



光ファイバ50年史

Fifty Year History of Optical Fibers

金森 弘雄
Hiroo Kanamori

損失20 dB/kmの光ファイバと半導体レーザの室温連続発振が実現し、光ファイバ通信が実用化に向けて歩みだした1970年から、丁度半世紀が経過した。この機会に光ファイバの進化の過程と当社での光ファイバ開発への取組みを振り返る。当社は、黎明期から光ファイバの開発と事業化に積極的に取り組んできた。光ファイバ製造方法として今日世界的に普及したVAD法を基盤技術とし、極低損失光ファイバや超多心光ケーブルをはじめとする高品質光ファイバ・ケーブルを世に送り出し、社会のライフラインとして欠かせない光ファイバ通信網の普及を支えている。

Optical fiber communication started to become practical use in 1970, when an optical fiber with a transmission loss of 20 dB/km and a laser diode continuously emitting at room temperature appeared. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has enterprisingly dedicated the development and commercialization of optical fibers since the early days. Utilizing the vapor-phase axial-deposition method, which has spread worldwide as a preform manufacturing process, we have kept launching high-quality optical fibers and cables such as ultra-low-loss silica core fibers and ultra-high-density optical cables. This way, we have continued to support the expansion of optical fiber networks as one of the indispensable social infrastructure. This paper looks at the evolution of optical fiber technology and our efforts in developing optical fibers and cables that will meet the need of the time.

キーワード：光ファイバ、VAD法、極低損失光ファイバ、超多心光ケーブル

1. 緒言

光ファイバ通信の歴史を遡ると「伝送損失20 dB/kmの光ファイバ」と「室温で連続発振する半導体レーザ」が出現した1970年に辿り着く。それから半世紀という節目に、光ファイバの進化の過程と当社における光ファイバ開発と事業への取組みを年代ごとに振り返ってみたい。

2. 黎明期：1964年～1974年

1966年、英国STC研究所のKaoは「遷移金属を除去した高純度ガラスの損失値は20 dB/km以下に低減できる」と予言し⁽¹⁾、この功績により2009年にノーベル物理学賞を受賞した。実は1964年、西澤潤一と佐々木市右衛門が、GIファイバ^{*1}の概念の特許出願していた。この特許は登録に至らなかったが、光ファイバ通信の可能性に言及した先駆性は、Kaoの業績に匹敵するとも言われている。

1970年には、米国コーニング社が伝送損失20 dB/kmの石英ガラス光ファイバの試作報告を行った⁽²⁾。20 dB/kmは、光ファイバで同軸ケーブル並みの中継間隔を実現できるという目安である。この目安が実現したことから米国、英国、そして日本で光ファイバの開発が俄然活発化した。当社も光ファイバの研究を開始し1970年代前半に後述するVAD (Vapor Phase Axial Deposition) 法に通じる母材製法の概念⁽³⁾や母材からファイバを線引した直後に被覆を施すタンデムプライマリコーティング⁽⁴⁾、純石英コア光ファ

イバ⁽⁵⁾など光ファイバの重要技術を創案した。1974年には米国Bell研究所がMCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法という母材の新製法で伝送損失2 dB/kmを達成した⁽⁶⁾。MCVD法では、石英パイプ内に気体のガラス原料と酸素を流し外部より酸水素バーナで加熱することでパイプ内表面に所望組成のガラス層を形成した後、パイプを径方向に収縮させ中実化する。その詳細も開示されたので、MCVD法は初期の母材製法として各国に普及していくことになる。

3. 開発期：1975年～1984年

3-1 電電公社と電線3社との共同研究

日本では光ファイバ開発で米・欧に遅れを取るまいと、電電公社 (現NTT) を中心に住友電工、古河電気工業(株)、藤倉電線(株) (現、(株)フジクラ) との光ファイバ共同研究が組織された。この共同研究は第1期から第3期まで継続した。

第1期 (1975年～1978年) では、MCVD法によるGIファイバの開発が進められ、その成果として、1978年に唐崎～蔵前局間20 kmでGIファイバ48心光ケーブルを用いた0.85 μm中小容量光伝送方式の第一次現場試験が実施された⁽⁷⁾。当時の光ファイバはガラス直径150 μm、コア径60 μm、被覆はシリコーン樹脂と熱可塑性プラスチックの2層構造であった。

並行して共同研究では、MCVD法に対抗する日本独自の

母材製造方法としてVAD法が編み出された⁸⁾。VAD法は、気体のガラス原料を酸素水バーナに送り込み発生したガラス微粒子（スス）を回転する出発材先端に堆積させつつ出発材を引き上げていくことで、ススの堆積体（スス体）を軸方向に成長させる（図1）。スス体は、脱水作用のあるガス雰囲気中で加熱し高純度化され、さらに高温で透明化されガラス母材となる。VAD法は、母材大型化が可能で量産性に優れると謳われたが、当初は堆積中のスス体変形や割れ、GIファイバとしての屈折率分布形成、透明化工程での気泡など多くの困難が発生した。これらの課題に対し共同研究メンバーは昼夜を厭わぬ努力で解決に取組み、中小容量第1次現場試験に一部（浜町～蔵前）ではあるがVAD製GIファイバを間に合わせることができ、VAD法の完成に向けて重要な第一歩となった。

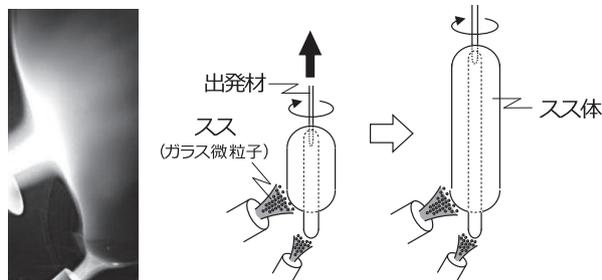


図1 VAD法

第2期（1978年～1980年）では、VAD法での脱水技術の改善で光ファイバの低損失化が急速に進んだ。光ファイバの強度保証技術も脆性材料の破断理論に基づき構築され、線引されたファイバ全長に一定の張力をかけ低強度部をインラインで除去するスクリーニング試験法が確立した。

これらの成果を基に1980年に中小容量光伝送方式の第二次現場試験が川崎地区で実施された⁹⁾。架空区間も含め20 kmの光ケーブルが敷設され1.3 μmでの100 Mbps伝送に世界で初めて成功した。この際、ガラス直径は125 μm、コア径は50 μmに細径化された。また、光ケーブルとしてナイロン心線6心ユニット型構造が完成した。この構造は、1986年にテープ心線スロット構造が導入されるまで電電公社の標準となった。GIファイバの中小容量伝送方式は、1980年の商用試験を経て1982年に本格採用となった。

第2期では、MCVD法によるSMファイバ^{*2)}の開発も始まり、その現場試験が、1980年10月にF-400M伝送方式として電電公社武蔵野通研と厚木通研を結んで実施された¹⁰⁾。1.3 μmで400 Mbps、中継間隔は20 kmであった。この他にも無中継海底ケーブル伝送方式の現場試験（1980年）、加入者方式の現場試験（1980年）が実施され光ファイバ

の本格実用化が着実に近づきつつあった。

第3期（1981年～1983年）にはVAD法によるSMファイバ開発が進められた。SMファイバでは低損失化のために十分なクラッド厚を確保しなければならないが、スス堆積時にクラッド部を厚く堆積するには限界があり相対的にコアを細くする必要があった。細いコアを安定に成長させるためのスス堆積用バーナの構造をはじめ多くの工夫を重ねられた結果、VAD法がSMファイバの製法として、特性・生産性両面でMCVD法を凌ぐようになった。そして、共同研究の成果の集大成として、F-400M伝送方式による旭川と鹿児島を結ぶ日本縦貫ルートが1983年に着工された。

ところが、この直前の1982年に重大問題が発覚した。水素による損失増加問題である。第2次中小容量伝送方式の現場試験で敷設していた光ケーブルの伝送損失が経時的に増加していることが発覚し、共同研究の中で原因究明が緊急に進められた。その結果、「光ファイバ被覆樹脂等から発生した微量な水素が、ガラスファイバに浸透しガラス中のGe成分の欠陥構造と結合して光を吸収するOH基を形成する。OH基は、リン（P）が添加されていると著しく増加する」ということが判明した。製造工程でPを使うMCVD法にとっては切実な問題である一方、Pを使わないVAD法の優位性が認識された。

3-2 共同研究以外での活動

当社は、電電公社との共同研究と同時期に電力会社との共同開発も行った。電力会社は、送配電システムの運用のために自営の通信回線を保有している。光ファイバは無誘導なので電力ケーブルと併設できる利点があった。

一方、通商産業省（現、経済産業省）が開始した映像情報配信を含めた地域情報システムの実験において伝送路を光ファイバに切り替える検討が進められ、1976年に当社の光ファイバが採用された。東生駒光映像情報システム（HiOVIS; Higashi-ikoma Optical Visual Information System）である。使用された光ファイバは、高純度石英ロッドを線引しクラッド用シリコーン樹脂の被覆を施したPCF（Plastic Clad Fiber）であった。

3-3 事業部の発足

当社の光ファイバの開発は、当初、事業部内の研究開発部署（通信事業部通信研究部）が担当し、その組織が1976年に研究開発本部の下に移った。光ファイバ・ケーブルの事業化が見え始めた1981年には、研究部門の光ファイバと光通信システム技術者を2分する形で光開発事業部が発足し、1984年には光事業部と改称した。

4. 普及期：1984年～1990年

1983年に電電公社との共同研究契約が終了した。その後、電電公社との光ファイバ開発は個別案件毎に行われたが、1985年に電電公社が民営化されNTTが誕生すると、メーカー間で熾烈な開発競争が繰り上げられるようになった。

4-1 UV硬化樹脂被覆とテープスロット型光ケーブル

光ファイバは、側圧を受けると微小に変形し光損失が発生する。そのため、被覆には、光ファイバのガラス表面を保護するだけでなく、光損失が発生しないよう側圧を吸収する役割が求められる。その目的で、日本では前述したように、光ファイバの線引時に軟らかい熱硬化型シリコン樹脂を外径400 μmまで被覆し、さらに硬いナイロンを外径900 μmに被覆していた。一方、米国ではBell研究所中心に開発されたUV硬化型アクリル樹脂を被覆した外径250 μmの光ファイバが用いられていた。光ファイバを直接撚り合わせる日本のケーブル構造で外径250 μm光ファイバを用いると大きな光損失が発生するが、海外のケーブルはチューブ内に光ファイバを収納するルースチューブ型であり損失を抑制できていた。このような技術背景の下、共同研究では、将来の加入者系への光ファイバ展開には細径高密度の光ケーブルが必要であることを重視し、光ファイバはUV硬化樹脂被覆とするとの判断がなされた。光ファイバの水素による損失増加問題も、水素を発生しやすいシリコン樹脂からUV硬化樹脂への切替を促した。

浮上した重要命題は、ルースチューブに勝るUV硬化樹脂被覆光ファイバに適したケーブル構造の実現であり、辿り着いた構造が、**図2**に示すテープスロット型光ケーブルである⁽¹¹⁾。この構造では、UV硬化樹脂被覆ファイバを4～8心単位で、UV硬化樹脂を用いてテープ化し、複数枚のテープを溝（スロット）に収納する。UV硬化反応は、熱硬化に比べ短時間で完了するため、UV硬化樹脂は線引やテープ化の生産性の観点からも有利である。日本独自のUV硬化樹脂テープは、今日では広く世界で採用されている。

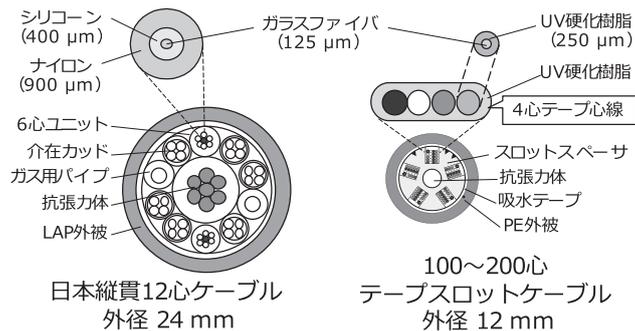


図2 光ファイバ被覆とケーブル構造の変遷

4-2 VAD全合成化

VAD法での母材製造は、コアとクラッドの一部を同時に合成し、脱水・透明化後に市販石英管に挿入し加熱一体化後に線引されていた。しかし、市販石英管では不純物の影

響でファイバ強度が低下しスクリーニングを通過して得られるファイバ長が制限されていた。石英管中の不純物は、わずかながら損失にも悪影響を及ぼし、さらに石英管の肉厚のバラツキや加熱一体化時の周方向のわずかな不均一性が、コア偏心の劣化要因にもなる。加えて石英パイプの価格が光ファイバの経済化のネックになりつつあった。そこで当社は、脱水・透明化した母材の外周に再度VAD法でガラス層を合成する全合成化に取り組んだ。1980年台半ばには、低損失かつ高強度、さらに水素損失増加も抑制されたVAD全合成光ファイバが実現し1989年に開通した太平洋横断光海底ケーブル（TPC-3）にも導入された。

全合成VADファイバの実用化において重要な技術が、スス体堆積速度の高速化であった。1980年代前半、VAD法の堆積速度は1 g/分程度であったが、この程度では生産性が低すぎた。そこで、発案された方法が二重火炎VAD法である⁽¹²⁾。バーナ構造を工夫し形成した二重の火炎が、スス形成反応を促進させ付着効率を高めている（**図3**）。この技術に磨きを加え1980年台後半には堆積速度は20 g/分まで到達⁽¹³⁾、5年で20倍という画期的な生産速度の向上が実現した。

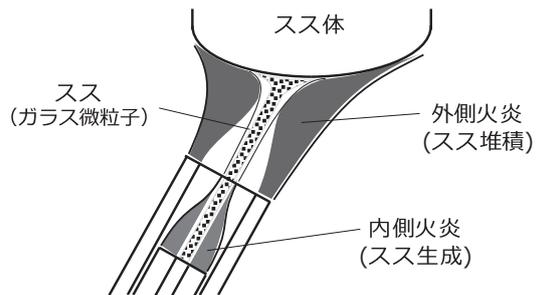


図3 二重火炎VAD法

VAD全合成ファイバでは、母材寸法の制限要因であった市販石英管を使用しなくて済むことから母材が一気に大型化し、生産性が向上した。さらにガラス外周に対するコアの偏心量が1 μmを十分に下回るレベルに抑えられ、融着接続やコネクタ接続でガラス外周を基準にするだけで低損失接続が可能となった。光ファイバ網構築に不可欠な多心一括融着接続技術や各種光コネクタは、光ファイバの低偏心化無くして実現は不可能であった。

4-3 純石英コア光ファイバ

光ファイバの伝送損失は、脱水工程の改善などにより、1980年代前半には1.55 μm帯で0.20 dB/kmまで低減し、ほぼ材料で定まる低損失化の限界に達したと見做されていた。光ファイバではコアの屈折率を高める添加材として一般的にGeO₂が用いられる。当社では、この低損失化の限界を、コアを純粋石英としGeO₂による散乱損失増加

を抑制することで打破しようとした。その際、クラッドには屈折率を低下させるフッ素 (F) を添加する (図4)。この原理は前述したとおり光ファイバ開発当初の1970年代に創案されていた⁽⁵⁾。時を置いて1980年代前半、VAD法のスズ体をフッ素含有雰囲気中で加熱するというフッ素添加技術が見出され、純石英コアSMファイバが実現し、1986年には0.154 dB/kmという最低損失値を達成した⁽¹⁴⁾。

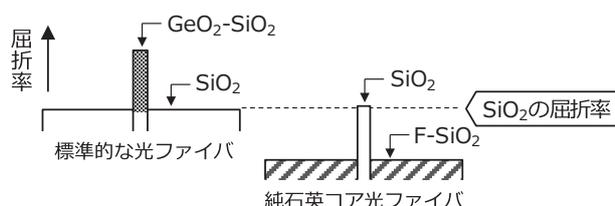


図4 純石英コア光ファイバの屈折率分布構造

4-4 分散シフト光ファイバ

SMファイバの伝送距離を制限する要因として、伝送損失とともに波長分散^{*3}がある。標準的なSMファイバの波長分散は1.3 μm帯でゼロとなるが、伝送損失が最低となる1.55 μm帯では波長分散の影響で伝送距離が制限される。そこで1.55 μm帯で波長分散がゼロとなる分散シフトファイバが求められた。波長分散を1.55 μm付近でゼロとするとともに、接続しやすいようにモードフィールド径^{*4}を8 μm前後に維持しつつケーブル化時に損失が増加しないよう曲げ損失を抑制するといった課題解決のため、種々の理論検討と試作を繰り返した。その結果、コアを中心の高屈折率部と周囲の低屈折率部からなる二重構造にすればよいことが判明した⁽¹⁵⁾。本ファイバの実現により、それまで1.3 μmで40 km程度であった中継間隔が、1.55 μm帯を用いることで100 km以上にまで拡大でき、1987年にNTTの大分～松山間120 kmの光海底ケーブルに適用された。さらに1988年からは、NTTの陸上中継ケーブルに全面的に使用されるようになった。

4-5 海外への事業展開

VAD法の優秀さが各国で理解され始めた1980年代前半、当社は他社に先んじて海外への事業展開にも取り組んだ。英国ケーブルメーカーおよび韓国ケーブルメーカーとは1984年に技術供与契約を締結、豪州ケーブルメーカーとは1985年に現地合弁会社を設立した。世界市場の過半を占める米国では、自ら事業を行うべく1983年に光ファイバ・ケーブル製造子会社を設立した。

5. 発展期：1990年～2000年

5-1 光ファイバ増幅器と波長多重伝送技術

1990年代は光ファイバ増幅器と波長多重伝送により、光ファイバ通信技術が飛躍的に進歩した時代である。

(1) エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA)

光ファイバ増幅器は、光信号を電気信号に変換せずに光の状態を増幅する。1987年に英国サザンプトン大学でエルビウム添加石英ファイバにより1.55 μm帯の光増幅現象が報告⁽¹⁶⁾されて以来、国内外の光ファイバメーカーが増幅用光ファイバの開発を進めた。並行して開発された励起光源用半導体レーザーの実用化と相俟ってエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) は一気に実用化レベルに達した。当社でも、1990年にいち早く既存CATV施設を用い光AM-VSB信号による増幅・分岐伝送に成功しEDFAの光CATVへの適用性を実証した⁽¹⁷⁾。EDFAは、基幹伝送網の中継距離延伸と伝送速度高速化を加速し、KDD (現、KDDI) は、分散シフトファイバとEDFAを用いて太平洋を再生中継無しで伝送する海底ケーブルシステム (TPC-5) を敷設、信号波長1.558 μm、伝送速度を5 Gbpsまで高速化し1995年に運用を開始した。

(2) 高密度波長多重 (DWDM)

1990年代半ばからは、わずかに波長が異なる複数の信号を同時に1本の光ファイバで伝送する高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 方式の実用化が進み、先行して普及していたEDFAとの併用により光ファイバの伝送容量は桁違いに拡大した。

DWDMを初採用した海底ケーブルシステムは1999年に開通した。ここでは、8波長多重、波長間隔1.6 nm (周波数換算で100 GHz)、1波長あたりの伝送速度2.5 Gbps (光ファイバ1本あたり20 Gbps) であったが、2001年には16波長x10 Gbps = 160 Gbps となり、その後も波長数は増え続け、今日では100波長前後のDWDMシステムが実用化されている。

5-2 DWDM用光ファイバ

波長分散がゼロに近い波長帯でDWDM方式を適用すると波長が異なる信号が同じ速度で伝搬するため信号同士の相互作用による非線形光学効果が顕著化し伝送品質が劣化する。そこで、あえて1.55 μm帯で波長分散をゼロにしない非零分散シフトファイバ (NZ-DSF; Non-zero Dispersion Shifted Fiber) を用いて非線形効果を抑制し、蓄積した波長分散はNZ-DSFと逆符号の波長分散を有する分散補償ファイバ (DCF; Dispersion Compensating Fiber) で相殺する手法が用いられるようになった。

NZ-DSFとDCFを組み合わせた光ファイバ伝送路による伝送距離と伝送容量の拡大は、後述するデジタルコヒーレント技術が現れるまで続いた。しかし、波長数増加ならびに伝送速度高速化に伴いNZ-DSFやDCFに対する波長分散特性への要求が厳しくなり、光ファイバの屈折率分布構造を3～4重の年輪状に精度良く形成することが求められ

た。このような複雑な屈折率分布の形成はVAD法にとっては容易ではなく、その製造に苦労は絶えなかった。

5-3 FTTHに向けた技術蓄積

1980年代、光ファイバを家庭にまで届ける加入者系には、技術完成度が高く接続も容易なGIファイバが用いられると考えられていた。実際、1984年の電電公社による三鷹地区での光加入者モデル実験ではGIファイバが用いられた。しかし、電電公社では本質的に広帯域特性を備えるSMファイバの加入者系への適用検討もなされていた。同時期にVAD全合成化が進展し、SMファイバがGIファイバを凌駕する経済性、および融着接続やコネクタで多心一括接続に必要な低偏心性を実現できるはずという技術的洞察により、最終的に加入者系にもSMファイバを適用するという決断が1988年にNTTでなされた。

1990年代には、NTTの研究所で加入者系に必要なケーブル技術、配線技術の開発が進められた。当初は、局側の伝送機器と各家庭を1本の光ファイバで結ぶSS (Single Star) 方式を前提に局から饋線点^{*5}までの饋線ケーブルとして4000心ケーブルの開発も行われた。1995年頃になると経済性を重視し局から家庭までの途中にスプリッタを設置するPDS (Passive Double Star) 方式への転換がなされ、饋線ケーブルの心数は1000心が変わった。なお、饋線点から各家庭まではメタルで結ぶCT/RT (Central Terminal/Remote Terminal) 方式や、各家庭近くの柱上から各家庭までをメタルで結ぶ π (パイ) システムも一部実用化されたが、あくまで過渡期の対応であった。

当社は、NTTの調達コンペを通じて、競合社と鎬を削りつつ各種ケーブルや配線物品の開発に注力した。こうして実現した技術が、2000年代に日本が世界に先駆けて構築したFTTH (Fiber To The Home) 網として結実した。

5-4 光ファイバの量産プラント

1980年代後半から国内外で基幹通信網中心に光ファイバが本格的に普及し始めた。当社では、事業部発足以来、光ファイバ製造設備の逐次増強に努めてきた。しかし競合社との競争を勝ち抜くためには、母材製造から線引、着色までの全工程に最新技術を適用した一貫製造ラインが必要となり、光ファイバの量産プラント建設が進められた。そして1994年に横浜製作所、1999年に栃木県清原工業団地に量産プラントが竣工、稼働した。

6. 激変期：2001年～2011年

6-1 ITバブル崩壊と回復、円高、震災

インターネットが普及し始めた1990年代末、通信需要の劇的増加とDWDMをはじめとする技術革新への期待から全世界的に通信関連企業への投資が過熱し2000年にピークを迎えた。ITバブルである。しかし、実需が伴わないバブルは2001年に米国で一気に崩壊した。日本では、2001年はFTTH網建設当初の通信業者の顧客囲い込み競争によ

る需要のため時間差が生じたが、2002年以降数年間、一気に光ファイバ需要が冷え込んだ。当社では、1999年に稼働した清原の新プラントも稼働率を落とさざるを得ず光ファイバの事業環境は極めて厳しいものになった。

しかし、インターネットの本格的な普及や携帯電話での画像のやり取りなどの新サービスの台頭により通信需要は着実に成長した。2004年に底を打った光ファイバ需要は2006年にはITバブル期と同水準の年間1億km前後にまで回復し、以降、光ファイバ需要は右肩上がりに成長した。その後、リーマンショックや超円高、東日本大震災などの逆風もあったが、徹底的な低コスト化で乗り切ってきた。

6-2 中国市場

2000年代は、中国が光通信インフラの拡充を本格的に進め、世界の光ファイバ消費中心が米欧から中国に移行していった時代である。2000年の世界の年間光ファイバ需要0.9億kmのうち70%は米欧だったが、2006年には世界需要1億kmのうち中国が0.3億km、5年後の2011年には、世界需要2億kmのうち中国が1億kmを占めるようになった。当社を含む光ファイバメーカは、拡大する中国市場での事業のために、中国メーカとの資本提携などを通じて中国現地での光ファイバ製造を開始した。

6-3 FTTHの普及

国内に目を転じると1990年代末には安価なブロードバンドサービスとしてADSLが普及した。さらに電力系の通信事業者がFTTH光サービスを開始する中、NTTは、1990年代に完成度を高めた加入者システムを「Bフレッツ」と銘打って2001年に商用化した。FTTHの契約者は、2008年に1000万に達した。その後、スマートフォンの普及とともに契約者数の増加に頭打ち傾向が現れ契約者数が2000万に達したのは2017年である。

6-4 デジタルコヒーレント

DWDMの後に現れた革新的な伝送技術がデジタルコヒーレント技術である。光ファイバ通信におけるコヒーレント伝送方式の検討は1980年代から行われていた。振幅と位相変調を組み合わせた多値化による伝送容量増大を図るもので、マイクロ波伝送で使われる技術である。信号検出には、受信端に設置された局発光と信号光の干渉を利用する。1990年代は、信号光と局発光の周波数や位相の同期などの技術障壁が高かったことに加え、DWDM方式の進歩もありコヒーレント伝送への関心が薄れていた。ところが、2000年代になりDWDM方式の伸び代が減少し新たな革新技術への期待が高まった。折しもLSI技術の進化によりコヒーレント伝送の受信端で位相変調された信号をデジタル演算処理することが可能となり、また半導体レーザーの狭線幅化など関連デバイス技術も成熟してきた。その結果、コヒーレント方式での諸課題が解決し1本の光ファイバで10 Tbps (= 100波長×100 Gbps) 伝送も実現し、2006年には、デジタルコヒーレントシステムが商用化され始めた。

デジタルコヒーレント方式の光ファイバに対するインパ

クトは、受信端での演算処理により光ファイバ中を伝搬する過程で生じた波長分散や動的な偏波分散変動に起因する線形な波形歪を補正することが可能になったことである。この結果、光ファイバの波長分散への要求が緩和し、複雑な屈折率分布が求められたDWDM用ファイバは必要なくなった。光ファイバへの要求は、低損失性と非線形波形歪の抑制に変わった。非線形波形歪の抑制のためには、コアを太くし光のエネルギー密度を下げれば良い。比較的単純な構造を得意とするVAD法にとって有利な展開になった。

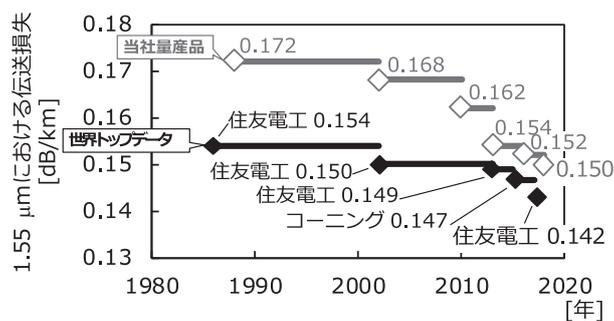


図5 純石英コア光ファイバ低損失化の推移

7. 新しい社会に向けて：2012年～

7-1 光ファイバ需要急伸、VAD普及、OTT台頭

2010年代に入ると、スマートフォンと4Gモバイル、クラウドサービスの普及、ハイビジョン高精細映像の利用拡大などにより、通信需要の増加にさらに加速度がついた。特に中国の光ファイバ需要の伸びはすさまじく、2018年に年間5億kmに達した世界の光ファイバ需要のうち中国が3億kmを占めた。この需要増に合わせ各国の光ファイバ製造メーカは設備投資を進めてきたが、その6割近くがコア／クラッド母材の製法としてVAD法を採用している。これは、日本が開発したVAD法の優位性の証左と言える。世界に普及したVAD法は2015年に国際的に権威のあるIEEEマイルストーンに認定された⁽¹⁸⁾。

一方、光ファイバの顧客も様変わりしている。OTT (Over the Top) と呼ばれるITサービスを提供する巨大事業者が、膨大なデータを保管するデータセンタを建設し、さらに海底ケーブルシステムを含む自前の通信インフラを構築するようになった。今や巨大OTT事業者は通信事業者に代わって業界の主役の座に就いた感がある。

7-2 極低損失光ファイバ

海底ケーブルは、2000年のITバブル期に一旦大きな建設ブームを迎えた後、しばらくブームは沈静化していた。しかし地球規模でクラウドサービスが普及しデータ交換に国境がなくなり始めた2013年頃から改めて大洋横断級の光海底ケーブルプロジェクトが増え続け現在に至っている。海底システムには、デジタルコヒーレント技術も適用され、必要となる極低損失光ファイバとして当社の純石英コア光ファイバが脚光を浴びるようになった。

前述したように当社は、純石英コア光ファイバを1980年代に開発し、その後も図5に示すように損失記録を塗り替えてきた⁽¹⁹⁾。現在の1.55 μmでの伝送損失のトップデータは、0.142 dB/kmである。トップデータだけではなく量産品の伝送損失も改善し0.150 dB/kmという極低損失品も製造・販売されている。

低損失化においては、損失の主要因であるガラスの密度揺らぎをラマンスペクトルにより定量的に把握し密度揺らぎを低減する改良を施した。また、デジタルコヒーレント通信に必要な低非線形性を実現するためにコアを太くする

と、ケーブル化時の側圧によるガラスの微小変形に対し敏感に損失増が発生する。この弊害を除くために光ファイバの被覆樹脂にも改良を重ねられた。その結果、実効コア断面積が130 μm²あるいは150 μm²という大口径極低損失光ファイバ (Z-PLUS Fiber130 ULLなど) が実用化され海底ケーブルに用いられている。

7-3 超多心光ケーブル

大規模データセンタでは、屋外ダクト内に大量の光ファイバを敷設するニーズが高く、限られたスペースに光ファイバを高密度に詰め込む技術が必要となる。そこで、当社は、柔軟性と一括作業性を両立した間欠12心テープ心線を用い3456心以上の超多心光ケーブル (図6) を開発し、世界に先駆けて製品化した⁽²⁰⁾。間欠テープは、複数の光ファイバをテープ状に並べ隣接する光ファイバ同士を間欠的につなげたものである。標準的なテープ心線と同様の一括接続性を維持しつつテープの柔軟性を高めケーブル内の空間に稠密に配置でき超多心化を実現している。また、被覆を薄くした外径200 μmの光ファイバを用いることで更なるケーブルの細径・軽量化も進められている⁽²¹⁾。

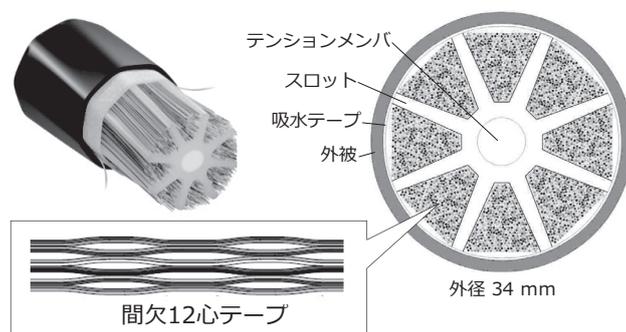


図6 超多心 (3456心) 光ケーブル

7-4 マルチコア光ファイバ

光ファイバの伝送容量の拡大は、ムーアの法則（10年で100倍）に匹敵する急激な伸びを見せ、光ファイバ1心あたりの伝送速度は理論限界100 Tbpsに近づいている。この限界を打破する手段として、複数のコアを有するマルチコア光ファイバ（MCF）が提案されている。当社もMCFの開発に取り組み⁽²²⁾、特にMCFの課題であるコア間クロストーク現象を解明し対策を講じたMCFを提案するなど実用的な見地から研究開発を進めている。

8. 結 言

光ファイバ通信ネットワークは、今や人類社会に欠かせないライフラインである。その構築に当社も少なからず貢献してきた。光ファイバの開発と事業に注力してきた関係者の努力の賜物である。本稿は、その一部を紹介したにすぎないが、これまでの軌跡を将来に向けた活動の糧とするきっかけになれば幸いである。

- ・Z-PLUS Fiberは住友電気工業㈱の登録商標です。
- ・BフレッツはNTT東日本、NTT西日本の登録商標です。

用語集

※1 GIファイバ

コアの屈折率分布を放物線状とし光信号の伝搬モード間での伝搬時間差を低減した光ファイバ。

※2 SMファイバ

コア径を約10 μm、コア・クラッドの比屈折率差を0.3～0.4%とし伝搬モードを単一に限定した光ファイバ。

※3 波長分散

光信号の伝搬時間の波長依存性。

※4 モードフィールド径

光ファイバ中の光信号パワ分布の拡がりを示す特性。

※5 饋線点（きせんてん）

局から各ユーザ向けに敷設されたケーブルの分岐点。

参 考 文 献

- (1) K. C. Kao, and G. A. Hockham, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, Proc. IEE, vol.113, no.7, pp.1151-1158 (July 1966)
- (2) 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 (November 1970)
- (3) 藤原国生、田中豪太郎、黒崎四郎、光伝送用ガラスの製造方法、特許1114674
- (4) 山本豊、川口宗孝、光伝送用ファイバーの製造方法、特許1276951
- (5) 白石敏、藤原国生、黒崎四郎、光伝送路及びその製法、特許1315123
- (6) J. B. Mac Chesney, et al., "Preparation of Low Loss Optical Fibers using Simultaneous Vapor Phase Deposition and Fusion," 10th Int. Congr. on Glass, Kyoto, 6-40 - 45 (July, 1974)
- (7) 島田禎晋 他、近距離光ケーブル伝送方式最終現場試験の概要、研究実用化報告vol.28, no.9, pp.1803-1822 (1979年)
- (8) T. Izawa, et. al, "Continuous fabrication of high-silica fiber preform," IOOC'77, C1-1, pp.375-378 (July 1977)
- (9) 島田禎晋 他、中小容量光伝送方式最終現場試験の概要、研究実用化報告vol.30, no.9, pp.2121-2132 (1981年)
- (10) 石田之則 他、F-400M方式現場試験線路の特性、研究実用化報告vol.32, no.3, pp.633-644 (1983年)
- (11) S. Hatano et al., "Multi-hundred-fiber cable composed of optical fiber ribbons inserted tightly into slots," Proc. IWCS 1986, pp.17-23
- (12) H. Suda, et al., Double-flame VAD Process for High Rate Optical Preform Fabrication, Electron. Lett. vol.21, no.1, pp.29-30 (January 1986)
- (13) 伊藤真澄 他、「3重火炎バーナによる高速合成の検討」、信学半導体材料全大、418 (1987年)
- (14) H. Yokota, et al., "Ultra-Low-Loss Pure-Silica-Core Single-Mode Fiber and Transmission Experiment," Postdeadline Paper OFC'86 PD3 (1986)
- (15) 重松昌行 他、「1.55μm帯分散シフトファイバの開発」、住友電気第130号、pp.1-6 (1987年3月)
- (16) R. J. Mears, et al., Low-Noise Erbium Doped Fibre Amplifier Operating at 1.54μm, Electron. Lett. vol.23, no.19, pp.1026-1028 (September 1987)
- (17) 重松昌行 他、「光ファイバ増幅器の開発と光CATV実証実験」、住友電気第137号、pp.28-35 (1990年9月)
- (18) <https://sei.co.jp/company/press/2015/05/prs038.html>
- (19) 長谷川健美、田村欣章、佐久間洋宇、川口雄揮、山本義典、小谷野裕史、「世界初0.14dB/kmの極低損失光ファイバ」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.14-19 (2018年1月)
- (20) 佐藤文昭、土屋健太、長尾美昭、平間隆郎、岡涼英、高橋健、「データセンタ向け超多心光ファイバケーブル」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.42-47 (2018年1月)
- (21) 佐藤文昭、鈴木洋平、高見正和、西川二郎、武田健太郎、「間欠テープ心線を用いた空気圧送用高密度マイクロダクト光ケーブル」、SEIテクニカルレビュー第195号、pp.13-17 (2019年7月)
- (22) 林哲也、中西哲也、「次世代通信用マルチコア光ファイバ」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.42-47 (2018年1月)

執 筆 者

金森 弘雄 : シニアスペシャリスト
光通信研究所



*主執筆者