

# 能動モード同期による

## マルチモードファイバーレーザーの空間モード選択の研究

白川 (晃) 研究室 勝又 悠介

### 1 序論

ファイバーレーザーのパワースケーリング法としてコヒーレントビーム結合(CBC)のような増幅した光を空間的、時間的に結合することが主流となっている。本研究室ではファイバーレーザーのパワースケーリングの一手法としてCBCの研究が行われており、主に結合型マルチコアファイバー(MCF)によるCBCが行われてきた。結合型MCFではシングルモードのコアを隣接させエバネッセント結合することで、スーパーモードを励振させる。コア数の増加によりパワースケーリングをすることが可能だが、コア数に伴いモード数も増加するため選択的にスーパーモードを励振させる必要がある。スーパーモード中の in-phase mode はコア同士の位相が揃い遠視野像で中心にピークパワーを持つため、パワースケーリングに優れていることから、in-phase mode を選択励振する方法が研究されてきた。

そこで本研究室では、任意のモードを選択励振させる方法として能動モード同期による時間領域モード選択を提案した。時間領域モード選択とは、MCFはコア数が多く自由空間からの再結合が困難であることから、マルチモードファイバー(MMF)レーザーの横モードがそれぞれ異なる実効屈折率を持ち各横モードの群速度や縦モード間隔が異なるという特性を利用し、繰り返し周波数を制御し能動モード同期発振により横モードの選択励振をするという方法である。本研究では時間領域モード選択を空間モード選

択と呼ぶことにする。

### 2 原理

#### 2.1 空間モードの実効屈折率の計算

本研究で用いたマルチモードファイバー(MMF)内に存在する閉じ込めモードを市販ソフトの Fimmwave で有限差分法(Finite Difference Method: FDM)により計算し、近視野像を実効屈折率の高い順に並べ図1に示した。

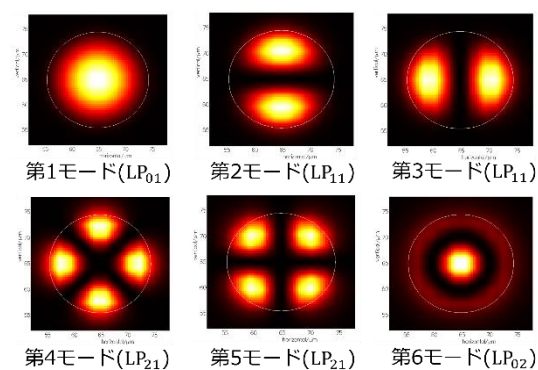


図1 マルチモードファイバーレーザーの近視野像  
使用したマルチモードファイバーのパラメータをもとに設計し、それぞれコア径  $19 \mu\text{m}$  , クラッド径  $130 \mu\text{m}$  , コアの屈折率を 1.4523, クラッドの屈折率を 1.45 として計算している。また、各モードの波長  $1000 \mu\text{m} \sim 1080 \mu\text{m}$  における実効屈折率の値を計算し図2に示した。

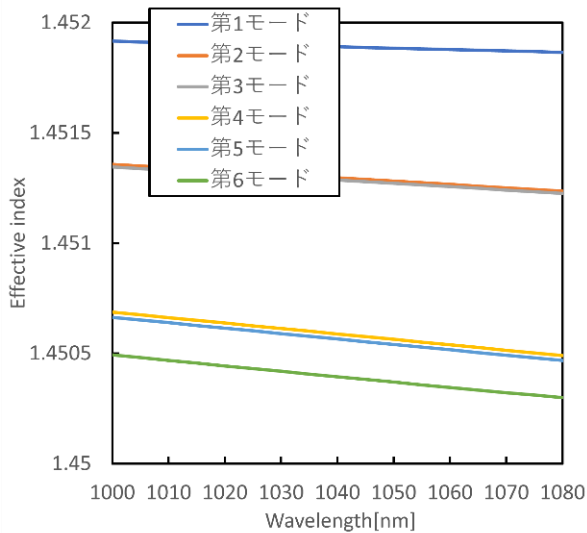


図2 モードごとの実効屈折率

## 2.2 空間モード選択

図3に能動モード同期による空間モード選択の原理を示す。図3のように周期  $t$  で  $t_{\text{open}}$  だけ開いているようなシャッターの役割を果たす素子を共振器内に挿入する。シャッターが開いている時間が短いと仮定すると損失が大きくなり連続波(CW)発振は存在しない。また、位相がそろっていない多モード発振もシャッターの開き時間が一定周期であることから抑制される。しかしシャッターでの変調周期  $t$  が共振器内を光が1周する周期と重なり合うときにはパルスが発生する。これは損失が最小の場合に強い光が発生させるという特徴から、変調周期と等しい光のみがシャッターによる減衰を感じずに共振器内を周回するうちに複数の縦モード同士が干渉し合い、位相がそろった光が増大されることを示している。本実験での変調はファンクションジェネレータ(FG)によって矩形波を発生させ、音響光学変調器(AOM)がシャッターの役割を果たすことで能動モード同期を行っている。

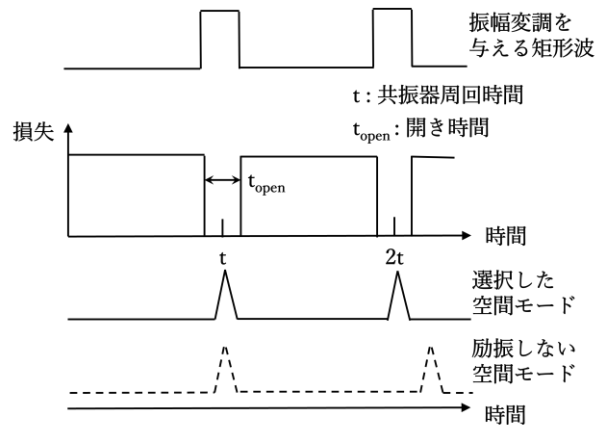


図3 能動モード同期による空間モード選択の原理  
共振器を1周する周期と変調周期の差を時間離調  $T_d$  とすると能動モードの安定性を示すパラメータとして規格化離調  $\Delta$  が式1のように与えられる[1].

$$\Delta = \frac{1}{2\sqrt{2D_f M_s}} \frac{T_d}{\tau_a} \quad (1)$$

$D_f$ はレーザー帯域幅を制限する周波数における共振器内損失の曲率、 $M_s$ はパルス幅が共振器内の往復時間よりもはるかに短い場合の最小損失点での損失変調の曲率、 $\tau_a$ はガウシアンビームのパルス幅、 $T_d$ は共振器を光が1周する周期と変調周期の離調である。

規格化離調  $\Delta$  はレーザー自身のノイズを考慮すると、能動モード同期の安定性は  $\Delta=2$  が閾値となる。  $\Delta < 2$  の場合、安定な能動モード同期となるが、  $\Delta > 2$  の場合は離調が増加するにつれて定常状態を維持できずに不安定になる。規格化離調  $\Delta$  の値に変化を及ぼす時間離調  $T_d$  は空間モードによってほとんど変化しないことから、  $\Delta < 2$  を満たすように設計することで能動モード同期の安定性は空間モードによらなくなる。

実際の実験に関しては周波数領域での制御を目指しているため、任意の第  $n$  モードの繰り返し周波数を  $f_R^n$ 、変調を与える周波数を  $f_M$  とすると周波数離調  $f_d^n$  は式2のように求められる。

$$f_d^n = f_M - f_R^n \quad (2)$$

ここで $\Delta = \Delta_c = 2$ を与える周波数離調を臨界周波数 $f_c$ として定義する. 図4に空間モード選択の簡単な概念図を記載する.

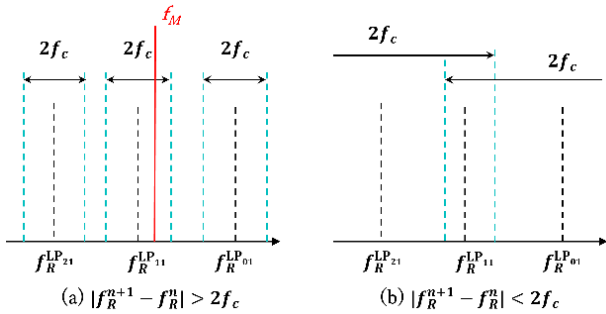


図4 空間モード選択の概念図

(b)の場合は複数の空間モードが励振しうる. 単一の空間モードの選択ができるのは(a)の場合である. したがって, 単一モード選択を行うための条件は式3のように表すことができる.

$$|f_R^{n+1} - f_R^n| > 2f_c \quad (3)$$

つまり, 第nモードを選択したい場合, 第nモードの繰り返し周波数 $f_R^n$ から臨界周波数 $f_c$ 以内の範囲で繰り返し周波数 $f_M$ の変調を与えてやればよい.

### 3 実験および結果

#### 3.1 共振器設計

本研究では図5のようなリング型共振器を設計し, 実験を行った.

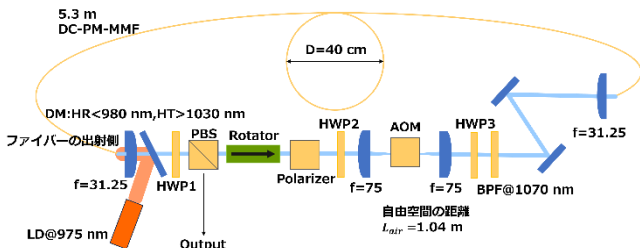


図5 リング型共振器の配置図

ファイバーは長さが5.3 mのYb添加ダブルクラッド偏波保持マルチモードファイバー(DC-PM-MMF)を使用し, 端面による寄生発振を防ぐために $8^\circ$ に研磨している. 共振器内にはRotatorを挿入し, その両側にそれぞれ偏光ビー

ムスプリッター(PBS)とPolarizerを設置することでアイソレータとして機能させている. PBSはp偏光を透過しs偏光を反射するため, 半波長板1(HWP1)の角度を調整することで偏光を操作し共振器内パワー, 共振器からの出力が調整できる. AOMは水平偏光について最大の回折を与えるため, Rotatorで $45^\circ$ 回転させた偏光をPolarizer透過後のHWP2を挿入することで水平偏光にしている. AOMはFGで操作することにより変調周波数を調整し能動モード同期をかけ, 空間モード選択を試みている. AOMを通過した光はHWPにより偏光を回転させMMFに戻している. BPFは中心波長が1070 nm( $T > 90\%$ ), 半値全幅が10 nmである. ミラーはファイバーへの入射の調整のしやすさ, 左右反転の補償のため2枚挿入している.

#### 3.2 繰り返し周波数の計算

空間モードごとの共振器内の繰り返し周波数 $f_R^{mode}$ は式4のように表すことができる.

$$f_R^{mode} = \frac{1}{T_R^{mode}} = \frac{c}{L_{air} + n_g^{mode}L} \quad (4)$$

このとき, モードごとの実効群屈折率 $n_g^{mode}$ は実効屈折率の計算結果から式5のように計算した.

$$n_g^{mode} = n_{eff}^{mode} - \lambda \frac{\partial n_{eff}^{mode}}{\partial \lambda} \quad (5)$$

繰り返し周波数の計算結果を図6に示した. 図6から, 能動モード同期が約34.3 MHzの変調で起こることが予想できる. また, モードごとの繰り返し周波数の範囲から約13 kHzの範囲内に空間モードの単一励振可能である周波数が存在すると考えられる.

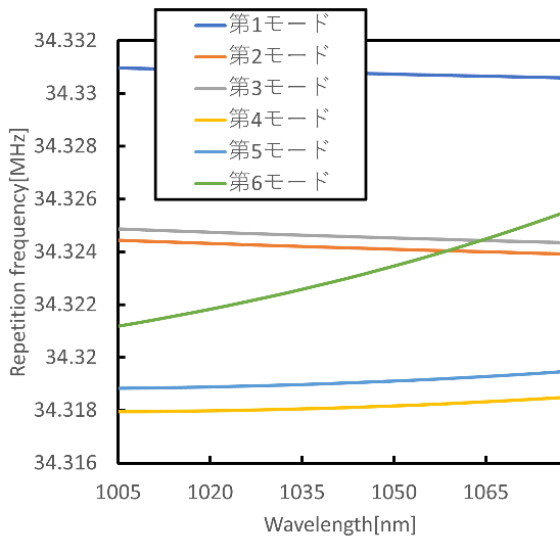


図6 空間モードごとの繰り返し周波数

### 3.3 能動モード同期

図7に能動モード同期の起こる範囲について実際に測定した波形を示した。

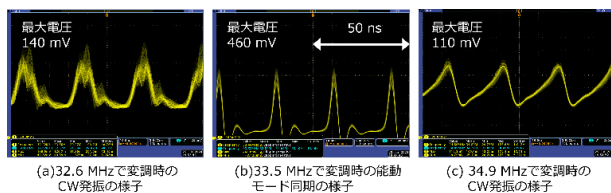


図7 能動モード同期の範囲

図7に記載している最大電圧は波形の縦軸の最大値であり、縦軸の表示範囲が(a), (c)と(b)で異なっていることを示している。(a), (c)は能動モード同期が起こっておらず連続波(CW)発振の状態にAOMの変調が影響していると考えられる。(b)は能動モード同期が起こっておりCW発振時と比べて非常にピークパワーが高いパルスとなっている。能動モード同期は実験より32.9 MHz から 34.8 MHz の範囲で確認できたため先行研究[2]での能動モード同期が起こっていた範囲と比べると200倍近くに広がってしまっていた。共振器内での偏光がファイバーの軸に合わせた入射ではないため、ファイバー中の偏光が単一ではなくリング型共振器を一周する間に偏光が回ってしまうことで広い範囲でのモー

ド同期になってしまっていると考えられる。したがって偏光状態や共振器内パワーなどを再検討する必要があると考えた。

## 4 まとめ

本実験ではマルチモードファイバーレーザーの横モードが異なる実効屈折率を持つことから共振器内の繰り返し周波数も異なるため、AOMを用いた能動モード同期を行うことで繰り返し周波数の制御による横モードの選択励振を試みた。モード同期の起きている範囲は約1.9 MHzであった。これは空間モードごとの繰り返し周波数の計算により求められた空間モードの単一励振可能な周波数が存在する範囲の13 kHzの約100倍に相当する。今後の展望として、ビームサンプラーなどを用いて共振器内のレーザー光をモニターし、半波長板の角度を調整することでファイバーの軸と偏光の関係を最適化したレーザー発振に近づけることが必要である。能動モード同期の起こる変調周波数範囲をより計算値に近づけ、モードの変化をより高精度で行えるような共振器を実現させていきたい。

## 参考文献

- [1] F. X. Kärtner, D.M.Zumbühl, N.Matuschek, Turbulence in Mode-Locked Lasers, Physical Review Letters 82, 22, 4428-4431 (1999)
- [2] 大西志昌, マルチモードファイバーレーザーにおける能動モード同期時間領域モード選択のリング型共振器の研究, 2022年度電気通信大学修士論文