

2023 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	数モード光ファイバが有する空間モードフィルタ特性の究明
キーワード	①光ファイバ通信、②ホログラフィ、③空間モード

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	マエダ トモヒロ 前田 智弘
配付時の所属先・職位等 (令和5年4月1日現在)	青山学院大学 理工学部 助教
現在の所属先・職位等	青山学院大学 理工学部 助教
プロフィール	<p>北海道大学大学院情報科学研究科で空間モード変換技術に関する研究に従事し、2015年3月に修士課程を修了した。その後、2015年4月から2017年1月までスタンレー電気株式会社で設備開発の業務に従事した。2017年4月から北海道大学大学院情報科学研究科で再度空間モード変換技術に関する研究に従事し、2020年3月に博士後期課程を修了した。2020年4月に青山学院大学に赴任し、現在に至る。</p> <p>博士後期課程在籍中は株式会社 KDDI 総合研究所との共同研究に参画し、現在は国立研究開発法人情報通信研究機構との共同研究に参画している。</p>

1. 研究の概要

近年、光ファイバ通信や光計測の分野で、マルチモード光ファイバ (MMF) 中に存在する空間モードを積極的に活用した技術に注目が集まっている。MMF 中では有限個の空間モードのみが伝搬可能であり、それ以外の空間モードは放射モードとなって伝搬中に消失する。すなわち、空間モードという直交基底系における低域通過フィルタとして動作する。本研究では、特に光ファイバ通信分野で用いられる数モード光ファイバ (FMF) に対して、数値解析と実験の両側面からモードフィルタ効果に関する基本的な検討を行った。まず、数値解析により、放射モードの消失に要する距離がファイバの V 値や空間モードの次数に対してどのように変化するかを確認した。その後、実験で任意の空間モードに対応した位相分布を有する光波を 10 モードファイバに入力したときの出力強度分布を評価した。

2. 研究の動機、目的

光ファイバ通信システムの飛躍的な大容量化に向けて、FMF 中に存在する空間モードの直交性を信号の多重化に活用したモード分割多重伝送が盛んに研究されている。その中で我々は、多重信号の生成に必要な空間モード変換技術に注目し、低損失かつ高精度な空間モード変換技術の確立に向けた研究に取り組んできた。一般に、自由空間型の空間モード変換技術は、空間モードの光波面を正確に再現可能であることから、極めて高精度な変換が実現できる。しかし、光強度の減衰を空間的に与えることで強度分布を変調するため、大きな光エネルギー損失を伴う。この問題に対して、我々は光複素振幅変調の出力をあえて変換目標と放射モ

ードとの重ね合わせ状態とすることで、光エネルギー利用効率の向上を実現する波面重ね合わせ法を提案している。これまでの研究活動では、FMF が理想的な空間モードフィルタ特性を有すると仮定して、数値解析を主とした原理実証を行ってきた。しかし、基本モードのみが伝搬可能なシングルモード光ファイバ (SMF) を空間モードフィルタとして用いる例は数多く存在するが、FMF を空間モードフィルタとして利用する試みは申請者の知る限り存在せず、フィルタとしての特性については未だに明らかになっていない。そこで、本研究では、波面重ね合わせ法の動作原理の根幹をなす空間モードフィルタ効果について、実験的な実証および特性評価を目的とした。

3. 研究の結果

実験に先んじて、数値解析により、FMF 中における放射モードの伝搬特性を確認した。解析にはオープンソースの電磁界解析ソフトである BPM-Matlab を用いた。まず、コア径を変数としてファイバの V 値を制御し、放射モードをファイバに入力したときの光パワーの変化から、放射距離の V 値依存性を評価した。その結果、カットオフ値が 6.37 である $LP_{4,1}$ モードに対して、 V 値を 6.30、6.20 としたときに、それぞれ 18 cm、50 cm の伝搬距離で 20 dB の減衰が生じた。次に、ファイバの V 値が各空間モードのカットオフ値よりも 0.05 だけ小さい値を取るようコア径を設定し、放射距離の空間モード次数依存性を評価した。 $LP_{1,1}$ から $LP_{3,2}$ までの 10 種類の空間モードに対して、光パワーが 20 dB 減衰する距離をまとめた結果を図 1 に示す。いずれの空間モードについても、数 cm から数十 cm 程度の距離で 20 dB の減衰が生じているが、空間モードによって放射距離には大きな差があることがわかった。ここで、動径方向の次数 ($LP_{l,m}$ の m) が共通する空間モードに注目すると、方位角方向の次数 ($LP_{l,m}$ の l) が大きい空間モードほど、放射に要する伝搬距離は長くなっている。また、方位角方向の次数が共通する空間モードに注目すると、動径方向の次数が大きいほど、放射に要する伝搬距離が短くなっている。以上の解析から、方位角方向の次数が大きいほど放射には長い距離を要するが、動径方向の次数が大きい場合には逆に短い距離で放射することがわかった。

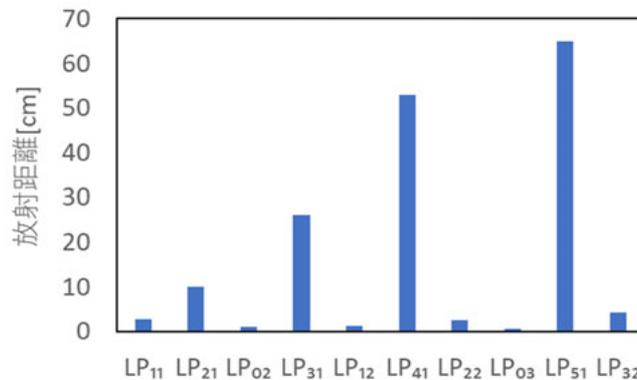


図 1. 空間モードごとの放射に要する距離の解析結果

実験では、FMF に任意の空間モードを有した光波を入力したときの出力分布を確認した。実験系を図 2 に示す。波長 1550 nm の CW 光を SMF から出力し、空間光変調器 (SLM) で空間モードの位相分布を与え、FMF に結合した。FMF は YOFC 社製 10 モードファイバを長さ約 1 m に切断したものを用いた。FMF 出力光については、InGaAs カメラで光強度分布を取得した。

与えた位相分布と得られた強度分布を図 3 に示す。導波モードに対応した位相分布を与えた場合、対応する空間モードの強度に近い分布が現れた。方位角方向のモード次数が大きくなるに従い、カメラで観測される強度値は小さくなり、放射モードに対応した位相分布を与えた場合には導波モードの場合よりも明らかに小さくなった。しかし、 $LP_{0,1}$ および $LP_{1,1}$ に対応した位相分布を与えた場合には比較的きれいな強度分布が観測されたが、それ以降は強度分布に歪みが現れた。また、カットオフから十分に離れた $LP_{30,1}$ などの位相分布を与えた場合でも、画像中心付近に僅かな強度ピークが観測された。これらの原因としては、ファイバ切断時の端面が完全に平坦になっておらず、入出力時に意図せぬモード変換が生じてしまったことが考えられる。また、高次の分布を与えた場合に得られた強度の概形が $LP_{0,1}$ の位相分布を与えた場合

に類似していることから、SLMから0次光が発生して低次の空間モードに結合してしまったことが考えられる。さらに、InGaAsカメラで得られた画像全体に縞状のノイズが生じた。これらの要因により、各空間モードの光パワー減衰量を正確に評価することはできなかった。一方で、放射モードの中でもカットオフに近いLP_{4,1}の位相分布を与えたときは、他の放射モードの場合とは明らかに異なる分布が得られ、強度値もわずかに高くなった。この結果は、放射モードであるはずのLP_{4,1}モードの残留を示唆するものである。今後、純粋なフィルタ特性を評価するためには、より精度の高いファイバ切断器の導入およびSLMの位相応答特性の補正により選択的に空間モードを励起できるようにし、カメラ取得画像からノイズを除去するなどして検出精度を改善する必要がある。

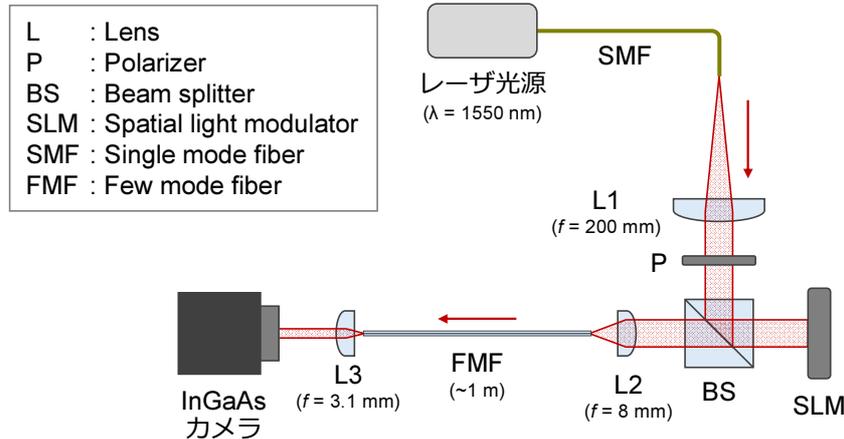


図 2. 実験系

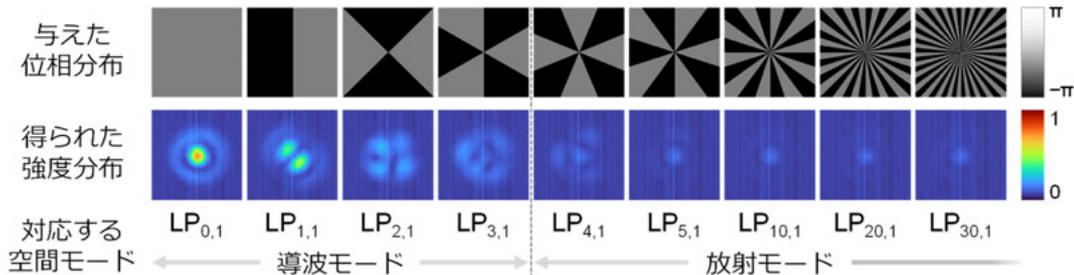


図 3. 与えた位相分布と得られた強度分布

(本実験では動径方向のモード次数については考慮していないため、LP_{0,1}とLP_{1,1}に対応した位相分布を与えた場合の出力強度には、LP_{0,2}とLP_{1,2}がそれぞれ混合した状態が得られている)

4. 研究者としてのこれからの展望

近年、光学の分野においても、多分に漏れず、機械学習を取り入れた研究が隆盛を極めている。比較的高性能なGPUが市販されており、ライブラリも充実していることから、ハード・ソフト両面で導入のハードルが低く、この流れは当面続いていくと思われる。しかし、研究報告の多くが従来のアプローチでは達成不可能な領域に踏み込んだ極めて有効な技術であることは言うまでもないが、中には「機械学習である必要性」に疑問を感じるものも散見される。このような時代において私は、問題の本質を正確に理解し、伝統的な手法と新しい技術を適切に使い分けられる研究者を目指したい。また、誰もが注目する領域で速さを競うよりも、まだ誰も見出していない「おもしろい」研究に取り組んでいきたい。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

私は学生時代から空間モード制御技術に関する研究に取り組んできましたが、数値解析や可視光のレーザ光源を用いた基礎的な検討にとどまっており、これまで実際のFMFを使った実験の経験はありませんでした。本助成制度の支援を受け、念願ともいえる実験を実施することができました。視認できない近赤外光を用いた実験には、思うように進めることができないことも多く、新たな課題にも直面しましたが、研究者としての大きな一歩を踏み出せた実感

しております。本助成金を賜りましたこと、支援者の皆様に心より感謝申し上げます。

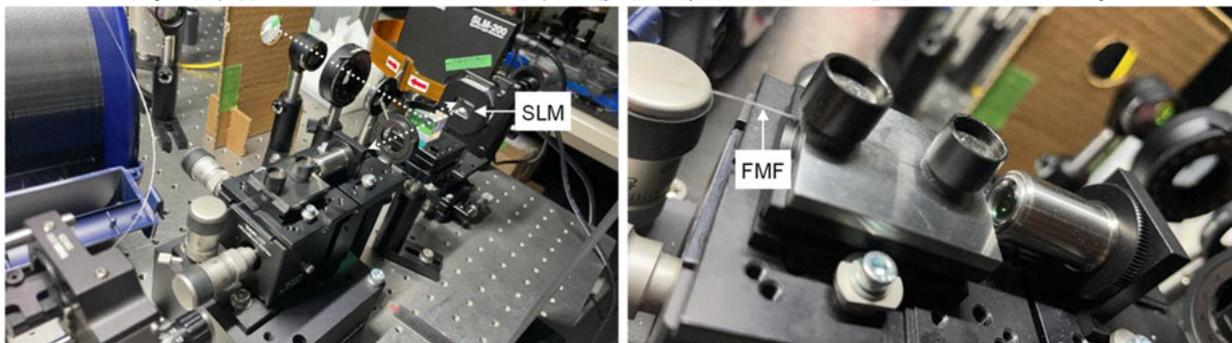


図 4. 実験の様子