

3-4 水素メーザ原子周波数標準器

3-4 Hydrogen Maser

伊東宏之 細川瑞彦 梅津 純 森川容雄 津田正宏 高幣謙一郎
植原正朗 森謙二郎

ITO Hiroyuki, HOSOKAWA Mizuhiko, UMEZU Jun, MORIKAWA Takao, TSUDA Masahiro, TAKAHEI Ken-ichiro, UEHARA Masaro, and MORI Kenjiro

要旨

日本における水素メーザの開発に対して通信総合研究所が果たした役割は大きい。本稿では、通信総合研究所における水素メーザ開発の歴史と水素メーザの動作原理について述べるとともに、最近のトピックとして衛星搭載用水素メーザについて最新の実験データから開発状況を詳解する。

Communications Research Laboratory (CRL) plays an important role in development of hydrogen maser in Japan. In this paper we describe history of development of hydrogen maser in CRL, and a principle of the hydrogen maser. And also, as a recent topics, we are also describe about the development of space-borne hydrogen maser.

[キーワード]

原子時計, 水素メーザ, 衛星搭載用超小型水素メーザ, 周波数安定度, サファイヤ共振器

Atomic frequency standard, Hydrogen maser, Space-borne hydrogen maser, Frequency stability, Sapphire loaded cavity

1 はじめに

1.1 CRLの研究開発の背景

通信総合研究所(CRL)における水素メーザの開発は1965年に開始された。翌1966年にはアメリカ、スイスに次いで世界で3番目の水素メーザ発振に成功している。さらにその後の研究成果をアンリツ株式会社に技術移転し、アンリツ株式会社から商用水素メーザが発売され国内の様々な研究施設で利用されている。

また、最近では衛星測位システム用の衛星搭載用超小型水素メーザの開発をアンリツ株式会社と共同で行っており、その研究成果を国内外の学会で発表してきた。

1.2 水素メーザの特徴と他の原子周波数標準器との比較

現在までに実用化されている主な原子周波数標準器としては水素メーザ型周波数標準器のほか、

- ・ルビジウム原子周波数標準器

- ・セシウム原子周波数標準器

が挙げられる。図1に各原子周波数標準器の一般的な周波数安定度を示す。

ルビジウム原子周波数標準器はルビジウム原子を封じ込めたガスセルを利用するもので、小型軽量化が可能であり、通信・放送分野の基準信号源として広く利用されている。周波数安定度は短期的にはセシウム原子周波数標準器と同程度であるが、長期安定度はセシウム原子周波数標準器と比較すると劣る。

セシウム原子周波数標準器はオープンで加熱させたセシウム原子を真空中に飛行させ、その際にマイクロ波と相互作用させて基準周波数を得るもので、長期安定度が優れていることが特徴である。また、一秒の定義がセシウム原子の遷移周波数から決められているため、ドイツ、フランス、アメリカ、日本等の標準研究機関ではセシウム一次周波数標準器を運用し、その確度評価結果を国際度量衡局(BIPM)に報告することで、TAIの確度向上に貢献している。CRLにおいても光励起型セシウム原子一次周波数標準

器CRL-O1を運用しており、年に数回のペースでBIPMに精度評価結果を報告している。

また最近、より高い周波数精度を得ることのできるセシウム原子一次周波数標準器として原子泉型周波数標準器の開発が進んでいる。これはレーザー冷却技術を用いてトラップした原子集団をマイクロ波と相互作用させる方法で、従来の熱ビームタイプと比較して一桁近い精度の向上が期待されている。

これらの原子周波数標準器と比較して、水素メーザ型周波数標準器の最大の特徴は短期安定度が非常に高いことである。その特徴を生かして超長基線電波干渉計(VLBI)の信号源や、一次原子周波数標準器のリファレンス信号源として利用されている。

水素メーザは、メーザ発振のための空洞共振器や、真空排気系、水素源などのために一般的にはサイズ、重量とも大きな物になる。

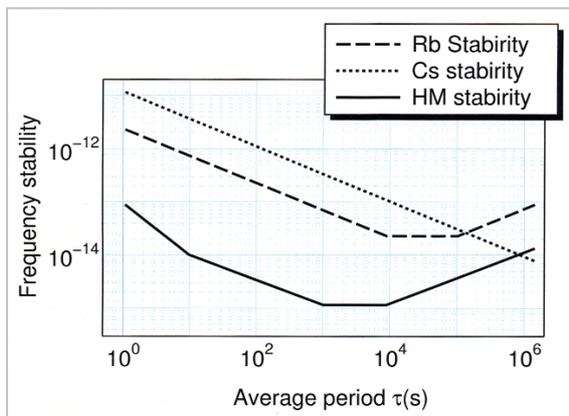


図1 原子時計の安定度

1.3 衛星搭載水素メーザの開発経緯

GPSに代表される衛星測位システムは、元々軍事目的のために開発されたが、今日では当初の目的を大きく越えて、カーナビゲーション、土木・建設測量、石油探査、タクシー・トラックの運用合理化、航空管制、地震予知、GPS気象学等に非常に広く応用されている。このように、GPSは既に現代社会にとって不可欠の社会基盤の一つになっており、その利用分野は巨大なマーケットに成長しているにもかかわらず、日本では衛星測位システムそのものは米国のGPSに完全に依存し、技術開発は全くなされて

こなかった。このような重要なシステムを特定の国に完全に依存するのは問題であるという議論は以前からなされていたが、最近、日本として衛星測位システムの技術開発を行うべきであるという動きが活発になってきている。宇宙開発委員会の衛星測位技術分科会は平成9年3月に「我が国における衛星測位技術開発への取り組み方針について」を答申し、当面我が国は衛星測位システムの要素技術を確立し、最小限の数の衛星により実証すべきであると報告している。この要素技術には(1)衛星搭載用原子時計、(2)衛星群時刻管理技術、(3)高精度衛星軌道決定技術の三つを挙げている。この答申に基づき、通信総合研究所(CRL)や宇宙開発事業団において関連研究が開始された。特に、(1)の衛星搭載用原子時計ではCRLはこれまでの研究開発成果[1][2]に基づき、衛星搭載用水素メーザ(SHM)の技術開発を平成9年度からアンリツ株式会社と共同で行っている。

衛星搭載仕様では温度環境や打ち上げ時の激しい機械的振動等、技術課題が多い。このため、1970年代に行われた重力シフトの検出を目的としたロケットによる弾道飛行実験[5]を除き、水素メーザの宇宙空間での使用実績はない。しかし、近年欧米では次世代衛星測位システムや宇宙ステーションへの応用のほか、スペースVLBI、一般相対論の検証等のscientificな応用も視野に入れたSHMの開発が行われている[6]。

2 原理と構造

2.1 原理と構造

図2に水素メーザの基本構造を示す。水素源からの水素分子ガスは、まず水素流量制御装置で流量を一定に制御された後、高周波放電により分子から原子に解離される。水素原子はコリメータにより指向性を持たされ原子ビームとして、真空中に放出され、準位選別磁石によりメーザ発振に必要な上準位の原子のみが選別され、マイクロ波共振器に向かって飛行する。水素原子は共振器内のストレージ空間内に約1秒前後滞在し、この間に下準位に遷移するときに1.42GHzの電磁波エネルギーを放出し、メーザ発振が起きる。この信号に外部のVCXOを位相同期させ、

標準周波数を作る。以上が水素メーザの基本的な動作原理である。

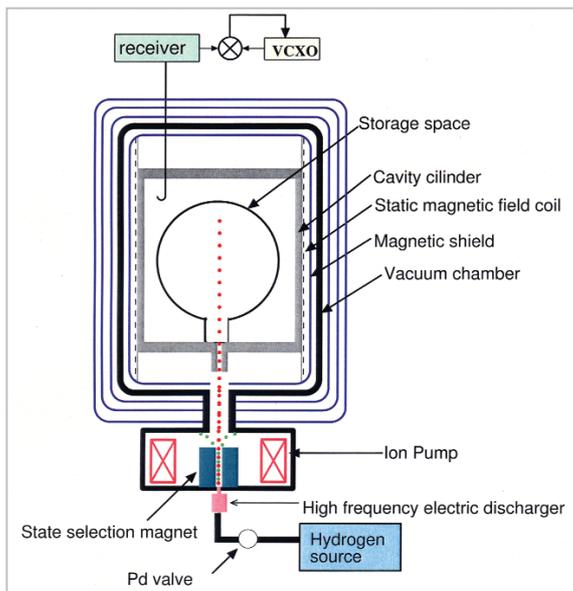


図2 水素メーザの構造図

2.2 周波数変動要因

水素メーザの発振周波数 f_m は様々な物理的要因によって変動するため、十分な周波数安定度を得るためには変動要因を考慮した設計が必要になる。 f_m の変動要因には雑音によるランダムなものや系統的なものがあるが、ここでは後者について考察する。

f_m は次式により表される。

$$f_m - f_H = \frac{Q_c}{Q_l} (f_c - f_H) \quad (1)$$

ただし、 f_H は水素原子の遷移周波数、 f_c はマイクロ波共振器周波数、 Q_c は共振器負荷 Q 、 Q_l は原子発振スペクトル Q である。したがって、 f_m の変動要因として、 f_c 、 f_H 、 Q_c 、 Q_l 変動が考えられるが、 Q_c 、 Q_l 変動は充分小さくここでは考慮しない。

式(1)から分かるように f_c の変動は f_m の変動を引き起こすため、 f_c には高い安定度が要求される。通常、 $Q_c \sim 40,000$ 、 $Q_l \sim 1 \times 10^9$ 程度であり、 1×10^{-15} の周波数安定度を得るためには $df_c/f_c < 2.5 \times 10^{-11}$ ($df_c < 0.04 \text{ Hz}$) が必要になる。 f_c の最大の変動要因は共振器温度 T_c の変化による共振器の変形やストレージバルブの誘電率の変化であり、 df_c/dT_c は共振器の構造、材質の熱膨張係数やバ

ルプ材質の誘電率の温度係数等に依存する。通常の TE_{011} モードのフルサイズの共振器では $-1 \sim -0.3 \text{ kHz/K}$ であり、 $df_c < 0.04 \text{ Hz}$ とするためには $dT_c < 4 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{ K}$ が必要になり、厳しい温度制御が要求される。

f_H の主なシフト要因は、2次ゼーマン・シフト、スピン交換シフト、2次ドップラ・シフト、Wallシフト等であり、これら変動すれば、 f_m も変動することになり、高い周波数安定度を得るためにはこれらのシフト要因の安定化が不可欠である。

水素原子のエネルギー準位の縮退を解くために一定の静磁場を加えるが、 f_H は次式で表されるように静磁場に応じてシフトする(2次ゼーマンシフト)。

$$f_H = f_{H0} (1 + 195 B_c^2) \quad (2)$$

ただし、 f_{H0} は $B_c = 0$ のときの遷移周波数、 B_c は静磁場の磁束密度で単位は T である。 B_c が dB_c だけ変化したときの遷移周波数の変化 df_H は次式で表される。

$$\frac{df_H}{f_{H0}} = 390 B_c dB_c \quad (3)$$

B_c は $0.1 \mu T$ で運用されるが、この条件で df_H/f_{H0} を 1×10^{-15} に抑えるためには式(3)から、下記条件を満たす必要がある。

$$dB_c < 2.6 \times 10^{-11} T \quad (4)$$

$$\frac{dB_c}{B_c} < 260 \text{ ppm} (@ B_c = 10^{-7} T) \quad (5)$$

B_c の変動要因には静磁場コイルの電流源の温度変動と外部磁場変動の二つがある。前者は最近のDA変換器の温度安定度は $\pm 10 \text{ ppm}$ 程度以下であり十分小さくすることができる。

ストレージバルブ内の水素原子同士の衝突により f_H は次式のようにシフトする。

$$\Delta f_H = \frac{\lambda' h v_r}{16 \pi \mu_0 \mu_B^2 h' Q_c} \frac{1}{T_{20}} + \frac{q}{T_l} \frac{I}{I_h} \quad (6)$$

ただし、 λ' はスピン交換周波数シフト断面積 ($4.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$)、 h はプランク定数、 v_r は水素原子の平均相対速度、 μ_0 は真空透磁率、 μ_B はボーア磁子、 T_{20} は水素ビーム量が0の時の横緩和時定

数、 q は水素メーザの発振 quality 係数、 I は水素原子ビーム量、 I_{th} はスレッシュホールドビーム量である。 Δf_H は 10^{-13} のオーダであり、 10^{-15} の周波数安定度を得るためには I の変動を1%以下に抑える必要がある。

二次ドップラ・シフトと wallシフトはストレージバルブ温度に依存し、 1×10^{-15} の周波数安定度を得るためには、いずれもストレージバルブ温度を0.01K程度に安定化すればよい。一般に共振器温度は 10^{-4} ℃以下に安定化するので、これらの影響は問題にならない。

このように、水素メーザの周波数の変動要因は多様であり、変動要因に応じた安定化対策が必要である。

2.3 各部の目的と機能

原子時計の動作には、主に以下に挙げる三つの段階が必要である。

- (1) 粒子の準備
- (2) 粒子の閉じ込め
- (3) 粒子の観察

まず、粒子の準備は、遷移の正味の効果を観察するために、はじめに十分な原子数の差を得るための過程である。水素メーザでは水素原子の基底状態磁氣的超微細遷移を利用しているため、水素分子を解離して水素原子を生成し、その後超微細遷移の上準位にある原子のみを空洞共振器内に供給する必要がある。このための機能を提供しているのが、分子から原子に解離させるための高周波放電と、指向性を持つ原子ビームにするためのコリメータ及び上準位の原子のみを選別するための準位選別磁石である。

次の粒子の閉じ込めは、粒子を相互作用領域に十分長い時間保っておくことにより、遷移を起こさせ、狭い線幅の信号を得るための過程である。放射場と相互作用する粒子の集合の線幅は近似的に次式で与えられる。

$$W \sim \frac{1}{T_r} \quad (7)$$

ここで T_r は平均相互作用時間である。上式から分かるように線幅の細い信号を得るためには T_r をできるだけ長くする必要があり、粒子の閉じ込めはそのための手段である。水素メーザで

はストレージバルブが粒子の閉じ込めを担っている。

最後の粒子の観察では、この段階で実際の信号を得ることになるが、セシウム周波数標準器やルビジウム周波数標準器と異なり、水素メーザでは空洞共振器内の誘導放出により発生するメーザ発振を信号源としている。なお、水素メーザでも受動式の動作を行う物も存在するが、本稿で議論しているのはすべて能動式の水素メーザである。

3 衛星搭載化

3.1 衛星搭載水素メーザに必要な性能

衛星搭載用水素メーザに必要な性能は、搭載する衛星の軌道や提供する環境及び構築される測位システムの仕様によって大きく変わってくる。現状では上記仕様について決定された値があるわけではないので、暫定的に下記の仕様値を想定して、搭載メーザ開発に必要な技術の確立を目標に研究を進めている。今後、計画が具体化した段階で、本研究の成果に基づき仕様が具体化される。

表1 現在想定されているSHM仕様

重量	< 100kg
消費電力	< 100W
使用温度	15~35℃
周波数安定度	< 3×10^{-15} (@ $10^3 < \tau < 10^4$ s)
磁場感受率	< 1×10^{-14} /G
温度感受率	< 3×10^{-15} /°C

3.2 衛星搭載のための技術開発課題

CRLでは、平成9年からアンリツ株式会社と共同で衛星搭載用水素メーザ(SHM)の技術開発を行っている。現在までに衛星搭載用水素メーザの地上モデル(BBM)を試作し、各種の動作試験などを行っている。

先に述べたとおり水素メーザは、ルビジウムやセシウム等の他の原子時計に比べ周波数安定度が格段に優れているという特徴があるが、その一方で重量、大きさ、消費電力等で劣っている。水素メーザの技術自体は既に成熟しており、



図3 衛星搭載用超小型裾メーザの地上モデル

日本ではCRLの研究成果を基にアンリツ株式会社が製品化し[3][4]、国内の主要研究機関で使用されている。しかし、地上での使用を想定しており重量は数百kgもあり、そのままでは衛星に搭載できない。したがって、衛星搭載を考えた場合まず小型・軽量化が必須である。さらに、打ち上げ時に加わる機械的振動に耐えるための構造を考える必要もある。また、使用可能な電力も厳しく制限されるため、低消費電力化も必須の課題である。

3.3 小型軽量化

水素メーザのサイズを決める最も大きな要因は空洞共振器であり、この共振器を小さくすることができれば、その外側にあるベルジャー、磁気シールドがすべて小さくなるため、全体の小型・軽量化が可能になる。衛星搭載用超小型水素メーザではサファイア誘電体共振器を使用することにより、共振器の小型軽量化を実現している。

これまでの解析で、メーザの周波数安定度は共振器の内径 $2a$ がサファイア円筒の外径 $2b$ の2倍の時に最良になること、また、共振器高さ l と a の比はメーザの軽量化という観点から決めることができ、その最適値は2であることが分かった。さらに、要求される周波数安定度から最小の共振器体積が決まる。

これらの条件から 10^{-15} 台の周波数安定度を確保できる共振器として、図4に示すサファイア誘電体共振器を作成した。従来の共振器サイズは $\phi 300 \times 300 \text{mm}$ 程度であったが、作成したサファイア共振器のサイズは $\phi 161.9 \times 161.9 \text{mm}$ と体積比

1/8程度の小型化を実現した。

共振器の小型化により、磁気シールドも小型化され、設計の最適化と合わせて64kgから17.4kgと重量比で1/4近い軽量化を実現できた。

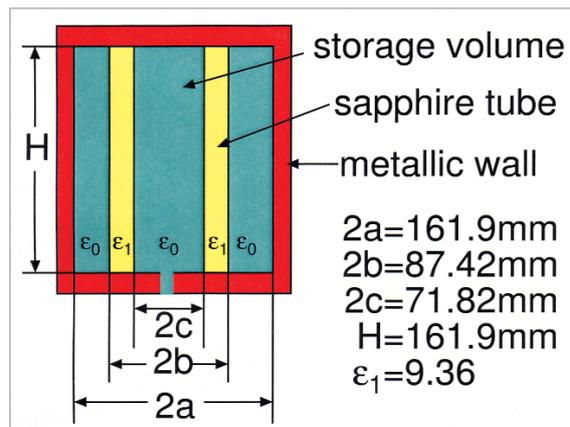


図4 サファイア共振器の構造

その他の小型軽量化として、アルミ製真空容器の採用、真空排気系にゲッターポンプを採用、水素源として水素貯蔵合金を利用することで試作された地上モデルでは重量72kgと大幅な軽量化を実現できた。さらに、現在アルミハニカム材の使用など更なる軽量化を検討中である。

3.4 耐宇宙環境特性の改善

衛星搭載を考えた場合、地上とは異なる厳しい環境下での動作が予想される。考慮すべき耐宇宙環境様の対策としては、温度特性の改善、磁場特性の改善、打ち上げ時の機械的振動特性の改善、真空中での動作特性の改善などが挙げられる。

まず温度特性については、サファイア誘電体共振器ではサファイアの誘電率温度変動が大 df_c/dT_c は約 -70.9kHz/K にも達するため、温度制御だけで f_c を安定化することはほぼ不可能であり、 f_c の自動制御による安定化が不可欠になる。

外部磁場の変動要因としては、地球磁場の変化と衛星姿勢制御用磁気ジャイロの漏洩磁場が考えられる。地球磁場の変化は衛星の軌道が決まらなると正確に評価できないが、例えば軌道高度20,000kmの場合 $\pm 8.0 \times 10^{-7} \text{T}$ 程度、軌道高度3,100kmの場合 $\pm 1.8 \times 10^{-5} \text{T}$ 程度である。このとき、 dB_c を $2.6 \times 10^{-11} \text{T}$ 以下におさえるためには磁気シールドの遮蔽率はそれぞれ62,000, 1,400,000

以上が必要になる。

このように衛星搭載用水素メーザでは環境条件が地上より格段に厳しくなるため、安定化対策の要求も厳しくなる。

3.5 特性評価結果

3.5.1 周波数安定度

図5にBBMの周波数安定度測定結果を示す。目標とする安定度よりも2~3倍程度悪い値が得られているが、これは後述する温度変化による周波数変動が影響しているものと考えられ、共振器温度安定化の改良で周波数安定度も改善されるものと思われる。

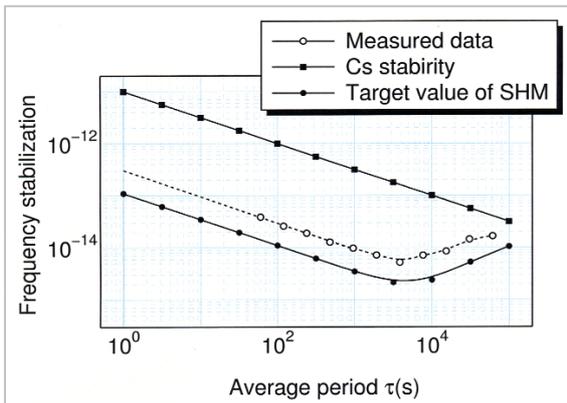


図5 安定度測定の結果

3.5.2 温度特性

温度特性の評価は、BBMを恒温槽中に設置し、恒温槽の温度を22℃から23℃まで変化させ、その際の周波数変動などを測定した。先に記したとおりサファイア共振器においては f_c の自動制御による安定化が不可欠であり、carrier free typeの共振器自動同調によって f_c の安定化を行っている。表2に測定結果を示す。

得られた周波数変動の温度依存性は 3×10^{-14} であり、目標値 3×10^{-15} と比較して10倍程度大きな値になっている。表2から分かるとおり、共振

表2 温度特性測定結果

周波数変化 ($\Delta f/f$)	$3 \times 10^{-14}/^\circ\text{C}$
水素流量変化 ($\Delta I/I$)	$1.4 \times 10^{-2}/^\circ\text{C}$
共振器温度変化	$0.02^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$

器温度の環境温度依存性が $0.02^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ となっているが、これは目標値の10倍以上の大きな値であり、これが周波数変動の大きな原因の一つになっていると考えられる。大きな共振器温度の環境温度依存性の原因については、

- (1) 温度制御回路のゲイン不足
 - (2) SHMの断熱性能
 - (3) コネクタ部での熱起電力の変動
- などが考えられるが、現在原因の究明と性能改善を行っている。

3.5.3 磁場特性

表3 磁場印加時の周波数変動

印加方向	周波数変化 ($\Delta f/f$)
x 方向	$< 1 \times 10^{-14}/\text{G}$
y 方向	$< 1 \times 10^{-14}/\text{G}$
z 方向	$2.0 \times 10^{-14}/\text{G}$

磁場変動特性の測定は、ヘルムホルツコイル中にSHMを設置して行った。ヘルムホルツコイルはx, y, z軸それぞれ独立に磁場を印加できるようにしてある。測定時間は10分、印加磁場は $\pm 1\text{G}$ の2通り、測定周波数は1.4GHzである。また、SHMの自動同調はOFFの状態にしてある。測定結果を表3に示す。

この結果からSHMの磁気遮蔽率を計算すると200,000となる。2.2に示したように、軌道高度20,000kmで運用するには十分な値である。具体的には、軌道高度12,000km以上での運用には問題がない。しかし、実際に運用される軌道によっては更に磁気遮蔽率を高める必要がでてくる可能性もある。

3.5.4 振動試験

振動試験は、BBMと同等の構造の振動試験用実験機に対して行った。実験機はその重量配分なども含めてBBMと同じ条件で振動実験を行うことができるように設計されている。実験の様子を図6に示す。

振動の加速度は5.0G、周波数範囲は5~300Hz

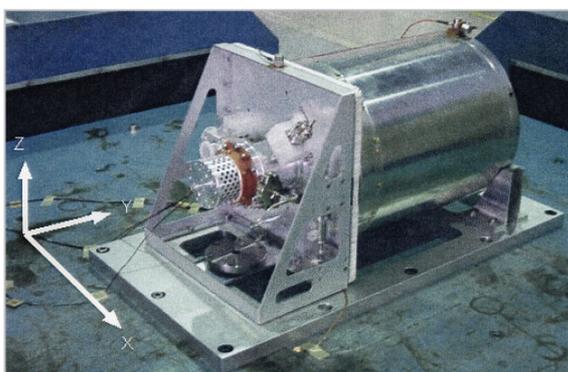


図6 振動試験の様子

で測定を行った。周波数は5～300Hzまで、その後300～5Hzまでそれぞれ2分間掃引した。測定結果を図7に、測定の結果得られた主な共振周波数とその時実験機上で観測された加速度を表4に示す。

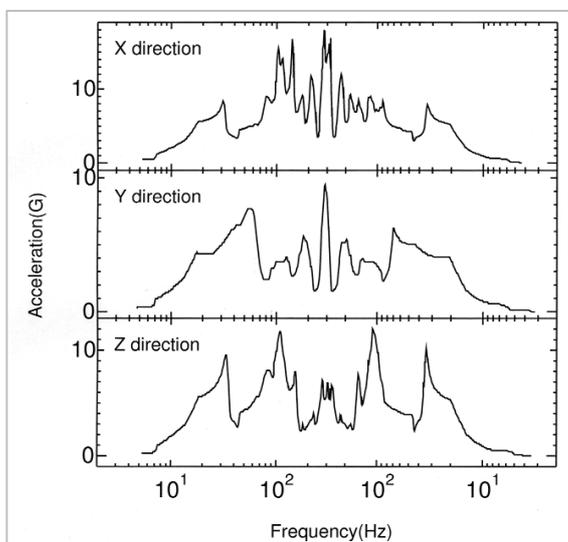


図7 振動試験の結果

表4 振動試験の結果

Acceleration	Direction	Resonances frequency(Hz)	Measured Acceleration(G)
5.0G	X	90	13.0
		110	17.0
		290	18.0
	Y	50	8.0
	Z	30	9.0
		90	12.0

真空漏れの検査、水素ビーム軸の検査も同時に行ったが大きな真空漏れは観測されず、水素ビーム軸のずれも0.1mm以下だった。

また、振動試験後に空洞共振器の共振周波数に100kHz程度のずれが観測されたが、これは共振器の温度変化に起因する物と考えられる。

3.6 今後の課題

現在、衛星搭載水素メーザの寿命を制限しているのは真空排気系の寿命であるため、より効率よく水素原子をストレージバルブ内に供給できれば長寿命化が可能になる。現在そのためのビームコリメータのマルチコリメータへの変更、準位選別磁石の設計変更を行っているところである。

また、温度変動に関しては初期データとしては十分良いものが得られたが、実用化に向けて今後更に詳細な試験を行い、動作を改善していく必要がある。

振動試験については、一部の部品の設計変更などを行い、最終的には20Gでの振動試験に耐える構造にする必要がある、さらに、その後実際に発振動作する実験機での動作試験も行う必要がある。

4 まとめ

水素メーザ原子周波数標準器について、その原理及び構造並びにCRLにおける研究の経緯と最近のトピックとして衛星搭載用水素メーザについて最新の成果を概説した。

水素メーザはその高い周波数安定度から現在でも様々な分野での利用が期待されている。衛星搭載用水素メーザは、水素メーザの新しい利用分野を切り開くことになる。

これまで日本における水素メーザ開発に関してCRLが大きな役割を果たしてきたが、衛星搭載用水素メーザの開発により、今後も水素メーザの研究開発においてCRLが主導的な役割を果たすことになるであろう。

参考文献

- 1 Takao Morikawa, Yasusada Ohta, and Hitoshi Kiuchi, "Development of Hydrogen Maser for K-3 VLBI System", Proc. of 16th Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting, pp.295-311, Nov. 1984.
- 2 太田安貞, 齊藤春夫, 梅津準, "ループギャップ共振器を用いた超小型水素メーザの開発", 電子情報通信学会論文誌 C-1, Vol.J74-C-1, No.6, pp.222-230, 1991.
- 3 津田正宏, 菅弘彦, 植原正朗, 森謙二郎, 小林正紀, "高性能水素メーザ原子周波数標準器", アンリツテクニカル, No.60, pp.31-41, Sep. 1990.
- 4 森謙二郎, 菅弘彦, 植原正朗, "高性能化水素メーザ原子周波数標準器", アンリツテクニカル, No.63, pp.29-37, May, 1992.
- 5 R.F.C. Vessot, M.W. Levine, E.M. Mattison, E.L. Blomberg, T.E. Hoffman, G.U. Nystrom, and B.F. Farrel, "Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser", Phys. Rev. Letters, Vol.45, No.26 pp.2081-2084, Dec. 1980.
- 6 L.G. Brenier, G. Busca, A. Jornod, and H. Schweda, "The SHM Space Borne Hydrogen Maser First Evaluation of the PEM Physics Package", Proc. of 11th European Frequency and Time Forum, pp.664-667, 1997.



伊東宏之
電磁波計測部門原子周波数標準グループ
研究員 博士(理学)
原子周波数標準



細川瑞彦
電磁波計測部門原子周波数標準グループ
リーダー 理学博士
原子周波数標準、時空計測



梅津 純
基礎先端部門主任研究員
マイクロ波工学



森川容雄
電磁波計測部門研究主管
周波数標準、時空計測

津田正宏
アンリツ株式会社研究所担当部長
原子周波数標準器

高幣謙一郎
アンリツ株式会社研究所首席研究員
理学博士
原子周波数標準器

植原正朗
アンリツ株式会社研究所原子時計開発
プロジェクトチーム
原子周波数標準器

森謙二郎
元アンリツ株式会社研究所
原子周波数標準器