

## テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.11, No.2

## 巻頭言

テラヘルツテクノロジーフォーラム会長 萩行 正憲

初代の阪井会長が 2012 年度をもって退任され、2013 年度より会長職を拝命いたしました。初代の阪井会長が長年のご努力により築かれたフォーラムのアクティビティを堅持し、さらに発展させるという重責ですので、非力な私には荷が重すぎる気がしますが、皆様のご協力を得て何とか責任が果たせればと思います。テラヘルツテクノロジーは、基本技術や応用提案はひととおりに出そろい、いよいよ真の産業応用に向けて羽ばたく時期に来ているように感じます。このために、従来の考え方の枠を超えて新しいチャレンジができればと考えております。会長としましては、若い方々の積極的な提案を期待しております。何卒よろしくお願ひいたします。

今年度は会長交代に加えて学術情報委員長も川瀬晃道先生（名古屋大学）より、山本晃司先生（福井大学）にご担当いただくことになりました。川瀬先生にはこれまでのご尽力に感謝いたしますとともに、山本先生に学術情報委員会が担当している本「テラテク通信」やフォーラムの Web ページを通じた情報発信においてリーダーシップを取っていただけるものと期待しています。

また、阪井清美前会長が K. J. Button 賞を受賞されるという慶事もありました。授賞式はドイツのマインツで行われた IRMMW-THz2013 にて行われ（写真参照）、阪井先生は“Exploring Frontiers Between Optics And Electronics - 1950 To The Present: A Prominent Period -”と題する Plenary 講演をされたことは皆様ご存じのとおりです。この賞は IRMMW 国際会議の創設者である故 K. J. Button 博士にちなんで命名されたもので、1991 年から実施されており、赤外・ミリ波・THz 波分野では大変権威のある賞です。日本人の受賞としては 3 人目であり、フォーラムとしても日本人としても大変名誉なことであるといえます。

フォーラムの活動も 11 年目を迎えています。フォーラムはテラヘルツ波技術の産学官の連携を目指した活動を行ってまいりましたが、今後さらにテラヘルツ波技術の産業利用を加速するために、より効果的な活動と、運営の効率化を図っていきたくと考えています。本フォーラムの活動は、主として民間企業の一般会員、および学識経験者の個人会員の皆様に支えられています。今後も皆様の変わらぬご支援をお願いする次第です。



写真左： IRMMW-THz 2013 での受賞式。写真右：受賞式後に賞状と記念メダルと一緒に撮影。

## 研究紹介

# 回転電気光学結晶法によるテラヘルツ波の電場ベクトル計測技術

慶應義塾大学理工学部物理学科 渡邊 紳一、安松 直弥

慶應義塾大学理工学部物理学科渡邊研究室では、テラヘルツ領域の新しい偏光計測技術を開拓し遠赤外～中赤外にかけての超広帯域分光計測を実現すべく、日夜研究開発に勤しんでいる。本報告では、私たちが開発したテラヘルツ波電場ベクトル計測の原理を簡単に紹介し、特に最近の研究進展について詳しく報告する。

## 1. はじめに：テラヘルツ波偏光計測の超広帯域化に向けて

雑誌 *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* の 2013 年 11 月号においてテラヘルツ波偏光計測を活用した物質の異方性計測(Anisotropy in the Terahertz Band)についての特集が組まれる[1]など、テラヘルツ帯域の偏光計測がにわかに脚光をあびている。以前よりテラヘルツ帯域の光のファラデー回転角を計測することによって半導体中のキャリア密度と易動度を調べたり[2]、テラヘルツ時間領域分光エリプソメトリーによって正確な光学定数を求めたり[3]、テラヘルツ帯域の光の複屈折計測を通してポリマー材料の配向の様子を調べたりする[4]など、テラヘルツ波偏光計測の多種多様なアプリケーションが提案・開発されてきたが、近年のワイヤーグリッド偏光子の広帯域化と高い消光比の実現を背景に研究開発が加速しているように感じられる。

このような背景のもと、私たちの研究室では将来の中～遠赤外領域にわたる超広帯域テラヘルツ偏光計測技術への要請を見据えて、ワイヤーグリッド偏光子不要の電気光学結晶の方位依存性を利用したテラヘルツ波偏光計測技術の開発を進めている。超広帯域偏光計測を用いると振動円二色性スペクトル計測を通して複雑な分子構造変化を議論できる可能性があり、生体分子分光の分野で今後とりわけ重要性を増すものと私たちは考えている。

## 2. 電気光学サンプリングの結晶方位依存性を利用したテラヘルツ波電場ベクトル計測

私たちは 2012 年に、テラヘルツ波の検出技術の一つである「電気光学(EO)サンプリング法」に用いる EO 結晶を高速回転させることで高速かつ精度よくテラヘルツ電場ベクトルの大きさと方向を計測できる「回転 EO 結晶法」を考案し、その検証実験を行った[5]。EO サンプリング法は、テラヘルツ電場印加によって EO 結晶に生じた電気光学効果を、近赤外プローブ光の偏光回転によって計測する手法である。私たちは、その EO 結晶を高速モーターに装着し角周波数 $\omega$ で回転させることによって、検出信号が以下の方程式に従い周波数 $\omega$ の関数として変化することを見出した。

$$C \cdot |\vec{E}| \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cos(\omega t + \beta_0 + \gamma) + \frac{3}{2} \cos(3\omega t + 3\beta_0 - \gamma) \right\} \dots (1)$$

ただし $C$ は比例定数、 $t$ は計測時間、 $|\vec{E}|$ はテラヘルツ電場の大きさ、 $\gamma$ はプローブ光の偏光角度とテラヘルツ電場ベクトルのなす角度、そして $\beta_0$ は回転開始時( $t = 0$ )の EO 結晶の初期角度である。実験結果を(1)式にあてはめて $|\vec{E}|$ と $\gamma$ が決定できれば、プローブ光照射時刻でのテラヘルツ電場ベクトルの大きさと向きが決定できる。そしてテラヘルツ光に対するプローブ光の遅延時間をディレイステー

ジで変化させることで、ベクトル情報を含んだテラヘルツ時間波形を得ることができる。

(1)式の最大のポイントは、信号が $\omega$ と $3\omega$ の二つの周波数成分を含むため、二つの周波数成分の位相の値を実験的に抽出して $\beta_0$ と $\gamma$ の連立方程式を解くことができることである。従って正確な値を決定するのが難しい $\beta_0$ の値を知る必要なく、電場ベクトルの角度 $\gamma$ が決定できる。私たちは何度もモーターを止めたり動かしたり、またモーターに装着したEO結晶の初期角度 $\beta_0$ を手で強制的に変えたあとにモーターを回したりして実験を繰り返し行ったが、常に再現性良く $\gamma$ の値を決定できた。

本手法はワイヤグリッド偏光子を使用する必要がないため、偏光スペクトル計測の広帯域化が容易である。(1)式は閃亜鉛鉱型構造をもつ(110)面結晶(ZnTe, GaP等)を使えばいつでも成り立つ式であるため、例えば10 fs程度のパルス幅の短いレーザーをテラヘルツ光発生・検出光源に用い、厚さの薄いZnTe結晶を回転EO結晶として用いれば中赤外領域のテラヘルツ光でも偏光分析が可能となるだろう。そこで、現在私たちはパルス幅の短いレーザー光源の開発を開始しスペクトル計測の広帯域化をはかっている。

### 3. EO結晶に残存する複屈折のテラヘルツ電場ベクトル計測に与える影響(実験)[6]

テラヘルツ波偏光計測装置の開発にあたり障害と考えられたのは、EO結晶に残存する残留複屈折の影響であった。この問題は古くから知られており、これを解決するためにテラヘルツ波が存在するときとしないときの差分信号を抽出する信号処理がJiangらにより提案されていた[7]。回転EO結晶法でもこれと同様の差分信号処理を行っているが、以下の新たな問題が加わるためJiangらと同じ手法で問題が解決できるのかが、はじめ自明ではなかった。

(1) EO結晶が回転するので、残留複屈折の屈折率固有軸も回転する。

(2) EO結晶の回転中心にプローブ光が照射されない限り、回転中、異なる位置にプローブ光が照射される。

これらの効果を検証するため、高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波の発生と偏光検出を行い、テラヘルツ電場のEO効果で引き起こされる複屈折が、残留複屈折に比べて著しく小さい条件のもとで正しく偏光計測ができるかを検証した。

図1(a)は、EO結晶を二回転した時に得られる電圧信号である。横軸は結晶角度をデータ点で記したものであり、125点が一回転分に相当する。縦軸は検出電圧信号で、 $\pm 4$  V程度の信号が得られている。縦軸の電圧信号はEO結晶の残留複屈折に起因したプローブ光の偏光回転を表すものであり、結晶角度の関数として同じ形の信号が二回繰り返されているのが分かる。

実は、図1(a)のデータはテラヘルツ波のON/OFFを繰り返しながら二回計測したもの

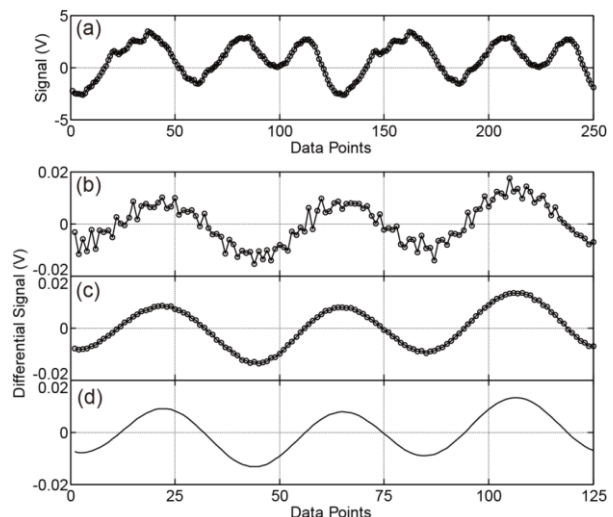


図1：テラヘルツ電場のEO効果で引き起こされる複屈折が、残留複屈折に比べて著しく小さい条件のもとでの式(1)の検証実験(論文[6]より転載)

であり、EO 効果に起因する微弱な偏光回転信号が重畳されている。そこで、図 1 (a)のデータについてテラヘルツ波が存在するときとしないときの差分信号処理を施したものが図 1 (b)である。図 1 (a)に存在した±4 V 程度のバックグラウンド信号がきれいに消え去り、±0.01 V 程度の EO 効果に起因した信号があらわれている。また図 1 (c)は 1,000 回積算をして S/N を向上させた実験データであり、図 1 (d)に示した図は、図 1 (c)を(1)式を用いてフィッティングした結果である。

私たちは、残留複屈折に起因する信号 (±4 V) に対して 1/400 程度の大きさしかないテラヘルツ波の EO 効果に起因する信号(±0.01 V)が、差分信号処理を施すことで(1)式に従って極めて忠実に再現されたことに、大きな驚きを感じた。しかも図 1 (c)のように積算を繰り返すこともなく、たった一回の計測[図 1 (b)]で(1)式が再現でき、 $|\vec{E}|$ と  $\gamma$  を決定することでテラヘルツ波の電場ベクトル計測ができるのである。なぜここまで有効に差分信号処理が働くのか、それについての理解を深めるため、私たちは EO 検出信号の理論を詳細に調べることにした。

#### 4. EO 結晶に残存する複屈折のテラヘルツ電場ベクトル計測に与える影響 (理論) [8]

EO サンプリングの検出感度の結晶方位依存性については van der Valk らによって便利な形に定式化されていた[9]。そこで私達は彼らの定式化を利用し、結晶角度に依存する残留複屈折の効果も取り入れた EO サンプリング信号の定式化を行い、以下の結論を得た。

- (1) EO 結晶に残留複屈折があるとき、EO サンプリング法で用いる 1/4 波長板 (QWP) の屈折率固有軸とウォラストンプリズム (WP) 透過後のプローブ光偏光面のなす角度を  $45^\circ$  に正確に合わせた上で差分信号処理を行えば、残留複屈折に起因する偏波計測誤差はゼロとなること。
- (2) 偏波計測誤差は、上記角度の  $45^\circ$  からの偏差と EO 結晶中の残留複屈折の大きさに依存すること。ただし大切なことは計測するテラヘルツ波の電場強度には依存しないことである。従って発生するテラヘルツ波の電場強度が小さい高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ偏波計測を行ってもデメリットは生じない。
- (3) EO 結晶に残留複屈折が存在しなければ、QWP や WP の角度あわせを特に行わなくても、正確にテラヘルツ偏波計測ができること。

要約すると、「EO サンプリング法で用いる QWP と WP の角度あわせを正確に行えば、残留複屈折に起因する信号は差分信号処理で完全に消し去ることができる。角度あわせが若干不正確でも、残留複屈折が小さい結晶を利用すれば偏波計測誤差を小さくできる。この結果はテラヘルツ電場の大きさによらない。」ということである。これらの結果は決して自明ではなく、実験検証を含めて本結論を得るために一年以上の時間を要した。

#### 5. おわりに

私たちが 2012 年に「回転 EO 結晶法によるテラヘルツ波偏光計測」を発表した時には、その実験デモンストレーション用の光源として、発生するテラヘルツ電場強度の大きな再生増幅器を用いていた。当時から EO 結晶内の残留複屈折の計測に与える影響は認識しており、はたして発生するテラヘルツ電場強度が小さい高繰り返しフェムト秒レーザーでも正しく電場ベクトル計測できるのかという一抹の不安があった。しかし今回、実験と理論解析を通じて、テラヘルツ電場強度が小さい場合でも同手法が問題なく使えることが確認でき、今後の各種応用計測に向けて大きな一歩を踏み出せたもの

と考えている。

謝辞:残留複屈折の効果について示唆に富んだご助言をくださった深澤亮一様に深く感謝いたします。また本研究に協力いただいた渡邊研究室の皆様には感謝します。なお本研究は文部科学省科学研究費補助金(24656054, 24340070)、JST A-STEP、光科学技術研究振興財団、住友財団、慶應義塾先端科学技術研究センターの支援を受けて行われました。

## 参考文献

- [1] E. Castro-Camus, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **34**, 661 (2013)とその引用文献。
- [2] D. M. Mittleman, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 16 (1997).
- [3] T. Nagashima and M. Hangyo, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3917 (2001).
- [4] C. Jordens, *et al.*, *Appl. Opt.* **48**, 2037 (2009).
- [5] N. Yasumatsu and S. Watanabe, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 023104 (2012).
- [6] S. Watanabe, *et al.*, *Sensors* **13**, 3299 (2013).
- [7] Z. P. Jiang, X. G. Xu, and X. -C. Zhang, *Appl. Opt.* **39**, 2982 (2000).
- [8] N. Yasumatsu and S. Watanabe, *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, 2940 (2013).
- [9] N. C. J. van der Valk, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **21**, 622 (2004).

## 研究室紹介

# 福井工業大学 電気電子情報工学科 栞島研究室 (レーザーカオス研究室)

現在、栞島研究室では、「レーザーカオスを用いた THz 発生」の研究を行っています。レーザーカオス光は、レーザー光に比べ、時系列がマクロに揺らぎ、スペクトルが広がるため、時間的にはパルス状のコヒーレントになりますが、空間的なコヒーレンスは元（単体）のレーザーと同等に保たれます。また瞬間のスペクトルは激しく変動しますが、時間平均は安定化します。カオスは、連続系の場合、3変数以上で発生します。筆者は、誘導分極と反転分布の緩和が速く電場に從属し、一変数系となるためカオス発生が困難だと考えられていた、単一モード class A レーザーにおいて、光学的遅延帰還を加えることで、系が無次元次元となることでカオス光が発生することを、岩澤宏先生（福井大学名誉教授）とともに実験により示しました。また、単一モード class A レーザーの理論方程式も導出し、数値計算により定性的に現象も証明しました。

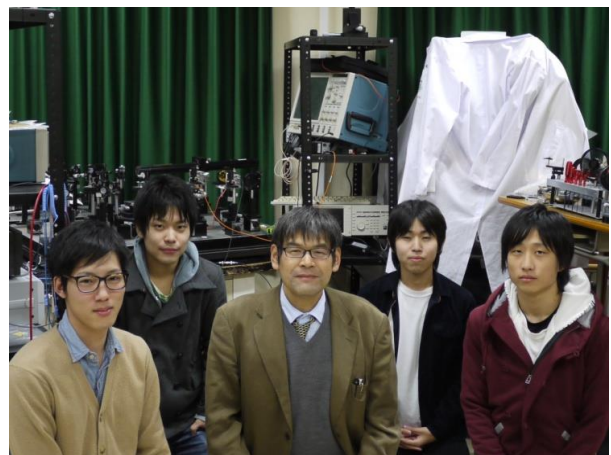
このカオス光の応用の一つとして、レーザーカオスを用いたテラヘルツ (THz) 波の発生を阪大の萩行先生、福井大学の谷先生、栗原先生、山本先生とともにを行っています。多モード半導体レーザーを用いたテラヘルツ時間領域分光法 (MLD-THz-TDS) は、安価なテラヘルツ波発生検出方法として開発されましたが、0.5 THz 以下に発生帯域が限られ、発生効率の良い空間的コヒーレンスに優れる半導体レーザーを用いると発生が安定しないなどの問題がありました。この点を、レーザーカオス光励起とすることで解決しつつあります。また最近は検出感度の向上方法も共同研究しています。

学生の卒業研究を通じた教育にも力を注いでいます。基礎力養成と、考える力の育成に力を注いでいます。学会発表は学部生からおこなっています。現在、学部一年の学生も本人の希望で研究室に所属（大学で他とのつながりを作ることに役立っています）して研究をしています。既に学会講演を行いました。冷や汗をかきながらも一つ一つ克服してゆくことで少しずつでも達成感を味わってもらいたいと思っています。また研究室の学生が達成感を味わうことで伸びて行くのは非常に楽しみです。「研究は、苦しく困難なことが多いけれども、楽しく」が研究室のモットーです。また平成 25 年 1 月のレーザー学会では、当研究室の白尾拓哉が、優秀論文発表賞も受賞しました。このように、多くの方々のお世話になりながら、学生とともに成長してゆきたいと思っています。

レーザーカオスの議論を深めるためにレーザー学会にレーザーカオス・ノイズダイナミクスとその応用」専門委員会も立ち上げました。自由な討論の場を設けることを主眼としていますので、皆様の参加を歓迎します。

福井工業大学は、福井の市街地にあり、福井大学にも近いところにあります。福井にお越しの際には、是非、当研究室にお立ち寄りください。

(栞島 史欣 : [kuwashima@fukui-ut.ac.jp](mailto:kuwashima@fukui-ut.ac.jp))





## 国内会議・国際会議予定

2014 年度（平成 26 年度）総会および第 12 回講演会のお知らせ（予定）

- ◆日時： 2014 年 5 月 16 日（金）
- ◆場所： 理化学研究所（和光市）
- ◆ 詳細・参加申込みは 後日掲載いたします（<http://www.terahertzjapan.com/index.html>） ◆

### 国際会議およびシンポジウム等

- 8th Asian Conference on Ultrafast Phenomena (ACUP 2014)  
January 20-22, 2014 (Kobe, Japan)  
<http://www2.kobe-u.ac.jp/~tominaga/ACUP2014/site.html>
- SPIE Photonics West 2014  
February 1-6, 2014 (California, USA)  
<http://spie.org/x2584.xml>
- The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2014 (IW-FIRT 2014)  
March 5-7, 2014 (Fukui, Japan)  
<http://fir.u-fukui.ac.jp/IWFIRT2014/>
- 6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications  
March 11-1, 2014 (Kaiserslautern, Germany)  
<http://www.ipm.fraunhofer.de/en/tradefairs-events/thz-workshop-2014.html>
- 5th International THz-Bio Workshop 2014  
April 3-4, 2014 (Workshop); April 2, 2014 (Mini-course) (Seoul, Korea)  
<http://www.thzbioworkshop2014.com/>
- 4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2014)  
May 11-14, 2014  
<http://www.myeos.org/events/tst2014>
- 19th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2014)  
July 7 - 11, 2014 (Okinawa, Japan)  
<http://up2014.org/>
- Applied Superconductivity Conference  
August 10-15, 2014 (North Carolina, USA)  
<http://ascinc.org/>

- The 39th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves (IRMMW-THz 2014)  
September 15-19, 2014 (Tucson, USA)  
<http://www.irmmw-thz2014.org/>

#### 国内会議および研究会等

- テラヘルツ応用技術講演会  
2014年1月29日（名古屋市工業研究所管理等1Fホール）  
<http://www.nipc.or.jp/sansien/tera/pdf/tera140129.pdf>
- 日本物理学会第69回年次大会  
2014年3月27日～30日（東海大学湘南キャンパス）  
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/>
- 2014年第61回応用物理学会春季学術講演会  
2014年3月17日～20日（青山学院大学相模キャンパス）  
<https://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/>
- テラヘルツ科学の最先端  
2014年8月4日～5日（沖縄科学技術大学院大学）
- 2014年日本物理学会秋季大会（物性）  
2014年9月7日～10日（中部大学 春日井キャンパス）  
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/future.html>
- 2014年応用物理学会秋季講演会  
2014年9月17日～20日（北海道大学 札幌キャンパス）  
<https://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/>

#### テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.11, No.2

発行日 2013年12月27日  
企画・編集 谷 正彦（福井大学）／山本晃司（福井大学）  
メール：kohji@fir.u-fukui.ac.jp  
発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局  
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3  
大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 未来物質領域 芦田研究室内  
Tel: 06-6850-6507 Fax: 06-6850-6509  
E-mail: teratech@terahertzjapan.com  
<http://www.terahertzjapan.com>