

氏 名(本籍)	ち は たか お 千 葉 孝 雄 (宮城県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 第 1 8 3 号
学位授与年月日	昭和 4 8 年 3 月 7 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項額当
最 終 学 歴	昭和 3 4 年 3 月 東北大学工学部通信工学科卒業
学位論文題目	レーザービームの大気伝搬特性に関する研究

(主査)

論文審査委員	教 授 稲場 文男	教 授 佐藤 利三郎
	教 授 虫明 康人	教 授 西田 茂穂
	助教授 米山 務	

論 文 内 容 要 旨

1. ま え が き

レーザー発振の成功以来、今日までレーザーを光通信に応用しようとする研究が続けられて来たが、実用化のうえで、大きな問題点となっているのは、レーザービームの大気伝搬特性である。

この大気伝搬特性上の問題は現象的に、

- (1) 減衰特性
- (2) 振幅(強度)変動
- (3) 位相変動
- (4) 到来角変動

- (5) 偏波面変動
- (6) ビームの到来位置変動
- (7) ビームの散らばり

に分類できると考えられる。

まず(1)の大気伝搬における光波の減衰特性に関しては、大気および雨、霧による散乱、吸収など多くの理論的、実験的研究がこれまでなされている。特に可視光に関しては、減衰量と視程との間の密接な関係により、年間の減衰量の時間分布が求められ、光通信における回線の信頼度、伝送路マージン等の推定が可能となっている。

(2),(3)の振幅、位相の変動に関しては、ランダム媒質における波動方程式の解を求める方法で、多くの研究がなされて来ており、その強度変動の確率分布関数や飽和の問題など種々の性質が明らかにされている。光通信との関連では、ヘテロダイン検波における有効受信面積等が求められている。

(4)の到来角変動に関しては、幾何学および波動的な解析が行なわれている。幾何学的には主として光線方程式を用いて、また波動的には構造関数を用いて到来角変動の分散が求められている。

(5)の偏波面の変動に関しては、理論的に小さいことが予測されており、実験的にも問題になるような偏波面の変動は観測されていない。

(6)のビームの到来位置変動は、ほぼ一日の週期で変動するビームの曲がり (beam bending) とかなり速くランダムに変動するビームの踊り (beam wander, spot dancing) とに分けて考えられる。

ビームの曲がりは垂直方向の屈折率の傾斜として、理論的予測が可能であり、また比較的近距離の伝搬には問題が少ないと考えられる。

ビームの踊りに関しては、Chernov⁽¹⁾、Beckmann⁽²⁾、Hodara⁽³⁾、木下等⁽⁴⁾によって、幾何学的に解析が行なわれているが、いずれも大気屈折率変動の取扱いに関しては、ガウス形の相関関数を仮定している。しかし、このガウス形の相関関数のパラメータは気象学的には測定できないので、理論と実験との対応はなされておらず、また、ChernovとBeckmannの解析の間には若干の相違があった。さらに実験的には、これまでConsortini等⁽⁵⁾の3本のレーザビームを用いたビームの踊りの測定があるが、その測定は屈折率のガウス形相関関数の自己相関関数と相関長を求めるためのものであった。

(7)のビームの散らばり (beam spreading) に関しては、相互コヒーレンス関数の伝搬方程式を解く方法でWhitmanとBeranによって最近その統計的な強度分布が求められている⁽⁶⁾。しかし、そこではビームサイズが大気屈折率変動の特性長よりも十分大きいことを仮定している。

また、ビームの散らばりの測定は二次元的であって、しかも統計的な強度分布を問題にする性質上非常に困難であって、これまでほとんど行なわれていない。

このビームの踊りと散らばりの問題は指向性の鋭いレーザービームを用いた光通信において、受信側の受光器からのビームのはみだしを生じさせ、受信レベルの変動、ひいては光通信の信頼性を低下させる。さらにレーザー・レーダ、測距などのレーザービームを用いた計測においては、その測定精度に影響すると考えられる。

筆者はレーザービームの大気伝搬において、ビームの踊りと散らばりがいまだ十分検討されていない非常に重要な問題であると考え、大気屈折率変動に関して現在一般的に認められているコルモゴロフ形の構造関数を用いて幾何光学的にこれらの問題の理論的解析を行なった。⁽⁷⁾⁽⁸⁾ またビームの踊りおよび散らばりの測定を行ない、⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 理論的解析結果と比較し、よく一致することを確認した。さらにこれらの研究結果を比較的近距离でテレビ信号を中継する光通信装置の設計に生かし、装置の試作と伝搬実験を行ないレーザービームを用いる光通信の実用化の一步を進めた。⁽¹¹⁾

2 大気中を伝搬するレーザービームの踊りの理論的解析⁽⁷⁾⁽⁹⁾

ビームの踊りはビーム全体としての中心の位置変動であるので、ビームの太さを無視した幾何光学で、十分取扱うことができ、またビームの太さによる影響はコルモゴロフ形の屈折率の乱れのスペクトル成分を考慮すればよいと筆者は考え、幾何光学を用いて到来角変動とビームの踊りの解析を行なった。

まず光線方程式

$$\frac{d(\vec{n}s)}{d\ell} - \text{grad } n = 0$$

を微小距離 $d\ell$ の範囲で積分して二乗平均をとることにより、角度変動を屈折率の相関関数 B_n で表わし次式を得る。

$$\langle \Delta \theta^2 \rangle = -2 \Delta \ell \int_0^{\Delta \ell} V^2 B_n(r) dr \quad (2-1)$$

この B_n にコルモゴロフ形の相関関数を代入するさいに、ビーム全体の角度変動に影響するのは、ビームサイズ w_0 以上の大きさの屈折率の乱れによるものであるとして、コルモゴロフ形の相関関数のスペクトル展開からビームサイズより小さい波長をもつスペクトル成分を取り除き、伝搬路 L における到来角変動の二乗平均として次式を得た。

$$\sigma_\theta^2 = 5.7 C_n^2 L \left[w_0^{-\frac{1}{3}} - L_0^{-\frac{1}{3}} \right] \quad (2-2)$$

ただし、ビームサイズ w_0 および屈折率構造定数 C_n は、全伝搬路で一定であると仮定した。

また L_0 は乱れの outer scale で $w_0 \ll L_0$ である。

ビームの踊りに関する解析はこれまで Chernov⁽¹⁾ および Beckmann⁽²⁾ によって行なわれているが、両者の解析結果には若干の相違があった。そこで筆者は独自に角度変動が小さい場合のビームの踊りの解析を行なった。

すなわち伝搬路の途中で角度変動を生じた光線が受光点まで伝搬する間に到来位置の変動を生じ、さらに伝搬路の各点で生じる角度変動は、たがいに無相関であると考えればビームの踊りの二乗平均として次式が得られる。

$$\sigma_{\rho}^2 = \int_0^L (L-Z)^2 \frac{d\sigma_{\theta}^2}{dZ} dZ \quad (2-3)$$

上式の σ_{θ}^2 に (2-2) 式を代入すると

$$\sigma_{\rho}^2 = 1.90 C_n^2 L^3 w_0^{-\frac{1}{3}} \quad (2-4)$$

を得る。これを σ_{ρ}^2 と σ_{θ}^2 の間の関係で表わせば、

$$\sigma_{\rho}^2 = \frac{1}{3} \sigma_{\theta}^2 L^2 \quad (2-5)$$

を得る。

この結果は角度変化が小さいかぎり、相関関数のいかに問わず成り立つ。

また、ビームサイズが伝搬路で変わる場合についても若干の検討を行なった。しかし、指向性の鋭さを利用した比較的近距离の光通信では受信光のビームサイズは送信光にくらべあまり変わらない場合が多い。最小のビームサイズでしかも伝搬路でビームサイズがほとんど変わらない伝搬モードとして共焦点形の伝搬モードを考え、ビームサイズのパラメータを消去すれば、

(2-4) 式は、

$$\sigma_{\rho}^2 = 1.83 C_n^2 \lambda^{-\frac{1}{6}} L^{-\frac{17}{6}} = 2 \sigma_x^2 \quad (2-6)$$

となる。この式は実際のレーザ伝搬においてビームの踊りを評価する上で便利な式である。

図 2-1 に $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ (He-Ne レーザの波長) の場合について、 C_n をパラメータにして σ_x と L との関係を図示した。

3 大気中を伝搬するレーザビームの散らばりの理論的解析

ビームの散らばりはビームの踊りに影響を与えなかったビームサイズより小さいスケールの屈折率の乱れが原因であると考え、また、この屈折率の乱れの大きさは、光の波長とくらべ十分大きいので回折効果が無視できる範囲内で幾何光学が使えるとして、ビームの散らばりを解析し、ビームの強度分布の分散を求めた。

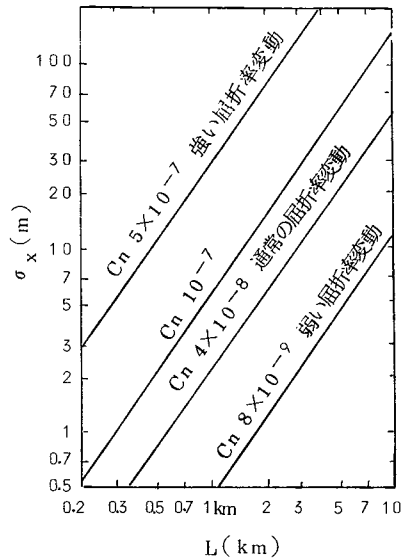


図2-1 伝搬路でほとんどビームサイズが変わらないとした場合の
ビーム踊りの標準偏差 σ_x と伝搬距離 L との関係

伝搬路の屈折率のゆらぎがないときの受光面におけるビームの強度分布をガウス分布とし、そのスポットサイズを w_0 (電界が中心の $1/e$ となる直径) で表わし、ビームの中心を x, y 座標の原点とすれば、その強度分布は次式で表わされる。

$$I_0 e^{-\frac{8}{w_0^2} (x^2 + y^2)} \quad (3-1)$$

ビーム断面内の各微小部分はゆらぎのないときに到達すべき点 (x_1, y_1) を中心として変動し、その位置変動の確率密度関数は、 x および y 方向の分散が共に σ_{sx}^2 の正規分布であると仮定すると、全体の強度分布関数として次式が得られる。

$$\frac{I_0}{1 + \left(\frac{4}{w_0} \sigma_{sx}\right)^2} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_1^2 + y_1^2}{\left(\frac{w_0}{4}\right)^2 + \sigma_{sx}^2} \right]} \quad (3-2)$$

ここで σ_{sx}^2 はビームの踊りの場合類似の解析より次式で与えられる：

$$\sigma_{sx}^2 = 0.605 Cn^2 L^3 Km^{\frac{1}{3}} - 0.65 Cn^2 L^3 \left(\frac{\pi}{w_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-3)$$

ただし、 $Km \ell_0 = 5.91$ (ℓ_0 : 屈折率の乱れの inner scale) である。

これよりビームの散らばりによる等価的なビームサイズが計算できる。

以上の解析ではビーム内の微小光束の回折効果を無視している。

この微小光束の回折が生じるのは、周囲の光束と位相の相関がなくなった場合であるとして、平面波の位相構造関数から波面のチルト成分をさしひいたものが、 1 rad^2 となる口径をもって無相関となる範囲とし、それからの回折を求めてみると通常の大気伝搬では σ_{sx} によるビームの散らばりとくらべ無視できることがわかった。

次に相互コヒーレンス関数を用いて波動的にビームの散らばりを解析したWhitmanとBeran⁽⁶⁾の結果と比較し、上に示した幾何光学的なビームの散らばりの解析結果は、ビームの踊りに対応する(3-3)式の第2項を除けば一致することを明らかにした。

4. レーザビームの踊りおよび散らばりの測定方法と実験装置

ビームの踊りについては次の二つの方法で測定を行なった。一つは座標を書いたスクリーンにビームスポットを投射し、それをテレビカメラまたはシネカメラで撮影し、それから1フィールドまたは1コマずつビームスポットの中心の座標を読み取る方法である。もう一つはLateral photo-effectを利用した光位置検出器を用いる方法である。

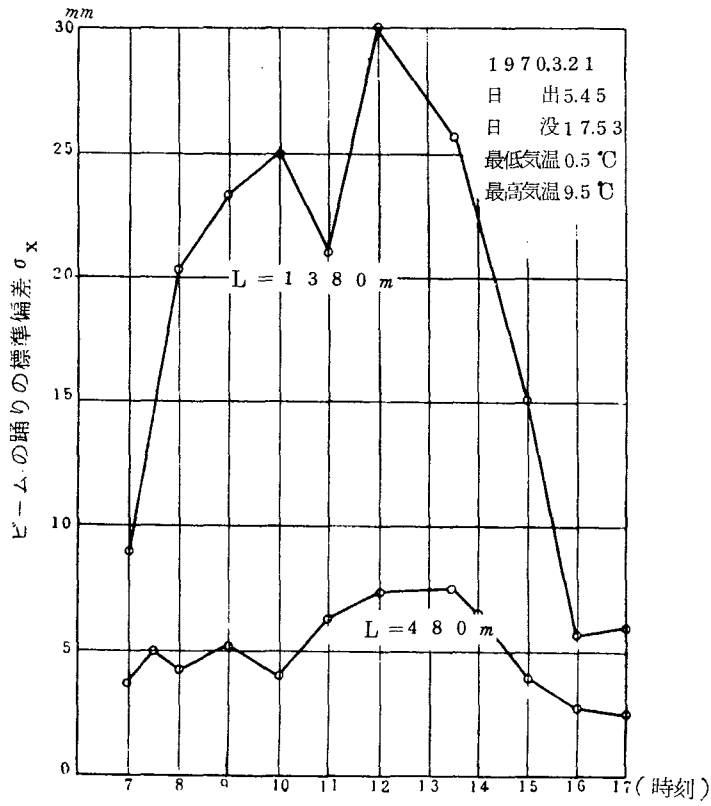
またビームの散らばりについては、次の方法で測定を行なった。まず、ビームスポットを16mmシネカメラで撮影し、次にその一コマ一コマのフィルム上のビームの像をスリットを用いて走査することにより、垂直方向は光学的に積分して水平方向の強度分布を求めた。さらにそのアンサンプル平均を求めて、ビームの統計的強度分布とした⁽¹⁰⁾。

また理論解析との対応に必要な大気屈折率構造定数は、数 μm の白金線を用いて大気温度変化を早い速度で検出することにより測定した。

5. ビームの踊りおよび散らばりの測定結果と理論的解析結果との比較⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

図5-1には480mと1380mの距離で同時にレーザ伝搬実験を行ない、スポットの動きを撮像し、そのスポットの座標を読みとる方法で、ビームの踊りを測定した結果を示した。

ビームの踊りが最大である正午において1380mと480mのビームの踊りの比は4:1である。これは理論から予想される距離特性とほぼ一致する。図5-2(a),(b)にはビームの踊り σ_x と屈折率構造定数 C_n の測定を同時に行なった結果を示した。伝搬距離は1380mであり、 C_n の測定はレーザビーム送信点で行なった。また図には C_n の測定値より計算したビームの踊りを示した。これより理論と実験の非常によい一致がみとめられる。



快	快	快	快	快	快	快	快	快	快	晴	雲	雲	雲 (天候)
晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴	雲	雲	雲 (天候)
微	微	弱	弱	弱	弱	弱	弱	弱	弱	弱	弱	弱	無 (風)
風	風	風	風	風	風	風	風	風	風	風	風	風	無 (風)

図5-1 480 mと1380 mの伝搬路で同時に測定したビームの踊りの標準偏差

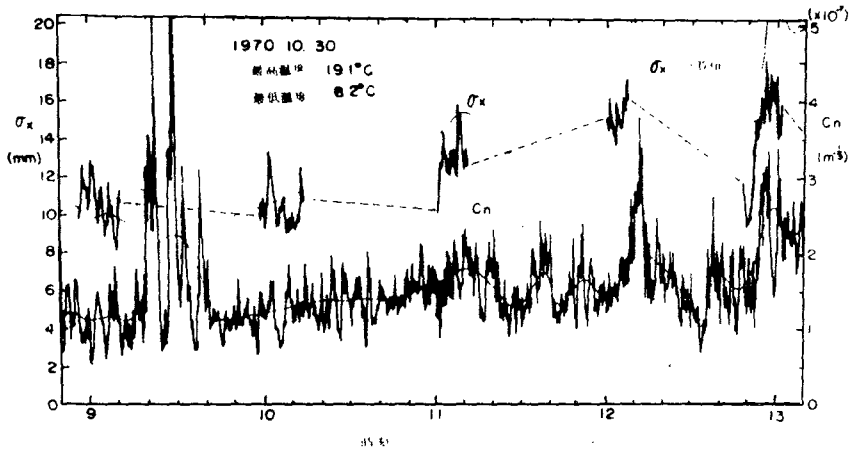


図 5 - 2 (a)

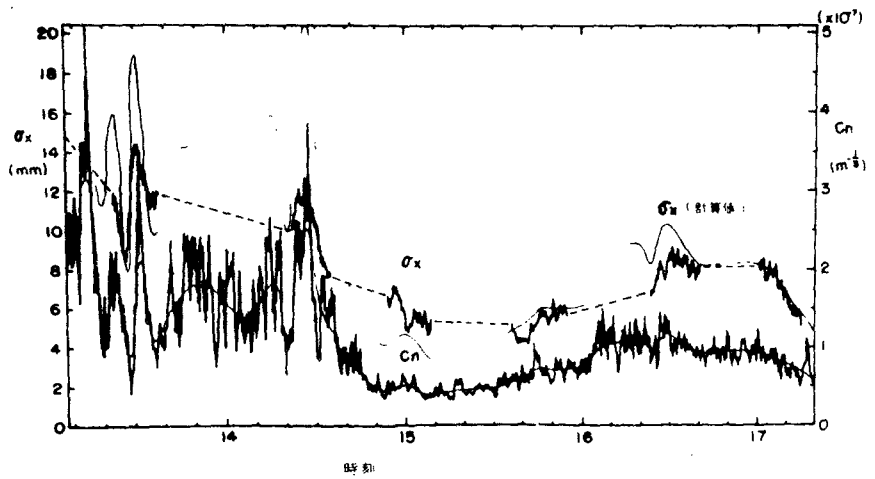


図 5 - 2 (b)

1380 m の伝搬路におけるビームの踊りの標準偏差とレーザー送信点における屈折率構造定数の測定値

ビームの散らばりを示す平均の強度分布の測定では図 5 - 3 , 図 5 - 4 に示すようにガウス分布にはほぼ等しい強度分布が得られた。すなわち図 5 - 3 は各時刻のビームのランダムな強度分布をその中心を一致させて重ね合わせて得られたビームの平均の強度分布である。

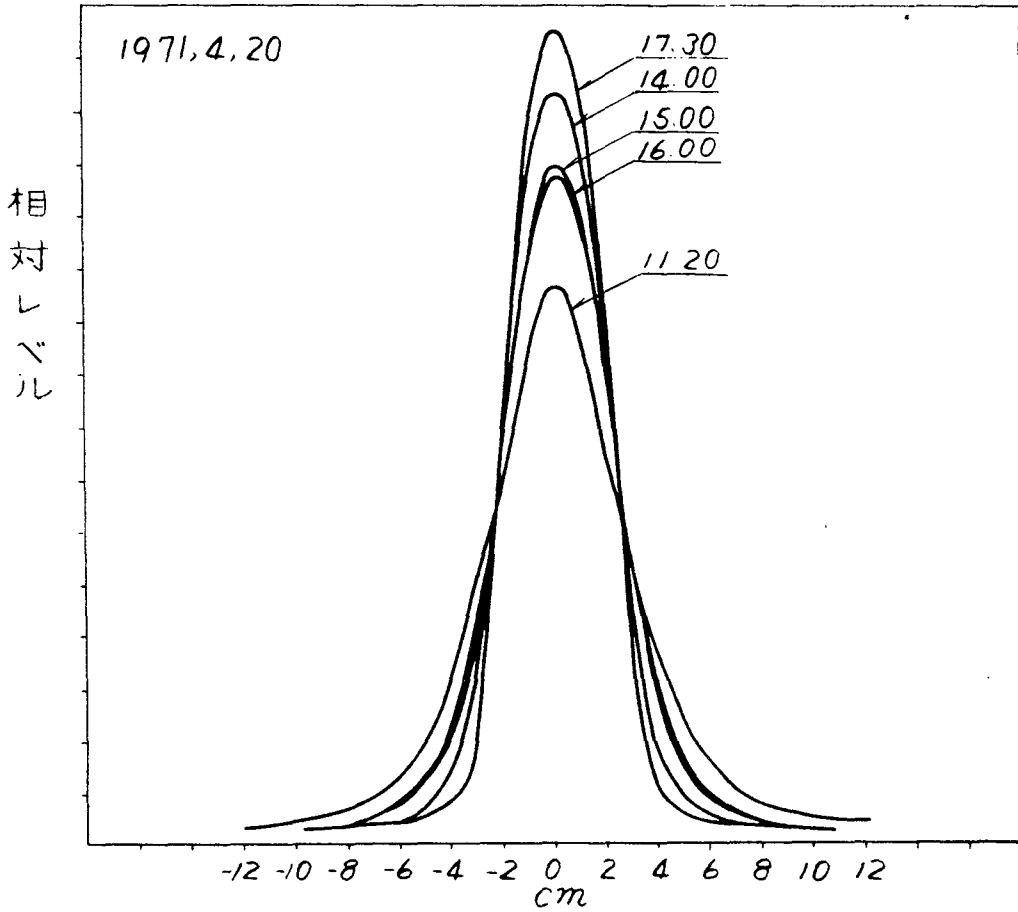


図5-3 100個のランダムな強度分布の中心を一致させて重ね合わせたビームの平均の強度分布

図5-4はビームの中心を合わせる操作をせずに、ランダムな強度分布をそのまま直接重ね合わせて得られたビームの平均の強度分布である。

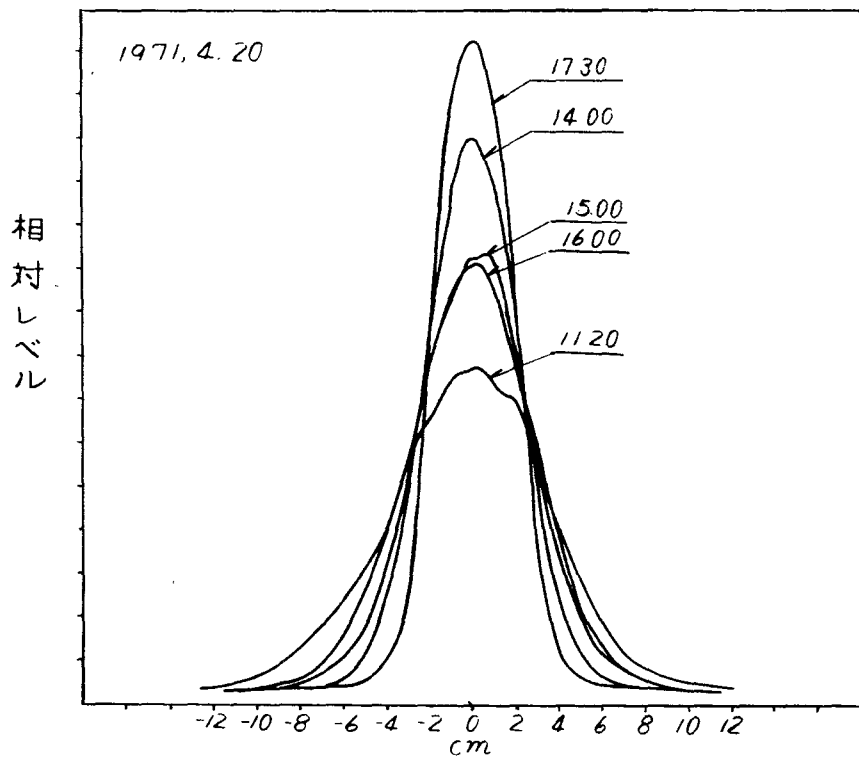


図5-4 100個のランダムな強度分布を直接重ね合わせた
ビームの平均の強度分布

これより等価的なビームサイズと考えられる $1/e^2$ 幅を求め、理論値と比較したのが図5-5、
および図5-6である。測定値を丸印で示し l_0 が 1 mm と 10 mm の場合の理論値の範囲を実線で
示した。理論値と実験値のよい対応関係がみとめられる。

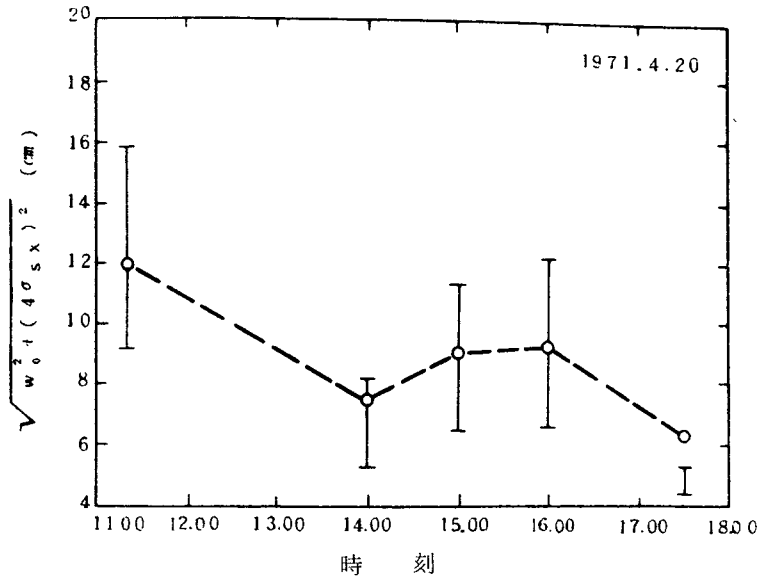


図 5-5 ビームの踊りを除いた平均の強度分布の $1/e^2$ 幅の測定値 (丸印) と計算値 ($l_0=1\sim 10$ mm に対する計算値の範囲を実線で示した。)

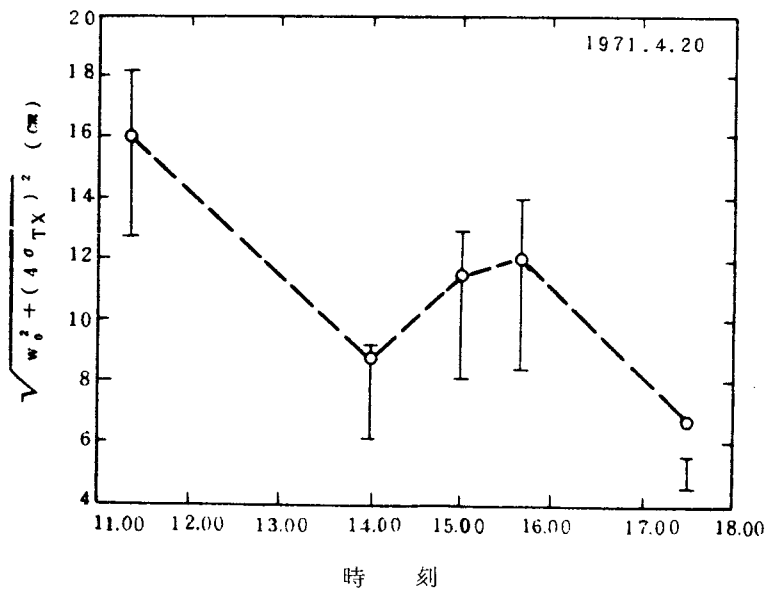


図 5-6 ビームの踊りを含んだ平均の強度分布の $1/e^2$ 幅の測定値 (丸印) と計算値 ($l_0=1\sim 10$ mm に対する計算値の範囲を実線で示した。)

6. レーザビームの伝搬特性を考慮して設計したビーム制御機構を持つ光通信装置の試作および伝送実験⁽¹¹⁾

レーザーを用いてテレビ信号の中継装置として使用できるような機動性の高い近距離光通信装置において、大きな問題点となるのは指向性の鋭さからくる初期セットアップの困難さと、装置の振動および屈折率変動によるビームの変動である。これを解決する方法として図6-1、図6-2に示すようなビーム制御機構を持つ光通信装置を試作した。本装置は二点間で相互にレーザー通信を行うものであるが、装置の機動性と信頼性を高めるために自動的にレーザービームの光軸合わせと、対称的なビーム位置制御を行う機構を備えている点に特徴がある。そのためにそれぞれの端局にレーザーと光偏向器を持ち、同一光偏向器で送受信ビームを偏向している。

さらに一方の端局では角度検出器を用いて、ローカルなサーボ系を形成させ、コーナーキューブと同様な働きをもたせている。また相互に位置検出器を持ち、位置制御信号をレーザーで伝送することにより、相互の光軸がつねに一致した形で位置制御を行わせている。

また、本装置の伝送可能距離の限界は、回折および大気屈折率変動によって広がったビームが、受光レンズの口径より大きくなった場合であるとし、受信光学系の口径と伝送可能距離の検討を行なった。

さらに、野外伝送実験を行ない、ビームの踊りと散らばりの検討から予想された距離の範囲内で安定に動作することを確認した。

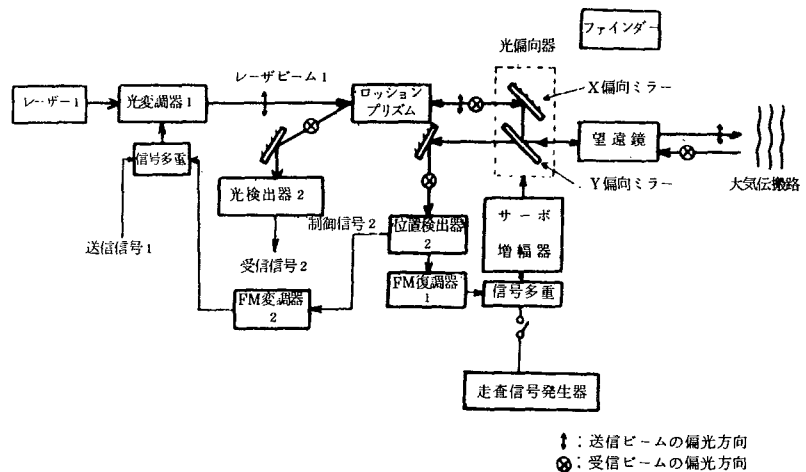


図6-1 走査側端局系統図

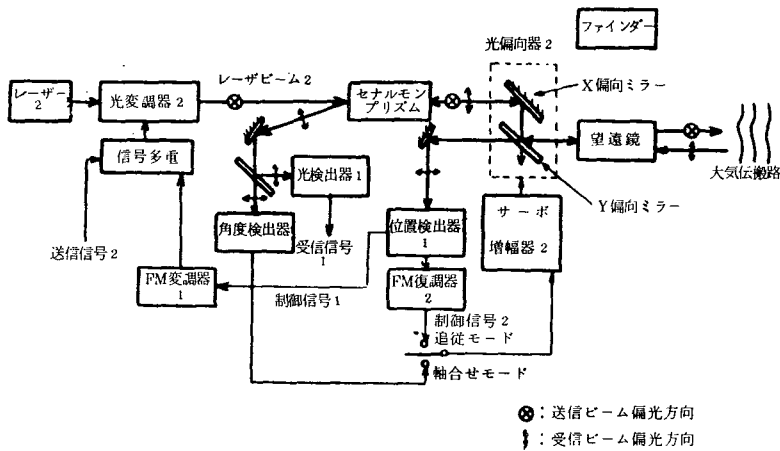


図 6-2 コーナキューブ側端局系統図

7 む す び

レーザービームの大気伝搬特性に関する研究結果の要点をまとめると次のようになる。

1. 大気中を伝搬するレーザービームの踊りについて、理論的解析を行ないその特性を明らかにした。すなわち、幾何光学的にビームの到来角変動を解析し、その結果を従来の波動的な到来角変動の解析と比較し、受光器の口径 D とビームサイズ w_0 を等しいと置けば、ほぼ一致することを確かめた。次にビームの踊りと到来角変動の関係式を導いた。

2. He-Ne レーザを用い、 480 m 、 1380 m の伝搬距離においてビームの踊りを測定する実験を行ない、距離特性および大気屈折率構造定数との関係を調べ、理論的解析結果との良好な一致を確認した。

3. ビームの踊りのパワースペクトルの測定を行ない、そのスペクトルが $1/f$ 特性を示すことを明らかにした。

4. 大気中を伝搬するレーザービームの散らばりを、幾何光学的方法を用いて理論的に解析し、ビームの平均の強度分布を求めた。

さらに、これまで波動的に取扱われているビームの散らばりに関する研究結果と比較し、ビームの平均の強度分布は、ビームの踊りを除けばほぼ一致することを明らかにした。

5. この理論的解析結果を確かめるため、He-Ne レーザを用い、 1380 m の距離でビーム

の散らばりを測定する実験を行ない，理論的解析結果との良好な一致を得た。

6. ビームの踊りおよび散らばりの理論的解析結果から光通信装置の光学系の口径の決定に一つの基準を与えた。

7. レーザ光通信装置においては光軸調整の困難さ，装置の振動および大気の屈折率ゆらぎによるビームの変動が問題となる。

これを解決する方法を考案し，そのような装置の光学系口径と伝送可能距離との関係を明らかにした。さらに，その装置の試作ならびに野外伝送実験を行ない，レーザ光通信装置として実用上十分な性能を有することを確めた。

参 考 文 献

- (1) L.A.Chernov ; "Wave Propagation in a Random Medium" , Mc Graw-Hill Book Co, New York (1960) .
- (2) P.Beckmann ; " Signal Degeneration in Laser Beams Propagated Through a Turbulent Atmosphere" , Radio Science J. Res, NBS/USNC-URSI, 69D, 4, P. 629 , (1966) .
- (3) H.Hodara ; " Laser Wave Propagation Through the Atmosphere " Proc. IEEE, 54 , 3 , P. 368 (1966) .
- (4) 木下，鈴木，松本 ; " かげろうの中における光路のゆらぎ" ，電子通信学会誌，49，6，P. 1181 (1966) .
- (5) A.Consortini, L.Ronchi, L.Stefanutti ; " Investigation of Atmospheric Turbulence dy Narrow Laser Beams" , Appl. Optics, 9, 11 , P. 2543 (1970) .
- (6) A.M.Whitman , M.J.Beran ; " Beam Spread of Laser Light Propagating in a Random" , J. Opt. Soc. Amer, 60, 12 , P. 1595 , (1970) .
- (7) 千葉，杉浦 ; " 大気中を伝搬するレーザービームの Spot dancing" 電子通信学会論文誌(B)，54-B，2，P. 31，(1971) .
- (8) 千葉 ; " 大気中を伝搬するレーザービームの散らばり" 電子通信学会論文誌(B)，54-B，10，P. 676 (1971) .
- (9) T.Chiba ; " Spot Dancing of the Laser Beam Propagated Through the Turbulent Atmosphere" , Appl. Optics, 10, 11, P. 2456 (1971) .
- (10) 千葉 ; " レーザ光伝搬におけるビームの散らばりの測定"

電子通信学会量子エレクトロニクス研究会資料QE72-17(1972)

- (11) T.Motoki, Y.Sugiura, T.Chiba ; "Automatic Acquisition and Tracking System for Laser Communication" IEEE Tr.on Communications, COM-20, 5, P. 847 (1972) .

審査結果の要旨

大容量通信回線に対する需要は、情報化社会の発展と共に急速に増大し、無線回線の多重化はますます要求されてきている。そのためレーザを光通信に応用しようとする研究が進められているが、実用化の際に大きな問題点となるものに、レーザビームの大気伝搬特性がある。それには減衰や振幅および位相の変動のほか、ビーム波特有の問題として到来位置変動を生じる踊りならびに散らばりがある。本論文は、光通信の実用化を目的として、従来十分に検討されていなかったビームの踊りと散らばりについて理論的解析ならびに実験的検討を進めて、その特性を明らかにすると共に、その結果をテレビ信号を中継する光通信装置の設計に応用して、実用装置の試作と伝搬実験を行なった成果をまとめたもので、全文7章および付録からなっている。

第一章は序論で本研究の目的を述べ問題点の所在を分類し、明確にしている。

第2章では大気をコルモゴロフ形のランダム媒質と考え、大気中を伝搬するレーザビームの変動と踊りについて幾何光学的手法を用いて理論的に解析し、その特性を明らかにしている。

第3章では、レーザビームの散らばりを前章と同様な方法を用いて解析し、ビームの平均の強度分布についての有用な結果を得ている。

第4章では、ビームの踊りと散らばりおよび大気屈折率構造常数の測定方法ならびに実験装置について述べると共に、膨大な測定データを迅速かつ確実に統計処理するために新たに考案した装置について言及している。

第5章はHe-Neレーザを用いて測定したビームの踊りおよび散らばりの詳細な検討結果をまとめたもので、伝搬距離特性および大気屈折率構造常数との相関を定量的に調べて、理論的解析の結果とよく一致することを示しており、これは有用な知見である。

第6章では、レーザ光通信装置における光軸調整の困難さや装置の振動および大気屈折率ゆらぎによるビームの変動などの問題を実用的に解決する方式を考案し、この装置の光学系の口径と伝送可能距離の関係を、第2章および第3章の理論的解析にもとづいて明らかにしている。さらに、この装置を試作し、テレビ信号の野外伝送実験を行なって、上記の結果を実験的に立証すると共に、本装置が実用上十分な性能を有することを確かめている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、従来研究の少なかったレーザビームの大気伝搬にともなう踊りと散らばりについて、理論と実験の両面から系統的研究を進めて、両者の良好な一致が得られることを実証すると共に、ここに明らかにされた特性にもとづいて、テレビ信号の中継のためのレーザ光通信装置を新たに考案、設計し、試作ならびに伝搬実験を行なって、いくつかの実用上有用な知見を加えたものであって、通信工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。