

験に用いたレーザーシステムのブロックダイアグラムを示す。シード光には、波長 1064nm で連続発振しているファイバー発振器を使った。この光を、LN 振幅変調器を使って任意のパルス幅、繰り返しでパルスに切り出した。典型的な繰り返しは 1MHz, パルス幅 10ns を用いている。その後、ファイバー増幅器で 5W まで増幅した直線偏光ビームを前置増幅器通過後、軸対称偏光子に挿入し軸対称偏光に変換した。次に、図中赤枠部分で軸対称偏光からラゲールガウスビームの左右円偏光に変換した。得られた左右円偏光を $\lambda/4$ 板に通し直線偏光に変換した後 7mm Φ \times 145mm の Nd:YAG ロッド増幅器 2 台でダブルパス増幅し、1 ビーム当たり 50W の出力を出した²⁾。増幅後に再度 $\lambda/4$ 板に通し左右円偏光に戻した後、図中青枠部分で示した軸対称偏光スイッチング部でビーム結合させ、軸対称偏光のスイッチングを行った。最後に、図中黄色枠部分で 2 本の軸対称偏光ビームを 1 ビームにまとめ結合出力として得ている。この時、それぞれの光路からラジアル偏光とアジマス偏光が対になって得られるため、出力光として得る前に 90 度旋光子を用いて両偏光を揃えている。

2・2 軸対称偏光から左右円偏光への変換

軸対称偏光から直線偏光への変換の原理について説明する。最終的に必要なのは直線偏光であるが、軸対称偏光から直接直線偏光への変換はできない。そのため、一度円偏光に変換する。図 2 に変換の原理図を示す。図に示すように、軸対称偏光であるラジアル偏光とアジマス偏光は互いに偏光が直交するように偏光が分布している。この 2 つの偏光を位相差 $\pi/2$ でハーフミラーによりビーム結合する事により、各位置で円偏光が発生する。ただ、発生する円偏光は、ビーム中心を中心として偏光軸が螺旋状に回転している状態になる。これを瞬時に評価すると、面内で位相が螺旋状に 0 から 2π まで変化することになり、これは一般的に、ラゲールビームと呼ばれるものに相当する。ハーフミラーから出射される結合後の 2 ビームは位相差 π を持つことから、左右円偏光のラゲールビームが得られることになる。

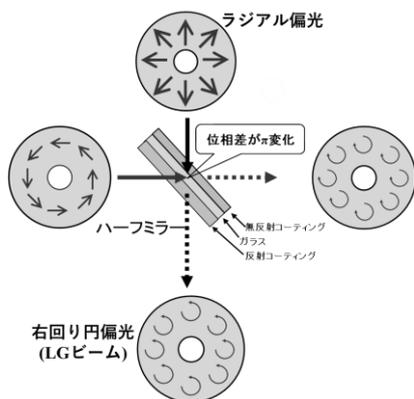


図 2 軸対称偏光から直線偏光への変換原理

2・3 直線偏光から軸対称偏光への変換とスイッチング

直線偏光ラゲールビームから軸対称偏光に変換するには、左右円偏光ラゲールビーム変換した後に、ハーフミラーを使ってビーム結合する。この時、2 つのビームの位相差が 0 の時はラジアル偏光、位相差が π の時はアジマス偏光が得られる。図 3 に軸対称偏光へ変換とスイッチングの構成を示している。軸対称偏光への変換ではハーフミラーの出射光としてラジアル偏光とアジマス偏光が現れる。この時、結合時の位相差でどちら側にどちらの偏光が現れるかを切り替えることができる。したがって、ピエゾミラーをパルスに合わせて駆動することで自由に切り替えることができる。最終的には、片側に 90 度旋光子を入れることで同じ軸対称偏光ビームに変換し、2 ビームから 1 ビームへ結合した。

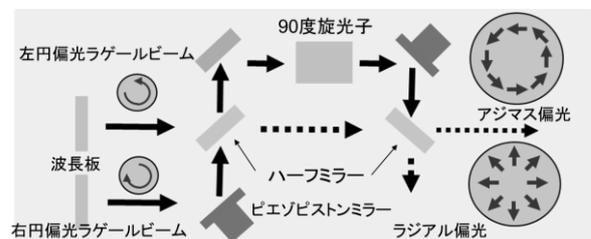


図 3 軸対称偏光のスイッチング

3. 実験成果³⁾

3・1 円偏光ラゲールビームの発生

軸対称偏光から左右円偏光ラゲールビームに変換されている様子を確認するために、結合後の片方のビームを偏光子に通過させた後、カメラにより強度分布を計測した。図 4 に計測した強度分布を示している。アジマス偏光とラジアル偏光のビーム結合は、偏光軸が螺旋状に回転してい

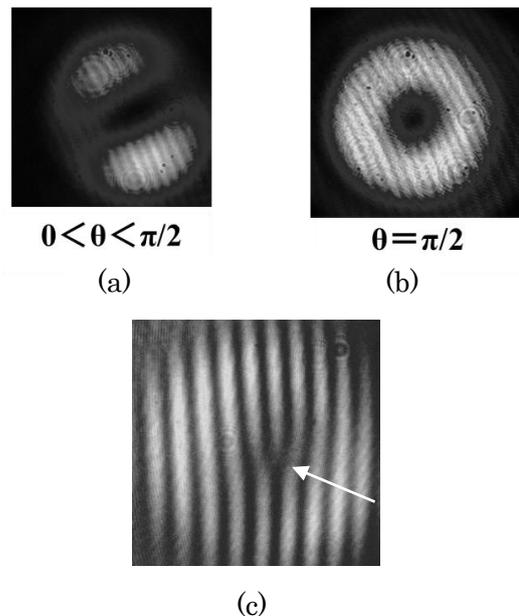


図 4 軸対称偏光から変換したラゲールビーム。(a) 2 ビームの位相差が $\pi/2$ でない場合、(b) 位相差が $\pi/2$ の場合の偏光子通過後の強度分布。(c) 平面波との干渉パターン。

る状況となるので、すべての断面領域で円偏光となるには位相差を $\pi/2$ に保つ必要がある。図4(a)では位相差が $\pi/2$ からずれているため、部分的に直線偏光となり、偏光子通過後に扇形の強度分布となっている。一方で、図4(b)では、ピエゾピストンミラーで位相差を $\pi/2$ に保っているため、ビーム断面の全領域で円偏光が実現されており、偏光子透過後の分布がドーナツ状になっている。さらに、結合後のビームは偏光軸が螺旋状に回転しているため、ラゲールビームとなっていると予想される。図4(c)は平面波との干渉パターンを示している。図中の矢印で示しているように、ビーム中央部に位相の飛びが現れており、ラゲールビームに特有の特徴が観測されている。もう片方のビームについても同様の傾向が観測されており、左右円偏光ラゲールビームが発生していることが確認できた。

次に、アジマス偏光とラジアル偏光を結合させて得られた円偏光の安定性を調べた。図5に位相制御フィードバックによるパワーの安定化の様子を示す。軸対称偏光から円偏光への変換では、どのような位相差であっても縦、横偏光成分の比が変化しないため、基本的には位相差によるパワーの変動は発生しない。しかしながら、ビームの強度分布やミラーの偏光依存性などによって変更分布の変化がパワー変動として現れる。図5からわかるように、位相フィードバック制御をしない場合は若干のパワー変動が生じている。フィードバック制御により位相差を $\pi/2$ に維持することでパワーが一定になることがわかる。

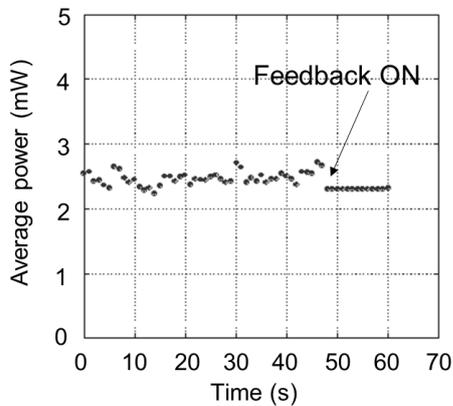


図5 円偏光変換におけるフィードバック制御

3・2 軸対称偏光スイッチングの原理実証

スイッチングの原理実証のために主増幅器をバイパスした状態でラジアル偏光、アジマス偏光の相互スイッチングを検証した。図6にスイッチングしたときのパターンの変化結果を示す。パターンの計測は偏光子を透過した後で行っており、軸対称偏光特有の扇形分布が得られている。制御反転前では、水平方向成分に縦型の扇分布、垂直方向成分に横型の扇分布が見られたことからアジマス偏光が得られていることが分かる。この状態から制御反転を行うと、強度分布が90度回転した。このことから、アジマス

偏光からラジアル偏光の切り替えが行えていることが分かる。

	制御反転前	制御反転後
水平成分		
垂直成分		

図6 アジマス偏光とラジアル偏光のスイッチング

3・3 高出力動作における軸対称偏光のスイッチング

次に、図1に示しているNd:YAG ロッド増幅器2台を用いてダブルパス増幅後、原理実証時に用いた方法で軸対称偏光のスイッチングを行った。図7にスイッチングを行った結果を示す。原理実証実験の時と同様にビーム結合後のビームを偏光子に通過させ、垂直成分と水平成分のビームパターンをCCDカメラにより計測し、扇形の強度分布が確認されるか否かでスイッチングの可否を判断した。原理実証時と異なり、増幅を行うことで、ビーム品質が劣化することが予想される。そのため、イメージ点にCCDカメラを配置し、ビームパターンを観察できるようにしている。図7からわかるように、水平成分においては傾きが生じているものの扇形の強度分布が得られており、位相差 π を与える事で扇形分布が約90度回転し、スイッチングが行え

	制御反転前	制御反転後
水平成分		
垂直成分		

図7 高出力動作時における軸対称偏光のスイッチング動作結果

ている。垂直成分においても扇形の強度分布が見られるがラジアル偏光の制御反転前、アジマス偏光を制御反転してラジアル偏光になった垂直成分は漏れ成分があるが、扇形模様が90度回転している様子が確認できた。しかしながら、増幅時に受ける熱歪が大きく影響しており、均一な強度分布が得られていない。特に、偏光の漏れが大きく、熱複屈折や熱レンズによる位相歪がスイッチング特性を低下させている。これらの影響をいかにして除去するか、今後の課題である。

3・4 軸対称偏光レーザーによるCFRPの加工特性

開発したレーザー装置は、軸対称偏光の高出力化、光速スイッチングの可能性を検証することができたが、加工特性を比較するのに十分なビーム品質を得ることができなかった。そのため、加工評価には高速偏光スイッチングが可能なファイバーレーザー装置に軸対称偏光変換素子を挿入することで代用した。最終出力は、繰り返し10MHz、平均出力45Wであり、パルス幅は200ps~5nsで可変可能である。

まず、厚さ100ミクロンのCFRPの切断加工を行った。CFRPは繊維の方向が交差するように形で多層に積み上げられるが、この厚みの場合、単層状態となる。切断したCFRPの断面を顕微鏡で拡大したものを図8に示す。それぞれの切断面を見比べてみると、ラジアル偏光ビームで切

断したCFRPの断面は切断面が歪曲している。また、同様に、アジマス偏光ビームで切断したCFRPの断面についても歪曲している様子が見える。しかし、アジマス偏光の断面と比べると直線に近い。直線偏光ビームで切断したCFRPの断面、円偏光ビームで切断したCFRPの断面は共に直線的であった。これは、今回使用してCFRPの繊維の方向が2mmごとに直交するような市松構造をしていることが起因している。軸対称偏光では切断しやすい繊維の方向が交互に現れる構造となり、その影響が顕著に表れたと考えられる。加工部周辺の熱影響領域(HAZ)については偏光による大きな差はみられなかった。加工効率を比較するため、切断時の単位長さ当たり投入されたエネルギーを評価した。図9に結果を示す。図中、縦横と書かれているのは直線偏光であり、切断方向に対しての偏光の方向を示している。この結果から、切断方向に対して並行(縦)な成分を持っている場合には切断効率が低下していると考えられる。図8の結果を考慮すると、切断時は円偏光が最も適していると言える。

次に、CFRPの穴あけ加工を行った。図10に加工痕を示す。CFRPに使われる炭素繊維は熱伝導率が高い。そのため、繊維方向に熱が拡散してしまう。加工痕を見ると、繊維に沿った方向に熱影響領域が広がっていることがわかる。熱影響領域の拡がりは、ラジアル偏光が最も小さく、円偏光が最も大きくなっている。アジマス偏光は加工痕が

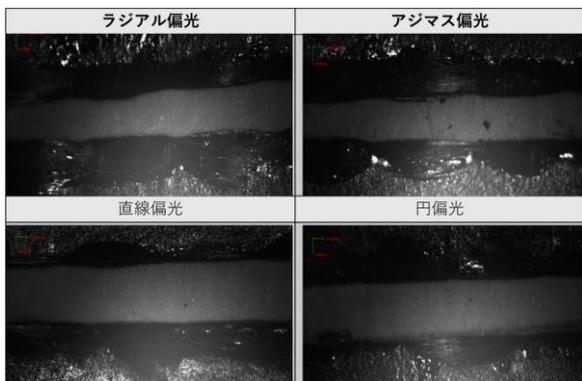


図8 CFRPの切断加工痕

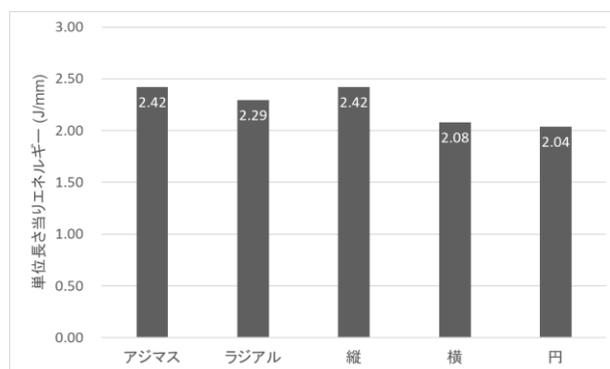


図9 切断に要した単位長さ当りのエネルギー

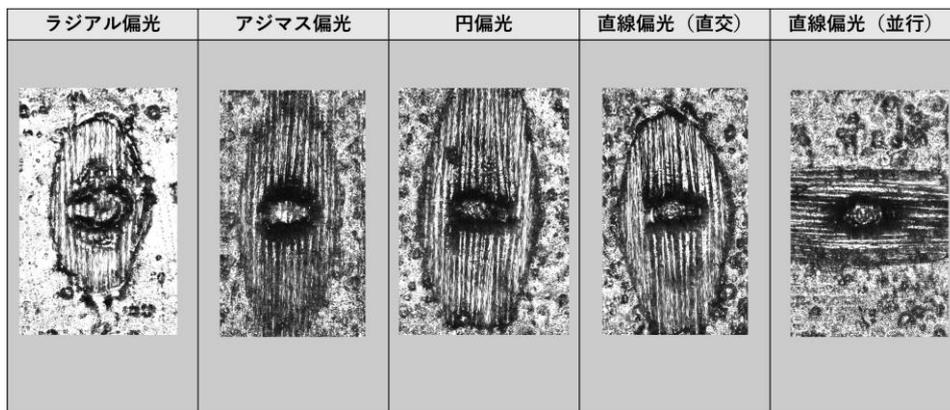


図10 CFRPの穴あけ加工痕

丸くなっているが、他は楕円になっており、繊維の方向に並行な成分が切断に使われず、吸収されたエネルギーが拡散してしまうためと考えられる。次に、加工効率の比較を行うため、1mJ当たりの加工量を評価した。加工量は、レーザー顕微鏡を用いて加工穴の容積を計測した結果から計算した。図11に穴あけ加工時の加工効率を示す。直線偏光がアジマス偏光と同程度になっているが、厚みのあるCFRPでは繊維が層ごとにクロスするので、効率は低下することが予測できる。ラジアル偏光は最も効率が悪くなっている。軸対称偏光では、レーザーの分布が穴あきとなっているので、中央部が加工されにくかったためと思われる。

これらのことから、穴あけ加工では、アジマス偏光が最も適していると言える。

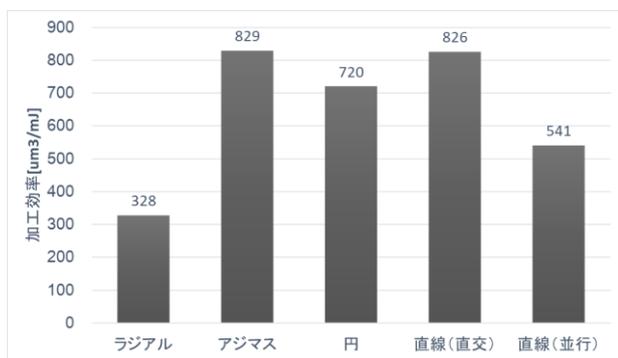


図11 CFRPの穴あけ加工効率

4. 結論

本研究では、軸対称偏光から直線偏光のラゲールガウスビームに変換することで高出力化を可能にするとともに、

2種類の軸対称偏光を、コヒーレントビーム結合を用いて高速に切り替える技術を開発し、原理を実証した。また、軸対称偏光レーザーによるCFRPの加工を行い、偏光依存性を確認した。

レーザーの増幅では、用いた増幅器の熱影響のため、ビーム品質が劣化し、十分なビーム結合効率が得られなかったが、軸対称偏光への再変換および、スイッチング動作を確認できた。効率の変換、スイッチングを行うためには、ビーム品質の良い増幅を行う必要がある。CFRPについては、切断では軸対称偏光の優位性は確認できなかったが、穴あけ加工ではアジマス偏光が有効であることが確認できた。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご支援いただきました公益財団法人天田財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) V. G. Niziev and A. V. Nesterov: "Influence of beam polarization on laser cutting efficiency," J. Phys. D, 32, 1455-1461 (1999).
- 2) K. Tsubakimoto, et al., "High-average-power green laser using Nd:YAG amplifier with stimulated Brillouin scattering phase-conjugate pulse-cleaning mirror," Optics Express, 24, 12557-12564 (2016).
- 3) 下垣弘輝、川崎鉄次、椿本孝治、中田芳樹、白神宏之、"ビーム結合を用いた高出力軸対称偏光ビームのスイッチング技術の開発"、レーザー学会第41回年次大会予稿集 (2021).