

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01814

研究課題名（和文）強光電磁場とキラル分子の非摂動磁気双極子相互作用による円偏光高次高調波発生

研究課題名（英文）Circularly polarized high harmonic generation by non-perturbative magnetic dipole interaction between high laser field and chiral molecules

研究代表者

関川 太郎（SEKIKAWA, TARO）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90282607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：互いに直交する円偏光の基本波（ ω ）とその第二高調波（ 2ω ）の合成電場は三回対称性を持ち、発生する円偏光高次高調波の $3m+1$ 次、 $3m+2$ 次はそれぞれ ω と 2ω の円偏光と同じである。貴ガスから発生する $3m+1$ 次と $3m+2$ 次の強度比は、最外殻軌道の磁気量子数に依存する。そこで、固定したキラリティを持つキラル分子からの高調波スペクトルの $3m+1$ 次と $3m+2$ 次の強度比は円偏光に依存することが期待される。本研究では、リモネンおよび酸化プロピレン鏡像異性体から発生した高次高調波スペクトルにおいて、上記現象を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体関連分子や薬剤には鏡像異性体を持つものが多い。しかしその物理的な性質は同じであり、異性体の区別が難しい。通常用いられる円偏光の吸収の違い（円二色性）は1万分の1の違いしかない。今回発見した高次高調波発生による円偏光による違いは百分の1と大きい。そのため、高次高調波発生により容易に分子のキラリティの弁別を行うことができる可能性がある。生体反応においてキラル分子の選択性が重要な役割を果たしており、生体内のキラリティに依存する反応を観測することに適用できるであろう。

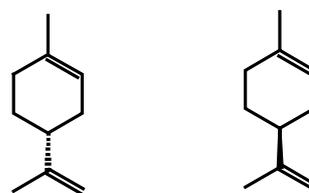
研究成果の概要（英文）：The composite electric field of the mutually orthogonal circularly polarized fundamental (ω) and its second harmonic (2ω) has three-fold symmetry, and the polarizations of the $(3m+1)$ -th and $(3m+2)$ -th orders of the generated circularly polarized high harmonics are the same as those of ω and 2ω polarization, respectively. The intensity ratio of the $(3m+1)$ -th and $(3m+2)$ -th orders generated from the noble gas depends on the magnetic quantum number of the outermost orbitals. Therefore, the intensity ratio of the $(3m+1)$ -th and $(3m+2)$ -th orders of the harmonic spectrum from chiral molecules with fixed chirality is expected to depend on the circular polarization. In this study, we confirmed the above-mentioned phenomenon in the high harmonic spectra generated from limonene and propylene oxide enantiomers.

研究分野：超高速光科学

キーワード：キラル分子 円偏光高次高調波 非摂動相互作用

1. 研究開始当初の背景

互いに直交する円偏光の基本波()とその第二高調波(2)を空間的に重ねると三回対称合成電磁場が生成される。その光電磁場と貴ガスとの非線形相互作用により円偏光高次高調波が発生される。1) 3m 次が発生せず、2) 3m+1 次、3m+2 次はそれぞれ と2 の円偏光と同じ円偏光を持つ。さらに、ETH Zurich の Wörner らは、3) 3m+1 次と3m+2 次の強度比は、貴ガスの場合最外殻軌道の磁気量子数に依存することを見出した(Phys. Rev. Lett. 116, 123001 (2016))。すなわち最外殻軌道が1sのヘリウムと2pのネオンを比較したとき、強度比が大きく異なりネオンでは3m+2 次の強度が低い。ネオンは最外殻軌道が磁気量子数 $m = \pm 1$ を取りうるため、円偏光を発生するための再結合確率が低いと考えられた。我々はこの結果に刺激をうけ、固定したキラリティを持つキラル分子からの高調波スペクトルは円偏光に依存し、高次高調波発生によりキラリティを区別できるのではないかと考えた。そして、気化したリモネン分子鏡像異性体(図1)から発生した高次高調波スペクトルにおいて、円偏光の向きに応じて3m+1 次と3m+2 次の強度比が変化することを見出した[1]。貴ガスから発生する3m+1 次と3m+2 次の強度比は合成電場の回転方向に依存せず一定である。一方、キラル分子の場合は固有のキラリティ、すなわち構造で決まる磁気双極子の向きにより再結合確率が決まる、と考えられる。その結果、鏡像異性体と円偏光が変わると3m+1 次と3m+2 次の強度比が変わる。以上より、発生した高次高調波の円偏光の向きと3m+1 次と3m+2 次の強度比が分かれば、高次高調波スペクトルから分子のキラリティを区別できることが示唆される。鏡像異性体の物理的な性質は同じであるため、異性体の区別が難しい。生体関連分子や薬剤にキラル分子が多いため、高次高調波発生により容易に異性体の弁別を行うことができれば、それは意義のあることである。



R-(+)-limonene S-(-)-limonene

図1 リモネンの二つの鏡像異性体

2. 研究の目的

(1) キラルな非摂動非線形光学現象の普遍性の確認

リモネン以外の分子、他の高調波次数でも同様の傾向があることを確認する。

(2) 電子状態や分子構造変化に起因するキラリティの変化の検出

(1)に引き続き発展的研究課題として、分子を光励起した後の電子状態や分子構造変化に起因するキラリティの変化を、円偏光高次高調波発生をプローブとして観測する。生体においてキラル分子が選択的に反応をしていることから、単にキラリティを区別するだけでなく、反応中のキラリティの変化に興味を持たれる。サリドマイド事件は、キラリティに起因する薬害として知られている。しかし、その後、サリドマイドは無害な鏡像異性体のみ摂取しても体内でラセミ化することが分かった。そのため、なぜもう一方の異性体が悪影響を及ぼさないのか疑問に思われてきた(サリドマイドの逆説)。しかし、近年の研究により、自己不均一化現象によりラセミ体が形成され、ラセミ体は悪影響を及ぼさないと説明されている。このようなキラリティの変化を、敏感に追跡する手法の開発は必要であり、高次高調波発生がそのような用途に応用できないか探っている。いきなり分子量の大きい薬剤分子に適用することは難しい。そのため、比較的単純な分子から手がけることが必要である。

3. 研究の方法

(1) 高調波スペクトル観測系の構築

研究開始時は、キラル分子からの高次高調波をかりうじて検出している状況であった。光学分光器を所有していなかったため、クリプトンを光電変換媒質として光電子分光器を用いて高次高調波スペクトルを観測した。しかし、この方法では光電変換効率が悪いいため、スペクトル測定に1時間以上を要した。キラル依存性を観測するためにはさらに信号比を上げる必要があり、数時間程度必要である。そのため、時間分解計測を行うためには検出効率を上げる必要があり、光学分光器とマルチチャンネル受光器が必須である。そこで、図2aに示す光学分光器とマルチチャンネル受光器を用いた光学系を構築した。更に以下のような改善を行った。

液体であるリモネンや他のキラル分子の入ったボトルを温水浴により最高摂氏 97 ° まで加熱し、ヘリウムガスでバブリングした。温水浴にすることにより加熱温度を安定化することができた。また、ボトルと真空槽をつなぐパイプはヒーターで 100 ° に加熱してある。

図2aは、分子をガスノズルから噴出する形式である。しかし、相互作用長およびガス密度を増すため、図2bに示すセミインフィニットガスセルと呼ばれるガスセルでも研究を行った。貴ガスを使用した場合、10倍程度の光量を得ることができた。

円偏光高次高調波発生のために広帯域波長板を新たに製作した。2 (=400 nm)と (=800 nm)において同時に 1/4 位相となる波長板である。これまで使用していた超広帯域波長板は、有機接着剤により基板を接着しているため、レーザー光の多光子吸収により接着剤に損傷が生じた。

そこで、本研究ではエアギャップ構造で 2 の二波長において $\pi/4$ 位相となる波長板を用いた。これにより高強度のレーザー場を生成することが可能になった。

(2) キラル分子間の比較

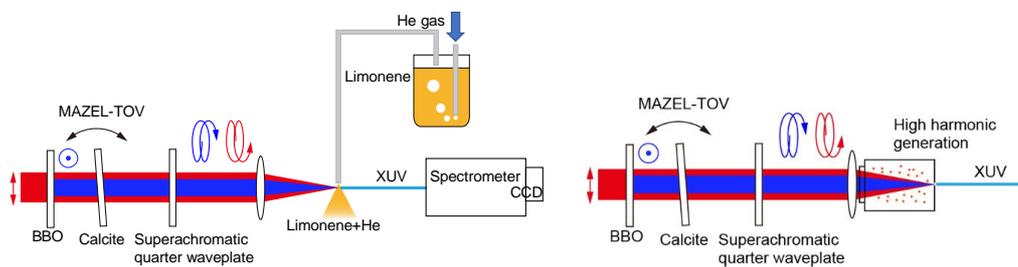


図 2a) 円偏光高次高調波スペクトル計測図

b) セミインフィニットガスセル

リモネンと比較するキラル分子として、酸化プロピレンとエピクロロヒドリンからの高次高調波スペクトルを計測した。分子量が小さいため、蒸気圧がリモネンより高いため選択した。分子のキラリティの起源は磁気双極子と考えられる。磁気双極子の大きさは式(1)で示される比旋光角 θ が一つの指標となる。

$$\theta \propto \sum_n \frac{\epsilon_{n0}^2 \vec{\mu}^{0n} \vec{m}^{n0}}{(\hbar\omega)^2 - \epsilon_{n0}^2} \quad (1)$$

ただし、通常データを得ることができるのはナトリウム D 線 (589 nm) での値であり電気双極子モーメントにも依存するため、異なる波長や異なる分子間の磁気双極子の大きさとの相関は必ずしも自明ではない。しかし、表 1 に比旋光角 θ を示すようにリモネンが最も大きい値を持つので、円偏光依存性が大きい可能性がある。

表 1 キラル分子の比旋光角 (東京化成工業株式会社の Web ページより)

分子名	酸化プロピレン	エピクロロヒドリン	リモネン
比旋光角 (°)	14	-44.5	113

(3) ポンププローブ光学系の構築

光励起後の構造変化を検出するため、ポンププローブ光学系を構築した。最も吸収波長が長いと思われるリモネンでも吸収端は 200 nm である。そこで 2 の二光子吸収により励起することにした。遅延時間路を通ったポンパルスと高調波発生用パルスをもとの吹き出し口に集光する。遅延時間ごとに高次高調波スペクトルを測定する。なお、遅延時間 0 付近ではポンプ光とプローブ光が重なり高次高調波発生に影響を与えるため、計測は難しい。

4. 研究成果

(1) 高次高調波スペクトル

リモネンからの円偏光高次高調波スペクトルを図 3a) に示す。上段は S-リモネン下段は R-リモネンからの高次高調波スペクトルである。偏光は図中の矢印と色で示した方向である。赤は σ 、青は π の偏光を示す。光電子分光器によるスペクトル測定より 5 分の 1 程度の積算時間でスペクトルを計測することができた。鏡像異性体および円偏光を切り替えると、 $3m+1$ 次と $3m+2$ 次の強度比が変わることが観測された。ただ、S-リモネンのほうが異方性は小さかった。試薬会社はロットごとの比旋光角を提供しており、実は、S-リモネンで 88 度、R-リモネンで 123 度と S-リモネンの旋光角がかなり小さい。異方性の大小は、鏡像異性体の純度に依存しているため、使用した S-リモネンの純度は低いと判断される。

(2) キラル分子間の比較

図 3b) 上段に R-酸化プロピレンの高次高調波スペクトルを示す。下段はアルゴンからの高次高調波スペクトルである。アルゴンでは円偏光に依存した異方性は観測されなかったが、酸化プロピレンでは観測された。しかし、S-酸化プロピレン、および S-、R-エピクロロヒドリンでは異方性は観測されなかった。リモネンで観測された鏡像異性体の純度依存性を考慮すると、S-酸化プロピレンは純度が悪い可能性がある。エピクロロヒドリンについては何とも言えない結果である。残念ながら、これらの試料については、ロットごとの比旋光角が公開されていない。R-酸化プロピレンについては明瞭に異方性が観測されたため、酸化プロピレンについては、鏡像異性体依存性があると考えている。

(3) ポンププローブ実験

リモネンについて行った。しかし、1時間以上、リモネンガスを噴出し続けると、ノズルもしくはインフィニットガスセルの口が結露して閉塞する現象が起きた。温度を上げることにより蒸気圧を増すことはできたが、断熱膨張による結露が起こりやすくなったと考えている。報告執筆時点でも、リモネンの温度を下げるなど、実験条件を探索している。

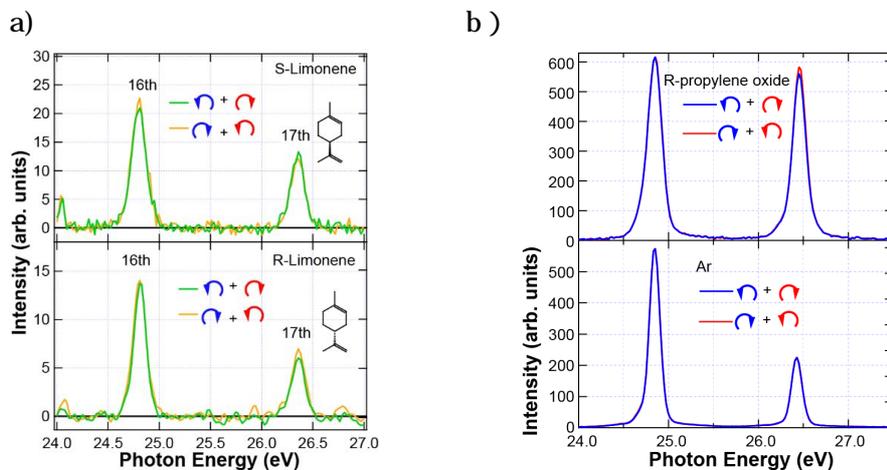


図 3a) S-リモネン (上段) および R-リモネン (下段) から発生した高次高調波スペクトル。b) R-酸化プロピレン (上段) およびアルゴン (下段) から発生した高次高調波スペクトル。

参考文献

- [1] Y. Harada, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa, Phys. Rev. A **98**, 021401(R) (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kaneshima Keisuke, Ninota Yuki, Sekikawa Taro	4. 巻 38
2. 論文標題 Dynamic interference of the high harmonics from photoisomerizing 1,3-cyclohexadiene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 441 ~ 441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.404251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nitta Yuki, Schalk Oliver, Igarashi Hironori, Wada Sato, Tsutsumi Takuro, Saita Kenichiro, Taketsugu Tetsuya, Sekikawa Taro	4. 巻 12
2. 論文標題 Real-Time Probing of an Atmospheric Photochemical Reaction by Ultrashort Extreme Ultraviolet Pulses: Nitrous Acid Release from o-Nitrophenol	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 674 ~ 679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c03297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 関川太郎	4. 巻 48
2. 論文標題 キラル分子からの円偏光高次高調波発生	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 179-183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Haraguchi Eisuke, Akiyama Tomohiro, Ando Toshiyuki, Sekikawa Taro	4. 巻 12
2. 論文標題 Simultaneous detection of beam pointing and optical phase errors for multiple beams using a quadrant photo detector for high-efficiency coherent beam combining systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 102012 ~ 102012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab411d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Kengo, Haraguchi Eisuke, Kaneshima Keisuke, Sekikawa Taro	4. 巻 27
2. 論文標題 Polarimetry of a single-order circularly polarized high harmonic separated by a time-delay compensated monochromator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38735 ~ 38735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.382423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金島圭佑, 関川太郎	4. 巻 48
2. 論文標題 真空紫外高調波発生と超高速光電子分光・高次高調波分光への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 367~373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ito, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa	4. 巻 11370
2. 論文標題 Ellipticity of a single-order circularly polarized high harmonic separated by a time-delay compensated monochromator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ultrafast Optics 2019: Abstract Book	6. 最初と最後の頁 506-509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562972	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harada Yoichi, Haraguchi Eisuke, Kaneshima Keisuke, Sekikawa Taro	4. 巻 205
2. 論文標題 Circular dichroism in high harmonic generation from chiral molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02001 ~ 02001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920502001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaneshima Keisuke, Ninota Yuki, Sekikawa Taro	4. 巻 205
2. 論文標題 Time-resolved high-harmonic spectroscopy of ultrafast ring-opening of 1,3-cyclohexadiene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09017 ~ 09017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920509017	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nitta Yuki, Schalk Oliver, Kaneshima Keisuke, Sekikawa Taro	4. 巻 205
2. 論文標題 Ultrafast Photolysis of o-Nitrophenol Studied by Time-Resolved Photoelectron Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09022 ~ 09022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920509022	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 K. Ito, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa,
2. 発表標題 "Polarimetry of a Single-Order Circularly Polarized High Harmonic Separated by a Time-Delay Compensated Monochromator"
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kaneshima, T. Ando, and T. Sekikawa,
2. 発表標題 "High Harmonic Spectroscopy of Circularly Polarized High Harmonic Generation Process"
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kurimoto, N. Saito, Y. Ishii, T. Kanai, J. Itatani, K. Saita, T. Taketsugu, and T. Sekikawa,
2. 発表標題 “Delayed ring-opening in 1,3-cyclohexadiene upon photoexcitation at a higher state probed by femtosecond soft x-ray absorption”
3. 学会等名 Time-resolved imaging of photo-induced dynamics Faraday Discussion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nitta, O. Schalk, H. Igarashi, S. Wada, T. Tsutsumi, K. Saita, T. Taketsugu, and T. Sekikawa,
2. 発表標題 “Real-Time Probing Atmospheric Photochemical Reaction by Ultrashort High Harmonic Pulses: Nitrous Acid Release from o-Nitrophenol”
3. 学会等名 Time-resolved imaging of photo-induced dynamics Faraday Discussion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗本悠太郎、関川太郎、齋藤成之、石井 順久、金井輝人、板谷治郎、斉田謙一郎、武次徹也
2. 発表標題 「軟X線吸収分光による環状分子の光開環ダイナミクスの研究」
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東 健吾、関川 太郎
2. 発表標題 時間遅延補償分光器によって次数選択した円偏光高次高調波の偏光計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗本悠太郎、齋藤成之、石井順久、金井 輝人、板谷治郎、斉田謙一郎、武次徹也、関川太郎
2. 発表標題 「軟X線吸収分光による環状分子の光開環ダイナミクスの研究」
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東健吾, 原口英介, 金島圭佑, 関川太郎
2. 発表標題 時間遅延補償分光器によって次数選択した円偏光高次高調波の偏光計測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金島圭佑, 二ノ田有輝, 関川太郎
2. 発表標題 時間分解高次高調波分光による 1,3-cyclohexadieneの電子励起状態ダイナミクスの観測
3. 学会等名 13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田優輝, Schalk Oliver, 和田諒, 堤拓朗, 武次徹也, 金島圭佑, 関川太郎
2. 発表標題 時間分解光電子分光法によるo-ニトロフェノールの超高速光解離反応の観測
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関川太郎, 金島圭佑
2. 発表標題 高次高調波分光による化学反応ダイナミクスの観測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田 優輝, Schalk Oliver, 和田 諒, 堤 拓朗, 武次 徹也, 金島圭佑, 関川太郎
2. 発表標題 時間分解光電子分光法によるo-ニトロフェノールの超高速光解離反応の観測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kaneshima, Y. Ninota; and T. Sekikawa
2. 発表標題 Ultrafast Ring-Opening Dynamics of 1,3-cyclohexadiene Probed via Time-Resolved High-Harmonic Spectroscopy ”
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kaneshima, Y. Ninota; and T. Sekikawa
2. 発表標題 Ultrafast Ring-Opening Dynamics of 1,3-cyclohexadiene Probed via Time-Resolved High-Harmonic Spectroscopy
3. 学会等名 7th International Conference on Attosecond Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Ito, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa
2 . 発表標題 Polarimetry of a Single-Order Circularly Polarized High Harmonic Separated by a Time-Delay Compensated Monochromator
3 . 学会等名 7th International Conference on Attosecond Science and Technology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Sekikawa,
2 . 発表標題 Circularly polarized high harmonic generation probing molecular chirality
3 . 学会等名 International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Nitta, O. Schalk, S. Wada, T. Tsutsumi, T. Taketsugu, K. Kaneshima ¹ , T. Sekikawa,
2 . 発表標題 Ultrafast photolysis of o-nitrophenol studied by time-resolved photoelectron spectroscopy
3 . 学会等名 International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Ito, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa,
2 . 発表標題 Polarimetry of a Single-Order Circularly Polarized High Harmonic Separated by a Time-Delay Compensated Monochromator
3 . 学会等名 International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ito, E. Haraguchi, K. Kaneshima, and T. Sekikawa
2. 発表標題 Ellipticity of a single-order circularly polarized high harmonic separated by a time-delay compensated monochromator
3. 学会等名 Ultrafast Optics XII (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Sekikawa, K. Ito, E. Haraguchi, and K. Kaneshima	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 20
3. 書名 Progress in Ultrafast Intense Laser Science XVI	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>PM2.5から光化学スモッグ原因物質が発生するメカニズムを解明 https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/01/pm25.html?fbclid=IwAR1WS3G8joflyabp8-nido6FjwKxjdmz3U4-m2VqjH3HDtxppT9s2bbgNEU Extreme UV laser shows generation of atmospheric https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/extreme-uv-laser-shows-generation-of-atmospheric-pollutant/</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

デンマーク	University of Copenhagen			
-------	--------------------------	--	--	--