

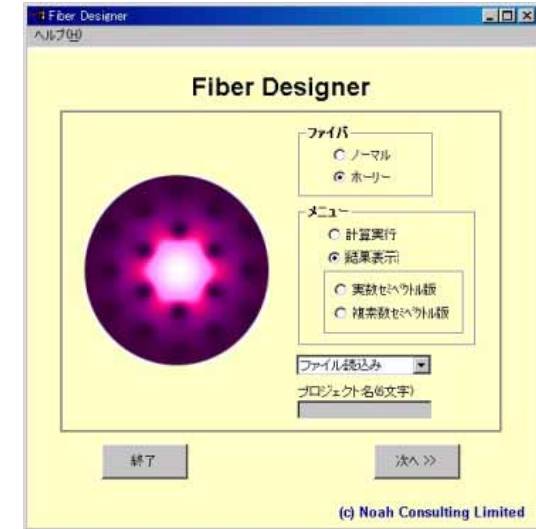
数値解析によるホーリー ファイバの 曲がりを含む損失に関する検討

横山 清行 大場 美織

ノア コンサルティング

Outline

- はじめに
- 数値解析手法
特に曲げ特性に焦点をあてて
- 数値解析結果
既報告を矛盾無く説明
ホーリー ファイバの曲げ特性
- まとめ



プログラム開発の経緯

- お客様にソリューションを提供するお仕事の中で、実際に計算してお見せする必要があった。
- これらの業務の中での蓄積技術の組み合わせが可能となった。
- Apollo社のソフトの販売実績があった。
このビジネスもソリューション提供型で共通
- ツールは必要としている方へオープンの方針。



ウェブ イメージ ニュース **New!** グループ ディレクトリ

ホーリーファイバ 曲げ

Google 検索

検索オプション
表示設定

ウェブ全体から検索 日本語のページを検索

ウェブ

ホーリーファイバ 曲げ の検索結果 約 221 件中 1 - 10 件目 (0.44 秒)

[NTT、伝送特性や曲げ特性を向上した「ホーリー...](#)

NTT、伝送特性や曲げ特性を向上した「ホーリーファイバ」の実用化にめど。新構造光ファイバ「ホーリーファイバ」における研究開発のねらい。NTT(持ち株)は、次世代の伝送媒体や...

bb.watch.impress.co.jp/cda/news/3638.html - 15k - [キャッシュ](#) - [関連ページ](#)

[FujikuraNEWS](#)

... **ホーリーファイバ**の**曲げ**損失特性。 **ホーリーファイバ**とSMFとの融着接続損失特性。 **ホーリーファイバ**の断面写真 黒い領域:空孔。 **ホーリーファイバ**とSMFとの融着接続部。光ファイバ事業部。TEL.03-5606-1206 FAX.03-5606-1536. ...

www.fujikura.co.jp/news/0409/news1.html - 15k - [キャッシュ](#) - [関連ページ](#)

[PDF](#) [接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバ](#)

ファイルタイプ: PDF/Adobe Acrobat

... 一般家庭内での光ファイバの取り扱いを平易にするという観点からは、さらなる許容**曲げ**半径の低減が重要である。このような屋内配線向けの**低曲げ**損失光ファイバの要求に対し、**ホーリーファイバ**を用い...

www.fujikura.co.jp/gihou/gihou105/pdf105/105_02.pdf - [関連ページ](#)

[News Release 031217](#)

... につながる課題も指摘されていました。そのためNTTでは、バックボーンの超大容量化によるネットワークの経済化を目指し、従来の光ファイバよりも優れた伝送特性や**曲げ**損失特性を備えた**ホーリーファイバ**の研究開発を...

www.ntt.co.jp/news/news03/0312/031217.html - 8k - [キャッシュ](#) - [関連ページ](#)

[PDF](#) [極小径曲げ対応ホーリーファイバの開発](#)

ファイルタイプ: PDF/Adobe Acrobat - [HTMLバージョン](#)

Page 1. 情報通信 - () - 極小径**曲げ**対応**ホーリーファイバ**の開発 72 2. **ホーリーファイバ**の特徴 ... 極小径**曲げ**対応**ホーリーファイバ**の開発 西岡大造・長谷川健美・斎藤達彦 笹岡英資・細谷俊史 Page 2. ...

www.sei.co.jp/tr/t_technical_pdf/seil0387.pdf - [関連ページ](#)

[論文概要](#)

タイトル、極小径**曲げ**対応**ホーリーファイバ**の開発。概要、光通信システムに対する大容量化と低コスト化の要求が高まるにつれて、小径**曲げ**で布設できる光ファイバを用いた高密度...

www.sei.co.jp/tr/staticFile/13/rakcat&

[DESTINATION=TLVL03&TECHNICAL_CD=119.htm">DESTINATION=TLVL03&TECHNICAL_CD=119.htm](#) - 8k - [キャッシュ](#) - [関連ページ](#)

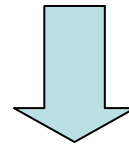
[[他、www.sei.co.jp内のページ](#)]

[PDF](#) [ホーリーファイバ](#)

Googleによる「ホーリーファイバ 曲げ」の検索結果

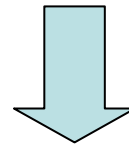
imited

多くの機関で「曲げ特性の重要性」に着目



にもかかわらず

ホーリーファイバに関する数ある数値解析報告で、曲げ特性に関する報告は少ない。



なぜ

数値解析が難しいから



曲げを含む数値解析の現状

曲げを含む数値解析の現状(1)

Technical University of Denmark

Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre

T. Sørensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen and S.E. Barkou Libori

Photonic crystal fibres are examined with respect to bending loss. An equivalent step-index fibre is modelled using an effective-index approach for the microstructured cladding. Measurements have been performed in a broad spectral range, and the results agree well with the calculated losses.

Electron. Lett, vol. 37,
pp.287-289, March 2001.

Spectral macro-bending loss considerations for photonic crystal fibres

T. Sørensen, J. Broeng, A. Bjarklev, T.P. Hansen, E. Knudsen, S.E.B. Libori, H.R. Simonsen and J.R. Jensen

Abstract: Both a scalar method and a fully vectorial method have been applied to modelling the bending losses in photonic crystal fibres (PCFs). Due to a decreasing index difference between the core and the cladding towards short wavelengths, an unusual loss mechanism is seen, that is a short-wavelength loss edge. This is verified by measurements. For large-mode area PCFs, the model gives a massive overestimate, never an underestimate.

IEE Proc. Optoelectron., vol. 149, pp. 206-210, Oct./Dec. 2002.

曲げを含む数値解析の現状(1)

Technical University of Denmark

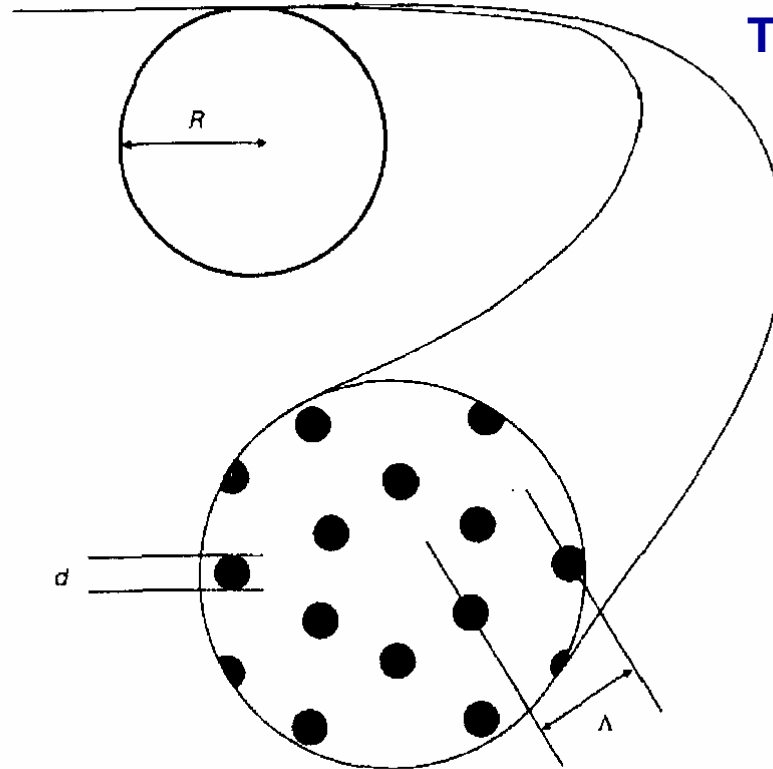


Fig. 1 Schematic of a PCF with a bend radius R

The end view shows a scanning electron micrograph of a fibre with air hole diameter $d = 2.4 \mu\text{m}$ and pitch $\lambda = 7.8 \mu\text{m}$. Effective mode area is approximately $100 \mu\text{m}^2$ at 1550 nm

fibres Sakai and Kimura [7] considered an arbitrary index profile and calculated α perturbatively:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi} A_e^2 \rho \exp(-4\Delta W^3 R / (3\rho V^2))}{8 P W \sqrt{WR} / \rho + V^2 / (2\Delta W)} \quad (1)$$

解析式に対して、数値解析で求めたパラメータを反映

ある構造で説明できても構造が変われば説明できない、いわゆるフィッティングに過ぎない。

曲げを含む数値解析の現状(2)

Understanding bending losses in holey optical fibers

Joanne C. Baggett *, Tanya M. Monro, Kentaro Furusawa,
Vittoria Finazzi, D.J. Richardson

Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK

Received 7 January 2003; received in revised form 23 September 2003; accepted 24 September 2003

Abstract

Extremely large mode area fibers that are single-moded over a broad wavelength range can be created using holey fiber technology. However, as with any fiber, the largest mode areas that are practically feasible are ultimately determined by bending losses. It is therefore essential to gain an understanding of the factors that influence bend loss in these fibers in order to form accurate predictions that can facilitate improved bend loss design. Here, we present the first detailed study of transition loss and pure bend loss in a holey fiber, and consider the impact of the fiber structure. A theoretical model is derived that retains the full refractive index profile of a holey fiber. This approach is used to predict the bend loss in large mode area holey fibers and is validated through comparison with experimental data. For the fibers under study here, we demonstrate that pure bend loss is the dominant component of macro-bend loss and that the hole configuration within the cladding can strongly influence this loss.

© 2003 Elsevier B.V. All rights reserved.

Optics Communications, vol. 227, pp. 317-335, 2003

示唆に富む非常に優れた論文



曲げを含む数値解析の現状(2)

University of Southampton

Hermite-Gaussian basic function

$$\mathbf{E}_j(x, y, z) = \mathbf{e}_j^t(x, y) + e_j^z(x, y) \hat{\mathbf{z}} \exp(i\beta_j z), \quad (1)$$

$$\mathbf{e}^t(x, y) = \sum_{a, b=0}^{F-1} (\varepsilon_{ab}^x \psi_a(x) \psi_b(y) \hat{\mathbf{x}} + \varepsilon_{ab}^y \psi_a(x) \psi_b(y) \hat{\mathbf{y}}), \quad (2)$$

次数の選択

$$\psi_i(x) = \frac{2^{-1/2}}{\sqrt[4]{\pi} \sqrt{i!} w_m} \exp\left(\frac{-x^2}{2w_m^2}\right) H_i\left(\frac{x}{w_m}\right). \quad (3)$$

Characteristics widthの決定

精度と計算時間に関係

曲げを含む数値解析の現状(2)

University of Southampton

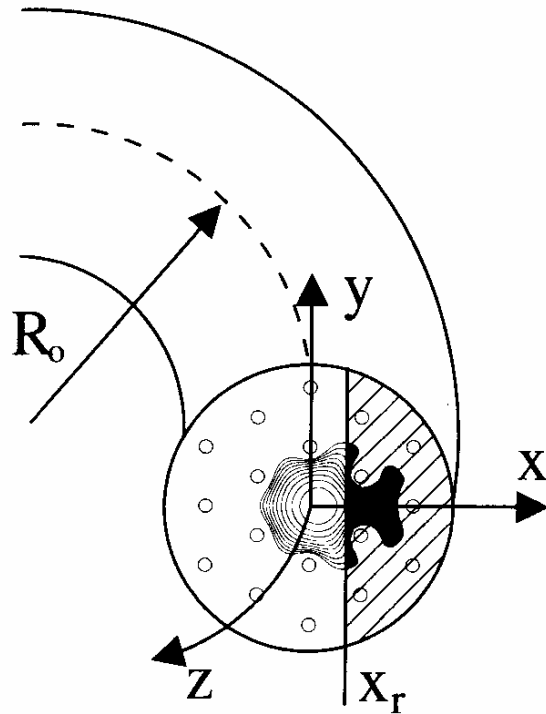


Fig. 5. Mode propagating in the z -direction around a bend of radius R_0 in the x -direction.

suffering loss, the local group velocity along the phase fronts of the mode must decrease on the inside of the bend and increase on the outside of the bend in order to maintain a constant angular velocity across the mode. At some distance towards the outside of the bend (x_r), the required group velocity will exceed the local speed of light. This condition is given by

$$x_r = \left(\frac{\beta_b}{\beta_c} - 1 \right) R_0, \quad (6)$$

曲げ損失を評価するための x_r (積分領域を決定する値)を求めなければならない。

このように、プログラムを上手に使うのは難しいと思われる。

我々の数値解析手法

- ・Maxwellの方程式を有限差分法で求解
- ・複素数の固有値解析

$$A(z) = A(0)e^{-j\beta z} = A(0)e^{-j(n_r + jn_i)\frac{2\pi}{\lambda}z}$$

複素固有値

その虚部

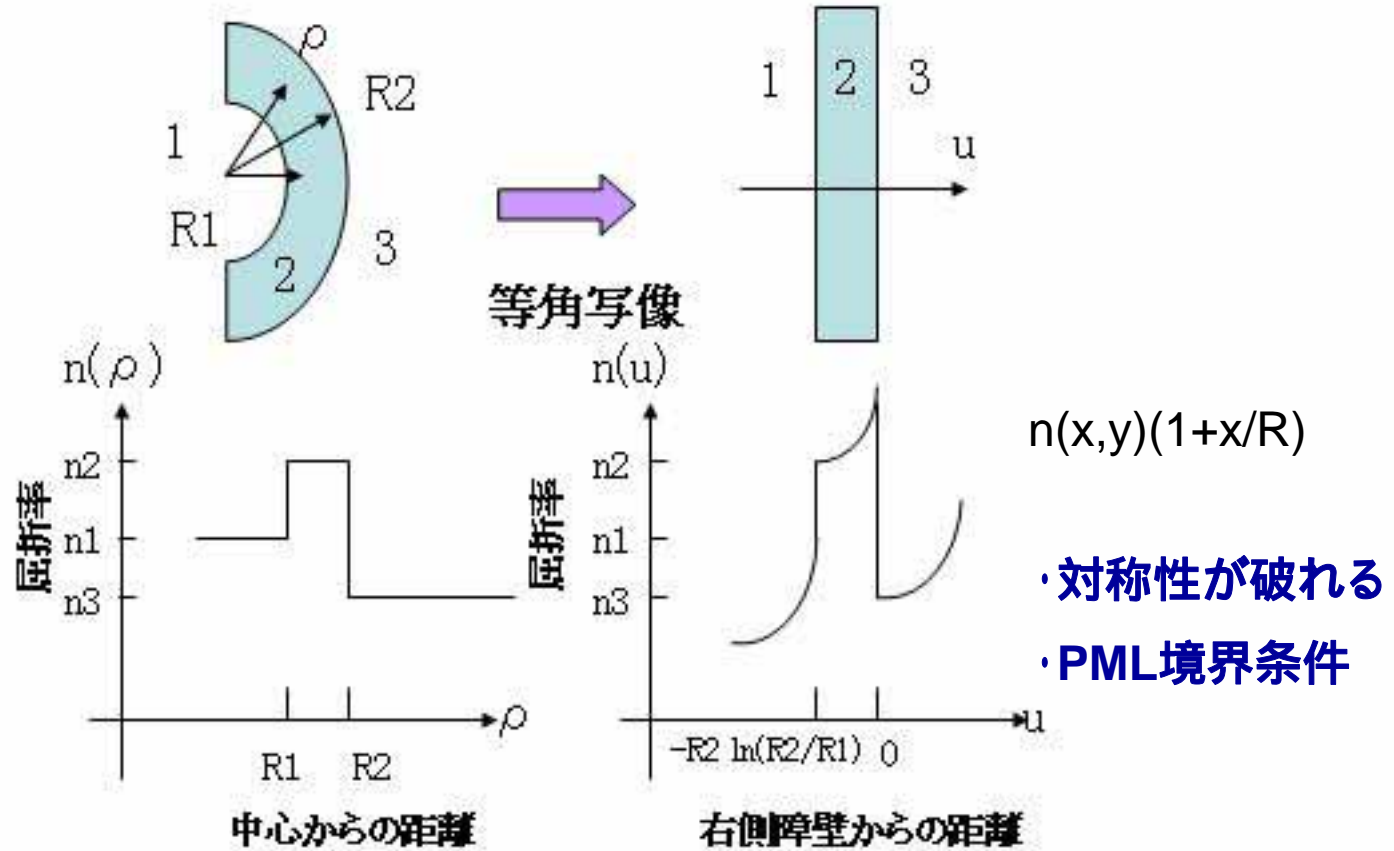
$$\alpha(z) = 20 \log_{10} \left(\frac{|A(z)|}{|A(0)|} \right) = 20 \log_{10} \left(e^{-2\pi n_i \frac{z}{\lambda}} \right)$$

閉じ込め損失(Confinement Loss) [dB/m]

直線HFの低損失化の設計でも重要な設計パラメータ

0.28 dB/km の報告では閉じ込め損失 < 0.01dB/km @ 1.55 μ m

曲げ効果



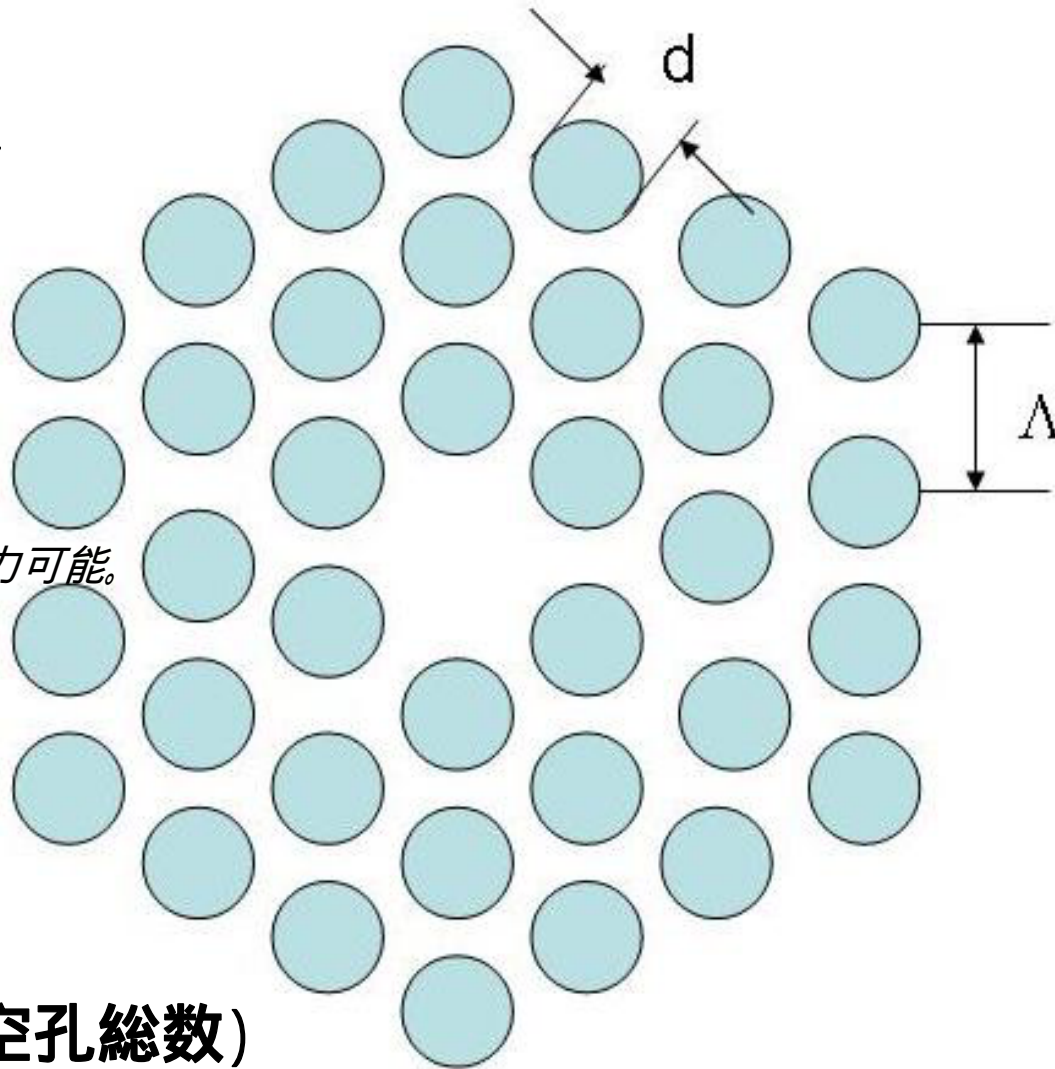
(a)
曲がり導波路

(b)
直線導波路 → 問題の簡単化

屈折率モデルはセルマ
イヤーの式を用いた。

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$$

その他のモデルやテーブル入力可能。



- ・空孔径
- ・ピッチ
- ・リング多重度(空孔総数)

今回の報告で対象とした構造

Confinement losses in microstructured optical fibers

T. P. White, R. C. McPhedran, and C. M. de Sterke

School of Physics, University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia

L. C. Botten

School of Mathematical Sciences, University of Technology, Sydney, NSW 2008, Australia

M. J. Steel

Department of Applied Physics, Columbia University, 500 West 120th Street, New York, New York 10027

Received May 9, 2001

We describe a multipole formulation that can be used for high-accuracy calculations of the full complex propagation constant of a microstructured optical fiber with a finite number of holes. We show how the imaginary part of the microstructure, which describes confinement losses not associated with absorption, varies with hole size, the number of rings of holes, and wavelength, and give the minimum number of rings of holes required for a specific loss for given parameters. © 2001 Optical Society of America

OCIS codes: 060.2280, 060.2400.

Optics Lett., vol. 26, pp. 1660-1662, Nov. 2001

リングの多重度増加
d/Λ大

閉じ込め損失
1680 dB/m

実効断面積
A_{eff}=10.6μm²@1.55μm

マルチポール定式化



曲げは適用不可
閉じ込め損失OK

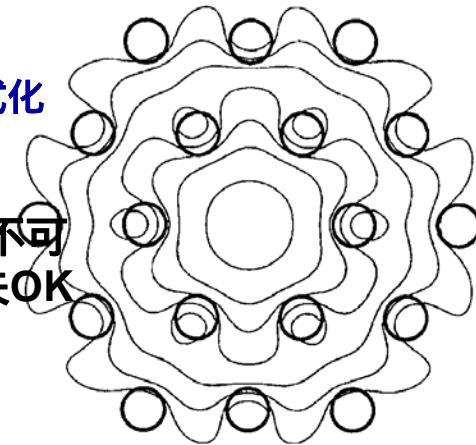
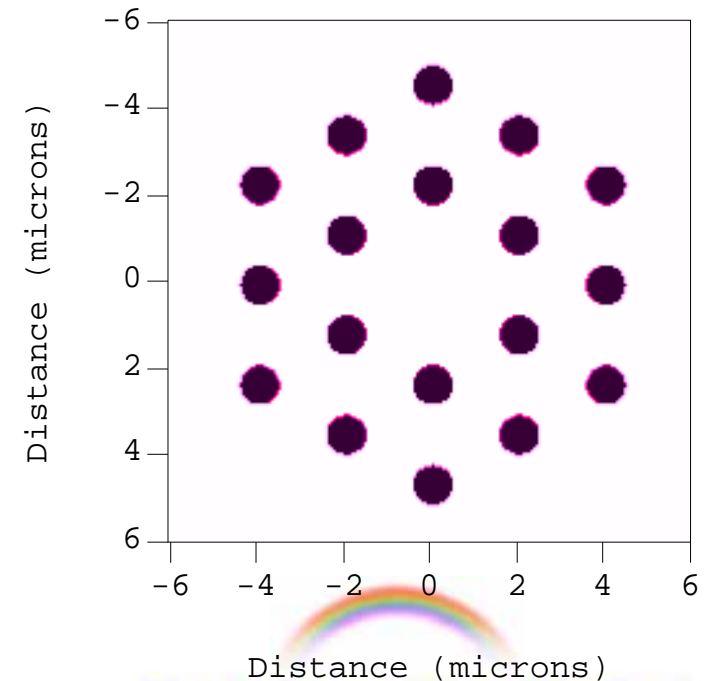
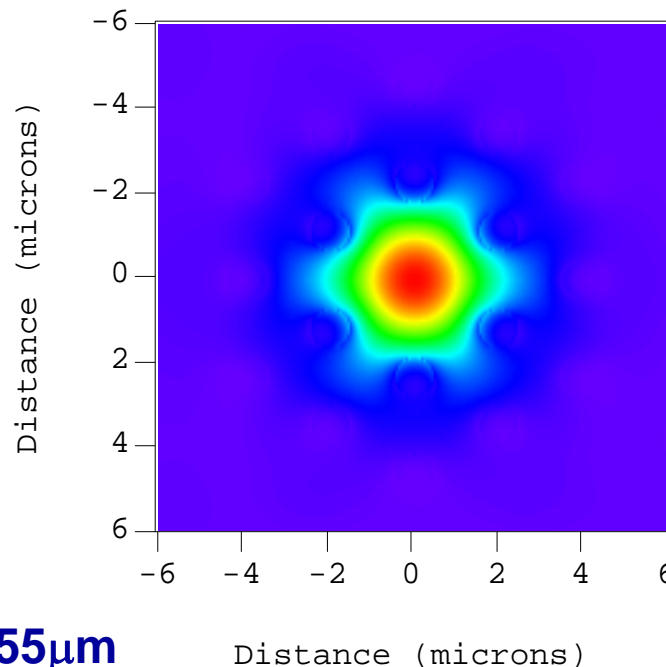


Fig. 1. Longitudinal component of the Poynting vector of the leaky fundamental mode of the MOF consisting of 18 holes of diameter $d = 0.92 \mu\text{m}$ with spacing $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$. At $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ the structural loss of this mode is 1600 dB/m. Contour lines are at 0.5-dB intervals.



Noah Consulting Limited

Low water peak photonic crystal fibres

K. Tajima, J. Zhou, K. Kurokawa, and K. Nakajima
NTT Access Network Service Systems Laboratories
1-7-1 Hanabatake, Tsukuba, Ibaraki, Japan
Email: tajima@ansl.ntt.co.jp

ECOC, pp.42-43, 2003

Abstract We have succeeded in development of a low loss (0.28dB/km) photonic crystal fibre by dehydration process. The lowest OH absorption peak at 1.38 μ m was 0.4dB/km. This is comparable to that of a conventional single-mode fibre.

5重リング、 $d=4\mu\text{m}$, $\Lambda=8\mu\text{m}$

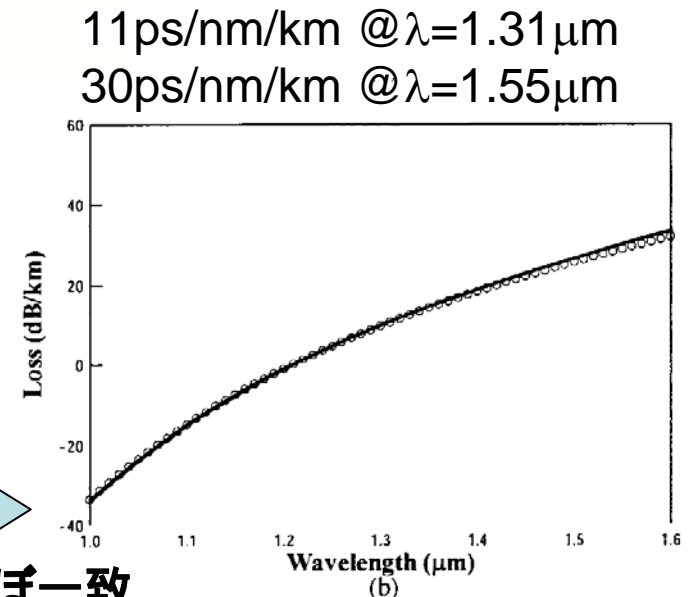
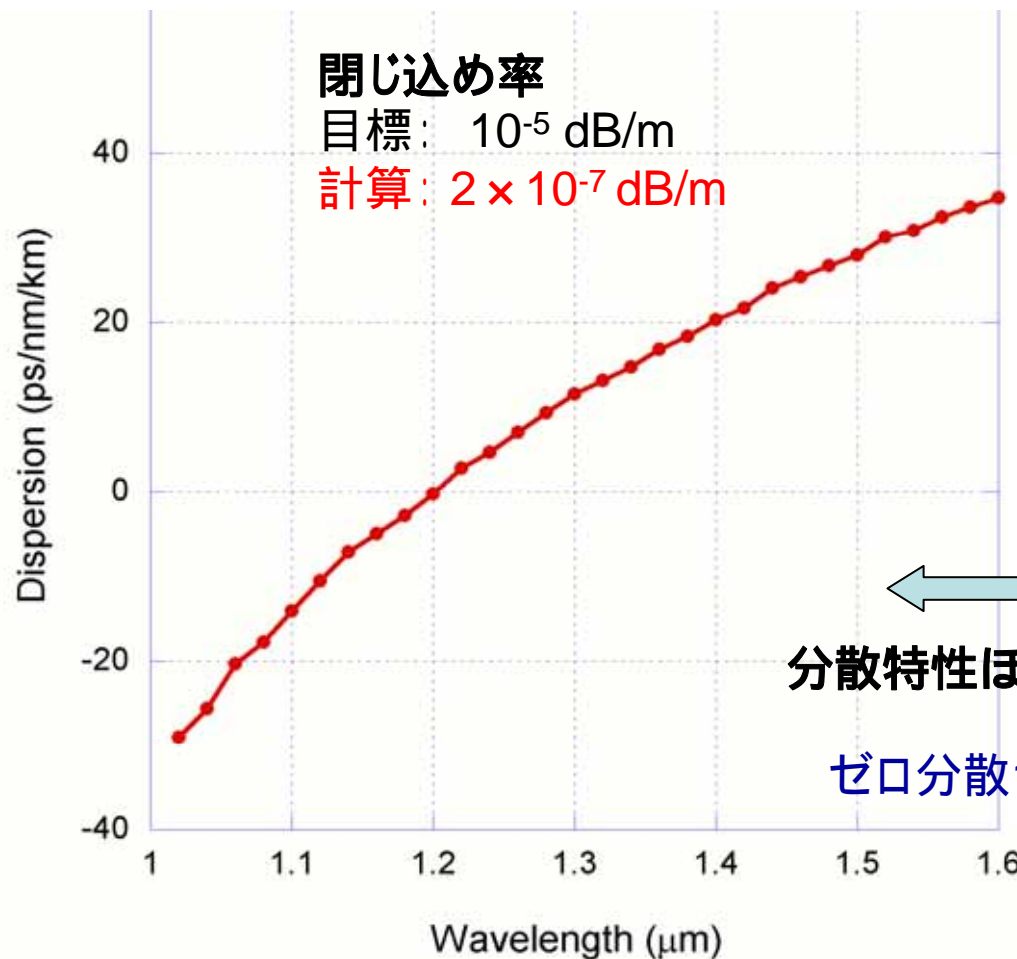
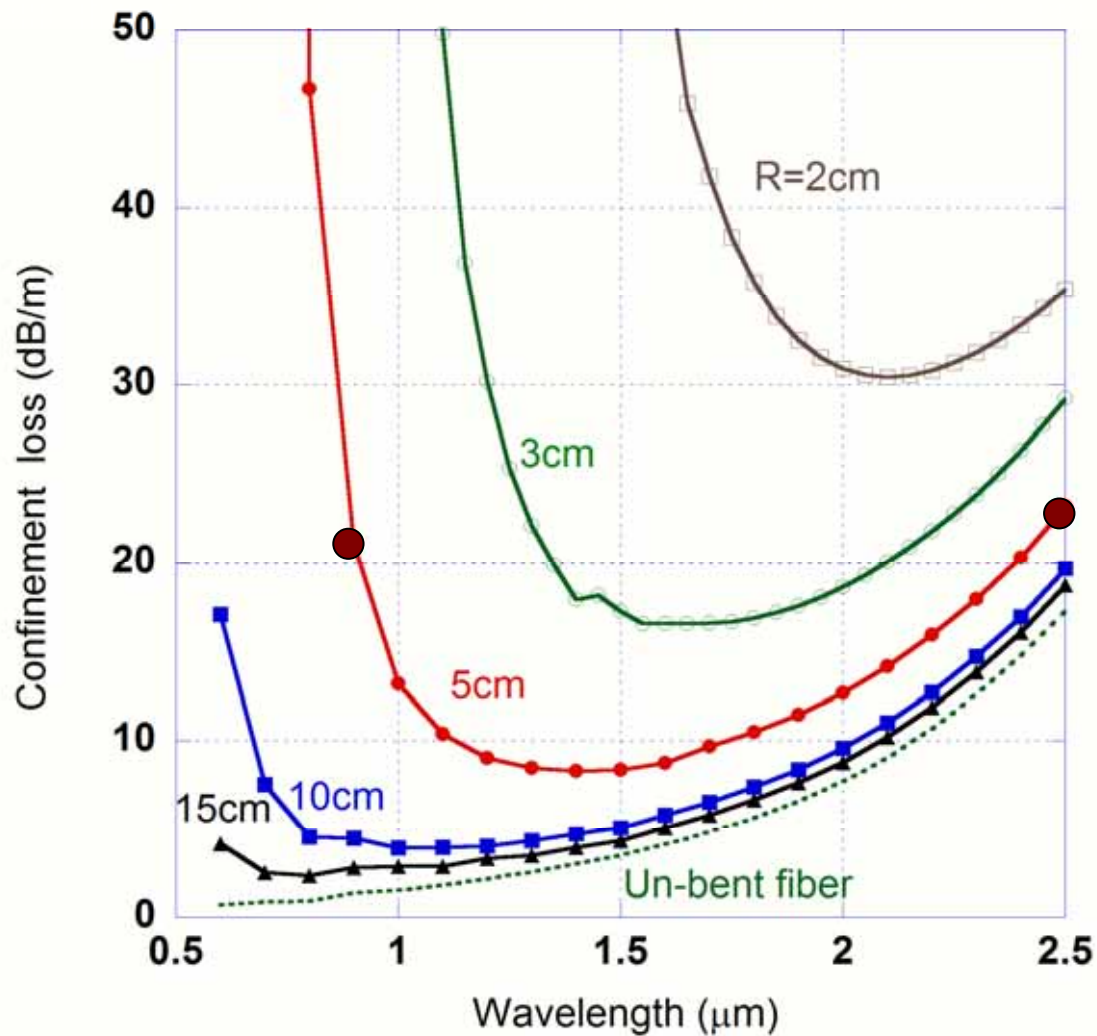


Fig. 1. Optical properties of lowest loss PCF
(a) Optical attenuation (b) Dispersion



$d=2.4\mu\text{m}$, $\Lambda=7.8\mu\text{m}$

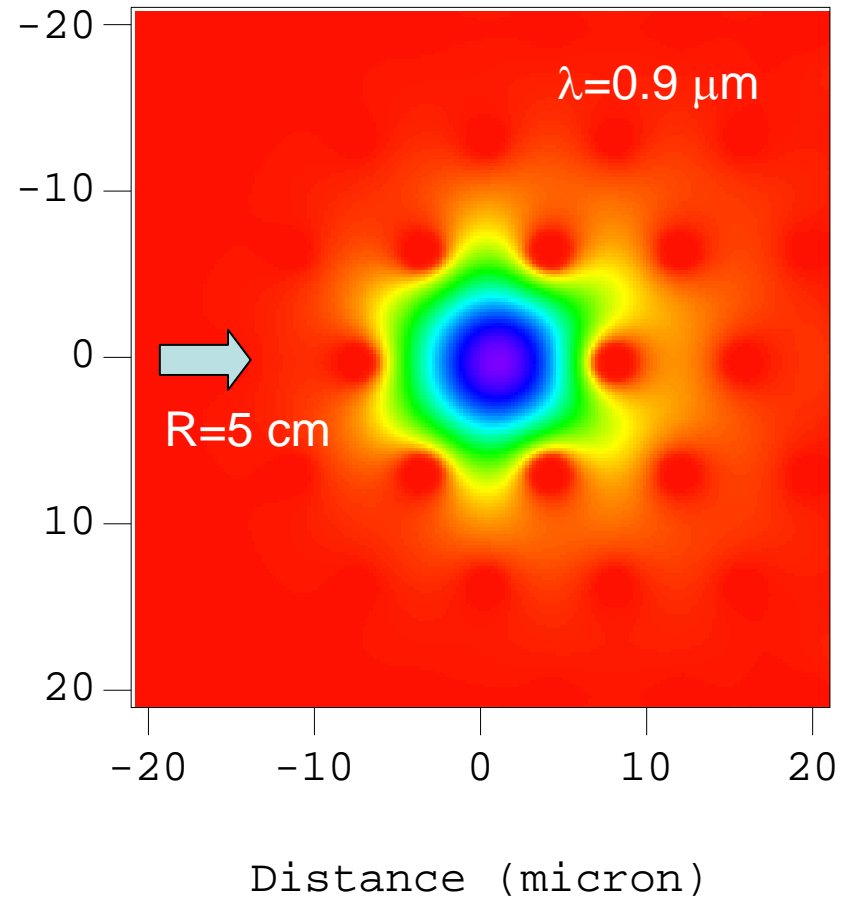
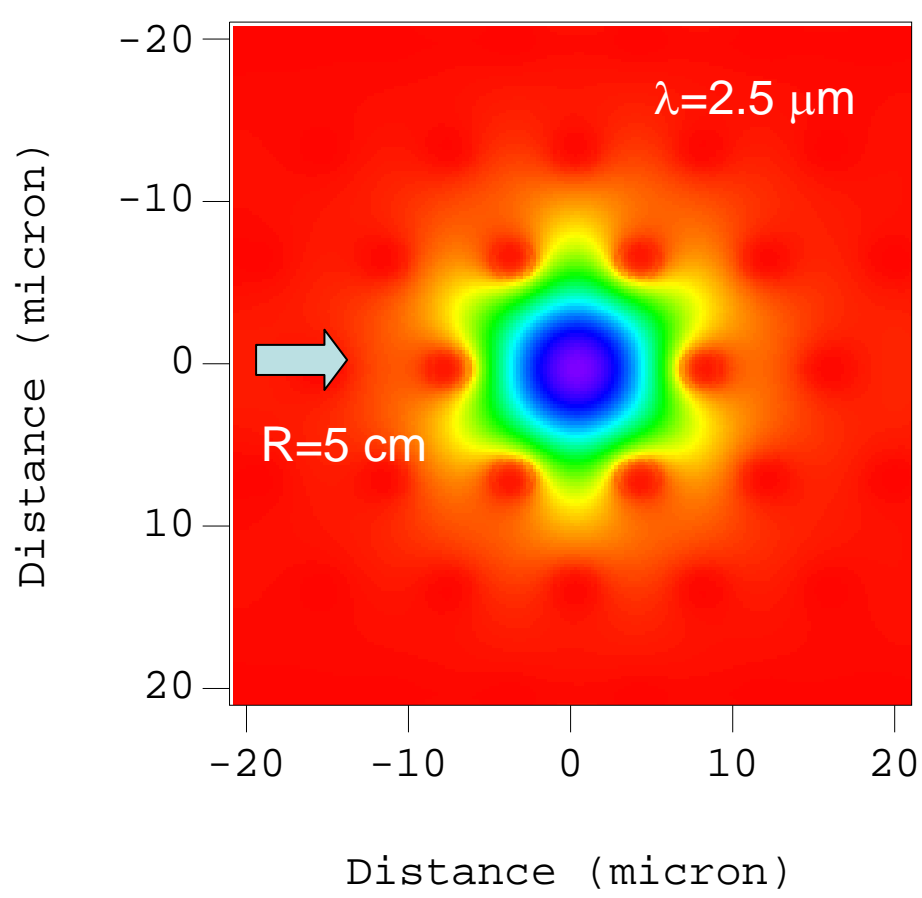
$A_{\text{eff}}=109.1\mu\text{m}^2@1.5\mu\text{m}$

閉じ込め損失が最小となる波長はRに依存している。



Sorensenは $\Lambda/2$ で最小

● に対応する点でのフィールド分布は次ページ

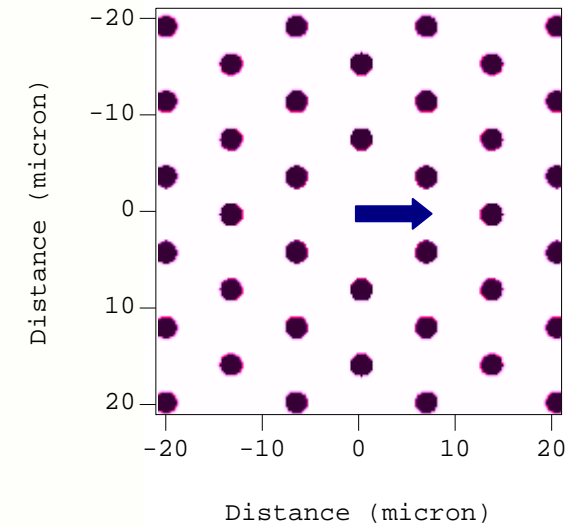
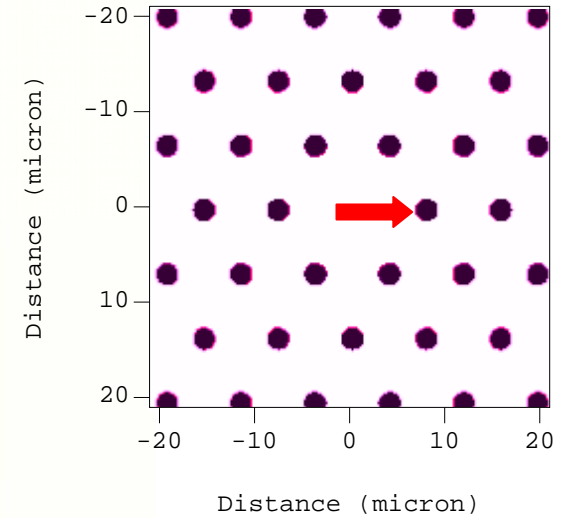
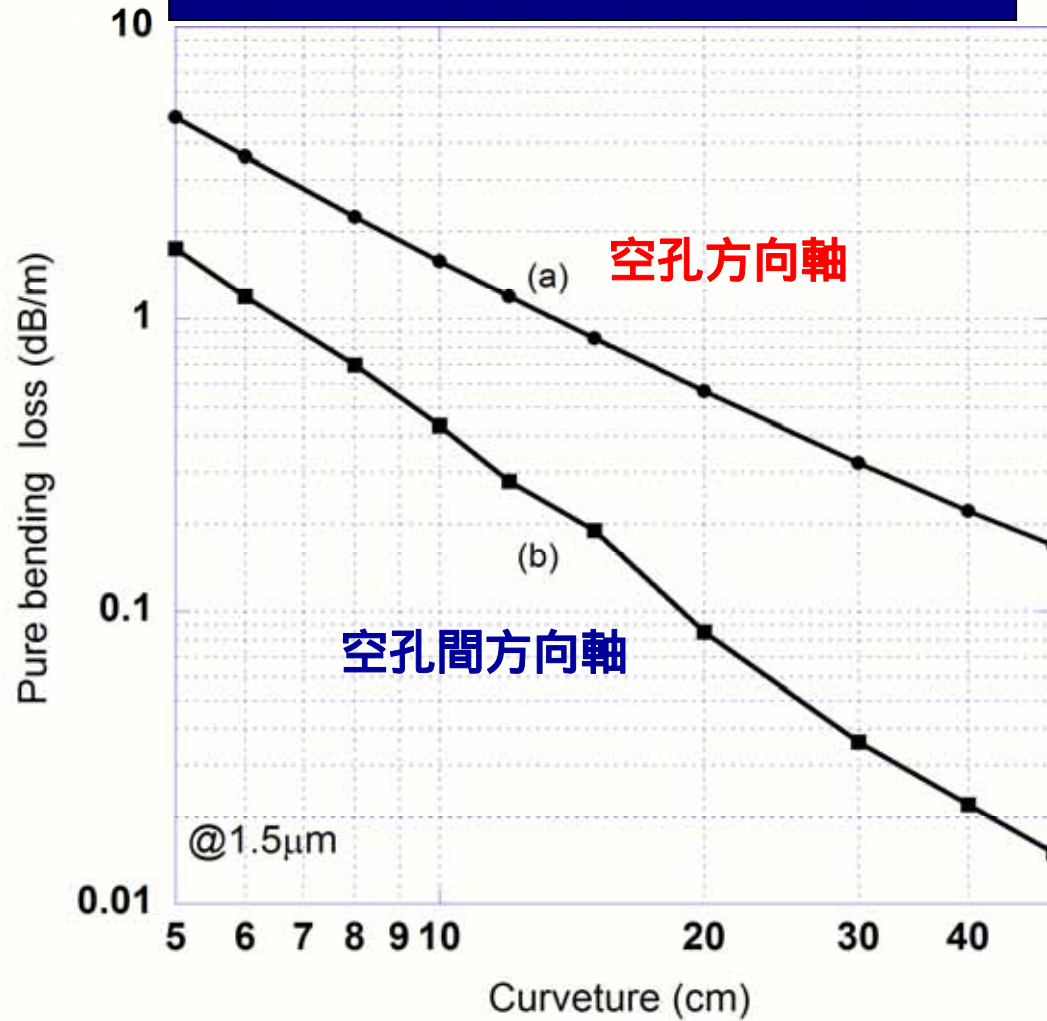


ほぼ閉じ込め損失が同じ値となる2波長での
曲がりがあるときのフィールド分布の比較

どちらに曲がるかで損失増加が異なる

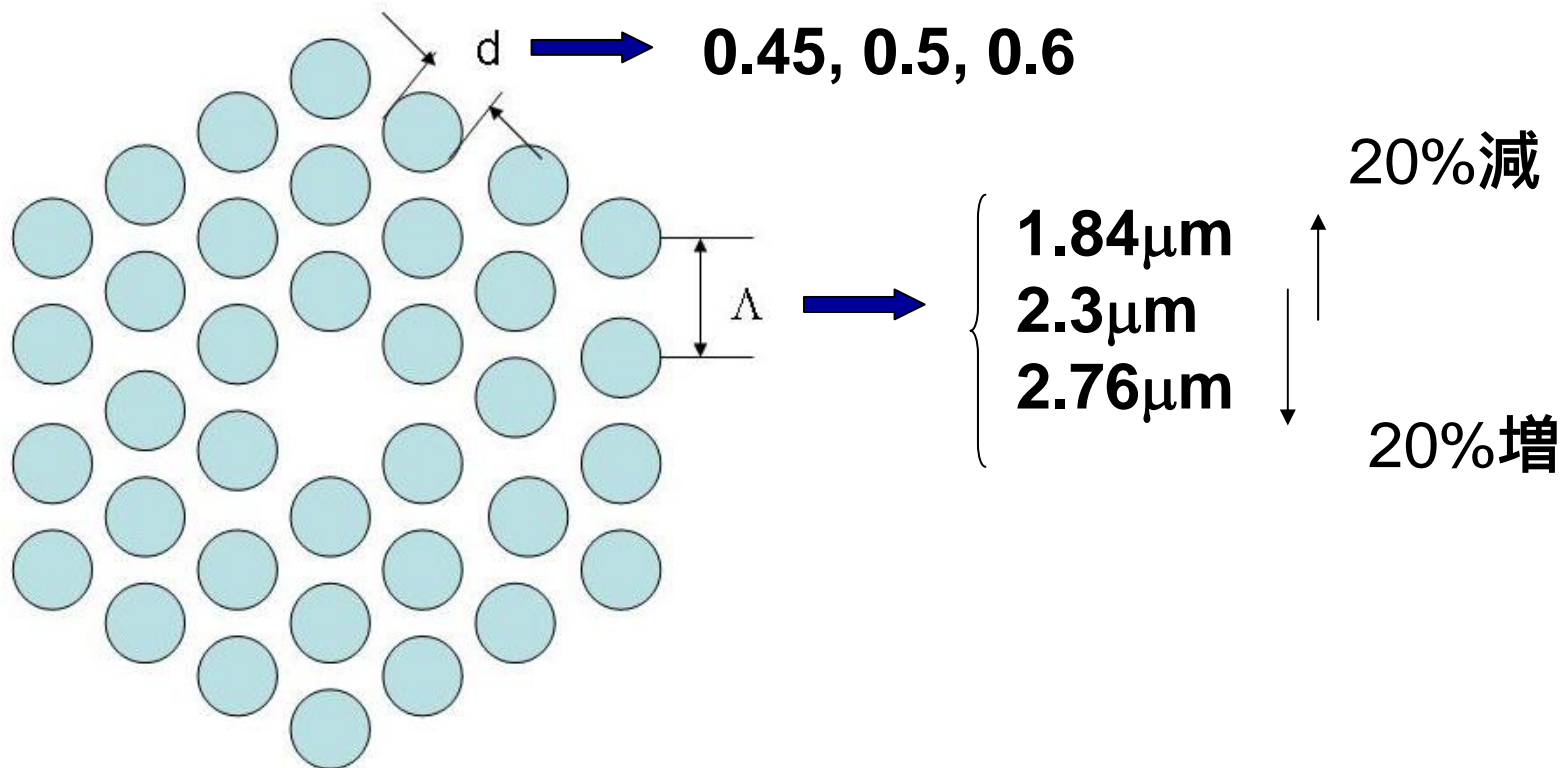


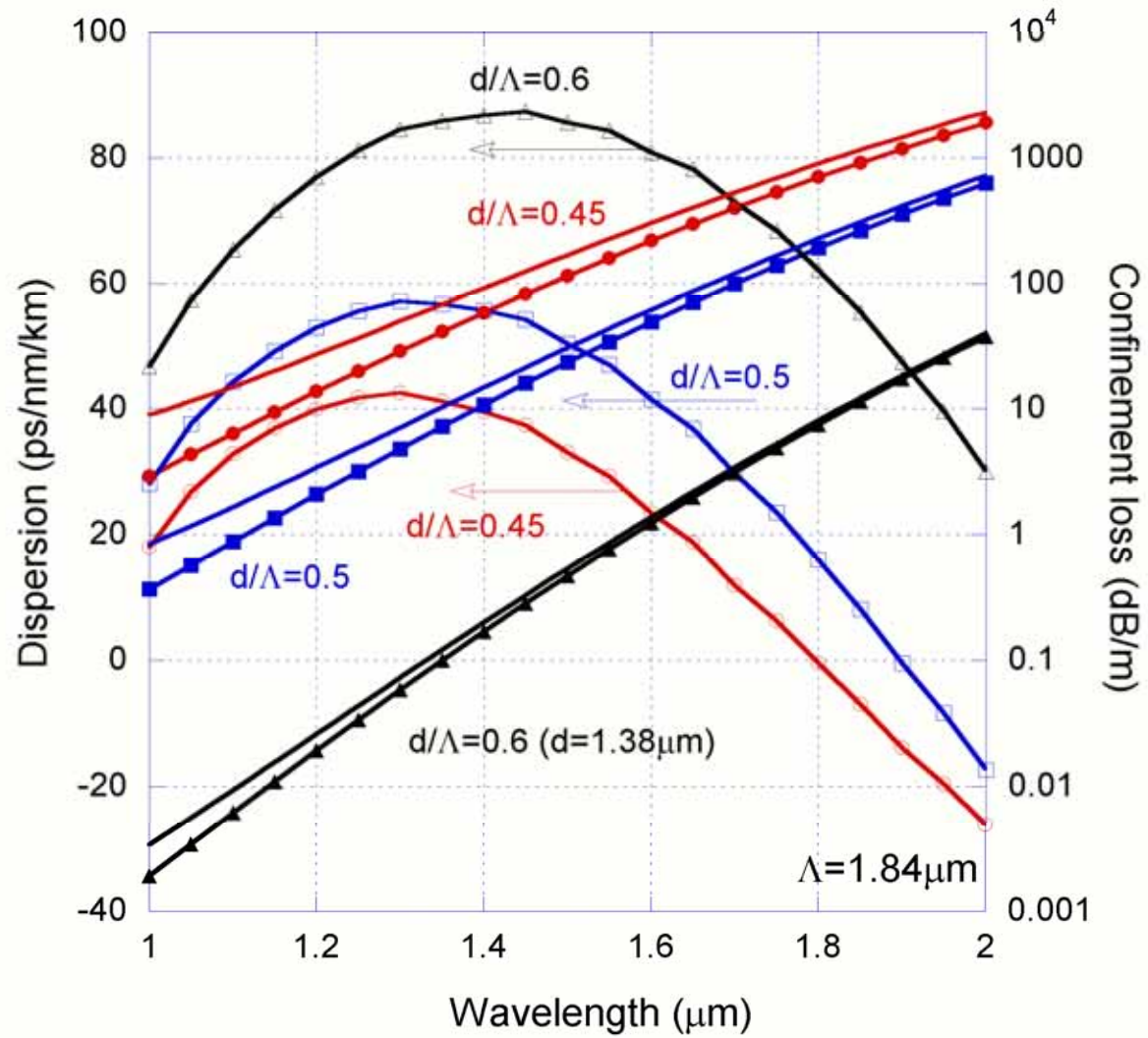
積極的に利用することも興味深い



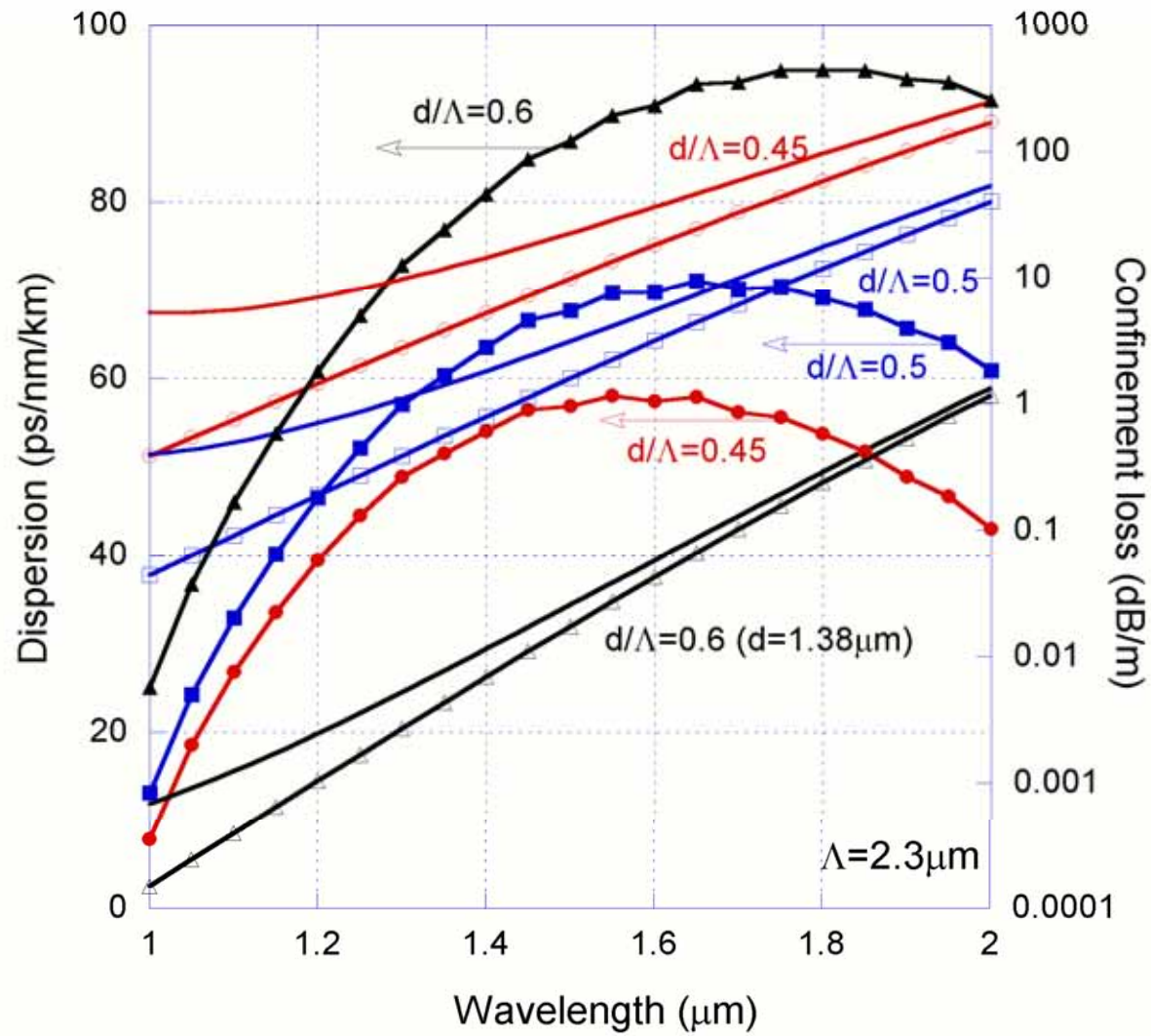
純粋な曲げ損失の曲率依存性

Λ 変化と分散、閉じ込め損失特性

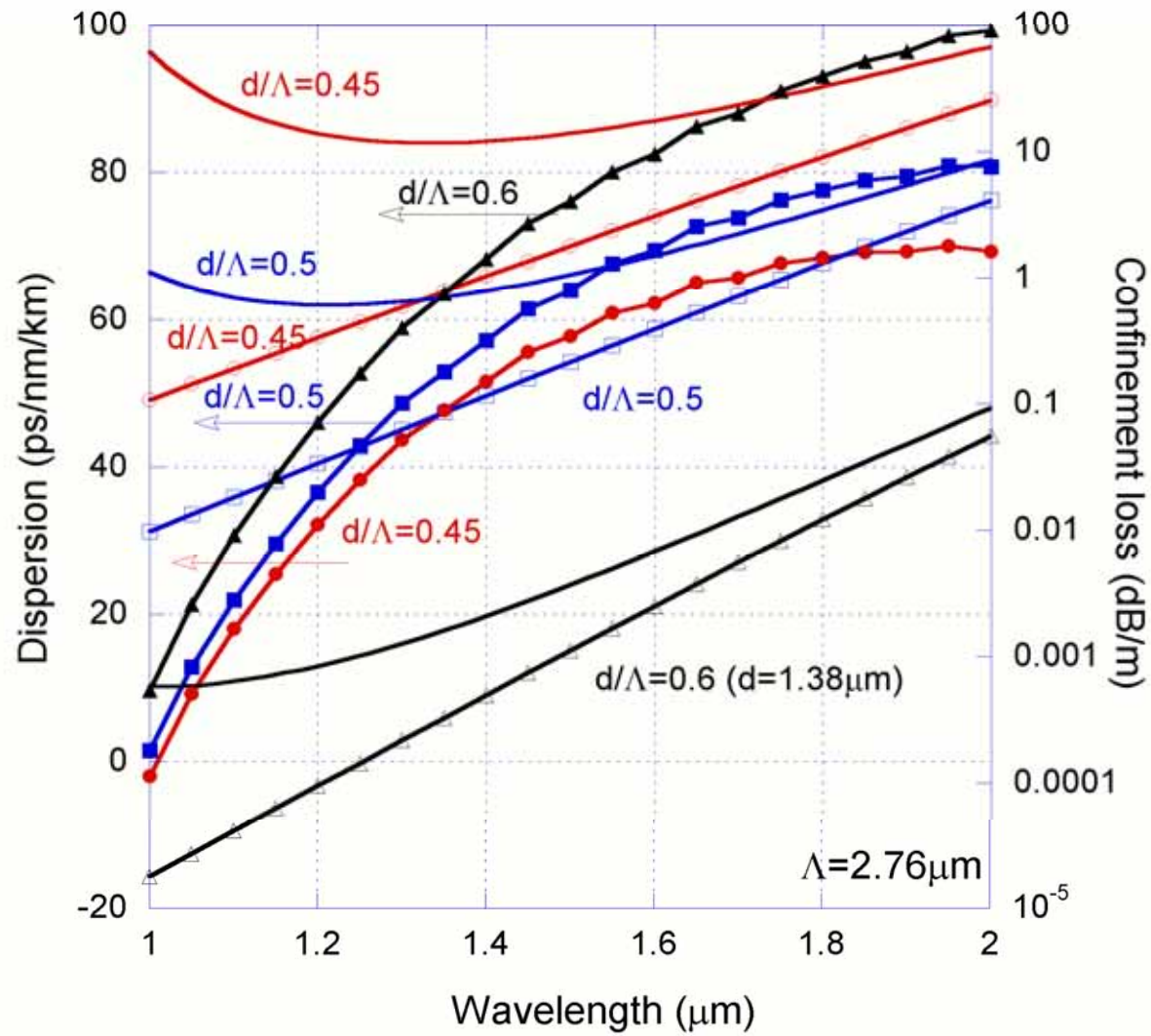




$\Lambda = 1.84 \mu\text{m}$



$\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$



$\Lambda = 2.76 \mu\text{m}$

Low water peak photonic crystal fibres

K. Tajima, J. Zhou, K. Kurokawa, and K. Nakajima
NTT Access Network Service Systems Laboratories
1-7-1 Hanabatake, Tsukuba, Ibaraki, Japan
Email: tajima@ansl.ntt.co.jp

ECOC, pp.42-43, 2003

Abstract We have succeeded in development of a low loss (0.28dB/km) photonic crystal fibre by dehydration process. The lowest OH absorption peak at 1.38 μ m was 0.4dB/km. This is comparable to that of a conventional single-mode fibre.

5重リング、 $d=4\mu\text{m}$, $\Lambda=8\mu\text{m}$

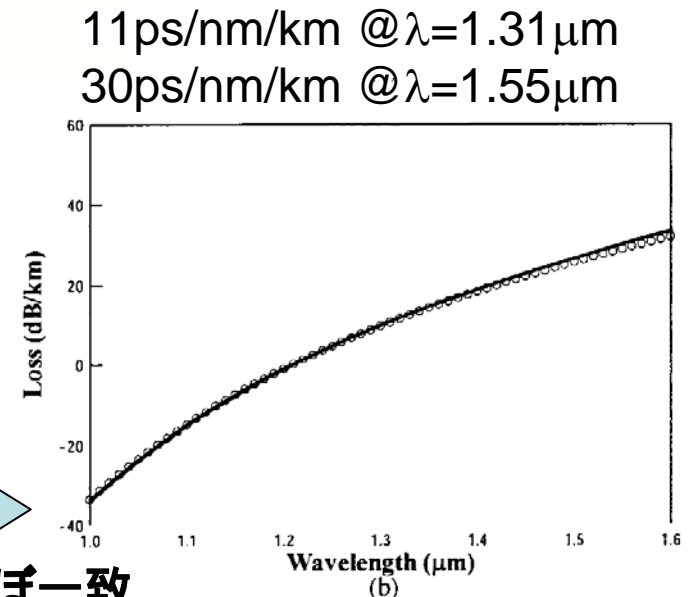
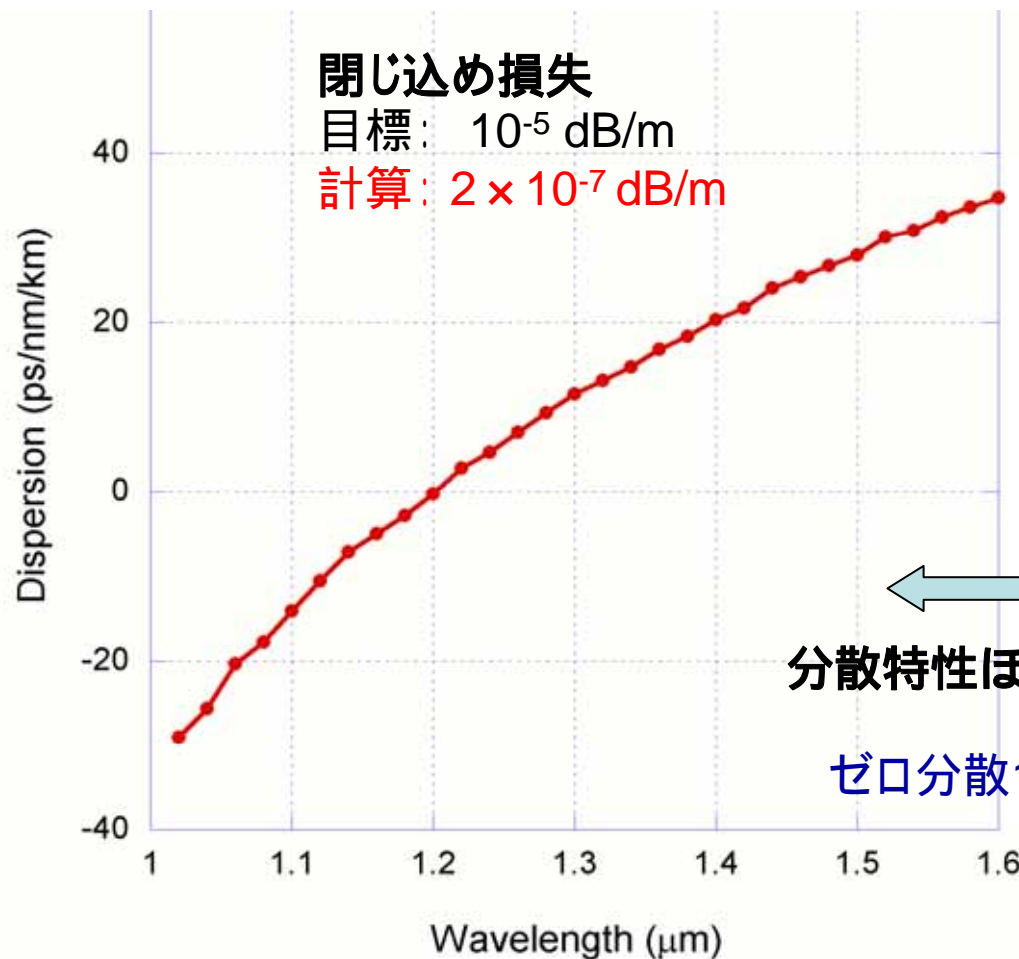
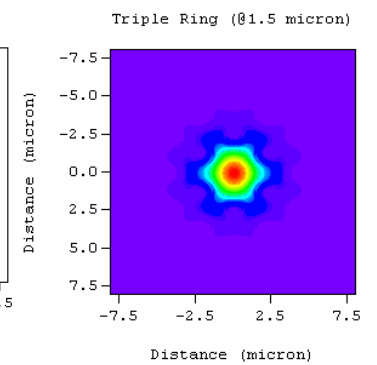
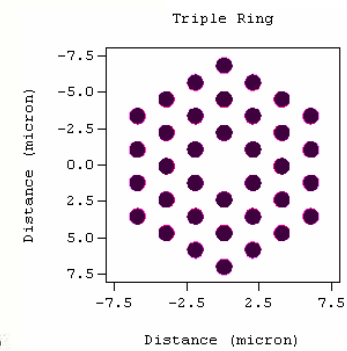
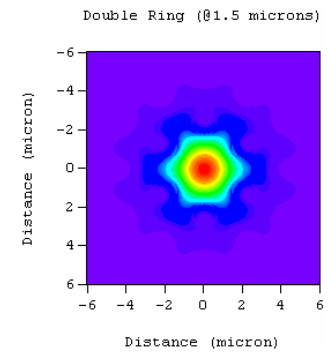
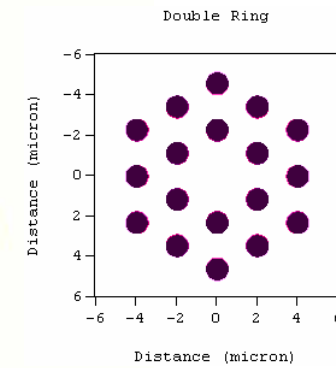
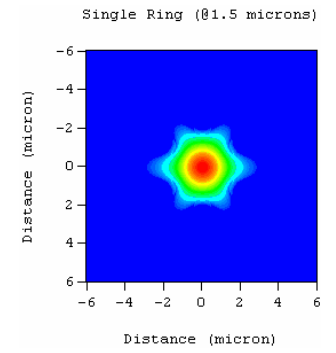
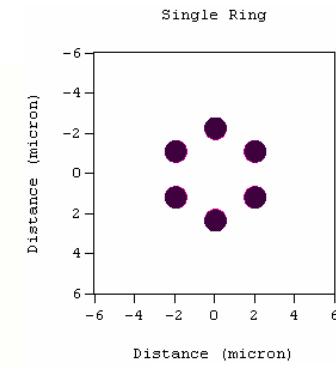
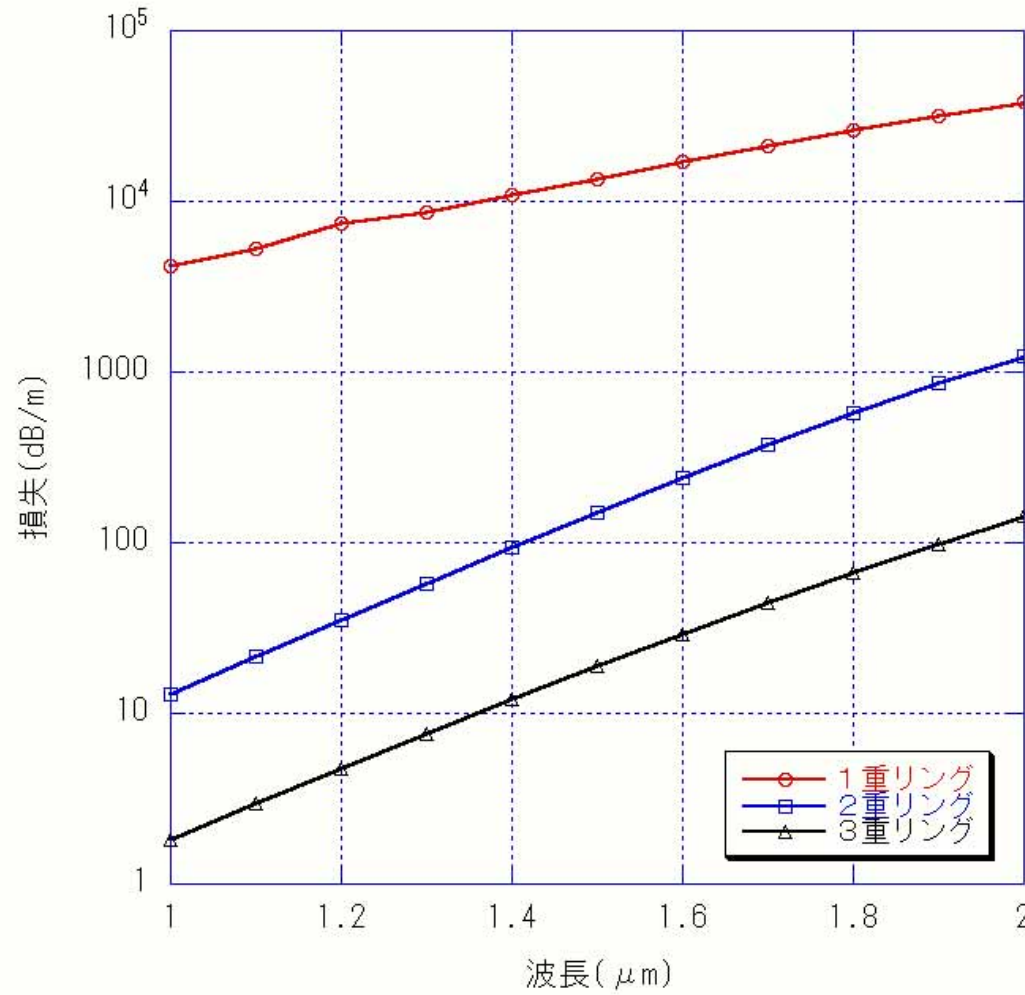
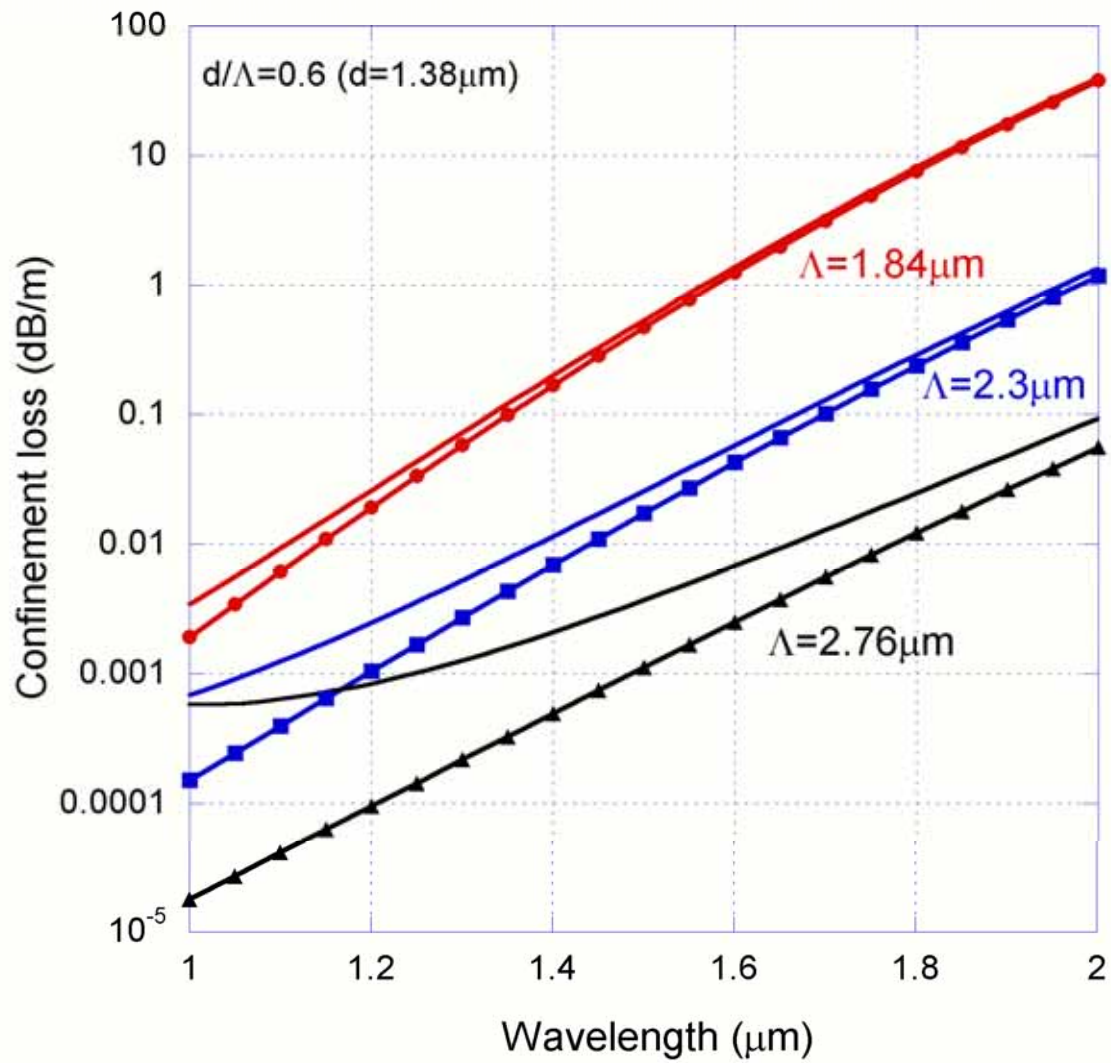


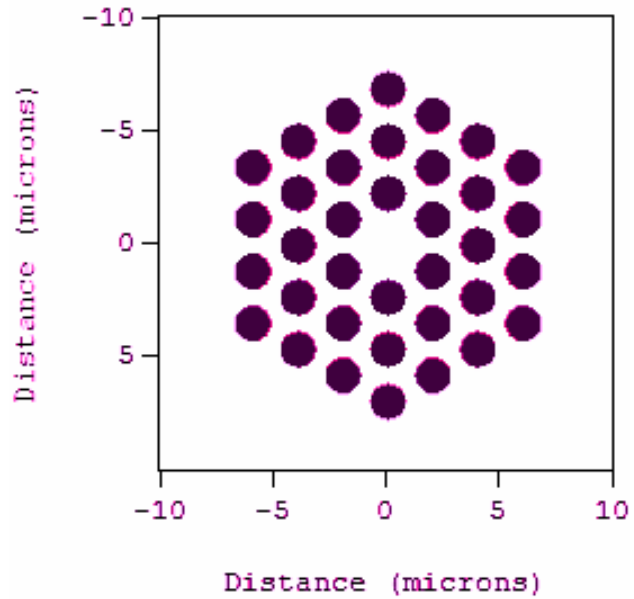
Fig. 1. Optical properties of lowest loss PCF
(a) Optical attenuation (b) Dispersion



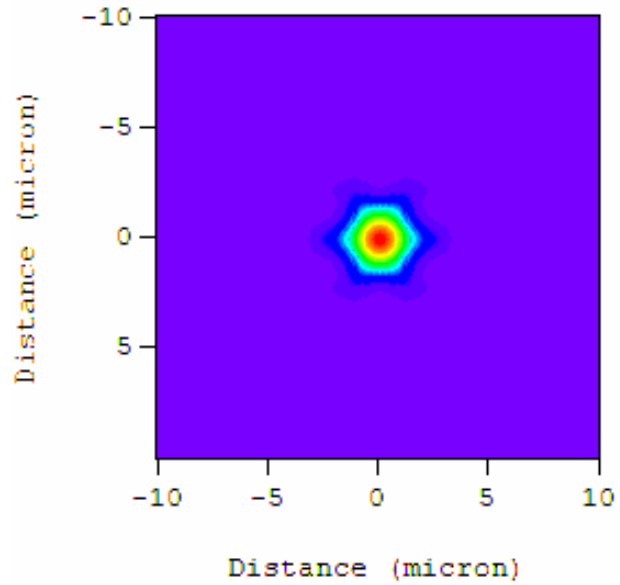


Λ 大

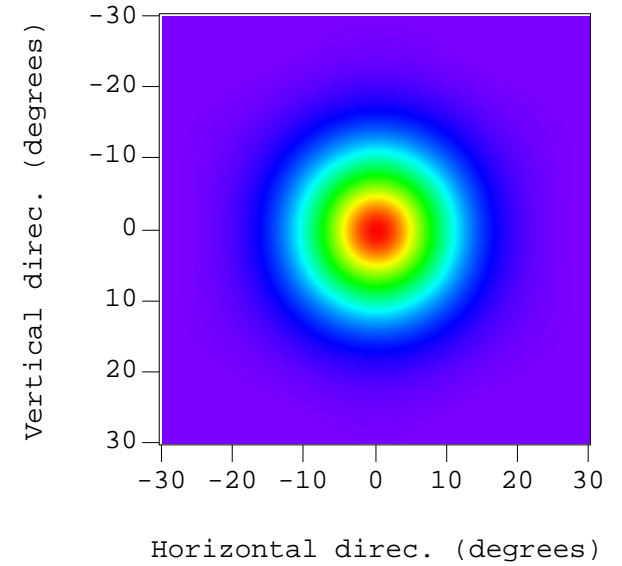
曲げを考慮した設計が重要



構造

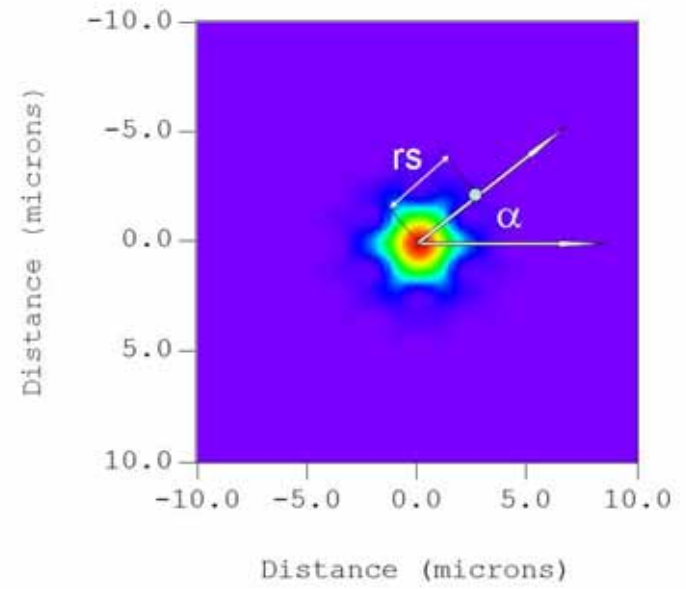
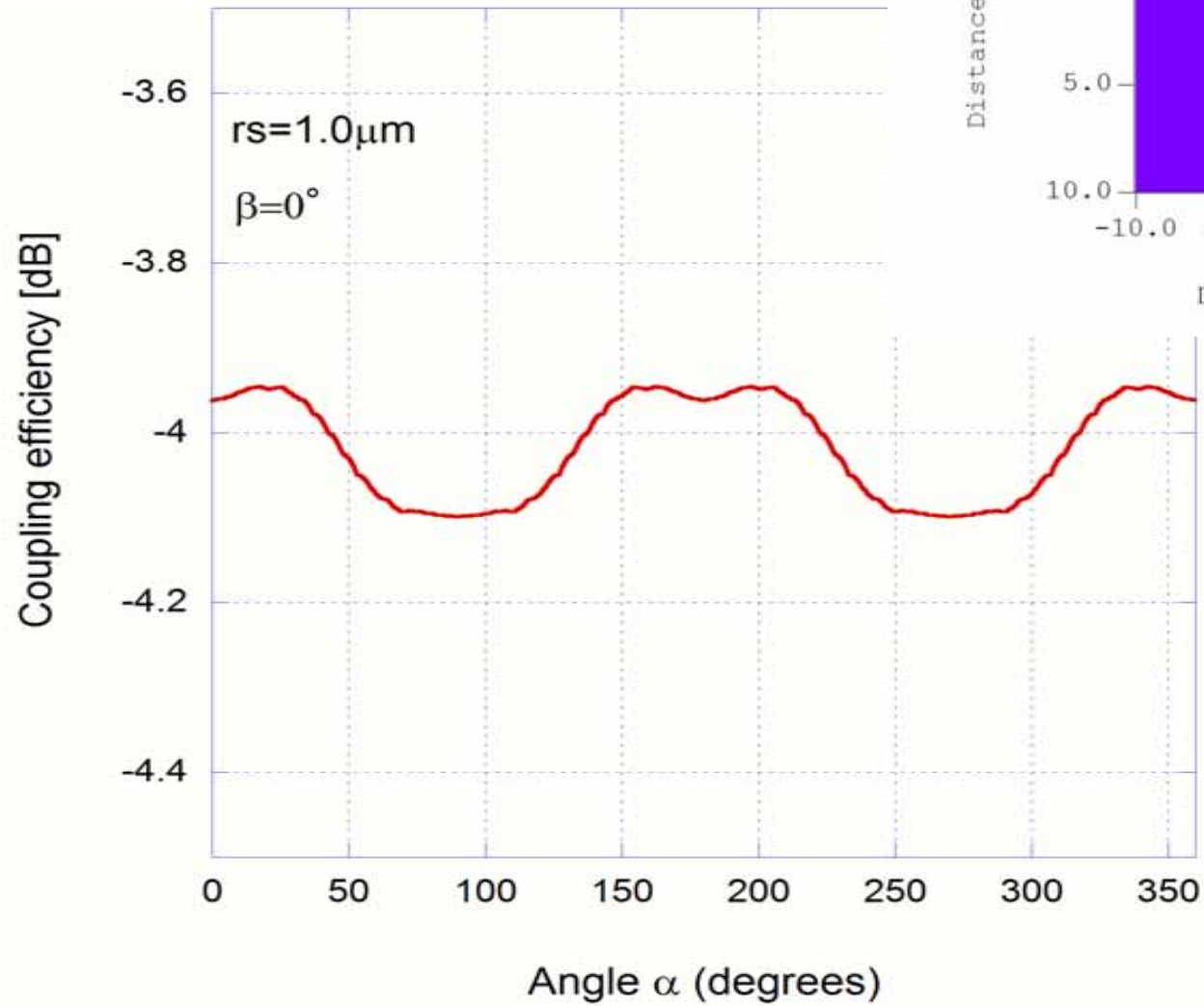


フィールド分布



FFP

@ $\lambda=1.55\mu\text{m}$



まとめ

- HFの曲げ特性まで含めて解析できるソフトを開発し、それを用いて知見を得た。
- 直線での閉じ込め損失低減設計と曲げ損失低減設計はおおよそ対応することを示した。
- Λ の大きな構造では曲げ損失に注目した設計が必要であることを示した。
- 曲げ方向によって損失が変化する、またリング多重度、 Λ や d により変化するものでこれらを積極的に制御しての応用分野も期待したい。

数値解析によるホーリー ファイバの曲がりを含む損失に関する検討

横山 清行[†] 大場 美織[†]

† 有限会社ノア コンサルティング 〒709-0854 岡山県赤磐郡瀬戸町江尻 1607 番地

E-mail: † yoko@noah-c.com

あらまし 数値解析により構造（空孔径，ピッチ，配置形状，コアドーピング）に柔軟に閉じ込めロスが計算できるプログラム、Fiber Designer を開発した。閉じ込め損失は複素数固有値の虚部から評価した。本プログラムを種々のホーリー ファイバに適用し、曲げを含む低損失化を他のファイバパラメータと関連させて設計できることを報告する。

キーワード ホーリー ファイバ，曲げ損失，固有値問題，複素数モード解析，PCF

Numerical Analysis of Confinement Loss including Bending Effects for Holey Fibers

Kiyoyuki YOKOYAMA[†] and Mio OHBA[†]

† Noah Consulting Limited 1607 Ejiri, Seto, Akaiwa, Okayama, 709-0854 Japan

E-mail: † yoko@noah-c.com

Abstract Confinement loss including bending effects for holey fibers was calculated using numerical simulator, Fiber Designer, which can flexibly be applicable to the fiber structures. The confinement loss was estimated by imaginary part of complex eigenvalues of the wave equation. The obtained results well agreed with the reported values.

Keywords holey fiber, bending loss, eigen problem, complex mode solver, PCF (photonic crystal fiber)

1. はじめに

ホーリー ファイバ(Holey fiber: HF)は従来の全反射型ファイバの一種であり現用ファイバ製造の延長線上で考えられる。空孔を制御することで分散、実効断面積，曲げ損失などの特性制御が可能であるので、単に通信だけでなく応用分野が広がる可能性があり、その設計技術は注目されている。

適用分野が明確になり目標とすべき性能が示されている場合でも、製造とその後の測定評価のサイクルで設計条件を決定する方式は、これまで通常行われてきた。しかし、設計上のパラメータが増加するとポテンシャルの高い構造設計を行うにはシミュレーションが重要な役割を果たすことになる。HF の設計は、回転対称性を利用した従来の円筒座標系での取り扱いが困難であるため、数値解析に頼ることになる。

HF 構造ファイバの諸特性一般に関しては、種々の手法による多くの報告がなされている[1]が、ここではそれらの詳細に関する引用は割愛する。しかし HF 構造

と曲げ特性の関係を議論した数値解析報告は少ない[2]-[4]。円筒座標系での解析手法に数値解析を組み合わせた報告[2]があるが、フィティングの域を出ず、適用限界がある[3]。それに対して、構造に柔軟に対応できる報告は、実効断面積の大きな構造に対して曲げ損失を検討した報告[4]があるに過ぎない。この報告は曲げ特性を理解する上で、十分に良く検討された論文である。しかし、エルミート・ガウス関数を基底とするもので、精度を得るためには、関数の数やエルミート多項式での特性幅という変数の選択などに高度な知識が必要である。更に、曲げ損失の計算でも、放射損失の2重積分の下限値を評価しなければならず、複雑である。

我々は、従来の実数に加えて、複素数をも取り扱うホーリー ファイバ解析プログラム Fiber Designer を開発した。ファイバパラメータの中でも、今回は主として HF の曲げ効果を含む閉じ込め損失の計算並びに結果に焦点をあてて報告する。

2. 数値解析手法

モード解析はマックスウエルの方程式を有限差分法で離散化して、固有値問題に帰着させて解いた。損失や利得がある場合には複素数の固有値問題として解き、複素数固有値 $n_{eff} = n_r + jn_i$ が得られる。位置 z でのフィールド $A(z)$ は式(1)で表すことができる。

$$A(z) = A(0)e^{-jkz} = A(0)e^{-j(n_r + jn_i)\frac{2\pi}{\lambda}z} \quad (1)$$

実部 n_r は伝搬定数を与え、虚部 n_i は正なら利得、負なら損失に対応することがわかる。式(1)の虚部から計算される損失は閉じ込め損失と呼ばれ、式(2)となる。

$$\alpha(z) = 20 \log_{10} \left(\frac{|A(z)|}{|A(0)|} \right) = 20 \log_{10} \left(e^{-n_i \frac{2\pi}{\lambda} z} \right) \quad (2)$$

式(2)から単位長さ当たりの損失[dB/m]を計算することができる。

光通信用にホーリーファイバを用いる研究開発が行われ、直線 HF で 0.28dB/km の低損失を実現した報告がなされている[5]。彼らの報告では、その性能実現のために閉じ込め損失は 0.01dB/km(@1.55 μ m)以下にする必要がある[5]と述べられ、閉じ込め損失は重要な設計パラメータの一つである。

図1は曲がり導波路を直線導波路に置き直す等角写像(Conformal mapping)[6]である。このように、座標系と屈折率を変換することで、直線導波路として取り扱うことができる。この手法を用いた。実際の計算で

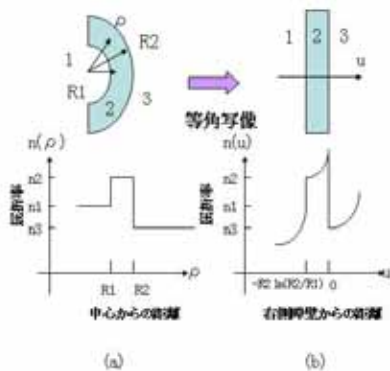


図1 . 階段型屈折率分布構造での等角写像
(a)実空間、(b)曲げ後の等角写像

は、曲率 R は通常 mm 以上のオーダーであり、解析しようとしている構造自体のコア領域の寸法と比較して十分に大きく、等角写像後の屈折率が簡単に近似できる。直線 HF 構造の解析では、対称性を利用して一部を解析領域として切り出して解析し、メモリや CPU の

効率化を図ることもよく行われている。しかし、曲げの構造解析では、等角写像によって対称性が失われてしまい、全領域を解析対象としなければならない。このことは、数値解析上は厳しい方向となるが、このようにして計算された閉じ込め損失は曲げの効果を含んだものとなる。そして、曲げの有無による閉じ込め損失の差分を評価すれば、純粹曲げ効果による損失増加分を評価することができる。

境界条件も精度良い解を得るためには重要である。我々は、既に検討済みの PML(Perfect Matched Layer)境界条件[7]を適用した。

3. 数値解析結果

図2は本報告で扱う典型的なホーリーファイバ構造である。空孔直径が d 、空孔間隔が Λ である。図では

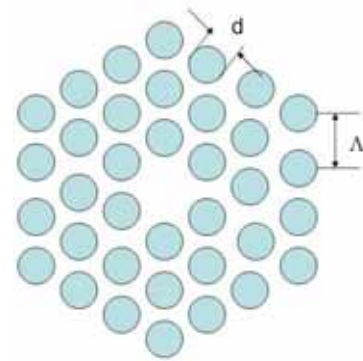


図2 . 本報告での解析対象 HF 構造

空孔の3重リング構造を示したが、リングの多重度やコアドーピングなど設計者が指定できる。屈折率の波長依存性は使用する材料に応じてセルマイヤーの式[8]の係数を与える方法で取り込んだ。このようにして、分散特性などを求める際の数値微分に対応した。その他の屈折率モデルの利用や実測値をテーブル入力して利用することも可能である。

まず、Fiber Designer の閉じ込め損失計算の妥当性について述べる。White らはマルチポールの定式化でリングの多重度並びに d/Λ と閉じ込め損失の結果を報告している[9]。彼らの結論は、『リングの多重度の増加、 d/Λ を大きく設計することで閉じ込め損失を小さくすることができる』ということである。その結論導出の過程で、2重リング、 $d=0.92 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ で、閉じ込め損失が 1600dB/m となる報告がなされている。同一条件に対して Fiber Designer で計算した。図3の結果と閉じ込め損失 1680dB/m の結果を得た。実効断面積は $10.6 \mu\text{m}^2$ ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)であった。これらの事実から、われわれの結果と文献[9]の閉じ込め損失とは良く一致していることが結論される。しかし、文献[9]の手法は、原理的に曲げ損失評価に用いることは不

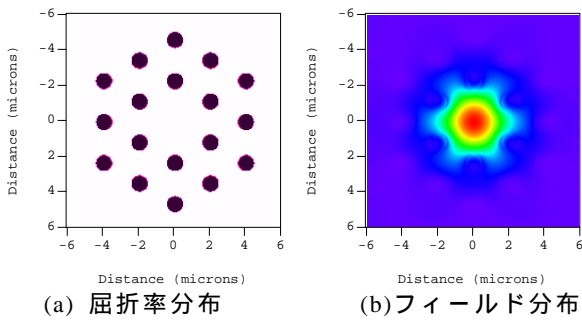


図3 . 文献[9]の構造を解析した結果

可能である。

次に、Fiber Designer を分散特性と閉じ込め損失のマルチパラメータ問題に適用した。光通信への応用を考える際には低ロスと分散の制御が重要であり、文献[5]は HF が従来のファイバとロスにおいて遜色がないことを実証した極めて意義ある報告であり、彼らの閉じ込め損失要求値は $\lambda=1.55\mu\text{m}$ で 10^{-5} dB/m 以下であった。

我々はこの構造（5重リング、 $d=4\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=8\mu\text{m}$ ）に Fiber Designer を適用した。 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ で実効断面積は $74.1\mu\text{m}^2$ 、閉じ込め損失は、 2×10^{-7} dB/m であった。この閉じ込め損失は設計条件を満足している。分散特性の計算結果を図4に示す。

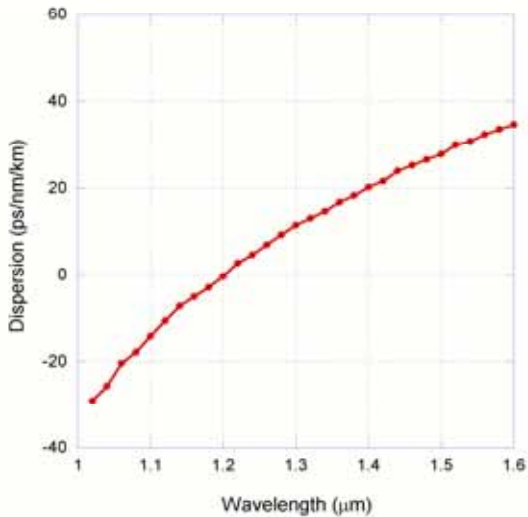


図4 . 文献[4]の構造での分散特性計算結果

文献[5]ではゼロ分散が $1.21\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ での分散値がそれぞれ、11と 30ps/nm/km との報告が記され、図4はその結果と良く一致していることがわかる。紙面の都合上、多くの実例を掲載することは困難であるが、Fiber Designer は手法の異なる他の解析結果や、

実測結果と他のファイバパラメータでも良く一致することが確認できた。

次に、本報告の主題である曲げ損失に関する計算結果を記す。曲げ特性に関する数値解析の初期の報告が文献[2],[3]である。この構造は、 $d=2.4\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=7.8\mu\text{m}$ でリングの多重度は記されていないので、十分にリングが配置されている境界条件として扱った。実効断面積の計算結果は $109.1\mu\text{m}^2$ ($\lambda=1.5\mu\text{m}$)で、この構造での閉じ込め損失の曲げの曲率 R 依存性を図5に示す。

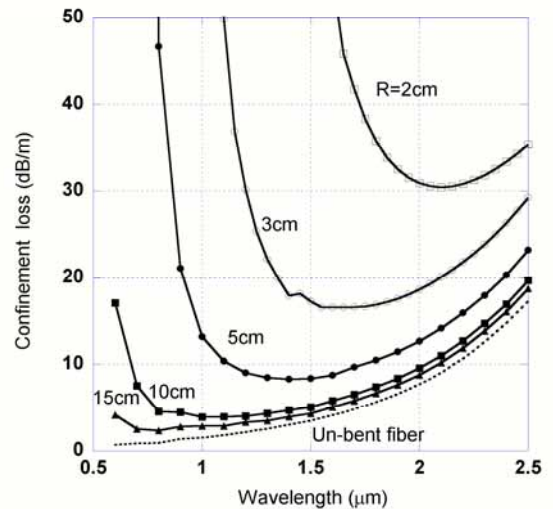


図5 . 閉じ込め損失の波長依存性の計算結果 (パラメータは曲げの曲率)

Sorensen は、 $R=10\text{ cm}$ と $R=15\text{ cm}$ の短波長側で実験と計算が一致することを示しているが、 $R=5\text{ cm}$ に関しては具体的な比較は記されていない[2], [3]。図5では、曲げ効果を考慮した閉じ込め損失は長波と短波側で増大し、中間の波長で損失が小さな領域が存在することがわかる。このことに関しては、Sorensen の報告では $\Lambda/2$ で曲がり損失は最小となると述べられ、R が変化しても最小値の位置は $\Lambda/2$ より大きく変化することはない。また、文献[2]で実測と計算の比較がたとえ合致しているとしても、文献[3]では構造変化に対して説明できないことが記されている。即ち、ホーリーファイバの曲げ特性を議論する際に、従来のファイバで使われている解析的式を用い、式の中で使われているパラメータを等価的に置き直すだけでは、フィッティングの域を出なく、実際の設計利用には耐えられないことが結論される。

図5の $R=5\text{ cm}$ で閉じ込め損失がほぼ同じ値となる (a) $\lambda=2.5\mu\text{m}$ と(b) $\lambda=0.9\mu\text{m}$ でのフィールド分布を図

6 (a), (b)に記す。図 6 (a)より、図 5 の長波長側での損

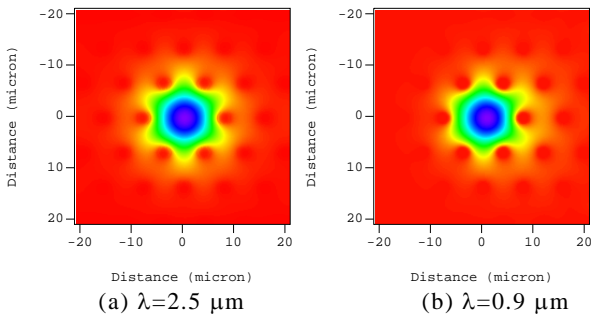


図 6 . R=5 cm のときのフィールド分布

失増大は波長が長いことに起因した漏れであることがわかる。曲げ効果での損失増大も重畳されているが、曲げが無くとも長波になるに伴い閉じ込め損失が増大していることも図から理解できる。なお、図 5 の点線は曲げが無いときの閉じ込め損失特性である。

また、図 6 (b)はフィールド分布が曲げの外側（図で言えば右側）に漏れていて、明らかに曲げ効果が顕著に現れていることが理解できる。短波になるに従いコア領域に光が閉じ込められ、実質的にはコアと実効的なクラッド差が小さく、曲げ効果でフィールドが漏れ易いと考えられる。また、Sorensen らの主張[2],[3]と異なり、曲げまで考慮したときの波長に対して損失が最小となる値は曲率 R に依存して変化することがわかる。

一方、Baggett らの報告[4]と我々の報告は結果や、曲げ損失の理解を与えるという観点からは差異は無いと思われる。しかし、実際に精度を考慮して種々の構造の計算を行うには、「1. はじめに」で述べたように、彼らの手法は数値解析アルゴリズムに対するより深い理解が要求されるため利用者に高度な知識が必要と判断される。

損失の絶対値評価は閉じ込め損失のみではできなく、波長に依存しての Rayleigh 散乱項、OH 吸収項、赤外線吸収項、その他の補正項などで実測値を説明するフィッティングが用いられる。しかし、ある波長での曲げ効果による損失増加は直線ファイバからの損失増加分として評価し易い物理量である。図 7 は図 5 で用いた計算結果から $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ での R による損失変化を示した結果である。純粋な曲げ損失と曲率の関係は、厳密には log-log の直線関係ではないが、それに近い特性を示すことがわかる。図 7 の (a), (b) は図 8 (a), (b) の方向の曲げ特性に対応する。なお、図 5 及び 6 は図 8 (a) の方向の曲げ特性である。図 7 より、曲げ損失の増加は図 8 (b) の方向の曲げの方が抑制されることがわかる。どういう寸法の条件でも図 8 (b) の方向が曲げに強

いかどうかは検討の余地があるが、図 7 に示した構造では、図 8 (b)の構造の方が、曲げの軸方向に関しては空孔がコア近くまで影響を与え、曲げによるリークを抑制していると考えられる。通常回転軸方向に依存しないファイバに慣れている分野で、ファイバで曲げる方向をどこまで明確にして利用できるかは疑問があるが、曲げの方向で損失が変わることを積極的に利用する分野への応用も考えられよう。

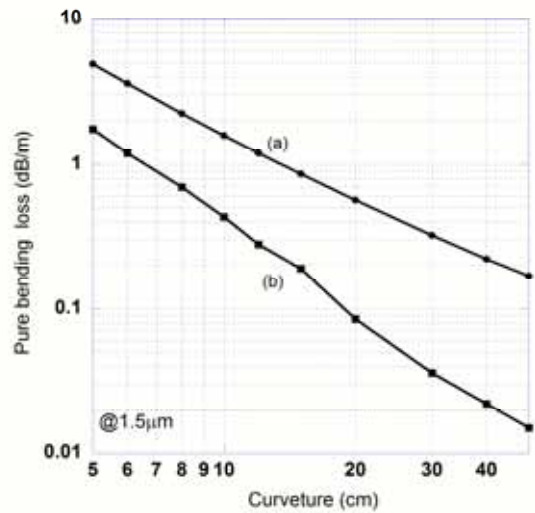
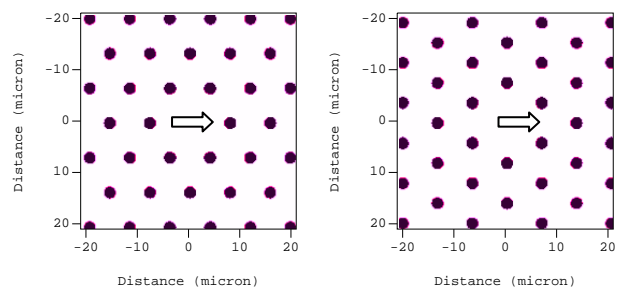


図 7 . 純粋な曲げ損失の曲率依存性



(a)空孔方向軸 (b)空孔間方向軸

図 8 . 曲率 R 方向を矢印で示した図

HF の空孔のピッチ(Λ)や直径(d)を変化させて、曲げを含む閉じ込め損失や分散がどのように変化するかを 3 重リング構造で検討した結果を以下に記す。計算では、 $\Lambda=2.3\mu\text{m}$ の 20% 増の $\Lambda=2.76\mu\text{m}$ 、20% 減の $\Lambda=1.84\mu\text{m}$ の 3 種類を選んだ。それぞれの Λ について、 $d/\Lambda=0.6, 0.5, 0.45$ の 3 水準で計算を行った。これらの計算結果を図 9 ~ 11 に記す。これらの図でシンボル付の表示は直

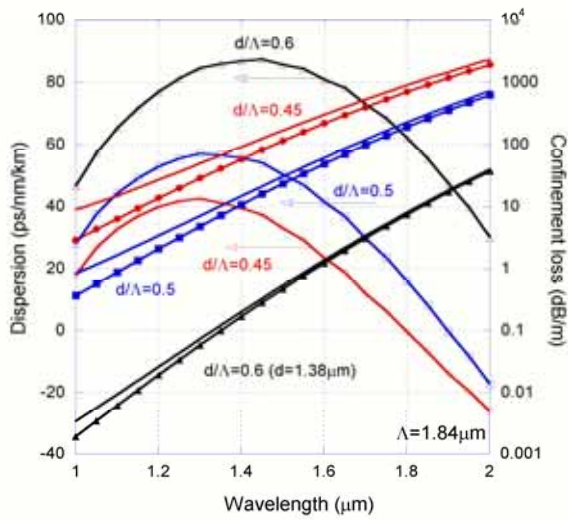


図 9 . $\Lambda=1.84\mu\text{m}$ での計算結果

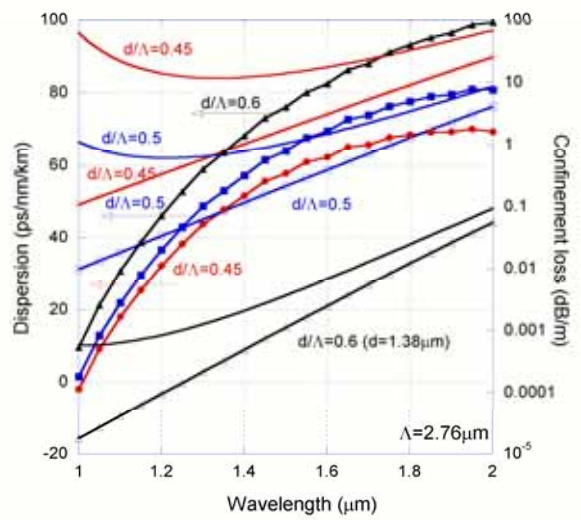


図 1 1 . $\Lambda=2.76\mu\text{m}$ での計算結果

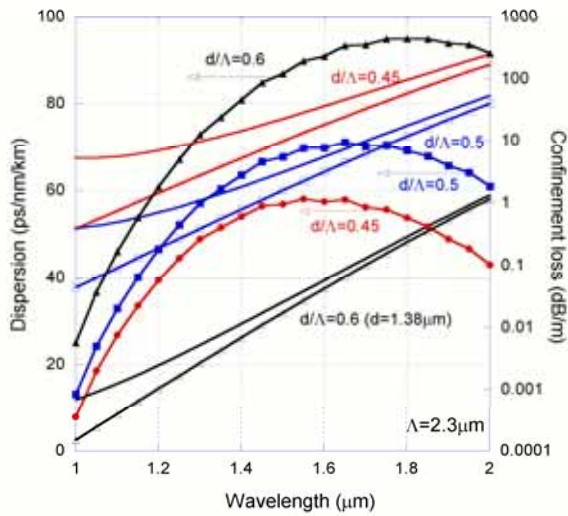


図 1 0 . $\Lambda=2.3\mu\text{m}$ での計算結果

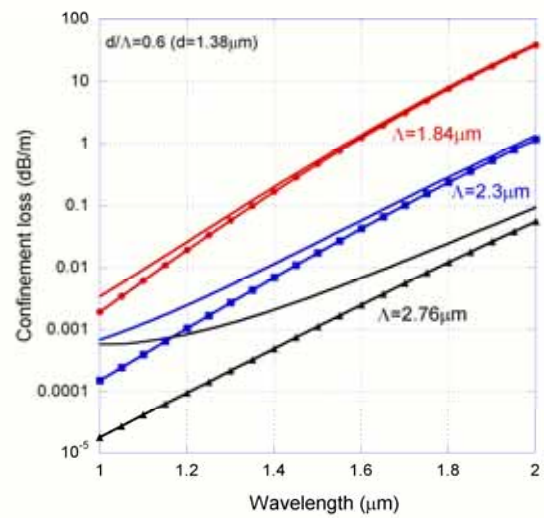


図 1 2 . $d/\Lambda=0.6$ での計算結果

線での特性であり、シンボルなしの閉じ込め損失は図 8 (a)の方向に $R=1\text{mm}$ の曲げを含んだ閉じ込め損失特性である。

分散はコア近傍での影響を反映し、閉じ込め損失は文字通り閉じ込めに関係するので、リングの多重度を増加させると分散を保ったままで閉じ込め損失の低下を実現することができる。そのため、分散と閉じ込め損失のマルチパラメータ設計では、分散設計を優先させることになる。図 9 ~ 1 1 より、ある波長または波

長領域での分散の絶対値や感度を含めて空孔の Λ や d を決定する。この際に閉じ込め損失に対する自由度が残っていれば閉じ込め損失を改善する方向でパラメータの選択が可能であることがわかる。閉じ込め損失の設計への要求条件が満たされなければリングの多重度で補うこととする。直線導波路の場合には、以上のように考えることで分散特性と閉じ込め損失について設計を進めることができる。文献[5]で採用した構造設計

思想も以上のシナリオで理解することができる。

図 1 2 は $d/\Lambda=0.6$ で Λ を変化させたときの $R=1\text{mm}$ に対する閉じ込め損失特性 (シンボルなしのカーブ) と直線ファイバでの閉じ込め損失特性 (シンボルあり) を図 9 ~ 1 1 のデータを用いて再表示したものである。曲げに関しては、一般的には直線での閉じ込め損失が小さな構造が曲げ特性にも強いと考えて良いことがわかる。このことは直感的でおおよそ正しいが、図 1 2 からわかるように直線での閉じ込め損失が小さくても、空孔のピッチ間隔 Λ が大きいと d/Λ がたとえ同じであっても曲げにより間隙からフィールドが漏れ易くなることを示している。我々は様々な構造の曲げ特性の計算を行っている。その結果から、曲げ損失だけに特に注目して詳細な設計をする場合には、必ずしも直線での閉じ込め損失が小さいものが曲げ損失も最善との結論ではなく、専用の設計条件が存在することがわかった。

HF はファイバ内での波長オーダー構造の空孔を制御することでファイバ特性を制御することができるの魅力から注目を集めた。しかし、HF の構造は単純ではあるものの、従来構造と比較して複雑なため、従来のファイバで実現できない分野での活躍が期待されている。曲がり損失を小さくできる利点も魅力的な特質の一つである。また、通常ファイバではどの方向に曲がっても損失が大きくなるが、曲がる方向で損失が異なる性質があり、曲がり損失の絶対値も制御可能なパラメータであり、積極的に曲がり損失を活用することも考えられる。その他、Fiber Designer では実効断面積、モードフィールド径、FFP、ファイバ端面のバットジョイント時の結合効率が位置ズレ、回転軸ズレなどで評価できるので、HF ならではの今後の応用分野拡大に活躍できると思われる。

4. まとめ

複素数固有値問題を解くことにより、その固有値の虚部から、ホーリーファイバの閉じ込め損失 (曲げ損失を含む) を評価するプログラム (Fiber Designer) を開発した。他のアルゴリズムで解いた曲げの無い構造での閉じ込め損失と Fiber Designer で求めた値が良く一致することを示した。曲げ特性に関する報告は少ないが、我々の得た値は既報の文献の値をよく説明し、曲がり損失に関する理解を深めることにも有用であることを示した。Fiber Designer は閉じ込め損失の他に分散などファイバの諸特性を同時に、性能をやりくりして設計することができることを示した。このようにファイバの所望のマルチパラメータを得る構造設計は、将来の HF の応用分野を広げる観点からも有意義である。

文 献

- [1] M. Koshiba, "Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method," IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, no.4, pp.881-888, April 2002.
- [2] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, and S. E. B. Libori, "Macro-bending loss properties of photonic crystal fiber," Electron. Lett., vol.37, no.5, pp.287-289, March 2002.
- [3] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, S. E. B. Libori, H. R. Simonsen, and J. R. Jensen, "Spectral macro-bending loss considerations for photonic crystal fibers," IEE Proc. -Optoelectron., vol.149, no.5/6, pp.206-210, Oct./Dec. 2002.
- [4] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi, and D. J. Richardson, "Understanding bending losses in holey optical fibers," Opt. Commun., vol.227, pp.317-335, 2003.
- [5] K. Tajima, J. Zhou, K. Kurosawa, and K. Nakajima, "Low water peak photonic crystal fibers," 29th European Conf. on Optical Commun., ECOC'03 (Rimini, Italy), pp.42-43, 2003.
- [6] Heiblum and J. H. Harris, "Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-11, no.2, pp.75-82, Feb. 1975.
- [7] W. P. Huang, C. L. Xu, W. Lui, and K. Yokoyama, "The perfectly matched boundary condition for modal analysis of optical waveguide: Leaky mode calculations," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, no.5, pp.652-654, May 1996.
- [8] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 2nd edition, p.7, Academic Press.
- [9] T. P. White, R. C. McPhedran, and C. M. de Sterke, "Confinement losses in microstructured optical fibers," Optics Lett., vol.26, no.21, pp.1660-1662, Nov. 2001.