

UDC 521.1:
521.4:
529.7:
629.783

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-359

宇宙飛行体の汎用軌道解析用プログラム

“STANPS”

[1] 人工衛星および惑星間宇宙船の軌道生成プログラム

松島 弘一 ・ 志 甫 徹
村田 正秋 ・ 武内 澄夫

1978年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	2
2. 記 号	4
3. 特殊摂動法による人工衛星の軌道生成 (STANPS-B)	4
3.1 時系および座標系	4
3.1.1 時 系	4
3.1.1.1 基本的データ	5
3.1.1.2 原子時 (TAI) を基準にした時系変換	7
3.1.2 座標系	7
3.1.2.1 座標系の種類	7
3.1.2.2 座標系の変換	10
3.2 運動方程式	12
3.2.1 地球重力ポテンシャルの2次以上の項による加速度	14
3.2.2 月および太陽の引力による加速度	15
3.2.3 太陽輻射圧による加速度	36
3.2.4 大気抵抗によって生じる加速度	37
3.2.5 制御力によって生じる加速度	40
3.2.5.1 Impulsive thrust	40
3.2.5.2 Medium thrust	53
3.2.5.3 Low thrust	53
3.3 数値積分法	53
3.3.1 Gauss-Jackson 法	55
3.3.2 ステップサイズ制御	58
4. 特殊摂動法による惑星間宇宙船の軌道生成 (STANPS-C)	61
4.1 時系および座標系	61
4.1.1 時 系	61
4.1.2 座標系	61
4.1.2.1 座標系の種類	61
4.1.2.2 座標系の変換	61
4.2 運動方程式	67
4.2.1 運動方程式 I における摂動加速度	69
4.2.1.1 惑星を質点とする重力による摂動加速度	69
4.2.1.2 一般相対性理論の効果による摂動加速度	70
4.2.1.3 太陽輻射による摂動加速度	70
4.2.1.4 太陽の J_2 項による摂動加速度	71
4.2.1.5 制御推力による加速度	72
4.2.2 運動方程式 II における摂動加速度	72
4.2.2.1 太陽を質点とする重力による摂動加速度	72
4.2.2.2 惑星を質点とする重力による摂動加速度	72
4.2.2.3 一般相対性理論の効果による摂動加速度	72
4.2.2.4 太陽輻射による摂動加速度	73
4.2.2.5 制御推力による加速度	73
4.2.2.6 中心惑星 (または月) の重力ポテンシャルの高次項による摂動加速度	73
4.2.3 定 数	74

5. 入力および出力	74
5.1 STANPS-B の入力および出力	75
5.2 STANPS-C の入力および出力	78
5.3 具体的な出力例	79
5.3.1 STANPS-B の出力例	79
5.3.2 STANPS-C の出力例	84
6. むすび	84

宇宙飛行体の汎用軌道解析用プログラム “STANPS”

〔1〕 人工衛星および惑星間宇宙船の軌道生成プログラム

松島弘一**・志甫徹**
村田正秋**・武内澄夫***

Space Trajectory and Mission Analysis Program
“STANPS”.

[1] Programs for Orbit Generation of Artificial Satellite
and Interplanetary Spacecraft.

By

Koichi MATSUSHIMA, Toru SHIHO, Masaaki MURATA
and Sumio TAKEUCHI

Space trajectory and mission analysis program system “STANPS”, which has been completed at the National Aerospace Laboratory, consists of the following six large subprograms (A-F) and data file.

STANPS - A ; Orbit generation of an artificial Earth satellite by general perturbation theory (Lagrange's Planetary equations).

STANPS - B ; Orbit generation of an artificial Earth satellite by special perturbation theory (Cowell's Method) with the Gauss-Jackson numerical integration formula.

STANPS - C ; Trajectory generation of an interplanetary spacecraft by Cowell's method with the Gauss-Jackson numerical integration formula.

STANPS - D ; Generation of Lunar and planetary ephemerides by numerically integrating the Cowell-type equations of motion of the Moon and nine planets with the Gauss-Jackson formula.

STANPS - E ; Navigation systems (Observation and trajectory estimation processes with the function of guidance and control).

STANPS - F ; Formation of the basic table of atmospheric density model J-71 and generation of the ephemerides of the Sun and Moon by the theories of Newcomb and Brown for STANPS - B.

STANPS -

- DATA FILE ;
1. Lunar and planetary ephemerides generated by STANPS - D.
 2. Atmospheric density table generated by STANPS - F.
 3. Data of Universal time and the coordinates of the pole by BIH.
 4. Orbital elements of asteroids (2016) and short-period comets (88).
 5. A catalogue of about 6000 stars.

*昭和53年6月16日 受付

計測部 *宇宙研究グループ

In this report, we document mathematical models for STANPS-B, STANPS-C and STANPS-F and how to use them.

1. まえがき

人工衛星および惑星間宇宙船の運動解析，誘導制御，およびミッション解析等に関連する研究に用いるための，多目的シミュレーション・プログラム“STANPS”

(Space Trajectory and Mission Analysis Program System) の作製を行った。このプログラムは人工衛星および宇宙船の軌道を生成するプログラムを基幹として，レーダーや光学センサによる観測系，カルマン・フィルタなどの情報処理系および誘導制御系からなる航法系のプログラム（言語はフォートランを使用）を配したもので，全体で約40,000 ステップ程の大きさである。STANPS 全体の構成は表1.1に示した通りである。このプログラムは単に軌道生成やミッション解析に用いるだけでなく，運動方程式や数値積分法の検討，航法系における種々のセンサや情報処理，誘導手法の比較など，現在のプログラム構成の一部を変更して使用することもできるように計画された。この報告では軌道生成プログラムのうち，特殊摂動理論による人工衛星の軌道生成プログラムSTANPS-Bと，惑星間宇宙船の軌道生成プログラムSTANPS-CおよびSTANPS-Fの内容について述べたものである。プログラムに用いられた式はすべて示したが，それらの導出については非常に長くなるので省略した。

STANPS-B

人工衛星の運動を記述する方程式はNewtonの法則から出発して，摂動力の精密な定式化は別として，容易に求めることができる。しかし問題はいかにしてこの方程式の解を求めるかにある。三体問題，あるいは多体問題の解析的アプローチは長い間の天体力学の主題であるが，ここで築き上げられた理論を基礎として人工衛星の運動を求める一般摂動理論が作られている。この手法は長期間にわたる運動の見通しを立てたり，運動の様々な特徴を解析するのに非常に偉力を発揮するわけであるが，地球を周る人工衛星のように高度も低く，大気抵抗や太陽輻射圧のような非保存力の他に制御力も加ってくると，式の複雑さは大変なものとなる。

一方，電子計算機の進歩と共に，数値積分の速度も速くなり，また高精度な積分法もいろいろ考えられてきた。運動方程式を直接，数値積分することによって解を求める特殊摂動論は，人工衛星の高精度な運動を知るのに非常に有効で，かつ実用的なものである。そこでプログラ

ムSTANPSでは，人工衛星の軌道生成の部分は一般摂動論によるものと，特殊摂動論によるものとの二つを用意して，それぞれの手法の特徴を十分に活用できるようにしたわけである。

STANPS-Bは運動方程式（2階の常微分方程式）をGauss-Jackson法によって積分することにより，軌道の変化を求めるもので，各摂動力は現在考えられる最大の厳密さで定式化してある。数値積分のステップサイズは任意に固定することもできるが，入力カードで与えた制限値内に打ち切り誤差をおさめるように，自動的なステップサイズ制御の機能も持たしてある。ただ数値積分における打ち切り誤差の推定については困難な問題が多く，あまり信頼を置くことは危険であろう。

基準座標系は1950.0平均赤道面座標系にとってあるが，地球固定座標系との変換の際には，地球自転の詳しいデータが必要になる。これは地球の自転が不規則な変動をともなっているためで，このデータは世界時と原子時との差の形で公表されている。普通，この時系列データを補間して用いることになるわけであるが，このプログラムでは過去のデータの調和解析から得られた周期項と，最小二乗法による補正を加えて，計算で求めるようになっている。

STANPS-C

惑星間を飛行する宇宙船の軌道計算も基本的には人工衛星の場合と同じである。ただ運動を記述するための中心天体を地球から太陽へ，そしてまた惑星にと変えていくことと，考慮する摂動力が少し異なるという違いがある。STANPS-Bの場合と同様，このプログラムにおいても運動方程式をGauss-Jackson法によって積分し，宇宙船の軌道を求めるものであるが，自動的なステップサイズ制御は行っていない。これは打ち切り誤差の推定に十分な信頼がおけないためであるが，そのかわりに任意の時刻にステップサイズの大きさを変えられるようにしてある。またこのプログラムでは時間を過去に遡って軌道を求めることができるようになっている。これは数値積分の誤差を調べるのに非常に有効であるし，またある惑星への軌道の初期条件をきめるのにも役立つであろう。

以上は二つのプログラムの機能の特徴を簡単に示したものであるが，各プログラムの内容（理論式）を3および4章で，入力制御カードおよび具体的計算例を5章で示す。

表 1.1 STANPS の概要

区分	内 容	方 式		備 考
		解 法	摂 動 力	
STANPS-A	人工衛星の軌道生成系 (一般摂動法)	Lagrange の惑星方程式の一般項表示	地球重力場の歪み 大気抵抗 月・太陽の引力 太陽輻射圧 制御力	<ul style="list-style-type: none"> • 長期間にわたる人工衛星の見通しを立てるのに適している。
STANPS-B	人工衛星の軌道生成系 (特別摂動法)	Cowell 法 Gauss-Jackson 法による数値積分。(4~12次公式選択可能, ステップサイズ可変)	地球重力場の歪み 大気抵抗 月・太陽の引力 太陽輻射圧 制御力	<ul style="list-style-type: none"> • 摂動力の各種の組合せを選択可能 • 重力ポテンシャル調和係数は最大22次まで選択可能。 • ステップサイズ制御機能あり。
STANPS-C	惑星間宇宙船の軌道生成系 (特別摂動法)	Cowell 法 数値積分法は同上	太陽・惑星の引力 太陽輻射圧 太陽重力ポテンシャル J_2 項 一般相対性理論の効果 近くの惑星(地球を含む)の重力場の歪み 制御力	<ul style="list-style-type: none"> • 目標天体は月および9惑星のうちから任意に選択でき、軌道の各フェーズにおける中心天体は自動的に切換えられる。 • 逆時間軌道生成も可能。
STANPS-D	月および9惑星のエフェメリス生成系	Cowell 法 数値積分法は同上	太陽・惑星の引力 太陽輻射圧 太陽重力ポテンシャル J_2 項 一般相対性理論の効果 近くの惑星重力場の歪み	<ul style="list-style-type: none"> • 太陽中心の1950.0年の平均(または瞬時)赤道面座標系における月、惑星の位置、速度、加速度のベクトル、ケプラー6要素、赤経、赤緯が任意の時間々隔で計算される。
STANPS-E	誘導制御を伴う宇宙航法系	観測系: レーダー追跡 (range radar と range and range rate radar の選択可能。追跡局は最大3局) 惑星直径観測の光学センサー (レーダー追跡と併用可能) 情報処理系: 標準的カルマン・フィルター、観測値差分方式の有色雑音フィルター 誘導制御系: 摂動型誘導方式	<ul style="list-style-type: none"> • 利用者が自分の研究したい部分のサブプログラムを用意して、その部分を交換して使用することを前提としている。 • 観測機器の追加、交換可能 • 他方式のフィルターに交換可能 • 誘導制御系も交換可能 • 制御誤差は大きさと方向にランダムノイズを付加できる。 	
STANPS-F	大気密度の basic table 生成系	Jacchia-71年モデル 高度 (90~1,000km) と大気外圏温度 (500~2,000 K) の2変数の関数として大気密度を表示		生成した basic table のデータを用いて、地磁気活動、季節、緯度、半年周期、太陽活動、日周変化による変動を考慮して補正を行って使用する。
	月・太陽のエフェメリス生成系	Newcomb, Brown の方式 (一般摂動法)		<ul style="list-style-type: none"> • STANPS-D 作製以前に完成 • STANPS-A, B で使用
STANPS データファイル	月・惑星のエフェメリス	STANPS-D を用いて、オフラインでデータファイルを作製		
	大気密度テーブル	STANPS-F を用いて、オフラインでデータファイルを作製		実際に使う時は、STANPS-F の備考欄に記した諸種の補正を行なう。
	BIHデータ	地球の極運動の位置変動量、時系変換用データ (UT2-UT1, UT1-UTC, UT1-TAI)		パリ国際報時局 (BIH) の公表データ (1962年1月0日以降5日刻みのデータ)
	恒星、小惑星、周期彗星データ	6等星以上の恒星約6,000、小惑星1,861個 (1976) 周期彗星88個 (1976) のカタログ		

2. 記 号

a	: 軌道半長径
AU	: 天文単位
C	: 光速
$C_{n,m}$: 重力ポテンシャル定数
D	: 月の平均離角
e	: 軌道の離心率
ET	: 暦表時
F	: 月の平均黄緯引数
$F_{10.7}$: 10.7 cm 波長の solar flux の指標
g'	: 金星の平均近点離角
g''	: 火星の "
g^{IV}	: 木星の "
g^V	: 土星の "
G_{m_i}	: 天体の引力定数
GMST	: グリニジ平均恒星時
GAST	: グリニジ視恒星時
H_n	: 座標変換行列
i	: 軌道傾斜角
J	: 木星の日心平均黄経
J_n	: 重力ポテンシャル定数
k	: ガウス定数
K_p	: 地磁気の変化の指標
L	: 月の平均黄経
L'	: 太陽の平均黄経
l	: 月の平均近点離角
l'	: 太陽の平均近点離角
M	: 平均近点離角
N	: 章動行列
P	: 歳差行列
P_o	: 太陽定数
R_S	: 太陽の赤道半径
R_E	: 地球の赤道半径
r	: 位置ベクトル
\dot{r}	: 速度ベクトル
\ddot{r}	: 加速度ベクトル
$S_{h,m}$: 重力ポテンシャル定数
S_1	: Delayed IR (赤外線) の輻射定数
TAI	: 国際原子時
T_∞	: 大気外圏温度
UT1	: 世界時
UTC	: 協定世界時
V	: 金星の日心平均黄経
α	: 赤経

α_i	: 視赤経
r_{dE}	: 地球のアルベド
r_d	: 反射係数 (Diffuse 成分)
r_s	: " (Specular 成分)
δ	: 赤緯
δ_i	: 視赤緯
ϵ_i	: 真黄道傾角
ϵ_M	: 平均黄道傾角
$\Delta\epsilon$: 黄道傾角の章動
θ	: 黄経
θ_g	: グリニジ視恒星時
λ	: 経度
μ	: 地心重力定数
ρ	: 大気密度
ρ_B	: 大気基本密度
φ	: 緯度
$\Delta\phi$: 黄経の章動
ϕ	: 黄緯
ϕ_c	: ニュートンポテンシャル
Ω	: 昇交点経度
ω	: 近地点引数

3. 特殊摂動法による人工衛星の軌道生成 (STANPS-B)

人工衛星の軌道変化を一般に Cowell 法と呼ばれる手法によって求める。これは直交座標系における衛星の運動方程式を直接、数値積分することによって摂動を受けた衛星の位置および速度ベクトルの各成分を求めるもので、摂動加速度を生じさせる月や太陽の運動、地球の重力ポテンシャル、大気密度の変化などの様子はすでにかかっているものとしている。(図 3.1)

3.1 時系および座標系

3.1.1 時 系

用いられている時系とそれらの関係は図 3.2 に示した通りである(詳しい時系の議論は参考文献 3.1 で行っている)。基本時系としては国際原子時(TAI)を用いているが、世界時(UT1)との差(TAI-UT1)は、将来の値に対しても予測計算を行っている。また原子時と暦表時の流れは同じものとしている(時間に対する一般相対性理論の効果は考慮していない)。衛星の軌道要素は普通、協定世界時(UTC)で与えられることが多いので、このプログラムの入力もエポックを UTC で与えるようになっているが、出力の時刻は TAI で与え、TAI-UTC の値を同時に出すようにしている。以下に原子時を基準として他の時系への変換を示す。

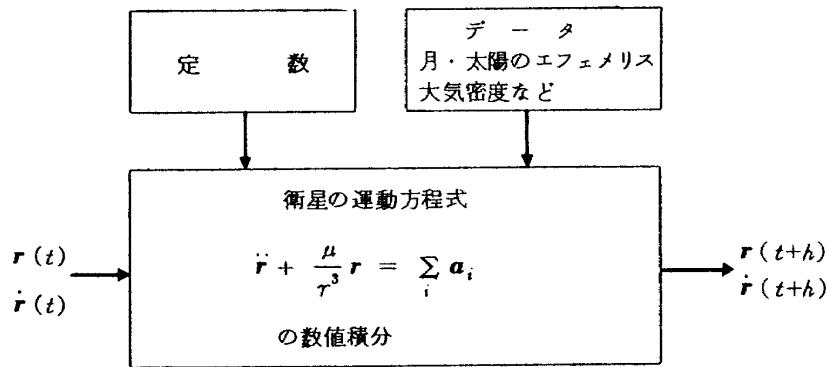


図 3.1 Cowell 法

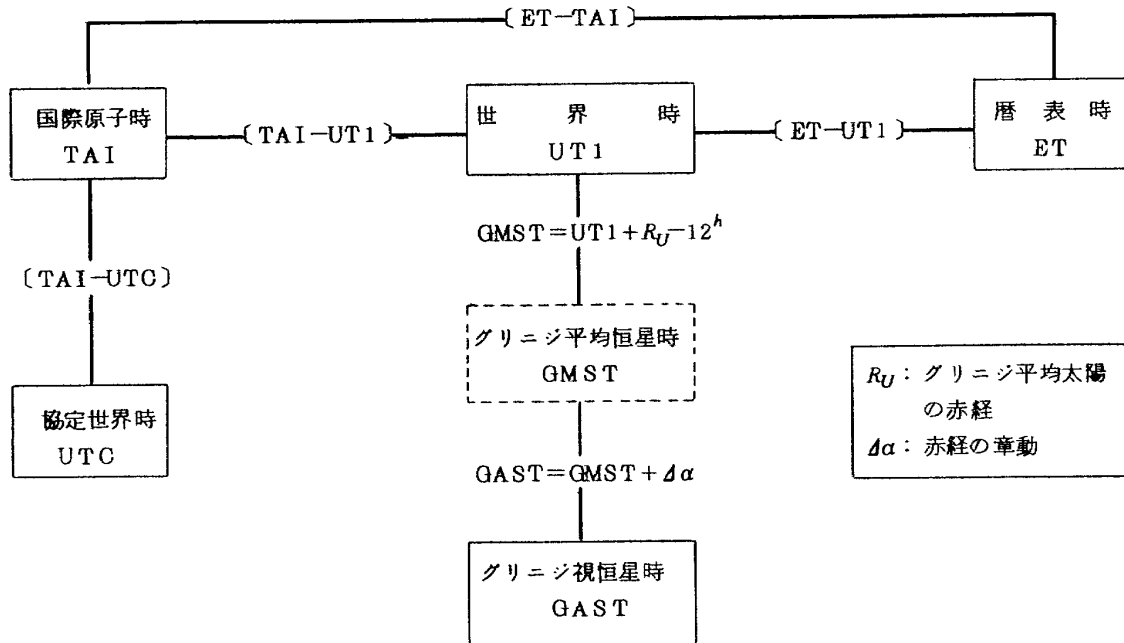


図 3.2 STANPS-B における時系

3.1.1.1 基本的データ

(1) $\{TAI-UT1\}$

$\{TAI-UT1\}$ のデータは定期的に BIH (BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE) より配布されるが、このプログラムでは次のように計算で求めている⁽¹⁾。
 < 1962.0 から 1975.0 まで >

$$\{TAI-UT1\} = \{TAI-UT1\}_0 + \Delta S + \Delta_i \{TAI-UT1\} \quad (3.1)$$

$$\{TAI-UT1\}_0 = C_n + B_y \left\{ C_o t + \frac{1}{2} C_1 t^2 \right.$$

$$+ \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{A_i}{\omega_i} \right) \sin(\omega_i t - \theta_i) \Big|_{1962.0}^t \quad (3.2)$$

$$\Delta S = S_1 \sin 2\pi t' + S_2 \cos 2\pi t' + S_3 \sin 4\pi t' + S_4 \cos 4\pi t' \quad (3.3)$$

$$\Delta_i \{TAI-UT1\} = A_{0i} + A_{1i} (T - T_{0i}) + A_{2i} (T - T_{0i})^2 \quad (3.4)$$

① $\{TAI-UT1\}_0$ における各定数 $C_o, C_1, C_n, A_i, \omega_i, \theta_i$ は表 3.1 に与えられる。

② ΔS は地球自転変動の季節変化に対応する量であるが $S_1 \sim S_4$ は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} S_1 &= 0.^s0198 \\ S_2 &= -0.^s0083 \\ S_3 &= -0.^s0067 \\ S_4 &= 0.^s0053 \end{aligned}$$

③ Δ_i ($\text{TAI}-\text{UT1}$)を計算するのに必要な $A_{0i}, A_{1i}, A_{2i}, T_{0i}$ の各値は表 3.2 に示した。

④ (3.2)~(3.4) 式の計算において、時間はすべてベッセル年を基準にしている。(3.2) 式における t は 1820.0 より起算した年数で与えるもので、
 $t = T - 1820.0$

となる。ここで T は $(\text{TAI}-\text{UT1})$ を求めたい時刻をベッセル年で表わしたもので、(3.4) 式における T と同じものである。(3.3) 式の t' はベッセル年初からの時間経過を年を単位として表わしたものである。また (3.2) 式における B_y はベッセル年の長さで、 $B_y = 365.25$ と与える。

< 1975.0 から 1985.0 まで >

この期間における $(\text{TAI}-\text{UT1})$ は予測値を求めるとになるが、それは次式で与えられる。

$$(\text{TAI}-\text{UT1}) = (\text{TAI}-\text{UT1})_0 + \Delta S \quad (3.5)$$

表 3.1

i	A_i	ω_i	θ_i
1	0,3580D-03	0,35160D-01	0,3223623D+01
2	0,8030D-03	0,70320D-01	0,1117010D+00
3	0,1239D-02	0,10550D+00	0,2816961D+01
4	0,3040D-03	0,13960D+00	0,4937536D+01
5	0,2150D-03	0,18210D+00	0,3689626D+01
6	0,5210D-03	0,21096D+00	0,5497790D+00
7	0,4340D-03	0,28128D+00	0,4719370D+01
8	0,1890D-03	0,31644D+00	0,2630211D+01
9	0,5210D-03	0,33780D+00	0,2476622D+01
10	0,1410D-03	0,51712D+00	0,4572763D+01
11	0,1620D-03	0,56256D+00	0,6492620D+00
12	0,1840D-03	0,68293D+00	0,3001970D+00

$$C_0 = -0,848762D-03$$

$$C_1 = 0,196870D-04$$

$$C_n = 0.88753 \text{ (sec)}$$

表 3.2

i	INTERVAL	T_{0i}	A_{0i}	A_{1i}	A_{2i}
1	1962,00 - 1962,50	1962,00	0,9215823E+00	0,6969027E-02	0,3150258E-01
2	1962,50 - 1963,00	1962,50	0,9296236E+00	-0,2686999E-01	0,7125146E-01
3	1963,00 - 1963,50	1963,00	0,9327631E+00	-0,1504284E+00	0,2711748E+00
4	1963,50 - 1964,00	1963,50	0,9198011E+00	-0,1323248E-01	0,1687656E+00
5	1964,00 - 1964,50	1964,00	0,9553621E+00	0,8309959E-01	-0,7095797E-02
6	1964,50 - 1965,00	1964,50	0,9932452E+00	-0,2786188E-02	0,5849237E-01
7	1965,00 - 1965,50	1965,00	0,1003352E+01	0,7794895E-02	0,7710089E-01
8	1965,50 - 1966,00	1965,50	0,1025273E+01	0,4832484E-01	-0,4789461E-01
9	1966,00 - 1966,50	1966,00	0,1034811E+01	-0,2724122E-01	0,6980124E-01
10	1966,50 - 1967,00	1966,50	0,1031335E+01	0,5290993E-01	-0,1166649E+00
11	1967,00 - 1967,50	1967,00	0,1024178E+01	-0,1095518E+00	0,5377123E-01
12	1967,50 - 1968,00	1967,50	0,9795189E+00	-0,1564305E+00	0,2325100E-01
13	1968,00 - 1968,50	1968,00	0,9076686E+00	-0,1384725E+00	0,3654949E-02
14	1968,50 - 1969,00	1968,50	0,8383066E+00	-0,4561914E-01	-0,1437253E+00
15	1969,00 - 1969,50	1969,00	0,7775268E+00	-0,1296536E+00	0,1155913E+00
16	1969,50 - 1970,00	1969,50	0,7361812E+00	-0,8744938E-01	-0,1231630E-01
17	1970,00 - 1970,50	1970,00	0,6879628E+00	-0,3042661E-01	-0,5851636E-01
18	1970,50 - 1971,00	1970,50	0,6569145E+00	-0,1729780E+00	0,6197567E-01
19	1971,00 - 1971,50	1971,00	0,5834954E+00	-0,2560108E+00	0,3006232E+00
20	1971,50 - 1972,00	1971,50	0,5244302E+00	-0,9687868E-03	-0,3583874E-01
21	1972,00 - 1972,50	1972,00	0,5086300E+00	-0,3446459E-01	0,6254342E-01
22	1972,50 - 1973,00	1972,50	0,5060298E+00	-0,3240654E-01	-0,1043395E+00
23	1973,00 - 1973,50	1973,00	0,4643083E+00	-0,8408451E-01	-0,7079953E-02
24	1973,50 - 1974,00	1973,50	0,4163648E+00	-0,1090909E+00	-0,1490347E+00
25	1974,00 - 1974,50	1974,00	0,3207406E+00	-0,3698359E+00	0,1545480E+00
26	1974,50 - 1975,00	1974,50	0,1682408E+00	-0,3157019E+00	-0,2363487E-01

ここで $\{TAI-UT1\}_0$ と ΔS はそれぞれ (3.2) 式と (3.3) 式に等しい。

(2) $\{ET-TAI\}$

暦表時 ET と原子時 TAI はその進み方は、厳密な意味ではまったく同じではない。^(3.1)しかし、その差は非常に小さいので、このプログラムでは一定としている。

$$ET - TAI = 32.18$$

(3) $\{TAI-UTC\}$

UTC (協定世界時) の方式は何度か変更されたため、その変換は複雑になるが、1962年以後の $\{TAI-UTC\}$ は次のようにして求める。

$$\begin{aligned} \{TAI-UTC\} &= \{TAI-UTC\}_i \\ &\quad + O_{si} (MJCD - MJCD_i) \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} \{TAI-UTC\} &= \{TAI-UTC\}_i \\ &\quad + O_{si} (MJAD - MJAD_i) \end{aligned} \tag{3.6'}$$

① (3.6) 式は UTC が与えられたときに $\{TAI-UTC\}$ を求める式で、(3.6') 式は逆に TAI が与えられた場合の式である。

② MJCD, MJCD_i は UTC を基にしたユリウス日、

MJAD, MJAD_i は TAI を基にしたユリウス日である。

③ 必要なデータは表 3.3, 3.4 にそれぞれ与えられている。

3.1.1.2 原子時 (TAI) を基準にした時系変換

以上の基本的データを用いて、時系の間の変換は次のように行われる。基準の時系は TAI であるが、衛星のエポックは UTC で与えるので、まず UTC から TAI への変換を行い、次に TAI を基にして UT1, GMST, GAST, ET, UTC を決め、軌道の計算が行われている間は、これらの時系がつねに与えられるようにしている。変換のプロセスを図 3.3 に示したが、ここで MJED はユリウス暦表日である。

3.1.2 座標系

3.1.2.1 座標系の種類

STANPS-B において用いられる座標系は次の 4 つである。(図 3.4)

(1) 1950.0 平均赤道面座標系 (C_{1950})

原点: 地球重心

基準軸: 1950.0 (ベッセル年初) における平均春分点方向

基準面: 1950.0 における平均赤道面

また赤経 (α) と赤緯 (δ) は次のようにきめる。

表 3.3

1	INTERVAL (MJCD)	$\{TAI-UTC\}_i$	O_{si}	MJCD _i
1	37665.0 - 38334.0	0.1845858D+01	0.11232D-02	37665.0
2	38334.0 - 38395.0	0.2697279D+01	0.11232D-02	38334.0
3	38395.0 - 38486.0	0.2765794D+01	0.12960D-02	38395.0
4	38486.0 - 38639.0	0.2883730D+01	0.12960D-02	38486.0
5	38639.0 - 38761.0	0.3282018D+01	0.12960D-02	38639.0
6	38761.0 - 38820.0	0.3540130D+01	0.12960D-02	38761.0
7	38820.0 - 38942.0	0.3716594D+01	0.12960D-02	38820.0
8	38942.0 - 39004.0	0.3974706D+01	0.12960D-02	38942.0
9	39004.0 - 39126.0	0.4155058D+01	0.12960D-02	39004.0
10	39126.0 - 39887.0	0.4313170D+01	0.25920D-02	39126.0
11	39887.0 - 41317.0	0.6185682D+01	0.25920D-02	39887.0
12	41317.0 - 41499.0	-0.1000000D+02	0.0	41317.0
13	41499.0 - 41683.0	0.1100000D+02	0.0	41499.0
14	41683.0 - 42048.0	0.1200000D+02	0.0	41683.0
15	42048.0 - 42413.0	0.1300000D+02	0.0	42048.0
16	42413.0 -	0.1400000D+02	0.0	42413.0

表 3.4

1	INTERVAL	$[TAI-UTC]_i$	O_{si}	$MJAC_i$
1	$MJAD_1 - MJAD_{1+1}$	0,1845858D+01	0,11232D-02	37665,0 + 0,21364097D-04
2	"	0,2697279D+01	0,11232D-02	38334,0 + 0,31218504D-04
3	"	0,2765794D+01	0,12960D-02	38395,0 + 0,32011504D-04
4	"	0,2883730D+01	0,12960D-02	38486,0 + 0,33376504D-04
5	"	0,3282018D+01	0,12960D-02	38639,0 + 0,37986319D-04
6	"	0,3540130D+01	0,12960D-02	38761,0 + 0,40973726D-04
7	"	0,3716594D+01	0,12960D-02	38820,0 + 0,43016134D-04
8	"	0,3974706D+01	0,12960D-02	38942,0 + 0,46003541D-04
9	"	0,4155058D+01	0,12960D-02	39004,0 + 0,48090949D-04
10	"	0,4313170D+01	0,25920D-02	39126,0 + 0,49920949D-04
11	"	0,6185682D+01	0,25920D-02	39887,0 + 0,71593541D-04
12	"	0,1000000D+02	0,0	41317,0 + 0,11574074D-03
13	"	0,1100000D+02	0,0	41499,0 + 0,12731481D-03
14	"	0,1200000D+02	0,0	41683,0 + 0,13888889D-03
15	"	0,1300000D+02	0,0	42048,0 + 0,15046296D-03
16	"	0,1400000D+02	0,0	42413,0 + 0,16203703D-03

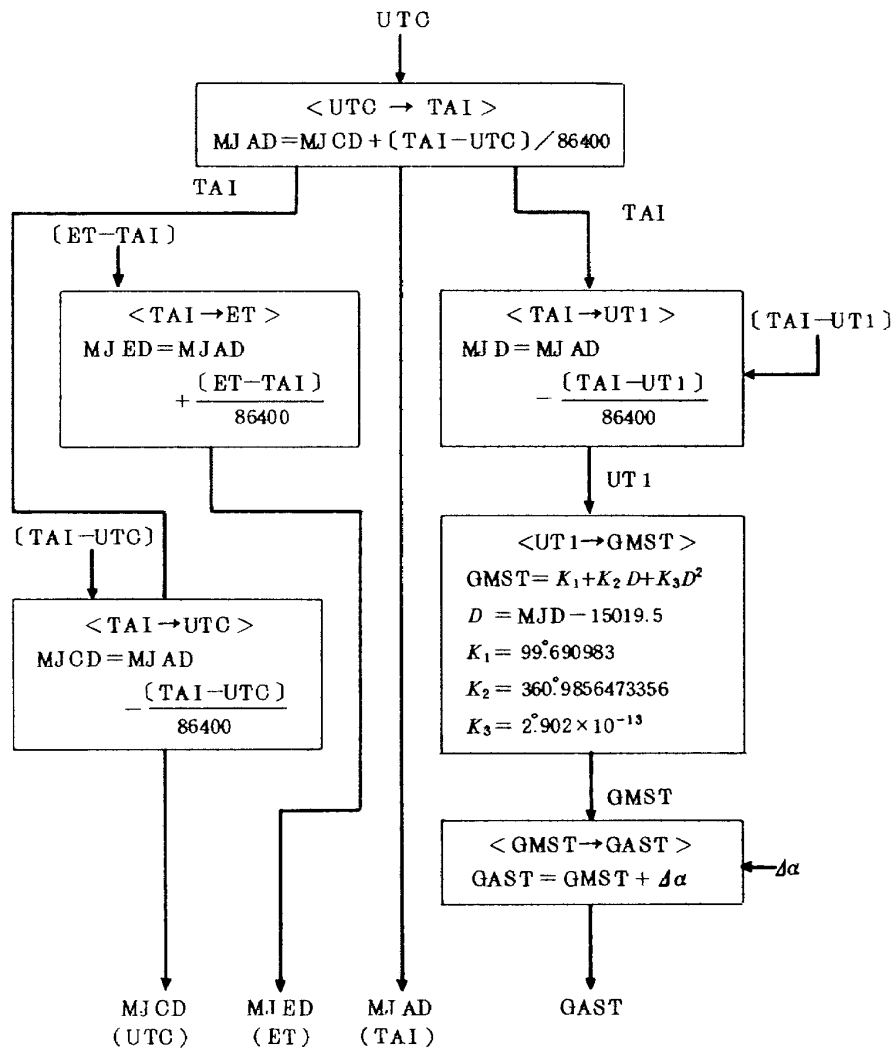


図 3.3 時系の変換

赤 経： 春分点方向から基準面によって反時計まわりに測られる角度（単位は時間）

赤 緯： 基準面から上向きに測った角度

これは基準座標系となるもので、運動方程式の積分はこの座標系で行われる。また制御力が加わったときに生じる加速度もここで求められる。

(2) 瞬時の真の赤道面座標系 (C_{true})

原 点： 地球重心

基準軸： 瞬時の真 (True of date) の春分点方向

基準面： 瞬時の真の赤道面

赤経 (α_t)、赤緯 (δ_t) は 1950.0 平均赤道面座標系の場合と同様に定義される。

(3) 地球に固定した座標系 (C_{terr})

原 点： 地球重心

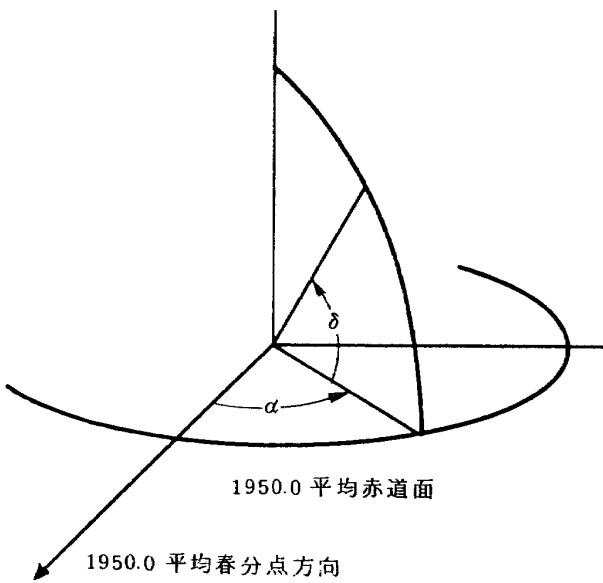
基準軸： グリニジ子午線方向

基準面： 赤道面

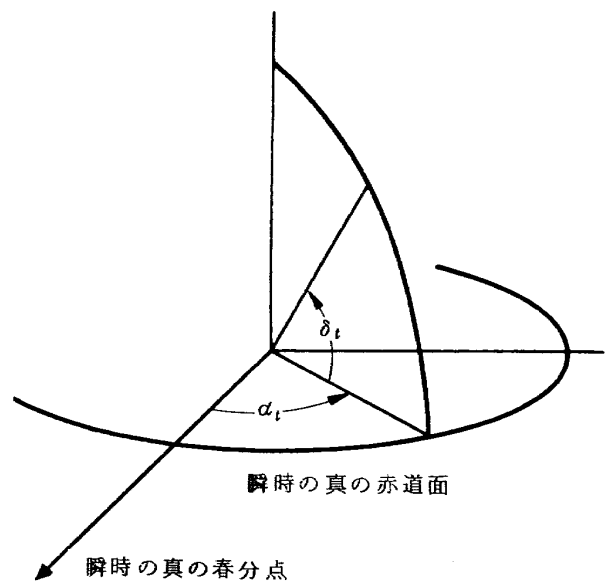
また経度 (λ) と緯度 (ϕ) は次のように定める。

経 度： グリニジ子午線から基準面によって反時計まわりに測られる角度

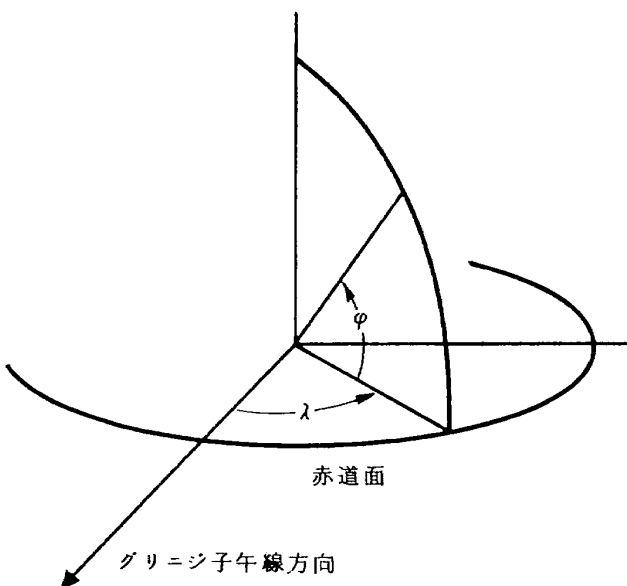
緯 度： 基準面から上向きに測った角度



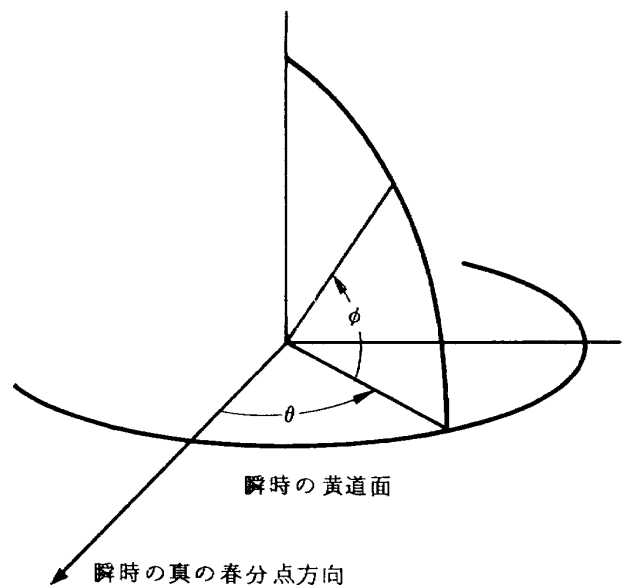
(1) 1950.0 平均赤道面座標系



(2) 瞬時の真の赤道面座標系



(3) 地球に固定した座標系



(4) 瞬時の黄道面座標系

図 3.4 座 標 系

この座標系は地球の自転と共に、基準座標系に対して回転する。地球の重力ポテンシャルおよび大気抵抗による摂動加速度はこの座標系で計算される。

(4) 瞬時の黄道面座標系 (C_{ecl})

原点：地球重心

基準軸：瞬時の真の春分点方向

基準面：瞬時の黄道面

また黄経 (θ) および黄緯 (ϕ) は次のように定める。

黄経：春分点方向から基準面にそって反時計まわりに測られた角度

黄緯：基準面から上向きに測った角度

月、太陽の引力および太陽輻射による摂動加速度はこ

の座標系で計算される。

3.1.2.2 座標系の変換

STANPS-B において必要な座標系の変換は次の通りである。(図3.5)

$$\begin{aligned}
 C_{1950} \rightleftharpoons C_{true} & : C_{true} = H_1 C_{1950} \\
 & C_{1950} = {}^t H_1 C_{true} \\
 C_{1950} \rightleftharpoons C_{terr} & : C_{terr} = H_2 C_{1950} \\
 & C_{1950} = {}^t H_2 C_{terr} \\
 C_{1950} \rightleftharpoons C_{ecl} & : C_{ecl} = H_3 C_{1950} \\
 & C_{1950} = {}^t H_3 C_{ecl}
 \end{aligned}$$

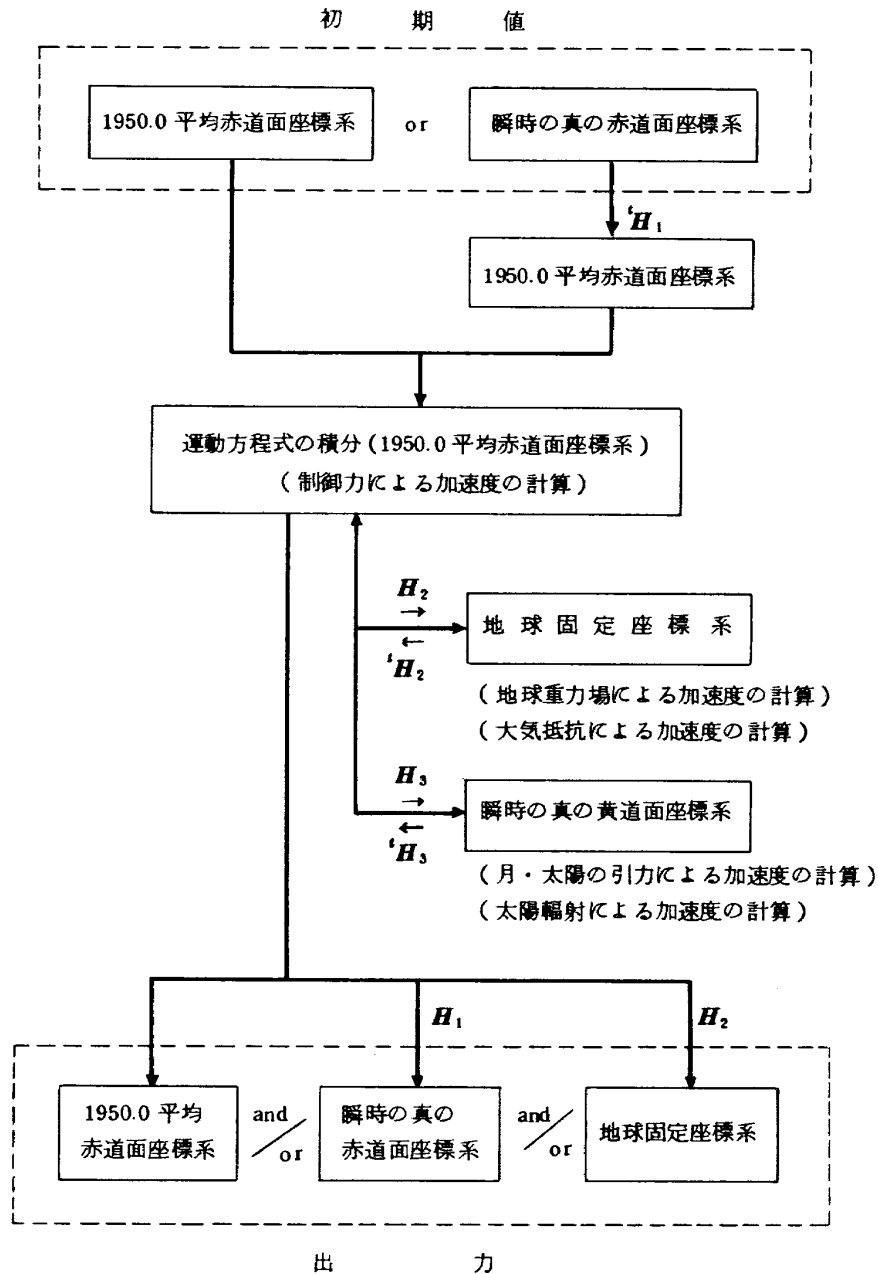


図 3.5 座標系の関係

次に各変換行列 $H_1 \sim H_3$ およびその転置行列 ${}^tH_1 \sim {}^tH_3$ は以下のように与えられる。

$\langle H_1, {}^tH_1 \rangle$

$$H_1 = NP, \quad {}^tH_1 = {}^tP {}^tN \quad (3.7)$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= \cos Z \cos \theta \cos \zeta_0 - \sin Z \sin \zeta_0 \\ P_{12} &= -\cos Z \cos \theta \sin \zeta_0 - \sin Z \cos \zeta_0 \\ P_{13} &= -\cos Z \sin \theta \\ P_{21} &= \sin Z \cos \theta \cos \zeta_0 + \cos Z \sin \zeta_0 \\ P_{22} &= -\sin Z \cos \theta \sin \zeta_0 + \cos Z \cos \zeta_0 \\ P_{23} &= -\sin Z \sin \theta \\ P_{31} &= \sin \theta \cos \zeta_0 \\ P_{32} &= -\sin \theta \sin \zeta_0 \\ P_{33} &= \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

$$N = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{11} &= \cos \Delta\phi \\ N_{12} &= -\sin \Delta\phi \cos \epsilon_M \\ N_{13} &= -\sin \Delta\phi \sin \epsilon_M \\ N_{21} &= \cos \epsilon_t \sin \Delta\phi \\ N_{22} &= \cos \epsilon_t \cos \Delta\phi \cos \epsilon_M + \sin \epsilon_t \sin \epsilon_M \\ N_{23} &= \cos \epsilon_t \cos \Delta\phi \sin \epsilon_M - \sin \epsilon_t \cos \epsilon_M \\ N_{31} &= \sin \epsilon_t \sin \Delta\phi \\ N_{32} &= \sin \epsilon_t \cos \Delta\phi \cos \epsilon_M - \cos \epsilon_t \sin \epsilon_M \\ N_{33} &= \sin \epsilon_t \cos \Delta\phi \sin \epsilon_M + \cos \epsilon_t \cos \epsilon_M \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

① P は地球自転軸の歳差に対応する変換行列で、1950.0 から任意のエポック (MJED) までの間の歳差量を表すパラメータ ζ_0, Z, θ は次式で与えられる。^(13, 18)

$$\left. \begin{aligned} \zeta_0 &= 2304''.948 T + 0''.302 T^2 + 0''.0179 T^3 \\ Z &= 2304''.948 T + 1''.093 T^2 + 0''.0192 T^3 \\ \theta &= 2004''.255 T - 0''.426 T^2 - 0''.0416 T^3 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{100} \left(\frac{L_z}{360^\circ} \right) \\ L_z &= 129602768.13 + 1.088995409 T_z \\ &\quad + 1''.089 T_z^2 \end{aligned} \right\}$$

$$T_z = (\text{MJED} - 33281.923) / 36525 \quad (3.13)$$

② N は地球自転軸の章動に対応する変換行列で、

(3.11) 式にあるパラメータはそれぞれ

$\Delta\phi$: 黄経の章動
 ϵ_M : 平均黄道傾角
 ϵ_t : 真黄道傾角

で次のように与えられる。⁽¹³⁾

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi &= \sum_{i=1}^{69} (K_{1i} + K_{2i} T) \\ &\quad \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q) \\ \Delta\epsilon &= \sum_{i=1}^{40} (K_{1i} + K_{2i} T) \\ &\quad \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q) \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= \epsilon_M + \Delta\epsilon \\ \epsilon_M &= 23^\circ.452294 - 0^\circ.0130125 T \\ &\quad - 0^\circ.164 \times 10^{-5} T^2 + 0^\circ.503 \times 10^{-6} T^3 \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$\left. \begin{aligned} l &= 296^\circ 06' 16'' 59 + 1325^\circ 198' 50'' 56'' 79 T \\ &\quad + 33'' 09 T^2 + 0'' 0518 T^3 \\ l' &= 358^\circ 28' 33'' 00 + 99^\circ 359' 02'' 59'' 10 T \\ &\quad - 0'' 54 T^2 - 0'' 0120 T^3 \\ F &= 11^\circ 15' 03'' 20 + 1342^\circ 82' 01'' 30'' 54 T \\ &\quad - 11'' 56 T^2 - 0'' 0012 T^3 \\ D &= 350^\circ 44' 14'' 95 + 1236^\circ 307' 06'' 51'' 18 T \\ &\quad - 5'' 17 T^2 + 0'' 0068 T^3 \\ Q &= 259^\circ 10' 59'' 79 - 5^\circ 134' 08'' 31'' 23 T \\ &\quad + 7'' 48 T^2 + 0'' 0080 T^3 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

ここで T は 1900 年 1 月 0.5 ET (15019.5 MJED) からユリウス世紀 (36525 暦表日) 単位で測ったものであり、(3.14) 式における $K_{1i}, K_{2i}, a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$ の各定数は表 3.5 に与えられている。 l, l', F, D, Q については 3.2.2 節を参照のこと。

$\langle H_2, {}^tH_2 \rangle$

$$H_2 = SH_1, \quad {}^tH_2 = {}^tH_1 {}^tS \quad (3.17)$$

$$S = \begin{pmatrix} \cos \theta_g & \sin \theta_g & 0 \\ -\sin \theta_g & \cos \theta_g & 0 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

表 3.5 章 動 (1)

(K_{1i}, K_{2i} ($i=1, 2$ を除く) の単位は $\times 10^{-4}$ arc sec)

i	$\Delta\phi$ の係数		$\Delta\epsilon$ の係数		引 数				
	K_{1i}	K_{2i}	K_{1i}	K_{2i}	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	-17."2327	-0."01737	+9."2100	-0."00091					+1
2	-1."2729	-0."00013	+0."5522	-0."00029			+2	-2	+2
3	+2088	+0.2	-904	+0.4					+2
4	+2037	-0.2	+884	-0.5			+2		+2
5	+1261	-3.1							
6	+675	+0.1			+1				
7	-497	+1.2	+216	-0.6		1	+2	-2	+2
8	-342	-0.4	+183				+2		+1
9	-261		+113	-0.1	+1		+2		+2
10	+214	-0.5	-93	+0.3		-1	+2	-2	+2
11	+124	+0.1	-66				+2	-2	+1
12	+16	-0.1				2			
13	-15	+0.1	+7			2	+2	-2	+2
14	+114		+50		-1		+2		+2
15	+58		-31		+1				+1
16	-57		+30		-1				+1
17	-52		+22		-1		+2	+2	+2
18	+45		-24		-2		+2		+1
19	-44		+23		+1		+2		+1
20	-32		+14				+2	+2	+2
21	+26		-11		+1		+2	-2	+2
22	-26		+11		+2		+2		+2
23	+19		-10		-1		+2		+1
24	-15		+8		+1				+1
25	+14		-7		-1			+2	+1

$$\theta_g = \text{GAST} = K_1 + K_2 D + K_3 D^2 + \Delta\phi \cos \epsilon_t \quad (3.19)$$

グリニッジ視恒星時 θ_g を求めるための定数および D は

- $K_1 = 279.690983$
- $K_2 = 360.9856473356$
- $K_3 = 2.902 \times 10^{-3}$
- $D = \text{MJD} - 15019.5$

で与えられる⁽¹⁾
 $\langle H_3, {}^t H_3 \rangle$

$$H_3 = QH_1, {}^t H_3 = {}^t Q {}^t H_1 \quad (3.20)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon_t & \sin \epsilon_t \\ 0 & -\sin \epsilon_t & \cos \epsilon_t \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

3.2 運動方程式

地球を回る人工衛星の運動方程式を次のように与える。

表 3.5 章 動 (2)

(K_{1i}, K_{2i} の単位は ×10⁻⁴ arc sec)

i	Δφの係数		Δεの係数		引 数				
	K _{1i}	K _{2i}	K _{1i}	K _{2i}	a _i	b _i	c _i	d _i	e _i
26	-13		+7		+1			-2	+1
27	-10		+5			-1			+1
28	-9		+5		-1		+2	+2	+1
29	+7		-3			1	+2		+2
30	-6		+3			-1	+2		+2
31	-6		+3		+1		+2	+2	+2
32	+6		-2		+2		+2	-2	+2
33	-6		+3					+2	+1
34	-5		+3		-2			+2	+1
35	-5		+3			-1	+2	-2	+1
36	+5		-3		+1		+2	-2	+1
37	-5		+3					-2	+1
38	-5		+3				+2	+2	+1
39	-4		+2			-2	+2	-2	+1
40	+4		-2		+2			-2	+1
41	-4		+2		+2		+2		+1
42	+3		-2			+1	+2	-2	+1
43	-3		+2		-2		+2		+2
44	-149				+1			-2	
45	+60							+2	
46	+45				+2			-2	
47	+28				+2				
48	+25						+2		
49	-21						+2	-2	
50	+10				+2		-2		
51	-7				+1	+1		-2	
52	+6				+1			+2	
53	+4				+1	-1			
54	-4					+1		-2	
55	-4							+1	
56	+4				+1		-2		
57	+3				+1		+2		
58	-3				+1	+1			
59	-3				+1			-1	
60	-3				+1	-1	+2		+2
61	-2				+1	-1		-1	
62	-2				-2				+1
63	-2				-1		+2	-2	+1
64	+2				+2				+1
65	-2				-1	-1	+2	+2	+2
66	-2					-1	+2	+2	+2
67	-2				+1				+2
68	+2				+1	+1	+2		+2
69	-2				+3		+2		+2

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{a}_g + \mathbf{a}_{SM} + \mathbf{a}_{SP} + \mathbf{a}_D + \mathbf{a}_C \quad (3.22)$$

① \mathbf{r} は座標系 C_{1950} における衛星の位置ベクトル、 μ は地心重力定数で

$$\mu = 3.986013 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{sec}^2$$

で与えられる。⁽³⁾

② 中心力による加速度以外に次の各加速度を考慮している。

- \mathbf{a}_g : 地球重力ポテンシャルの 2 次以上の項による加速度
- \mathbf{a}_{SM} : 月および太陽の引力による加速度
- \mathbf{a}_{SP} : 太陽輻射圧によって生じる加速度
- \mathbf{a}_D : 大気抵抗によって生じる加速度
- \mathbf{a}_C : 制御力を加えたときに生じる加速度

③ (3.22) 式の数値積分によって衛星の運動を求め、図 3.6 に全体図を示したが、この節では各加速度の内容を記す。

3.2.1 地球重力ポテンシャルの 2 次以上の項による加速度

地球の重力ポテンシャルは Legendre 関数 $P_l^m(\sin \varphi)$ を用いると次のように表わすことができる。

$$U = \frac{\mu}{r} + \mu \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{R_E^n P_l^m(\sin \varphi)}{r^{n+1}} (C_{l,m} \cos m\lambda)$$

$$+ S_{l,m} \sin m\lambda) \quad (3.23)$$

右辺の第 1 項から生じる加速度は (3.22) 式の右辺の第 1 項にあたり、これを中心加速度とする。(3.23) 式の右辺の第 2 項から生じる摂動加速度が \mathbf{a}_g にあたるわけで、 \mathbf{a}_g の x, y, z 成分をそれぞれ a_{gx}, a_{gy}, a_{gz} とすると次のように与えられる(参考文献 3.2)。

$$\left. \begin{aligned} a_{gx} &= \text{Real} \sum_{l=2}^K \sum_{m=0}^l \mu R_E^l (C_{l,m} - i S_{l,m}) \frac{\partial U_{l,m}}{\partial x} \\ a_{gy} &= \text{Real} \sum_{l=2}^K \sum_{m=0}^l \mu R_E^l (C_{l,m} - i S_{l,m}) \frac{\partial U_{l,m}}{\partial y} \\ a_{gz} &= \text{Real} \sum_{l=2}^K \sum_{m=0}^l \mu R_E^l (C_{l,m} - i S_{l,m}) \frac{\partial U_{l,m}}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

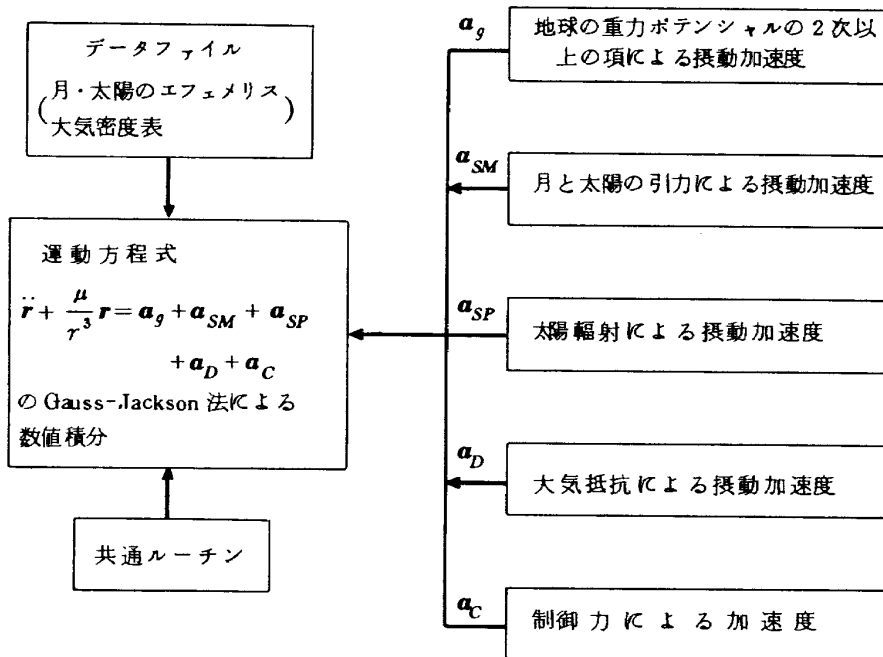


図 3.6 運動方程式の積分

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_{l,m}}{\partial x} &= -\frac{U_{l+1,m+1}}{2} \\ &+ \frac{(l-m+2)!}{2(l-m)!} U_{l+1,m-1} \quad (m > 0) \\ &= -\frac{U_{l+1,1}}{2} - \frac{U_{l+1,1}^*}{2} \quad (m = 0) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_{l,m}}{\partial y} &= \frac{iU_{l+1,m+1}}{2} \\ &+ \frac{i(l-m+2)!}{(l-m)!} U_{l+1,m-1} \quad (m > 0) \\ &= \frac{iU_{l+1,1}}{2} - \frac{iU_{l+1,1}^*}{2} \quad (m = 0) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_{l,m}}{\partial z} &= -\frac{(l-m+1)!}{(l-m)!} U_{l+1,m} \quad (m \geq 0) \end{aligned} \right\}$$

(U^* は共役複素数) (3.25)

($U_{l,m}$ の計算)

• $l = m$ の場合

$$U_{l,m} = (2l-1) \frac{(x+iy)}{r^2} U_{l-1,m-1}$$

• $l = m+1$ の場合

$$U_{l,m} = (2l-1) \frac{z}{r^2} U_{l-1,m}$$

• $l \neq m, l \neq m+1$ の場合

$$U_{l,m} = \frac{(2l-1)z}{(l-m)r^2} U_{l-1,m} - \frac{(l+m-1)}{(l-m)} \frac{1}{r^2} U_{l-2,m}$$

(3.27)

① (3.24) 式において K の値は一般に任意の大きさまでとれるわけであるが、定数 $C_{l,m}, S_{l,m}$ が観測によって決められるために当然ある範囲に限られる。このプログラムでは $K=22$ まで可能である。 $C_{l,m}, S_{l,m}$ の値は表 3.6 に示したが、これは参考文献 3 によったものである。なお R_E は地球の平均赤道半径で

$$R_E = 6378.140 \text{ km}$$

とする。(3)

② (3.27) 式における $U_{l,m}$ は

$$U_{l,m} \equiv \frac{P_l^m(\sin \varphi)(\cos m\lambda + i \sin m\lambda)}{r^{l+1}} \quad (3.28)$$

として定義されるもので、これを用いると (3.23) 式の右辺の第 2 項は次のようになる。

$$U' = \text{Real} \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \mu R_E^l (C_{l,m} - i S_{l,m}) U_{l,m} \quad (3.29)$$

(3.29) 式からわかるように (3.24) 式は $a_{gx} = \partial U' / \partial x, a_{gy} = \partial U' / \partial y, a_{gz} = \partial U' / \partial z$ から求められたものである。

③ (3.27) 式を計算するためには次の出発値を必要とする。

$$\left. \begin{aligned} U_{0,0} &= \frac{1}{r} \\ U_{1,0} &= \frac{z}{r^2} U_{0,0} \\ U_{1,1} &= \frac{(x+iy)}{r^2} U_{0,0} \\ U_{2,0} &= \frac{3}{2} \frac{z}{r^2} U_{1,0} - \frac{1}{2} \frac{1}{r^2} U_{0,0} \\ U_{2,1} &= 3 \frac{z}{r^2} U_{1,1} \\ U_{2,2} &= 3 \frac{(x+iy)}{r^2} U_{1,1} \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

④ 表 3.6 において Harmonic 定数 $C_{l,m}, S_{l,m}$ とその正規化された $\bar{C}_{l,m}, \bar{S}_{l,m}$ が示されているが、それらの間の関係は次のようにして与えられる。

$$C_{l,m} = \left[\frac{\varepsilon(2l+1)(l-m)!}{(l+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} \bar{C}_{l,m}$$

$$S_{l,m} = \left[\frac{\varepsilon(2l+1)(l-m)!}{(l+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} \bar{S}_{l,m}$$

ここで

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 : m = 0 \\ 2 : m \neq 0 \end{cases}$$

である。

3.2.2 月および太陽の引力による加速度

$$a_{SM} = -Gm_1 \sum_{n=1}^2 \left(\frac{m_n}{m_1} \right) \frac{1}{d_n^3} \{ \mathbf{r} + f(q) \mathbf{r}_n \}$$

表 3.6 重力ポテンシャルの Harmonic 定数

(1) Zonal harmonics

($S_{l,0} = 0$)

l	m	正規化された Harmonic 定数	Harmonic 定数
		$\bar{C}_{l,m}$	$C_{l,m} (\times 10^{-5})$
2	0	-4.84170×10^{-4}	-1082.637
3	0	9.60408×10^{-7}	2.541
4	0	5.39333×10^{-7}	1.618
5	0	6.87446×10^{-8}	0.228
6	0	-1.53097×10^{-7}	-0.552
7	0	9.08860×10^{-8}	0.352
8	0	4.97198×10^{-8}	0.205
9	0	3.53300×10^{-8}	0.154
10	0	5.17176×10^{-8}	0.237
11	0	-6.50565×10^{-8}	-0.312
12	0	3.84000×10^{-8}	0.192
13	0	6.52406×10^{-8}	0.339
14	0	-1.94980×10^{-8}	-0.105
15	0	-1.88586×10^{-8}	-0.105
16	0	-5.91864×10^{-9}	-0.034
17	0	3.71868×10^{-8}	0.220
18	0	1.67687×10^{-8}	0.102
19	0	-1.58527×10^{-8}	-0.099
20	0	1.85847×10^{-8}	0.119
21	0	1.26574×10^{-8}	0.083
22	0	-1.37146×10^{-8}	-0.092

$$f(q) = \frac{3q + 3q^2 + q^3}{1 + (1+q)^{\frac{3}{2}}} \tag{3.31}$$

$$q = \frac{1}{r_n^2} (\tau^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}) \tag{3.32}$$

$$d_n = |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}| \tag{3.33}$$

(添字 1 : 太陽, 2 : 月)

① 月, 太陽の引力による摂動加速度は

$$\mathbf{a}_{SM} = Gm_1 \sum_{n=1}^2 \left(\frac{m_n}{m_1} \right) \left(\frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_n|^3} \right) \tag{3.34}$$

と書かれるが, \mathbf{r} が \mathbf{r}_n に比較して非常に小さい場合には非常に大きな有効数字を取扱うことになり, 計算機の丸め誤差などの影響を受けやすい。そこで (3.34) 式を次のように変形して (3.31) ~ (3.33) 式が得られる。

$$\mathbf{a}_{SM} = -Gm_1 \sum_{n=1}^2 \left(\frac{m_n}{m_1} \right) \left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_n}{d_n^3} + \frac{\mathbf{r}_n}{r_n^3} \right)$$

$$= -Gm_1 \sum_{n=1}^2 \left(\frac{m_n}{m_1} \right) \frac{1}{d_n^3} \left\{ \mathbf{r} + \left(\frac{d_n^3}{r_n^3} - 1 \right) \mathbf{r}_n \right\}$$

$$d_n^2 = (\mathbf{r}_n - \mathbf{r}) \cdot (\mathbf{r}_n - \mathbf{r}) = r_n^2 + \tau^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}$$

の関係を用いて

$$\frac{d_n^3}{r_n^3} - 1 \equiv f(q)$$

$$= \frac{1}{r_n^3} \left\{ (r_n^2 + \tau^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r})^{\frac{3}{2}} - 1 \right\}$$

$$= \left[1 + \frac{1}{r_n^2} (\tau^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}) \right]^{\frac{3}{2}} - 1$$

$$q = \frac{1}{r_n^2} (\tau^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}) \text{ とおけば}$$

$$f(q) = \left[1 + q \right]^{\frac{3}{2}} - 1 = \frac{3q + 3q^2 + q^3}{1 + (1+q)^{\frac{3}{2}}}$$

表 3.6 重力ポテンシャルの Harmonic 定数
(2) Non-zonal harmonics

l	m	正規化された Harmonic 定数		Harmonic 定数	
		$\bar{C}_{l,m}$	$\bar{S}_{l,m}$	$C_{l,m}$	$S_{l,m}$
2	2	2.3799D-06	-1.3656D-06	1.5362D-06	-8.8149D-07
3	1	1.9977D-06	2.2337D-07	2.1578D-06	2.4127D-07
3	2	7.7830D-07	-7.5519D-07	2.6584D-07	-2.5795D-07
3	3	4.9011D-07	1.5283D-06	6.8343D-08	2.1311D-07
4	1	-5.1748D-07	-4.8410D-07	-4.9092D-07	-4.5926D-07
4	2	3.4296D-07	6.7174D-07	7.6688D-08	1.5021D-07
4	3	1.0390D-06	-1.1923D-07	6.2092D-08	-7.1254D-09
4	4	-1.0512D-07	3.5661D-07	-2.2211D-09	7.5348D-09
5	1	-5.3667D-08	-7.9973D-08	-4.5958D-08	-6.8485D-08
5	2	5.9869D-07	-3.9910D-07	9.6889D-08	-6.4588D-08
5	3	-5.8429D-07	-1.6338D-07	-1.9302D-08	-5.3972D-09
5	4	-1.1583D-07	-4.5393D-08	-9.0188D-10	-3.5344D-10
5	5	1.3956D-07	-8.6841D-07	3.4363D-10	-2.1382D-09
6	1	-7.2166D-08	1.7756D-08	-5.6780D-08	1.3970D-08
6	2	2.4670D-08	-4.0654D-07	3.0690D-09	-5.0575D-08
6	3	4.4139D-09	2.9055D-08	9.1517D-11	6.0242D-10
6	4	-1.0003D-07	-3.0297D-07	-3.7866D-10	-1.1469D-09
6	5	-1.3504D-07	-6.0964D-07	-1.0899D-10	-4.9202D-10
6	6	-2.9136D-08	-2.6327D-07	-6.7881D-12	-6.1337D-11
7	1	2.3532D-07	5.5634D-08	1.7224D-07	4.0720D-08
7	2	2.0425D-07	1.7321D-07	2.0344D-08	1.7252D-08
7	3	2.1994D-07	-3.4644D-07	3.0981D-09	-4.8799D-09
7	4	-2.8617D-07	-2.7738D-07	-6.0769D-10	-5.8902D-10
7	5	3.4727D-08	8.7014D-08	1.2291D-11	3.0796D-11
7	6	-2.7496D-07	8.5865D-08	-1.9085D-11	5.9599D-12
7	7	-2.4856D-08	-8.8968D-09	-4.6109D-13	-1.6504D-13
8	1	1.0946D-08	4.8429D-08	7.5219D-09	3.3280D-08
8	2	1.1084D-07	1.0359D-07	9.1038D-09	8.5063D-09
8	3	-8.8578D-08	-5.0715D-08	-8.9553D-10	-5.1273D-10
8	4	-2.2315D-07	2.6511D-07	-2.9126D-10	3.4602D-10
8	5	1.5318D-07	8.1158D-08	2.7725D-11	1.4689D-11
8	6	-9.7542D-08	2.8082D-07	-2.7242D-12	7.8429D-12
8	7	2.0498D-07	2.4592D-07	1.0452D-12	1.2540D-12
8	8	1.6967D-07	9.3261D-08	2.1629D-13	1.1889D-13
9	1	1.8099D-07	4.1091D-08	1.1760D-07	2.6700D-08
9	2	-2.2013D-08	2.4215D-08	-1.5248D-09	1.6773D-09
9	3	-9.9252D-08	-2.3085D-08	-7.5012D-10	-1.7447D-10
9	4	-4.0867D-08	-3.8525D-08	-3.4972D-11	-3.2967D-11
9	5	-5.8957D-08	3.6834D-09	-6.0302D-12	3.7674D-13
9	6	4.8812D-08	1.1115D-07	6.4453D-13	1.4677D-12
9	7	-1.9880D-07	-1.4978D-07	-3.7689D-13	-2.8546D-13
9	8	2.3523D-07	9.6355D-09	7.6887D-14	3.1494D-15
9	9	-3.4533D-08	5.9502D-08	-2.6605D-15	4.5841D-15

表 3.6 重力ポテンシャルの Harmonic 定数

(2) Non-zonal harmonics (つづき)

l	m	正規化された Harmonic 定数		Harmonic 定数	
		$\bar{C}_{l,m}$	$\bar{S}_{l,m}$	$C_{l,m}$	$S_{l,m}$
10	1	8.9008D-08	-6.0157D-08	5.4999D-08	-3.7172D-08
10	2	-3.7256D-08	-6.3676D-08	-2.2152D-09	-3.7861D-09
10	3	-1.3307D-07	-7.2728D-08	-7.7585D-10	-4.2403D-10
10	4	-2.1887D-08	-7.8408D-08	-1.2891D-11	-4.6179D-11
10	5	-6.1509D-09	-1.1904D-07	-3.8186D-13	-7.3902D-12
10	6	-9.4142D-08	-1.1728D-08	-6.5344D-13	-8.1404D-14
10	7	1.8525D-07	2.1656D-08	1.5593D-13	1.8228D-14
10	8	1.0887D-09	7.0781D-09	1.2470D-16	8.1075D-16
10	9	7.8473D-08	5.6381D-09	1.4581D-15	1.0476D-16
10	10	1.3321D-07	9.8839D-08	5.5348D-16	4.1067D-16
11	1	-1.2194D-08	7.5463D-08	-7.1984D-09	4.4548D-08
11	2	-2.0255D-08	-6.2998D-08	-1.0487D-09	-3.2617D-09
11	3	-1.0988D-09	-3.8098D-08	-5.0682D-12	-1.7573D-10
11	4	1.5676D-08	-1.9551D-07	6.6005D-12	-8.2322D-11
11	5	-1.8591D-09	6.1113D-08	-7.3967D-14	2.4315D-12
11	6	6.3601D-08	-2.6457D-08	2.5055D-13	-1.0423D-13
11	7	-3.3761D-08	-1.2825D-07	-1.4019D-14	-5.3256D-14
11	8	-1.3634D-08	4.5229D-08	-6.4943D-16	2.1544D-15
11	9	2.1256D-08	6.6721D-08	1.3071D-16	4.1029D-16
11	10	5.2555D-08	-7.7401D-08	4.9868D-17	-7.3444D-17
11	11	8.6996D-08	-2.5691D-08	1.7599D-17	-5.1973D-18
12	1	-5.6935D-08	-6.6159D-08	-3.2233D-08	-3.7455D-08
12	2	-9.7424D-08	4.6341D-08	-4.4446D-09	2.1141D-09
12	3	1.1555D-07	-4.8666D-08	4.3041D-10	-1.8128D-10
12	4	-5.0379D-08	5.3568D-08	-1.5638D-11	1.6628D-11
12	5	8.8134D-08	2.7932D-08	2.3459D-12	7.4348D-13
12	6	-2.1177D-08	3.5034D-08	-5.0216D-14	8.3075D-14
12	7	2.9751D-08	3.1783D-08	6.6074D-15	7.0587D-15
12	8	4.0190D-08	5.6877D-08	8.9258D-16	1.2632D-15
12	9	-1.1503D-07	1.4508D-08	-2.7874D-16	3.5156D-17
12	10	-4.5921D-08	-4.3264D-08	-1.3697D-17	-1.2905D-17
12	11	-7.8443D-09	-4.7858D-08	-3.4498D-19	-2.1047D-18
12	12	-2.7617D-08	-1.6808D-08	-2.4792D-19	-1.5089D-19
13	1	8.6136D-09	-3.2401D-08	4.6919D-09	-1.7649D-08
13	2	-1.0679D-08	-9.0670D-08	-4.3357D-10	-3.6812D-09
13	3	-3.2361D-08	4.9286D-08	-9.9035D-11	1.5083D-10
13	4	3.9852D-08	-1.0608D-07	9.3539D-12	-2.4899D-11
13	5	4.0041D-08	3.8114D-08	7.3851D-13	7.0286D-13
13	6	-2.1906D-08	-1.1321D-08	-3.2766D-14	-1.6934D-14
13	7	-7.6933D-08	1.1140D-08	-9.7255D-15	1.4083D-15
13	8	-2.7448D-09	1.4309D-08	-3.0912D-17	1.6115D-16
13	9	-1.1588D-08	7.2989D-08	-1.2443D-17	7.8375D-17
13	10	4.1979D-09	7.6769D-09	4.6996D-19	8.5943D-19
13	11	-5.4381D-08	1.3450D-08	-7.1747D-19	1.7745D-19
13	12	-4.6633D-08	7.9963D-08	-8.7010D-20	1.4920D-19
13	13	-6.8944D-08	7.1891D-08	-2.5228D-20	2.6306D-20

表 3.6 重力ポテンシャルの Harmonic 定数(つづき)

l	m	正規化された Harmonic 定数		Harmonic 定数	
		$\bar{C}_{l,m}$	$\bar{S}_{l,m}$	$C_{l,m}$	$S_{l,m}$
14	1	-1.4359D-08	5.2390D-08	-7.5462D-09	2.7533D-08
14	2	-1.5908D-08	2.7374D-08	-5.7968D-10	9.9750D-10
14	3	9.6915D-08	-2.5631D-08	2.4726D-10	-6.5392D-11
14	4	-2.9864D-08	-3.8189D-09	-5.4147D-12	-6.9241D-13
14	5	-1.3828D-09	-5.8680D-08	-1.8189D-14	-7.7186D-13
14	6	-1.3872D-08	-2.7976D-08	-1.3600D-14	-2.7428D-14
14	7	7.1056D-08	2.4043D-09	5.3747D-15	1.8186D-16
14	8	-1.8779D-08	-5.8750D-08	-1.1446D-16	-3.5810D-16
14	9	-2.4322D-08	6.0461D-08	-1.2620D-17	3.1371D-17
14	10	2.8985D-08	-3.4224D-08	1.3729D-18	-1.6211D-18
14	11	8.2611D-08	-1.9627D-09	3.9130D-19	-9.2965D-21
14	12	1.1751D-09	-3.0967D-08	6.3022D-22	-1.6608D-20
14	13	3.0793D-08	4.7620D-08	2.2474D-21	3.4755D-21
14	14	-6.5969D-08	3.3030D-09	-9.0988D-22	4.5557D-23
15	1	2.9358D-08	-1.6691D-08	1.4922D-08	-8.4835D-09
15	2	-1.2291D-08	-6.8963D-08	-4.0494D-10	-2.2721D-09
15	3	-5.8921D-08	4.4772D-08	-1.2690D-10	9.6427D-11
15	4	1.4876D-08	7.0359D-09	2.1218D-12	1.0036D-12
15	5	3.6806D-08	-8.4051D-09	3.5394D-13	-8.0827D-14
15	6	1.0081D-08	-3.0473D-08	6.6897D-15	-2.0222D-14
15	7	3.0439D-08	1.5775D-08	1.4355D-15	7.4395D-16
15	8	-6.8884D-08	6.0808D-08	-2.3949D-16	2.1141D-16
15	9	-4.5169D-08	5.5556D-08	-1.2116D-17	1.4902D-17
15	10	6.2126D-08	-7.1799D-09	1.3606D-18	-1.5725D-19
15	11	-4.4724D-08	-3.4391D-09	-8.5908D-20	-6.6060D-21
15	12	-4.2025D-08	5.9072D-09	-7.7676D-21	1.0918D-21
15	13	-4.1654D-08	-5.5892D-09	-8.4003D-22	-1.1272D-22
15	14	9.5654D-09	-2.7145D-08	2.5330D-23	-7.1881D-23
15	15	-5.6358D-08	3.4895D-08	-2.7247D-23	1.6871D-23
16	1	-9.9588D-09	5.4160D-08	-4.9056D-09	2.6679D-08
16	2	5.5086D-09	4.9455D-08	1.6514D-10	1.4826D-09
16	3	5.4189D-08	5.4887D-09	9.9604D-11	1.0089D-11
16	4	4.6176D-08	3.6270D-08	5.2637D-12	4.1345D-12
16	5	-2.4432D-08	2.9671D-08	-1.7544D-13	2.1306D-13
16	6	-3.7203D-09	-2.0786D-08	-1.7173D-15	-9.5949D-15
16	7	-2.2794D-09	3.0609D-09	-6.9379D-17	9.3166D-17
16	8	-1.0459D-07	-4.4731D-08	-2.1661D-16	-9.2638D-17
16	9	2.4845D-08	-8.6262D-08	3.6383D-18	-1.2632D-17
16	10	-3.9928D-08	-4.5058D-09	-4.3342D-19	-4.8910D-20
16	11	-2.0848D-08	2.9738D-08	-1.7780D-20	2.5362D-20
16	12	1.5930D-08	-1.2703D-08	1.1482D-21	-9.1562D-22
16	13	2.5280D-08	6.6240D-09	1.6918D-22	4.4330D-23
16	14	-1.4852D-08	-8.1713D-09	-1.0477D-23	-5.7643D-24
16	15	-7.7425D-08	-2.6491D-08	-6.9365D-24	-2.3733D-24
16	16	-1.8538D-08	-2.2310D-08	-2.9360D-25	-3.5333D-25

表 3.6 重力ポテンシャルの Harmonic 定数 (つづき)

l	m	正規化された Harmonic 定数		Harmonic 定数	
		$\bar{C}_{l,m}$	$\bar{S}_{l,m}$	$C_{l,m}$	$S_{l,m}$
17	1	8.6593D-09	-4.1093D-08	4.1416D-09	-1.9654D-08
17	2	-9.0769D-09	-2.7205D-08	-2.4899D-10	-7.4628D-10
17	3	-7.7864D-09	-1.7913D-08	-1.2332D-11	-2.8370D-11
17	4	-4.3231D-08	6.8203D-08	-3.9931D-12	6.2997D-12
17	5	4.1513D-08	-2.5453D-08	2.2673D-13	-1.3902D-13
17	6	-4.5453D-08	-1.7273D-08	-1.4943D-14	-5.6787D-15
17	7	1.6938D-08	-3.3752D-08	3.4272D-16	-6.8293D-16
17	8	4.1231D-08	5.8792D-09	5.2763D-17	7.5236D-18
17	9	-4.3119D-08	-1.5974D-08	-3.6072D-18	-1.3363D-18
17	10	-1.0844D-08	5.5628D-08	-6.1725D-20	3.1664D-19
17	11	-4.4136D-08	-4.3123D-09	-1.7945D-20	-1.7533D-21
17	12	3.1661D-08	6.2982D-09	9.7588D-22	1.9413D-22
17	13	2.5147D-08	9.7728D-09	6.3286D-23	2.4595D-23
17	14	-5.5945D-09	7.2604D-09	-1.2644D-24	1.6409D-24
17	15	4.9113D-08	3.1958D-08	1.1329D-24	7.3715D-25
17	16	-2.3540D-08	-1.5882D-08	-6.6836D-26	-4.5093D-26
17	17	-9.0191D-08	-9.4775D-09	-4.3917D-26	-4.6149D-27
18	1	-2.3557D-08	-7.4536D-08	-1.0958D-08	-3.4671D-08
18	2	-9.4249D-09	3.0353D-08	-2.3776D-10	7.6571D-10
18	3	-3.5003D-08	-2.0464D-08	-4.8172D-11	-2.8163D-11
18	4	2.9433D-08	-4.4672D-08	2.2298D-12	-3.3843D-12
18	5	1.7511D-09	-6.0367D-09	7.3930D-15	-2.5486D-14
18	6	2.3931D-08	-4.4966D-09	5.7200D-15	-1.0748D-15
18	7	-7.8040D-10	-8.2010D-09	-1.0769D-17	-1.1317D-16
18	8	5.3819D-08	-2.2106D-08	4.3916D-17	-1.8038D-17
18	9	-3.6120D-10	-5.0562D-09	-1.7937D-20	-2.5109D-19
18	10	4.2146D-08	7.8924D-09	1.3184D-19	2.4690D-20
18	11	2.4981D-08	2.3183D-08	5.1306D-21	4.7614D-21
18	12	-6.2242D-09	6.6025D-09	-8.8214D-23	9.3575D-23
18	13	-2.6685D-08	-4.2500D-08	-2.7731D-23	-4.4166D-23
18	14	9.1191D-09	-3.3129D-08	7.4918D-25	-2.7217D-24
18	15	-4.1521D-08	-1.7610D-08	-2.9690D-25	-1.2592D-25
18	16	2.4850D-08	-4.8182D-09	1.7594D-26	-3.4114D-27
18	17	3.5357D-08	-4.7166D-08	2.9921D-27	-3.9914D-27
18	18	-3.4701D-10	5.0554D-08	-4.8943D-30	7.1302D-28
19	12	3.6058D-08	-3.4421D-09	2.4932D-22	-2.3800D-23
19	13	9.6876D-09	-6.6095D-08	4.4755D-24	-3.0535D-23
19	14	7.6389D-09	-2.7649D-08	2.5080D-25	-9.0777D-25
20	13	2.7630D-08	3.2389D-08	6.0278D-24	7.0661D-24
20	14	3.3687D-08	-6.5741D-08	4.7638D-25	-9.2967D-25
21	13	-1.9799D-08	-3.0711D-08	-2.1457D-24	-3.3283D-24
21	14	1.6623D-08	8.7215D-09	1.0766D-25	5.6486D-26
22	13	-7.9435D-09	4.1452D-09	-4.4658D-25	2.3304D-25
22	14	2.8516D-09	-4.2148D-08	8.9064D-27	-1.3164D-25

となる。

- ② (3.31) 式において G を万有引力定数, m_1 を太陽質量と見ることでもできるが, 実は Gm_1 はまとめて考えると天文定数におけるガウスの定数 k の 2 乗になっている。 k は天文単位系 (長さ: 1 天文単位, 質量: 太陽の質量, 時間: 平均太陽日) で与えられるが, そのうち長さや時間だけを km, sec になおしたとき

$$Gm_1 = 1.327125196 \times 10^{11}$$

となる。この Gm_1 は $(\text{km})^3 (\text{m}_1)^{-1} (\text{sec})^{-2}$ のディメンションを持つわけである。このようにしたのは, 精度の悪い万有引力定数や太陽の質量を直接用いることを避けたためである。月の場合に

$$m_2/m_1 = 1/27068807.1301$$

を用いる。

- ③ このプログラムでは太陽および月の位置ベクトル r_1, r_2 は Newcomb および Brown のテーブルを基にして E. W. Woorard によって瞬時の黄道面および真春分点に準拠する座標系に編集されたテーブルから計算している。^(3, 4) ここに簡単にその概要を示す。太陽の位置ベクトル (r_1)

瞬時の真の春分点をもとにした太陽の黄経 θ_1 , 黄緯 ϕ_1 , および太陽の地心距離 r_1 は次のように与えられる。(係数 K_i が $0.''100$ 以上の項)

$$\begin{aligned} \theta_1 = & L' \\ & + K_i \sin(a_i l' + b_i g' + c_i g''' + d_i g^{IV} + e_i g^V \\ & + f_i T + h_i l + j_i F + k_i D + m_i Q) \\ & + K_i \cos(a_i l' + b_i g' + c_i g''' + d_i g^{IV} + e_i T) \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \phi_1 = & 0.''576 \sin F \\ & + 0.''166 \sin(l' - 2g^{IV}) \\ & + 0.''100 \sin(4l' - 3g') \\ & - 0.''185 \cos(4l' - 3g') \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \log r_1 = & K_i \sin(a_i l' + b_i g' + c_i g''' + d_i g^{IV} \\ & + e_i g^V) + K_i \cos(a_i l' + b_i l + c_i D \\ & + d_i g' + e_i g''' + f_i g^{IV} + h_i g^V) \end{aligned} \quad (3.36)$$

以上の値を用いて $r_1 = (x, y, z)$ は

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_1 \cos \phi_1 \cos \theta_1 \\ y_1 &= r_1 \cos \phi_1 \sin \theta_1 \\ z &= r_1 \sin \phi_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

となる。

月の位置ベクトル (r_2)

瞬時の真の春分点をもとにした月の黄経 θ_2 , 黄緯 ϕ_2 , 地心距離 r_2 は次のように与えられる。(係数

が $0.''100$ 以上の項)

$$\begin{aligned} \theta_2 = & L \\ & + K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q \\ & + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T) \\ & + K_i \cos(\quad \quad \quad) \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \phi_2 = & K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q \\ & + f_i L' + h_i V) \\ & + K_i \cos(\quad \quad \quad) \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$r_2 = R_E / \sin P \quad (3.40)$$

P は平均赤道地平視差で, $0.''0006$ 以上の係数を考慮して

$$\begin{aligned} P = & K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' \\ & + h_i V + j_i J + k_i T) \\ & + K_i \cos(\quad \quad \quad) \end{aligned} \quad (3.41)$$

と与えられる。(3.34) ~ (3.41) 式における係数 k_i および $a_i \sim m_i$ の各値は表 3.7 に与えられている。

また l, l', F, D, Q については (3.16) 式で与えられているが, その他は次のようになる。⁽¹³⁾

$$\left. \begin{aligned} L' &= 279^\circ 41' 48.''04 + 100^\circ 0' 46.''08 T + 1.''09 T^2 \\ V &= 342^\circ 46' 01.''39 + 162^\circ 199' 12' 42.''88 T \\ J &= 238^\circ 03' 00.''88 + 8^\circ 156' 18' 11.''52 T \\ g' &= 212^\circ 36' 11.''6 + 162^\circ 197' 48' 13.''95 T + 4.''63 T^2 \\ g''' &= 319^\circ 31' 45.''9 + 53^\circ 59' 51' 30.''60 T + 0.''651 T^2 \\ g^{IV} &= 225^\circ 20' 16.''6 + 8^\circ 154' 41' 31.''29 T \\ g^V &= 175^\circ 28' 34.''3 + 3^\circ 141' 33' 05.''28 T \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

ここで T は (3.16) 式の場合と同様である。

(3.34) ~ (3.42) 式において

- l : 月の平均近点離角
- l' : 太陽の平均近点離角
- F : 月の平均黄緯引数
- D : 月の平均離角
- V : 金星の日心平均黄経
- J : 木星の "
- L : 月の平均黄経
- L' : 太陽の平均黄経
- Q : 月の昇交点の平均黄経
- g' : 金星の平均近点離角
- g''' : 火星の "
- g^{IV} : 木星の "
- g^V : 土星の "

を意味している。

表 3.7 (1) θ_i の係数

$$K_i \sin(a_i \ell' + b_i g' + c_i g''' + d_i g^{\text{IV}} + e_i g^{\text{V}} + f_i T + h_i \ell + j_i F + k_i D + m_i Q)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i	m_i
1	33502	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	351	2									
3	5	3									
4	25	4	0	92	3						
5	-20	1	99								
6	14	2	98								
7	-8	3	98								
8	-2	4	97								
9	-3	5	97								
10	7	13	92	0	0	0	4.5				
11	1	1	0	99							
12	3	2	0	98							
13	3	1	0	98							
14	1	2	0	97							
15	-2	3	0	96							
16	1	2	0	96							
17	-1	3	0	95							
18	-13	0	0	0	1						
19	-13	2	0	0	98						
20	-7	1	0	0	98						
21	-3	2	0	0	97						
22	-1	1	0	0	97						
23	-2	1	0	0	0	99					
24	-2	0	0	0	0	1					
25	31	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
26	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
27	2							1	0	99	0
28	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	99	0
29	-84										1
30	1										2
31	-6	0	0	0	0	0	0	0	2	98	2
32	-1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
33	-83.58T	1									
34	-1.75T	2									
35	-0.25T ²	1									

表 3.7(2) θ_1 の係数

$$K_i \cos(a_i l' + b_i g' + c_i g'' + d_i g^{IV} + e_i T)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	11	1	99	0	0	0
2	-23	2	98			
3	9	3	98			
4	-3	3	97			
5	7	4	97			
6	4	5	97			
7	-1	4	96			
8	1	6	96			
9	1	8	95			
10	6	13	92	0	0	4.5
11	18	4	0	92		
12	-1	1	0	99		
13	10	2	0	98		
14	-8	1	0	98		
15	2	2	0	97		
16	3	2	0	96		
17	1	8	0	85		
18	-1	2	0	0	99	0
19	-35	1	0	0	99	0
20	-1	0	0	0	1	0
21	-3	1	0	0	98	0
22	-1	3	0	0	97	0
23	-1	7	97	96	0	0

(K_i の単位は $\times 10^{-6}$ rad)

表 3.7(3) $\log r_1$ の係数

$$K_i \sin(a_i l' + b_i g' + c_i g''' + d_i g^{IV} + e_i g^V)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	-1146	1	99	0	0	0
2	136	1	98			
3	5822	2	98			
4	-632	3	98			
5	1044	3	97	0	0	0
6	-1448	4	97	0	0	0
7	148	5	97			
8	337	4	96			
9	189	5	96			
10	-91	6	96	0	0	0
11	93	5	95	0	0	0
12	136	7	95	0		
13	-119	1	0	99		
14	1976	2	0	98		
15	137	1	0	98	0	0
16	201	2	0	97	0	0
17	-125	3	0	96		
18	-96	2	0	96		
19	-94	4	0	94		
20	-193	2	0	0	99	0
21	-7067	1	0	0	99	0
22	-89	0	0	0	1	
23	203	2	0	0	98	
24	-486	1	0	0	98	
25	-278	3	0	0	97	0
26	104	2	0	0	97	0
27	-73	3	0	0	96	
28	-79	1	0	0	0	99

(K_i の単位は $\times 10^{-9}$ rad)

表 3.7(4) $\log r_1$ の係数

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i D + d_i g' + e_i g''' + f_i g^{IV} + h_i g^V)$$

i	$K_i (\times 10^{-9})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i
1	30570	0	0	0	0	0	0	0
2	-7274120	0	1					
3	-91380	0	2					
4	-1450	0	3					
5	-85	0	0	0	1			
6	-2062	0	1	0	99			
7	84	0	1	0	98			
8	3593	0	2	0	98			
9	-596	0	3	0	98			
10	-381	0	4	0	97			
11	126	0	5	0	97			
12	-166	0	4	0	96			
13	-134	0	5	0	95			
14	-80	0	6	0	94			
15	-92	0	1	0	0	99		
16	-573	0	2	0	0	98		
17	-154		3			97		
18	-77		2			97		
19	461		3			96		
20	87	0	4	0	0	95		
21	87	0	3	0	0	95		
22	-102		4			94		
23	91		3			92	3	
24	-91		5			92	3	
25	-78	0	2	0	0	0	99	
26	227	0	0	0	0	0	1	0
27	79	0	1				1	
28	102	0	3				98	
29	4021	0	2				98	
30	1376	0	1	0	0	0	98	
31	796	0	2	0	0	0	97	
32	172	0	1				97	
33	110	0	2				96	
34	422	0	1	0	0	0	0	99
35	-152	0	2	0	0	0	0	98
36	-103	0	1	0	0	0	0	98
37	1336	0	0	1				
38	-133	1	0	99				
39	-150 T	0	0	0	0	0	0	0
40	18140 T	0	1					
41	460 T	0	2					

表 3.7 (5) θ_2 の係数

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
1	-607	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	11490				2					
3	2				3					
4	67				4					
5	1	0	0	0	6					
6	1	0	0	2	97					
7	-267				98					
8	3				99					
9	-1996				0					
10	1	0	0	0	1					
11	-28	0	0	0	2					
12	2	0	0	4	0					
13	2	0	1	98	98					
14	-7				2					
15	-9	0	1	0	96					
16	-801	0	0	0	98					
17	3				99					
18	-3238	0	0	0	0					
19	87				1					
20	-118				2					
21	1	0	0	0	3					
22	-1	0	0	0	4					
23	-10	0	1	2	98					
24	2	0	0	0	0					
25	-1	0	2	0	96					
26	-39	0	0	0	98					
27	-36				0					
28	-1	0	0	0	2					
29	-2	0	3	0	98					
30	12	1	98	0	98					
31	12									
32	4	0	0	0	2					
33	-2	1	99	98	2					
34	3	1	99	0	96					
35	-1				97					
36	138	0	0	0	98					
37	-5				99					
38	716				0					
39	-1	0	0	0	1					
40	71				2					
41	1	0	0	0	4					
42	-1	1	99	2	0					
43	1	1	0	98	96					
44	45				98					
45	192				0					

表 3.7(5) θ_2 の係数 (つづき)

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
46	-31	0	0	0	2	0	0	0	0	0
47	-2	1	0	0	94					
48	-186				96					
49	16				97					
50	-22236	0	0	0	98					
51	90	0	0	0	99					
52	109760				0					
53	-41	0	0	0	1					
54	931				2					
55	10	0	0	0	4					
56	-1	1	0	2	96					
57	-1				98					
58	-219				0					
59	-5	0	0	0	2					
60	2	1	1	98	98					
61	-21	1	1	0	96					
62	1				97					
63	-999				98					
64	1	0	0	0	99					
65	-532									
66	6	0	0	0	1					
67	-14				2					
68	1	1	1	2	0					
69	-2	1	2	0	96					
70	-36	0	0	0	98					
71	-6									
72	-1	1	3	0	98					
73	1	2	98	0	98					
74	1				0					
75	2	2	99	0	96					
76	-12	0	0	0	98					
77	-2				99					
78	47				0					
79	6	0	0	0	2					
80	1	2	0	98	96					
81	3	0	0	0	98					
82	-6				0					
83	-2				2					
84	-3	2	0	0	94					
85	-149				96					
86	6	0	0	0	97					
87	-1026				98					
88	8				99					
89	3728				0					
90	-3	0	0	0	1					

表 3.7(5) θ_2 の係数 (つづき)

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
91	70	0	0	0	2					
92	1				4					
93	3	2		2	98					
94	-19				0					
95	-1	0	0	0	2					
96	-13	2	1	0	96					
97	-42				98					
98	-37	0	0	0	0					
99	-1	0	0	0	2					
100	-1	2	2	0	96					
101	-1	0	0	0	98	0	0	0	0	0
102	-1	3	99	0	98					
103	3				0					
104	-1	3	0	0	94					
105	-6				96					
106	-64				98					
107	1				99					
108	175				0					
109	5				2					
110	-2	3	0	2	0					
111	-2	3	1	0	98					
112	-3				0					
113	-5	4	0	0	98					
114	9				0					
115	1	5	0	0	0					
116	2.002 T	0	1	0	98					
117	8.096 T				0					
118	-0.218 T	0	0	0	1					
119	0.296 T				2					
120	0.194 T	0	0	2	98					
121	0.179 T									
122	-0.344 T	1	99	0	98					
123	-1.789 T				0					
124	-0.175 T				2					
125	2.497 T	1	1	0	98					
126	1.328 T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
127	0.179 T	1	2	0	98					
128	1	99	0	0	2	0	84	18		
129	3						97	3		
130	-6	0	0	0	0	0	2	0	98	
131	-1	1	0	0	0	0	3	90		
132	-61						16	82	0	1.8
133	-2	0	0	0	0	99				
134	2					1				
135	-1	0	0	0	2	0	16	82		

表 3.7(5) θ_2 の係数 (つづき)
 $K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L + h_i V + j_i J + k_i T)$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
136	- 3	2	0	0	0	0	16	82		
137	- 1	0	0	0	98	0	16	82		
138	3						84	18		
139	3						99	0	1	
140	- 4	0	0	0	0	0	1	99		
141	- 1	0	0	0	0	0	13	92		
142	3	0	0	0	0	0	0	0	0	20°.2
143	-49	0	0	0	0	1				
144	- 1						16	82		
145	2	0	0	2	0	1				
146	1	0	0	0	0	2				
147	- 1			2	0	2				
148	- 6	0	0	2	98	2				

表 3.7(6) θ_2 の係数 (つづき)

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
1	1	0	0	0	0	0	21	80	0	0
2	- 1	1					3	90		
3	32	0	0	0	0	0	16	82	0	1°.8
4	1									20°.2
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-20°.2
6	1	0	0	0	98	0	0	0	0	20°.2
7	1				98					-20°.2
8	2	2	0	0	0	0	16	82	0	0
9	2						84	18	0	0
10	1						13	92	0	0
11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	20°.2
12	- 1	0	0	0	0	1				

表 3.7 (7) ϕ_2 の係数

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i
1	6	0	0	1	4	0	0	0
2	569				2			
3	-26				1			
4	89503				0			
5	23	0	0	0	99			
6	-3023	0	0	0	98			
7	2				97			
8	-18				96			
9	-1	0	0	3	2			
10	-30				0			
11	-10				98			
12	-6	0	1	1	2			
13	4				1			
14	-31				0			
15	-144	0	0	0	98			
16	-2				96			
17	-1	0	1	99	4			
18	-58				2			
19	4				1			
20	-24	0	0	0	0			
21	-39	0	0	0	98			
22	-1				96			
23	-6	0	2	1	98			
24	-1	0	2	99	2			
25	-2				98			
26	-5	1	0	3	0			
27	-2				98			
28	1	1	0	1	4			
29	73				2			
30	-3	0	0	0	1			
31	4897				0			
32	2	0	0	0	99			
33	-807				98			
34	2				97			
35	-32	0	0	0	96			
36	2	1	0	99	4			
37	161	1	0	99	2			
38	-3				1			
39	4847				0			
40	-1	0	0	0	99			
41	-967	0	0	0	98			
42	1				97			
43	-15				96			
44	-1	1	0	97	2			
45	14				0			

表 3.7(7) ϕ_2 の係数 (つづき)
 $K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V)$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i
46	1				98	0	0	0
47	-1	1	1	1	2			
48	1				1			
49	-26				0			
50	-36	0	0	0	98			
51	-3	0	0	0	96			
52	-4	1	1	99	2			
53	-25				0			
54	-43				98			
55	-2	0	0	0	96			
56	6	1	99	1	2			
57	33				0			
58	4				98			
59	1	1	99	99	4			
60	8	0	0	0	2			
61	28	0	0	0	0			
62	6				98			
63	-1	1	2	1	98			
64	-2	1	2	99	98			
65	1	1	98	1	2			
66	1	0	0	0	98			
67	1				96			
68	1	1	98	99	0			
69	1				98			
70	1	0	0	0	96			
71	7	2	0	1	2			
72	301				0			
73	1				99			
74	-75				98			
75	-2	0	0	0	96			
76	11	2	0	99	2			
77	154				0			
78	8				98			
79	-12				96			
80	-1	0	0	0	94			
81	-1	2	0	97	0			
82	1				98			
83	-3	2	1	1	0			
84	-3				98			
85	-1	2	1	99	2			
86	-1	0	0	0	0			
87	1				98			
88	-1				96			
89	1	2	99	1	2			
90	4	0	0	0	0			

表3.7(7) ϕ_2 の係数 (つづき)

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i
91	1	2	99	99	2	0	0	0
92	2				0			
93	1	3	0	1	2			
94	20				0			
95	-8	0	0	0	98			
96	1	3	0	99	2			
97	8				0			
98	-1				98			
99	1	4	0	1	0			
100	-1	0	0	0	98			
101	1	4	0	99	0			
102	0.4 T	0	1	1	98			
103	0.1 T	0	1	99	98			
104	0.1 T	1	1	1	98			
105	0.1 T	1	1	99	98			
106	-3	1	0	1	0	0	16	82
107	-3	1	0	99	0	0	16	82
108	-40	0	0	1	0	1	0	0
109	1	0	0	1	0	1		
110	-2	1	0	1	0	1		
111	-1	0	0	1	0	99		
112	-2	1	0	99	0	99		

表3.7(8) ϕ_2 の係数

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V)$$

i	$K_i (\times 10^{-6} \text{ rad})$	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i
1	1	1	0	1	0	0	16	82
2	1	1	0	99	0	0	16	82
3	7	0	0	1	0	1	0	0

表 3.7(9) P の係数

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	K_i (註)	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
1	10 ⁷	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-2858	0	0	0	1					
3	82488				2					
4	6				3					
5	763	0	0	0	4					
6	9	0	0	0	6					
7	9	0	0	2	96					
8	-6				97					
9	-307				98					
10	20	0	0	0	99					
11	-35				0					
12	-3	0	0	0	2					
13	6	0	1	98	0					
14	3				2					
15	3	0	1	0	94					
16	99	0	0	0	96					
17	3				97					
18	5604				98					
19	-12	0	0	0	99					
20	-1169				0					
21	435	0	0	0	1					
22	-877				2					
23	9				3					
24	-15				4					
25	-20	0	1	2	98					
26	3	0	0	0	0					
27	9	0	2	0	96					
28	269				98					
29	-26				0					
30	-9	0	0	0	2					
31	12	0	3	0	98					
32	-61	1	98	0	98					
33	58				0					
34	32				2					
35	-9	1	99	98	0					
36	-9	0	0	0	2					
37	-29	1	99	0	96					
38	12				97					
39	-660				98					
40	3369	0	0	0	0					
41	-3	0	0	0	1					
42	672				2					
43	18				4					
44	-32	1	0	98	98					
45	3				99					

(註) K_i の単位は $\times(1.65929422 \times 10^{-9})$ rad となる。

表 3.7 (9) P の係数 (つづき)

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
46	-2086				0	0	0	0	0	0
47	-140	0	0	0	2					
48	26	1	0	0	94					
49	1756				96					
50	-114	0	0	0	97					
51	100247	0	0	0	98					
52	35				99					
53	545008				0					
54	-318				1					
55	9017	0	0	0	2					
56	126	0	0	0	4					
57	3				6					
58	3	1	0	2	96					
59	-242				98					
60	3	0	0	0	99					
61	-3				0					
62	-3	1	1	98	98					
63	6				0					
64	3				2					
65	6	1	1	0	94					
66	196	0	0	0	96					
67	-6				97					
68	4219				98					
69	-2773				0					
70	47	0	0	0	1					
71	-140	0	0	0	2					
72	-3				4					
73	-9	1	1	2	98					
74	12	1	2	0	96					
75	140	0	0	0	98					
76	-32	0	0	0	0					
77	3	1	3	0	98					
78	6	2	98	0	0					
79	3				2					
80	-12	2	99	0	96					
81	-6	0	0	0	98					
82	-9				99					
83	371				0					
84	61				2					
85	3	0	0	0	4					
86	-41	2	0	98	98					
87	-15				2					
88	32	2	0	0	94					
89	-3				95					
90	1087	0	0	0	96					

表 3.7(9) P の係数 (つづき)

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
91	-26	0	0	0	96	0	0	0	0	0
92	-888				98					
93	47				99					
94	29700				0					
95	-29	0	0	0	1					
96	827	0	0	0	2					
97	15				4					
98	-26	2	0	2	98					
99	6	2	1	0	94					
100	93	0	0	0	96					
101	-56	0	0	0	98					
102	-304				0					
103	6				1					
104	-15				2					
105	6	2	2	0	96					
106	-3	0	0	0	98					
107	-3				0					
108	-6	3	99	0	98					
109	35				0					
110	6	0	0	0	2					
111	-3	3	0	98	96					
112	15	3	0	0	94					
113	20				96					
114	-348				98					
115	6	0	0	0	99					
116	1817	0	0	0	0					
117	-3				1					
118	70				2					
119	3				4					
120	-3	3	0	2	98					
121	3	3	1	0	96					
122	-12				98					
123	-29				0					
124	-3				2					
125	-38	4	0	0	98					
126	117	0	0	0	0					
127	6				2					
128	-3	5	0	0	98					
129	9				0					
130	2.19 T	0	1	0	2					
131	2.92 T	0	1	0	0					
132	-14.01 T	0	1	0	98					
133	6.93 T	1	1	0	0					
134	-10.55 T	1	1	0	98					
135	-1.68 T	1	99	0	2					

表 3.7(9) P の係数 (つづき)

$$K_i \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
136	-8.42 T	1	99	0	0	0	0	0	0	0
137	1.65 T	1	99	0	98					
138	-1.34 T	0	2	0	98					
139	-1.09 T	0	1	0	1					
140	0.76 T	2	1	0	0					
141	-0.93 T	2	99	0	0					
142	-0.70 T	1	2	0	98					
143	17	0	0	0	0	0	16	82	0	0
144	-3	0	0	0	2	0	16	82	0	0
145	5				2	0	99	0	1	0
146	-5	0	0	0	2	0	2	98	0	0
147	2	1	0	0	0	0	0	0	0	20°2
148	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	-20°2
149	2						84	18	0	0
150	-5	0	0	0	2	0	16	82	0	0
151	16	99	0	0	2	0	97	3	0	0
152	-28				2	0	2	0	98	0
153	11				2	0	2	0	97	0
154	-17	2	0	0	0	0	16	82	0	0
155	3				98	0	16	82	0	0
156	-2	3	0	0	0	0	16	82	0	0
157	5	1	0	0	98	0	16	82	0	0
158	3				2	1				
159	-3				2	99				
160	12	1	0	0	0	1	0	0	0	0
161	-12	1	0	0	0	99	0	0	0	0

表 3.7(10) P の係数

$$K_i \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D + e_i Q + f_i L' + h_i V + j_i J + k_i T)$$

i	K_i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	h_i	j_i	k_i
1	9	0	0	0	0	0	16	82	0	0
2	-2				2	0	16	82	0	0
3	-2				2	0	0	0	0	20°2
4	-2				2	0	0	0	0	-20°2
5	-3	1	0	0	0	0	0	0	0	20°2
6	-3									-20°2
7	-3	0	0	0	2	0	16	82	0	0
8	2				98	0	0	0	0	20°2
9	2				98	0	0	0	0	-20°2
10	-9	2	0	0	0	0	16	82	0	0
11	2				98	0	16	82	0	0
12	3	1	0	0	98	0	16	82	0	0

3.2.3 太陽輻射圧による加速度

$$\mathbf{a}_{sp} = F(s) \cdot \mathbf{a}_{spd} + \mathbf{a}_{spr} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{a}_{spd} = P \left(\frac{A}{m} \right) \left[1 + \frac{2}{3} \tau_d + \tau_s \right] \mathbf{r}_{do} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{spr} = P_r \left(\frac{A}{m} \right) & \left| \mathbf{r}_{do} \cdot \mathbf{r}_o \right| \left[(1 - \tau_s) \mathbf{r}_o \right. \\ & \left. + \left\{ 2\tau_s (\mathbf{r}_{do} \cdot \mathbf{r}_o) \pm \frac{2}{3} \tau_d \right\} \mathbf{r}_{do} \right] \end{aligned} \quad (3.45)$$

右辺の符号は

($\mathbf{r}_{do} \cdot \mathbf{r}$) > 0 のとき +
($\mathbf{r}_{do} \cdot \mathbf{r}$) < 0 のとき -

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_d &= \mathbf{r} - \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_{do} &= (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1| \\ \mathbf{r}_o &= \mathbf{r} / |\mathbf{r}| \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

- ① ここでは衛星の形状を板状とし、その法線方向の単位ベクトルは常に太陽中心を向いていると仮定している。(3.43)式で \mathbf{a}_{spd} は直接の輻射圧によって衛星に生じる摂動加速度、また \mathbf{a}_{spr} は地球の反射光による輻射圧によって生じる加速度である。
- ② \mathbf{r}, \mathbf{r}_1 は地球中心から測った衛星と太陽の位置ベクトルであり、 A, m は衛星の断面積および質量である。また τ_s, τ_d は反射係数であるが、光の反射を正反射 (Specularly reflected radiation) と乱反射 (Diffusely reflected radiation) に分け、 τ_s は前者、 τ_d は後者の反射係数とする。
- ③ P は直接光による輻射圧、 P_r は地球の反射光による輻射圧でそれぞれ次のようになる。⁽⁵⁾

$$P = P_o \wedge |\mathbf{r}_d|^2 \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} P_r = \frac{2}{\pi} P \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 & \left\{ \tau_{dE} U(\theta'_T - \theta) \right. \\ & \times \left[I_6 - U(\theta - \theta_T) I_7 \right] + \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \tau_{dE}}{3 - S_1} \right) \\ & \left. \times \left[C_4 - S_1 (C_5 \cos^2 \delta + C_6 \sin^2 \delta) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} I_6 = \pi \cos \theta & \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{R_E}{r} \right) - \frac{1}{15} \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{12} - \frac{5}{18\pi} \right) \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 - \frac{1}{105} \left(\frac{R_E}{r} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} I_7 = \frac{1}{3} (\theta \cos \theta - \sin \theta) & + \frac{\pi}{16} (1 + 2 \cos \theta \\ & - 3 \cos^2 \theta) \left(\frac{R_E}{r} \right) + \left[\left(\frac{107}{120} - \frac{\pi}{4} \right) \sin \theta \right. \\ & - \frac{1}{15} \theta \cos \theta - \frac{8}{15} \sin \theta \cos^2 \theta \left. \right] \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 \\ & + \left[\left(\frac{\pi}{24} - \frac{5}{36} \right) \cos \theta - \frac{\pi}{8} \cos^2 \theta \right. \\ & + \frac{5}{24} \pi \cos^4 \theta \left. \right] \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \\ & + \left[\left(\frac{11}{16} \pi - \frac{361}{168} \right) \sin \theta - \frac{1}{105} \theta \cos \theta \right. \\ & - \frac{8}{21} \sin \theta \cos^2 \theta + \frac{32}{35} \sin \theta \cos^4 \theta \\ & \left. - \frac{1}{24} \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} \right] \left(\frac{R_E}{r} \right)^4 \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\left. \begin{aligned} C_4 &= \frac{\pi}{2} + \left(\frac{7}{3} - \frac{3}{4} \pi \right) \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 \\ & + \left(\frac{23}{16} \pi - \frac{27}{6} \right) \left(\frac{R_E}{r} \right)^4 \\ C_5 &= -\frac{3}{8} \pi - \frac{2}{15} \pi \left(\frac{R_E}{r} \right) + \left(1 - \frac{17}{48} \pi \right) \\ & \times \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 + \frac{4}{105} \pi \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \\ C_6 &= \frac{\pi}{4} + \frac{4}{15} \pi \left(\frac{R_E}{r} \right) + \frac{\pi}{12} \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 \\ & - \frac{8}{105} \pi \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \\ & + \left(\frac{4}{9} - \frac{17}{96} \pi \right) \left(\frac{R_E}{r} \right)^4 \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

ここで用いられている定数は

- P_o : 太陽定数 (太陽から 1AU のところでの輻射エネルギー密度) で $4.7 \times 10^{-5} \text{ dyn/cm}^2$
- τ_{dE} : 地球のアルベドで 0.40
- S_1 : Delayed IR (赤外線) の輻射係数で 0.40

としている。また θ は地心から見て、太陽および衛星の方向のなす角度で、 θ_T は衛星から見たとき、地平線に terminator (地球の明るい部分と暗い部分の境界) が入ってくる瞬間の θ の値で、 θ'_T は terminator が地平線から消える瞬間の θ の値である。衛星の視界に地球の反射面が入っているのは

$\theta_T < \theta < \theta'_T$ の範囲においてである。図 3.7 からわかるように θ_T および θ'_T は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_T &= \sin^{-1}\left(\frac{R_E}{r}\right) \\ \theta'_T &= \frac{\pi}{2} + \cos^{-1}\left(\frac{R_E}{r}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

そこで step 関数 U は次のように定義される。

$$U(\theta - \theta_T) \begin{cases} = 1 & (\theta_T \leq \theta) \\ = 0 & (\theta_T > \theta) \end{cases}$$

$$U(\theta'_T - \theta) \begin{cases} = 1 & (\theta'_T > \theta) \\ = 0 & (\theta'_T \leq \theta) \end{cases}$$

以上は radial 成分であって、この外に transverse 成分もあるが、その効果は小さいので省略している。また r_{de} の緯度によるちがいを特に考慮しないで一定としている。

- ④ 地球による影は円筒状を仮定し、衛星が影に入っているかどうかの判定は次のように行う。(3.43) 式における $F(s)$ は影の関数で次のように定められる。(3.6)

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{衛星が地球の影にあるとき。} \\ 1 & \text{衛星が地球の影にないとき。} \end{cases}$$

- (i) $|r_{SE} + r| \leq |r_{SE}|$ の場合 $F(s) = 1$
 (ii) $|r_{SE} + r| > |r_{SE}|$ の場合

$$D_1 \neq 0 \text{ のとき } F(s) = \begin{cases} 1 & ; D_1 > 0 \\ 0 & ; D_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$D_1 = 0 \text{ のとき } F(s) = \begin{cases} 1 & ; D_2 \geq 0 \\ 0 & ; D_2 < 0 \end{cases}$$

ここで

$$D_1 = |r \times \frac{r_{SE}}{|r_{SE}|}| - R_E$$

$$D_2 = |(r + \dot{r}) \times \frac{r_{SE}}{|r_{SE}|}| - R_E$$

ここで r_{SE} は太陽中心から測った地球の位置ベクトルで $r_{SE} = -r_1$ となる。また図 3.8, 3.9 からわかるように $D_2 \geq 0$ のときは衛星が影を離れるところであり、 $D_2 < 0$ の場合が衛星が影に入るところである。

3.2.4 大気抵抗によって生じる加速度

$$a_D = -\frac{1}{2} \rho C_D \left(\frac{A}{m}\right) V V \quad (3.53)$$

- ① A, m は衛星の断面積および質量、 C_D は大気抵抗係数である。また $V = |V|$ は地球固定座標系での衛星の速度である(大気は地球に全く一致して自転しているものとしている)。
 ② 大気抵抗による摂動加速度は衛星の高度が 90km

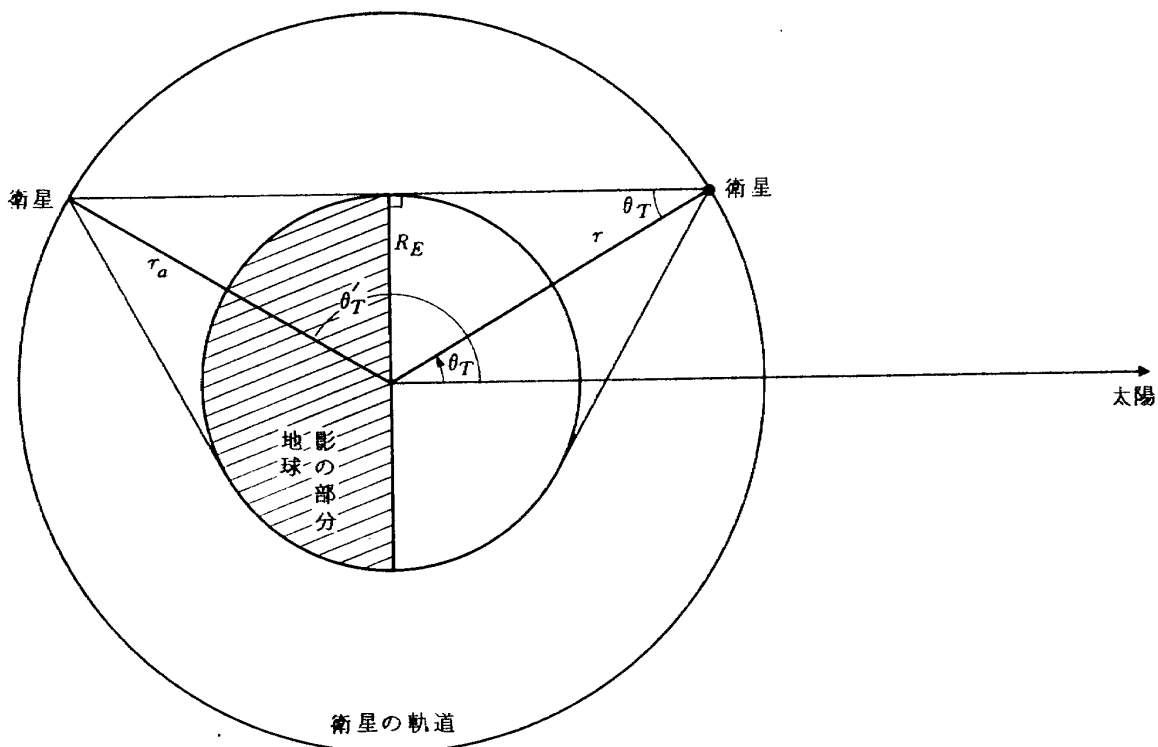


図 3.7

から 1000km の範囲で考慮する。

③ ρ は大気密度で Jacchia 71 年モデルによって求められるが、その概要は図 3.10 のようになる。基本テーブルの内容は基本密度 ρ_B とヘリウム (He) の数密度 (Number Density) d_{He} を大気外圏温度 (Exospheric Temperature) T_∞ と高度の関数として与えたもので、その常用対数をとった値 ($\log_{10} \rho_B$, $\log_{10} d_3$) を表 3.7, 3.8 にそれぞれ示す。これらの値の求め方については別の報告で示す予定なのでここでは省略する。

④ ρ を求めるのに必要な計算を以下に示す。

(i) 大気外圏温度 T_∞ の計算

$$T_\infty = T_l + \Delta T_\infty \quad (3.54)$$

$$T_l = T_N \left\{ 1 + \left(\frac{T_D - T_N}{T_N} \right) \cos^3 \frac{\tau}{2} \right\} \quad (3.55)$$

$$\Delta T_\infty = 14^\circ K_p + 0.02 \exp(K_p) \quad (3.56)$$

(高度: $90 \leq h < 200\text{km}$ のとき)

$$\Delta T_\infty = 28^\circ K_p + 0.03 \exp(K_p) \quad (3.57)$$

(高度: $200 \leq h \leq 1000\text{km}$ のとき)

ここで T_l は日周変化, ΔT_∞ は地磁気活動による変化で, K_p は地磁気変化の指標 (3-hour geomagnetic planetary index) である。 ΔT_∞ の変化は K_p の変化に対して 6, 7 時間の時間遅れがある。(3.54) 式の右辺には次の各値を代入する。

$$\left. \begin{aligned} T_D &= T_C (1 + 0.3 \cos^{2.2} \eta) \\ T_N &= T_C (1 + 0.3 \sin^{2.2} \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

$$T_C = 379^\circ + 3.24 \bar{F}_{10.7} + 1.3 (F_{10.7} - \bar{F}_{10.7}) \quad (3.59)$$

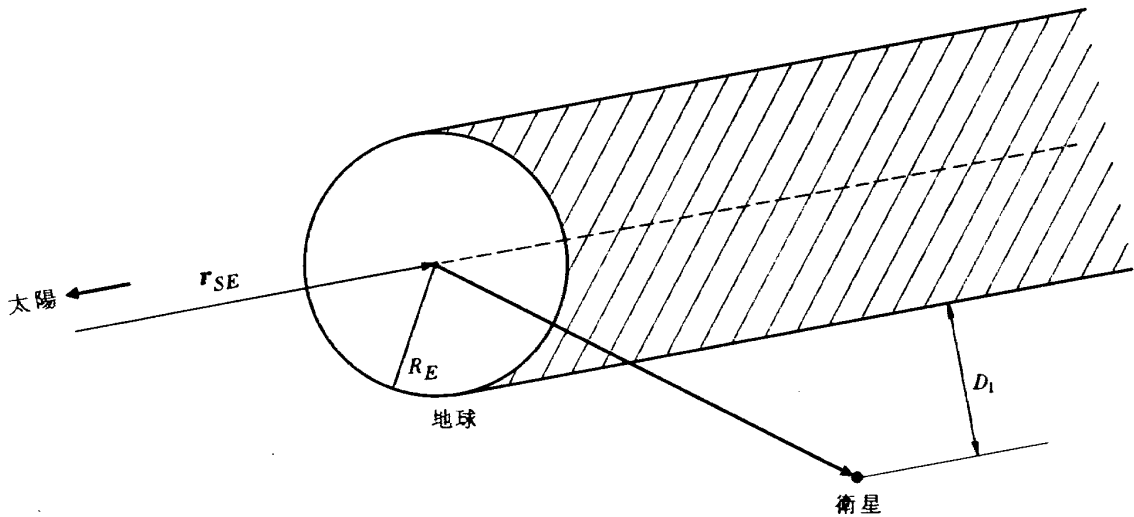


図 3.8

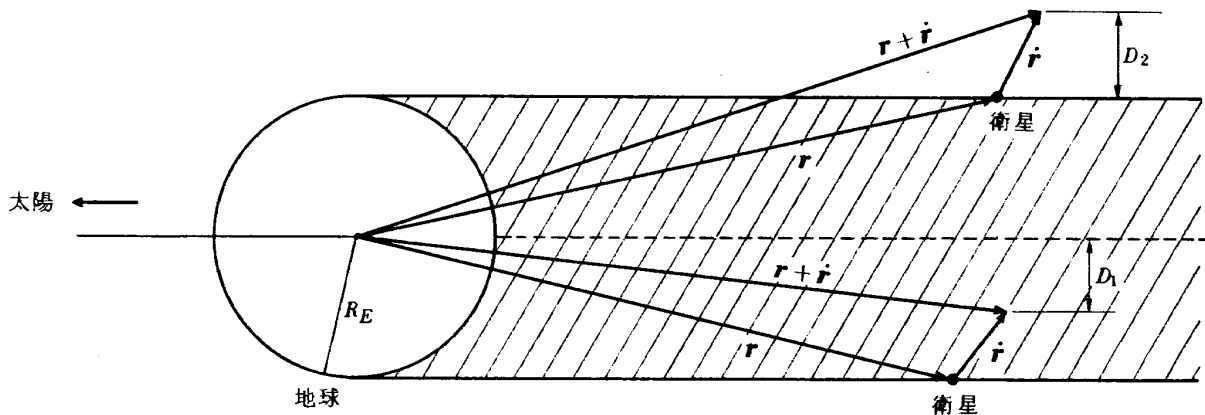


図 3.9

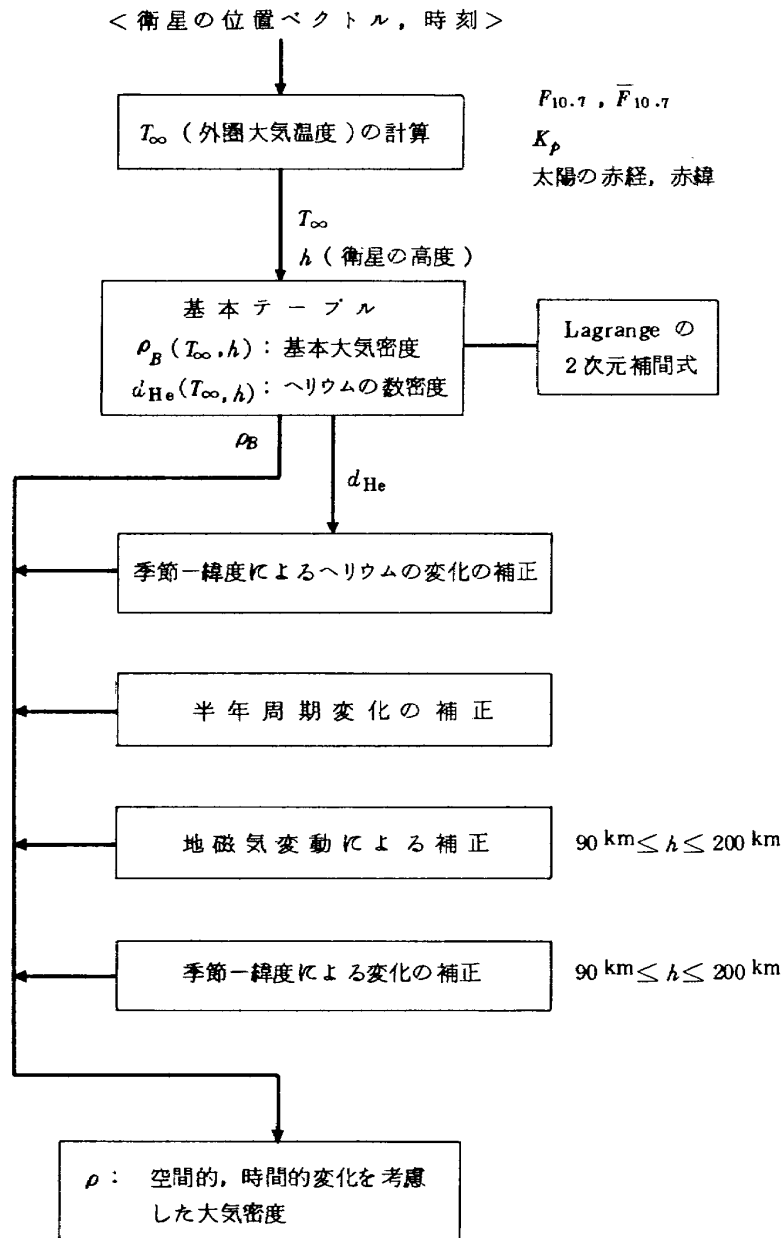


図 3.10 Jacchia 71 モデルによる大気密度

$$\left. \begin{aligned} \eta &= |\delta - \delta_1| / 2 \\ \theta &= |\delta + \delta_1| / 2 \end{aligned} \right\} \quad (3.60)$$

$$\tau = H - 37^\circ + 6^\circ \sin(H + 43^\circ) \quad (3.61)$$

$$H = \alpha - \alpha_1 \quad (3.62)$$

ここで T_D, T_N はそれぞれ昼間最高温度, 夜間最低温度で, T_C は太陽活動 (EUV 放射) による変化, $F_{10.7}$ は 10.7 cm 波長の solar flux の指標で $\bar{F}_{10.7}$ は 90 日間の平均である。また α, δ および α_1, δ_1 はそれぞれ衛星と太陽の赤経, 赤緯である。以上のようにして求まった T_∞ および衛星の高度 h から 2 次元の Lagrange 補間公式 (共通ルーチン参照) によ

って ρ_B および d_{He} を求める。
(ii) 基本密度 ρ_B の補正

衛星の高度: $90 \leq h < 200 \text{ km}$

$$\rho = \rho_B \cdot 10^{(\epsilon_g + \epsilon_{sl} + \epsilon_s)} + \Delta\rho \quad (3.63)$$

衛星の高度: $200 \leq h \leq 1000 \text{ km}$

$$\rho = \rho_B \cdot 10^{\epsilon_s} + \Delta\rho \quad (3.64)$$

ρ が求めたい大気密度で,

- ϵ_g : 地磁気活動による変動の補正項
- ϵ_{sl} : 季節-緯度による低温度圏の変化の補正項

ϵ_s : 半年周期の変動の補正項
 $\Delta\rho$: 季節一緯度によるヘリウム (He) の変動
 の補正項

はそれぞれ次のように与えられる。

$$\epsilon_g = 0.012 K_p + 1.2 \times 10^{-5} \exp(K_p) \quad (3.65)$$

$$\epsilon_{sI} = S \frac{\delta}{|\delta|} P \sin^2 \delta \quad (3.66)$$

$$\left. \begin{aligned} S &= 0.014 (h - 90) \exp[-0.0013 (h - 90)^2] \\ P &= \sin(2\pi\Phi + 1.72) \\ \Phi &= (\text{MJD} - 36204) / 365.2422 \end{aligned} \right\} \quad (3.67)$$

$$\epsilon_s = f(h) \cdot g(t) \quad (3.68)$$

$$f(h) = (5.876 \times 10^{-7} h^{2.331} + 0.06328) \times \exp[-2.868 \times 10^{-3} h] \quad (3.69)$$

$$g(t) = 0.02835 + 0.3817 [1 + 0.4671 \sin(2\pi\tau + 4.137)] \times \sin(4\pi\tau + 4.259) \quad (3.70)$$

$$\tau = \Phi + 0.09544 \left\{ \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(2\pi\Phi + 6.035) \right]^{1.650} - \frac{1}{2} \right\} \quad (3.71)$$

$$\Delta\rho = M_{\text{He}} \cdot \Delta d_{\text{He}} \quad (3.72)$$

$$\Delta d_{\text{He}} = d_{\text{He}} (10^{\epsilon_{\text{He}}} - 1) \quad (3.73)$$

$$\epsilon_{\text{He}} = 0.65 \left| \frac{\delta_1}{\epsilon} \right| \left[\sin^3 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2} \frac{\delta_1}{|\delta_1|} \right) - \sin^3 \frac{\pi}{4} \right] \quad (3.74)$$

(3.72) 式で M_{He} はヘリウムの分子量で

$$M_{\text{He}} = 4.0026 \quad (\text{g/mole})$$

(3.74) 式の ϵ は黄道面傾斜角で

$$\epsilon = 23.44$$

でそれぞれ与えられる。また (3.69) 式における高度 h は km を単位とする。

3.2.5 制御力によって生じる加速度

制御推力の大きさによって次の三つに場合を分ける。

1. Impulsive thrust : 推力が 10^3 Newton 以上
2. Medium thrust : 推力が 10 Newton 以上
3. Low thrust : 推力が 0.1 ~ 1 Newton

さらに接線方向 (速度ベクトル方向) に推力を加える場合を特に考慮している。図 3.11 に各推力形式に対応した入力および数値積分の取りあつかいを示した。そこで一般の制御力というのは任意の方向に加えられる制御力を意味する。

3.2.5.1 Impulsive thrust

(1) 一般の制御力の場合

$$\mathbf{r}_{t+} = \mathbf{r}_{t-} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{V} \cdot \delta t \quad (3.75)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{t+} = \dot{\mathbf{r}}_{t-} + \Delta \mathbf{V} \quad (3.76)$$

$$m_{t+} = m_{t-} - \Delta m \quad (3.77)$$

① 入力として必要なのは

$\Delta \mathbf{V}$: Impulsive な速度増分ベクトル

Δm : 燃料消費にともなう質量減少

δt : 推力付加時間

である。

推力形式	入力形式		運動方程式の数値積分
	一般の制御力	接線方向の制御力	
Impulsive Thrust	$\Delta \mathbf{V}$: 速度増分 (ベクトル) Δm : 質量減少 δt : 推力付加時間	$ \Delta \mathbf{V} $: 速度増分 (スカラー) Δm : 質量減少 δt : 推力付加時間	推力付加以前と同じステップサイズ h で積分を再スタートさせる。
Medium Thrust	\mathbf{F}_c : 推力 (ベクトル) \dot{m} : 質量減少率 h_c : 指定ステップサイズ	$ \mathbf{F}_c $: 推力 (スカラー) \dot{m} : 質量減少率 h_c : 指定ステップサイズ	推力付加中は指定したステップサイズ h_c で積分し、付加終了後、付加以前のステップサイズ h で積分を再スタートさせる。
Low Thrust	\mathbf{F}_c : 推力 (ベクトル) \dot{m} : 質量減少率	$ \mathbf{F}_c $: 推力 (スカラー) \dot{m} : 質量減少率	ステップサイズは特に変えない。

図 3.11

表 3.8(1) 基本密度 ρ_B ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 950^\circ$)

	500.0	550.0	600.0	650.0	700.0	750.0	800.0	850.0	900.0	950.0
90.0	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609
92.0	-8.6205	-8.6206	-8.6206	-8.6206	-8.6206	-8.6206	-8.6207	-8.6207	-8.6207	-8.6207
94.0	-8.7805	-8.7806	-8.7808	-8.7809	-8.7810	-8.7811	-8.7812	-8.7813	-8.7814	-8.7814
96.0	-8.9409	-8.9402	-8.9405	-8.9408	-8.9410	-8.9413	-8.9415	-8.9417	-8.9419	-8.9420
98.0	-9.1018	-9.1018	-9.1028	-9.1033	-9.1037	-9.1041	-9.1045	-9.1048	-9.1051	-9.1054
100.0	-9.2636	-9.2636	-9.2651	-9.2657	-9.2663	-9.2669	-9.2674	-9.2679	-9.2683	-9.2687
102.0	-9.4260	-9.4260	-9.4289	-9.4297	-9.4304	-9.4311	-9.4317	-9.4323	-9.4329	-9.4334
104.0	-9.5886	-9.5886	-9.5926	-9.5935	-9.5943	-9.5951	-9.5957	-9.5963	-9.5969	-9.5974
106.0	-9.7517	-9.7516	-9.7565	-9.7573	-9.7581	-9.7589	-9.7596	-9.7603	-9.7610	-9.7617
108.0	-9.9151	-9.9151	-9.9209	-9.9217	-9.9225	-9.9233	-9.9241	-9.9248	-9.9256	-9.9263
110.0	-10.0799	-10.0799	-10.0867	-10.0875	-10.0883	-10.0891	-10.0899	-10.0907	-10.0915	-10.0923
112.0	-10.2450	-10.2450	-10.2528	-10.2536	-10.2544	-10.2552	-10.2560	-10.2568	-10.2576	-10.2584
120.0	-10.6482	-10.6482	-10.6574	-10.6582	-10.6590	-10.6598	-10.6606	-10.6614	-10.6622	-10.6630
125.0	-10.9238	-10.9238	-10.9340	-10.9348	-10.9356	-10.9364	-10.9372	-10.9380	-10.9388	-10.9396
130.0	-11.1677	-11.1677	-11.1795	-11.1803	-11.1811	-11.1819	-11.1827	-11.1835	-11.1843	-11.1851
135.0	-11.3826	-11.3826	-11.4059	-11.4075	-11.4091	-11.4107	-11.4123	-11.4139	-11.4155	-11.4171
140.0	-11.5735	-11.5735	-11.6088	-11.6112	-11.6136	-11.6160	-11.6184	-11.6208	-11.6232	-11.6256
145.0	-11.7456	-11.7456	-11.7931	-11.7966	-11.8001	-11.8036	-11.8071	-11.8106	-11.8141	-11.8176
150.0	-11.9031	-11.9031	-11.9635	-11.9680	-11.9725	-11.9770	-11.9815	-11.9860	-11.9905	-11.9950
155.0	-12.0493	-12.0493	-12.1237	-12.1292	-12.1347	-12.1402	-12.1457	-12.1512	-12.1567	-12.1622
160.0	-12.1865	-12.1865	-12.2757	-12.2822	-12.2887	-12.2952	-12.3017	-12.3082	-12.3147	-12.3212
170.0	-12.4399	-12.4399	-12.5431	-12.5516	-12.5601	-12.5686	-12.5771	-12.5856	-12.5941	-12.6026
180.0	-12.6719	-12.6719	-12.7953	-12.8058	-12.8163	-12.8268	-12.8373	-12.8478	-12.8583	-12.8688
190.0	-12.8874	-12.8874	-13.0359	-13.0474	-13.0589	-13.0704	-13.0819	-13.0934	-13.1049	-13.1164
200.0	-13.0900	-13.0900	-13.2594	-13.2729	-13.2864	-13.2999	-13.3134	-13.3269	-13.3404	-13.3539
210.0	-13.2821	-13.2821	-13.4737	-13.4892	-13.5047	-13.5202	-13.5357	-13.5512	-13.5667	-13.5822
220.0	-13.4657	-13.4657	-13.6803	-13.7068	-13.7333	-13.7598	-13.7863	-13.8128	-13.8393	-13.8658
230.0	-13.6425	-13.6425	-13.8821	-13.9206	-13.9591	-13.9976	-14.0361	-14.0746	-14.1131	-14.1516
240.0	-13.8136	-13.8136	-14.0822	-14.1317	-14.1812	-14.2307	-14.2802	-14.3297	-14.3792	-14.4287
250.0	-13.9806	-13.9806	-14.2811	-14.3416	-14.4021	-14.4626	-14.5231	-14.5836	-14.6441	-14.7046
260.0	-14.1436	-14.1436	-14.3797	-14.4412	-14.5027	-14.5642	-14.6257	-14.6872	-14.7487	-14.8102
270.0	-14.3036	-14.3036	-14.5719	-14.6444	-14.7169	-14.7894	-14.8619	-14.9344	-15.0069	-15.0794
280.0	-14.4609	-14.4609	-14.7733	-14.8568	-14.9403	-15.0238	-15.1073	-15.1908	-15.2743	-15.3578
290.0	-14.6159	-14.6159	-14.9733	-15.0678	-15.1623	-15.2568	-15.3513	-15.4458	-15.5403	-15.6348
300.0	-14.7689	-14.7689	-15.1733	-15.2888	-15.4043	-15.5198	-15.6353	-15.7508	-15.8663	-15.9818
310.0	-14.9200	-14.9200	-15.3733	-15.4988	-15.6243	-15.7498	-15.8753	-15.9908	-16.1063	-16.2218
320.0	-15.0699	-15.0699	-15.5333	-15.6688	-15.8043	-15.9398	-16.0753	-16.2108	-16.3463	-16.4818
330.0	-15.2167	-15.2167	-15.6933	-15.8388	-15.9843	-16.1298	-16.2753	-16.4208	-16.5663	-16.7118
340.0	-15.3622	-15.3622	-15.8433	-15.9988	-16.1543	-16.3098	-16.4653	-16.6208	-16.7763	-16.9318
350.0	-15.5056	-15.5056	-16.0033	-16.1688	-16.3343	-16.4998	-16.6653	-16.8308	-16.9963	-17.1618

表 3.8 (2) 基本密度 ρ_B ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 950^\circ$) (つづき)

	500.0	550.0	600.0	650.0	700.0	750.0	800.0	850.0	900.0	950.0
260.0	-15.6467	-15.2701	-15.1373	-14.9400	-14.7713	-14.6257	-14.4987	-14.3872	-14.2886	-14.2006
370.0	-15.7651	-15.4998	-15.2584	-15.0333	-14.8276	-14.6359	-14.45936	-14.4774	-14.3746	-14.2830
380.0	-15.9206	-15.6276	-15.3781	-15.1654	-14.9629	-14.7821	-14.6875	-14.5667	-14.4597	-14.3644
390.0	-16.0225	-15.7534	-15.4964	-15.2764	-15.0720	-14.8834	-14.7806	-14.6551	-14.5440	-14.4450
400.0	-16.1604	-15.8667	-15.6131	-15.3862	-15.1805	-14.9929	-14.8728	-14.7426	-14.6247	-14.5247
420.0	-16.4218	-16.1151	-15.8412	-15.6020	-15.3942	-15.2133	-15.0549	-14.9155	-14.7920	-14.6820
440.0	-16.6402	-16.3396	-16.0608	-15.8122	-15.5937	-15.4022	-15.2340	-15.0856	-14.9540	-14.8366
460.0	-16.8223	-16.5469	-16.2697	-16.0154	-15.7883	-15.5874	-15.4100	-15.2529	-15.1134	-14.9888
480.0	-16.9771	-16.7340	-16.4655	-16.2102	-15.9772	-15.7684	-15.5827	-15.4175	-15.2704	-15.1387
500.0	-16.7119	-16.7563	-16.6046	-16.3826	-16.1552	-15.9431	-15.7511	-15.5768	-15.4246	-15.2862
520.0	-16.7649	-16.8600	-16.7217	-16.5498	-16.3275	-16.1132	-15.9160	-15.7375	-15.5766	-15.4319
540.0	-16.8082	-16.9433	-16.8179	-16.7015	-16.4892	-16.2762	-16.0759	-15.8923	-15.7257	-15.5750
560.0	-16.8451	-17.0111	-16.9045	-16.8368	-16.6391	-16.4311	-16.2301	-16.0430	-15.8716	-15.7156
580.0	-16.8760	-17.0675	-17.0741	-16.9254	-16.7460	-16.5765	-16.3777	-16.1890	-16.0139	-15.8534
600.0	-16.9079	-17.1160	-17.1200	-17.0284	-16.8492	-16.6716	-16.5177	-16.3294	-16.1522	-15.9882
620.0	-16.9359	-17.1587	-17.1474	-17.0888	-16.9088	-16.7353	-16.5692	-16.4036	-16.2489	-16.1194
640.0	-16.9623	-17.1974	-17.2120	-17.1249	-17.0084	-16.8474	-16.6908	-16.5398	-16.3944	-16.2467
660.0	-16.9874	-17.2330	-17.2329	-17.2329	-17.1909	-17.0484	-16.8838	-16.7403	-16.5370	-16.3696
680.0	-17.0115	-17.2662	-17.2693	-17.2635	-17.2664	-17.2385	-16.9864	-16.8216	-16.6531	-16.4875
700.0	-17.0347	-17.2876	-17.2823	-17.2884	-17.2337	-17.2189	-17.0792	-16.9243	-16.7623	-16.6000
720.0	-17.0571	-17.3273	-17.2526	-17.2489	-17.2345	-17.2210	-17.1630	-17.0184	-16.8641	-16.7065
740.0	-17.0788	-17.3557	-17.24907	-17.25061	-17.24501	-17.23560	-17.2385	-17.1042	-16.9584	-16.8068
760.0	-17.0999	-17.3828	-17.25269	-17.25507	-17.25017	-17.24152	-17.23067	-17.1821	-17.0452	-16.9005
780.0	-17.1204	-17.4089	-17.25616	-17.25931	-17.25501	-17.24697	-17.23688	-17.22530	-17.1248	-16.9875
800.0	-17.1404	-17.4339	-17.25949	-17.26338	-17.25660	-17.25205	-17.24257	-17.23175	-17.1976	-17.0680
820.0	-17.1599	-17.4580	-17.26268	-17.26730	-17.26399	-17.25884	-17.24784	-17.23766	-17.2642	-17.1423
840.0	-17.1790	-17.4812	-17.26576	-17.27108	-17.26823	-17.26139	-17.25277	-17.24310	-17.3252	-17.2105
860.0	-17.1977	-17.5036	-17.26872	-17.27475	-17.27232	-17.26575	-17.25742	-17.4816	-17.3814	-17.2732
880.0	-17.2161	-17.5253	-17.27158	-17.27830	-17.27630	-17.26996	-17.26184	-17.5290	-17.4534	-17.3310
900.0	-17.2341	-17.5463	-17.27433	-17.28175	-17.28018	-17.27403	-17.26608	-17.5738	-17.4819	-17.3845
920.0	-17.2518	-17.5666	-17.27698	-17.28509	-17.28397	-17.27803	-17.27018	-17.6165	-17.5274	-17.4342
940.0	-17.2692	-17.5863	-17.27954	-17.28834	-17.28767	-17.28192	-17.27416	-17.6574	-17.5704	-17.4806
960.0	-17.2863	-17.6055	-17.28201	-17.29150	-17.29128	-17.28573	-17.2804	-17.6969	-17.6114	-17.5243
980.0	-17.3032	-17.6242	-17.28440	-17.29456	-17.29482	-17.28947	-17.28184	-17.7352	-17.6508	-17.5656
1000.0	-17.3199	-17.6424	-17.28670	-17.29753	-17.29829	-17.29315	-17.28556	-17.7726	-17.6887	-17.6050

表 3. 8.(3) 基本密度 ρ_B ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $50^\circ \leq T_\infty \leq 95^\circ$) (つづき)

	1000.0	1050.0	1100.0	1150.0	1200.0	1250.0	1300.0	1350.0	1400.0	1450.0
90.0	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609	-8.4609
92.0	-8.6207	-8.6208	-8.6208	-8.6208	-8.6208	-8.6208	-8.6208	-8.6208	-8.6209	-8.6209
94.0	-8.7815	-8.7816	-8.7816	-8.7817	-8.7817	-8.7818	-8.7819	-8.7819	-8.7819	-8.7820
96.0	-8.9424	-8.9424	-8.9425	-8.9426	-8.9428	-8.9429	-8.9430	-8.9431	-8.9432	-8.9433
98.0	-9.1031	-9.1031	-9.1022	-9.1024	-9.1026	-9.1028	-9.1030	-9.1032	-9.1034	-9.1035
100.0	-9.2591	-9.2595	-9.2598	-9.2601	-9.2604	-9.2607	-9.2610	-9.2613	-9.2615	-9.2618
102.0	-9.4148	-9.4153	-9.4157	-9.4161	-9.4165	-9.4168	-9.4171	-9.4175	-9.4178	-9.4181
104.0	-9.5679	-9.5684	-9.5689	-9.5693	-9.5697	-9.5701	-9.5704	-9.5708	-9.5711	-9.5714
106.0	-9.7175	-9.7180	-9.7184	-9.7188	-9.7192	-9.7195	-9.7198	-9.7202	-9.7205	-9.7208
108.0	-9.8627	-9.8630	-9.8634	-9.8637	-9.8639	-9.8642	-9.8645	-9.8647	-9.8650	-9.8652
110.0	-10.0028	-10.0029	-10.0030	-10.0032	-10.0033	-10.0034	-10.0036	-10.0037	-10.0038	-10.0039
115.0	-10.3273	-10.3267	-10.3260	-10.3255	-10.3249	-10.3244	-10.3240	-10.3235	-10.3231	-10.3227
120.0	-10.6128	-10.6109	-10.6092	-10.6075	-10.6060	-10.6046	-10.6033	-10.6021	-10.6009	-10.5998
125.0	-10.8598	-10.8564	-10.8533	-10.8505	-10.8478	-10.8452	-10.8430	-10.8408	-10.8388	-10.8368
130.0	-11.0720	-11.0670	-11.0624	-11.0582	-11.0544	-11.0507	-11.0474	-11.0442	-11.0412	-11.0384
135.0	-11.2555	-11.2490	-11.2431	-11.2376	-11.2326	-11.2279	-11.2235	-11.2194	-11.2155	-11.2119
140.0	-11.4159	-11.4081	-11.4009	-11.3943	-11.3883	-11.3826	-11.3773	-11.3724	-11.3678	-11.3634
145.0	-11.5580	-11.5489	-11.5406	-11.5330	-11.5259	-11.5194	-11.5134	-11.5077	-11.5024	-11.4973
150.0	-11.6852	-11.6749	-11.6656	-11.6570	-11.6491	-11.6418	-11.6350	-11.6287	-11.6227	-11.6171
155.0	-11.8007	-11.7892	-11.7788	-11.7693	-11.7605	-11.7525	-11.7450	-11.7380	-11.7315	-11.7253
160.0	-11.9065	-11.8938	-11.8823	-11.8719	-11.8623	-11.8535	-11.8453	-11.8378	-11.8307	-11.8240
170.0	-12.0962	-12.0810	-12.0672	-12.0546	-12.0434	-12.0331	-12.0235	-12.0146	-12.0064	-11.9987
180.0	-12.2642	-12.2462	-12.2300	-12.2154	-12.2021	-12.1900	-12.1790	-12.1687	-12.1592	-12.1504
190.0	-12.4163	-12.3954	-12.3767	-12.3598	-12.3445	-12.3305	-12.3178	-12.3061	-12.2952	-12.2852
200.0	-12.5584	-12.5325	-12.5111	-12.4918	-12.4743	-12.4584	-12.4439	-12.4306	-12.4183	-12.4070
210.0	-12.6869	-12.6600	-12.6359	-12.6141	-12.5944	-12.5764	-12.5601	-12.5451	-12.5313	-12.5185
220.0	-12.8096	-12.7797	-12.7527	-12.7285	-12.7064	-12.6864	-12.6681	-12.6514	-12.6359	-12.6217
230.0	-12.9258	-12.8928	-12.8631	-12.8363	-12.8119	-12.7898	-12.7696	-12.7510	-12.7339	-12.7181
240.0	-13.0364	-13.0004	-12.9679	-12.9386	-12.9119	-12.8876	-12.8654	-12.8450	-12.8262	-12.8088
250.0	-13.1422	-13.1032	-13.0680	-13.0361	-13.0071	-12.9807	-12.9565	-12.9342	-12.9137	-12.8947
260.0	-13.2439	-13.2020	-13.1641	-13.1297	-13.0984	-13.0698	-13.0436	-13.0194	-12.9972	-12.9766
270.0	-13.3421	-13.2972	-13.2566	-13.2197	-13.1861	-13.1554	-13.1272	-13.1012	-13.0772	-13.0549
280.0	-13.4371	-13.3893	-13.3460	-13.3066	-13.2708	-13.2379	-13.2077	-13.1799	-13.1542	-13.1303
290.0	-13.5295	-13.4787	-13.4327	-13.3909	-13.3528	-13.3178	-13.2857	-13.2560	-13.2287	-13.2031
300.0	-13.6194	-13.5657	-13.5171	-13.4729	-13.4325	-13.3954	-13.3613	-13.3298	-13.3007	-13.2736
310.0	-13.7072	-13.6506	-13.5993	-13.5527	-13.5100	-13.4709	-13.4349	-13.4016	-13.3708	-13.3421
320.0	-13.7931	-13.7336	-13.6797	-13.6307	-13.5858	-13.5446	-13.5066	-13.4715	-13.4390	-13.4088
330.0	-13.8773	-13.8150	-13.7584	-13.7069	-13.6598	-13.6166	-13.5767	-13.5399	-13.5057	-13.4739
340.0	-13.9601	-13.8948	-13.8356	-13.7817	-13.7324	-13.6871	-13.6453	-13.6067	-13.5709	-13.5376
350.0	-14.0415	-13.9733	-13.9114	-13.8552	-13.8036	-13.7563	-13.7126	-13.6722	-13.6348	-13.5999

表 3.8(4) 基本密度 ρ_B ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 950^\circ$) (つづき)

	1000.0	1050.0	1100.0	1150.0	1200.0	1250.0	1300.0	1350.0	1400.0	1450.0
250.0	-14.1217	-14.0206	-13.9861	-13.9274	-13.8736	-13.8242	-13.7787	-13.7366	-13.6975	-13.6611
370.0	-14.2008	-14.1267	-14.0597	-13.9985	-13.9425	-13.8911	-13.8437	-13.7998	-13.7591	-13.7212
380.0	-14.2190	-14.1419	-14.1222	-14.0686	-14.0104	-13.9589	-13.9076	-13.8620	-13.8197	-13.7803
390.0	-14.2362	-14.1762	-14.2038	-14.1377	-14.0773	-14.0218	-13.9707	-13.9233	-13.8794	-13.8385
400.0	-14.2527	-14.2047	-14.2742	-14.2061	-14.1434	-14.0859	-14.0329	-13.9838	-13.9382	-13.8958
420.0	-14.2633	-14.2493	-14.3405	-14.2734	-14.2117	-14.1549	-14.1024	-14.0536	-14.0082	-14.0082
440.0	-14.2713	-14.2664	-14.3505	-14.2822	-14.2206	-14.1639	-14.1114	-14.0632	-14.0197	-14.0197
460.0	-14.2769	-14.2761	-14.3648	-14.3016	-14.2425	-14.1887	-14.1394	-14.0951	-14.0557	-14.0223
480.0	-14.2804	-14.2838	-14.3770	-14.3170	-14.2629	-14.2144	-14.1714	-14.1339	-14.0919	-14.0543
500.0	-14.2816	-14.2892	-14.3871	-14.3311	-14.2844	-14.2430	-14.2063	-14.1744	-14.1469	-14.1236
520.0	-14.2813	-14.2932	-14.3959	-14.3431	-14.2997	-14.2626	-14.2309	-14.2036	-14.1801	-14.1596
540.0	-14.2877	-14.3037	-14.4102	-14.3603	-14.3203	-14.2864	-14.2549	-14.2282	-14.2061	-14.1876
560.0	-14.2939	-14.3132	-14.4228	-14.3753	-14.3383	-14.3075	-14.2829	-14.2620	-14.2451	-14.2316
580.0	-14.2969	-14.3193	-14.4314	-14.3853	-14.3503	-14.3215	-14.2989	-14.2800	-14.2651	-14.2536
600.0	-14.3074	-14.3333	-14.4371	-14.3922	-14.3583	-14.3265	-14.2958	-14.2759	-14.2600	-14.2485
620.0	-14.3152	-14.3433	-14.4429	-14.3992	-14.3673	-14.3375	-14.3088	-14.2909	-14.2750	-14.2635
640.0	-14.3201	-14.3503	-14.4487	-14.4050	-14.3742	-14.3465	-14.3198	-14.2941	-14.2782	-14.2667
660.0	-14.3214	-14.3536	-14.4523	-14.4092	-14.3794	-14.3527	-14.3270	-14.3023	-14.2874	-14.2759
680.0	-14.3290	-14.3629	-14.4595	-14.4163	-14.3875	-14.3618	-14.3371	-14.3134	-14.2995	-14.2870
700.0	-14.3423	-14.3771	-14.4677	-14.4245	-14.3967	-14.3710	-14.3473	-14.3246	-14.3121	-14.3006
720.0	-14.3510	-14.3867	-14.4759	-14.4327	-14.4049	-14.3792	-14.3555	-14.3328	-14.3203	-14.3088
740.0	-14.3546	-14.3913	-14.4825	-14.4393	-14.4115	-14.3858	-14.3621	-14.3394	-14.3269	-14.3154
760.0	-14.3528	-14.3901	-14.4836	-14.4404	-14.4126	-14.3869	-14.3632	-14.3405	-14.3280	-14.3165
780.0	-14.3453	-14.3849	-14.4809	-14.4377	-14.4099	-14.3842	-14.3605	-14.3378	-14.3253	-14.3138
800.0	-14.3319	-14.3728	-14.4752	-14.4320	-14.4042	-14.3785	-14.3548	-14.3321	-14.3196	-14.3081
820.0	-14.3127	-14.3546	-14.4632	-14.4200	-14.3922	-14.3665	-14.3428	-14.3201	-14.3076	-14.2961
840.0	-14.2877	-14.3306	-14.4477	-14.4045	-14.3767	-14.3510	-14.3273	-14.3046	-14.2921	-14.2806
860.0	-14.2570	-14.3009	-14.4275	-14.3843	-14.3565	-14.3308	-14.3071	-14.2844	-14.2719	-14.2604
880.0	-14.2212	-14.2651	-14.4027	-14.3595	-14.3317	-14.3060	-14.2823	-14.2596	-14.2471	-14.2356
900.0	-14.1804	-14.2243	-14.3731	-14.3303	-14.3025	-14.2768	-14.2531	-14.2304	-14.2179	-14.2064
920.0	-14.1353	-14.1792	-14.3387	-14.2959	-14.2681	-14.2424	-14.2187	-14.1960	-14.1835	-14.1720
940.0	-14.0862	-14.1301	-14.3043	-14.2615	-14.2337	-14.2080	-14.1843	-14.1616	-14.1491	-14.1376
960.0	-14.0338	-14.0777	-14.2709	-14.2281	-14.2003	-14.1746	-14.1509	-14.1282	-14.1157	-14.1042
980.0	-14.0783	-14.1222	-14.2365	-14.1937	-14.1659	-14.1402	-14.1165	-14.0938	-14.0813	-14.0708
1000.0	-14.1202	-14.1641	-14.2027	-14.1599	-14.1321	-14.1064	-14.0827	-14.0600	-14.0475	-14.0360

表 3.8(6) 基本密度 ρ_B ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 950^\circ$) (つづき)

	1500.0	1550.0	1600.0	1650.0	1700.0	1750.0	1800.0	1850.0	1900.0	1950.0
360.0	-13.6271	-13.5953	-13.5653	-13.5374	-13.5109	-13.4859	-13.4622	-13.4397	-13.4183	-13.3980
370.0	-13.6458	-13.6226	-13.6215	-13.5923	-13.5647	-13.5386	-13.5139	-13.4904	-13.4681	-13.4469
380.0	-13.7435	-13.7090	-13.6766	-13.6462	-13.6175	-13.5903	-13.5646	-13.5402	-13.5170	-13.4948
390.0	-13.8003	-13.7645	-13.7309	-13.6992	-13.6694	-13.6412	-13.6145	-13.5891	-13.5650	-13.5420
400.0	-13.8262	-13.6191	-13.7843	-13.7515	-13.7205	-13.6913	-13.6636	-13.6372	-13.6122	-13.5884
420.0	-13.9658	-13.9261	-13.8888	-13.8537	-13.8206	-13.7893	-13.7596	-13.7314	-13.7046	-13.6791
440.0	-14.0727	-14.0304	-13.9907	-13.9533	-13.9180	-13.8846	-13.8530	-13.8230	-13.7945	-13.7673
460.0	-14.1773	-14.1324	-14.0902	-14.0506	-14.0131	-13.9777	-13.9442	-13.9124	-13.8821	-13.8533
480.0	-14.2798	-14.2323	-14.1877	-14.1458	-14.1062	-14.0688	-14.0334	-13.9998	-13.9678	-13.9373
500.0	-14.3601	-14.3300	-14.2990	-14.2687	-14.2400	-14.2126	-14.1865	-14.1615	-14.1375	-14.1144
520.0	-14.4495	-14.4268	-14.3774	-14.3309	-14.2871	-14.2457	-14.2065	-14.1693	-14.1339	-14.1003
540.0	-14.5270	-14.4217	-14.4699	-14.4211	-14.3752	-14.3318	-14.2907	-14.2517	-14.2147	-14.1794
560.0	-14.6731	-14.6152	-14.5610	-14.5100	-14.4619	-14.4165	-14.3736	-14.3328	-14.2941	-14.2573
580.0	-14.7679	-14.7075	-14.6508	-14.5976	-14.5474	-14.5000	-14.4552	-14.4127	-14.3723	-14.3339
600.0	-14.8616	-14.7986	-14.7395	-14.6840	-14.6317	-14.5824	-14.5357	-14.4914	-14.4494	-14.4094
620.0	-14.9542	-14.8886	-14.8272	-14.7694	-14.7150	-14.6637	-14.6151	-14.5691	-14.5254	-14.4838
640.0	-15.0457	-14.9776	-14.9137	-14.8537	-14.7972	-14.7439	-14.6935	-14.6457	-14.6004	-14.5572
660.0	-15.1361	-15.0656	-14.9994	-14.9371	-14.8785	-14.8233	-14.7710	-14.7215	-14.6744	-14.6297
680.0	-15.2256	-15.1526	-15.0840	-15.0196	-14.9589	-14.9017	-14.8476	-14.7963	-14.7476	-14.7014
700.0	-15.3141	-15.2386	-15.1678	-15.1012	-15.0385	-14.9793	-14.9233	-14.8703	-14.8200	-14.7722
720.0	-15.4016	-15.3238	-15.2507	-15.1819	-15.1172	-15.0561	-14.9983	-14.9435	-14.8916	-14.8422
740.0	-15.4882	-15.4080	-15.3327	-15.2618	-15.1950	-15.1320	-15.0724	-15.0160	-14.9624	-14.9115
760.0	-15.5737	-15.4913	-15.4138	-15.3409	-15.2721	-15.2072	-15.1458	-15.0877	-15.0325	-14.9801
780.0	-15.6582	-15.5736	-15.4940	-15.4191	-15.3484	-15.2817	-15.2185	-15.1587	-15.1019	-15.0480
800.0	-15.7417	-15.6550	-15.5734	-15.4965	-15.4239	-15.3554	-15.2905	-15.2290	-15.1707	-15.1152
820.0	-15.8241	-15.7354	-15.6519	-15.5731	-15.4987	-15.4283	-15.3617	-15.2986	-15.2387	-15.1818
840.0	-15.9053	-15.8148	-15.7294	-15.6488	-15.5726	-15.5005	-15.4323	-15.3676	-15.3061	-15.2477
860.0	-15.9854	-15.8931	-15.8060	-15.7236	-15.6457	-15.5720	-15.5021	-15.4358	-15.3729	-15.3130
880.0	-16.0641	-15.9704	-15.8836	-15.7976	-15.7180	-15.6427	-15.5712	-15.5034	-15.4390	-15.3777
900.0	-16.1416	-16.0464	-15.9561	-15.8706	-15.7895	-15.7126	-15.6396	-15.5703	-15.5044	-15.4417
920.0	-16.2176	-16.1213	-16.0296	-15.9426	-15.8601	-15.7817	-15.7072	-15.6365	-15.5692	-15.5052
940.0	-16.2922	-16.1948	-16.1020	-16.0137	-15.9298	-15.8500	-15.7742	-15.7020	-15.6334	-15.5680
960.0	-16.3652	-16.2670	-16.1732	-16.0837	-15.9995	-15.9175	-15.8403	-15.7668	-15.6969	-15.6302
980.0	-16.4365	-16.3378	-16.2431	-16.1527	-16.0664	-15.9841	-15.9056	-15.8309	-15.7597	-15.6918
1000.0	-16.5061	-16.4070	-16.3118	-16.2205	-16.1332	-16.0498	-15.9702	-15.8943	-15.8219	-15.7528

表 3.9(1) ヘリウム (He) の Number density dN_{He}
 ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 950^\circ$)

	500.0	550.0	600.0	650.0	700.0	750.0	800.0	850.0	900.0	950.0
90.0	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457
92.0	8.4862	8.4861	8.4861	8.4861	8.4860	8.4860	8.4860	8.4860	8.4859	8.4859
94.0	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252	8.3252
96.0	8.1668	8.1664	8.1664	8.1656	8.1656	8.1654	8.1652	8.1650	8.1648	8.1646
98.0	8.0089	8.0084	8.0078	8.0074	8.0070	8.0066	8.0062	8.0059	8.0056	8.0053
100.0	7.8531	7.8523	7.8516	7.8509	7.8503	7.8498	7.8493	7.8488	7.8483	7.8479
102.0	7.8273	7.8261	7.8250	7.8240	7.8231	7.8222	7.8214	7.8207	7.8200	7.8194
104.0	7.8008	7.7991	7.7975	7.7961	7.7948	7.7936	7.7925	7.7914	7.7905	7.7896
106.0	7.7736	7.7713	7.7692	7.7674	7.7656	7.7640	7.7626	7.7612	7.7600	7.7588
108.0	7.7459	7.7430	7.7404	7.7380	7.7358	7.7339	7.7321	7.7304	7.7288	7.7274
110.0	7.7178	7.7143	7.7111	7.7083	7.7057	7.7033	7.7011	7.6991	7.6973	7.6956
112.0	7.6892	7.6843	7.6799	7.6759	7.6720	7.6682	7.6640	7.6613	7.6188	7.6164
120.0	7.5766	7.5725	7.5671	7.5622	7.5579	7.5539	7.5503	7.5470	7.5440	7.5412
125.0	7.5144	7.5076	7.5016	7.4962	7.4913	7.4870	7.4830	7.4794	7.4761	7.4731
130.0	7.4566	7.4495	7.4432	7.4376	7.4325	7.4280	7.4239	7.4201	7.4167	7.4135
132.0	7.4300	7.4226	7.4161	7.4108	7.4058	7.4010	7.3968	7.3931	7.3898	7.3868
140.0	7.3626	7.3555	7.3490	7.3432	7.3379	7.3328	7.3288	7.3248	7.3212	7.3178
145.0	7.3246	7.3177	7.3113	7.3055	7.3002	7.2953	7.2908	7.2867	7.2829	7.2794
150.0	7.2906	7.2842	7.2781	7.2724	7.2671	7.2622	7.2576	7.2534	7.2495	7.2458
155.0	7.2597	7.2539	7.2482	7.2428	7.2377	7.2328	7.2282	7.2239	7.2199	7.2161
160.0	7.2309	7.2260	7.2209	7.2159	7.2110	7.2063	7.2018	7.1975	7.1934	7.1895
170.0	7.1780	7.1751	7.1716	7.1677	7.1636	7.1594	7.1553	7.1512	7.1472	7.1433
180.0	7.1290	7.1286	7.1270	7.1245	7.1215	7.1182	7.1147	7.1110	7.1074	7.1037
190.0	7.0826	7.0849	7.0853	7.0846	7.0829	7.0807	7.0780	7.0750	7.0718	7.0686
200.0	7.0379	7.0431	7.0459	7.0463	7.0468	7.0457	7.0440	7.0419	7.0394	7.0366
210.0	6.9946	7.0027	7.0079	7.0110	7.0124	7.0127	7.0121	7.0109	7.0091	7.0070
220.0	6.9523	6.9635	6.9712	6.9763	6.9795	6.9818	6.9818	6.9815	6.9806	6.9792
230.0	6.9108	6.9251	6.9354	6.9426	6.9476	6.9508	6.9526	6.9535	6.9535	6.9529
240.0	6.8700	6.8875	6.9004	6.9098	6.9166	6.9213	6.9245	6.9265	6.9275	6.9277
250.0	6.8297	6.8505	6.8660	6.8777	6.8863	6.8927	6.8972	6.9003	6.9023	6.9034
260.0	6.7900	6.8140	6.8322	6.8461	6.8567	6.8646	6.8706	6.8749	6.8780	6.8800
270.0	6.7506	6.7780	6.7989	6.8150	6.8275	6.8371	6.8445	6.8501	6.8542	6.8572
280.0	6.7117	6.7423	6.7660	6.7844	6.7988	6.8101	6.8189	6.8257	6.8310	6.8349
290.0	6.6730	6.7069	6.7333	6.7541	6.7702	6.7834	6.7937	6.8018	6.8082	6.8131
300.0	6.6347	6.6719	6.7010	6.7241	6.7424	6.7571	6.7689	6.7783	6.7858	6.7917
310.0	6.5965	6.6371	6.6690	6.6944	6.7147	6.7311	6.7443	6.7550	6.7637	6.7706
320.0	6.5586	6.6025	6.6372	6.6649	6.6872	6.7033	6.7200	6.7320	6.7418	6.7498
330.0	6.5210	6.5682	6.6056	6.6356	6.6599	6.6797	6.6959	6.7102	6.7202	6.7292
340.0	6.4835	6.5340	6.5742	6.6065	6.6328	6.6543	6.6720	6.6867	6.6988	6.7089
350.0	6.4462	6.5000	6.5429	6.5776	6.6059	6.6291	6.6483	6.6643	6.6776	6.6887

表 3.9(2) ヘリウム (He) の Number density dN_{He}
 ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 960^\circ$) (つぎ)

	500.0	550.0	600.0	650.0	700.0	750.0	800.0	850.0	900.0	950.0
360.0	6.4090	6.4662	6.5119	6.5489	6.5791	6.6041	6.6248	6.6421	6.6565	6.6687
370.0	6.3720	6.4325	6.4809	6.5202	6.5525	6.5792	6.6014	6.6200	6.6356	6.6488
380.0	6.3352	6.3989	6.4501	6.4918	6.5260	6.5544	6.5781	6.5980	6.6149	6.6291
390.0	6.2985	6.3655	6.4195	6.4634	6.4996	6.5298	6.5550	6.5762	6.5942	6.6095
400.0	6.2619	6.3323	6.3889	6.4334	6.4734	6.5082	6.5389	6.5545	6.5717	6.5900
420.0	6.1892	6.2661	6.3262	6.3791	6.4212	6.4565	6.4862	6.5114	6.5329	6.5513
440.0	6.1170	6.2004	6.2679	6.3234	6.3695	6.4081	6.4408	6.4686	6.4924	6.5130
460.0	6.0453	6.1351	6.2061	6.2681	6.3181	6.3601	6.3958	6.4262	6.4523	6.4749
480.0	5.9740	6.0703	6.1486	6.2132	6.2671	6.3125	6.3511	6.3841	6.4126	6.4372
500.0	5.9032	6.0059	6.0896	6.1587	6.2165	6.2653	6.3068	6.3424	6.3732	6.3999
520.0	5.8327	5.9418	6.0308	6.1044	6.1660	6.2181	6.2626	6.3008	6.3338	6.3626
540.0	5.7628	5.8782	5.9725	6.0506	6.1160	6.1714	6.2188	6.2595	6.2948	6.3256
560.0	5.6932	5.8150	5.9145	5.9970	6.0663	6.1250	6.1752	6.2185	6.2561	6.2889
580.0	5.6241	5.7521	5.8269	5.8938	6.0019	6.0789	6.1320	6.1778	6.2176	6.2525
600.0	5.5553	5.6896	5.7496	5.8099	5.9677	6.0330	6.0890	6.1373	6.1794	6.2162
620.0	5.4870	5.6275	5.7426	5.8383	5.9819	6.0674	6.1482	6.2071	6.2414	6.2702
640.0	5.4191	5.5657	5.6660	5.7660	5.9073	5.9921	6.0736	6.1421	6.2006	6.2444
660.0	5.3515	5.5043	5.5927	5.7341	5.8221	5.9570	5.9615	6.0473	6.1068	6.1568
680.0	5.2844	5.4433	5.5173	5.6824	5.7741	5.8523	5.9195	5.9778	6.0287	6.0735
700.0	5.2176	5.3826	5.4561	5.6310	5.7264	5.8077	5.8777	5.9385	5.9916	6.0383
720.0	5.1512	5.3222	5.4027	5.5800	5.6790	5.7634	5.8362	5.8994	5.9547	6.0033
740.0	5.0852	5.2622	5.3477	5.5292	5.6318	5.7194	5.7950	5.8606	5.9180	5.9686
760.0	5.0196	5.2025	5.2920	5.4787	5.5849	5.6757	5.7539	5.8220	5.8815	5.9340
780.0	4.9543	5.1432	5.2366	5.4285	5.5383	5.6321	5.7131	5.7835	5.8452	5.8996
800.0	4.8894	5.0842	5.2445	5.3785	5.4919	5.5889	5.6725	5.7454	5.8092	5.8654
820.0	4.8249	5.0255	5.1908	5.3289	5.4458	5.5458	5.6322	5.7074	5.7733	5.8314
840.0	4.7607	4.9672	5.1373	5.2795	5.4000	5.5030	5.5921	5.6696	5.7376	5.7976
860.0	4.6969	4.9091	5.0841	5.2304	5.3544	5.4605	5.5522	5.6321	5.7022	5.7640
880.0	4.6334	4.8514	5.0312	5.1916	5.3090	5.4182	5.5125	5.5947	5.6669	5.7306
900.0	4.5703	4.7941	4.9786	5.1330	5.2639	5.3761	5.4731	5.5576	5.6318	5.6974
920.0	4.5075	4.7370	4.9263	5.0848	5.2191	5.3342	5.4338	5.5207	5.5970	5.6643
940.0	4.4451	4.6803	4.8743	5.0367	5.1745	5.2926	5.3948	5.4839	5.5623	5.6315
960.0	4.3830	4.6238	4.8225	4.9890	5.1302	5.2512	5.3560	5.4474	5.5278	5.5988
980.0	4.3213	4.5677	4.7711	4.9415	5.0861	5.2101	5.3174	5.4111	5.4935	5.5663
1000.0	4.2599	4.5119	4.7199	4.8942	5.0422	5.1691	5.2790	5.3750	5.4594	5.5340

表 3.9(4) ヘリウム (He) の Number density d_{He}
 ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 960^\circ$) (つづき)

	1000.0	1050.0	1100.0	1150.0	1200.0	1250.0	1300.0	1350.0	1400.0	1450.0
360.0	6.6789	6.6875	6.6948	6.7009	6.7060	6.7103	6.7138	6.7168	6.7191	6.7211
370.0	6.6600	6.6695	6.6775	6.6843	6.6900	6.6949	6.6990	6.7024	6.7052	6.7076
380.0	6.6412	6.6515	6.6603	6.6678	6.6742	6.6796	6.6843	6.6882	6.6915	6.6943
390.0	6.6225	6.6337	6.6432	6.6514	6.6585	6.6645	6.6697	6.6741	6.6779	6.6811
400.0	6.6040	6.6160	6.6263	6.6352	6.6429	6.6495	6.6552	6.6601	6.6644	6.6680
420.0	6.5672	6.5809	6.5927	6.6030	6.6120	6.6198	6.6266	6.6325	6.6377	6.6422
440.0	6.5307	6.5461	6.5595	6.5712	6.5814	6.5904	6.5982	6.6052	6.6113	6.6167
460.0	6.4945	6.5116	6.5265	6.5396	6.5511	6.5613	6.5703	6.5782	6.5852	6.5915
480.0	6.4587	6.4774	6.4939	6.5083	6.5211	6.5325	6.5425	6.5514	6.5594	6.5665
500.0	6.4232	6.4436	6.4616	6.4775	6.4916	6.5041	6.5152	6.5252	6.5340	6.5420
520.0	6.3877	6.4098	6.4293	6.4465	6.4619	6.4755	6.4877	6.4986	6.5085	6.5173
540.0	6.3526	6.3763	6.3973	6.4160	6.4326	6.4474	6.4606	6.4726	6.4833	6.4929
560.0	6.3177	6.3431	6.3656	6.3856	6.4034	6.4194	6.4337	6.4466	6.4583	6.4688
580.0	6.2831	6.3101	6.3341	6.3544	6.3725	6.3886	6.4030	6.4159	6.4275	6.4378
600.0	6.2487	6.2773	6.3028	6.3245	6.3438	6.3614	6.3774	6.3925	6.4068	6.4201
620.0	6.2144	6.2447	6.2716	6.2957	6.3173	6.3366	6.3541	6.3700	6.3843	6.3974
640.0	6.1804	6.2123	6.2407	6.2661	6.2889	6.3094	6.3279	6.3447	6.3600	6.3738
660.0	6.1466	6.1801	6.2099	6.2367	6.2607	6.2823	6.3019	6.3196	6.3358	6.3505
680.0	6.1129	6.1481	6.1794	6.2074	6.2327	6.2554	6.2760	6.2947	6.3117	6.3273
700.0	6.0795	6.1162	6.1490	6.1784	6.2048	6.2287	6.2503	6.2699	6.2878	6.3042
720.0	6.0463	6.0846	6.1188	6.1495	6.1771	6.2021	6.2247	6.2453	6.2641	6.2813
740.0	6.0133	6.0531	6.0888	6.1207	6.1496	6.1756	6.1993	6.2208	6.2403	6.2585
760.0	5.9804	6.0218	6.0589	6.0922	6.1222	6.1494	6.1740	6.1965	6.2170	6.2358
780.0	5.9478	5.9907	6.0292	6.0638	6.0950	6.1232	6.1489	6.1723	6.1937	6.2133
800.0	5.9153	5.9598	5.9997	6.0355	6.0679	6.0972	6.1239	6.1482	6.1705	6.1909
820.0	5.8830	5.9291	5.9703	6.0075	6.0410	6.0714	6.0991	6.1243	6.1474	6.1686
840.0	5.8509	5.8985	5.9411	5.9795	6.0142	6.0457	6.0744	6.1005	6.1245	6.1464
860.0	5.8190	5.8681	5.9121	5.9518	5.9876	6.0202	6.0498	6.0769	6.1016	6.1244
880.0	5.7873	5.8379	5.8833	5.9242	5.9612	5.9948	6.0254	6.0533	6.0790	6.11025
900.0	5.7557	5.8078	5.8546	5.8967	5.9349	5.9695	6.0011	6.0299	6.0564	6.10807
920.0	5.7243	5.7779	5.8260	5.8694	5.9087	5.9444	5.9769	6.0067	6.0340	6.10591
940.0	5.6931	5.7482	5.7976	5.8423	5.8827	5.9194	5.9529	5.9836	6.0117	6.10375
960.0	5.6620	5.7186	5.7694	5.8153	5.8568	5.8946	5.9290	5.9606	5.9895	6.0161
980.0	5.6312	5.6892	5.7413	5.7884	5.8311	5.8699	5.9033	5.9337	5.9614	5.9948
1000.0	5.6005	5.6599	5.7134	5.7617	5.8055	5.8453	5.8816	5.9149	5.9455	5.9736

表 3.9 (5) ヘリウム (He) の Number density d_{He}
($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_{\infty} \leq 960^\circ$) (つづき)

	1500.0	1550.0	1600.0	1650.0	1700.0	1750.0	1800.0	1850.0	1900.0	1950.0
90.0	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457	8.6457
92.0	8.4658	8.4658	8.4658	8.4658	8.4657	8.4657	8.4657	8.4657	8.4657	8.4657
94.0	8.3246	8.3246	8.3245	8.3245	8.3245	8.3244	8.3244	8.3243	8.3243	8.3243
96.0	8.1632	8.1632	8.1631	8.1630	8.1629	8.1628	8.1627	8.1626	8.1626	8.1625
98.0	8.0029	8.0028	8.0026	8.0025	8.0023	8.0022	8.0021	8.0019	8.0018	8.0017
100.0	7.8447	7.8444	7.8442	7.8440	7.8438	7.8436	7.8434	7.8432	7.8430	7.8429
102.0	7.6847	7.6844	7.6842	7.6840	7.6838	7.6836	7.6834	7.6832	7.6830	7.6829
104.0	7.5247	7.5244	7.5242	7.5240	7.5238	7.5236	7.5234	7.5232	7.5230	7.5229
106.0	7.3647	7.3644	7.3642	7.3640	7.3638	7.3636	7.3634	7.3632	7.3630	7.3629
108.0	7.2047	7.2044	7.2042	7.2040	7.2038	7.2036	7.2034	7.2032	7.2030	7.2029
110.0	7.0447	7.0444	7.0442	7.0440	7.0438	7.0436	7.0434	7.0432	7.0430	7.0429
112.0	6.8847	6.8844	6.8842	6.8840	6.8838	6.8836	6.8834	6.8832	6.8830	6.8829
114.0	6.7247	6.7244	6.7242	6.7240	6.7238	6.7236	6.7234	6.7232	6.7230	6.7229
116.0	6.5647	6.5644	6.5642	6.5640	6.5638	6.5636	6.5634	6.5632	6.5630	6.5629
118.0	6.4047	6.4044	6.4042	6.4040	6.4038	6.4036	6.4034	6.4032	6.4030	6.4029
120.0	6.2447	6.2444	6.2442	6.2440	6.2438	6.2436	6.2434	6.2432	6.2430	6.2429
122.0	6.0847	6.0844	6.0842	6.0840	6.0838	6.0836	6.0834	6.0832	6.0830	6.0829
124.0	5.9247	5.9244	5.9242	5.9240	5.9238	5.9236	5.9234	5.9232	5.9230	5.9229
126.0	5.7647	5.7644	5.7642	5.7640	5.7638	5.7636	5.7634	5.7632	5.7630	5.7629
128.0	5.6047	5.6044	5.6042	5.6040	5.6038	5.6036	5.6034	5.6032	5.6030	5.6029
130.0	5.4447	5.4444	5.4442	5.4440	5.4438	5.4436	5.4434	5.4432	5.4430	5.4429
132.0	5.2847	5.2844	5.2842	5.2840	5.2838	5.2836	5.2834	5.2832	5.2830	5.2829
134.0	5.1247	5.1244	5.1242	5.1240	5.1238	5.1236	5.1234	5.1232	5.1230	5.1229
136.0	4.9647	4.9644	4.9642	4.9640	4.9638	4.9636	4.9634	4.9632	4.9630	4.9629
138.0	4.8047	4.8044	4.8042	4.8040	4.8038	4.8036	4.8034	4.8032	4.8030	4.8029
140.0	4.6447	4.6444	4.6442	4.6440	4.6438	4.6436	4.6434	4.6432	4.6430	4.6429
142.0	4.4847	4.4844	4.4842	4.4840	4.4838	4.4836	4.4834	4.4832	4.4830	4.4829
144.0	4.3247	4.3244	4.3242	4.3240	4.3238	4.3236	4.3234	4.3232	4.3230	4.3229
146.0	4.1647	4.1644	4.1642	4.1640	4.1638	4.1636	4.1634	4.1632	4.1630	4.1629
148.0	4.0047	4.0044	4.0042	4.0040	4.0038	4.0036	4.0034	4.0032	4.0030	4.0029
150.0	3.8447	3.8444	3.8442	3.8440	3.8438	3.8436	3.8434	3.8432	3.8430	3.8429
152.0	3.6847	3.6844	3.6842	3.6840	3.6838	3.6836	3.6834	3.6832	3.6830	3.6829
160.0	7.1589	7.1589	7.1550	7.1532	7.1515	7.1498	7.1482	7.1466	7.1451	7.1437
170.0	7.1104	7.1081	7.1060	7.1039	7.1019	7.1000	7.0982	7.0964	7.0947	7.0931
180.0	7.0695	7.0670	7.0647	7.0624	7.0602	7.0580	7.0560	7.0540	7.0521	7.0502
190.0	7.0344	7.0317	7.0292	7.0267	7.0243	7.0220	7.0197	7.0176	7.0155	7.0134
200.0	7.0035	7.0008	6.9981	6.9955	6.9930	6.9905	6.9881	6.9858	6.9835	6.9813
210.0	6.9761	6.9733	6.9706	6.9679	6.9653	6.9627	6.9602	6.9578	6.9554	6.9531
220.0	6.9513	6.9486	6.9459	6.9432	6.9405	6.9380	6.9354	6.9329	6.9305	6.9281
230.0	6.9287	6.9261	6.9234	6.9208	6.9182	6.9156	6.9131	6.9106	6.9081	6.9057
240.0	6.9079	6.9054	6.9029	6.9004	6.8978	6.8953	6.8928	6.8904	6.8880	6.8855
250.0	6.8885	6.8862	6.8839	6.8815	6.8791	6.8767	6.8743	6.8719	6.8695	6.8672
260.0	6.8704	6.8683	6.8661	6.8639	6.8617	6.8594	6.8572	6.8549	6.8526	6.8504
270.0	6.8532	6.8513	6.8494	6.8474	6.8454	6.8433	6.8412	6.8391	6.8369	6.8348
280.0	6.8368	6.8352	6.8336	6.8318	6.8300	6.8281	6.8262	6.8242	6.8222	6.8202
290.0	6.8211	6.8198	6.8185	6.8170	6.8154	6.8137	6.8120	6.8102	6.8084	6.8065
300.0	6.8059	6.8050	6.8039	6.8027	6.8013	6.7999	6.7984	6.7968	6.7952	6.7935
310.0	6.7913	6.7907	6.7899	6.7889	6.7878	6.7867	6.7854	6.7840	6.7826	6.7811
320.0	6.7770	6.7767	6.7762	6.7756	6.7748	6.7738	6.7728	6.7716	6.7704	6.7691
330.0	6.7630	6.7629	6.7629	6.7626	6.7621	6.7614	6.7606	6.7597	6.7586	6.7576
340.0	6.7493	6.7491	6.7499	6.7499	6.7497	6.7492	6.7487	6.7480	6.7472	6.7464
350.0	6.7358	6.7356	6.7372	6.7374	6.7375	6.7374	6.7371	6.7366	6.7361	6.7354

表 3.9(6) ヘリウム (He) の Number density d_{He}
 ($90 \text{ km} \leq h \leq 1000 \text{ km}$, $500^\circ \leq T_\infty \leq 960^\circ$) (つづき)

	1500.0	1550.0	1600.0	1650.0	1700.0	1750.0	1800.0	1850.0	1900.0	1950.0
360.0	6.7226	6.7238	6.7246	6.7252	6.7256	6.7257	6.7257	6.7255	6.7252	6.7247
370.0	6.7195	6.7110	6.7123	6.7132	6.7138	6.7143	6.7145	6.7146	6.7145	6.7143
380.0	6.6986	6.6985	6.7000	6.7013	6.7022	6.7030	6.7035	6.7038	6.7039	6.7039
390.0	6.6838	6.6861	6.6880	6.6895	6.6908	6.6918	6.6926	6.6932	6.6936	6.6938
400.0	6.6711	6.6738	6.6760	6.6779	6.6795	6.6808	6.6818	6.6827	6.6832	6.6838
420.0	6.6461	6.6495	6.6524	6.6550	6.6572	6.6591	6.6607	6.6620	6.6631	6.6641
440.0	6.6214	6.6255	6.6292	6.6324	6.6352	6.6377	6.6399	6.6417	6.6432	6.6447
460.0	6.5970	6.6019	6.6063	6.6101	6.6136	6.6166	6.6193	6.6217	6.6238	6.6257
480.0	6.5728	6.5785	6.5836	6.5881	6.5922	6.5958	6.5991	6.6020	6.6046	6.6069
500.0	6.5492	6.5556	6.5614	6.5666	6.5713	6.5755	6.5793	6.5828	6.5864	6.5887
520.0	6.5252	6.5324	6.5388	6.5447	6.5500	6.5548	6.5592	6.5631	6.5667	6.5700
540.0	6.5017	6.5096	6.5168	6.5232	6.5292	6.5346	6.5395	6.5440	6.5480	6.5518
560.0	6.4783	6.4870	6.4948	6.5020	6.5085	6.5145	6.5200	6.5250	6.5295	6.5337
580.0	6.4551	6.4645	6.4731	6.4809	6.4880	6.4946	6.5006	6.5061	6.5112	6.5158
600.0	6.4321	6.4422	6.4515	6.4599	6.4677	6.4748	6.4814	6.4874	6.4929	6.4980
620.0	6.4092	6.4201	6.4300	6.4391	6.4475	6.4552	6.4623	6.4688	6.4748	6.4804
640.0	6.3865	6.3981	6.4087	6.4185	6.4274	6.4357	6.4433	6.4503	6.4568	6.4629
660.0	6.3639	6.3762	6.3875	6.3979	6.4075	6.4163	6.4244	6.4320	6.4390	6.4455
680.0	6.3415	6.3545	6.3665	6.3775	6.3877	6.3970	6.4057	6.4138	6.4212	6.4282
700.0	6.3192	6.3329	6.3456	6.3572	6.3680	6.3779	6.3871	6.3957	6.4036	6.4110
720.0	6.2970	6.3112	6.3248	6.3370	6.3484	6.3589	6.3686	6.3777	6.3861	6.3939
740.0	6.2750	6.2901	6.3041	6.3170	6.3289	6.3400	6.3502	6.3598	6.3686	6.3769
760.0	6.2530	6.2689	6.2835	6.2971	6.3096	6.3212	6.3320	6.3420	6.3513	6.3600
780.0	6.2313	6.2478	6.2631	6.2773	6.2903	6.3025	6.3138	6.3243	6.3341	6.3433
800.0	6.2096	6.2269	6.2428	6.2576	6.2712	6.2839	6.2957	6.3067	6.3170	6.3266
820.0	6.1881	6.2060	6.2226	6.2380	6.2522	6.2655	6.2778	6.2893	6.3000	6.3100
840.0	6.1666	6.1852	6.2025	6.2185	6.2333	6.2471	6.2599	6.2719	6.2831	6.2935
860.0	6.1454	6.1647	6.1826	6.2005	6.2175	6.2338	6.2492	6.2646	6.2791	6.2927
880.0	6.1242	6.1442	6.1627	6.1811	6.2000	6.2188	6.2371	6.2546	6.2714	6.2879
900.0	6.1031	6.1238	6.1430	6.1607	6.1773	6.1926	6.2070	6.2204	6.2329	6.2446
920.0	6.0822	6.1036	6.1233	6.1417	6.1588	6.1747	6.1895	6.2034	6.2164	6.2285
940.0	6.0614	6.0834	6.1038	6.1228	6.1404	6.1568	6.1722	6.1865	6.1999	6.2125
960.0	6.0407	6.0634	6.0844	6.1040	6.1221	6.1391	6.1549	6.1697	6.1836	6.1966
980.0	6.0201	6.0434	6.0651	6.0852	6.1040	6.1214	6.1377	6.1530	6.1673	6.1807
1000.0	5.9996	6.0236	6.0459	6.0666	6.0859	6.1039	6.1207	6.1364	6.1511	6.1650

② 添字 t は Impulsive thrust を付加する瞬間の時刻を表わし、 $t-$ は推力が付加される前、 $t+$ は付加された後を意味している。例えば r_{t-} と r_{t+} で時刻 t における位置ベクトルの推力が付加される直前と付加された直後の状態を区別した。

③ Impulsive thrust の場合には形式的に推力付加時間の長さを無視するが、位置ベクトルは推力付加時間中の変化を補正してある。

④ 運動方程式の数値積分は r_{t+} 、 \dot{r}_{t+} をもとに出発値を計算して再スタートさせる。

(2) 接線方向の制御力の場合

$$r_{t+} = r_{t-} + \frac{1}{2} \Delta V \cdot \delta t \quad (3.78)$$

$$\dot{r}_{t+} = \dot{r}_{t-} + \Delta V \quad (3.79)$$

$$m_{t+} = m_{t-} - \Delta m \quad (3.80)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_x &= |\Delta V| \cos \alpha \cos \beta \\ \Delta V_y &= |\Delta V| \cos \alpha \sin \beta \\ \Delta V_z &= |\Delta V| \sin \alpha \end{aligned} \right\} (3.81)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \dot{y}_{t-} / \sqrt{\dot{x}_{t-}^2 + \dot{y}_{t-}^2} \\ \cos \beta &= \dot{x}_{t-} / \sqrt{\dot{x}_{t-}^2 + \dot{y}_{t-}^2} \\ \sin \alpha &= \dot{z}_{t-} / |\dot{r}_{t-}| \end{aligned} \right\} (3.82)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \sqrt{\dot{x}_{t-}^2 + \dot{y}_{t-}^2} / |\dot{r}_{t-}| \end{aligned} \right\}$$

ここで

$$\sqrt{\Delta V_x^2 + \Delta V_y^2 + \Delta V_z^2} = |\Delta V|$$

$$\sqrt{\dot{x}_{t-}^2 + \dot{y}_{t-}^2 + \dot{z}_{t-}^2} = |\dot{r}_{t-}|$$

である。

① 入力(1)の場合と比べて、速度増分の絶対値 $|\Delta V|$ を与えればよいわけである。

3.2.5.2 Medium thrust

(1) 一般の制御力の場合

$$a_c = F_c / (m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c) \quad (3.83)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (3.84)$$

① 入力

- F_c : 推力 (単位はニュートン)
- \dot{m} : 燃料消費による質量減少率
- h_c : 推力付加時間における数値積分のステップサイズ

② この制御推力によって生じる加速度は他の摂動加

速度に比較してはるかに大きいため、推力を付加している間は特に数値積分の適当なステップサイズ h_c を指定する。

(2) 接線方向の制御力の場合

$$a_c = F_c / (m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c) \quad (3.85)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (3.86)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{cx} &= |F_c| \cos \alpha \cos \beta \\ F_{cy} &= |F_c| \cos \alpha \sin \beta \\ F_{cz} &= |F_c| \sin \alpha \end{aligned} \right\} (3.87)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \dot{y}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} \\ \cos \beta &= \dot{x}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} \\ \sin \alpha &= \dot{z}_t / |\dot{r}_t| \\ \cos \alpha &= \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} / |\dot{r}_t| \end{aligned} \right\} (3.88)$$

ここで

$$\sqrt{F_{cx}^2 + F_{cy}^2 + F_{cz}^2} = |F_c|$$

$$\sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2 + \dot{z}_t^2} = |\dot{r}_t|$$

である。

① 入力として推力の大きさ $|F_c|$ を与えると(3.87)、(3.88)式によって推力の各成分が求められるわけである。 \dot{m} 、 h_c については(1)の場合と同じ。

3.2.5.3 Low thrust

Low thrust の場合には生じる加速度が他の摂動加速度と同程度と考えられるので、Medium thrust の場合のように数値積分の指定を行わない。したがって(3.83)~(3.86)式における h_c を推力付加時刻まで用いられてきたステップサイズ h で置き換えればよい。

3.3 数値積分法

運動方程式の数値積分は2階の常微分方程式を直接積分できる Gauss-Jackson 法(予測子-修正子法)によっている。数値積分を開始するとき必要な出発値は8次の Runge-Kutta 法により求める。なお積分のステップサイズ制御も可能になっている。

衛星の運動方程式は(3.22)式で表わされるが、これを次のように書き直す。

$$\ddot{r}_i = f_i(t, r, \dot{r}) \quad (3.89)$$

($i=1\sim 3$)

ここで $r = (r_1, r_2, r_3) = (x, y, z)$ を意味する。いまエポック t_0 における衛星の位置、速度ベクトルを r_{t_0} 、 \dot{r}_{t_0} 、ステップサイズを h として

$$f_i(t_0, r_{t_0}, \dot{r}_{t_0}) \equiv f_{i,0}$$

$$f_i(t_0 + kh, r_{t_0 + kh}, \dot{r}_{t_0 + kh}) \equiv f_{i,k}$$

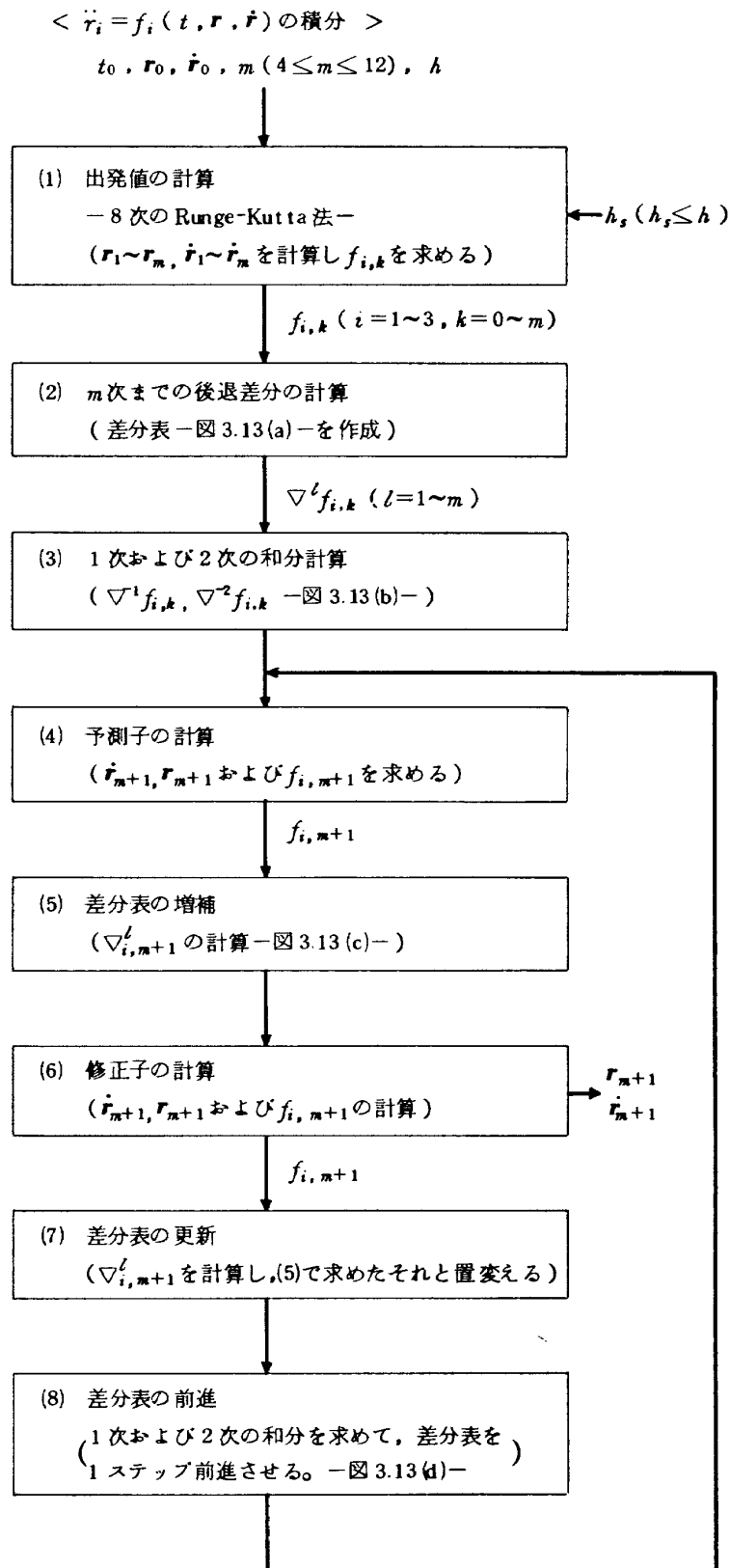


図 3.12 Gauss-Jackson 法

とおくとき、Gauss-Jackson 法による運動方程式の数値積分のプロセスは図 3.12 のようになる。なお修正子は 1 回だけ使用している。図 3.12 に示された 8 つのプロセスで用いられる計算式を以下に示す。なお G-J 法の次数は 4~12 次の間で任意にえらべる。

3.3.1 Gauss-Jackson 法

(1) 出発値の計算

出発値の計算は 8 次の Runge-Kutta 法^(3,8)を用いる。出発値の計算ではステップサイズ制御は行なわない。ここに用いている 8 次の RK 法は一階の方程式を積分するための方法であるので (3.89) 式を 6 個の一階の常微分方程式になおす。

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{F}(t, \mathbf{R}) \quad (3.90)$$

ここで $\mathbf{R} = (R_1 \cdots R_6)$, $\mathbf{F} = (F_1 \cdots F_6)$ とする。初期値として t_0, \mathbf{R}_0 が与えられたとき、(3.90) 式は次の方法で積分する。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}_0 &= \mathbf{F}(t_0, \mathbf{R}_0) \\ \mathbf{K}_n &= \mathbf{F}\left(t_0 + \alpha_n h_s, \mathbf{R}_0 + h_s \sum_{\lambda=0}^{n-1} \beta_{n\lambda} \mathbf{K}_\lambda\right) \end{aligned} \right\}$$

$$\quad (3.91)$$

ここで $n = 1 \sim 14$, $\mathbf{K} = (\mathbf{K}_1, \cdots, \mathbf{K}_6)$ とする。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + h_s \sum_{n=0}^{14} C_n \mathbf{K}_n \quad (3.92)$$

- ① h_s は出発値を計算するときのステップサイズで、 $h_s \leq h$ とする。
 - ② 係数 $\alpha_n, C_n, \beta_{n\lambda}$ は表 3.10 に示した。
 - ③ m 次の G-J 法を用いる場合、出発値の計算で $f_{i,0} \sim f_{i,m}$ ($i=1 \sim 3$) が求められる。
- (2) 差分表の作製 (m 次の G-J 法)
- m 次までの後退差分の計算式は次のようになる。

$$\nabla^l f_{i,k} = \nabla^{l-1} f_{i,k} - \nabla^{l-1} f_{i,k-1} \quad (3.93)$$

$(l=1 \sim m, i=1 \sim 3, k=1 \sim m)$

- ① (3.93) 式で求められた後退差分を用いて差分表を作る。 $m=4$ の場合の例を図 13(a) に示した。
- ③ 1 次および 2 次の和分計算

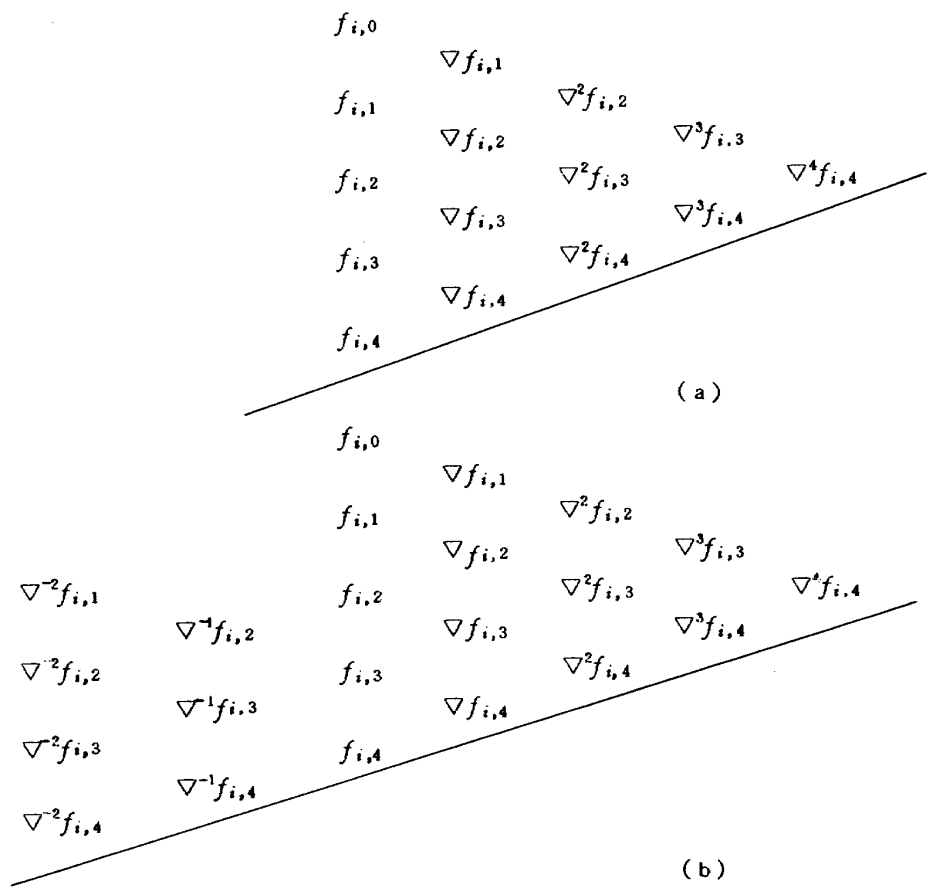
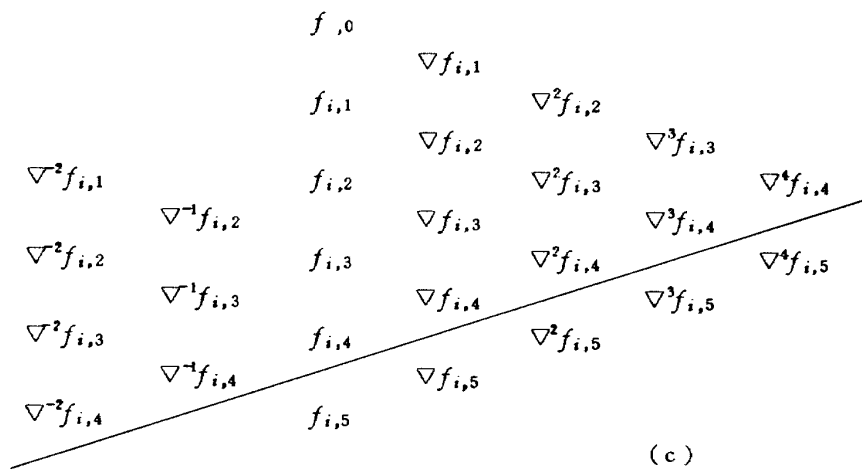
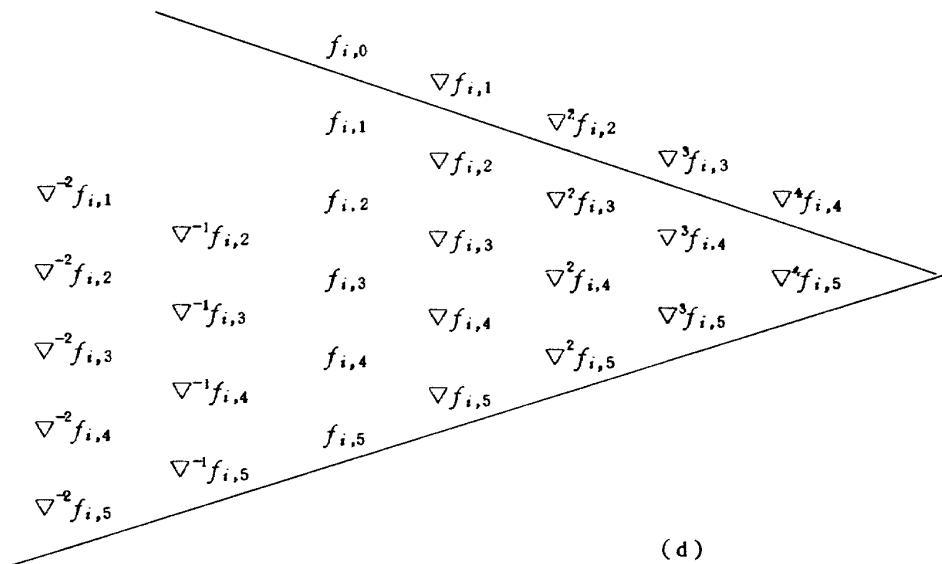


図 3.13



(c)



(d)

図 3.13

表 3.10 (1)

$\alpha_1 = 0.4436\ 8940\ 3764\ 9818$	$\alpha_{14} = 1$
$\alpha_2 = 0.6655\ 3410\ 5647\ 4727$	$\alpha_{15} = 0$
$\alpha_3 = 0.9983\ 0115\ 8471\ 2091$	$\alpha_{16} = 1$
$\alpha_4 = 0.3155\ 0000\ 0000\ 0000$	
$\alpha_5 = 0.5054\ 4100\ 9481\ 6906$	$c_0 = 0.3225\ 6083\ 5002\ 1624 \cdot 10^{-1}$
$\alpha_6 = 0.1714\ 2857\ 1428\ 5714$	$c_8 = 0.2598\ 3725\ 2837\ 1540$
$\alpha_7 = 0.8285\ 7142\ 8571\ 4285$	$c_9 = 0.9284\ 7805\ 9965\ 7702 \cdot 10^{-1}$
$\alpha_8 = 0.6654\ 3966\ 1210\ 1156$	$c_{10} = 0.1645\ 2339\ 5147\ 6434$
$\alpha_9 = 0.2487\ 8317\ 9680\ 6265$	$c_{11} = 0.1766\ 5951\ 6378\ 6007$
$\alpha_{10} = 0.1090\ 0000\ 0000\ 0000$	$c_{12} = 0.2392\ 0102\ 3203\ 5275$
$\alpha_{11} = 0.8910\ 0000\ 0000\ 0000$	$c_{13} = 0.3948\ 4274\ 6042\ 0285 \cdot 10^{-2}$
$\alpha_{12} = 0.3995\ 0000\ 0000\ 0000$	$c_{14} = 0.3072\ 6495\ 4758\ 6064 \cdot 10^{-1}$
$\alpha_{13} = 0.6005\ 0000\ 0000\ 0000$	

表 3.10 (2)

$\beta_{10} = 0.4436\ 8940\ 3764\ 9818$	$\beta_{128} = -0.5807\ 7254\ 5283\ 2060 \cdot 10^{-1}$
$\beta_{20} = 0.1663\ 8352\ 6411\ 8681$	$\beta_{129} = 0.3359\ 8659\ 3288\ 8497$
$\beta_{21} = 0.4991\ 5057\ 9235\ 6045$	$\beta_{1210} = 0.4106\ 6880\ 4019\ 4995$
$\beta_{30} = 0.2495\ 7528\ 9617\ 8022$	$\beta_{1211} = -0.1184\ 0245\ 9723\ 5598 \cdot 10^{-1}$
$\beta_{32} = 0.7487\ 2586\ 8853\ 4068$	$\beta_{130} = -0.1237\ 5357\ 9212\ 4514 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{40} = 0.2066\ 1891\ 1634\ 0060$	$\beta_{135} = -0.2443\ 0768\ 5513\ 5478 \cdot 10^{+2}$
$\beta_{42} = 0.1770\ 7880\ 3779\ 8634$	$\beta_{136} = 0.5477\ 9568\ 9327\ 7865$
$\beta_{43} = -0.6819\ 7715\ 4138\ 6949 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{137} = -0.4441\ 3863\ 5334\ 1324 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{50} = 0.1092\ 7823\ 1526\ 6640$	$\beta_{138} = 0.1001\ 3104\ 8137\ 1326 \cdot 10^{+2}$
$\beta_{53} = 0.4021\ 5962\ 6423\ 6799 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{139} = -0.1499\ 5773\ 1020\ 5175 \cdot 10^{+2}$
$\beta_{54} = 0.3921\ 4118\ 1690\ 7898$	$\beta_{1310} = 0.5894\ 6948\ 5232\ 1701 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{60} = 0.9889\ 9281\ 4091\ 6466 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{1311} = 0.1738\ 0377\ 5034\ 2898 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{63} = 0.3513\ 8370\ 2279\ 6396 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{1312} = 0.2751\ 2330\ 6931\ 6673 \cdot 10^{+2}$
$\beta_{64} = 0.1247\ 6099\ 9831\ 6001$	$\beta_{140} = -0.3526\ 0859\ 3883\ 3452$
$\beta_{65} = -0.5574\ 5546\ 8349\ 8979 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{145} = -0.1839\ 6103\ 1448\ 4827$
$\beta_{70} = -0.3680\ 6865\ 2862\ 4220$	$\beta_{146} = -0.6557\ 0189\ 4497\ 4164$
$\beta_{74} = -0.2227\ 3897\ 4694\ 7600 \cdot 10^{+1}$	$\beta_{147} = -0.3908\ 6144\ 8804\ 3986$
$\beta_{75} = 0.1374\ 2908\ 2567\ 0291 \cdot 10^{+1}$	$\beta_{148} = 0.2679\ 4646\ 7128\ 5002$
$\beta_{76} = 0.2049\ 7390\ 0271\ 1160 \cdot 10^{+1}$	$\beta_{149} = -0.1038\ 3022\ 9913\ 8249 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{80} = 0.4546\ 7962\ 6413\ 4715 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{1410} = 0.1667\ 2327\ 3242\ 5867 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{85} = 0.3254\ 2131\ 7015\ 8914$	$\beta_{1411} = 0.4955\ 1925\ 8553\ 1597$
$\beta_{86} = 0.2847\ 6660\ 1385\ 2790$	$\beta_{1412} = 0.1139\ 4001\ 1323\ 9706 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{87} = 0.9783\ 7801\ 6759\ 7915 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{1413} = 0.5133\ 6696\ 4246\ 5861 \cdot 10^{-1}$
$\beta_{90} = 0.6084\ 2071\ 0626\ 2205 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{150} = 0.1046\ 4847\ 3406\ 1481 \cdot 10^{-2}$
$\beta_{95} = -0.2118\ 4565\ 7440\ 3700 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{158} = -0.6716\ 3886\ 8449\ 9028 \cdot 10^{-2}$
$\beta_{96} = 0.1959\ 6557\ 2661\ 7083$	$\beta_{259} = 0.8182\ 8762\ 1894\ 2502 \cdot 10^{-2}$
$\beta_{97} = -0.4274\ 2640\ 3648\ 1760 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{1510} = -0.4264\ 0342\ 8644\ 8334 \cdot 10^{-2}$
$\beta_{98} = 0.1743\ 4365\ 7368\ 1491 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{1511} = 0.2800\ 9029\ 4741\ 6893 \cdot 10^{-3}$
$\beta_{100} = 0.5405\ 9783\ 2969\ 3191 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{1512} = -0.8783\ 5333\ 8762\ 3867 \cdot 10^{-2}$
$\beta_{106} = 0.1102\ 9825\ 5978\ 2892$	$\beta_{1513} = 0.1025\ 4505\ 1108\ 2555 \cdot 10^{-1}$
$\beta_{107} = -0.1256\ 5008\ 5200\ 7255 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{160} = -0.1353\ 6550\ 7861\ 7406 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{108} = 0.3679\ 0043\ 4775\ 8146 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{165} = -0.1839\ 6103\ 1448\ 4827$
$\beta_{109} = -0.5778\ 0542\ 7709\ 7207 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{166} = -0.6557\ 0189\ 4497\ 4164$
$\beta_{110} = 0.1273\ 2477\ 0686\ 6711$	$\beta_{167} = -0.3908\ 6144\ 8804\ 3986$
$\beta_{117} = 0.1144\ 8805\ 0063\ 9610$	$\beta_{168} = 0.2746\ 6285\ 5812\ 9992$
$\beta_{118} = 0.2877\ 3020\ 7096\ 9799$	$\beta_{169} = -0.1046\ 4851\ 7535\ 7191 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{119} = 0.5094\ 5379\ 4596\ 1136$	$\beta_{1610} = 0.1671\ 4967\ 6671\ 2315 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{1110} = -0.1479\ 9682\ 2443\ 7257$	$\beta_{1611} = 0.4952\ 3916\ 8258\ 4180$
$\beta_{120} = -0.3652\ 6793\ 8766\ 1674 \cdot 10^{-2}$	$\beta_{1612} = 0.1148\ 1836\ 4662\ 7330 \cdot 10^{+1}$
$\beta_{125} = 0.8162\ 9896\ 0123\ 1891 \cdot 10^{-1}$	$\beta_{1613} = 0.4108\ 2191\ 3138\ 3305 \cdot 10^{-1}$
$\beta_{126} = -0.3860\ 7735\ 6356\ 9350$	$\beta_{1615} = 1$
$\beta_{127} = 0.3086\ 2242\ 9246\ 0510 \cdot 10^{-1}$	

$$\nabla^{-1}f_{i,k} = h^{-1}\dot{r}_{i,k} - d_0 f_{i,k} - \sum_{l=1}^m d_l \nabla^l f_{i,k} \quad (3.94)$$

$$\nabla^{-2}f_{i,k} = h^{-2}r_{i,k} - b_0 f_{i,k} - \sum_{l=1}^m b_l \nabla^l f_{i,k} \quad (3.95)$$

- ① 係数 b_l, d_l は表3.11に示した。
 ② これらの和分を(2)で作った差分表に加える。(図3.13(b)参照)
 (4) 予測子の計算

$$\dot{r}_{i,m+1} = h \left[\nabla^{-1}f_{i,m} + C_0 f_{i,m} + \sum_{l=1}^m C_l \nabla^l f_{i,m} \right] \quad (3.96)$$

$$r_{i,m+1} = h^2 \left[\nabla^{-2}f_{i,m} + a_0 f_{i,m} + \sum_{l=1}^m a_l \nabla^l f_{i,m} \right] \quad (3.97)$$

$$f_{i,m+1} = f_i(t_0 + (m+1)h, r_{m+1}, \dot{r}_{m+1}) \quad (3.98)$$

- (5) 差分表の増補
 (4)で求めた $f_{i,m+1}$ から次式を用いて差分表の増補を行う。(図3.13(c))

$$\nabla^l f_{i,m+1} = \nabla^{l-1} f_{i,m+1} - \nabla^{l-1} f_{i,m} \quad (3.99)$$

- (6) 修正子の計算

$$\dot{r}_{i,m+1} = h \left[\nabla^{-1}f_{i,m} + (1+d_0)f_{i,m+1} + \sum_{l=1}^m d_l \nabla^l f_{i,m+1} \right] \quad (3.100)$$

$$r_{i,m+1} = h^2 \left[\nabla^{-2}f_{i,m} + b_0 f_{i,m+1} + \sum_{l=1}^m b_l \nabla^l f_{i,m+1} \right] \quad (3.101)$$

$$f_{i,m+1} = f_i(t_0 + (m+1)h, r_{m+1}, \dot{r}_{m+1})$$

(3.102)

- ① (3.100), (3.101) 式の右辺には予測子で求められた値を入れる。
 ② ここでは修正子を1回しか用いないので、ここで求められた r_{m+1}, \dot{r}_{m+1} が G-J 法によって積分された1ステップ後の値となる。
 (7) 差分表の更新
 修正子によって求められた $f_{i,m+1}$ をもとにして、(3.99) 式を再び用いて差分表(図3.13(c)にあたるもの)の更新を行う。
 (8) 1次および2次の和分計算
 $\nabla^{-1}f_{i,m+1}, \nabla^{-2}f_{i,m+1}$ を求めて差分表を前進させる。(図3.13(d))

$$\nabla^{-1}f_{i,m+1} = \nabla^{-1}f_{i,m} + f_{i,m+1} \quad (3.103)$$

$$\nabla^{-2}f_{i,m+1} = \nabla^{-2}f_{i,m} + \nabla^{-1}f_{i,m+1} \quad (3.104)$$

3.3.2 ステップサイズ制御

指定された G-J 法の次数を m として、数値積分の打ち切り誤差 E_{GJ} を次の値によって推定する

$$(\dot{E}_{GJ})_i = h^2 C_{m+1} \nabla^{m+1} f_{i,m} \quad (3.105)$$

$$(E_{GJ})_i = h a_{m+1} \nabla^{m+1} f_{i,m} \quad (3.106)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{GJ} &= \sqrt{(\dot{E}_{GJ})_1^2 + (\dot{E}_{GJ})_2^2 + (\dot{E}_{GJ})_3^2} \\ E_{GJ} &= \sqrt{(E_{GJ})_1^2 + (E_{GJ})_2^2 + (E_{GJ})_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.107)$$

誤差許容範囲の上限を ϵ_2 , 下限を ϵ_1 とすると, $\epsilon_1 \leq \dot{E}_{GJ} \leq \epsilon_2$, $\epsilon_1 \leq E_{GJ} \leq \epsilon_2$ をいつも満足しているようにするために, ステップサイズ h を次のように制御する。

- (i) $E_{GJ}(h), \dot{E}_{GJ}(h) < \epsilon_1$ のとき
 ステップサイズを2倍 ($h \rightarrow 2h$) にする。この操作を $\epsilon_1 \leq E_{GJ}, \dot{E}_{GJ} \leq \epsilon_2$ が満足されるまで行う。
 (ii) $E_{GJ}(h), \dot{E}_{GJ}(h) > \epsilon_2$ のとき
 ステップサイズを半分 ($h \rightarrow h/2$) にする。この操作を $\epsilon_1 \leq E_{GJ}, \dot{E}_{GJ} \leq \epsilon_2$ が満足されるまで行う。
 (iii) $E_{GJ}(h), \dot{E}_{GJ}(h) < \epsilon_1$ で $E_{GJ}(2h), \dot{E}_{GJ}(2h) > \epsilon_2$ のとき
 ステップサイズを h とする。
 (iv) $E_{GJ}(h), \dot{E}_{GJ}(h) > \epsilon_2$ で $E_{GJ}(h/2), \dot{E}_{GJ}(h/2) < \epsilon_1$ のとき
 ステップサイズを $h/2$ とする。

表 3.11(1)

l	a_l
-2	1.0
-1	0,0
0	0,8333333333333333333470D-01
1	0,83333333333333333333640D-01
2	0,791666666666666666590D-01
3	0,7500000000000000000360D-01
4	0,71345899470899470840D-01
5	0,68204365079365079260D-01
6	0,65495756172839505480D-01
7	0,63140432098765432750D-01
8	0,61072649861712361600D-01
9	0,59240564123376622070D-01
10	0,57603625837453136710D-01
11	0,56129980884507174280D-01
12	0,54794379107071146910D-01
13	0,53576593744966381190D-01
14	0,52460247680248765460D-01
15	0,51431942901177079190D-01

l	b_l
-2	0,10000000000000000000D+01
-1	-0,10000000000000000000D+01
0	0,83333333333333333335D-01
1	0,0
2	-0,416666666666666666733D-02
3	-0,41666666666666666605D-02
4	-0,365410052910052942D-02
5	-0,314153439153439160D-02
6	-0,270860890652557312D-02
7	-0,235532407407407431D-02
8	-0,206778223705307024D-02
9	-0,183208573833573836D-02
10	-0,163693828592348762D-02
11	-0,147364495294596128D-02
12	-0,133560177743602729D-02
13	-0,121778536210476508D-02
14	-0,111634606471761700D-02
15	-0,102830477907168590D-02

表 3. 11 (2)

l	c_l
-1	1.0
0	0.5
1	0.41666666666666666666700+00
2	0.3750000000000000000000+00
3	0.34861111111111111110900+00
4	0.3298611111111111111200+00
5	0.315591931216931216900+00
6	0.304224537037037037200+00
7	0.294868000440917107100+00
8	0.286975446428571428900+00
9	0.280189596443936722200+00
10	0.274265540031599059400+00
11	0.269028846773648714400+00
12	0.264351348366606510000+00
13	0.260136396127601037300+00
14	0.256309496574389152200+00
15	0.252812146729039234500+00

l	d_l
-1	0.10000000000000000000+01
0	-0.50000000000000000000+00
1	-0.83333333333333333330-01
2	-0.41666666666666666660-01
3	-0.26388888888888888890-01
4	-0.18750000000000000000-01
5	-0.1426917989417989420-01
6	-0.1136739417989417990-01
7	-0.9356536596119929430-02
8	-0.7892554012345679010-02
9	-0.6785849984634706850-02
10	-0.5924056412337662320-02
11	-0.5236693257950285060-02
12	-0.4677498407042264520-02
13	-0.4214952239005472860-02
14	-0.3826899553211884430-02
15	-0.3497349845349917640-02

4. 特殊摂動法による惑星間飛行宇宙船の軌道生成 (STANPS-C)

地球の Parking Orbit より出発して惑星間を飛行する宇宙船の軌道を, 前節に示した人工衛星の場合と同様に Cowell 法によって生成する。目標の天体としては水星, 金星, 火星, 木星, 土星, 天王星, 海王星, 冥王星の八惑星および月の中から任意に選ぶことができる。宇宙船の運動方程式の中心天体は, それが地球の作用圏にあるときは地球, 太陽の作用圏にあるときは太陽, 惑星の作用圏に入ったときにはその惑星に切り変わるようになっている。月, 惑星の運動はすでにわかっているものとしてゐる。(月, 惑星のエフェメリスは STANPS-D によって生成されるが, その詳しい内容は別に報告する。)

4.1 時系および座標系

4.1.1 時系

基本的な時系, すなわち運動方程式の積分は暦表時で行われる。しかし座標系の変換においては世界時, 原子時, 視恒星時などが当然必要になるが, それらの時系の間の変換については 3.1.1 に示した通りであるのでここでは省略する。

4.1.2 座標系

4.1.2.1 座標系の種類

STANPS-C において用いられる座標系は次の 6 つである。

(1) 1950.0 平均赤道面座標系 (C_i^{1950})

- 原点: 各天体 ($i=0\sim 10$) の重心
- 基準軸: (地球の) 1950.0 平均春分点方向
- 基準面: (地球の) 1950.0 平均赤道面

ここで添字 i ($0\sim 10$) は次の天体を意味する。

- | | |
|--------|---------|
| 0 : 太陽 | 6 : 土星 |
| 1 : 水星 | 7 : 天王星 |
| 2 : 金星 | 8 : 海王星 |
| 3 : 地球 | 9 : 冥王星 |
| 4 : 火星 | 10 : 月 |
| 5 : 木星 | |

これは基準座標系となるもので, 運動方程式の積分はこの座標系で行われる。原点にどの天体の重心をとるかは, 宇宙船がどの天体の作用圏に属しているかで定められる。

また赤経 (α) と赤緯 (δ) は次のようになる。

- 赤 経 : 春分点方向から基準面にそって反時計まわりに測った角度 (単位は時間)
- 赤 緯 : 基準面から上向きに測った角度

(2) 瞬時の真の赤道面座標系 (C_i^t)

- 原 点 : 各天体 ($i=0\sim 10$) の重心
- 基準軸 : (地球の) 瞬時の真 (True of date) の春分点方向

基準面 : (地球の) 瞬時の真の赤道面
赤経 (α_t), 赤緯 (δ_t) は C_i^{1950} の場合と同様に定義される。

(3) 地球に固定した座標系 (C_3^f)

- 原 点 : 地球重心
- 基準軸 : グリニッジ子午線方向
- 基準面 : 地球の赤道面

経度 (λ) と緯度 (φ) は次のように定める。

- 経 度 : グリニッジ子午線から基準面にそって反時計まわりに測られる角度
- 緯 度 : 基準面から上向きに測った角度

(4) 月に固定した座標系 (C_{10}^f)

- 原 点 : 月重心
- 基準軸 : 月の赤道面上で地球を望む方向
- 基準面 : 月の赤道面

(5) 太陽の赤道面に準拠する座標系 (C_0^s)

- 原 点 : 太陽重心
- 基準軸 : 1950.0 の黄道面に対する太陽の赤道面の昇交点方向
- 基準面 : 太陽の赤道面

(6) 惑星の赤道面に準拠する座標系 (C_i^M)

- 原 点 : 惑星重心 ($i=1\sim 9, i\neq 3$)
- 基準軸 : 各惑星の瞬時の平均の春分点方向
- 基準面 : 各惑星の瞬時の平均の赤道面

以上の各座標系間の関係を図 4.1 に示した。宇宙船の運動方程式は太陽または惑星を原点とする C_i^{1950} において積分されるわけで, 他の座標系は必要に応じて C_i^{1950} を補足することになるわけである。

4.1.2.2 座標系の変換

次にこれらの座標系間の変換では次の 5 つが必要になる。

(i) C_i^{1950} と C_i^t の間の変換

$$\left. \begin{aligned} r_i^t &= H_1 r_i^{1950} \\ r_i^{1950} &= {}^t H_1 r_i^t \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{r}_i^t &= H_1 \dot{r}_i^{1950} + \dot{H}_1 r_i^{1950} \\ \dot{r}_i^{1950} &= {}^t H_1 \dot{r}_i^t + {}^t \dot{H}_1 r_i^t \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

- ① $r_i^{1950}, \dot{r}_i^{1950}, r_i^t, \dot{r}_i^t$ はそれぞれ C_i^{1950} および C_i^t での位置ベクトルと速度ベクトルを表わす。
- ② $H_1, {}^t H_1$ は (3.7) 式と同じもので (3.8) ~ (3.16) 式を用いて計算できる。

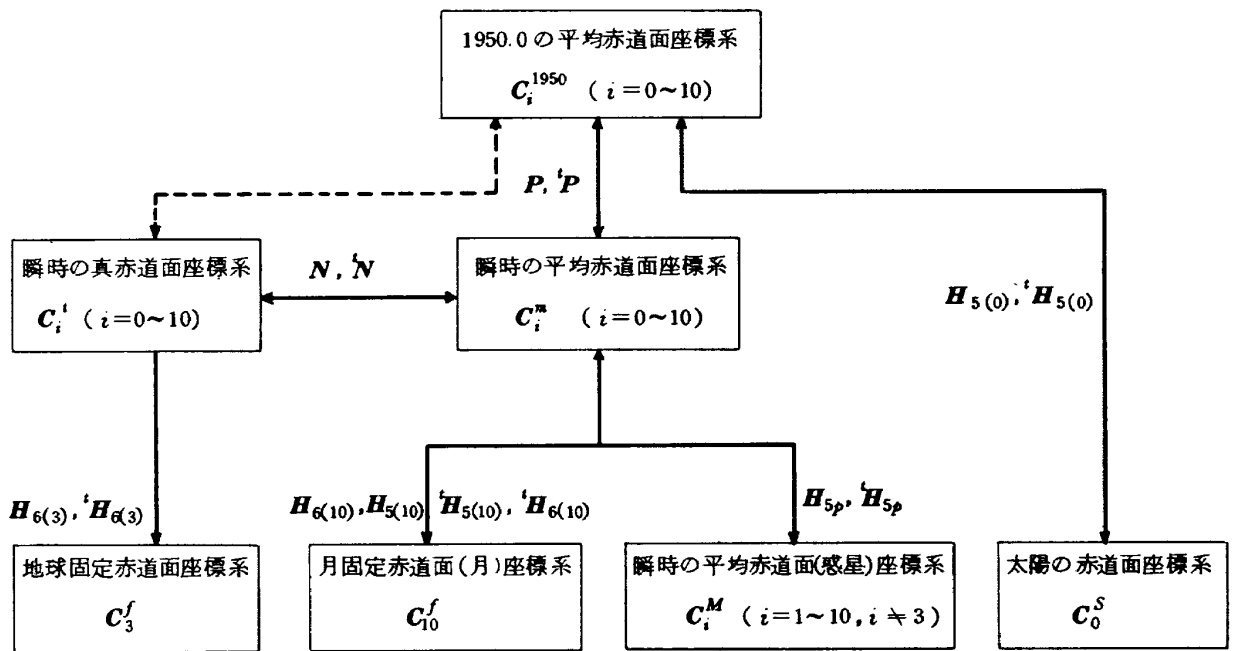


図 4.1 座標系の関係

③ \dot{H}_1, \dot{H}_1' は次のように与えられる。なお STANPS-B においてはこれらの値が非常に小さいこと、速度の変換が必要なのは初期値を瞬時の真の座標系での要素で与えた場合と出力する場合だけで、運動方程式の積分の過程では必要ないので省略している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_1 &= \dot{N}P + N\dot{P} \\ \dot{H}_1' &= \dot{P}'N + P'\dot{N}' \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{P} &= \begin{pmatrix} \dot{P}_{11} & \dot{P}_{12} & \dot{P}_{13} \\ \dot{P}_{21} & \dot{P}_{22} & \dot{P}_{23} \\ \dot{P}_{31} & \dot{P}_{32} & \dot{P}_{33} \end{pmatrix} \\ \dot{P}' &= \begin{pmatrix} \dot{P}'_{11} & \dot{P}'_{21} & \dot{P}'_{31} \\ \dot{P}'_{12} & \dot{P}'_{22} & \dot{P}'_{32} \\ \dot{P}'_{13} & \dot{P}'_{23} & \dot{P}'_{33} \end{pmatrix} \\ \dot{N} &= \begin{pmatrix} \dot{N}_{11} & \dot{N}_{12} & \dot{N}_{13} \\ \dot{N}_{21} & \dot{N}_{22} & \dot{N}_{23} \\ \dot{N}_{31} & \dot{N}_{32} & \dot{N}_{33} \end{pmatrix} \\ \dot{N}' &= \begin{pmatrix} \dot{N}'_{11} & \dot{N}'_{21} & \dot{N}'_{31} \\ \dot{N}'_{12} & \dot{N}'_{22} & \dot{N}'_{32} \\ \dot{N}'_{13} & \dot{N}'_{23} & \dot{N}'_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{11} &= -(\cos Z \cos \theta \sin \zeta_o + \sin Z \cos \zeta_o) \dot{\zeta}_o \\ &\quad -(\sin Z \cos \theta \cos \zeta_o + \cos Z \sin \zeta_o) \dot{Z} \\ &\quad -\cos Z \sin \theta \cos \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{12} &= -(\cos Z \cos \theta \cos \zeta_o - \sin Z \sin \zeta_o) \dot{\zeta}_o \\ &\quad +(\sin Z \cos \theta \sin \zeta_o - \cos Z \cos \zeta_o) \dot{Z} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

$$\left. \begin{aligned} &+ \cos Z \sin \theta \sin \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{13} &= \sin Z \sin \theta \cdot \dot{Z} - \cos Z \cos \theta \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{21} &= -(\sin Z \cos \theta \sin \zeta_o - \cos Z \cos \zeta_o) \dot{\zeta}_o \\ &\quad +(\cos Z \cos \theta \cos \zeta_o - \sin Z \sin \zeta_o) \dot{Z} \\ &\quad -\sin Z \sin \theta \cos \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{22} &= -(\sin Z \cos \theta \cos \zeta_o + \cos Z \sin \zeta_o) \dot{\zeta}_o \\ &\quad -(\cos Z \cos \theta \sin \zeta_o + \sin Z \cos \zeta_o) \dot{Z} \\ &\quad + \sin Z \sin \theta \sin \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{23} &= -\cos Z \sin \theta \cdot \dot{Z} - \sin Z \cos \theta \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{31} &= -\sin \theta \sin \zeta_o \cdot \dot{\zeta}_o + \cos \theta \cos \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{32} &= -\sin \theta \cos \zeta_o \cdot \dot{\zeta}_o - \cos \theta \sin \zeta_o \cdot \dot{\theta} \\ \dot{P}_{33} &= -\sin \theta \cdot \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_{11} &= -\sin \Delta\phi \cdot \dot{\Delta\phi} \\ \dot{N}_{12} &= -\cos \Delta\phi \cos \epsilon_M \cdot \dot{\Delta\phi} \\ &\quad + \sin \Delta\phi \sin \epsilon_M \cdot \dot{\epsilon}_M \\ \dot{N}_{13} &= -\cos \Delta\phi \sin \epsilon_M \cdot \dot{\Delta\phi} \\ &\quad - \sin \Delta\phi \cos \epsilon_M \cdot \dot{\epsilon}_M \\ \dot{N}_{21} &= -\sin \epsilon_i \sin \Delta\phi \cdot \dot{\epsilon}_i \\ &\quad + \cos \epsilon_i \cos \Delta\phi \cdot \dot{\Delta\phi} \\ \dot{N}_{22} &= -(\sin \epsilon_i \cos \Delta\phi \cos \epsilon_M \\ &\quad - \cos \epsilon_i \sin \epsilon_M) \dot{\epsilon}_i \\ &\quad - \cos \epsilon_i \sin \Delta\phi \cos \epsilon_M \cdot \dot{\Delta\phi} \\ &\quad - (\cos \epsilon_i \cos \Delta\phi \sin \epsilon_M \\ &\quad - \sin \epsilon_i \cos \epsilon_M) \dot{\epsilon}_M \\ \dot{N}_{23} &= -(\sin \epsilon_i \cos \Delta\phi \sin \epsilon_M \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + \cos \epsilon_i \cos \epsilon_M \dot{\epsilon}_i \\
 & - \cos \epsilon_i \sin \Delta \phi \sin \epsilon_M \cdot \Delta \dot{\phi} \\
 & + (\cos \epsilon_i \cos \Delta \phi \cos \epsilon_M \\
 & + \sin \epsilon_i \sin \epsilon_M) \dot{\epsilon}_M \\
 \dot{N}_{31} = & \cos \epsilon_i \sin \Delta \phi \cdot \dot{\epsilon}_i \\
 & + \sin \epsilon_i \cos \Delta \phi \cdot \Delta \dot{\phi} \\
 \dot{N}_{32} = & (\cos \epsilon_i \cos \Delta \phi \cos \epsilon_M \\
 & + \sin \epsilon_i \sin \epsilon_M) \dot{\epsilon}_i \\
 & - \sin \epsilon_i \sin \Delta \phi \cos \epsilon_M \cdot \Delta \dot{\phi} \\
 & - (\sin \epsilon_i \cos \Delta \phi \sin \epsilon_M \\
 & + \cos \epsilon_i \cos \epsilon_M) \dot{\epsilon}_M \\
 \dot{N}_{33} = & (\cos \epsilon_i \cos \Delta \phi \sin \epsilon_M \\
 & - \sin \epsilon_i \cos \epsilon_M) \dot{\epsilon}_i \\
 & - \sin \epsilon_i \sin \Delta \phi \sin \epsilon_M \cdot \Delta \dot{\phi} \\
 & + (\sin \epsilon_i \cos \Delta \phi \cos \epsilon_M \\
 & - \cos \epsilon_i \sin \epsilon_M) \dot{\epsilon}_M
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{C}_0 &= K_p (\alpha_1 + 2\beta_1 T + 3\gamma_1 T^2) \\
 \dot{Z} &= K_p (\alpha_2 + 2\beta_2 T + 3\gamma_2 T^2) \\
 \dot{\theta} &= K_p (\alpha_3 + 2\beta_3 T + 3\gamma_3 T^2)
 \end{aligned} \right\} \tag{4.8}$$

$$K_p = \frac{1}{100 \times 360 \times 3600} (b + 2CT_1 + 2CT_2) \tag{4.9}$$

ここで各定数は次のようになる。

$$\alpha_1 = 2304''948$$

$$\alpha_2 = \alpha_1$$

$$\alpha_3 = 2004''255$$

$$\beta_1 = 0''302$$

$$\beta_2 = 1''093$$

$$\beta_3 = -0''426$$

$$\gamma_1 = 0''0179$$

$$\gamma_2 = 0''0192$$

$$\gamma_3 = -0''0416$$

$$b = 129602768''04$$

$$C = 1''089$$

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_M + \Delta \dot{\epsilon} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_M = & -0.0130125 - 0.328 \times 10^{-5} T \\
 & + 1.509 \times 10^{-6} T^2
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\phi} = & \sum_{i=1}^{69} [K_{2i} \sin(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D \\
 & + e_i Q) + (K_{1i} + K_{2i} T)(a_i \dot{l} + b_i \dot{l}' \\
 & + c_i \dot{F} + d_i \dot{D} + e_i \dot{Q}) \times \cos(a_i l + b_i l' \\
 & + c_i F + d_i D + e_i Q)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\epsilon} = & \sum_{i=1}^{40} [K_{2i} \cos(a_i l + b_i l' + c_i F + d_i D \\
 & + e_i Q) - (K_{1i} + K_{2i} T)(a_i \dot{l} + b_i \dot{l}' \\
 & + c_i \dot{F} + d_i \dot{D} + e_i \dot{Q}) \times \sin(a_i l + b_i l' \\
 & + c_i F + d_i D + e_i Q)]
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

① (4.8) ~ (4.12) 式で求められる量の単位は arc sec/Julian century または degree/Julian century である。

② (4.12) 式における $\dot{l}, \dot{l}', \dot{F}, \dot{D}, \dot{Q}$ の値は(3.16) 式を微分して得られる。

C_i^{1950} と C_j^{1950} および C_i^t と C_j^t の間の変換, すなわち原点の移動は次のように行われる。

$$\left. \begin{aligned}
 r_j^{1950} &= r_i^{1950} - \rho^{1950} \\
 \dot{r}_j^{1950} &= \dot{r}_i^{1950} - \dot{\rho}^{1950}
 \end{aligned} \right\} \tag{4.13}$$

$$\left. \begin{aligned}
 r_j^t &= r_i^t - \rho^t \\
 \dot{r}_j^t &= \dot{r}_i^t - \dot{\rho}^t
 \end{aligned} \right\} \tag{4.14}$$

① ここで ρ^{1950} および ρ^t は C_i^{1950} および C_i^t から見た C_j^{1950} と C_j^t の原点の位置ベクトルである。

(ii) C_3^t と C_3^f の間の変換

$$\left. \begin{aligned}
 r_3^f &= H_{6(3)} r_3^t \\
 \dot{r}_3^f &= {}^t H_{6(3)} \dot{r}_3^t
 \end{aligned} \right\} \tag{4.15}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{r}_3^f &= H_{6(3)} \dot{r}_3^t + \dot{H}_{6(3)} r_3^t \\
 \dot{r}_3^t &= {}^t H_{6(3)} \dot{r}_3^f + {}^t \dot{H}_{6(3)} r_3^f
 \end{aligned} \right\} \tag{4.16}$$

① $r_3^t, \dot{r}_3^t, r_3^f, \dot{r}_3^f$ はそれぞれ地球重心を原点とする座標系 C_3^t および C_3^f における速度ベクトルと位置ベクトルである。

$$\begin{aligned}
 H_{6(3)} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \dot{H}_{6(3)} &= -\dot{\theta}_3 \begin{pmatrix} \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \theta_3 &= 279.690983 + 360.9856473356 D_{ET} \\
 &+ 2.902 \times 10^{-13} D_{ET}^2 - 1.0027379 \Delta T + \Delta \alpha \\
 \dot{\theta}_3 &= 360.9856473356 + 5.804 \times 10^{-13} D_{ET}^2 \\
 &- 1.0027379 \Delta \dot{T} + \Delta \dot{\alpha}
 \end{aligned} \right\}$$

$$D_{ET} = MJED - 15019.5 \quad (4.18)$$

$$D_{ET} = MJED - 15019.5 \quad (4.19)$$

$$\Delta \dot{\alpha} = \Delta \dot{\phi} \cos \epsilon_t - \Delta \phi \dot{\epsilon}_t \sin \epsilon_t \quad (4.20)$$

$$\Delta \dot{T} = P(t) + \frac{d\Delta_s}{dt} \quad (4.21)$$

$$I_0 = 7.25 \quad (4.26)$$

$$\phi_0 = 75.0625$$

$$\epsilon_0 = 23.4457878$$

- ① θ_3 グリニジ視恒星時でグリニジ子午線を基準とした春分点の時角である。また MJED は修正ユリウス暦表日である。
- ② (4.21) 式における $P(t)$ は 1820~1970 年間に於ける地球自転速度の変動分, $\frac{d\Delta_s}{dt}$ は地球自転速度の季節的变化と呼ばれる変動量の変化率で次のように与えられる。

$$P(t) = C_0 + C_1 t + \sum_{i=1}^{12} A_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \quad (4.22)$$

$$\frac{d\Delta_s}{dt} = \frac{2\pi}{B_y} \{ S_1 \cos 2\pi t - S_2 \sin 2\pi t + 2S_3 \cos 4\pi t - 2S_4 \sin 4\pi t \} \quad (4.23)$$

$B_y = 365.2422$
 その他の定数はすべて 3.1.1 節に与えられている。 $P(t)$, $\frac{d\Delta_s}{dt}$ の単位は sec/day である。

(4.17) ~ (4.23) 式については参考文献 (3.1) に記述してある。

(iii) C_0^{1950} と C_0^s の間の変換

$$\left. \begin{aligned} r_0^s &= H_{5(0)} r_0^{1950} \\ r_0^{1950} &= {}^t H_{5(0)} r_0^s \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

$$H_{5(0)} = \begin{pmatrix} h_{011} & h_{012} & h_{013} \\ h_{021} & h_{022} & h_{023} \\ h_{031} & h_{032} & h_{033} \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

$$\left. \begin{aligned} h_{011} &= \cos \phi_0 \\ h_{012} &= \sin \phi_0 \cos \epsilon_0 \\ h_{013} &= \sin \phi_0 \sin \epsilon_0 \\ h_{021} &= -\sin \phi_0 \cos I_0 \\ h_{022} &= \cos \phi_0 \cos I_0 \cos \epsilon_0 - \sin I_0 \sin \epsilon_0 \\ h_{023} &= \cos \phi_0 \cos I_0 \sin \epsilon_0 + \sin I_0 \cos \epsilon_0 \\ h_{031} &= \sin \phi_0 \sin I_0 \\ h_{032} &= -\cos \phi_0 \sin I_0 \cos \epsilon_0 - \cos I_0 \sin \epsilon_0 \\ h_{033} &= -\cos \phi_0 \sin I_0 \sin \epsilon_0 + \cos I_0 \cos \epsilon_0 \end{aligned} \right\}$$

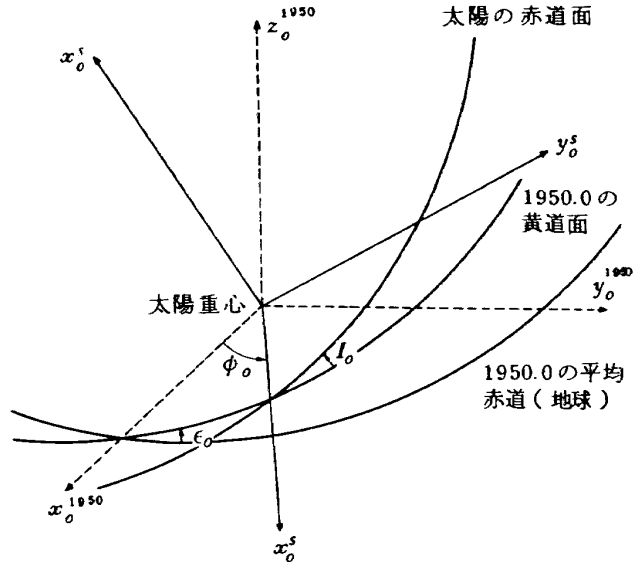


図 4.2 $C_0^{1950}(x_0^{1950}, y_0^{1950}, z_0^{1950})$ と $C_0^s(x_0^s, y_0^s, z_0^s)$

- ϕ_0 : 黄道面上で測った太陽の赤道面の昇交点経度
- I_0 : 太陽の赤道面の黄道面に対する傾き
- ϵ_0 : 平均黄道傾角

で、上に示した数値は 1950.0 におけるそれぞれの値である。⁽¹³⁾

(iv) C_i^{1950} と C_{10}^f の間の変換

$$\left. \begin{aligned} r_{10}^f &= H_{10} r_{10}^{1950} \\ r_{10}^{1950} &= {}^t H_{10} r_{10}^f \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{10} &= H_{6(10)} \cdot H_{5(10)} \cdot P \\ {}^t H_{10} &= {}^t P \cdot {}^t H_{5(10)} \cdot {}^t H_{6(10)} \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

- ① C_i^{1950} から C_{10}^f への座標変換は次のプロセスで行われる。(図 4.3)
- (a) C_i^{1950} ($i \neq 10$) から C_{10}^{1950} への原点移動 ((4.13) および (4.14) 式で与えられる)。
- (b) C_{10}^{1950} から瞬時の平均 (Mean of Date) の座標系 C_{10}^m への変換 (P)。
- (c) 瞬時の平均の座標系から月の真の赤道面を基準面とし、その黄道面に対する昇交点方向を基準方向にとった座標系への変換 ($H_{5(10)}$)。

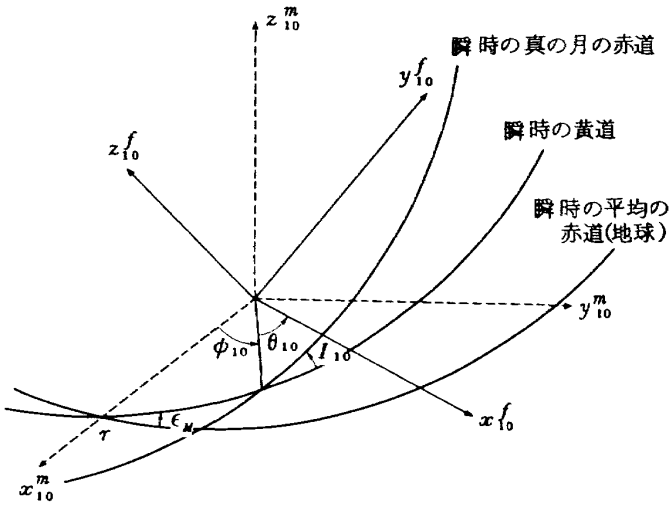


図 4.3 $C_{10}^m(x_{10}^m, y_{10}^m, z_{10}^m)$ と $C_{10}^f(x_{10}^f, y_{10}^f, z_{10}^f)$

(d) さらに基準方向だけを地球を望む方向に移した C_{10}^f への変換 ($H_{6(10)}$)。月の場合には地球を回る公転周期と自転周期が一致しているため、基準方向をこのように定めると月に固定した座標系となる。

② また月の赤道面、軌道面と黄道面は一点で交り、赤道面の降交点は軌道面の昇交点になっている。これは Cassini の法則の 1 つであるが、このため座標変換が他の惑星に比べて少し簡単になる。(12)

$$H_{5(10)} = \begin{pmatrix} h_{1011} & h_{1012} & h_{1013} \\ h_{1021} & h_{1022} & h_{1023} \\ h_{1031} & h_{1032} & h_{1033} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

$$\left. \begin{aligned} h_{1011} &= \cos \phi_{10} \\ h_{1012} &= \sin \phi_{10} \cos \epsilon_M \\ h_{1013} &= \sin \phi_{10} \sin \epsilon_M \\ h_{1021} &= -\sin \phi_{10} \cos I_{10} \\ h_{1022} &= \cos \phi_{10} \cos I_{10} \cos \epsilon_M \\ &\quad -\sin I_{10} \sin \epsilon_M \\ h_{1023} &= \cos \phi_{10} \cos I_{10} \sin \epsilon_M \\ &\quad +\sin I_{10} \cos \epsilon_M \\ h_{1031} &= \sin \phi_{10} \sin I_{10} \\ h_{1032} &= -\cos \phi_{10} \sin I_{10} \cos \epsilon_M \\ &\quad -\cos I_{10} \sin \epsilon_M \\ h_{1033} &= -\cos \phi_{10} \sin I_{10} \sin \epsilon_M \\ &\quad +\cos I_{10} \cos \epsilon_M \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

$$\phi_{10} = 180^\circ + Q + \sigma \quad (4.31)$$

$$I_{10} = I_M + \rho \quad (4.32)$$

$$(I_M = 5549.''0)$$

$$Q = 259^\circ.183275 - 0^\circ.0529539222d + 1^\circ.557 \times 10^{-12}d^2 + 5.0 \times 10^{-20}d^3$$

$$(4.33)$$

(ここで d は 1900 年 1 月 0.5 ET (15019.5MJED) から起算した時間経過を日数で測ったものである。)

$$\begin{aligned} \rho &= -3.''3 \cos(2L - 2Q) \\ &\quad -11.''0 \cos(2M - 2Q) \\ &\quad +24.''3 \cos(M + \Gamma' - 2Q) \\ &\quad -2.''0 \cos(2L - M - \Gamma') \\ &\quad -99.''1 \cos(M - \Gamma') \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} I_M \sigma &= -3.''2 \sin(2L - 2Q) \\ &\quad -10.''6 \sin(2M - 2Q) \\ &\quad +24.''1 \sin(M + \Gamma' - 2Q) \\ &\quad +2.''5 \sin(2L - M - \Gamma') \\ &\quad -101.''3 \sin(M - \Gamma') \\ &\quad -0.''9 \sin(2L - 2\Gamma') \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$H_{6(10)} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{10} & \sin \theta_{10} & 0 \\ -\sin \theta_{10} & \cos \theta_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

$$\theta_{10} = \mathcal{L}_M + (\tau - \sigma) \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_M &= 11^\circ.250889 + 13^\circ.229350449d \\ &\quad -2^\circ.407 \times 10^{-12}d^2 - 1^\circ.1 \times 10^{-20}d^3 \end{aligned} \quad (4.38)$$

(ここで d は (4.33) 式と同じ)

$$\begin{aligned} \tau &= 1.''7 \sin(2L - 2Q) \\ &\quad +91.''6 \sin(L - \Gamma) \\ &\quad -1.''2 \sin(\Gamma - \Gamma') \\ &\quad +4.''1 \sin(2L - M - \Gamma') \\ &\quad -3.''5 \sin(L - \Gamma') \\ &\quad -16.''9 \sin(M - \Gamma') \\ &\quad +0.''4 \sin(2\Gamma - 2\Gamma') \\ &\quad +0.''9 \sin(L + \Gamma - 2\Gamma') \\ &\quad +31.''1 \sin(2Q - 2\Gamma') \\ &\quad +10.''0 \sin(2L - 2\Gamma') \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$L = 279^\circ.69668 + 129602768.''13T + 1.''089T^2$$

$$\Gamma = 281^\circ.22083 + 6189.''03T + 1.''089T^2$$

$$M = 270^\circ.434358 + 1336^\circ.307'52''59.31T - 4.''08T^2 + 0.''0068T^3$$

$$\Gamma' = 334^\circ.329653 + 11^\circ.109'02''02.52T - 37.''17T^2 - 0.''045T^3$$

$$Q = 259^\circ.183275 - 5^\circ.134'08''31.23T + 7.''48T^2 + 0.008T^3$$

$$(4.39)$$

(T は (3.16) 式と同じ)

- ① ϕ_{10} : Mean of date の春分点から黄道面上に
 求めて測った月の真の赤道面の昇交点黄
 経

I_{10} : 月の赤道面の黄道面に対する真の傾角
 である。 ϵ_M は平均黄道傾角で (3.15) 式で与えら
 れる。さらに

- I_M : 月の赤道面の黄道面に対する平均傾角
- Ω : Mean of date の春分点に基づく月の平
 均昇交点黄経
- l_M : 月の Mean argument
- σ : 月の physical libration の Ω 方向成分
- ρ : 月の physical libration の I_M 方向成分
- τ : 月の physical libration の黄経成分

- ② (4.34), (4.35), (4.38) 式の引数に現れる
 変数は

- L : 太陽の mean of date の春分点に基づく
 平均黄経
- Γ : Mean of date の春分点に基づく太陽の
 近地点の平均黄経
- M : Mean of date の春分点に基づく月の平
 均黄経
- Γ' : Mean of date の春分点に基づく月の近
 地点の平均黄経

(V) C_i^{1950} と C_j^M の間の交換

$$\left. \begin{aligned} r_j^M &= H_{8p} r_j^{1950} \\ r_j^{1950} &= {}^t H_{8p} r_j^M \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{5p} &= H_{5p} \cdot P \\ {}^t H_{5p} &= {}^t P \cdot {}^t H_{5p} \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

- ① C_j^M は惑星 j の平均赤道面および平均春分点に基
 準面および基準方向を置く座標系である。ただ惑星
 の場合に真の瞬時 (True of date) および惑星に固
 定した座標系を考えていないのは、惑星の章動、自
 転に関する詳しい情報が得られないためである。
- ② この変換は次のプロセスで行う。(図 4.4)
- (a) C_i^{1950} から C_j^{1950} への原点移動 ((4.13) および (4.
 14) 式で与えられる)。
- (b) C_j^{1950} から Mean of date (地球の赤道, 春分点)
 の座標系 $C_j^m(x_j^m, y_j^m, z_j^m)$ への交換 (P)
- (c) さらに惑星の Mean of date の赤道, 春分点に準
 拠する C_j^M への交換 (H_{5p})
- ③ 変換行列 P は (3.8) 式で与えられる。

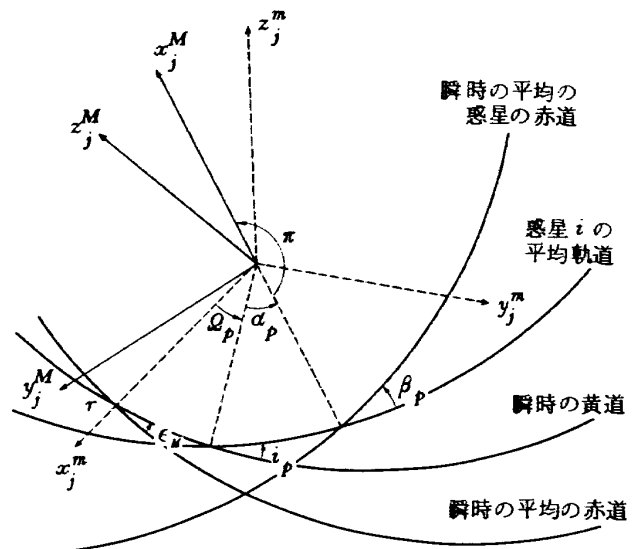


図 4.4 $C_j^m(x_j^m, y_j^m, z_j^m)$ と $C_j^M(x_j^M, y_j^M, z_j^M)$

$$\left. \begin{aligned} H_{5p} &= W_2 \cdot W_1 \\ {}^t H_{5p} &= {}^t W_1 \cdot {}^t W_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

$$W_1 = \begin{pmatrix} W_{111} & W_{112} & W_{113} \\ W_{121} & W_{122} & W_{123} \\ W_{131} & W_{132} & W_{133} \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

$$\left. \begin{aligned} W_{111} &= \cos \Omega_p \\ W_{112} &= \sin \Omega_p \cos \epsilon_M \\ W_{113} &= \sin \Omega_p \sin \epsilon_M \\ W_{121} &= -\sin \Omega_p \cos i_p \\ W_{122} &= \cos \Omega_p \cos i_p \cos \epsilon_M - \sin i_p \sin \epsilon_M \\ W_{123} &= \cos \Omega_p \cos i_p \sin \epsilon_M + \sin i_p \cos \epsilon_M \\ W_{131} &= \sin \Omega_p \sin i_p \\ W_{132} &= -\cos \Omega_p \sin i_p \cos \epsilon_M - \cos i_p \sin \epsilon_M \\ W_{133} &= -\cos \Omega_p \sin i_p \sin \epsilon_M + \cos i_p \cos \epsilon_M \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

$$W_2 = \begin{pmatrix} -\cos \alpha_p & -\sin \alpha_p & 0 \\ \cos \beta_p \sin \alpha_p & -\cos \beta_p \cos \alpha_p & -\sin \beta_p \\ \sin \beta_p \sin \alpha_p & -\sin \beta_p \cos \alpha_p & \cos \beta_p \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

$$\Omega_p = a_0 + b_0 T + C_0 T^2 + d_0 T^3 \quad (4.46)$$

$$i_p = a_i + b_i T + C_i T^2 \quad (4.47)$$

(T は (3.16) 式に同じ)

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p &= K_1 - \Omega_p \\ \beta_p &= K_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

- ① ϵ_M : 平均黄道傾角
- Ω_p : 黄道面に対する惑星軌道の昇交点黄経
- i_p : 黄道面に対する惑星軌道の傾き

α_p : 惑星軌道面上で測った, 惑星軌道の昇交点から惑星の秋分点までの角度

β_p : 惑星の軌道面に対する赤道面の傾き

② (4.46), (4.47) 式における各定数は表 4.1 に与えられている。⁽¹³⁾ また (4.48) 式における K_1, K_2 の値は金星, 火星, 木星についてだけ次のように与えられる。(その他の惑星については不明)

金星 : $K_1 = 170^\circ, K_2 = 176.7$

火星 : $K_1 = 88^\circ, K_2 = 23.99$

木星 : $K_1 = 316^\circ, K_2 = 3.07$

4.2 運動方程式

惑星間宇宙船の運動方程式を中心天体で2つに分類し, それが太陽である場合を運動方程式 I, 惑星(月を含む)である場合を運動方程式 II として次のように与える。

(図 4.5)

(1) 運動方程式 I (中心天体-太陽)

表 4.1

planets	a_g	b_g	c_g	d_g	a_i	b_i	c_i
Mercury	47°8'45"40	4266"75	0"626	0	7°0'10"37	6"699	-0"066
Venus	75°46'46"73	3239"46	1"476	0	3°23'37"07	3"621	-0"0035
Mars	48°47'11"19	2775"57	-0"0.05	-0"0192	1°51'1"20	-2"430	0"0454
Jupiter	99°26'36"19	3637"908	1"2680	-0"03064	1°18'31"45	-20"506	0"014
Saturn	112°47'25"40	3143"5025	-0"54785	-0"0191	2°29'33"07	-14"108	-0"05576
Uranus	73°28'37"55	1795"204	4"722	0	0°46'20"87	2"251	0"1422
Neptune	130°40'52"89	3956"166	0"89952	-0"016984	1°46'45"27	-34"357	-0"0328

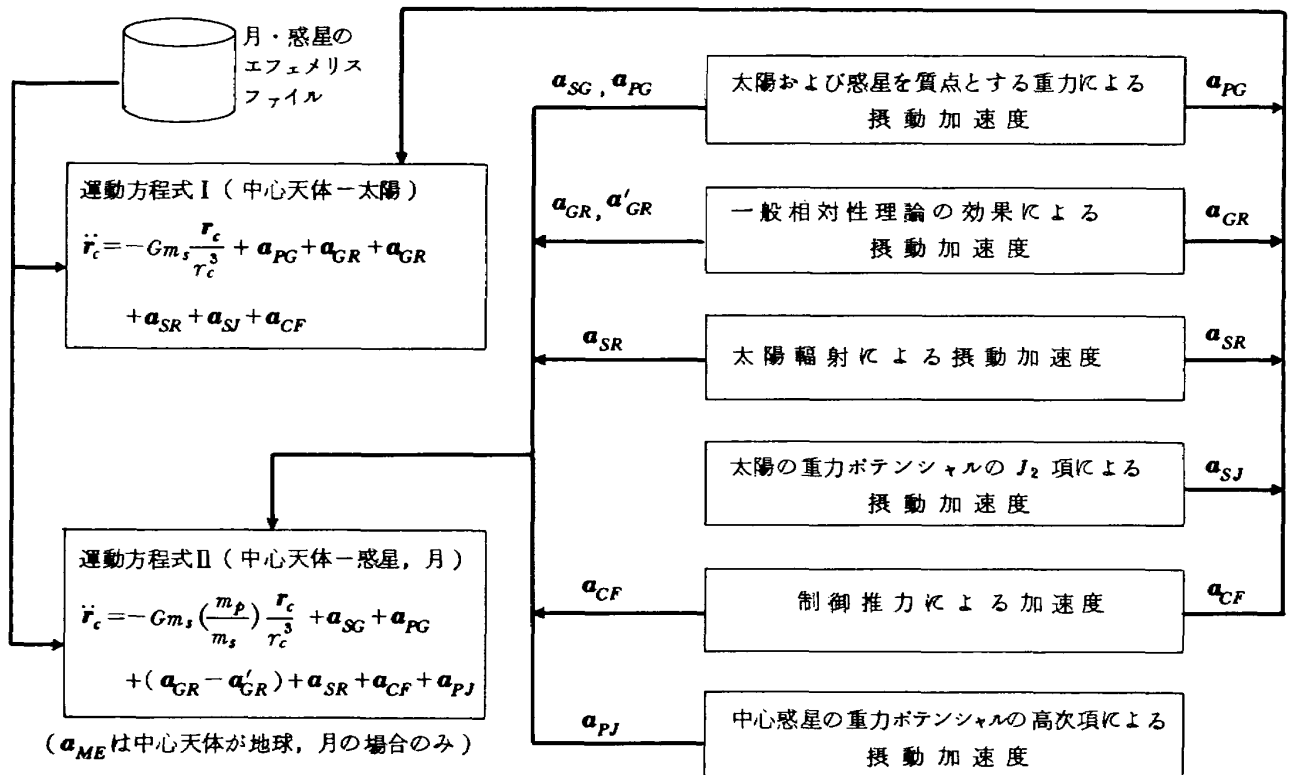


図 4.5 宇宙船の運動方程式

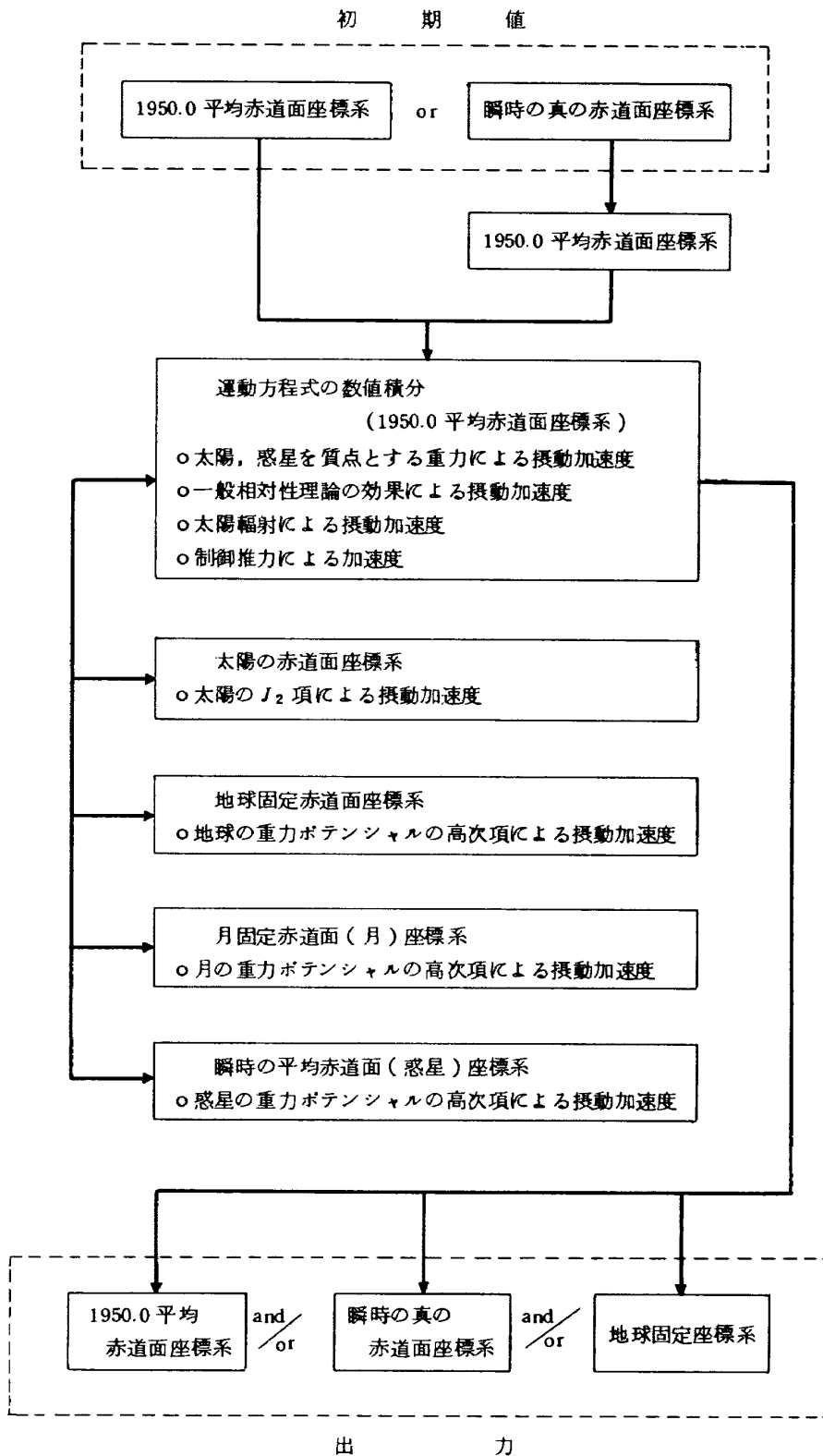


図 4.6 摂動加速度の計算と座標系

$$\ddot{\mathbf{r}}_c = -Gm_s \frac{\mathbf{r}_c}{r_c^3} + \mathbf{a}_{PG} + \mathbf{a}_{GR} + \mathbf{a}_{SR} + \mathbf{a}_{SJ} + \mathbf{a}_{CF} \quad (4.49)$$

① \mathbf{r}_c は太陽重心から測った宇宙船の位置ベクトル、 G は万有引力定数、 m_s は太陽の質量であるが、 Gm_s はガウスの定数を k ($= 0.01720209895$) とすると $Gm_s = k^2$ となる。

② 次の摂動加速度を考慮している。

- \mathbf{a}_{PG} : 惑星を質点とする重力による摂動加速度
- \mathbf{a}_{GR} : 一般相対性理論の効果による摂動加速度
- \mathbf{a}_{SR} : 太陽輻射による摂動加速度
- \mathbf{a}_{SJ} : 太陽の J_2 項による摂動加速度
- \mathbf{a}_{CF} : 制御推力による加速度

③ 宇宙船の運動は (4.49) 式の数値積分によって求めるが、数値積分法は 3.3 節に示したものである。

(2) 運動方程式 II (中心天体—惑星, 月)

$$\ddot{\mathbf{r}}_c = -Gm_s \left(\frac{m_p}{m_s}\right) \frac{\mathbf{r}_c}{r_c^3} + \mathbf{a}_{SG} + \mathbf{a}_{PG} + (\mathbf{a}_{GR} - \mathbf{a}'_{GR}) + \mathbf{a}_{SR} + \mathbf{a}_{CF} + \mathbf{a}_{PJ} \quad (4.50)$$

① \mathbf{r}_c は惑星または月の重心から測った宇宙船の位置ベクトル、 m_p は惑星または月の質量であるが、計算では太陽の質量を単位にとっているので、データは (m_p/m_s) で与えられる。

② 次の摂動加速度を考慮している。

- \mathbf{a}_{SG} : 太陽を質点とする重力による摂動加速度
- \mathbf{a}_{PG} : 惑星を質点とする重力による摂動加速度
- \mathbf{a}_{GR} : 中心天体が太陽重心の場合に宇宙船が受ける一般相対論の効果 (4.49式における \mathbf{a}_{GR} と同じもの)
- \mathbf{a}'_{GR} : 中心天体が太陽重心の場合に惑星または月が受ける一般相対論の効果
- \mathbf{a}_{SR} : 太陽輻射による摂動加速度
- \mathbf{a}_{CF} : 制御推力による加速度
- \mathbf{a}_{PJ} : 中心惑星 (または月) の重力ポテンシャルの高次項による摂動加速度

各摂動加速度の計算は必要に応じて 4.1.2 に示した各種の座標系で求められるが、それらの関係は図 4.6 に示した通りである。

また (4.49) および (4.50) 式の数値積分 (4 次から 12 次まで次数可変の Gauss-Jackson 法) によって宇宙

船の運動が求められる。Gauss-Jackson 法については 3.3.1 節に示してある。

4.2.1 運動方程式 I における摂動加速度

4.2.1.1 惑星を質点とする重力による摂動加速度

$$\mathbf{a}_{PG} = Gm_s \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{m_n}{m_s}\right) \left(\frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c|^3} - \frac{\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_n|^3}\right) \quad (4.51)$$

① $\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_c$ はそれぞれ各惑星と月 ($n=1 \sim 10$) および宇宙船の太陽重心から測った位置ベクトルである。

② (4.51) 式の右辺にあらわれる

$$\frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c|^3} - \frac{\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_n|^3}$$

の項は 3.2.2 節に示したように、次のように変形して計算される。

$$\frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c|^3} - \frac{\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_n|^3} = -\frac{1}{d_n^3} (\mathbf{r}_c + f(q)\mathbf{r}_n) \quad (4.52)$$

$$f(q) = \frac{3q + 3q^2 + q^3}{1 + (1+q)^2} \quad (4.53)$$

$$q = \frac{1}{|\mathbf{r}_n|^2} (|\mathbf{r}_c|^2 - 2\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}_c) \quad (4.54)$$

$$d_n = |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c| \quad (4.55)$$

③ 惑星および月の各位置ベクトル \mathbf{r}_n は惑星のエフェメリス生成プログラム (STANPS-D) によって計算され、0.5 日間隔で必要な期間だけデータファイルに登録されることになる。STANPS-D については別に報告を行う予定なので、ここではその概要を説明する。これは月および惑星の比較的短期間 (10~20 年) における高精度な位置および速度ベクトルを、月と 9 惑星を合わせた 10 天体の運動方程式を同時に数値積分することによって求めるものである。運動方程式は図 4.7 に示したように、太陽に対する 10 天体の相対運動の方程式を (I) 8 惑星 (地球と月を除く) の運動方程式、(II) 地球—月系の重心の運動方程式と地球に対する月の相対運動の方程式、の二つに整理し、Gauss-Jackson 法によって数値積分を行うが、月の公転周期が惑星のそれに比べて小さいので、方程式系 (II) のステップサイズは (I) に比較して小さくとるようになっている。このプロ

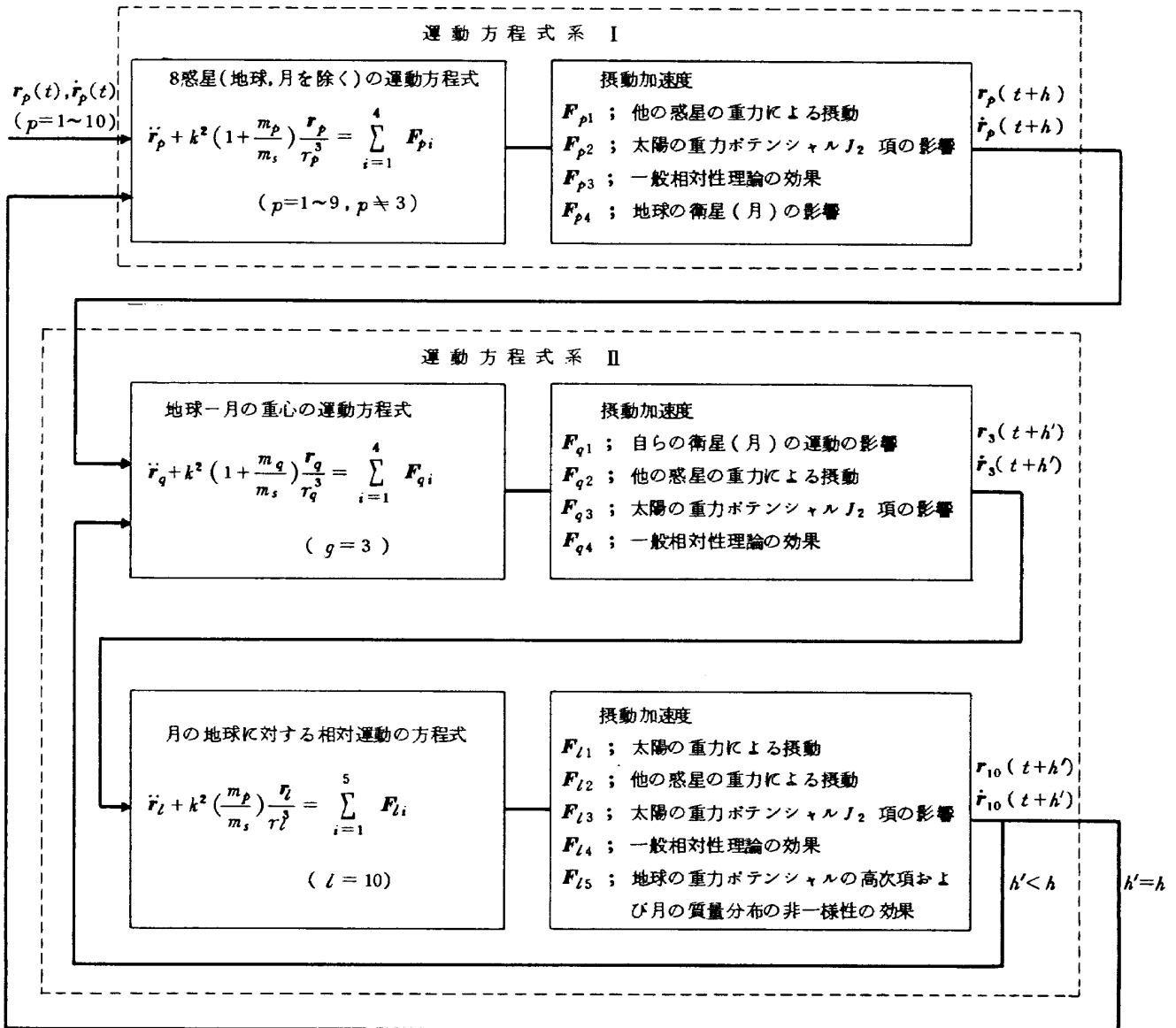


図 4.7 運動方程式

グラムの入出力の内容は図 4.8 に示した通りである。

4.2.1.2 一般相対性理論の効果による摂動加速度

$$\mathbf{a}_{GR} = \frac{Gm_s}{C^2 |\mathbf{r}_c|^3} \left\{ [2(1+\gamma)\phi_c - \gamma |\dot{\mathbf{r}}_c|^2] \mathbf{r}_c + 2(1+\gamma)(\mathbf{r}_c \cdot \dot{\mathbf{r}}_c) \dot{\mathbf{r}}_c \right\} \quad (4.56)$$

① (4.56) 式は Brans-Dicke の重力理論に基づいて定式化されたもので、左辺の γ は $0 \sim 1$ の間で変えるパラメータであるが $\gamma=1$ とおくと Einstein による一般相対性理論の結果と一致する。(このプログラムでは $\gamma=1$ としている)

② ϕ_c, C はそれぞれ次のようなものである。
 ϕ_c : ニュートンポテンシャルで $\phi_c = Gm_s / |\mathbf{r}_c|$
 C : 光速 = 299792.5 (km/sec)

4.2.1.3 太陽輻射による摂動加速度

太陽輻射による摂動加速度の計算においては次の仮定を行っている。

- (1) 太陽からの直接の輻射圧のみを考慮することにし、惑星による反射の影響は無視する。
- (2) 惑星の影による影響は宇宙船がその作用圏にあるときだけ考慮する。
- (3) 太陽の輻射圧定数の変動は無視する。
- (4) 宇宙船の形は板状とし、その法線方向は常に太陽中心の方向に一致しているものとする。

$$\mathbf{a}_{SR} = P \left(\frac{A_c}{m_c} \right) \left(1 + \gamma_s + \frac{2}{3} \gamma_d \right) F(s) \frac{\mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_c|} \quad (4.57)$$

$$P = P_0 / |\mathbf{r}_c|^2 \quad (4.58)$$

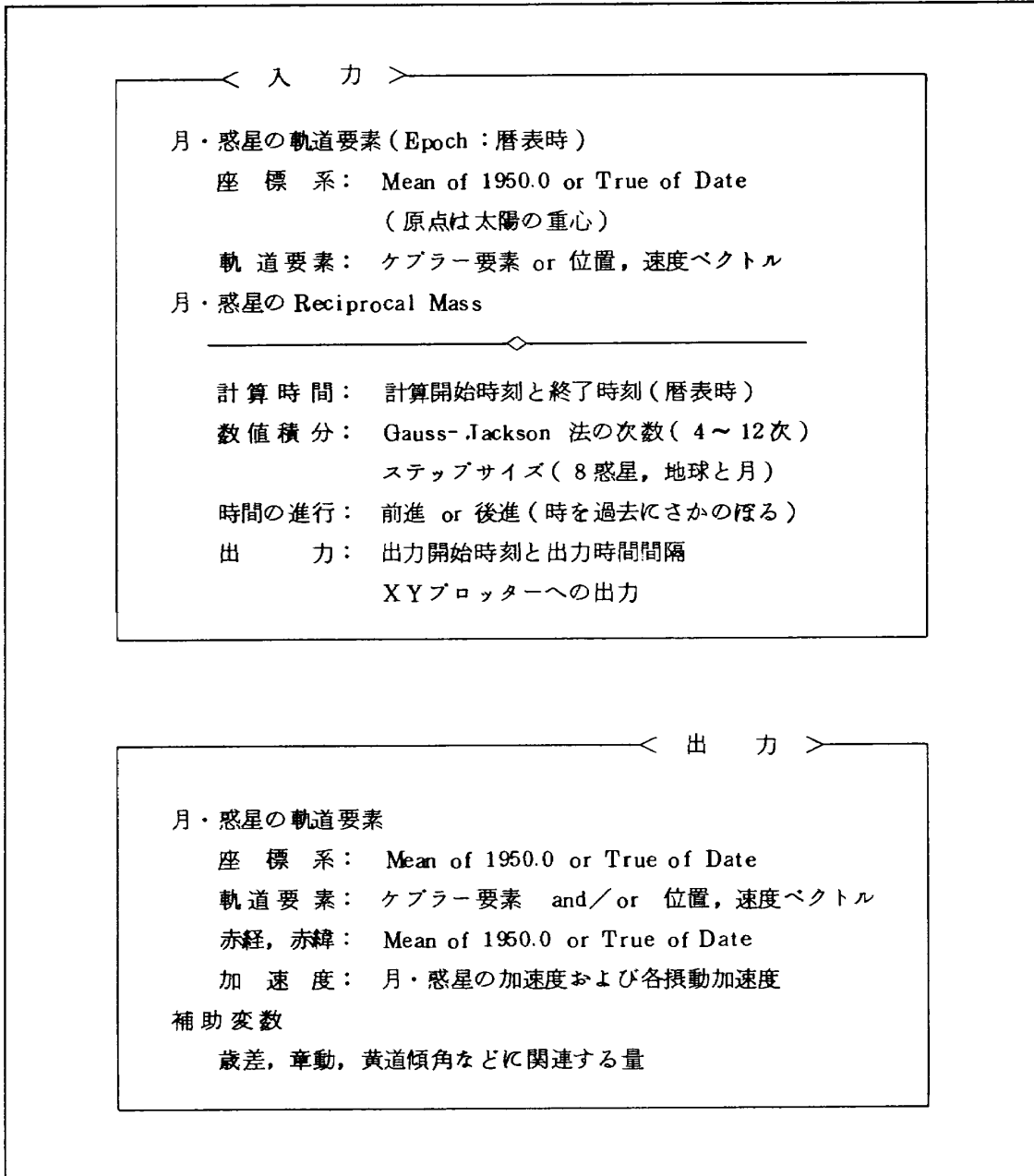


図 4.8 STANPS-Dの入出力

① A_c, m_c は宇宙船の断面積および質量で, τ_s, τ_d はそれぞれ正反射係数および乱反射係数である。

② P_0 は太陽定数で $4.7 \times 10^{-5} \text{ dyn/cm}^2$ とする。

③ $F(s)$ は影の関数で

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{宇宙船が惑星の影にあるとき,} \\ 1 & \text{宇宙船が惑星の影にないとき,} \end{cases}$$

となるが, (4.57) 式は中心天体が太陽の場合であるから, 仮定(2)によって $F(s) = 1$ としておく。

4.2.1.4 太陽の J_2 項による摂動加速度

$$a_{SJ_x} = \frac{3}{2} Gm_s J_2 R_s^2 \left(\frac{x_c}{r_c^5} \right)$$

$$a_{SJ_y} = \frac{3}{2} Gm_s J_2 R_s^2 \left(\frac{y_c}{r_c^5} \right) \times \left[5 \left(\frac{z_c}{r_c} \right)^2 - 1 \right]$$

$$a_{SJ_z} = \frac{3}{2} Gm_s J_2 R_s^2 \left(\frac{z_c}{r_c^5} \right) \times \left[5 \left(\frac{z_c}{r_c} \right)^2 - 3 \right]$$

$$r_c^2 = x_c^2 + y_c^2 + z_c^2 \tag{4.60}$$

$$\tag{4.59}$$

① (4.59) 式は太陽の赤道面に準拠する座標系 C_0^s 系での摂動加速度の各軸成分である。したがって (4.49) 式における a_{SJ} はこれらの加速度の C_0^{1950} 系に変換されたものである。

② x_c, y_c, z_c は C_0^s における宇宙船の位置ベクトルの各軸成分である。

③ J_2, R_s はそれぞれ太陽の重力ポテンシャルの J_2 項および太陽の赤道半径で次のようなものである。

$$J_2 = 0.0000070$$

$$R_s = 696000 \text{ (km)}$$

4.2.1.5 制御推力による加速度

STANPS-B においては推力の大きさによって3つの場合に分類している(3.2.5節)が、ここではそこにおける Medium thrust の場合のみを考慮している。これは Low thrust, Medium thrust の場合もその特殊な場合として考慮できるからである。また接線方向に推力を加える場合を特に別けているのは 3.2.5 節と同様である。

(1) 一般の制御力の場合

$$a_{CF} = F_c / (m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c) \quad (4.61)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (4.62)$$

① F_c, \dot{m}, h_c は入力として必要なもので、それぞれ

F_c : 推力 (単位はニュートン)

\dot{m} : 燃料消費による質量減少率 (kg/sec)

h_c : 推力付加時間における数値積分のステップサイズ

である。

(2) 接線方向の制御力の場合

$$a_{CF} = F_c / (m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c) \quad (4.63)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (4.64)$$

$$F_{cx} = |F_c| \cos \alpha \cos \beta$$

$$F_{cy} = |F_c| \cos \alpha \sin \beta \quad (4.65)$$

$$F_{cz} = |F_c| \sin \alpha$$

$$\sin \beta = \dot{y}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2}$$

$$\cos \beta = \dot{x}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} \quad (4.66)$$

$$\sin \alpha = \dot{z}_t / |\dot{\mathbf{r}}_t|$$

$$\cos \alpha = \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} / |\dot{\mathbf{r}}_t|$$

① ここで (F_{cx}, F_{cy}, F_{cz}) および ($\dot{x}_t, \dot{y}_t, \dot{z}_t$)

はそれぞれ F_c と $\dot{\mathbf{r}}_t$ の各軸成分であるが、入力としては $|F_c|$ を与えればよいわけである。

4.2.2 運動方程式 II における摂動加速度

4.2.2.1 太陽を質点とする重力による摂動加速度

$$a_{SG} = G m_s \left(\frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_c|^3} - \frac{\mathbf{r}_s}{|\mathbf{r}_s|^3} \right) \quad (4.67)$$

① $\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_c$ は中心天体である惑星の重心から測った太陽および宇宙船の位置ベクトルである。

② (4.67) 式の実際の計算は (4.52) ~ (4.55) 式の形に直して行われる。

4.2.2.2 惑星を質点とする重力による摂動加速度

$$a_{PG} = G m_s \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq P}}^{10} \left(\frac{m_n}{m_s} \right) \left(\frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c}{|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_c|^3} - \frac{\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_n|^3} \right) \quad (4.68)$$

(添字 P に当る惑星が中心天体)

① $\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_c$ は中心天体である惑星の重心から測った摂動加速度を生じさせる他の惑星および宇宙船の位置ベクトルである。

② (4.68) 式の計算も (4.52) ~ (4.55) 式の形に直して行われる。

4.2.2.3 一般相対性理論の効果による摂動加速度

$$a_{GR} = \frac{G m_s}{C^2 |\mathbf{r}_c|^3} \{ [2(1+\gamma) \phi_c - \gamma |\dot{\mathbf{r}}_c|^2] \mathbf{r}_c + 2(1+\gamma) (\mathbf{r}_c \cdot \dot{\mathbf{r}}_c) \dot{\mathbf{r}}_c \} \quad (4.69)$$

$$a'_{GR} = \frac{G m_s}{C^2 |\mathbf{r}_p|^3} \{ [2(1+\gamma) \phi_p - \gamma |\dot{\mathbf{r}}_p|^2] \mathbf{r}_c + 2(1+\gamma) (\mathbf{r}_c \cdot \dot{\mathbf{r}}_c) \dot{\mathbf{r}}_c \} \quad (P=1 \sim 10) \quad (4.70)$$

① (4.69) 式は (4.56) 式と全く同じものであり、 a'_{GR} は (4.69) 式における宇宙船の位置、速度のベクトルを惑星または月のそれらに置き変えたものである。したがって (4.69) および (4.70) 式における $\mathbf{r}_c, \dot{\mathbf{r}}_c, \mathbf{r}_p, \dot{\mathbf{r}}_p$ はそれぞれ太陽重心を原点として測った宇宙船および惑星(または月)の位置ベクトルと速度ベクトルである。

② ニュートンポテンシャル ϕ は (4.56) 式の場合と同様であるが、中心天体が地球または月の場合には

特にお互の効果を考慮している。

$$\begin{aligned} \phi_c &= Gm_s / |r_c| \\ \phi_p &= Gm_s / |r_p| \quad (P=1\sim 9, P\neq 3) \\ \phi_3 &= Gm_s / |r_3| + Gm_s / |r_3 - r_{10}| \\ \phi_{10} &= Gm_s / |r_{10}| + Gm_s / |r_3 - r_{10}| \end{aligned} \quad (4.71)$$

4.2.2.4 太陽輻射による摂動加速度

太陽輻射による摂動を考慮するときの仮定は 4.2.1.3 のところに示した通りで、今考えているのは中心天体が惑星の場合の運動方程式であるから、その惑星による影の効果を考慮する。

$$\begin{aligned} a_{SR} &= P \left(\frac{A_c}{m_c} \right) \left[1 + \gamma_s + \frac{2}{3} \gamma_d \right] F(s) \frac{(r_c - r_s)}{|r_c - r_s|} \\ P &= P_0 / |r_c|^2 \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$P = P_0 / |r_c|^2 \quad (4.72)$$

- ① r_c, r_s は中心天体(惑星)の重心を原点として測った宇宙船と太陽の位置ベクトルであり、その他のパラメータについては(4.57)~(4.58)式の場合とまったく同じである。
- ② 影の関数 $F(s)$ は

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{宇宙船が惑星の影にあるとき,} \\ 1 & \text{宇宙船が惑星の影にないとき,} \end{cases}$$

として与えられるが、それは次のようにきまる。

(i) $|r_c - r_s| \leq |r_s|$ の場合 $F(s) = 1$
 (ii) $|r_c - r_s| > |r_s|$ の場合

$$D_1 \neq 0 \text{ のとき } F(s) = \begin{cases} 1 & ; D_1 > 0 \\ 0 & ; D_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$D_1 = 0 \text{ のとき } F(s) = \begin{cases} 1 & ; D_2 \geq 0 \\ 0 & ; D_2 < 0 \end{cases}$$

ここで

$$D_1 = |r_c \times \left(-\frac{r_s}{|r_s|}\right) - R_p$$

$$D_2 = |(r_c + \dot{r}_c) \times \left(-\frac{r_s}{|r_s|}\right)| - R_p$$

ここで $r_c \rightarrow r, r_s \rightarrow -r_{SE}, R_p$ (中心惑星の半径) $\rightarrow R_E$ とおき変えれば図 3.8, 3.9 と全く同じになるので説明と図は省略する。

4.2.2.5 制御推力による加速度

- (1) 一般の制御力の場合

$$a_{CF} = F_c / \left(m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c\right) \quad (4.73)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (4.74)$$

- ① 入力値 F_c (推力) が惑星重心を原点とした 1950.0 mean の座標系での値で与える以外は(4.61), (4.62) 式と同じである。
- (2) 接線方向の制御力の場合

$$a_{CF} = F_c / \left(m_t - \frac{1}{2} \dot{m} h_c\right) \quad (4.75)$$

$$m_{t+h_c} = m_t - \dot{m} h_c \quad (4.76)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{cx} &= |F_c| \cos \alpha \cos \beta \\ F_{cy} &= |F_c| \cos \alpha \sin \beta \\ F_{cz} &= |F_c| \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4.77)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \dot{y}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} \\ \cos \beta &= \dot{x}_t / \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} \\ \sin \alpha &= \dot{z}_t / |\dot{r}_t| \\ \cos \alpha &= \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2} / |\dot{r}_t| \end{aligned} \right\} \quad (4.78)$$

- ① r_t が中心惑星の重心を原点として測った宇宙船の位置ベクトルである以外は(4.63)~(4.66)式と全く同じである。

4.2.2.6 中心惑星(または月)の重力ポテンシャルの高次項による摂動加速度

$$\begin{aligned} a_{PJx} &= \frac{1}{2} Gm_s \left(\frac{m_p}{m_s}\right) \frac{x_c}{|r_c|} \left[J_2 \left(\frac{R_p}{|r_c|}\right)^2 \right. \\ &\quad \times \left\{ 15 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right)^2 - 3 \right\} + J_3 \left(\frac{R_p}{|r_c|}\right)^3 \\ &\quad \times \left\{ 35 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right)^3 - 15 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right) \right\} \Big] \\ &\quad - 3 Gm_s \left(\frac{m_p}{m_s}\right) \left(\frac{R_p}{|r_c|}\right)^2 \frac{1}{|r_c|^3} \left[5 \left(\frac{x_c}{|r_c|^2}\right) \right. \\ &\quad \times (c_{2,2} x_c^2 - c_{2,2} y_c^2 + 2s_{2,2} x_c y_c) \\ &\quad \left. + 2(c_{2,2} x_c + s_{2,2} y_c) \right] \end{aligned} \quad (4.79)$$

$$\begin{aligned} a_{PJy} &= \frac{1}{2} Gm_s \left(\frac{m_p}{m_s}\right) \frac{y_c}{|r_c|^3} \left[J_2 \left(\frac{R_p}{|r_c|}\right)^2 \right. \\ &\quad \times \left\{ 15 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right)^2 - 3 \right\} + J_3 \left(\frac{R_p}{|r_c|}\right)^3 \\ &\quad \times \left\{ 35 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right)^3 - 15 \left(\frac{z_c}{|r_c|}\right) \right\} \Big] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -3 G m_s \left(\frac{m_p}{m_s} \right) \left(\frac{R_p}{|r_c|} \right)^2 \frac{1}{|r_c|^3} \left[5 \left(\frac{y_c}{|r_c|^2} \right) \right. \\
 & \times (C_{2,2} x_c^2 - C_{2,2} y_c^2 + 2 S_{2,2} x_c y_c) \\
 & \left. + 2 (S_{2,2} x_c - C_{2,2} y_c) \right] \tag{4.80}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{PJz} = & \frac{1}{2} G m_s \left(\frac{m_p}{m_s} \right) \frac{z_c}{|r_c|^3} \left[J_2 \left(\frac{R_p}{|r_c|} \right)^2 \right. \\
 & \times \left\{ 15 \left(\frac{z_c}{|r_c|} \right) - 9 \right\} + J_3 \left(\frac{R_p}{|r_c|} \right)^3 \\
 & \times \left\{ 35 \left(\frac{z_c}{|r_c|} \right)^3 - 30 \left(\frac{z_c}{|r_c|} \right) \right\} \left. \right] \\
 & + \frac{3}{2} G m_s \left(\frac{m_p}{m_s} \right) \frac{J_3}{|r_c|^2} \left(\frac{R_p}{|r_c|} \right)^3 \\
 & - 15 G m_s \left(\frac{m_p}{m_s} \right) \left(\frac{R_p}{|r_p|} \right)^2 \left(\frac{z_c}{|r_p|^5} \right) \\
 & \times (C_{2,2} x_c^2 - C_{2,2} y_c^2 + 2 S_{2,2} x_c y_c) \tag{4.81}
 \end{aligned}$$

① 宇宙船の位置ベクトル r_c は中心天体が地球あるいは月の場合にはそれらの天体に固定の座標系 C_3^f あるいは C_{10}^f において測られたものであり、中心天体がそれ以外の惑星の場合にはその中心惑星の赤道面に準拠する座標系 C_i^M において測ったものである。このようにした理由は地球と月以外の惑星については歳差、章動および自転について詳しい情報を得ることが困難なことから、重力ポテンシャルの non-zonal な harmonics についてもあまりわかっていないためである。(4.80)~(4.81)式でもとまる摂動加速度は 1950.0 mean の座標系でのそれらに変換される。

② m_s, m_p は太陽および中心惑星の質量、 R_p は惑星の赤道半径、 $J_2, J_3, C_{2,2}, S_{2,2}$ は重力ポテンシャル定数で表 4.2 に与えられているが、 $C_{2,2}, S_{2,2}$ については地球と月の場合のみ考慮する。

4.2.3 定数

以上の方程式で用いられている定数は次のようなものである。

(1) 基本定数

- 1 天文単位 (1 AU) : 149597900 (km)
- ガウスの重力定数 (k): 0.01720209895
- 光速度 (c) : 299792.5 (km/sec)

(2) 太陽に関する定数

- 赤道半径 (R_s) : 696000 (km)
- 重力ポテンシャル (J_2): 0.0000070
- 赤道面の黄道面に対する傾き (I_s): $7.15'$

(3) 惑星に関する定数

Reciprocal mass は次のようになる。⁽¹⁶⁾

- 水星 : 5983000 土星 : 3499.2
- 金星 : 408522 天王星 : 22930
- 地球 : 328900.1 海王星 : 19260
- 火星 : 3098700 冥王星 : 1812000
- 木星 : 1047.3908

5. 入力および出力

この報告で記述する STANPS-B および STANPS-C について、その入力および出力について示す。

5.1 STANPS-B の入力および出力

実行に必要な入力カードは次の 5 種類からなる。

(1) 衛星に関する情報

表 4.2

P	planet	J_2	J_3	$C_{2,2}$	$S_{2,2}$	R_p (km)	(mp/ms) ⁻¹
1	Mercury						5983000
2	Venus						408522
3	Earth	1082.637×10^{-6}	-2.541×10^{-6}	1.5362×10^{-6}	-0.8815×10^{-6}	6378.140	328900.1
4	Mars	1.964×10^{-3}	0.036×10^{-3}				3098700
5	Jupiter	0.0147					1047.3908
6	Saturn	0.0167					3499.2
7	Uranus	0.012					22930
8	Neptune	0.005					19260
10	Moon	2.071×10^{-4}	-0.210×10^{-4}	0.207×10^{-4}		1736	2706880.7 13010

衛星の名称, 番号, 質量, 断面積, 大気抵抗係数, 反射係数(diffuse成分, specular成分)について定義する。(図5.1)

(2) エポックにおける衛星の軌道要素

エポックは協定世界時(UTC)で与え, 軌道要素(接触要素)はケプラー要素または位置および速度ベクトルの形で与えられる。また軌道要素を定義する座標系は瞬時の真の座標系(True of Date)あるいは1950.0の平均座標系(Mean of 1950.0)のいずれかを選択できる。(図5.2)

(3) 数値積分の指定

数値積分は4次~12次の Gauss-Jackson 法によって行われる。したがってステップサイズの大きさと共に, その次数を指定する必要がある。またステップサイズの制御を行う場合にはその旨の指定と打ち切り誤差の上限および下限値を与える。(図5.3)

(4) 摂動項の選択

考慮している摂動項は

- 地球の重力ポテンシャルの高次項,
- 月および太陽の引力,
- 太陽輻射,
- 大気抵抗,
- 制御推力,

の5つである。これらのうちから任意のいくつか, または全部, あるいはすべて考慮しない(二体問題)ことも

できる。さらに重力ポテンシャルの高次項においては Zonal 項のみの場合と, non-zonal な項を含めた場合とに分けられる。また大気密度の計算(後述)は高度と大気外圏温度によってきまる基本テーブルに動的変化の補正を行っているが, この補正を行うかどうかの選択ができる。(図5.4(1))

制御推力は加える推力の大きさによって, 次の三つに分類する。

- Impulsive : 10³ニュートン以上の推力
- Medium : 10 ニュートン以上の推力
- Low : 0.1~1ニュートンの推力

図3.11にも示すように, Impulsiveの場合には速度増分, 質量減少, 推力付加時間を与え, その他の場合には推力, 質量減少率, 推力付加時間を与える。なお Medium の場合には, 推力付加中は, 指定する任意のステップサイズで計算が行われる。推力付加の開始は, 指定した時刻の場合と, 近地点通過時のいずれかを選び, また推力の方向は指定した任意の方向の場合と, 速度ベクトルの方向の二つが考慮できる。なお速度増分あるいは推力の大きさはすべて1950.0平均赤道面座標系を基準とする。

(図5.4(2))

(5) 出力内容の指定

軌道計算の結果は Mean of 1950.0 の座標系におけるケプラー要素ならびに Mean of 1950.0, True of date の赤道面座標系および地球固定座標系における位置および

	10 11			58
/SATELLITE	コ メ ン ト			
	12 A4			
	20	23	30	
名 称	番 号			
5 A4	2X	2 A4		
	20 21	40 41		60
質 量 (kg)	断 面 積 (m ²)	大 気 抵 抗 係 数		
D20.0	D20.0	D20.0		
	20 21	40		
反射係数 (diffuse成分)	反射係数 (specular成分)			
D20.0	D20.0			

図5.1 衛星に関する情報の入力カード

1011		58	
/ORBIT	コ メ ン ト		
	12 A 4		

15		21 24		31 34		41 44						
エポック (西暦) ①		座標系 ②		軌道要素の型 ③		軌道要素 ④						
年	月	日	時	分	秒	F 5.0	5 X	A 4	5 X	A 4	5 X	A 4

- ① エポックの時系は UTC
- ② 座標系は "TRUE" (True of dateの座標系) または "MEAN" (Mean of dateの座標系)
- ③ 軌道要素の型は "KEPL" (ケプラー要素) または "CART" (位置, 速度ベクトル)。
- ④ 軌道要素は "OSCU" (接触要素) とする。

2021		4041		60	
a (km) or r_x (km)		e or r_y (km)		i or r_z (km)	
D20.0		D20.0		D20.0	

2021		4041		60	
Q (deg) or r_x (km/sec)		ω (deg) or r_y (km/sec)		M (deg) or r_z (km/sec)	
D20.0		D20.0		D20.0	

図 5.2 エポックにおける軌道要素の入力カード

10 11		58	
/INTEGRAL	コ メ ン ト		
	12 A 4		

4 6 8 11		20 21		40 41		60	
ステップサイズの制御指示 ①		GJ法の次数 ②		速度許容誤差下限 (km/sec)		速度許容誤差上限 (km/sec)	
4 X	3 X	I2	F 10.0	D 20.0	D 20.0		

- ① ステップサイズ制御指示は 0 (制御を行わない) または 1 (制御を行う)。
- ② プロセスの次数は 4 次~12 次の間で可能。

図 5.3 数値積分に関する入力カード

10 11	コ メ ン ト	58
/PERTURB	12 A 4	

4	11 14	
① 摂動法 A4	② 手法 A4	6 X

5	8 9	11 14	16	
③ 摂動項 1 2 3 4 5	2 X I 2	4 X	I 1	I 1

ハーモニック（重力ポテンシャル）の最大次数 ④
 non-zonal 項の指示 ⑤
 大気密度の補正 ⑥

- ① 摂動法は STANPS-B の場合は "SPEC" とする。
- ② 手法は STANPS-B の場合は "GAUS" とする。
- ③ 摂動項は 1 : 地球の扁平, 2 : 月, 太陽の引力, 3 : 大気抵抗, 4 : 太陽輻射, 5 : 制御推力に対応し, 各コラムにおける指示は 0 (考慮しない) または 1 (考慮する) となる。
- ④ ハーモニック (重力ポテンシャル) の最大次数は 22 次。
- ⑤ non-zonal 項の指示は 0 (zonal 項のみ考慮) または 1 (zonal 項および non-zonal 項を考慮) となる。
- ⑥ 大気密度の補正は 0 (動的補正を行なわない) または 1 (動的補正を行なう) となる。

図 5.4 (1) 摂動項の選択に関する入力カード

10 11	コ メ ン ト	58
/CFORCE	12 A 4	

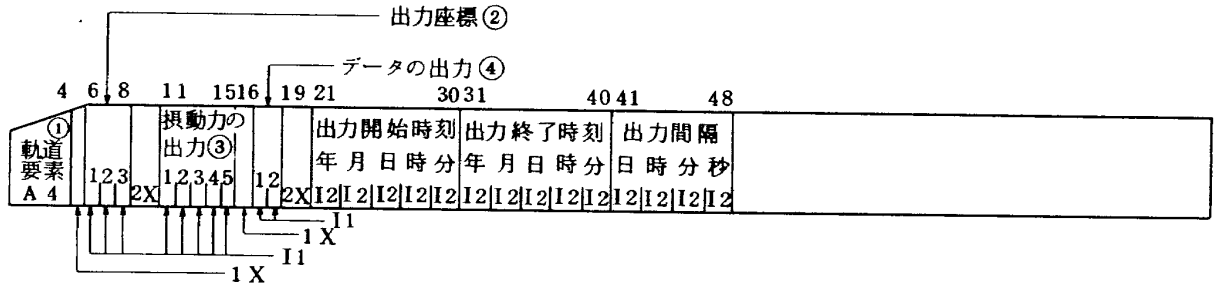
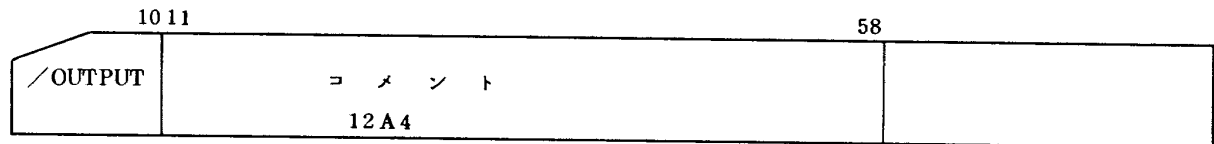
1 2 3	11	24	28	37	41	50 51	60
I 2	I 2 I 2 I 2 I 2	F 4.1	3 X	I 3 I 2 I 2 I 3	3 X	D 10.0	D 10.0

制御力の型 (1 : Impulsive, 2 : Medium, 3 : Low)
 推力方向の制御 (0 : 次のカード成分が与えられた方向, 1 : 速度ベクトルの方向)
 推力開始時刻の制御 (0 : 指示した時刻に開始, 1 : n 回後の近地点通過時刻に推力を付加)
 近地点通過回数 n (n は 2 ケタまでの整数)

速度増分 (m/sec) または 推力 (Newton) の x 成分 D20.0	速度増分 (m/sec) または推 力 (Newton) の y 成分 D20.0	速度増分 (m/sec) または推 力 (Newton) の z 成分 D20.0
---	---	---

- ① 推力を近地点通過時に付加する場合にはこの指定は不要。
- ② 推力付加時間は Impulsive の場合には秒のみを指定
- ③ 質量減少 (kg) は Impulsive の場合, 質量減少率 (kg/sec) は Medium または Low の場合になる。
- ④ 推力付加中のステップサイズの指定は Medium の場合のみ可能。
- ⑤ Impulsive の場合には速度増分 (m/sec) を指定し, 他の場合には推力 (Newton) を指定する。
 推力方向が速度ベクトルの方向に付加する場合は x 成分のコラムに速度増分または推力の大きさを与える。

図 5.4 (2) 制御力の入力カード



- ① 軌道要素の列は“OSCU”（接触軌道）と指定する。
- ② 出力座標は 1：1950.0 平均赤道面座標系，2：True of date の赤道面座標系，3：地球固定座標系，でいずれも 0（出力しない）または 1（出力する）と指定。
- ③ 摂動力の出力は

1：	地球の重力ポテンシャルの高次項による摂動加速度	}	であり，0（出力しない） または 1（出力する）と指定。
2：	月および太陽の引力による摂動加速度		
3：	大気抵抗による摂動加速度		
4：	太陽輻射による摂動加速度		
5：	制御力による摂動加速度		
- ④ データの出力は 1：大気密度，2：月，太陽のエフェメリスで 0（出力しない）または 1（出力する）と指定。

図 5.5 出力内容の入力カード

び速度ベクトルの形で出力することができる。また摂動加速度および大気密度，月太陽のエフェメリスも必要に応じて出力される。（図 5.5）

5.2 STANPS-C の入力および出力

実行に必要な入力カードは次の 6 種類からなる。

(1) 宇宙船に関する情報

宇宙船の名称，番号，質量，断面積，大気抵抗係数，反射係数(diffuse 成分，specular 成分)について定義する。（図 5.6）

(2) エポックにおける宇宙船の軌道要素

エポックは暦表時(Ephemeris Time)で与え，軌道要素(接触要素)はケプラー要素または位置および速度ベクトルの形で与える。軌道要素を定義する座標系は瞬時の真の座標系あるいは 1950.0 の平均座標系で，原点は太陽，月，9 惑星のいずれかを指定する。単位は天文単位(AU, day)あるいは MKS(km, sec)である。

(図 5.7)

(3) 数値積分の指定

数値積分は 4 次～12 次の Gauss-Jackson 法によって行われるが，STANPS-C では時間を逆にたどって軌道を求めることもできる。したがって次数およびステップサイズの大きさの他に時間の前進または後進の指定も行う。さらに任意の指定した時刻からステップサイズの

大きさを変えることができるが，STANPS-B のように自動的にステップサイズ制御は行わない。また Gauss-Jackson 法の出発値は 8 次の Runge-Kutta 法で求めるが，そのステップサイズの大きさも指定できる。（図 5.8）

(4) 摂動項の選択

考慮できる摂動項は

- 太陽および惑星を質点とする重力，
- 一般相対性理論の効果，
- 太陽輻射，
- 太陽の重力ポテンシャルの J_2 項，
- 中心惑星の重力ポテンシャルの高次項，
- （中心天体が太陽の場合をのぞく）
- 制御推力，

の 6 つである。これらのうちから任意のいくつか，または全部，あるいはすべて考慮しない(二体問題)こともできる。一般相対性理論の効果を検討する場合には Brance-Dicke のパラメータ(0～1)を与えるが，これが 1 つの場合には Einstein の理論に一致する。（図 5.9(1)）

制御推力は STANPS-B の場合と異なり，推力の大きさによる分類を行っていない。したがって指定するのは推力制御の回数，推力方向(速度ベクトルの方向また

は任意に指定した方向), 推力開始時刻, 推力付加時間, 質量減少率, 推力付加中の積分のステップサイズなどである。推力の大きさを定義する座標系は 1950.0 mean の赤道面座標系である。(図 5.9(2))

(5) 出力内容の指定

軌道計算の結果は Mean of 1950.0 座標系(原点は中心天体-太陽, 月, 惑星)におけるケプラー要素ならびに Mean of 1950.0, True of date の赤道面座標系(原点は中心天体)および地球固定座標系における位置および速度ベクトルの形で出力することができる。また考慮した摂動加速度の出力も可能である。(図 5.10)

(6) 定数の変更

太陽, 地球, 月に関する諸定数ならびに各惑星の reciprocal mass はプログラムの中で与えられているが(4章), 必要の場合には入力データとして, 別の値を与えることができる。(図 5.11(1)~図 5.11(4))

5.3 具体的な出力例

5.3.1 STANPS-B の出力例

例題として取上げた人工衛星は図 5.12 の proof list に示された通りである。入力データとしては 1950.0 平均赤道面座標系におけるケプラー要素で与えたが, list には位置および速度ベクトルの値および True of date における値も出力される。重力ポテンシャルは 5 次までの Zonal 項および non-zonal 項を考慮している。図 5.5

1011						
/SPACE CRFT		コメント				
		15 A 4				

1011		2021		3031		4041		60		63		70	
質量 (kg)	断面積 (m ²)	反射係数 (specular成分)	反射係数 (diffuse成分)	宇宙船の名称				番号					
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	5 A 4				2X	2 A 4				

図 5.6 宇宙船に関する情報の入力カード

1011										70	
/ORBIT		コメント									
		15 A 4									

15		21		24		31		34		38		41		45	
エポック (西暦, ET)															
年	月	日	時	分	秒										
5X		A4		6X		A4		4X		I2		4X			

座標系 ("MEAN": Mean of 1950.0, "TRUE": True of date)
 軌道要素の型 ("KEPL": ケプラー要素, "CART": 位置, 速度ベクトル)
 座標系の原点 (1~10 の数字で指定) ①
 単位系 (0: AU, Day, 1: km, sec)

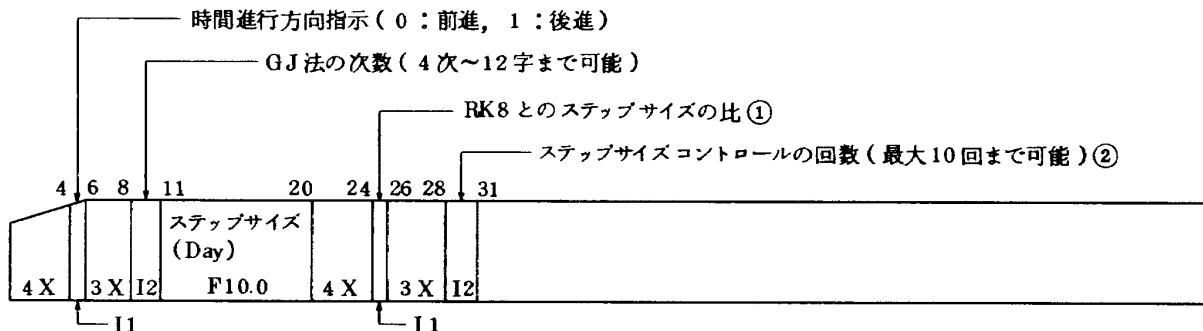
① 座標系の原点は 0: 太陽, 1: 水星, 2: 金星, 3: 地球, 4: 火星, 5: 木星, 6: 土星, 7: 天王星, 8: 海王星, 9: 冥王星, 10: 月

2021		40 41				60	
a or r_x	e or r_y	i (deg) or r_z					
D20.0		D20.0		D20.0			

2021		40 41				60	
Ω (deg) or \dot{r}_x	ω (deg) or \dot{r}_y	M (deg) or \dot{r}_z					
D20.0		D20.0		D20.0			

図 5.7 エポックにおける軌道要素の入力カード

1011	コメント	70
/INTEGRAL	15 A 4	



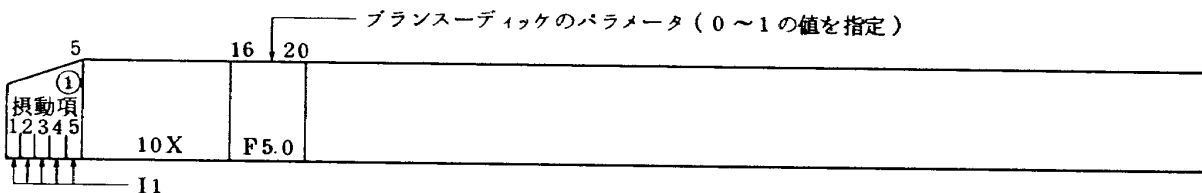
① 比は〔GJ法のステップサイズ〕／〔RK8のステップサイズ〕で与え、整数でなければならない。

② ここで指定した数だけ、以下のカードを用意する。

1011	ステップ サイズの変更 の時刻 年月日時分 I 2 I 2 I 2 I 2	20	ステップサイズ (Day) F 10.0	
------	---	----	----------------------------	--

図 5.8 数値積分法に関する入力カード

1011	コメント	70
/PERTURB	15 A 4	



① 摂動項の数字はそれぞれ

- 1 : 太陽および惑星を質点とする重力による摂動。
- 2 : 一般相対性理論による効果。
- 3 : 太陽輻射による摂動。
- 4 : 太陽の重力ポテンシャルの J_2 項による摂動。
- 5 : 近くの惑星の重力ポテンシャルの高次項の効果による摂動。

に対応し、0 (考慮しない) または 1 (考慮する) と指定。

図 5.9(1) 摂動項の選択に関する入力カード

1011	コ メ ン ト	70
/CFORC	15A4	

— 推力制御の回数(最大5回まで可能)①

2	
I1	

① ここで指定した制御の回数だけ、以下の2枚の組のカードを与える。

— 推力方向(0:次のカードにおいて与えられた成分方向, 1:速度ベクトルの方向)

2	11	20	23	3031	4041	50
9X	I2 I2 I2 I2 I2	2X	I4 I2 I2	F10.0	F10.0	②
I1						

2021	4041	60
③ 推力のx成分(Newton)	推力のy成分(Newton)	推力のz成分(Newton)

- ② 推力を付加している間の数値積分のステップサイズは、数値積分に関する入力データによって定義されたものに優先する。
- ③ 推力が速度ベクトルの方向である場合には、このコラムに推力の大きさを与える。

図 5.9(2) 制御推力に関する入力カード

1011	コ メ ン ト	70
/OUTPUT	15A4	

— 軌道要素の型(0:出力しない, 1:出力する)①

— 出力座標(0:出力しない, 1:出力する)②

— 摂動項(0:出力しない, 1:出力する)③

— 単位系(0: AU/Day, 1: km/sec)

3	4	6	9	11	20	31	4041	50	54	56
I2	I2	I3	2X	I2 I2 I2 I2 I2	10X	I2 I2 I2 I2 I2	F10.0	4X		
I1									I1	

- ① 軌道要素の型
 - 1: 位置および速度ベクトルで、指示された出力座標系において出力する。(出力座標の指示のない場合には 1950.0 mean の座標系において出力する)。
 - 2: ケプラー要素で、中心天体を原点とする 1950.0 平均赤道面座標系で出力される。
- ② 出力座標
 - 1: Mean of 1950.0の赤道面座標系(原点は中心天体)。
 - 2: True of Date の赤道面座標系(")。
 - 3: 地球固定座標系。
- ③ 摂動項
 - 出力されるのは考慮した摂動力のみで、座標系は中心天体を原点とする 1950.0 平均赤道面座標系。

図 5.10 出力内容のデータカード

1011	
/SCONS	

2021		4041		60	
太陽の赤道半径 R_s (km)	太陽の重力ポテンシャル定数 J_2	太陽定数 P_0 (dyn/cm ²)			
D20.0	D 20.0	D 20.0			

< プログラムの中で与えられている定数値 >

$$R_s = 696000 \text{ km}$$

$$J_2 = 0.0000070$$

$$P_0 = 4.7 \times 10^{-5} \text{ (dyn/cm}^2\text{)}$$

図 5.11 (1) 太陽に関する定数の変更入力カード

1011	
/ECONS	

2021		4041		60	
地球の赤道半径 R_E (km)	地心重力定数 $G m_E$ (km ³ /sec ²)	太陽と地球の質量比 m_S / m_E			
D 20.0	D 20.0	D 20.0			

20 21		4041		60	
重力ポテンシャル定数 J_2	J_3	$C_{2,2}$			
D 20.0	D 20.0	D 20.0			

20 21					
$S_{2,2}$					
D 20.0					

図 5.11 (2) 地球に関する定数の変更入力カード

1011				
/MCONS				
20 21		40 41		60
月の赤道半径 R_M (km)	太陽と月の質量比 m_S/m_M	地球と月の質量比 m_E/m_M		
D 20.0	D 20.0	D 20.0		
20 21		40 41		60
月の慣性モーメント α	β	γ		
D 20.0	D 20.0	D 20.0		
20 21				
$I_z/m_M R_M^2$				
D 20.0				

図 5.11 (3) 月に関する定数の変更入力カード

10				
/RMASS				
20 21		40 41		60
1. 火星	2. 金星	3. 地球		
D 20.0	D 20.0	D 20.0		
20 21		40 41		60
4. 火星	5. 木星	6. 土星		
D 20.0	D 20.0	D 20.0		
20 21		40 41		60
7. 天王星	8. 海王星	9. 冥王星		
D 20.0	D 20.0	D 20.0		
20 21				
10. 月				
D 20.0				

図 5.11 (4) 惑星, 月の Reciprocal mass の変更入力カード

における出力内容の入力カードにおいて、出力に関する部分をすべて on (1)にしたときの出力の一部を図 5.12~図 5.24に示した。

5.3.2 STANPS -C の出力例

火星に向う宇宙船の軌道で、地球の引力圏を脱出するための双曲線軌道に乗ったところの値を 1950.0 平均赤道面座標系におけるケプラー要素で入力したものである。(図 5.25) 図 5.26~図 5.30に出力の一部を示したが、単位は km, sec と指定した場合である。

6. むすび

プログラム "STANPS" はある意味で未完成のプログラムである。常にユーザーの改良や補足を期待しているからである。この報告では人工衛星および惑星間宇宙船の軌道生成の部分の説明を行った。ここに示した STANPS -B および STANPS -C によって、かなり満足すべき軌道生成ができると思う。しかしさらに高精度で、かつ高速度の軌道生成が可能になるような運動方程式の定式化や数値積分法の改良を目的として、これらのプログラムが利用されることを望むのである。

最後に、このプログラムは富士通株式会社の多大の協力があって初めて完成されたものであることを記さなくてはならない。富士通(株)の小坂義裕氏、笹原昭彦氏、卓種継氏、宮下徹氏、大興電子通信(株)の坂本邦雄氏、栗田博氏、山本富嘉氏、山本信夫氏に深く謝意を表する次第である。特に STANPS -B および STANPS -C の作製にあたって、システム設計に当たった山本富嘉氏の労力の大なるものがあつたことを付したい。また種々の資料やデータの提供、討論などを通して、宇宙開発事業団・追跡管制部、東京天文台、海上保安庁・水路部、富士通・国際情報社会科学研究所の方々のお世話になった。また STANPS -データファイルにおける恒星、小惑星、彗星のデータは計算センター、磯部俊夫主任研究官の労によるものである。さらにこれらのプログラムの計画遂行にあたっては、計算センター、三好甫計算研究室長の多大の助力をいただいた。

参 考 文 献

- 1) 松島弘一: "衛星運動のシミュレーションシステムにおける世界時の予測", 航技研報告 TR-430, 1975.
- 2) L. E. Cunningham: On the Computation of the Spherical Harmonic Terms Needed During the Numerical Integration of the Orbital Motion of an Artificial Satellite, *Celestial Mechanics* Vol. 2, No. 2 (1970).
- 3) E. M. Gaposchkin: 1973 Smithsonian Standard Earth (III), SAO Special Report 353 (1973).
- 4) E. W. Woolard: Theory of the Rotation of the Earth around its Center of Mass, *Astronomical Papers*, Vol. XV, Part I (1953).
- 5) R. M. L. Baker: *Astrodynamic*s, Academic Press (1967).
- 6) G. W. Spier: Design and Implementation of Models for the Double Precision Trajectory Program (DPTRAJ), JPL TM-33-451 (1971).
- 7) L. G. Jacchia: Revised Static Models of the Thermosphere and Exosphere with Empirical Temperature Profiles, SAO Special Report 332 (1971).
- 8) E. Fehlberg: Classical Fifth-, Sixth-, Seventh-, and Eighth- Order Runge-Kutta Formula with Step Size Control, NASA TRR-287 (1968).
- 9) M. E. Ash: Determination of Earth Satellite Orbits, Technical Note 1972-5, Lincoln Laboratory, MIT (1972).
- 10) R. H. Merson: Numerical Integration of the Differential Equations of Celestial Mechanics, RAE-TR (1973).
- 11) S. Herrick: *Astrodynamic*s, Vol. 2, Van Nostrand Reinhold Co. (1972).
- 12) M. D. Moutsoulas: Libration of the Lunar Grobe, Chapter 2 in *Physics and Astronomy of the Moon* (2nd Edition) edited by Z. Kopal, Academic Press (1971).
- 13) H. M. Nautical Almanac Office: Explanatory Supplement to the *Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac*, Her Majesty's Stationary Office (1961).
- 14) T. D. Moyer: Mathematical Formulation of the Double-Precision Orbit Determination Program (DPODP), Technical Report 32-1527, JPL (1971).
- 15) A. E. Roy: *The Foundation of Astrodynamic*s, The MacMillan Company (1965).
- 16) D. A. O'Handley, D. B. Holdridge, W. G. Melbourne and J. D. Mulholland: JPL Development Ephemeris Number 69, Technical Report 32-1465, JPL (1969).
- 17) R. H. Battin: *Astronautical Guidance*, McGraw-Hill (1964).
- 18) 海上保安庁水路部: "天体位置表", 昭和50年

```

CONTROL DATA CARD PROOF LIST (STANPS.B)

***** SIMULATION CONDITION *****
SATELLITE NAME : SMAP.TEST1          SATELLITE I.D : 1111

EPOCH ( INITIAL TIME )   Y M D H M S      MJED      DAY
                        1971 1 15 0 0 0.0    40966.0000000
FINAL TIME                1971 1 16 3 0 0.0    40967.1250000

INPUT COORDINATE SYSTEM : MEAN OF 1950.0    ELEMENT : KEPLERIAN

***** OSCULATING ORBITAL ELEMENTS AT EPOCH *****
S.M AXIS ( KM )          8.2500000000000D+03    TRUE OF DATE          7.4574686407437D+03 (SEC)
ECCENTRICITY             2.0000000000000D-01
INCLINATION ( DEG )      4.5000000000000D+01
LONG. OF NODE ( DEG )    1.0000000000000D+01
ARG. OF PERIGEE ( DEG )  1.0000000000000D+01
MEAN ANOMALY ( DEG )    0.0

***** INITIAL CONDITIONS FOR NUMERICAL INTEGRATION *****
MEAN OF 1950.0
POSITION VECTOR          X      5.2602612511605D+03    TRUE OF DATE          ( KM )
                        Y      1.9267541897130D+03    ( KM )
                        Z      8.1039950619522D+02    ( KM )
VELOCITY VECTOR         XDOT  -2.4852517434123D+00    ( KM/SEC )
                        YDOT   5.5814576246035D+00    ( KM/SEC )
                        ZDOT   5.9282221781058D+00    ( KM/SEC )

***** NUMERICAL INTEGRATION *****
CALCULATION OF STARTING VALUES : 8-TH ORDER RUNGE-KUTTA FORMULA

GAUSS-JACKSON FORMULA    MODE : FIXED ORDER AND FIXED STEP SIZE
STEP-SIZE : 30.00 SEC
ORDER : 8
    
```

図 5.12(1) STANPS - B の入力データ


```

***** THE CAUSES OF PERTURBING ACCELERATION *****
**
** ASPHERICITY OF THE EARTH
**
** HARMONIC COEFFICIENT : 5 ZONAL TESSERAL
**
** GRAVITATIONAL ATTRACTIONS OF SUN AND MOON
**
** SOLAR RADIATION PRESSURE
**
** SATELLITE MASS = 100.00 (KG) CROSS SECTION = 2.00 (M**2)
**
** SATELLITE DIFFUSE REFLECTIVE COEFFICIENT = 0.3000
**
** SATELLITE SPECULAR REFLECTIVE COEFFICIENT = 0.5000
**
** SOLAR RADIATION CONSTANT = 1.3525D+03 ( KG/SEC**3 )
**
** ATMOSPHERIC DRAG
**
** ATMOSPHERIC DENSITY MODEL : JACCHIA 71 MODEL
**
** SATELLITE MASS = 100.00 (KG) CROSS SECTION = 2.00 (M**2)
**
** SATELLITE DRAG COEFFICIENT = 2.2000
**
** CONTROL FORCE
**
** THRUST TYPE : MEDIUM
**
** THRUST STARTING TIME = 1971 1 15 0 15 0.0 MJED DAY
**
** THRUSTING DURATION = 900.00 (SEC)
**
** MASS DECREASE RATIO = 0.0222222 (KG/SEC)
**
** THRUST DIRECTION : VELOCITY VECTOR DIRECTION
**
** INTEGRATION STEP SIZE = 5.000 (SEC)
**
** CONTROL FORCE X 1.00000000000000D+01 (NEWTON)
**
** Y 0.0
**
** Z 0.0

```

図 5.12(2) STANPS - B の入力データ

DATE (TAI)		SATELLITE (MEAN EQUINOX AND EQUATOR OF 1950.0)		POSITION (KM)		VELOCITY (KM/SEC)		ACCELERATION (KM/SEC**2)		R.A. DEC		H M S	
Y	M D H M S	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	R.A	DEC	H	M S
71	1 15 0 0 0.00	6.2602612511603D+03	1.92675418971300D+03	-2.4852517434123D+00	5.5814576246035D+00	-8.691763136883D-03	-2.675224374487D-03	R.A	1 8 25.70				
	TIME = 0.0	8.1039930619522D+02	5.9282221781058D+03	5.9282221781058D+03	8.5131054049838D+00	-1.1288997110457D-03	9.1639503730177D-03	DEC	7 3 10.88				
	(TAI-UTC) = 8.9824 SEC	6.600000000000D+03	1.3188426659639D+03	-7.3372055792753D+00	1.2566444675878D+00	-1.3816029913785D-03	-5.4353956277783D-03	R.A	5 2 57.48				
71	1 15 0 15 0.00	5.188976318468D+03	4.8776584170183D+03	1.2566444675878D+00	2.5031083229326D+00	-5.1221297299416D-03	7.5952989030438D-03	DEC	42 20 4.98				
	TIME = 900.0	7.2426728407146D+03	5.2150721929238D+03	-6.15822164911486D+00	-2.5819815034596D+00	3.1662610282105D-03	-2.904936165992D-03	R.A	9 15 39.28				
	(TAI-UTC) = 8.9825 SEC	8.5057917998872D+03	8.5057917998872D+03	-1.4849380459512D+00	6.8407090163742D+00	-3.408377951364D-03	5.484606028385D-03	DEC	37 48 55.63				
71	1 15 0 30 0.00	-5.0646131391918D+03	1.277545799270D+03	-2.685663925074D+00	-4.0501365788233D+00	4.090344369617D-03	-5.7447486958086D-04	R.A	11 28 1.22				
	TIME = 1800.0	5.2150721929238D+03	2.8158947512123D+03	-3.3286355034952D+00	6.0056361481879D+00	-1.268083982276D-03	4.3208462464456D-03	DEC	17 2 37.25				
	(TAI-UTC) = 8.9825 SEC	9.6072618476964D+03	9.6072618476964D+03	8.7364502414667D-01	8.7364502414667D-01	3.7264589435117D-03	8.9792504069463D-04	R.A	12 54 11.39				
71	1 15 1 0 0.00	-9.886221033849D+03	-2.382137518389D+03	-3.8629484108505D+00	-3.9543929962351D+00	2.4654062515918D-04	3.8410347455131D-03	DEC	-3 40 31.62				
	TIME = 2700.0	1.0190125706287D+04	1.0190125706287D+04	5.5966820347341D+00	3.8998765197286D+00	2.9285241327451D-03	2.033638962108D-03	R.A	14 19 6.54				
	(TAI-UTC) = 8.9826 SEC	7.6845380273697D+03	-5.3363697181194D+03	-2.532388824000D+00	-3.1611088446493D+00	1.5033033027945D-03	3.8693568697959D-03	DEC	-22 50 9.67				
71	1 15 1 15 0.00	1.0151361879590D+04	1.0151361879590D+04	5.8226671795657D+00	5.8226671795657D+00	2.9285241327451D-03	2.033638962108D-03	R.A	16 18 29.55				
	TIME = 4500.0	-3.1530200967247D+03	-6.6471634920665D+03	-1.2344597461249D+00	6.0840122494174D+00	4.4190715374797D-03	1.4663457618944D-03	DEC	-39 13 19.71				
	(TAI-UTC) = 8.9826 SEC	9.4966534753888D+03	9.4966534753888D+03	6.0417726518582D+00	6.0417726518582D+00	-1.6788688210826D-03	3.0913001320676D-03	R.A	19 36 36.97				
71	1 15 1 45 0.00	2.4552191208074D+03	-5.4748482487480D+03	2.9298569238949D+00	1.8573671573081D+00	3.9781624782395D-03	5.7149031332456D-03	DEC	-44 3 37.16				
	TIME = 6300.0	-5.806519583292D+03	8.3497146028599D+03	6.9668422637722D+00	6.9668422637722D+00	-1.6788688210826D-03	3.0913001320676D-03	R.A	19 36 36.97				
	(TAI-UTC) = 8.9826 SEC	8.3497146028599D+03	8.3497146028599D+03	6.9668422637722D+00	6.9668422637722D+00	3.9781624782395D-03	5.7149031332456D-03	DEC	-44 3 37.16				

図 5.13 1950.0 平均赤道面座標系における衛星の位置、速度ベクトルと赤経、赤緯

DATE (TAI)		SATELLITE (TRUE EQUINOX AND EQUATOR OF DATE)				R.A		H M S					
Y	M	D	H	M	S	DEC	;	;	;				
71	1	15	0	0	0.00	X	6.2493511289909D+03	VELOCITY (KM/SEC)	ACCELERATION (KM/SEC**2)	R.A	H	M	S
						Y	1.9564377403070D+03	-2.5239738701165D+00	-8.6766072331191D-03	R.A	1	9	32.01
						Z	8.2338437857543D+02	5.5693525557158D+00	-2.7164369434654D-03	R.A			
						ABS	6.6000000000000D+03	5.9232450269637D+00	-1.1469279373582D-03	DEC	7	9	59.83
								8.5131054049838D+00	9.1639503730177D-03	DEC			
71	1	15	0	15	0.00	X	1.2841033118946D+03	-7.3482455634703D+00	-1.3451873869724D-03	R.A	5	4	27.81
						Y	5.1949878965135D+03	2.4216769893674D+00	-5.4416927938619D-03	R.A			
						Z	4.8805258705524D+03	2.4879880987239D+00	-5.1251356916454D-03	DEC	42	21	55.55
						ABS	7.2426758407146D+03	7.8536165113132D+00	7.5952989030458D-03	DEC			
71	1	15	0	30	0.00	X	-5.0962918779251D+03	-6.1428022464766D+00	3.1870562689282D-03	R.A	9	16	59.29
						Y	4.3917013557756D+03	-2.6111460628079D+00	-2.8897268708932D-03	R.A			
						Z	5.2047346176055D+03	-1.4977304984768D+00	-3.4019191990581D-03	DEC	37	43	38.49
						ABS	8.5057917998872D+03	6.8407090163742D+00	5.4846060283850D-03	DEC			
71	1	15	0	45	0.00	X	-9.1078098883060D+03	-2.6591017675074D+00	4.0957271246961D-03	R.A	11	29	7.07
						Y	1.2342103754723D+03	-4.0627075723495D+00	-5.5498723342408D-04	R.A			
						Z	2.7971421125417D+03	-3.5342963254422D+00	-1.2596510524618D-03	DEC	16	55	36.27
						ABS	9.6072618476964D+03	6.00565361481879D+00	4.5208462464456D-03	DEC			
71	1	15	1	0	0.00	X	-9.8734233570525D+03	9.0014946083261D-01	3.7216344128806D-03	R.A	12	55	17.12
						Y	-2.4290465119868D+03	-3.8585969460350D+00	9.1560665156451D-04	R.A			
						Z	-6.7372265479693D+02	-3.9528966210221D+00	2.5426299910198D-04	DEC	-3	47	27.20
						ABS	1.0190125706287D+04	5.5966820547341D+00	3.8410347455131D-03	DEC			
71	1	15	1	15	0.00	X	-7.6509498877258D+03	3.9183814101001D+00	2.9157199721120D-03	R.A	14	20	18.56
						Y	-5.3726556904428D+03	-2.5136587378722D+00	2.0474821521425D-03	R.A			
						Z	-3.9557154419715D+03	-3.1531243373304D+00	1.5094093105325D-03	DEC	-22	56	3.04
						ABS	1.0151361879590D+04	5.6226671795657D+00	3.8693568697959D-03	DEC			
71	1	15	1	30	0.00	X	-3.1090010743828D+03	5.9568625157131D+00	1.4458660013394D-03	R.A	16	19	55.69
						Y	-6.661826372821D+03	-1.9312454800779D-01	3.0981191110353D-03	R.A			
						Z	-6.0117059644976D+03	-1.2221689445039D+00	2.7998790369218D-03	DEC	-39	16	27.60
						ABS	9.4966534753888D+03	6.0880122499174D+00	4.4190715374797D-03	DEC			
71	1	15	1	45	0.00	X	2.4931841866616D+03	6.0239382854416D+00	-1.7048454406983D-03	R.A	19	38	7.50
						Y	-5.4628917285935D+03	2.9584496867314D+00	5.7355840945403D-03	R.A			
						Z	-5.8016013480432D+03	1.8692889057483D+00	3.9747995318416D-03	DEC	-44	0	48.17
						ABS	8.3497146028599D+03	6.9668422637722D+00	5.7149031332456D-03	DEC			

図 5.14 True of date の座標系における衛星の位置、速度ベクトルと赤経、赤緯

DATE (TAI)		S A T E L L I T E			(EARTH-FIXED COORDINATE SYSTEM)								
Y	M	D	H	M	S	POSITION (KM)	VELOCITY (KM/SEC)	ACCELERATION (KM/SEC**2)	LNG	LAT	TIME		
71	1	15	0	0	0.00	X	-7.2670554436215D+02	6.1142201027937D+00	1.0080525299218D-03	-96	22	17.25	
						Y	-6.5079902394358D+03	6.6667244453614D+00	9.0357489627871D-03				
					0.0	Z	8.2338437857543D+02	5.9232450269657D+00	-1.146927937582D-03				
					0.9825	ABS	6.600000000000D+03	8.5131054049838D+00	9.1639503730177D-03		7	9	59.83
71	1	15	0	15	0.00	X	4.0141445586813D+03	4.4782328098290D+00	-4.2047246539979D-03	-41	23	57.29	
						Y	-3.5388506640645D+03	5.9526850495108D+00	3.7069988067025D-03				
					900.0	Z	4.880525870524D+03	2.4879880987239D+00	-5.1251356916454D-03				
					0.9825	ABS	7.2426758407146D+03	7.8536165113132D+00	7.5952989030458D-03		42	21	55.55
71	1	15	0	30	0.00	X	6.3992575278422D+03	9.5734749923455D+01	-4.1243637488913D-03	17	58	18.07	
						Y	2.0757492130991D+03	6.6057239547490D+00	-1.2237126772684D-03				
					1800.0	Z	5.2047346176055D+03	-1.4977304984768D+00	-3.4019191990581D-03				
					0.9825	ABS	8.5037917998872D+03	6.8407090163742D+00	5.4846060283850D-03		37	43	38.49
71	1	15	0	45	0.00	X	6.2392306889243D+03	-1.7999720834141D+00	-2.8057200414132D-03	47	14	49.72	
						Y	6.748887065970D+03	4.5096025908407D+00	-3.034950833195D-03				
					2700.0	Z	2.791421125417D+03	-3.5342963254422D+00	-1.2396510524618D-03				
					0.9825	ABS	9.6072618476964D+03	6.0056361481817D+00	4.3208462464456D-03		16	55	36.27
71	1	15	1	0	0.00	X	4.2930187092870D+03	-3.5713106838965D+00	-1.6181752755585D-03	65	1	31.58	
						Y	9.2170901078413D+03	1.7160359678716D+00	-3.4742491305457D-03				
					3600.0	Z	-6.7322265479693D+02	-3.9526966210221D+00	2.5426299910198D-04				
					0.9826	ABS	1.0190125708287D+04	5.5966820547341D+00	3.8410347455131D-03		-3	47	27.20
71	1	15	1	15	0.00	X	1.2168585062603D+03	-4.5016490441841D+00	-4.6373341082184D-04	82	31	16.14	
						Y	9.2693968912913D+03	-1.1863174147317D+00	-3.5325001688326D-03				
					4500.0	Z	-3.9557154419715D+03	-3.153124373304D+00	1.509409310325D-03				
					0.9826	ABS	1.0151361879590D+04	5.6226671795657D+00	3.8693568697959D-03		-22	56	3.04
71	1	15	1	30	0.00	X	-2.3528342226148D+03	-4.4411831335041D+00	1.0941928175450D-03	108	39	56.20	
						Y	6.9649115238383D+03	-3.9745943814218D+00	-3.2390758864230D-03				
					5400.0	Z	-6.0117059644976D+03	-1.22221689445039D+00	2.7998790569218D-03				
					0.9826	ABS	9.4966534753888D+03	6.0840122494174D+00	4.4190715374797D-03		-39	16	27.60
71	1	15	1	45	0.00	X	-5.4179069151228D+03	-2.7211656711386D+00	3.7048071129546D-03	154	27	16.40	
						Y	2.5894860660021D+03	-6.1347790837117D+00	-1.7707317018265D-03				
					6300.0	Z	-5.8016015480432D+03	1.8699289057483D+00	3.9747995318416D-03				
					0.9826	ABS	8.3497146028599D+03	6.9668422637722D+00	5.7149031532556D-03		-44	0	48.17

図 5.15 地球固定座標系における衛星の位置，速度ベクトルと経度，緯度

S A T E L L I T E (MEAN EQUINOX AND EQUATOR OF 1950.0)		I N I T I A L < 6 > E L E M E N T S		O M E G 1		O M E G 2		M (DEG)	
A (KM)	E	I	O M E G 1	O M E G 2	M (DEG)				
71 1 15 0 0 0.0	8.25000000D+03	2.00000000D-01	4.50000000D+01	1.00000000D+01	1.00000000D+01	0.0			
71 1 15 0 0 0.0	8.25000000D+03	2.00000000D-01	4.50000000D+01	1.00000000D+01	1.00000000D+01	7.37677477D+18			
71 1 15 0 15 0.00	8.23711564D+03	1.9843068D-01	4.4969018D+01	9.95243242D+00	1.00205517D+01	4.35639349D+01			
71 1 15 0 30 0.00	8.49364115D+03	2.0697592D-01	4.49730117D+01	9.88609306D+00	1.74991166D+01	7.83373527D+01			
71 1 15 0 45 0.00	8.49687762D+03	2.06678069D-01	4.49879753D+01	9.86512814D+00	1.76036499D+01	1.20045464D+02			
71 1 15 1 0 0.00	8.49714944D+03	2.06433357D-01	4.49919437D+01	9.86340224D+00	1.75461229D+01	1.61710780D+02			
71 1 15 1 15 0.00	8.49584499D+03	2.06638135D-01	4.49853541D+01	9.85951814D+00	1.74855833D+01	2.03376293D+02			
71 1 15 1 30 0.00	8.49345097D+03	2.06928189D-01	4.49736098D+01	9.83988770D+00	1.75376061D+01	2.44928811D+02			
71 1 15 1 45 0.00	8.49176671D+03	2.06790344D-01	4.49694303D+01	9.79455541D+00	1.76222171D+01	2.86449371D+02			
71 1 15 2 0 0.00	8.49975761D+03	2.07182446D-01	4.49916046D+01	9.74651679D+00	1.74616216D+01	3.28209059D+02			
71 1 15 2 15 0.00	8.49982237D+03	2.07361138D-01	4.49898618D+01	9.73645387D+00	1.77679066D+01	9.584661559D+00			
71 1 15 2 30 0.00	8.49069175D+03	2.06769350D-01	4.49661478D+01	9.66891613D+00	1.76783741D+01	5.12992116D+01			
71 1 15 2 45 0.00	8.49520101D+03	2.06924608D-01	4.49790831D+01	9.61940902D+00	1.78295880D+01	9.27621033D+01			
71 1 15 3 0 0.00	8.49724508D+03	2.06587227D-01	4.49908092D+01	9.6038856D+00	1.78666799D+01	1.34336351D+02			
71 1 15 3 15 0.00	8.49683561D+03	2.06459623D-01	4.49906166D+01	9.60791445D+00	1.77879159D+01	1.76022299D+02			
71 1 15 3 30 0.00	8.49509584D+03	2.06750360D-01	4.49814317D+01	9.59997599D+00	1.77586475D+01	2.17656619D+02			
71 1 15 3 45 0.00	8.49249559D+03	2.06943186D-01	4.49704048D+01	9.57229929D+00	1.78479205D+01	2.59172276D+02			
71 1 15 4 0 0.00	8.49282313D+03	2.06716524D-01	4.49741929D+01	9.52026782D+00	1.78615807D+01	3.00765049D+02			
71 1 15 4 15 0.00	8.50376718D+03	2.07669301D-01	4.49991975D+01	9.48813624D+00	1.77948966D+01	3.42466676D+02			
71 1 15 4 30 0.00	8.49411381D+03	2.06811305D-01	4.49772793D+01	9.46309360D+00	1.80307244D+01	2.38885769D+01			
71 1 15 4 45 0.00	8.49194941D+03	2.06923367D-01	4.49687426D+01	9.39163008D+00	1.79815710D+01	6.55331520D+01			
71 1 15 5 0 0.00	8.49627815D+03	2.06803136D-01	4.49844665D+01	9.35896888D+00	1.81350628D+01	1.07013532D+02			
71 1 15 5 15 0.00	8.49728683D+03	2.0646897D-01	4.49919037D+01	9.35449359D+00	1.81128238D+01	1.48645795D+02			
71 1 15 5 30 0.00	8.49634432D+03	2.06542759D-01	4.49878642D+01	9.35276906D+00	1.80347186D+01	1.90330245D+02			
71 1 15 5 45 0.00	8.49422877D+03	2.06860627D-01	4.49768123D+01	9.33510962D+00	1.80470174D+01	2.31923171D+02			
71 1 15 6 0 0.00	8.49181220D+03	2.06889733D-01	4.49683682D+01	9.30225554D+00	1.81507554D+01	2.73424498D+02			
71 1 15 6 15 0.00	8.49573176D+03	2.0683353D-01	4.49821742D+01	9.24909655D+00	1.80632373D+01	3.13122969D+02			
71 1 15 6 30 0.00	8.50382500D+03	2.07781370D-01	4.49978256D+01	9.23413409D+00	1.82071325D+01	3.56632784D+02			
71 1 15 6 45 0.00	8.49083748D+03	2.06674749D-01	4.49680932D+01	9.18337493D+00	1.82363305D+01	3.82443760D+01			
71 1 15 7 0 0.00	8.49370427D+03	2.06989060D-01	4.49737265D+01	9.12122064D+00	1.83139440D+01	7.97802358D+01			
71 1 15 7 15 0.00	8.49689726D+03	2.06669911D-01	4.49882825D+01	9.10204019D+00	1.84139975D+01	1.21293207D+02			
71 1 15 7 30 0.00	8.49707090D+03	2.06457869D-01	4.49913648D+01	9.10067135D+00	1.83520336D+01	1.62963647D+02			
71 1 15 7 45 0.00	8.49568403D+03	2.06638516D-01	4.49841430D+01	9.09612463D+00	1.82939640D+01	2.04627594D+02			
71 1 15 8 0 0.00	8.49326753D+03	2.06941284D-01	4.49723532D+01	9.07528563D+00	1.83504117D+01	2.46176540D+02			
71 1 15 8 15 0.00	8.49180508D+03	2.0679389D-01	4.49691853D+01	9.02949321D+00	1.84276478D+01	2.87705601D+02			
71 1 15 8 30 0.00	8.50013722D+03	2.07245126D-01	4.4991671D+01	8.98492974D+00	1.82876031D+01	3.29465624D+02			
71 1 15 8 45 0.00	8.49924025D+03	2.07348616D-01	4.49866409D+01	8.97381260D+00	1.85840321D+01	1.08336055D+01			
71 1 15 9 0 0.00	8.49063736D+03	2.06801513D-01	4.49646037D+01	8.90428949D+00	1.84893956D+01	5.25527342D+01			
71 1 15 9 15 0.00	8.49523855D+03	2.06937494D-01	4.49784298D+01	8.85663241D+00	1.86445389D+01	9.40117094D+01			
71 1 15 9 30 0.00	8.49718632D+03	2.06538812D-01	4.49896359D+01	8.84592479D+00	1.8675724D+01	1.3592322D+02			
71 1 15 9 45 0.00	8.49669239D+03	2.06499228D-01	4.49887282D+01	8.84619989D+00	1.85959324D+01	1.77279567D+02			

図 5.16 1950.0 平均赤道面座標系における衛星のケプラー要素

DATE (TAI)		PERTURBING ACCELERATION DUE TO ASPHERICITY OF THE EARTH			(CM/SEC**2)			
Y	M	D	H	M	X	Y	Z	ABS
71	1	15	0	0	-1.22405120493050+00	-3.7033444425462D-01	-5.1365328620354D-01	1.3762005750611D+00
71	1	15	0	15	2.0742794045281D-01	8.6686216459021D-01	-4.6893399833839D-01	1.0071620811330D+00
71	1	15	0	30	-2.3672628406635D-01	2.2735478961973D-01	-4.8917942226398D-01	4.8917942226398D-01
71	1	15	0	45	1.6664977635546D-01	-2.06243393743D-02	-2.3101268569674D-01	2.853947838097D-01
71	1	15	1	0	2.2817196242573D-01	5.6323929336573D-02	4.6381758554556D-02	2.3935395421436D-01
71	1	15	1	15	4.3983120498192D-02	3.0514579610122D-02	2.1386554825992D-01	2.2046343730891D-01
71	1	15	1	30	-1.0725214540515D-01	-2.2938451739259D-01	2.029382071723D-01	3.2450607920918D-01
71	1	15	1	45	2.3095087990324D-01	-5.0703388122698D-01	2.223391678621D-01	5.9989325581464D-01
71	1	15	2	0	-3.5911009760700D-01	7.0210144070182D-02	8.5769348662680D-01	9.3248464473080D-01
71	1	15	2	15	-2.4754256647378D-01	-1.6208834563605D-01	-1.0863333024024D+00	1.12590865211135D+00
71	1	15	2	30	-1.5409581367118D-01	7.9139756355264D-01	-2.6957679845908D-01	8.5013367987363D-01
71	1	15	2	45	-9.5214556202668D-02	4.8786823961200D-02	-3.5988726931386D-01	3.7543280997654D-01
71	1	15	3	0	2.3692824287736D-01	1.299597704309D-03	-1.3064092630074D-01	2.7056186345600D-01
71	1	15	3	15	1.8124022525134D-01	6.9052878188538D-02	1.2430476816537D-01	2.3036491620183D-01
71	1	15	3	30	-3.1590591037070D-02	-2.8095931557839D-02	2.3152264563267D-01	2.3535097674364D-01
71	1	15	3	45	-6.9145776107040D-02	-3.6059371438328D-01	1.6787639787891D-01	4.0372199614459D-01
71	1	15	4	0	3.765249131152D-01	-3.850859724993D-01	4.2402144645383D-01	6.8546051301827D-01
71	1	15	4	15	-1.1196004190251D+00	-6.234460994986D-02	3.8302495457925D-01	1.1849472834253D+00
71	1	15	4	30	3.5952961512633D-01	4.935304666864D-01	-8.5391930221255D-01	1.0513951291502D+00
71	1	15	4	45	-3.1751892075647D-01	4.8216189567603D-01	-2.9318946072689D-01	6.4750167456277D-01
71	1	15	5	0	6.7387525367501D-02	-2.2320316491189D-02	-3.0771785480242D-01	3.1584261461357D-01
71	1	15	5	15	2.5351670806413D-01	3.1362104817864D-02	-2.8879110088670D-02	2.5707643922136D-01
71	1	15	5	30	1.1234381341895D-01	5.9135784466922D-02	1.8385931001413D-01	2.235398294009D-01
71	1	15	5	45	-8.8997717181106D-02	-1.2084038378044D-01	2.2572613362721D-01	2.7106323878007D-01
71	1	15	6	0	5.33359603438241D-02	-4.6962081830774D-01	1.6030629559908D-01	4.9915251295977D-01
71	1	15	6	15	2.1629715016486D-01	-1.0554913070474D-01	7.3359777196843D-01	7.72069146664363D-01
71	1	15	6	30	-1.0420061797714D+00	-3.5725261895308D-01	-5.9721255410695D-01	1.2530240010523D+00
71	1	15	6	45	1.9408020957347D-01	8.8540158411583D-01	-4.2219797308179D-01	9.9992710803202D-01
71	1	15	7	0	-2.4694609704513D-01	2.0069012801099D-01	-3.5321663791941D-01	4.7541654959623D-01
71	1	15	7	15	1.8243868310871D-01	-2.5010328952380D-02	-2.1814474551072D-01	2.8548873461138D-01
71	1	15	7	30	2.2697653707271D-01	5.5431655566541D-02	6.1852122377770D-02	2.4169547340197D-01
71	1	15	7	45	3.339254882094D-02	2.2804219067720D-02	2.2041359081221D-01	2.2408708866936D-01
71	1	15	8	0	-1.0656503788291D-01	-2.4264913177967D-01	1.982593794831D-01	3.3097052740609D-01
71	1	15	8	15	2.3852091223095D-01	-4.895765642685D-01	2.3815875855891D-01	5.9437237386672D-01
71	1	15	8	30	-4.3882752630332D-01	1.0198185169794D-01	8.3139638104726D-01	9.4561611573393D-01
71	1	15	8	45	-1.4437850828852D-01	-1.1196799904032D-01	-1.1136915132246D+00	1.1285790947440D+00
71	1	15	9	0	-1.7430499925054D-01	7.7483854878503D-01	-2.6473955718197D-01	8.3716428649575D-01
71	1	15	9	15	-7.7440265401314D-02	3.6608922808246D-02	-3.5699164192445D-01	3.6712428459382D-01
71	1	15	9	30	2.4283563302686D-01	1.5416036946280D-03	-1.1578726243402D-01	2.6903198945759D-01
71	1	15	9	45	1.7227443818671D-01	6.5630238660241D-02	1.3596489172450D-01	2.2906943472312D-01

図 5.17 地球の重力ポテンシャルの高次項による振動加速度

DATE (TAI)			PERTURBING ACCELERATION DUE TO GRAVITATION ATTRICTIONS OF SUN AND MOON			(CM/SEC**2)		
Y	M	D	X	Y	Z	X	Y	Z
71	1	15	0	0	0	-7.1757795194542D-05	-2.9318563007635D-05	8.0203996852761D-05
71	1	15	0	15	0	1.5884360121658D-05	-2.4486485966743D-05	8.170838595082D-05
71	1	15	0	30	0	9.9289962409177D-05	8.1733975347289D-07	1.608865252525D-04
71	1	15	0	45	0	1.3591472715000D-04	2.8187403253866D-05	1.7536563842829D-04
71	1	15	1	0	0	1.2230880007835D-04	4.5659156566137D-05	1.3854603907231D-04
71	1	15	1	15	0	7.0394640965106D-05	4.8321936017216D-05	8.9925909640636D-05
71	1	15	1	30	0	-1.7264841130246D-06	3.566248213237D-05	9.8039570650465D-05
71	1	15	1	45	0	-6.9193712288681D-05	1.0751164396506D-05	1.3707601251523D-04
71	1	15	2	0	0	-9.5737768343672D-05	-1.7687745483883D-05	1.2774907969457D-04
71	1	15	2	15	0	-4.7185070668436D-05	-3.1546375957865D-05	5.837472507317D-05
71	1	15	2	30	0	4.5687660989026D-05	-1.8336435146949D-05	1.1402897387892D-04
71	1	15	2	45	0	1.1472615343751D-04	9.3738815316185D-06	1.7171131850130D-04
71	1	15	3	0	0	1.3407406952305D-04	3.4657806322222D-05	1.6670957913483D-04
71	1	15	3	15	0	1.0718028008123D-04	4.8109650533672D-05	1.2018209739812D-04
71	1	15	3	30	0	4.7760793463389D-05	4.6206957690384D-05	8.12230862404989D-05
71	1	15	3	45	0	-2.4708069604268D-05	2.9360447656047D-05	1.1032690584888D-04
71	1	15	4	0	0	-8.645957861628D-03	-1.9009164184931D-06	1.40230449936004D-04
71	1	15	4	30	0	-1.7249525265959D-05	-3.031984742085D-05	5.8481726842712D-05
71	1	15	4	45	0	7.156861100071D-05	-1.0737174602138D-05	1.3880712645680D-04
71	1	15	5	0	0	1.2406138710896D-04	1.7607815378608D-05	1.7543678615716D-04
71	1	15	5	15	0	1.2745778516961D-04	4.006161078724D-05	1.5354853207798D-04
71	1	15	5	30	0	8.923716559344D-05	4.9220179538106D-05	1.0198102572421D-04
71	1	15	5	45	0	2.4511997218214D-05	4.273066901418D-05	8.3234753144016D-05
71	1	15	6	0	0	-4.5499508758414D-05	2.195493202310D-05	1.2252968016625D-04
71	1	15	6	15	0	1.0295767805335D-04	-7.1130246793936D-06	1.3665195608047D-04
71	1	15	6	30	0	2.5270443738667D-05	-2.9456156630977D-05	7.9032388421320D-05
71	1	15	6	45	0	-7.6313396000419D-05	-2.6559970905807D-05	8.1887584461940D-05
71	1	15	7	0	0	-1.2726340268376D-04	-2.45710915378D-06	1.5703237405397D-04
71	1	15	7	15	0	-1.1355399087655D-04	2.523428525286D-05	1.7274209128072D-04
71	1	15	7	30	0	-5.6455414025665D-05	4.4283204665349D-05	1.3704082340626D-04
71	1	15	7	45	0	1.7703026862495D-05	4.8953117275724D-05	8.6595769562726D-05
71	1	15	8	0	0	8.352921527321D-05	3.7930323042096D-05	9.1749642155121D-05
71	1	15	8	15	0	1.1498408322489D-04	1.3612379779103D-05	1.317927889689D-04
71	1	15	8	30	0	8.5011418823423D-05	-1.5719040931178D-05	1.24210375757639D-04
71	1	15	8	45	0	-8.7251652884116D-06	-3.1758862092005D-05	5.5484920434969D-05
71	1	15	9	0	0	-9.9902642635034D-05	-2.07914082686D-05	1.1016414055693D-04
71	1	15	9	15	0	-1.2983690561645D-04	6.0176096780826D-06	1.6805674677857D-04
71	1	15	9	30	0	-1.0052668019847D-04	3.2027093266317D-05	1.6449668087410D-04
71	1	15	9	45	0	-3.5804148810315D-05	4.7252355171239D-05	1.1854212894870D-04

図 5.18 月と太陽の引力による振動加速度

DATE (TAI)			PERTURBING ACCELERATION DUE TO ATMOSPHERIC DRAG (MEAN EQUINOX AND EQUATOR OF 1950.0)				(CM/SEC**2)	
Y	M	D H M S	X	Y	Z	ABS		
71	1	15 0 0 0.0	7.02388933972240-03	-1.5352561971222D-02	-1.7757623314193D-02	2.4502435925957D-02		
71	1	15 0 15 0.0	7.2500006897515D-07	-1.2097946746098D-07	-2.6070316563092D-07	7.7988926914729D-07		
71	1	15 0 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 0 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 1 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 1 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 1 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 1 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 2 0 0.0	-1.7081862542452D-06	-4.3949389643178D-06	-4.4199222765541D-06	6.4629019573292D-06		
71	1	15 2 15 0.0	3.88091922303566D-04	-3.12382817629547D-04	-4.1841825777893D-04	6.5616603566819D-04		
71	1	15 2 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 2 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 3 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 3 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 3 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 3 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 4 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 4 15 0.0	8.8978537240515D-06	-1.7295598015108D-04	-1.8789098169990D-04	2.5553074937289D-04		
71	1	15 4 30 0.0	1.8876476155677D-05	-7.5964342412260D-06	-1.1464682757866D-05	2.3355216033590D-05		
71	1	15 4 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 5 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 5 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 5 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 5 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 6 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 6 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 6 30 0.0	5.4926813492301D-04	-9.777921702277D-04	-1.1479120746964D-03	1.6048287001180D-03		
71	1	15 6 45 0.0	5.6636311791562D-07	-8.2600116446339D-08	-1.8295504599958D-07	6.008477217247D-07		
71	1	15 7 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 7 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 7 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 7 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 8 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 8 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 8 30 0.0	-2.9571474144490D-06	-8.5617789687295D-06	-8.7426940105338D-06	1.2589022148750D-05		
71	1	15 8 45 0.0	4.0613250326646D-04	-3.1641706217814D-04	-4.0854991835830D-04	6.5724911809565D-04		
71	1	15 9 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 9 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 9 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
71	1	15 9 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

図 5.19 大気抵抗による摂動加速度

DATE (TAI)		PERTURBING ACCELERATION DUE TO SOLAR RADIATION (MEAN EQUINOX AND EQUATOR OF 1950.0)		Z		AB5	
Y	M D H M S	X	Y	Z	AB5	Z	AB5
71	1 15 0 0 0.0	-5.5971324322050-06	1.1840417184789D-05	5.1340194298925D-06	1.4067036862516D-05	5.1340194298925D-06	1.4067036862516D-05
71	1 15 0 15 0.0	-2.9383079400313D-07	1.1390226638074D-06	6.6997556546789D-07	1.3537288640666D-06	6.6997556546789D-07	1.3537288640666D-06
71	1 15 0 30 0.0	-8.0025270708792D-07	1.2722863476857D-06	7.6054990423862D-07	1.6845038149397D-06	7.6054990423862D-07	1.6845038149397D-06
71	1 15 0 45 0.0	-7.6487072993341D-06	1.5201113702507D-05	6.816865582799D-06	1.8278013822279D-05	6.816865582799D-06	1.8278013822279D-05
71	1 15 1 0 0.0	-7.2347283759624D-06	1.4737834342095D-05	6.3945077723052D-06	1.7619159611601D-05	6.3945077723052D-06	1.7619159611601D-05
71	1 15 1 15 0.0	-7.1883491204237D-06	1.4436041298696D-05	6.2279810646962D-06	1.7287550422109D-05	6.2279810646962D-06	1.7287550422109D-05
71	1 15 1 30 0.0	-6.8233530882055D-06	1.3031486877164D-05	5.3991490893888D-06	1.5669252522854D-05	5.3991490893888D-06	1.5669252522854D-05
71	1 15 1 45 0.0	-5.1969916416720D-06	1.0650504848152D-05	3.9624844803985D-06	1.2495729626617D-05	3.9624844803985D-06	1.2495729626617D-05
71	1 15 2 0 0.0	-4.7540318300545D-06	1.2266781311765D-05	4.9235973235440D-06	1.4049045245451D-05	4.9235973235440D-06	1.4049045245451D-05
71	1 15 2 15 0.0	-7.0176744688110D-06	1.5048880889162D-05	6.5687799808355D-06	1.7856803784637D-05	6.5687799808355D-06	1.7856803784637D-05
71	1 15 2 30 0.0	-6.0987561483707D-07	1.5180617228468D-06	9.0155877417323D-07	1.8679582123897D-06	9.0155877417323D-07	1.8679582123897D-06
71	1 15 2 45 0.0	-7.7029237757703D-07	1.0181268202454D-06	6.0724472475135D-07	1.4137463438661D-06	6.0724472475135D-07	1.4137463438661D-06
71	1 15 3 0 0.0	-7.5221669756046D-06	1.4972510712730D-05	6.5348094872821D-06	1.7985071812110D-05	6.5348094872821D-06	1.7985071812110D-05
71	1 15 3 15 0.0	-7.1516943070832D-06	1.4689211262860D-05	6.3692983043643D-06	1.7535324915065D-05	6.3692983043643D-06	1.7535324915065D-05
71	1 15 3 30 0.0	-7.1858052539546D-06	1.4110437335733D-05	6.0391654240011D-06	1.6947323032617D-05	6.0391654240011D-06	1.6947323032617D-05
71	1 15 3 45 0.0	-6.4484084499908D-06	1.2230155367789D-05	4.9186190226499D-06	1.4674858941320D-05	4.9186190226499D-06	1.4674858941320D-05
71	1 15 4 0 0.0	-4.5411078027348D-06	1.0312726296639D-05	3.7588749181659D-06	1.1878683613762D-05	3.7588749181659D-06	1.1878683613762D-05
71	1 15 4 15 0.0	-5.9964682920215D-06	1.3941034686246D-05	5.9403277988580D-06	1.6297164614074D-05	5.9403277988580D-06	1.6297164614074D-05
71	1 15 4 30 0.0	-7.6186115413357D-08	1.0175886336815D-06	5.9106044344582D-07	1.1792554428053D-06	5.9106044344582D-07	1.1792554428053D-06
71	1 15 4 45 0.0	-7.6194478669705D-07	1.4485177801117D-06	8.6324408011897D-07	1.8503929202067D-06	8.6324408011897D-07	1.8503929202067D-06
71	1 15 5 0 0.0	-7.8389539510200D-06	1.543065655572D-05	6.8107589922069D-06	1.8599483915374D-05	6.8107589922069D-06	1.8599483915374D-05
71	1 15 5 15 0.0	-7.4047413005140D-06	1.4806556590132D-05	6.4367603620838D-06	1.7762212580172D-05	6.4367603620838D-06	1.7762212580172D-05
71	1 15 5 30 0.0	-7.2140729652299D-06	1.4592363539844D-05	6.3184913243780D-06	1.7461479176830D-05	6.3184913243780D-06	1.7461479176830D-05
71	1 15 5 45 0.0	-7.092652288275D-06	1.3621188013958D-05	5.7504099152518D-06	1.6598469198108D-05	5.7504099152518D-06	1.6598469198108D-05
71	1 15 6 0 0.0	-5.8850275935227D-06	1.1337832607549D-05	4.3820189218141D-06	1.3504891169145D-05	4.3820189218141D-06	1.3504891169145D-05
71	1 15 6 15 0.0	-4.2931701941653D-06	1.08545368804919D-05	4.0914051805851D-06	1.2368988475907D-05	4.0914051805851D-06	1.2368988475907D-05
71	1 15 6 30 0.0	-7.0779009731461D-06	1.4662979828029D-05	6.3603495386626D-06	1.7480094561438D-05	6.3603495386626D-06	1.7480094561438D-05
71	1 15 6 45 0.0	-3.8829673124442D-07	1.4099093901861D-06	8.3278035044646D-07	1.6828968928962D-06	8.3278035044646D-07	1.6828968928962D-06
71	1 15 7 0 0.0	-8.1412613543943D-07	1.2603789836148D-06	7.5040202697578D-07	1.6776551646220D-06	7.5040202697578D-07	1.6776551646220D-06
71	1 15 7 15 0.0	-7.7210633960834D-06	1.5154340658506D-05	6.6449844657044D-06	1.8259920024739D-05	6.6449844657044D-06	1.8259920024739D-05
71	1 15 7 30 0.0	-7.3044517628654D-06	1.4702024786023D-05	6.3771724213537D-06	1.7611725538870D-05	6.3771724213537D-06	1.7611725538870D-05
71	1 15 7 45 0.0	-7.2635090934631D-06	1.4389371767048D-05	6.2032231054341D-06	1.7271148227526D-05	6.2032231054341D-06	1.7271148227526D-05
71	1 15 8 0 0.0	-6.8658781178118D-06	1.2950526857594D-05	5.3507395423362D-06	1.5604064914722D-05	5.3507395423362D-06	1.5604064914722D-05
71	1 15 8 15 0.0	-5.1810375931478D-06	1.0561985028138D-05	3.9166850164842D-06	1.2399157221134D-05	3.9166850164842D-06	1.2399157221134D-05
71	1 15 8 30 0.0	-4.8756032183870D-06	1.2362864982440D-05	5.0084968203116D-06	1.4202006115914D-05	5.0084968203116D-06	1.4202006115914D-05
71	1 15 8 45 0.0	-7.1003340200393D-06	1.5064181378190D-05	6.5857143842203D-06	1.7908543708017D-05	6.5857143842203D-06	1.7908543708017D-05
71	1 15 9 0 0.0	-6.3616719462014D-07	1.5166227228216D-06	9.0147233315678D-07	1.8755014130458D-06	9.0147233315678D-07	1.8755014130458D-06
71	1 15 9 15 0.0	-7.7670825282473D-07	1.0027451841295D-06	5.9397993060367D-07	1.4005662327290D-06	5.9397993060367D-07	1.4005662327290D-06
71	1 15 9 30 0.0	-7.591920972726D-06	1.4928902508634D-05	6.510317423329D-06	1.7969452346617D-05	6.510317423329D-06	1.7969452346617D-05
71	1 15 9 45 0.0	-7.2222216945592D-06	1.4657220466604D-05	6.35550355514163D-06	1.7532461129891D-05	6.35550355514163D-06	1.7532461129891D-05

図 5.20 太陽輻射による振動加速度

DATE (TAI)				PERTURBING ACCELERATION DUE TO CONTROL FORCE (MEAN EQUINOX AND EQUATOR OF 1950.0)			(CM/SEC**2)			
Y	M	D	H M S	X	Y	Z	ABS			
71	1	15	0 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	0 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	0 30 0.0	-1.1167573600375D+01	-4.6822758729694D+00	-2.6928502666305D+00	1.2405234783303D+01	0.0	0.0	0.0
71	1	15	0 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	1 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	1 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	1 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	1 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	2 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	2 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	2 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	2 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	3 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	3 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	3 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	3 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	4 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	4 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	4 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	4 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	5 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	5 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	5 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	5 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	6 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	6 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	6 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	6 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	7 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	7 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	7 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	7 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	8 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	8 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	8 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	8 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	9 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	9 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	9 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1	15	9 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 5.21 制御力による加速度

THE ESTIMATION OF THE ATMOSPHERIC DENSITY

DATE (TAI)		HEIGHT KM	EX. TEMP DEG K	BASIC DENSITY	THE MODIFICATION OF BASIC DENSITY				DENSITY GM/CM3
Y	M D H N S				VARIATIONS WITH GEOMAGNETIC ACTIVITY	SEASONAL LATITUDINAL VARIATIONS	SEMIANNUAL VARIATIONS	VARIATIONS OF HELIUM	
71	1 15 0 0 0.0	222.19	1144.82	1.75753E-13	1.75753E-13	1.75753E-13	1.66467E-13	1.73311E-21	1.66467E-13
71	1 15 0 15 0.0	874.27	1029.94	7.36076E-18	7.36076E-18	7.36076E-18	6.32551E-18	7.64946E-22	6.32627E-18
71	1 15 0 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 0 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 1 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 1 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 1 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 1 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 2 0 0.0	761.78	1151.88	4.66620E-17	4.66620E-17	4.66620E-17	4.00551E-17	-5.72787E-22	4.00546E-17
71	1 15 2 15 0.0	401.09	1031.50	4.09767E-15	4.09767E-15	4.09767E-15	3.69647E-15	2.48450E-21	3.69647E-15
71	1 15 2 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 2 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 3 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 3 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 3 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 3 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 4 0 0.0	488.38	1151.88	1.66595E-15	1.66595E-15	1.66595E-15	1.47310E-15	-4.90882E-22	1.47310E-15
71	1 15 4 30 0.0	597.99	1009.70	1.59653E-16	1.59653E-16	1.59653E-16	1.38650E-16	1.72547E-21	1.38652E-16
71	1 15 4 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 5 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 5 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 5 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 5 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 6 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 6 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 6 30 0.0	364.16	1107.46	9.82813E-15	9.82813E-15	9.82813E-15	8.95153E-15	1.18671E-21	8.95153E-15
71	1 15 6 45 0.0	923.37	999.35	4.51381E-18	4.51381E-18	4.51381E-18	3.88767E-18	6.01627E-22	3.88827E-18
71	1 15 7 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 7 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 7 30 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 7 45 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 8 0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 8 15 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	1 15 8 30 0.0	732.59	1206.76	9.01236E-17	9.01236E-17	9.01236E-17	7.74237E-17	-6.27978E-22	7.74231E-17

図 5.22 大気密度

DATE (TAI)			S U N (TRUE EQUINOX AND EQUATOR OF DATE)										RIGHT ASCENSION			APPARENT DECLINATION					
Y	M	D	X	P	O	S	I	T	I	O	N	Z	A	B	S	H	M	S	δ	'	"
71	1	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5.340580550D+07	1.471435548D+08	19	44	19.72	-21	16	53.40		
71	1	15	0	15	0	0	0	0	0	0	-5.340140060D+07	1.471436450D+08	19	44	22.41	-21	16	46.72			
71	1	15	0	30	0	0	0	0	0	0	-5.339699390D+07	1.471437430D+08	19	44	25.10	-21	16	40.04			
71	1	15	0	45	0	0	0	0	0	0	-5.339258540D+07	1.471438400D+08	19	44	27.79	-21	16	33.35			
71	1	15	1	0	0	0	0	0	0	0	-5.338817510D+07	1.471439380D+08	19	44	30.48	-21	16	26.66			
71	1	15	1	15	0	0	0	0	0	0	-5.338376300D+07	1.471440360D+08	19	44	33.17	-21	16	19.97			
71	1	15	1	30	0	0	0	0	0	0	-5.337934920D+07	1.471441330D+08	19	44	35.86	-21	16	13.28			
71	1	15	1	45	0	0	0	0	0	0	-5.337493350D+07	1.471442310D+08	19	44	38.55	-21	16	6.58			
71	1	15	2	0	0	0	0	0	0	0	-5.337051610D+07	1.471443290D+08	19	44	41.24	-21	15	59.89			
71	1	15	2	15	0	0	0	0	0	0	-5.336609680D+07	1.471444270D+08	19	44	43.93	-21	15	53.18			
71	1	15	2	30	0	0	0	0	0	0	-5.336167580D+07	1.471445260D+08	19	44	46.62	-21	15	46.48			
71	1	15	2	45	0	0	0	0	0	0	-5.335725300D+07	1.471446240D+08	19	44	49.30	-21	15	39.77			
71	1	15	3	0	0	0	0	0	0	0	-5.335282840D+07	1.471447220D+08	19	44	51.99	-21	15	33.07			
71	1	15	3	15	0	0	0	0	0	0	-5.334840200D+07	1.471448210D+08	19	44	54.68	-21	15	26.35			
71	1	15	3	30	0	0	0	0	0	0	-5.334397380D+07	1.471449190D+08	19	44	57.37	-21	15	19.64			
71	1	15	3	45	0	0	0	0	0	0	-5.333954380D+07	1.471450180D+08	19	45	0.06	-21	15	12.92			
71	1	15	4	0	0	0	0	0	0	0	-5.333511200D+07	1.471451170D+08	19	45	2.75	-21	15	6.20			
71	1	15	4	15	0	0	0	0	0	0	-5.333067850D+07	1.471452160D+08	19	45	5.44	-21	14	59.48			
71	1	15	4	30	0	0	0	0	0	0	-5.332624310D+07	1.471453150D+08	19	45	8.13	-21	14	52.76			
71	1	15	4	45	0	0	0	0	0	0	-5.332180600D+07	1.471454140D+08	19	45	10.82	-21	14	46.03			
71	1	15	5	0	0	0	0	0	0	0	-5.331736710D+07	1.471455130D+08	19	45	13.51	-21	14	39.30			
71	1	15	5	15	0	0	0	0	0	0	-5.331292630D+07	1.471456120D+08	19	45	16.19	-21	14	32.57			
71	1	15	5	30	0	0	0	0	0	0	-5.330849380D+07	1.471457120D+08	19	45	18.88	-21	14	25.83			
71	1	15	5	45	0	0	0	0	0	0	-5.330403950D+07	1.471458110D+08	19	45	21.57	-21	14	19.09			
71	1	15	6	0	0	0	0	0	0	0	-5.329959340D+07	1.471459110D+08	19	45	24.26	-21	14	12.35			
71	1	15	6	15	0	0	0	0	0	0	-5.329514560D+07	1.471460100D+08	19	45	26.95	-21	14	5.61			
71	1	15	6	30	0	0	0	0	0	0	-5.329069590D+07	1.471461100D+08	19	45	29.64	-21	13	58.86			
71	1	15	6	45	0	0	0	0	0	0	-5.328624450D+07	1.471462100D+08	19	45	32.32	-21	13	52.11			
71	1	15	7	0	0	0	0	0	0	0	-5.328179120D+07	1.471463100D+08	19	45	35.01	-21	13	45.36			
71	1	15	7	15	0	0	0	0	0	0	-5.327733620D+07	1.471464100D+08	19	45	37.70	-21	13	38.61			
71	1	15	7	30	0	0	0	0	0	0	-5.327287940D+07	1.471465110D+08	19	45	40.39	-21	13	31.85			
71	1	15	7	45	0	0	0	0	0	0	-5.326842070D+07	1.471466110D+08	19	45	43.08	-21	13	25.09			
71	1	15	8	0	0	0	0	0	0	0	-5.326396030D+07	1.471467110D+08	19	45	45.76	-21	13	18.33			
71	1	15	8	15	0	0	0	0	0	0	-5.325949810D+07	1.471468120D+08	19	45	48.45	-21	13	11.57			
71	1	15	8	30	0	0	0	0	0	0	-5.325503410D+07	1.471469130D+08	19	45	51.14	-21	13	4.80			
71	1	15	8	45	0	0	0	0	0	0	-5.325056830D+07	1.471470130D+08	19	45	53.83	-21	12	58.03			
71	1	15	9	0	0	0	0	0	0	0	-5.324610060D+07	1.471471140D+08	19	45	56.51	-21	12	51.26			
71	1	15	9	15	0	0	0	0	0	0	-5.324163120D+08	1.471472150D+08	19	45	59.20	-21	12	44.48			
71	1	15	9	30	0	0	0	0	0	0	-5.323716000D+07	1.471473160D+08	19	46	1.89	-21	12	37.70			
71	1	15	9	45	0	0	0	0	0	0	-5.323268700D+07	1.471474170D+08	19	46	4.58	-21	12	30.92			

図 5.23 真の黄道面座標系における太陽の位置と視赤経、視赤緯

DATE (TAI)			M O O N (TRUE EQUINOX AND EQUATOR OF DATE)										APPARENT RIGHT ASCENSION			APPARENT DECLINATION					
Y	M	D	X	P	O	S	I	T	I	O	N	Z	A	B	S	H	M	S	;	'	''
71	1	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.9093657D+04	4.04093474D+05	10 16	42	71	9	50	42	57
71	1	15	0	15	0	0	0	0	0	0	0	6.87182083D+04	4.04108390D+05	10 17	9	86	9	47	25	36	
71	1	15	0	30	0	0	0	0	0	0	0	6.83377197D+04	4.04123214D+05	10 17	36	99	9	44	8	03	
71	1	15	0	45	0	0	0	0	0	0	0	6.79589019D+04	4.04137948D+05	10 18	4	12	9	40	50	59	
71	1	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6.75797567D+04	4.04152590D+05	10 18	31	23	9	37	33	04	
71	1	15	1	15	0	0	0	0	0	0	0	6.72002861D+04	4.04167140D+05	10 18	58	34	9	34	15	37	
71	1	15	1	30	0	0	0	0	0	0	0	6.68204919D+04	4.04181980D+05	10 19	25	43	9	30	57	58	
71	1	15	1	45	0	0	0	0	0	0	0	6.6403761D+04	4.04195964D+05	10 19	52	51	9	27	39	69	
71	1	15	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6.60599407D+04	4.04210238D+05	10 20	19	58	9	24	21	68	
71	1	15	2	15	0	0	0	0	0	0	0	6.56791874D+04	4.04224419D+05	10 20	46	64	9	21	3	56	
71	1	15	2	30	0	0	0	0	0	0	0	6.52981182D+04	4.04238508D+05	10 21	13	68	9	17	45	33	
71	1	15	2	45	0	0	0	0	0	0	0	6.49167350D+04	4.04252503D+05	10 21	40	72	9	14	26	99	
71	1	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	6.45350398D+04	4.04266405D+05	10 22	7	74	9	11	8	55	
71	1	15	3	15	0	0	0	0	0	0	0	6.41503345D+04	4.04280214D+05	10 22	34	76	9	7	49	39	
71	1	15	3	30	0	0	0	0	0	0	0	6.37707209D+04	4.04293929D+05	10 23	1	76	9	4	31	33	
71	1	15	3	45	0	0	0	0	0	0	0	6.33881010D+04	4.04307550D+05	10 23	28	75	9	1	12	56	
71	1	15	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6.30031768D+04	4.04321077D+05	10 23	55	74	8	57	53	68	
71	1	15	4	15	0	0	0	0	0	0	0	6.26219500D+04	4.04334510D+05	10 24	22	71	8	54	34	70	
71	1	15	4	30	0	0	0	0	0	0	0	6.22384277D+04	4.04347848D+05	10 24	49	67	8	51	15	62	
71	1	15	4	45	0	0	0	0	0	0	0	6.18545968D+04	4.04361091D+05	10 25	16	62	8	47	56	43	
71	1	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	6.14704741D+04	4.04374239D+05	10 25	43	56	8	44	37	14	
71	1	15	5	15	0	0	0	0	0	0	0	6.10860567D+04	4.04387292D+05	10 26	10	49	8	41	17	74	
71	1	15	5	30	0	0	0	0	0	0	0	6.07013464D+04	4.04400249D+05	10 26	37	40	8	37	58	23	
71	1	15	5	45	0	0	0	0	0	0	0	6.03193452D+04	4.04413111D+05	10 27	4	21	8	34	38	55	
71	1	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	5.99310349D+04	4.04425877D+05	10 27	31	21	8	31	18	96	
71	1	15	6	15	0	0	0	0	0	0	0	5.95494776D+04	4.04438547D+05	10 27	58	10	8	27	59	16	
71	1	15	6	30	0	0	0	0	0	0	0	5.91596152D+04	4.04451121D+05	10 28	24	98	8	24	39	27	
71	1	15	6	45	0	0	0	0	0	0	0	5.87794695D+04	4.04463598D+05	10 28	51	85	8	21	19	28	
71	1	15	7	0	0	0	0	0	0	0	0	5.83870425D+04	4.04475978D+05	10 29	18	70	8	17	59	19	
71	1	15	7	15	0	0	0	0	0	0	0	5.80003361D+04	4.04488261D+05	10 29	45	55	8	14	39	01	
71	1	15	7	30	0	0	0	0	0	0	0	5.76133352D+04	4.04500447D+05	10 30	12	39	8	11	18	73	
71	1	15	7	45	0	0	0	0	0	0	0	5.72260928D+04	4.04512535D+05	10 30	39	22	8	7	58	35	
71	1	15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	5.68385598D+04	4.04524525D+05	10 31	6	04	8	4	37	88	
71	1	15	8	15	0	0	0	0	0	0	0	5.64507351D+04	4.04536170D+05	10 31	32	83	8	1	37	32	
71	1	15	8	30	0	0	0	0	0	0	0	5.60626806D+04	4.04548210D+05	10 31	59	63	7	57	56	67	
71	1	15	8	45	0	0	0	0	0	0	0	5.56743384D+04	4.04559905D+05	10 32	26	44	7	54	35	92	
71	1	15	9	0	0	0	0	0	0	0	0	5.52857302D+04	4.04571501D+05	10 32	53	22	7	51	15	08	
71	1	15	9	15	0	0	0	0	0	0	0	5.48968581D+04	4.04582998D+05	10 33	19	99	7	47	54	16	
71	1	15	9	30	0	0	0	0	0	0	0	5.45072397D+04	4.04594396D+05	10 33	46	75	7	44	33	14	
71	1	15	9	45	0	0	0	0	0	0	0	5.41183297D+04	4.04605694D+05	10 34	13	50	7	41	12	03	

図 5.24 真の黄道面座標系における月の位置と視赤経、視赤緯

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)

C O N T R O L D A T E C A R D P R O O F L I S T

FLIGHT TO MARS

***** (SPACE C R A F T I N F O R M A T I O N) *****
 NAME I
 MASS I 200.0000 (KG) CROSS SECTION I J.D I
 REFLECTIVE COEFFICIENT (DIFFUSE = 0.300)
 (SPECULAR = 0.300)

EPOCH (INITIAL TIME) 1972 10 14 0 0 0.0 M J E D DAY
 FINAL TIME 1972 10 23 0 0 0.0 41604.00000000
 41613.00000000

INITIAL COORDINATE SYSTEM I MEAN OF 1950.0 ORIGIN I EARTH ELEMENT I KEPLERIAN

***** OSCULATING ORBITAL ELEMENTS AT EPOCH

S.M AXIS	(KM)	MEAN OF 1950.0	TRUE OF DATE
ECCENTRICITY		-4.5823990396328D+04	-4.5824003742028D+04
INCLINATION	(DEG)	1.1492262000000D+00	1.1492261560098D+00
LONG. OF NODE	(DEG)	2.3442500000000D+01	2.3443547116158D+01
ARG. OF PERIGEE	(DEG)	0.0	3.5999925866519D+02
MEAN ANOMALY	(DEG)	0.0	3.2299774885531D-01
		0.0	3.59999999998924D+02

***** INITIAL CONDITION FOR NUMERICAL INTEGRATION

POSITION VECTOR	X	MEAN OF 1950.0	TRUE OF DATE
	Y	6.8381399556805D+03	6.8380317307253D+03
	Z	4.0334236775313D-17	3.5278353825581D+01
VELOCITY VECTOR	XDOT	1.7489715417020D-17	1.5336518083254D+01
	YDOT	-3.5481745901808D-20	-6.2965187329353D-02
	ZDOT	1.0269006669488D+01	1.0268762845260D+01
		4.45284225135532D+00	4.4529593892211D+00

***** CONDITION OF NUMERICAL INTEGRATION

CALCULATION OF STARTING VALUES : 8-TH ORDER RUNGE-KUTTA FORMULA, STEP SIZE = 0.001388
 GAUSS JACKSON INTEGRATION ORDER I 8 STEP SIZE I 0.001388

図 5.25(1) STANPS-C の入力データ

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)

C O N T R O L D A T A C A R D P R O O F L I S T

* * * * * (THE CAUSES OF PERTURBING ACCELERATION) * * * * *
 * * * * * NEWTONIAN POINT-MASS ACCELERATION OF PERTURBING BODY
 * * * * * G E N E R A L R E L A T I V I T Y : B R A N S - D I C K E P A R A M E T E R = 1.00
 * * * * * S O L A R R A D I A T I O N P R E S S U R E : R E F L E C T I V E C O E F F I C I E N T (D I F F U S E = 0.300 S P E C U L A R = 0.300)
 * * * * * T H E E F F E C T O F S U N ' S G E O P O T E N T I A L J 2 T E A M
 * * * * * O B L A T E B O D Y A N D I N D I R E C T O B L A T E N E S S
 * * * * * C O N T R O L F O R C E

T H R U S T T I P E : M E D I U M

T H R U S T S T A R T I N G T I M E = 1972 Y M D H M S M J E D DAY
 11 17 15 0 0.0 41638.6250000
 T H R U S T I N G D U R A T I O N = 900.00 (S E C)
 M A S S D E C R E A S E R A T I O N = 0.0222222 (K G / S E C)
 T H R U S T D I R E C T I O N : V E L O C I T Y V E C T O R D I R E C T I O N
 I N T E G R A T I O N S T E P S I Z E = 0.0006944 (D A Y)
 C O N T R O L F O R C E X 1.0000000000000D+01 (N E W T O N)
 Y 0.0
 Z 0.0

* * * * * (O U T P U T C O N D I T I O N) * * * * *
 S T A R T I N G T I M E 1972 Y M D H M S M J E D DAY I N T E R V A L DAY
 F I N A L T I M E 1972 10 14 0 0 0.00 41604.0000000 0.25000
 1972 10 23 0 0 0.00 41613.0000000
 O U T P U T O R B I T A L E L E M E N T : K E P L E R I A N C A R T E S I A N
 O U T P U T C O O R D I N A T E S Y S T E M : M E A N O F 1950.0 T R U E O F D A T E E A R T H - F I X E D

図 5.25 (2) STANPS - C の入力データ

N A L - F A C O M E P H E M E R I S
C O N T R O L D A T A C A R D P R O O F L I S T (S T A N P . C)

```

MEASURE OF 1 A.U.
VELOCITY OF LIGHT
GAUSSIAN GRAVITATIONAL CONSTANT
EQUATORIAL RADIUS FOR SUN
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR SUN I J2
MEAN INCLINATION OF SUN EQUATOR TO ECLIPTIC
SOLAR ENERGY DENSITY ; E0
EQUATORIAL RADIUS FOR EARTH
GEOCENTRIC GRAVITATIONAL CONSTANT
RATIO OF MASSES OF SUN AND EARTH ; GS/GE
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ; J2
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ; J3
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ; C22
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ; S22
EQUATORIAL RADIUS FOR MOON
LUNAR INERTIAL MOMENT ; ALPHA
; BETA
; GAMMA
; DELTA
RATIO OF MASSES OF SUN AND MOON ; GS/GM
RATIO OF MASSES OF EARTH AND MOON ; GE/GM
RECIPROCAL MASS RATIIONS OF PLANETS TO SUN
MERCURY = 5.98300000D+06 VENUS = 4.08522000D+05
JUPITER = 1.04739080D+03 SATURN = 3.49920000D+03
PLUTO = 1.81200000D+06 MOON = 2.70688071D+07
DYNAMICAL FORM-FACTOR
MERCURY 0.0 J2
VENUS 0.0 J3
EARTH 1.08264D-03
MARS 1.96400D-03
JUPITER 1.47000D-02
SATURN 1.67000D-02
URANUS 1.20000D-02
NEPTUNE 5.00000D-03
PLUTO 0.0
MOON 2.07100D-04
EQUATORIAL RADIUS FOR PLANETS ( AU )
MERCURY = 1.55951387D-05 VENUS = 4.04551133D-05
JUPITER = 4.73736597D-04 SATURN = 4.01073149D-04
PLUTO = 1.93852989D-05 MOON = 1.82890266D-05
MEASURE OF 1 A.U. ( KM )
VELOCITY OF LIGHT ( KM/SEC )
GAUSSIAN GRAVITATIONAL CONSTANT DEFINING A.U.
EQUATORIAL RADIUS ( KM )
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR SUN I J2 ( KM3/SEC**2 )
MEAN INCLINATION OF SUN EQUATOR TO ECLIPTIC ( RAD )
SOLAR ENERGY DENSITY ( DYN/CM**2 )
EQUATORIAL RADIUS ( KM )
GEOCENTRIC GRAVITATIONAL CONSTANT ( KM3/SEC**2 )
RATIO OF MASSES OF SUN AND EARTH ( KM )
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ( KM )
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ( KM )
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ( KM )
DYNAMICAL FORM-FACTOR FOR EARTH ( KM )
EQUATORIAL RADIUS FOR MOON ( KM )
LUNAR INERTIAL MOMENT ( KM )
; ALPHA ( KM )
; BETA ( KM )
; GAMMA ( KM )
; DELTA ( KM )
RATIO OF MASSES OF SUN AND MOON ( KM )
RATIO OF MASSES OF EARTH AND MOON ( KM )
RECIPROCAL MASS RATIIONS OF PLANETS TO SUN ( KM )
MERCURY = 3.32943562D+05 MARS = 3.09870000D+06
JUPITER = 1.04739080D+03 SATURN = 3.49920000D+03 NEPTUNE = 1.92600000D+04
PLUTO = 1.81200000D+06 MOON = 2.70688071D+07
DYNAMICAL FORM-FACTOR ( KM )
MERCURY 0.0 C22 S22
VENUS 0.0
EARTH 1.53620D-06
MARS 1.53620D-06
JUPITER 5.50000D-05
SATURN 5.50000D-05
URANUS 5.50000D-05
NEPTUNE 5.50000D-05
PLUTO 5.50000D-05
MOON 5.50000D-05
EQUATORIAL RADIUS FOR PLANETS ( AU )
MERCURY = 1.55951387D-05 VENUS = 4.04551133D-05
JUPITER = 4.73736597D-04 SATURN = 4.01073149D-04
PLUTO = 1.93852989D-05 MOON = 1.82890266D-05

```

図 5.25 (3) 計算に用いられる定数

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)

EQUATORIAL COORDINATE IN MEAN EQUATOR AND EQUINOX OF 1950.0

DATE		POSITION (KM)			VELOCITY (KM/SEC)			R.A	H M S
Y	M D H M S	X	Y	Z	ABS	X	Y	Z	DEC
72 10 16	6 0 0.0	-5.8012842557041726D+05	-2.73069045563788651D+00						
(MJED	41606.2500000)	3.26560250121630510D+05	1.41488034147055566D+00				R.A	10 2	29.855
		1.41316492030782921D+05	6.12193019324949045D+01				DEC	11 59	4.307
ORIG.BODY	EARTH	6.80359306249213587D+05	3.13581521110717069D+00						
72 10 16	12 0 0.0	-6.38921277058965431D+05	-2.71703892346884414D+00						
(MJED	41606.5000000)	3.57009995953137849D+05	1.40659625754901412D+00				R.A	10 3	13.165
		1.54491410631940815D+05	6.08595711912717787D+01				DEC	11 55	9.086
ORIG.BODY	EARTH	7.48026825353319616D+05	3.11948750341368987D+00						
72 10 16	18 0 0.0	-6.97446910119955130D+05	-2.70582693728170162D+00						
(MJED	41606.7500000)	3.87295606338813993D+05	1.39960783278597972D+00				R.A	10 3	49.530
		1.67594992951686639D+05	6.0555414915124704D+01				DEC	11 51	51.103
ORIG.BODY	EARTH	8.15179833403463339D+05	3.10597792339999890D+00						
72 10 17	0 0 0.0	-7.55751784711625249D+05	-2.69650936245568573D+00						
(MJED	41607.0000000)	4.17441301524123468D+05	1.39358751284693202D+00				R.A	10 4	20.599
		1.80637639986392004D+05	6.02930314167227963D+01				DEC	11 49	1.576
ORIG.BODY	EARTH	8.82070267775087343D+05	3.09463630520871691D+00						
72 10 17	6 0 0.0	1.35724885152508170D+08	-1.51335150955758998D+01						
(MJED	41607.2500000)	5.5304455368509977D+07	2.63190309904791038D+01				R.A	1 28	40.716
		2.39803575313718054D+07	1.14101930353958496D+01				DEC	9 17	32.917
ORIG.BODY	SUN	1.485088710499570528D+08	3.24331185158096004D+01						
72 10 17	12 0 0.0	1.35397014939068831D+08	-1.52444230759470727D+01						
(MJED	41607.5000000)	5.58720117942378093D+07	2.62661518364886685D+01				R.A	1 29	41.676
		2.42264125090883436D+07	1.13872687140952612D+01				DEC	9 23	30.034
ORIG.BODY	SUN	1.48461956134918245D+08	3.243341341176955748D+01						
72 10 17	18 0 0.0	1.3506674202905334D+08	-1.55560929792943869D+01						
(MJED	41607.7500000)	5.64384268272446705D+07	2.62132608202108459D+01				R.A	1 30	42.695
		2.44719726614669595D+07	1.1364538818998993D+01				DEC	9 29	26.645
ORIG.BODY	SUN	1.48415626824023850D+08	3.24339805031549674D+01						
72 10 18	0 0 0.0	1.34734052016322631D+08	-1.54683576841315095D+01						
(MJED	41608.0000000)	5.70036991512230369D+07	2.61602640180582220D+01				R.A	1 31	43.776
		2.4717037410035805D+07	1.13413626299095028D+01				DEC	9 35	22.750
ORIG.BODY	SUN	1.4836987031056754D+08	3.24334958163852072D+01						
72 10 18	6 0 0.0	1.34398933369659533D+08	-1.55810861218216288D+01						
(MJED	41608.2500000)	5.75678256666724735D+07	2.61070888413401288D+01				R.A	1 32	44.920
		2.49616054038733760D+07	1.13183089435826831D+01				DEC	9 41	18.344
ORIG.BODY	SUN	1.48324676258636268D+08	3.24415543685507244D+01						

図 5.26 1950.0 平均赤道面座標系における宇宙船の位置，速度ベクトル 赤経，赤緯
(中心天体は地球から太陽に変化している)

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)

EQUATORIAL COORDINATE IN TRUE EQUATOR AND EQUINOX OF DATE

DATE		POSITION (KM)				VELOCITY (KM/SEC)				R.A	H M S		
Y	M D H M S	X	Y	Z	ABS	X	Y	Z	ABS	DEC	:	:	:
72	10 16 6 0 0.0	-5.82121598298373755D+05	3.23558600438343209D+05	1.40018702833479707D+05	6.8055929596150565D+05	-2.73932521908068802D+00	1.40075002964121645D+00	6.0608139882889258D-01	3.13581535863227681D+00	R.A	10 3	44.048	
(MJED	41606.2500000)									DEC	11 52	22.291	
	ORIG.BODY	EARTH											
72	10 16 12 0 0.0	-6.4110025653055864D+05	3.53704107184501268D+05	1.5306203370525079D+05	7.48026818069295715D+05	-2.72562349023469229D+00	1.39253600183243944D+00	6.0251447712212852D-01	3.11948771802938373D+00	R.A	10 4	27.325	
(MJED	41606.5000000)									DEC	11 48	26.340	
	ORIG.BODY	EARTH											
72	10 16 18 0 0.0	-6.99810726412943893D+05	3.83686848613711057D+05	1.6603462293737296D+05	8.15179824710896934D+05	-2.71436916072420139D+00	1.38560511361966098D+00	5.9949914854151271D-01	3.10397821960837388D+00	R.A	10 5	3.663	
(MJED	41606.7500000)									DEC	11 45	7.747	
	ORIG.BODY	EARTH											
72	10 17 0 0 0.0	-7.58299587329434366D+05	4.135308089149565D+05	1.78946768334268956D+05	8.82070257799039971D+05	-2.70501509705322257D+00	1.37963263956432729D+00	5.96894812233339394D-01	3.09463670119485537D+00	R.A	10 5	34.706	
(MJED	41607.0000000)									DEC	11 42	17.702	
	ORIG.BODY	EARTH											
72	10 17 6 0 0.0	1.35383486183899115D+08	5.60036515666741149D+07	2.42855302714670803D+07	1.48508869434366729D+08	-1.52951246588111630D+01	2.62409773495784179D+01	1.13769184135675269D+01	3.24339945609330199D+01	R.A	1 29	53.581	
(MJED	41607.2500000)									DEC	9 24	42.483	
	ORIG.BODY	SUN											
72	10 17 12 0 0.0	1.35052132531670298D+08	5.65695165097886396D+07	2.45308639416280485D+07	1.48461954672655969D+08	-1.54056959182856312D+01	2.61874545354500335D+01	1.13537121774041110D+01	3.24349352083105835D+01	R.A	1 30	54.583	
(MJED	41607.5000000)									DEC	9 30	38.843	
	ORIG.BODY	SUN											
72	10 17 18 0 0.0	1.34718383936191465D+08	5.71342257952003877D+07	2.47756968692563239D+07	1.48415625467648485D+08	-1.55170281879802137D+01	2.61339168766036682D+01	1.13304968881449004D+01	3.24367065965714808D+01	R.A	1 31	55.646	
(MJED	41607.7500000)									DEC	9 36	34.687	
	ORIG.BODY	SUN											
72	10 18 0 0 0.0	1.34382225808126195D+08	5.7697783418978345D+07	2.50200281892056745D+07	1.48369869074976403D+08	-1.56289540735179662D+01	2.60802724886269063D+01	1.13072324599682518D+01	3.24391480223652452D+01	R.A	1 32	56.771	
(MJED	41608.0000000)									DEC	9 42	30.014	
	ORIG.BODY	SUN											
72	10 18 6 0 0.0	1.34043646754115457D+08	5.82601713443906856D+07	2.52638562648398149D+07	1.48324675066525377D+08	-1.57413424022562954D+01	2.60264506956720261D+01	1.12838880126392850D+01	3.24421350271695812D+01	R.A	1 33	57.958	
(MJED	41608.2500000)									DEC	9 48	24.820	
	ORIG.BODY	SUN											

図 5.27 True of date の赤道面座標系における宇宙船の位置、速度ベクトルと赤経、赤緯

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)

EARTH - FIXED COORDINATE SYSTEM

DATE		POSITION (KM)				VELOCITY (KM/SEC)							
Y	M	D	H	M	S	X	Y	Z	ABS	LNG	LAT	LONG	LAT
72	10	16	6	0	0.0	X	5.403240668797011710+05	Y	3.893365671154752570+05	2.509878187062226380+00		LNG	35 46
(MJED	41606.2500000)	Z	1.400187028354797060+05	ABS	6.060813988258892570-01					LAT	11 52	22.291	
ORIG. BODY	EARTH												
72	10	16	12	0	0.0	X	4.279818615085482130+05	Y	-5.940939829762328650+05	1.748881466508437390+00		LNG	-54 13
(MJED	41606.5000000)	Z	1.530620337052550810+05	ABS	7.480268180692957280+05					LAT	11 48	26.340	
ORIG. BODY	EARTH												
72	10	16	18	0	0.0	X	-6.478610066380559860+05	Y	-4.660759237288039100+05	-2.513082340385459410+00		LNG	-144 16
(MJED	41606.7500000)	Z	1.66034622953729610+05	ABS	8.151798247108969500+05					LAT	11 45	7.747	
ORIG. BODY	EARTH												
72	10	17	0	0	0.0	X	-5.036807204652827900+05	Y	7.01663541612334700+05	2.517213699925318050+00		LNG	125 40
(MJED	41607.0000000)	Z	1.789467683342689590+05	ABS	8.820702577990399980+05					LAT	11 42	17.702	
ORIG. BODY	EARTH												
72	10	17	6	0	0.0	X	7.555307308322823760+05	Y	5.408221649727433900+05	2.522503056910942330+00		LNG	35 35
(MJED	41607.2500000)	Z	1.918062088115286170+05	ABS	9.487385947121677730+05					LAT	11 39	49.920	
ORIG. BODY	SUN												
72	10	17	12	0	0.0	X	5.775211224845710080+05	Y	-8.09485051722030990+05	1.652439910267600050+00		LNG	-54 29
(MJED	41607.5000000)	Z	2.046188476724203590+05	ABS	1.015217005718486680+06					LAT	11 37	39.794	
ORIG. BODY	SUN												
72	10	17	18	0	0.0	X	-8.635440581478402000+05	Y	-6.137946940865682930+05	-2.535572872542932720+00		LNG	-144 35
(MJED	41607.7500000)	Z	2.173892325344347350+05	ABS	1.081531461406424390+06					LAT	11 35	43.866	
ORIG. BODY	SUN												
72	10	18	0	0	0.0	X	-6.496571128380892160+05	Y	9.177215838144804940+05	-1.609287978498713090+00		LNG	125 17
(MJED	41608.0000000)	Z	2.301208813753898120+05	ABS	1.147703310836493620+06					LAT	11 33	59.485	
ORIG. BODY	SUN												
72	10	18	6	0	0.0	X	9.720285891594494780+05	Y	6.851203847936855480+05	2.550874146708243180+00		LNG	35 10
(MJED	41608.2500000)	Z	2.428162506671521600+05	ABS	1.213750131827817570+06					LAT	11 32	24.586	
ORIG. BODY	SUN												

図 5.28 地球固定座標系における宇宙船の位置、速度ベクトルと経度、緯度。
 (原点はすべて地球重心であって、ORIG. BODYのところ地球から太陽に変わっているが、ここでは無関係)

S T A N P S - C (TRAJECTORY GENERATION OF INTERPLANETARY SPACECRAFT)
 OSCULATING EQUATORIAL ELEMENTS IN MEAN EQUATOR AND EQUINOX OF 1950.0

DATE		Y	M	D	H	M	S	ORG	A	(KM)	E	I	OMG1	OMG2	M	(DEG)
Y	M															
72	10	14	0	0	0	0	0	0	-4.58239903960+04	1.14922620000+00	2.34425000000+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	10	14	6	0	0	0	0	0	-4.61113223570+04	1.14832162170+00	2.34324094430+01	3.59949611640+02	8.73667283870-02	1.38651003380+02	0.0	0.0
72	10	14	12	0	0	0	0	0	-4.610073093730+04	1.14829263420+00	2.34318413660+01	3.59950732830+02	8.21342470580-02	1.43363544660+02	0.0	0.0
72	10	14	18	0	0	0	0	0	-4.61005794420+04	1.14827765390+00	2.34308791030+01	3.59952455370+02	7.80599539990-02	1.45292430220+02	0.0	0.0
72	10	15	0	0	0	0	0	0	-4.60913555970+04	1.14832337020+00	2.34298102290+01	3.59954272120+02	8.03044888760-02	1.46366755160+02	0.0	0.0
72	10	15	6	0	0	0	0	0	-4.60799359740+04	1.148482977480+00	2.34289478210+01	3.59955691840+02	9.43779155480-02	1.47049014470+02	0.0	0.0
72	10	15	12	0	0	0	0	0	-4.60666120760+04	1.14881253140+00	2.34286671850+01	3.59956225360+02	1.25892506150-01	1.47506701790+02	0.0	0.0
72	10	15	18	0	0	0	0	0	-4.60516421930+04	1.14936957830+00	2.34291441710+01	3.59955393480+02	1.80446105510-01	1.47821833030+02	0.0	0.0
72	10	16	0	0	0	0	0	0	-4.60352499390+04	1.15021282730+00	2.34308477500+01	3.59952733990+02	2.63573982490-01	1.46026493130+02	0.0	0.0
72	10	16	6	0	0	0	0	0	-4.60175287920+04	1.15141007320+00	2.343403566280+01	3.59947773870+02	3.81477978580-01	1.48143292660+02	0.0	0.0
72	10	16	12	0	0	0	0	0	-4.59988473640+04	1.15301034690+00	2.34390240660+01	3.59940159670+02	5.38210461910-01	1.48181797580+02	0.0	0.0
72	10	16	18	0	0	0	0	0	-4.59792664300+04	1.15508369090+00	2.34460248660+01	3.59929505710+02	7.39505571940-01	1.48148417290+02	0.0	0.0
72	10	17	0	0	0	0	0	0	-4.59589226910+04	1.15769770180+00	2.3452868660+01	3.59915503630+02	9.90356004450-01	1.48045580090+02	0.0	0.0
72	10	17	6	0	0	0	0	0	1.80472842230+08	1.89139637870-01	2.34390307310+01	3.59996844930+02	4.87051935900+01	3.43259991290+02	0.0	0.0
72	10	17	12	0	0	0	0	0	1.803504485640+08	1.88569696350-01	2.34390366050+01	3.59996851590+02	4.87161047040+01	3.43417250560+02	0.0	0.0
72	10	17	18	0	0	0	0	0	1.80243124150+08	1.88069072560-01	2.34390185550+01	3.59996857530+02	4.87253717730+01	3.43578573580+02	0.0	0.0
72	10	18	0	0	0	0	0	0	1.80148107400+08	1.87425617360-01	2.34390465840+01	3.5996862980+02	4.87330300260+01	3.43743236380+02	0.0	0.0
72	10	18	6	0	0	0	0	0	1.80063378870+08	1.87229889330-01	2.3439088720+01	3.5996867980+02	4.87401291470+01	3.43106778840+02	0.0	0.0
72	10	18	12	0	0	0	0	0	1.79986918140+08	1.86872562010-01	2.34390348030+01	3.59996872620+02	4.87460761790+01	3.44081405290+02	0.0	0.0
72	10	18	18	0	0	0	0	0	1.79918271430+08	1.86551595490-01	2.34390383860+01	3.59996876900+02	4.87512231370+01	3.44253178250+02	0.0	0.0
72	10	19	0	0	0	0	0	0	1.79855948910+08	1.86260083860-01	2.34390616880+01	3.59996880900+02	4.87557237360+01	3.44426649280+02	0.0	0.0
72	10	19	6	0	0	0	0	0	1.79799096290+08	1.85994074220-01	2.34390847420+01	3.59996884640+02	4.87596699810+01	3.44601585900+02	0.0	0.0
72	10	19	12	0	0	0	0	0	1.79747007970+08	1.85750296810-01	2.34390675780+01	3.5996888160+02	4.876231425020+01	3.4477796260+02	0.0	0.0
72	10	19	18	0	0	0	0	0	1.79699095860+08	1.85526022770-01	2.34390702220+01	3.5996891470+02	4.87662043290+01	3.44955120630+02	0.0	0.0
72	10	20	0	0	0	0	0	0	1.79654865730+08	1.85318956090-01	2.34390726940+01	3.59996894610+02	4.87689087270+01	3.45133424950+02	0.0	0.0
72	10	20	6	0	0	0	0	0	1.79613899120+08	1.85127150620-01	2.34390750110+01	3.59996897580+02	4.87713003510+01	3.45312595850+02	0.0	0.0
72	10	20	12	0	0	0	0	0	1.79575839250+08	1.84948945540-01	2.34390771900+01	3.5996900420+02	4.87734149060+01	3.45492536760+02	0.0	0.0
72	10	20	18	0	0	0	0	0	1.79540189780+08	1.84762023800-01	2.34390792540+01	3.5996903130+02	4.87759002330+01	3.45674170260+02	0.0	0.0
72	10	21	0	0	0	0	0	0	1.79507079330+08	1.84626992720-01	2.34390811930+01	3.5996905710+02	4.87769570100+01	3.45853417720+02	0.0	0.0
72	10	21	6	0	0	0	0	0	1.79476074910+08	1.84481828600-01	2.34390830280+01	3.5996908170+02	4.87784218670+01	3.46037219100+02	0.0	0.0
72	10	21	12	0	0	0	0	0	1.79446976760+08	1.84345598590-01	2.34390847670+01	3.5996910540+02	4.87797131480+01	3.46219520620+02	0.0	0.0
72	10	21	18	0	0	0	0	0	1.79419609850+08	1.84217484810-01	2.34390864180+01	3.5996912810+02	4.87808545340+01	3.46402275250+02	0.0	0.0
72	10	22	0	0	0	0	0	0	1.79393820130+08	1.84096767070-01	2.34390897890+01	3.5996915000+02	4.8781854570+01	3.46585441650+02	0.0	0.0
72	10	22	6	0	0	0	0	0	1.79369471470+08	1.8398208660-01	2.3439084840+01	3.5996917100+02	4.87827314390+01	3.46768983340+02	0.0	0.0
72	10	22	12	0	0	0	0	0	1.79346443130+08	1.83875044470-01	2.34390909100+01	3.5996919130+02	4.87834943770+01	3.46952868010+02	0.0	0.0
72	10	22	18	0	0	0	0	0	1.79324505990+08	1.83772419200-01	2.34390927770+01	3.5996921090+02	4.87841581820+01	3.47138091100+02	0.0	0.0
72	10	23	0	0	0	0	0	0	1.79303816790+08	1.83675615100-01	2.34390935760+01	3.5996922980+02	4.87847248710+01	3.47322580200+02	0.0	0.0

図 5.29 1950.0 平均赤道面座標系における宇宙船のケプラー要素

N A L - F A C O M E P H E M E R I S

EQUATORIAL COORDINATE IN MEAN EQUATOR AND EQUINOX OF 1950.0

DATE		ACCELERATION				PERTURBING				ACCELERATION				ACCELERATION						
Y	M	D	H	M	S	PG	GH	SR	SJ	PJ	CF	SR	SJ	PJ	CF	SR	SJ	PJ	CF	
72	10	16	0	0	0.0	X	8.74202D-07	-2.98905D-08	-1.24032D-15	1.31655D-10	0.0	1.31655D-10	0.0	1.24017D-13	0.0	1.31655D-10	0.0	1.24017D-13	0.0	
(MJED	41606.0000000)	Y	-5.17787D-07	-4.35141D-09	-1.60378D-14	Y	-7.50870D-09	-1.56887D-14	5.02788D-11	0.0	5.02788D-11	0.0	5.02788D-11	0.0	-6.60269D-14	0.0	5.02788D-11	0.0	-6.60269D-14	0.0
Z	-2.24397D-07	Z	-2.24397D-07	-6.93237D-09	-2.18014D-11	Z	-3.74149D-09	-6.80196D-15	2.20635D-11	0.0	2.20635D-11	0.0	2.20635D-11	0.0	-9.78624D-14	0.0	2.20635D-11	0.0	-9.78624D-14	0.0
CENT.BODY	EARTH	ABS	1.04032D-06	3.02932D-08	1.75242D-14	ABS	3.48826D-08	1.71386D-14	1.42703D-10	0.0	1.42703D-10	0.0	1.42703D-10	0.0	1.71222D-13	0.0	1.42703D-10	0.0	1.71222D-13	0.0
72	10	16	6	0	0.0	X	6.99882D-07	-3.35887D-08	-1.15363D-15	1.31484D-10	0.0	1.31484D-10	0.0	7.85320D-14	0.0	1.31484D-10	0.0	7.85320D-14	0.0	
(MJED	41606.2500000)	Y	-4.20414D-07	-7.50870D-09	-1.56887D-14	Y	-7.50870D-09	-1.56887D-14	5.02788D-11	0.0	5.02788D-11	0.0	5.02788D-11	0.0	-4.13112D-14	0.0	5.02788D-11	0.0	-4.13112D-14	0.0
Z	-1.82423D-07	Z	-1.82423D-07	-3.74149D-09	-6.80196D-15	Z	-3.74149D-09	-6.80196D-15	2.20635D-11	0.0	2.20635D-11	0.0	2.20635D-11	0.0	-5.99426D-14	0.0	2.20635D-11	0.0	-5.99426D-14	0.0
CENT.BODY	EARTH	ABS	8.36577D-07	3.48826D-08	1.71386D-14	ABS	3.48826D-08	1.71386D-14	1.42703D-10	0.0	1.42703D-10	0.0	1.42703D-10	0.0	1.07161D-13	0.0	1.42703D-10	0.0	1.07161D-13	0.0
72	10	16	12	0	0.0	X	5.70937D-07	-3.76582D-08	-1.07410D-15	1.31310D-10	0.0	1.31310D-10	0.0	5.36539D-14	0.0	1.31310D-10	0.0	5.36539D-14	0.0	
(MJED	41606.5000000)	Y	-3.50752D-07	-1.08126D-08	-1.53635D-14	Y	-3.50752D-07	-1.08126D-08	5.14837D-11	0.0	5.14837D-11	0.0	5.14837D-11	0.0	-2.60221D-14	0.0	5.14837D-11	0.0	-2.60221D-14	0.0
Z	-1.52446D-07	Z	-1.52446D-07	-5.34147D-09	-6.66101D-15	Z	-5.34147D-09	-6.66101D-15	2.25238D-11	0.0	2.25238D-11	0.0	2.25238D-11	0.0	-3.78868D-14	0.0	2.25238D-11	0.0	-3.78868D-14	0.0
CENT.BODY	EARTH	ABS	6.87194D-07	3.95421D-08	1.64392D-14	ABS	3.95421D-08	1.64392D-14	1.42798D-10	0.0	1.42798D-10	0.0	1.42798D-10	0.0	7.06491D-14	0.0	1.42798D-10	0.0	7.06491D-14	0.0
72	10	16	18	0	0.0	X	4.72019D-07	-4.13155D-08	-1.00047D-15	1.31131D-10	0.0	1.31131D-10	0.0	3.54340D-14	0.0	1.31131D-10	0.0	3.54340D-14	0.0	
(MJED	41606.7500000)	Y	-2.99226D-07	-1.42939D-08	-1.50547D-14	Y	-2.99226D-07	-1.42939D-08	5.20835D-11	0.0	5.20835D-11	0.0	5.20835D-11	0.0	-1.64446D-14	0.0	5.20835D-11	0.0	-1.64446D-14	0.0
Z	-1.30320D-07	Z	-1.30320D-07	-7.02128D-09	-6.52713D-15	Z	-7.02128D-09	-6.52713D-15	2.25838D-11	0.0	2.25838D-11	0.0	2.25838D-11	0.0	-2.38132D-14	0.0	2.25838D-11	0.0	-2.38132D-14	0.0
CENT.BODY	EARTH	ABS	5.73866D-07	4.42785D-08	1.64392D-14	ABS	4.42785D-08	1.64392D-14	1.42891D-10	0.0	1.42891D-10	0.0	1.42891D-10	0.0	4.57500D-14	0.0	1.42891D-10	0.0	4.57500D-14	0.0
72	10	17	0	0	0.0	X	3.94240D-07	-4.48338D-08	-9.32200D-16	1.30947D-10	0.0	1.30947D-10	0.0	2.44839D-14	0.0	1.30947D-10	0.0	2.44839D-14	0.0	
(MJED	41607.0000000)	Y	-2.60333D-07	-1.79345D-08	-1.47583D-14	Y	-2.60333D-07	-1.79345D-08	5.26826D-11	0.0	5.26826D-11	0.0	5.26826D-11	0.0	-9.92038D-15	0.0	5.26826D-11	0.0	-9.92038D-15	0.0
Z	-1.13664D-07	Z	-1.13664D-07	-8.77228D-09	-6.59868D-15	Z	-8.77228D-09	-6.59868D-15	2.28435D-11	0.0	2.28435D-11	0.0	2.28435D-11	0.0	-1.49621D-14	0.0	2.28435D-11	0.0	-1.49621D-14	0.0
CENT.BODY	EARTH	ABS	4.85920D-07	4.90782D-08	1.61127D-14	ABS	4.90782D-08	1.61127D-14	1.42984D-10	0.0	1.42984D-10	0.0	1.42984D-10	0.0	3.03602D-14	0.0	1.42984D-10	0.0	3.03602D-14	0.0
72	10	17	6	0	0.0	X	5.11715D-06	3.82104D-07	1.63221D-13	1.30759D-10	0.0	1.30759D-10	0.0	0.0	0.0	1.30759D-10	0.0	0.0	0.0	
(MJED	41607.2500000)	Y	-2.45117D-06	-2.10365D-07	4.74802D-14	Y	-2.45117D-06	-2.10365D-07	5.32811D-11	0.0	5.32811D-11	0.0	5.32811D-11	0.0	0.0	0.0	5.32811D-11	0.0	0.0	0.0
Z	-1.06263D-06	Z	-1.06263D-06	-9.09998D-08	2.05888D-14	Z	-9.09998D-08	2.05888D-14	2.31030D-11	0.0	2.31030D-11	0.0	2.31030D-11	0.0	0.0	0.0	2.31030D-11	0.0	0.0	0.0
CENT.BODY	SUN	ABS	5.77258D-06	4.45576D-07	1.71229D-13	ABS	4.45576D-07	1.71229D-13	1.43076D-10	0.0	1.43076D-10	0.0	1.43076D-10	0.0	0.0	0.0	1.43076D-10	0.0	0.0	0.0
72	10	17	12	0	0.0	X	5.15702D-06	3.34150D-07	1.63018D-13	1.30567D-10	0.0	1.30567D-10	0.0	0.0	0.0	1.30567D-10	0.0	0.0	0.0	
(MJED	41607.5000000)	Y	-2.44913D-06	-1.83177D-07	4.84274D-14	Y	-2.44913D-06	-1.83177D-07	5.38789D-11	0.0	5.38789D-11	0.0	5.38789D-11	0.0	0.0	0.0	5.38789D-11	0.0	0.0	0.0
Z	-1.06176D-06	Z	-1.06176D-06	-7.92347D-08	2.09993D-14	Z	-7.92347D-08	2.09993D-14	2.33622D-11	0.0	2.33622D-11	0.0	2.33622D-11	0.0	0.0	0.0	2.33622D-11	0.0	0.0	0.0
CENT.BODY	SUN	ABS	5.80693D-06	3.89213D-07	1.71350D-13	ABS	3.89213D-07	1.71350D-13	1.43166D-10	0.0	1.43166D-10	0.0	1.43166D-10	0.0	0.0	0.0	1.43166D-10	0.0	0.0	0.0
72	10	17	18	0	0.0	X	5.18812D-06	2.94785D-07	1.62806D-13	1.30371D-10	0.0	1.30371D-10	0.0	0.0	0.0	1.30371D-10	0.0	0.0	0.0	
(MJED	41607.7500000)	Y	-2.45204D-06	-1.60979D-07	4.93676D-14	Y	-2.45204D-06	-1.60979D-07	5.44761D-11	0.0	5.44761D-11	0.0	5.44761D-11	0.0	0.0	0.0	5.44761D-11	0.0	0.0	0.0
Z	-1.06305D-06	Z	-1.06305D-06	-6.96290D-08	2.14071D-14	Z	-6.96290D-08	2.14071D-14	2.36211D-11	0.0	2.36211D-11	0.0	2.36211D-11	0.0	0.0	0.0	2.36211D-11	0.0	0.0	0.0
CENT.BODY	SUN	ABS	5.83603D-06	3.43016D-07	1.71468D-13	ABS	3.43016D-07	1.71468D-13	1.43253D-10	0.0	1.43253D-10	0.0	1.43253D-10	0.0	0.0	0.0	1.43253D-10	0.0	0.0	0.0

図 5.30 各振動加速度

航空宇宙技術研究所資料359号

昭和53年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
