

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390086

研究課題名(和文) 軸対称偏光炭酸ガスレーザーによる炭素繊維強化樹脂(CFRP)加工

研究課題名(英文) Processing of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by cylindrivally polaized pulsed carbon dioxide laser

研究代表者

遠藤 雅守 (Endo, Masamori)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：60317758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)： 代表者が開発した「トリプルアクシコン(T-axicon)光共振器」を用い、軸対称偏光で発振するパルス炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)レーザーを開発した。開発したレーザーを用いて炭素繊維強化プラスチック(CFRP)加工の基礎研究を行った。

ラジアル偏光、アジマス偏光、ランダム偏光の3種類の偏光のパルスレーザーで0.45mm厚の2層CFRP板の穴あけを行ったところ、アジマス偏光のみ25%小さいエネルギーで穴あけが可能であった。切断試験の結果は、ラジアル偏光、アジマス偏光の両方がランダム偏光に対して2倍の速度で切断可能という結果を得た。

研究成果の概要(英文)： We developed a pulsed CO<sub>2</sub> laser oscillating in the cylindrically polarized modes by means of a Triple-axicon optical resonator. We applied it to the machining of the carbon fiber reinforced plastic (CFRP).

Drilling was conducted by radially, azimuthally, and randomly polarized beams. It was found that azimuthally polarized beam could drill the CFRP plate by 25% smaller pulse energy. On the other hand, both radially and azimuthally polarized beams could cut the CFRP plate faster than randomly polarized beam by a factor of two.

研究分野：レーザー，波動光学

キーワード：軸対称偏光 CO<sub>2</sub>レーザー アジマス偏光 レーザー加工 パルスレーザー

## 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic=CFRP)は炭素繊維の骨格を持つ熱硬化性樹脂をオートクレーブで加熱、硬化させたもので、極めて強靱かつ軽量であることから航空宇宙、自動車などへの応用が広がりつつある新素材である。最近では Boeing 社の B-787 型旅客機が主翼、胴体などの大部分に CFRP を採用し話題となった。しかし、CFRP はレーザー加工にとっては厄介な素材である。理由は、CFRP が複合材であることに加え、炭素繊維と樹脂の熱伝導率が大きく異なるために、切断に伴って素材構造の破壊や剥離等が起こり、切断線近くの機械的強度が損なわれるためである。これを熱影響領域(Heat Affected Zone=HAZ)と呼ぶ。HAZ 発生を防ぐためには、大きな尖頭出力を持ったパルスを用い、材料を熔融させずに蒸散させることが有効であることがわかっている。日本では NEDO 依託研究「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」が発足し、ファイバーレーザー(近赤外)と YAG レーザーの高調波(紫外)を同時照射することで問題解決を図る。

一方、Salama 等[1]は、マイクロ秒以下の CO<sub>2</sub> レーザーのパルスが、HAZ の発生防止に効果的であることを報告した。Ziremann 等[2]は、各種レーザーで CFRP の切断加工を行い、マイクロ秒のパルスが最もコスト・性能に優れることを示した。CO<sub>2</sub> レーザーは、紫外レーザーに比べ出力・光子コストに優れるため、本研究は CO<sub>2</sub> レーザーによる CFRP 加工の可能性に着目した。

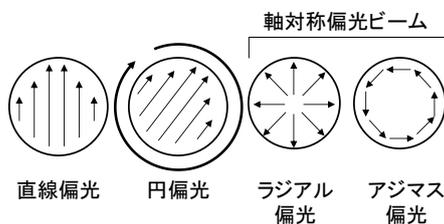


図 1: レーザービームの電場空間分布(概念図)

本研究の独自性は、CO<sub>2</sub> レーザーを「軸対称偏光」で発振させ、CFRP 加工に適用する点に求められる。軸対称偏光とは、図 1 のように光電場がビーム中心から放射状に走る「ラジアル偏光」、電場が円周状に走る「アジマス偏光」に代表される、特異な偏光状態のレーザービームである。

Niziev 等は、ラジアル偏光ビームによる切断速度が、理論的には円偏光の 2 倍になることを指摘した[3]。その後、いくつかのグループから Niziev の仮説を支持する実験結果が相次いだ。一方、光電場が円周にそって走る「アジマス偏光」は、レーザー穴あけ加工に有利であることが分かっている。しかし、レーザー加工に適用可能なほどの大出力で軸対称偏光ビームを発生させることは大変困難で、実験的研究は遅れている。

代表者は、アクシコン(円錐形)光学素子を利

用した「トリプルアクシコン(T-axicon)光共振器」を発明し、市販の CO<sub>2</sub> レーザーに組み込んで連続発振、出力 2kW の軸対称偏光レーザービームを発生させることに成功した[4]。T-axicon 光共振器の概念図を図 2 に示す。

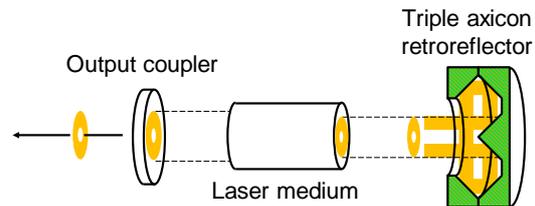


図 2: T-axicon 光共振器の概念図

開発したレーザーを金属切断加工に適用し、条件によっては円偏光の 2 倍の切断速度が出せることを実証した。しかし現象は単純では無く、条件によっては円偏光との大きな違いは見られなかった。軸対称偏光レーザーによる加工の理解は、まだ緒に就いたばかりと言って良い。

## 2. 研究の目的

以上の背景より、軸対称偏光で発振するパルス CO<sub>2</sub> レーザーは、CFRP 加工にも優れた性能を示すことが期待されるが、未だ誰も試みたことはない。CFRP は複合材であり、レーザー加工と偏光の関係も単純ではないため、その効果を実験により確認することが望まれる。

本研究は、軸対称偏光パルス CO<sub>2</sub> レーザーが CFRP 加工に有効であることを実証するため、以下の項目で研究を行う。

- ①. CFRP の加工が可能なスペックを持つパルス CO<sub>2</sub> レーザーにトリプルアクシコン光共振器を組み合わせ、軸対称偏光で発振させる。
- ②. CFRP 試料に対するレーザー照射試験を行い、穴開け加工によって軸対称偏光が加工に及ぼす影響を評価する。
- ③. 高繰り返しパルス発振により CFRP の切断加工を試み、軸対称偏光の優位性を実証する。

加工性能は材料の除去レート(速度)、HAZ 幅を定量的に比較、軸対称偏光ビームが従来のレーザーに比べどの程度優位であるか明らかにする。また、単純な速度の比較のみではなく、軸対称偏光が CFRP の除去加工に及ぼす影響をその素過程に遡って解明することも目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験装置

図 3 は実験装置の全体構成図である。実験装置は以下のブロックに分かれる。

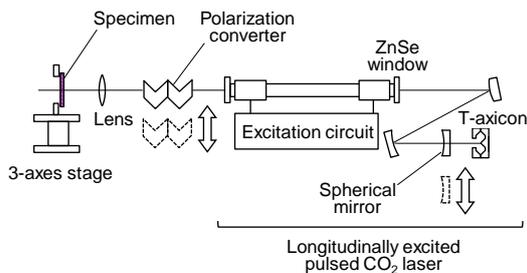


図 3: 実験装置の全体構成図

- ① 軸方向励起パルス CO<sub>2</sub> レーザー: レーザー本体分担者が発明した独自方式で、媒質ガス組成を変えることでパルス幅をサブ  $\mu\text{s}$  (ピークのみ) から数十  $\mu\text{s}$  (ピーク+テール) まで任意に変えられる特徴を持つ。レーザーの構成概念図を図 4 に示す。本研究では、パルスエネルギーを最大化するため、テール付きパルスを得るガス組成比(CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:2)を選択した。パルスエネルギーは 18mJ, 繰り返しは最大 10Hz である。

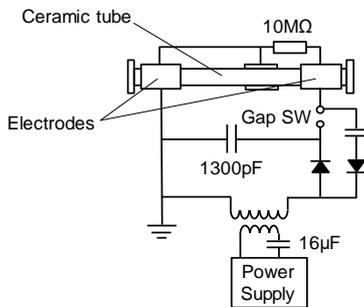


図 4: 軸方向放電励起パルス CO<sub>2</sub> レーザー

- ② T-axicon 光共振器: かつて、2kW 級 CO<sub>2</sub> レーザー用に開発したものを流用した。設計上のビーム径が異なるため、望遠鏡共振器の構成でビーム径を整合させた。そのため、光共振器は一部外部化され、ミラーで折り返す Z 型の構成となっている。T-axicon 直前には、脱着可能な球面鏡が装備される。光共振器は T-axicon でアジマス偏光、球面鏡でランダム偏光発振をする。
- ③ 偏光コンバーター: T-axicon は原理的にラジアル・アジマスどちらか一方の偏光しか生成できない。両偏光での試験を可能とするため、偏光コンバーターを使用した。詳細については文献[4]を参照されたい。
- ④ 集光レンズおよび加工ステージ: 集光レンズはゲルマニウム製、焦点距離 50mm の単レンズを使用した。加工ステージはマイクロメータ制御の 3 軸で、図 3 の上下方向の移動はモータライズされており、切断試験の際は一定速度で送る。

(2) 実験方法

- ① ビーム品質・偏光測定: ビーム品質は、焦点距離 192mm の単レンズでビームを集光し、焦点近傍のビーム半径を計測、ガウスビームの伝搬公式にフィットして  $M^2$  を計測した。偏

光は、ビームを直線偏光板に通し、透過光をビームプロファイラー(Spiricon Pyrocam III)で観測することにより確認した。

- ② 穴あけ試験: レンズで集光したビームを、厚さ 0.44mm, 2 層 CFRP 整形板(O-KEI 樹脂)に照射し、パルスエネルギーと貫通に要する時間の関係を計測した。パルスの繰り返しは 3Hz で行った。
- ③ 切断試験: レーザーを、より高出力な精電舎電子工業製 UPL-01 に交換した。装置の写真を図 5 に示す。UPL-01 は、分担者が考案した CO<sub>2</sub> レーザーを商品化するために開発された試作機で、レーザーパルスパラメータは図 4 のものと同様である。ただし、電源が大幅に強化されており、繰り返し 100Hz での動作が可能である。100Hz 動作時の平均出力は 1.6W である。これを、図 4 のレーザーと交換すれば、光共振器はそのまま使用できる。初期の実験で、2 層 CFRP の分断が困難であることが明らかになり、切断試験には厚さ 0.24mm の単相 CFRP 整形板(茨城工業)を使用した。

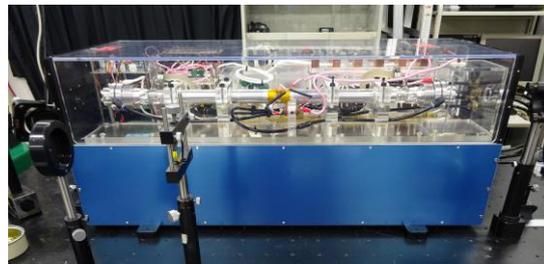


図 5: 精電舎電子工業 UPL-01

4. 研究成果

(1) ビーム品質・偏光測定

ビーム品質の測定結果を図 6 に示す。軸対称偏光は LG<sub>01</sub> のラゲールガウスモードであるため、理論的な  $M^2$  は 2 であるが、計測結果はそれに近い値を示している。また、球面鏡を用いて得たランダム偏光も、断面強度分布は T-axicon 光共振器と同一で、同様に LG<sub>01</sub> モードで発振していることが期待される。ビーム品質計測の結果、 $M^2=1.97$  で、発振モードが LG<sub>01</sub> であることが裏付けられた。

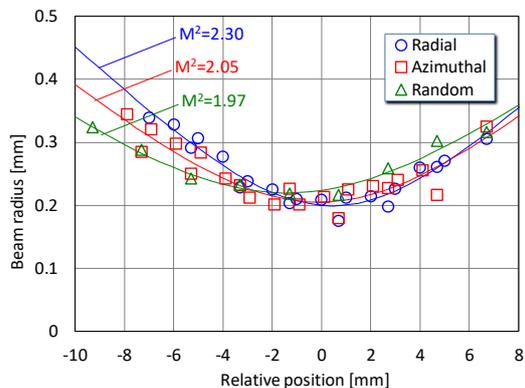


図 6: ビーム品質計測の結果

偏光計測の結果を図 7 に示す。図上部の矢印は、偏光板の透過方向を示している。T-axicon 光共振器で直接得たモード(アジマス偏光)は、偏光板通過後の強度分布が 2 個のローブを呈し、偏光板の回転に伴い暗線が回転する。これを偏光変換器に通すことで(ラジアル偏光)、暗線の向きが 90° 回転する。一方、球面鏡光共振器で得たビームは、偏光板を通して強度分布が変化しない。

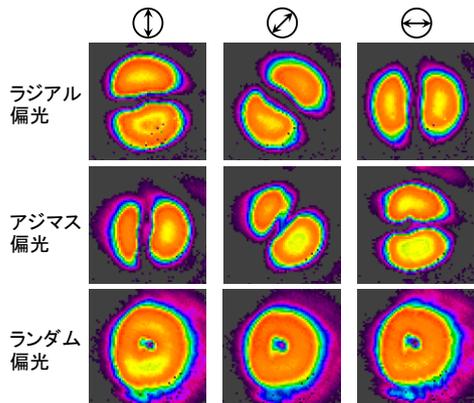


図 7: 偏光計測の結果

以上の実験結果から、本研究で開発したレーザーは、同一のビーム品質を持つラジアル偏光、アジマス偏光、ランダム偏光であり、偏光の違いが加工に及ぼす影響を調査する試験に利用できることが明らかになった。

## (2) 穴あけ試験

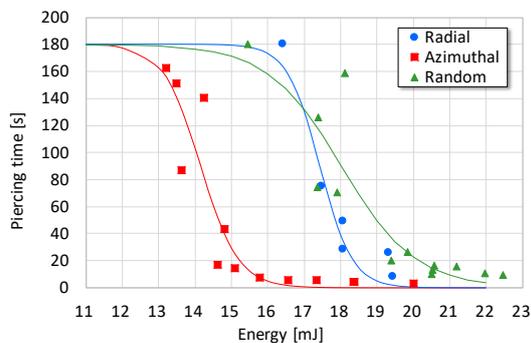


図 8: 穴あけ試験の結果

各偏光で、パルスエネルギーを変えて穴あけ試験を行った。結果を図 8 に示す。グラフの横軸がパルスエネルギー (mJ/pulse)、縦軸が貫通に要した時間である。180 秒(540 shots)で貫通できなかったケースはそこで試験を打ち切った。グラフから、穴あけに要する総フルエンスは一定でなく、穴あけが可能になる閾値エネルギーが存在することがわかる。そして、アジマス偏光のしきい値は、他の偏光に比べて 25%ほど小さいことが明らかになった。

アジマス偏光の、特異な穴あけ性能向上のメカニズムを解明するため、幾つかの実験を行っ

た。パルスエネルギーを 18mJ に固定して、レーザーを指定された回数照射し、生成された穴の深さをレーザー顕微鏡で観察した。ショット数と穴の深さの関係を図 9 に示す。

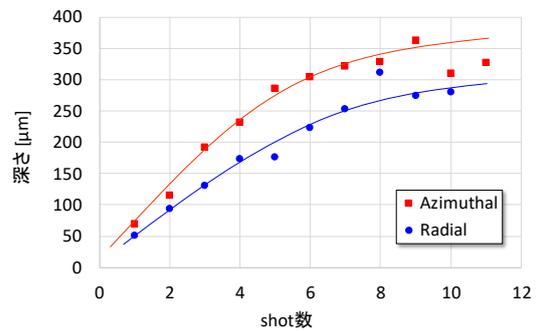


図 9: 軸対称偏光による穴あけ加工: ショット数と穴の深さの関係。パルスエネルギー 18mJ。

穴の深さははじめの数ショットは線形に増大していくが、その後は飽和現象が観測され、10 ショット以降は穴の深さがほとんど変化しない。加工レートが飽和する穴の深さはパルスエネルギーに依存するものと推測される。これが、穴あけ加工にしきい値が存在する理由である。また、同じエネルギーで比較すると、アジマス偏光の飽和深さはラジアル偏光に比べて 25%ほど大きいことが明らかとなった。

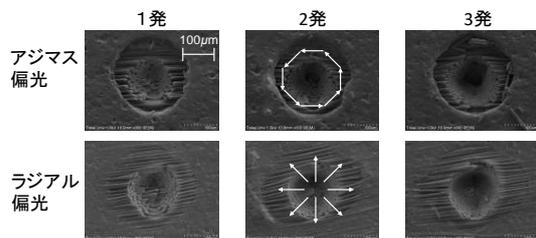


図 10: レーザーを 1~3 ショット照射したあとの加工痕の電子顕微鏡写真

次に、各偏光で 1~3 ショット照射した加工痕を電子顕微鏡で観察した。写真を図 10 に示す。ラジアル偏光とアジマス偏光の加工痕に著しい差が観測された。ラジアル偏光は、炭素繊維の方向に沿って大きな熱影響層が観測されたが、アジマス偏光には見られなかった。

これらの実験結果から、アジマス偏光における特異的な穴あけ加工性能向上を以下のように説明できる。最初のパルスで CFRP 表面に穴が穿たれると、切れた炭素繊維が穴表面に露出する。このとき、ラジアル偏光は電場が繊維方向に平行、アジマス偏光は垂直である。すると、ラジアル偏光は炭素繊維がアンテナとなってレーザー電場と効率よく結合するのに対して、アジマス偏光は結合が弱く、反射した電場が穴底面に送られる。

## (3) 切断試験

レーザーを UPL-01 に変え、切断試験を行った。各偏光における、平均パワーと切断可能な

最大送り速度の関係を図 11 に示す. 最大パルスエネルギーは 70Hz までは一定だが, 90Hz では若干小さい. そのため, 平均パワーが増加しているにもかかわらず, 最大切断速度は 70Hz で頭打ちとなっている.

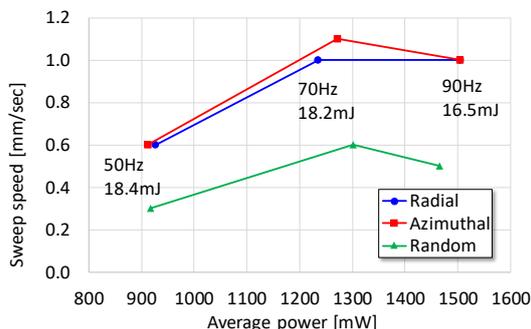


図 11: 切断試験の結果

アジマス偏光, ラジアル偏光が, ランダム偏光に対して 2 倍の切断速度という結果を得た. しかし, この結果は, ラジアル偏光とアジマス偏光が互いに直交する偏光であることを考えれば, 俄には信じがたい. 一方, レーザー加工における重要なパラメータ, すなわちエネルギー, パルス幅, ビーム品質(フルエンス)は全ての偏光で同等であることを確認している.

今後は, 加工の詳細な機構を解明して, 観測された結果を説明できる理論の構築が課題となる.

アシストガスなし 50Hz



アシストガスあり 50Hz



ラジアル                      アジマス                      ランダム

図 12: 切断した試料の顕微鏡写真

切断した試料の顕微鏡写真を図 12 に示す. HAZ の幅は, 目視で確認できる変質層の幅とする. アシストガスを使用しない試料は片側幅 0.2mm の HAZ が観測された. 一方, 窒素ガスアシストとして吹き付けた試料は, 切断速度を犠牲にすること無く HAZ を片側 50µm まで減らすことができた. 予想に反し, 偏光による HAZ の差異は見られなかった.

#### (4) 結論

軸対称偏光パルスレーザーによる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の穴あけ, 切断加工を行った. 穴あけ加工においては, アジマス偏光が他の偏光に対して 25%ほど早い穴あけが可能であることを示した. 切断加工においては, ラジアル偏光, アジマス偏光がどちらもランダム偏光に対して約 2 倍の切断速度で切断が可能であった. 偏光の違いによる熱影響層の差は見られなかった.

#### (5) 謝辞

切断試験で使用した CO<sub>2</sub> レーザーは精電舎

電子工業より貸与をうけたものである. ここに明記し, 謝意を表する.

#### (6) 参考文献

- [1] A. Salama et al., Proc. of 31st ICALEO Paper 808, pp. 302-308.
- [2] S. Ziermann et al., Proc. of 31st ICALEO Paper 407, pp. 146-150.
- [3] V. Niziev et al., J. Phys. D 32 (1999), pp. 1445-1461.
- [4] M. Endo et al., Proc. SPIE 7579 (2010), 75790F (9pp).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

1. M. Endo, N. Araya, Y. Kurokawa and K. Uno, "Anomalous enhancement of drilling rate in carbon fiber reinforced plastic using azimuthally polarized CO<sub>2</sub> laser," Laser Phys. 26 (2016) 096001 (5pp). (査読有)  
doi:10.1088/1054-660X/26/9/096001

[学会発表] (計3件)

1. 新谷實海, 足立幸謙, 遠藤雅守, 宇野和行, 「軸対称偏光パルス CO<sub>2</sub> レーザーによる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の穴あけ」, 第 77 回応用物理学学会学術講演会 (2016 年 9 月, 新潟)
2. 新谷實海, 黒川悠輝, 遠藤雅守, 宇野和行, 「軸対称偏光パルス CO<sub>2</sub> レーザーによる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の穴あけ」, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会 (2016 年 1 月, 愛知)
3. 曾根有紀, 黒川悠輝, 遠藤雅守, 宇野和行, 「Triple-axicon 光共振器によるアジマス偏光パルス CO<sub>2</sub> レーザーの開発」, 第 76 回応用物理学学会学術講演会 (2015 年 9 月, 愛知)

[その他]

研究成果 Web ページ:

<http://teamcoil.sp.u-tokai.ac.jp/researches/radialMP/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

遠藤 雅守(ENDO, Masamori)  
東海大学・理学部・教授  
研究者番号:60317758

##### (2) 研究分担者

宇野 和行(UNO, Kazuyuki)  
山梨大学・総合研究部・准教授  
研究者番号:20550768