

マルチコア光ファイバの 光伝送特性試験

マルチチャネルファイバテスト MT9100A

はじめに

近年、AIやクラウドサービスの普及に伴い、光海底ケーブルやデータセンタ間を接続する光通信分野では、伝送容量の増大が継続的に進んでいます。これまで広く利用されているシングルモード光ファイバ(SMF)は、1本の光ファイバ内に単一の光伝送路(コア)を備える構造であるため、光ファイバ一本あたりの伝送容量には物理的な限界が存在します。

この限界を克服する技術として、空間分割多重(Space Division Multiplexing : SDM)の一種であるマルチコア光ファイバ(MCF)が注目されています。MCFは1本の光ファイバ内に複数のコアを独立して配置することで、SMFと比べて大容量の光伝送を実現できると期待されています。

しかし、MCFをネットワークに利用する際には、光伝送品質に直接影響を及ぼすコア間クロストークの抑制が重要な課題となります。そのため、設計・製造や光ネットワークの構築・運用に至る各段階で、信頼性の高いコア間クロストーク測定手法が必要になっています。

本書では、MCFの光伝送特性の重要性と課題について紹介するとともに、従来手法の制約や新たな測定技術についても解説します。

マルチコアファイバの光伝送特性と評価の重要性

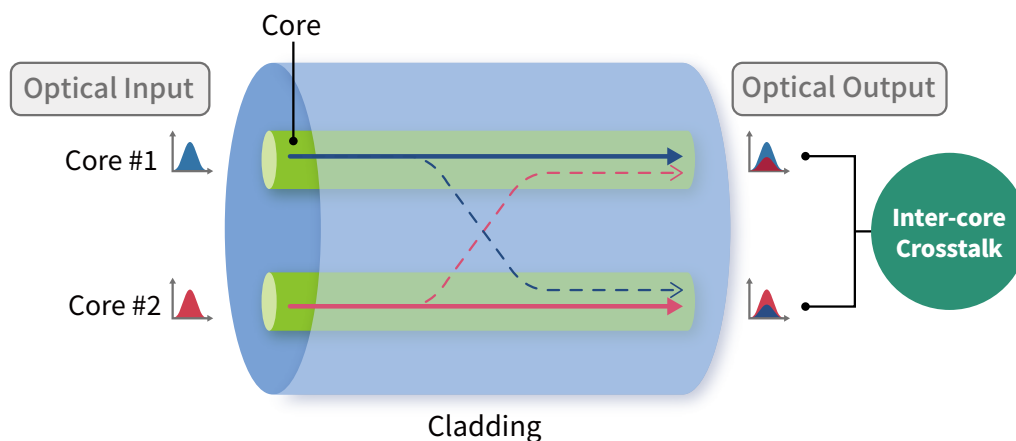


図1 MCFのコア間クロストーク(コア2つの例)

MCFをネットワークへ導入する際には、MCFに特有の光伝送特性であるコア間クロストークが重要な評価項目となります。コア間クロストークとは、あるコアを伝搬する信号光が隣接するコアへ漏れ、その結果として隣接コアの信号品質が劣化する現象を指します。この現象を避けるためには、MCFの設計段階から運用段階に至るまで、各フェーズでコア間クロストーク量を定量的かつ正確に評価することが不可欠です。

MCFの光伝送特性評価では、コア間クロストークに加えて、伝送損失や反射減衰量も主要な評価指標となります。これらの特性は、ファイバ自体の品質に加え、敷設時に生じる曲げや張力、接続部の加工精度など、さまざまな要因によって大きく影響を受けます。そのため、製造工程や現場において、迅速かつ高精度にこれらの特性を測定・評価できる体制の整備が求められます。

MCFのコア間クロストーク評価手法と課題

MCFのコア間クロストークの代表的な測定手法として、「透過法」と「ループバック法」が挙げられます。本章では、これらの手法の概要とその一例を解説します。

透過法とは

透過法は、MCFの一端から光を入力し、反対端で光パワーメータ (OPM) によって出力光パワーを測定することで、コア間クロストーク (XT) を評価する手法です。パワーメータ法とも呼ばれます。この測定では光源の種類によってクロストーク評価の手順や得られる測定精度が異なります。ここでは波長可変光源 (TLS) またはCW光源を用いる方法を解説します。

透過法 — TLSの場合^[1]

TLSを用いた透過法では、TLSの出力光波長を所定範囲で一定間隔ごとに掃引し、各波長の光パワーをOPMで測定します。MCFのコア間クロストーク (XT) は、MCFの微妙な屈曲やファイバ構造のわずかな不均一さなどで光の位相変化が生じることにより変動します。このことから、XTは、本質的に確率的な物理量として知られています。従来は、MCFを巻き直す、曲げ条件を変える、など物理的に擾乱を与えることで統計データを取得していましたが、再現性・作業効率の両面で課題がありました。

この課題に対し、文献^[1]では光源波長を掃引させることでコア間の位相差を変化させることができる点に着目し、TLSを使用して光源の波長を掃引する手法が提案されました。これにより、MCFの巻き直しなどの作業を伴わず、多数のXT測定値を得ることが出来ます。これらのXT測定値に演算を施すことで、安定したXTが得られることを明らかにしました。

例として、コア #1からコア #2へ漏洩するクロストークを評価する場合の手順を以下に示します。

1. 各波長で、コア #1の光パワー P_1 およびコア #2の光パワー P_2 を測定する。
2. 各波長で P_2/P_1 を算出し、これを当該波長でのコア間クロストークとする。
 P_2/P_1 は、隣接コアへの漏洩割合を示すためXTの定義に対応します。
3. 全波長で得られたクロストーク値の算術平均を求め、MCFの帯域平均XTとして評価する。
平均化するのは、図2 (b) のようなXTの測定ばらつきを平滑化し、実伝送帯域でのXT代表値を得るためです。

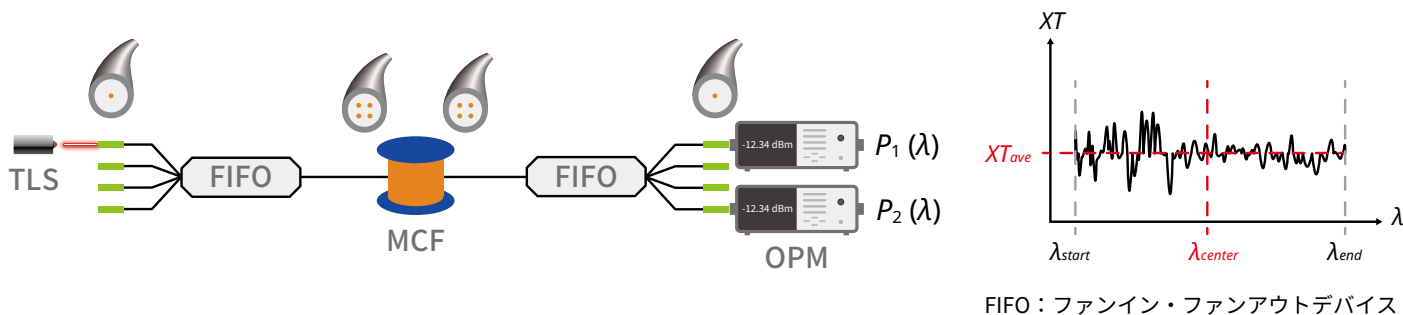


図2 TLSを用いた透過法 (a) 測定系 (b) TLSの各波長でのコア間クロストーク測定例

透過法 — CW光源の場合

TLSの代わりに、CW光源を用いてもXTを評価できます。Fabry-Perot (FP) 光源やスーパールミネッセントダイオード (SLD) 光源などの連続光 (CW) 光源を用いる場合、各コアの出力端における光パワーを光パワーメータ (OPM) で測定し、そのパワー比からXTを算出します。

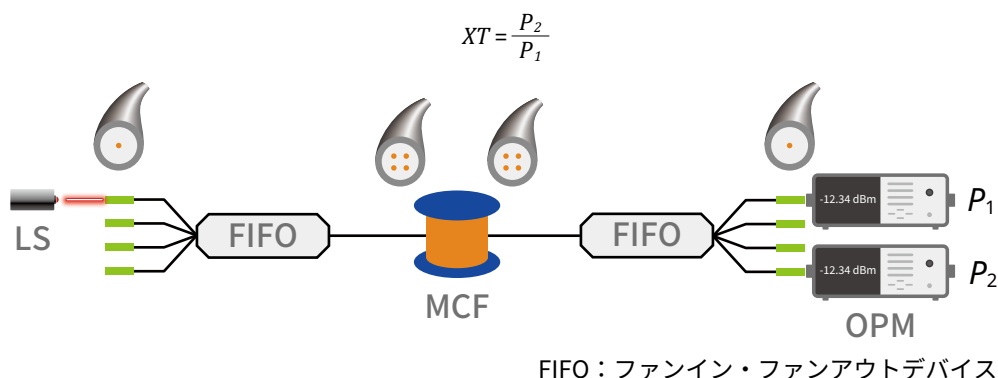


図3 CW光源を用いた透過法の測定系

透過法は一般的な手法であり、高感度のOPMを使用することで極めて小さいXTでも測定することができるため、開発時の測定に適しています。しかし、MCFの両端に光源とOPMを設置する必要があるため、MCFの両端の距離が長くなる敷設の場合には、両端へのアクセスが困難となるため、現場での保守や遠隔での測定には適しません。またコア数が多い場合には接続の切替に時間がかかるため、製造時には検査工数が増加します。こうしたケースでは他の測定法の検討が必要となります。

ループバック法^[2]とは

ループバック法は、OTDRとダミー-SMFを利用して、MCFのXTを高感度に測定する手法です。本方式の特長は、従来のOTDRで各コアの伝送損失、反射を測定しつつ、XT成分も検出できる点にあります。またXTは透過光として観測されるため、透過法に次いで小さいXTを高 SN比で観測可能です。

測定系は以下の構成で構成されます。

- OTDR本体： 励振側コアにパルス光 P_0 を入力し、MCFを伝搬させる。
MCFからの戻り光 (主に後方散乱光) を時間領域波形として取得する。
- FIFOデバイス： OTDRの単芯ポートをMCFの複数コアへ分岐・結合するインタフェース
OTDRからのパルス光をMCFの特定コアに入力し、戻り光を適切なコアから取得する構成を実現
- ダミー-SMF： MCFの反対側で、励振コアと測定対象コアをダミー-SMFの両端に接続し、パルス光のループバック伝送経路を形成

この構成により、OTDRのパルス光 P_0 を励振コア (例：Core1) へ入力すると、MCF内のコア間結合により隣接コア (Core2など) へXTパルス光成分 P_{xt} が生成されます。主パルス光成分とXTパルス光成分はいずれも、MCFの端面へ到達した後、ダミー-SMFを伝搬します。ダミー-SMF内では、主パルスはCore1 → ダミー-SMF → Core2、XTパルスはCore2 → ダミー-SMF → Core1という逆方向経路を伝搬するため、両信号はダミー-SMFの midpoint で同一到達時刻となるように設計されています。この midpoint ではSMF固有の後方散乱光も同時に発生するため、後方散乱成分とXT成分が重畳してOTDR側へ戻り、OTDR波形上では midpoint 位置に明瞭なXTピークとして観測されます。

本方式はXTを透過光成分として観測できるため、信号強度が大きく、低XT領域でも高い測定感度が得られます。さらに励振コアおよび測定対象のコアの損失や反射の分布も同時に測定可能です。比較的低コストで実現可能でもあり、MCFの特性評価に有効な手法です。

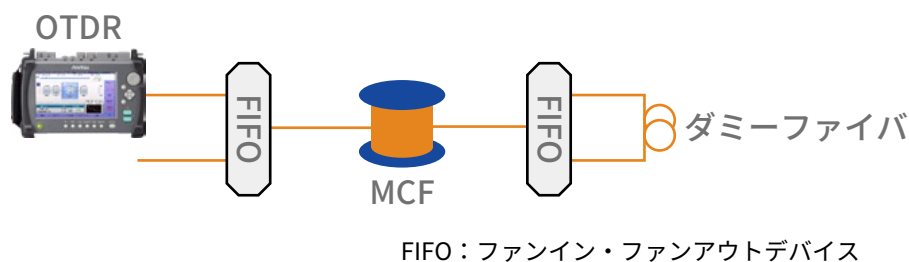


図4 ループバック法

MCFの評価では、コア間クロストークだけでなく、損失分布および反射分布の測定も不可欠です。これらは、施工品質の確認、不良箇所の位置特定、ならびに伝送特性の診断に必要です。しかし、従来の測定方法では、コアごとに光源や受光器の接続を切り替える必要があり、測定時間が長くなるという課題があります。そのため、MCFに対してこれら三つの特性を短時間で取得できる測定方式が求められています。

さらに、OTDRが提供する損失分布と同様に、コア間クロストークについても空間分布として取得できる測定方式が望まれています。MCFのクロストークは曲げ、製造ばらつき、外力などにより区間ごとに変動するため、単一の総合値だけでなく、位置分解能を持った分布情報が得られることが、実際の保守・運用上重要です。

課題を解決するマルチチャネルOTDR方式^[3]

前述のコア間クロストーク測定法では、MCFの位置を考慮したコア間結合を評価できないこと、さらにMCFのコアの切り替え作業が発生し、手間のかかることが課題となっています。そこで東北大学中沢特別栄誉教授らのグループは、前述の課題を解決する「マルチチャネルOTDR方式」を提案しました。この方式では、複数のOTDRユニットを同一クロックで同期動作させ、MCFの各コアからの後方散乱光を同時に取得することで、長手方向に沿ったモード結合 (mode coupling) を非破壊で測定することができます。

マルチチャネルOTDR方式の原理

マルチチャネルOTDR方式は、複数のOTDRユニットを同期動作させることにより、MCFの各コアからの後方散乱光を同一時間軸で取得する手法です。これにより、MCFの長手方向に沿ったモード結合を測定でき、得られたモード結合からコア間クロストークを算出することができます。

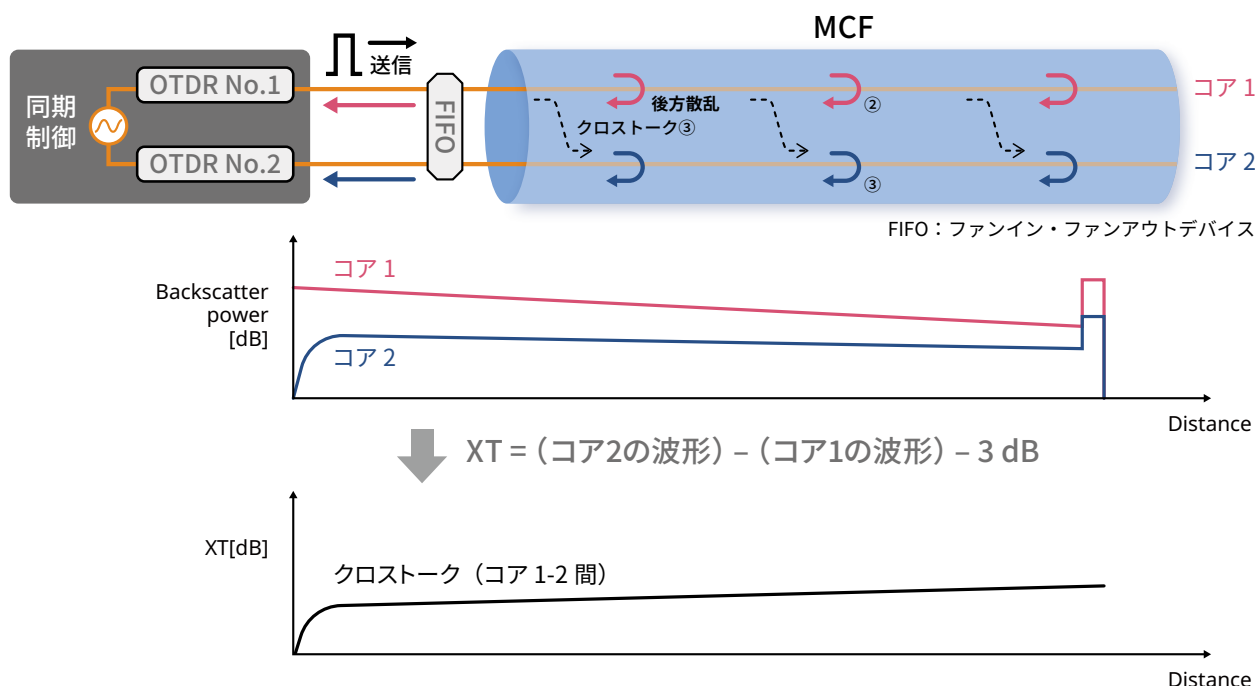


図5 マルチチャネルOTDR方式

コア間クロストークを得るには、まず、1つのOTDRユニットから励振コア (core1) にパルス光を入射します (①)。光が伝搬するにつれて隣接コアとの間でわずかな結合が連続的に発生し、コア2へ漏洩します (②)。これにより、励振していない側のコア (core2など) にも後方散乱光が生じます。マルチチャネルOTDRでは、励振コアと非励振コアの後方散乱光を同時に取得できるため (図5)、その散乱光の比率 (mode coupling ratio) を用いて、位置に応じたモード結合の強さを求めることができます。

取得した2本の後方散乱信号の比較により、長手方向のモード結合の変化を読み取ることができます。OTDRは往復光を計測する方式であるため、観測されるモード結合比の変化量は実際の値の2倍として現れます。このため、結合量を算出する際には3 dBの補正を行い、正しいクロストークの増加量として換算します。

このように、マルチチャネルOTDR方式は、従来法では困難であった「距離方向のクロストーク分布」の測定を実現するだけでなく、複数コアを同時に計測できるため、測定効率の大幅な向上が可能となる点でも優れた手法です。

マルチチャネルOTDR方式を実現する試験ソリューション

マルチチャネルOTDR方式を実現する試験ソリューションとして、アンリツのマルチチャネルファイバテスタ MT9100Aを用いることで、マルチコア光ファイバ(MCF)の光伝送特性を、片端から・複数コア同時に効率よく評価できます。MT9100Aは最大4つのコアを同時に測定でき、損失分布・反射分布・コア間クロストーク分布といった評価項目を、距離方向(長手方向)に沿って可視化します。これにより、従来のようなコアごとの接続切り替えや複雑な測定手順を大幅に減らし、MCF評価の作業負担を軽減します。



図6 マルチチャネルファイバテスタ MT9100A

試験構成と測定イメージ

測定では、MCFをSMFへ分岐できるFIFOを介して、MT9100Aの各チャネル(ポート)とMCFの各コアを接続します。MT9100A側は片端接続で測定が完結するため、遠端側に測定器や作業者を配置する必要がなく、研究開発だけでなく製造ラインやフィールドでも扱いやすい構成です。

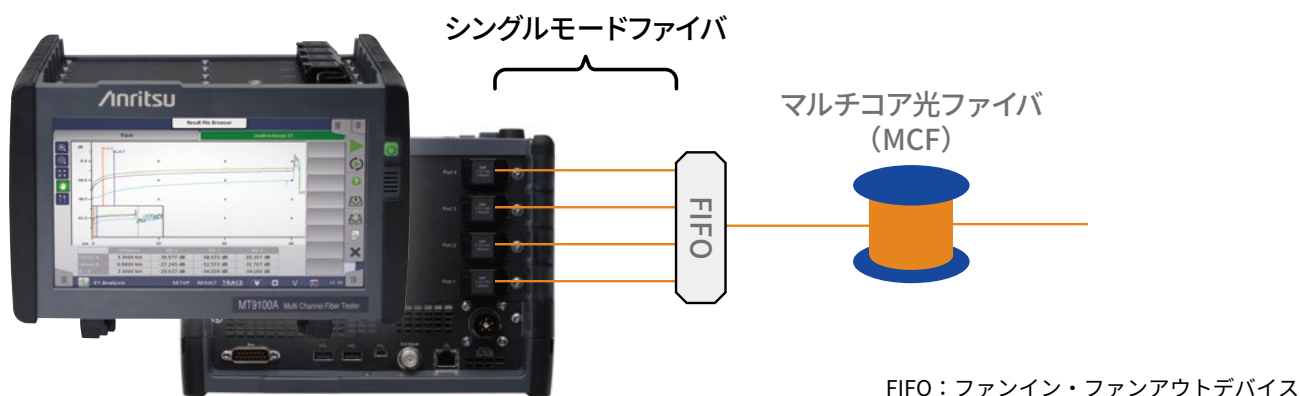


図7 MT9100Aを用いたMCFの測定イメージ

試験の流れ

1. 接続：まず、測定対象であるMCFの各コアとMT9100Aの各チャネル（ポート）をFIFOを介して接続します。
接続時には、光ファイバのコネクタの種類（UPC/APC）が正しいことを確認し、ファイバのフェルール端面を十分にクリーニングしてください。これにより、接続損失やコア間クロストークのばらつきを最小限に抑えることができます。
2. 測定条件設定：次に、測定するコア数（最大4コア）、使用する波長（1310/1550/1625 nm）、平均化時間（たとえば30 s/波長）など、評価に必要な測定条件を設定します。
レベルオフセットや波長補正値を設定すると、測定精度を高めることができます。※詳細はAppendix参照
公称波長により近い状態で測定が必要な場合は、中心波長確度オプション（ ± 10 nm@1550/1625 nm）の利用も推奨されます。
3. ワンアクション測定：準備ができれば測定を開始します。装置内部で送信ポートが自動的に切り替わり、各コアの後方散乱信号を同一の時間軸で取得します。外部光スイッチや手動切り替えは不要で、全てのコアを一括で評価できます。
4. 結果確認：取得したトレースデータから、損失や反射、クロストークを距離方向に可視化し、光伝送特性を総合的に把握できます。
また、測定データはXTA形式（波形データ）やCSV形式（数値データ）で自動/手動保存可能です。USBメモリやネットワーク経由でPCに転送し、品質記録やトレーサビリティ管理に活用可能です。
5. 良否判定：良否判定のしきい値をあらかじめ設定しておくことができます。しきい値を超えた場合は自動的にNG判定が表示され、異常区間やイベント（接続部・融着部など）も自動検出されます。必要に応じて、分布トレースを用いてコア間クロストーク増加箇所の特定や原因分析を行います。サマリ画面でコア間クロストークや損失の分布を一目で確認できます。



アプリケーション セレクタ

結果 OK

No.	波長	テスト	コアID	テスト結果	OTDR	損失方向XT
11	1625nm	XT3-1		完了	OK	-30.997 dB
		XT3-2		完了	OK	-17.343 dB
		OTDR		完了	OK	
		XT3-4		完了	OK	-19.525 dB
12	1625nm	XT4-1		完了	OK	-17.286 dB
		XT4-2		完了	OK	-32.350 dB
		XT4-3		完了	OK	-16.900 dB
		OTDR		完了	OK	

アプリケーション セレクタ

結果 OK

		1310 nm	1550 nm	1625 nm	
送信	ポート1				
	ポート2	-14.523 dB	-30.997 dB	-17.286 dB	-12.615 dB
	ポート3	-17.882 dB	-17.343 dB	-32.350 dB	-14.521 dB
	ポート4	-30.686 dB	-14.159 dB	-16.900 dB	-12.244 dB
受信	ポート1	-19.732 dB	-31.067 dB	-19.525 dB	-16.464 dB
	ポート2				
	ポート3				
	ポート4				

このようにMT9100Aを導入することで、MCFの研究開発・製造・フィールドの各シーンにおいて、高精度かつ効率的な測定・解析を行えるようになります。特に、全コアを同時に扱える点は測定の繰り返し作業を減らし、評価のスループット向上に直結します。

コア間クロストーク分布可視化の利点

マルチチャネルOTDR方式の大きな特長の一つが、コア間クロストークを距離方向の「分布」として可視化できる点です。

従来の透過法などでは、ファイバ全体の平均値としてクロストークを評価することが一般的でしたが、これでは「どの区間でクロストークが増加しているのか」を把握することが困難でした。

MCFでは、敷設時の曲げ半径、張力、固定方法、接続部の加工精度などにより、クロストークが区間ごとに変動します。マルチチャネルOTDR方式では、各コアの後方散乱信号を同一時間軸で取得することで、コア間クロストークの発生位置や増加区間を距離分解能をもって把握できます。

これにより、

- 設計段階で想定した敷設条件が妥当かどうかの検証
- 製造工程や敷設作業に起因する品質ばらつきの把握
- 許容クロストークを満たすための曲げ条件や敷設ルールの明確化

といった、敷設要件の定量的な策定が可能になります。分布測定は、MCFの信頼性を確保するうえで不可欠な情報を提供します。

シングルエンド測定の利便性

従来のMCF評価手法では、光源や測定器をファイバの両端に設置する必要があり、敷設後のフィールド環境では作業負担が大きな課題となっていました。遠端側への人員配置や機材搬入が必要になるだけでなく、作業時間や調整工数の増加にもつながります。

マルチチャネルOTDR方式では、片端（シングルエンド）からの測定で全コアの評価が完結します。MT9100Aを用いることで、遠端側に測定器や作業者を配置する必要がなく、現場での作業負担を大幅に軽減できます。

この特長により、

- 敷設後のフィールド検証や保守作業
- 電源確保が難しい屋外・地下環境
- 生産ラインでの抜き取り検査や全数検査

といったシーンでも、迅速かつ柔軟な評価が可能になります。シングルエンド測定は、MCF評価を「特別な作業」から「日常的な検証作業」へと変える大きなメリットを提供します。

測定時間・コストの大幅削減

マルチチャネルOTDR方式では、複数コアの測定を同時に実行できるため、従来手法と比較して測定時間を大幅に短縮できます。MT9100Aでは、測定開始後に装置内部で送信ポートを自動的に切り替え、各コアの後方散乱信号を連続して取得します。外部光スイッチや手動での接続切り替えは不要です。

たとえば、

- 全コア・全波長の測定をワンアクションで実施
- 測定時間は「コア数 × 波長数 × 平均化時間」に依存
- 測定データは自動保存・自動判定が可能

といった特長により、作業の属人性を排除し、評価フローの標準化を図ることができます。

その結果、

- 測定作業時間の短縮
- 人員コストや作業ミスの低減
- 製造・フィールド双方での運用コスト削減

を実現します。マルチチャネルOTDR方式は、MCF評価の効率化と高精度化を両立する、実用性の高い試験ソリューションです。

まとめ

MCFの普及に伴い、伝送特性評価の効率化・高精度化はますます重要になっています。マルチチャネルOTDR方式は、全コア同時・分布的な評価を可能にし、従来手法の課題を解決する有力なソリューションです。今後は、さらなるコア数増加や新規格への対応、評価自動化の進展など、MCF評価技術の発展が期待されます。アンリツでは、関連製品やサポート体制の強化を通じて、現場の課題解決に貢献していきます。

Appendix

測定時の実践ポイント

MCFの光伝送特性評価を効率的かつ高精度に行うためには、適切な測定フローの設計と、現場での実践的なノウハウが不可欠です。ここでは、MT9100Aを用いた評価の一連の流れと、各工程でのポイントを詳しく解説します。

補正・精度管理のポイント

● ノイズフロア管理

コア間クロストークを再現性良く測定するために、波形レベルはノイズフロアから見て4.5 dB以上高くなるようにパルス幅や平均化時間を調整します。波形レベルはパルス幅に依存し、2倍にすることでおよそ1.5 dB以上向上させることができます。またノイズフロアは平均化時間に依存し、2倍にすることでおよそ0.75 dB低減することができます。一般にコア間クロストークが比較的大きいステップインデックス型のMCFでは、パルス幅1 μs、平均化時間30 sで十分な場合が多いです。

● デッドゾーン対策

近接イベントの分離が必要な場合は、短パルス・近距離レンジ・高サンプリング分解能を選択します。パルス幅を短くするほどダイナミックレンジが低下するトレードオフの関係にあるため、クロストークが見える最小パルス幅を選択します。

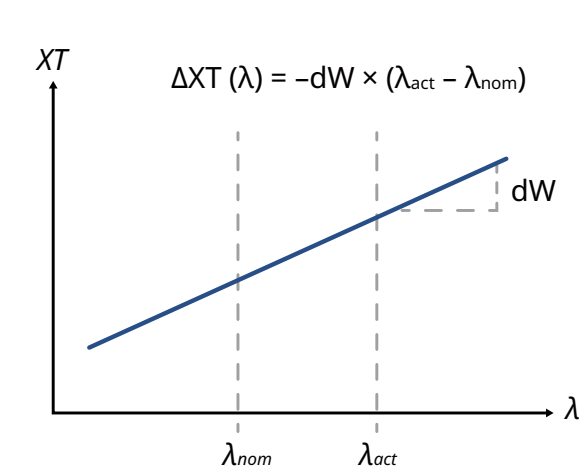
● 波長方向の補正

クロストークは波長依存性が存在し、長波長になるほど大きくなる傾向にあります。公称波長に合ったクロストークを求めたい場合、MT9100Aの実効中心波長と評価対象のMCFが持つクロストークの波長依存性の値を入力します。実効中心波長(λ_{act})はMT9100Aから光パルスを出射し、光スペクトラムアナライザで測定することで得られます。またクロストークの波長依存性(dW) はたとえば透過法(波長掃引)のデータから傾きを求めます。これらの値が設定されると次の計算式に従って補正量(ΔXT)を算出し、実測したクロストーク量(XT_m)に対して補正した結果(XT_c)が得られます。

$$\Delta XT(\lambda) = -dW \times (\lambda_{act} - \lambda_{nom})$$
$$XT_c(\lambda) = -XT_m(\lambda) - \Delta XT(\lambda)$$



測定用光パルスの設定と実効中心波長の入力



$$\Delta XT(\lambda) = -dW \times (\lambda_{act} - \lambda_{nom})$$

ΔXT(λ) [dB]	XT変化量 値が小さくなるほど、クロストークが大きくなる(悪化する)ことを示します。
dW [dB/nm]	コア間クロストーク係数 詳細は、係数設定を参照してください。
λ _{act} [nm]	実効波長 光スペクトラムアナライザで測定した波長
λ _{nom} [nm]	公称波長 1310 nm、1550 nm、1625 nmのいずれか

補正後のXT測定値であるXT_c(λ)は、以下の式で示されます。

$$XT_c(\lambda) = -XT_m(\lambda) - \Delta XT(\lambda)$$

XT _m (λ) [dB]	XT測定値(補正前)
XT _c (λ) [dB]	補正後のXT値

● レベル方向の補正

装置近端での損失がコア毎に異なる場合、損失の差分 [dB] × 2倍だけクロストークに誤差を生じさせます。MCFまでの接続で複数の接続点があり、コア毎の損失差が大きくなる可能性が予想される場合はレベルオフセット機能を使用することが有効です。それぞれの接続損失を補正值として設定することで、測定の再現性を高めます。「自動設定」を選択することでそれぞれの接続損失を測定前に算出することができるため手間を省くことができます。



関連製品

マルチチャネルファイバテスト MT9100A

マルチチャネルファイバテスト MT9100Aは、マルチコア光ファイバの光伝送路（コア）間クロストークを含む光伝送特性の評価を実現した業界初の*OTDRです。最大4コアの同時測定とマルチコア光ファイバのコア間クロストークを含む光伝送特性を距離方向に可視化することで、マルチコア光ファイバの障害点の特定を実現します。MT9100Aを導入することで、マルチコア光ファイバの研究開発や製造工程はもちろん、ネットワーク構築および運用のあらゆるシーンにおいて、高精度かつ効率的な測定・解析が可能となります。エンジニアにとって、革新的な技術で作業の品質と生産性を飛躍的に向上させる理想的な試験ソリューションです。

*：2025年11月現在、当社調べ

[詳細はこちら](#)



参考文献

- [1] Tetsuya Hayashi, Toshiki Taru, Osamu Shimakawa, Takashi Sasaki, and Eisuke Sasaoka, "Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber," Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 4, pp.583-589, Feb 15, 2012
- [2] May Nakagawa, Masaki Ohzeki, Katsuhiko Takenaga, and Kentaro Ichii, "Novel Inter-core Crosstalk Measurement Method Using Loopback and Bidirectional OTDR Technique," The 48th European Conference on Optical Communication, Tu4A.4, 2022.
- [3] Masataka Nakazawa, Masato Yoshida, and Toshihiko Hirooka, "Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR," Optics Express, vol. 20, no. 11, pp. 12530-12540, May 2012.