

# 準天頂衛星搭載用水素メーザ発振器の試作開発

Engineering Model Development of Hydrogen Maser Atomic Oscillators for Quasi-Zenith Satellite

滝沢正則 Masanori Takizawa, 沼田泰明 Yasuaki Numata, 北山光政 Mitsumasa Kitayama, 名古屋康彦 Yasuhiko Nago, 木村幸泰 Yukiyasu Kimura

[要 旨]	衛星測位などに利用される準天頂衛星の打ち上げが計画されている。情報通信研究機構 NICT : National Institute of Information and Communications Technology からの受注により、この衛星に実験機として搭載する水素メーザ発振器の試作開発を進めてきた。共振器容積 3.3 リットルの試作器を開発し、真空中で 10000s での周波数安定度 (アラン標準偏差) $3 \times 10^{-15}$ を得た。また、小型軽量化の一環として、能動型水素メーザ発振器としては世界最小の共振器容積 2.07 リットルを持つ試作器の開発も行ってきた。本文では、これらを含む衛星搭載用水素メーザ発振器の設計および評価について紹介する。
[Summary]	Launch of a quasi-zenith satellite is being planned by the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) and we have developed an engineering model of a hydrogen maser for the satellite. The maser has a 3.3-liter resonator and a frequency stability of $3 \times 10^{-15}$ (Allan deviation) for 10,000 s of averaging time in a vacuum. We have also developed a 2.07-liter resonator model, which is the smallest resonator of all active hydrogen masers. This paper describes the design and performance of these hydrogen masers.

## 1 まえがき

衛星測位システムは現代社会にとって不可欠な社会基盤となっており、カー・ナビゲーション、航空管制、土木・建設測量、気象学などに幅広く応用されている。しかしながら、その衛星システムについて日本では米国の GPS (Global Positioning System) に完全に依存している。このような重要なシステムを特定の国に依拠すべきではないという議論は各国でなされており、ヨーロッパでは EU/ESA が測位衛星システム GALILEO の開発を進めており、中国でも測位衛星 BEIDOU が打上げられた。

一方、我が国では宇宙開発委員会の衛星測位技術分科会による平成9年3月の答申「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」以降、情報通信研究機構(旧・通信総合研究所)による衛星搭載用水素メーザの研究開発が進められ、アンリツもこれに協力してきた<sup>1)</sup>。

さらに、平成 15 年度からは総務省、文科省、国交省、経産省および民間の連携による準天頂衛星測位システム計画が開始され、情報通信研究機構からの受注により衛星搭載水素メーザ原子時計<sup>2)</sup>の開発に着手した。以下、特に断らない限り、水素メーザ原子時計は「能動型」水素メーザ原子時計の意味とする。

これまで測位衛星搭載用の原子時計は、ルビジウム原子時計あるいはセシウム原子時計に限定されており、唯一 GALILEO がルビジウム原子時計のほかにも受動型水素メーザ原子時計の搭載を計

画している<sup>3)</sup>だけである。能動型水素メーザ原子時計は、ヨーロッパで国際宇宙ステーションに搭載する開発が進められていたが<sup>4)</sup>、世界的にもまだ衛星に搭載された実績がない。地上で使用されている水素メーザ原子時計は、ルビジウム原子時計やセシウム原子時計に比べ大型で重量・消費電力も大きいため、本来、衛星搭載には適していない。しかしながら、周波数安定度は格段に優れているという特徴を持つため、小型軽量化を図り、衛星搭載可能な形態とすることは非常に挑戦的な技術課題である。

本文では、このような背景から進めてきた準天頂衛星搭載用水素メーザ原子時計 (SHM) の試作器開発状況について報告する。

## 2 原理と基本構成<sup>6)</sup>

水素メーザの基本構成を図 1 に示す。水素源から供給される水素分子ガスは、水素流量制御装置で流量を一定に制御された後、放電管内において高周波放電によって水素原子に解離され、真空中にビーム状に放出される。水素原子は準位選別磁石によって、メーザ発振に必要な上準位 (エネルギーが高い状態) の原子が空洞共振器中に置かれた水素蓄積球に入る。蓄積球に滞在する上準位の原子は、空洞共振器中の電磁場により遷移し、マイクロ波 (約 1.42GHz) としてエネルギーを放出する。水素蓄積球内面は不活性なテフロンで被覆されているため、水素原子は壁面と衝突しても緩和しにくく、その状態を保ちつつ長時間 (約 1s) 共振器中の電

磁場と相互作用を続ける。その結果、スペクトル幅は1Hz程度の狭いものとなる。多数の水素原子の遷移によって放射される電力が、共振器損失を上回るとメーザ発振が生じ、コヒーレンシーの高い、周波数が極めて安定なマイクロ波が得られる。

このメーザ発振は  $10^{-13}\text{W}$  ( $-100\text{dBm}$ ) 程度と微弱で、 $1.420405751 \dots \text{GHz}$  という周波数であるため、これを基準に位相同期回路を用いて、 $10\text{MHz}$  などの利用しやすい周波数に変換して出力する受信部を備えている。

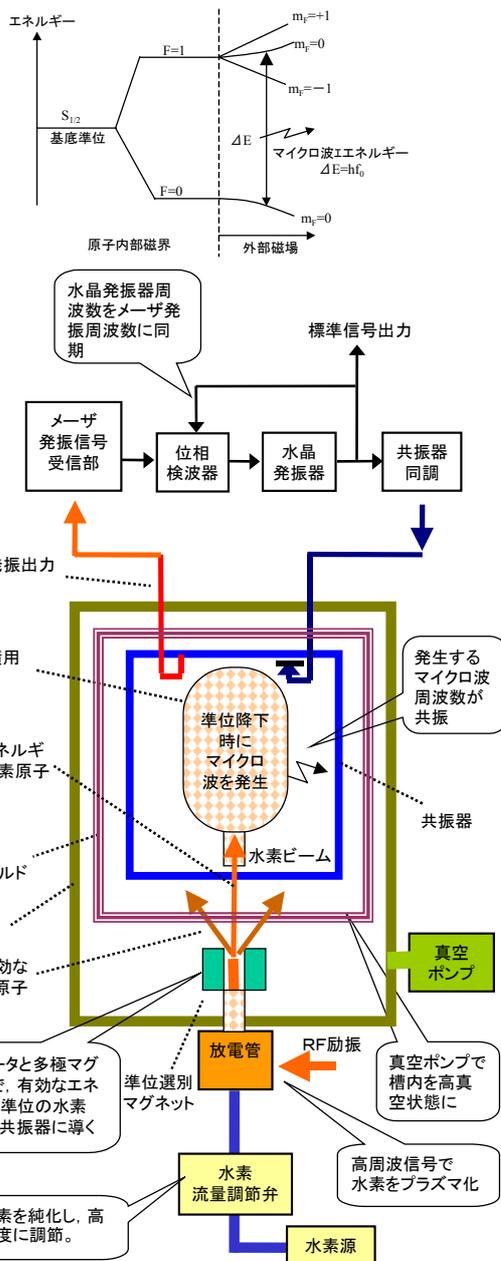


図1 水素メーザの構造  
Schematic of hydrogen maser

### 3 衛星搭載用水素メーザ (SHM) の構成

#### 3.1 目標性能

衛星搭載用水素メーザとして、以下の性能実現を目指した。特に、衛星搭載では重量に対する要求が厳しく、また、打上げ時の振動に耐える堅牢な構造が求められた。図2に共振器サイズが3.3リットルのSHM構造と外観図を示す。

- 目標周波数安定度 :  $\leq 2 \times 10^{-14}$  (測定平均時間  $10^2\text{s}$ )
- $\leq 7 \times 10^{-15}$  (測定平均時間  $10^3\text{s}$ )
- $\leq 5 \times 10^{-15}$  (測定平均時間  $10^4 \sim 10^5\text{s}$ )
- 総重量 :  $< 100\text{kg}$
- 耐振動特性 :  $20\text{G}$
- 設計寿命 :  $5\text{年}$

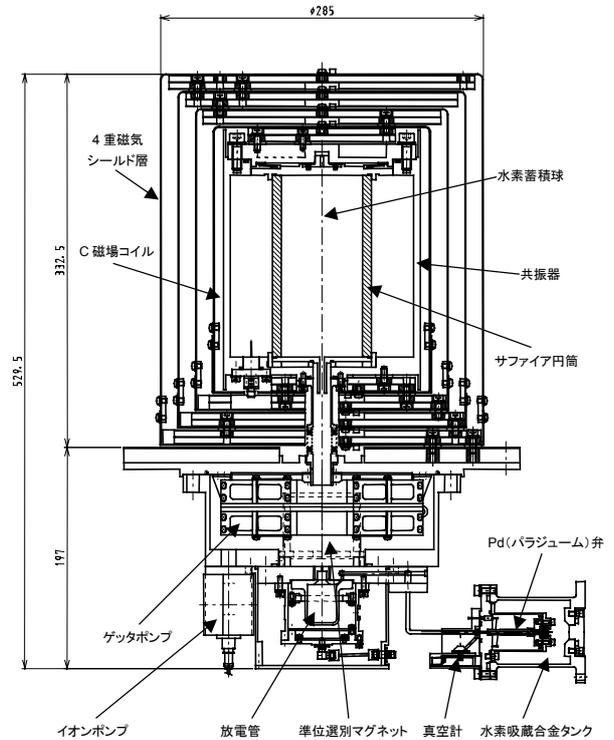


図2 3.3リットル SHM の構造と外観  
Schematic of SHM and exterior (3.3 liter)

### 3.2 共振器

水素メーザの量子部は、1.42GHz 空洞共振器の大きさで全体のサイズがほぼ決定される。よって、この空洞共振器のサイズを小さくすることが、小型・軽量化にとって最も重要である。地上で使われる水素メーザ(以下HMと呼ぶ)は全石英製共振器を用いているが、SHMでは図3のようなサファイア装荷共振器を採用した<sup>5)</sup>。サファイアの比誘電率は円筒軸方向で9.36と高いため、共振器を小型にすることができる。共振器壁面は軽量化のため、アルミニウムによって構成することとした。また、HMでは共振器内の水素蓄積球として肉厚の薄い石英製の球を用いており、振動に弱い構造であるが、SHMではサファイア円筒の内側を水素蓄積部として利用することで、耐振動性も強化されている。今回は、共振器サイズが3.3リットルと2.07リットルの2種のSHMを試作した。

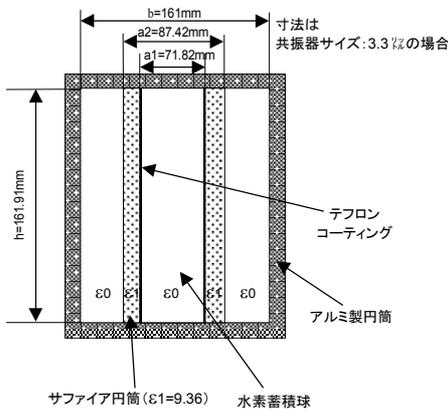


図3 共振器の構造  
Structure of microwave cavity

一方、サファイアの誘電率は温度係数が大きい(アルミニウムの熱膨張よりも影響が大きい)、共振器の温度特性は石英共振器に比べて約250倍大きい $-75\text{kHz/K}$ となった。メーザ発振周波数 $f_m$ は次式のCavity Pulling効果によって変化を受ける<sup>6)</sup>。

$$\Delta f_m/f_0 = (Q_c/Q_l) \cdot \Delta f_c/f_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\Delta f_c = f_c - f_0, \Delta f_m = f_m - f_0, Q_c/Q_l = \text{Pulling Factor (PF)}$$

$Q_c$ : 共振器負荷時のQ値(約50000),  $f_c$ : 共振器共振周波数  
 $Q_l$ : 原子共鳴線のQ値(約 $1 \times 10^9$ ),  $f_0$ : 水素原子固有遷移周波数

目標とする周波数安定度( $\Delta f_m/f_0 \leq 5 \times 10^{-15}$ )を達成するためには、共振周波数を $\Delta f_c = 0.14\text{Hz}$ 以下に制御する必要があり、温度制御(約 $2 \times 10^{-6}\text{K}$ 以下の安定度で共振器温度制御が必要)だけで $f_c$ を安定化することは不可能である。このため、パラクタダイ

オードを用いて $f_c$ を微調整する共振器自動同調制御によって安定化した。

### 3.3 磁気シールド

水素メーザでは、水素原子のエネルギー準位の縮退を解いて、特定のエネルギー準位間の遷移( $\sigma$ 遷移)を利用するために、一定の静磁場(C磁場と呼ばれる)を加える必要がある。しかし、この遷移周波数 $f_0$ は次式で表されるように静磁場に応じて変化する<sup>6)</sup>。

$$f_0 = f_{B0} \cdot (1 + 195 B^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $f_{B0}$ は $B=0$ のときの遷移周波数、 $B$ は静磁場の磁束密度で単位はTである。これより、静磁場が $B$ から $\Delta B$ だけ変化したときの遷移周波数の変化 $\Delta f_0$ は次式で近似される。

$$\Delta f_0/f_0 = 390 B \Delta B \quad \dots\dots\dots (3)$$

通常、 $B$ は $0.1\mu\text{T}$ 程度で使用され、この条件で $\Delta f_0/f_0$ を $5 \times 10^{-15}$ に抑えるためには、式(3)から静磁場の変動を0.13%以下( $0.13\text{nT}$ 以下)とする必要がある。ところが、地上では $30\mu\text{T}$ 程度の地磁気が存在し、時間変動するため、外部磁場およびその変動を遮蔽するために、水素メーザの共振器の周辺には通常4~5層の磁気シールドが施される。

想定される衛星軌道上でも数 $1\mu\text{T}$ 程度の地磁気が存在するため、周波数への影響を $5 \times 10^{-15}$ 以下にする条件から、磁気遮蔽率 $10^5$ 以上が要求された。軽量化の要求も考慮して、最内層の厚さを1mm、他の3層の厚さを0.5mmとするパーマロイ(高透磁率の合金)の4層磁気シールドを採用した。これに基づく磁気シールドを試作し、実測によって円筒軸方向、動径方向ともに $10^5$ 以上の磁気遮蔽率を確認した。

### 3.4 真空系

水素原子が水素蓄積部に滞在する間に、不要な他の分子と衝突して緩和することを極力避けるために、水素蓄積部のコリメータ(水素の出入口)周辺を高真空に維持する必要がある。地上用のHMでは大型のイオンポンプを用いて真空を維持すればよいが、重量、消費電力の制約が大きいSHMではゲッタポンプ(図4参照)と小型のイオンポンプを併用することで真空を維持する構成とした。ゲッタポンプは不要な水素分子をはじめ、大部分のガスに対して、数10リットル/s以上の排気速度を持つが、希ガスやメタンを排気できない特性を持つ。このため、イオンポンプは真空槽の材料や各種配線材料から放出される微量のアウトガスの中、希ガスやメタンを排気するために必要となる。

また、地上用HMでは磁気シールド4層までを真空槽内に収納する構成である(図1参照)が、SHMではアウトガスをできるだけ

減らすため、共振器自体を真空槽とする構成にして、その内部に収納される材料を最低限にした。このような構造を採ると、地上では大気圧変動や対流により共振周波数の変動が大きくなるが、宇宙空間では、この問題はない。

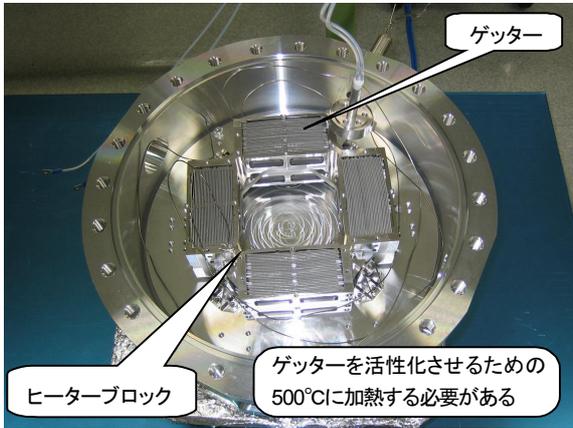


図4 ゲッターポンプの外観  
Exterior of non-evaporation getter

### 3.5 水素供給系

水素メーザを安定に発振させるためには、高純度で微量の水素を長期間にわたり一定流量で安定に供給する必要がある。SHMでは水素供給源として Ti-Zr 系水素吸蔵合金を、流量調整弁として Pd(パラジウム)合金を用いた。Pd は水素原子のみが透過できる特性を持つため、水素純化器としても作用し、その温度を調整することで流量を変化させることができる。また、流量(放電管内の水素圧)を制御するために必要な真空計として耐振動性にすぐれたマイクロピラニ真空計を用いた。これらの構成品を図5のように一体化することで小型軽量化した。

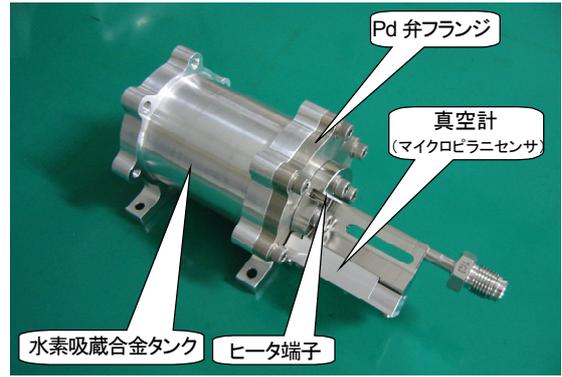


図5 水素供給系の外観  
Exterior of hydrogen source

### 3.6 エレクトロニクス系

SHM エレクトロニクス系の主要部分は各部の制御回路、メーザ発振信号から所望の周波数を得る受信部から成る。安定なメーザ発振を得るためには共振器等の温度、水素流量、C 磁場電流、水素放電部、イオンポンプ用高圧電源の制御が必要であり、特に時定数の長い温度制御と水素流量制御にはデジタル PID 制御方式を用いた。また、受信部は 10.23MHz(GPS と関連)を出力する仕様であり、図6のような PLL 系を構成した。衛星搭載用の電子部品は MIL 規格のクラス S またはクラス B 品相当の信頼性とトータルドーズ 100kRad 以上などの耐放射線性が求められるが、受信部に必要な水晶フィルタ、DDS (Direct Digital Synthesizer)、PLO (Phase-Locked Oscillator) は衛星搭載実績のある部品がないため、水晶フィルタはスクリーニングをすることで、DDS はアンチヒューズタイプの FPGA とラダー抵抗を用いて、PLO は衛星搭載用が存在する 5GHz 帯の PLO と 1/4 分周器を使用することで試作を行った。

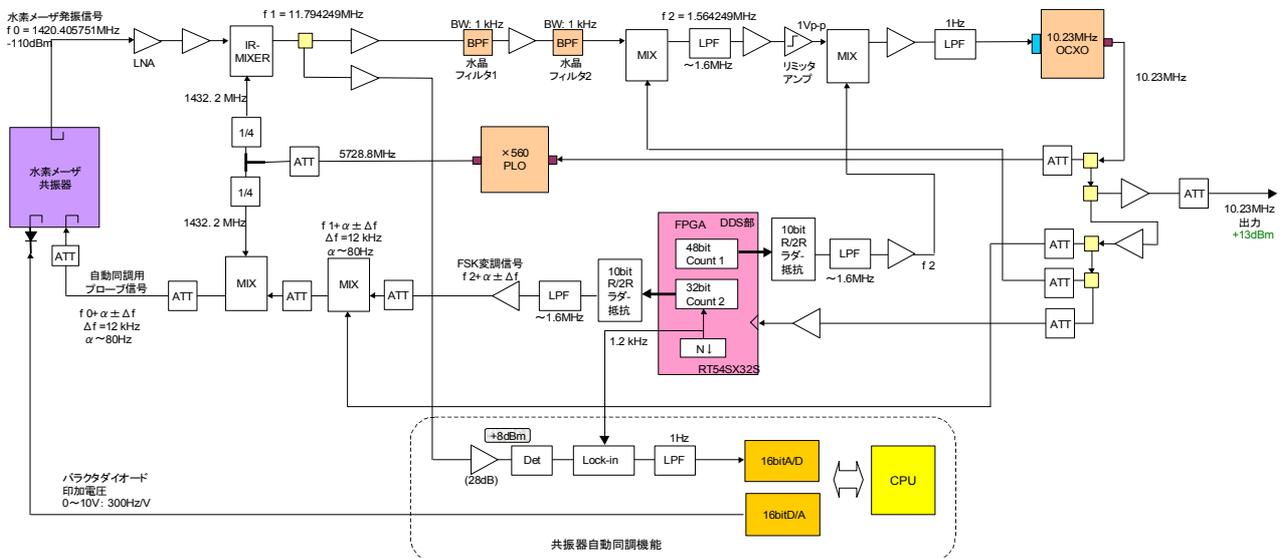


図6 SHM 用受信部の構成  
Schematic of SHM receiver

## 4 特性評価結果

### 4.1 3.3 リットル SHM 特性評価結果

共振器サイズが3.3リットルタイプのSHMについて、大気中で総合調整を行いながら、評価した結果を以下に示す。

#### (1) 基本特性

3.3リットル SHM の水素圧に対する発振電力を図7に示す。C 磁場は  $0.16\mu\text{T}$  とした。

発振閾値は  $1.5\text{Pa}$  程度である。発振電力は約  $3.0\text{Pa}$  で  $-100\text{dBm}$  に達しており、良好な特性と考えられる。発振電力の面からは、 $3.0\text{Pa}$  での使用も十分に許容されるが、水素圧変動に対する感度を考慮すれば、 $4.0\text{Pa}$  以上での使用が安全と考えられる。水素使用量の面からも、水素吸蔵タンクには約  $2\text{mol}$  の水素を吸蔵しており、地上試験・保管期間を含めて7年間以上使用可能である。

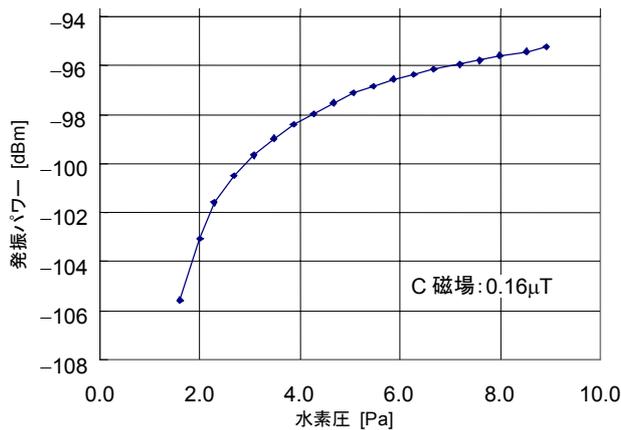


図7 3.3リットル SHM:水素圧対発振電力  
Hydrogen pressure vs. output power (3.3 liter)

3.3リットル SHM の C 磁場に対する発振電力を図8に示す。下段は C 磁場が 0 付近の部分拡大して図示したものである。水素圧は  $5.5\text{Pa}$  である。発振電力が  $0.01\mu\text{T}$  強でフラットな領域に達しており、また、グラフは左右対称(C 磁場の符号に依らない)で正常な特性である。広範囲に見ると、 $\pm 1.3\mu\text{T}$  付近に発振電力が  $2\text{dB}$  程度低下する部分が見られ、この原因は不明ではあるが、通常、C 磁場を設定する範囲外であるため、特に支障はないものと考えられる。

この結果を測定した後に、調整のため磁気シールド第4層の取外し・組立・消磁と行った結果、C 磁場閾値が  $0.32\mu\text{T}$  に上昇した。このことは、3.3リットル SHM の C 磁場閾値が消磁を含む組立条件や何らかの要因で変化するものであ

り、原因究明と製造再現性の確保が必要と考えられる。

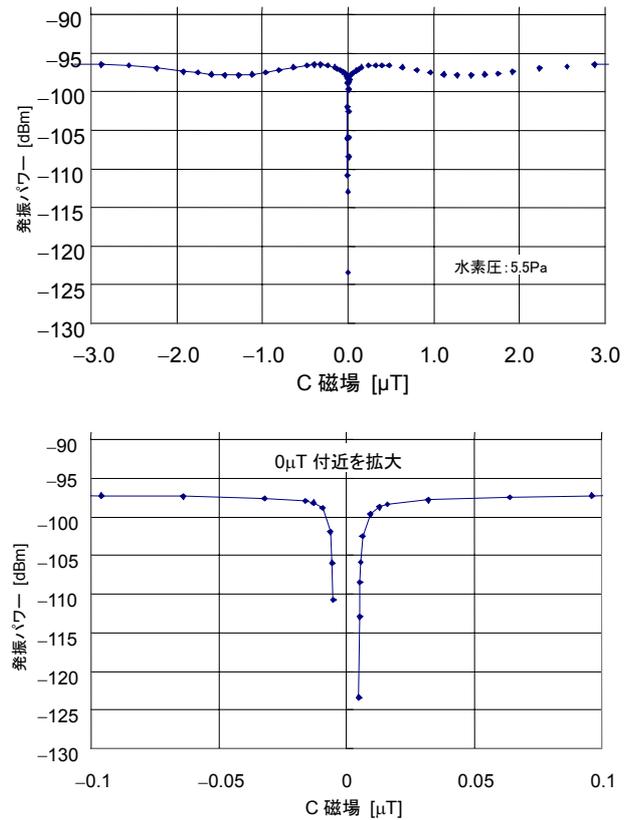


図8 3.3リットル SHM:C 磁場対発振電力  
(下段:C 磁場  $0\mu\text{T}$  付近の部分)  
C-field vs. output power (3.3 liter)

#### (2) 発振特性

周波数安定度の測定に先立ち、原子共鳴線の Q 値の実測を行った。この結果を図9に示す。参照した基準は恒温槽内の地上用水素メーザである。水素圧  $3.5\text{Pa}$ 、 $5.5\text{Pa}$  での共鳴線の Q 値は式(1)より 各々  $5.2 \times 10^8$ 、 $4.5 \times 10^8$  であり、水素圧変化に不感になるグラフの交点は  $+9.4\text{Hz}$  であった。この Q 値は地上用 HM の  $1/4 \sim 1/2$  程度の値である。この分、短期安定度は劣化することが予想されるが、共振器の負荷 Q 値は地上用 HM と同程度の  $50000$  であるから、周波数プリングの影響は相対的に小さく、共振器自動同調に依存する  $100\text{s}$  程度以上での周波数安定度に対しては幾分有利である。

図10に恒温槽内で測定した3.3リットル SHM の恒温槽内 ( $35^\circ\text{C}$ ) での周波数安定度を示す。C 磁場  $-1.6\mu\text{T}$ 、水素流量  $3.5\text{Pa}$  の結果である。  $100\text{s}$  で約  $2 \times 10^{-14}$ 、 $1000\text{s}$  で約  $7.5 \times 10^{-15}$ 、 $10000\text{s}$  で約  $6 \times 10^{-15}$  の安定度となり、ほぼ目標の安定度を実現した。  $100000\text{s}$  は  $10^{-13} \sim 10^{-14}/\text{day}$

の周波数ドリフトがあり、 $3.5 \times 10^{-14}$  となった。このドリフトの原因は不明で、今後も経過を見る必要があるが、このドリフトを除けば、目標性能が得られるポテンシャルを持つことが確認された。

なヒータ電流はわずかとなるので、ヒータ電流による共振器内の磁場と乱れが少なくなったことが要因と考えられる。しかし、100000sでは、大気中と同様に約  $3.5 \times 10^{-14}/\text{day}$  の一方方向の周波数ドリフトがあり、安定度は約  $1.5 \times 10^{-14}$  となった。このドリフトの問題を除けば、宇宙空間と同じ真空状態において目標性能を上回る性能を得ることができた。

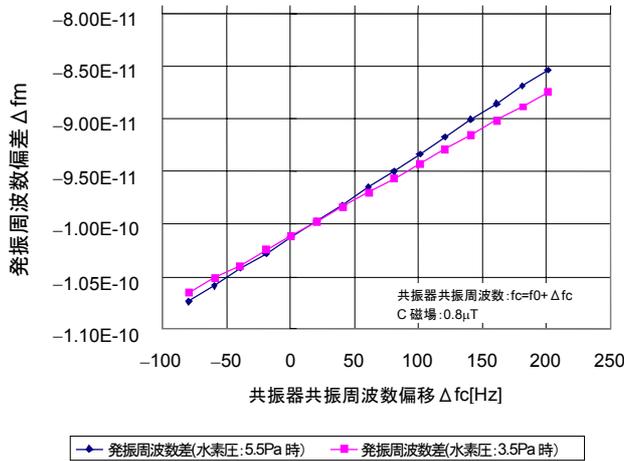


図9 3.3リットル SHM の周波数プリング測定結果  
Cavity pulling (3.3 liter)

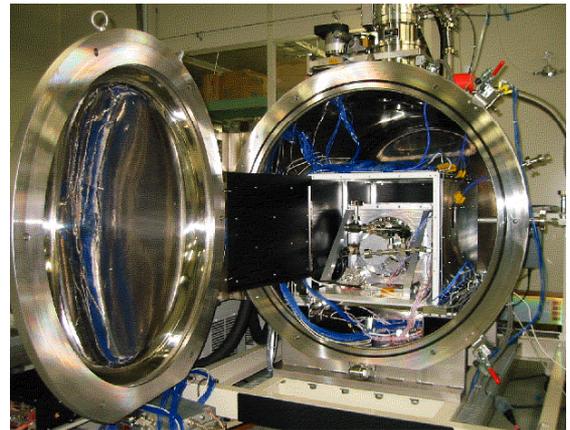


図11 熱真空槽装置と3.3リットル SHM  
Exterior of vacuum chamber and 3.3-liter SHM

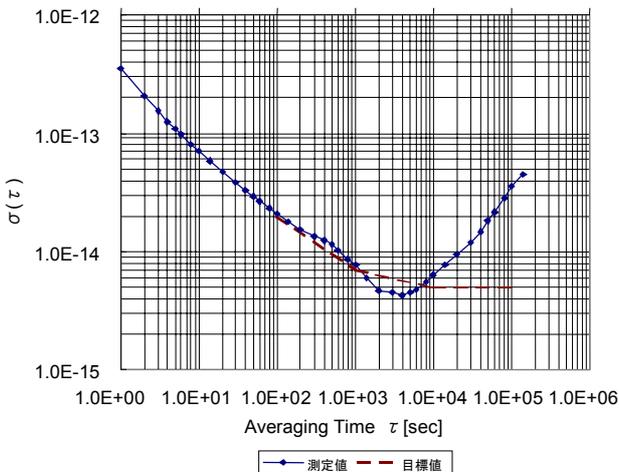


図10 大気中での3.3リットル SHM の周波数安定度  
Allan deviation in atmosphere (3.3 liter)

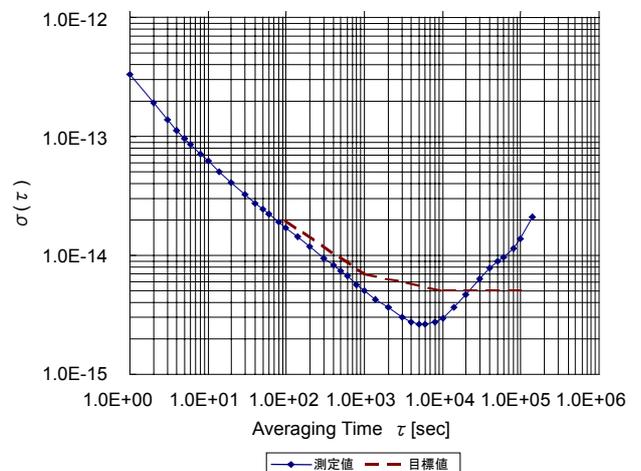


図12 真空中での3.3リットル SHM の周波数安定度  
Allan deviation in vacuum (3.3 liter)

#### 4.2 3.3 リットル SHM 熱真空槽での特性評価結果

大気中での調整評価後に、3.3リットル SHM を熱真空槽(図11)に入れ、真空中での安定度測定を行った。3.3リットル SHM の取り付け面の温度を  $35^\circ\text{C}$  一定な状態で測定した。測定結果を図12に示す。C 磁場  $-1.6\mu\text{T}$ 、水素流量  $3.5\text{Pa}$  の結果である。大気中と比較して周波数安定度がよくなり、100s で約  $1.8 \times 10^{-14}$ 、1000s で約  $5 \times 10^{-15}$ 、10000s で約  $3 \times 10^{-15}$  となり、目標の安定度を実現した。真空槽に入れることで共振器が断熱され、対流による共振器温度の乱れがなくなり、さらに、真空中では温度制御に必要

#### 4.3 2.07 リットル SHM 特性評価結果

より小型化が可能な 2.07 リットル SHM について大気中で特性評価を行った。

##### (1) 基本特性

まず、2.07リットル SHM の水素圧に対する発振電力を図13に示す。C 磁場は  $-0.48\mu\text{T}$  とした。発振閾値は  $2.0\text{Pa}$  程度で3.3リットル SHM よりも 50%ほど高い。水素圧  $4.0\text{Pa}$  付近で発振電力は  $-101\text{dBm}$  となっており、実用可能な出

カレベルと考えられる。メーザ・クオリティ・ファクタは高くなく、閾値の2倍付近で発振電力が最大となり、4.0Paを超えると発振電力が低下していく点特徴的である。水素使用量から見ると、7年間以上の使用が可能である。

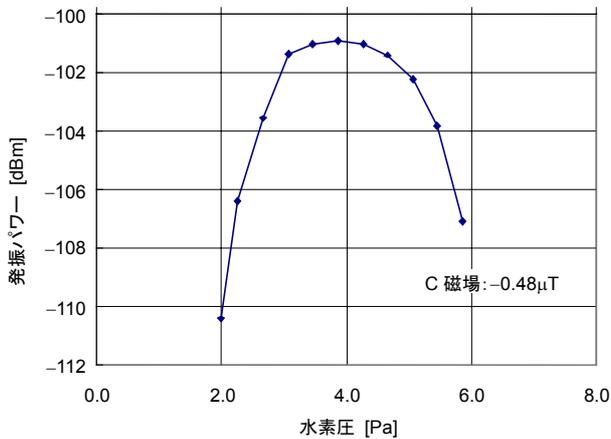


図 13 2.07リットル SHM の水素圧対発振電力  
Hydrogen pressure vs. output power (2.07 liter)

図 14 に C 磁場に対する発振出力を示す。測定データ 1 と測定データ 2 と測定データ 3 は測定した日が異なる。C 磁場閾値は経時的に大きく変化している。周辺の磁気的環境が変わったとは思えないため、原因は不明である。

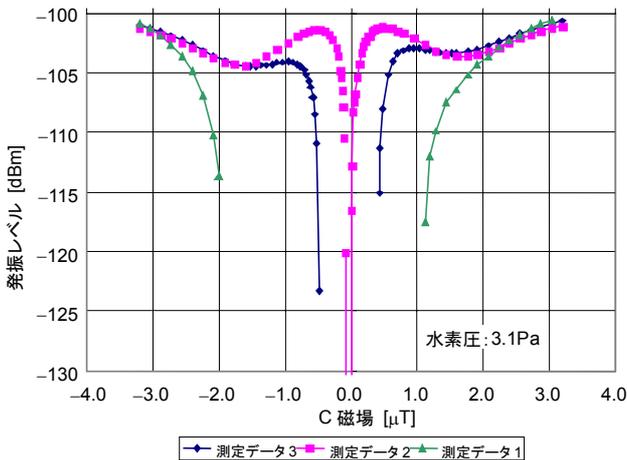


図 14 2.07リットル SHM C 磁場に対する発振出力  
C-field vs. output power (2.07 liter)

また、3.3リットル SHM の場合と同様に、測定データ 2 の結果では±1.6μT 付近に発振電力が 3dB 程度低下する部分が見られる。測定データ 1 の結果は C 磁場閾値が高いためにこのくぼみが見えないのか、このくぼみが極端に大きくなったために C 磁場閾値が高くなっているのかは、この

C 磁場閾値の問題を解決する糸口である可能性があり、今後の検討課題となっている。

(2) 発振特性

周波数安定度の測定に先立ち、原子共鳴線の Q 値の実測を行った。この結果を図 15 に示す。参照した基準は恒温槽内の地上用水素メーザである。水素圧 2.7Pa, 3.1Pa での原子共鳴線の Q 値は  $4.3 \times 10^8$  前後であり、グラフの交点は +33Hz であった。この Q 値は 3.3 リットル SHM よりもやや低い値である。

図 16 に室温、大気中での 2.07 リットル SHM の周波数安定度を示す。C 磁場  $-0.8 \mu\text{T}$ 、水素流量 3.1Pa の結果である。

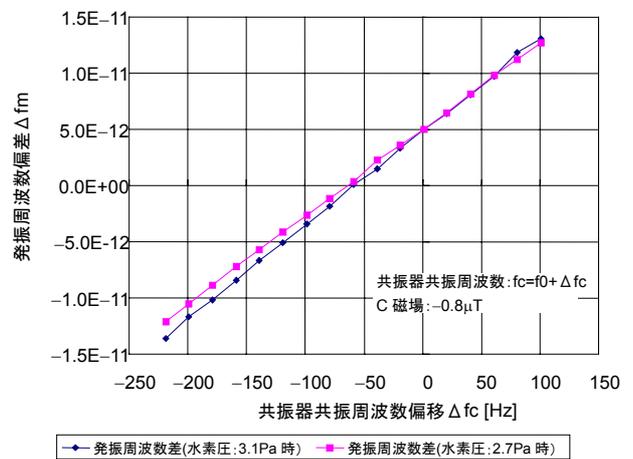


図 15 2.07リットル SHM 周波数プリング測定結果  
Cavity pulling (2.07 liter)

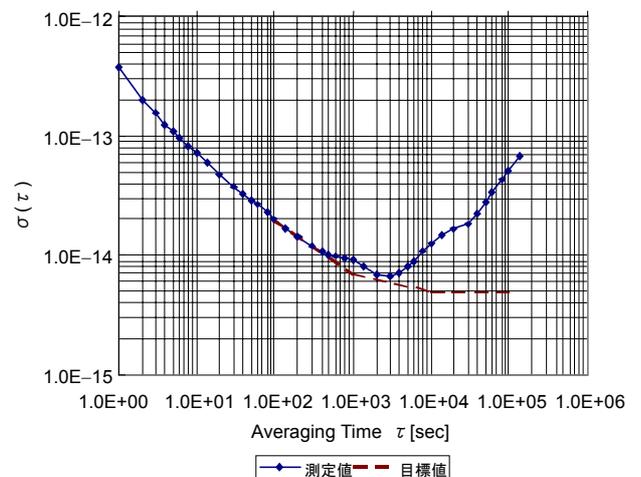


図 16 大気中での 2.07リットル SHM 周波数安定度測定結果  
Allan deviation in atmosphere (2.07 liter)

3.3 リットル SHM と、傾向はほぼ一致しており、1000s～5000s で  $10^{-15}$  台に入り、これより長い時間では周波数ドリフトが支配的になっているが、目標性能にはやや不足である。但し、真空中で測定すれば目標性能とほぼ同じような特性を得られる可能性が大きい。周波数ドリフトは、3.3 リットル SHM と同様に 2.07 リットル SHM でも起きており、その原因究明のためにはさらに検討を進める必要がある。

## 5 むすび

衛星搭載用 SHM として、共振器サイズが 3.3 リットルと 2.07 リットルの 2 種類を開発した。3.3 リットル SHM の周波数安定度として、真空中において 1000s で  $5 \times 10^{-15}$ 、10000s で  $3 \times 10^{-15}$  が得られ、目標値を満足することができた。周波数ドリフトの問題を解決すれば、100000s においても目標値を十分満足できる可能性がある。また、2.07 リットル SHM の周波数安定度は目標には若干不足であるが、能動型水素メーザとしては世界最小の共振器容積でありながら、500s～7000s で  $10^{-15}$  台の安定度が確認された。

これらは大気中でも 10000s で  $1 \times 10^{-15}$  前後の安定度を有しており、可搬性に優れた水素メーザとしての利用も期待できる。

最後に、本開発の機会とご指導をいただきました情報通信研究機構 森川容雄様、浜真一様、伊東宏之様ほか、関係者の皆様に深謝致します。また、日頃より助言いただきました(故)津田正宏 元部長、高幣謙一郎元主席研究員、丸山昭夫氏、植原正朗氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 森川容雄, 伊東宏之, 細川瑞彦, 高幣謙一郎, 植原正朗, 津田正宏, “2F9 衛星搭載用水素メーザ原子時計の開発”, 第 46 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.908-912, 2002
- 2) 森川容雄, 伊東宏之, 石田等, 木村和宏, 浜真一, 高幣謙一郎, 待鳥誠範, 沼田泰明, 北山光政: “準天頂衛星搭載水素メーザ原子時計の BBM 開発”, 信学論 B, pp.52-61 (2005.1)

- 3) Ch. Bourga, B. Lobert, M. Brunet, “Characterisation of Galileo clocks On-Board an Experimental Satellite,” Proc. of European Frequency and Time Forum 2002, Saint-Petersbourg (Russie), 11-14 March 2003
- 4) A. Jornod, D. Goujon, D. Gritti, and L. G. Bernier, “The 35kg Space Active Hydrogen Maser (SHM-35) for ACES,” Proc. of IEEE International Frequency Control Symp., pp.82-85, 2003
- 5) 森川容雄, 太田安貞, 高幣謙一郎, 津田正宏, 佐分利義和: “衛星搭載水素メーザ用小型誘電体共振器の設計”, 電気学会電子回路研究会, pp21-26(1998.9)
- 6) J. Vanier, C. Audoin, “The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards,” Ch.6, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989

## 執筆者



滝沢 正則  
R&D 本部, コアテクノロジー  
R&D センター  
事業化推進部



沼田 泰明  
R&D 本部, コアテクノロジー  
R&D センター  
事業化推進部



北山 光政  
R&D 本部, コアテクノロジー  
R&D センター  
事業化推進部



名古 康彦  
R&D 本部, コアテクノロジー  
R&D センター  
事業化推進部



木村 幸泰  
R&D 本部, コアテクノロジー  
R&D センター  
事業化推進部