

# 新しいレーザビームデリバリファイバ

ジェフ・ヘクト

細心の注意を要する手術から高出力レーザ加工装置まで、光ファイバは必要などころに光をデリバリする。新しいファイバは、ハイパワー超高速パルスを含む一段と要求の厳しい課題に対処可能である。

「光ファイバ伝送が私の命を救った」とある地質学者が数年前に話してくれた。光ファイバによって医師は、別の方法では不可能だった、細心の注意を要する頭蓋骨内の手術を行うことができた。その話の詳細は思い出せないが、生きていることの彼の喜びを今でも共有している。

光ファイバビームデリバリの結果が、それほど劇的なことはめったにない。したがって、その重要性は簡単に過小評価される。腹腔鏡手術から溶接までの作業はレーザビームの精密な動きを必要とする。以前は、歯科用ドリルに似た大きな多関節アームが必要だった。現在は、手術室では熟練した医師の手が柔軟な光ファイバを容易に、正確に操作できるようになっている。あるいは製造ラインでは、光ファイバはプログラムされたロボットアームによって操作される。新しいファイバ設計は、さらなる改善を約束するものである。

## パワーと柔軟性

ファイバビームデリバリは、1990年代に登場した。ファイバは、コア径が大きなステップインデクスマルチモードファイバで、連続波(CW)、ハイパワーダイオード、固体レーザからの光を産業アプリケーション向けにデリバリするものだった。ロボットアームは、加工対象全域にファイバ先端を動かすことができ、レーザと加工対象は固定のままでもよかった。ファイバビームデ

リバリは、ファイバレーザが産業用パワーレベルに達したときに、自然にファイバレーザに適合するものとなり、今では、キロワット範囲までのCW出力を利用する多くのアプリケーションで標準となっている<sup>(1)</sup>。

最も広く使われているビームデリバリファイバは、ピュアシリカで、コア径100 $\mu\text{m}$ 、NA 0.22程度、外径360 $\mu\text{m}$ である。ビームデリバリに広く用いられる他のファイバは、コア径が数 $\mu\text{m}$ から1mmのものがある。現在の課題は、厳しい要求に対処できる新しいファイバの開発である。これには、高いピークパワーの超高速パルス、デリバリビームを厳しい要求に適合できるように調整することが含まれる。

## フラットトップデリバリファイバ

SPIE フォトニクスウエスト2016で、米ヌーファン社(Nufern)のクレメンス・ジョイベ氏のチームが、モードをかき混ぜてシングルモードをフラットトップ出力ビームに変換する新しいタイプのファイバを発表した。コア径50、100、200 $\mu\text{m}$ のファイバでは、ビームパラメタ積2、4、8mm-mradのフラットトップ出力ビームとなった<sup>(2)</sup>。

図1は、フラットトップファイバを示している。その100 $\mu\text{m}$ シリカコアは、未知のモードミキシング要素を含んでおり、より低い屈折率、フッ素ドーパ層およびピュアシリカクラッドで囲まれている。モードミキシング要素を加

えることで、ファイバの減衰がわずかにピュアシリカを上回っていたかも知れないが、損失は750~1330nmの範囲で5dB/km以下であり、ピュアシリカコアファイバのロットごとの変動幅に収まっていた。ファイバは、ファイバに入力されるシングルモードレーザ出力をBPP 3.8mm-mradのフラットトップビームに変換することができた。標準ビームデリバリを同じ光源に結合したとき、出力はBPP 2.6mm-mradだった(図2)。フラットトップファイバは、マルチモードレーザ光源のビームプロファイルも滑らかにした。

ヌーファン社のジェフ・ヴォトキヴィ氏(Jeff Wojtkiewicz)は同社がフラットトップファイバを「新技術として提供しており、まだ標準製品としてではない」と話している。

## 中空フォトニック結晶ファイバ

CWビームでは効果があるソリッドコアシリカファイバは、高いピークパワーの超高速パルスのデリバリにはあまり適合していない。シリカは、光学損傷が起りがちで、高い色分散があり、強い非線形性の影響を受ける。

代替の1つに、反射が大きくなるように内部に金属被覆した中空ガラスキャピラリを使ったビームデリバリがある。実際にフェムト秒パルス伝送が行われたが、中空が曲げ損失の影響を受けやすく、可視や近赤外アプリケーションには厳しいことが判明した<sup>(3)</sup>。

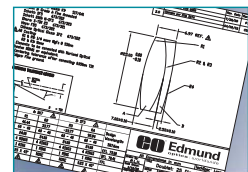
# 在庫品と特注品の オプティクス

設計から試作、  
そして大量生産まで



Craig Ament

光学コーティングエンジニア  
米国本社



完全な設計データを公開



在庫品のパーツを用いて  
試作品を素早く構築



特注の組み立てにも対応する  
垂直統合された製造資源

あなたのアプリケーションを  
ご相談ください！

**Edmund**  
optics | japan

エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社

〒113-0021 東京都文京区本駒込2-29-24

パシフィックスクエア千石 4F

TEL: 03-3944-6210 FAX: 03-3944-6211 | [www.edmundoptics.jp](http://www.edmundoptics.jp)

[www.edmundoptics.jp/manufacturing](http://www.edmundoptics.jp/manufacturing)

一般的なマルチモードファイバ

特殊マルチモード設計

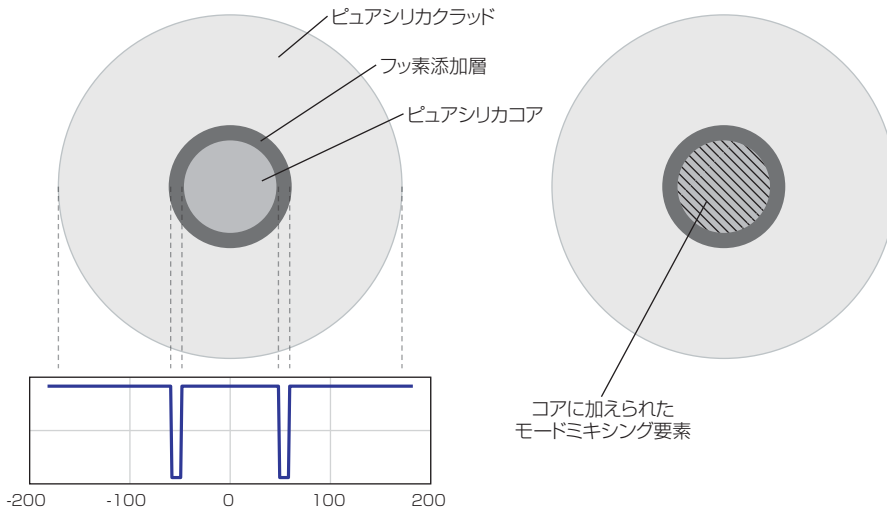


図1 フラットトップビームデリバリファイバの構造(提供: ヌーフアン社<sup>(2)</sup>)。

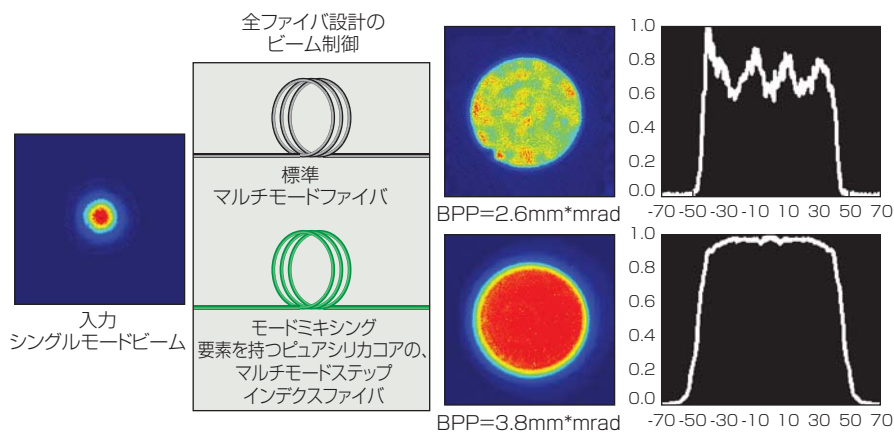


図2 シングルモードレーザー光源の出力、上方の標準デリバリファイバを通った後と下方のフラットトップファイバを通った後の比較。ビーム均一性の著しい違いに注目(提供: ヌーフアン社<sup>(2)</sup>)。

もう1つの代替は、中空フォトニック結晶ファイバのコアに沿って光を導波するフォトニックバンドギャップの利用である。2005年の実験では、記録的な低減衰1.7dB/kmを達成した<sup>(4)</sup>。しかし、1%程度のコア導波モードがクラッドと重畳しており、閾値をレーザー誘起損傷まで下げることになるので、強力な超高速パルスでの利用は制限される。

中空フォトニックバンドギャップファイバ(HC-PBGF)の開発は継続している。潜在的な低損失に加え、HC-PBGF

は曲げ耐性が優れており、コアで偏波と単一横モードを維持することができる。デンマークのNKTフォトニクス社(NKT Photonics)のマチアス・ミキレット氏のチームが開発した新タイプは、コア壁を構造化して反共振にしており、コアの導波モードは一定の波長で行われる<sup>(5)</sup>。7個の非接触チューブを含むファイバが、高次モードの抑圧と低閉じ込めおよび低曲げ損失の最良の組み合わせとなることが確認されており、1090nmで30dB/kmの減衰だった。製造には一層の研究が必要である

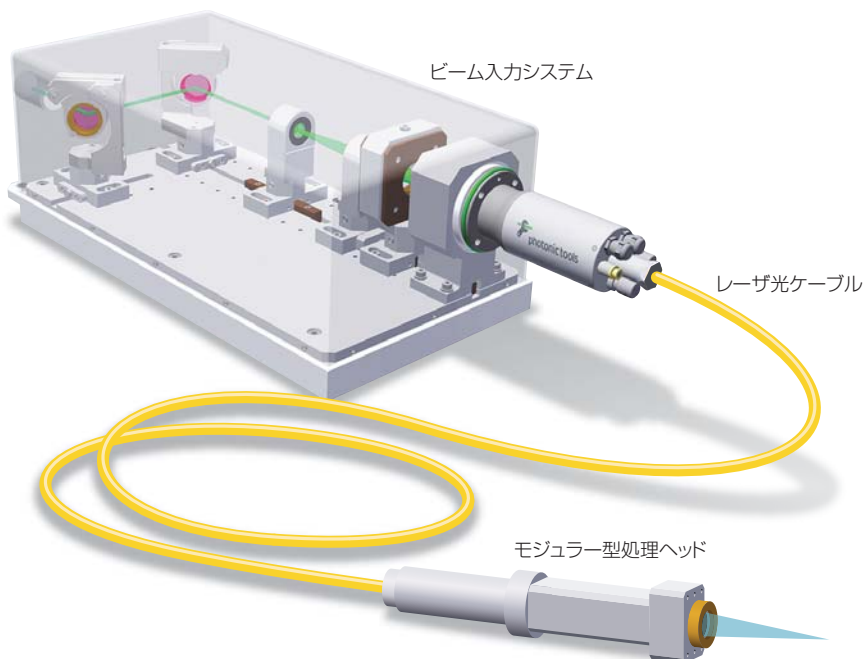


図3 このビームデリバリシステムでは、入射レーザーパルスはビーム入力システムとコネクタによってファイバに結合され、10mまでのファイバで伝送される(提供:PT フォトニックツールズ社)。

と言うことであり、将来的にはそのファイバは100Wを上回る平均パワーを10km以上伝送できるようになる。

フォトニクスウエスト2016では、他にも、中空フォトニッククリスタルファイバで心強い成果が報告されていた。独PTフォトニックツールズ社のビョロン・ヴェーデル氏とマックス・フंक氏は、マイクロストラクチャ中空コアファイバについて説明している。このファイバは数100mJのエネルギー、平均パワー数100Wの超高速パルスで、優れたビーム品質を維持した。伝送効率は、3~5mケーブルで90%を上回った。数ps/km/nmの分散は、フェムト秒パルスのデリバリを可能にするものであった。

「ファイバをシステムにパッケージした完璧なビームデリバリシステムを当社は提供する」とヴェーデル氏は話している。入力レーザーパルスは、ビーム入力システムとコネクタによってファイバに結合され(図3)、ユーザーの要求を満たすように選択した10mまでの

ファイバで伝送される。ファイバはシングルモードパルスをデリバリできる。入力パルスは、先端のモジュラー型処理ヘッドが所望のビームプロファイルに成形する。ヘッドには、必要なら周波数通倍オプティクスを入れることもできる。

### カゴメファイバ

特徴的なタイリングパターン(図4)

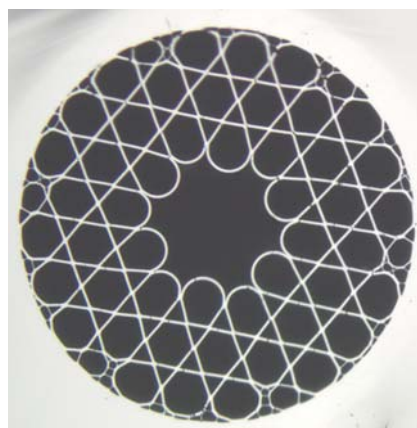


図4 ビームデリバリに使用されるカゴメファイバのクラッド(提供:トルンプ社<sup>(7)</sup>)。

を形成する中空セルリングが特に注意を引くことから、マイクロストラクチャは「カゴメ」と呼ばれている。通常の中空コアフォトニック結晶ファイバとの重要な違いは、カゴメファイバの内壁がファイバ中央に曲がり込んでいる点。ファイバ中央から遠ざかるようにはなっていない。これによって、ファイバの光導波が変わり、抑制された結合機構になり、コアモードのクラッドへの重畳が0.01%に減少する、またファイバは広いスペクトル範囲に対応するようになる。ガスを充填したカゴメファイバはパルスをデリバリするとともにパルスを圧縮することもできる。これは、860fs、1030nmパルスを48fsに圧縮したスイス連邦工科大チューリヒ校の実験で実証されている<sup>(6)</sup>。

カゴメファイバは低損失に、またレーザー損傷に対して脆弱性を低くできる。2013年、仏XLIM研究所の研究者は、19セルのハイポサイクロイドカゴメファイバを作製し、1064nmで17dB/kmの記録的な低損失を達成した<sup>(3)</sup>。そうした特性は、超高速レーザーパルスデリバリには極めて魅力的であると研究者たちは考えている。

リモージュのグループは、トルンプレーザー社(Trumpf Laser)のセバスチャン・プリッキング氏、および同社の人々と協働して、1030nmシングルモードサブピコ秒パルスを空気充填ハイポサイクロイドカゴメファイバで伝送した。フォトニクスウエスト2015で、同グループは損失20dB/km、 $M^2$ パラメータ1.15で80%の伝送効率を報告した。フォトニクスウエスト2016では、プリッキング氏のグループはレーザーヘッドにモードマッチングおよび結合オプティクスを組込み、LLK-Dコネクタによるファイバ結合、特許となっているフレキシブルホース内へのファイバの気密封止を



報告。パルス伝送では、5mのファイバで、500mJ、平均パワー最大150Wを報告した。ファイバ長によるが、全般的な効率率は85%を上回り、ビーム品質は $M^2 < 1.3$ を達成した。恐らく最も素晴らしいことは、アクティブビーム操作なしで数週間におよぶ動作で堅牢なファイバ結合を維持したことである<sup>(8)</sup>。

リモージュグループからのスピノフである、仏GLOフォトニクス社(GLO photonics)は、カゴメファイバ(抑制結合ガイド)とバンドギャップガイド中空フォトニック結晶ファイバの両方を製造している。同社の標準製品には、7セル中空フォトニック結晶ファイバ、1、7、19セルカゴメファイバがあり、1030nm伝送用に設計された7セルファイバの減衰波50dB/kmである。XLIMのグループ長であるフェタ・ベナビッド氏(Fatah Belnabid)、GLO photonics顧問は、Laser Focus World 2014年9月号で開発成果を詳細に説明している<sup>(9)</sup>。

## 他の帯域のビームデリバリ

カゴメファイバはテラヘルツ周波数でも実証されている。ここでのファイバ減衰は、材料損失を優に下回る<sup>(10)</sup>。

内部が金属・誘電体構造の中空ガラスキャピラリは、シリカの伝送範囲を超える赤外波長を伝送できる。米ポリマイクロ・テクノロジーズ社は、500~1000 $\mu\text{m}$ 口径キャピラリ内部を銀とヨウ化銀層でコーティングし、従来の手術および腹腔鏡手術向け10 $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub>ビーム伝送に最適化している。2.94 $\mu\text{m}$ エルビウム・YAGレーザライン向けに、また手術用途でも様々な中空ファイバを販売している。生体適合ジャケットは、侵襲手術用の消毒に耐えられる。

シングルモード口径の40倍程度でCO<sub>2</sub>帯域およびそれ以上の波長のシングルモード伝送が可能である。現在、

伊バリー大のアンジェロ・サンパオログループは、200 $\mu\text{m}$ 口径、最大50cm長のフレキシブル中空導波路を通して5.11~10.5 $\mu\text{m}$ のシングルモード伝送を実証した<sup>(11)</sup>。それは、量子カスケードレーザ(QCL)のかなりの領域をカバーするようになる。

他の新展開がソリッドコアファイバで試みられている。英サザンプトン大(University of Southampton)のジャヤンタ・サフ教授のグループは、コアの周囲に細い低屈折率の「溝」(トレンチ)をたくさん持つ新しいタイプのファイバを研究している。用途は可視光と近紫外で、マルチトレンチファイバが改良化学気相成長法(CVD)で製造できることが重要な利点になっている。それにより、この種のファイバは量産に適している。このファイバは、高次モードを強力に減衰させるので、10 $\mu\text{m}$ の大きな実効面積で405nmの効果的なシングルモード伝送が可能になる。その著者たちによると、マルチトレンチファ

イバの大きな利点は、それらがフォトニック結晶ファイバと比較してスプライスや加工が容易であること。

## 展望

ファイバビームデリバリは、多くのアプリケーションにとって重要な利益を提供する。大きな課題はその能力を広げること、特に伸び続ける超高速パルスアプリケーションの領域に拡大することである。このアプリケーションは、ピーク強度が高いため、デリバリファイバに一段と大きな試練を課すことになる。新しいファイバは特殊ビームプロファイルデリバリを目的として開発されており、われわれは特殊化が進んでいることも知っている。医療アプリケーションは、生体適合ビームデリバリシステム実現のためにパッケージングで一層のイノベーションを必要としている。したがって、今度誰かがファイバオプティクスが命を救ってくれたと言っても驚かないだろう。

## 参考文献

- (1) B. Wedel and M. Funck, "Industrial fiber beam delivery enhances ultrafast laser machining," *Industrial Laser Solutions*, 31, 1, 28-30 (Jan/Feb 2016).
- (2) C. Jollivet et al., "Specialty flat-top beam delivery fibers with controlled beam parameter product," *Proc. SPIE, 9727, Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XVIII*, 97270T (Mar. 8, 2016); doi:10.1117/12.2209348.
- (3) B. Debord et al., *Opt. Express*, 21, 23, 28597 (Nov. 18, 2013); doi:10.1364/oe.21.028597.
- (4) P. J. Roberts et al., *Opt. Express*, 13, 1, 236-244 (2005).
- (5) M. Michieletto et al., "High-power picosecond pulse delivery through hollow core photonic band gap fibers," *Proc. SPIE, 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*, 97282Z (Mar. 11, 2016); doi:10.1117/12.2211324.
- (6) F. Emaury et al., *Opt. Express*, 21, 4, 4986-4994 (2013); doi:10.1364/oe.21.004986.
- (7) S. Pricking et al., "Hollow core fiber delivery of sub-ps pulses from a TruMicro 5000 Femto edition thin disk amplifier," *Proc. SPIE, 9356, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications IV*, 935602 (Mar. 9, 2015); doi:10.1117/12.2079289.
- (8) S. Pricking et al., "Industrial grade fiber-coupled laser systems delivering ultrashort high-power pulses for micromachining," *Proc. SPIE, 9741, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*, 974109 (Mar. 18, 2016); doi:10.1117/12.2213356.
- (9) F. Benabid et al., "Kagome PC fiber goes to extremes in ultrashort-pulse lasers," *Laser Focus World*, 50, 9, 29-34 (Sep. 2014).
- (10) J. Anthony et al., "Air-core microstructured fibers provide low-loss, broadband terahertz guidance," *Laser Focus World*, 48, 3 (Mar. 2012).
- (11) A. Sampaolo et al., *Opt. Express*, 23, 1, 195-204 (2015); doi:10.1364/oe.23.000195.
- (12) D. Jain et al., *Opt. Lett.*, 40, 5026 (Nov. 1, 2015).