

# 汎用光伝送路におけるファイバヒューズの発生及び伝搬の抑圧の研究

代表研究者

黒河 賢二

北見工業大学工学部 教授

## 1 はじめに

ファイバヒューズ現象とは、数 W の高パワーが入力されている光ファイバが局所的に加熱されることでプラズマが発生し、それが光源に向かって伝搬していく現象のことである[1, 2]。一度ファイバヒューズ現象が起こると、光源を停止するか、または伝搬閾値（ファイバヒューズが伝搬し得る最低の光パワー）以下に入力パワーを低下させない限りファイバヒューズは伝搬し続ける。さらに、ファイバヒューズが発生し伝搬した後はコア内に弾丸型の気泡が形成されるため、光パワーを伝送することが出来なくなる。光通信に用いられている従来型の単一モードファイバである SMF や分散シフトファイバ (DSF) の伝搬閾値は、波長 1.55  $\mu\text{m}$  で約 1.2~1.4 W と報告されている。今後も増大し続けるとされるネットワークトラフィックにより、光ファイバに入力される光のパワーが伝搬閾値を超えることが予想され、ファイバヒューズの発生が危惧されている。

ファイバヒューズの対策について種々の方法が提案されている。その一つとして、伝送路中で発生したファイバヒューズを停止するための光ファイバ型デバイスが挙げられる。テーパ型光ファイバ[3]や TEC (Thermally diffused Expanded Core) 型光ファイバ[4]、あるいは、従来型のマルチモードファイバの1つであるグレーデッドインデックスファイバ (GIF) [5]を用いたファイバヒューズ停止部品が作成され、入力パワーが 2 W 程度においてファイバヒューズを停止できることが報告されている。最近、従来型のマルチモードファイバの1つであるステップインデックス型ファイバを用いた停止部品[6]では 6 W の入力パワーでも停止できることが報告されている。また、伝搬するファイバヒューズからの後方散乱光を検出すること[7]、あるいは、ファイバヒューズが放つ可視光をファイバ外部に設置した受光器によってモニタすること[8]により、ファイバヒューズの発生を検知し速やかに光源を遮断する方式も報告されている。一方、光ファイバの断面内に空孔を有するフォトニック結晶ファイバ(PCF)や空孔アシストファイバ(HAF)では、ファイバヒューズの伝搬閾値が SMF と比較して非常に大きな値になることが報告されている[9-11]。その特長を活かし、HAF を用いたファイバヒューズ停止部品が作成され、高いファイバヒューズ抑止力を持つことが報告されている[12]。最近、入力光を強度変調することにより 5 W という高い入力パワーにもかかわらず SMF においてファイバヒューズの発生を抑圧できることが報告された[13]。

本研究では、まず、ファイバヒューズ発生を抑圧可能な強度変調法をさらに拡張し、より変調度の高い光パルスを入力光として用いることにより、既存伝送路に用いられている単一モードファイバにおいて高入力時にファイバヒューズを発生させず、かつ、万が一、発生した場合でもファイバヒューズを伝搬させない方法について検討を行った。また、ファイバヒューズ抑圧法の光ファイバ給電への応用に向けて 2 波長 WDM システムにおける入力光の強度変調によるファイバヒューズの発生抑圧法について検討を行った。

## 2 DSF におけるファイバヒューズの発生及び伝搬の抑圧

入力光としてパルス光を用いることによりファイバヒューズの発生および伝搬を抑圧する方法について基本的な検討を行った。図 1 に実験系を示す。光源は波長 1.55  $\mu\text{m}$  のファブリペローLD であり、ファンクションジェネレータを用いて音響光学 (AO) 変調器により矩形波パルス光を発生した。パルス光のデューティ比は 0.5 であった。AO 変調器の出力光はエルビウム光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅され、DSF に入力された。波長 1.55  $\mu\text{m}$  における DSF のモードフィールド径 (MFD) は 7.9  $\mu\text{m}$  であり、平均入力パワーは 2.2, 2.8, 3.4 W であった。伝搬抑圧実験は以下のようにして行われた。まず、ファンクションジェネレータの出力をオフにし、EDFA の出力光を連続 (CW) 光にしてファイバヒューズを発生させた。ファイバヒューズは、再現性が良く定量的な評価に適している融着接続機の電気放電加熱を用いて発生させた[14]。続いて、ファイバヒューズが DSF を伝搬している際、ある時刻  $t_1$  においてファンクションジェネレータの出力をオンにして矩形波パルス光を発生させる。CW 光からパルス光に変化させることにより伝搬中のファイバヒューズが停止消滅するかどうかを入力パルス光の繰り返し周波数を変えながら調べた。

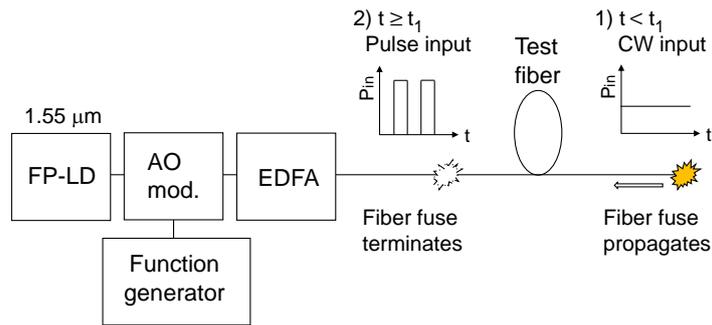


図 1. ファイバヒューズ伝搬抑圧実験系

表 1. 伝搬抑圧の実験結果

Input power (W)	Pulse repetition rate (kHz)						
	50	70	80	100	140	200	300
2.2	○	—	—	○	—	○	■
2.8	—	—	—	○	■	■	■
3.4	○	○	○	■	—	—	—

○ : Terminated ■ : Not terminated

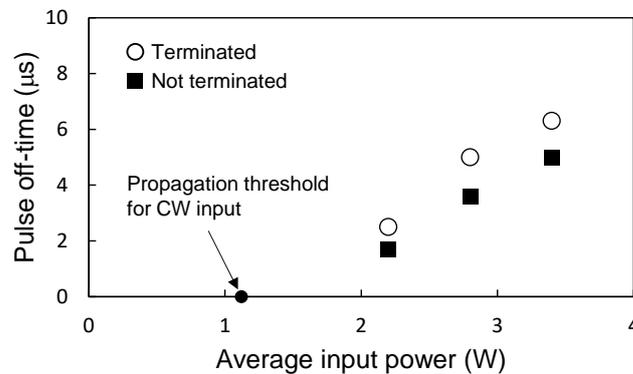


図 2. 伝搬抑圧に必要なパルス off-time の平均入力パワー依存性

表 1 に実験結果を示す。白丸はパルス化による伝搬停止を示し、黒四角は伝搬停止しなかったことを表す。平均入力パワーが 2.2 W の時は、繰り返し周波数が 300 kHz では伝搬停止しなかったが、200 kHz 以下では停止した。平均入力パワーが 2.8 W に増加すると、繰り返し周波数が 140 kHz まで伝搬停止しなかったが、100 kHz で停止した。さらに、平均入力パワーを 3.4 W に増加すると、繰り返し周波数が 100 kHz まで伝搬停止しなかったが、80 kHz 以下で停止した。DSF において波長 1.55 μm でのファイバヒューズ伝搬閾値は 1.1 W であるので、伝搬閾値の 3 倍以上である平均入力パワーを 3.4 W においても繰り返し周波数を 80 kHz 以下にすることでファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかった。

図 2 に表 1 の実験結果を基にファイバヒューズ伝搬停止条件の平均入力パワー依存性を示す。入力光パルスのデューティ比が 0.5 であるので、繰り返し周波数を R とすると光パルスの off-time は  $1/2R$  となる。図 2 において白丸と黒四角は、それぞれ伝搬停止と伝搬非停止を表す。入力パワーが 3.4 W の場合、パルス off-time が約 6 μs でファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかった。入力パワーが小さくなるに連れて伝搬停止に必要な off-time も小さくなることがわかる。パルス off-time の間は入力光の吸収による加熱

がないにもかかわらず熱伝導による放熱が起こるため、ファイバヒューズの温度が減少し off-time の間に伝搬停止が起こると考えられる。従って、平均入力光パワーの減少に伴い定常伝搬時のファイバヒューズ温度も下がるため、伝搬停止に必要なパルス off-time も平均入力光パワーの減少に伴い小さくなったと考えられる。また、表 1 に白丸で示したファイバヒューズの伝搬停止を起こす繰り返し周波数を有する光パルスを入力に用いて電気放電加熱によりファイバヒューズが発生するかどうかを確認したところ、光パルス入力時にはファイバヒューズが発生しないことを確認できた。こうして矩形波パルス光を用いることにより DSF においてファイバヒューズの発生及び伝搬を抑圧できることがわかった[15]。

### 3 WDM システムにおける入力光強度変調によるファイバヒューズ発生抑圧

入力波長が 1.48  $\mu\text{m}$  と 1.55  $\mu\text{m}$  の 2 波長である WDM システムにおいて入力光の強度変調により SMF ならびに DSF でファイバヒューズの発生を抑圧できるか検討を行った。図 3 に実験系を示す。光源には波長 1.48  $\mu\text{m}$  の連続 (CW) 光と波長 1.55  $\mu\text{m}$  のパルス光源を用いた。矩形波パルス光は、ファブリペロー型レーザーダイオード (FP-LD) からの CW 光、音響光学 (AO) 変調器、ファンクションジェネレータを用いて発生させた。パルス光のデューティ比と繰り返し周波数は、それぞれ 0.44 と 100 kHz であった。AO 変調器の出力はエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて増幅した。波長 1.48  $\mu\text{m}$  の CW 光と波長 1.55  $\mu\text{m}$  の増幅されたパルス光は WDM カプラで合波しテストファイバに入射した。合波された WDM 光は、図 3 に示すように矩形

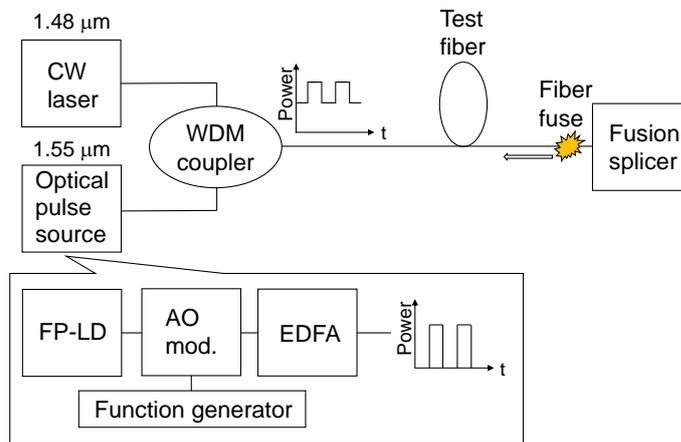


図 3. ファイバヒューズ発生抑圧実験系

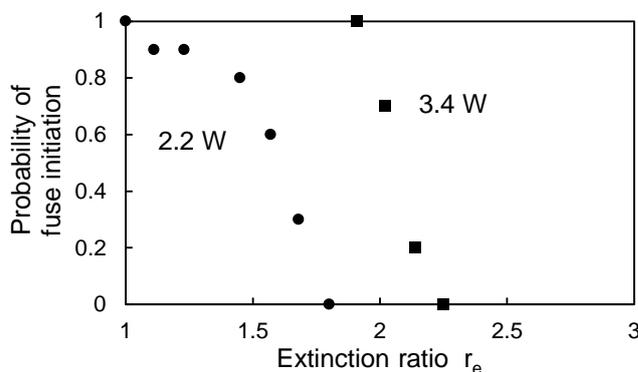


図 4. DSF におけるファイバヒューズ発生確率の消光比 ( $r_e$ ) 依存性

波強度変調光となる。強度変調光の消光比  $r_e$  は、 $r_e = P_{\max}/P_{\min}$  と定義される。ここで、 $P_{\max}$  と  $P_{\min}$  は、それぞれ強度変調光の瞬時ピークパワーの最大値と最小値を表す。なお、 $P_{\min}$  は波長 1.48  $\mu\text{m}$  の CW 光入力パワーとなる。テストファイバには DSF と SMF を用いた。DSF と SMF の波長 1.55  $\mu\text{m}$  におけるモードフィールド径はそれぞれ 7.9  $\mu\text{m}$  と 10.2  $\mu\text{m}$  であった。ファイバヒューズの発生には、再現性が高くファイバヒューズ発生の定量的評価が可能な融着接続機の電気放電加熱を利用した。

図 4 に DSF におけるファイバヒューズ発生の消光比 ( $r_e$ ) 依存性を示す。WDM 光の平均入力パワーは 2.2 W (黒丸) と 3.4 W (黒四角) であった。融着接続機の電気放電を用いたファイバヒューズ発生は確率的となるので[14]、各消光比について 10 回ずつ試行し発生確率を求めた。入力パワーが 3.4 W の場合、 $r_e$  が 1.9 のとき 10 回とも発生したので発生確率は 1 となった。 $r_e$  が 1.9 から大きくなるにつれて発生確率が下がり、 $r_e$  が 2.3 でファイバヒューズは一度も発生しなかった。したがって、DSF における入力パワーが 3.4 W の場合、2 波長 WDM システムにおいて消光比  $r_e$  が 2.3 の強度変調によりファイバヒューズ発生を抑圧できることがわかった。入力パワーが 2.2 W の場合には、図 4 に示すように、発生抑圧に必要な消光比  $r_e$  は 1.8 へと小さくなった。

次に、DSF における強度変調によるファイバヒューズ発生抑圧特性について 2 波長 WDM システムの場合と 1 波長の場合とで比較を行った。1 波長の場合については、波長 1.55  $\mu\text{m}$  のファブリペロー型 LD からの CW 光を正弦波変調した強度変調光を用いた。繰り返し周波数は WDM システムの場合と同じ 100 kHz とした。図 5 に DSF での 2 波長 WDM システムと 1 波長におけるファイバヒューズ発生確率の消光比依存性を示す。黒丸と白丸はそれぞれ入力パワー 2.2 W における WDM システムと 1 波長における発生確率を示し、黒四角と白四角はそれぞれ入力パワー 3.4 W における WDM システムと 1 波長における発生確率を示す。入力パワーが 2.2 W の場合、1 波長において発生抑圧に必要な  $r_e$  は 2.3 であり、WDM システムの場合の 1.8 よりも大きな値となった。入力パワーが 3.4 W の場合は、1 波長において発生抑圧に必要な  $r_e$  は 4.3 となり、WDM システムの場合の 2.3 よりもずっと大きな値となった。

ここで、1 波長において発生抑圧に必要な  $r_e$  が WDM システムの場合よりも大きくなる理由を検討するため、WDM システムにおける変調波形を矩形波から正弦波に変更して実験を行った。その際、図 3 の波長 1.55  $\mu\text{m}$  のパルス光源において AO 変調器は用いないで FP-LD を正弦波で直接変調する方法に変更することにより、繰り返し周波数 100 kHz で正弦波変調された WDM 光を発生した。その結果、正弦波変調を用いた WDM システムにおいて発生抑圧に必要な  $r_e$  が、入力パワー 2.2 および 3.4 W において、それぞれ、2.3、4.0 となり、1 波長の場合の結果とほぼ等しい値となることがわかった。従って、図 5 に示された発生抑圧に必要な  $r_e$  の 1 波長と WDM システムにおける差については、変調波形の違いが原因であったと考えられる。

また、SMF においても入力パワーが 4、5、6 W の時、2 波長 WDM システムにおいて入力光の強度変調によるファイバヒューズの発生抑圧を確認することができた[16]。

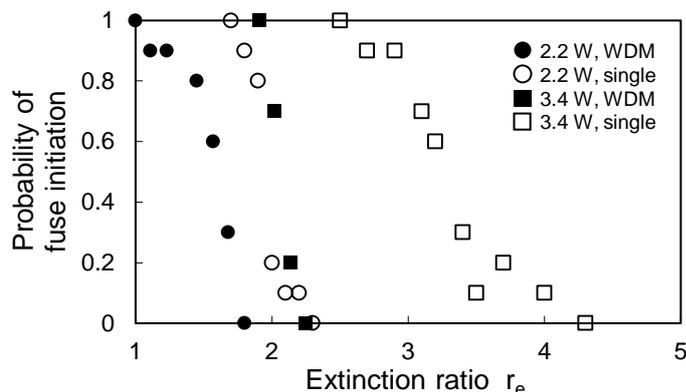


図 5. DSF におけるファイバヒューズ発生確率の消光比 ( $r_e$ ) 依存性の WDM と 1 波長での比較

## 4 まとめ

本研究では、光パルスを入力光として用いることにより DSF において高入力時にファイバヒューズを発生させず、かつ、万が一、発生した場合でもファイバヒューズを伝搬させない方法について検討を行った。また、ファイバヒューズ抑圧法の光ファイバ給電への応用に向けて 2 波長 WDM システムにおける入力光の強度変調によるファイバヒューズの発生抑圧法について検討を行った。

CW 光を用いて発生させたファイバヒューズが DSF を伝搬中に、入力光を矩形波パルスに変えることによりファイバヒューズ伝搬が停止する条件について検討を行った結果、伝搬閾値の 3 倍以上である平均入力パワーを 3.4 W においても繰り返し周波数を 80 kHz 以下にすることでファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかった。そして、伝搬抑圧条件の入力パワー依存性についても検討を行った。また、伝搬抑圧条件を満たすパルス光を入力とした場合には、電気放電ではファイバヒューズが発生しないことも確認した。今後、各種ファイバにおいてファイバヒューズ伝搬を抑圧するための条件について検討を進めていく予定である。

2 波長 WDM システムにおける入力光の強度変調によるファイバヒューズの発生抑圧法についての検討については、波長 1.48  $\mu\text{m}$  の CW 光と 1.55  $\mu\text{m}$  の矩形波パルス光を用いた 2 波長 WDM システムにおいて入力光の強度変調により DSF ならびに SMF でファイバヒューズの発生を抑圧するための条件を明らかにした。

### 【参考文献】

- [1] R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibre," *Electron. Lett.*, vol.24, no.1, pp.47–49, Jan, 1988.
- [2] D. P. Hand and P. St. J. Russell, "Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse," *Opt. Lett.*, vol.13, no.9, pp.767-769, Sep. 1988.
- [3] D. P. Hand and T. A. Birks, "Single-mode tapers as 'fiber fuse' damage circuit-breakers," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 33-34, Jan, 1989.
- [4] S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, Y. Shuto, and R. Nagase, "Fiber fuse terminator," *Proc. Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-optics*, vol. 1, p. 386, 2003.
- [5] 藤田 仁, 森下裕一, "GI ファイバによるファイバヒューズの遮断," 2004 信学ソ大, no.B-10-5, p.234, 2004.
- [6] S. Furuya and K. Kurokawa, "Fiber fuse terminator consisting of a step-index multimode fiber spliced with SMFs," *IEICE Commun. Express*, vol. 9, no. 9, pp.400–404, 2020.
- [7] K.S. Abedin, M. Nakazawa, T. Miyazaki, "Backreflected radiation due to a propagating fiber fuse," *Opt. Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6525-6531, 2009.
- [8] T. Kinoshita, N. Sato and M. Yamada, "Detection and termination system for optical fiber fuse," *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf.*, paper WS4-6, 2013.
- [9] E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, Y. K. Chamorovsky, G. A. Ivanov, and I. L. Vorobjev, "Fiber fuse effect in microstructured fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 180-181, Jan. 2004.
- [10] K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, and H. Tsuchiya, "Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers," *Proc. European Conf. and Exhib. on Optical Commun.*, paper P.1.14, 2008.
- [11] N. Hanzawa, K. Kurokawa, K. Tsujikawa, T. Matsui, K. Nakajima, S. Tomita, and M. Tsubokawa, "Suppression of fiber fuse propagation in hole assisted fiber and photonic crystal fiber," *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 15, pp. 2115-2120, Aug. 2010.
- [12] K. Kurokawa and N. Hanzawa, "Suppression of fiber fuse propagation and its break in compact fiber fuse terminator," *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf.*, paper WS4-5, 2013.
- [13] S. Ishikawa, K. Kurokawa, N. Hanzawa, T. Matsui, and K. Nakajima, "Suppression of fiber fuse initiation by amplitude modulation of input light," *Proc. Microoptics Conf.*, paper P-28, 2019.

- [14] S. Todoroki, “Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer,” Sci. Rep., vol. 6, 25366, 2016.
- [15] K. Kurokawa and D. Shimokura, “Termination of fiber fuse propagation using optical pulses,” Proc. Microoptics Conf., paper PO-1, 2021.
- [16] 小熊崇也, 下倉大輝, 黒河賢二, “WDM システムにおける入力光強度変調によるファイバヒューズ発生抑圧,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J105-B, no. 3, pp.307-309, 2022.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Termination of fiber fuse propagation using optical pulses	26th Microoptics Conference (MOC2021)	2021 年 9 月
Suppression of fiber fuse initiation by AM of input light in a WDM system	電気学会 電子・情報・システム部門大会	2021 年 9 月
WDM システムにおける入力光強度変調によるファイバヒューズ発生抑圧	電子情報通信学会論文誌 B	2022 年 3 月