ハイパワーレーザのための LMAファイバ選定方法

ケビン・ファーレイ、ジョージ・ウランドセン、カニシカ・タンカラ

ハイパワーは、吸収を最大化する光ファイバを選定することでコストを下げながら達成できる。しかし、ハイパワーで優れたビーム品質、最高のコストパフォーマンスを実現するには、ラージモードエリア（LMA）ファイバの中から適切なファイバを選定する方法を理解していなければならない。

ファイバレーザ発振器と増幅器は過去10年の間に著しく改善されてきた。これはアクティブファイバやパッシブファイバ、励起用半導体レーザとファイバレーザを構成する各種ファイバおよび光部品の改善が技術基盤の成熟を推し進めた結果であると考えられる。回折限界のビーム品質を維持しながら高出力（ピーク出力と平均出力）が可能なファイバレーザは、ダブルクラッド（DC）ファイバ、特にLMA DCファイバの継続的な開発とエンジニアリングによって可能になった。シングルモードファイバ（SMF）は回折限界の出力を得ることはできるが、本質的にモード領域が小さいので高出力にまで増強することはできない。マルチモードファイバ（MMF）では、数十から数千のモードが伝搬できるのでハイパワーの出力には対応するが、そのビーム品質が悪くなってしまう。

数個のモードを維持できるLMAファイバは出力を増強するための基本モード領域が大きく、ファイバの選定を適切に行えば、優れたビーム品質のファイバレーザ出力を得ることができる。特定の応用分野に適したファイバレーザを実現するためのLMAファイバは、ファイバパラメータ、所望のレーザ特性、製造コスト、製品の信頼度について熟慮する必要がある。ここでは、レーザメーカーがレーザの用途に依存する最適なレーザ特性を実現するために考慮すべきファイバの選択方法について述べる。

レーザメーカーが利用できるLMAファイバの選択肢は複数ある。ファイバの特徴と特性のトレードオフ、パフォーマンスへの影響を理解することは、特定アプリケーションに最適なファイバを選ぶ上では重要である。ビーム品質は劣るが、最小コストで実力通りの出力を得るためにLMAファイバを選ぶことは、わずかに高いコストで優れたビーム品質の高出力を提供するLMAファイバとは同じではあり得ない。高吸収（最短ファイバデバイス長）のLMAファイバを選べば、全般的なレーザ製品のコストは下げられるが、このようなファイバは優れたビーム品質達成が難しい。一方、吸収が若干低いファイバを選ぶと最高パワーで優れたビーム品質が可能となるかもしれない。

イッテルビウム（Yb）添加ファイバの吸収は、Yb濃度とファイバコアの組成の両方に依存する。**図1**は、2つのYb添加ファイバの波長915nmでのクラド吸収を示している。Yb濃度を最大化し、コア組成で妥協することで開口数（NA）0.07のファイバBは、0.065NAのファイバAよりも吸収を25～30%高くすることができる。ファイバBを用いることでレーザメーカーは、短尺ファイバを使うことができ、潜在的には製造コストを下げられる。

アプリケーションの所定の出力が回折限界に近いビーム品質を必要としないのであれば、これは理にかなった選定になるだろう。しかし、レーザがシングルモード的ビーム品質を必要とするなら、ファイバの選定は慎重にすべ

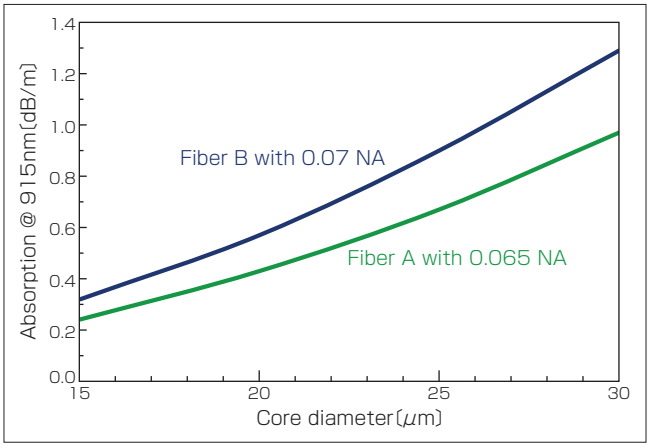

図1　コアサイズの関数として、915nmでのYb添加ファイバ400μmクラッドのクラッディング吸収を示している。0.065NAファイバA（緑色カーブ）は、優れたビーム品質の出力が得られるように最適化されている。0.07NAファイバB（青色カーブ）は、所定のコアサイズでクラッド吸収が最大となる。

きである。考慮すべき点は、そのファイバがサポートする導波モードの数、優れたビーム品質の実現がどの程度容易であるかが基本になる。所定のコアサイズでは、モードの数はNAとともに増加する。導波モードの数が増えれば増えるほど、基本モード動作の実現はますます難しくなる。

規格化周波数、V#は、標準式V=2πa NA/λによって定まる直線偏光モードの数を決める。ここではaはコアの半径、NAはコアの開口数、λは動作波長である。**図2**は、異なるコアサイズとNAを持つファイバがサポートするモード数を表している。コアのNAまたはコア径が増すにともない、V#およびファイバ内のモードも増える。所定のコアサイズおよびNAトレランスを持つ市販のLMAファイバがサポートするモード数は、図2で決めることができる。

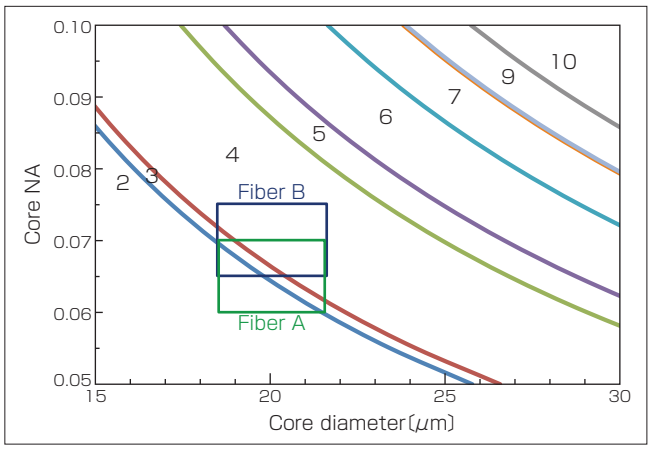

図2　異なるコアサイズとNAを持つファイバがサポートする直線偏光モードの数を波長1064nmで見た。隣接する曲線が、所定のモード数をサポートするコアサイズとNAのグループを形成する。

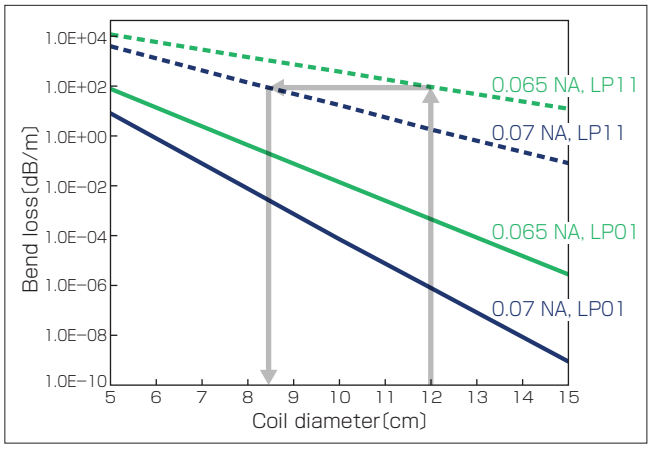

図3　コア径20μmファイバのLP 01とLP 11の波長1060nmでの曲げ損失をファイバA（0.065NA）およびファイバB（0.07NA）で対比した。

モードとNAについて

一般に、ファイバのコアサイズは特定のアプリケーションに必要なレーザパワーによって決まる。NAが低いファイバを選ぶことによって、レーザメーカーは最高品質を達成するために扱わなければならないモード数を制限することができる。これは、わずかにNAが異なる2つのコア径20（±1.5）μmのLMAファイバ考察することで明らかになる。ファイバAはNA 0.065±0.005であり、ファイバBはNA 0.07±0.005である。ファイバA（緑色枠）およびファイバB（青色枠）がサポートするモード数を図2に示した。

ファイバAが主に2から3モード（緑枠付箇所）、ファイバBが主に4モード（青枠箇所）をサポートしていることは明らかである。このモード数の違いは、優れたビーム品質を実現する能力に大きな影響を持つことができる。この利点を認識しているファイバメーカーはファイバAを提供するだけでなく、製造するファイバのコアサイズやNAが確実に緑枠に入るようにする。

LMAファイバでは、コアがサポートする個々のモードに利得がある。高次モード（HOM）の利得を抑圧することで基本モードに利得のすべてが出るようになり、回折限界ビームとなる。HOMの利得を抑圧するのに用いる技術の1つは、ファイバをコイル状に巻くことである[1]。一定のコイル径でHOMの曲げ損失が、基本モードと比べて大きくなる。したがって適切なコイル径を選択することによって、第2および他の高次モードの損失を高くしながら基本モードの損失を小さくしておくことができる。

曲げ損失を高くすることでHOMの利得を抑圧し、全パワーが基本モードで維持されることになる。一定のコアサイズでモード数が少ないファイバとすることで、HOMの曲げ損失に起因する利得抑圧が可能になる。逆に、ファイバのモードが多くなればなるほど、HOMはますます安定的になり、所望の曲げ損失を起こすにはコイル径をより厳しくすることが必要になる。

図3は、基本モード（LP 01）と最初の高次モード（LP 11）の波長1060nmでの曲げ損失を、ファイバA（0.065NA）とファイバBの（0.07NA）のコイル径の関数で示している。ファイバBは、さらに2つのモードをサポートしているが、曲げ損失がLP11よりも大きいので図には表示されていない。これら追加モードの抑圧は容易であり、この

例では主要な関心事ではない。ファイバBで優れたビーム品質を達成しようとしているレーザメーカーが直面している課題を理解するには、2つの最下位モードの曲げ損失を調べるだけで十分である。ファイバAとファイバBとのNAの違いは一見小さいようであるが、この違いはLP 01とLP 11モードの曲げ損失、LP 11利得抑圧のために必要なコイル径で大きな違いとなる。

選定のバランス

915nmで0.45dB/mの吸収を持つ(図1)ファイバAを使用するレーザメーカーは、～13dBの全吸収を実現するために～30mのファイバが必要になる。コイル径12cmで基本モードの曲げ損失は<0.03dB(0.01dB/mで30m)。同じ径で、不要なLP 11モードは、ファイバ30mで3000dBの損失となる。損失を高くすることでLP 11の利得の大幅な抑制を確実にし、基本モード動作、したがって優れたビーム品質が可能になる。

ファイバB(0.55dB/m吸収)を使用するレーザメーカーは、～13dBの全吸収を実現するために24mのファイバがあれば足りる。ファイバAと同じ12cmコイル径では、不要なLP 11モードの曲げ損失はファイバBでは30dBにしかならない。ファイバBではファイバAに比べてLP 11モードの曲げ損失は遙かに(100倍)低いので、ファイバBで基本モード動作を達成することは困難になる。レーザメーカーがファイバBで基本モード動作を実現しようとすると、コイル径を12cmより小さくせざるを得ない。図3は、ファイバBがコイル径12cmのファイバAと同じLP 11の損失になるには径が8.5cm以下でなければならないことを示している。

LMA大径ダブルクラッドファイバは固いので、適切に巻いてパッケージするのは、特に径が小さいと骨が折れ、時間もかかる。さらに、巻径が小さくなるにしたがってファイバへの応力が増すので、ファイバの機械的な信頼性に悪影響を与えることになる。

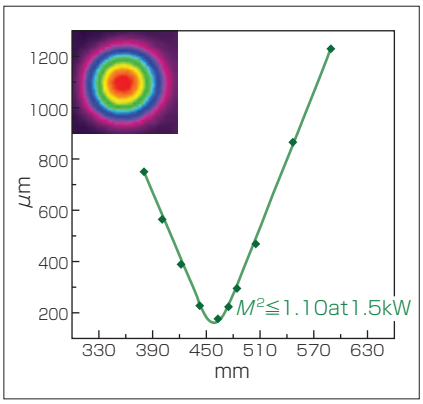

図4 0.06NA、25/ 400μm Ybファイバで達成したビーム品質(M^2)。出力1500Wでの動作。

ファイバの曲げ径を小さくするにしたがって引張歪が増し、高い引張歪は早期の機械的故障の原因となる。ファイバの引張歪は巻径に反比例する。上で議論したように、コイル径12cmのファイバAと同じビーム品質を達成するにはファイバBは約8cmの径に巻かなければならない。結果的にファイバBの引張歪は、ファイバAの場合よりも50%高くなる。ファイバレーザは数千時間の寿命となるように設計され、巻きによる歪はファイバに対する一定な力となるので、ファイバのコイル径を考慮することは重要である。

その歪が十分に大きいと、時間の経過とともにその歪はファイバの機械的な故障の原因となる。したがって、ファイバへの歪を最小化することは高信頼のレーザを実現する上で重要になる。コイル径を可能な範囲に維持することでファイバの機械的信頼性を改善し、動作中に高価なレーザコンポーネントやレーザ自体の突発的事故を防ぐことになる。ファイバAの選定は優れたビーム品質を達成するだけではなく、優れたレーザ品質確保でも一役買うことになる。

前述の議論は20μmコアファイバに焦点を絞ったものであったが、より大きなコアサイズのファイバの選定でも同様のアプローチがとれる。**図4**は、回折限界に近いビーム品質が25μmコアで達成できることを示しており、Yb添加ファイバはこの記事で議論したのと同様のファイバ選定プロセスにしたがった。

ファイバレーザは、マーキング、マイクロマシニング、切断、溶接、穴開け、彫刻など多くの産業アプリケーションで採用が進んでいる。ビーム品質が劣るそのままの出力で足りるアプリケーションもあるかもしれないが、現状では優れた(SM)ビーム品質のハイパワーファイバレーザに対する関心が高まっている。レーザメーカーは、LMAファイバの複数の選択肢から選定しなければならない。ハイパワーは、吸収を最大化するファイバを選ぶことで幾分コストを下げて実現することができる。しかし、ハイパワーとともに優れたビーム品質が望ましいなら、レーザメーカーは入手可能なファイバから慎重に選定しなければならない。的確な選定は、最終的には、目標とするアプリケーションに最良のコストパフォーマンスを提供することになる。

参考文献
(1) J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg, Opt. Lett., 25, 442-444 (2000).

著者紹介
ケビン・ファーレイ博士はヌーファン(Nufern)のサイエンティスト、ジョージ・ウランドセン博士はファイバ製品ラインマネージャー、カニシカ・タンカラはファイバ事業担当副社長。
e-mail: goulundsen@nufern.com URL: www.nufern.com.

LFWJ