

# 光伝送路における耐ハイパワー特性の評価

## Evaluation of High-power Endurance in Optical Fiber Links

瀬尾浩司\* 西村直也\* 椎野雅人\* 湯口廉一\* 佐々木宏和\*<sup>2</sup>  
Koji Seo Naoya Nishimura Masato Shiino Renichi Yuguchi Hirokazu Sasaki

概要 近年、DWDMシステムの普及により光通信における伝送容量が飛躍的に増加してきたが、それとともに光伝送路内の光パワーも増加してきた。そして光パワーが高出力化してきたことにより、光ファイバや光部品の損傷といったシステムの信頼性、もしくは人体に対する安全性が懸念事項となってきている。本稿においては、光通信の高出力化により発生する3つの問題、すなわちコネクタ端面の損傷、ファイバヒューズと呼ばれている現象、ファイバ被覆の損傷に関して実験的に検討した結果を報告する。

### 1. はじめに

近年、DWDMシステムの普及により光通信における伝送容量が飛躍的に増加してきたが、それとともに光伝送路内の光パワーも増加してきた。例えば、1400 nm帯半導体励起レーザの出力は400 mWにまで達している。また、最近特に注目されている分布ラマン増幅は広帯域に渡って平坦な利得を得ることが可能であるが、伝送路中の励起光強度は1 W以上に達することもある<sup>1)</sup>。しかし光パワーが増大すればするほど、これまでの光通信においては問題となつてこなかった高出力化による光ファイバや光部品の損傷といったシステムの信頼性、もしくは人体に対する安全性が懸念事項となってきている。我々は、これらの高出力化に付随する問題を大きく4つに分けて考えている。

第1の問題は、コネクタ端面の損傷である。コネクタ端面に異物が付着していると高出力光により端面が損傷を受けるといふ報告がされている<sup>2)</sup>。特に、従来のFCコネクタで使用されていたリン青銅に問題があることが報告されており<sup>3)</sup>、最近ではリン青銅を使用しないFCコネクタが主流となっている。

第2の問題は、ファイバヒューズと呼ばれている現象で光ファイバ中の高い光パワーによりコア部だけが部分的に熔融する現象である。そして、その熔融部は可視光を発生しながら光源に向かって伝達していく。熔融部伝達後の光ファイバにはコア領域長手方向に空洞の列が形成される。その伝達現象は光源を停止するか、もしくはある閾値まで光パワーを低下させるまで続き、実験的に1.5 kmに渡ってファイバヒューズを伝達させたという報告もある<sup>4)</sup>。本現象は1980年代から確認されていたが<sup>5)</sup>、発生および伝達のシーケンスを完全に説明する理論はまだ確立されていない<sup>6)</sup>。

第3の問題は、ファイバ被覆の損傷である。ラマンアンプの導入等でハイパワー環境下にある光伝送ファイバが、作業中のアクシデントにより折れたり曲がったりした際に発生する可能性がある。光ファイバから漏れた光が被覆材に吸収され発熱し、最悪の場合は発火することもある。

第4の問題は、光伝送路の破断時やコネクタ切り放し時のレーザ光放射による人体に対する安全性である。現在の技術においては、シャッタ機能付きコネクタや反射光を検出して光源を停止する方法等の利用が考えられる。

光通信システムを安全に運用していくためには、これらの問題が非常に重要になってきており、国際標準化においてもガイドラインの作成が進行中である<sup>7)</sup>。そこで今回我々は、コネクタ端面の損傷、ファイバヒューズ現象、ファイバ被覆の損傷に関して実験的に検討した結果を報告する。

### 2. コネクタ端面の損傷

#### 2.1 実験方法

コネクタ端面にリン青銅が付着したために、高出力光により端面が損傷してしまった例を図1に示す。FCコネクタにはアダプタスリーブやコネクタキーにリン青銅が使用されているものがあり、コネクタ接続時に削れたリン青銅の粉末が端面に入ってしまった結果である。ただし、リン青銅を使用していない他のコネクタにおいても同様の事象が発生することがある。

そこで、今回の実験においてはコネクタ端面が容易に損傷し得る異物種類の調査とコネクタ端面に傷(研磨傷等)がついていた場合を具体的に調査した。実験には、EDFアンプやラマンアンプの励起光と同じ波長帯である中心波長1480 nmの2 W光源を使用し、実験サンプルにはシングルモードファイバ(以下SMF)のFCコネクタを用いた。

#### 2.2 コネクタ端面傷の影響

コネクタ端面の傷に関しては、コアに傷なし(一般に市場に出回っているレベル)、コアに傷あり(コアに研磨傷があ

\* 研究開発本部 ファイタルフォトンクス研究所

<sup>2</sup> 研究開発本部 横浜研究所

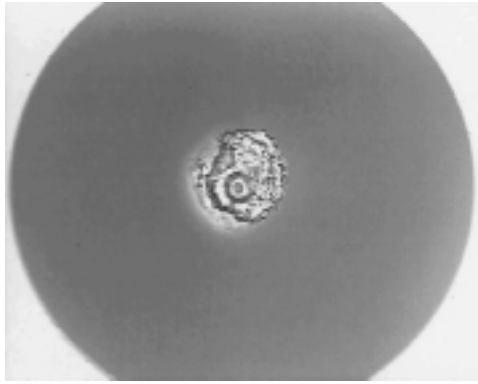


図1 コネクタ端面の損傷  
Damage of connector end face

るが接続損失は正常品と同等なレベル), 5 μmのヤスリ傷(接続損失に影響する大きな傷があるレベル)の3種類を各5サンプル評価した。評価結果を表1に示す。全てのサンプルで実験前後における端面状態の変化は観察されなかった。5 μmのヤスリで全面に傷を付けたサンプルだけは、実験中にコネクタ周辺部の温度が50 以上になる発熱が観察された。これは接続損失によるものであると考えられる。接続損失と発熱の関係に関しては、MUコネクタを使用した場合で発熱を10 以内に抑えるために0.25 dB以下にすべきであるとの報告があるが<sup>8)</sup>, 少なくとも接続損失に影響しない範囲の傷であれば、発熱も少なく端面損傷の要因となる可能性は低いと考えられる。

2.3 異物の影響

異物に関しては、コネクタ端面に実際に付着し易いと考えられるものを評価した。評価結果を表2に示す。エタノール、手の油、屈折率整合剤といった光透過度の高い物質に関しては、コネクタ端面が損傷することはなかった。ただし、屈折率整合剤を介在させたサンプルは一部接続損失が悪くなっており実験中に発熱するサンプルがあった。これは、FCコネクタという通常は屈折率整合剤を使用しないコネクタの接続部に、大量に整合剤を塗布したことにより気泡を巻き込んだことが原因であると考えられる。エポキシ樹脂(MTフェルールの削り粉)、ニッケルメッキ、黒マジックインク、リン青銅といった金属や黒い材料のように光吸収率が高い異物に関しては、黒インクを付着させたサンプルのように接続損失が良くてもコネクタ端面が損傷した。更に、次項で詳しく述べるが、ファイバヒューズが発生したサンプルもあった。特に、リン青銅の場合には50 mWでも端面が損傷することを確認した。また、エポキシ樹脂やリン青銅のサンプルにおいて端面が変化しなかったものもあったが、これは実験後のサンプルを観察したところ、異物がコア部に介在していなかったことが分かった。

2.4 端面の損傷に関する考察と対策

以上の結果より、今回評価した光強度においてはコネクタ端面を損傷させるのは光吸収率が高い物質だけであることが分かった。ただし、コアに付いた傷は端面損傷の直接的な要因とはならなくても、上記吸収物質が入り込み易くなるので避けた方が無難である。また、屈折率整合剤に関しても不純物が入り込む可能性は否定できないのでハイパワー環境下においては避けるべきである。また、残念なことに接続損失に影響しない程度

表1 コネクタ端面傷の影響  
Influence of scratches on connector end face

水準	接続損失	結果 (n = 5)
コアに傷なし	平均0.12 dB	変化なし
コアに研磨傷	平均0.18 dB	変化なし
全面に5 μm傷	平均0.78 dB	温度上昇

表2 異物の影響  
Influence of contaminations

水準	接続損失	結果
エタノール	平均0.14 dB	変化なし : n = 5
手の油	平均0.21 dB	変化なし : n = 5
屈折率整合剤	平均0.64 dB	変化なし : n = 2 温度上昇 : n = 3
エポキシ樹脂	平均0.67 dB	変化なし : n = 1 温度上昇 : n = 2 端面損傷 : n = 2
ニッケルメッキ	平均1.39 dB	温度上昇 : n = 2 端面損傷 : n = 3
黒インク	平均0.24 dB	端面損傷 : n = 4 ファイバヒューズ : n = 1
リン青銅	平均1.12 dB	変化なし : n = 1 端面損傷 : n = 3 ファイバヒューズ : n = 1

の微小な異物であっても端面損傷が発生してしまうことがあることが分かった。そのため、端面損傷を防止するためには接続作業の度に毎回注意深く清掃することが最も効果的な方法となる。ただし、高出力光を放射中に端面を清掃することはアルコール類の有無に関わらず端面が損傷するという実験結果も得られており、また人体に対する安全性の面からも問題があるので避けなければならない。

従って高出力光に曝されるコネクタの取扱には十分に注意する必要がある、光源を停止した状態での端面清掃および端面チェックが必須となる。

3. ファイバヒューズ

3.1 実験方法

ファイバヒューズは、図2に示すようにコア部に空洞を形成しながら伝達していく現象である。この空洞部の形状は条件により変化するが典型的には写真のように弾丸形状をしている。ファイバヒューズの伝達現象は光源装置を停止するか、もしくはある閾値以下まで光パワーを低下させるまで続き、最終的に

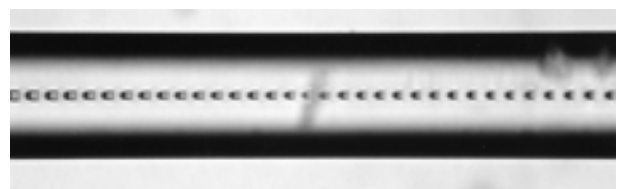


図2 ファイバヒューズ伝達後の光ファイバ  
Optical fiber after fuse propagation

は光源装置に達して故障させる恐れもある。今回我々は、ファイバヒューズの伝達が停止する光パワーの閾値を測定した。

実験装置の構成を図3に示す。中心波長が1064 nmと1467 nmの2種類の光源を使用して各々の波長でファイバヒューズを発生させた。ここで注意したいのは、ファイバヒューズはハイパワー環境になると必ず発生するわけではないという点である。石英ファイバ自体の高出力耐久性は10 GW/cm<sup>2</sup>以上という報告もあり<sup>9)</sup>、一般的なSMFはW級の光強度に十分な耐久性がある。しかしながら、そのようなハイパワー環境下にある光ファイバに対して、ある地点でファイバコアを溶融させるような誘因があるとそこから発生し光源へ向かって伝達していく。実際の光伝送路においては、コネクタ端面に付着した異物の光吸収やファイバ破断時の多重反射による光エネルギーの集中が上記誘因となる可能性がある。従って、光強度が強いほどその発生確率は高くなる傾向にあるが、その誘因が何かによってヒューズ発生の確率は大きく変わってくる。

今回の実験においては、ファイバヒューズの発生確率を高めるために5 Wのハイパワー光を通光させている光ファイバを、アーク放電により局所的に1000 以上に加熱する方法をとった。そしてファイバヒューズの伝達中に光強度を徐々に下げていき、ヒューズが停止したときのパワーを測定して伝達パワー閾値とした。この伝達パワー閾値は、ヒューズの発生方法によらず光ファイバ種と波長だけで決まり、少なくともこのパワー以下ではヒューズは伝達しないので発生することもないと考えられる値である。

### 3.2 ファイバヒューズ伝達パワー閾値の測定結果

図4は、SMFと分散シフトファイバ (ITU-T G.653, 以下DSF) のファイバヒューズ伝達パワー閾値を各2波長で測定した結果である。DSFがSMFよりも閾値が小さいのは、MFDが

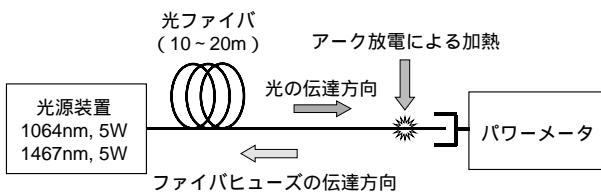


図3 ファイバヒューズの実験装置  
Setup for testing fiber fuse

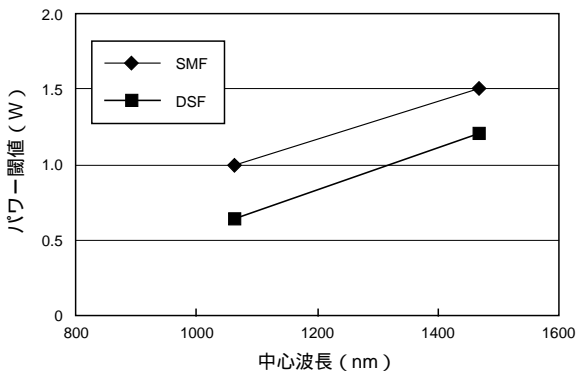


図4 ファイバヒューズ伝達閾値 (波長依存性)  
Wavelength dependence of threshold power of fuse propagation

小さいのでパワー密度が高くなっているのが原因だと考えている。波長1467 nmよりも1064 nmの閾値が低いのも同じ理由を含むと推測できる。そこで更に、MFDの異なる各種ファイバを中心波長1467 nmで評価した結果を図5に示す。使用したファイバは、SMF用分散補償ファイバ (以下DCF), DSF, SMF, 部分的にコアを拡大した (20 μm, 30 μm) SMFである。DCF, DSF, SMFに関しては実測値をプロットし、コア拡大ファイバに関してはヒューズがコア拡大部を通過した値を上限、停止した値を下限として表示してある。

結果は予想に反し、実行断面積 (以下A<sub>eff</sub>) に比例しているというよりはMFDに比例している結果が得られた。もしA<sub>eff</sub>に比例している場合には、測定データは表中の直線ではなく2次曲線に乗るはずである。ただし、少なくともファイバヒューズの伝達閾値を高くするにはMFDを拡大することが有効であることが確認できた。

### 3.3 ファイバヒューズに関する考察と対策

ファイバヒューズを発生させない方法としては、伝達閾値以上にならないように光源の出力パワーを制御すればよい。例えば、実験結果より励起光波長である1467 nmではSMFのファイバヒューズ伝達閾値は約1.5 Wであり、それ以下で運用すればファイバヒューズに関しては完全に安全であるといえる。

しかし、今後の光通信ネットワークにおける高出力化を考えると、万が一ファイバヒューズが発生してしまった場合にもその伝達を停止する技術も必要となる。

第一の方法として、図6は図3の実験におけるパワーメータの実測値であるが、ヒューズが発生するとすぐに断線状態となるため、出力パワーをモニタリングし断線状態もしくはある値以下になった際に光源を停止するように制御方法が考えられる。ヒューズ伝達スピードが数m/s程度であることを考慮すると被害はそれほど大きくはならない。特に、断線時に光源を瞬時に停止する方法として国際標準化で検討されているAPR (Automatic Power Reduction) システムは人体に対しての安全性を高めるのにも有効であるだけでなく、ファイバヒューズの伝達を停止する対策としても有効である。

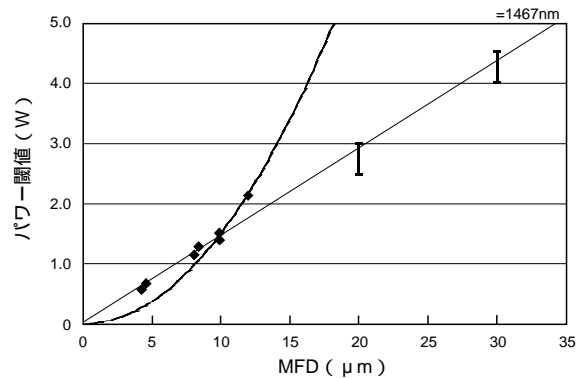


図5 ファイバヒューズ伝達閾値 (MFD依存性)  
MFD dependence of threshold power of fuse propagation

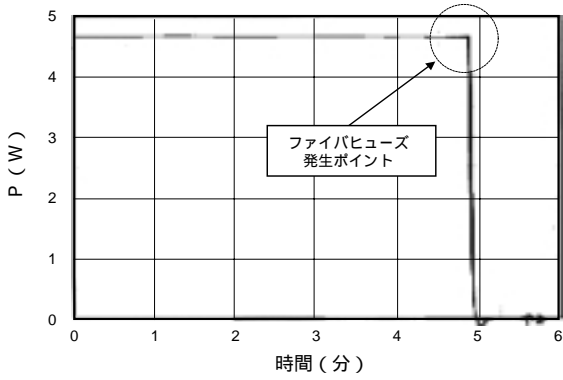


図6 出力パワー変化  
Change in output power

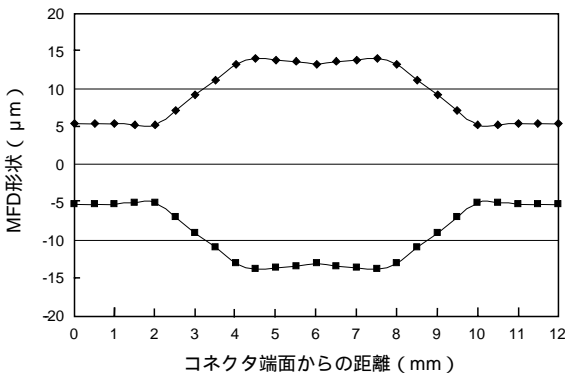


図7 MFDのプロファイル  
Profile of MFD

また、今回の実験結果から伝送路中の適当な箇所にMFD拡大部を設けておくことも効果的であることが分かる。例えば我々は、図7に示すようにSMFの一部のMFDを30 $\mu\text{m}$ に拡大した光ファイバを内装したSCコネクタを試作した。本コネクタ端面のMFDは10 $\mu\text{m}$ となっており、標準のSMF用SCコネクタと互換性がある。本コネクタにおいては、中心波長が1467 nmの光源では4 Wで伝達しているヒューズを停止することができることを実際に確認している。

#### 4. ファイバ被覆の損傷

##### 4.1 実験方法

光ファイバの曲げ直径は標準のSMFの場合、長期的な信頼性から60 mm以上と決められている。しかしながら、実際のシステム導入の際などアクシデントで更に小径に曲げられてしまう可能性がある。通光中の光ファイバが小径に曲げられると、コアから漏れた光が被覆材に吸収され発熱する。特にハイパワー環境下においては、その発熱は被覆材を損傷させるまでに高温となることがある。我々は、ハイパワー環境下において短期的に曲げが加わった場合に、ファイバ被覆がどの程度まで損傷を受けるのかを定性的に調査した。

図8は、ファイバ被覆の損傷を調査するための実験装置である。中心波長は1480 nmで、最大3 Wの光源を使用した。試料ファイバは0.25 mm UV心線（透明、白、緑）と0.9 mm ナイロン心線（白）を評価した。評価する光ファイバを中間部で

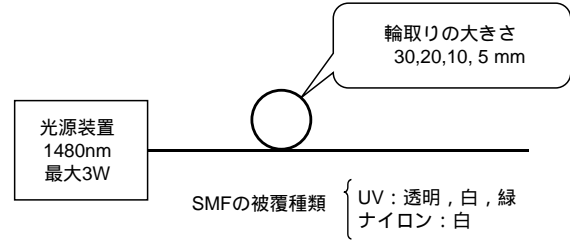


図8 被覆損傷の実験装置  
Setup for testing fiber coating damage

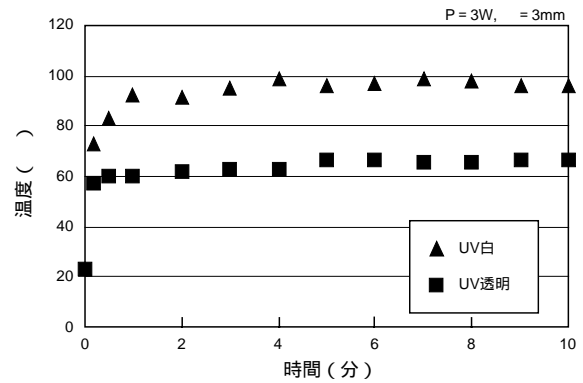


図9 被覆の温度変化  
Temperature change of fiber coating

表3 被覆損傷の実験結果  
Test results of fiber coating damage

入力 1480 nm	曲げ直径 (mm)	被覆種類			
		UV透明	UV白	UV緑	ナイロン白
1 W	30	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
	20	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
	10	変化なし	曲がり癖	曲がり癖	曲がり癖
	5	変化なし	曲がり癖	変色	熔融
3 W	30	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
	20	変化なし	変化なし	曲がり癖	変化なし
	10	変化なし	曲がり癖	曲がり癖	曲がり癖
	5	変色	変色	変色	発火

一回転だけ輪取り、曲げ直径を30、20、10、5 mm以下で変化させた。室温は約25 $^{\circ}\text{C}$ であった。

まず、3 Wの光強度で3 mmに曲げた光ファイバのある一点での温度変化を熱電対を用いて測定した。測定温度を時間軸でプロットした結果を図9に示す。温度は急激に上昇し、5分もすれば十分に熱平衡状態になることが分かる。そこで、被覆の損傷具合を調査する実験においてはテストサンプルを5分間ハイパワー環境下に曝すことにした。

##### 4.2 被覆の損傷に関する評価結果

評価サンプルを5分間のハイパワー環境下に曝した実験結果を表3に示す。被覆の損傷具合を定性的に4段階に分けて評価した。「曲がり癖」は、被覆樹脂が熱硬化により輪取り状態の癖が残ってしまったことを示している。「変色」は、更に被覆

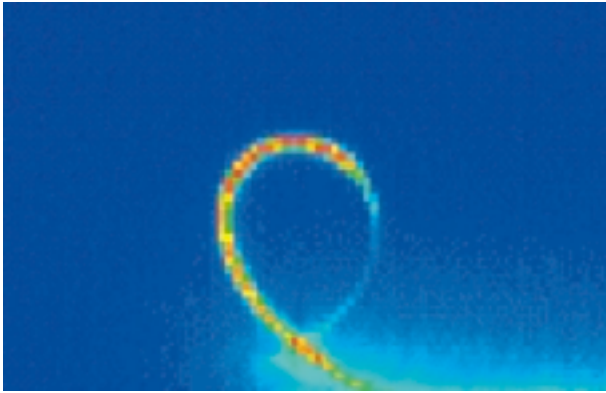


図10 サーマビューア観察結果  
Image of thermo-viewer

樹脂が褐色を帯びたことを示している。「溶融」は、被覆樹脂が溶けて中の光ファイバ素線が露出したことを示している。「発火」は、文字通り炎を上げて被覆樹脂が燃えたことを示している。

曲げ直径が 5 mm 以下の場合、ナイロンにおいては1 Wで溶融し3 Wで発火した。UV被覆においても3 Wでは全ての水準で変色し、1 Wでは透明以外は曲がり癖がつき変色するものもあった。従って、5 mm 以下は非常に危険な領域であると考えられる。曲げ直径 10 mm においてもUV透明以外は全ての被覆種で曲がり癖がついた。曲げ直径 20 mm では、UV緑だけが3 Wの場合に曲がり癖がついた。ここで曲がり癖と分類している中にも程度の差があり、伝送損失に影響するものからしないものも含むが、長期的な信頼性を考慮するといずれにしても避けなければならないと考えられる。

従って、実験データより火災等の危険性は3 Wまでの光強度であれば直径 5 mm 以下の極小曲げがなければ発生する確率は低いが、伝送路の信頼性を低下させないためには1 Wで直径 20 mm 以上、3 Wで 30 mm 以上を確保しなければならない。また、UV透明はUV色付きよりも耐久性があるといえる。

#### 4.3 被覆の損傷に関する考察と発熱モデルの検討

実際にファイバ被覆がどれだけ発熱しているか調査するため、サーモビューアで実測した様子を図10に示す。その中における最高温度をプロットしたものが図11のグラフである。特に、被覆種類がナイロン白で曲げ直径が 5 mm、光強度が3 Wの際には160 を越える発熱が観察された。これはほぼナイロンの融点に達しているが発火点には達していない。そこで表3における発火現象に関しては、ナイロンが溶融したために被覆強度が低下し光ファイバが折れ、そこからの光放射により発生した可能性が高いと考えられる。

また、実験によって得られた温度上昇に対して、曲げ損失は放射モードのみによるものとし、被覆に吸収された光エネルギーは全て熱に変換されるものとして発熱モデルを検討した。さらに、発生した熱は被覆材内部から逃げないものと仮定した場合、平均温度上昇は以下の式で表される。

$$\Delta T = \frac{P}{C_p \{r_2^2 - r_1^2\}} \quad (1)$$

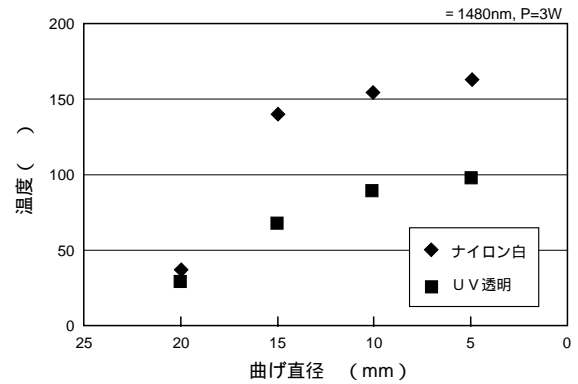


図11 曲げ直径による被覆温度  
Dependence of coating temperature on bending diameter

ここで、 $P$ : 光強度、 $\alpha$ : 曲げ損失、 $\mu$ : 被覆材料の吸収率、 $C_p$ : 被覆材料の比熱、 $r$ : 曲げ直径、 $r_1, r_2$ : それぞれ被覆の内径および外形、 $\rho$ : 被覆材の密度である。実際には熱放射があるため、上記の仮定が近似的に成立するのは数十秒間であると考えられる。例えばUV透明被覆の場合を考え、 $P = 3 \text{ W}$ 、 $r = 5 \text{ mm}$ 、 $\mu = 95\%$  (13 dB) とすると、10秒あたりの温度上昇は室温を考慮するとおよそ105 に達する計算になる。実験における測定値は95 であり、計算結果とほぼ一致した。

## 5. おわりに

WDMシステムの普及により光通信における伝送容量が飛躍的に増加してきたが、それともなっていく光伝送路内の光パワーも増加してきた。そして、これまでの光通信においてはあまり意識されてこなかったハイパワー環境下における人体に対する安全性やシステムに対する信頼性という問題が危惧されるようになってきた。

本稿では、光伝送路におけるハイパワー化に伴う問題について評価および検討を行った。今回の評価においては、3つのハイパワー問題に関して定性的な傾向とある程度の定量的な目処を得たが、信頼性や保証値として結論付けるには引き続きデータを積み重ねてゆくことが重要である。従って、今後も評価を継続し、ハイパワー耐久性および安全性の高い製品により光通信システムの発展に貢献していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Y. Emori, Y. Akasaka, and S. Namiki: "Less than 4.7 dB noise figure broadband in-line EDFA with a Raman amplifier-1300 ps/nm DCF pumped by multi-channel WDM laser diodes," in Tech. Dig. OAA '98, Vail CO, July '98, paper PD3.
- 2) M. E. De Rosa, V. A. Bhagavatula, Q. Wu, and K. Matusick: "High optical power testing of physical contact connectors at 1550nm," OFC '01, Technical Digest, Tu17-1.
- 3) J. Nakajima, H. Takara, and S. Nishi: "Temperature increase of optical connector end face due to spot heated by high power light," IEICE '91, B-574, 4-35.
- 4) Raman Kashyap: "Self-propelled self-focusing damage in optical fibers," Electronics Letters, 24( 1988 ) 859.
- 5) D.P. Hand and P. St. J. Russell: "Solitary thermal shockwaves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse," Opt. Lett., 13 ( 1988 ) 767.

- 6) D.D. Davis, S.C. Mettler and D.J. DiGiovanni: "A comparative evaluation of fiber fuse models," SPIE 2966,( 1997 ), 592.
- 7) "Optical safety procedures and requirements for optical transport systems," in ITU-T, G.664
- 8) S. Yanagi, S. Asakawa and R. Nagase, "Characteristics of fibre-optic connector at high-power optical incidence," Electronics Letters 15<sup>th</sup>, Aug. 2002, Vol38, No.17.
- 9) Stolen R H: "Optical fibre communications," Miller S E & Chynoweth A G, eds., Academic Press, 1979.