HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | Zeeman型波長安定化レーザの長期波長再現性の測定 |
| Author(s) | 覚間, 誠一; 田中, 敬一 |
| Citation | 北海道大學工學部研究報告, 146, 97-104 |
| Issue Date | 1989-05-31 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/42181 |
| Type | bulletin (article) |
| File Information | 146_97-104.pdf |

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第146号（平成元年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 146 (1989)

# Zeeman 型波長安定化レーザの長期波長再現性の測定

覚間　誠一　田中　敬一*

（昭和63年12月20日受理）

# Long Time Frequency Reproducibility Measurement of Zeeman Stabilized Laser

Sei-ichi KAKUMA, Keiichi TANAKA

(Received December 20, 1988)

**Abstract**

Frequency stability and reproducibility of commercially available stabilized He-Ne lasers are measured in comparison with an iodine stabilized He-Ne laser using the beat frequency counting method. Measurements were carried out on two samples of Zeeman stabilized He-Ne laser and was repeated for three months for one sample and for three weeks for the other. The obtained values of their wavelength reproducibility were $6.3 \times 10^{-8}$ and $1.1 \times 10^{-8}$, respectively.

## 1. はじめに

近年，半導体レーザを用いた光応用計測が注目されつつあるが，半導体レーザの特徴として波長が広帯域に可変である反面，光共振器のフィネスが低いために発光スペクトル幅が他のレーザに比べて広いという欠点を持っている。そのため特に高精度精密測長の分野における実用光源としては，発振波長に各種の方式の安定化制御を施した単色性の優れている波長安定化 He-Ne レーザが多用されている。

最近になってよう素安定化 He-Ne レーザが小型化，可搬化され[1]，高精度の実用干渉光源として一般ユーザ向けに製品化されるようになってきたが，価格の面で一般的とはなっていない。現在市販，使用されているのは価格及び安定化制御機構の簡易さなどの点から，ラムくぼみ式[2]，ゼーマン分離式[3]，2モード式[4]などのいわゆる簡易波長安定化レーザである。これらの簡易安定化レーザは通常の測定環境において必要かつ十分な測定精度が得られるような波長安定度を目標として設計されている。しかしそれらのレーザではその安定化基準は，よう素安定化レーザにおけるよう素分子吸収線のような温度，気圧などの外界の環境変化に対して安定なものではなく，種々の条件により変化する利得曲線の形状に依存している。そのため長時間の波長安定度，あるいは長期間にわたる波長の再現性，繰り返し性が時間経過に連れて変動することが予想される。従っ

応用物理学科　応用計測学講座
＊　現在　東京電機大学理工学部勤務

て発振波長の長期的変動の振る舞いを調べることはこれら簡易波長安定化レーザを実用計測に使用するにあたりきわめて重要である。これらの特性を知る手法としては，一般的には制御系の制御誤差信号から逆算して間接的に求めることが行われるが，最終的な性能評価及び波長絶対値の測定は外部の極めて安定な波長基準との直接比較(絶対測定)により行う必要がある。現在 633 nm の波長領域においてはこのような波長基準用の光源（すなわち高精度長さ標準）として前述のよう素安定化 He-Ne レーザを使用することが国際的に取り決められている。著者らは市販の簡易波長安定化レーザ（ゼーマン分離式波長安定化レーザ）とよう素安定化レーザとの光ビート信号の長時間連続測定を行い，かつそれを長期間繰り返して行うことにより，その波長安定度，再現性を調べて来た。本論ではその測定方法，測定結果について報告する。

## 2．よう素安定化 He-Ne レーザと被検市販安定化レーザ

Fig. 1 に基準に使用するよう素安定化レーザの構成を示す。外部鏡型レーザ共振器の中にレーザ管およびよう素 ($^{127}I_2$) ガスをつめたセル(よう素セル)を設置する。共振器長は 34 cm，縦モード間隔は約 440 MHz である。一方の反射鏡には電歪素子 (PZT) が取り付けられており，印加電圧信号により発振周波数走査及び変調を行う。よう素セルは温度 11℃ で封じ切りを行って製作したものを使用した。

このレーザはよう素分子の飽和吸収の結果発生する安定な反転ラムくぼみの中心に波長を安定化するものである[5]。よう素の場合このくぼみは位相敏感検出を用いて出力の 3 次微分をとることにより Fig. 2 のように明瞭に観測される。これらの内の一つを周波数弁別に利用し吸収線中心に周波数をロックする。発振光の波長は PZT により周波数 1 KHz で周波数変調されているため，ラムくぼみでは吸収率の変化によりわずかな強度変化が見られる。この光をフォトダイオードで受光してのちロックインアンプで 3 KHz で同期検出を行い，出力の 3 次微分信号を取り出す。He-Ne レーザの出力曲線中には Fig. 3 のように 11 本の超微細構造 a，b，c，… l，m，n (11-5 バンド R (127) 線）が存在しており，各成分の周波数絶対値はすでに精密測定がなされている。i 成分は 47361222 14.8 MHz に位置する。本実験においては積分制御により PZT を伸縮して共振器長を制御しており，$\pm 5.0\times10^{-11}$ の波長安定度及び再現性が得ることができる。

本研究においては㈱和泉電気製 MOC-Q 型（レーザ A と表記する）及び MOC-D 型（レーザ B）

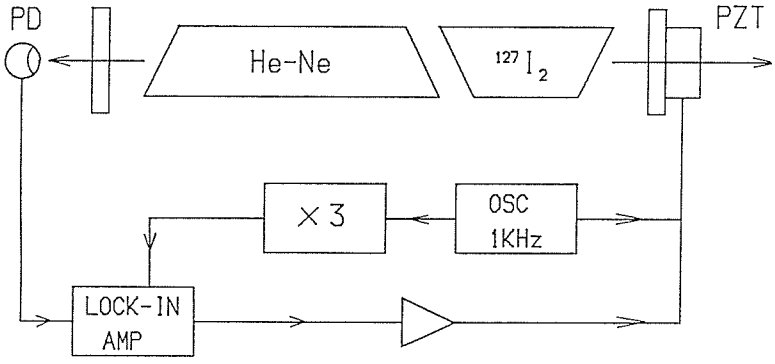


**Fig. 1** Schematic diagram of iodine stabilized 633nm He-Ne laser. An iodine absorption cell is set in the laser cavity, and length of which is controlled based on the light absorption by the cell.

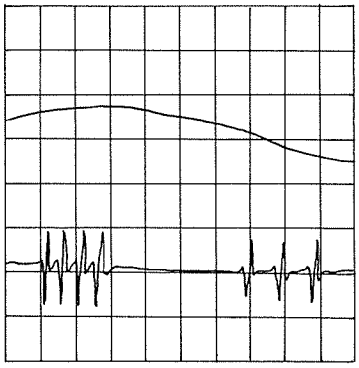

**Fig. 2** Examples of the He-Ne laser gain curve (above) and its detected third derivative (below). The S-shaped changes in the derivative correspond to the hyperfine components of the iodine absorption spectrum.

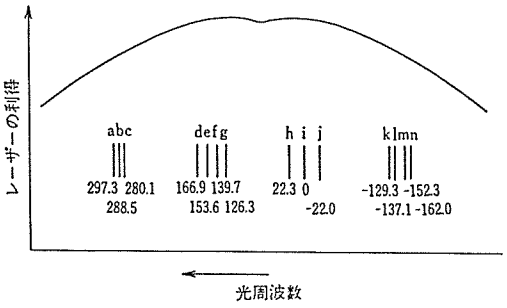


**Fig. 3** Position and frequency separation of the hyperfine components of iodine absorption spectrum in the He-Ne laser gain curve.

の2台のゼーマン分離型安定化レーザについて測定を行った。前者は共振器長の制御をレーザ管に巻き付けた電熱ヒーターにより，後者は電熱ヒーターと弱風の送風器の併用により行なっており，両者ともに通電開始後約15～30分から安定化制御動作が開始される。

## 3．光ビート信号の測定システムと実験

Fig. 4に光学系を示す。サスペンションつきの定盤上に平行に並べられた波長(周波数)基準よう素安定化He-Neレーザと簡易波長安定化He-Neレーザからの出射光は，おのおの平行光にコリメートされたのち全反射鏡，半透明鏡を介して光混合され，アバランシェフォトダイオード(APD) 受光面上でその差周波数に相当する光ビートを発生する。

なお，被検レーザは横磁場型のゼーマンレーザであるため，1本の単一縦モードがわずかに周波数の異なる2つの直交直線偏光成分からなっており，その一方を除去する目的で偏光板（P）

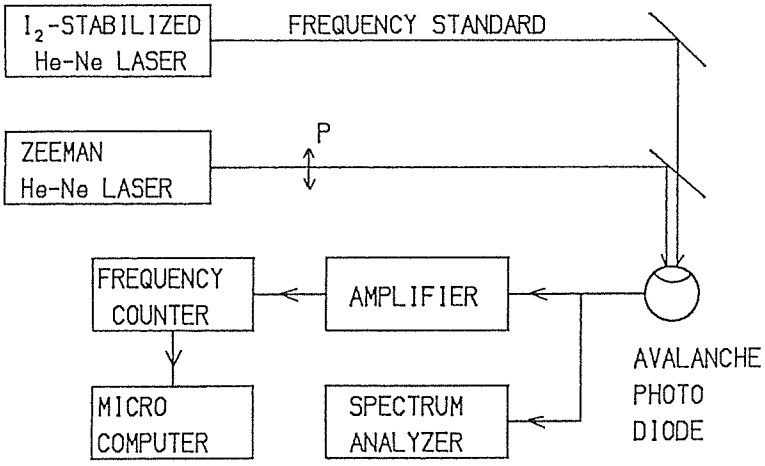


**Fig. 4** Experimental setup for the wavelength calibration of Zeeman stabilized He-Ne lasers using the iodine stabilized He-Ne laser.

を挿入している。また，ゼーマンビート周波数を同時に測定するときには，半透明鏡で被検レーザ出力の一部を取り出し，両偏波方向に45°に設定された偏光板を通して現れるゼーマンビートを，PINフォトダイオードで光電変換し計数する。

APDにより光電変換されたビート信号はスペクトラム・アナライザーにより観察されると同時に，帯域幅170 MHz，利得60 dBの高周波増幅器で増幅されたのち周波数カウンターに送られ計数される。周波数カウンターはマイクロコンピュータ（NEC，PC-9801）に制御されており，計数値は逐次メモリに取り込まれる。データは最大15000個まで収録可能である。

## 4．測定結果と検討

レーザAの測定ではよう素安定化レーザをｉ成分に，レーザBではｊ成分にロックしてビートの連続測定を行った。周波数カウンタのゲート時間は1 ms，10 ms，0.1 s，1 sに設定可能であるが，ゲート時間が短ければ最大測定継続時間は短くなる。またコンピュータと周波数カウンタとの通信には一定時間が必要なため，1 ms，10 msではゲート時間に対する観測死時間の比率が大きくなる。以上を考慮してゲート時間1 sで測定を行った。測定は室温が比較的安定し，かつ地面の微震動が最も少なくなる深夜に行った。但し，測定室には空調設備がないため室温は完全には安定していない。IC温度センサによる室温測定によれば，測定時間帯内の最大温度変化幅は無人状態で約2℃であるが，有人では幅約0.5℃の細かな温度ゆらぎが発生することが明らかとなった。

周波数安定度は，少なくとも12時間以上予熱を与えたときの周波数ゆらぎ幅から求めた。

### 4．1　発振開始直後の周波数変動

Fig. 5（a）は，ｉ線にロックしたよう素安定化レーザとMOC-Q型（レーザA）とのビート信号を，レーザA安定化制御開始とほぼ同時に記録を開始したものである。Fig. 5（b）はこの結果から立ち上がり部分及び極端に離れた数値を除いたヒストグラムである。

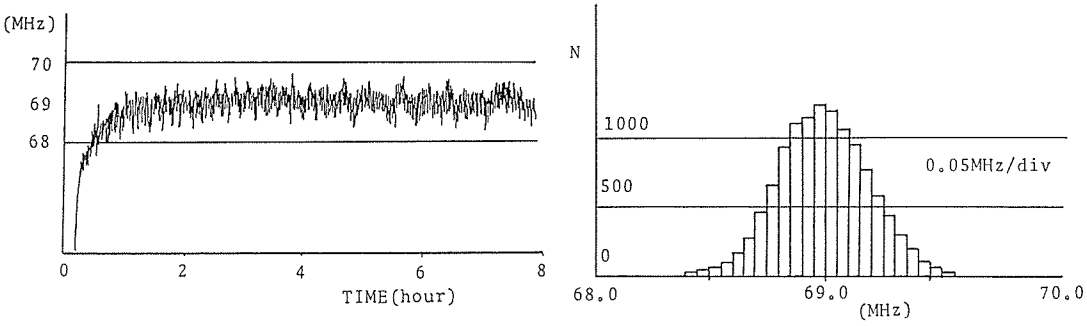


**Fig. 5**　Examples of observed beat frequency fluctuations between laser A and the iodine stabilized laser (a), and its histgram (b).　The iodine laser was locked at i-component.

基準レーザを別の成分にロックすることにより，レーザAの発振周波数はよう素ｉ成分より高いことが判明した。ビート周波数の平均値は69.1 MHz，標準偏差$\sigma$は0.18 MHzである。周期10～15 minで幅1 MHz程度の周波数ドリフトが見られ，その周期が徐々に延びていることがわかる。このときのレーザAの周波数を較正すると

$$f_A = f_i + 69.1 \pm 0.5\ \mathrm{MHz} = 473612283.9 \pm 0.5\ \mathrm{MHz}$$

となる。光速度C＝299792458 m/sより波長に換算すると

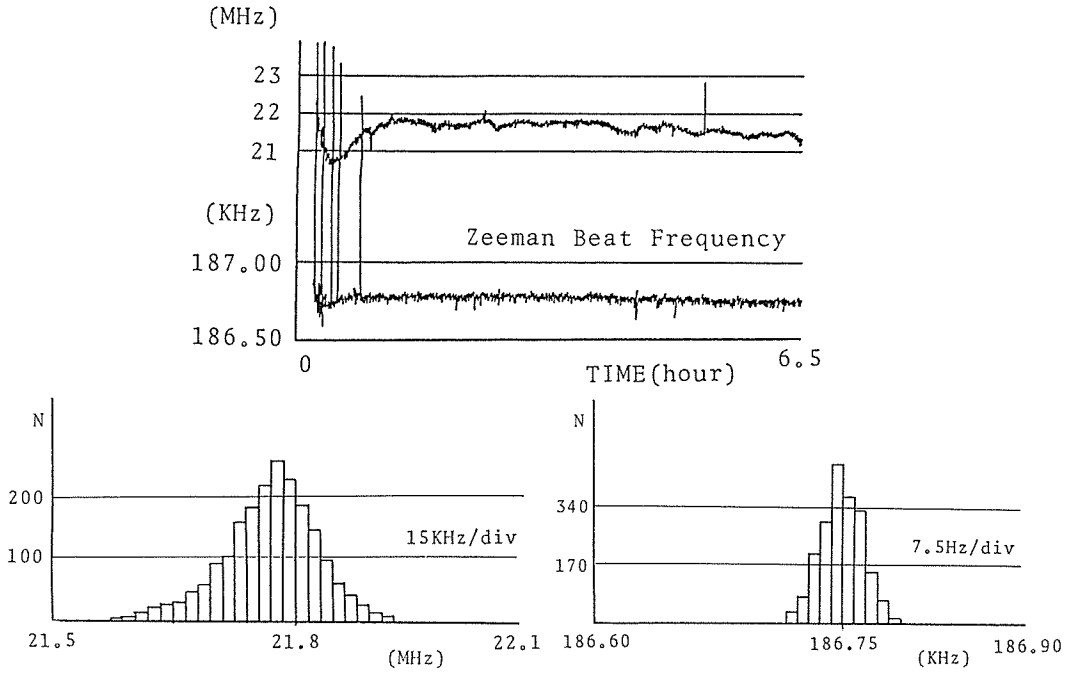


**Fig. 6** Examples of simultaneously observed beat frequency fluctuations between the iodine stabilized laser and laser B (above) and Zeeman beat of laser B (below) (a), histgram of the beat frequency (b), and histgram of Zeeman beat frequency (c). The iodine laser was locked at j-component.

$\lambda_A = 632991295.4 \pm 0.7$ fm　である。

Fig. 6（a）は周波数カウンターを2台用意してレーザB（MOC-D）と基準レーザとのビート（上）及びゼーマンビート（下）を同時に記録したものである。基準レーザはj線にロックした。データ点数はそれぞれ7800個である。開始2時間後以降の平均値はそれぞれ21.7 MHz, 186.79 kHz, 標準偏差 $\sigma$ は0.09 MHz, 0.04 kHzであった。Fig. 6（b），Fig. 6（c）は測定開始後2.5～4時間におけるそれぞれのヒストグラムで1区間の周波数幅はそれぞれ15 kHz, 7.5 Hzである。周波数ゆらぎの幅はレーザAに比べ明らかに小さくなっている。ただしこの周波数ゆらぎ幅の差が共振器長制御方法の違い（レーザAではヒーターのみ，レーザBではヒーターと風冷ファンの併用）によるものか否かは断定できない。

### 4．2　熱平衡状態における周波数変動および周波数安定度

Fig. 7（a）は放電開始後24時間を経過し，熱平衡状態に達したと思われるレーザAのビート

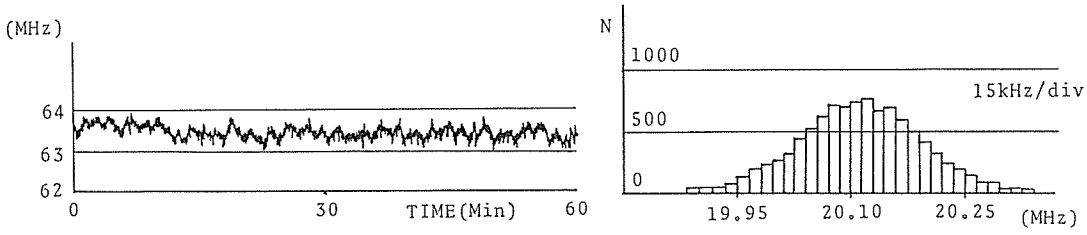


**Fig. 7** Examples of the beat frequency fluctuations of laser A in thermal equilibrium after 24 hours discharge (a), and its histgram (b).

信号の記録，Fig. 7（b）はそのヒストグラムである。ゲート時間は1 sで，3500個のデータを記録した。ビート周波数の平均値は63.5 MHz，標準偏差$\sigma$は0.17 MHzである。

Fig. 8は放電開始17時間経過後のレーザBと基準レーザとのビート信号のヒストグラムである。平均値はそれぞれ20.1 MHz，186.97 kHz，標準偏差$\sigma$は0.08 MHz，0.03 kHzである。$\pm 3\sigma$で周波数ゆらぎ幅を定義することにすると，2台のレーザの周波数安定度はそれぞれ

レーザA：$\pm 1.7\times 10^{-9}$

レーザB：$\pm 6.3\times 10^{-10}$

となる。

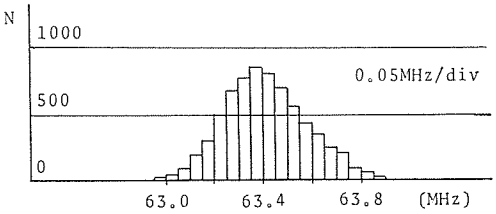


**Fig. 8** Histgram of the beat frequency of laser B after 17 hours discharge.

### 4．3 長期周波数再現性

前節と同様の測定をレーザAについては約3カ月，レーザBは3週間，測定を繰り返した。Fig. 9にレーザAのビート周波数平均値の変化を示す。3カ月の間に明らかにビート周波数が約30 MHz直線的に下降しており，その割合は約$-10$ MHz/monthである。すなわちこのレーザの発振周波数は1カ月に10 MHzずつ減少していることになる。

したがってこの間の周波数再現性は

$$30(\mathrm{MHz})/473(\mathrm{THz})=6.3\times 10^{-8}$$

となる。

しかしながら発振周波数は，Fig. 9のようにこのまま下降を続けることも予想されるが，あるいは上昇に転ずる可能性もあるため，本レーザの最終的な周波数再現性を知るためにはさらに約半年程度の継続測定が必要と考えられる。なお，この連続測定は外気温が下がり始める9月から12月にかけて行われたが，外気温が上昇する時期にも測定を行うことによってレーザ発振周波数の

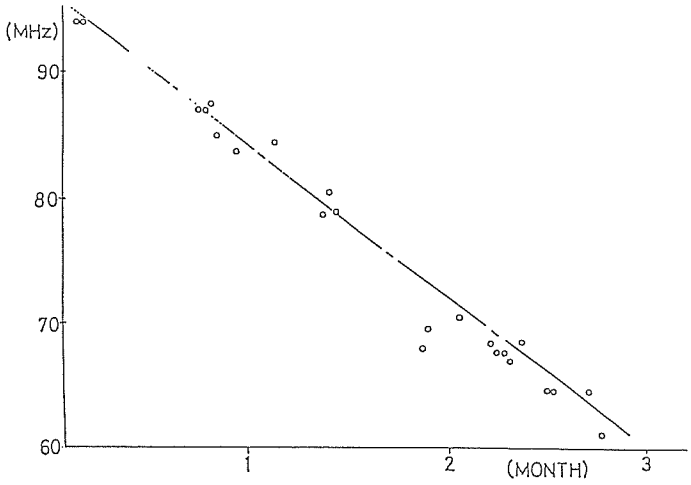


**Fig. 9** Observed drift for three months of the beat frequency between the laser A and the iodine stabilized laser at i-component. It was found that the frequency of laser A monotonically decreased at a rate of $-10$ MHz/month and that the maximum frequency deviation was 30 MHz corresponding to $6.3\times 10^{-8}$.

気温への依存性の有無が明らかとなると思われる。レーザAの測定では基準レーザとのビート周波数のみを観測したが，レーザBでは発振周波数と室温，及びゼーマンビート周波数も併せて測定し，これらに対する依存性を調べた。Fig. 10（a）にレーザBとよう素安定化レーザのビート周波数および測定時の室温を，Fig. 10（b）に同時に記録したレーザBのゼーマンビート周波数を示す。本レーザについては3週間，16回測定を繰り返した。この間よう素安定化レーザはj線にロックされている。

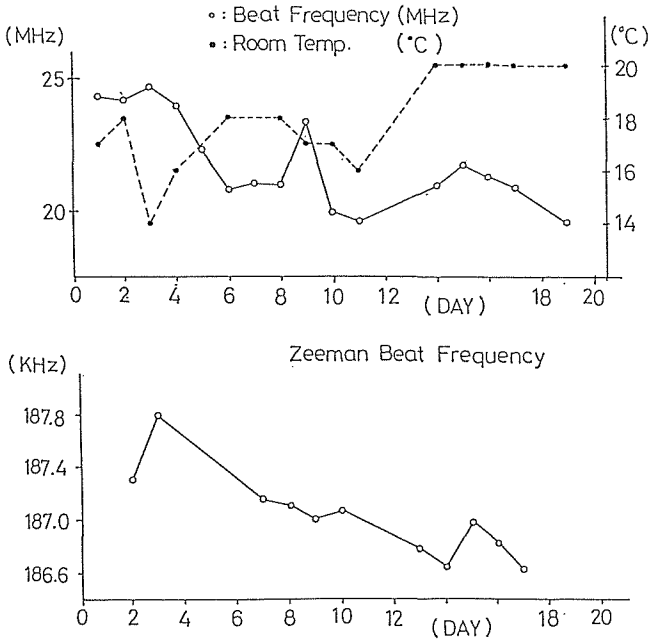


**Fig. 10** Observed drift for three weeks of the beat frequency (○) between the laser B and the iodine stabilized laser at j-component, and room temperture change (●) (a), and Zeeman beat frequency of laser B (b). The maximum frequency deviation was 5 MHz corresponding to $1.1\times10^{-8}$.

その結果，3週間の周波数変動幅は約5 MHz，測定室の平均室温の変動は6 ℃であり，ゼーマンビート周波数の変動は1.2 kHzであった。これらを比較すると，レーザBの発振周波数とゼーマンビート周波数の変化には相関関係があると思われるが，室温との相関の有無は判定できない。

結果としてレーザBの3週間における周波数再現性は

$$5\ \mathrm{MHz}/473\ \mathrm{THz}=1.1\times10^{-8}$$

となる。

上述のように，これら2台のレーザーは時間経過と共に発振周波数変動を示したが，その原因としては以下のものが考えられる。

(1) 通電時間の長期化によるレーザ間の発振出力特性の変化

(2) 制御系構成部品の特性の経時変化

(3) 横磁場を引加する永久磁石の磁束密度変化

本研究で扱ったこれらのレーザに対する評価としては，十分な予熱を与えて熱平衡状態にしておけば実用上十分な短時間周波数（波長）安定度を示す。しかし長さ測定においては測定時間内

における安定性もさることながら繰り返し測定に用いたときの波長再現性が重要であることを考えると，この点において特にレーザAには再検討すべき点があるといえる。

## 5．ま　と　め

よう素安定化 He-Ne レーザとのビートをとることにより２台の市販ゼーマン分離型簡易波長安定化レーザについて周波数安定度の測定をおこない，それぞれ$\pm 1.7\times 10^{-9}$, $\pm 6.3\times 10^{-10}$を得た。他方，長期再現性については，レーザAは３カ月間で$6.3\times 10^{-8}$，レーザBは３週間で，$1.1\times 10^{-8}$となった。

短時間周波数安定度については両レーザともに$10^{-9}$～$10^{-10}$に達しており，通常の精密測定では$1\times 10^{-7}$で十分に高精度であることを考えれば使用に耐えると考えられる。反面，周波数再現性が現時点では未知数であることより，例えば同一の測定対象物の変位を長期にわたって測定するような場合には，その測定精度については保証されないといえる。以上見られたようなレーザ発振周波数が経時変化を示す原因としては，サーボシステムの内部素子の温度特性，あるいは連続通電による特性変化などが考えられ，外囲環境の気温などを変えながらさらに長期の観測を行うことが必要である。

## 参考文献

1）岩崎茂雄：光学，**17**，(1988)，p. 407
2）K. Shimoda and A. Javan : J. Appl. Phys., **36**, March, (1965), p. 718
3）梅田，高崎，築地：応用物理，**47**，(1978)，p. 1053
4）梅田，高崎，築地：応用物理，**47**，(1978)，p. 42
5）G. R. Hanes and C. E. Dahlstrom : Appl. Phys. Letters, **14**, (1969), p. 362