

# 人工衛星搭載用恒温槽のスペース・シミュレーター による性能試験

中山晴美・大島耕一

Space environmental test of a thermos for space use

By

Harumi NAKAYAMA and Koichi OSHIMA

**Abstract:** A thermos, which is used aboard a spacecraft in order to maintain a constant temperature for a crystal oscillator, was environmentally tested in space simulators. This thermos is composed of three-fold aluminum containers, between which thermal insulation is applied. Measured thermal resistance between them showed reasonably consistent values with the calculated ones. However, the temperature of the inner container was seriously affected by contamination of residual gas molecule showing heavy drift and large cyclic variation. Thus the thermos for space use is recommended to be kept in pressurized vessel.

## 概 要

アルミニウム製の三重の容器をつくり、その間に適当な熱絶縁を行なうことによって、内槽の温度変化を減少させる方式の恒温槽の試験を、スペース・シミュレーター中で行なった。各槽間の熱的結合抵抗は、各槽間のふく射結合だけが存在するばあいには、ほぼ計算どおりの値が得られたが、スーパーインシュレーション等をそう入して、より高度の熱絶縁を計っても、各種の漏洩抵抗のために、予期どおりの値は得られなかった。

さらに、このような高度に熱絶縁された体系ではスペース・シミュレーター中に残留した分子の汚染効果による熱入力が影響して、内槽の温度は、予期していたより大きな変化を示すことがわかった。

## 1. 序 言

人工衛星に搭載する水晶発振器に対して、ドップラー効果による測定を行なう際に、非常に高い精度で発振周波数を一定に保つことを要求されることがある。そのようなばあいには、当然水晶および発振回路を恒温槽に入れ、一定温度に保持することが求められる。この研究は、この問題に関連して、実際の試作発振器の宇宙環境試験を行なっているうちにまとめられたものである。

人工衛星に搭載し、宇宙空間において使用されるこのような機器は、地上における使用状態と当然異なった環境のもとで使用されるので、相当した環境のもとで試験を行なわれね

ばならない。このような環境試験法については、すでに多くの論文が発表されているので [I] 繰返す必要はないが、ここで報告する実験は、すべて、東大宇宙航空研究所の 60 cm スペース・シミュレーターの中で行なわれた。

この環境試験によって、このような恒温槽の性能に対しては、真空状態に保持したときの残留気体の汚染効果が大きいために、慎重な考慮が必要ながわかった。なお試料をいただいた、日本電気 K. K. 塚田七郎課長、浜付武重氏のご援助に感謝します。

## 2. 恒温槽

この恒温槽は、温度の時間的変化を小さくすることを目的とし、ある一定の温度に保持しようとするものでなく、また人工衛星搭載用であるために、電力の使用が望めないで、すべて受動素子ばかりで組立てられねばならないから、槽を何重かにして、互いの間の熱伝達率をなるべく小さくし、重量の許す限り熱容量を大きくすることが設計の要点である。

このようにして設計された各槽の諸元を第1表に示した。これら各槽の間の熱絶縁方法を第2表に示す5種類について試験を行なった。

第 1 表

	外 槽	中 間 槽	内 槽
大きさ (cm)	7.8 $\phi$ $\times$ 13 $\times$ 0.1 t	6.6 $\phi$ $\times$ 10.8 $\times$ 0.1 t	3.45 $\phi$ $\times$ 6.0 $\times$ 0.33 t
質量 (g)	95.0	62.4	75.0
熱容量 (J/deg.)	84.2	55.3 (20°C) 57.0 (50°C)	66.5 (20°C) 70.5 (100°C)
表面積 (cm <sup>2</sup> ) 側面 上底と下底	318	224 68	65.0 18.8

第 2 表

Model	外槽と中間槽の熱絶縁方法	中間槽と内槽の熱絶縁方法
I	ゴムのホルダー6個で固定 スーパー・インシュレーションなし	木綿糸で連結 スーパー・インシュレーションなし
II	Iと同じ	木綿糸で連結 アルミナイズド・マイラー三重にして入れる
III	木綿糸で連結 スーパー・インシュレーションなし	IIと同じ
IV	木綿糸で連結 アルミナイズド・マイラーとガラス クロス積層を入れる	Iと同じ
V	ゴムホルダー6個で固定 アルミナイズド・マイラーとガラス クロス積層を入れる	Iと同じ

(外槽の外表面と内槽の内表面のみ黒色塗装、他の面はアルミの研磨面)

## 3. 解 析

## ○熱絶縁抵抗

これら各槽の間を、スーパー・インシュレーション（アルミナイズド・マイラーとガラスクロスの積層）で絶縁したときの熱抵抗は、文献[2]に与えられた熱伝導率を利用すると、第3表のように示される。

第 3 表

	内槽と中間槽の間の熱抵抗	中間槽と外槽の間の熱抵抗
ふく射熱交換による	571 (deg./watt)	275 (deg./watt)
6個のホルダーの熱伝導による	—	293
三重のアルミナイズド・マイラーの熱伝導	$3.25 \times 10^5$	—
ガラスクロスとマイラーの積層の熱伝導	—	467

また、外槽と中間槽の間の熱抵抗  $R_2$ 、中間槽と内槽の間のそれ  $R_3$ 、のうちふく射熱交換によるものは、

$$R_2 = \frac{T_1 - T_2}{(\varepsilon_{1-2}' A_2' + \varepsilon_{1-2}'' A_2'') \sigma (T_1^4 - T_2^4)} \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{T_2 - T_3}{(\varepsilon_{2-3}' A_3' + \varepsilon_{2-3}'' A_3'') \sigma (T_2^4 - T_3^4)} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma$  は Stefan-Boltzman 定数

$A_2'$  は中槽上下底の外表面積

$A_2''$  は中槽側面の外表面積

$\varepsilon_{1-2}'$  は外槽と中槽の両底間のふく射係数で

$$\frac{1}{\varepsilon_{1-2}'} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

$\varepsilon_{1-2}''$  は外槽と中槽の側面のふく射係数で

$$\frac{1}{\varepsilon_{1-2}''} = \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2''}{A_1''} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)$$

$A_3'$  は内槽上下底の外表面積

$A_3''$  は内槽側面の外表面積

$\varepsilon_{2-3}'$  は中槽と内槽の両底間のふく射係数で

$$\frac{1}{\varepsilon_{2-3}'} = \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1$$

$\varepsilon_{2-3}''$  は中槽と内槽の側面のふく射係数で

$$\frac{1}{\varepsilon_{2-3}''} = \frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{A_3''}{A_2''} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$$

ここで、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  はいずれもアルミ研磨面のふく射率なので  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.04$  として適用すると、同じ表に示された値を得る。

また、外槽と中槽を結合している支持材の熱伝導による結合抵抗も同じ表に示されている。

#### ○基礎式

このような系の熱平衡の方程式は次のように示される。

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_1 - A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - K_{12}(T_1 - T_2) - A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_2 - K_{21}(T_2 - T_1) - A_2 F_{21} \sigma (T_2^4 - T_1^4) - K_{23}(T_2 - T_3) - A_2 F_{23} \sigma (T_2^4 - T_3^4) \quad (4)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = Q_3 - K_{32}(T_3 - T_2) - A_3 F_{32} \sigma (T_3^4 - T_2^4) \quad (5)$$

ここで、 $C_1, C_2, C_3$  と  $Q_1, Q_2, Q_3$  はそれぞれ外槽、中槽、内槽の熱容量と発生熱量で、 $K$  は熱伝導率、 $F$  はふく射熱交換係数である。これらの式は次の線型化を行なうことによっ

$$T_i = T_0 \left( \frac{3}{4} + \theta_i \right)$$

簡単化される。

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{Q_1}{C_1 T_0} - \frac{\theta_1}{C_1 S} - \frac{1}{C_1 R_{12}} (\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{Q_2}{C_2 T_0} + \frac{1}{C_2 R_{12}} (\theta_1 - \theta_2) - \frac{1}{C_2 R_{23}} (\theta_2 - \theta_3) \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_3}{dt} = \frac{Q_3}{C_3 T_0} - \frac{1}{C_3 R_{23}} (\theta_3 - \theta_2) \quad (8)$$

$$\text{ここで,} \quad S = \frac{1}{4A_1 \varepsilon_1 T_0^3} \quad (9)$$

$$R_{i,j} = R_j = \frac{1}{K_{i,j} + 4A_i \sigma F_{i,j} T_0^3} \quad (10)$$

#### ○定常解

長時間一定の  $Q_1, Q_2, Q_3$  を受けたのちの最終平衡温度  $T_{1\infty}, T_{2\infty}, T_{3\infty}$  は次の式で示される。

$$T_{1\infty} = S(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad (11)$$

$$T_{2\infty} = S(Q_1 + Q_2 + Q_3) + R_2(Q_2 + Q_3) \quad (12)$$

$$T_{3\infty} = S(Q_1 + Q_2 + Q_3) + R_2(Q_2 + Q_3) + R_3 Q_3 \quad (13)$$

特に興味があるのは、 $Q_1 = Q_2 = 0$  のときで、この際の最終平衡温度から、熱結合抵抗が定められる。

$$R_2 = \frac{T_{2\infty} - T_{1\infty}}{Q_3} \quad (14)$$

$$R_3 = \frac{T_{3\infty} - T_{2\infty}}{Q_3} \quad (15)$$

### ○ 周期解

簡単のために、内槽の存在を無視し、外槽と中槽だけの系について、外槽の熱入力を断続して温度に変化を与えたときの解は、文献[3]によれば、 $t_1=t_2$  のばあい、

$$\begin{aligned} \frac{T_{1\max} - T_{1\min}}{T_0} &= \frac{1}{2} \frac{1 - \beta\tau}{\alpha\tau - \beta\tau} \tanh \frac{\alpha t_1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\alpha\tau - 1}{\alpha\tau - \beta\tau} \tanh \frac{\beta t_2}{2} \\ &\doteq \frac{t_2}{4\tau} \left\{ 1 - \frac{1}{12} \left( 1 + \frac{2S}{R} \right) \frac{t_1 t_2}{\tau^2} + \dots \right\} \quad (t_1 t_2 \ll \tau, S \ll R) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{T_{2\max} - T_{2\min}}{T_0} = (1 + e^{-\alpha t_1})^{\frac{\beta}{\alpha - \beta}} (1 + e^{-\beta t_1})^{-\frac{\alpha}{\alpha - \beta}} - \frac{1}{2} \quad (17)$$

$$\doteq \frac{t_1 t_2}{16 C_1 S C_2 R_2} + \dots \quad (t_1, t_2 \ll \tau, S \ll R_2) \quad (17')$$

ここで、

$$T_0 = 4 \left( \frac{t_1}{t_1 + t_2} \right) S Q_{11} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \alpha\tau = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \frac{S}{R} + \left\{ 1 + 2 \left( 1 - \frac{C_1}{C_2} \right) \frac{S}{R} + \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right)^2 \left( \frac{S}{R} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \\ \beta\tau = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \frac{S}{R} - \left\{ 1 + 2 \left( 1 - \frac{C_1}{C_2} \right) \frac{S}{R} + \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right)^2 \left( \frac{S}{R} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \end{cases} \quad (19)$$

$Q_{11}$  は外槽発生熱量、 $t_1$  は  $Q_{11}$  の熱量が与えられた時間、 $t_2$  は  $Q_{11}$  を断たれた時間である。これらの式を使って  $C_1, C_2, S, R_2, R_3$  の値から各槽の温度振幅が求められる。

### ○ Fourier 級数による解

$Q_1, Q_2, Q_3$  が次のように示されるとすると

$$Q_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{1n} e^{i\omega t}$$

$$Q_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{2n} e^{i\omega t}$$

$$Q_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{3n} e^{i\omega t}$$

文献[3]より  $Q_2=Q_3=0$  のとき

$$\frac{T_{2\max} - T_{2\min}}{T_{1\max} - T_{1\min}} = \frac{t_1 + t_2}{2\pi C_2 R_2} \quad (20)$$

$$\frac{T_{3\max} - T_{3\min}}{T_{2\max} - T_{2\min}} = \frac{t_1 + t_2}{2\pi C_3 R_3} \quad (21)$$

また、 $Q_2, Q_3$  が存在するときは

$$\frac{(T_{2\max} - T_{2\min})_{Q_2, Q_3 \neq 0}}{(T_{2\max} - T_{2\min})_{Q_2=Q_3=0}} = \left( \frac{2\pi C_1 R_2}{t_1 + t_2} \right) \frac{Q_2}{Q_1} \quad (22)$$

$$\frac{(T_{3\max} - T_{3\min})_{Q_2, Q_3 \neq 0}}{(T_{3\max} - T_{3\min})_{Q_2=Q_3=0}} = \left( \frac{2\pi}{t_1 + t_2} \right)^2 C_1 R_2 C_2 R_3 \frac{Q_3}{Q_1} \quad (23)$$

がえられる。

## 4. 実験結果

## ○熱抵抗

式(14)と(15)にしたがって、一定の熱入力を内槽に与えて求めた  $R_2$  と  $R_3$  の値を第4表に示してある。また  $S$  は式(9)より求められた。Model IV と V については、式(17')から Model I と比較して求めた。

第4表

	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
$S$ (deg./watt)	8.17	—	—	7.75	7.63
$R_2$	225	175	171	403	273
$R_3$	500	667	617	500	500
$C_1S$ (min.)	11.5	—	—	10.9	10.7
$C_2R_2$	207	161	158	371	252
$C_3R_3$	554	739	684	554	554

内槽と中槽の間、中槽と外槽の間の熱抵抗の測定値は、ふく射結合のばあいには、よく計算値と一致し、それぞれ約  $200 \pm 50^\circ\text{C}/\text{watt}$ ,  $500 \pm 100^\circ\text{C}/\text{watt}$  ぐらいの値をとる。これらの値は、計算における各種の仮定を考慮に入れるとこれ以上の一致は望めないであろう。外槽におけるゴム製のホルダーの影響も、大体計算値どおり現われている。スーパー・インシュレーションの効果は、外槽と中槽の間では大体期待どおりであるが、内槽に対しては、定量的に期待されるような大きな熱絶縁効果を示さない。これは、ちょうど電気工学において、大きな抵抗値を測定する際には、漏洩電流に注意しなければならないことに相当している。

この測定から、内槽に対しては、 $300^\circ\text{C}/\text{watt}$ 、中槽に対しては  $600^\circ\text{C}/\text{watt}$  程度の熱絶縁を簡単なスーパー・インシュレーションと適当な保持方法を使用することによって得られることがわかり、これ以上の熱絶縁はより多層のスーパー・インシュレーションを使用しても、あまり望めないことがわかった。

## ○温度振幅

このようにして求めた熱抵抗を使って計算した温度振幅と実験値を第5表に比較してある。実験値は観測された最大値であって、いずれも計算値より大きい。外槽の温度振幅については、その値が大きいから前述のような線型近似では計算値の精度が悪くなるからであろう。中槽と内槽については次節で考慮する。

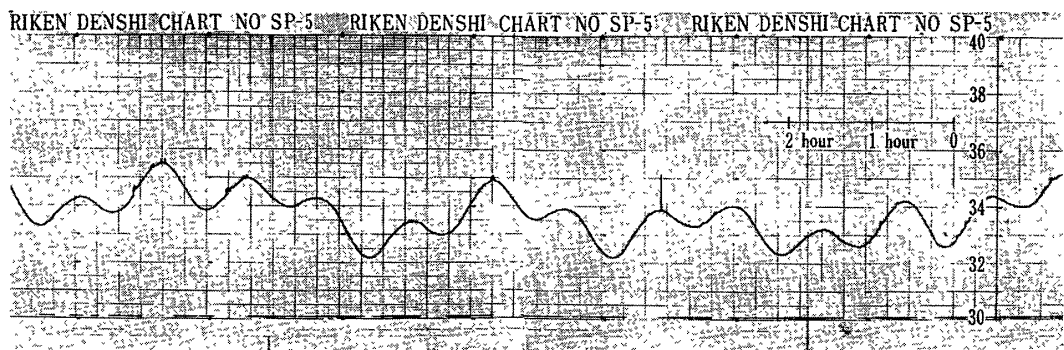
この実験では、測定値の精度をよくするために、外槽の温度振幅を大きく与えて測定を行なったが、実際の宇宙船内では、外槽の温度振幅は、たかだか  $5^\circ\text{C}$  程度であると考えられるから、この結果得られる内槽の温度振幅は式(20)と(21)による計算値としては  $10^{-3}^\circ\text{C}$  程度になるはずである。だが、このような小さな値に対しては、次に述べる汚染効果の方が大きく影響して、内槽温度変化はもっと大きな値をとるであろう。このことは、温度測定値においても現われており、事実、周期的な変化は、第5表に掲げられた値よりも小さく、観測できない程度になることも多かった。

第 5 表

	Model I	Model II	Model III
$T_{1\max} - T_{1\min}$ deg.	98.1	105	104
$T_{2\max} - T_{2\min}$ deg.	10.8	6	8.7
$T_{3\max} - T_{3\min}$ deg.	1.3	1	0.7
$\frac{T_{1\max} - T_{1\min}}{T_0}$ Meas.	0.313	0.352	0.354
Cal.	0.425	0.434	0.435
$\frac{T_{2\max} - T_{2\min}}{T_0}$ Meas.	0.034	0.019	0.028
Cal.	0.020	0.010	0.016
$\frac{T_{2\max} - T_{2\min}}{T_{1\max} - T_{1\min}}$ Meas.	0.110	0.057	0.084
Cal.	0.046	0.026	0.038
$\frac{T_{3\max} - T_{3\min}}{T_{2\max} - T_{2\min}}$ Meas.	0.120	0.167	0.080
Cal.	0.017	0.017	0.017

5. 汚染効果

前の第5表に示された内槽の温度変化は、第1図に示されているような記録から読みとられたものである。(これは、多くの実験値の中、最も周期的変化が明瞭に現われたものであって、外のばあいには周期的変化より drift の方が大きく、多くのばあいには、周期的変化は認められなかった。)この記録からわかるように、内槽の温度は大きい drift を示し、不安定なことを示している。この不安定の理由は、内槽表面に対して各種の汚染物質が付着した



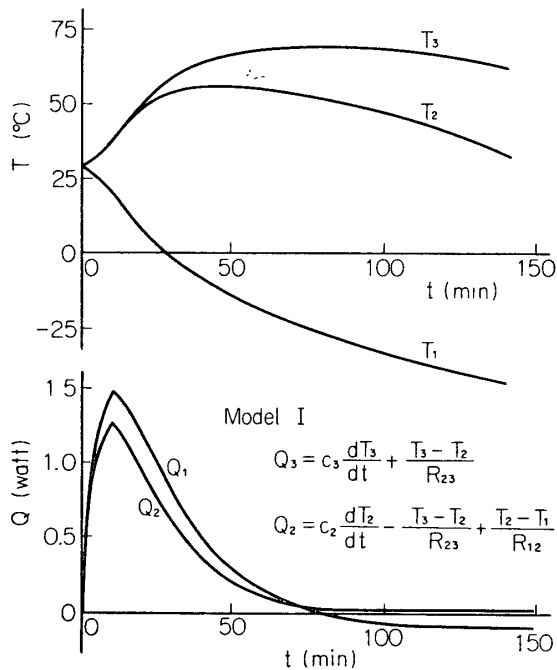
第1図 内槽の周期的な温度変化と drift

第 6 表

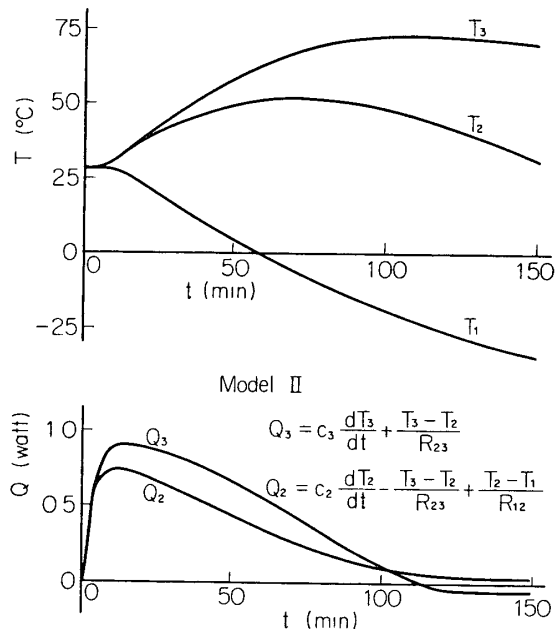
	Model I	Model II	Model III
$Q_2$ (watt)	0.154	0.096	0.131
(watt/cm <sup>2</sup> )	$5.3 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-4}$
$Q_3$ (watt)	0.023	0.020	0.013
(watt/cm <sup>2</sup> )	$2.7 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$

り蒸発したりする際の発熱吸熱によるものと思われる。式 (22) と (23) を使用して、中槽と内槽の温度変化の実測値と計算値の違いを説明するためには、どの程度の  $Q_2$ ,  $Q_3$  を与えればよいかを推定した例を第6表に示してある。この例からわかるように、槽の単位表面積当り  $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$  watt/cm<sup>2</sup> 程度の熱入力があるとすれば、十分にこの差異を説明することができる。もちろん、このような場合には、熱結合抵抗  $R_2$ ,  $R_3$  も変化するであろうから、この値は定量的には意味の少ない値であるが、毎時間、表面積 1 cm<sup>2</sup> 当り 1/10 mW 程度の熱発生は、水分による汚染を考慮しただけでも、十分に説明できる値である。

また、このような効果は、スペース・シミュレーターの液体窒素シュラウドの冷却初期における、第2図に示されたような内槽、中槽の温度の上昇として顕著に観測される。この冷



第2図 (a) 冷気初期における温度変化



第2図 (b) 冷気初期における温度変化

却の開始によって、電離真空計で測定した槽内圧力は  $4 \times 10^{-5}$  Torr から  $2 \times 10^{-5}$  Torr 程度に下るだけであるが、水蒸気や有機ガス成分は冷却面に吸着されて減少し、槽表面の残留気体に変化を起して、温度変化を与えるものであろう。この際の温度変化から計算した発熱量も同じ図に示してある。ここに示されたように、発熱量は大きく、長時間にわたるから、前に述べた drift を説明するのに決して不十分な値ではない。

## 6. 結 言

この実験によって、この種恒温槽の槽間熱伝達抵抗は、ほぼ計算値に近い値を示すが、最内槽の温度は長時間にわたる実験ののちにも、大きな drift と周期変化を示す。これはおそらく、残留気体の表面汚染効果によると思われる。

実際の人工衛生内部は多数の各種汚染源からの蒸発気体で汚染されており、数か月程度経



過しても清浄になるとは考えられず、また、宇宙の無重力状態がこのような現象に及ぼす効果も全く未知であるから、実際の水晶発振器の設計の際はより慎重な考慮が必要であろう。

1967年11月21日 航空力学部

#### 参 考 文 献

- [1] 大島耕一：人工衛星の温度平衡研究設備について 宇宙研報告 第2巻第1号 (1966) 1
- [2] 中川 洋, 高橋和雄：低温における断熱法“真空” 第6巻第7号
- [3] Koichi Oshima & Yuko Oshima: An analytical approach to the thermal design of spacecrafts. ISAS Univ. Tokyo Report 419 (1967)