

## 光通信実験地上施設送受信系

豊田 雅宏\*<sup>1</sup> 荒木 賢一\*<sup>2</sup> 有賀 規\*<sup>3</sup>

(1994年1月24日受理)

OPTICAL GROUND FACILITY FOR  
LASER COMMUNICATION EXPERIMENT

By

Masahiro TOYODA, Kenichi ARAKI, and Tadashi ARUGA

An experiment in optical communication between the geostationary satellite ETS-VI and a ground station is to be started in 1994, and this paper describes equipments installed in the ground station: a laser pointing equipment, an optical signal receiver, and a laser modulation and polarization controller. All of these equipments are built into 1.5-m-diameter telescope system. The laser pointing system compensates for atmospheric turbulence, and the servo and pointing jitter performance of this system are shown here. The optics and demodulation method for the optical signal receiver, and the electro-optical modulator and half-wave rotator for the laser modulation and polarization and polarization controller are also described.

[キーワード] レーザビーム伝搬, 空間光通信, 捕捉追尾, 大気ゆらぎ, 衛星間通信.

Laser beam propagation, Free-space laser communication, Acquisition and tracking, Atmospheric turbulence, Inter satellite communication.

## 1. ま え が き

通信総合研究所では, 宇宙光通信の基礎技術の確立を目的として, 技術試験衛星VI型 (ETS-VI: Engineering Test Satellite- VI) に搭載する光通信基礎実験装置 (LCE: Laser Communication Equipment) を用いた光通信実験を計画している<sup>(1)</sup>. この実験では, 宇宙空間でのレーザ光による光通信の基礎的な技術を実証する. また, 本実験により地上と衛星間での光通信における大気の影響について評価することもできる.

本稿では, 光通信実験用地上局に整備された光送受信系装置の概要を述べる. 光送受信系装置は, 当所にある口径1.5 mの望遠鏡システムに組み込まれており, レーザ光を衛星へ高精度に指向するレーザポインティング装置, LCEから地上へ向けて送られてくるレーザ光を受光する光信号受光装置, および, LCEへ送信するレー

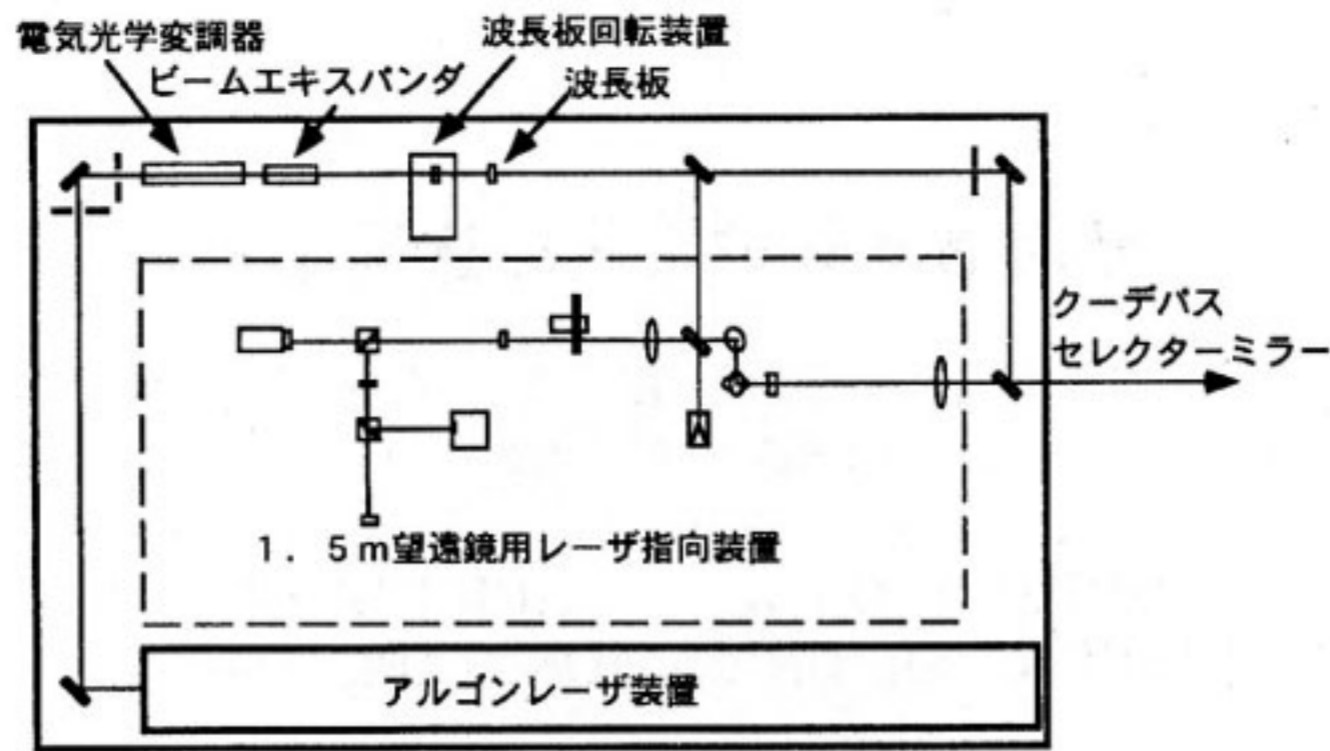
ザ光に対して変調および偏光の制御を加える装置に大別できる<sup>(2)</sup>. 各装置の解説に先立ち地上装置の送受信光と1.5 m望遠鏡システムの概要について説明する.

## 2. 送受信光学系と1.5m望遠鏡システム

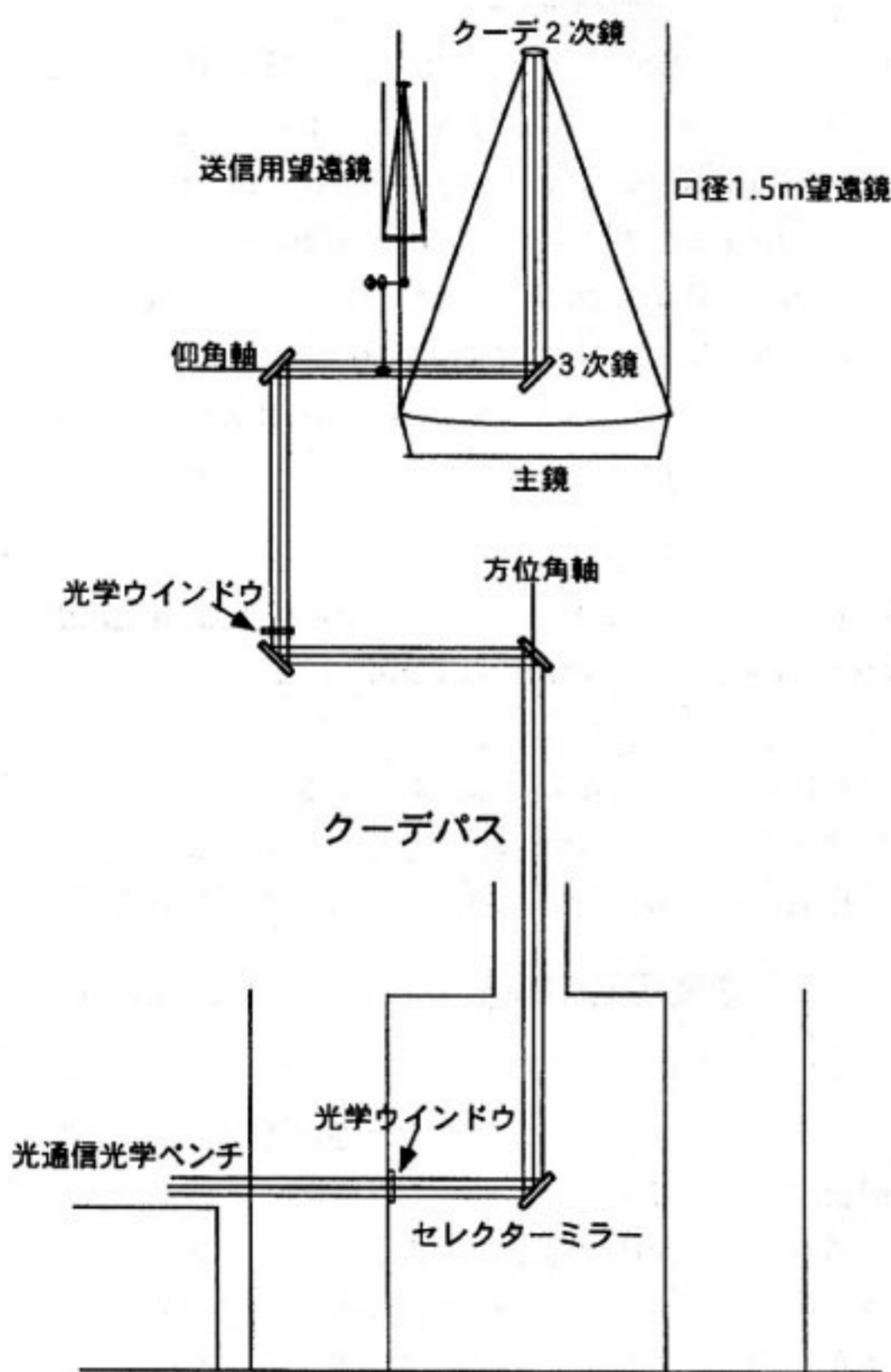
## 2.1 送信光

レーザ光の送信に用いる光学系を第1図から第4図に機能別に分けて示す. 地上から送信するレーザ光は, 第1図に示した光通信光学ベンチ上のアルゴンレーザ装置から供給される. このレーザ光の波長は514 nm, 最大強度は10 Wである. また, 出口でのビームパターンの包絡線値が最大値の $1/e^2$  ( $e$ :自然対数の底)となるビーム幅 (以下ビーム幅) は1.9 mmである. アルゴンレーザは, 最大出力, LCE上の光検出器の感度, 大気透過特性等を総合的に考慮して選択された. ベンチ上でレーザ光に対して外部変調と偏光制御, 及び, ミラーの損傷を抑えるためのビーム径の拡大を行う. 第1図の点線内の光学機器は, 口径1.5 mの望遠鏡を用いてレーザの送信を行う場合に用いるもので, ビーム径が1.5 m

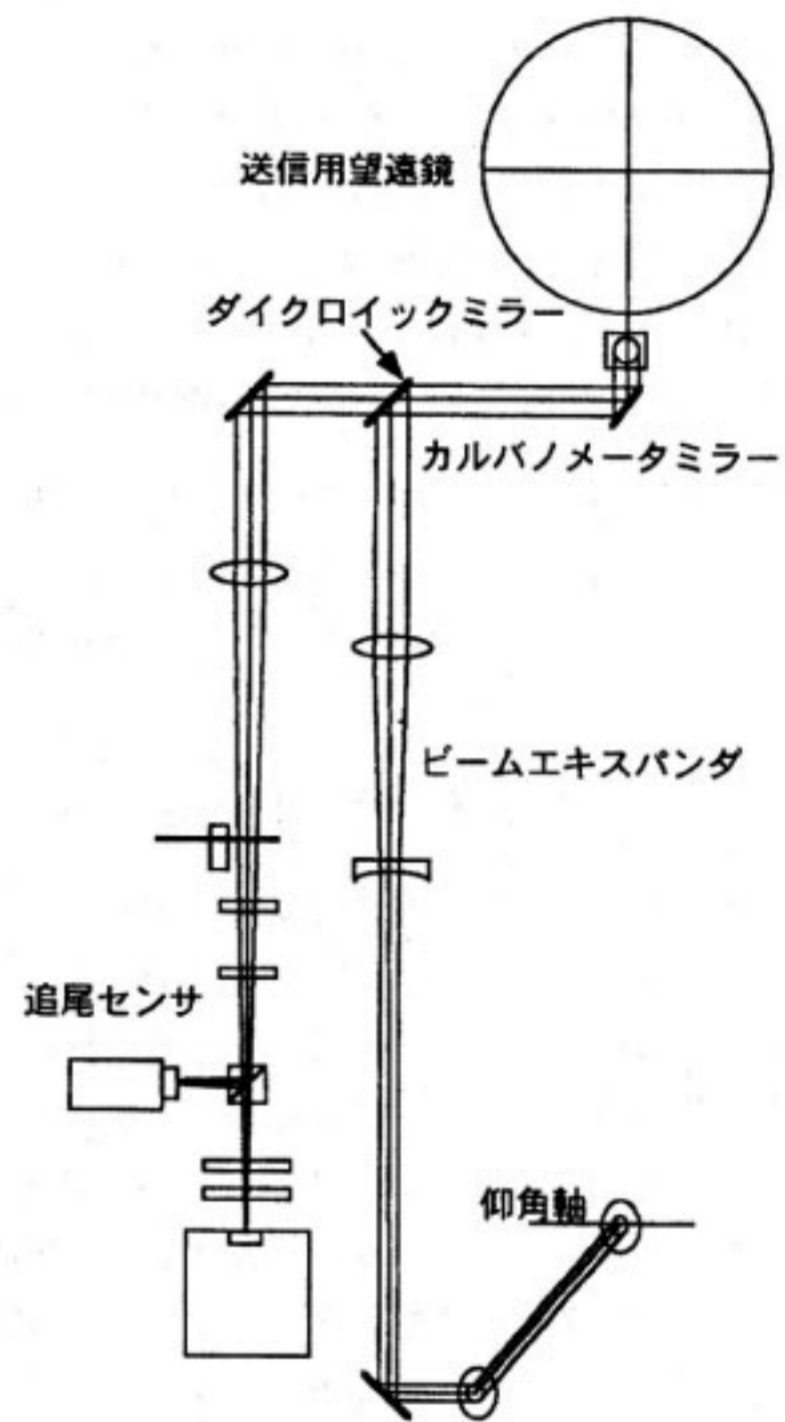
\*<sup>1</sup> 宇宙通信部 宇宙技術研究室\*<sup>2</sup> 電磁波技術部 光技術研究室\*<sup>3</sup> 宇宙通信部



第1図 光通信光学ベンチ上の装置



第2図 クーデパスと口径1.5m望遠鏡



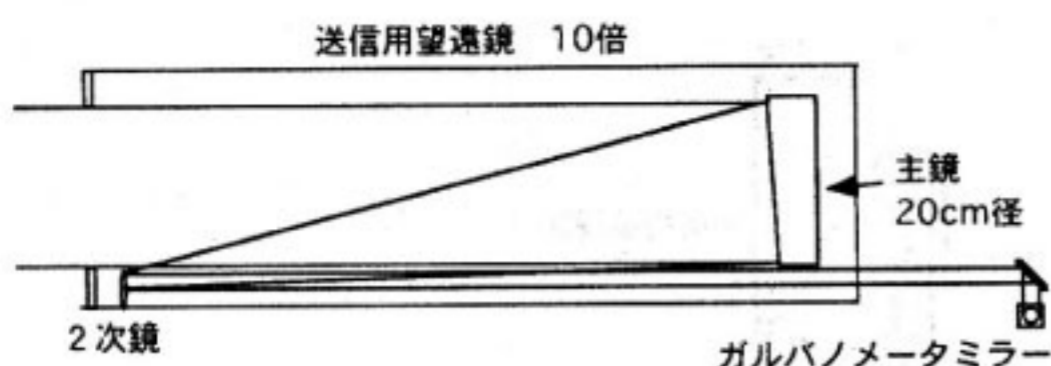
第3図 口径1.5m望遠鏡仰角軸と送信用望遠鏡の間の光学機器

までのレーザー送信をすることができ、口径が20cmの送信用望遠鏡を用いたレーザー送信と切換えて使う。

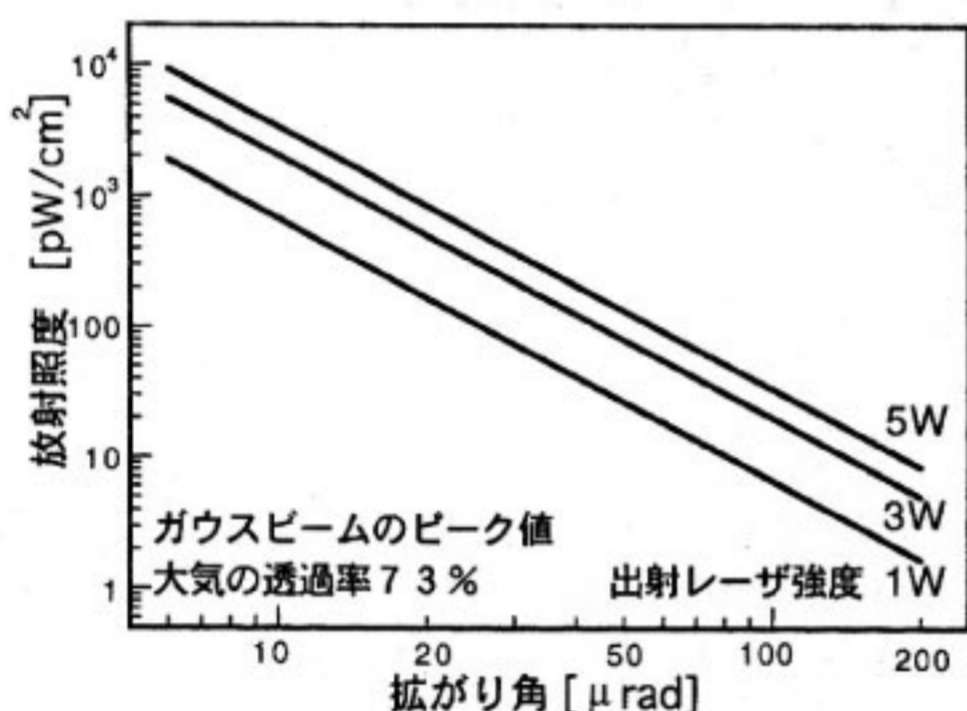
第2図の光通信光学ベンチの端から望遠鏡経緯台の仰角軸までは約11mの距離があり、パスの内部で空気の流れによりビームのゆらぎが生じる。空気の流れを抑え

るためクーデパスの途中に光学ウインドウを2カ所に設置した。クーデパスを通過したビームは、仰角軸上に設置したミラーによって方向を変えて、送信用望遠鏡へ続くパスへ導かれる。

第3図に仰角軸から送信用望遠鏡までの間に設置した



第4図 送信用望遠鏡



第5図 地上送信光の ETS-VIでの放射照度

光学機器を示す。送信光は2倍のビームエキスパンダを通り、700 nm を境界として長波長側が透過する特性を有するダイクロイックミラーと、ガルバノメータミラーで反射した後、第4図の送信用望遠鏡で口径が10倍に拡大される。出射口でのビーム幅は約11 cm である。

送信ビームの拡がり角の制御は、第3図に示した倍率が2倍であるガリレオ式ビームエキスパンダのレンズ間隔を変えることで行われる。レンズ間隔が1 mm 変化すると、無限遠方でビーム拡がり角が約12 μrad 変わるように設定した。ビーム拡がり角の可変範囲は6 μrad から150 μrad 程度である。

地上光学装置全体のレーザー光の送信効率は約16%である。現在の装置では、クーデパスの4枚のミラーにアルミ蒸着ミラーを使っているが、このミラーを誘電体多層膜を用いた高反射率のミラーに変えることで、送信効率を30%程度に改善できると考えている。

ETS-VI の位置での地上送信光の放射照度は、出射ビームがガウスビームでビームウエスト位置が地上望遠鏡出射端にあるとし、大気の透過率を73%としたとき、第5図のようになる。この図の放射照度は、ビームパターンが最大値となる点の値をとっている。LCE の各光検出器での要求光強度から放射照度を求めると、粗追尾に用いる CCD では  $4.7 \text{ pW/cm}^2$  ( $-83 \text{ dBm/cm}^2$ )、精

追尾用の4分割光検出器 (QD: Quadrant Detector) では  $93 \text{ pW/cm}^2$  ( $-70 \text{ dBm/cm}^2$ )、通信用受光器 (APD: Avalanche Photo-Diode) では  $180 \text{ pW/cm}^2$  (平均値) ( $-67 \text{ dBm/cm}^2$ ) であり、出射光強度が3 W のとき CCD に対しては  $200 \mu\text{rad}$  以内、精追尾センサには  $50 \mu\text{rad}$  以内、APD には  $20 \mu\text{rad}$  以内の拡がり角のレーザー送信が必要となる。

### 2.2 受信光

LCE が出射するレーザー光は波長が830 nm の円偏波光である。地上での放射照度は、LCE 出射ビームをガウスビームであると仮定し、平均出射強度を4.1 mW、拡がり角を  $30 \mu\text{rad}$ 、大気透過率を92%とした場合、ガウスビームのピーク値で  $0.38 \text{ pW/cm}^2$  となる。

LCE からの出射ビームの方向は、ETS-VI の姿勢の変化によって変わり、地上においては受光強度の変化となる。地上への送信方向の精度は、LCE の粗追尾機構が動作しているときには  $\pm 120 \mu\text{rad}$  以内、さらに精追尾も動作している場合には  $\pm 2 \mu\text{rad}$  となる。一方、粗追尾をしない場合は ETS-VI の姿勢は保持範囲である  $\pm 870 \mu\text{rad}$  角となる。

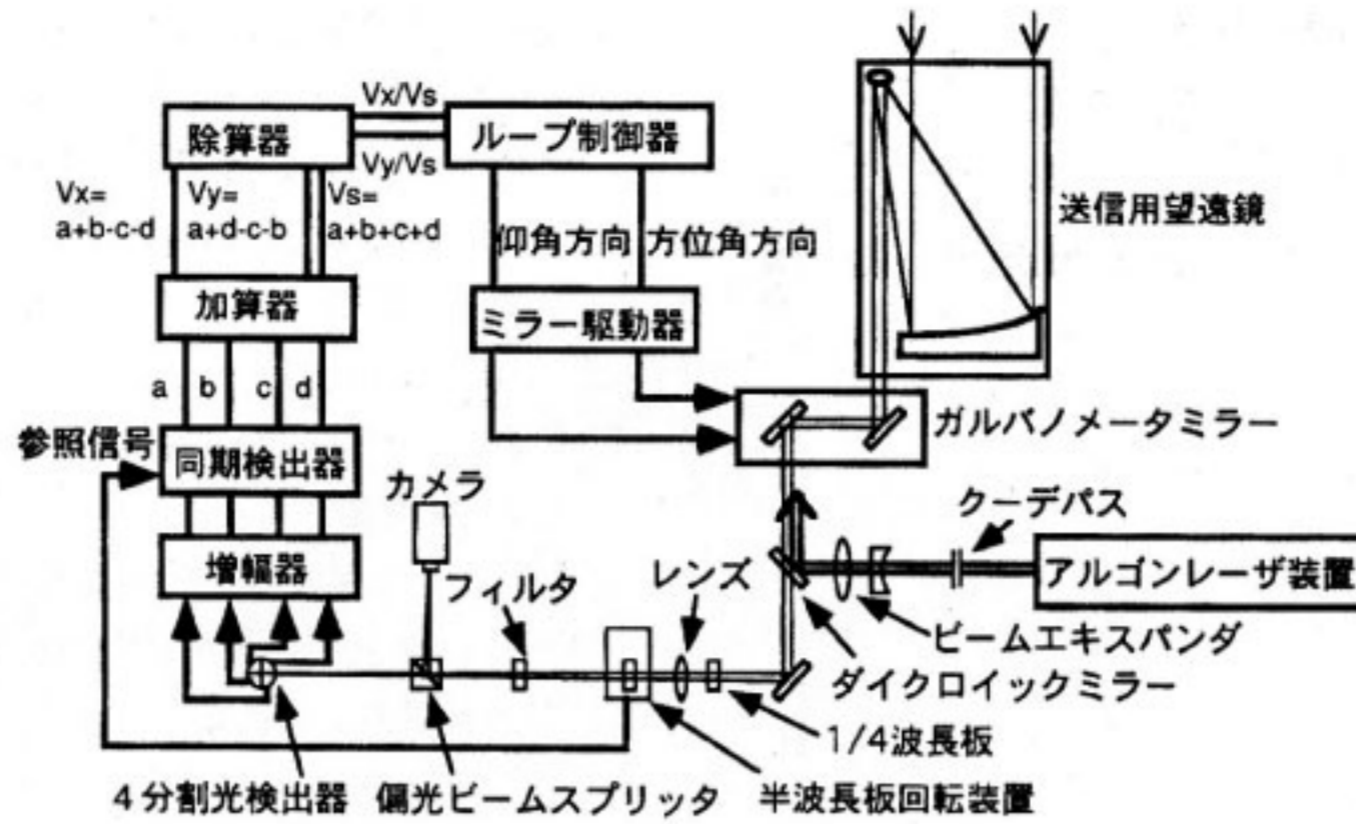
### 2.3 1.5 m 望遠鏡システム

1.5 m 望遠鏡システムは米国コントラバス社によって作られたもので、経緯台に載せられており、計算機による自動追尾を行なうことができる<sup>(3)</sup>。衛星の軌道要素は Two Line Element の形式で入力し、自動追尾中に、手動で指向方向に偏差を加えることができる。望遠鏡の指向方向は仰角と方位角で表示され記録できる。この他に、望遠鏡のマウント制御部に仰角と方位角を入力して指向させることもできる。入力する角度の最小単位は  $0.0001^\circ$  である。指向目標が静止衛星であることから、角度入力の頻度が少ないためこの方法も有効である。

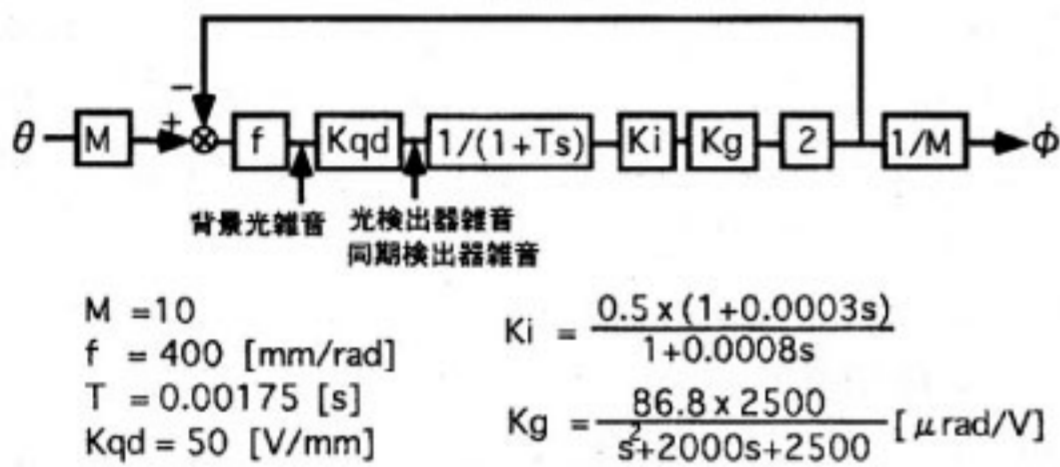
## 3. レーザポインティング装置

### 3.1 光学系

地上から衛星に対して、拡がり角が  $20 \mu\text{rad}$  程度の狭ビームなレーザーを照射するために、大気のゆらぎで生じるレーザービームの伝搬方向の変動を補正する必要がある<sup>(3,4)</sup>。第6図に半波長板回転方式のレーザーポインティングシステムを示す。口径20 cm の送信用望遠鏡で LCE からのレーザー光を集光し、QD で受光する<sup>(5)</sup>。ここで、大気による方向変化が光スポットの位置変化として検出される。QD からの信号を用いてビーム方向を高速に変えられるガルバノメータミラーを動作させ、QD の中央に光スポットを結像させる帰還制御を行う。このような制御をしている状態で、送信用のアルゴンレーザー光をガルバノメータミラーを通して出射させることに



第6図 レーザポインティングシステム（半波長板回転方式）



第7図 レーザポインティングシステムのブロック図

より、大気による方向変動を補正したレーザーポインティングを行う。

2.2で述べたように、LCEからのレーザー光の地上での最大放射照度は  $0.38 \text{ pW/cm}^2$  であるため、QDでの受光強度は約  $70 \text{ pW}$  ( $-72 \text{ dBm}$ ) と微弱である。このため、光検出の感度を上げるためにロックインアンプを用いて同期検出を行う。同期検出に必要な光の強度変調には羽チョッパーを用いるか、あるいは、LCEからのレーザー光が円偏光であることを利用して半波長板回転装置と偏光ビームスプリッタを用いる。

また、地上局と衛星との相対速度の視線方向に対して垂直な成分のために光行差が発生する<sup>(2)</sup>。この大きさは、地上望遠鏡の方位角成分に変換すると東方向に  $17 \mu\text{rad}$  で、仰角成分については下方向に  $6.0 \mu\text{rad}$  となる。この角度の補正は第6図中に示したダイクロイックミラーで行う。

### 3.2 制御系

第7図に制御系のブロック図を示す<sup>(6)</sup>。LCEから到来してきたレーザー光の送信用望遠鏡への入射角を  $\theta$ 、地上から送信するレーザー光の出射角を  $\phi$  とする。Mは望

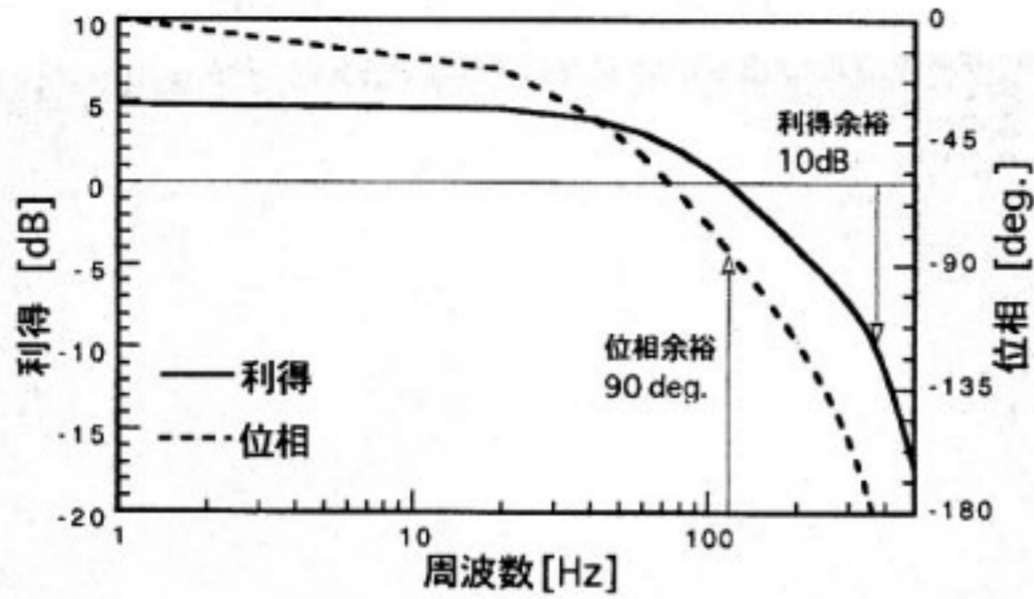
遠鏡の倍率であり、 $f$ は集光レンズへの光の入射角に対するスポット位置の変化の割合で、レンズの焦点距離と等しい。ロックインアンプでの信号検出を1次おくれ系として、その時定数を  $T$  とおき、伝達関数を  $1/(1+Ts)$  と表す。QDのスポット位置変位対差分信号電圧の伝達関数を  $K_{qd}$ 、ループコントローラの伝達関数を  $K_i$ 、ミラードライブ回路への入力電圧対ミラー回転角の伝達関数を  $K_g$  とする。望遠鏡の外観での送信ビーム出射方向の変化は、ガルバノメータミラーの回転により生じた内部でのビーム方向の変化の  $1/M$  となる。また、制御系に加わる主な雑音を図中に示した。M、fの値はカタログ値を用い、T、 $K_{qd}$ 、 $K_g$ はそれぞれ個別に測定により求めた。Tは制御系の応答特性と同期検出での雑音帯域幅を考慮して設定された。このときの雑音帯域幅は  $250 \text{ Hz}$  となり、 $\theta$ の主要な周波数成分を含むと考えられる。 $K_{qd}$ はQDにおける光スポット径の関数であり、QDでの受光効率と視野を考えてスポット径は約  $0.7 \text{ mm}$  とした。ミラードライブ回路単体には帰還制御が施されており、 $K_g$ は測定結果を基に2次の伝達関数とした。また、 $K_i$ は比例要素と遅れ補償回路とした。第8図に制御系の一巡伝達関数のボデ線図の計算結果を示す。このグラフの位相余裕は  $90^\circ$ 、利得余裕は  $10 \text{ dB}$  であり制御系は安定と考えられる。

### 3.3 レーザポインティング装置の評価

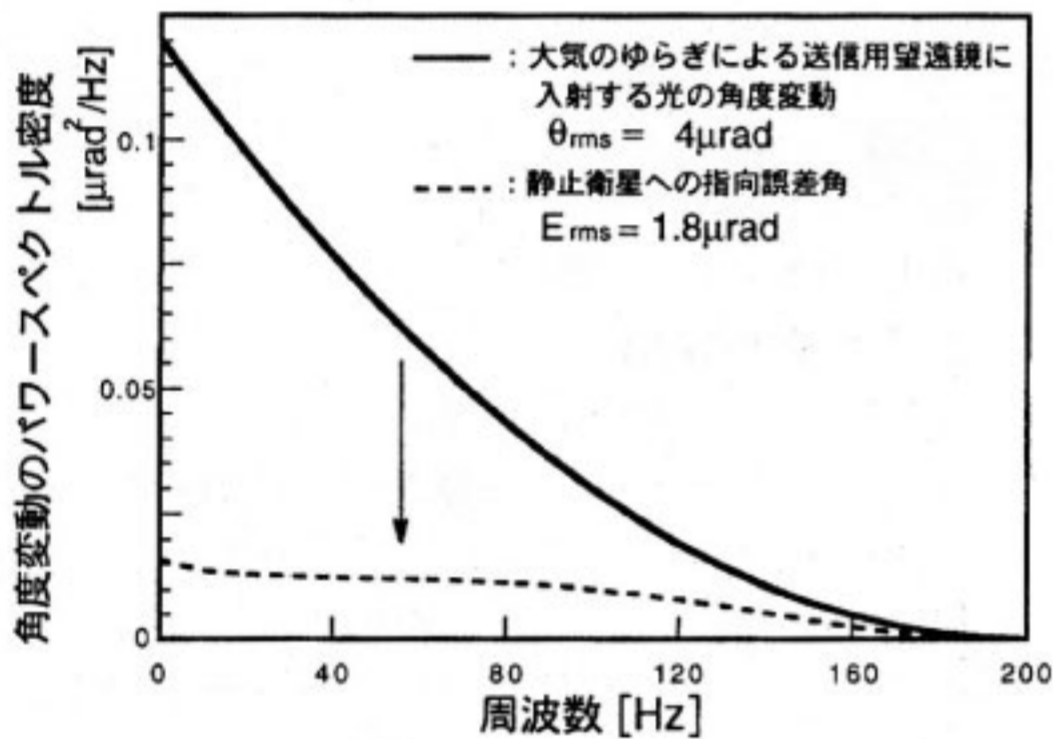
第7図の制御系について外乱の要素を無視すると、送信光の大気による方向変動を補正した後に残留する衛星への指向誤差角  $E$  の自乗平均  $\overline{E^2}$  は次式で表される<sup>(7)</sup>。

$$\overline{E^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left| \frac{1}{1+G(\omega)} \right| \theta(\omega) d\omega \text{ [rad}^2\text{]}$$

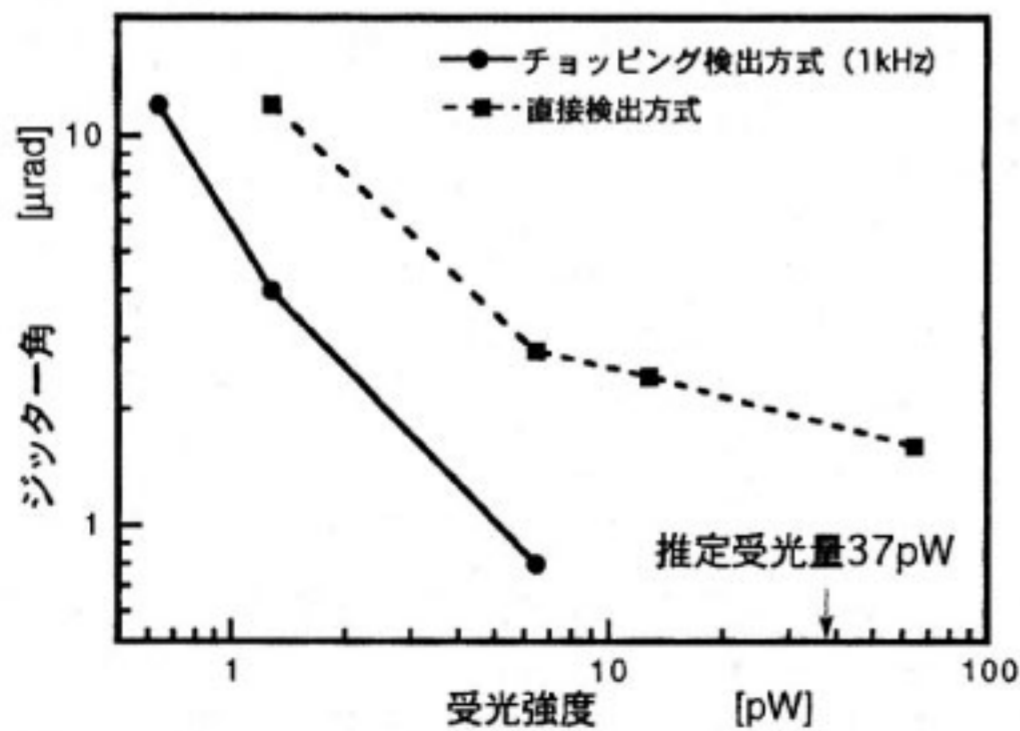
ここで、 $G(\omega)$ は制御系の一巡伝達関数、 $\theta(\omega)$ は $\theta$



第8図 レーザポインティングシステム制御系の閉ループポード線図



第9図 大気ゆらぎによる方向変化とレーザの指向誤差のパワースペクトル密度



第10図 レーザポインティングシステムの光量特性

のパワースペクトル密度、 $\omega$  は角周波数である。第9図に  $E$  のパワースペクトル密度の計算結果を示す。ここで、 $\Theta(\omega)$  は口径 20 cm の望遠鏡を用いた大気による方向変動の測定結果を基にして、200 Hz までの周波数成分を有する  $\omega$  の関数として次式で近似した<sup>(4)</sup>。

$$\Theta(\omega) = 0.12 \times (1 - 0.0008\omega)^2 \quad [\mu\text{rad}^2/\text{Hz}]$$

$$(\omega < 200 \cdot 2\pi [\text{Hz}])$$

このとき、 $\theta$  の標準偏差  $\theta_{rms}$  は  $4 \mu\text{rad}$  であり、シーイング 1.9 秒に相当する。大気による方向変動の補正により、指向誤差角のパワースペクトル密度の積分から  $E_{rms}$  が  $1.8 \mu\text{rad}$  と改善される。

APD での受光量が小さくなると雑音によってガルバノメータミラーの振れ角 (ジッター角) が大きくなるため受光量の減少時の特性が問題となる<sup>(8)</sup>。第10図に QD での受光量を変えたときに、ジッター角を測定した結果を示す。図中のジッター角は望遠鏡の外側での値である。受光量を小さくしていくと制御が外れてジッター角は測定できなくなる。LCE からのレーザ光の受光強度は最大値で 37 pW (チョッピング検出方式) であり、受光する光がビームパターンの  $1/e^2$  幅の端の場合には受光量は 5 pW となり、このときのジッター角はチョッピング検出方式で  $1 \mu\text{rad}$  となる。

#### 4. 光信号受光装置

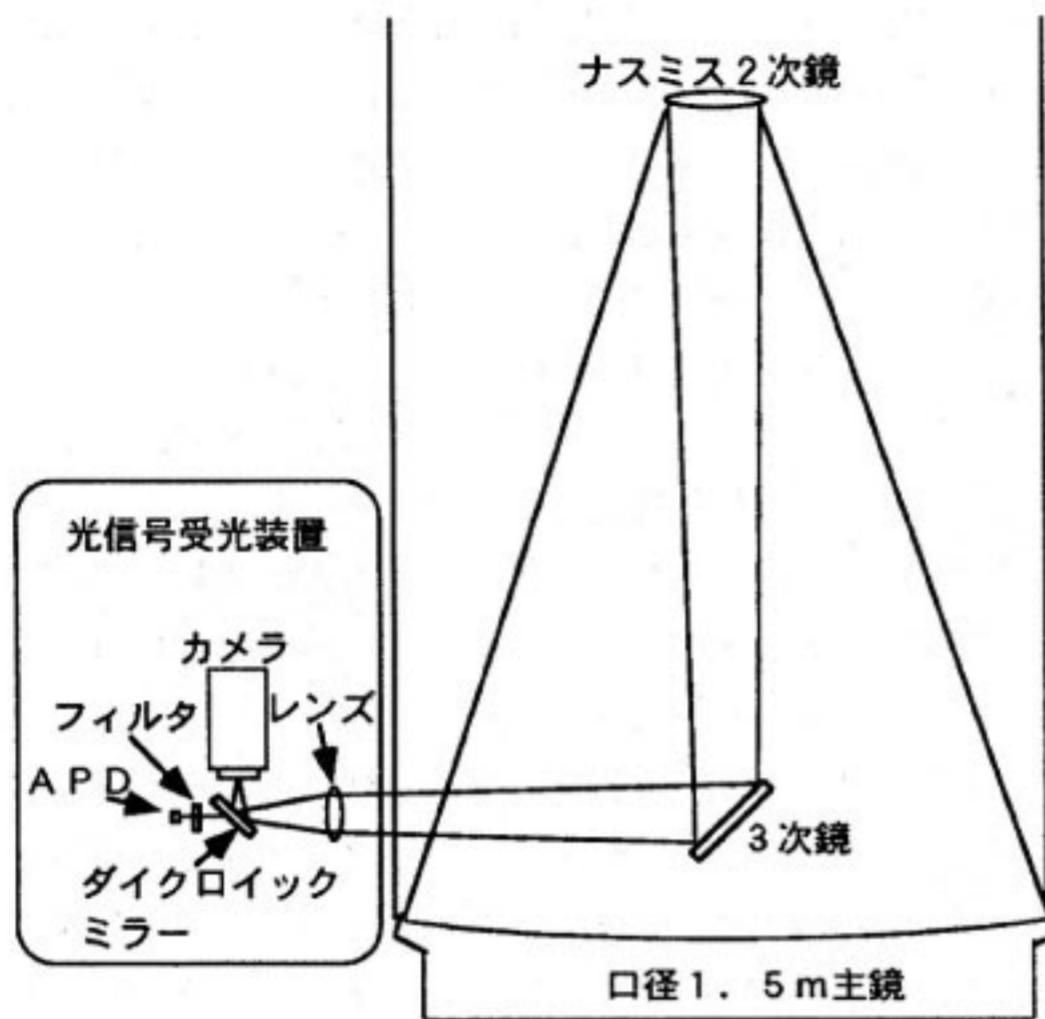
##### 4.1 光学系

第11図に光信号受光装置光学系を示す。受光用のカメラと APD は 1.5 m 望遠鏡のベントカセグレン焦点位置に取り付けられている。この焦点位置では、検出器の視野を大きくとるためにパスの途中にレンズを設置しており、合成焦点距離は約 6 m である。望遠鏡で受光した LCE からのレーザ光は、図中のダイクロイックミラーにおいて 85% が透過して APD で受光される。残りの 15% の光と、視野内に入った送信レーザ光の散乱光はカメラで受光される。第12図にレーザ送信時のカメラ出力画像を示す。このとき、カメラ受光面の一部分を覆ってあるため画面の左上のビームは見えなくなっている。

受光光学系の効率、カメラまでが 9.0%、APD まででは透過率 60% の干渉フィルタを付けた場合に 36% となる。カメラの視野は  $2.1 \times 1.6 \text{ mrad}$  で、受光面径が 1.0 mm の APD の視野の直径は  $170 \mu\text{rad}$  である。

##### 4.2 光信号復調系

復調するデジタル信号は、LCE 出射光に加えられている 1.024 Mbps のバイフェーズ信号である。データの内容は、折返し信号 (地上で加えた 1.024 Mbps のバイフェーズデジタル信号と同じ波形の信号)、LCE で発

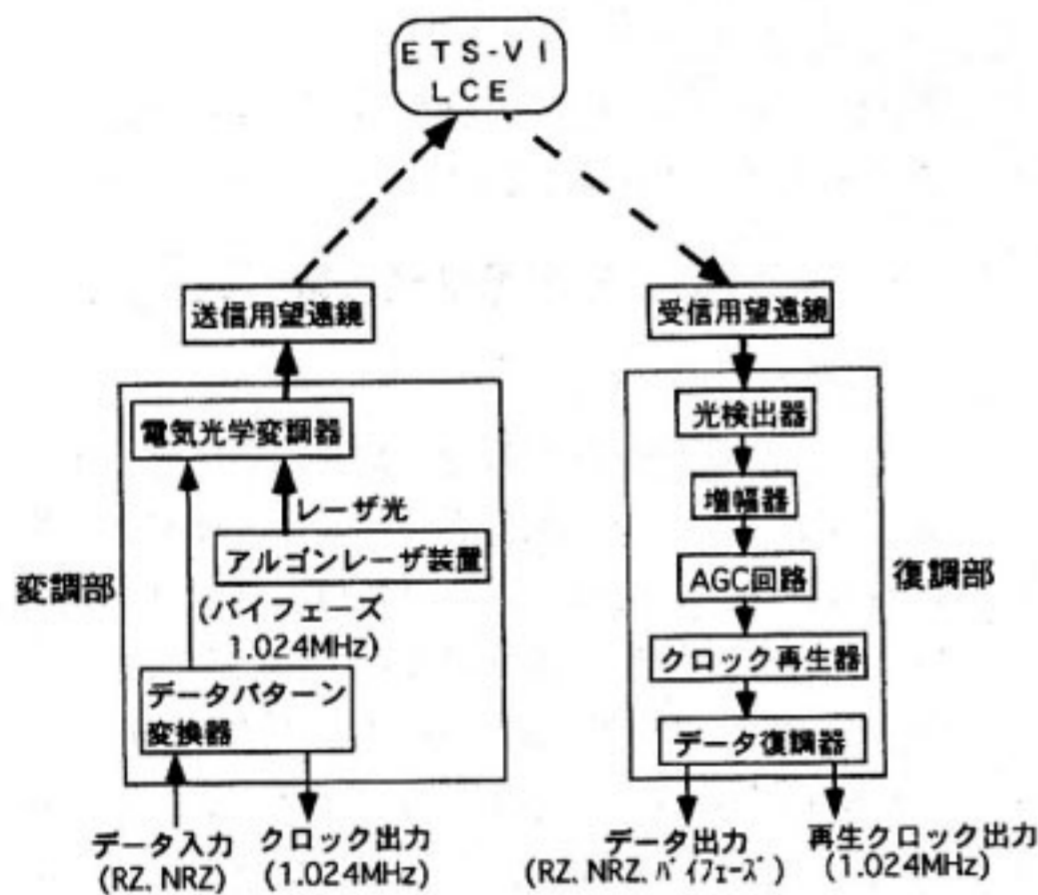


第11図 光信号受光装置光学系



視野 2100×1600μrad

第12図 レーザ送信時のカメラ出力画像



第13図 光通信データ変復調系のブロック図

生するランダムパターンの信号、E2データ信号（LCEのテレメトリデータが載せられている）の三種類である。また、周波数が8kHzのアナログ強度変調信号が変調度20%で載せられている。

光通信データ変復調系のブロック図を第13図に示す。復調部は、光検出器、増幅器、AGC回路、クロック再生器、および、データ復調器で構成される。出力されるデータは、バイフェーズ、NRZ、RZの方式が選択できる。復調されたデータは、地上においてLCE折返しでのビットエラー率測定や、画像伝送装置による光通信デモンストレーション、E2データからテレメトリデー

タの再生に用いる。

### 4.3 受光装置の評価

必要とする機能は次の3つである。

- ① LCEの出射ビームをAPDで受光して強度を測定しデジタル信号を復元する。
- ② ETS-VIからの太陽光の反射光をカメラで受光する。
- ③ 送信レーザービームの散乱光をカメラで受光する。

②と③は、夜間において、ETS-VIへの望遠鏡の指向と送信レーザー光の伝搬方向のアライメントに用いる。これらの機能については気象衛星GMS-4へのレーザー送信により確認を行なった。大気中を通過することによる受光強度の変化の周波数は数十Hzまでの成分が主と考えられるため、振幅変調信号の8kHzやデータレートより十分小さい。また、大気による方向変化の振幅は1.4μrad (rms)程度でAPDの視野より十分小さい<sup>(9)</sup>。APDの受光周波数帯域を200Hzに制限すれば電圧S/N比は750となりLCEからのレーザー光はビームパターンのすそにおいても検出可能と考えられ、シンチレーションやビームパターンの測定が可能と思われる。また、受光回路の帯域を8kHz付近にすれば8kHz振幅変調信号が検出できると考えられる。

①については、APDでの受光強度はマーク時に7.1nWであり、APD受光回路の雑音等価受光強度は増倍率が30で-3dB周波数帯域幅を2MHzとしたときに0.42nWとなるため、受光後の電圧S/N比は17となる。電圧S/N比の測定値は、平均受光強度が3.5nWのときに13であり、このとき、受光回路の-3dB周

波数帯域幅は6 MHzであった。符号誤り率が $10^{-6}$ となる電圧  $S/N$  比の計算値は9.7となるため、APD単体の性能は符号誤り率 $10^{-6}$ を満たすと考えられる<sup>(10)</sup>。しかし、データ復調の総合的な評価を行うには、データ復調回路での劣化特性を調査する必要がある。

## 5. 送信光の変調および偏光制御装置

### 5.1 電気光学変調器を用いた強度変調と偏光変調

第1図に示すように、光通信ベンチ上でアルゴンレーザー光に対して電気光学変調器 (EOM: Electro-Optic Modulator) を用いて外部変調を行う。EOMはConoptics社モデル390を用いており有効開口3.5 mm角で単位面積当りの許容入射光強度は3.5 W/mm<sup>2</sup>である。透過率は出射端のポラライザの有無により85%、および88%となる。また、立上がり時間は14 nsである。LCE内部の光行差補正用の受光器では315 Hzと8 kHzの強度変調成分を検出し、APD信号受光器では1.024 MHzのバイフェーズ信号を受信するため、EOMへはそれらの信号を作成し入力する。

EOMを用いた光変調の方法として、EOMの出射端にポラライザを付ける強度変調の方法と、ポラライザを付けない偏光変調の方法がある。強度変調は一般に行なわれており、光の強度に信号が変調された光が得られる。偏光変調はEOM透過光を半波長板に透過させLCEへ送信する方式である。半波長板では結晶の光軸方向で決まる角度だけ偏光方向が回転する。LCEで受光したレーザー光の偏光方向と、LCEのAPD手前にある偏光板の方向が一致する場合には、APDにおいて地上での変調信号が最も強く検出できる。また、LCEのCCD手前にあるビームスプリッタの反射率が偏光特性をもつことから、地上において315 Hzと8 kHzの偏光変調を加えた場合、LCEにおいて、これらの周波数の信号の検出も可能である。この方法の利点は、変調する信号データのスペース時にもレーザー光を伝送するため、平均出射強度が強度変調時の2倍となることである。このため、LCEのCCDおよび精追尾用の受光器での平均受光強度が強度変調時の2倍になる。

### 5.2 偏光制御

地上から送信する光の偏光方向を、LCE内部の機器の偏光特性に合せた適切な方向にする必要がある。偏光方向の制御は、光通信光学ベンチ上の半波長板を用いて行なわれる。ベンチ上と送信用望遠鏡出射口、および、LCEでの偏光方向の対応は次のように考えられる。ETS-VIが打ち上げられる静止軌道上東経154°の方向に望遠鏡を指向したときに方位角は156°、仰角は46°であるため、ベンチ上の偏光角をレーザーの進行方向の後

方から見て上方を基点として右回りに22°にしたとき、送信用望遠鏡出射口で水平偏光となる。そして、望遠鏡の後から見て上下方向から左方向に19.3°の偏光方向のときに、LCEで南北方向の偏光成分が最大となる。光通信ベンチ上では、上方を基点として後から見て右回りに93°の偏光方向に対応する。

LCEでのヨー角変動測定のために、半波長板を回転させて送信光の偏光を回転させるとともに回転に対して同期した強度変調信号を加える。地上から偏光方向が10 Hzで回転したレーザー光を送信すると、LCEのAPDの出力は、APDの手前にある偏光板があることにより20 Hzの強度変化をする。20 Hzの強度変化の包絡線のなかで、地上で加えた基準となるパルスの位置変化からヨー角の変動を測定する。基準パルスは1.024 MHzのバイフェーズの同一データの繰返し信号に偏光の回転と同期している4  $\mu$ sのパルスを20 Hzの周期で加えたものであり、APDで基準パルスが受光包絡線のピーク値から半分以上の位置にくるように、基準パルスの発生箇所を調整をする。偏波面の回転はステッピングモータを用いて半波長板を回転させることにより行う。ステッピングモータに入力する1パルス当りの半波長板の回転角は0.0028°であり、偏光の回転角は0.0056°となる。LCEでのヨー角測定の精度は0.05°以下であり、偏光の回転の最小分解角は十分小さいと考えられる。

## 6. む す び

光通信実験の地上局の光送受信系装置について、レーザーポインティング装置、光信号受光装置、変調および偏光制御装置に分けてその概要を述べた。各装置ともに、基本的な機能の確認が済み、現在、最終的な調整段階にある。レーザーポインティング装置は、サーボ定数の最適化と、大気による方向変動を補正した後の指向誤差の最終的な評価が残されている。光信号受光装置は、信号復調回路の調整と背景光およびクロストークの影響調査が今後必要である。

## 参 考 文 献

- (1) 荒木, 鹿谷, 豊田, 有本, 有賀, 鈴木, “光通信基礎実験装置の開発”, 通信総研季, 90, 2, pp.153-179, 1994.
- (2) 豊田, 荒木, 有賀, “宇宙光通信実験計画と地上装置を用いた予備実験”, テレビ学会技報, 14, 42, pp. 25-30, 1990.
- (3) D. Greenwald, C. McLaughlin, “A beacon tracker and point ahead system for optical communications”, SPIE, 1111, 1989.

- (4) 豊田, 武藤, 高見, 荒木, 有本, 有賀, “恒星観測による大気ゆらぎの2波長同時測定”, レーザー学会年次大会, pp.232, 1994.
  - (5) 豊田, 高見, 荒木, 有賀, “宇宙光通信用地上装置の開発: 恒星観測による大気擾乱の測定”, レーザーセンシングシンポジウム, pp.77-80, 1991.
  - (6) 豊田, 高見, 荒木, 有賀, “微弱光位置検出のためのAPD 4分割受光器の特性測定”, レーザー研究, **21**, 3, pp.392-398, 1993.
  - (7) P.V. LaSala, C. McLaughlin, “Beam tracker and point ahead system for optical communications II-servo performance”, SPIE, 1482, 1991.
  - (8) 福島弘毅, 制御工学基礎論, pp.141-148, 丸善, 1976.
  - (9) 豊田, 荒木, 高見, 有賀, “APD 四分割受光器を用いた衛星光学追尾装置の雑音等価角度”, 1993信学春全大, B-154, 1993.
  - (10) V.I. Tataruski, “Wave propagation in a turbulent medium”, pp.224-226, McGraw-HILL, 1961.
  - (11) 野田健一編著, 光ファイバ伝送, pp.283, 電子通信学会, 1979.
-