

宇宙船の温度設計についての基礎的な研究

大島 耕一・中山 晴美・大島 裕子*

On Thermal Design of an Artificial Satellite

By

Koichi OSHIMA, Harumi NAKAYAMA & Yuko OSHIMA

Abstract: A new thermal design concept of an artificial satellite, "uniform skin temperature-lumped heat mass method", is presented, which is especially useful for the satellite with a metal-covered skin and spinning around its own axis. At first, the temperature of a single skin body under cyclic heating and cooling is analysed, and a time constant which determines the temperature variation of the body is found out. Secondly, the effect of the internal compartments is analysed, which results in a correction to the time constant of the single skin body. Finally, using this skin temperature modified by the above-mentioned correction and the coupling constants between the skin and the internal compartments, the temperature of the whole system is calculated.

Triple cylinders, which consist of three cylinders with different sizes successively hanged inside the each bigger one so as to be thermally coupled with each adjacent cylinder only through radiation, are tested in the space simulator. The outermost, biggest cylinder is heated cyclically in various way by an electric heater. Then this temperature variation gradually penetrates into the inner cylinders through radiation. This provides the simplest model of the above analysis and the results obtained strongly confirmed the usefulness of the above analysis.

要 約

一様外被-集中熱容量方式とも呼ばれるべき宇宙船の温度設計方式を検討し、スペース・シミュレーターによる小型模型による実験によって、この解析法の有用性を論じた。この設計方式は薄い金属外被に包まれ、自身のまわりにスピンしながら、比較的低高度を飛ぶ人工衛星の温度設計に有用である。またこの設計方式を適用する際に必要な一様温度外被と、内部の集中した熱容量をもった諸計測器群との結合係数を実験的に定める方法も述べられる。

* お茶の水女子大学理学部

1. は し が き

宇宙船や人工衛星の搭載機器が、宇宙空間の環境のもとで、正常に動作するようにするためにいろいろの設計方式が考えられているが、その一つとしてここでは“一様外被-集中熱容量”方式について述べる。

この方式では、幾つかの内部機器やその部品をまとめて、熱的に一体に近い、つまり外部環境が変化してもその中ではほぼ一様な温度分布（時間的にはもちろん変化するが）をもつと思われるような機器室に入れ、それを外被など直接宇宙空間環境の影響をうける部分となるべく熱的に絶縁して保持し、一方外被の温度は環境に応じて適当に設計して、内部機器の温度を許容値以下に保持するものである。この外被温度の設計の際には、当然内部の集中熱容量の効果も考慮されなくてはならない。

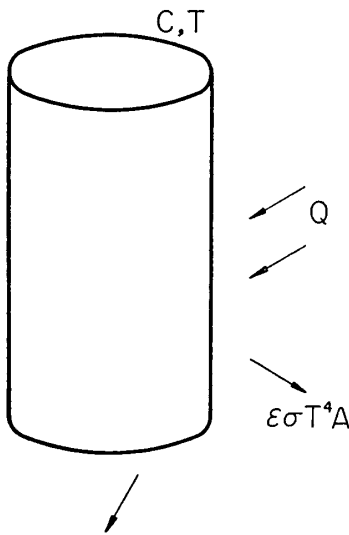
したがってこの論文では、内部に集中熱容量があるばあいの外被温度の計算法を述べ、またこのようにして決定された温度の外被のもとでの内部機器の温度変化の計算法が導かれる。次に、小型の単純化した模型について、スペースシミュレーター試験を行ない、上の各段階の解析を検討し、あわせて実機設計に対する注意をも述べた。

本研究はある特定の宇宙船開発計画とはなんらの関連なく行なわれた基礎研究である。

2. 解 析

2.1 単一外被の温度

第1図に示すように、熱容量 C 、温度 T の模型に、 Q のふく射エネルギーが入射吸収されており、一方模型自身からは $\varepsilon\sigma T^4 A$ のエネルギーがふく射で外界に失われているとする。ここで ε は模型の表面のふく射率、 A は外表面積、 σ は Stefan-Boltzman の定数である。もし模型が十分に熱伝導のよい材料で作られているか、自身のまわりに回転しているとすると、模型の温度 T は一様であると考えられる。われわれの実験では四囲にヒーターを取付けて加熱したので、外側円筒については（内側円筒についてはもちろん）ふた部を除いて、この条件は満足されていることが確かめられた。



第1図 単一円筒の熱平衡

このばあいの熱平衡の式は

$$\left. \begin{aligned} \text{加熱時には } C \frac{dT}{dt} &= Q - \varepsilon\sigma T^4 A \\ \text{冷却時には } C \frac{dT}{dt} &= -\varepsilon\sigma T^4 A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で与えられ、この解は

$$\left. \begin{aligned} \text{加熱時} \quad & \ln \frac{(T_\infty + T)(T_\infty - T_0)}{(T_\infty - T)(T_\infty + T_0)} + 2 \tan^{-1} \frac{T}{T_\infty} - 2 \tan^{-1} \frac{T_0}{T_\infty} = \frac{4\varepsilon\sigma T_\infty^3 A}{C} (t - t_0) \\ \text{冷却時} \quad & \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 = 1 + \frac{3\varepsilon\sigma T_0^3 A}{C} (t - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで T_∞ は長時間加熱された後の平衡温度で

$$T_\infty = \left(\frac{Q}{\varepsilon \sigma A} \right)^{1/4}$$

であり、また T_0 は $t=t_0$ のときの温度である。

さて次に、 t_1 時間加熱、 t_2 時間冷却という繰り返しを続けるばあいを考える。長い時間たつて、定常状態に達したとすると、その状態の一周期の中で加熱の初めのときの温度（最低温度） T_{\min} と終りのときの温度（最高温度） T_{\max} はそれぞれ冷却の終りと初めの温度に等しいはずであるから、

$$\left. \begin{aligned} \ln \left(\frac{T_{\max} + T_\infty}{T_{\max} - T_\infty} \cdot \frac{T_{\min} - T_\infty}{T_{\min} + T_\infty} \right) + 2 \tan^{-1} \frac{T_{\max}}{T_\infty} - 2 \tan^{-1} \frac{T_{\min}}{T_\infty} &= \frac{4 \varepsilon \sigma A}{C} T_\infty^3 t_1 \dots\dots \\ \left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right)^3 &= 1 + \frac{3 \varepsilon \sigma T_{\max}^3 A}{C} t_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

T_{\max} , T_{\min} はこの式の解として与えられるであろう。

一方一周期の間に授受される熱量の等しいことから

$$\begin{aligned} Q t_1 &= \varepsilon \sigma A \left[\int_0^{t_1} T_{(\text{heat})}^4 dt + \int_0^{t_2} T_{(\text{cool})}^4 dt \right] \\ &= \frac{C T_\infty^4}{4} \left[\ln \frac{(T_\infty + T_{\max})(T_\infty - T_{\min})}{(T_\infty - T_{\max})(T_\infty + T_{\min})} + 2 \tan^{-1} \frac{T_{\max}}{T_\infty} - 2 \tan^{-1} \frac{T_{\min}}{T_\infty} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

当然これは (3) と等価である。

また加熱・冷却の一周期の平均温度 \bar{T} は

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{1}{t_1 + t_2} \int_0^{t_1} T_{(\text{heat})} dt + \int_0^{t_2} T_{(\text{cool})} dt \\ &= \frac{T_\infty t_1}{t_1 + t_2} \left[\left\{ \left(\frac{T_\infty}{T_{\min}} \right)^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{(T_\infty^2 + T_{\min}^2)}{(T_\infty^2 - T_{\min}^2)} \right\} - \left\{ \left(\frac{T_\infty}{T_{\max}} \right)^2 - \frac{1}{2} \ln \frac{(T_\infty^2 + T_{\max}^2)}{(T_\infty^2 - T_{\max}^2)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

何れの式も数値計算を必要とするが、これから T_{\max} , T_{\min} , \bar{T} が求められ温度変化が定められる。

2.2 単一外被の温度 (線型近似)

温度 T がある温度 T_0 からあまり変わらないとすると、次の近似をすることができる。

$$T = T_0 \left(1 + \theta - \frac{1}{4} \right) \quad (6)$$

すると $T^4 = 4 T_0^4 \theta$ とかけるから、式 (1) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{加熱時} & \quad C T_0 \frac{d\theta}{dt} = Q - 4 \sigma T_0^4 \varepsilon A \theta \\ \text{冷却時} & \quad C T_0 \frac{d\theta}{dt} = -4 \sigma T_0^4 \varepsilon A \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで時定数 $\tau = \frac{C}{4 \sigma \varepsilon T_0^3 A}$ を定義しよう。

解は加熱時と冷却時の初めと終りがそれぞれ一致するように積分定数を定めると

$$\text{加熱時} \quad \theta = \frac{Q}{4 \sigma T_0^4 \varepsilon A} \left\{ 1 - \left(\frac{1 - e^{-t_2/\tau}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}} \right) e^{-t/\tau} \right\} \quad 0 < t < t_1,$$

$$\text{冷却時} \quad \theta = \frac{Q}{4\sigma T_0^4 \epsilon_1 A} \left(\frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}} \right) e^{-t/\tau} \quad 0 < t < t_2 \quad (8)$$

全入力エネルギーの平衡の式は

$$Qt_1 = 4\sigma T_0^4 \epsilon_1 A \left\{ \int_0^{t_1} \theta_{(\text{heat})} dt + \int_0^{t_2} \theta_{(\text{cool})} dt \right\} \quad (9)$$

この式は恒等的に満足される。すなわち、線型近似では、基準温度 (T_0) を定めることはできない。そこで最高温度と最低温度の平均として、 T_0 を定義しよう。(8) から

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\max} &= \frac{Q}{4\sigma T_0^4 \epsilon_1 A} \frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}} \\ \theta_{\min} &= \frac{Q}{4\sigma T_0^4 \epsilon_1 A} \frac{(1 - e^{-t_1/\tau}) e^{-t_2/\tau}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

したがって (6) を使って

$$\frac{Q}{4\sigma T_0^4 \epsilon_1 A} = \frac{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}}{2(1 - e^{-t_1/\tau})(1 + e^{-t_2/\tau})} \quad (11)$$

また

$$T_0^4 = \frac{Q}{2\sigma \epsilon_1 A} \frac{(1 - e^{-t_1/\tau})(1 + e^{-t_2/\tau})}{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}} \quad (12)$$

したがって式 (8) は

$$\left. \begin{aligned} \text{加熱時} \quad \theta &= \frac{1}{2(1 - e^{-t_1/\tau})(1 + e^{-t_2/\tau})} \{ 1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau} - (1 - e^{-t_2/\tau}) e^{-t/\tau} \} \quad 0 < t < t_1 \\ \text{冷却時} \quad \theta &= \frac{1}{2(1 + e^{-t_2/\tau})} e^{-t/\tau} \quad 0 < t < t_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

そこで最高温度 T_{\max} と最低温度 T_{\min} は

$$\left. \begin{aligned} T_{\max} &= T_0 \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2(1 + e^{-t_2/\tau})} \right) \\ T_{\min} &= T_0 \left(\frac{3}{4} + \frac{e^{-t_2/\tau}}{2(1 + e^{-t_2/\tau})} \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

温度振幅 T_{\max} , T_{\min} は

$$T_{\max} - T_{\min} = \frac{T_0}{2} \frac{1 - e^{-t_2/\tau}}{1 + e^{-t_2/\tau}} \quad (15)$$

で与えられる。また時定数 τ は次のようにして示すことができる。

$$\tau = \frac{Q}{CT_0} \left\{ \frac{1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}}{2(1 - e^{-t_1/\tau})(1 + e^{-t_2/\tau})} \right\}^{-1}$$

ひとしい時間の加熱冷却がくり返されるばあいは

$$T_0^4 = \frac{Q}{2\sigma \epsilon_1 A} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{2Q}{CT_0}$$

$$T_{\max} - T_{\min} = \frac{T_0}{2} \frac{1 - e^{-t_2/\tau}}{1 + e^{-t_2/\tau}} = \frac{T_0}{2} \tan^{-1} \frac{t_1}{2\tau} \quad (17)$$

また、 τ が十分長いばあいは展開して

$$\frac{Q}{4\sigma\epsilon T_0^4 A} = \frac{t_1+t_2}{4t_1} \tag{18}$$

$$T_0^4 = \frac{Q}{\sigma\epsilon A} \frac{t_1}{t_1+t_2} \tag{19}$$

$$\tau = \frac{Q}{CT_0} \frac{4t_1}{(t_1+t_2)}$$

$$T_{\max} - T_{\min} = \frac{T_0}{4} \frac{t_2}{\tau} \tag{20}$$

この式はもし通電時間が異なっても一周あたりに入力エネルギーが一定になるように Q を加減すると、同じ T_0 が得られ、その温度振幅は、冷却週期の長さに比例することがわかる。

2.3 内部熱容量のあるとき

さて次に第 2 図のように外側円筒の内部に内部円筒があり外側円筒と熱伝達抵抗 R_{12} で結合しているとする。この際の熱平衡方程式は

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= Q - \sigma T_1^4 \epsilon_1 A_1 - \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

与えられる。ここで添字 1, 2 はそれぞれ外側円筒と内側円筒に関する量を示す。また加熱時、冷却時は Q を有限常数ととるか 0 ととるかで区別できる。

前と同様に

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_0 \left(1 + \theta_1 - \frac{1}{4} \right) & T_1^4 &= 4 T_0^4 \theta_1 \\ T_2 &= T_0 \left(1 + \theta_2 - \frac{1}{4} \right) & T_2^4 &= 4 T_0^4 \theta_2 \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

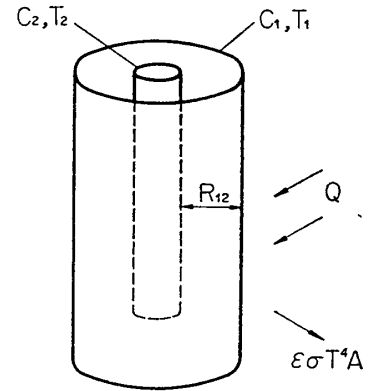
とおけると考える。ただし、 T_0 は式 (12) で定義されたものを使用すると、線型近似方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \frac{Q}{C_1 T_0} - \frac{4\sigma T_0^3 \epsilon_1 A_1}{C_1} \theta_1 - \frac{1}{C_1 R_{12}} (\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{1}{C_2 R_{12}} (\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \right\} \tag{23}$$

ここで $\tau = C/4\epsilon_1\sigma T_0^3 A_1$, $\tau_1 = C_1 R_{12}$, $\tau_2 = C_2 R_{12}$ という 3 種の時定数を導入する。これらはそれぞれ外筒の温度変化、外筒の内筒への結合、内筒の外筒への結合に関係した量である。

(23) は容易に分離できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_2} \theta_1 &= \frac{Q}{\tau_2 C_1 T_0} \\ \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_2} \theta_2 &= \frac{Q}{\tau_2 C_1 T_0} \end{aligned} \right\} \tag{24}$$



第 2 図 二重円筒の熱平衡

これらの式は直ちに解くことができ、解は前節と似て、2つの指数関数の和となり、その振幅は前と同じく初期条件より定まる。加熱・冷却の周期が等しいとすると、適当な計算の結果、第1近似として、

$$\frac{T_{1\max} - T_{1\min}}{T_0} = \frac{t_2}{4\tau} \quad (25)$$

$$\frac{T_0}{T_\infty} = \left(\frac{t_1}{t_1 + t_2} \right)^{1/4} \quad (26)$$

が得られる。従って、実際の設計の際は、外被の熱容量と結合定数から、この時定数を出し、それらをつかって、外被の温度変化を、第1近似として決定できる。より高次の補正も求められているが、一般のばあいには、この近似を採用しうることが多い。

さて、さらにこの式を使って、 θ_1 , θ_2 を決定することもできるが、加熱時、冷却時異った表示を与え、見通しのよい結果が得られないので、これから先は、下の変化が与えられたものとして、 T_2 を求めることを考えよう。

2.4 内部熱容量のあるとき (外被温度の与えられたとき)

前節と同様のばあいについて考えよう。もし外筒の温度 T_1 が与えられたとすると、内筒の温度は結合抵抗 R_{12} を通して影響されることになるので、内筒温度 T_2 、内筒の熱容量 C_2 について次の式をとけばよい。

$$\frac{dT_2}{dt} + \frac{1}{C_2 R_{12}} T_2 = \frac{1}{C_2 R_{12}} T_1 \quad (27)$$

もし T_1 が $T_1 = T_0 + \theta_1 \cdot \sin \omega t$ の如く変化したとすると、

$$T_2 = T_0 + \frac{\theta_1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}} \sin(\omega t + \tan^{-1} \omega\tau_2) + \text{Const. } e^{-t/\tau_2} \quad (28)$$

よって、 T_1 を振幅 θ_1 、角周波数 ω で周期的に変化させると、十分時間がたって定常状態に達した後では、 T_0 は T_1 と同じ平均温度で、その振幅 θ_2 は $\theta_1 / \sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}$ で与えられ $\tan^{-1} \omega\tau_2$ だけ遅れた位相角をもって変化するから、 θ_1 , θ_2 から直ちに τ_2 を求めることができる。

$$\omega\tau_2 = \sqrt{\left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right)^2 - 1} \quad (29)$$

このようにして、温度振幅の比から結合定数を定めることができ、また外筒の温度振幅は前節の方法で定められるから、結合定数を知れば、内筒の温度振幅を定めることができる。

2.5 結合定数について

熱伝達抵抗 R_{12} は、二つの円筒の間の熱伝達がふく射のみによるとすると、

$$R_{12(\text{rad})} = (T_2 - T_1) / \sigma (T_2^4 - T_1^4) \epsilon_{12} A_2 \quad (30)$$

ここで ϵ_{12} は外筒と内筒の実効ふく射率である。

内円筒の半径を r_2 , 高さを h_2 とすると

$$R_{12(\text{rad})} = \frac{1}{\sigma(T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2)2\epsilon_{12}\pi r_2 h_2} \left. \vphantom{\frac{1}{\sigma(T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2)2\epsilon_{12}\pi r_2 h_2}} \right\} \quad (31)$$

$$\doteq \frac{1}{4\sigma T_0^3 \epsilon_{12} 2\pi r_2 h_2}$$

もし内筒と外筒が断面積 F , 長さ L , 熱伝達率 κ の支持棒で結合されているとすると, そこを通しての熱伝達抵抗 $R_{12(\text{cond})}$ は

$$R_{12(\text{cond})} = \frac{L}{F\kappa} \quad (32)$$

もしこの際ふく射による熱伝達も存在すると, 全熱伝達抵抗 R_{total} は

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_{\text{cond}}} + \frac{1}{R_{\text{rad}}} \quad (33)$$

と書ける。実際にはマイラー薄膜にアルミニウムを蒸着したスーパー・インシュレーション等を使用して, 二つの円筒間のふく射結合を十分に小さくすることができるから, (33) 式を使わないですむ場合も多い。われわれの実験は熱伝導結合はほとんどない状態で行なわれた。

2.6 温度設計法

ここで実際の宇宙船の温度設計法をまとめておく。考えている宇宙船の外被熱容量・内部計器熱容量, それらの結合度は前もって定められたとする。これらの量から三つの時定数 τ_1, τ_2 は定まる。次に軌道要素, 宇宙船の姿勢から, 一週期当りの全ふく射入力 Q_{t1} と, 日照率 $t_1/t_1 + t_2$ を定める。すると前に定めた T_0 などを用いて, (12) またはその近似表現である (16), (19) 又は (26) から T_0 が定まる。これが外被および内部計器室の平均温度である。次に (15) または (17), (20) や (25) から外被の温度振幅がきまる。これを使用して, (28) によって内部計器室の温度が定められる。反対に, これら各段階での温度変化を測定することによって, 上記各種時定数が定められる。以下単純化した模型について, 実験を行ない。この解析の妥当性を検討しよう。

3. 実 験

使用したスペース・チャンバーは直径 30 cm 長さ 50 cm の円筒型の液体窒素によって冷却された空間をもつ中型のスペース・シュミレーターで, その性能構造などについては以前に報告した [2]。写真 1 はそのふたを除いて, 内部液体窒素冷却部を示した写真である。同時に圧力計, レコーダー, 温度計などの計測系が示されている。

使用した模型はそれぞれ, 直径, 高さとも 10 cm, 7 cm, 5 cm の厚さ 2 mm の銅製の 3 個の円筒より成り, これをそれぞれの内側の中央同心に糸で支持し, 3 重の互いにふく射だけで結合した系を構成するようにした。各円筒の大きさなどは表 1 にまとめた。写真 2 にこの円筒の分解図を, 写真 3 に組立て熱電対などを取りつけた状態を写真 4 に支持棒につり下げた状態を示す。外側円筒の外側壁には 8 個の合計 120 W (100 V) の小さいヒーターを取付け, その電圧を加減することによって, 注入電力を加減した。温度測定用の熱電対は各円

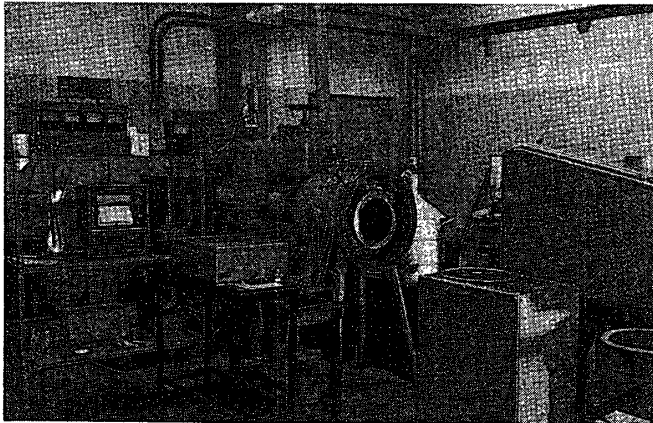


写真1 スペース・シミュレーターおよび測定系

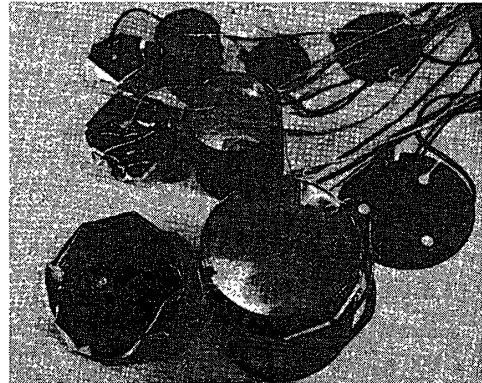


写真2 三重円筒の分解図

表1 模型円筒

	直径×長さ (cm)	側面積 (cm ²)	側壁重量 (g)	ふた重量 (g)	側壁熱容量 (cal/°C)	ふた熱容量 (cal/°C)
外側円筒	10.1×10	317	303	68	28.5	6.6
中間円筒	7.1×7	156	131	38	12.3	3.6
内側円筒	5.0×5.1	80	70	22	6.6	2.1

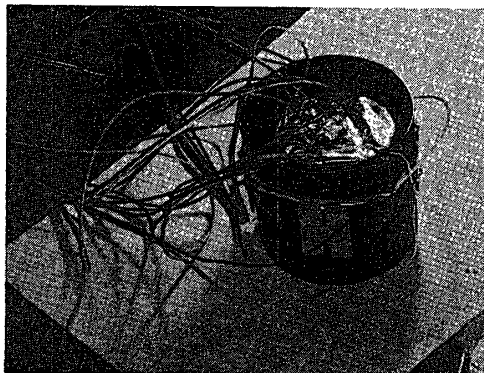


写真3 三重円筒の組立図



写真4 三重円筒の取付図

筒の側壁中央付近に各4か所、各上下ふた部に3か所合計18個取付けられた。この鉄・コンスタン熱電対は、いずれも直径0.1mmのエナメル塗装素線よりなり、ハーメチック・シールを通して外部に導かれ、切替スイッチを経て、2チャンネルのペン・レコーダーに導かれている。したがって、温度記録は写真5に示すように、適当に各チャンネルを切替ることによって全時間にわたって各円筒の温度が連続的に示されるように行なった。

各円筒には、着脱できる上、下のふたがついているが、それらと側壁の熱的結合は必ずしも十分ではないので、後には、これらを除き、代わりにスーパー・インシュレーションを3枚重ねて、上、下方向に向けてのふく射熱伝達を除いた構造で行なった。行なわれた実験の模型の状態は表2にまとめてある。つまり Model I は外円筒だけで、内部に外の円筒を取付

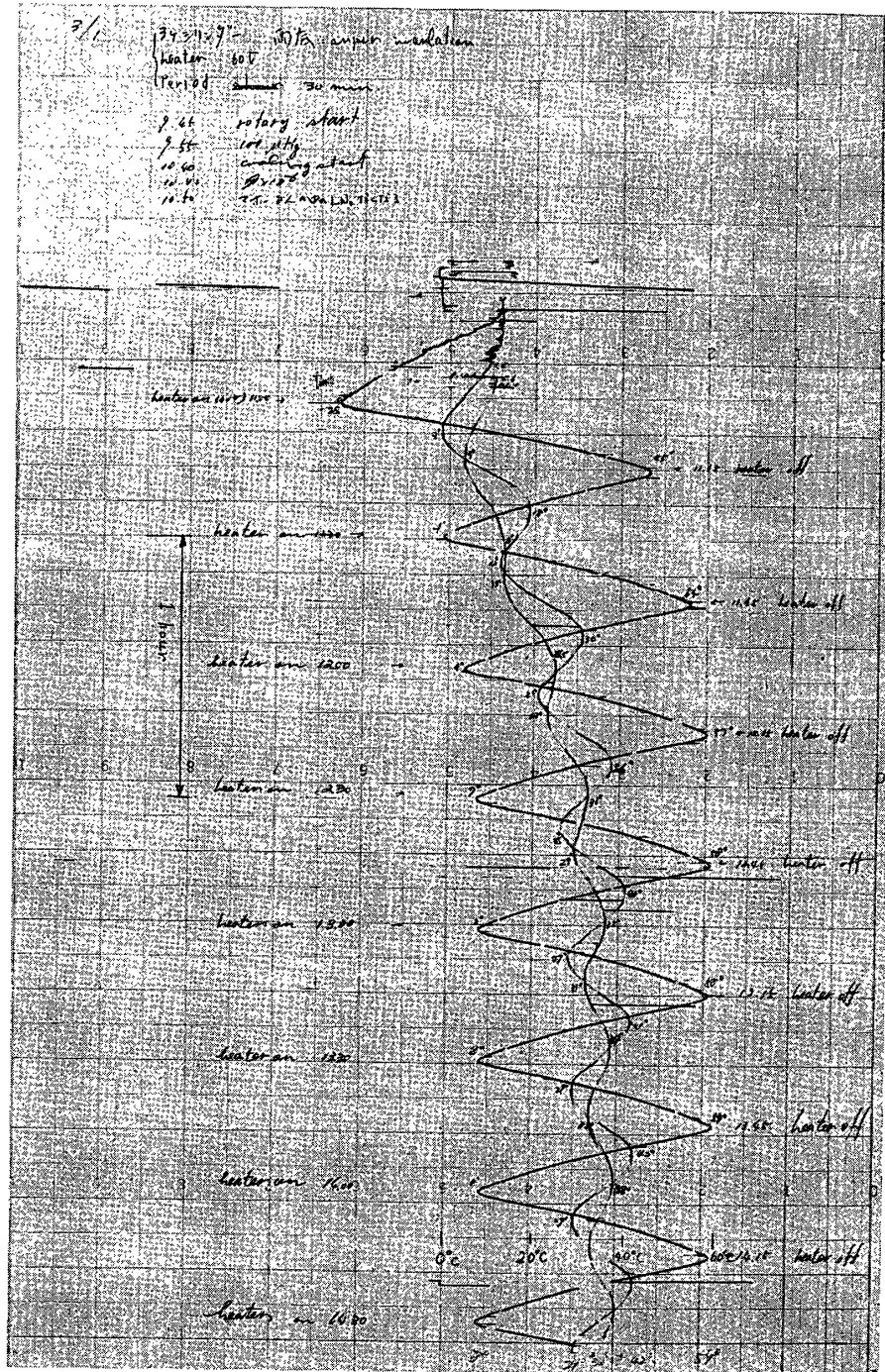


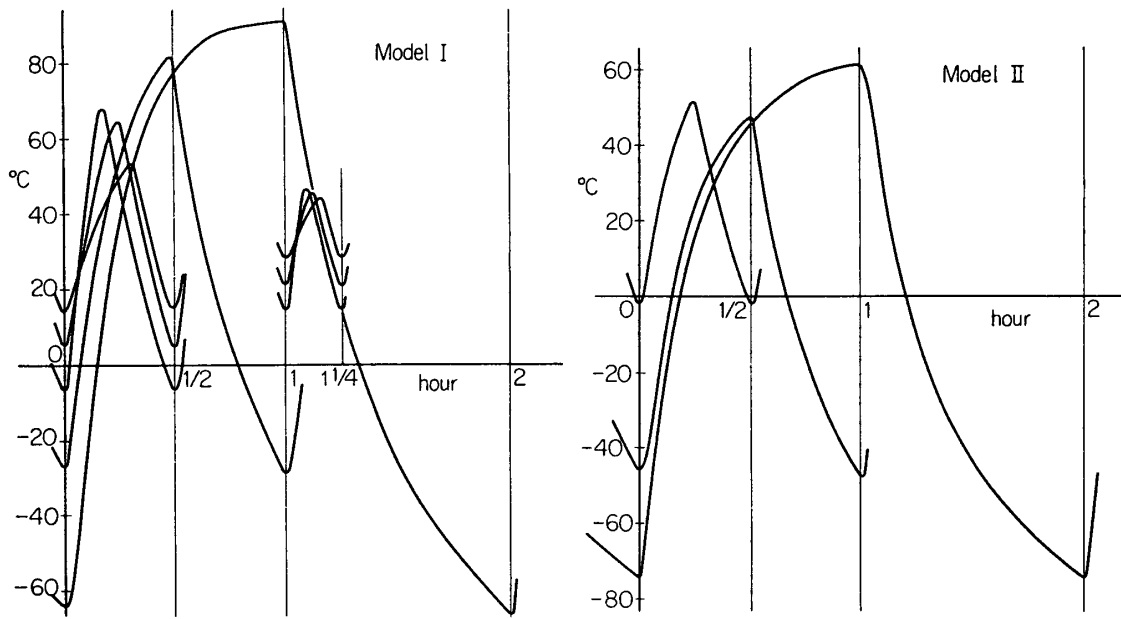
写真 5 レコーダー記録

けないで行なった試験で, Model II, III, IV ではそれぞれ記入した状態に模型を調製した. 表 2 に示したような各円筒の状態と, 黒色塗装面のふく射率 0.85, クロム鍍金面のふく射率 0.2 を使用すると, 表 3 に示すような熱伝達抵抗が得られる. これから計算した時定数 τ_1, τ_2 は τ と共に表 4 に示してある. 実験は表 5 に示したように, 60 V, 43.2 W の加熱電流を, 15 分, 30 分, 60 分の間等時間づつ断続して実験を行ない. また 5 分~10 分, 10

表 2 Model の状態

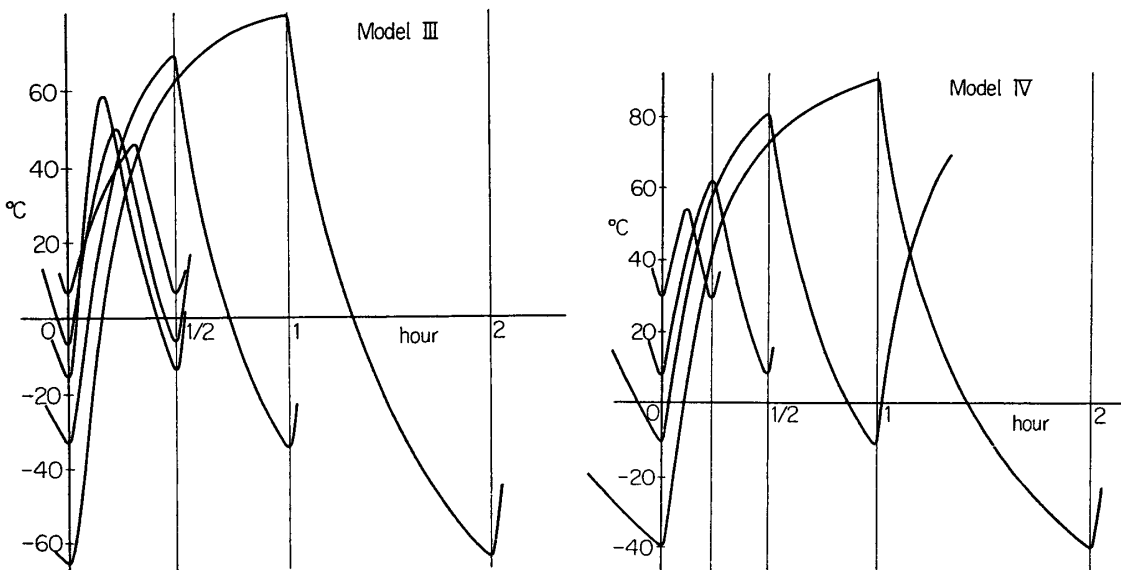
Model	塗 装	上下のふた
I	外側円筒のみ, 内外側とも黒色塗装	上・下ともスーパー・インシュレーション
II	各円筒の外側は黒色, 内側はニクロム鍍金	上・下ともふた
III	"	上・スーパー・インシュレーション, 下ふた
IV	各円筒の外側・内側とも黒色塗装	上・下ともスーパー・インシュレーション

第 3 図



(a) Model I の温度変化

(b) Model II の外被温度変化



(c) Model III の外被温度変化

(d) Model IV の外被温度変化

分～20 分の間で加熱，冷却を繰返し行なった。ただし，この後の場合には，一周期当りの全加熱電力が等しくなるように，1/3 周期加熱のときは 73.5 V に，2/3 周期加熱のときは 52 V に電圧を調節して，いずれもほぼ定常状態に達したと思われるまで，加熱冷却を繰り返した。このようすは写真 5 に示したレコーダー記録によく示されている。このような記録から，最終定常状態に達した後の，外側円筒，中間円筒，内側円筒の温度をそれぞれ T_1, T_2, T_3 とし，それぞれの最大最小値 T_{1max}, T_{1min} などや，それぞれの振幅 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を求めた。Model II と III の場合には，ふたの部分はもちろん多少これら側壁の温度と違った値を示すが，ここでは側壁の温度だけについて考えることにする。ふたの影響は，側壁部分の温度平衡に対してあまりないことは別に確かめられた。

第 3 図にはそれぞれの Model について，外側円筒の温度 T_1 を示してある。ここに示されたように T_1 は正弦波とは著しく異なり前節に示されたような指数関数的変化を示すが， T_2, T_3 は前のレコーダー記録に示されたようにほとんど完全な正弦波とみなすことができる。第 4 図には， T_1, T_2, T_3 の最大，最小値を繰返した周期について描いてある。第 5 図には，前述の式 (17) に関係して $\tanh^{-1}[(T_{max}-T_{min})/T_0]$ を加熱時間 t_1 に対して取ってある。各点がそれぞれの直線上に落ちることから，前述の解析の有用性が示されており，またこの直線の傾きから時定数 τ_{total} が直ちに求められる。第 6 図には式 (20) に関連して加熱時間の割合をかえたときの外円筒の温度振幅を冷却時間に対して取ってある。この関係

第 4 図

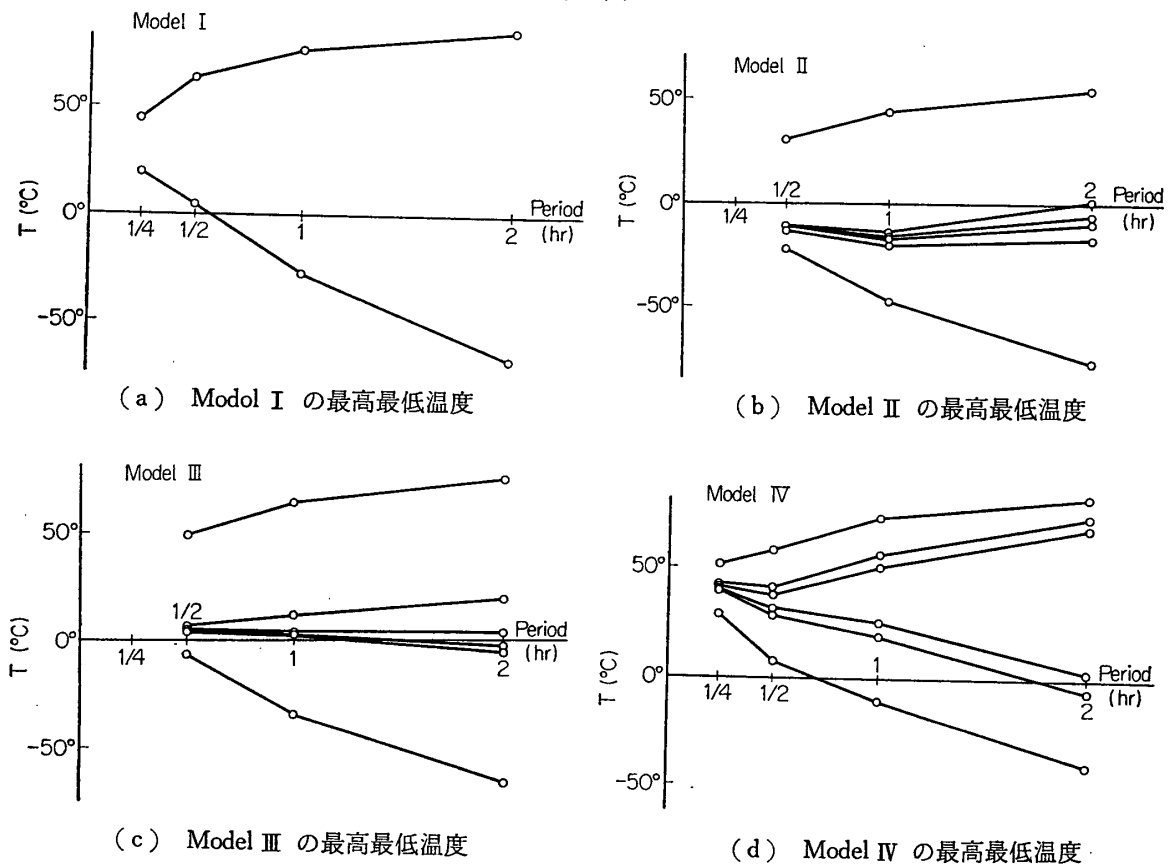


表 3 ふく射結合抵抗 (deg/watt)

	Model II	Model III	Model IV
中間円筒と外側円筒の間	69.9	62.1	12.5
内側円筒と中間円筒の間	136	120	24.4

表 4 各種時定数

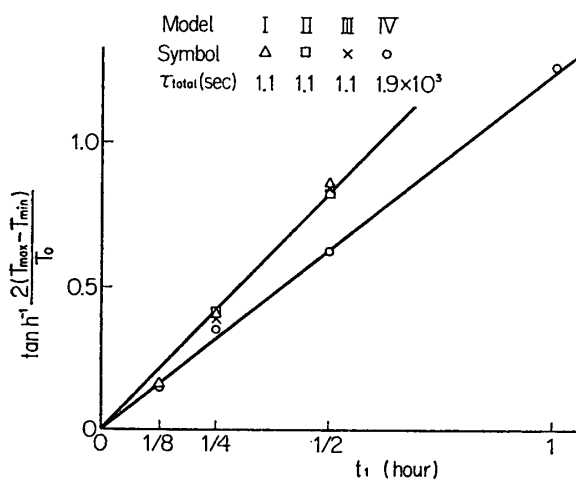
Model	外被円筒 $\tau(\times 10^3\text{sec})$		中間円筒 $\tau_2(\times 10^3\text{sec})$		内部円筒 $\tau_2(\times 10^3\text{sec})$	
	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
I	1.8	1.1, 1.2 ^x				
II		1.1,	5.7	9.7	6.2	5.6
III		1.1, 1.2 ^x	4.1	6.0	4.4	5.6
IV		1.9	0.84	1.15	0.89	0.44

× 前の数字は第5図より, 後の数字は第6図より求めた値である.

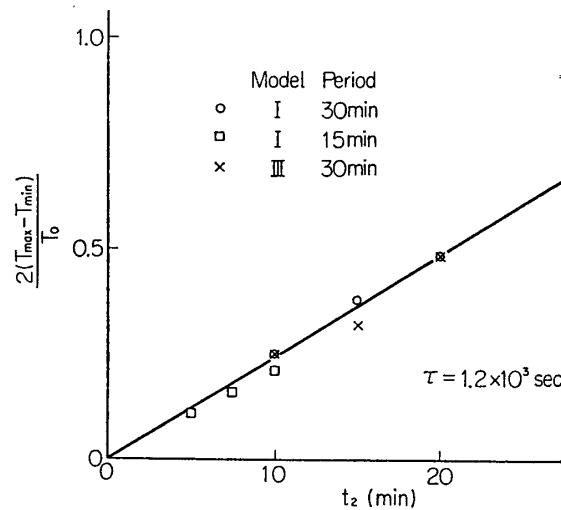
表 5 加熱冷却条件

Model I	60 on/60 off	30 on/30 off	10 on/20 off	15 on/15 off	20 on/10 off
	5 on/10 off	7.5 on/7.5 off	10 on/ 5 off		
Model II	60 on/60 off	30 on/30 off	15 on/20 off		
Model III	60 on/60 off	30 on/30 off	10 on/20 off	15 on/15 off	20 on/20 off,
Model IV	60 on/60 off	30 on/30 off	15 on/15 off	7.5 on/7.5 off	

たとえば 10 on/20 off は 10 分間加熱, 20 分間冷却を繰返すことを示す.

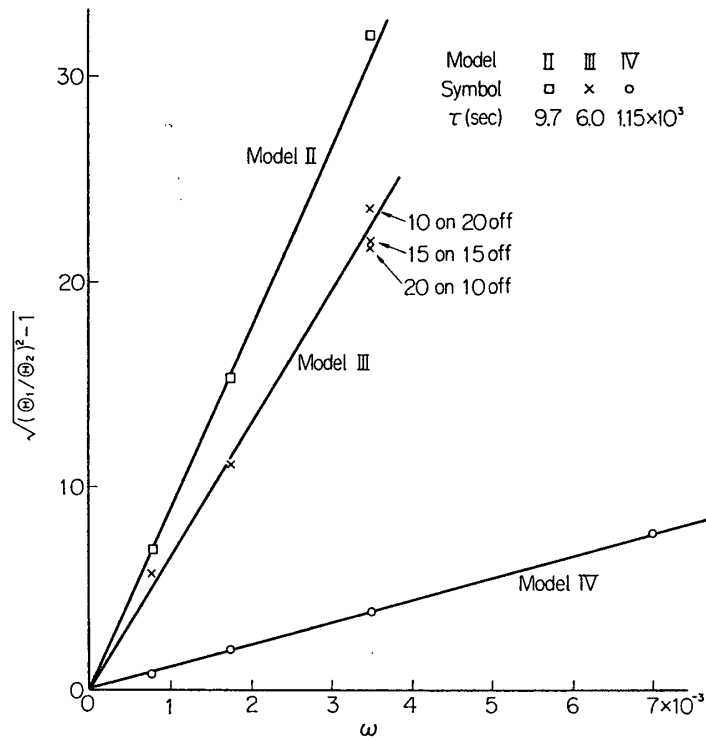


第5図 外被温度振幅の変化

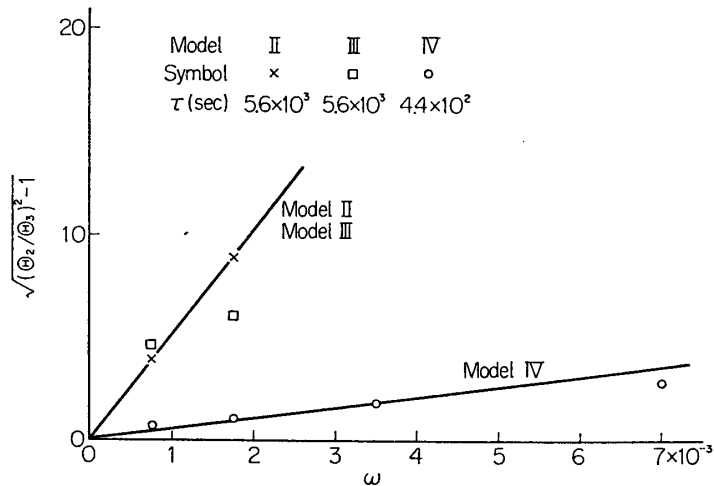


第6図 加熱冷却時間の比を加えたときの外被温度振幅

からもまた時定数 τ が求められる. 第7図には式 (29) に関して $\sqrt{(\theta_1/\theta_2)^2 - 1}$, $\sqrt{(\theta_2/\theta_3)^2 - 1}$ を繰返し周期 ω に対して記した.



第 7 図 中間円筒の温度振幅変化



第 8 図 内側円筒の温度振幅変化

model II, III では θ_3 が著しく小さくなる部分があり、その付近での精度は失なわれるが、その他の部分では (29) 式の有用性は十分に立証されたと言える。またこのような図から求めた結合時定数 τ_2 も示されている。

このように求められた τ_1 , τ_2 の値は、表 4 の中に示してある。計算値がやや任意に結合定数をとって求めたものであるから、数値の比較は無意味であり、むしろ実験値に近い計算値を得たので、結合定数の値の推定があまり大きな誤差を含まなかったことが確かめられたといえるであろう。むしろ、この表から、この種解析法の有用であること、またこのような簡

単な実験から有用な結合定数に関する資料の得られることがわかる。またふたの影響が特に実験値にほとんど入っていないことも示された。

4. 結 論

スペース・シミュレーター中に保持された二重円筒の外側円筒の加熱・冷却を繰り返すと、内側円筒の温度は“一様外被-集中熱容量”解析によって得られた解析とよく一致する温度変化を示した。したがってこの計算法は宇宙船の外被温度や内部機器等の温度を定めるのに有用である。また、このことから宇宙船の内部機器はなるべく各部品を集中させて機器室にまとめ、それを外被とよく熱的に絶縁して保持するのが望ましいことがわかる。さらにこのような測定によってこのような結合部分の熱伝達抵抗を直接に測定するよい手段が与えられることも確かめられた。

1966年3月10日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] 大島耕一・大島裕子：スペース・シミュレーターによる基礎実験，宇宙研報告 1, 4, (1965)
- [2] 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 2, 1 (1966) 1.