

ファイバ曲げ特性の 3 次元 BPM 解析(Fiber3D)

1. はじめに

当社ではApollo社の階層的集積回路シミュレータ APSS [1],[2]の販売、技術サポート、シミュレーションの請負などを行なっている。同時に、Fiber のモード解析に特化した FiberDesigner[3]を開発しホーリーファイバなど回転対象を利用した極座標系では取り扱うことのできない問題解決に取り組んでいる。FiberDesigner では閉じ込め損失の曲率半径依存を求めることができるので曲げファイバ設計のガイドラインを得ることができる[4]。

近年、ファイバを曲げたときの伝搬解析ができないかとのお問い合わせが複数社からあり、FiberDesigner の構造定義を用いて BPM 解析ができる Fiber3D を開発した。本特集では、Fiber3D を(1)シングルモードファイバ(SMF)、(2)3重リング構造のホーリーファイバ(RING3)、(3)フジクラより発表された曲げに強い溝付き SMF (TI-SMF) [5],[6]に適用した結果を示す。これらの解析より、伝搬過程において曲がりファイバ中のフィールド分布を可視化することができるため理解を深めることができると共に、より定量的に損失特性を評価することが可能となった。

2. ファイバの 3 次元伝搬解析

PC の資源を有効に利用するためにシリンダカル BPM による 3 次元解析を行なった。FiberDesigner などのモード解析では常套手段となっている手法により、等角写像を用いて曲げ半径に応じた屈折率分布とすることで直線問題に置き直し、この直線導波路の伝搬解析として単純化した。BPM そのものは近軸近似手法であるが、高次の Pade 近似まで選択できる機能により広角性[7]を考慮した。境界条件に関しては、既の実績を有する PML 境界条件[8]を採用し、有限差分(FD)BPM を用いた。数値解析に関する手法は APSS で培ったノウハウを反映した。

曲げ構造について、図 1 に示した。直線 AB から半径 R の円弧に入る領域 BC にはクロソイド曲線(Clothoid curve)を用いた。クロソイド曲線は車の速度を一定としてハンドルを一定の角速度で回した時に車が描く軌跡であり、高速道路のインターチェンジの設計に用いられるカーブである。曲率半径 R とクロソイド曲線長 CL (曲線 BC の長さ)が反比例し、

$$R \times CL = const^2$$

と表される。ここで *const* は定数である。点 C において半径 R の円を点 D,E,F を経て一周した後、曲線 CG は曲率 R から ∞ となるクロソイド曲線で、GH は直線である。ここで紹介する計算では直線長(直線 AB および直線 GH)は 2mm、クロソイド曲線長 BC および CG は R とした。

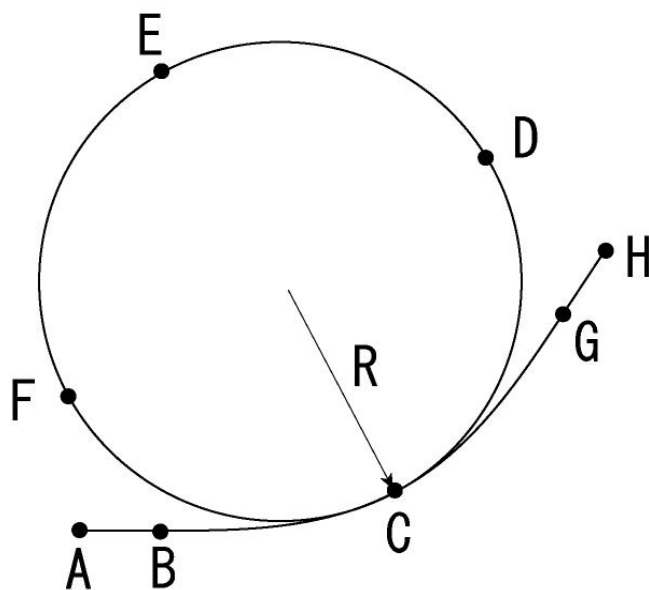


図1. 解析で用いたファイバ曲げ構造

3. 解析結果

(1) シングルモードファイバ(SMF)

最初に SMF の計算結果を図2に記す。今回の計算では、以下の全ての場合 Pade 次数は1次とした。

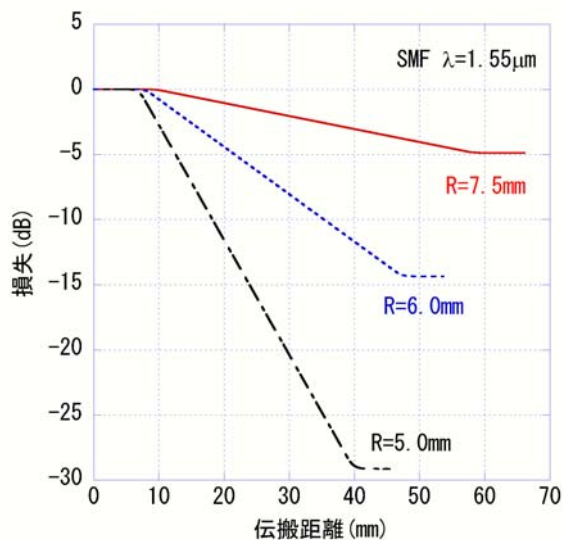


図2. SMF の曲げ特性計算結果

図2は横軸が図1の構造での光が伝搬する距離で、縦軸が損失である。パラメータは曲率 7.5mm, 6.0mm, 5.0mm である。既によく知られているように SMF は曲げ損失が大きいこと、 $R=7.5\text{mm}$ で一巻きした状態で 5dB 弱の損失が加わることがわかる。更に曲率が小さくなると急激に曲げ損失が増加することが理解できる。図3に $R=6\text{mm}$ でのクロソイド曲線に入る点 B と1周回って、クロソイド曲線から直線に移行する点 G でのフィールド分布を示す。図2でのロスを図3ではビーム明るさが暗くなることとして直感的に理解することができる。

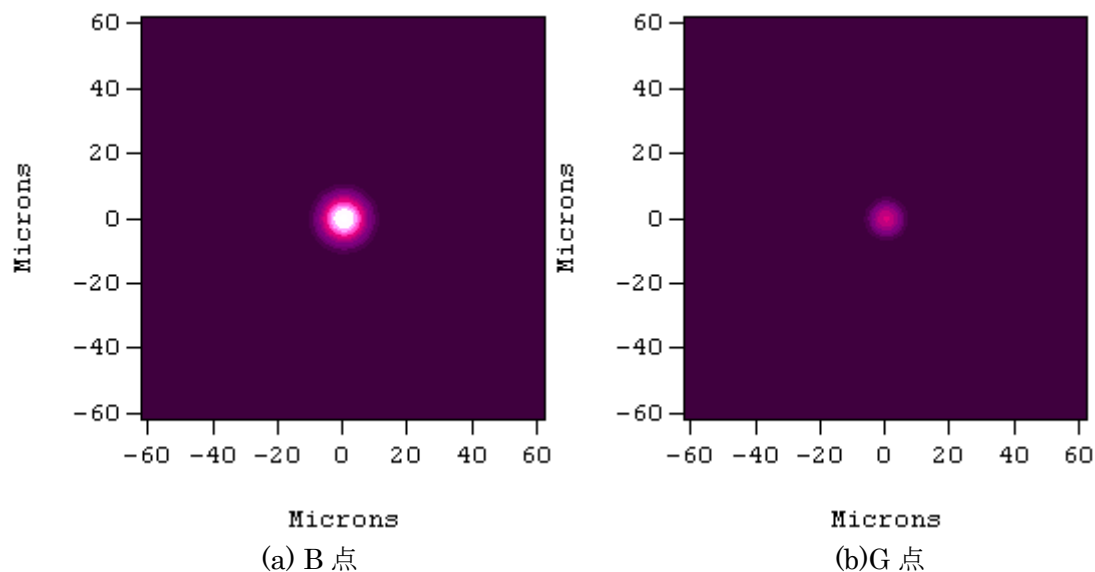


図3. $R=6\text{mm}$ の構造でのフィールド分布

(2) 3重リング構造のホーリーファイバ(RING3)

曲げ特性が優れているので FTTH 構想を具体化するためにホーリーファイバが注目されている。このファイバは図4に示すように空孔を意図的に導入したものである。本特集の計算では、空孔の直径 $d=1.15\mu\text{m}$ 、ピッチ $\Lambda=2.3\mu\text{m}$ の構造で行なった。

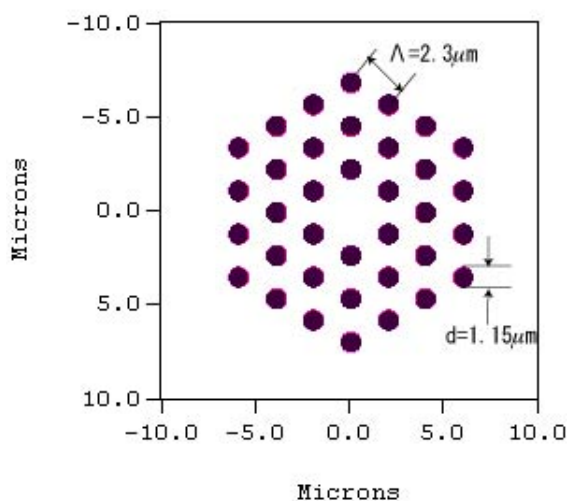


図4. 3重リング構造(RING3)ホーリーファイバの断面図
(黒く見える部分が空孔、バックグラウンド部分がクラッド)

このようなホーリーファイバでは、空孔が無い中心部分が実質的にコアとして働き、空孔によって等価的に屈折率を低くした領域がクラッドとして作用する。図4では中心領域を取り囲む空孔を3重に配置した3重リング構造である。この種のホーリーファイバでは、所望のモードフィールド径(MDF)となるように注意を払いながら、 Λ や d やリングの多重度を制御することで光の閉じ込めを人工的に調節することができる。勿論、分散特性なども制御できるが、製造コストを考慮すれば長距離伝送はSMFが有利であり、用途をユーザに近い部分に限定するなどホーリーならではの曲げ特性などに特化して設計すれば良いことになる。

図5にこのRING3の曲げ特性を記す。SMFと比較すると曲げ特性の改善効果がよく理解できる。絶対値は小さいが、 $R=3\text{mm}$ 辺りで曲げによる損失劣化が生じ始めていることがわかる。図6は $R=2\text{mm}$ の構造でのクロソイド曲線に入る点Bと1周回って、クロソイド曲線から直線に移行する点Gでのフィールド分布を示す。同図から明らかなように、直感的には点Bのフィールドと比較して点Gの特性劣化は殆ど認められない。このことは図5の結果とも良く一致している。一方、この構造では図5の $R=7.5\text{mm}$ においても図1の前後の直線導波路を含んだ領域で右下がりの直線になっており、伝搬距離に応じた損失が生じていることを示している。

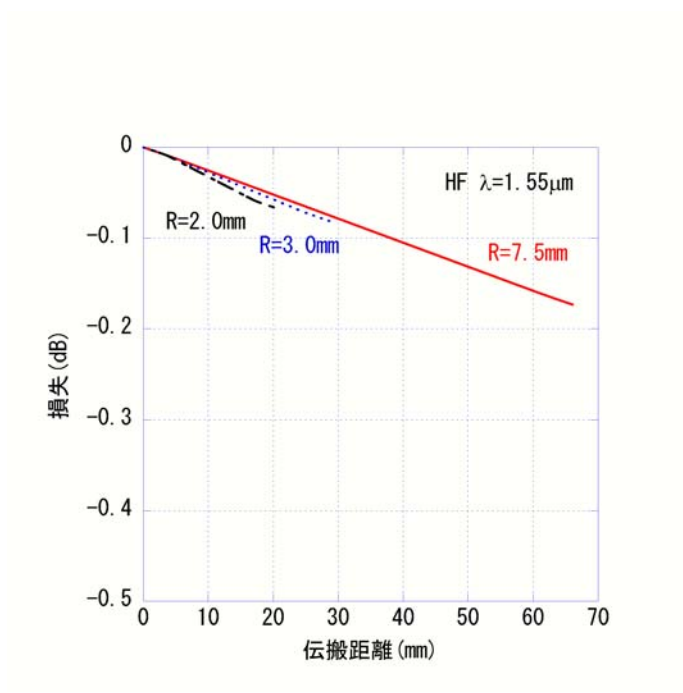


図 5. RING3 の曲げ特性計算結果

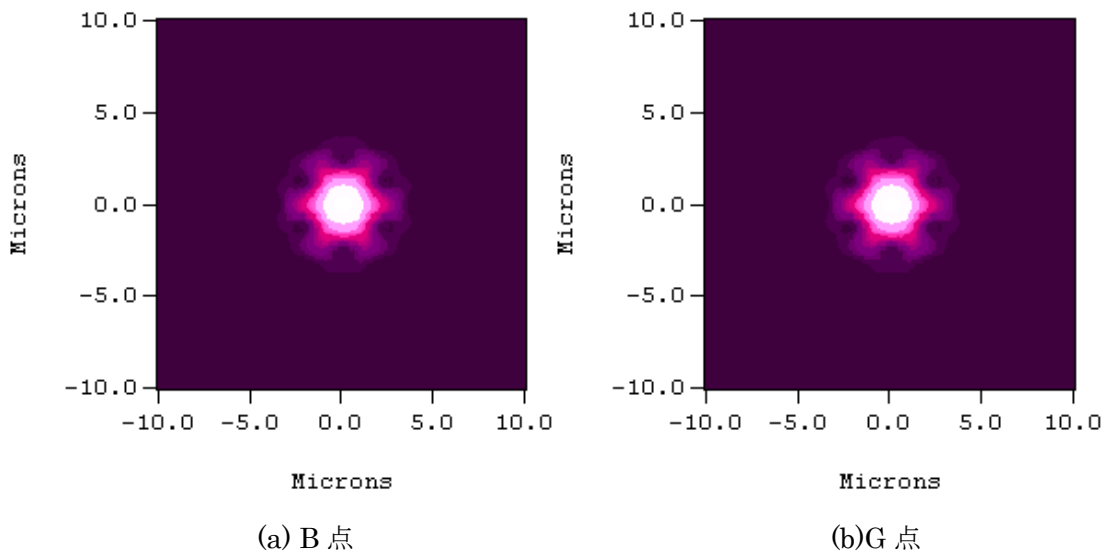


図 6. R=2mm の構造でのフィールド分布

(3) 曲げに強い溝付き SMF (TI-SMF)

ホーリーファイバは曲げに強いことがシミュレーションでも確認されたが、空孔があるためにファイバ接続が簡単ではなく、ファイバ自体が高価であることに加えて接続コストにも課題が残る。そのような課題を克服する、フジクラより発表された溝付き (Trench Index) SMF (TI-SMF) は注目に値する。ファイバ断面構造の模式図を図 7 に記す。

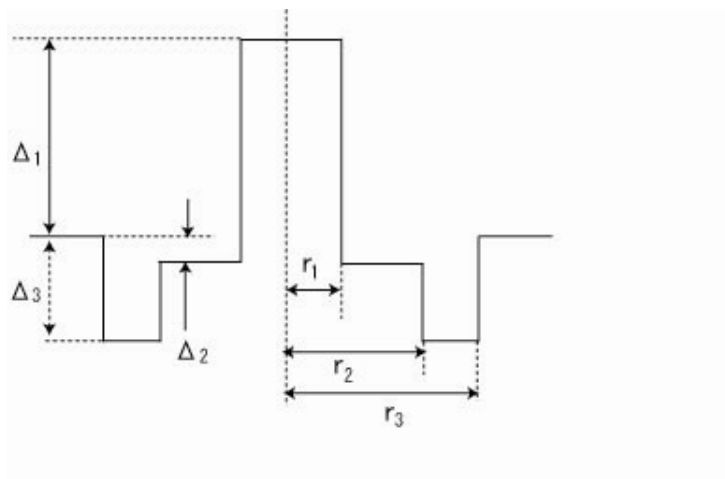


図 7. 溝付き SMF 構造の模式図

今回の計算では文献で記された範囲の値として、 $\Delta_1=0.40\%$ 、 $\Delta_2=0\%$ 、 $\Delta_3=-0.25\%$ 、 $r_1=4.5\mu\text{m}$ として、 $r_2/r_1=3.5$ 、 $r_3/r_1=5.5$ を用い、波長は $1.65\mu\text{m}$ とした。図 8 に Fiber3D での計算結果を記す。また、図 9 には $R=6\text{mm}$ での計算時の点 B と G におけるフィールド分布を記す。

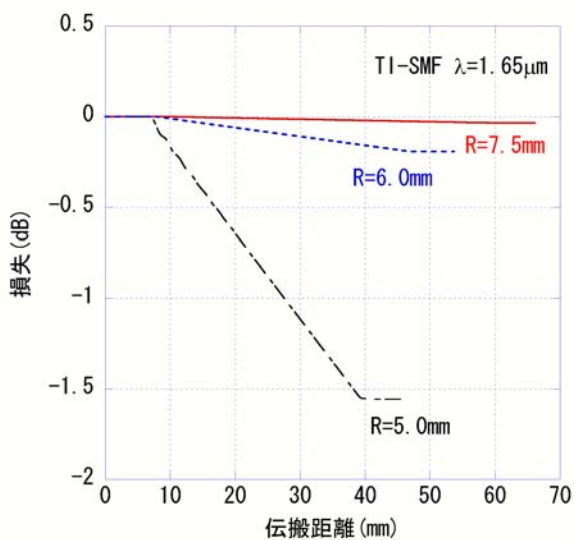


図 8. TI-SMF の曲げ特性計算結果

boundary condition for the beam propagation method,” IEEE Photon. Technol. Lett.,
vol. 8, pp. 649-651, May 1996.

この記事は、当社 横山が「光アライアンス」寄稿したものです。

正式には以下をご参照ください。

横山清行、「ファイバ曲げ特性の3次元 BPM 解析(Fiber3D)」光アライアンス、pp.31-34,
2008.2 発行