

くりかえしレンズによるレーザー・ビーム伝送

Laser Beam Transmission by Lens Guide

藤井陽一*・白石敏*・伊藤孝雄*・三好正美*

Yoichi FUJII, Satoshi SHIRAISHI, Takao ITO and Masami MIYOSHI

レーザー・ビームの伝送は、レーザーを通信等へ応用するとき重要な問題の一つであり、現在いろいろなビーム伝送の方法が考えられている。ここではレンズによるビーム伝送線路の特性を調べ、レンズを光に対してプリユースタ角におくことによって表面反射による伝送損失を著しく改善できることを示した。

1. はじめに

レーザー光を光通信、その他に利用するには、その伝送方法が問題となり、長距離にわたって安定かつ低損失の伝送線路が必要になってくる。

すでに数種の伝送方法について、解析、実験がなされている。

伝送線路として凸レンズを周期的にならべたもの、またそれに凹レンズを組み合わせたもの、凸面鏡、凹面鏡等をつかって屈曲させながら伝送する方法もある。この場合ビームを曲げるには、プリズムを使うほか、同様の効果を得るものとしてレンズの軸からはずれた所を利用する。反射鏡を使ったものでは、その角度を調整する¹⁾。

ビームの安定性を乱すものに温度変化²⁾ 機械的変位等がある。これらを打ち消すために伝送路にずれの検出部をそう入して、レンズ、反射鏡を微調し、全体としてビームの安定化を計る。

BTLでは、800mにわたってレンズを配置した鉄製伝送路を地下に埋めその温度変化、ビームのずれを調べている³⁾。

レンズのかわりに光の通り道のガス密度を変え、集束作用を伝ぱん方向に一樣に分散させたガスレンズがある⁴⁾。この場合ビームを曲げるときその曲率半径は、必然的に長くなる。

ここでは、集束レンズを周期的にならべたレンズ伝送線路について、モード整合光ビームのずれ、伝送損失等を調べた結果を報告する。

また、レンズを使った伝送線路では、伝送損失の原因として、表面反射によるものが主であるので、これを改善する一方法としてのプリユースタ角においたレンズについて、あわせて報告する。

2. 実験装置

この実験は空気の乱れ、温度変化等の外乱を防ぐため東京大学生産技術研究所・千葉実験所内齊藤研究室の100mトンネルで行なったもので、使用したレーザー管は、日本電気製の波長6328Å He-Ne ガスレーザー(GLT-685)である。実験のほとんどはマルチ・モードで行なったが

シングルモードの発振を得るためにレーザー共振器内にしぼりを入れ、これを調節するようにした。

レンズの支持は、レンズマウントを、トンネル側壁に張った13φのパイプにムッフで支え自由に移動できるようにしてある。

レンズに光ビームに対する角度、ずれを与えるため、それぞれ微調装置を製作した。この実験に使用したレンズは、 $f=2.4\text{m}$ (外径35φ)と $f=11.54\text{m}$ (外径60φ)の2種類である。

レーザー光の伝送損失測定には、ソーラーセルをつかいこの出力を較正した電流計で直読できるようにしてある。

3. モード整合

レーザーからの光を、希望するスポットのひろがり伝えるには、焦束レンズの焦点距離とレンズの間隔を適当に定める必要がある。

このような焦束伝送系の設計には、従来の幾何光学的な方法ではなく、光ビームの等価回路表現⁵⁾を用いると非常に便利である。

たとえば、レーザーから出た光を焦点距離 f の凸レンズが距離 r で配置されているような伝送線路で伝えるとき、図1のように等価回路に描きかえて電気回路と同様の計算を行なう。この回路の任意の2端子から見たインピーダンスの実部、虚部が、共にいつも0となるように f_2 , r_1 , r_2 を定めるとレーザーと伝送線路との間でモード整合がとれ、光をある一定のくりかえしで伝えることができる。

このように、等価回路による表現法を用いると計算も容易になり、また、スミス・チャートによっても以上と同様な結果が得られる。

曲率半径1mの反射鏡一对を1mの間隔で置いて共振器としたレーザーからの光を $f=2.4\text{m}$ の凸レンズを5mごとにならべたレンズ系に通したときのモード整合は等価回路により、 r_1 , r_2 を求めると

$$\begin{pmatrix} r_1=1.27(\text{m}) \\ r_2=2.02(\text{m}) \end{pmatrix} \text{ または } \begin{pmatrix} r_1=3.55 \\ r_2=7.68 \end{pmatrix}$$

となり、このときのビームの様子は、図2のようになる。このときのスポットサイズ(D)の最大、最小の比は、

* 東京大学生産技術研究所第3部

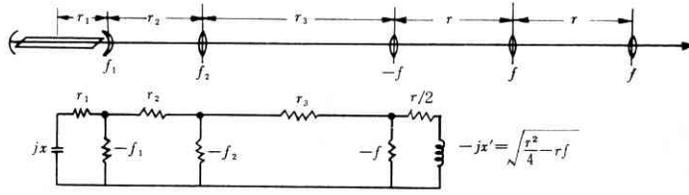
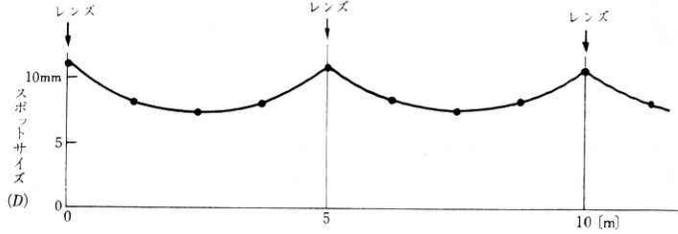
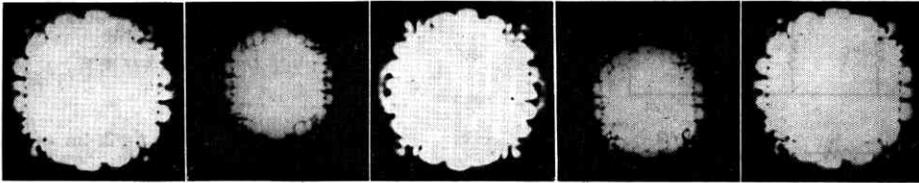


図 1 モード整合の問題



マルチ・モード



シングル・モード

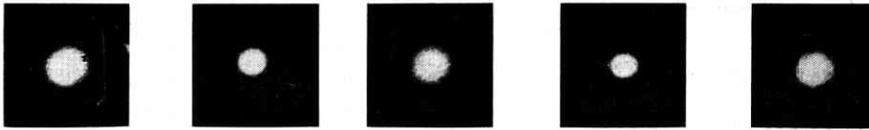


図 2 モード整合のとれている時のビームの様子とモード

($f=2.4\text{m}$, レンズ距離 5m)

$$\frac{D_{MAX}}{D_{MIN}} = \left(\sqrt{\frac{4f^2 r}{r-4f}} \sqrt{\frac{r^2}{4} - rf} \right)^{1/2} = 1.44 \quad (1)$$

となる。

次に $f=11.54\text{m}$ の凸レンズを距離 10m で配置したときに $f=2.4\text{m}$ と $f=11.54\text{m}$ の 2 枚の凸レンズでモード整合をとるとその距離は、

$$\left(\begin{matrix} r_1=7.35 \\ r_2=4.86 \end{matrix} \right) \text{ または } \left(\begin{matrix} r_1=20.4 \\ r_2=27.9 \end{matrix} \right)$$

となる。このときのスポットの最大、最小比は 1.12 となる。

4. プリュースタレンズ

プリュースタレンズとは、レンズの軸を光軸に対してプリュースタ角となるようにしたもので、このようにするとレーザー管のプリュースタ窓と同様、ある特定の振動方向をもった光に対しては損失を与えないで通過させる。このとき、レーザーから出た直線偏波の光が損失なく通るような方向にレンズを傾けて設置する必要がある。

ところが球面レンズを傾けると非点収差によって縦方向と横方向のみかけの焦点距離は短くなってしま⁶⁾。

光に対するレンズの角度が、 θ であるときの縦方向の焦点距離 f_{\perp} と横方向焦点距離 f_{\parallel} は

$$\left. \begin{aligned} f_{\perp} &= \frac{(\cos \theta)^2}{\sqrt{n^2 - (\sin \theta)^2} - \cos \theta} R \\ f_{\parallel} &= \frac{1}{\sqrt{n^2 - (\sin \theta)^2} - \cos \theta} R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ここで n , R はおのおのレンズの屈折率と曲率半径である。

また、 f_{\perp} と f_{\parallel} との間には、次の関係がある。

$$\frac{f_{\parallel}}{f_{\perp}} = \cos^2 \theta \quad (3)$$

以上のことから、モード整合も以上のことを考慮して上方向、 \parallel 方向二つの等価回路を描き、おのおのについてモード整合の条件が満足されていなければならない。見かけ上二つの焦点距離 f_{\perp} , f_{\parallel} を持ったプリュースタレンズの間隔は、

$$\left. \begin{aligned} X_{\perp} &= \sqrt{\frac{4f_{\perp}^2 r}{r-4f_{\perp}}} \\ X_{\parallel} &= \sqrt{\frac{4f_{\parallel}^2 r}{r-4f_{\parallel}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

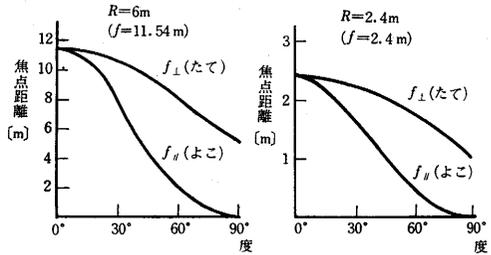
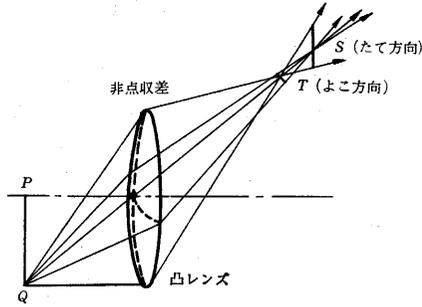


図 3 非点収差による焦点距離の変化

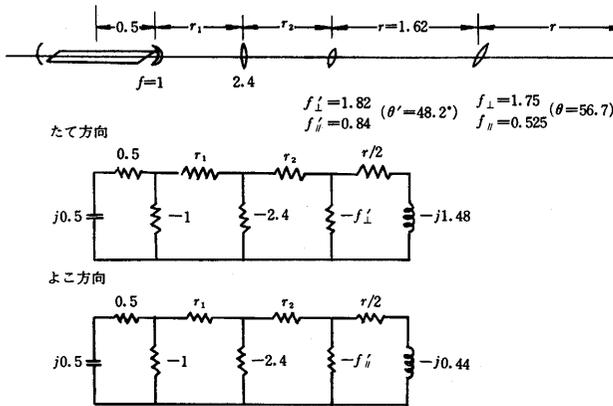


図 4 ブリュースタレンズのモード整合 ($f=2.4$)

このときのモード整合もスミス・チャート上で示すことができる。

$f=2.4\text{m}$ の凸レンズを使用したとき、ブリュースタ角での f_{\perp} , f_{\parallel} は、

$$\begin{pmatrix} f_{\perp} = 1.75 \\ f_{\parallel} = 0.53 \end{pmatrix} \quad \theta = 56.7^{\circ}$$

となる。このとき伝送系のレンズ間隔は、

$$r = 1.62\text{m}$$

モード整合用に $f=2.4\text{m}$ のレンズを使うと、 $\theta'=48.2^{\circ}$ としたとき

$$f_{\perp}' = 1.87, f_{\parallel}' = 0.84$$

となり、マッチング距離 r_1, r_2 は、等価回路より次のようになる。

$$\begin{pmatrix} r_1 = 0.76 \\ r_2 = 0.59 \end{pmatrix} \quad \text{または} \quad \begin{pmatrix} r_1 = 4.04 \\ r_2 = 5.73 \end{pmatrix}$$

スポットサイズの変化の割合が \perp 方向、 \parallel 方向で違うので、レンズの所で最大で円となり、レンズの間では長円となり、たて、よこ比は、1.87となる。

5. レンズの傾きによるモード不整合

ブリュースタレンズでは、レンズの角度を確実にブリュースタ角に設置しなければ、焦点距離がずれてしまいモードは不整合となり、光ビームはくりかえしが乱れてスポットサイズが不ぞろいとなる。このときのレンズの中間のスポット面積の最大、最小比 VSWR は、整合のとれていない焦点距離 f のレンズをつないだとき x', r' は、

で、 $X_{\perp} = X_{\parallel}$ となるような距離 r で

$$r = 4(f_{\perp}^{-1} + f_{\parallel}^{-1})^{-1} \quad \left(\frac{r}{4} < f_{\parallel} < f_{\perp} \right) \quad (5)$$

レーザとブリュースタレンズ伝送線路との間でモード整合をとるには、ふつうのレンズ系のようにレンズを光ビームに直角においただけでは十分でなく \perp 方向 \parallel 方向それぞれモード整合をとるための焦点距離が違っているのであるから、整合用のレンズの傾きを適当に選んで共に整合の条件に合うようにしなければならない。

このとき、光ビームのスポットは、レンズの所で円、レンズの間では長円となり、その縦横比は、

$$\frac{\sqrt{X_{\perp}}}{\sqrt{X_{\parallel}}} = \left(\frac{\sqrt{r^2 - rf_{\perp}}}{\sqrt{r^2 - rf_{\parallel}}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

で求めることができる。

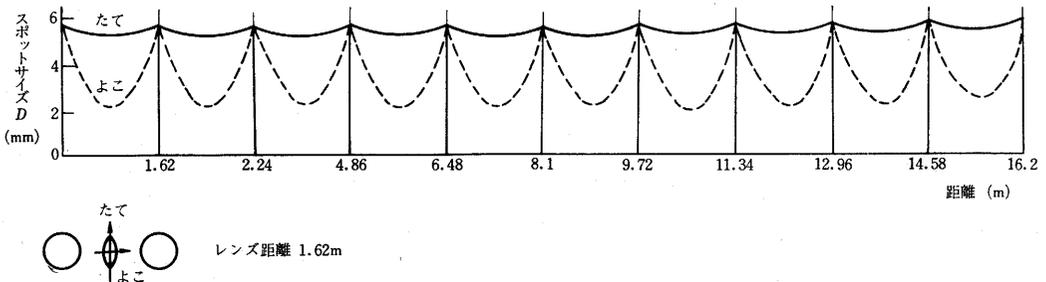


図 5 モード整合のとれていないときのスポットサイズの変化 ($f=2.4\text{m}$, ブリュースタレンズ)

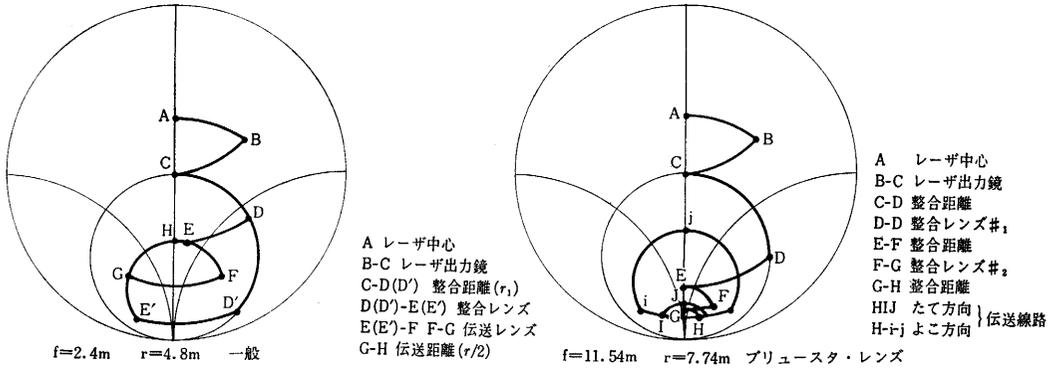


図 6 スミスチャートによるモード整合

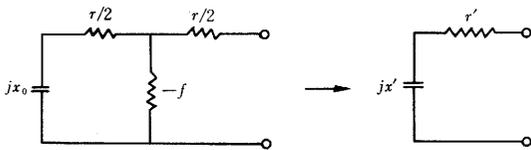


図 7 VSWR の計算

$$x' = \frac{x_0 f^2}{(r/2 - f)^2 + x_0^2}$$

$$r' = \frac{(-r/2) f (r/2 - f) - f x_0^2}{(r/2 - f)^2 + x_0^2} + \frac{r}{2} \quad (7)$$

となりスポット面積の最大最小の比を、電気回路の表現にならぬ VSWR とかくと、これより VSWR は、

$$\text{VSWR} = \frac{x_0}{|jx' + r'|} \quad (8)$$

また、実験的には

$$\text{VSWR} = \frac{\omega^2_{\text{MAX}}}{\omega^2_{\text{MIN}}} \quad (9)$$

表 1 レンズ中間のスポット面積最大, 最小比 (VSWR)

θ		VSWR (計算値)	VSWR (実験値)
53°	たて	1.04	1.34
	よこ	2.68	3.04
56.7°	たて	1.00	1.30
	よこ	1.00	1.47
58°	たて	1.02	1.42
	よこ	1.34	1.75

ω_{MAX} : レンズ中間のスポットサイズの最大値

ω_{MIN} : レンズ中間のスポットサイズの最小値

f=11.54m のレンズを使用しレンズの傾き θ が 53°(不整合) 56.7°, 58°(不整合) のときの VSWR は表 1 のようになる。

6. レンズの軸のずれ

距離 r で焦点距離 f の凸レンズがくりかえしおかれているようなレンズ系の一つの section を考え、それをマ

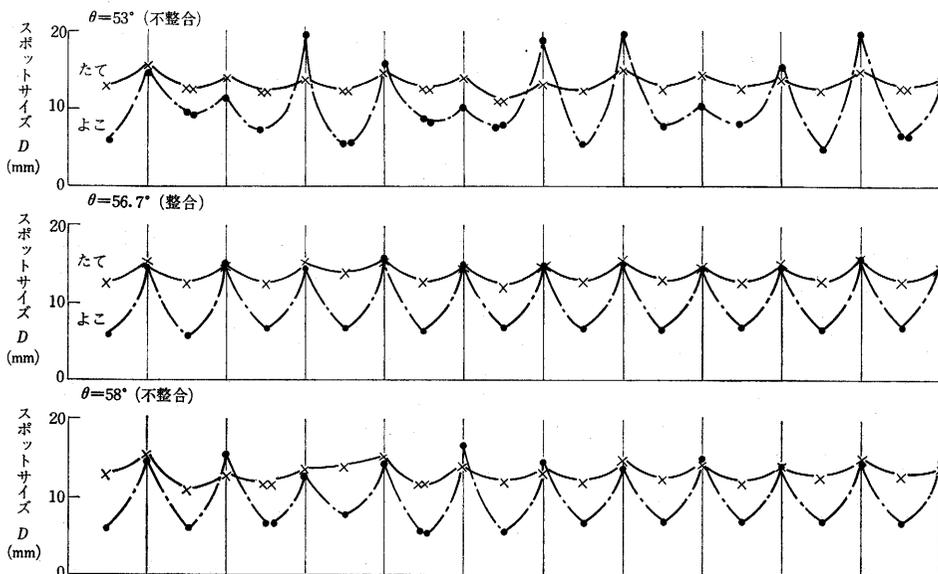


図 8 モード整合および不整合の時のスポットサイズの変化 (レンズ間隔 7.74m)

トリクスで表わすと

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{r}{2f} & \frac{r}{2} + \frac{r}{2} \left(1 + \frac{r/2}{-f}\right) \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{r}{2f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで θ , Z_0 は

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{r}{2f}\right) \quad (11)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r^2}{4} - rf} \quad (12)$$

このような section が n 個集まった伝送系では次のように表示できる。

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}^n = \begin{pmatrix} \cos n\theta & jZ_0 \sin n\theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin n\theta & \cos n\theta \end{pmatrix} \quad (13)$$

一枚のレンズが光軸より E だけずれたときの影響はずれたレンズに直列に E なる電圧源をつなぎ、これを伝送線路の n 番目の section から見たときのインピーダンスを調べることによって n 番目の section でのビームのずれ E'' , 傾き J'' がわかる。

$$\left. \begin{aligned} E'' &= \frac{E}{f} \left(\frac{r}{2} \cos n\theta - x_0 \sin n\theta \right) \\ J'' &= \frac{E}{f x_0} \left(x_0 \cos n\theta + \frac{r}{2} \sin n\theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

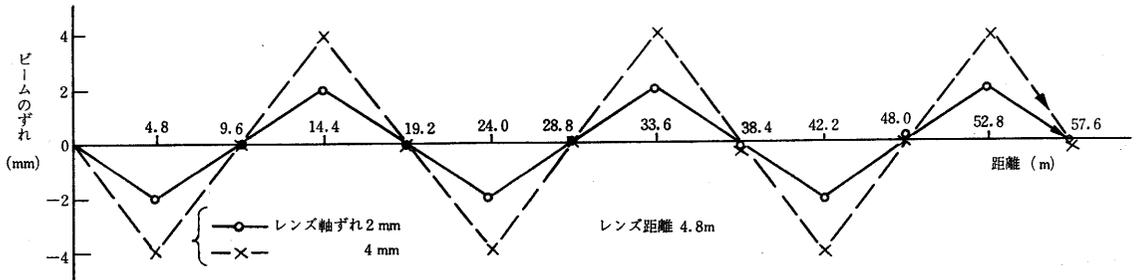


図 9 レンズの軸ずれによるビームのずれ ($f=2.4$ m, confocal)

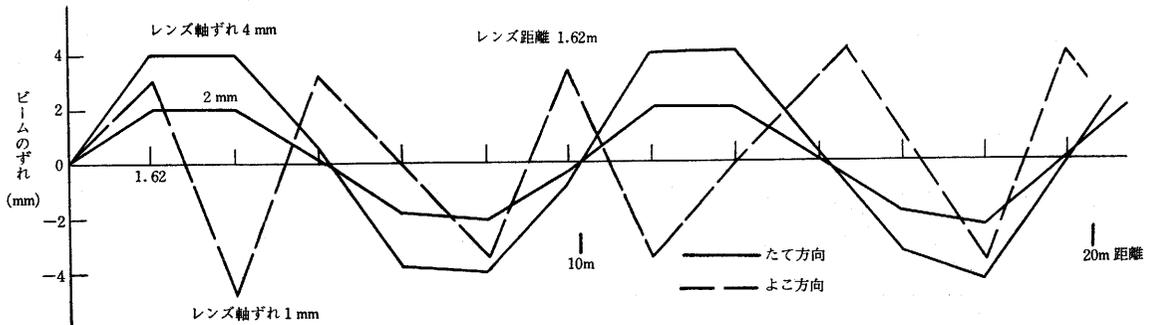


図 10 レンズの軸ずれによるビームのずれ ($f=2.4$ m, プリュースタレンズ)

プリュースタレンズのときのずれは、モード整合のときと同様に \perp 方向, \parallel 方向の二つに分けて考えるとまったく同じに計算することができる。

7. 伝送損失の測定

ガラスが光に対して直角をなしているとき、ガラスの表面による反射損失は、

$$2 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad n: \text{屈折率} \quad (15)$$

となり、これは普通およそ -0.38 dB 程度となる。

ガラスが任意の角度でおかれているときの反射損失は

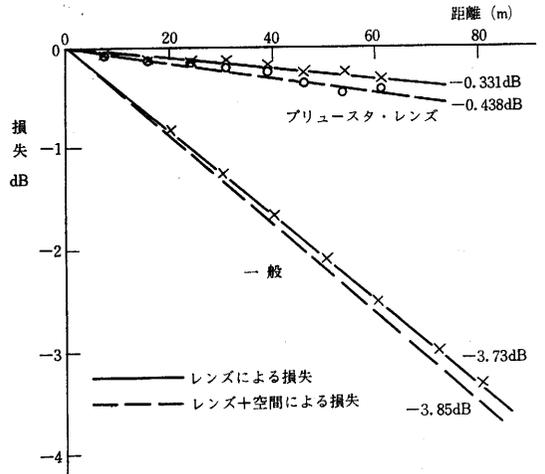


図 11 伝送損失

$$2 \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \left(n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \right) \quad (16)$$

となる。

プリュースタレンズと一般の場合の伝送損失を比較してみるとレンズ一枚当たり、

プリュースタレンズ	-0.045 ± 0.005 dB
一般の場合	-0.40 ± 0.40 dB

となる。

このレンズの内部損失を微小損失測定法⁷⁾によって測定すると -0.02 dB 程度であった。

プリュースタレンズのときの損失は、ほとんどこの内部の吸収散乱による損失とプリュースタ角にレンズを設置するときの残留損失によるものと思われる。プリュースタレンズの損失測定は、二つのソーラーセルを使い、一つでレーザパワーをモニターしてそれとの差を読んでレーザの出力変動の影響を防いだ。

8. 結 論

以上のようにくりかえしレンズによるレーザ光の伝送は、光学焦束系の等価回路表現によって十分解析でき、またその設計も容易に行なうことができ、実験結果とも

良く一致する。

また、レンズ伝送で最も問題となるものの一つは伝送損失であるが、これは、プリュースタレンズを採用することによって、反射防止膜をつけなくてもガラスの内部損失のオーダーにまで押えることができ、モードにも悪影響を与えていない。

このことからプリュースタレンズ伝送線路は、レーザ光の伝送線路として十分考慮にあたいするものである。

終わりに、日頃ご指導いただき本所・斉藤教授・浜崎教授ならびに関係各研究室の方々に深く感謝する。

(1968年8月24日受理)

文 献

- 1) 末松, 伊賀: エレクトロニクス, 41年12月号.
- 2) D. W. Berreman: B. STJ July 1964, pp. 1469~1475.
- 3) D. Gloge: B. STJ 46, April 1967, 4, pp. 721~735.
- 4) A. C. Beck: IEEE Trans. MTT July 1967 pp. 433~434.
- 5) 藤井陽一: 生産研究, Vol. 19, No. 1.
- 6) 久保田 広: 光学(上), 岩波, pp. 102~108.
- 7) 藤井, 白石: 昭41年電気連合大会 1012

(p. 7 よりつづく)

$$h_{33} = \beta_{33}^S e_{33} = 2g_{31}c_{13}^D + g_{33}c_{33}^D \quad (2-11)$$

$$h_{15} = \beta_{11}^S e_{15} = g_{15}c_{44}^D \quad (2-12)$$

(3) 誘 電 定 数

$$\epsilon = \beta^{-1}, \quad \beta = \epsilon^{-1}$$

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{\beta_{11}} \quad (3-1)$$

$$\epsilon_{33} = \frac{1}{\beta_{33}} \quad (3-2)$$

$$\epsilon^T - \epsilon^S = d e_i = d c^E d_i = e s^E e_i$$

$$\epsilon_{11}^T - \epsilon_{11}^S = d_{15} e_{15} = d_{15}^2 c_{44}^E = e_{15}^2 s_{44}^E \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{33}^T - \epsilon_{33}^S &= 2d_{31} e_{31} + d_{33} e_{33} \\ &= 2d_{31}^2 (c_{11}^E + c_{12}^E) + 4d_{31} d_{33} c_{13}^E \\ &\quad + d_{33}^2 c_{33}^E \\ &= 2e_{31}^2 (s_{11}^E + s_{12}^E) + 4e_{31} e_{33} s_{13}^E \\ &\quad + e_{33}^2 s_{33}^E \end{aligned} \quad (3-4)$$

$$\beta^S - \beta^T = h g_i = h s^D h_i = g c^D g_i$$

$$\beta_{11}^S - \beta_{11}^T = h_{15} g_{15} = h_{15}^2 s_{44}^D = g_{15}^2 c_{44}^D \quad (3-5)$$

$$\beta_{33}^S - \beta_{33}^T = 2h_{31} g_{31} + h_{33} g_{33}$$

$$\begin{aligned} &= 2h_{31}^2 (s_{11}^D + s_{12}^D) + 4h_{31} h_{33} s_{13}^D \\ &\quad + h_{33}^2 s_{33}^D \\ &= 2g_{31}^2 (c_{11}^D + c_{12}^D) + 4g_{31} g_{33} c_{13}^D \\ &\quad + g_{33}^2 c_{33}^D \end{aligned} \quad (3-6)$$

(4) 電気機械結合係数

$$(k_{31})^2 = 1 - \frac{s_{11}^D}{s_{11}^E} = \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (4-1)$$

$$(k_p)^2 = 1 - \frac{\epsilon_{33}^S c_{33}^D}{\epsilon_{33}^T c_{33}^E} = \frac{2d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)} \quad (4-2)$$

$$(k_{33})^2 = 1 - \frac{s_{33}^D}{s_{33}^E} = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T s_{33}^E} = \frac{g_{33}^2}{\beta_{33}^T s_{33}^E} \quad (4-3)$$

$$(k_i)^2 = 1 - \frac{c_{33}^E}{c_{33}^D} = \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S c_{33}^D} = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33}^S c_{33}^D} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} (k_{15})^2 &= 1 - \frac{\epsilon_{11}^S}{\epsilon_{11}^T} = 1 - \frac{s_{44}^D}{s_{44}^E} = 1 - \frac{c_{44}^E}{c_{44}^D} \\ &= \frac{d_{15}^2}{\epsilon_{11}^T s_{44}^E} = \frac{e_{15}^2}{\epsilon_{11}^S c_{44}^D} = \frac{g_{15}^2}{\beta_{11}^T s_{44}^E} = \frac{h_{15}^2}{\beta_{11}^S c_{44}^D} \end{aligned} \quad (4-5)$$

