

## ■ 技術報告 ■

## 石英ロッド型照明光伝送路

Illumination Light Guide using Silica Glass Rod.

山下 博志\*      • 藤井 兼栄\*\*      • 早川 惇二\*\*\*  
 Hiroshi Yamashita      Kanenaga Fujii      junji Hayakawa  
 野上 正行\*\*\*\*      • 牧原 正記\*\*\*\*\*      • 小見山 亨\*\*\*\*\*  
 Masayuki Nogami      Masaki Makihara      Tohru Komiyama

## 1. はじめに

太陽はエネルギーの根源である。太陽に源を発したエネルギーの中、今日、人類が享受するエネルギーの形態は次の二つに大別される。第一の形態は地殻変動、造山活動に伴い偏析、濃縮されたエネルギー（ウラン、石油、天然ガス等）、あるいは植物相を介して蓄積濃縮されたエネルギー（石炭、薪炭等）である。これらのエネルギーは空間的、あるいは時間的に濃縮されているので使い易く、厚子力を除き、古くからエネルギー源として活用されて来た。ところが、第二の形態は上記化石燃料の枯渇が騒がれ出して俄かに注目されたもので、太陽熱、風力、波力等を含む自然エネルギーと言われるものである。この形態は時間的な蓄積過程を経ず、また空間的にも偏析過程を経ないために、時間変動が大きく希薄であり、使い勝手が非常に悪い。しかし、エネルギー、資源に乏しいのが我国の宿命であり、何としても、この自然エネルギーを制御して安全確保を計らねばならない。

今日、自然エネルギーの根源である太陽光は太陽熱、太陽電池として利用されているが、光エネルギーを光として利用する技術は古来余り進歩していない。光エネルギーは他のエネルギー形態（電気、化学、機械等）と比べてエネルギー序列が最も高次な形態の一つであり、一旦、他のエネルギー形態に変換して、再び光エネルギーに戻す場合には多大な変換損失を伴う。従って光エネルギーは出来るだけ変換せずに、光として利

用するのが望ましい。オフィス、地下街などでは昼間でも電灯照明を行っており、太陽光採光ができれば電力は大いに節約される。また、電気から光への変換効率は光源の種類、規模にもよるが、大略20%であり、残り80%は熱に変換するから、電灯の代りに太陽光の中、可視光線だけを採光すれば夏期の冷房負担は軽減されよう。また、来るべき宇宙基地計画においても、唯一持続するエネルギー源として太陽光を採光することにより、閉鎖系における生命維持が可能となる。

本稿で扱う太陽光利用技術は、太陽光を集光濃縮し、光伝送路により必要箇所へ伝送し、照明光として利用するものである。以下では太陽光利用技術の主要部である太陽光採光部、および光エネルギー伝送路部について概略を説明し、最後に光伝送路を用いた周辺技術の展望と今後の見通しを述べる。

## 2. 太陽光採光装置

自然エネルギーの典型である太陽エネルギーは先にも述べた様に希薄であり、且つ、日周運動による位置移動、天候による強度変動を伴う。従って年間約2,000時間の日照時間について、太陽光を追尾濃縮してこれを有効に使うことが必要である。

## 2.1 濃縮技術

太陽光エネルギーは地表で垂直面積1㎡当り約1KWであり、その中、波長域0.4~0.7μの可視光線は約400W、0.7μ以上の赤外線は約600Wと言う波長分布を持つ。従って太陽光利用技術の一つとして、図-1に示す様にレンズで集光濃縮した後、波長選択フィルターにより可視光と赤外線に分けて、夫々照明用、熱源として利用することが考えられる。ここで集光濃縮する意味は、可視光線について、高密度伝送した方が経済性が良いこと、赤外線について、濃縮した方が高温の熱湯が得られることによる。濃縮度は次に述べる

\* 工業技術院 大阪工業技術試験所 計測センター  
〒563 池田市緑ヶ丘1-8-31

\*\* 工業技術院大阪工業技術試験所第3部

\*\*\* 工業技術院大阪工業技術試験所第4部

\*\*\*\* 工業技術院大阪工業技術試験所第4部

\*\*\*\*\* 工業技術院大阪工業技術試験所第4部

\*\*\*\*\* 工業技術院大阪工業技術試験所研究企画官

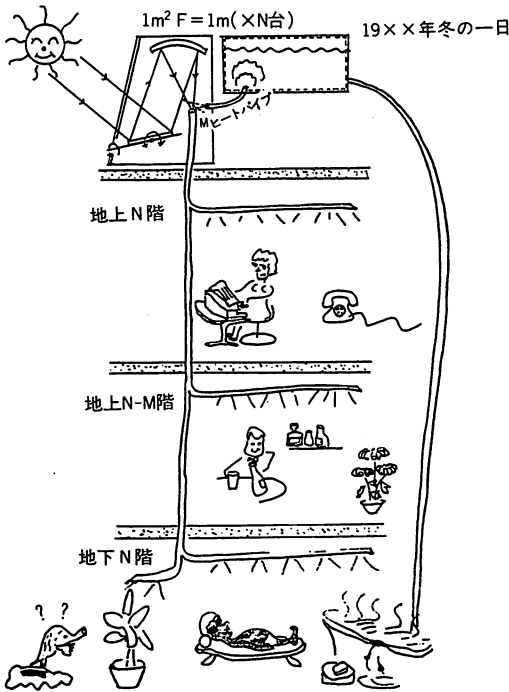


図-1 石英ロッド型太陽光採光システム

伝送路特性との兼合いから約1,600倍とし、直径40cmのアクリル製フレネルレンズにより、直径約1cmのスポットに集光する。この時、集められるエネルギーは、可視光線が約50W、赤外線が約75Wとなる。因みに50Wの可視光線は蛍光灯の光量と比較した場合、電気から光への変換効率が約20%であるから、40Wの蛍光灯を約6本点灯した時の光量に匹敵する。直径1cm内に集光された50Wの光量はエネルギー密度が大変高く、生木と言えども数秒の中に発煙するので、用いる材料、取扱い等、安全性には十分な注意が必要である。

## 2.2 追尾技術

日周運動に伴う太陽位置の変化に対しては、焦点位置が動かないヘリオスタット型が有利である。即ち図の様に追尾用平面鏡とレンズを結ぶ軸が地軸の方向を向いているので、太陽位置が変化しても焦点位置、光軸方向が変わらず、ガラスロッド、鏡ダクトの様に可とう性を持たない光伝送路を使う時には便利である。

追尾機構は経済性の観点から、コンピュータは用いずに光センサを用いることにより、全天空の中で最も明るい方向を探す方式とした。この方式は朝夕の鏡の巻きもどし、停止が自動化されて機構が簡単になり、安価なこと、一定光量以下では駆動モータ電源が切れるので使用電力が少くなるなどの特長を持つ。光センサの指向性は鋭いほど追尾精度が上がるが、他方、太

陽が雲間にかくれた時などにこれを見先う危険性が多くなる。従ってセンサ指向性は鋭いものと、大雑把に方向を決めるものとの併用が必要である。具体的には隔壁で分離された二対のセンサを追尾鏡に取付けて、一対はシリンドリカルレンズを組込むことにより狭指向性、高感度で左右のバランスを取らせ、他の一対はレンズを用いずに広角とする。駆動モータは、ハンチングを起こさない様に、トルク及び減速比を選択することが必要であり、実際には20Wの多極モータを1/1,000の減速比で用いた。日照時には約3秒間隔で0.2秒程度の間、モータが駆動されるので、必要電力はセンサ用電力と合せても約1Wである。

## 3. 照明光伝送路

集光濃縮された可視光を必要照明箇所へ伝送するためには光伝送路が必要である。現在、伝送方式は大別して鏡、レンズ等を用いた空中伝播方式と、ファイバー束、ロッド等を用いる媒質中伝播方式がある。これらの方式は夫々に一長一短があり、空中伝播方式は原理が簡単であるが、外界から攪乱を受け易いことが問題である。他方、本稿で扱う媒質中伝播方式は高純度石英ガラスの開発に負うものであり、光が高密度で送れること、攪乱を受け難いことなどが特徴である。

伝送路の要件は明るいこと、耐熱性、耐光性があること、安価なことなどである。明るいと言う要件には濃縮された光が効率よく伝送路に取り込まれること、材料の透明性が良いこと、深い角度で入射した光も伝送されることなどが含まれる。耐熱性、耐光性には、採光装置、伝送路に用いる材料及びこれらの周辺に配置される材料すべてについて、耐熱性、耐光性を吟味することが必要である。以下においては伝送路に求められるこれらの要件を念頭において、伝送路材、被覆技術、接続技術、曲げ技術、総合伝送効率について述べる。

### 3.1 伝送路材

光が伝わる部分、即ちコア一部の材質は可視域で透明度が高く、また、耐光性、耐熱性に優れた材質でなければならない。光通信用ファイバーに用いられる合成石英は透明度が高く、また耐光性も良いので、照明光伝送用コア材として最適である。但し、光通信用石英では赤外域での透明性を良くするために残留水分濃度を極度に下げる必要があるが、可視光伝送用コア材では残留水分は殆んど支障を来さない。従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。具体的には、高純度四塩化ケイ素 ( $\text{SiCl}_4$ ) を酸水素炎中で加水分解して、直径20cm、長さ約70cmのスート棒を作り、これを再度電気炉で焼き締めることにより透明母材を作った。得られた母材中の金属不純物はppbオーダーであり、He-Neレーザー波長(632.8nm)での透明度は約44dB/Kmであった。但し、残留水分は約1,300ppmであり、光通信用ファイバーよりも4桁程度多い。この母材は表面不純物を除くこと、および最終成形品であるロッド表面の平滑性を得るために、一旦、ダイヤモンドバイトで研削した後、電気炉にセットして、非接触ダイス法により直径約10mmのロッドに成形される。ダイスが接触するとロッド表面に縦キズが残り伝送効率を落とす原因となるので避けなければならない。

伝送路の寸法形状について、太陽光を焦点距離が1mのレンズで集光すると、太陽の視直径の関係から像の大きさは約1cmとなるので、伝送路受光端は1.5cm程度の直径を持たなければならない。ファイバー束型伝送路では、ファイバー相互間の隙間および各ファイバーが持つ被覆材部の無効面積などにより、有効受光断面積は約50%程度になる。他方、ロッド型伝送路では、この様な隙間が全くないので効率が良い。実際の伝送路ではレンズ収差により像が多少ボケること、及び追尾センサの不感帯により像中心が振動することを考慮して、伝送路受光端部は直径1.5cm程度が必要である。

### 3.2 石英ロッドの被覆法

一般に石英材は固くて傷がつき難いものであるとの印象があるが、実際には空気中のほこりにより細かな傷を受け易く、また汚染され易い。この様な傷、汚染により、見た目は透明であろうとも、光を伝送すると漏れが著しく伝送効率が悪い。従ってロッド成形後は速やかに被覆して、これらの発生を防止しなければならない。

次に伝送路は明るくしなければならぬから、出来るだけ入射角が深い光も伝送すべく、ロッドの周囲は低屈折率であることが望ましい。即ちロッドの周囲は空気であることが望ましく、その為には被覆材がロッドから離れている方が望ましい。実際、4mのロッドについて緊密に被覆した場合と、緩やかに被覆してロッドを浮かせた場合を比較すると、前者では入射角が $34^\circ$ を超える光が伝送されないのに対して、後者ではこの様なカットオフが殆んど見られず、伝送路として明るさがかなり改善されることが分かった。

従って被覆材に求められる性質は外界からのほこりや水を通さないこと、石英との接触性が低いこと、屈折率が低く、耐光性、耐熱性に優れていることである。この様な性質を持つ材料としてフッ化エチレン・プロピレン・コポリマー (FEP) を選び、直径10mmのロッドに対して内径2mm、肉厚1mmのチューブに成形加工して被覆材とした。ロッドは自然冷却後、直ちにFEPチューブに挿入され、両端部は熱収縮性FEPチューブでシールして、傷あるいは汚染から防御される。更にこの様に被覆されたロッドは機械的衝撃からも防御すべく、全体が金属管の中に挿入される。

### 3.3 接続技術

ロッド型伝送路にはファイバー束型の様な可とう性がないのが欠点である。即ち、ロッド型伝送路は建物に敷設した場合、建物との熱膨張差あるいは歪み等により破損するおそれがある。これを避けるには、鉄道レールの隙間構造の様な逃げ機構が必要であるが、他方、隙間を空気層として残しておくことと端面反射等により損失を生じる。従って屈折率が石英に等しく、且つ耐光性がある透明弾性体で隙間を充填する必要がある。液体充填材の場合には透明弾性体容器が必要になり、構造が複雑になる割にはメリットがない。

各種透明弾性材について耐光性テストを行った結果、ジメチル系シリコンゴムが優れていることが分かった。この材質はキセノンランプ光、XeClエキシマレーザーに対して劣化が認められず、屈折率が石英に近く ( $n=1.41$ )、対石英接着性があり、 $200^\circ\text{C}$ 近くの耐熱性もあるので総合的に優れた材質である。この材質で特に都合が良い点は、加硫前は粘稠な液体であることであり、石英ロッドの接続端面を研磨せずとも破断面のままでも液が空気を置換するので、接続工程が簡単になることである。但し、屈折率が石英に近いとは言え、わずかに低いことは、接続部での臨界角を下げて損失を生ずる原因となっており、また石英との接着力が低いことは接続部での機械的強度の低下を招く。高屈折率、高接着力シリコンゴムの開発が求められる。

### 3.4 曲げ技術

ロッド型伝送路には可とう性がないので、建物への敷設に際しては曲げ技術が不可欠である。曲げ加工には酸水素炎を用いるが、この加工を作業現場で行うのは装置的にも安全性の点でも不都合である。従ってL字型の曲げ部を予め工場キット化しておき、これを現場でシリコンゴムを用いて接続する方が有利であ

る。その為にL型曲げ部の両端には5 cm程度の直線部を残しておき、接続すると便利である。伝送路用曲げ細工で注意すべき点は、一般の石英細工と異り、ロッド表面を素手で触らぬこと、表面白濁層をフッ酸処理しないことである。付着したアルカリ成分は加熱により石英表面に融け込み散乱源となる。また細工中に表面析出するクリストバライトをフッ酸処理するとピットを生じて散乱源になるので、必ずフレーム処理により清浄化しなければならない。

次に曲げ半径の目安であるが、直径1 cmのロッドに対しては10~15cmの曲げ半径が適当である。理論的には入射角が30°の場合、最少曲げ半径は約3 cmと計算され、これよりも大きい曲げ半径として5 cm程度であれば曲げ損失が皆無で、且つコンパクトなキットになるはずであるが、実際にはかなりの曲げ損失が見られる。このくい違いの原因はロッドの内部が多少とも不均質であること、表面形状が平滑でないこと、付着物があることなどの理由により光が散乱されることによる。即ち、たとえ入射角が臨界角以内であろうとも、数m以上伝送された光の角度分布は臨界角近くまで広がっていることによる。従って曲げ損失は半径が大きいほど少くなるが、他方、半径が大き過ぎても無駄にスペースを取るの、両者の兼合いとして10~15cm程度の曲げ半径が効率的である。

### 3.5 総合伝送効率

以上の技術を総合して、直線部約9 m、接続部3ヶ所、曲げ部2ヶ所を含む全長約10mの伝送路の効率をテストした。キセノンランプ光をレンズで集光し、半角が約30°の条件で伝送路端に入射したところ、伝送効率は約47%であった。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%、及び曲げ損失約5%である。

実際の太陽光採光装置では集光角が約11°なので、この点から伝送損失は上記30°の場合よりも条件が緩くなり、60%/10m程度になると期待される。更に効率を上げるためには、第一に石英材質の改良とロッド成形法の改善が必要である。ここで用いた材質は可視域で44dB/Kmと言う性能であったが、ファイバーでは20dB/Kmのものがある事から、材質の改善余地は十分にある。また表面散乱損失についても、溶融法の改善、環境清浄化等により向上することが期待できる。その他の改善策として、端面反射防止を行うこと、高屈折率シリコンを開発すること、曲げ加工の熱処理を十分に行うことなどである。これらの技術を

総合すれば伝送効率が80%/10mになることも決して夢ではない。また価格も量産体制が整えば現在の約3万円/mから1万円/m程度には下がるものと思われる。

## 4. ロッド型光伝送路の応用と展望

以上に述べて来た様に、ロッド型伝送路の特長は明るいこと、および安価なことである。これらの特長を生かした応用として第一に太陽光採光がある。しかし、これを実用化するには、いくつかの問題点が残されていることも事実である。最初は経済性の問題であり、年平均日照時間が2,000時間あるとはいえ、実際には薄雲がかかっている時間が多く、この時の集光量は晴天時と比べて1/3~1/10程度と低い。また、曇天、雨天時には電灯照明が必要となり二重投資は免がれない。従ってこの様な経済負担に耐えて、尚且つ屋光色のメリットが生かされる様な環境、例えば染色、衣料関係、美術品関係では採光システムの導入は近いであろう。その他の分野、例えば暗どん部屋、地下室、地下街等への採光については量産化によるシステムの値下りが必要となる。太陽光採光について他の問題点は取扱いの安全性にある。即ち50Wの光エネルギーが直径1 cm内に濃縮されているので、作業時に眼に入ると失明の恐れがあるし、吸収物体があると発熱して火災になる危険性がある。従って高圧電線に対する安全確保が長い経験で培われて来たのと同様に、高密度光エネルギー伝送に対しても十分な経験が必要となろう。

以上の事情に鑑みて、光伝送技術は太陽光採光に応用する前に人工光伝送に応用して、技術面、経済面での経験を重ねることが重要と思われる。省エネルギーへの対応として考えられるものに集中照明と低温環境照明がある。集中照明について、現在、オフィス、スーパーマーケット等では天井部に多数の蛍光灯を並べて小型分散方式で点灯しているが、これを集中大型光源にして伝送路により分配給光するものである。一般に光源は大型になるほど電気から光への変換効率が高くなることと、光源を屋外に設置することにより空調負担の軽減が計れることなどにより省エネが期待できる。空調負担の軽減と同様の意味で、低温環境照明に応用して省エネルギーが期待できる。即ち発熱源を冷凍環境外に置いて可視光だけが伝送路によって導入されるので冷凍負担が軽減される。この効果は温度が低温になるほど大きくなる。

省エネルギーに直接的には結びつかないが、伝送路

の重要な応用分野として漏電性、爆発性環境など、電気が持ち込めない環境の照明がある。これらについても、光源部と照明箇所が伝送路を介して分離されていることを利用している。この見方からは他にも高所環境、放射線環境など保守管理が難しい環境、腐食性ガス、高温環境など光源が点灯しない環境の照明等にも使える。これらの用途開発を通して経験を積み、経済性が改善されるに従って、本題である太陽光採光システムも普及するものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (ファイバー一般論)
- 1) Fibre Optics, N.S.Kapany, Academic Press, (1967)
  - 2) 光学ファイバー, 長尾和美著, 共立出版 (1974)
- (ファイバー束伝送路)
- 3) 光ファイバー・アイデアの基礎, 根本俊雄著オーム社
  - 4) 光ファイバーを用いた太陽光自動集光伝送照明システム, 森 敬, 照明学会 (昭56年)
- (ロッド型伝送路)
- 5) 石英ロッド型照明光伝送路, 大工試ニュースNo.2 (1984)
  - 6) 石英ロッド型照明光伝送路, 光学技術コンタクト, 23, No.3, p159 (1985)

## 協賛行事 第5回「光がかかわる触媒化学シンポジウム」

## 開催計画について

明年6月2日(月)理化学研究所にて標記シンポジウムが開催されます。事業計画は下記の通りです。詳細は下記にお問い合わせ下さい。

- ① 種 類 シンポジウム
- ② 主 催 理化学研究所, 触媒学会
- ③ 協 賛 日本化学会, 高分子学会 }  
電気化学協会 } (交渉中)  
エネルギー・資源研究会 }
- ④ テ ー マ 第5回「光がかかわる触媒化学シンポジウム」
- ⑤ 日 時 1985年6月2日(月)
- ⑥ 場 所 埼玉県和光市広沢 理化学研究所レーザー棟会議室
- ⑦ 趣 旨 光触媒作用を構成する素過程として光励起, 電荷分離, 電子移動があるが, 前回までのシンポジウムにおいてはこれらを始めとして, 光触媒作用の関連する多くの領域において掘り下げた議論を重ねてきた。次回もこれに沿って掘り下げた議論を展開したい。  
一方, 光触媒作用には今後は特に応用分野での進展が期待される。例えば, 無機半導体や金属錯体による太陽光エネルギー変換や光センサーの開発, 光電極反応による選択的有機合成や環境浄化, 更には生物学や医学関連領域への応用などである。それで特定の分野にとらわれずに, 種々の観点から光触媒作用を眺め直し, その応用範囲の拡張に資するような討論も, 次回のシンポジウムでは行ないたいと思っている。
- ⑧ 特別講演 大阪府大工 安保 正一  
東工大工 藤平 正道
- ⑨ 一般講演 公 募
- ⑩ 世話人 斉藤 泰和 (東大生産研), 大倉 一郎 (東工大工), 山田 瑛 (理研), 吉良 爽 (理研)  
(問い合わせ先) 田中 一範 (理研)

〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1 理化学研究所触媒研究室 田中一範

TEL (0484) 62-1111 (代)