

パワー伝送用矩形コアファイバの開発

小西一昌*・蟹江智彦・高橋健一郎
 島川修・水戸瀬雄一・佐々木隆
 樽稔樹・永島拓志・布施敬司
 井上享

Development of Rectangular Core Optical Fiber Cable for High Power Laser — by Kazuhisa Konishi, Tomohiko Kanie, Kenichirou Takahashi, Osamu Shimakawa, Yuuichi Mitose, Takashi Sasaki, Toshiki Taru, Takuji Nagashima, Keiji Fuse and Akira Inoue — Laser scribing is a commonly used process for manufacturing thin film solar cells. The quality and efficiency of the scribing process can be improved by the use of rectangular flat-top beams. The rectangular flat-top beams are easily formed by rectangular core optical fiber. Thus the rectangular core optical fiber gives scribing systems great flexibility.

In this study, the authors developed a rectangular core optical fiber, and examined its characteristics. The results demonstrated that the developed optical fiber was capable of forming rectangular flat-top beams that showed a sufficient uniform intensity distribution. This paper also includes the result of investigation about factors affecting uniform intensity distribution profiles.

Keywords: rectangular core optical fiber cable, flat-top beam, laser scribe, thin film solar cell

1. 緒言

近年、地球温暖化対策として、CO₂排出量削減への取り組みが各分野で活発になされており、なかでも太陽電池は、再生可能エネルギーとして急激な拡がりを見せている。特に大規模太陽光発電システムでの利用が見込まれるシリコン系薄膜型太陽電池は、全世界で大幅な増産が計画されている⁽¹⁾。

シリコン系薄膜型太陽電池は図1に示すようにベースのガラス基板上に透明電極 (TCO膜)、発電層 (シリコン膜)、裏面電極 (メタル膜) が積層された構造となっている。さらにこの積層されたパネルは複数のセルに分割され、各セルが直列に接続された構造をとっており、この構造を形成するためには、各層を選択的に切断 (スクライブ) する必要がある。このスクライブプロセスにおいてレーザー加工が採用されており、各層ごとに吸収率の高い波長のレーザーを使うことで、選択的なスクライブ加工が可能となっている。

このスクライブ加工では、通常のレーザービームをレンズ

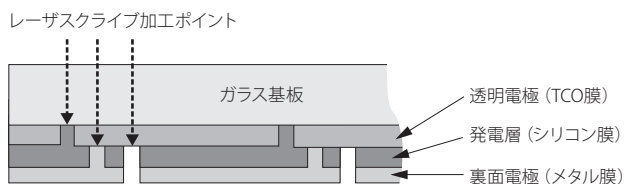


図1 シリコン系薄膜型太陽電池の断面構造

で集光すると図2に示すようにスポット中心部でエネルギー密度が高くなり (ガウシアンビーム)、他の層にダメージを与える結果となる。またスクライブ加工は、パルスビームを高速にスキャンすることでライン形状を形成しており、円形スポット形状より矩形スポット形状の方がビームのオーバーラップを低減できるため加工速度を上げることができる。

このように矩形均一強度ビームを用いることで、効率的な加工を実現している。

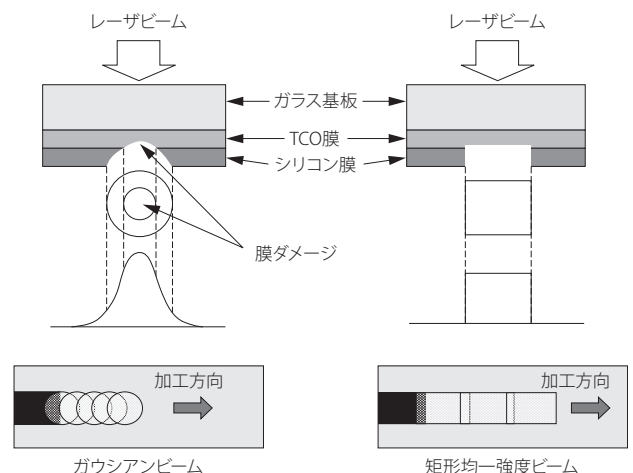


図2 薄膜型太陽電池のレーザースクライブ加工

矩形均一強度ビームの形成には、様々なホモジナイズ光学系が提案されている^{(2),(3)}。その中でも矩形コアファイバは、容易に矩形均一強度ビームが形成でき、また伝送のフレキシブルさは、大面積薄膜型太陽電池などの加工ヘッドを高速に移動させることが必要なシステムでは有効である。今回、レーザスクライブ加工システム向けに開発したパワー伝送用矩形コアファイバについて、その特性を報告する。

2. 矩形コアファイバの透過特性

2-1 透過特性（伝送損失） 開発したパワー伝送用矩形コアファイバは、高出力レーザビームに対して信頼性の高い全石英とし、スクライブ加工の幅にあわせ、各種矩形コア形状をラインナップしている。その断面写真の例を写真1に示す。

また、各種レーザ光源に対応するため、異なるファイバNAのタイプも用意している。表1にYAG基本波（波長1064nm）レーザでの各種ファイバの伝送損失を示す。ファイバ内の伝送損失は0.1dB/10m以下で、実際の加工システムで使用される10m～20m程度のファイバ長においては、レーザパワーロスは、ほぼ入射結合時のロスとファイバ端面での反射ロスとなる。入射ビームの結合が十分な場合、透過率は94%レベルである。

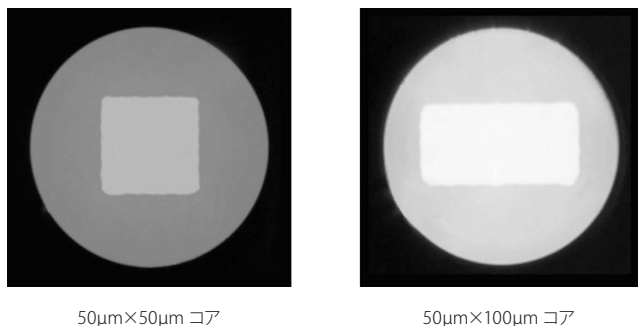


写真1 矩形コアファイバ断面

表1 全石英矩形コアファイバ伝送損失

アスペクト比	コア形状 (μm)	NA	伝送損失 (dB/10m)
1 : 1	35 × 35	0.10	0.1以下
	50 × 50	0.10	
	50 × 50	0.18	
	480 × 480	0.15	
	600 × 600	0.10	
	600 × 600	0.15	
1 : 2	35 × 70	0.18	
	50 × 100	0.10	

2-2 曲げ損失特性 一般的にマルチモードファイバの曲げ損失は、ファイバのNAが大きい方が曲げに対する損失は少なく、同じNAのファイバではコア形状の小さいファイバの方が損失は少なくなる⁽⁴⁾。図3に今回製作した矩形コアファイバの曲げ損失特性の一例を示す。実際の加工システムでの最小曲げ曲率は、使用するファイバの曲げ強度とともに、この曲げ損失特性を考慮して決定する必要がある。

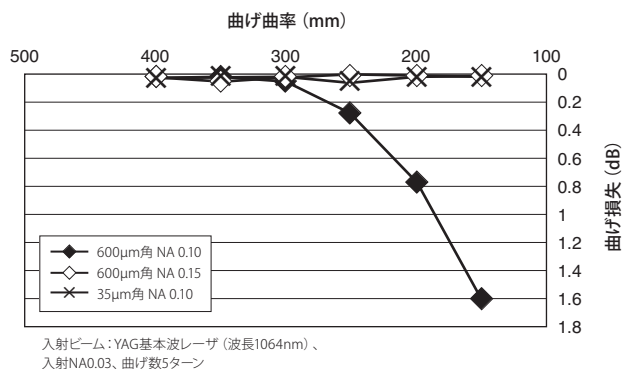


図3 矩形コアファイバの曲げ損失特性

3. 出射特性（FFP：ファーフールドパターン）

出射ビームの拡がり（出射NA）は、転写結像レンズの大きさを決定する要因であり、できるだけ小さい方が好ましく、特にヘッドを高速に移動させるシステムでは極めて重要になってくる。50μm角コアファイバ（ファイバ長10m）でファイバNA0.10および0.18の2種類について、入射ビームのNAの変化に対する出射NAを図4に示す。

入射ビームはYAG基本波（波長1064nm）のシングルモードレーザを用い、出射NAの測定は、NAが十分小さいとき $NA = \sin \theta \approx \tan \theta \approx r/L$ （ここでrはファイバ端からL離れた位置でのビームの半径）となり、ファイバ端

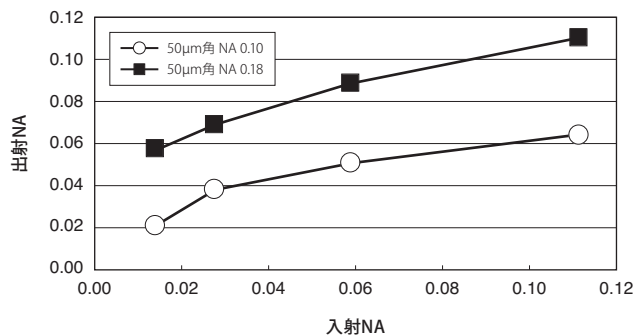


図4 出射NAの入射NA依存性

から任意の距離でのビーム径を測定することで算出した。なおビーム径はエネルギーの95%の範囲とした。

レーザ加工用ファイバは全長10~20m程度と短いのので、出射NAはファイバNAとはならず、入射NAがある程度保存される。またファイバNAが大きいかほど出射NAは大きくなる傾向を示すことが分かる。

4. 結像パターン (NFP:ニアフィールドパターン)

4-1 マルチモードビームによる結像パターン
50 μ m角コア、及び600 μ m角コアファイバを用いて、図5に示すプロファイルのYAG基本波(波長1064nm)マルチモードビームを入射させ、ファイバ出射端の結像パターンを測定した。

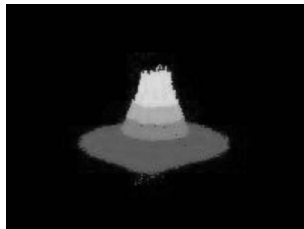


図5 マルチモード入射ビームプロファイル

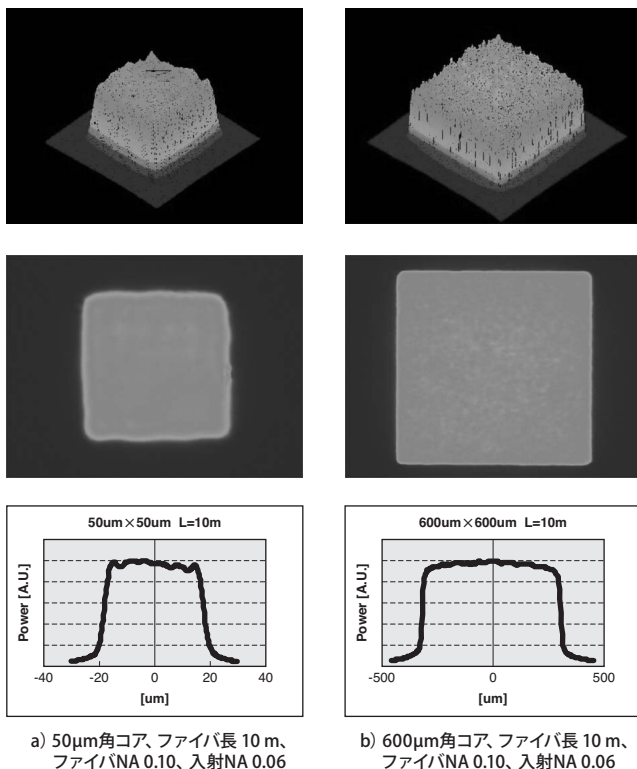


図6 マルチモードビーム入射時の結像パターン

図6に示す通り、何れの矩形コアファイバも十分な矩形均一強度分布の結像パターンが得られており、矩形均一強度分布形成に有効であることを確認した。

4-2 ファイバ品種の違いによる結像パターン
矩形コアファイバはビームを重ね合わせる原理で、均一強度分布を形成するため、入射するレーザビームの干渉性が低いマルチモードビームほど均一強度ビームが形成されやすい。このためより多くのモードが発生伝播(励振)しやすいことが重要となる。励振しやすさについて、ファイバの各種仕様や入射ビームのNAが及ぼす影響を示すために測定した各種結像パターンを図7に示す。なお影響を明確にするため、YAG基本波(波長1064nm)ガウスモードビームを評価光源として使用した。

まずファイバNAの違いによる差について、50 μ m角コア、ファイバ長10mのファイバにNA0.03でビームを入射させた場合で、異なるファイバNAでの結像パターンを図7のa)、b)に示す。ファイバがNA0.10では入射ビームのモードが主として励振されているのに対し、NA0.18では他のモードの励振が増えているのが分かる。

次にファイバ長を50mと長くした場合(図7のc))は、さらに多くのモードの励振が見られ均一性が向上していることが分かる。また同じファイバでも図7のb)、d)

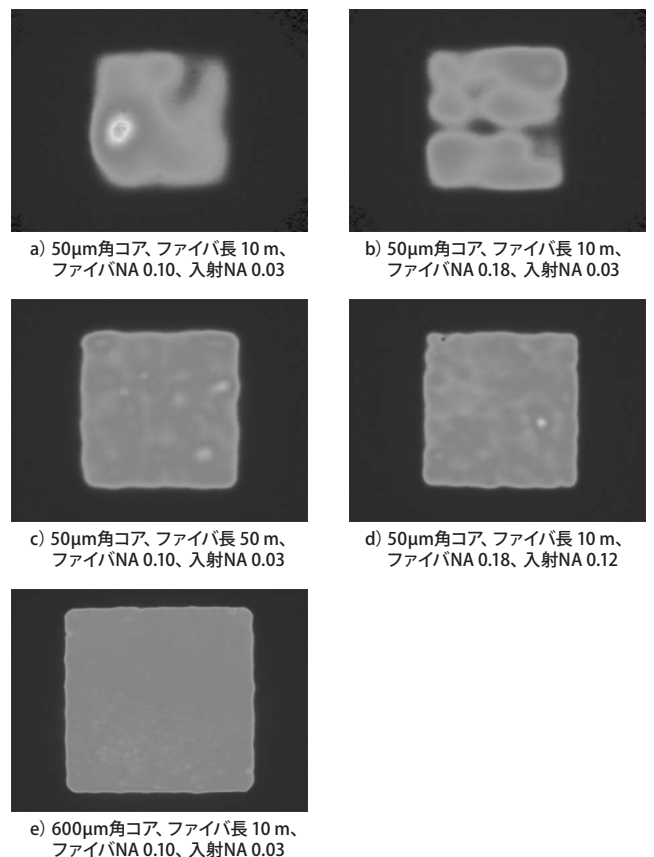


図7 ガウスモードビーム入射時の結像パターン

の結像パターンからわかるように、入射するビームのNAを0.03から0.12に大きくすると多くのモードの励振が見られ均一性の向上が認められる。

さらにコア形状を大きくした場合、**図7のe)**に示す通り600 μ m角コアではより多くのモードの励振が可能となり、マルチモードビームを入射させた場合とほぼ同レベルの均一強度が得られていることが分かる。

5. 耐久性

ファイバ保護としてSUSフレキシ管を用い、入射アライメント時の損傷を避けるためエアギャップタイプのコネクタを実装したファイバについて、各種耐久性を評価した結果を**表2**にまとめる。

特にファイバの曲げが繰り返し発生する実際の加工システムでも十分な耐久性があると判断される。

表2 矩形コアファイバ耐久性試験結果

項目	条件	結果
繰り返し曲げ (ケーブルベア試験)	R = 150mm (1ターン) 1000万回	異常なし
引っ張り強度試験	50N	異常なし
ヒートサイクル試験	5~60℃ 6hrs/cyc × 10cyc	異常なし

6. 結 言

薄膜型太陽電池スクライプ加工システム向けに開発した矩形コアファイバで、矩形均一強度ビームが形成可能であることを示すとともに、各種ファイバの仕様や入射条件が矩形均一強度分布形成に及ぼす影響について示した。

均一強度ビームを得るためには、より多くの高次モードを励振させることが重要で、光源として干渉性の低いマルチモードビームが有効である。

一方、微細な形状加工の場合は、干渉性の高いシングルモードのレーザ光源を選択する機会が多いが、その場合は当社で既に製品化しているDOE (Diffractive Optical Element) ホモジナイザ⁽⁵⁾の使用をお奨めする。

参 考 文 献

- (1) 近藤道雄、「太陽光発電の現状と将来」、レーザ加工学会誌、Vol.15、No.2、pp.1-5 (2008)
- (2) 岩間誠司、「固体レーザによる薄膜太陽電池のパターニング加工」、レーザ加工学会誌、Vol.15、No.2、pp.16-20 (2008)
- (3) 空田和彦、「太陽電池製造プロセスにおけるレーザ加工」、レーザ協会誌、Vol.33、No.1、pp.26-31 (2008)
- (4) Allan W. Snyder and John D. Love, Optical Waveguide Theory
- (5) 平井隆之、布施敬司、栗巢賢一、江畑恵司、「回折型ビームホモジナイザの開発」、SEIテクニカルレビュー、第166号、pp.13-18 (2005年3月)

執 筆 者

小西 一昌*：光通信研究所 光部品研究部 主席
パワー伝送用光ファイバの開発に従事



蟹江 智彦：光通信研究所 光部品研究部 グループ長
高橋健一郎：光通信研究所 光部品研究部 主席
島川 修：光通信研究所 光部品研究部 主査
水戸瀬雄一：光通信研究所 光部品研究部
佐々木 隆：光通信研究所 光材料機能応用研究部 グループ長
樽 稔樹：光通信研究所 光材料機能応用研究部 主査
永島 拓志：光通信研究所 光材料機能応用研究部
布施 敬司：住友電工ハードメタル(株) 光学部品開発部 主席
井上 享：光通信研究所 光部品研究部 部長

*主執筆者