

850 nm 帯における光パルス周回法を用いたポリマークラッドシリカコアファイバーの伝送帯域測定

相葉 孝充*・柴田 宣**

* 矢崎総業(株)技術研究所 〒239-0847 横須賀市光の丘 3-1

** 矢崎総業(株)技術研究所 〒410-1194 裾野市御宿 1500

Transmission Bandwidth Measurement Based on Optical Pulse Circulation through a Polymer-Clad Silica-Core Fiber in the 850 nm-Wavelength Region

Takamichi AIBA* and Nori SHIBATA**

* Research & Technology Center, YAZAKI Corporation, 3-1 Hikarino-oka, Yokosuka 239-0847

** Research & Technology Center, YAZAKI Corporation, 1500 Mishuku, Susono 410-1194

Polymer-clad silica-core (PCS) fibers are attractive for automotive applications. Fiber-lengths inside automobiles will be less than 100 m, and systems that can measure the transmission bandwidth B as a function of fiber-length L are important for designing and evaluating the transmission media from the viewpoint of the fiber applications. We apply an optical pulse circulation technique to a 100-m long PCS fiber having a graded-index profile at the wavelength of 835 nm. An optical pulse that circulates the fiber 6 times is successfully observed. Fiber-length dependence of optical pulse spreading is measured for coaxial and off-axis alignments of the fiber input, and the resultant 3 dB transmission bandwidths are quantitatively evaluated. When B is expressed as $B = B_0 L^{-\gamma}$, a 3 dB bandwidth linearly decreases with the fiber-length under the launch condition of coaxial alignment, namely, $\gamma \approx 1$, while the fiber under off-axis alignment condition exhibits $\gamma > 1$. The pulse spreading due to group delay differences between guided modes in the PCS fiber are discussed in a comparison to that created by material dispersion in a 110-m long single-mode fiber (SMF) having cut-off wavelength of 759 nm. The experimental results for both the PCS fiber and SMF suggest that multimode- and chromatic-dispersions comparably contribute to the optical pulse spreading for the coaxial alignment. The experimentally obtained results will provide useful data in the design of automobile fiber-optic LAN systems.

Key words: automotive application, polymer-clad silica-core fiber, single-mode fiber, chromatic dispersion, transmission bandwidth

1. はじめに


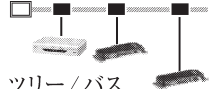

「安全・安心」「環境」「利便性・快適性」の3つの市場ニーズを背景に自動車の電子化が急速に浸透しつつある。自動車電子化の潮流は、自動車に搭載される電子制御ユニット (ECU: electronic control unit) 数の急激な増大傾向から把握することができる¹⁾。ECU間を結ぶリンクはワイヤーハーネスとよばれる自動車用組電線により構成され、リンク数の増大は車載ネットワークがハンドリングする情報量を増大させる。したがって、車載ネットワークのさらなる高速・大容量化が求められる。複雑化する車載機器の

ユーザーインターフェースをシンプルに提供する手段が車載 LAN である。高速・大容量化へ向けた取り組みに車載 LAN の光化があり、大容量化の手段に双方向の波長多重 (WDM: wavelength-division-multiplexing) 伝送技術が検討されている^{2,3)}。

車載 LAN で光化が進む LAN として、欧州を中心に展開される MOST (media oriented systems transport) と IEEE1394 規格を基本とする IDB-1394 (ITS data bus 1394) の情報系光 LAN がある⁴⁾。Table 1 に MOST と IDB-1394 の仕様について概要を整理した。伝送媒体はプラスチック

** E-mail: n-shibata@ytc.yzk.co.jp

Table 1 Some specifications of MOST and IDB-1394 protocols.

車載 LAN	MOST	IDB-1394
ネットポロジ	 リング	 ツリー/バス
伝送媒体	プラスチックファイバー (POF) 	
波長 (nm)	650±30	
ノード数	64 (最大)	63 (最大)
伝送路長 (m)	20 (最大)	4.5 (ノード間)
伝送速度 (Mb/s)	25, 50, 150	100, 200, 400, 800
伝送路符号	NRZ (non-return-to-zero) 符号	

光ファイバー (POF: plastic optical fiber) であり、使用波長は POF の低損失領域である 650 ± 30 nm で規定されている。これまで、POF を用いた大容量化の伝送実験として、LED と自己形成光導波路技術⁵⁾により光素子間のインターコネクションを実現した 250 Mb/s の双方向 WDM 伝送実験⁶⁾がある。一方、さらなる高速化へ向け、石英ガラスのコアとハードポリマーのクラッドからなるポリマークラッドシリカコア (PCS: polymer-clad silica-core) ファイバーが注目されている⁶⁾。PCS ファイバーの低損失波長領域は 850 nm 帯であるため、面発光レーザー (VCSEL: vertical cavity surface emitting laser)⁷⁾との併用により、IDB-1394 の伝送速度 400 Mb/s を意識した 500 Mb/s の WDM 伝送実験が報告⁸⁾されている。

車載に適用される光伝送媒体の特徴のひとつに短尺であることが挙げられる。Table 1 から伝送路長の規定は MOST で最大 20 m、IDB-1394 ではノード間で規定され 4.5 m である⁹⁾。IDB-1394 の最大ノード数は 63 であることから、光ファイバーの総延長距離は最大でも 280 m 程度となる。したがって、短尺の試料ファイバーを用いて光伝送特性を評価できる方法が必要となる。光ファイバーの伝送特性を把握するうえで伝送帯域と光損失が重要である。先に述べた車載 LAN の高速化へ向けた取り組みにおいては、光ファイバーの伝送帯域特性を把握することがより重要となる。

本論文では、今後、車載光 LAN の伝送媒体として期待される PCS ファイバーについて、伝送帯域の距離依存性を光パルス周回法^{8,9)}により実験的に評価した結果を述べる。実験は波長 850 nm 帯で行い、試料ファイバーには長さが 100 m の短尺ファイバーを用いた。多モードファイバーの伝送帯域は励振される伝播モードの光電力分布に依存するため、同軸入射と軸ずれ入射の 2 つのモード励振条

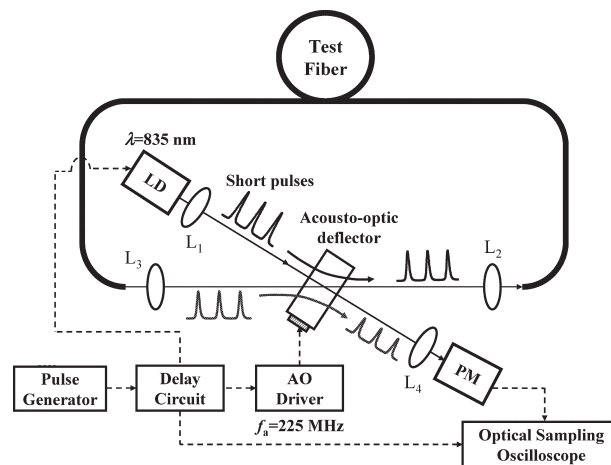


Fig. 1 Experimental arrangement used for making optical pulse circulation measurements.

件に対して、伝送帯域の距離依存性を調べた。また、PCS ファイバーと 850 nm 帯で単一モード動作する単一モードファイバー (SMF: single-mode fiber) の伝送帯域特性を比較することにより、光パルス広がりに対する多モード分散と色分散の寄与を明らかにした。

2. 光パルス周回法と測定系

光パルス周回法はシャトルパルス法ともよばれ、1975 年 Bell 研の Cohen⁸⁾が多モードファイバーの光パルス広がりを観測する手段として用いた。1977 年 NTT の谷藤と池田⁹⁾は、長さ 1 km 程度の長尺多モードファイバーに光パルス周回法を適用し、同軸入射および軸ずれ入射に対する伝送帯域の距離依存性を調べた。長さ 100 m 程度の短尺ファイバーに光パルス周回法を適用した例として、波長 647 nm において PCS ファイバーを 11 周回した光パルスが観測され、この方法の有用性が確認された¹⁰⁾。しかし、使用波長が PCS ファイバーの動作波長と異なる 650 nm 帯であるため、実用上の観点からはモード励振条件の伝送帯域依存性を議論するうえで不十分であった。

光パルス周回法は音響光学偏向素子 (AO: acousto-optic deflector) のスイッチング機能を利用し、所望の回数だけ被測定光ファイバーを周回した光パルスを抽出して光パルス広がりを観測する。以下に述べる測定系は谷藤と池田の方法を適用し、実験は PCS ファイバーの動作波長である 850 nm 帯で行った。Fig. 1 に光パルス広がり測定系を示す。短光パルス光源は中心波長が 835 nm の半導体レーザー (LD) を用いた。LD からの光パルス列は 225 MHz で駆動される AO に入射され、AO からの 1 次回折光はレンズ (開口数 $NA=0.25$) を介して被測定ファイバーに入射

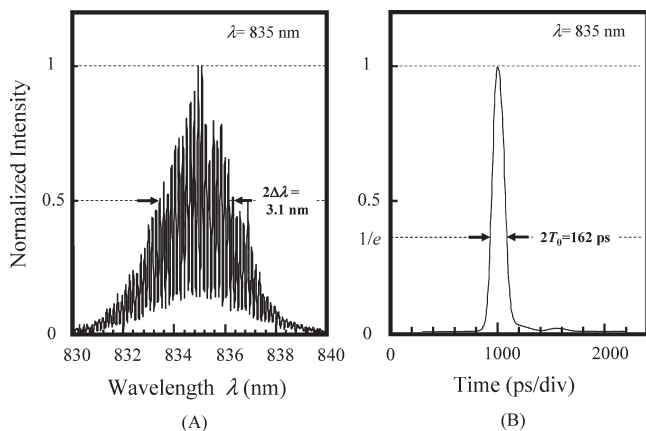


Fig. 2 Emission spectrum and optical pulses of the pulsed laser diode.

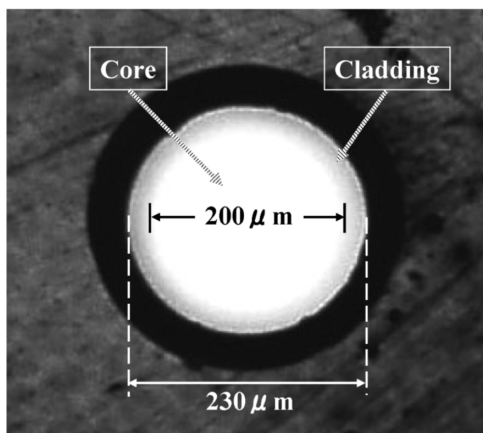


Fig. 3 Fiber cross-section of the PCS fiber used in the experiments.

させる。光ファイバー出射端からの光パルスは再度 AO に入射され、その 0 次回折光は被測定ファイバーに再入射され、1 次回折光は光検出器へ導かれる。被測定ファイバーを n 周回 ($n=1, 2, 3, \dots$) した光パルスは、パルスパターン発生器 (PG: pulse generator) と遅延回路 (delay circuit) を用いて LD の光パルス発生と AO のスイッチング動作を同期させ、抽出する。AO の 1 次回折光として抽出された光パルスの波形は、光電子増倍管 (PM: photomultiplier) を実装した光サンプリングオシロスコープ (OSO: optical sampling oscilloscope) により観測される。測定可能な周回数は、光パルスのピーク値と OSO の受信感度の差である送受信レベル差 (ダイナミックレンジ) で決まる。

Fig. 2 に LD の発振スペクトル (A) と光パルス波形 (B) を示す。Fig. 2 (A) から LD のスペクトル半値全幅は $2\Delta\lambda=3.1$ nm である。また、Fig. 2 (B) から光パルスピ

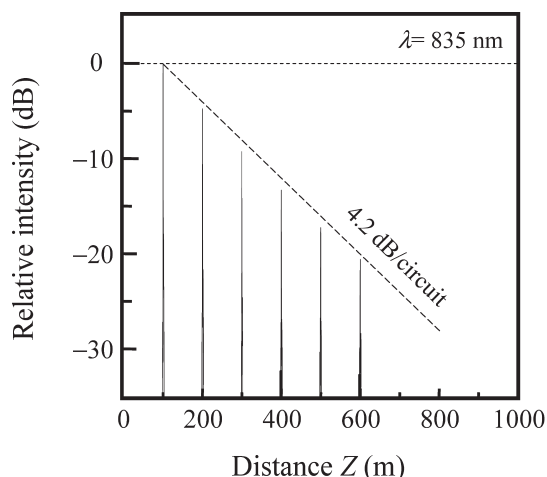


Fig. 4 Optical pulse trains from 1st to 6th circulations.

ークの $1/e$ ($=0.3679$) で規定したパルス半値全幅は $2T_0=162$ ps である。被測定ファイバーとして長さ 100 m の PCS ファイバーと 110 m の SMF を用いた。Fig. 3 に PCS ファイバーの断面写真を示す。中央の明るい部分は $200 \mu\text{m}$ 径のコアを示し、コア周辺に $230 \mu\text{m}$ 径のクラッドを有している。コア内の屈折率分布は、低次伝播モードと高次伝播モードの群速度がほぼ等しくなるよう設計された二乗分布である。また、SMF は 835 nm で単一モード動作が可能な遮断波長 $\lambda_c=759$ nm、比屈折率差 $\Delta=0.45\%$ のものを用いた。

3. 光パルス広がり と 伝送帯域の距離特性評価結果

Fig. 4 は、PCS ファイバーを用いて、光パルス周回法により抽出された 1~6 周回の光パルス列を示す。図から、光パルスピークを結ぶ線の傾きは 4.2 dB/周回であり、これは被測定ファイバーを含む光ループの光損失 (=ファイバー損失+レンズ系による挿入損失+AO の回折効率に依存したスイッチング損失) を意味する。測定系のダイナミックレンジは約 30 dB であり、測定可能な光パルス周回数は $30 \div 4.2 \approx 7$ 程度であることがわかる。同軸入射と軸ずれ入射に対して得られた出射光パルス波形 ($n=0, 2, 4, 6$) をそれぞれ Fig. 5 (A) と (B) に示す。これらの図で、横軸は光パルスの半値全幅に対するものであり、各周回パルスの間隔は実際の遅延時間を与えるものでないことを記しておく。Fig. 5 (A) から、同軸入射では光パルスの半値全幅はほぼ一定の割合で増加し、伝送帯域は距離に反比例して減少することが予想される。一方、軸ずれ入射では、光パルスの前縁部に高次モードの励振に起因する盛り上がり観測された。これは、試料ファイバーを伝播する高次モード群の群速度が低次モード群の群速度よりも大きいこ

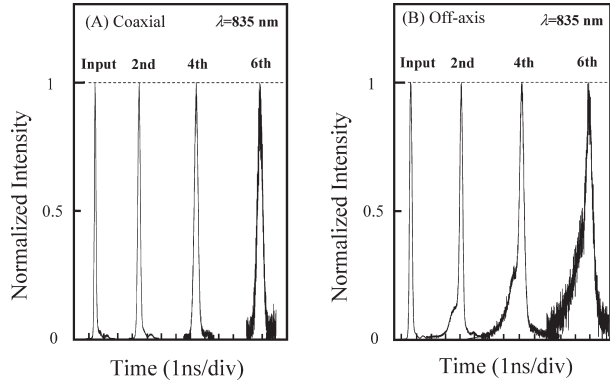


Fig. 5 Shape of the optical pulses after circulating the 100-m long PCS fiber for launching conditions of (A) coaxial alignment and (B) off-axis alignment.

とを意味する。光パルス前縁部の盛り上がりは周回数の増加とともに顕著となり、6周回後の光パルス波形から、この前縁部がパルス半値全幅に影響していることがわかる。したがって、ある周回数以上で光パルス前縁部の影響により、伝送帯域は急激に減少することが予想される。Fig. 6は、長さが110 mのSMFを周回した光パルス波形を示す。SMFは最低次の伝播モードである HE_{11} モードのみが伝播可能であるから、光パルス広がりや色分散特性を反映する。図から、光パルス広がりや周回数の増加に対し、単調増加することがわかる。

光パルス伝播特性におけるPCSファイバーとSMFの差は、多モード分散による効果である。したがって、PCSファイバーの屈折率分布の最適化度合いは、光パルス広がりやどの程度SMFのそれに漸近するかにより把握できる。そこで、比較の対象とするSMFを伝播する光パルス広がりについて理論的背景¹¹⁾を述べ、Fig. 6の実験結果を考察する。SMFを伝播する光パルスの振る舞いについては、光パルス前縁部から後縁部にかけて波長が異なるチャープ¹¹⁾の影響により、LD出射パルスの半値全幅よりも小さい、光パルス半値全幅が最小となる伝送距離の存在が観測されている¹⁰⁾。そのため、チャープの影響を考慮した光パルス伝播特性を扱う¹²⁾。光ファイバーの振幅減衰定数を α 、伝播定数を β 、光角周波数を ω 、光パルスのスペクトル分布を $F(\omega)$ とすると、距離 z の光ファイバーを伝播した光パルス波形は、

$$V(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp\{i(\omega t - \beta z) - \alpha z\} d\omega \\ = \frac{\exp(-\alpha z)}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp\{i(\omega t - \beta z)\} d\omega \quad (1)$$

と表される¹³⁾。ここで、光源のスペクトル広がりに対し、

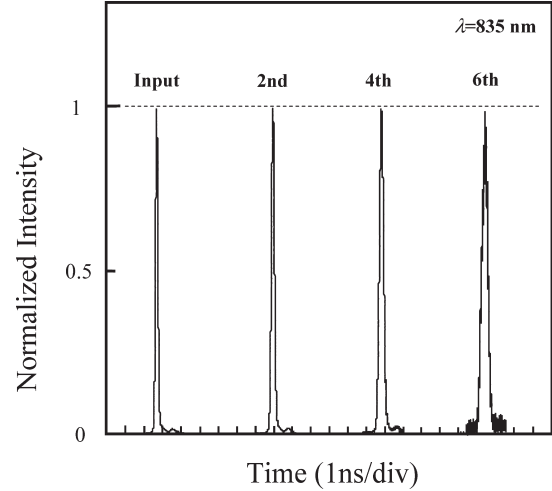


Fig. 6 Shape of the optical pulses after circulating the 110-m long single-mode fiber.

光ファイバーの振幅減衰定数 α は一定値とした。次に、光パルス広がりやGVD (group velocity dispersion) パラメーター $\beta''(\omega)$ ¹¹⁾の符号に依存するため、式(1)の伝播定数 $\beta(\omega)$ を角周波数 Ω の近傍でテイラー展開する。 $\beta(\omega)$ は、

$$\beta(\omega) \cong \beta(\Omega) + \beta'(\Omega)(\omega - \Omega) + \frac{1}{2}\beta''(\Omega)(\omega - \Omega)^2 + \dots \quad (2)$$

と書ける。ここで、 $\beta'(\omega) = d\beta/d\omega$ 、 $\beta''(\omega) = d^2\beta/d\omega^2$ である。また、 $\beta''(\omega)$ は色分散 D を用いて、

$$\beta''(\omega) = \frac{\lambda^2 D}{2\pi c} \quad (3)$$

と表される¹⁴⁾。ここで、 λ は波長、 $c (= 3 \times 10^8 \text{ m/s})$ は自由空間中の光速である。Fig. 2 (B)に示した光パルス波形をガウス型で近似すると、チャープを考慮した光パルス波形は

$$U(T) = A \exp\left\{-\frac{(1+iC)}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right\} \quad (4)$$

と記述できる¹¹⁾。ここで、 C はチャープパラメーターである。光パルス前縁部から後縁部にかけて瞬時光周波数が増加する場合、 $C > 0$ となりアップチャープ (up-chirp)、逆の場合は $C < 0$ となりダウンチャープ (down-chirp)とよばれる。 $\beta''(\omega)$ と C を用いて、光ファイバーを距離 z だけ伝播した光パルスの半値幅 T_1 と入射光パルスの半値幅 T_0 の関係は

$$\frac{T_1}{T_0} = \left\{ \left(1 + \frac{C\beta''z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta''z}{T_0^2}\right)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

で与えられる¹¹⁾。式(5)で $\beta''C > 0$ の場合、光パルス幅 T_1 は単調増加する。また、 $\beta''C < 0$ の場合、先に述べた

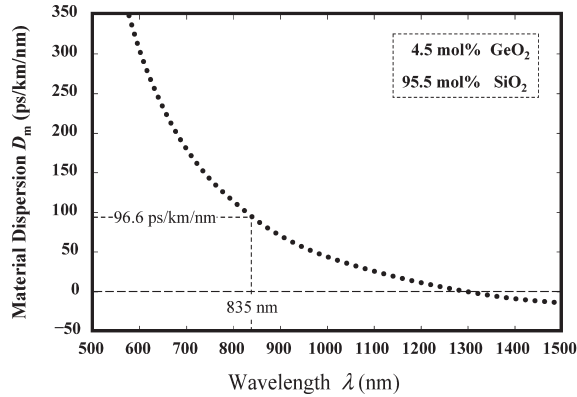


Fig. 7 Material dispersion as a function of wavelength for the 4.5 mol% GeO₂-doped glass.

ように T_0 よりも小さい T_1 が存在し、 T_1 が最小となる光ファイバー伝送距離が存在する¹⁰⁾。

式 (3) の色分散 D は、材料分散 (material dispersion) D_M と導波路分散 (waveguide dispersion) D_W の和で表される。波長 850 nm 帯では導波路分散の影響は無視できるため、 $D = D_M + D_W \cong D_M$ が成り立つ。試料ファイバーとして用いた SMF のコアは GeO₂/SiO₂、クラッドは SiO₂ であり、比屈折率差が $\Delta = 0.45\%$ であることから、GeO₂ の添加量は 4.5 mol% である。このコアガラス組成に対する材料分散の波長依存性を Fig. 7 に示す。ここで、材料分散曲線はセルマイヤーの多項式¹⁴⁾ を用いて計算した。図から、波長 $\lambda = 835$ nm で $D_M = 96.6$ ps/km/nm であることがわかる。これより、式 (3) を用いて GVD パラメータ β'' の値を求めると、 $\beta'' = 35.7$ ps²/km が得られる。Fig. 5 と Fig. 6 の結果から得られた PCS ファイバーと SMF に対する光パルス半値幅 T_1 の伝送距離依存性を Fig. 8 に示す。図で、点線は式 (5) を用いて得られた SMF に対する理論曲線を示し、実験値に最小二乗近似を適用することにより、チャープパラメータの値を求めることができる。その結果、 $C = 373.8$ が得られた。また、 \odot で示す T_1 は伝送距離 Z に対して単調増加することから、式 (5) において $\beta''C > 0$ であることがわかる。PCS ファイバーについては、 \bullet で示す同軸入射では T_1 は Z にほぼ比例して大きくなることがわかる。一方、 \circ で示す軸ずれ入射の場合、 $Z \leq 400$ m で T_1 は Z にほぼ比例するが、 $Z \geq 400$ m で T_1 は急激に増加することがわかる。これは、Fig. 5 (B) で観測された光パルス前縁部の盛り上がり光パルス半値全幅に影響するためと理解できる。

PCS ファイバーの多モード分散に起因した光パルス半値幅の増加 ΔT_{mult} は、 \circ あるいは \bullet で示された実験値と SMF について点線で示した値の差から求めることができ

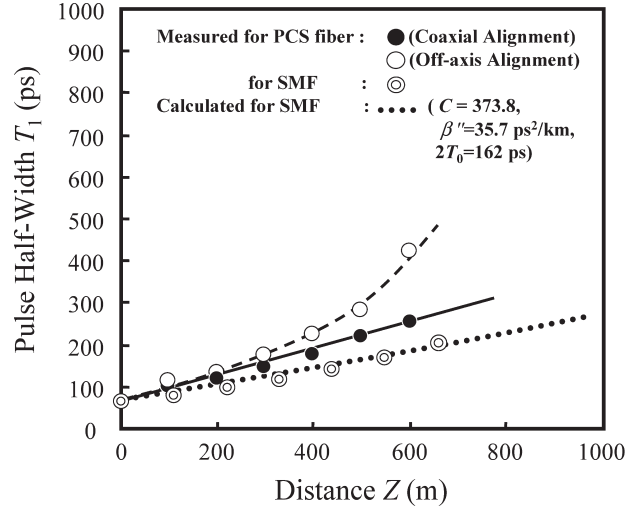


Fig. 8 Optical pulse half-width as a function of fiber distance.

る。 $Z = 600$ m における多モード分散に起因した光パルス半値幅の増加を求めると、同軸入射の場合、 $\Delta T_{\text{mult}} \approx 100$ ps、軸ずれ入射の場合、 $\Delta T_{\text{mult}} \approx 260$ ps であることがわかる。色分散による光パルス広がり ΔT_{ch} は $\Delta T_{\text{ch}} = T_1 - T_0 = 180$ ps $- 81$ ps ≈ 100 ps となり、同軸入射の場合、 $\Delta T_{\text{mult}} \approx \Delta T_{\text{ch}}$ が成り立つことがわかる。したがって、光パルス半値幅の増加に対する多モード分散と色分散の寄与はほぼ等しい。一方、軸ずれ入射の場合は、 $Z \geq 400$ m において多モード分散の寄与が急激に増加し、支配的となることがわかる。

Fig. 5 と Fig. 6 で得られた光パルス波形からベースバンド周波数応答特性¹⁴⁾ を求めた結果をそれぞれ Fig. 9 と Fig. 10 に示す。伝送帯域は周波数 $f = 0$ GHz の振幅レベルから 3 dB だけ低下した周波数で定義した。これを 3 dB 帯域とよぶことにする。図中の 1st~6th は光パルスの周回数を表す。Fig. 9 (A) と Fig. 10 に示す 1st~6th で表された曲線から、同軸入射の GI-PCS ファイバーと SMF では 3 dB 帯域はほぼ一定の割合で減少する。一方、Fig. 9 (B) の軸ずれ入射の場合、3 dB 帯域の変化の割合が周回数の増加とともに大きくなることがわかる (例えば、1 周回と 2 周回の帯域変化の割合 $R = 1.8$ GHz/1.4 GHz = 1.28 に対し、5 周回と 6 周回では $R = 0.35$ GHz/0.2 GHz = 1.75)。Fig. 9 と Fig. 10 の結果から得られる伝送帯域の伝送距離依存性を Fig. 11 に示す。伝送帯域 B と伝送距離 Z の関係は $B \propto Z^{-\gamma}$ で表され、 B の距離依存性は傾き γ により議論される。図から同軸入射の場合、 $Z \geq 200$ m に対して $\gamma \approx 1$ が成り立つ。一方、軸ずれ入射の場合、 $100 \leq Z \leq 400$ m で $\gamma \approx 1$ が成り立つが、 $Z \geq 400$ m において $\gamma > 1$ と

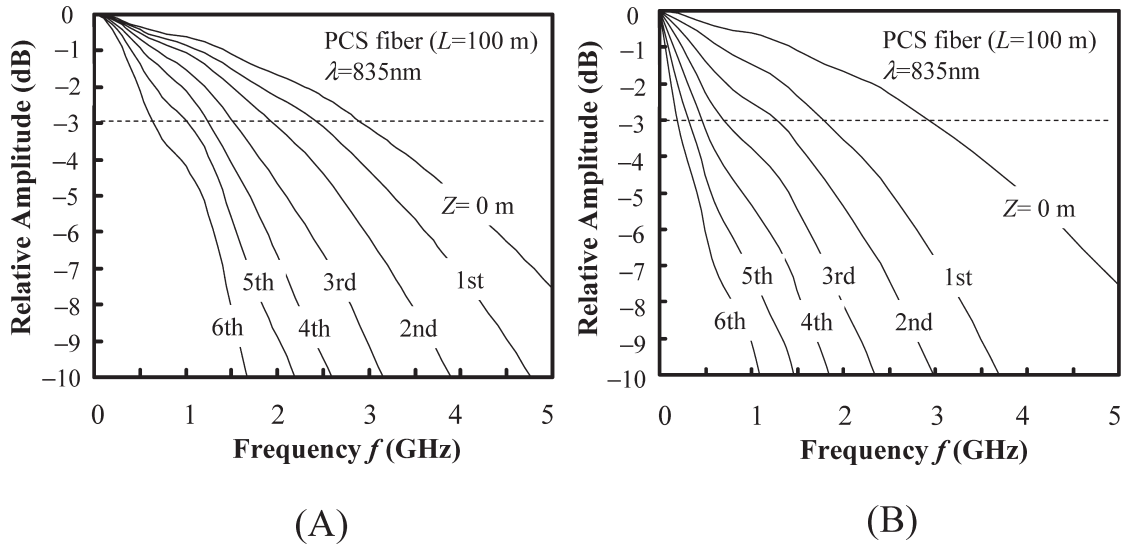


Fig. 9 Baseband frequency responses of the PCS fiber for coaxial and off-axis alignments. (A) Coaxial alignment, (B) Off-axis alignment.

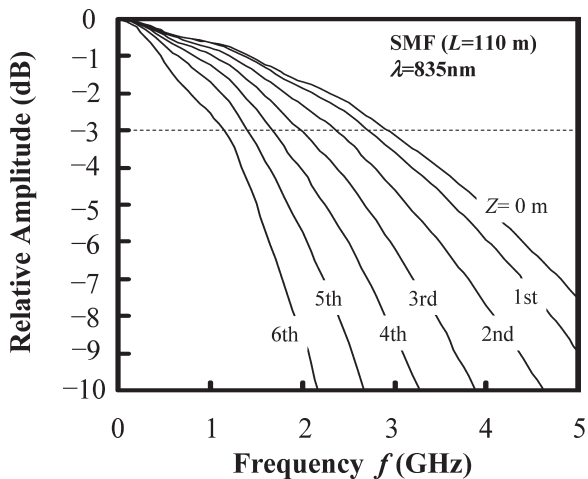


Fig. 10 Baseband frequency response for the single-mode fiber.

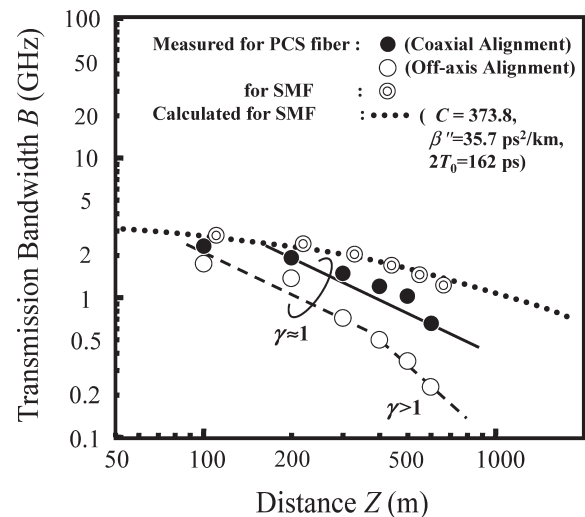


Fig. 11 Transmission bandwidth as a function of fiber distance.

なり、 B は急激に減少することがわかる。

ここで、伝送帯域と伝送速度の関係について述べる。Table 1 から MOST と IDB-1394 の伝送路符号は共通で、符号“1”または“0”が連続する場合、同じ振幅レベルを維持し続ける NRZ (non-return-to-zero) 符号が用いられる。NRZ 符号を用いる場合、要求される光ファイバーの伝送帯域 B_{NRZ} と伝送速度 b_{NRZ} の間には $B_{NRZ} \approx 2b_{NRZ}$ が成り立つ。PCS ファイバーの適用が期待される車載光 LAN は Table 1 に示す IDB-1394 である。先に述べたように、IDB-1394 における光ファイバーの総延長距離は最大でも 280 m である。そこで、 $Z=300$ m として、Fig. 11 の同軸入射および軸ずれ入射に対して得られた 3 dB 帯域から伝送速度を求める。伝送速度は、それぞれ $b_{NRZ}=1.6(\text{GHz})/$

$2=800(\text{Mb/s})$ 、 $b_{NRZ}=750(\text{MHz})/2=375(\text{Mb/s})$ となる。したがって、モード励振条件によらず信号伝送可能な伝送速度は Table 1 に示す 200 Mb/s であることがわかる。ただし、車載 LAN に適用される光ファイバー長は通常 100 m 未満であることを考慮すると、 $Z=100$ m における伝送速度評価が重要である。この距離において $b_{NRZ}=2.5(\text{GHz})/2=1.25(\text{Gb/s})$ 、 $b_{NRZ}=1.8(\text{GHz})/2=900(\text{Mb/s})$ となり、モード励振条件によらず最高速の 800 Mb/s の信号伝送が可能になることがわかる。

4. ま と め

短尺の GI-PCS ファイバーに光パルス周回法を適用し、

伝送帯域の距離特性を調べた。その結果、モード励振条件によらず被測定ファイバーを6周回した出射光パルスの観測に成功し、伝送距離600 mまでの伝送帯域を評価することができた。モード励振条件として、同軸入射と軸ずれ入射を検討した。同軸入射の場合、伝送帯域と伝送距離の関係はほぼ線形関係にあることがわかった。一方、軸ずれ入射の場合、伝送距離<400 mにおいて線形関係が成り立つが、伝送距離 \geq 400 mでは伝送帯域は急激に減少することがわかった。このようなPCSファイバーの伝送帯域特性を理解するため、SMFの伝送帯域の距離依存性を調べ、多モード分散と色分散の寄与を調べた。その結果、同軸入射の場合にはGI-PCSファイバーの光パルス広がりに対する多モード分散と色分散の寄与はほぼ等しいことがわかった。また、100 mのPCSファイバー伝送を考えると、同軸入射、軸ずれ入射に対し、それぞれ1.25 Gb/s、900 Mb/sの信号伝送が可能であることがわかった。これより、モード励振条件によらず車載光LAN規格値800 Mb/sの信号伝送が可能であることを明らかにした。

光ファイバーのガラス組成について有益なご助言をいただいた大阪府立大学大学院工学研究科、大橋正治教授に感謝します。

文 献

1) 大倉勝徳, 飯田眞喜男, 鈴木康利, 永見啓明: “カーエレクトロニクスを支える半導体技術”, 電子情報通信学会誌, **90** (2007) 309-324.

- 2) M. Yonemura, A. Kawasaki, S. Kato, M. Kagami and Y. Inui: “Polymer waveguide module for visible wavelength division multiplexing plastic optical fiber communication,” *Opt. Lett.*, **30** (2005) 2206-2208.
- 3) 川合裕輝, 若林知敬, 田中 聡, 中田 敦: “ポリマー光導波路を用いた一芯双方向通信モジュール”, 電子情報通信学会技術研究報告, **105**, No. 245 (2005) 39-43.
- 4) 柴田 宣: “車載情報系光LAN”, *エレクトロニクス実装学会誌*, **10** (2007) 234-241.
- 5) M. Kagami, T. Yamashita and H. Ito: “Light-induced self-written three-dimensional optical waveguide,” *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 1079-1081.
- 6) R. Bräuerle, S. Poferi, S. Seiffert and E. Zeeb: “HCS fiber based optical star net for automotive applications,” *Proc. LEOS Annual Meeting*, Rio Mare (2000) pp. 496-497.
- 7) 伊賀健一, 小山二三夫編著: 面発光レーザの基礎と応用 (共立出版, 2003).
- 8) L. G. Cohen: “Shuttle pulse measurements of pulse spreading in an optical fiber,” *Appl. Opt.*, **14** (1975) 1351-1356.
- 9) T. Tanifuji and M. Ikeda: “Pulse circulation measurement of transmission characteristics in long optical fiber,” *Appl. Opt.*, **16** (1977) 2175-2179.
- 10) T. Aiba, Y. Inoue and N. Shibata: “Transmission bandwidth evaluation based on optical pulse circulation,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17** (2005) 1489-1491.
- 11) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. (Academic Press, San Diego, 2000) pp. 67-71.
- 12) K. Iwashita, K. Nakagawa, Y. Nakano and Y. Suzuki: “Chirp pulse transmission through a single-mode fibre,” *Electron. Lett.*, **18** (1982) 873-874.
- 13) R. E. Collin: *Theory of Guided Waves* (McGraw-Hill, New York, 1960).
- 14) 岡本勝就: 光導波路の基礎 (コロナ社, 1992).