

光ファイバおよびケーブルに関連する研究の現在と未来

とみた しげる
富田 茂

NTTアクセスサービスシステム研究所 プロジェクトマネージャ



NTTアクセスサービスシステム研究所では、光ファイバ、ケーブルをはじめアクセス系技術全般を研究・開発しています。組織の紹介とともに、低曲げ損失光ファイバやファイバヒューズ現象など各グループにおける研究のトピック、ならびに将来に向けた研究開発の方向性について説明します。

当研究所の光ファイバ関連研究開発体制

NTTアクセスサービスシステム研究所では、アクセス系技術の研究開発全般を扱っています。中でもアクセスメディアプロジェクトは、戦略的な検討により選定したテーマから核となる技術を抽出し、研究開発を行い、その成果を推進プロジェクトに引き渡すという位置付けにあり、要であるコア技術の研究開発そのものを一手に扱う部門です。プロジェクトは次の4グループから構成されています。

- ① 媒体応用グループ：次世代屋外光線路技術
- ② 媒体設備保守グループ：光線路試験技術，光媒体網管理運用技術，予防保全技術
- ③ 媒体基礎グループ：新構造光ファイバ関連の技術
- ④ 媒体設備運用グループ：光媒体の計測技術

各グループにおける研究トピック

■低曲げ損失光ファイバ（媒体応用グループ）

FTHH（Fiber To The Home）の急速な普及に伴い、近年は、熟練していない作業者が光ファイバの布設に当たることが少なくありません。そのために、現場において光ファイバの曲げによる損失の発生が頻発したのを機に、低曲げ損失光ファイバ（BIF: Bending-loss Insensitive Fiber）の開発が活発化しました。

ITU-T（International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector）に

おいて勧告化された、曲げ損失を低減した光ファイバ（G.657）は、従来の光ファイバ（G.652）との整合性に応じて、完全整合する「カテゴリA」と部分整合の「カテゴリB」とに分けて標準化が進んでいます（表）。

曲げ損失を低減させるアプローチには、屈折率分布を制御する方式（屈折率分布最適化型）と空孔を空ける方式（微細構造型）の2つのタイプがあります。前者は従来のSMF（Single-Mode Fiber）の屈折率分布を適切に制御して曲げ損失を抑制するもので、後者に比べると曲げ損失の抑制効果が十分に得られないのが難点です。一方、微細構造型には、屈折率の差

表 媒体応用グループ：BIFの開発と標準化

G.657 アクセス用 低曲げ損失光ファイバ	最小曲げ半径		
	10 mm	7.5 mm	5 mm
カテゴリA G.652完全整合	A1 規格あり	A2 規格あり	A3 継続審議
カテゴリB G.652部分整合	B1 標準品なし	B2 規格あり	B3 規格あり

G.652：通常の単一モード光ファイバ（SMF）

が非常に大きく取れ、設計の自由度が高いというメリットがあります。NTTでは従来から微細構造型を採用しています。微細構造型には、空孔アシスト型（HAF: Hole-Assisted Fiber）やナノ構造型などの種類があります。

NTTは、通常のSMFと同じ「単一モード伝送特性」とG.657.B.3の規格を大きく上回る「低曲げ損失特性」を同時に実現する単一モードHAFの設計技術を開発しました。HAFの環状領域に占める空孔部の面積割合（空孔占有率）とコア構造（コア径、屈折率）により、HAFの伝送特性を簡易に決定することができます。空孔占有率が大きくなるほど曲げ損失は抑制されますが、同時に単一モードとなるための最短の波長（遮断波長）が大きくなり、単一モード伝送ができなくなります。空孔占有率を0.3~0.4程度に設定すると、曲げ損失を抑制しつつ遮断波長を維持する最適な伝送特性を確保することができます（図1）。

単一モード伝送特性と低曲げ損失特性を同時に実現するHAFの例は、次のとおりです。

- ・空孔占有率：0.41
- ・曲げ損失（@1 625 nm, R=5 mm）：0.04 dB/turn
- ・遮断波長：1 126 nm
- ・損失（@1 550 nm）：0.19 dB/km

すでに、NTTは曲げ損失の抑制効果が大きいHAFを用いた曲げフリー光ファイバコードを実用化しており、宅内で一般ユーザが触れる場所に活用されています。今後、単一モードHAFをNTT局内や屋内設備、屋外設備などにも適用範囲を広げ、さらに高い伝送品質と高い信頼性の実現を目指したいと考えています。

■単一モードHAF所内用光コード（媒体設備保守グループ）

NTT局内のケーブルと所外のケーブルを結ぶ地点に、配線架という分岐接続する光配線盤があります。接続作業の際、作業者が光ファイバに直接接触することの多い個所であり、ここに低曲げ損失光ファイバを適用するのは非常に有効です。

耐衝撃性の実験においては、SMFでは大きく影響が生じるのに対し、単一モードHAFでは、衝撃発生時のフレームエラーが発生しないことを確認しました。単一モードHAFを配線架に適用すれば、誤って光ファイバを曲げたり引っかけたりしても、伝送品質を損なう心配がありません。

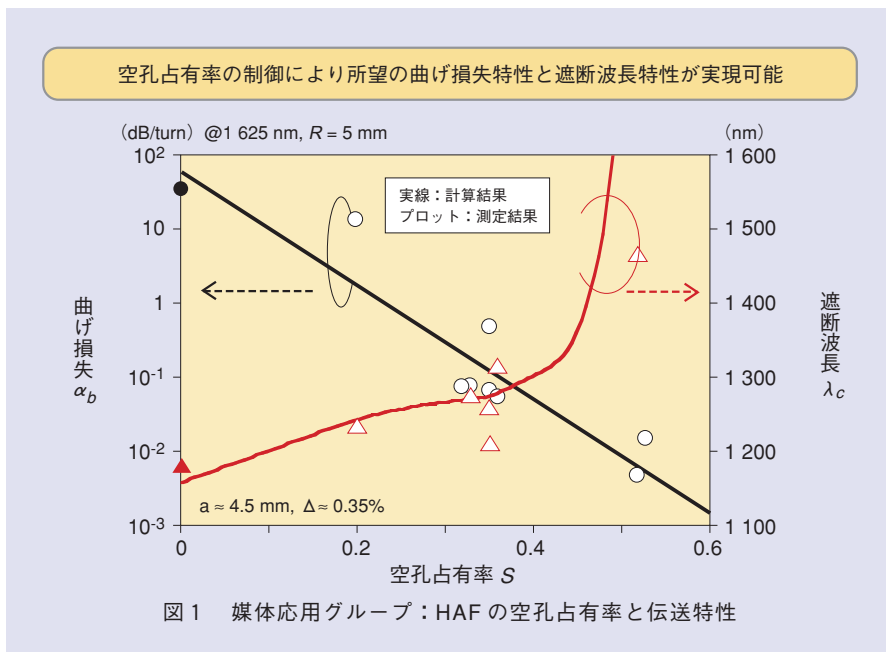
■ファイバヒューズ現象の解明とその抑止策（媒体基礎グループ）

入射光量が増えると光ファイバ内の温度が上昇してプラズマ状態になり、放電現象が発生することがあります。閃光は光源に向かって進みながら光ファイバを損傷させてしまいます。こ

れをファイバヒューズ現象といいます。SMFでは、1.3 W程度の光パワーでファイバヒューズが生じます（波長1 480 nmの場合）。

これに対し空孔構造型ファイバでは、しきい値が非常に高く、PCF（Photonic Crystal Fiber）では9.0 W（波長1 060 nmの場合）、HAFでは8.1 W（波長1 550 nmの場合）以上でないファイバヒューズが発生しないことが分かっています。10 Wを超える光源についても、PCFおよびHAFにおいては、波長1 480 nmおよび1 550 nmにおいてファイバヒューズは抑制されます。

また通常光ファイバと空孔構造型ファイバをつないだ場合には、ファイバヒューズ現象がその接続点で停止することが分かっています。SMFとHAFをつないだ実験では、SMF側から伝播した閃光は、SMFには多数の孔を空け破壊しましたが、接続点を通じたところで勢いを失い消滅しました。ヒューズ伝播が停止するのは、プラズ



マの広がり空孔に達した際に、その密度が一気に減少するためであると考えられます。

ファイバヒューズと空孔の関係を明らかにするため、複数のタイプのHAFとPCFとで伝播現象を比較したところ、空孔の内接円の直径(c)と、ファイバヒューズによって溶融した部分の直径(D_{melted})の関係が特性を決定付けていることが分かりました(図2)。D_{melted}がc未満、すなわちD_{melted}/cの値が1を下回る時にはファイバヒューズが伝播しますが、1より大きい場合には伝播は起こりません。

それならばプラズマが空孔に達することで抑制されるのではないかという予測のもと、D_{melted}とcがほぼ同等の構造のHAFでヒューズを伝播させると、コアの壊れ方が通常のSMFとは大きく異なっていました。SMFではごく短い間隔(10 μm)でコアが溶けてできた孔が断続的に残るのに対し、HAFでは非常に長い間隔(330 μm)で孔が空きコアが壊れていきます。コアの壊れた部分を分析すると、D_{melted}が徐々に広がって行って空孔に近づくと止まっていることが分かります。さらに、一度止まるとエネルギーの集中が起き、再びファイバヒューズ現象が起こるといふ繰り返し現象が見て取れます。境界現象のようなことが起こっているためと推測できるものの、詳しい説明には至っていません。

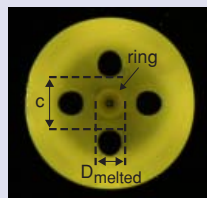
■長距離・高分解能測定が可能なPNC-OFDR(媒体設備運用グループ)

光ファイバの長手方向の障害点探索や歪分布測定技術であるコヒーレントOFDR(光周波数領域反射計)は、分解能には優れているものの、光源の

位相雑音の影響で測定距離が2~3 km程度に制限されるのが難点です。位相雑音の影響が小さいのが光パルスを入射することで光ファイバ内の測定を行うOTDR(光パルス試験器)ですが、長距離の測定が可能な一方で分解能が低いのが欠点です。

PNC-OFDR(位相雑音補償光周波数領域反射計)は長距離かつ高分

解能を実現したもので、補助干渉計によって位相雑音をモニタし、その影響を除去することで、遠方でも精度を維持することが可能になっています(図3)。補助干渉計は、位相雑音を電氣的にメモリしておき、それを重ね合わせ比較することで位相分を補償する働きをし、これにより、長距離になると位相雑音が大きくなりすぎて測定でき



- 竹永らによれば、ファイバヒューズの伝播現象は、空孔の内接円の直径cと溶融した部分の直径(D_{melted})の関係に依存する
- D_{melted}は、プラズマが発生した部分のサイズとほぼ同等と考えられる

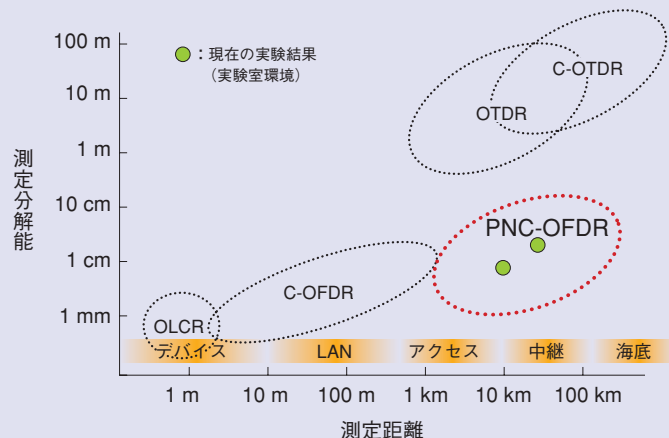
Fiber fuse propagation versus D_{melted}/c

	P _{in} (W)	D _{melted} (μm)	D _{melted} / c	Fiber fuse
HAF - A	15.6	23.5	0.77	Propagate
HAF - B	15.6	23.5	1.37	Not propagate
HAF - C	13.5	22.8	2.39	Not propagate
PCF	14.3	23.2	2.35	Not propagate

出典: Takenaga, ECOC2008, P.1.14

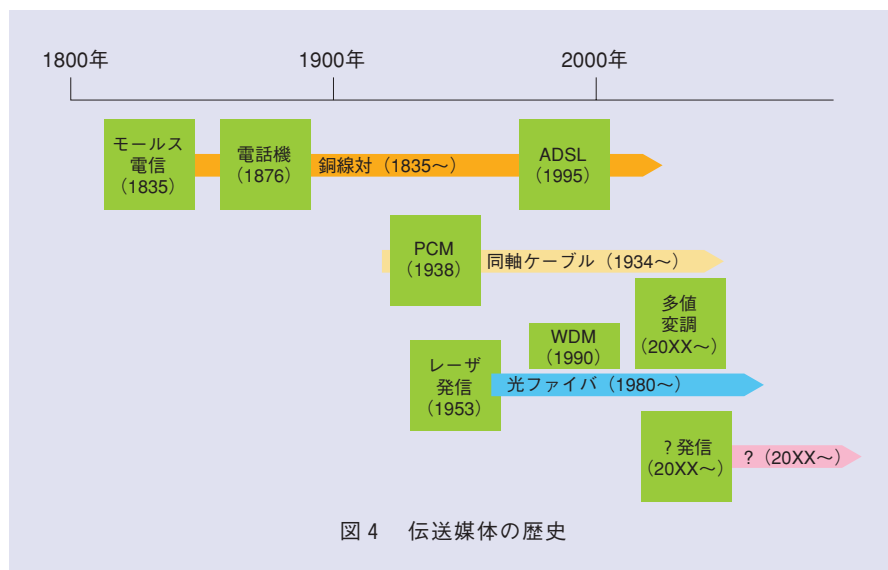
図2 ファイバヒューズと D_{melted}/c の関係

・40 kmで5 cm分解能を実現: 他のいかなる反射計でも未到達な領域



OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry
 C-OFDR: Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry
 OTDR: Optical Time Domain Reflectometry
 C-OTDR: Coherent-OTDR
 EDFA: Erbium Doped Optical Amplifier

図3 長距離・高分解能測定が可能なPNC-OFDR



ないという問題を解消しました。

PNC-OFDRでは40 km先で5 cmの分解能を実現することができ、これは他のいかなる反射計でも未到達な領域です。

PNC-OFDRの技術は、高PMD（偏波モード分散）区間の検出に非常に有効です。PMDは光の複屈折により生じる伝送速度の制限要因の1つです。最近の光ファイバではPMDは制御されていますが、古いものでは制御されておらず、伝送品質を確保するには高PMD区間を見つけて新しいものと交換する必要があります。高PMD区間では進行方向に短周期の偏波変動が生じるので、これを検出することで該当箇所が特定できますが、この変動周期は数十cm以下であり、検出には5～10 cm程度の高い分解能が要求されます。

また、伝送路の中継間隔は現在80 kmまで延伸しており、両端から測定するとしても40 kmの測定距離性能が必要になります。約40 kmのSMFの先に現場から採取した高PMDファイバを取り付けて、PNC-OFDRにより

測定した実験では、該当個所でPMDを明瞭に観測することに成功しました。

今後の光ファイバ研究の方向性

■次なる伝送媒体の模索

通信媒体はモールス電信から始まる銅線対による伝送で発展し、20世紀に入ってからは並行して同軸ケーブルによる伝送、光ファイバによる伝送と、新たな手段による方式が開発されてきました（図4）。

光ファイバ技術の発展により伝送容量は格段に増しましたが、容量の追求という点ではそろそろ限界が見え始めており、次世代の伝送媒体の発見および開発を模索する段階に入っています。新たな伝送媒体の候補として、光ファイバ系では次の技術を検討しています。

- ① マルチコア光ファイバ：1クラッド内に複数のコアを有することで空間密度を上げ、大容量伝送を実現
- ② マルチモード光ファイバ：MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）の伝送が可能な構造で、多チャネル伝送により大容量

量伝送を実現

さらに次の世代の検討としては、テラヘルツ帯域伝送媒体や、紫外線伝送媒体の可能性についても研究を進めています。

■ケーブルの高密度化

ケーブルの高密度化により伝送容量を拡大する技術として、超細径高密度光ケーブルがあります。1000心の場合の比較で、従来のスロット型光ケーブルでは外径23 mm、重量0.45 kg/m、超細径高密度光ケーブルでは外径15.8 mm、重量0.19 kg/mと、大幅にコンパクトな実装を実現しました。ケーブルの細径化・軽量化には複数の外国企業も参入していますが、最先端の他社研究品としても1.5倍以上の密度を誇ります。ただしファイバ密度の追求は極限に近づいており、今後は、ケーブルの研究開発の目的は機能面の充実にシフトしていくことになります。

■人材不足への対応

ケーブルの布設や保守にかかわる人員が、7年後には60%程度減少すると予測されます。若手を補充できてもスキルのある人材が大幅に不足してしまうため、スキルのない人材でも作業できるような機械やナビゲーションによるサポート体制の充実が急務です。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所
 アクセスメディアプロジェクト
 TEL 029-868-6141
 FAX 029-868-6440
 E-mail tomita@ansl.ntt.co.jp