HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	マイクロコンピュータ制御による633nm沃素安定化レーザーの予備実験
Author(s)	田中, 敬一; Tanaka, Keiichi; 河端, 章一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 125, 37-46
Issue Date	1985-03-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41909
Type	departmental bulletin paper
File Information	125_37-46.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第125号（昭和60年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 125 (1985)

マイクロコンピュータ制御による633nm沃素安定化レーザーの予備実験

田中敬一　河端章一*

（昭和59年11月30日受理）

Preliminary Experiment for Microcomputer Control of a 633 nm He-Ne Laser with an Iodine Absorption Cell

Keiichi TANAKA and Shoichi KAWABATA

(Received November 30, 1984)

Abstract

A new Servocontrol system employing a microcomputer was studied for stabilizing 633 nm helium-neon laser with an iodine absorption cell in the laser resonator. The third derivative of saturated absorption signal appeared by hyperfine structure of iodine 127 absorption line is detected by a phase sensitive detection technique and the laser is locked at a component of the hyperfine structure. The control system shows the ability to find one of the commanded components and automatically locks the frequency on it. The frequency stability of 5×10^{-10} was obtained in a preliminary experiment.

1. はじめに

1960年の秋，セーブル（仏）で開催された国際度量衡総会において，長さの単位メートルがクリプトン同位元素86の橙色輝線スペクトルの真空波長（605nm）で定義されることになり[1]，このスペクトル線が長さの1次標準として採択され，それまでのメートル原器は廃止された。同じ年の暮に初めてHe-Neレーザーの連続発振の成功が報じられ[2]，レーザー光の優れた単色性と指向性が確認されて，レーザーを次世代の高精度長さ標準として用いようという着想が生れ，レーザーの波長安定化研究の発端となった。

光の発振器であるレーザーは，光の増幅器と共振器より構成されている。ガスレーザーの場合，共振器は2枚の高反射率反射鏡を対向させたファブリ・ペロ干渉計であり，その中に増幅器としての活性ガス放電管がおかれる。レーザーの発振波長は共振器の共振波長により1次的に規制されるので，室温の変化や空気の屈折率の変動など，共振器の実効光路長に影響するすべての要因がレーザーの波長変動の原因になる。当時の1次標準に比べて実験的にも1万倍以上の単色性を示したHe-Neレーザーに，1次標準より優れた波長の安定度と再現性をもたせる目的で提案されたのが，分子吸収線を安定化基準とした自動制御系をもつ波長安定化レーザーである。現在分子吸収線安定化レーザーの代表的なものは霜田の提案[3]によるメタン分子（CH_4）を用いた3.39

応用物理学科　応用計測学講座
＊現在　松下電器産業株式会社

μmHe-Ne レーザーおよび Hanes[4]の提案による沃素同位元素分子（$^{127}I_2$）を用いた633nmHe-Ne レーザーがある。両レーザーは既に1983年の国際度量衡総会で採択された"メートルの定義の改訂"[注)]にともない，クリプトンに代る高精度長さ標準として指定されている[5)~9)]。

本報告は長さ標準としての沃素安定化レーザーの自動制御機能を向上し，精密測長用干渉計の光源としての操作性を改善するために制御系にマイクロコンピュータを導入し，沃素分子の複数の吸収線微細構造成分のうちの任意の一つを自動選択して安定化動作に入らせるシステムを開発するための予備実験に関するものである。

2. 分子吸収線を用いた He-Ne レーザーの安定化

2.1 沃素安定化レーザー

633nmHe-Ne レーザーの共振器長を連続変化させて周波数の走査を行なうと，レーザーの周波数一強度曲線を画くことができる。He-Ne レーザーの発振周波数領域の幅は励起入力などによって変るが，一般には1,000MHz～数100MHz 程度である。すなわち特に波長の安定化を行なっていない He-Ne レーザーが自由発振しているときは，共振器内の光路長の変動により，幅1,000MHz の周波数変動をする。この場合，波長633nm の周波数約474THz に対してレーザーの周波数安定度は1,000/（474×10^6）≈ 2×10^{-6}である。

レーザーの変動する周波数を自動制御系を用いて安定化する研究は，1963年に Rowley と Wilson[10]がレーザーの出力曲線の頂点を安定化基準として周波数を安定化したのに始まり，以来種々の方法が試みられた。1969年に Hanes と Dahlstrom は分光学的探索により，Ne の633nm の輝線スペクトルの領域内に存在する沃素同位元素分子$^{127}I_2$の吸収線超微細構造を観測し，これらの一つを安定化基準に用いて光波長標準を実現することを提唱し，以来国際的に協力研究が続けられて来た。分子吸収線を安定化基準に用いる理由は，原子スペクトル線が大きなドップラー幅をもつ上にシュタルク効果やゼーマン効果など，外界の電磁場に敏感でスペクトルの分離にともなう中心周波数の偏移や偏光状態の変化などを生じやすいのに対して，分子の吸収線スペクトルはドップラー幅も小さい上に自然幅そのものが狭く，電磁場の影響も受けにくいので，優れた周波数の安定度と再現性が期待できる点にある。

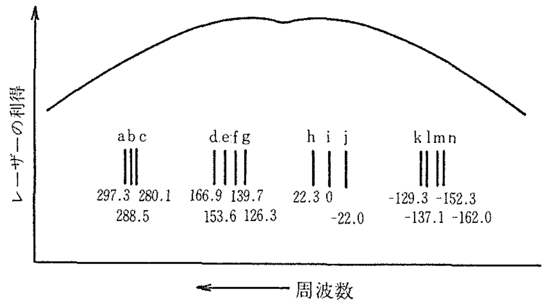

図 1 Ne の633nm のスペクトルと$^{127}I_2$の吸収線超微細構造のスペクトル

注）メートルは，1秒の299792458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さとする。

図1は$^{127}I_2$の$B^3\Pi^+_{0u} \leftarrow X^1\Sigma^+_{0g}$電子遷移, 11-5バンドのR(127)の吸収線超微細構造の中で, Hanesらによって観測された14本の成分と633nmHe-Neレーザーの出力曲線との関係を示すもので, 各成分の下に記した数字は, i成分の周波数を原点とした各成分の周波数間隔(単位MHz)である。個々の成分は隣接成分との周波数間隔よりかなり広いドップラー幅をもって重なり合っているために, レーザー光を$^{127}I_2$のガス中を透過させて強度を測定する方法では各成分を分離検出することはできない。図2はこれらの成分を分離検出するために, 共振器の内部に$^{127}I_2$の吸収セルを配置したレーザー装置を示している。$^{127}I_2$のガス分子は, 共振器内でくり返し反射往復するレーザー光の強い定在波電場と相互作用して飽和吸収を起こし, 吸収線はドップラー効果を受けない自然幅に近いスペクトルプロフィルになり, レーザーの出力曲線の上に微細ではあるが鋭いピークとなって現れる。飽和吸収によるこのピークは反転ラムくぼみと呼ばれる。レーザーの周波数をこのピークの頂点にロックすることにより, 分子吸収線と同程度の周波受数安定度と再現性をもたせるのが沃素安定化レーザーである。

2．2　$^{127}I_2$の吸収線超微細構造の検出

光の発振器であるレーザーでは, 発振光の波長 λ, 周波数 ν と発振器の鏡面間隔Lの間に, 次の関係が成立し, 共振器内に光の定在波が存在できなければならない。

$$2nL = q \cdot \lambda_q = q \frac{c}{\nu_q} \qquad (1)$$

ただしnは共振器内の媒質の平均屈折率, qは大きな正整数, λ_qおよびν_qはq次の縦共振モードの波長と周波数, cは真空中の光速度の値である。(1)式より, 共振器長がΔL変化したときの波長と周波数の変化分をそれぞれ$\Delta\lambda$, $\Delta\nu$とすると簡単のためにn=1として, $\Delta L << L$のとき次の関係が導びかれる。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \qquad (2)$$

さらに隣接する縦モードの周波数間隔$\delta\nu$は,

$$\delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L} \qquad (3)$$

になる。かりに共振器の反射鏡を平行に保ったまま片方を角周波数ωの正弦波振動をさせると, (2)式より変調レーザー光の周波数ν_mは,

$$\nu_m = \nu + K \sin \omega t \qquad (4)$$

で表わせる。ここでνは変調レーザー光の平均周波数, $K = \nu A/L$でAは反射鏡の振動の振幅, Lは共振器の鏡面間隔である。レーザーの光強度Iは発振周波数の関数であるから, $I = F(\nu_m)$と表わし, (4)式を用いると,

$$I(t) = F(\nu + K \sin \omega t) \qquad (5)$$

が得られる。この式をテーラー展開すると, 次式のようになる。

$$I(t) = F(\nu) + (K \sin \omega t) F^{(1)}_{(\nu)} + \frac{1}{2!}(K \sin \omega t)^2 F^{(2)}_{(\nu)} + \frac{1}{3!}(K \sin \omega t)^3 F^{(3)}_{(\nu)} + \cdots\cdots + \frac{1}{n!}(K \sin \omega t)^n F^{(n)}_{(\nu)} + \cdots\cdots \qquad (6)$$

(6)式を展開し sin, cos 項についてまとめると次のようになる。

$$
\begin{aligned}
I(\mathrm{t})=F(\nu)&+\sin\omega t\left[KF^{(1)}_{(\nu)}+\frac{3}{24}K^3F^{(3)}_{(\nu)}+\cdots\cdots\right]\\
&+\cos 2\omega\mathrm{t}\left[-\frac{1}{4}K^2F^{(2)}_{(\nu)}-\frac{1}{48}K^4F^{(4)}_{(\nu)}-\cdots\cdots\cdots\right]\\
&+\sin 3\omega\mathrm{t}\left[-\frac{1}{24}K^3F^{(3)}_{(\nu)}-\frac{5}{1920}K^5F^{(5)}_{(\nu)}-\cdots\cdots\cdots\right]\\
&+\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots
\end{aligned}
\tag{7}
$$

すなわち光強度 I は直流成分 $F(\nu)$ と周波数 ω およびその高調波成分の和である。このような光の光電検出信号をロックイン増幅器に与え，参照信号として角周波数 nω の信号を用いて位相敏感検出すると出力として sin nωt 又は cos nωt の振幅である係数部分が現われる。係数のうち $F^{(n)}_{(\nu)}$ に比べて高次の項は小さく無視できるので，出力は近似的に $F(\nu)$ のn次微分と見なせる。レーザーの周波数安定化には，次にのべるとおり3次微分が用いられる。

3 実 験

3．1 実験装置

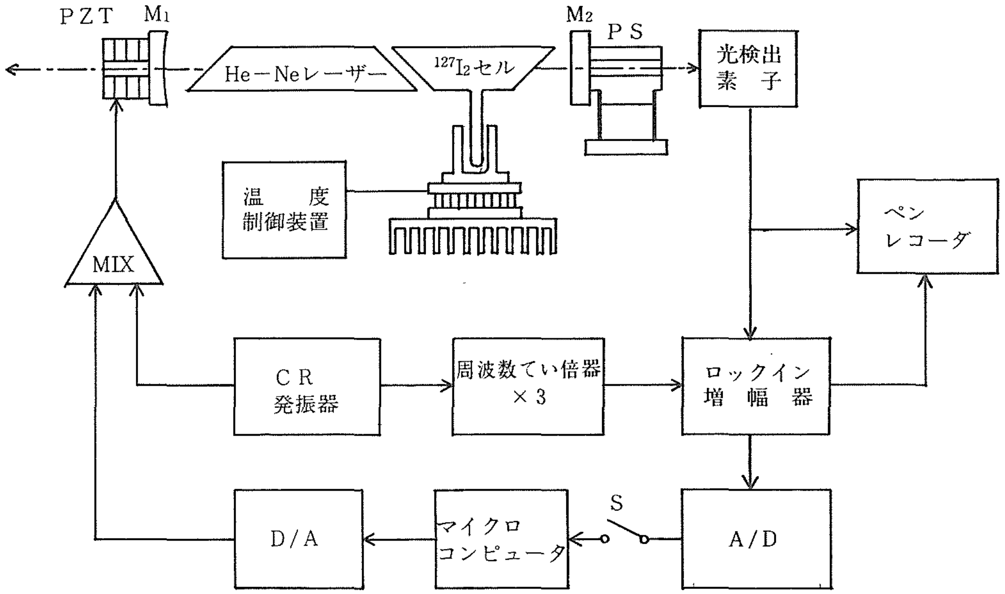

図 2 共振器内に沃素の吸収セルをもつレーザーとマイクロコンピュータをもつ周波数制御系

図2は沃素安定化レーザー装置の構成を示す。レーザー共振器は反射率 R=99.8%，曲率半経1mの凹画鏡とR=99.1%の平面鏡構成で鏡面間隔は約31cm，(3)式より求められる縦モード間隔は$\delta\nu\approx$483MHz である。片方の反射鏡 M_1は電歪素子（piezo electric transducer 以後 PZT と記す）に固定し，電圧信号により周波数の変調と走査を行なう。他の反射鏡 M_2はマイクロメーターと2重てこおよび平行ばねで構成された平行微動装置 PS に固定されている。モータで駆動されるマイクロメーターの変位は2重てこで1/100に縮小されて反射鏡を平行移動し，最大移動幅は250

μm, 周波数走査幅は380GHz になる。長さ約18cm のレーザー管は分圧比 He/Ne=6.2/1.0の混合ガスを圧力3.1mmHg で封入した。レーザー管と同軸上においたブリユスター窓をもつ吸収セルは長さ10cm で，直空排気して$^{127}I_2$（99.99%）の結晶の微小片を封入してある。セルの中央より出ている側枝の先端はペルティーエ素子に固定した内径1 cm 深さ 2 cm の円筒形冷却槽の水中に挿入しておき，銅コンスタンタン熱電対を温度検出に用いた温度安定化回路によって4℃～18℃の範囲内の任意の温度に精度±1℃で安定化し，$^{127}I_2$の蒸気圧の調節と安定化を行なった。$^{127}I_2$の温度と飽和蒸気圧の関係は表1の通りである。

温度(℃)	飽和蒸気圧(mmHg)
0	0.03
15	0.131
30	0.469

表 1　I_2の温度と飽和蒸気圧
理科年表（1985）物62

共振器より射出したレーザー光をフォトダイオードで検出増幅の後，ロックイン増幅器で出力の微分を取出す。微分信号の検出のために，CR 発振器の正弦波信号（f ≈ 1 kHz）で反射鏡M_2を振動させレーザー光に周波数変調を与える。同時にこの正弦波信号を参照信号としてロックイン増幅器に与えればレーザー出力の1次微分が，また周波数てい倍を行なって3f の参照信号をロックイン増幅器に与えれば3次微分が得られる。本研究では3次微分信号をレーザー光の周波数弁別に用い，これを誤差信号として制御系を通して PZT にフィードバックし，共振器を安定化する。

3．2　レーザーの出力と微分曲線

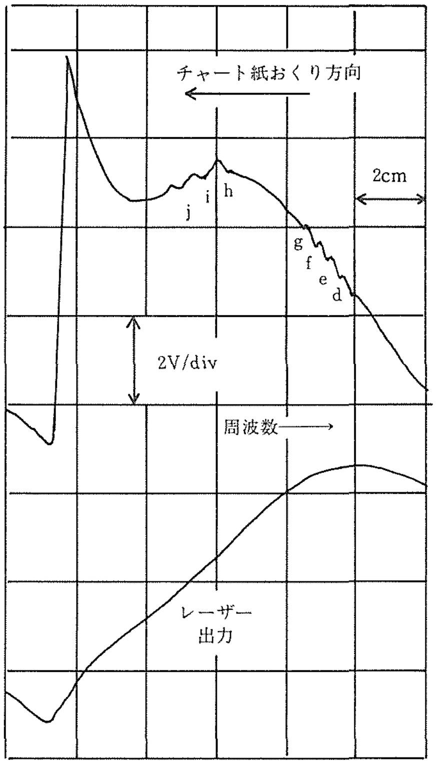

図 3　633nmHe-Ne レーザーの出力（下）と出力の1次微分（上）。レーザーの変調周波数920Hz，ロックイン増幅器の感度200 mV，時定数10ms，垂直方向目盛2 V/div

レーザー出力および微分曲線の記録は図2のスイッチSを開き，フィードバック回路を開いた状態で平行微動装置による周波数走査を行ないつつ，ペンレコーダでレーザー出力と微分曲線を記録した。図3は1次微分を記録した例である。この場合の PZT による変調周波数は920Hz, ロックイン増幅器の感度200mV, ローパスフィルタの時定数10ms, チャート紙の送り速度は5 cm/min, 垂直目盛は2 V/div である。使用したネオンガスは自然組成のもので，強度および中心周波数の異なる^{20}Ne と^{22}Ne の633nm の自然放出光スペクトルの重なりのために，出力曲線は非対称である。微分曲線には，出力曲線に重なって存在する$^{127}I_2$の吸収線超微細構造成分のうち7本，高周波数側より順にd, e, f, g, h, i, j, が明らかに現われている。これらの吸収線信号は，バックグランドとなっている微分曲線の高さがレーザー出力の変動に従って変化するので，安定化基準として用いることはできない。図4はレーザー出力と3次微分曲線の記録である。この場合，2次曲線で近以される出力曲線の影響は無視し得る程小さくなり，吸収線の各成分の3次微分曲線は零交叉点を中心とする点対称図形になる。これらの中の一つを周波数弁別に用いて誤差信号を取出し，周波数安定化を行なう。

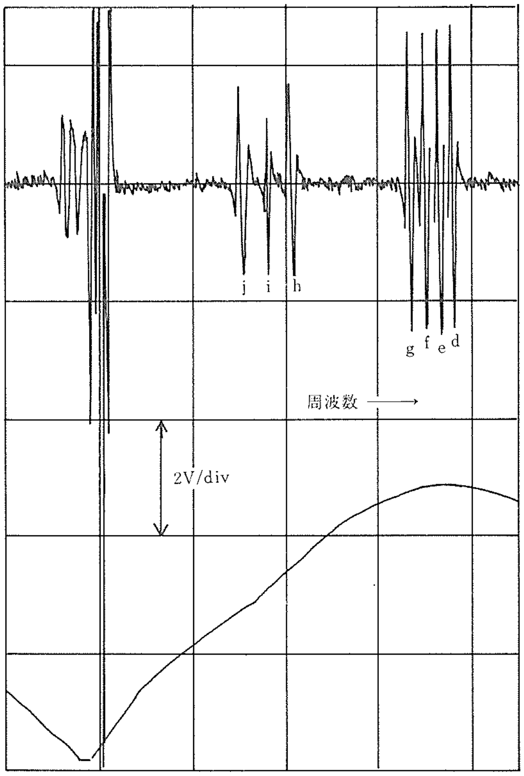

図 4 633nmHe-Ne レーザーの出力（下）と出力の3次微分(上)。レーザーの変調周波数920Hz, ロックイン増幅器の感度5 mV, 時定数30ms, 垂直方向目盛2 V/div

3．3　マイクロコンピュータによる周波数安定化

(1)周波数の安定化　　図4で見る通り，安定化基準となる3次微分信号はピークピーク値が約5Vであるのに対して，約0.4Vの雑音が重なっている。光電検出された吸収線信号は分解能2 mV/bitの8 bitA/D変換器でデジタル変換されるが，16bitのマイクロコンピュータを用いて安定化の精度向上のための平均化を行なう。すなわち周波数軸上のある点でのレーザーの出力を決定するのにコンピュータの指令により100μsのサンプリングを数回くり返し，これらの値の平均値を求めて制御データを作成し，12bitD/A変換器によりアナログ制御信号にかえて共振器制御用のPZTに与え，比例制御を行なった。図5はその記録でチャートの時間軸の方向は右より左に向う。直線PQはコンピュータ制御によりPZTに与えられた走査電圧で，周波数走査は高周波数より低周波数に向い，d成分が検出された瞬間にQ点でフィードバックループが閉じられて安定化動作に入っている。Q点より左方の軌跡は外部雑音による周波数の変動を補正するための制御電圧の変化を，R点より左方の記録は安定化レーザーの周波数ゆらぎの様相を現わしている。

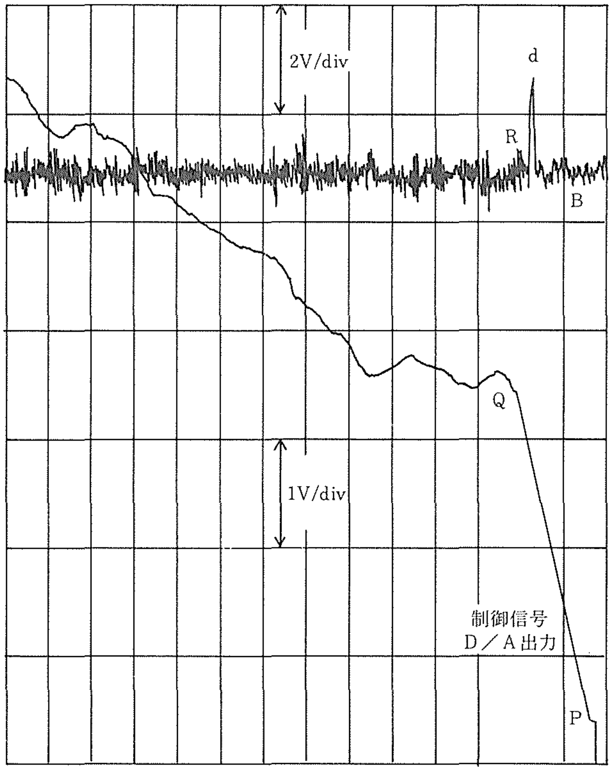

図　5　$^{127}I_2$の吸収線超微細構造のd成分による633nmHe-Neレーザーの安定化記録。制御信号電圧（下）と周波数ゆらぎを示すロックイン増幅器の出力（上）。レーザーの変調周波数920Hz ロックイン増幅器の感度100μV，時定数100ms

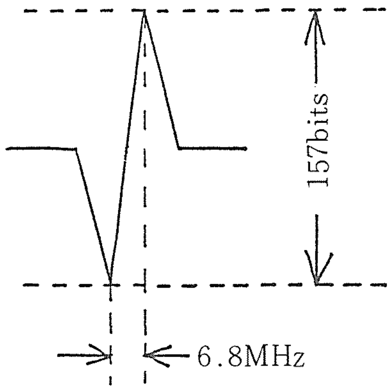

図 6 吸収線3次微分信号のピークの高低差と周波数間隔

Sample 数	ローパスフィルタ定数	平均	分散	min	max
16	100ms	129.2	6.1	109.0	146.0
8	100ms	138.4	6.1	110.0	143.5
2	100ms	127.8	6.1	114.2	144.0
8	300me	128.2	5.8	112.3	145.0

表 2 マイクロコンピュータ制御による633nm 沃素安定化レーザーの周波数ゆらぎ

図1の通り,既に知られている吸収線各成分の周波数間隔[11]の値と,周波軸を拡大して記録した3次微分曲線から一つの成分についてピークの周波数間隔を求めると約6.8MHz である。A/D 変換に際してピークの高低差を157bits に設定してあるので3次微分曲線を図6のように直線近似すると,周波数弁別の感度は0.04MHz/bit である。他方コンピュータ出力としてデジタル量で与えられる周波数ゆらぎの最大,最小値と分散を示すのが表2である。ここで周波数が3次微分曲線の零交叉点にあるときのA/D コンバータの出力が128になるようにロックイン増幅器の出力にオフセットを与えてあるので,理想的には表中の平均値は128になる筈である。平均値のゆらぎの原因としては,雑音の外に,実験中の室温の変化などによるオフセット電圧のドリフトが考えられる。表で見る通り,周波数ゆらぎの分散6.1bitsに対応する周波数ゆらぎの幅は264kHz, すなわちレーザーの安定度の限界が雑音により支配されると考えれば,この測定でのレーザーの周波数安定度はレーザー光の平均周波数を474THz として

$$\frac{\Delta\nu}{\nu}=\frac{264\text{kHz}}{474\times10^{9}\text{kHz}}\approx 5\times10^{-10} \tag{8}$$

である。

(2)特定の吸収線への自動安定化

レーザーの安定化の手順として先づ周波数走査を行なうとき,走査の方向を規定するならば,吸収線の個々の成分が検出される順序が決定される。この順位番号をそれぞれの成分の識別符号とし,任意の一つを指定してコンピュータに記憶させ,周波数走査中に現れる吸収線信号を計数して該当する成分が現われたときにフィードバックループを閉じ,自動的に安定化動作に入らせることが出来る。図7はその記録で時間軸の方向は左向きである。PQ は高周波数から低周波数への周波数走査信号の軌跡で,この走査中に d, e, f の3成分が現われ,指定されている f 成分の信号の零交叉点で自動的にフィードバックループが閉じて安定化動作に入ったことを示している。

4 む す び

レーザーの周波数安定化に従来から用いられているアナログ自動制御系では，レーザーの出力特性と環境による外部雑音の様相ならびにレーザーの使用目的により，比例，積分あるいは微分等の要素を加えたフィードバックループを必要とする。他方，自動制御系にデジタル制御を用いる最大の利点は，アナログ方式では行なえない論理的制御が可能であり，制御のソフトウエアを自在に変化させて最適の制御系を容易にしかも自動的に選ぶことが出来る点にある。本報告では沃素安定化 He-Ne レーザーにデジタル制御を用いる第一歩としてマイクロコンピュータを導入し，レーザー出力のサンプリングと平均化処理を行わせ，デジタル比例制御を試みた。$^{127}I_2$の吸収線超微細構造成分に安定化させたレーザーの短時間周波数安定度は5×10^{-10}である。また上記の成分の任意のものを自動識別して，これにレーザーの周波数を自動ロックし周波数を安定化できることを確かめた。

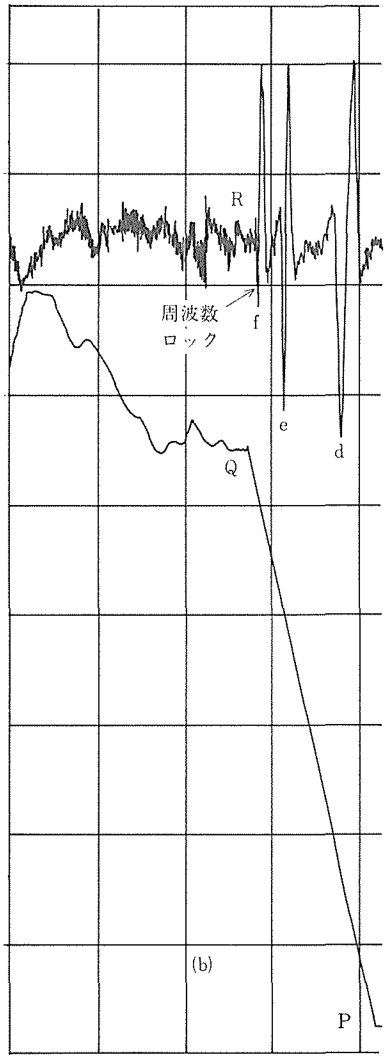

図 7　マイクロコンピュータ制御による特定吸収線成分の識別と自動ロック動作の記録。制御信号（下）とロックイン増幅器の出力（上）。PQ で周波数走査を行い Q で自動ロック。

5 参考文献

1) 磯部 孝編 物理測定と標準 (1975) 56 共立出版
2) A. Javan, W. R. Benett and D. R. Herriot : Phys. Rev. Letters. (1961) **6** 106
3) K. Shimoda : IEEE Trans. Instr, and Meas. (1968) IM-17 343
4) G. R. Hanes and C. E. Dahlstrom : Appl. Phys. Letters (1969) **14** 362
5) A. J. Wallard : J. Phys. E Sci. Instrum (1972) **5** 926
6) 田中，桜井，黒沢：計測自動制御学会論文集，(1974) **10** 29
7) J. Helmcke und F. Bayer-Helms : Metrologia (1974) **10** 669
8) K. Tanaka, T. Sakurai and T. Kurosawa : Jpn. J. Appl. Phys. (1977) **16** 383
9) N. Ito and K. Tanaka : Metrologia (1978) **14** 47
10) W. R. C. Rowley and D.C. Wilsson : Nature (1963) **200** 745
11) A. Morinaga and K. Tanaka : Appl. Phys. Letters : (1978) **32** 114