

Keio University



2022年10月16日(日)

# 理工学部同窓会総会 特別講演会

## 私にとってのファンダメンタルズ ～ POFの研究開発を通して ～

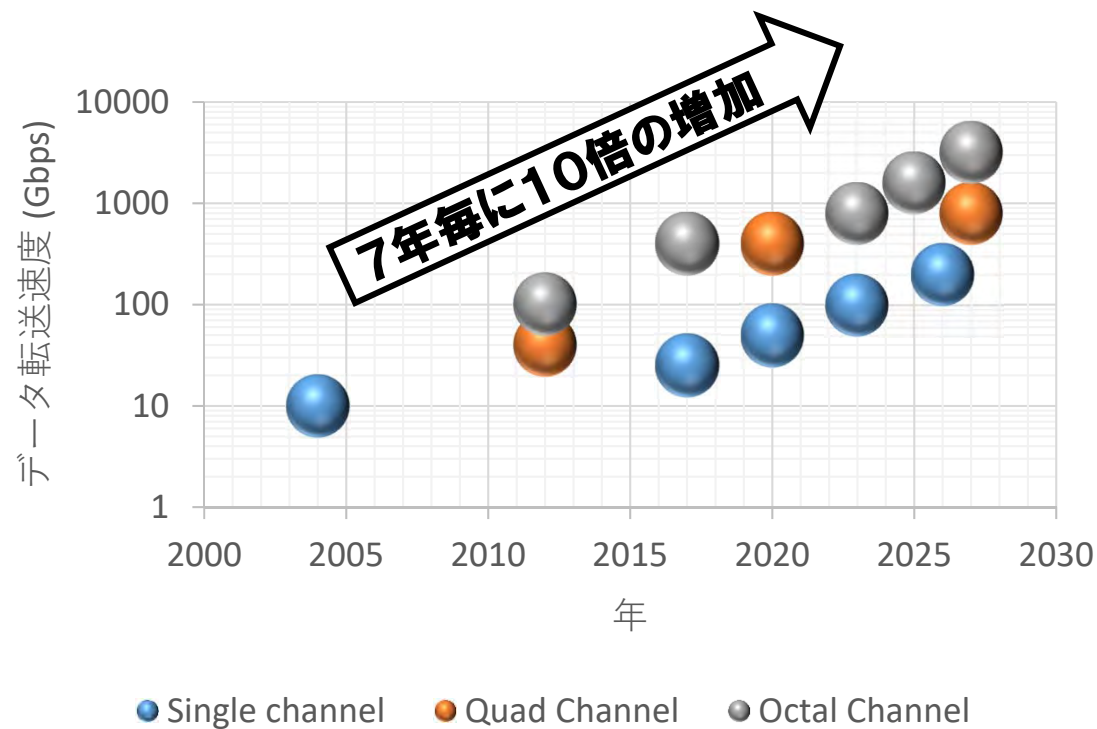
慶應義塾大学 教授

慶應フォトニクス・リサーチ・インスティテュート 所長

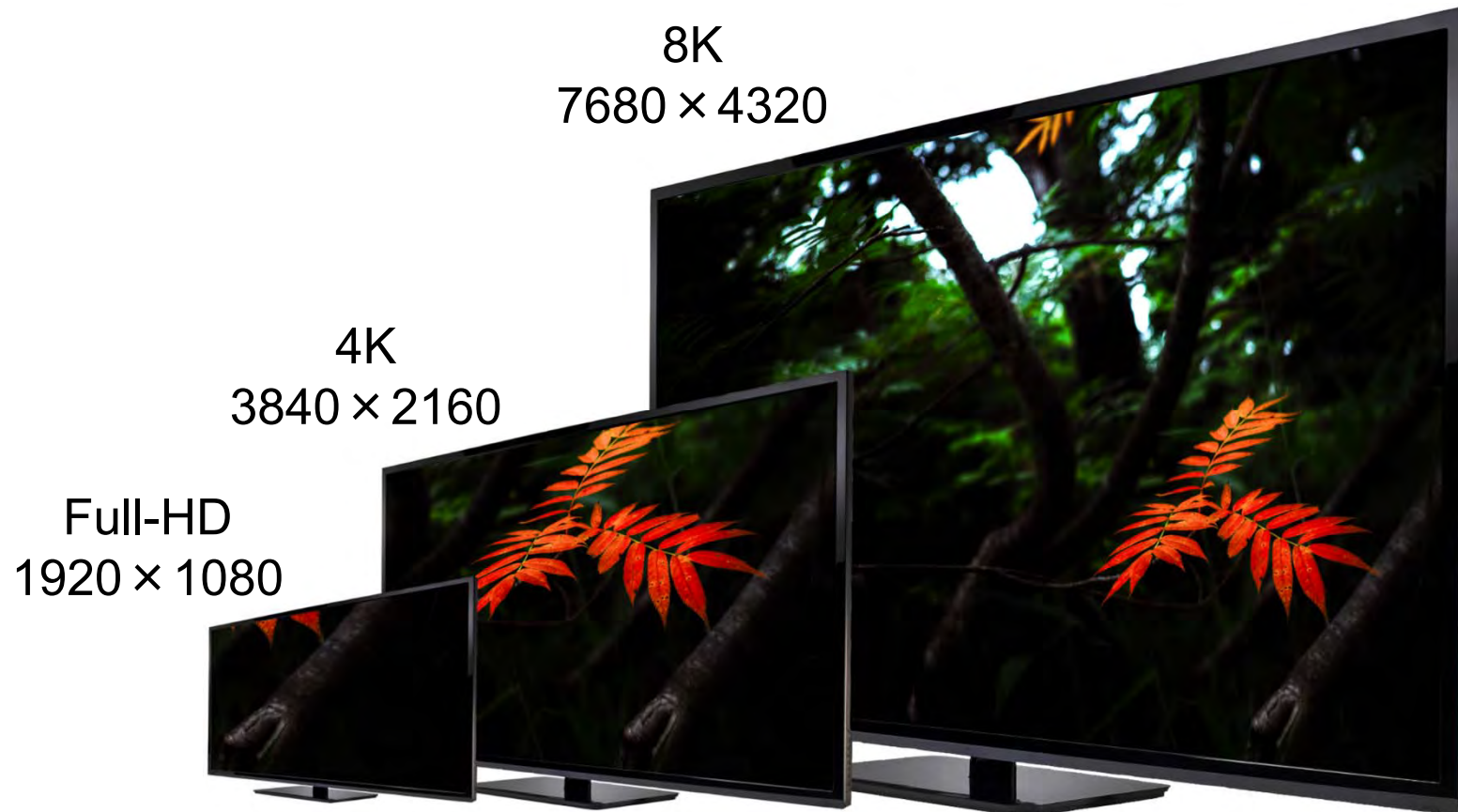
小池 康博

# 増え続けるインターネットのトラフィック

- トランシーバ市場におけるデータ転送速度の増加
  - インターネットのトラフィックの増加は、対数的であり、7年毎に10倍に成長しています。



# 4K・8Kスーパーハイビジョン






次世代放送規格である4K・8Kスーパーハイビジョンの  
実用化が進められている

# 4K・8Kスーパーハイビジョン



100 Gb/sを超える8K映像伝送のために  
宅内用高速光ケーブルが求められている

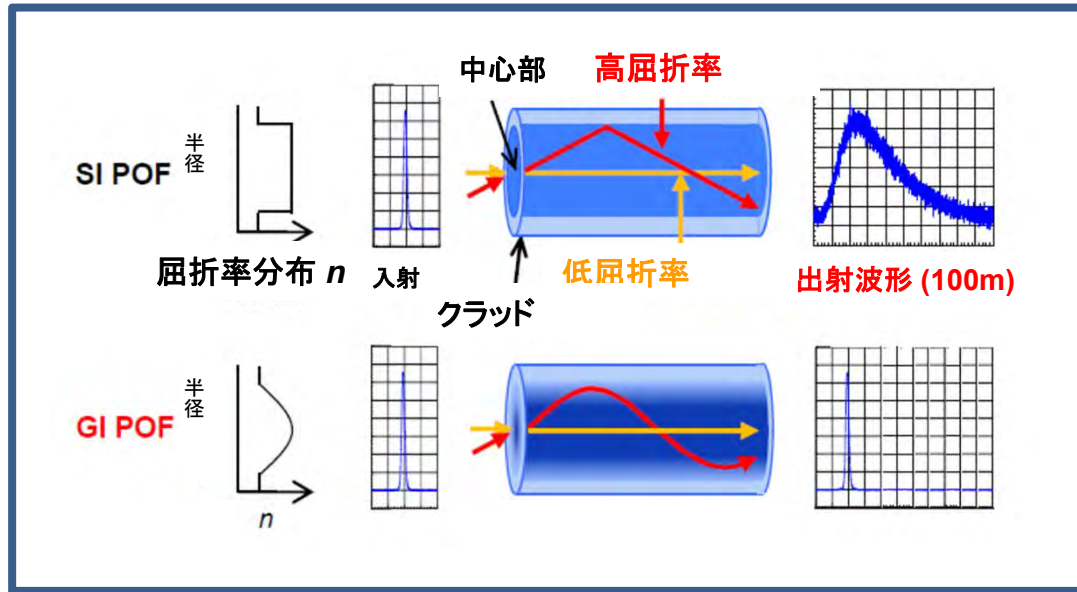
# 4K/8K映像伝送に必要なデータレート

	1950 ~	1990	2005	2010	2015	2020
	Analog	SD	HD	HD+	NEXT GENERATION	
Color Gamut	BT.1700	BT.601	BT.709	xvYCC, BT.2020		
Color Depth	-	8bits		10bits~16bits		
Frame rate	30fps	30fps		60fps	120fps	
Resolution	535line	720x480	1920x1080	4K, 8K		
Dimension	2D	2D		3D (w.glass)	3D (wo.glass)	
Transmission speed	10MHz	0.25Gb/s	1Gb/s	10Gb/s	> 100Gb/s	
						
	RCA cable	HDMI cable		Optical cable		

Y. Koike and A. Inoue, J. Lightw. Technol. **34**, 1551 (2016).

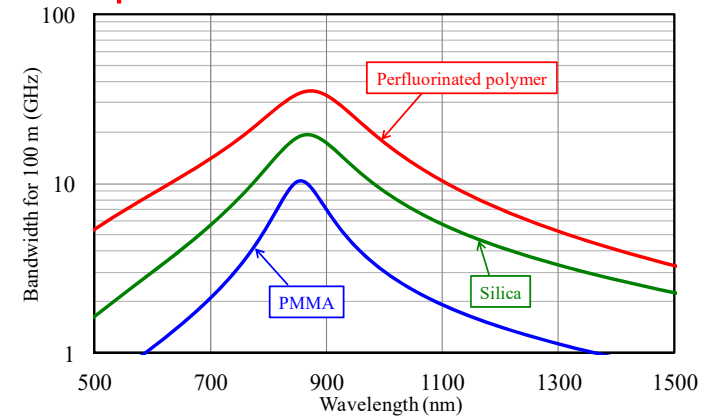
**100 Gb/sを超える非圧縮8K映像伝送のために  
一般消費者向けの高速度光ケーブルが求められている**

# 8 K、5 G時代へ向けた 屈折率分布型プラスチック光ファイバー (GI POF)



## 世界最速

~40Gbps



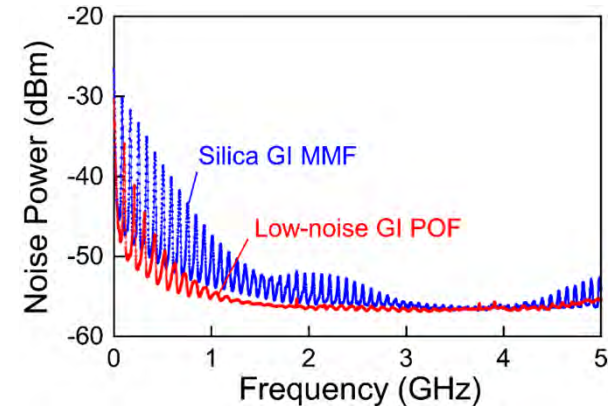
## 安全性



## 柔軟性



## 超低ノイズ



2021年9月24日 NHKおはよう日本

開発

大容量データ・高速通信でも  
エラー起きない光ファイバー



慶應義塾大学 小池康博教授の研究グループ

特殊なプラスチック使い 光の屈折・散乱の方向調整  
通信エラー起きにくくする光ファイバーを開発



2021年9月24日 NHKおはよう日本

開発

大容量データ・高速通信でも  
エラー起きない光ファイバー

慶應義塾大学 小池康博教授の研究グループ  
特殊なプラスチック使い 光の屈折・散乱の方向調整  
通信エラー起きにくくする光ファイバーを開発

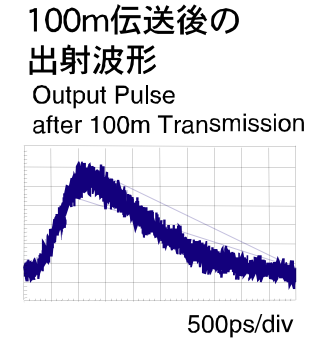
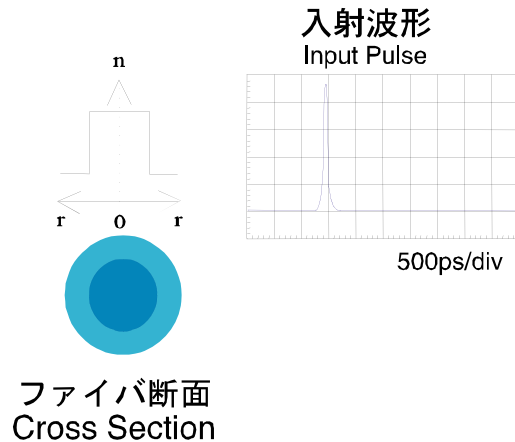




# Plastic Optical Fiber (POF)

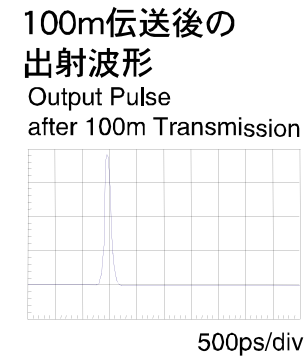
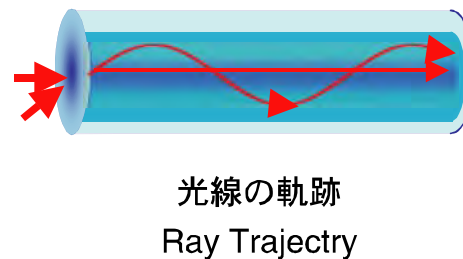
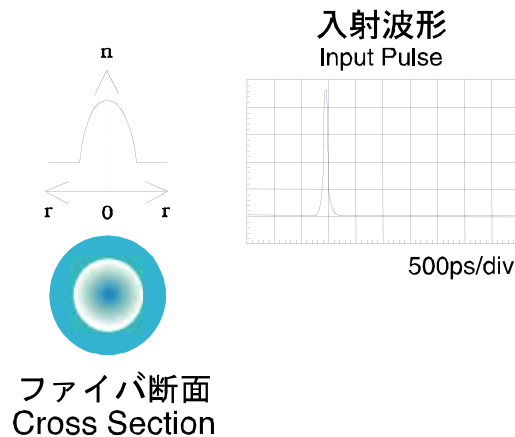
## Step-index (SI) POF

## SI 型プラスチック光ファイバー



## Graded-index (GI) POF

## GI 型プラスチック光ファイバー

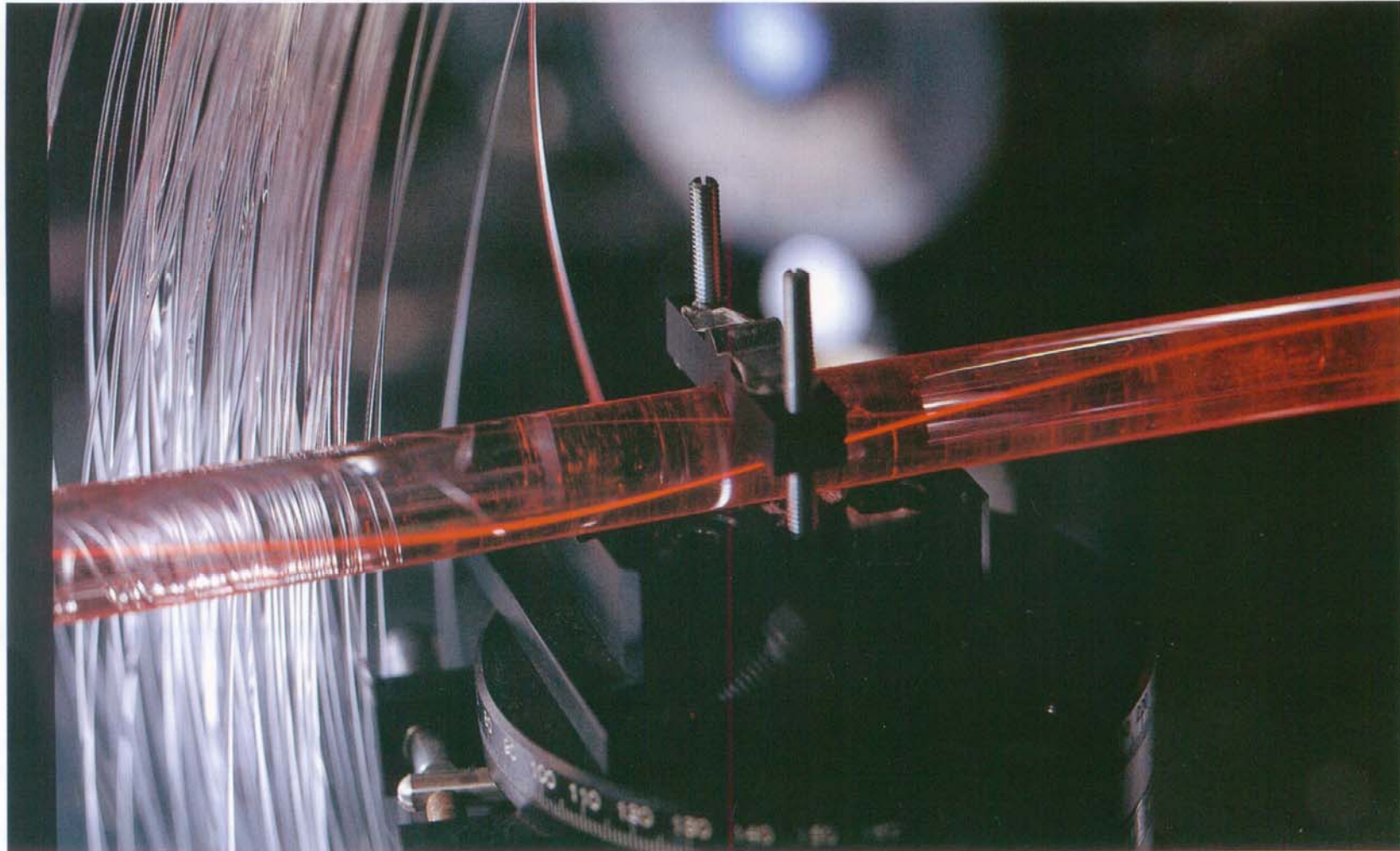


実測値 (Real Data)

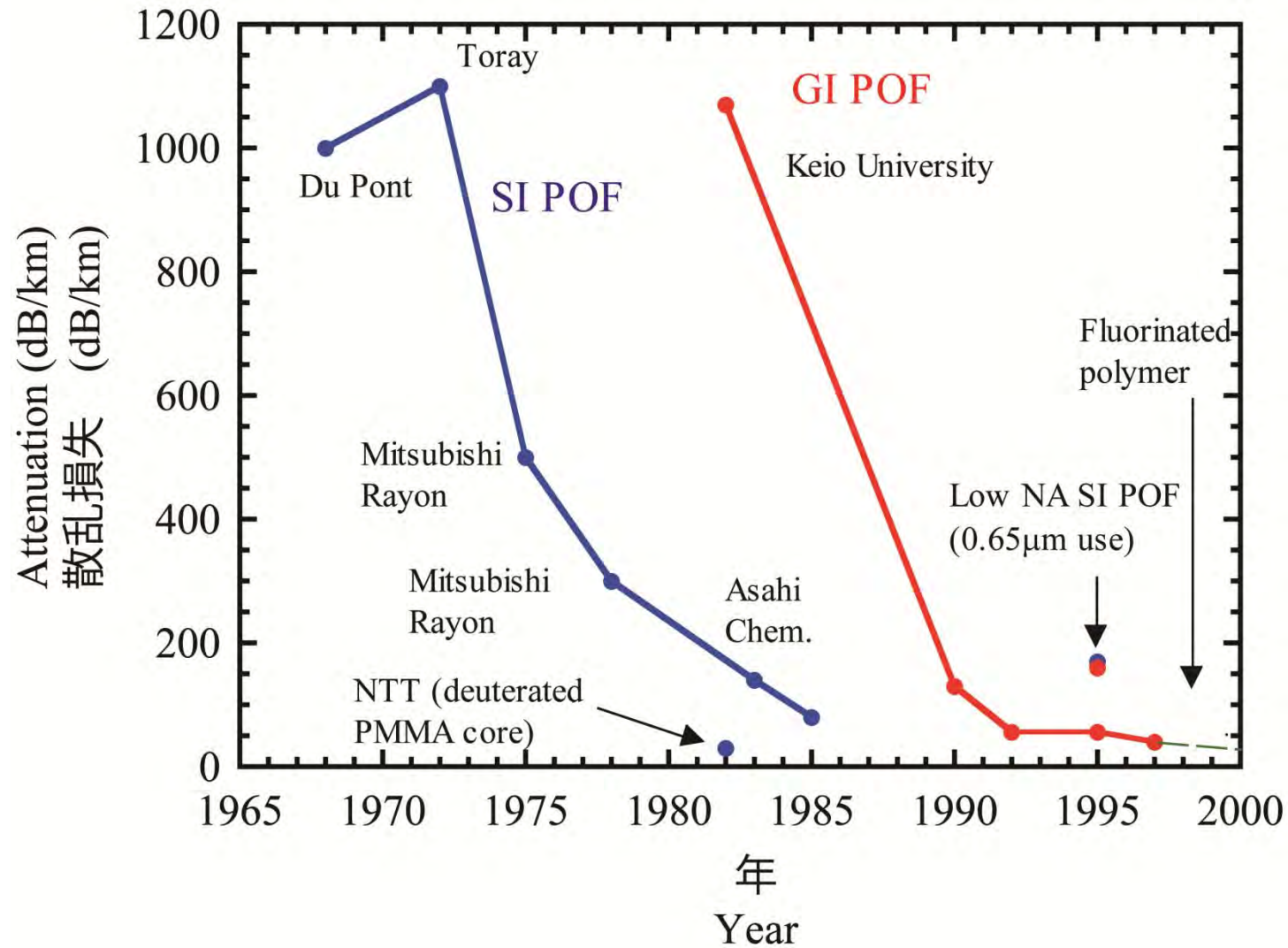
# 屈折率分布型プラスチック光ファイバー誕生の歴史

**1982 Proposal of GI POF toward data transmission  
Y. Koike, PhD Thesis from Keio University**

# High-Speed GI Plastic Optical Fiber 高速GI型プラスチック光ファイバー



# POFの低損失化の歴史





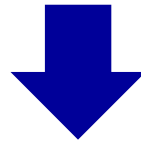
**Duncan Moore教授、大塚保治先生と共に**

# Main stream of Optical Fiber Development in 1980s

1980年代

光ファイバー研究において主流であった考え方

How to make a transparent optical fiber  
最も透明な光ファイバーを作製するには？



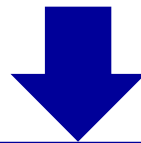
How to eliminate impurities  
如何にして不純物を取り除くか

*Is it true?*

**本当にそうなのであろうか？**

Proposal of GI POF from Keio University  
慶應大学から屈折率分布型(GI型)  
プラスチック光ファイバーを提案

Index profile should be formed in POF core  
プラスチック光ファイバーの中に  
屈折率の分布をつけなくてはならない



It is necessary to distribute dopants  
into the polymer materials.  
屈折率の異なる分子をポリマー中に分布させる必要あり

*Does it correspond to adding impurities?*  
**不純物を添加！？**

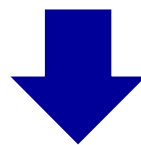
- In academia  
学会の意見

“Although the idea is OK,....”  
「アイデアは面白いけれども・・・」

- The theory is far from reality  
大学の机上の空論

- In my laboratory  
作製してはみたけれども・・・

“The attenuation is always more  
than 1000 dB/km”  
「散乱損失が大きく使い物にな  
らない試作品」



I had to stop the research on the POF.  
プラスチック光ファイバーの研究を一旦断念

*For eight years from 1982*  
*1982年から8年間*



# 屈折率分布型プラスチック光ファイバー誕生の歴史

**1982**    **Proposal of GI POF toward data transmission**  
          **Y. Koike, PhD Thesis**

**1988**    **GI plastic optical waveguide**  
          **Y. Koike et al., Appl. Opt. 27, 486**

# 屈折率分布型プラスチック光導波路の提案

## New interfacial-gel copolymerization technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays

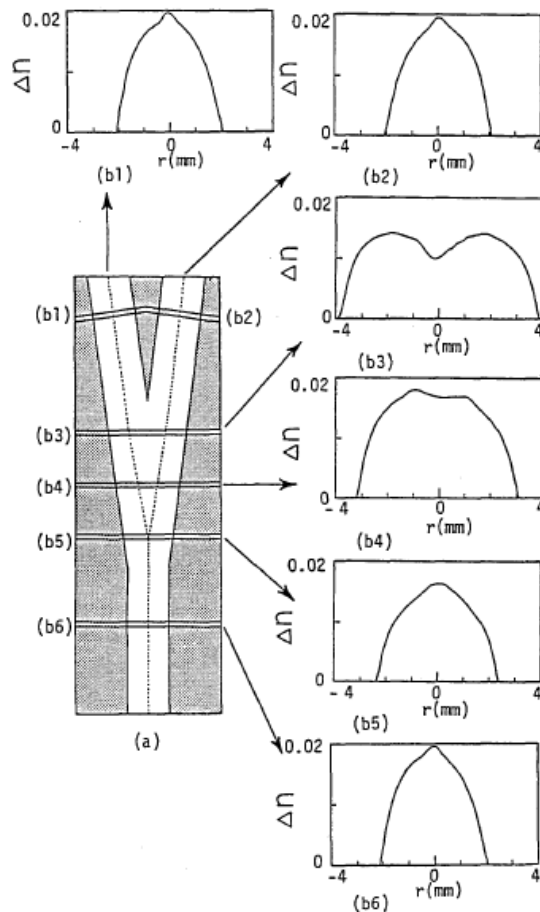


Fig. 4. Index distribution of radial-GRIN Y-branching waveguide.

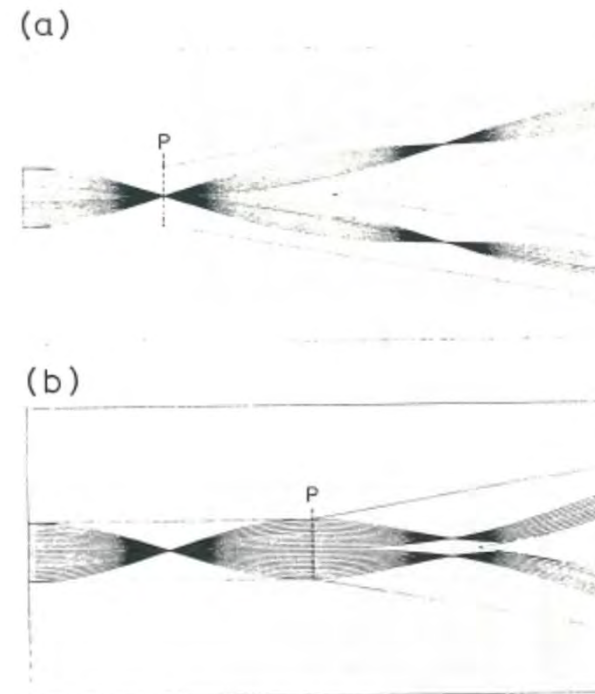
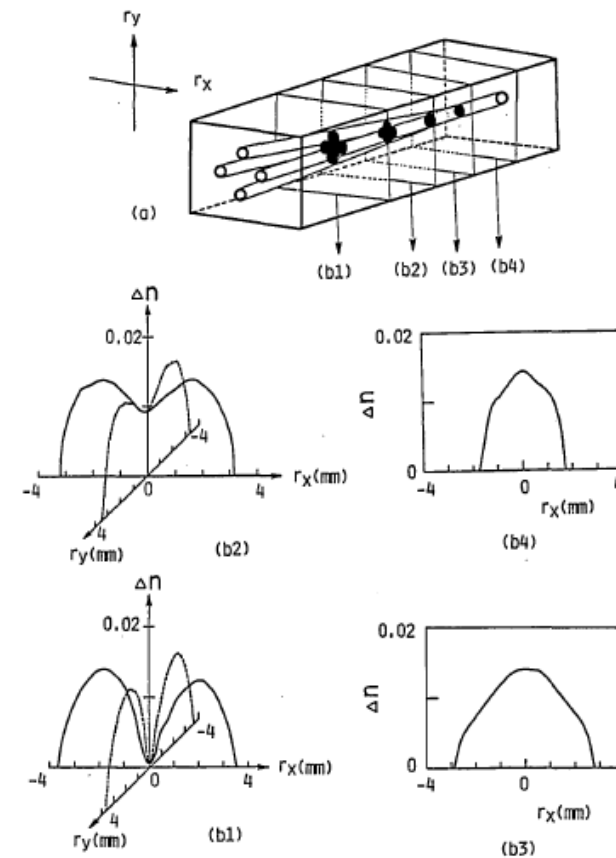
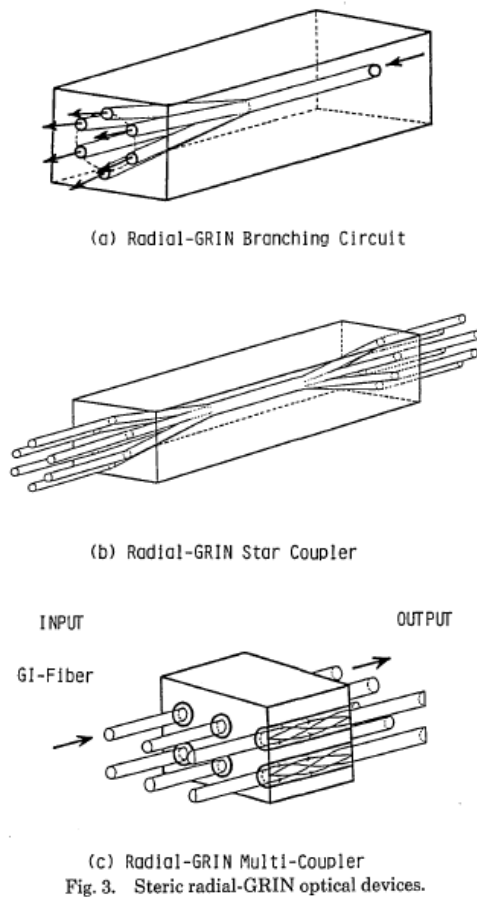


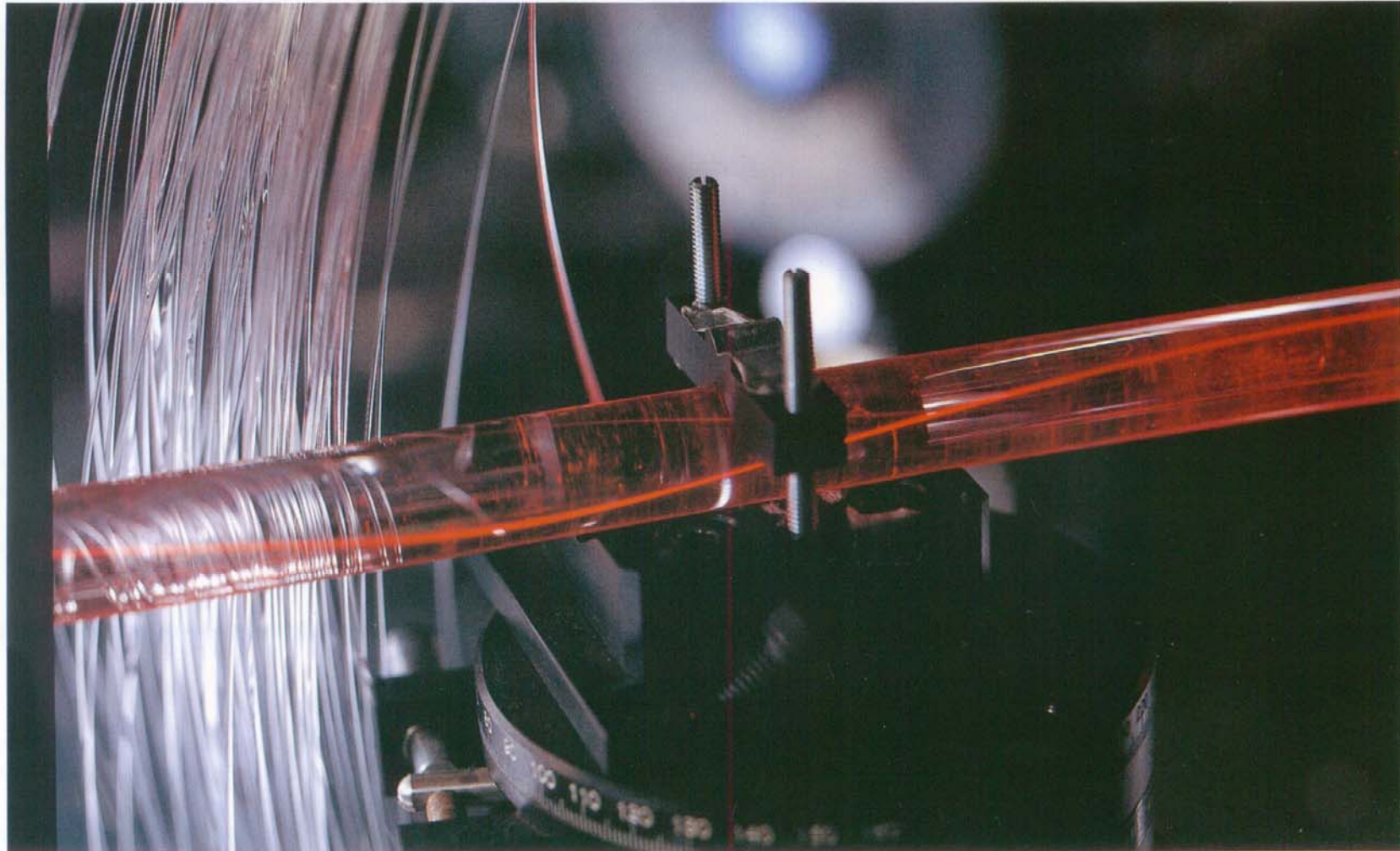
Fig. 5. Ray tracing of radial-GRIN Y-branching waveguide in the meridional plane. The scale of the ordinate is twice that of the abscissa. (a) All parallel rays focus at junction P. (b) All rays passing through P are parallel.

# 屈折率分布型プラスチック光導波路の提案

## New interfacial-gel copolymerization technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays



# High-Speed GI Plastic Optical Fiber 高速GI型プラスチック光ファイバー



# What is an intrinsic scattering loss of an amorphous polymer? 無定形ポリマーの固有散乱損失とは？

- **Einstein's fluctuation formula in 1910**  
アインシュタインの揺動説理論 (1910年)

$$\underbrace{V_v^{iso}}_{\text{散乱損失}} = \frac{\pi^2}{9\lambda_0^4} (n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2 kT \underbrace{\beta}_{\text{圧縮率}}$$

$V_v^{iso}$  : The isotropic part of  $V_v$  scattering

$n$  : The reflective index of the polymer

$k$  : Boltzmann's constant,  $T$  : The absolute temperature

$\beta$  : The isothermal compressibility

$\lambda_0$  : The wavelength of light in vacuum

# Scattering intensities of PMMA in 1990s

## 1990年代におけるPMMAの散乱損失値

- **Einstein's fluctuation formula**

アインシュタインの揺動説理論

**9.5 dB/km**

- **Experimental values of POF**

実験値

**1000 dB/km**

In 1990s, it was considered that the Einstein's theory couldn't be applied to solid-state PMMAs.

Einsteinの理論は、1990年代においてはPMMA固体に適用できないと一般に考えられていた

# Hypothetical origin of excess scattering loss of polymers at that time ポリマーの過剰散乱の原因の仮説

- ~~Stereoregularity according to the configuration of specific tacticities~~
- ~~The effect of high molecular weight~~
- ~~Low molecular impurities such as residual monomer or additives~~
- ~~The formation of cross-links or bulky side chains as the result of “gel effect” during polymerization~~
- ~~Internal frozen strain~~

Etc.....

# Excess Light-Scattering by Debye Theory in 1949 デバイの過剰光散乱理論 (1949年)

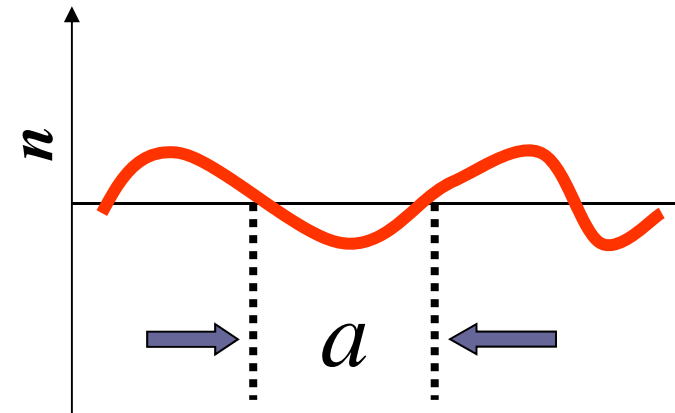
$$V_{V2}^{iso} = \frac{4\langle\eta^2\rangle\pi^3}{\lambda_0^4} \int_0^\infty \frac{\sin(vsr)}{vsr} r^2 \gamma(r) dr$$

$$\gamma(r) = \exp(-r/a)$$

$\gamma(r)$  : Correlation Function

$a$  : Correlation Length

$$V_{V2}^{iso} = \frac{8\pi^3\langle\eta^2\rangle a^3}{\lambda_0^4 (1+v^2 s^2 a^2)^2}$$





# *Bell Laboratories in 1989*

平成元年 米国ベル研究所



# 米国ベル研究所での研究仲間



# Proposal of Excess Light Scattering Model of Polymer

## ポリマーの過剰散乱モデルを提案

Nov. 14, 1989

### Excess Scattering Model in Amorphous Polymer Glasses

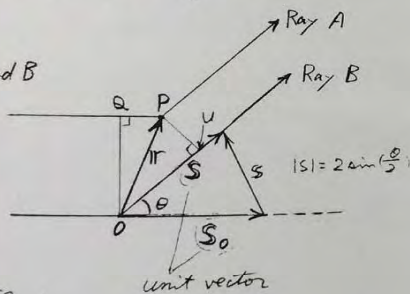
Nov. 14, 1989 Yamu Koike

#### 1. General Theory

In an isotropic medium, an angular dependence of the scattering intensity is caused by an interference effect.

Path difference between Rays A and B

$$\begin{aligned} \overline{QP - OU} &= (r \cdot S_0) - (r \cdot S) \\ &= -r \cdot (S - S_0) \\ &= -(r \cdot SS) \end{aligned}$$



Then a phase difference  $\varphi$  is

$$\varphi = \frac{-2\pi}{\lambda} (r \cdot SS) = k (r \cdot SS), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

A single secondary wave by a complex form is

$$\exp(i\varphi) = \exp[-ik(r \cdot SS)]$$

Therefore, the scattered intensity I is

$$I = \int_V \langle \eta(r_1) \cdot \eta(r_2) \rangle \cdot \exp[-ik(r \cdot SS)] dV \quad (1)$$

$\eta$ : fluctuation of dielectric constant from average

A correlation function  $\gamma(r)$  is defined as

$$\gamma(r) = \frac{\langle \eta(r_1) \cdot \eta(r_2) \rangle}{\langle \eta^2 \rangle} \quad (2)$$

$$\text{and } \langle \exp[-ik(r \cdot SS)] \rangle = \frac{\sin kSR}{kSR} \quad (3)$$

$$dV = 4\pi r^2 \cdot dr \quad (4)$$

$$\text{Then } I = \langle \eta^2 \rangle V \int_0^\infty 4\pi r^2 \gamma(r) \frac{\sin kSR}{kSR} dr \quad (5)$$

In the light scattering, the isotropic  $V_V$  sca

$$\text{is } V_{V_2}^{iso} = \frac{\pi^2}{\lambda_0^4 V} I$$

Finally

$$V_{V_2}^{iso} = \frac{4 \langle \eta^2 \rangle \pi^3}{\lambda_0^4} \int_0^\infty \frac{\sin kSR}{kSR} r^2 \gamma(r) dr \quad (6)$$

Equation (6) is, then, a general equation only an assumption of isotropic media.

$$S = 2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

# Macromolecules

Reprinted from *Macromolecules*, 1992, 25.

Copyright © 1992 by the American Chemical Society and reprinted by permission of the copyright owner.

## Origin of Excess Light Scattering in Poly(methyl methacrylate) Glasses

Yasuhiro Koike,<sup>\*,†</sup> Shiro Matsuoka,<sup>‡</sup> and Harvey E. Bair<sup>†</sup>

*Faculty of Science and Technology, Keio University, Kohokuku, Yokohama 223, Japan, and AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974*

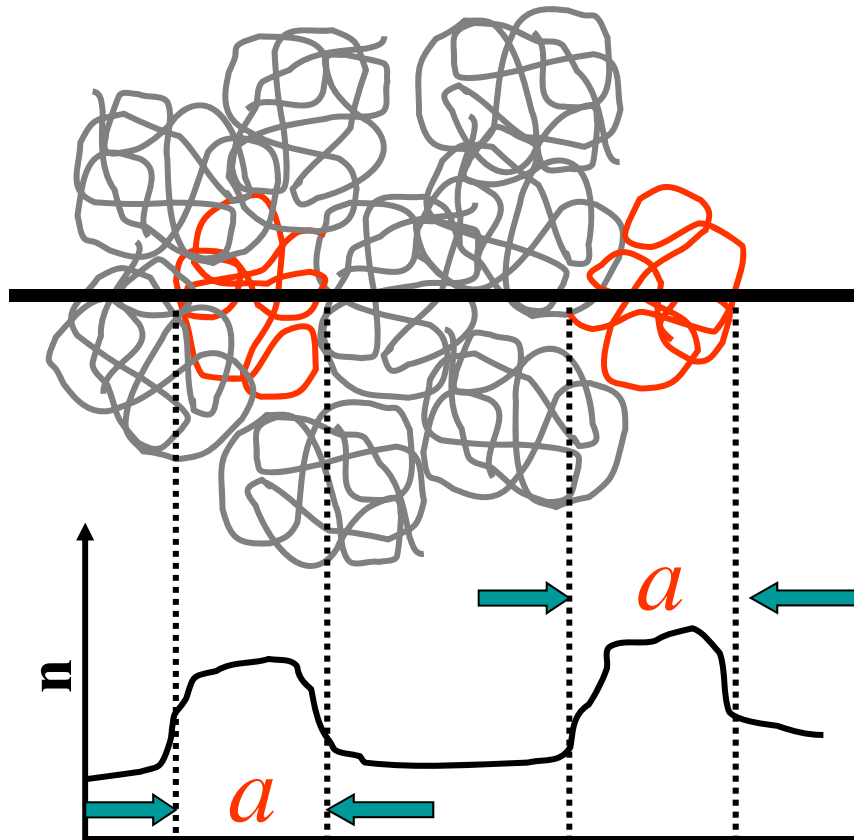
*Received March 9, 1992*

**ABSTRACT:** The origin of the excess light scattering invariably observed in purified poly(methyl methacrylate) (PMMA) glasses was investigated. The isotropic heterogeneous structure with a dimension of about 1000 Å, which increases the scattering loss by at least 1 order of magnitude (to several hundred dB/km), is generated during polymerization below  $T_g$  at high conversion and is not due to high molecular weight, specific tacticities, formation of cross-links, or aging. It is clearly shown that the remaining monomer in concentrations of several weight percent does not aggregate spontaneously at high conversion to cause excess scattering unless polymerization takes place. The excess scattering is, we believe, mainly due to voids caused by the volume shrinkage accompanying polymerization of the remaining monomer trapped inside the polymer glass. The excess scattering model proposed in this paper shows that if a slight amount of monomer in the PMMA glass is polymerized in situ at high conversion, generating slightly localized voids due to the aggregation of the unreacted initiator, a rise of only 1 wt % in the conversion increases the scattering loss by several hundred dB/km, which can reasonably explain the experimental results obtained in this paper.

# Correlation Length ( $a$ ) (相関距離 $a$ )

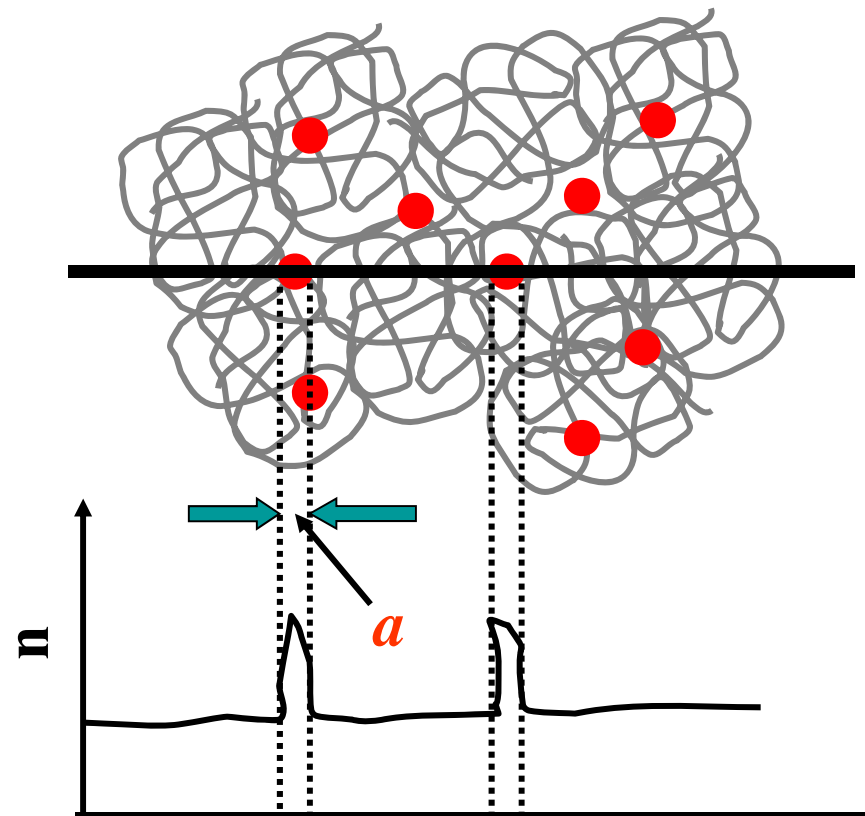
**Copolymer System**  
(1000 dB/km)

$a =$  a few hundreds ( $\text{\AA}$ )



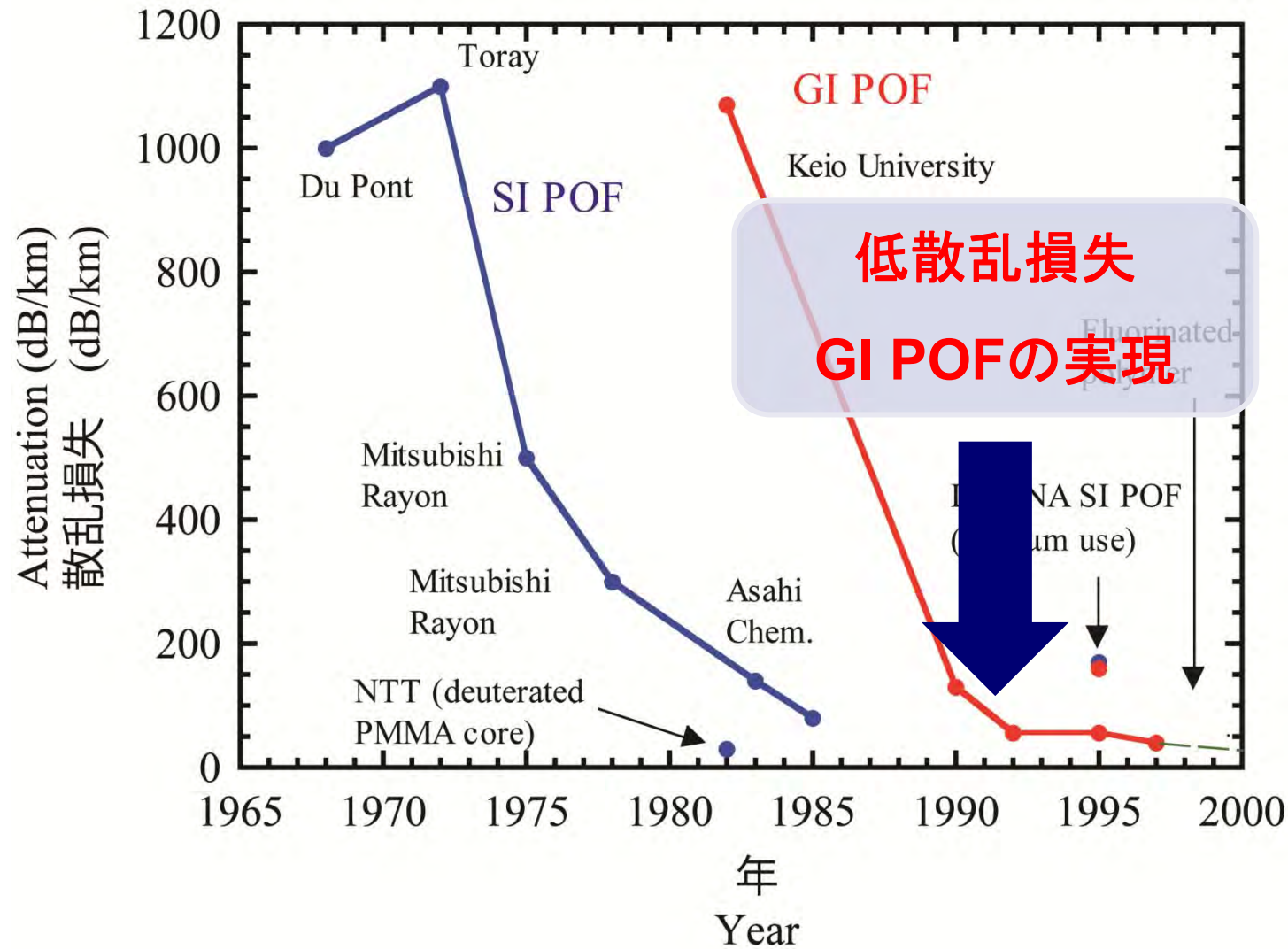
**Small-Dopant System**  
(less than 10 dB/km)

$\gg a =$  several ( $\text{\AA}$ )



# Development in the attenuation of POF

## POFの低損失化の歴史



# 屈折率分布型プラスチック光ファイバーの誕生

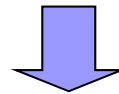
- 1982** Proposal of GI POF toward data transmission  
Y. Koike, PhD Thesis
- 1988** GI plastic optical waveguide  
Y. Koike et al., Appl. Opt. 27, 486
- 1991** Low-loss GI POF by dopant system  
Y. Koike, JP 3332922 USP 5,541,247 EP 0566744

# Development of Low-Loss GI-POF at Keio University from 1990

## 低損失GI型POFの提案

- **Dopant-type GI-POF** (低分子添加系GI型POF)  
where the concentration of **small dopants** is gradually changed to form the index profile.

Patent	Filing Year
JP 3332922	1991
US 5541247	1992
EPC 566744	1992
KR 170358	1992
US 5763514	1995
US 5767200	1996



The attenuation became **100-110dB/km** for  
PMMA-Dopant system GI-POF.  
低損失化に成功 (100-110 dB/km)



# プラスチック光ファイバー

NECの富士通三菱日立、住友化学などの光通信、マルチメディア関連メーカー四十社が結集、日本産産された高純度プラスチック光ファイバー(POC)の商用化に乗り出す。回線プラスチックファイバーは通信の敷設が容易で、マルチメディアなどを容易に導入するための技術に有利である。三菱日立は「カー」は生体適合性の建設機械を誇る。米田の技術は、日本に技術供与の申し入れをしてきており、日本の技術が世界の市場で活躍することを促すことになった。

# 45社結集、実用化を推進

## 低コスト可能 米に技術供与へ

この技術は慶応大学の小嶋康博助教が開発した。三菱日立は、米田の技術で生体適合性を高める。米田は、NECなどは個別に性能を評価、実用レベルに必要とを指摘したため、二つを併せて開発。カー、高純度プラスチックの開発メーカー、三菱化学などの商社、日本電信電話(NTT)、日本フイルム・エムは日本の関連企業が一丸となって推進協議会「POCコンソーシアム」を結成、実用化を推進することになった。

日本生命保険、第一生命保険は、期間五年を超える長期の固定金利融資に相当するプライムレート(最優遇貸付金利)を設定する。生保協会は、導入する方向で検討に入った。期間十年の融資の割合、金利は十年物

# 日本経済新聞

発行所 日本経済新聞社  
 東京本社 〒100-6600 033270-0251  
 東京都千代田区大手町1-9-5  
 振替口座 00130-7-5555  
 大阪本社 〒540-0800 06943-7111  
 大阪市中央区大手前1-1-1  
 振替口座 00920-1-73217  
 名古屋支社 〒460-0000 052322-2561  
 名古屋市中区正栄2-3-1  
 振替口座 00830-6-6149  
 西部支社 〒612-0000 092473-3300  
 福岡市博多区博多駅東2-6-1  
 振替口座 01710-1-1248  
 札幌支社 〒060-0000 011291-3211  
 札幌市中央区北1条西7-3  
 ©日本経済新聞社 1994

着色しないサブミクロン微粒子  
 繊維・樹脂の練込みコーティング剤  
**抗菌剤ノバロン**  
 抗菌剤ノバロン  
 化学で結ぶ  
 明らかにしを  
**東亜合成**  
 03(59)741111

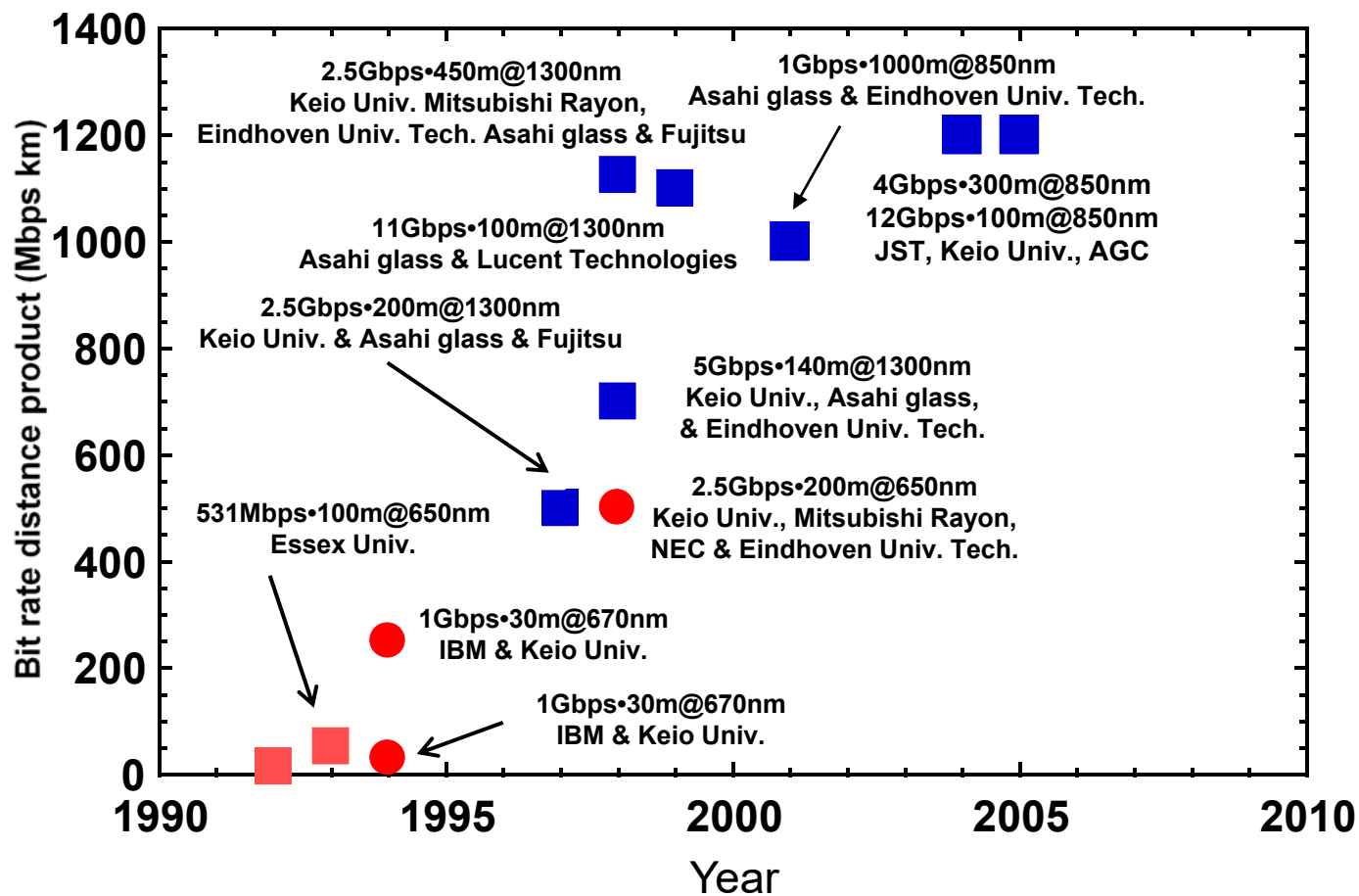
## と命 第一生命

# 独自長

## 5年超融資 金利

期間五年を超える長期の固定金利融資に相当するプライムレート(最優遇貸付金利)を設定する。生保協会は、導入する方向で検討に入った。期間十年の融資の割合、金利は十年物

# GI POFが世界の伝送性能を塗り替える



# 病院への高速GI型POF導入例



榊原記念病院



榊原記念病院内サーバー



山形大学医学部附属病院



帝京大学医学部附属病院

科学技術 & アニメーション



平成16年11月22日  
WALSLEY SECURITY PRINTERS LTD

Science and Technology and Animation Series, No.6



第6集: 楽

- ① ドラえもん: 未来の世界からやってきたネコ型ロボット「ドラえもん」が主人公のアニメーション。未来の発明品を通して科学技術への興味を高めるに貢献。放送25周年を迎え、海外でも放送されている人気作品。
- ② 平賀源内・エレキテル: 本草学、蘭学、創作などで活躍した平賀源内【享保13(1728)年-安永8(1779)年】は、安永5(1776)年に日本人で初めて従来の静電気式治療器「エレキテル」を修理、紹介し、科学技術の分野にも業績を残した。切手デザインは、肖像(慶應義塾大学所蔵)とエレキテルの装飾部分(重慶文化財/通信総合博物館所蔵)。
- ③ 榎付からくり: 切手デザインは、ゼンマイを動力とした「榎付舞蛙」(石川県立歴史博物館所蔵)と「榎付茶運び人形」(大野からくり記念館所蔵)。加賀の大野弁吉【享和元(1801)年-明治3(1870)年】が嘉永6(1853)年頃に製作した「江戸時代のマイクロロボット」と言える榎付玩具。
- ④ テレビ: 電子工学者・高橋健次郎【明治32(1899)年-平成2(1990)年】が、昭和元(1926)年にブラウン管に「イ」の字を映し出す事に成功し、昭和10(1935)年には全電子式テレビを完成した。切手デザインは、高橋式テレビ復元模型。
- ⑤ プラスチック光ファイバー (POF): ガラスと同等の伝送特性を持つプラスチックによって作られた光ファイバーは、高速情報通信の普及を促進するための画期的な技術。切手デザインは、屈折率分布型POFを通る光線の軌跡のイメージ。

背景 ドラえもん(タイムマシン)・プラスチック光ファイバー  
©藤子プロ・小学館・テレビ朝日

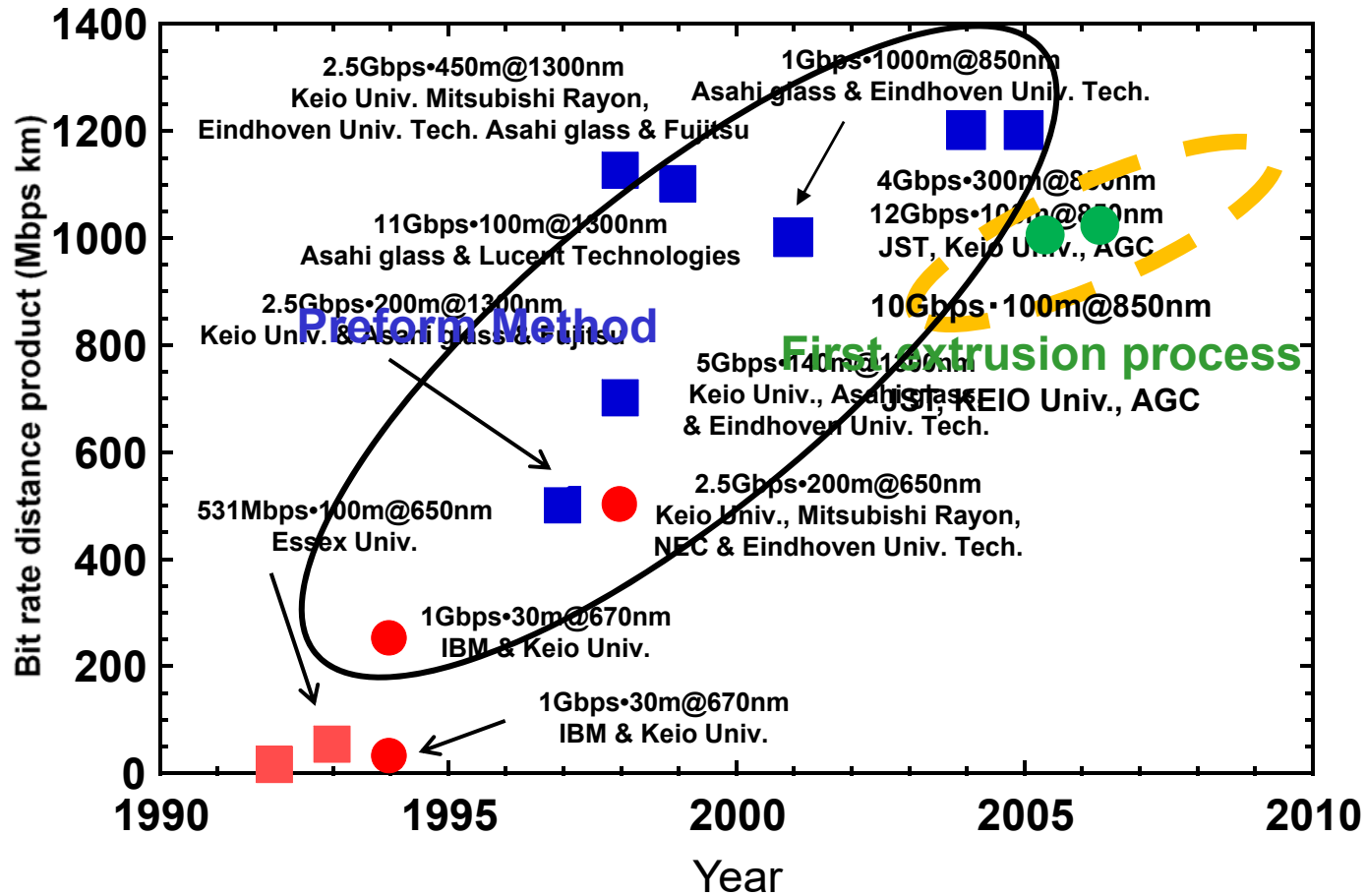
⑤ プラスチック光ファイバー (POF): ガラスと同等の伝送特性を持つプラスチックによって作られた光ファイバーは、高速情報通信の普及を促進するための画期的な技術。切手デザインは、屈折率分布型POFを通る光線の軌跡のイメージ。

背景 ドラえもん(タイムマシン)・プラスチック光ファイバー

©藤子プロ・小学館・テレビ朝日

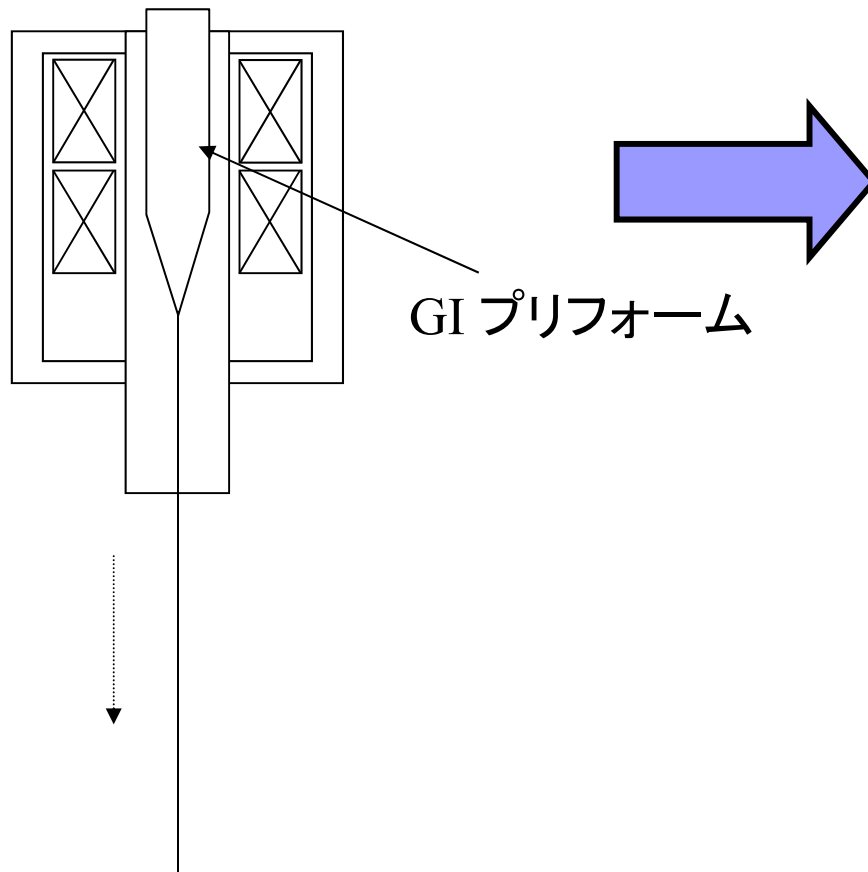
2004.11.22 発行

# GI POFが伝送性能を塗り替える

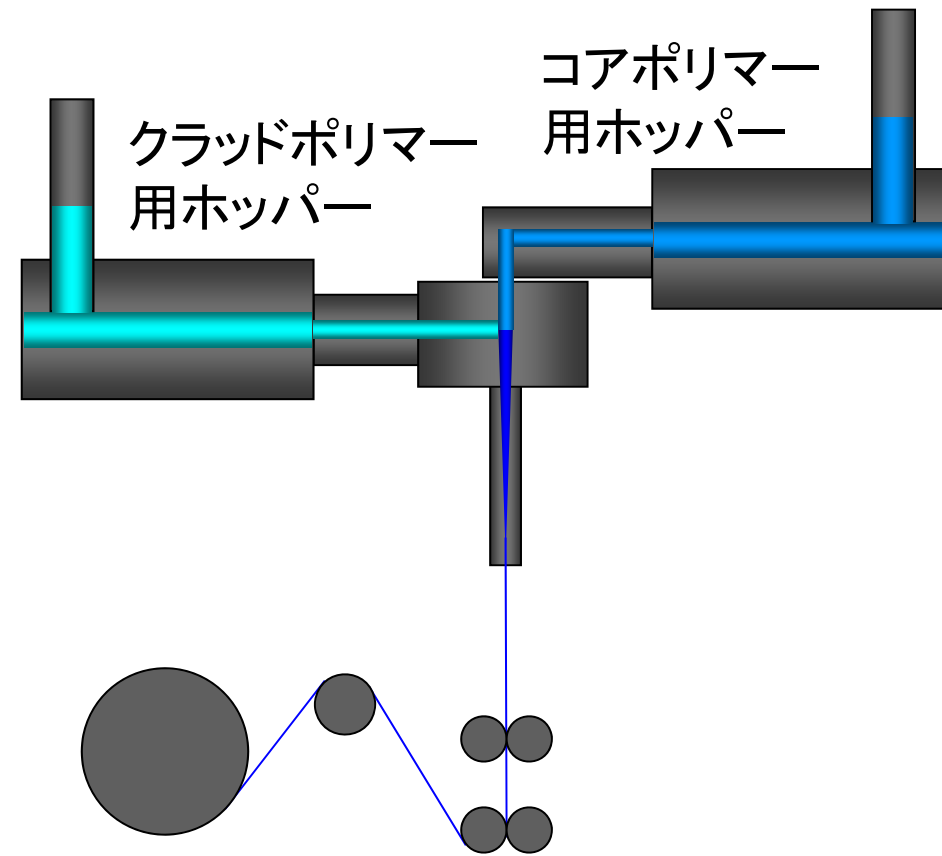


# 次世代FTTH構築のためポリマーデバイス R&Dプロジェクト (METI, 2004-2006)

## プリフォーム法

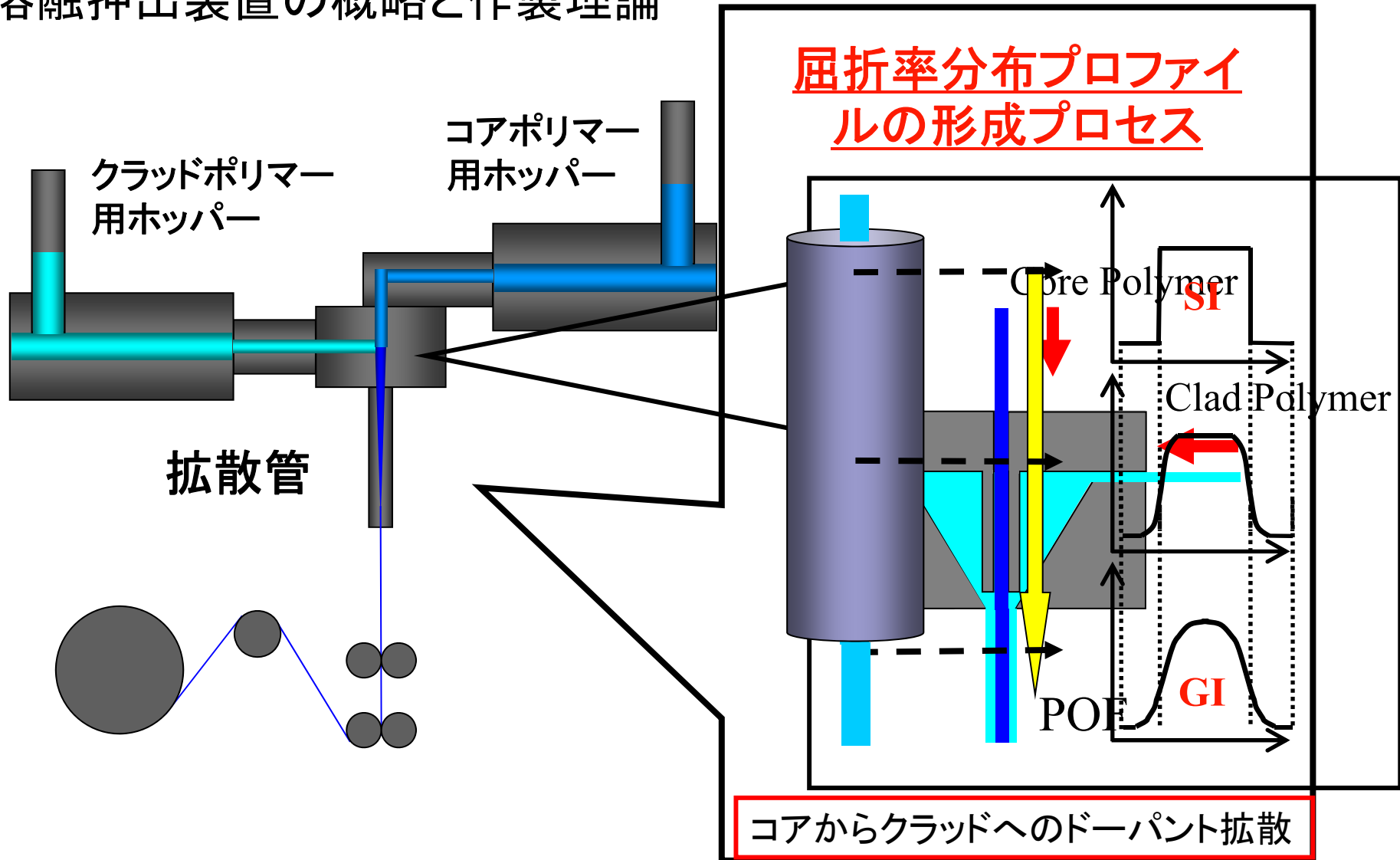


## 溶融押出法

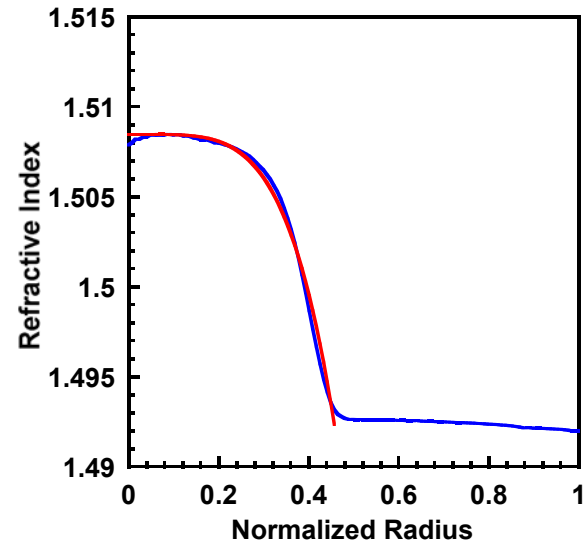
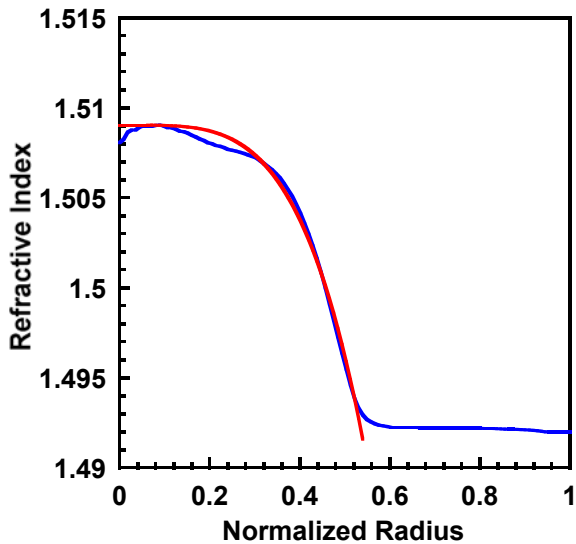
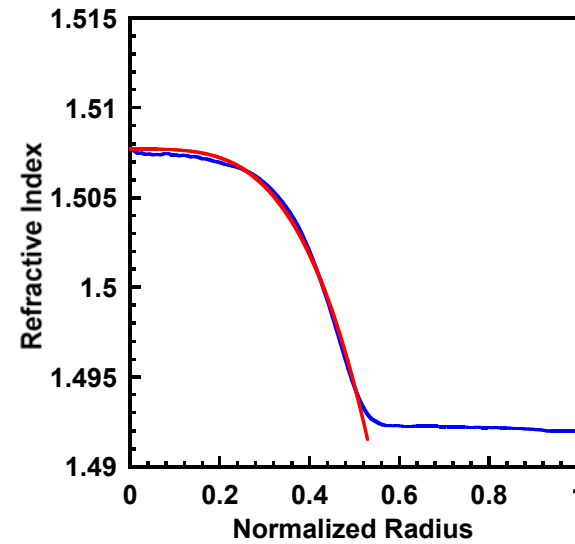
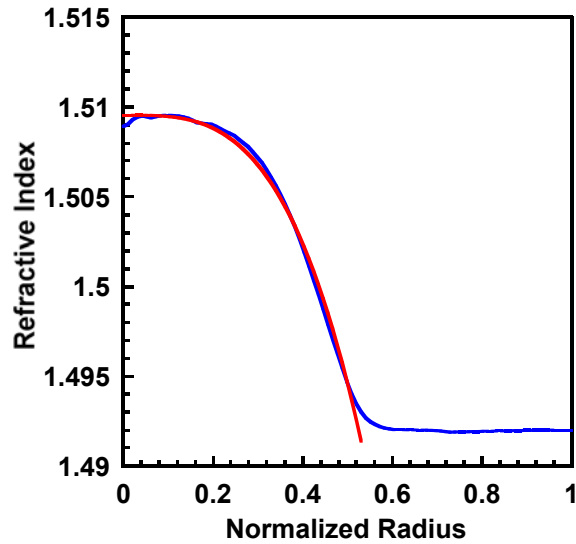


# GI-POFの溶融押出法

## 溶融押出装置の概略と作製理論



# 押出法によって得られるGI-POFの屈折率分布プロファイル



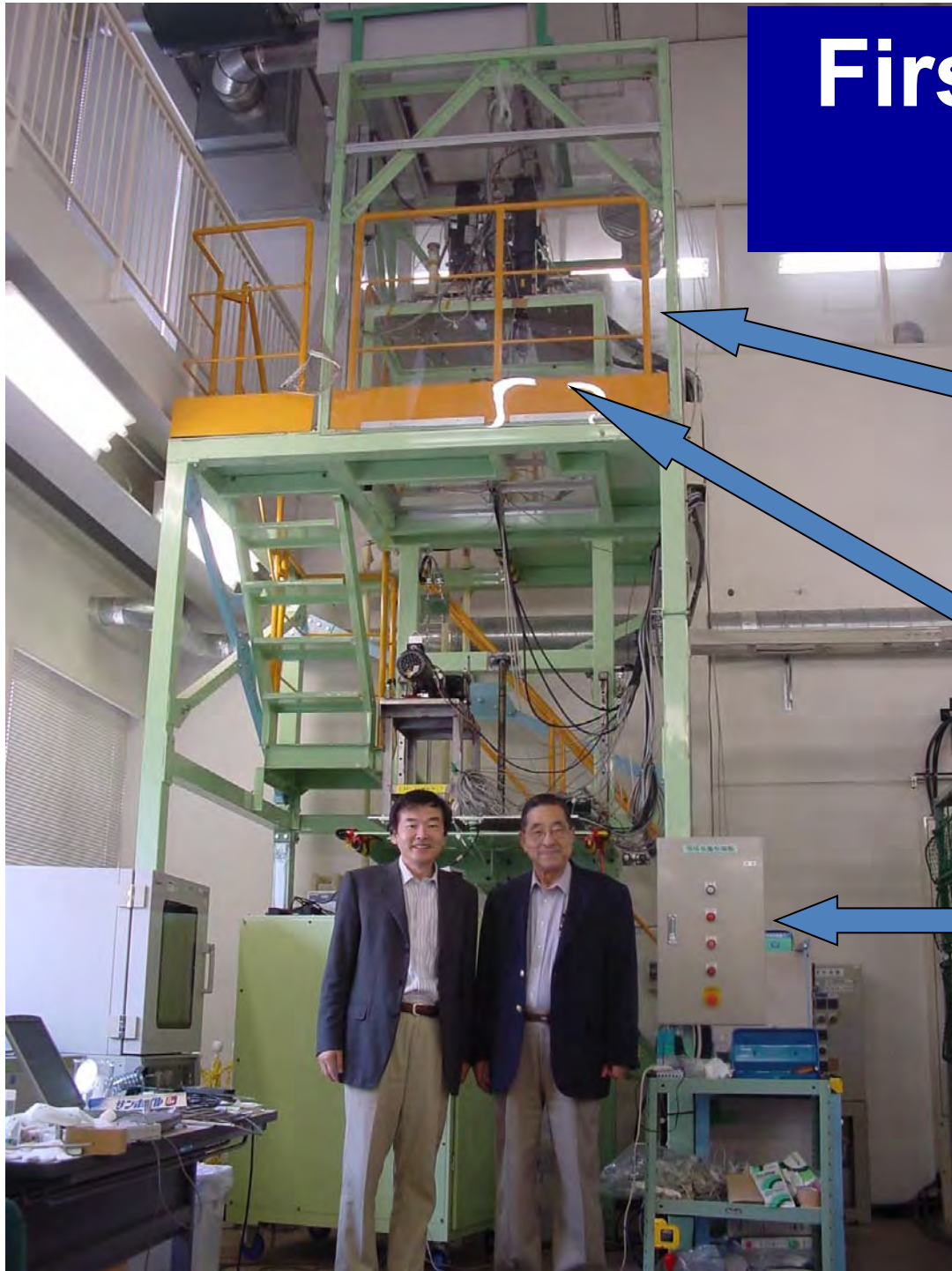


# First Co-Extrusion Tower

Hopper for Core and Clad Polymer

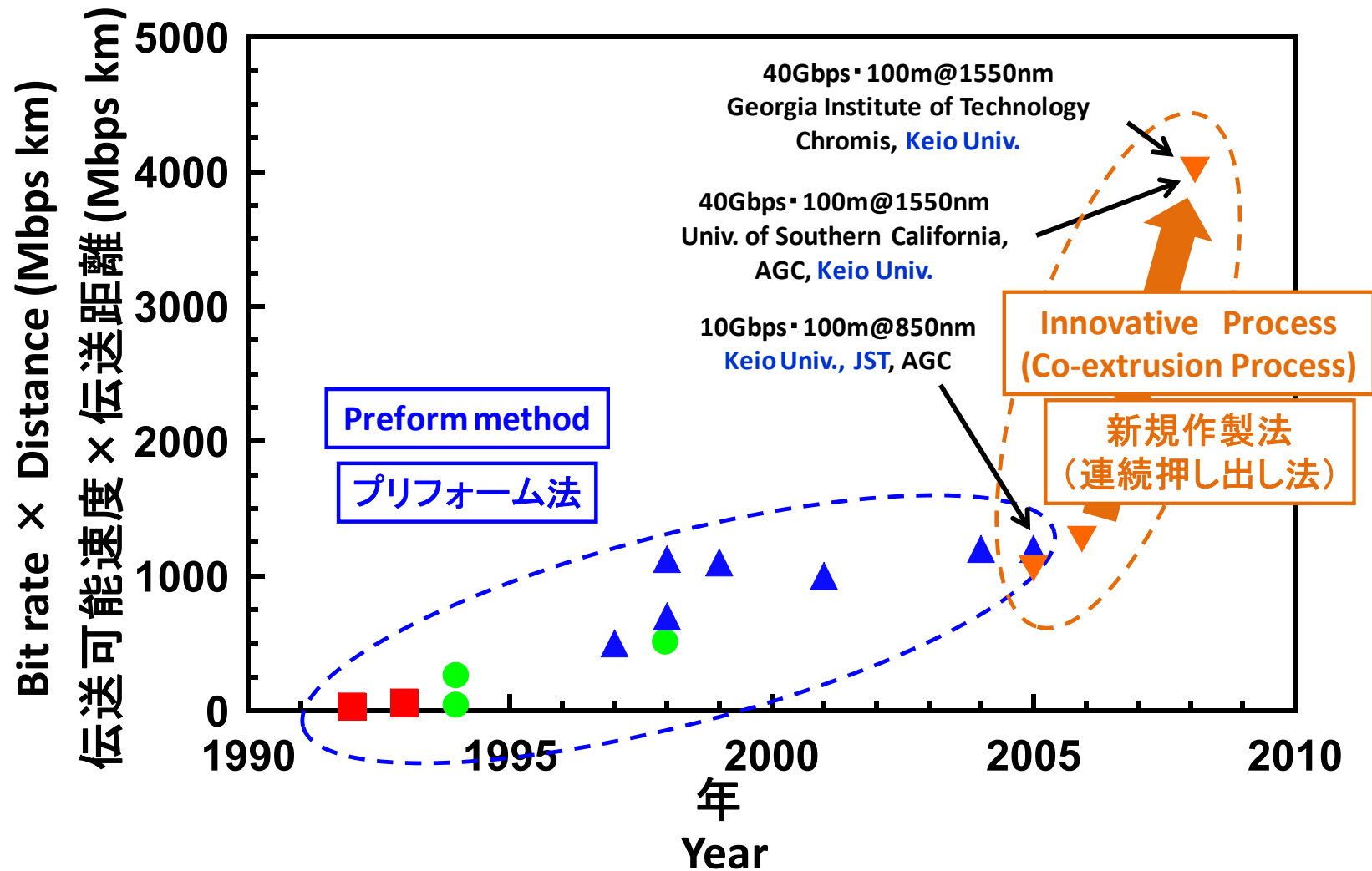
Diffusion Zone

Control Panel



# New development of GI POF

## GI型POFの新展開



# 公示地価 2年連続下落

1日時点

地価の変動率  
前年比%、  
年、▲は下落

地	商業地	全用途
2	▲6.1	▲4.6
2)	(▲4.7)	(▲3.5)

## 次世代光技術で実現する分野

分野	内容
テレビ電話	高精細な画像で話し相手の動きが滑らかになり、相手が目の前にいるような感覚で会話ができる
映画	超高速通信が実現することで見たいときにネット経由で高画質映画を大画面で楽しめる
オンラインゲーム	3D映像を使うことで画面から怪物が飛び出すように見え、臨場感あるゲームができる
医療	高精細な画像と手術ロボットを組み合わせて遠くにいる患者の治療ができる

共同研究は小池教授が持つ技術を中核に進め、小池教授は政府が2009年度補正予算に盛り込んだ研究者30人を支援する先端研究助成基金で選ばれた一人。国は今後5年間で約40億円の資金を提供する。開発には東芝などのほか、三井化学とソニー、積水化学工業も参加。旭硝子と三井化学、ソニーの3社がプラスチック光ファイバーによる通信技術の事業化を担当し、東芝は液晶テレビの開発で協力する方向。積水化学はこれらの製品を使った住宅の建設などに取り組み、

【ドーハ】藤田生動物の国際取引するワシントン条約国会議は18日、

## 遠隔医療や高精細TV

# 日本発の光技術 実用化へ

## 慶大・東芝・旭硝子など連携

慶応義塾大学は東芝や旭硝子など5社と共同で次世代光技術の実用化に乗り出す。慶大の小池康博教授が開発した高性能プラスチック素材を活用して高速通信網や高精細の大画面液晶テレビを試作。遠隔医療や臨場感あふれるスポーツ中継などが楽しめるモデル住宅を5年以内に実現する。政府も開発資金を提供。日本発技術の実用化で力を結集し、韓国や台湾勢に押され気味の家電・情報機器分野で新市場を創出する。(関連記事13面に)

む。製品開発から術まで確立し、サ形態も考案して最終的には10社ほどする見通しだ。実用化を目指す大容量で高速の光

## モデル住宅 5年以内に

# 日本経済新聞

3月19日  
金曜日

発行所 日本経済新聞社  
東京本社 ☎(03)3270-0251  
〒100-8006 東京都千代田区大手町1-3-7  
大阪本社 ☎(06)6943-7111  
名古屋支社 ☎(052)243-3311  
西部支社 ☎(092)473-3300  
札幌支社 ☎(011)281-3211  
NIKKEI NET アドレス  
<http://www.nikkei.co.jp/>  
購読のお申し込み  
☎0120-21-4946  
<http://www.nikkei4946.com>



Daiwa Lease.

# KPRI 国際シンポジウム 2010



## プログラム

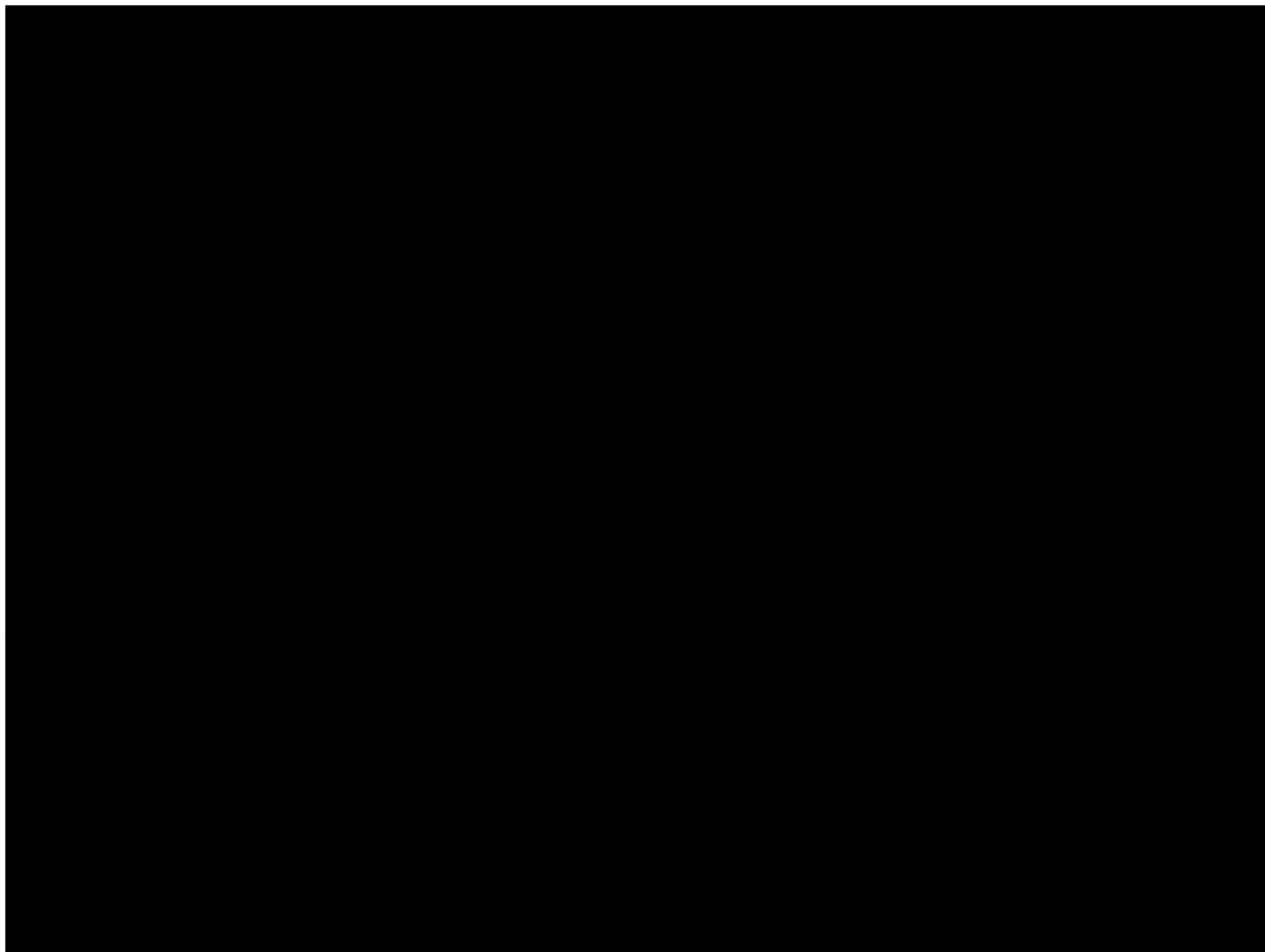
ご挨拶	慶應義塾長 清家 篤	
来賓祝辞	前内閣総理大臣 鳩山 由紀夫	
基調講演 「KPRI としての研究開発のビジョン ～Face-to-Face コミュニケーションの世界へ～」	慶應義塾大学 フォトニクス・リサーチ・ インスティテュート 所長 小池 康博	
講演 「すべては患者さんのために ～一身独立の基礎・臨床一体型医学・医療を目指して～」	慶應義塾大学 医学部長 末松 誠	
遠隔パネルディスカッション (協生館と日本科学未来館を結んで) 「地球の光」	コーディネーター 慶應義塾大学 環境情報学部長 村井 純	
講演 「世界地図 400 年目のイノベーション」	ゲスト 日本科学未来館館長 宇宙飛行士 毛利 衛	
フォトニクスポリマーによる高精細 3D 映像デモンストレーション		
謝辞	慶應義塾大学 理工学部長 青山 藤詞郎	

# 150インチHSOTスクリーンによる Face to Face コミュニケーション



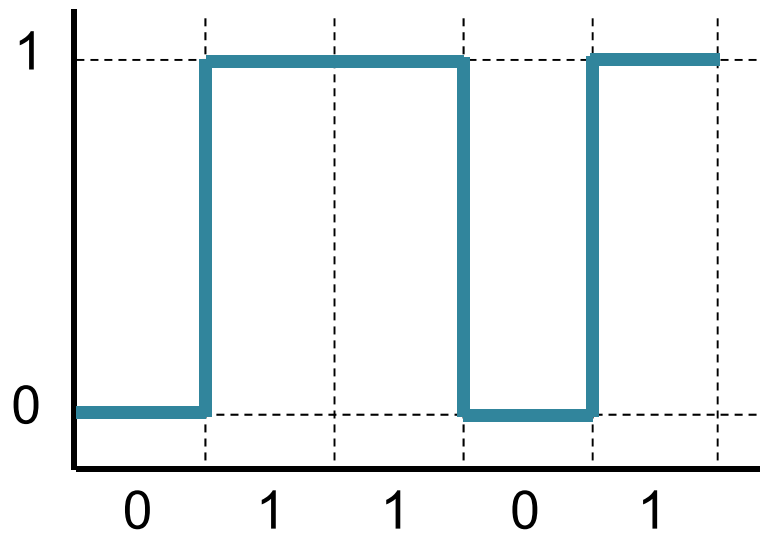
Courtesy of Nikkei Inc.

# GI POFと高精細ディスプレイが慶應大学医学部へ導入

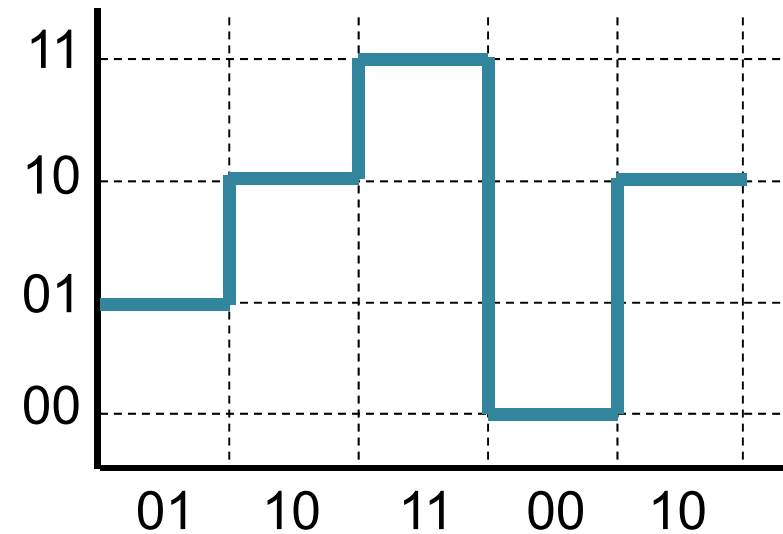


# 高速化にノイズの壁

2-level modulation  
(conventional)



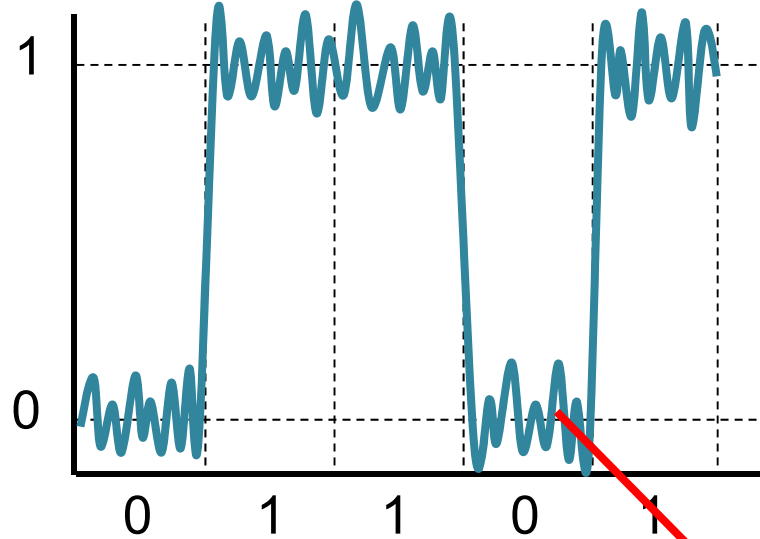
4-level modulation  
(PAM-4)



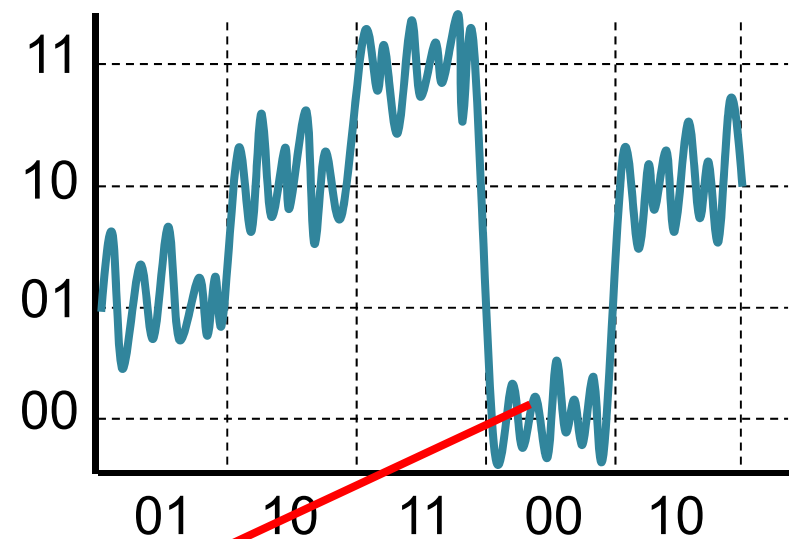
多値伝送は高ビットレートを可能にします。

# 高速化にノイズの壁

2-level modulation  
(従来)



4-level modulation  
(PAM-4)



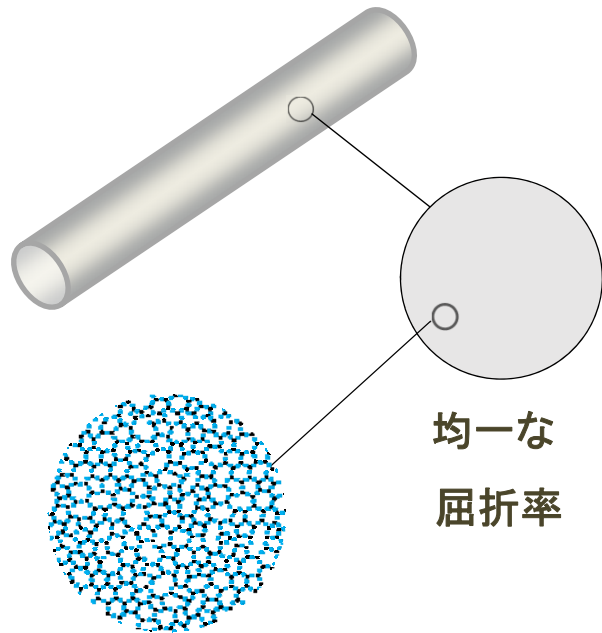
Noise

多値伝送は高ビットレートを可能にします。  
⇒ ノイズ低減



# ミクロの不均一構造

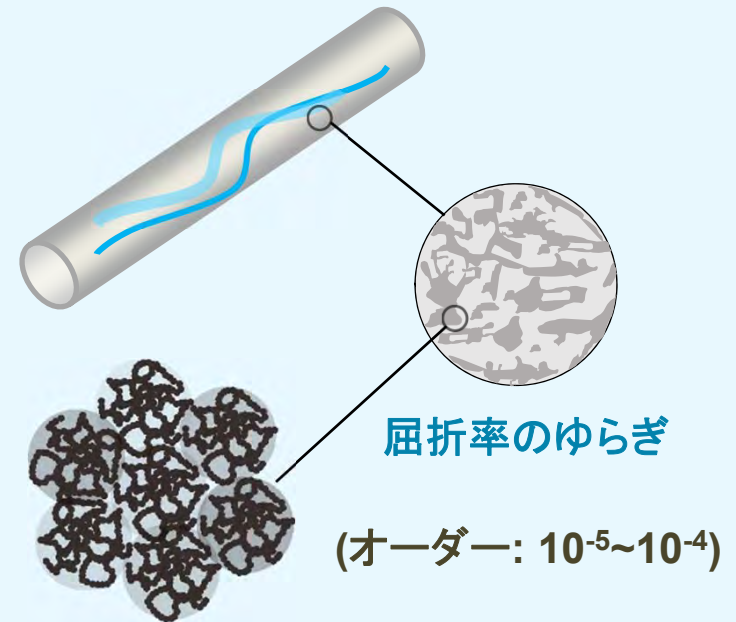
## ガラス光ファイバー



Si-O 共有結合的ネットワーク

本質的に異なる構造

## プラスチック光ファイバー



アモルファスポリマー構造  
コイルの階層構造

**GI POF は、本質的な屈折率の揺らぎにより  
ポリマー特有の光散乱を引き起こす。**

# 慶應義塾大学から提案された POFのためのモード結合理論

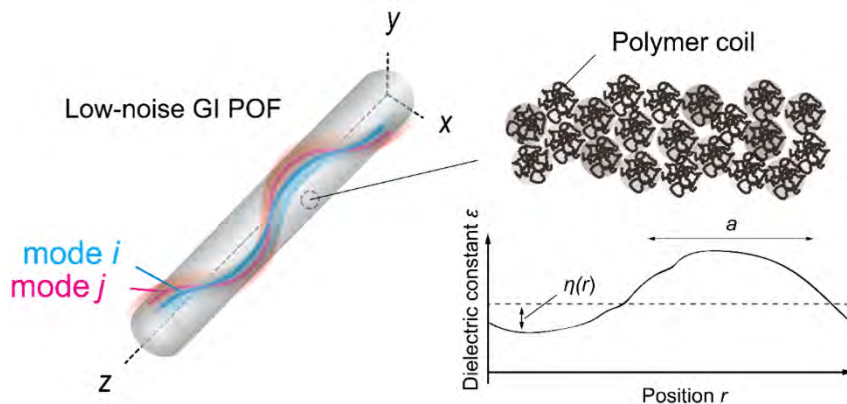
## デバイの光散乱理論

$$V_{V2}^{iso} = \frac{4 \langle \eta^2 \rangle \pi^3}{\lambda_0^4} \int_0^\infty \frac{\sin(\nu sr)}{\nu sr} r^2 \gamma(r) dr$$

$$\gamma(r) = \exp(-r/a)$$

## 電力結合方程式 (D. Marcuse, ベル研, 1974)

$$\frac{\partial P_i}{\partial z} = \sum_{j=1}^N h_{ij} (P_j - P_i)$$



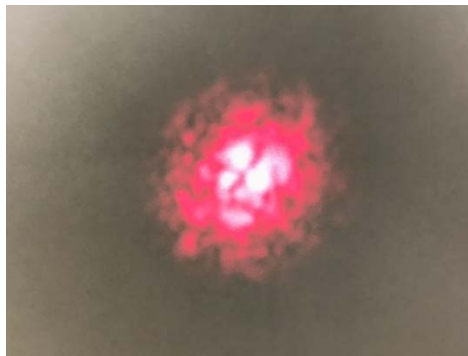
$$h_{ij} = \epsilon_0^2 \langle \eta^2 \rangle \frac{\omega^2 \pi^{3/2} a^3}{8} e^{-\frac{\Delta\beta^2 a^2}{4}} \iint |\mathbf{E}_i^* \cdot \mathbf{E}_j|^2 dx dy$$

## モード結合理論 (慶應義塾大学より提案)

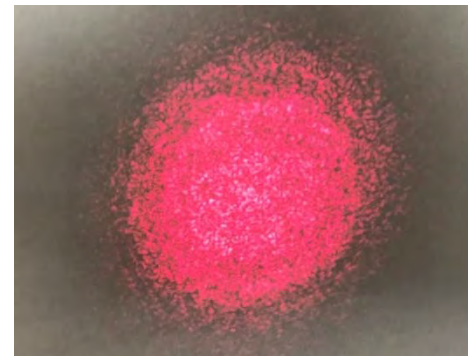
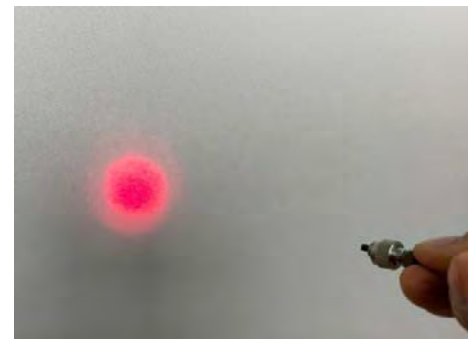
我々は、はじめてミクロの不均一構造による  
GI POFのモード結合理論を導出しました。

# 低ノイズGI POFの出力ビームパターン

シリカ GI MMF



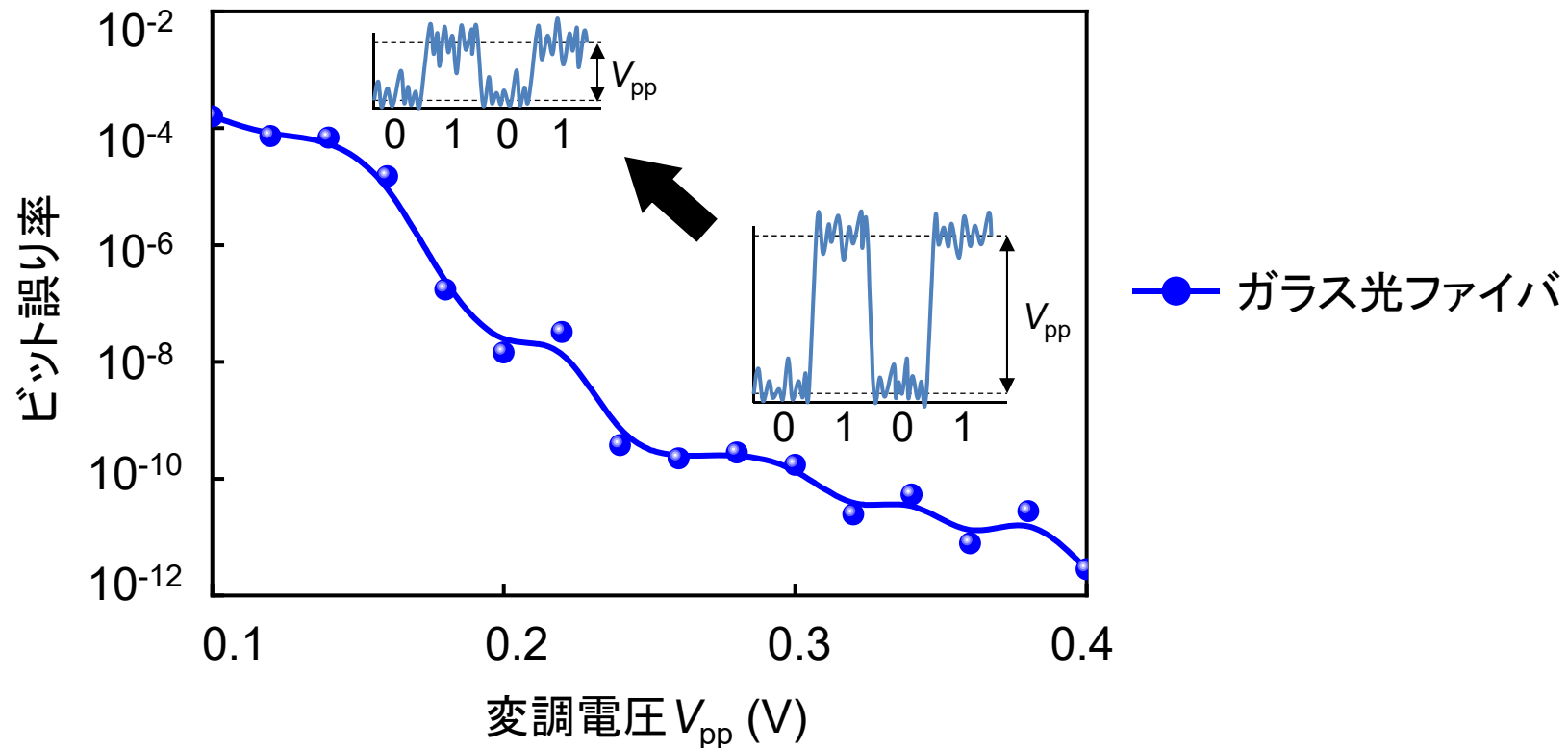
低ノイズ GI POF



完全に異なる出力ビームパターン  
⇒ GI POFの強いモード結合

# ビット誤り率の変調電圧依存性

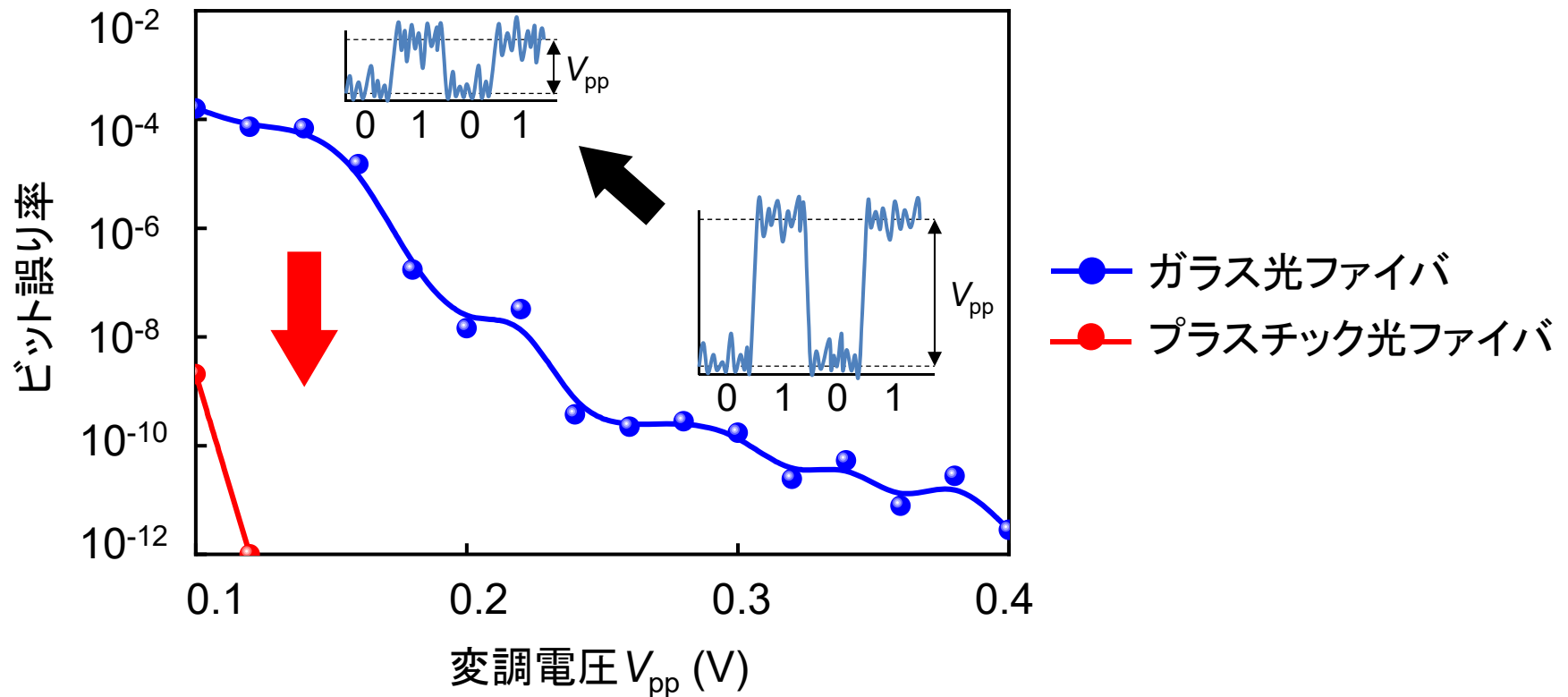
測定結果(伝送速度:10Gb/s、伝送方式:NRZ、ファイバ長:1 m)



低振幅信号伝送(多値伝送)ではビット誤り率が悪化  
⇒エラーフリー伝送(ビット誤り率が $10^{-12}$ 以下)を達成するために  
誤り訂正(FEC)が必要となる

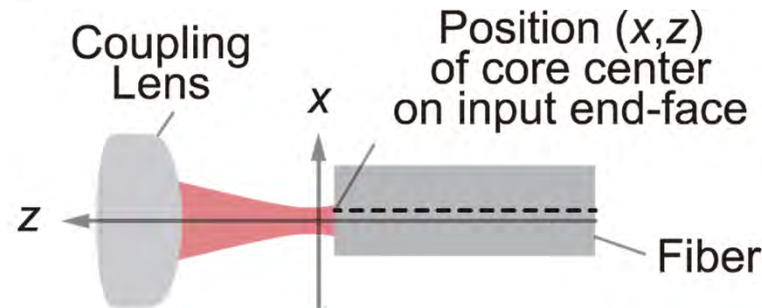
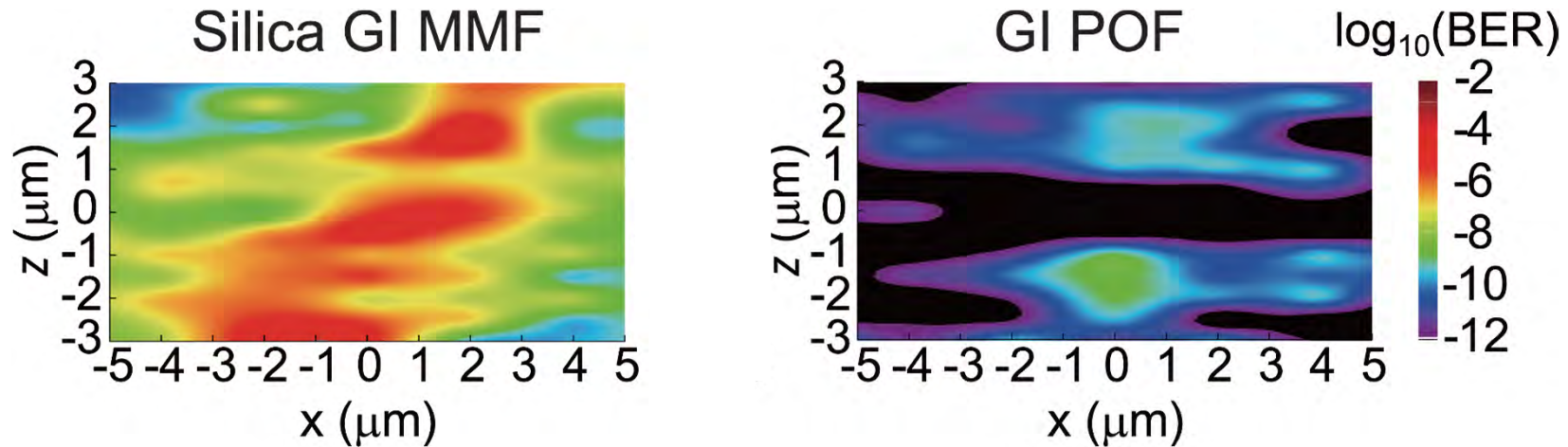
# ビット誤り率の変調電圧依存性

測定結果(伝送速度:10Gb/s、伝送方式:NRZ、ファイバ長:1 m)



プラスチック光ファイバを用いることでビット誤り率が大幅に低減  
⇒FECによる誤データ処理が不要になる


# Launching-dependence of BER ( $V_{pp}=0.1$ )



**Significant improvement of fiber alignment tolerance just by replacing with the low-noise GI POF**

# The 28<sup>th</sup> International Conference on Plastic Optical Fibers

← → ↻ <https://pof2019.org> 🔍 ☆ 🌐 Y ⋮




**POF 2019**  
The 28th International Conference on Plastic Optical Fibers

Conference & Exhibition: November 20th-22nd  
Venue: Fujiwara Hiroshi Memorial Hall of Keio University Hiyoshi Campus, Yokohama, Japan.

[Home](#) | [Call for Papers](#) | [Important Dates](#) | [Committee](#) | [Registration](#) | [Venue](#)

## Information

2019/04/24 [Call for Papers](#), [Important Dates](#), [Committee](#), [Venue](#) has been updated.



### Foreword

We are pleased to announce that the 28th International Plastic Optical Fibers (POF 2019) will be held at Keio University Hiyoshi Campus, Yokohama, Japan from November 20th to 22nd.

Objective & scope of the conference is to discuss the latest developments of POF and a variety of POF related applications. With the development of Internet-of-Things (IoT), internet traffic continues to grow rapidly as the increase of network-connected smartphones, tablets, televisions, etc. This traffic growth will be significantly accelerated by the proliferation of ultrahigh definition (UHD) technologies for a variety of applications.

In this trend, POF is the promising medium for the data transmission in household, datacenter, automobile/airplane,

⬆

# The 28<sup>th</sup> International Conference on Plastic Optical Fibers Nov. 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup>, 2019







慶應義塾大学理工学部創立80周年記念イベント

プラスチック光ファイバー国際会議 (POF2019) スペシャルセッション枠

## KPRI 国際シンポジウム「8 K、5 G時代への新たな展開」

本年、プラスチック光ファイバー (GI-POF) を用いた伝送システムが、2020年東京オリンピックを前に新4K8K衛星放送に向け製品化されました。また本年度は、慶應義塾大学の研究課題が内閣府最先端研開発支援 (FIRST) プログラムに採択されたことを機に、GI-POFの開発の拠点として設立されたKPRI (慶應義塾大学フォトンクス・リサーチ・インスティテュート) の設立10年に当たります。この節目に、国際会議POF2019の初日スペシャルセッションに於いて、KPRI国際シンポジウム「8 K、5 G時代への新たな展開」を開催致します。皆様のご参加をお待ち致しております。

日時：2019年11月20日 (水) 15:00~17:30

会場：慶應義塾大学日吉キャンパス 協生館 藤原洋記念ホール

お申込：無料 <https://pof2019.org/specialsession/ja/>

※上記ホームページから事前登録をお願い致します。

※満席になり次第締め切らせていただきます。

主言語：日本語 (日本語→英語 同時通訳付き)

# KPRI 国際シンポジウム 2019

## 「8K、5G時代への新たな展開」

### Special Session Speakers



**Makoto Suematsu**  
President, Japan  
Agency for Medical  
Research and  
Development (AMED)



**Motoyuki Ii**  
Senior Executive Vice President,  
Representative Member of  
the Board, CTO, CIO, and CDO,  
Nippon Telegraph and Telephone  
Corporation (NTT)



**Keiji Kodama**  
Director of Engineering  
Administration Department,  
Japan Broadcasting Corporation  
(NHK)



**Toshiyuki Umehara**  
Representative Director,  
Senior Executive Vice President,  
and CTO,  
Nitto Denko Corporation



**Yasuhiro Koike**  
Professor, Keio University,  
Director, Keio Photonics  
Research Institute,  
Keio University

# KPRI 国際シンポジウム 2019 「8K、5G時代への新たな展開」

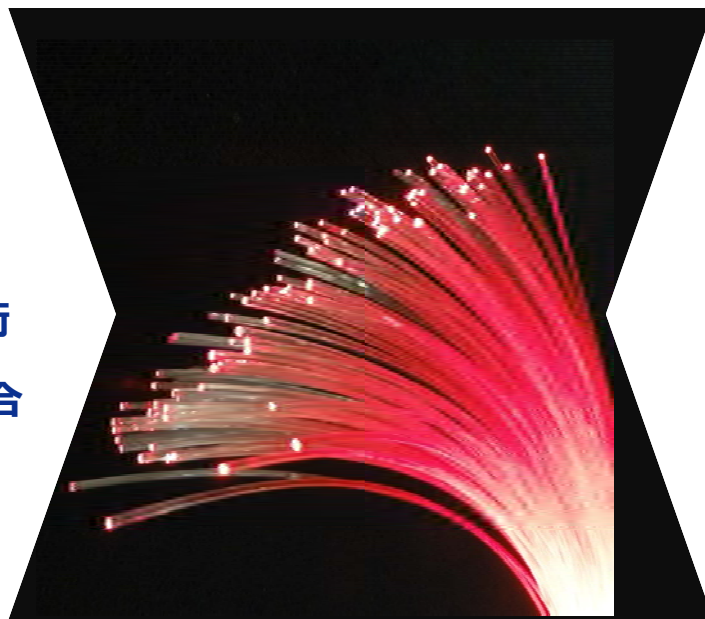


# Nitto・慶應義塾大学 光ケーブル共同研究センター

**Nitto**

Innovation for Customers

- 光学フィルムの押出成形技術
- 光電混載基板における光結合技術



**Keio University**

Tokyo, Japan

- フォトニクスポリマー技術

技術の融合により、新規プラスチック光ケーブルを研究・開発

高速・大容量

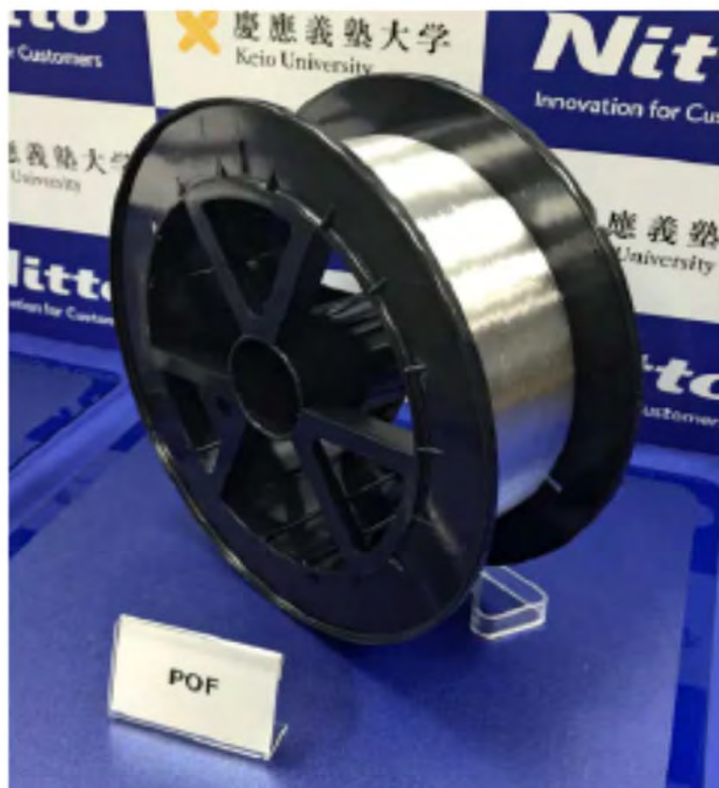
低ノイズ

フレキシブル

高耐熱性

## 慶大と日東電工、低ノイズのプラ製光ファイバー開発

2020/1/6付 | 日本経済新聞 朝刊



日東電工と慶応大学が共同開発したプラスチック製の光ファイバー

慶応義塾大学の小池康博教授らと日東電工は共同で、高速通信に適したプラスチック製の光ファイバーを開発した。内部を通る光の向きを整える工夫をして、誤った信号を送る割合を従来のガラス製の1万分の1以下にした。同社が2020年度にも実用化する。

高速通信などで使われる光ファイバーは一般にガラス製だ。ノイズ除去に特殊な加工が必要でコストがかかり、折れやすく扱いも難しい。代替として期待されるプラスチック製は柔軟性が高く設置しやすいが、普及に向けてはノイズが多いという課題が残る。

小池教授らは、信号を送る方向とは逆向きに進む光が生じることで、ノイズが発生することを突き止めた。複数の材料を組み合わせ、ファイバー内に局所的に光が拡散する構造を作り、逆向きに進む光を減らしてノイズを低減した。家庭やデータセンターなどの通信での実用化を想定する。

2020年1月6日

日本経済新聞 15面

# 屈折率分布型プラスチック光ファイバーの誕生

- 1982** Proposal of GI POF toward data transmission  
Y. Koike, PhD Thesis
- 1988** GI plastic optical waveguide  
Y. Koike et al., Appl. Opt. 27, 486
- 1991** Low-loss GI POF by dopant system  
Y. Koike, JP 3332922 USP 5,541,247 EP 0566744
- 2005** Co-extrusion process for mass production of GI POF  
Keio Univ. & AGC©, NEDO project
- 2014** Ballpoint-pen interconnect for GI POF  
Keio Univ. & Mitsubishi Pencil©
- 2017** Proposal of low-noise GI POF  
Keio Univ., Nitto
- 2021** Proposal of Error-Free GI POF  
Press Release of Keio Univ.



いいね! 15

シェア

ツイート

## 世界初エラーフリーPOF（プラスチック光ファイバ）伝送に成功 – 通信システムの発熱、遅延、コストの問題を一気に解決 –

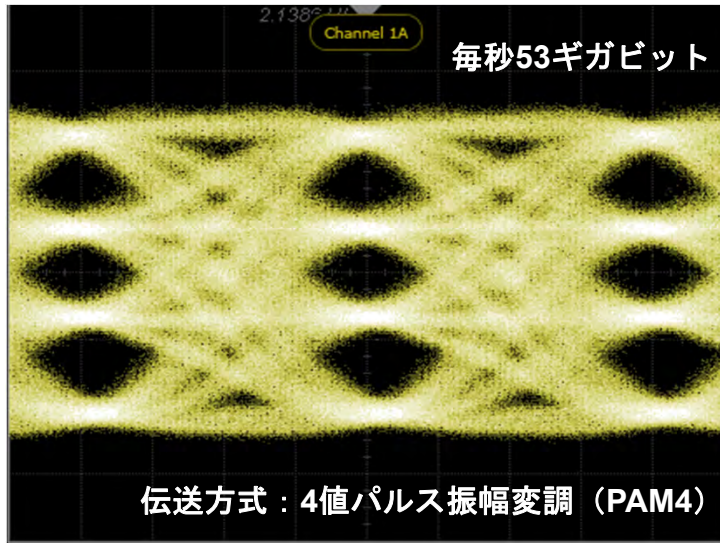
2021/09/24

慶應義塾

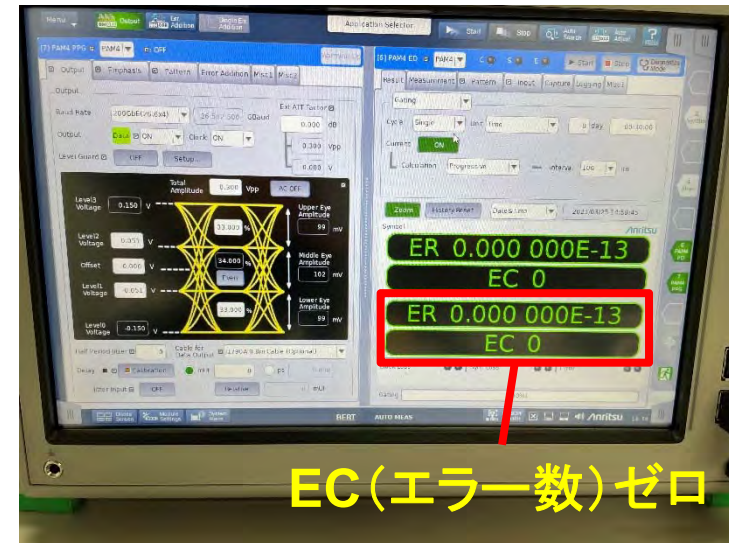
慶應義塾大学新川崎先端研究教育連携スクエアを研究拠点とする慶應フォトニクス・リサーチ・インスティテュート（KPRI）の小池康博教授らの研究グループは、データセンター、車、医療等の短距離通信で課題となっている通信エラーをほとんど発現しないプラスチック光ファイバ（以下、エラーフリーPOF）を開発しました。さらに、このエラーフリーPOFを用いることによって、データセンター通信の次世代標準であるPAM4（Four-level Pulse Amplitude Modulation）方式による毎秒53ギガビットの信号を、現在必要とされている誤り訂正機能を用いることなく、エラーフリーで伝送することに成功しました。

# エラーフリーPOF伝送の実証

## エラーフリー伝送波形



## エラーフリー測定



データセンター向け1レーン毎秒53ギガビットの  
POFエラーフリー伝送を世界に先駆けて達成

Y. Koike and K. Muramoto, "Error-free PAM-4 transmission by a high-speed plastic optical fiber without forward error correction," *Optics Letters*, Vol. 46, No. 15, 1st August 2021.



# エラーフリーPOF



2021年4月13日 日本経済新聞  
「データセンター 国内誘致を促進  
政府、成長戦略会議で議論 重要情報の流出防ぐ」

日本経済新聞 2021年(令和3年)4月13日(火曜日)

# データセンター 国内誘致を促進

## 重要情報の流出防ぐ

### 政府、成長戦略会議で議論

政府は12日の成長戦略会議で、データセンターの国内誘致に向けた促進策の議論を進めた。国内外の事業者が日本でのデータセンター稼働の拡大を促すための後援を検討する。データセンターの国内誘致は、デジタル経済の成長を促す重要な役割を果たす。政府は、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。

政府は12日の成長戦略会議で、データセンターの国内誘致に向けた促進策の議論を進めた。国内外の事業者が日本でのデータセンター稼働の拡大を促すための後援を検討する。データセンターの国内誘致は、デジタル経済の成長を促す重要な役割を果たす。政府は、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。

データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。

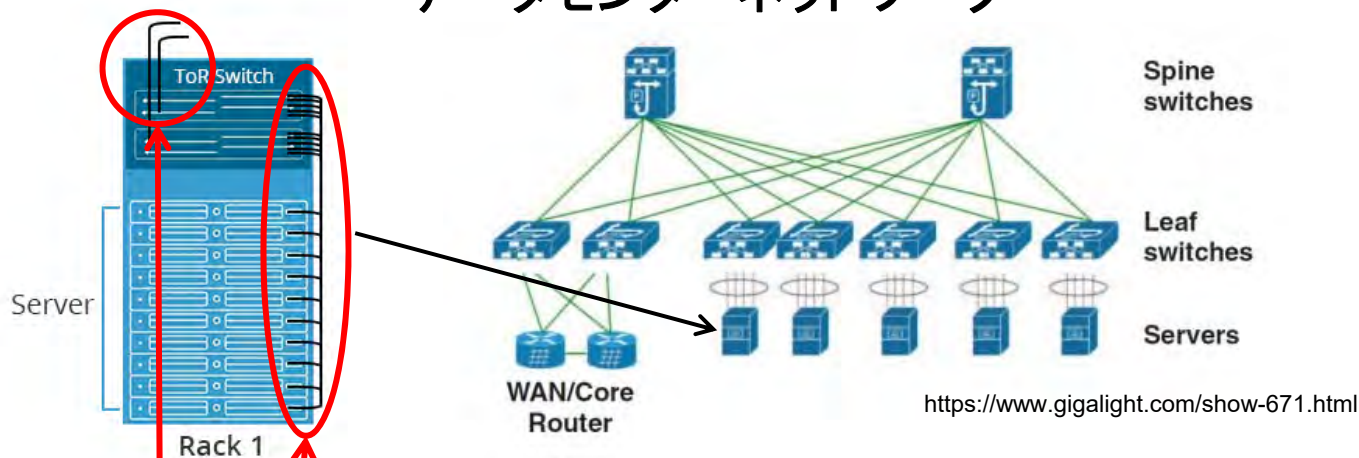
データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。また、データセンターの国内誘致を促進するため、重要情報の流出を防ぐための対策を講じる。

送信時に遅延が生じる

機器の冷却に大量の電力とコスト

# データセンターにおけるGI POFの提案

## データセンターネットワーク



A End	Z End	Volume	Reach (max)	Medium	Cost Sensitivity	Market Space
Server ‡	TOR	10k – 100k	3 m	Copper	Extreme	LAN
TOR	LEAF	1k – 10k	20 m	Fiber (AOC)	High	
LEAF	SPINE	1k – 10k	400 m	SMF	High	
SPINE	DCR	100 – 1000	1,000 m	SMF	Medium	Campus
DCR	Metro	100 – 300	10 - 80 km	SMF	Low	WAN

‡ Server-TOR links may be served by breakout cables

Y. S. Son, ECOC 2018, Workshop WS01 “Optical fibres”.

# エラーフリーPOFが通信システムを変える

## 既存の通信システムの課題＝「誤データ処理」

- 「誤データ処理」のために、誤り訂正や波形整形等の信号処理が必須となっている
- しかし、これらの処理のために、①通信遅延 ②発熱 ③コストが大幅に増大する



エラーフリーPOF(プラスチック光ファイバ)により  
①②③を一気に解決



通信遅延、発熱、コストの原因となる補正回路が不要

“エラーフリーPOFが通信システム自身を変える”

## 通信エラーほぼゼロの光ファイバー 慶大が開発

[コラム](#)[+フォローする](#)

2021年9月24日 2:00 [有科会員限定]



保存



慶応義塾大学の小池康博教授らの研究チームは、通信エラーがほぼ発生しないプラスチック製の光ファイバーを開発した。内部の光の通り方を制御し、誤送信の原因となる通信時のノイズを減らした。データセンターの省電力化や自動運転車における通信遅延の低減につながる。2022年以降の商用化を目指す。



## 光ファイバーにプラ製という革新 脱炭素や自動運転に

編集委員 小玉祥司

[小玉 祥司](#)

[+フォローする](#)

2021年10月5日 5:00 [有料会員限定]



保存



ネット社会のインフラに欠かせない光ファイバーに革新が起こりつつある。従来脇役だったプラスチック製光ファイバー（POF）の技術が進展、データセンターの電力消費削減や遅れのないデータ処理などへの期待が高まっている。大きな可能性を秘めるこの技術は実は日本発。脱炭素や自動運転などへの貢献が見込まれる。

# Beyond 5G 推進戦略の全体像

- **Beyond 5G推進戦略**は、  
①2030年代に期待されるInclusive、Sustainable、Dependableな社会を目指した**Society 5.0実現のための取組**。  
②Society 5.0からバックキャストして行う**コロナに対する緊急対応策**かつ**コロナ後の成長戦略を見据えた対応策**。
- 本戦略に基づく**先行的取組**については、大阪・関西万博が開催される**2025年をマイルストーンとして世界に示す**。

## 基本方針

### グローバル・ファースト

- 国内市場をグローバル市場の一部と捉えるとともに、我が国に世界から人材等が集まるようにするといった双方向性も目指す。

### イノベーションを生むエコシステムの構築

- 多様なプレイヤーによる自由でアジャイルな取組を積極的に促す制度設計が基本。

### リソースの集中的投入

- 我が国のプレイヤーが**グローバルな協働に効果的に参画**できるようになるために必要性の高い施策へ一定期間集中的にリソースを投入。

政府と民間が一丸となって、国際連携の下で戦略的に取り組む

### 研究開発戦略

先端技術への集中投資と、大胆な電波開放等による

**世界最高レベルの研究開発環境の実現**

2025年頃から順次要素技術を確立

### 知財・標準化戦略

戦略的オープン化・デファクト化の促進と、海外の戦略的パートナーとの連携等による

**ゲームチェンジの実現**  
〔サプライチェーンリスクの低減と市場参入機会の創出〕

Beyond 5G必須特許シェア10%以上

### 展開戦略

5G・光ファイバ網の社会全体への展開と、5Gソリューションの実証を通じた産業・公的利用の促進等による

**Beyond 5G readyな環境の実現**

2030年度に44兆円の付加価値創出

Beyond 5Gの早期かつ円滑な導入

Beyond 5Gにおける国際競争力強化

インフラ市場シェア3割程度  
デバイス・ソリューション市場でも持続的プレゼンス

産学官の連携により強力かつ積極的に推進

## Beyond 5G推進コンソーシアム

- ①各戦略に基づき実施される具体的な取組の共有、②国内外の企業・大学等による実証プロジェクトの立ち上げ支援、③国際会議の開催

※総務省の部局横断的タスクフォースが戦略の進捗を管理。毎年プログレスレポートを作成・公表し、必要に応じて戦略を見直す。

## 「Beyond 5G研究開発促進事業（一般型）」に係る令和4年度新規委託研究の公募（第1回）の結果

### エラーフリー-POFによる革新的通信システムの開発※1

提案者：学校法人慶應義塾（代表提案者）

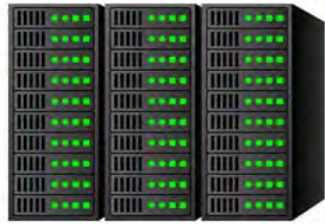
#### 概要非表示

概要：Beyond 5G時代において大容量、省電力、低遅延のデータ通信を実現する革新的エラーフリー-POF（プラスチック光ファイバー）伝送システムを開発する。Beyond 5G時代では大容量かつ高品質なデータ伝送が当たり前求められるが、通信の高速化に伴いデータを誤りなく伝送することが困難になる。伝送エラーを補正するためにはFEC（Forward Error Correction）に代表される誤り訂正処理が必要になるが、この信号処理のために通信遅延や消費電力が増加することが問題となる。今回提案するエラーフリー-POFは高速通信における誤り訂正処理を不要とするものであり、通信システムの省電力化、低遅延化に大きく貢献できる。



# エラーフリーPOFのこれから

## データセンター



DX時代の到来によりデータ通信量が爆発的に増大しており、データセンターの**省電力化が喫緊の課題**となっている。

©DESIGNALIKE

## 自動運転車



自動運転車の高い安全性を実現するためには、**超低遅延のリアルタイム通信**による制御が不可欠となる。

pixta.jp - 28933344

## ロボティクス



産業用・医療用ロボットでは、**リアルタイム通信制御**による精密かつ正確な動作の実現が重要となる。

## 高精細映像伝送



4K8Kの真の臨場感・没入感を味わうためには、**大容量の映像データをリアルタイムに伝送**することが重要となる。

**省電力・リアルタイムのエラーフリーPOF伝送システムは次世代情報産業を支えるコアテクノロジーとなる**

## Back to the Fundamentals ファンダメンタルズに戻ることの大切さ

ポリマーは高性能なフォトニクス分野には不向きであると漠然と考えられていたが、それから三十年が過ぎ、世界最速プラスチック光ファイバーや高画質ディスプレイに代表されるフォトニクスポリマーが誕生してきた。1900年代前半のEinsteinやDebyeの「光散乱とは」といった本質に迫る論文は私のバイブルとなった。ブレイクスルーをしようとするほど、ファンダメンタルズに戻ることの大切さを学んだ。

ご清聴ありがとうございました。

