衛星搭載水晶発振器用恒温槽の設計と熱解析

正員 下田 義雄 (NTT)

1. ま え が き

衛星上で時分割交換を行うマルチビーム衛星では、その基準タイミング信号源として高安定な水晶発振器が必要となる⁽¹⁾。この要求を実現するため、著者は8.192 MHz・SCカット水晶振動子を用いた高安定水晶発振器の開発を進めてきた⁽²⁾⁽³⁾。高安定水晶発振器は、一般に恒温槽によって水晶振動子の温度補償を行っている。そのため、発振周波数の安定度は恒温槽の性能に依存するところが大きく、高い周波数安定度を実現するためには恒温槽の最適設計が重要となる。

衛星搭載用発振器の置かれている環境は、気圧 10^{-3} Pa以下の真空であるばかりでなく、温度変化範囲が広く、かつ温度変化率が大きいため、地上用高安定水晶発振器の使用環境に比べて厳しい。また、衛星搭載用機器では、小形・軽量・低消費電力化が必須の課題であるうえ、打上げ時の振動・衝撃に耐え得る十分な機械的強度を保证する必要がある。以上の理由から、恒温槽の設計に種々の制約が課せられる。例えば、地上の高安定水晶発振器で一般的に用いられているガラス製のフラスコは、機械的強度および寸法の点で衛星搭載用フラスコとして適用できない。そのため、アメリカでは金属フラスコ(ステンレス鋼、アルミニウムなど)を用いた恒温槽が開発されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。また、軽量化・低消費電力化のため、断熱特性に優れたマイラはくなどを積層したフラスコも検討されている⁽⁷⁾。

さて、ここで検討対象とした発振器は、特に低消費電力化と軽量化に重点をおいて開発を進めた。低消費電力化を図るためには、断熱特性の優れた恒温槽を実現し、ヒータ容量を低減することが重要となる。限られた発熱量(恒温槽のヒータ容量)のもとで熱的に安定な恒温槽を実現するためには、熱特性の支配要因を的確

に把握し、恒温槽の構成法および使用材料の選択などに反映させる必要がある。それには恒温槽の断熱特性を熱等価回路で表し、構成要素の熱抵抗を明確にすることが有効と考えられる。しかしながら、水晶発振器用恒温槽の熱抵抗を解析的に求めた例はこれまでにほとんどない。その最も大きな理由は、熱伝導以外の対流や熱放射の影響が大きい系では熱抵抗の解析が複雑になり、実測値とよい一致が得られなかったためであると考えられる。一方、本恒温槽の場合は真空環境で使用されることから対流が無視できるため、解析が比較的簡単になると予想される。そのため、熱伝導と熱放射の二つの熱伝達形態を考慮して熱抵抗の解析を行うこととした。

多くの衛星搭載用発振器の恒温層には前述のように金属フラスコが用いられており、発振器全体の重量に対して大きなウェイトを占めている。従って、発振器の軽量化に対しては、恒温槽の構成要素のうち、特にフラスコの重量軽減が重要となる。以上の観点から、フラスコ材料としては機械的強度や断熱特性ばかりでなく、比重の小さい材料の選択が要求される。

本論文では、初めに衛星搭載用としての恒温槽構成法、材料の選定方針などについて述べる。特に、フラスコ材料としてはプラスチックの一種であるレキソライト(アメリカ・Dodge社の商品名;物性値は付録参照)が優れていることを示す。次に、熱伝導と熱放射を考慮して恒温槽の熱抵抗を解析し、熱等価回路から熱特性の支配要因を明らかにする。ここでは、フラスコとしてプラスチック(レキソライト)および金属(コパール)を用いた恒温槽に本解析法を適用し、恒温槽の熱抵抗はフラスコの放射率に大きく依存することを示す。最後に、以上の解析結果に基づいて熱特性の改善を図った衛星搭載用恒温槽の特性について述べる。

2. 発振器の構成

水晶発振器の構成を図1に示す。発振回路は、AGC付きピエース発振回路とし、水晶振動子にはSCカット、8.192 MHz、三次オーバートーンを採用し

Design and Thermal Analysis of Quartz Oscillator Ovens for Satellite. By Yoshio Shimoda, Member (NTT Opto-electronics Laboratories).

下田義雄: 正員, NTT 光エレクトロニクス研究所

図 1 水晶発振器の構成
Fig. 1. Quartz oscillator block diagram.

た。水晶振動子を含む発振回路および温度制御回路は、発振周波数の温度安定度を確保するため、恒温槽中に収容している。恒温槽内の温度は約 65°C とし、周囲温度が 50°C になってもヒータへの供給電力のみで制御可能にした。なお、具体的な設定温度は組込まれる水晶振動子の頂点温度に合わせるため、その製造偏差に依存し、65±5°C 程度となる。従来の衛星用発振器の総消費電力は数 W ～ 数十 W であったが⁽⁴⁾⁽¹²⁾、本発振器では低消費電力化のため安定化電源などを含めて 3W 以下とした。なお、ヒータ容量の設計目標は 1.5 W 以下とした。周波数温度安定度としては、周囲温度 -10 ～ +40°C に対し、±5×10⁻⁹ 以内を設計目標とした。

3. 恒温槽の設計

ここでは衛星の温度環境について述べ、恒温槽に要求される熱抵抗を明らかにする。また、要求熱抵抗を満たし、かつ耐振・耐衝撃性を考慮した恒温槽の構成法を示す。

〈3・1〉 衛星の温度環境 通信衛星は気圧 10⁻³Pa 以下の真空中に打上げられるため、熱の伝達形態として対流は存在せず、伝導と放射のみとなる。発振器などの通信機器が搭載されるプラットフォーム上の温度は、主として太陽からの放射熱に支配されるが、ヒータなどによる温度制御が行われるため、その温度範囲は -10°C ～ +40°C 程度となる⁽⁸⁾。また平均温度は機器の搭載位置により若干異なるが約 20°C になる⁽⁹⁾。一方、衛星が蝕(太陽と衛星の間に地球または月が入って太陽からの受光が一時的に遮られる期間)となる直後は、急激に周囲温度が低下する。このときの温度変化率はプラットフォーム上で最大 -0.7°C/min 程度と

図 2 熱解析モデル
Fig. 2. Thermal analysis model.

想定される。

〈3・2〉 恒温槽に要求される熱抵抗 ここでは、周囲温度変化に対して恒温槽の温度を一定に保持するために必要な熱抵抗を求める。設計に際しては、周囲温度に対して ±10°C の余裕を見込み、使用温度範囲を -20°C ～ +50°C とする。ヒータ容量は前述のとおり 1.5 W とする。恒温槽の設定温度は水晶振動子の頂点温度に合わせるため約 65±5°C であるが、設計にあたっては周囲温度との差が大きく、熱的に厳しい 70°C を設定温度とする。

初めに、恒温槽の発熱部と周囲との関係を図 2 のように単純化して表す。すなわち、熱容量 C_f 、単位時間あたりの発熱量 Q_f 、温度 T_f の恒温槽から、熱抵抗 R を介して無限大のヒートシンクである周囲(温度 T_s)に熱が放散するものとする。このモデルに従って熱平衡方程式を立てると次式が得られる⁽¹⁰⁾。

$$C_f \frac{dT_f(t)}{dt} = -\frac{1}{R} \{T_f(t) - T_s(t)\} + Q_f(t) \quad (1)$$

従って、定常状態においては次式の関係となる。

$$Q_f = (T_f - T_s)/R \quad (2)$$

なお、以後、(1)、(2)式における単位時間あたりの発熱量 Q_f を、単に発熱量という。

恒温槽内の温度 T_f は 70°C、周囲温度 T_s は最低時で -20°C である。また、最大発熱量(ヒータ容量)は 1.5 W であるから、これらの値を(2)式に代入すれば、恒温槽に要求される熱抵抗として、 $R \geq 60^\circ\text{C}/\text{W}$ が得られる。

〈3・3〉 恒温槽の構成 熱抵抗に対する要求を満たし、かつ耐振・耐衝撃性を考慮した恒温槽の構成法について述べる。

恒温槽の性能は、フラスコの性能に依存するところが大きい。そこで、各種フラスコ材料の検討を行った。表 1 は検討対象としたフラスコ材料の物性値を示す。従来から用いられているガラスは、熱伝導率および比重が小さく、比較的優れた物性値を有するが、微

表1 フラスコ材料の比較
Table 1. Material constants for flask.

材 料	比重(g/cm ³)	熱伝導率(W/°C・cm)
ガラス	2.70	7.53×10^{-3}
ステンレス鋼	8.03	1.63×10^{-1}
コパール	8.35	1.67×10^{-1}
レキソライト	1.05	1.46×10^{-3}

図3 恒温槽の構成
Fig. 3. Oven assembly.

小さな傷が直ちに破壊に結びつくなど、機械的強度に問題がある。そのため、衛星搭載用として用いられた例は見あたらない。ステンレス鋼などの金属フラスコは、重量、熱伝導率に難点はあるが、耐振・耐衝撃性が要求される衛星用として、アメリカで一般化している。プラスチックはこれまでに使用例がないが、比重、熱伝導率とも極めて小さいという特徴を有する。なかでも、レキソライトは以上の特徴に加えて真空中におけるアウトガスが少なく、また切削加工も容易であることから衛星用材料として実績がある。以上の理由により、レキソライトフラスコの採用を前提として検討を進めたが、金属フラスコとの特性比較を行うため、コパールフラスコも試作した。発振器の軽量化に関しては、レキソライトフラスコを用いた場合、フラスコ重量が発振器の全重量に対して4%であるのに対し、コパールフラスコは19%となり、前者が著しく優れている。

恒温槽中には水晶振動子のみでなく発振回路、温度制御回路などを収容し、回路素子の温度特性を補償している。それらを機械的に安定に実装し、断熱特性の優れた構成とするため、ヒータ、水晶振動子、支柱などの配置および材質を検討した。その結果、図3に示す構成の恒温槽を試作した。水晶振動子は最も安定な

温度条件が要求されるため、フラスコの最奥部に配置し、ヒータが取付けられているアルミブロックで覆った。ヒータは薄膜抵抗体で形成し、従来の巻線形ヒータに比べて振動・衝撃などに対する信頼度の向上を図った。フラスコは内部・外部フラスコからなる二重構造とした。水晶振動子と発振回路を支持する支柱は、ステンレス鋼のネジとレキソライトの棒で形成し、十分な熱抵抗と機械的強度を確保した。また、フラスコの出入口はレキソライト製の断熱板と断熱棒で構成し、熱の流出を防いだ。更に、フラスコの外側は断熱と緩衝のため、発泡ウレタンを充てんした。

4. 恒温槽の熱解析

本章では、熱特性の支配要因を明らかにするため、恒温槽の熱抵抗を解析する。本発振器は真空中で使用されるため、熱の伝達形態として対流は無視し、伝導と放射のみを考える。

〈4・1〉 熱伝導および熱放射による熱抵抗 熱伝導により単位時間に伝わる熱量 $Q(W)$ は、高温側と低温側の温度差を $\Delta T(^{\circ}C)$ とすれば、次式で与えられる。

$$Q = (1/R_c) \Delta T \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで $R_c(^{\circ}C/W)$ は熱伝導に対する熱抵抗であり、次式で与えられる。

$$R_c = (1/\lambda)(L/A) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 λ : 熱伝導率($W/^{\circ}C \cdot cm$)、 A : 構成材料の断面積、 L : 構成材料の長さ

一方、熱放射によって単位時間、単位面積あたりに伝わる熱量 $q(W/cm^2)$ は、形態係数を F とすれば近似的に次式で表すことができる⁽¹¹⁾。

$$q \approx F \sigma f_a 4 T_m^3 \Delta T \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$T_m = (1/2)(T_1 + T_2)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$f_a = 1/(a_1^{-1} + a_2^{-1} - 1)$$

ここで σ : ステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-12} W/cm^2 \cdot K^4$)、 T_1, T_2 : 各要素面の表面温度(K)、 f_a : 放射係数、 a_i : 放射率(=吸収率)

(5)式において、形態係数とは、例えば面 S_m から面 S_n に放射される熱エネルギーのうち、面 S_n に入射する熱エネルギーの割合を示す係数であり、面 S_m が面 S_n に完全に囲まれているときは、 $F=1$ となる。

(5)式より、熱放射に対する熱抵抗 $R_{mn}(K/W)$ は、要素面の面積を S とすれば、次式で与えられる。

$$R_{mn} = 1/(SF \sigma f_a 4 T_m^3) \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式から明らかなように、熱放射による熱抵抗は表面温度に依存する。表面温度は周囲温度の変動に伴って変化するが、ここでは恒温槽内における構成要素の温度に着目しているため、その変動は極めて狭い温度範囲に限定される。従って、周囲温度の変動による R_{mn} の温度依存性は近似的に無視できるものとして解析する。

〈4・2〉 解析対象と解析上の仮定 図3に示す恒温槽の熱抵抗を解析する。対象とする恒温槽はレキソライトおよびコパールフラスコを用いた二種類である。

ヒータおよび温度センサは水晶振動子を収容しているアルミブロック(1)に取付けられており、アルミブロックが所定の温度になるようにヒータへの供給電力が制御される。ここで、ヒータとアルミブロック(1)間の熱抵抗は極めて小さいので無視し、両者は熱的に同一ポテンシャルであるとして解析する。プリント基板上には発振回路、温度制御回路用の回路部品が実装されているが、これらの部品の影響は近似的に無視できるものとする。以上の仮定の下に、ヒータ[=アルミブロック(1)]から恒温槽外部までの熱抵抗を求める。なお、解析を簡易化するため、接触熱抵抗は無視する。

解析手順としては、初めに熱伝導のみによる熱等価回路を求め、次に放射項を考慮して熱等価回路の修正を行う。

表2に以後の解析で用いる恒温槽構成材料の熱伝導率と熱放射率を示す。なお、放射率は材料の表面状態に強く依存するため、放射温度計による実測値を示した。ここで、()内の数値は計算に用いた放射率である。

表2 材料の熱伝導率と放射率

Table 2. Thermal conductivity and emissivity for materials.

材 料	熱伝導率(W/°C・cm)	放 射 率
アルミニウム	2.28	0.1~0.13(0.12)
ステンレス鋼	0.163	—
銅はく	3.93	—
ガラスエポキシ	2.1×10^{-3}	—
発泡ウレタン	2.1×10^{-4}	—
ゴ ム	1.6×10^{-3}	—
はんだめっき	0.5	0.25~0.35(0.3)
レキソライト	1.46×10^{-3}	0.87~0.92(0.9)
コパール	1.67×10^{-1}	0.85~0.87(0.86)*1 0.52~0.6(0.57)*2

*1: フラスコ内面, *2: フラスコ外面

()内は計算に使用した値

〈4・3〉 熱伝導による熱等価回路 図3に示す恒温槽は、熱伝導のみを考慮した場合、図4の熱等価回路で表すことができる。すなわち、ヒータからの熱は支柱の構成要素であるステンレス鋼のねじ、レキソライト(REX)棒を経由するものと、ねじ、プリント基板(PWB)を経由するものに分かれてアルミブロック(2)に伝達される。その後、レキソライトの断熱板およびレキソライト棒などを介して恒温槽外部に至る。一方、水晶振動子を収容したアルミブロック(1)からの熱は、Oリングを介して内部フラスコ、外部フラスコに伝搬し、発泡ウレタンを通して恒温槽外部に至るものもある。ここで、内部フラスコ、外部フラスコとは、二重構造になっているフラスコのうち、それぞれ内、外側のフラスコをいう。

(4)式に基づいて図4の各要素の熱抵抗を求め、並列に配置されているねじ、レキソライト棒などを一つにまとめて整理すると、図5が得られる。図中の()内の数値は熱抵抗を示す。ここで、図4の r_4 は他の並列要素に比べて極めて大きいため、図5では省略した。ガラスエポキシ製のプリント基板は両面に35 μ mの銅はくを有し、更にその上に数十 μ mのはんだめっきが施されている。表2より、銅の熱伝導率ははんだ

図4 恒温槽の熱等価回路(熱伝導による)
Fig.4. Thermal equivalent circuit for oven (based on thermal conduction).

REX・フラスコでは $r_6=4900$, $r_7=5580$
KOV・フラスコでは $r_6=43$, $r_7=49$

図5 簡略化した熱等価回路(熱伝導による)
Fig.5. Simplified thermal equivalent circuit (based on thermal conduction).

の約8倍であることから、プリント基板の熱伝導は主に銅はくに支配されるとして計算した。この等価回路から、ヒータと周囲間の総熱抵抗を求めると、レキソライトフラスコの場合、 $1,150^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、コパールフラスコでは $167^{\circ}\text{C}/\text{W}$ となり、後述の実験値に比べて極めて大きな値となる。

〈4・4〉 熱放射の影響を含めた熱等価回路 熱放射が支配的となる部分として、温度が高く、対向面への熱放射量が大きいと考えられる①アルミブロック(1)-内部フラスコ間、②内部フラスコ-外部フラスコ間、③プリント基板(はんだめっき付き)-内部フラスコ間をあげ、以下にそれらの熱抵抗を求める。ただし、構成要素の放射率としては、表2に示す実測値を用いる。形態係数 F は、近似的に①、②については $F=1$ 、③については $F=0.4$ とする。ここで、内部フラスコの面積は 128 cm^2 、外部フラスコの面積は 145 cm^2 である。

解析は衛星が定常状態にあるとして行い、各部分の表面温度は次のように仮定する。アルミブロック(1)の温度、すなわち恒温槽の設定温度は、組込まれている水晶振動子の頂点温度に等しいものとする。従って、この温度は水晶振動子の製造偏差に依存し、約 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ となる。その他の部分の温度は類似の恒温槽で実測した値に基づき、次のように仮定する。内部フラスコの温度はアルミブロックより 10°C だけ低く、プリント基板の温度は 5°C 低いものとする。また、外部フラスコの温度は内部フラスコより 10°C 低いものとする。なお、これらの表面温度は周囲温度によって $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度変動すると考えられる。従って、これに起因する熱抵抗の計算誤差として約10%が見込まれる。

以上の数値に基づいて放射による熱抵抗を求め、熱伝導のみによる熱等価回路(図5)を熱放射を考慮した等価回路に修正すると、図6が得られる。ここで、 r_{mn} は恒温槽の設定温度(水晶振動子の頂点温度)を $58\sim 70^{\circ}\text{C}$ としたときの放射による熱抵抗を示しており、 $r_{0.6}$ はアルミブロック-内部フラスコ間、 $r_{6.7}$ は内部フラスコ-外部フラスコ間、 $r_{2.6}$ はプリント基板-内部フラスコ間の熱抵抗である。 $r_{0.6}$ と $r_{2.6}$ はレキソライトおよびコパールフラスコともほとんど同じ値となる。その理由はこの部分の放射率が両材料ともほぼ等しいためである。また、 r_6 、 r_7 は熱伝導による抵抗であるが、図5の値と異なる。その理由は、放射熱によってフラスコの内面が一樣に加熱されるため、熱の伝搬方向がフラスコの軸方向ではなく厚さ方向になるとしたためである。

その他の熱抵抗値

	r_6	r_7	$r_{6.7}$
REX・フラスコ	0.5	0.5	10.5~11.8
KOV・フラスコ	0.005	0.004	16.5~18.5

ただし、 r_{mn} は恒温槽の設定温度を $58\sim 70^{\circ}\text{C}$ としたときの値。

図6 修正熱等価回路(熱伝導と熱放射による)
Fig. 6. Modified thermal equivalent circuit (based on thermal conduction and radiation).

図7 恒温槽の設定温度に対する熱抵抗の解析値

Fig. 7. Thermal resistance as a function of oven operating-temperature.

図6より本恒温槽の総熱抵抗を求めると、恒温槽の設定温度に対して図7の関係が得られる。すなわち、設定温度 $58\sim 70^{\circ}\text{C}$ に対してレキソライトフラスコの場合 $90\sim 96(^{\circ}\text{C}/\text{W})$ 、コパールフラスコの場合 $95\sim 101(^{\circ}\text{C}/\text{W})$ となり、熱放射を考慮することによって熱抵抗が大幅に低下することがわかる。特に、レキソライトフラスコについては、熱放射を考慮することによって熱抵抗が1けた以上低下し、放射の影響が極めて大きい。

〈4・5〉 解析値と実験値の比較 レキソライトおよびコパールフラスコを用いた水晶発振器の真空中における入力電力とヒータ電力の温度依存性を図8に示す。ただし、恒温槽の設定温度は組込まれている水晶振動子の頂点温度に調整されているため、前者の恒温槽の温度は 66°C 、後者は 59°C に設定されている。

図8のヒータ電力と(2)式の関係から試作恒温槽の熱抵抗を求めると、図9の実線が得られる。他方、図7より熱放射を考慮した熱抵抗の解析値は、レキソラ

イトフラスコでは $91(^{\circ}\text{C}/\text{W})$ 、コパールフラスコでは $100(^{\circ}\text{C}/\text{W})$ となる。これらを図 9 にプロットすると破線のようになり、解析値と実験値がよく一致することがわかる。高温側では解析値と実験値との差が若干大きくなるが、これは解析において(6)式の R_{mn} の温度依存性を無視したためである。

なお、熱伝導のみによる解析結果は、実験値と大きな差があり、特に熱伝導率の小さいレキシライトフラスコを用いた場合には良い対応が得られない。このことから熱伝導率の小さい材料で構成された恒温槽の場合、熱特性を支配する要因として、熱放射の影響が大きいことが確認できる。

以上の解析結果から、恒温槽の熱抵抗を改善するためには、図 6 における内部・外部フラスコ間の熱抵抗 $r_{6,7}$ を大きくするのが最も効果的であることがわかる。すなわち、フラスコの放射率の低減が重要となる。例えば、内部・外部フラスコの片側表面(加工性を考慮して外面)に放射率 0.12 のアルミニウムを蒸着し

たとすればレキシライトフラスコの場合、熱抵抗は従来の約 1.7 倍 ($155^{\circ}\text{C}/\text{W}$) となり、断熱特性の向上が期待できる。

5. 試作水晶発振器の熱特性

前章までの検討結果から、レキシライトの表面にアルミニウムを蒸着したフラスコを衛星搭載用水晶発振器に用いることとした。本章では、このフラスコを用いた恒温槽および水晶発振器の真空中 (10^{-3}Pa 以下) における実験結果を示す。

図 10 は槽内温度を 66.3°C (水晶振動子の頂点温度) に設定した試作恒温槽の熱抵抗である。図 9 との比較からレキシライトにアルミニウムを蒸着することにより、熱抵抗が 32~60% 高くなっていることがわかり、フラスコ表面の放射率低減効果が確認できる。なお、前章で予測した熱抵抗に比べて実験値は若干低い値となっているが、その理由は構成要素の諸定数の製造ばらつき(特に発泡ウレタンの充てん率)に起因するものと考えられる。このときのヒート電力は周囲温度 -20°C において 0.72W であり、設計目標の 1.5W 以下を十分に満足することが確認できた。

図 11 は発振周波数の温度依存性である。周囲温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ の範囲で周波数変化率は $\pm 6 \times 10^{-10}$ 以内であり、極めて安定である。

水晶振動子は熱衝撃によるストレス変化により、共

図 8 消費電力の温度依存性
Fig. 8. Temperature dependence of power.

図 9 恒温槽の熱抵抗
Fig. 9. Thermal resistance for ovens.

図 10 アルミニウム蒸着フラスコを用いた
恒温槽の熱抵抗
Fig. 10. Thermal resistance for a oven using
metalized plastic flask.

図 11 発振周波数の温度特性
Fig. 11. Frequency temperature characteristics.

図 12 発振周波数の熱衝撃特性
Fig. 12. Frequency change by thermal shock.

振周波数が変化する。蝕時における恒温槽内の過渡的温度変化は、構成材料の熱容量などが関与して解析が極めて複雑となる。そのため、周囲温度を急激に変化させたときの発振器の周波数変化を実験的に確かめた。図 12 は衛星が蝕となるときの最大温度傾斜 $-0.7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で周囲温度を変化させた結果であるが、発振周波数変化率は 10^{-10} オーダを示している。衛星が蝕となるときの温度傾斜はこれよりも緩やかな値であるため、周波数安定度 $\pm 5 \times 10^{-9}$ 以内を十分に達成できるものと考ええる。

6. む す び

衛星搭載用水晶発振器の恒温槽について、その設計思想を述べると共に、熱解析により熱抵抗の支配要因を明らかにし、以下の結論を得た。

(1) 恒温槽の構造は、構成材料の耐振・耐衝撃性、熱伝導率などを考慮して決めた。特に、恒温槽の性能を左右するフラスコ材料については、重量、製造性などの点で優れているレキソライトを用いることにより、従来の金属フラスコに比べて 1/5 の重量とした。

(2) 恒温槽の熱特性向上には、フラスコの放射率低減が最も効果的であることがわかった。レキソライト製フラスコの表面にアルミニウムを蒸着して放射率を低減することにより、従来に比べ恒温槽の熱抵抗が数十%向上することがわかった。また、ヒータ電力は真空中、 -20°C において 0.72 W であり、設計目標 1.5 W の約 1/2 にすることができた。

(3) 上記恒温槽を用いた水晶発振器は優れた周波数温度特性、熱衝撃特性を有することを確認した。

終りに、日ごろから御指導・御べんたつをいただい

ている光エレクトロニクス研究所・光複合部品研究部 杉田グループリーダに感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、有益な助言と討論をしていただいた光素子研究部の十文字グループリーダおよび光複合部品研究部 宇野主幹研究員、長岡主任研究員に深謝いたします。(昭和 63 年 11 月 10 日受付)

文 献

- (1) 森・田中・下田・木幡：「マルチビーム衛星搭載用 IF スイッチおよび制御回路」，通研実報，**35**，1327 (昭 61-12)
- (2) 下田・森・十文字：「マルチビーム衛星搭載用高安定水晶発振器」，昭 61 電子通信学会全大，2438
- (3) 下田・十文字：「衛星搭載用高安定水晶発振器の構成と諸特性」，電学論 C，**108**，657 (昭 63-9)
- (4) M. B. Bloch, M. P. Meirs & T. M. Robinson: "Stable Oscillator for Pioneer Venus Program", Proc. 30th Ann. Freq. Contr. Symp. p.279 (1976)
- (5) M. B. Bloch & A. I. Vulcan: "The Stability of Precision Oscillators in Vibratory Environments," Proc. 30th Ann. Freq. Contr. Symp. p.284 (1976)
- (6) H. S. Babbitt: "Precision Oscillators Frown on the LES-8/9 Spacecraft", Proc. 31st Ann. Freq. Contr. Symp. p.412 (1977)
- (7) J. R. Norton: "An Ultrastable Low Power 5 MHz Quartz Oscillator", Proc. 30th Ann. Freq. Contr. Symp. p.275 (1976)
- (8) 田中・市川・土橋：「通信衛星 2 号 (CS-2) とその通信システム」，信学誌，**67**，835 (昭 59-8)
- (9) 更田・工藤・磯・中谷：「中容量国内衛星通信方式現場試験」，通研実報，**29**，583 (昭 55-4)
- (10) J. P. Holman: Heat Transfer (1976) McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo
- (11) 伊藤(謹)・伊藤(博)・国峰：電子機器の熱対策設計 (昭 56) 日刊工業
- (12) C. A. Bartholomew: "Satellite Frequency Standard", J. Inst. Navigation, **25**, 113 (1978)

付 録

付表 1 レキソライトの物性値
app. Table 1. Properties of rexolite.

誘電率	at 1MHz-10GHz	2.53
誘電正接	at 1MHz	1.2×10^{-4}
	10MHz	2.5×10^{-4}
	10GHz	6.6×10^{-4}
抵抗率	0hm-cm	$> 10^{16}$
絶縁耐力	kV/cm	200
比重	g/cm ³	1.05
引張り強度	kg/cm ²	490
曲げ強度	kg/cm ²	805
線膨張率		7.0×10^{-5}
熱伝導率	W/°C・cm	1.46×10^{-3}
使用温度範囲	°C	-60 ~ +100
吸水率	%	0.05 max