石英ロッド形照明光伝送路†

山下 博志*

1. はじめに

太陽光あるいは人工光を伝送して、必要箇所を照明するための石英ロッド形照明光伝送路について述べる[†]。

図1 石英ロッド形太陽光採光システム

図1に一般応用例で示すように、光源から出た光は鏡あるいはレンズなどを用いて伝送路受光端に集光され、目的箇所へ濃縮伝送された後、拡散照明に供される。したがって、この例からもわかるように伝送路が具備すべき一般的な要件は、伝送特性が良く明かるいこと、耐久性に富むこと、価格が安いことなどである。中でも明かるい伝送路という要件は重要であり、そのためには伝送路受光端に入射する光が、できるだけ広い角度範囲のものまで伝送されること、すなわち開口数が多いこと、受光端は光源像以上の口径を持ち、かつ隙間がないこと、すなわち有効受光断面積が多いこと、伝送路材の透明性が高いこと、側壁での表面散乱が少ないことなどが要件である。耐久性については、耐光性、耐熱性、耐機械衝撃性などを備えた材料、および構造を採ることが必要である。また安価なことは、材料費が安く、しかも建造物などへの敷設工事が容易でなければならない。

一般に石英ロッドは広い波長範囲で透明性が良いこと、有効受光断面積が大きく取れること、耐光性、耐熱性に優れているなどの特長を持っている。しかし、これを用いて実際に伝送路を構成するには、いかにして開口数を大きくするか、表面散乱を少なくするか、耐機械衝撃性、熱膨張差緩衝性を付与するか、接続性、曲げ性、分岐性などの問題が解決されなければならない。

図2 石英ロッド形照明光伝送路
FO:集光部 (L:集光レンズ), CL:被覆部
(1:石英ロッド, 2:FEPチューブ, 3:金属管), CN:接続部 (4:充てん材, 5:保持材), BE:曲げ部, BR:分岐部

図2は今回試作した伝送路の概略図である。焦点距離が1mのフレネルレンズにより太陽光を集光し、適当なフィルタにより熱線を遮断した後（実際にはドーム用カバーに使うガラス板、あるいはポリカーボネート板が、熱線カットおよび紫外線カットフィルタを兼用）、口径約12mmの伝送路受光端に送り込む。このとき太陽像の大きさは約10mmの直径になるので、受光端は10mm以上の断面積を持ち、かつ隙間があってはならない。この意味ではロッド形伝送路は100%の有効受光断面積を持つので、ファイバ束と比べて有利である。伝送路の構造は中心に石英ロッドを配し、これをふつ素樹脂チューブで緩やかに被覆した状態で、機械的保護のために全体を金属管に納めた。この伝送路は敷設建造物との熱膨張差を考慮して、適当な可撓性と伸縮性を持つ接続部により順次接続されるとともに、適宜、曲げ部を介して照明箇所へ伝送される。また途中で必要に応じて分岐部を入れることもできる。照明末端では、ロッドの側壁に高屈折率粉体を塗布することにより、濃縮伝送された光を拡散光として取り出し照明に供する。

† Illumination Light Guid Using Quarts Rod

* 大阪工業技術試験所

Hiroshi Yamashita

紹介者 編集理事 大谷 義彦

以下においては、石英ロッドの基本特性である伝送特性を調べることで、設計パラメータとして伝送エネルギーと集光角の関係を明らかにすること、可撓性、伸縮性を付与した接続法、曲げ半径の設計方針、分岐法等について述べ、最後に石英ロッド形を中心とした伝送路の一般的な特徴と期待される応用分野などについて略記する。

2. 伝送特性と被覆技術

伝送しである石英ロッドは、四塩化けい素を原料とする合成石英を用い、表面傷を極力少なくするために非接触法によりロッドを成形した。ただし光通信用石英では残留水分を除去する必要があるが、可視域伝送路では水分はあまり影響しないので水分除去工程は不要である。したがって石英の合成法として、大量生産が可能な加水分解法が採れるので通信用石英と比べて安価になる。成形したロッドは、できるだけ速やかにふっ化エチレン・プロピレン・コポリマー・チューブ (FEP) に挿入し、成形後の傷あるいは汚染の発生を防止した。ここで被覆材として FEP を選んだ理由は、屈折率が低く ($n=1.34$)、耐光性があり、石英材との接触性が低いことによる。ロッドの基本長は 4 m とし、これを破断法 (軽くやすり目を入れて破断すること) により適当な長さに切り、必要に応じて後述の方法で接続して伝送路を構成する。

図 3 石英ロッドの伝送特性
ロッド寸法：直径 10 mm，長さ 4 m，
測定波長：632.8 nm (He-Ne レーザ)

伝送路の基本特性として、最も重要なのは伝送特性である。図 3 は直径 10 mm，長さ 4 m の石英ロッドについてヘリウム・ネオン・レーザ (波長 632.8 nm) を用いて測定した入射角に対する伝送特性である。点線は熱収縮性 FEP チューブにより、ロッドを緊密に被覆したときの伝送特性を、また実線は非収縮チューブにより緩く被覆したときの特性を示す。入射角が小さいとき ($\theta \approx 0^\circ$)，両者の内部透過率 (外部透過率に対して端面反射補正を行なった透過率) は共に約 96% であるが、入射角が増すに従い透過率は減少する。緊密に被覆した場合、透過率は約 34° でカットオフになるが、緩く被覆した場合には、このようなカ

ットオフがほとんど見られない。入射角が増すにつれて透過率が減る理由は、光がロッド内を反射しながら伝送するときの光学距離が増すことと、各反射ごとにわずかな損失を伴い、このような反射回数が角度とともに増大するからである。反射回数はロッドの直径が太いほど少ない。この意味からも径が細いファイバを束ねるよりも、径が太いロッドのほうが原理的に有利である。

また、できるだけ大量の光を伝送するには、レンズ径を大きくして、入射角が大きい光も伝送することが必要である。そのためには約 34° でカットオフになる緊密被覆よりも、カットオフが目立たない緩やかな被覆のほうが有利である。

なお、図 3 の測定に際して注意すべきことは、ロッドからの出射光の方向が非常に複雑な動きをするので、光検出器の前には必ず積分球を使用することである。使用しない場合には、検出器のローカリティーが影響して良いデータが得られない。

図 4 石英ロッドの伝送特性
ロッド寸法：直径 10 mm，長さ 4 m，測定波長：546 nm，313 nm
(Hg ランプ)

図 4 に、さらに短波長である 546 nm および 313 nm に対する受光角特性を示す。この図は緩い被覆の場合であるが、図 3 と比べて短波長になるに従い、 $\theta = 0^\circ$ での透過率が小さくなることと受光角が狭くなることがわかる。(ただし、650 nm に残留水分による吸収があるので、He-Ne 波長での透過率は多少落ちる)。これらの受光角特性は内部透過率を T_{int} として、ロッド長および直径をそれぞれ L, d (cm) とした場合、ファイバの理論と同様に n を石英の屈折率として

$$-\ln T_{int} = \frac{L}{\cos \gamma} \left(\alpha + \frac{\beta}{d} \sin^2 \gamma \right) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$\sin \gamma = \frac{1}{n} \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

なる式に良く合致することがわかった。ここで α は吸収係数、 β は側面の散乱係数であり、それぞれ $\theta = 0^\circ$ での透

過率値、および入射角を変えたときの透過率半値幅を与える量である。

なお、ファイバ理論では(1)式の第2項が $\sin r$ の一乗になっているのに対して、ここでは $\sin r$ の2乗になっている²⁾。この違いの理由は定かではないが、恐らくファイバでも2乗になるべきところが、径が細く平行性が良い入射ビームが得難いこと、およびファイバの開口係数が小さいために、入射角が十分に大きい領域まで測定できないなど、実験上のつごうにより式の検証が困難なためと思われる。 $\sin r$ の2乗になる理由は、後節の接続損失および曲げ損失でも述べるように、伝送光は表面傷あるいは汚染によって散乱を受けて角度分布が広がる結果、全反射臨界角以上の角度成分が生じるためと思われる。このような成分の発生は、入射角が大きくて臨界角に近いほど起こりやすい。

次に照明光伝送路の場合には、演色性の面から可視光全域を伝送する必要があるため、 α 、 β の波長依存性が重要となる。 α についての波長依存性は図5に示すように、波長に対してほぼ4乗に逆比例していることがわかる。

また、 β の波長依存性については、図6に示すように波長に対して約3乗に逆比例することがわかった。 α についてはレーリー散乱がきいているものと思われるが、 β についてはこの機構だけでは説明がつかない。

図5 吸収係数(α)の波長依存性
Hg ランプ使用

図6 散乱係数(β)の波長依存性
Hg ランプ使用

考えられることは、二つの相反する現象が関与しており、一つは表面汚染などによる散乱損失であり、これはレーリー則に近いであろう。他の一つは、石英の屈折率が短波長になるほど大きくなることであり、臨界角が広がる結果、損失を押さえる方向に働く。これらの合成として、波長の3乗に逆比例するものと考えられる。

3. 伝送エネルギーと集光角の関係

実際に伝送路を使って照明光を伝送するときは、光源から出射する光をレンズなどで集光してロッド端面へ入射するので、伝送特性はさきに述べた平行光束の場合とは異なる。すなわち図7に示すように入射角は 0° からレンズの半径で張られる角度 θ_c (以下、集光角と呼ぶ)まで連続的に分布していることを考える必要がある。

図7 レンズを用いた集光
 f : 焦点距離, θ : 入射角, r : 屈折角

入射角範囲が $(\theta, \theta + d\theta)$ で、焦点距離が f のレンズ上に張られる輪帯の面積は、

$$2\pi f^2 \sin\theta / \cos^3\theta \cdot d\theta$$

である。レンズ上のエネルギー密度を ρ (一定)とすれば、ロッド中を伝送されるエネルギー(E)は(1)式を用いて、

$$E(\alpha, \beta, \theta_c) = 2\pi \rho f^2 \int_0^{\theta_c} \frac{\sin\theta}{\cos^3\theta} \exp\left[-\frac{L}{\cos r} \left(\alpha + \frac{\beta}{d} \sin^2 r\right)\right] d\theta \quad \dots\dots(3)$$

となる。また、伝送効率が入射エネルギーに対する出射エネルギーで定義されるから、(3)式を入射エネルギーで割ることにより、

$$\eta(\alpha, \beta, \theta_c) = \frac{E}{\pi \rho f^2 \tan^2 \theta_c} \quad \dots\dots(4)$$

となる。伝送エネルギー(E)、伝送効率(η)は共に石英ロッドの特性(α , β)に依存するとともに、集光角(θ_c)にも依存することに注意すべきである。

図8は E および η の θ_c 依存性を示したものであり、 θ_c が増加するにつれて E は増加するが、 η はむしろ減少する(点線は β が現在の1/4になったと仮定したときのエネルギー、効率を示す)。このように光伝送路の効率、伝送エネルギーは、単に伝送路の特性だけでは決まらず、入射条件によっても変わるので注意する必要がある。

図8の結果からいえることは、太陽光採光のように光が無料の場合には、伝送効率が多少悪くとも θ_c を大きくして伝送エネルギーを多くしたほうが有利であるが、人工光伝送の場合には伝送効率が重要となり、光源の性質に応じ

図8 集光角 (θ_c) と伝送エネルギー (E) および伝送効率 (η) の関係
 ロッド寸法: $L=10\text{ m}$, $d=1\text{ cm}$, $\alpha=2.88E-5\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ (He-Ne), $\beta=4.60E-3$ (He-Ne)
 点線は β が $1/4$ になったと仮定したときの値。

た θ_c の設定が行なわれなければならない。

ただし、太陽光採光の場合でもあまりに口径の大きなレンズを使用すると、収差により太陽像が広がるので伝送路径を太くしなければならないこと、端面反射損失が増大すること、あるいはレンズ自体の製作費が高くなることなどを考慮しなければならない。一般的にはこれらの事情から θ_c は 30° 程度が限界と考えられる。

4. 接 続 技 術

ロッド形伝送路には可撓性、伸縮性がないので、敷設建造物のひずみ、あるいは熱膨張差などによる破損を避けるべく、接続部は適当な間隔で鉄道レールのような隙間構造による緩衝機構を兼ねる必要がある。しかし隙間を空気層として残すと端面反射損失を生じるので、屈折率が石英に近く、かつ耐光性がある透明弾性体もしくは液体によって隙間を充てんしなければならない。液体充てん材の場合には何らかの透明弾性体容器が必要となり、構造が複雑になるわりにはあまり利点がない。したがって試作伝送路では透明弾性体を充てん材として用い、ジメチル系シリコンゴムを適当な紫外線カットフィルタを入射端に配して用いた。シリコンゴムは他の透明弾性体と比べて一般に耐光性が高く、中でもジメチル系はフェニル系と比べて耐光性が高い傾向を示す。なお、屈折率が石英に近いという観点からはフェニル系のほうが良いわけであるが、ここでは耐光性を重視してジメチル系を選んだ。

耐光性とともシリコンゴムが有利な点は、加硫前の状態が粘稠な液体であることであり、ロッドの接続端面を平面研磨せずとも破断面のままで接続部に液が浸透して空気を置換することである。この点は敷設工事を進めるうえに、時間的にも、経費的にもつごうが良い。

接続工程は、接続部に FEP 製熱収縮チューブを覆せ、注射針を用いてシリコンを注入する。その際、接続部に

泡を残さないために、ロッドの接続部およびチューブの内面をあらかじめシリコンで濡らしておくが良い。注入した後、バンドヒータなどにより 140°C 、20分加熱するとシリコンが硬化する。熱収縮 FEP チューブの役割は、シリコンが加硫するまでの容器として作用するとともに、ロッド間の中心軸合わせとして作用する。シリコンが硬化した後では FEP チューブは不用であり、シリコン層を傷つけないように切除する。その際、FEP 材質を使えばシリコンとの離形性が良く、シリコン表面が平滑性よく仕上がる。FEP チューブの切除について、よほど機械的強度が必要でない限り、積極的に切除すべきであり、そのままにして残しておく、前節で述べた緩やかな被覆という要請を破ることになり、損失が大きくなる。したがって、通常は接続部分に FEP チューブがなく接続強度が落ちるので、これを補強するために図2に見られるようなふっ素樹脂製ねじにより、点接触支持機構を採ることが望ましい。

また、可撓性、伸縮性があまり問題にならない接続箇所として、曲げ部分および分岐部の接続がある。これらの箇所は酸水素炎による融着も考えられるが、長尺物を敷設現場で融着するのは作業性が悪い。したがってこれらの接続部においてもシリコンによる接続が有利である。

図9 接続部透過率の厚さ依存性
 充てん材: ジメチル系シリコン
 ゴム、ロッド端面は平面研磨

図9にシリコンゴム層の厚さに対する透過率依存性を示す。入射光源はキセノンランプ、集光角約 30° で入射し、4 mの直線ロッドの後に接続した。また、接続損失を見るために、接続ロッドの全長と同一長の無接続ロッドを比較として用いた。図から見られるようにシリコン層の厚さが増すに従い透過率は減少するが、約6 mm以上では一定レベルに落ち着くことがわかる。図示はないが、同じ集光条件でも、接続層に至るまでのロッド長が短いときには透過率減少はゆるやかになる。したがって接続層が4 mm以下の薄い領域で見られる透過率の急激な低下は、シリコンの吸収によるものではなく、シリコンの屈折率 ($n_s=1.41$) が、石英部 ($n_q=1.47$) よりも低いために全反射

臨界角が狭まることによると考えられる。

すなわち、集光角が 30° で臨界角よりも小さくとも、石英ロッド内を数m以上伝送された光は、散乱によって角度が広がり、シリコン層部の臨界角を超える成分が生じるものと解される。接続厚さが6 mm以上では透過率低下はゆるやかになり、シリコン自体の透過損失に近い値になる(約5,000 dB/km)。接続層の厚さは、可撓性、伸縮性を考慮して少なくとも1~2 mmは必要であるから、接続損失は一箇所当たり3~5%となる。高屈折率、高耐光性で、かつ対ガラス接着力が強い充てん材が望まれる(なお、対ガラス接着力を得るためにシランカップリング剤を用いることは、耐光性を落とす傾向があるので好ましくない)。

5. 曲 げ 技 術

曲げ技術は、石英ロッドに可撓性がないために必要となるロッド形固有の技術である。曲げ部は作業性の観点から、現場において長尺物を曲げるのではなく、L形ロッドをあらかじめ部品化しておき、これを接続する方法を採用した。ファイバの理論では図10に見られるように、直径が10 mm、集光角が 30° のとき(屈折角、 $r \leq 20^\circ$)最少曲げ半径は約3 cmと計算される。これ以上の曲げ半径であれば光は全く損失なしに伝送されるはずであるが、実際にはかなりの損失が見られる。この原因も接続部の損失で触れたのと同じく、曲げ部に達するまでに数m以上伝送された光は散乱を受けて角度分布が広がるためである。臨界角は緩い被覆の場合、直線部では図に見られるように約 47° であり、この辺りまで広がった光線成分は曲げ部の臨界角を超えているので必ず漏れることになる。

図10 屈折角(r)と最少曲げ半径(R)の関係
ロッド径: 10 mm

この意味から曲げ半径が大きいほど損失は少なくなるが、他方、半径が大き過ぎても実際に使用するときに不便である。したがって試作伝送路においては、使用上の観点から曲げ半径を10 cmとし、L形曲げ部の両端には接続のために5~10 cm程度の直線部を残した。

曲げ部の損失を起こす他の原因に、曲げ加工時に生じる微結晶による散乱がある。曲げ加工には、一般に酸水素炎が使われるが、直径が10 mm程度と太くなると、どうしても表面が過熱されて微結晶が発生する。したがって、こ

のような微結晶は、フレーム処理を念入りに施すことにより焼鈍しなければならない。ガラス加工で慣用されるふっ酸処理は表面にピットを作るので、見た目には透明でも光を通すと散乱の原因になる。フレーム処理をしても完全は期し難く、より損失を下げるためにはロッド成型時に同時に曲げ細工を施すことが必要となろう。曲げ損失はキセノンランプ光を 30° の集光角で入射し、直線部を4 m通過した後接続して、一箇所当たり約2%であった。

6. 分 岐 技 術

分岐部は図2に見られるように2種類のものを試作した。一つは直線部に側枝をつけるもので、半径10 cmのL形曲げ部をシリコンゴムを介して押し当てて分岐する。分岐される光量は接触面積に比例するが、シリコンの弾性により圧力に応じて面積が変わり、0~0.3程度の割合で分岐することができる。分岐損失はシリコン圧着部において角度的に多少の無理を来たすので5%程度である。他の一つは分岐される光量は固定であるが、損失がほとんどないもので、2本のL形曲げ部の背面あるいは側面を平面研磨して、シリコンゴムで接着するものである。分岐光量は断面積比で決まり、0.3~0.7程度の範囲で設計できる。これらの分岐技術はロッド形伝送路に固有の技術であり、ファイバ束伝送路においてファイバ本数の分割によって分岐されるのとは対比される。

直線部からシリコンゴムを介して分岐するものについて、分岐比が0~0.3の範囲で可変であることは、単なる分岐技術にとどまらず、さらに調光性、スイッチング性があることを意味する。このような機能が比較的簡単に得られることがロッドの利点である。特にスイッチング性について、電気配線の場合には支線回路中の任意の点で回路を切ればオフ状態になり、支線部を流れていた電力は本線部を流れることになる。しかし光伝送路の場合には電圧に相当する概念がないので電気のように作動せず、たとえ支線の途中箇所へ鏡を挿入したとしても、光は可逆性の原理によって、光源部へ逆流して本線末端へ流入することはない。したがってスイッチングは分岐部の接続を離す方法が最も簡便にして確実な方法といえる。

なお、送電回路にも存在することではあるが、照明光伝送路において、上流部でたとえば干渉フィルタなどを用いて赤色光を分岐させると、本線部は補色である青色がかった色になることにも触れておきたい。

7. 伝送路の特徴と応用分野

以上、石英ロッド形伝送路の概略を説明した。直線部9 m、接続部3箇所、曲げ部2箇所を含む全長10 mのテスト伝送路にキセノンランプを集光角 30° で入射したところ、伝送効率は約47%という結果を得た。損失分約53%の内訳は、端面反射損失約8%、直線部伝送損失約30%、接続損失約10%、および曲げ損失約5%であった。将来、ロッド表面の改善、接続材料の改良などにより、伝送効率は

70%程度には向上することが期待される。

効率改善とともに種々の応用が開けるものと思われる。期待される応用分野として太陽光採光も挙げられるが、伝送されるエネルギー量が数100Wになり、しかも直径が1cmのロッド内に濃縮されていることを考慮して、火災には十分な注意が払われなければならない。これだけの光量および密度の下では生木といえども数秒の内に発火する。したがって、太陽光採光は一般民生用への応用を目指す前に、十分な使用実績と経験の積み重ねが必要であり、そのためにはまず保守管理が行き届いた分野、あるいは特殊分野などへの応用が先着されなければならない。

伝送路に係わる一般的な特徴として、光源部と照明部が分離されるので、お互いの間で相互干渉がなくなることが挙げられる。すなわち、光源からの熱あるいは電気雑音が照明環境へ導入されないし、逆に照明環境から光源部へ高熱、冷氣、腐食性ガス、漏電性ガスが導入されることがない。光源からの干渉が遮断されるという特徴に関して、発熱の観点から、冷凍倉庫内の照明、厳密な空調を要する環境の照明などがあり、また電気導入がないことから、電磁気シールドを要する環境、あるいは爆発性環境の照明等が

挙げられる。また照明環境から光源部への干渉に関して、通常光源が点灯しないような低温、高温、腐食性環境等が挙げられる。さらに光源の保守という観点から、人間が立ち入りにくいような高所、低所、狭所、危険区域などの照明が可能となる。

以上は、光を伝送して照明光として利用するものであったが、他にも植物栽培用、化学合成用、殺菌用、表示、装飾用給光、光利用事務機用光源などへの対応がある。また他の観点からは、集中照明、太陽光採光などによる省エネ設計への対応、あるいは宇宙基地内への太陽光導入による閉鎖系における生命維持への対応など、エネルギー的側面への対応も可能となろう。光伝送技術の大いなる発展を期待する。

参考文献

- (1) 石英ロッド形照明光伝送路
光学技術コンタクト 23 (昭59) 159
エネルギー・資源 6 (昭60) 71
- (2) Fibre Optics, N. S. Kapany, Academic Press (1967)
(受付1986年3月26日)

著者紹介

ひだか たけひこ
日高 建彦君

昭和16年7月20日生まれ。昭和42年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了(電子工学専攻)、同年4月工業技術院電気試験所(現電子技術総合研究所)に入所。以来、マイクロ波工学、赤外伝送技術、固体物性論などの研究に従事。現在は主として軟X線伝送ファイバの研究を行なう。理学博士。電子通信学会、物理学会会員。

やました ひろし
山下 博志君

昭和16年9月13日生まれ。昭和48年3月京都大学理学研究科卒業(物理学専攻)。上記在学中、昭和40年から昭和48年まで東大原子核研究所にてSOR光施設建設に従事。SOR分光学専攻。現在、大阪工業技術試験所ガラス・セラミック材料部において、光材料の創生と評価技術、光材料の屈折率温度変化、ガラスの放射線着色などの研究に従事。昭和48年3月理学博士、日本応用物理学会、日本分光学会会員。

はやし のぶこ
林 宣彦君(正会員)

昭和29年3月8日生まれ。昭和54年3月東京工業大学理工学研究科修了。同年4月株式会社東芝に入社。現在、照明事業部にて生産技術開発を担当。

ゆげ ようじ
弓削 洋二君(専門会員)

昭和60年10月号参照。

ふじもり やすもと
藤森 康朝君

昭和24年1月28日生まれ。昭和51年3月東京大学精密工学系博士課程修了。同年4月株式会社東芝に入社。現在、生産技術研究所、主任研究員、工学博士。精密工学会、応用物理学会会員。