

# 温度設計の立場よりみた人工衛星の 最適打上げ計画

小 林 康 徳

## Launch Optimization of Artificial Satellites on the point of view of Thermal Design

Yashinori By KOBAYASHI

**Abstract:** The methods of calculating the radiative heat input to an artificial satellite orbiting around the earth with relatively low altitude due to the solar radiation, the earth albedo and the infrared thermal radiation of the earth are surveyed, with the emphasis on the approximate expressions of the angle factor between the earth and the satellite elements. The calculating formula was written in Fortran IV.

Using this program, the optimum launch operation, especially the launch times, is found, in which the variation of the radiative heat input to the satellite is minimized during its specified life period. An example of this method applied to a spherical satellite is shown.

### 概 要

比較的低高度の地球軌道上を飛行する人工衛星に対する、太陽ふく射・地球のアルビドおよびその赤外温度ふく射による熱入力を計算する方法の展望を行ない、特に、あとの二つに対して重要な効果を持つ衛星表面と地球表面との間の形態係数の求め方について、幾つかの方法を提示した。

これらの方法を使用して、ある軌道・姿勢の条件のもとに飛行している衛星に対する熱入力を計算するプログラムが示された。このプログラムを使用して、ある与えられた衛星の最も熱入力の変化が少なくなるような打上げ時刻を選定することができる。球状衛星に対する計算結果が示された。

### 1. 緒 言

軌道上を飛行する人工衛星は宇宙空間のかこくな熱的環境の中で長期にわたって正常にその使命を果しうることが要請される。したがって人工衛星の温度制御系の設計は正確に行なわれなければならない、そのためには外界からの熱入力の大きさを知ることが重要である。この熱量はほとんど太陽などの天体からのふく射によるものであり、その量は衛星の軌道、位置および姿勢によって大きく変化する。一方、衛星の寿命や性能という観点から見れば、当

然外界からの熱入力は時間的に大きく変化しないことが望ましい。

この論文ではもっぱら外界から衛星に入射する熱ふく射に着目して、その時間的变化が小さいという要求を満足するような最適打上げ条件を求める方法が報告される。

## 2. 軌道パラメータ

衛星は軌道上を一周する間に一般にある時間、太陽に対して地球の陰に入り太陽からのふく射をさえぎられる期間がある。衛星の周期に対するこの時間の比を日陰率 (eclipse factor) と言い、1 から日陰率を引いたものを日照率という。日照率はあとで見るごとく衛星への熱入力を考えるうえで最も重要なパラメータであり、その値は普通、0.65 程度から最大 1 までの間の値をとる。

日照率の計算は W. S. Snoddy [1] の計算法によった。これは地球の赤道に対して、ある傾きを持った円軌道上を飛行している衛星について各周期ごとの日照率および種々の軌道パラメータを計算する方法で、地球のゆがみ (oblateness) に起因する微小じょう乱の効果も考慮されている。これは初期条件として

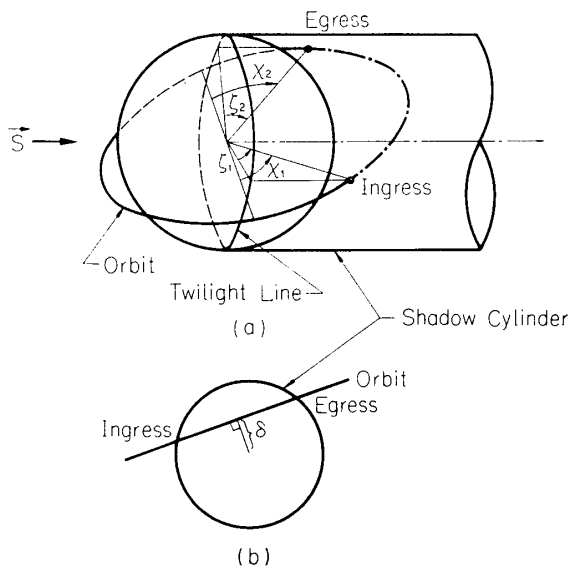
- i) 打上げの世界時 ( $T$ )
- ii) 春分の日から何日後に打ち上げたか ( $D_0$ )
- iii) 軌道の離心率 ( $e$ )
- iv) 最初の近地点の緯度、経度 (LAT, LON)
- v) 軌道の赤道面に対する傾き角 ( $i$ )
- vi) 軌道の近地点半径 ( $r_p$ )
- vii) 近地点での衛星の速度の北向き成分 +or-(S)
- viii) 打上げ年度 (YEAR)

を与えて日照率を打上げ後経過した日数の関数として求める方法で、計算法の骨子は太陽に対して地球の陰になる宇宙空間を円筒形と仮定し、衛星がその中に侵入するとき、およびそこから脱出するときの位置を求め、さらに周期上の基準点からそれらの位置に達するまでに要する時間差から日照率を求めるものである。

陰の部分に侵入するとき、およびそこから脱出するときの角度関係は、第 1—(a), (b) 図を参考にして、

$$\left. \begin{aligned} \sin X_1 &= \frac{\sin \zeta_1}{\cos \delta_1} \\ \sin X_2 &= \frac{\sin \zeta_2}{\cos \delta_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $X$  は軌道面内での日出日没線と侵入時・脱出時における衛星の位置ベクトルとのなす角であり、 $\zeta$  は侵入時、脱出時における衛星の位置ベクトルと、そこから円筒形の母線に沿って地球の表面に引いた接線が日の出日没線と交わる点とのなす角であり、 $\delta$  は軌道面と太陽ベクトルのなす角である。なお、添字 1, 2 はそれぞれ侵入時、脱出時を表す。したがって、計算の基本はさきあげた初期条件を用いて (1) 式を解き、基準点 (ここでは太陽ベクトルが軌道面に投写する位置) から  $X_1, X_2$  に達するまでの時間差を



第1図 太陽と地球と衛星軌道の関係を示す図  
(文献 [1] より)

求めることである。地球のゆがみの効果は赤道上での昇交点退却 ( $\dot{\Omega}$ ) としたがって近地点引数 ( $\dot{\omega}$ ) を表わすばあいに、 $P$  を周期とすると、

$$\dot{\Omega} = -\frac{2\pi}{P} \cos i \left[ \frac{3K_1 \cdot}{\{r_p(1+e)\}^2} + \frac{10K_2}{\{r_p(1+e)\}^4} \left( 1 + \frac{3}{2}e^2 \right) \left( 1 - \frac{7}{4} \sin^2 i \right) \right]$$

(rad/day)

$$\dot{\omega} = \frac{2\pi}{P} \left[ \frac{3K_1(1-3/2 \sin^2 i)}{\{r_p(1+e)\}^2} + \frac{10K_2}{\{r_p(1+e)\}^4} \left( 1 - 5 \sin^2 i + \frac{35}{3} \sin^4 i \right) \right]$$

$-\cos i \times \dot{\Omega}$  (rad/day)

(2)

のごとく級数で展開した式で表わし、 $K_1, K_2$  の二つの定数の中に含まれている。さらにその他の地球の公転中のゆらぎも考慮されている。参考のためにゆがみのないときの  $\dot{\Omega}$  と  $\dot{\omega}$  の形は

$$\dot{\Omega} = -\frac{\pi}{18} \cdot \frac{\cos i}{(1-e^2)^2} \left( \frac{r_e}{a} \right)^{3.5}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\pi}{9} \cdot \frac{(1-1.5 \sin^2 i)}{(1-e^2)} \left( \frac{r_e}{a} \right)^{3.5}$$

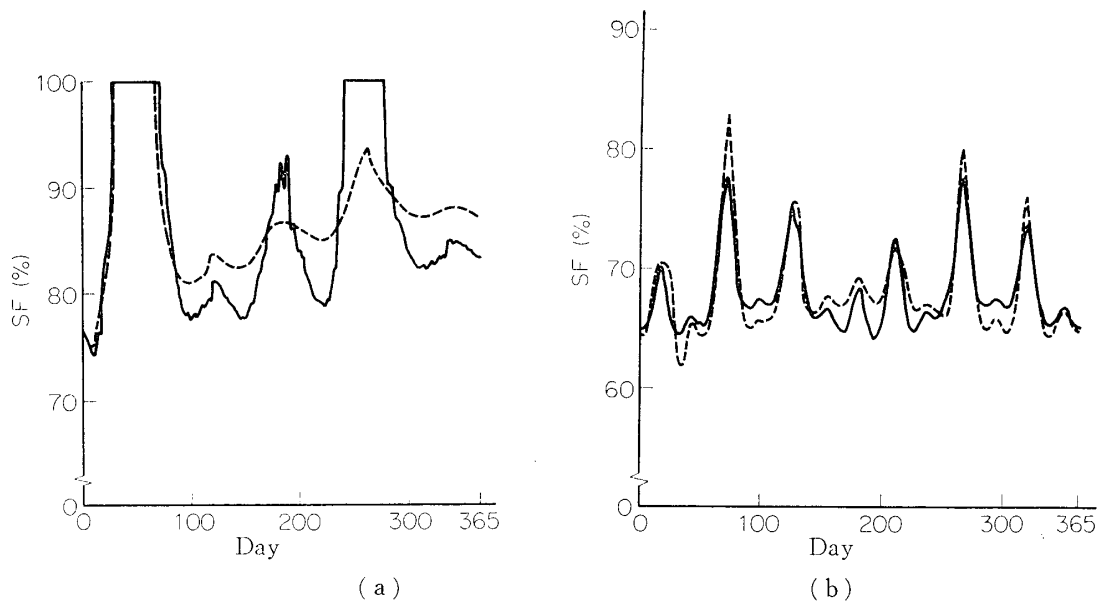
である。ただし  $r_e$  は地球の平均半径、 $a$  は衛星の軌道の長軸半径である。

第2-(a), (b) 図は日照率 (SF) の分布を打上げ後経過した日数 (DAY) に対して示したものである。地球のゆがみを考慮に入れないときの日照率も参考のために点線で示されている。

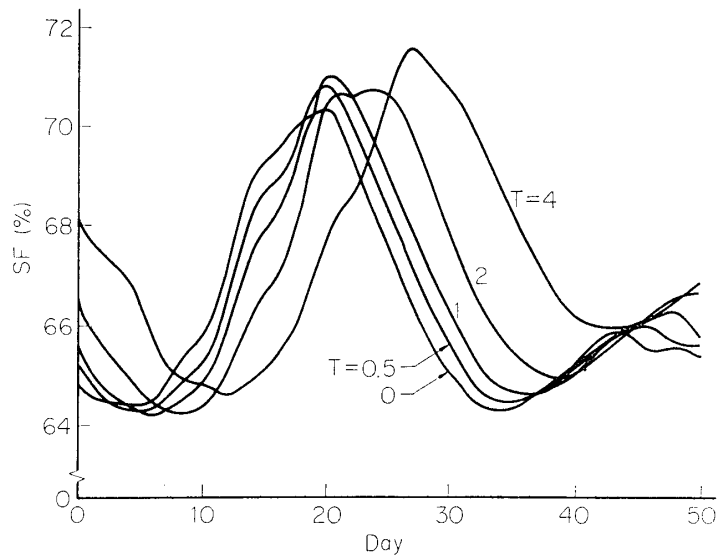
第3図はやはり日照率の打上げ後の変化を、打上げ時刻をパラメータとして示したものである。図中  $T=0$  は春分の日午前9時に衛星が最初に近地点に達するように打上げを意味し、したがって、たとえば  $T=4$  はそれより4時間後、すなわち春分の日午後1時に最初に近地点に達するような打上げを意味する。(以後、この論文の中のグラフでは、 $T$  はすべてこのような意味で用いられている。したがって  $T$  は飛しょう体が地上を発射する厳密な時刻を表わすものではない。しかし、地上発射から、最初に近地点に達するまでに要する時間は飛しょう体の性能と打上げ時の軌道条件から容易に求められる性質のものであるから、この論文中、 $T$  を打上げ時刻と呼ぶ。) これら第2, 3, の図から日照率 (SF) は打上げ時刻 ( $T$ ) と打上げ後経過した日数 (DAY) の関数であることがわかる。

### 3. 熱入力

#### (1) 衛星の熱的環境



第 2 図 日照率の分布, (春分午前 9 時打上げ)  
 (a) 近地点高度 ( $h_P$ ) 500 km, 離心率 0.40874 (遠地点高度 ( $h_A$ )=10,000 km に相当)  
 (b) " 500 km " 0.049102 (遠地点高度 ( $h_A$ )=1,000 km に相当)



第 3 図 打上げ時刻による日照率分布の変動 (近地点高度 500 km, 離心率 0.049102)

地球を周る人工衛星に入射するふく射エネルギーには, 太陽からの直接ふく射, アルビド, 地球からの赤外ふく射の三種が考えられる.

太陽ふく射の強さ ( $E_S$ ) は地球の近傍ではほぼ一定で, 約  $0.14 \text{ watt/cm}^2$  である. また, 地球表面上での赤外ふく射の強さ ( $E_R$ ) は地球が球状の灰色体であり, かつその温度は一樣

で一定であると仮定すると、次のように近似的に求められる。すなわち、地球が単位時間に、吸収する太陽ふく射のエネルギー ( $Q_E$ ) は、

$$Q_E = E_S \cdot \pi r_e^2 (1 - R)$$

である。ただし、 $r_e$  は地球の半径、 $R$  は地球の反射率で、普通、0.34 がその値として用いられる。吸収された熱量  $Q_E$  は地球の全表面から拡散的に放射されるから、 $E_R$  は次のように台えられる。

$$E_R = Q_E / 4\pi r_e^2 = E_S (1 - R) / 4 \quad (\text{watt/cm}^2) \quad (3)$$

アルビドの強さ ( $E_A$ ) は地球上の地域や気候条件、などによって異なり定量的には三者のうちでもっとも不確定なものである。この論文では、

$$E_A = 0.34 \cdot E_S \quad (4)$$

を採用した。

### (2) 形態係数の定義 [3]

実際の衛星への熱入力を計算するに先だって拡散的に放射し、反射する二つの平面の間のふく射熱交換を考え、その形態係数 (angle factor) を定義する。

第4図で  $dA_1, dA_2$  はそれぞれ平面  $A_1, A_2$  の微小面要素で  $l$  はそれらの間の長さ、 $\beta$  は面要素にたてた法線ベクトル  $\vec{n}$  と  $\vec{l}$  とのなす角である。このとき  $dA_1$  から出る全熱ふく射エネルギー ( $Q_{dA_1}$ ) とし、その中で  $dA_2$  に達する量を  $dQ_{dA_1-dA_2}$  とするとき、それらの比  $dQ_{dA_1-dA_2}/Q_{dA_1}$  を面要素  $dA_2$  の  $dA_1$  に対する形態係数と定義する。すなわち、

$$dF_{dA_1-dA_2} = dQ_{dA_1-dA_2} / Q_{dA_1} \quad (5)$$

しかるに

$$dQ_{dA_1-dA_2} = I_n \cos \beta_1 dA_1 d\omega$$

ただし  $d\omega$  は  $dA_1$  から  $dA_2$  を見る立体角であり、 $I_n$  は  $dA_1$  からその法線方向に出ていくふく射の強さである。第4図からも明らかごとく

$$d\omega = dA_2 \cos \beta_2 / l^2$$

であるから

$$\begin{aligned} dQ_{dA_1-dA_2} &= I_n \cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_1 dA_2 / l^2 \\ &= B_1 \cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_1 dA_2 / \pi l^2 \end{aligned} \quad (6)$$

と表わされる。ただし、 $B$  はふく射能で  $I_n$  との関係は  $B = \pi I_n$  である。一方、 $dA_1$  から出る全ふく射エネルギー  $Q_{dA_1}$  は

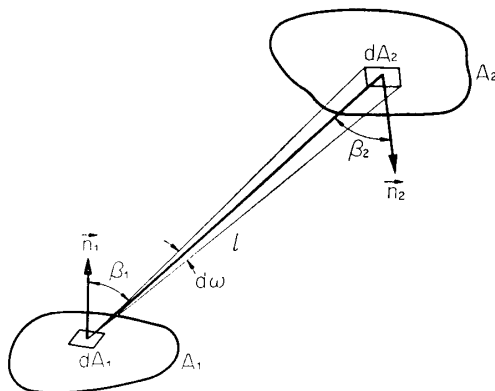
$$Q_{dA_1} = B_1 dA_1 \quad (7)$$

であるから (5), (6), (7) 式より、

$$dF_{dA_1-dA_2} = \cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_1 dA_2 / \pi l^2 \quad (8)$$

と表わされる。

この考え方を発展させて微小面要素  $dA_1$  と有限な平面  $A_2$  との間の熱交換における形態係数は次のように表わされる。



第4図

$$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_2}{\pi l^2} \quad (9)$$

および

$$dF_{A_2-dA_1} = dA_1 \int_{A_2} \frac{B_2 \cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi l^2} dA_2 \Big/ \int_{A_2} B_2 dA_2 \quad (10)$$

さらに二つの有限な平面  $A_1, A_2$  の間の形態係数は

$$F_{A_1-A_2} = \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{B_1 \cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_1 dA_2}{\pi l^2} \Big/ \int_{A_1} B_1 dA_1 \quad (11)$$

で表わされる。もし、 $B$  の値がその平面内で、一様であると仮定すると、(10), (11) 式はそれぞれ

$$dF_{A_2-dA_1} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi l^2} dA_2 \quad (12)$$

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi l^2} dA_1 dA_2 \quad (13)$$

と簡単化される。

### (3) 入射熱エネルギーの計算

衛星に入射するふく射熱エネルギーは衛星の軌道上における位置、および姿勢によってかなり大きく異なることはさきに述べたがこれらの効果を形態係数に含ませることによって以下のように一般的に表わされる。

#### [A] 太陽ふく射による熱入力

第 5 図に示すごとく太陽からのふく射ベクトル ( $\vec{S}$ ) とのなす角を  $\theta_s$  とすると単位時間に、この表面に入射する熱量 ( $q_s$ ) は

$$q_s = E_s \cdot A \cdot F_s(\theta_s) \quad (14)$$

$$F_s(\theta_s) = \cos \theta_s \quad (15)$$

と表わされる。ここで  $A$  は平面の表面積、 $F_s(\theta_s)$  は太陽ふく射における平面  $A$  の形態係数であり、その幾何学的面積と太陽ふく射に有効に寄与する面積との比を表わす。 $F_s$  は (15) 式に示されるごとく  $\theta_s$  の関係である。衛星が軌道上を一周する間に得る平均熱量 ( $Q_s$ ) は、

$$Q_s = E_s \cdot F_s(\theta_s) \cdot A \cdot SF \quad (16)$$

である。

#### [B] 地球の赤外ふく射による熱入力

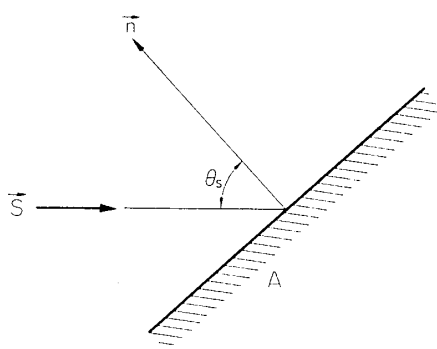
軌道上の任意の位置での単位時間当りの熱入力  $q_R(\psi)$  は [A] と同じような考え方により

$$q_s(\psi) = E_R \cdot A \cdot F_R(\psi) \quad (17)$$

と表わされ、一周平均の熱量  $Q_R$  は

$$Q_R = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} q_R(\psi) d\psi = \frac{1}{P} \int_0^P q_R\{t(\psi)\} dt(\psi) \quad (18)$$

と表わされる。ただし  $\psi$  は真近点きより (true anomaly),  $P$  は周期、 $F_R(\psi)$  は衛星と地球との赤外ふく射における形態係数で  $\psi$  の関数である。(18) 式において  $dt(\psi)$  は衛星が軌



第5図

道上の位置を  $d\psi$  移動するのに要する時間を示す。時間  $t$  と角度  $\psi$  との関係式はケプラーの法則から、

$$t = \frac{2\pi}{P}(\psi_e - e \sin \psi_e)$$

$$\psi_e = 2 \tan^{-1} \left\{ \tan \frac{\psi}{2} \left( \frac{a-c}{b} \right) \right\}$$

ただし  $a, b, c$  は第6図に示すごとくダ円軌道の長軸, 短軸, および焦点と中心間のきよりを示す。

#### [C] アルビドによる熱入力

アルビドにおける衛星と地球との形態係数を  $F_A(\psi)$  とすると [B] と全く同じように考え, 単位時間当りの熱入力 ( $q_A$ ), 一周平均の熱量 ( $Q_A$ ) はそれぞれ

$$q_A(\psi) = E_A \cdot A \cdot F_A(\psi) \quad (20)$$

$$Q_A = \frac{1}{P} \int_0^P q_A\{t(\psi)\} dt(\psi) \quad (21)$$

と表わされる。

したがって衛星に入射する一周平均の全ふく射エネルギー ( $Q_T$ ) は [A], [B], [C] に示された三つの成分の和として

$$Q_T = Q_S + Q_R + Q_A \quad (22)$$

と表わされる。

#### (4) 形態係数

前節で用いられた衛星の形態係数,  $F_S, F_R, F_A$  について吟味する。いま, 衛星の姿勢はスピニング安定法によって慣性空間に対して常に一定に保たれている場合を考える。平行光に対する平板の形態係数は (15) 式で既に示されている。一方, 地球と衛星表面の間の形態係数  $F_R(\psi), F_A(\psi)$  は一般的には計算がかなりやっかいになるので適当な仮定を導入してその近似値を使用するばあいが多い。二, 三の形状の衛星について例を示す。

##### [A] 球形衛星と地球との形態係数

球形衛星の形態係数については既にいくつかの文献で紹介されている [4] [5] [6]。

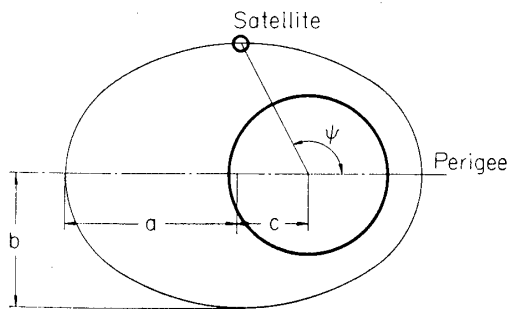
赤外ふく射における地球の衛星に対する形態係数 ( $F_R$ ) は第7図を参照し, (13) 式を用いて

$$F_R = \int_{A_E} \frac{\cos \beta_1 dA_E}{\pi l^2} = 2 \{ 1 - \sqrt{1 - (r_e/r)^2} \} \quad (23)$$

を得る。ただし  $r$  は地球の中心から衛星までのきよりで, ダ円軌道であれば

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \psi} \quad (24)$$

と表わされる。 $A_E, dA_E$  は, 第7図で斜線部で示されるごとく地球上で衛星を見ることが出来る範囲, およびその内部の微小面要素を示す。また, 球状衛星では同図に示されるように, (13) 式において  $\beta_2 = 0$  とおけるような任意の断面を考えることができるので  $F_R$  の値を簡



第 6 図

単に計算できることに注意されたい。

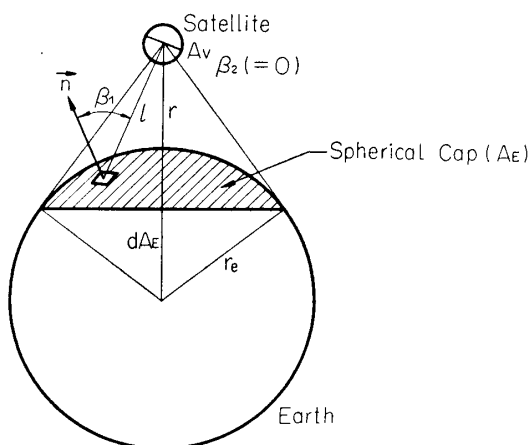
アルビドにおける地球の衛星に対する形態係数 ( $F_A$ ) は赤外ふく射のばあいと同じ考え方で、やはり (13) 式を用いて求められる。ただし、この場合積分範囲は第 8-(a) 図に斜線で示されるように、衛星を見ることが出来る地球上の領域と太陽ふく射を受ける半球表面との重複した領域である。もし、第 8-(b) 図のように重複した領域がない場合は積分領域は零である。

第 9-(a) 図を参照して斜線部の任意の微小面要素  $dA_E$  からなるアルビドは  $E_A \cdot \cos \lambda \cdot dA_E$  で表わされる。一方、同図より、

$$\left. \begin{aligned} dA_E &= r_e \sin \theta d\theta d\phi \\ l^2 &= r^2 + r_e^2 - 2rr_e \cos \theta \\ \cos \beta_1 &= (r \cos \theta - r_e)/l \\ \cos \lambda &= \cos \theta \cos \theta_s + \sin \theta \sin \theta_s \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

の関係が得られるから (13) 式にこれらを代入して次のように表わされる。

$$\begin{aligned} F_A &= \int_{A_E} \cos \lambda \cos \beta_1 dA_E / \pi l^2 \\ &= \int_0^{\theta_m} \int_0^{\phi_m} \frac{(r \cos \theta - r_e)(\cos \theta \cos \theta_s + \sin \theta \sin \theta_s \cos \phi) r_e^2 \sin \theta}{\pi (r^2 + r_e^2 - 2rr_e \cos \theta)^{3/2}} d\theta d\phi \end{aligned} \quad (26)$$



第 7 図 赤外ふく射による衛星と地球の関係図

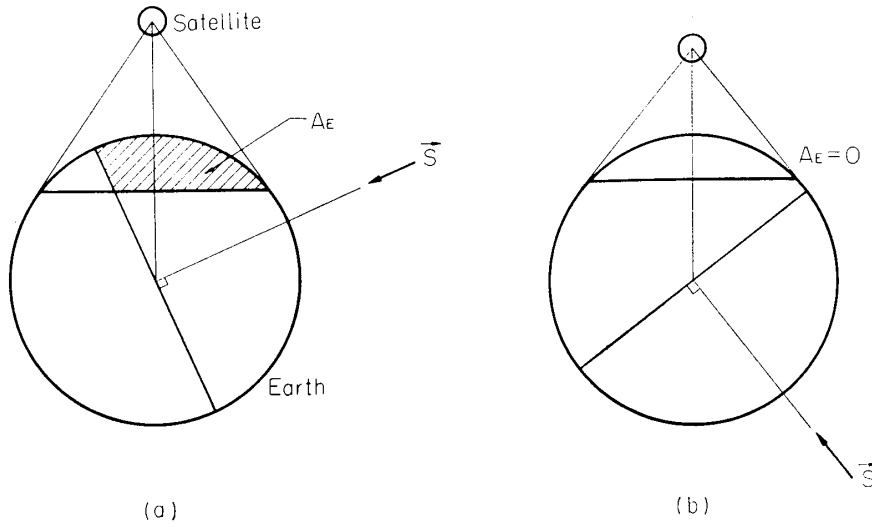
ただし  $\lambda$  は太陽ベクトル ( $\vec{S}$ ) と  $dA_E$  の法線ベクトル  $\vec{n}_1$  とのなす角である。さらに第 9-(b) 図を参照して  $\theta_s$  を他の軌道パラメータ  $\delta, \varphi$  を用いて

$$\cos \theta_s = \cos \delta \cos \varphi \quad (27)$$

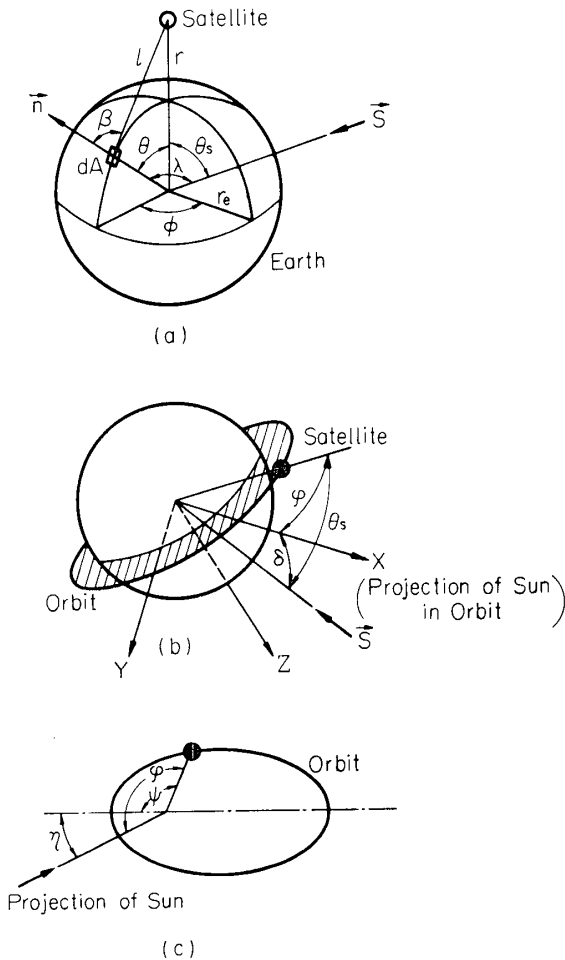
と表わされることに注目して (26) 式を整理すると

$$\begin{aligned} F_A &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta_m} \{ a(1-e^2) - W \} \sin \\ &\quad \theta \cdot W^2 \cdot \{ \phi_m \cos \theta \cos \delta \cos \varphi \\ &\quad + \sin \theta (1 - \cos^2 \delta \cos^2 \varphi)^{1/2} \sin \\ &\quad \phi_m \} \{ a^2(1-e^2) + W^2 \\ &\quad - 2aW(1-e^2)\cos \theta \}^{-3/2} d\theta \end{aligned} \quad (28)$$





第 8 図 アルビドにおける衛星と地球の関係図



第 9 図 衛星，地球，太陽の位置関係を表わす図（文献 [5] より）

となる。ただし、

$$\left. \begin{aligned} W &= 1 + e \cos(\varphi - \eta) \\ \cos \theta_m &= r_e / r \\ \cos \phi_m &= -\cot \theta \cos \delta \cos \varphi / \\ & (1 - \cos^2 \delta \cos^2 \varphi)^{1/2} \end{aligned} \right\} (29)$$

である。上式で、 $\eta$  は第 9-(c) 図に示されるごとく近地点の位置と太陽ベクトル ( $\vec{S}$ ) を軌道面に投写したときの位置とのなす角であり、角度、 $\varphi, \psi$  との関係は  $\psi = \varphi - \eta$  である。 $F_A$  の計算順序としては、与えられた軌道条件からまず (29) 式を計算し、 $\theta_m, \phi_m$  を求め、これらの値を用いて (28) 式を計算する。このときもし  $|\cos \phi_m| > 1$  ならば  $\phi_m = \pi$  とおいた後で (28) 式の計算を行なう。

$F_A$  を求めるより簡単な近似法としては Bannister の近似 [6] [7]

$$F_A \approx F_R \cos \theta_s \quad (30)$$

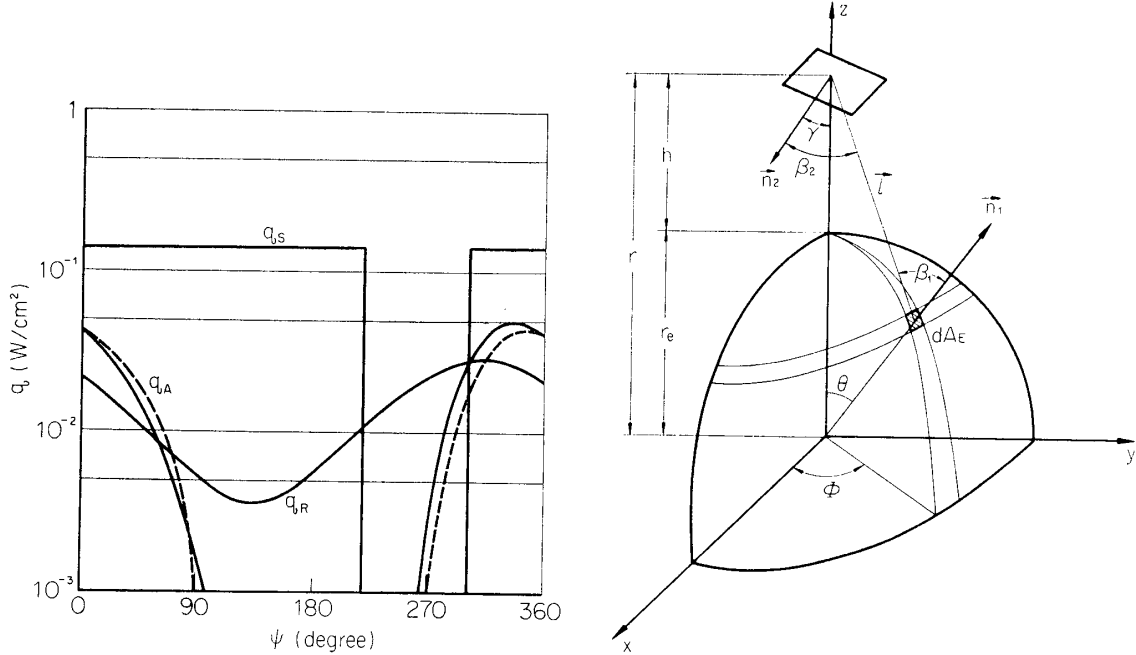
もよく用いられる。衛星の形状が簡単な形状であるときには有効な方法であろう。

第 10 図に (1), (23), (28), (30) 式を用いて計算された単位断面積を持つ球形衛星の一周期間の  $q_s, q_R, q_A$  の分布図の例を示

す. 点線が Bannister の近似式による結果である.

〔B〕 平板と地球との形態係数 [8]

ここでは文献 [8] の下地, 足立両氏による計算法を紹介する. 第 11 図に示されるごとく地球上任意の高さ  $h$  に  $\gamma$  の傾き角を持った平板があるとき, これと地球との形態係数を考える. 初期条件として  $\gamma$  と  $r(=r_e+h)$  が与えられると同図の記号を用いて



第 10 図 一周期に亘る  $q_s, q_R, q_A$  の分布 (春分午前 9 時打上げの第一周目, 近地点きより 500 km, 離心率 0.40874)

第 11 図 地球と平板の位置関係 (文献 [8] より)

$$\left. \begin{aligned} \vec{l} &= (r_e \sin \theta \cos \Phi, r_e \sin \theta \sin \Phi, r_e \cos \theta - r) \\ \vec{n}_2 &= (\sin \gamma, 0, -\cos \gamma) \\ \vec{n}_1 &= (\sin \theta \cos \Phi, \sin \theta \sin \Phi, \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

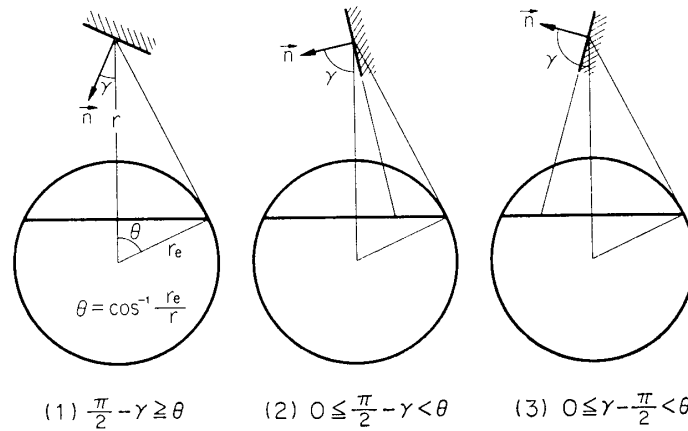
のごとくベクトル量が求められ, したがってこれらのベクトルの内積から  $\beta_1, \beta_2$  が求められるから赤外ふく射における地球の平板に対する形態係数  $F_R$  は (13) 式を用いて,

$$F_R = 2 \int_0^{\cos^{-1}(r_e/r)} \int_0^\pi \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi l^2} r_e^2 \sin \theta d\theta d\Phi \quad (32)$$

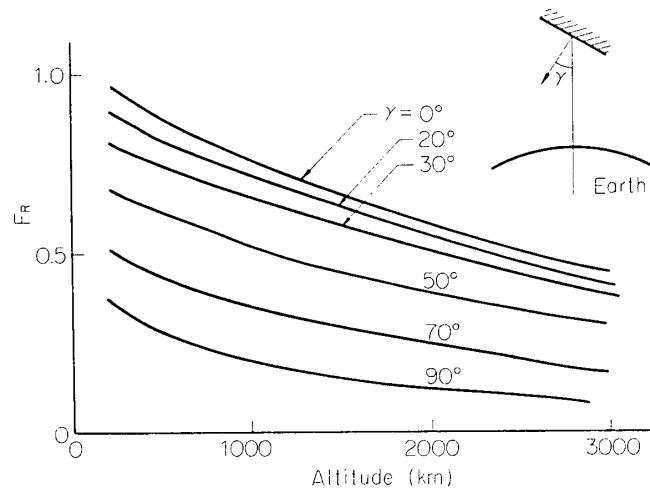
で与えられる. 上式の積分範囲は第 12 図に示されるごとく  $r$  と  $\gamma$  の値によって異なり,  $\cos \gamma > 0$  が制限条件として加わる. 傾き角  $\gamma$  をパラメータとした  $F_R$  の計算例を第 13 図に示す.

〔C〕 円筒形衛星と地球との形態係数 [8]

円筒形に対する地球の形態係数は次のようにして求められる. まず円筒の側面を母線に沿



第 12 図 平板に入射する赤外ふく射の計算の積分範囲を示す図 (文献 [8] より)

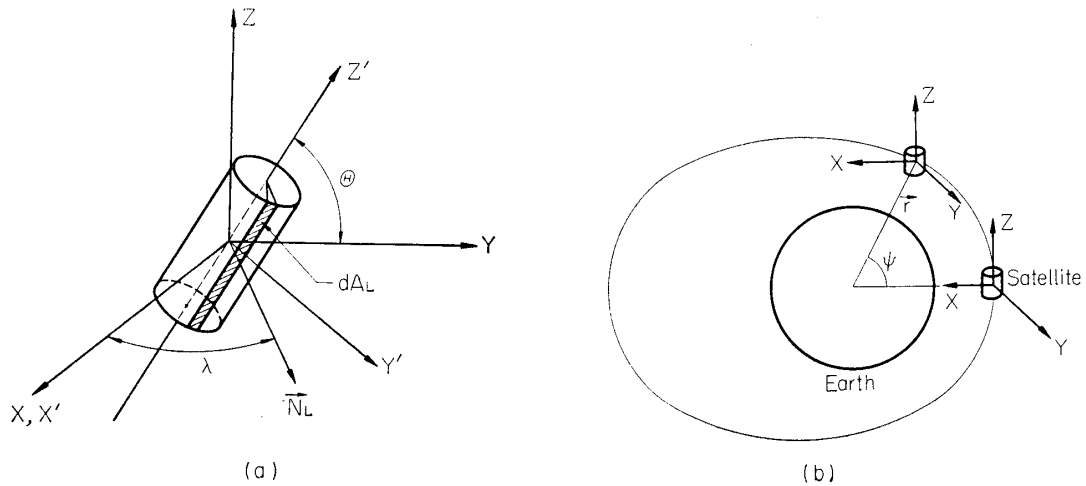


第 13 図 平板と地球の形態係数

って多数の面要素に分割し、そのおのおのを平板とみなしてこれと地球との形態係数を順次求め、これらの総和を円筒側面の形態係数と近似する。したがって円筒形衛星の形態係数は、上・下両底面を含めて、おのおの特有の傾き角  $\gamma$  を持った多数の平面と地球との形態係数を求める問題となり、とりもなおさず [B] で取扱った問題に帰する。上・下両底面の中心を貫いてスピン軸を持つ表面要素の傾き角を  $\gamma_L$ 、上・下両底面の傾き角をそれぞれ  $\gamma_U, \gamma_B$  とすると、第 14-(a), (b) 図を参照して、

$$\left. \begin{aligned} \cos \gamma_L &= \cos \phi \cos \lambda + \sin \phi \cos \theta \sin \lambda \\ \cos \gamma_U &= \sin \phi \cos \theta \\ \cos \gamma_B &= -\sin \phi \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

で与えられる。上式で、 $\theta, \lambda$  は初期条件として、 $\phi$  は軌道パラメータとして与えられるから (33) 式より  $\gamma_L, \gamma_U, \gamma_B$  が求められる。得られたおのおのの  $\gamma$  と  $\phi$  の関数として与え



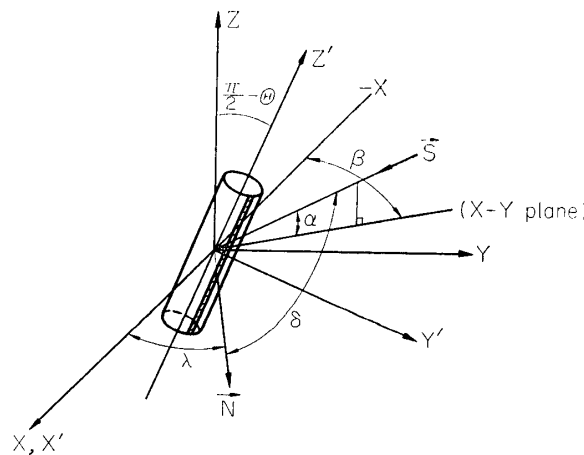
第 14 図 円筒形衛星の姿勢 (赤外ふく射, アルビドの計算) (文献 [8] より)

られる  $r$  の値を (31) 式に代入して  $\beta_1, \beta_2$  を求め, (32) 式を用いて赤外ふく射における円筒形衛星に対する地球の形態係数が求められる。

太陽ふく射における形態係数を求めるには, 赤外ふく射のばあいと同様, 円筒形を上, 下底面と側面の三つの部分にわけ, 側面をさらに多数の平面とみなせる面要素にわけて計算される。これらの平面の法線ベクトルを  $\vec{n}_U, \vec{n}_B, \vec{n}_L$  とし, これらと太陽ベクトル  $S$  とのなす角を  $\theta_{SU}, \theta_{SB}, \theta_{SL}$  とすると第 15 図を参照し, 同図内の記号を用いて

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_{SU} &= \cos \Theta \cos \alpha \cos \beta - \sin \Theta \\ \cos \theta_{SB} &= -\cos \Theta \cos \alpha \cos \beta + \sin \Theta \sin \alpha \\ \cos \theta_{SL} &= -\cos \alpha \cos \beta \cos \lambda + \cos \alpha \cos \beta \sin \lambda - \sin \alpha \cos \Theta \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

と表わされる。上式で求められる  $\theta_s$  の値を用いて円筒形衛星の  $F_s(\theta_s)$  を求めることができる。



第 15 図 円筒形衛星の姿勢 (太陽ふく射の計算のための参考図 (文献 [8] より))

## 〔D〕 別の近似法 [10]

衛星の形状が単純な凸多面体であるときに応用できるもう一つの近似法がある。

地球上任意の高度にある平面を考えるととき ( $F_s(\theta_s)$  を考えるときと同じように) 地球から拡散的に入射してくる赤外ふく射やアルビドに対して, その幾何学的面積のうちどれだけの部分が有効に参与しているかを表わす形態係数 ( $F_v$ ) が求められれば, その平面に単位時間当たりの熱入力  $q_R, q_A$  は

$$\left. \begin{aligned} q_R &= E_{R,s} \cdot A \cdot F_v \\ q_A &= E_{A,s} \cdot A \cdot F_v \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

で与えられる。ただし  $A$  は平面の表面積,  $E_{R,s}, E_{A,s}$  はそれぞれ衛星の単位表面積当たりの赤外ふく射, アルビドの強さで〔A〕の項で検討された球形衛星の値が用いられる。また  $F_v$  は地球から見た衛星の形状を表わすものであるから, (35) 式に示されるごとく  $q_R, q_A$  は全く同一の  $F_v$  を持つことは明らかである。

$F_v$  の近似値として第 16—(a), (b), (c) 図に示されるごとく衛星の表面上に単位長さの半球を描きこれによって切りとられる面要素  $dA$  (面積 =  $\pi$ ) と  $dA$  の中心から地球を見たときの立体角を  $dA$  上に投影したときの面積 ( $dA_f$ ) との比, すなわち

$$F_v = dA_f / dA \quad (36)$$

を用いる。第 16 図からも明らかのように  $dA$  の方向と地球との位置関係から (a), (b), (c) の三つの場合が考えられる。同図の記号を用いて,

a) の場合,

$$F_v = x \cdot y \quad (37)$$

ただし

$$\begin{aligned} x &= \cos \xi = r_e / r \\ y &= x \cdot \cos \chi \end{aligned}$$

b) の場合,

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left\{ zu + \frac{\pi xy}{2} + xy \sin^{-1} \frac{z}{y} + \frac{1}{2} (\mu - \sin \mu) \right\} \quad (38)$$

c) の場合,

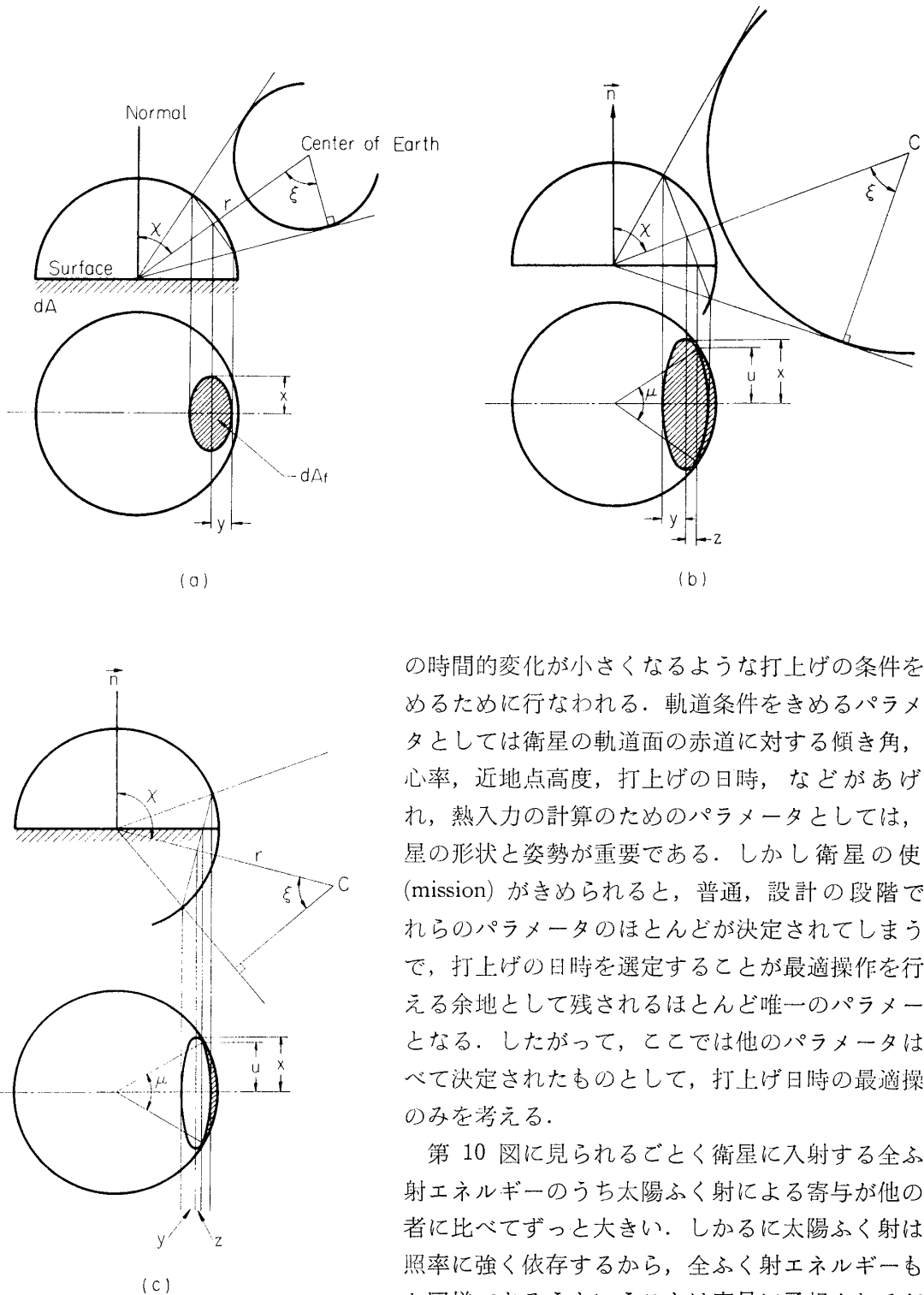
$$F_v = \frac{1}{\pi} \left\{ zu - \frac{\pi xy}{2} + xy \sin^{-1} \frac{z}{y} + \frac{1}{2} (\mu - \sin \mu) \right\} \quad (39)$$

ただし, 上式において  $x, y, z, u$ , はそれぞれ第 16 図に示されるごとく長さを  $\chi, \xi, \mu$  は角度を表わす。実際の計算では衛星の軌道上の位置, 姿勢が与えられれば,  $dA$  の法線が決定されるので  $F_v$  は容易に求められる。この近似法を用いて計算された円筒形衛星の  $F_v$  の例が, 第 17 図に示されている。

その他, 衛星の表面に凹部があったり, 付属物の陰が落ちる場合の形態係数を検討している文献 [9] もあるが, ここでは説明をはぶく。

#### 4. 最適打上げ日の選定

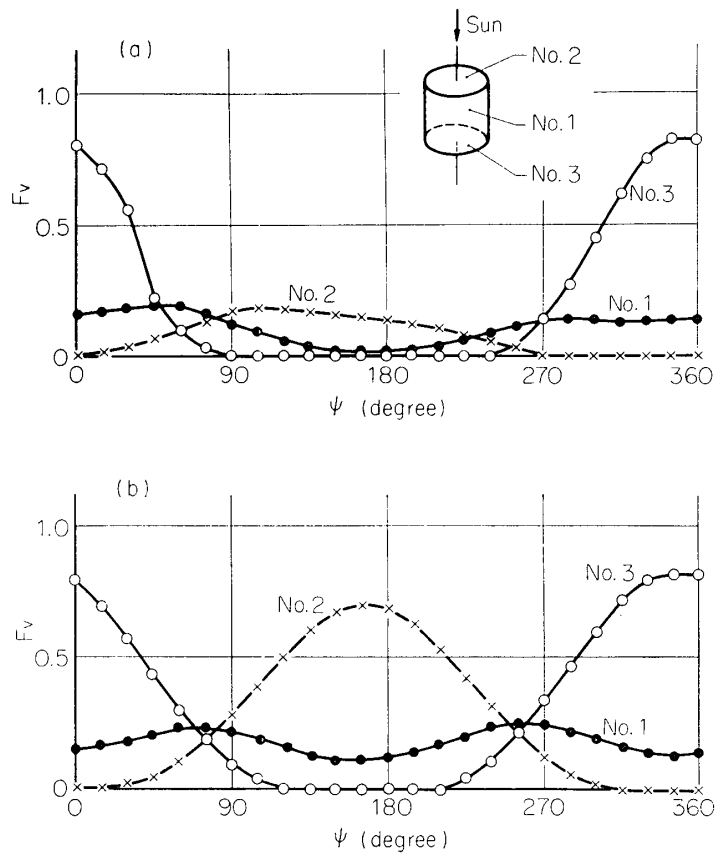
熱的条件から見た最適打上げ計画は, 打上げ後長期にわたって (22) 式で表わされる  $Q_T$



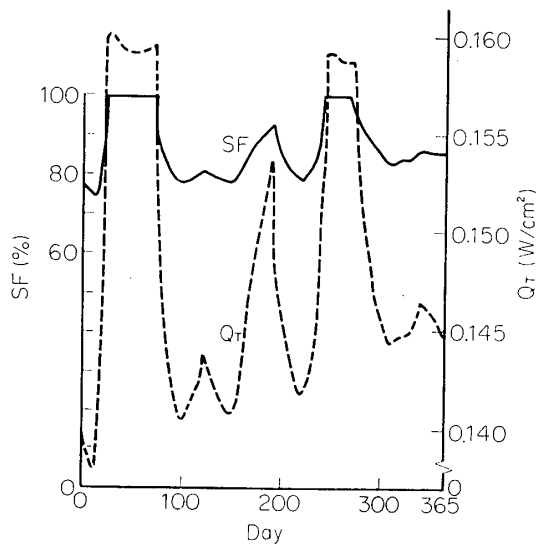
第 16 図 形態係数の近似値を  
求めるための参考図

の時間的变化が小さくなるような打上げの条件を求めるために行なわれる。軌道条件をきめるパラメータとしては衛星の軌道面の赤道に対する傾き角、離心率、近地点高度、打上げの日時、などがあげられ、熱入力計算のためのパラメータとしては、衛星の形状と姿勢が重要である。しかし衛星の使命 (mission) がきめられると、普通、設計の段階でそれらのパラメータのほとんどが決定されてしまうので、打上げの日時を選定することが最適操作を行なえる余地として残されるほとんど唯一のパラメータとなる。したがって、ここでは他のパラメータはすべて決定されたものとして、打上げ日時の最適操作のみを考える。

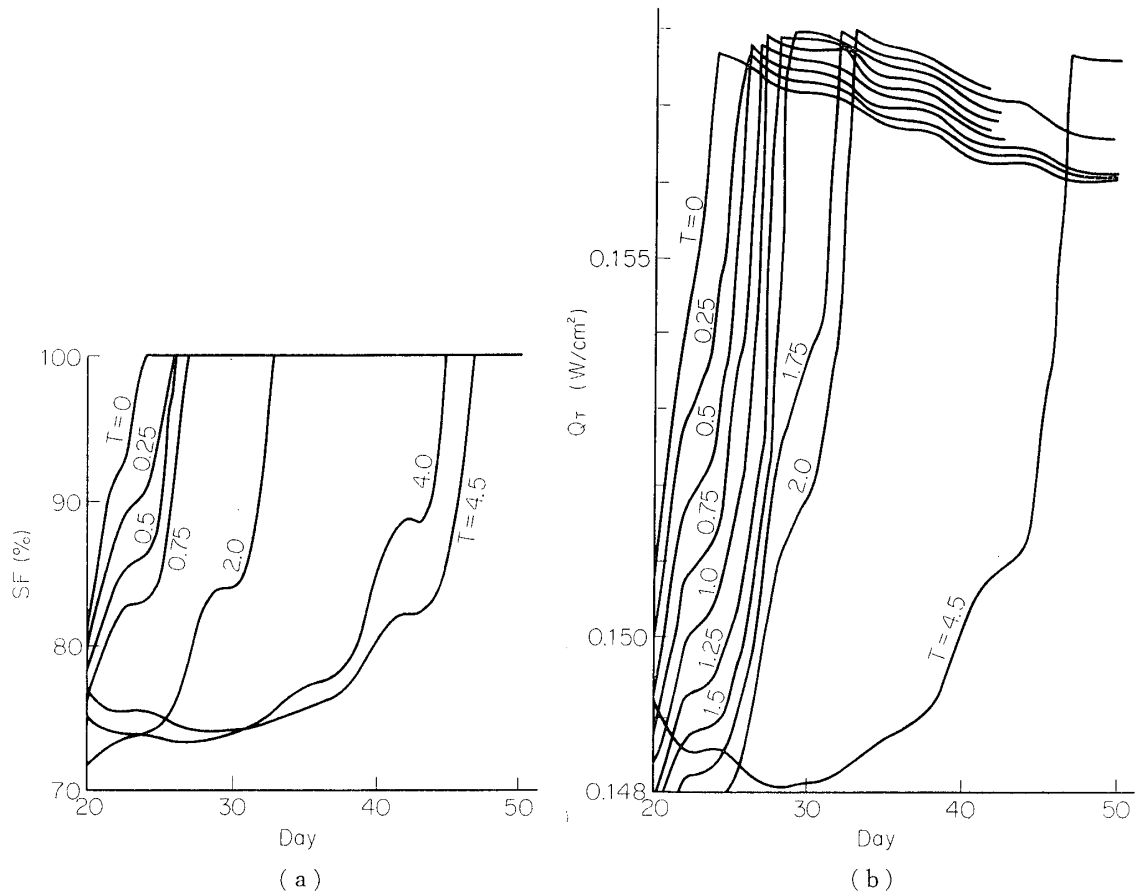
第 10 図に見られるごとく衛星に入射する全ふく射エネルギーのうち太陽ふく射による寄与が他の二者に比べてずっと大きい。しかるに太陽ふく射は日照率に強く依存するから、全ふく射エネルギーもまた同様であろうということは容易に予想されるが、第 18 図は実際にその様子を示している。第 19—(a), (b) 図は、 $Q_T$  が  $SF$  と同様、打上げ時刻 ( $T$ )



第 17 図 円筒形衛星の形態係数 (春分, 正午打上げ)  
 (a)  $h_P=500$  km,  $h_A=10,000$  km  
 (b)  $h_P=500$  ",  $h_A=1,000$  "



第 18 図 日照率と全入射ふく射束の 1 年間に亘る分布図 (春分, 正午打上げ,  $h_P=500$  km,  $h_A=10,000$  km)



第 19 図 日照率と全入射束の分布の打上げ時刻による変化 (春分, 午前 9 時打上げ。  
 $h_p=500$  km,  $h_A=10,000$  km)

と打上げ後経過した日数 (DAY) の関数であることを示している。

いま, ある時刻  $T$  に打上げられた衛星が打上げ後  $D_1$  日目に  $Q_T$  が最大,  $D_2$  日目に最小になったとする。このとき,

$$DQ_T(T) = Q_T(T, D_1) - Q_T(T, D_2) \quad (40)$$

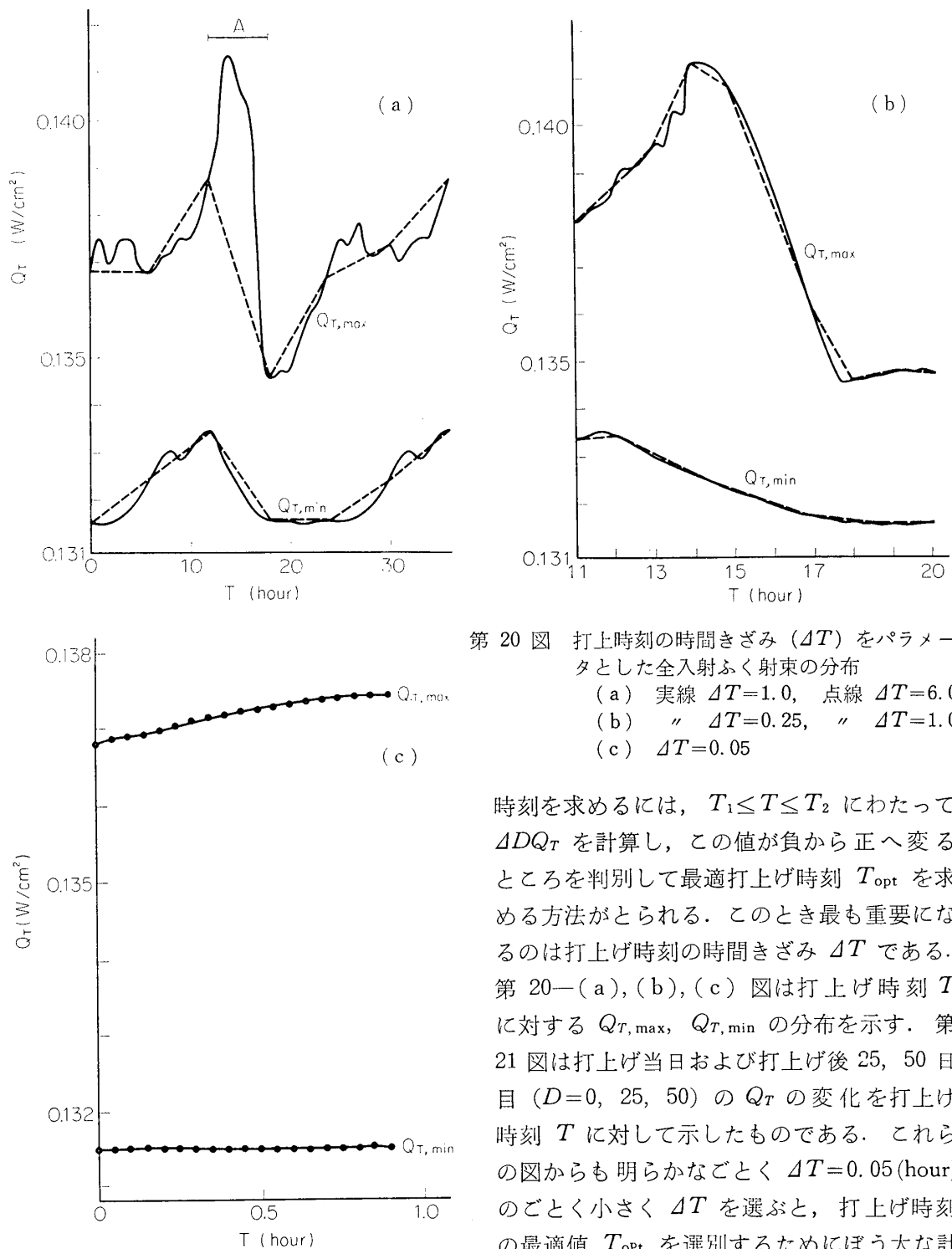
とおいて新しい関数  $DQ_T$  を考える。打上げ後何日目に  $Q_T$  が最大あるいは最小値をとるかということが問題にならないばあいは  $DQ_T$  は打上げ時刻のみの関数となるから,  $DQ_T$  が目的関数, 打上げ時刻  $T$  が制御パラメータ, 打上げ操作のできる時間的余裕 ( $T_1 \leq T \leq T_2$ ) が拘束条件であるような最も単純な形の最適操作の問題になる。いまのばあい,  $DQ_T$  の値が解析的にではなく数値的にしか与えられないところに困難さがある。

ある打上げ時刻  $T$  とそれより  $\Delta T$  時間だけ遅れて打上げられた衛星の  $DQ_T$  値をそれぞれ  $DQ_T(T)$ ,  $DQ_T(T + \Delta T)$  とし, さらに,

$$\Delta DQ_T(T) = \frac{DQ_T(T + \Delta T) - DQ_T(T)}{\Delta T} \quad (41)$$

を作ると, 明らかに  $\Delta DQ_T$  は  $DQ_T$  曲線の二点間のこう配を表わす。したがって最適打上





第 20 図 打上時刻の時間きざみ ( $\Delta T$ ) をパラメータとした全入射ふく射束の分布  
 (a) 実線  $\Delta T=1.0$ , 点線  $\Delta T=6.0$   
 (b) "  $\Delta T=0.25$ , "  $\Delta T=1.0$   
 (c)  $\Delta T=0.05$

時刻を求めるには、 $T_1 \leq T \leq T_2$  にわたって  $\Delta D Q_T$  を計算し、この値が負から正へ変るところを判別して最適打上げ時刻  $T_{opt}$  を求める方法がとられる。このとき最も重要になるのは打上げ時刻の時間きざみ  $\Delta T$  である。第 20—(a), (b), (c) 図は打上げ時刻  $T$  に対する  $Q_{T,max}$ ,  $Q_{T,min}$  の分布を示す。第 21 図は打上げ当日および打上げ後 25, 50 日目 ( $D=0, 25, 50$ ) の  $Q_T$  の変化を打上げ時刻  $T$  に対して示したものである。これらの図からも明らかなごとく  $\Delta T=0.05$  (hour) のごとく小さく  $\Delta T$  を選ぶと、打上げ時刻の最適値  $T_{opt}$  を選別するためにぼう大な計算時間を要し、現実には有効な手段にはなり得ないし、逆に  $\Delta T=6.0$  のごとく大きく選ぶとたとえば第 20—(a) 図において A 部の  $Q_T$  の極大値が全く看過されてしまう。というように最適操作が不完全になるおそれが生じる。

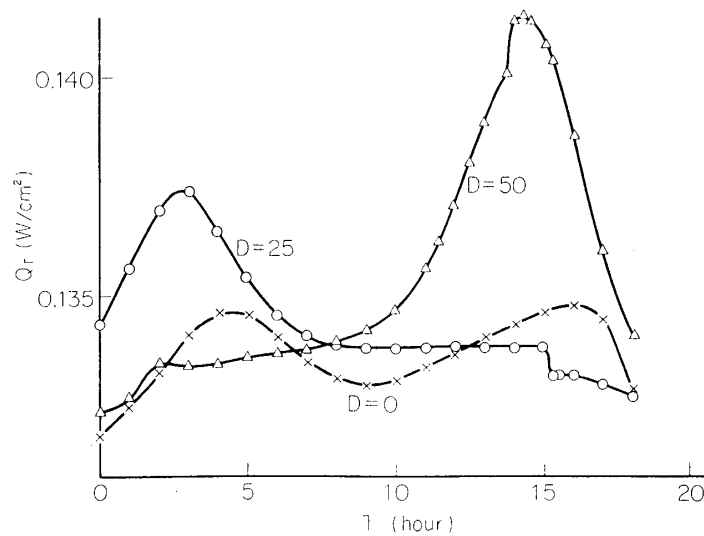
算時間を要し、現実には有効な手段にはなり得ないし、逆に  $\Delta T=6.0$  のごとく大きく選ぶとたとえば第 20—(a) 図において A 部の  $Q_T$  の極大値が全く看過されてしまう。というように最適操作が不完全になるおそれが生じる。

ここで再び第 22—(a), (b), (c), (d) 図に示されるごとく  $Q_T$  と  $SF$ ,  $DQ_T$  と  $DSF$  の分布の類似性に着目して以下のような計算過程で打上げの最適時刻  $T_{opt}$  を選別する方法が試みられた。

(i) ある初期条件で打上げられた衛星の  $Q_T$  の第零近似値,  $Q_T^0$  として  $SF$  を用いる。すなわち,

$$Q_T^0 = C \cdot SF \quad (42)$$

とおき,  $DSF (=DQ_T^0)$  についてさきに述べた最適操作を行ない,  $T_{opt}$  の第零近似値,  $T_{opt}^0$



第 21 図 打上げ後経過した日数と打上げ時刻による全入射  
ふく射束の分布 ( $h_P=500$  km,  $h_A=1,000$  km)

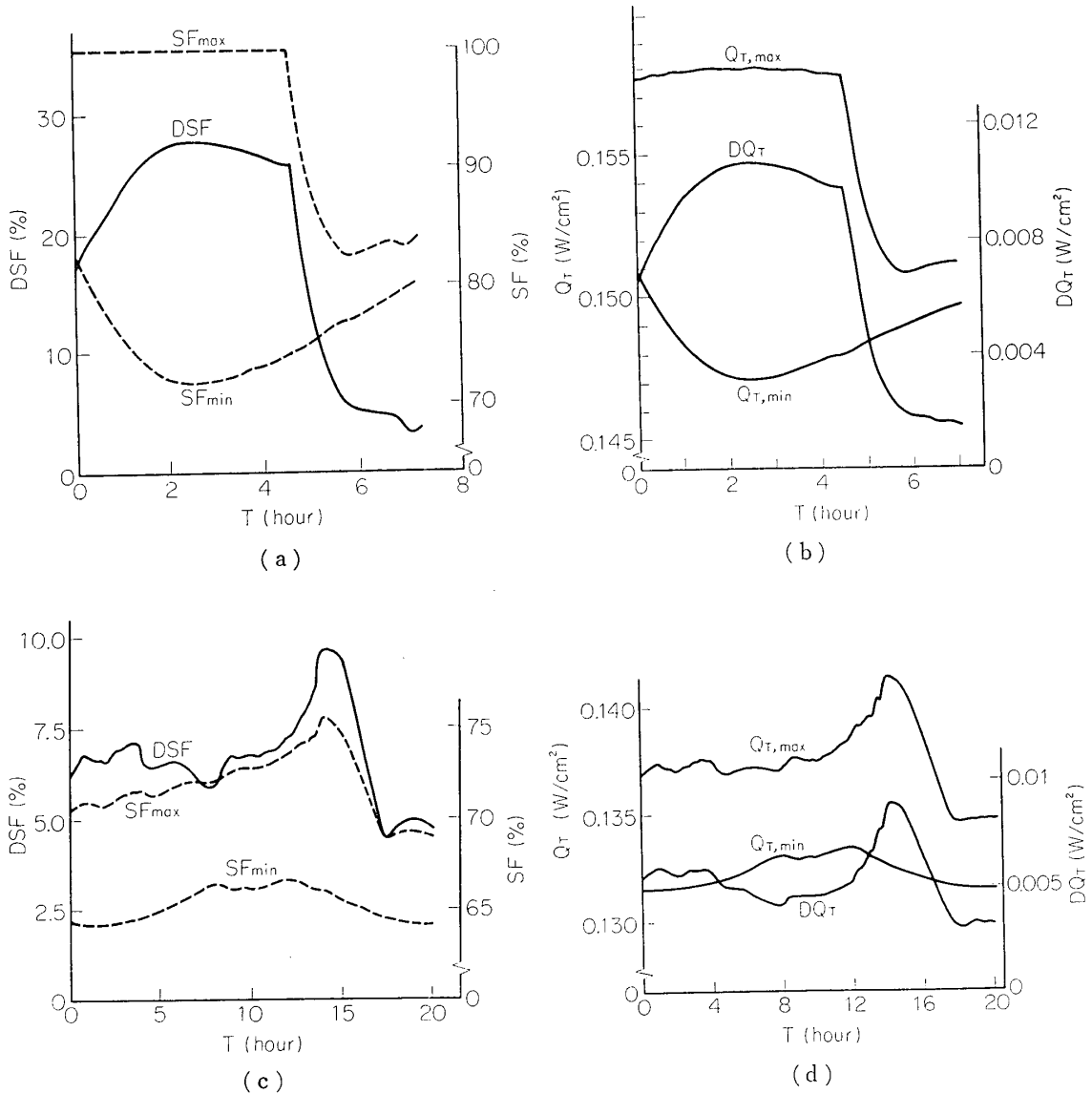
を求める。ただし, (42) 式において  $C$  は比例定数であるが  $T_{opt}$  を求めるに当っては  $Q_T$  の相対的な大きさのみが問題になるから,  $C=1$  とおいてよい。  $T_{opt}^0$  を求めるに当っては  $\Delta T^0$  は比較的大きくにとってよく今までの結果から判断して  $\Delta T^0=2\sim 6$  程度で十分であろう。

(ii)  $T_{opt}^0$  の近傍に  $T_{opt}^1$  があることを予想して

$$T^1 < T_{opt}^0 < T^2$$

を満足する適当な時刻  $T_1^1, T_2^1$  を設定し, これらの時間幅  $\Delta T_{max}^1 = (T_2^1 - T_1^1)$  にわたって  $\Delta T^1$  を適当に小さく選んで  $DQ_T^1$  の最適操作を行ない,  $T_{opt}^1$  (第一次近似) を求める。以下同様にして  $T_{opt}^1$  の近傍にさらにせまい  $\Delta T_{max}^2$  を設け,  $\Delta T^1$  よりも小さい  $\Delta T^2$  を用いて  $T_{opt}^2$  を求める。という具合にして  $T_{opt}$  に近い値を求める。なお, 衛星の寿命中, 常に  $SF=1$  のような打上げ条件のばあいは直接 (ii) の計算を行なう。

この論文で実際に使用された計算プログラムは (41) 式で示される  $\Delta DQ_T$  の値を求めないで直接の大きさを比較して  $T_{opt}$  を選定するように作られた。簡単なフローチャートを第 23 図に, プログラムの一部を補遺に示す。

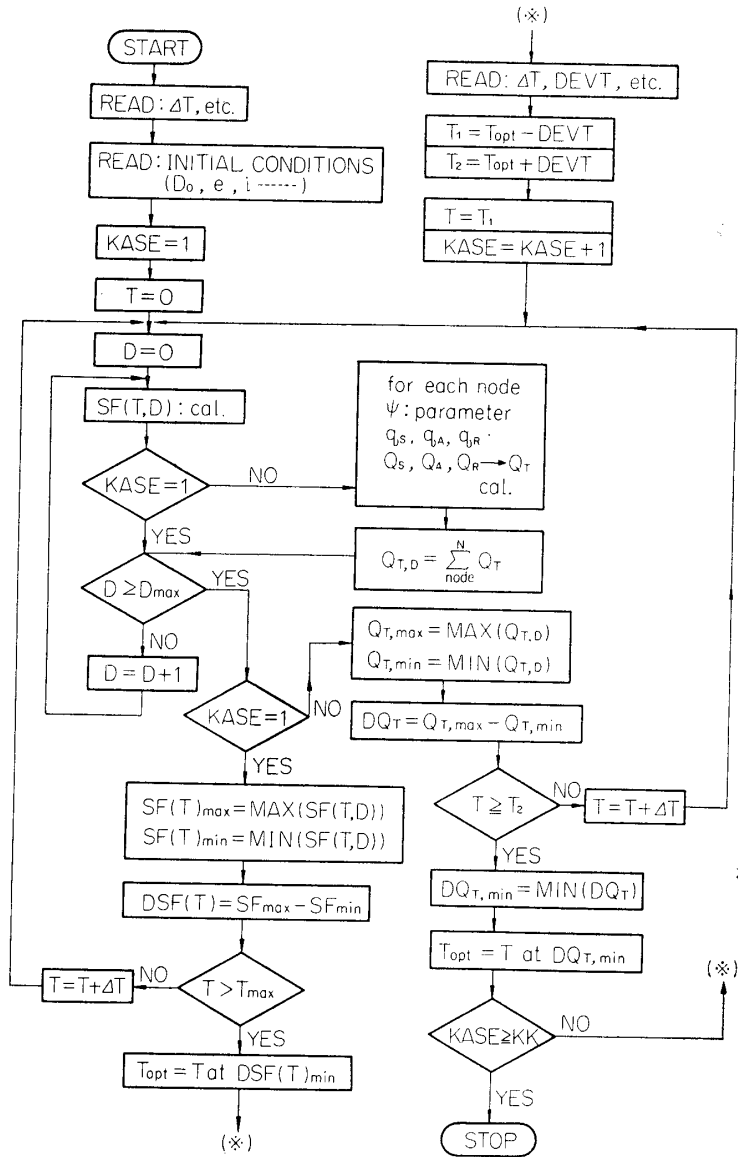


第 22 図 50 日間わたる日照率と全入射ふく射束の分布

- (a)  $h_P=500$  km,  $h_A=10,000$  km 日照率
- (b) " " " 全入射ふく射束
- (c)  $h_P=500$  km,  $h_A=1,000$  km 日照率
- (d) " " " 全入射ふく射束

$T_{opt}$  を決定する計算例の一つを示す。

	軌道〔1〕	軌道〔2〕
衛星の形状	球形	"
近地点高度	500 km	"
遠地点高度	3,000 km,	1,000 km
離心率	0.15380,	0.049102



第 23 図 フローチャート

最初の近地点位置 (28° north, 150° east) //

軌道の傾き角 31.5° //

打上げ許容日時 1970 年 8 月中 (30 日間) //

衛星の寿命 100 日間 //

計算パラメータとしては

$$\Delta T^0 = 6.0$$

$$\Delta T^1 = 0.5$$

$$T^1, T^2 = T^{\text{opt}} \text{ (hour)}$$

を与えて  $T^1_{\text{opt}}$  を計算した。計算時間は HITAC-5020 で各軌道とも約 1 時間であった。

結果は、軌道〔1〕のばあいは8月1日午後7時30分に、軌道〔2〕のばあいは、8月3日午後3時0分に最初に近地点に達するように打上げ時刻を選ぶことが最適であった。このとき、衛星が100日間の寿命の間で受ける入射エネルギーの時間的変動の最大値は最悪の打上時刻に打上げられた衛星が受けるそれらの $1/5$ から $1/7$ であった。

## 5. 結 語

ダ円軌道上を飛行中の衛星に入射する熱ふく射エネルギーを求める計算法と、その結果をもとにして外界から入射する熱入力の変動が衛星に与える効果という熱的条件より見た衛星の最適打上げ計画（ここではもっぱら打上げ日時の選定）を行なう方法について、その大筋が述べられた。

前半の入射エネルギーを求める計算法に他の文献に示されているところを利用した部分的が多いが、用いられ近似値がどの程度であるかという検討は、ここでは全く行なわれていない。また最適打上げ時刻を選定する計算過程は他と比較できるような文献が筆者の手元にないのでどの程度信頼できるものであるか評価されていない。これらの二点が今後の課題として残されている。

実際の計算は現行の大型計算機の力を借りても、かなりの時間を要する性質のものであるため計算過程で用いられる $\Delta T$ や $\Delta T_{\max}$ 、 $T^1$ 、 $T^2$ の選び方については十分な考察が必要である。これについては目下検討中である。

1970年6月1日 航空力学部

## 参 考 文 献

- [1] W.S. Snoddy, "Calculations Concerning the Passage of a Satellite Through the Earth's Shadow" NASA MTP-RP-61-1 (1961)
- [2] H.G.L. Krause, "The Secular and Periodic Perturbations of the Orbit of an Artificial Earth Satellite" paper presented at the VII International Astronautical Federation Meeting, Rome, 17-22 Sept. (1956)
- [3] E.M. Sparrow & R.D. Cess "Radiation Heat Transfer" Brooks/Cole Publishing Company 1967.
- [4] F.G. Cunningham, "Earth Reflected Solar Radiation Input to Spherical Satellites" NASA TND-1099 (1961)
- [5] F.G. Cunningham, "Earth-Reflected Solar Radiation Incident upon Spherical Satellites in General Elliptical Orbits", NASA TND-1472 (1963)
- [6] H.L. Finch, D. Sommerville, R. Vogt and D. Bland "A Computer Program for Calculating External Thermal-Radiation Heat Loads and Temperatures of Spacecraft Orbiting the Planets or the Moon" NASA TR R-278 (1968)
- [7] J.C. Bannister, "Radiation Geometry Factor Between the Earth and a Satellite" NASA TND-2750 (1965)
- [8] 下地貞夫, 足立恭子, 「地球を周る人工衛星に対する熱入射の計算」三菱電機研究報告 45年3月.

- [9] J. Doenecke, "Thermal Radiations Absorbed by a Partially Obscured Spacecraft" *Astronautica Acta*, Vol. 15, pp. 107—117 (1969)
- [10] G. A. McCue & S. I. Feher: Optimum Thermal Design Through Computer Simulation of a Space Vehicle Structure in Earth Orbit, ASME paper 66-WA/HT-44.

### 補 遺

この論文で用いられたプログラムの一部を紹介する。これは HITAC-5020 用に FORTRAN-4 で書かれており、前半部が  $SF$  の計算、後半部が球形衛星に入射する熱ふく射エネルギーの計算である。

#### 入力データ

- 1) KK: KASE の回数  
 [例]  $KK=1(KASE=1)\cdots DQ^0_T (=DSF)$ ,  $T^0_{opt}$  の計算  
 $KK=2( \quad =2)\cdots DQ^1_T, T^1_{opt}$                     "  
 $KK=3( \quad =3)\cdots DQ^2_T, T^2_{opt}$                     "  
           :  
 2) ATM: 打上げの時間きざみ  $\Delta T$  (hour)  
 3) DEVT: 打上げを試みる時間幅の 1/2  
 [例]  $\Delta T_{max} = T_2^1 - T_1^1 = (T_{opt}^0 + DEVT) - (T_{opt}^1 - DEVT)$   
 4) TO: 衛星が打上げ後最初に近地点に達する時の世界時 (hour)  
 5) DO: 春分の日から何日後に打上げたか (day)  
 6) ECC: 衛星の軌道の離心率  
 7) DLON: 最初の近地点の経度 ( $^{\circ}$ East)  
 8) DLAT: 最初の近地点の緯度 ( $^{\circ}$ North)  
 9) DINC: 軌道の赤道面に対する傾き角 (degree)  
 10) RP: 地球の中心と近地点とのきざみ (km)  
 11) S: 近地点における衛星の速度の北向きの成分 +1 or -1  
 12) RO: 地球の平均半径  
 13) DEPS: 地軸と地球の公転面の法線とのなす角 (degree)  
 14) TMAX: 衛星の寿命 (days)  
 15) DJ: 打上げ後の  $Q_T$  計算のきざみ。  
 16) YEAR: 打上げ年度

を与える。たとえば本文の計算例の場合には入力データとして表 1 のような値を与えればよい。(データカードの順序は (a), (b), (c) の順である。)

#### 出力データ

- 1) PERIOD : 人工衛星の周期(時間)
- 2) LAUNCH : 打上げの試みの回数
- 3) T : 打上げ時刻  $T$
- 4) DAYMAX : 打上げ後 (DAYMAX) 日目に  $SF$  あるいは  $Q_T$  が最大値をとる。
- 5) SFMAX : その最大値,  $(SF)_{max} = (Q^0_T)_{max}$

- 6) DAYMIN : (DAYMIN) 日目に  $SF$  あるいは  $Q_T$  が最小値をとる.  
 7) SFMIN :  $(SF)_{\min} = (Q^0_T)_{\min}$   
 8) DSF :  $DSF (= (SF)_{\max} - (SF)_{\min}) = DQ^0_T$   
 9) TOPTO :  $T^0_{opt}$   
 10) TXMIN :  $DQ^0_T (= DSF)$  の最小値  
 11) QMAX :  $Q_{T, \max}$  の値  
 12) QMIN :  $Q_{T, \min}$  の値  
 13) DQDT :  $DQ_T (= Q_{T, \max} - Q_{T, \min})$  の値  
 14) DQMI :  $DQ_T$  の最小値

表 1

	軌道〔1〕	軌道〔2〕			軌道〔1〕	軌道〔2〕	
1) KK	2	2	} (a)	10) S	-1.	-1.	} (c)
2) ATM	6.0	6.0		11) RO	6378.	6378.	
3) TO	0.0	0.0		12) DEPS	23.45	23.45	
4) DO	133.	133.		13) TMAX	100.	100.	
5) ECC	0.15380	0.049102		14) DJ	1.	1.	
6) DLON	150.	150.	15) YEAR	1970.	1970.		
7) DLAT	28.	28.	} (b)	16) ATM	0.25	0.25	
8) DINC	31.5	31.5		17) DEVT	4.0	4.0	
9) RP	6878.	6878.					

```

DIMENSION DTX(400),DTTX(400),Q(40),UQ(1500),DINTQ(10)
DATA DEGRADZ,0.174552937,ADDEG/97,295780Z,AK1/2,764E-6Z,
P1/3,1439265Z,AK2/2,206E+4Z,AK4/1,58057E+9Z,RO/5378Z
2,R/O,31Z,SUN/0.14Z,KASE/1Z
READ(5,509)KK,TO MAX,ATM
READ(5,500) TO,DO,ECC,DLON,DLAT,DINC,RP,S,DEPS,TMAX,DJ,YEAR
WRITE(6,101) KASE
WRITE(6,102)
WRITE(6,103) TO,DO,ECC,DLON,DLAT,DINC,RP,S,RO,DEPS,TMAX,DJ,YEAR
WRITE(6,511) KK,TO MAX,ATM
PEAK1*(RP/(1.-ECC))**1.15
WRITE(6,99) P
J=
IF(KASE,NE,1) GO TO 4
WRITE(6,504)
WRITE(6,505)
TE=
I=
EPS=DEPS*DEGRAD
KNTRL=
ALON=DLON*DEGRAD
ALAT=DLAT*DEGRAD
AINC=DINC*DEGRAD
Y=COS(AINC)/COS(ALAT)
Z=ARSIN(Y)
Z=POS(Z)
IF(S.GT.0.) GO TO 8
Z=PI-Z
8 TANL=SENG(ALAT)/COS(ALAT)
COSZ=COS(PI-Z)
TEMPP=ATAN2(TANL,COSZ)
W0=PI-TEMPP
W0=POS(W0)
10 U=DO+T+10/24
TEMPP=00.*YEAR
12 IF(TEMPP.LT.360.) GO TO 20
TEMPP=TEMPP-360.
GO TO 18
20 AK=282.6-TEMPP/360.
ALGD= .9856*(U+77.)+1.94E1*SIN(.9856*(U+77.))+.0207*SIN(1.9712*
1(CU+77.))-36.*AK8
ALGR=ALGD*DEGRAD
ALGR=POS(ALGR)
ALPHA=ATAN2(COS(EPS)*SIN(ALGR),COS(ALGR))
ALPHA=POS(ALPHA)
ALPHD=ALPHA*RADDEG
16 IF(KNTRL,NE,1) GO TO 31
25 HD=TO+DLON/15.+(.9856*(DO+T0/24.)-ALPHD)/15.-.609-.066*TEMPP/360.
SIGMD=(15.*(HD-6.))
SIGMA=SIGMD*DEGRAD
SIGMA=POS(SIGMA)
30 OM00=ATAN2(-SIN(ALAT),COS(Z)/SIN(Z))
OM00=POS(OM00)
OMEO=OM00+ALPHA+SIGMA-PI/2.
OMEO=POS(OMEO)
35 PB=RP*(1.+ECC)
OMDOT=(-48.*PI/P)*COS(AINC)*(3.*AK2/PB**2+(10.*AK4/PB**4)*(1.+1.5*
(1ECC**2)*(1.-1.75*SIN(AINC)**2))
WDOT=(-8.*PI/P)*(3.*AK2/PB**2*(1.-1.5*SIN(AINC)**2)+10.*
1AK4/PB**4*(1.+1.75*ECC**2)*(1.-5.*SIN(AINC)**2)+35./8.*SIN(AINC)**
24)*-OMDOT*COS(AINC)
31 Y=SIN(EPS)*SIN(ALGR)
GAMMA=ARSIN(Y)
GAMMA=POS(GAMMA)
OMEGA=OMEO+OMDOT*T
OMEGA=POS(OMEGA)
32 W=W0+WDOT*T
W=POS(W)
45 AOP=ALPHA-OMEGA-PI/2.
AOP=POS(AOP)
40 Y=-COS(AINC)*SIN(GAMMA)+SIN(AINC)*COS(GAMMA)*COS(AOP)
ZP=PI/2*-ARSIN(Y)
YESIN(AINC)*SIN(AOP)/SIN(ZP)

```



B=AR SIN(Y)	70
B=POS(B)	71
Y=COS(B)*COS(AOP)+SIN(B)*SIN(AOP)*SIN(GAMMA)	72
TPHI=PI/2.-AR SIN(Y)	73
IF(AOP.LT.PI) GO TO 41	74
TPHI=2.*PI-TPHI	75
43 PHI=TPHI-W	76
PHI=POS(PHI)	77
42 Y=COS(AINC)*COS(EPS)+SIN(AINC)*SIN(EPS)*COS(OMEGA)	78
AJ=PI/2.-AR SIN(Y)	79
Y=SIN(EPS)*SIN(OMEGA)/SIN(AJ)	80
EO=AR SIN(Y)	81
EO=POS(EO)	82
SOM=SIN(OMEGA)*SIN(AINC)/SIN(AJ)	83
COS=EOS(EO)*COS(OMEGA)-SIN(EO)*SIN(OMEGA)*COS(AINC)	84
DMS=ATAN2(SOM,COS)	85
AS=ATAN2(ARG*SIN(ALCR-DMS),COS(ALCR-DMS))+AR SIN(SIN(EPS)*SIN(OMEGA)/SIN(AJ))	86
AS=POS(AS)	87
THIS SECTION SOLVES FOR X1 AND X2 BY ITERATION.	88
ITER=1	89
ISTEP=1	90
X=.17453293	91
UX=.17453293	92
A1=RO/(RP*(1.+ECC))	93
A2=1.-SIN(AJ)**2*SIN(DMS-ALCR)**2	94
48 VNU=PHI-X	95
IF(ITER.EQ.2) VNU=PHI+PI+X	96
TEMP1=SIN(X)	97
TEMP2=SQRT((1.-(A1+(1.+ECC*COS(VNU)))**2)/A2)	98
IF(TEMP2-TEMP1.LT.Q.) GO TO (50,51,52,55) ISTEP	99
IF(X.GE.PI/2.) GO TO 53	100
X=X+DX	101
GO TO 48	102
50 DX=.017453293	103
X=X+.017453293+DX	104
ISTEP=2	105
GO TO 48	106
51 DX=.0017453293	107
X=X-.017453293+DX	108
ISTEP=3	109
GO TO 48	110
52 DX=.0001745329	111
X=X-.0017453293+DX	112
ISTEP=4	113
GO TO 48	114
53 X1=PI/2.	115
X2=PI/2.	116
GO TO 60	117
55 IF(ITER.EQ.2) GO TO 56	118
X1=X-DX/2.	119
X=.17453293	120
DX=.17453293	121
ITER=2	122
ISTEP=1	123
GO TO 48	124
56 X2=X-DX/2.	125
60 CONTINUE	126
V1=PHI-X1	127
V1=POS(V1)	128
64 V2=PHI+PI+X2	129
V2=POS(V2)	130
66 ARG=SQRT((1.-ECC)/(1.+ECC))	131
E1=2.*ATAN2(ARG*SIN(V1/2.),COS(V1/2.))	132
E1=POS(E1)	133
E2=2.*ATAN2(ARG*SIN(V2/2.),COS(V2/2.))	134
E2=POS(E2)	135
AM1=E1-ECC*SIN(E1)	136
AM2=E2-ECC*SIN(E2)	137

	IF (ABS (AM1-AM2).GT..001) GO TO 70	142
	TX=100.	144
	GO TO 72	145
70	IF (AM1.GT.AM2) GO TO 71	146
	TX=((AM2-AM1)/(2.*PI))*100.	146
	GO TO 72	149
71	TX=((AM2-AM1+2.*PI)/(2.*PI))*100.	150
72	EP=2.*A*AN2 (ARG*SIN(W/2.),COS(W/2.))	151
	EP=POS (EP)	152
	TP=(30.*P/PI)*(EP-FCC*SIN (EP))	153
	TI=TP+(30.*P/PI)*AM2	154
	IF (TI.GE.P*60.) TI=TI-P*60.	155
	TE=TP+(30.*P/PI)*AM1	157
	IF (TE.GE.P*60.) TE=TE-P*60.	158
	PS=AS*W	160
	PS=POS (PS)	161
	Y=SIN (AJ)*SIN (OMS-ALCR)	162
	DELTA=ARSIN (Y)	163
	ALATP=ARSIN (SIN (ALNC)*SIN (W))	164
C	*****	
C	DELTA=DELTA*RAUDEG	165
	DELT=DELT*DEGRAD	166
	PS=PS*RAUDEG	167
C		
	IF (KASE.GE.2) GO TO 203	168
	DTX(I)=IX	170
	IF ((I.GE.TMAX).OR.(KNTRL.GE.367)) GO TO 209	171
	T=T+DJ	173
	I=I+1	174
	KNTRL=KNTRL+1	175
	GO TO 10	176
299	IM=1	177
	IX=1	178
	IX=A+DTX(1)	179
	IXMI=U-IX(1)	180
	DO 1994 IX=1,1	181
	IF (IXMA.GT.DTX(IX)) GO TO 1995	183
	IX=A+DTX(IX)	185
	IM=IX	186
1995	IF (IXMI.LT.DTX(IX)) GO TO 1994	187
	IXMI=DTX(IX)	189
	IM=IX	190
1994	CONTINUE	191
	DTX(J)=IXMA-IXMI	192
	WRITE(6,1993),TO,IMA,IXMA,IMI,IXMI,DTX(J)	193
	IF (TO.GE.TOMAX) GO TO 1889	194
	TO=TO+AIM	196
	J=J+1	197
	GO TO	198
1889	ITMI=1	199
	DTXMI=DTX(1)	200
	DO 1885 JT=1,1	201
	IF (DTXMI.LT.DTX(JT)) GO TO 1885	203
	ITMI=JT	205
	DTXMI=DTX(JT)	206
1885	CONTINUE	207
	TOPT=FLOAT (ITMI-1)*AIM	208
	WRITE(6,1883),TOPT,DTXMI	209
	READ(5,210)A1P,DEVT	210
	TO=TOPT-DEVT	211
	TOMAX=TOPT+DEVT	212
	KASE=KASE+1	213
	UNTO(KASE)=TO	214
	GO TO 3	215
203	SUMQA=0.	216
	SUMQR=0.	217
	SUMUT=0.	218
	JF=15	219
20	FPSS=0.5*(FLOAT (JF)+PS)*DEGRAD	220
	FPSS=POS (FPSS)	221
	FPSS=0.5*(FLOAT (JF-15)+PS)*DEGRAD	222
	FPSS=POS (FPSS)	223

	ABC=SQRT((1.-ECC)/(1.+ECC))	224
	EL=2.*ATAN(TAN(FPSL)*ABC)	225
	EL=POS(EL)	226
	ES=2.*ATAN(TAN(FPSS)*ABC)	227
601	ES=POS(ES)	228
600	SMA=RP/((1.-ECC)*R0)	229
	D=SMA*(1.-ECC*COS(EL))	230
	FOG=2.*(1.-SQRT(1.-((1./D)**2)))	231
	IF(EL.GE.ES) GO TO 60	232
	EL=EL+6.2831853	234
80	DT=(0.5*P/PI)*(EL*ECC*(SIN(EL)-SIN(ES)))*3600.	235
	SUMDT=SUMDT+DT	236
	CALL FPSE(DELTA,PS,SMA,ECC,JF,PS,E)	237
	ER=SUN*(1.-R)*FOG/4.	238
	QA=PS*DT	239
	QR=ER*DT	240
	SUMQA=SUMQA+QA	241
		242
1999	SUMQR=SUMQR+QR	243
	IF((JF-360).GE.0) GO TO 302	245
	JF=JF+10	246
	GO TO 201	247
302	SUMQS=SUN*TX*D.11	248
	SUMQT=SUMQS+(SUMQA+SUNQR)/SUMDT	249
94	D(I)=SUMQT	250
	IF(AT.GE.TMAX).OR.(KNTRL.GE.307) GO TO 74	251
999	T=T+DT	252
998	I=I+1	253
	KNTRL=KNTRL+1	254
	GO TO 10	255
74	IMA=1	256
	IMI=1	257
	QMAX=Q(1)	258
	QMIN=Q(1)	259
	DO 2000 IJ=1,I	260
	IF(QMAX.GT.Q(IJ)) GO TO 2001	261
	QMAX=Q(IJ)	262
	IMA=IJ	263
2001	IF(QMIN.LT.Q(IJ)) GO TO 2000	264
	QMIN=Q(IJ)	265
	IMI=IJ	266
2000	CONTINUE	267
95	DDT=QMAX-QMIN	268
	DD(I)=DDT	269
	WRITE(6,114) TO	270
	WRITE(6,112)	271
	WRITE(6,113) QMAX,QMIN,DDT	272
	WRITE(6,499) IMA,IMI	273
91	IF(TO.GE.TOMAX) GO TO 96	274
	TO=TO+AIM	275
	J=J+1	276
	GO TO 4	277
96	DQMA=DQ(1)	278
	DQMI=DQ(I)	279
	JMI=1	280
	JMA=1	281
	DO 1000 IJ=1,J	282
	IF(DQMA.GT.DQ(IJ)) GO TO 1001	283
	DQMA=DQ(IJ)	284
	JMA=IJ	285
1001	IF(DQMI.LT.DQ(IJ)) GO TO 1000	286
	DQMI=DQ(IJ)	287
	JMI=IJ	288
1000	CONTINUE	289
	TOPT=FLOAT(JMI-1)*AIM+BJNTO(KASE)	290
	TO=TOPT-DEVT	291
	TOMAX=TOPT+DEVT	292
	WRITE(6,501) TOPT,DQMI	293
3000	IF(KASE.GE.KK) GO TO 3001	294

READ(5,210)ATM,DEVT	803
KASE=KASE+1	804
DIHTO(KASE)=10	805
GO TO 3	806
99 FORMAT(1H0,1X,6HPERIOD,E15.7)	807
101 FORMAT(1H1,26HSHADOW CALCULATIONS = CASE,13)	808
102 FORMAT(1H0,18HINITIAL CONDITIONS)	809
103 FORMAT(1H0,1X,6HTO ,E15.7,2X,6HDO ,E15.7,2X,6HECC ,E15.7, 12X,6HLON ,E15.7,2X,6HLAT ,E15.7,2X,6HIND ,E15.7,2X,6HRP 2,E15.7,2X,6HS ,E15.7,2X,6HRO ,E15.7,2X,6HEPS ,E15.7, 3/2,6HMAX ,E15.7,2X,6HTDAY ,E15.7,2X,6HYEAR ,E15.7)	810
112 FORMAT(1H ,5X,4HQMAX,11X,4HQMIN,11X,4HQDT)	811
113 FORMAT(1H ,5X,3E15.7)	812
114 FORMAT(1H0,2HT=,F8.3)	813
497 FORMAT(1H ,5X,7HDAYMAX=,15,3X,7HDAYMIN=,15)	814
501 FORMAT(1H0,10HTOPT= ,E15.7,5X,10HQMT= ,E15.7)	815
504 FORMAT(1H0,6H1AUNPH,6X,2HTO,14X,6HDAYMAX,4X,5HSEMAX,10X,6HDAYMIN, 14X,5HSEMIN,12X,3HDSF)	816
505 FORMAT(1H0)	817
509 FORMAT(16,2F8.0)	818
510 FORMAT(2F8.0)	819
511 FORMAT(1H,3X,2CHK,17,14X,5HTOMAX,1X,E15.7,2X,3HATM,3X,E15.7)	820
700 FORMAT(6F12.0,3Z6E12.0)	821
1883 FORMAT(1H0,6HTOPTO ,E15.7,5X,6HTXMIN ,E15.7)	822
1993 FORMAT(1H ,18,2X,E15.7,2,2(18,2X,E15.7),2X,E15.7)	823
300 STOP	824
END	825
SUBROUTINE FPSE(DELTA,PS,SMA,ECC,JF,PSE)	1
DATA DEGRAD/,0.174532937/,SUN/D,147,R/O,347,PI/3.141592657,R0/6378./	2
RDELTA=DELTA*DEGRAD	3
496 FAI=FLOAT(JF)*DEGRAD	4
FLFAI=(FLOAT(JF)+PS)*DEGRAD	5
FLFAI=POS(FLFAI)	6
497 ECOS=1.+ECC*COS(FLFAI)	7
ECC12=1.-ECC**2	8
1 SITAM=.5*PI-ARSIN(ECOS/(SMA+ECC12))	9
SITAM=POS(SITAM)	10
H=SITAM/32.	11
SUNY=0.	12
SUNY=0.	13
DO 550 IX=1,16	14
2 DK=FLOAT(2*IX-1)*H	15
CALL FSUMY(DK,RDELTA,FAI,SUNY,PI,SMA,ECC12,ECOS)	16
SUNY0=SUNY0+.4.*SUNY	17
550 CONTINUE	18
DO 559 IX=1,15	19
DK=FLOAT(2*IX)*H	20
CALL FSUMY(DK,RDELTA,FAI,SUNY,PI,SMA,ECC12,ECOS)	21
SUNYE=SUNYE+.2.*SUNY	22
559 CONTINUE	23
DK=SITAM	24
CALL FSUMY(DK,RDELTA,FAI,SUNY,PI,SMA,ECC12,ECOS)	25
YMAX=SUNY	26
YO=0.	27
560 PSE=(2.*SUN*R/PI)*(H/3.)*(YO+YMAX+SUNYE+SUNY0)	28
RETURN	29
END	30
SUBROUTINE FSUMY(DK,RDELTA,FAI,SUNY,PI,SMA,ECC12,ECOS)	1
1 SINDK=SIN(DK)	2
COSDK=COS(DK)	3
COSDELTA=COS(RDELTA)	4
COSFI=COS(FAI)	5
YKKE=SINDK*SURT(1.-(COSDK*COSFI)**2)	6
IF(YKKE.LT.1.E-9)GO TO 495	7
YK=COSDK*COSDELTA*COSFI/YKKE	8
IF(ABS(YK).GT.1.)GO TO 495	9
FAIM=.5*PI-ARSIN(YK)	10

FALM=POS(FALM)	13
SFALM=SQRT(1.-COS(FALM)**2)	4
GO TO 496	15
495 FALM=PI	6
SFALM=0.	17
496 BI1=SMA*ECC12*COSDK+ECDS	8
BI2=FALM*COSDK*COSDL+COSFI+SINDK*SQRT(1.-((COSDL+COSFI)**2))*SFALM	9
IF(BI1.LT.0..OR.BI2.LT.0.) GO TO 501	10
BUNSI=BI1*BI2*ECOS**2*SINDK	12
BUNBO=((SMA*ECC12)**2+ECOS**2-2.*SMA*ECC12*COSDK*ECOS)**.5	13
SUMY=BUNSI/BUNBO	4
GO TO 502	5
501 SUMY=0.	6
502 RETURN	7
END	28
FUNCTION ARSIN(Y)	1
IF(ABS(Y).GT.1.0) GO TO 1001	2
ARSIN=Y*1./6.*Y**3+3./40.*Y**5+5./112.*Y**7+35./1152.*Y**9+	3
165./2816.*Y**11	4
GO TO 1003	5
1001 WRITE(6,1002) Y	6
1002 FORMAT(1H0,4X,6HYYY ,E16.8)	7
1003 RETURN	8
END	9
FUNCTION POS(X)	1
IF(X.LT.6.2831853) GO TO 2	2
X=X-6.2831853	4
GO TO 1	5
2 IF(X.GE.0.) GO TO 3	6
X=X+6.2831853	8
GO TO 2	9
3 POS=X	10
RETURN	1
END	2



39	0.2280000E+03	100	8657440E+02	80	0.7277293E+02	0.1350147E+02
40	0.2340000E+03	4	8017990E+02	94	0.6709627E+02	0.1358372E+02
41	0.2400000E+03	63	8489553E+02	43	0.6697815E+02	0.1716334E+02
42	0.2460000E+03	82	8019845E+02	1	0.6688242E+02	0.1091604E+02
43	0.2520000E+03	99	8539751E+02	79	0.7228100E+02	0.1288745E+02
44	0.2580000E+03	3	7983580E+02	93	0.6711520E+02	0.1220578E+02
45	0.2640000E+03	63	8509160E+02	43	0.6698093E+02	0.1811067E+02
46	0.2700000E+03	81	8015522E+02	1	0.6687099E+02	0.1094459E+02
47	0.2760000E+03	99	8616949E+02	78	0.72287560E+02	0.1395689E+02
48	0.2820000E+03	99	7975175E+02	42	0.6720762E+02	0.1292106E+02
49	0.2880000E+03	63	8400564E+02	95	0.6697374E+02	0.1745190E+02
50	0.2940000E+03	81	8019693E+02	1	0.6973232E+02	0.1064401E+02
51	0.3000000E+03	99	8644946E+02	82	0.7229081E+02	0.1358455E+02
52	0.3060000E+03	5	7984563E+02	95	0.6706004E+02	0.128558E+02
53	0.3120000E+03	63	8477495E+02	42	0.6699455E+02	0.1778040E+02
54	0.3180000E+03	84	8020442E+02	1	0.6997215E+02	0.1033238E+02
55	0.3240000E+03	100	8762010E+02	82	0.7228289E+02	0.1479112E+02
56	0.3300000E+03	5	7985271E+02	94	0.6703666E+02	0.1261606E+02
57	0.3360000E+03	65	8625387E+02	43	0.6703590E+02	0.1092197E+02
58	0.3420000E+03	83	8046565E+02	21	0.6992107E+02	0.147670E+02
59	0.3480000E+03	100	8764418E+02	81	0.7276988E+02	0.1429675E+02
60	0.3540000E+03	5	7961602E+02	94	0.6704376E+02	0.1296756E+02
61	0.3600000E+03	64	8799852E+02	43	0.6702597E+02	0.2097235E+02
62	0.3660000E+03	83	8068457E+02	20	0.6992596E+02	0.1095638E+02
63	0.3720000E+03	100	8818787E+02	80	0.7275589E+02	0.1543158E+02
64	0.3780000E+03	4	7936362E+02	93	0.6707132E+02	0.1229230E+02
65	0.3840000E+03	63	8961754E+02	43	0.6701529E+02	0.2266071E+02
66	0.3900000E+03	82	8091383E+02	19	0.6994629E+02	0.1091744E+02
67	0.3960000E+03	99	8676114E+02	79	0.7277762E+02	0.1388332E+02
68	0.4020000E+03	3	7905887E+02	93	0.6709618E+02	0.1196269E+02
69	0.4080000E+03	63	9068594E+02	42	0.6689332E+02	0.2389240E+02
70	0.4140000E+03	81	8107383E+02	1	0.6994871E+02	0.1108659E+02
71	0.4200000E+03	99	8740964E+02	78	0.729718E+02	0.1458246E+02
72	0.4260000E+03	7	7879161E+02	93	0.670721E+02	0.165440E+02
73	0.4320000E+03	63	9011008E+02	42	0.6697612E+02	0.2313396E+02
74	0.4380000E+03	82	8094608E+02	22	0.6999228E+02	0.1094679E+02
75	0.4440000E+03	99	8790822E+02	78	0.7267938E+02	0.150287E+02
76	0.4500000E+03	6	788570E+02	94	0.6712889E+02	0.17286E+02
77	0.4560000E+03	63	8942287E+02	42	0.6697705E+02	0.224452E+02
78	0.4620000E+03	82	8088954E+02	22	0.6994087E+02	0.104867E+02
79	0.4680000E+03	99	8802983E+02	82	0.7269671E+02	0.153312E+02
80	0.4740000E+03	9	7891147E+02	94	0.6707066E+02	0.144024E+02
81	0.4800000E+03	65	9114569E+02	41	0.6699815E+02	0.244759E+02
82	0.4860000E+03	83	8109186E+02	21	0.6992772E+02	0.146414E+02
83	0.4920000E+03	100	8954533E+02	81	0.7204459E+02	0.1630078E+02
84	0.4980000E+03	5	7876333E+02	94	0.6709339E+02	0.14102E+02
85	0.5040000E+03	64	9503815E+02	42	0.6704881E+02	0.179454E+02
86	0.5100000E+03	83	8133879E+02	20	0.6997920E+02	0.145959E+02
87	0.5160000E+03	100	8989810E+02	80	0.7277594E+02	0.172246E+02

TOPIC	U.900000E+1	1XMIN	U.9545364E+01
88	0.5221000E+3	4	.7856229E+02
89	0.5220000E+3	64	.1000000E+03
90	0.5340000E+3	62	.6159924E+02
91	0.5400000E+3	69	.8815915E+02
92	0.5460000E+3	3	.7829337E+02
93	0.5520000E+3	64	.1000000E+03
94	0.5580000E+3	82	.8175566E+02
95	0.5640000E+3	93	.6869191E+02
96	0.5700000E+3	3	.7806319E+02
97	0.5760000E+3	64	.1000000E+03
98	0.5820000E+3	81	.8197125E+02
99	0.5880000E+3	69	.8921318E+02
100	0.5940000E+3	6	.7814442E+02
101	0.6000000E+3	65	.1000000E+03
102	0.6060000E+3	82	.8166567E+02
103	0.6120000E+3	93	.6944870E+02
104	0.6180000E+3	44	.7816633E+02
105	0.6240000E+3	64	.1000000E+03
106	0.6300000E+3	83	.8170357E+02
107	0.6360000E+3	100	.1000000E+03
108	0.6420000E+3	44	.7860550E+02
109	0.6480000E+3	66	.1000000E+03
110	0.6540000E+3	83	.8195198E+02
111	0.6600000E+3	100	.1000000E+03
112	0.6660000E+3	45	.7826819E+02
113	0.6720000E+3	66	.1000000E+03
114	0.6780000E+3	82	.8224109E+02
115	0.6840000E+3	93	.8950531E+02
116	0.6900000E+3	43	.7893156E+02
117	0.6960000E+3	64	.1000000E+03
118	0.7020000E+3	82	.8244836E+02
119	0.7080000E+3	99	.8972723E+02
120	0.7140000E+3	43	.7960452E+02
121	0.7200000E+3	67	.1000000E+03
122		41	0.6700003E+02
123		93	0.6758804E+02
124		42	0.6714280E+02
125		20	0.7017001E+02
126		79	0.7217771E+02
127		93	0.6706270E+02
128		42	0.6711241E+02
129		24	0.7007547E+02
130		79	0.7200598E+02
131		92	0.6711429E+02
132		42	0.6701105E+02
133		78	0.6920740E+02
134		92	0.6715143E+02
135		41	0.6697870E+02
136		22	0.6955624E+02
137		77	0.7288994E+02
138		94	0.6713506E+02
139		41	0.6697379E+02
140		22	0.6998108E+02
141		81	0.7290021E+02
142		93	0.6709265E+02
143		41	0.6699817E+02
144		21	0.7002658E+02
145		80	0.7280720E+02
146		93	0.6706287E+02
147		41	0.6704048E+02
148		20	0.7015544E+02
149		80	0.7281883E+02
150		93	0.6708466E+02
151		42	0.6705327E+02
152		24	0.7005920E+02
153		79	0.7279865E+02
154		92	0.6709668E+02
155		41	0.6700003E+02
156		93	0.6758804E+02
157		42	0.6714280E+02
158		20	0.7017001E+02
159		79	0.7217771E+02
160		93	0.6706270E+02
161		42	0.6711241E+02
162		24	0.7007547E+02
163		79	0.7200598E+02
164		92	0.6711429E+02
165		42	0.6701105E+02
166		78	0.6920740E+02
167		92	0.6715143E+02
168		41	0.6697870E+02
169		22	0.6955624E+02
170		77	0.7288994E+02
171		94	0.6713506E+02
172		41	0.6697379E+02
173		22	0.6998108E+02
174		81	0.7290021E+02
175		93	0.6709265E+02
176		41	0.6699817E+02
177		21	0.7002658E+02
178		80	0.7280720E+02
179		93	0.6706287E+02
180		41	0.6704048E+02
181		20	0.7015544E+02
182		80	0.7281883E+02
183		93	0.6708466E+02
184		42	0.6705327E+02
185		24	0.7005920E+02
186		79	0.7279865E+02
187		92	0.6709668E+02
188		41	0.6700003E+02



SHADOW CALCULATIONS - CASE 2

INITIAL CONDITIONS

TO	DO	EQC	LEN	LAT
0.2000000E+00	0.1330000E+03	0.1538010E+00	0.1500000E+03	0.2800000E+02
INC	RP	S	RU	EPS
0.5500000E+02	0.5878000E+04	-0.1000000E+01	0.6578000E+04	0.2345000E+02
IMAX	IMIN	YEAR	ATM	
0.1000000E+03	0.1000000E+01	0.1970000E+04	0.5000000E+00	
KK	YOMAX			
2	0.1000000E+02			
PERIOD				
0.20225455E+01				

I=	QMAX	QMIN	QDDT
1	0.1499688E+00	0.1254622E+00	0.2452666E-01
	DAYMAX= 31	DAYMIN= 8	
1	0.1450697E+00	0.1255567E+00	0.1953307E-01
	DAYMAX= 33	DAYMIN= 9	
1	0.1428943E+00	0.1258191E+00	0.1657519E-01
	DAYMAX= 34	DAYMIN= 10	
1	0.1402280E+00	0.1262765E+00	0.1395148E-01
	DAYMAX= 36	DAYMIN= 10	
1	0.1389158E+00	0.1266530E+00	0.1226285E-01
	DAYMAX= 38	DAYMIN= 15	
1	0.1375117E+00	0.1270346E+00	0.1047710E-01
	DAYMAX= 39	DAYMIN= 15	
1	0.1371466E+00	0.1275757E+00	0.9572983E-02
	DAYMAX= 79	DAYMIN= 15	
1	0.1372078E+00	0.1281142E+00	0.9126574E-02
	DAYMAX= 79	DAYMIN= 4	

T=	0.000	QMIN	DQDI
QMAX	0.1172853E+00	QMIN	0.128162E+00
DAYMAX=	80	DAYMIN=	1
T=	6.500	QMIN	DQDI
QMAX	0.1573286E+00	QMIN	0.128245E+00
DAYMAX=	85	DAYMIN=	1
T=	7.000	QMIN	DQDI
QMAX	0.1374956E+00	QMIN	0.128427E+00
DAYMAX=	85	DAYMIN=	1
T=	7.500	QMIN	DQDI
QMAX	0.1575915E+00	QMIN	0.128691E+00
DAYMAX=	86	DAYMIN=	1
T=	8.000	QMIN	DQDI
QMAX	0.1575223E+00	QMIN	0.1290285E+00
DAYMAX=	86	DAYMIN=	1
T=	8.500	QMIN	DQDI
QMAX	0.157756E+00	QMIN	0.129425E+00
DAYMAX=	91	DAYMIN=	1
T=	9.000	QMIN	DQDI
QMAX	0.1579751E+00	QMIN	0.1298878E+00
DAYMAX=	92	DAYMIN=	1
T=	9.500	QMIN	DQDI
QMAX	0.158115E+00	QMIN	0.130374E+00
DAYMAX=	92	DAYMIN=	2
T=	10.000	QMIN	DQDI
QMAX	0.1582672E+00	QMIN	0.1308754E+00
DAYMAX=	94	DAYMIN=	2
T=	10.500	QMIN	DQDI
QMAX	0.1585574E+00	QMIN	0.1314093E+00
DAYMAX=	97	DAYMIN=	2

T= 11.000	QMAX	0.1391651E+00	QMIN	0.1319584E+00	DQDT	0.7206708E-02
	DAYMAX=	96	DAYMIN=	3		
T= 11.500	QMAX	0.1414609E+00	QMIN	0.1316011E+00	DQDT	0.9859800E-02
	DAYMAX=	98	DAYMIN=	82		
T= 12.000	QMAX	0.1435350E+00	QMIN	0.1309966E+00	DQDT	0.1253539E-01
	DAYMAX=	100	DAYMIN=	82		
T= 12.500	QMAX	0.1451302E+00	QMIN	0.1304213E+00	DQDT	0.1470897E-01
	DAYMAX=	101	DAYMIN=	83		
T= 13.000	QMAX	0.1456097E+00	QMIN	0.1298555E+00	DQDT	0.1575419E-01
	DAYMAX=	101	DAYMIN=	83		
T= 13.500	QMAX	0.1458154E+00	QMIN	0.1293279E+00	DQDT	0.1648751E-01
	DAYMAX=	101	DAYMIN=	88		
T= 14.000	QMAX	0.1450308E+00	QMIN	0.1285984E+00	DQDT	0.1643334E-01
	DAYMAX=	101	DAYMIN=	88		
T= 14.500	QMAX	0.1430539E+00	QMIN	0.1279693E+00	DQDT	0.1508459E-01
	DAYMAX=	101	DAYMIN=	88		
TOP1=	0.1050000E+02		DOM1=	0.7128090E-02		

軌道 [2]

SHADON CALCULATIONS - CASE 1

INITIAL CONDITIONS

TIME 0.000000E+00 NO 1.000000E+00 ECC 0.4940208E-01 LON 0.1500000E+03 LAT 0.2600000E+02  
 INC 0.000000E+00 PS 0.6828000E+04 S -0.1000000E+01 RO 0.6300000E+01 EPS 0.2000000E+02  
 MAX 0.000000E+00 DAY 0.0100000E+01 YEAR 0.1197000E+04  
 KE1 0.000000E+00 MAX 0.2200000E+03 STM 0.6000000E+01

PERIOD 0.1197000E+04

LAUNCH	TIME	SRMAX	SRMIN	DSR
1	0.000000E+00	1.724481E+02	0.6642135E+02	0.5920406E+01
2	0.000000E+00	7.084429E+02	0.6510387E+02	0.5708449E+01
3	0.120000E+02	7.104492E+02	0.6462530E+02	0.5619583E+01
4	0.150000E+02	7.427157E+02	0.6462656E+02	0.5400700E+02
5	0.240000E+02	7.445120E+02	0.6460655E+02	0.563650E+01
6	0.330000E+02	7.069473E+02	0.6510029E+02	0.54438E+01
7	0.500000E+02	6.709230E+02	0.6442697E+02	0.650006E+01
8	0.700000E+02	6.7430054E+02	0.6515534E+02	0.510530E+02
9	0.900000E+02	6.708445E+02	0.649854E+02	0.555919E+01
10	0.530000E+02	6.704498E+02	0.651009E+02	0.520870E+01
11	0.000000E+02	6.7123907E+02	0.649150E+02	0.58759E+01
12	0.860000E+02	6.745835E+02	0.646024E+02	0.610761E+02
13	0.200000E+02	6.742290E+02	0.6443221E+02	0.596809E+01
14	0.740000E+02	6.702159E+02	0.651748E+02	0.604112E+01
15	0.440000E+02	6.7149471E+02	0.6407651E+02	0.71815E+01
16	0.900000E+02	6.744553E+02	0.6442816E+02	0.706835E+02
17	0.360000E+02	6.744599E+02	0.6446410E+02	0.701002E+02
18	0.100000E+02	6.704260E+02	0.6515009E+02	0.509250E+01
19	0.080000E+02	6.718488E+02	0.6448724E+02	0.746174E+01
20	0.2144000E+03	6.75559E+02	0.644858E+02	0.6865E+02
21	0.200000E+02	6.748346E+02	0.6404291E+02	0.917E+02
22	0.125000E+03	6.703583E+02	0.6515102E+02	0.7367E+01
23	0.152000E+03	6.719146E+02	0.6440591E+02	0.785524E+01
24	0.158000E+03	6.745857E+02	0.642782E+02	0.700928E+02
25	0.144000E+03	6.742742E+02	0.6404129E+02	0.99309E+01
26	0.150000E+03	6.704373E+02	0.651976E+02	0.92024E+01
27	0.155000E+03	6.721753E+02	0.6442659E+02	0.719023E+01
28	0.162000E+03	6.737406E+02	0.642758E+02	0.70659E+02
29	0.158000E+03	6.742034E+02	0.6441048E+02	0.88839E+01
30	0.174000E+03	6.704934E+02	0.652752E+02	0.52830E+02
31	0.185000E+03	6.720196E+02	0.6441391E+02	0.76092E+02
32	0.192000E+03	6.744097E+02	0.6430295E+02	0.7979E+02
33	0.198000E+03	6.7044038E+02	0.6530993E+02	0.510453E+01
34	0.204000E+03	6.724135E+02	0.643854E+02	0.77283E+01
35	0.210000E+03	6.757940E+02	0.644997E+02	0.1446E+02
36	0.216000E+03	6.7479367E+02	0.643615E+02	0.20672E+02
37	0.222000E+03	6.7054804E+02	0.653856E+02	0.512434E+01

39	0.2280000E+03	74	7.238914E+02	92	0.6436545E+02	0.40233697E+01
40	0.2340000E+03	88	7.626461E+02	71	0.6425832E+02	0.1200330E+02
41	0.2400000E+03	101	7.509193E+02	32	0.6431976E+02	0.1077217E+02
42	0.2460000E+03	62	7.071491E+02	1	0.6529977E+02	0.5414734E+01
43	0.2520000E+03	74	7.280916E+02	92	0.6436914E+02	0.6440018E+01
44	0.2580000E+03	89	7.664638E+02	71	0.6428079E+02	0.128676E+02
45	0.2640000E+03	101	7.515731E+02	2	0.6432547E+02	0.1083154E+02
46	0.2700000E+03	61	7.086591E+02	1	0.6528134E+02	0.5584564E+01
47	0.2760000E+03	75	7.083389E+02	92	0.6439249E+02	0.6443405E+01
48	0.2820000E+03	89	7.603346E+02	71	0.6428995E+02	0.117453E+02
49	0.2880000E+03	101	7.502345E+02	33	0.6434032E+02	0.1068513E+02
50	0.2940000E+03	61	7.100395E+02	1	0.6531850E+02	0.5685089E+01
51	0.3000000E+03	74	7.340111E+02	92	0.6441347E+02	0.6987640E+01
52	0.3060000E+03	89	7.607074E+02	71	0.6427454E+02	0.1179620E+02
53	0.3120000E+03	101	7.489798E+02	33	0.6432439E+02	0.105665E+02
54	0.3180000E+03	60	7.106381E+02	15	0.6531276E+02	0.5750854E+01
55	0.3240000E+03	74	7.325656E+02	93	0.6440442E+02	0.582144E+01
56	0.3300000E+03	89	7.647160E+02	71	0.6425871E+02	0.1221289E+02
57	0.3360000E+03	101	7.498184E+02	33	0.6432907E+02	0.1065277E+02
58	0.3420000E+03	60	7.104755E+02	15	0.6533267E+02	0.5714874E+01
59	0.3480000E+03	74	7.312489E+02	93	0.6437221E+02	0.8752487E+01
60	0.3540000E+03	89	7.070708E+02	71	0.6426675E+02	0.1120685E+02
61	0.3600000E+03	101	7.531117E+02	32	0.6430214E+02	0.1100923E+02
62	0.3660000E+03	62	7.102197E+02	15	0.6539128E+02	0.560064E+01
63	0.3720000E+03	76	7.336835E+02	93	0.6436418E+02	0.9004166E+01
64	0.3780000E+03	89	7.642406E+02	70	0.6424525E+02	0.1327861E+02
65	0.3840000E+03	101	7.565227E+02	32	0.6429823E+02	0.118545E+02
66	0.3900000E+03	62	7.123961E+02	17	0.654101E+02	0.5829514E+01
67	0.3960000E+03	74	7.382494E+02	92	0.6431805E+02	0.9446884E+01
68	0.4020000E+03	88	7.315737E+02	70	0.6425459E+02	0.1390273E+02
69	0.4080000E+03	101	7.579226E+02	32	0.6433984E+02	0.114727E+02
70	0.4140000E+03	62	7.140822E+02	17	0.6536913E+02	0.603903E+01
71	0.4200000E+03	74	7.240756E+02	92	0.6433273E+02	0.1011479E+02
72	0.4260000E+03	88	7.827921E+02	70	0.6427782E+02	0.1400139E+02
73	0.4320000E+03	101	7.757181E+02	2	0.6434062E+02	0.137749E+02
74	0.4380000E+03	61	7.159796E+02	16	0.6535018E+02	0.6267776E+01
75	0.4440000E+03	74	7.469438E+02	93	0.6441182E+02	0.1028256E+02
76	0.4500000E+03	89	7.752023E+02	71	0.6428003E+02	0.1324020E+02
77	0.4560000E+03	101	7.556329E+02	33	0.6435069E+02	0.1121266E+02
78	0.4620000E+03	60	7.165653E+02	16	0.6538446E+02	0.6338064E+01
79	0.4680000E+03	74	7.462170E+02	93	0.6432977E+02	0.1022673E+02
80	0.4740000E+03	89	7.778969E+02	71	0.6427829E+02	0.13351140E+02
81	0.4800000E+03	101	7.554531E+02	32	0.6433127E+02	0.1141404E+02
82	0.4860000E+03	60	7.170090E+02	15	0.6537228E+02	0.633618E+01
83	0.4920000E+03	74	7.442881E+02	93	0.6436366E+02	0.1086514E+02
84	0.4980000E+03	89	7.835962E+02	70	0.6425676E+02	0.141026E+02
85	0.5040000E+03	101	7.578661E+02	32	0.6431021E+02	0.1147348E+02
86	0.5100000E+03	60	7.161055E+02	15	0.6541054E+02	0.6290012E+01
87	0.5160000E+03	74	7.446646E+02	93	0.6439927E+02	0.1031719E+02

東大宇宙研一室

TOP10	0.780000E+02	IX11	1.504122E+01
85	0.524000E+03	84	7.689018E+02
86	0.528000E+03	85	7.618485E+02
90	0.540000E+03	62	7.179112E+02
91	0.548000E+03	74	7.491830E+02
92	0.546000E+03	88	7.763335E+02
94	0.552000E+03	101	7.620501E+02
94	0.538000E+03	62	7.199841E+02
95	0.554000E+03	74	7.585926E+02
99	0.570000E+03	86	7.792484E+02
97	0.576000E+03	101	7.680339E+02
94	0.582000E+03	61	7.220251E+02
99	0.568000E+03	74	7.616979E+02
101	0.594000E+03	89	7.904251E+02
101	0.600000E+03	101	7.616979E+02
102	0.606000E+03	93	7.829276E+02
105	0.612000E+03	74	7.607101E+02
104	0.618000E+03	86	7.716491E+02
106	0.624000E+03	101	7.697693E+02
106	0.630000E+03	61	7.283191E+02
107	0.636000E+03	74	7.587247E+02
108	0.642000E+03	82	7.743391E+02
109	0.648000E+03	86	7.692106E+02
110	0.654000E+03	69	7.722083E+02
111	0.660000E+03	74	7.677458E+02
112	0.666000E+03	89	7.693821E+02
113	0.672000E+03	101	7.647992E+02
114	0.678000E+03	63	7.256555E+02
115	0.684000E+03	74	7.606891E+02
116	0.690000E+03	89	7.610293E+02
117	0.696000E+03	101	7.568339E+02
118	0.702000E+03	62	7.259744E+02
119	0.708000E+03	74	7.674722E+02
120	0.714000E+03	88	7.614634E+02
121	0.720000E+03	101	7.675011E+02
		61	7.643144E+02

SHADOW CALCULATIONS - CASE 2

INITIAL CONDITIONS

TO	NO	EQ	LO	LAT
0.749000E+02	02	0.138600E+03	0.491020E-01	0.150000E+03
INC	PP	0.68780-0E+04	RD	0.657800E+04
TRAX	TRAY	0.170000E+01	YEAR	0.1970000E+04
KK	TOMAX	0.000000E+00	ATM	0.500000E+00
PERIOD	0.376000E+01			

T= 74.000	QMIN	QOD1
QMAX	0.1082206E+03	0.6822785E-02
DAYMAX= 22	DAYMIN= 6	
T= 74.500	QMIN	QOD1
QMAX	0.1876677E+03	0.6286098E-02
DAYMAX= 28	DAYMIN= 7	
T= 75.000	QMIN	QOD1
QMAX	0.1577966E+03	0.5556617E-02
DAYMAX= 25	DAYMIN= 8	
T= 75.500	QMIN	QOD1
QMAX	0.1306702E+03	0.5059958E-02
DAYMAX= 27	DAYMIN= 9	
T= 76.000	QMIN	QOD1
QMAX	0.1065381E+03	0.483319E-02
DAYMAX= 24	DAYMIN= 11	
T= 76.500	QMIN	QOD1
QMAX	0.1362129E+03	0.4424830E-02
DAYMAX= 20	DAYMIN= 12	
T= 77.000	QMIN	QOD1
QMAX	0.1033592E+03	0.4015177E-02
DAYMAX= 23	DAYMIN= 13	
T= 77.500	QMIN	QOD1
QMAX	0.1304026E+03	0.354600E-02
DAYMAX= 30	DAYMIN= 15	

T = 78.000	GMAX	0.135643E+00	GMIN	0.1321583E+00	DDDT	0.8275454E+02
	DAYMAX	31	DAYMIN	4		
T = 78.500	GMAX	0.1355519E+00	GMIN	0.1320792E+00	DDDT	0.8352344E+02
	DAYMAX	33	DAYMIN	100		
T = 79.000	GMAX	0.1349218E+00	GMIN	0.1319448E+00	DDDT	0.8397018E+02
	DAYMAX	34	DAYMIN	104		
T = 79.500	GMAX	0.1335160E+00	GMIN	0.1318195E+00	DDDT	0.8533819E+02
	DAYMAX	35	DAYMIN	104		
T = 80.000	GMAX	0.1325053E+00	GMIN	0.1317354E+00	DDDT	0.859873E+02
	DAYMAX	35	DAYMIN	104		
T = 80.500	GMAX	0.132245E+00	GMIN	0.1316828E+00	DDDT	0.8549665E+02
	DAYMAX	36	DAYMIN	104		
T = 81.000	GMAX	0.1315929E+00	GMIN	0.131661E+00	DDDT	0.8734916E+02
	DAYMAX	39	DAYMIN	104		
T = 81.500	GMAX	0.130868E+00	GMIN	0.1316691E+00	DDDT	0.917128E+02
	DAYMAX	69	DAYMIN	114		
T = 82.000	GMAX	0.1301407E+00	GMIN	0.131670E+00	DDDT	0.9403279E+02
	DAYMAX	70	DAYMIN	104		
T = 82.500	GMAX	0.1294125E+00	GMIN	0.131670E+00	DDDT	0.9327545E+02
	DAYMAX	70	DAYMIN	104		