

# 内部共振器型 He-Ne レーザにおける 出力変動と発振モードの周波数シフト

波々伯部 圭 佑・中 道 義 忠

## Fluctuation of Output Power and Frequency Shift of Oscillating Modes in the Intracavity Helium-Neon Laser

Keisuke HOHKABE · Yoshitada NAKAMICHI

Output power in the intracavity helium-neon laser at 632.8 nm (wavelength) usually shows a few percent fluctuation and its beam has two linear polarization at right angle to each other.

In this paper we report the relation of output fluctuation and frequency shift depending on the thermal expansion of the laser tube.

As the experimental results, the thermal expansion causes the resonant frequency of the cavity to drift through the gain profile and produces a peak-to-peak change in output power.

### 1. ま え が き

内部共振器型 He-Ne レーザは小型、軽量で、取扱い簡便なレーザ装置としていろいろのところで使用されている。市販されているこれらのレーザ装置は発振波長 632.8 nm, レーザ出力数 mW 程度のものである。

さらに、これらのレーザ装置は、カタログ値としてのレーザ出力の変動率は 2% 以下であり、偏光は“ランダム偏光”と表示されている。

また、発振波長は 632.8 nm と示されているが、レーザ出力を周波数上で細かくみると完全な単一周波数ではなく、数 100 MHz づつ周波数の異なる数個のスペクトル成分を含んでいる。一方、これらのレーザの空間的強度を表わす横モードは円形モードパターンを示す TEM<sub>00</sub> モードであり、このモードの空間的強度はレーザ光線軸を含む断面図でガウス形分布をもっている。

これらの基本的特性はレーザ装置を使用する上で十分に考慮しておく必要があり、その中でもレーザ出力の変動については、その様子を認識しておくことは大切である。

このレーザ出力変動、偏光特性については以前に報告したが、<sup>1,2,3)</sup> 本論文では特に出力変動と発振モードの周波数シフト及び各モードの偏光について実験的考察を行ったので報告する。

## 2. 内部共振器型 He-Ne レーザの特性

### 2.1 一般的構造<sup>4)</sup>

内部共振器型 He-Ne レーザは図-1 に示すように一対のレーザミラー（光共振器）の間にレーザ媒質である He, Ne の混合ガスが存在する構造を有する。市販されているレーザ装置では、レーザミラー間隔は 20~30 cm 程度であり、レーザ放電管内に封入されている He, Ne の混合ガス圧力は数 Torr, 電極間に印加される放電電圧は直流 1 kV 以上, 放電電流は数 mA で、グロー放電を形成している。

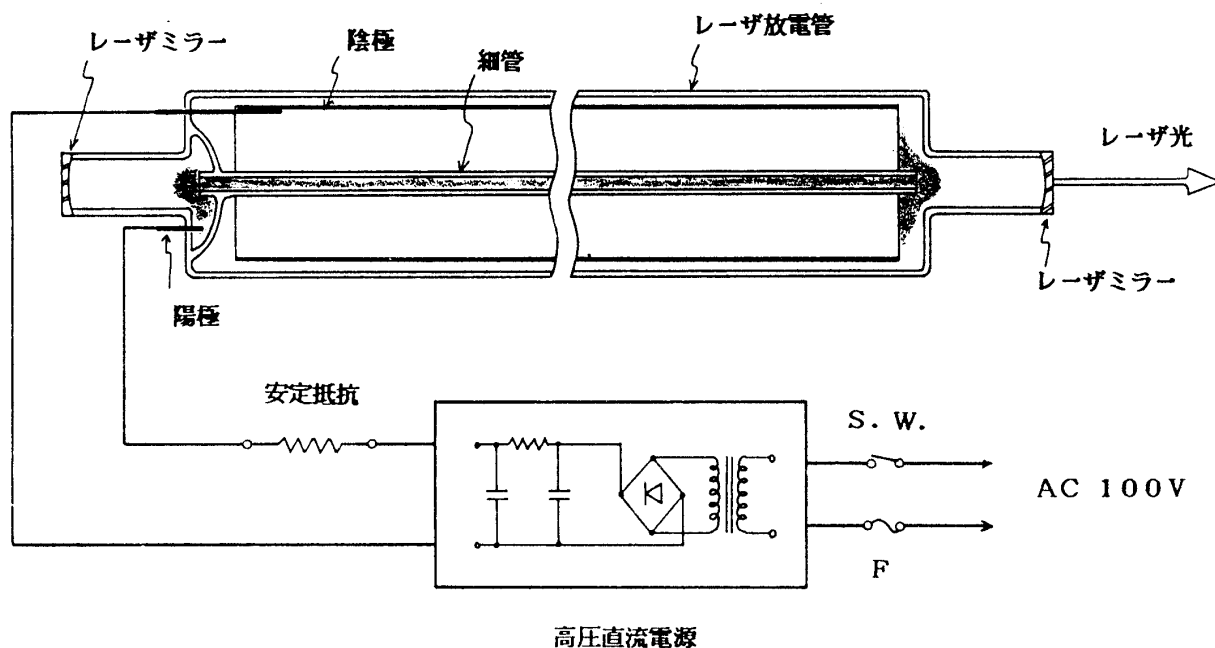


図-1 内部共振器 He-Ne レーザの構造

この放電を安定に持続させるため、放電回路中に数  $10k\Omega$  の安定抵抗を設ける。

レーザ放電管軸中心部に内径 1.5mm 位の細管を設けるのは、細管内壁への Ne 原子の衝突を促進して準安定準位に励起された Ne 原子を基底準位により速く遷移させ、効率よいレーザ発振を行わせるためである。

一方、レーザ放電管は直径 3 cm 程度に太くしてあり、封入ガスの劣化を緩和するリザーバの役割を果たしている。

レーザミラーの反射率は発振波長の光に対して、出力側が公称 97% 程度, 全反射側が公称 100% とし、一般には一方からレーザ光を取り出している。

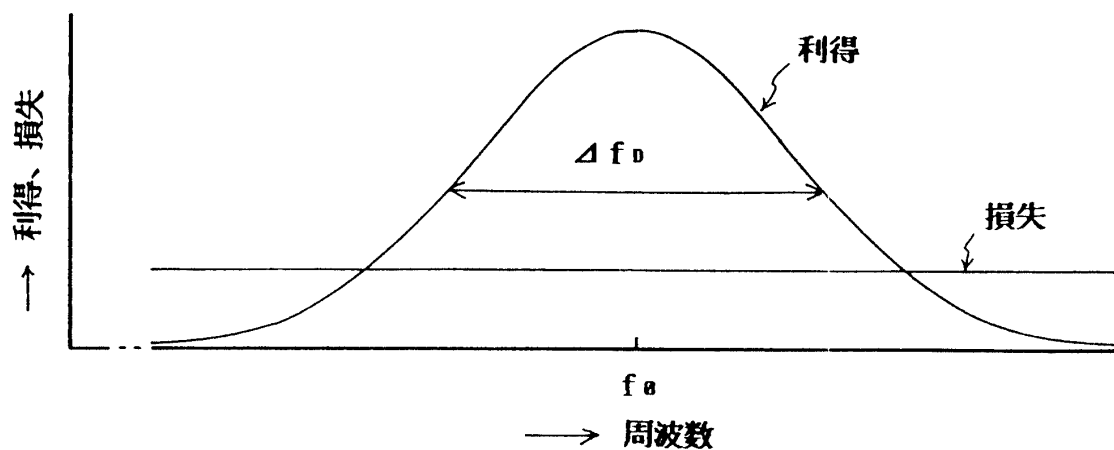
また、本レーザ装置はスイッチ 1 個の操作でレーザ発振をオン、オフできる。

### 2.2 レーザ出力の特性

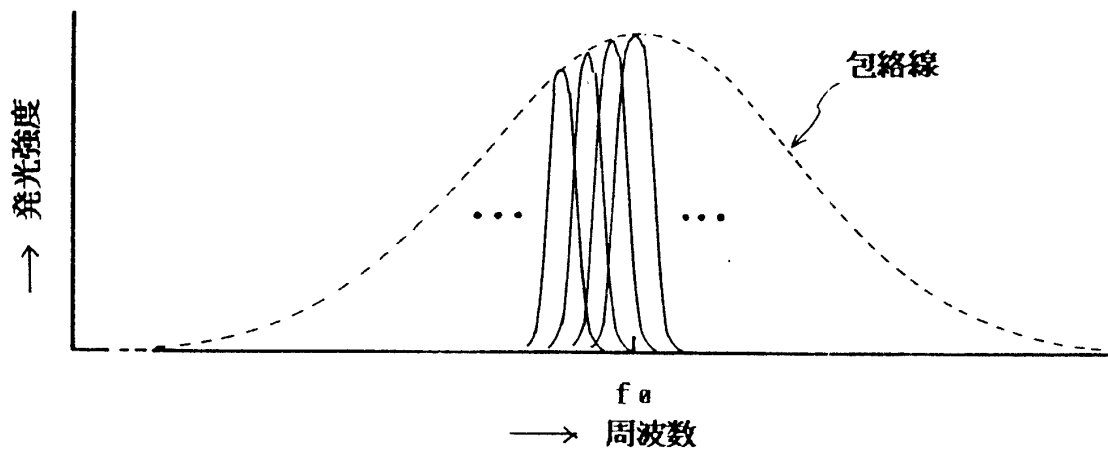
#### (1) 発振スペクトル

レーザ発振が定常的に持続しているとき、その発振光に対する利得と損失とは光共振器内部で

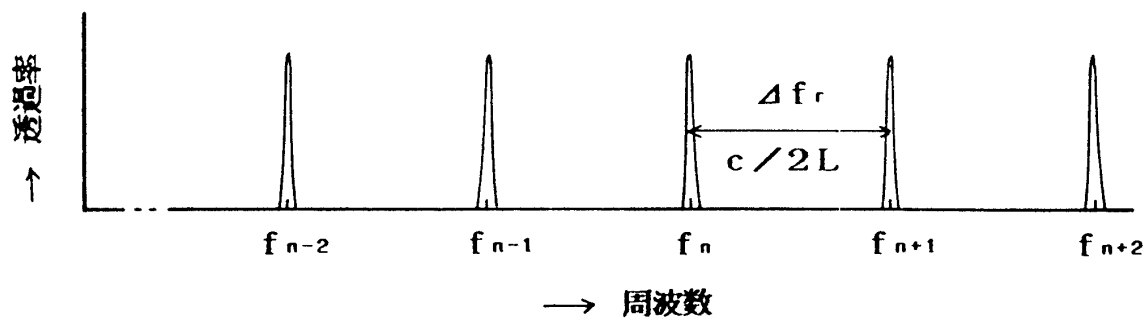
つり合った状態が維持されている。この定常的発振状態を He-Ne レーザ光 (632.8 nm) について、周波数軸上で考える。



(a) レーザ利得と損失



(b) レーザ遷移の発光



(c) 光共振器の共振周波数

図-2 He-Ne レーザの利得, 損失, 発光と光共振器の共振周波数

利得は、Ne 原子のエネルギー準位  $3s_2$  から  $2p_4$  への遷移によって定まる周波数  $f_0$  を中心周波数とし、ドプラ幅の拡がりをもつガウス形曲線で与えられる (図-2(a))。損失はレーザミラー面での透過 (レーザ出力を取り出すためミラーはある透過率をもつ)、吸収、反射等の損失及び回折損失など周波数に関係なく一定となる (図-2(a))。

図-2(a)の利得曲線の拡がり  $\Delta f_D$  はドプラ幅といわれ、その半値全幅は次式で与えられる。<sup>5)</sup>

$$\Delta f_D = 2f_0 \sqrt{\frac{2kT}{Mc^2} \ln 2} \quad (1)$$

ここで、 $M$  は Ne 原子の質量 ( $33.5 \times 10^{-27}$  kg)、 $c$  は光速 ( $3 \times 10^8$  m/s)、 $k$  はボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)、 $T$  は放電中のガス温度である。

通常のレーザ装置では、 $T \cong 400$  K とおけるから式(1)に従って  $\Delta f_D$  を求めると、 $\Delta f_D \cong 1500$  MHz となる。

ところで、利得曲線がドプラ幅の拡がりをもつのは次のようである。

各 Ne 原子は  $3s_2 \rightarrow 2p_4$  遷移によって 10 MHz 程度の拡がりをもつ自然放出光を放出し、また、ガス温度で定まるボルツマン速度分布則に従った速度で運動している。このとき、自然放出光を放電管軸方向で観測すると、ドプラ効果によって個々の自然放出光の中心周波数がずれ、これが集まったような拡がった発光分布として観測される。この様子は図-2(b)中の包絡線で示される。632.8 nm レーザ光に対する利得は  $3s_2, 2p_4$  間の反転分布によって生ずるため、利得曲線は図-2(b)の包絡線に比例した曲線となる。

一方、一対のレーザミラーで構成される光共振器ではミラー間隔  $L$  のとき、 $\Delta f_r = c/2L$  ( $c$ : 光速) ごとに共振周波数を有する。各共振曲線の幅は光共振器の  $Q$  によって定まり、数 MHz オーダーである。<sup>6)</sup> この様子を図-2(c)に示す。

以上のことから、定常的なレーザ発振は利得曲線が損失より大きい周波数範囲内で行われ、その周波数は光共振器の共振周波数のところで起る。各発振スペクトルの周波数幅は反転分布の量に関係し、Hz 以下のオーダーとなる。

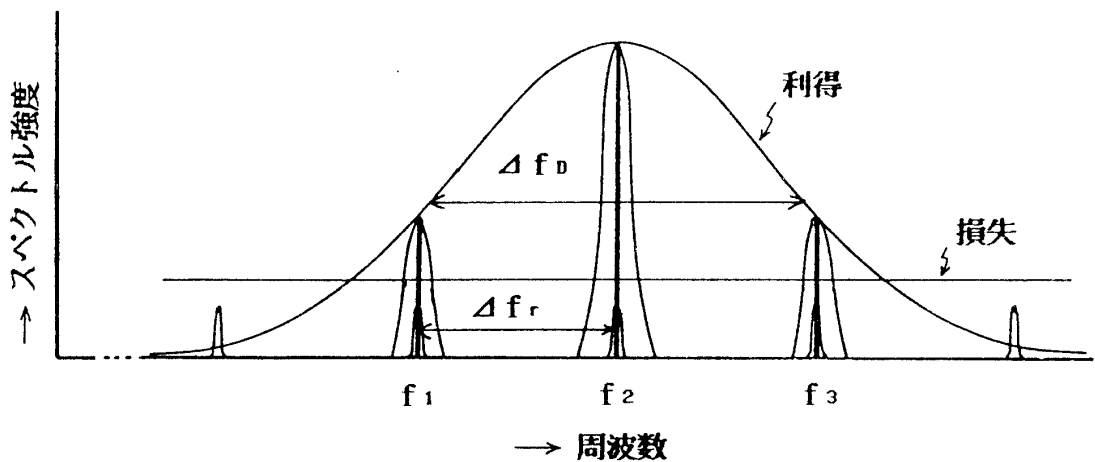


図-3 He-Ne レーザの発振スペクトル

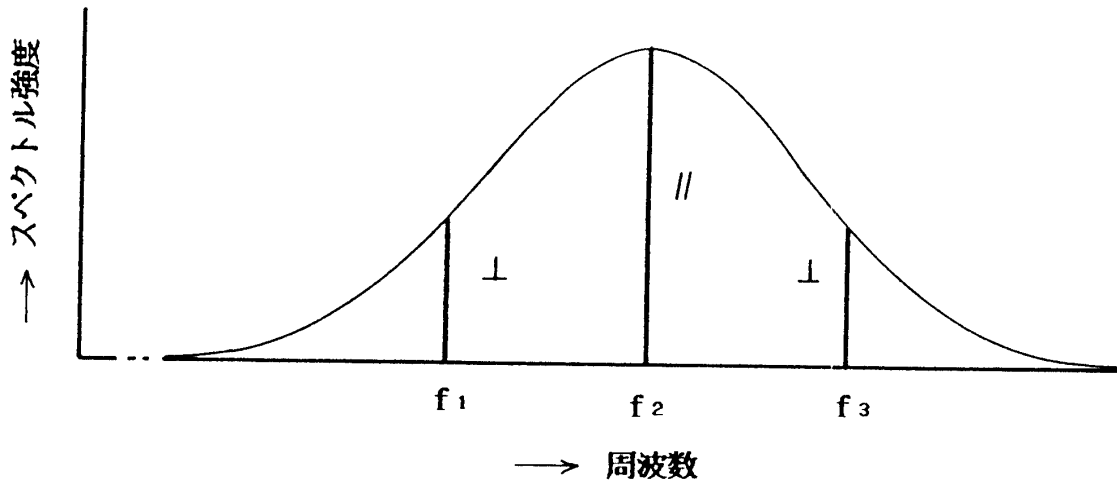
これらを図-3に示す。 $f_1, f_2, f_3$ のスペクトルが発振する。レーザミラー間隔 25 cm のレーザでは、 $\Delta f_r = c/2L = 600 \text{ MHz}$  であり、 $\Delta f_D \cong 1500 \text{ MHz}$  とするとドプラ幅内に入る発振スペクトル数は3本となる。このように実際の小型のレーザ装置では3~4個の周波数成分を含むレーザ光線が出力される。

(2) 偏 光

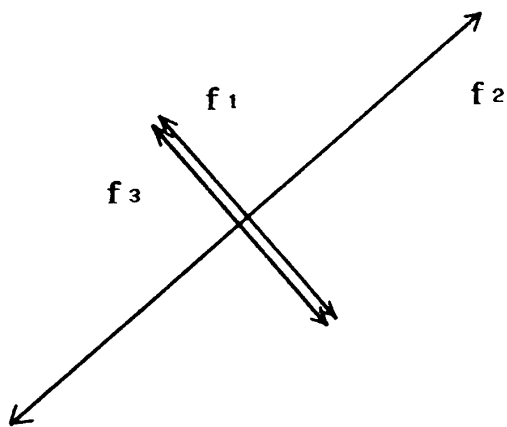
レーザ発振はレーザ遷移の準位間に反転分布の形成が必要であるが、反転分布は誘導放出によって生ずる。

誘導放出は入射した光と周波数、位相、偏光面を同一にして起る。内部共振器型レーザではブリュースタ窓のように偏光面を規制するものがないため、誘導放出の際の偏光面はミラー面上の何かの条件によって定まる任意方向をとり、これがレーザ出力の偏光面になると考えられている。

これは1つの周波数成分についていえるが、前述のように複数本の発振スペクトルがある場合は1つのスペクトルがある偏光方向をもつと次のスペクトルはこれと直交した偏光方向をもつと



(a) 発振スペクトル



(b) 発振スペクトルの偏光方向

いうように交互に偏光方向が直交している。<sup>7)</sup>

これを図-4に示す。

図-4のように、周波数  $f_1, f_2, f_3$  の3本のスペクトルをもつレーザ出力は、 $f_1, f_3$ の同一方向の直線偏光と、これに直交する  $f_2$ の直線偏光とが同時に出力される。<sup>8)</sup>

この偏光方向の関係はレーザ装置に独自の方向で保たれている。

図-4 He-Ne レーザ発振スペクトルと偏光方向

### 2.3 レーザ出力の変動

He-Neレーザの出力変動の要因としては、(i)光共振器長の変化、(ii)放電電流の変化、(iii)アライメントの変化がある。<sup>2)</sup>

内部共振器型レーザでは(i)が最も大きく影響すると考えられる。すなわち、レーザが動作開始とともに放電による温度上昇が起り、これによってレーザ放電管が伸びていくため共振器長も長くなる。この温度上昇が外部温度とバランスして落ち着いても何らかの温度変化があれば、共振器長はそれに伴って伸び縮みする。

いま、 $\Delta t$ なる温度上昇があるとき、共振器長が $L$ から $\Delta L$ だけ伸びるとすると、前述の共振周波数間隔 $\Delta f_r$ は $c/2(L+\Delta L)$ となる。

$\Delta L$ が発振波長(632.8nm)のオーダーとすると、

$$\Delta f_r = \frac{c}{2(L+\Delta L)} \cong \frac{c}{2L} \left(1 - \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (2)$$

となる。

上式から、共振器長が $\Delta L$ だけ伸びると、共振周波数間隔 $\Delta f_r$ は $\Delta L \cdot c/2L^2$ だけ狭くなることわかる。このとき周波数軸上でみると共振周波数の位置は周波数の高い方から低い方へずれていくので発振スペクトルも図-5のようにずれていく。

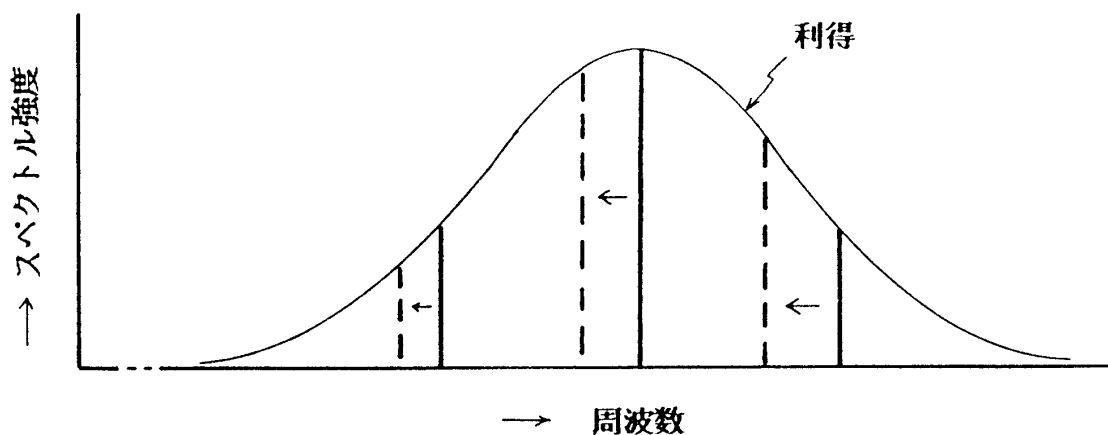


図-5 発振スペクトルのドリフト

ところで、He-Neレーザの1つのスペクトルのレーザ出力 $P$ は

$$P = \frac{T}{S} \left[ \left( \frac{G}{A+T} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

で与えられる。<sup>9)</sup>

ここで、 $T$ はレーザミラーの透過率、 $S$ は飽和パラメータ、 $G$ は不飽和利得、 $A$ は損失(ミラーの透過率を除いたもの)である。これから、レーザ出力 $P$ はおおよそ利得に比例した量と考えられる。

さらに、図-5の各スペクトルの大きさを合計すると、全出力に比例する量になると考えられ

る。

ところが、図-5のように  $\Delta L$  の変化によってスペクトルがドリフトすると、スペクトルの大きさを合計した量は変化する。すなわち、これはレーザ出力の変化となって現われる。

時間経過とともに温度上昇が続いていくと、スペクトルは図-5の右から左へ次々とずれていき、各スペクトルの大きさは利得曲線に従って変化するとともに発振スペクトル数も変化して、レーザ出力は変動する。

次に、図-5のスペクトルの1つの偏光面に合せて偏光板をおくと（例えば、図-5の中央のスペクトル）、他のスペクトルは偏光板でカットされ、レーザ出力は単一周波数成分だけとなる。この場合でも上述のように温度上昇によってスペクトルがドリフトすれば出力変動が生ずると同時に発振周波が2つになることも起り得る。

### 3. レーザ出力変動の測定

#### 3.1 測定方法

##### (1) 出力変動

レーザ出力の時間的変動を図-6で測定した。内部共振型 He-Ne レーザ装置として、(株)日本レーザー製、JLH-RT20U (2mW 級 632.8nm) 2台を用いた。

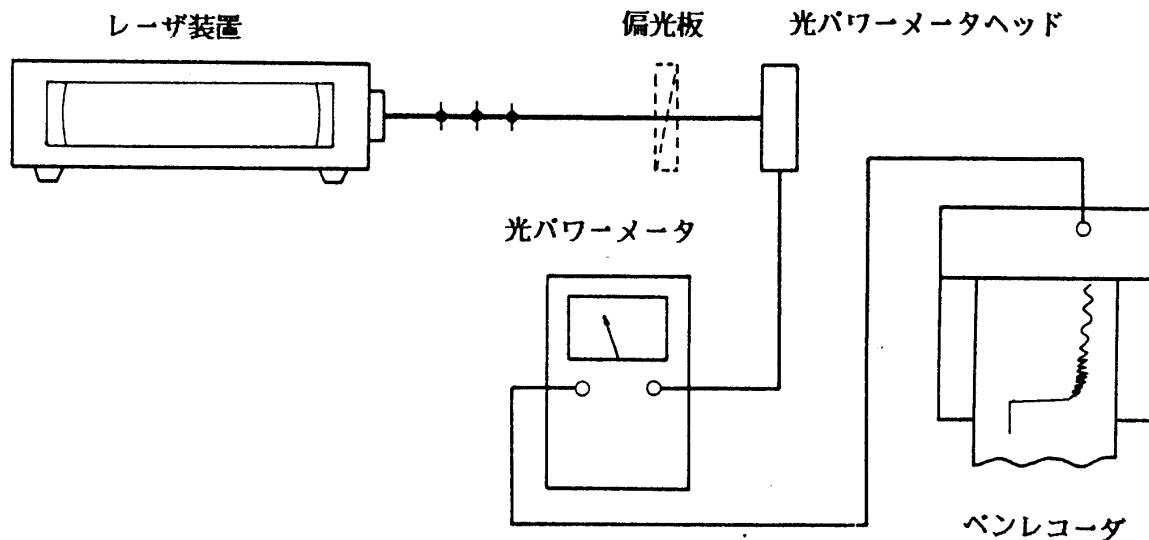


図-6 レーザ出力変動の測定系

図-6に示すように、レーザ出力を光パワーメータで受光し、光パワーメータの出力信号をペンレコーダへ入力してレーザ全出力の時間的変動を測定した。

また、レーザ出力に含まれる一方向の偏光成分の時間的変動を測定するには、レーザ出力を偏光面が測定しようとする偏光成分に一致するように配置した偏光板を通して後光パワーメータで受光し、上と同様に測定した。

##### (2) 発振スペクトル

発振スペクトルの時間的変化を観測するため図-7に示すように光スペクトルアナライザを使

用し、オシロスコープ上に表示されるスペクトルを写真撮影した。

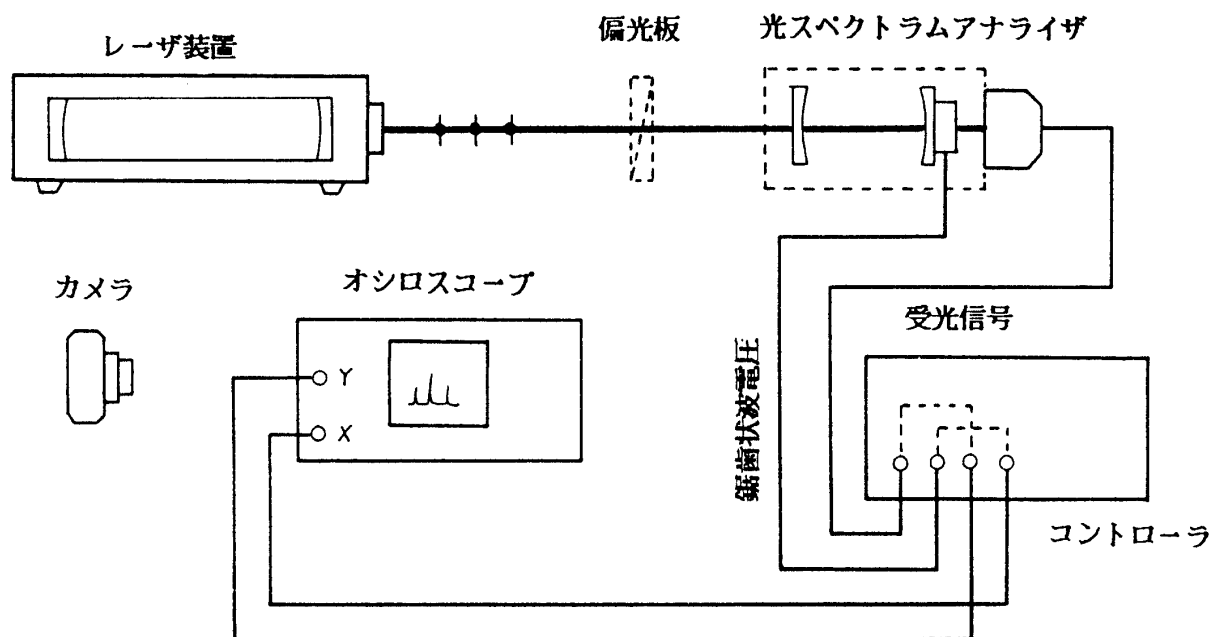


図-7 発振スペクトルの測定系

光スペクトルアナライザヘッドは2枚のミラーで構成される光共振器とその透過光を受光する受光素子（フォトダイオード）からなる。一方のミラーには圧電素子が装着されていて、これに鋸歯状波電圧を印加して共振器長を変化させる。

この光共振器は共振器長が短くしてあり、前述2. 2(1)項で見た共振周波数間隔はレーザ装置の発振スペクトル間隔よりもはるかに大きい。そこで、この共振器長を変化させ共振周波数が発振スペクトルに一致すると、この発振スペクトル成分の光は光共振器を通過し受光素子に達する。本測定に使用した光スペクトルアナライザは Tec Optics 社製、SA-2型で、上のような掃引周波数範囲は2GHzである。共振器圧電素子に印加する鋸歯状波電圧の一部をオシロスコープの水平軸へ入力し、アナライザヘッドの受光素子の出力信号を垂直軸へ入力すると、オシロスコープ上に発振スペクトルを表示できる。

また、前と同様にレーザ出力を偏光板を通して同様に測定すると、一偏光成分のスペクトルの変化を観測できる。

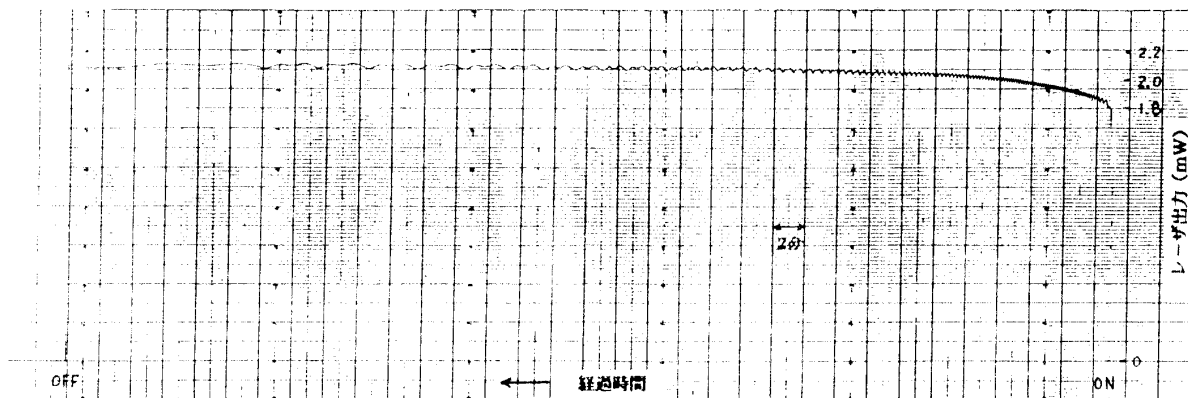
### 3. 2 測定結果

#### (1) 出力変動

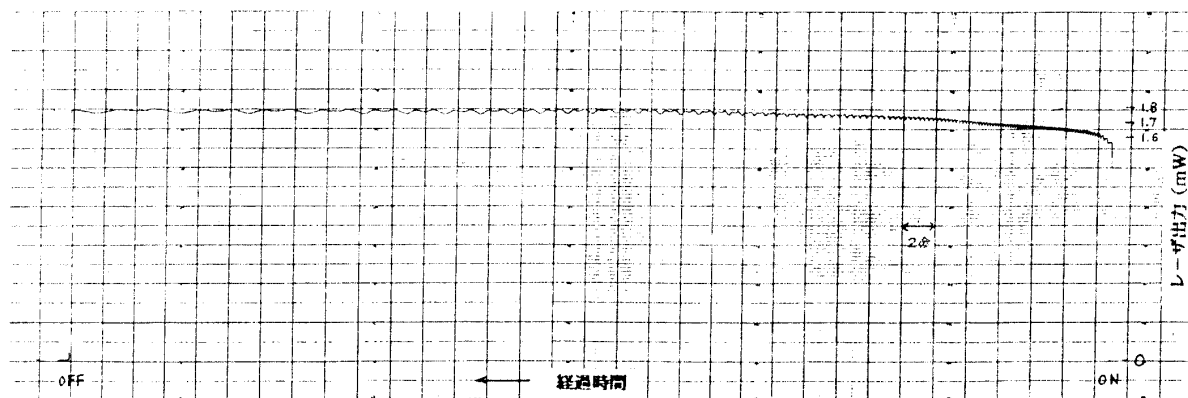
図-6の測定系による全出力の時間的変動の測定結果の一例を2台のレーザ装置について図-8(a), (b)に示す。同図(b)は1000時間程使用したレーザ装置の測定結果であり、出力は定常値に達しても2mWに至っていない。

図-8にみられるように、発振開始後10数分間は出力が全体的に増加し、その後徐々に一定になっていく。約30分以上経過したところでの出力変動率（平均値に対する変動分）は(a)では1.5





(a) レーザ装置 I



(b) レーザ装置 II

図-8 レーザ出力の時間的変動の一例

% 弱, (b)では約 1.5% である。

また、図-8 の変化の様子を細かくみると、規則的変動があり、その周期は発振開始直後 2 分位が最も短かく、時間経過とともに長くなっていくことがわかる。1 時間近くになると、レーザ装置によっても異なるが、数分の周期になる。このような時点では短時間の出力変動率が極めて小さくなることがある。

時間経過に対する変動周期の変化を図-9 に示す。

次に、偏光板光を挿入した場合のレーザ出力の時間的変化の測定結果の一例を図-10 に示す。この場合は出力変動分が大きく、約 45% であった。しかし、変動周期の変化の様子は全出力の場合と同様である。

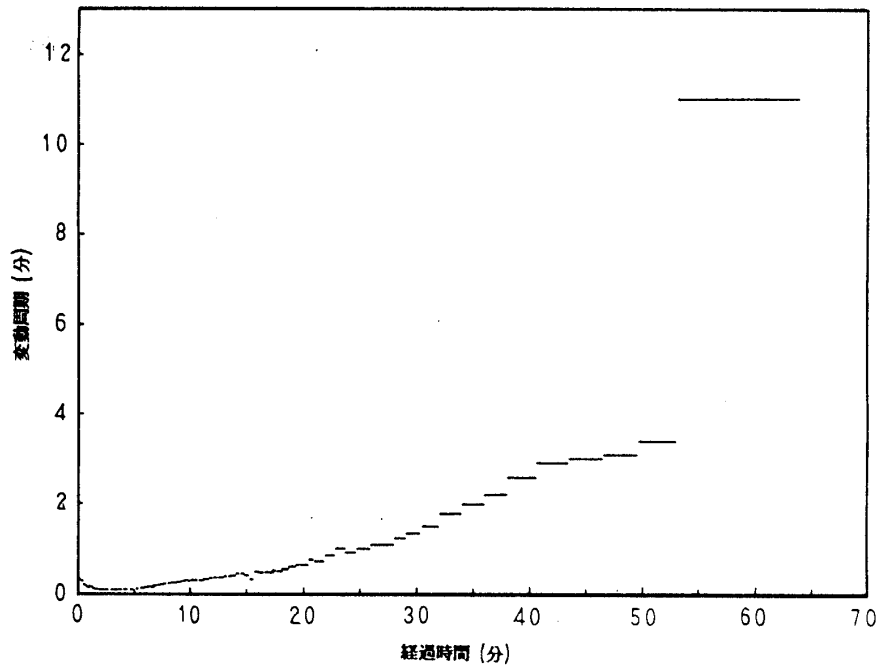
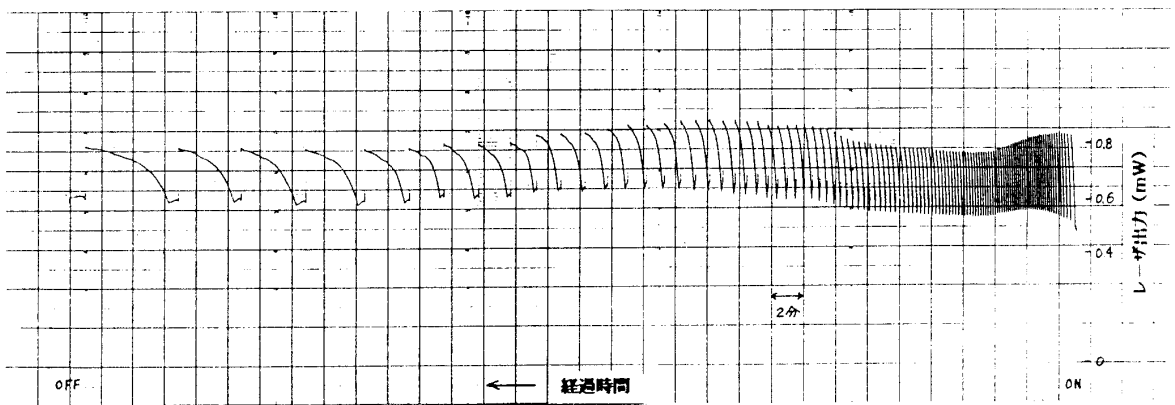
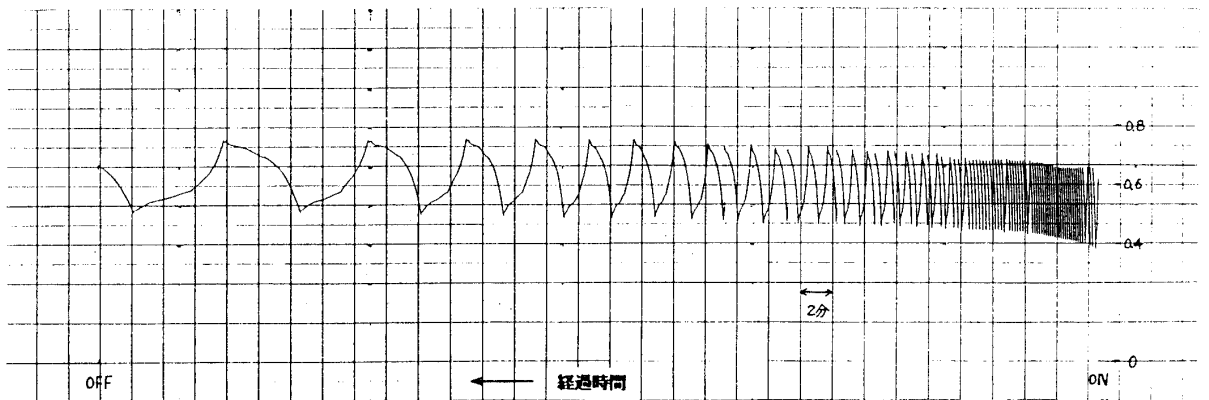


図-9 変動周期の変化



(a) レーザ装置 I



(b) レーザ装置 II

図-10 レーザ出力の時間的変動の一例 (偏光板挿入)

## (2) 発振スペクトル

全出力の発振スペクトルの時間的変化を図-11に示す。スペクトルは時間経過とともに周波数の高い方から低い方へ移動していくことがわかる。この移動が速く起るところで露光時間を長くして写真撮影すると、図-12のようになる。

図-12に示される範囲が発振スペクトルの移動範囲であり、これはレーザ発振の周波数範囲である。また、これは前述の利得曲線に相当するものであるが、ガウス形ではない。これは封入されている Ne ガスに同位元素が含まれているためといわれている。

本レーザ装置では発振スペクトル間隔が 640 MHz (カタログ値) であり、この値から発振周波数範囲は約 1500 MHz と考えられる。

次に、偏光板挿入時の発振スペクトルの時間的変化を図-13に示す。

変化の様子は全出力の場合(図-11)と同様であるが、スペクトルが利得曲線の中央部にある場合には単一周波数発振であることを示している。

## 3.3 考 察

本測定はレーザ出力変動の様子とその要因を考察するために行った。

測定結果から、内部共振器型 He-Ne レーザでは発振開始直後は出力が増加していき、10分以上経るとおおよそ定常値に達することがみられた。しかし、変動周期が長く、より安定な状態になるのは30分以上経てからである。このような変動を生ずるのは、内部共振器型レーザではレーザミラーがレーザ放電管に封着されているためであることが測定結果から見られる。放電による温度上昇によってレーザ放電管はわずかではあるが伸びていくと光共振器のミラー間隔が長くなり、共振周波数間隔がわずかに狭くなる。これは発振スペクトルが周波数軸上でドリフトすることにつながる。このとき、発振スペクトルは利得曲線に沿ってその大きさが変化しながらドリフトするので、レーザ出力が変化することになる。

この温度上昇は長時間かかって周囲の温度とバランスするまで続くと思われる。このため発振開始後、長時間経た時点では変動周期も長くなり、レーザ出力は安定する。また、この時点では発振スペクトルも静止した状態で観測される。

次に、レーザ出力光を偏光板を通して取出すと発振スペクトル数が減少することがわかる。これは発振スペクトル成分が交互に直交した偏光となっていることによるものである。本レーザ装置のようにミラー間隔が20数cmのものでは元来3本程度の発振スペクトルがあり、偏光板を通したレーザ光は単一周波数の光となることがある。しかし、この場合の出力変動は極めて大きくなる。これは、1つのスペクトルが利得曲線(本装置では図-12)に沿って移動するためである。また、この曲線は滑らかでないため、図-10に見られるように急激な変化をする。

## 4. ま と め

本論文では、内部共振器型 He-Ne レーザのレーザ出力変動を観測し、その要因について考察

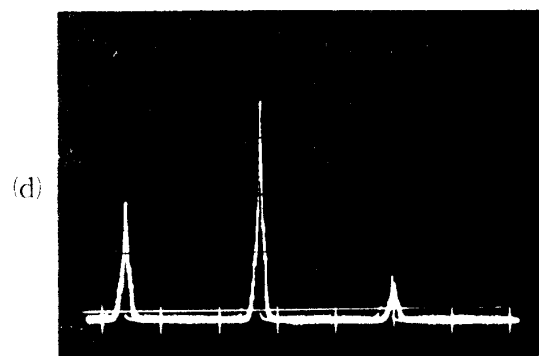
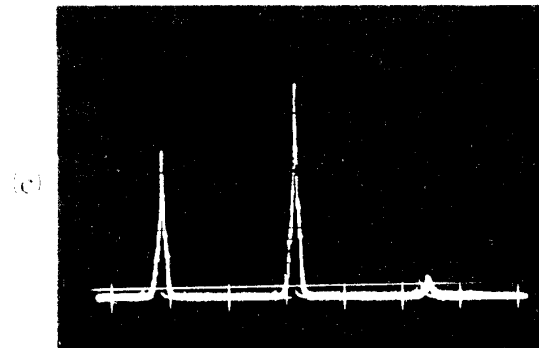
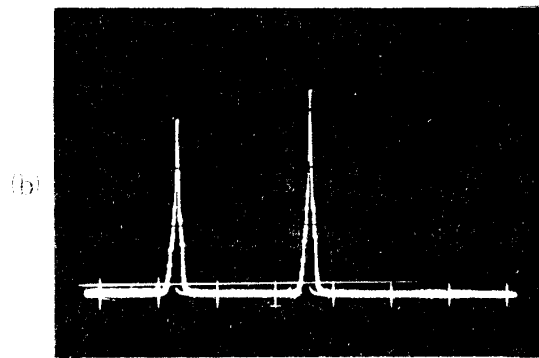
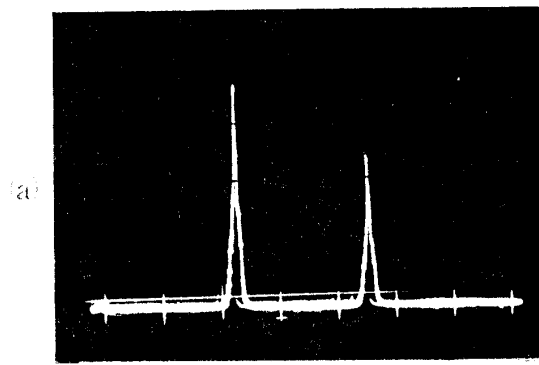


図-11 発振スペクトルの時間的变化

時間経過

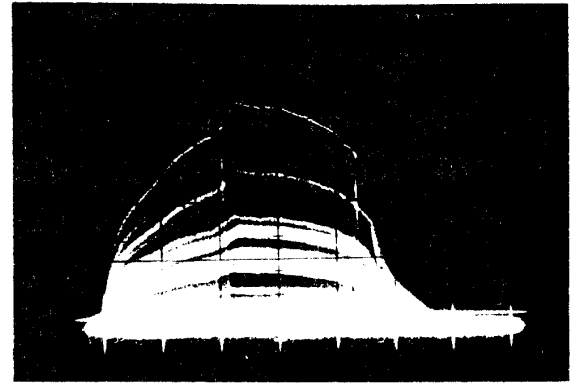


図-12 発振周波数範囲

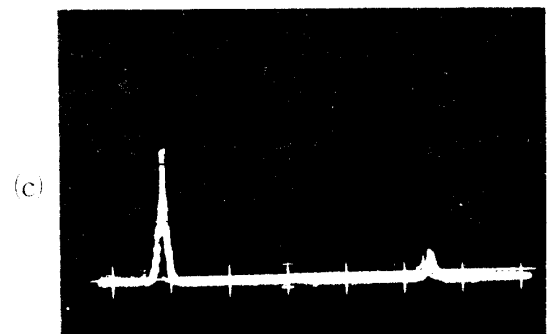
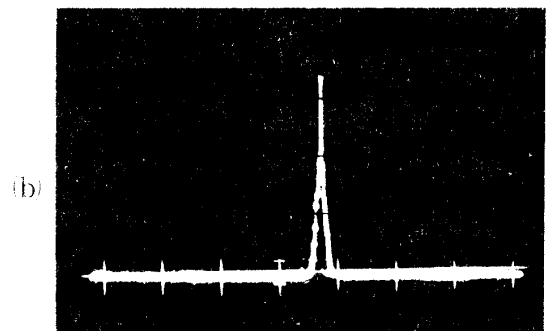
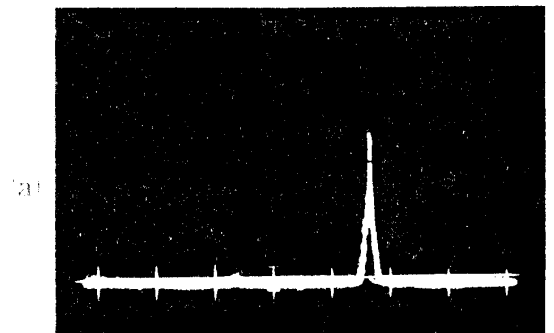


図-13 発振スペクトルの時間的变化  
(偏光板挿入)

時間経過



した。この結果、本レーザではレーザ放電管の温度変化が光共振器長の変化を生じさせ、これによって発振スペクトルの周波数が変化して出力変動となることがわかった。

内部共振器型レーザではレーザ放電管にレーザミラーが封着された構造をとるため、上述の出力変動は避けがたい。

もし、内部共振器型を外部共振器型にすると、レーザミラーの保持はレーザ放電管と独立して行えるが、温度変化による共振器長の変化とは別の原因で起る可能性があり、悪くするとアライメントの変化となって出力が大幅に変化することもある。また、同寸法の両タイプのレーザ出力はブリュースタ窓を有しない内部共振器型の方が大きい。

このようなことから内部共振器型 He-Ne レーザは広く使用されている。

ただ、本レーザを使用するに当たってはレーザ出力変動があることを考慮しておく必要がある。

また、本レーザでは偏光板や偏光ビームスプリッタ等の簡単な光学部品を用いると、単一周波数の光を得ることも可能である。

このような特性を利用して特別の方法で出力を安定化した高級な単一周波数レーザ装置も実際に市販されている。

以上の考察から、我々が手軽に使用している内部共振器型 He-Ne レーザは出力に 2% 以下の変動があり、発振光は単色ではあるが、詳細に見ると 1500 MHz 程度の周波数範囲内に複数のスペクトル成分が含まれていることがわかった。本レーザをより安定な状態で使用するには、発振開始後 30 分以上経たところで使用する方がよく、しかも外部から急激な温度変化を与えないことが望ましいといえる。

#### 参 考 文 献

- 1) 波々伯部, “内部共振器型 He-Ne レーザ (632.8 nm) の二, 三の特性”, 昭和 59 年度電気四学会北陸支部連合大会, C-19, 昭和 59 年 10 月。
- 2) 波々伯部, “内部共振器型 He-Ne レーザの出力変動”, 福井工業大学研究紀要, 第 15 号, p. 61, 昭和 60 年。
- 3) 波々伯部, 中道, 金井, “光センシング利用の「糸切れ検知装置」構成要素の特性”, 昭和 61 年度電気関係学会北陸支部連合大会, C-41, 昭和 61 年 10 月。
- 4) 望月, 姫野, 浜本共訳, “レーザの基礎と応用”, p. 125, 丸善, 昭和 61 年。
- 5) 桜庭著, “レーザ工学”, p. 14, 1984 年。
- 6) 島津著, “レーザーとその応用”, p. 53, 産報出版, 1984 年。
- 7) 4) に同じ, p. 46。
- 8) 波々伯部, 中道, “内部共振器型 He-Ne レーザの出力変動と偏光”, 昭和 62 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 発表予定, 昭和 62 年 10 月。
- 9) A. L. Bloom, “Gas Lasers”, p. 33, Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. 1978.