

資料

3. 周波数標準

3(2). 水素周波数標準器の現状

森川容雄\*

(昭和54年10月20日受理)

HYDROGEN FREQUENCY STANDARDS

By

Takao MORIKAWA

1. ま え が き

水素メーザは従来から優れた短期周波数安定度を誇っている。また長期周波数安定度も最近の研究により大幅に改善され、平均化時間  $\tau$  が  $10^3 \sim 10^6$  秒の領域で  $10^{-15} \sim 10^{-16}$  という優れた安定度が報告されている。この優れた安定度のため、VLBI、時刻保持、衛星追尾、航法などの分野への応用が考えられ、このため小形可搬水素メーザの開発研究が盛んに行われている。また、最近発表された受動型水素メーザは、従来の発振型水素メーザの大きな問題点であったプリング効果をほぼ解決し、優れた長期安定度が報告されており、次世代の水素周波数標準器として非常に有望である。

ここでは水素周波数標準器の安定度を決定する種々の物理的要因について解説し、現在の RRL 水素メーザの成果について報告するとともに、現在の小形水素メーザと受動型水素メーザの研究開発状況を概観してみたい。

2. 水素メーザの安定度

水素メーザは、現在実用化されている原子周波数標準器の中で最も優れた短期安定度を持っている。しかしその周波数は種々の物理的要因に影響される。これらの物理的要因を把握することは水素メーザの安定度特性を理解するうえで重要である。これらの要因には、主なものとして熱雑音、プリング効果、2次ドップラ効果、wall シフトの温度及び経年変化、磁界変動などがある。

これらのうち熱雑音の影響は比較的短い  $\tau$  で支配的になり、次式で表される<sup>(1)</sup>。

$$\frac{\sigma(\langle \dot{\phi} \rangle)}{2\pi f_H} = \left\{ \frac{kT}{2P} \left( \frac{Ff_1'Q_e}{2\pi f_H^2 \tau^2 Q_{cl}} + \frac{1}{Q_l^2 \tau} \right) \right\}^{1/2} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $k$ : ボルツマン定数  $P$ : 発振パワー

\* 周波数標準部 原子標準研究室

$F$ : 系の NF  $f_1'$ : 系の帯域幅  $Q_e$ : 外部  $Q$   
 $Q_{cl}$ : 共振器負荷  $Q$   $f_H$ : 原子遷移周波数  
 $Q_l$ : 原子の共振線幅

(1)式の第1項は受信系の付加雑音による項で、系の帯域幅に依存し  $\tau^{-1}$  特性を示す。第2項はメーザの擾乱雑音による項で系の帯域幅に依存せず  $\tau^{-1/2}$  特性を示す。 $\tau$  が十分大きいときあるいは  $f_1'$  が十分小さいとき擾乱雑音の項が支配的になる。

更に  $\tau$  が大きくなると、共振器周波数  $f_c$  の変動に起因するプリング効果<sup>(2),(3)</sup>の影響が支配的になる。プリング効果は次式で表される。

$$f_m - f_H \approx P_l(f_c - f_H) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $f_m$ : メーザ発振周波数  $f_c$ : 共振器中心周波数  $P_l$ : プリング係数

(2)式からわかるように、 $f_c$  の変動は  $f_m$  の安定度に影響する。発振型水素メーザでは  $P_l$  は  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  であるので  $1 \times 10^{-14}$  の安定度を得るためには  $f_c$  を  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  程度に安定化する必要がある。このため共振器には高精度の温度制御と機械的安定性が要求される。実際、発振型メーザの長期安定度を決定する一番大きな問題は、この共振器の温度変動であり、このため後述するように共振器の温度制御とともに共振器の自動同調が必要になる。

温度に依存する周波数変動要因として他に2次ドップラ効果と wall シフトの温度変化がある。2次ドップラ効果は次式で表される<sup>(2)</sup>。

$$\frac{\Delta f_m}{f_H} = -\frac{v^2}{2c^2} = -\frac{3kT}{2mc^2} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $v$ : 水素原子のバルブ内での平均速度  
 $c$ : 光速  $m$ : 水素原子の質量

2次ドップラ効果による周波数の温度変化率は、 $-1.38 \times 10^{-13}/K$  である。これに対し wall シフトの温度変化

率は  $+1 \sim 5 \times 10^{-13}/K$  である。wall シフトには経年変化があり、これは周波数変動の要因になる。NRC の Morris の報告によると、これは  $3 \sim 8 \times 10^{-13}/\text{年}$  である<sup>(4)</sup>。

磁界変動も水素メーザの安定度を悪化させる大きな要因である。水素原子のエネルギー単位は磁場に依存し、零磁場では単位が縮退している。この縮退を解くために一様な静磁場を加える。このとき  $f_H$  は次式で表される<sup>(2)</sup>。

$$f_H = f_{H_0} + 2750H^2 \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $H$  : 静磁場強度 (エルステッド)

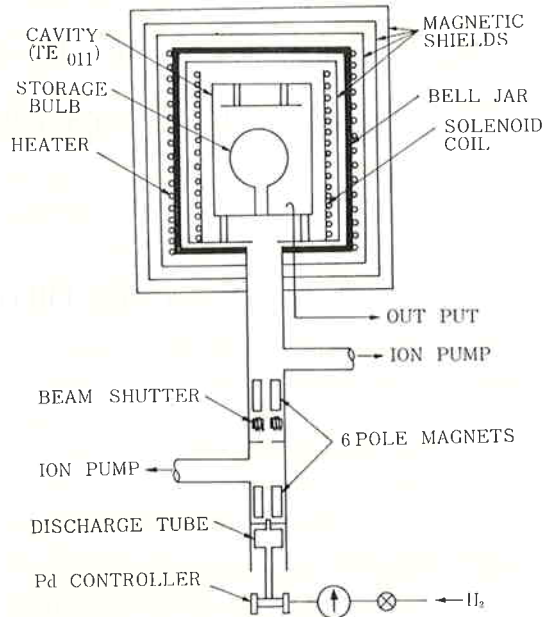
磁場の変動による周波数変動は次式のようになる<sup>(2)</sup>。

$$\Delta f_H / f_H = 3.9 \times 10^{-6} H \Delta H \quad \dots\dots(5)$$

周波数の磁場に対する変動率は  $H$  に依存するため、できるだけ小さい  $H$  で使用することが望ましい。このため普通  $10\text{mOe}$  以下で使用する。 $10\text{mOe}$  で使用したとき、 $1 \times 10^{-14}$  の安定度を得るためには  $H$  の変動を  $2.6 \times 10^{-5}$  以下に押さえる必要がある。このため外部磁場の影響を除くため、普通 3 重あるいは 4 重の磁気シールドを行う。

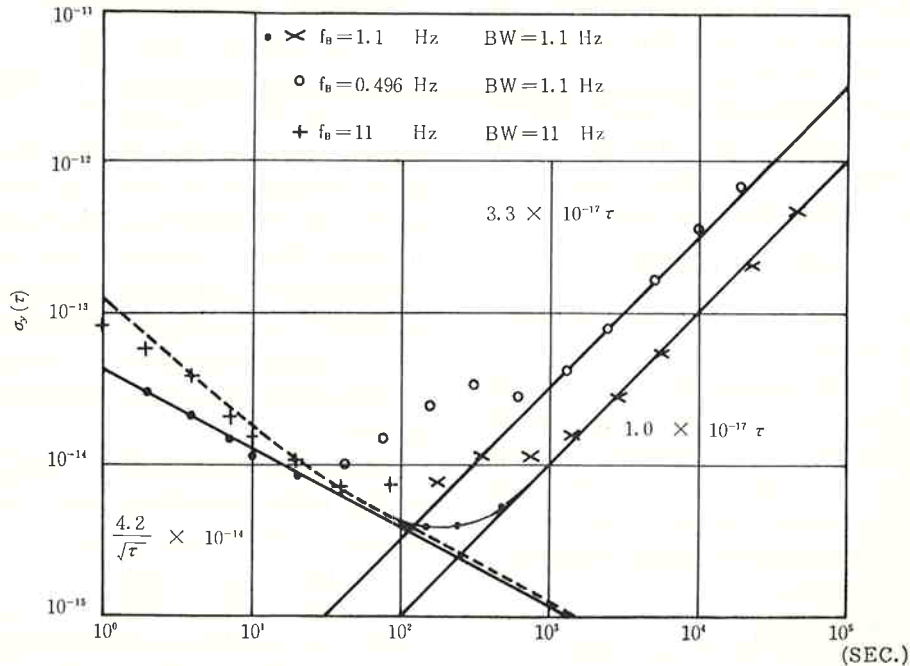
### 3. RRL 水素メーザの現状

RRL では従来の商用セシウム時計群による原子時よりも安定度の優れた原子時発生を目的として数年前より



第1図 RRL メーザ構造図

新設水素メーザを建設し研究を行ってきた<sup>(5), (6)</sup>。原子時発生には旧メーザでは満たすことができなかった長期連続運転での高い信頼度と安定度が要求される。我々は旧メーザの研究成果に基づき、長期連続運転での信頼度の



STABILITY OF FREE RUNNING RRL MASER

第2図 RRL メーザ安定度 (自走状態)

向上を図るとともに、長期安定度を悪化させる主要因である  $f_c$  の変動を共振器の温度特性の改善、及び自動同調により減少させ、短期安定度  $7 \times 10^{-13}$  ( $\tau \approx 40 \sim 90$  秒)、長期安定度  $2 \times 10^{-14}$  以下 ( $\tau < 10^6$  秒) を得ることができた。更に商用セシウム時計との安定度比較においても水素メーザは約 1 桁近く優れていることが確認された。

第 1 図に RRL メーザの構造を示す。水素分子ガスは高周波放電により原子に解離した後、単位選別用 6 極マグネットを通過し、発振に必要な  $F=1, m_F=0$  の原子が選択され、反転分布が形成される。選択された原子は共振器中に置かれたストレージ・バルブ内に収束し、内面にコーティングされたテフロン薄膜と弾性衝突を繰り返しながらバルブ内に約 1 秒間滞在する。原子はこの間に共振器の電磁場と相互作用し低準位に遷移しマイクロ波を誘導放出する。水素原子のエネルギー準位縮退を解くため、ソレノイド・コイルにより一様な静磁場を加えるとともに、外部磁場の影響を除くために 4 重の磁気シールドを行っている。共振器の温度制御は真空ベル・ジャー上のヒータで行っている。

第 2 図は RRL メーザの自走状態 (共振器自動同調を行わない状態) の安定度である。発振パワーが約  $4 \times 10^{-12}$  W と比較的大きく  $\tau \approx 40$  秒で  $7 \times 10^{-13}$  という短期安定度が得られている。図中の点線は雑音機構から決まる安定度の理論値であり  $\tau < 100$  秒で実験値とよく一致している。しかし  $\tau > 100$  秒では理論値と実験値の違いが大きくなる。これは  $f_c$  の温度変動が原因であることが確認されている。特に  $10^2 < \tau < 10^3$  秒では周波数変動が室温変動とはっきりした相関を示しており、 $f_c$  が室温により振られていることが原因である。 $\tau > 10^3$  秒の動

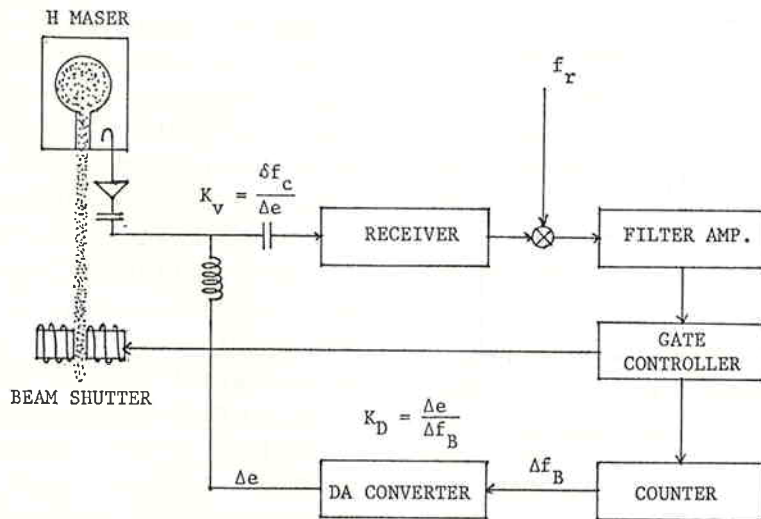
きは  $f_c$  のドリフトが原因である。このため共振器の温度制御を改善すれば、安定度の向上が更に期待できる。

$f_c$  のドリフトは共振器温度制御だけでは除くことができないので、共振器の自動同調<sup>(7)~(9)</sup>が必要になる。第 3 図は自動同調系のブロック・ダイアグラムである。(2)式において  $P_l$  を変化させると  $f_c \approx f_H$  のとき  $f_m$  に変化が生ずるので、これを検出して  $f_c = f_H$  になるように共振器を制御するのが自動同調の原理である。 $P_l$  の変化は水素ビーム量を変えて行う。メーザ出力を基準信号  $f_r$  と混合しビート信号  $f_B$  を得た後、ビームの  $H_i, L_0$  状態での  $f_B$  の差  $\Delta f_B$  を計測する。 $\Delta f_B$  に比例した誤差信号を同調用パラクタ・ダイオードに加え  $f_c$  を制御する。

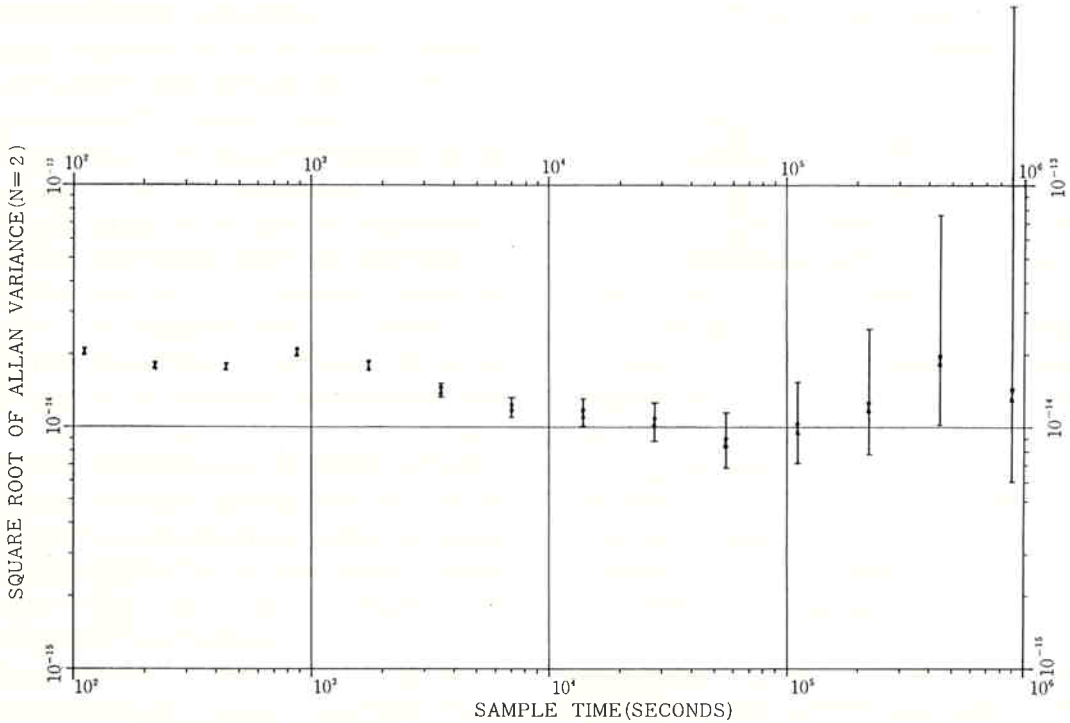
第 4 図は自動同調を行ったときの長期安定度の測定結果である。 $\tau > 10^3$  秒でのドリフトがなくなり長期安定度が大幅に改善されて  $\tau < 10^6$  秒で  $2 \times 10^{-14}$  以下という安定度が得られている。 $10^2 < \tau < 10^3$  秒で安定度が自走状態に比べ若干悪くなっているが、これはビーム強度を切り替えるときに発生する過渡現象が主な原因と思われる。第 5 図は商用セシウム時計との位相比較から求めた安定測定結果である。このデータはまだ測定個数が少ないので結果を定量的に評価するには無理があるが、水素メーザの安定度が商用セシウム時計に比べて約 1 桁弱優れていることがわかる。このことから高安定な原子時発生への大きな展望が開けたと言える。

#### 4. 小形水素メーザの現状

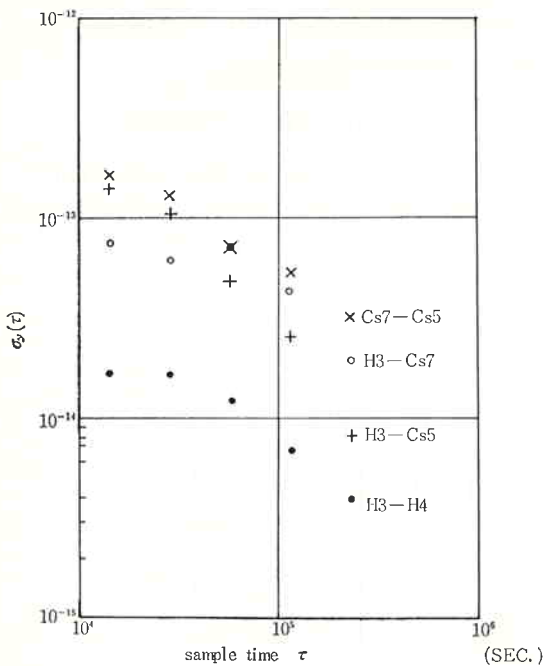
現在安定度の優れた小形可搬水素メーザは VLBI, ロケット搭載などの分野から需要があり、研究開発が進め



第 3 図 自動同調ダイアグラム



第4図 RRL メーザ安定度 (自動同調状態)



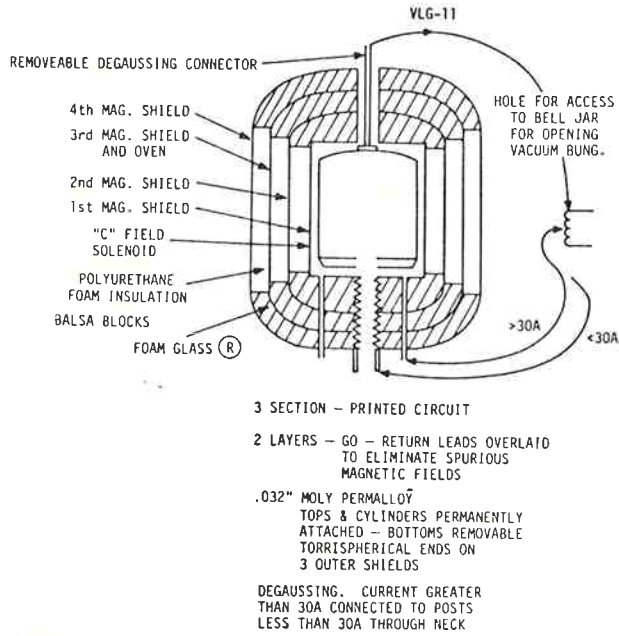
第5図 RRL 標準器の周波数安定度比較

SAO の研究は長年にわたる重力場のレッド・シフト測定用のロケット搭載用メーザの技術の延長上にあり、現在はフィールド・タイプの小形メーザ VLG-11 の開発研究を行っている。VLG-11 は既に NRL, Max Planck 研究所で使用されているという実績がある。VLG-11 は共振器の自動同調なしでも長期にわたり良好な安定度が得られること、及び可搬型でありかつ機械的に頑丈であることを目標に設計されており、 $\tau$  が 1400 秒から 20000 秒で  $1 \times 10^{-15}$  以下という非常に優れた安定度を誇っている。このような優れた特性を得るために共振器、温度制御、磁気シールドを中心に優れた改善がなされている。VLG-11 の大きさは、高さ 132 cm, 幅 56 cm, 奥行 76 cm, 重量 300 kg である。

磁気シールドの特色はドーム型シールドの採用及び発泡ガラス材のブロックによるシールド支持により、シールドに加わる局所ストレスを極力小さくしていることである。この局所ストレスは磁気シールドの透磁率を劣化させる作用があり、この影響は解析しにくい。この磁気シールドの改良により磁気シールド率は約 1.5 倍増加している。また静磁場コイルに多層構造のプリント・パターン化されたソレノイド・コイルを使うことでリード線の影響による不要磁場をなくし非常に一様な静磁場を発生させている点も注目すべきである。第6図に VLG-11 の磁気シールドの構造を示す。

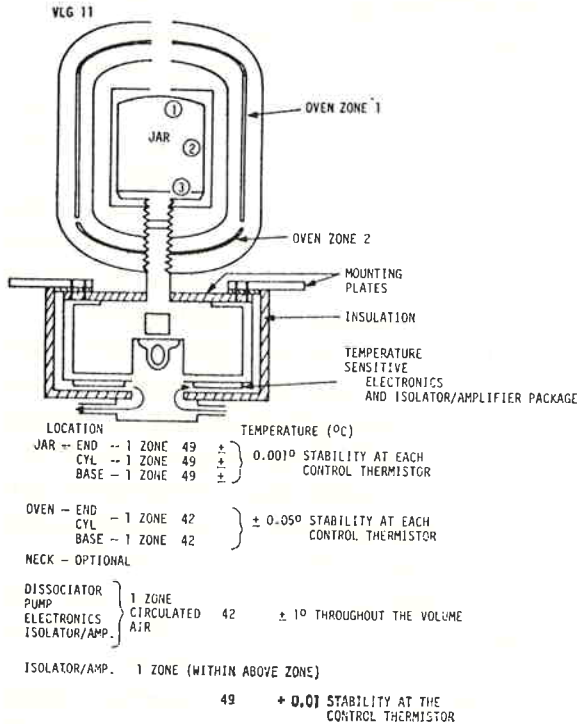
られている。特にスミソニアン天文台 (SAO) 及び NASA ではこの分野で優れた研究を行っている。

4.1 SAO 水素メーザ<sup>(10), (11)</sup>



Ⓡ PITTSBURGH-CORNING

第6図 VLG-11 の磁気シールド



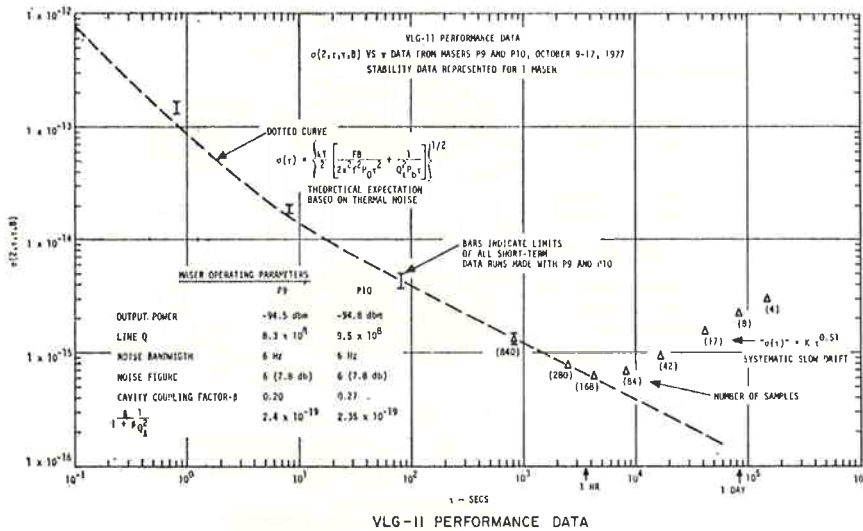
第7図 VLG-11 の温度制御系

共振器・バルブ系の中心周波数の変動はプリング効果

によるメーザの安定度を悪化させる一番大きな問題である。VLG-11では共振器に熱膨張係数の非常に小さいセルビット（膨張係数  $2 \sim 5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ）を採用し、更にストレージ・バルブの誘電体温度変動を小さくするためバルブを軽量化することで共振器・バルブ系の周波数変化率を  $-1 \text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$  から  $-300 \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$  に改善している。更に熱膨張による共振器に加わるストレスを皿型ワッシャーとローラを使って吸収している。また大気圧に起因するストレスから絶縁するため基部を floating 構造にしている。

更に共振器の温度制御にも細かい配慮が見られる。SAOでは周囲温度変動に対する共振器の依存性は主に真空ベル・ジャーの温度勾配に原因することが確認された。このためベル・ジャーは上、中、下部に分けそれぞれ独立に温度制御することでベル・ジャーの温度勾配を小さくしている。更にベル・ジャーの外部にオープンを設け、上中部と下部に分け独立に温度制御している。結局全部で五つの独立した温度制御により、ベル・ジャー上で  $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ 、オープン上で  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$  という優れた温度特性が得られている。周囲温度変動は受信系初段のアイソレータ、プリ・アンプの特性に影響を与え、共振器のカップリング、受信系の位相変動などを引き起こす。このためプリ・アンプとアイソレータは独自の恒温





第8図 VLG-11の周波数安定度

槽に入れ±0.01°Cの温度制御を行っている。この恒温槽及び放電管、他の温度に比較的依存する回路系（ベル・ジャー温度制御用プリ・アンプ、共振器同調用ダイオード電源等）は±1°Cに制御された空気還流中に設置されている。第7図に VLG-11の温度制御系を示す。

以上のように VLG-11は磁気シールド、共振器、温度制御を中心に非常に注意して設計されており、自動同調なしでも長期にわたり優れた安定度が得られている。第8図は VLG-11の安定度測定結果であり、 $\tau$ が1400秒から20000秒で $1 \times 10^{-15}$ 以下という非常に優れた安定度が得られている。 $\tau$ が1時間以上になると安定度が悪くなっているが、これは系統誤差（共振器のドリフトと思われる）が原因である。 $\tau < 4000$ 秒では安定度は熱雑音機構から決まる理論値と一致しており、このことから SAOでは従来から言われていた水素メーザのフリッカ・レベルは存在せず安定度の制限要因は共振線幅内の雑音だけであると考えている。

VLG-11は周囲環境の変化に対しても優れた特性を示している。外部磁場の影響はメーザをヘルムホルツ・コイル内におよそ0.4ガウスの磁場を加え測定した。機種により差はあるが、 $5.7 \sim 0.3 \times 10^{-13}/\text{Gauss}$ である。 $(f_0 = 500 \text{ Hz})$ 周囲温度に対する依存性は周囲温度を24°Cから31°Cに変化させて測定した。このとき周波数変化は時定数の長い部分と短い部分に分けられるが、長い部分で $2.0 \times 10^{-14}/^\circ\text{C}$ 、短い部分で $6.3 \times 10^{-15}/^\circ\text{C}$ である。大気圧の影響は平均 $-1 \times 10^{-15}/\text{inch Hg}$ であった。

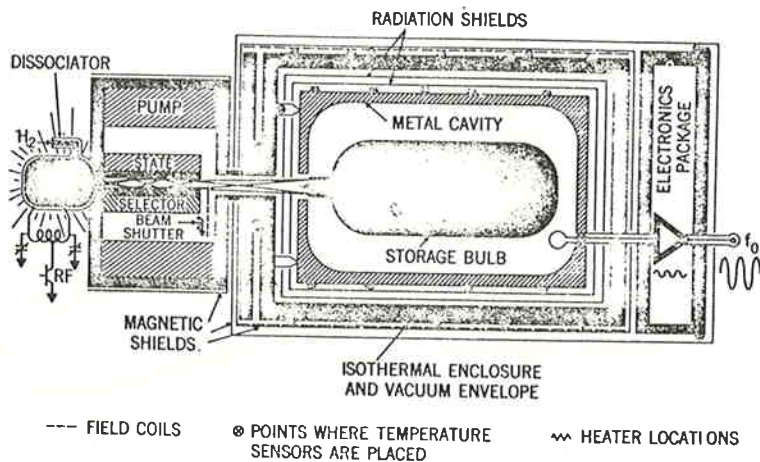
4.2 NASA 水素メーザ<sup>(12), (13)</sup>

NASAでは1966年以来小形可搬水素メーザの開発研

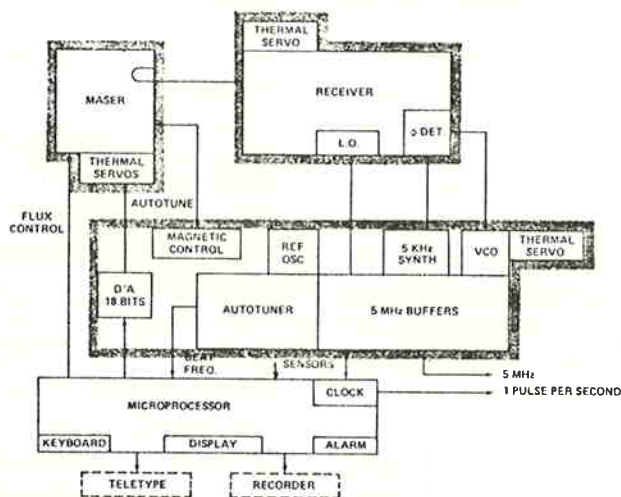
究を精力的に行ってきた。特に初期の実験器 NX 1に続いて開発された NP シリーズは、過去6年間にわたり、平均14回、28000マイルの移動を行い、世界各地で現地運転を行いテストされた実績を持っている。NASAではNPシリーズの成果に基づき実験器 NX 2, NX 3を建設した後、現在ではNPシリーズを Johns Hopkins Univ.と協同して開発中である。

第9図に NASAメーザの構造図を示す。NASAメーザの特徴は主に共振器やビーム・オプティクスに見ることができる。共振器はアルミ製である。アルミ製共振器は石英やセルビットに比べ機械的に頑丈であり、工作がしやすく、また熱伝導度が大きいので共振器の温度勾配を小さくできるという利点がある。またアルミの熱膨張係数が大きいことを利用して共振器周波数の微調を温度で行っている。しかし熱膨張係数が大きいということは $f_0$ の安定化のためには、高精度の温度制御が要求されるということも意味している。このため NASAでは共振器に直接温度制御用ヒータを巻くとともに更に真空ベル・ジャーにヒータを巻いて温度制御を行っている。

ビーム・オプティクスの特徴は準位選別用磁石に6極磁石ではなく、4極電磁石を使っている点である。4極磁石は6極磁石に比べ軸上を走る原子の選別効率が高く、また極間の間隔を大きくできるので真空排気効率を高くすることができるという利点がある<sup>(14)</sup>。また電磁石は磁場の強さを変えることができるので、ビーム・オプティクスのパラメータを最適値にすることができ、効率のよいビーム・オプティクスが得られる。このため真空ポンプを小形にすることができる。NPシリーズでは60 l/sのノーブル・ポンプを2台使用し、ポンプ寿命は6~7



第9図 NASA メーザの構造図



第10図 NR メーザのブロック・ダイアグラム

年以上である。また NR シリーズでは水素源に 高圧水素ガス・ポンペを使う代わりに KOH 水溶液の電気分解により水素を発生させている。これは高圧水素ポンペを空輸する場合問題があるからである。

第10図は NR メーザの電子回路系のブロック・ダイアグラムである。受信系、位相同期系、自動同調系など、ほとんど全ての回路が温度制御され、外部温度変化の影響を極力小さくしている。自動同調系では振幅一位相補正器を使い原子ビームを切り替えたときに発生する振幅一位相変換による位相シフトを 1 psec. に抑さえている。また自動同調用基準発振器として高安定水晶を内蔵している。自動同調はマイクロ・プロセッサにより制御される。この CPU は自動同調の制御以外に各部データの集録、出力秒信号の調整も行う。

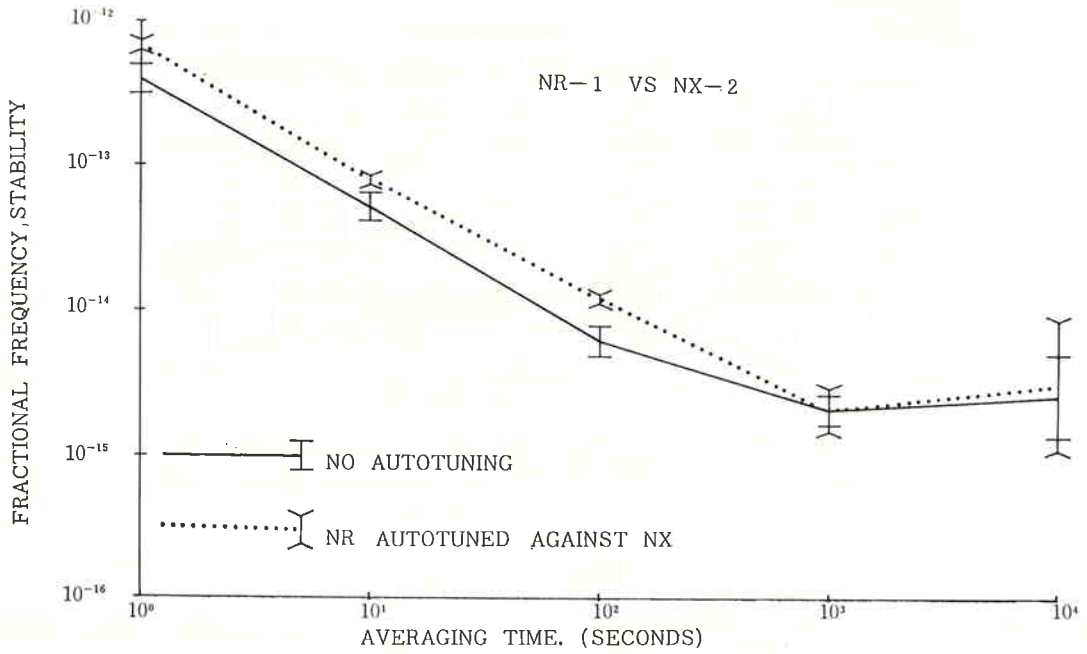
磁気シールドは四重のモリ・パーマロイで行い、シー

ルド入口の直径を小さくし不均一磁場を減少させている。磁気シールド率は  $2 \sim 6 \times 10^4$  程度である。

第11図は NR メーザの安定度である。  $10^8 < \tau < 10^4$  秒で約  $1 \sim 2 \times 10^{-15}$  という値が得られている。環境変化に対する依存性は温度が  $4.5 \times 10^{-14}/^\circ\text{C}$ 、磁界が  $1 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$ 、大気圧が  $5 \times 10^{-15}/\text{inch Hg}$  である。これらの値は SAO の VLG-11 と比較すると、わずかに劣るが、ほぼ誤差の範囲内と考えられ、結局この程度の値が現在の小形可搬水素メーザの最高の性能と考えてよいであろう。

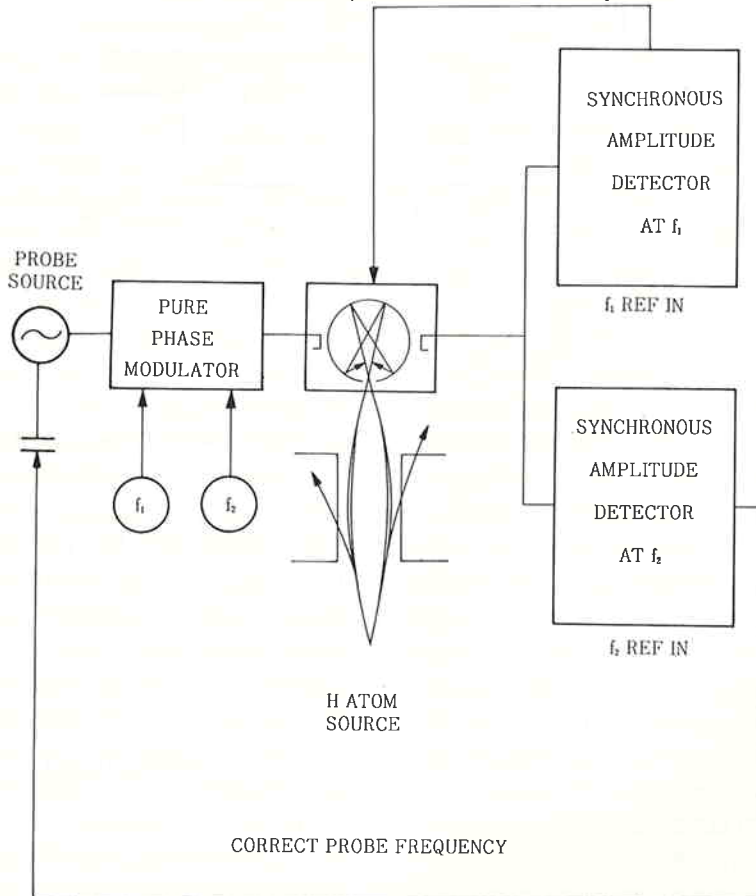
### 5. 受動型水素メーザ

NBS では 2, 3 年前から  $\tau$  が 1 日から 1 年で  $1 \times 10^{-14}$  以下の長期安定度の達成を目標として新しく受動型水素メーザの開発研究を行っている<sup>(15), (16)</sup>。この受動



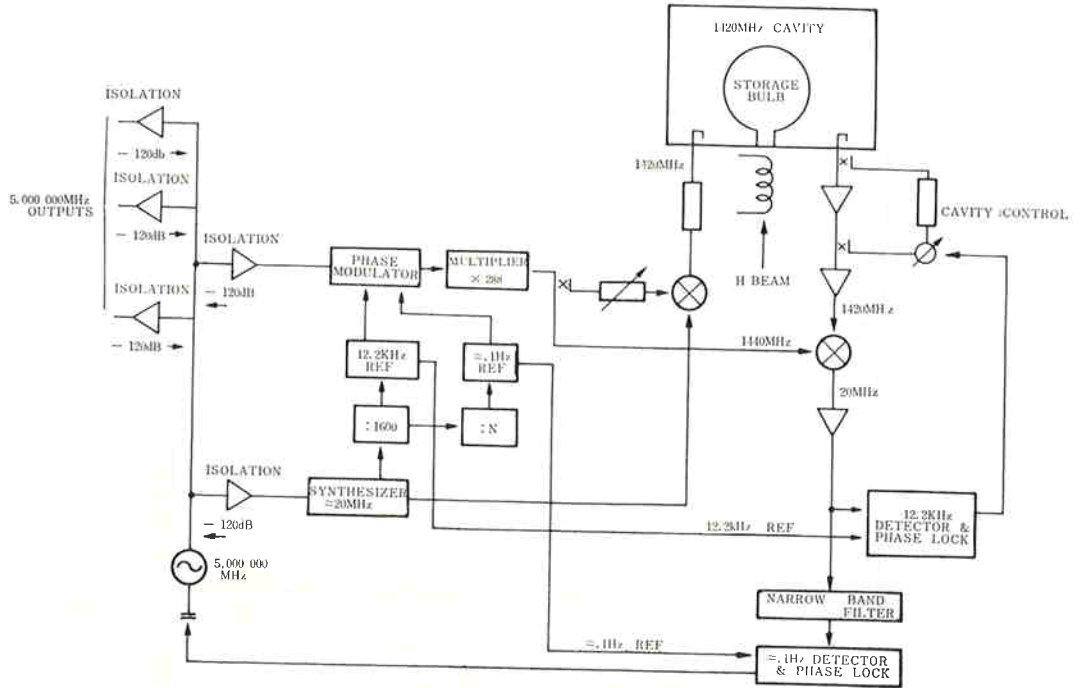
第11図 NRメーザの安定度

, CORRECT CAVITY FREQUENCY



第12図 受動型メーザ原理図





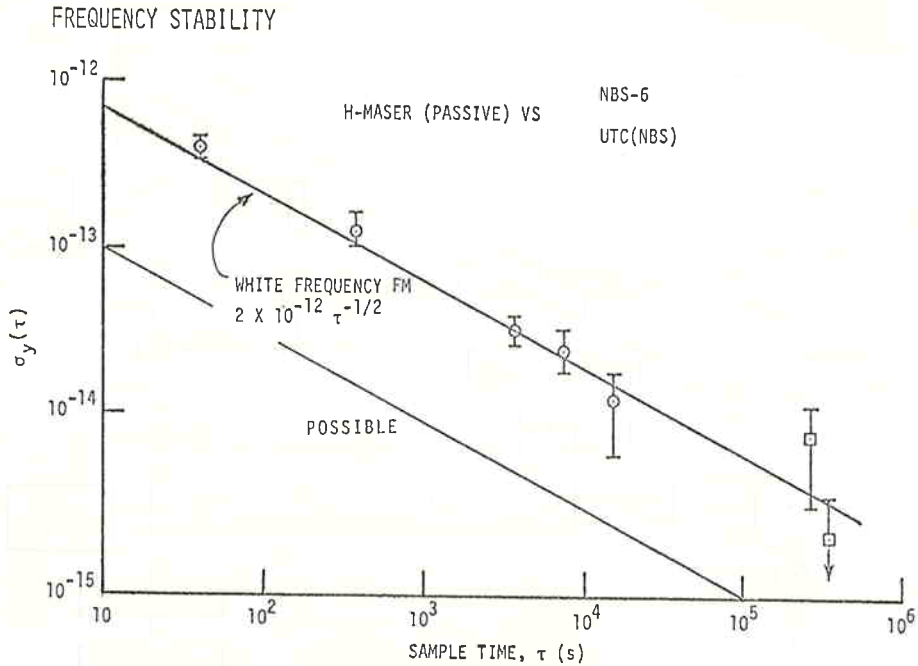
第 13 図 NBS 受動型メーザのブロック・ダイアグラム

型メーザの特色は従来の発振型メーザと異なり発振の閾値以下で動作するため、水素ビーム量と共振器Qを小さくすることができる点にある。このため発振型メーザで問題になっていた種々の周波数変動要因、シフト要因を大幅に減少させることができ、更に誘電体共振器の採用などにより全体を小形・軽量化することができる。特に発振型メーザの大きな問題点であったプリング効果はほぼ解決され、このため周波数の温度依存性は2次ドップラ効果と wall シフトによって決まり、 $1.3 \times 10^{-13}/K$  という小さな値が得られ温度制御が非常に簡単になり、優れた長期安定度が得られている。現在  $10 < \tau < 4 \times 10^5$  秒で  $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$  という特性が得られている。 $\tau$  が数日での安定度は1台の標準器で達成されたものとしては、これまで報告されたものの中で一番優れており、時刻保持へ応用した場合従来の複数台の商用セシウム時計によるアンサンブル平均よりも優れている。

第 12 図に受動型水素メーザの概念図を示す。受動型メーザの原理は水素原子の基底状態の超微細構造間の遷移を使うこと、及びビーム・オプティクス、ストレージ・バルブ、共振器などは従来の発振型メーザとほぼ同じであるが、発振の閾値以下で運転し、共振器に二つの周波数  $f_1$  と  $f_2$  で位相相調されたプローブ用マイクロ波を注入する点が異なる ( $f_1$  は共振器の半値幅、 $f_2$  は原子共振線の半値幅程度に相当する)。このとき水素原子

は量子発振器としてではなく、量子増幅器として動作する。共振器及び水素原子は位相変調されたマイクロ波に対し一種の周波数弁別器として働き、共振器からは  $f_1$ 、 $f_2$  で振幅変調された信号が得られる。 $f_2$  AM 成分の大きさはプローブ周波数と原子共振周波数の差に比例している。このマイクロ波信号は包絡線検波した後で位相同期検波し誤差信号を得てプローブ信号の原振である VCXO の周波数を制御する。同様に  $f_1$  AM 成分は  $f_c$  を制御し、常に  $f_c$  がプローブ周波数に一致するようにする。このように VCXO だけでなく共振器も同時に制御するため、プリング効果を大幅に減少させることができる。第 13 図に NBS の受動型メーザのブロック・ダイアグラムを示す。

受動型メーザは共振の閾値以下で動作するため、水素ビーム量を大きく減少させることができる。このためスピン衝突による原子共振線の線幅の広がりを小さくすることができる。この場合線幅はパルプの滞在時間を十分長くしてやれば、ほぼ wall による緩和だけで決定される。このように  $Q_L$  を大きくとれるため発振型メーザの問題点であったプリング効果を小さくすることができる。更にビーム量が小さいためスピン衝突シフト、Crampton 効果も小さくすることができるだけでなく、真空系の小形化、軽量化が可能である。



第14図 NBS 受動型メーザの周波数安定度

発振条件を満たさなくても良いということはビーム量だけでなく、共振器Qも低くすることができることを意味している。このことはプリング効果を小さくすることができるとともに、誘電体共振器の採用により小形化が可能であるという利点を持っている。NBSでは $\text{Al}_2\text{O}_3$ を誘電体に使い直径15cm、高さ15cm、体積1lの小形共振器の開発を行っている。この共振器の特色は小形であるばかりでなく、内面をテフロンでコーティングしストレージ・バルブを形成していることである。このため機械的に頑丈な共振器・バルブ系を構成できただけでなく、バルブを正確に共振器の中心に設置でき、Crampton効果を小さくすることができる。共振器Qは5000程度である。この共振器は更に真空バル・ジャーとしても使われる。

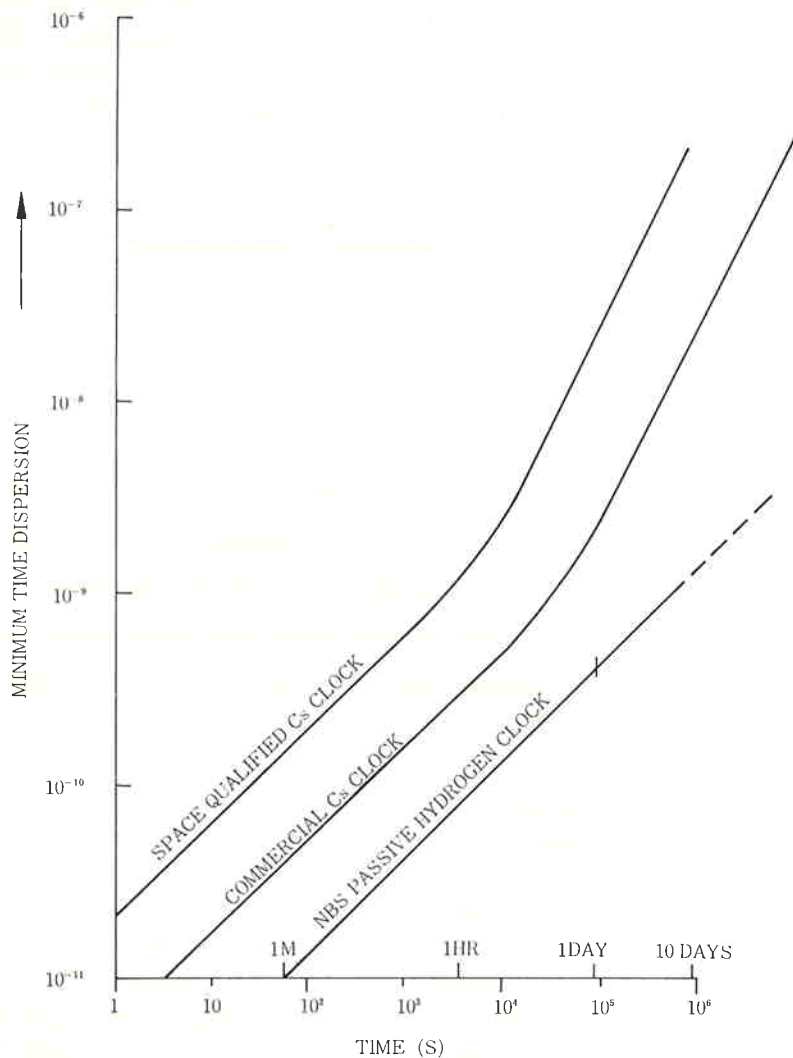
以上のようにプリング効果、スピン衝突、Crampton効果等を減少させることができるため受動型水素メーザでは優れた長期安定度が得られている。第14図はNBSの受動型水素メーザの安定度である。 $10 < \tau < 4 \times 10^5$ 秒で $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ という特性を示している。第15図は受動型メーザを時刻保持に応用した場合に得られる原子時の特性であり、セシウム時計の特性よりもはるかに優れていることがわかる。期待される精度は2ns/10daysである。

## 6. ま と め

RRL水素メーザの研究成果について報告するとともに、現在各分野から要求されている小形可搬水素メーザ及び研究が開始されたばかりではあるが、非常に将来性のある受動型水素メーザの研究状況を概観した。特に受動型水素メーザは最近NBS以外にも多くの研究機関が研究を開始しており、今後急速に研究が進んで行くものと思われる。

## 参 考 文 献

- (1) Cutler, L. S. and Searle, C. L.; "Some Aspects of the Theory and Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards", Proc. IEEE, 54, No. 2, pp. 136-154, Feb. 1966.
- (2) Kleppner, D., Goldenberg, H. M. and Ramsey, N. F.; "Theory of the Hydrogen Maser", Phys. Rev., 126, No. 2, pp. 603-615, Apr. 1962.
- (3) Audoin, C., Schermann, J. P. and Grivet, P.; "Physics of the Hydrogen Maser", Advances in Atomic and Molecular Physics, 7, pp. 2-45, 1971.
- (4) Morris, D.; "Time-Dependent Frequency Shifts in the Hydrogen Maser", IEEE Trans. IM., IM-27, No. 4, pp. 10-12, Dec. 1978.
- (5) 森川容雄, 太田安貞, 小林正紀; "水素メーザとその共振器自動同調", 第21回自動制御連合講演会,



第15図 原子時の特性比較

pp. 453—454, 昭53.11.

(6) 太田安貞, 森川容雄, 小林正紀; “水素メーザの自動同調と長期安定度の測定”, 第21回自動制御連合講演会, pp. 455—456, 昭53.11.

(7) Kleppner, D., Berg, H. C., Crampton, S. B. and Ramsey, N. F.; “Hydrogen-Maser Principles and Techniques”, *Phys. Rev.*, **138**, No. 4A, pp. A972—A983, May, 1965.

(8) Moriss, D. and Nakagiri, K.; “The Frequency Stability of a Pair of Auto-Tuned Hydrogen Masers”, *Metrologia*, **12**, pp. 1—6, 1976.

(9) 太田安貞, 吉村和幸, ほか; “水素メーザ空胴共振器の自動同調について”, *電波研季報*, **20**, No. 106, pp. 39—58, Jan. 1974.

(10) Levine, M. W., Vessot, R., Mattison, E., *et al.*; “A New Generation of SAO Hydrogen Masers”, *Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control (ASFC)*, pp. 525—534, 1977.

(11) Levine, M. W., Vessot, R. F. and Mattison, E. M.; “Performance Evaluation of the SAO VLG-11 Atomic Hydrogen Masers”, *Proc. 32nd ASFC*, pp. 477—485, 1978.

(12) Reinhardt, V. S., Kaufmann, D. C., *et al.*; “NASA Atomic Hydrogen Standards Program”, *Proc. 30th ASFC*, pp. 481—488, 1976.

(13) Rueger, L. J., Bates, A., Reinhardt, V. S., *et al.*; “NASA NR Hydrogen Maser”, *Proc. 32nd ASFC*, pp. 486—491, 1978.