

赤外中空ファイバ用ボール型シーリングキャップの製作と その特性

遠藤 正志, 笠原 亮介, 松浦 祐司, 宮城 光信
東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05)

Fabrication and Characteristics of Ball-Shaped Sealing Caps for Infrared Hollow Fibers

Masashi ENDO, Ryosuke KASAHARA, Yuji MATSUURA, and Mitsunobu MIYAGI
Graduate School of Engineering, Tohoku University, 05, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

(Received December 25, 2003)

To seal the end of hollow fibers for medical uses, a sealing cap for Er:YAG laser light is fabricated by fusing a glass ball onto the end of a glass capillary. The cap has a focusing effect and the focal point is located near the cap surface. Optical properties of the caps with a diameter of 1 mm are evaluated, and the lowest insertion loss of 0.27 dB and the highest transmitted pulse energy above 750 mJ have been obtained for the cap made of low-OH silica glass.

Key Words: Hollow fiber, Sealing cap, Er:YAG laser

1. はじめに

レーザー治療において、Er:YAGレーザーはその発振波長が水の吸収ピークに一致しており、生体軟組織、硬組織とともに効率よく切除できるため、眼科治療や歯科治療等で実用化が進んでいる^{1,2)}。

そのためのフレキシブルな伝送路として、中空ファイバがある^{3,4)}が、レーザー照射時に飛散した組織や水分から中空ファイバを保護するためには、出射端面を封止する必要がある⁵⁾。このことにより、中空ファイバは体内で使用することが可能となる^{6,7)}。うへ、シーリングキャップの先端を加工することによりレンズ機能を持たせることもできる。

本研究では、強固でしかも効率の良いシーリングキャップの簡便な製作法を示すと同時に、その耐エネルギー、レーザー入射時の温度上昇を測定し、実用に耐えるエネルギー範囲を明らかにした。

2. ボール型シーリングキャップの製作

患部へのレーザー照射を行う場合、周辺組織への影響を抑えるために、キャップと患部は接触させるのが望ましい。その際、効率の良い切除を行うためには、出射端付近に焦点を持つキャップが適している。そこで、これらの要求を満たすキャップとしてガラス球をベースとしたボール型キャップを考え、その簡便な製作法を考案し

た。

Fig. 1(a)に示すように、細径のガラスファイバ、あるいはチューブを加熱し融解させた際に生じる表面張力の性質を用いることにより、ガラスボールを製作することが出来る。これをFig. 1(b)に示すようにガラスチューブに挿入し、回転させながらガスバーナーを用いて加熱融着させることにより、先端がボール状となるキャップを完成する。ガラス材料としては、軟化点が低く、加工が容易なパイレックスガラス、中空ファイバの原材料であり、入手が容易な合成石英、OH基含有量が少なく、吸収損失の小さな無水石英の3種類を選択した。

製作したガラスボール及び、各種内径のシーリング

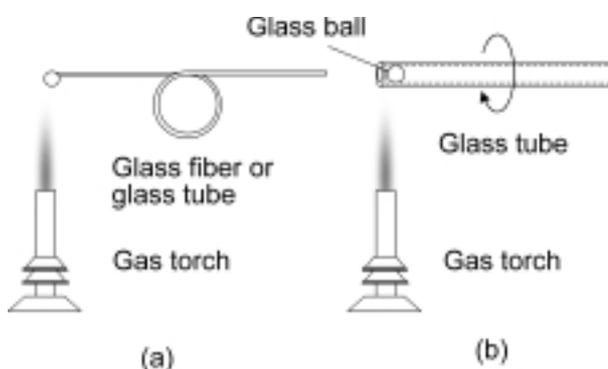


Fig. 1 Fabrication method of glass ball (a) and glass sealing cap (b).

キャップの外観をそれぞれFig. 2, Fig. 3に示す. いずれも先端部の内・外面が球状であることが確認できる.

3. シーリングキャップ(1 mmφ)の光特性

3.1 焦点位置及びビーム拡がり

内径700 μmの中空ファイバ先端に内径1 mmのボール型シーリングキャップを装着した場合の, Er:YAGレーザービーム拡がりを測定した結果をFig. 4に示す. キャップ先端と感熱紙を接触させた時の位置を0 mmとした. 比較のためにキャップを装着しない場合の結果も示している. キャップのレンズ作用により, 出射端付近のビーム径が小さく, その後のビーム拡がりが大きくなっていることが分かる. 本キャップの先端部は内・外面が球状であることから2球面レンズとして機能し, 集光性を持ったためである. 図中では確認されないが, 焦点はキャップ先端面付近に位置している(付録).

肉片(ハム)と本キャップを近接させ, Er:YAGレーザー(パルス幅 250 μs, 繰り返し周波数10 Hz)を照射した後の断面写真をFig. 5に示す. キャップからの出射エネルギーは(a) 200 mJ, (b) 400 mJとし, それぞれ0.1 mm/sec, 3

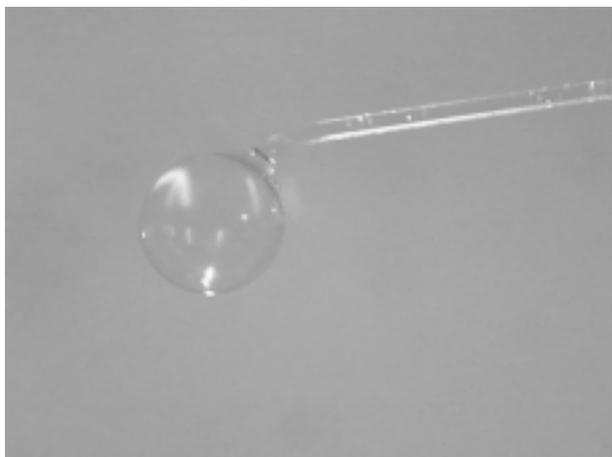
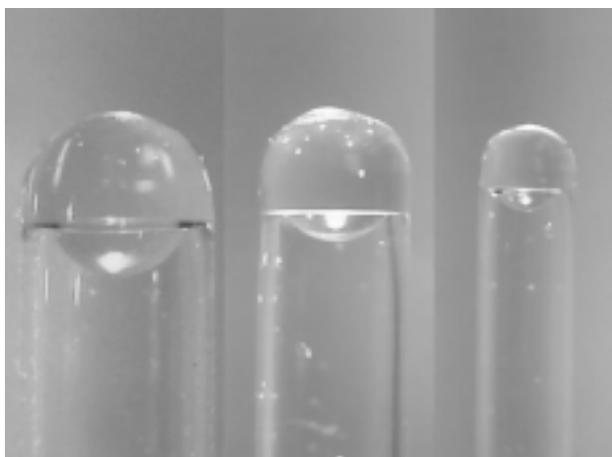


Fig. 2 Glass ball.



(a) (b) (c)

Fig. 3 Glass sealing caps. Inner diameters of the caps are 1 mm (a), 0.8 mm (b), and 0.5 mm, respectively.

mm/secの速さでレーザー光を走査している. (a)に示す切断面の形状は, レンズ機能を持たないドーム型キャップを使用した場合^{5,6)}と異なっており, ボール型キャップの集光効果が確認できる. また, (b)に示す切断面の深さから, 本キャップを使用してEr:YAGレーザーを照射することで, Ho:YAGレーザーを使用した場合⁸⁾よりも高効率なアブレーションが可能なが分かった.

3.2 透過損失

Fig. 3(a)のキャップに中空ファイバを介し, Er:YAGレーザー光を入射し, 内径1 mmの各種キャップの透過損失を測定した. パイレックスガラスキャップの場合は1.8~3.4 dB, 合成石英キャップでは0.35~0.95 dB, 無水石英キャップでは0.27~0.66 dBという損失値を得た. いずれのキャップにも損失に幅が生じている. これは, パイレックスガラスキャップの場合には, 材料による吸収が大きいため, レンズ厚のばらつきによるものである. 一方, 合成石英キャップと無水石英キャップの場合には, 製作の際に混入する気泡の量のばらつきが主要な原因と考えられる.

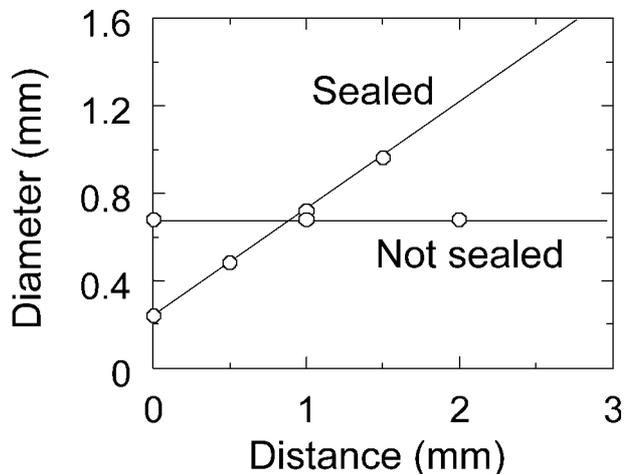


Fig. 4 Output beam divergence in air for 1 mmφ cap.

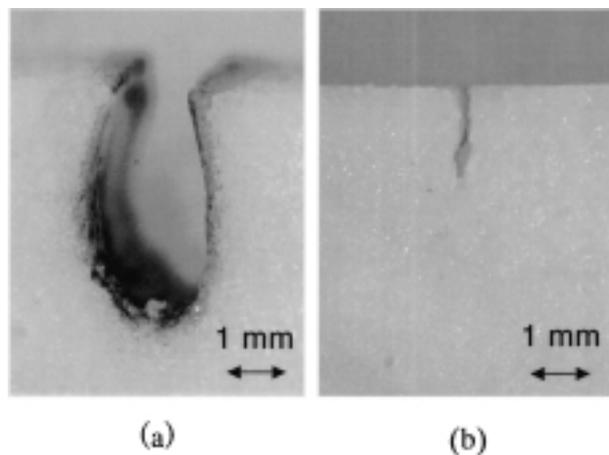


Fig. 5 Cross section of meat ablated by Er:YAG laser pluses. Energy is 200 mJ and scanning speed is 6 mm/min (a). Energy is 400 mJ and scanning speed is 3 mm/sec (b).

3.3 耐エネルギー特性

各種キャップに対し、Er:YAGレーザー光(パルス幅 250 μ s, 繰り返し周波数10 Hz)を2分間連続照射し、キャップが耐えうる最大エネルギーを調べた。中空ファイバの使用条件を考慮し、実験は空気中と水中で5本ずつ行った。測定結果をTable 1に示す。

パイレックスガラスキャップの場合は、空気中では125 mJ以下のエネルギーしか耐えられなかったが、水中では275 mJ以下では破壊されず、耐エネルギーの向上が見られた。これは、水の冷却効果により温度上昇が抑えられるためである。合成石英キャップ、無水石英キャップの場合は、ともに500 mJでは破壊されず、高い耐エネルギー特性を有していることが明らかになった。また、空気中において、無水石英キャップは合成石英キャップに比較し、より高い耐エネルギー性を示した。現有のレーザーの最大出力の制限により、750 mJ以上の耐エネルギーについては、データは得られていない。

3.4 温度上昇

Er:YAGレーザー光(パルス幅 250 μ s, 繰り返し周波数10 Hz)入射時に、空気中でキャップ射出端付近の温度をサーモグラフィーを用いて測定した。その結果をFig. 6に示す。ただし、キャップ先端の最高温度をキャップ温度として定義する。

損失と温度上昇の大きさの間には、相関関係がある。注目すべき点は、無水石英キャップの温度上昇の低さである。250 mJ入射の場合、キャップ温度は35 $^{\circ}$ Cと人間の体温以下の温度を保っている。また、500 mJ入射時においては、合成石英キャップが100 $^{\circ}$ C以上の高温となるのに対し、無水石英キャップでは54 $^{\circ}$ Cであった。60 $^{\circ}$ C以下の温度であれば、生体組織への影響は可逆的なものとどまり、組織構造の破壊は起こらないため²⁾、長時間でなければ安全に使用することが可能である。水中で使用した場合には、その冷却効果により、温度上昇は更に少ないことが予想される。以上の結果から、シーリングキャップのガラス材料として無水石英が3種類の中で最も適しているが、小エネルギー用途に対しては、製作のし易さ、材料の調達容易さの観点から、パイレックスガラスあるいは石英ガラスからなるキャップも有用である。

4. まとめ

中空ファイバの体内使用に適した、焦点を出射端付近

Table 1 Energy capability for various sealing caps.

Glass material	Environment	Energy capability (mJ)
Pyrex	Air	125
	Water	275
Silica	Air	500
	Water	>750
Low-OH silica	Air	>750
	Water	>750

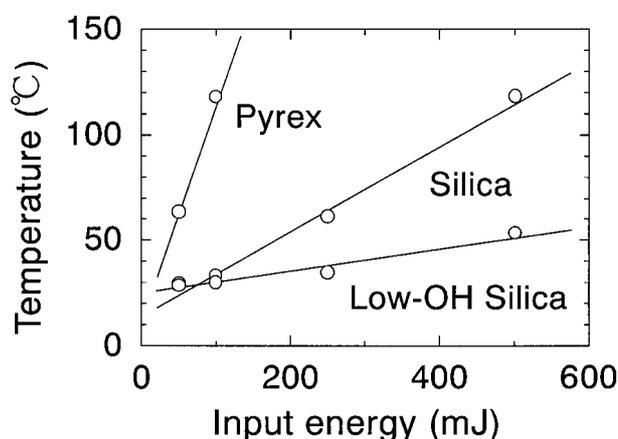


Fig. 6 Measured temperatures of various sealing caps for Er:YAG laser input.

に持つシーリングキャップの簡易な製作法を示し、内径1 mmのキャップについて測定を行った。耐エネルギー特性の評価では、合成石英キャップと無水石英キャップは、500 mJのエネルギーを入射しても破壊されなかった。キャップ温度測定の結果では、OH基含有量の少ない無水石英キャップが優れた特性を示しており、Er:YAGレーザー光用シーリングキャップのガラス材料として適していることが確認された。

付 録

Fig. 7のような曲率半径 R_1 , R_2 , 厚さ D , 屈折率 n の2球面ロッドレンズに光を平行入射させた時のレンズの右端面から焦点までの距離 Z は、

$$Z = \frac{R_2[nR_1 - (n-1)D]}{(n-1)[n(R_1 + R_2) - (n-1)D]} \quad (1)$$

と与えられる⁸⁾。そこで、Fig. 8のような屈折率 n のボール型シーリングキャップモデルに光を入射させた場合の右端面から焦点までの距離は、(1)式に $R_1 = a$, $R_2 = a + d$, $D = 2a + d$ を代入すれば、

$$Z = \frac{(a+d)[(2-n)a - d(n-1)]}{(n-1)(2a+d)} \quad (2)$$

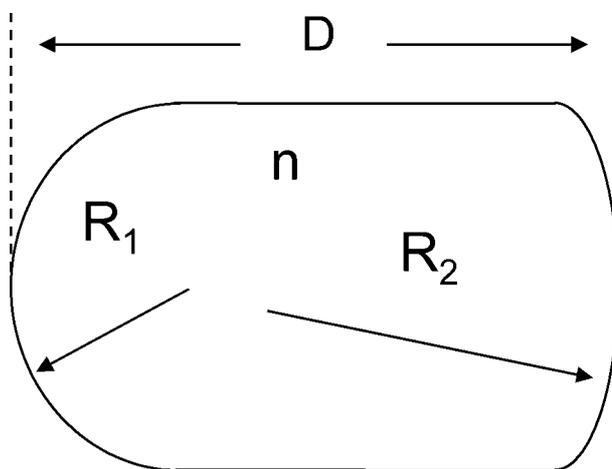


Fig. 7 Bi-convex rod lens.

参考文献

- 1) 野馳 潤：レーザー研究 **24** (1996) 28.
- 2) 栗津 邦夫：レーザー研究 **28** (1999) 291.
- 3) Y. W. Shi, Y. Wang, Y. Abe, Y. Matsuura, M. Miyagi, S. Sato, M. Taniwaki, and H. Uyama: Appl. Opt. **37** (1998) 7758.
- 4) R. L. Kozodoy, A. T. Pagkalinawan, and J. A. Harrington: Appl. Opt. **35** (1996) 1077.
- 5) S. Mohri, T. Kasai, Y. Abe, Y. W. Shi, Y. Matsuura, and M. Miyagi: Appl. Opt. **41** (2002) 1251.
- 6) K. Iwai, Y. W. Shi, K. Nito, Y. Matsuura, T. Kasai, M. Miyagi, S. Saito, Y. Arai, N. Ioritani, Y. Okagami, M. Nemeč, J. Sulc, H. Jelinkova, M. Zavoral, O. Kohler, and P. Drlík: Appl. Opt. **42** (2003) 2431.
- 7) G. Boas: Biophotonics International **9** (2002) No. 7, 57.
- 8) 河野 健治：光デバイスのための光結合系の基礎と応用（現代工学社, 1991） p. 21.
- 9) J. Zenk, U. W. Geisthoff, I. Hamadi, and H. Iro: Lasers Surg Med **25** (1999) 396.

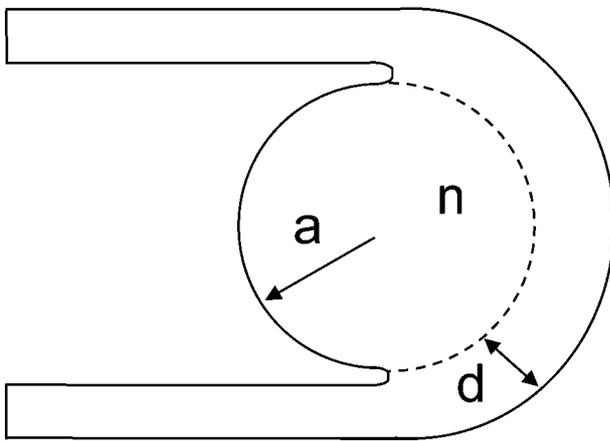


Fig. 8 Model of ball-shaped sealing cap.

となる。本論文で製作したボール型キャップの場合、 $a = 0.5 \text{ mm}$ 、 $d = 0.2 \text{ mm}$ 、 $n = 1.42$ を代入すれば、 $Z = 0.3 \text{ mm}$ となり、キャップ直後に光が収束することが分かる。