

細径光ファイバに適したマイクロバンド損失解析

Analytical Formula for Microbending Sensitivity of Optical Fibers with Small Diameters

野村 卓弘*
Takahiro Nomura

塩崎 学
Manabu Shiozaki

相馬 一之
Kazuyuki Sohma

データセンタの光配線では光ケーブルの細径多心化が求められており、光ファイバの細径化はその有力な手段の一つである。光ファイバを細径化することに伴う主要課題の一つは、ケーブル状態のマイクロバンド損失（MB損失）の増大である。光ファイバ構造を決定する際、この損失への影響を考慮しつつ複数のパラメータを調整する必要がある。我々は、Cocchiniが被覆外径250 μm の標準的光ファイバを前提に提案した手法を応用し、被覆外径165 μm 以下の細径光ファイバ用にMB損失を予測可能な解析式を新たに導出した。これにより、任意の光ファイバ構造でMB損失を予測することが可能となった。

Thinner optical cables are required for data center networks to meet the increasing demand for communication traffic. For these cables, thinner optical fibers are essential, and one of the concerns in reducing the optical fiber diameter is the increase in attenuation by microbending in the cabling process. It is necessary to adjust the optical fiber structure based on an analytical formula that systematically estimates the effects of structural parameters. Based on Cocchini's established method for conventional optical fibers with a coating diameter of 250 μm , we have derived an analytical formula to predict the microbending attenuation of optical fibers with a smaller diameter of 165 μm or less.

キーワード：光ファイバ、細径光ファイバ、光ケーブル、マイクロバンド損失、解析

1. 緒言

クラウドコンピューティングや5Gの普及により、データセンタの建設及び増設が世界的に活発化している。その建設において、経済的かつ空間効率の良い光ネットワーク構築が強く求められている。例えば、データセンタ間を繋ぐOSP (Outside Plant) ケーブルは地下管路^{*1}に敷設され、その空間を有効活用するため光ケーブル細径化や高密度化が必要となる。その要求に対応すべく、被覆外径165 μm 以下の細径光ファイバを用いて多心化した光ケーブルの特性が報告されている⁽¹⁾。この報告では、被覆外径を200 μm から165 μm に細径化すると、微小曲げによる光減衰、すなわちマイクロバンド損失（Microbending 以下ではMB損失と称す）の増加が指摘されている。MB損失は、光ファイバのケーブル状態における伝送損失特性において重要な指標である。

光ファイバを細径化する構造として、図1に示す2通りがある。一つは、光導波部であるコアを有するガラス部の外径を125 μm に維持したまま、被覆厚みを減らす構造である。もう一つは、ガラス径と被覆厚みを共に減らす構造である。前者はプライマリ被覆とセカンダリ被覆の外径及びヤング率の計4種類が、光ファイバの構造検討において考慮すべきパラメータとなる。後者の場合、それらにガラス径を加えた5種類を調整し、MB損失を評価しつつ、細径光ファイバの構造を決定する必要がある。最適構造の決定には、それらの構造パラメータがMB損失に与える影響を系統的に推定する手法が必要である。

Cocchiniはガラス径125 μm 、被覆外径250 μm の光ファイバに対し、被覆構造とヤング率を変数として用いたMB

損失の解析式を導出した⁽²⁾。その式を用いて細径光ファイバ構造を検討した報告例もある⁽³⁾。しかし、この従来のは、ガラス径125 μm 、被覆外径250 μm の標準的な光ファイバ構造を前提に導出したものであり、データセンタで求められている細径光ファイバ、特に最近研究が進む被覆外径165 μm 以下の構造は考慮されていない。

本報告では、Cocchiniの従来手法を応用し、被覆外径165 μm 以下の細径光ファイバに適したMB損失の解析式を新たに導出した。以下ではまず、従来の手法と得られた解析式を紹介する。次に、本報告における細径光ファイバ用の解析条件と得られた解析式を説明する。解析式で予測される値と実測値とを比較し、考察した後に結言を述べる。

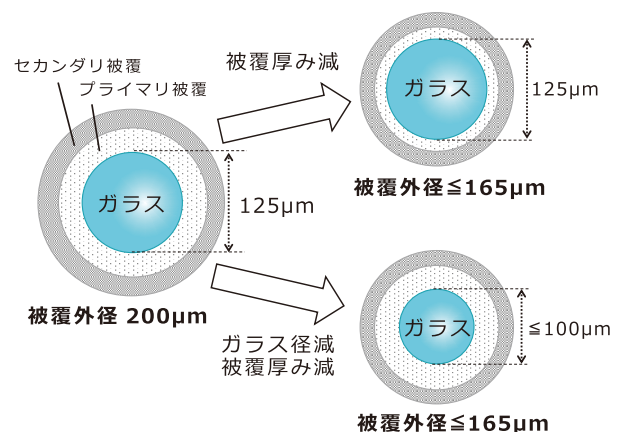


図1 細径光ファイバの構造例

2. 解析式の導出

2-1 従来の手法

MB 損失 α_{MB} は式 (1) で表される⁽⁴⁾。

$$\alpha_{MB} \approx A \times (D/H^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

A は光ファイバの光学特性に起因する定数、H と D は各々光ファイバの曲げ剛性率、側方剛性率である。H は式 (2) で表すことができる。

$$H \propto \pi R_0^4 E_0 + \pi (R_2^4 - R_1^4) E_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

従来の手法では、D の解析式は式 (3) で表される。

$$D = E_1 + (E_2 - E_1) \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}} \left(2 \frac{R_2 - R_1}{R_2 - R_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで R_i 、 E_i は i 層の半径とヤング率であり、図 2 (a) に示す通り $i=0$ がガラス層、1 はプライマリ被覆、2 はセカンダリ被覆を表す。

式 (3) は、下記に示す 2 段階で求めることができる。

【第 1 段階】 R_i と E_i の値が異なる被覆外径 250 μm の光ファイバ数十種類に対し、二次元有限要素法 (Finite Element Method、以下では FEM と称す)^{*2} により光ファイバ表面変位量 u_y^* を求める。図 2 (b) に FEM 計算の結果例を示す。その結果に対し、下記に示す式 (4) を用いて側方剛性率 D を算出する。F は側圧 (1MPa)、 θ は応力付与角 (0~9 度) である。

$$D = 2F\theta R_2 / u_y^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

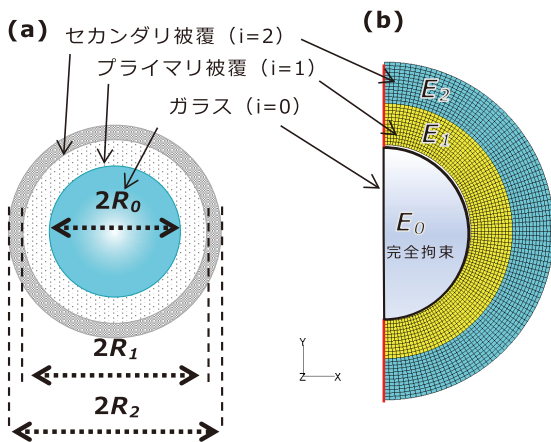


図 2 (a) 光ファイバの構造 (b) FEM 計算例

【第 2 段階】規格化剛性率 $(D-D_1) / (D_2-D_1)$ 、規格化半径 $(R_2-R_1) / (R_2-R_0)$ 、ヤング率比 (E_1 / E_2) を定義し、規格化剛性率を目的変数、規格化半径及びヤング率比を説明変数としてフィッティングを行う。その際、式 (5) の近似を仮定する。

$$\frac{D-D_1}{D_2-D_1} \approx \frac{D-E_1}{E_2-E_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

2-2 新解析式

本報告では、2-1 節で説明した従来の手法に基づき、被覆外径 165 μm 以下の細径光ファイバに適用させた解析式を新たに導出した。なお、比較のため、現在主流である被覆外径 200 μm の光ファイバも適用範囲に含めた。

2-1 節で説明した第 1 段階の FEM 計算条件を、表 1 に比較して示す。被覆外径 110~210 μm の光ファイバ合計 378 種類の条件に対して FEM 計算を行った。その結果から光ファイバ表面変位量 u_y^* を求め、式 (4) から側方剛性率 D を算出した。

表 1 FEM 計算条件の比較

	新解析式の計算条件	従来の計算条件
解析ソフト	MSC.Nastran 2020sp1	PDE/PROTRAN
ガラス径 [μm]	75-130	125
セカンダリ被覆外径 [μm]	110-210	250
プライマリ被覆ヤング率 [MPa]	0.05-1.0	10-20
セカンダリ被覆ヤング率 [MPa]	1000-3000	500-1000
計算条件種類	378	30

続く第 2 段階において、目的変数と説明変数を設定してフィッティングによって解析式を求める方法は変更せず、それらの変数と式を変更した。新解析式の目的変数は規格化剛性率 $(D-D_1) / (D_2-D_1)$ である。説明変数は、従来手法と同様にプライマリ半径に依存する項 $(R_2-R_1) / (R_2-R_0)$ 、プライマリ被覆とセカンダリ被覆のヤング率比 (E_1 / E_2) 、それに加えてガラス径とセカンダリ被覆外径の半径比 (R_0 / R_2) とした。表式は式 (6) のような展開式とした。

$$\log_{10} \frac{D-D_1}{D_2-D_1} \approx \sum_{i,j,k} c_{ijk} \left(\log_{10} \frac{R_2-R_1}{R_2-R_0}\right)^i \left(\log_{10} \frac{E_1}{E_2}\right)^j \left(\log_{10} \frac{R_0}{R_2}\right)^k \quad \dots (6)$$

ここで i, j, k は 0 から 2 の整数、 c_{ijk} は定数である。また、式 (5) の近似は今回の計算条件で成立しなかったため、新たに式 (7) を使用した。

$$\frac{D_1}{E_1} = \frac{D_2}{E_2} \approx \frac{c_1}{\left(1 - \frac{R_0}{R_2}\right)^{c_2}} + c_3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

フィッティングによって得た定数 c_{ijk} 及び $c_1 \sim c_3$ の値を表2に示す。

表2 c_{ijk} 及び $c_1 \sim c_3$ の値一覧

c_{000}	-0.612	c_1	0.209
c_{100}	3.62	c_2	1.21
c_{010}	0.253	c_3	0.401
c_{001}	-7.13		
c_{200}	0.788		
c_{110}	0.329		
c_{101}	2.32		
c_{020}	-0.0620		
c_{011}	-0.986		
c_{002}	-8.70		

式(6)と表2を用いることで、新たにガラス径を含む任意のパラメータ値で、被覆外径165 μm 以下の光ファイバにおける D を算出可能である。式(2)の H と、式(6)の D とで計算できる式(1)の右辺第2項 D/H^2 を算出し、その規格値をマイクロバンド感度 (Microbending Sensitivity、以下ではMBSと称す) と定義する。MBSはガラス径125 μm 、被覆外径200 μm の光ファイバの D/H^2 を基準として規格化した。同様に、実測のMB損失においても、被覆外径200 μm の光ファイバ構造を基準とした相対値をMBSとした。

3. 実験

3-1 光ファイバ試作

加熱炉で光ファイバ用プリフォームを熔融し、直径80~125 μm のガラスファイバに線引した。紫外線硬化樹脂を2層塗布して硬化させた後、光ファイバをポビンに巻き取り、光ファイバサンプルを得た。

本報告で試作した光ファイバサンプルの詳細を表3に示す。MBSのガラス径またはプライマリ被覆ヤング率の依存性を調査するためにそれぞれ3水準で変更した。

表3 光ファイバサンプルの詳細

ガラス径 [μm]	80	100	125						
プライマリ被覆径 [μm]		135							
セカンダリ被覆外径 [μm]		165							
プライマリ被覆ヤング率 [MPa]	0.2	0.4	0.9	0.2	0.4	0.9	0.2	0.4	0.9
セカンダリ被覆ヤング率 [MPa]	1500								

3-2 MB損失測定

図3にMB損失測定の概要図を示す。測定はIEC-TR62221 Method-Bに従った。胴径280mmのポビンに表面粗さ#240のサンドペーパーを張り付けた。それに光ファイバサンプルを張力80gで600m巻き付け、波長1550nmにおける伝送損失を測定した。巻き付け前後の伝送損失差をMB損失とした。

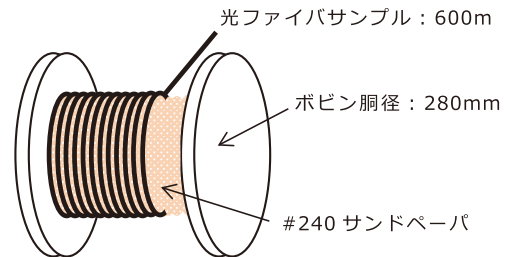


図3 MB損失測定の概要図

4. 解析結果

4-1 MBSのガラス径依存性

従来の式(3)と新解析の式(6)で計算したMBSのガラス径 ($2R_0$) 依存性を図4に示す。両式とも $2R_0$ が大きくなる程にMBSが低下した。 $2R_0$ が小さい領域では新解析式は従来式より低いMBSを示した。 $2R_0 = 120\mu\text{m}$ 付近で両式の大小関係が逆転し、新解析式では $2R_0 = 125\mu\text{m}$ で最小値を示した。

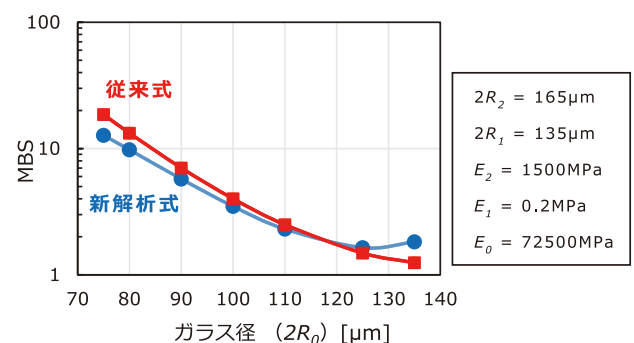


図4 MBSのガラス径依存性

4-2 MBSのプライマリ被覆径依存性

図5にMBSのプライマリ被覆径 ($2R_1$) 依存性をガラス径 ($2R_0$) で層別して示す。 $2R_0 = 125\mu\text{m}$ の場合、 $2R_1$ が大きくなるほどMBSが小さくなる傾向があり、従来式と新解析式の間大きな差はなかった。一方、 $2R_0 = 80\mu\text{m}$ の場合は、従来式と新解析式では $2R_1$ の増加に従ってMBSが単

調減少する傾向であるものの、新解析式では $2R_1 = 150\mu\text{m}$ で増加に転じた。

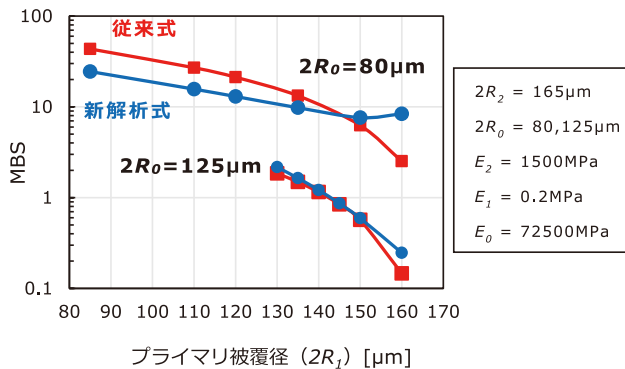


図5 MBSのプライマリ被覆径依存性

4-3 MBSのプライマリ被覆ヤング率依存性

図6にMBSのプライマリ被覆ヤング率 (E_1) 依存性をガラス径 ($2R_0$) で層別して示す。 $2R_0$ がどちらの場合においても、 E_1 を小さくするとMBSは減少する傾向であった。

$2R_0 = 80\mu\text{m}$ の場合、 E_1 が小さい領域で新解析式の方が従来式よりも低いMBSを示した。 $2R_0 = 125\mu\text{m}$ の場合、 E_1 が1.0MPaから0.2MPaまで低下するとMBSは約1/3に減少する。一方、 $2R_0 = 80\mu\text{m}$ の場合は1/4程度とより低減効果が大きく、 $2R_0$ が小さい場合に E_1 の影響を大きく受けた。

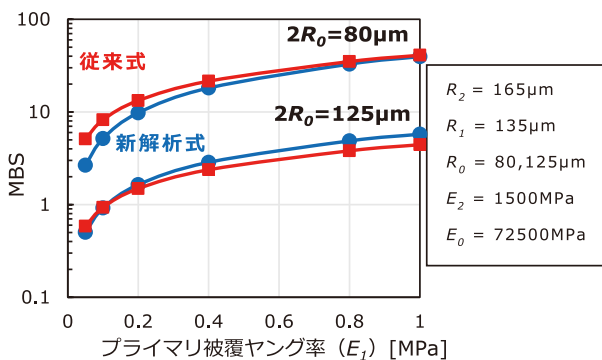


図6 MBSのプライマリ被覆ヤング率依存性

5. 考 察

5-1 MBSのプライマリ被覆ヤング率依存性

新解析式の妥当性を確認するため、計算値と実測値でMBSを比較した。

図7に、MBSのプライマリ被覆ヤング率 (E_1) 依存性をガラス径 ($2R_0$) で層別して示す。 $2R_0 = 80\mu\text{m}$ において、

計算と実測が同様の傾向を示した。 $2R_0 = 125\mu\text{m}$ の場合、MBS計算値は E_1 が0.2MPaから0.9MPaまで上昇すると約3倍になった。一方で、実測値では約1.1倍しか増加せず、計算と実測に差が見られた。これは $2R_0 = 125\mu\text{m}$ の場合、プライマリ被覆厚みが $5\mu\text{m}$ と非常に薄いため、計算で想定されるよりも E_1 低下による微小曲げに対する緩衝効果が小さくなったことが原因と考えられる。

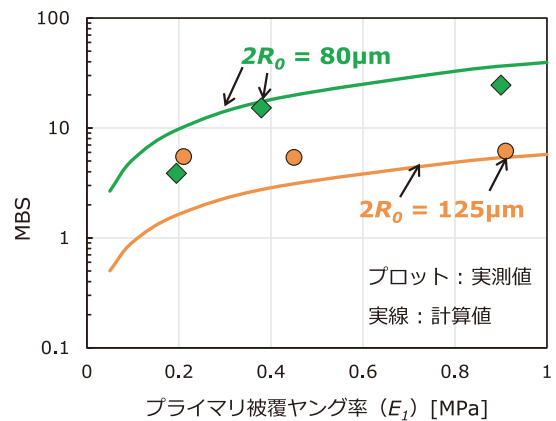


図7 計算及び実測MBSのプライマリ被覆ヤング率依存性

5-2 MBSのガラス径依存性

MBSの計算値と実測値のガラス径 ($2R_0$) 依存性をプライマリ被覆ヤング率 (E_1) で層別して図8に示す。

$E_1 = 0.9\text{MPa}$ の場合、実測と計算の傾向が一致した。その一方、 $E_1 = 0.2\text{MPa}$ では大きく異なり、計算では $2R_0$ が大きくなるに従ってMBSが単調減少する傾向に対して、実測ではそうならず、 $2R_0 = 100\mu\text{m}$ で最大となる凸型の傾向を示した。これらの原因は現時点で不明であり、さらなる調査が必要である。

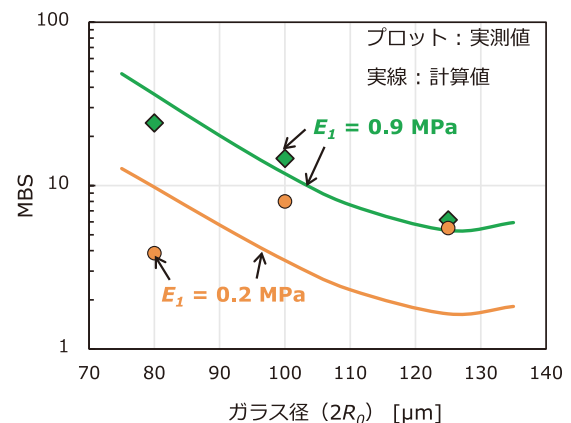


図8 計算及び実測MBSのガラス径依存性

6. 結 言

Cocchiniの手法を応用し、被覆外径165 μm 以下の細径光ファイバに適したマイクロバンド損失の解析式を新たに導出した。新解析式は従来式と比較し、ガラス径が小さい領域においてより低いマイクロバンド感度を示した。

新解析式による計算値と実測値の比較からは、ガラス径80 μm 及びプライマリ被覆ヤング率0.9MPaの条件では計算値と実測値の傾向が一致し、マイクロバンド損失の推定に有用と考えられる。ただし、ガラス径125 μm 及びプライマリ被覆ヤング率0.2MPaの領域では計算値と実測値に乖離があり、適用の際には注意が必要である。

用語集

※1 地下管路

地下に埋設された光ケーブル敷設用管路。新設や拡張には膨大な費用を要するため、既設管路の有効活用が重要視される。

※2 有限要素法 (FEM)

構造物を有限個の要素 (メッシュ) に分割して数値解析を行う解析手法。ある計算対象に対して荷重が加わると、物体を形作っている多数の要素が個々に変形することで物体の変形を再現することが可能である。

参 考 文 献

- (1) M-J. Li et al., "Reduced Coating Diameter Fibers for High Density Optical Interconnects," J. of Lightwave Technol., vol. 41, pp. 999-1009 (2023)
- (2) F. Cocchini, "The lateral rigidity of double-coated optical fibers," J. of Lightwave Technol., vol.13, pp1706-1710 (1995)
- (3) P. Sillard et al., "Reduced-Coated Fibers and Micro-Duct Cables," OFC 2022, M4E.2
P. Sillard et al., "Single-Mode Fibers with Reduced Cladding and/or Coating Diameters," ECOC 2022, Tu3A.1
- (4) M. Wandel & P. Kristensen, J. of Opt. Fiber Commun., No.3, pp.25-60 (2005). G. E. Anderson and B. R. Smith, "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come," Intell. Commun. Mag., 28(5), 5-14 (May, 1990)

執 筆 者

野村 卓弘* : 光通信研究所



塩崎 学 : シニアスペシャリスト
解析技術研究センター 主幹



相馬 一之 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者