

石英系光ファイバ技術発展の系統化調査

2

Historical Survey of the Development of Silica Optical Fiber Technology

河内 正夫 Masao Kawachi

■ 要旨

長距離伝送媒体としてのガラス光ファイバの可能性を指摘したのは英国 STL (Standard Telecommunication Laboratories) に勤務していた C.K. Kao であり、1966 年のことであった。当初は半信半疑であった NTT (当時日本電信電話公社) が光ファイバの研究を開始したのは 1971 年のことで、米国のガラスメーカ Corning 社による 1970 年の光ファイバ (20dB/km @ 0.6328 μ m 波長) 発表の直後であった。さらに 1974 年の Bell 研究所の MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法による石英系光ファイバ (1.1dB/km @ 1.02 μ m) 作製報告に接した NTT は 1975 年に電線 3 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線) との共同研究体制を整え、まずは MCVD 法を改良して石英系光ファイバの長波長帯 (1.3 μ m と 1.55 μ m) 開拓と極低損失化 (0.2dB/km @ 1.55 μ m) に進め、さらに日本発の量産製法 VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 法の確立に成功した。現在、世界の光ファイバの約 60% (日本では 90%以上) が VAD 法を基本として製造されている。

上記の光ファイバ作製技術の進歩と同期して通信用半導体レーザなどの開発が進み、光ファイバを実際の伝送路として使うために必要な技術群 (光ファイバ接続、ケーブル構造、布設工法等) も整えられ、1981 年には NTT 公衆通信網への多モード光ファイバ通信システム (32Mb/s と 100Mb/s) の導入が行われた。NTT 民営化直前の 1985 年 2 月には本命の VAD 単一モード光ファイバによる日本縦貫光ファイバ幹線網 (旭川から鹿児島まで 3,400km 長、400Mb/s) が開通し、世界初の本格的な単一モード光ファイバ通信網となった。

その後の半導体レーザの高性能化と単一モード光ファイバの波長分散制御を含む時分割多重 (TDM: Time-Division Multiplexing) 方式の進歩、光ファイバ増幅器の開発と波長多重 (WDM: Wavelength-Division Multiplexing) 方式の導入、さらに最近のデジタルコヒーレント方式の導入に支えられた光通信技術の進展は目覚しく、今日では光ファイバ 1 本当りの伝送容量が 10Tb/s (100Gb/s \times 100 波長) 級の幹線系システムも商用化されている。1981 年 (100Mb/s) に比べて 5 桁の容量向上である。

幹線系に比べて経済化要求が厳しいアクセス系については 2001 年から PON (Passive Optical Network) 方式による FTTH (Fiber-to-the-Home) サービスが本格スタートし、日本の FTTH 加入者数は 2017 年度末までに 3,000 万件を突破見込みである。伸びが著しいスマートフォンを含む携帯電話網も、ユーザ直近の無線区間を除いて、アンテナ基地局までは光ファイバ回線が担っている。

今日の光ファイバ通信網を構成する技術の広がりや、ハードウェアからソフトウェアまで広範囲に及んでいるが、本調査では、人類が発明した究極の伝送媒体とも言える石英系光ファイバの開発に軸足を置き、日本が世界に誇れる光ファイバ通信技術の発展経緯を報告する。

■ Abstract

Charles K. Kao of the British research center, STL (Standard Telecommunication Laboratories) proposed the potential of silica optical fiber as a long-distance transmission medium in 1966. At first, NTT (then Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation) had doubts about Kao's proposal, but eventually started optical fiber research in 1971, just after the 1970 achievement of 20 dB/km optical fiber loss (at a wavelength of 0.6328 μm) by the U.S. glass manufacturer Corning. NTT was also largely encouraged by a 1974 Bell Laboratories report on 1.1 dB/km loss (at 1.02 μm) attained by using the modified chemical vapor deposition (MCVD) method, and in 1975 rapidly organized a joint R&D program with three Japanese cable manufacturers, Sumitomo Electric, Furukawa Electric, and Fujikura Cable. They improved the MCVD method to open the longer wavelength windows of 1.3 μm and 1.55 μm for silica optical fiber and attain the ultra-low loss of 0.2 dB/km at 1.55 μm . They further succeeded in establishing the Japan-originated vapor-phase axial deposition (VAD) method, highly suitable for the mass production of optical fiber. Today, approximately 60% of optical fiber in the world, and over 90% in Japan, is produced using VAD.

In conjunction with the above-mentioned progress of optical fiber fabrication technology, semiconductor lasers operating at 1.3 μm and 1.55 μm wavelengths were developed, together with other key technologies (such as optical fiber connection, cable fabrication and installation) required for constructing practical optical fiber transmission systems. In 1981, multimode optical fiber transmission systems of 32 Mb/s and 100 Mb/s were introduced into NTT's public communication network. In February 1985, just prior to the privatization of NTT, the 400 Mb/s trunk line, running through Japan lengthwise—a distance of 3,400 km from Asahikawa to Kagoshima—came into service using VAD single-mode optical fibers. This became the first full-fledged single-mode optical fiber telecommunication network in the world.

Since then, a tremendous increase in transmission capacity has been achieved mainly by 1) the progress of time-division multiplexing (TDM) technology with higher-performance lasers and dispersion-controlled single-mode fibers, 2) the invention of the optical fiber amplifier, 3) the adoption of wavelength-division multiplexing (WDM) technology, and more recently by 4) the development of digital coherent technology. Today, even trunk line systems with a 10 Tb/s (100 Gb/s x 100 wavelengths) capacity per fiber are in commercial service. This is five orders of magnitude larger than the capacity in 1981 (100 Mb/s).

As for access systems, which have more exacting economical requirements than trunk line systems, fiber-to-the-home (FTTH) service using passive optical network (PON) architecture started in earnest in 2001, and the number of FTTH subscribers in Japan is expected to exceed 30 million by the end of FY 2017. With increasing numbers of smartphone users, even the mobile communication networks are supported by optical fiber lines up to the antenna base station, with just the last mile being a wireless connection.

Though the technologies making up today's optical fiber communication networks cover a wide range of both hardware and software, this survey focuses on the development of silica optical fiber—the ultimate transmission medium ever invented by humankind—and describes the history of Japan's world-class optical fiber communication technologies.

■ Profile

河内 正夫 *Masao Kawachi*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

- 昭和 48 年 3 月 東京工業大学大学院修士課程・電子物理工学
専攻修了
- 昭和 48 年 4 月 日本電信電話公社（現 NTT）入社、以来、
液晶表示、石英系光ファイバ、プレーナ光波
回路の研究開発に従事
- 昭和 53 年 12 月 液晶の電気光学効果に関する研究で東京工業
大学より工学博士号受領
- 昭和 57 年 2 月 カナダ通信研究所（CRC）交換研究員（1 年間）
- 平成 8 年 7 月より研究マネジメントに携わり、NTT 光エ
レクトロニクス研究所長、
NTT 未来ねっと研究所長、NTT 先端技術総
合研究所長等を歴任
- 平成 17 年 7 月 NTT エレクトロニクス株式会社（NEL）入
社、取締役（技術開発担当）
- 平成 21 年 7 月 同社・技術顧問 & NEL フェロー
- 平成 26 年 3 月 同社を退職
- 平成 29 年 4 月 国立科学博物館 産業技術史資料情報セン
ター主任調査員

電子情報通信学会名誉員（フェロー）、IEEE フェロー

■ Contents

- | | |
|---------------------------------------|-----|
| 1. はじめに | 112 |
| 2. 光通信の夜明け前 | 115 |
| 3. 通信用石英系光ファイバの誕生 | 123 |
| 4. MCVD 法の改良で日本が先導した
長波長帯の開拓 | 136 |
| 5. 日本が開発した量産製法「VAD 法」 | 145 |
| 6. 初期の光ファイバ通信システム実験と
商用化努力 | 164 |
| 7. その後の発展概要 | 186 |
| 8. おわりに | 196 |

1 | はじめに

黎明期の模索や試行錯誤を経て1970年代に入ると、米国のCorning社とBell研究所、そして日本のNTTと電線3社（住友電工、古河電工、藤倉電線）の努力によって低損失な光ファイバ（中心部は高純度な石英系ガラスからなる）の開発が進み、NTTでは1981年に光ファイバ通信システムの最初の商用導入が行われた。そして現在、光ファイバ通信網は、図1.1に示すように、幹線系からアクセス系（加入者系）まで、高速情報通信を支える最重要インフラになっている。光ファイバとは緑が薄いように見える携帯電話網も、ユーザ直近のアンテナ基地局までは光ファイバ回線が担っている。

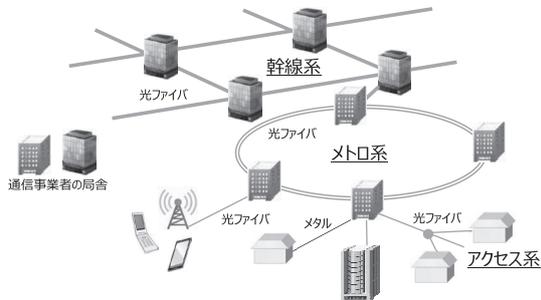


図 1.1 高速情報通信を支える光ファイバ通信網の構成

光ファイバ通信の基本は、図1.2に示すように、伝送媒体としての石英系光ファイバ、発光素子としての半導体レーザー、受光素子としてのフォトダイオードであるが、長距離幹線系では途中で光中継器が配置される¹⁾。発光素子（半導体レーザー）の駆動法としては、直接変調法と外部変調法があるが、伝送容量向上に有効な外部変調法の適用は1990年代以降であった。さらに光ファイバ増幅器の開発や波長多重方式の導入などを含めて、今日の光ファイバ通信網を構成する技術の広がりには多岐にわたっているが、本報告では、石英系光ファイバ技術の観点から、光ファイバ通信の発展経緯を紹介する。

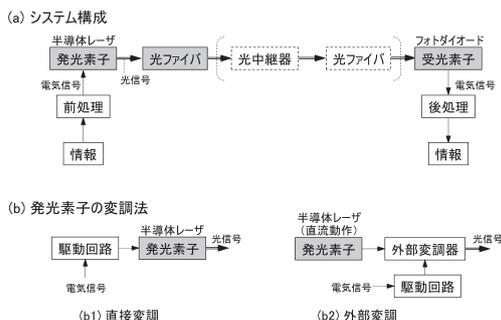


図 1.2 光ファイバ通信システムの基本構成
(参考文献¹⁾をもとに筆者作成)

報告を進める上で基本となる石英系光ファイバの三種類の構造を図1.3に示したが、いずれも、光が伝搬するコアと、その周囲を同心円状に覆うクラッドから構成され、コアの屈折率をクラッドの屈折率より少し高く設定することにより、光の全反射現象を利用して光信号をコアの中に閉じ込めて伝送させる。

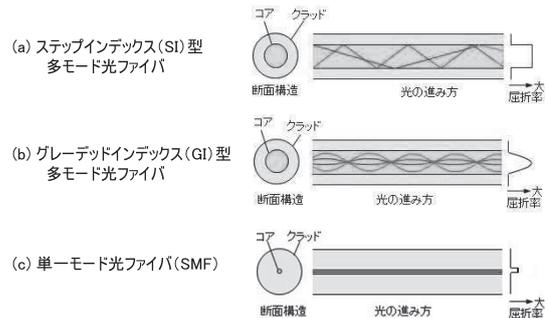


図 1.3 石英系光ファイバの基本構造

光ファイバ中の光の伝搬の仕方には幾通りかあり、それぞれをモードという。多数のモードを通すものを多モード光ファイバといい、その中でもコア内の屈折率分布が一樣である光ファイバをステップインデックス(SI: Step Index)型多モード光ファイバ(図1.3a)といい、コア内の屈折率分布がゆるやかに放物線状に変化した光ファイバをグレーデッドインデックス(GI: Graded Index)型多モード光ファイバ(図1.3b)という。インデックスとは屈折率(refractive index)のことである。

光ファイバのコア径を小さくしていくと、伝搬できるモードの数が減っていき、ついには基本モード(HE₁₁モード)だけが残るが、このように一つのモードのみを通す光ファイバを単一モード光ファイバ(SMF: Single-Mode Fiber、図1.3c)という。標準的な石英単一モード光ファイバのコア直径2aは8~10μm程度、コア・クラッド間の比屈折率差Δは0.2~0.3%に設定されている。多モード光ファイバであるSI型やGI型の代表的なコア直径2aは50μm、比屈折率差Δは1%である。

SI型多モード光ファイバ中の光の伝搬は、コアとクラッドの界面で全反射を繰り返して行われるため、コア中心軸に沿って伝わる光(最低次モード)と全反射を数多く繰り返しながら伝わる光(高次モード)では光路長が異なる。即ち、光ファイバ端面に入射された光パルスは他端に達するまでに、光路長に応じた時間で伝搬し、モード毎に異なる光路間の差によって

光パルスの到達時間に差（モード分散）を生じ、出射パルス幅が広がることになる。これに対し、GI型多モード光ファイバでは、コア周辺部の低い屈折率領域を通る高次モード光は伝搬速度が速められ、高い屈折率領域を伝搬する低次モード光は遅くなる。その結果、高次モードと低次モードの伝搬時間差は減少し、伝送帯域は1桁ほど向上する。最低次の基本モード（HE₁₁）のみが伝搬する単一モード光ファイバにはモード分散はなく、最も広帯域である。

光ファイバの多モード動作や単一モード動作は円柱座標系でMaxwell方程式を解くことによって導かれるが、最も基本的なVパラメータを記すと以下のようになる²⁾。

$$V = (2\pi / \lambda) a \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}$$

コアの屈折率 n_1

クラッドの屈折率 n_2

コア直径 $2a$

波長 λ

比屈折率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$

$V \leq 2.405$ の時、光ファイバ内を伝搬するのは基本モード（HE₁₁）のみになるが、ある波長で単一モードであっても、波長が異なると必ずしも単一モードにならない。例えば、 $n_1 = 1.462$ 、 $n_2 = 1.458$ ($\Delta = 0.274\%$) で $2a = 8\mu\text{m}$ の光ファイバは、 $\lambda \geq 1.18\mu\text{m}$ で単一モード動作になるが、 $\lambda < 1.18\mu\text{m}$ では高次モード光が励振され多モード（数次モード）動作となる。ここで、波長 $1.18\mu\text{m}$ のことを遮断波長（カットオフ波長 λ_c ）と呼ぶ。

実際に石英系光ファイバを製造するには、所望の光ファイバと断面構造が相似の大口径のガラス母材（プリフォーム）を作製し、それを高温の電気炉で加熱して、標準の $125\mu\text{m}$ (0.125mm) 外径になるよう一挙に線引きし、表面を樹脂で被覆しながら、ドラムに巻き取ることによって行われる。樹脂被覆された石英系光ファイバの引張強度は、同じ直径のピアノ線の約2.5倍であり、意外に丈夫である。

樹脂被覆の程度によって、図1.4に示すように光ファイバの呼称が変わり、線引きと同時に外径 0.25mm 程度に被覆（一次被覆）したものをファイバ素線と呼ぶ。さらに別工程で外径 0.9mm 程度にまで二次被覆したものをファイバ心線と呼ぶ。4心や8心の素線をテープ状に並べて被覆したものもあり、テープ心線と呼ばれる。さらにラフな扱いにも耐えるよう緩衝材（アラミド樹脂）で保護した光コードや、アクセス系の1,000心光ケーブルや海底用の光ケーブルなど、多種多様な光ファイバケーブルが商用化されている。

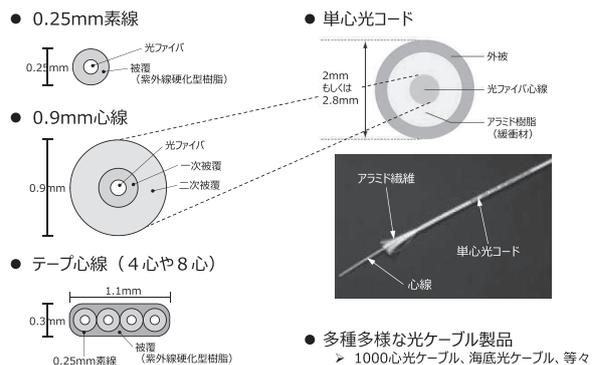


図 1.4 樹脂で被覆されている石英系光ファイバ

ここで少し歴史を遡ると、図1.3に示した三種類の光ファイバ構造自体は1960年代中頃には知られていた²⁾。例えばGI型光ファイバについては、東北大学の西澤潤一らによって1964年に特許出願され、光通信応用についても言及されていた。しかし、窓ガラスと類似の多成分系ガラスからなる当時の光ファイバは光伝搬損失が大きく（ $\sim 1,000$ dB/km）、1メートル程度の長さの光ファイバ束（胃カメラ用ファイバスコープ等）としての用途が主であり、長距離の光通信用とするには大きな壁があった。実際、1960年のルビーレーザー発振（波長 $0.6943\mu\text{m}$ ）や1961年のHeNeレーザー発振（波長 $0.6328\mu\text{m}$ ）を契機として、Bell研究所やNTT研究所の基礎研究者は光通信への関心を深めていたが、光伝搬損失が大き過ぎる光ファイバ通信ではなく、レーザービームを用いた空間光通信を有望視していた。さらに実用化志向が強い伝送技術者は、それまでの同軸ケーブル方式の後継として、得体が知れない光通信方式ではなく、ミリ波導波管方式（内径 50mm 程度の鋼管を利用）の実用化を目指していた。

そんな当時の常識を破ろうとしたのが、英国STL (Standard Telecommunication Laboratories) に勤務していたC.K. Kaoであった。Kao (1933年、上海生まれ) は、1966年の論文発表³⁾を通じて、石英ガラス中の遷移金属などの不純物を徹底的に除去すれば低損失 (20dB/km 以下) な通信用光ファイバを実現可能であることを、理論検討と予備実験に基づいて提案したのである。「 20dB/km (1km で $1/100$ に減衰)」は、当時の通信用の同軸ケーブルの損失値に相当していた。

Kaoの提案は英国内を除いて真剣には取り上げられなかったが、Kaoは米国のBell研究所をはじめとする有力な研究機関を訪れて、自分の考えを説明し、通信用光ファイバ開発の重要性を説いて回った。1967年にはNTT（当時日本電信電話公社）の武蔵野研究所でも講演したが、残念ながら聴衆の反応は前向きで

はなかった。「厚さが1kmものガラスを通して、その先が少しでも見える」などとは、当時の研究者や技術者にとっては夢物語のように思えたのであろう。

ところが1970年になって、それまで通信技術とは無縁だった米国の老舗ガラスメーカー Corning 社が、Kao の提案に応えるような形で、当時としては驚くほど低損失 (20dB/km@HeNe レーザ波長 0.6328 μ m) な石英系光ファイバの作製を発表した⁴⁾。同じ1970年には Bell 研究所等が半導体レーザ (GaAlAs 系で波長 0.85 μ m) の室温連続動作に成功したこともあって、小型な半導体レーザを光源とし、細径の光ファイバを伝送路とする光ファイバ通信が次世代の大容量通信システムの有力候補として注目されるようになった。その先見性を後になって高く評価された Kao は1996年に日本国際賞、2009年にノーベル物理学賞を受賞することになる。

上記のような歴史を踏まえて、本報告では、まず第2章「光通信の夜明け前」で、光ファイバ通信が「非常識」であった1960年代以前の諸事情について紹介する。続いて第3章「通信用石英系光ファイバの誕生」では、Kao の提案 (1966年) に沿うように Corning 社によって1970年に「20dB/km@0.6328 μ m」ファイバが発表され、1974年の Bell 研究所の MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法による「1.1dB/km@1.02 μ m」ファイバ実現に至るまでの経緯を述べる。

第4章「MCVD法の改良で日本が先導した長波長帯の開拓」では、NTTと電線3社の共同研究により MCVD法の改良が行われ、1976年に低損失な SI 型多モード光ファイバ (0.47dB/km@1.2 μ m) が開発され、さらに1979年の極低損失 (0.2dB/km@1.55 μ m 帯) 単一モード光ファイバ実現に至るまでの経緯を紹介する。第5章「日本が開発した量産製法「VAD法」」では、日本オリジナルの VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 法が多くの難題を克服して石英系光ファイバ量産製法として定着するまでの経緯を述べる。

第6章「初期の光ファイバ通信システム実験と商用化努力」では、1976年頃からの所内実験や現場

試験を経て、まずは GI 型多モード光ファイバによる 32Mb/s と 100Mb/s 伝送システムの商用化 (1981年)、その後は VAD 単一モード光ファイバによる 400Mb/s システム商用化 (1983年)、さらに 1.6Gb/s 伝送システム商用化 (1987年) に至るまでの経緯を述べる。幹線系に比べると経済化要求が厳しく、順風満帆ではなかった加入者系 (アクセス系) への光ファイバ導入努力についても紹介する。

NTT は、「加入者系にも単一モード光ファイバを適用する」との重要な決定を1988年10月に行ったが、第7章「その後の発展概要」では、石英系単一モード光ファイバの潜在能力をフルに引き出そうとした今日までの歩みを、1) 光幹線系の伝送容量の飛躍的な進展、2) PON (Passive Optical Network) 技術による FTTH 実現、3) 光ファイバ通信網を支えている石英系プレーナ光波回路技術の順に概説する。

本報告を通じて、石英系光ファイバは人類が発明した究極の伝送媒体であり、その研究開発と実用化に日本が大きな役割を果たしてきたことを伝えることができれば幸いである^{5) 6)}。

参考文献

- 1) 滑川敏彦, 森永規彦:「光通信技術」, テレビジョン学会誌, Vol. 38, No.5, pp.425-433, 1984.
- 2) 末松安晴, 伊賀健一:「光ファイバ通信入門 (改定5版)」, オーム社, 2017.
- 3) C.K. Kao and G.A. Hockham: “Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies,” Proc. IEE, Vol.113, No.7, pp.1151-1158, 1966.
- 4) F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer: “Radiation losses in glass optical waveguides,” Appl. Phys. Lett., Vol.17, No.10, pp.423-425, 1970.
- 5) 伊澤達夫:「光ファイバ開発の黎明期」, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J100-C, No.10, pp.417-423, 2017.
- 6) 河内正夫:「石英系光ファイバの低損失化と量産製法 (VAD法) の開発」, NTT 技術ジャーナル (2013.3).

2 | 光通信の夜明け前

本章では、1970年にCorning社によって当時としては驚くほど低損失な光ファイバ (20dB/km@0.6328 μ m) 作製が発表される以前の光通信関連の諸事情について、1) 光通信事始め、2) 画像伝達用光ファイバ束、3) レーザビームによる空間光通信、4) 集束型光ファイバ、5) Kaoの先駆的な提案、そして低損失光ファイバ誕生以前には実用化が近いと期待されていた、6) ミリ波導波管の順に概説する。

2.1 光通信事始め

遠く離れた人に可能であれば瞬時に情報を伝えたいとの思いは古代からあり、例えば狼煙 (のろし) は視認による光通信であった。その後、腕木式通信や手旗信号などの工夫もあったが、近代的な通信としては、Morseによる有線電信の発明 (1837年)、Graham Bellによる有線電話の発明 (1876年)、Marconiによる無線電信の成功 (1897年) などに先を越された^{1) 2)}。

近代的な光通信の始まりは、電話を発明したGraham Bell自身による1880年のPhotophone (光線電話) 実験である²⁾。Photophoneは、図2.1に示すように太陽を光源とし、太陽光を受ける鏡を音声による空気の動きで振動させて、反射量の変化によって太陽光を変調し、レンズガイドによって空間を200mほど伝送した後に、セレン (Se) の光導電効果によって復調して音声を伝えるもので、光源、変調、伝送、受光 (復調) の四つの機能を備えた世界初の光通信システムであった。雨などの天候や障害物の影響が避けられず、通信距離の限界もあって、実用化には至らなかったPhotophoneであるが、Bellは「私が成し遂げた中で電話よりも偉大な最大の発明である」と自負していたと伝わっている³⁾。

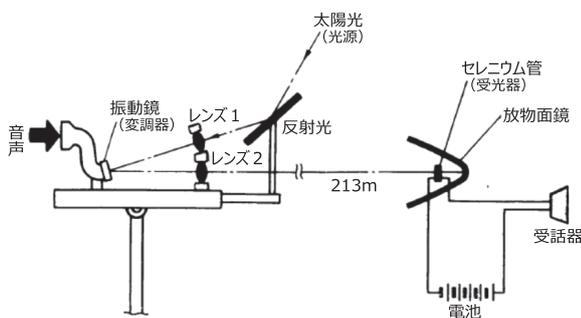


図2.1 BellのPhotophone実験 (1880年)
(参考文献²⁾をもとに筆者作成)

日本においては、逓信省の電気試験所に所属していた関壯夫と根岸博によって、1936年に図2.2のような構成の「光線通信方式の改良」特許が出願され、1938年に成立していた⁴⁾。この発明の名称が「・・・の改良」となっていて、明細書の中にも、空間伝播による光通信が従来技術として記述されていることから、Bellに起源する空間光通信が1936年当時の日本においても公知であったと言える。明細書には、

『水晶ノ棒ヲ光線ノ導管トシテ用フレバ水晶ト空気トノ接触面ハ水晶内ノ光線ニ対シ全反射ノ現象ヲ呈スルガ故ニ水晶棒ノ如キハ光線ノ導管トシテ有効ニ利用シ得ルモノナリ。(中略) 通信能率大ナルノミナラズ通信ガ外界ノ状況ニ依リ影響サルコトナキ特長ヲ有シ一般通信用特ニ多重通信用或ハ「テレビジョン」伝送用トシテ有利ナル通信方式ナリトス。』

とあり、文中の「光線ノ導管」としての「水晶ノ棒」が石英ガラス棒を指すと解釈できることから、後に1980年代になって、石英系光ファイバに関するCorning社の材料特許の、日本での成立を阻止する役割を果たすことになった⁵⁾。

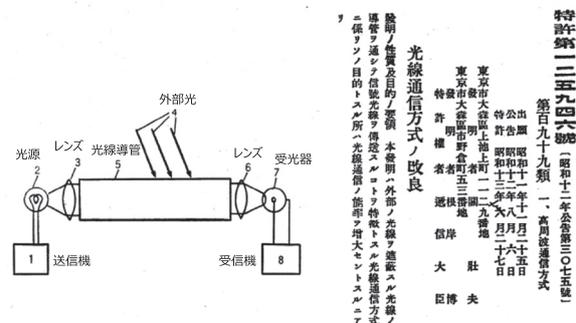


図2.2 関・根岸の特許出願 (1936年)⁴⁾

今回の系統化調査を通じて筆者は初めて知ったのであるが、CCD (Charge-Coupled Devices) を発明したW.S. BoyleとG.E. Smithと共に、C.K. Kaoが2009年ノーベル物理学賞を受賞した折のスウェーデン王立科学アカデミーの記念論文「Two Revolutionary Optical Technologies」の中に光通信に関連する数少ない先行発明としてBellのPhotophone特許 (1880年) と関・根岸特許 (1936年) のことが以下のように引用されている⁶⁾。

『In 1880, G. A. Bell patented an air-based optical telephone called “Photophone”, consisting in focusing sun light on the surface of a flat mirror

vibrating with sound. The light was then sent to a detector of selenium coupled to a telephone receiver. A few later ideas were also patented, one of them in Japan even suggesting quartz as a transmission medium. In the 1950's, however, very few communication scientists considered optical communication as a viable concept.』(下線部分は筆者が強調)

この英文中の“quartz”とは関・根岸特許中の「水晶」のことであり、関と根岸が所属していた逓信省電気試験所の後継機関に相当するNTT研究所に所属していた筆者としても、少し誇らしい気持ちになる。1909年生まれの間壯夫は、1959年に日立製作所に移り、技師長などの職歴を積み、1999年に没した。関は「日本半導体歴史館」サイト中の「黎明期の人々」コーナーに日本半導体のパイオニア(全24名)の一人として紹介されている。1908年生まれの間根岸博は、後に姓を清宮と改め、1955年に富士通に移り、1974年には富士通社長になった。社長就任後、間もなく病魔におかされた清宮は1976年に没したが、奇しくも1976年は、第4章で紹介するように、NTTと藤倉電線が石英系光ファイバの長波長帯発見となった低損失光ファイバ(0.47dB/km@1.2μm)の実現を発表して⁷⁾、日本勢の存在が世界から注目されるようになった年であった。

2.2 画像伝達用光ファイバ束

長距離伝送媒体として注目される以前の光ファイバには、近距離の画像伝達用の光ファイバ束としての研究開発と実用化の歴史があった⁸⁾。古くは1927年に英国のJ.L. Baird、および1930年に米国のC.W. Hansellが光学像の伝達に透明なガラスファイバ束を利用することを考案し、ドイツのH. Lammは同じ1930年にフレキシブルなファイバ束を胃部内視鏡に利用する可能性を論じている。初期の裸状態のガラスファイバは、表面の汚れに弱く、光の漏れも多かったが、1950年代になると、オランダのA.C.S. Van Heel⁹⁾や英国のH.H. HopkinsとN.S. Kapany¹⁰⁾によって図2.3に示すようなクラッド付光ファイバ(コアとクラッドの二層構造の光ファイバ)が考案されて、ファイバ光学(Fiber Optics)概念の整備が進んだ¹¹⁾。

当時の光ファイバの製法を図2.4に示したが、(a)ロッドインチューブ(Rod-in-Tube)法では、直径が10~20mmの屈折率の高い光学ガラスの丸棒を、肉厚が1mm程度の屈折率が低いガラス管の中に入れて、600~800℃に保持した電気炉に送り込んで加熱し、丸

棒と管が融着して垂れ下がってきたところを線引きする。(b)二重のつぼ法では、同心円状にノズルを配置した二重の白金のつぼを1,000~1,200℃の高温に加熱し、内側のつぼに屈折率の高いコア用のガラスを、外側のつぼに屈折率の低いクラッド用のガラスを投入して溶かすと、望みの二層構造の光ファイバを線引きすることができる¹²⁾。

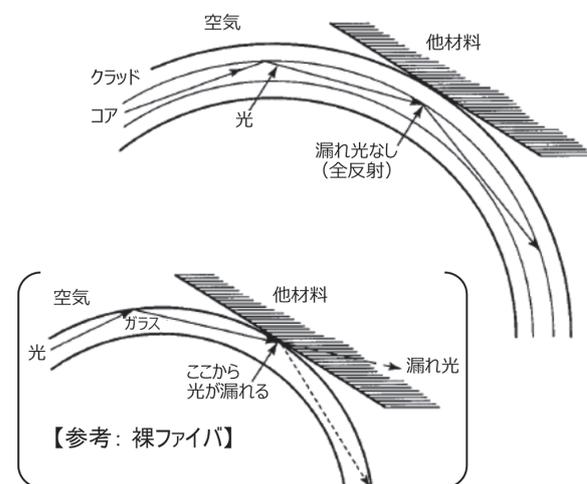


図2.3 クラッド付光ファイバ
(参考文献¹¹⁾をもとに筆者作成)

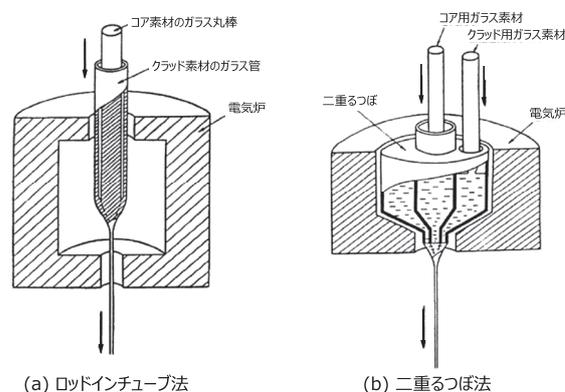


図2.4 クラッド付光ファイバの製法
(参考文献¹²⁾をもとに筆者作成)

1本の光ファイバは伝達できる光量が限られているので、通常は数千本以上のファイバを束ね、両端部は稠密に配列して使用する。光量を伝達するものをライトガイドと呼び、図2.5のように画像を伝達するのはイメージバンドルと呼んだ。胃カメラ用のイメージバンドル(光ファイバ束)は解像力が重要であるので、総延長が数kmにも及ぶ直径10~20μmの光ファイバを1m前後の長さで束ね、両端部における個々のファイバの配置が完全に対応するよう配列している。1960年には、米国のACMI社からファイバスコープが売り出され、1962年になって日本への輸入が可能になっ

た。間もなくファイバ스코ープの国産化が行われ、1964年にはオリンパス社からファイバ스코ープ付き胃カメラGTF (GasTrocamera with Fiberscope) が発売された¹³⁾。

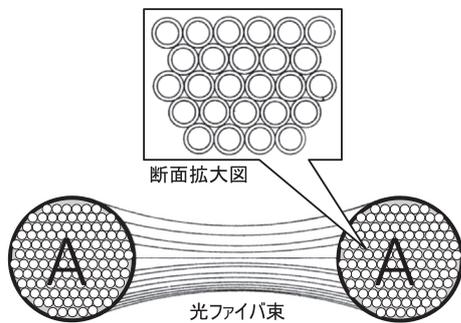


図 2.5 画像伝達用の光ファイバ束 (イメージバンドル)

ここで光ファイバ束に関連して特筆したいのは、1963年5月26日の東京工業大学全学祭において末松安晴が学生らと行った光ファイバ通信実験である¹⁴⁾。これは、図 2.6 に示すように、光源として HeNe レーザ (NEC 製)、伝送路として多成分ガラス光ファイバ束 (キャノン提供)、そして光電管 (駆動電圧は約千 V、浜松 TV 製) を用い、さらに ADP (Ammonium dihydrogen phosphate、理化学研究所製) 結晶を使って試作した光変調器により光に音を乗せて送る光通信装置であった。胃カメラ用の光ファイバ束を転用したものであるが、世界初の光ファイバ通信の公開実験であった。1961年に Bell 研究所で発振に成功したばかりの HeNe レーザが1963年の日本の大学で早くも NEC 製として入手できたことと合わせて興味深い。

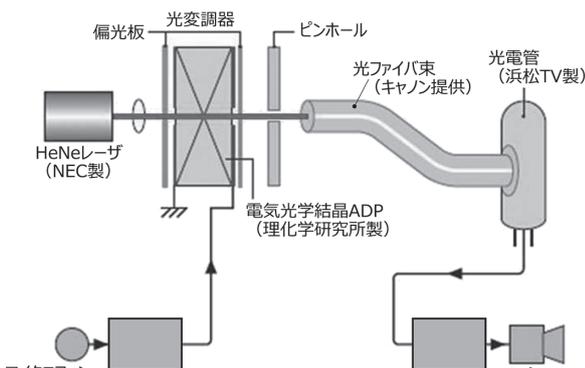


図 2.6 東工大の「光ファイバ通信」実験 (1963年)
(参考文献¹⁴⁾をもとに筆者作成)

2.3 レーザビームによる空間光通信

光源として HeNe レーザが手軽に利用できるようになったこともあり、1960年代には光通信研究が盛

んになったが、当初は損失の大き過ぎる光ファイバではなく、レーザービームによる空間光通信が有望視されていた。NTT 武蔵野研究所でも、1966年に基礎研究部が発足し、その中の第3研究室 (基礎3研) で光通信研究を開始したが、光ファイバ通信方式のイメージはなく、空間光通信を想定した研究体制であった¹⁵⁾。1970年3月までには、図 2.7 に示したように、東京の霞が関ビル 30 階の一室を借りて、最寄りの霞ヶ関電話局との間で 240Mbit/s (水平と垂直の偏波多重で、電話 3,400 回線相当) のレーザービーム空間伝搬実験を行うレベルに達していたが、自由空間伝搬では、霧、雨、雪などによる光の減衰があるだけでなく、大気の屈折率の不安定性のために良く晴れた日でも伝搬ビームがゆらぎ、安定した通信を行うことが難しいことが明らかになっていった¹⁵⁾。

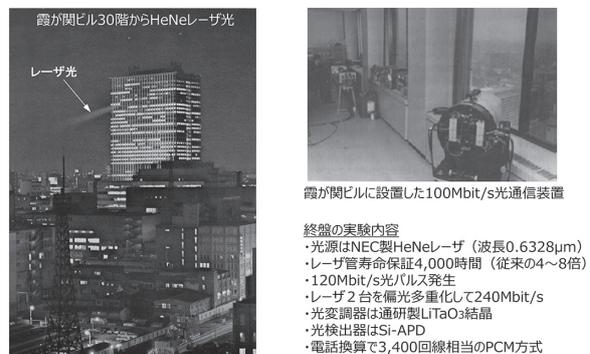


図 2.7 レーザ光空間通信実験 (1970年3月から2年間)
光ファイバ通信実用化研究の夜明け前
(参考文献¹⁵⁾等をもとに筆者作成)

気象条件などに左右される自由空間伝搬ではなく、図 2.8 のように湿気を遮断した導波管内に光学レンズを 100メートル程度の間隔で並べる光ビーム伝送路 (光レンズガイド) の研究も行われた。伝搬損失についてはレンズに無反射コーティングを施すことにより 0.5dB/km 以下も期待でき、従って中継間隔も 50km ないし

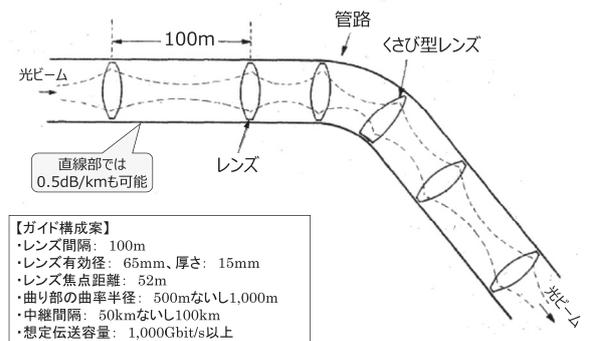


図 2.8 レンズ列を用いた光ビーム伝送路
(参考文献^{16) 17)}をもとに筆者作成)

100kmと長距離になると想定された。レンズの焦点距離は、レンズ間隔の1/2に選ばれるのが普通で、日本における光学技術は進んでおり、NTT 研究所では、焦点距離 52m の精度の良いレンズの試作にも成功していた。レンズ試作の依頼先は日本光学工業株式会社（現株式会社ニコン）の機器設計課であり、出来上がった6個の平凸レンズは、厚さ15mm、有効径65mmで、BK7材の光学ガラス製で、黒色メッキされた黄銅性フレームに入れられ、ずっしりした高級感があったという^{16) 17)}。

光レンズガイドには光ファイバのような可撓性はないが、図2.8に示したように、楔（くさび）形のレンズを用いて曲率半径500mないし1,000m程度のゆるい曲り線路はつくることのできるし、また伝送損失の増加を許容すれば、レンズの間隔を短くして、曲率半径数十m程度の曲りにすることも可能とされていた。

1973年当時のNTT 基礎3研には、基本クロック1.6Gb/sの光強度変調をベースとして、時分割多重（×8倍）、波長分割多重（×16倍）、偏波分割多重（×2倍）、空間分割多重（×4倍）を重ねて、光レンズガイド1系統で総伝送容量1,638Gbit/s（両方向）の光空間通信を可能にする将来構想案があった。しかし、レンズ列の動的制御は複雑であり、地震国である日本では、光通信システムであると同時に高感度な地震計としての光センサを構築するような違和感があったことも事実であろう。

1961年にHeNeレーザを発明したBell 研究所において光レンズガイド（レンズ列）の研究が行われたことはもちろんであり、1966年頃にはHolmdel 地区の研究所構内地下に大規模な実験伝送路を実際に建設していた¹⁸⁾。その一方で、Crawford Hill 地区のBell 研究所では、集束伝送路として「ガスレンズ」方式も検討された¹⁹⁾。ガスレンズは管路内の気体に例えば図2.9のような加熱方法で屈折率勾配をもたせ、この勾

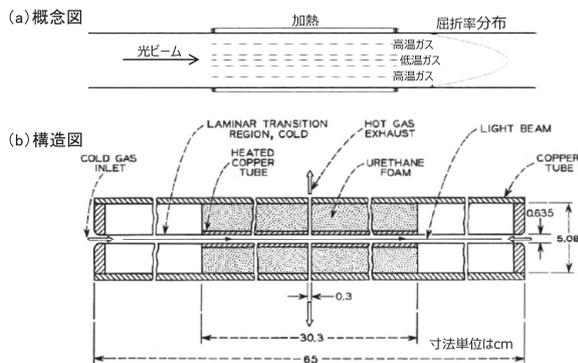


図2.9 Bell 研究所のガスレンズ構造例

(参考文献¹⁹⁾をもとに筆者作成)

配による収束効果で光を伝送させようとするものだったが、構造が複雑となり、結局、行き詰ってしまった。

レンズ列の代わりに反射鏡列を用いる研究も東京工業大学や大阪大学等で行われたが、1970年代の中頃になって石英系光ファイバの損失が1dB/km程度にまで低下するに伴い、Bell 研究所でもNTT 研究所でも公衆通信狙いの空間光通信研究は中止されていった。

2.4 集束型光ファイバ

Bell 研究所のガスレンズ列からのアナロジーで東北大学の西澤潤一らによって発案され、1964年11月に「光の伝送装置」として特許出願されたのが集束型光ファイバであり、前章の図1.3bのグレーデッドインデックス (GI) 型多モード光ファイバに相当するものである。集束型光ファイバでは、コア内の屈折率を周辺に向かって連続的に小さくなるよう、放物線状に変化させることにより、図2.10のように入射角の異なる光の伝達時間を揃える効果がある²⁰⁾。西澤は、自分と似たアイデアが、少し遅れてBell 研究所のS.E. Millerによって米国で特許出願（1965年2月）されていたことを後で知り、驚いたと伝わっている。

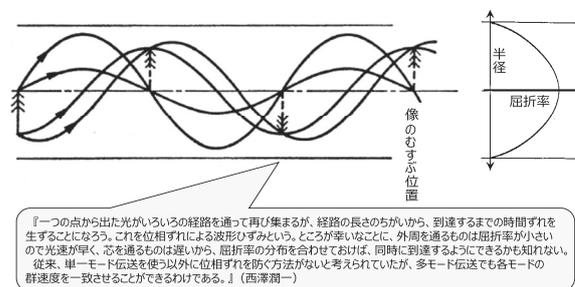


図2.10 集束型ファイバ中の光の進み方

(参考文献²⁰⁾をもとに筆者作成)

西澤らの集束型光ファイバは、制御が難しいガスレンズ列の「ソリッドステート光ファイバ化」に相当し、1962年にNTT 電気通信研究所次長職を辞して東北大学教授になった喜安善市は、当時、西澤から集束型光ファイバのアイデアを聞き、その時の感想を後に次のように書き残している²¹⁾。

『西澤教授は光学繊維自体にガスレンズと同じように光の屈折率分布を持たせれば光ケーブルになり、ガスレンズの欠点は根本的に克服され、その長所がそのまま受けつがれることを提案した。筆者はその着想の素晴らしさに驚き興奮して数日間も眠れなかった。これがわが国最初の光ケーブルの着想ではないかと思う』。

西澤らは、1964年出願の特許明細書の中で、光通信の可能性についても言及していたが、当時の特許審査官の理解を得られず、未成立になってしまった。当時、ガラスファイバではないが、アルミナにマグネシウムを添加した透明な棒が、棒の中心部から外周に向かって屈折率が高くなって、レンズと同じ集光作用をもつことから、光学素子として既に米国で先行特許が取得されていたことも、西澤らの特許不成立の一因であったとされている²¹⁾。その一方で、西澤らによる「Solid optical waveguide having a radially varying refractive index」と題する米国特許が1968年4月に出願され、1971年10月に成立（United States Patent 3614197）し、屈折率分布に関する解析は、後年のGI型多モード光ファイバ開発における屈折率分布制御の重要な指針になった。

集束型光ファイバ（＝GI型多モード光ファイバ）は、日本板硝子とNECによって、セルフオック（SELFOC）ファイバとして具現化されて、1968年11月に報道発表された。商標のSELFOCは「Self Focusing（自己集束）」を略したものである。多成分系ガラスを使用したSELFOCファイバは、図2.11に示すように、二重るつぼ内でのタリウムイオン（ Tl^+ ）とナトリウムイオン（ Na^+ ）とのイオン交換技術で作製され、1969年当時の光伝搬損失は最良値で80dB/km程度であった²²⁾。石英系光ファイバの出現に刺激されて、SELFOCファイバの損失も1970年代中頃には10dB/km以下にまで低下し、住友電工は1978年にSELFOCファイバを使って米国フロリダ州のディズニースペース内に電話回線用光ファイバ通信システム（波長0.85 μ m）を納入した¹²⁾。

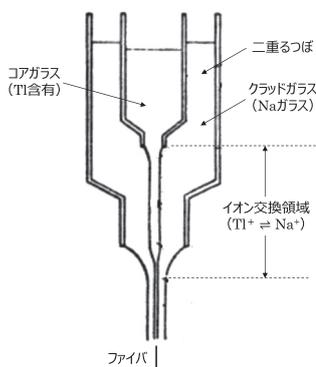


図2.11 SELFOCファイバの製法
（参考文献²²⁾をもとに筆者作成）

1970年代後半になると、低損失化に有利な石英系ガラスでGI型屈折率分布の形成が可能になり、NTTを始めとする1980年代初頭の公衆通信網には、石英

系GI型光ファイバが本格導入された。

多成分系ガラスのSELFOCファイバ製造は縮小されていくが、微小なレンズ（SELFOCレンズ）として、半導体レーザーと石英系光ファイバとの結合部分や複写機やスキャナ市場に活路を拓いていった¹²⁾。

2.5 Kaoの先駆的な提案

長距離伝送媒体としてのガラス光ファイバの可能性を1966年に指摘したC.K. Kaoは1933年に上海で生まれた。1957年に英国のロンドン大学を卒業しSTL（Standard Telecommunication Laboratories）に入所した。1960年頃からミリ波通信関連のプロジェクトに加わったが、周囲ではミリ波導波管の研究と共に、ルビーレーザーやHeNeレーザーの発明に触発された光通信研究のプロジェクトも始まっていて、1963年にはKaoも光通信プロジェクトに参画することになった。Kaoの関心は光伝送路研究に移り、誘電体ファイバの材料や構造上の問題点の解明を進めていった。Kaoは、ガラス中に含まれる鉄などの遷移金属を除去できれば、誘電体光ファイバ導波路という形で、実用に耐える光伝送路が実現できると考えるようになった¹¹⁾。

1965年に入り、同僚のG.A. Hockham（1938年生まれ）と共に光ファイバの設計理論の構築にとりかかり、光ファイバの曲がりによってもモードが乱れないクラッド層の厚さの下限を求めたり、ファイバの曲がりの影響についても計算した。材料面からは、ガラス材料の中では石英ガラスが最適であることを提案した。

Kaoらの先駆的な論文「Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies」（全8頁）は、英国電気学会（IEE）誌に1965年11月に受理され、1966年2月に修正されて、1966年7月号に掲載された²³⁾。Kaoらの論文の結論部分を図2.12に示したが、本文の要点を記すと、

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K.C. Kao and G.A. Hockham

Conclusions: Theoretical and experimental studies indicate that a fibre of glassy material constructed in a cladded structure with a core diameter of about λ_0 and an overall diameter of about $100\lambda_0$ represents a possible practical optical waveguide with important potential as a new form of communication medium. The refractive index of the core needs to be about 1% higher than that of the cladding. This form of waveguide operates in a single HE₁₁, E₀ or H₀ mode and has an information capacity in excess of 1 GHz. It is completely flexible and calls for a mechanical tolerance of around 10%, which can be readily met in practice. Thus, compared with existing coaxial cable and radio systems, this form of waveguide has a larger information capacity and possible advantages in basic material cost. The realisation of a successful fibre waveguide depends, at present, on the availability of suitable low-loss dielectric material. The crucial material problem appears to be one which is difficult but not impossible. Certainly, the required loss figure of around 20 dB/km is much higher than the lower limit of loss figure imposed by fundamental mechanisms.

Paper was originally published in the Proceedings IEE, July 1966. It was first received 24th November 1965 and in revised form 15th February 1966.

図2.12 Kaoらの1966年IEE論文の結論部分²³⁾

- 1) 通信用光ファイバ素材として石英ガラスがベストな選択
- 2) バルク損失低減のために不純物 (Fe 等) は 1ppm 以下に
- 3) コア・クラッド構造 (クラッドは波長の 100 倍程度必要)
- 4) 高温からの線引きにより機械的な強度は高くなる
- 5) 種々の損失原因を考慮しても 20dB/km 以下は可能
- 6) 単一モード伝送で 1GHz 以上の伝送帯域を予測できるようになる。

STL の Kao と東北大の西澤は 1960 年代中頃に交流関係があったが、西澤の関心が GI 型多モード光ファイバにあったのに対し、Kao は単一モード光ファイバを重視していた。実際、Kao が 1996 年に「広帯域・低損失光ファイバ通信の先導的研究」で日本国際賞を受賞した際の「授賞理由」は、下記の通りであり、単一モード光ファイバを用いた大容量光通信の可能性を具体的に予測したことが強調されている²⁸⁾。

『今世紀末から次世紀初頭にかけて大きな社会的変革をもたらすであろうとして期待されている情報通信ネットワーク構築は、最近の通信技術の進歩に負うところが大きい。そのなかでも、大容量の情報を低損失で送ることができる光ファイバ通信技術の発展は、こうした進歩の流れを強く推進してきた。その光通信システムは、光を伝える光ファイバ、光源の半導体レーザー、光を受けるフォトダイオード、そして光の流れを制御する各種の光部品などで構成されている。特に、光ファイバは単一モード伝送の状態ですべて低損失で、大容量の信号伝送に適し、その上に細くて強く、そして曲げやすいなどの優れた特徴を持ち、光通信技術の発展を推進する原動力となった。

光通信の研究は 1960 年のレーザーの発明により実質的に開始されたといっておく、光源、伝送路、そして光検出器などの研究が同時に行われ始めた。受賞者のカオ博士は、1966 年にホッカム氏と共に発表した論文で、単一モード光ファイバが大容量の伝送路に適し、予測される損失の大きさや許容される光電力の大きさから伝送距離を測定するなどして、単一モード光ファイバを用いた大容量光通信の可能性を具体的に予測した。その後、1970 年にコーニング社で低損失光ファイバが開発され、その後の低損失大容量光ファイバ通信の実用化が大きく推進されてカオ博士の予見が現実のものとなった。このようにカオ博士らの

研究はこうした一連の光ファイバ伝送路開拓の先駆的で、先導的な役割を果たしたものであり、その後の光通信技術の発展に大きな影響を与えたものとして国際的に極めて高く評価されている。

以上に述べたように、カオ博士は、光ファイバが極めて低損失で広帯域な情報伝送の可能性があることを予見するとともにその基礎的実証を行うことにより、現在、広く使われることになった光ファイバ通信開拓に大きなインパクトを与えた。

よって、カオ博士の業績は、1996 年 (第 12 回) 日本国際賞に誠にふさわしいものであります。』
(上記推薦文中の下線部分は筆者が強調)

敢て換言すると、1970 年頃までの通信技術者のガラス光ファイバに関する常識は、

- ・ ガラス光ファイバは脆弱で折れ易く、ケーブルに出来ない
- ・ 光の波長より微細な均一性の実現が困難
- ・ そもそも光伝搬損失が自由空間よりも小さくなる筈がない
- ・ ミリ波導波管に比べて伝搬損失が大きい
- ・ 値段が銅線に比べて極めて高い
- ・ 接続が非常に困難

などであり、次期の大容量通信媒体としての有望度は、
・ ミリ波導波管 > 空間光通信 > 光ファイバ
であったが、Kao は上記の常識を破る先導的な役割を果たしたのである。

1966 年の IEE 論文発表後に数件の関連論文を発表した Kao は、1969 年に STL を退社し、1996 年の日本国際賞受賞時には香港中文大学 (The Chinese University of Hong Kong) の学長職で米国籍であった。その後、2009 年になって Kao はノーベル物理学賞を受賞したが、イタリアの Guglielmo Marconi とドイツの Karl Ferdinand Braun の無線通信での受賞 (1909 年) 以来、100 年ぶりの通信分野での受賞となった。

2.6 ミリ波導波管

1960 年代からの電話需要の高まりを受けて、光ファイバ通信が商用化される 1980 年代初めまでの大容量伝送を担っていたのは、有線の同軸ケーブルや無線のマイクロ波 (センチメートル波) であり、1972 年頃には国内の市外伝送路の約 50% はマイクロ波方式が占めていた。そして次の超大容量伝送媒体候補として期待されていたのが、1954 年に Bell 研究所が提案したミリ波導波管伝送方式であった²⁴⁾。

ミリ波帯 (30~300GHz) は、それまでのマイクロ波帯 (2GHz、4GHz、5GHz、6GHz) に比べて、降雨などによる減衰が著しいので、ミリ波帯を長距離通信に用いるには、無線伝搬ではなく、図 2.13 に示したような円形導波管 (内径 51mm) を用いるのが適切とされていた^{25) 26)}。

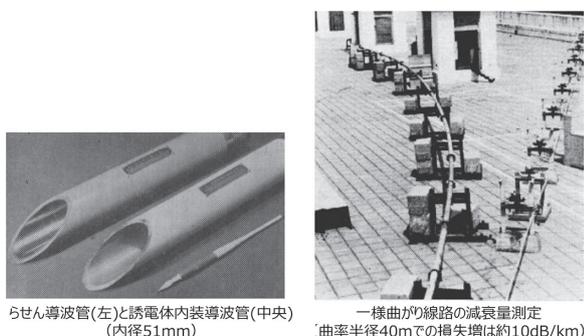


図 2.13 ミリ波導波管
(参考文献^{25) 26)}をもとに筆者作成)

導波管内で使用する TE_{01} モードのミリ波の伝送損失は、周波数の増加と共に 1~2dB/km 程度にまで小さくなるが、問題は導波管の曲がりや不完全性によって TE_{01} モードから TM_{11} やその他の高次モードへ容易に変換することであった。そのために、導波管の内壁に誘電体皮膜を施したり、導波管内壁に絶縁した銅線を螺旋状に巻きつけて、電磁モードの揺動を抑える方法が考案された。

1975 年当時の各国のミリ波導波管伝送方式を表 2.1 に示したが、いずれも現場試験を経て 1980 年前後の本格商用化を目指していた。NTT では、1972 年に茨城研究所と水戸電話局の間に約 23km 長の実験用導波管が敷設され、W-40G 方式 (上り下り双方向で電話各 30 万回線相当) が、実用化の一手手前の段階にあった²⁷⁾。

表 2.1 各国のミリ波導波管伝送方式 (1975 年当時)
(参考文献²⁷⁾をもとに筆者作成)

	アメリカ	イギリス	フランス	ドイツ	日本
方式名称	WT-4				W-40G
現場試験	1974~75年 (32km)	1974~75年 (15km)	1977年 (35km)	1976年 (45km)	1973~74年 (23km)
商用計画 (距離)	1980年~ (800km)	1979~80年	1981年 (500km)		1977年
周波数帯 (GHz)	40~110	32~49 32~88	31~60	35~115	43~87
伝送容量 (万ch)	23	11.5, 25	14.5	50	30
ビットレート 変調方式	274Mb/s 2 PSK*	500Mb/s 4 PSK*	564Mb/s 4 PSK*		800Mb/s 4 PSK*
中継間隔 (km)	30~40	10~20	17	40~45	15
導波管内径 (mm)	60	50	50	70	51

* PSK: Phase-Shift Keying (位相偏移変調)

しかし、まさにこのときに、Kao の予見が現実のものとなり、光ファイバ通信技術が急速に台頭してきた

のである。1970 年の Corning 社の 20dB/km 光ファイバ開発については、「まだ損失が大き過ぎる」として、様子見の姿勢であったとしても、1974 年の Bell 研究所による 1.1dB/km 光ファイバ開発については看過することはできなかった。細くて曲げるのが容易な光ファイバに比べて、太くて重く曲げるのも困難なミリ波導波管の不利は否めず、表 2.1 の各国の商用計画は中止に追い込まれていった。

NTT 研究所にとっても極めて大きなパラダイム変換となったが、それまでのミリ波導波管方式での技術蓄積は、周波数が 3 桁以上も高い光ファイバ通信方式の立ち上げに向けて、「人技一体」で有効に活かされていくことになる²⁷⁾。

参考・引用文献

- 1) 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 「光ファイバの基礎」, オーム社, 1977.7.15.
- 2) 柳井久義, 神谷武志: 「光通信発達の歴史と現状及び将来」, 精密機械, Vol.46, No.2, pp.147-152, 1980.
- 3) ナオミ・パサコフ著, 近藤隆文訳: 「グラハム・ベル 声をつなぐ世界を結ぶ」, 大月書店, 2011.4.20.
- 4) 新関暢一: 「電気通信研究所における光学結晶と光ファイバの研究開発」, 通研実報, Vol.32, No.7, pp.1429-1476, 1983.
- 5) 柘野邦夫: 「光ファイバ物語」, サイバー出版センター, 2014.12.
- 6) “Two Revolutionary Optical Technologies,” the Royal Swedish Academy of Sciences, 6 October 2009.
- 7) M. Horiguchi and H. Osanai: “Spectral losses of low-OH content optical fibres,” Electron. Lett., Vol.12, No.12, pp.310-312, 1976.
- 8) 大頭仁: 「繊維光学とその応用」, 応用物理, Vol.30, No.10, pp.717-727, 1961.
- 9) A.C.S. Van Heel: “A New Method of transporting Optical Images without Aberrations,” Nature 173, 39, 1954.
- 10) H.H. Hopkins & N.S. Kapany: “A Flexible Fibrescope, using Static Scanning,” Nature 173, 39-41, 1954.
- 11) Jeff Hecht: “City of Light: The Story of Fiber Optics”, Oxford University Press, 2004.
- 12) 村田浩, 小泉健, 新関暢一: 「光ファイバの歴史 開拓者たちのメモアール」, 工業通信, 2001.1.20.

- 13) 丹羽寛文：「ファイバースコープの開発とその後の発展」, 日本消化器内視鏡学会雑誌, Vol.51, No.9, pp.2392-2412, 2009.
- 14) 末松安晴：「光通信と半導体レーザーの研究を振り返って」, 電子情報通信学会誌, Vol.98, No.6, pp.445-453, 2015.
- 15) 光通信基礎研究調査会：「光ファイバ通信実用化研究の夜明け前 - NTT 基礎 3 研の足跡 -」, サイバー出版センター, 2016.10.
- 16) 大川原忠義：「光伝送とその問題点」, テレビジョン, 第 27 卷, 第 9 号, pp.665-671, 1973.
- 17) 野田健一, 大川原忠義：「光伝送方式」, 計測と制御, Vol.13, No.1, 1974.
- 18) D. Gloge：「Experiments with an underground lens waveguide,」 Bell Syst. Tech. J., Vol.46, 721-735, 1967.
- 19) P. Kaiser：「An Improved Thermal Gas Lens for Optical Beam Waveguides,」 Bell Syst. Tech. J., Vol.49, pp.137-153, 1970.
- 20) 西沢潤一：「光伝送」, テレビジョン, Vol.24, No.10, pp.793-798, 1970.
- 21) 渋谷寿：「光通信物語」, オプトロニクス社, 2003.10.16.
- 22) 小泉健：「光伝送体セルフロック」, レーザー研究, Vol.2, No.2, pp.91-100, 1974.
- 23) K.C. Kao and G.A. Hockham：「Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies,」 Proc. IEE, Vol.113, No.7, July 1966.
- 24) 池上文夫：「最近の大容量伝送方式」, 電気学会雑誌, Vol.92, No.12, pp.1214-1222, 1972.
- 25) 高木 渡部 島田 福田 岡本：「ミリ波低損失伝送導波管」, 日立製作所中央研究所創立二十周年記念論文集, pp.141-146, 1962.
- 26) 喜安善市：NHK 情報科学講座 5 「情報と通信」, 日本放送出版協会, 1968.
- 27) 島田禎晉：「ミリ波から光技術へ」, 電子情報通信学会誌, Vol.78, No.11, pp.1098-1106, 1995.
- 28) http://www.japanprize.jp/prize_past_1996_prize01.html

3 | 通信用石英系光ファイバの誕生

1970年になると、Kaoの提案（1966年）に沿うような形で、Corning社によって当時としては極めて低損失な20dB/km光ファイバが発表され、世界における低損失光ファイバ開発競争が始まった。さまざまな光ファイバが試作されて低損失値を競ったが、1974年になると、Bell研究所から、その後の模範となるMCVD（Modified Chemical Vapor Deposition）法による1.1dB/km光ファイバが発表された。本章では、その間の経緯について、1) Corning社の20dB/km光ファイバ発表、2) なぜCorning社は一番乗りできたのか、3) 日本の動き、4) 英国と米国の動き、5) Bell研究所のMCVD法発表、の順に報告する。

3.1 Corning社の20dB/km光ファイバ発表

1970年の9月29日から4日間、英国LondonでIEE学会が主催した「Trunk Telecommunications by Guided Waves（導波方式による基幹通信）」と題する国際会議が開催され、3日目の10月1日にCorning社のF.P. Kapron, D.B. KeckおよびR.D. Maurerは「Radiation losses in glass optical waveguides（ガラス光導波路の放射損失）」と題して発表を行った。演台に立ったMaurerはHeNeレーザー波長0.6328 μ mで損失20dB/kmの単一モード光ファイバの試作成功を報告した。当日の発表と同じ内容は、11月になってAPL（Applied Physics Letters）誌に掲載され、世界に広く知られることになった¹⁾。このAPL論文の冒頭部分を図3.1に示す。

RADIATION LOSSES IN GLASS OPTICAL WAVEGUIDES

F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer

Research and Development Laboratories, Corning Glass Works, Corning, New York 14830
Received 7 August 1970

Measurements show that single-mode waveguides can be constructed which have radiation losses of about 7 dB/km — very close to the intrinsic material scattering loss. These waveguides, with total losses between 60 and 70 dB/km, have permitted the measurement of bending losses which become dominant at radii of curvature of a few centimeters. An approximate theory based on bending a rectangular guide appears to represent the circular waveguide results very well.

Two distinct types of loss are encountered in dielectric optical waveguides, absorption loss, and radiation loss. Losses in the first category are brought about in the glass waveguides primarily by transition ion impurities and will not be discussed in this letter. Instead, two types of radiation losses are investigated, intrinsic material losses and bending losses. Several hundred meters of single-mode

glass optical waveguides were made for this work, with a core diameter of 3 - 4 μ m and a cladding-core diameter ratio of approximately 60:1. The two 30-m sections which were investigated had a total loss of between 60 and 70 dB/km. The lowest value of total attenuation observed in all waveguides constructed for this work was approximately 20 dB/km, measured at a 632.8-nm wavelength.

図3.1 Corning社の「20dB/km」論文の冒頭部分¹⁾

上記のConferenceに参加していた古河電工の村田浩は、発表会場の雰囲気や後に次のように回想している²⁾。

『1970年の9月29日～10月2日、IEEが主催したTrunk Communications by Guided WavesのコンファレンスがロンドンのサボイプレイスのIEEビルで行われた。このやや古めかしい小

さめのビルは、地下鉄のエンバンクメント駅の近く、テムズ河に臨んだビクトリア・エンバンクメント・ガーデンズに沿っている。この公園はそれ程広くないが、よく整備されていて、いつも花が美しく咲いている。このコンファレンスの主要なテーマはミリ波導波管であった。ヨーロッパではこの種のコンファレンスは始めてであり、コンファレンスの目玉として英国として初めてのミリ波導波管の現場敷設と伝送実験が技術見学として公開されることになっていた。敷設場所はロンドンの北約100kmにあるイプスウィッチの飛行場跡であった。この飛行場跡には、その後1973年に英国郵政省通信研究所が建設された。この英国で初めてのミリ波導波管のコンファレンスには世界中から関係する主要な研究者が集合し、参加人数は約400名であった。しかし、このコンファレンスでのミリ波導波管に関する発表とイプスウィッチでの公開実験の結果はいずれも平凡な内容であった。このコンファレンスで行われた低損失光ファイバ試作成功の発表によって、このコンファレンスがミリ波導波管開発の幕引きをしたことは、何とも皮肉な結果であった。

このコンファレンスの3日目の10月1日にセッション5の「光導波路」が行われた。日本からの出席者の殆どがミリ波導波管関係の研究開発者であったためであろうか、日本からの参加者にはこのセッションは殆ど注目されず、参加者は少なかった。セッションの2番目の発表はコーニングのマウラー博士による「ガラス導波路の放射損失」であった。この発表の中で、伝送損失20dB/km（波長632.8nm）のシングルモード光ファイバ試作成功が報告された。当時の光ファイバの伝送損失は数百～数千dB/kmであったから、この損失値は当時としては画期的な値だった。散乱損失は、全てのガラスの中で熔融石英が最小だが、通常のガラスでも熔融石英に近い値に到達できるとして、いくつかのガラスの例を述べた。このことは材料としての石英ガラスの良さを強く主張していない感じであったが、カムフラージュだったかも知れない。

20dB/kmの伝送損失を実現した光ファイバの材料と製法には一切触れず、それらについての具体的な報告は全く行われなかった。発表後、材

料、製法等についての質問が集中し、さらにはサンプルが欲しいとの要請も出た。会場は一時騒然となったが、マウラー博士の回答は、何れも今後詳細に発表するとの一点張りであった。コーニングは材料メーカであるためか、その後の発表も光ファイバの材料と製法には触れないものが大部分であり、電気メーカや通信メーカとは発表のポリシーが異なって今日に至っている。言わばカタログレポートと呼ばれる範疇の発表であった。伝送媒体において伝送損失が20dB/kmより小さくなった場合、そして伝送用素子の寿命が1500時間以上になった場合、実用化の検討を開始する価値があることを伝送技術者は経験則として良く知っている。コーニングが発表した光ファイバはまさしく実用化の検討が開始できる特性を持っていた。そして、この発表は世界における低損失光ファイバとそのケーブルの開発に火をつけた。』

(下線部分は筆者が強調)

村田が回想しているように、Corning社は、1970年の講演や論文の中で20dB/km光ファイバの材料や製法について一切公表しなかったが、1~2年後に公開された特許明細書などから、図3.2のように石英ガラス管の内壁にCVD (Chemical Vapor Deposition) 法でSiO₂-TiO₂ガラス膜を堆積させ、それを高温電気炉中で線引きしたものと推察された。Tiイオンは価電子状態が不安定であり、還元(Ti⁴⁺ → Ti³⁺)されると着色してしまうので、20dB/kmを実現するためには、線引き後の光ファイバを酸素含有雰囲気中で熱処理(Ti³⁺ → Ti⁴⁺)する必要があり、熱処理後の光ファイバは脆弱であったと考えられる。それでも20dB/kmが、当時としては極めて低損失値であったことは間違いなく、長距離伝送媒体としての低損失光ファイバ開発競争の幕開けとなった²⁾。

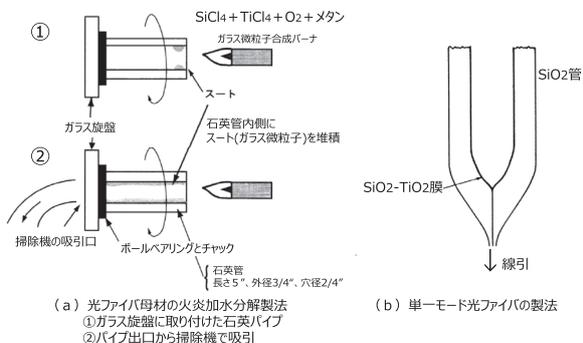


図3.2 Corning社の20dB/kmファイバの製法(想像図)
(参考文献²⁾をもとに筆者が作成)

1970年発表の20dB/km光ファイバの材料や製法に

ついて沈黙を守っていたCorning社であったが、Kaoがノーベル物理学賞を受賞した翌年の欧州光通信会議(ECOC2010)において、元Corning社のP.C. Schultzが「Making the First Low Loss Optical Fibers for Communications」と題して招待講演を行った³⁾。40年ぶりに提示された1970年当時の光ファイバ母材作製装置の写真を図3.3に示したが、図3.2左の推定図と(左右が反転しているが)符合している。

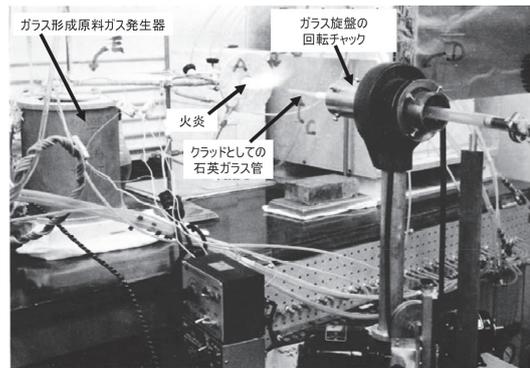


図3.3 40年後に公表された1970年当時のCorning社の装置写真
(参考文献³⁾をもとに筆者が作成)

なお、図3.1のAPL論文の筆頭著者であったF.P. Kapronは、1971年から1972年にかけて単一モード光ファイバ関連の数編の論文を発表した後に、カナダOttawa郊外のBell-Northern Research社に転職した。その後、Kapronの代わりにSchultzを加えた3人組(Maurer, Keck, Schultz)がCorning社の名声を担っていくことになる。

3.2 なぜCorning社は一番乗りできたのか

STLのKaoが石英系光ファイバの可能性を予見した1966年当時、Kao論文を事前に査読した研究者がいた英国郵便公社(BPO: British Post Office)と、ガラスの新用途を探していたCorning社との間に交流関係が生れていた。BPOの研究者は20dB/kmの単一モード光ファイバ(外径100μm、コア径0.75μm)の開発をCorning社に打診した。その一方で、BPOから「Corning社が光ファイバに興味を持っている」と聞いたKao自身は1968年にCorning社を訪問し、D.B. Keckと面会した。KaoはCorning社ばかりでなく、American Optical社やBausch & Lomb社など幾つかのガラス関連メーカも訪問したが、Corning社以外は、石英ガラスの単一モード光ファイバを開発することが極めて難しいとして、軟化温度の低い多成分ガラス材料での二重つぼ法などの方法を優先した。

石英ガラスを重視した Corning 社の R.D. Maurer (物理屋) は、1967 年に ロッド・イン・チューブ (Rod-in-Tube) 法を併用しての石英系光ファイバ作製を試みたが、コア・クラッド間の泡や不純物を除去できず低損失化が困難であった。1968 年になって、D.B. Keck (電気屋) と P.C. Schultz (化学屋) が参画し、若手の Schultz の提案で石英ガラス管の内側に堆積した TiO_2 添加 CVD 膜そのものをコアとすることにした。Keck は光ファイバ損失の精密測定を担当し、やがて 1970 年の 20dB/km 実現に漕ぎ着けた²⁾。

Corning 社の Maurer らが CVD 法を選択した背景には、図 3.4 に示したように同社の J.F. Hyde が 1934 年に四塩化シリコン (SiCl_4) を原料として石英 (SiO_2) ガラスを製造する基本特許出願 (USP2,272,342) を行い、1942 年に成立したことがあった⁴⁾。この方法はスートプロセス (Soot Process) と呼ばれ、気化した原料 (SiCl_4) ガスを酸素水バーナ中に送り込み、火炎加水分解反応により、まずは石英ガラスの微粒子 (粒径は 0.01~0.1 μm 程度) を合成し、これを焼結して透明なガラス体とする石英ガラスの製造方法である。スート (Soot) とは、英語で煤 (スス) という意味であるが、ここでは白色であるが煤のような感触のガラス微粒子を指している。ガラス微粒子 (スート) を生成する際の燃焼ガスとしては、水素 (H_2) の代わりに手軽なメタン (CH_4) ガスも使われていた。

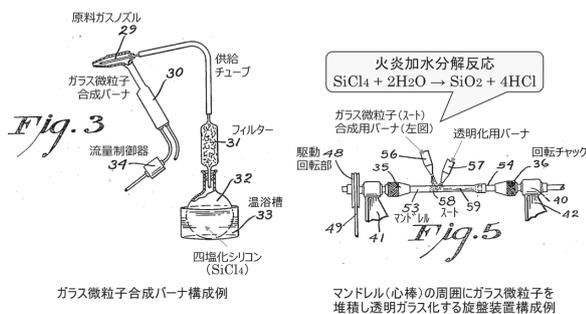


図 3.4 1934 年に Hyde によって考案された CVD 法による石英ガラスの製造方法 (参考文献⁴⁾をもとに筆者が作成)

多成分ガラスに比べて物理的・化学的に安定な石英ガラスは、軟化温度が 1700℃ と高く、天然の水晶などを原料とすると、熔融するには 2000℃ もの高温を必要とするが、Hyde の方法では、比表面積の大きいスート体の“粘性流動焼結”によって、比較的低温 (~1,400℃) で、るつぼを用いることなく、高純度で透明な石英系ガラス体を作製できた。液体原料 (SiCl_4) を気化させる過程は“蒸留”に相当し、蒸気圧の低い遷移金属などの不純物の混入も避けることができる。

さらに図 3.5 に示したように、Corning 社の M.E. Nordberg は、Hyde と同様の CVD 法により、四塩化シリコン (SiCl_4) と四塩化チタン (TiCl_4) を原料として、熱膨張係数が小さい石英系ガラスを製造する趣旨の特許出願 (USP2,326,059) を 1939 年に行い、1943 年に成立させていた⁵⁾。適量の TiO_2 を添加した石英系ガラスは熱膨張係数が純石英ガラスよりも小さく、ほぼ零になる性質があり、1960 年代の同社には天体望遠鏡の反射鏡用の超低膨張係数 (ULE: Ultra Low Expansion) ガラスとしての製造実績もあった (米国ハワイ島マウナ・ケア山頂に設置されて 1999 年に観測を開始した日本の国立天文台「すばる望遠鏡」の直径 8.2m の主鏡も Corning 社の ULE ガラスで作られている)。

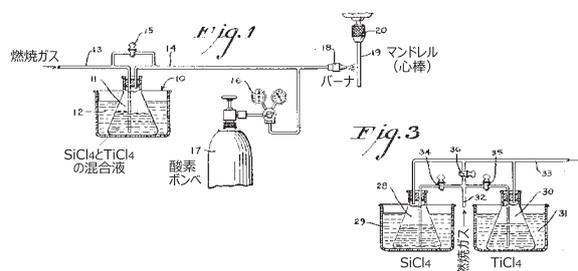


図 3.5 1939 年に Nordberg によって考案された CVD 法による TiO_2 添加石英ガラスの製造方法 (参考文献⁵⁾をもとに筆者が作成)

しかし当時の多くのガラスメーカーにとって、窯業というよりは新興の半導体産業に近い CVD 法は身近とはいえ、この時期に TiO_2 添加の 20dB/km 石英系光ファイバを実現できたのは、CVD スートプロセスによる石英系ガラス合成技術を 1940 年前後から蓄積してきた Corning 社なればこそであった。

3.3 日本の動き

Corning 社の 20dB/km 光ファイバ発表に先立って、1969 年には 80dB/km 程度の多成分系 SELFOC ファイバを実現していた日本板硝子の西澤紘一は Corning 社の「20dB/km」発表の衝撃を次のように回顧している⁶⁾。

『1970 年、米国のコーニング社が、CVD 法で 20dB/km なる石英系光ファイバを実現させ、世界をあっと驚かせた。当時セルフオックファイバも 40~50dB/km のレベルまで達していたが、20dB/km という値はまさに夢のまた夢であった。』

CVD 法で光ファイバを製作することは決して偶然に出来たものではない。当時、光ファイバの

製法はロッドインチューブ法としてコアロッドをクラッドに当たるパイプの中に挿入して熱延伸する方法が普及していた。ただし、この方法は、コアとクラッドの間の泡や不純物が除去できず損失を低減することが極めて困難であった。一方、コーニング社はCVD法によるTiドープの石英ガラス基板を天体望遠鏡の反射鏡用として製造しており、十分CVD技術の蓄積があったようだ。マウラーは、コアとクラッドの境界をスムーズにすべくこのCVD技術を応用しようとした。ここで、アイデアの転換が起こる。若いシュルツがコアとクラッドの境界にCVD薄膜をつけるのなら、CVD膜そのものをコアとすれば、どうせ後で熱延伸するのであるから同じことになるとの提案をした。当時、屈折率を高くする材料としてTiが選ばれた。熱延伸で出来たCVD法による光ファイバを最初に測定したのは、ケックであった。彼は、やっとできた200mくらいのサンプルを慎重に測定した。出てきた結果は、20dB/kmという値であった。彼は、そのときの実験日誌に、やった!! (Whoopee!!) と書き記している。結果としては、単純なアイデアではあるが、すばらしいブレークスルーをもたらした。

1970年10月、イギリスロンドンで開催された“導波管による幹線系長距離通信会議”の光通信セッションで、20dB/kmの成果がマウラーにより発表された。ミリ波管の専門家が多かったためか、この数字の意味を知っていたのは、ごく小数であったと聞く。中でも、古河電工から来ていた村田さんは、通信、電機業界では余り知られていなかったコーニング社が、画期的なアイデアを出したことに衝撃を受けたという。これがきっかけとなり、各国の研究機関で追試が行われCVD法による石英系光ファイバの低損失が確認された]

(下線部分は筆者が強調)

Corning社の20dB/km光ファイバ発表に刺激を受けた日本板硝子は二重つば製法でのSELFOCファイバの低損失化を、

- ・1968年 200dB/km
- ・1969年 80dB/km
- ・1970年 40~50dB/km
- ・1973年 20dB/km
- ・1975年 9.4dB/km

と進めて、1978年にはNECや住友電工と組んでSELFOCファイバによるフロリダ「Disney World」

内の電話回線開通に成功して注目された⁷⁾。しかし、石英系光ファイバの低損失化の勢いには追い付かず、1979年にSELFOCファイバの開発中止を決めて、その後のビジネス活路はGRINレンズ（GRINはGraded-Indexの略）とも呼ばれるSELFOCレンズ応用で拓いていった。

もう一人、NTT電気通信研究所（武蔵野）の次長職を辞して1962年に東北大学電気通信研究所教授に任用されて、西澤潤一教授と親しい関係にあった喜安善市は、自伝「情報通信の源流を求めて」の中で、Corning社の20dB/kmファイバ発表について次のように回顧している⁸⁾。

『私の東北大学教授時代、Kaoさんが英国から私を大学に訪ねてきたことがある。Kaoさんは香港出身の中国系イギリス人、ロンドンのスタンダード電話研究所（STL）の研究員であった。この頃、光通信の研究をしていて、私と連絡があったのである。来日する前に送ってくれた光ファイバケーブルに関する論文を読んで、私には閃くものがあつた。当時の光通信の研究には不満であったからである。そこで、国内ガラスメーカーやそのほかの専門家を集めて、電電公社電気通信研究所で彼の講演会を行った。Kaoさんは光ファイバについて原理から可能性まで事細かに説明し、共同研究やスポンサーを募ったのだが、会場に集まった誰もその重要性がピンとこなかったため、この講演会は徒勞に終わった。その後、彼はアメリカに渡り、コーニングガラス社の理解を得て実用化に成功したのである。』

喜安は、当初のKaoの期待にNTT電気通信研究所を含めて日本の業界が応えられなかったことを嘆いて、その罪滅ぼしのために、Kaoが1996年の日本国際賞を受賞できるよう、幅広い人脈を活かして縁の下で尽力した。

上記の喜安の回顧文にも表れているように、Corning社の1970年10月の発表はNTTの研究者達にも大きな衝撃を与えた。当時の電気通信研究所（武蔵野）は、次期通信技術としてミリ波導管方式の開発に注力しつつ、光通信担当の基礎第3研究室を1966年に発足させ、レーザービームを用いる空間光通信についてデバイスからシステムまでの研究を推進していた。しかし光伝搬損失が大きいと見なされていた光ファイバ通信方式は本格検討の対象外であった。

Corning社の低損失光ファイバ発表を知ったNTT電気通信研究所の茨城支所の中川喜策支所長と豊田博

夫総括担当調査役は「我々もすぐに始めなければ手遅れになる」と判断し、すぐに Corning 社の光ファイバの情報収集を始めるとともに、研究メンバの選定を行った⁹⁾。しかし研究所では、ガラスを扱ったことが殆どなく、かつて電子管の封止の研究をやっていたガラス関係の数少ない研究者も半導体時代になって退職していた。そこでリスクの高い研究ゆえにキャリアのあるベテランにやらせるべきか、それとも既成概念にとらわれず、柔軟な発想のできる若手でメンバを構成するかということが問題となった。中川と豊田の決断は、「ガラスには全員素人の我々だ。ここは既成概念にとらわれず、無鉄砲でもいい、とにかく突っ走ることのできる研究者を選ぶほかに方法がない。研究所で一番若い連中を探し出して、彼らに走らせてみることにしよう」というものであった。そこで、武蔵野の基礎第3研究室ではなく、東海村の茨城支所・誘電材料研究室の柘野邦夫（1957年 NTT 入社、化学出身）をリーダーとし、その下に若い研究者をつけたのである。当時の茨城支所（1971年3月には茨城電気通信研究所に昇格）でも、ガラス材料を扱っていたのは、海底中継器用のグレーズアルミナ基板（表面を多成分ガラス膜でコーティングしたアルミナ基板）の研究をやっていた柘野だけだった。

柘野の下に集められた人材は、1968年入社の宮下忠、枝広隆夫、1969年入社の中原基博、高橋志郎、埴文明、安光保、そして1971年入社となる堀口正治を含めて7名であった。こうして光ファイバ研究チームが発足し、動き出したのは Corning 社の発表から4ヶ月後の1971年2月であった¹⁰⁾。

柘野は、研究所幹部と相談して、1971年1月頃から「光学ガラス繊維の研究」と題した研究企画書の策定に取りかかり、連続生産ができそうな多成分ガラスファイバを中心テーマに設定した。各段階の審議を経て1971年10月に研究企画書が正式策定された。5年計画で、最終目標を5dB/km、当面の目標を20dB/kmとした。実際には Corning 社の光ファイバは石英系ガラスであったが、この時点では材料や製法について未発表であったし、そもそも当時の電気通信研究所には2,000℃を越えるような高温を出せるような装置がなく、融点が高い多成分ガラスの方が取り組み易かったのである。

やがて柘野らは、小松電子金属（半導体用シリコンウエハメーカー）との共同研究で得た高純度シリカ粉末を使い、二重つぼ法で波長0.6328μmで48dB/kmの多成分ガラス系光ファイバ作製に成功したが、この程度の光ファイバでは通信に使えないことから、石英系光ファイバの研究に重点を移していった¹⁰⁾。

柘野らのチームは1973年9月にNTTとして最初の石英系光ファイバ論文「Eccentric-core glass optical waveguide」を J. Appl. Phys. 誌に投稿し、図3.6に示した光ファイバ断面写真と損失波長特性図をもって1974年2月号に掲載された¹¹⁾。偏心したコア構造をもち、ECOF（Eccentric-Core Optical Fiber）と命名されたファイバのコアには小松電子金属が試作した合成溶融石英ガラス（外径3mm）を用い、クラッドには特殊な硼珪酸ガラス（組成は6SiO₂・1B₂O₃に近く、屈折率は石英ガラスより0.3%低い）を内面に塗布した石英ガラス管（内径8mm、外径10mm）を使用した。コア材とクラッド材を合わせてロッド・イン・チューブ法で線引きすると、コアが石英管内面の一部に偏心して位置する光ファイバが得られ、波長0.80μmにおける損失は10dB/kmであった。図3.6の損失波長特性において、0.95μm波長等の損失ピークは光ファイバ中の水酸（OH）イオンによる吸収損である。ECOFは変則的な構造であったが、これを一つの成果として、光ファイバ研究の進捗状況を見に来る見学者への説明に使用し、しばらくはその場をしのいでいた。

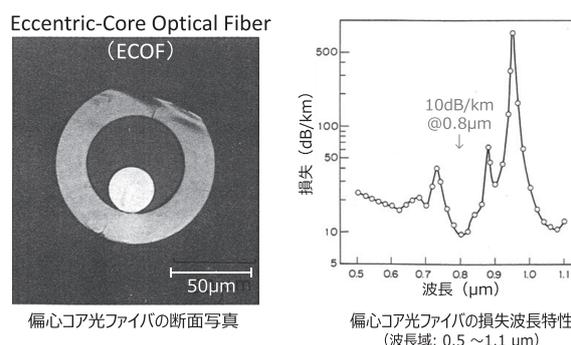


図3.6 NTT 茨城研究所の“偏った”石英系光ファイバ試作（1973年）
（参考文献¹¹⁾をもとに筆者が作成）

1974年春にはNTT研究所の光ファイバ研究体制の整理統合が行われ、武蔵野の基礎第3研究室から1970年博士入社の伊澤達夫、そして1971年入社の小林壯一と川名明夫が茨城研究所に異動した。伊澤は、米国UCLAでの1年間の海外研修の先約があったので、実際には1年遅れて1975年5月の茨城研究所赴任となったが、伊澤の異動は、やがて石英系光ファイバの量産製法となるVAD（Vapor-phase Axial Deposition）法の発明に結びつくことになる。

話は少し前後するが、日本で最初に20dB/kmを実現したのは、通商産業省傘下にあった電子技術総合研究所（ETL：Electrotechnical Laboratory）が1972年に開発した石英系光ファイバETLOFであった¹²⁾。

ETLOFは、クラッド材として屈折率が石英ガラスより小さい硼珪酸系 Vycor ガラス管（ガラス組成が96% SiO₂・4% B₂O₃であり、VycorはCorning社の登録商標）を選び、その中にコア材としての合成熔融石英ガラス棒を挿入したものを線引きしてステップインデックス（SI）型多モード光ファイバとしたものであった。ETLOFは、市販の石英系ガラス材料であっても20dB/km程度の損失値は比較的容易に得られることを実証し、石英系ガラスの素性の良さを示した。

3.1節で紹介した古河電工の村田浩の回想文に象徴されるように、ケーブルメーカーである日本の電線3社（住友電工、古河電工、藤倉電線）は、Corning社の20dB/km光ファイバ発表を知って強い衝撃を受けたが、1969年頃から光ファイバの探索研究を始めていた藤倉電線、そしてSELFOCファイバに関連して日本板硝子やNECと協力関係にあった住友電工も含めて、1970年以降、光ファイバとそのケーブル化の研究開発を本格化していくことになる。

3.4 英国と米国の動き

1966年のKaoの発表と1970年のCorning社の発表に関わる英国と米国の動きを表3.1にまとめたが、英国電気学会IEE誌（Proc. IEE）7月号への論文掲載に先だって、KaoがLondon所在のIEEで1月に講演したこともあって、英国では1966年末までに下記の三つの光ファイバ研究グループが発足した^{13) 14) 15)}。

- 1) STLのC.K. Kaoのグループ、
- 2) 英国郵便公社（BPO）のF.F. Robertsのグループ、
- 3) Southampton大学のW.A. Gamblingのグループ。

Southampton大学グループは国防省のサポートを得て多モード光ファイバの研究を開始し、ロッド・イン・チューブ法による光ファイバの線引きの研究を行った。母材ガラスは市販の多成分系のガラス棒（Schott製F7ガラス）とガラス管（Pilkington製ME1ガラス）を使って、ステップインデックス型多モード光ファイバの試作を行い、140dB/kmに始まり、やがて40dB/kmの損失値を得たが、損失目標値の20dB/kmを達成することはできなかった。

当初はKao提案に興味を示さなかった米国のBell研究所が、光ファイバに関心を寄せ始めたのは、STLのKaoらが石英ガラスの固有損失は約5dB/km（0.85μm）であることを実験的に予測^{16) 17)}した1968年以降であった。1970年になると、Corning社から20dB/km光ファイバ発表があり、同年に半導体レーザーの連続室温発振に成功したBell研究所は光ファイバ通信方式の研究に注力することになった。そして1972年末には、それまでのガスレンズやレンズ列による空間光通信方式の研究を中止した。

Corning社の20dB/km測定値が正しいことを1970年11月にはBPOとSTLが確認したが、20dB/kmを再現できないSouthampton大学とBell研究所は1971～72年頃に液体コア光ファイバの研究を行った。実際、英国で最も早く低損失を実現した光ファ

表 3.1 英国と米国の動き（1965～1974年）

年月	出来事	備考
1965.11	・STLのKaoがIEE誌に論文投稿（1966.2に改訂版を再投稿）	英国郵便公社（BPO）メンバがKao論文を査読
1966.1	・KaoがIEE会合で講演	BPOと国防省（英国）が興味を示す
1966初	・BPO研究所で光ファイバ通信の研究開始	国防省の支援でSouthampton大も研究開始
1966.7	・Kao論文がIEE誌（Proc. IEE）に掲載される	
1966	・BPOメンバがCorningからの訪問者に光ファイバ通信の可能性について示唆	Corningが石英系光ファイバの研究開始
1966	・KaoはBell研を訪問したが、Bell研は光ファイバ通信に関心を示さず	その後、Kaoは日本訪問
1967夏	・CorningのMaurerがRod-in-Tube法で作製した石英系光ファイバは損失大	コアガラスはTiO ₂ 添加石英ガラス（ULEガラス）
1968.1	・CorningのMaurerチームにKeckが参加（数か月後にはSchultzも参加）	同年、KaoがCorningを訪問してKeckと面会
1968	・Kaoらが石英ガラスの固有損失は約5dB/km（0.85μm）であることを実証	光ファイバに関しBell研も真剣に受け止め始める
1970.9	・CorningのMaurerがミリ波導波管中心の国際会議で20dB/km光ファイバ発表	
1970.11	・BPOとSTLがCorningの20dB/km値を検証	
1970晩秋	・KaoがSTLを離れて香港中文大学教授に就任	
1971～72	・Corningの20dB/km値を再現できず、Southampton大とBell研は液体コアファイバを研究	
1972.6	・CorningがGeO ₂ 添加の多モード光ファイバで4dB/km実現	CorningがOVD法の特許出願@1972.1
1972末	・Bell研がガスレンズ研究を中止して光ファイバ研究に傾注（一部の元ガスレンズ研究者は単一素材の石英系光ファイバを研究）	
1973～74	・熱酸化CVD法による石英系光ファイバ作製で英国勢とBell研が先陣争い ・Bell研がMCVD法による1.1dB/km光ファイバ発表@1974.7	Bell研がMCVD法の特許出願@1974.2

イバは Southampton 大学が試作した液体コアファイバであった。ガラス管を延伸して毛細管状の中空ファイバを製作し、その内部に高屈折率の液体を充填して光を伝搬させるものであり、英国のガラスメーカー Pilkington 製の ME1 ガラス管を引き伸ばした内径 120 μm の中空ガラスファイバにヘキサクロロブタジェン (HCB) を注入したものは、1972 年に 7dB/km (1.08 μm) の低損失値を実現した¹⁸⁾。Bell 研究所でも石英ガラス製の中空ファイバにテトラクロロエチレン (あるいはテトラクロロエチレンとカーボンテトラクロライドの等量混合液) を注入して、0.84~0.86 μm と 1.04~1.1 μm 波長域で 20dB/km ないしそれ以下の損失値を実現した¹⁹⁾。同時期には、オーストラリアの産官連携チームでもテトラクロロエチレンの液体コアの研究が行われて、1.09 μm , 1.205 μm , 1.28 μm の各波長で 8dB/km 以下の損失値が報告されている²⁰⁾。こうした液体コアファイバは液体の注入に長時間が必要で、実用性には問題があったが、伝送特性の基礎研究に役立った。

1972 年末の Bell 研究所では、ガスレンズの研究から転向した P. Kaiser らが、石英ガラスのみからなる単一素材 (SM: Single Material) 光ファイバの研究を行った²¹⁾。当初は、28dB/km (@1.06 μm) であった多モード光ファイバの損失値は、より高品質の合成石英ガラス材料を採用することにより、1974 年に入ると、図 3.7 に断面写真を含めて示したように、約 3dB/km (@1.1 μm) にまで低減した²²⁾。波長 0.95 μm 付近の損失増は石英ガラス中の OH イオン (水酸基) の光吸収損に相当するが、吸収ピークが 3dB 程度と比較的小さいことは、Kaiser らが OH 含有濃度の低い “dry” な合成石英ガラス (a Spectrosil WF core on a Suprasil W1 slab) を用いたことを反映している。

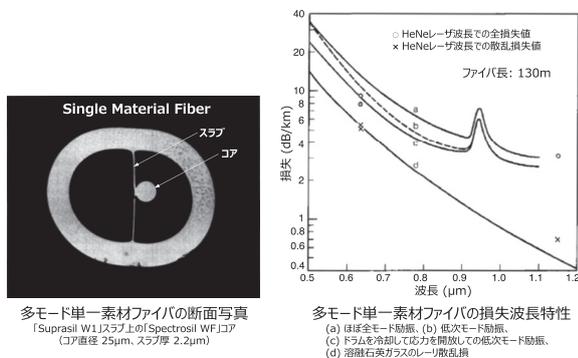


図 3.7 Bell 研究所の初期の石英系光ファイバ試作例
(参考文献²²⁾ をもとに筆者が作成)

Kaiser らの単一素材光ファイバは過渡的な研究テーマであったが、副産物として図 3.8 に示すように

石英ガラス中の OH 吸収損の大きさを定量的に解明した論文「Spectral losses of unclad vitreous silica and soda-lime-silicate fibers」を 1973 年に発表し、その後の石英系光ファイバ低損失化 (= 低 OH 化) に向けての良き指針となった²³⁾。

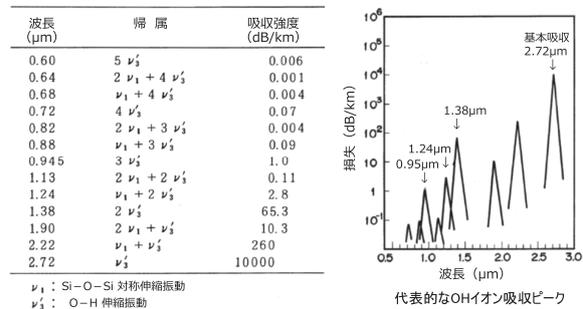


図 3.8 石英ガラス中の OH イオンによる吸収波長と 1ppm 当りの吸収損
(参考文献²³⁾ をもとに筆者が作成)

その一方で Corning 社であるが、1970 年の 20dB/km 発表以降も、光ファイバの材料や製法に関する成果は発表せず、特許出願に力を入れていた。1973 年 4 月号の APL (Appl. Phys. Lett.) 誌には同社の 3 人組による論文「On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides」(論文受理は 1972 年 12 月 1 日) が掲載され、波長 0.80~0.85 μm と 1.05 μm で 4dB/km の低損失値が実現できたがあったが、ここでも材料や製法への言及はなかった²⁴⁾。やがて公開となった一連の米国特許

- ① 「Method of Forming Optical Waveguide Fibers」, USP 3,737,292 (Filed Jan. 3, 1972)²⁵⁾、
- ② 「Method of Forming Light Focusing Fiber Waveguide」, USP 3,823,995 (Filed Mar. 30, 1972)²⁶⁾、
- ③ 「Germania Containing Optical Waveguides」, USP 3,884,550 (Filed Jan. 4, 1973)²⁷⁾、

から、他機関の光ファイバ関係者達は、Corning 社が新たに外付 (OVD: Outside Vapor Deposition) 法を開発し、石英ガラスへの屈折率制御用ドーパント (添加物) を TiO_2 から GeO_2 に変更したことを理解した。

Corning 社の外付 (OVD) 法の最初の米国特許①の明細書図面 (Fig.1~Fig.4) を図 3.9 に示したが、まずは火炎加水分解反応によって出発棒 12 の外周にコア用多孔質ガラス 10 を堆積し、続いてクラッド用多孔質ガラス層を堆積 (Fig.2) させる。その後、出発棒 12 を削り出す (あるいは引き抜く) などの手段で除去 (Fig.3) し、中空になったコアクラッド複合多孔質ガラス体を電気炉 28 中で高温に加熱して中実

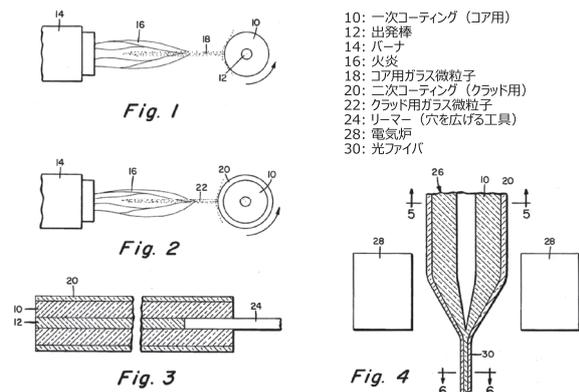


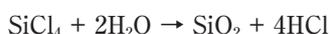
図 3.9 Corning 社本命の「外付 (OVD) 法」特許明細書より

(参考文献²⁵⁾をもとに筆者が作成)

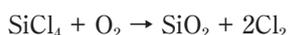
透明ガラス化すると同時に線引き (Fig.4) して光ファイバを得るのである。この特許図面のみでは解り難いので、Corning 社の Keck が 2010 年に寄稿した招待論文²⁸⁾に載っていた立体的なプロセス説明図を図 3.10 に示し、さらに同社の Schultz が 2010 年に公開³⁾した初期の OVD 装置写真を図 3.11 に示した。三つの図を合わせると外付 (OVD) 法のプロセス手順が理解し易い。

OVD 法では、上述の特許②で請求されているように、ガラス微粒子合成バーナに供給する原料ガス中のドーパントガス濃度を時間的に変化させることによって (日本板硝子の SELFOC ファイバのようなイオン交換技術に頼ることなく)、集束形すなわちグレーデッドインデックス (GI) 型の屈折率分布も形成可能であり、必要に応じて多彩な屈折率分布を実現できるようになった。

その一方で、この時期の英国での最も重要な成果は Southampton 大学と STL がそれぞれ独立に行った熱酸化反応での CVD 法による石英系光ファイバ作製法の研究である。すなわち、Corning 社の火炎加水分解反応



では、生成された石英系ガラス中に H_2O に起因する OH イオンが多量に含まれてしまうが、熱酸化反応



であれば、OH イオンの混入を抑制することができると、英国勢は考えたのである。

STL と Southampton 大学は、屈折率制御用のドーパント原料として、それぞれ四塩化ゲルマニウム (GeCl_4) と三塩化燐 (PCl_3) を使用し、熱酸化 CVD 法により、石英ガラス管の内側に、それぞれ $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系と $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 系のガラス層を堆積 (内付け) させ、それを線引きして、 $0.83\mu\text{m}$ 波長域でそれぞれ 4 dB/km と 2.7 dB/km の光ファイバを実現した^{29) 30)}。

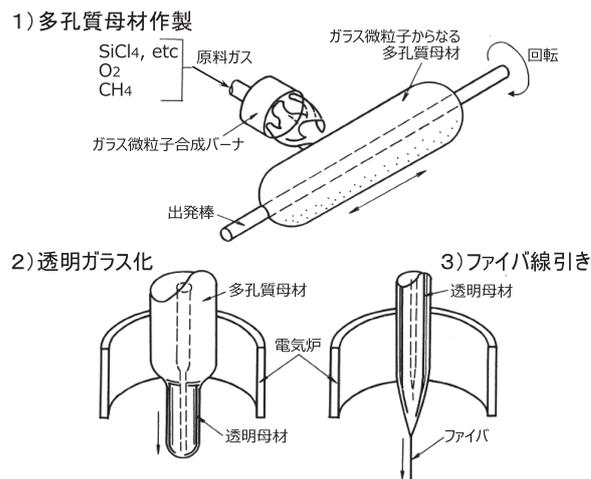


図 3.10 Corning 社の外付 (OVD) 法プロセス

(参考文献²⁸⁾をもとに筆者が作成)

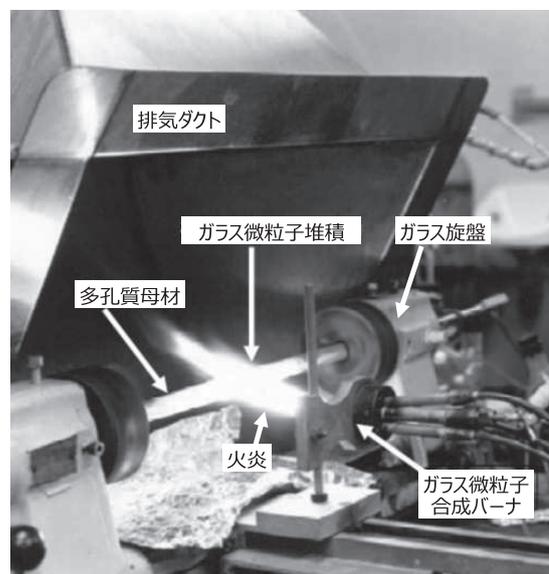


図 3.11 Corning 社の初期の外付 (OVD) 装置

(参考文献³⁾をもとに筆者が作成)

ここでは、 2.7 dB/km を記録した Southampton 大の $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 系光ファイバの損失波長特性を光ファイバの断面写真付で図 3.12 に示した³⁰⁾。この多モード光ファイバを作製するための熱酸化反応 CVD は電気炉 (= 光ファイバ線引炉) 中に設置されて回転する石英ガラス (Suprasil) 管中で行われ、約 1 時間でコアに適する層厚が得られた。 $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ ガラスが堆積した石英ガラス管は中実化とファイバ線引きを同時、あるいは 2 段階に分けて行われた。1.2km の長さに線引きされた光ファイバのコア径は $50\mu\text{m}$ 、外径は $150\mu\text{m}$ であった。図 3.12 では波長 $0.95\mu\text{m}$ に 35 dB/km 程度の OH イオン吸収損失ピークが現れているが、これはクラッドとして OH イオン濃度が高い合成石英ガラス (Suprasil) 管の高 OH イオン濃度によるとされた。

図面は省略するが、遷移金属不純物が多いがOHイオン濃度が低い熔融石英ガラス（Heralux）管を用いて試作した光ファイバでは、0.83 μm 波長域での損失は増加してしまっていたが、OHイオン吸収損失ピーク自体は35dB/kmから6dB/kmへと減少した³⁰⁾。

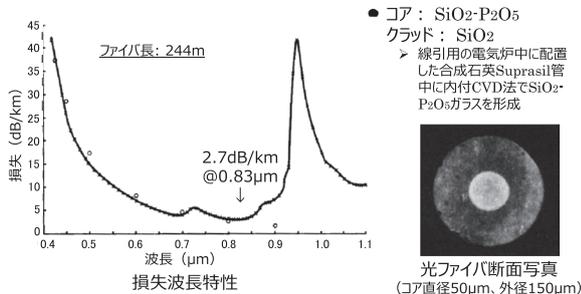


図 3.12 英国 Southampton 大学の 2.7dB/km 石英系光ファイバ試作
(参考文献³⁰⁾をもとに筆者が作成)

3.5 Bell 研究所の MCVD 法発表

英国の STL や Southampton 大とほぼ同時期に、米国の Bell 研究所においても熱酸化反応 CVD 法による石英系光ファイバの研究が開始され、三つの機関は競争関係にあった。Bell 研究所の J.B. MacChesney が先んじたことは、熱酸化反応 CVD の舞台として電気炉ではなくガラス旋盤（Glass Lathe）を活用した点にある。図 3.13 には出願日が 1974 年 2 月 22 日に遡及する Bell 研究所特許「Optical Fiber Fabrication and Resulting Product」(USP 4,217,027) の図面例を示した³¹⁾。この MacChesney らの石英系光ファイバ製法は、後に MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法と名付けられたが、やはり特許図面のみでは解り難いので、筆者が描いた MCVD 法による光ファイバ母材の作製工程を図 3.14 に示した。すなわち MCVD 法では、 SiCl_4 等のガラス形成原料ガスを酸素 (O_2) ガスと混合して、ガラス旋盤上にセットされ回転している石英ガラス管に導く。石英ガラス管を外部から酸水素バーナで局所的に加熱 (1,400~1,700 $^{\circ}\text{C}$) することにより、 SiCl_4 等は管内で酸化され、生成したガラス微粒子は下流側の管内壁に付着する。加熱部の移動に伴ってガラス微粒子は焼結され薄いガラス層となる。この工程を数十回以上繰り返した後、原料ガスの供給を止め、バーナ加熱温度を上昇 (~1,900 $^{\circ}\text{C}$) させると、ガラス管は表面張力で収縮し、中空部を完全につぶすこと (中実化: collapse) ができる。こうして作製した母材は、コア径/外径比の調

整のために必要に応じて別の石英ガラス管（ジャケット管）に収められ一体として線引きされ所望の光ファイバとなる。屈折率分布の制御は、原料ガス中のドーパント (GeCl_4 や BCl_3 等) 濃度を時間的に変化させることによって行われ、SI 型、GI 型、単一モード型などの各種構造の光ファイバを作製できる。MCVD 法では、室内に不純物があっても石英ガラス管内は清浄状態に保たれる。そして反応容器としての石英ガラス管をガラス旋盤上で回転させつつ酸水素バーナで局所的に加熱 (ゾーン加熱) することで、石英ガラス管の変形 (垂れ下がり) を防止できる巧みさがある。

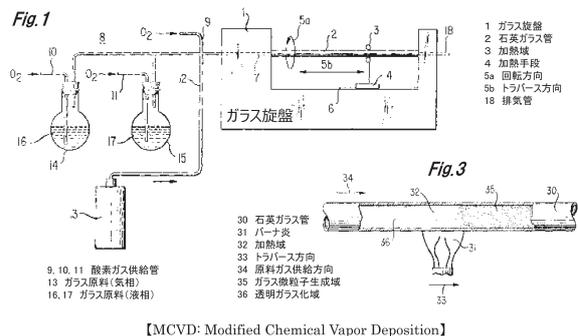


図 3.13 Bell 研究所の特許明細書より
(参考文献³¹⁾をもとに筆者が作成)

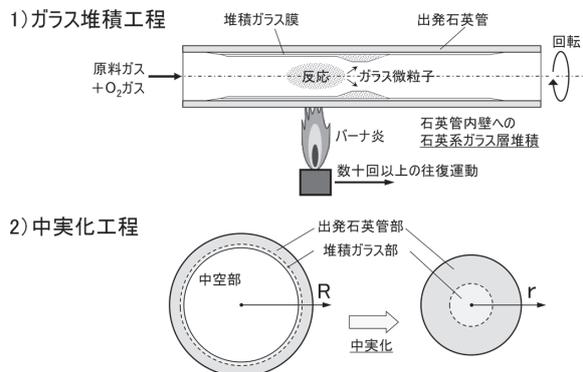


図 3.14 MCVD 法による光ファイバ母材作製工程

図 3.15 は、MCVD 法で作製された石英系光ファイバの損失波長特性例であり、BSTJ (Bell System Technical Journal) 誌の 1974 年 5-6 月号に掲載された論文「Optical Waveguides with Very Low Losses」から引用したものである³²⁾。図 3.15a は SiO_2 クラッド層に続いて $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ コア層を堆積させた光ファイバの特性、図 3.15b は $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ クラッド層に続いて SiO_2 コア層を堆積させた光ファイバの特性である。特に図 3.15b では当時としては世界最小の 1.1dB/km (@1.02 μm) を記録していて、それまでは Corning 社の後塵を拝していた Bell 研究所の存在感を一気に高めることになった。1.1dB/km は光ファイバに入射した光の 78% が 1km 先まで届くことを意味

し、ミリ波導波管の直線部での損失値や空間光通信で期待される最良損失値に匹敵していた。

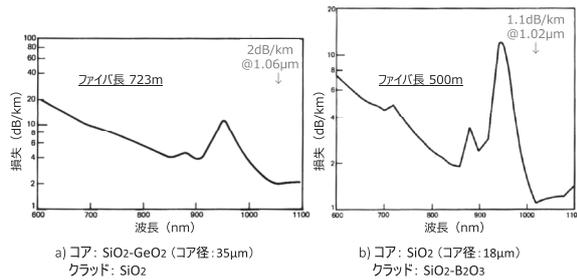
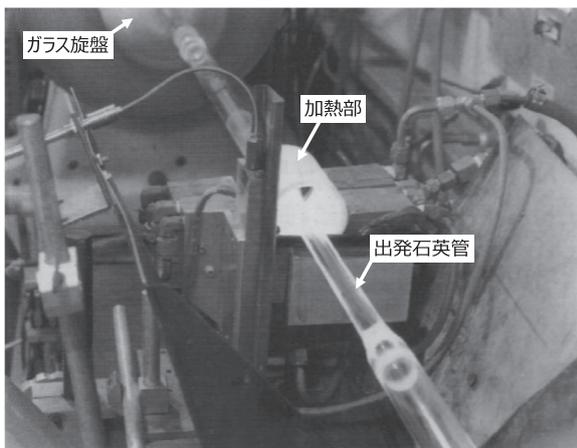


図 3.15 MCVD 法による石英系光ファイバの損失特性例
(参考文献³²⁾をもとに筆者作成)

同じ1974年の7月には第10回国際ガラス会議 (International Congress on Glass) がアジアで初めて京都で開催され、最終日の7月12日には光ファイバ関連のセッションがあった。このセッションには、Bell 研究所、Corning 社、NTT 茨城研究所、日本板硝子等から計15件の論文が発表された。NTT 茨城研究所の栞野チームからは宮下による ECOF を含む石英系光ファイバ関連の発表と高橋による多成分系光ファイバ関連の発表、そして日本板硝子からは西澤や池田による SELFOC ファイバ関連の発表があったが、何と云っても一番注目されたのは Bell 研究所の MacChesney が発表した MCVD 法に関する論文「Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion」であった³³⁾。MacChesney は BSTJ 誌 (1974年5-6月号) には載せていなかった MCVD 装置写真のスライド (図 3.16) を提示しながら作製プロセスを詳細に報告したのである。



【1974年7月の国際ガラス会議(京都)で公表】

図 3.16 Bell 研究所の MCVD 装置
(参考文献³³⁾をもとに筆者作成)

当時の日本では、NTT をはじめとして、主要電線メーカーは AT&T と何らかの形で特許に関する契約を

もっていて、AT&T 傘下の Bell 研究所とも交流しやすい状況にあった。実際、MacChesney は京都でのガラス会議の後に国内の各社を訪問して MCVD 法について説明をしたので、各社は一斉に MCVD 法の追試を始めた。日本での本格的な石英系光ファイバの開発は、MacChesney の発表を聴いてのガラス旋盤の手配から始まったといっても過言ではない。

第10回国際ガラス会議での Bell 研究所の発表姿勢であるが、当時の AT&T は世界的に独占的な実力と競争力を持っていて、革新的な技術を発表すれば、その技術を導入したいという企業が必ず現れた。独占禁止法に触れないためにも Bell 研究所は積極的な発表を行い、合理的な価格でライセンスを行うことを善としていた。逆に Corning 社の場合は、当時の新しい技術としては石英系光ファイバしかなく、自社で光ファイバの製造と販売ができなければ、何も得られなくなる恐れがあった。そのために、学会発表内容は必要最小限に留めて、ノウハウ流出防止に徹していたのである²⁾。

3.6 改めて石英系ガラスとは

Corning 社の OVD 法と Bell 研究所の MCVD 法の開発により、通信用光ファイバ材料として石英系ガラスの優位性が確実に上がったが、以下、改めて石英系ガラスの性質について概説する。

表 3.2 に製造法による石英ガラスの分類を示したが、「熔融法」と「合成法」に大別できる³⁴⁾。石英ガラスの製造が始まったのは1800年代前半からであり、それ以前には石英を熔融する熱源がなく、熔融は困難であったが、酸水素炎の研究開発により2,000℃以上の高温が得られるようになり、石英ガラスの製造が可能になった。その後、1800年代後半から1900年代初頭にかけて、熱源としてアーク放電や抵抗加熱などの電気的熱源を利用した製法も開発された。当初は原料として水晶 (Quartz) が用いられたので、石英ガラスは熔融水晶 (Fused Quartz) とも呼ばれた。天然の水晶には僅かながら遷移金属不純物が含まれるが、1900年代に入って化学的に合成した四塩化シリコン (SiCl₄) を原料とする合成法が開発された。1970年代に入って開発された通信用石英系光ファイバの三大製法 (OVD、MCVD、そして VAD 法) は、合成法の中のスート (Soot) 法に属している。

図 3.17 は、石英ガラスの SiO₂ 網目構造と、多成分系ガラス例としての SiO₂-Na₂O 系ガラス構造の二次元模式図である。石英ガラス (図 3.17a) では、ガラス

表 3.2 製造法による石英ガラスの分類

(参考文献³⁴⁾をもとに筆者作成)

分類名称	電気溶融法	酸水素炎溶融法	合成法				
			直接法	プラズマ法	スート法	ゾルゲル法	
原料	水晶	水晶	四塩化シリコン SiCl ₄	四塩化シリコン SiCl ₄	四塩化シリコン SiCl ₄	シリコンアルコシド Si(OC ₂ H ₅) ₄ 等	
製法	アークプラズマ、 または電気炉による溶融	酸水素炎による 溶融	四塩化ケイ素を酸 水素炎中で加水 分解して、シリカ (SiO ₂)微粉を生成させ溶融	四塩化ケイ素を高 周波プラズマ中で 熱酸分解し、シリ カ微粉を生成させ 溶融	四塩化ケイ素から 熱酸化、または加 水分解でシリカ多 孔質体を作り、焼 結してガラス化	シリコンアルコシドから シリカ多孔質体を作 り、焼結してガラス 化	
不純物	金属不純物 (ppm)	50~100	< 100	< 1	< 1	< 1	
	OHイオン量 (ppm)	< 10	100~300	800~1,300	< 5	< 1 または200程度	< 1 または200程度
光学的性質	紫外線吸収帯 (240nm)	あり	あり	なし	あり	なし	なし
	赤外線吸収帯 (2.7μm)	小	中	大	なし	なし(低OH品) 中(OH含有品)	なし(低OH品) 中(OH含有品)
主な用途	・半導体製造用 治具 ・ランプ	・半導体製造用 治具 ・シリカガラス繊維 ファイバー	・フォトマスク ・光学材 (I ⁺ マラーザ)	・光ファイバ	・光ファイバ ・光学材 ・TFT基板 ・フォトマスク	・シリカガラス繊維 ファイバー	
呼称	Type I	Type II	Type III	Type IV			

全体がSiとOから成る一つの巨大な網目構造を形成し、強く共有結合しているため、高温でも変形しにくい。一方、多成分系ガラス(図3.17b、ここではSiO₂-Na₂O系)では、NaがNa⁺イオンとして入り込んで、SiとOの網目構造が切断されて結合力が弱まる結果、溶融温度が低くなり、硬度も低下することになる。網目構造を切断する働きをする網目修飾化合物にはNa₂Oの他に、Li₂O、CaO、MgOなどのアルカリやアルカリ土類金属の酸化物が属している。

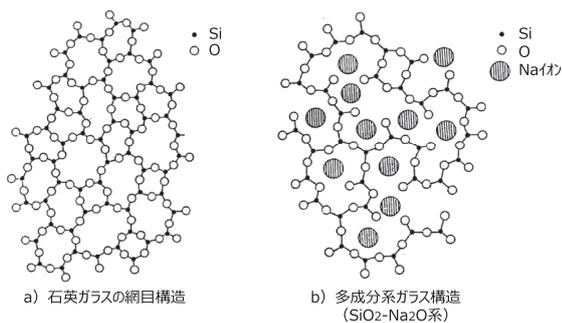


図 3.17 石英ガラスと多成分系ガラスの構造模式図

しっかりと網目を形成している100%石英ガラスの軟化温度は1650℃前後で、成形温度は1,800~2,100℃と高いために、2,000℃くらいの高温にしないと成型加工ができないが、石英ガラスは優れた耐熱性や透光性、機械的強度をもつことから、ろつぽ材料や理化学機器などの分野に応用されてきた。表3.3に石英ガラスの主な物理定数を示した^{35) 36)}。

表 3.3 石英ガラスの物理定数

(参考文献^{35) 36)}をもとに筆者作成)

屈折率	1.458 (λ _D = 0.589 μm) 1.445 (λ = 1.3 μm)
光透過波長域	0.16~4.5 μm
屈折率温度係数(熱光学定数)	1 × 10 ⁻⁵ /°C
熱伝導率	1.4 W/(m・°C)
熱膨張率	0.51 × 10 ⁻⁶ /°C
比熱	772 J/(kg・°C)
軟化温度	~1650°C
密度	2.2 × 10 ³ kg/m ³
ヤング率	7.3 × 10 ¹⁰ N/m ²
剛性率	3.1 × 10 ¹⁰ N/m ²
ポアソン比	0.17
音速	5.90 × 10 ³ m/s(縦波) 3.75 × 10 ³ m/s(横波)

石英ガラスに添加して共に網目を形成可能なドーパントとしては、GeO₂、P₂O₅、B₂O₃、TiO₂などが一般的であり、酸素の一部を置き換える陰イオンとしてF(フッ素)もドーパントになる。こうした石英系ガラスを構成する網目形成化合物となる元素のほぼ共通の性質として、それらの元素が常温で液状の塩化物(SiCl₄、GeCl₄、PCl₃、TiCl₄など)をもっている点がある。液状の塩化物は容易に気化させることが可能であり、気相反応を用いて遷移金属不純物の少ない石英系ガラスを合成することができる。主原料ガス(SiCl₄)に添加するドーパントガス(GeCl₄など)の比率によって石英系ガラスの屈折率値を精密に調節することが可能であり、光ファイバの導波構造(コア部とクラッド部)形成の基本になっている。

図 3.18 には石英系ガラスの屈折率値 ($\lambda_D = 0.589\mu\text{m}$) のドーパント濃度依存性を示した。TiO₂、GeO₂、P₂O₅、Al₂O₃ は屈折率値を増加させ、逆に B₂O₃、F は減少させる³⁷⁾。屈折率値は波長依存性をもっているが、代表例として 100% 石英ガラスの屈折率値の波長依存性を図 3.19 に示した³⁵⁾。

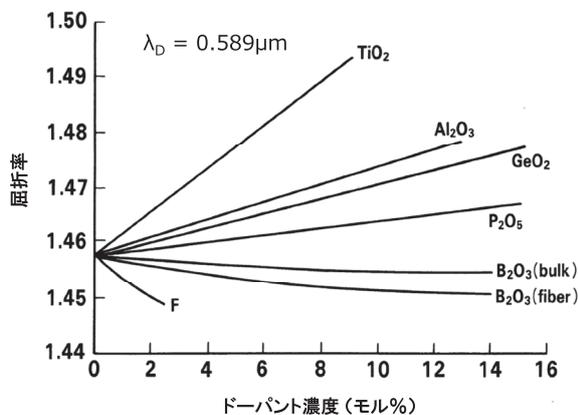


図 3.18 ドーパント濃度と屈折率の関係³⁵⁾

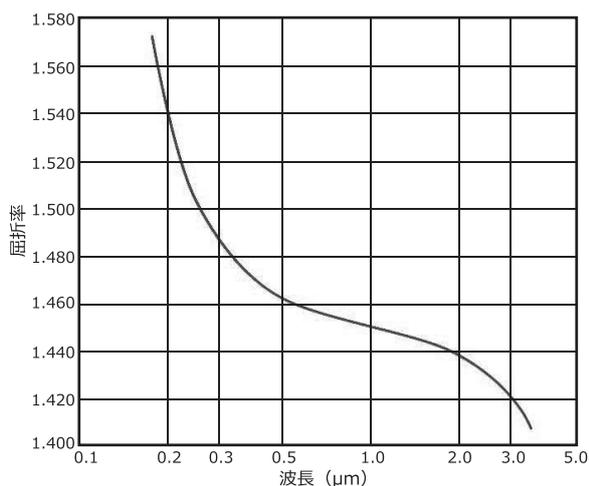


図 3.19 石英ガラス屈折率の波長依存性

(参考文献³⁵⁾をもとに筆者作成)

通信用光ファイバ材料としての石英系ガラスの見落としてはならない特長は、内部にアルカリやアルカリ土類金属イオンを含まない網目構造ゆえに熱的に極めて安定で、簡単には結晶状態 (SiO₂ の結晶相の一つクリストバライト) に転移しないことである。光ファイバ製造工程では何回もの温度サイクルを経るが、温度の上下によっても光散乱損失の原因になるような結晶化は発生しない。こうした石英系ガラスの例外的な素性の良さが、窯業から離れた CVD 製法と相伴って、次章以降で述べるように、ガラス製造については素人集団であった NTT 研究所と電線 3 社による急速なキャッチアップ (MCVD 法の改良) と新たな光ファイバ量産製法 (VAD 法) の開発を可能にしたのである。

参考・引用文献

- 1) F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer : "Radiation losses in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., Vol.17, No.10, pp.423-425, 1970.
- 2) 村田浩, 小泉健, 新関暢一:「光ファイバの歴史 開拓者たちのメモアール」, 工業通信, 2001.1.20.
- 3) P.C. Schultz : "Making the First Low-Loss Optical Fibers," OPN Optics and Photonics, Vol. 21, No. 10, pp.30-35, Oct, 2010.
- 4) J.F. Hyde : "Method of Making a Transparent Article of Silica," USP 2.272.342 (Filed Aug 27, 1934. Patented Aug Feb.10, 1942) .
- 5) M.E. Nordberg : "Glass Having an Expansion Lower than that of Silica," USP 2.326.059 (Filed Apr 22, 1939. Patented Aug 3, 1943) .
- 6) 西澤紘一:「ブレイクスルーを成功させるために」, NEW GLASS, Vol.22, No.3, pp.1-4, 2007.
- 7) 小泉健:「光ファイバー」, テレビジョン, Vol.31, No.8, pp.635-642, 1977.
- 8) 喜安善市:「情報通信の源流を求めて」, 三田出版会, 1997.7.25 発行 .
- 9) 藤芳誠一, 菌出碩也, 山田雄一, 根本孝:「製品開発における競争と協力 - 日本企業の光ファイバ開発の分析 -」, 明治大学 社会科学研究所紀要, 第 26 巻第 1 号, pp.107-160, 1987 年 10 月 .
- 10) 栢野邦夫:「光ファイバ物語」, サイバー出版センター, 2014.12.
- 11) T. Miyashita, T. Edahiro, S. Takahashi, M. Horiguchi, and K. Masuno, "Eccentric-core glass optical waveguide," J. Appl. Phys., Vol.45, No.2, pp.808-809 (1974) .
- 12) Daisuke Kato : "Fused - silica - core glass fiber as a low - loss optical waveguide," Appl. Phys. Lett. Vol.22, No.3, p.34, 1973.
- 13) W.A. Gambling : "The Rise and Rise of Optical Fibers," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vo.6, No.6, pp.1084-1093, 2000.
- 14) C.K. Kao : "Sand from Centuries Past : Send Future Voices Fast," Nobel Prize Lecture, Dec. 8, 2009.
- 15) JEFF HECHT : "City of Light : The Story of Fiber Optics," OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2004 (付属の年表: A Fiber-Optic Chronology) .
- 16) K. C. Kao and T. W. Davies, "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses I," J. Sci. Instrum. (J. Phys. E) , Vol. 1, pp. 1063-8, 1968.

- 17) M. W. Jones and K. C. Kao, "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses II," J. Sci. Instrum. (J. Phys. E) , Vol. 2, pp. 331-335, 1969.
- 18) W.A. Gambling, D.N. Payne and H. Matsumura, "Gigahertz bandwidth in multimode, liquid-core optical fibre waveguide," Optical Communications, Vo.6, No.4, pp.317-322, 1972.
- 19) J. Stone, "Optical Transmission in Liquid-Core Quartz Fibers," Appl. Phys. Lett., Vol.20, pp.29-240, 1972.
- 20) G.J. Ogilvie, R.J. Esdaile and G.P. Kidd, "Transmission loss of tetrachloroethylene-filled liquid-core-fibre light guide," Electron. Lett., Vo.8, No.22, pp.533-534, 1972.
- 21) P. Kaiser, E.A.J. Marcatili, and S.E. Miller, "A New Optical Fiber," Bell Syst. Tech. J., Vol. 52, No. 2, pp.265-269, February, 1973.
- 22) P. Kaiser and H.W. Astle, "Low-Loss Single-Material Fibers Made From Pure Fused Silica," Bell Syst. Tech. J., Vol.53, No. 6, pp.1021-1039, July-August 1974.
- 23) P. Kaiser, A.R. Tynes, H.W. Astle, A.D. Pearson, W.G. French, R.E. Jaeger and A.H. Cherin : "Spectral losses of unclad vitreous silica and soda-lime-silicate fibers," J. Opt. Soc. Am., Vol.63, No.9, pp.1141-1148, 1973.
- 24) D.B. Keck, R.D. Maurer, and P.C. Schultz : "On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., Vol.22, No.7, pp.307-309, 1973.
- 25) D.B. Keck, B. Flats, P.C. Schultz : "Method of Forming Optical Waveguide Fibers," USP 3,737,292 (Filed Jan. 3, 1972, Patented June 5, 1973)
- 26) L.L. Carpenter : "Method of Forming Light Focusing Fiber Waveguide," USP 3,823,995 (Filed Mar. 30, 1972. Filed July 16, 1974)
- 27) R.D. Maurer and P.C. Schultz : "Germania Containing Optical Waveguides," USP 3,884,550 (Filed Jan. 4, 1973. Patented May 20, 1975)
- 28) D. Keck : "A Future Full of light," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.6, No.6, PP.1254-1258, 2000.
- 29) P.W. Black, J. Irven, K. Byron, I.S. Few, R. Worthington : "Measurements on waveguide properties of GeO₂-SiO₂-cored optical fibres," Electron. Lett., Vol.10, No.12, pp.239 - 240, 1974.
- 30) D.N. Payne and W.A. Gambling : "New silica-based low-loss optical fibre," Electron. Lett., Vol.10, No.15, pp. 289-290, 1974.
- 31) J.B. MacChesney and P.B. O'Conner : "Optical Fiber Fabrication and Resulting Product," USP 4,217,027 (Filed Aug. 29, 1977. Filed Aug. 12, 1980) 特許出願日は1974年2月22日に遡及。
- 32) W.G. French, J.B. MacChesney, P.B. O'Conner and G.W. Tasker, "Optical Waveguides with Very Low Losses," Bell System Technical Journal, Vol.53, No.5, pp.951-954, 1974.
- 33) J.B. MacChesney, P.B. O'Conner, E.V. DiMarcello, J.R. Simpson and P.D. Lazay, "Preparation of low loss optical fibers using simultaneous vapor phase deposition and fusion," 10th Int. Congr. on Glass, Vol.6, pp.40-45, Kyoto, Japan, July 1974.
- 34) 小野田元 : 「石英ガラス概論 (第3回)」, Journal of Advanced Science, Vol.11, No.3, 1999.
- 35) 信越石英株式会社 : 「石英ガラスの技術ガイド -2 -- 石英ガラスの光学的特性」, PC-TG-OPC-007, <http://www.sqp.co.jp/seihin/catalog/pdf/g2.pdf>
- 36) 信越石英株式会社 : 「石英ガラスの技術ガイド -1 -- 石英ガラスの化学的, 物理的特性」, PC-TG-CFC-006, <http://www.sqp.co.jp/seihin/catalog/pdf/g1.pdf>
- 37) S.E. Miller and A.G. Chynoweth : "Optical Fiber Telecommunication," Academic Press, London & New York, 1979, p.188.

4 | MCVD 法の改良で日本が先導した長波長帯の開拓

Bell 研究所による 1974 年 7 月の MCVD 法の発表を契機として本気になった日本勢が石英系光ファイバの研究開発に取り組み、まずは MCVD 法を改良しての低損失長波長帯の開拓を通じて、世界的な存在感を高めていく。本章では、その過程を、1) NTT と電線 3 社の共同研究体制の構築、2) NTT 茨城研究所での MCVD 装置の立ち上げ、3) 低損失 (0.47dB/km@1.2 μ m) SI 型多モード光ファイバの開発、4) MCVD 母材中の OH イオン分布測定と単一モード光ファイバの低損失化努力、5) 内圧制御 MCVD 法の開発、6) 極低損失 (0.2dB/km@1.55 μ m) 単一モード光ファイバの開発、7) MCVD 法によるグレーデッドインデックス (GI) 型多モード光ファイバの開発、の順に報告する。

4.1 NTT と電線 3 社の共同研究体制の構築

前章で述べたように、20dB/km ファイバ発表後の Corning 社は、1972 年には新たに「外付 (OVD) 法」の特許出願を行い、屈折率制御のドーパントも TiO₂ から GeO₂ に変更していた。新規事業としての光ファイバの開発資金が必要な Corning 社は、1972 年に NTT (当時の電電公社) にも 7~8 億円相当の出資を求めてきた。しかし、当時の前田光治技術局長は出資を断り、茨城研究所での光ファイバ研究チーム発足 (1971 年 2 月) を踏まえて、日本自体で改良と開発が十分にできる体制作りの道を選ぶことにした。Corning 社は古河電工・富士通グループと技術契約を結ぶことを決意し、契約は 1973 年 10 月に締結され、有効期間は 5 年間であった¹⁾。

Corning 社への出資を断り、1974 春には武蔵野研究所から茨城研究所への研究者の異動を含めて光ファイバ研究体制の整理統合を行った NTT は、1974 年 7 月の Bell 研究所発表の MCVD 法による 1.1dB/km 報告に接すると、電線 3 社との交渉を進め、1975 年 5 月 1 日開始で住友電工と藤倉電線 (現フジクラ) と光ファイバと光ファイバケーブルに関する共同研究契約を結んだ。古河電工との契約は少し遅れて 6 月 25 日開始となった。古河電工は Corning 社と契約を結んでいたため、混乱を避けるために、共同研究の第 1 委員会を「NTT 研究所と住友電工と藤倉電線」で、第 2 委員会を「NTT 研究所と古河電工」で構成し、各委員会の下に、ファイバ分科会とケーブル分科会をそ

れぞれ設置した。この NTT と電線 3 社との共同研究は 1983 年 9 月まで続くことになる²⁾。

電線 3 社との共同研究での NTT の基本方針は、① MCVD 法を改良して、さらなる低損失化 (極限追及) を進めること、②量産に適した国産製法 (後の VAD 法) を新たに開発すること、の 2 つであり、その推進のために茨城研究所には 2 つの研究グループが編成された。そして早期実用化が期待されていた多モード光ファイバを電線 3 社が主に担当し、NTT 研究所は将来寄りと考えられていた単一モード光ファイバを主に担当することになった。

1976 年春には茨城研究所の大幅な組織再編が行われ、部品材料研究部の光部品研究室 (高田久夫室長) が光ファイバ担当になった。1973 年入社 of 筆者は、このタイミングで液晶表示研究チームから光ファイバ研究チームに異動した。茨城研究所の線路研究部には光線路研究室が新設され、茨城での光ファイバ研究草分けの枅野邦夫が初代室長になった。1977 年には NTT 横須賀研究所の伝送研究部に光伝送研究室が新設され、初代室長をミリ波伝送研究室長の島田禎晋が兼任した。長年に渡ってミリ波導波管伝送方式の開発を進めてきたミリ波伝送研究室は、その 1 年後に廃止となった。

そして、光ファイバに関する NTT と電線 3 社との共同研究は、下記のように 1983 年 9 月まで続くことになる。

第 1 期 (1975 年 5 月~1978 年 3 月)

- ・ MCVD 法の改良
- ・ 純国産 VAD 法の誕生

第 2 期 (1978 年 4 月~1981 年 3 月)

- ・ 光ファイバ通信の大規模現場試験 (FR-1 と FR-2)
- ・ VAD 単一モード光ファイバの開発スタート

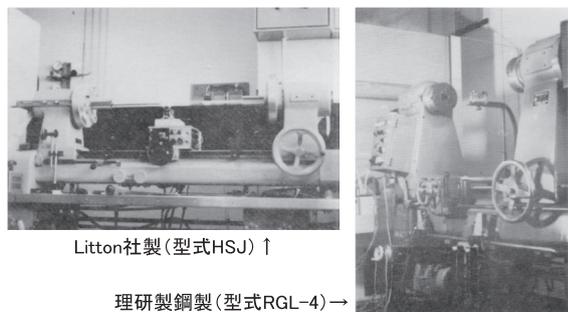
第 3 期 (1981 年 4 月~1983 年 9 月)

- ・ 単一モード光ファイバの現場布設伝送実験 (FR-L)
- ・ VAD 単一モード光ファイバの商用化

4.2 NTT 茨城研究所での MCVD 装置の立ち上げ

話を少し戻すが、1974 年 7 月の国際ガラス会議での Bell 研究所の MCVD 発表に驚いた NTT 茨城研究所の枅野らは MCVD 法のベースとなるガラス旋盤

(Glass Lathe) の確保を図った。入手した2台のガラス旋盤(米国 Litton 社製 HSJ と理研製鋼製 RGL-4)の写真を図 4.1 に示した。Litton 社製は武蔵野研究所(電子管研究室)で不要になったものを茨城に移管したものであった。写真は省略するが、もう1台、近くの機械メーカーにもガラス旋盤を試作してもらい、初期の MCVD 実験に用いたが、使い勝手は悪かった。



Litton社製(型式HSJ) ↑

理研製鋼製(型式RGL-4) →

図 4.1 NTT 茨城研究所のガラス旋盤

元来はガラス細工のための装置であるガラス旋盤は、ガラス棒またはガラス管を保持し回転する部分、軟化したガラス棒やガラス管を引き伸ばす(あるいは縮める)ための可動部分、およびバーナ部よりなっている。バーナ部は元来手動であるが、MCVD 法に用いる場合には、自動送り装置を組み込む必要があり、さらに反応部の正確な温度制御のために、バーナに供給する酸水素ガスの流量制御も、より重要となる。

図 4.2 には、ガラス旋盤をベースとする MCVD 装置全体の模式図を示したが、石英ガラス管への原料ガス供給系は、キャリアガスとしての酸素ガス精製部(図示省略)、流量制御器(Mass Flow Controller)、 SiCl_4 等を收容し酸化させるためのサチュレータ(Saturator)等からなっている。MCVD 法では、閉管系中で熱酸化反応や透明ガラス化等が行われるために、外部からの不純物の混入は少ないが、原料ガスを石英ガラス管に供給する導入部分では、石英ガラス管が回転し、一方の原料ガス供給側の配管系は固定しているために、特

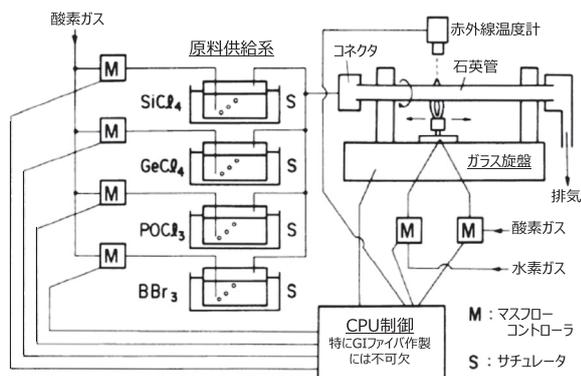
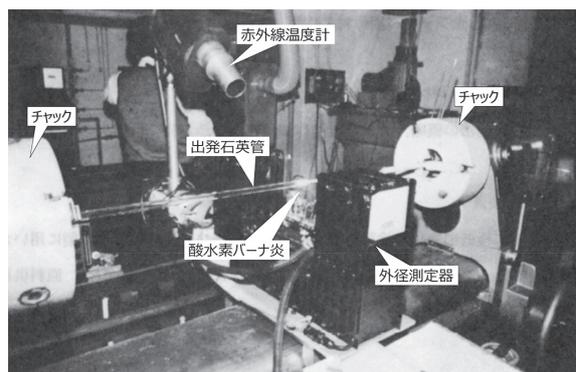


図 4.2 MCVD 装置の模式図

殊なコネクタ(Connector)が必要であり、気密を保つために耐塩素性のフッ素ゴム(パーフロン)製Oリングを内蔵したテフロン製コネクタを採用した³⁾。

1976年春にMCVDグループに加わった筆者は単一モード光ファイバ開発担当の“旋盤工”として理研製鋼製のガラス旋盤を預かることになった。酸水素バーナ炎で加熱された石英ガラス管の温度を測定するための赤外線温度計と、石英ガラス管の外径変化を観察するための外径測定器を備えたMCVD装置としての写真を図 4.3 に示した。



ベースのガラス旋盤は理研製鋼製(型式RGL-4)

図 4.3 NTT 茨城研究所の MCVD 装置

石英系光ファイバ母材をファイバ化するための線引き装置も整えられ、その基本構成と各部の仕様を図 4.4 に示した。特に線径測定部は光ファイバの線引き用に特別に開発したものであり、HeNe レーザ光線を光ファイバの長さ方向と垂直に偏向させて、光ファイバによって遮断される時間幅から外径を読み取るものであった。本測定器は、その性能、信頼性、そして使い易さの点で、アンリツ製品として広く実用に供されるようになった³⁾。

4.3 低損失(0.47dB/km@1.2μm) SI 型多モード光ファイバの開発

NTT と電線メーカーとの最初の具体的な共同研究成果は、MCVD 法を改良して OH イオン含有量の少な

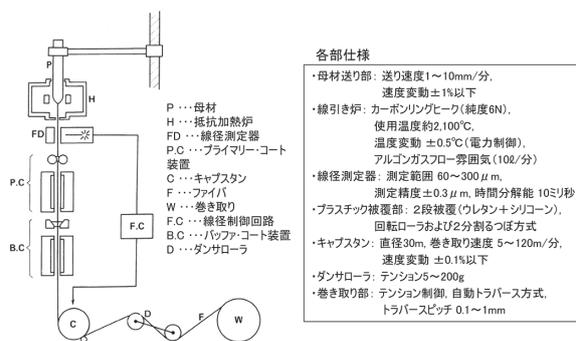


図 4.4 光ファイバ線引き装置構成と各部仕様

(参考文献³⁾をもとに筆者作成)

各部仕様	
母材送り部	送り速度 1~10mm/分、速度変動 ±1% 以下
線引き炉	カーボングレー炉(純度 6N)、使用温度 約 2100°C、温度変動 ±0.5°C (電力制御)、アルゴンガスフロー雰囲気 (100%/分)
線径測定器	測定範囲 60~300 μm、測定精度 ±0.3 μm、時間分解能 10 ミリ秒
プラスチック機械部	2 段機構 (ウレタンシリコン)、回転ローラおよび 2 分割つば方式
キャプスタン	直径 30mm、巻き取り速度 5~120m/分、速度変動 ±0.1% 以下
ダンサローラ	テンション 5~200g
巻き取り部	テンション制御、自動トラバース方式、トラバースピッチ 0.1~1mm

いSI型多モード光ファイバを作製した藤倉電線の小山内裕と、1.1 μm 以上の長波長域をもカバーする光ファイバ損失測定装置を世界に先駆けて構築していたNTT茨城研究所の堀口正治との連名論文「Spectral losses of low-OH content optical fibres」(Electronics Letters 1976年6月10日号掲載)として発表された⁴⁾。その光ファイバの損失波長特性と光ファイバ断面の干渉顕微鏡写真を図4.5に、そして液体窒素温度に冷却したInSb光検出器を採用した光ファイバ損失測定装置の構成を図4.6に示した。

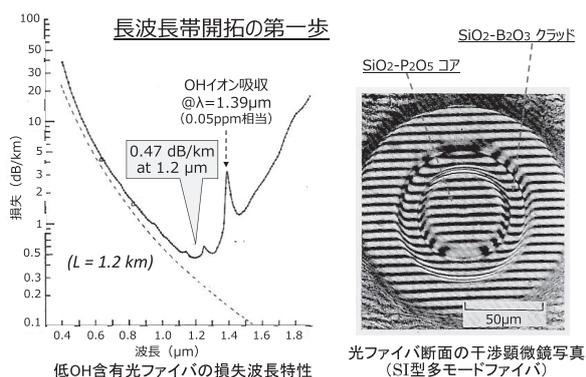


図 4.5 MCVD 法による低損失多モード光ファイバ
(参考文献⁴⁾をもとに筆者作成)

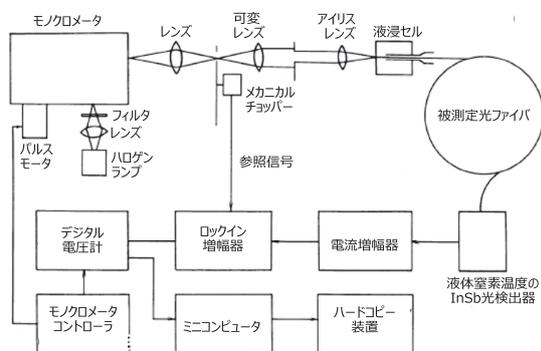


図 4.6 NTT 茨城研究所の光ファイバ損失測定装置

以下、小山内裕の回想文を引用するが、MCVD法の改良努力を重ねていた当時の光ファイバ開発現場の雰囲気が伝わってくる¹⁾。

『日本では半導体工業が進展して、高純度原料の入手が容易になっていた。これらの原料が、通常は液体なことも幸運だった。CVD法では普通の不純物は容易に除去できる。残る不純物は水素だけだった。私は水素の除去に集中した。私の専攻は化学で、専門は材料の精製だった。精製の時、先ず使用する容器を清浄にすることが重要である。使用する容器は、OHの含有量のできるだけ少ない石英ガラスのを選び、配管に使う

チューブはテフロン製にした。またMCVD装置の回転擦り合わせ部(シーベル)からの漏洩を防ぐために、そこは3重にカバーした。しかし、光ファイバ中のOHは減らず、損失は下がらなかった。

ある時、気が付いたのはキャリアガスの酸素だった。酸素ガスは空気を圧縮して作る。その時炭化水素が残ってしまう筈だ。調べたら、通常酸素ガスには、炭化水素が0.5ppmも入っていた。この炭化水素を除くために、酸素ガスの精製装置を作った。この特許出願をしなかったのは失敗だった。容器内に白金線を張り、1600°Cに加熱して酸素を流すと、白金の触媒作用で炭化水素が水と炭酸ガスに分離する。この方法で炭化水素の除去に成功した。

精製した酸素ガスを使って試作した光ファイバの損失は0.95 μm 帯でのOHによる損失増加が全く生じなかった。当時、波長1.1 μm まではシリコンの光検出器が使えたが、1.2~2.5 μm の波長帯で使用できる光検出器は無かった。その頃、茨城通研の堀口正治さんが光ファイバの損失測定法の研究を行っていて、新しい光検出器を試験していることを知った。この検出器は、富士通が開発した0.7~2.5 μm 帯の光が検出できるInSbの光検出器だった。検出器の窓は食塩(NaCl)で、液体窒素中で作動させるものだった。1975年の11月末に測定を始めた。ファイバの長さは1.2km、入射NAは0.05の小さい値だった。測定した損失値は、1.2 μm で0.47dB/km、0.95~1.37 μm で1dB/km以下の小さな値だった。

堀口さんは、このデータが本当なら、大変なことになると言った。彼は3ヶ月間、慎重に測定を繰り返した。測定値は変わらなかった。堀口さんは確信が持てるまで上司に報告しなかった。そして遂に、英国IEEのElectronics Letters誌に投稿した。投稿が受理されたのは1976年5月12日だった。IEEには論文の評価委員が5人いたが、委員全員が最高点を付けた。これはIEEでは初めてのことであった。この論文が基となってPREMIUM AWARD制度が設けられ、最初の最優秀論文賞(PREMIUM AWARD)を受賞することができた。』

実際、1970年代前半までの光ファイバの損失測定用光検出器にはSi-PD(0.4~1.1 μm 波長域)が使われていて、OHイオンを含んでいる光ファイバの損失も大きかったために、波長1.1 μm 以上の長波長域の

損失評価は、ほとんど行われなかったのである。そして、小山内の回想文にあるように、0.47dB/km（入射光の約90%が1km先まで届く）は、当時としては信じられないような低損失値であり、堀口の上司の高田久夫光部品研究室長も、しばらくは発表を抑えていたくらいであった。高田室長は新関暢一部品材料研究部長を始めとするNTT研究所幹部と発表時期と発表方法を相談し、堀口と小山内の連名で英国のElectronics Letters誌へのレター投稿に踏み切ったのである。こうして、1.1 μ mを越える最初の低損失長波長帯の発見になった最優秀論文の発表により、石英系光ファイバ分野での日本勢の存在が世界的に知られることになった。

上述の光ファイバは、SiO₂-P₂O₅系コアとSiO₂-B₂O₃系クラッドのSI型多モード光ファイバであったが、小山内と堀口らは、同様にSiO₂-GeO₂系コアとSiO₂-GeO₂-B₂O₃系コアの光ファイバも作製して、損失波長特性を比較した⁵⁾。その測定結果を図4.7に示したが、GeO₂添加は損失波長特性を長波長側に伸ばす効果があるのに対し、B₂O₃添加では逆効果になることが明らかになった。

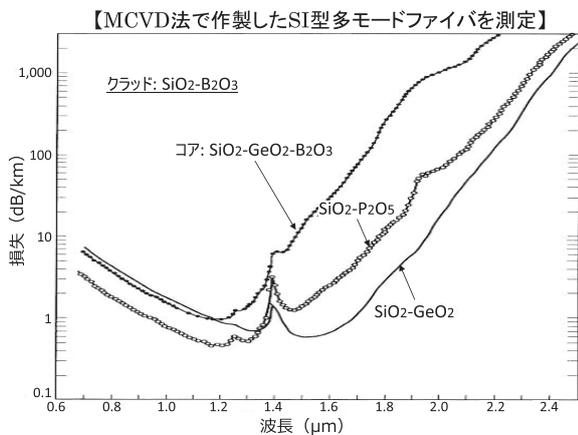


図 4.7 ドーパントの光ファイバ損失に及ぼす効果
(参考文献⁵⁾をもとに筆者作成)

図4.5の測定結果に基づいて堀口らが解明した石英系光ファイバの損失機構を図4.8に示したが、図4.7の測定結果も加味すると、

- 1) 短波長側は紫外吸収損失と波長の4乗に逆比例するレーリ散乱損 ($\propto 1/\lambda^4$) が支配的である。
 - 2) 長波長側は「Si-O」結合の赤外吸収損が支配的であるが、B₂O₃を添加すると、「B-O」結合による赤外吸収損が1.2 μ m波長付近から急増する。
 - 3) MCVD法での唯一の不純物吸収損はOHイオン吸収ピーク (@ $\lambda = 1.39\mu$ m 等) である。
- ことが明確になった⁶⁾。

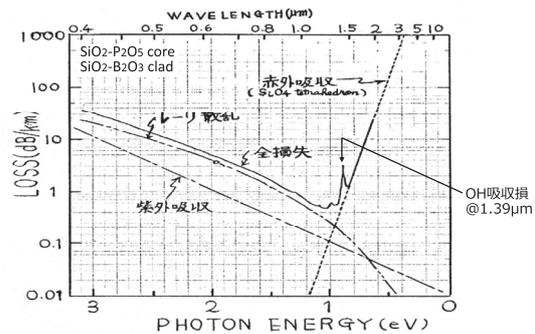


図 4.8 石英系光ファイバの損失機構
(堀口正治氏ノートより筆者作成)

上記3)のOHイオン吸収ピーク群は基本吸収波長2.73 μ mの各種高調波成分に相当し、OHイオン濃度1ppm (1,000ppb) 当たり、1dB/km (@ $\lambda = 0.95\mu$ m)、2.8dB/km (@ $\lambda = 1.24\mu$ m)、65dB/km (@ $\lambda = 1.39\mu$ m)、…、10,000dB/km (基本吸収 @ $\lambda = 2.73\mu$ m)の顕著な損失ピークとして現れる⁷⁾。MCVD法のみならず、次章で報告するVAD法の場合も含めて、石英系光ファイバの低損失化努力の半分は低OH化の歴史といっても過言ではない。

4.4 MCVD母材中のOHイオン分布測定と単一モード光ファイバの低損失化努力

少し遅れて光ファイバ研究グループに加わった筆者は、多モード光ファイバはともかくとして、将来の光通信の本命と考えられる単一モード光ファイバについては、作製法を含めてNTT研究所の手で低損失化をリードしたいと考えた。光部品研究室長の高田に連れられて藤倉電線を訪ねて、小山内氏から「MCVD法改良の秘訣は、OHイオンの元になる水素含有不純物(SiHCl₃等)を除去した高純度ガラス原料塩化物の使用と配管の気密化に加えて、酸素ガス中の炭化水素(CH₄等)を除去する精製装置の活用です。」と聞いた筆者は、早速、茨城研究所でのMCVD法による単一モード光ファイバの作製に適用したが、OHイオンによる吸収ピーク (@0.95 μ m、1.24 μ m、1.39 μ m)は思うようには下がらなかった。

そこで筆者が思い付いたのが、MCVD法で作製した母材(直径7mm)断面のOHイオン分布を測定することであった。1mm厚程度にスライスした母材断面にOHイオンの基本吸収波長2.73 μ mに相当する赤外光を照射して透過光強度分布を測定すれば、OHイオン分布を知ることができるだろうと考えたのである。測定技術が得意な堀口に相談したところ、図4.5に示した藤倉電線製の低OH化が進んだSI型ファイバを少し切り取り、それを赤外光検出用プローブ

(30cm 長) とした即席の顕微分光光度計 (空間分解能 $60\mu\text{m}$) を組み立ててくれた⁸⁾。

この分光光度計による MCVD 母材中の OH イオン分布測定結果例を図 4.9 と図 4.10 に示した^{9) 10)}。出発石英ガラス管は、外径 14mm で内径 12mm の Heralux 石英管 (ドイツ Heraeus 社製) であり、図 4.9 は、中実化後の母材のコア径 $2a$ を 0.5mm 相当として、堆積クラッド径 $2b$ を 1.0mm から 2.5mm まで 0.5mm 刻みで変えて作製した 4 種類の母材中の OH イオン分布であり、図 4.10 は中実化の際に石英管の排気口からの大気の侵入を許してしまった母材 ($2b = 2.0\text{mm}$) 中の OH イオン分布である。いずれの場合も、コア部分のレンズ作用を避けるために屈折率制御用のドーパントを添加しない母材 (non-doped silica rod preform) での測定とした。

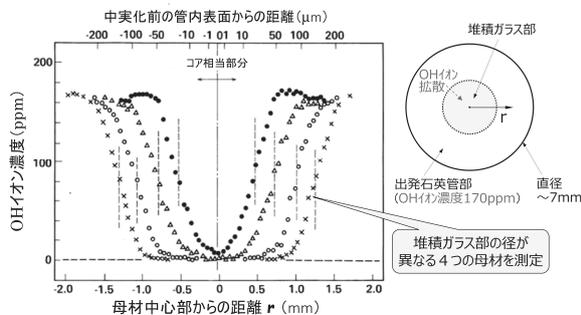


図 4.9 MCVD 母材断面の OH イオン分布測定例

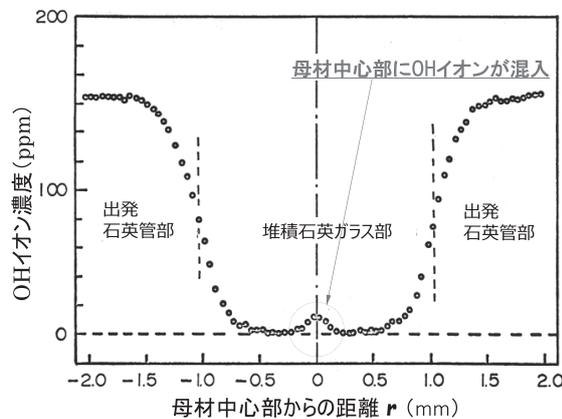


図 4.10 中実化工程で大気への混入がある場合の MCVD 母材断面の OH イオン分布測定例

こうした一連の測定により、以下の事実が明らかになった

- ① 使用した出発石英管 (水晶を原料とする熔融石英ガラスの Heralux 管) には 170 ppm 程度の OH イオンが含まれている。
- ② ガラス堆積時や中実化時の高温により、出発石英管部の OH イオンが堆積ガラス部に拡散侵入する。

③ 中実化時に水分を含む大気が排気口側から混入すると、母材中心部が OH イオンで汚染される。

そこで、まずは③を参考にして中実化工程を改良した。多モード光ファイバ用母材においては、コア径が大きく、中実化時に OH イオンが混入する領域は相対的にコア中心の小面積を占めるにすぎないが、コア径の小さい単一モード光ファイバ用母材作製に際しては、中実化時にも細心の注意が必要なのである。

さらに②に基づいての計算機シミュレーション (光ファイバ中の電磁界分布方程式と OH イオンの拡散方程式の重なり積分) により、多モード光ファイバに比べてクラッド部への電磁界広がりが大きい単一モード光ファイバの場合には、OH イオン拡散の抑制のためには「堆積クラッド径 $2b$ とコア径 $2a$ の比 (b/a) を 5 倍以上に設定する必要がある」という指針を得ることができた。この指針を基本として、さらに光ファイバの赤外吸収損の増加を招く可能性のある酸化ホウ素 (B_2O_3) や五酸化リン (P_2O_5) の添加も避けて $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系ファイバを作り込み、1977 年の春に、図 4.11 に示すように石英ガラスのゼロ分散波長 ($1.27\mu\text{m}$) 付近で 0.5dB/km の低損失単一モード光ファイバの作製に世界で初めて成功した¹¹⁾。

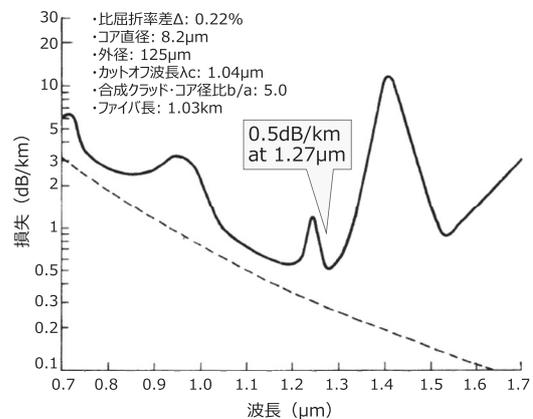


図 4.11 低損失 MCVD 単一モード光ファイバの損失波長特性

作製した MCVD 単一モード光ファイバ端面の顕微鏡写真を図 4.12a に示したが、 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ コアの周囲を約 5 倍の直径の堆積 SiO_2 クラッド層が取り囲んでいることが分かる。さらに図 4.12b は屈折率分布を示す干渉顕微鏡写真であるが、コア径が小さい単一モード光ファイバでは干渉縞の観察が困難であるので、線引き前の母材段階で観察したものである。コア中心部に屈折率分布の凹み (dip) があるが、これは MCVD 法では中実化の際の高温で GeO_2 が少し蒸発してしまうためであり、光ファイバが MCVD 法で作製された証跡でもある。

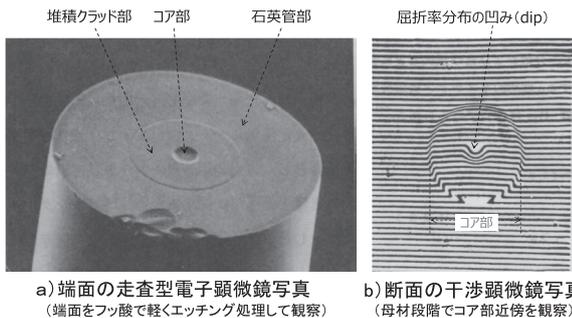


図 4.12 MCVD 単一モード光ファイバの観察

筆者らが茨城研究所で作製した単一モード光ファイバは武蔵野研究所（基礎研究部）に送られて、世界初（1978年）の1.3 μm 帯のゼロ分散伝送実験に用いられた^{12) 13)}。光源は1976年に室温連続発振に成功したダブルヘテロ（DH）構造ファブリーペロー（FP）型GaInAsP系の半導体レーザーであり、光検出器はGe系APD（アバランシェ・フォトダイオード）であった。当時のMCVD母材1本から得られる単一モード光ファイバ長は1~2km程度であり、武蔵野の基礎第3研究室では、10本の光ファイバを巧みに融着接続して全長11kmの伝送路としていた。

4.5 内圧制御 MCVD 法の開発

ガラス微粒子の熔融温度を下げる効果のある B_2O_3 や P_2O_5 を添加しないMCVD工程では、ガラス膜堆積の際に高い温度を必要とし、出発石英管の収縮や変形が問題になったが、筆者らは石英ガラス管にわずかな内圧を加えて収縮や変形を防止する内圧制御機構を考案して解決した¹⁴⁾。

内圧制御MCVD装置の構成を図4.13に示すが、HeNeレーザーを用いて、MCVD工程中の石英ガラス管の外径を $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で連続的に測定し、石英管の排気口に取り付けた調節弁にフィードバックして排気口の面積を変え、石英管内の圧力を適切に保って管の変形を防止する工夫であった。その効用例を図4.14に示したが、出発石英管（外径14mm、内径12mm）の内壁にMCVD法で石英ガラス層を30層堆積させた結果、内圧制御を行うと、外径はほぼ一定の14mm、楕円率は0.5%が保たれた。内圧制御しないと、外径は10mmに縮小し、楕円率は3%に増大した。

石英管の変形を防止する内圧制御MCVD法を用いると、ガラスの合成条件が一定になり、コア径と屈折率の高精度な制御が可能になり、4.7節で紹介するようにGI型多モード光ファイバ作製に適用した場合には、損失特性のみならず帯域特性も安定した。

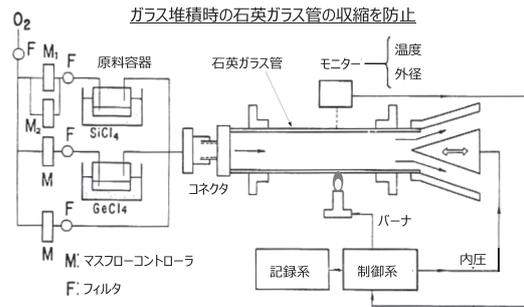


図 4.13 内圧制御機構付 MCVD 装置

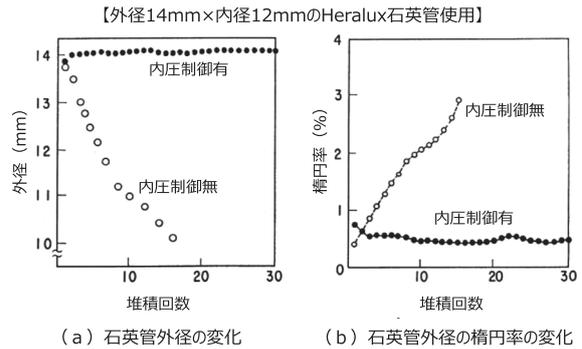


図 4.14 内圧制御 MCVD 法の効用実験例（ SiO_2 ガラス膜堆積回数依存性）

MCVD法の発案元であるBell研究所、そしてイタリアのCSELT研究所などでも内圧制御の追試実験が行われて、有効性が確認された^{15) 16)}。

上述の内圧制御に関連して、筆者らは1977年11月1日付で初歩的な特許出願を行っていた。ところが、1978年初頭に伊澤達夫（1977年にVAD法を発明）が研究開発本部の要職として武蔵野研究所に戻ることになり、その穴を一部埋める狙いもあって、筆者はそれまで2年間所属していたMCVD研究グループからVAD研究グループへと異動することになった。そして言い訳になってしまうが、筆者はVAD法の完成度向上に専念するあまり、内圧制御MCVD関連特許のアフターケア（補正や審査請求）を疎かにしてしまった。後になって、MCVD光ファイバの工場生産に内圧制御法が広く実施されていることを知ったが、時すでに遅く、権利化できないまま、筆者の苦い思い出になってしまった。

4.6 極低損失（0.2dB/km@1.55 μm ）単一モード光ファイバの開発

VAD研究グループへの異動に伴い、それまでのMCVD研究グループでの筆者の業務は宮哲雄が継承し、1979年の極低損失（0.2 dB/km@1.55 μm ）単一モード光ファイバ実現へと発展させた¹⁷⁾。その損失波長特性を図4.15に示したが、 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系光ファイ

バの損失が1.55 μm 帯で最小(0.2dB/km)になることを明らかにした画期的な研究成果となった。図4.16には、この光ファイバの損失値の「 $1/\lambda^4$ 」表示を示したが、「 $\lambda \rightarrow \infty$ 」に相当する切片部分が0 dBであり、この光ファイバでは、波長 λ の4乗に逆比例するガラスのレーリ散乱損以外の光散乱損が零になっていることを示している。

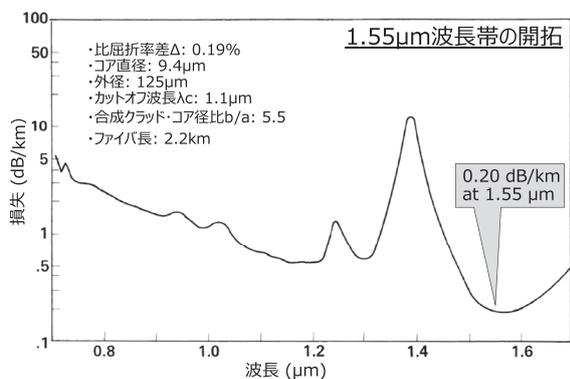


図 4.15 極低損失 MCVD 単一モード光ファイバの損失波長特性

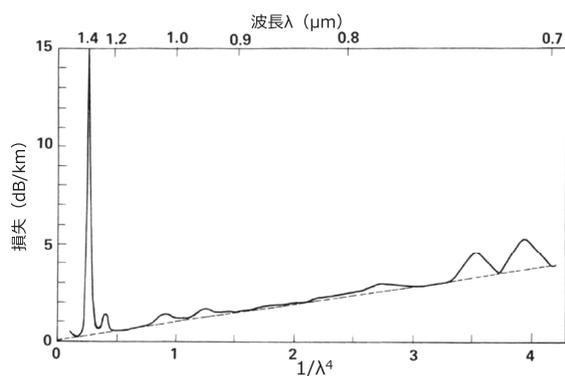


図 4.16 「0.2dB/km」ファイバ損失の $1/\lambda^4$ 特性

なお、1977年に筆者らが発表した図4.11に比べて、図4.15の光ファイバの損失が1.55 μm 帯で減少して極低損失になった要因の一つとして、光ファイバ線引き時の樹脂コーティング技術の進歩により、光ファイバをドラムに巻き取った際のマイクロベンディング損失の発生を防止できるようになったことも挙げることができる。

宮らが図4.15をベースとして英国 Electronics Letters 誌に投稿した論文「Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm 」(1979年2月15日掲載)は、堀口と小山内の0.47dB/km多モード光ファイバ発表(1976年)の場合と同じく、同誌の年間最優秀論文賞を受賞した。MCVD法の改良であったが、石英系光ファイバの損失が最小となる1.55 μm 波長帯の開拓もリードした日本勢の存在感は、ますます高まっていった。

ここで改めて図4.15に示した単一モード光ファイバの波長1.39 μm におけるOHイオン吸収損を、図4.5に

示した多モード光ファイバの場合と比較してみると、単一モード光ファイバでのOHイオン吸収損の方が大きいことが分かる。この辺りの事情については、茨城研究所の保坂敏人らが解析しているので付記する¹⁸⁾。

4.7 MCVD法によるグレーデッドインデックス(GI)型多モード光ファイバの開発

4.4節で述べたように、NTT研究所では1978年に10本の石英系単一モード光ファイバを融着接続して1.3 μm 帯での室内伝送実験(11km長)に成功していたものの、コア径が小さくて接続が難しいと考えられていた単一モード光ファイバ伝送方式は基礎研究段階と見なされていて、1976~1978年当時の電線3社にとっての最大課題は、コア径が比較的大きいグレーデッドインデックス(GI)型多モード光ファイバの開発であった。

GI光ファイバの実用化研究を促進するためにNTT茨城研究所でも千田和憲らによってCPU制御機能を備えたMCVD装置によるGI型光ファイバの作製条件の検討が行われ、1978年頃までには図4.17に示すように望ましい放射線状の屈折率分布をもつGI光ファイバが得られるようになった¹⁹⁾。

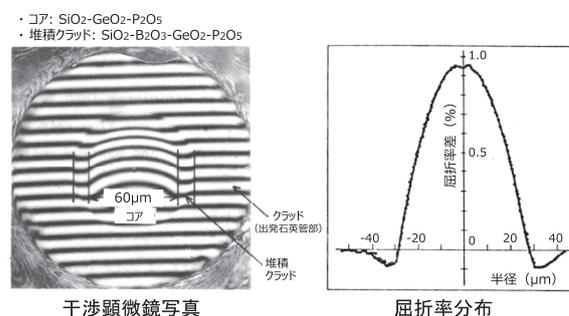


図 4.17 MCVD法で作製したGI型多モード光ファイバの屈折率分布例

図4.18は、コア部($\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 系ガラス)を取り囲む堆積クラッド層($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 系ガラス)の厚さを変えて作製した4本のGI光ファイバの損失波長特性を比較したものである。出発石英管からのOHイオンの拡散侵入による吸収ピークが1.39 μm 、1.24 μm 、0.95 μm などの波長に現れているが、7 μm 程度のクラッド層を形成することで、0.95 μm での吸収損失は無視できることが分かる。さらに1.24 μm と1.39 μm のOH吸収ピークの間“1.3 μm 帯の窓”を開くためには、単一モード光ファイバの場合に比べると薄い、それでも11 μm 程度の堆積クラッド層(合成クラッド層)厚が必要であることが分かる。

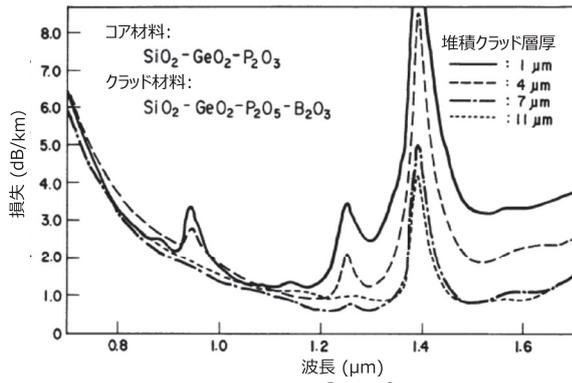


図 4.18 GI 型多モード光ファイバの損失特性の堆積クラッド層厚依存性

多モード光ファイバの伝送帯域の測定にはパルス法と周波数掃引法がある。1970 年代前半には、パルス光を用いて被測定光ファイバの入射端と出射端での受信波形のフーリエ変換から求めるパルス法が主流であった。1970 年代半ばには、正弦波で強度変調された光信号を用いて、その周波数応答特性から直接的に帯域を求める周波数掃引法が、NTT 横須賀研究所の小林郁太郎らによって提案されて広まっていった²⁰⁾。周波数掃引法での光ファイバの伝送帯域は、直流での受信レベルを基準として、減衰量が電圧振幅で 6dB ダウン（光強度振幅では 3dB ダウン）する周波数として定義される。

多モード光ファイバの周波数特性は入射光の励振条件に大きく依存するために、再現性の良い励振方法が必要であるが、1~2m 長の SI 型光ファイバと GI 型光ファイバを「SI + GI + SI」の順に接続した「SGS 励振器」を用いることが推奨された²¹⁾。

参考までに、表 4.1 は 1978 年の東京都（唐ヶ崎局 - 蔵前局間 20.8km）での第 1 次 NTT 現場試験 (FR-1) 用に電線 3 社で MCVD 法で製造された全部で 1,000km 相当の GI 型光ファイバの光損失と 6dB 帯域であるが、波長 0.85μm での伝送試験（伝送容量 32Mb/s と 100Mb/s、中継間隔約 5km）に必要な仕様（光損失 4.5dB/km 以下、6dB 伝送帯域 250MHz·km 以上）を十分に満たしていた¹⁹⁾。

本章の最後に、管径制御（内圧制御）法を始めとして 1970 年代後半に日本勢が考案した MCVD 法の改良技術例を表 4.2 に示したが、MCVD 法の追試から改良へと進み、Bell 研究所に先んじて石英系光ファイバの低損失長波長帯（1.3μm 帯と 1.55μm 帯）の開拓に成功した日本勢の動きは、当時、どのように米国側に映っていたのだろうか？

表 4.1 MCVD 法で作製した GI 型光ファイバの特性（第一次現場試験 FR-1 用）

(参考文献¹⁹⁾をもとに筆者作成)

光ファイバ特性	仕様 (@0.85μm波長)	実測値 (平均値)	標準偏差
損失 (dB/km)	4.5	2.64	0.23
6dB帯域 (MHz·km)	250	740	200
コアとクラッドの屈折率差	0.015 ± 0.002	0.0149	0.0002
コア直径 (μm)	60 ± 3	60.0	0.5
外径 (μm)	150 ± 3	149.7	0.4

【全部で1,000km長】

表 4.2 MCVD 法の改良技術例

(参考文献²²⁾をもとに筆者作成)

改良技術	狙い
・管径制御(内圧制御)	・ガラス堆積過程で生じる出発石英管の変形を石英管内圧制御を行って防止する。 ・堆積ガラス膜を厚く形成できる。
・原料ガスを添加しつつ中実化 ・中実化に先立ちエッチング	・中実化過程で生じる添加剤(ドーパント)の揮散による屈折率変動を抑制する。
・管壁冷却	・出発石英管の下流部を冷却し、サーモフォシス効果を利用してガラスの堆積効率を向上させる。
・塩素ガスを導入しつつ中実化	・OH汚染の生じ易い中実化時に塩素ガスを導入して低OH化を図る。
・Heガス添加堆積法	・原料ガスにHeガスを添加することで透明ガラス化を容易にして、ガラス合成速度を向上させる。

MCVD 法については当初からオープンな発表姿勢であった Bell 研究所だったが、日本でも全 11 頁の明細書からなる基本特許（特公昭 55-022423、優先権主張 1974 年 2 月 22 日）を、しっかり成立させた。1980 年代に入ると国産 VAD 法の比重を次第に強めていった日本メーカであったが、小回りが利く MCVD 法の魅力も捨て難く、多額の特許料を支払うことになった。Corning 社とは流儀が異なるが、結局は Bell 研究所の思惑通りだったのかも知れない¹⁾。

NTT と電線 3 社との共同研究体制の真価は、次章の VAD 法の開発で問われることになる。

参考・引用文献

- 1) 村田浩, 小泉健, 新聞暢一:「光ファイバの歴史 開拓者たちのメモアール」, 工業通信, 2001.
- 2) 柘野邦夫:「光ファイバ物語～汗と涙でたどりついた光ケーブル現場試験」, サイバー出版センター, 2014 年 12 月発行.
- 3) 宮下忠: 博士論文「単一モード光ファイバの低損失化に関する研究」, 東京工業大学, 1979 年.
- 4) M. Horiguchi and H. Osanai: "Spectral losses of low-OH content optical fibres," Electron. Lett., Vol.12, No.12, pp.310-312, 1976.
- 5) H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi, T. Izawa, and H. Takata: "Effect of dopants on transmission loss of low-OH-content

- optical fiber,” *Electron. Lett.*, Vol.12, No.21, pp.549-550, 1976.
- 6) 堀口正治, 小山内裕:「低 OH 光ファイバの製造と特性」, 電子通信学会 光・電波部門全国大会講演予稿集, S3-7, pp.491-492, 1976.
 - 7) P. Kaiser, A.R. Tynes, H.W. Astle, A.D. Pearson, W.G. French, R.E. Jaeger and A.H. Cherin: “Spectral losses of unclad vitreous silica and soda-lime-silicate fibers,” *J. Opt. Soc. Am.*, Vol.63, No.9, pp.1141-1148, 1973.
 - 8) M. Horiguchi and M. Kawachi: “Measurement technique of OH-ion distribution profile in rod preform of silica-based optical fiber waveguides,” *Appl. Opt.*, Vol.17, No.16, pp.2570-2574, 1978.
 - 9) M. Kawachi, M Horiguchi, A Kawana and T Miyashita: “OH-ion distribution profiles in rod preforms of high-silica optical waveguide,” *Electron. Lett.*, Vol.13, No.9, pp.247-248, 1977.
 - 10) M. Kawachi, M. Horiguchi, A. Kawana, and T. Miyashita: “OH-ion distribution in preforms of high-silica optical fiber,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.17, No.11, pp.1975-1981, 1978.
 - 11) M. Kawachi, A. Kawana, and T. Miyashita: “Low-loss single-mode fibre at the material dispersion-free wavelength of 1.27 μ m,” *Electron. Lett.*, Vol.13, No.15, pp.442-443, 1977.
 - 12) J. Yamada, M. Saruwatari, K. Asatani, H. Tsuchiya, A. Kawana, K. Sugiyama, and T. Kimura: “High-speed optical pulse transmission at 1.29- μ m wavelength using low-loss single-mode fibers,” *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol.14, No.11, pp.791-800, 1978.
 - 13) A. Kawana, M. Kawachi, and T. Miyashita: “Pulse broadening in long-span single-mode fibers,” *Opt. Lett.*, Vol.2, No.4, pp.106-108, 1978.
 - 14) M. Okada, M. Kawachi, and A. Kawana: “Improved chemical vapour deposition method for long-length optical fibre,” *Electron. Lett.*, Vol.14, No.4, pp.89-90, 1978.
 - 15) P.D. Lazay and W.G. French: “Control of substrate tube diameter during MCVD preform preparation,” *OFC1979 Technical Digest WC3*, pp.50-51, 1979.
 - 16) E. Modone, G. Parisi and G. Roba: “Low-loss fibres by pressurised MCVD method,” *Electron. Lett.*, Vol.18, No.17, pp.721-722, 1982.
 - 17) T Miya, Y Terunuma, T Hosaka, T Miyashita: “Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μ m,” *Electronics Letters*, Vol.15, No.4, pp.106-108, 1979.
 - 18) 保坂敏人, 大森保治, 宮哲雄, 照沼幸雄:「単一モード光ファイバ中の拡散 OH 基の解析」, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J64-C, No.2, 1981.
 - 19) 千田和憲: 博士論文「Studies on Fabrication System for High Quality Optical Fibers (高品質光ファイバ製造システムに関する研究)」, 東北大学, 1984.
 - 20) 小林郁太郎, 小山正樹, 青山耕一:「光ファイバの伝送特性と周波数掃引法による測定」, 信学会論文誌 C, Vol.J60-C, No.4, pp.243-250, 1977.
 - 21) 徳田正満, 堀口常雄, 谷藤忠敏:「グレーデッド形ファイバ伝送帯域測定用 SGS 励振器の設計と特性」, 信学会論文誌 B, Vol.J65-B, No.5, pp.585-592, 1982.
 - 22) 田中豪太郎, 松井和則:「光ファイバの製造方法」, 金属表面技術, Vol.35, No.12, 1984.

5 | 日本が開発した量産製法「VAD法」

1974年にBell研究所が発表したMCVD法は、比較的容易に低損失な石英系光ファイバを作製できるエレガントな製法であった。実際、1975年からのNTTと電線3社の共同研究は、MCVD法の追試と改良から始まり、元祖のBell研究所に先駆けて石英系光ファイバの低損失長波長帯の開拓に成功した。しかし、MCVD法では中実化が可能な出発石英ガラス管の大きさに制限があり、用いる良質な石英ガラス管はドイツHeraeus社製（信越石英株式会社が輸入代理店）であった。そしてMCVD法自体がBell研究所からの“借り物”であるとの思いから、NTTは、MCVD法の改良努力に並行して、日本発の新たな量産製法（後のVAD法）の開発を進めていた¹⁾。

本章では、その成功裡の技術開発経緯を、1) VAD法の発明、2) VAD多孔質母材の透明ガラス化、3) 火炎加水分解反応に起因するOHイオンの除去、4) ガラス微粒子堆積機構とGI型屈折率分布の形成、5) VAD法による長尺低損失単一モード光ファイバの開発、6) 偏波保持(PANDA)光ファイバの開発、7) VAD全合成化と線引き速度の向上、8) 純石英コアファイバ(PSCF)の開発、9) 単一モード光ファイバの波長分散特性と分散シフトファイバの開発、10) 石英系ガラスの素性の良さとVAD法の利点、の順に報告する。

5.1 VAD法の発明

1975年5月にスタートした電線3社との共同研究体制を契機として、NTT茨城研究所にはMCVD法を改良するグループと、独自の新技术を開発するグループができたが、後者のリーダーとして武蔵野研究所（基礎研究部・第3研究室）から1975年5月に転動してきたのが伊澤達夫であり、伊澤らが狙いを定めたのが、後にVAD（Vapor-phase Axial Deposition、気相軸付け）法と命名された技術であった^{2) 3)}。

図5.1はVAD法の概念図であるが、ガラス原料ガスを酸水素バーナに送り込み、火炎加水分解反応で生成したガラス微粒子（スート）を回転する出発棒の先端に堆積させ、ガラス微粒子の集合体（多孔質母材）を軸方向に成長させる。この多孔質母材を上部に設置した電気炉で高温に加熱して透明ガラス化して光ファイバ母材を得る製法である。Corning社の外付法（OVD法）との違いは、多孔質母材を軸方向に成長させるこ

と、多孔質母材の中心部に支持棒がないことである。MCVD法と異なり、出発石英ガラス管の制約を受けることもなく、量産に適していると考えられた。

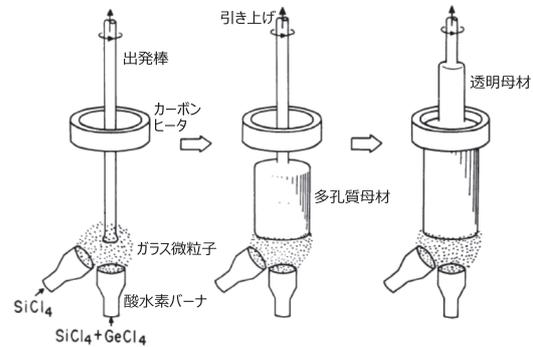


図5.1 VAD法（気相軸付け法）の概念図

VAD法は1977年7月に東京で開催された国際会議IOOC'77（International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1977）で「Continuous fabrication of high silica fiber preform」と題して発表されたが、当初の呼称はVAD法ではなく、「気相ベルヌーイ法」であった⁴⁾。その理由であるが、1902年にフランスの化学者ベルヌーイ（Verneuil）によって開発された酸化物結晶の育成法（ベルヌーイ法）から伊澤らがヒントを得ていたからであった。ベルヌーイ法の炉構成を図5.2aに示したが、例えば人工ルビーを合成する場合には、微細に粉碎された精製アルミナと酸化クロムを2,000℃以上の酸水素炎で溶融させ、炎の下部に置かれた支持棒上の小さな結晶を種として大きな結晶を成長させるものである。ベルヌーイ法は、さらに図5.2bに示したように、水晶粉を原料とする溶融石英ガラス（Type II）の製造にも商用化されていたが、光ファイバ用母材とするには、原料の純度や作製された石英ガラスの品質に問題があった。伊澤らは、出発原料を、粉末ではなく、高純度化が

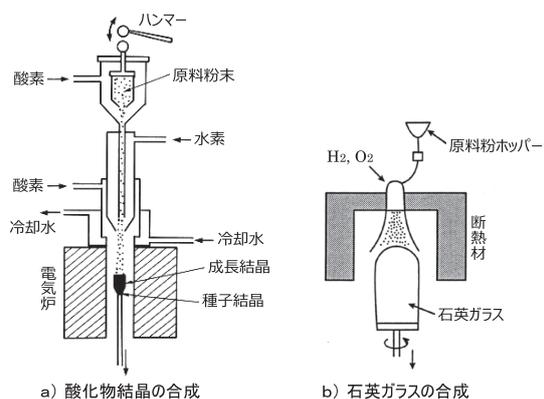


図5.2 ベルヌーイ（Verneuil）法

容易な気相の SiCl_4 や GeCl_4 に変えたので「気相ベルヌーイ法」と名付けたのであった。

気相ベルヌーイ法の初期の実験では、原料粉末を落下させる元来のベルヌーイ法（図 5.2a）のように、バーナを上部に設置して出発棒を引き下げる成長法も試みられたが、やがて引き上げる成長法（図 5.1）に統一されていった。引き上げる成長法が優先されたのは、IOOC'77での発表題目でも強調されているように、「連続生産（Continuous Fabrication）」を行い易くする意図もあったと思われる。しかし、連続生産を行うと、制御が複雑になってしまうので、実際上は、図 5.3 に示すように多孔質母材形成工程と透明ガラス化工程を分離する形で技術開発が進展した。図 5.3 では、図 5.1 と異なり、コア合成用バーナが多孔質母材の成長軸に対して傾いて配置され、さらに排気管が設けられているが、これは上方に拡散しようとする余剰のガラス微粒子と熱流を速やかに排出して多孔質母材の軸方向への安定成長を可能にする重要なノウハウであった。

IOOC'77での論文発表後に呼称を「気相ベルヌーイ法」から「VAD法」へと変えた理由であるが、当時のNTT本社の技術局長（前田光治）から、将来、新製法が国際的に通用する技術になったとき、「気相ベルヌーイ法」ではフランスの発明と思われる可能性があると指摘されたからであった。やがて、VAD法の呼称は世界中に広まり、“外国産”に間違われることなく発展した。

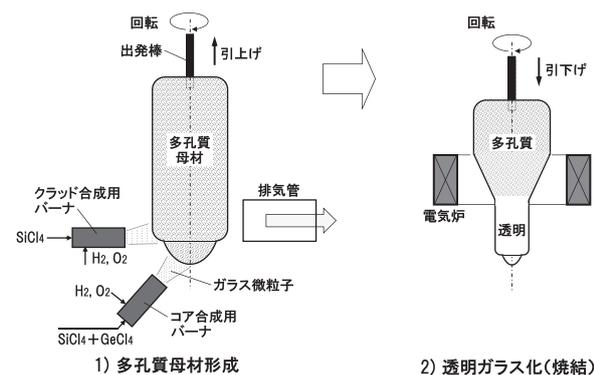


図 5.3 実際の VAD 工程（多孔質母材形成と透明ガラス化を分離）

特許の世界では「似たような時期に似たような発明をする人が複数いる」と言われるが、VAD法の場合も、図 5.4 に示すように、複数の機関から 1970 年代中頃に特許出願が行われていた。

- ① は Bell 研究所の S.E. Miller の出願 USP 3966446 「Axial fabrication of optical fibers」 (Filed: Oct. 23, 1975)、

- ② は NTT の伊澤達夫らの出願 USP 4062665 「Continuous optical fiber perform fabrication method」 (Filed: Apr. 5, 1977)、

- ③ は 住友電工の藤原国生らの出願 USP 4135901 「Method of manufacturing glass for optical waveguide」 (Filed: Jun. 13, 1977)、

である。

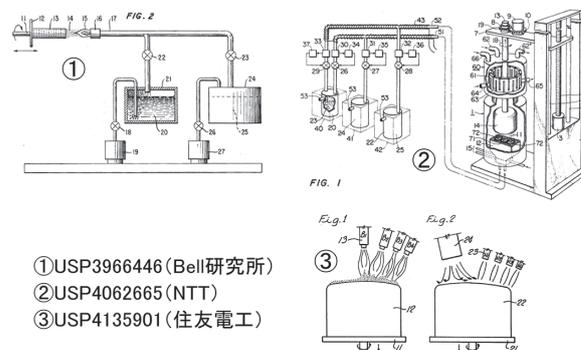


図 5.4 VAD 関連の米国特許

特許名称から想像すると、①が VAD 法に一番近いように見えるが、実際にはアイデア特許に留まっていた。その一方で、上記②の元になった日本特許「光ファイバ用母材の製造方法及びその製造装置」（1976年4月6日出願、1979年11月1日公告）の3名の発明者（伊澤達夫、宮下忠、埴文明）は、社団法人発明協会が主催する全国発明表彰の最高賞である「恩賜発明賞」を昭和 57（1982）年に受賞するまでに至った。また、上記③の元になった日本特許「光伝送用ガラスの製造方法」（1974年12月18日出願）は、当初の出願人は住友電工であったが、1981年8月3日に公告になった際の出願人は、共同研究体制を配慮したためか、NTT、古河電工、藤倉電線を加えた4社になっていた。

技術開発に話を戻すが、図 5.5 は NTT 茨城研究所の初期の VAD 実験装置であり、多孔質母材成長と同期する連続生産実験を想定して透明ガラス用の電気炉（カーボン抵抗炉）も備え付けられていた。図 5.5 には、ガラス製の反応容器内における多孔質母材の成長写真も示したが、筆者が加わることになった 1978 年初めの VAD 研究グループは、伊澤から直接指導を受けた埴文明や須藤昭一によって、多孔質母材の透明ガラス化に目途が立った段階であった。それも含めて、1977~78年当時に VAD 法で予想された課題（問題点）としては、

- 1) 多孔質母材の透明ガラス化（脱泡）は可能か？
- 2) 酸水素バーナから直接混入する OH イオンを除去（脱水）しての低損失化は可能か？



酸水素バーナ炎中でSiCl₄等を加水分解しガラス微粒子を生成

図 5.5 初期の VAD 実験装置

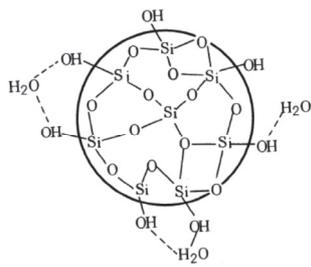
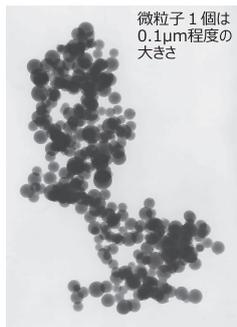
3) 多モード光ファイバの広帯域化に必要な GI 型の屈折率分布形成は可能か？

4) 単一モード光ファイバ母材（細径コア）の作製は可能か？

上記の課題をどう解決していったか、以下、順に説明する。

5.2 VAD 多孔質母材の透明ガラス化

図 5.6 は VAD 法で生成されるガラス微粒子の電子顕微鏡写真と OH イオンを含む SiO₂ ガラス微粒子構造の概念図である。個々のガラス微粒子は 0.1μm 前後の球形であり、一部連結しているものもある。これらのガラス微粒子の集合体である多孔質母材を電気炉で高温に加熱して透明にすることは、当初、困難を伴った。例えば、図 5.7 に示すように、母材の特に中心部



(a) ガラス微粒子の電子顕微鏡写真 (b) OH イオンを含むガラス微粒子の概念図

図 5.6 VAD ガラス微粒子の構造

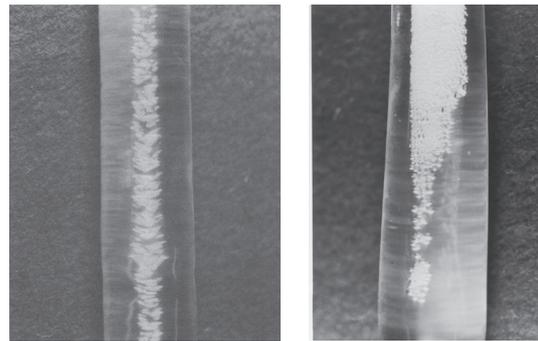


図 5.7 多孔質母材の透明ガラス化の際に気泡が残ってしまった初期の VAD 母材例

や、コアとクラッドの境界部の泡が除去できなかったのである。1 年近い苦闘が続いたが、初期の透明ガラス化工程での雰囲気ガスはアルゴン (Ar) ガスであった。ある時、ヘリウム (He) ガスに変えたところ、泡はきれいに無くなり、問題は一気に解決した。もっと早く試せば良かったが、He ガスは当時も貴重品であり、そう簡単に試用できなかったのである。

He ガス雰囲気中で脱泡ができた理由は、高温のガラス中での He ガスの拡散速度が大きいためであることが、須藤昭一らによって定量的に明らかにされた^{5) 6)}。図 5.8 は、そのモデル図であるが、(a) は、多孔質母材を構成するガラス微粒子が軽く焼結している状態を表す。透明ガラス化用電気炉にガスを流して温度を徐々に上げていくと、ガラス微粒子の焼結の程度が進み、(b) のように不連続なガラス体が集合した空間になる。この空間はまだ開いていて、つながって、母材の外まで達している。さらに昇温していくと、(c) のように空間 (ポア) が閉じ、次には、表面張力により、(d) のように閉じた空間が球状のポアになる。ガラス中のガスの溶解度や、ガスがガラス中を拡散する拡散係数等を使って計算すると、そのガスの臨界空間径 d_c が求まる。(d) の状態で、ポアの直径が d_c より小さい場合には、ガスは外に出て、ポアが潰れる。しかし、臨界空間径 d_c より大きいポアがあると、それは

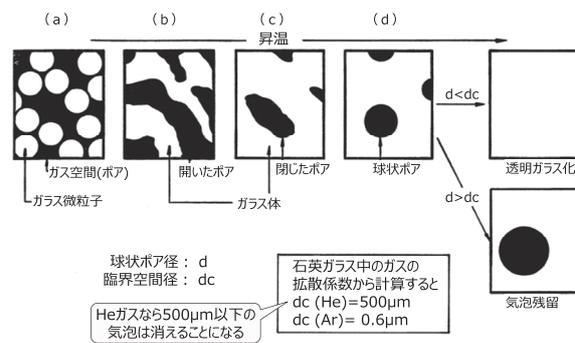


図 5.8 VAD 多孔質母材の透明ガラス化モデル

(参考文献⁶⁾をもとに筆者作成)

気泡としてガラス体中に残留してしまう。

ガラス中のガスの透過率に基づく計算による臨界空間径は、He ガスの場合には 500 μm 、Ar ガスの場合は 0.6 μm である。すなわち、He ガス雰囲気中では 500 μm 以下のポアは潰れて消えてくれるが、Ar ガス雰囲気中では 0.6 μm 以下でないと残ってしまうのである。同じ不活性ガスでも、He と Ar では、透明ガラス化の難しさが 10³ 倍ほど違うことになる。ちなみに臨界空間径の大きさの順は He > H₂ > Ne > O₂ > Ar であり、後で考えると、当初の Ar 使用は最悪に近い選択であった。

VAD 法が本格普及するに伴い、希少資源である He ガスの使用量を減らす試みがなされたが、多孔質母材の透明ガラス化工程での He ガス利用を完全にゼロにすることは難しいと見られている。

5.3 火災加水分解反応に起因する OH イオンの除去

1977 年当時の He ガス主体の乾燥雰囲気中で透明化した VAD 母材から作製した多モード光ファイバの OH イオン含有量は 30ppm 程度であった。MCVD 多モード光ファイバでは 1976 年発表の藤倉電線製の低 OH 含有光ファイバを模範例とするように、既に 1ppm 以下になっていたので、VAD 光ファイバの低 OH 化が急務となった。

塩素を含む雰囲気中で石英ガラス粉体を処理すれば、OH イオンを除去できるらしいことは知られていたが、塩素 (Cl₂) ガスボンベを実験室に持ち込むことを躊躇した筆者は、室温で液体である塩化チオニル (SOCl₂) を気化させたガスを透明ガラス化用の電気炉に導入した。NTT 茨城研究所での筆者の最初の研究テーマが「液晶表示の研究」であり、液晶セルを構成するガラスの表面化学の専門書を通じて、SOCl₂ に下記のような脱水作用 (H₂O の除去と OH イオンを Cl イオンで置き換える作用) があることを知っていたのは幸運であった。



図 5.9 には VAD 多モード光ファイバの低 OH 化の経緯を示したが、1977 年段階は SOCl₂ 未使用であり、OH イオンによる吸収ピークが 30dB/km (波長 0.95 μm) ほど重畳されていて、光ファイバは 1.2 μm 以上の長波長領域において極めて高い損失をもっていった。1978 年、初めて多孔質母材に SOCl₂ ガスによる脱水処理を施した結果、0.95 μm 波長における OH イオン吸収増は約 1dB/km にまで低下した。その結

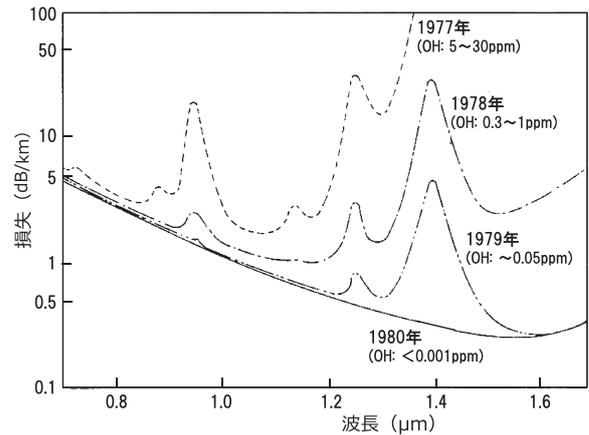


図 5.9 VAD 多モード光ファイバの低 OH 化の経緯

果、1.2 μm 以上の波長においても損失は急激に低下した⁷⁾。1978 年での脱水処理は、いわば透明ガラス化の前工程として 800 $^{\circ}\text{C}$ の温度で SOCl₂ ガスを含む雰囲気中で熱処理を行った後に、別の透明化用炉に移して透明化を行う 2 段階であったため、脱水処理された多孔質母材は再び空気中の湿気に汚染されたものであった。1979 年には、同一電気炉内で脱水処理と透明化を連続して行うことにより、OH イオン濃度はさらに一桁以上の低減となり、定常的に 0.1ppm 以下の低 OH 光ファイバが実現できた。1980 年には、取り扱いが厄介ではあるものの、さらに強力な脱水作用のある塩素ガスの活用と、気密性の高い電気炉の設計、クラッド層の最適合成などにより、OH イオン含有量は 0.001ppm (1ppb) 以下となった^{8) 9)}。この「完全無水」とも言える VAD 多モード光ファイバの損失波長特性例を図 5.10 に示したが、波長 0.95 μm と 1.24 μm はもちろん、波長 1.39 μm でも OH イオンによる吸収増も、ほぼ零となった。

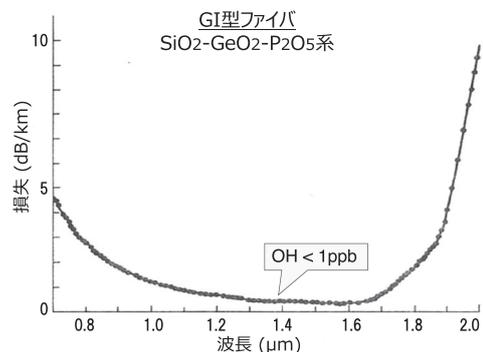


図 5.10 完全無水 VAD 多モード光ファイバの損失波長特性

当初は心配された VAD 光ファイバの低 OH 化であったが、ガラス膜の堆積時や中実化時に OH イオンの混入を防止しなければならない MCVD 法と異なり、VAD 法では多孔質母材の段階で塩素含有ガスによる「脱水」を存分に実行できたのである。こ

の1980年のVAD法による完全無水ファイバ実現を祝って、図5.11のような記念品（ネクタイピン）を作成した。図5.10の損失波長特性を模した図とともに、“これぞVADファイバ”という思いを込めて「THE VAD FIBER」と刻まれた。

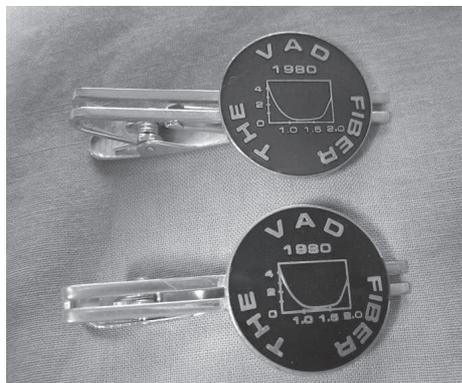


図 5.11 完全無水ファイバ実現の記念品

5.4 ガラス微粒子堆積機構とGI型屈折率分布の形成

VAD法の発案当初には、グレーデッドインデックス(GI)型光ファイバを作製するには、図5.12(案A)のようにコア合成バーナで生成されるガラス微粒子とクラッド合成バーナで生成されるガラス微粒子を空間軸上で適度に拡散混合させればよいと考えられていた。さらに必要に応じて図5.12(案B)のようにバーナを多数配置して、各バーナに供給する原料ガス中のドーパント濃度を少しずつ変えれば、それによって半径方向の屈折率が変化して、所望の屈折率分布を持つ母材が得られると考えられていた。

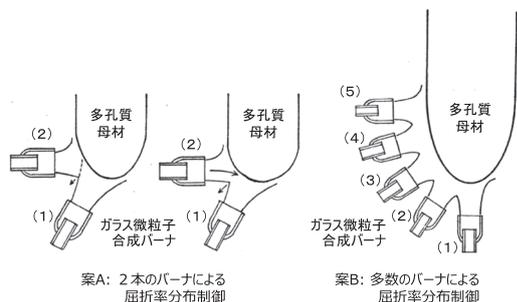


図 5.12 VAD法によるGIファイバ母材作製
(当初のイメージ案)

ところが1979年当時の筆者が不思議に思ったことは、図5.13のようにバーナが1本のみであっても、 GeCl_4 をドーパントとして $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系多孔質母材を合成すると、透明ガラス化後にGI型に似た屈折率分布(中心部で屈折率が高く、周辺部で低い)が得られ

ることが多い実験事実であった。その一方で、試しに TiCl_4 をドーパントとして $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 系母材を合成すると、中心部と周辺部の屈折率値は常に同じであった。

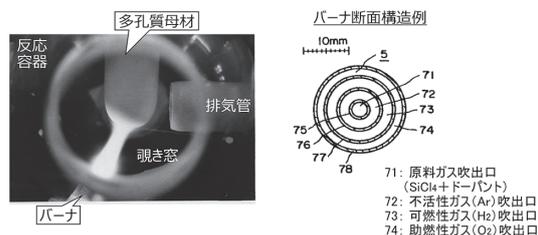


図 5.13 1本バーナによる多孔質母材作製模様

未知の点多そうなVAD法によるガラス微粒子の堆積機構を調べるために筆者らが用意した実験系を図5.14に示した。酸水素バーナ火炎内に、基板としての石英ガラスパイプ(外径10mm、肉厚0.5mm)を設置し、その表面温度をパイプ内に冷却ガスを流すことにより調節した。バーナに原料ガスを30秒間供給することにより微粒子をパイプ上に堆積させ、堆積中の基板表面温度は二次元光温度計(日本電子製 Thermo Viewer)により測定した(200~800℃)。バーナに供給した燃焼ガス供給量は、 $\text{O}_2 = 4\text{ l/min}$ 、 $\text{H}_2 = 2\text{ l/min}$ であり、原料ガスとしては、 $\text{SiCl}_4\text{-GeCl}_4$ (10mol%)、 $\text{SiCl}_4\text{-BBr}_3$ (8mol%)、 $\text{SiCl}_4\text{-TiCl}_4$ (4mol%)の3種類を用いた(供給量:約160cc/min)。火炎は立体構造を持っているため微粒子堆積部には30℃程度の温度分布があったが、便宜上、中心部の最高温度をもって代表させた。一回30秒間の微粒子堆積量は30mg程度、付着効率は15%程度であり、堆積量の顕著な基板温度依存性は見られなかった。採取した微粒子中のドーパントの含有量および結晶形は、微粒子を均一に攪拌した後、赤外吸収スペクトル測定(KBr法)およびX線回折測定(粉末法)により判定した^{10) 11)}。

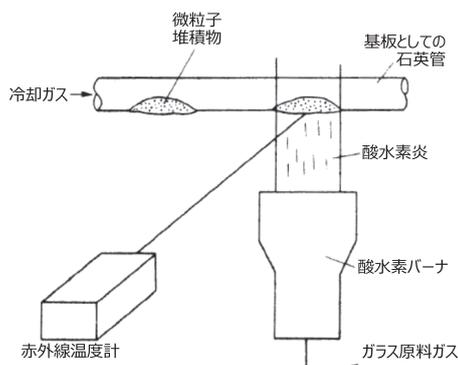


図 5.14 ガラス微粒子堆積実験系

解析の詳細は省くが、図 5.15 は、堆積微粒子中の (a) GeO_2 濃度と (b) TiO_2 濃度の基板温度依存性を示したものである。図 5.15a によると、基板温度が 400°C より低い場合には、 GeO_2 は六方晶状態で堆積する。この結晶性 GeO_2 量は基板温度の上昇とともに減少し、基板温度が 500°C 以上の場合には、 GeO_2 は、結晶性ではなく、 SiO_2 と固溶した非晶質（ガラス）状態で堆積する。この固溶性 GeO_2 濃度は基板温度の上昇とともに増加する。これに対して、図 5.15b の TiO_2 の場合は、基板温度に関係なく、 SiO_2 と固溶した非晶質（ガラス）状態で堆積している。図面は省略するが、 B_2O_3 の場合は、 GeO_2 と類似の基板温度依存性を示した。

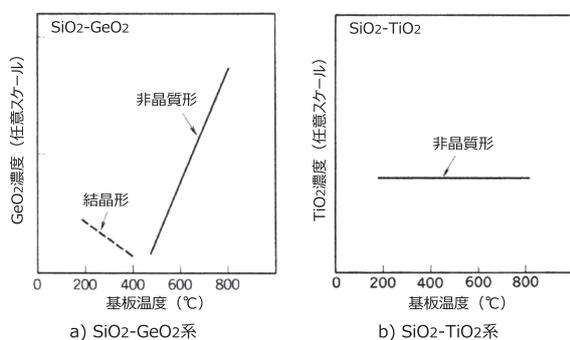


図 5.15 ドーパント濃度の基板温度依存性

上記の堆積実験結果は、筆者が不思議と感じていた図 5.13 に示した 1 本バーナによる $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系母材と $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 系母材の屈折率分布の違いを裏付けるものであったが、さらに火炎内での微粒子生成特性を調べるために組み立てた実験系を図 5.16 に示した¹²⁾。バーナ火炎を横切るように HeNe レーザ光 ($0.6328\mu\text{m}$) を照射し、火炎内で生成した微粒子によるレーザ光の散乱強度をシリコン太陽電池により検出した。レーザ光をあらかじめ光チョッパーで断続させロックインアンプで同期増幅することにより、酸水素炎や室内光による影響を除去した。使用したガラス原料は、 SiCl_4 、 GeCl_4 、 BBr_3 、 PCl_3 、 SnCl_4 であり、サチュレータを用い Ar ガスにより気相輸送した。サチュ

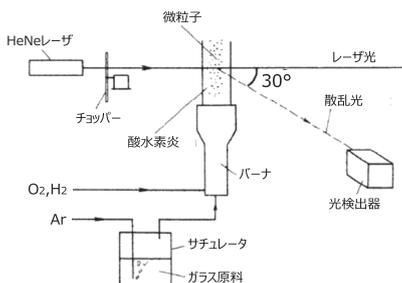


図 5.16 微粒子生成実験系

レータの温度は各原料の蒸気圧が 100mmHg になるよう制御した。トーチへの原料ガス供給量を変化させ、光散乱強度との関係を調べた。

図 5.17A に、 SiCl_4 についての光散乱測定結果を示した。光散乱強度は原料供給量にほぼ比例し、また、 $\text{H}_2 = 1\sim 3$ (ℓ/min) の範囲では、 H_2 ガス供給量が少ないほど光散乱強度が大きいことが分かる。なお、 TiCl_4 も SiCl_4 と類似の挙動を示した。

図 5.17B は GeCl_4 についての実験結果である。この場合には、光散乱が生ずるための臨界的な原料ガス供給量が存在する。図 5.17B において、 H_2 供給量が少ないほど、従って、火炎温度が低いほど臨界原料ガス供給量が小さいことは注目に値する。なお、 BBr_3 、 SnCl_4 も GeCl_4 と類似の挙動を示した。 PCl_3 の場合には、原料ガス供給量を $140\text{cc}/\text{min}$ まで増加しても光散乱は検出されなかった。火炎は P 原子特有の赤色の発光を呈していたことから、 PCl_3 の加水分解反応が営まれていることは確かであり、生成酸化物 P_2O_5 が粒子化しにくいものと推定された。

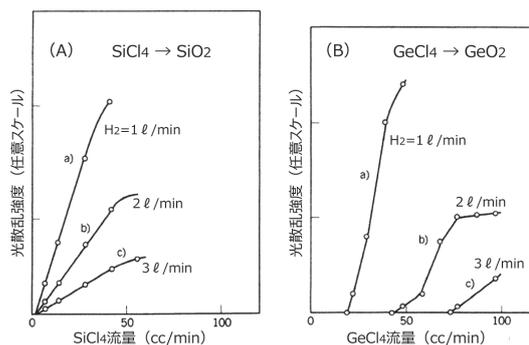


図 5.17 酸水素炎中の微粒子による光散乱強度

粒子生成に必要な臨界原料ガス供給量を小さいものから大きいものへと原料を並べると、

TiCl_4 、 $\text{SiCl}_4 < \text{GeCl}_4$ 、 BBr_3 、 $\text{SnCl}_4 < \text{PCl}_3$ の順になり、右側ほど粒子化が困難である。

図 5.18 は、酸化物の高温での飽和蒸気圧の文献値¹³⁾

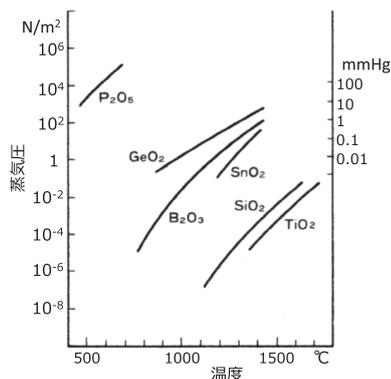


図 5.18 酸化物の飽和蒸気圧

であるが、飽和蒸気圧の大きい酸化物が、上記の順に沿って、大きい臨界原料ガス供給量に対応していることが理解できる。

例えば図 5.17B において、 GeCl_4 の臨界原料ガス供給量は 20~80cc/min であり、 GeCl_4 が全て反応して GeO_2 になったと仮定すると、燃焼ガスやキャリアガス供給量を考慮して火炎中で 2~10mmHg 程度の蒸気圧を与え、これは図 5.18 における GeO_2 の 1,200~1,400°C での飽和蒸気圧 (~1mmHg) にほぼ一致し、火炎加水分解反応における粒子化特性を支配しているのが生成酸化物の飽和蒸気圧であることを支持している。図 5.17B において、 H_2 供給量が少ないほど、 GeCl_4 の臨界原料ガス供給量が小さくなっているが、これは火炎温度が低いほど生成酸化物の蒸気圧が低下することを考えれば自然である。

以上の二種類の実験から、 SiO_2 - TiO_2 系と SiO_2 - GeO_2 系の微粒子生成堆積特性を次のように説明することができる。

【 SiO_2 - TiO_2 系】

この系では、主成分 SiCl_4 、ドーパント TiCl_4 ともに粒子化が容易であるため、火炎内で生成した SiO_2 、 TiO_2 蒸気は直ちに粒子を形成する。その際、 TiO_2 の結晶化は、ガラス微粒子として生成する傾向の強い SiO_2 に引き込まれて阻害され、 SiO_2 と TiO_2 とが固溶したガラス微粒子が形成されるものと考えられる。このように、 SiO_2 - TiO_2 系では、火炎内で粒子の形成が完了してしまうので、堆積微粒子中の TiO_2 濃度は基板温度にほとんど左右されないことになる (図 5.15b)。

【 SiO_2 - GeO_2 系】

この系では、火炎内で粒子が形成されるのは主成分 SiO_2 のみであり、ドーパント GeO_2 は火炎内では気相状態に留まっていると考えられる。 SiO_2 粒子および GeO_2 蒸気を含んだ高温ガスは、やがて基板表面 (多孔質母材表面) に達すると冷却されることになる。この際、基板温度が低い場合には、高温ガスの冷却が有効に進み、 GeO_2 蒸気は SiO_2 粒子と固溶していない結晶粒として基板上に堆積すると推測される。基板温度が高くなるにつれて、結晶性 GeO_2 は堆積し得なくなる。図 5.15a は、基板温度が高い場合には、火炎内の GeO_2 が基板表面近傍で SiO_2 と固溶する形でとり込まれることを示している。

図 5.19 は、1979 年当時に筆者らが想い描いた SiO_2 - GeO_2 系微粒子のラフな構造モデルである。その後、藤倉電線^{14) 15) 16)} や、VAD 法の追試を始めた Bell 研究所など^{17) 18) 19)} でも、 SiO_2 - GeO_2 系微粒子の挙動解

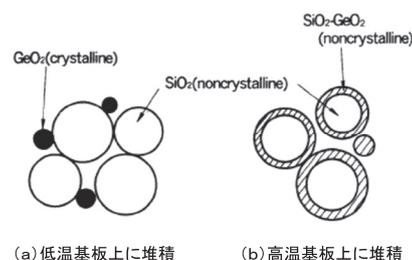


図 5.19 SiO_2 - GeO_2 微粒子の構造モデル

明が試みられ、藤倉電線の真田和夫らは、VAD 多孔質母材の外周付近に含まれる結晶性 GeO_2 が、塩素系ガス雰囲気中での脱水工程で塩素化されて、除去され易いことを明らかにした。さらに、ごく最近 (2017 年 7 月 31 日) になって、住友電工の久保優吾らによって、電子顕微鏡等による SiO_2 - GeO_2 系微粒子の直接観察結果が報告され、図 5.19 の微粒子構造モデルを裏付ける内容になっている^(註1)。

図 5.20a に二次元光温度計で測定した VAD 多孔質母材成長面の温度分布例を示したが、多孔質母材の成長面は、中心部の温度が高く、中心部から外辺部に向かうにつれて温度が低下する放物線状の温度分布を持っている。従って、 SiO_2 - GeO_2 系の場合は、図 5.15a から理解されるように、 GeO_2 濃度は表面温度分布に沿った形で分布することになり、概ね 800~400°C の範囲で多孔質母材を成長させれば、図 5.20b のようなグレーデッド型に近い屈折率分布が自ずと形成されることになる²⁰⁾。

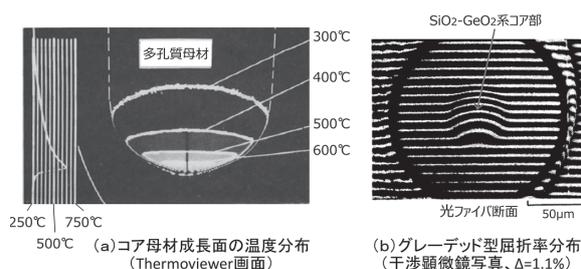


図 5.20 VAD 多孔質母材成長面の温度分布を利用してのグレーデッド型屈折率分布の形成

ここで、筆者が MCVD 研究から移った 1978 年当時の VAD 研究グループの状況を振り返ると、主力部隊は、茨城研究所内に「小さな VAD 工場」(ミニプラント) を建設し、1978 年 4 月から 1979 年 3 月までの 1 年間は共同研究相手の電線 3 社からもフルタイム

(註1) Y. Kubo and K. Yonezawa: "Nanoscale Phase-Separated Structure in Core-Shell Nanoparticles of SiO_2 - $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}_2$ Glass Revealed by Electron Microscopy," Anal. Chem., Vol.89, No.17, pp.8772-8781, 2017

で作業者と監督者を派遣してもらい、先行している MCVD 法に代わる国産 VAD 法によるグレーデッドインデックス (GI) 型ファイバ製造の再現性向上に取り組んでいた。ミニプラント内には高速線引き装置も配備され、VAD 量産工程の確立を目的に、毎日作業を繰り返していた。この間に製造した光ファイバの総延長は約 14 万 km (電線 3 社での試作長も含めると 30 万 km) に達した^{1) 2)}。

こうした VAD 法による GI 型光ファイバの伝送帯域の進展経緯を図 5.21 に示したが、ミニプラント運用から少し距離を置いた筆者らが通常の実験室 (俗称「奥ノ院」) で解明を進めた SiO₂-GeO₂ 系微粒子の生成堆積機構 (特に図 5.15a) は、上記のミニプラントや電線 3 社での VAD 法による屈折率分布制御の有力な指針となった⁶⁾。実際、図 5.21 に表れているように、微粒子の生成堆積機構 (= Ge 固溶反応機構) が見えてきた 1980 年頃から、伝送帯域の改善が加速され、トップデータ (例えば 1980 年の 6.7GHz・km) では、MCVD 法による GI 型光ファイバの帯域を上回るまでになった^{20) 21)}。

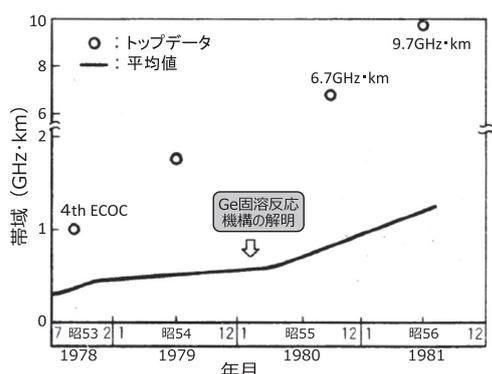


図 5.21 VAD 法による GI 型ファイバの帯域向上 (参考文献⁶⁾をもとに筆者作成)

しかし、時間軸上でドーパント濃度を自在に調節可能な MCVD 法に比べて、分解能が劣る空間軸上での制御に依存する VAD 法では、“隔靴搔痒”の感があることは否めず、帯域特性の再現性は十分ではなかった。実際、電線 3 社での VAD 法による GI 型ファイバの工場生産は、MCVD 法に比べて、あまりにもデリケートで、十分に成功したとはいえなかった。その一方で、VAD 法が真価を発揮するのは、次節で述べるように、コア径は小さいが、屈折率分布については GI ファイバほど神経質に制御する必要がない VAD 単一モード光ファイバの開発を通じてであった。

5.5 VAD 法による長尺低損失単一モード光ファイバの開発

前節の屈折率分布形成機構の検討と並行して、1979

年当時の筆者らは VAD 法による長尺低損失単一モード光ファイバ作製法の偵察実験を「奥ノ院」で進めていた。図 5.22 として、1979 年 7 月 27 日作成の所内資料「VAD 法による単一モード光ファイバの作製 (I)」の表紙と「あらまし」を示したが、正直なところ、当時の筆者は「ほどの性能の多モード光ファイバの量産は VAD 法が適しているが、細いコア構造を持つ単一モード光ファイバの製造には Bell 研究所オリジナルの MCVD 法を改良しつつ当分は使わざるを得ないだろう」と考えていた。

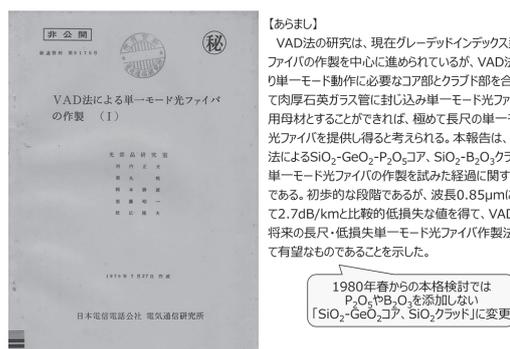


図 5.22 VAD 法による単一モード光ファイバ作製の予備検討

ところが、1980 年春、筆者は上司の高田久夫総括担当調査役に呼ばれて、「VAD 法で 100 km 長の単一モード光ファイバをつくり、11 月の茨城研究所の 20 周年記念の施設案内の目玉として展示せよ」との特命を受けてしまった。早速、筆者を含めて 3 人の専任担当チームを編成し、厚いクラッド層の中心に細いコア部を形成するガラス微粒子合成バーナの工夫から始まり、苦心して到達したのが、図 5.23 に示すようなバーナ配置であった²²⁾。通常の円形バーナでコア部を形成すると直径 30~50mm 前後の多孔質体になってしまうが、特別に開発した長方形偏心バーナを用いて、直径 10mm 程度のコア部を安定に成長できるようになった。コア用バーナの上部に円形バーナを二段に配置して、念願の 5 倍以上の堆積クラッド・コア径

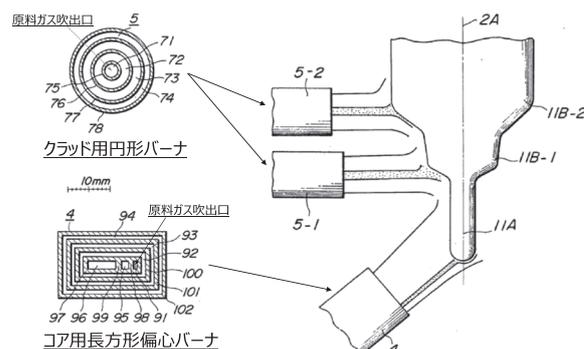


図 5.23 単一モード光ファイバ母材作製のバーナ構造と配置

比 (b/a) を得ることに成功した。筆者らが用いた探索実験用 VAD 装置と単一モード光ファイバ母材の成長模様を図 5.24 に示した。

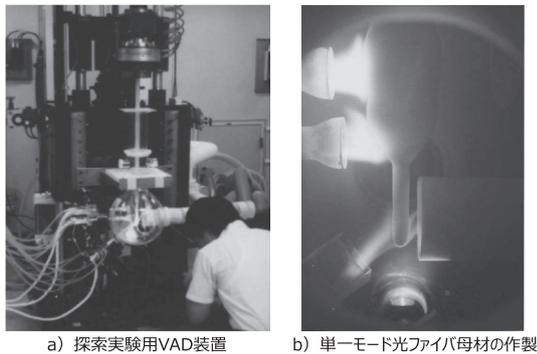


図 5.24 VAD 法による単一モード光ファイバ母材の作製模様

図 5.25 は、多孔質母材のクラッド層のひび割れ等の困難を乗り越えての上首尾の単一モード光ファイバ用 VAD 合成母材例である。堆積直後の多孔質母材は、脱水処理を兼ねた透明ガラス化工程を経て、縦も横も寸法が約 1/2 に収縮した透明母材になる。透明母材は、さらに延伸されて、肉厚の石英ガラス管でジャケット（被覆）され、図 5.26 に示したように、線引き用の複合母材となる^(註2)。こうして 100 km 長ファイバ相当の母材を作製し、周囲の研究者から最優先のサポートを受けつつ、光ファイバの線引きに漕ぎ着けたのが 1980 年の 10 月末のことであった。

(註2) 現在は、ジャケット用の石英ガラス管を使わない「全合成母材」が主流になっている (⇒ 5.7 節参照)。

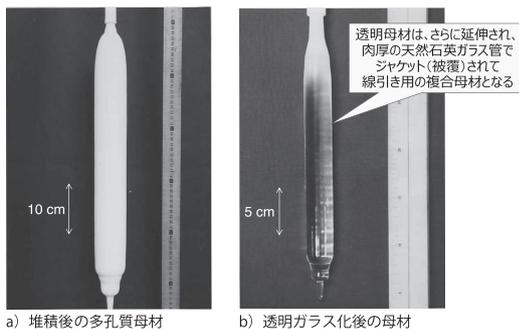
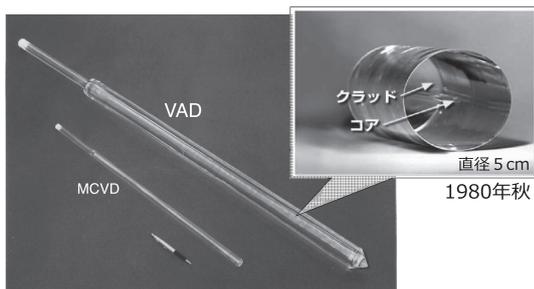


図 5.25 単一モード光ファイバ用 VAD 母材例



VAD複合母材は100km長ファイバ相当

図 5.26 ファイバ線引き用複合母材

筆者らが用いた光ファイバ線引き装置を図 5.27 に示したが、当時の線引き速度は毎分 60 メートル程度であり、100km 長ファイバの線引きは茨城研究所のある東海村から上野まで常磐線に沿って歩いていくようなもので、光ファイバ被覆用のプラスチック材料を何度も調合し継ぎ足しながらの徹夜作業となった。

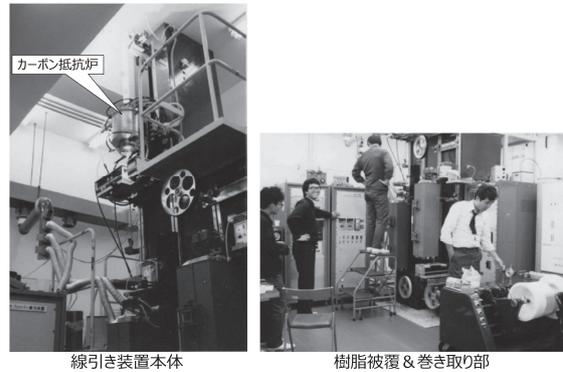


図 5.27 1980 年当時の光ファイバ線引き装置

11 月 6 日、7 日の茨城研究所の施設案内の当日、線引き前の VAD 母材サンプルと一緒に展示された図 5.28 の 100km 長単一モード光ファイバは壮観であったが、直径 30 cm のドラムの下層のファイバがその上に何重にも巻かれたファイバ自身の重みで曲がり、光信号パルスを通すのに苦労した。5km 長に切り出した光ファイバで実測した損失特性を図 5.29 に示したが、1.3 μm で 0.35dB/km、1.55 μm で 0.2 dB/km であり、宮らが 1979 年に作製した MCVD 単一モード

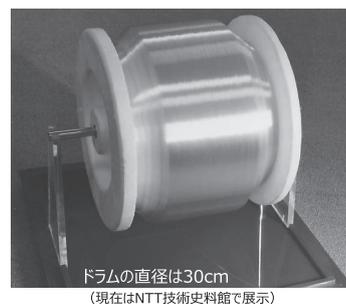


図 5.28 線引き後の 100km 長 VAD 単一モード光ファイバ

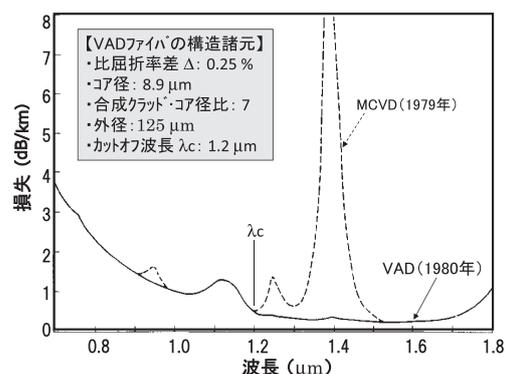


図 5.29 VAD 単一モード光ファイバ特性

光ファイバ（図中の破線の特徴）に比べて、1.39 μm のOHイオン吸収損も微小であり、0.5 dB/km以下の低損失波長域が1.20~1.70 μm に及んでいた^{23) 24) 25)}。

こうして茨城研究所の施設案内が成功裡に終了し、急ぎ仕事のために弱点だらけの技術項目をじっくり再検討しようと思っていたある日のこと、また高田統括担当調査役から呼び出された。「君は、明日から光ファイバの研究はやらなくてもよい。100 kmファイバもできたし、もういいだろう。新しいことを始めて欲しい」と言われ、執着心の少なかった当時の私は「そういわれると、そんな気がします。違うことをやります」と答えてしまった。実際には、生まれたてのVAD単一モード光ファイバ作製技術が電線3社での量産レベルに達するまでには、多くの研究者や技術者の継続的な努力を必要としたことはいまでもない。

図5.23の製法をベースとして電線3社で製造されたVAD単一モード光ファイバは、NTTの光ファイバケーブル伝送方式の現場試験FR-L（1980.10~1982.6）に採用され、その光ケーブルがNTT武蔵野研究所-厚木研究所間の約76kmに布設された。屈折率分布を制御した広帯域のVADグレーデッドインデックス（GI）ファイバの工場生産は成功したとはいえなかったが、その技術ノウハウはVAD単一モード光ファイバの工場生産に立派に活かされていった。

筆者自身は、交換研究員としてのカナダ通信研究所（CRC：Communications Research Centre）への長期出張（1982.2~1983.1の1年間、名目は“光集積回路用材料の研究”）予定があり、次第にVAD技術開発現場から離れることになったが、筆者らが1981年に行ったVAD全合成化の試みを含めて、その後のVAD単一モード光ファイバ関連技術の発展を次節以降で概説する。

5.6 偏波保持（PANDA）光ファイバの開発

単一モード光ファイバの変形として1980年代前半に開発されたのが、偏波保持型単一モード光ファイバ（偏波保持ファイバ）である。通常の単一モード光ファイバでは、互いに直交する2つの偏波モードが伝搬可能である。しかし、伝搬する光の偏波状態は保持されず、外乱（振動や温度変化等）によって、ランダムに変動する。一方、偏波保持ファイバにおいては、意図的に複屈折率を大きくして、偏波モード間の伝搬定数差を大きくすることにより、偏波モード間のパワー結合を抑制する。このため、偏波保持ファイバの複屈折の主軸方向（偏波主軸：X軸およびY軸）に

一致した直線偏波光を入射した場合、ファイバ中を伝搬する光は他の偏波モードに変わることなく、長距離に渡って直線偏波を保持したまま伝搬することが可能になる²⁶⁾。偏波保持ファイバは、光の偏波状態を利用した光ファイバセンサ用、そして偏波依存性のある光部品間を連結する光配線用などに、大量ではないが重要な需要がある。

偏波保持ファイバに大きな複屈折率を発生させる方法としては、①コアの形状に異方性を持たせることで構造複屈折性を大きくする、あるいは②コアに加わる応力に異方性を持たせて応力複屈折を大きくすることが考えられる。ここでは代表例として、方法②に沿って1980年代前半にNTT茨城研究所の佐々木豊らによって提案された応力複屈折利用の偏波保持ファイバであるPANDA（Polarization-maintaining AND Absorption-reducing）ファイバの断面構造と断面写真例を図5.30に示した²⁷⁾。PANDAファイバは、コア、クラッド、応力付与部から構成され、コア両脇の応力付与部は B_2O_3 等を多量に添加した石英ガラスからなり、純石英ガラスのクラッド部分よりも熱膨張係数が大きくなっている。このため、光ファイバ線引き時に高温になったファイバが常温まで冷却されると、応力付与部が収縮しようとして、コア部に対して引っ張り応力が加わる。その結果、応力複屈折が発生する。複屈折率の大きさは応力付与部への B_2O_3 添加濃度、応力付与部の直径、応力付与部の間隔等に依存するが、概ね 10^{-4} のオーダーであり、通常の単一モード光ファイバよりも2桁以上大きな値になっている。

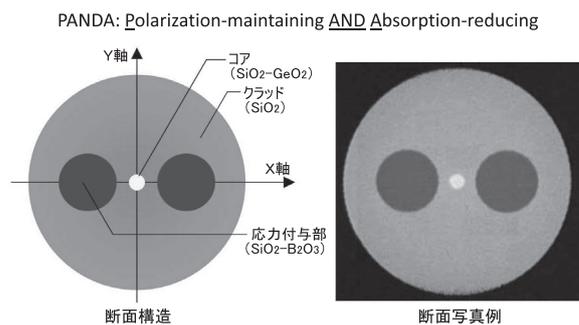


図 5.30 偏波保持（PANDA）ファイバの構造

PANDAファイバの製法を図5.31に示したが、VAD法で作製した単一モード光ファイバ母材（透明母材）のコアの両脇にドリルや超音波加工で孔を開け、孔の内壁を研磨洗浄する。同じくVAD法で合成して寸法を合わせた2本の B_2O_3 添加石英ガラス棒を応力付与部として孔に挿入し、最後に全体を線引きすると、PANDAファイバを得ることができる。

図5.32は、PANDAファイバを含めて1980年代に提

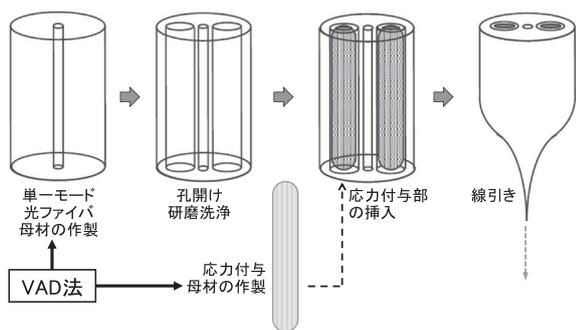


図 5.31 PANDA ファイバの製法



図 5.32 各種の偏波保持ファイバの断面構造
(参考文献²⁸⁾をもとに筆者作成)

案された各種の偏波保持ファイバの断面構造である²⁸⁾。MCVD法での製造に適した構造もあるが、VAD法によるPANDA型は偏波クロストーク特性(100m長ファイバで、 $\leq -30\text{dB}$)に優れていることに加え、比較的低損失であるため、親しみやすいPANDAの呼称(ファイバ断面が動物のパンダの顔に似ている)とともに、偏波保持ファイバの代表格になっている。

ここでPANDAファイバに関連して紹介したいのが、図5.33のPANDAファイバカプラである。1982年に筆者が交換研究員として滞在したカナダ通信研究所(CRC)の光通信研究グループ(K.O. Hill室長)は、隣接させた2本の光ファイバの一部を小型バーナ(mini-torch)で融着して延伸した光ファイバカプラ発祥の地であって、光分岐合流素子や方向性結合器としての多モード光ファイバカプラや単一モード光ファイ

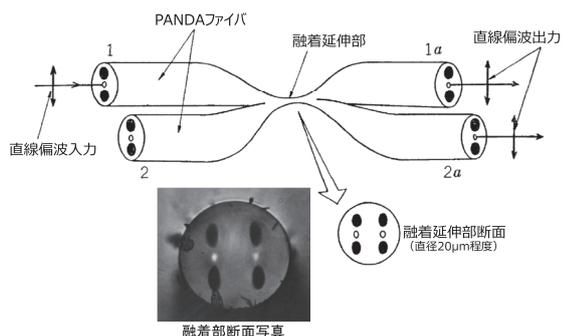


図 5.33 PANDA ファイバカプラの構造

バカプラの研究が行われていた。そこで筆者は、NTT茨城研究所から取り寄せたPANDAファイバの主軸方向を揃えて、世界初の偏波保持性単一モード光ファイバカプラ(PANDAファイバカプラ)を実現した²⁹⁾。

その後、PANDA型以外の偏波保持光ファイバを用いたカプラも他機関で試作されるようになり、偏波保持光ファイバカプラは、ファイバ型ジャイロスコープなどの構築に必要な光回路デバイスとしての応用を見出していった。現在市販されているPANDAファイバカプラの偏波消光比は、概ね20dB以上、過剰損は0.5dB以下である。

5.7 VAD全合成化と線引き速度の向上

話を通常の単一モード光ファイバに戻すが、1980年11月のNTT茨城研究所の施設案内日での展示に間に合うように開発した100km長単一モード光ファイバは、コアとその5倍以上の直径のクラッド部をVAD法で合成し、脱水・透明ガラス化後に市販の石英管に挿入し、外径125 μm の光ファイバになるよう線引きしたものであった。しかしながら、天然水晶を原料とする市販石英管には僅かではあるが異物が含まれていて、光ファイバの強度劣化の原因になる。そして将来的には石英管の価格が光ファイバ経済化のネックになることが予想された。そこで筆者らは、VAD法開発の当初の狙いである「市販石英管からの完全脱却」を目指して、クラッド最外層部までもVAD法で合成する「VAD全合成化」の基礎検討を行った。図5.34に示すように、クラッド用バーナを2本から3本に増やして多孔質母材を成長させ、合成クラッド・コア径比 b/a を10にまで増大させ、1981年の末には図5.35に示したようにコア径10 μm でクラッド径100 μm の全合成単一モード光ファイバ(比屈折率差 $\Delta = 0.20\%$ 、合成クラッド・コア径比 $b/a = 10$)の

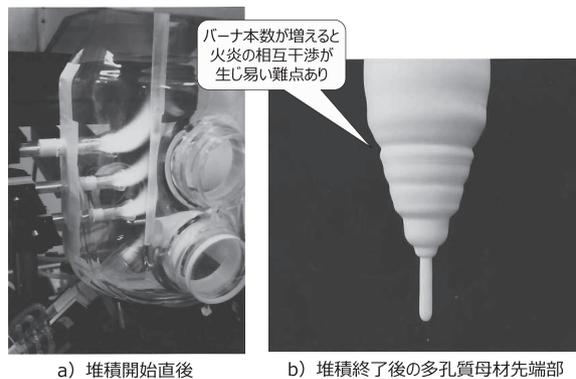


図 5.34 3段クラッドバーナによる単一モード光ファイバ母材「全合成化」の試み

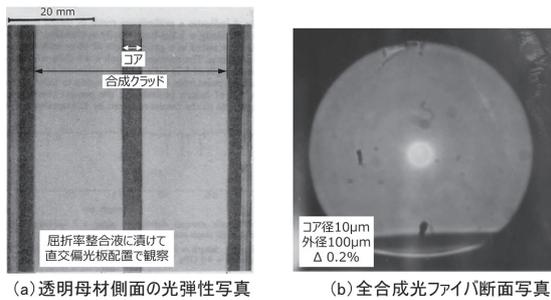


図 5.35 最初の VAD 全合成単一モード光ファイバ

実現に成功した³⁰⁾。しかし、それ以上にクラッド用バーナの本数を増やすと、火炎の相互干渉が生じ易くなり、標準の 125 μm のファイバ外径に相当する b/a 値 (~ 12.5) には届かなかった。

上記の筆者らの試みは、1982 年以降、須田裕之らに継承されていった³¹⁾。須田らは、GI ファイバ母材の高速合成用に開発した図 5.36 の二重火炎バーナ (外径 60mm で大型) の適用を進めた。図 5.36 にはガラス微粒子の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真も載せてあるが、内側火炎のみにより合成したガラス微粒子は大きいくとも 0.1 μm 程度であるが、二重火炎の場合には、微粒子が堆積面に到達するまでの距離を拡大して、火炎中の微粒子形成反応を促進させるので、大きなもので 0.5 μm 程度にまで成長していることが分かる。

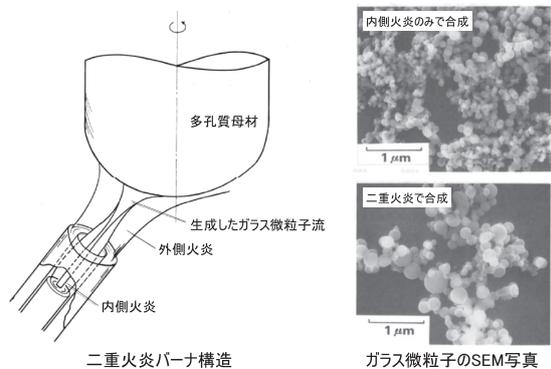


図 5.36 高速合成用二重火炎バーナ (参考文献³¹⁾ をもとに筆者作成)

須田らが採用した単一モード光ファイバ用母材作製系と堆積終了後の多孔質母材先端部の写真例を図 5.37 に示した^{31) 32)}。2 段構成のクラッド用二重火炎バーナにより大口径の多孔質クラッド層を堆積できるようになったので、コア用バーナとしては、筆者らが用いた特殊な角形バーナの代わりに、標準的な円形バーナの適用が可能になった。須田らは、主原料として四塩化シリコン (SiCl_4) よりも蒸気圧の高いトリクロロシラン (SiHCl_3) も活用し、特に大量の原料ガスを送り込む必要があるクラッド用の二重火炎バーナ用には、キャリアガス (Ar) なしでも原料の直接ガス化が可

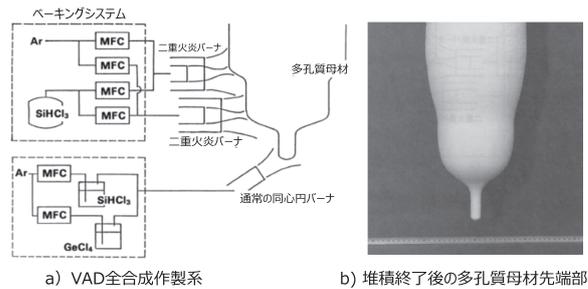


図 5.37 高速合成用二重火炎バーナを用いた VAD 全合成単一モード光ファイバ母材作製

(参考文献³¹⁾ をもとに筆者作成)

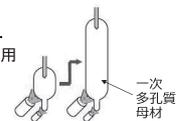
能なベーキングシステムを採用した。その結果、多孔質母材の直径は 21cm に達し、クラッド・コア径比 b/a は 12.3 相当になった。

図 5.37 の作製系で採用されたベーキングシステムは、温度変化の影響を受けやすいサチュレータによるバブリングシステムに比べて、原料の大量かつ安定な供給が可能であり、その後、通常の上塩化シリコン (SiCl_4) の供給にも使われるようになった³³⁾。

1980 年代中頃になると、図 5.38 に示すような「2 ステップ VAD 法」が開発され、現在に至っている。この方法では、初めに①一次多孔質母材を VAD で作製する (クラッド合成には二重火炎バーナを利用) が、その際の b/a 比は 5~6 程度 (あるいは 3~5 程度) でも十分である。②脱水・透明ガラス化の後に、③透明母材を 10~20mm Φ 程度にまで延伸する。④ 2 回目の VAD (二重火炎バーナを利用) で外側クラッドを堆積すると、 b/a 比を 15~18 程度にまで高めることができる。⑤全体を再び脱水・透明ガラス化し、最後の⑥線引きして、光ファイバを得る³⁴⁾。

① 一次多孔質母材の合成 (1 回目の VAD)

↑ クラッド形成は二重火炎バーナ利用
⇒ 合成クラッド・コア径比: 5~6



② 脱水・透明ガラス化
③ 一次透明母材の延伸

④ 外側クラッドの合成 (2 回目の VAD)

↑ 二重火炎バーナ利用
⇒ 合成クラッド・コア径比: 12~18



⑤ 脱水・透明ガラス化
⑥ 線引き

図 5.38 「2 ステップ VAD 法」による全合成単一モード光ファイバ作製工程

VAD 全合成化は、不純物や欠陥を含む市販石英管を使用しないので、高強度の光ファイバが得られ、かつ大型母材の作製が可能となる利点ある。肉厚変動を往々にして伴う市販石英管を用いない VAD 全合成化の効果は、光ファイバの低い偏心率としても顕れる。実際、VAD 全合成化により、コアの偏心量が 1 μm を

十分に下回るレベルに抑えられ、光ファイバの融着接続やコネクタ接続においても、クラッド外周を基準にするだけで単一モード光ファイバの低損失接続が可能になった。その後の光ファイバ通信の本格普及に際して必要となった多心一括融着接続技術や多心コネクタ、現地組立て型コネクタ（FAコネクタ）は、光ファイバの低偏心化なくして実現は不可能であったものであり、VAD全合成化は、FTTH（Fiber-to-the-Home）工事の効率化や経済化にも大きく寄与することになった。

さらに、光ファイバ母材寸法の制限要因であり価格低減のネックになっていた市販石英管を使用せずに済むことから、母材の寸法化が一気に進み、生産性が向上し、VAD全合成化は情報通信インフラとしての光ファイバ網の構築を進めるキー技術になった。ちなみに1980年代初めのVAD法でのガラス微粒子堆積速度は1g/min程度であったが、須田らの二重火炎バーナの採用により10g/min近くにまで向上し、その後、電線メーカーによって改良を加えられ、1980年代後半には20g/minに達した³⁵⁾。

VAD母材の高速合成に沿うように進められたのが、光ファイバ線引き速度の高速化であった。初期の光ファイバ線引き工程では、図5.39(a)に示すように、樹脂が満たされた「オープンダイ」と呼ばれる開放型のコーティングダイに光ファイバを走行させて樹脂を被覆していた。線引き速度は60~120 m/min程度であった。実際、1980年11月の茨城研究所での100km長VAD単一モード光ファイバ開発は、このオープンダイ方式により、60m/minの線引き速度で樹脂被覆を行っていた。

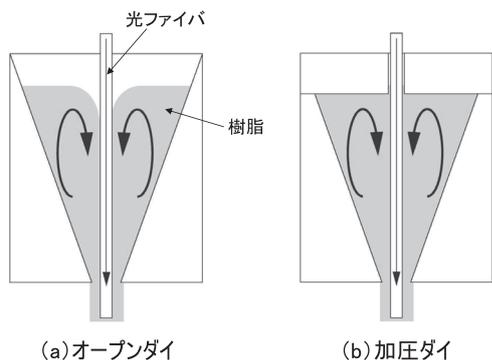


図 5.39 光ファイバ線引き用の樹脂コーティング技術の進歩
(参考文献³⁶⁾³⁷⁾をもとに筆者作成)

その後、図5.39(b)のように密閉型のコーティングダイに樹脂を加圧供給して被覆する「加圧ダイ(Pressurized Die)」方式への移行が行われた³⁶⁾³⁷⁾。図5.40は1980年代中頃のNTT茨城研究所の線引き装置の構成図であるが、加圧ダイと紫外線硬化型樹

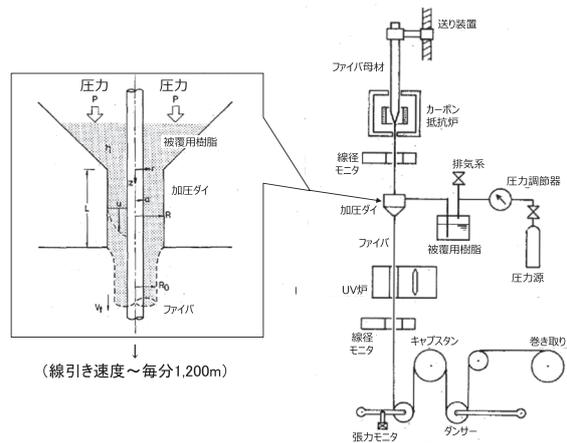


図 5.40 加圧ダイを用いた高速線引き装置構成
(参考文献³⁸⁾をもとに筆者作成)

脂の採用により、線引き速度は1,200m/min程度にまで向上した³⁸⁾。そして、今日の光ファイバ製造工場では、1980年11月当時のNTT茨城研究所に比べて、VAD母材の大きさは20倍の2,000 km長ファイバ相当になり、線引き速度は30倍の1,800 m/min (= 108km/hr)に達している。

5.8 純石英コアファイバ (PSCF) の開発

コアにGeO₂を添加した石英系単一モード光ファイバの1.55μm波長帯での最小損失値は、NTTが1979年にMCVD法で、さらに1980年にVAD法で達成した0.2dB/kmであった。その後、図5.41に示すように、1984年にBell研究所がクラッドに屈折率を下げる効果のあるフッ素(F)を添加した純石英コアファイバ(PSCF: Pure Silica Core Fiber)をMCVD法で作製し0.157dB/kmの低損失値を報告した。コア部に添加物GeO₂を含まない純石英コア構造を採用すると、僅かではあるがレイリー散乱損失が減少するのである。続いて1986年には、住友電工がVAD法により0.154dB/kmの純石英コア(F添加石英クラッド)単一モード光ファイバの開発に成功した³⁹⁾。VAD法では多孔質母材をフッ素含有雰囲気中で加熱することによって

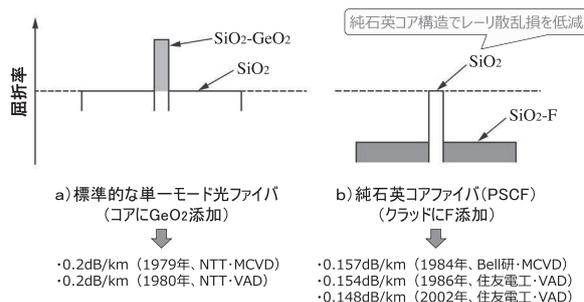


図 5.41 単一モード光ファイバの究極の低損失化

フッ素 (F) 添加が可能である。住友電工は 2000 年代に入って 0.148dB/km へと世界記録を更新した⁴⁰⁾。コア部に GeO₂ を添加した標準的な単一モード光ファイバに比べて、純石英コアファイバ (PSCF) の製造コストは高くなるが、極低損失性を活かして、長距離海底ケーブル用などの高性能用途に使われている。

ここで純石英コアファイバに関連して触れておきたいことは、1984 年から 1989 年にかけての Corning 社と住友電工の間の特許係争である⁴¹⁾。論点になったのは、2.1 節で紹介した「関・根岸特許」(1936 年出願、1938 年成立) の存在もあって日本では拒絶された特許に対応する米国特許 USP3,659,915 (“Fused Silica Optical Waveguide”, 1970.5.11 出願、1972.5.2 登録) であった。日本とは異なり、Corning 特許は米国では成立していたのである。

Corning 特許のクレーム (特許請求の範囲) は「純粋な酸化ケイ素からなるクラッドと、15wt% 以下の不純物を添加した酸化ケイ素からなるコアとによって形成される光ファイバ」であり、明細書の文言通りに解釈すれば、「クラッドにフッ素を添加した住友電工の純石英コアファイバ製品」はコーニング社特許に抵触しないはずだった。それでも Corning 社は、住友電工がアメリカに輸出した光ファイバが自社の特許を侵害しているとして、1984 年に輸入差し止めと損害賠償を求めて訴訟を起こしてきた。訴えられた住友電工が Corning 特許の無効を訴えて逆提訴するなど、裁判は二転三転したが、最終的 (1989 年) に住友電工側の敗訴となり、住友電工は Corning 社に和解金 2,500 万ドル (約 33 億円) を支払った。

米国での判決内容は「住友電工のファイバは、コアに添加したゲルマニウムを、クラッドに添加したフッ素に置き換え、屈折率の差を得ている。したがって、実質的に同一の方法で、同一の作用を持ち、同一の結果を得ている。基本特許は広く解釈すべきであり、広い均等の範囲がある。この均等の原理 (Doctrine of Equivalence) は、発明時にたとえ石英ガラスにフッ素を添加して屈折率を下げるのが知られていなかったにせよ、適用される。」というものであった。ここで均等の原理 (均等論) とは、特許法において一定の要件のもとで特許発明の技術的範囲 (特許権の効力が及ぶ範囲) を拡張することを認める理論であり、米国は 1980 年代のレーガン政権下でプロパテント政策 (特許権をはじめとする知的財産権の保護強化政策) に傾斜していた。

コーニング社の構造特許は、屈折率の差をコアに添加剤を加えることによって与えるものだが、その内容

は極めて一般的で、ガラスでできた光ファイバのほぼすべてが該当してしまう。そもそも、1960 年代後半の C.K. Kao や西澤潤一らの論文の存在を考えれば、上記の Corning 社の光ファイバ構造特許が米国で成立したこと自体が不自然とも言えるのだが、Corning 社との特許係争を経験した住友電工・元技師長 (京藤倫久) は 2007 年の NEW GLASS 誌に寄せた巻頭言「光ファイバ開発競争の現場で学んだこと」を次の言葉で結んでいる⁴²⁾。

『特許係争の当時、筆者自身、“特許は法律、裁判は白か黒”との意識で取り組んでいたが、国際特許の専門家や法律家の友人達から、“特許は法律でなく政策である”、“アメリカの裁判は、白か黒でなく、取引の手段”とアドバイスされたことが今でも脳裏に焼きついている。』

京藤が学んだように、正に米国の国策に沿った判決であった。

その一方で、外付 (OVD) 法に関する Corning 社の製法特許については日本でも無理なく成立していたが、日本は独自の VAD 法を開発したので、日本で光ファイバを製造することに関しては、OVD 特許からの制約を受けることは回避できた。

5.9 単一モード光ファイバの波長分散特性と分散シフトファイバの開発

単一モード光ファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) の伝送距離を制限する特性として、伝送損失とともに波長分散特性がある⁴³⁾。標準的な単一モード光ファイバの波長分散は 1.3μm 帯で極小となり、伝送損失が最低となる 1.55μm 帯では波長分散の影響で高速伝送が制限される。単一波長で発振する分布帰還型半導体レーザ (DFB-LD) を用いれば、波長分散の影響は緩和されるが、情報を乗せるために高速変調を行うと、必然的に側帯波が発生するので、伝搬光は波長分散の影響を受けてしまうのである。

そもそも波長分散とは、波長が 1nm 異なる二つの入射光パルスが光ファイバ中を 1km 伝搬した際の出射時刻差で定義され、単位は「ps/nm/km」である。単一モード光ファイバの波長分散は、1) 材料分散と 2) 構造分散 (導波路分散) の和で表される。

1) 材料分散は、光ファイバの屈折率自身が波長に依存して変化することによって生じる分散であり、次式で与えられる。

$$\text{材料分散} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2}$$

ここで、 $n_1(\lambda)$ はコアの屈折率、 λ は光波長であ

り、石英ガラスでは、 $\lambda = 1.27\mu\text{m}$ 近傍で材料分散が零となる。

2) 構造分散 (導波路分散) は、光を導波路内に閉じ込めることによって生じる分散であり、導波路構造の調節によって制御可能である。

図 5.42 は標準的な単一モード光ファイバの波長分散特性であり、材料分散と構造分散の和により、零分散波長は $1.3\mu\text{m}$ 帯 (正確には $1.31\mu\text{m}$) となる。

次章で報告するが、NTT 幹線系の光ファイバ通信システムの場合、1983 年に商用化され 1985 年に日本縦貫を達成した F-400M 方式 (400Mb/s、中継間隔 40km) は、 $1.3\mu\text{m}$ 波長の Fabry-Perot 型半導体レーザー (FP-LD) を用いた世界初の本格的な単一モード光ファイバ通信システムであった。その後、1987 年に商用化された F-1.6G 方式 (1.6Gb/s) は、スペクトル線幅の狭い $1.3\mu\text{m}$ 波長 DFB-LD を用いてギガビット光伝送を達成していた。F-1.6G の中継間隔は F-400M と同じ 40km であるため、F-400M からのアップグレードが容易であり、電話需要の拡大に合わせて全国規模で大量に導入された。

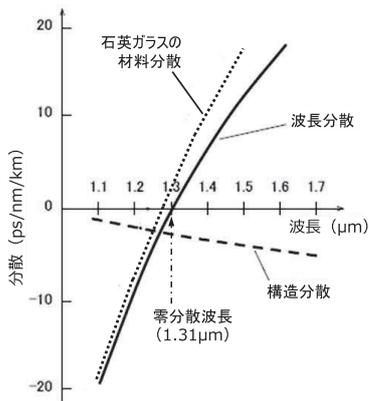


図 5.42 単一モード光ファイバ (SMF) の波長分散特性

しかし、 $1.3\mu\text{m}$ 帯よりさらに低損失な $1.55\mu\text{m}$ 帯を活用するには、前述したように、単一モード光ファイバの零分散波長を $1.3\mu\text{m}$ 帯から $1.55\mu\text{m}$ 帯にシフトさせる必要がある。こうした動機に基づいて、零分散波長を光ファイバ損失が最小になる $1.55\mu\text{m}$ 付近に移した光ファイバが分散シフトファイバ (DSF: Dispersion Shifted Fiber) であり、分散シフトファイバ (= $1.55\mu\text{m}$ 零分散ファイバ) は、 $1.55\mu\text{m}$ 帯での長距離伝送に適している。

図 5.43 に分散シフトファイバ (DSF) の波長分散特性を示したが、初期の DSF は、構造分散の効き目を高めるために、コア径を小さくし、比屈折率差 Δ を大きく設定した「高 Δ ステップインデックス (High- Δ Step-Index) 型」であった^{44) 45) 46)}。しかし、この

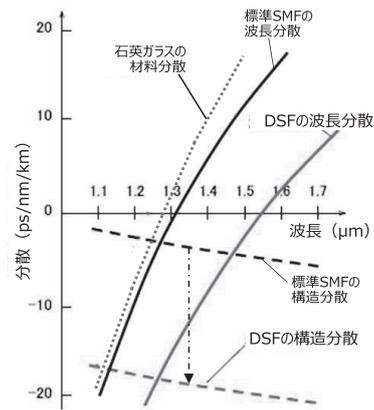


図 5.43 分散シフトファイバ (DSF) の分散特性

単純な方法では、光ファイバ接続損失が大きくなるなどの問題があり、

- ①伝送損失が小さいこと、
- ②光ファイバ間の接続損失を小さくできること、
- ③曲げ損失に強いこと、

に留意して 1980 年代の中頃にコア部の屈折率分布構造の工夫が行われた。

図 5.44 に分散シフトファイバの屈折率分布構造例を示したが、1985 年になって、コアの外側にリングを配置し、コアとリングとのモード結合特性を利用した「セグメントコア型 (Segment Core)」が Corning 社より提案された⁴⁷⁾。この光ファイバは、単一モード光ファイバの実質的なコア径に相当するモードフィールド径 (MFD: Mode-Field Diameter) が大きく、しかも曲げ損失を小さくできる構造であった。しかし、この構造は日本の VAD 法で作り易い構造ではなかったので、NTT 茨城研究所の線路研究部の大橋正治らは「階段型 (DSC: Dual-Shape Core)」構造を提案した⁴⁸⁾。この“墓石”のような屈折率分布を有する光ファイバは、上記①②③に優れ、分散の制御性も良好であり、1988 年に NTT が大分～松山間の約 120km を無中継で結んだ $1.55\mu\text{m}$ 帯の 400Mb/s 光海底ケーブル伝送方式に初めて使われた。今も実用に供されている分散シフトファイバ (DSF) は、Corning

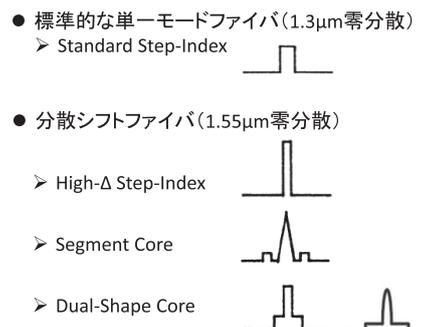


図 5.44 分散シフトファイバの屈折率分布構造

社が1985年に提案した「Segment core 型」(OVD 製)と、NTTが1986年に提案した「Dual-Shape Core (DSC) 型」(VAD 製)の2種類である⁴⁹⁾。

なお、波長分散の測定は、当初、光ファイバに波長の異なる2つのパルスを入射し、受信端でオシロスコープにより、その到達時間差を測定する方法(ツインパルス法)が使われていたが、単一モード光ファイバの波長分散制御の重要性が高まるにつれて、より高精度な測定法が考案されていった⁵⁰⁾。

5.10 石英系ガラスの素性の良さとVAD法の利点

図5.45と表5.1には、石英系光ファイバ母材の三大製法(OVD法、MCVD法、VAD法)の概要と特徴を示した⁵¹⁾。ここで、通信用光ファイバ材料としての石英系ガラスの素性の良さを改めて列挙すると、以下ようになる⁵²⁾。

- 物理的、化学的に安定である。
- 化学気相堆積CVD (Chemical Vapor Deposition) に適した液体や気相の原料が存在している。
- SiCl_4 などの原料は、シリコン半導体産業の副生成物として、比較的安価に入手できる。
- 但し、屈折率制御用のGeに加えて、透明ガラス化用のHeについては油断できない。
- ルツボに接することなく、ガラスを作製できる。
- CVDで生成したガラス微粒子(俗称はSoot = 煤)を経る「スートプロセス」により、比較的低温(1,400~1,500℃)で透明な石英系ガラスを作製できる。
- CVD工程で不純物として考慮すべきものは、

ほとんどOHイオンのみであり、ガラス微粒子の焼結の際に塩素系脱水ガスを加えることにより、OHイオンも徹底的に除去できる。

☆ 但し、MCVD法では、ガラス膜の堆積時にOHイオンが混入しないように、細心の注意が必要である。

- 屈折率制御用ドーパント(主に GeO_2)を含めてガラス組成が2成分、多くて3成分であり、組成の管理がし易い。
- 石英系ガラス中でGeやFは拡散し難く、プリフォーム(母材)と光ファイバの屈折率分布の相似が保たれ、プリフォームの屈折率分布からファイバの伝送特性を推定可能である。
- 2,000℃もの高温でも、適度な粘性があり、プリフォームが落下(melt down)することなく、線引き可能である。

なお、図5.45や表5.1に示した三大製法に比べると、マイナーな製法になるが、1975年にPhilips社により開発され、その後、Draka社が完成させたPCVD(Plasma CVD)法がある⁵³⁾。MCVD法に似ているが、石英管を外側から加熱する酸水素バーナの代わりに、石英管の内側に発生させた高周波プラズマで SiCl_4 等を酸化させて、ガラス微粒子を経ずにガラス管内壁に透明なガラス膜を直接堆積するものである。プラズマを用いることで多量のフッ素を添加することが可能であり、また毎秒3m程度で高速で往復移動するプラズマキャビティ(plasma cavity)によってMCVD法よりも薄いガラス層を高速で堆積するため、屈折率分布制御精度がよい利点がある。PCVD法は、装置が複雑で高価であるが、複雑な屈折率分布が必要な特殊

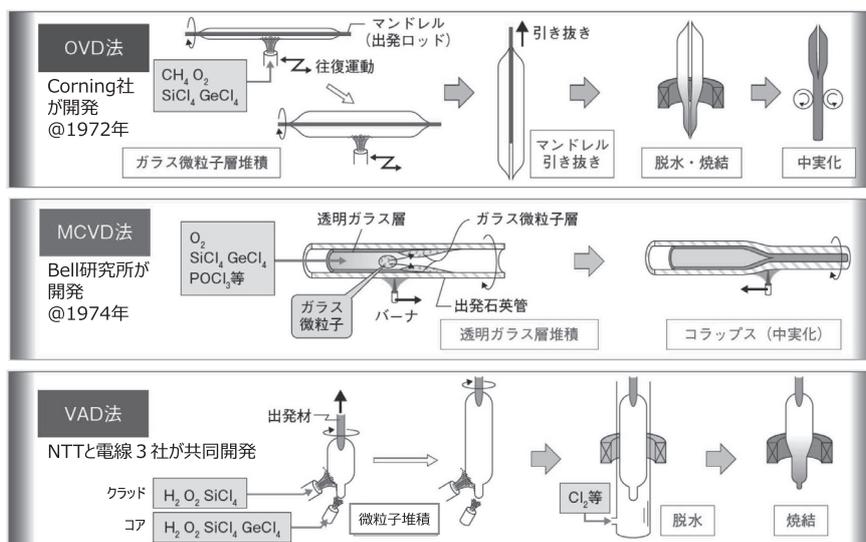


図 5.45 石英系光ファイバ母材の三大製法

(参考文献⁵¹⁾をもとに筆者作成)

表 5.1 光ファイバの三大製法の特徴比較

製法/	OVD(外付)法 Corning社が開発	MCVD(内付)法 Bell研究所が開発	VAD(軸付)法 NTTと電線3社が共同開発
基本プロセス	・種棒外周にガラス微粒子を半径方向に層状に堆積し多孔質母材を形成 ・ガラス微粒子合成バーナが種棒の軸方向に往復(バームクーヘンの製法に類似)	・出発石英管内壁にガラス層を半径方向に層状に堆積 ・加熱用バーナが石英管の軸方向に往復(～数10回)	・種棒先端にガラス微粒子からなる多孔質母材を軸方向に形成 ・ガラス微粒子合成バーナに対し種棒は引き上げられる
ガラス生成反応	・ガラス微粒子合成バーナによる気相塩化物原料の火炎加水分解	・出発石英管内での気相塩化物原料の高温熱酸化	・ガラス微粒子合成バーナによる気相塩化物原料の火炎加水分解
透明ガラス化	・多孔質母材から種棒を除去してから電気炉内で透明ガラス化	・堆積層毎に透明ガラス化 ・ガラス層堆積後に石英管を中実化	・多孔質母材を電気炉内で透明ガラス化
屈折率分布形成	・層毎に原料ガス成分を調整 ・屈折率分布形成の柔軟性が大きい	・層毎に原料ガス成分を調整 ・屈折率分布形成の柔軟性が大きい	・ガラス微粒子合成バーナの配置とガラス微粒子堆積面の温度分布による ・複雑な屈折率分布の形成は苦手
低OH化	・塩素含有雰囲気中で脱水処理	・原料ガス中の水素含有不純物除去 ・出発石英管からのOHイオンの拡散侵入の防止	・塩素含有雰囲気中で脱水処理
量産化	・高速合成バーナ ・全合成化	・出発石英管の大口径化 ・全合成化は困難	・高速合成バーナ、複数バーナ ・全合成化
備考	・現在、Corning社のみが使用	・ガラス旋盤ベースの一つの装置で母材作製が可能であり、色々な光ファイバ試作に適している	・ガラスマスク基板用石英ガラスの製造や、MCVD法の出発石英管の製造にも活用されている

ファイバの製法として主に用いられている。

ここで、我田引水の感もあるが、日本が開発したVAD法の特徴を並べると、以下ようになる。

- ①石英管を使わないので母材の大型化への制約が小さい。
- ②脱水工程により、OHイオンを含めて不純物を除去できるので、低損失化を達成し易い。
- ③ガラスの全合成化によって、異物や欠陥がなく、高い破断強度を実現できる(海底ケーブル用には特に重要)。
- ④回転対称であり、母材の楕円化を招き易い中実化が不要な製法なので、高い真円度を実現でき、コア偏心はほとんどなく、光ファイバ接続損失を小さくできる。
- ⑤ドーパントとしてP(リン)を使わずにガラス合成ができるので、水素に対し安定である。
- ⑥但し、複雑な屈折率分布の形成は難しい。

上記⑤については、1982年にMCVD製GIファイバを布設してのNTT現場試験で発生した「水素による光ファイバ損失増」問題に関連して、次章(6.4.4)で説明する。

上記⑥はVAD法の弱点であるが、現在、世界で使われている通信用光ファイバの90%以上が、複雑な屈折率分布を必要としない標準の単一モード光ファイバであり、実際、世界の通信用光ファイバの約60%(日本では90%以上)がVAD法を基本として製造されている。

VAD法は、光ファイバ用途以外にも、フォトマスク基板用石英ガラス等の製造に適用されているが、興味深いのは、VAD法で作製された無水(OH含有量<1ppm)の石英ガラス管が、MCVD法での出発石英管や、VAD法でのジャケット石英管としても使われていることである。例えば信越石英株式会社からは「SUPRASIL-F300」という名称で販売されている無水合成石英管を用いると、単一モード光ファイバの低損失化に必要な堆積クラッド・コア径比 b/a を3以下に減少できるとされている⁵⁴⁾。

以上、前章と本章で石英系光ファイバの低損失化と量産製法(VAD法)の開発経緯について報告したが、次章では、1970年代に戻って、初期の光ファイバ通信システム実験と商用化努力について紹介する。

参考・引用文献

- 1) 村田浩, 小泉健, 新関暢一:「光ファイバの歴史 開拓者たちのメモアール」, 工業通信, 2001.
- 2) 柘野邦夫:「光ファイバ物語～汗と涙でたどりついた光ケーブル現場試験」, サイバー出版センター, 2014年12月発行.
- 3) 伊澤達夫:「光ファイバ開発の黎明期」, 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J100-C, No.10, pp.417-423, 2017.
- 4) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo, and F. Hanawa: “Continuous fabrication of high silica fiber

- preform," IOOC'77, C1-1, pp.375-378, July, 1977.
- 5) S. Sudo, T. Edahiro and M. Kawachi : "Sintering process of porous preforms made by a VAD method for optical fiber fabrication," Trans. IECE Japan, Vol.E63, No.10, pp.731-737, 1980.
 - 6) 新関 : 「電気通信研究所における光学結晶と光ファイバの研究開発」, 通研実報, Vol.32, No.7, pp.1429-1476, 1983.
 - 7) T. Edahiro, M. Kawachi, S. Sudo and H. Takata, "OH-ion reduction in VAD optical fibres," Electron. Lett., Vol.15, No.16, pp.482-483, 1979.
 - 8) F. Hanawa, S. Sudo, M. Kawachi and M. Nakahara, "Fabrication of completely OH-free VAD fibre," Electron. Lett., Vol.16, No.18, pp.699-700, 1980.
 - 9) T. Moriyama, O. Fukuda, K. Sanada, K. Inada, T. Edahiro, and K. Chida, "Ultimately low OH content VAD optical fibres," Electron. Lett., Vol.16, No.18, pp.698-699, 1980.
 - 10) M. Kawachi, S. Sudo, N. Shibata and T. Edahiro : "Deposition Properties of SiO₂-GeO₂ Particles in the Flame Hydrolysis Reaction for Optical Fiber Fabrication," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.19, No.2 pp.L69-L71, 1980.
 - 11) T. Edahiro, M. Kawachi, S. Sudo and S. Tomaru : "Deposition Properties of High-Silica Particles in the Flame Hydrolysis Reaction for Optical Fiber Fabrication," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.19, No.11, pp.2047-2054, 1980.
 - 12) 河内正夫, 須藤昭一, 枝広隆夫 : 「VAD法による光ファイバの屈折率分布形成機構」, 信学会論文誌, Vol.J65-C, No.4, pp.292-299, 1982.
 - 13) G.V. Samsonov : "The Oxide Handbook (English Translation) ," IFI/Plenum, New York-Washington-London, pp.178-206, 1973.
 - 14) K. Sanada, R. Yamauchi, O. Fukuda, and K. Inada : "Behavior of GeO₂ in dehydration and consolidation processes of the VAD method," Technical Digest of OFC 1984, Paper MI2, pp.26-28.
 - 15) K. Sanada, T. Shiota, K. Inada : "Studies of the chemical kinetics on the vapor phase axial deposition method," J. Non-Crystalline. Solids, Vol.188, No.3, pp.275-284, 1995.
 - 16) K. Sanada, T. Moriyama, K. Inada : "Chlorination and vaporization of GeO₂ component in SiO₂ : GeO₂ porous preform in dehydration process by VAD method and spontaneous formation of SiO₂ cladding layer during the dehydration by selective vaporization of GeO₂," J. Non-Crystalline Solids, Vol.194, No.1-2, pp.163-172, 1996.
 - 17) E. Potkay, H.R. Clark, I. P. Smyth, T.Y. Kometani, and D.L. Wood : "Characterization of Soot from Multimode Vapor-Phase Axial Deposition (VAD) Optical Fiber Preforms," J. Lightwave Technol., Vol.6, No.8, pp.1338-1347 1988.
 - 18) D.L. Wood, E. Potkay, H.R. Clark, and T.Y. Kometani : "Characterization of Torch-Deposited Silica for Light-Guide Preform," Applied Spectroscopy, Vol.42, No.2, pp.299-304, 1988.
 - 19) Juliana Santiago dos Santos, Eduardo Ono, Edmilton Gusken, and Carlos Kenichi Suzuki : "Correlation Study between VAD Preform Deposition Surface and Germanium Doping Profiles," J. Lightwave Technol., Vol.24, No.2, pp.831-837, 2006.
 - 20) S. Sudo, M. Kawachi, T. Edahiro, and K. Chida : "21.2km graded-index V.A.D. fibre with low loss and wide bandwidth," Electron. Lett., Vol.16, No.4, pp.152-154, 1980.
 - 21) K.Chida, M. Nakahara, S. Sudo, and N. Inagaki : "On-Line Monitoring Technique of the Refractive-Index Profile in the VAD Process," J. Lightwave Technol., Vol.LT-1, No.1, pp.56-60, 1983.
 - 22) M. Kawachi, S. Tomaru, S. Sudo and T. Edahiro : "Fabrication Method of Single-Mode Optical Fiber Preforms," US Patent 4,345,928 (Filed : Sep.19, 1980) .
 - 23) M. Kawachi, S. Tomaru, M. Yasu, M. Horiguchi, S. Sakaguchi, and T. Kimura : "100 km single mode VAD fibres," Electron. Lett., Vol.17, No.2, p.57-58, 1981.
 - 24) S. Tomaru, M. Yasu, M. Kawachi, and T. Edahiro : "VAD single mode fibre with 0.2 dB/km loss," Electron. Lett., Vol.17, No.2, Vol.17, No.2, p.92-93, 1981.
 - 25) S. Tomaru, K. Kawachi, and T. Edahiro : "Fabrication of the VAD Single-Mode Fibres," Trans. IEICE Japan, Vol.E65, No.12, pp.717-722, 1982.
 - 26) 三木哲也, 須藤昭一編 : 「光通信技術ハンドブッ

- ク」(オプトロニクス社, 2002年)のpp.220-222, 笹岡英資著:「偏波保持光ファイバ」.
- 27) Y. Sasaki, T. Hosaka, M. Horiguchi, and J. Noda, "Design and Fabrication of Low-Loss and Low-Crosstalk Polarization-Maintaining Optical Fibers," IEEE J. Lightwave Technol., Vol.LT-4, No.8, pp.1097-1102, 1986.
 - 28) 菊地佳夫, 稲田浩一:「偏波保持光ファイバの現状」, レーザー研究, Vol.16, No.9, pp.545-553, 1988.
 - 29) M. Kawachi, B.S. Kawasaki, K.O. Hill, and T. Edahiro: "Fabrication of single-polarisation single-mode-fibre couplers," Electron. Lett., Vol.18, No.22, pp.962-964, 1982.
 - 30) M. Kawachi, M. Yasu, S. Tomaru, T. Edahiro, and S. Sakaguchi, "Wholly synthesised VAD single-mode fibre," Electron. Lett., Vol.18, No.8, pp.328-330, 1982.
 - 31) 須田裕之:「通信用光ファイバ母材の高速合成に関する研究」, 博士論文, 慶応義塾大学, 1991.
 - 32) H. Suda, S. Shibata and M. Nakahara, "High-rate fabrication of wholly synthesised fibre preform by the multiflame VAD method using SiHCl₃ raw materials," Electron. Lett., Vol.21, No.24, pp.1123-1124, 1985.
 - 33) 今澤正博, 福島洋治, 岡野広明:「全合成シングルモード形光ファイバ」, 日立評論, Vol.69, No.11, pp.93-96, 1987_11_15.
 - 34) 山内良三, 稲田浩一:「製造側から見た光ファイバの将来」, 光学, Vol.19, No.9, pp.626-633, 1990.
 - 35) 鈴木修三, 山内良三, 小倉邦男:「光ファイバの高品質化・経済化への取り組み」, 電気通信, Vol.71, No.733, pp.27-35, 2008.
 - 36) 千田和憲, 木村隆男, 我妻 誠:「光ファイバの高速線引き」, NTT 研究実用化報告, 第32巻12号, pp.2675-2685, 1983.
 - 37) 常石克之:「光ファイバの被覆材料と構造」, SEI テクニカルレビュー, 第182号, pp.56-64, 2013.
 - 38) S. Sakaguchi and T. Kimura: "High-speed drawing of optical fibers with pressurized coating," IEEE. Journal of Lightwave Technology, Vol.3, No.3, pp.669-673, 1985.
 - 39) 渡辺稔:「光ファイバの最近の動向」, レーザー研究, Vol.17, No.2, pp.92-101, 1989.
 - 40) K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh, and Y. Chigusa: "Ultra-low-loss (0.1484dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance," Electron. Lett., vol.38, no.20, pp.1168-1169, 2002.
 - 41) 上山明博:「プロパテント・ウォーズ—国際特許戦争の舞台裏」, 文春新書, 2000.5.
 - 42) 京藤倫久:「光ファイバ開発競争の現場で学んだこと」, NEW GLASS, Vol.22, No.4, pp.1-3, 2007.
 - 43) 末松安晴, 伊賀健一:「光ファイバ通信入門(改訂5版)」, オーム社, 2017.
 - 44) H. Tsuchiya and N. Imoto: "Dispersion-free single-mode fibre in 1.5 μm wavelength region," Electron. Lett., Vol.15, No.15, pp.476-478, 1979.
 - 45) T. Miya, A. Kawana, Y. Terunuma and T. Hosaka: "Fabrication of Single-Mode Fibers for 1.5 μm Wavelength Region," Trans. IECE, Vol. E63, No.7, pp.514-519, 1980.
 - 46) T. Tomaru, M. Kawachi, M. Yasu, T. Miya and T. Edahiro, "VAD single-mode fibres with high Δn values," Electron. Lett., Vol.17, pp.731-732, 1981.
 - 47) T. Croft, J. Ritter, V. Bhagavatula, "Low-loss dispersion-shifted single-mode fiber manufactured by the OVD process," IEEE J. Lightwave Technol., Vol.3, No.5, pp.931-934, 1985.
 - 48) M. Ohashi, N. Kuwaki, C. Tanaka, N. Uesugi and Y. Negishi, "Bend-optimised dispersion-shifted step-shaped-index (SSI) fibres," Electron Lett., Vol.22, pp.1285-1286, 1986.
 - 49) 大橋正治, 「光ファイバ: 光ファイバの研究開発の歴史と今後の展開」, OPTRONICS (2011) No.1 pp.173-180, 2011.
 - 50) 青山耕一:「光測定技術: 研究開発の歴史を振り返る」, OPTRONICS (2012) No.2, pp.105 -113.
 - 51) 加賀田俊, 中芝幸司:『高品質光ファイバの量産製造技術「VAD法」の功績による「IEEEマイルストーン」認定記念式典開催報告』, NTT 技術ジャーナル (2015.9), pp.94-99.
 - 52) 柴田修一:「20世紀に名を残すガラス技術 光ファイバー」, NEW GLASS, Vol.15, No.2, pp.73-75, 2000.
 - 53) 小倉邦男:「通信用石英系光ファイバの製造方法」, NEW GLASS, Vol.27, No.105, pp.37-39, 2012.
 - 54) 信越石英株式会社:「光ファイバ用合成石英ガラス SUPRASIL-F300」, PC-FBR-SYN-008. <http://www.sqp.co.jp/seihin/catalog/pdf/4-1.pdf>

6 | 初期の光ファイバ通信システム実験と商用化努力

NTTでは、当初は武蔵野研究所（基礎研究部・基礎第3研究室）で光ファイバ通信システムの研究が行われたが、実用化段階に入ると横須賀研究所（1972年11月開所）を中心に開発が進められ、各種の現場試験を経て、1981年には多モード光ファイバ（GI型）による32Mb/sや100 Mb/s伝送システムの商用化、1983年には単一モード光ファイバによる400 Mb/sシステムの商用化が開始された。そして1985年には、VAD単一モード光ファイバを本格導入した日本縦貫光ファイバ幹線網（400 Mb/s）が開通したが、その後も、伝送容量の向上努力が続いた。

以下、本章では、こうした1970年代中頃から1980年代後半までの技術発展の経緯を、1) ミリ波導波管から光ファイバ通信システム開発への転換、2) 発光素子と受光素子の歩み、3) 石英系光ファイバケーブル布設実験の始まり、4) 多モード光ファイバ通信システムのNTT現場試験と商用化、5) 単一モード光ファイバ通信システムの現場試験と商用化、6) 単一モード光ファイバ化を促進した光結合技術、7) 加入者系への光ファイバ導入努力、の順に報告する。

6.1 ミリ波導波管から光ファイバ通信システム開発への転換

図6.1は、電気学会雑誌（1972年12月号）に当時のNTT伝送研究部長（池上文夫）が寄せた解説論文「最近の大容量伝送方式」の第1図「総合通信網を支える技術」であり、電子交換機間をつなぐ長距離伝送路として、同軸ケーブル方式、マイクロ波方式、準ミリ波方式、ミリ波（導波管）方式などが載っている¹⁾。この技術展望図の中央付近には、レンズ列らしき光通信方式も載っているが、光ファイバへの言及は本文に

も見られず、実用化開発を担う1972年当時のNTT伝送研究部の優先順位からすると、まだ海の物とも山の物とも分らない光ファイバ通信方式は時期尚早であったことが理解できる。

1970年のCorning社の20dB/kmファイバ発表を受けて、1971年早々には茨城研究所（東海村）に光ファイバ研究担当の柊野チームが発足していたが、上記の伝送研究部を含めてNTT研究所全体の雰囲気が変わるのは、1974年7月にBell研究所のMCVD法による1.1dB/kmファイバ発表が行われた後であった。翌年の1975年4月17日には、武蔵野研究所講堂に所内外から約240名の参加者を集めて、「光ファイバ伝送」をテーマにした研究討論会が開催されるまでになった。当日の野田健一基礎研究部長の基調講演記録が、NTT研究所内向けの「通研新聞」（1975年4月25日号）に載っていて、印象的であるので、以下に引用する。

『●光伝送技術発展のために私たちがなしたこと：従来の有線伝送媒体は全て良伝導性金属を主材料とするものであった。ところが1970年に光ファイバの飛躍的な低損失化が報じられ、相前後して半導体レーザーの常温連続発振も報じられた。当時は、それまで光のビームガイドおよび空間伝送の研究を進めていたが、この状況を見て光ファイバ伝送の研究を始めた。』

私たちは今日までの方式検討によって既存方式を凌駕する光伝送方式の見通しを得、その未来像を明らかにしつつある。高性能かつ高寿命の5層構造の高輝度発光ダイオードの発案と実験による見通しを得た。また半導体レーザーについても独得の方法で劣化機構を明らかにし、素子化を進展さ

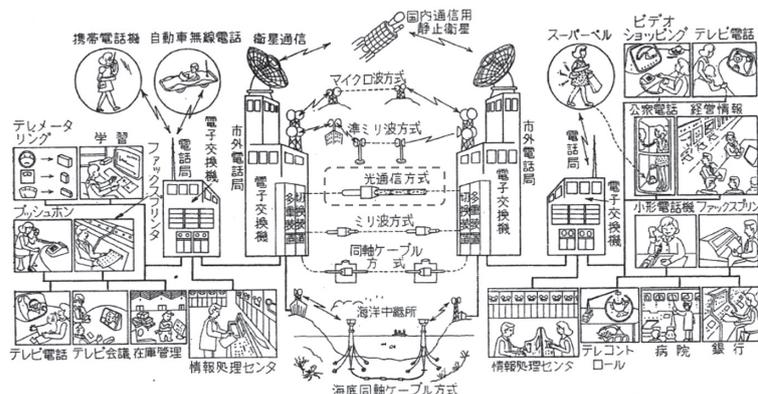


図6.1 総合通信網を支える技術（1972年当時）¹⁾

せた。つぎに 100Mb/s において、ほぼ 1 中継スパ
ンの PCM 伝送の確認実験を行った。さらに低損失
ファイバを実現し、独得な接続法の発案を得た。

●盛り沢山の特長 中継間隔長く、多対も可能、
管路引込可：<記載省略>

●小束から大束まで、どの伝送路に入れても有
効：<記載省略>

●光源の長寿命化、ファイバの広帯域化など多く
の課題：<記載省略>

●どんな方式の実現を目指すか：<記載省略>

●新しい伝送時代の幕開け：これまでの伝送の歴史
において、新しい伝送媒体が何回か新しい時代の
幕を開いてきた。光ファイバも新しい時代の幕
を開くものである。しかも 4 半世紀に 1 度の大
傑作といえる。この大傑作を使って意義ある方式
を生み出すために努力を傾注したい。』

(下線部は筆者が強調)

上記の野田部長の基調講演に続いて行われた技術講
演は、①光ファイバの作製、②多モードファイバの伝送
特性、③光伝送用高輝度発光ダイオード、④半導体レー
ザの熱解析、⑤光中継系の基礎実験と検討、⑥光伝送方
式の検討及び方式設計上の問題点、の 6 項目であった。

この研究討論会の開催に先立って、2 月上旬の基礎
第 3 研究室では、古河電工製の 880m 長の 4 心多モー
ド光ファイバケーブル (Corning 社製の OVD 法で作
製された SI 型多モード光ファイバを内蔵) を武蔵野
研究所内の実験用管路中に布設し、実際の光ファイ
バケーブルの伝送特性等を (後の 6.3 節で紹介するよ

うに) 確認済であった。そして、研究討論会の翌月
(1975 年 5 月) には、根回し済みの NTT と電線 3 社
との光ファイバ共同研究が正式スタートした。

それまで基礎研究部 (武蔵野) で行われていた「光
のビームガイドおよび空間伝送の研究」が基礎研究段
階であったのに対して、横須賀の伝送研究部と茨城の
線路研究部で行われていたミリ波導波管方式の開発は
電線 3 社との関係を含めて実用化寸前であったので、
光ファイバ通信方式開発への全面切り替えまでには
過渡期間が必要であった。当時の NTT は茨城研究所
(東海村) と水戸電話局の間に埋設したミリ波導波管
(23km 長) での現場試験を 1973~1974 年に済ませて
いて、1977 年の商用化を目指していたからである。

参考までに、表 6.1 は「通研新聞」(1975 年 4 月か
ら 1977 年 9 月までの期間) に掲載されたミリ波導波
管関連記事 (●印) と光ファイバ関連記事 (○印) の
表題をリストアップしたものである。1977 年 3 月 17
日付で、ミリ波導波管関連の最後の記事『既設管路内
導波管線路を開発 - 長管路でも布設が容易』があり、
積年のミリ波導波管関連の研究終結までに、1975 年 4
月 25 日付の記事『1975.4.17 に「光ファイバ伝送」を
テーマに研究討論会おこなわれる』掲載から数えて、
2 年近くを要したことが分かる。

基礎第 3 研究室 (武蔵野) は、早期実用化が期待さ
れる多モード光ファイバ通信システム研究について
は 1976 年に横須賀研究所に技術移管を行い、以後は
将来寄りの単一モード光ファイバ通信システムの研究
に専念することになったが、技術移管を受けた横須
賀研究所では、表 6.1 にも表れているように、当初は

表 6.1 NTT 研究所での「ミリ波導波管」から「光ファイバ」への移行過程 (「通研新聞」記事表題より)

発行日	表題 (●ミリ波導波管関連、○光ファイバ関連)	担当研究室	備考
1975.4.25	○1975.4.17に「光ファイバ伝送」をテーマに研究討論会おこなわれる	基礎研究部長が基調講演	約240名が出席
1975.6.12	●導波管不要モード発生量測定法を開発 各種導波管の特性解明に威力	導波管線路研究室 (茨城)	
1975.6.26	○光ファイバコネクタを試作、二重偏心管法で低接続損失を実現	基礎第三研究室 (武蔵野)	SIファイバ
1975.10.9	●新しい高速多値変復調回路の実験に成功 多値伝送の研究に明るい見通し	ミリ波伝送研究室 (横須賀)	
1976.4.8	●どう道用導波管線路現場試験すむ	導波管線路研究室 (茨城)	
1976.4.8	●建設・保守用ミリ波帯測定器を試作	ミリ波伝送研究室 (横須賀)	
1976.4.15	○周波数掃引法による光伝送系の測定	ミリ波伝送研究室 (横須賀)	SIファイバ
1976.5.20	○単一モードファイバ方式研究の研究すむ	基礎第三研究室 (武蔵野)	0.85μm帯
1976.6.10	○極低損失光ファイバの開発に成功 波長1.2ミクロンで0.5dB/km以下	光部品研究室 (茨城)	SIファイバ、長波長帯
1976.9.2	○光ファイバ長距離伝送に見通し 8kmの伝送特性を解明	ミリ波伝送研究室 (横須賀)	SIファイバ、0.85μm帯
1976.9.16	○光ファイバの融着接続 気体放電で平均損失0.15dB	基礎第三研究室 (武蔵野)	SIファイバ
1976.10.7	●どう道内ミリ波導波管伝送方式実用化に見通し 総合伝送試験で確認	ミリ波伝送研究室 (横須賀) 導波管線路研究室 (茨城)	
1976.11.4	○波長1.2μm半導体レーザを試作 GaInAsP-InP二重ヘテロ接合	基礎第七研究室 (武蔵野)	長波長帯
1977.1.27	○極低損失光ファイバの研究すむ 単一モードでも進展	光部品研究室 (茨城)	1.06μm帯
1977.2.17	○光伝送方式用測定器の研究進む 5種の測定器類を試作	光伝送研究室 (横須賀)	
1977.3.17	●既設管路内導波管線路を開発 長管路でも布設が容易	導波管線路研究室 (茨城)	ミリ波導波管、最後の記事
1977.3.31	○光ファイバの新製造技術を開発 母材の連続製造に見通し	光部品研究室 (茨城)	
1977.5.19	○光ファイバ伝送の研究進む 横須賀研で所内伝送実験	光伝送研究室 (横須賀) 光線路研究室 (茨城)	
1977.6.16	○多成分光ファイバで低損失化達成 新製法でガラスを均質化	光部品研究室 (茨城)	4.2dB/km@0.85μm
1977.9.8	○半導体レーザ寿命130万時間を予測 高温加速寿命試験に成功	基礎第七研究室 (武蔵野)	

ミリ波伝送研究室が光ファイバ通信方式の研究も担当した。1977年初めになって光伝送研究室が新設され、その1年後の1978年に、光技術にバトンを渡し終わったミリ波伝送研究室が廃止された。

1978年12月には、1975年4月の「光ファイバ伝送」研究討論会で基調講演を行った野田基礎研究部長が編著者となって、図6.2の専門書「光ファイバ伝送」が電子通信学会から発行された²⁾。その目次と著書一覧を見ると、武蔵野、茨城、横須賀の研究所を横断して、部品サイドから方式サイドまで、光ファイバ通信システムの本格的な研究開発体制が1978年までには整えられたことが分かる^(註3)。

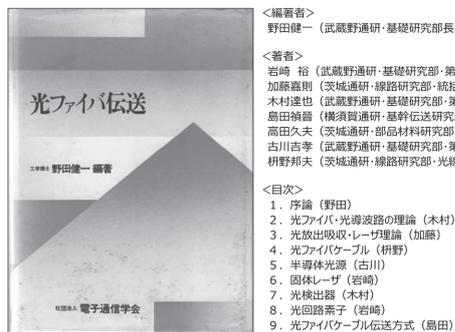


図 6.2 単行本「光ファイバ伝送」(1978年12月発行)

6.2 発光素子と受光素子の歩み

6.2.1 初期の研究開発の歩み

初期の発光素子と受光素子の研究開発の歩みを、光ファイバと並べて表6.2に示したが、Corning社が20dB/kmを発表した1970年は、Bell研究所(林巖雄ら)とソ連のヨッフエ研究所(Z.I. Alferovら)とで、

(註3) 大規模なクリーンルームを擁して、LSI試作を筆頭に光部品開発や基礎研究を担当することになる第四通研としてのNTT厚木研究所の開設は、さらに5年後の1983年3月であった。

ほぼ同時期に0.85μm帯のGaAlAs系半導体レーザーの室温連続発振に成功した年でもあった^{3) 4)}。

表6.2から、1970年代後半の石英系光ファイバの長波長帯開拓(0.85μm帯⇒1.3μm帯⇒1.55μm帯)に沿うように通信用の半導体レーザーとフォトダイオードの長波長化が進んだ経緯、すなわち、

半導体レーザーの材料系としては、

GaAlAs (0.85μm帯) / GaAs基板 ⇒ InGaAsP (1.3/1.55μm帯) / InP基板、

フォトダイオードの材料系としては、

Si (0.85μm帯) ⇒ Ge (1.3μm帯) ⇒ InGaAs (1.3/1.55μm帯) / InP基板、

の歩みが理解できる^{5) 6)}。

表6.2において、長波長帯で安定に単一縦モード発振する半導体レーザーの研究開発に東京工業大学の末松安晴研究室の果たした指導的な役割は大きく、例えばNTT研究所における分布帰還型(DFB: Distributed Feedback) レーザ実現(1981年)には、同年に末松研究室を卒業した板屋義夫博士が参画していた。

6.2.2 半導体レーザーの概要

図6.3には、代表的な2種類の半導体レーザーの発振特性と構造を示した⁷⁾。半導体レーザーは、レーザーダイオード(LD: Laser Diode)とも呼ばれるが、図6.3aのFabry-Perot (FP)型半導体レーザー(FP-LD)は、化合物半導体結晶(GaAs基板やInP基板)の劈開面を利用した反射鏡中に活性層を配置したものである。同構造は各種半導体レーザーの中でも最もシンプルであり、複雑なプロセス無しに、安価に製造できる利点がある。発振スペクトルの縦モード間隔Δλは、

$$\Delta \lambda = \lambda^2 / (2n_{\text{eff}} \cdot L)$$

により与えられ、長波長帯での半導体レーザーのΔλ

表 6.2 1970年代の光ファイバの長波長帯開拓に伴う発光素子と受光素子の歩み

年	光ファイバ	発光素子(半導体レーザー)	受光素子(フォトダイオード)
1936	・光通信方式特許(電気試験所)		
1953			・PIN-PDとAPDの特許出願(東北大)
1957		・半導体レーザー(半導体メーザ)の特許出願(東北大)	
1960		・ルビドレーザー発振@0.69μm(Hughes社)	
1961		・HeNeレーザーの発振@0.63μm(Bell研)	
1962		・GaAsレーザー低温ハルス発振@0.85μm(GE・IBM・MIT)	
1964	・GIファイバの特許出願(東北大)		・Si-APD論文(Bell研)
1966	・低損失光ファイバの可能性示唆(Kao)		・Ge-APD論文(Bell研) ・光通信用光検波器研究開始(NTT)
1969	・80dB/kmセルフォックファイバ(日本板)		
1970	・20dB/km石英系ファイバ(Corning社)	・GaAlAsレーザー連続発振@0.85μm(Bell研、ソビエト、MIT)	(1970年当時、Si-APDは市販品あり)
1971			・光通信用Ge-APD試作(NTT)
1974	・MCVD法1.1dB/kmファイバ(Bell研)	・動的単一モードレーザー概念の提案(東工大)	
1976	・MCVD法で0.47dB/km(NTT&藤倉) ⇒1.3μm波長帯の発見	・InGaAsPレーザー連続発振@1.3μm(MIT、KDD、東工大、NTT)	・長波長帯用Ge-APD作製(NTT&富士通)
1977	・VAD法発表(NTT) ・MCVD-0.5dB/km-SMファイバ(NTT)	・GaAlAsレーザー寿命推定~100万時間(Bell研、NTT) ・面発光レーザー(VCSEL)の提案(東工大)	・InGaAs-APD試作(仏Thomson/CSF)
1979	・MCVD法で0.2dB/km-SMファイバ(NTT) ⇒1.55μm波長帯の発見(NTT)	・InGaAsPレーザー連続発振@1.55μm(KDD、東工大、NTT)	
1980	・完全無水VADファイバ(NTT、藤倉) ・VAD長尺低損失SMファイバ(NTT)		・InGaAs-APD試作と特性測定(NTT)
1981		・DFBレーザー実現(KDD、NTT)、DBRレーザー実現(東工大)	

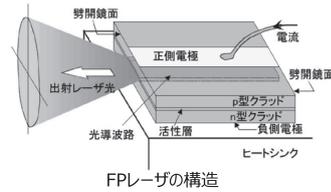
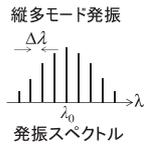
a) Fabry-Perot(FP)型半導体レーザー

➢ 2枚の平行に向き合った鏡によるFP型光共振器によって正帰還が得られ発振するレーザー

発振波長間隔

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2n_{eff}L}$$

λ_0 : 発振波長の中心値
 n_{eff} : 実効屈折率
 L : 素子長



b) 分布帰還(DFB)型半導体レーザー

➢ 回折格子(グレーティング)によるBragg反射により、光の分布帰還が得られ、Bragg波長近傍の単一波長で発振

発振波長

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda$$

Λ : 回折格子の周期
 n_{eff} : 実効屈折率

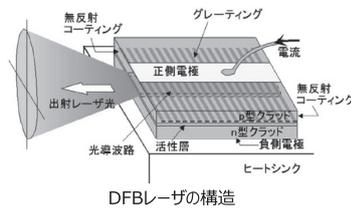


図 6.3 代表的な半導体レーザーの構造と発振特性

(参考文献⁷⁾をもとに筆者作成)

は、素子長Lが300μmとすると1nm程度になり、波長選択性の無い反射鏡を用いたFP構造では、半導体レーザーの発振可能波長域(利得スペクトル幅)の中で多数の縦モードによる多モード発振となる。一例として、図6.4には1976年にNTT武蔵野研究所で連続室温発振に成功した1.3μm帯FP-LDの断面構造と発振スペクトル特性を示した⁸⁾。なお、茨城研究所で作製したMCVD単一モード光ファイバを用いて1978年に武蔵野研究所(基礎研究部)で行われた1.3μm波長帯での伝送実験には、図6.4のGaInAsP(=InGaAsP)系FP-LDが、受光素子としてのGe-APD(Avalanche Photodiode)と共に用いられた⁹⁾。

FP-LDは、比較的低速で短距離の光ファイバ通信システムで今日でも広く使われているが、長距離で大容量な光ファイバ通信システムには、単一波長で発振する半導体レーザーが要求される。代表的な構造は、図6.3bのように、波長選択性の強い回折格子(グレーティング)を形成した分布帰還(DFB: Distributed FeedBack)型半導体レーザー(DFB-LD)である。ここでは、一例として、1981年にNTT研究所で室温連続発振に成功した1.55μm帯DFB-LDの構造と発振ス

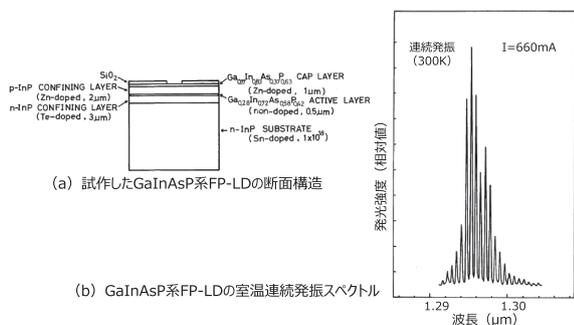


図 6.4 1.3μm帯FP-LDの室温連続発振に成功(1976年NTT)

(参考文献⁸⁾をもとに筆者作成)

ペクトル特性を図6.5に示した¹⁰⁾。図6.4に例示したFP-LDの発振スペクトル特性との違いは明白である。

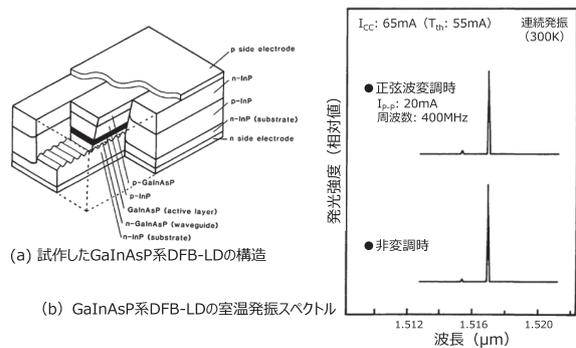


図 6.5 1.55μm帯DFB-LDの室温連続発振に成功(1981年NTT)

(参考文献¹⁰⁾をもとに筆者作成)

補足になるが、比較的短距離の多モード光ファイバ通信用の経済的な発光素子として、光共振器構造を持たない図6.6のような発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)も併用された¹¹⁾。初期段階では、LEDはLDより長期信頼性に優れ、光出力は小さいが、駆動電流対光出力の直線性が比較的よく、画像情報のアナログ伝送方式に適していたのである。

基板と垂直方向に光が出力されることは発光ダイオードに似ているが、東京工業大学の伊賀健一によって1977年に発明され、1988年に室温連続発振に成功した面発光レーザー(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting LASER)の発展は目覚ましい^{3) 12)}。VCSELは、図6.7のような共振器構造を備えていて、主にGI型光ファイバと組み合わせて、今日のデータセンタ内の光配線(光インターコネクション)用光源として大量に使われている。レーザープリンタ用アレイ光源や、身近なレーザーマウス用光源としても活躍している。

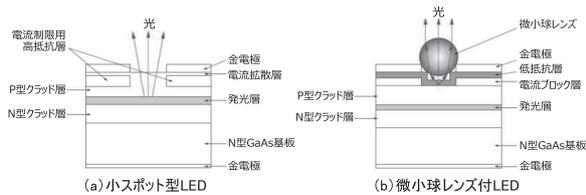


図 6.6 通信用 LED の断面構造例

(参考文献¹¹⁾ をもとに筆者作成)

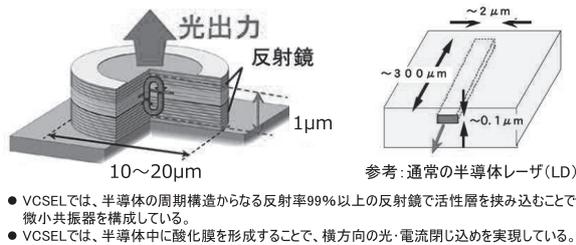


図 6.7 面発光レーザ (VCSEL) の概念図

(参考文献¹²⁾ をもとに筆者作成)

6.2.3 フォトダイオードの概要

光ファイバ通信用の受光素子として、図 6.8 に代表的な 2 種類のフォトダイオードの構造と動作の概念図を示した¹³⁾。どちらも半導体レーザの場合と同様に pn 接合ダイオードと類似の 2 端子素子であるが、半導体レーザと異なり、逆方向の電圧 (逆バイアス) をかける。図 6.8a の PIN-PD は、p 型半導体と n 型半導体の間に絶縁性の i 型半導体を挟んだ構造であり、絶縁性の i 層に電圧をかけて使用する。i 層への光入射で生成した電子とホールは、この電圧により移動が加速され、高速応答性が得られる。光が入射しない時の暗電流も小さく、広く使われている。

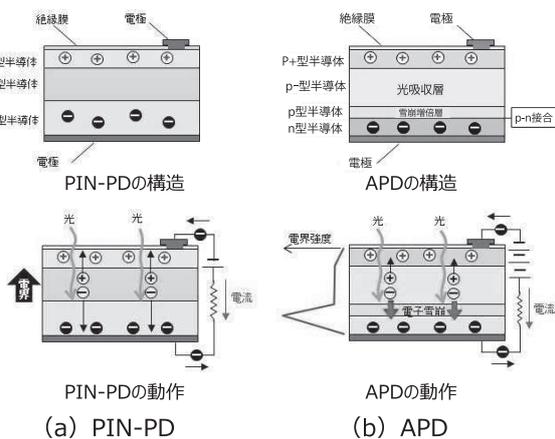


図 6.8 代表的なフォトダイオードの構造と動作

(参考文献¹³⁾ をもとに筆者作成)

図 6.8b の APD (Avalanche Photodiode) は、増幅機能を持つ高感度の PD で、微弱な光信号の検出に適している。構造は、p 型半導体が p+ 層、p- 層、p 層の 3 層に分かれている。p+ はキャリア濃度の高い

層、p- は低い層を表している。p- 層は光を吸収して電子とホールを生成する役割、p 層は生成した電子を高電界で加速して電子雪崩を起こさせる役割を担っている。APD は PIN-PD よりも高い電圧をかけて使うが、薄くしている p 層で大きな電界勾配ができ、光照射により p- 層で生成した電子は、この電界勾配で加速されて半導体の原子に衝突して電子やホールを生成し、生成した電子がまた別の原子に衝突して次々に電子やホールを発生させていく。こうしたアバランシェ (雪崩) 効果を利用して、光電流を増倍できるため、高感度な受光素子を実現できる。

図 6.9 には、通信用の 3 種類の材料系のフォトダイオードの受光感度の波長特性を示したが、当初は、GaAlAs 系 FP-LD の発振波長に感度がある Si-APD が使われた^{3) 4)}。やがて 1.3μm 帯での光ファイバの低損失化が進み、InGaAsP 系半導体レーザでの 1.3μm 帯の連続発振が可能となると、フォトダイオードも、この波長帯で感度のある Ge-APD が用いられるようになったが、1980 年代後半になると、暗電流が低く、より低雑音な InGaAs-APD に代わっていった。さらに、光ファイバの損失が最も低い 1.55μm 帯に長距離系の通信波長が移ったが、InGaAs-APD は、この波長帯でも感度があり、引き続き使用されていた⁶⁾。

1980 年代末になると、APD より雑音の小さい光ファイバ増幅器が開発され、光信号の増幅を必要とするような長距離の光ファイバ通信システムでは、APD は、より低雑音で受信可能な光ファイバ増幅器と PIN-PD を組み合わせた光受信器に取って代わられた。しかし、アクセス系など光増幅が不要な中短距離の光通信システムにおいては、現在も APD が広く使用されている。

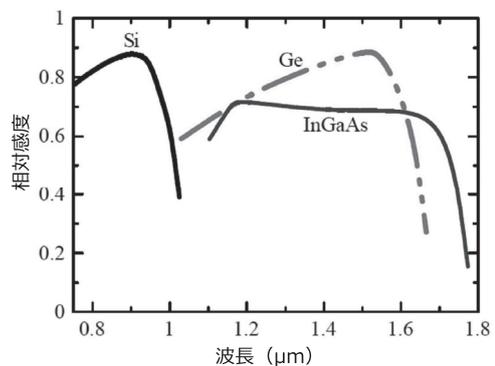


図 6.9 Si, Ge, InGaAs 系フォトダイオード (PD) の相対感度例^{3) 4)}

6.2.4 パッケージ構造

半導体レーザやフォトダイオードは、デバイス性能

や寿命が外界の影響を受けやすいため、通常、気密パッケージに収められた状態で実用に供される^{14) 15)}。図 6.10 には、半導体レーザー (LD) の代表的なパッケージ構造を示した。図 6.10a の TO-CAN 型は、半導体レーザー (LD) とモニタ用 PD が、筒状の金属で覆われ、気密封止されている。レーザー光はガラス窓を介して取り出されるが、レンズ付も可能である。汎用タイプであり、低中速から高速 (~10Gb/s) まで動作するものが開発されている。

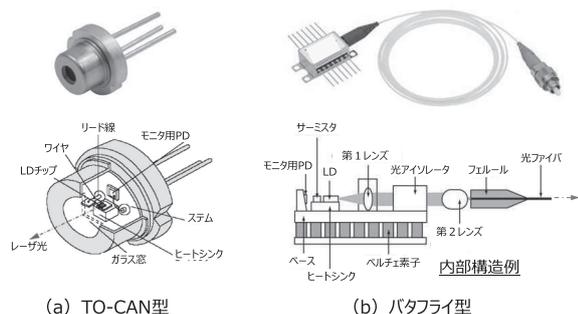


図 6.10 半導体レーザーのパッケージ構造例
(参考文献¹⁵⁾をもとに筆者作成)

図 6.10b のバタフライ型では、長方形の金属の容器の中に、半導体レーザー、モニタ用 PD、冷却用ペルチェ素子が内包されている。回路との接続用ピンが左右対称に配置されていることからバタフライ型と呼ばれる。外部からの高周波信号を入力する端子が付いたものもある。TO-CAN 型に比べて高価になるが、高周波配線が容易であり、LD への反射戻り光を防止する光アイソレータなどの光学部品を内蔵し易いことから、高性能、高機能な半導体レーザーモジュールが実現できる。

以上、最小限の記述に留めたが、発光素子や受光素子に関しては、多くの優れた専門書があるので、奥が深い構造設計や作製プロセスを含めての詳細は、そちらを参照されたい^{3) 4)}。

6.3 石英系光ファイバケーブル布設実験の始まり

6.3.1 最初の光ファイバケーブル布設実験

1974 年夏、古河電工は、技術契約先の Corning 社から入手できたステップインデックス (SI) 型多モード光ファイバを用いて、図 6.11 に示した 4 心の光ファイバケーブルを試作し、現場布設、接続試験を実施した。架空 200m、地下 200m の布設で、地下マンホール内での現場接続であった。実験結果を 1975 年の第 1 回 ECOC (欧州光通信会議) で発表し、この現場布設と接続が世界初の実験であることが分かった¹⁶⁾。

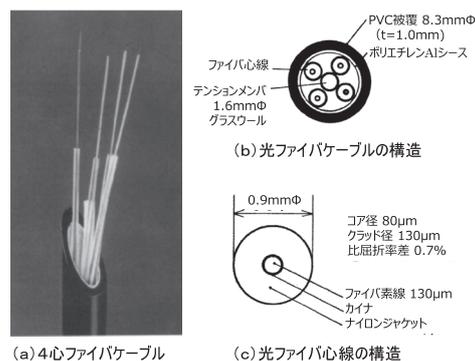


図 6.11 初期の古河電工製光ファイバケーブル
(参考文献^{16) 17)}をもとに筆者作成)

1975 年 2 月上旬には、同じ古河電工製の光ファイバケーブルを用いて、NTT 武蔵野研究所の基礎研究部第三研究室の池田正宏らによって、同研究所内で布設、接続、伝送実験が行われた。全長 452m の実験用管路にケーブル長 880m の 4 心光ファイバケーブル 1 条を折り返して布設した。光ファイバケーブルの片端を実験室に引き込んで接続し、全長 3.52km (880m × 4) とした。当時は融着接続技術がなく、ガラススリーブを用いて接続した。布設前の光ファイバ心線 4 本の平均損失は約 7.5dB/km (波長 0.82µm) であった¹⁷⁾。

布設後の光ファイバケーブルの全損失特性を測定するために、池田らは、キセノンランプと分光器による波長依存性の測定と、クリプトンレーザー波長 0.647µm での測定を行った。図 6.12a に示した損失波長依存性は、3 か所の接続損失を含んでいるが、布設前後で約 1dB/km の損失の減少が観測された。布設前のケーブルはドラム (直径約 1m) に巻かれていたが、布設によって、ほとんど直線状態になり、損失が減少したと推定された。

さらに図 6.12b は、布設した光ファイバケーブルの伝送帯域を表すベースバンド周波数特性の測定結果 (1.76km 長と 3.52km 長) であるが、光レベルで 3dB ダウンの帯域幅として SI 型ファイバ相応の 27.5MHz·km の値が観測された。しかし、光ファイバ素線が Corning 製ということもあって、当時、実験データは公表されなかった。その後の基礎第 3 研究室の関心は単一モード光ファイバ通信システムに移っていった。

1976 年になると、表 6.3 に示すように日米欧で競うように光ファイバケーブルの布設実験が行われるようになった¹⁸⁾。ドイツの Siemens 社が早めの 1975 年から現場試験を行うことが出来たのは、Corning 社との間に、合弁の光ファイバケーブル製造会社 Siecor 設立に至る交流があったためと考えられる。さらに、米国 Bell 研の 144 心光ファイバケーブルは、「12 心 × 12 枚」の積層構造を採用した先進的な試みであった¹⁶⁾

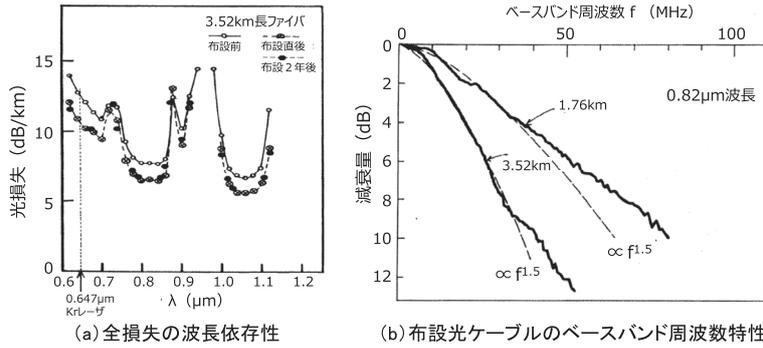


図 6.12 布設した光ファイバケーブルの特性 (1975 年 NTT 武蔵野研究所)
(参考文献¹⁷⁾をもとに筆者作成)

表 6.3 光ファイバ伝送方式の実験状況 (計画を含めて 1976 年当時)
(参考文献¹⁸⁾をもとに筆者作成)

研究機関 (メーカ)	目的	時期	ケーブル長 (心数)	伝送速度 (Mb/s)	中継間隔 (km)	光ファイバ種別 (損失)	発光・受光素子	実施地
東京電力 (日電・住友・日本板硝子・日立・日立電線)	実証試験	1976初～	約3km (4心)	6.3		SI, Si-LF (6~10dB/km)	LD-APD	新宿変電所 田端通信所
関西電力 (日電・富士通・古河・日立・日立電線)	実証試験	1976初～	1.5~3.5km (4心)	0.24		SI (5~8dB/km)	LED-APD	大阪北支店・新曽根崎制御所 東意岐部変電所
				6.3			LD-APD	
				100				
NTT研究所 (日電・富士通・古河・住友・藤倉)	総合伝送実験	1976末～	8km (8心)	8	6km	SI (~3dB/km)	LED-APD	横須賀研究所
				32	8km		LD-APD	
米国Bell研 (Western Electric)	所内実験	1976初～	0.8km (144心)	1.5		GI (6dB/km)	LED-PIN	Atlanta
				45	7km		LD-APD	
米国GTE	現場試験	1976初～	4.5km	1.5		(5dB/km)		米国西海岸
英国BPO (BICC, STL)	現場試験	1977初～	5km (2心), 7km (2心)	8, 140	8km, 5km	GI (6dB/km)		Martlesham Ipswich
ドイツTST (Telefunken, SEL, Siemens, EGF-TKD)	現場試験	1977～	18km (6心)	34		GI		Berlin
F4YSiemens	現場試験	1975～	2km (10心)	2, 34	4km	GI	LED- LD-APD	Munich

6.3.2 電力会社の実証実験

日本では、誘導障害が発生しない光ファイバ伝送に着目した東京電力と関西電力が、送電網制御のための光ファイバケーブルの実証実験を行った。両社は、1974年頃から互いに協力しつつ、電力システムの保護用、発電所構内の監視制御用回線などに光ファイバ通信方式を導入することを目的として予備検討を進めていたが、それぞれ3つのメーカーグループ (①日本電気・住友電工・日本板硝子、②富士通・古河電工、③日立・日立電線) の協力を得て、1976年初めに実証実験を開始したのである^{19) 20)}。試験場所は、東京電力が「①新宿変電所、②関内変電所、③田端通信所」、関西電力が「①本店～中之島セントビル間 (この区間は光中継器なし)、②大阪北支店～新曽根崎制御所間、③意岐部制御所～意岐部変電所間」であった。

東京電力と関西電力の実験内容は類似しているが、ここでは代表として東京電力が用いた光ファイバケーブルの概要を表 6.4 に、光端局と中継器の概要を表 6.5 に示した。グループ①は石英系 SI 型ファイバと日本板硝子製 SELFOC ファイバ、グループ②は石英系 SI 型ファイバ、そしてグループ③は石英系 W 型ファイバを用いた。発光素子は 0.85μm 帯の GaAlAs 系 FP-LD、受光素子は Si-APD であった。グループ③の W 型ファイバは、伝送帯域の改善のために東北大学の川上彰二郎が提唱した構造であり、SI 型ファイバのコア部の周囲に低屈折率層 (SiO₂-B₂O₃ 系ガラス層) を設けた多モード光ファイバであった。

東京電力が用いた光ファイバケーブル (1976 年開始の実証実験用)
(参考文献¹⁹⁾をもとに筆者作成)

項目	試験場所	新宿変電所	関内変電所	田端通信所
布設コウ長		2.9km	2.9km	3.0km
光ファイバの種類		石英系 SI ファイバ	SELFOC ファイバ	石英系 SI ファイバ (W 型)
心数		2	2	4
伝送損失 (送受端間)		約 19dB*	約 37.5dB*	約 25dB*
伝送帯域幅 (送受端間)		約 15MHz*	約 75MHz*	約 63MHz*
ケーブル外径		19mm	15mm	17mm
ケーブル重量		240kg/km	170kg/km	200kg/km
構造				
協力メーカー		日本電気・住友電工・日本板硝子	富士通・古河電工	日立・日立電線

表 6.5 東京電力の光端局と光中継器 (1976 年開始の実証実験用)
(参考文献¹⁹⁾をもとに筆者作成)

項目	試験場所	新宿変電所	関内変電所	田端通信所
送信素子		GaAs 系 LD (波長 0.83 μm)	GaAlAs 系 LD (波長 0.83 μm)	GaAlAs 系 LD (波長 0.83 μm)
受光素子		Si-APD	Si-APD	Si-APD
送信レベル		-15.5dBm 以上 (装置出力域での平均値)	-6dBm 以上 (装置出力域での平均値)	0dBm 以上 (装置出力域での平均値)
最小受信レベル		-62dBm 以下 (符号誤り率 10 ⁻⁸ における装置入力域での平均値)	-57dBm 以下 (符号誤り率 10 ⁻⁸ における装置入力域での平均値)	-47dBm 以下 (符号誤り率 10 ⁻⁸ における装置入力域での平均値)
光変調方式		差動パルス位置変調 (DPPM) 一強度変調 (IM) 方式	強度変調 (IM) 方式	2 値変調 (2 値 AM) 一強度変調 (IM) 方式
設置場所		地下洞道または人孔内	地下洞道または人孔内	地下洞道または人孔内
中継方式		再生中継方式	再生中継方式	再生中継方式
給電方式		商用電源 (AC200V) 電池併用 (維持充電) 方式	商用電源 (AC100V) 電池併用 (浮動充電) 方式	商用電源 (AC200V) 電池併用 (浮動充電) 方式
監視方式		主信号に重畳する方式	主信号に重畳する方式	主信号に重畳する方式
監視項目		光送信レベル断 光受信固定パルス誤り率異常 商用電源断	光送信レベル断 商用電源断 蓄電池電圧上昇・下降 蓄電池温度上昇 ヒューズ断	光送信レベル断 光受信レベル断 商用電源断 蓄電池出力低下 充電器出力断
協力メーカー		日本電気・住友電工・日本板硝子	富士通・古河電工	日立・日立電線

こうした実証実験を踏まえて、東京電力は 1978 年に埼玉県の京北変電所～鳩ヶ谷変電所間 6.3km に初めての光ファイバ通信の実用回線を導入するに至った。石英系 SI 型ファイバからなるノンメタリック 2 心ファイバケー

ブル（損失 5dB/km@0.83 μ m）を用いて、FP-LD（光出力：-5dBm 以上）と Si-APD（感度：-55dBm）による伝送速度は 1.544Mb/s（6.3Mb/s に拡張可能）であった。

1980 年代に入ると、電力会社は、送電線の避雷のため、最上部に架線しているアース線内部に光ファイバを組込んだ光ファイバ複合架空地線（OPGW：Optical fiber composite overhead ground wire）を開発し、堅固な光ファイバ通信ルートを構築していった。このような取組みにより、1985 年には、光ファイバ通信を主な伝送路として、社内全事業所間を 32～100Mb/s の伝送速度で結ぶデジタルネットワークを構築・運用開始し、設備の自動化、業務の機械化、映像監視、テレビ会議等の急速な進展に応じていった。当時の通信自由化の動きに伴い、東京電力では 1986 年から通信事業へ、2002 年からは FTTH 事業への参入を果たしていくことになる²¹⁾。

6.3.3 NTT 横須賀研究所での総合実験

表 6.3 に記載されているように、NTT 研究所（通研）では、光ファイバ伝送方式の総合実験を 1976 年末に横須賀研究所で実施した。この実用化を目指しての総合実験は 1976 年 10 月に始まり、電線 3 社に加えて NEC と富士通の協力を得て、研究所内の 300m 洞道内に、8km 長の 8 心光ケーブル（光ファイバ全長：8km \times 8 心 = 64km）が布設され、伝送速度 32Mb/s と 6.3Mb/s の近距離用伝送システム実験が行われた。光ファイバ心線は、MCVD 法による日本製のステップインデックス（SI）型多モード光ファイバ（コア径 60 μ m、外径 150 μ m、比屈折率差 0.7%）であった。布設した光ファイバケーブルの断面構造を図 6.13 に示した²²⁾。日本での MCVD 法の検討開始直後であったので、損失規格は目標 5dB/km（波長 0.85 μ m）に設定したが、実際には電線 3 社が競い合うような状況になり、4dB/km 以下（平均 2.95dB/km）の低損失光ファイバが納入された。ファイバ 1km 当りの伝送損失と帯域幅の分布（波

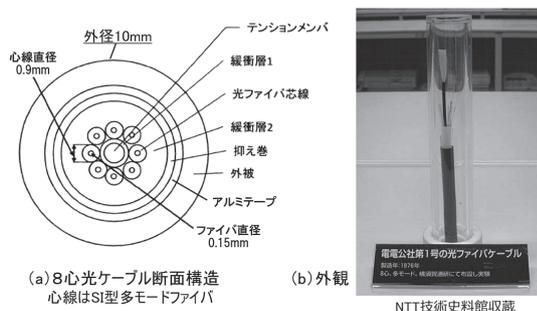


図 6.13 NTT 横須賀研究所に布設した光ファイバケーブルの構造
(参考文献²²⁾をもとに筆者作成)

長 0.85 μ m）を図 6.14 に示した²³⁾。帯域幅は、SI 型に相応する値（平均 39.2MHz）であった。

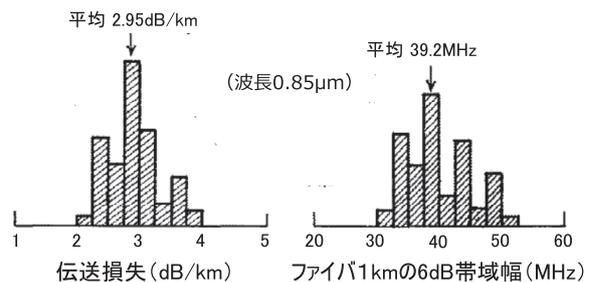


図 6.14 NTT 横須賀研究所に布設した光ファイバケーブルの伝送損失と帯域幅の分布
(参考文献²³⁾をもとに筆者作成)

6.4 多モード光ファイバ通信システムの NTT 現場試験と商用化

6.4.1 NTT 現場試験 FR-1

前節で述べた武蔵野研究所内（1975 年）と横須賀研究所内（1976 年）での光ファイバケーブル布設実験を経て、NTT は公衆通信用に電話局間を結ぶ本格的な現場試験 FR-1 を 1978 年に東京都心で実施した。図 6.15 に試験ルートを示したが、①唐ヶ崎局 - 蔵前局間（20.8km）と、②蔵前局 - 浜町局間（1.9km）であった^{16) 22)}。それまでの SI 型ファイバに代わり、より広帯域のグレーデッドインデックス（GI）型光ファイバケーブルが採用され、ケーブル布設は 1978 年 3 月末～8 月に行われた。区間①には、中継点間約 5km で、中間中継所は 3 か所、MCVD 法で作製した GI ファイバ 48 心のケーブルを布設し、区間②には後発の VAD 法で作製した GI ファイバ 8 心のケーブルを初めて採用した。9 月には近距離光伝送方式（波長 0.85 μ m で 32Mb/s と 100Mb/s）の初期試験をほぼ終了し、翌年の 1979 年 9 月まで安定度試験が続いた。

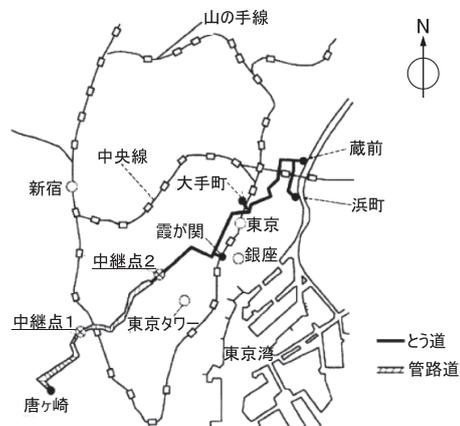


図 6.15 NTT 現場試験（FR-1）ルート（1978 年 3 月～）
(参考文献^{16) 22)}をもとに筆者作成)

FR-1で使用されたGI型ファイバの仕様は、コア径60 μm 、クラッド外径150 μm 、屈折率差0.015、波長0.85 μm （発光素子は、当時研究が進んでいたGaAlAs系半導体レーザを主体として、一部は発光ダイオードを使用）で、規格光損失4.5dB/km（目標光損失3.5dB/km以下）、伝送帯域250MHz \cdot km（目標600MHz \cdot km）以上という厳しいものであった。使用された48心光ケーブルの断面構造と外観を図6.16に示した²⁴⁾。図6.17は現場試験模様的一端であるが、当初は、光ファイバの断線を心配して、人海戦術の手引きで洞道に光ケーブルを引き込んだと伝わっている²⁵⁾。

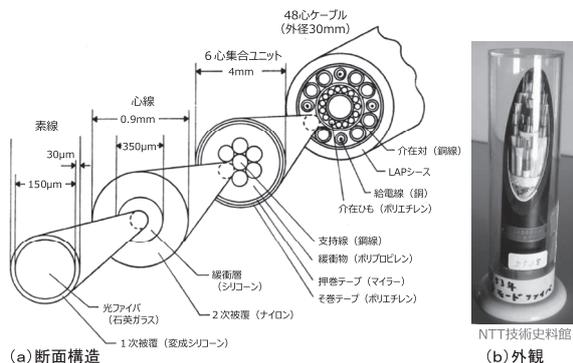


図 6.16 現場試験 (FR-1) 用 48 心光ファイバケーブル
(参考文献²⁴⁾をもとに筆者作成)

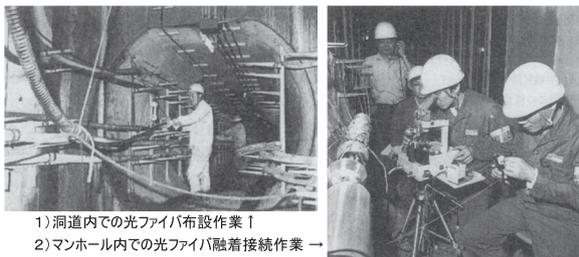


図 6.17 NTT 現場試験 (FR-1) 模様²⁵⁾

FR-1の初期試験を終えた1978年12月5~7日には、NTT研究所で図6.18の講演プログラムに沿って「光伝送シンポジウム」が開催され、「技術講演-1 近距離光伝送方式現場試験」セッションを中心に現場試験 (FR-1)の模様が報告された。このセッションの最初の講演「現場試験の概要と伝送機器の特性…… 島田禎晉・三木哲也・米田悦吾」の要旨は下記の通りであった。

『1976年から1977年にかけて横須賀研究所で行った32Mb/sの所内伝送実験において、光ケーブル伝送技術は近い将来に十分実用になり得る技術であると判断したため、次のステップとして現場環境において実用的観点に立った総合評価を下し問題点を洗い出すとともに今後の実用化計画を明確にするために現場試験が計画された。近い将来

に実用化可能と思われる技術のレベル、光伝送方式適用の効果を考慮して、局間中継線・近距離市外などへの適用を考えた近距離伝送方式が最初の実用化目標としてふさわしいと判断し、これを目指した光伝送および光ケーブルの技術開発が行われた。この領域における当面の伝送路需要を考慮して32Mb/sと100Mb/sのデジタル伝送方式およびアナログCTV信号とデジタル信号の伝送が可能な汎用伝送方式を開発した。光ケーブルについても、この領域での適用性を十分考慮して芯数については、8芯と48芯光ケーブルを開発した。光ファイバはMCVD法のグレーデッド形ファイバを中心に、MCVD法のステップ形およびVAD法のグレーデッド形ファイバも一部使用した。装置、部品、ケーブルの設計および工法については考え得るかぎり実用的条件を盛り込み、オルタネートを数多く採用した。測定器についても建設・保守上必要と考えられる一連の種類について開発を行った。

現場試験は1978年3月末から工事に着工し、9月には伝送方式としての初期試験をほぼ終了し、現在は、来年9月までの予定で安定度試験中である。

伝送装置、光ケーブル、測定器とも、ほとんどの項目において所期の特性を満足し、技術的には実用化に対してほとんど問題のないことが明確になった。残る大きな課題である光部品の経済化と高信頼度化および標準化についても見通しが得られつつあるので、近い将来に商用化し得るものとする。

参考までに、上述の島田らの技術講演予稿から、「現場試験系の概要」を表6.6に、「線路および中継器の代表的特性」を表6.7に、「現場試験システムの設計目標と実現値」を表6.8に示した。1978年当時の光ファイバ通信の技術水準が伝われば幸いである。なお、図6.18の講演プログラムの最後には「単一モー

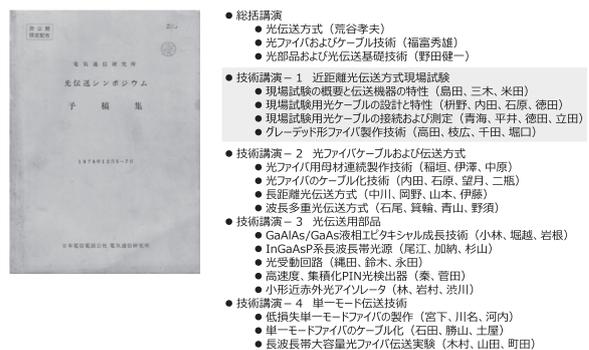


図 6.18 NTT 研究所「光伝送シンポジウム」(1978年12月5~7日)

「ド伝送技術」関連の3件の講演題目が載っていて、将来を見据えた布石が打たれていたことが分かる。

都心でのNTT現場試験 (FR-1) の総経費は20億円で、内訳は光ファイバケーブル費用が16億円、端局装置代は4億円だった。光ファイバ価格は1心・1m当り1,390円に設定されていた。ちなみに東京電力が1978年に京北変電所～鳩ヶ谷変電所間に導入したノンメタル構造の光ファイバケーブル (光ファイバ心線は、コア径60 μ m、クラッド径150 μ mのSI型ファイバ) では、1心・1m当り2,000円以上であった。当時の大容量通信の主力媒体であった18心の同軸ケーブルの1心・1m当りの価格が400円であったので、いずれにしても初期の光ファイバケーブルは同軸ケーブルの3倍以上の価格であった²²⁾。

6.4.2 NTT 現場試験 FR-2

現場試験 FR-1 の成功を受けて、NTT では現場試

表 6.6 近距離光伝送方式現場試験 (FR-1) 系の概要

(図 6.18 の予稿集をもとに筆者が作成)

伝送システム	(1)100Mb/sシステム (2)32Mb/sシステム (3)汎用システム (カラー-TV or 32Mb/s)
光ファイバ	グレーデッドインデックス(GI)型ファイバ (MCVD製&VAD製)
光ケーブル	(1)48心(給電線有&無) (2)8心
発光素子	(1)GaAlAs半導体レーザ(LD) (2)GaAlAs発光ダイオード(LED)
受光素子	Si-APD

表 6.7 現場試験 (FR-1) 用線路および中継器の代表的特性

(図 6.18 の予稿集をもとに筆者が作成)

光ケーブル	光損失	3.4dB/km (接続損を含む)	平均値
	6dB帯域	800MHz-km	
光接続	スプライス損失	0.2dB	最良ケース
	光コネクタ損失	0.4dB	
中継間隔	32Mb/sシステム	16km(LD) 8km(LED)	最良ケース
	100Mb/sシステム	14km	
	汎用システム	11km	

表 6.8 現場試験システムの設計目標と実現値

(図 6.18 の予稿集をもとに筆者が作成)

項目		目標値	実測値
発光素子	光ファイバへの入力光パワー	LD	-3 dBm
		LED	-18 dBm
	発振波長	0.85 \pm 0.03 μ m	0.82 ~ 0.85 μ m
受光素子	過剰雑音係数 X (M = 50)	< 0.4	0.24 ~ 0.3
	量子効率 ($\lambda = 0.85\mu$ m)	> 0.65	0.7 ~ 0.75
AGCダイナミックレンジ (光パワー)		> 20 dB	25 ~ 35 dB
RMSタイミングジッター		< 1 degree	0.3 ~ 0.4 degree
最小受信感度 (誤り率 = 10 ⁻¹¹)	100Mb/s	< -44.1 dBm	< -50.0 dBm
	32Mb/s	LD	< -51.4 dBm
		LED	< -46.3 dBm
	汎用	< -37.5 dBm	< -43.0 dBm

験 FR-2 が行われた。FR-1 と異なる点は、通信波長が長波長1.3 μ mになり、ファイバ寸法が「60/150 μ m」から「50/125 μ m」へと細くなったことである¹⁶⁾。ケーブル布設は1980年1~6月に行ない、布設ルートは、神奈川県の川崎中継所-下母田分室の11.1kmと下母田分室-ループ状ルート-下母田分室6.5kmで計17.6kmであった。FR-1で用いた6心ユニットを基本として、24心と48心のファイバケーブルを製作した。光ファイバは主としてMCVD法で製造した比屈折率差 $\Delta = 1\%$ のGI型であった。中継間隔18kmで100Mb/s伝送実験を成功裡に実施し、波長1.3 μ mでの伝送損失は0.6dB/km、帯域は1,300MHz \cdot kmであった。参考までに、波長0.85 μ mでは伝送損失2.5dB/km、帯域1,100MHz/kmであり、FR-1での3.4dB/kmと800MHz/kmに比べて改善された。

6.4.3 NTT 公衆通信網への商用導入

FR-1 と FR-2 の成功を受けて、NTT は1981年に中小容量 (32Mb/s と100Mb/s) 中継伝送用としてGI型光ファイバケーブルを用いたF-32M方式とF-100M方式の商用導入を決定した。方式諸元を表6.9に、端局中継装置の外観を図6.19に示した。F-32M方式 (32Mb/s) は電話換算で480ch、F-100M方式 (100Mb/s) は1,440chの伝送容量に相当していた²⁶⁾。

表 6.9 F-32M と F-100M 方式の諸元

(NTT 技術史料館資料をもとに筆者が作成)

方式名	F-32M	F-100M
項目		
伝送容量	32.064Mb/s	97.728Mb/s
電話換算容量	480ch	1,440ch
光ファイバ	GI型ファイバ	GI型ファイバ
発光素子	InGaAsP系FP-LD (波長1.3 μ m)	InGaAsP系FP-LD (波長1.3 μ m)
受光素子	Ge-APD	Ge-APD
中継間隔	20km	10km



F-32M-1形端局中継装置
NTT技術史料館(NEC製)



F-100M-2形端局中継装置
NTT技術史料館(富士通製)

図 6.19 F-32M と F-100M 端局中継装置 (中小容量光伝送方式用に1981年に商用化)

NTT 公衆通信網への商用導入は、Corning 社による 20dB/km ファイバ発表 (1970 年) からわずか 11 年という早さであり、曲げることも困難で布設も大変だったミリ波導波管に比べて、石英系光ファイバの素性の良さを示していた。

6.4.4 光ファイバケーブルの損失増問題の解決

ところが、光ファイバ通信方式の本格商用化の矢先の 1982 年 6 月に、FR-2 で布設した光ファイバケーブルの伝送損失が徐々に増加していく図 6.20 のような現象が発見された^{27) 28)}。当時、カナダ通信研究所 (CRC) に滞在中の筆者のところに日本から国際電話があり、「原因として何か心当たりはないか?」と問われたが、思い当たることはなかった。類似の損失増現象は、前後して KDD 研究所と英国 BTRL (英国郵政省電気通信研究所) によっても見出されていた²⁹⁾。

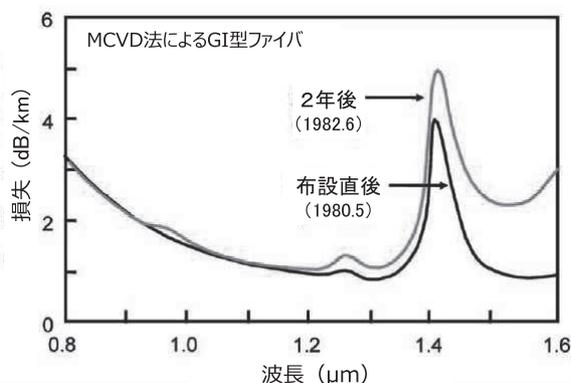


図 6.20 現場に布設した光ファイバケーブルで観測された光損失増
(参考文献²⁸⁾をもとに筆者作成)

NTT 研究所と電線 3 社とで緊急の原因究明が行われ、以下の事実が判明した。

- 1) 損失増は、光ファイバ被覆樹脂等から発生した微量な水素ガスが、ガラスファイバ中の Ge 成分の構造欠陥と結合して OH イオンを形成したことによる。
- 2) ガラス中の欠陥は、製造工程でリン (P) を使用すると著しく増加し、MCVD 法での出発材などに用いる天然石英ガラス管中の不純物も損失増に影響する。

解決策が見つかるまで公表を控えていた NTT 研究所であったが、線路研究部の内田直也らは 1983 年 10 月の国際会議 ECOC' 83 の Post-Deadline セッションで発表し、世界に衝撃を与えた²⁷⁾。しかし、リン (P) を使わない VAD ファイバでは問題なく、水素発生量の少ない被覆材料の開発やリン (P) を含まないガラス組成の選択などの損失増防止対策を示し、問題は収

束していった。光ファイバの一次被覆に使っていたシリコーン樹脂は水素を発生するので、紫外線硬化型樹脂に切り替えられた^{28) 30)}。

結果論になるが、筆者らが MCVD 法による長波長帯用の単一モード光ファイバ開発と、さらに VAD 法による 100km 長単一モード光ファイバ開発に際して、ガラスの軟化温度を下げる効果がある P_2O_5 をコアにもクラッドにも添加しない SiO_2-GeO_2 系ガラス組成としたことは正解であった。

6.5 単一モード光ファイバ通信システムの現場試験と商用化

6.5.1 NTT 現場試験 FR-L

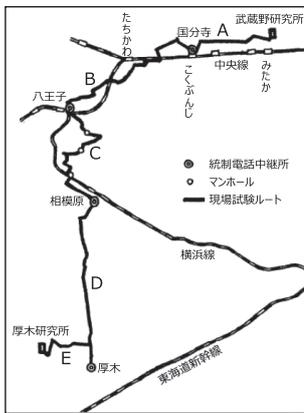
NTT では、グレーデッドインデックス (GI) 型光ファイバケーブルを用いた現場試験 (FR-1 と FR-2) の成功から、次の段階として単一モード (SM) 光ファイバケーブルによる大容量伝送方式の現場実験 FR-L が計画された¹⁶⁾。当初は難しいと考えられていた単一モード光ファイバの接続も、後の 6.6 節で紹介するように、武蔵野研究所の基礎第 3 研究室が 1975 年頃に先鞭を付けた放電融着接続法が茨城研究所の線路研究部や電線メーカーによって改良されて、1980 年頃には単一モード光ファイバの接続も 0.1dB 以下の低接続損で実現できるようになりつつあった¹⁷⁾。その頃には、基礎第 3 研究室の関心は、さらに将来寄りのコヒーレント光通信や半導体レーザー応用の光増幅器の研究に移っていて、大容量光伝送方式の実用化を目指して 1980 年からの単一モード光ファイバケーブルによる NTT 現場試験 (FR-L) を担ったのは、FR-1 や FR-2 の場合と同じく、横須賀研究所の伝送関連研究部と茨城研究所の線路研究部であった。

現場試験 (FR-L) ルートは、図 6.21 に示したように武蔵野研究所と厚木研究所 (建設中) 間の 76km 長であり、両研究所を結ぶ総合実験網 (テレビ会議等) の一環として、1980 年 10 月から 1982 年 6 月まで、単一モード光ファイバを布設して波長 1.3μm で 400Mb/s の伝送実験 (中継間隔 20km) を実施した³¹⁾。ケーブル布設は八王子-相模原区間 (18km) から始まり、順次拡張された。

最初に布設が行われた八王子-相模原区間 (図 6.21 の C 区間) には MCVD 単一モード光ファイバが用いられたが、その後の 4 区間 (A、B、D、E) については完成度を高めてきた VAD 単一モード光ファイバが適用された。

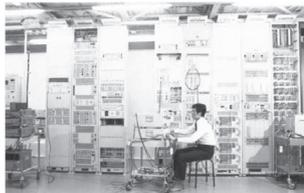
単一モード光ファイバの仕様は、コア径 10μm、クラッド外径 125μm、比屈折率差 0.26%、カットオフ波長 1.1~1.28μm、光損失 0.8dB/km 以下であった。

光ケーブルは6心と12心を布設し、布設後のファイバ損失は0.5dB/km (1.3μm 波長)であった。発光素子はInGaAsP 半導体レーザ (FP-LD)、受光素子はGe-APD が用いられた。



各区間の光ケーブル長

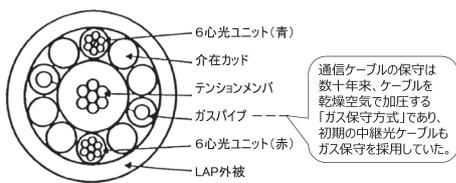
区間	光ケーブル長
A	武蔵野研究所-国分寺 10km
B	国分寺-八王子 18km
C	八王子-相模原 18km
D	相模原-厚木 20km
E	厚木-厚木研究所 10km
合計	76km



八王子統制電話中継所での試験模様

図 6.21 現場試験 (FR-L) ルート
(参考文献³¹⁾をもとに筆者作成)

図 6.22 に 12 心の単一モード光ファイバケーブル構造を示す¹⁶⁾。当時の NTT の中継系ケーブルは防水のために圧力 0.65kg/cm² のガス保守が行われていた。しかし、それまでの通信ケーブルに比べて、光ファイバケーブルは太さが細いので、20km の中継間隔ではガス抵抗が大きくなり過ぎる問題があった。ガス抵抗を下げるために、長手方向にスリットがあるプラスチックパイプ 2 本をケーブルに挿入して、20km 長のガス保守を可能にした (現在の光ファイバケーブルは防水材料を使用し、ガス保守を行っていない)。



12心光ケーブル(外径24mm, 0.63kg/m)

図 6.22 現場試験 FR-L 用単一モード光ファイバケーブル構造
(参考文献¹⁶⁾をもとに筆者作成)

6.5.2 大容量中継光伝送用 F-400M 方式の商用化と日本縦貫ルートの開通

現場試験 (FR-L) の成功を受けて、1983 年に世界初の本格的な単一モード光ファイバ伝送方式「F-400M」が商用化された^{32) 33)}。旭川-鹿児島間を結ぶ大容量伝送単一モード光ファイバケーブルの布設が始まり、VAD 単一モード光ファイバを用いて図 6.23 に示すように総延長 3,400km の日本縦貫ルートが開通したのは 1985 年 2 月 (4 月 1 日の NTT 民営化の寸前) であった。日本縦貫に使用した光ファイバは延べ約 5 万 km で、平均損失は 0.45dB/km (波長 1.3μm)、ケーブルの心数は需要予測により区間によって変えてあった。総経費は 650 億円であったと伝わっている。

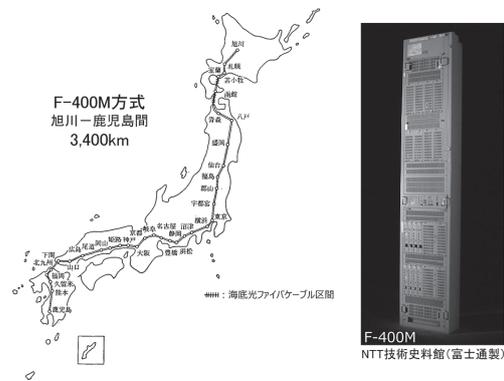


図 6.23 日本縦貫光ファイバ幹線網 (1985 年 2 月開通) と F-400M 中継装置の外観
(通信白書昭和 60 年版をもとに筆者作成)

40km に拡張された F-400M 方式の中継間隔仕様は、それまでの同軸ケーブルを用いた DC-400M 方式の中継間隔 (1.5km) の 20 倍以上に相当した。

6.5.3 1980 年代の大容量光伝送方式の諸元

単一モード光ファイバケーブルを用いて 1980 年代に商用化された NTT の主な光伝送方式の諸元を表 6.10 として示した²⁶⁾。F-400M 方式 (1983 年) から F-1.6G 方式 (1987 年) への進歩は、1.3μm 波長帯の InGaAsP 系半導体レーザを FP 型から DFB 型に変えたことに主によっている。従来の同軸ケーブル方式では 400Mb/s が限界であったが、F-1.6G 方式によって初めてギガビット通信が実現した。分散シフトファイバ (DSF) の新規開発に合わせて、通信波長を 1.55μm に移した「1.55μm F-400M」方式 (1988 年) では、中継間隔は 80km (海底区間では 120km) に伸びている。

表 6.10 1980 年代の主な NTT 大容量光伝送方式の諸元
(参考文献²⁶⁾をもとに筆者作成)

方式名 項目	F-400M	F-1.6G	1.55μm F-400M
伝送容量	397.2Mb/s	1588.8Mb/s	397.2Mb/s
電話換算容量	5,760ch	23,040ch	5,760ch
光ファイバ	1.3μm 零分散SMF	1.3μm 零分散SMF	1.55μm 零分散SMF (= DSF)
発光素子	1.3μm 波長 InGaAsP-FP-LD (送信出力 -6dBm)	1.3μm 波長 InGaAsP-DFB-LD (送信出力 0dBm)	1.55μm 波長 InGaAsP-DFB-LD (送信出力 +3dBm)
受光素子	Ge-APD (受信電力 -32dBm)	InGaAs-APD (受信電力 -30dBm)	InGaAs-APD (受信電力 -35dBm)
中継間隔	40km	40km	80km(陸上区間) 120km(海底区間)
商用化年度	1983年	1987年	1988年

表 6.11 は、1987 年時点の各国の海底光ファイバ中継伝送方式の開発状況である²⁶⁾。表中の NTT の FS-400M 方式は、F-400M 方式の海底 (Submarine) 版であり、伊豆半島近くの相模湾での布設実験 (1982 年から 1984 年) を経て、日本初の海底光中継伝送方式として、1986 年から 1987 年にかけて八戸～苫小牧、宮崎～名護間に導入された³⁴⁾。この FS-400M (1.3μm 波長 FP-LD を用いて 400Mb/s、中継間隔 40km) 方式の後継として、1.55μm 波長 DFB-LD と分散シフトファイバ (DSF) を活用した FS-1.8G 方式 (1.8Gb/s、中継間隔 100km) が 1990 年に商用化されたことも付記したい³⁵⁾。

表 6.11 各国の海底光ファイバ中継伝送方式 (1987 年時点の開発状況)

(参考文献²⁶⁾をもとに筆者作成)

国名	日本		米国	英国	仏国
	NTT	KDD			
方式名	FS-400M	OS-280M	SL	NL1	S-280
情報速度 (Mb/s)	400		280		
伝送媒体、波長	単一モード光ファイバ、波長 1.31 μm				
中継間隔 (km)	40	50	50	40~50	45
適用最大水深 (m)	8,000	8,000	7,500	7,500	6,500
適用ルート (km)	本州～北海道 (300) 九州～沖縄 (800)	TPC-3 (9,080) 日本分岐 (2,230) グアム分岐 (1,540) ハワイ (5,310)	HAW-4 ハワイ～サンフランシスコ (4,150)	TAT-8 (6,400) 米国分岐、英国分岐、仏国分岐 (5,600) (500) (300)	
運用開始予定	1986.11 1987.2	1988.12		1988.6	

NTT と KDD (国際電電) は、1983 年 7 月に海底光ファイバケーブル伝送方式についての技術協力協定を締結したが、表 6.11 で KDD が担った TPC-3 方式 (280Mb/s) は 1989 年に開通し、初めての太平洋横断光ファイバケーブル方式となった³⁶⁾。

図 6.24 は F-1.6G 方式を中心とする 1990 年 3 月時点での日本縦貫光幹線網ルート図と F-1.6G 中継装置の外観である³⁷⁾。F-1.6G は F-400M の 4 倍の伝送容量 (電話換算 23,040 回線) を持つが、中継間隔が同一の 40km であるため、F-400M からのアップグレードが容易であり、電話需要の拡大に合わせて、全国規

模で大量に導入された。その後、分散シフトファイバ (DSF) と 1.55μm 波長 DFB-LD を組み合わせて、F-400M や F-1.6G の中継間隔を 40km から 80km に拡張した方式も商用化されていった。

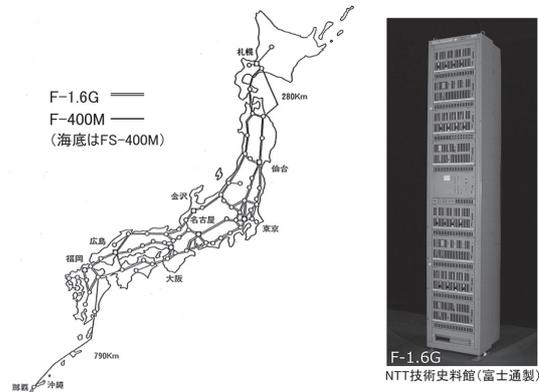


図 6.24 1990 年 3 月時点の日本縦貫光ファイバ幹線網と F-1.6G 中継装置の外観

(参考文献³⁷⁾をもとに筆者作成)

1970 年代に入ってからミリ波導波管から光ファイバ通信システムへの実用化テーマの変更については、少し時間を要した NTT であったが、本流になる単一モード光ファイバ通信システムについては、研究から実用化まで、世界の先導役を果たすことができたと言える³²⁾ ³³⁾。

6.6 単一モード光ファイバ化を促進した光結合技術

1980 年以降、特に日本において、当初の予想よりも早く単一モード光ファイバ伝送方式の商用導入が進んだ要因の一つとして、単一モード光ファイバ同士の接続や半導体レーザとのカップリングなど、日本勢が率先して光結合技術の開発に取り組んだことを挙げることができる。

6.6.1 光ファイバ融着接続技術

1975 年当時の各種の光ファイバ接続固定法を図 6.25 に示したが、1975 年 2 月の NTT 基礎第 3 研究室での古河電工製の 4 心 SI 型光ファイバケーブルの布設実験には、(b) 3 ロッド方式や (c) スリーブ方式が使われた³⁸⁾。しかし、接着剤での固定では長期信頼性で不安が残ることから、光ファイバ先端を溶かして接続する方式の模索が行われた。

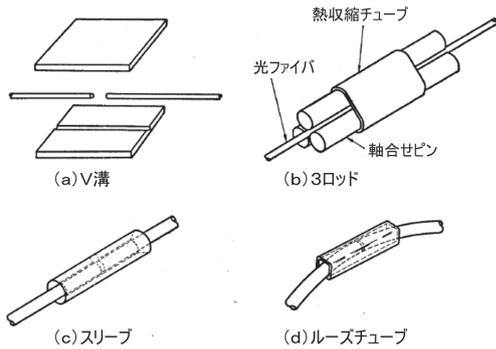


図 6.25 1975 年当時の光ファイバ接続法
(参考文献³⁸⁾をもとに筆者作成)

Bell 研究所は、Corning 社の 20dB/km ファイバ発表 (1970 年) の翌年 (1971 年) に、ニクロム線の抵抗加熱による融着接続について報告³⁹⁾していたが、基礎第 3 研究室の土屋治彦らは、その後の主流になる電気放電で光ファイバを加熱し融着接続する方法を提案し、1975 年に図 6.26 に示したような融着接続装置の試作を行った^{38) 40)}。基本は、光ファイバの軸合わせを行うための V 溝と放電のための電極対であり、光ファイバは V 溝に設置して微動機構で軸合わせを行う。土屋らは、放電電流、放電時間、電極間隔、ファイバ同士の加圧力などのパラメータを振り、1975 年 12 月の電子情報学会光量子エレクトロニクス研究会の発表時には SI 型ファイバの平均接続損が 0.28dB であると報告した。土屋らの融着接続技術は、1976 年 8 月に電線 3 社に技術移転が行われ、現場試験 FR-1 (1978 年) 等を通して洗練され、実用化されていった。

土屋らの放電融着接続技術は単一モード光ファイバの接続にも適用され、1977 年 2 月に開催された第 2 回光ファイバ通信国際会議 (OFC' 77) に投稿された Post-Deadline 論文「H. Tuchiya and I. Hatakeyama, "Fusion Splices of Single-Mode Optical Fiber"」は、第 1 位で採択され、世界中に大きなインパクトを与えた^{41) 42)}。

第 4 章以来、何回も引用することになるが、1978 年に基礎第 3 研究室が実施した単一モード光ファイバを用いての 1.3 μ m 帯での零分散伝送実験では、茨城研究所で筆者らが作製した MCVD 単一モード光ファイバ 10 本 (カットオフ波長調整を優先したために外径が個々に異なっていた 10 本) を 9 カ所で巧みに放電融着接続して 11km 長の伝送路としていたのである。

基礎第 3 研究室の土屋らの 1975 年の試作機 (図 6.26) を起点とする融着接続機の進化の一端を図 6.27 に示した。単一モード光ファイバの低損失接続には、特に高精度のコア軸合せが必要になるが、藤倉電線 (現フジクラ) は、NTT との共同研究により世界初の

コア直視法を採用した融着接続機 FSM-20 を 1985 年に開発・製品化した。コア直視法とは、光ファイバに側方から平行光線を投射し、屈折率分布に応じて透過した前方散乱光を TV カメラで捕らえ、画像処理でコア軸を高精度にキャッチする技術であり、光ファイバ接続技術の発展に重要な役割を果たした^{43) 44)}。近頃のコア直視型融着接続機では、標準的な単一モードファイバ (SMF) で 0.02dB、分散シフトファイバ (DSF) で 0.04dB の平均接続損の実現が可能であり、現在、日本の電線 3 社が融着接続機の世界市場の約 90% を占めている。

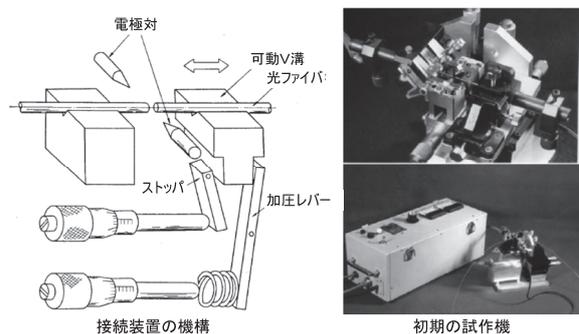


図 6.26 光ファイバの放電融着接続装置
(参考文献^{38) 40)}をもとに筆者作成)



図 6.27 光ファイバ融着接続機の進化

6.6.2 光ファイバコネクタ技術

光ファイバ通信装置を構成するには、融着接続のような永久接続 (スプライシング) 技術に加えて、自在に着脱可能な光ファイバコネクタが必要である。基礎第 3 研究室の土屋らは、まだ光ファイバコアの偏心率が大きかった 1975 年に、図 6.28a のような断面構造をもつ調心型の 2 重偏心光コネクタを試作した¹⁷⁾。内側偏心管と中間偏心管を回転させると、光ファイバコアの中心は、図の点群の領域内の任意の位置に移動でき、コアの中心を外側偏心管の外径の中心に軸合わせできる。接続損失はフレネル反射を含めて 0.5dB であった⁴⁵⁾。2 重偏心機構は 1978 年には単一モード光ファイバ用にも拡張された (図 6.28b)⁴⁶⁾。

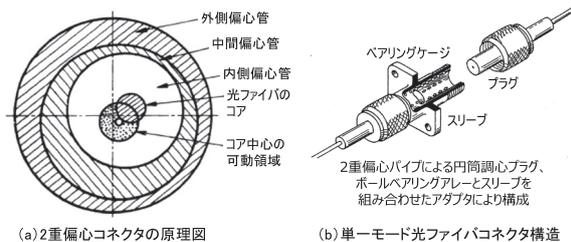


図 6.28 二重偏心光ファイバコネクタ

(参考文献⁴⁵⁾⁴⁶⁾をもとに筆者作成)

上記の2重偏心光コネクタは、出射光をモニタしながらの調心が必要であったが、1979年になると、横須賀研究所の鈴木信雄らによって、調心を必要としない図 6.29 の画期的な単一モード光ファイバコネクタが開発され、「FC 形光コネクタ」と命名された。「Fiber Connector」の頭文字をとった FC 形光コネクタは、

- ①光ファイバを固定する微細孔が正確に中心に開けられた精密フェルール、
- ②2本のフェルールを割りスリーブを用いて整列する手法、
- ③プラグおよびアダプタハウジング内でフェルールとスリーブがフロートしており、フェルールどうしの接続部が外力の影響を受けない構造【2重重合(かんごう)構造】、

の3点が大きな特徴であった⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

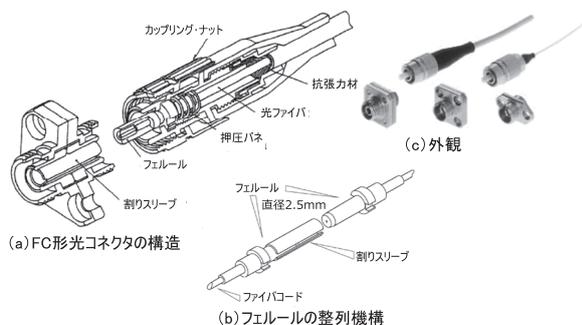


図 6.29 F-400M 用に開発された FC 形光コネクタ

(参考文献⁴⁷⁾⁴⁸⁾をもとに筆者作成)

単一モードファイバは光信号が通るコアの直径が10 μ m程度と小さいため、接続する双方の光ファイバを1 μ m以下の精度で位置決めする必要があるが、FC形光コネクタは上記の基本構造によって、繰り返し着脱を行っても接続損失のばらつきが少なく、運用中に光ケーブルに外力が作用しても安定な性能を維持することができた。FC形光コネクタは、「F-400M方式」に採用され、上述①②③の基本構造は、現在標準的に使用されている単一モードファイバ用単心系光コネクタのすべてに引き継がれている。

初期のFC形光コネクタは、フェルール端面が平面研磨でファイバ端面間に空隙が存在したため、反射戻り光を抑制するためにはフェルール端面に屈折率整合剤を塗布する必要があったが、伝送容量の増大に伴い、より反射が少なく損失ばらつきの小さい光コネクタが求められるようになり、図 6.30 のような PC (Physical Contact) 接続と呼ばれる新たな接続方法が開発された⁴⁸⁾⁴⁹⁾。

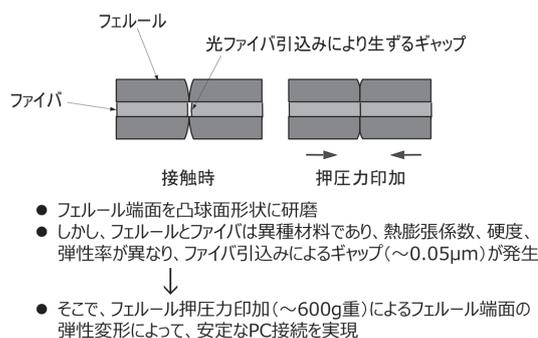


図 6.30 Physical Contact (PC) 技術

FC形光コネクタは脱着に際して回転が必要であったが、1980年代の後半には、回転が不要なSC形コネクタがNTT研究所の杉田悦治らによって開発されて世界標準に発展していった⁵⁰⁾。SC形コネクタの構造を図 6.31 に示したが、プッシュプル方式を採用し、カチッとプラグを差し込むだけで着脱可能である。SCの名称は「Single fiber Coupling」からとっている。

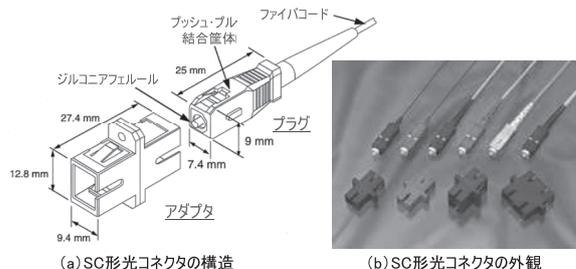


図 6.31 世界標準になった SC 形光コネクタ

(参考文献⁵⁰⁾をもとに筆者作成)

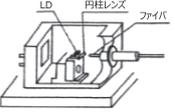
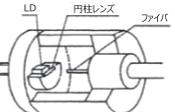
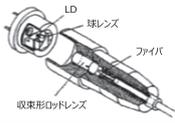
FC形やSC形のフェルール外径は2.5mmであるが、1990年代に入ると、フェルール外径を半分の1.25mmとした小型のMU形光コネクタが開発され、高密度実装が必要な光通信装置類のバックプレーン光コネクタとして普及していった⁴⁸⁾⁴⁹⁾。MUの名称は「Miniature Universal coupling」に由来する。

6.6.3 半導体レーザー (LD) モジュール技術

多モード光ファイバに比べてコア径が小さい単一モード光ファイバ通信システムの実用化に際しては、

半導体レーザー (LD) との光結合が重要であり、結合レンズ等を組み込んだLD モジュールの開発が、NTT 横須賀研究所の猿渡正俊らによって行われた。表 6.12 は、猿渡が区分した単一モード光ファイバ用 LD モジュール構造の変遷である⁵¹⁾。

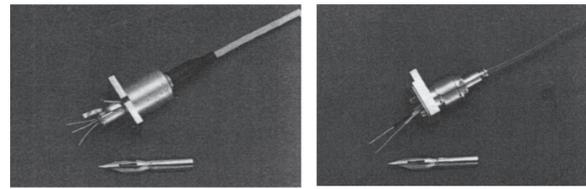
表 6.12 単一モード光ファイバ用 LD モジュール構造の変遷
(参考文献⁵¹⁾をもとに筆者作成)

世代	構造	結合レンズ系	固定法	改善点	時期
0	光学定盤上の実験 (微動台による結合)	円柱レンズ ファイバ先端加工 短波長FP-LD	-	-	1978年以降
I		微小円柱レンズ (15 μm直径) 短波長FP-LD	接着剤	結合効率	1978~79年
II		微小円柱レンズ (20 μm直径) 長波長FP-LD	同上	温度特性	1979~80年
III		共焦点複合レンズ (球レンズ +GRINレンズ) 長波長FP-LD	接着剤 →ハンダ	許容軸ずれ 結合効率 信頼性	1980~82年
IV		第二レンズ分割系 (球+GRINレンズ +GRINレンズ) 長波長DFB-LD	レーザ溶接	反射戻り光 許容軸ずれ 信頼性	1983年~

1978年以前には、多モード光ファイバ用のLD モジュールは試作されていたが、単一モード光ファイバ用については、光学定盤上で精密な微動台を用いてLD チップとの結合実験が行われていた(表3の第0世代)。その後、第I世代、第II世代と改善が進められ、猿渡正俊らが本命となる第III世代用の共焦点複合レンズ系を考案したのは1980年であった。LD チップを内蔵しているTO-CANパッケージの窓材を含めた結合光学系に反射防止膜加工を施して反射光が実効的にLD チップに戻らないようにした。この第III世代の光結合方式は装置メーカーに技術開示され、1.3μm 波長FP-LD モジュールとしてF-400M方式(商用化開始1983年)に採用された。LD チップと単一モード光ファイバとの光結合効率は-3~-5dBで、その温度変化は5~50℃の範囲で0.5dB以下であった。

さらなる伝送速度の向上を目指して、FP-LDの代わりに単一波長で発振してコヒーレンス性の良いDFB-LDが使われるようになると、遠方からの微弱な反射戻り光でも特性が劣化するため、光アイソレータを内蔵した第IV世代LD モジュールが開発され、F-1.6G方式(商用化開始1987年)に採用された。図6.32に、F-400M方式用FP-LD モジュールとF-1.6G

方式用DFB-LD モジュール(光アイソレータ内蔵)の外観写真例を示した⁵¹⁾。



(a) F-400M方式用FP-LDモジュール (b) F-1.6G方式用DFB-LDモジュール
図 6.32 単一モード光ファイバ用 LD モジュール例⁵¹⁾

本節で概説したような光ファイバ接続技術やLD モジュール構成技術の考案と改良により、日本では世界に先駆けての幹線系への単一モード光ファイバ通信システムの導入が行われ、その勢いは加入者系への単一モード光ファイバ導入にまで及ぶことになる。

6.7 加入者系への光ファイバ導入努力

6.7.1 加入者系への多モード光ファイバ導入の試み

家庭を巻き込んでの早期の光ファイバ利用実験として、通商産業省のリードで1978年から1986年まで実施されたHi-OVIS (Highly-interactive Optical Visual Information System) プロジェクトを挙げることができる。Hi-OVISは、奈良県東生駒を実験フィールドとして、家庭(約300加入)や公共施設と実験センタの間に光ファイバケーブルを布設し、双方向の映像利用実験を行うというプロジェクトであった⁵²⁾。使用された光ファイバケーブルは、低損失石英ガラスコア(直径150μm)と光学的低損失プラスチッククラッド(直径350μm)からなるステップインデックス(SI)型光ファイバ心線を最多36心まで束ねたもので、実験に使用した光ファイバは単心換算にして約350kmであった。発光素子は、0.83μm波長のLED、受光素子はSi-PIN-PDであり、映像信号、音声信号、データ信号を周波数分割多重して伝送した。

Hi-OVISは、世界で初めて大規模な光ファイバ通信技術を取り入れた完全双方向機能を持った映像情報システムであり、昭和天皇のご来訪を含めて、国内外からの3万5千人もの見学者が訪れた。そこで実現されたコミュニティは、未来学者アルビン・トフラーの有名な著書「第三の波、The Third Wave (1980)」で未来社会の一例として紹介されるなど、高い関心を集めた。

一方、NTT 研究所では、1979年頃から加入者系(現在のアクセス系)における光伝送方式の本格開発がスタートした。加入者系においては、多重化による経済効果の発揮が難しく、①施工法を含めて光ファイバ通信方

式の徹底的な低コスト化と、②光ファイバならではの高速広帯域サービス提供が必要とされた。しかし、加入者系への光ファイバ導入を検討し始めた1980年当時は、上記①②のいずれも満足できる状況になく、以下で概説するように、模索と試行実験の時期が続いた⁵³⁾。

伝送距離が長くない加入者系（通常は7km以内）では、「接続が容易であることが最優先」との観点から、まずはコア径が大きいグレーデッドインデックス (GI) 型多心光ファイバケーブルが開発された。この光ケーブルは、直径0.9mmの単心光ファイバ心線を集合し、最大100心まで収容したものであった。

さらに多心の加入者用光ケーブルの開発が、大都市での需要の増大を想定して行われ、1986年には5心の光ファイバテープ心線をプラスチックのロッドに設けた溝（スロット）に積層して収容したスロットロッド型光ファイバケーブルが実用化された。このテープ心線は、単心光ファイバ心線を横一列に並べ、それらをプラスチックによって一括して被覆して形成したもので、光ファイバを高密度にケーブル化できるとともに、複数の光ファイバを一括で接続できる特徴を持っていた。この構造により、図6.33に示したように、1986年には200心ケーブルが、翌1987年には600心の高密度ケーブルが開発された。

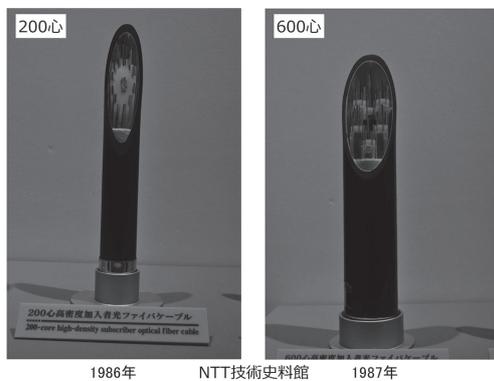


図 6.33 高密度加入者光ファイバケーブル (GI型 200心と600心)

苦心が続いたのは、光ファイバでなければ提供できないような高速広帯域サービスの開拓であり、表6.13には、1980年から1988年にかけて実施されたGIファイバケーブルを用いてのNTT現場実験例

- 1) 横須賀・吉祥寺実験「特定加入者光伝送方式」、
- 2) INSモデルシステム実験（三鷹・吉祥寺）「汎用加入者光伝送方式」、
- 3) 丸の内実験「複合光加入者伝送システム」

の概要を示した⁵⁴⁾。図6.34は、上記の1)と2)を通じて実験場になった三鷹・吉祥寺地区の布設ルート図である⁵⁵⁾。

表 6.13 GI型多モード光ファイバを用いた1980年代のNTT光加入者方式の現場実験例

(参考文献⁵⁴⁾等をもとに筆者作成)

実験	時期	概要
1) 横須賀・吉祥寺実験 「特定加入者光伝送方式」(SS)	1980.4 ～1984	広帯域専用加入者線光伝送方式 ・双方向アナログ映像信号/デジタル信号の4波多重 ・5km 閉域加入者光伝送方式 ・片方向2chアナログ映像伝送 ・制御信号 ・5km
2) INSモデルシステム実験(三鷹・吉祥寺) 「汎用加入者光伝送方式」(SS) * 拡大計画(1985.3～)	1984.9 ～1987.3	・基本ユニット(映像双方向+64kb/s) ・追加ユニット(映像分配1ch/高速デジタル) ・4波多重(0.81, 0.89, 1.2, 1.3μm) ・5km
3) 丸の内実験 「複合光加入者伝送システム」(SS)	1986.1 ～1988	・映像分配2ch(音声2ch)+64kb/sの経済化 ・3波多重(0.78, 0.88, 1.3μm) ・2km

・SS: Single Star網(個々のユーザが1本の光ファイバを占有)



図 6.34 三鷹・吉祥寺地区ルート図⁵⁵⁾

上記2)のINSモデルシステム実験(1984年開始)での加入者光ケーブル網構成の概要を図6.35に示したが、光ファイバ総長3,400km、300加入者の規模であった⁵⁶⁾。光源にはFP-LDを用いての4波多重(下り0.89μmと1.2μm、上り0.81μmと1.3μm)により、映像双方向伝達、付随音声、映像分配、高速デジタル双方向サービスが提供可能であった。図6.36は、4波長多重用合分波器の構成図と内部写真である⁵⁷⁾。

上記3)の東京・丸の内地区での「複合光加入者伝送方式」実験(1986年開始)は、徹底的な経済化を狙ってLED光源(下り0.88μmと0.78μm、上り1.3μmの3波長多重)を採用し、図6.37に示したように、お客様にアナログ映像2チャンネルとISDN回線を合わせて提供する試みであった⁵⁸⁾。図6.38は、従来の個別光部品モジュールに代えて、新たに開発された受発光素子と3波長多重用合分波器を単一アルミナ基板上に配置した一体化モジュールの構成図である⁵⁹⁾。

複合光加入者伝送方式は、経済性に優れた方式選定、デバイスの小型・経済化、高密度多心光ファイバケーブルの開発など、実用化を強く意識した最初の加入者系向けシステム開発であったが、当時の郵政省との間で微妙な問題となっていた通信と放送の境界問題

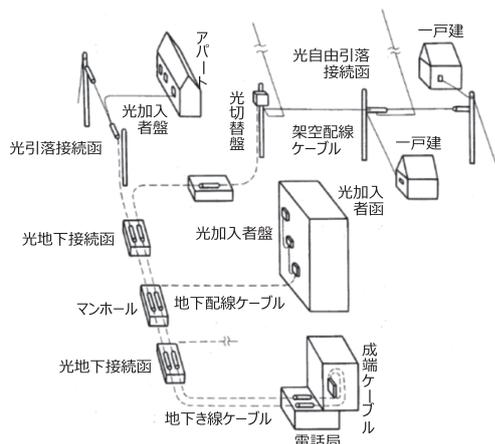


図 6.35 INS モデルシステムにおける加入者光ケーブル網構成の概要⁵⁶⁾

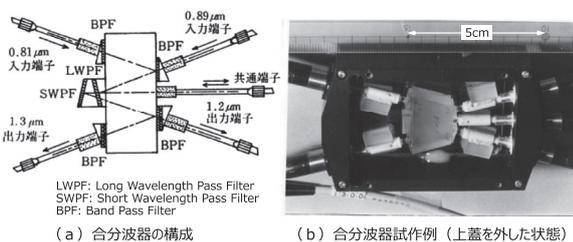
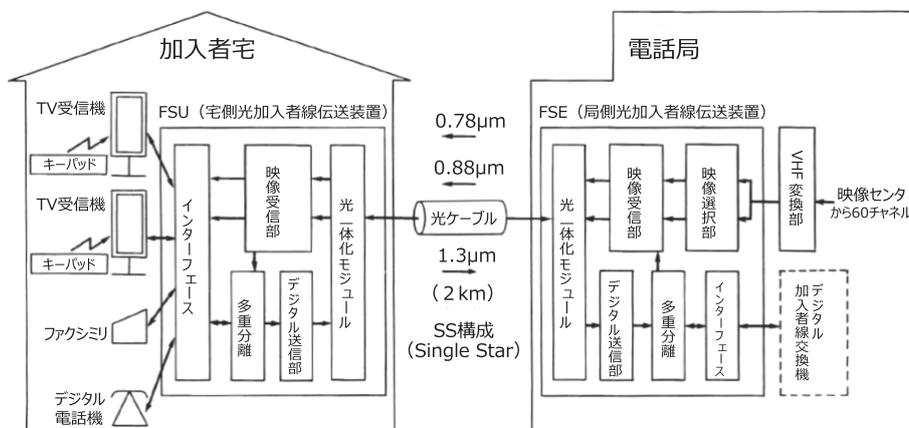


図 6.36 INS モデルシステム実験用 4 波長多重用合分波器 (参考文献⁵⁷⁾ をもとに筆者作成)

に触れるものだとの判断から、実用化を見合わせるようになった。しかし、「複合光加入者伝送方式」の実用化の見送りは、伝送容量に制約のある多モード光ファイバケーブルを加入者系に大量に導入せずに済んだことになり、長い目で見ると、むしろ賢明な見送りだったと言えよう。

6.7.2 加入者系にも単一モード光ファイバを導入することを決定



※お客様に映像情報 2 チャンネルを同時に分配するサービスと、デジタル電話等の 64kb/s サービスを併せて提供
 ・光ファイバ：GI 型 (50μm/125μm)
 ・伝送距離：2km
 ・光一体化モジュール：発光・受光素子：0.78μm と 0.88μm は LED と APD、1.3μm は LED と PD
 合分波器：多層膜フィルタ型

図 6.37 複合光加入者システム構成例 (東京・丸の内実験)

(参考文献⁵⁸⁾ をもとに筆者作成)

一般家庭への光ファイバ導入 (FTTH) が直ぐに進むことはなかったが、NTT は 1988 年 10 月に、それまでのグレーデッドインデックス (GI) 型多モード光ファイバに代わって、加入者系にも単一モード (SM) 光ファイバを導入するとの重要な決定を行った^{16) 53)}。この決定の背景には、

- 偏心の極めて小さい SM ファイバが、VAD 全合成法により量産可能になり、単一モード光ファイバの接続損失が GI ファイバ並みになったこと、
- SM ファイバの製造コストが、ゲルマニウム (Ge) 添加量の多い GI ファイバより安くなったこと、
- SM ファイバであれば、将来にわたって光ファイバケーブルを引き直すことなく、光送受信装置を更新するだけで、より広帯域なサービスを提供できること、
- 中継系との光ファイバ統一による量産効果も期待できること、

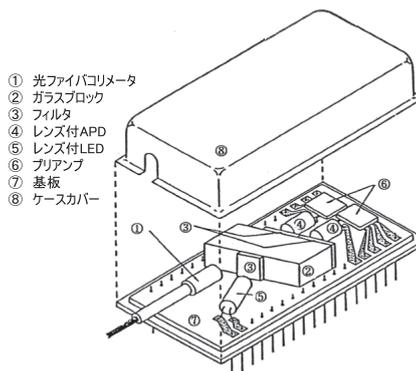


図 6.38 複合光加入者系用一体化モジュール例

(参考文献⁵⁹⁾ をもとに筆者作成)

があった。この判断により、光ファイバケーブルを引き直すことなく、将来にわたって、より広帯域なサービスを提供できる基盤が整えられていった。

上記の決定に沿って、1989年に、単一モード (SM) 光ファイバを適用した4心/8心光ファイバテープにより構成された最大1,000心の加入者系光ファイバケーブルが開発され、その後の加入者系の光化のための中心的なケーブルになった。単一モード光ファイバへの移行に際して、それまでの5心テープから4心テープへの変更が行われたが、テープ状の伝送線では、往復のとれる偶数の方が扱い易かったのである。図6.39は加入者系用に開発された100心と1,000心の単一モード光ファイバケーブル構造例である¹⁶⁾。

光加入者系 (光アクセス系) の経済化のために必要な単一モード光ファイバの多心一括接続技術として、図6.40のようなテープファイバの一括融着接続技術⁴³⁾と、図6.41のような高精度プラスチック成形技術による一括コネクタ接続技術 (MTコネクタ)^{48) 49)}が1987年に開発された。どちらもVAD全合成化による単一モード光ファイバのコアの低偏心化なくしては実現困難な接続技術であった。ここでMTコネクタは着脱回数の少ない場所での使用を前提として開発されたもので、出来る限り簡易で小型な構造を採用し、接続端面で生じる反射戻り光は、屈折率整合剤を用いることで経済的に抑制している^(註4)。

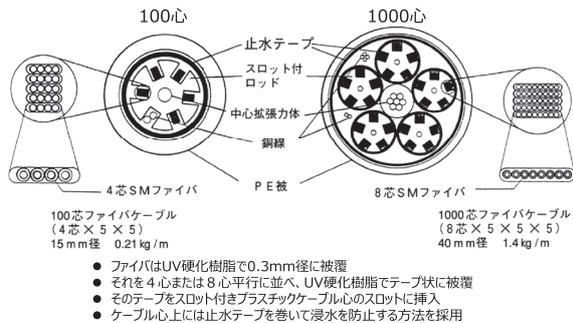


図6.39 加入者系単一モード光ファイバケーブル構造 (100心および1000心)
(参考文献¹⁶⁾をもとに筆者作成)

(註4) その後、屈折率整合剤を不要とするために、MTフェルールの端面を8度の斜め研磨面として、反射戻り光を抑制するとともに、その面から光ファイバ端面をわずかに突き出した状態に研磨することによって、光ファイバ端面同志の密着接続を容易にしたMPO (Multi-fiber Push On) コネクタが開発された。SCコネクタのようなプッシュプル構造を採用したMPOコネクタは着脱が容易であり、今日ではデータセンタ内の装置間の光ファイバ配線にも多用されている⁴⁸⁾。

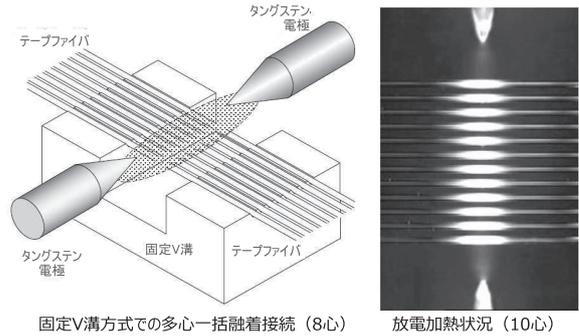


図6.40 テープファイバの一括融着接続技術
(参考文献⁴³⁾をもとに筆者作成)

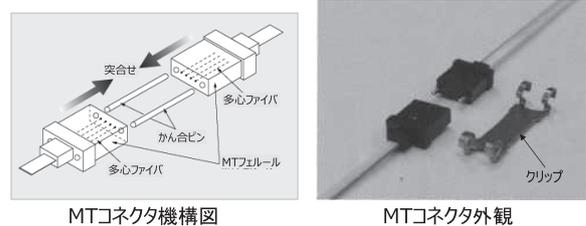
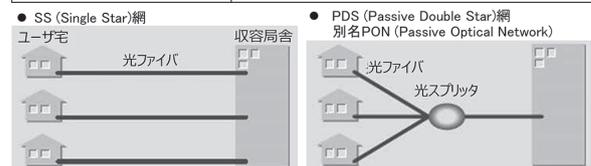


図6.41 テープファイバ用多心コネクタ (MTコネクタ)
(参考文献^{48) 49)}をもとに筆者作成)

1990年代に入ると、表6.14に示したように単一モード光ファイバを用いた1)「VI&P総合実験」(1991.4~1994)、2)「京阪名実験」(1994.3~1995)、3)「マルチメディア共同利用実験」(1995.9~1998)などが実施された⁶⁰⁾。1本の光ファイバを途中で光スプリッタを介して複数のユーザで共有するPDS (Passive Double Star) 網、別名PON (Passive Optical Network) システムの実験も行われた。しか

表6.14 単一モード光ファイバを用いた光アクセス方式現場実験例
(参考文献⁶⁰⁾をもとに筆者作成)

実験	概要
1) VI&P総合実験 1991.4~1994	低速光加入者伝送システム (PDS) 多チャンネル光映像分配システム (PDS) 高速光加入者伝送システム (SS)
2) 京阪名実験 1994.3~1995	多チャンネル映像分配 (SCM-PDS) ISDN (STM-PON)
3) マルチメディア共同利用実験 1995.9~1998 (立川) 1996.1~1998 (浦安・横須賀)	(立川) ・多チャンネル映像分配、VoD (MPEG-2)、(SCM-PDS) ・ISDN (STM-PDS) (浦安・横須賀) ・CATV/VoD (MPEG-2)/ISDN ・150Mb/s ATM-PDS



し、ビジネスユーザ向けの光ファイバによる専用線サービスや、遠隔に集中している加入者に対して複数のメタル回線を（加入者には見えない形で）光ファイバで集約するCT/RT（Central Terminal/Remote Terminal）方式の導入などは別として、一般家庭への光ファイバ導入（FTTH：Fiber-to-the-Home）は、1990年代でも依然として時期尚早であった。

一般家庭向けのFTTHサービスが本格化するには、上記1) 2) 3) 等の実験を通じて、経済的なPDS（別名PON）技術の開発と標準化を進めつつ、インターネットの登場による光ブロードバンドアクセス需要が実際に立ち上がる2000年代に入るまで待つ必要があった⁶¹⁾。

その間にも光ファイバの経済化努力が続けられ、1990年代後半には、標準的なVAD単一モード光ファイバの素線価格として、NTT念願の「1心・1m当り10円」目標が実現されたことを特記したい。

参考・引用文献

- 1) 池上文夫：「最近の大容量伝送方式」, 電気学会雑誌, Vol.92, No.12, pp.1214-1222, 1972.
- 2) 野田健一（編著）：「光ファイバ伝送」, 電子通信学会, 1978.12.15発行.
- 3) 末松安晴, 伊賀健一（共著）：「光ファイバ通信入門（改訂5版）」, オーム社, 2017.
- 4) 米津宏雄：「光通信素子工学 - 発光・受光素子 -」, 工学図書株式会社, 1984.
- 5) 大橋弘美：「半導体レーザー：研究開発経緯と今後の展開」, OPTRONICS (2011) No.2, pp.137-144.
- 6) 兎玉聡, 石橋忠夫：「フォトダイオード：研究開発の歴史と今後の展開」, OPTRONICS (2011) No.3, pp.131-135.
- 7) 山田博仁：東北大学での講義資料「コミュニケーション工学B」, <http://www5a.biglobe.ne.jp/~babe/>
- 8) K. Oe, S. Ando, and K. Sugiyama, "1.3 μm cw operation of GaInAsP/InP DH diode lasers at room temperature," Jpn. J. Appl. Phys., vol.16, pp.1273-1274, 1977.
- 9) J. Yamada, M. Saruwatari, K. Asatani, H. Tsuchiya, A. Kawana, K. Sugiyama, and T. Kimura: "High-speed optical pulse transmission at 1.29- μm wavelength using low-loss single-mode fibers," IEEE J. Quant. Electron., Vol.14, No.11, pp.791-800, 1978.
- 10) T. Matsuoka, T. Nagai, Y. Itaya, H. Noguchi, Y. Suzuki, and T. Ikegami, "CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5 mm wavelength region," Electron. Lett. Vol. 18, pp. 27-28, 1982.
- 11) 浜松ホトニクス：「光半導体素子ハンドブック 第8章 LED」, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/08_handbook.pdf
- 12) 小山二三夫：「面発光レーザーの進展」, 応用物理, Vol.84, No.12, pp.1078-1085, 2015.
- 13) ファイバーラボ株式会社：「フォトディテクタ（光検出器）とは」, <https://www.fiberlabs.co.jp/about-pd/>
- 14) 竹村浩二：「光モジュールパッケージ技術」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.1, No.4, pp.317-320, 1998.
- 15) 株式会社光響：「Optipedia, ファイバーカップルLDの構成」, <http://optipedia.info/source-index/fiberlaser-index/fiberlaser-basic/fl-components/pump-ld/>
- 16) 村田浩, 小泉健, 新関暢一：「光ファイバの歴史 開拓者たちのメモアール」, 工業通信, 2001.
- 17) 光通信基礎研究調査会, "光ファイバ通信実用化研究の夜明け前 - NTT基礎3研の足跡 -," サイバー出版センター, 2016.10.
- 18) 島田禎晋, 山縣淳：「光ファイバ・ケーブル通信とは」, 月刊ビジネスコミュニケーション, 1977年1月号（同誌2016年2月号に復刻版を掲載）.
- 19) 青木文雄, 安藤洪哉, 深津啓典：「III. 電力用光ファイバ通信方式（東電・関電における電力用光ファイバ通信試験）」, 電気学会雑誌, Vol.96, No.12, pp.1079-1083, 1976.
- 20) 深津啓典, 内藤正一：「電力会社における光ファイバーの応用」, テレビジョン, Vol.31, No.9, pp.706-711, 1977.
- 21) 加藤高昭：「夢の電力用通信の実現」, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.11, pp.1638-1641, 2005.
- 22) 枅野邦夫：「光ファイバ物語～汗と涙でたどりついた光ケーブル現場試験」, サイバー出版センター, 2014年12月発行.
- 23) 加藤嘉則：「第3章 公衆通信」, 電気学会雑誌, Vol.97, No.11, pp.1005-1009, 1977.
- 24) 新関：「電気通信研究所における光学結晶と光ファイバの研究開発」, 通研実報, Vol.32, No.7, pp.1429-1476, 1983.
- 25) 平井正孝：「電気通信物語 - 光ファイバケーブル

- ル編 (その5) -」, 電気通信, 第59巻1月号, pp.45-60, 1996.
- 26) 中川清司:「光ファイバ通信の公衆通信への応用」, テレビジョン学会誌, Vol. 42, No.3, pp.263-270, 1988.
 - 27) N. Uchida, N. Uesugi, Y. Murakami, M. Nakahara, T. Tanifuji, and N. Inagaki: "Infrared loss increase in silica optical fiber due to chemical reaction of hydrogen," Proc. 9th ECOC, pp.525-528, 1983.
 - 28) 内田直也:「水素による光ファイバ損失増の発見と防止策の確立 - 最悪のシナリオを際どく回避 -」, 電子情報通信学会, 通信ソサイエティマガジン, Vol.7, No.1, pp.72-79, 2013.
 - 29) K. Mochizuki, Y. Namihira, and H. Yamamoto: "Transmission loss increase in optical fibres due to hydrogen permwation," Electron. Lett., Vol.19, No.18, pp.743-745, 1983.
 - 30) 真田和夫:「光ファイバの水素劣化とそのメカニズム」, New Glass, Vol.4, No.1, pp.57-61, 1989.
 - 31) 福富秀雄:「電気通信開発物語 - 光ファイバケーブル編 (その1) -」, 電気通信, 58巻9月号, pp.33-48, 1995.
 - 32) 島田禎晉:「シングルモードファイバを使った日本縦貫光伝送システムの完成 (前編)」, 映像情報メディア学会誌, Vol. 59, No.12, pp.1792-1794, 2005.
 - 33) 島田禎晉:「シングルモードファイバを使った日本縦貫光伝送システムの完成 (後編)」, 映像情報メディア学会誌, Vol. 59, No.12, pp.1795-1799, 2005.
 - 34) H. Fukinuki, T. Ito, M. Aiki, Y. Hayashi: "The FS-400M submarine system," Journal of Lightwave Technology, Vol.2, No.6, pp.754-760, 1984.
 - 35) 雨宮正樹, 四十木守, 河西宏之:「ギガビット海底光中継伝送方式 (FS-1.8G) の設計と特性」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-B-I, No.5, pp.366-376, 1994.
 - 36) 秋葉重幸:「長波長レーザの開発と大容量光海底ケーブルの実用化」, 電子情報通信学会, 通信ソサイエティマガジン, No.23 [冬号], pp.210-217, 2012.
 - 37) 特集「電話事業100年を迎えて - 大容量化, 長スパン化を完成した光伝送方式の第1期」, NTT技術ジャーナル (1990.10), pp.14-15.
 - 38) 土屋治彦:「光ファイバの接続」, テレビジョン学会誌, Vol.32, No.4, pp.296-300, 1978.
 - 39) D.L. Bisbee: "Optical fiber joining technique," Bell Syst. Tech. J., Vol.50, No.10, pp.3153-3158, 1971.
 - 40) N. Kashima and H Tsuchiya, "Early days of fusion splice developments," IEICE Communications Society - GLOBAL NEWSLETTERS, Vol.35, No.3, pp.2-5, 2011.
 - 41) H. Tuchiya and I. Hatakeyama, "Fusion Splices for Single-Mode Optical Fiber," OFC Technical Digest -II, PD-1, Feb. 1977.
 - 42) I. Hatakeyama and H. Tsuchiya, "Fusion Splices for Single-Mode Optical Fibers," IEEE JQE-14, No.8, pp.614-619, 1978.
 - 43) 川西紀行:「融着技術: 技術開発の歴史と今後の動向」, OPTRONICS (2011), No.5, pp.12-117.
 - 44) 小沼朋浩:「光ファイバ融着接続の基礎と最新技術」, 電子情報通信学会 OCS 研究会 30周年記念講演会, 2017.7.28.
 - 45) H.Tsuchiya, H.Nakagome, N.Shimizu, and S.Ohara: "Double eccentric connectors for optical fibers," Appl. Opt., Vol.16, No.5, pp.1323-1331, 1977.
 - 46) 発見と発明のデジタル博物館:「単一モード光ファイバコネクタ (専門向け)」, 登録番号 861, <https://dbnst.nii.ac.jp/pro/detail/861>.
 - 47) N. Suzuki, M. Saruwatari, and E. Sugie: "Ceramic capillary connector for 1.3 μ m single-mode fibres," Electron. Lett., Vol.15, No.25, pp.809-811, 1979.
 - 48) 長瀬亮, 保薊和男「世界に誇れる研究開発成果光コネクタ」, NTT技術ジャーナル (2007.12), pp.74-78.
 - 49) 長瀬亮:「光コネクタ: 光通信技術の発展を支えた研究開発の歴史」, OPTRONICS (2011), No.4, pp.196-203.
 - 50) 杉田悦治:「日本発の光コネクタ技術 (SC コネクタ) が世界標準に」, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol. 9, No. 2, pp.116-122, 2015.
 - 51) 猿渡正俊:「LD モジュール: 大容量光伝送方式の進展を支えた研究開発の歴史」, OPTRONICS (2011) No.7, pp.141-148.
 - 52) 川畑 正大, 厚主 健一:「映像情報システムへの光通信の応用」, レーザー研究, Vol.5, No.3, pp.20-26, 1977.

- 53) 上野谷拓也, 富田茂, 佐藤公紀:「光ファイバをアクセス網に導入するために一光ケーブル多心化の歩み」, 電気通信, Vol.71, No.733, pp.36-41, 2008.
- 54) 佐野浩一:「光加入者システムの開発動向」, テレビジョン学会技術報告, Vo.14, No.34, pp.1-6, 1990.
- 55) 小山正樹, 石尾秀樹, 二瓶文博, 坂本光:「広帯域専用および閉域加入者光伝送方式現場試験の概要」, 研究実用化報告, Vol.33, No.3, pp.415-425, 1984.
- 56) 島田禎管:「加入者系光通信方式の概要」, 研究実用化報告, Vol.34, No.7, pp.1049-1056, 1985.
- 57) 佐野浩一, 藤井洋二, 箕輪純一郎:「加入者光伝送方式用光合分波器」, 研究実用化報告, Vol.33, No.3, pp.487-501, 1984.
- 58) 太田紘一, 宮守良夫, 吉屋勉, 瓜田一幾, 前田稔:「光加入者線伝送システム」, 日立評論, Vol.69, No.11, pp.1025-1030, 1987.
- 59) NTT 中央電気通信学園:「エレクトロニクス技術光ファイバコース (D041)」テキスト, 1989年7月.
- 60) 川瀬正明:「光ファイバをアクセス網へ ～ FTTH 1000万加入の道のり～」, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.32, No.52, pp.99-104, 2008.
- 61) 三木哲也:「光アクセスのこれまでとこれから」, 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.7, pp.638-643, 2016.

7 | その後の発展概要

前章では、初期の光ファイバ通信システム実験と商用化努力について報告したが、光幹線系については、その後の技術革新による伝送容量の向上が続き、難関のアクセス系の光化 (FTTH) についても 2000 年代に入って本格化することになる。しかし、前章に続いて今日まで約 30 年間の技術発展の全容を網羅することは、紙面の制約と筆者の能力範囲を超えてしまいそうである。そこで本章では、1) 光幹線系の伝送容量の飛躍的な進展、2) PON (Passive Optical Network) 技術による FTTH 実現、3) 光ファイバ通信網を支えている石英系プレーナ光波回路技術の三点に絞って、概要のみを報告する。

7.1 光幹線系の伝送容量の飛躍的な進展

今日までの幹線系の商用光ファイバ通信システムの進展模様を図 7.1 に示した。1980 年代までの進展は、主に多モード光ファイバから単一モード光ファイバへの移行と、DFB-LD や分散シフトファイバ (DSF) の採用を含めての時分割多重 (TDM: Time-Division Multiplexing) 技術の向上によるものであった。その後の進展も目覚ましく、1990 年代には①光ファイバ増幅器と②高密度波長多重 (WDM: Wavelength-Division Multiplexing) 技術の開発、2000 年代には③位相変調方式の導入、さらに 2010 年代に入るとの④デジタルコヒーレント光受信技術の適用により、今日では単一モード光ファイバ 1 本当たり、10Tb/s 級の伝送方式が商用化されている。1987 年の 1.6Gb/s と比較すると、30 年間で約 4 桁の容量アップに相当する。

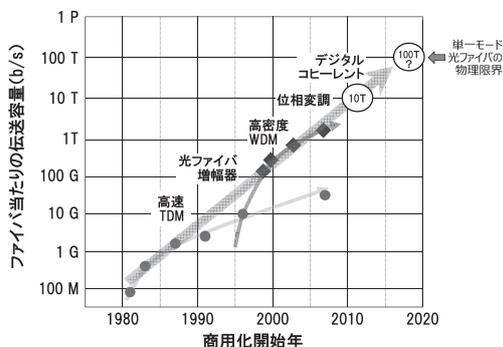


図 7.1 商用光ファイバ通信システムの進展

7.1.1 光ファイバ増幅器の登場

1990 年代からの光ファイバ通信システムの飛躍的な発展をもたらした最大の技術革新は、図 7.2 に概念

図を示したエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) の開発である¹⁾。

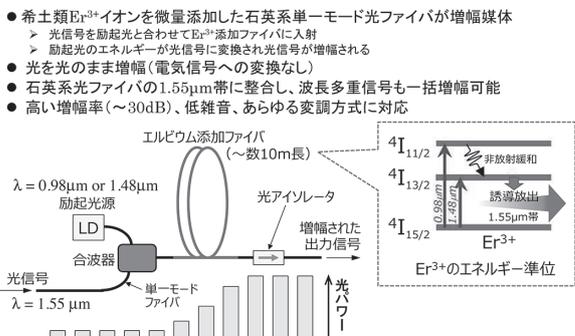


図 7.2 エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA)

ネオジウム (Nd) やエルビウム (Er) などの希土類イオンをガラスに添加すると増幅や発振機能があることは 1960 年代前半に E. Snitzer (American Optical 社) によって報告されていたが、低損失な石英系光ファイバ誕生前であり、大きな話題になることはなかった。1987 年になって、英国 Southampton 大学の D.N. Payne らが、Er イオンを添加した石英系単一モード光ファイバを Ar イオン励起 DCM 色素レーザーで励起し、光ファイバ損失の最小になる 1.55μm 帯での増幅結果を発表した²⁾。1989 年には、NTT 研究所の中沢正隆らによって小型の半導体レーザー (LD) 励起の EDFA が開発され、さらに萩本和男らによって図 7.3 のシステム構成での 212km 無中継伝送実験が報告され、EDFA の有用性が実証された^{3) 4) 5)}。

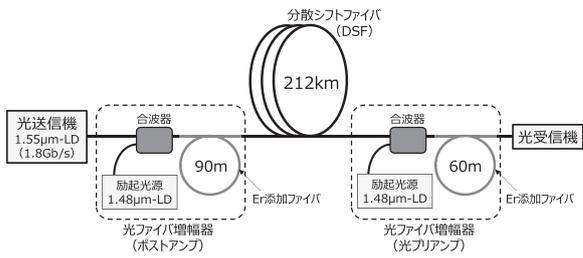


図 7.3 LD 励起光ファイバ増幅器を用いての世界初の長距離伝送実験 (1989 年 NTT) (参考文献⁴⁾をもとに筆者作成)

EDFA を用いて NTT 幹線系に商用導入された代表的な光ファイバ通信システムは、1996 年に商用化された FA-2.4G 方式 (2.4Gb/s) と FA-10G 方式 (10Gb/s) であり、

- ・光源は 1.55μm 帯 DFB-LD と外部変調器 (LiNbO₃ 変調器) の組み合わせ、

- ・光ファイバは分散シフトファイバ (DSF)、
- ・80km 間隔で配置した「線形中継器」としての EDFA で光増幅、
- ・電気信号に戻して波形を整える「再生中継器」の間隔は、FA-2.4G 方式で 640km、FA-10G 方式では 320km であった⁶⁾。

7.1.2 高密度波長多重 (Dense WDM) 通信

エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) が、さらに真価を発揮したのは、図 7.4 に示すように 1.55 μm 波長帯で高密度に波長多重 (WDM) された複数の信号光の一括増幅であった⁷⁾。高密度 WDM での波長間隔は、ITU (International Telecommunication Union) 標準になった光周波数グリッドに沿って、100Hz 間隔 (波長間隔 \sim 0.8nm) や 50GHz 間隔 (波長間隔 \sim 0.4nm) に設定するのが通例であった。

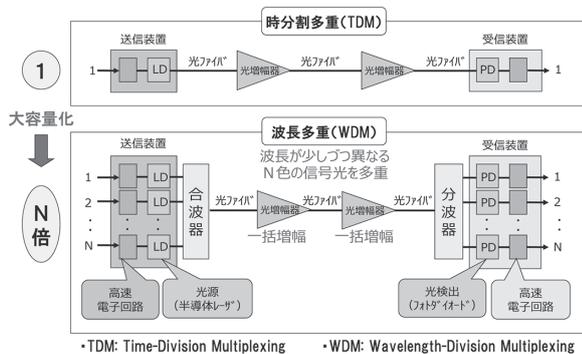


図 7.4 高密度波長多重 (WDM) 通信の概念図

高密度 WDM 通信方式の実用化に際しては、FA-2.4G (2.4Gb/s) や FA-10G (10Gb/s) 方式のような単一波長での高速 TDM 伝送では問題にならなかった非線形光学現象 (四光波混合) を抑制するために、波長分散制御技術の見直しが行われた。ここで四光波混合とは、2つ以上の異なる波長の光をファイバ中に入射した際に生じ、新たな波長の光が発生する現象であり、1.55 μm 帯に零分散波長をシフトした分散シフトファイバ (DSF) で特に顕著となり、問題点として浮上した。零分散波長近傍では、高密度 WDM 信号パルス群が長距離にわたって揃ったままの状態と一緒に伝搬するので、四光波混合が生じ易い事情があった。

波長分散制御の見直し策の一つとして、図 7.5 に示すように、1.55 μm 波長帯で零ではない適度な分散を有する非零分散シフトファイバ (NZ-DSF: Non-Zero Dispersion-Shifted Dispersion Shifted Fiber) が開発された。DSF に比べて、プラス側に非零化した「Positive NZ-DSF」と、マイナス側に非零化した「Negative NZ-DSF」が用意された。

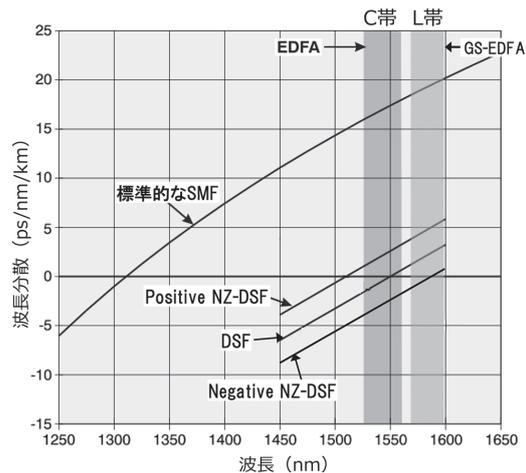


図 7.5 各種単一モード光ファイバの分散特性

さらに太平洋を横断するような長距離系では、波長分散の符号が異なる 2 種類のファイバを交互に接続して、局所的な波長分散は非零 (Non-Zero) として四光波混合を抑制しながら、伝送路全体としての波長分散累積値を零に近づける分散マネージメントファイバ (DMF: Dispersion Management Fiber) 手法が開発され、KDDI 等による太平洋横断光ファイバ通信システム TGN-P (2003 年開通、10Gb/s \times 64 波) や Unity (2010 年開通、10Gb/s \times 96 波) に適用された⁸⁾。

その一方で、事業現場への DSF 導入で先行していた NTT では、布設済みの DSF を活用するために、これも図 7.5 に記載したように、通常の C (Conventional) 帯 (1.53 \sim 1.56 μm) に比べて長波長側に寄った L (Longer) 帯 (1.57 \sim 1.60 μm) で動作する GS-EDFA (Gain-Shifted EDFA) を開発し、2000 年商用化の 2.4Gb/s \times 48 波 (= 115.2Gb/s) 方式、2003 年商用化の 10Gb/s \times 80 波 (= 800Gb/s) 方式、2007 年商用化の 40Gb/s \times 40 波 (= 1.6Tb/s) 方式に適用した⁹⁾。

日本に比べて分散シフトファイバ (DSF) 導入が遅れていた北米では、TDM 技術による 2.5G/s から 10Gb/s への伝送容量アップが困難であったが、逆に四光波混合に煩わされることがない標準的な単一モード光ファイバを用いた高密度 WDM 通信 (2.5Gb/s \times N 波) 方式の導入が、日本より早い 1995 年頃から始まり、波長数 N は、図 7.6 に示すように急速に増えていった。1 本の光ファイバ伝送路の伝送容量を一挙に N 倍 (N = 4, 8, 16, 32, ...) にしてしまう高密度 WDM 技術の威力は「魔法」のようであり、インターネット登場によるブロードバンド需要増への期待感の高まりとともに、投機の対象にもなった。やがて過剰投資状態に陥った北米ネットバブルは 2001 年に崩壊

し、米国に販路を広げていた日本の光通信機器製造業界も深刻な影響を被ることになった。

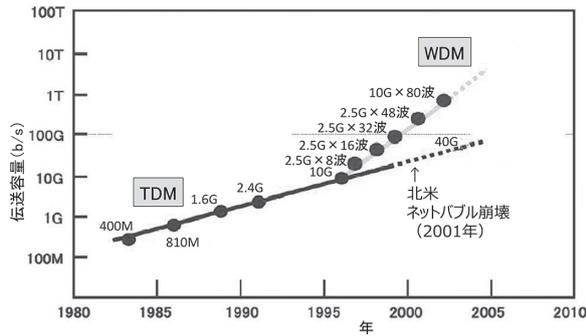


図 7.6 北米・光幹線系の伝送容量推移

北米ネットバブル崩壊から数年して回復の兆しが見えると、高密度 WDM 通信の利点を“Point-to-Point”の長距離幹線系のみならず、地域幹線系やメトロ（都市域）系で活用する動きが高まり、図 7.7 のようなリング型の ROADM システムとして商用導入が進められた¹⁰⁾。ROADM は“Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer”の略称であり、あえて和訳すると「再構成可能な光挿入・分岐多重装置」となる。

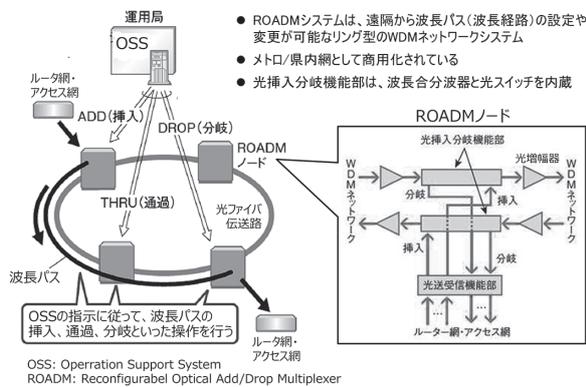


図 7.7 ROADM システム

(参考文献¹⁰⁾をもとに筆者作成)

ROADM システムは、遠隔の OSS (Operation Support System) から各 ROADM ノードでの波長パス（波長経路）の Add（挿入）や Drop（分岐）を設定可能なフォトニックネットワーク（Photonic Network）である。ここでフォトニックネットワークとは、それまでは電気領域で行われていたスイッチングや転送機能の少なくとも一部を光領域で処理するネットワークである。実際、ROADM ノードの光挿入分岐機能部は、波長合分波器と光スイッチで構成されていて、通過（Through）波長については、電気信号に戻ることなく、光信号のまま ROADM ノードを通過するので、システム運用の効率化とともに、消

費電力を低減できる特長がある。NTT では、2004 年の L 帯 16 波の 10G-ROADM システムの商用化に始まり、2005 年に 32 波、2007 年に最大 80 波（最大 12 ノード、最長 550km リング）に拡張された^{9) 11)}。

7.1.3 位相変調方式の導入

単一モード光ファイバ通信システムの代表的な外部変調方式と光送受信器構成例を表 7.1 に示したが、1995 年商用化の FA-10G 方式までは、最も光送受信構成がシンプルなオンオフ変調（OOK：On-Off Keying）方式が使われた¹²⁾。その後、高密度 WDM 通信が主流になり、1 波長当りの伝送容量を 10Gb/s を超えて増やそうとすると、それまでの OOK 変調では、2 値しか送れないことや、変調に伴う占有帯域幅が広過ぎるなどの問題点が顕著になった。そこで適用されたのが無線通信技術に範をとった位相変調方式であり、例えば 2007 年 NTT 商用化の 40Gb/s × 40 波（= 1.6Tb/s）伝送方式には、表 7.1 中の DQPSK (Differential Quadrature PSK, 差動四位相偏移変調) 方式が採用された。

表 7.1 変調方式と光送受信器構成例

(参考文献¹²⁾をもとに筆者作成)

変調方式	OOK	DPSK	DQPSK	DP-QPSK
コンスタレーションマップ				
シンボルレート	1 bit/symbol	1 bit/symbol	2 bit/symbol	2 pol. X 2 bit/symbol
光変調器構成 (外部変調器)	OOK (On-Off Keying)	PSK (Phase Shift Keying)	PSK (Phase Shift Keying)	PSK (Phase Shift Keying)
光受信器構成	PD (Photodiode)	光遅延干渉計 (Dual-PD)	光遅延干渉計 (Dual-PD)	光90度ハイブリッド回路 (Dual-PD)

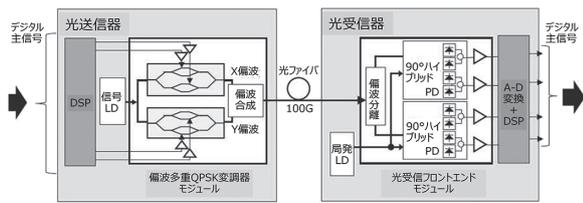
DPSK (Differential PSK), DQPSK (Differential Quadrature PSK), DP-QPSK (Dual-Polarization Quadrature PSK)

QPSK 方式や DQPSK 変調方式で、位相変調された信号光を検出するには、一つ前の信号光パルスとの位相差の有無を検出する必要があり、Dual-PD (= バランス型 PD) の前に、復調器としての光遅延干渉計が配置される。光遅延干渉計を構成する 2 本の導波路の長さの差は、40Gb/s 伝送の場合、QPSK では約 5mm、DQPSK では約 10mm である。DQPSK は 4 値変調であるため、シンボルレートは 1/2 に低減され、光送受信器の構成は複雑になるが、占有帯域幅が縮小されることに加えて、送受信の電子回路の動作速度が緩和される利点があり、その後のデジタルコヒーレント送受信技術への橋渡しになった¹²⁾。

7.1.4 デジタルコヒーレント技術

2010年代に入ると、長距離伝送に伴う波長分散による光信号の波形劣化などを、光領域での分散制御や分散補償ではなく、電気領域でのデジタル信号処理で補償するデジタルコヒーレント送受信技術が開発された。これは、1980年代に東京大学の太越研究室やNTT研究所（基礎第3研究室）を初めとして各国で研究が行われたにもかかわらず、光ファイバ増幅器（EDFA）の登場によって出番を失ってしまった「コヒーレント光通信方式」が、20年以上の歳月を経て進歩した高速デジタル信号処理技術と融合しての復活であった¹³⁾。

表7.1右端のDP-QPSK（Dual-Polarization Quadrature PSK）方式に相当するが、図7.8は1波長当り100Gb/s伝送用のDP-QPSKデジタルコヒーレント光送信器と光受信器の構成例である¹⁴⁾。無線通信でのホモダイン検波やヘテロダイン検波と同様に、受信側には局発光源（LD）が備えられている。受信光と局発光がミキシングされ4対のバランス型PDで検出される。A/D変換の後に、信号光と参照光の周波数や位相のずれ、伝送路で発生する偏光状態の変化、波長分散による信号歪み等をデジタル信号処理回路によって補正する。超高速で動作する大規模集積回路であるDSP（Digital Signal Processor）の開発には多額の開発費が必要であるが、日本では、NTT、NEC、富士通、三菱電機、情報通信研究機構が公的資金を活用しての共同開発体制を2010年前後に整えて、DSP開発に成功した^{14) 15)}。



DP-QPSK: Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying

- 光信号に生じる下記の劣化をデジタル信号処理回路(DSP)で補償
 - 波長分散、偏波モード分散
 - 局発光の位相(周波数)ゆらぎ、信号光の偏波ゆらぎ

図7.8 デジタルコヒーレント光送受信器構成

(参考文献¹⁴⁾をもとに筆者作成)

図7.8の構成を基本として、NTTの陸上系では2013年に100Gb/s-DP-QPSK × 80波 (= 8Tb/s)の「100G-PTS」¹⁶⁾が、そしてKDDIの海底系では2016年に100Gb/s-DP-QPSK × 100波 (= 10Tb/s)で太平洋を横断する「FASTER」¹⁷⁾が商用化された。デジタルコヒーレント技術の登場により、それまでの長距離大容量単一モード光ファイバ伝送路における高度な分散マネージメントの必要性から解放された。“力

仕事”を引き受けているDSPの大きな消費電力には改善の余地があるが、いずれはアクセス系にまで適用領域が広がると期待されている。

図7.9は、NTT未来ねっと研究所の宮本裕とKDDI総合研究所の森田逸郎によって整理された光中継伝送システム（陸上系と海底系）の発展模様であるが、1987年商用化のF-1.6G方式から数えて30年の間に4桁もの伝送容量拡大が達成されたことが改めて理解できる¹⁸⁾。2016年商用化の海底光方式FASTER（ファイバ当り10Tb/s容量）は、仮に電話回線（64kb/s）に換算すると、日本の総人口を上回る約1.5億人もの通話を1本の石英系単一モード光ファイバで伝送できる勘定である。

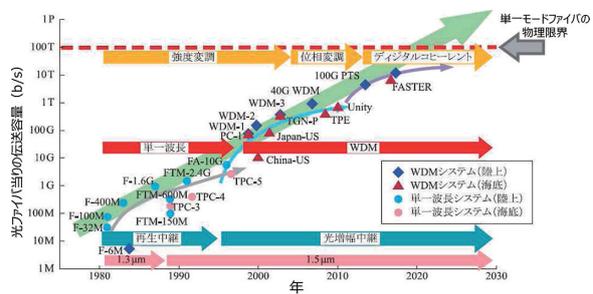


図7.9 光中継伝送システムの発展¹⁸⁾

(Copyright©2017 IEICE、許諾番号：17KB0109)

ちなみに、現在日本の国際通信の約99%は海底光ファイバケーブルを経由しているが、それらのファイバのコアの面積は、全ケーブル分を足しても1平方ミリメートルに遥かに及ばない。インターネットで世界中と繋がっている日常の感覚では、意識することはないが、この面積が世界に向けた日本の「ガラス窓」ということになる¹⁹⁾。

その一方で、かつては無限に近いと思われていた石英系単一モード光ファイバの伝送容量も限界（1心で100Tb/s程度）が見えてきている。それ以上に伝送容量を増やそうとすると、高密度WDMを含めて大きくなり過ぎた入射光のエネルギー（>1ワット）によりファイバコア部が破壊される「ファイバヒューズ現象」が発生し、コア部が破壊されてしまうからである^{20) 21)}。この物理限界を突破するために、1本のファイバ中に複数のコアを持つマルチコアファイバ（MCF：Multi-Core Fiber）の研究が2010年代に入って盛んになっている。現行のMCFの製法例²²⁾を図7.10に示したが、これまでに、MCF1本で毎秒1ペタビット（Pb/s）を超える空間分割多重（SDM：Space-Division Multiplexing）伝送実験例がNTTやKDDI等から報告されている^{18) 23)}。長尺での本格商用化に至るには、MCF素線の製造コスト

問題を含めて、解決すべき課題が山積しているが、新たなマルチコア光ファイバ通信方式が、現在の原理確認や極限追求の段階を経て、10~20年後にどこまで普及するか、楽しみでもある

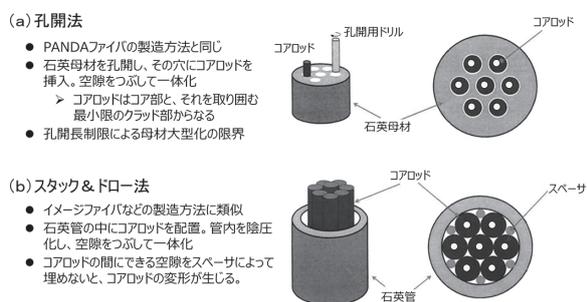


図 7.10 マルチコアファイバ (MCF) の製法
(参考文献²²⁾をもとに筆者作成)

7.2 PON 技術による FTTH 実現

前章 (6.7 節) で報告したように、NTT は、加入者系 (アクセス網) の光化を目指して、1980 年代には多モード光ファイバによる現場実験、さらに 1990 年代には単一モード光ファイバによる現場実験を行ってきたが、2000 年代に入ると、図 7.11 に示すように FTTH 契約数が本格的に立ち上がった²⁴⁾。その背景にはインターネットの普及に伴うブロードバンド接続需要の高まりがあったが、技術的な要因として PON (Passive Optical Network) 技術の開発と標準化を挙げることができる²⁵⁾。

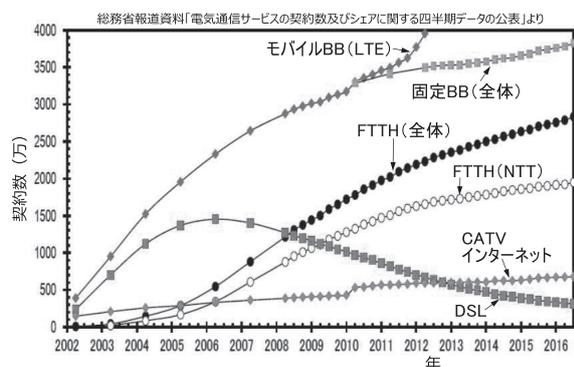


図 7.11 日本のブロードバンド (BB) 契約数の推移
(参考文献²⁴⁾をもとに筆者作成)

PON 技術は、1990 年頃に NTT 横須賀研究所の三木哲也らによって、別名の PDS (Passive Double Star) 方式として提案された。英国の BTRL (British Telecom Research Laboratories) によっても独立に研究されていて PON と名付けられていて、用語が PON に統一された経緯がある²⁶⁾。NTT は BT (British Telecom) を含む通信会社間の会合 (Telco Meeting) のキーメンバとして PON (PDS) 技術の開

発と国際標準化を先導し、2001 年 8 月から PON による FTTH ブロードバンドサービスの提供を開始した。

PON システムは、図 7.12 に示すように、

- ・局舎に設置される OLT (Optical Line Terminal)、
- ・ユーザ宅に設置される ONU (Optical Network Unit)、
- ・局舎からユーザ宅まで布設された単一モード光ファイバ、
- ・光ファイバを分岐する光スプリッタ、

から構成され、一つの OLT に複数の ONU が接続される。光スプリッタが動作に電力を必要としない受動 (Passive) デバイスであることから、PON と PDS のいずれも “Passive” を強調しての命名であった。

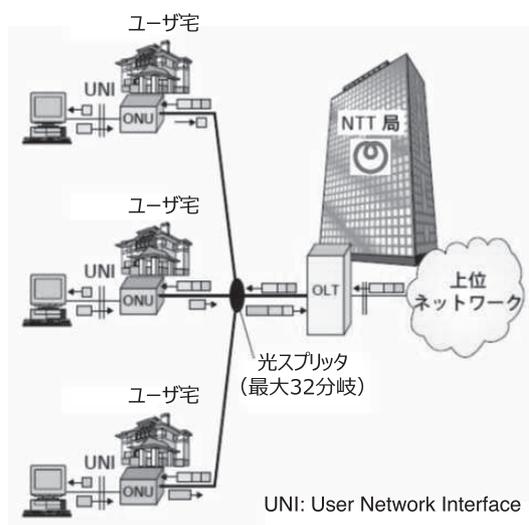


図 7.12 PON システムの構成
(参考文献²⁵⁾をもとに筆者作成)

OLT と複数の ONU が通信するためには多重化技術が必要であり、TDM 技術や WDM 技術が用いられている。現在広く用いられている PON システムでは、複数 ONU 向け信号の多重には TDM 技術が使われており、TDM-PON と呼ばれる。OLT から ONU への下り信号と ONU から OLT への上り信号の多重に WDM 技術 (上り 1.3 μ m 帯 / 下り 1.5 μ m 帯) が使われている。上り信号の多重では、複数の ONU からの信号が伝送路上で衝突することのないよう制御する TDMA (Time-Division Multiplex Access) 技術が併用されている²⁷⁾。図 7.13 は NTT 東西の B フレッツ網で採用している PON システム構成であり、NTT 所内で 4 分岐、さらに所外で 8 分岐、合わせて 4 \times 8 = 32 分岐であり、1 台の OLT が 32 台の ONU とやりとり可能である²⁸⁾。

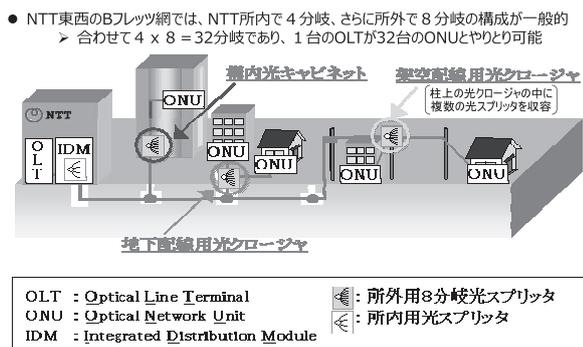


図 7.13 NTT 東西の PON システム構成
 (参考文献²⁸⁾をもとに筆者作成)

図 7.11 に示したように、FTTH サービス開始当初はメタル電話回線によるDSL (Digital Subscriber Line) 方式やCATVによる高速モデムが先行していたが、2008年にはPONを用いたFTTHの契約数がDSL契約数を越え、2017年度中には3,000万に達する見込みである。

PONシステムは、ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) とIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) の2系統で標準化されており、現在、日本ではIEEE系の1Gb/s級PON (GE-PON) が主流であるが、10Gb/s級PONが定番待ちである。ITU-Tでは、さらに40Gb/s級の標準化が完了し、IEEEでは100Gb/s級の標準化が開始されている²⁷⁾。

参考までに図 7.14 に ONU 用光送受信モジュール (BOSA : Bi-directional Optical SubAssembly) の断面構造と外観例を示したが、CD (コンパクトディスク) の光ピックアップモジュール用として広く普及している直径5.6mmのTO-CANを活用することによって経済化を達成している²⁹⁾。実は、1990年代後半から2000年代初めにかけて、平面基板上に小型集積化された光送受信モジュールを開発する試みが、NTT研究所を含めての日本勢や北米ベンチャー企業などで行われたが、小型化に伴うLD/PD間の光電気クロストーク問題もあって、結局はCDプレーヤーの量産で低コスト化が進んだTO-CANを図7.14のように活用する手法が主流になった経緯がある。

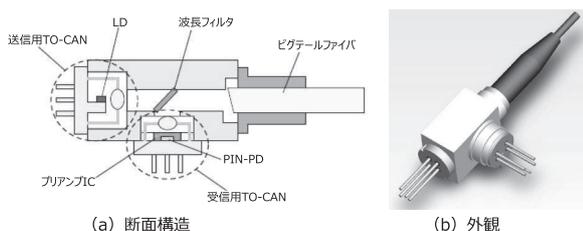


図 7.14 ONU 用光送受信モジュール構造例
 (参考文献²⁹⁾をもとに筆者作成)

FTTH が普及する中、一般家庭への光ファイバの引き込みに伴って、宅内配線に柔軟に対応する光ファイバが、2000年代に開発された。標準的な単一モード光ファイバ (SMF) では、半径20mm以下の強い曲げを与えると光損失が増えてしまうが、図7.15に例示したように、(a) コア部の周囲に低屈折率なトレンチを配したトレンチ型光ファイバ³⁰⁾や、(b) のように空孔を配置した空孔アシスト型光ファイバ (HAF : Hole-Assisted Fiber)³¹⁾では、直角に近い半径5mmの曲げも許容する。こうした光ファイバは「低曲げ損失光ファイバ (BIF : Bending-loss Insensitive Fiber)」と総称され、両端に光コネクタを付けた光コードとして販売されていて、通常の電気配線と同様の感覚で光配線が行えるようになっている。

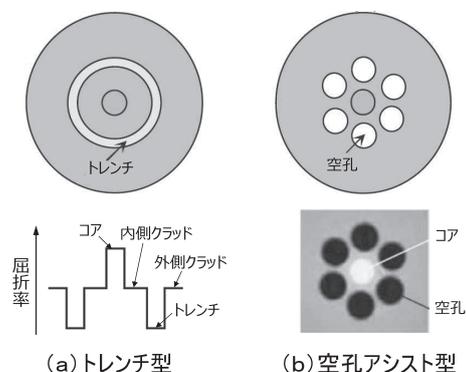


図 7.15 低曲げ損失光ファイバの構造例
 (参考文献³⁰⁾³¹⁾をもとに筆者作成)

ここで改めて図 7.11 を眺めると、スマートフォンを中心とするモバイルブロードバンド (BB) サービスであるLTE (3.9-4世代) 契約数が2012年頃から急増していることが分かる。図 7.11 の縦軸枠から出てしまうが、2017年3月時点での日本のLTE契約数は1億件に達している。LTEを含めての現在の携帯電話通信網は、アンテナ基地局までは既に光ファイバ回線が担っているが、さらに高速な第5世代 (5G) モバイル通信網の構築やIoT (Internet of Things) 時代の到来に向けて、光・無線融合技術や次世代PON技術の適用を見据えたモバイル対応光アクセスシステム議論が進行中である²⁷⁾。

7.3 光ファイバ通信網を支えている石英系プレーナ光波回路技術

石英系光ファイバの潜在能力を有効に引き出すためには、受発光素子に加えて、光信号の分岐、高密度WDM用の合分波器、光路を切り替える光スイッチ等の機能をもつ多彩な光回路部品が必要となったが、

光ファイバに続く研究ターゲットとして、1980年代前半に筆者らが狙いを定めたのが、VAD法で開発したガラス微粒子堆積技術とLSI微細加工技術とを組み合わせ、図7.16のようにシリコン基板上に石英系光導波路を形成して、石英系光ファイバとの整合性に優れた光集積回路を構成する試みであった^{32) 33)}。1978年に茨城研究所から武蔵野研究所に戻り、石英系光導波路研究をいち早くスタートしていた伊澤達夫らの先駆的な成果は、筆者らの茨城チームに継承されていった^{34) 35)}。筆者にとっての石英系光導波路は、光ファイバの場合よりも長期間になる10年以上にわたって関与した技術分野であり、語りだすと切りがないが、以下、ここでは概略のみを紹介したい。

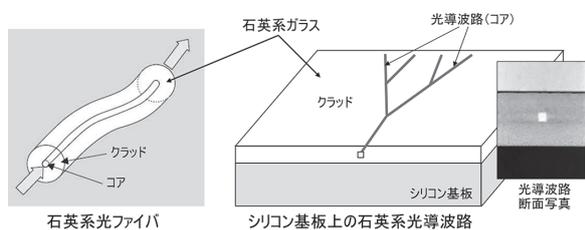


図 7.16 シリコン基板上の石英系光導波路

茨城研究所での石英系光導波路研究を探索研究段階から本格研究へと格上げさせたのが、1983年に光部品研究室長に就任した宮下忠であった。シリコン基板上の石英系光導波路技術の将来性を確信した宮下は、研究所の上層部と交渉して大型の研究費を引き出し、1987年にはNTT、三菱商事、米国 Battelle 研究所の合弁ベンチャー会社 PIRI (Photonic Integration Research, Inc.) を米国 Ohio 州 Columbus 市に設立し、自ら社長として渡米した³⁶⁾。

上記の大型研究費を活用して筆者らが開発した石英系光導波路の作製工程を図7.17に示した。屈折率制御用ドーパントとして、当初はTiO₂を添加していたが、着色現象(coloration)が生じ易いのでGeO₂に変更した経緯がある。

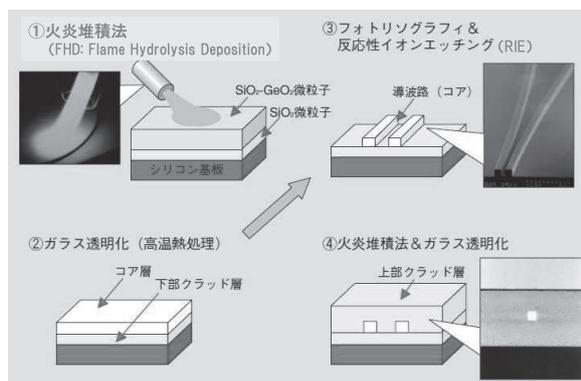


図 7.17 石英系光導波路の作製工程

作製したSiO₂-GeO₂系光導波路の特性例を表7.2に示した。高温での線引き工程を伴わない石英系光導波路の伝搬損失は、石英系光ファイバのようには小さくならないが、それでも0.01dB/cm (1dB/m) オーダの損失値は、平面基板上の光導波路としては、最も低損失である。表7.2から分かるように、コア・クラッド間の比屈折率差Δが高いほど、伝搬損失は増加傾向にあるが、光波の閉じ込め効果が強く、小さな曲率半径でも放射損失なく伝搬可能で、複雑な光回路をコンパクトにレイアウトするのに適している。高Δ化すると、標準的な単一モード光ファイバとの接続損失が大きくなるので、必要に応じてスポットサイズ変換器を入出力端に形成するなどの工夫が行われている。

表 7.2 SiO₂-GeO₂系光導波路の特性例

コア・クラッド間の比屈折率差Δ	コア寸法	許容曲げ半径	伝搬損失	ファイバ(SMF)との接続損失	適用例	
Low Δ	0.25%	8 μm	25 mm	< 0.01 dB/cm	< 0.1dB	スプリッタ カプラ
Medium Δ	0.45%	7 μm	12 mm	0.02 dB/cm	0.1dB	大規模スプリッタ
High Δ	0.75%	6 μm	5 mm	0.03 dB/cm	0.5dB	AWG スイッチ
Super-high Δ	1.5%	4.5 μm	2 mm	0.05 dB/cm	1.8dB	大規模AWG 複合回路
Ultra-high Δ	2.5%	3.5 μm	1 mm	0.08 dB/cm	3dB	複合高機能回路

石英系光導波路技術は、「平面基板上の低損失石英系光導波路を伝搬する光信号の位相や干渉を制御して有用な光回路機能を引き出すプレーナ光波回路(PLC: Planar Lightwave Circuit)技術」として、図7.18のように体系化が進み、1990年代初めには高密度WDM通信用のアレイ導波路格子(AWG: Arrayed Waveguide Grating)型合分波器の実現に成功した^{37) 38)}(註5)。

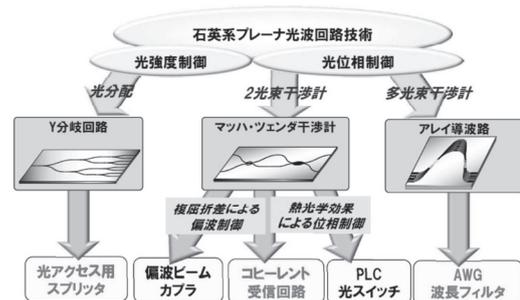


図 7.18 石英系プレーナ光波回路の機能例

AWG合分波器は、図7.19に示したように、入出力導波路、2つのスラブ導波路、ΔLずつ長さが異なる数百本のアレイ導波路から構成されている。実際のAWGモジュールでは、光入出力用の光ファイバアレ

(註5) プレーナ光波回路は、全て漢字表記にして「平面光波回路」と呼ばれることも多い。

イが紫外線硬化接着剤で固定されている。入力導波路から入射された光は、まず入力スラブ導波路で多数のアレイ導波路に分岐される。各々のアレイ導波路を伝搬した光は出力スラブ導波路で多光束干渉を起こし、出力スラブ導波路の出力端に焦点を結ぶが、アレイ導波路の長さが ΔL ずつ異なるため、出力スラブ導波路の入射端における波面は入射光の波長に依存する。すなわち、出力スラブ導波路の出力端における焦点位置も入射光の波長に依存することになる。その結果、異なる波長の光は異なる出力導波路に結合して別々の出力ポートから出力されることになり、AWGが光波長合分波器として機能する。AWGで合分波可能な光周波数間隔は、ITU標準のグリッド間隔に合わせて200GHz、100GHz、50GHz等であり、40波長チャンネル以上の信号光を一括で合分波可能である。一例として、L帯用の100GHz(0.8nm)間隔40チャンネルAWGの透過スペクトル特性例を図7.20に示した。

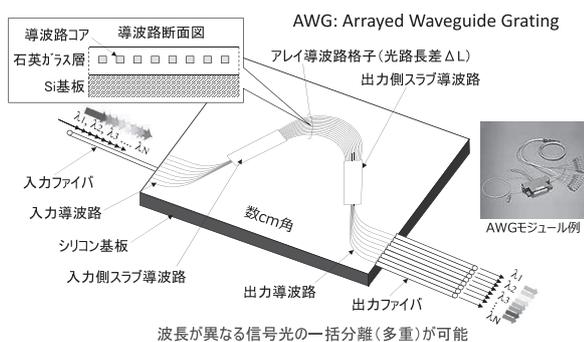


図 7.19 アレイ導波路格子 (AWG) 型合分波器

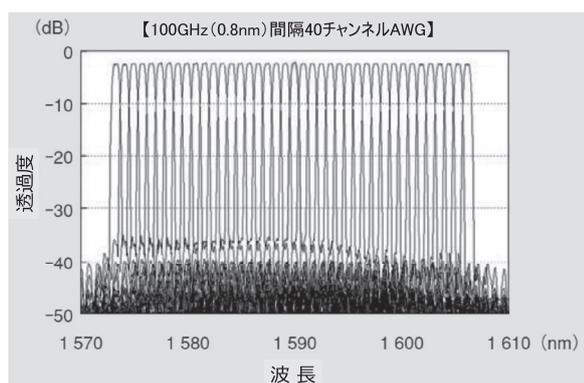


図 7.20 AWG 合分波器の透過スペクトル例

1990年代後半の北米の高密度WDM通信網建設ブーム(図7.6参照)に乗ってAWG型合分波器を製造販売したPIRI社(当時の資本金は約10億円で、NTTと三菱商事とBattelleの出資比率は49:41:10)の企業価値は急上昇し、北米ネットバブル崩壊(2001年)直前のPIRI社売却(2000年)によってNTT(出資比率49%)が獲得した特別利益は1,487億円(200

倍以上のキャピタルゲインに相当)に達した。

AWG以外にも色々なヒット商品が生まれたが、一番身近なところにあるPLC製品は、Y分岐素子を多段に集積した図7.21のPLCスプリッタである³⁹⁾。日本では2002年頃からのFTTH本格化に伴い、PONシステム用の光スプリッタとしての大量需要が発生し、実際、FTTHユーザ宅近くの電信柱上の光クロージャ(接続箱)の中には複数個の1×8型PLCスプリッタが収容されている。

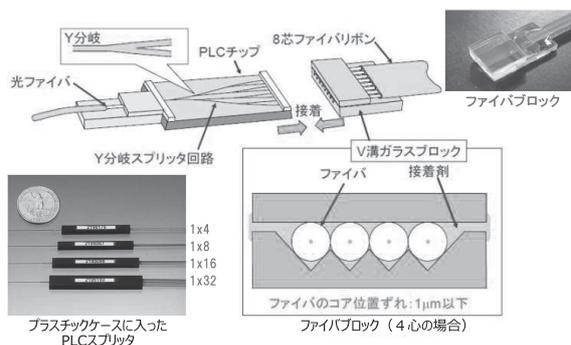


図 7.21 PLC スプリッタの構造

安定である反面、動的な機能性には乏しい石英系光導波路であるが、石英ガラスの屈折率のわずかな温度依存性、すなわち熱光学効果(Thermo-Optic effect: $dn/dT \sim 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)を利用して光スイッチングやチューニング機能を実現可能である⁴⁰⁾。PLC技術による熱光学スイッチは、図7.22に示すように、導波路アーム上に熱光学位相シフタとしての薄膜ヒータを備えた対称型マッハツェンダ干渉計(MZI: Mach-Zehnder Interferometer)構成を基本としている。薄膜ヒータへの供給電力が零の場合、光信号はMZIをクロス状態で通過するが、薄膜ヒータに π (半波長分)の位相シフトに相当する電力を供給すると、光路はパー状態に切り替わる。クロスパーの中間状態で保持すると、可変光減衰器(VOA: Variable Optical Attenuator)と

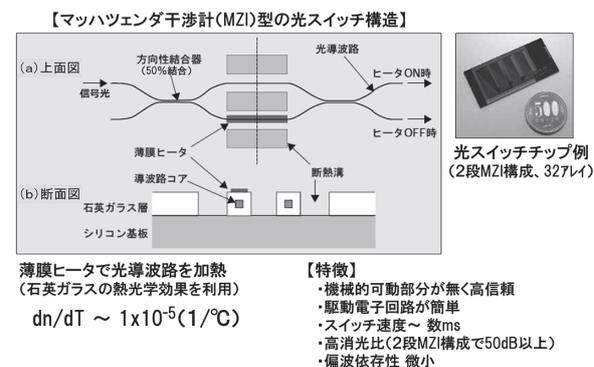


図 7.22 PLC 光スイッチの基本構造

(参考文献⁴⁰⁾をもとに筆者作成)

しても有用である。石英系光導波路とヒートシンク作用のある Si 基板との組み合わせは、熱光学位相シフタの安定動作に好適である。PLC 光スイッチの応答時間は数 ms で、スイッチングに必要な電力は 0.5W 程度であるが、薄膜ヒータ近傍に断熱溝を形成し水平方向への熱の流出を防止することで、消費電力を 0.1~0.2W レベルに低減している。必要に応じて MZI を 2 段構成とすると 50dB 以上の高い消光比を実現可能である。PLC 光スイッチは、例えば図 7.7 に示した ROADM システムの構成要素として商用化された^{9) 10) 40)}。

上述の応用例以外にも、PLC 技術は、DPSK や DQPSK 変調方式での光受信器構成に必要な光遅延干渉計 (表 7.1 参照) やデジタルコヒーレント光受信器の構成に必要な光 90 度ハイブリッド回路 (表 7.1 と図 7.8 参照) などの作製にも活用されていて、今日の商用光ファイバ通信網を要所要所で支えている^{41) 42)}。

本章を閉じるにあたり、PLC 技術開発に際しての方式研究者と部品研究者との協力関係について記したい。その代表例が 1980 年代後半から 1990 年代初めにかけて NTT 横須賀研究所で推進された光周波数間隔 10GHz (波長間隔~0.08nm) の 100 波多重伝送実験⁴³⁾であった。今思えば、高密度 WDM 通信技術 [当時は光周波数多重 (FDM: Frequency-Division Multiplexing) と呼んでいた] を先取りしすぎた感もあるが、こうしたチャレンジングな方式実験に必要な集積型光周波数選択フィルタ等の試作と提供努力を通じて、NTT 茨城研究所での PLC 光スイッチや AWG の創製が進んだことは事実である。方式研究が部品開発を先導し、逆に部品研究が方式開発を先導した好例と言えよう。

参考・引用文献

- 1) 須藤昭一, 横浜至, 山田誠:「光ファイバと光ファイバ増幅器」, 共立出版, 2006 年発行.
- 2) R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey and D.N. Payne: “Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m,” *Electron. Lett.*, Vol.23, No.19, pp.1026-1028, 1987.
- 3) M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki: “Efficient Er³⁺ - doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μ m InGaAsP laser diode,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.54, No.4, p.295, 1989.
- 4) K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, K. Nakagawa, and M. Horiguchi: “A 212 km Non-Repeated Transmission Experiment at 1.8 Gb/s

using LD Pumped Er³⁺-Doped Fiber Amplifiers in an IM/Direct-Detection Repeater System,” *Optical Fiber Communication Conference Technical Digest*, paper PD15, 1989.

- 5) 萩本和男, 青山耕一:「光ファイバ増幅器を用いた中継光伝送システム」, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J75-B-I, No.5, pp.246-262, 1992.
- 6) 島田禎晉:「シングルモードファイバを使った日本縦貫光伝送システムの完成 (後編)」, *映像情報メディア学会誌*, Vol. 59, No.12, pp.1795-1799, 2005.
- 7) 佐藤健一, 鳥羽弘:「高密度波長多重通信に向けて」, *光学*, Vol.29, No.3, pp.120-130, 2000.
- 8) 鈴木正敏:「光通信システムの革新的進化と将来」, *電子情報通信学会 OCS30 周年記念シンポジウム講演*, 2017.7.27.
- 9) 織田一弘:「波長分割多重 (WDM) 技術」, *OPTRONICS* (2012) No.1, pp.138-145.
- 10) 高橋哲夫:「光スイッチ適用による光ネットワークの革新」, *光学*, Vol.42, No.5, pp.220-228, 2013.
- 11) 日比野善典, 坪川信, 神野正彦, 高田篤, 宮本裕:「最新フォトリックネットワーク技術の概要」, *NTT 技術ジャーナル*, 2007.10, pp.8-13.
- 12) 村田浩一, 才田隆志:「ネットワークの進化を支える光部品」, *NTT 技術ジャーナル*, 2011.3, pp.48-52.
- 13) 菊池和朗:「デジタル信号処理を駆使したコヒーレント光通信技術」, *レーザー研究* 2009 年 3 月, pp.164-170.
- 14) 鈴木扇太, 他:「光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発」, *電子情報通信学会誌*, Vol.95, No.12, pp.1100-1116, 2012.
- 15) 金子明正:「次世代デジタルコヒーレント伝送用光デバイスの技術動向」, *電子情報通信学会誌*, Vol.99, No.11, pp.1072-1076, 2016.
- 16) 堀口真, 島崎大作, 笹倉芳明, 井波正朗, 山本秀人:「100G パケットトランスポートシステム (100G-PTS) の実用化」, *NTT 技術ジャーナル*, 2014.10, pp.54-57.
- 17) KDDI 株式会社ニュースリリース『日米間を結ぶ光海底ケーブル「FASTER」を運用開始』, 2016 年 6 月 29 日.
- 18) 宮本裕, 森田逸郎:「大容量光中継伝送技術」, *電子情報通信学会誌*, Vol.100, No.8, pp.783-788,

- 2017.
- 19) 西成人, 那賀 明:「海底用光ケーブル技術」, OPTRONICS (2012) No.10, p.118-131.
 - 20) 首藤義人, 柳秀一, 浅川修一郎, 長瀬亮:「単一モード光ファイバにおけるファイバヒューズ発生機構の検討」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-C, No.3, pp.252-261, 2003.
 - 21) 轟真市:「ファイバヒューズ ... その危うさと怪しさ」, NEW GLASS, Vol.21, No.2, pp.45-52, 2006.
 - 22) 松尾昌一郎:「光通信の超大容量化を目指す空間多重伝送用マルチコアファイバー」, PST-net 招待講演会, 2012年2月24日.
 - 23) 宮本裕, 川村龍太郎:「大容量光ネットワークの進化を支える空間多重光通信技術」, NTT技術ジャーナル, 2017.3, pp.8-12.
 - 24) 前田洋一:「光アクセスPON標準化の過去と将来」, 光通信技術展, 講演FOE-8, 東京ビッグサイト, 2017.4.6.
 - 25) 「技術基礎講座【GE-PON技術】第1回PONとは」, NTT技術ジャーナル, 2005.8, pp.71-74.
 - 26) 三木哲也:「光アクセスのこれまでとこれから」, 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.7, pp.638-643, 2016.
 - 27) 寺田純:「アクセス系伝送技術」, 電子情報通信学会誌, Vol.100, No.8, pp.777-782, 2017.
 - 28) NTTアクセスサービスシステム研究所: ANSL R&D Times, 第33号(2003_06), 所外用光スプリッタの設置箇所, <http://www.ansl.ntt.co.jp/j/times/033/01/03.html>
 - 29) 赤津祐史:「光ネットワーク用光モジュール技術の研究開発動向」, NTT技術ジャーナル, 2006.7, pp.42-45.
 - 30) 楠修一, 八若正義, 橋本守, 木下貴陽, 田中正俊, 樋口降幸, 金正高, 大泉晴郎:「5mmR耐曲げ型光ファイバの開発」, 三菱電線工業時報, 第105号, pp.33-37, 2008.
 - 31) 清水正利:「FTTHの更なる発展に向けた光アクセスネットワーク技術(光媒体技術)の展開」, NTT技術ジャーナル(2008.10), pp.42-47.
 - 32) 河内正夫:「プレーナ光波回路デバイス」, 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J81-C1, No.6, pp.311-321, 1998.
 - 33) 河内正夫:「プレーナ光波回路技術の歩みと見果てぬ光集積回路の夢」, 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J92-C, No.8, pp.360-370, 2009.
 - 34) T. Izawa, H. Mori, Y. Murakami, and N. Shimizu: "Deposited silica waveguide for integrated optical circuits," Appl. Phys. Lett., Vol. 38, No. 7, pp. 483-485, 1981.
 - 35) M. Kawachi: "Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components," Optical and Quantum Electronics, Vol.22, No.5, pp.391-416, 1990.
 - 36) 宮下忠:「ある米国Start-Upのてんまつ記」, 電子情報通信学会誌, Vol.85, No.3, pp.197-199, 2002.
 - 37) H. Takahashi, S. Suzuki, and K. Kato: "Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution," Electronics Letters, Vol.26, No.2, pp.87-88, 1990.
 - 38) 鈴木扇太, 杉田彰夫:「石英系プレーナ光波回路技術の研究開発動向」, NTT技術ジャーナル, 2005.8, pp.8-11.
 - 39) 井上靖之:「石英系プレーナ光波回路技術」, NTT技術ジャーナル, 2008.3, pp.58-62.
 - 40) 高橋浩, 渡辺俊夫, 郷隆司, 相馬俊一, 高橋哲夫:「光ネットワークの高機能化を実現するPLC光スイッチ」, NTT技術ジャーナル, 2005.5, pp.12-15.
 - 41) 高橋浩:「石英ガラス平面光波回路:研究開発の歴史と最新の研究状況」, OPTRONICS (2012), No.12, pp.89-95.
 - 42) 高橋浩:「導波路型パッシブ光部品の基礎と応用」, 2016年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 講演BT-2-6.
 - 43) H. Toba, K. Nakanishi, N. Shibata, K. Nosu, N. Takato, and M. Fukuda, "A 100-channel optical FDM transmission/distribution at 622 Mb/s over 50 km," IEEE. J. Lightwave Tech., Vol.8, No.9, pp.1396-1401, 1990.

8 | おわりに

本報告では、NTT 茨城研究所での筆者の身近な経験（MCVD 法で2年、VAD 法で3年余り）を含めて、石英系光ファイバの初期の開発努力と公衆通信網への導入経緯を紹介した。多くの研究者や技術者が参画したビッグプロジェクトであったので、さまざまな視点からの“開発物語”が可能であろうが、MCVD 法を改良して光ファイバの低損失化を進めるとともに、量産に適した国産製法（VAD 法）を開発する NTT の方針が大成であったことに異論はないであろう。

第6章（6.1節）で紹介したように、NTT と電線3社との共同研究が正式スタートする1か月前（1975年4月）に NTT 武蔵野研究所講堂で開催された「光ファイバ伝送」研究討論会では、当時の野田健一基礎研究部長が、『これまでの伝送の歴史において、新しい伝送媒体が何回か新しい時代の幕を開いてきた。光ファイバも新しい時代の幕を開くものである。しかも4半世紀に1度の大傑作といえる。この大傑作を使って意義ある方式を生み出すために努力を傾注したい。』との趣旨の基調講演を行った。実際には、野田部長の予想を大きく超えて、百年に一度あるかないかの大傑作になったが、それを可能にした一番の立役者は1980年代後半に登場した光ファイバ増幅器（EDFA）であった。EDFA は、1990年代後半には高密度 WDM 技術と組み合わせられ、その威力の大きさから北米ネットバブル崩壊（2001年）を招いたが、通信利用者にとってはインターネット常時接続を可能にする長距離通信コストの劇的低下をもたらすことになった。

インターネットの申し子とも言える Amazon の創業は1994年、楽天は1997年、Google は1998年、Facebook は2004年であり、過剰投資状態にあった北米を含めての光ファイバ世界需要が回復したのは、図8.1に示すように2005年前後であった¹⁾。現在、世界の光ファイバ生産量（2014年度で約3億 km、地球と太陽間の1往復に相当）のうち約60%はVAD 法を基本として製造されている。世界最高レベルまで光ファイバ導入が進んでいる日本国内の需要は縮小傾向にあるが、日本の電線メーカーは、中国の現地メーカーと提携を進めるなどして、海外展開を推し進め、今や世界の光ファイバ消費の半分近くを占める中国市場においても、VAD 光ファイバが主役を務めている。このように、VAD 法が光ファイバ量産技術として広く用いられ、今日の世界規模での急速な光ファイバ通信

網構築に貢献したとして、2015年5月には世界的に権威ある「IEEE マイルストーン」に認定され、その証として図8.2の銘板がNTT、古河電工、住友電工、フジクラの4社に贈呈された^{2) 3)}。

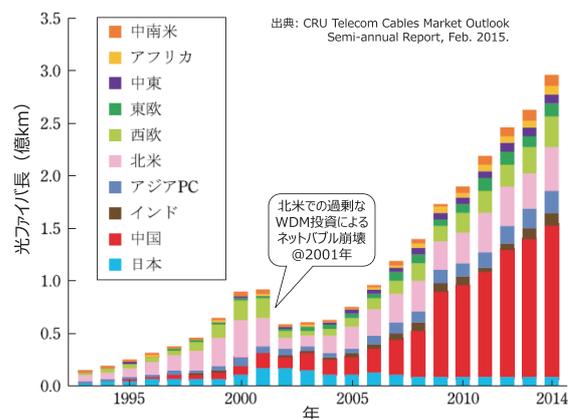


図8.1 光ファイバ世界需要の年度推移

(参考文献¹⁾をもとに筆者加筆)

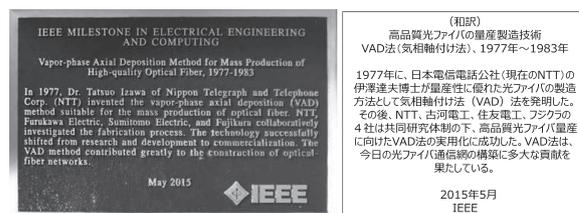


図8.2 VAD 法の IEEE マイルストーン銘板

(参考文献^{2) 3)}をもとに筆者加筆)

VAD 法の次の研究テーマ候補として1980年代初めに筆者らが狙いを定めた石英系プレーナ光波回路（PLC）技術は、光ファイバとの接続性に優れた実用的なパッシブ光集積回路の提供手段として発展し、AWGやPLCスプリッタの呼称の普及とともに通信用光部品産業の重要な一角を占めている。そして本報告ではカバーできなかったが、石英系 PLC の開発を通じて蓄積された光波回路現象へのより深い洞察は、InP 光集積回路やシリコンフォトリソグラフィの技術開発にも活かされている⁴⁾。

初期の光ファイバや石英系 PLC 開発の舞台となった東海村の NTT 茨城研究所は2002年に閉所になったが、関連の研究者の多くは NTT 厚木研究所に移って光半導体やシリコンフォトリソグラフィ分野の研究者との連携を強化している。今後、ガラス、シリコン、光半導体などの材料枠、光や電子などの専門枠、そして方式や部品などのレイヤ枠を越えた人の交流と技術の組

み合わせにより、さらなるイノベーションが日本を核として生まれることを期待したい。

ここで、1970年代からの光ファイバ通信技術の広がりに関連して表8.1を追加しておきたい。この表は、NTT横須賀研究所の初代の光伝送研究室長や伝送システム研究所長として、光ファイバ通信システムの研究実用化をリードされた島田禎晉氏の監修により、月刊オプトロニクス誌に「光通信技術の基礎－原点を見直し、将来を考える－」として連載（2011.1～2012.12）された計25件の記事リストである。光ファイバについては第1回記事、そして石英系PLCについても第12回記事になっているが、監修者の島田氏は、連載から漏れてしまった項目として、第24回の最終記事「連載の終りにあたって」中で、光加入者系システム、光LAN、光インターコネクション、光アイソレータ・サーキュレータ、光多層膜フィルタ、光変調器、光スイッチ、光クロスコネクタなどを挙げている。今こうして表8.1全体を見渡すと、光ファイバ通信技術の基礎が広範囲に及んでいること、そして事前に覚悟していたことであるが、今回の筆者の調査報告範囲が「氷山の一角」であることを改めて痛感させられる。

表8.1 島田禎晉監修「光通信技術の基礎－原点を見直し、将来を考える－」

【月刊オプトロニクス誌連載（2011.1～2012.12）】
第1回 「連載の開始にあたって」、島田禎晉、2011.1
第1回 「光ファイバ：光ファイバの研究開発の歴史と今後の展開」、大橋正治、2011.1
第2回 「半導体レーザー -- 研究開発経緯と今後の展開」、大橋弘美、2011.2
第3回 「フォトダイオード -- 研究開発の歴史と今後の展開」、児玉聡・石橋忠夫、2011.3
第4回 「光コネクタ：光通信技術の発展を支えた研究開発の歴史」、長瀬亮、2011.4
第5回 「融着技術：技術開発の歴史と今後の動向」、川西紀行、2011.5
第6回 「光ケーブル」、工藤行敏、2011.6
第7回 「LDモジュール：大容量光伝送方式の進展を支えた研究開発の歴史」、猿渡正俊、2011.7
第8回 「光変調技術」、中川清司、2011.8
第9回 「光増幅器：研究開発の歴史と今後の展開」、増田浩次、2011.9
第10回 「光ファイバ通信システムの安全基準の動向と今後の展開」、高良秀彦・猿渡正俊、2011.10
第11回 「高速電子回路」、佐野 栄一・村田 浩一、2011.11
第12回 「石英ガラス平面光波回路：研究開発の歴史と最新の研究状況」、高橋浩、2011.12
第13回 「波長分割多重(WDM)技術」、織田一弘、2012.1
第14回 「光測定技術：研究開発の歴史と今後の展開」、青山耕一、2012.2
第15回 「非線形補償・等化」、高岡敏夫・山崎尚史、2012.3
第16回 「ファイバフォーブス：光通信にわたる眠れる悪魔」、轟真市、2012.4
第17回 「光周波数コム技術」、渡辺茂樹、2012.5
第18回 「微細構造ファイバ」、後藤龍一郎・松尾昌一郎、2012.6
第19回 「コヒーレント光通信技術：研究開発を振り返って」、若下克、2012.7
第20回 「光ネットワーク(OTN)とイーサネット関連技術」、富澤哲人・石田修、2012.8
第21回 「光通信用誤り訂正技術」、水落隆司、2012.9
第22回 「海底用光ケーブル技術」、西成人・那賀明、2012.10
第23回 「陸上光ケーブル敷設技術：信頼性の高い光ファイバ網の構築に向けて」、宮島義昭・半田隆夫、2012.11
第24回 「連載の終りにあたって」、島田禎晉、2012.12

※監修者の島田氏は、連載から漏れてしまった項目として、光加入者系システム、光LAN、光インターコネクション、光アイソレータ・サーキュレータ、光多層膜フィルタ、光変調器、光スイッチ、光クロスコネクタなどを挙げている。

表8.1の連載期間以降に顕著になった傾向としては、データセンタ向けの光ファイバ通信市場の急速な立ち上がりを挙げることができる。Amazon、Google、Facebookなどのインターネット由来の事業者は、自ら保有するデータセンタ内での短距離の光ファイバ配線システムのみならず、複数のデータセンタ間を接続して連携させる中長距離（メトロ系や幹線系に相当）の光ファイバ通信システムも自前で構築し、光送受信モジュールのようなハードウェアの業界標準化もリードしている。2001年に北米ネットババ

ル崩壊を招いた光ファイバ通信技術の発展は、産業構造の変革とインターネット社会の光と影を伴いつつ、今も進行中なのである。

残念ながら、島田氏は2017年8月に急逝（享年79歳）されてしまい、筆者の原稿についての批評を頂く機会も失われてしまったが、生前の島田氏が望まれたように「光通信技術の原点を見直し、将来を考える」ためにも、筆者とは異なる視点や軸足からの系統化調査が、今後さらに実施されることを願いつつ、本報告を終える。

参考・引用文献

- 1) 宮島義昭：「光ファイバ・ケーブル技術」, 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.7, pp.659-664, 2016.
- 2) 鈴木扇太, 大越春喜, 金森弘雄, 西出研二：「IEEEマイルストーン受賞 (VAD法)」, 電気通信, Vol.78, No.824, pp.7-12, 2015.9.
- 3) 加賀田俊, 中芝幸司：『高品質光ファイバの量産製造技術「VAD法」の功績による「IEEEマイルストーン」認定記念式典開催報告』, NTT技術ジャーナル (2015.9), pp.94-99.
- 4) 石川浩：「光エレクトロニクス, 光通信を支える技術」, 電子情報通信学会誌, Vol.100, No.9, pp.907-912, 2017.

謝辞

今回の調査に際して、多数の文献を参照させていただいた。インターネット上で公開されている下記のデータベースにアクセスして入手した文献や資料も多く、著者の皆様とデータベースを運用管理されている関係者各位に感謝したい。

- ・J-STAGE (科学技術振興機構の学術論文プラットフォーム)
- ・I-Discover (電子情報通信学会論文の検索サイト)
- ・NDL-Search (国立国会図書館サーチ)
- ・J-PlatPat (工業所有権情報・研修館の日本特許情報プラットフォーム)
- ・発見と発明のデジタル博物館：卓越研究データベース (日本学術振興会)
- ・産業技術史資料データベース (国立科学博物館・産業技術史資料情報センター)
- ・Google Scholar (Google社提供の学術文献検索サイト)
- ・IEEE Xplore (IEEEの論文検索サイト)
- ・Free Patent Online (米国と欧州特許の検索サイト)

- ・ The Bell System Technical Journal (1922-1983) Search (かつての Bell 研ジャーナル論文を公開)

さらに、学術文献には載り難い逸話や試行錯誤の経緯については、下記の三つ単行本から特に多くを学ばせていただいた。

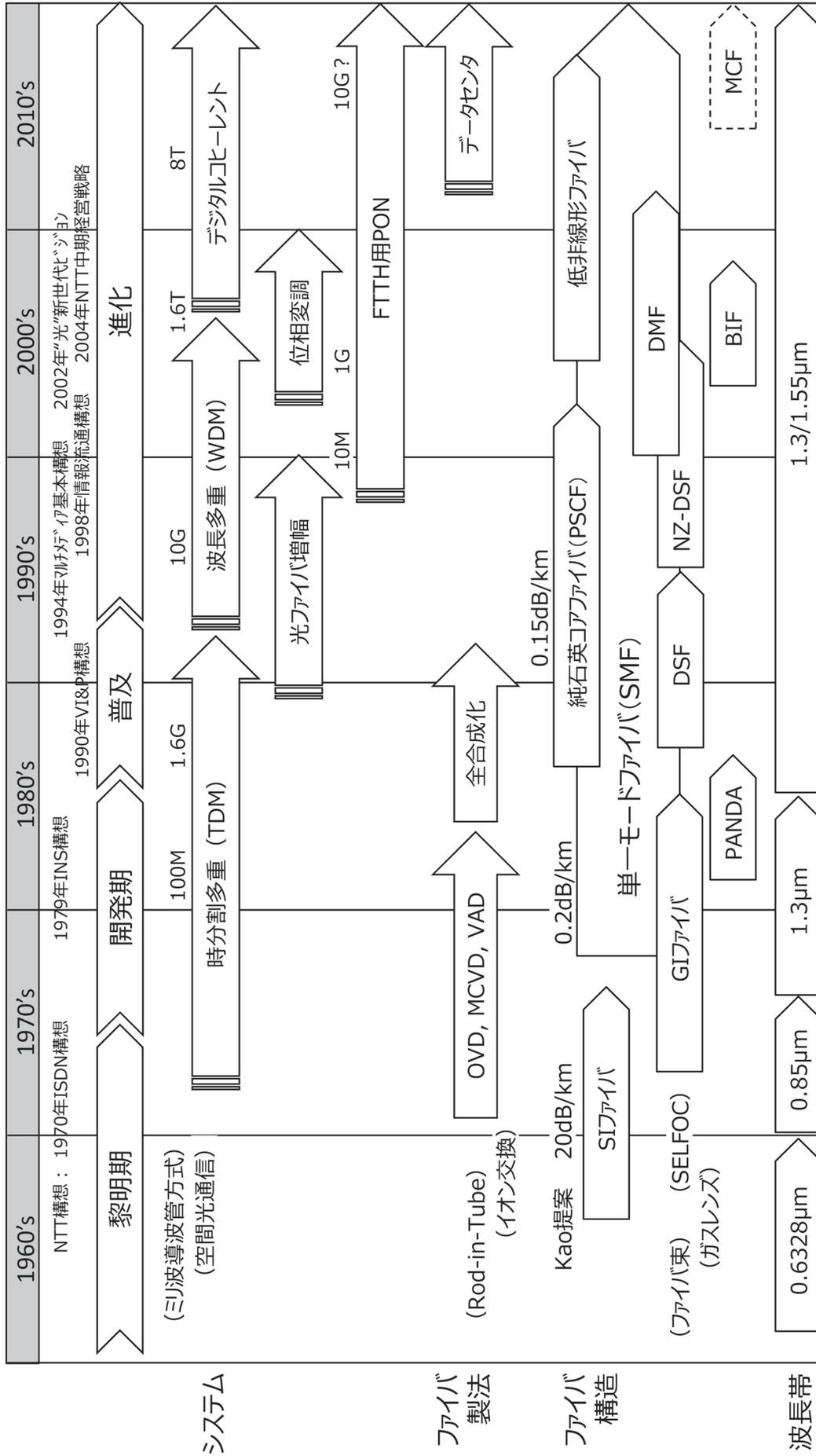
- ①村田浩、小泉健、新関暢一：「光ファイバの歴史 - 開拓者たちのメモアール -」、工業通信、2001.
- ②栢野邦夫：「光ファイバ物語 - 汗と涙でたどりついた光ケーブル現場試験 -」、サイバー出版センター、2014.
- ③光通信基礎研究調査会：「光ファイバ通信実用化研究の夜明け前 - NTT 基礎 3 研の足跡 -」、サイバー出版センター、2016.

上記①共著者の村田浩、小泉健、新関暢一の各氏は、それぞれ、古河電工、日本板硝子、NTT 茨城研

究所で初期の光ファイバ開発を指揮された。随所に載っている開拓者たちの十数件の回想録（筆頭は C.K. Kao 氏）は貴重である。上記②著者の栢野邦夫氏は、NTT 茨城研究所に 1971 年に結成された最初の光ファイバ研究チームのリーダーを務めた後に、光ケーブル開発から東京都心の洞道での現場試験まで一貫して経験された研究者である。上記③はかつての NTT 武蔵野研究所の基礎第 3 研究室に所属していた十数名の研究者による回想記であり、1960 年代に始まった光通信の基礎研究が、その後の光ファイバ通信実用化研究にどのように貢献したのか、各研究者が思い思いの形で章ごとに執筆している。②と③は比較的最近の著作であるが、①とともに後進のために実践記録を残されたことに深く敬意を表したい。

最後に本調査の機会を与えていただいた方々や本調査に協力いただいた多くの方々、調査の過程で貴重なご意見をいただいた方々に厚くお礼申し上げます。

石英系光ファイバ技術の系統図



ISDN: Integrated Services Digital Network
 INS: Information Network System
 VI&P: Visual Intelligence & Personal

DSF: Dispersion Shifted Fiber
 NZ-DSF: Non-Zero DSF
 DMF: Dispersion Management Fiber

BIF: Bending-loss Insensitive Fiber
 MCF: Multi-Core Fiber

石英系光ファイバに関連技術の歩み

年	・光ファイバ(&光導波路)、★光ファイバ接続	●発光素子、▲受光素子、○方式(◎は光通信方式)
1837		○電信の発明(米 Morse)、モールス符号
1876		○電話の発明(米 Graham Bell)
1880		◎太陽光を利用した光線電話(Photophone)実験(米 Graham Bell)
1901		○大西洋横断の無線通信に成功(伊 Marconi)
1909		○無線通信発展への貢献でノーベル物理学賞を受賞(伊 Marconi と独 Braun)
1934	・SiCl ₄ を原料とする石英ガラス製法の基本特許出願(米 Corning 社)	
1936	・水晶(石英)棒による光通信方式特許(関・根岸/通信省電気試験所)	
1937		○パルス符号変調 PCM 方式の発明(仏 A.H. Reeves)
1939	・SiCl ₄ と TiCl ₄ を原料とする低膨張係数ガラス特許出願(米 Corning 社)	
1953	・クラッド付ファイバの提案(蘭 A.van Heel)	▲PIN-PD と APD の特許出願(西澤/東北大)
1954	・医療用ファイバース束 Nature 論文(①蘭 A. van Heel、②英 H.H. Hopkins & N.S. Kapany)	○日本初の東京-大阪間マイクロ波回線(電話 360 回線)
1957	・医療用ファイバースコープ試作(米 B.I. Hirschowitz)	○ミリ波導波管伝送方式の提案(米 Bell 研)
1960	・医療用ファイバースコープ発売開始(米 ACMI 社)	●半導体レーザ(半導体メーザ)の特許出願(西澤/東北大)
1961	・導波モード解析から単一モード光ファイバ動作を認識(米 E. Snitzer)	●ルビレーザの発振@0.6943μm (Maiman/米 Hughes 社)
1962		●HeNe レーザの発振@0.6328μm (米 Bell 研)
1963		●GaAs レーザの低温パルス発振@0.85μm (GE・IBM・MIT 共同)
1964	・自己集束性グレーデッドインデックス(GI)型ファイバの特許出願(西澤/東北大)	◎レンズ列やガスレンズによる空間光通信の研究開始(Bell 研)、1964 年に詳細を発表
1966	・20dB/km 以下のガラスファイバ伝送路の可能性を指摘(C.K. Kao/英 STL)	◎光ファイバ束を用いた光通信デモ実験(東工大)
1967	(NTT 武蔵野研究所で C.K. Kao が講演)	▲Si-APD 論文(Bell 研)
1969	・セルフォック(SELFOC)ファイバ発表~80dB/km(日本板硝子&日本電気) (日本の電線メーカーが光ファイバ研究に着手)	▲光通信用光検波器研究開始(NTT)
1970	・20dB/km@0.6328μm 光ファイバ発表(米 Corning)、翌年に材料は石英系と発表	○太平洋横断の初の海底同軸ケーブル(TPC-1)方式の開通(KDD 他)、電話 128 回線
		◎ファイバースコープ付胃カメラを発表(オリンパス)
		▲Ge-APD 論文(Bell 研)
		○NTT 武蔵野研究所-基礎研究部が空間光通信方式の研究開始
		●半導体レーザの電流直接変調理論発表(東工大)
		◎霞が関ビルと霞ヶ関電話局との間で空間光通信実験開始(NTT)、約2年間継続
		○インターネットの起源となる米国 ARPAnet 構築
		●GaAlAs レーザ連続発振@0.85μm(Bell 研、ソビエト、MIT)

		(NTT が ISDN 構想発表)		
1971	(NTT が茨城研究所での光ファイバの組織的研究を開始)	▲光通信用 Ge-APD 試作 (NTT)		
1972	・液体コアファイバ研究 (米 Bell 研、英 Southampton 大学、…) ・石英系光ファイバ ETLOF (20dB/km) 試作 (電総研) ・単一素材石英ファイバ (3dB/km) 実現 (Bell 研) ・外付 (OVD) 法に関する一連の特許出願 (Corning 社)	○ミリ波導波管実験線 (東海村-水戸、4.2km+18.5km) 現場試験 (NTT) ◎Bell 研がガラスレンズ光通信研究を中止		
1973	・石英系偏芯コア光ファイバ ECOF (10dB/km) 試作 (NTT)	◎Corning 製ファイバによる4心光ケーブル試作と布設実験 (古河電工)		
1974	(NTT 光ファイバ研究体制の整理 ⇒ 光ファイバ製法は茨城の部品材料研究部が担当) ・石英管内への熱酸化 CVD 法による石英系ファイバ (4dB/km と 2.7dB/km) 実現 (英国勢) ・低損失石英系光ファイバ製法 (MCVD 法) の発明 ~ 1.1 dB/km @ 1.02μm (Bell 研)			
1975	(NTT と電線3社の光ファイバ共同研究開始、1983 年まで続く) ★放電加熱による光ファイバ融着接続装置を試作 (NTT) ★二重偏芯光コネクタの開発 (NTT)	◎古河電工製 SI 型 4 心光ケーブル 880m による所内実験 (NTT)、武蔵野研究所洞道にて ○ミリ波導波管方式 W-40G方式実用化 (NTT)、但し本格商用化は中断 ○米 Bell 研と英 STL がミリ波導波管方式の本格商用化を中止		
1976	(NTT 茨城研究所に光線路研究室新設、光ファイバ製法は光部品研究室が担当) ・MCVD 法による 0.47dB/km ファイバ開発 @ 1.2μm (NTT & 藤倉電線) ⇒ 石英系ファイバの 1.3μm 波長帯の発見	●InGaAsP レーザ連続発振 @ 1.3μm (MIT、KDD、東工大、NTT) ▲長波長帯用 Ge-APD 作製 (NTT & 富士通) ◎アトランタ実験 (AT&T)、Bell 研洞道、0.66km 長 GI 型 12 心 × 12 層光ケーブル、44.7Mb/s ◎電力網制御用光ファイバ通信方式の現場試験 (東電と関電)、SI 型ファイバ、0.89μm ◎光ファイバ伝送方式総合実験 (NTT)、横須賀研究所内、8km 長、SI 型 8 心ケーブル		
1977	・光ファイバ量産製法 (VAD 法) の発明 (NTT) ・MCVD 法による 0.5dB/km 単一モードファイバ開発 @ 1.3μm (NTT) ★放電加熱による単一モード光ファイバ融着接続に成功 (NTT)	(NTT 横須賀研究所に光伝送研究室新設) ●GaAlAs レーザ寿命推定 ~ 100 万時間 (Bell 研、NTT) ●面発光レーザの提案 (東工大) ▲InGaAs-APD 試作 (仏 Thomson/CSF) ◎シカゴ現場実験 (AT&T)、2.6km、GI 型 12 心 × 2 層光ケーブル、44.7Mb/s ○同軸ケーブル DC-400M 方式の開通 (NTT)、東京-神戸-姫路、400Mb/s		
1978	★現場試験 FR-1 用多モードファイバ融着接続機開発 (NTT & 藤倉) ・内圧制御 MCVD 法の開発 (NTT)	◎近距離光伝送方式現場試験 FR-1 実施 (NTT)、唐ヶ崎一蔵前-浜町、23km、32Mb/s および 100Mb/s、0.85μm、GI 型 48 心光ケーブル ◎電力網監視制御用光ファイバ通信回線構築 (東電、関電)、 京北変電所-鳩ヶ谷変電所 (6.3km) 等、0.83μm ◎映像情報システム HI-OVIS 実験開始 (通産省)、1986 年まで続 ◎SELFOC ファイバによる米国ディスプレイ内電話回線開通 (NEC)、0.85μm ◎MCVD 単一モード光ファイバ (総長 11km) による 1.3μm 帯ゼロ分散伝送実験 (NTT) (NTT ミリ波伝送研究室の廃止)		

1979	<ul style="list-style-type: none"> ・MCVD 法による 0.2dB/km 単一モードファイバの開発@1.55μm(NTT) ⇒石英系ファイバの 1.55μm 波長帯の発見 ★FC 形光コネクタの開発(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ●InGaAsP レーザ連続発振@1.55μm(KDD、東工大、NTT) ○日本で第1世代モバイル通信(自動車電話)開始(NTT が INS 構想発表)
1980	<ul style="list-style-type: none"> ・GI 型ファイバ標準寸法の変更(60μm コア/150μm 外径 ⇒ 50μm コア/125μm 外径) ・VAD 法によるガラス微粒子生成・堆積機構の解明(NTT) ・VAD 法による完全無水(OHイオン濃度 < 1ppb)ファイバ作製(NTT、藤倉電線) ・VAD 法による長尺(100km)低損失(0.2dB/km)単一モードファイバの開発(NTT) ・石英ガラス基板上への厚膜石英系光導波路作製に成功(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ●共焦点複合レンズ系を用いた半導体レーザモジュール構造の開発(NTT) ▲InGaAs-APD 試作と特性測定(NTT) ◎中小容量光伝送方式現場試験 FR-2 実施(NTT)、川崎-下母田、GI 型、1.3μm 波長 ◎単一モードファイバによる大容量光伝送方式現場試験 FR-L 開始(NTT)、400Mb/s、1.3μm 波長、布設は八王子-相模原区間(17.9km)から始めて順次拡張 ◎特定加入者光伝送方式実験(NTT)～1984 年、横須賀と吉祥寺地区
1981	<ul style="list-style-type: none"> ・PANDA 型偏波保持ファイバの開発(NTT)、0.62dB/km@1.52μm ・高Δ型の分散シフトファイバ(DSF)開発(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ●DFB レーザ実現(KDD、NTT)、DBR レーザ実現(東工大) ◎中小容量光方式商用化開始(NTT)、F-32M(32Mb/s)と F-100M(100Mb/s)方式 ◎無中継海底光伝送方式現場試験(NTT)
1982	<ul style="list-style-type: none"> ・VAD 母材高速合成および高速線引き技術開発(NTT) ・FR-2 で布設した光ファイバケーブルの損失増を発見(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ◎大容量光伝送方式現場試験 FR-L 完遂(NTT)、武蔵野-厚木研究所間(76km) ◎中継海底光伝送方式現場試験開始(NTT)、伊豆半島八幡野沖 45km で中継間隔 30km
1983	<ul style="list-style-type: none"> ・水素による光ファイバケーブル損失増と防止策を発表(NTT、KDD、英 BTRL) ・Si 基板上への厚膜石英系光導波路作製に成功(NTT)、後に PLC 技術へと発展 	<ul style="list-style-type: none"> ◎単一モードファイバ伝送方式(F-400M)商用化開始(NTT)、400Mb/s、1.3μm 波長 ○ARPAnet がインターネットの中核プロトコルになる TCP/IP ベースに移行
1984	<ul style="list-style-type: none"> ・Coming と住友電工間の特許係争開始 →1989 年に住友電工が和解金支払い 	<ul style="list-style-type: none"> ◎汎用加入者光伝送方式モデルシステム実験(NTT)～1987、武蔵野-三鷹地区
1985	<ul style="list-style-type: none"> ・VAD 全合成単一モードファイバ母材高速製造技術の開発(NTT) ★コア直視型単一モード光ファイバ融着接続機の開発(NTT と藤倉) ・GI 型テーブファイバケーブル実用化(NTT) ・セグメントコア(Segment Core)型分散シフトファイバ(DSF)の提案(Coming) 	<ul style="list-style-type: none"> ◎F-400M 方式による日本縦貫単一モード光ファイバ通信網(総長 3,400km)開通(NTT) ◎ヒート光伝送実験(NTT)、400Mb/s、250km 無中継(NTT 民営化)
1986	<ul style="list-style-type: none"> ★光コネクタ PC(Physical Contact)機構の開発(NTT) ★SC 形光コネクタ(多モードファイバ用)の開発(NTT) ・純シリカコアファイバ(PCSF)で最小損失 0.154dB/km ファイバの開発(住友電工) ・階段型(DSC: Dual Core Shape)分散シフトファイバ(DSF)の提案(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ◎中継海底光伝送方式(FS-400M)商用化(NTT)八戸-苫小牧、(宮崎-名護は 1987) ◎複合光加入者伝送システム実験(NTT)～1988、丸の内地区
1987	<ul style="list-style-type: none"> ・単一モード光ファイバのテーブ心線化を実現(NTT) ・ファイバヒューズ現象についての最初の報告(BTRL/英) ・米国の PLC ベンチャー会社 PIRI 設立(NTT・三菱商事・Battelle 研究所の合弁) 	<ul style="list-style-type: none"> ●エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)発表(英 Southampton 大学) ◎F-1.6G 方式の商用化(NTT)、DFB-LD 使用
1988	<ul style="list-style-type: none"> ★SC 形光コネクタ(単一モードファイバ用)の開発(NTT) (NTT が加入者系にも単一モードファイバを用いることを決定) ★単一モードファイバ用 4 心テーブ融着接続器の開発(NTT & 藤倉)、1991 年に 8 心 ・吸水材を用いた防水ファイバケーブルを開発(NTT) 	<ul style="list-style-type: none"> ●面発光レーザの室温動作に成功(東工大) ◎1.55μm 帯 F-400M 方式の商用化(NTT)、分散シフトファイバ(DSF)使用 ○ISDN サービス開始(NTT)、64kb/s × 2 回線 ◎光アークス網も単一モード光ファイバに統一することを決定(NTT)

1989	★テーブファイバ用 MT コネクタの開発 (NTT) ・テーブファイバによる 1,000 心単一モードファイバケーブル開発 (NTT) ・アレイ導波路格子 (AWG) 型合分波器提案 (NTT)	●半導体レーザ励起 EDFA による 212km 無中継伝送実験報告 (NTT) ◎太平洋横断の初の海底光方式 (TPC-3) 開通 (KDD 他)、VAD 全合成ファイバ、280Mb/s ◎中継海底光伝送方式 (FS-18G) 商用化 (NTT) ○WWW (World Wide Web) の発明 (欧州 CERN) ○インターネットの商用サービス解禁 (NTT が VI&P 構想発表)
1990		◎光加入者系 VI&P 総合実験 (NTT) ~1994
1991	★MU 形光コネクタの開発	◎海底光方式 (TPC-4) 開通、560Mb/s、純シリカコア構造の分散シフトファイバ (DSF) 採用
1992	・WDM システム用ノン零分散シフトファイバ (NZ-DSF) の提案 (Bell 研) ・NTT エレクトロニクス社 (NEL) に PLC 事業部門開設	○WWW ブラウザ (Mosaic) の登場 (米国立スーパコンピュータ応用研究所 NCSA) ○日本でのインターネット商用サービス開始 ○日本で第2世代モバイル通信開始
1993		◎光加入者系京阪奈実験 (NTT) ~1995 年 (NTT がマルチメディア基本構想発表)
1994		○Windows95 (Internet Explorer 付) 発売 (米 Microsoft 社) ◎光加入者系マルチメディア共同利用実験 (NTT) ~1998 ◎北米幹線系での高密度 WDM 方式導入本格化
1995		◎EDFA を用いた大容量伝送方式 (FA-2.4G と FA-10G) 商用化 (NTT)、外部変調器採用 ◎海底光方式 (TPC-5CN) 開通 (KDD 他)、5Gb/s、DSF、EDFA 採用
1996	・北米での高密度 WDM 方式導入に伴う AWG 合分波器需要の増加 (PIRI) ・広帯域・低損失光ファイバ通信の先導的研究で日本国際賞を受賞 (C.K. Kao)	●利得帯域を長波長側にシフトしたエルビウム添加光増幅器 (GS-EDFA) の開発 (NTT) (NTT が情報流通構想発表)
1997		◎海底光方式 (China-US) 開通 (KDD 他)、20Gb/s (2.5Gb/s × 8 波)、NZ-DSF 採用 ○日本の ADSL 常時接続サービス開始
1998		◎24G-WDM システムの商用化 (NTT)、C 帯不等間隔 12 波 + L 帯 36 波、最大 115.2Gb/s ◎海底光方式 (Japan-US) 開通 (KDDI 他)、160Gb/s (10Gb/s × 16 波) ○北米ネットバブル崩壊 (⇒日本の光通信機器製造業界も深刻な痛手) ◎PON による FTTH サービス開始 (NTT) ○日本で第3世代モバイル通信 (FOMA) 開始、384kb/s (NTT “光” 新世代ビジョン発表)
1999		◎10G-WDM システムの商用化 (NTT)、L 帯 80 波、最大 800Gb/s、分布ラマン増幅 ◎海底光方式 (TGN-P) 開通 (KDD 他)、640Gb/s (10Gb/s × 64 波)、分散シフトファイバ
2000	・AWG 製造販売で企業価値が高まった PIRI 社を売却 (NTT・三菱商事・Battelle 研究所)	◎10G-ROADM システムの商用化 (NTT)、当初 16 波、2005 年 32 波、2007 年 80 波
2001		
2002	・0.148dB/km の純シリカファイバ (PSCF) 実現 (住友電工) ・FTTH 用 PLC スプリッタ需要の増加	
2003	・宅内光配線用の空孔アシスト型ファイバ (HAF) コードを開発 (NTT) ・ファイバヒューズ現象解明の本格化 (NTT 他)	
2004		

2007		◎40G-WDM システムの商用化(NTT)、L 帯 40 波、最大 1,600Gb/s(=1.6Tb/s)
2008		○日本の FTTH 契約数が DSL 契約数を上回る ◎デジタルコヒーレント光通信方式研究の活発化
2009	・光ファイバ通信発展への貢献でノーベル物理学賞を受賞(C.K. Kao)	
2010	・マルチコアファイバ(MCF)研究の活発化	◎海底光方式(Unity) 開通(KDD 他)、960Gb/s(10Gb/s × 96 波)、分散ネットワークファイバ ●デジタルコヒーレント通信用 DSP 共同開発(NTT, NEC, 富士通、三菱電機、NICT) ○日本で第 3.9 世代モバイル通信(LTE) 開始、受信最大 300Mb/s
2012		◎MCF による 1Pb/s 級伝送実験(NTT)、456Gb/s × 222 波 × 12 コア、52.4km 長
2013		◎デジタルコヒーレント 100G-PTS 方式商用化(NTT)、100G × 80 波で 8Tb/s
2015		◎MCF による 2Pb/s 級伝送実験(KDDI)、50Gb/s × 360 波 × 6 モード × 19 コア、9.8km 長
2016		◎デジタルコヒーレント海底光方式(FASTER) 開通(KDDI 他)、100Gb/s × 100 波で 10Tb/s

石英系光ファイバ技術 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	所在地	資料種類	資料現状	製作者	製作年	選定理由
1	光ファイバ通信実験装置	東京工業大学 博物館	復元品	展示	東京工業大学 末松研究室	1963年 (2008年に復元)	<ul style="list-style-type: none"> 1963年5月の東京工業大学学祭で公開された世界初の光ファイバ通信実験装置。HeNeレーザからの光が、ADP電気光学結晶を用いた光変調器で音声に変調され、光ファイバ束で光電管に導かれ、再び音声に復調された。当時、通信用光ファイバは未開発であり、数万本のガラスファイバからなるイメージスコープ用の光ファイバ束(長さ数10cm、直径数mm)を転用した。 2008年7月の同大学百年記念イベントで再現モデルを実施。
2	VAD光ファイバ母材製造装置	NTT技術史料館	試作品	展示	早川鉄工所 (かつての茨城県 県勝田市で壘 業、今は廃業)	1976年	<ul style="list-style-type: none"> 石英系光ファイバの量産製法(VAD法)の開発に用いられた実験装置であり、得られた実験データが1977年7月に東京で開催された光IC/ファイバ国際会議(IOC'77)でのVAD法発表のベースになった。今日では、世界の通信用光ファイバの約60%(日本では90%以上)がVAD法を基本として製造されており、VAD法は2015年5月に「IEEEマイルストーン」に認定された。
3	100km長VAD単一モード光ファイバ	NTT技術史料館	試作品	展示	NTT研究所	1980年	<ul style="list-style-type: none"> VAD法による長尺低損失単一モード光ファイバ製造が可能であることを初めて実証した記念碑的な光ファイバである。1980年11月のNTT茨城研究所の20周年記念の施設案内日に間に合うように開発され展示された。 その後の全合成単一モード光ファイバの実現を含むVAD法の発展と普及の先駆けになった。
4	4心光ファイバケーブル	古河電工 千葉事業所	試作品	布設	古河電工	1974年	<ul style="list-style-type: none"> 1974年夏、SI型多モード光ファイバ心線(米国Corning社製)を用いて、4心光ファイバケーブルの試作、現場布設、接続試験が行われた。架空200m、地下200mの布設で、地下マンホール内での現場接続にも世界で初めて成功した。試験結果は1975年の第1回欧州光通信国際会議(ECOC'75)で報告され、実用的な光ファイバケーブル開発の出発点になった。 架空部分については、今も布設当時のまま保存されている。
5	8心光ファイバケーブルサンプル	NTT技術史料館	特注品	保管	古河電工 住友電工 藤倉電線	1976年	<ul style="list-style-type: none"> NTT第1号の光ファイバケーブルとして、MCVD法による国産SI型多モード光ファイバ心線を用いて電線3社によって作製され、NTT横須賀研究所内での総合伝送実験に供された。 伝送実験は1976年10月に始まり、電線3社に加えて日本電気と富士通の協力を得て、研究所内の300m洞道内に、8km長の8心ケーブル(光ファイバ全長: 8km×8心=64km)が布設され、伝送容量32Mb/sと6.3Mb/sのシステム実験(波長0.85μm)が行われた。
6	48心光ファイバケーブルサンプル	NTT技術史料館	特注品	保管	古河電工 住友電工 藤倉電線	1978年	<ul style="list-style-type: none"> 1978年に東京都心で行われたNTT現場試験用のGI型多モード光ファイバケーブル(波長0.85μm)であり、光ファイバ心線は主にMCVD法で作製された。それまで数心であった光ファイバケーブルと異なり、光ファイバ6心をユニット化し、このユニットを繋ぎ合わせることで多心化を可能にした。続いて1980年から川崎市内で実施された第2次現場試験用の光ファイバケーブル(波長1.3μm)開発と合わせて、1981年からの光ファイバ通信商用化に大きく貢献した。
7	F-32M方式 端局中継装置	NTT技術史料館	製品	展示	日本電気	1981年	<ul style="list-style-type: none"> GI型多モード光ファイバケーブルを用いたF-32M方式(波長1.3μm、伝送容量32Mb/s、中継間隔20km)は、1981年に公衆通信網への導入が開始された世界初の本格的な光ファイバ通信方式である。NTT仕様に沿って日本電気と富士通の2社体制で製作され、主に市内中継伝送用に用いられた。同時期にF-100M方式(伝送容量100Mb/s、中継間隔10km、主に県内中継伝送用)も商用化され、本格的な光ファイバ通信時代の幕開けとなった。
8	F-400M方式 端局中継装置	NTT技術史料館	製品	保管	富士通	1985年	<ul style="list-style-type: none"> F-400M方式(伝送容量400Mb/s、中継間隔40km)は、1980年からのNTT武蔵野研究所-厚木研究所間での現場試験を経て、1983年に商用化が開始された世界初の大容量単一モード光ファイバ通信方式であり、VAD単一モード光ファイバケーブルが本格採用された。 NTT仕様に沿って富士通と日本電気が量産し、NTT民営化寸前の1985年2月には、旭川-鹿兒島間を結ぶ総延長3,400kmの日本縦貫光幹線ルートが開通した。

石英系光ファイバ技術発展の系統化調査 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 第25集 2018年3月 (誤)	全文PDF版 2018年8月 (正)
要旨	下から6		(Fiber-the-the-Home)	(Fiber-to-the-Home)
113	図1.4		多種多様な光ケーブル製品	多種多様な光ケーブル製品
116	左	23	(0.47dB/km@1.2mm)の実現 ⁷⁾ を通じて、	(0.47dB/km@1.2mm)実現を発表して ⁷⁾ 、
118	左	13	曲率半径500mないし1,000程度	曲率半径500mないし1,000m程度
120	左	17	受賞した際の「受賞理由」は、	受賞した際の「授賞理由」は、
120	左	19	強調されている。	強調されている ²⁸⁾ 。
122	右		【参考・引用文献 追加】	28) http://www.japanprize.jp/prize_past_1996_prize01.html
124	右	8	符号している。	符合している。
126	右	31	日本の業界が答えられなかった	日本の業界が答えられなかった
133	左	4	NaがNa ⁻ イオンとして	NaがNa ⁺ イオンとして
135	左	3	pp.331-5	pp.331-335
135	右	8	GeO ₂ -SiO ₂ -cored	GeO ₂ -SiO ₂ -cored
138	図4.5		OHイオン吸収 @ λ = 1.39 μ m (0.08ppm相当)	OHイオン吸収 @ λ = 1.39 μ m (0.05ppm相当)
142	図4.15		損失(dB/cm)	損失(dB/km)
143	図4.18		損失(dB/cm)	損失(dB/km)
148	図5.9		損失	損失(dB/km)
149	右	14	= 40/min)	= 40/min
150	左	下から8	バーナ火炎を横切り	バーナ火炎を横切るように
153	図5.25		a)の多孔質母材	a)堆積後の多孔質母材
153	図5.29		損失(dB)	損失(dB/km)
156	左	4	値(～12.5)は届かなかった。	値(～12.5)には届かなかった。
159	図5.42			点線カーブを右方にシフト
159	図5.43			点線カーブを右方にシフト
163	左	27	日立評, VOL.69,	日立評論, Vol.69,
165	右	20	研究集結までに	研究終結までに
168	図6.8 APDの構造		電子加速層	雪崩増倍層
172	図6.16 素線		←125 μ m→	←150 μ m→
174	図6.20		損失(dB)	損失(dB/km)
174	右	下から7	付設が行われた	布設が行われた
177	右	3	側法から	側方から
186	右	11	光ファイバの最小になる	光ファイバ損失の最小になる
186	右	下から5	1995年前後に商用化	1996年に商用化
187	図7.4		Wavelength-Division Multiplexing	WDM: Wavelength-Division Multiplexing
187	右	17	2004年	2003年
188	右	下から6	シンボルレート(=ビットレート)	シンボルレート
189	左	9	(EDFA)に登場によって	(EDFA)の登場によって
189	図7.9		単モード光ファイバの 物理限界	単モードファイバの 物理限界
192	左	12	に渡って関与した技術分野であり、	にわたって関与した技術分野であり、
196	図8.2 右側の和訳文章		今日の光ファイバ通信網に構築に	今日の光ファイバ通信網の構築に
203	年表	1995年	◎EDFAを用いた大容量伝送方式(FA-2.4GとFA-10G)商用化、外部変調器採用 ◎海底光方式(TPC-5CN)開通(KDD他)、5Gb/s、DSF、EDFA採用	【左記の2項目を1996年の枠に移動】
203	年表	2004年	◎10G-WDMシステムの商用化(NTT)、L帯80波、最大800Gb/s	【左記の1項目を2003年の枠に移動】