度を精密回転ステージ（可変回転角： $\pm 3^\circ$ 、最小可変角度：0.06 秒）で変化させて行った。本回転ステージを用いることで従来に比べ再現性が大きく向上した。

本分光システムの評価として、吸収スペクトルが既知の水蒸気、または塩化水素ガス（HCl 5% + He 混合ガス）を 870 mm 長のライトパイプ中に封入して常圧下にて分光測定を行った。それぞれの分光結果は、これまでに報告されている文献と良く吸収スペクトルが一致しており、本システムによる分光測定の信頼性を確認した。

また、THz 分光システムを誰でも簡単に使用できるユーザーフレンドリーなシステムを構築するため、励起光レーザーの繰り返し周波数に対応した高速信号処理電子回路や分光システムプログラムの開発を外委託し、独自の THz 分光システムとした（Tera-photonics Spectroscopic System: TSS-1）。今後、THz 波を応用する各種研究分野で利用されることが期待される。

## 4. 高速周波数可変テラヘルツ波パラメトリック発振器に関する研究（今井）

$\text{LiNbO}_3$  結晶のパラメトリック発振による広帯域波長可変 THz 波発生（テラヘルツパラメトリック発振器：TPO）はノンコリニア位相整合という高速周波数同調に有利な特徴を有しているが、従来アイドラ光共振器の回転によって周波数同調を行っていたため高速な周波数同調が困難であった。これに対してガルバノ式光学スキャナと共焦点光学系による新しい周波数同調法を開発し、高速ランダム波長アクセス可能な THz 波パラメトリック発振器を世界に先駆けて実現した。

TPO は長さ 50 mm の  $\text{LiNbO}_3$  結晶と 2 枚の反射鏡（ $R > 99\%$ 、 $R = 40\%$ ）からなるファブリペロー型共振器で構成されており、Q スイッチ Nd:YAG レーザー（波長 1.064  $\mu\text{m}$ 、パルス幅 25 ns、50 Hz、40 mJ/pulse）で励起された。ポンプ光ビームはガルバノ式光学スキャナで反射された後、焦点距離  $f = 200$  mm のレンズを 2 枚通過して TPO に入射する。2 枚のレンズ間隔を  $2f$  で配置した共焦点光学系によって、光学スキャナで与えられるビーム振れ角を  $\text{LiNbO}_3$  結晶内の 1 点を中心とするポンプ光の入射角に対応させた。本方式は共振器を回転せずポンプ光入射角によって位相整合条件を変化させるため、高速な THz 波長選択が可能である。しかも、連続的な周波数同調のみならず、任意周波数へ同調できる点も特徴である。同調速度はガルバノスキャナの応答によって決まり、1 ms である。

光学式スキャナドライバへの制御電圧変えることによって 150–290  $\mu\text{m}$  までの波長可変性が得られ、従来の同調法と同様な波長同調特性が得られることを確認した。また反射鏡の間隔を固定したファブリペロー干渉計を周波数選択フィルタとして用い、通過した THz 波パルス列を Si ボロメータで検出した結果、透過パルスの振幅変化より 1 パルス毎に発振波長 167  $\mu\text{m}$  と 193  $\mu\text{m}$  のスイッチングが得られることを確認できた。

波長可変の高速性は、波長可変テラヘルツ光源の応用上、

広い同調範囲，狭いスペクトル線幅と並ぶ重要な性能である。これまで報告されている波長可変テラヘルツ光源のなかで周波数同調の高速性まで追及した光源は存在しなかった。新しい同調法は分光計測の高速化のほか，差分吸収法による高感度ガス検出や差分イメージング等広範囲な応用が期待される。

## 誌 上 発 表 Publications

( 原著論文 ) \*印は査読制度がある論文誌

Kawase K., Shikata J. I., Minamide H., Imai K., and Ito H.: “Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator”, *Appl. Opt.* **40**, 1423–1426 (2001). \*

Imai K., Kawase K., Shikata J. I., Minamide H., and Ito H.: “Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator”, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1026–1028 (2001). \*

Shikata J. I., Kawase K., Karino K., Taniuchi T., and Ito H.: “Tunable terahertz-wave parametric oscillators using  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{MgO:LiNbO}_3$  crystals”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **48**, 653–661 (2000). \*

Hatanaka T., Nakamura K., Taniuchi T., Ito H., Furukawa Y., and Kitamura K.: “Quasi-phase-matched optical parametric oscillation with periodically poled stoichiometric  $\text{LiTaO}_3$ ”, *Opt. Lett.* **25**, 651–653 (2000). \*

Kawase K., Hatanaka T., Takahashi H., Nakamura K., Taniuchi T., and Ito H.: “Tunable terahertz-wave generation from DAST crystal by dual signal-wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate”, *Opt. Lett.* **25**, 1714–1716 (2000). \*

Avetisyan Y. H., Kawase K., and Ito H.: “Surface-emitted difference frequency generation in non-ferroelectric materials”, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **4111**, 382–390 (2000).

今井一宏，菅原郷史，川瀬晃道，四方潤一，南出泰亜，伊藤弘昌: “テラヘルツパラメトリック発振の光注入動作”，*信学技報*，No. LQE2000-5，pp. 25–30 (2000).

四方潤一，川瀬晃道，谷内哲夫，伊藤弘昌: “THz 波パラメトリック発生光を用いたフーリエ分光光度計”，*信学技報*，No. OME2000-120，pp. 31–36 (2000).

狩野健一，四方潤一，川瀬晃道，伊藤弘昌，佐橋家隆: “ $\text{MgO:LiNbO}_3$  を用いた THz 波パラメトリック特性の検討”，*電子情報通信学会論文誌 C* **83**，268–275 (2000). \*

今井一宏，菅原郷史，四方潤一，川瀬晃道，南出泰亜，伊藤弘昌: “テラヘルツパラメトリック発振の光注入動作”，*電子情報通信学会論文誌 C* **84**，184–191 (2001). \*

( その他 )

川瀬晃道，伊藤弘昌: “光波からテラヘルツ波への波長変換”，*エレクトロニクス* **45**，No. 9，pp. 60–63 (2000).

伊藤弘昌，小林洋平，小関俊政，猿倉信彦，小山二三夫，和田智之，平等拓範，今井一宏，南出泰亜，松本正行，佐藤尚，熊谷寛，向井剛輝，吉田正裕: “CLEO/QELS 2000 の報告”，*レーザー研究* **28**，526–547 (2000).

## 口 頭 発 表 Oral Presentations

( 国際会議等 )

Hatanaka T., Kawase K., Takahashi H., Nakamura K., Taniuchi T., and Ito H.: “Dual signal-wave parametric oscillation using PPLN for generating THz-waves from DAST crystal”, *Conf. on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conf. (CLEO/QELS 2000)*, San Francisco, USA, May (2000).

Imai K., Kawase K., Minamide H., Sato A., and Ito H.: “Power enhancement of terahertz parametric oscillator”, *Conf. on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conf. (CLEO/QELS 2000)*, San Francisco, USA, May (2000).

Hatanaka T., Nakamura K., Taniuchi T., Furukawa Y., Kitamura K., and Ito H.: “Quasi-phase-matched optical parametric oscillator with periodically poled stoichiometric  $\text{LiTaO}_3$ ”, *Conf. on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conf. (CLEO/QELS 2000)*, San Francisco, USA, May (2000).

Minamide H., Kawase K., Imai K., Sato A., and Ito H.: “Widely tunable  $\text{MgO:LiNbO}_3$  THz parametric oscillator and an application to THz spectroscopic system”, *Conf. on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conf. (CLEO/QELS 2000)*, San Francisco, USA, May (2000).

Ito H.: “Advanced operation of OPO using periodically poled materials to generate mid-IR to THz waves”, *6th Int. Symp. on Ferroic Domains and Mesoscopic Structures (ISFD-6)*, Nanjing, China, May–June (2000).

Avetisyan Y. H., Kawase K., and Ito H.: “Surface-emitted difference frequency generation in non-ferroelectric materials”, *Int. Symp. on Optical Science and Technology, (SPIE)*, San Diego, USA, July–Aug. (2000).

Kawase K., Shikata J. I., Minamide H., Imai K., and Ito H.: “THz-wave parametric oscillator with arrayed silicon prism coupler”, *Nonlinear Optics 2000*, Kauai Island, USA, Aug. (2000).

Ito H. and Kawase K.: “Terahertz parametric generation and oscillation with 100 MHz linewidth”, *2000 Ann. Affiliates Meet.*, (Center for Novel Optoelectronic Materials), Palo Alto, USA, Sept. (2000).

Shikata J. I., Kawase K., Taniuchi T., and Ito H.: “Fourier transform THz-wave spectrometer using THz-wave parametric generation”, *8th Int. Conf. on Terahertz Electronics (THz Conf. 2000)*, Darmstadt, Germany, Sept. (2000).

Shikata J. I., Karino K., Kawase K., Sahashi I., Kitamura K., Furukawa Y., Choi J. K., and Ito H.: “Efficient THz-wave parametric generation via polariton in doped  $\text{LiNbO}_3$ ”, *Int. Terahertz Workshop (ITW2000)*, Sandbjerg Estate, Denmark, Sept. (2000).

Imai K., Kawase K., Shikata J. I., Minamide H., and Ito H.: “Injection-seeded THz-wave parametric oscillator”, *Int. Terahertz Workshop (ITW2000)*, Sandbjerg Estate, Denmark, Sept. (2000).

Ito H. and Kawase K.: “Parametric generation of coher-

ent tunable terahertz-waves”, IEEE Laser and Electro-Optics Soc. 2000 Ann. Meet. (LEOS2000), Puerto Rico, USA, Nov. (2000).

Ito H. and Kawase K.: “Coherent tunable terahertz wave generation”, Int. Photonics Conf. (IPC 2000), (IEO/NCTU), Hsinchu, Taiwan, Dec. (2000).

Sato A., Kawase K., Wada S., and Ito H.: “A tabletop terahertz-wave parametric generator using a diode-pumped solid-state laser”, Advanced Solid-State Lasers 2001, (Optical Society of America), Seattle, USA, Jan. (2001).

(国内会議)

伊藤弘昌: “非線形光学効果を用いた広帯域 THz 波発生”, 日本化学会第 78 春季年会, 船橋, 3 月 (2000).

伊藤弘昌: “有機イオン結晶の成長とテラヘルツへの応用”, 日本化学会第 78 春季年会, 船橋, 3 月 (2000).

今井一宏, 菅原郷史, 川瀬晃道, 四方潤一, 南出泰亜, 伊藤弘昌: “光パラメトリック発振の光注入動作”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 福井, 5 月 (2000).

水野麻弥, 孫永睦, 大崎直樹, 川瀬晃道, 四方潤一, 伊藤弘昌: “有機非線形光学結晶 DAST を用いた CW 第 2 高調波発生”, 平成 12 年度電気関係学会東北支部連合大会, 会津, 8 月 (2000).

川瀬晃道, 四方潤一, 今井一宏, 伊藤弘昌: “THz 波パラメトリック発生 (TPG) への光注入による狭線化・高出力化”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).

四方潤一, 川瀬晃道, 伊藤弘昌: “THz 波パラメトリック発生光を用いたフーリエ分光光度計”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).

伊藤弘昌: “テラフォトリクスの新展開”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).

今井一宏, 川瀬晃道, 四方潤一, 南出泰亜, 伊藤弘昌: “テラヘルツパラメトリック発振器の光注入による線幅狭窄化”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).

川瀬晃道, 四方潤一, 今井一宏, 伊藤弘昌: “光注入によるテラヘルツ波パラメトリック発生 (TPG) の狭線化・高出力化”, 第 3 回理研 PDC テラフォトリクスフォーラム, 仙台, 10 月 (2000).

伊藤弘昌, 川瀬晃道: “Recent advance of tunable terahertz parametric generation”, 電気学会研究会 (光・量子デバイス研究会), 岡崎, 10 月 (2000).

四方潤一, 川瀬晃道, 谷内哲夫, 伊藤弘昌: “THz 波パラメトリック発生光を用いたフーリエ分光光度計”, 電子情報通信学会有機・光エレクトロニクス合同研究会, 東京, 10 月 (2000).

川瀬晃道, 伊藤弘昌: “テラヘルツ波パラメトリック発生”,

分子研レーザーセンター研究会, 岡崎, 11 月 (2000).

水野麻弥, 川瀬晃道, 伊藤弘昌: “有機結晶 DAST の 2 次非線形光学効果”, 第 55 回応用物理学学会東北支部学術講演会, 仙台, 12 月 (2000).

川瀬晃道, 伊藤弘昌: “パラメトリック発生による波長可変テラヘルツ電磁波の発生”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).

川瀬晃道: “広帯域波長可変な THz 波の発生”, 平成 12 年度理研と親しむ会, 東京, 2 月 (2001).

宇佐美威, 平間淳司, 伊藤弘昌: “1 mm 厚 congruent LiNbO<sub>3</sub> の周期分極反転”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).

川瀬晃道, 四方潤一, 今井一宏, 南出泰亜, 伊藤弘昌: “光注入型 THz 波パラメトリック発生 (TPG) の波長可変性”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).

今井一宏, 川瀬晃道, 伊藤弘昌: “高速周波数可変 THz 波パラメトリック発振器”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).

南出泰亜, 川瀬晃道, 今井一宏, 佐藤篤, 伊藤弘昌: “新同調方法を用いた広帯域周波数可変リング型パラメトリック発振器”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).

佐藤篤, 川瀬晃道, 南出泰亜, 和田智之, 伊藤弘昌: “全固体小型 THz 波パラメトリック発生システム (I)”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).

---

## Research Subjects and Members of Laboratory for Tera-Photonics

1. Injection Seeded TPG
2. Development of a Diode-Pumped Solid-State Laser for TPG
3. Development of THz-Wave Spectroscopic System Using TPO
4. Frequency Agile TPO

## Head

Prof. Hiromasa ITO

## Research Scientists

Dr. Kodo KAWASE

Dr. Kazuhiro IMAI

Dr. Hiroaki MINAMIDE

Dr. Atsushi SATO