

# 軌道角運動量光ビームを用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

代表研究者 岸川博紀 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 准教授  
共同研究者 後藤信夫 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 教授

## 1 研究背景・目的

我が国の通信データ量の状況は、総務省報道資料によると2018年5月時点の総ダウンロードデータ量は前年比29.7%増の約12.5テラビット毎秒と年々増加している。高速光インターネット接続やスマートフォンの普及、動画配信サービスなどの充実に伴い今後も通信データ量の増加が続くと予想されている。このような通信を支えるネットワークへの要求条件として、更なる大容量化に加え、データ量の変動に対応する柔軟性を持たせ、高効率に運用することが求められる。

大容量化と柔軟性、高効率性の実現技術として軌道角運動量光ビームがある。軌道角運動量光ビームは新たな多重化の次元として期待されており、所望の伝送容量に応じて適用することで、大容量化だけでなく高柔軟、高効率な光通信ネットワークの実現に寄与できると期待される。本研究では、軌道角運動量光ビームを用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信ネットワークの実現を目的とし、以下の項目に関して検討を行う。

- (1) 軌道角運動量光ビームの多重分離技術
- (2) 軌道角運動量光ビームの光ファイバ伝搬中のモード変換技術
- (3) 軌道角運動量光ビームに重畳した変調方式変換技術

## 2 軌道角運動量光ビーム

軌道角運動量光ビームとは光波伝搬の物理的性質を用いて光ビームに軌道角運動量 (Orbital Angular Momentum, OAM) を持たせた光のことである[1]。光渦とも呼ばれる。図1に示すように、軌道角運動量光ビームは螺旋状の等位相面を持ち、絡み合う螺旋の数で次数  $m$  が決まり、異なる次数  $m$  の値を持つビームは互いに直交していることが特徴である。したがって、異なる次数  $m$  のビームそれぞれに情報を載せて多重化することが可能であり、従来用いられてきた多重化の物理量である直交変調、波長、偏光、空間に次ぐ新たな多重化の次元として期待されている。この新たな多重化を所望の伝送容量に応じて適用することで、大容量化だけでなく高柔軟、高効率な光通信ネットワークの実現に寄与できると期待されている。

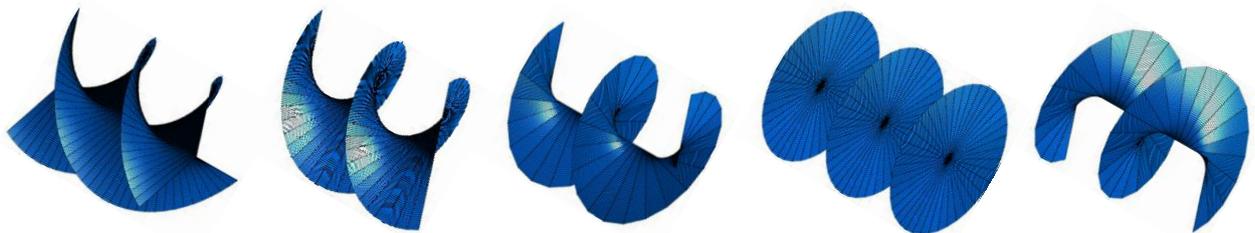


図1. 軌道角運動量光ビームを特徴づけるらせん状の等位相面

## 3 軌道角運動量光ビームの多重分離技術

軌道角運動量(OAM)光ビームはモード間の直交性を活かした多重化が可能である。送信時に多重化したOAM光ビームは、受信機において情報ビットを復号するために多重分離する必要がある。高効率な多重分離技術としてモードソーティング法が提案されている[2]。本検討項目ではこのモードソーティング法を用いる際に、送受信機間の光学素子の配置誤差が多重分離性能にどのような影響を与えるかを調査し、多重分離技術の実現課題を明確化する。加えて、配置誤差を補償する方法を提案する。受信したOAM光ビームから誤差の特徴量を抽出し、それに基づいて受信機側でOAM光ビームの振幅・位相を制御し適応的に補償する手法を考案

し、計算機シミュレーションで評価する。

OAM 光ビームを用いた自由空間伝送では、送受信機間の光学素子の配置誤差だけでなく、伝搬空間中の大気の揺らぎが原因で OAM 光ビームの位相分布が乱れて受信信号品質が劣化することも重要な課題である[3]。そこで本検討項目では、大気の揺らぎによる受信信号品質の劣化を補償する方法も検討する。大気の揺らぎは温度分布、風、気圧などの影響で時間・空間に対し確率的な振る舞いをするため、やはり適応的に補償する必要があり、受信した OAM 光ビームから揺らぎの特徴量を抽出し、それに基づいて受信機側で OAM 光ビームの位相を制御し適応的に補償する手法を考案し、計算機シミュレーションで評価する。

### 3-1 モードソーティングにおける送受信機間の光学素子の配置誤差の影響評価と適応補償

図 2 に示すように、まず配置誤差として送受信機間の中心軸がずれる位置誤差と、受信機と入射光が正対せず角度がずれる角度誤差を定義した。

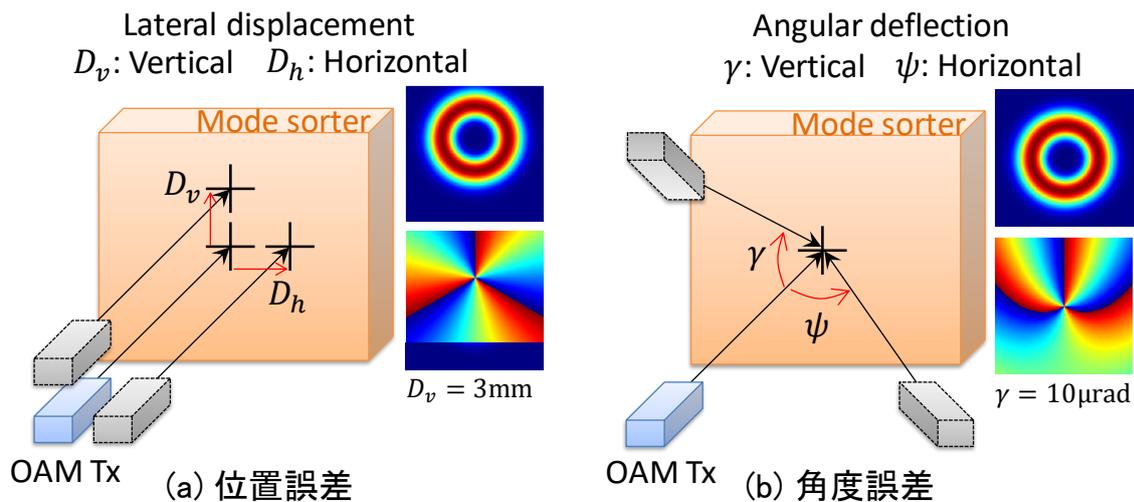


図 2. 位置誤差と角度誤差の定義

我々のこれまでの検討の結果、配置誤差に関しては次のような事項を明らかにしてきた[4, 5]。図 2 (a) に示す位置誤差は伝搬光ビームの直径のおよそ±20%程度まで許容でき、自由空間光通信で用いられる数キロ程度の伝搬距離であっても手動での位置調整が十分可能であることを明らかにした。一方図 2 (b) に示す角度誤差は 1000 分の 5.7 度 (100 マイクロラジアン) 以内に抑える必要があることが分かった。手動調整は困難で、自動的に補償する手法を考案する必要があることを明らかにした。鉛直方向の角度誤差  $\gamma$  に対する影響評価結果を図 3 に示す。縦軸にはクロストーク (XT) をとっており、この値が小さいほうが良く、許容できる XT 値として -3dB を考慮すると、角度誤差は 1000 分の 5.7 度 (100 マイクロラジアン) 以内に抑える必要がある。

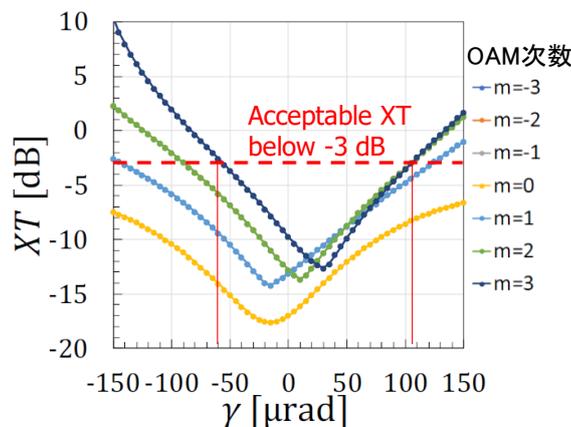


図 3. 角度誤差の影響評価結果

これらの影響調査の結果、角度誤差の影響が顕著であるため、適応補償法の考案では角度誤差を対象にすることを決定した。角度誤差の適応補償法を検討した結果、パイロットビームを用いる方法を考案した。図4に適応補償法の構成図を示す。通信データを送る光ビームとは別に、角度誤差を検知する専用のパイロットビームを用いる。通信データビームとパイロットビームを同軸で自由空間伝送することで、両ビームに等しい角度誤差が付与される。受信機でパイロットビームを分離し、その角度誤差をレンズを用いた空間フーリエ変換を施すことにより検知する。検知した角度誤差を打ち消すような補償位相を計算し、通信データビームにその補償を施すことで、角度誤差の影響を抑えることができる。

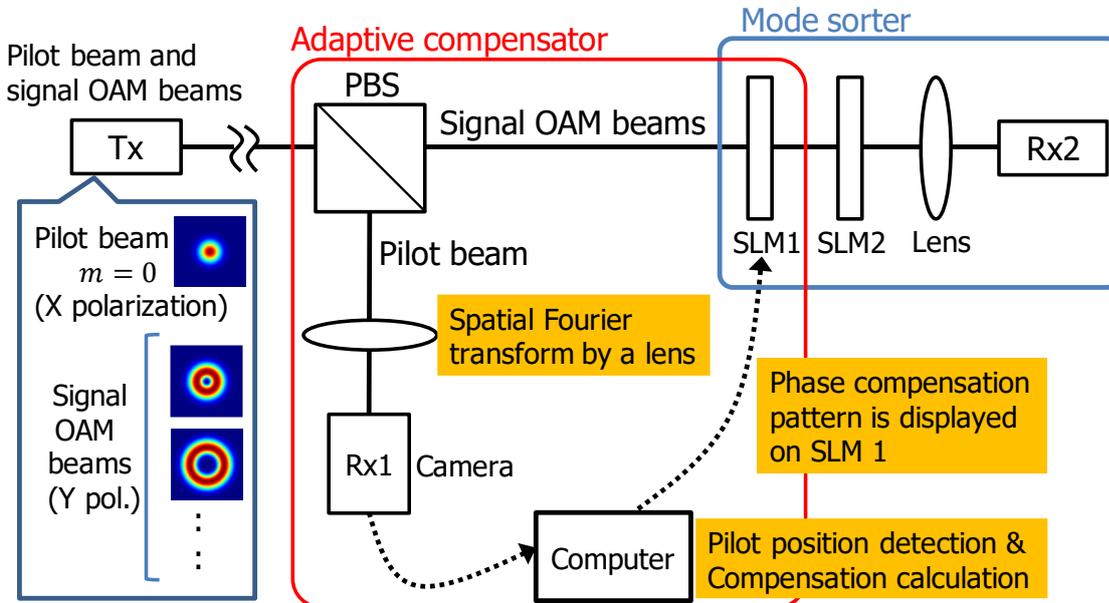


図4. 角度誤差の適応補償法の構成図

本手法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。図5に計算機シミュレーションの結果を示す。補償なしと補償ありで分け、各図の縦軸が鉛直方向の角度誤差、横軸が水平方向の角度誤差の量を表す。等高線図の色の違いが評価指標であるクロストークを意味し、値が小さいほど(色が青色に近いほど)信号品質劣化が少なく品質が良いことを示す。OAMビームの次数を  $m=-3, 0, 2$  の場合で補償の有効性を検証した結果、補償ありの場合は角度誤差に対してクロストークが低減できていることが分かり、角度誤差の影響を抑えて受信信号品質を高めることができることを明らかにした。

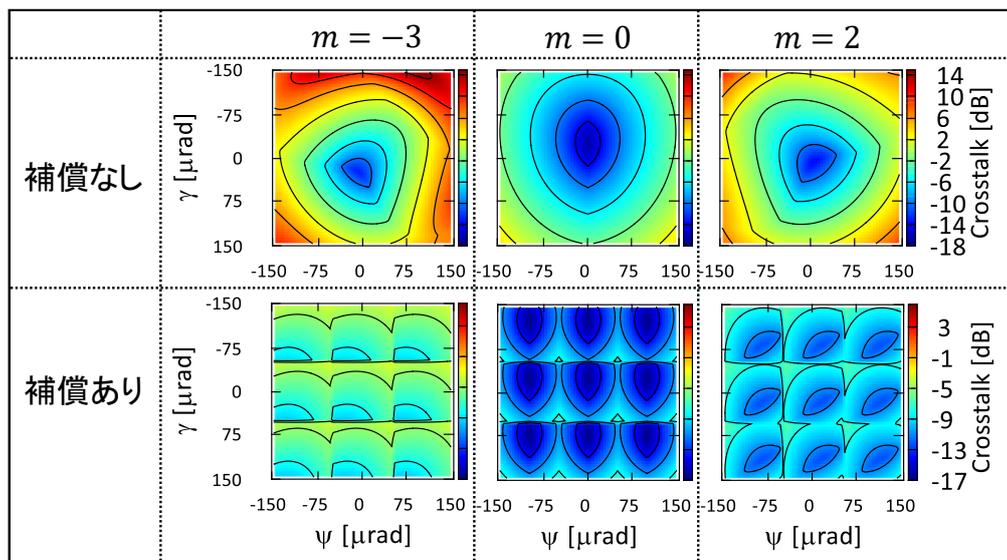


図5. 鉛直・水平方向の角度誤差に対するクロストーク計算結果

本テーマに関する研究成果は「発表資料」欄に記載しており、学術誌論文として(8)、国際会議論文発表として(9)がある。

### 3-2 大気の揺らぎによる位相変動の影響評価と適応補償

OAM 光ビームを用いた自由空間伝送では、3-1 に記載の送受信機間の光学素子の配置誤差だけでなく、伝搬空間中の大気の揺らぎが原因で OAM 光ビームの位相分布が乱れて受信信号品質が劣化することも重要な課題である。そこで本検討項目では、大気の揺らぎによる受信信号品質の劣化を補償する方法も検討した。大気の揺らぎは温度分布、風、気圧などの影響で時間・空間に対し確率的な振る舞いをするため、やはり適応的に補償する必要がある、図 4 で用いた専用のパイロットビームを用いる手法が適用でき、類似の光学系が使えるため着想に至った。

図 6 に大気の揺らぎに対する適応補償法の構成図を示す。図 4 と同様に通信データを送る光ビームとは別に、大気の揺らぎを検知する専用のパイロットビームを用いる。通信データビームとパイロットビームを同軸で空間伝送することで、両ビームに等しい変動が付与される。受信機でパイロットビームを分離し、その位相変動を波面センサーを用いて検知する。検知した位相変動を打ち消すような補償位相を計算し、通信データビームにその補償を施すことで、大気の揺らぎが原因で生じる位相変動の影響を抑えることができる。

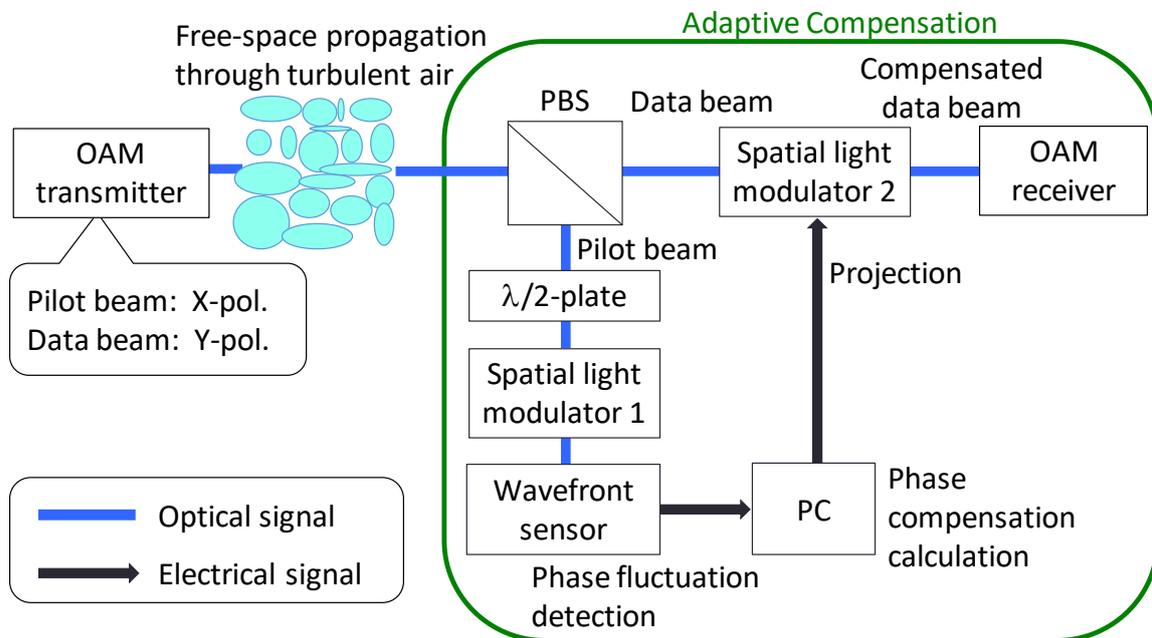


図 6. 大気の揺らぎによる位相変動の適応補償法の構成図

本手法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。大気の揺らぎは Modified von Karman モデルで生成した位相スクリーンを送信ビームに乗算し、その後ビーム伝搬法によるフレネル回折計算を施すことで自由空間伝搬を模擬した [6]。大気の揺らぎの強さを示すパラメータに大気構造定数  $C_n^2$  があり、この値が大きいか小さいかで大気の揺らぎが強く、小さいほど揺らぎが弱い状況を模擬できる。

図 7 に、大気の揺らぎに対する適応補償の有無による受信信号品質の計算結果を示す。受信信号品質は、送信データビームの次数 3 が正しく受信できているかで評価した。図 7 (a) に表すように、大気揺らぎがない場合は、適応補償をしなくても受信データビームの次数 3 が強く表れており、送信データビームが正しく受信できていることがわかる。一方、図 7 (b) や (c) に表すように、中程度および強い大気揺らぎの中をデータビームが通過すると、補償なしの場合は受信データビームの次数は 3 以外にも周辺部に現れ、判別が困難になり、信号品質が悪くなることがわかる。適応補償を行うと、図 7 (d) や (e) に表すように次数 3 の強度が回復してきており、受信データビームの信号品質が改善することがわかる。図 7 (f) や (g) の結果は、パイロットビームの次数をデータビームの次数と一致させた方が改善効果が高いことを示している。

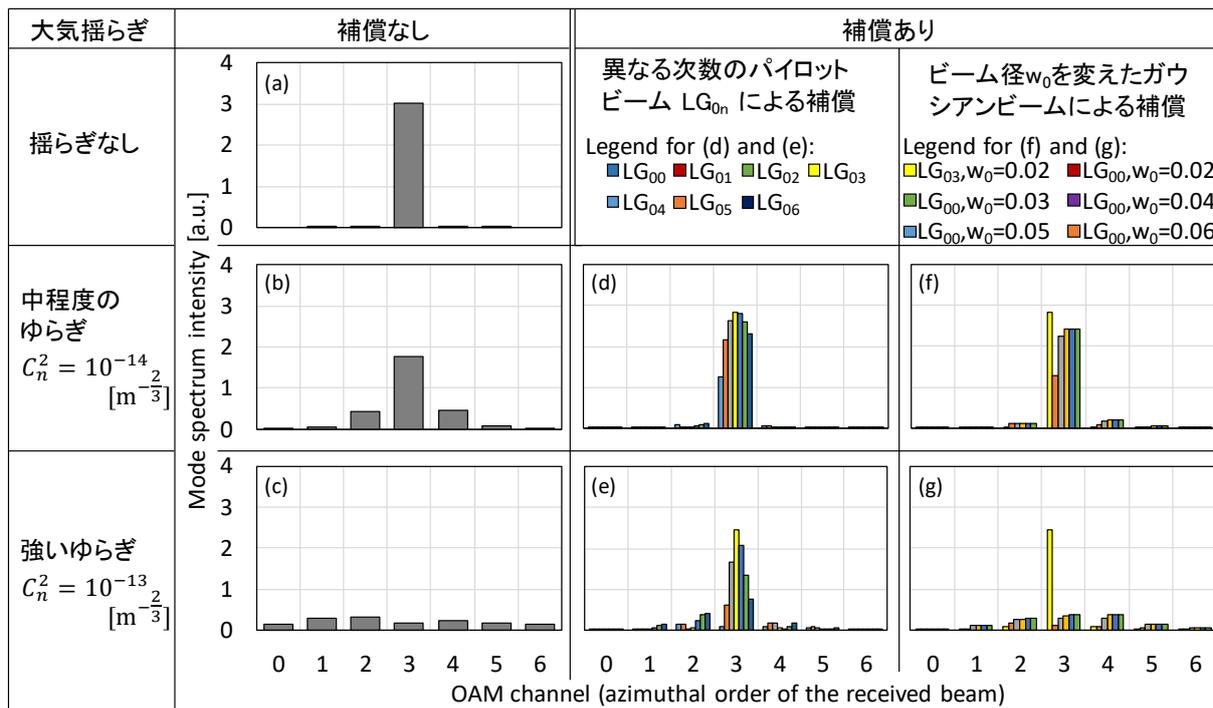


図7. 大気の揺らぎに対する適応補償の有無による受信信号品質計算結果

本テーマに関する研究成果は「発表資料」欄に記載しており、学術誌論文として(1)、国際会議論文発表として(5)がある。

#### 4 軌道角運動量光ビームの光ファイバ伝搬中のモード変換技術

OAM 光ビームを光ファイバ中で伝搬させることは、長距離大容量通信の実現には不可欠である。OAM 光ビームの生成法として一般的なバルク光学部品を用いる方法では、ファイバ入射時に生じる挿入損失の影響がある。直接光ファイバ中で OAM 光ビームを生成する方法が効率的であり、我々はこれまで音響光学効果を用いて超音波の一種である弾性波で渦を生成し、生成した弾性波渦で二乗分布屈折率光ファイバを振動させ、光ファイバに通した光を OAM 光ビームに変換する手法を理論的に検討してきた[7]。本研究では、より高次の OAM 光ビームを光ファイバ中で生成するため、モード変換技術の理論検討および計算機シミュレーション解析を行う。

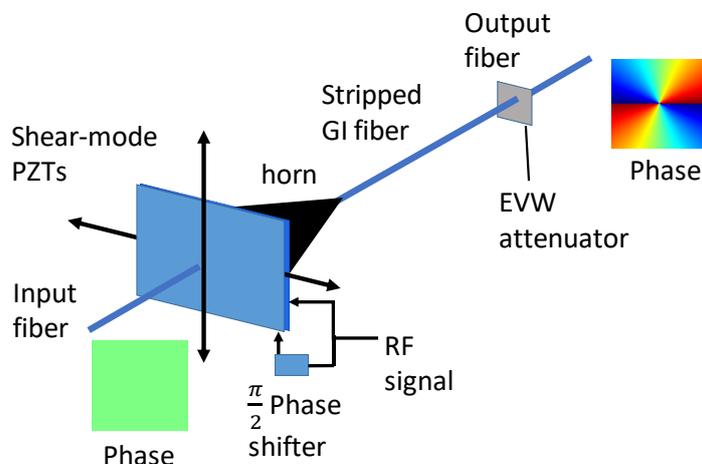


図8. 弾性波渦による二乗分布屈折率ファイバ中のモード変換構成

光ファイバ中でのモード変換は図8の構成で行う。弾性波渦は圧電素子 (Shear-mode PZT) で生成し、この弾性波渦で二乗分布屈折率ファイバを振動させる。左側の入力ファイバから0次のOAM光ビームを入射し、右側の出力方向へと伝搬する間に、弾性波渦によって励振された振動により高次のOAM光ビームに変換される。

変換原理の理論解析を行った結果を以下に示す。定式化のプロセスは非常に複雑であるので、本要約では結果だけを記載し定性的な説明に留める。詳細は研究成果である学術論文誌を参照されたい。

◆ Dielectric constant

<p>Displacement <math>\mathbf{u}</math> induced by EVW</p> $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \end{bmatrix}$		<p>Strain tensor <math>\mathbf{S}</math></p> $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \frac{1}{r}(u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}) \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \end{bmatrix}$		<p>Dielectric change <math>\Delta \epsilon</math></p> $\Delta \epsilon = \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_1 \\ \Delta \epsilon_2 \\ \Delta \epsilon_3 \\ \Delta \epsilon_4 \\ \Delta \epsilon_5 \\ \Delta \epsilon_6 \end{bmatrix} = -\epsilon_0 \epsilon_r^2 \begin{bmatrix} p_{11} S_1 + p_{12} S_2 + p_{13} S_3 \\ p_{12} S_1 + p_{12} S_2 + p_{12} S_3 \\ p_{12} S_1 + p_{12} S_2 + p_{11} S_3 \\ 2p_{44} S_4 \\ 2p_{44} S_5 \\ 2p_{44} S_6 \end{bmatrix}$
--	--	--	--	---

◆ Total dielectric constant  
 $\epsilon = \epsilon_r + \Delta \epsilon$   
 $\epsilon_r$ : dielectric constant of the fiber  
 $p_{ij}$ : elasto-optic coefficient

弾性波渦による変位  $\mathbf{u}$  を求め、そこから導出される歪のテンソル  $\mathbf{S}$  を計算し、最終的に光ファイバの比誘電率の変化  $\Delta \epsilon$  を計算する。光ファイバの比誘電率が変化することは屈折率の変化に相当し、そこを通る光の位相が変化することになる。これにより OAM 光ビームの特徴である回転位相を生じさせることができ、モード変換が達成されるのである。モード変換を解析するために、どのモードからどのモードへとパワーが移行するかを表すモード結合方程式を、モード結合係数や位相整合条件、OAM 整合条件を加味して導出すると以下のようになる。

◆ Mode coupling equation

$$\frac{dA_p(z)}{dz} = \sum_{l=0}^n A_l(z) \vartheta_{pl} e^{i(\beta_p - \beta_l - k_0)z}$$

$A_p$ : Existing rate of Optical mode

$\beta_l$ : Incident optical mode propagation constant

$\beta_p$ : Converted optical mode propagation constant

$k_0$ : Elastic vortex wave propagation constant

◆ Mode coupling coefficient

$$\vartheta_{pl} = \frac{\omega}{4(\beta_l - \beta_p)} \iint \frac{E_p(r, \theta) \cdot E_l^*(r, \theta)}{N_p N_l} \frac{d\epsilon}{dz} r dr d\theta$$

◆ Phase matching condition

$$\beta_l - \beta_p = k_0$$

◆ OAM matching condition

$$LG_{v n} = LG_{v-m n} + EVW_m$$

e.g. : 2 = 0 + 2

導出した式を元にモード結合の様子を計算機シミュレーションで評価した。まず初めに弾性波渦が OAM を持つかどうかを確かめた。回転次数  $m=1$  の弾性波渦により生じる変位  $\mathbf{u}$  の強度分布および位相分布を図9に示す。それぞれの位相分布を見ると、回転方向に位相が変化していて螺旋状の等位相面を持つことから、これにより弾性波渦が OAM を持つことが確認できた。

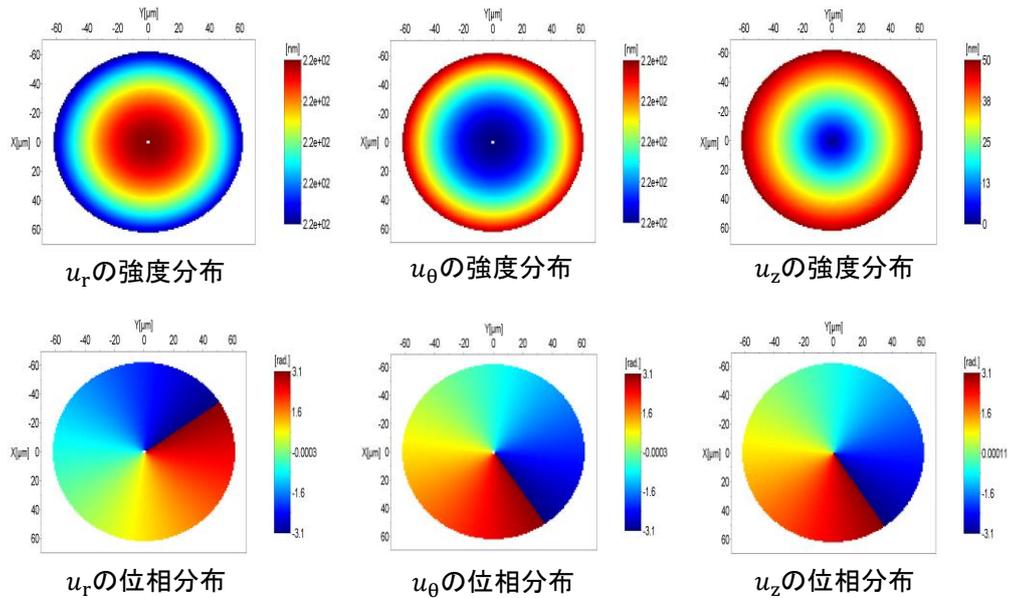


図9. 回転次数  $m=1$  の弾性波渦により生じる変位  $u$  の強度分布および位相分布

また回転次数  $m=2$  の弾性波渦により生じる変位  $u$  の強度分布および位相分布を図10に示す。同様に回転方向に位相が変化しているが、 $m=1$  とは異なり  $m=2$  では位相  $0$  から  $2\pi$  を2回繰り返しており、二重螺旋状の等位相面を持つことから、弾性波渦がやはり OAM を持つことが確認できた。

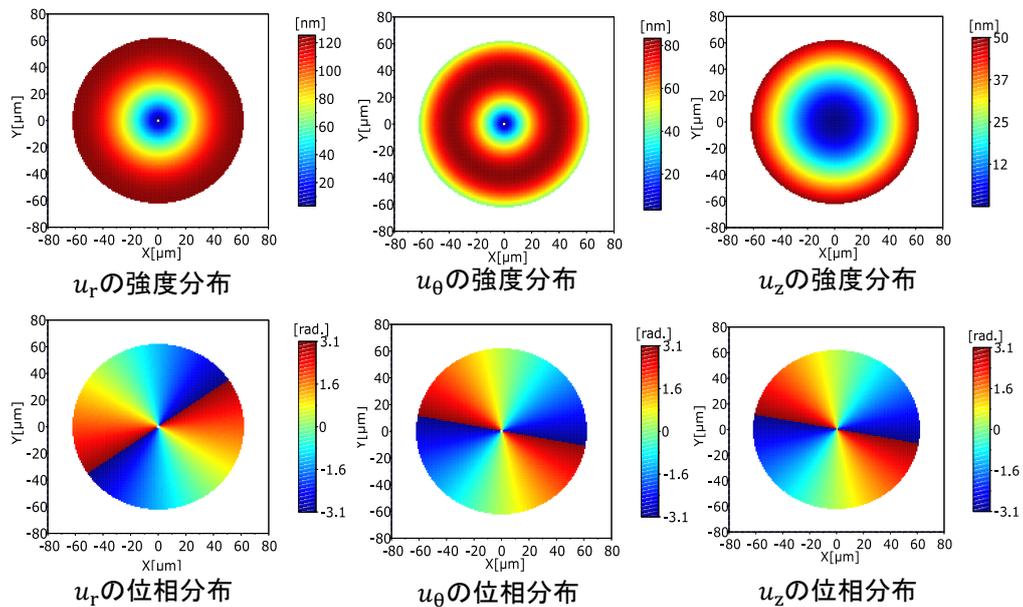


図10. 回転次数  $m=2$  の弾性波渦により生じる変位  $u$  の強度分布および位相分布

次に弾性波渦による歪テンソル  $S$  の各成分  $S_1 \sim S_6$  の大きさを比較した。図11から分かるように、回転次数  $m=1$  の弾性波渦による歪テンソルは  $S_6$  以外の成分が値を持ち、回転次数  $m=2$  の弾性波渦による歪テンソルは  $S_1, S_2, S_6$  の成分が比較的高い値を持つことから、それぞれの成分がモード変換に大きく寄与する可能性が高いと考えられる。

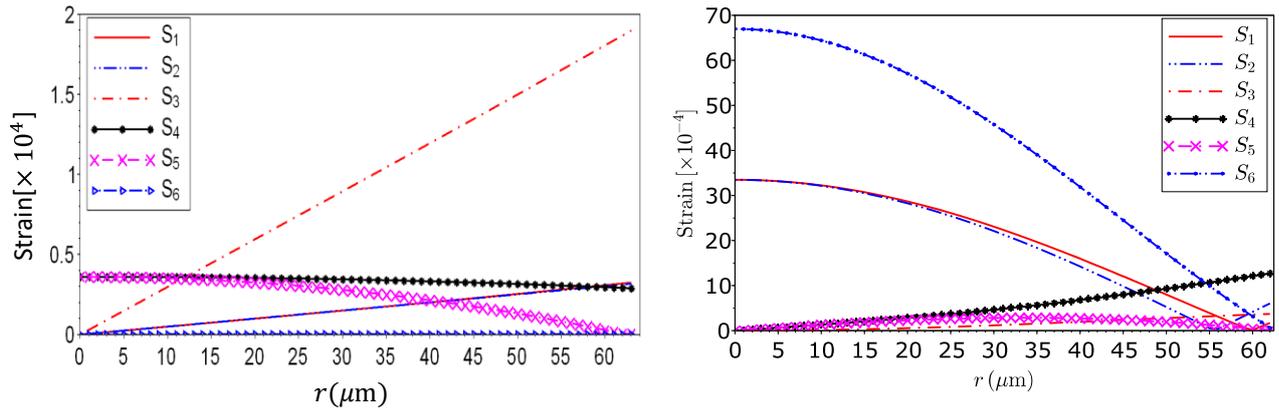


図 1 1. 弾性波渦による歪テンソル  $S$  の各成分の大きさのファイバ半径依存性  
 左図：回転次数  $m=1$  の弾性波渦、右図：回転次数  $m=2$  の弾性波渦

次に、弾性波渦と光の位相整合条件を見出すことを行った。これは図 1 2 のような分散曲線を描くことでわかり、弾性波渦と光の分散曲線が一致している点から位相整合が可能な弾性波渦の周波数を導出することができる。まず回転次数  $m=1$  の弾性波渦を用いて、代表的な OAM 光ビームであるラゲールガウシアン (LG) ビームのモード変換を考えた場合の結果を述べる。図 1 2 に LG ビームの次数 0 ( $LG_{00}$ ) と次数 1 ( $LG_{10}$ ) を相互に変換する際の位相整合条件と、 $LG_{10}$  と次数 2 ( $LG_{20}$ ) を相互に変換する際の位相整合条件を示す。図の曲線の一致点から分かるように、 $LG_{00}$  と  $LG_{10}$  間のモード変換は周波数 0.3918 MHz の弾性波渦を用い、 $LG_{10}$  と  $LG_{20}$  間のモード変換は周波数 0.3925 MHz の弾性波渦を用いることで達成できることを見出した。

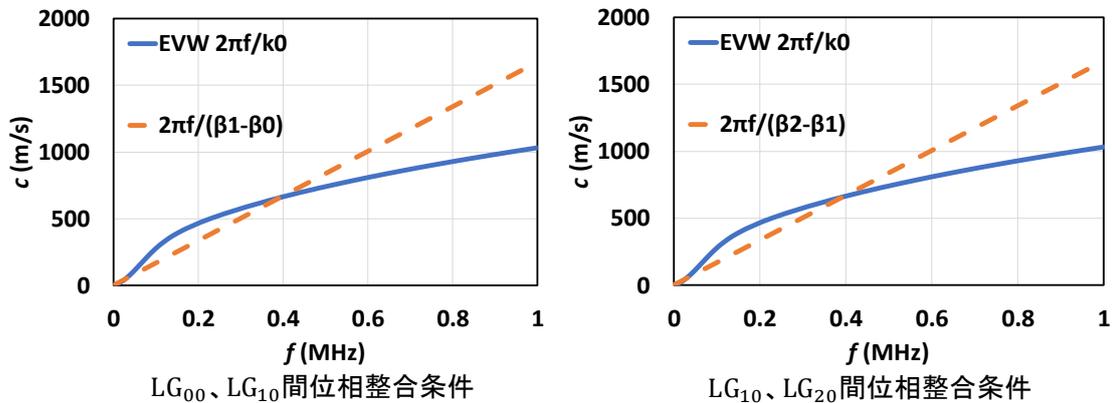
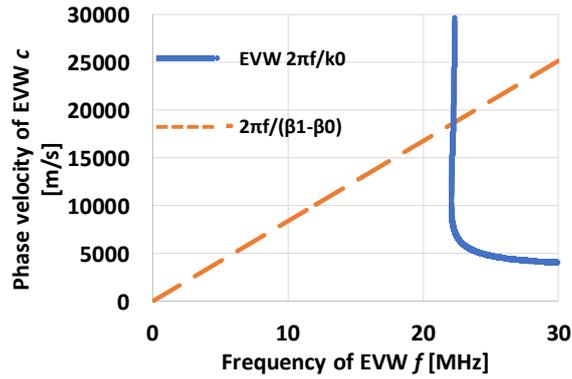


図 1 2. 回転次数  $m=1$  の弾性波渦と光の分散曲線より位相整合条件を求める図

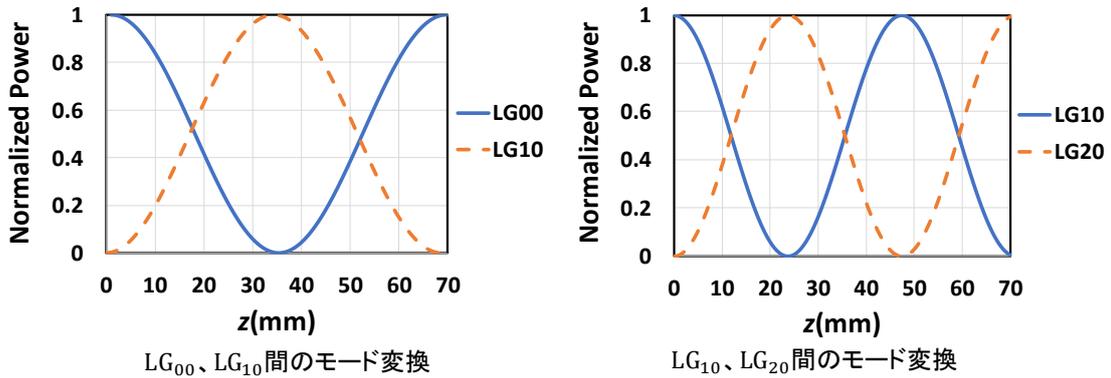
次いで回転次数  $m=2$  の弾性波渦を用いて OAM 光ビームのモード変換を考えた場合の結果を述べる。ここでは実際に生成されるビームの形状が LG ビームとは厳密には異なるため、一般的な呼称の OAM 光ビームを使う。図 1 3 に OAM 光ビームの次数 0 ( $OAM_{00}$ ) と次数 2 ( $OAM_{20}$ ) を相互に変換する際の位相整合条件を示す。図の曲線の一致点から分かるように、 $OAM_{00}$  と  $OAM_{20}$  間のモード変換は周波数 22.45 MHz の弾性波渦を用いることで達成できることを見出した。



OAM<sub>00</sub>、OAM<sub>20</sub>間位相整合条件

図 1 3. 回転次数  $m=2$  の弾性波渦と光の分散曲線より位相整合条件を求める図

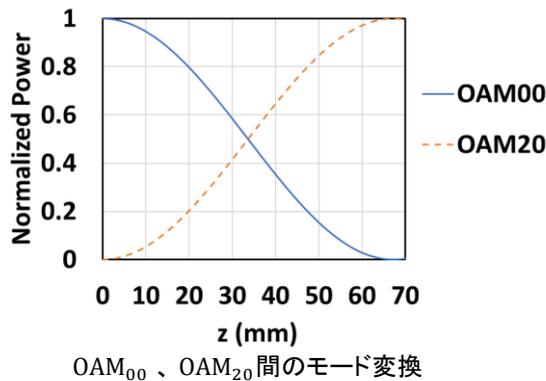
位相整合条件を用いることで、OAM 光ビームのモード変換の様子をファイバ伝搬距離  $z$  と各モードの光パワーの関係で導出することができる。図 1 4 に回転次数  $m=1$  の弾性波渦による LG<sub>00</sub> と LG<sub>10</sub> 間のモード変換、LG<sub>10</sub> と LG<sub>20</sub> 間のモード変換の様子を示す。また図 1 5 に回転次数  $m=2$  の弾性波渦による OAM<sub>00</sub> と OAM<sub>20</sub> 間のモード変換の様子を示す。いずれの図においても、ファイバ伝搬距離  $z$  が一定値になると、一方の次数から他方の次数への光パワーが完全に移行しており、モード変換が達成できることがわかる。そこから更に  $z$  が大きくなると元の次数に光パワーが移行することがわかる。このようにパワーの移行が繰り返し行われるのがモード結合の特徴であり、OAM 光ビームのモード変換が実現可能であることを明らかにした。



LG<sub>00</sub>、LG<sub>10</sub>間のモード変換

LG<sub>10</sub>、LG<sub>20</sub>間のモード変換

図 1 4. 回転次数  $m=1$  の弾性波渦による LG<sub>00</sub> と LG<sub>10</sub> 間のモード変換



OAM<sub>00</sub>、OAM<sub>20</sub>間のモード変換

図 1 4. 回転次数  $m=2$  の弾性波渦による OAM<sub>00</sub> と OAM<sub>20</sub> 間のモード変換

本テーマに関する研究成果は「発表資料」欄に記載しており、学術誌論文として(11)、国際会議論文発表として(4)、(7)、(10)、国内学会発表として(2)がある。

## 5 軌道角運動量光ビームに重畳した変調方式変換技術

情報ビットを光に載せて通信するためには変調を行い光信号を生成する必要がある。各ネットワークにおいて所望の伝送容量や伝送距離に応じて異なる変調方式が使われており、ネットワークを跨いで通信するには変調方式を変換する必要がある。現在の光通信ネットワークではこの変換をルータ内で電気信号を介することでやっている。つまり、光信号として到着したものを一旦受信しビット情報を復元し、次に新たなネットワークに送出する際に異なる変調方式で光信号を作り送信するという方法である。しかしこの方法ではルータ部で生じる光・電気の相互変換や電氣的処理に時間がかかり、ネットワークの低遅延化や高速化を阻む要因となる。そこで本研究では電気信号を介することなく光信号のまま変調方式変換を実現することで低遅延化や高速化を図る。当研究室ではこれまで種々の変調方式変換術を提案しているが、光渦に対して適用した例はこれまで存在しない。したがって、本研究で世界で初めて適用する。OAM 光ビームは空間伝搬と相性が良いため、空間伝搬光に対する受動的な全光処理による方式を考案し、変換性能を検証する。

本検討項目で対象とする変調方式変換技術は2相位相変調(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)から4相位相変調(Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK)への変換とする。図15に、マイケルソン干渉計によるBPSKからQPSKへのOAM光ビーム変調方式変換の概略図を示す。BPSK光信号をハーフミラーで2つに分け、それぞれをミラーで反射して戻すことで遅延干渉を起こし、QPSK光信号に変換するものである。原理は我々が過去に提案した手法[8]を応用しており、BPSKからQPSKへの変調方式変換が遅延干渉によって実現可能であることが分かっている。本研究ではこれを自由空間を伝搬するOAM光ビームに応用し、空間光学系のわずかな配置ずれからくる位相誤差が、変調方式変換にどのような影響を与えるかを解析した。

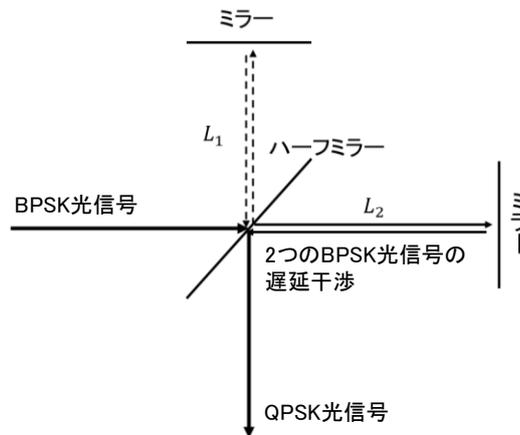


図15. マイケルソン干渉計によるBPSKからQPSKへのOAM光ビーム変調方式変換

BPSK光信号の光電界を式で書くと

$$u(r, z, t) = u_m(r, z) \sum_i f_0(t - i\Delta t) e^{j\varphi_j} e^{j\omega t}$$

と表され、 $f_0$ はBPSKパルス列の単一パルス波形、 $\varphi_j = 0, \pi$ である。 $u_m(r, z)$ はOAM光ビームの空間分布であり、伝搬距離 $z$ とし $u_m(r) e^{-jkz}$ で表される。遅延干渉によりQPSK光信号に変換する式は以下で表される。

$$\begin{aligned} v(r, z, t) &= \frac{1}{2} [u(r, z, t) e^{j\frac{\pi}{2}} - u(r, z, t - \Delta t)] \\ &= \frac{1}{2} u_m(r) \sum_i [f_0(t - i\Delta t) e^{j\varphi_j} e^{j\omega t} e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-jkz} - f_0(t - (i+1)\Delta t) e^{j\varphi_{j-1}} e^{j\omega(t-\Delta t)} e^{-jk(z-\Delta z)}] \end{aligned}$$

すなわち、1つのBPSK信号を位相 $\pi/2$ だけ回転させ、遅延したもう1つのBPSK信号と干渉をとることで変

換される。ここで  $\omega\Delta t - k\Delta z = 2\pi q$  ( $q = 0, 1, 2, \dots$ ) とおくと、

$$v(r, z, t) = \frac{1}{2} u_m(r) e^{-jkz} e^{j\omega t} \sum_i \left[ f_0(t - i\Delta t) e^{j(\varphi_i + \frac{\pi}{2})} - f_0(t - (i+1)\Delta t) e^{j\varphi_{i-1}} \right]$$

となり、空間光学系のわずかな配置ずれからくる位相誤差は、OAM の空間位相分布に変化を与えることなく、遅延干渉する 2 つの BPSK 光信号間の位相差となって現れることが分かった。

そこで計算機シミュレーションでは、2 つの BPSK 光信号間に位相差を付与した場合に、所望の QPSK 光信号が得られるかどうかを検証した。図 1 6 に示すシミュレーション構成では、マイケルソン干渉計を 3dB カプラと遅延器・位相シフタで模擬した。送信 BPSK 光信号にノイズを付与し、変換された QPSK 光信号を受信した後、エラーベクトル振幅 (EVM) という指標を用いて信号品質を評価した。EVM は値がゼロに近づくほどエラーが少なく良好な品質を表す。

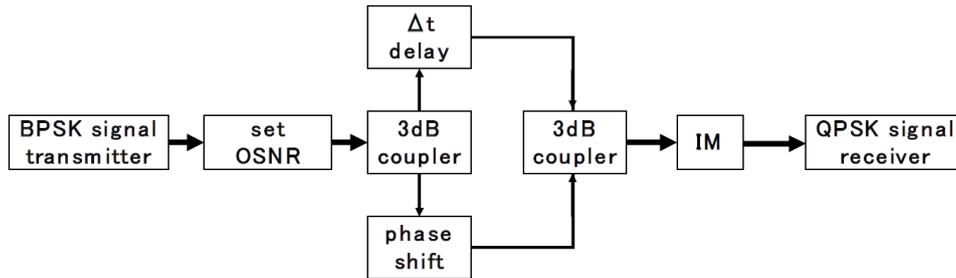


図 1 8. 計算機シミュレーション構成。マイケルソン干渉計を 3dB カプラと遅延器・位相シフタで模擬。

図 1 9 に計算機シミュレーション結果を示す。中央の図は位相差に対する EVM 値であり、位相差が 0 度および 180 度付近で EVM 値がエラー訂正閾値 (FEC limit) を下回り、エラーがない変換が可能であることを示している。また周囲の図は位相差 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度における QPSK 信号点配置図を示しており、0 度と 180 度において QPSK 本来の信号点配置になっていることがわかる。それ以外では傾いていたり、信号点数が 3 点になっていたりと、QPSK 信号とは言えない。なお、0 度と 180 度において QPSK 本来の信号点配置になっているが、受信機でビット情報を復元するには注意が必要で、180 度の場合は位相が反転していることを考慮する必要がある。

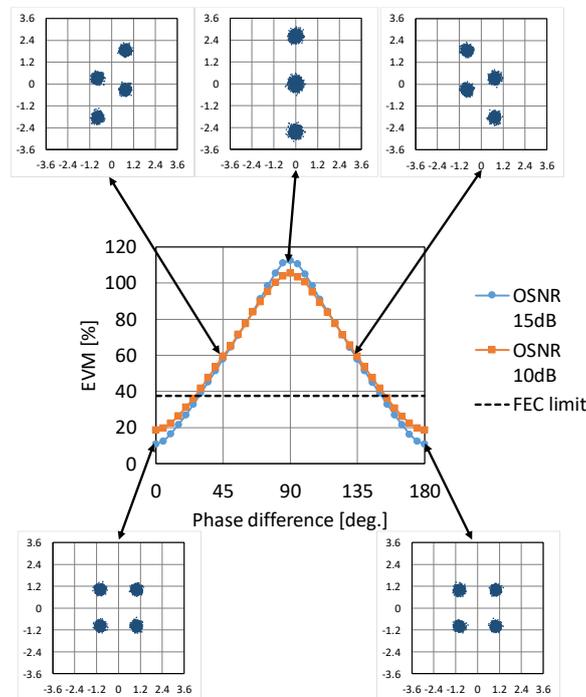


図 1 9. 計算機シミュレーション結果。中央図は位相差に対する EVM 値。  
周囲の図は各位相差における変換後の QPSK 信号点配置図。

本テーマに関する研究成果は「発表資料」欄に記載しており、国際会議論文発表として(6)、国内学会発表として(3)がある。

## 【参考文献】

- [1] P. J. Winzer, “Scaling optical fiber networks: challenges and solutions,” *Optics and Photonics News*, vol. 26, no. 3, pp. 28–35, Mar. 2015.
- [2] G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, J. Courtial, M. W. Beijersbergen, and M. J. Padgett, “Efficient sorting of orbital angular momentum states of light,” *Physical Review Letters*, vol. 105, no. 15, pp. 153601-1–4, Oct. 2010.
- [3] A. E. Willner et al., “Optical communications using orbital angular momentum beams,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 7, no. 1, pp.66–106, Mar. 2015.
- [4] H. Kishikawa, N. Sakashita and N. Goto, “Mode sorting performance for optical beams carrying orbital angular momentum suffering lateral displacement and angular deflection,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.57, No.8S2, 08PB01-1-08PB01-5, June 2018.
- [5] N. Sakashita, H. Kishikawa and N. Goto, “Influence of lateral displacement and angular deflection on mode sorting for beams carrying orbital angular momentum,” *OSA Advanced Photonics Congress 2018*, No.JTu5A.35, Zurich, Switzerland, Jul. 2018.
- [6] J. D. Schmidt, *Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB*, SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2010.
- [7] T. Shoro, H. Kishikawa and N. Goto, “Analysis of elastic vortex waves for optical orbital-angular-momentum mode conversion by acoustooptic interaction,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (US2018)*, No.P2-A2-5, Kobe, Oct. 2018.
- [8] H. Kishikawa, P. Seddighian, N. Goto, S. Yanagiya and L. R. Chen, “All-optical modulation format conversion from binary to quadrature phase-shift keying using delay line interferometer,” *IEEE Photonics Conference (IPC2011)*, Arlington, Virginia, USA, Vol.WO2, 513-514, Sep. 2011.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
(1) H. Kishikawa, H. Kishimoto, N. Sakashita, N. Goto and S. K. Liaw, “Pilot beam-assisted adaptive compensation for atmospheric turbulence in free-space optical transmission of beams carrying orbital angular momentum”	<i>Japanese Journal of Applied Physics (Special Issues)</i> , vol. 59, no. SO, pp. S00D03-1-S00D03-8.	May 2020.
(2) 正路 拓哉, 岸川 博紀, 後藤 信夫, “リングコア光ファイバにおける弾性波渦を用いた光軌道角運動量モード変換の解析”	レーザー学会 中国・四国支部, 関西支部連合 若手学術交流研究会, No.A-8, 25-26.	2019年11月.
(3) 藤原 康志, 後藤 信夫, 岸川 博紀, “OAM ビームを用いた自由空間通信におけるBPSKからQPSKへの全光変調フォーマット変換の検討”	レーザー学会 中国・四国支部, 関西支部連合 若手学術交流研究会, No.A-7, 23-24.	2019年11月.
(4) T. Shoro, H. Kishikawa and N. Goto, “Analysis of elastic vortex wave for optical orbital angular momentum mode conversion in ring core optical fiber”	<i>The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2019)</i> , Tokyo, Japan, No.1P1-1.	November 2019.
(5) H. Kishimoto, H. Kishikawa and N. Goto, “Adaptive compensation for atmospheric turbulence in orbital angular momentum free space optical transmission system”	<i>24th Microoptics Conference (MOC2019)</i> , Toyama, Japan, No.P-52.	November 2019.

(6) K. Fujiwara, H. Kishikawa and N. Goto, "Consideration of all-optical modulation format conversion from BPSK to QPSK in free-space communication using OAM beam"	24th Microoptics Conference (MOC2019), Toyama, Japan, No.P-61.	November 2019.
(7) T. Shoro, H. Kishikawa and N. Goto, "Generation of optical higher-order OAM mode by using higher-order elastic vortex wave in graded-index optical fiber"	2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2019), Glasgow, United Kingdom, No.WePoS-24.6.	October 2019.
(8) H. Kishikawa, N. Sakashita and N. Goto, "Adaptive compensation for angular deflection of beams carrying orbital angular momentum on mode sorting"	Japanese Journal of Applied Physics (Special Issues), vol. 58, no. SJ, pp. SJJE04-1-SJJE04-5.	August 2019.
(9) H. Kishikawa, N. Sakashita and N. Goto, "Influence of angular deflection on mode sorting with adaptive compensation for beams carrying orbital angular momentum"	OSA Advanced Photonics Congress 2019, San Francisco, United States, No.SpTh3E.5.	July 2019.
(10) T. Shoro, H. Kishikawa and N. Goto, "Optical OAM mode conversion by higher order elastic vortex wave"	24th OptoElectronics and Communication Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2019 (OECC/PSC 2019), Fukuoka, Japan, No.TuP4-F10.	July 2019.
(11) T. Shoro, H. Kishikawa and N. Goto, "Analysis of optical OAM mode conversion using elastic vortex wave in graded index optical fiber"	Japanese Journal of Applied Physics (Special Issues), Vol.58, No.SG, pp. SGGA04-1-SGGA04-9.	June 2019.