

Title	2モードファイバのLP ₁₁ モードの曲げ損失推定法の提案
Author(s)	垂野, 将明; 久保田, 寛和; 三好, 悠司; 大橋, 正治
Editor(s)	
Citation	電子情報通信学会論文誌B. 2017, J100B (6), p.445-446
Issue Date	2017-06-01
URL	http://hdl.handle.net/10466/16029
Rights	copyright (C) 2017 IEICE

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会 **B** 論文誌

通 信

VOL. J100-B NO. 6

JUNE 2017

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

2 モードファイバの LP_{11} モードの曲げ損失推定法の提案

垂野 将明[†] (学生員) 久保田寛和[†] (正員: シニア会員)
三好 悠司[†] (正員) 大橋 正治[†] (正員: フェロー)

Proposal of Ending Loss Estimation Technique of LP_{11} Mode

Masaaki TARUNO[†], Student Member,

Hirokazu KUBOTA[†], Senior Member,

Yuji MIYOSHI[†], Member, and Masaharu OHASHI[†], Fellow

[†] 大阪府立大学大学院工学研究科, 堺市

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai-shi, 599-8531 Japan

DOI:10.14923/transcomj.2017JBL4001

あらまし 2 モードファイバの LP_{11} モードの曲げ損失の曲げ直径依存性を, 3 種類の異なった直径のマンドレルにファイバを巻きつけた 3 回の光パワー測定により推定する方法を提案し, 模擬データにより妥当性の検討を行った。

キーワード 2 モードファイバ, 曲げ損失, 最小 2 乗法

1. ま え が き

次世代大容量伝送システムとして, 近年複数のモードを伝搬する数モードファイバ (Few-Mode Fiber; FMF) を用いたモード分割多重 (Mode Division Multiplexing; MDM) 伝送が注目されている [1]. MDM 伝送に使用する光ファイバは各伝搬モードの曲げ損失を評価する必要がある. 特定のモードのみを励振できれば当該モードの曲げ損失が測定できるが, モードが混じっている場合にはモードの励振比を知る必要がある. 曲げ法 [2] により励振比を測定し, 更にある曲げを与えた場合の損失を測定することで曲げ損失を測定可能であるが, 曲げ法であるモードを完全に減衰させるための条件はファイバごとに異なり, 汎用性のある測定方法とすることは難しい。

今回, LP_{11} モードの曲げ損失に比べて LP_{01} モードの曲げ損失が無視できることを利用し, 3 種類の異なった直径のマンドレルによる 3 回の曲げ測定で, 2 モードファイバ (TMF) の LP_{11} モードの曲げ損失の曲げ直径依存性の推定が可能であることを提案し, 数値シミュレーションを行った。

2. 提案方法

以下, TMF の長さは十分に短いとし, 損失は曲げ損失のみを考慮し, また TMF 中のモード変換は無視できるとする. モードの区別を添え字 $m \in \{01, 11\}$ で

表す. TMF への入射光は LP_{01} モードと LP_{11} モードが混在している. 入射端におけるそれぞれの光パワーを P_m [mW], TMF 中での各モードの損失が α_m [dB] であるとする, 出射端における受光パワーは

$$P = P_{01}10^{-\alpha_{01}/10} + P_{11}10^{-\alpha_{11}/10} \text{ [mW]}, \quad (1)$$

と表せる. 直径 $2R$ の円筒に 1 回光ファイバを巻きつけたとき, 曲げ直径と損失 α'_m [dB/turn] を片対数グラフに描くと近似的に R の一次関数

$$\ln(\alpha'_m \text{ [dB/turn]}) = A_m + B_m R, \quad (2)$$

となる. 曲げ直径 $2R$ の曲げ有無でのパワー比のリニアスケールでの値を $\eta(R)$, 入射端における励振比を $\gamma = P_{11}/P_{01}$ と書くと

$$\eta(R) = \frac{10^{\frac{\exp(A_{01}+B_{01}R)}{10}} + \gamma 10^{\frac{\exp(A_{11}+B_{11}R)}{10}}}{1 + \gamma}, \quad (3)$$

となり, 曲げ損失の曲げ直径依存性の測定は, 原理的には 5 種類の曲げ損失の測定で 5 個の未知数を求める連立非線形方程式の求根問題となる。

光ファイバを通信に用いる場合, 定められた曲げ直径において曲げ損失の規格値が規定されている [3]. モード多重通信においては全てのモードの曲げ損失が十分小さい必要がある. 一般にこのような条件下でステップインデックス (SI) 型ファイバの LP_{01} モードの曲げ損失は LP_{11} モードに比べて 2 桁以上小さいため, LP_{01} モードの曲げ損失を無視すると, 式 (3) の分子第 1 項目は 1 となり, 未知数が 3 に減る. 式 (2) の直線を求めると考えた場合も γ が必要であり, 未知数は 3 となる. なお η は曲げ損失がない場合に対するパワー比であるため, パワー測定は 4 回行う必要があることに注意が必要である。

ここで, 曲げ直径が $2R_x$ 以上の場合には曲げ損失が十分小さくなり, 曲げを与えない場合と同様と見做すことができるという条件を導入する. この条件は

$$P(R_x) = P_{01}(1 + \gamma 10^{-\alpha_{11}/10}) = P_{01}(1 + \gamma), \quad (4)$$

と表せる. すなわち, $\alpha_{11}|_{R=R_x} = 0$ という条件が付加され, 未知数を一つ減らすことができる. 曲げを与えない場合の測定を省略でき, 3 種類の曲げ径による 3 回のパワー測定で励振比と LP_{11} モードの曲げ損失の波長依存性を推定することが可能となる。

3. 数値シミュレーション

模擬データは OptifiberTM を用いて $\Delta = 0.425\%$,

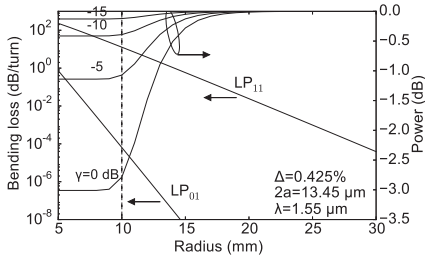


図1 曲げ直径に対する曲げ損失と受光パワー変化
Fig.1 Bending loss and output power change as a function of bending radius.

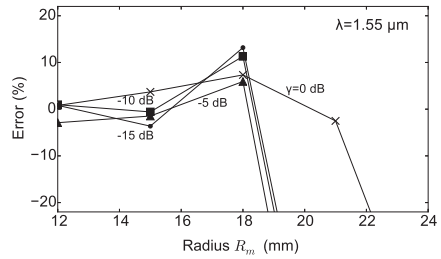


図2 $R_L=60$ mmにおける推定値の相対誤差
Fig.2 Fitting error at $R_L=60$ mm.

$2a = 13.45\mu\text{m}$ の SI 型 TMF の波長 $1.55\mu\text{m}$ における各モードの曲げ損失を計算し、その値を用いて曲げ直径を変化させて得られたパワー比から作成した。また3桁のパワーメータでの測定を想定し、四捨五入して有効数字3桁とした。入射端の励振比 γ は 0 dB から -15 dB まで変化させ、提案法の適用範囲を調べた。連立非線形方程式には種々の数値解法があるが、ここでは最小2乗基準の非線形最適化法 [4] を用いた。

図1はこのTMFの曲げ直径に対する曲げ損失と受光パワー変化のシミュレーション結果である。3種類の曲げ径を R_S, R_M, R_L とし、最も小さい径 R_S として LP_{11} モードの損失が約 10 dB となる 10 mm、曲げなしとして扱う最も大きい径 R_L として、30, 60, 100 mm の場合を計算し、中間の曲げ半径 R_M は 12 mm から 24 mm まで 3 mm 刻みで計算した。

$R_L=30$ mm の場合、いずれの励振比の場合も非線形最小2乗近似で正しい推定値を得ることができなかった。 $R_L=60$ mm 及び 100 mm の場合は R_M が 12, 15, 18 mm の場合に最小2乗近似が収束した。例として図2に $R_L=60$ mm の場合のフィッティングによる B_{11} の推定値と模擬データの相対誤差を示す。曲げ半径 18 mm の場合、 LP_{11} モードの曲げ損失は 0.1 dB 以下と曲げによるパワー変化が少ないため、推定誤差が増える傾向にある。更に $R_M = 21$ mm は計算が収束したのは励振比 0 dB の場合のみであるため、適切な条件とはいえない。

図3に $R_M=15$ mm の場合の曲げ損失の推定値を示す。黒丸は図1に示した模擬データの曲げ損失の値である。対数軸ではあるが、提案法によるフィッティングは模擬データをよく再現している。励振比が 0 dB から -15 dB の範囲で、曲げ半径が 10 mm 場合の曲げ損失の値は模擬データと 2 dB/turn の差があるが、曲げ損失が 10 dB/turn となる曲げ半径のばらつきは

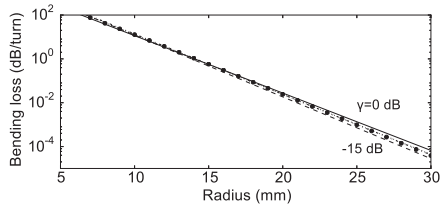


図3 $R_M=15$ mmにおける曲げ損失の推定値
Fig.3 Estimated bending loss for $R_M=15$ mm.

0.5 mm 以下であった。また、 γ の推定値の誤差はどの励振比の場合も $\pm 4\%$ 以内であった。

詳細な検討は今後の課題であるが、曲げがない場合として曲げ直径 60 mm ないし 100 mm をとり、最小の曲げ直径として曲げ損失が 0.5 dB 程度以上となる径を選び、中間の曲げ直径としてその半分程度の曲げ損失がえられる径を選ぶことで提案法により曲げ損失の推定値を得られるのではないかと考える。

謝辞 本研究は、独立行政法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究/革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発の一環としてなされたものである。

文 献

[1] P.J. Winzer and G.J. Foschini, "MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems," Opt. Express, vol.19, no.17, pp.16680-16696, Aug. 2011.
 [2] H. Kubota, Y. Miyoshi, and M. Ohashi, "Technique for measuring mode power of two-mode fiber II; Experiment," IEICE Electron. Express, vol.11, no.15, pp.20140611, Aug. 2014.
 [3] "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," ITU-T Recommendation G.652 (06/2005), 2005.
 [4] J.J. More, "The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory," in Numerical Analysis, ed. G.A. Watson, Lecture Notes in Mathematics 630, pp.105-116, Springer Verlag, 1977.

(平成 29 年 1 月 11 日受付, 2 月 7 日再受付, 2 月 21 日早期公開)