

解禁時間 (テレビ、ラジオ、WEB) : 平成 25 年 8 月 12 日 (月) 午前 2 時 (日本時間)  
(新聞) : 平成 25 年 8 月 12 日 (月) 付朝刊



東京大学 大学院  
理学系研究科・理学部  
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO



東京農工大学

平成 25 年 8 月 8 日  
科学技術振興機構 (JST)  
Tel : 03-5214-8404 (広報課)  
東京大学  
Tel : 03-5841-7585 (理学系研究科 広報室)  
東京農工大学  
Tel : 042-367-5895 (総務課 広報室)

## 光の電場の向きと波形を自在に制御することに成功 ～光による物質操作の新しい可能性に道を開く～

### ポイント

- 光の電場の向きと大きさを設計通りに時間変化させることに初めて成功し、物質を分子原子レベルで自由に操作する可能性を開く。
- 生体分子の特定や、天文観測、新物質の合成、医学診断など、基礎から実用分野に至る幅広い分野において、新しい光の活用法を開く技術。

JST 課題達成型基礎研究の一環として、東京大学 大学院理学系研究科 五神 真 教授および東京農工大学 大学院工学研究院 三沢 和彦 教授らは、光を用いて物質を分子原子レベルで操作するために重要な、光の持つ電場の向きと大きさの時間変化を自在に制御できる手法を、世界で初めて実現しました。

光は電場と磁場の振動が空中を伝わる波です。一方、物質はイオンや電子からできています。光が物質に当たると、物質中のイオンや電子は光の電場に沿った方向に動かされます。この電場の向きや大きさを自由に变化させられれば、イオンや電子の運動を自在に操作できると考えられています。このような光を当てることで物質の組成や構造を精密に分析したり、物質を光で変化させたりすることが可能となります。ところが、光の電場の向きと大きさの時間変化を完全に自在に制御するのは、技術の進歩が目覚ましい可視光の周波数領域においてすら前例がありませんでした。

今回、目で見える可視光よりも 100 分の 1 ほど低い周波数を持つテラヘルツ光<sup>注1)</sup>の自在な制御に成功し、光の電場の向きや波形を完全に制御できることを示しました。今回研究グループは、テラヘルツ光を発生させるために結晶に照射する可視光レーザーの振動方向と振幅の時間変化を制御することで、テラヘルツ光の電場の向きと時間波形を自在に制御することに成功しました。また、目的のテラヘルツ波を得るために可視光レーザーパルスに必要な条件を求める逆問題を解くアルゴリズムも新たに考案しました。

今回の成果は、光を自在に制御する手法を開拓するという基礎的意義にとどまらず、テラヘルツ光の応用の可能性を大きく広げるものです。

本研究は、東京農工大学の佐藤 正明 氏、東京大学の樋口 卓也 氏、神田 夏輝 氏の 3 名の博士課程大学院生 (当時) が中心に連携協力のもとで研究を進めたものです。

本研究成果は、2013 年 8 月 11 日 (英国時間) 発行の英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン速報版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域 : 「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

(研究総括 : 伊澤 達夫 元 東京工業大学 理事・副学長)

研究課題名 : 「時空間モルフロジーの制御による能動メゾ光学」

研究代表者 : 五神 真 (東京大学 大学院理学系研究科 教授)

研究期間 : 平成 18 年 10 月 ~ 平成 24 年 3 月

JST はこの領域で、情報処理・通信、材料、ライフサイエンスなど、基礎科学から産業技術にわたる広範な科学技術の基盤である光学および量子光学に関して、光の発生、検知、制御および利用に関する革新的な技術の創出を目指しています。上記研究課題では、物質の形態に敏感な光学効果に着目しその動的制御による光操作法“能動メゾ光学”を開拓することを目標に研究を行いました。

## ＜研究の背景と経緯＞

テレビや携帯電話で使用されている電波と、目で見ることのできる光はどちらも電場と磁場の振動が空中を伝わる電磁波であるという共通点があります。これらの波はその周波数によって区別され、可視光は電波よりも何桁も高い周波数を持ちます。電波は多くの物質を透過する性質があり、特定の化学物質のみを検知することなどが可能であるため、空港における安全検査などで利用可能です。一方で可視光はレンズで結像することができ、レーザー光線のように直進させることもできるため、望遠鏡のように遠く離れたものを観察したり、顕微鏡のように小さなものを拡大したりするのに適しています。

この2つの周波数帯域の間にあるテラヘルツ光は、電波と同様に多くの物質を透過する性質と、可視光と同様に直進する性質の両方を併せ持つために近年特に注目を集めています。例えばテラヘルツ光を用いることで、封筒の中にある爆薬の写真を撮ったり、生体内の水の分布を調べたり、天体のガスの分布を観察したりすることができます。

このように、テラヘルツ光を用いることで可視光では見ることのできないものを観察することができます。この特長に加えて、テラヘルツ光によって物質の性質を制御するという新たな応用が期待されています。一般に光が物質に当たると、物質中のイオンや電子は光の持つ電場によって、その方向に強制的に動かされます。光によって動かせる対象は光の周波数によって決まっています。目に見える光は、主に電子を強制的に動かすのに対して、テラヘルツ光は物質の構造の骨格となるイオンや分子を動かすことを得意とします。そのため、テラヘルツ光の電場の向きや大きさの時間変化を自由に設計できるようになれば、物質構造の制御に大きく近づくことが期待されています。

しかしこれまで、光が持つ振動する電場の向きや大きさを制御することは非常に困難であり、すでに技術の進歩が目覚ましい可視光の周波数領域でも完全に自在な制御を行った例はありません。さらに、テラヘルツ光は近年になってようやく利用され始めたこともあり、電場の振動する方向を変化させることすら難しい状況でした。

## ＜研究の内容＞

今回、東大と農工大の研究グループは、テラヘルツ光の電場の向きと大きさを設計通りに時間変化させることに初めて成功しました。非常に短い時間幅の可視光のパルスレーザーを非線形光学結晶<sup>注2)</sup>と呼ばれる透明物質に照射するとこの時間幅と同程度の周期で振動するパルス状のテラヘルツ光が発生します。この方法によって作られたテラヘルツ光パルスは、その電場の振動が始まるタイミングを振動の周期よりはるかに細かい精度で定めることができるという特長があります。この開始のタイミングは光パルスの重要なパラメーターで、これを決められないと電場の振動の方向は決まっても向きを決めることはできず、電場に沿って動く電子やイオンの運動が動き始める向きも分からなくなってしまいます。このタイミングの制御の難しさが可視光において電場の自在な制御の大きな障害となっていました。テラヘルツ光であれば、この困難を容易に乗り越えられることに研究グループは着目したのです。

しかし、テラヘルツ光の制御には一方で大きな課題が残されていました。テラヘルツ光の電場の振動の方向を変化させることが困難だったのです。そこで、テラヘルツ光パルスの発生に用いる可視光レーザーパルスの電場の振動方向を時間変化させ、そのレーザーを

3回回転対称性<sup>注3)</sup>という性質を持つ結晶に入射することで、発生したテラヘルツ光の電場の振動方向を操作できるという新しい方式を考案しました。この方法では、最初から目的の振動方向を持つようなテラヘルツ光を発生させることができるので、一度発生したテラヘルツ光の振動方向を後から変化させる必要がなく、この困難な課題を乗り越えることができました。

可視光レーザーの電場振動方向の時間変化は、今回新たに考案し開発した「ベクトル波形整形器<sup>注4)</sup>」によって実現しました。さらに、目的のテラヘルツ光パルスを作るためにどのような可視光レーザーパルスを用意すれば良いかという逆問題を解くアルゴリズムを新たに開発しました。

このように、これまで技術的に制御が困難であったテラヘルツ光に着目し、その特長を生かすという逆転の発想が、成熟した可視光領域でも困難であった光の電場の向きと大きさの時間変化の自在な制御を可能にしました。

### <今後の展開>

今回の成果は、光を自在に制御する新しい手法を考案しそれを実証したという基礎的意義にとどまらず、テラヘルツ光の応用の可能性を大きく広げる成果です。電場の向きや時間波形が自由自在に設計されたテラヘルツ電磁波を使うことで、材料科学・生体分子計測・電波天文学などの基礎学術分野から情報通信・環境計測・医療診断などの実用分野に至る幅広い分野で活用の自由度が飛躍的に広がるものと期待されます。現在、光パルスの極短化の研究が加速して進んでおり、この手法はテラヘルツにとどまらず、可視光までの広い周波数帯域に、今後活用されると期待されます。

### <付記>

本研究は、東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻および大学院工学系研究科 光量子科学研究センターの五神研究室（五神 真 教授、樋口 卓也 氏、神田 夏輝 氏（兼 理化学研究所）、小西 邦昭 特任助教、吉岡 孝高 助教）と、東京農工大学 大学院工学研究院および東京農工大学 光ナノ科学融合研究リングの三沢研究室（三沢 和彦 教授、佐藤 正明 氏、鈴木 隆行 助教）の共同研究によって行われました。冒頭に述べたように、CRESTにおいて、2つの大学のグループが密接に連携して研究を行った結果得られたものです。特に、大学院博士課程の学生諸君が機関を越えて連携協力したもので、この事業の特性を存分に生かしたものです。

農工大で開発された、光波形制御技術を佐藤 正明 氏が東京大学に持ち込み、神田 夏輝 氏が開発したテラヘルツ波の偏光解析装置と組み合わせ、2人が中心になって実験を行いました。東京大学の樋口 卓也 氏は、この研究の重要な要素である波形制御法の理論の構築と、波形制御アルゴリズムの開発を担当しました。

本成果の一部は以下の事業の支援を受けています。文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点プログラム」、文部科学省「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」、文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域「半導体における動的相関電子系の光科学」、内閣府／日本学術振興会 最先端研究開発支援プログラムおよび日本学術振興会 特別研究員奨励費、文部科学省「持続可能型社会実現のための光・ナノ科学融合研究推進」。

<参考図>

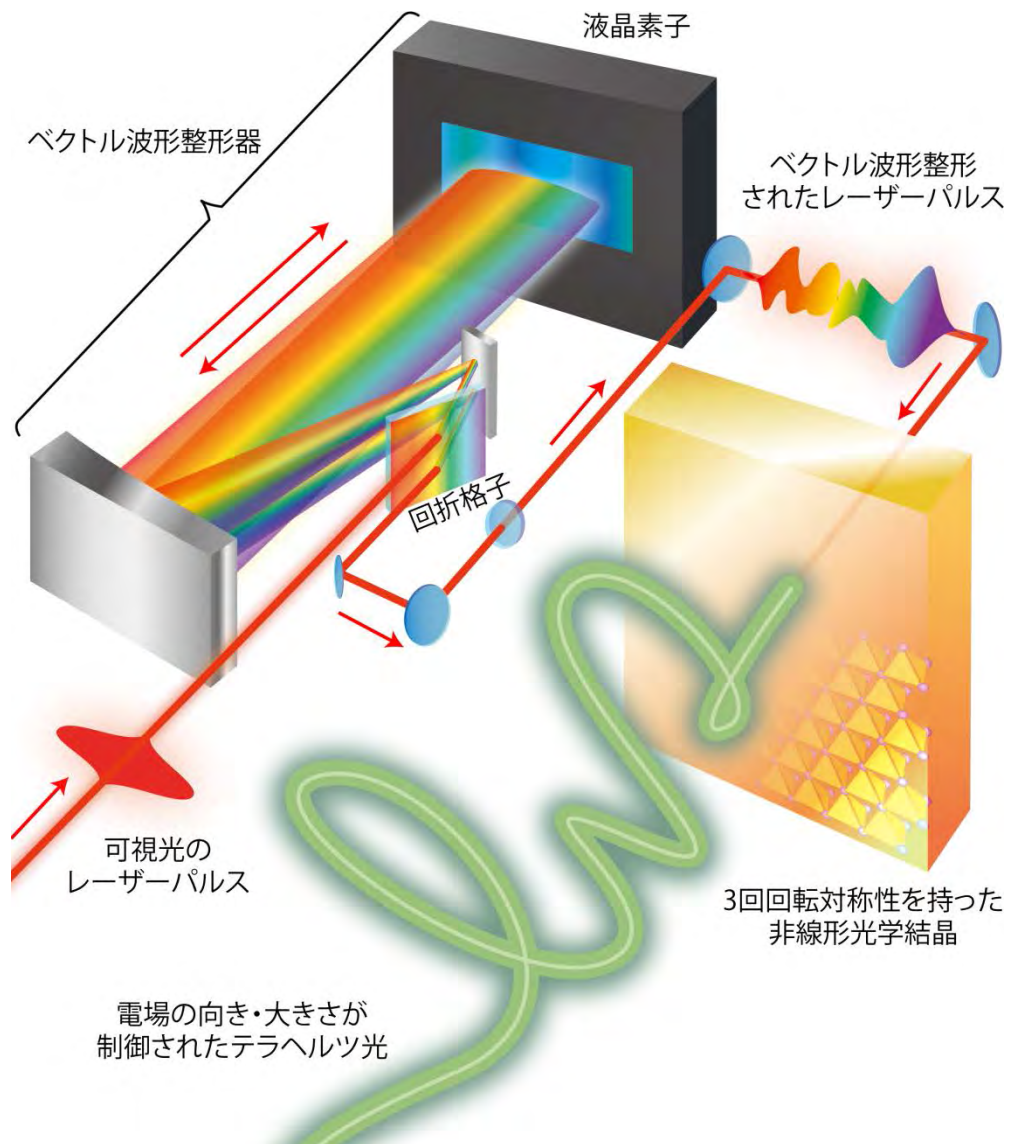
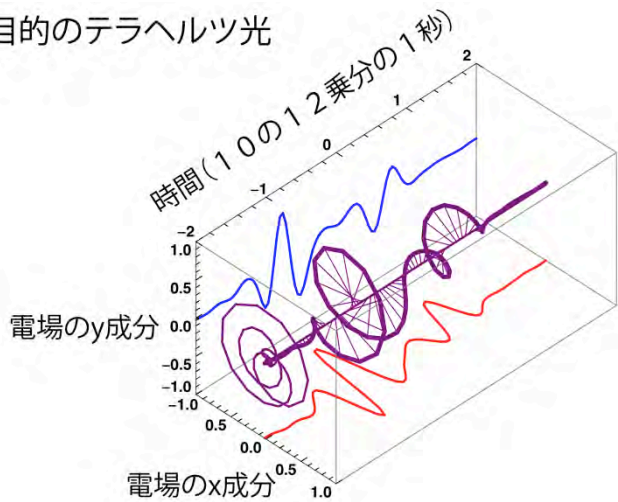


図1 テラヘルツ帯電磁波の振動方向とその時間波形を任意制御する装置の概略図

可視光のレーザーパルスはまずベクトル波形整形器を通ります。ここではレーザーパルスは回折格子によって色ごとに分けられたのち、液晶素子によって変調を受け、再度回折格子によって1つのパルスに集められることで、瞬間的な偏光状態と光強度が制御されたレーザーパルスとなります。このパルス为非線形光学結晶(リン化ガリウム)の3回回転対称軸に沿って入射することで、レーザーパルスの瞬間的な電場振動の向きに追従するテラヘルツ光が得られます。

目的のテラヘルツ光



実験で得られた  
テラヘルツ光

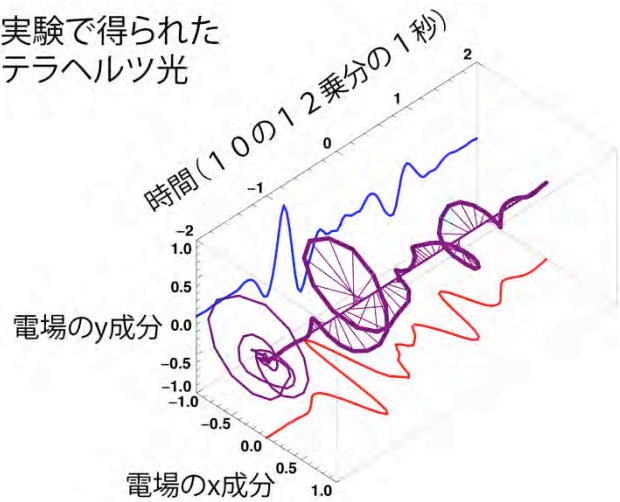


図2 目的とした波形(左)と実際に実験で得られたテラヘルツ光のx方向とy方向の電場波形(右)

目的としたテラヘルツ光と同じ電場の向き・大きさを持ったテラヘルツ波を忠実に発生させることに成功しました。

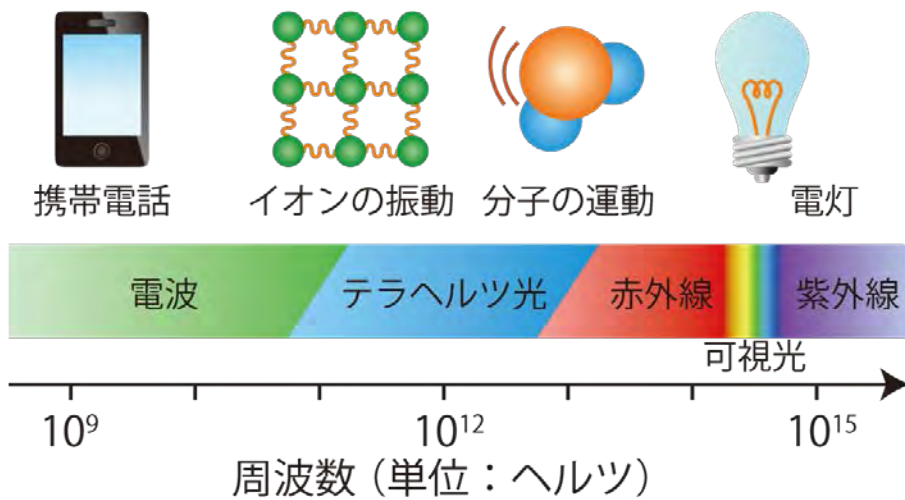


図3

テラヘルツ光は携帯電話などに用いられる電波よりも高い周波数を持ち、目に見える光よりも低い周波数を持つ光です。

## <用語解説>

### 注1) テラヘルツ光

可視光よりも100分の1ほど低い周波数を持つ光。その周波数帯がテラ(=10<sup>12</sup>)ヘルツであることからテラヘルツ光と呼ぶ。同時に携帯電話の電波よりも1,000倍ほど高い周波数を持つ電波ともいえる。光と電波の両方の良い性質を併せ持つ光である。

### 注2) 非線形光学結晶

周波数 $\omega_1$ と $\omega_2$ の2つのレーザー光を入射した時、主に入射光周波数の和 $\omega_1 + \omega_2$ あるいは差 $\omega_1 - \omega_2$ となる周波数を持つ光を発生させることのできる結晶。この性質を持つ結晶は2次の非線形光学結晶と呼ばれる。

### 注3) 3回回転対称性

ある図形を120度回転させた時にもとの図形に重なる性質。360度1回転するうちにもとの図形に3回重なることから、3回回転対称性と呼ぶ。

### 注4) ベクトル波形整形

ベクトルとは、大きさと向きを持つ量のことである。光の波は、振動の大きさ(振幅)、波の山と谷の位置(位相)という性質に加えて、光の進行方向に対して縦と横の2つの振動方向(偏光)を持っている。光の電場の向きと大きさを表されるベクトルを設計通りに時間変化させることをベクトル波形整形と呼ぶ。

## <論文タイトル>

“Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control”

(任意電場波形制御のできるテラヘルツ偏光パルス整形)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

五神 真 (ゴノカミ マコト)

東京大学 大学院理学系研究科 教授  
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1  
Tel : 03-5841-4041 Fax : 03-5841-4042  
E-mail : gonokami@phys.s.u-tokyo.ac.jp

三沢 和彦 (ミサワ カズヒコ)

東京農工大学 大学院工学研究院 教授  
〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16  
Tel : 042-388-7485 Fax : 042-388-7485  
E-mail : kmisawa@cc.tuat.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

古川 雅士 (フルカワ マサシ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066  
E-mail : crest@jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432  
E-mail : jstkoho@jst.go.jp

東京大学 大学院理学系研究科 理学部

広報室 副室長 (准教授) 横山 広美、特任専門職員 武田 加奈子  
Tel : 03-5841-8856 E-mail : kouhou@adm.s.u-tokyo.ac.jp