

## II-7 水素メーザ原子標準

森川容雄\* 太田安貞\*\* 木内 等\*\*\*

(昭和59年7月3日受理)

## 1. ま え が き

VLBI 実験では複数の地上局で電波星の信号を受信し、相関を求めるわけであるが、現在のところマイクロ波帯の信号を直接記録したり、相関をとることのできる高速記録装置又は相関器はないので、受信信号を一度IF帯にまで周波数変換をした後で記録又は相関をとらざるを得ない。このため各受信信号は周波数変換によってコヒーレンスを失ってはならず、各地上局の周波数変換用の局部発振器は互いに独立でありながらコヒーレントであることが要求される。特に電波星のように信号強度が弱い場合は長時間にわたり受信信号を積分しなければならず、この積分時間内で局部発振器のランダムな位相雑音は十分に小さくなければならない。また基線長等のパラメータ推定を行うためには、数個の電波星を何回か観測して各々について遅延時間を求める必要がある。したがってこの観測時間内に生じる各地上局の時計の時刻差の変動は遅延時間の測定精度以下であることが必要になる。

一つの電波星を観測するのに必要な積分時間は、波源の強度と受信システムの雑音の比、すなわち、どの位のS/N がとれるかで決まる。今回の日米 VLBI 実験ではこの積分時間は約10分間程度になり、この時間内での位相変動を0.3ラジアン位に抑えるためには局部発振器(約8GHz)の周波数安定度は $1 \times 10^{-14}$ 以上が必要になる。このような高安定の周波数標準器は現時点では水素メーザ原子周波数標準器以外には考えられない。換言すれば今回の日米 VLBI 実験は水素メーザがあつてはじめて可能になった実験であり、その意味で水素メーザの果たす役割は非常に大きく、VLBI システムの中で最も重要な装置の一つといえる。

K-3 用水素メーザはこのような厳しい要求を満足するため、設計に際し以下の周波数安定度を目標とした<sup>(1)</sup>。

$$\begin{aligned} 10 < \tau \leq 1000 \text{ 秒} & \quad \sigma_y(\tau) < 1 \times 10^{-14} \\ \tau \approx 600 \text{ 秒} & \quad \sigma_y(\tau) < 5 \times 10^{-15} \\ \tau = 18000 \text{ 秒} & \quad \sigma_y(\tau) < 2.8 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

\* 周波数標準部 周波数標準値研究室

\*\* 周波数標準部 原子標準研究室

\*\*\* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

さらに各地上局の局部発振器の周波数差はフリンジ・レートに影響するため<sup>(2)</sup>、可能な限り小さいことが望まれる。このため K-3 用水素メーザでは標準周波数の設定分解能を $7 \times 10^{-13}$ としている。水素メーザは VLBI 観測中は最高の周波数安定度を確保するため、共振器中心周波数の自動同調を行わない、いわゆるフリーランニング状態で運転するが、観測前にあらかじめ共振器中心周波数を水素原子の遷移周波数に一致させるための共振器自動同調機構をそなえている。そしてこの自動同調機構のための参照信号源として、もう一台の水素メーザを用意している。これら2台の水素メーザは同一の構造、特性を持っており、万一、一台が故障しても他の一台で VLBI システムに標準周波数と時刻信号を供給できるため、システムとして高い信頼性を持っているといえる。この他にメーザの構造的な特徴として、磁気シールドをすべて真空ベル・ジャー内に設置し、磁気シールドだけでなく熱輻射シールドとしても機能させており、この結果断熱材をほとんど使用することなく共振器温度を0.001 K以内に安定化することに成功している。さらに共振器の支持に皿バネを採用し、共振器の機械的歪の変動を吸収している。

K-3 用水素メーザの特性は設計時の目標値をほぼ満足しており、その周波数安定度は $\tau=830$ 秒で $2.4 \times 10^{-15}$ 、 $\tau=10^5$ 秒で $1.4 \times 10^{-14}$ である。また室温変化の影響は $2.3 \times 10^{-14}/\text{K}$ 、外部磁場の影響は $2.5 \times 10^{-13}/\text{G}$ であり、それぞれ十分な値である。2台の水素メーザは1983年9月に電波研究所鹿島支所に設置され、その後ほとんど故障もなく7か月以上にわたり連続運転をしており非常に信頼性が高いといえる。

## 2. K-3 用水素メーザの構成

K-3 用水素メーザは量子系、受信・位相同期系、共振器自動同調系から構成される。量子系では、水素原子の反転分布状態を作り、空洞共振器内の電磁場と相互作用させメーザ発振を起こさせる。受信・位相同期系は量子系からメーザ発振出力を取り出し、VCXO をメーザの発振周波数に位相同期させ、10 MHz の標準周波数および秒信号を VLBI システムに供給する。共振器自動同調系は水素メーザのプリング効果を利用し、共振器中心周

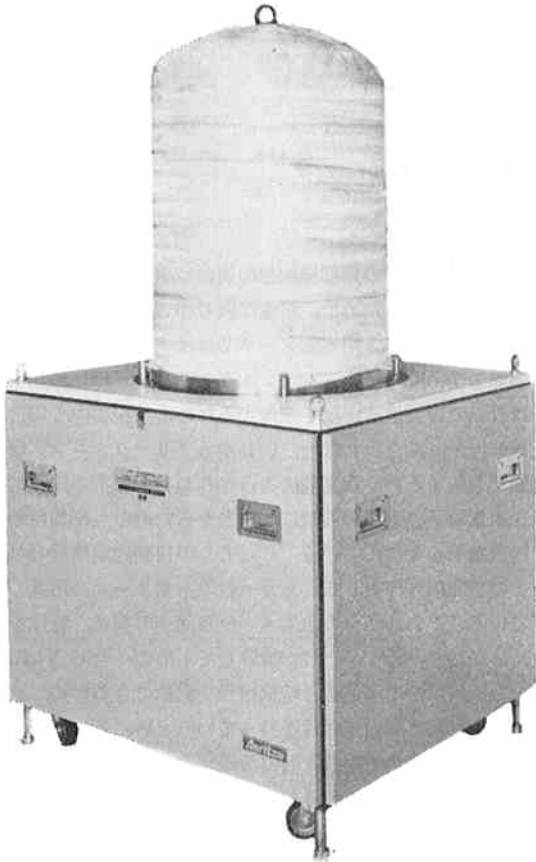


写真1 K-3 用水素メーザ量子系

波数を水素原子の遷移周波数に一致させる。共振器自動同調系では、2台のメーザ相互間のビート周波数が作られるが、これは2台のメーザの相互安定度測定にも利用される。メーザの量子系を写真1に、受信・位相同期系と自動同調系を含んだエレクトロニクス架を写真2に示す。なおメーザの原理については詳しい報告が既にあるため、関心のある方は文献(3)~(5)を参照されたい。

### 2.1 量子系

第1図に量子系の構造を示す。量子系は磁気シールド、共振器、恒温槽、水素ビーム・オプティクス、真空ポンプ等から構成されている。量子系の大きさは幅84cm、奥行94cm、高さ160cm、重量は550kgであり、電波研の従来の実験室形メーザに比べ体積比で約 $\frac{1}{4}$ に小形化されている。メーザの有効出力は-93dBm以下である。

#### 2.1.1 磁気シールド

磁気シールド材には厚さ2mmのパーマロイを使用し、全部で4重の磁気シールドを行っている。共振器中心部での残留磁場は50 $\mu$ G以下である。磁気シールドはすべて真空ベル・ジャー内に設置し、磁気シールドだけでなく熱輻射シールドとしても機能している。このため

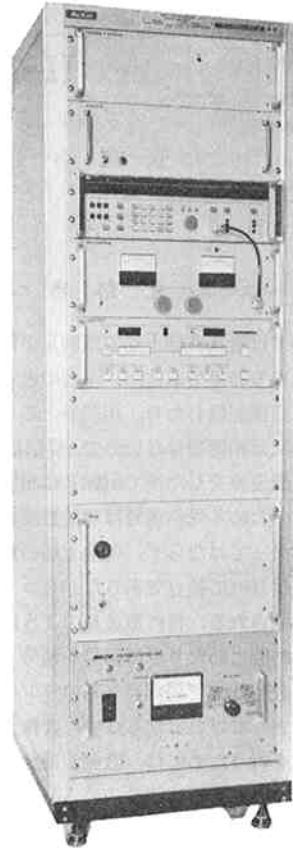


写真2 K-3 用水素メーザのエレクトロニクス架

2.1.3で述べるように特に断熱材を使用することなく共振器部分で0.001Kの温度安定度を達成している。従来のメーザでは共振器部とイオン・ポンプを結ぶ真空排気管のために磁気シールド底部にかなり大きな穴をあける必要があったが、磁気シールドをすべて真空中に設置することにより、この排気管が不要になり共振器部を直接排気できるため、磁気シールド底部の開口面積をかなり小さくでき(穴径4cm)良好な磁気シールド特性が得られるという長所がある。また排気管が不要になるため排気管を通して熱が共振器部へ伝わることもなくなり温度制御が容易になるという利点もある。

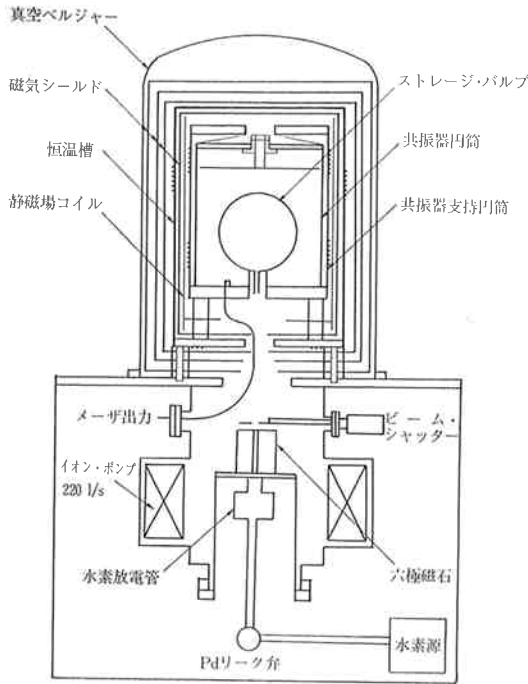
磁気シールド最内層の内側には水素原子のエネルギー縮退を解くための静磁場発生用ソレノイド・コイルが設置されている。水素原子の遷移周波数 $f_H$ は(1)式に示すように磁場に依存するため<sup>(3)</sup>、ソレノイド・コイルの電流は十分に安定であることが要求される。

$$f_H = f_0 + 2750H^2 \quad \dots\dots(1)$$

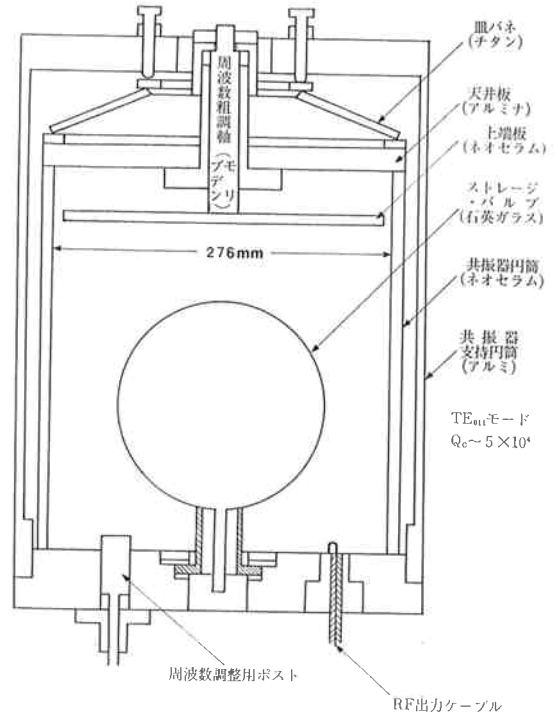
ただし $H$ : 磁場強度 (エルステッド)

(1)式から磁場の変動による周波数変化は(2)式で表せる。

$$\frac{\Delta f_H}{f_H} = 3.9 \times 10^{-6} H \Delta H \quad \dots\dots(2)$$



第1図 K-3用水素メーザ量子系構造図



第2図 共振器構造図

したがって  $1 \times 10^{-14}$  の周波数安定度を達成するためには、 $H=10 \text{ mOe}$  の場合コイル電流の安定度は  $2.5 \times 10^{-5}$  必要になる。K-3用メーザで採用しているコイルの定電流源の安定度仕様は  $1 \times 10^{-5}/\text{hr}$ 、 $5 \times 10^{-5}/\text{day}$  である。これから  $1 \times 10^{-14}$  の安定度を得るためにはメーザは  $7 \text{ mOe}$  以下の静磁場で運転する必要がある。VLBIシステムの時間・周波数源となるメーザは通常  $1 \text{ mOe}$  以下で運転している。

水素メーザの磁界特性として、このほかにマヨラナ効果の影響<sup>(6),(7)</sup>があるが、K-3用メーザでは実験室形メーザと違い特にマヨラナ効果に対する対策はとっていないが、VLBI実験で要求される特性は十分満足されている。

### 2.1.2 共振器

第2図に共振器の構造を示す。水素メーザでは(3)式に示すように共振器周波数  $f_c$  の変動はプリング効果<sup>(8)</sup>によりメーザ発振周波数  $f_m$  の変動を引き起こし、特に長期安定度において重要な問題となる。

$$f_m - f_H = -\frac{Q_c}{Q_i} (f_c - f_H) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $Q_c$  : 共振器負荷  $Q$

$Q_i$  : 原子共鳴線  $Q$

$Q_c/Q_i$  は通常  $5 \times 10^{-5}$  程度であるため、 $1 \times 10^{-14}$  の周波

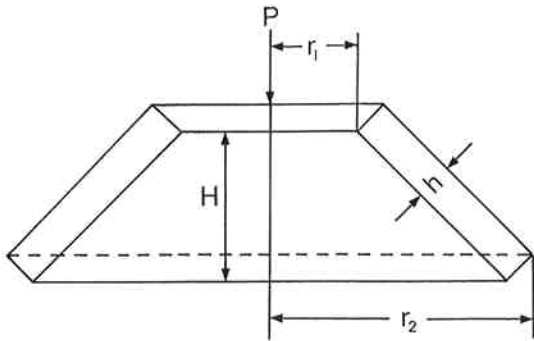
数安定度を達成するためには、 $f_c$  の安定度は  $2 \times 10^{-10}$  が必要になる。このため共振器の高安定化はメーザの高い周波数安定度を達成するために不可欠である。

$f_c$  の変動要因としては次の3つが考えられる。

- (1) 共振器材質の熱膨張
- (2) ストレージ・バルブの誘電率の温度変動
- (3) 共振器の機械的歪による変形

(1)の要因からは、共振器材質の熱膨張係数は十分小さいことが要求される。このため共振器円筒と上端板には熱膨張係数  $-5 \times 10^{-7}$  の結晶化ガラス(ネオセラム)を採用している。さらに上端板の位置を調整するための周波数粗調用軸および軸受けにはモリブデン(熱膨張係数  $5 \times 10^{-6}$ )を使用している。(2)の要因からは、ストレージ・バルブをできるだけ軽量化することが要求される<sup>(9)</sup>。

K-3用メーザで使用しているストレージ・バルブ(石英ガラス製、直径  $180 \phi$ )の重量は  $300 \text{ g}$  あるいは  $260 \text{ g}$  である。(3)の機械的歪の主な原因として、共振器を固定するために上部から印加するストレスがある。このストレスが変化すると共振器天井板の歪量が増加し、上端板の位置も変化することになる。 $2 \times 10^{-10}$  の  $f_c$  の安定度を達成するためには、上端板の位置変化は  $3 \text{ \AA}$  程度に抑えなければならない。このためには天井板の歪の絶対量を小さくするとともに、ストレスの変化を小さくすること



第3図 皿パネの形状

が必要になる。円板に一樣な線荷重が加わった場合の円板の歪は一般に円板のヤング率と板厚の3乗に反比例する。K-3用メーザではこのため天井板にヤング率の大きいアルミナ ( $E \approx 3 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ) を使用している。またストレスの変化を小さくするためには皿パネを利用している。第3図は皿パネの形状であり、パネの荷重  $P$  は次式で表される<sup>(9)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{C_1 C E h^4}{r_2^2} \\ C &= \pi \left( \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} - \frac{2}{\ln \alpha} \right) \left( \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \\ C_1 &= \frac{\delta}{(1 - \nu^2) h} \left\{ \left( \frac{H - \delta}{h} \right) \left( \frac{H - \delta}{h} + 1 \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

ただし、 $H$ ：皿パネの自由高さ

$h$ ：パネ材の厚さ

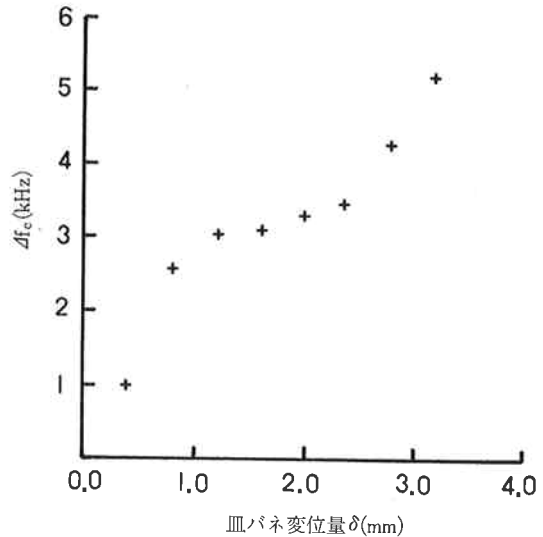
$E$ ：パネ材の縦弾性率

$\nu$ ：パネ材のポアソン比

$\delta$ ：パネの変形量

$\alpha = r_2 / r_1$

上式より  $H = \sqrt{2}h$  のとき  $\delta = H$  で  $\partial P / \partial \delta = 0$  になり  $P$  は一定になる。この定荷重特性を利用することにより、共振器支持円筒が熱膨張等により変形し天井板に加わるストレスの支点位置が変化してもストレスを一定に保つことが可能になる。第4図は皿パネの変形量  $\delta$  に対して  $f_c$  の変化をプロットしたものである。  $1.0 < \delta < 2.0 \text{ mm}$  で  $f_c$  はほぼ一定になっており、この範囲の中央に皿パネをセットすることで  $f_c$  を安定化することができる。K-3用メーザでは皿パネの材質にチタン ( $E = 1.18 \times 10^6 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\nu = 0.32$ ) を採用しているが、ベリリウム銅や磷青銅も使用できる。この他に共振器の機械的変形の原因として、共振器円筒と下端板および天井板との間の接触面の微視的凹凸が徐々に磨耗しつぶれ、端板間距離が短縮される現象が考えられる。このため接触面は鏡面研磨をほどこし微視的凹凸を除去している。さ



第4図 皿パネによる  $f_c$  の安定化

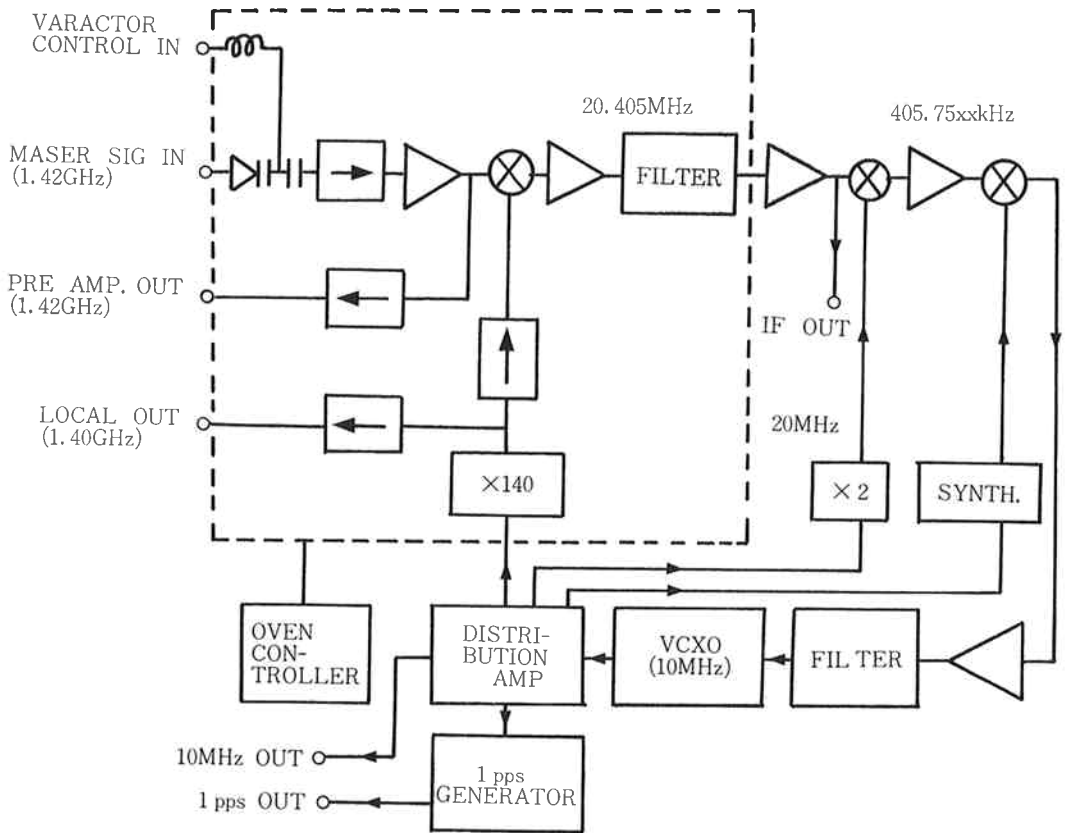
らに長期的な変形要因としては共振器材質のクリープ現象<sup>(10)</sup> が考えられるが、材質のクリープ特性に未知な点が多いこと、またそのオーダは小さいと考えられるため無視しているが、さらに高い安定度を追求する場合には問題になる可能性がある。

K-3用メーザでは上記のような共振器の安定化をはかり、その結果  $f_c$  の温度変化率として  $500 \text{ Hz/K}$  (2号機では  $200 \text{ Hz/K}$ ) という値が得られている。

### 2.1.3 恒温槽

$f_c$  の温度変化率を考えると  $1 \times 10^{-14}$  のメーザ周波数安定度を達成するためには  $0.001 \text{ K}$  以上の精度で共振器の温度を制御する必要がある。このため K-3用メーザでは二重の恒温槽を構成して温度制御を行っている。まず外側の恒温槽として最内層の磁気シールドの外側に厚さ  $6 \text{ mm}$  のアルミ円筒を置き、その上にヒータを巻いている。コントロール・センサにはサーミスタを使用している。ヒータは円筒の中央部と底部に巻かれており、それぞれ独立にコントロールを行い、温度勾配を小さくしている。さらに共振器支持円筒(アルミ製)にもヒータを巻き、内側の恒温槽としている。ここでもやはりヒータは円筒の上部と下部に分割して巻き、それぞれ独立に温度制御を行い温度勾配を小さくしている。これらのヒータはすべてバイファイラー巻きとし、加熱電流による発生磁界を打ち消している。

温度制御を行う場合、外部の温度変化が直接伝わらないように恒温槽は熱的に外部から絶縁されている必要がある。一般に熱の伝達には伝導、輻射、対流の三つが考えられるが、K-3用メーザでは伝導と輻射が問題になる。このうち輻射は、2.1.1で述べたように磁気シールド



第5図 受信位相同期系ブロック図

ドをすべて真空内に設置し熱輻射シールドとしても機能させることにより小さくしている。一方、熱伝導の経路としては、共振器や恒温槽等に接続されるケーブルやリード線類と磁気シールド、恒温槽、共振器を固定しているポストやスペーサがある。このうちケーブル、リード線類はすべて熱容量の大きい外側の恒温槽の底部に熱的に接続し、外部の温度変化が直接共振器に影響しないようにしている。またポスト、スペーサには熱伝導率の小さいポリイミド (0.28 kcal/m/hr°C) を使用している。

これらの結果、内外の恒温槽表面の温度変動はモニター用温度計の分解能 (1 mK) 以内におさまっている。

2.2 受信・位相同期系

第5図に受信・位相同期系のブロック・ダイアグラムを示す。量子系からのメーザ出力信号は受信・位相同期系により周波数変換された後、VCXOの信号と位相比較される。位相比較器の出力は誤差信号としてVCXOに帰還されVCXOをメーザ出力信号に位相同期させ、K-3システムの各部へ供給する標準周波数と秒信号を発生させる。位相同期系の帯域幅は10Hzである。

受信・位相同期系ではメーザ出力信号の優れた周波数

安定度を損うことなく、いかにVCXOに移しかえるかが重要になる。標準周波数の周波数安定度はメーザ信号の安定度に受信・位相同期系の雑音による影響が付加されたものであり、次式で表される<sup>(1)</sup>。

$$\frac{\sigma(\langle \phi \rangle)}{2\pi f_m} = \left\{ \frac{kT}{2P} \left( \frac{F f_1' Q_e}{2\pi f_m^2 \tau^2 Q_{cl}} + \frac{1}{Q_l^2 \tau} \right) \right\}^{1/2} \dots (5)$$

ただし、P:メーザ発振パワー

k:ボルツマン定数

F:受信・位相同期系の雑音指数

f<sub>1</sub>':受信・位相同期系の帯域幅

Q<sub>e</sub>:外部Q

Q<sub>cl</sub>:共振器負荷Q

Q<sub>l</sub>:原子共鳴線のQ

上式の第1項が受信・位相同期系の付加雑音による項であり、第2項はメーザ内部の擾乱雑音による項であり、メーザの周波数安定度の理論的限界を与える。第1項と第2項はそれぞれτ<sup>-1</sup>, τ<sup>-1/2</sup>特性を示すため、短いτでは第1項が支配的になる。このため短期安定度を損なわないためには受信・位相同期系のNFをできる限り小さく

することが重要になる。K-3用メーザでは  $NF=2.2\text{dB}$  のプリアンプを使用するとともに、ミキサにはイメージ・リジェクション・ミキサを使用しイメージ・ノイズを除去し  $NF$  の改善をはかっている。系の総合  $NF$  は  $4.5\text{dB}$  である。標準周波数の周波数安定度を乱す要因としてはこのほかに受信・位相同期系の位相変動がある。特に第1局発用逡倍器のゆっくりした位相変動は逡倍次数が大きいため無視できない<sup>(7)</sup>。このため K-3 用メーザでは、逡倍器、プリ・アンプ、ミキサ、IF フィルタ部を恒温槽に入れ、温度による位相変動を十分小さくしている。恒温槽はペルチェ素子により温度制御され、温度変動は  $0.005\text{K}$  以下である。

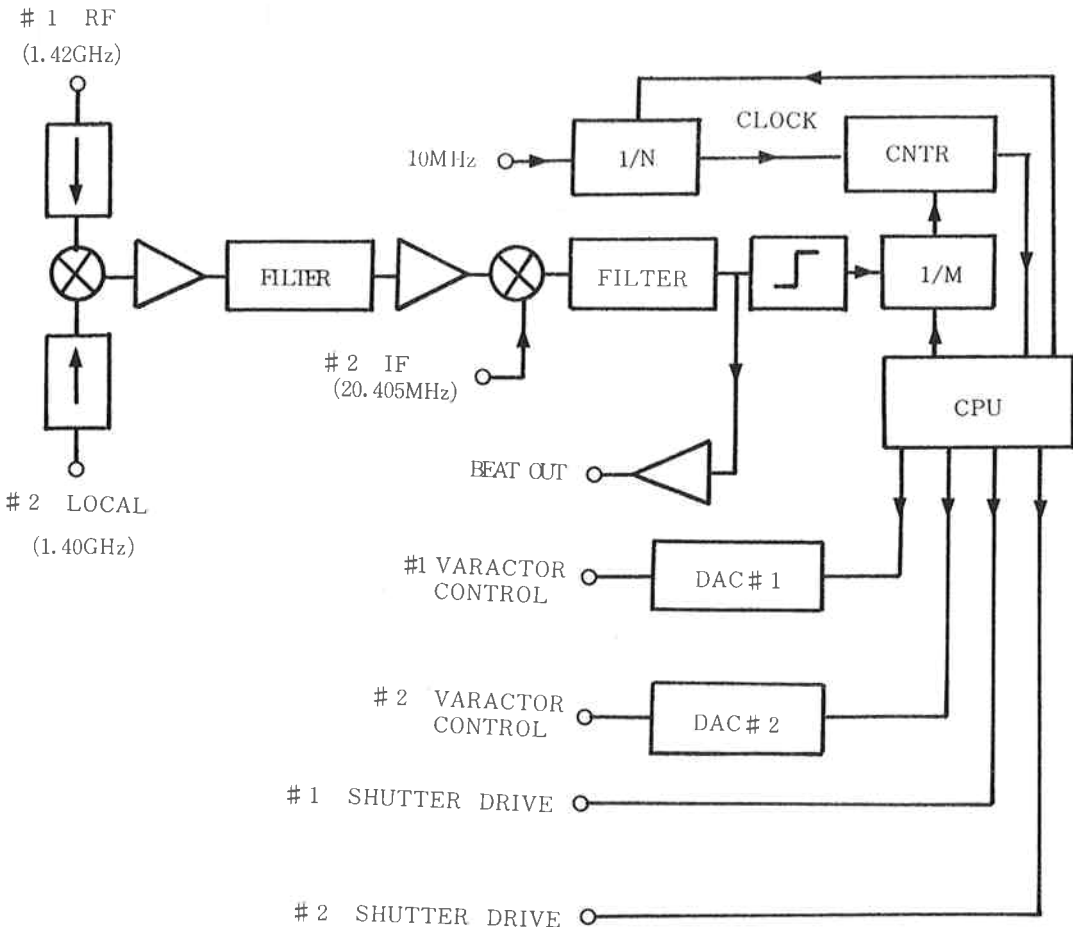
まえがきで述べたように VLBI 実験では、各地地上局の局部発振器の周波数差はフリッジ・レートに影響し、相互相関スペクトルの位相回転を引き起こすことになる。このため各地地上局の標準周波数はできる限り一致していることが望ましい。K-3 用メーザでは、このため位相比較器の参照周波数をシンセサイザにより変え、標準周

波数を自由に設定できるようにしている。シンセサイザの分解能は  $1\text{mHz}$  であるため、標準周波数の設定分解能は  $7 \times 10^{-13}$  になる。

2.3 共振器自動同調系

2.1.2 で述べたようにプリング効果により  $f_c$  の変動は  $f_m$  の変動を引き起こす。このため共振器の安定化をはかっているが、それでも長期間にわたり  $f_c$  を一定に保つことは難しい。また短期間の運転でも  $f_c$  が  $f_H$  からずれていると  $P_L(\equiv Q_c/Q_i)$  の変化が  $f_m$  の変動を引き起こすことになる。この影響は  $(f_c - f_H)$  に比例して大きくなり、一例として  $(f_c - f_H) = 100\text{Hz}$ ,  $P_L = 5 \times 10^{-5}$  の場合、 $1 \times 10^{-14}$  の周波数安定度を達成するためには  $\Delta P_L/P_L \leq 0.28\%$  となる。このため短期間の運転でも、運転開始前に  $f_c = f_H$  とすることが望ましい。このような理由から常に  $f_c$  を  $f_H$  に一致させる共振器自動同調機構が必要になる。

自動同調の原理、機構については既に詳しい報告があるため<sup>(12)~(14)</sup>、ここでは概略だけを述べる。(3)式にお



第6図 自動同調系ブロック図

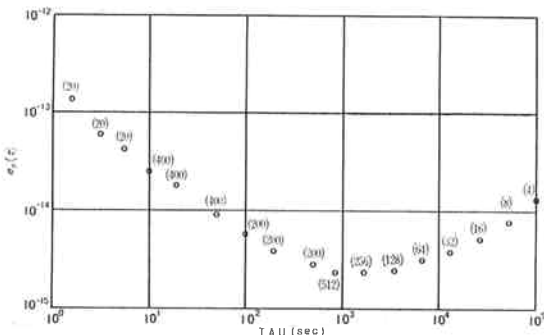
いて  $f_c \approx f_H$  のとき  $P_L$  を変化させると  $f_m$  が変化する。この変化量を検出し、これに比例した電圧を共振器周波数制御用バラクタ・ダイオードに加え、 $P_L$  を変化させても  $f_m$  が変化しないように  $f_c$  を制御する。 $P_L$  の変化は水素原子のビーム量をシャッタにより変えることで行っている。 $f_m$  の変化の検出は、他の基準メーザとの間でビート周波数を作り、このビート周期を測定して行っている。

第6図はK-3用メーザの自動同調系のブロック・ダイアグラムである。基本構成は従来の実験室形メーザのそれと本質的には同じであるが、自動同調のシーケンス・コントロール、各測定パラメータ、測定モードの設定などをすべてマイクロ・プロセッサを使って行っており、マン・マシン・インターフェイスが従来よりも改善されている。また外部雑音等によりビート周期の測定誤差が発生すると、異常なバラクタ制御電圧  $V_c$  が出力される危険性がある。このため新しい  $V_c$  と前回の  $V_c$  の差が基準値よりも大きい場合 ( $\Delta f_c \geq 25 \text{ Hz}$  に相当) は、異常値として棄却する機能を備えており、信頼性が高い。ビート周期の測定は150周期平均(124秒)で行っている。

自動同調により短期安定度はフリーランニング時より少し劣化するため、VLBI実験では、実験前に  $f_c$  を  $f_H$  に一致させ、観測中はフリーランニング運転をしている。

### 3. K-3用メーザの周波数安定度

K-3用メーザは昭和58年3月に完成した後、9月上旬まで国分寺本所で総合調整と特性測定が行われた。第7図はK-3用メーザの相互周波数安定度であり、8月26日から8月31日まで約1週間にわたって測定された。図中の測定点の上の数字は測定データの個数を示している。測定は2.3で述べた自動同調系で作られるメーザ相互間のビート周波数を取り出し、その周期測定から周波数安定度を求めている。測定帯域幅は2 Hz であり、メーザは2台ともフリーランニング状態で運転している。



第7図 K-3用水素メーザの周波数安定度

メーザは2台ともフリーランニング状態で運転している。

第7図に示されているように  $\tau < 20$  秒では周波数安定度は  $\tau^{-1}$  特性を示しており、受信・位相同期系の付加雑音の影響が支配的になっている。  $20 < \tau < 1000$  秒では  $\tau^{-1/2}$  特性を示しており、メーザの擾乱雑音による影響が支配的になっている。特に  $\tau = 830$  秒では  $2.4 \times 10^{-15}$  という最も優れた安定度を示している。VLBI実験では1つの電波星の観測時間は信号強度にもよるが、一般に数百秒から数千秒程度になり、この時間領域でのメーザの周波数安定度が問題になるわけであるが、K-3用メーザでは  $500 < \tau < 5000$  秒で  $3 \times 10^{-15}$  以下というVLBI実験にとって十分な周波数安定度を達成している。 $\tau > 3000$  秒では周波数安定度は徐々に悪くなっているが、それでも  $\tau = 10^5$  秒で  $1.4 \times 10^{-14}$  という優れた安定度を達成している。この時間領域でこのように優れたフリーランニング安定度は従来の実験室形メーザでもまだ得られておらず、K-3用メーザは非常に優れた特性を持っていることを示している。 $\tau > 3000$  秒で周波数安定度が悪くなっている原因としては次の2つが考えられる。第1の原因として静磁場発生用コイルの電流源の変動が考えられる。電流源の安定度は2.1.1で述べたように低い静磁場で運転する場合には問題はないが、メーザの周波数安定度測定では2台のメーザ間のビート周波数(約1 Hz)を発生させるために一台のメーザには約20 mGというかなり大きな静磁場を加えている。K-3用メーザに使用している電流源の安定度仕様は  $5 \times 10^{-5}/\text{day}$  であるから、20 mG で運転した場合(2)式から  $\Delta f_H/f_H$  は  $7.8 \times 10^{-14}/\text{day}$  にもなる。実際の周波数安定度は  $\tau = 1 \text{ day}$  で  $1 \times 10^{-14}$  が得られているが、これは電流源の実際の安定度が仕様よりも優れているためと思われる。しかし  $\tau > 3000$  秒ではメーザの周波数安定度は静磁場発生用コイルの電流源により制限されていることは十分にあり得ることである。このためこの電流源に、より優れた特性のものを使用することで、 $\tau > 3000$  秒での周波数安定度は改善される可能性がある。実際のVLBI実験では、実験システムに標準周波数を供給するメーザの静磁場を十分小さくして運転すれば電流源の影響は無視できる。 $\tau > 3000$  秒での周波数安定度劣化の第2の原因としては共振器周波数のドリフトが考えられる。メーザは7月末に一度真空ベーキングされており、このため8月中旬頃までメーザ周波数はかなり大きなドリフトを示しており、この影響が周波数安定度測定中も若干残っていた可能性がある。

メーザの周波数を変動させる要因には2.2で述べたメーザ・システム内部の雑音のほかに、メーザの置かれている環境の変化がある。特に室温、外部磁場、大気圧の

変動, 及び機械的振動は無視できない影響をメーザに与える. これらの要因のうち大気圧の変動, 及び機械的振動は測定装置の問題等があり評価できなかつたため, 室温・外部磁場についての評価を行った<sup>(15)</sup>. まず室温変動の影響だが, 急激な室温変化に対してはメーザの周波数はあまり変化しないが, ゆっくりした室温変化に対してはある程度影響を受ける. このため室温を  $6.5^{\circ}\text{C}$  上昇させ(室温上昇の時定数  $3.9$  時間),  $24$  時間後にビート周波数の変化を測定した. この測定期間中, 基準メーザとして別室に置かれた実験室形メーザを使用しており, ビート周波数の変化は被測定メーザの周波数変化だけを反映している. 測定結果から K-3 用メーザの室温変化による周波数変化率は  $2.3 \times 10^{-14}/\text{K}$  であり, 室温を  $1^{\circ}\text{C}$  の精度で制御すれば, VLBI 実験で要求される性能はほぼ満足されることになる. 次に外部磁場の変動の影響であるが, これはメーザの真空ベル・ジャー上にヘルムホルツ・コイルを巻き垂直方向に  $1$  ガウスの磁場を印加し, その時のビート周波数の変化を測定した. この結果  $1.0 \text{ mOe}$  の静磁場で運転した場合, メーザの外部磁場変化による周波数変化率は  $2.5 \times 10^{-13}/\text{G}$  であり, 通常の地磁気変化程度の外乱は十分に無視できる.

#### 4. ま と め

K-3 型 VLBI システムの標準周波数・時刻源となる水素メーザを 2 台開発した. 開発された水素メーザは磁気シールドをすべて真空中に設置し, 熱輻射シールドとしても機能させており, 共振器部で  $0.001\text{K}$  という良好な温度安定度が得られている. さらに共振器を皿パネの非線形特性を利用して固定することにより, 共振器に加わる機械的歪みの変動をおさえ安定化を計った結果  $500 \text{ Hz/K}$  という共振器周波数温度変化率を得ている. 受信・位相同期系および自動同調系の構成は従来の実験室形メーザと基本的には大きな違いはないが, 受信系のフロント・エンド部全体を恒温化したり, 自動同調の制御にマイクロ・プロセッサを使用し操作性, 信頼性を高めている.

今回開発された K-3 用メーザは従来の実験室形メーザよりも大幅に小形化されており, より優れた周波数安定度が得られている. 実測された周波数安定度は  $\tau=830$  秒で  $2.4 \times 10^{-15}$ ,  $\tau=10^5$  秒で  $1.4 \times 10^{-14}$  である. 長期の安定度は静磁場発生用コイルの電流源の安定度により制限されている可能性があり, 電流源を改善することでより優れた長期安定度が期待できる. また室温変化のメーザへの影響は  $2.3 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ , 外部磁場の変動による影響は  $2.5 \times 10^{-13}/\text{G}$  であり, VLBI 実験で要求される性能を十分に満足しており, 既に実施された三回の日米

VLBI 実験においても安定に動作し実験に貢献している.

メーザは国分寺本所で調整された後, 昭和58年9月上旬に鹿島支所へトラックで輸送されたが, 輸送によるトラブルもなく鹿島設置後短時間で発振を開始し, その後約7ヶ月にわたり2台とも順調に連続運転を行っており, 今後も VLBI 実験において重要な役割を果たして行くものと期待される.

#### 謝 辞

最後に今回の K-3 用水素メーザ開発の機会を与えてくださった佐分利元 VLBI 本部長, 吉村主幹をはじめ関係各位に厚く御礼申し上げます.

また, メーザ開発の過程においては林物性応用研究室長及び中桐原子標準研究室長はじめ同研究室一同からは有益な助言をいただきました. ここに深く感謝します.

さらに実際のメーザ製作にあたっては安立電気の小林正紀氏ほか多数の方々の御協力をいただき, ここに深謝します.

#### 参 考 文 献

- (1) 郵政省電波研究所, 超高精度電波干渉計 システム (K-3) 研究開発概念書, pp. 48-68, 1980
- (2) 河野宣之; "I-2. VLBI の原理", 電波季, **24**, 130, pp. 455-462, Sep. 1978
- (3) Kleppner, D., Goldenberg, H. M. and Ramsey, N. F.; "Theory of the Hydrogen Maser", Phys. Rev. **126**, 2, pp. 603-615, Apr. 1962
- (4) Kleppner, D., Berg, H. C., Crampton, S. B., Ramsey, N. F., Vessot, R. F. C., Peter, H. E. and Vanier, J.; "Hydrogen Maser Principles and Techniques", Phys. Rev. **138**, 4A, pp. A 972-A983, May 1965
- (5) Audoin, C., Schermann, J. P. and Grivet, P.; "Physics of the Hydrogen Maser", Advances in Atomic and Molecular Physics, Vol. 7, Academic Press, pp. 2-45, 1971
- (6) Urabe, S., Nakagiri, K., Ohta, Y., Kobayashi, M., and Saburi, Y.; "Majorana Effect on Atomic Frequency Standards", IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-29**, 4, pp. 303-310, Dec. 1980
- (7) 森川容雄, 占部伸二, 太田安貞; "2 水素メーザ原子周波数標準器", 電波季, **29**, 149, pp. 69-95, Feb. 1983
- (8) Levine, M. W., Vessot, R. F. and Mattison, E. F.; "Performance Evaluation of the SAO VLG-11



- Atomic Hydrogen Maser", Proc. 32nd Ann. Symp. on Frequency Control, pp. 477-485, 1978
- (9) ばね技術研究会編, ばねの設計, 丸善, pp. 121-218, 1978
- (10) 平修二, 現代材料力学, オーム社, pp. 149-152, 1979
- (11) Cutler, L. S. and Searle, C. L. ; "Some Aspects of the Theory and Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards", Proc. IEEE, 54, 2, pp. 136-154, Feb. 1966
- (12) Brousseau, R. and Vanier, J. ; An Electronic System for the Tuning of Masers", IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-22**, 4, pp. 367-375, Dec. 1973
- (13) 太田安貞, 吉村和幸, 渋木政昭, 中桐紘治, 森川容雄, 小林正紀, 佐分利義和 ; "水素メーザ空胴共振器の自動同調について", 電波季, 20, 106, pp. 39-58, Jan. 1974
- (14) Audoin, C., Lesage, P., Vlennet, J. and Barillet, R. ; "Analysis of H-Maser Autotuning Systems", Proc. 32nd Ann. Symp. on Frequency Control, pp. 531-541, 1978
- (15) 森川容雄, 太田安貞 ; "VLBI 用高安定水素メーザ", 昭58 信学総全大, 2355

