# ファイバレーザの性能を改善する能動ファイバと受動ファイバの整合接続

ジョージ・オーランドセン、ケヴィン・ファーリー、ジャロスロー・アブラムシャク、カンシーアン・ワイ

**能動ファイバと受動ファイバを注意深く整合接続して、ファイバレーザ性能をキロワット出力レベルに改善した。迷光を最小に抑え、低損失と熱管理に優れた再現性のある融着接続を可能にして、単一モードの高出力動作を実現した。**

本稿は2本のファイバを十分なアラインメント精度で融着接続するいくつかの方法を概説し、そのような整合状態のファイバを製作するときの測定の役割の重要性について議論する。また、ファイバを整合接続すると、どのようにしてレーザの全体性能が改善され、高出力のビーム品質が得られるかを明らかにする。最後に、能動ファイバと受動ファイバの整合状態の計測工学とその結果を示し、ファイバ整合に必要となる重要な測定について述べる。

ファイバ技術の進歩は高出力レベルで動作するファイバレーザに対して重要な役割を果たす。これらのファイバの多くは二重クラッドファイバの幾何学配置からなり、断面が八角形の内部クラッドを使用してポンプ光を吸収する（**図1**）。最近のファイバ技術の改良には光黒化を回避するためのガラス組成の最適化と、ポンプ光の導波路を形成する二重クラッドファイバに用いる低屈折率高分子被覆の改良が含まれている。

これらの改善によって、1kWの出力レベルで信頼性よく動作し、単一モードのビーム品質を備え、産業用レーザの標準寿命を満足する二重クラッドファイバが市販されるようになった。最近の課題はこれらの性能をマルチキロワットレベルで維持することにある。

標準的なキロワットレベルのファイバレーザの動作は、多数の半導体レーザを用いてポンプするラージモードエリア（LMA）Ybドープ二重クラッドファイバと、回折格子レーザ発振器またはマスタ発振器パワー増幅器（MOPA）のアーキテクチャに基づいている。いずれの場合も、能動ファイバ（Ybドープ）と受動ファイバが融着接続され、さらにファイバ部品（回折格子、光結合器、配送用の受動ファイバ）とカスケード接続されて一体構造になる。業界標準のYbドープLMAファイバは20/400設計にもとづいて、直径20μmの低NA（一般に0.065）コアと直径400μmの内部クラッドがポンプ導波路を形成する。

ファイバレーザの課題はシステムの信頼性を維持し、出力ビーム品質の劣化を起こさずに、ファイバと部品の連鎖をマルチキロワットの出力レベルで機能させることであった。とくに、LMA

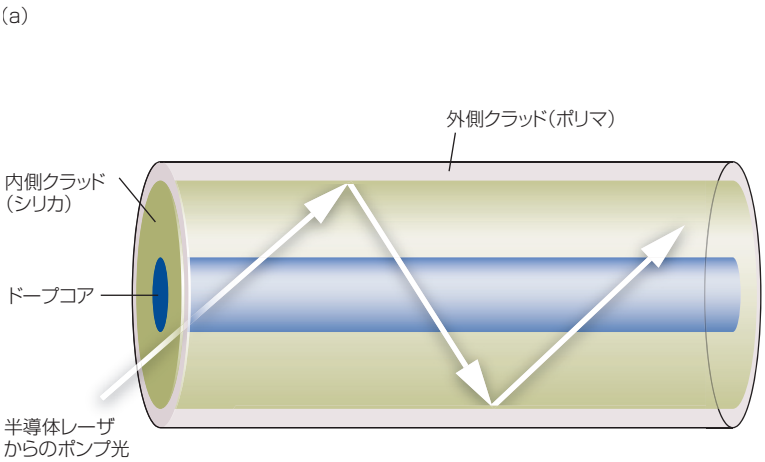

**図1**　光ファイバの多くは二重クラッドファイバの幾何学形状にもとづいて（a）、その八角形状の内側クラッドがポンプ光の吸収を増強している（b）。

コアは高次モードが伝搬するため、1kW以上の高出力レベルではビーム品質が劣化しやすいと報告されていた。

高出力の信頼性と再現性を実現するために、ファイバレーザ内部のファイバ部品は前世代のLMAファイバ技術の許容範囲を超えた注意深い整合接続が必要になる。われわれは能動ファイバと受動ファイバのすべての連鎖を正しく選択し、注意深く接続して、市販の最新世代の二重クラッドファイバから2kWの出力パワーが得られ、単一モードのビーム品質が維持されることを実証した。

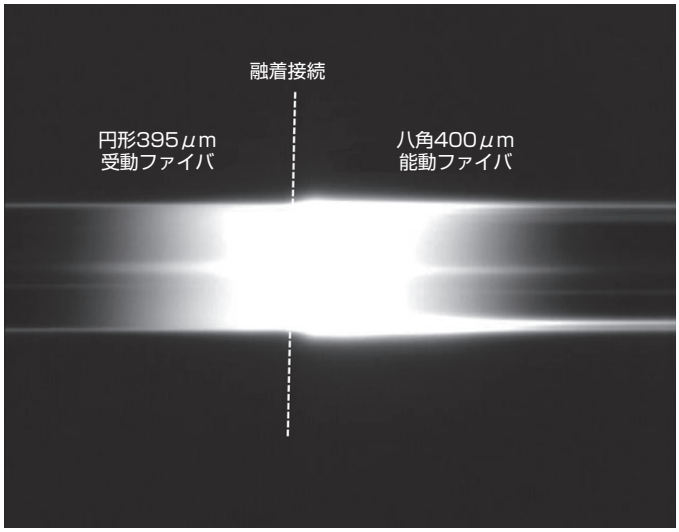


**図2**　395μmのクラッド直径をもつ受動ファイバが400μmのクラッド直径をもつ能動八角形状ファイバと融着接続され、能動ファイバへのポンプパワーの結合が改善されている。

## 能動と受動ファイバの整合接続

二重クラッドファイバは信号用のYbドープコア導波路とポンプ用の内側クラッド導波路から構成される。能動ファイバの内側クラッドは、一般にクラッドモードが混合され、ドープコア内のポンプ光の重畳が増えるように形成される。

能動ファイバと受動ファイバの接続を整合して信号の完全性を改善するには、コア／クラッドの同心性の向上と、融着接続損失を減らすためのコア直径とNAによるモード場直径（MFD）の最適化が必要になる。このことは関連するすべてのファイバの仕様を厳密化することで可能になる。

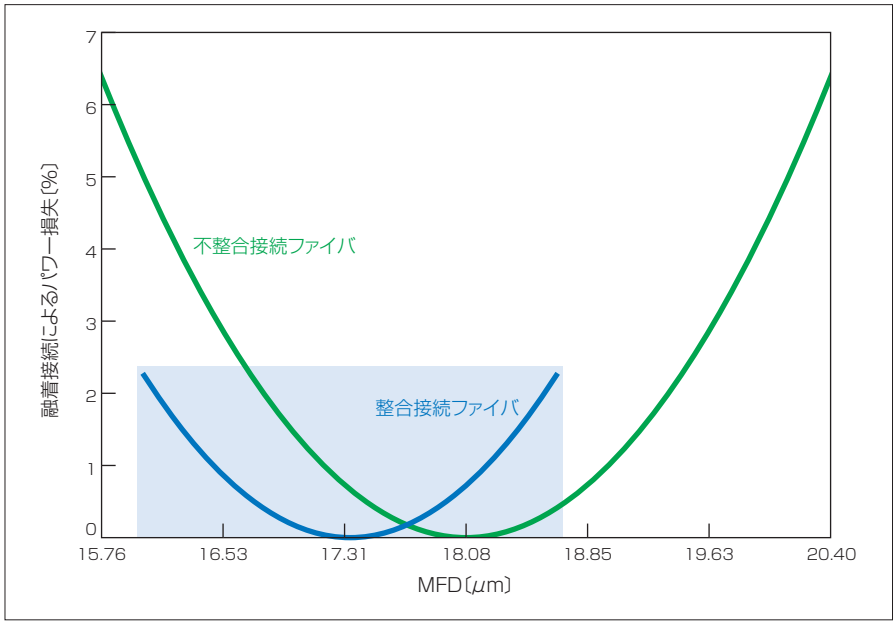


**図3**　MDDに対する融着接続の相対損失依存性を示している。

ポンプ光の結合を改善するためのファイバの整合接続は、受動ファイバと能動ファイバのクラッド直径の最適化が必要になる。能動ファイバに結合するポンプパワー量を最大化するために、能動ファイバはそのクラッド直径がポンプパワーを供給する受動ファイバよりもわずかに大きくなるように設計される。その1例として、395μmのクラッド直径をもつ受動ファイバと400μmのクラッド直径をもつ八角形状の能動ファイバを融着接続して能動ファイバへの結合を改善した例を示す（**図2**）。受動ファイバは能動ファイバとの接続点においてクラッド直径が増加していることに注目して欲しい。

能動ファイバと受動ファイバの整合接続はいくつかの方法で最適化される。最初の方法はそれぞれのファイバのNAとコア直径を等しくして信号伝送光を整合した。しかし、この方法は屈折率分布形状をまったく考慮しなかった。MFDを整合してファイバの信号伝送を整合する方法も利用された。

われわれは3つの部品、つまり能動ファイバ、受動ファイバ、ファイバ部品のすべてを整合接続し、それらの組み合わせを最適化して、高出力の増幅器とレーザを構成する方法を開発した。この方法は基本的にMFDのモデリングを行い、得られたNAとコア直径を目標にしてファイバを製作する。まず、コアロッドを作り、そのコア直径とNA

を線引き前に検査する。屈折率分布を測定し、最終のコア／クラッド比を決定して、目標のMFDに合わせる。

この方法はプリフォームからファイバへの線引きを行う前に、高精度かつ容易に測定できるプリフォームの詳しい屈折率分布を利用する。モデリングから得られた接続損失（全出力に対する比率）とMFDとの関係を示す（**図3**）。この図はMFD仕様が大きい（15.76から20.4μm）、つまり整合接続しない場合は、厳しいMFD仕様で整合接続したファイバに比べて、MFD不整合による融着接続損失が大幅に大きくなることを証明している。網がけした領域はMFD仕様を非常に厳しく（16から18.5μm）して精密に整合接続した場合の接続損失の計算値を示している。

整合接続ファイバは、上述のパラメータばかりでなく、光学および幾何学パラメータも厳しく設定される。加工法を改良し、コアNAを厳しく制御して、コアの分光損失と曲げ損失を大幅に減少させた。これらのファイバのコア／クラッドオフセットを最小にすることで、能動ファイバと受動ファイバの融着接続は容易になり、再現性も向上した。さらに、クラッド直径と被覆直径の仕様を厳しく設定して変動を抑え、信頼性の高い製品が得られるようにした。

## 整合接続ファイバの試験と測定

十分に整合接続されたLMAファイバを得るには、正確な試験と測定および再現性に優れた製造プロセスが必要になる。工程のプロセス制御とフィードバック制御を行うには、NA、コアとクラッドの直径、コア／クラッドオフセット、MFDおよびコアとクラッドの損失を測定しなければならない。

われわれは大量生産に必要な再現性と歩留りの判定基準を満足するファイバだけを特別の整合ファイバとして販売している。これらのファイバは市販のベンチと自前の装置を使用して測定される。

**表1** ファイバ形状の自前のベンチと市販のベンチの比較

| パラメータ | ベンチAの1σ仕様 | ベンチAの1σ代表値 | 自前ベンチの1σ代表値 | ベンチBの1σ仕様 |
|---|---|---|---|---|
| コア直径 | 0.02 | 0.012 | 0.007 | 0.05 |
| コア離心率 | 0.5 | 0.203 | 0.038 | 1.00 |
| クラッド直径 | 0.01 | 0.004 | 0.002 | 0.05 |
| クラッド離心率 | 0.05 | 0.005 | 0.001 | 0.1 |
| コア／クラッドオフセット | 0.01 | 0.008 | 0.003 | 0.04 |

注）ベンチBの1σ代表値は入手できない。

コアとクラッドの分光損失は市販の計測装置を用いて測定される。LMAファイバのコアのバックグラウンド損失を効率よく測定するには、直径が約100mmのループからなる高次モードフィルタが必要になる。直径が100mm以上のループを使用すると、よじれた高次モードが発生する。小さい直径のループを使用すると、ファイバの基本モードにはマイクロベンディング損失が発生し、高い波長領域の測定雑音が増加する。

コアのバックグラウンド損失の測定にはクラッドモードの伝搬を効果的に除き、する工夫が必要になる。その1つの方法はファイバの両端の被覆を屈折率整合液に置き換えて、クラッドモードのパワーを取り除く。

ファイバを最適整合状態に制御するパワーメータはコアとクラッドの幾何学形状だが、とくにコア／クラッドオフセットが重要になる。能動ファイバと受動ファイバの最適な整合接続を行うには、広い範囲のファイバ直径を優れた再現性で測定できるファイバ形状用光学ベンチを使用しなければならない。

このような測定器を市販品で用意することは難しい。そこで、自前の光学ベンチを開発し、より大きいクラッドファイバ形状を再現性よく測定できるようにした。**表1**は自前のベンチと市販の2種類のベンチ（AとB）の標準偏差を示している。これらのベンチはいずれもコアとクラッドの直径、コアとクラッドの離心率およびコア／クラッドオフセットを測定できる。

設計した自前のベンチはHOTP-176のIEC標準に準拠した機能が得られる。この機能は能動ファイバと受動ファイバに最適な整合接続の再現性を確保できる。表の標準偏差が示すように、自前のベンチの再現性は市販のベンチよりも良好であった。

われわれは測定によるコア直径のばらつきが主として光源のモードパワー分布の変化から生じると考えている。コアの均一照明には角度を含めたモードパワー分布の空間均一性が必要になる。コアを不均一に照明すると、LMAファイバは少数モードによる伝搬が支配的になる。したがって、光源のNAが不安定で、コア照明が時間的に変動すると、ファイバコアのモードパワー分布は変化が起こる。その結果、コアの強度プロフィルが変化し、測定するコア直径の値が変化する。

われわれはコア直径の測定を安定化する1つの方法として、励振するNAとスポットサイズを固定することを考案した。そのために、ステップ形ファイバの端面を均一に照明し、照明した光が試験ファイバを伝搬するようにした。

自前のベンチには照明波長を短波長にする改良を加え、光源の波長を850nmから530nmに短くした。光源の波

長を短くすることで、コアはより多くのモードが励振され、コアのモードパワー分布と強度プロフィルが安定化され、コア形状の測定性能が改善された。これらの測定方法の改善によって、自前の測定器によるコア直径の標準偏差は市販の測定器の1.7分の1になった。

## 試験結果

**図4**の整合接続20/400LMAファイバを用いた2kW共ポンプMOPAファイバシステムのパワー効率曲線が示すように、整合接続ファイバによるレーザ性能の改善が実証された。図が示すように、励振ポンプパワーから出力信号パワーへのエネルギー変換効率は約89%であった。整合接続ファイバを使用しない同様のレーザシステムは高次モードが存在するため、融着接続損失は増加し、エネルギー変換効率は低下し、1kW以上の出力パワーレベルの単一モードビームを得ることはできない。

**図5**は図4の場合と同様のレーザの出力パワー強度マップを示している。ビーム出力とパワー密度の良好な対称性に注目してほしい。このレーザは1.1の$M^2$値が得られている。

現在は2kWのパワーレベルで動作する高出力二重クラッドファイバが市販されている。能動ファイバと受動ファイバを精密に整合接続したLMA二重クラッドが入手可能になり、損失の低減と光閉じ込めの増強によるレーザ性能の改善によって、良好なビーム品質が高い動作パワーで得られている。このような改善がファイバレーザ技術の可能性をさらに高め、高出力ファイバレーザの成長を可能にした。

これからも精密整合接続ファイバの改良は継続され、その用途は拡大し、10kW以上で動作するファイバレーザの利用が可能になるであろう。

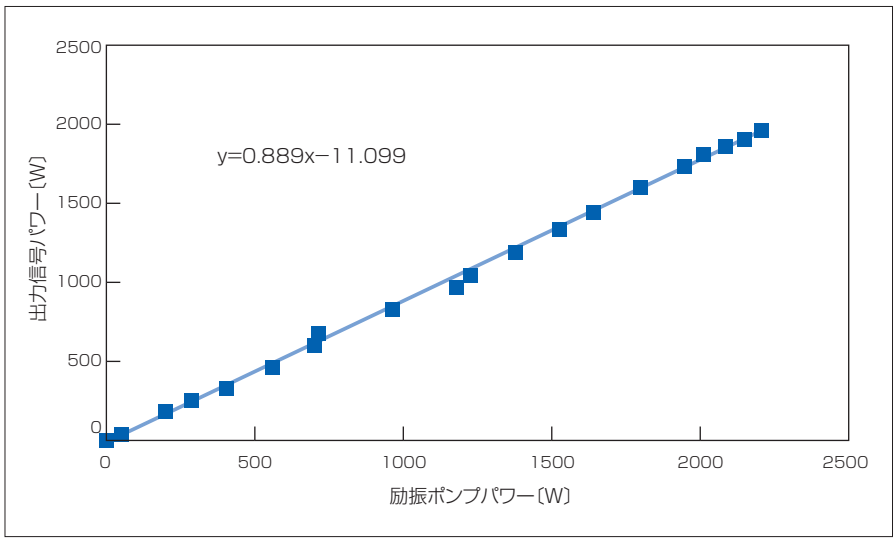


**図4**　整合接続したファイバによる2kW共ポンプMOPAのパワー結合効率を示している。

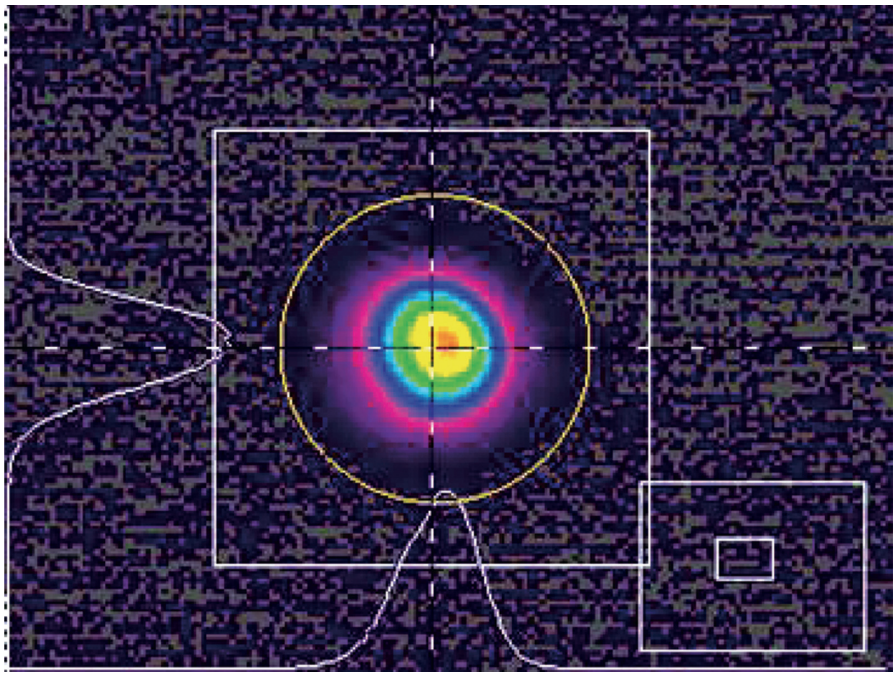

**図5**　共ポンプMOPAファイバレーザのパワー強度プロットを示している。このレーザは1.1の$M^2$値が得られている。


**参考文献**

(1) FOTP-176-IEC 60793-1-20 Optical Fibres Part 1-20: Measurement Methods and Test Procedures-Fibre Geometry（ANSI/TIA-455-176-A-2003）.

(2) FOTP-78-IEC 60793-1-40 Optical Fibres Part 1-40: Measurement Methods and Test Procedures-Attenuation（ANSI/TIA-455-78-B-2002）.



**著者紹介**

ジョージ・オーランドセン（George Oulundsen, PhD）は米ヌファン社（Nufern）のファイバ製品ラインマネージャ、ケヴィン・ファーリー（Kevin Farley, PhD）は同社の研究開発サイエンティスト、ジャロスロー・アブラムシャク（Jaroslaw Abramczyk）は同社のファイバ試験測定技術マネージャ、カンシーアン・ワイ（Kanxian Wei）は同社の上級研究開発サイエンティスト。e-mail: goulundsen@nufern.com; www.nufern.com.


LFWJ