

高速光ファイバ通信における ”反射減衰量”の影響を徹底解析！ 反射による通信エラーを解決します。

2022年 7月 13日

NTTアドバンステクノロジー株式会社 藤原 稔 (jin.Fujiwara@ntt-at.co.jp)

株式会社マクニカ 阿部野 一郎 (abeno-i@macnica.co.jp)

株式会社マクニカ 松野 晃樹 (matsuno-ko@macnica.co.jp)



藤原 稔

NTTアドバンステクノロジー株式会社
光プロダクツビジネスユニット

東京生まれの東京育ちで、東京ヤクルトスワローズのファン歴36年。
(今年も素敵なシーズンになりそう。)

光ネットワークにおける様々な課題を解決し、光ネットワーク社会の効率化や安全に貢献することが目標。



松野 晃樹

マクニカラビスカンパニー FAE

茨城県出身の24歳。現在普通二輪免許の取得に向けて奮闘中。

2021年より株式会社マクニカにて光トランシーバー・光計測機器のFAEとして技術サポートに従事。



阿部野 一郎

マクニカラビスカンパニー FAE

ワイヤレス製品のアプリケーションエンジニアとして豊富な経験を持つ。
高周波・無線システムが専門。

近年は、光トランシーバや光計測機器の技術サポートなど、光通信の分野に活動を拡大中。

1. はじめに(前回JANOG49発表内容のおさらい)
2. 反射減衰量の影響可視化(アイパターン計測)による検証
3. 反射減衰量の悪化原因と対策
4. まとめ

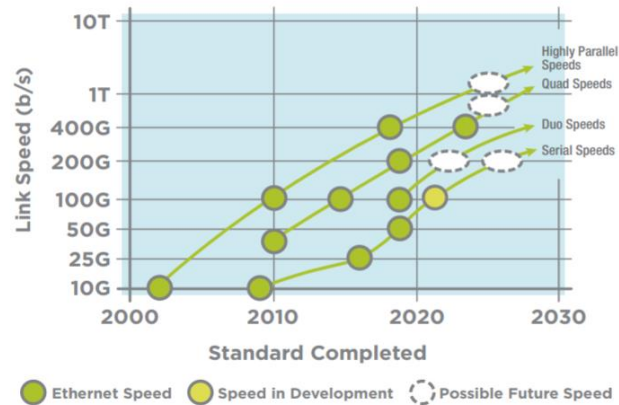
1. はじめに(前回JANOG49発表内容のおさらい)

Ethernet規格の動向

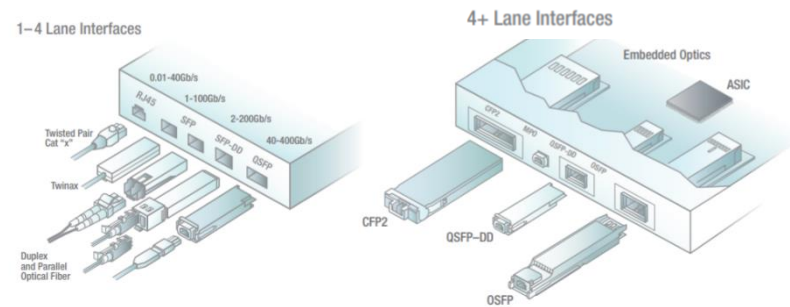
前回JANOG49発表内容のおさらい

◆今後のEthernet規格の動向

PATH TO SINGLE LANE



Ethernet Alliance EthernetRoadmap 2020より抜粋
<https://ethermetalliance.org/technology/2020-roadmap/>



400G、800G、1.6Tの規格化が進行中。
 (今のところ、トランシーバのインタフェースは必ず光コネクタが用いられる)
そろそろ100Gを導入するところも増えている。



100G化による通信トラブルの相談が**急増!**

100GbE規格のおさらい

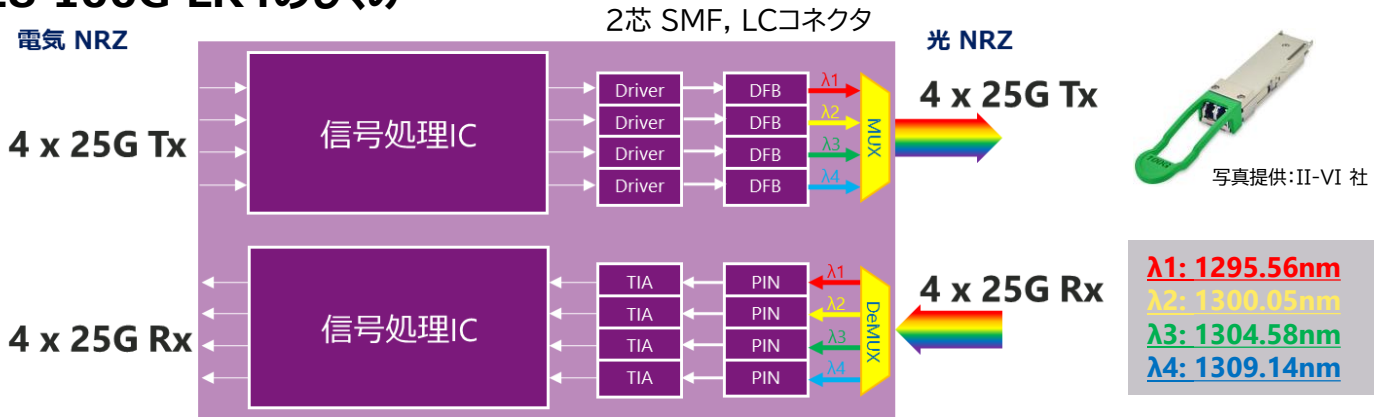
前回JANOG49発表内容のおさらい

| 対応規格 | 対応規格名称 | ファイバ | 最大接続距離 | 許容損失 [dB] | 総反射減衰量 [dB] |
|-------------|---------------|---------|--------|-----------|-------------|
| IEEE802.3bm | 100GBASE-SR4 | マルチモード | 150m | 1.5 | - |
| IEEE802.3ba | 100GBASE-SR10 | マルチモード | 100m | 1.9 | - |
| | 100GBASE-LR4 | シングルモード | 10km | 6.3 | 21dB |
| | 100GBASE-ER4 | シングルモード | 40km | 18 | 21dB |

反射減衰量について規定されるようになった！

[補足] 25GbEと100GbEの関係

◆ QSFP28 100G LR4のしくみ



100Gの中身は25Gを4レーン多重 ⇒ 光学特性は**25Gの1レーン**について規定

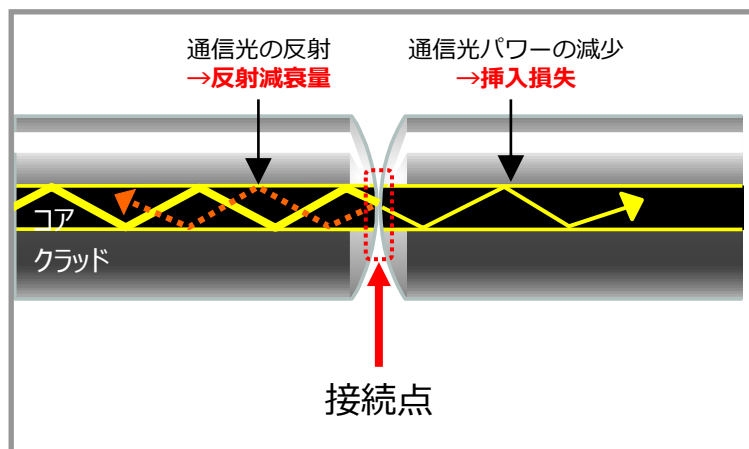
ということは、**25GbEの規格も同様に反射減衰量の規定がある**・・・？

| 対応規格 | 対応規格名称 | ファイバ | 最大接続距離 | 許容損失 [dB] | 総反射減衰量 [dB] |
|-------------|------------|---------|--------|-----------|-------------|
| IEEE802.3CC | 25GBASE-LR | シングルモード | 10km | 6.3 | 21dB |
| | 25GBASE-ER | シングルモード | 40km | 18 | 21dB |

25GBASE-LR/ERも同様に**反射減衰量**は規定されている！

前回JANOG49発表内容のおさらい

◆ 光コネクタ接続点における光信号透過イメージ



「挿入損失」・・・接続箇所では**失われた光の強さ(量)**

⇒ **大きいほど伝わる信号が小さい(弱い)**

代表的な規格値：0.5dB以下（約10%のロス）



光トランシーバの受光感度外となって通信エラー or リンクダウン。

「反射減衰量」・・・接続箇所では**反射した光の強さ(量)**

⇒ (絶対値が) **小さいほど反射した光が大きい(強い)**

代表的な規格値：-40dB以上（1万分の1が反射）



反射減衰量の値が悪いと、通信にどんな影響がある・・・？

→ **実験してみました！**

反射の影響実験結果のまとめ

前回JANOG49発表内容のおさらい

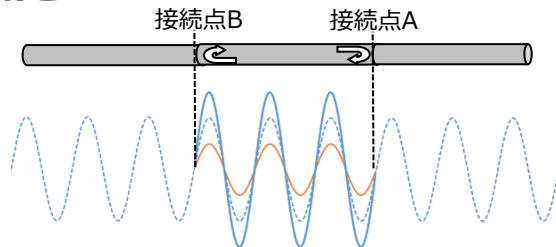
総反射減衰量が悪い状態では通信エラーが発生することは間違いないが、光伝送路の接続環境に**条件**あり。

その条件とは・・・

◆**反射減衰量の悪い光コネクタ接続点が複数個所**あること。

⇒光伝送路の中で**多重反射**が発生することが、通信エラー発生の原因と推測。

多重反射とは



①接続点Aで送信光が反射

②接続点Aで反射した光が、手前の別の接続点Bでさらに反射

この①と②が繰り返されることにより、光が反射し続ける現象を**多重反射**と呼ぶ。

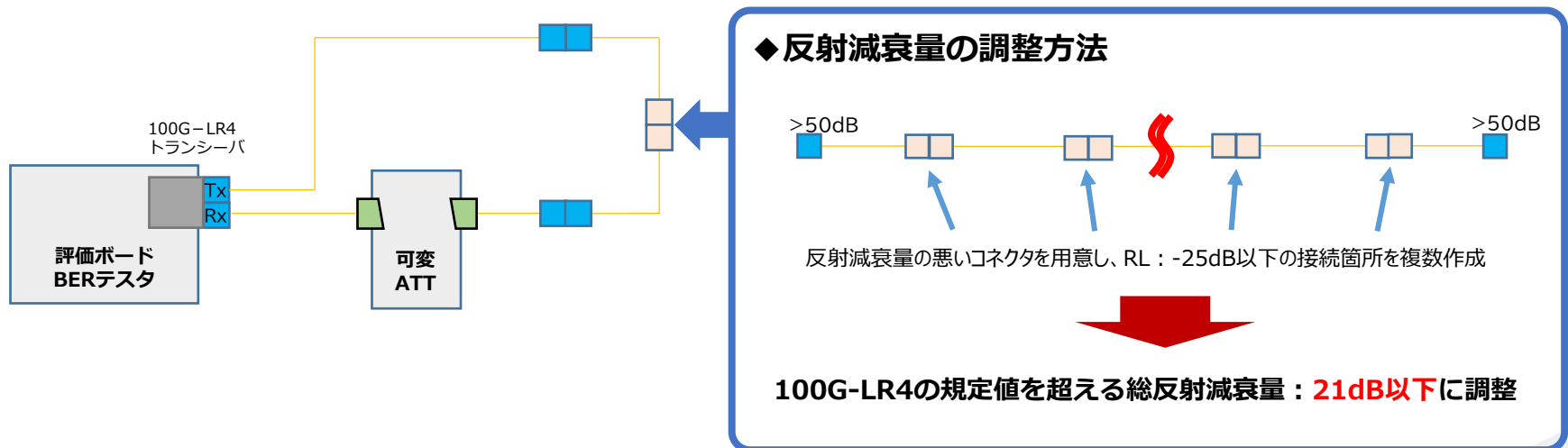
多重反射が発生することで、**送信光の波に干渉**がおり、**波形の劣化**が発生。

それが複数個所で発生することにより、読み取りエラーとなるほどのジッタ揺らぎに繋がっていく！？(要追加検証)

2. 反射減衰量の影響可視化による検証

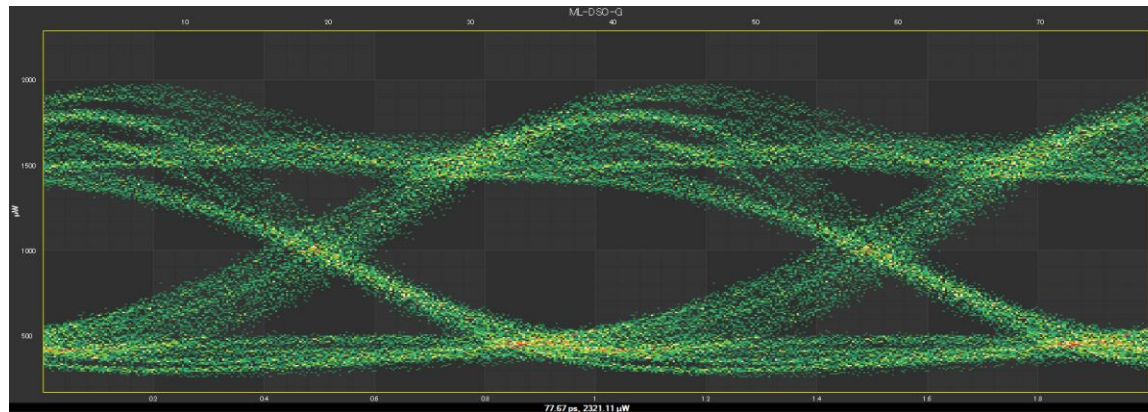
検証環境接続構成

- ① 100G-LR4環境に反射減衰量の悪い接続箇所を複数挿入し、多重反射を発生。
- ② その状態で、アイパターンとBERを計測

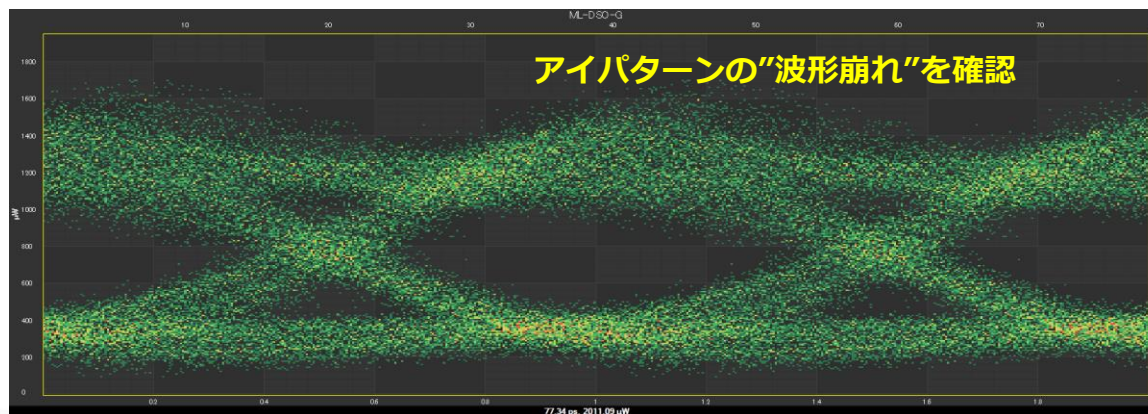


平常時と多重反射発生時のアイパターン比較

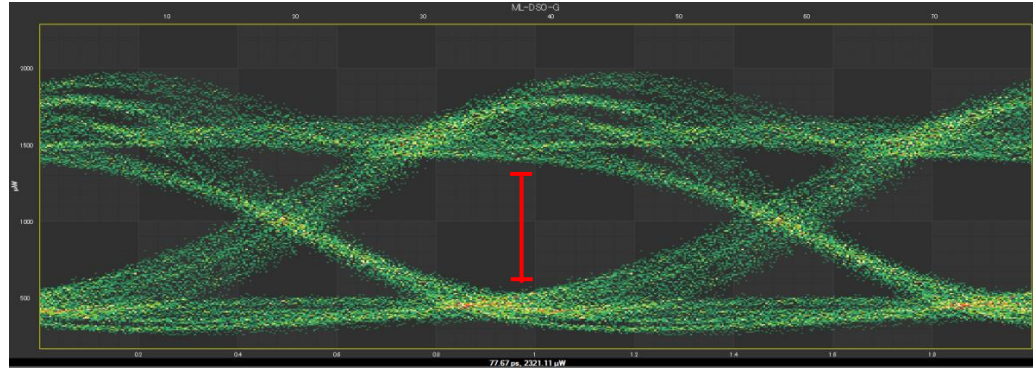
◆ 平常時のアイパターン



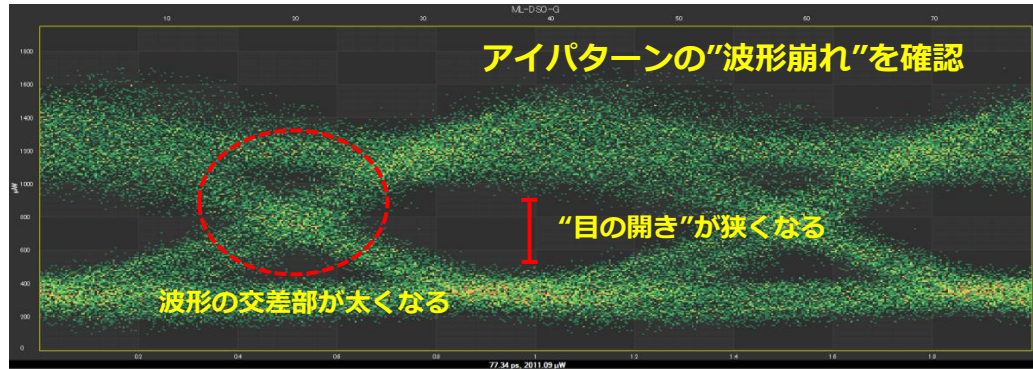
◆ 多重反射発生時のアイパターン



◆ 平常時のアイパターン



◆ 多重反射発生時のアイパターン

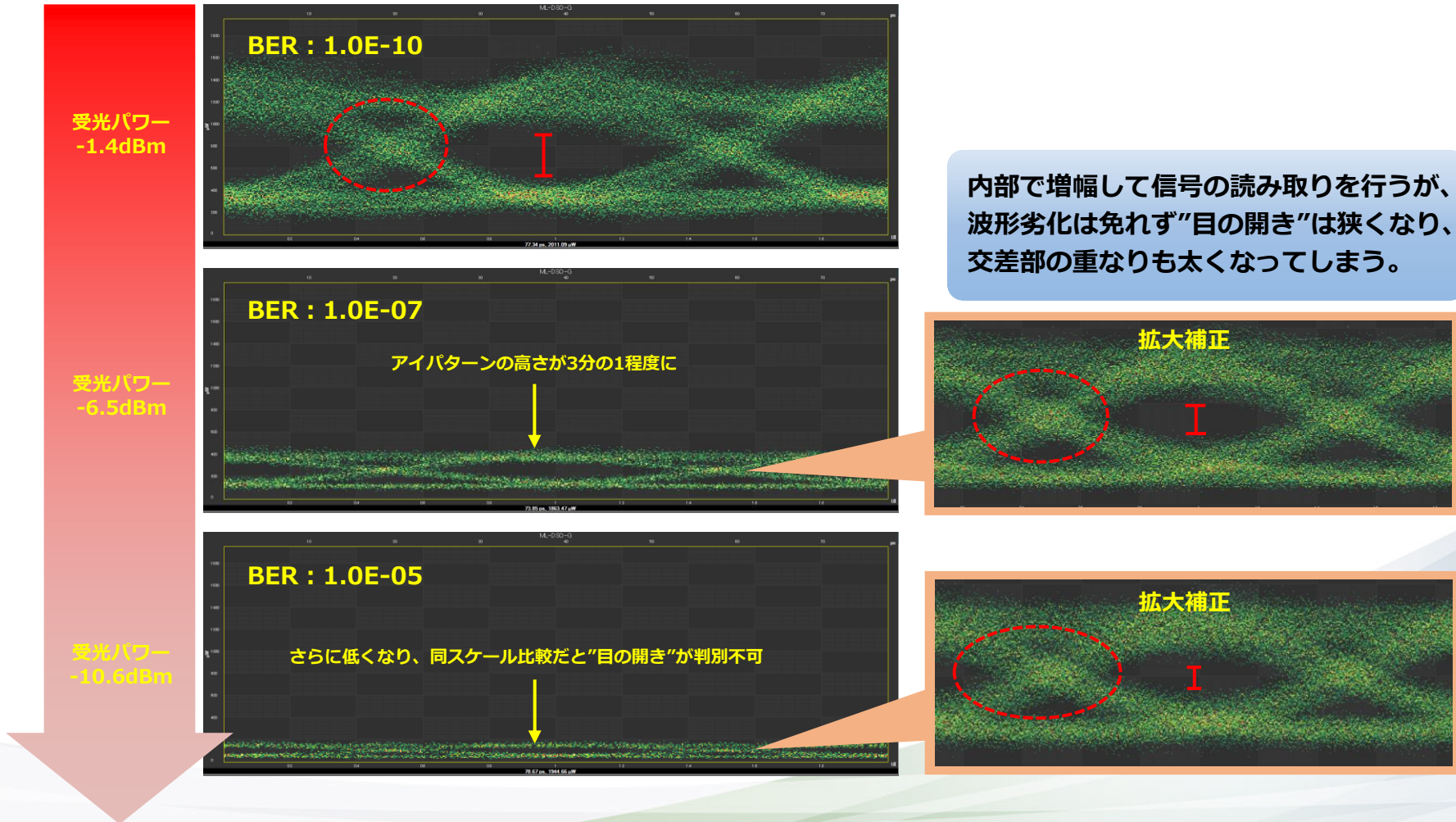


多重反射発生時には、波形の劣化が発生していることを確認。

乱れた波形により"目の開き"が狭くなることで**信号の誤認**、波形の交差部の重なりが太くなることで**ジッタ揺らぎ**を引き起こし、その結果BERの劣化に繋がっていく。

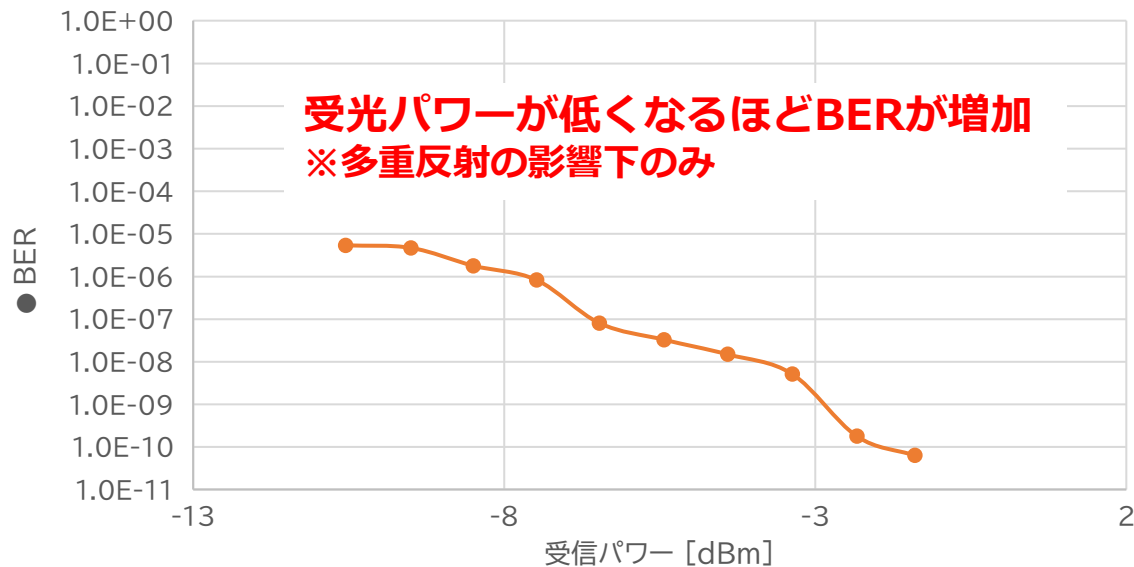
受光パワー状態による反射の影響度合い①

◆多重反射発生時に光パワーを減衰させた各アイパターンを同スケール比較



受光パワー状態による反射の影響度合い②

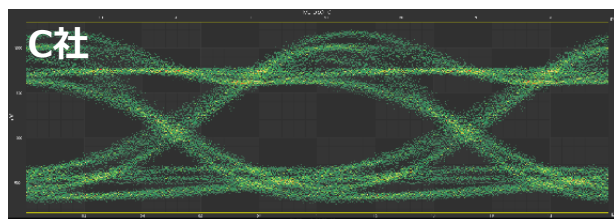
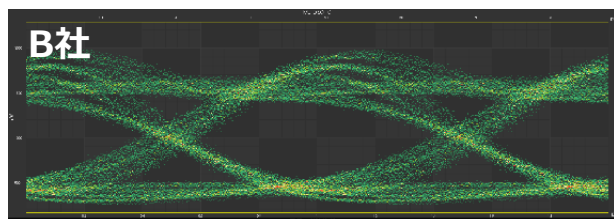
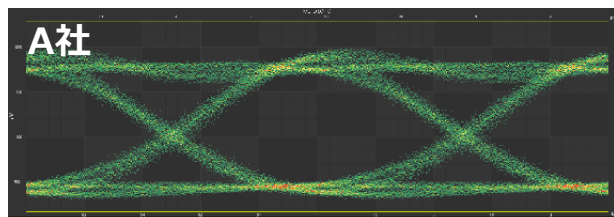
◆多重反射発生時に光パワーを減衰させた場合のBER傾向



光パワーレベルの低下に伴い、多重反射による送信光への影響度合いは増加

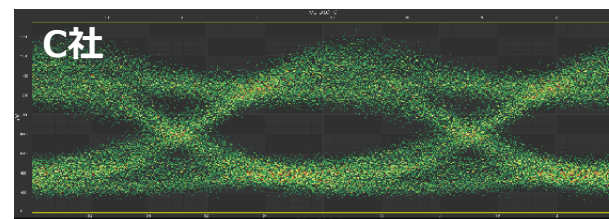
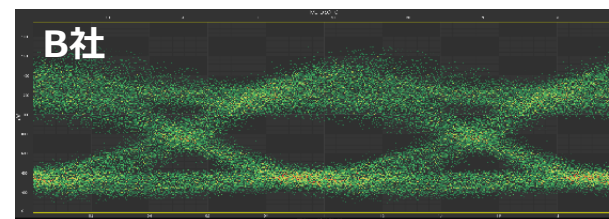
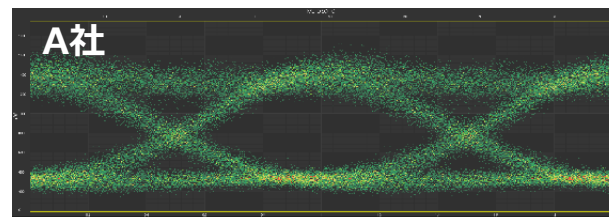
光トランシーバメーカーによる性能差①

◆ 平常時のアイパターン



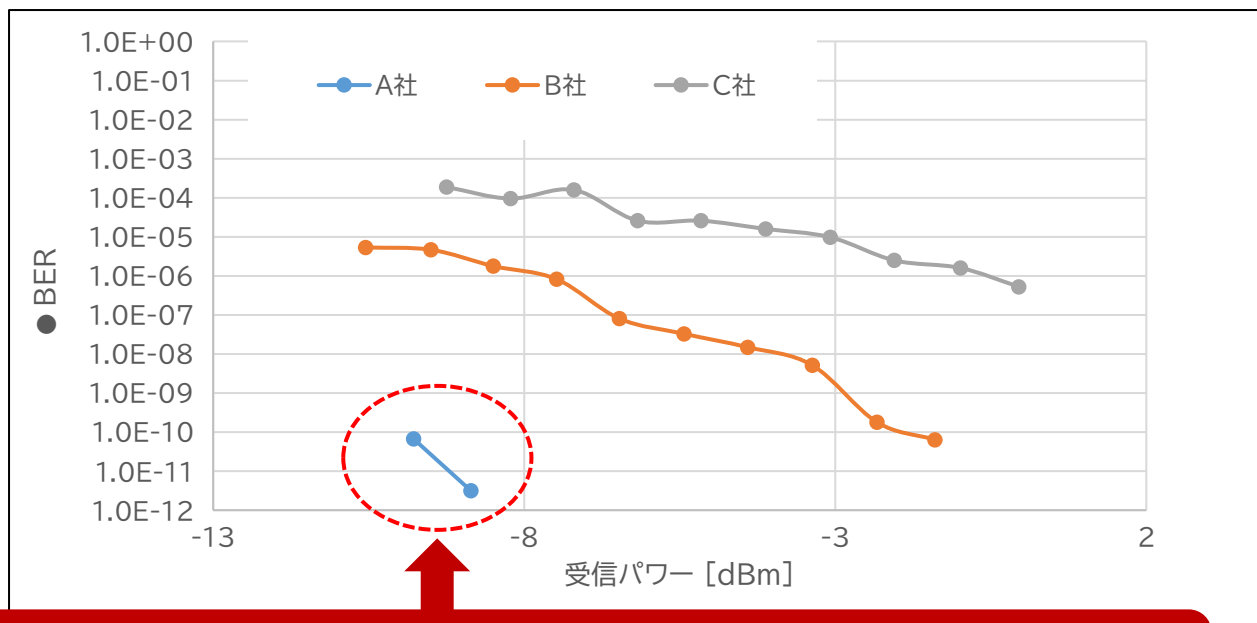
多重反射
発生時

◆ 多重反射発生時のアイパターン



同じ規格であっても、メーカーによってアイパターン形状に差がある。

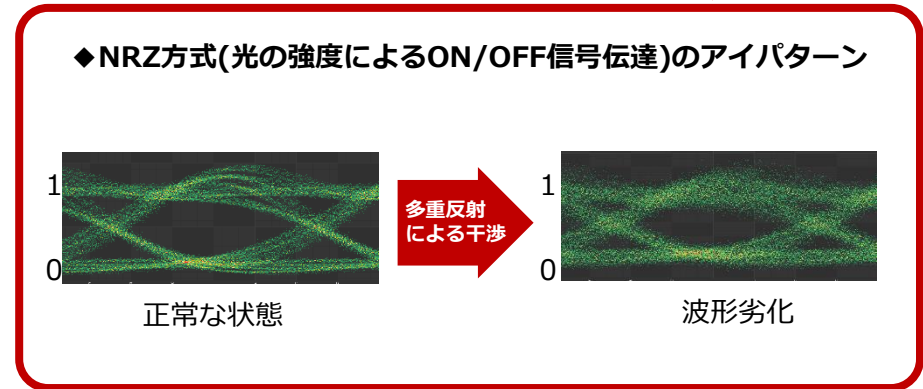
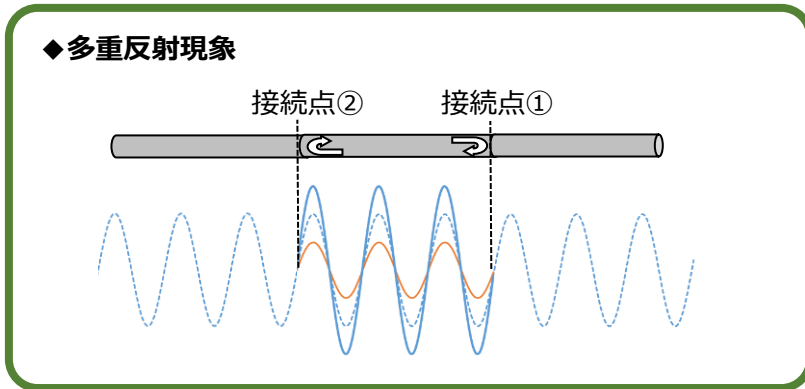
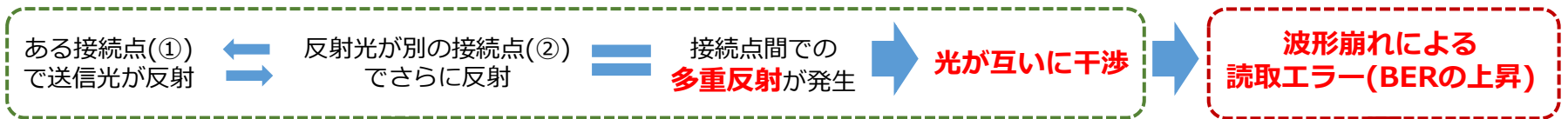
◆メーカー別BER



A社は、多重反射発生時でも-8dBmまではエラーが発生しない(エラーフリー)。光パワーを減衰させて-9dBmくらいからようやくエラー発生を確認。それでも他2社よりBERは低い

反射減衰量の規格値(21dB以下)を下回った環境では、メーカーによる性能差を確認。一方で、規格値内(21dB以上)であればメーカー差分は確認できず。
⇒ **規格値の遵守は重要。**

多重反射が通信光に影響を及ぼすロジック

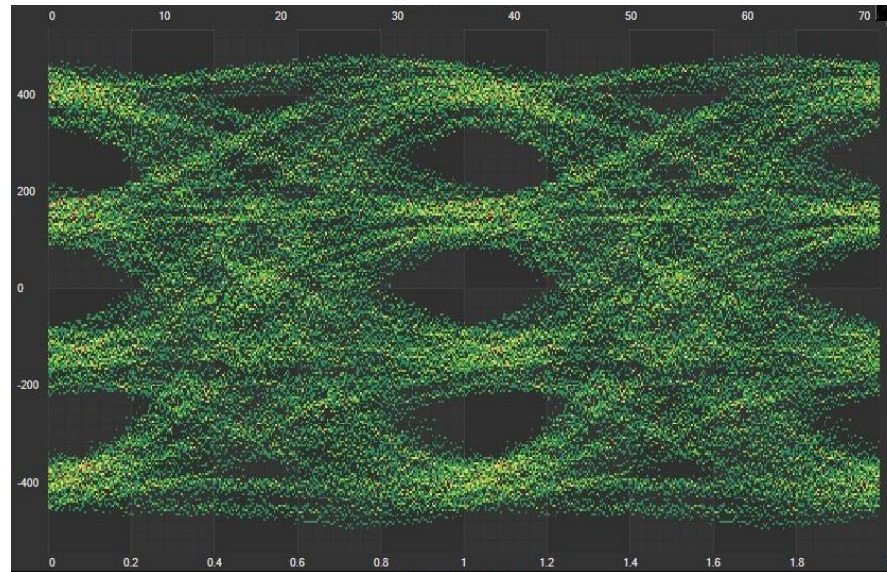


今回のアイパターン計測により、多重反射が発生することで**送信光の波に干渉**がおり、**波形の劣化**が発生するという仮説は正しかったことを確認。
 また、**光パワーレベルの低下**すると、多重反射による送信光への**影響度合いが増加**することも確認。

➡ **光コネクタ接続点が多い光ファイバ伝送路は要注意。**
光パワーレベルに余裕をもったネットワーク設計を推奨。

[補足]PAM4変調方式について

◆PAM4のアイパターン



波形が複数重なり、光トランシーバ側の判別が複雑化。

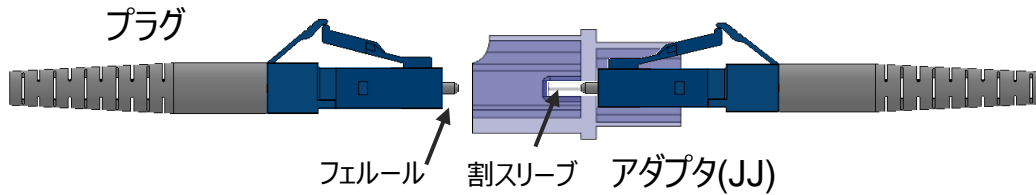
FEC(誤り訂正)機能があっても、多重反射影響時の信号読み取りエラーを防ぐことは困難。



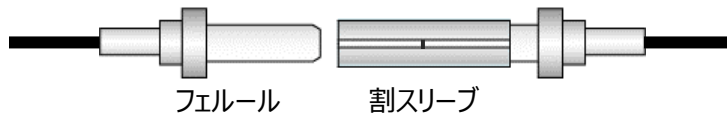
**400GbE以上は今のところPAM4方式が主流。
光ファイバ伝送路には、より厳しい光学特性が求められる**

3. 反射減衰量の悪化原因と対策

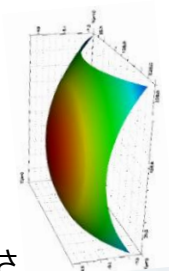
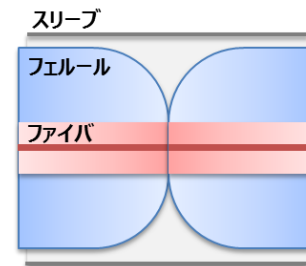
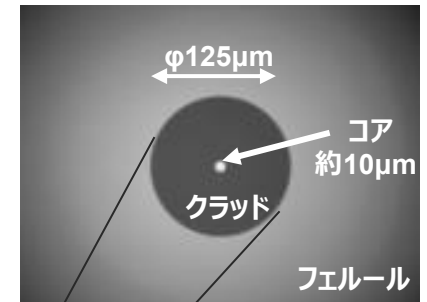
光コネクタの構造



精密フェルールを割スリーブで軸合わせ

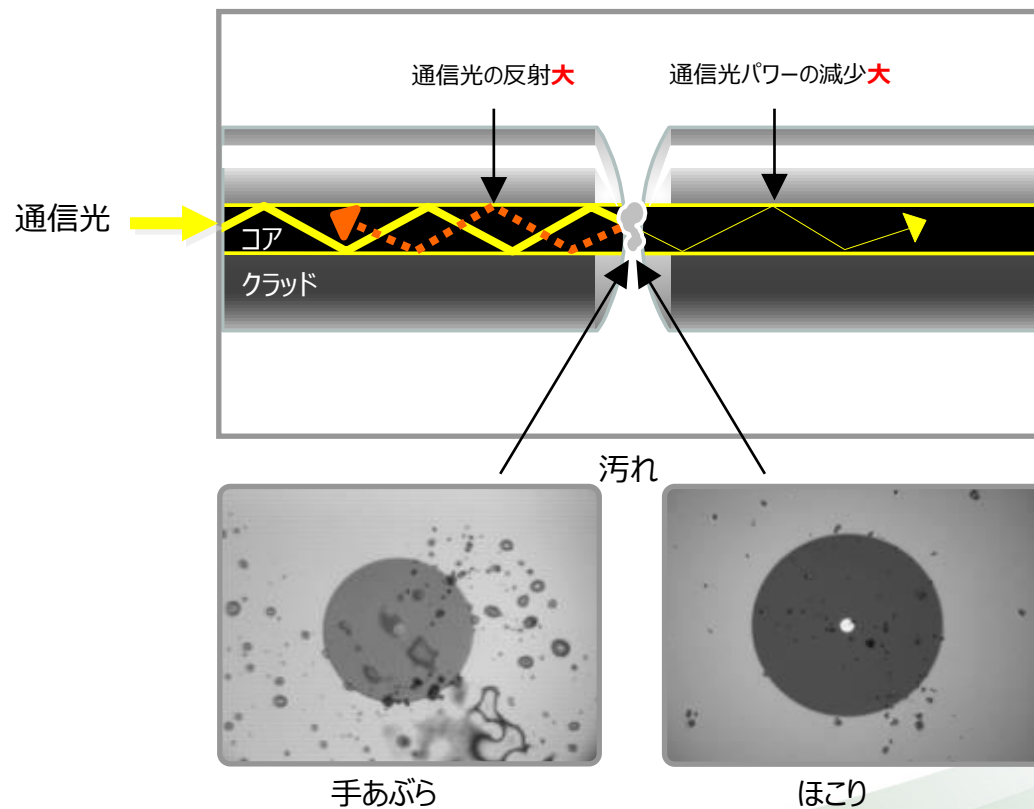


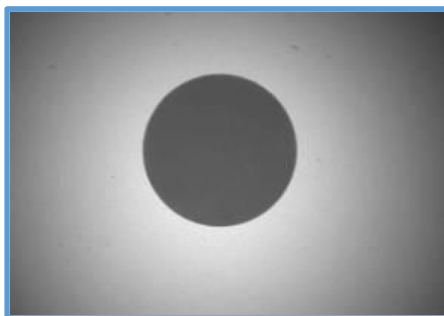
スプリングによりフィジカルコンタクト
(フェルールとファイバの**弾性変形**による密着)



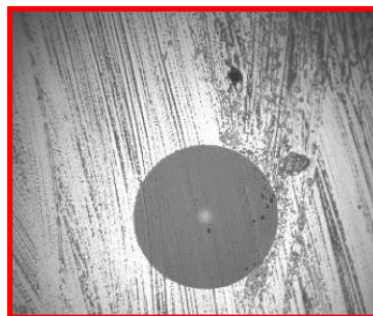
ファイバ高さ
-0.05~0.1 μm

光学特性の悪化を引き起こす、光ネットワーク不具合原因の大半は**光コネクタの端面汚れ**。
汚れにより通信光の反射と損失が増加。

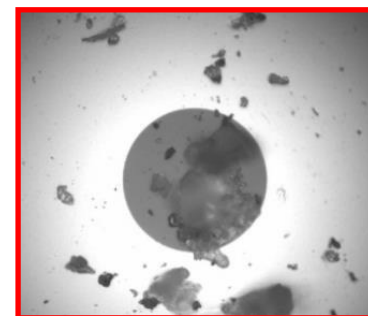




○綺麗な端面



×手脂



×ほこり

◆光コネクタの宿命

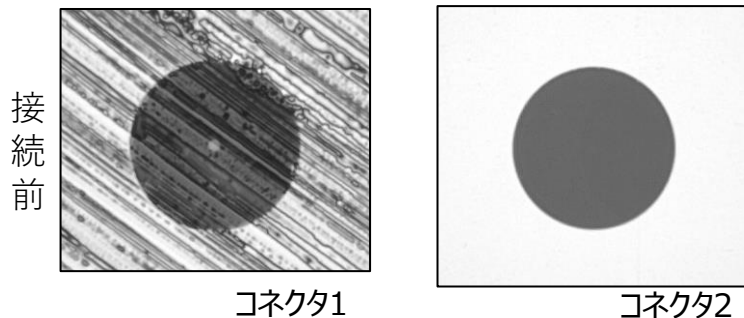
- ・ 光ファイバが露出 ⇒ 汚れが付着しやすい
- ・ 肉眼では汚れが見えない ⇒ 見過ごしがち

◆代表的な汚れの種類

- ・ 手脂：作業時における指の接触。
- ・ ほこり：キャップ無しでの放置。ラック、衣服 etc との接触。

光コネクタ端面汚れが光学特性に及ぼす影響

◆手脂が付着

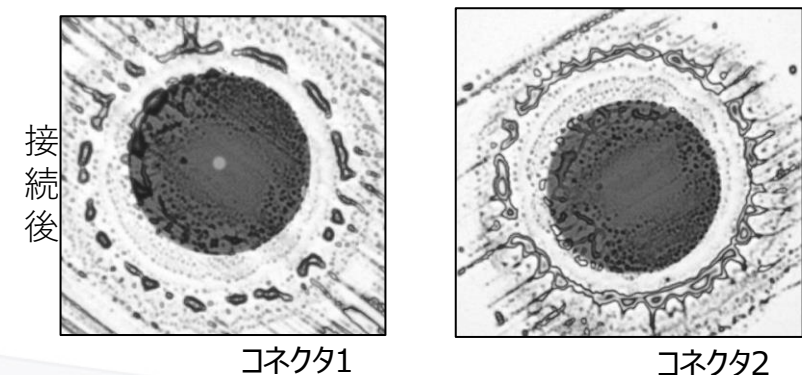


挿入損失 [dB]

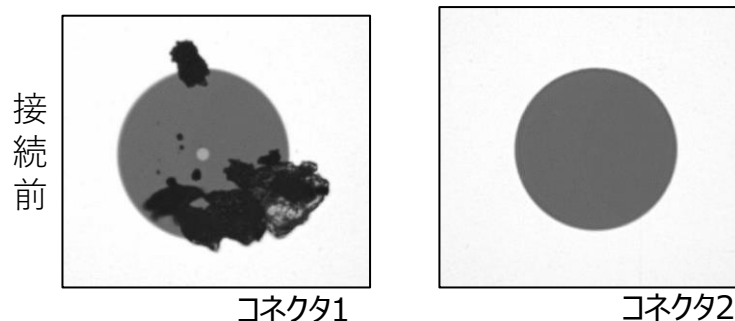
0.10

反射減衰量 [dB]

-44.2



◆ほこりが付着

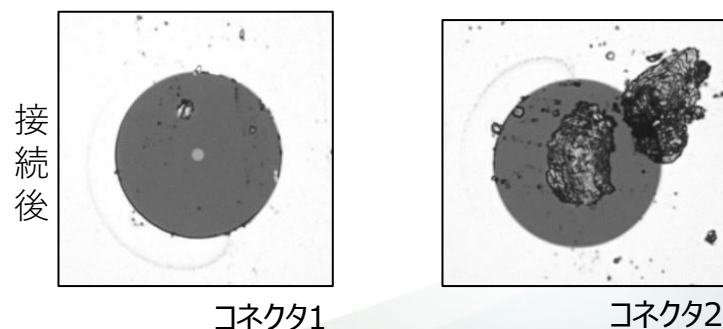


挿入損失 [dB]

1.1

反射減衰量 [dB]

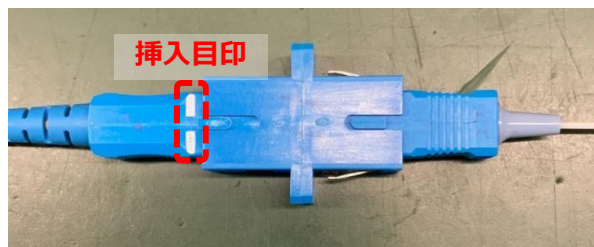
-22.7



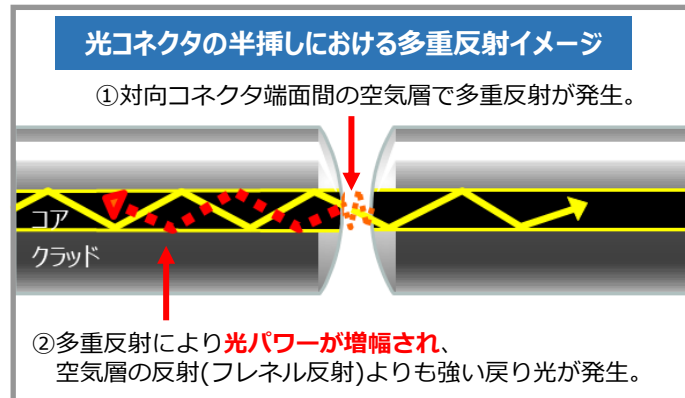
光学特性を悪化させる特殊ケース

◆光コネクタの半挿し

光コネクタが最後まで差し込まれないことで“半挿し”状態となり、端面間の空気層で多重反射が発生。



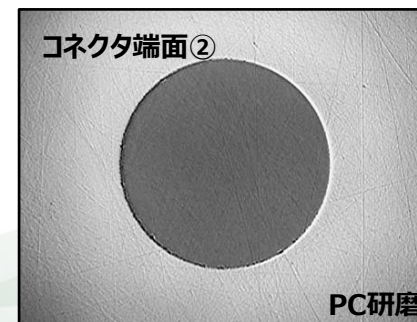
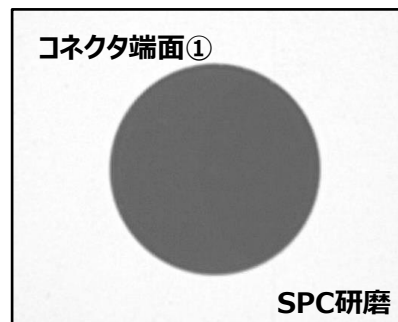
| 挿入損失 [dB] | 反射減衰量 [dB] |
|-----------|------------|
| 0.14 | -13.8 |



◆研磨面が旧グレード

光コネクタ端面の研磨品質が旧グレード(PC研磨)の場合、反射減衰量の値が元々悪い。

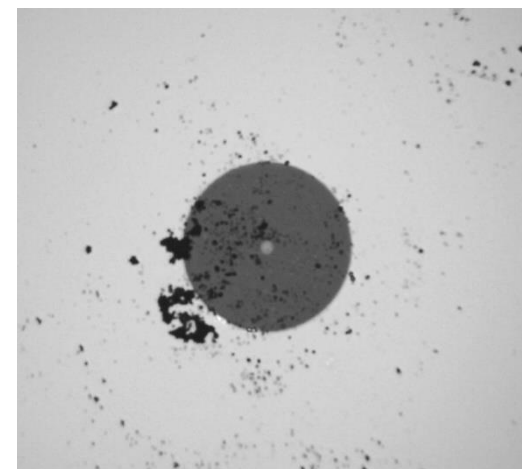
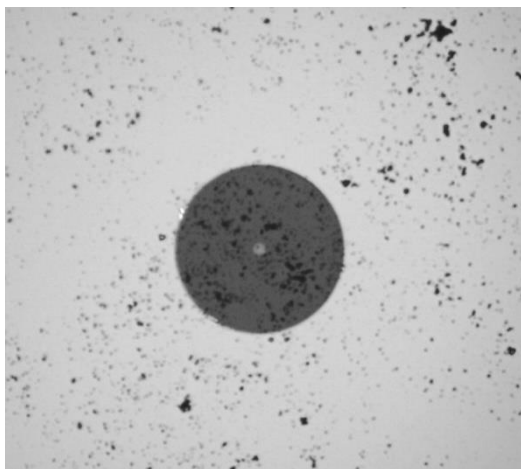
| 研磨グレード | 反射減衰量 |
|--------|---------|
| PC研磨 | -25dB以上 |
| SPC研磨 | -40dB以上 |
| UPC研磨 | -50dB以上 |



挿入損失(IL)は問題ない場合もあり、光パワーレベルの測定だけでは**発覚しない**こともあるので要注意。

光学特性を悪化させる特殊な汚れ

◆砂塵が付着



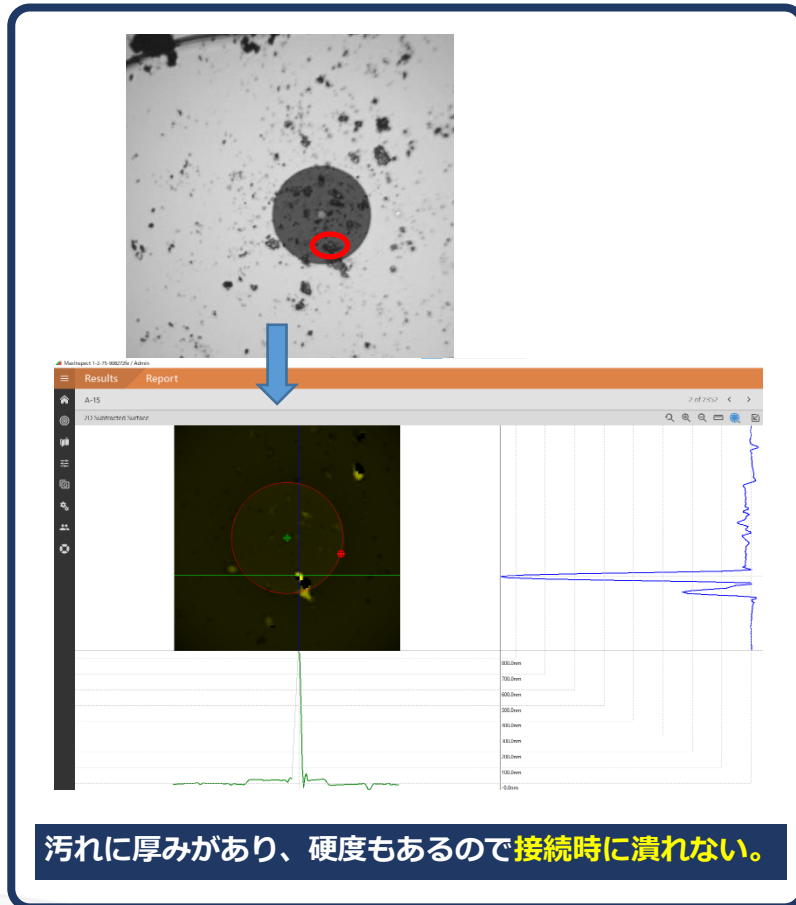
| 挿入損失 [dB] | 反射減衰量 [dB] |
|-----------|------------|
| 0.55 | -12.7 |

| 挿入損失 [dB] | 反射減衰量 [dB] |
|-----------|------------|
| 0.22 | -19.3 |

手脂やほこりよりも**大きい反射**が発生。
 混入ルートは限定的だが、**端面にキズをつける**原因にもなる非常に厄介な汚れ。

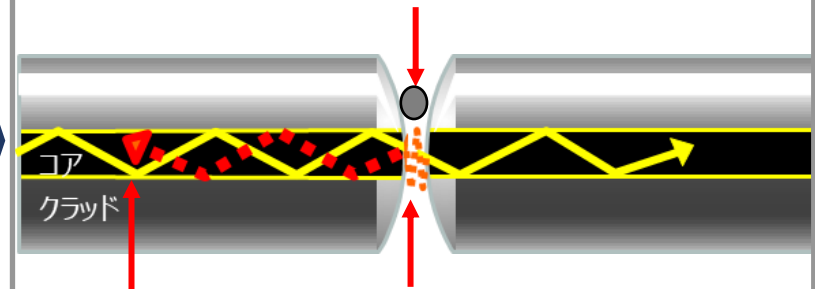
光学特性を悪化させる特殊な汚れ

◆砂塵が付着すると反射が大きくなる仕組み



厚みがあって潰れない汚れが付着した時のイメージ

① 汚れによってコネクタ同士の間になすかな隙間(空隙)が発生。



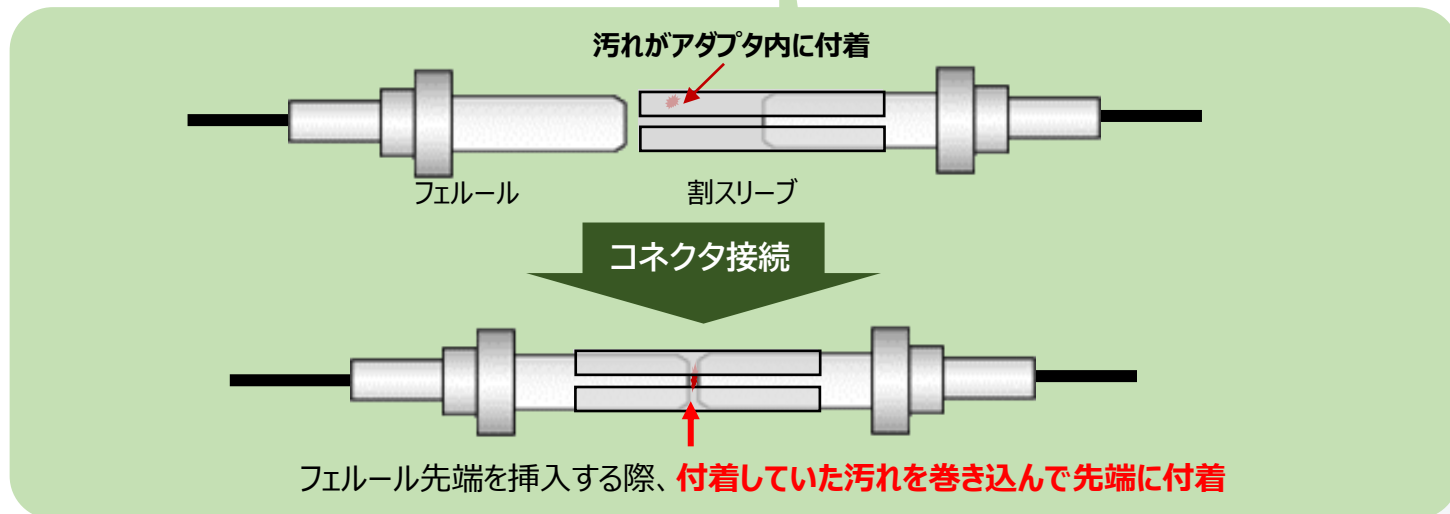
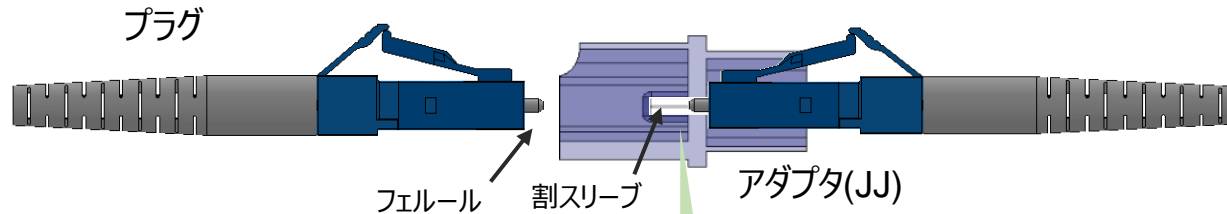
② 対向コネクタ端面間の空気層で多重反射が発生。

③ 多重反射により**光パワーが増幅され**、
空気層の反射(フレネル反射)よりも強い戻り光が発生。

砂塵以外にも、コネクタ挿入時に接触する部品が削れた際のゴミ(プラ片)なども、同様の問題を発生させる可能性あり。 ⇒**挿抜の多い箇所**は要注意。

光学特性を悪化させる特殊な汚れ

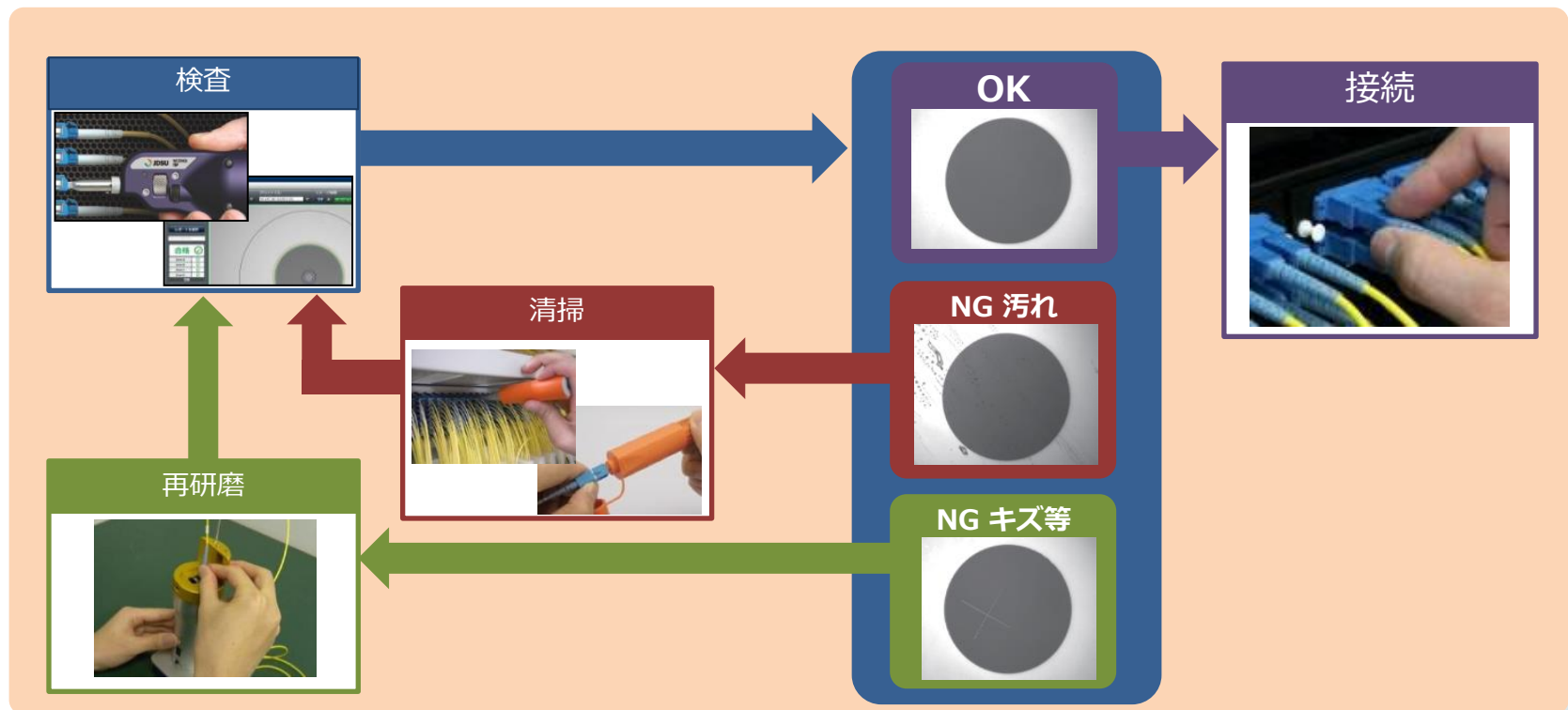
◆光コネクタアダプタ内に汚れが付着している場合



コネクタ接続前に清掃しても特性が悪い場合は、アダプタ内に汚れが付着している可能性あり。 → **割スリーブ部分も清掃が必要。**

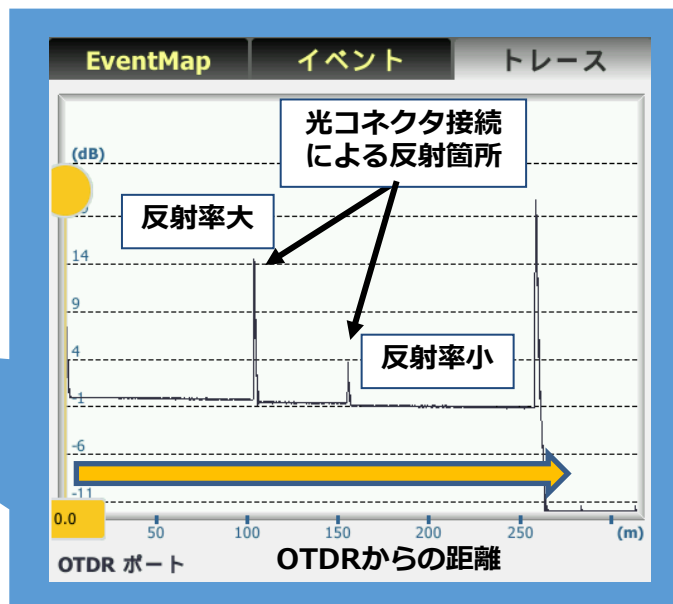
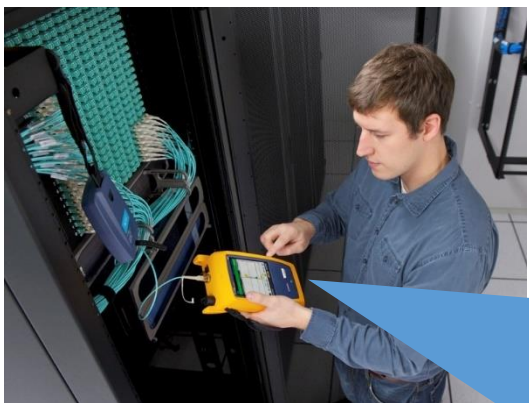
光コネクタ接続時の推奨フロー

- ◆ 接続前に端面を観察することにより、端面汚れによる障害を未然に防止。
- ◆ 端面の傷や汚れを視認することで、光コネクタ接続におけるトラブル発生原因を特定。



光ネットワークの反射減衰量測定について

◆ 反射減衰量の測定はOTDRが有効。



ピークの高さや線の下がり具合で、反射や損失の程度や発生位置を確認可能。

出展元：フルーク・ネットワークス様

5. まとめ

まとめ

- ◆ 反射による通信エラーは、**多重反射**が発生していることが原因。
接続箇所が多い光ファイバ伝送路は、多重反射が発生する可能性が高くなるので特に注意が必要。
- ◆ 光パワーレベルの低下すると、多重反射によるの送信光への影響度合いは増加。受光レベルがギリギリのネットワークは、反射によるエラーが発生しやすいので、**光パワーレベルに余裕をもった**ネットワーク設計を推奨。
- ◆ 反射減衰量に規定がある通信規格でネットワークを構築する場合、伝送路は光パワーレベルの測定だけでなく、**OTDR測定**も実施することを推奨。
- ◆ 光コネクタ端面はまずは清掃する。重要な箇所では端面検査も推奨。古いコネクタは端面の品質が悪い可能性があるので、再研磨や交換も視野に。

未来を拓くチカラと技術。

