

# 車載ネットワークの光化に向けた動向

相葉孝充

矢崎総業株式会社  
技術研究所

# 発表内容

1. 車載LANの変遷
2. 車載光通信システムとギガビット伝送の標準化
3. マルチギガビット伝送の実現に向けて採用された技術と標準化
4. まとめ

# 発表内容

## 1. 車載LANの変遷

## 2. 車載光通信システムとギガビット伝送の標準化

## 3. マルチギガビット伝送の実現に向けて採用された技術と標準化

## 4. まとめ

# 車載ネットワークの構成

## 《ドメイン分散型》



## 主なプロトコル

情報系 : CAN (CSN-FD) 、 MOST、 IDB-1394、 Ethernet

ボディ系 : CAN、 LIN、 CXPI

走行系 : CAN、 FlexRay

CAN : Controller Area Network

MOST :

IDB1394 :

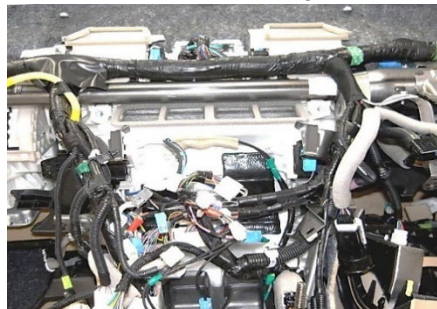
LIN : Local Interconnect Network

CXPI : Clock Extension Peripheral Interface

- 情報系ネットワーク** : オーディオ、ビデオ、ナビ等エンターテインメントシステムを構成するネットワーク
- ボディ系ネットワーク** : エアコン、照明、パワーウィンドウ等、車の利便性を高めるシステムを構成するネットワーク
- 走行系ネットワーク** : 車の『走る』、『曲がる』、『止まる』を制御するシステムを構成するネットワーク
- 電源マネージメント** : 車両ネットワークシステムを支える電源分配ネットワーク
- 車両ネットワークゲートウェイ** : 各ネットワーク間の情報交換

# ワイヤーハーネスの搭載例

インストルメントパネル(インパネ)



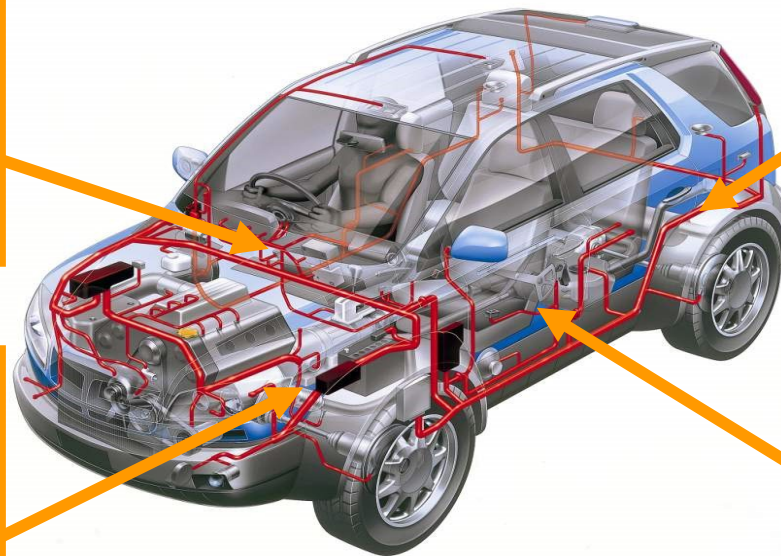
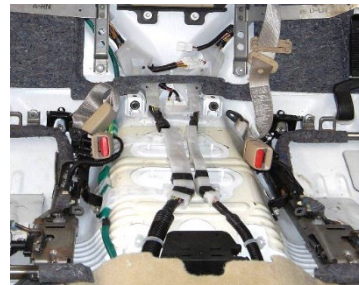
リアドア付近



リレーボックス



センターフロア

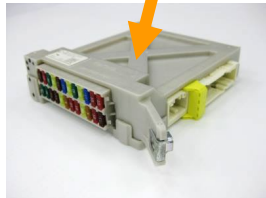


# ワイヤーハーネスの構成部品

## ワイヤーハーネスの外観

### ①電源分配ボックス

- ・ジャンクションブロック
- ・リレーボックス



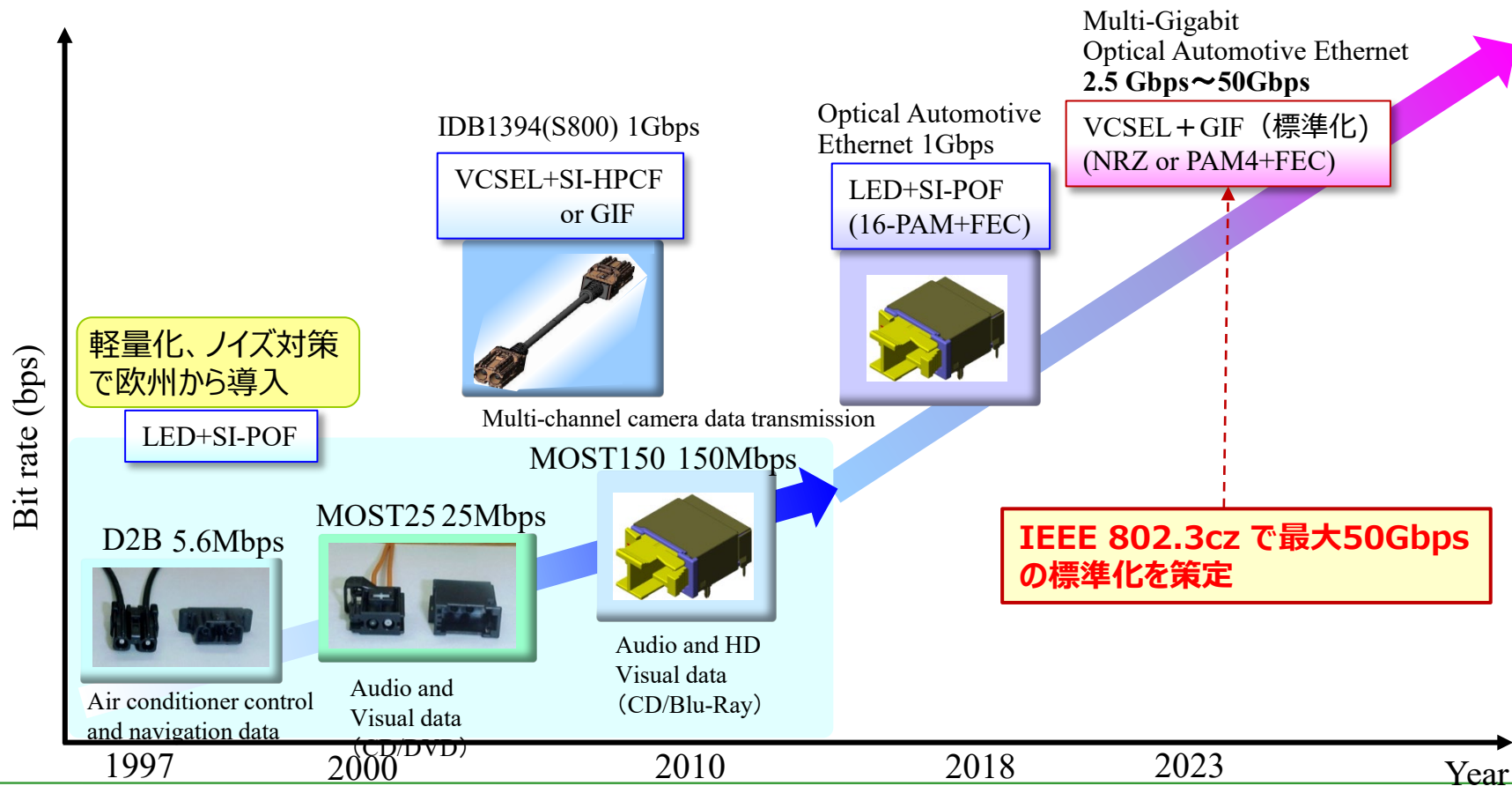
### ②電線

### ③コネクタ

### ④外装



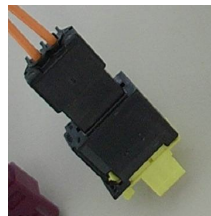
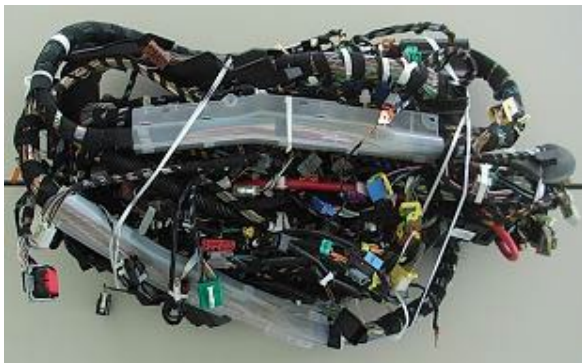
# 車載用光LANの変遷





# 光ワイヤーハーネスにおける光部材の状態

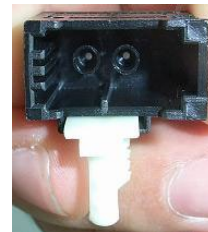
荷姿 (フロア+インパネ)



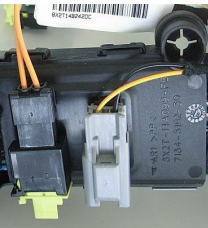
光中継コネクタ  
もダストキャップ  
で保護



光コネクタは  
ダストキャップ  
で保護

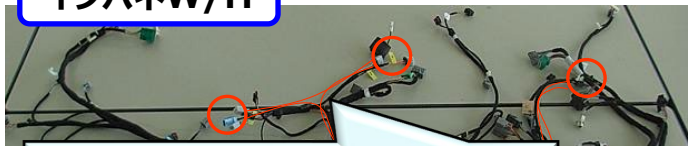


ボディに  
固定



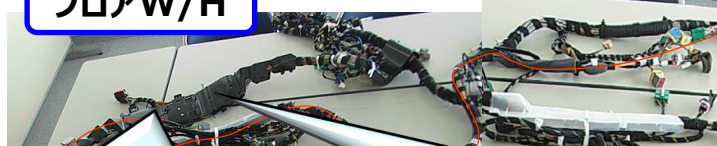
プロテクタ  
に固定

インパネW/H

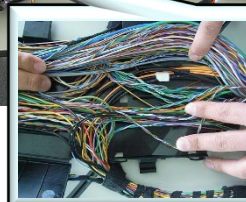


小線分岐部への  
光ハーネス抱き合  
わせ  
(R15mm確  
保)

フロアW/H



プロテクタに出口部も  
電線同等の扱いで可



プロテクタ内は  
光ファイバ用  
プロテクタ無し



# 実用化された車載用光コンポーネント

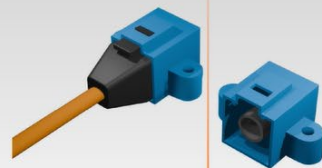
1980年代前半

1990年代前半

1990年代後半

2000年～

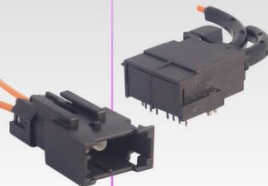
2020年～



PtoP 1.5Mbps



D2B 5.6Mbps



MOST 25/150Mbps



Ethernet 1Gbps



ドア系ハーネスの  
光ネットワーク化  
(ドアロック、パワー  
ウィンドウ)



ラジオへの電磁ノイズ  
の影響低減



CD 等の  
オーディオデータ伝送



DVD 等の映像データ伝送



高圧バッテリーパック内  
の信号絶縁

※bps : bit per second

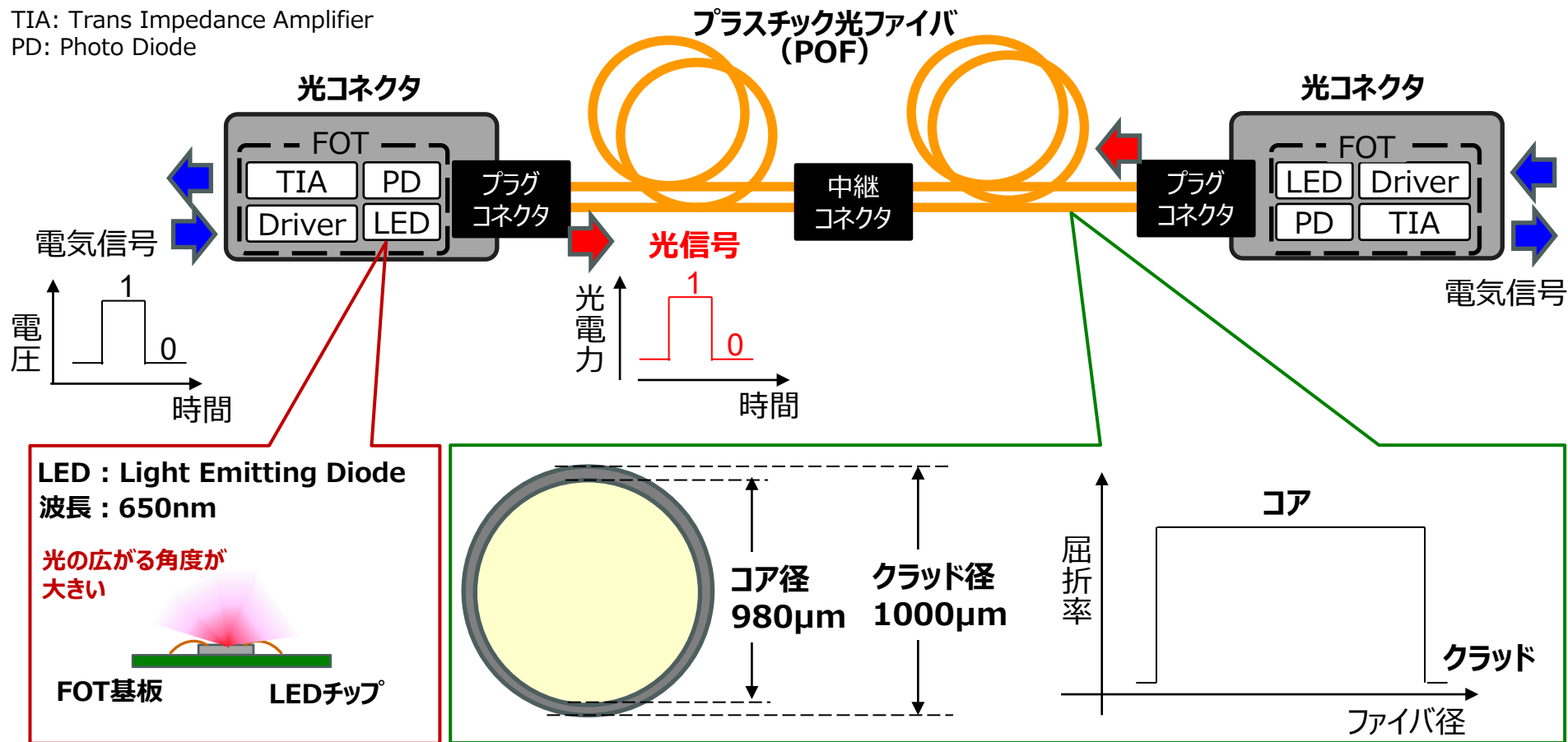
2025年1月現在、実用化された車載用光通信システムはSI型のMMF (POF)用のみ

# 発表内容

1. 車載LANの変遷
- 2. 車載光通信システムとギガビット伝送の標準化**
3. マルチギガビット伝送の実現に向けて採用された技術と標準化
4. まとめ

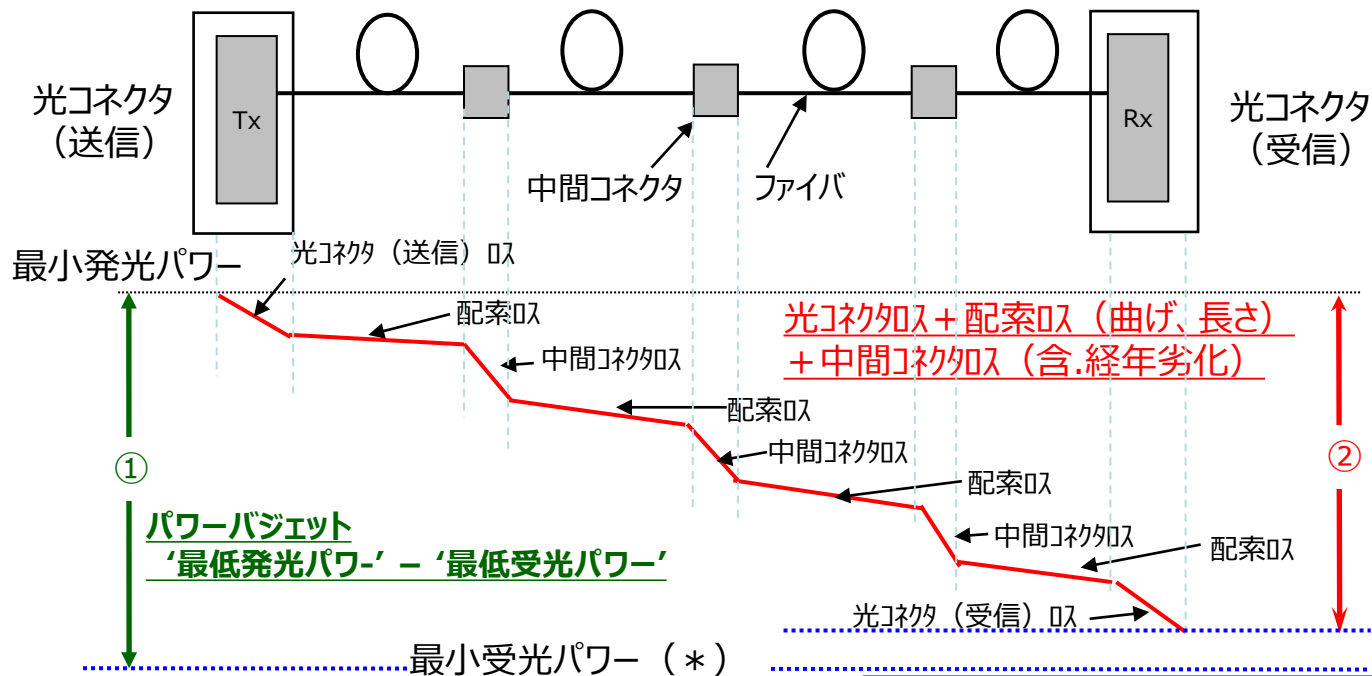
# 実用化されている光通信システムの基本構成

TIA: Trans Impedance Amplifier  
PD: Photo Diode



# 光通信システムの成立条件

## ● 光パワー損失の割付け

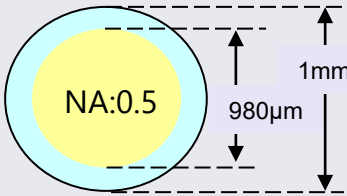
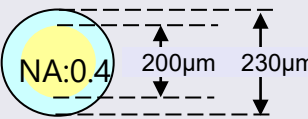
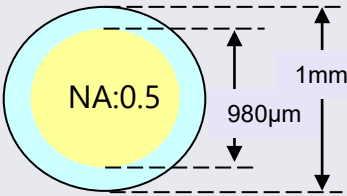


\* 信号の誤り率が $10^{-12}$ 以下となる光パワー

光伝送路成立条件： ①  $\geq$  ②

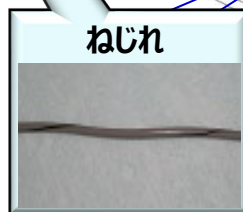
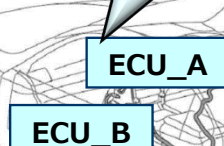
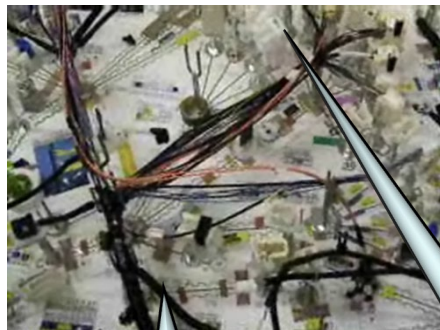
伝送距離は短いが中継接続でPCしていないためバジェットが厳しい

# 標準化された車載光ネットワーク規格の主な特徴

車載LAN	MOST	IDB-1394	Automotive Ethernet (IEEE802.3bv)
ネットポロジ	リング 仮想スター	ツリー バス	リニア、スター リング、メッシュ
波長 (nm)	650 (LED)	650 (LED) 850 (VCSEL)	650 (LED)
最大ノード数	64	63	遅延、帯域などの要件に依存
伝送路長 (m)	20	20	40
伝送速度 (Mb/s)	25, 50, 100	100, 200, 400, 800	1000
伝送媒体	<p><b>SI-POF<sup>1)</sup></b></p>  <p>1) Step-Index Plastic Optical Fiber</p>	<p>SI-POF, SI-HPCF<sup>2)</sup></p>  <p>2) Step-Index Hard Polymer Cladding Fiber</p>	<p><b>SI-POF</b></p> 

# 光ワイヤーハーネスの生産、車両組付けへの対応

## W/H生産工程

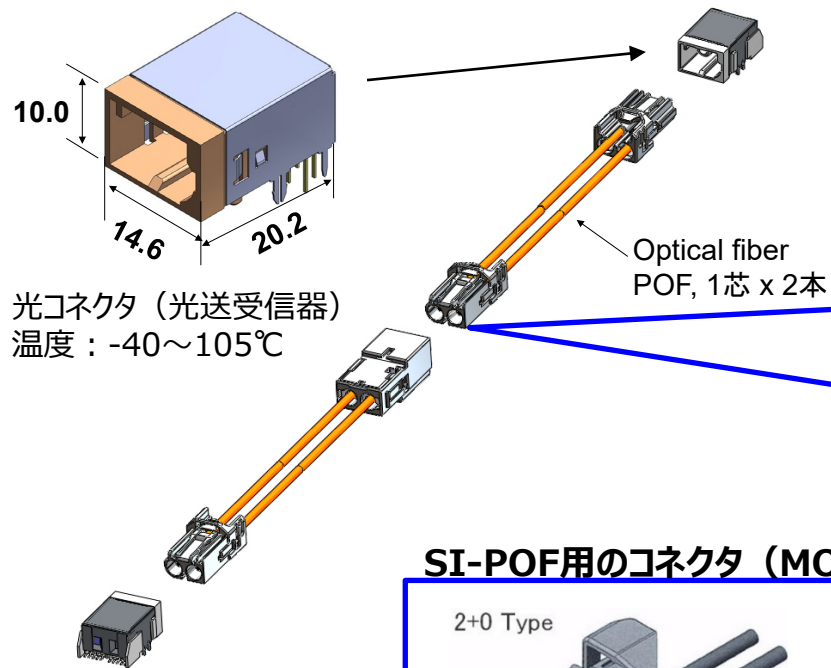


## 車両組付け時



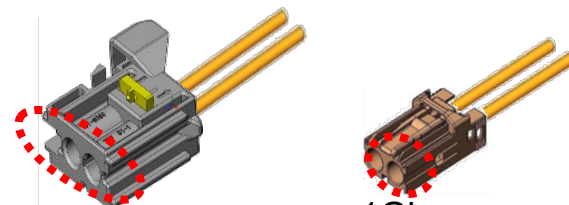


# 車載用光通信コンポーネントの特長



## 《端面保護構造》

ファイバ端面がコネクタ端面より奥になる構造

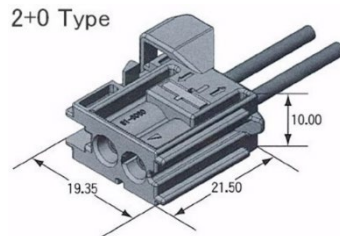


MOST

1Gbps

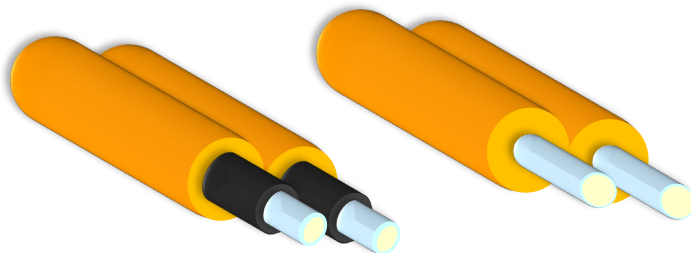
- ・手探り組付け等での光ファイバ端面の損傷や汚れを防止
- ・コネクタ嵌合時の振動等によるファイバ端面の劣化を防止(間隙)

## SI-POF用のコネクタ (MOST用)



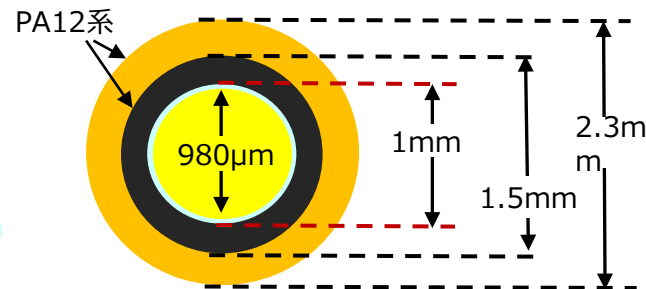
# 実用化されている車載用光ファイバコードの構造

## MOST用タイト光ファイバコード

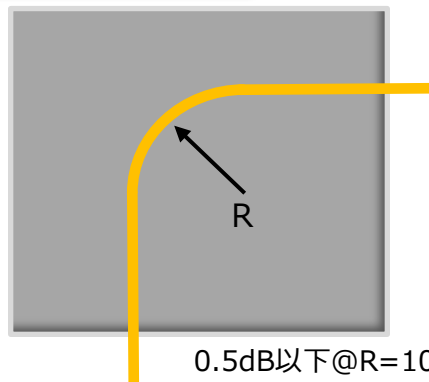


2層構造

1層構造



曲げ損失



0.5dB以下@R=10mm

曲げ戻し



変化量  
0.2dB以下

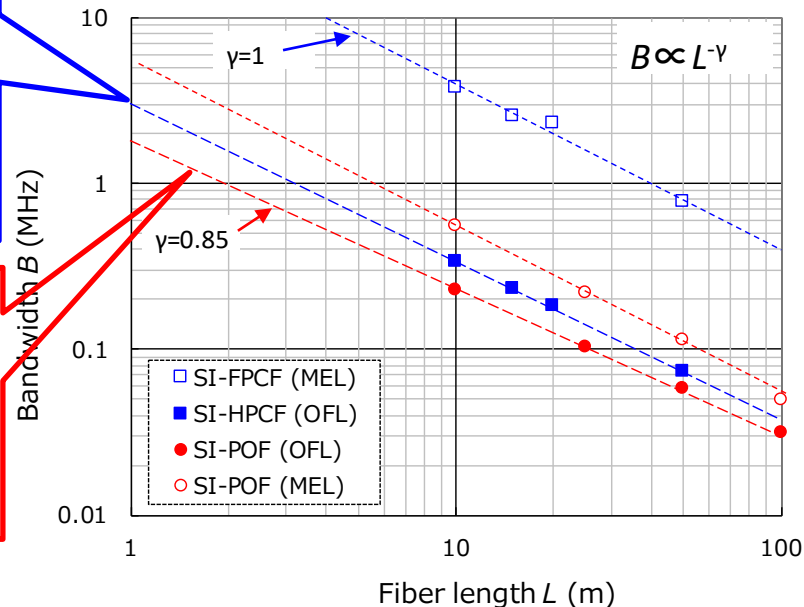
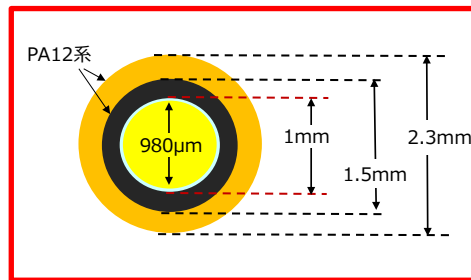
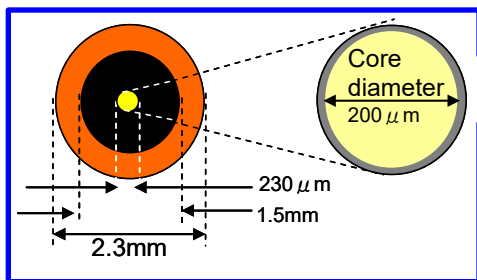
温度：-40～105℃

\* 連続1000H以上  
損失増加0.5dB以下  
伸び収縮、etc.

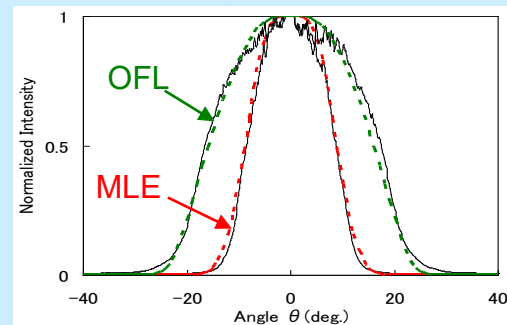
基本的にはJASO D 618,  
JIS C 6851に準拠

耐ガス試験、耐油試験などは  
メーカー毎の異なる仕様に対応

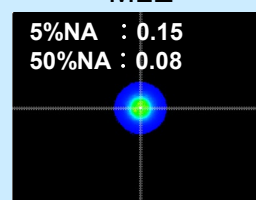
# 車載用SI型マルチモード光ファイバコードの伝送帯域距離特性



SI-HPCFのFar Field Pattern

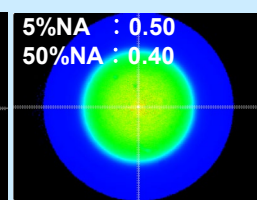


MLE



5%NA : 0.15  
50%NA : 0.08

OFL



5%NA : 0.50  
50%NA : 0.40

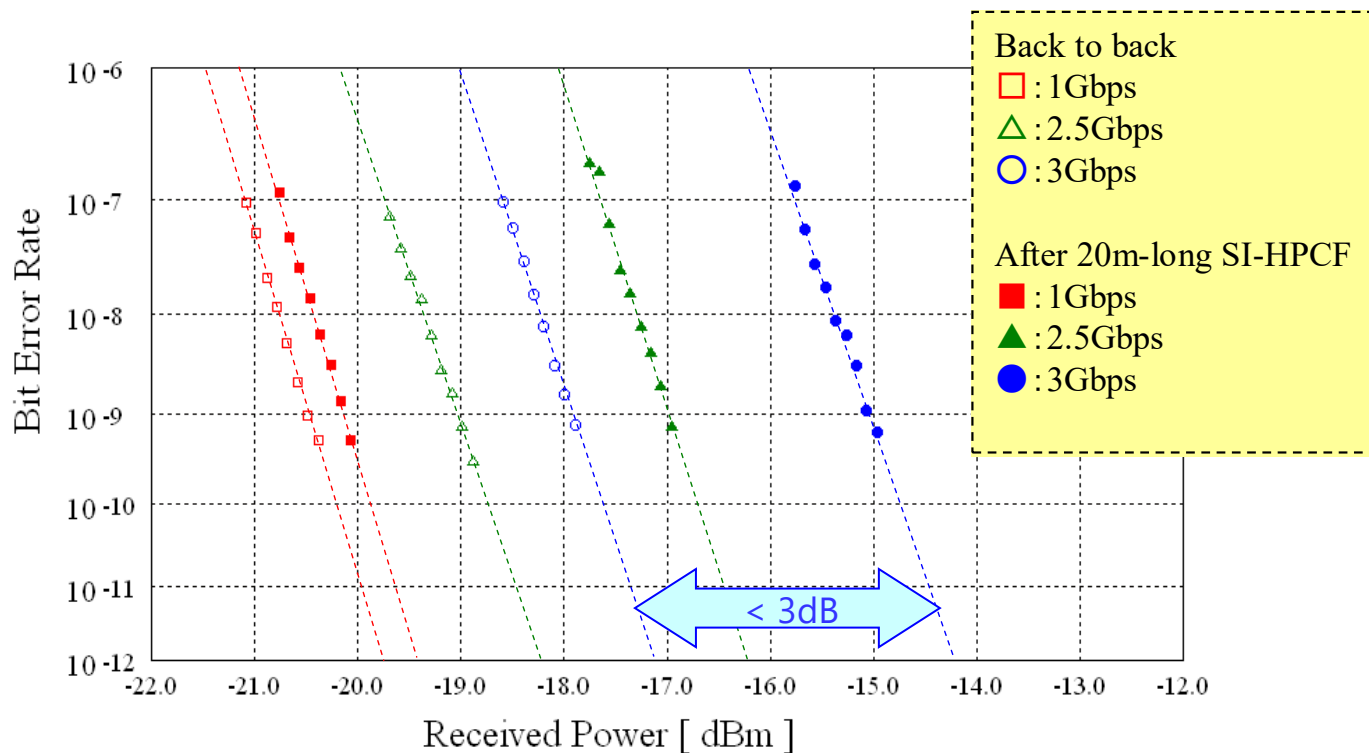
OFL : Over Filled Launch (全モード励振)  
MLE : Mode Limited Launch (限定モード励振)

- SI型のマルチモード光ファイバの伝送帯域は励振状態（光の入射状態）に強く依存
- SI-POFでは**限定モード励振**でも10m以上のギガビット伝送が困難（500MHz程度）



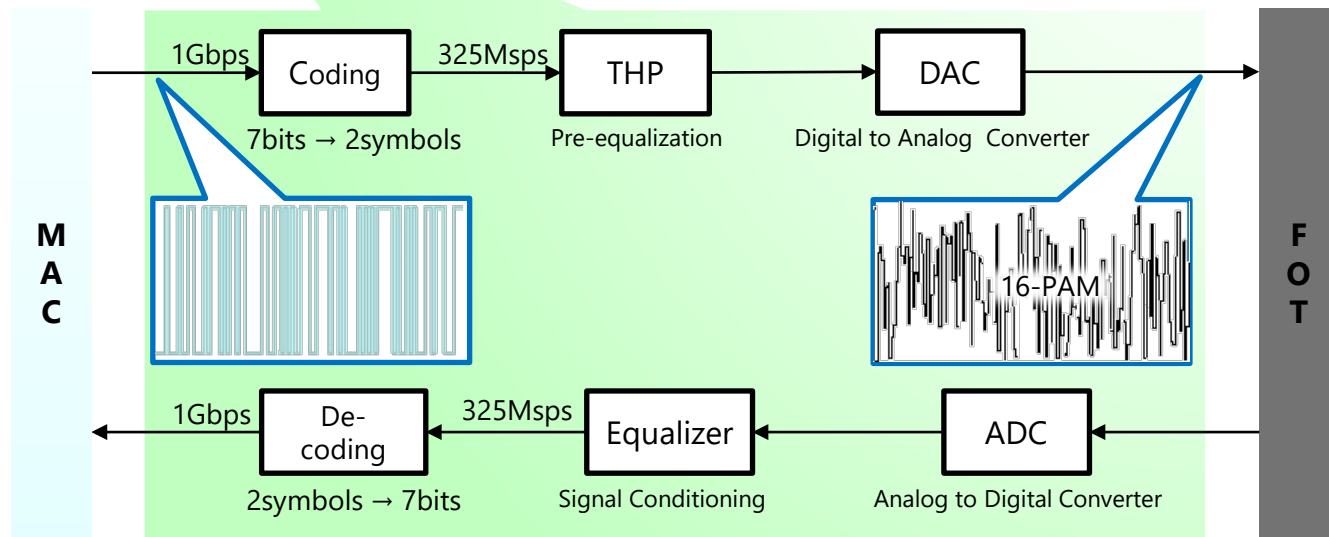
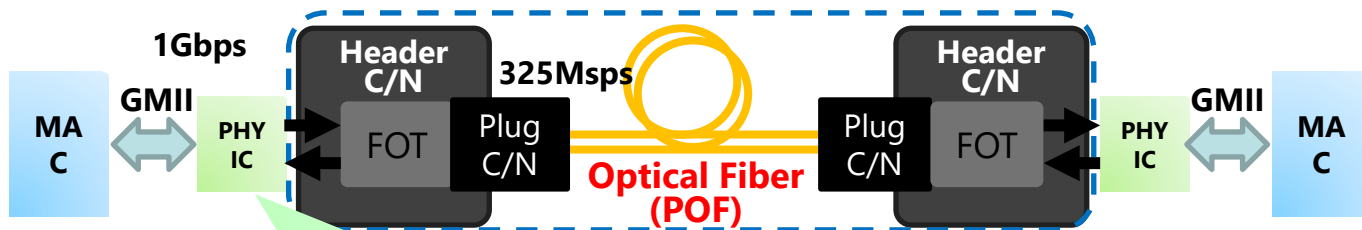
HPCFでは**限定モード励振**をすることで**20mで1GHz以上**の伝送帯域を確保することが可能

# SI-HPCFを用いたギガビット伝送に対する誤り率特性



- ・限定モード励振をすることで、OOK (NRZ) のギガビット信号をSI-HPCFで伝送が可能 (3Gbpsではペナルティ増加)

# 多値変調によるSI-POFを用いた1Gbps光伝送



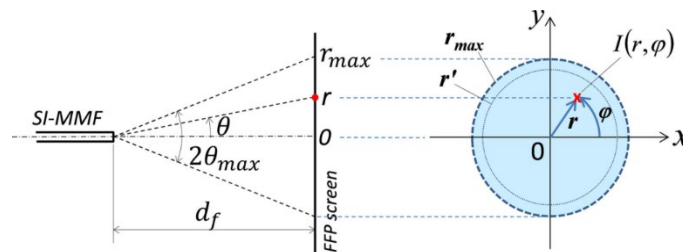
MAC: Medium Access Control, PHY: Physical Layer Device, GMII: Gigabit Media Independent Interface, PAM: Pulse-Amplitude Modulation

# 車載光ハーネスの評価に向けたEncircled Angular Flux (EAF)の規定



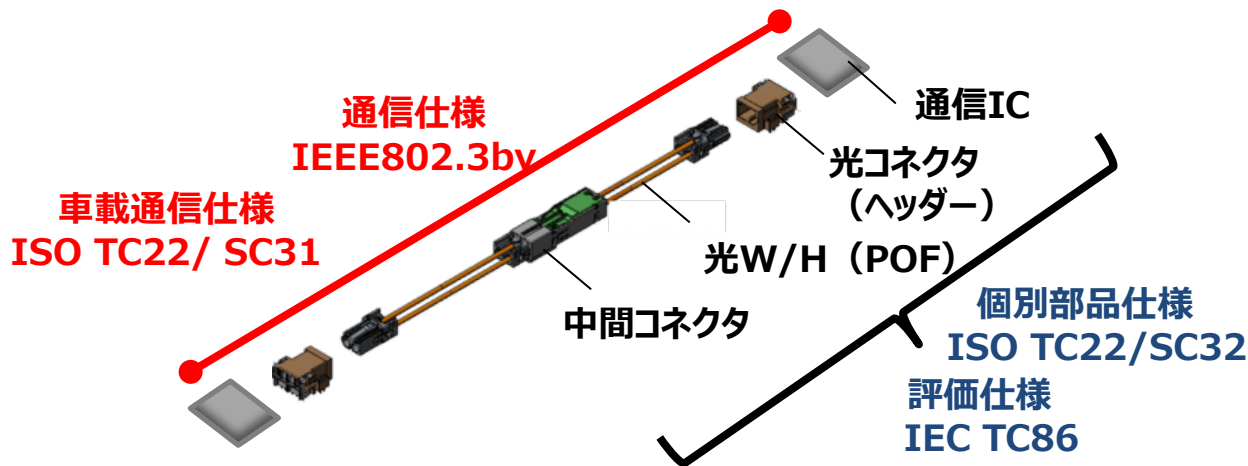
損失はTP2で励振状態をEAFで規定して評価

$$EAF(\theta') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta'} I(\theta, \varphi) \cdot \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} \cdot d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} I(\theta, \varphi) \cdot \frac{\sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} \cdot d\theta d\varphi}$$





# 車載用ギガビット光イーサネット通信システムの標準化



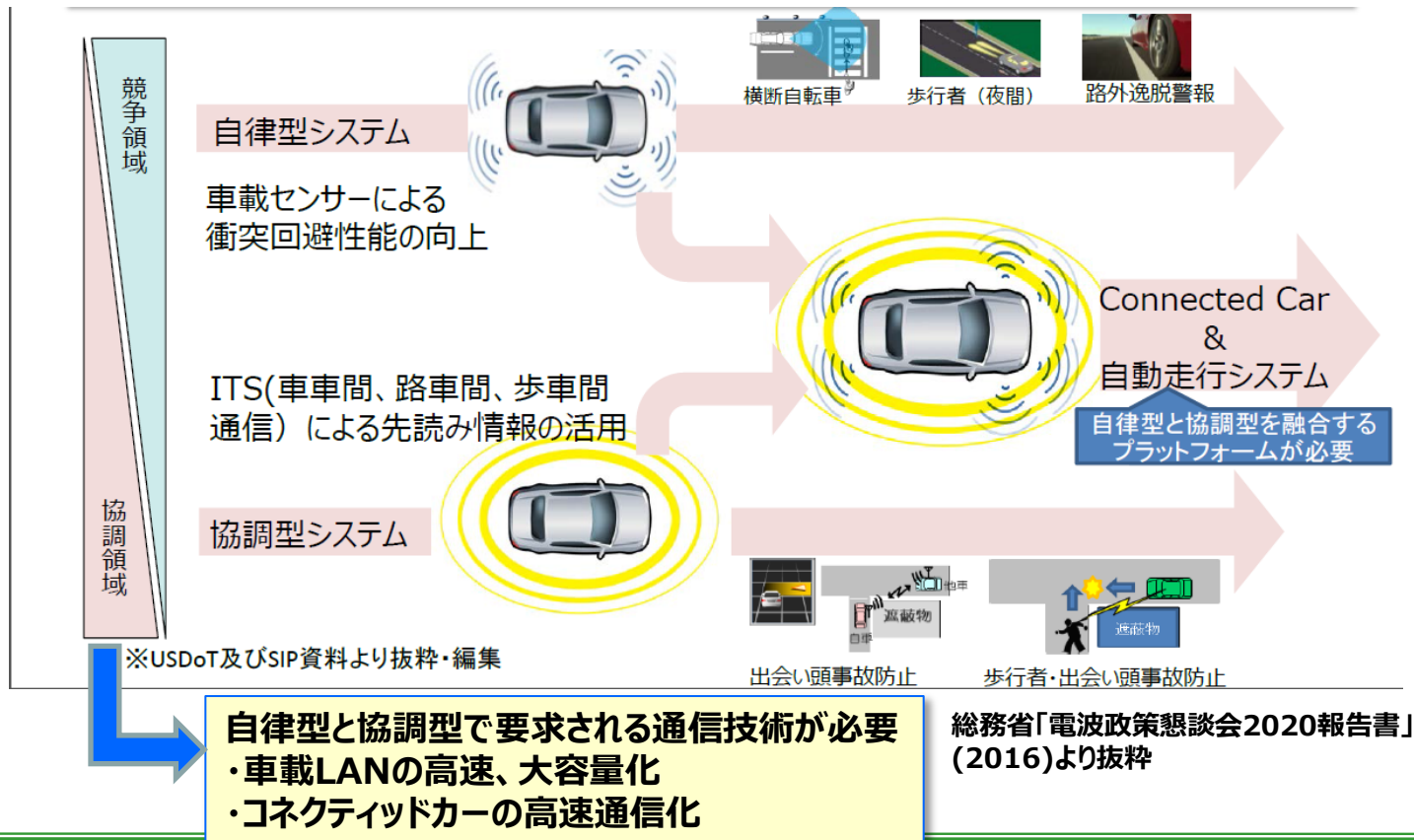
活動母体	標準化活動団体	標準化の対象
IEEE802.3	802.3bv	POFを用いたギガビット光イーサネット通信方式
ISO TC22	SC31/ SC32	車載に特化したイーサネット通信方式 車載用光通信部品 車載特有の環境試験
IEC TC86	SC86A/ SC86B/ SC86C	光通信の評価方法 光部品の評価方法

# 発表内容

1. 車載LANの変遷
2. 車載光通信システムとギガビット伝送の標準化
- 3. マルチギガビット伝送の実現に向けて採用された技術と標準化**
4. まとめ

# 自動車の高機能化に伴う車載ネットワークの更なる高速・大容量化

## Connected Carや自動走行システムの実現に向けた発展シナリオ



# 高精細カメラによる物体認識

## カメラ解像度の違いによる遠方の物体認識<sup>1)</sup>

### Long Distance -> High Resolution

Resolution Comparison - 160m ahead

High resolution sensor enables to capture recognizable signs, small objects and person in 160m ahead



160m先の物体認識では4K解像度カメラが必要

### ■ 非圧縮伝送に必要な伝送容量

$$4K(4096 \times 2160) \times 3(\text{RGB}) \times 12\text{bit} \times 120\text{fps}$$



35Gbps

1) 大西健治, “自動運転を支える車載センシング技術の動向,” FOE-8, 2020.

## VOLVO<sup>2)</sup>

### • ECU sensors

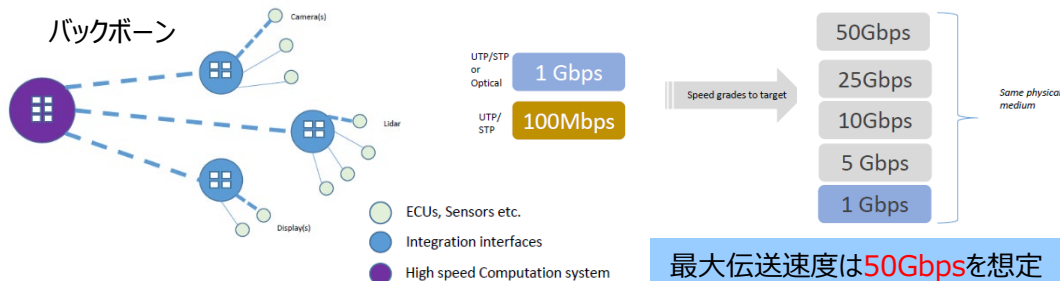
#### • Cameras

- Today: <= 6Gbps LVDS links
- Tomorrow: > 6 Gbps ?

#### • Lidar/radar

- Today: <= 1 Gbps Ethernet
- Tomorrow: > 1 Gbps ?

#### • Displays

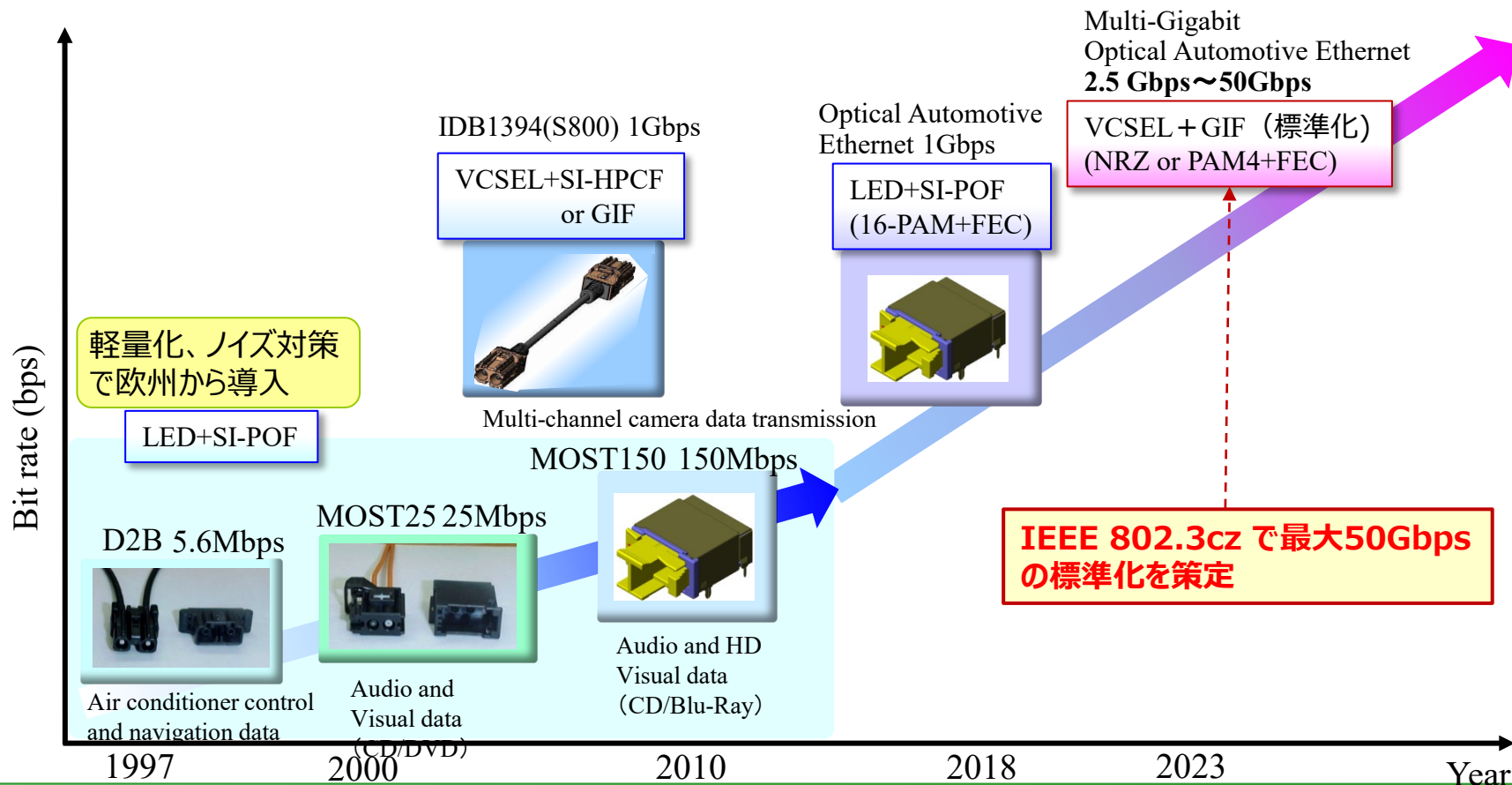


IEEE802.3 Multi Gigabit Automotive Optical PHY Study Group

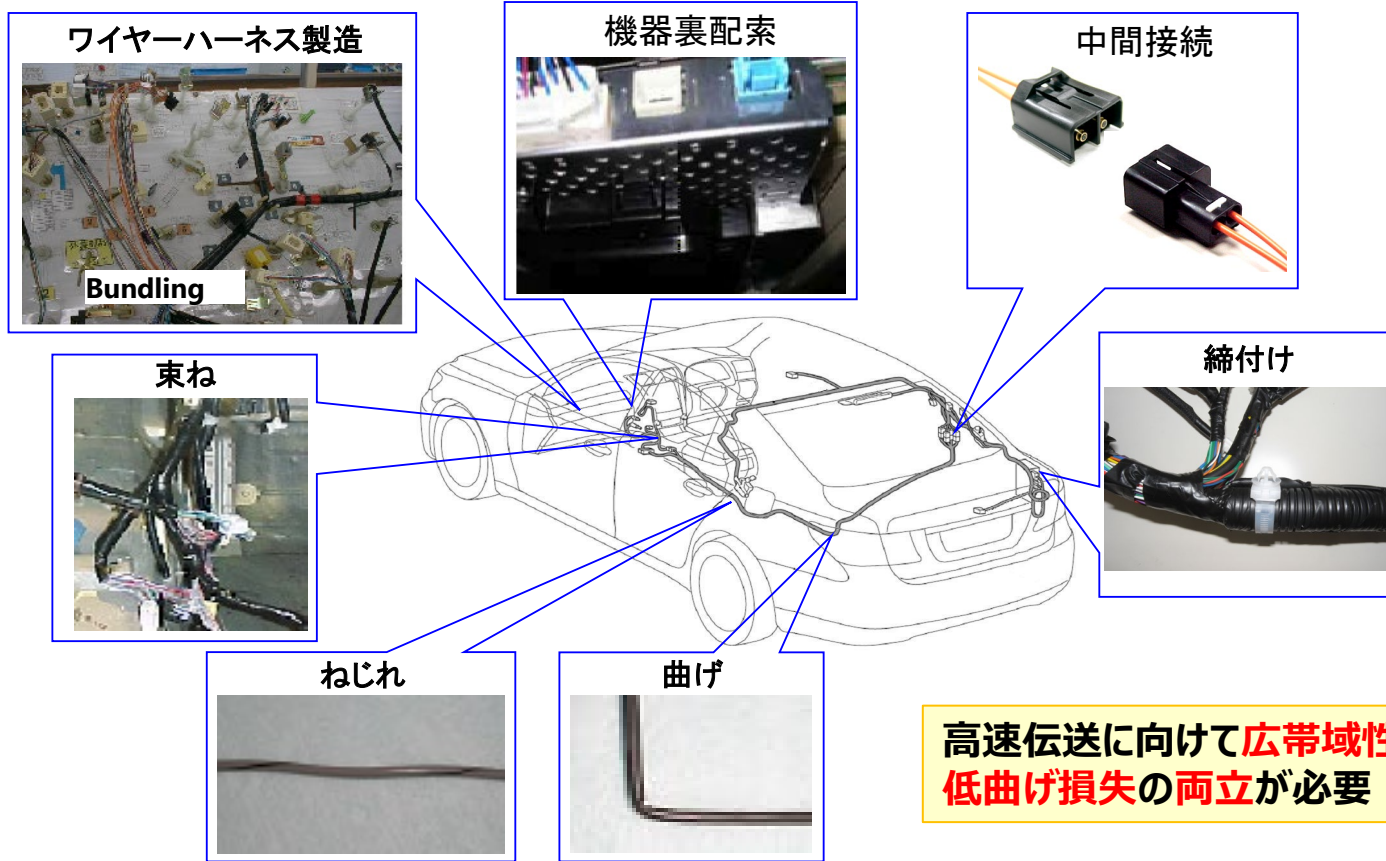
2) “Input-Automotive Use-cases and Requirements Multi Gigabit” より抜粋

非圧縮、多ch高精細映像信号伝送において10Gbpsを超える伝送速度が必要

# 車載用光LANの変遷



# 車載配線で求められるマルチモード光ファイバの特性

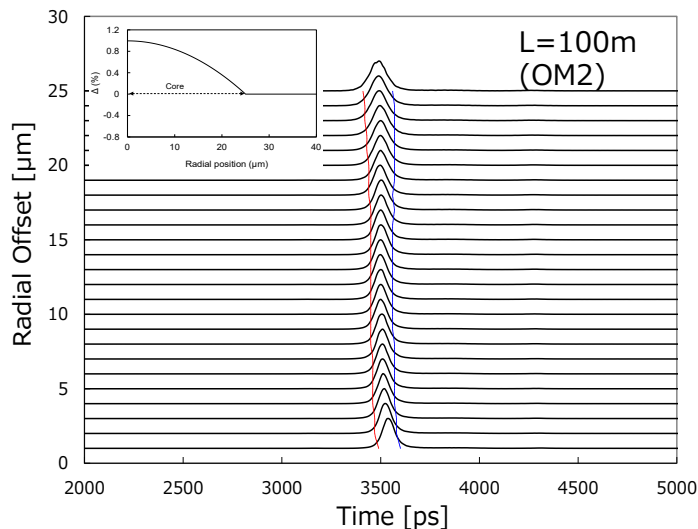


高速伝送に向けて**広帯域性**と  
**低曲げ損失**の両立が必要



# GI型マルチモード光ファイバの伝送帯域と曲げ損失特性

## <DMD波形>

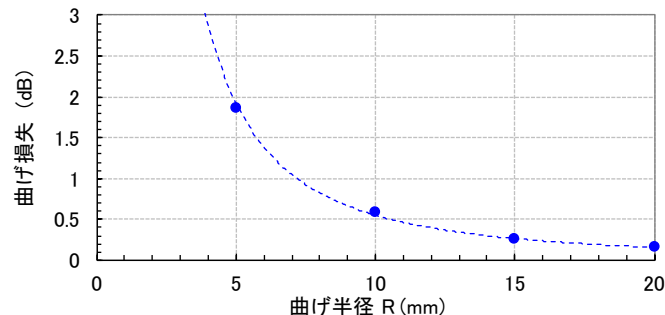
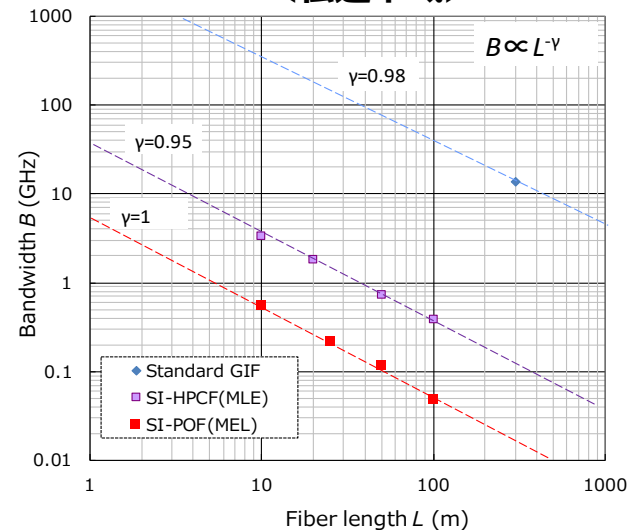


$$DMD = (T_{\text{slow}} - T_{\text{fast}}) - \Delta T_{\text{REF}}$$

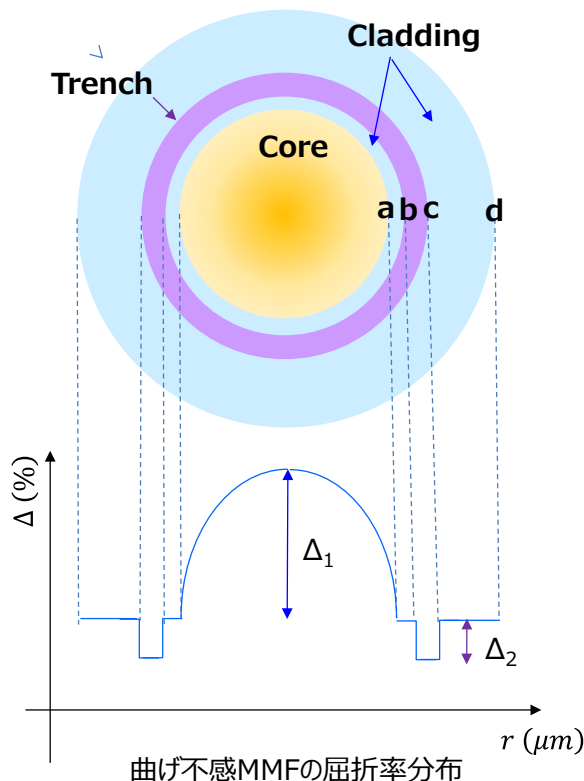
$$\Delta T_{\text{REF}} = \sqrt{(\Delta T_{\text{PULSE}})^2 + (\Delta T_{\text{chrom}})^2} \quad DMD = 0.6 \text{ ps/m}$$

伝送帯域は十分であるが、曲げ損失が大きい  
⇒ 曲げ不感型のGI型MMFが必要

## <伝送帯域>



# 曲げ不感マルチモード光ファイバの屈折率分布



BI-MMFの主なパラメータ

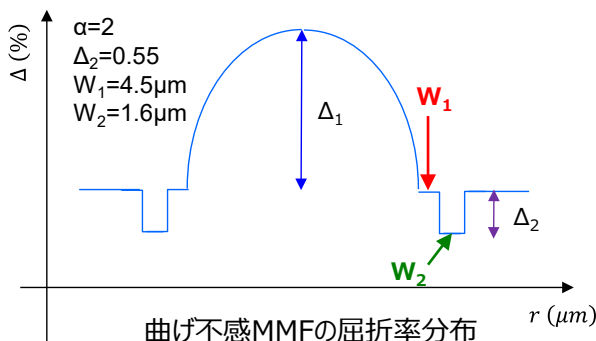
Core	$n_1$	コアの屈折率
	$a$	コア半径
	$\Delta_1$	コアとクラッドの比屈折率差
	$\alpha$	2乗分布の係数
Cladding	$b$	トレンチ内径までの半径
	$d$	光ファイバ外形
Trench	$c$	トレンチ外形の半径
	$\Delta_2$	クラッドとトレンチの比屈折率差

コアの屈折率分布

$$n(r)_{core} = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta_1 \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

曲げ不感構造ではコア周辺に**トレンチ（溝）**を設けることで曲げ損失を抑制

# 曲げ不感マルチモード光ファイバの広帯域性と低曲げ損失の原理



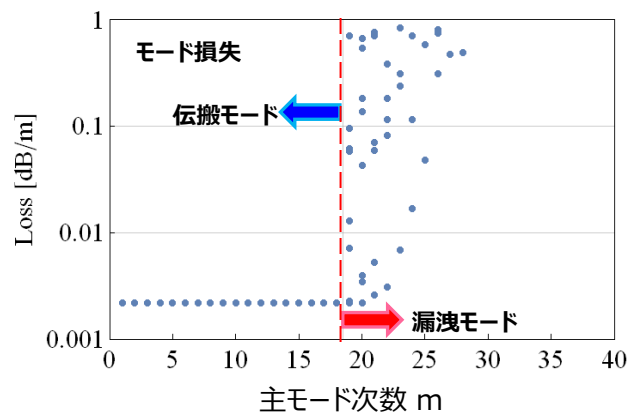
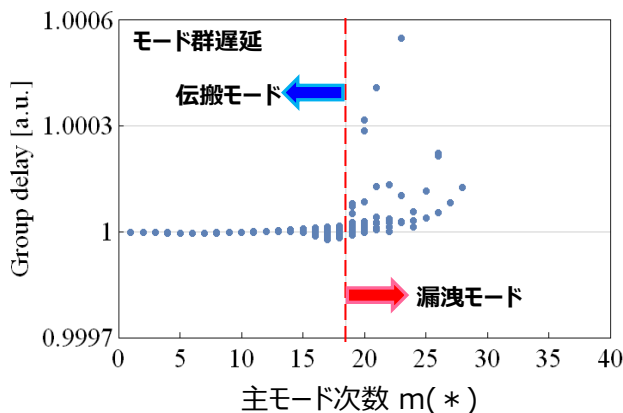
## α値の最適化(伝搬モードの群遅延差抑制)

$$\alpha_{opt} = 2 + y - \Delta \frac{(4 + y)(3 + y)}{(5 + y)} = 1.976$$

$y = 0$  (Δの波長依存性を示す値、約1.1μmで0)

$\Delta = 0.01$  (コアとクラッドの屈折率差1%)

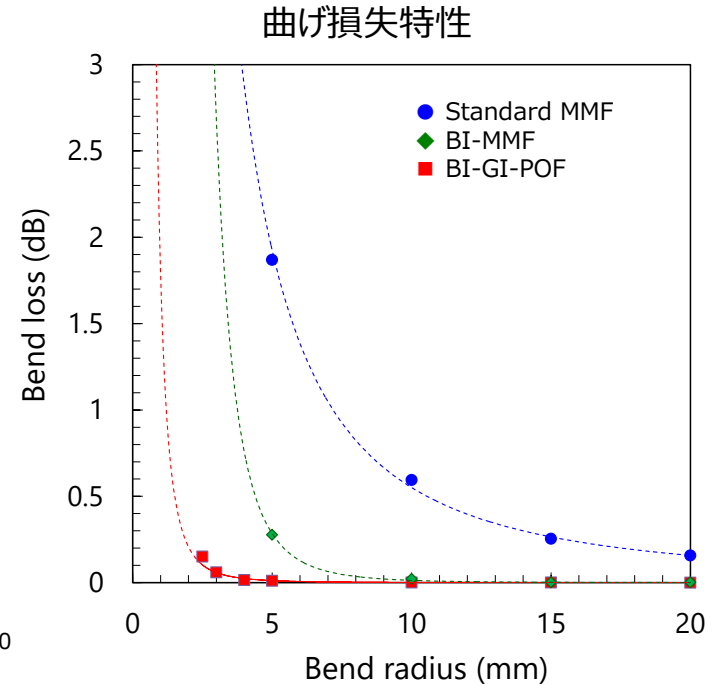
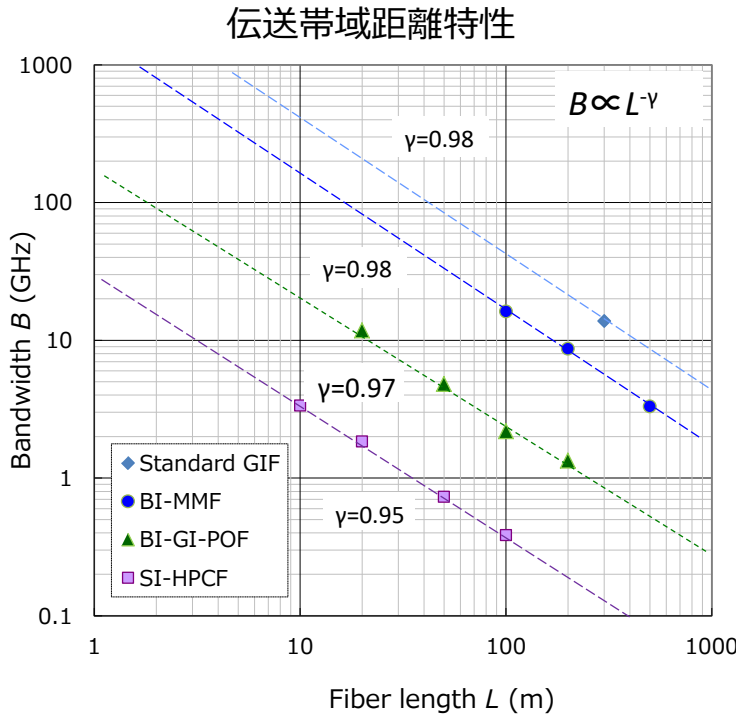
## トレンチの最適化 ( $W_1$ : 高次伝搬モードの群遅延差抑制、 $W_2$ : 曲げ損失抑制)



\*  $m$

$= 2q + l - 1$

# マルチモード光ファイバの伝送帯域と曲げ損失特性



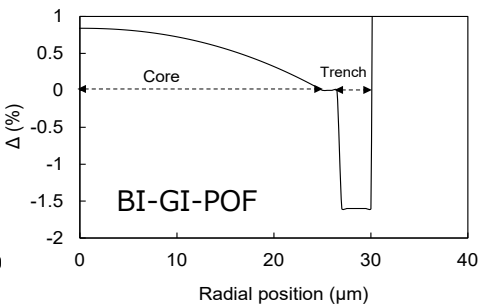
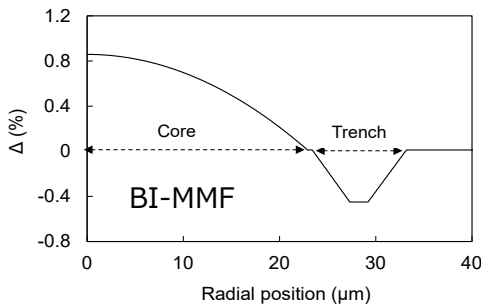
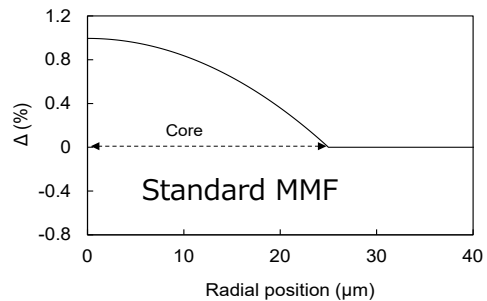
曲げ不感型の構造を採用することで、曲げ損失は大幅に低減



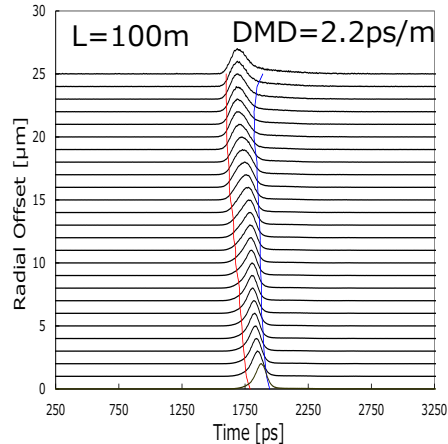
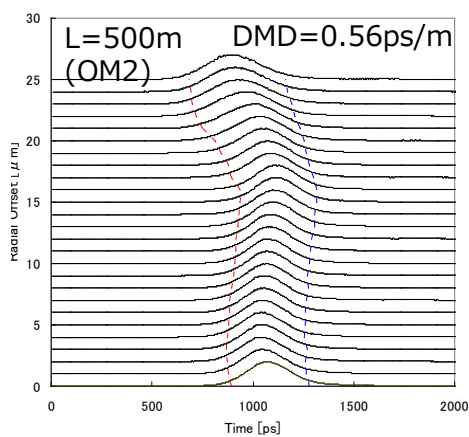
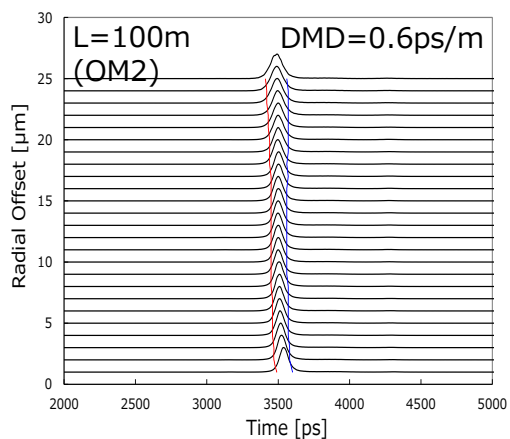
- BI-MMF : 曲げ損失の更なる低減
- BI-GI-POF: 伝送帯域の向上

# マルチモード光ファイバの屈折率分布とDMD

## <屈折率分布>



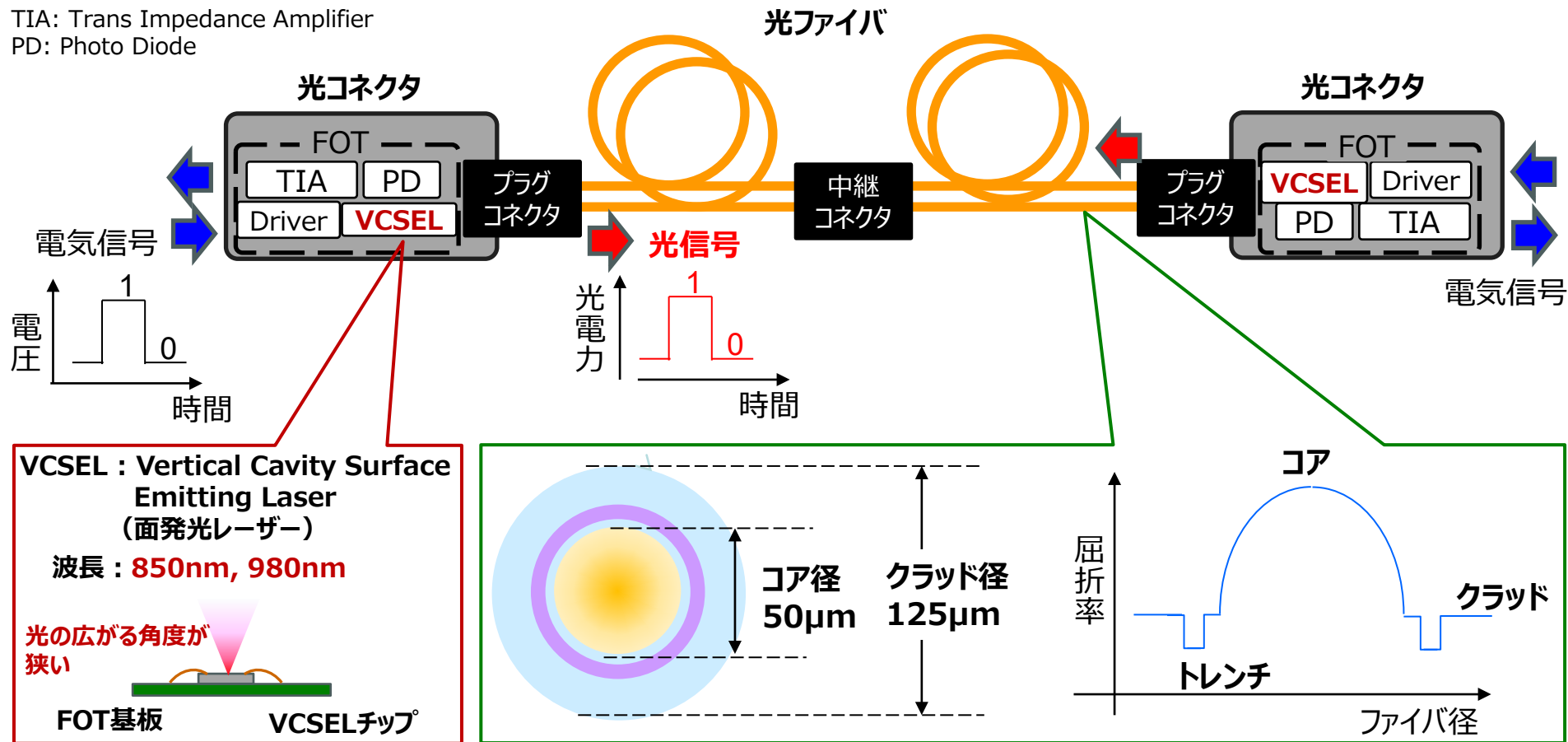
## <DMD波形>



$$DMD = (T_{slow} - T_{fast}) - \Delta T_{REF} \quad \Delta T_{REF} = \sqrt{(\Delta T_{PULSE})^2 + (\Delta T_{chrom})^2}$$

# マルチギガ光Ethernetの基本構成

TIA: Trans Impedance Amplifier  
PD: Photo Diode





# 車載用ギガビットEthernetの規格

通信容量		1Gbps	2.5Gbps	10Gbps	25Gbps	50Gbps	100Gbps
電気	規格	IEEE802.3bp	IEEE802.3ch		IEEE802.3cy		
	媒体	UTP/STP (15m)	STP (15m)		STP (11m)		
光	規格	IEEE802.3bv	IEEE802.3cz				未策定
	媒体	POF (SI型) (40m)	BI-MMF (GI型 * 石英ガラス) (40m)				未策定

UTP : Unshielded Twisted Pair

STP : Shielded Twisted Pair

POF : Plastic Optical Fiber

BI-MMF: Bend-Insensitive Multi-Mode Fiber

- マルチギガビット以上では電気通信はEMC対策としてSTPが必須
- 光ファイバはEMC対策が不要、かつ通信距離が長いのが特徴

# マルチギガビット光Ethernet（IEEE P802.3cz）の規格概要

Tx

Parameter	2.5GBASE-AU		5GBASE-AU		10GBASE-AU		25GBASE-AU		50GBASE-AU		Units
Signaling rate (range)	2.65625		5.3125		10.625		26.5625				Gbd
	±100 ppm		±100 ppm		±100 ppm		±100 ppm				
Modulation format	NRZ								PAM4		
Center wavelength (range)	970 to 990										nm
RMS spectral width <sup>a</sup> (max)	0.7										nm
Average launch power (max)	3.9								5.0		dBm
Average launch power <sup>b</sup> (min)	-4.3		-3.3		-2.4		-1.4		-0.3		dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA <sub>outer</sub> ) (max)	3.2								4.3		dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA <sub>outer</sub> ) (min)	max (A, <b>TDFOM</b> + B)										dBm
A	-5		-4		-3.1		-2.1		-1		dBm
B	-5		-3.9		-2.7		-1.5		-0.4		dBm
Transmitter and distortion figure of merit (TDFOM) (max)	1.0		1.0		2.0		2.5		3.0		dB
Transmitter and distortion figure of merit (TDFOM) (min)	-0.3		-0.4		-1		-1.5		-1.7		dB
Average launch power of OFF transmitter (max)	-30										dBm
Extinction ratio (min)	4										dB
RIN <sub>12OMA</sub> (max)	-120						-124		-131		dB/Hz
Optical return loss tolerance (max)	12										dB
Uncorrelated random jitter (tJ) (max)	0.02								0.008		UI
Encircled flux <sup>c</sup>	86% at 19 μm										
	30% at 4.5μm										

Rx

Parameter	2.5GBASE-AU	5GBASE-AU	10GBASE-AU	25GBASE-AU	50GBASE-AU	Units
Signaling rate (range)	2.65625	5.3125	10.625	26.5625		Gbd
	±100 ppm	±100 ppm	±100 ppm	±100 ppm		
Modulation format	NRZ				PAM4	
Center wavelength (range)	970 to 990					nm
Damage threshold <sup>a</sup> (max)	4.9				6	dBm
Average receive power (max)	3.9				5	dBm
Average receive power <sup>b</sup> (min)	-19.9	-17.9	-15.7	-12.7	-7.9	dBm
Receive power (OMA <sub>outer</sub> ) (max)	3.2				4.3	dBm
Receiver reflectance (max)	-12					dBm
Stressed receiver sensitivity <sup>c</sup> (OMA <sub>outer</sub> ), condition 1 (max)	-17	-14.9	-11.4	-7.7	-2.4	dBm
Stressed receiver sensitivity <sup>d</sup> (OMA <sub>outer</sub> ), condition 2 (max)	-18	-16	-13.8	-10.8	-6	dBm
Receiver sensitivity (OMA <sub>outer</sub> ) (max)	max (C, <b>TDFOM</b> + D)					dBm
C	-18	-16	-13.8	-10.8	-6	dBm
D	-18	-15.9	-13.4	-10.2	-5.4	dBm
Conditions of stressed receiver sensitivity tests:						
Stressed TDFOM (STDFOM), condition 1	1	1	2	2.5	3	dB
Stressed TDFOM (STDFOM), condition 2	0	-0.1	-0.4	-0.6	-0.6	dB

車載用規格の特徴: ・波長が980nm帯を使用（信頼性向上）  
・光送信波形歪を考慮したTDFOMを使用

# TDFOM : Transmitter and distortion figure of merit

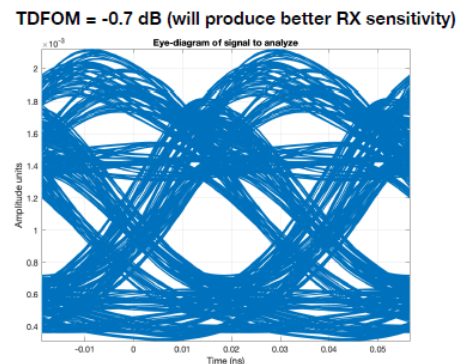
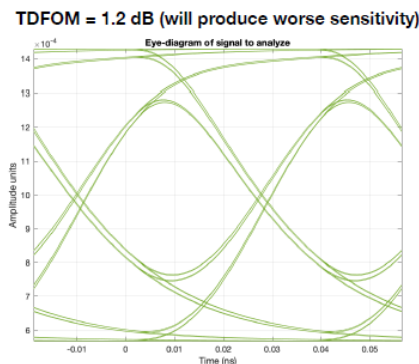
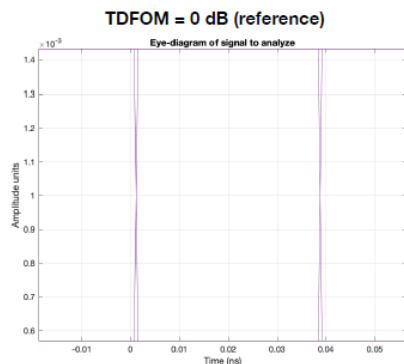
$$TDFOM = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{OMA_{in}}{2(M-1)\sigma_{n_{in}}Q_0} \right) - TDFOM_0$$

$Q_0 = 3.5741$  :NRZ変調の誤り率 $1.757 \times 10^{-4}$ の値       $M$  :多値数

$Q_0 = 3.4981$  :PAM4変調の誤り率 $1.757 \times 10^{-4}$ の値

TDFOM<sub>0</sub>は理想トランスミッタ（矩形パルス）をリファレンスレーバに接続した際にTDFOMが0dBとなる値

Bitrate	2.5Gbps	5Gbps	10Gbps	25Gbps	50Gbps
TDFOM <sub>0</sub>	3.59469	3.60715	3.63153	3.92395	2.83113



Rubén Pérez-Aranda, David Leyba, "TDFOM simplification proposal," IEEE 802.3cz Task Force - May 20

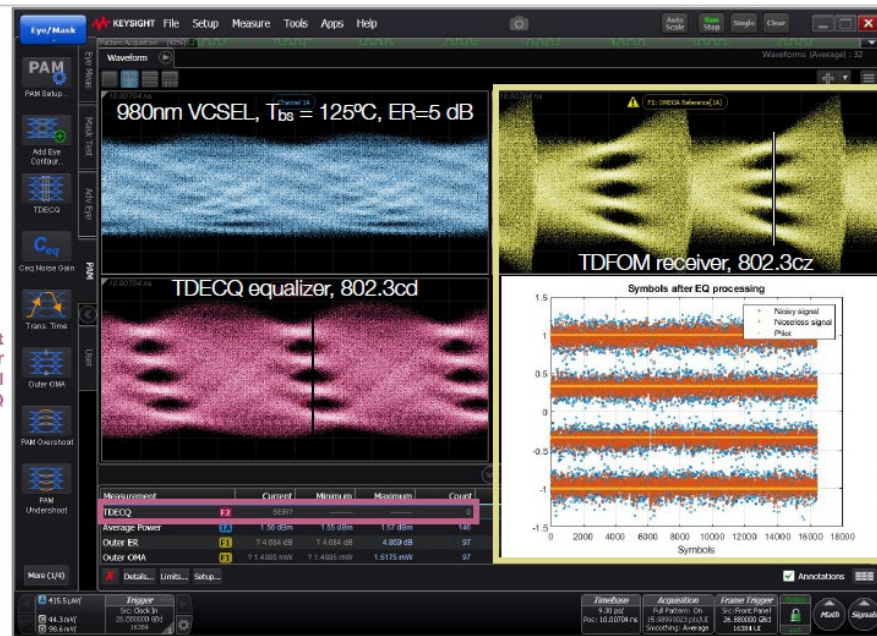
# TDECQとTDFOMの波形比較

The reference receiver — e.g. TDECQ vs TDFOM



TDECQ: Transmitter Dispersion and Eye Closure Quaternary

TDECQ cannot be calculated for the output signal of TDECQ EQ



TDFOM receiver is able to deal with non linear ISI

Reference eq.  
TDFOM: MMSE-DFE  
TDECQ: 5tap-FIR

Comparison of TDECQ equalizer performance vs TDFOM receiver performance, both doing processing of VCSEL signal operating at  $T_{BS} = 125^{\circ}\text{C}$ , 26.88 GBd, PAM4

Rubén Pérez-Aranda, David Leyba, "Base-AU 980nm/OM3 baseline reference receiver and transmitter and distortion figure of merit," IEEE 802.3cz Task Force – 8 February 2022 Interim Meeting

# 発表内容

1. 車載LANの変遷
2. 車載光通信システムとギガビット伝送の標準化
3. マルチギガビット伝送の実現に向けて採用された技術と標準化
4. まとめ

## まとめ

- 車載光ネットワークは1980年代に実用化され、2000年代から欧州を中心に採用された
- 車載光ネットワークの大容量化はギガビットまでは多値化により、従来のSI-POFとLEDの組合せで実現され、欧州車に採用された
- マルチギガビット光Ethernetでは車載環境に対応するため、信頼性向上の高い980nm帯のVCSELと曲げに強いBI-MMFを採用され、送受信機の指標にもTDFOMを採用
- 今後の自動運転レベルおよびADAS機能の向上による車載ネットワークの大容量化にはEMC対策の観点からもネットワークの光化が期待されている