電気自動車用電動機向けメタルパーツの
デブリフリーレーザー溶接技術の開発

宇都宮大学　工学部　基盤工学科
教授　東口　武史
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022217-B3）

キーワード：レーザー，ベクトルビーム，シートジェット

１．研究の目的と背景

高ピークパワーのレーザーパルスを希ガスや石英板などに集光すると光カー効果により自己位相変調がかかり，スペクトルが広がる．このような光を超広帯域光またはスーパーコンティニューム[Supercontinuum(SC)]光という．超広帯域光は，連続で広帯域なレーザー光であり，超短パルス光を非線形光学材料に入射すると，自己位相変調，相互位相変調，四光波混合，ラマン散乱などの非線形光学効果によって発生する．従来の白熱灯などの白色光源と比較すると，指向性・可干渉性・集束性・エネルギー密度・輝度などレーザーの特徴をもつ．超広帯域光の発生は，Alfano らによって初めて発見され，それ以降も気体，固体，液体を用いて超広帯域光発生が確認された．発生当時は主に分光計測用のインコヒーレントな白色光源として用いられてきた [1]．その後，非線形光学材料としてシングルモードファイバーを用いた SC 光発生実験が行われ，通信用光源としての取り組みが始まった．これまでに多波長パルス光源や光周波数標準光源などへの応用が検討され，その一部では製品化が始まった．2000 年頃には，フォトニック結晶ファイバーを非線形光学材料として用いることにより，1 オクターブ以上の光スペクトル広がりが実現され，現在に至る．

このような超広帯域光は，光通信分野，高精度の周波数・時間計測分野，超高速分光計測，蛍光顕微鏡，光コヒーレンストモグラフィーなどのさまざまな分野に適用されている [2]．しかしながら，未だに広く普及していないのが現状である．その原因として超広帯域光の持つスペクトル平坦性の欠如，スペクトルの微細構造，雑音の増加，コヒーレンスの劣化などの問題が挙げられる．これらの問題は，超広帯域光の生成過程での自己位相変調，相互位相変調，四光波混合，誘導ラマン散乱の相互作用によって起こることがわかっている．このため，高品質な超広帯域光を生成する必要がある上，有効な応用にも適用することで光源の有効性を示す必要がある．

電気自動車(EV)などの電動機では Cu 巻線をレーザー溶接している．溶接時の Cu 液滴が隣接する銅線に付着し，電極間を短絡するため，デブリ除去・回収法が必要である．レーザーによる金属の切断・溶接・穴開け加工では対象の物質の加工結果が重要である．一方，同時に発生するデブリ（ナノ粒子，クラスター，フラグメント，バルク）がプロセス周辺部を汚染し，電気的短絡が起き，劣化してしまう．特に，プロセス対象の銅線(Cu)やアルミニウム(Al)などの遷移元素のデブリ対策は透明ガラス・透明フィルムで止めたり，粉末はガスで流したりすることが多く，効率的なデブリ回収法は未確立の状況にある．したがって，高いスループットのレーザープロセスではプロセス部周辺の光学素子や各種デバイスにデブリの付着・汚染を防ぐことは未解決の状況にある．実際のところ，ガス流によるデブリ対策はレーザー加工分野で多用されており，低速の粉末を流すのに適用しているものの，粒径が数 μm の高速の金属デブリは除去できない問題が残り，汚染の影響が大きい課題が残っている．そこで，本研究では，新しいデブリイメージング法を駆使し，錯生成によるデブリ回収法により，従来にないデブリフリーレーザー溶接法を実現することを目的とする．本研究では，以下の 2 つの具体的な開発目標を設定した．

(1) 各種遷移金属(Cu や Al)のアブレーションを可視化し，デブリ量の時空間分布を定量化できるようにする．
(2) 金属デブリを電子対供与体と配位結合させ，錯体を生成し，レーザー溶接領域外に排出できるスキームを考案し，要素技術を検討する．

本研究開発では，電動機向け銅線のレーザー接合を対象とし，粒径 1 μm 以上のデブリが 0.2 mm 離れた場所に付着せずデブリを錯体回収することを最終目標としている．具体的には，現在の電動機銅線間隔の 2 mm に設定し，銅線のレーザー溶接をデブリフリー化に展開できるようにすることを目指している．

２．研究方法

本研究では，各種遷移金属(Cu や Al)のアブレーションを可視化し，デブリ量の時空間分布を定量化するための超広帯域ベクトル光解析法を実現した．ここでは，その実験装置と偏光解析法について述べる．

実験装置の光学系を図 1 に示す．超広帯域光源のスペクトルは可視光から近赤外までブロードに存在し，今回の測定においては可視光を用いるため，近赤外を除去する 800 nm ショートパスフィルター(SPF)を設置した．PCF から出力される光をコリメート光にするため，f = 200 mm の平凸レンズを挿入した．その後，PBS1 により直線偏光

を取り出した．このときの偏光方向は光学定盤面に対して垂直である．QWP1 により左円偏光に変換した後，ラジアル偏光コンバータ(S-waveplate)により円偏光を円偏光光渦に変換した．この波長板は円偏光を入射すると光渦に変換するように設計されている．S-waveplate の対応波長は He-Ne レーザーの波長 $\lambda_{\mathrm{He\text{-}Ne}}$ = 633 nm であるため，ほかの波長に対しては光渦の偏光状態に波長依存性（波長分散）が出る可能性がある．そこで，これらの光学素子の波長依存性を詳しく調べる必要がある．

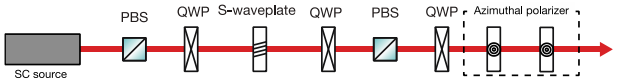


図 1　実験装置

QWP2 で円偏光光渦を直線偏光光渦に変換した．このとき，S-waveplate で光渦に変換された光のみ水平な直線偏光が出力されるように軸を調整した．PBS2 で S-waveplate により変換された光成分である水平直線偏光を取り出した．S-waveplate により変換された光と変換されていない光の偏光方位角度差は 90° である．PBS2 は変換された光成分のみ切り出すことができるように軸を調整した．これによりビーム形状がフラットトップな光渦を取り出すことができる．QWP により円偏光光渦に再度変換した．この光をアジマス偏光子(Azimuthal polarizer)によりアジマス偏光に変換した．このとき，消光比向上のためアジマス偏光子を 2 枚重ねた．これによりアジマス偏光のベクトルビームが生成される．

超広帯域ベクトルビームのスペクトルを図 2 に示す．全ファイバー超広帯域光源装置から出力される光のピーク波長は 560 nm 付近であったが，相対的に短波長側の損失が大きく，結果としてピーク波長は約 700 nm であった．スペクトルは約 500 nm から 800 nm までの広いスペクトル帯域を有しており，可視光帯域の λ = 400 – 700 nm を広くカバーできていることを確認した．

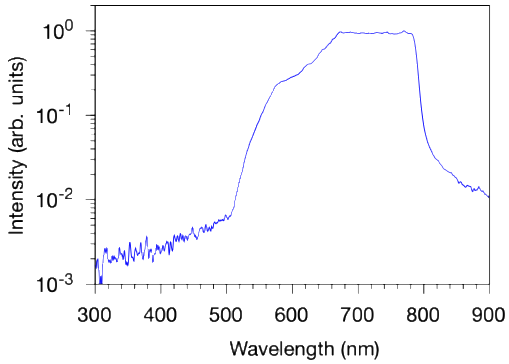


図 2　超広帯域光のスペクトル

超広帯域ベクトルビームの偏光状態を評価した．偏光状態の測定には，図 3 に示す回転補償子法を用いた [3]．回転する QWP と固定偏光子で構成しており，QWP を 180° 回転したときに偏光子を透過したビームプロファイルを撮影して偏光特性を測定する方法である．これによりビーム断面のストークスパラメータの分布を求めることができる．QWP は遅軸が地面に対して垂直方向のときを 0° とし，ビームプロファイルカメラからみて反時計回りに回転した．この測定方法では 0° から 180° の間を等間隔に 8 点以上測定する必要がある．今回は測定精度の向上のため，0° から 360° を 10° 間隔で合計 36 点（0° から 180° の範囲は 18 点）撮影しながら測定した．

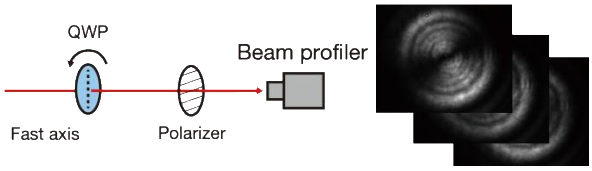


図 3　偏光特性の測定方法．QWP を 360° 回転しながら撮像

それぞれの偏光状態における光強度の変化を図 4 に示す．水平方向の直線偏偏光を測定したとき，回転 QWP の角度が 0°，90°，180° のときに光強度は 0 となり，45°，135° のときに規格化光強度は 0.5 となる．垂直方向の偏光状態を測定した場合，回転 QWP の角度が 0°，90°，180° のときに光強度最大となり，45°，135°のときに規格化光強度は 0.5 となる．直線偏光のときは，周期が 90° の三角関数で光強度が変化する．円偏光になると，回転 QWP の周期 180°で光強度が変化し，右円偏光の場合は 135° が最大，左円偏光の場合は 45° が最大の光強度となる [4]．

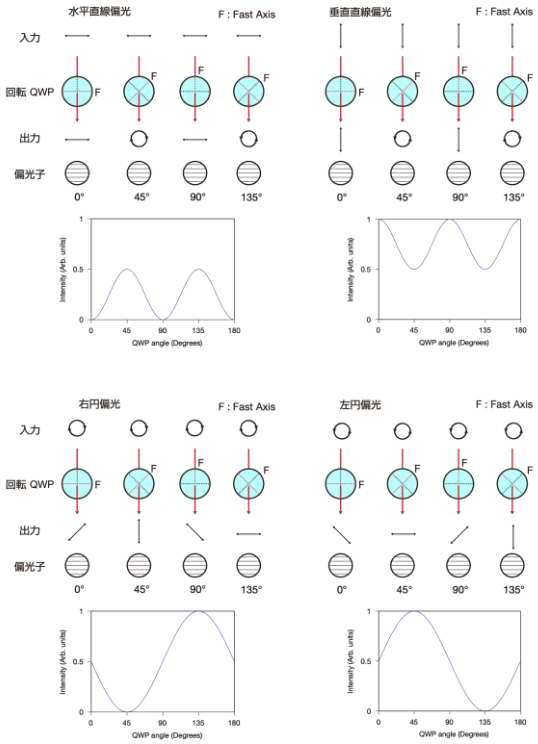


図 4　回転補償子法における入射偏光による光強度の変化

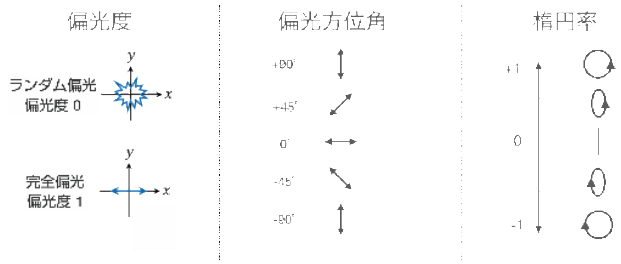


図 5　偏光解析で測定できる偏光特性

3．研究成果

全ファイバー超広帯域光からベクトルビームに変換した．このときのベクトルビームの偏光状態を図 6 に示す．図 6(a)は生成したビームの光強度分布，図 6(b)は偏光度分布，図 6(c)は楕円率である．楕円率が 0 のとき図 5 に示す直線偏光であり，符号が正（プラス）のとき左円偏光，符号が負（マイナス）のとき右円偏光である．図 6(d)は偏光方位角である．0° は水平方向であり，反時計回りが正である．また，図 6(b)，図 6(c)，図 6(d)は規格化光強度が 0.05 以下の部分にグレーを塗り重ねている．これらの 4 つの図を視覚的に偏光状態がわかる 1 枚の図に変換した．図 6（光強度，偏光度，偏光方位角，楕円率）をひとつにまとめ，視覚的に示した偏光状態を図 7 に示す．

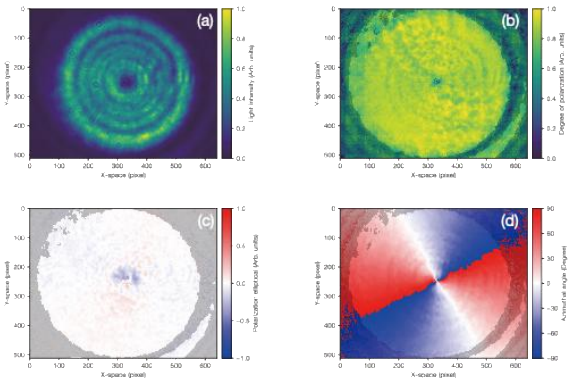


図 6　ベクトルビームの偏光特性．(a)光強度，(b)偏光度，(c)楕円率，(d)偏光方位角

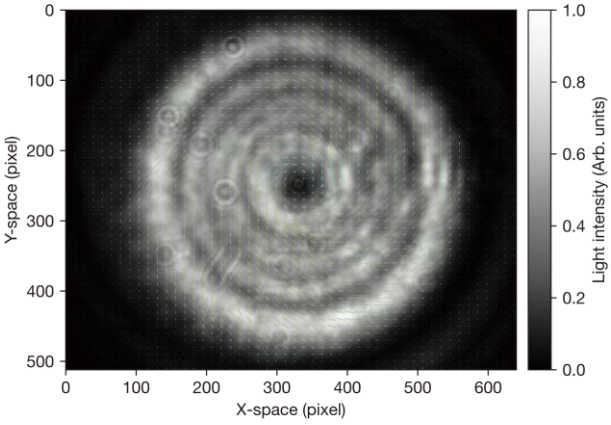


図 7　ベクトルビームの偏光状態

図 7 のベクトルビームはアジマス偏光であることがわかる．ところで，生成したベクトルビームには偏光方位角に波長依存性が見られた．そこで，中心波長が λ = 450 nm と 766 nm の偏光方位角を図 8 に示す．フィルターをベクトルビーム変換光学系のアジマス偏光子の後に設置して波長による偏光特性を測定した．図 8(a)は中心波長が λ = 450 nm の偏光方位角分布，図 8(b)は λ = 450 nm の偏光特性，図 8(c)は中心波長が λ = 766 nm の偏光方位角分布，図 8(d)は中心波長が λ = 766 nm の偏光特性である．波長により偏光方位角の角度は変化した．

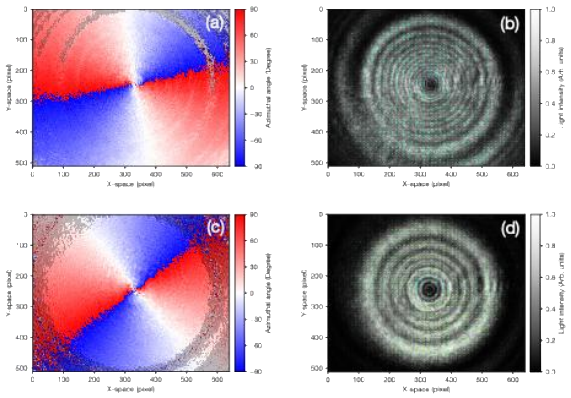


図 8　ベクトルビームの偏光特性の波長依存性．(a) λ = 450 nm の偏光方位角分布，(b) λ = 450 nm の偏光特性，(c) λ = 766 nm の偏光方位角分布，(d) λ = 766 nm の偏光特性．

図 9 はアジマス偏光の偏光方位角の波長依存性（波長分散）である．ベクトルビームの偏光方位角が 90° となる角度を波長範囲が λ = 450 nm から 766 nm の範囲でプロットした．短波長側の 450 nm ではその角度が 10° であるが，長波長になるほど角度が大きくなり，波長が λ = 766 nm のときの角度は 32° であった．

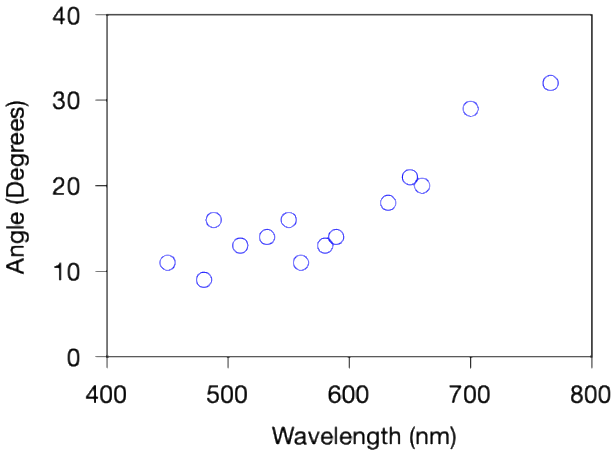


図 9　アジマス偏光の偏光方位角の波長依存性（波長分散）

波長依存性が出たのは，S-waveplate が λ = 633 nm に最適化されているため，波長がこれからずれると光渦の度合いが波長によって変わることに起因すると考えている．また，そのほかの波長板やPBSは可視波長域 λ = 400 – 700 nm に対応の波長依存性が出ない（出にくい）アクロマティック素子であるが，小さくても波長依存性があると考えている．このようにベクトルビームを用いて光学素子を計測するときはこれらの波長依存性を評価し，較正する必要がある．次に，超広帯域ベクトル光に情報（分光・偏光度）を乗せ，Cu デブリと錯体の粒子種と粒径分布を計測するための実験装置を構築した[5]．

超広帯域ベクトル光の多モードベクトル光結合とモード分離法を構築する．計測システムには光ファイバーを多用し，計測系の自由度を高くすることにより，錯体生成と粒径を定量化することを目指した．Cu イオンは化学的に容易に $Cu2^{+}$に移行する．edta4-電子対供与体水溶蒸気を粒子・錯体セルに入れる．デブリ可視化の S/N 比とデブリ量の時空間分布の定量化の計測範囲を評価することにした．そこで，超広帯域ベクトル光を粒子・錯体セルに入射できるようにする必要がある．これは，粒子・錯体セルを複数回透過し，同軸波長板で偏光解析し粒径分布を評価するためである．粒子の形状により偏光状態は変化するため，ストークスパラメータをすべて評価し，Cu 粒子，Cu 錯体の非球状粒子の粒径分布を評価することにしていた．現在のところ，まだ有効な信号は得られていないが，線積分密度を上昇させることで S/N 比を改善できるのではないかと考えている．

もうひとつの研究開発の電動機の Cu 線を模した電極対をレーザー溶接における発生するデブリ，つまり，Cu 金属デブリを錯体で覆いレーザー溶接領域外に排出する手法について検討した．そのため，電子対供与体(edta4-)の蒸気流を発生させ，高効率で Cu の錯生成ができることを確認した．このことを踏まえ，edta4-蒸気の粒径・断面積・流量・照射面積を変化し，錯生成効率を最大化することを試みているが，変換効率の目標値の 50%のための最適パラメータは見つかっていないため，数値解析法により評価を進めている．

４．まとめ

本報告では，超広帯域ベクトルビームへの変換を示し，現在の研究の進捗について報告した．超広帯域光源を開発し，それを光源として超広帯域ベクトルビームに変換した．また，導線のレーザーアブレーション，レーザー溶接における Cu 錯体の生成も確認したものの，超広帯域ベクトルビームでの検出には至っていない．これは，線積分密度が不足していることに起因していると考えている．そこで，濃度を高めることで，S/N 比を評価し，高感度検出のしきい値や光強度のしきい値を明らかにする予定である．

参考文献

1) R. R. Alfano and S. L. Shapiro, Phys. Rev. Lett. 24, 584 (1970).
2) P. St. J. Russell, P. Hölzer, W. Chang, A. Abdolvand, and J. C. Travers, Nat. Photon. 8, 278 (2014).
3) T. Wakayama, T. Higashiguchi, H. Oikawa, K. Sakaue, M. Washio, M. Yonemura, T. Yoshizawa, J. S. Tyo, and Y. Otani, Sci. Rep. 5, 9416 (2015); and references therein.
4) T. Wakayama, N. Shinozaki, M. Shoji, T. Ishiyama, K. Sakaue, T. Miura, T. Ejima, and T. Higashiguchi, Appl. Phys. Lett. 114, 231101 (2019); and references therein.
5) 小林 隼大，草野 滉介，森田 大樹，若山 俊隆，東口 武史，レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会，P01-23p-P-15 (2025).