

マルチコアおよびマルチモードファイバーレーザーの横モード解析

白川研究室 梯 太郎

1. 序論

ファイバー中の光が伝播する部分であるコアが複数あるファイバーはマルチコアファイバーと呼ばれる。マルチコアファイバーはコアが一つしかないファイバーでの出力限界を超えた出力を得ることができる。マルチコアファイバーおよびマルチモードファイバーは複数のモードを伝搬させることができるので、近年のトラフィック増に伴い通信の領域においても盛んに研究が行われている。コア間の距離が近いマルチコアファイバーでは、コア間に強いエバネッセント場結合が働き、その複数のコアのアレイ構造による複数の固有のモード(スーパーモード)が励振されている。我々の研究室では遠視野におけるビームについての測定による、ストレール比や中心ローブ比等といったモードの占有率の評価を行ってきたが、in-phase モードについての評価は行えるが、各スーパーモードの算出は困難であった。近視野におけるスーパーモードの評価についても、強度による評価しか行えておらず全スーパーモードの評価は困難であり、新しいモード解析法の考案が求められていた。動作していないファイバーのモード解析は、Spatially and spectrally resolved imaging (S²法) などによって行われているが、動作時のファイバーレーザーに関するモード解析法に関しては一件のみしか報告されておらず、またその方法も高コストで手間がかかる方法となっている[1]。そのモード解析法について簡単に説明する。回折格子として作用する計算機合成ホログラム(CGH)を、測定するレーザーが励振する全

てのスーパーモードについて算出することによって、各スーパーモードがそれぞれ異なる回折角で回折するように設計することによって各スーパーモードを分離するという方法である。測定するレーザーごとに異なる CGH を設計することが求められるのでコストと手間がかかる。そこで、本研究では、本研究室で考案された干渉計を用いた新規のモード解析法についての研究を行った。このモード解析法は同様の原理でマルチモードファイバーレーザーの解析が可能であるので、マルチコアファイバーレーザーとマルチモードファイバーレーザーの両方を解析対象として研究した。レーザービーム品質の評価には一般に M² 及び BPP(Beam Parameter Products)が使用されるが、回折限界ビームからどの程度逸脱しているかについては評価できるが、レーザービームの詳細なモード解析はできない。マルチコアファイバーレーザーのビーム品質評価に用いていたストレール比や中心ローブ比も同様である。マルチモードレーザーのモード占有率が分かれば、ビーム品質評価とビームシェイピングに利用できる。そこで、フーリエ変換法[2]に基づく干渉法によるモード解析法でマルチコアファイバーレーザー及びマルチモードファイバーレーザーのモード解析を行った。

2. マルチコアフォトニック結晶ファイバー

本研究で用いた6コアマルチコアフォトニック結晶ファイバー(6コア MCPCF)の構造パラメータと、断面図を以下の図1に示す。

空孔間隔 Λ [μm]	13.5
空孔サイズ d [μm]	6.6
コア径 [μm]	20.7
クラッド径 [μm]	180
Yb 添加濃度 [ppm]	1300
d/Λ	0.49



図 1 6 コア MCPCF の構造パラメータ(左)と断面図(右)

6 コア MCPCF の 6 つのコアには Yb^{3+} イオンが添加されている。コアの周りに周期的に空孔が配置されている構造によって実効屈折率の制御がされている。この 6 コア MCPCF は発振波長において式(1)のシングルモード条件を満たすように設計されている。

$$V_{pcf} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{silica}}^2 - n_{\text{eff}}^2} < 4.1 \quad (1)$$

(Λ : 空孔間隔、 n_{silica} : シリカガラスの屈折率、 n_{eff} : クラッドの実効屈折率)

本研究で用いた 6 コア MCPCF のパラメータを用いた計算によって得られた各スーパーモードの近視野電界分布(図 2)および遠視野強度分布(図 3)を示す。計算には市販の導波路モードソルバーである FIMMWAVE を用いており、有限要素法(FEM)で計算を行った。コア伝播する電界の位相状態が全て揃っているモードのことを in-phase モード、隣り合ったコア間の位相が反転しているモードを out-of-phase モードと呼ぶ。それぞれのモードの番号は伝搬定数が大きい順番に割り振られている。

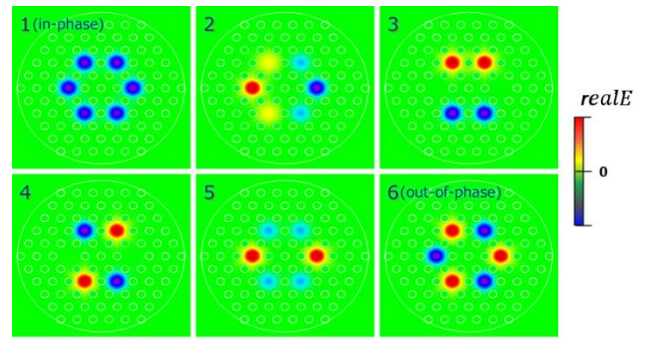


図 2 6 コア MCPCF のスーパーモード(近視野電界分布)

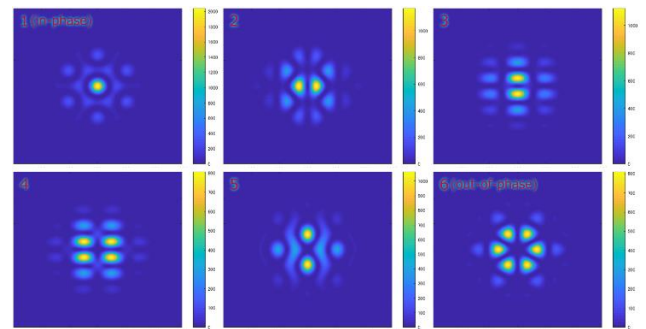


図 3 6 コア MCPCF のスーパーモード(遠視野強度分布, 拡がり角 12°)

3. マルチモードファイバー

ファイバー内で伝搬するモードの数は、式(2)で定義される。導波路パラメータ(Vパラメータ; 規格化周波数)によって決まる。

$$V = \pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} = \pi \frac{d}{\lambda} NA \quad (2)$$

光ファイバー中を伝搬するモードは LP モード (Linearly Polarized mode) で表される。LP モードは、ベクトルモード(HE, EH, TE, TM)で構成されている近似モードである。 $V = 2.405$ では LP_{11} モードの伝搬定数が 0 となりカットオフとなる。従って、 $V < 2.405$ では LP_{01} モードのみが伝搬されるシングルモード伝搬となり、 $V > 2.405$ では 2 つ以上のモードが伝搬されるマルチモード伝搬となる。式(2)から短波長、大口径コア、高屈折率差になるにつれて V パラメータが大きくなり、伝搬可能なモード数が増加することが分かる。

FIMMWAVE で計算した $LP_{l,m(a,b)}$ モードの複素電界分布を図 4 に示す。 LP_{0m} 以外のモードでは、同一 (l,m) のモードでも軸によって (a,b) の 2 種類のモードが存在しておりこの 2 種類のモードは伝搬定数が同じで縮退している。また、全 LP モードで直交する 2 偏光での縮退が存在しているが、図 4 は単一偏光の場合のモードを載せている。

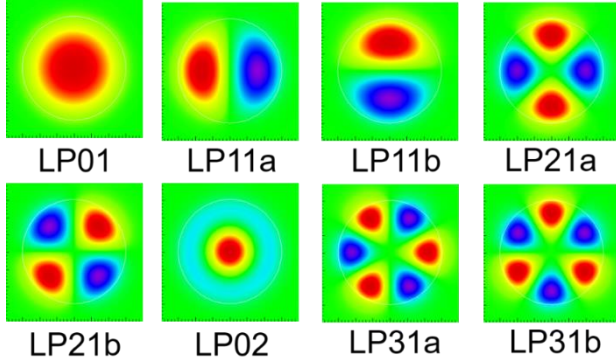


図 4 マルチモードファイバーで伝搬する LP_{lm} モード

4. 干渉を用いた横モード解析法

モード解析の原理について説明する。マッハツェンダー干渉計を用いることで、ファイバーレーザーの近視野像と平面波参照光との干渉縞を得る。干渉縞は式(3)のように表される。ここで $a(x,y)$ は干渉縞の背景光や雑音の強度、 $b(x,y)$ は干渉縞の振幅、 (f_{x0}, f_{y0}) は空間キャリア周波数、 $\varphi(x,y)$ は位相を表している。

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos[2\pi(f_{x0}x + f_{y0}y) + \varphi(x,y)] \quad (3)$$

得られた干渉縞に対して 2 次元フーリエ変換を行うことによって、干渉縞の複素振幅を式(4)とすると式(5)のように 3 つに分離された空間周波数スペクトルが取得される。ここで $f = (f_x, f_y)$, $f_0 = (f_{x0}, f_{y0})$ である。

$$c(x,y) = \frac{1}{2}b(x,y) \exp[i\varphi(x,y)] \quad (4)$$

$$G(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*(f + f_0) \quad (5)$$

マスク処理によって $C(f - f_0)$ 成分のみを取り出し空間周波数スペクトル上の中心に周波数シフトさせることによって、背景光・雑音および干渉

縞の明暗を除去したスペクトル $C(f)$ が得られる。 $C(f)$ を逆 2 次元フーリエ変換することによって干渉縞の複素振幅 $c(x,y)$ が得られるので、次の式(6)のように複素電界分布及び位相を算出できる(フーリエ変換法[2])。

$$E(x,y) = c(x,y) \quad (6)$$

$$\varphi(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[c(x,y)]}{\text{Re}[c(x,y)]} \right)$$

マルチコア及びマルチモードファイバーレーザーをサンプルとして得られた干渉縞と再構成された近視野電界分布の例を図 5 と図 6 に示す。得られた複素電界分布はファイバーレーザーで励振している全モードの線形結合で表されるので、市販の導波路モードソルバー FIMMWAVE によって計算された各モードとの内積を取ることで各モードの占有率を算出することができる。

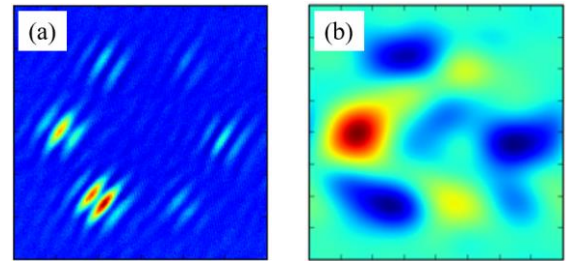


図 5 6 コアマルチコアファイバーレーザーにおける(a)干渉縞 (b)再構成された電界分布

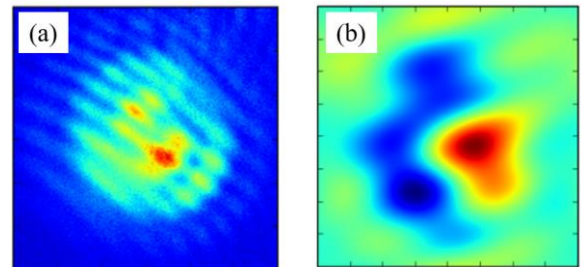


図 6 マルチモードファイバーレーザーにおける(a)干渉縞 (b)再構成された電界分布

5. 近視野像転送干渉計

干渉縞の観測に用いた実験系を図 7 に示す。近視野像と参照光を重ね合わせて生成した干渉縞を観測する。

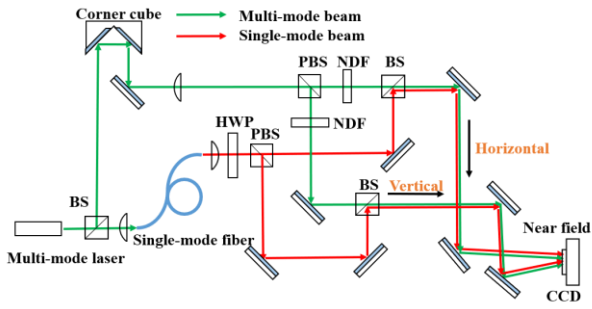


図 7 モード解析に用いる干渉計の実験系

参照経路にはシングルモードファイバーが挿入され、平面波シングルモード光に変換される。測定対象のマルチモードビームのサンプル経路と参照経路の光それぞれが水平偏光と垂直偏光に分割され、合計 4 つの光が CCD に入射する。サンプル光が CCD 上にマルチモードファイバーレーザーの近視野像を生成する。同じ偏光の参照光とサンプル光だけが互いに干渉できるので、1 つの CCD で 2 つの独立した干渉縞を観測できる。それぞれの干渉縞について解析を行う。

6. マルチコアファイバーレーザーの解析

Talbot 効果を利用したエンドシール法と呼ばれる位相同期法で **out-of-phase** モードの選択励振を行っているマルチコアファイバーレーザーをサンプルとして観測を行った。エンドシール法を用いた理由としては解析結果の妥当性の評価を行うためである。エンドシール法では図 8 で示すように Talbot 共振器における鏡をエンドシール部終端におけるフレネル反射に置き換えることによって、全ファイバー共振器を構成している。Talbot 法と同様に、図 9 で示す MCPCF レーザーにおける各スーパーモードの Talbot 距離 Z_S の違いを利用して、特定のスーパーモードのみを選択的に励振させる。Talbot 共振器に比べて高い再結合効率を達成できるという利点がある。

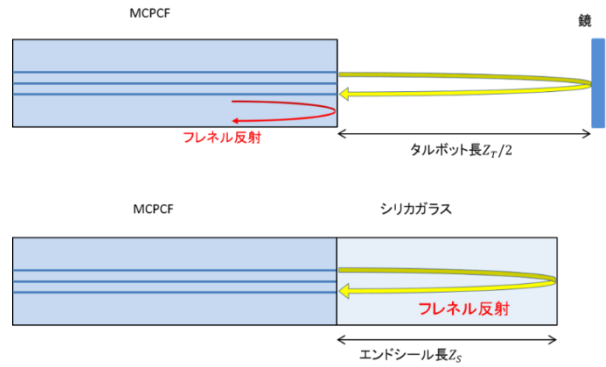


図 8 Talbot 共振器(上)とエンドシール共振器(下)

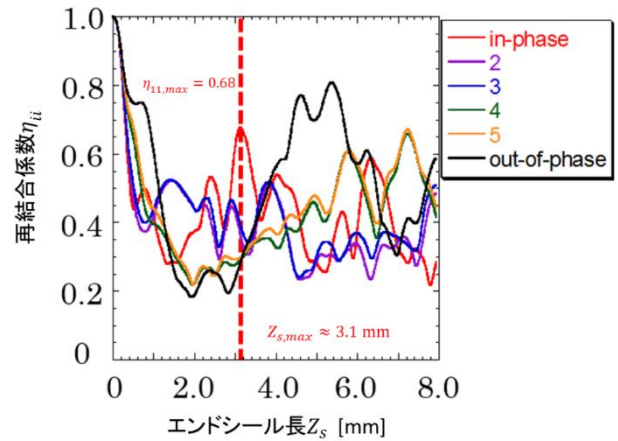


図 9 6 コア MCPCF の再結合係数とエンドシール長の関係

得られた干渉縞とフーリエ領域再構成によって生成された電界分布として図 10 で示したものが得られた。ただし、観測に用いた干渉計は図 7 で示したものではなく偏光の分離が行われていない図 11 の干渉計を用いている。

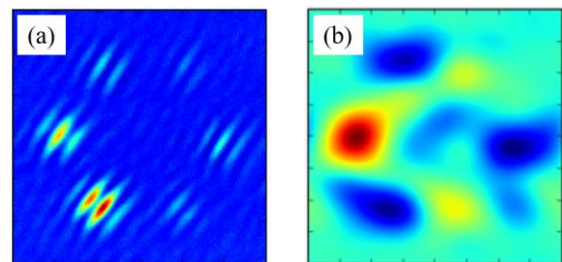


図 10 マルチコアファイバーレーザーで得られた(a)干渉縞 (b)再構成された電界分布

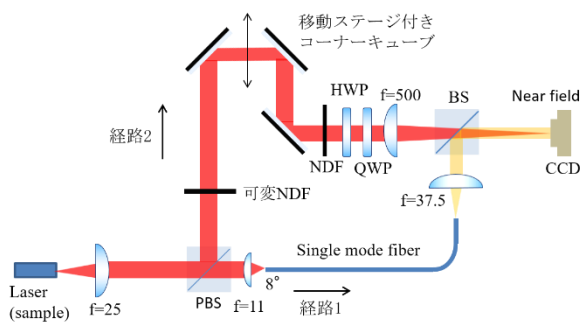


図 11 先行研究に準じた干渉計の実験系

解析結果として、out-of-phase モードが約 75%と支配的になっており、モード分布の特徴としては妥当なものが得られている。しかし、先行研究の干渉計及び解析法に準じたマルチコアファイバーの解析[3]については、干渉計に入れたレーザー光を PBS 等の偏向制御素子を透過させているので、ファイバーレーザーから出た光と観測している光の偏向状態が全く違うものになってしまうという点等、偏光に関する諸所の問題があることが判明したため、実験系及び解析法の改善が必要となった。そこで、新しく開発した干渉計が図 7 で示した干渉計である。ただし、この手法ではマルチコアファイバーレーザーについては正しい解析が行えないという問題点が存在する。その理由は、図 7 の干渉計では偏光ごとに分離した干渉縞が得られるが解析に用いる解析に用いる計算で得られる近視野電界分布の偏光が単一偏光状態のものではないからである。マルチコアファイバーのような複雑な構造では FEM を用いなければ正しいモードの計算ができないのだが、FEM では複雑な偏光分布で計算されるからである。以上の理由から、解析サンプルとしてマルチコアファイバーレーザーを外した。ただしこれは、マルチコアファイバーレーザーへの評価法として全く適切ではないということを意味しているわけではない。モード解析法の精度の評価や解析手法の改善を行う上でマルチコアファイバーレ

ーザーの問題点が悪影響を及ぼすことを避けるためである。

7. マルチモードファイバーレーザーの解析

実験には、単一偏波で発振する PM Yb-doped ダブルクラッドファイバー (コア径 20 μm , $V = 4.7$) を利用した。励振する LP モードの種類は単一偏光の場合は LP(01, 11a, 11b, 21a, 21b, 02) の 6 種類である。図 12 の実験系で発振動作させ、消光比は 14 dB であった。

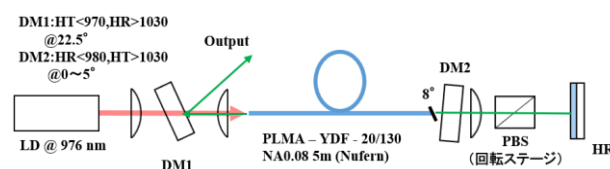


図 12 マルチモード PM ファイバーによる単一偏光発振の実験系

結果として図 13 で示したのもののような干渉縞,電界分布が得られた。実際は図 14 のように干渉計上における水平偏光と垂直偏光で独立した干渉縞が得られるが、単一偏波動作させているので水平偏光成分が 96%を占めており、図 13 では水平偏光成分について示している。水平偏光と垂直偏光の強度が同程度のような結果となっているのは、ND フィルターで CCD 上の強度比を揃えているからである。

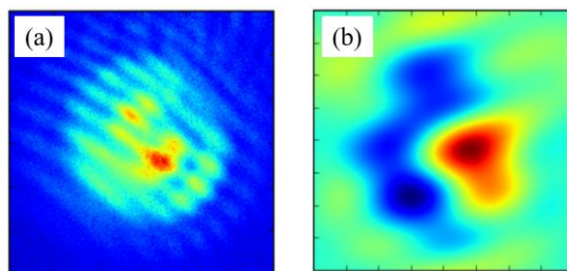


図 13 マルチモードファイバーレーザーで得られた(a)干渉縞 (b)再構成された電界分布

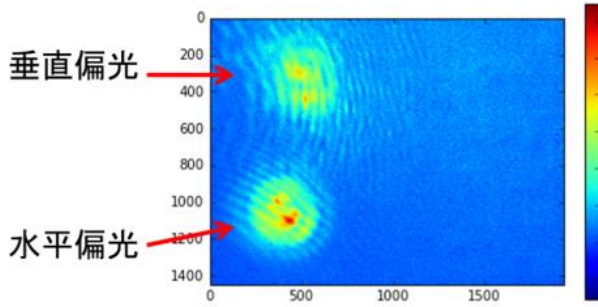


図 14 PM マルチモードファイバーレーザーで得られた干渉縞

図 13 のレーザー状態の LP モードの存在割合として LP₁₁ モードが約 82%と占有的となっている解析結果が得られた。この解析結果がどれだけ有意な結果なのかを評価するために、励起強度を一定にした状態で、ファイバーの曲げ径を小さくしていった場合の解析を行った。もし現状の解析が意味のある結果を示しているのならば、ファイバーの曲げ損失の増加に伴い基本モードの割合が増加するはずと考えた。ファイバーの曲げ長は約 3 m であった。図 15 はファイバーの曲げ半径を変化させた場合のモード解析の結果を示している。曲げ半径が小さくなると、高次モード LP₁₁ が減衰し、基本モード LP₀₁ が増加する。この傾向は、モードフィルタリング用として良く知られているコイル技術と一致している[4]。以上の解析結果を踏まえると、この横モード解析法は正確な値としての評価はまだ不十分であるが、メインとなるモードの割合や、モードの大小についてはモード割合の真の値と相関を示しているものと言える。と考える。

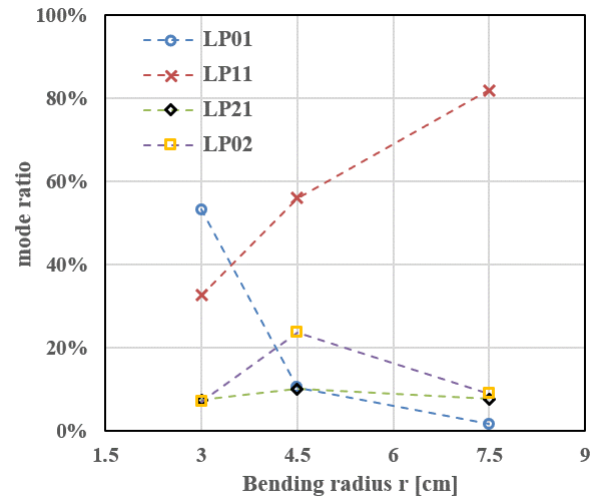


図 15 モード解析結果の曲げ半径 r 特性

8. まとめと今後の展望

フーリエ変換法に基づいた干渉法によるモード解析法によってマルチコアファイバー及びマルチモードファイバーレーザーのモード解析を行った。マルチコアファイバーレーザーの解析について、モード分布の傾向として一致した結果が得られたが、偏光に関する諸所の問題が存在した。マルチモードファイバーレーザーの解析について、モードフィルタリング用として良く知られているコイル技術と一致している傾向を得られた。今後の展望としては、マルチコアファイバー由来の解析法の問題の改善や、本研究とは異なる手法によるモード解析法[5]との比較・評価、解析の際に発生するデジタル的な雑音の軽減を考えている。

参考文献

- [1] Clémence Jollivet et al., J. Opt. Soc. Express. 22, 30377-30386 (2014).
- [2] Mitsuo Takeda et al., J. Opt. Soc. Am. 72, 156-160 (1982).
- [3] 黒須 雄太, 他, 電気通信大学修士論文, 2017.
- [4] J. P. Koplow et al., Opt. Lett. 25, 442-444 (2000).
- [5] Kyung Jun Park et al., Opt. Express, 24 (4), 3543-3549 (2016).