

電力 10 W 以上を供給可能なファイバヒューズ抑圧型光パワー給電の研究

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熱孤立波が発生し、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れば、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、単一モードファイバにおいて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 μm 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。さらに、近年、防災・減災のための各種 IoT センサやモニターカメラへの電力供給、5G 等の無線基地局への電力供給法として光ファイバ給電が注目されている。光ファイバ給電においてもハイパワー光を光ファイバを用いて伝送するためファイバヒューズの発生が危惧される。

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リソ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圧力を持つことが報告されている[12]。最近では、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[13]や、パルス光を用いることによりファイバヒューズの発生のみならず伝搬中のファイバヒューズを停止消滅できる方法について報告がなされている[14]。

本研究では、ファイバヒューズを抑圧した状態の下、マルチモードファイバ (MMF) を用いた比較的短距離での光パワー伝送により 10 W という大きな電力を得ることを目的として検討を進めた。まず、連続(CW)光を用いて MMF のファイバヒューズ基本特性評価を行った。次に、パルス光を用いた MMF におけるファイバヒューズ伝搬抑圧条件の検討を行い、その検討結果を用いて長さ 500 m の MMF を用いたファイバヒューズ抑圧型光パワー伝送を行い、その電力供給性能について検討を行った。

2 MMF におけるファイバヒューズ伝搬の基本特性評価

これまで屈折率分布がステップ型である MMF における全モード励振状態でのファイバヒューズの基本特性についての報告例はないため、今回、空間モードがマルチモードである高出力半導体レーザー (LD) からの CW 光を用い、ファイバヒューズ基本特性の中でも特に重要であるファイバヒューズ伝搬閾値の測定をまず実施した。評価に用いた MMF の構造パラメータ等を表 1 に示す。コアは純石英ガラスからなり、クラッドにフッ素を添加してステップ型の屈折率プロファイルを実現した純石英コア MMF である。コア径は 105 μm 、クラッド径は 125 μm であり、NA は 0.22 であった。

上記純石英コア MMF のファイバヒューズ伝搬閾値を以下の方法で求めた。光源には波長 980 nm の高出力 LD からの CW 光を用いた。高出力 LD の出力は、テストファイバと同じコア径 105 μm の純石英コア MMF を通

表 1. MMF の構造パラメタ等

コア径 (μm)	クラッド径 (μm)	コア の構成	クラッド の構成
105	125	純石英	フッ素 添加

して出力されるため、高出力 LD の出力ファイバとテストファイバを融着接続することにより、全モード励振状態を実現できる。高出力 CW 光の入力による全モード励振状態でファイバヒューズを発生させ、テストファイバの MMF においてファイバヒューズが伝搬している間に高出力 LD からの入力パワーをゆっくり下げていき、ファイバヒューズの伝搬が停止するパワーを測定した。その結果、コア径 $105\mu\text{m}$ の純石英コア MMF の波長 980 nm における全モード励振状態でのファイバヒューズ伝搬閾値は約 16 W となることがわかった。単一モードファイバである SMF の波長 $1.55\mu\text{m}$ における伝搬閾値が約 1.4 W であることから、コア $105\mu\text{m}$ の MMF の伝搬閾値は SMF の伝搬閾値の約 11 倍大きい。したがって、光ファイバ損失をあまり気にしなくてよい比較的短距離の光パワー伝送用としては、ファイバヒューズ伝搬閾値の高い MMF が魅力的であることが確認された。なお、波長 $1.55\mu\text{m}$ における SMF のモードフィールド径が約 $10\mu\text{m}$ であることから、MMF と SMF におけるファイバヒューズ伝搬閾値の比は、MMF のコア径と SMF のモードフィールド径の比におおよそ一致していることがわかる。

ここで、同じ石英ガラスでできた光ファイバであるにもかかわらず単一モードファイバと MMF ではファイバヒューズの伝搬の様子が大きく異なることに注意が必要である。単一モードファイバの場合は、ファイバヒューズの伝搬に伴いファイバのコア領域が破壊され気泡が形成されるが、クラッド外縁部や被覆部への恒久的な損傷は発生しない。一方、MMF の場合には、ファイバヒューズの伝搬に伴い被覆が燃焼するとともに石英ガラス部分も気化し、ファイバヒューズ伝搬とともに光ファイバ自体が消失してしまう。そして、ファイバヒューズの伝搬速度についても、単一モードファイバの場合には入力パワーの大きさに依存するもののおおよそ毎秒 1 m 程度のオーダーとなるが、MMF の場合には、例えば、CW 光入力パワーが約 24 W のとき、伝搬速度が毎秒 4 mm 程度であり単一モードファイバと比べ 2 桁以上小さい速度となる。今後、上記に記した MMF における特異なファイバヒューズ伝搬特性のメカニズムについて検討を進めていきたい。

3 パルス光を用いた MMF におけるファイバヒューズ伝搬抑圧条件の検討

続いて入力光としてパルス光を用い MMF においてファイバヒューズの伝搬を抑圧できるか検討を行った。図 1 に実験系を示す。光源には空間モードがマルチモードである波長 980 nm の高出力半導体 LD を用いた。矩形波パルス光は、ファンクションジェネレータを用いて高出力 LD を直接変調することにより発生させた。パルス光のデューティ比と繰り返し周波数は、それぞれ 0.8 と 50 Hz であった。パルス光の繰り返し周波数については、ファイバヒューズ伝搬抑圧特性に優れた周波数を実験的に選出した。MMF におけるファイバヒューズ伝搬においてはファイバ自体の焼失を伴いながらの伝搬となるため、今回図 2 に示すように、MMF を固

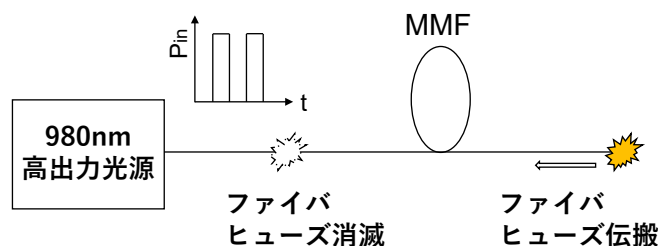


図 1. ファイバヒューズ伝搬抑圧実験系

定台に固定し、固定台への固定端から MMF の出力端が 6 cm だけ空中に突き出ているような形態で実験を行った。高出力 LD からの出力光に関しては、LD 出力を ON にした際、パルス光の立ち上がりにおいて若干の出力パワーのオーバーシュートが存在するため、定常時においてファイバヒューズが伝搬できない平均入力パワー条件に設定した場合においてもパルス光の立ち上がり時にファイバヒューズを発生させることができる。MMF におけるファイバヒューズ伝搬は、単一モードファイバにおけるファイバヒューズ伝搬と異なり少し不安定な伝搬であるため、今回、空中でのファイバヒューズ伝搬距離が 6 cm 以上となる場合を安定した伝搬とし、伝搬距離が 6 cm 未満で伝搬停止した場合は非伝搬と判断した。

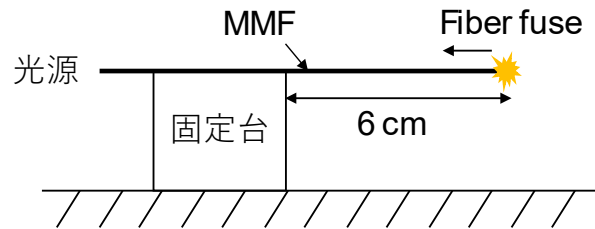


図 2. 伝搬抑圧実験における MMF の固定法

ファイバヒューズが安定的に伝搬する（ファイバヒューズ伝搬距離が 6 cm 以上となる）確率の平均入力パワー依存性を図 3 に示す。各平均入力パワーについて 5 回ずつ試行し確率を求めた。図 3 より、平均入力パワーが 33 W の時には 5 回の試行全てにおいてファイバヒューズは 6 cm 以上伝搬し、確率は 1 となった。平均入力パワーが下がるにつれて多少ばらつきはあるものの 6 cm 以上伝搬する確率は下がっていった。そして、平均入力パワーが 22 W 以下では、一度も 6 cm 以上伝搬することはなかった。したがって、デューティ比が 0.8 で繰り返し周波数が 50 Hz のパルス光を用いることにより、平均入力パワーが 22 W において MMF におけるファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかった。すなわち、パルス光を入力として用いることにより MMF における伝搬閾値である 16 W より 6 W 高い平均入力パワーにおいてファイバヒューズ伝搬を抑圧できることが明らかとなった。

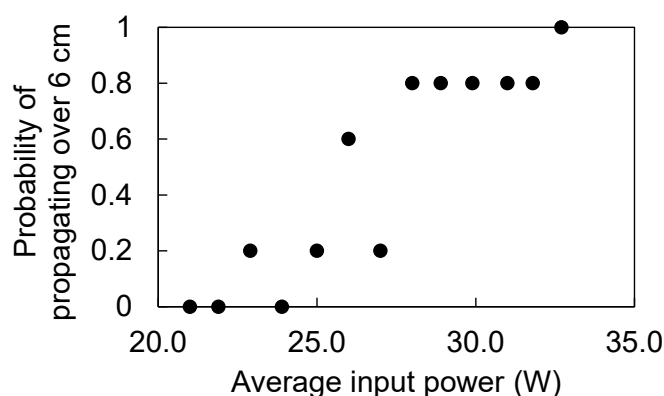


図 3. MMF を 6 cm 以上安定伝搬する確率の平均入力パワー依存性

4 ファイバヒューズ抑圧下での MMF における光パワー伝送

デューティ比が 0.8 で繰り返し周波数が 50 Hz のパルス光を用いることにより、平均入力パワーが 22 W において MMF におけるファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかったため、このパルス光を用いてファイバヒューズ抑圧下での MMF における光パワー伝送の実験を行った。実験系を図 4 に示す。用いた MMF の長さは 500 m であり、平均入力パワー 22 W のパルス光を入射した際の MMF の平均出力パワーは 19 W であった。光パワー伝送用 MMF と光電変換器 (PPC) 入力用 MMF を融着接続し、光電変換器にて光パワーを電力に変換した。光電変換器には波長 915~980 nm で変換効率の高い市販の光電変換器を使用した。また、入力光が繰り返し周期 50 Hz のパルス光であるため、静電容量 4700 μ F のコンデンサーを用いて出力電圧の平滑化を行った。図 5 に光電変換した際の I-V 特性を示す。光電変換により電力 4.4 W を得ることができ、その際の光電変換効率は 23% であった。以上より、コア径 105 μ m、クラッド径 125 μ m の純石英コア MMF を用いることによりファイバヒューズを抑圧した状態で平均パワー 22 W のパルス光を長さ 500 m にわたり光パワー伝送し、遠端で 4.4 W の電力が得られることを実証することができた。

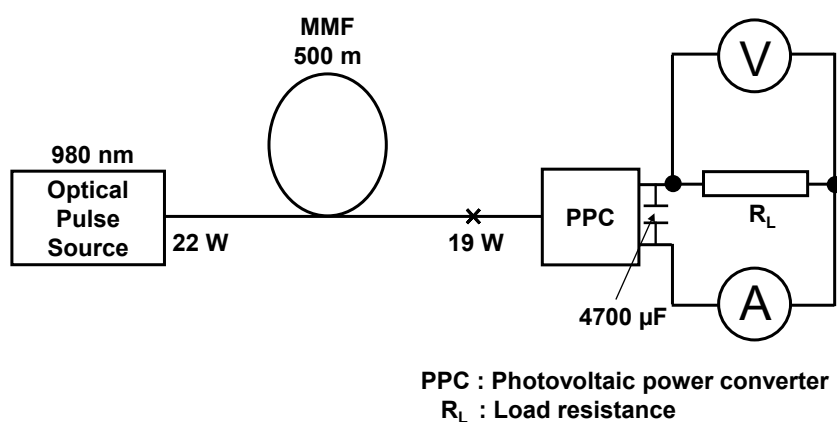


図 4. MMF を用いた光パワー伝送の実験系

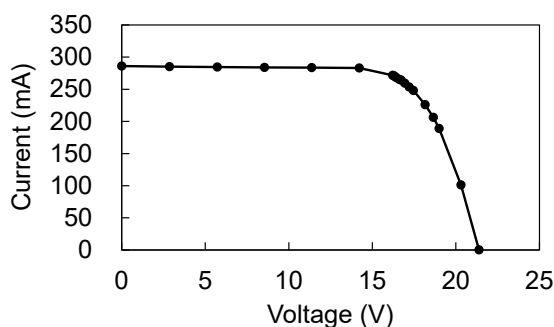


図 5. 光電変換時の I-V 特性

5 まとめ

本研究では、波長 980 nm の光パルスを入力光として用いることによりファイバヒューズを抑圧した状態で MMF における高出力光パワー伝送を行い遠端で大きな電力を得る方法について検討を行った。まず、コア径 105 μ m の MMF における全モード励振状態でのファイバヒューズの基本特性測定を行い、ファイバヒューズ伝搬閾値が 16 W となることを明らかにした。次に、パルス光を用いた MMF におけるファイバヒューズ伝搬抑圧特性について検討を行い、デューティ比が 0.8 で繰り返し周波数が 50 Hz のパルス光を用いることにより、

平均入力パワーが伝搬閾値より 6 W 高い 22 W においてファイバヒューズ伝搬を抑圧できることを明らかにした。そして、このパルス光を用いることにより、長さ 500 m の MMF においてファイバヒューズを抑圧した状態で平均入力パワー 22 W の光パワー伝送を実現し、遠端での光電変換により 4.4 W の電力を得ることができた。今後は、MMF におけるファイバヒューズ伝搬メカニズムの解明を図るとともに、さらに大きな入力パワーでのファイバヒューズ伝搬抑圧方法について検討を進め、光パワー伝送における出力電力の向上を目指す。

【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] K. Kurokawa and D. Shimokura, "Termination of fiber fuse propagation using optical pulses," *Proc. Microoptics Conf.*, paper PO-1, 2021.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
22 W optical power delivery with suppressed fiber fuse in pure-silica-core multi-mode fiber	6th IEICE-CS International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025)	2025 年 11 月（予定、投稿済み）