

次世代伝送用ファイバに関する高度シミュレーション技術

Advanced Simulation Technologies for Next-Generation Transmission Fibers

Zoltán Várallyay ^{*1}武笠和則 ^{*2}
Kazunori MukasaTamás Mihálffy ^{*1}Sándor Bilicz ^{*3}Bence Németh ^{*1}Péter Szelestey ^{*1}Béla Csengeri ^{*1}Zsolt Puskás ^{*1}Gábor Varga ^{*1,*3}新子谷悦宏 ^{*2}
Yoshihiro Arashitani

〈概要〉

光ファイバの光学特性シミュレーションは、光ファイバの研究開発、および製造において重要なキー技術の一つである。その中でも、マイクロバンド損失とレイリー散乱損失は、きわめて重要な特性ながら、現象が複雑なため、シミュレーションでの特性予測が難しい特性であった。それに対して、マイクロバンド損失に関しては機械的効果と結合モード理論を用いた光学的効果を組み合わせた新規シミュレーション手法を、レイリー散乱損失に関しては分子動力学シミュレーションを用いたガラスの員環構造分布の変化を求める手法を、それぞれ立ち上げ、各種特性を検討することに成功したので、報告する。

1. はじめに

光ファイバによる大容量通信は我々の生活に欠かせない基盤の一つとなっている。コロナ感染症拡大や排出ガス抑制要求の高まりを受け、光通信の需要はさらに高まる傾向にあり、通信用ファイバ・ケーブルの高性能化によるさらなる大容量化も強く求められている。

その解決策の一つは、光ケーブルに収納される光ファイバの本数を増やすことである。しかしながら、ケーブルの太さは従来と同程度に維持することが求められるため、光ファイバには高密度化に寄与する細径化が要求される^{1), 2)}。一方で、光ファイバを細径化すると、機械的外乱の影響によって生じる光ファイバ変形に伴う損失増加が起こりやすくなる。これがマイクロバンド損失であり、ケーブル化後の特性変化を表す指標として非常に重要である。マイクロバンド損失を低減するには光ファイバ構造の最適化が重要になるが^{2)~5)}、サブミクロンオーダーの微細でランダムな光ファイバの変形を扱わなくてはならないため、シミュレーションによる特性予測は非常に困難であった。

別の解決策の一つは光ファイバ自体の伝送損失を低減することである。伝送損失はガラスの構造によって大きく支配され、温度、圧力、ドーパント材料によってガラス構造がどのように変化するかをシミュレーションで求めることは非常に重要な技術となるが⁶⁾、ミクロな分子構造の変化を取り扱う必要があり、

こちらにも非常に高度な技術構築が必要であった。

マイクロバンド損失のシミュレーションには、光学的特性(ヘルムホルツ固有値方程式を解くこと)だけでなく、ガラスと樹脂の機械的特性も考慮に入れる必要がある。光学的特性に関しては、ファイバガラスの微小変形によって生じる伝搬コアモードから放射クラッドモードへの結合を評価する結合モード理論(Coupled Mode theory)などが検討されている⁷⁾。一方で、機械的特性も重要な要素であるにも関わらず、現在まで限られた報告^{8), 9)}しかされて来なかった。空間的に離散的な変形で、かつ変形の大きさがその離散距離と比べて十分に小さい場合、Olshanskyは、その問題固有の調整パラメータを用いたパワー形式の相関関数でパワースペクトルの変形を表現することを提案している¹⁰⁾。この形式の相関関数は、近年、ステップ型よりも複雑な構造であるトレンチ型ファイバのマイクロバンド損失を計算するのにも使用されており¹¹⁾、我々もトレンチ型のような複雑なプロファイルを有する光ファイバのマイクロバンド損失特性を評価するために、この相関関数を用いた検討を進め、測定値との良好な関係を確認してきた^{3)~5)}。

一方、レイリー散乱特性は、現在の最適化されたシリカ系光ファイバの通信波長帯の伝送損失の主要因となっている要素である。レイリー散乱損失は、ドーパントの濃度が十分に小さい場合には、10Åオーダーのガラスの員環構造分布に起因する密度揺らぎに大きく支配される¹²⁾。レイリー散乱損失を低減するには、例えば、以下のような方向性が考えられる。(1)ファイバ線引き時のアニーリング処理を含むファイバ冷却条件を最適化する^{13)~16)}、(2)ガラスが熔融してファイバ化する際に母材に圧力を付加する^{17), 18)}、(3)シリカのネットワーク構造を

^{*1} Simulation Group, FETI Ltd.

^{*2} 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

^{*3} Budapest University of Technology and Economics

変化させる大イオンなどのドーパントを大きな濃度揺らぎが発生しない範囲でドーピングする¹⁹⁾、の3つの方向性である。しかしながら、これらの条件を実験で最適化するの是非常に多くの労力が必要となる。それに対して、分子動力学シミュレーションを用いることで、異なるプロセス条件に対するミクロなガラス構造の変化を把握することが可能となる。現在までに、これらのシミュレーション研究は、主に二体相互作用ポテンシャルを用いて行われてきた^{13), 14)}。我々は、これらに加えて、異なるプロセス条件やドーパントによるガラス構造の変化をより高精度に調査すべく、三体相互作用ポテンシャルに関しても検討を行い、興味深い結果を確認している。

今回、(1) ケーブル化後の微細変形に伴う損失増加を表す重要指標であるマイクロバンド損失感度の低減、(2) ガラス構造均一性に大きく支配されるレイリー散乱損失の、線引きプロセスやドーパント材料による低減、ということを目指し、シミュレーションによる検討を行ったので、その内容を報告する。

2. マイクロバンド損失シミュレーション

2.1 理論

結合モード理論をベースにしたマイクロバンド損失は、下記の式(1)に示されるように、LP₀₁コア伝搬モードとLP₁₁型放射モードの結合係数: C_{1s}^2 と、変形関数のパワースペクトル: $\Phi(\Delta\beta_{1s})$ の乗算によって求められる。

$$2\alpha_m = \sum_{s=1}^{\infty} C_{1s}^2 \Phi(\Delta\beta_{1s}) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\beta_{1s} = \beta_{01} - \beta_{1s}$ は、LP₀₁コアモードとLP_{1s}放射モード ($s=1, 2, \dots, \infty$)との伝搬定数の差である。変形関数のパワースペクトル: $\Phi(\Delta\beta_{1s})$ は、 s が大きくなると無視できるほどに小さい寄与になるので、有限の放射モードを足し合わせることで計算が可能になる。

結合係数を求めるためには、計算に必要となるモード電界分布を求めるためのモードソルバーが必要になる。結合係数は、電界分布を使用して、以下の式(2)によって求めることができる。

$$C_{1s}^2 = \frac{k^2 \left(\int_0^{\infty} \frac{\partial n_0}{\partial r} E_{01} E_{1s} r dr \right)^2}{2 \int_0^{\infty} E_{01}^2 r dr \int_0^{\infty} E_{1s}^2 r dr} \quad (2)$$

ここで、 E_{01} はLP₀₁モードの電界分布を、 E_{1s} はLP_{1s}モードの電界分布を、 k は波数を、 n_0 は変形が無い状態での光ファイバの初期屈折率プロファイルを表している。

$f(z)$ 関数で与えられる変形分布に対する規格化パワースペクトルは、以下の式(3)によって求めることができる。

$$\Phi(\Delta\beta_{1s}) = \frac{1}{2L} \left| \int_{-L}^L f(z) \exp(-i\Delta\beta_{1s}z) dz \right|^2 \quad (3)$$

ここで、 L は0をセンターとした変形の長さを、 z は軸座標を表している。ドラムに巻かれたファイバの測定によって得られた $p \approx 1.1$ ⁸⁾を用いて、 $1/\Delta\beta_{1s}^{2p}$ 形式のパワースペクトルを有する変形関数を選択する手法がOlshanskyから提案されている¹⁰⁾。しかし、マイクロバンド損失の測定には、参考文献8)で用い

られているドラムよりも表面粗さの大きな、例えばサンドペーパーなどが用いられるため、どのような p の値を用いればよいのかが一つの課題となる。我々は、これに対して、実験条件を高精度にシミュレーションすることが可能なパラメタリストを作成し、実験をせずにファイバの最適化ができる環境を立ち上げた。空間周波数 $\Delta\beta_{1s}$ での他の形の変形関数の規格化パワースペクトルは、サンドペーパー微粒子上のファイバの機械的変形を調べることで求められる。我々は、マイクロバンド損失の測定データを異なる形の変形パワースペクトルを用いた計算結果と比較し、 p 指数ファクターを実験結果と整合させた。また、機械的シミュレーションを元に新規の $\Phi(\Delta\beta_{1s})$ を導入し、結果を参考文献10), 11)で紹介された近似値と比較した。

機械的変動に関しては、有限要素分析を用いて、光ファイバの粒子による変形を解析した。図1に示すように、モデルは、端部の z 軸と y 軸への変位を禁じて x 軸への変位(上下動)のみを可能としたファイバ断片を含んでいる。ファイバの片端は粒子に触れており、もう片端には実験におけるファイバの巻き付け張力に相当する量の力が掛かっている。長さ1 mmのファイバで得られる変位関数を図1に示した。また、コアの変位はガウシアン状プロファイルである。変形関数がガウシアン形状であるとするならば、変形関数は以下の式(4)の形で表現できる。

$$f(z) = Ae^{-\frac{z^2}{2b^2}} \quad (4)$$

ここで、 A と b は、正の実数である。同様に、 $A \cdot z \cdot e^{-z^2/(2b^2)}$ で表される変形関数も定義できるが、下記で示すように、これは、サンドペーパーを用いたマイクロバンド損失のモデルには正確性を加えないことが分かった。式(3)を用いて、式(4)で与えられる変形のパワースペクトルを計算することで、式(5)の形を得ることができる。

$$\Phi(\Delta\beta_{1s}) = (Ab)^2 e^{-b^2 \Delta\beta_{1s}^2} \quad (5)$$

ここで A はガラス径とコーティング厚さに依存する実質的な変形の大きさである。

これらの式(1)と(5)と参考文献3), 4)(ここでは寄与の小さなセカンダリコーティング厚さの影響は省略した)で示された大きさ(A)の前提を用いて、マイクロバンド損失は以下の式(6)で表すことが可能である。

$$2\alpha_m = \underbrace{a^2 \cdot e^{-\frac{2d_g}{\tau_g}} e^{-\frac{2t_p}{\tau_p}}}_{\text{Mechanical effect}} \cdot b^2 \underbrace{\sum_{s=1}^N C_{1s}^2 \cdot e^{-b^2 \Delta\beta_{1s}^2}}_{\text{Optical effect (Y)}} \quad (6)$$

ここで、 d_g はファイバガラス径、 t_p はプライマリコーティングの厚さであり、 a 、 τ_g 、 τ_p は実験に対するパラメタ特性である。最初の3因子は機械的特性と呼ばれて変形の大きさに関わり、総和の部分はモードオーバーラップと伝搬定数差に関連して、光学的特性に関わるものである。

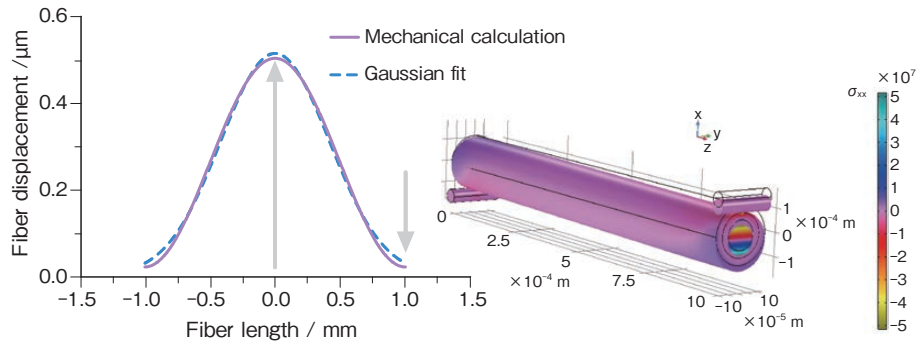


図1 プライマリとセカンダリのコーティングを含むファイバ片の機械的変動を計算するためのモデルと、フィットさせたガウシアンプロファイルを用いて得られた変位関数
The model to calculate the mechanical deformation of a piece of fiber including primary and secondary coatings, and the obtained displacement function along with a fitted Gaussian profile.

機械的特性シミュレーションは、ガラスとコーティングの剛性を考慮し、標準のガラス径125 μmと被覆後の外径250 μmを使用した。図1で得られた変形の大きさのオーダーはサブミクロンであり、最近のマルチコアファイバを用いた微細変形の形状と大きさに関する実験で得られている値⁹⁾とよく一致している。

2.2 マイクロバンド損失シミュレーションの結果

式(6)で得られた記述を用いて、実験的に調査されたそれぞれの光ファイバ設計についてのマイクロバンド損失を3つの異なる変形関数を適用して計算した(表1)。ここでは、Olshanskyによって導入された関数形¹⁰⁾である $1/\Delta\beta_{1s}^{2p}$ において $p = 0, 1, 2$ としたもの、およびファイバのガウシアン変形とOlshanskyの式と同様の追加指数因子 p を仮定して式(5)で得られる $e^{-b^2\Delta\beta_{1s}^{2p}}$ を用いた。また、表1に示すように、 $\Delta\beta_{1s}^{2p}e^{-b^2\Delta\beta_{1s}^{2p}}$ パワース

ベクトル関数を使用した計算も行ったが、これはガウシアン変形と同じ回帰パラメータを与え、マイクロバンド損失モデルを改善しなかった。

損失計算は、最小境界と最大境界を持つ制約された最適化アルゴリズムに挿入され、得られた実験結果と最も合うまでパラメータが変更された。2つの異なる変形パワースペクトルは、図2に示すように異なるシミュレーション結果を示し、近似線はグラフ上で異なる傾きを持っている。2つの異なる計算方法で計算された結果と測定値の間の相関は、両方のモデルで良好だが、式(5)で得られるガウス近似のものの方がわずかに優れていた。表1に示されるように、 R^2 回帰パラメータは、最初のケースでは0.934、ガウス形式では0.951であり、より複雑なガウス近似とパワーの式を組み合わせた場合は0.950である。 $1/\Delta\beta_{1s}^{2p}$ 式のサンドペーパー試験の p パラメータは、ファイバの巻き付け

表1 異なる変形関数、変形のパワースペクトル、得られたパラメータ、および回帰の精度 (R^2)
振幅パラメータには、式(4)、(5)、および(6)で記述されているように、 a, τ_g, τ_p が含まれる
Different deformation functions, power spectrum of the deformations, obtained parameters and the accuracy of the regression (R^2). A amplitude parameter contains a, τ_g, τ_p as it is written in the equations (4), (5) and (6).

$f(z)$	$\Phi(\Delta\beta_{1s})$	a	τ_g	τ_p	b	p	R^2
$A \cdot z $	$A \Delta\beta_{1s}^{-2p}$	10^5	12.8	9.8	-	2.2387	0.934
$A \cdot e^{-z^2/(2b^2)}$	$A^2 b^2 e^{-b^2 \Delta\beta_{1s}^{2p}}$	10^3	25.4	19.5	3.02	0.2582	0.951
$A \cdot z \cdot e^{-z^2/(2b^2)}$	$A^2 \cdot b^6 \cdot \Delta\beta_{1s}^2 \cdot e^{-b^2 \Delta\beta_{1s}^{2p}}$	$10^5/6$	25.4	19.5	4.04	0.2043	0.950

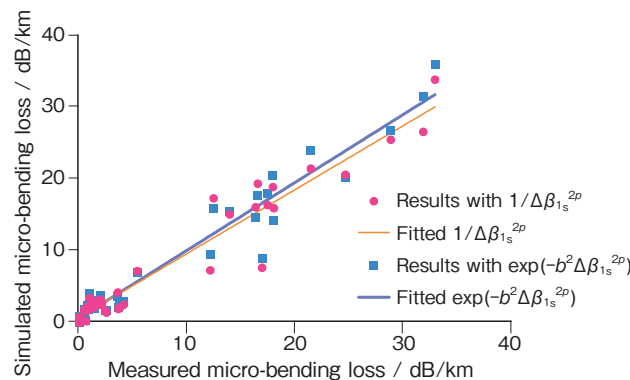


図2 2つの異なるパワースペクトル関数を利用して、測定およびシミュレーションされた1550 nmでのマイクロバンディング損失
The measured and simulated micro-bending loss using two different power spectrum functions at 1550 nm.

に用いた表面粗さが我々の実験で用いたサンドペーパーよりも小さい参考文献3)の1.1とは対照的に、参考文献8)に記載されている2に近い2.2387が得られた。

マイクロベンディング効果とマクロベンディング効果の組み合わせに最もよく適合するパラメータセットは、次のように得られた。

$$p = 2.67, A = 10^5, \tau_1 = 12.8 \mu\text{m}, \tau_2 = 9.8 \mu\text{m}, \tau_3 = 29.6 \mu\text{m} \quad (7)$$

これらのパラメータとCMTモデルを使用して、図3に示す波長の関数としてのマイクロベンディング損失を計算し、計算結果をステップインデックスファイバとトレンチアシストファイバの測定値と比較した。計算値は測定値とよく一致している。したがって、以下では、このモデルを使用してさまざまなファイバ設計のマイクロバンド損失を評価した。

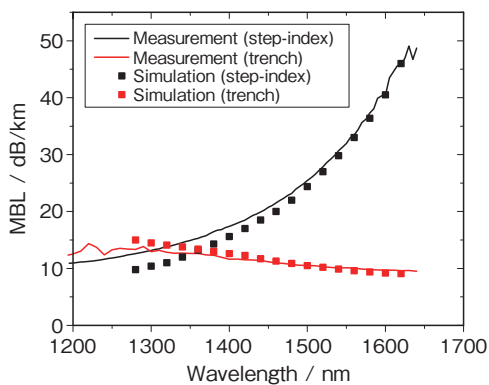


図3 ガラス径68 μmのステップインデックスファイバとガラス径80 μmのトレンチアシストファイバにおけるマイクロバンド損失の計算および測定された波長依存性 Calculated and measured wavelength dependency of MBL in a step-index fiber with 68 μm and a trench assisted fiber with 80 μm glass diameter.

また、式(6)に基づいて、セカンダリコーティングの因子がプライマリーコーティングの因子と同様の形としてコーティングの振る舞いをテストし、シミュレーションでのコーティング厚さの影響を測定値と比較した。これを行うには、マイクロバンド損失の測定結果と計算結果を、計算された光学係数(Y)と、検討されるパラメータを含まない機械的係数の部分で除算す

る。たとえば、ガラスの直径の影響を調べる場合、測定および計算された α_m を $Y \cdot e^{-2t_p/\tau_2} \cdot e^{-2t_s/\tau_3}$ で除算する。こうして、式(6)によると、計算上の純粋な指数関数である $a^2 e^{-2d_g/\tau_1}$ を取得するが、それらの操作は、測定データでも同様の振る舞いを起こすはずである。このテストは図4に視覚化されており、測定データは、計算結果と同様にガラスの直径(図4(a))とプライマリーコーティングの厚さ(図4(b))の増加に伴い、指数関数的減衰を示している。これは、ガラスの直径とプライマリーコーティング厚さのパラメータが、マイクロバンド損失の観点から重要な特性であることを示している。図4(c)によると、セカンダリコーティングは、理論的検討から得られたものと比べ、測定値の方はそのような明確な傾向を示していない。図4(c)のシミュレーション結果は、セカンダリコーティングの厚さが増すにつれて浅い勾配でほぼ線形に減少はしているが、測定されたマイクロバンド損失はセカンダリコーティングの厚さとの相関がさらに弱い。一般的に、式(3)は適切に適合されたパラメータセットを使用して機械的特性を説明するための適切な近似値であり、セカンダリコーティングの厚さはマイクロバンド損失の抑制に重要な役割を果たしていないことが確認された。

例として、コアとクラッド領域で構成される単純なステップインデックスファイバ設計に関して検討を行った。この検討により、有効コア面積とファイバパラメータの関係を確立することができる。ステップインデックスファイバのコアサイズ(2a)とコアとクラッドの比屈折率差(Δ)を変化させた場合の結果を図5に示す。計算に使用したパラメータ範囲は、 $\Delta_1 = 0.32, 0.33, \dots, 0.42\%$, $2a = 8, 9, \dots, 13 \mu\text{m}$ である。ほとんどの比屈折率差の場合で、コア径とマイクロバンド損失の関係は最小値を有する様な関係曲線を示しており、それぞれの比屈折率差でマイクロバンド損失が最小値となるコア径を確認することができる。たとえば、 $\Delta_1 = 0.32\%$ の場合、最適値は $2a = 9 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ の間である。最適なコアサイズよりも小さいと、基本コアモードと放射クラッドモードの結合が強化される。コア径を固定した場合は、比屈折率差が小さいほど有効コア面積とマイクロバンド損失が大きくなる。より複雑な構造に関しても、我々のモデルは適用可能である。これらの検討は、他のファイバパラメータ(分散、カットオフ波長、モードフィールド径など)の計算が可能なモデルと一緒に使用することによって、各種の特性トレードオフを考慮に入れた検討・分析が可能となる。

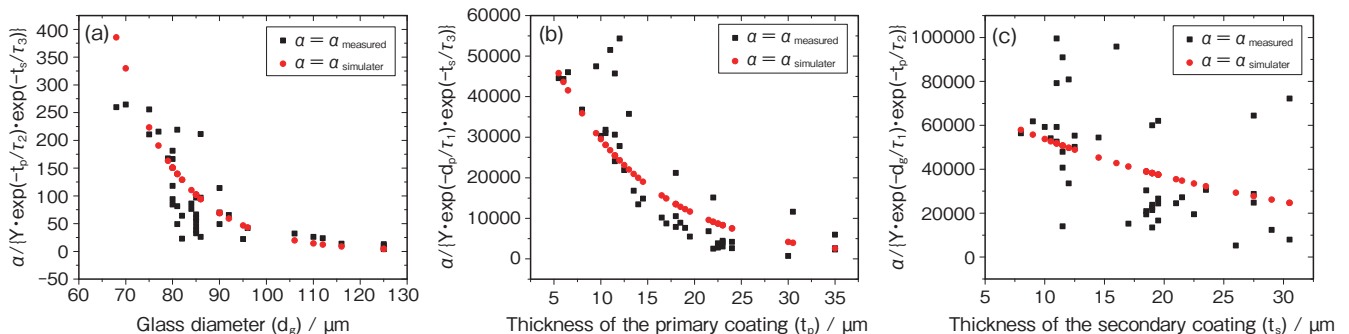


図4 結合されていないファイバの特性についての、測定および計算されたMBLを光学係数Yおよび指数関数的機械的係数で割ったものを、(a) ガラス直径、(b) プライマリーコーティング厚さ、および(c) セカンダリコーティング厚さの関数として示す The measured and calculated micro-bending loss divided by the optical factor Y and the exponential mechanical factors for the disjoint fiber properties as functions of (a) glass diameter, (b) primary coating thickness and (c) secondary coating thickness.

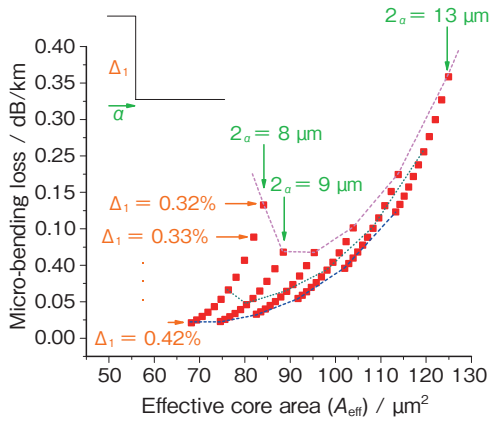


図5 ステップインデックスファイバの2つのファイバパラメータ(コアの比屈折率差 Δ_1 とコア径 a)を変化させたときの、有効コア面積とマイクロバンド損失の関係 The micro-bending loss as a function of an effective core area in a step-index fiber, by changing two fiber parameters: the relative index difference of the core (Δ_1) and the core radius (a).

3. ガラスシミュレーションの結果

分子動力学シミュレーションにおいて、光ファイバ線引きプロセス中に発生する状態変化を再現すべく、熔融(線引き炉)温度から室温まで、数千の原子を含むアモルファス SiO_2 構造を冷却する。冷却速度の影響を変更して調べ、さまざまな冷却パターンを導入したり、初期温度(炉内温度)を変化させたりし、その影響も確認した。また、線引きプロセス中の圧力の影響も、線引きプロセス開始時の熔融状態のガラスにオーダーの異なる圧力を適用して計算した。冷却プロセスのシミュレーションにはNVTアンサンブルでのVashishtaポテンシャル²⁰⁾を使用し、圧力効果には、より信頼性の高いTersoffポテンシャル²¹⁾が適用された。これは元パラメータ化された大気圧でのガラスの熔融状態をうまく扱うことができないVashishtaポテンシャルと比較して、NPTアンサンブルでの圧力依存効果を把握できるためである。ドーパントについては、Ohta-Hamaguchiポテンシャルを使用して、 SiO_2 ガラス中のClとFのドーパ濃度を変えて計算した²²⁾。これらの検討は、これらの影響が微視的レ

ベルでのガラスの均一性に大きな影響を与える可能性があることを示していた。

我々のモデルには、 1000°C の初期温度で 37 \AA の長方形の箱の中にランダムに配置された3375個のSi原子とO原子が含まれている。ガラスを熔融するには、Tersoffポテンシャルを使用すると、実際に起こっているよりもかなり高い温度範囲が必要であることには注意が必要である。この事実は参考文献23)から知られているが、圧力関連の計算は、Tersoffポテンシャルを使用すると、たとえば、NPTアンサンブルのVashishtaポテンシャルのように大気圧近くでシステムが崩壊したりせず、自然な振る舞いの範囲に近いものが得られる。シリカのガラス転移温度は 1300°C から 1800°C の間と予想されるが、分子動力学シミュレーションでTersoffポテンシャルを使用すると、これは約 2500°C で発生する。これは、ポテンシャルのパラメータ設定によるものであり、分子動力学シミュレーションで認識されている問題である。力場の再パラメータ化によって克服可能であるが、我々は、参考文献21)に記載されているような元パラメータ化を使用した。ただし、元パラメータ化では、圧力に依存する計算をする場合は、アニーリングプロセスはシステムを 5000°C に加熱し室温まで冷却するように設定されている。我々のモデルでは、冷却は時間の関数としての線形関数で近似した。図6は、全てVashishtaポテンシャルを使用した計算に対応している。図6(a)は、NVTアンサンブルを使用した異なる冷却速度の効果として得られた員環構造分布を示している。冷却速度の低下とともに見られるガラスの均一性増加の明確な傾向は、フィッティングガンマ関数でも示されている。また、炉の出口($\sim 2000^\circ\text{C}$)からファイバ固化(\sim 室温)の間で冷却速度を変えてファイバを冷却した場合に何が起るも興味深いテーマである。例えば、ガラス転移温度(GTT)付近(この例では約 1250°C)で、冷却を遅くすると、どう構造が変化するかなどである。対応する冷却パターンを図6(b)の挿入図に示す。考え方は、ファイバにコーティングを施すために必要な十分に低い温度に達してからコーティングを適用するために、同じ平均速度または同じ時間でファイバを冷却しながら、冷却速度をGTTの辺りでは遅くするというものである。いくつかの追加炉を設定することで線引き炉から出たファイバを加熱し、冷却速度を遅くすることも可能である。図6(b)は、ガラスのGTT

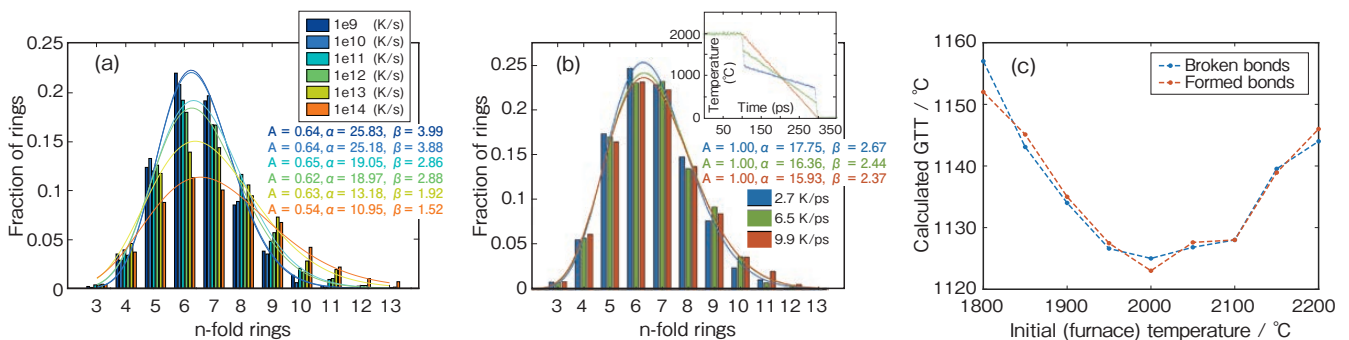


図6 (a) ファイバ軸方向に、異なる冷却速度で一定の温度変化の場合の、員環構造分布とガンマ関数フィッティングカーブ (b) ガラスのGTTの近辺で冷却速度を変化させた場合の員環構造分布とガンマ関数フィッティングカーブ (c) 初期温度とガラスのGTTの関係

The glass-membered ring structure distribution and Gamma function fitted curves for different cooling rates with constant temperature change along the fiber. (b) The glass-membered ring structure distribution and Gamma function fitted curves when the cooling rate is changed near the GTT of the glass. (c) The relations between the GTT of the glass and the initial temperature.

付近のさまざまな冷却速度パターンに対応する構造の員環構造分布を示している。一定速度の冷却(図6(b)の赤い曲線と赤いバー)は最も広がった員環構造分布を示している。これは、統計的に大きな数の員環構造と3および4の小さな員環構造が、この構造で最も多いことを意味している。図6(c)に示されている最終構造に対する初期温度または線引き炉温度の影響も興味深い結果となっている。以前と同じ冷却プロセスで計算をするが、冷却速度は全ての場合で一定の 10^{12} K/sが選択され、初期温度を 1800°C から 2200°C の間で変化させた。ガラスのGTTの最小値は、約 2000°C であった。

また、例えば、線引き炉の下に圧力室を導入するなどして、溶融状態のガラス光ファイバに圧力をかけた場合の影響に関して、計算を行った。 10^{12} および 10^{13} K/sの冷却速度の場合の異なる圧力による密度の変化を図7(a)に示す。この結果は、分子動力学シミュレーションの開始時の原子の初速度ベクトルと方向を5つの異なるランダムな値で与えた場合の計算結果の平均である。これらの曲線は、ガラスの最終密度が圧力に依存することを示しているが、低圧領域では、分子動力学シミュレーションで計算された圧力値にノイズがあり、計算の誤差は1 MPa以上の圧力でのみ許容できることに注意する必要がある。2つのケースの圧力依存性の計算により、10 MPa以上の圧力を加えるとガラスの密度が変化することがわかる。 10^{12} K/sの冷却速度において、10 MPaでのガラスの密度は 2.256 g/cm^3 であるが、1 MPaでの密度は 2.254 g/cm^3 である。得られた員環構造分布を図7(b)に示す。加えられた圧力は、

構造内の3員環や4員環の数にはあまり影響を与えていない。溶融ガラスに対する圧力の違いは、8員環、9員環、10員環などの大きな数の員環構造に現れる。これは、参考文献(18)にも記載されているように、加えられた圧力がシリカ構造のポイドを抑制することを示している。

ドープガラスシミュレーション(Cl, F)に関しては、元々エッチング目的で開発された、Si, O, およびハロゲン原子間の相互作用を2体および3体相互作用で表すことができるOhta-Hamaguchiポテンシャルを実装してテストした²²⁾。3375個のSiおよびO原子を含むシステムを使用して、 10^{13} K/sと 10^{12} K/sの冷却速度で、異なるClドーピング濃度の効果をテストした。図8(a)は、構造中の小さな部分を、Si原子と周囲の3つの酸素によって形成された四面体中に現れるCl原子を強調して示している。塩素はここでSi-O結合の形成をブロックし、フリーな末端部を形成する。図8(b)は、塩素原子がSi原子の代わりにリングに配置された、同じ構造中の別の例を示している。ここでは、Ohta-Hamaguchiによって開発された力場によって明確に定義されたO-Cl-Oトリプレットが現れている²²⁾。異なるClドーピング量で得られた員環構造分布を図8(c)に示す。Cl濃度の増加に伴い9員環、10員環、11員環、および12員環の量が増加する傾向が示されている。Clによる特定のSi-O結合の切断により、Cl原子がない場合よりもリングサイズが大きくなる可能性が見られる。図8(d)は、 SiO_2 構造にフッ素を添加した分子動力学シミュレーションから得られた構造を示している。Si配位では5配位対が実行可能であることが見てとれる²⁴⁾。

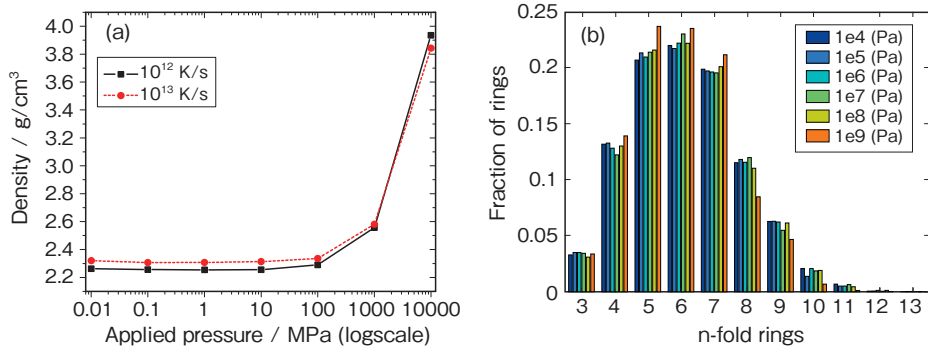


図7 (a) 線引き溶融状態の光ファイバに異なる圧力を加えて得られたガラス構造の密度変化 (b) 異なる圧力を加えて得られた構造の員環構造分布 (a) Density changes of the obtained glass structure applying different pressure on the melted state of the drawn fiber. (b) The glass-member ring structure distribution of the structure obtained applying different pressures.

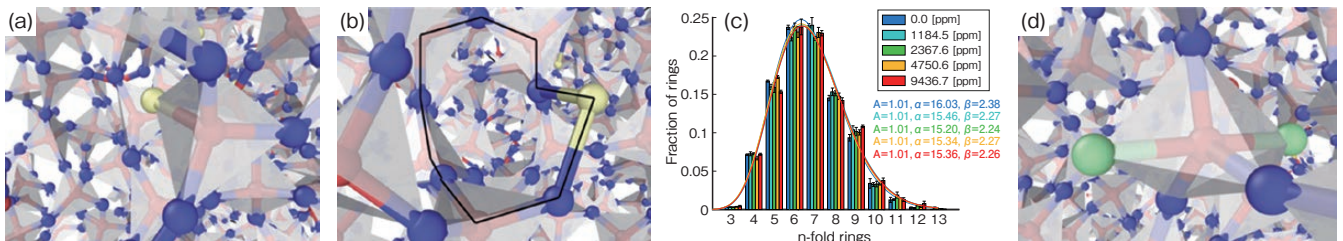


図8 (a) Si (赤)の周囲に形成された四面体にCl (黄色)が現れて形成される構造, (b) 2つの酸素(青)の間のシリカ4員環にClが現れる構造, (c) 塩素濃度が異なる場合の員環構造分布, (d) シリカの興味深い5配位対を持つフッ素ドープシリカ構造 (a) Obtained structure with Cl (yellow) appearing in a tetrahedron formed around a Si (red), (b) Cl is appearing in a silica four membered ring between two oxygens (blue) (c) The membered ring structure distributions with different Chlorine concentration, (d) Fluorine doped SiO_2 with interesting five-fold coordination of silica.

4. おわりに

ガラスファイバとコーティングの重要な機械的特性を含む、サンドペーパー粒子によって引き起こされる2つの異なるガウス変形の場合のマイクロベンディング損失の計算式を導き出した。式(6)で与えられる損失式のシミュレーションパラメータを最適化した後、3つの異なるパワースペクトル関数を使用して実験結果とシミュレーション結果を比較した。2つの異なるファイバの波長依存性を計算し、開発したモデルを使用してマイクロバンド損失の低いファイバを選択することが可能であることを示した。

Vashishta, Tersoff, およびOhtaの力場を使用した分子動力学シミュレーションにより、線引き工程における冷却プロセスの影響、圧力の影響、およびのガラスへのドーピングの影響を検証した。ガラス構造に関連して、①散乱損失の観点から冷却速度が遅いことが有利であること、②熔融状態のガラスファイバに圧力を加えると大きな数の員環構造が抑制され、局所的な密度変動による光散乱も減少すること、③塩素ドーピングは、9～11の員環構造の増加を示し、より小さな員環構造の形成をブロックすること、を確認した。ただし、ドーピングによる効果とその結果には、さらに分析が必要である。

参考文献

- 1) https://www.furukawa.co.jp/en/release/2018/comm_180330.html
- 2) K. Mukasa, T. Mihálffy and Z. Várallyay, "Optimizations of thin glass diameter fibers," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, OSA Technical Digest, paper M3C.1.
- 3) T. Mihálffy, Z. Várallyay, G. Varga and K. Mukasa, "Combined Mechanical-Optical Simulation to Predict Microbending Loss of Single Mode Fibers," 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8818048.
- 4) Z. Várallyay, T. Mihálffy, S. Bilicz, G. Varga, and K. Mukasa, "Microbending Loss Properties of Different Fiber Designs" in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, OSA Technical Digest, paper Th1A.49.
- 5) Z. Várallyay, T. Mihálffy and K. Mukasa, "Comparison of Different Deformation Functions Modeling Micro-bending Loss of Optical Fibers on Sandpaper Test," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, OSA Technical Digest, paper M4E.3.
- 6) Z. Várallyay, K. Mukasa, B. Csengeri, Zs. Puskás, B. Németh and P. Szelestey, "Silica glass structure simulation for optical fiber application," 2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC48412.2020.9273632.
- 7) D. Marcuse, Theory of Dielectric Optical Waveguides, (Academic Press, second ed. 1991), Chap. 3.
- 8) W. B. Gardner, "Microbending Loss in Optical Fibers." Bell System Technical Journal, 54, 457-465 (1975).
- 9) R. Ahmad, W. Ko, K. S. Feder, and P. S. Westbrook, "Measuring the shape of microbends in optical fibers," Optics Express 45, 5189-5192, (2020).
- 10) R. Olshansky, "Distortion Losses in Cabled Optical Fibers," Applied Optics, 14, 20-21 (1975).
- 11) P. Sillard, "New fibers for ultra-high capacity transport," Optical Fiber Technology, 17, 495-502 (2011).
- 12) B. Champagnon, C. Chemarin, E. Duval and R. Le Parc, "Glass structure and light scattering," Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 274, pp. 81-86, (2000).
- 13) X. Bidault, S. Chaussedent, W. Blanc, and D. R. Neuville, "Deformation of silica glass studied by molecular dynamics: Structural origin of the anisotropy and non-Newtonian behavior," Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 43, pp. 38-44, (2016).
- 14) P. Koziatek, J. L. Barrat and D. Rodney, "Short- and medium-range orders in as-quenched and deformed SiO₂ glasses: An atomistic study," Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 414, pp. 7-15, (2015).
- 15) A. E. Geissberger and F. L. Galeener, "Raman studies of vitreous SiO₂ versus fictive temperature," Physical Review B, vol. 28, pp. 3266, (1983).
- 16) Y. Tamura, H. Sakuma, K. Morita, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, Y. Honma, K. Sohma, T. Fujii and T. Hasegawa, "Lowest-ever 0.1419-dB/km loss optical fiber," OFC 2017 conference, paper Th5D.1, 2017.
- 17) M. Ono, S. Aoyama, M. Fujinami, and S. Ito, "Significant suppression of Rayleigh scattering loss in silica glass formed by the compression of its melted phase," Optics Express, vol. 26, pp. 7942-7948, (2018).
- 18) Y. Yang, O. Homma, S. Urata, M. Ono and J. C. Mauro, "Topological pruning enables ultra-low Rayleigh scattering in pressure-quenched silica glass," npj Computational Materials vol. 6, pp. 139, (2020).
- 19) J. Schroeder, R. Mohr, P. B. Macedo and C. J. Montrose, "Rayleigh and Brillouin Scattering in K₂O-SiO₂ Glasses", Journal of The American Ceramic Society, vol. 56, pp. 510-514, (1973).
- 20) P. Vashishta, R. K. Kalia, J. P. Rino and I. Ebbsjö, "Interaction potential for SiO₂: A molecular dynamics study of structural correlations," Physical Review B, vol. 41, pp. 12197-12209, (1990).
- 21) J. Tersoff, "New empirical approach for the structure and energy of covalent systems," Physical Review B, vol. 37, pp. 6991-7000, (1988).
- 22) H. Ohta and S. Hamaguchi, "Classical interatomic potentials for Si-O-F and Si-O-Cl systems," J. Chemical Physics, vol. 115, pp. 6679-6690, (2001).
- 23) S. Munetoh, T. Motooka, K. Moriguchi and A. Shintani, "Interatomic potential for Si-O systems using Tersoff parameterization," Computational Materials Science Vol. 39, pp. 334-339 (2007).
- 24) J. R. Rustad, D. A. Yuen, F. J. Spera, "Coordination variability and the structural components of silica glass under high pressures," Chemical Geology vol. 96, pp 421-437 (1992).