長寿命気体中粗密波構造を利用した
加工用ファイバーレーザー制御素子の開発

電気通信大学　レーザー新世代研究センター
特任助教　道根　百合奈
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023213-B2）

キーワード：気体光学素子，エントロピー波，マルチモード励起

１．研究の目的と背景

近年、自動車や航空宇宙、エネルギー産業において、電気自動車(EV)化に伴う軽量化や高効率化への要求が急速に立ち上がっている。これに伴い、鋼と軽量なアルミニウム合金に代表される異種金属材料溶接や、金属と炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などの異種材料接合技術の需要が激増している。これらの加工プロセスでは、生産性（スループット）を最大限に高めるため、高出力な連続波(CW)レーザー、およびマイクロ秒からミリ秒パルスで動作する疑似 CW(QCW)ファイバーレーザーが有力な光源として導入されつつある。

我々もこれまで、Q-LEAP（光・量子飛躍フラッグシッププログラム）等の国家プロジェクトにおいて、CW レーザーを用いた高度加工プロセスの研究開発を推進してきた。しかし、実際のレーザー加工現象は、レーザー光と物質との単純な相互作用に留まらず、アシストガスの流体挙動、レーザーの空間モード特性、時間的な強度変調など、多数の物理要因が複雑に影響し合う環境にある。例えば、加工ヘッドの光学素子へのデブリ付着や熱変形を防ぐため、1 つの集光ヘッドあたり 100 L/min に達する多量のアシストガスを噴射しなければならないのが現状である。

今後の先進レーザー加工においては、レーザーのさらなる高強度化に加え、パルス時間波形や空間モードを動的に変化させる制御素子を集光ヘッドエリアに配置することが不可欠となる。しかし、現在のダメージマネージメント技術はこの要求に追いついていない。空間モード変形や多点同時加工、時間変調を実現する素子として液晶空間光変調器(SLM)などの固体光学素子が期待されているものの、これらは現在の産業用高出力 CW ファイバーレーザーを入射しただけで容易に光損傷に至るほど、レーザー耐力が脆弱であるという致命的な課題を抱えている。

このような背景のもと、我々は固体材料を一切使用せず、気体を媒質とした全く新しい光学素子の概念を提唱し、高強度レーザー加工への応用展開を試みてきた。一般に気体は、明確な境界（界面）を持たせることが難しく、真空や周囲の空気との屈折率差も 10^{-4} 程度と極めて小さいため、従来の気体光学は蜃気楼や太陽ハローのような、空間的に緩慢でボヤっとした現象に限定されていた。これに対し我々は、紫外レーザーに対して大きな吸収断面積を持つオゾン(O_3)分子を混入させた気体に、周期的な空間強度変調を施した短パルス紫外レーザーを照射する手法を開発した。オゾン分子の光解離・再結合プロセスに伴う急激な光熱変換（熱エネルギーの周期分布の形成）を利用することで、気体中に音波と同時に温度の波であるエントロピー波（第二音波）を励起し、これまでにない高密度比（0 から 1 に近い大振幅）の粗密波を生成することに成功した。気体中の密度の周期構造は、すなわち光学的な屈折率の周期構造（回折格子）となるため、照射する紫外レーザーの空間周波数に応じた「気体回折光学素子」が形成される [1)]（図 1）。

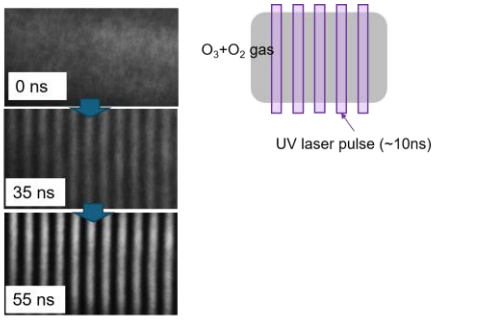


図 1.　気体光学素子（密度変調構造）の生成

この素子は、固体素子よりも 2 桁以上高い 1.6 kJ/cm^2 という圧倒的なレーザー耐力を持ちながら、波長の 1/10 以下の高精度な波面精度と、96%に達する極めて高い回折効率を、わずか 60 mJ/cm^2 の紫外レーザー励起で実現できるという、社会実装上極めて重要な優位性を持つ。気体媒質であるため固体のような永久破壊に至らず、「絶対に壊れない光学素子」として世界的に注目を集めてきた。しかしながら、この初期型の素子をレーザー加工装置メーカー等へ提案した際、産業界からは「現在の加工の主流である CW や QCW ファイバーレーザーに適用できない」という指摘を受けた。初期型の気体光学素子は、紫外パルス照射直後に数 ns～100 ns 周期で激しく時間振動する「音波成分」が支配的であり、この時間変調特性は連続波の制御には合致しなかったためである。

この課題に対し、流体物理学的な定式化を進めたところ、生成される粗密波の密度発展 $\rho(x,t)$ は次式のような簡略化モデルで表されることが判明した。

$$\rho(x,t)=\rho_0\Phi\cos(Kx)\cos(\Omega t)-\rho_0\Phi\cos(Kx)$$

右辺第 1 項が時間振動する音波成分であり、第 2 項が時間変動の極めて緩慢なエントロピー波成分である。素子が激しく振動する原因は第 1 項の音波に起因するが、第 2 項のエントロピー波は空間に固定されたまま長時間残留する特性を持つ。さらに、紫外レーザーの照射強度を高めていくと、照射後数百 ns で音波成分のみが急激に減衰し、時間振動しないエントロピー波のみが長時間残り続ける現象を発見した。本研究は、この時間振動しないエントロピー波のみを選択的に利用する、“エントロピー波オプティクス”の開発を目的とした。特に、高出力ファイバーレーザーを QCW 的に高速変調・制御可能な試験機の構築に向け、音波成分を意図的かつ極初期段階でシャットアウトし、同時に素子の立ち上がり高速化と高機能化（高分散化・回折角制御）を両立するデバイス制御手法の開発（申請計画における研究開発(A)1 および 2）に取り組んだ。

２．実験方法

本研究では、産業用 CW レーザーの高度制御に適したエントロピー波単独生成構造を確立するため、以下の 2 つのアプローチから実験システムを構築し、検証を行った。

2・1　Wave breaking（リーマン減衰）を利用した音波成分の高速減衰

気体力学における不線形波動理論（Riemann damping）

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x}=\frac{-kB\sin\Phi}{1-\frac{6}{5}Bkt\sin\Phi}$$

に基づき、下式で表される波の速度変調の不線形発展を評価した。

ここで、δ v(x,t) は波の速度、B は速度変調の振幅、ϕ は速度変調の周期、k は空間変調の波数である。本理論は、t = 5/6kB において Wave breaking（波の砕け）が生じることを示唆している。すなわち、振幅 B（紫外励起レーザーの光強度）を非常に大きく設定することで、通常音波の減衰速度を高速化できると考えられる。実験では、後述するオゾン混合ガス流路に対し、照射する紫外レーザーのエネルギー密度を系統的に変化させた。生成された粗密波の時間発展挙動を、固体レーザーから導光したプローブ光の回折効率変化として高速フォトダイオードおよびオシロスコープにより時間分解計測し、不線形減衰の閾値特性および減衰定数の励起強度依存性を詳細に評価した。

2・2　時空間マルチモード励起による過渡特性・空間周波数制御

従来の干渉照射手法（単一パルス照射）では、空間周期間隔を短縮して回折角や分散量を大きくしようとすると、2 本の紫外レーザーの交差角を大きくする必要があった。ところが、粗密波の立ち上がり時間（時間変調周期の半分）が励起紫外光パルスのパルス幅に近づくと、原理的に、有効な密度変調が形成できなくなる物理限界が存在した。この限界を超えるには励起光のパルス幅を短縮することが考えられるが、パルス幅を数 ps 以下に短縮すると、フーリエ限界によりレーザーの時間・空間コヒーレンスが著しく低下し、干渉縞の明瞭度(Visibility)が悪化するため、数 mm 以上の気体厚み（奥行き）にわたって均一な回折格子を書き込むことが困難になるという問題が生じてしまう。

この問題を解決するため、本研究では気体への入射パルスを多重化し、時空間的に精密に制御して入射する「時空間マルチモード励起光学系」を開発した。

【実験システムの具体的構成】

・オゾン混合ガス生成・流路部： 酸素ガスを原料とし、誘電体バリア放電管を用いて高濃度オゾンを安定生成した。オゾン濃度は、波長 266 nm の紫外レーザーが、厚み 3 mm～10 mm のガス層を通過する際に最適な光吸収を起こすよう、1%～3%の範囲で精密に調整した。流路は十分な長さを確保した矩形断面構造とし、層流状態のオゾン混合ガス中に紫外励起光および被制御レーザー光が窓無し領域から正確に入射できる構造を構築した。

・紫外パルスレーザー光源： オゾン分子に大きな吸収断面積を持つ波長 266 nm のパルス光源として、ナノ秒から数百ピコ秒のパルス幅を持つ紫外レーザーを用意した。本システムは、ビームスプリッタおよび可変遅延光路（ディレイライン）を用いることで、独立して制御可能な 2 つ以上のパルス（第一の紫外レーザー、第二の紫外レーザー）が時間差をもって発生できる構造とした（図 2）。

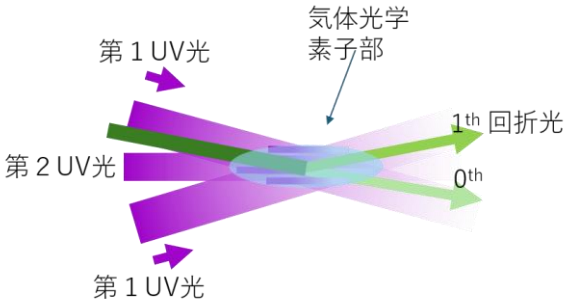


図 2.　UV 光の時空間重畳の概念

・多重干渉光学系： 第一の紫外レーザーをビームスプリッタで分割後、所定の交差角でオゾン流路内にて干渉させ、高いコントラスト比を持つ単一空間周波数の 1 次元強度分布光を照射して初期の粗密波を書き込む。さらに、第二の紫外レーザーを、第一のパルスによって生成された第一の時間的変調ピークのタイミングに完全に同期（適切な時間遅延）させて同一領域に入射可能なインジェクション光学系を配置した（図 3）。

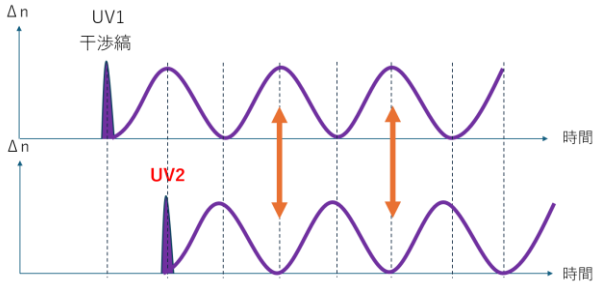


図 3.　多重干渉光学系による時間変調特性制御のアイディア

この多重パルス照射により、交差角（物理配置）を固定したまま空間変調周期を疑似的に半分に短縮し、異なるモードの音波の位相を不揃いにさせることで、時間振動成分の早期鎮静化（デフェージング）および過渡的な高速立ち上がり特性の検証を行った。

３．研究成果／実験成果など

３・１　時空間マルチモード励起による過渡特性・空間周波数制御

紫外励起レーザーの照射エネルギー密度を上昇させ、大振幅粗密波を生成した結果、回折効率の初期時間応答において明確な不線形減衰挙動が観測された。理論式から予測される通り、高強度励起に伴い流体中での速度変調振幅が増大したことで、数 100ns 以下の時刻で Wave breaking（波の砕け）が誘起された。これにより、音波に起因する時間振動成分は、紫外光照射直後の数百 ns 以内という極めて短い時間内に急激に減衰・鎮静化することを確認した。本検証により、不線形流体力学モデルの予測と実験が定性的には一致することがわかった。今後、時間的にフラットで安定したエントロピー波構造を単独で取り出すためには、後半のエントロピー波のみを強く励起できる条件を探索していく必要がある。（なお、本挙動の流体運動学的基礎特性の解析にあたっては、光科学技術振興財団の助成により得られた知見も一部有効に活用した）。

３・２　時空間マルチモード励起による過渡特性・空間周波数制御

複数パルスを時間・空間的にずらして入射するマルチモード励起の導入により、従来の単一パルス励起の物理的限界（パルス幅の壁、コヒーレンスの壁）を超えることができた。

実験において、第一の紫外レーザー照射によって生成された初期の粗密波が、流体振動によって第一の時間的変調ピーク（回折効率の極大点）に達した瞬間を狙い、第二の紫外レーザーパルスを時空間的に同期させて重畳照射した。その結果、以下の 3 つの成果が得られた。

①時間変調周期の半減化と高速立ち上がりの達成：

第二のパルスが適切な位相で重畳されたことにより、第二以降の時間変調周期が正確に半分へと短縮されるダイナミクスを観測した（図 4）。これにより、紫外レーザー自体のパルス幅を短縮（短パルス化によるコヒーレンス劣化を誘発）することなく、過渡的な回折光学素子・光スイッチとしての立ち上がり時間を大幅に高速化できることを実証した。

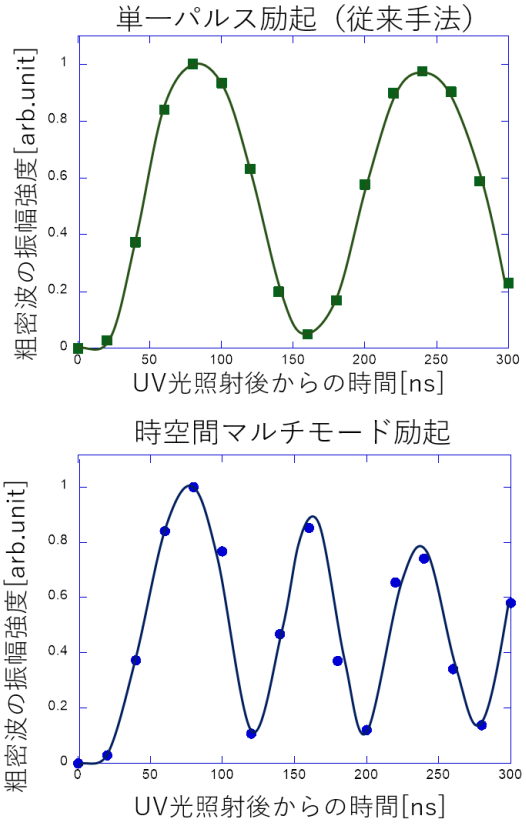


図 4.　粗密波の時間発展（上：単一 UV 光励起時の粗密波時間周期、下：複数ＵＶ光照射による粗密波周期の短縮）

②空間周期間隔の能動的短縮（高機能化）：

交差角度などの物理的なミラー配置を一切変更することなく、2 本目のパルスの入射タイミングをナノ秒スケールで制御するだけで、気体中に形成される密度格子の空間変調周期を動的に変更できることを実証した。これにより、被制御レーザー（加工用ファイバーレーザー）に対して回折角の任意制御やビーム分散量の動的変更が、電気的・光学的タイミング調整のみで達成できることになる。

③マルチモードデフェージングによる音波成分の完全消滅：

空間周波数が多重化（マルチモード化）された結果、各モードに励起された音波成分は、音速に基づく固有の分散関係に従って異なる振動数で運動を始める。そのため、最初に位相が揃っていた音波のうなりおよび時間振動成分が、互いに激しく打ち消し合い（デフェージング）、単一モード励起時と比較して格段に早い時間で完全に鎮静化することを確認した。

以上の通り、不線形減衰効果と時空間多重インジェクションを組み合わせることで、パルス幅制限やコヒーレンス劣化を回避しながら高速立ち上がりと回折角・分散量の能動制御、音波成分の早期消滅（エントロピー波の単独抽出）

を同時に達成するデバイス制御手法の基礎の部分の手法が開発できたことになる。

本成果（時空間マルチモード励起デバイスおよび制御手法）のコアとなる構成については、現在特許出願（特願2025-068330）を完了している。

４．結び

本研究では、長寿命気体光学素子を高出力ファイバーレーザー加工（CW および QCW プロセス）へ適応させるため、デバイスの時間振動（音波成分）を極初期に排除し、過渡特性を高度に制御する新手法の開発に取り組んだ。流体力学的な不線形効果である Wave breaking の積極的利用、および 2 つ以上の紫外パルスをナノ秒スケールで時空間制御してインジェクションするマルチモード励起光学系の構築により、音波成分のみを選択的かつ高速に干渉消滅（デフェージング）させることが可能であることがわかった。さらに、励起パルス幅の物理限界を超えて、素子の時間変調周期および空間周期間隔を能動的に短縮（周期の半減化）し、回折角や分散量を配置変更なしに制御できることも実証した。いままで積極的な制御ができないと思われていた粗密波が制御できることが可能になったことが、この気体光学素子を応用していく上で重要な成果になると考えている。今後は、本研究で得られたマルチモード制御技術の知見を踏まえ、次のステップであるエントロピー波自体のさらなる長寿命化（現行の 10 倍を確保）および繰り返し周波数 100 kHz での連続動作試験を進める。最終的には、現有する高出力ファイバーレーザー加工システムへ本素子を組み込み、実際の金属・異種材料溶接において高速空間変調および QCW 制御が行える試験機の構築へと展開し、産業界への社会実装に向けた共同研究へと繋げたい。

謝　辞

本研究の遂行にあたり、多大なる研究助成を賜り、粗密波の基礎研究の部分と制御という、実用化デバイスへ向けての重要なパートを力強く後押ししていただきました公益財団法人天田財団に深く感謝いたします。また、本研究の流体物理モデルおよび知財化戦略の構築において有益なご助言をいただきました共同研究者各位、ならびに多大な実験的協力をいただいた研究室のスタッフの皆様に厚く御礼申し上げます。

なお、本研究における流体力学挙動の基礎検証プロセスの一部においては、公益財団法人光科学技術振興財団からの助成による知見もあわせて有効に活用させていただきました。ここに重ねて感謝の意を表します。

参考文献

1) Y. Michine and H.Yoneda, Communications Physics Vol. 3,24 (2020)