

研究終了報告書

「光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発」

研究期間:2020 年 10 月～2024 年 3 月

研究者:加藤 峰士

1. 研究のねらい

本研究課題では、光周波数コムを用いた光フェーズドアレイの実現を目指した。本技術では、光の絶対周波数を高安定に制御できる光周波数コムと、広帯域な超短パルスが扱える空間光学系による光アンテナを用いることで、従来の光集積回路を用いた光フェーズドアレイでは困難であった広帯域な光フェーズドアレイの実現を目指した。特に、光の波面を光周波数コムの周波数制御パラメータによって制御することが出来る画期的な手法であり、光周波数(縦モード)によって波面(横モード)を直接制御するという革新的な光学技術の創始に挑戦するものである。

開発を目指す光フェーズドアレイは、近年の光集積回路の発展に伴い、現在光導波路型の光フェーズドアレイの研究・開発が盛んである。動作の基本原理は、光源である CW レーザーの単色光を分岐して位相制御器に導入し、設計された相対的な位相量を与える。その後これらの光をアレイ状に配置された光アンテナから出射することで、個々の波面が干渉し、与えられた位相パターンに応じた干渉波面が形成される。位相量を制御することで光強度を空間的に孤立させることができ、いわゆる集光点走査のような動作も可能である。また、この過程を逆にたどることで、受信機としての機能も果たすことができ、個々の光アンテナで検知した位相差から、入射した光の波面を計測することも可能である。以上の機能から、光フェーズドアレイは光の波面を制御および計測することが可能な、フェーズドアレイレーダーの光版といえる技術である。すでに約 1000 個の光アンテナを実装した例や、光フェーズドアレイから受光部まで組み込んだ例が報告されており、近赤外や可視光、近年とくに研究が盛んな中赤外領域での実装も進められている。また、特定の空間点に光を照射し、その反射光の遅延時間から距離を求める Lidar としての機能を組み込むことで、ガルバノミラーといった機械駆動が一切無い高速 3D Lidar として応用も進められている。

提案手法は従来手法とは全く異なり、原子時計と同期した光周波数コムの周波数制御による超短パルスの全帯域位相制御を行うことで、高精度に制御された波面の発生が可能となる。また、干渉波面を繰り返し周波数で切り替えることができるため、GHz の高速波面制御が可能となる。以上のように本提案手法は、レーザー共振器の周波数制御によって光の波面を操作するという全く新しい制御概念を提案するものである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究課題では、光周波数コムを用いた光フェーズドアレイの実現を目指し、提案手法の原理検証とその応用法について開発を進めた。本技術では、光の絶対周波数を高安定に制御できる光周波数コムと、広帯域な超短パルスが扱える空間光学系による光アンテナを用いるこ

とで、従来手法では困難であった広帯域な光フェーズドアレイを実現した。特に、光の波面を光周波数コム（光コム）の周波数制御パラメータによって制御することが出来ることから、光周波数（縦モード）によって波面（横モード）を直接制御することが出来る画期的な手法である。

研究期間においては、まず Er ファイバレーザを用いて、繰り返し周波数 107 MHz 程度、中心波長 1550 nm の光周波数コムを作成した。周波数安定度は $\sim 10^{-12}$ （ゲートタイム 1 秒）に達する安定した光源である。まず光アンテナとなる光共振器を構築し、互いに干渉した合成波面を計測した。当初は少ない光アンテナ数であったため各出力光のねじれが大きく、遠方で干渉させることはできなかった。そこでウェッジプリズムによる偏向光学系を構築することでこの課題を解決し、想定通り光点の形成と周波数制御による光点走査を実現した。また原理的に繰り返し周波数で波面が切り替わるため高速波面制御が可能となるが、それも実験的に検証した。

さらに従来の光集積回路技術による光フェーズドアレイでは困難であった広帯域光フェーズドアレイも、本手法によって実現できた。これは、広帯域な超短パルス光である光周波数コムを光源とし、光アンテナが空間光学系で構築しているため、分散による影響をほぼ無くした広帯域波面形成が出来る。ここで光アンテナの波数ベクトルによる波面位相の波長依存性が生じるが、これは入力光のチャープ量によって調節可能であることが示唆された。プリズム対による位相調整機構を組み込むことによって、全位相が揃った超短パルスの光点の形成とその走査という、世界初の技術実現に向けて具体的な知見を得た。

また、光フェーズドアレイの光計測への適応例として、高速かつ高精度な 3D Lidar の開発も行った。本研究では、光周波数コムが得意とする広ダイナミックレンジ計測を組み合わせた光学系の構築を目指した。基本的な光学系構築はすでに完了しており、光フェーズドアレイの光点走査と合わせることによって、機械駆動はもちろん外部位相変調器等も必要としない、高安定・高精度な高速 3D Lidar が実現できる見込みを得た。

(2) 詳細

【光周波数コムについて】

初めに本研究で用いる光周波数コム（光コム）について説明する。光コムとは周波数制御されたモード同期レーザーであり、図 1 に示すように周波数領域において櫛のように等間隔に並んだスペクトル群で構成される fs オーダーの超短

パルス列を形成する。そして、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリアエンベロップ周波数 f_{ceo} という 2 つの無線周波数によって光周波数を自在に操ることができ、マイクロ波周波数基準による安定化で 15 桁以上の周波数安定度を実現できる。

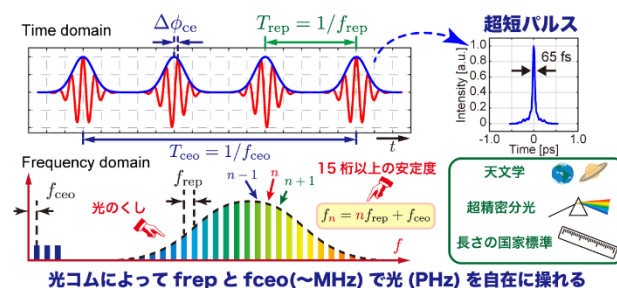


図 1 光周波数コム（光コム）の概念図

(1) 提案する光フェーズドアレイ(OPA: Optical Phased Array)の原理

本研究で提案する光フェーズドアレイの概念図を図2に示す。本手法では、光コム f_{rep} と f_{ceo} (図1参照)の周波数比を調整することにより、超短パルス列の全帯域位相制御が実現できることを利用する。つまり、周波数比を調節することで個々のパルスの位相関係を自由に制御することができる。一方で光フェーズドアレイは互いに一定の位相差をもつ光を出射することで任意の波面を作るため、位相関係を与えた超短パルス列を空間的に再配置することで光フェーズドアレイが実現できる。そこで図2に示すように、共振器構造をもつ MPC により超短パルス列を円周上に再配置し、更にパルス間隔と MPC の間隔を合わせることで一連の位相差パルス群を MPC から同時に射出させる。この射出点が光アンテナに相当する。この時射出する個々のパルス強度の差を抑えるため、光コムのパワーを十分大きくして射出面の透過率を低く抑え、さらに光アンテナの順番に合わせて透過率にグラデーションを与える。

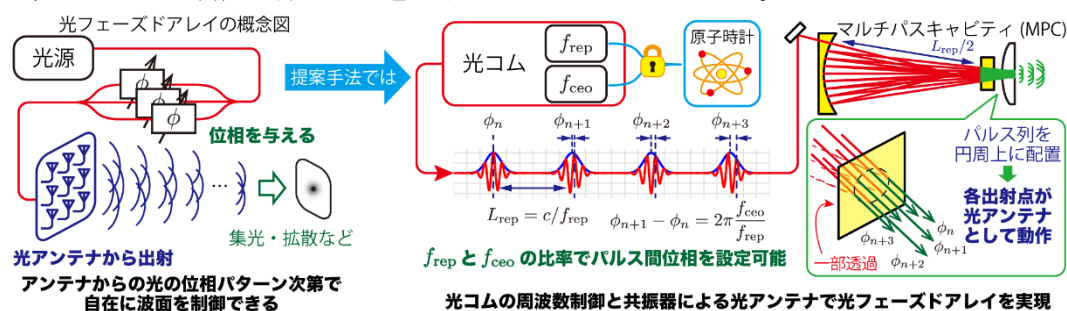


図2 本研究で開発した、光コムによる光フェーズドアレイの概念図

(2) ウェッジプリズム光学系による点群形成と走査

原理実証のためにまず5点の光アンテナを用いた OPA を構成した。図3の左図に MPC とウェッジプリズム光学系を示した。光アンテナのアンテナ数が少ない MPC を構成したため、各光アンテナからのビーム方向は互いに大きくねじれた構造をしていた。そのため傾斜角2度のウェッジプリズムを用いて各ビームを偏向し、それぞれの光線波面が互いに重なる状況を作成した。図3右図が計測した干渉画像である。周囲に配置した縞模様は、光アンテナ5点のうち2点ずつ干渉させたときの干渉縞である。各ビームの方向が異なるため縞模様の方向が異なっている。これらをすべて干渉させた結果が中央の画像である。画像が示すように、画像上に間隔を開けた光点が形成されており、さらに周波数比によって光点位置を操作できた。これにより、提案した光コムによる OPA の原理実証が達成された。

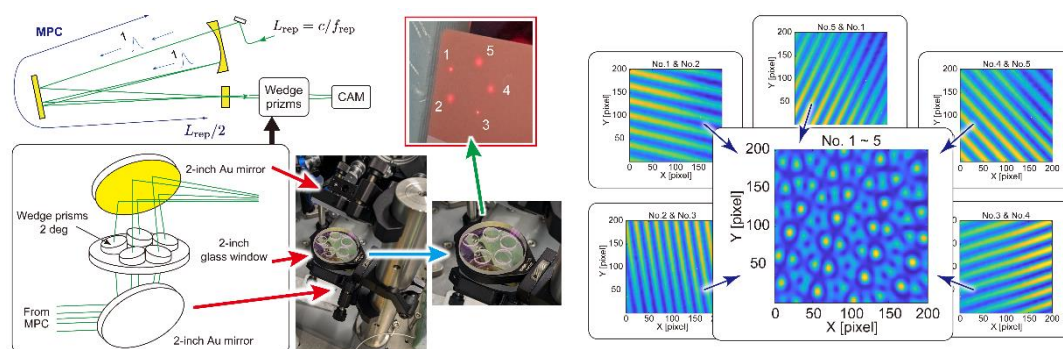


図3 (左図)ウェッジプリズム光学系によるビーム偏向機構 (右図)

(3) 広帯域動作することの検証

次に提案手法の広帯域性を示した。近年光集積回路を用いた OPA の世界では、少ない制御パラメータで、または再校正を行わずに広帯域な OPA を発生させることができるという論文がいくつか出版されている。それらは導波路故に広帯域性を示しづらいからという問

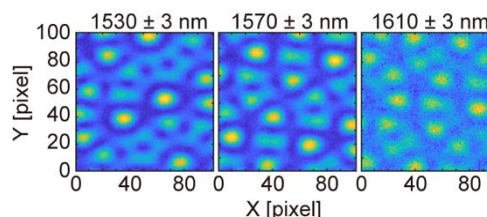


図4 広い波長帯で計測した OPA 波面

題があるためであり、本研究はまさにその点に優位性がある。実験では可変バンドパスフィルタを用いて波長を限定した光コム光源によって波面形成を行った。光源は 1510 ~ 1620 nm 程度のスペクトルを持ち、図4が示すようにその全帯域で OPA 波面の操作を行うことが出来た。この結果から、本手法が従来手法に比べて非常に簡便な操作で広帯域 OPA として動作することを示すことが出来た。

<②光フェーズドアレイによる集光点走査を用いた 3 次元計測への応用>

(1) 全光ヒルベルト変換による干渉信号解析手法を用いた高速かつ精密な光距離計測

本手法を用いた光計測手法への応用例として、3D Lidar への応用が考えられる。元々 OPA はビーム方向を走査する技術として用いられており、これに距離計測などを組み合わせることで3次元的な情報を得ることが出来る。①の原理実証におけるビーム偏向手法の開発に時間がかかり研究期間終了時では未完了の課題ではあるが、図3・図4に示すように光点形成まで進むことが出来たことから、速やかに 3D Lidar への適応を進めていく。

具体的な構成は割愛するが、光コムの制御性を用いた瞬時距離計測を組み合わせることで、 f_{rep} 程度に切り替わる反射パルスそれぞれの干渉位相を瞬時計測することが出来、提案する OPA が持つ光点の高速走査の優位性が活かせる。

(2) コム距離計によるダイナミックレンジの拡大

次に、光コムの高次マルチヘテロダインビートを用いた距離計測手法（コム距離計）を距離計測手法として導入する手法を考案した。コム距離計は光干渉計ではなく、光コムのマルチヘテロダインビートの高次成分である RF 信号を用いて距離を計測する。十分な RF の位相分解能が得られれば、上記(1)との組み合わせで広ダイナミックレンジ計測が可能となる。

<③横モード生成のための光コム2号機と光学系の設計>

研究期間を通して光コムによる OPA の開発を行った結果、横モード生成にはいくつかの技術的課題があることがわかった。それはパルス列の相対位相差の自由度が少ない点である。上記①②では単純な光点走査であるため $f_{\text{rep}}/f_{\text{ceo}}$ の掃引だけで良いが、所望の高次横モード（例えばエルミート・ガウシアンビーム）を形成するには各パルス間位相差を調整する必要がある。そこで FPGA による高速制御で各パルス間位相差を自由に設定できる、自由度の高い光コムを開発し、OPA にさらなる自由度を与えて、この課題を解決しようと考えている。

＜④さきがけ研究を通じて実現した連携＞

研究機関を通して得られた研究者ネットワークは今後の研究者人生にとって非常に有意義なものであった。詳細は割愛するが、いくつか共同研究にむけた議論を進めており、OPA のさらなる高機能化はもちろん、様々な分野に対して光コムの特長が活用できる応用を目指したいと考えている。

3. 今後の展開

これまでの知見から、光アンテナ数を増加させることで各光軸のねじれが減少し、ウェッジプリズム対なしでも集光できる可能性が示唆された。この光アンテナ数は MPC と MPC への入射角によって自由に調整でき、すでに 30 点近い光アンテナの構築ができています。MPC のサイズを拡大すれば 100 点近い光アンテナも比較的容易に達成できる。これにより、より孤立した光点形成が可能となり、各種計測手法への応用が期待できる。

また一方で、円周配置の光アンテナで形成された光点は、より多くの格子状光アンテナで形成された光点と同等のビーム径を有することが報告されている。つまり本手法は、少ない光アンテナ数でも明瞭な光点が作れることを意味する。計算では、円周配置された 32 点の光アンテナと、格子状配置された 256 点の光アンテナによる OPA の光点形成能力が同等であると報告されているので、現状で構築可能な光アンテナでも十分質の良い光点が作れると考えている。

次に取り組むのは各種光計測手法への応用である。特にすでに進めている 3D Lidar への応用は比較的短時間で達成できるものと見込んでいる。上記「研究成果：詳細」で述べたように、単純な Time of flight による距離計測はもちろん、光コムによる光演算手法を用いた干渉計測にも挑戦する。これが実現できれば、単一パルスで位相情報を読み出すことが可能となり、光コムによる OPA が持つ高速波面制御の性能を完全に活かすことが出来る。

また光アンテナ数のさらなる増加のためには、MPC 上での反射点を増やす必要がある。しかし反射点の増加に伴って共振器構造には堅牢性が求められるため、共振器長の短尺も同時に要求される。そのためには繰り返し周波数を上げてパルス間隔を短くする必要があるため、非常に高い繰り返し周波数を有するマイクロコムの導入を行う。マイクロコムが発生出来る 100 GHz の繰り返し周波数があればパルス間隔は 3 mm 程度となり、非常にコンパクトな共振器の構成が可能となる。光源も小型化するので、OPA システム全体が小型化することで、社会実装へ具体的な提案が可能となる。次年度には具体的な設計を考えて、システム構築に必要な予算獲得に向けた基礎実験を共同研究者と進めていく。

4. 自己評価

【研究目標の達成状況】

今回のさきがけ研究期間において、光周波数コムによる光フェーズドアレイという極めて挑戦的な課題に取り組むことが出来たのは貴重な機会であった。本手法が持つユニークな性質と、横モードと縦モードをリンクさせ、縦モードである光周波数の高い安定度と制御性を横モードに直接展開できるというアイデアは、光コム分野でも非常に注目された。そのため、本研究にいち早く取り組めたことは、今後の研究成果の創出と先駆的な応用展開に非常に大きな意味を持った。

【研究の進め方(研究計画)】

研究計画としては、まず光コムによる OPA を構築して原理検証を行い、その後 1 つ応用例を示したのち、より高度な波面形成を行う予定であった。当初計画していた研究スケジュールに対しては、OPA の光アンテナの光学設計が難航したため、原理検証後の進捗は遅れていた。

光アンテナの光学設計が難航したのは、光アンテナ出力光のねじれ構造により、単純な光学素子で互いを干渉させることが非常に困難であったことが、設計を困難にした原因と考えている。しかし数値計算と実験を繰り返し、現実的で構築が容易な方法を模索した結果、ウェッジプリズムによって直接光軸を個別に偏向する方法が有効であるとわかり、この課題を解決した。また、数値計算によると、本手法で構築している円周配置の光アンテナは、従来手法でよく用いられる格子状配置よりも少ないアンテナ数で明瞭な光点形成が可能であると報告されたため、比較的少ないプリズムアレイでも実用十分な光点形成と走査が可能になると考えている。

光点形成にめどが立ったため、本手法の 3D Lidar への応用を進めている。また高繰り返しコムによる OPA の構成についても同様に進めていく。光源としては、EO コム(電気変調による光コム光源)やマイクロコムを応用することを検討しており、連携している研究室との共同研究を進め、光コムによる OPA のさらなる高機能化を目指す。

【研究の進め方(研究費執行状況)】

研究費執行状況としては、まず光コム光源開発に伴う消耗品と、各種計測機器の導入を行った。また設計した特注の光学素子が複数必要であったため、そのための購入を行った。特に難航した光アンテナ出射光の調整には多くのリソースを割いた。光学素子を用いる試みはもちろん、可変ミラーによる光軸偏向も試すなど、様々な試みをここで行った。また、研究室新設に伴うスタートアップ支援によって、光学テーブルを新規導入した。当初は光スペクトルアナライザも導入する予定であったが、昨今の物価高と円安の影響で価格が高騰し導入を断念し、代わりに、光学テーブルに設置する大型アルミシェルフや、各種計測器などを導入した。

【研究の進め方(研究実施体制)】

2022 年 9 月までは専任研究者として研究に従事した。この期間における課題点としては、マンパワーの問題と自身の研究時間の減少が挙げられる。まず初年度は新型コロナによって初動が遅くなってしまったということに加え、本研究以外の研究テーマとの両立が非常に困難であった。OPA の研究を行う学生はいなかったため、他のテーマの実験や担当する学生の指導をしつつ新しい自身の研究を進めるのは大変ではあったが、今後の研究者人生において多くの教訓を得ることが出来たと考えている。

2022 年 10 月より、電気通信大学基盤理工学専攻のテニユア・トラック准教授職に着任でき、公私共に非常に大きな節目となった。幸いにも OPA の研究を行っていた建物内の 1 室が、新しく立ち上げる研究室となったため、新研究室立ち上げと並行して OPA の実験を行うことが出来、異動に伴う影響は比較的軽微であった。

一方で、大学の学務によりさらに研究時間は削減され、非常に頭を悩ませた。2023 年度からは授業も始まり、前期はほぼ実験が出来なかった。学務と研究の両立の仕方を確立する必要もあり、

非常に困難な状況であったが、夏以降はうまく活動を再開できた。2024 年度には学生とともに OPA を研究して行くため、これまで以上に研究を加速させる予定である。

【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果】

光コムによる光フェーズドアレイは様々な場面での応用が考えられる。正確かつ高速なビーム走査が原子時計レベルでの安定度で実現できるため、光測量では奥行きと平面上の位置という3次元測量の全次元において高精度・高分解能が達成される。本手法による超精密なビーム走査と、光コムが得意とする超精密距離計測技術が組み合わせれば、機械駆動無しで精密な面測定が実現し、物体形状の測定精度向上も期待できる。また、周波数に起源を持つ横モード発生が可能となれば、横モードの基準光源として利用可能である。つまり、既存の分光器と同じ様に、任意波面を横モードについてスペクトル分解出来ることになる。これは光通信や空間光学系で発生する横モードの評価に有用であり、幅広い光学分野に貢献する手法を与える。以上のように、本研究構想の成果は科学と産業の双方において大きなインパクトを与えると期待される。

【当初計画では想定されていなかった展開やそれによる成果、及び研究者としての飛躍につながるような成果】

当初想定していなかった展開としては、光コムのパルス間位相差を用いた新しい光計測手法として、逆位相光による背景光除去が挙げられる。これは光コムにより位相制御されたパルス列と遅延光学系を用いることで、全帯域で 180 度位相差を持つパルス対を生成し、逆位相干渉によって広帯域光を選択的に除去する手法である。これにより、光計測において検出器飽和をもたらす背景光を光領域で除去することができ、信号対雑音比を劇的に改善することが出来る。現在様々な基礎実験を進めており、2023 年度には科研費基盤研究 B に採択され、半導体企業との共同研究も始まるなど、研究テーマが急速に広がっている状況である。

研究者としては、限られた時間内で効率よく研究を遂行する術を習得し、自身のキャリアを大きく進めることが出来た。特にさきがけ研究者とは非常に多くの議論を行うことが出来、自身とは異なる分野をより深く知ることができた。現在様々な分野と光コムの連携を模索しており、研究者との幅広いコミュニティによって、本研究以外の研究テーマを大きく広げられることが見込まれる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 4件

- [1] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Broadband Light Beam Steering by Optical Phased Array Based on Phase-controlled Optical Frequency Comb,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2024)*, SM1G.1, Charlotte, USA 2024(May).

光コムによる光フェーズドアレイにおいて、光アンテナを増やすことでより孤立した広帯域光点形成を実現した。また、光コムの周波数比によって光点制御出来ることを確認し、光点の出現位置が離散的になることを報告した。

- [2] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Ultrafast Dot Pattern Projection using Optical Phased Array

Based on Frequency-Controlled Optical Frequency Comb,” *The 12rd Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2023)*, ALPS23-02, Yokohama, Japan (Hybrid) 2023(Apr.).

光コムによる光フェーズドアレイを用いて、増加させた光アンテナ数により広帯域な光点群の投影と走査を実現した。周波数比による制御と、多波長での点群走査を実験的に示した。

[3] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Optical phased array based on optical frequency comb for broadband wavefront control of ultrashort pulse,” *The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR2022)*, CThA6C-03, Sapporo, Japan (Hybrid) 2022(Aug.)

光コムによる光フェーズドアレイを用いて、広帯域な超短パルスによる合成波面の走査を実現し、超高速に波面が変化する様子を計測した。特に MPC の設計を改良することで波面状態の改善を行った。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数： 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	加藤 峰士、美濃島 薫
	発 明 の 名 称	波面制御装置及び補償光学装置
	出 願 人	国立大学法人電気通信大学
	出 願 日	2021 年 8 月 25 日
	出 願 番 号	特願 2021-137394
	概 要	光周波数コムを用いた光フェーズドアレイの基本原理とその構成方法について。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

<プレプリント> (計1件)

[1] **T. Kato**, and K. Minoshima, *arXiv:2405.03053*, 2024(May).

<依頼解説論文> (計1件)

[1] **加藤峰士**, “光周波数コムを用いたフェーズドアレイ,” 月刊 OPTRONICS, 2022 (10 月).

<招待・依頼講演> (計3件)

[1] **加藤峰士**, 美濃島薫, “光周波数コムによる光演算を用いた応用光計測手法について”, 光応用工学特別研究会, 東京, 2024(3 月).

[2] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Optical phased array with phase-controlled optical frequency comb,” *the 15th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII 2023)*, Seoul, South Korea 2023(Sep.).

[3] **加藤峰士**, “光周波数コムを用いた光フェーズドアレイ,” 新技術説明会, 東京(Online) 2022(5 月).

<国際学会(一般)・査読付き>(計7件)

- [1] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Broadband Light Beam Steering by Optical Phased Array Based on Phase-controlled Optical Frequency Comb,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2024)*, SM1G.1, Charlotte, USA 2024(May).

<国際学会 (ポスター)・査読付き>(計1件)

- [1] **T. Kato**, and K. Minoshima, “Ultrafast Wavefront Control of Femtosecond Pulses Using Optical Phased Array Based on Optical Frequency Comb,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2022)*, JW3B.101, San Jose, USA (Hybrid) 2022(May).

<国内学会 (一般) > (計 4 件)

- [1] **加藤峰士**, 美濃島薫, “光周波数コムによる光フェーズドアレイを用いた広帯域光点走査,” 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23a-1BL-6, 東京 2024(3 月).