

UDC 531.36 ;
629.7.05/.07 ;
629.76 ;
681.3.06

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-310

ストラップダウン用慣性センサシステムの
評価プログラム

大坪孔治・新田慶治
森 英彦・小口美津夫

1976 年 9 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ストラップダウン用慣性センサシステムの 評価プログラム*

大坪 孔治**新田 慶治**
森 英彦**小口 美津夫**

1. はじめに

ロケットに搭載されたジャイロおよび加速度計は、飛行中のロケットの状態を知るためのもっとも基本的な検出器である。特に純慣性誘導システムのような自律系の場合には唯一の検出機器として主要な構成要素を成し、その性能の良否は直接誘導システム全体の精度に大きな影響を与える。従って慣性誘導システムの研究開発を進めるに際しては、これ等センサの諸特性すなわち、トルカ・フィードバック・ゲインの大きさ、フィードバック系の応答時間遅れ、各種誤差項の影響等を詳細に評価するシステムが必要である。本報告はロケットの慣性誘導システムのうち、ストラップダウン方式に用いられる広角積分ジャイロ、ヒンジド・ペンデュラス型加速度計¹⁾を用いたストラップダウン慣性センサ・システムの“諸特性評価をソフトウェア的におこなう事を目的に作成された”シミュレーション・システムに関するものである。あるミッションに対応した慣性誘導システムに用いられるこれ等慣性機器の要求仕様を決めるためには誤差補償ルーチンの附加が必要であるが、これについては搭載用ソフトウェアとの関連で別報で報告する予定である。センサの制御方式としてはデジタル・リバランス方式を用いた2値制御法を基本としているが、わずかな変更で3値制御法の評価もおこなえる。なお、センサ数学モデルの基本的な記述²⁾に関しては別報で考察した。

2. 記号

$a_c(a_{IRA}, a_{ORA}, a_{SRA})$: ケース軸系で観測される
加速度 (cm/sec^2)

$a_g(a_{IA}, a_{OA}, a_{SA})$: ジンバル軸系で観測される加
速度 (cm/sec^2)

A_g' : ジンバル回転角 (rad)

\dot{A}_g : ジンバル回転角速度 (rad/sec)

\ddot{A}_g : ジンバル回転角加速度 (rad/sec^2)

C_1, C_2 : 積分定数

C_D : ケース・フロート間オイルの粘性係数
($\text{dyn}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$)

C_c^g : ケース軸系からジンバル軸系への変換行列

$d(d_{IA}, 0, d_{SA})$: ロータの質量中心が回転軸からず
れている距離 (cm)

I : ジャイロ・ロータ部又は加速度計振子部の
慣性テンソル

(IA, OA, PA) : ジャイロ・ジンバル軸系又は加速度
計振子系の座標系

H_g : ジンバル系角運動量 ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

(IRA, ORA, PRA) : ジャイロ又は加速度計のケー
ス軸座標系

K_{SA}, K_{IA} : ジャイロのコンプライアンス ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

K : バルス・ウェイト

M_B : バイアス・トルク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

M_e : A_g 項を含まない外乱トルク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

M_c : コンプライアンス・トルク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

M_g : センサに加わる全トルク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

M_{ms} : 出力軸まわりのマスアンバランス・トル
ク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

M_r : ジャイロ・ロータ部質量 (gr)

M_{ty} : センサ・トルカによるフィードバック・
トルク ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

P_g : 加速度計のペンデュラスティ
(Pendulousty, ($\text{gr}\cdot\text{cm}$))

S : 符号を考慮したフィードバックトルク
($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

$S_{gn}(A_g(t-id))$: $A_g(t-id)$ の正負によって
±1とする符号化記号

S_{tgi} : トルカによるフィードバックトルクの大
きさ ($\text{dyn}\cdot\text{cm}$)

Δt_c : センサ駆動用パルスのサイクル・タイム
(sec)

t_d : 応答遅れ時間 (sec)

Δt_{ss} : パルス・サンプリング・タイム (sec)

* 昭和51年5月20日受付

** 宇宙研究グループ

- ΔV : 速度増分 (cm/sec)
- $\Delta \theta$: 角度増分 (rad/sec)
- θ_a : 加速度計振子の振れ角 (deg)
- $\dot{\theta}_a$: " " 振れ角速度 (deg/sec)
- $\delta_x(d_{IA}, 0, d_{SA})$: ジンバル軸系中心からみた不平衡質量までの距離 (cm)
- ω_i^g : ジンバル軸系と慣性軸系との相対回転角速度ベクトル
- ω_i^c : ケース軸系と慣性軸系との相対回転角速度ベクトル
- ω_c^g : ジンバル軸系とケース軸系との相対回転角速度ベクトル

3. センサ数学モデル

(1) ジャイロの数学モデル

(イ) 外部トルクが作用する場合のジャイロダイナミクス

ジャイロとしては1自由度積分ジャイロを対象としており、その動作原理に関するモデルを示せば、図1のようになる。ここで、直交右手座標系 (IRA, ORA, SRA)

はケース軸系を (IA, OA, SA) はジンバル軸系を表わす。ジャイロの運動方程式を求めるにあたり、ケース内のジンバルの回転は OA 軸まわりに限る、機体に加わる併進加速度は、支持点を通してそのままジンバルに伝達するほか、回転運動に寄与する機体の回転角速度及び角加速度についても各軸成分は各々そのままジンバル系に伝達するものとする。今ジャイロに加わる外部トルクを M_g とすれば、ジンバルの角運動量 H_g との間には、一般に次の関係式が成立つ。

$$M_g = \left(\frac{dH}{dt} \Big|_i \right)_g = \left(\frac{dH_g}{dt} \Big|_g \right)_g + (\omega_{gi})_g \times H_g \quad (3.1)$$

ここでサフィックス g はジンバル軸系、 i は慣性軸系で表現された量を、又、特に断りが無い場合、ベクトルは列ベクトルを表わすものとする。すなわち上式はジンバル軸系に関する表現であり、 $(\omega_{gi})_g$ は慣性空間に対するジンバルの相対的な回転角速度 ω_{gi} をジンバル座標系で表わしたものであり、 $\left(\frac{dH_g}{dt} \Big|_i \right)_g$ は慣性空間からながめた角運動量の変化 $\frac{dH_g}{dt} \Big|_i$ をジンバル座標系

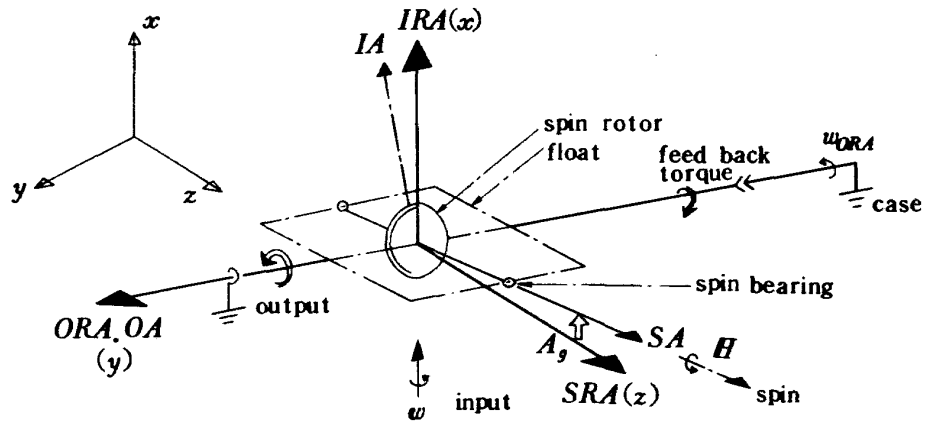


図 1 ジャイロ動作モデル

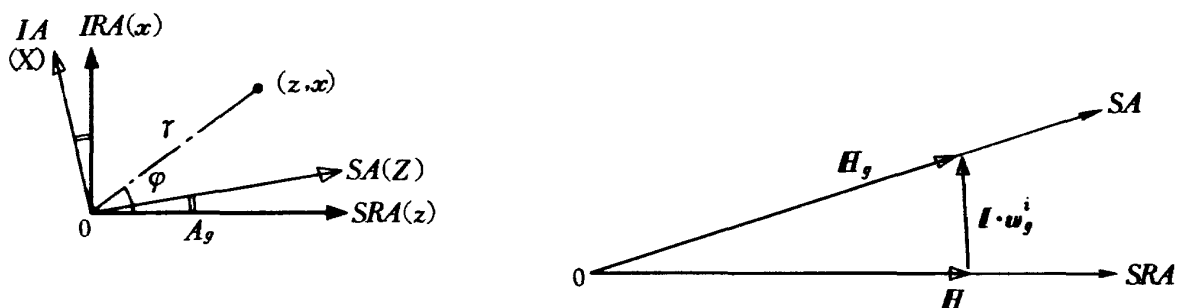


図 2 角運動量の変化

で表現したものである。いまジナルの慣性モーメントを I とすれば、回転角速度 w_{gi} によってジナルの角運動量は図2に示すごとく次のように変化する。

$$H_g = I (w_{gi})_g + H \quad (3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし } H &= (0, 0, H)' \\ I &= \begin{bmatrix} I_{IA} & 0 & 0 \\ 0 & I_{OA} & 0 \\ 0 & 0 & I_{SA} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$(w_{gi})_g$ はケースとジナル・フロートの相対的回転およびケースの慣性空間に対する回転の和として表わせる。すなわち、ケース軸系に関する量をサフィックス C で表わすと次の関係がある。

$$(w_{gi})_g = C_{gc} (w_{ci})_c + (w_{gc})_g \quad (3.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし,} \\ (w_{ci})_c &= (w_{IRA}, w_{ORA}, w_{SRA})' \\ (w_{gc})_g &= (0, \dot{A}_g, 0)' \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

リバランス方式を用いて、つねにフロートの動きを零近傍に制御するとすれば、フロートの出力軸まわりの回転角 A_g は小さいとみなせるので、ケース軸系からジナル軸系への変換行列 C_{gc} は次のように近似できる。

$$C_{gc} = \begin{bmatrix} \cos A_g & 0 & -\sin A_g \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_g & 0 & \cos A_g \end{bmatrix} \doteq \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A_g \\ 0 & 1 & 0 \\ A_g & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

(3.5), (3.6) 式を(3.4)式に代入すれば、 $(w_{gi})_g$ に関して次式を得る。

$$\begin{aligned} (w_{gi})_g &= C_{gc} (w_{ci})_c + (w_{gc})_g \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A_g \\ 0 & 1 & 0 \\ A_g & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_{IRA} & 0 \\ w_{ORA} & \dot{A}_g \\ w_{SRA} & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} w_{IRA} - A_g \cdot w_{SRA} \\ w_{ORA} + \dot{A}_g \\ w_{SRA} + A_g \cdot w_{IRA} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

これと(3.3)式を(3.2)式に代入すれば、 H_g に関して次式を得る。

$$\begin{aligned} H_g &= I \cdot (w_{gi})_g + H \\ &= \begin{bmatrix} I_{IA} (w_{IRA} - A_g \cdot w_{SRA}) \\ I_{OA} (w_{ORA} + \dot{A}_g) \\ I_{SA} (w_{SRA} + A_g \cdot w_{IRA}) + H \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

上式右辺は第1列から順に、それぞれ入力軸方向、出力軸方向およびスピン軸方向成分を表わしており、我々が必要なのは、このうち出力軸方向成分の関係である。

(3.1)式の右辺第1項について、出力軸方向成分を求めると、上式より、

$$\left(\frac{dH_g}{dt} \right)_g, OA \text{成分} = I_{OA} (\dot{w}_{ORA} + \ddot{A}_g) \quad (3.9)$$

又、(3.1)式の右辺第2項については、(3.1)式、(3.8)式を用いてベクトル積を作り、その出力軸方向成分について注目すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \{ (w_{gi})_g \times H_g \}_{OA \text{成分}} \\ = (w_{IRA} - A_g \cdot w_{SRA})(w_{SRA} + A_g \cdot w_{IRA}) \times \\ (I_{IA} - I_{SP}) + H \cdot (A_g \cdot w_{SRA} - w_{IRA}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

従って、(3.9), (3.10)式より外部トルク M_g が作用する場合のジャイロの出力軸に関する運動方程式を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} M_g, OA \text{成分} &= I_{OA} (\dot{w}_{ORA} + \ddot{A}_g) + \\ &H (A_g \cdot w_{SRA} - w_{IRA}) + (w_{IRA} - A_g \cdot w_{SRA}) \\ &\times (w_{SRA} + A_g \cdot w_{IRA})(I_{IA} - I_{SP}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

次に、ジャイロの出力軸まわりに回転を発生させるような外部トルクについて考えてみると、基本的なものとしては、測定しようとする入力トルク $(H \cdot w_{IRA})$ およびそれに対してフロートを零位置近傍にとどめるためにトルクによって発生されるフィードバック・トルクがあるが、このほかにもいくつかの外乱トルクが存在するので、これ等のいくつか代表的なものについて以下に説明する。

(ロ) マス・アンバランス・トルク

ロータを含むジャイロのジナル部は出力軸まわりに平衡な質量分布をするよう製作されねばならないが、工作技術上の問題等で、部分的に質量の不均衡部分が出る。これは外部から加速度が加わった場合、出力軸まわりに回転トルクを生じさせる原因となる。この関係を模式的に示せば、図3のようになる。今、ケース軸系での加速度を $a_C (a_{IRA}, a_{ORA}, a_{SRA})$ 、ジナル軸系での加速度を $a_g (a_{IA}, a_{OA}, a_{SA})$ 、不平衡質量およびジナル軸から測ったその分布中心位置をそれぞれ MU 、

$\delta_u(\delta_{IA}, 0, \delta_{SA})$ とすれば、出力軸まわりのマス・アンバランス・トルク M_{mu} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_{mu} &= -M_u \cdot a_{IA} \cdot \delta_{SA} + M_u \cdot a_{SA} \cdot \delta_{IA} \\ &= -M_u \{ a_{IRA} \cdot \delta_{SA} - a_{SRA} \cdot \delta_{IA} \\ &\quad - A_g (a_{SRA} \cdot \delta_{SA} + a_{IRA} \cdot \delta_{IA}) \} \\ &\doteq -M_u \{ a_{IRA} \cdot \delta_{SA} - a_{SRA} \cdot \delta_{IA} \} \quad (3.12) \end{aligned}$$

ただし、 a_g と a_c の関係は A_g の動きが微小範囲に留まるため次のようにおいた。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_{IA} \\ a_{OA} \\ a_{SA} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A_g \\ 0 & 1 & 0 \\ A_g & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{IRA} \\ a_{ORA} \\ a_{SRA} \end{bmatrix} \\ &\doteq - \begin{bmatrix} a_{IRA} \\ a_{ORA} \\ a_{SRA} \end{bmatrix} \quad (3.13) \end{aligned}$$

(ハ) コンプライアンス・トルク

ジャイロに加速度が加わると、ジンバル部に弾性変形が生じ、その質量中心が平衡位置よりずれる。これを模式的に示せば図4のようになる。すなわち出力軸に対し垂直成分を持つ加速度 $a_g(a_{IA}, a_{OA}, a_{SA})$ が加わることによってジンバルの質量中心が平衡位置より $d(d_{IA}, 0, d_{SA})$ だけずれる場合で、弾性変形をバネモデルで置換え、 IA, SA 軸方向のバネ定数(コンプライアンス)をそれぞれ K_{IA}, K_{SA} とすると、 K_{IA}, K_{SA} が等しくない時には出力軸まわりに回転モーメントが発生する³⁾。これがコンプライアンス・トルクと呼ばれ、通常、ジャイロの場合には誤差要因となる。加速度と変位の関係は、ジンバル中心質量を M_r とすると簡単な次式の関係で与えられる。

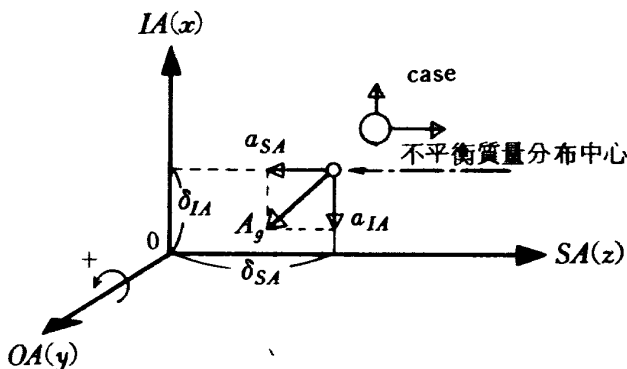


図3 不平衡質量による回転モーメント

$$\begin{cases} M_r \cdot a_{IA} = -2K_{IA} \cdot d_{IA} \\ M_r \cdot a_{SA} = -2K_{SA} \cdot d_{SA} \end{cases}$$

すなわち

$$\begin{cases} d_{IA} = \frac{-1}{2K_{IA}} M_r \cdot a_{IA} \\ d_{SA} = \frac{-1}{2K_{SA}} M_r \cdot a_{SA} \end{cases} \quad (3.14)$$

上式と外部加速度に関する(3.13)式を用いると出力軸まわりのコンプライアンス・トルクとして次式を得る。

$$\begin{aligned} M_c &= -M_r \cdot a_{SA} \cdot d_{IA} + M_r \cdot a_{IA} \cdot d_{SA} \\ &= \frac{M_r^2 \cdot a_{SRA} \cdot a_{IRA}}{2K_{IA} \cdot K_{SA}} \cdot (K_{SA} - K_{IA}) \quad (3.15) \end{aligned}$$

(ニ) その他のトルク^{5), 6)}

上記以外に働くトルクとしては、ケースとフロート間のオイルによるダンピングトルク ($-C_D \dot{A}_g$)、加速度の作用に関係なく発生するバイアス・トルク (M_B) のほかアクティブなものとして、トルカによって発生するフィードバック・トルク ($-M_{tg}$) がある。本評価プログラムでは上記のトルクの作用を考慮している。

(ホ) ジャイロ運動方程式

ジャイロに働くトルク $M_{mu}, M_c, M_B, C_D \dot{A}_g, M_{tg}$ によって引おこされるジャイロ角運動量の変化に関する運動方程式(3.11)を用いて、これまでの関係を整理すると次式を得る。

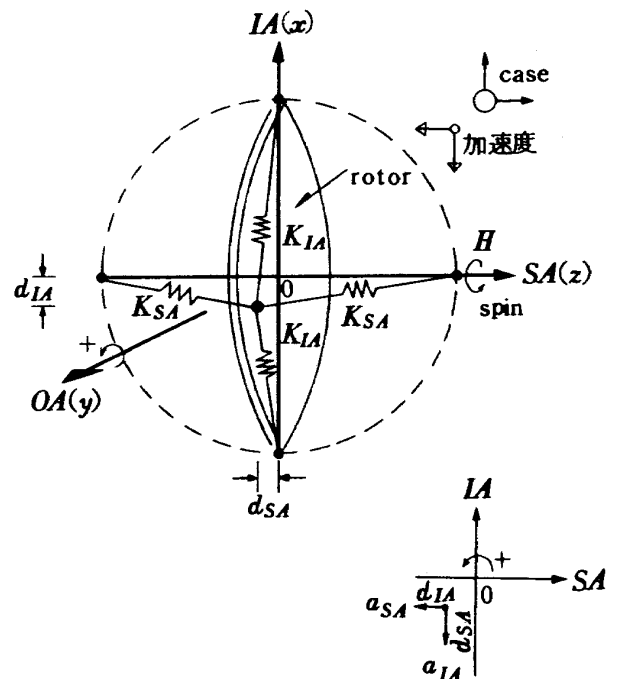


図4 コンプライアンストルク

$$\begin{aligned}
 & I_{OA} (\dot{w}_{ORA} + \ddot{A}_g) + H \cdot (A_g \cdot w_{SRA} - w_{IRA}) \\
 & + (w_{IRA} - A_g \cdot w_{SRA})(w_{SRA} + A_g w_{IRA}) \\
 & \times (I_{IA} - I_{SA}) = M_{um} + M_c + M_B - C_D \dot{A}_g - M_{tg} \\
 & A_g^2 \text{の項は微小ゆえこれを無視し, 上式を整理すれば, ジ} \\
 & \text{ャイロ運動方程式として次式を得る.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{OA} \ddot{A}_g + C_D \dot{A}_g &= H \cdot w_{IRA} - H \cdot w_{SRA} \cdot A_g \\
 &- I_{OA} \dot{w}_{ORA} + (I_{SA} - I_{IA}) \\
 &\{ w_{IRA} \cdot w_{SRA} + A_g (w_{IRA}^2 - w_{SRA}^2) \} \\
 &+ M_B + M_{um} + M_c - M_{tg} \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

右辺第1項は入力トルク, 第2項はクロス・カップリングトルク (cross coupling torque), 第3項は出力軸カップリングトルク (output axis coupling torque) 第4項はアノイナ-シアトルク (anisoinertia torque) と呼ばれるもので, 入力軸方向以外の角速度成分があれば必然的に発生する誤差トルクである。補償をおこなわない場合, これ等の誤差トルクが出力に対し, どのような影響を与えるのかこのプログラムによってソフトウェア的に評価検討をおこなうことができる。なお第3項はジンバルに対して, ケースが相対的回転をおこすことによって発生する誤差トルクである。

(へ) パルス・リバランス制御方式

一般にジャイロの制御方式としては, 入力角速度によって起こされる出力軸まわりのジンバルの回転は信号発生器 (signal generator) で検出され, それに対応する電流に変換される。この電流は増幅され, トルク発生器 (torque generator) に与えられてジンバルの回転を制御する。入力はこの電流を測定することによって知ることが出来るが, 測定法として精度を上げるため, デジタル化 (パルス化) した場合の取扱いについて述べる。このようなデジタル・フィードバック制御をシミュレートするためには, 設定されたパルス間隔ごとに (3.17) 式を解かねばならぬが, これを数値積分で解いたのでは, シミュレーションに莫大な時間を要し実用的でない。このためパルス・サンプリング・タイム Δt_{ss} 内で入力および誤差トルク等は一定であると仮定し, (3.17) 式の解析解を求める方式を用いた。今, フィードバック方式として2値制御方式を採用するとして, (3.17) 式を書直すと,

$$\begin{aligned}
 I_{OA} \ddot{A}_g(t) + C_D \dot{A}_g(t) &= H \cdot w_{IRA} + M_e \\
 &- S_{gn} [A_g(t - t_d)] (S_{tgi}) \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 M_e &= M_B + M_{um} + M_c - H w_{SRA} A_g - I_{OA} \dot{w}_{ORA} \\
 &+ (I_{SA} - I_{IA}) \{ w_{IRA} w_{SRA} + A_g (w_{IRA}^2 - w_{SRA}^2) \} \\
 S_{gn} [A_g(t - t_d)] (S_{tgi}) &: \text{符号を考慮したフィードバック・トルク}
 \end{aligned}$$

今, 簡単のため, M_e に含まれる A_g 項を無視して考えると, (3.18) 式の右辺は Δt_{ss} 間で一定とみなせるゆえ, $\dot{A}_g(t)$, $A_g(t)$ に対する解は,

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_g(t) &= \frac{H \cdot w_{IRA} + M_e - S}{C_D} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_D}{I_{OA}} \cdot t\right) \right\} \\
 &+ A_g(o) \cdot \exp\left(-\frac{C_D}{I_{OA}} \cdot t\right) \\
 A_g(t) &= \frac{t}{C_D} (H \cdot w_{IRA} + M_e - S) \\
 &+ \frac{I_{OA}}{C_D} \left\{ \frac{1}{C_D} (H \cdot w_{IRA} + M_e - S) \right. \\
 &\left. - \dot{A}_g(o) \right\} \times \left\{ \exp\left(-\frac{C_D}{I_{OA}} \cdot t\right) + A_g(o) \right\} \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

ただし

$$S = S_{gn} [A_g(t - t_d)] \cdot (S_{tgi})$$

上式をパルス間隔時間 Δt_c ごとに解いて, 入力 w_{IRA} に対し,

$$\Delta \theta = \int_0^{\Delta t_{ss}} w_{IRA} dt = K \cdot \sum_0^{\Delta t_{ss}} S_{gn} [A_g(t - t_d)] \quad (3.20)$$

を求めればよい。なおセンサ・パラメータ等の選択による応答に関する考察は森その他によっておこなわれている。又, 誤差トルク M_e に含まれる A_g 項を考慮する場合には異なった解となるが, この場合についての考察は別の機会にゆずる。

(2) 加速度計数学モデル

高精度加速度計としてはいくつかの種類があるが, こゝでモデルとして取上げるのは航技研でも開発研究が進められている1自由度浮動振子型加速度計である。その動作原理を模式的に示せば図5のようになる。こゝで, (IRA, PRA, ORA) はケース軸系を, (IA, PA, OA) はジンバル軸系を表わす。今, ジンバルに加わるトルクを M_g , ジンバル角運動量を H_g , 加速度を a , 角

速度を w , ペンデュラスティ (pendulosity) を P とすれば, ジャイロ同様の関係が成立つ,

$$M_g = \left(\frac{dH_g}{dt} \right)_i \Big|_g + (a_{gi})_g \times P$$

$$= \left(\frac{dH_g}{dt} \right)_g \Big|_g + (w_{gi}) \times H_g + (a_{gi})_g \times P \quad (3.21)$$

サフィックス i, g はそれぞれ慣性軸系, ジンバル軸系での成分を表わす。ジャイロ同様の考察から, 上式各項の成分は次のようになる。

$$C_{gc} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a & 0 \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \doteq \begin{bmatrix} 1 & \theta_a & 0 \\ -\theta_a & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$(w_{gi})_g = C_{gc} (w_{ci})_c + (w_{gc})_g$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \theta_a & 0 \\ -\theta_a & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{IRA} \\ w_{PRA} \\ w_{ORA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} w_{IRA} + \theta_a \cdot w_{PRA} \\ w_{PRA} - \theta_a \cdot w_{IRA} \\ w_{ORA} + \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$(a_{gi})_g = -C_c^g (a_{ci})_c + (a_{gc})_g$$

$$= - \begin{bmatrix} a_{IRA} + \theta_a a_{PRA} \\ a_{PRA} - \theta_a a_{IRA} \\ a_{ORA} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$H_g = I (w_{gi})_g$$

$$= \begin{bmatrix} I_{IA} (w_{IRA} + \theta_a w_{PRA}) \\ I_{PA} (w_{PRA} - \theta_a w_{IRA}) \\ I_{OA} (w_{ORA} + \dot{\theta}_a) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

これ等の各成分を用いて, (3.21) 式の出力軸 (OA 軸) に関する成分を求めると次式を得る。

$$(M_g)_{OA} \text{成分} = I_{OA} (\dot{w}_{ORA} + \dot{\theta}_a) + (w_{IRA} + \theta_a w_{PRA}) \times (w_{PRA} - \theta_a w_{IRA}) (I_{PA} - I_{IA}) - P (a_{IRA} + \theta_a a_{PRA}) \quad (3.26)$$

M_g の OA 成分としては, 系のフィードバック・トルク $-M_{tg}$, ケースとフロート間のオイルによるダンピング・トルク $-C_D \dot{\theta}_a$ のほか, 誤差量として入ってくるバイアストルク M_B および非線形誤差トルク $K_2 a_{IRA}^2, K_3 a_{IRA}^3$ 等をこの数学モデルでは考慮している。(3.26) 式の M_g にこれ等の諸量を代入し, 右辺については θ_a^2 項を無視して書直すと, 加速度計数学モデルとして次式を得る。

$$I_{OA} \dot{\theta}_a + C_D \dot{\theta}_a = P a_{IRA} + P \theta_a a_{PRA} - I_{ORA} \dot{w}_{ORA} + (I_{IA} - I_{PA}) \{ w_{IRA} w_{PRA} + \theta_a (w_{PRA}^2 - w_{IRA}^2) \} + M_B - M_{tg} + K_2 a_{IRA}^2 + K_3 a_{IRA}^3 \quad (3.27)$$

右辺第 1 項は入力, 第 2 項以下順にクロス・カップリング誤差 (cross coupling error), 出力軸カップリング誤差 (output axis coupling error), アニソイナーシャ誤差 (anisoinertia error) の各量である。

(3.27) 式のシミュレーションについては, ジャイロ同様の仮定をもうけ, 解析解を求めて利用する。又, 制御方式としても, 2 値制御のデジタル・リバランス方式とする。すなわち, サンプリング・タイム Δt_{ss} 間において, 外部力の値を一定とみなせば, 加速度計振子の振れ角に対する解は次式のようにになる。

$$\theta_a(t) = C_1 + C_2 \exp\left(-\frac{C_D}{I_{OA}} t\right) + \frac{w_e}{C_D} \cdot t - S_{gn} [\theta_a(t - t_d)] \frac{S_{tg} \cdot i}{C_D} \cdot t \quad (3.28)$$

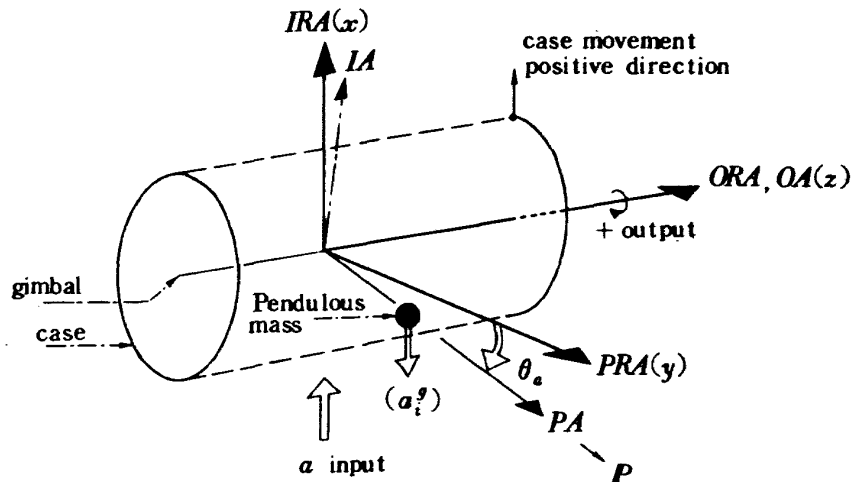


図 5 加速度計動作モデル

ただし,

$$W_{ea} = M_B + P\theta_a a_{PRA} - I_{ORA} \dot{\omega}_{ORA} + (I_{IA} - I_{PA}) \{ \omega_{IRA} \omega_{PRA} + \theta_a (\omega_{PRA}^2 - \omega_{IRA}^2) \} + K_2 a_{IRA}^2 + K_3 a_{IRA}^3$$

$$C_1 = \theta_a(0) - C_2$$

$$C_2 = \frac{I_{OA}}{C_D} \left\{ \frac{W_e}{C_D} - S_{gn} [\theta_a(t - t_d)] \cdot \frac{S_{tgi}}{C_D} - \dot{\theta}_a(0) \right\}$$

この場合にも誤差トルクに含まれる θ_a 項は微小ゆえ無視しているが、これを考慮する場合についてはジャイロ同様、別の機会にゆずる。

(3) 座標システム

各センサの座標系および機体軸に対する取付け方等については、いろいろな方法が提案されている。^{2), 4), 5)} センサの動作を記述するという点に関しては、単なる表

現法上の違いという問題であるが、取付け法によっては誤差項の影響が異なってくる。しかし、基本的には入力軸方向はすべて同じであるため、出力軸およびスピン軸(加速度計の場合には振子軸)をどう設定するかという問題になるが、特別なハードウェア上の問題が無い限り、センサ誤差項の影響をなるべく小さくする方法が取られている。すなわち図6および表1に示すように、機軸方向の加速度およびピッチ回転角速度がなるべく他のセンサに悪影響を与えないような配置である。なお、設定法の違いによる影響等を調べるためには、表1の各成分値を入替えてやればよく、プログラムの簡易な操作である。

(4) センサ取付角誤差

センサの座標システムに関する誤差項は厳密に言えば (a) センサの各軸 (IA, OA, SA) の直交性と、センサ取付面との直交性、 (b) パッケージ化した場合の

表1. センサ各軸と機体軸との関係

Gyro axis	Roll Gyro (x)	Pitch Gyro (y)	Yaw Gyro (z)
IRA (x)	X_B	Y_B	Z_B
ORA (y)	$-Y_B$	$-X_B$	$-X_B$
SRA (z)	Z_B	Z_B	$-Y_B$

Accel axis	a_x accel	a_y accel	a_z accel
IRA (x)	X_B	Y_B	Z_B
PRA (y)	Y_B	Z_B	$-Y_B$
ORA (z)	Z_B	X_B	X_B

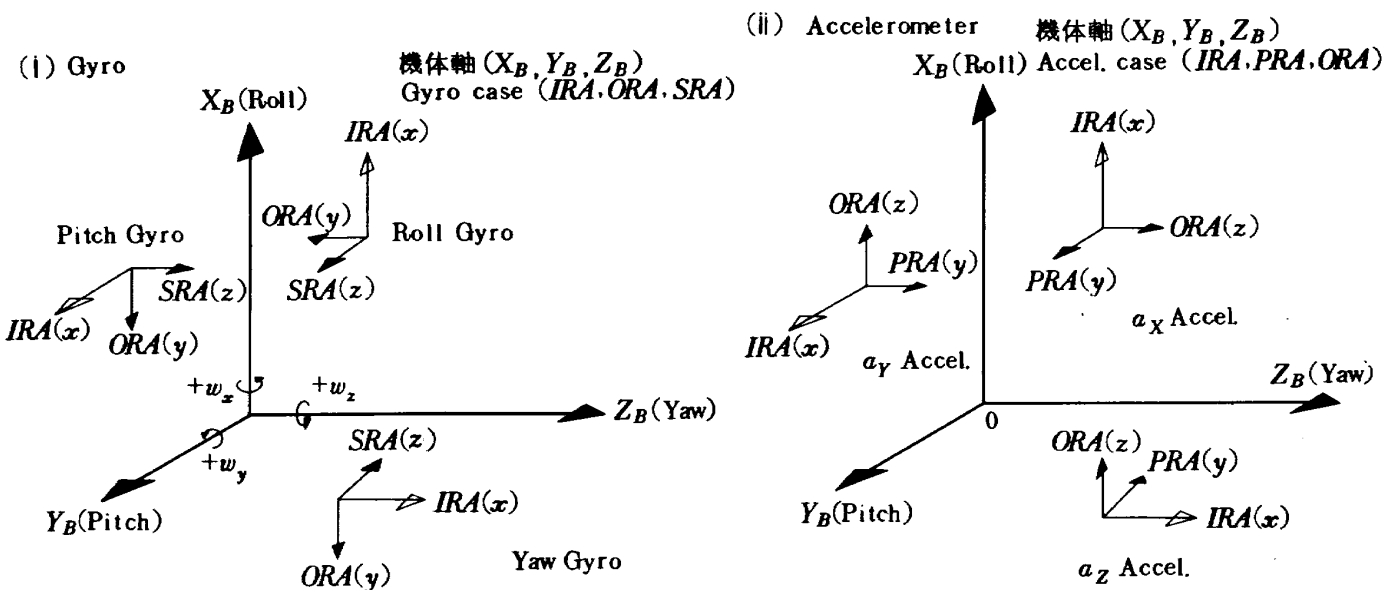


図6 センサ取付け法

各センサの直交性，(c)センサ・パッケージと機体軸との直交性の問題によって発生する。これ等の問題について，詳細な考察をおこなう事はこの報告の目的ではないので，さておき，慣性誘導システムの評価法という立場から (b) および (c) について考える。今，直交機体座標系を $B(x, y, z)$ ，非直交センサ取付座標系を $\tilde{B}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ とし，それ等各軸のずれ角が，図7に示

すような関係にあるとする。この場合，センサ・ダイナミクスへの入力として必要な各種ベクトル，すなわち，機体角速度，機体角加速度，機体加速度のB系成分を \tilde{B} 系成分へ変換してやる必要がある。今，機体角速度 ω_B に関する座標変換を例に取ってみると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \tilde{w}_x \\ \tilde{w}_y \\ \tilde{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{xz} \cos \theta_{xy} & \sin \theta_{xy} & -\sin \theta_{xz} \cos \theta_{xy} \\ -\sin \theta_{yx} \cos \theta_{yz} & \cos \theta_{yx} \cos \theta_{yz} & \sin \theta_{yz} \\ \sin \theta_{zx} & -\sin \theta_{zy} \cos \theta_{zx} & \cos \theta_{zy} \cos \theta_{zx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

機体軸線が正確に決定される場合には (3.29) 式の関係を用いればよいが，現実問題として，このような軸線は正確に決定されるものではなく，又，誘導制御の点からは，それほど正確な必要もない。そこで今，センサ・パ

ッケージの取付面 (ここでは \tilde{x} 軸， \tilde{y} 軸を含む面とする) と， \tilde{x} 軸を基準として考えると，図7のずれ角のうち， θ_{xy} ， θ_{xz} ， θ_{yz} は零になるため，(3.29) 式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \tilde{w}_x \\ \tilde{w}_y \\ \tilde{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{yx} & \cos \theta_{yx} & 0 \\ \sin \theta_{zx} & -\sin \theta_{zy} \cos \theta_{zx} & \cos \theta_{zy} \cos \theta_{zx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

取付角誤差	回 転 軸
θ_{xz}	Y_B
θ_{xy}	Z_B を Y_B に関して θ_{xz} だけ回転した軸
θ_{yx}	Z_B
θ_{yz}	X_B を Z_B に関して θ_{yx} だけ回転した軸
θ_{zy}	X_B
θ_{zx}	Y_B を X_B に関して θ_{zy} だけ回転した軸

すなわち，各入力ベクトルにこのマトリックスを作用させれば，取付角誤差の影響を調べることができる。なおこれ等取付角誤差の補正効果は搭載用ソフトウェアの評価との関連で別の機会に報告する予定である。

4. プログラム概説

(1) 全系の構成

前章までに述べた計算の論理的処理の流れを示せば図8のようになる。すなわち，まずセンサを動かす外部入力を求め，それに対して取付角誤差を付加する。次に現時点のフロートの変位 A_g ， θ_a の符号を利用して積分定数を定め，それよりパルス発生間隔 Δt_c 後のフロートの位置を求め，その正負によって +1 又は -1 を発生させる。これをセンサ・サンプリング・タイム Δt_{ss} 間，繰返して累積し，それにジャイロの場合は $(Stgi/H)_{gyro}$ ， Δt_c 加速度計の場合には $(Stgi/P)_{acc} \Delta t_c$ を掛けて，機体回転角増分 $\Delta \theta$ ，速度増分 ΔV をそれぞれ求めるようになっている。このプログラムは剛体ロケットの飛しょう軌道を発生させるプログラム RMAP* をメイン・ルーチ

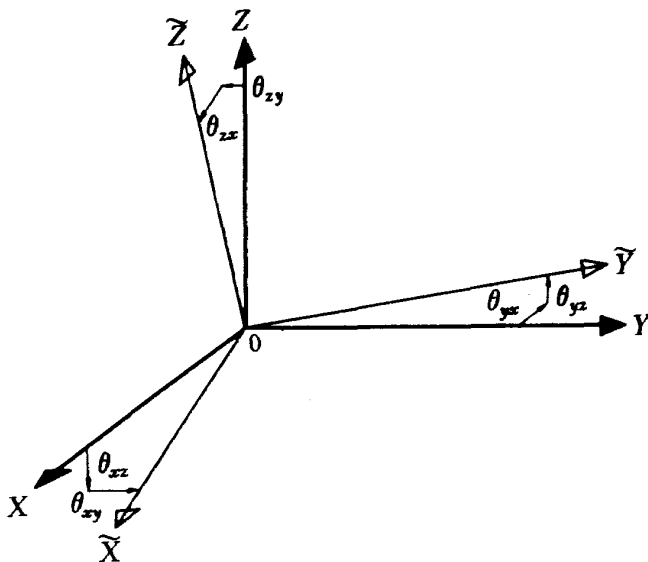


図7 センサ取付角誤差

* : RMAP (Rocket Mission Analysis Program)

3次元6自由度のロケットの飛しょう軌道を発生させるプログラムで，これについては，引続き別報で報告する予定である。

Logical flowchart of SE2602

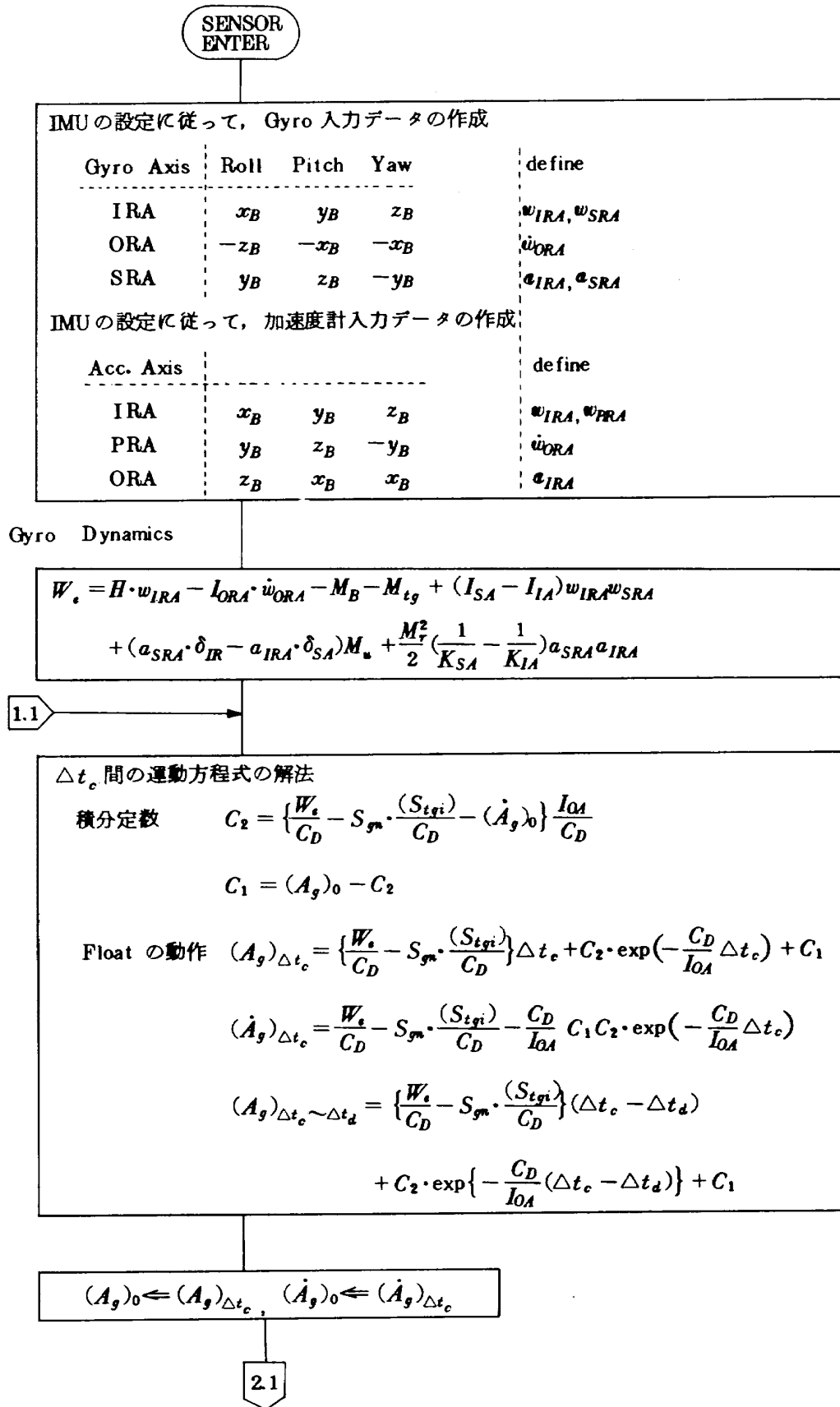


図 8 センササブルーチンの論理フロー (1)

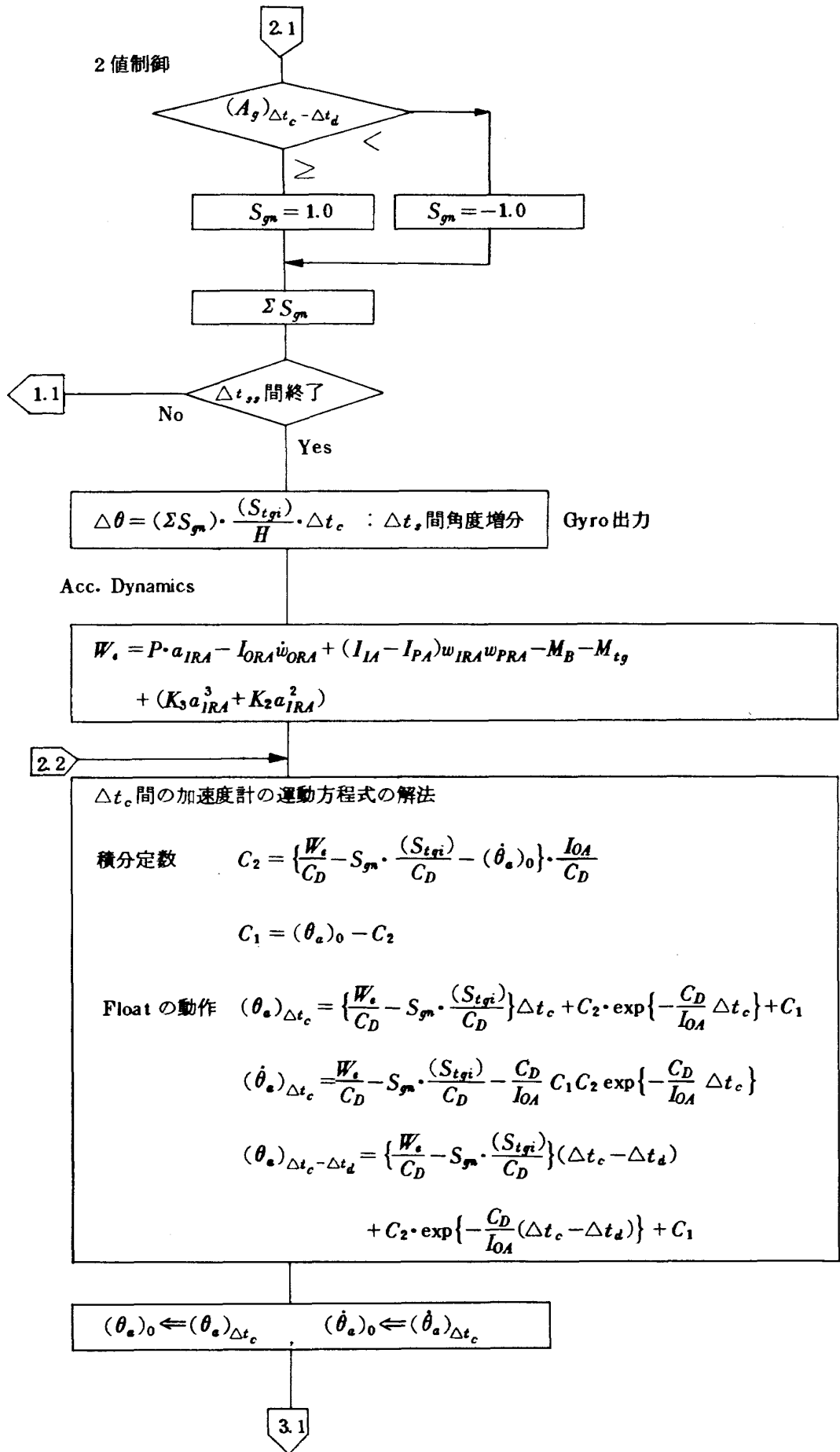


図 8 センササブルーチンの論理フロー (2)

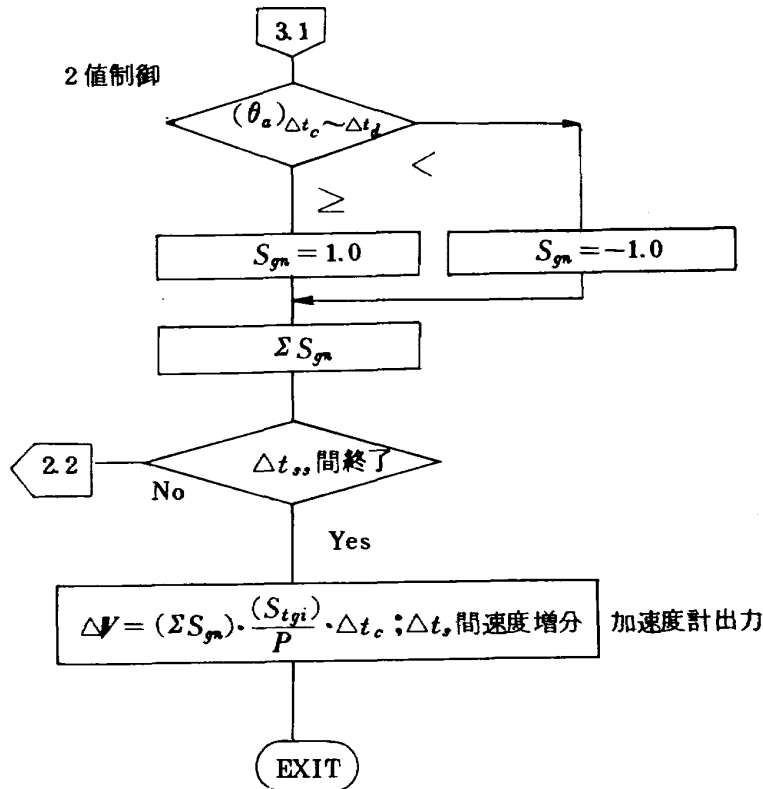


図 8 センササブルーチンの論理フロー (3)

ンとしており、その構成概要を示せば、図 9. a および図 9. b のようになる。図 9. a は図 9. b の基本的なサブルーチンの説明であるが、センサ・ルーチン (SE 2602) およびグラフ処理ルーチン (GRAPID) は、プログラムとしては、取扱い上の便利さ等の関係で、ロケットの運動を解くサブルーチン (FLITRA (2)) のサブルーチンとして組込れている。これ等のサブルーチンの処理フローを示せば、図 9. c のようになる。図中、2 重の縦枠線で示されているのは、サブルーチンを表わす。このプログラムでは次のような特性評価が可能である。

- (イ) センサパラメータの変化による応答特性の評価
 - (ロ) 入力に対する応答特性の評価
 - (ハ) パッケージ化した場合での特性評価
- (イ) については取付法をすべて等しくすれば、各センサは単体として同一の機能となるため、異ったパラメータをセットする事によって 1 度に 3 ケースの特性評価がおこなえる。(ロ) については、現在、ETS-1 打上げ飛しょう軌道の入力が与えられるようになっているが、特定の入力について評価したい場合には、サブルーチン PREPG (1) の誘導指令角のデータを変更する、又は、このルーチンをコールしたすぐ後で、指令角の関数発生をおこなえばよい。(ハ) については前章で述べたよう

に、機体軸への取付けを変えることによって、飛しょう状態に対するセンサ・パッケージとしてのセンサ構成法の特長評価がおこなえる。さらに取付角誤差付加ルーチンを働かせることによって、その影響および初期設定誤差 (initial alignment error) の影響等も評価できる。

(2) 入力形式

プログラムへの入力データとしては、表 2 (a) に示されるセンサ特性定数のほか、表 2 (b) に示されるセンサへの入力値すなわち、重力加速度項を除いた機体の加速度 a_B 、慣性空間に対する機体の回転角速度 ω および回転角加速度 $\dot{\omega}$ の 3 種が必要である。これ等の入力値の各成分は、図 6 に示したセンサ取付法に対応して入力されるように現在セットされており、飛しょう軌道例として、前述の ETS-1 ミッション軌道を入力として使用する場合には、ユーザは何も指定する必要はないが、特定の入力について応答を調べたい時には、センサルーチンをコールする前で、その入力を発生させるサブルーチンを挿入すればよい。このほか、誤差項の各係数は、データ文による入力形式となっている。

(3) 出力形式

出力データは、基本的にはタイム・シーケンシャルな $\Delta \theta$ 、 ΔV およびその積算値 $\theta = \Sigma \Delta \theta$ 、 $V = \Sigma \Delta V$

のほか入力基準値に対する相対誤差のラインプリンタ出力である。さらに結果の変化の把握を助け、データ整理の便に供するため、ラインプリンタ上へのグラフ出力が出来るようになっている。グラフ項目としては、現在、表3に示される項目が組込まれている。図10はジャイロ出力(T)および各時刻における基準値に対する相対誤差(E)をプロットした1例ではあるが、1枚の図中に処理されるデータは各成分および絶対値の同時比較が可能なよう最大4種類にセットしている。

(4) その他

プログラムはJIS7000レベルのFORTRAN言語で書かれており、その大きさはカード・ベースで、約6000ステップ、必要メモリ容量は約98Kワードである。当所大型計算機FACOM230-75による処理速度は、1300秒間の飛しょう計算に対し、CPUタイムで約920秒であり、打上げから軌道投入までの全区間にわたるシミュレーションが充分可能である。

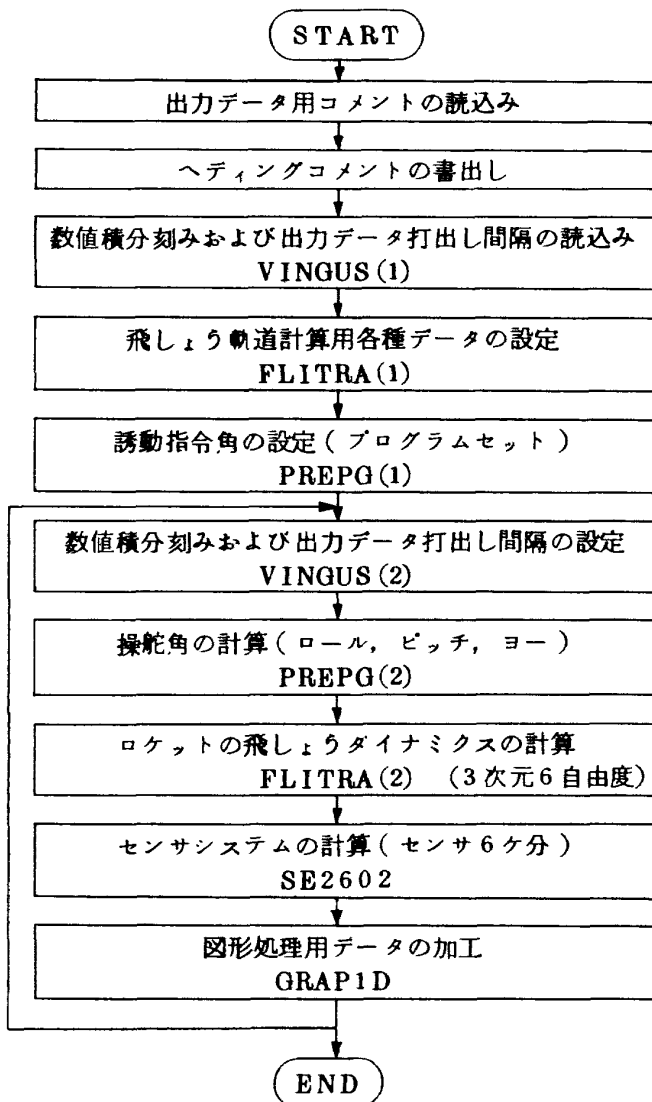


図9a プログラム全系の概略フロー

MAIN ROUTINE

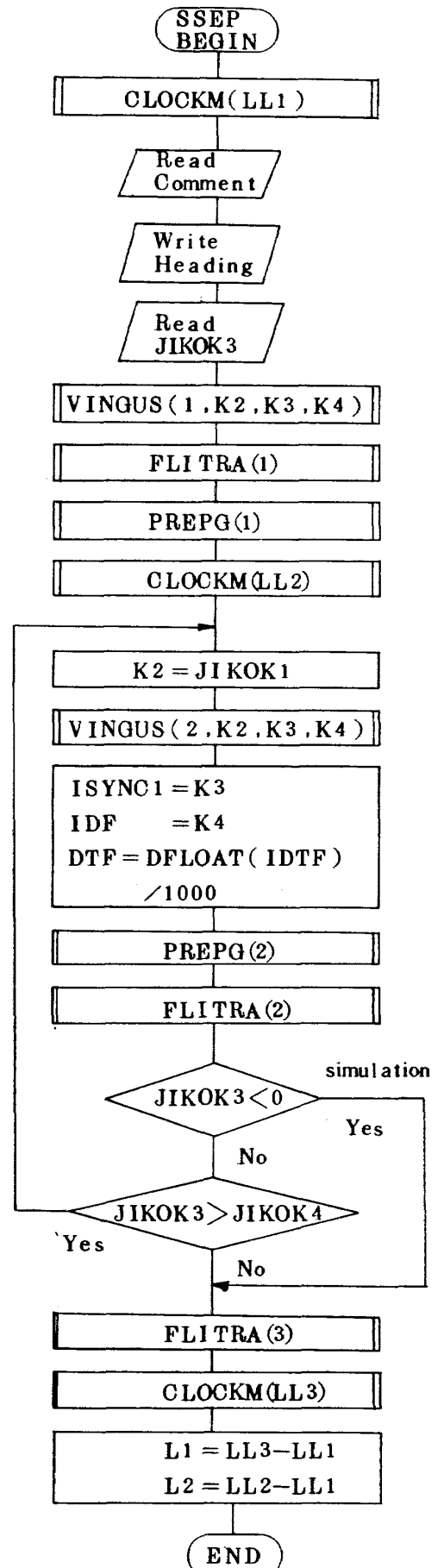


図9b プログラム基本フローチャート (メインルーチン)

Subroutine FLITRA

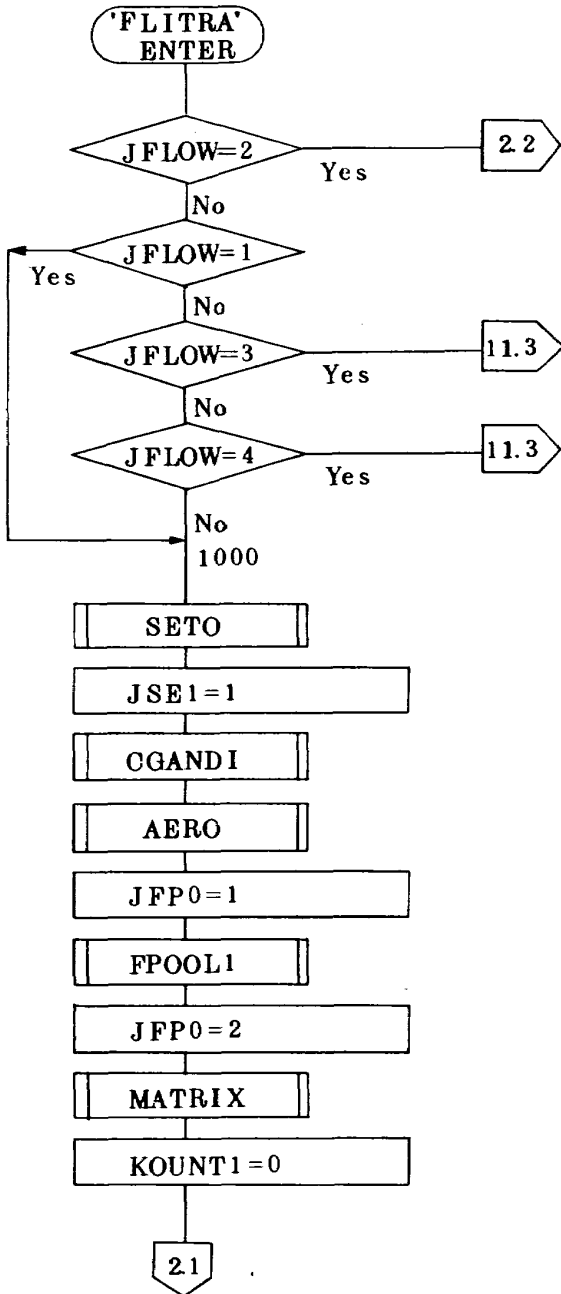


図 9c プログラム詳細フローチャート(1)
(サブルーチン FLITRA)

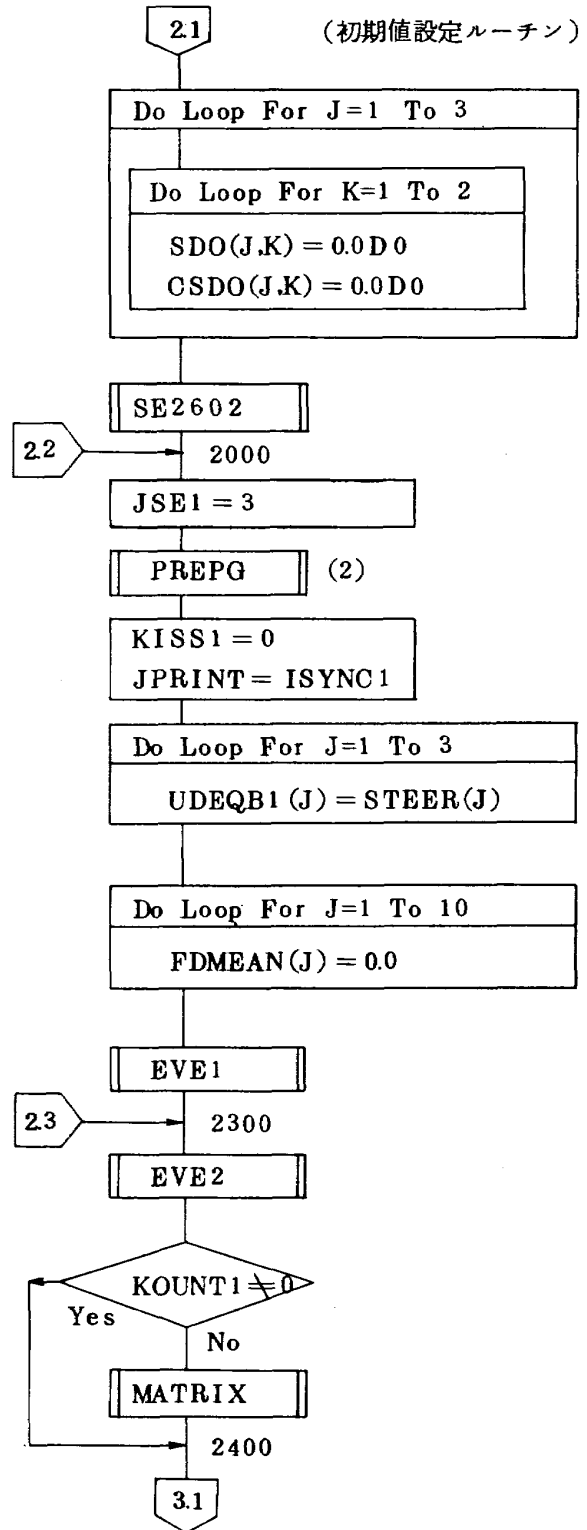


図 9c プログラム詳細フローチャート(2)
(サブルーチン FLITRA)

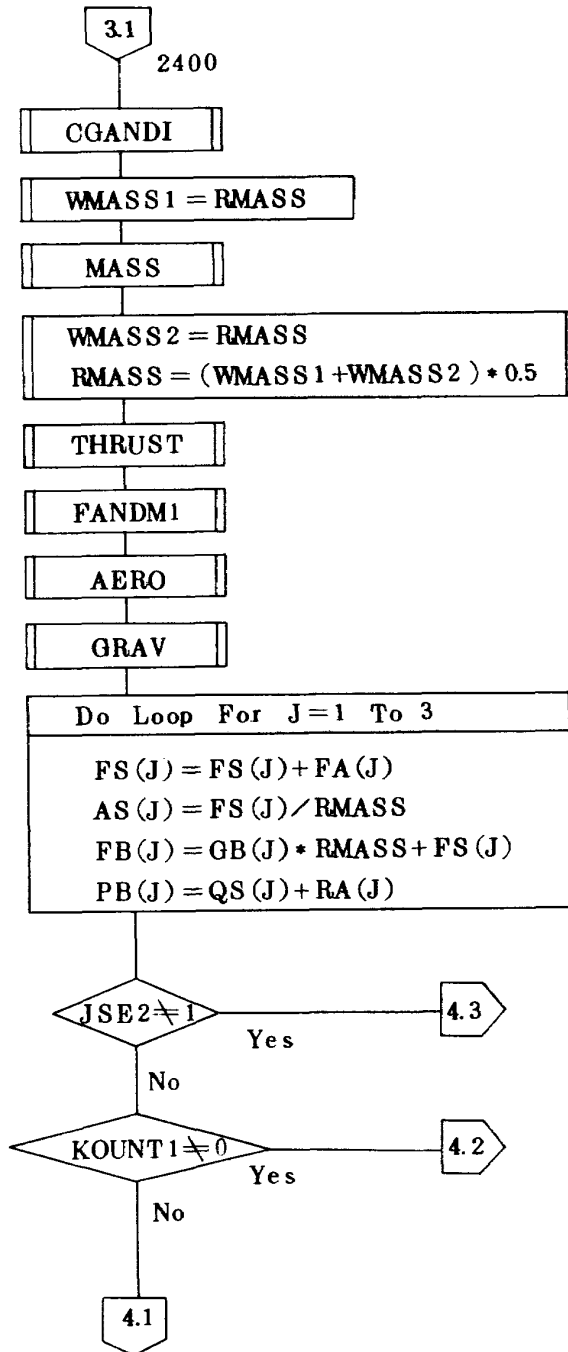


図 9c プログラム詳細フローチャート(3)
(サブルーチン FLITRA)

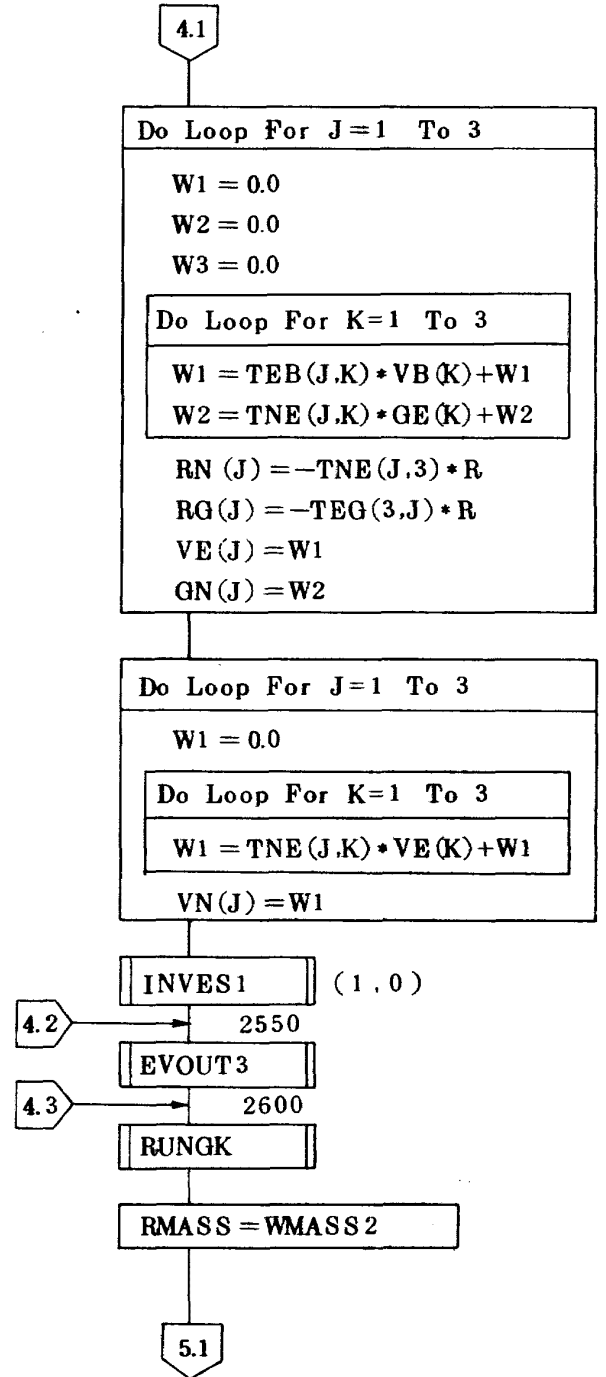


図 9c プログラム詳細フローチャート(3)
(サブルーチン FLITRA)

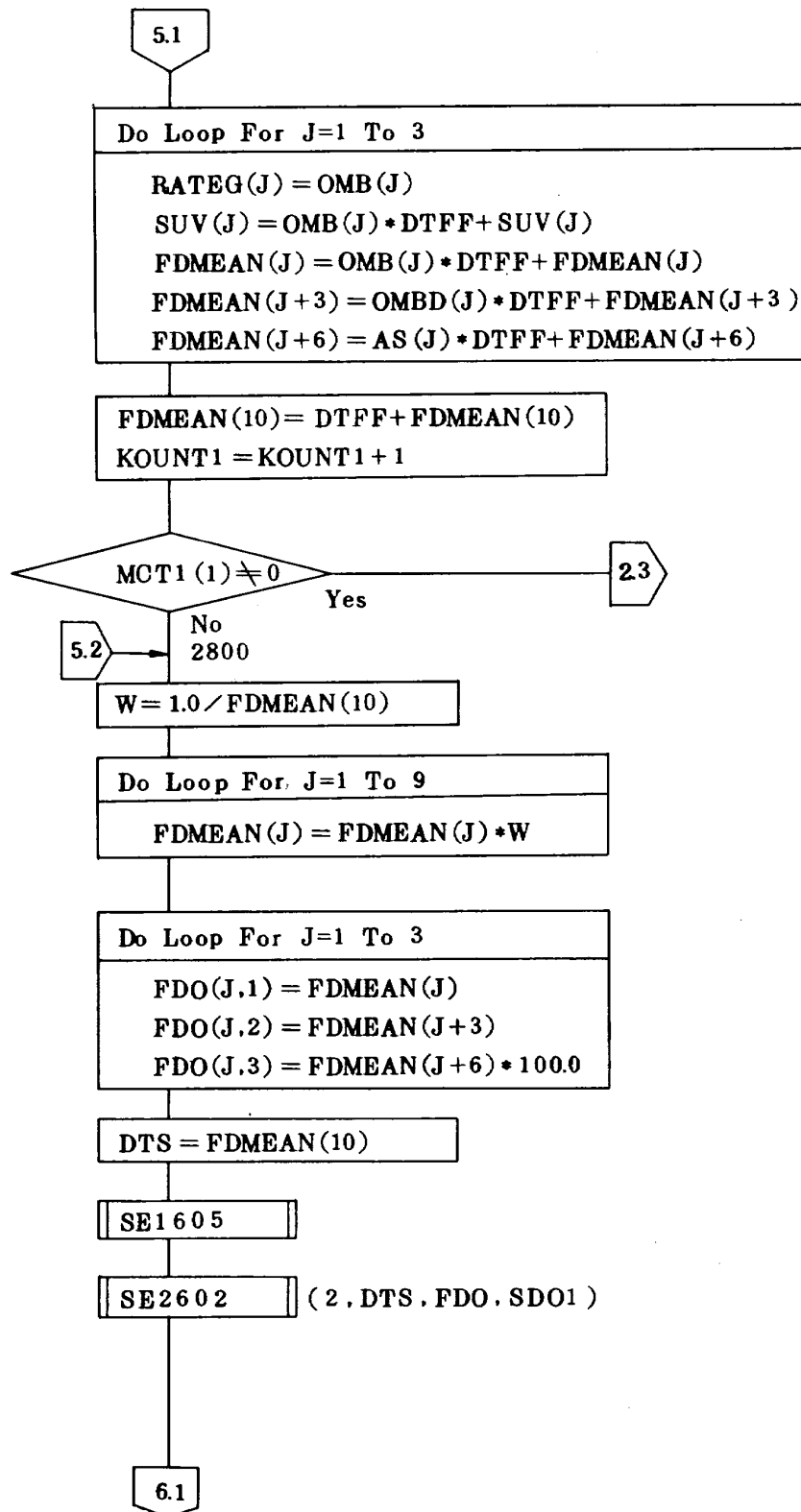
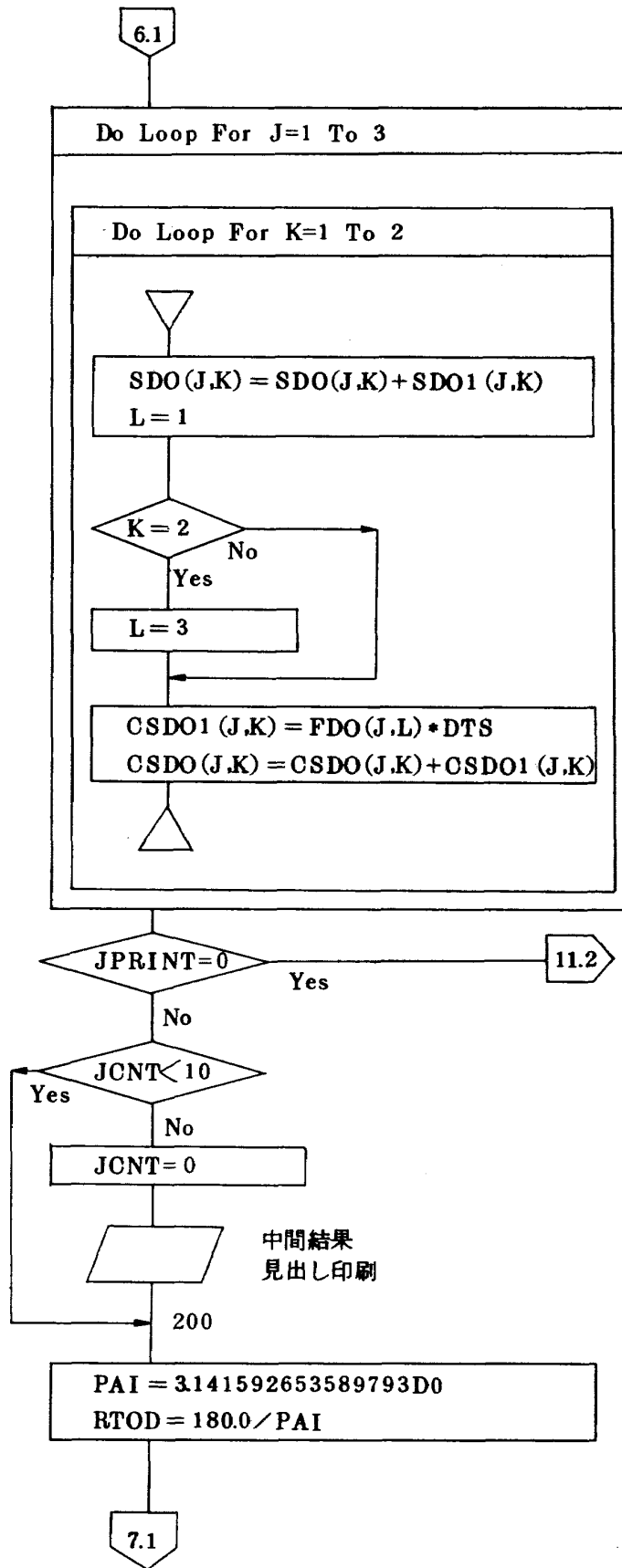
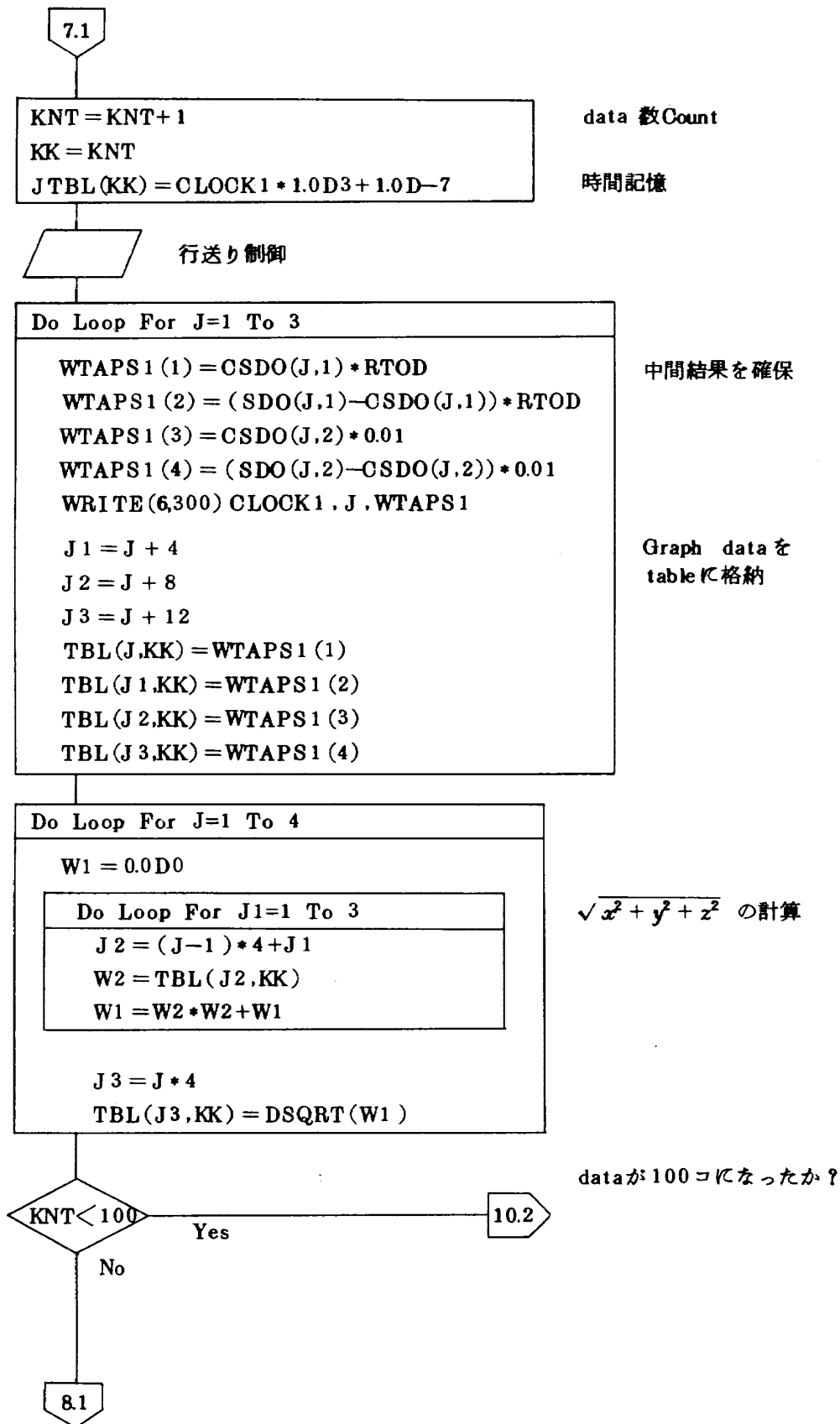
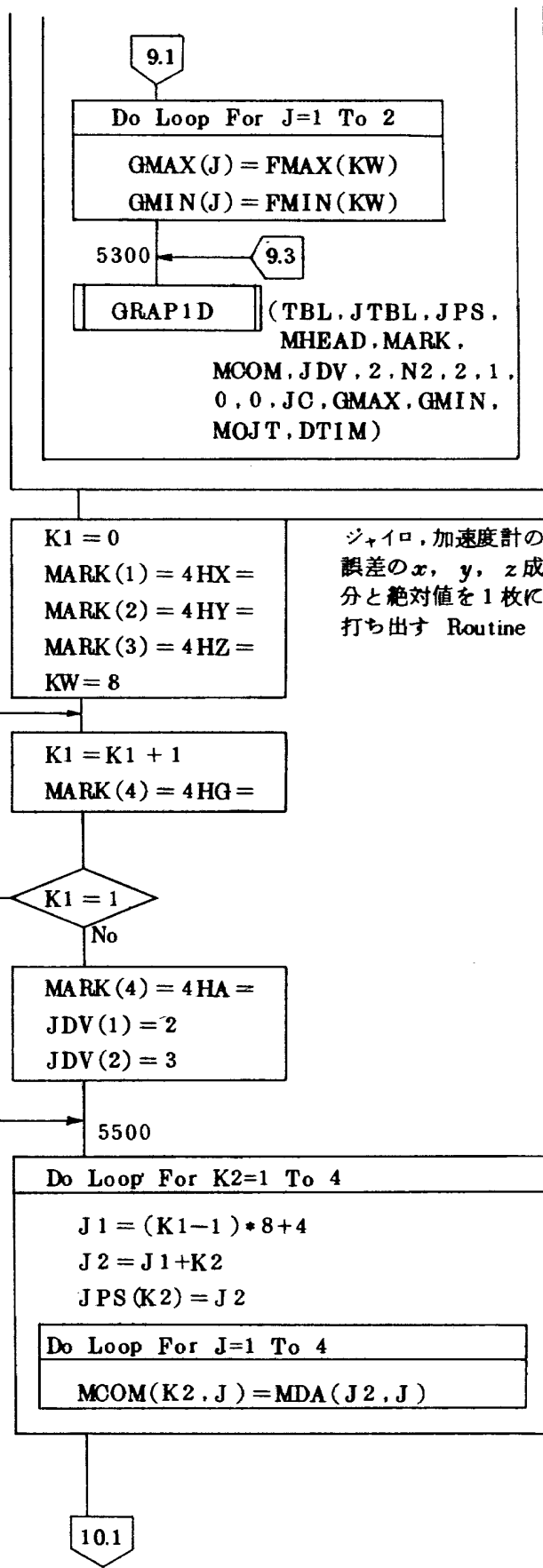
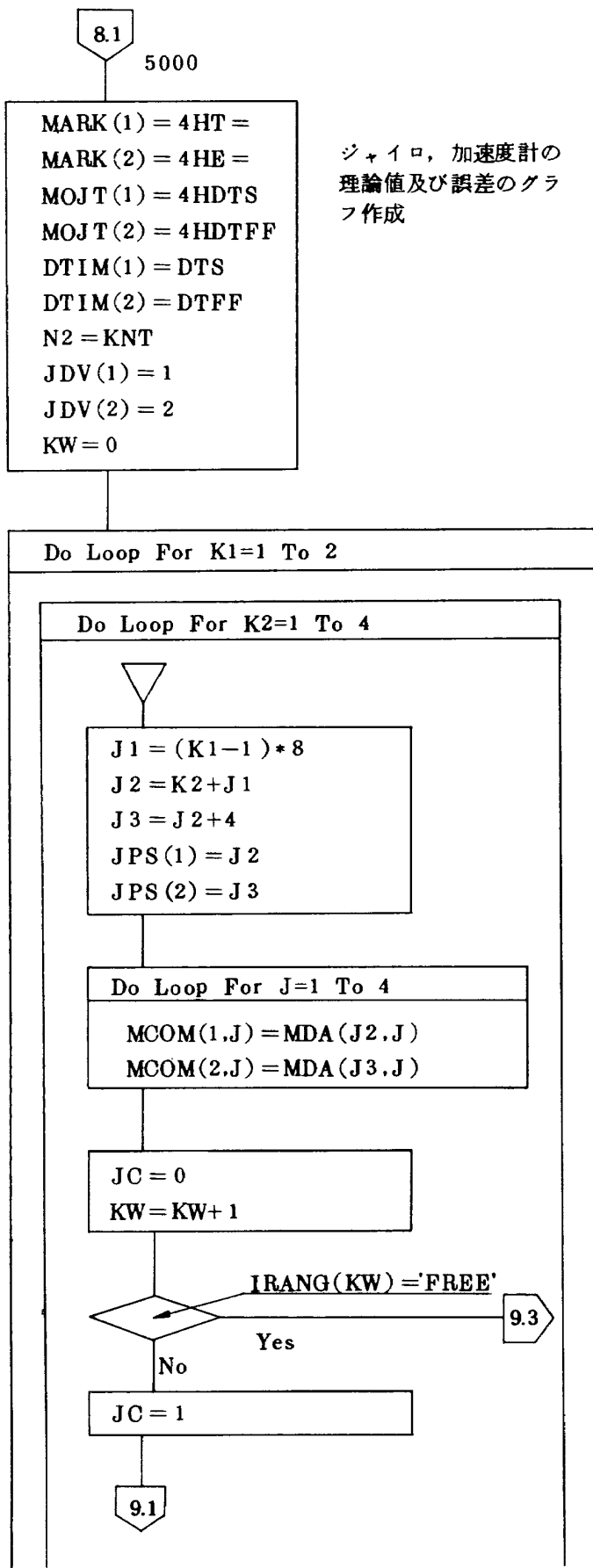
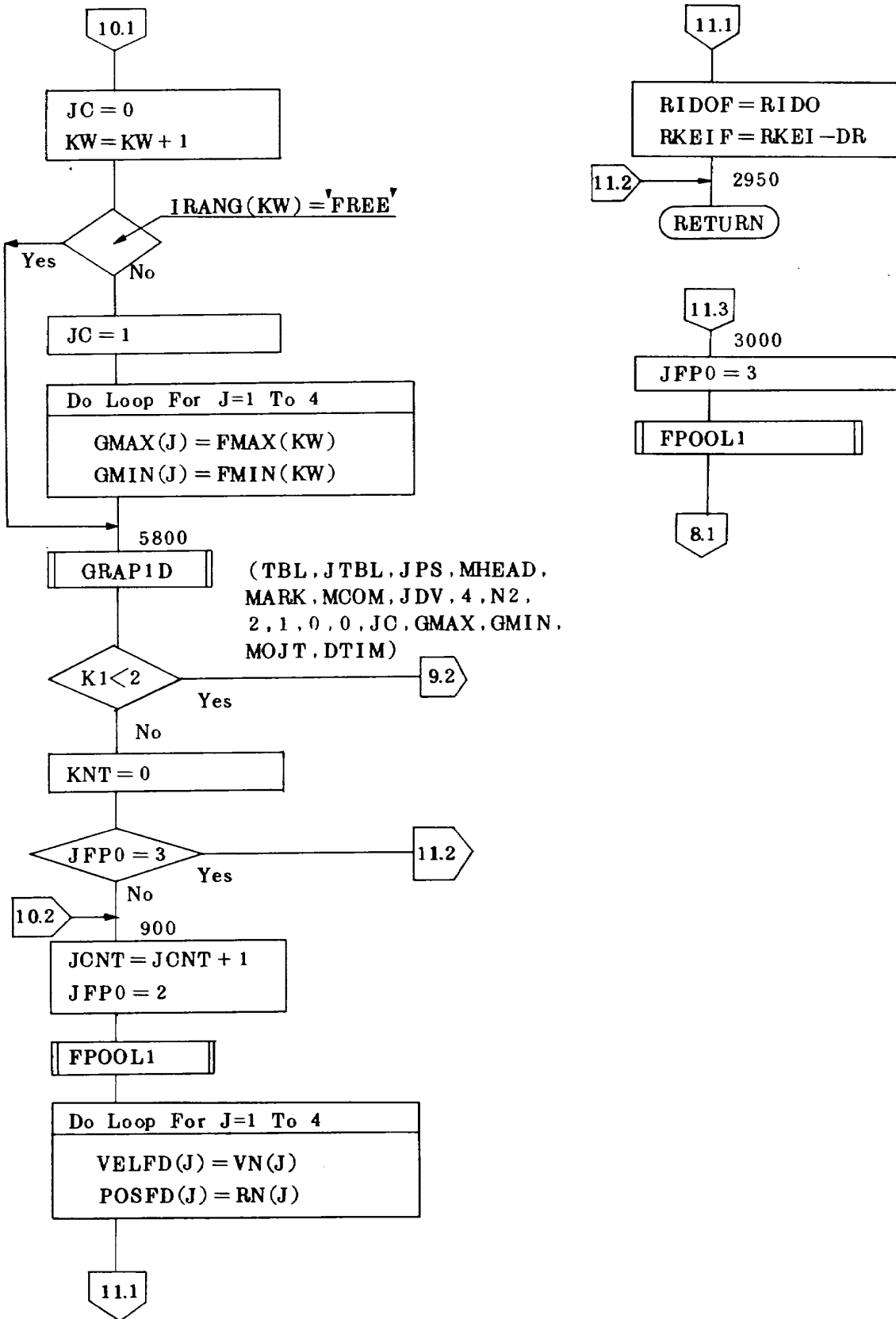


図 9c プログラム詳細フローチャート(4)
(サブルーチン FLITRA)









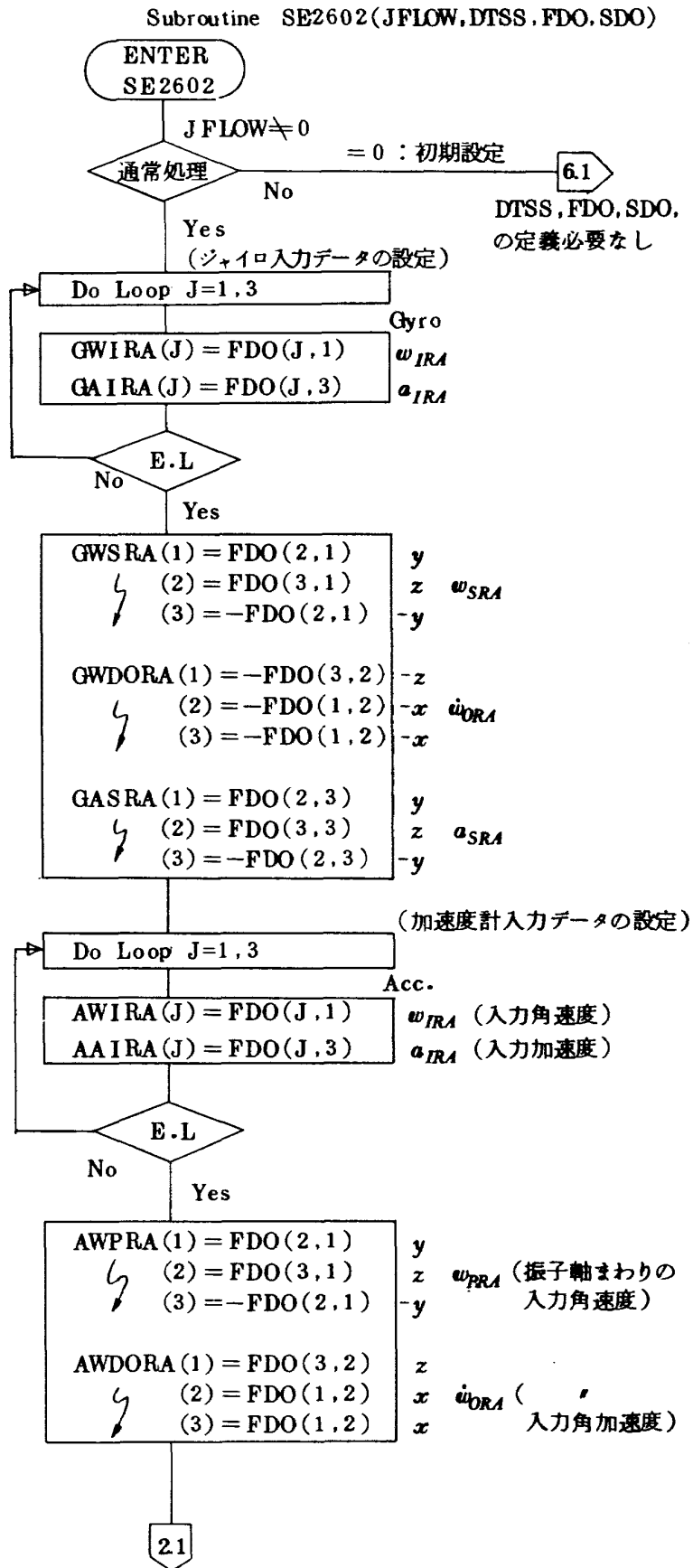


図 9d プログラム詳細フローチャート(1)
(サブルーチン SE2602)

ジャイロ処理ルーチン

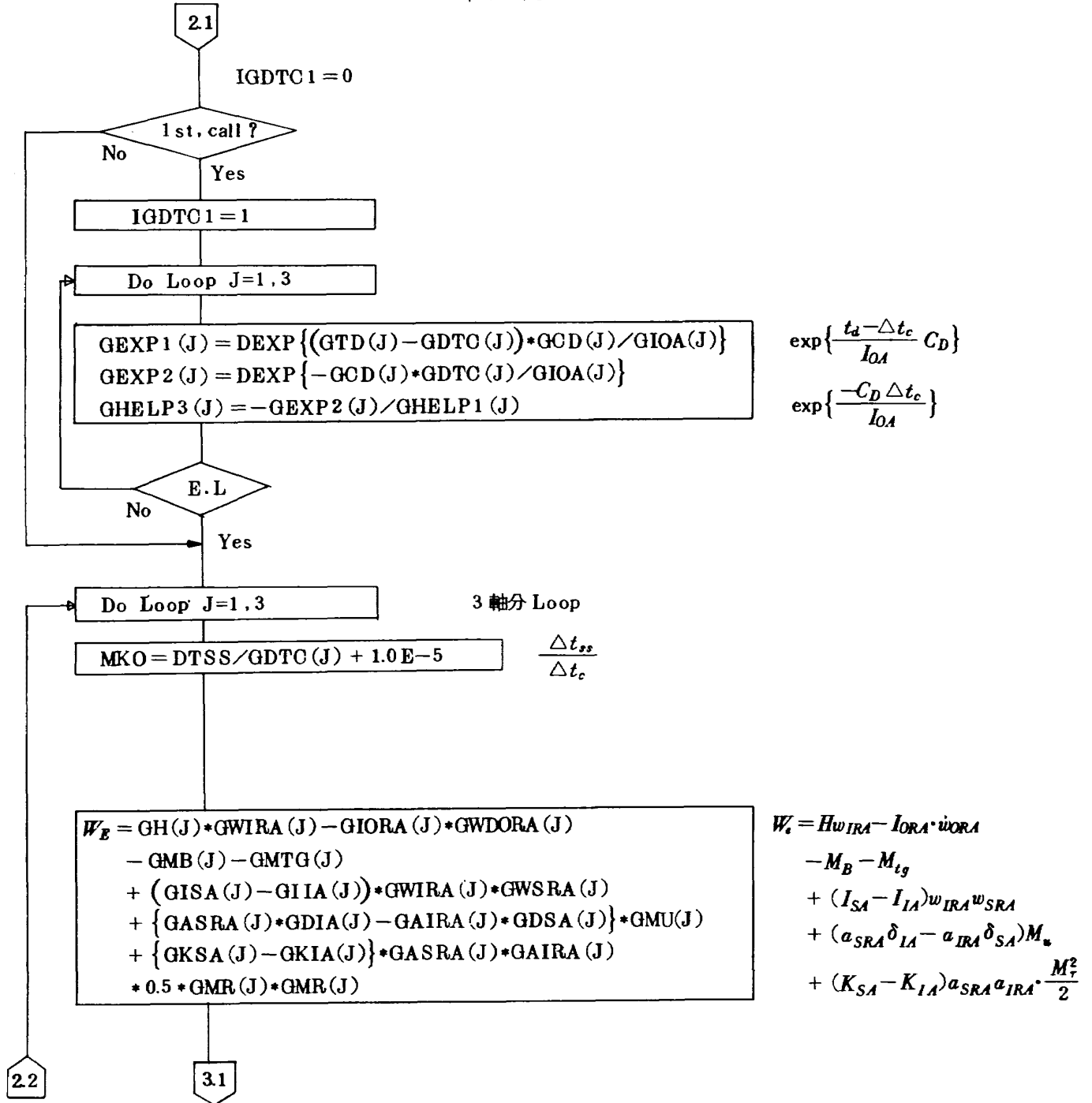


図 9d プログラム詳細フローチャート(2)
(サブルーチン SE2602)

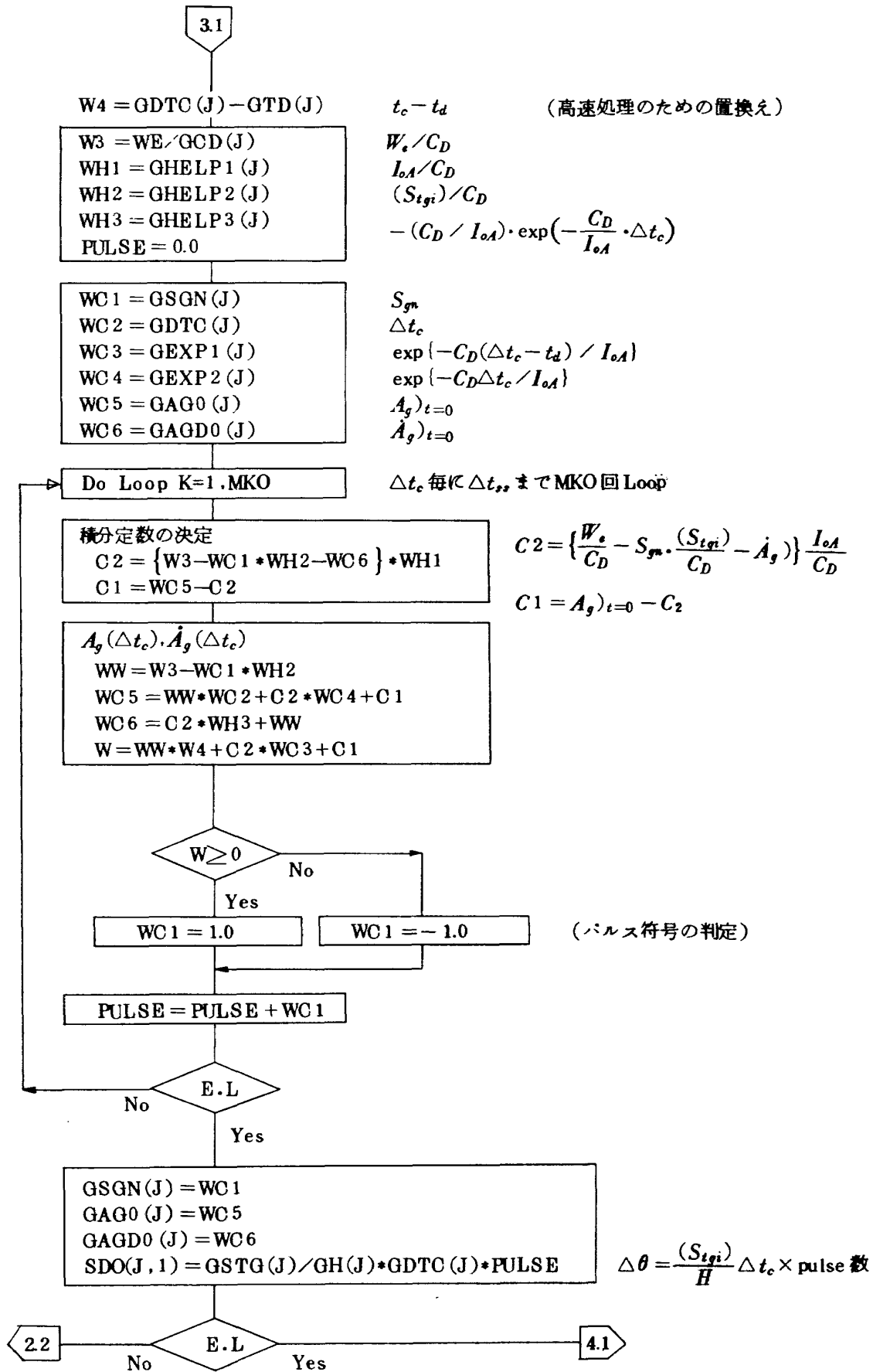


図 9d プログラム詳細フローチャート(3)
(サブルーチン SE2602)

加速度計処理ルーチン

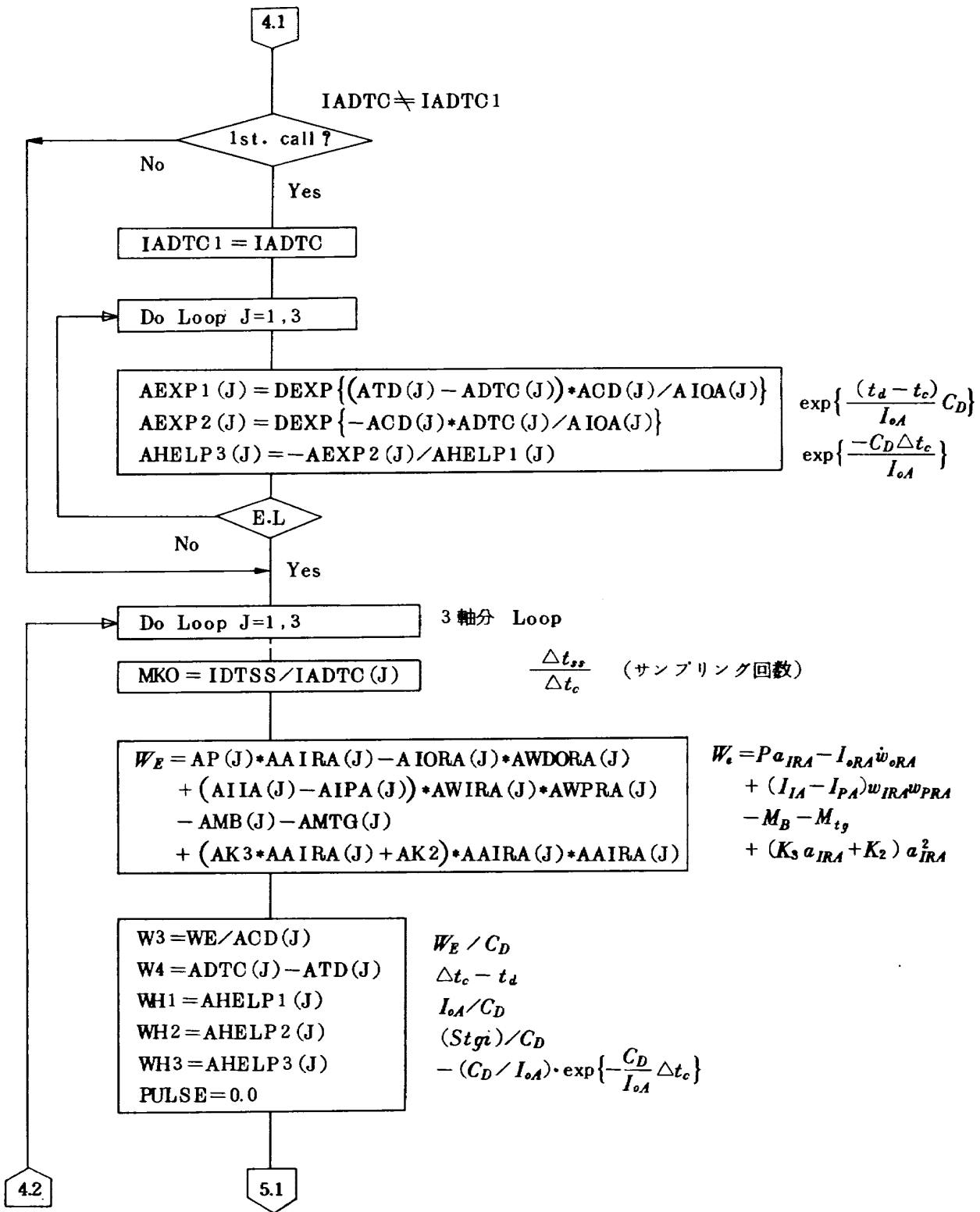


図 9d プログラム詳細フローチャート(4)
(サブルーチン SE2602)

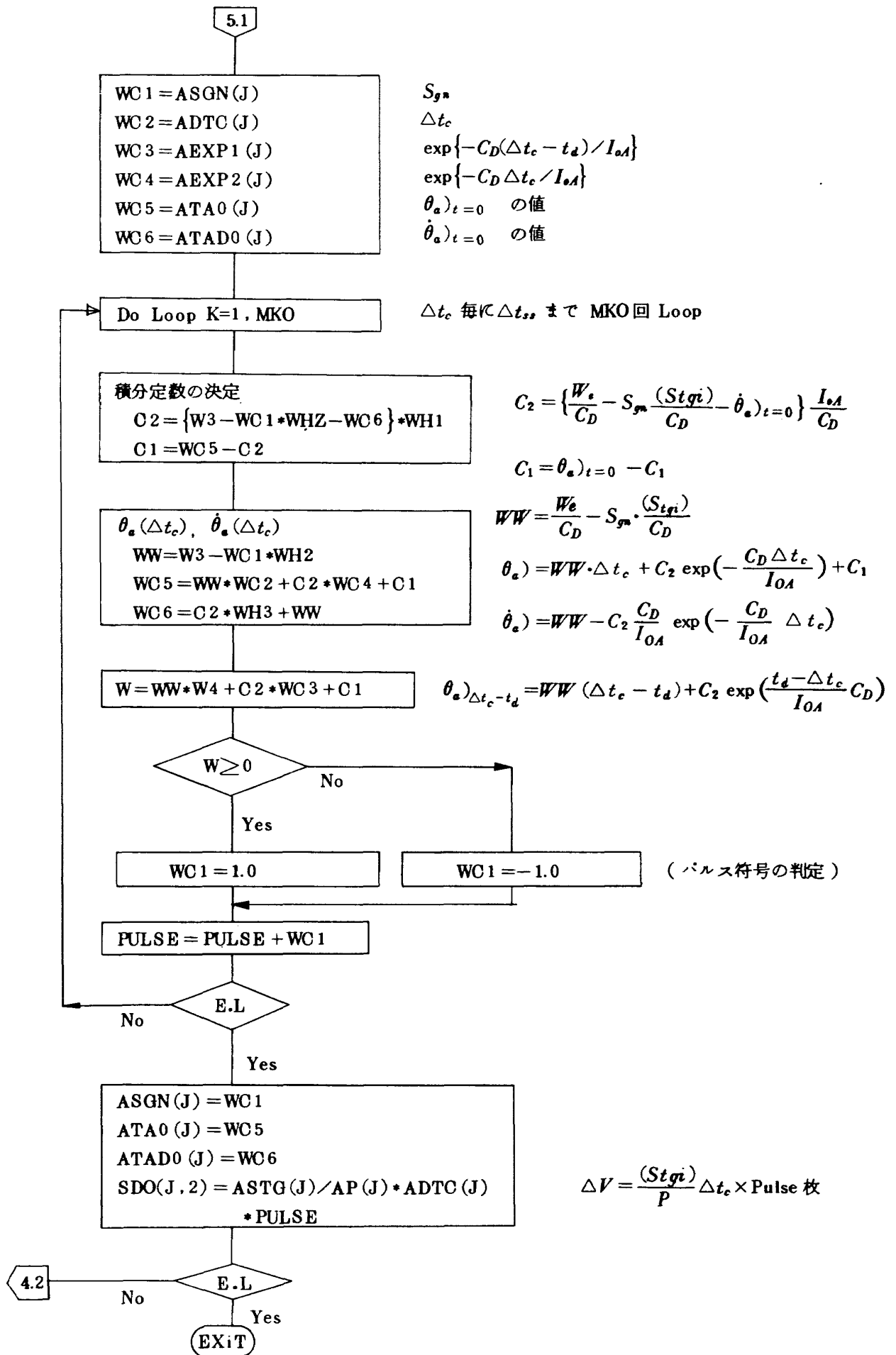


図 9d プログラム詳細フローチャート (5)
(サブルーチン SE2602)

6.1 初期設定 Phase

DEFINITION OF SENSOR CONSTANT VALUES

GIOA	/	2.00000D+02	2.00000D+02	2.00000D+02/
GIORA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GISA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GIIA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GCD	/	2.90000D+05	2.90000D+05	2.90000D+05/
GH	/	1.00000D+05	1.00000D+05	1.00000D+05/
GMB	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GMTG	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GMU	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GDSA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GDIA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GMR	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GKIA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GKSA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GTD	/	2.00000D-05	2.00000D-05	2.00000D-05/
GSTG	/	6.98100D+03	6.98100D+03	6.98100D+03/
GZONE	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AIOA	/	7.06000D+00	7.06000D+00	7.06000D+00/
AIORA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AIPA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AIIA	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
ACD	/	2.15000D+06	2.15000D+06	2.15000D+06/
AP	/	2.06000D+00	2.06000D+00	2.06000D+00/
AMB	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AMTG	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AK2	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
AK3	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
ATD	/	2.00000D-05	2.00000D-05	2.00000D-05/
ASTG	/	2.54800D+04	2.54800D+04	2.54800D+04/
AZONE	/	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00/
GDTC	/	2.50000D-04	2.50000D-04	2.50000D-04/
ADTC	/	2.50000D-04	2.50000D-04	-2.50000D-04/

$K_{IA} \leftarrow 1/K_{IA}$
 $K_{SA} \leftarrow 1/K_{SA}$

IGDTC1 = 0
 IADTC1 = 0

Do Loop For. J=1 to 3
 GHELP1(J) = GIOA(J)/GCD(J)
 AHELP1(J) = AIOA(J)/ACD(J)
 GHELP2(J) = GSTG(J)/GCD(J)
 GHELP3(J) = ASTG(J)/ACD(J)
 GSGN(J) = 0.0 ASGN(J) = 0.0
 GAG0(J) = 0.0 ATA0(J) = 0.0
 GAGD0(J) = 0.0 ATAD0(J) = 0.0

I_{sa}/C_D
 $(St_{gi})/C_D$
 $(S_{gn})_0$
 $(A_g)_0, (\theta_a)_0$
 $(\dot{A}_g)_0, (\dot{\theta}_a)_0$

Sensor 定数等
 Check list 作成

EXIT

図 9d プログラム詳細フローチャート(6)
 (サブルーチン SE2602)

SENSOR 取付角誤差附加
SUBROUTINE SE1605(FDO)

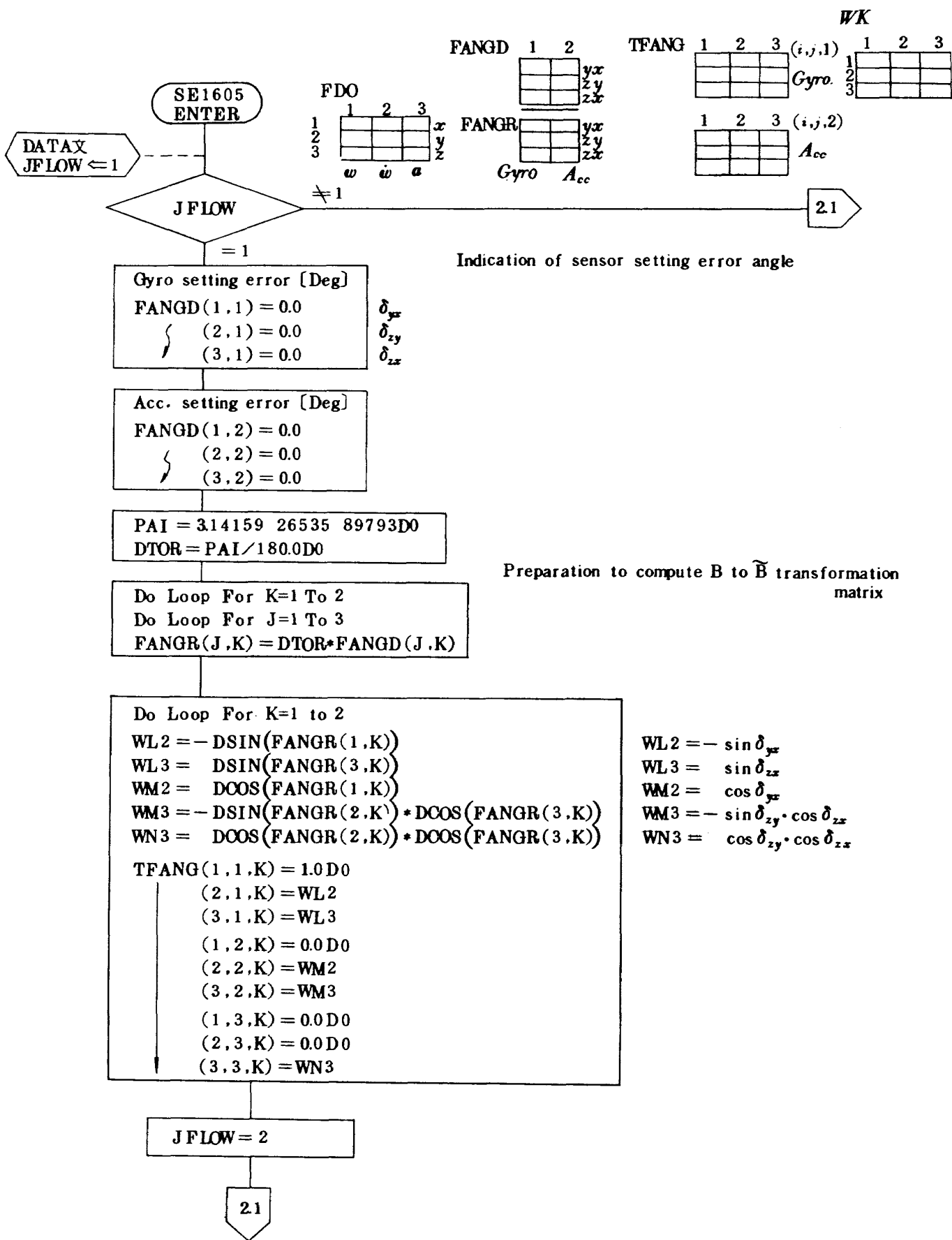


図 9d プログラム詳細フローチャート (7)
(サブルーチン SE1605)

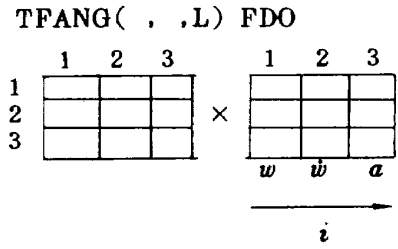
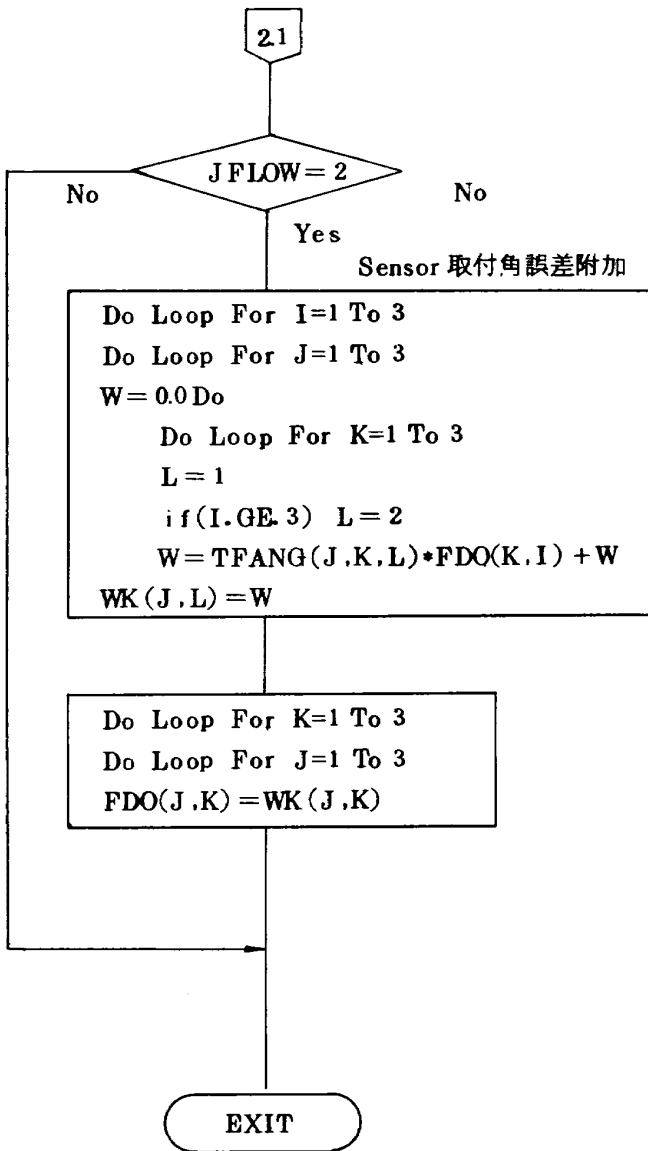


図 9d プログラム詳細フローチャート(8)
(サブルーチン SE1605)

表2. センサ関連データ
(a) センサパラメータ

Sensor 常数 tablo area Subroutine 内, Data 文にて定義

1. Gyro

	1	2	3	
<i>GIOA</i>				<i>IOA</i>
<i>GIORA</i>				<i>IORA</i>
<i>GISA</i>				<i>ISA</i>
<i>GIIA</i>				<i>IIA</i>
	1	2	3	
<i>GCD</i>				<i>C_D</i>
<i>GH</i>				<i>H</i>
<i>GMB</i>				<i>M_B</i>
<i>GMTG</i>				<i>M_{tg}</i>
<i>GMU</i>				<i>M_u</i>
<i>GDSA</i>				<i>δ_{SA}</i>
<i>GDIA</i>				<i>δ_{IA}</i>
<i>GMR</i>				<i>M_r</i>
<i>GKIA</i>				<i>K_{IA}</i>
<i>GKSA</i>				<i>K_{SA}</i>
<i>GTD</i>				<i>t_d</i>
<i>GSTG</i>				<i>S_{tg}</i>
<i>GZONE</i>			 未使用 (3 値制御用)
	(R)	(P)	(Y)	

2. 加速度計

	1	2	3	
<i>AIOA</i>				<i>IOA</i>
<i>AIORA</i>				<i>IORA</i>
<i>AIPA</i>				<i>IPA</i>
<i>AIIA</i>				<i>IIA</i>
	1	2	3	
<i>ACD</i>				<i>C_D</i>
<i>AP</i>				<i>P</i>
<i>AMB</i>				<i>M_B</i>
<i>AMTG</i>				<i>M_{tg}</i>
<i>AK2</i>				<i>K₂</i>
<i>AK3</i>				<i>K₃</i>
<i>ATD</i>				<i>t_d</i>
<i>ASTG</i>				<i>S_{tg}</i>
<i>AZONE</i>			 未使用 (3 値制御用)
	(x)	(y)	(z)	

3.

<i>GDTC</i>	<input type="text"/>	Sec	} Δt_c
<i>ADTC</i>	<input type="text"/>	Sec	

表 2. センサ関連データ
(b) 入力データ

Gyro 入力 data

	1	2	3	
<i>GWIRA</i> ○	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	ω_{IRA}
<i>GWORA</i>				ω_{ORA}
<i>GW SRA</i> ○	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>-y</i>	ω_{SRA}

	1	2	3	
<i>GWDIRA</i>				$\dot{\omega}_{IRA}$
<i>GW DORA</i> ○	<i>-z</i>	<i>-x</i>	<i>-x</i>	$\dot{\omega}_{ORA}$
<i>GWDSRA</i>				$\dot{\omega}_{SRA}$

	1	2	3	
<i>G A I R A</i> ○	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	a_{IRA}
<i>GAORA</i>				a_{ORA}
<i>G A S R A</i> ○	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>-y</i>	a_{SRA}
	(<i>x</i>)	(<i>y</i>)	(<i>z</i>)	

加速度計入力 data

	1	2	3	
<i>AWIRA</i> ○	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	ω_{IRA}
<i>AWORA</i>				ω_{ORA}
<i>AWPRA</i> ○	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>-y</i>	ω_{PRA}

	1	2	3	
<i>AWDIRA</i>				$\dot{\omega}_{IRA}$
<i>AW DORA</i> ○	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	$\dot{\omega}_{ORA}$
<i>AWDPRA</i>				$\dot{\omega}_{PRA}$

	1	2	3	
<i>AAIRA</i> ○	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	a_{IRA}
<i>AAORA</i>				a_{ORA}
<i>AAPRA</i>				a_{PRA}

表 3 グラフ出力項目

グラフページ	グラフ出力項目
1	ジャイロ出力理論値と誤差のそれぞれの <i>x</i> 成分
2	" <i>y</i> 成分
3	" <i>z</i> 成分
4	" 絶対値
5	加速度計出力の理論値と誤差のそれぞれの <i>x</i> 成分
6	" <i>y</i> 成分
7	" <i>z</i> 成分
8	" 絶対値
9	ジャイロ出力の誤差の <i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i> 成分と絶対値
10	加速度計 " "

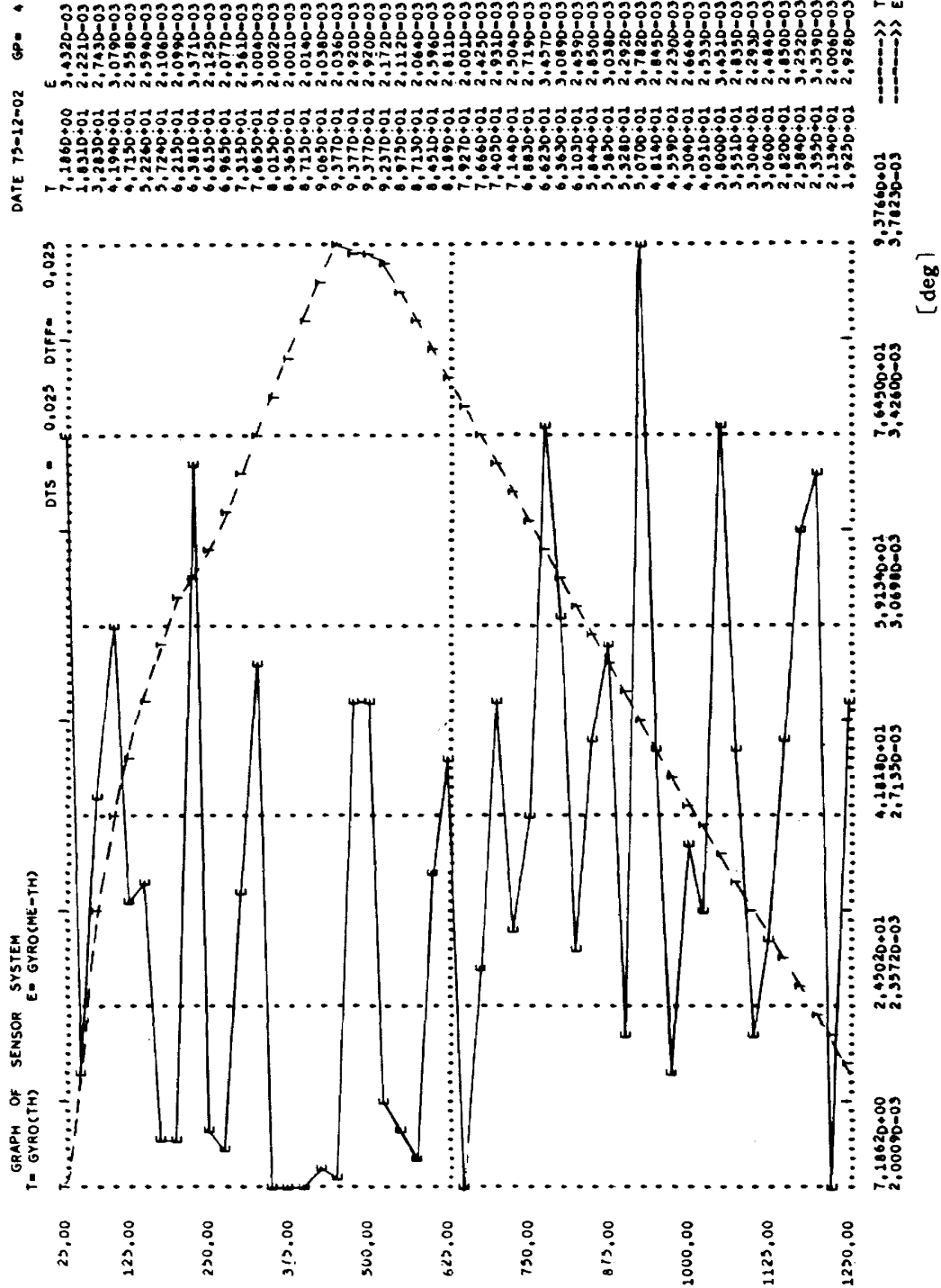


図 10 グラフ出力例 (b)

5. あとがき

このSSEP (Sensor System Evaluation Program) の前段階として、センサ単体の特性評価用プログラムを作成した。これはSSEPにおけるサブルーチンSE 2602の基本部分に入出力ルーチン及び図形処理ルーチンを付加したもので、約550ステップの大きさである。特定入力に対するセンサ単体としての応等等を調べるには、当所計算センタのジョブクラスのうち処理レベルの高いSHRTではしるため効率的に使用できる。

センサ数学モデルの解析段階は新田、森が中心に、プログラム作成、検証段階は大坪、森、小口が中心になって進めた。プログラムが非常に短期間で完成したのは、実際の作業にあたった大興ファコム・データ・センタ株式会社・谷宗行氏、海老沢正広氏および大興電子通信株式会社の山本富嘉氏、七田正博氏の御努力に負うものである。深く感謝する仕第である。なおセンサの各種パラメータ等のデータは計測部機器研究室、鈴木孝雄主任研究官および新宮博公技官より提供して頂いたものを使用している。

参 考 文 献

- 1) 大月正男, 鈴木孝雄, 円居繁治; アナログトルク平衡方式による浮動振子型加速度計の研究, 航技研報告, NAL TR-230, Jan, 1971
- 2) 森英彦, 新田慶治, 大坪孔治; ストラップダウン方式を用いた慣性誘導システム - 航法計算法の評価 -, 航技研報告, NAL TR-416, July, 1975
- 3) 大月正男, 新宮博公, 田畑浄治, 鈴木孝雄, 円居繁治; 浮動型1自由度積分ジャイロの不等弾性誤差, 航技研報告, NAL TR-188, Jan, 1970
- 4) 村田正秋; Kalman-Bucy フィルターによる誘導誤差の推定, 航技研報告, NAL TR-302, Oct, 1972
- 5) 大月正男, 新宮博公, 鈴木孝雄; ストラップダウン方式の慣性機器誤差によって生ずる飛しょう径路誤差の一考察, 航技研資料, NAL TM-225, May, 1972
- 6) Charles Stark Draper Laboratory, M. I.T.; Strap-down System Performance Optimization Test Evaluation (SPOT), 1973

正誤表 TM-310

頁, 列, 行	誤	正
2頁 左上15行目	ジャイロダイナミス	ジャイロダイナミクス
12頁 図9a 5行目	誘動指令角	誘導指令角

TM 310 既刊資料

TM-300	自動着陸用電気サーボ系の非線形シミュレーションモデルについて	1976年4月	永安正彦, 堀川勇壮
TM-301	燃料蒸発管に関する研究 (V) —高圧形箱形燃焼器の特性—	1976年5月	田丸卓, 鈴木邦男, 相模滋, 桜沢義男, 山田秀志
TM-302	40° 後退翼の前・後縁切り込みに関する低速風洞実験	1976年6月	滝沢直人, 岡田典秋, 宮本義人
TM-303	自由分子流における DAS の空力特性	1976年7月	恩地 瑛, 津田尚一
TM-304	人工衛星の姿勢制御研究用3軸テーブル装置および実験例	1976年7月	村上力, 狼嘉彰, 岡本修, 中島厚, 木田隆
TM-305	マイクロ計算機による1軸模擬衛星の姿勢制御	1976年7月	岡本修, 木田隆
TM-306	航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究 (V) —箱形燃焼器の内部ガス測定結果—	1976年8月	鈴木邦男, 齋藤隆, 石井浅五郎, 山田秀志
TM-307	QA 機のフレア制御シミュレーション実験	1976年8月	渡辺 颯, 堀川勇壮, 石川貢司
*TM-308	ファンジェットエンジン FJR 710/10 静止部剛性試験第1報—圧縮機, 燃焼器, タービン等の静止部—	1976年9月	池田為治, 小河昭記, 松末勝利, 宮地敏雄
*TM-309	ファンジェットエンジン FJR 710/10 静止部剛性試験第2報—ファン静止部—	1976年9月	池田為治, 小河昭紀, 松末勝利, 宮地敏雄

* は配布先限定版

航空宇宙技術研究所資料310号

昭和51年9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 東京プレス 東京都板橋区桜川 2-27-12
