

Step-Index 型光ファイバの接続部のBPM解析

正員 堀田 昌志† 正員 下代 雅啓††

准員 富元 剛†

Analysis of Coupling Efficiency between Step-Index Optical Fibers through a Gap Utilizing Modified Beam Propagation Methods

Masashi HOTTA†, Masahiro GESHIRO††, Members and Tsuyoshi TOMIMOTO†, Associate Member

† 愛媛大学工学部電気電子工学科, 松山市 Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama-shi, 790 Japan

†† 大阪府立大学工学部電気電子システム工学科, 堺市 College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai-shi, 593 Japan

あらまし 単一モード伝送光ファイバ間の突合せ接続部にギャップが存在する場合の接続効率を反射の影響を考慮に入れた3次元ビーム伝搬法を用いて解析している。そして、既に報告されている実験結果ならびに理論的解析結果と比較することで本解析法の妥当性を明らかにしている。

キーワード 突合せ接続, 結合効率, 光ファイバ, ビーム伝搬法, 反射

1. まえがき

放射モードを含めた光波の伝搬特性を簡単かつ明瞭に解析することのできる手法としてビーム伝搬法(BPM)がある⁽¹⁾。しかし、従来のBPMは、反射の影響を無視しており、これが顕著に現れるような不連続を含む導波系に適用するためには特別な工夫が必要となる。筆者らは、これまでに、スラブ導波路モデルを取り上げ、BPMに透過係数の概念を導入することで、反射の顕著な導波系の特性が精度良く解析できることを明らかにしてきた^{(2),(3)}。

ところで、光ファイバ間の接続効率に関しては、理論的解析ならびに実験的測定による研究がこれまでに数多く報告されている^{(4)~(8)}。しかしながら、BPMに基づく研究報告はほとんどなされていないようである。そこで、本論文では、3次元BPMに透過係数の概念を導入し、光ファイバ間のギャップを介した突合せ接続の接続効率を解析する。そして、これまでに報告されている実験結果⁽⁴⁾ならびに理論的解析結果⁽⁸⁾と比較し、本解析の精度について検討する。

2. 解析モデルおよび解析手法

図1に示すように、異なる2本の光ファイバが、長さ Δz のギャップ部を介して突合せ接続されている場合を考える。このとき、両光ファイバの伝送軸間には $x-z$ 面内で x 方向に Δx の軸ずれが存在するものとする。なお、解析の対象とする光ファイバはコア・クラッド間の屈折率差が小さいStep-Index型光ファイバとする。

解析手法は、フーリエ変換およびその逆変換を1次元から2次元に変更しさえすれば、文献(3)で示されている2種類の手法(Method IおよびMethod II)をほぼ直接的に適用することができる。Method Iは、スペース領域での修正法である。すなわち、光ファイバの界分布と屈折率分布を用いて定義した実効的な屈折率⁽³⁾およびギャップの屈折率で与えられる透過係数によって透過界分布を修正する手法である。また、Method IIはスペクトル領域での修正法であり、フーリエ変換によって境界面直前で平面波展開された界分布の各素波ごとに透過係数を乗じることによって透過波を評価するものである。すなわち、境界面Iでは

$$t_1 = \frac{2\sqrt{n_{1o} \cos \theta \sqrt{n_g^2 - n_{1o}^2 \sin^2 \theta}}}{n_{1o} \cos \theta + \sqrt{n_g^2 - n_{1o}^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

そして、境界面IIでは

$$t_2 = \frac{2\sqrt{n_g \cos \theta \sqrt{n_{2o}^2 - n_g^2 \sin^2 \theta}}}{n_g \cos \theta + \sqrt{n_{2o}^2 - n_g^2 \sin^2 \theta}} \quad (2)$$

なる透過係数を乗じる。但し、

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{Nk_0} \quad (3)$$

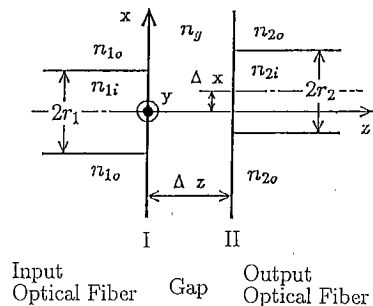


図1 ギャップを介した単一モード光ファイバ間の突合せ接続 Fig.1 Butt-jointed single-mode optical fibers through a gap.

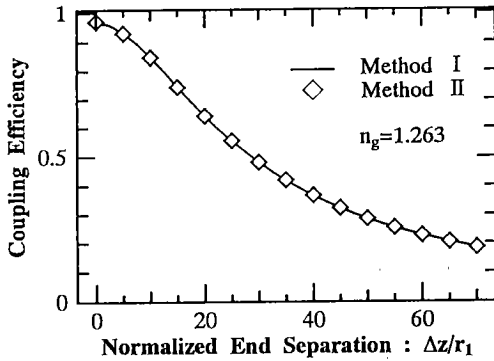


図2 2種類の修正法(Method I:スペース領域修正法およびMethod II:スペクトル領域修正法)を用いたBPMによる突合せ光ファイバ間の結合効率。但し、 $\Delta x = 0.0\mu\text{m}$ および $n_g = 1.263$

Fig. 2 Coupling efficiency between butt-jointed optical fibers estimated with BPM modified in two ways: Method I in the spatial domain and Method II in the spectral domain. $\Delta x = 0.0\mu\text{m}$ and $n_g = 1.263$.

において、ギャップ領域では $N = n_g$ を、そして、出射側光ファイバに対しては $N = n_{2o}$ を用いるものとする。また、 k_x および k_y は、それぞれ、フーリエ変換によって得られる平面波の x 方向および y 方向の波数であり、 k_0 は自由空間波数を表す。

3. 解析結果および精度の検討

実際の数値解析では、構造パラメータは、文献(4)と一致するよう以下のように設定する。すなわち、

コア半径 : $r_1 = r_2 = 1.85\mu\text{m}$,

波長 : $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,

コアの屈折率 : $n_{1i} = n_{2i} = 1.617$,

クラッドの屈折率 : $n_{1o} = n_{2o} = 1.61256$

また、ギャップについては、空気ギャップの場合($n_g=1$)、および、マッチングオイルで満たされた場合について検討する。但し、マッチングオイルの屈折率は、文献(4)の実験結果に対して文献(8)の手法を適用して得られる推定値 $n_g = 1.263$ を用いる。更に、Step-Index型の弱導波光ファイバを取り扱っていることを考慮して、入射界は LP_{01} モード⁽⁹⁾とする。

図2は、光ファイバ間に軸ずれがない場合($\Delta x = 0$)のギャップ長に対する接続効率の依存性について、前章で説明したMethod IおよびMethod IIによって求めた結果を示している。但し、ギャップは屈折率1.263のマッチングオイルで満たされているものとしている。同図より、両者は極めてよく一致していることがわかる。

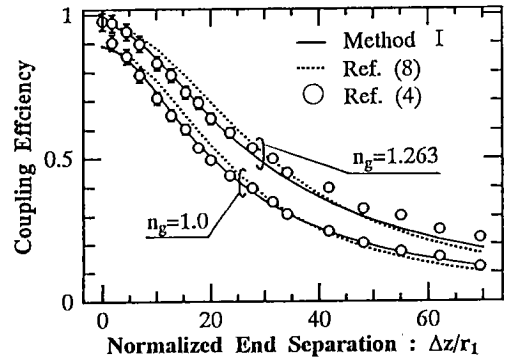


図3 突合せ接続された光ファイバ間の結合効率のギャップ長依存性

Fig. 3 Coupling efficiency between butt-jointed optical fibers obtained with Method I as a function of end separation, where $\Delta x = 0.0\mu\text{m}$. The circles represent the experimental data in Ref.(4) and the dotted lines show the theoretical results in Ref.(8).

次に、この手法の精度を検討する。図3は、同じくギャップ長に対する接続効率の依存性について、Method Iによる結果、文献(4)の実験結果および文献(8)の理論的解析結果を同時に示したものである。この結果より、ギャップが空気($n_g=1$)の場合、本手法による解析結果と実験結果は非常によく一致していることがわかる。更に、ギャップがマッチングオイルで満たされている場合も、ギャップ領域が短いところでは、本解析結果と実験結果はよく一致している。しかし、ギャップ領域が長いところでは、両者の間に無視できない差が認められる。これは、文献(4)でも指摘されているように、実験値には3%程度の相対誤差が含まれている可能性があること、あるいは、マッチングオイルの屈折率の推定誤差などによるものと考えられる。更に、Method Iの結果は、文献(8)の理論結果とも非常によく一致している。但し、ギャップ長が短いところでは、両者に多少の差が認められるが、本解析の方が実験値により近い結果を与えている。

図4は、ギャップ長を $\Delta z = 5.08\mu\text{m}$ に固定し、光ファイバ間の軸ずれ量を変化させた場合の接続効率をMethod Iに基づいて求めた結果である。同図には、文献(4)の実験結果も同時に示している。先の例と同様、空気ギャップの場合には本解析結果と実験結果が非常によく一致している。また、マッチングオイルを用いた場合にも、軸ずれ量の大きいところで多少の差が認められるものの、全般的には非常によく一致している。

以上の結果より、本解析法は、従来の理論的解析手

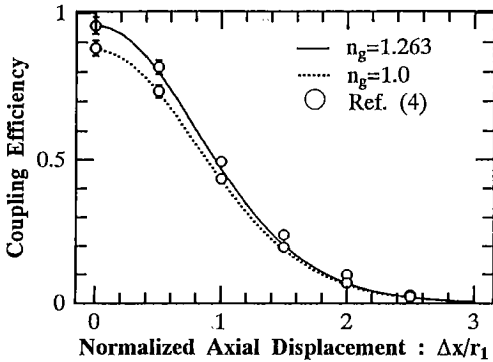


図4 突合せ接続された光ファイバ間の軸ずれ結合特性。Method Iによる結果と文献(4)の実験結果との比較。但し、 $\Delta z = 5.08\mu\text{m}$

Fig. 4 Coupling efficiency between butt-jointed optical fibers obtained with Method I as a function of axial displacement, where $\Delta z = 5.08\mu\text{m}$. The circles represent the experimental data in Ref.(4).

法と同様、光ファイバの不連続問題に広く適用し得る可能性のあることが明らかとなった。なお、本手法によれば、界分布を容易に得ることができ、接続部透過後の光波の振舞いが視覚的にたやすく把握できるといった利点がある。

4. むすび

従来のBPMに対して、反射の影響を考慮に入れた2種類の修正法に基づいて、光ファイバ間のギャップを介した突合せ接続の接続効率を解析し、既に報告されている実験結果⁽⁴⁾ならびに理論的解析結果⁽⁸⁾と比較検討した。その結果、本論文で示した2種類の解析法による結果は、互いによく一致し、更に、既に報告されている結果ともよく一致することが示された。最後に、マッチングオイルの屈折率を変化させた場合の接

続効率、ならびに、異なる光ファイバ間の接続効率についての検討は今後の課題としたい。

文 献

- (1) Feit M.D. and Fleck Jr. J.A.: "Light Propagation in Graded-Index Optical Fiber", *Appl. Opt.*, **17**, 24, pp.3990-3998 (Dec. 1978).
- (2) Hotta M., Geshiro M., Kanoh K. and Kanetake H.: "Effects of Air Gaps on Butt-Joints between Isotropic and Anisotropic Planar Waveguides", *IEICE Trans. Electron.*, **E76-C**, 8, pp.1345-1349 (Aug. 1993).
- (3) Hotta M., Geshiro M. and Sawa S.: "Application of Beam Propagation Method to Discontinuities of Weakly Guiding Structures", *IEICE Trans. Electron.*, **E76-C**, 8, pp.1333-1338 (Aug. 1993).
- (4) Bisbee D.L.: "Measurements of Loss Due to Offsets and End Separations of Optical Fibers", *Bell Syst. Tech. J.*, **50**, 10, pp.3159-3168 (Dec. 1971).
- (5) Cook J.S., Mammel W.L. and Grow R.J.: "Effect of Misalignments on Coupling Efficiency of Single-Mode Optical Fiber Butt Joint", *Bell Syst. Tech. J.*, **52**, 8, pp.1439-1448 (Oct. 1973).
- (6) Gloge D.: "Offset and Tilt Loss in Optical Fiber Splices", *Bell Syst. Tech. J.*, **55**, 7, pp.905-916 (Sep. 1976).
- (7) Marcuse D.: "Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices", *Bell Syst. Tech. J.*, **56**, 5, pp.703-718 (May-June 1977).
- (8) Nemoto S. and Makimoto T.: "Analysis of Splice Loss in Single-Mode Fibers Using a Gaussian Field Approximation", *Opt. & Quantum Electron.*, **11**, 5, pp.447-457 (Sept. 1979).
- (9) 岡本勝就: "光導波路の基礎", 第3章, コロナ社 (Oct. 1992).

(平成6年3月16日受付, 6月13日再受付)