

FTTH用ファイバの開発

Development of an Optical Fiber Suitable for FTTH Applications

杉崎 隆一*
Ryuichi Sugizaki宮部 亮*
Ryo Miyabe八木 健*
Takeshi Yagi

概要 FTTHの普及に伴い一般家庭への光ファイバでの配線が検討されている。局所曲げに対して、通常の光ファイバよりも損失増加が発生しないファイバとしてFlexiWaveがリリースされているが、宅内における電気ケーブル等での配線と比較すると、更に曲げ半径を小さくする要求が高まってきている。この要求に応えるため、曲げ半径7.5 mmの局所曲げを加えても従来の敷設時と同等の信頼性を保ちつつ損失増加を発生させない光ファイバを開発した。本報告において、半径7.5 mmの局所曲げに対応した宅内配線ファイバの光学特性、信頼性について紹介する。

1. はじめに

FTTH (fiber to the home) の普及に伴い、宅内やビル内へ光ファイバが導入され始めている。宅内への光配線を容易にするため通常のSMF (ITU-T G.652) と同等の光学特性を保ちつつ、15 mmの最小曲げ半径を許容できるアクセスケーブル用光ファイバ (FlexiWave) が開発され、実用化へと向かっている¹⁾。しかし、最小曲げ半径15 mmではメタル線相当の柔軟な取り扱いができず、配線形態に制限が生じたり、各種の周辺装置が小型化できない原因の一つになりうる。このため、配線のための十分なスペースを確保することが難しい建物内での使用に適した光ファイバが望まれ、曲げ半径15 mm以下まで対応可能な光ファイバも開発されている^{2), 3)}。

FTTHの普及のためには屋外設備への対応も重要である。インドアケーブルだけでなくドロップケーブル、架空ケーブルに関しても小径曲げでの特性が向上すれば、作業性の向上やクロージャの小型化の可能性も高まってくる。

我々はFTTHの普及のキーとなる最小曲げ半径7.5 mmまで対応可能な光ファイバの最適化を行ったので報告する。

2. ファイバ寿命設計

ファイバ構造を決めるために最も重要な要素はファイバの破断に起因する製品寿命の設定である。寿命推定にはFITという概念が用いられる。FITとは1 h当たりの故障率が 1×10^{-9} の状態を1FITとするという考え方であり、電気部品等の寿命推定に一般的に用いられている。一般的な光ファイバの破断確率は $4.7 \times 10^{-3}/\text{km}$ 以下と設定されているので、ファイバの寿

命を20年と仮定すると1 km当たりの通常光ファイバのFIT数は26.83 FIT以下と言える。

ファイバの破断確率の推定には(1)式が用いられる⁵⁾。

$$\lambda = \alpha \cdot N_p \cdot \frac{B_p/E^2}{(B/E^2)^\beta} \cdot \frac{(\bar{\varepsilon}^n \cdot t_s)^\beta}{\varepsilon_p^{n_p} \cdot t_p} \quad (1)$$

α : m/n_p

N_p : スクリーニング試験時の単位長当りの破断回数

B_p/E^2 : 環境により決定する係数
 $(B/E^2)^\beta$

$\bar{\varepsilon}$: 等価負荷ひずみ

ε_p : スクリーニング試験印加応力

n_p : スクリーニング試験時の疲労係数

n : 使用環境での疲労係数

t_p : ε_p が付加される時間

t_s : $\bar{\varepsilon}$ が付加される時間

(1)式のうち通常のファイバと異なるのは設置時の応力 ε である。図1に示すように、光ファイバは曲げ径を小さくすると、印加される応力が増大する。(1)式によると設置時の応力増加は破断率の増大、つまりFIT数の増大を招く。図1によると、設置時の応力を低減するためにはクラッド径を小さくすることと被覆径を大きくすることが効果的である。しかし、FTTHのようなシステムでは工事時のファイバ取り扱いを通常ファイバと同様にすることにより工事コストを増大させないことも重要なファクターであるため、設置時後の応力増大があることを前提での信頼度設計が必要である。

通常のファイバと比較して疲労係数やファイバ平均生存長、強度パラメータを向上させることは製法上難しいため、クラッド径を維持しつつ、小さな最小曲げ半径を保証するためにはブルーテストレベルを上げることが必要である。通常の光ファ

* 研究開発本部 ファイナルフォトリクス研究所

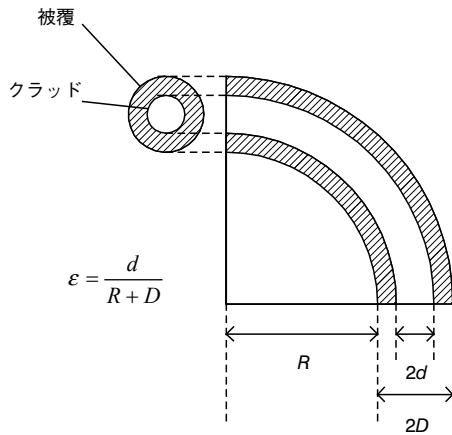


図1 曲げによるファイバへのストレス
Fiber stress by bending.

ファイバのブルーテスト応力は0.69 GPaが要求されている。これは、ひずみにして1%の伸びをファイバに与えたものと同等である。

屋内でのファイバ取り回しを考慮すると直角折り曲げは部屋内で4箇所程度、壁の内部で16箇所程度、合計20箇所程度が想定される。直角折り曲げを1/4ターンとすると屋内配線時の曲げは5ターンと想定できる。これにアクシデントによる曲げとして更に5ターンのマージンを加えた10ターンの曲げを加えた場合のFIT数を計算することにより屋内での布設におけるFIT数増加が見積もれる。屋外での使用を前提とした場合、最もシビアな条件はクロージャ内の収納と考えられる。現状のクロージャでは具体的な小曲げ径化の要求は無いが、今後のクロージャの小型化には余長収納部の細径巻きが要求される可能性がある。しかし、現状では屋内での配線よりも厳しく要求される可能性は低く、屋内配線での環境条件を満たせば、クロージャ内収納で問題になることはないと考えられる。

図2に10ターンの曲げ付与によるFIT数の増加量を示す。局所的な曲げの付与が無い場合ケーブル自体のFITは1%のブルーレベルで十分目標FIT数を満たしている。また、通常最小曲げ半径30 mmはケーブル自体のFIT数より十分に小さく、信頼度を劣化させることはない。これに対して最小曲げ半径15 mmになるとケーブル自体のFITと曲げによって増加したFITの合計は目標値ギリギリとなり、1%よりも大きなひ

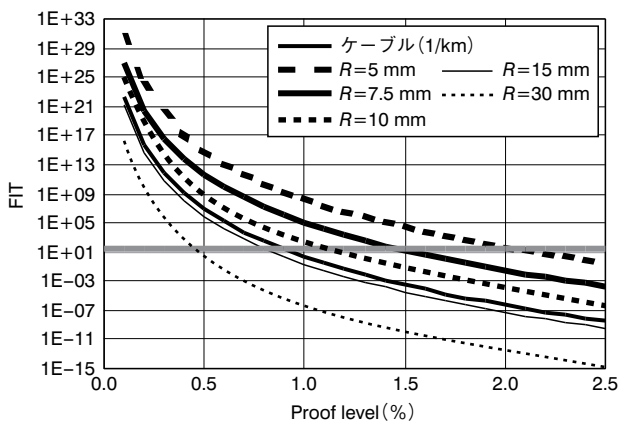


図2 曲げ付与によるFIT数
Relationship between fiber bending and FIT.

ずみを加えたブルーテストが望まれる。また、最小曲げ半径を10 mmとした場合は1%のブルーレベルでは曲げ付与によるFIT数増加のみで目標FIT数を超過してしまう。更に最小曲げ半径を7.5 mmと仮定した本開発ではブルーレベルを1.5%としても目標を満たすことができない。このため、最小曲げ半径を7.5 mmとした場合は2%のブルーレベルが必要かつ十分な値であることが分かる。もし、最小曲げ半径を5 mmに設定した場合は2%のブルーレベルでも十分なFIT数が確保できないことが分かる。2%以上のブルーレベルは製造上望ましくないため、最小曲げ半径を5 mmとするファイバはクラッド径125 μmのファイバでは実現できないことが分かる。

3. 光学特性上の要求事項

光ファイバを最小曲げ半径7.5 mmにて使用するためには曲げ損失の設計も重要である。FTTHのようなシステムでは信号光は1310 nmで使用されるが、1650 nmの監視光も同時に使われる。つまり、曲げロス特性は、より敏感な1650 nmの値を満たす必要がある。通常ファイバと比較して小さな径に巻いて使うことが前提なので、曲げロスを低減することが要求条件となる。本開発においては半径7.5 mmの曲げが10箇所付与されたときのロス増加を0.1 dB以内とすることで、工事やアクシデントによる損失増加または損失変動を防ぐことを目標とした。

また、曲げロスを低減することは一般的にモードフィールド径(MFD)縮小の傾向につながる。FTTHのようなシステムではフィールドでの接続は主に安価なメカニカルスプライスを用いた接続が用いられている。メカニカルスプライスにおいて、接続損失はMFDの大きさとコア偏心量で決まる。このため、使用波長帯におけるMFDの縮小を避けることが重要である。

宅内配線のみであれば条長はあまり長くないので分散の影響はほぼ無視できるといってよい。しかし、このファイバを架空ケーブルにまで適用した場合、比較的長い条長で用いられるので分散も重要なファクターとなる。近年のアクセスシステムではPONシステム⁶⁾など比較的広い波長範囲を用いたアプリケーションも使われ始めている。これらのアプリケーションに対応するため、本開発においては分散特性も通常のG.652ファイバと同等となることを目標とした。

4. 光学特性の設計

図3に単峰型プロファイルを示す。通常のSMFは図3の様な単峰型で構成されている。この構造ではコアの比屈折率差(Δ)、コア形状を示すα、そしてコア径で特性が決まる。1310 nm帯で使用するためにはカットオフ波長が1250 nm以下であることが必要である。カットオフを1250 nmとし、α、Δを変化させたときの1310 nmでのMFDと曲げロスの関係を図4に示す。図4によると、αを2~10、Δを0.2~1.0%に変化させてもMFDと曲げロスのトレードオフ関係にあり、MFDを維持しながら曲げロスを抑制することはできないことが分かる。

MFDの低減を防ぎながら曲げ損失を低減するためには異なるプロファイル構造を選択する必要がある。センターコアの外側にディプレスト層を持つW型プロファイルはカットオフ波長を短波長にシフトすることができる構造としてよく知られて

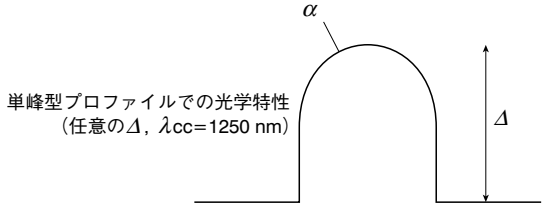


図3 単峰型プロファイル Simple refractive index profile.

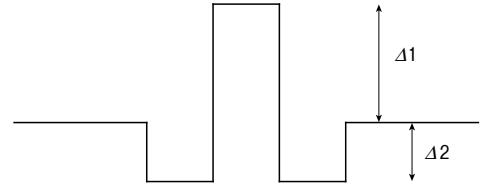


図5 W型プロファイル W-shaped refractive index profile.

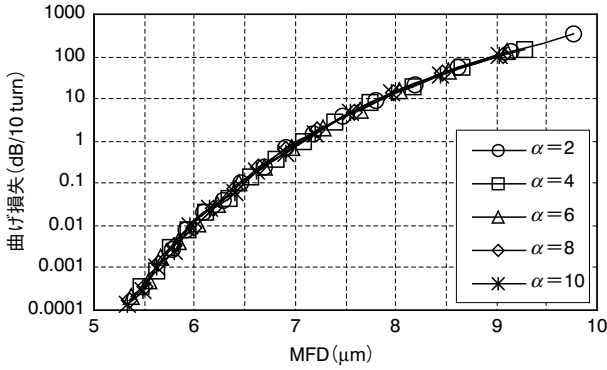


図4 単峰型プロファイルの曲げロスとMFD Macro-bend loss vs. MFD for simple refractive index fiber.

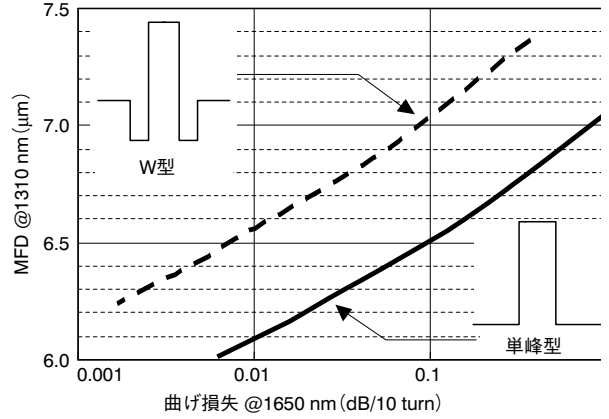


図6 曲げロスとMFDの予測結果 Simulation results of macro-bending loss vs. MFD for W-shaped and simple refractive index profiles.

いる。逆にカットオフ波長を維持すればMFDの拡大が可能である。図5にW型プロファイルを示す。図6に単峰型プロファイルとW型プロファイルの1650 nmの曲げ損失と1310 nmでのMFDの関係を示す。要求事項は1650 nmで0.1 dB/10ターン以下の曲げロスとすることであるが単峰型では6.5 mであるのに対して、W型では7.0 μmと0.5 μm程度拡大できることを示している。

図7に単峰型プロファイルとW型プロファイルを使用した場合の分散特性のシミュレーション結果を示す。分散特性のシミュレーションにおいて、1650 nmの曲げ損失は0.1 dB/ターンに固定して計算を行った。また、W型プロファイルのものはすべて単峰型よりもMFDが大きくなる構造を選択した。単峰型プロファイルを使用した場合分散特性は通常SMFとは異なりゼロ分散波長は長波長にシフトし、1550 nm帯での分散値は小さくなる。これに対してW型プロファイルを用いた場合、ディプレスト層を変化させることにより分散カーブをコントロールできる。図7では1310 nmでのMFDを変化させたときの最適分散カーブの例を示したが、どのMFDを選択しても同様に分散カーブのコントロールが可能であることが分かる。

5. 接続損失の推定

ファイバ軸ずれ時の接続損失 η_d は一般的に(2)式で表される⁴⁾。

$$\eta_d = \left(\frac{2W_1 \cdot W_2}{W_1^2 + W_2^2} \right)^2 \exp \left(- \frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (2)$$

W_1 : ファイバ1のMFD半径
 W_2 : ファイバ2のMFD半径

(2)式に従い、MFDが変化した時の軸ずれ量に対する接続損失の変化を図8に示す。G.652で規定されているMFD偏心の最大値は0.8 μmである。今回の設計において1310 nmのMFD

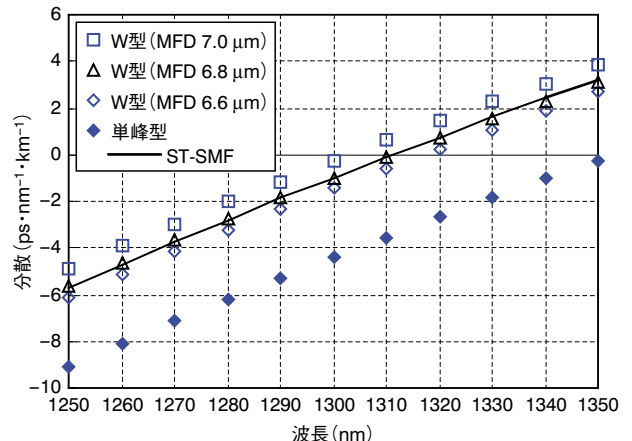


図7 分散特性のシミュレーション結果 Calculated results of chromatic dispersion.

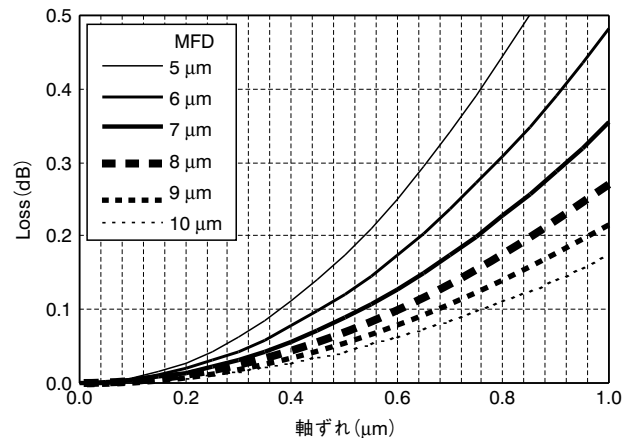


図8 軸ずれによる接続損失推定値 Estimated of splice loss with fiber offset.

は7.0 μmであるので、(2)式を用いると接続損失の最大値は0.23 dBと推測される。

(2)式ではフィールド分布にガウシアン近似を用いているので、今回のようなW型プロファイルでは正確な推定ができない可能性がある。このため接続損失 η を、フィールド分布を用いた式(3)を用いて見積もることを検討した。

$$\eta = \frac{\left(\int_S \phi_1(r) \phi_2(r) dS \right)^2}{\int_S \phi_1(r)^2 dS \int_S \phi_2(r)^2 dS} \quad (3)$$

シミュレーションにより求めたフィールド分布を用いて(3)式により単峰型プロファイルでの接続損失を計算し、(2)式での結果との比較を行った。図9に比較した結果を示す。図9によると、両者は軸ずれの小さな領域でよく一致している。軸ずれが大きくなると次第に両者に誤差が発生し始める。これは、モードフィールドの裾の部分が近似とずれてきているからと予想できる。これに対してW型同士での接続損失の比較を図10に示す。図10でもあまり両者の損失の値は変わらないことが分かる。同種ファイバの接続において、(2)式はW型プロファイルでの接続損失の推定にも有効であることが分かる。図11に単峰型ファイバでの接続損失を示す。こちらもW型プロファイルのファイバと同様に(2)式の有効性が示されている。

今回開発したファイバを新規に布設する際には既設のSMF伝送路と接続される。このため、通常SMFと本試作ファイバの接続損失についても計算した。SMFと単峰型、W型での接続損失の推定値を図12、13に示す。図12、13によると両方の式での値の差は単峰型の方が大きく、どちらの結果でも式(3)での損失推定値が小さく見積もられていることが分かる。

6. 試作ファイバの特性

表1にW型プロファイルを持つFTTHファイバの光学特性評価結果を示す。また比較として、1650 nmでの曲げ損失を同等とした単峰型屈折率プロファイルの光ファイバの光学特性を示す。図14に本試作ファイバの曲げロスとMFDの実測値とシミュレーションの値を示す。図14より、両者ともシミュレーションと比較して曲げ損失が低減されていることが分かる。測

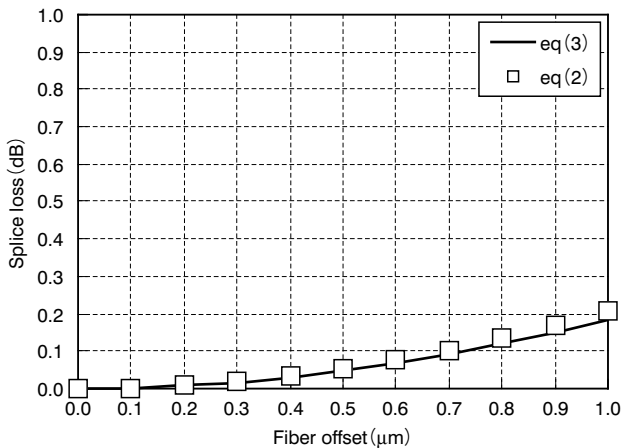


図9 式(2)、(3)での通常SMFの接続損失推定値
Splice loss of conventional SMF estimated using equations (2) and (3).

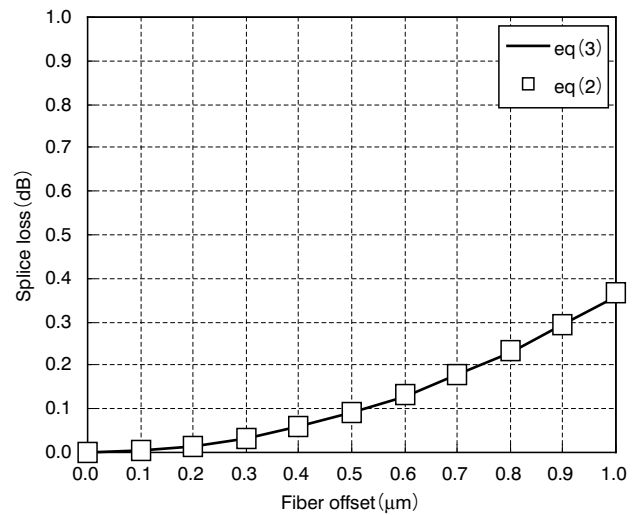


図10 式(2)、(3)でのW型ファイバの接続損失推定値
Splice loss of W-shaped refractive index fiber estimated using equations (2) and (3).

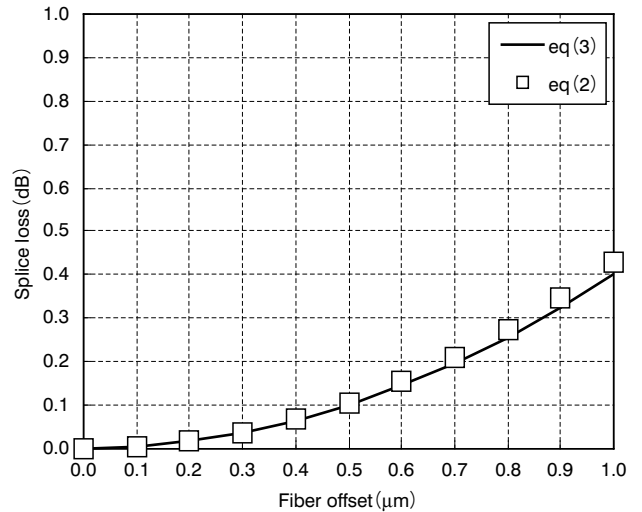


図11 式(2)、(3)での単峰型ファイバの接続損失推定値
Splice loss of simple refractive index fiber estimated using equations (2) and (3).

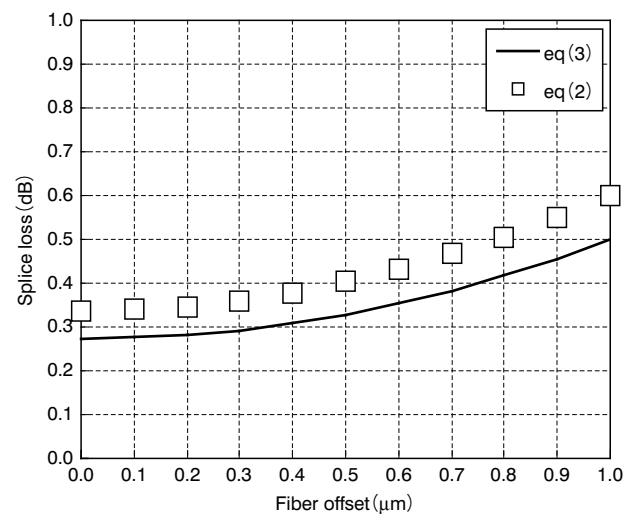


図12 SMFとW型ファイバの接続損失推定値
Splice loss between SMF and W-shaped refractive index fiber estimated using equations (2) and (3).

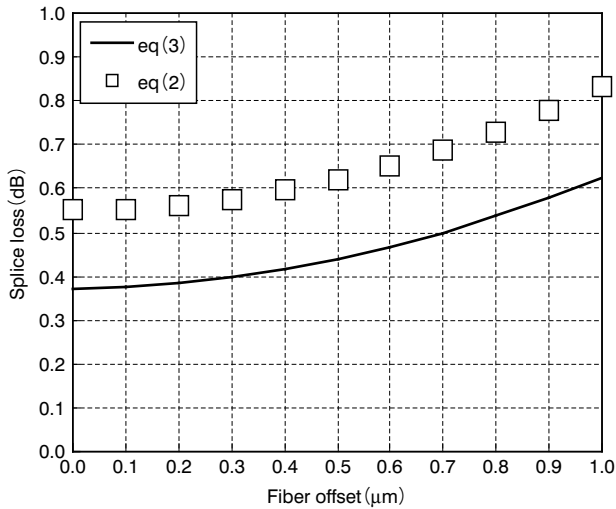


図13 SMFと単峰型ファイバの接続損失推定値
Splice loss between SMF and simple refractive index fiber estimated using equations (2) and (3).

表1 試作ファイバの光学特性
Optical characteristics of prototype fiber.

項目	波長	本試作品	単峰型
クラッド径 (μm)	—	125	125
MFD (μm)	1310 nm	7.0	6.4
	1550 nm	7.8	7.2
ケーブルカットオフ波長 (nm)	—	1227	1278
曲げ損失 (R7.5 mm × 10 turn)	1650 nm	0.03	0.02
伝送損失 (dB/km)	1310 nm	0.34	0.34
	1550 nm	0.19	0.20
波長分散 (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	1310 nm	-1.66	-3.98
	1550 nm	16.53	11.02
ゼロ分散波長 (nm)	—	1328	1363
ゼロ分散スロープ (ps · nm ⁻² · km ⁻¹)	—	0.0878	0.0907

定系の精度を考慮すると0.1 dB/10ターン以下の測定精度は低くこの程度の差は測定誤差の範囲と考えている。

本ファイバは2章での強度寿命設計に従い2%のブルーレベルを確保している。このため曲げ半径7.5 mmで曲げロス増が発生しないだけでなく、通常ファイバと同等の信頼度を確保している。更に、製品寿命や敷設時の曲げ発生箇所を低減することにより信頼度設計さえ確保できれば曲げ半径を小さくすることも可能である。図15に曲げ半径を変化させたときの曲げロスの値を示した。システムのロスマージンが大きければ曲げ半径5 mmでのロス増は1 dB/10ターン程度に抑えられていることが分かる。

W型ファイバは単峰型屈折率プロファイルと比較し、約0.6 μmのMFD拡大を実現している。また、MFD偏心率は最大0.4 μmに制御することができている。MFDの値はシミュレーションとよく一致しており、5章で検討したメカニカルブライズによる接続損失値0.1 dB@1310 nm以下に抑えることができると言える。

図16に波長分散特性を示す。波長分散特性は1310 nm, 1490 nm, 1550 nmでそれぞれ-1.7 ps/(nm · km), 12.5 ps/

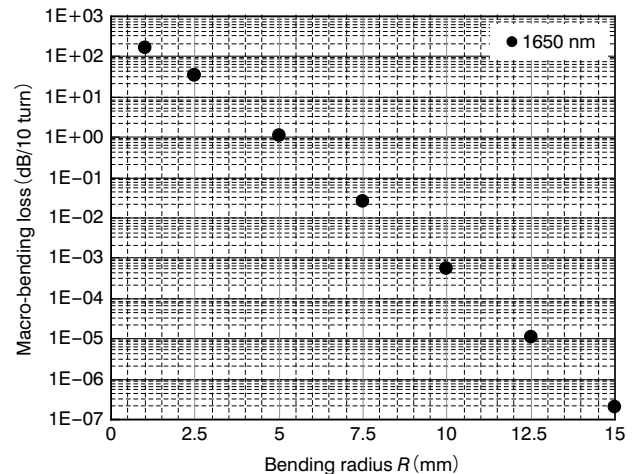


図15 曲げロスの曲げ半径依存性
Bending radius dependence of macro-bending loss.

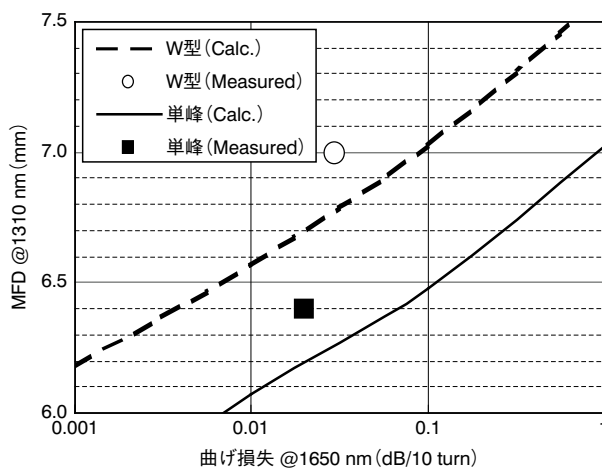


図14 曲げ損失とMFDの実測値予測値の比較
Comparison of macro-bending loss and MFD with those simulated and measured.

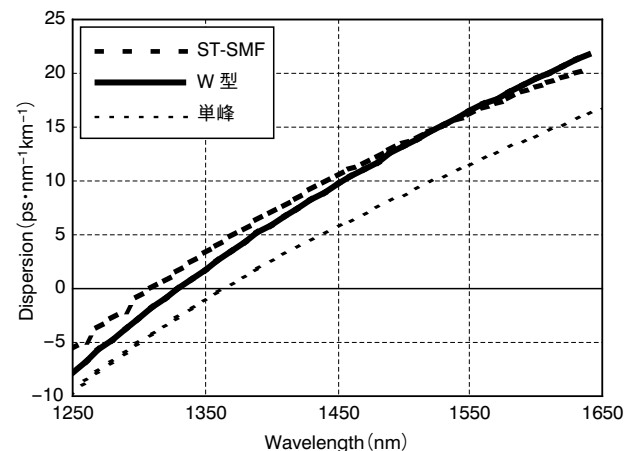


図16 波長分散特性
Chromatic dispersion curve of prototype fiber.

(nm・km), 16.5 ps/(nm・km)であった。これは予測値に対してほぼ同様の値であり、通常の単峰型では1310 nm付近に設定することのできないゼロ分散波長を1330 nm以下とすることができている。

7. おわりに

許容曲げ半径7.5 mmまで対応可能な宅内配線用光ファイバの最適化を行った。また、分散特性についても注目し、ゼロ分散波長を1310 nm付近にすることができた。このファイバは曲げ損失を低減しつつMFDの拡大を実現しており、配線性と接続性が良く、長寿命の宅内配線が実現できるだけでなく、分散特性の最適化により架空線への適用も可能である。

参考文献

- 1) T. Yasutomi, F. Nakajima, and Y. Rintsu: "Development of optical drop and indoor cable for small radius bending," Proceedings of 53rd IWCS 11-12, (2004).
- 2) I. Sakabe, H. Ishikawa, H. Tanji, Y. Terasawa, T. Ueda, and M. Ito: "Enhanced bending loss insensitive fiber and new cables for CWDM access network," Proceedings of 53rd IWCS 4-4, (2004).
- 3) H. Kutami, S. Matsuo, K. Himeno, and K. Ohashi: "Low-bending-loss and suppressed-splice-loss optical fibers for FTTH indoor wiring," OECC2004 Technical Digest 13D2-2, (2004).
- 4) D. Marcuse: "Loss analysis of single-mode fiber splices," The Bell System Technical Journal, **56** (1977), 703.
- 5) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, and Y. Ishida "Reliability assurance for long-length optical fiber based on proof testing," Electron. Lett., **17** (1981), 567.
- 6) "A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation," ITU-T Recommendation G.983.3, (2001).