

UDC 531.36:  
629.7.05:  
629.76:  
681.3.06

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-510

ステーブル・プラットフォーム動作評価プログラム  
とシミュレーション結果について

新田慶治・大坪孔治・小口美津夫

1977 年 8 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 既 刊 報 告

TR-500	高温タービン試験設備の予熱燃焼器 Pre-Combustor of the High Temperature Turbine Test Facility	1977年 4 月	坂田公夫, 鈴木邦男, 高原北雄, 能瀬弘幸, 吉田豊明, 渡辺実, 西村英明, 井上重雄, 三村富嗣雄, 臼井 弘
TR-501	亜音速および遷音速における二次元振動翼面上の非定常圧力分布の測定 Measurements of Unsteady Pressure Distributions on an Oscillating Two-Dimensional Airfoil in Subsonic and Transonic Flow	1977年 6 月	柳沢三憲, 菊地一雄
TR-502	円筒シェルの梁状曲げ振動について Beam-type Vibrations of Short Thin Cylindrical Shells	1977年 6 月	小松敬治, 戸田 勸
TR-503T	Solutions for Compressible Separated Boundary Layers Including Supersonic Interaction.	Jun. 1977	Nobuhiro KAWAI
TR-503	超音速粘性・非粘性干渉を含む圧縮性剝離境界層の解法 Solutions for Compressible Separated Boundary Layers Including Supersonic Interaction	1977年 8 月	河合伸垣
TR-504	金属壁面上の液体の蒸発と壁面温度 (I) A Study on the Evaporation of a Liquid Mass on a Metal Wall and Metal Wall Temperature (I)	1977年 7 月	相波哲朗, 松末勝利, 橋本良作
TR-505	イオンプレーティング金銀膜の摩擦摩耗特性に関する研究 Study on Friction and Wear Performance of Ion-Plated Gold and Silver Films	1977年 7 月	宮川行雄, 西村 充, 野坂正隆, 宮脇雄三
TR-506	騒音を受ける薄板の応答 Response of a thin Plate Structure to High Intensity Noise	1977年 7 月	佐野政明, 藤森義典
TR-507	超低高度人工衛星 DAS の軌道に関する初期解析 Preliminary Trajectory Analysis for the Lowest-Flying Earth Satellite, DAS	1977年 7 月	大坪孔治, 五代富文, 長洲秀夫
TR-508	酸素・水素燃焼生成物の非平衡ノズル流 Nonequilibrium Nozzle Flow of O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> Combustion Products	1977年 8 月	松崎利一, 平林則明
TR-509	フィラメント・ワインディング・パイプの強度および曲げ疲れ強度 Static and Flexural Fatigue Strength of Filament-Wound Pipe	1977年 8 月	野口義男, 古田敏康

## TR-510 正 誤 表

	誤	正
p. 125 左側, 図56	Vehicle Motion ( $\omega_{B1}$ ), Feed back $\omega_1$	削 除
p. 125 右側上, 図57	Vehicle $\omega_{B2}$ , Feed back $\omega_2$	削 除
p. 125 右側下, 図58	Vehicle Motion $\omega_{B3}$ , Feed back $\omega_3$	削 除
p. 126 左側下, 図59	S.O.B. (Bum Out)	S.O.B. (Burn Out)

# ステーブル・プラットフォーム動作評価プログラム とシミュレーション結果について\*

新田 慶治\*\* 大坪 孔治\*\* 小口 美津夫\*\*

## Stable Platform Evaluation Program and Stimulation Results

By Keiji NITTA, Koji OTSUBO and Mitsuo OGUCHI

The stable platform behavior evaluation program was developed during a special study regarding the Inertial Guidance System.

Gyro and accelerometer mathematical models, 4-gimbal cluster mathematical models, gimbal drive servomotor mathematical models and lead and lag phase network mathematical models were formulated, with platform system synthesis conducted to determine the numerical value of platform servo-parameters related to stability and torque stiffness.

The platform behavior Evolution program was then derived in conjunction with the formulated mathematical models mentioned above and the predetermine numerical value of the servo-parameters.

Computer test runs of the program for the ETS-1 mission trajectory showed the program to be fully applicable with high accuracy to platform behavior performance simulation, and to be very useful in synthesizing platform servosystem parameters prior to development of new hardware.

In the near future, this program will be used as a part of the guidance system accuracy evaluation program utilized to clarify the difference between the strapdown system and the platform system.

### 1 はじめに

慣性センサシステムには、ストラップダウン方式のIMU (Inertial Measurement Unit) とプラットフォーム方式の2種類があり、ストラップダウン方式のIMUについては、既にTM-310で報告した。

両方式には、それぞれ得失があるが、今後多様化する宇宙における研究開発実験を行なう場合に誘導システムとしていずれの方式を選択すべきかが問題となろう。したがって現時点で両方式の相互比較を充分行なっておくことが重要なことと考えられる。

方式の比較を行なうためには、ストラップダウン方式の場合と同様に、手始めにプラットフォーム方式のIMU単体動作評価プログラムを開発しておくことが必要となるが、現在のところ、国内ではプラットフォームの個々のジンバル

制御ループ解析プログラムが作られ使用されているのみで、プラットフォーム単体としての動作評価が出来、かつプラットフォーム方式慣性誘導システム総合評価プログラムの一部として使えるようなものは見当たらない。そこでプラットフォーム単体の動作評価にも誘導システム総合性能評価にも使えるようなステーブル・プラットフォーム動作評価プログラムを製作し、若干のシミュレーションテストを行なったのでその結果について報告する。

### 記号

$(X_O, Y_O, Z_O)$  : アウタ・ピッチ・ジンバル座標系。

$(X_r, Y_r, Z_r)$  : ロール・ジンバル座標系。

$(X_p, Y_p, Z_p)$  : インナ・ピッチ・ジンバル座標系。

$(X_y, Y_y, Z_y)$  : クラスタ・ジンバル座標系。

$(X_B, Y_B, Z_B)$  : 機体軸座標系。

$A_y$  : クラスタ・ジンバル回転角

\* 昭和52年7月8日受付

\*\* 宇宙研究グループ

$A_p$	: インナ・ピッチ・ジンバル回転角	$\omega_{iB}$	: 慣性空間における機体軸角速度
$A_r$	: ロール・ジンバル回転角	$\omega_{yiB} = \omega_y$	: 機体の慣性空間に対する角速度をクラスタ座標系で表示した量
$A_O$	: アウタ・ピッチ・ジンバル回転角	$\omega_{B1}$	: ロール成分
$T_{BO}$	: アウタ・ピッチ・ジンバル座標系から機体軸座標系への変換行列	$\omega_{B2}$	: ピッチ成分
$T_{or}$	: ロール・ジンバル座標系からアウタ・ピッチ・ジンバル座標系への変換行列	$\omega_{B3}$	: ヨー成分
$T_{rp}$	: インナ・ピッチ・ジンバル座標系からロール・ジンバル座標系への変換行列	$Y$	: 1 巡伝達関数またはサーボモータ出力トルク
$T_{py}$	: クラスタ (ヨー)・ジンバル座標系からインナ・ピッチ・ジンバル座標系への変換行列	$J$	: プラットホームの各ジンバル軸まわりの慣性モーメント
$T_{yB}$	: 機体座標系からクラスタ・ジンバル座標系への変換行列	$M_{fx}$	: ジンバルのマスアンバランス等による外乱トルク
$T_{pr} = T_{rp}^{-1}$		$C_{f1} = \omega_1, C_{f2} = \omega_2, \omega_5, \omega_6$	: 位相進み回路定数
$T_{ro} = T_{or}^{-1}$		$C_{f3} = \omega_3, C_{f4} = \omega_4, \omega_7, \omega_8$	: 位相遅れ回路定数
$T_{OB} = T_{BO}^{-1}$		$D$	: 各ターボモータへの入力
$T_{By} = T_{yB}^{-1}$		$E$	: 各ジャイロ出力量を各ジンバル座標系で表示した量
$\omega_y$	: クラスタ・ジンバル座標系からみた角速度。	$K, K_O$	: 増幅器の増幅度
$\omega_p$	: インナ・ピッチ・ジンバル座標系からみた角速度	$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}, C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}$	: サーボモータ特性定数
$\omega_r$	: ロール・ジンバル座標系からみた角速度	$C_2 = C_{s2}/C_{s1}$ 又は $C_{o2}/C_{o1}$	
$\omega_o$	: アウタ・ピッチ・ジンバル座標系からみた角速度	$C_3 = C_{s3}/C_{s1}$ 又は $C_{o3}/C_{o1}$	
$\omega_B$	: 機体座標系からみた角速度	$Y$	: サーボモータ出力
	: サーボモータ角速度をクラスタ・ジンバル座標系での角速度に変換する行列	$M_d$	: マスアンバランス等の外乱トルク
	: ジャイロ検出量をサーボモータ入力に変換する行列	$\mu$	: ジャイロ・トルクフィードバック・ゲイン
$\omega_{fiA}$	: サーボモータ駆動によるクラスタ・ジンバル座標系の回転角速度	$\cdot, \dots$	: 時間微分
$I_{OA}$	: ジャイロ・ジンバルの出力軸まわりの慣性モーメント	$S$	: ラプラス演算子 ( $= d/dt$ )
$C_D$	: ジャイロ・フロート・オイルのダンピング係数		
$H$	: ジャイロ・ロータの運動量		
$I_{SA}$	: ジャイロ・ジンバルのスピン軸まわりの慣性モーメント		
$I_{IA}$	: ジャイロ・ジンバルの入力軸まわりの慣性モーメント		
$M_B$	: ジャイロ出力軸に加わるバイアストルク		
$M_{un}$	: ジャイロ出力軸に加わるアンバランスマストルク		
$M_c$	: ジャイロ出力軸に加わるコンプライアンストルク		
$\theta$	: ジャイロ出口 (ジャイロ・ジンバル出力軸まわりの回転角)		

## 2 プラットホームの構成

通常のプラットホームには 3 ジンバル方式のものと 4 ジンバル方式のものがあるが、3 ジンバルの場合には 1 軸が  $90^\circ$  以上回転するとジンバルロック現象が生ずるので使用々途が非常に限定される。一方、4 ジンバルの場合には、2 軸が  $90^\circ$  以上回転してもジンバルロックがさけられると云う利点を持っているため、広く航空機の慣性航法装置として使用されている。

航空機の場合には、図 1 に示すように、加速度計およびジャイロが搭載されているクラスタのジンバルがヨー・ジンバルとなっており、順次外側に向って、インナ・ロール・ジンバル、ピッチ・ジンバル、アウタ・ロール・ジンバルとなっている。航空機がロール軸およびヨー軸まわりに  $90^\circ$  以上回転しても、慣性航法系としては、何の問題も生じないが、ピッチ軸まわりに  $90^\circ$  回転するとヨー軸とロール軸が一致し、ロール、ヨーの分離が一時的に出来なくなる現象が生ずる。これがいわゆるジンバルフリップと云う現象である。このようなジンバルフリップが生ずると

クラスタ・ジンバルによって保持しようとする慣性空間がくずれるため、次第に航法計算に影響を与える姿勢誤差が増大して行くことになる。商用航空機の場合には、戦闘機のような宙返り運動を行なうことはないので、図1のようなジンバル構成で充分と云える。

一方、ロケットの場合には垂直打上げから軌道投入までに $90^\circ$ 以上のピッチダウンを行なうので、航空機のように

なジンバル構成では、必ずジンバルフリップをとまうことになるので望ましくない。

したがって、ロケットの慣性誘導に用いるブラットホームのジンバル構成は、ピッチ軸まわりの運動に対しジンバルフリップの生じないものが望ましい。

考えられる構成としては、図2、図3、図4に示すようなものが上げられるが<sup>3, 6)</sup>、ブラックアロー・ロケット

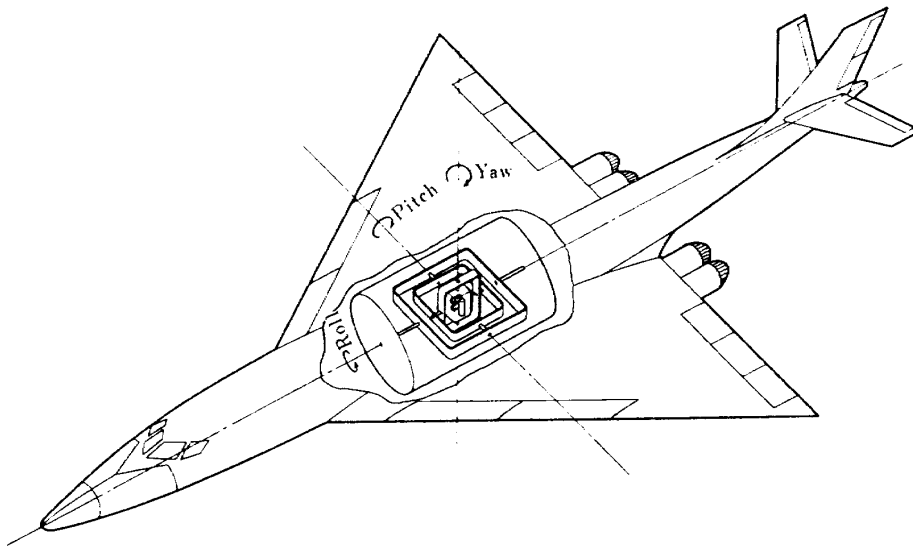


図 1 航空機用ジンバル構成

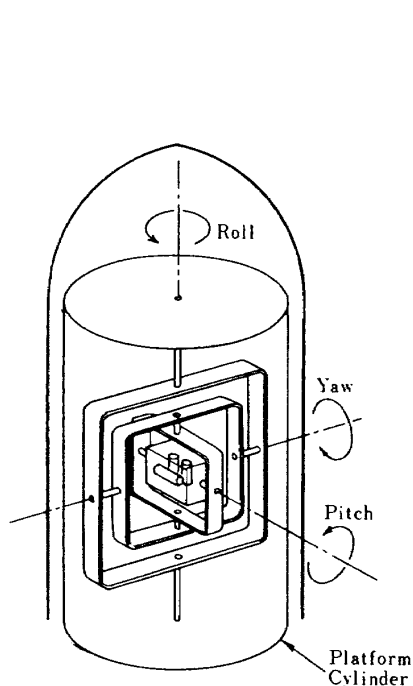


図 2 ロケット用ジンバル構成その 1

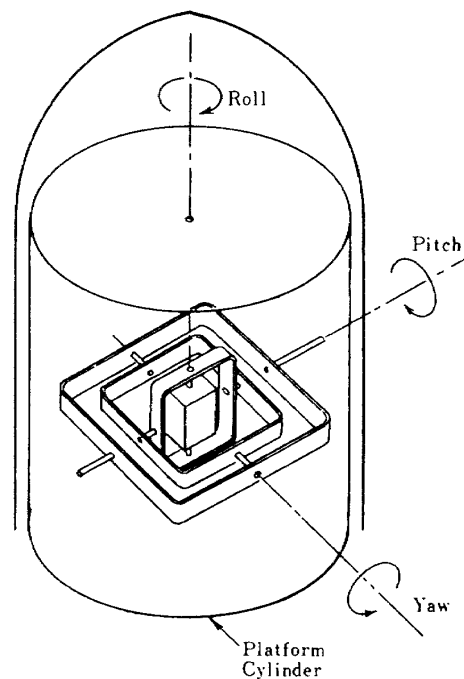


図 3 ロケット用ジンバル構成その 2

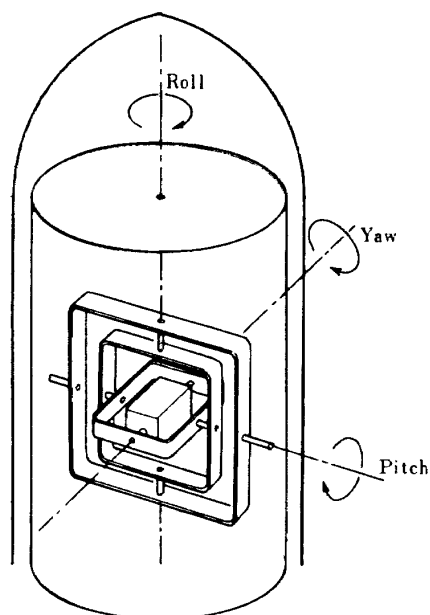


図 4 ロケット用ジンバル構成その3

やアリアン・ロケットに使用される英フェランティ社のものは図2のような構成となっており、パーシングミサイルやスペースシャトルに使用される米ケッホット社のもの(KT-70)は図4のような構成となっている。

本報告では、図4に示すようなジンバル構成のプラットフォームの動作評価が行なえるプログラムについて述べるが、他のジンバル構成のものに変更することはそれほど困難なことではない。

### 3 プラットホーム座標系と機体座標系

プラットフォームのクラスタ・ジンバル座標系( $X_y, Y_y, Z_y$ )と機体軸座標系( $X_B, Y_B, Z_B$ )の関係を図5に示す。

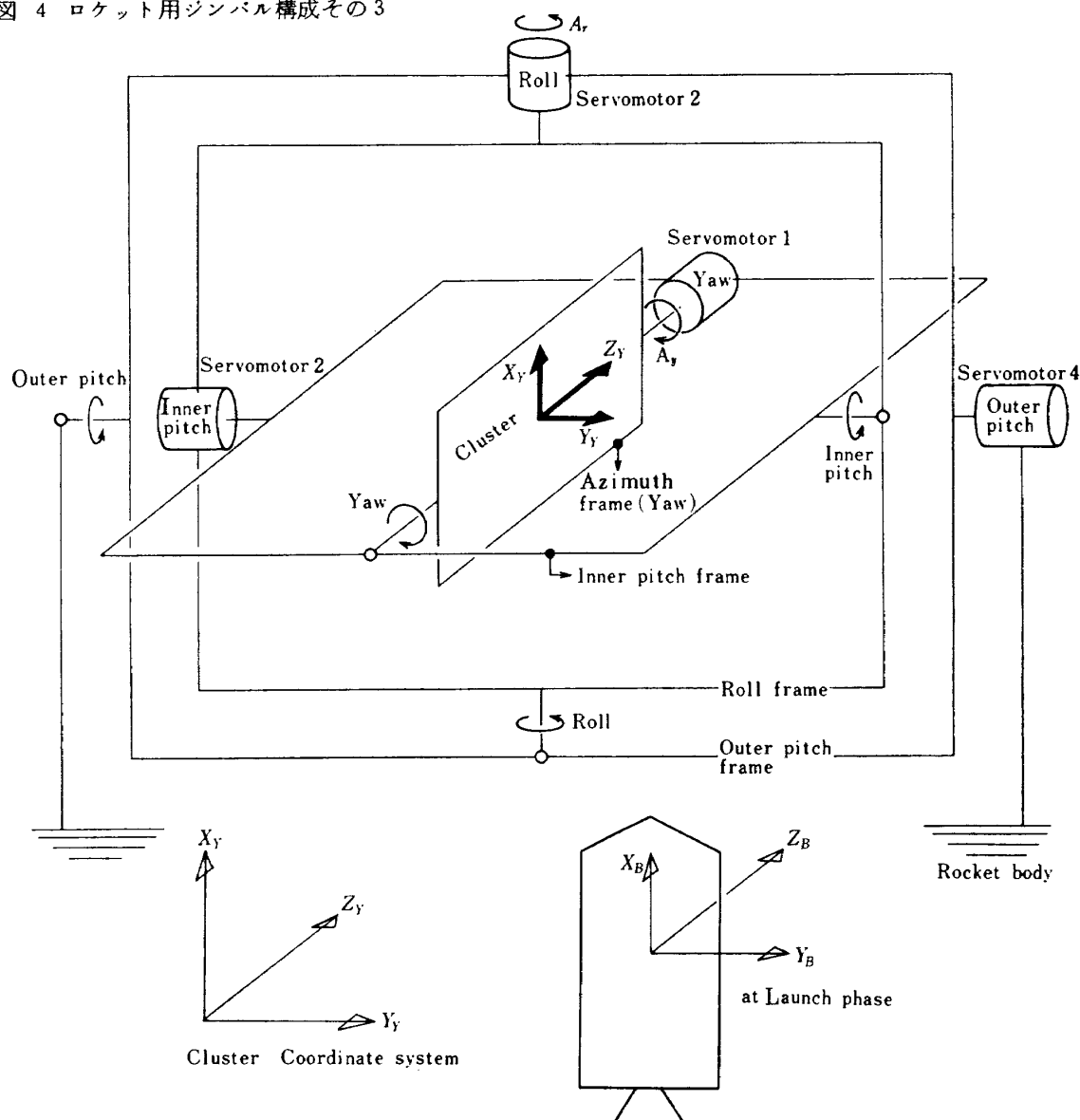


図 5 クラスタ座標系と機体座標系

両座標系は打上げ瞬間にはほぼ一致しているが、ロケットが、上昇、回転を行なうにつれ、機体軸座標系は $Y_B$ 軸まわりに回転し始める。ブラットホームジンバルとモータが剛に結合されているとすると、ロケットに搭載されているブラットホームも次第に回転し始めるので、ブラットホームのピッチ・ジンバルを逆回転させ、打上げ時の座標系に保たせるような制御が必要となって来る。したがって $(X_y, Y_y, Z_y)$ 軸まわりの回転を検出するようにジャイロをクラスタ・ジンバルに取付けておけば、各ジャイロの出力を用いて、各ジンバル軸に取付けられたサーボモータを駆動し、常に慣性空間にクラスタ・ジンバル座標系を固定することが出来る。この場合、ブラットホームの各ジンバル座標系は以下のようにして求められる。

今アウト・ピッチ・ジンバルがモータによって角度 $A_0$ だけ回転したとするとアウト・ピッチ・ジンバル座標系 $(X_0, Y_0, Z_0)$ と機体軸座標系 $(X_B, Y_B, Z_B)$ 間の座標変換行列 $T_{B_0}$ は図6を参照すれば

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A_0 & 0 & -\sin A_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_0 & 0 & \cos A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = T_{B_0} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。同様にして、ロール・ジンバルがモータによって角度 $A_r$ だけ回転したとすれば、ロール・ジンバル座標系 $(X_r, Y_r, Z_r)$ とアウト・ピッチ・ジンバル座標系 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 間の座標変換行列 $T_{or}$ は

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_r & \sin A_r \\ 0 & -\sin A_r & \cos A_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = T_{or} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} \quad (2)$$

インナ・ピッチ・ジンバルがインナ・ピッチ・ジンバルモータによって $A_p$ だけ回転したとすれば、インナ・ピッチ・ジンバル座標系 $(X_p, Y_p, Z_p)$ 間の座標変換行列 $T_{rp}$ は

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A_p & 0 & -\sin A_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_p & 0 & \cos A_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = T_{rp} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

クラスタ（ヨーまたはアジマス）・ジンバルがヨー・ジンバルモータによって $A_y$ だけ回転したとすれば、クラスタ・ジンバル座標系 $(X_y, Y_y, Z_y)$ とインナ・ピッチ・ジンバル座標系 $(X_p, Y_p, Z_p)$ 間の座標変換行列 $T_{py}$ は

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A_y & \sin A_y & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_y \\ Y_y \\ Z_y \end{pmatrix} = T_{py} \begin{pmatrix} X_y \\ Y_y \\ Z_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

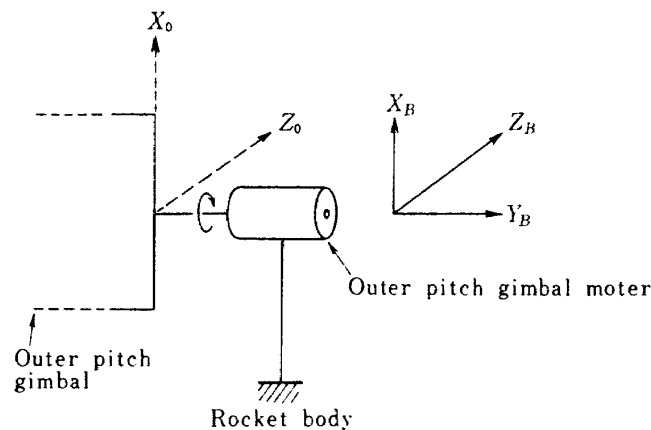


図6 アウトピッチジンバル座標系と機体座標系

となる。したがって機体軸座標系とクラスタ・ジンバル座標系間の変換行列 $T_{yB}$ は

$$\begin{aligned} T_{yB} &= T_{By}^{-1} = (T_{Bo} \cdot T_{er} \cdot T_{rp} \cdot T_{py})^{-1} \\ &= T_{yp} \cdot T_{pr} \cdot T_{ro} \cdot T_{oB} \\ &= \begin{pmatrix} \cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ \sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A_p & 0 & \sin A_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_p & 0 & \cos A_p \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_r & -\sin A_r \\ 0 & \sin A_r & \cos A_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A_o & 0 & \sin A_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_o & 0 & \cos A_o \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

#### 4 ジャイロ検出量とジンバル制御量

クラスタに搭載されたジャイロはクラスタ・ジンバル座標系 $(X_y, Y_y, Z_y)$ からみた飛しょう体の回転運動を慣性量として検出し、その量にもとづいて、クラスタ・ジンバル座標系が慣性空間に保持されるように各ジンバルの回転量を制御することが必要である。したがって、クラスタ・ジンバル座標系での回転角速度を各ジンバル座標系の回転角速度に変換する変換行列を求めておく。

今クラスタ・ジンバル座標系での回転角速度を $\omega_y$ 、インナ・ピッチ・ジンバル座標系で表現した回転角速度を $\omega_p$ 、ロール・ジンバル座標系で表現した回転角速度を $\omega_r$ 、アウト・ピッチ・ジンバル座標系で表現した回転角速度を $\omega_o$ 、機体軸座標系で表現した回転角速度を $\omega_B$ とすれば、(1)~(4)式の関係から次のような数式が成立する。

$$\omega_o = \begin{pmatrix} \cos A_o & 0 & \sin A_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_o & 0 & \cos A_o \end{pmatrix} \omega_B \quad (6)$$

$$\omega_r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_r & -\sin A_r \\ 0 & \sin A_r & \cos A_r \end{pmatrix} \omega_o \quad (7)$$

$$\omega_p = \begin{pmatrix} \cos A_p & 0 & \sin A_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_p & 0 & \cos A_p \end{pmatrix} \omega_r \quad (8)$$

$$\omega_y = \begin{pmatrix} \cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ \sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \omega_p \quad (9)$$

そこで $\omega_y$ がクラスタ上のジャイロによって検出された場合 $\omega_y, \omega_p, \omega_r, \omega_o$ のすべての成分を制御することによってクラスタを制御するのではなく、図5に示すように4つのサーボモータのみによって制御しなければならないと云う物理的制約がプラットフォーム・ハードウェアにかせられる。

すなわち、図5からわかるように、サーボモータ1では $\omega_y$ の $z$ 成分( $\omega_{y3}$ と書く)、サーボモータ2では $\omega_p$ の $Y$ 成分( $\omega_{p2}$ と書く)、サーボモータ3では $\omega_r$ の $X$ 成分( $\omega_{r1}$ と書く)、およびサーボモータ4では $\omega_o$ の $Y$ 成分( $\omega_{o2}$ と書く)のみが制御可能な量である。これらの制御可能な量と $\omega_y$ との関係を求めると、(9)式から

$$\left. \begin{aligned} \omega_{y1} &= \cos A_y \cdot \omega_{p1} - \sin A_y \cdot \omega_{p2} \\ \omega_{y2} &= \sin A_y \cdot \omega_{p1} + \cos A_y \cdot \omega_{p2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし $w$ の2番目のサフィックス1, 2, 3は $X, Y, Z$ 成分を示す。

(8)式から

$$\omega_{p1} = \cos A_p \cdot \omega_{r1} + \sin A_p \cdot \omega_{r3} \quad (11)$$

(11)式を(10)式に代入して

$$\begin{aligned} \omega_{y1} &= \cos A_y (\cos A_p \cdot \omega_{r1} + \sin A_p \cdot \omega_{r3}) - \sin A_y \cdot \omega_{p2} \\ \omega_{y2} &= \sin A_y (\sin A_y \cdot \omega_{r3} + \cos A_p \cdot \omega_{r1}) + \cos A_y \cdot \omega_{p2} \end{aligned}$$

となるから

$$\begin{pmatrix} \omega_{y1} \\ \omega_{y2} \\ \omega_{y3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A_y \cdot \cos A_p & -\sin A_y & 0 \\ \sin A_y \cdot \cos A_p & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{r1} \\ \omega_{p2} \\ \omega_{y3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos A_y \cdot \sin A_p \cdot \omega_{r3} \\ \sin A_y \cdot \sin A_p \cdot \omega_{r3} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

を得る。

(12)式の右辺第2項はロール・ジンバルの $Z$ 方向の回転成分であるがロール・ジンバル・モータ(サーボモータ3)は $Z$ 軸まわりに回転することはないので零と置ける。

したがってジャイロ検出量成分と各サーボモータの制御量との変換は

$$\omega_y = F \begin{pmatrix} \omega_{r1} \\ \omega_{p2} \\ \omega_{y3} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$F = \begin{pmatrix} \cos A_y \cdot \cos A_p & -\sin A_y & 0 \\ \sin A_y \cdot \cos A_p & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



のように書ける。

逆にジャイロ検出量から各サーボモータの制御量を求めるためには を求めればよいことになる。

$$F^{-1} = \begin{pmatrix} \cos A_y \cdot \sec A_p & \sin A_y \cdot \sec A_p & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

## 5 機体の角運動とクラスタ・ジンバルの角運動

ブラットホームではクラスタ上に取付けられたジャイロは機体の角速度とクラスタ自身の角速度の総和を検出することになるのでクラスタの姿勢を慣性空間に保持するためには、サーボモータ1～4により常にジャイロ出力が零になるような制御を行なえばよい。

今機体の慣性空間に対する角速度を $\omega_y$ ，サーボモータ駆動によるクラスタ・ジンバル回転角速度を $\omega_{fiA}$ とすれば、ジャイロ検出量は

$\omega_y + \omega_{fiA}$  で表わされる。

$\omega_y$  は、機体に取り付けられた姿勢制御用トルク等によって発生するものであるから、シミュレーションにおいては、外部から機体の飛しょう軌道計算等によって与えられるものである。

また  $\omega_{fiA}$  は、各ジンバルの角運動によって決まるので、(1)～(4)式から次のように与えられる。

$$\omega_{fiA} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{A}_y \end{pmatrix} + T_{yp} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{A}_p \\ 0 \end{pmatrix} + T_{yr} \begin{pmatrix} \dot{A}_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + T_{yo} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{A}_o \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ただし  $\dot{A}_y, \dot{A}_p, \dot{A}_r, \dot{A}_o$  はそれぞれサーボモータ1, 2, 3, 4 の回転角速度である。

## 6 使用ジャイロとクラスタへの取付け

5.で述べたようにクラスタ上のジャイロは機体とクラスタの角運動の総和を検出する。通常、ブラットホームに使われているジャイロは、1軸の積分ジャイロであるが近年になって、このような1軸積分ジャイロにかわる。高精度の2軸ジャイロが開発されるにおよんで、2軸ジャイロを用いたものが実用化されるにいたっている<sup>4, 5)</sup>。

ケアホット社のKT-70と呼ばれるブラットホームもこのような2軸のドライジャイロを2ヶ使用したもので、

現在、ロッキード社L1011機に使用されており、また、スペースシャトルにも使用される予定である。

ただこの種のジャイロは誤差トルクの解析が通常の1軸積分ジャイロに較べて相当複雑であること、また入力角を広角化することは材料の点から考え、相当に困難なものと考えられるので、ここではブラットホーム搭載用ジャイロとして、1軸積分ジャイロを用いるものとして評価プログラムを製作することとした。

1軸積分ジャイロの動作原理については、航技研報告TR-416に詳しく述べているので、ここでは省略するが、ストラップダウンIMUの場合に考慮したように、ロール軸（機軸）に沿っての推力加速度に対する誤差要因を出来るだけ小さく保つように、クラスタにジャイロを取付ける必要がある。そのような理由からストラップダウン用のものと同様に図7のように取付けることとした。

したがってロール、ピッチ、ヨージャイロの出力を $g_x, g_y, g_z$  とすれば

$$\begin{aligned} I_{oA} \begin{pmatrix} \ddot{g}_x \\ \ddot{g}_y \\ \ddot{g}_z \end{pmatrix} + C_D \begin{pmatrix} \dot{g}_x \\ \dot{g}_y \\ \dot{g}_z \end{pmatrix} &= H \begin{pmatrix} \omega_{yx} + \omega_{fiAx} \\ \omega_{yy} + \omega_{fiAy} \\ \omega_{yz} + \omega_{fiAz} \end{pmatrix} \\ &+ I_{oA} \begin{pmatrix} \omega_{yz} + \omega_{fiAz} \\ \omega_{yx} + \omega_{fiAx} \\ \omega_{yx} + \omega_{fiAx} \end{pmatrix} \\ &+ (I_{SA} - I_{IA}) \begin{pmatrix} (\omega_{yx} + \omega_{fiAx})(\omega_{yy} + \omega_{fiAy}) \\ (\omega_{yy} + \omega_{fiAy})(\omega_{yz} + \omega_{fiAz}) \\ -(\omega_{yz} + \omega_{fiAz})(\omega_{yy} + \omega_{fiAy}) \end{pmatrix} \\ &+ M_B + M_{un} + M_c \end{aligned} \quad (16)$$

と書くことが出来る。

(16)式の右辺第2項以下はジャイロの誤差要因となるトルクを示すものであるから、ジャイロの誤差項を無視してジャイロの伝達関数を考えれば

$$\frac{H}{I_{oA} S^2 + C_D S}$$

となる。通常のブラットホームでは、ジャイロのトルクリバランスを行わず、ポジションモードで使用されるのが一般的であるが、もともとブラットホームのジンバル軸駆動は、レートモード（角速度制御）で行なうものであり、またジャイロの周波数帯域を広げることを考えた場合、アナログ・トルクフィードバックを附加したレートモードでのジャイロを使用しても原理的には一向さしつかえない。ただしこの場合には、ジャイロ伝達関数が不完全積分項を

もつことになるので、オフセットの生じないようトルクスティフネスを充分大きくとった系の調整が必要となろう。したがって、ここでは図8のようなフィードバックゲイン $\mu$ をもつものを使用するものとした。(ポジションモードでは $\mu=0$ とすればよい。)したがって $x$ (ロール)ジャイロ,  $y$ (ピッチ)ジャイロおよび $z$ (ヨー)ジャイロの出力は次のように表わされる。

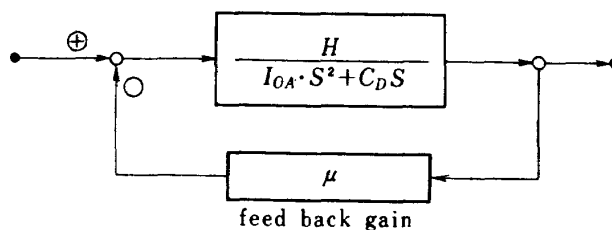
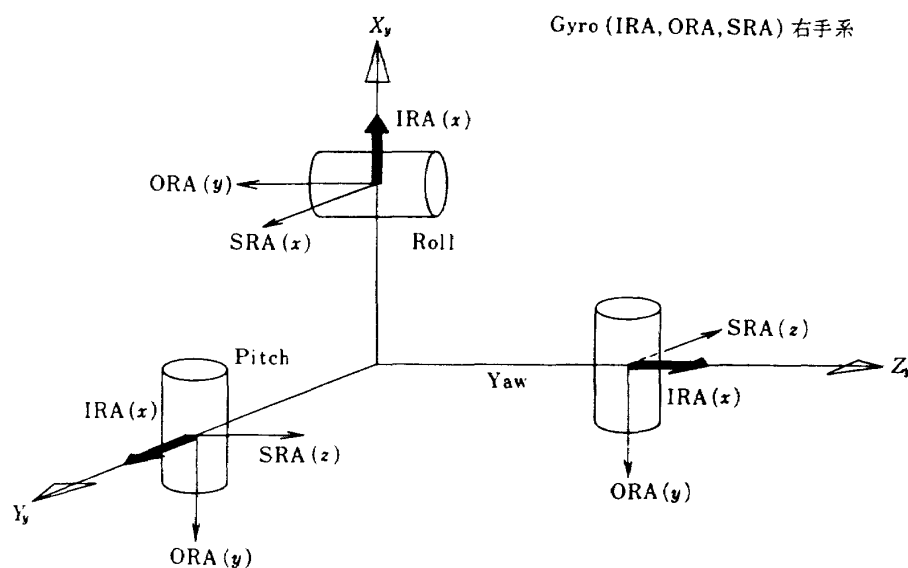


図 8 ジャイロ・モデル

## Gyroのclusterへの取付



## 加速度計のClusterへの取付

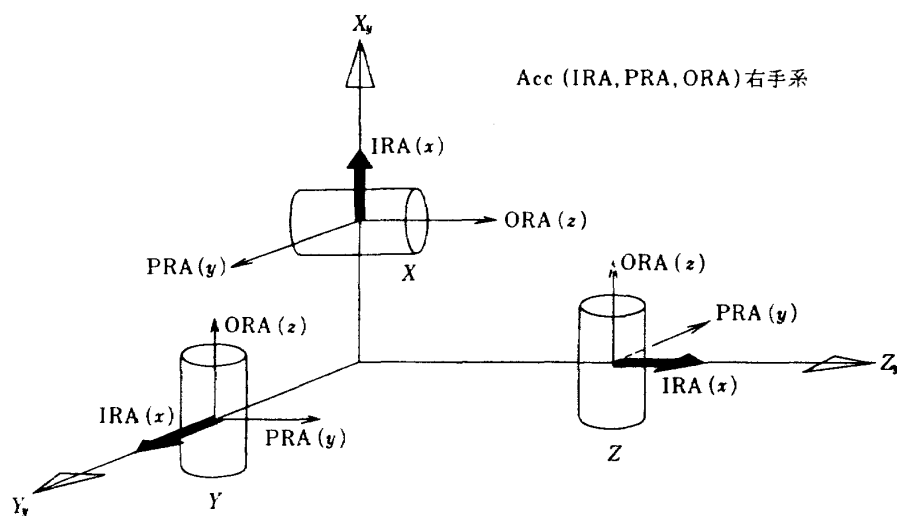


図 7 センサ取付け

$$\begin{aligned}
 & I_{OA} \begin{pmatrix} \ddot{g}_x \\ \ddot{g}_y \\ \ddot{g}_z \end{pmatrix} + C_D \begin{pmatrix} \dot{g}_x \\ \dot{g}_y \\ \dot{g}_z \end{pmatrix} + \mu H \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \omega_{yx} + \omega_{fiAx} \\ \omega_{yy} + \omega_{fiAy} \\ \omega_{yz} + \omega_{fiAz} \end{pmatrix} + \\
 & I_{OA} \begin{pmatrix} \dot{\omega}_{yx} + \dot{\omega}_{fiAx} \\ \dot{\omega}_{yy} + \dot{\omega}_{fiAy} \\ \dot{\omega}_{yz} + \dot{\omega}_{fiAz} \end{pmatrix} + (I_{SA} - I_{IA}) \begin{pmatrix} (\omega_{yx} + \omega_{fiAx})(\omega_{yy} + \omega_{fiAy}) \\ (\omega_{yy} + \omega_{fiAy})(\omega_{yz} + \omega_{fiAz}) \\ -(\omega_{yz} + \omega_{fiAz})(\omega_{yx} + \omega_{fiAx}) \end{pmatrix} \\
 & + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_{un} + \mathbf{M}_c \quad (17)
 \end{aligned}$$

## 7 ジンバル制御の安定性とトルクステイフネス

プラットフォームに附加しなければならない特性としては、機体軸の回転角速度にクラスタが忠実に追従し、かつ、ジンバルに加わる外乱トルクの影響が出来るだけ少ないことが要求される。すなわち、系の設計には十分な安定性とトルクステイフネスを与えるようにすることが必要である。ジャイロをポジションモードで使用する場合には、開ループ巡伝達関数の位相遅れは、少なくとも  $180^\circ$  以上になるので、ゲイン調整だけでは、系の安定化は不可能であり、位相進み回路を入れて、位相余裕をもたせることが必要となる。またジンバルをサーボモータで駆動する時には、必ずジンバルのマスアンバランス等による外乱が加わるので、ジンバル迄の一巡伝達関数を  $Y$ 、ジンバルの慣性モーメントを  $J$  とすれば、ジンバルの角速度  $\omega_{fiA}$  は

$$\omega_{fiA} = \frac{Y}{1+Y} \omega_y - \frac{1}{1+Y} \cdot \frac{M_{fx}}{SJ} \quad (18)$$

ただし、 $\omega_y$  は機体軸角速度をジンバル座標系で測った量、 $M_{fx}$  はジンバルのマスアンバランス等の外乱トルクと書けるが、(18)式の第2項が出来るだけ小さくなるように制御系を組むこと、すなわちトルクステイフネスを大きくすることが要求される。

このためには、適当な位相遅れ回路を入れることが必要となる。一般に位相進み、遅れ回路は

$$G_1(S) = \frac{C_{f2}}{C_{f1}} \cdot \frac{S + C_{f1}}{S + C_{f2}} \quad (19)$$

$$G_2(S) = \frac{S + C_{f4}}{S + C_{f3}} \quad (20)$$

で表わされるものが用いられている。

したがって、位相進みおよび遅れ回路を直列に入れたとすると

$$G_1(S)G_2(S) = \frac{C_{f2}S^2 + (C_{f1}C_{f2} + C_{f2}C_{f4})S + C_{f1}C_{f2}C_{f4}}{C_{f1}S^2 + (C_{f1}C_{f2} + C_{f1}C_{f3})S + C_{f2}C_{f1}C_{f3}} \quad (21)$$

ただし  $C_{f1} \sim C_{f4}$  は定数、と書ける。したがってジャイロの検出量を各ジンバル座標系に投影した成分  $\mathbf{E}$  が、位相進みおよび遅れ回路に入り、出力として  $\mathbf{D}$  なる量が得られたとすると

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} G_1(S)G_2(S)$$

の関係から

$$\begin{aligned}
 & \{C_{f1}S^2 + (C_{f1}C_{f2} + C_{f1}C_{f3})S + C_{f1}C_{f2}C_{f3}\} \mathbf{D} \\
 & = \{C_{f2}S^2 + (C_{f1}C_{f2} + C_{f2}C_{f3})S + C_{f1}C_{f2}C_{f3}\} \mathbf{E}
 \end{aligned}$$

となり、これを微分方程式の形に書直せば

$$\begin{aligned}
 & C_{f1}\ddot{\mathbf{D}} + (C_{f1}C_{f2} + C_{f1}C_{f3})\dot{\mathbf{D}} + C_{f1}C_{f2}C_{f3}\mathbf{D} \\
 & = C_{f2}\ddot{\mathbf{E}} + (C_{f1}C_{f2} + C_{f2}C_{f3})\dot{\mathbf{E}} + C_{f1}C_{f2}C_{f3}\mathbf{E} \quad (22)
 \end{aligned}$$

となる。ただし  $\mathbf{E}$  は

$$\mathbf{E} = \mathbf{K} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{g} \quad (23)$$

のように表わされる。ただし  $\mathbf{K}$  は増幅器のゲイン  $\mathbf{F}^{-1}$ 、 $\mathbf{g}$  はそれぞれ(14)および(17)式によって与えられる。

## 8 サーボモータとジンバル角速度

プラットフォームのクラスタ・ジンバル座標系が機体軸が回転しても常に慣性空間に固定するようにするため、各ジンバルをサーボモータで駆動するわけであるが、通常使用されるサーボモータは直流高能率の直巻きモータである。各ジンバルの慣性モーメントが異なる場合には、トルクゲインの異なるモータを用いた方が望ましいわけであるが、実際のプラットフォームでは、各ジンバルの慣性モーメントは、それほど大きな差がないので、ここでは同一の特性をもつサーボモータを使用することとした。したがってサーボモータの出力トルクを  $\mathbf{Y}$  とし、位相進み、遅れ回路の出力すなわちサーボモータの入力を  $\mathbf{D}$  とすれば、各サーボモータの特性は

$$C_{S1}\ddot{\mathbf{Y}} + C_{S2}\dot{\mathbf{Y}} = C_{S3}\mathbf{D} \quad (24)$$

で表わされる。

一方ジンバルの回転軸まわりの慣性モーメントを  $\mathbf{J}$  で表わし、各ジンバル座標系の相対角(回転角)を  $\mathbf{A}$  で表わすとすれば

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{A}} + \mathbf{R}\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{Y} + \mathbf{M}_d \quad (25)$$

が成立する。ここで  $\mathbf{R}$  はジンバル軸受によるフリクショントルク係数、 $\mathbf{M}_d$  はジンバルマスアンバランス等の外乱トルクである。

また、アウト・ピッチ・ジンバル軸駆動用サーボモータの入力  $D_0$  は増幅器のゲインを  $K_0$  , 位相進み回路を  $(\omega_6/\omega_5) \cdot \{(S+\omega_5)/(S+\omega_6)\}$  ,  $(S+\omega_8)/(S+\omega_7)$

$$D_0(S)/A_P(S) = (K_0\omega_6/\omega_5) \cdot (S+\omega_5)(S+\omega_8) / (S+\omega_6)(S+\omega_7)$$

と書けるので、微分方程式形式に直せば

$$\begin{aligned} \omega_5 \ddot{D}_0 + \omega_5(\omega_6 + \omega_7) \dot{D}_0 + \omega_5\omega_6\omega_7 D_0 \\ = K_0\omega_6 \ddot{A}_P + K_0\omega_6(\omega_5 + \omega_8) \dot{A}_P + K_0\omega_6\omega_5\omega_8 A_P \end{aligned} \quad (22')$$

のように表わされ、アウト・ピッチ・サーボモータの出力トルク  $Y$  はモータのパラメータを  $C_{01}$  ,  $C_{02}$  ,  $C_{03}$  と書けば

$$C_{01}\dot{Y} + C_{02}Y = C_{03}D_0 \quad (24')$$

で表わされ、アウト・ピッチ・ジンバルの回転角  $A_0$  は

$$J_0\ddot{A}_0 + R_0\dot{A}_0 = Y + M_d'' \quad (25')$$

で表わされる。

## 9 プラットホーム動作評価プログラム全体の構成

7までプラットホーム動作評価プログラムを構成するための個々のコンポーネントの運動方程式を示した。これらを有機的に結合すれば、プラットホーム全体の動作シミュレーションが可能となる。

結合の仕方は当然図9に示すようになるが、個々のコンポーネントの動作を解いてから順次、次のコンポーネントの入力とするような方法では、 $\omega_{fiA}$  なるフィードバック

量に時間遅れが生じ、プラットホーム全体としての応答周波数が低いものになってしまうので、各コンポーネントの運動を表わす微分方程式を並列に並べ連立微分方程式として、数値積分法により一気に解を得ることが必要となる。

このためには、(22)式の  $\ddot{E}, \dot{E}$  を求めることが必要であるが、(23)式から

$$\dot{E} = K\dot{F}^{-1}g + KF^{-1}g \quad (26)$$

$$\ddot{E} = K\ddot{F}^{-1}g + KF^{-1}\ddot{g} + 2K\dot{F}^{-1}\dot{g} \quad (27)$$

と書くことが出来るので、(17)式から  $\dot{g}, \ddot{g}$  を求め(14)式から  $\dot{F}^{-1}, \ddot{F}^{-1}$  を求めて  $\dot{E}, \ddot{E}$  を得る。

なお  $\dot{F}^{-1}, \ddot{F}^{-1}$  を求める演算については、附録Aを参照されたい。

以上(1)~(27)式にもとづきプラットホーム動作評価プログラムを製作した。このプログラムは、16ケのサブプログラムからなるが、プログラム全体の構成が理解出来るよう各サブプログラムの名前、データエリア、サブプログラムのフローチャートを記しておく。

### (1) サブプログラム名

プラットホーム動作評価プログラムに用いられているサブプログラムの名前と機能を表1に示す。

### (2) データエリアの変数および定数

各サブプログラムで使用される変数および定数のデータエリアを表2~表6に示す。

### (3) サブプログラムのフローチャート

以下表1に示した各サブプログラムのフローチャートを図10~図28に示す。

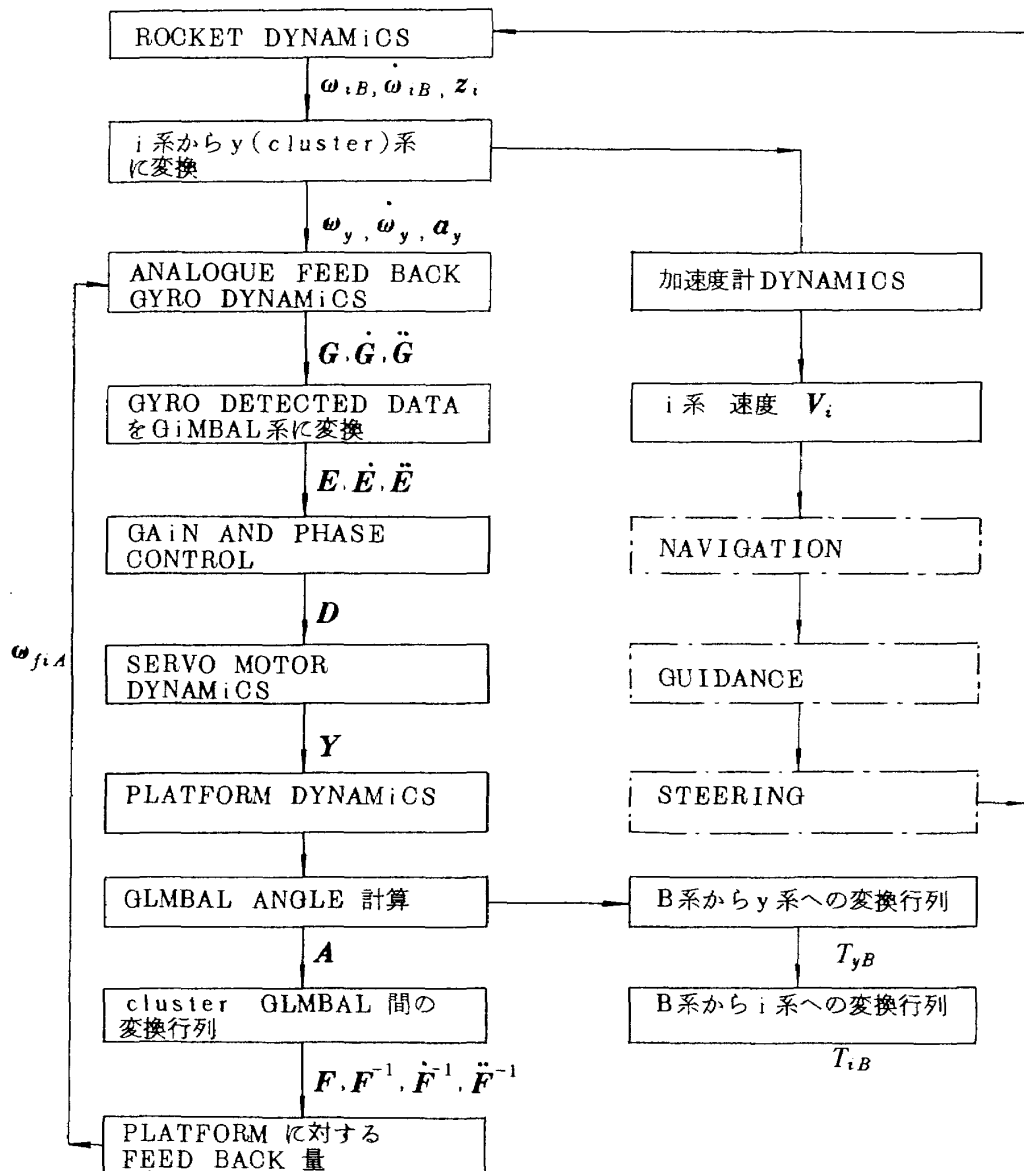


図 9 プラットホーム評価プログラムのフロー

表1 サブプログラム一覧表

サブプログラム名	機 能
(1) MAIN ROUTINE	Main routine であると同時に, RMAP <sup>*</sup> との結合用 Inter-face を有する
(2) PLAT2	Stable platform を構成する各種 routine を総合的に管理・駆動させるものである
(3) ZERO C1	共通データエリアの帰零
(4) SPRKG1	数値積分を担当する
(5) SPFUN1	数値積分を実行するのに必要な微係数計算を行うものである。各 Dynamics を微分方程式にて記述する
(6) SPFB1	Feed back 量 $\omega_{fiA}$ を計算する
(7) SPFB2	$\omega_{fiA}$ の時間微分
(8) TRANS 0	各種座標変換行列の初期値のうち, TRANS 1 によらないものを決定する
(9) TRANS 1	行列 $F$ , $F^{-1}$ , $\dot{F}^{-1}$ , $\ddot{F}^{-1}$ を計算する
(10) TRANS 3	行列 $SP T_{yP}$ , $SP T_{yT}$ , $SP T_{y0}$ , $SP T_{yB}$ 及び $SP \dot{T}_{yP}$ , $SP \dot{T}_{yT}$ , $SP \dot{T}_{y0}$ を計算する**
(11) DATAG2	疑似飛翔 Data 発生 routine
(12) ACCP1	Accelerometer Dynamics
(13) MULTY1	ベクトル演算 routine 1
2	" 2
3	" 3
4	" 4
(14) PPOOL3	中間結果, 一括管理 routine
(15) INPR1	Graph routine への Interface (解釈 routine)
(16) GRAPH3	Graph 作成 routine

注 \* Rocket Mission Program の略で, 軌道計算プログラム

\*\*  $SP T_{yP}$  は  $T_{yP}$  と同じ, 以下同様

表2 ルンゲクツタ・ギルのデータエリア

/SPRK1/ Stable Platform , Runge Kutta area 1

```
COMMON/SPRK1/MKODA,DELTA1,SPZ0(50),SPZ(50),SPF(50),Q(50)
```

- (1) MKODA = 独立 parameter 数,  $m$
- (2) DELA1 = 数値積分刻み  $\Delta t$  : sec
- (3) SPZ0 = 初期値退避領域
- (4) SPZ = 独立 parameter 値 : ( 初期値  $\rightarrow$  積分結果 ) : そのものの初期値は set する事
- (5) SPF = 微分係数値
- (6) Q = 作業用変数 ( そのものの初めでは零の事 )

MKODA

DELTA 1

[illegible]

表2 (つづき)

独立変数の配置とその意味

SPZ0 SPZ SPF Q				SPZと Equivalence 変数名	
1		1.0			time : 現時刻 (sec)
2				ZG (1) $x$	$\dot{G}$ : Gyro detected angle
3				(2) $y$	
4				(3) $z$	
5				ZDG (1) $x$	$\dot{G}$ : Gyro detected angular velocity
6				(2) $y$	
7				(3) $z$	
8				ZD (1) $r$	$D$ : Gain and phase controled angle
9				(2) $p$	
10				(3) $y$	
11				(4) $o$	
12				ZDD (1) $r$	$\dot{D}$ : Gain and phase controled angular velocity
13				(2) $p$	
14				(3) $y$	
15				(4) $o$	
16				ZY (1) $r$	$Y$ : Output torque from servo moter
17				(2) $p$	
18				(3) $y$	
19				(4) $o$	
20				ZA (1) $r$	$A$ : Gimbal angle
21				(2) $p$	
22				(3) $y$	
23				(4) $o$	
24				ZDA (1) $r$	$\dot{A}$ : Gimbal angular velocity
25				(2) $p$	
26				(3) $y$	
27				(4) $o$	
28				ZDDA (1) $r$	$\ddot{A}$ : Gimbal angular acceleration
29				(2) $p$	
30				(3) $y$	
31				(4) $o$	
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50					



表3 ジャイロパラメータのデータエリア

/GYRO1/ Gyro. parameter area 1

/GYRO2/ Gyro. parameter area 2

COMMON/GYRO1/GWIRA(3), GWORA(3), GWSRA(3), GWDIRA(3), GWDORA(3),  
GWDSRA(3), GAIRA(3), GAORA(3), GASRA(3), GWFIA(3)

	1	2	3	
GWIRA				$\omega_{iRA}$
GWORA				$\omega_{ORA}$
GWSRA				$\omega_{SRA}$
GWDIRA				$\omega_{iRA}$
GWDORA				$\omega_{ORA}$
GWDSRA				$\omega_{SRA}$
GAIRA				$\omega_{iRA}$
GAORA				$\omega_{ORA}$
GASRA				$\omega_{SRA}$
GWFIA				$\omega_{fiA}$
	Roll	Pitch	Yaw	
	X	Y	Z	

COMMON/GYRO2/GIOA(3), GISA(3), GIIA(3), GCD(3), GH(3), GMB(3),  
GMTG(3), GMU(3), GMC(3), GNU(3)

	1	2	3	
GIOA				$I_{OA}$
GISA				$I_{SA}$
GIIA				$I_{iA}$
GCD				$C_D$
GH				$H$
GMB				$M_B$
GMTG				$M_{tg}$
GMU				$M_u$
GMC				$M_c$
GNU				$\mu$
	Roll	Pitch	Yaw	

/GYRO3/ Gyro parameter area 3

COMMON/GYRO3/GWDFIA(3), UDGYR3(7)

1. GWDFIA

1	
2	
3	

$\omega_{fiA}$ : Feed back 量

2. UDGYR3

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

未定義領域

表 4 プラットホームの為のデータエリア

/PDATA1/Platform Data area 1

COMMON/PDATA1/RMC(4), RJ(4), CS1(4), CS2(4), CS3(4), CF1, CF2, CF3, CF4

(1) RMC

1		roll
2		pitch
3		yaw
4		outer pitch

 $M_c$ 

(2) RJ

1		toll
2		pitch
3		yaw
4		outer pitch

 $J$  : Moment of inertia of platform

(3) CS1

1	
2	
3	
4	

CS2

1	
2	
3	
4	

CS3

1		roll
2		pitch
3		yaw
4		outer pitch

Servo motor 用定数

(4) CF1 CF2 CF3 CF4 

Gain and phase control 用定数

表4 (つづき)

/SP1/ Stable Platform data area 1

この領域は、Main routine と PLAT routine との Inter Face 用 Data である。

COMMON/SP1/JOUT1,JOUT2,WDTF,WDTP,CLOCK,TIME,ORDB(3,3),ORDY(3,3),  
WOMB(4),SUVSP(4),DVI(4),DVL(4)(注) WDTF,WDTP はMAIN ROUTINE での名前であり、S.P. ROUTINE では  
DTF, DTP である。JOUT1 


 中間結果出力表示  
JOUT2 


 "WDTF 


 $\Delta t_f$  (sec)  
WDTP 


 $\Delta t_p$  (sec)CLOCK 


 現時刻  $\Delta t_f$  刻み sec.  
TIME 


 "  $\Delta t_p$  刻み sec.ORDB 

	1	2	3				
1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$

  
 $\omega_B$   $\dot{\omega}_B$   $a_B$   
 $i$ 系からみた $B$ の物理量を $B$ 系成分表示したるものORDY 

	1	2	3				
1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$

  
 $\omega_y$   $\dot{\omega}_y$   $a_y$   
 $i$ 系からみた $B$ の物理量を $y$ 系成分表示したるものWOMB 

1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$
4	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$M$

  
 $\omega_B$  (理論値)SUVSP 

1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$
4	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$M$

  
 $\Sigma \Delta \theta_i$   
未 定DVI 

1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$
4	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$M$

  
 $\Delta V_y$   
C.G.SDVI 

1	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$x$
2	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$y$
3	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$z$
4	<table border="1"><tr><td> </td></tr></table>		$M$

  
 $\Delta V_i$   
M.K.S

表 4 (つづき)

/SP2/ Stable Platform data area 2

COMMON/SP2/Y(4), DY(4), DUM1(4), DUM2(4), A(4), DA(4), DDA(4),  
 GDD(3,3), G(3), DG(3), DDG(3),  
 E(3), DE(3), DDE(3), D(4), DD(4), DUM3(3), FH(3)

## 1. Y

1		roll
2		pitch
3		yaw
4		outer pitch

 $Y$  : servo motor 出力 torque

## 2. DY

1		$r$
2		$p$
3		$y$
4		$o$

 $\dot{Y}$  : servo motor torque の時間変化率

## 3. DUM1

1	
2	
3	
4	

Dummy  $J$  は/PDATA1/で定義

## 4. DUM2

1	
2	
3	
4	

Dummy  $M_c$  は/PDATA1/で定義

## 5. A

1		$AR$
2		$AP$
3		$AY$
4		$AO$

Gimbal angle (理論値)

**A**

表 4 (つづき)

6. DA

1		DAR
2		DAP
3		DAY
4		DAO

**A**

Gimbal angular velocity (理論値)

7. DDA

1		DDAR
2		DDAP
3		DDAY
4		DDAO

**Ä**

Gimbal angular acceleration (理論値)

\* RJ <4> → DUM1<4>, RMC<4> → DUM2<4>, GWFIA<4> → DUM3<4> に変更して廃止

8. GDD

	1	2	3	
1				x
2				y
3				z
	<b>G</b>	<b>Ḡ</b>	<b>Ḡ</b>	

Gyro. detected data

9. G

1		x
2		y
3		z
	<b>G</b>	

Gyro. detected angle

10. DG

1		x
2		y
3		z
	<b>Ḡ</b>	

Gyro. detected angular velocity

11. DDG

1		x
2		y
3		z
	<b>Ḡ</b>	

Gyro. detected angular acceleration

表 4 (つづき)

12. E

1		$x$
2		$y$
3		$z$

 $\mathbf{E}$ 

15. D

1	
2	
3	
4	

 $\mathbf{D}$ 

13. DE

1		$x$
2		$y$
3		$z$

 $\dot{\mathbf{E}}$ 

16. DD

1	
2	
3	
4	

 $\dot{\mathbf{D}}$ 

14. DDE

1		$x$
2		$y$
3		$z$

 $\ddot{\mathbf{E}}$ 

17. DUM3

1	
2	
3	

Dummy  $\omega_{fiA}$  は /GYRO1/ で定義

/SP3/ Stable platform data area 3

COMMON/SP3/BIASW(3),UDSP3(7)

1. BIASW

1	
2	
3	

$$\int_0^t \omega_B dt$$

2. UDSP3

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

未定義領域

表5 座標変換の為のデータエリア

／TRANS6／ Stable Platform Transformation Matrix Area 6

理論値

COMMON／TRANS6／SPTYP(3,3),SPTYR(3,3),SPTYO(3,3)

$$SP\overline{T}_{YP}$$

	1	2	3
1			
2			
3			

$$T_{yp}^{theo} = \begin{bmatrix} \cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ \sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$SP\overline{T}_{YR}$$

	1	2	3
1			
2			
3			

$$T_{yr}^{theo} = T_{yp}^{theo} \cdot T_{pr}^{theo} = T_{yp}^{theo} \cdot \begin{bmatrix} \cos A_p & 0 & \sin A_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_p & 0 & \cos A_p \end{bmatrix}$$

$$SP\overline{T}_{YO}$$

	1	2	3
1			
2			
3			

$$T_{yo}^{theo} = T_{yr}^{theo} \cdot T_{ro}^{theo} = T_{yr}^{theo} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_r & -\sin A_r \\ 0 & \sin A_r & \cos A_r \end{bmatrix}$$

表 5 (つづき)

/TRANS7/ Stable Platform Transformation Matrix Area 7

理論値

COMMON/TRANS7/SPTIN(3,3),SPTIB(3,3),SPTYB(3,3),SPTYI(3,3),SPTNB(3,3)

$SP\bar{T}_{iN}$	1	2	3
1			
2			
3			

fix matrix :  $T_{iN} = (\tilde{T}_{NB})_o$  によって決定する。

$SP\bar{T}_{iB}$	1	2	3
1			
2			
3			

Vary matrix

 $\omega = {}_iB\omega_B$  を用いて,  $T_{iB} = T_{iB} Q$  を解く事により得る。

$$({T_{iB}})_o = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$SP\bar{T}_{yB}$	1	2	3
1			
2			
3			

vary matrix : theoretical  $A_r, A_p, A_y, A_o$  を用いて

$$T_{yB} = \begin{bmatrix} CA_y & -SA_y & 0 \\ SA_y & CA_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CA_p & 0 & SA_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -SA_p & 0 & CA_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & CA_r & -SA_r \\ 0 & SA_r & CA_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CA_o & 0 & SA_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -SA_o & 0 & CA_o \end{bmatrix}$$

$SP\bar{T}_{yi}$	1	2	3
1			
2			
3			

vary matrix

 $SP\bar{T}_{yi} = SP\bar{T}_{yB} \cdot SP\tilde{\bar{T}}_{iB}$  によって計算する。

$SP\bar{T}_{NB}$	1	2	3
1			
2			
3			

vary matrix

 $SP\bar{T}_{NB} = SP\bar{T}_{Ni} \cdot SP\bar{T}_{iB} = SP\tilde{\bar{T}}_{iN} \cdot SP\bar{T}_{iB}$  によって計算する。



表5 (つづき)

／TRANS8／ Stable platform transformation matrix area 8  
(observed matrix)

COMMON／TRANS8／F(3,3),H(3,3),DH(3,3),DDH(3,3),  
TYB(3,3),TIY(3,3),TIB(3,3),TNB(3,3)

F	1	2	3
1			
2			
3			

<仮定行列>

Gimbal 系から Platform 系への変換行列

H	1	2	3
1			
2			
3			

$F^{-1}$

platform 系から Gimbal 系への変換行列

DH	1	2	3
1			
2			
3			

$\dot{F}^{-1}$

DDH	1	2	3
1			
2			
3			

$\ddot{F}^{-1}$

TYB	1	2	3
1			
2			
3			

observed gimbal angle  $A_r, A_p, A_y, A_o$  を用いて

$$T_{yB} = \begin{bmatrix} CA_y & -SA_y & 0 \\ SA_y & CA_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CA_p & 0 & SA_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -SA_p & 0 & CA_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & CA_r & -SA_r \\ 0 & SA_r & CA_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CA_o & 0 & SA_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -SA_o & 0 & CA_o \end{bmatrix}$$

表 5 (つづき)

TIY

	1	2	3
1			
2			
3			

suppose  $T_{iy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

TIB

	1	2	3
1			
2			
3			

$$T_{iB}^{obs} = T_{iy}^{obs} = T_{yB}^{obs}$$

TNB

	1	2	3
1			
2			
3			

$$T_{NB}^{obs} = T_{Ni}^{theo, obs} T_{iB}^{obs} \quad \therefore T_{NB} = {}_{SP}\widetilde{T}_{iN} \cdot T_{iB} \text{ にて計算する}$$

表5 (つづき)

／TRANS9／ Stable platform transformation matrix area 9  
理論値

COMMON／TRANS9／SPTYPD(3,3),SPTYRD(3,3),  
SPTYOD(3,3),UDTRA9(23)

 $SP\dot{T}_{yp}$ 


$$\dot{T}_{yp}^{theo} = \begin{bmatrix} -\sin A_y \cdot \dot{A}_y & -\cos A_y \cdot \dot{A}_y & 0 \\ \cos A_y \cdot \dot{A}_y & -\sin A_y \cdot \dot{A}_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

 $SP\dot{T}_{yr}$ 


$$\dot{T}_{yr}^{theo} = \dot{T}_{yp}^{theo} \begin{bmatrix} \cos A_p & 0 & \sin A_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_p & 0 & \cos A_p \end{bmatrix} + T_{yp}^{theo} \begin{bmatrix} -\sin A_p \dot{A}_p & 0 & \cos A_p \dot{A}_p \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos A_p \dot{A}_p & 0 & -\sin A_p \dot{A}_p \end{bmatrix}$$

 $SP\dot{T}_{yo}$ 


$$\dot{T}_{yo}^{theo} = \dot{T}_{yr}^{theo} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_r & -\sin A_r \\ 0 & \sin A_r & \cos A_r \end{bmatrix} + T_{yr}^{theo} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin A_r \dot{A}_r & -\cos A_r \dot{A}_r \\ 0 & \cos A_r \dot{A}_r & -\sin A_r \dot{A}_r \end{bmatrix}$$

UDTRA9

1	
2	
3	
4	
⋮	
⋮	
22	
23	

未定義領域

表6 PPOOL3 routine の為のデータエリア

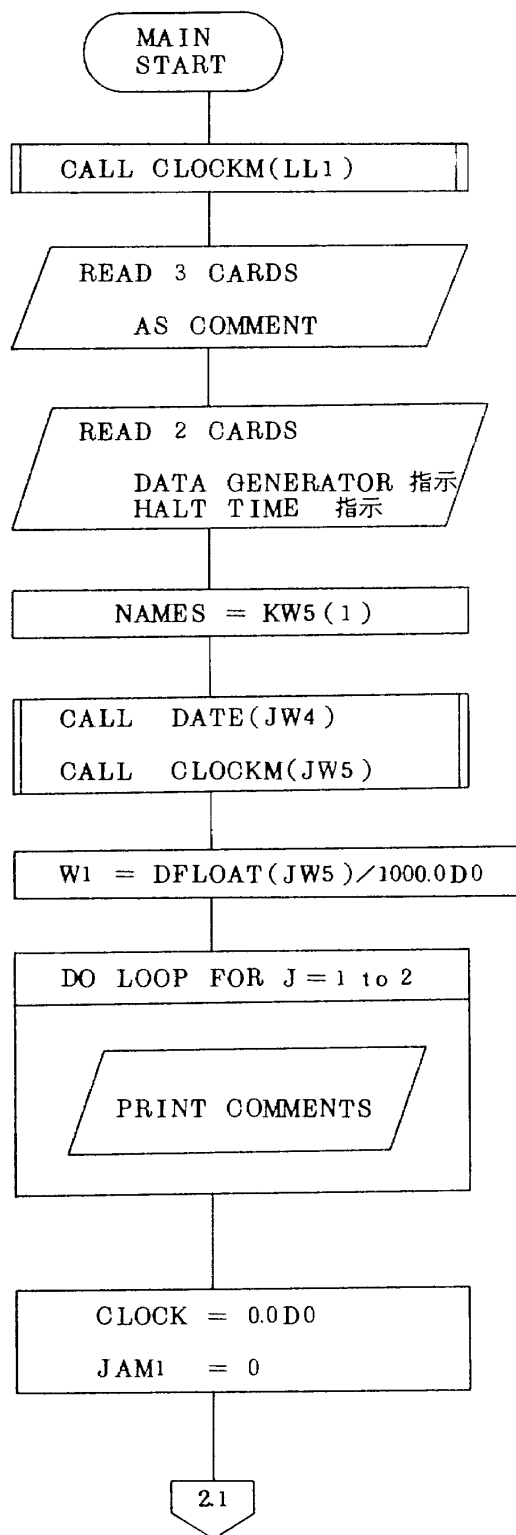
	現時刻			sec
1	Output from rocket dynamics (B-coordinate system)	$\omega_B$	1	$\Delta$ deg/sec
2			2	$\Delta$ "
3			3	$\Delta$ "
4			4	$\Delta$ "
5		$\dot{\omega}_B$	1	$\Delta$ deg/sec <sup>2</sup>
6			2	$\Delta$ "
7			3	$\Delta$ "
8			4	$\Delta$ "
9		$a_B$	1	m/sec
10			2	"
11			3	"
12			4	"
13	Output from rocket dynamics (platform- coordinate system)	$\omega_y$	1	$\Delta$ deg/sec
14			2	$\Delta$ "
15			3	$\Delta$ "
16			4	$\Delta$ "
17		$\dot{\omega}_y$	1	$\Delta$ deg/sec <sup>2</sup>
18			2	$\Delta$ "
19			3	$\Delta$ "
20			4	$\Delta$ "
21		$a_y$	1	m/sec
22			2	"
23			3	"
24			4	"
25	Gyro detected data (platform- coordinate system)	$G$	1	$\Delta$ deg
26			2	$\Delta$ "
27			3	$\Delta$ "
28			4	$\Delta$ "
29		$\dot{G}$	1	$\Delta$ deg/sec
30			2	$\Delta$ "
31			3	$\Delta$ "
32			4	$\Delta$ "
33		$\ddot{G}$	1	$\Delta$ deg/sec <sup>2</sup>
34			2	$\Delta$ "
35			3	$\Delta$ "
36			4	$\Delta$ "
37				
38				
39				
40				

表 6 (つづき)

41	Gyro detected data expressed in gimbal coordinate system	$E$	1	△	deg
42			2	△	"
43			3	△	"
44			4	△	"
45		$\dot{E}$	1	△	deg/sec
46			2	△	"
47			3	△	"
48			4	△	"
49		$\ddot{E}$	1	△	deg/sec <sup>2</sup>
50			2	△	"
51			3	△	"
52			4	△	"
53	Gain and phase control output	$D$	1	△	deg
54			2	△	"
55			3	△	"
56			4	△	"
57		$\dot{D}$	1	△	deg/sec
58			2	△	"
59			3	△	"
60			4	△	"
61	Servomotor dynamics output	$Y$	1		torque
62			2		"
63			3		"
64			4		"
65					
66					
67					
68					
69	Bias Error		1		percentage
70			2		"
71			3		"
72	Transformation Matrix $T_{ij}$				
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					

表 6 (つづき)

81			1	△	deg
82		<b>A</b>	2	△	"
83			3	△	"
84	Output from		4	△	"
85	platform	$\omega_g$	1	△	deg/sec
86	dynamics		2	△	"
87			3	△	"
88			4	△	"
89		$\omega_g$	1	△	deg/sec <sup>2</sup>
90			2	△	"
91			3	△	"
92			4	△	"
93	feed back	$\omega_{fiA}$	1	△	deg/sec
94	to gyro		2	△	"
95	dynamics		3	△	"
96			4	△	"
97					
98	Accuracy				
99	of integration				
100					



```

local area KW1(5),KW2(5),KW3(5),KW4(5),
           KW5(5),JW1(15),JW2(15),JW3(15),
           JW4(15),WMA(3,3)
    
```

PG 開始時間

```

READ( ) KW1,JW1,KW2,JW2,KW3,JN3
FORMAT (5A4,15A4)
    
```

```

READ( ) KW4,KW5
FORMAT(5A4,A4,A1)
READ( ) HTIME
FORMAT (20X,F10,0)
    
```

```

WRITE( ) KW1,JW1,KW2,JW2,KW3,JW3,
        JW4,W1,KW4,KW5,HTIME
FORMAT(1H1////////
      /31X, STABLE PLATFORM SYSTEM
      EVALUATION PROGRAM ,
      //31X,20A4/31X,20A4/31X,20A4,
      /31X,▼DATE OF SIMULATION :▼
      ,2A4,1H/,F9.3/
      /31X,7A4,
      /31X,▼SIMULATION HALT TIME is▼
      ,F10.3,4H SEC/)
    
```

図 10 Main Routine のフロー図

## PLAT2 DETAILED FLOWCHART

JFLOW1 初期設定

SUBROUTINE PLAT2(JFLOW, NAMES)

2 通常処理

3 終了処理

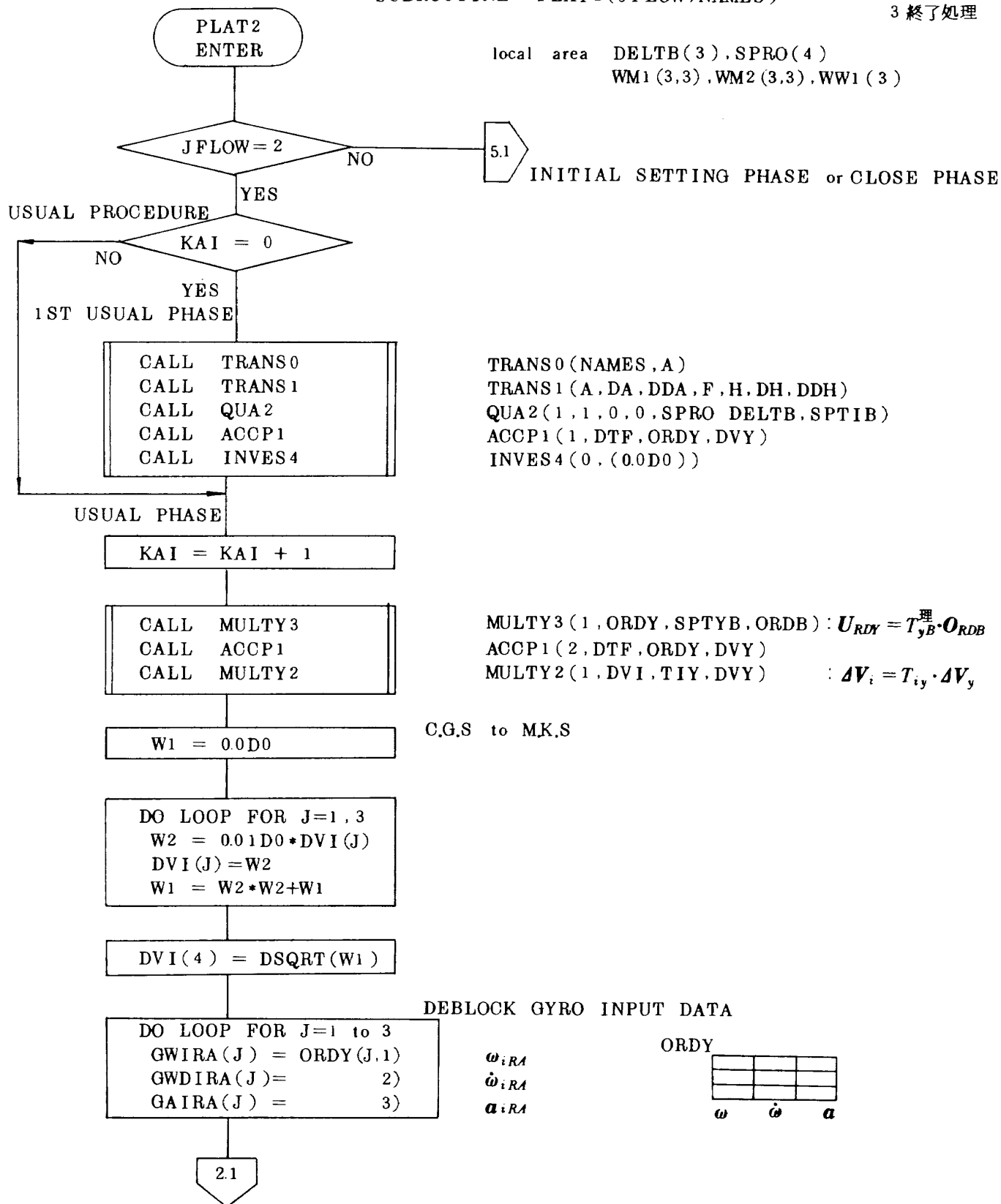
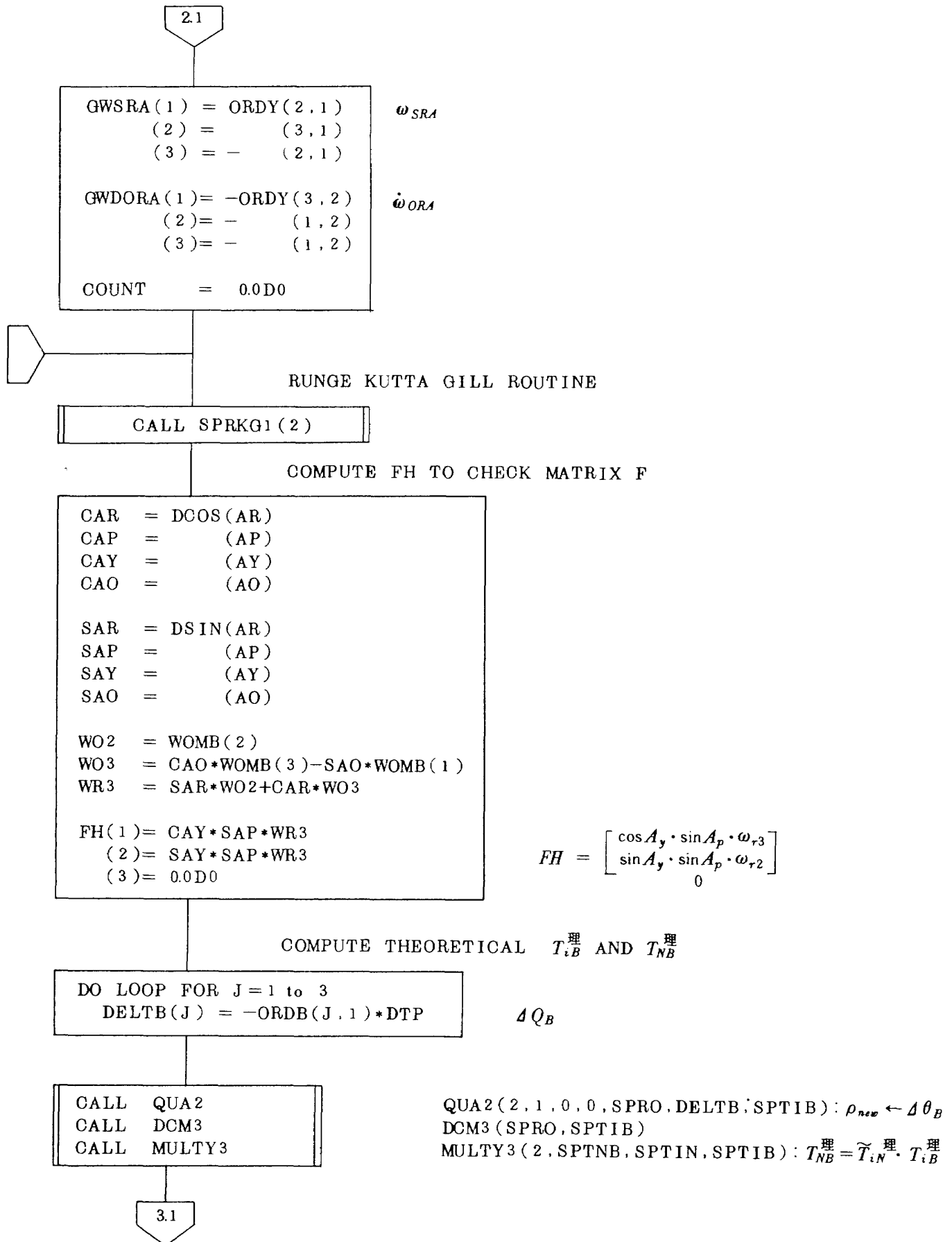


図 11 PLAT2 routine のフロー図 (1)





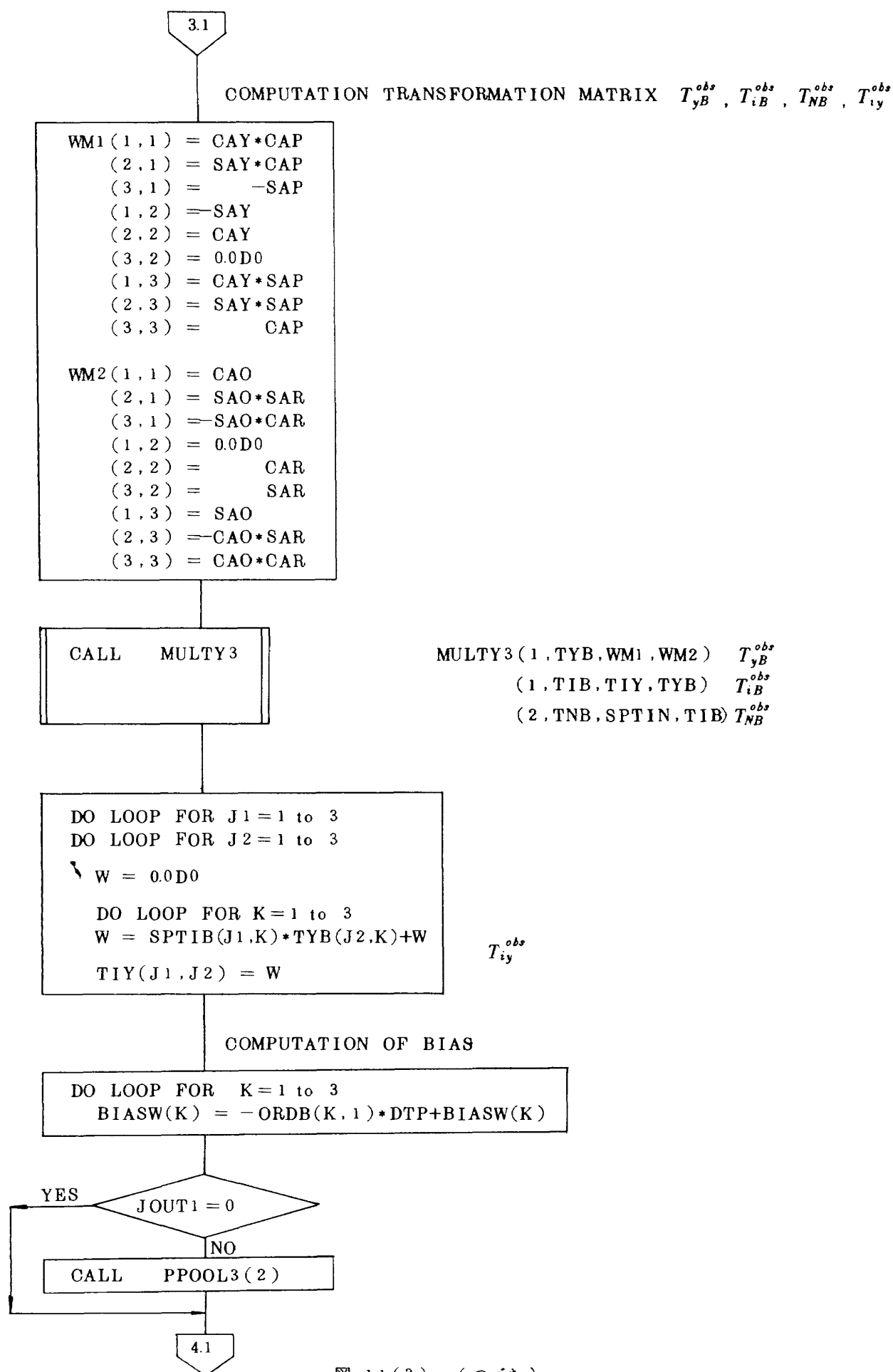


図 11(3) (つづき)

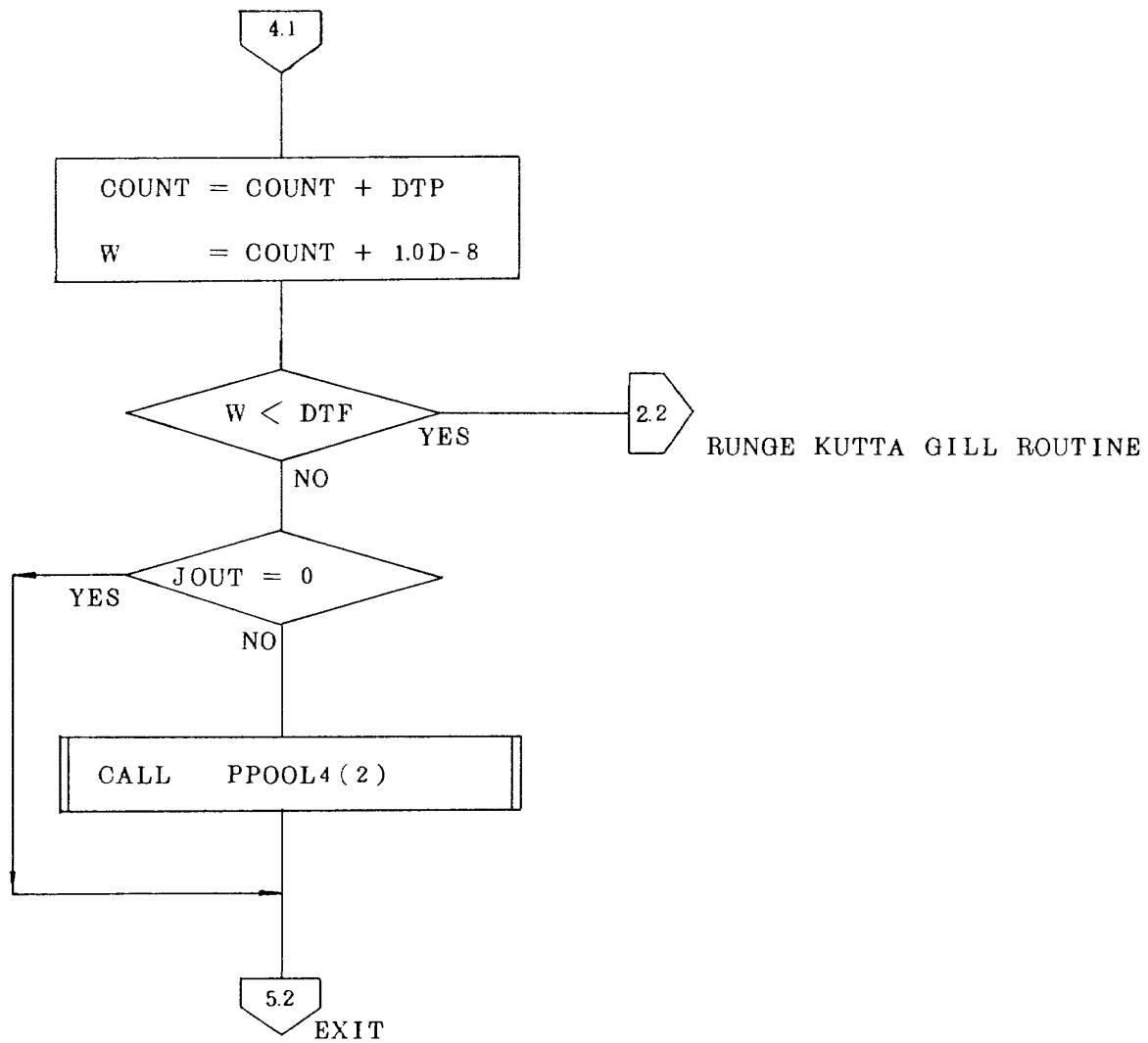


図 11(3) (つづき)

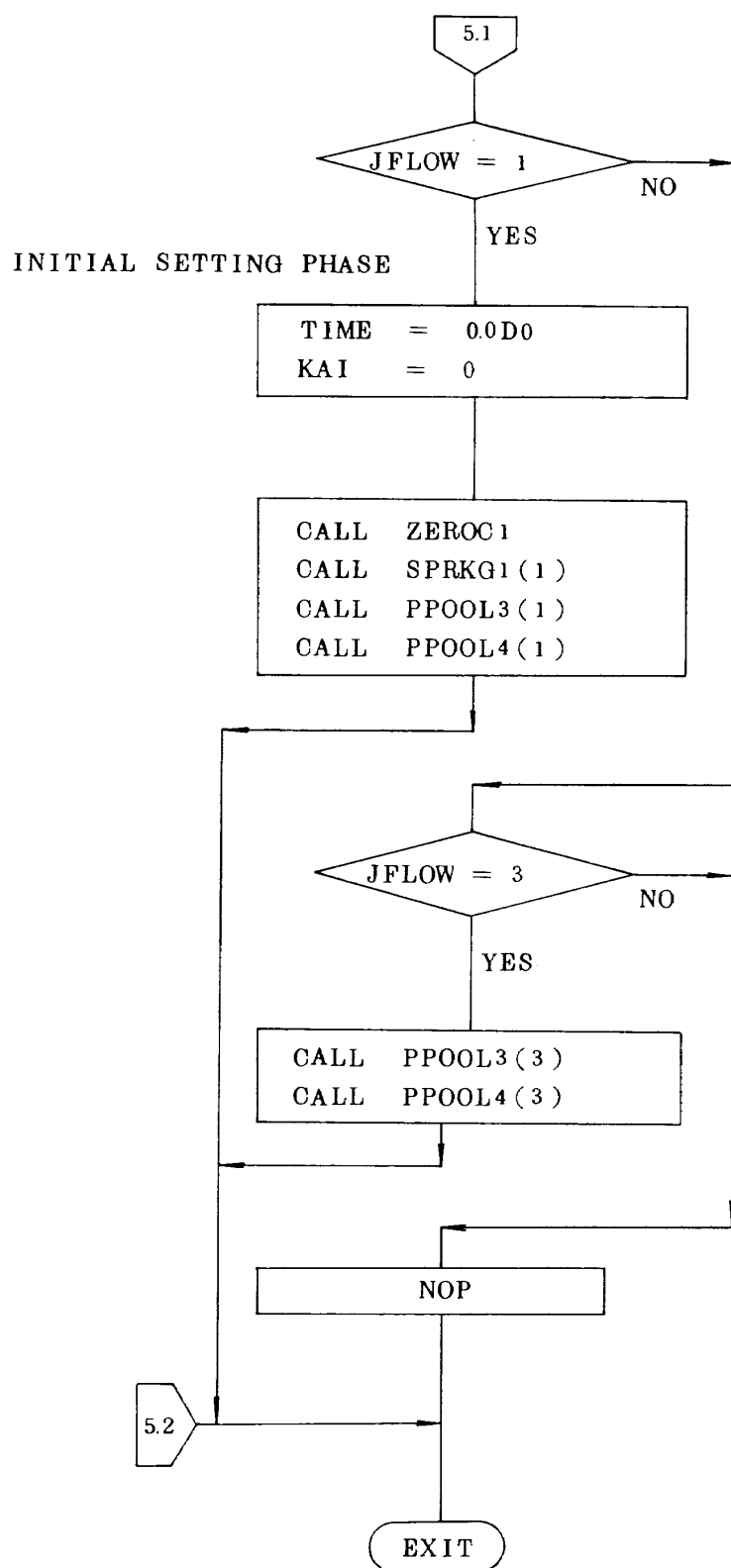


図 11(4) (つづき)

## 'ZEROC1' DETAILED FLOWCHART

## SUBROUTINE ZEROC1

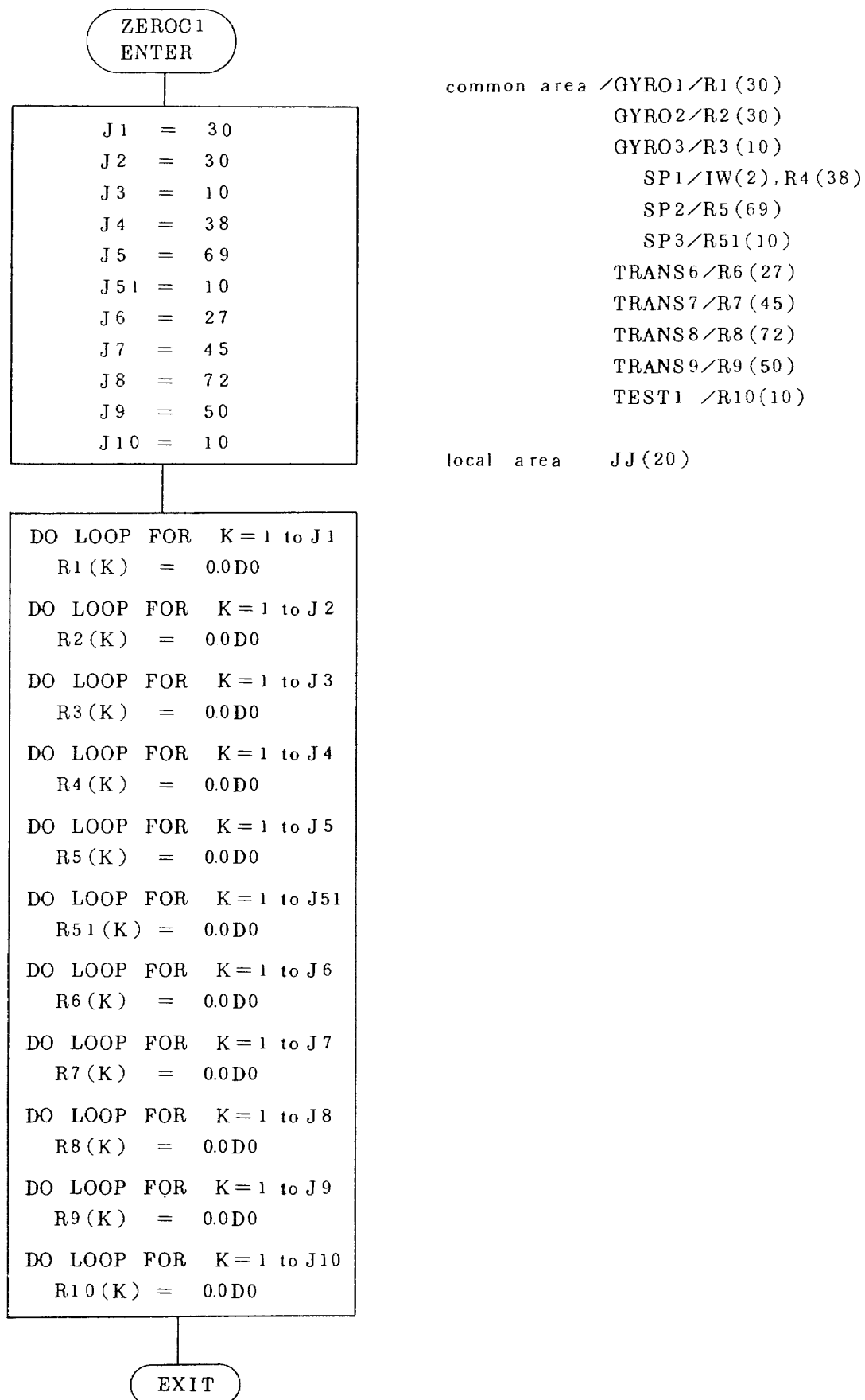


図 12 ZEROC 1 routine のフロー図

## SUBROUTINE SPRKG1(JFLOW)

local area WW1(3), WW2(3), WW3(3), WW4(3), WW5(3),  
WW6(3), WWDFIA(3)

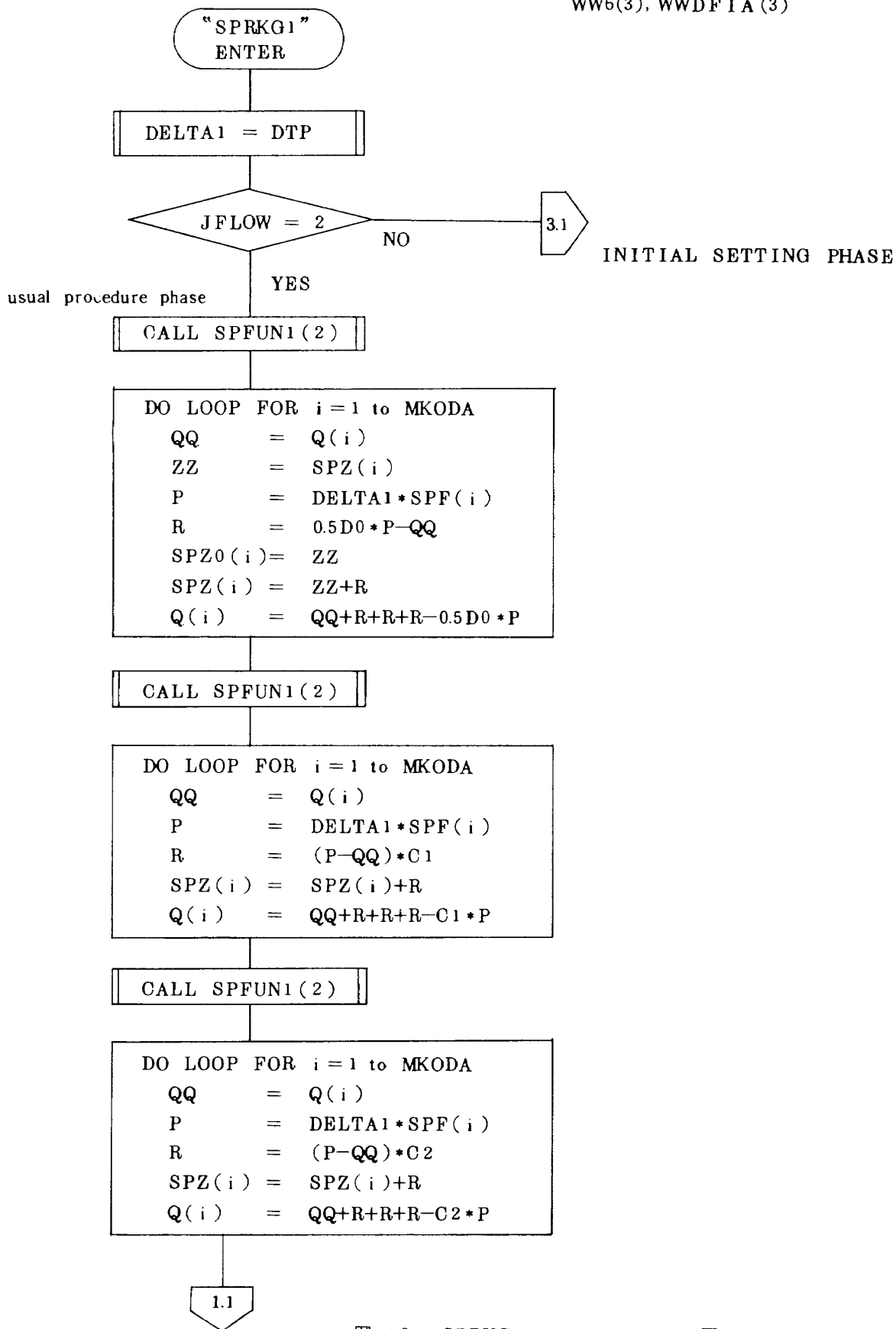


図 13 SPRKG1 routine のフロー図

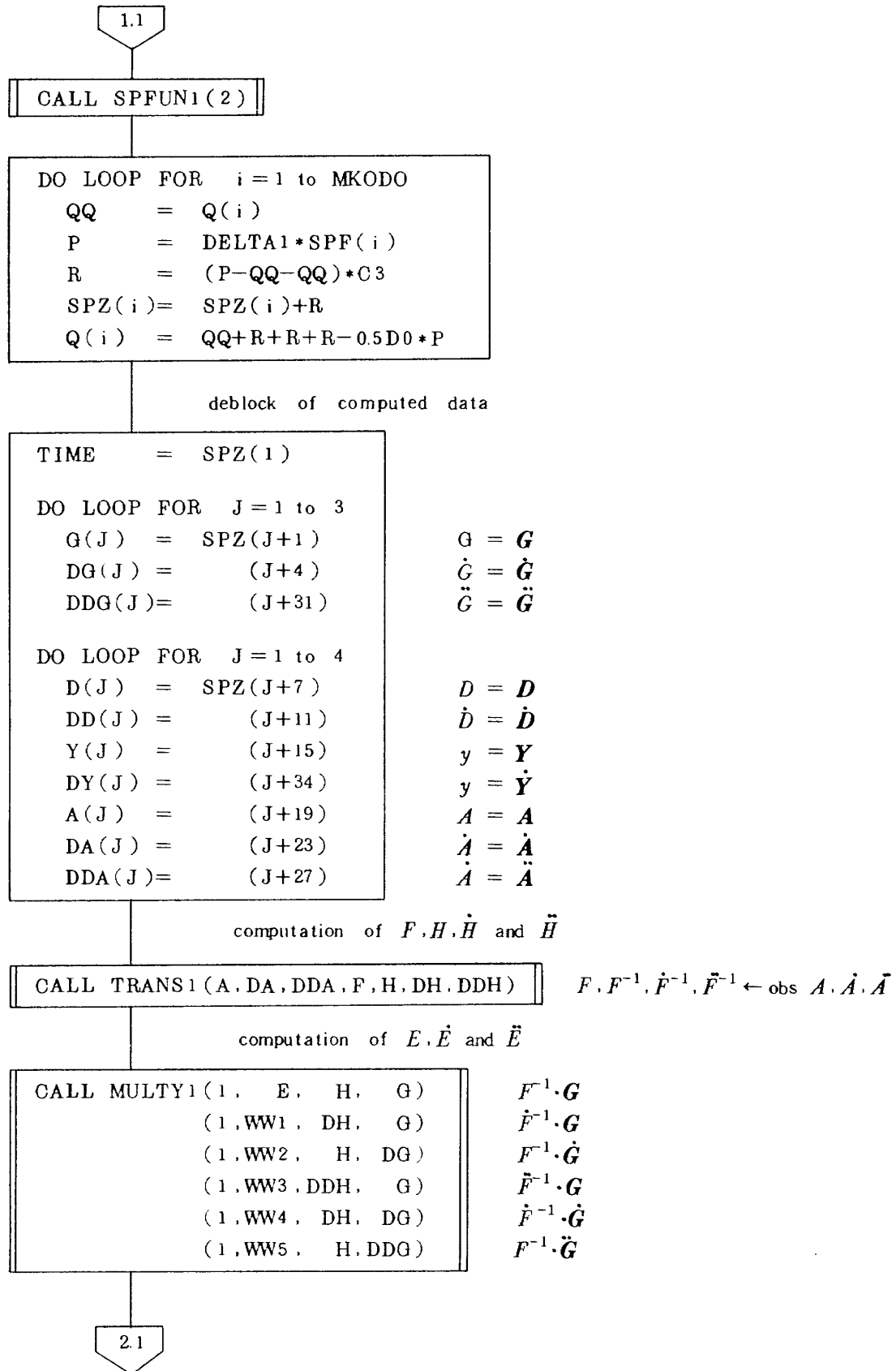
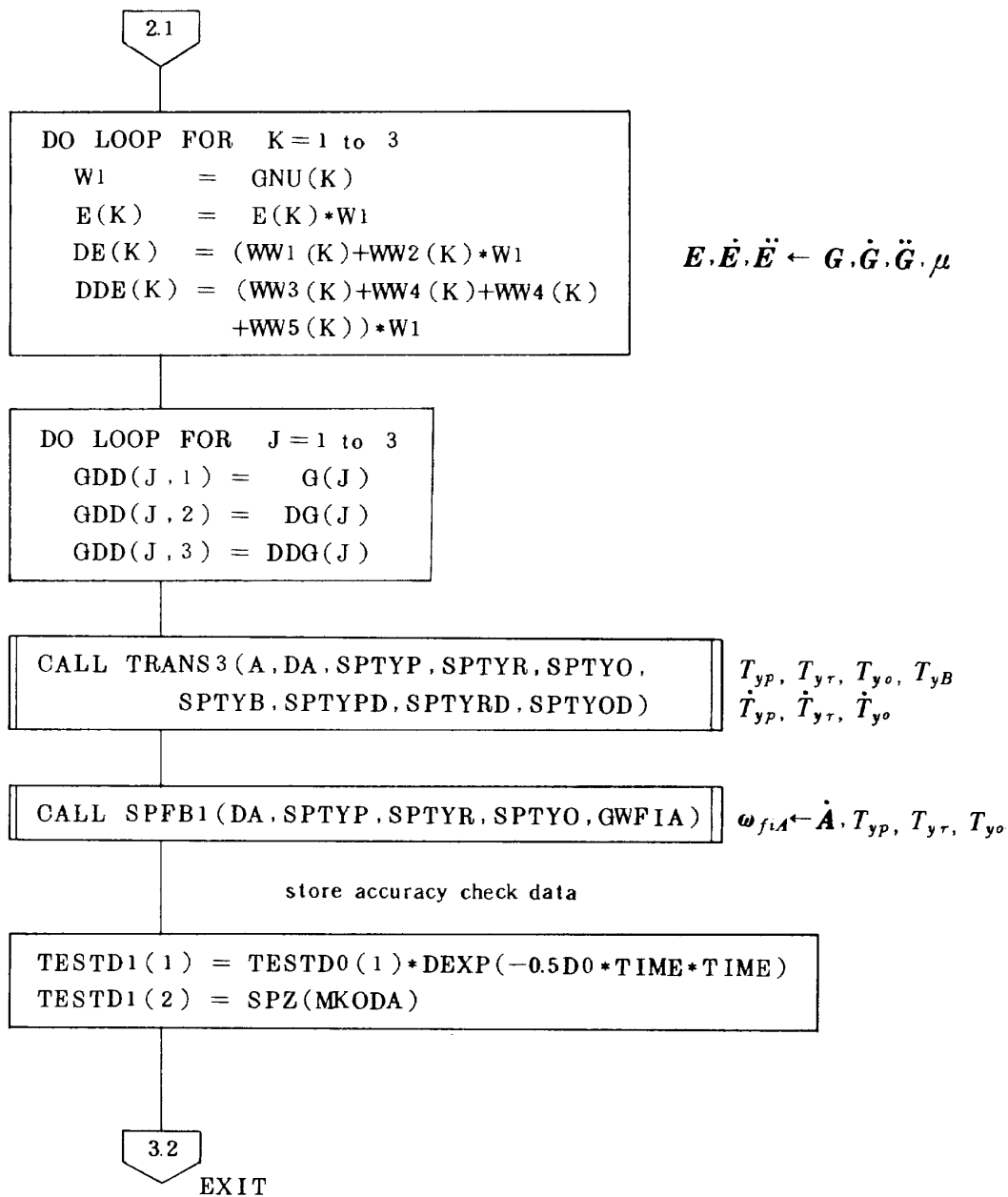


図 13 (つづき)





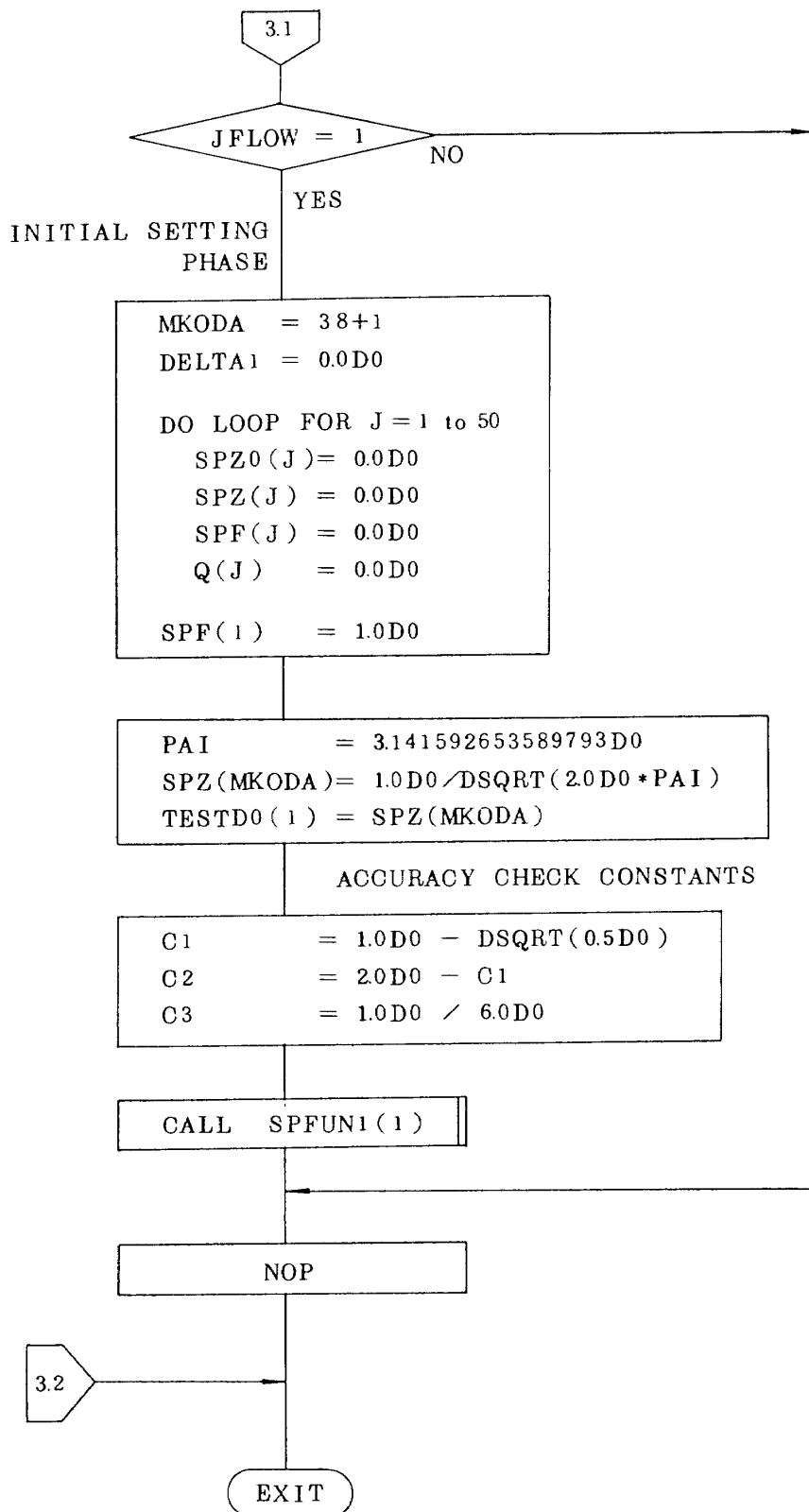


図 13 (つづき)

## 'SPFUN1' DETAILED FLOWCHART

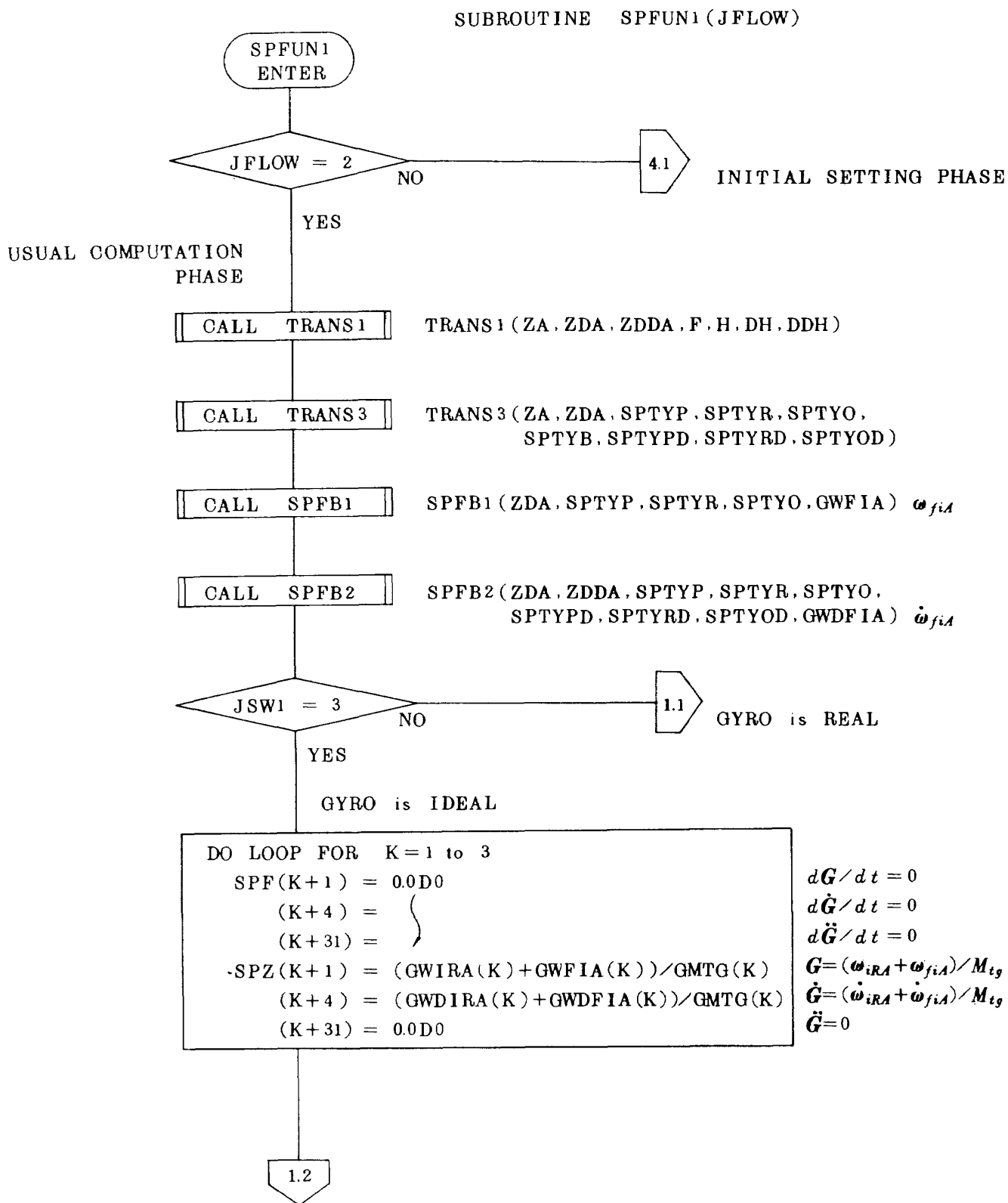
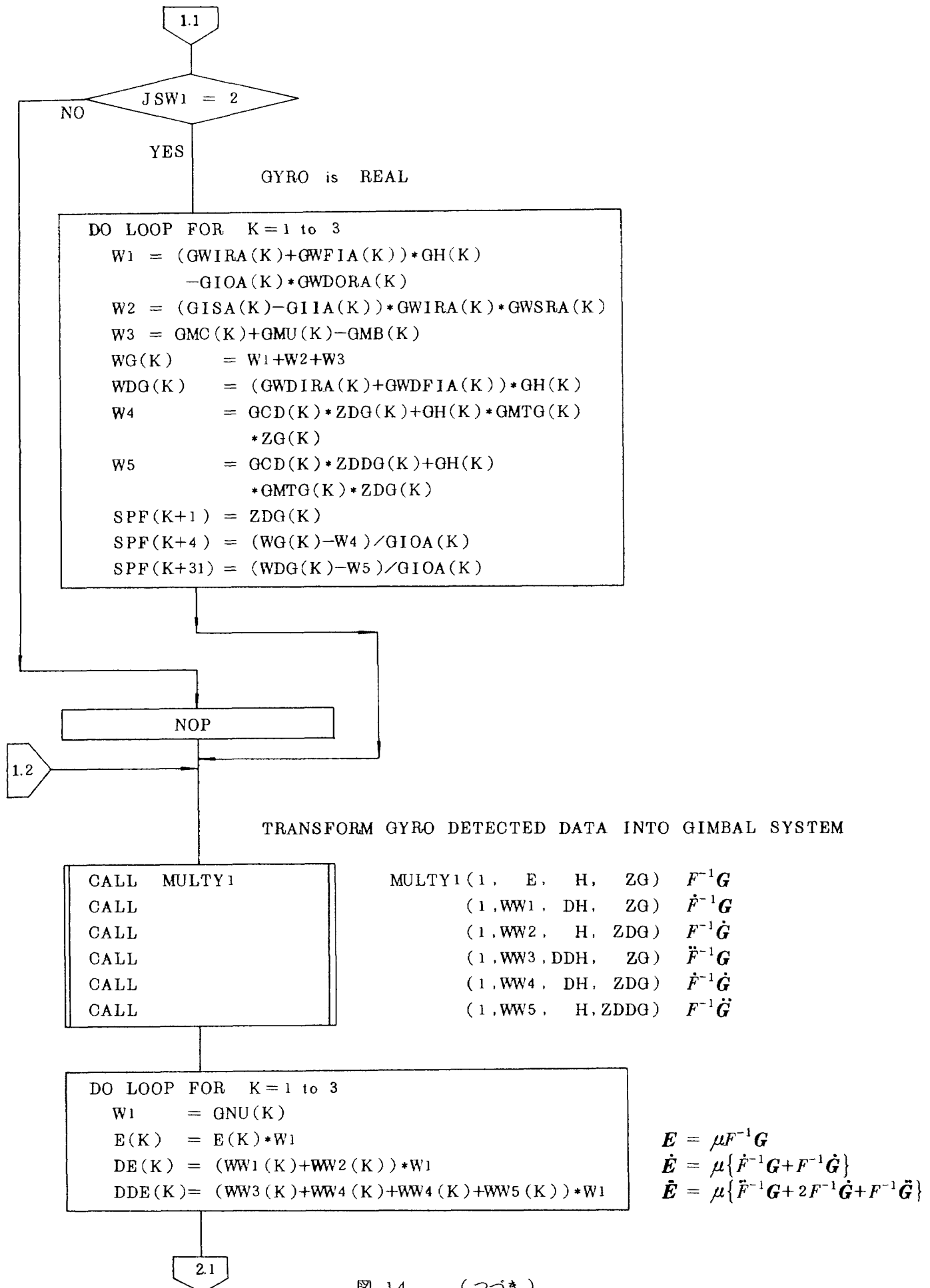


図 14 SPFUN1 routine のフロー図



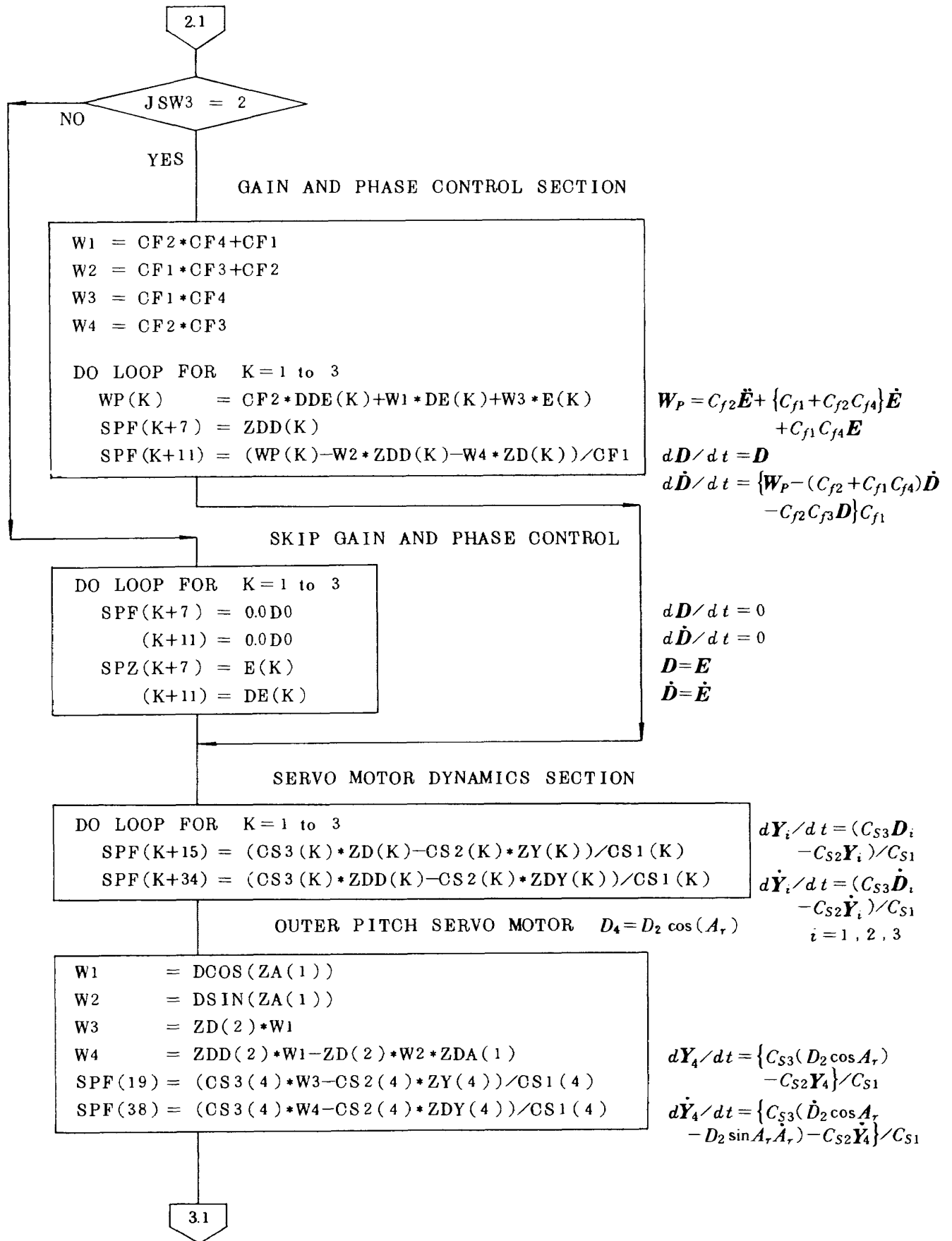


図 14 (つづき)

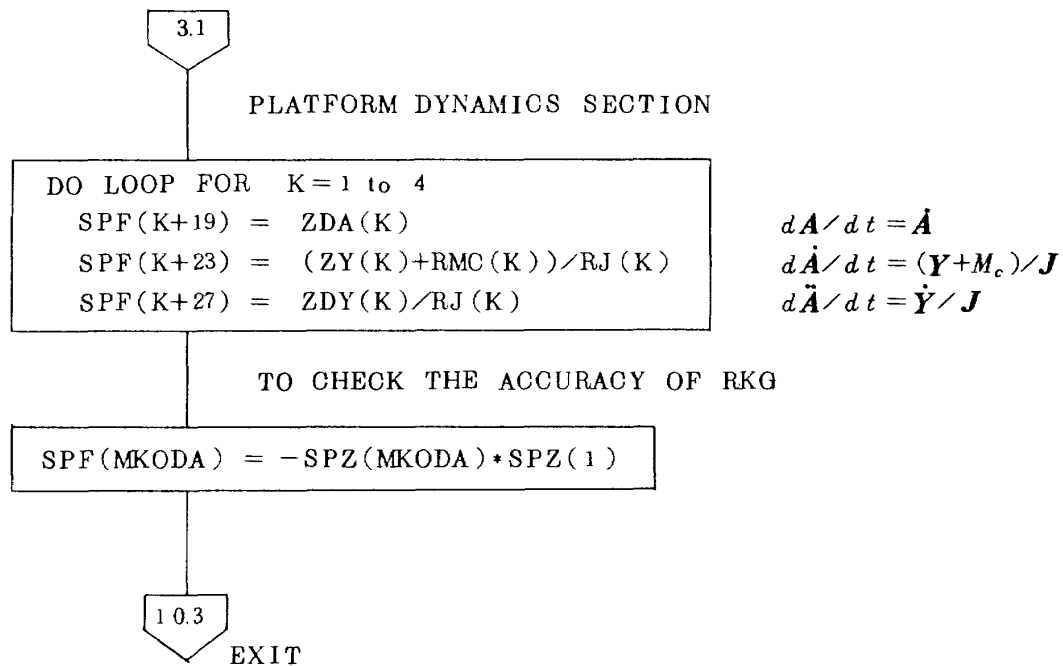


図 14 (つづき)

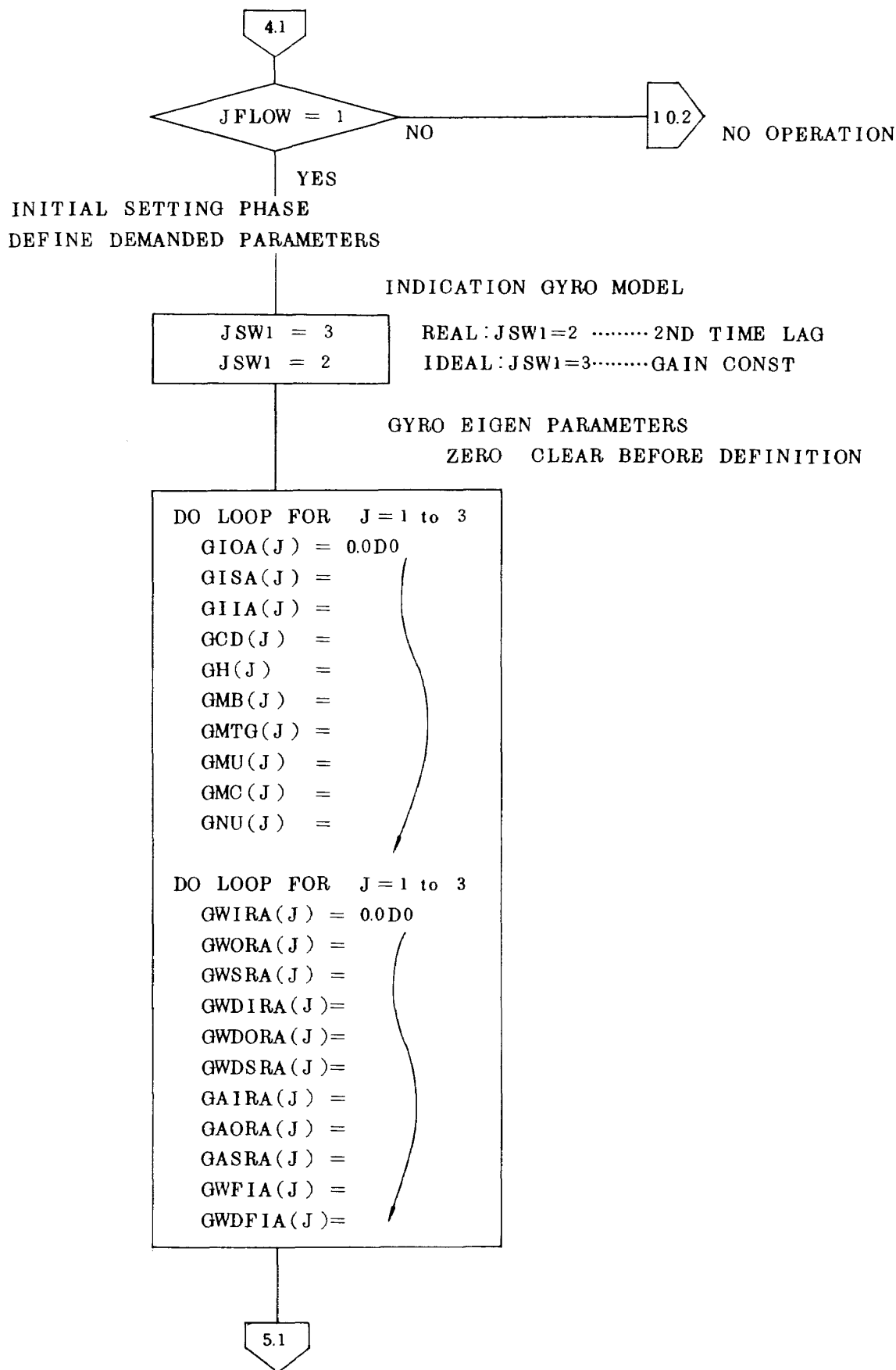
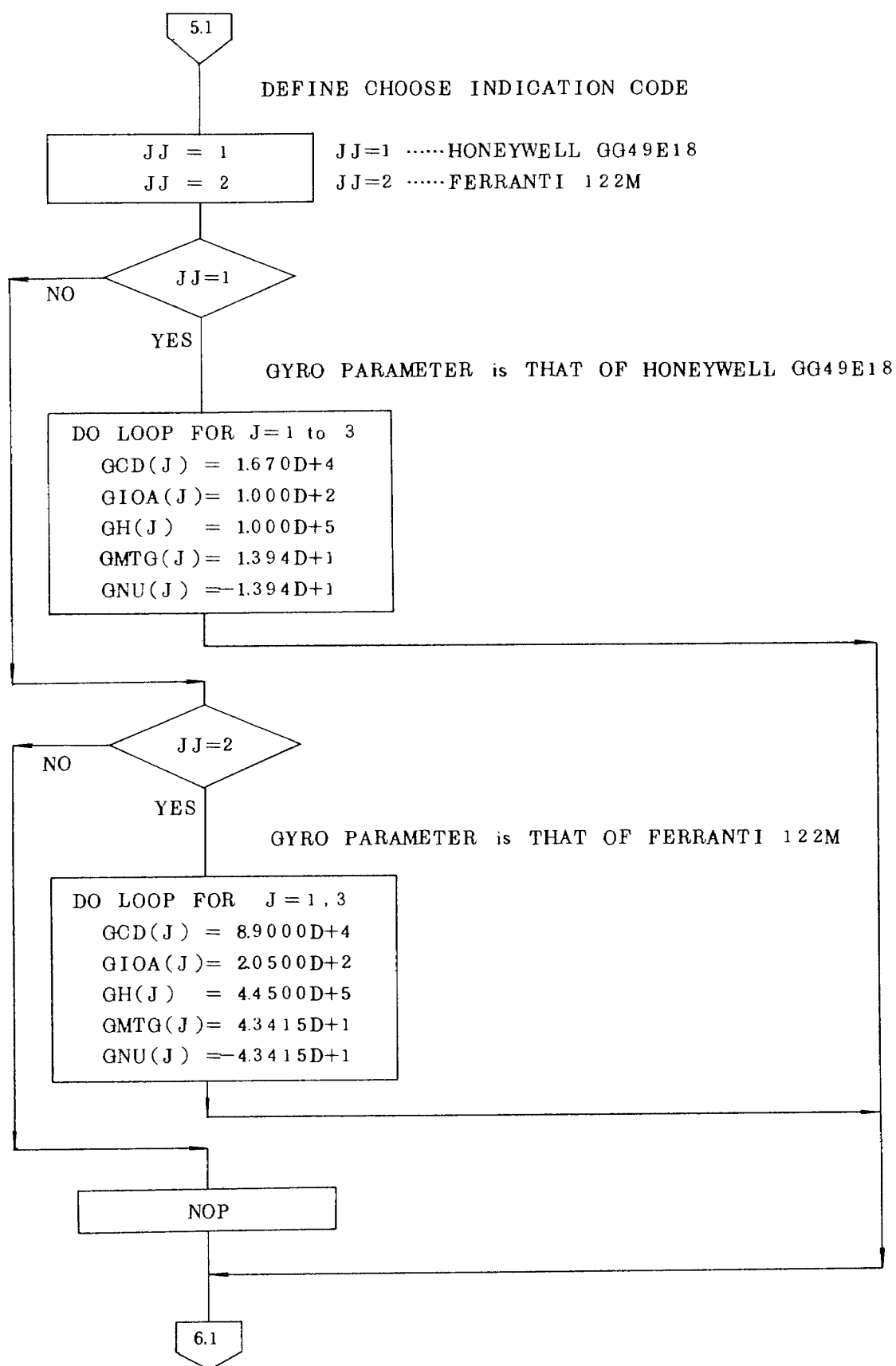
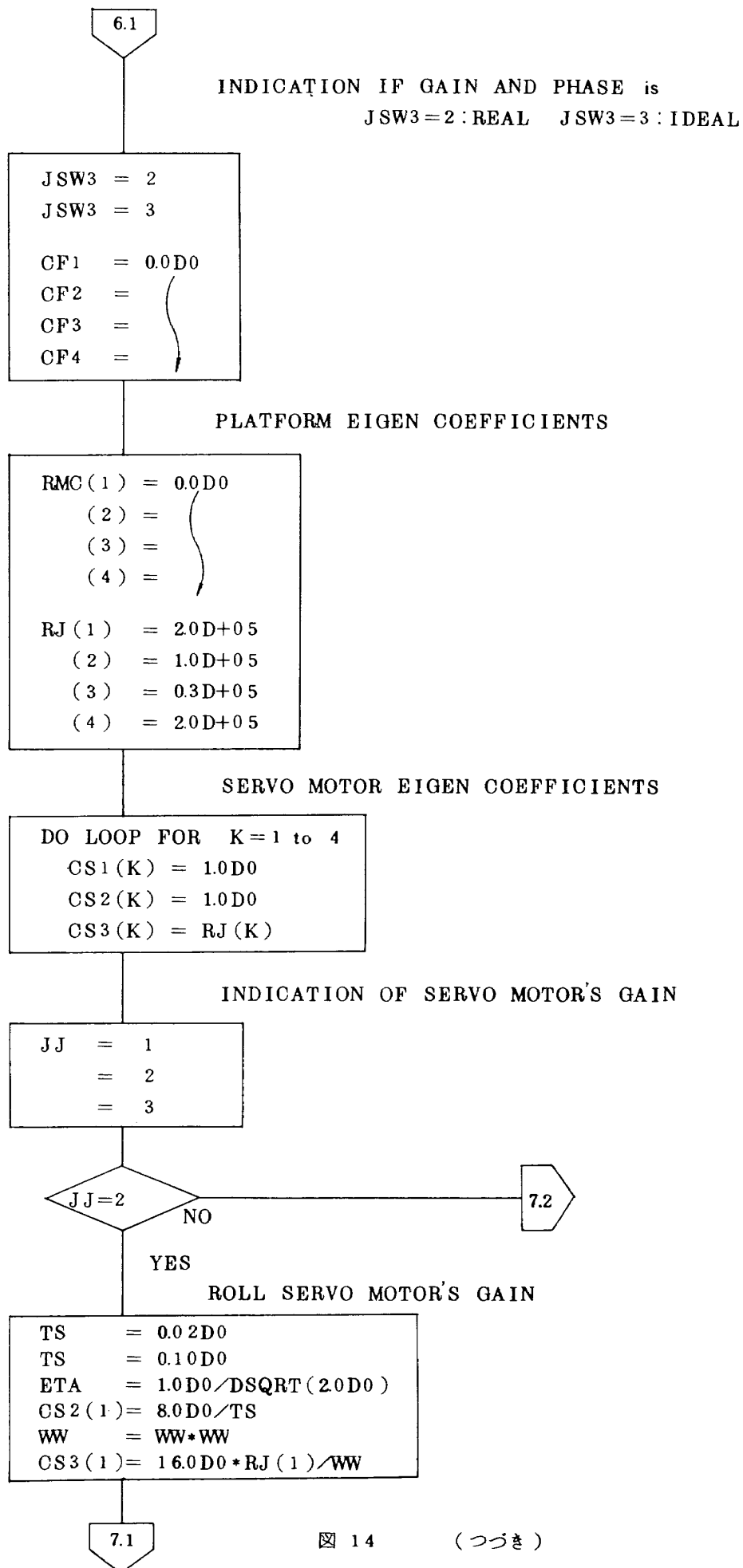


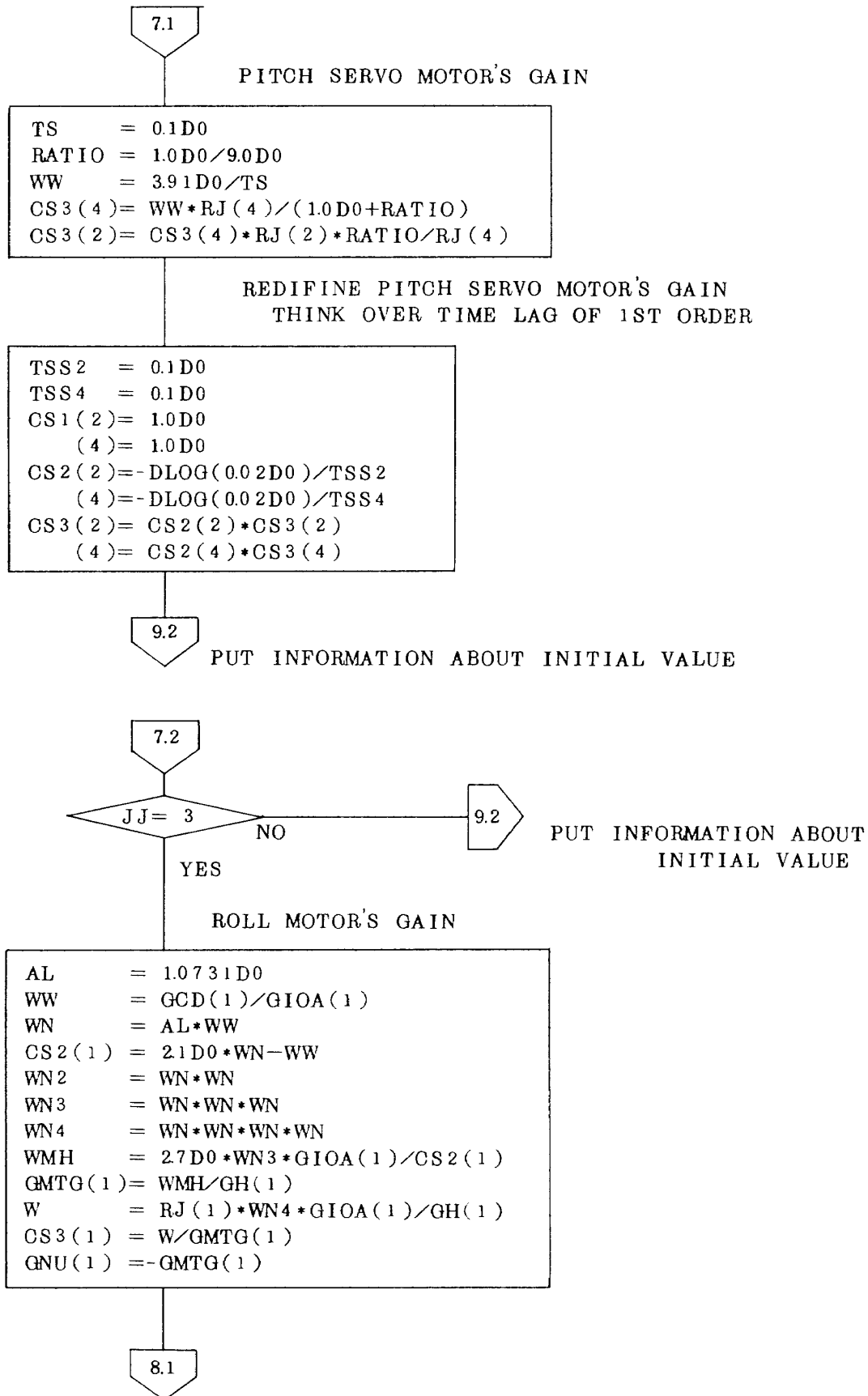
図 14 (つづき)



☒ 14 (つづき)







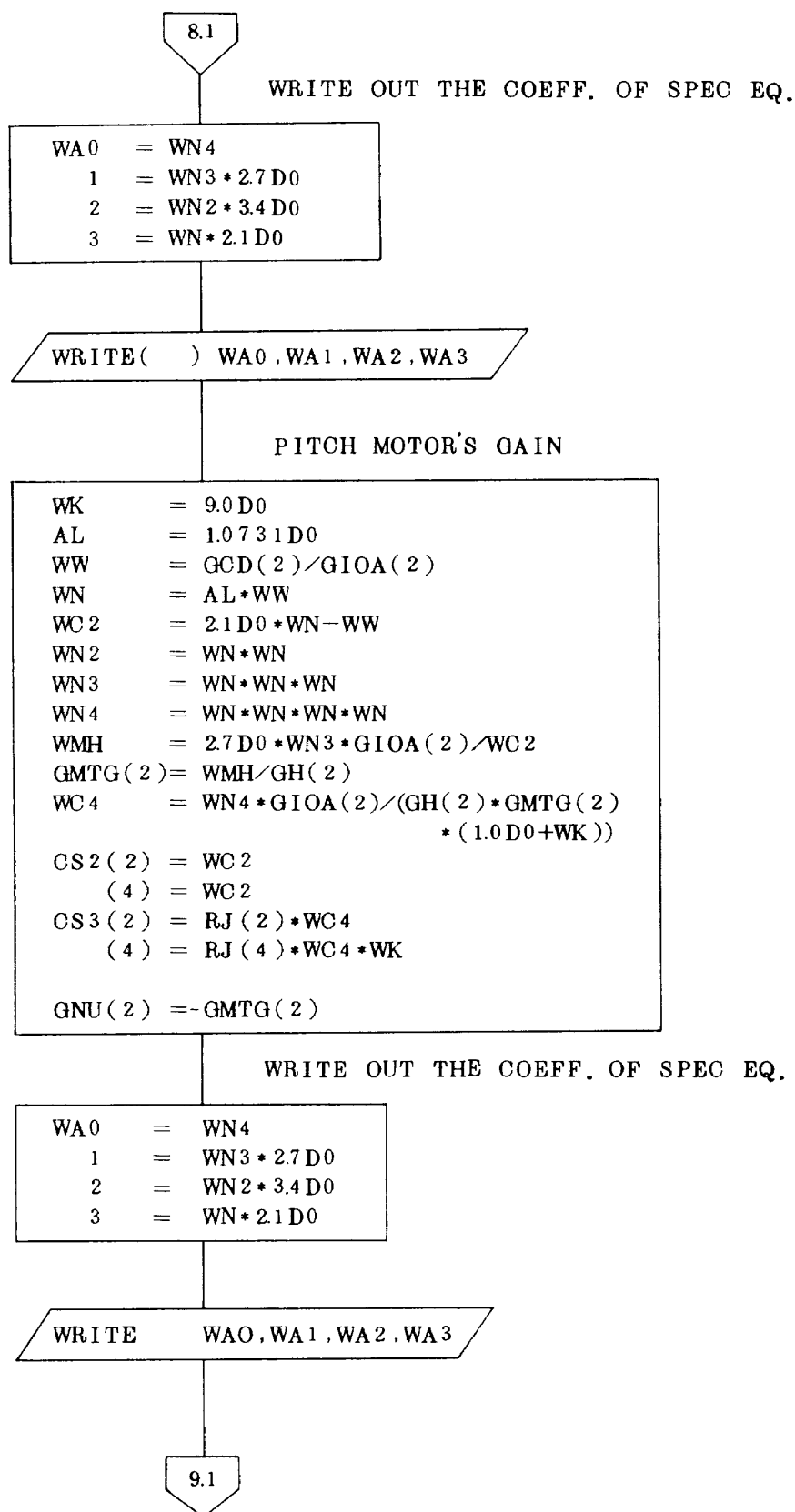


図 14 (つづき)

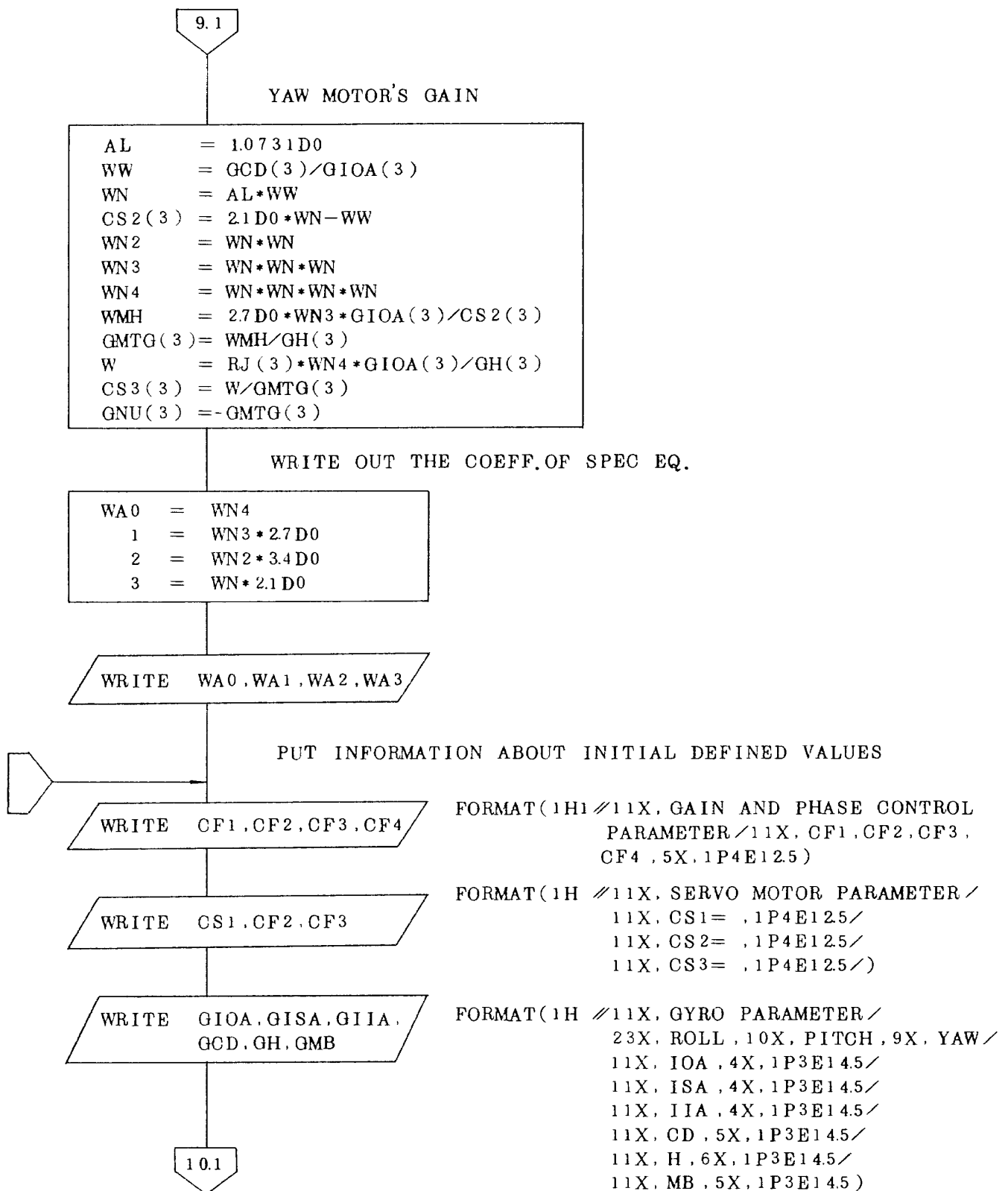


図 14 (つづき)

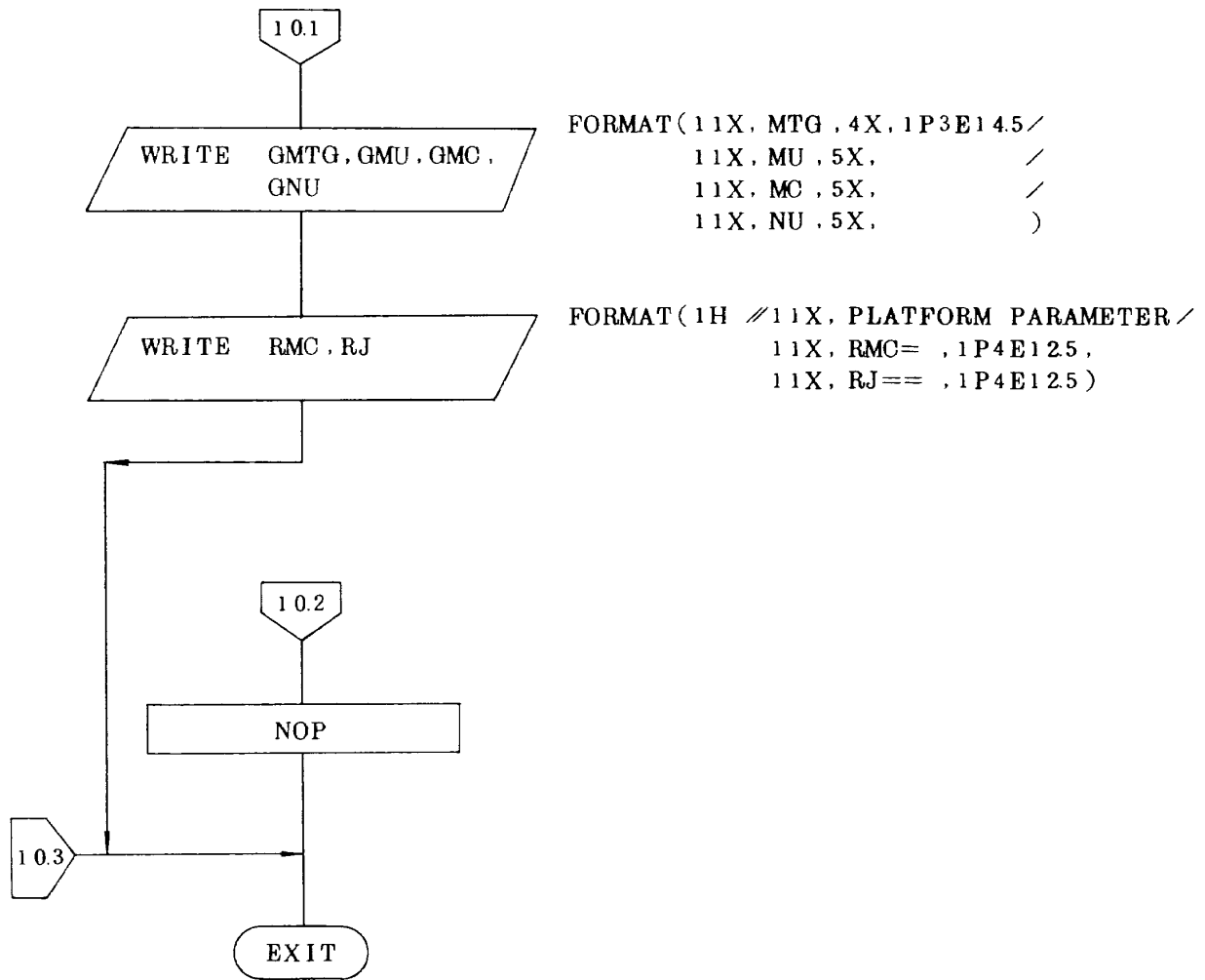


図 14 (つづき)

## Detailed Flawchart of SPFB1

SUBROUTINE SPFB1 (DA, SPTYP, SPTYR, SPTYO, GWFIA)

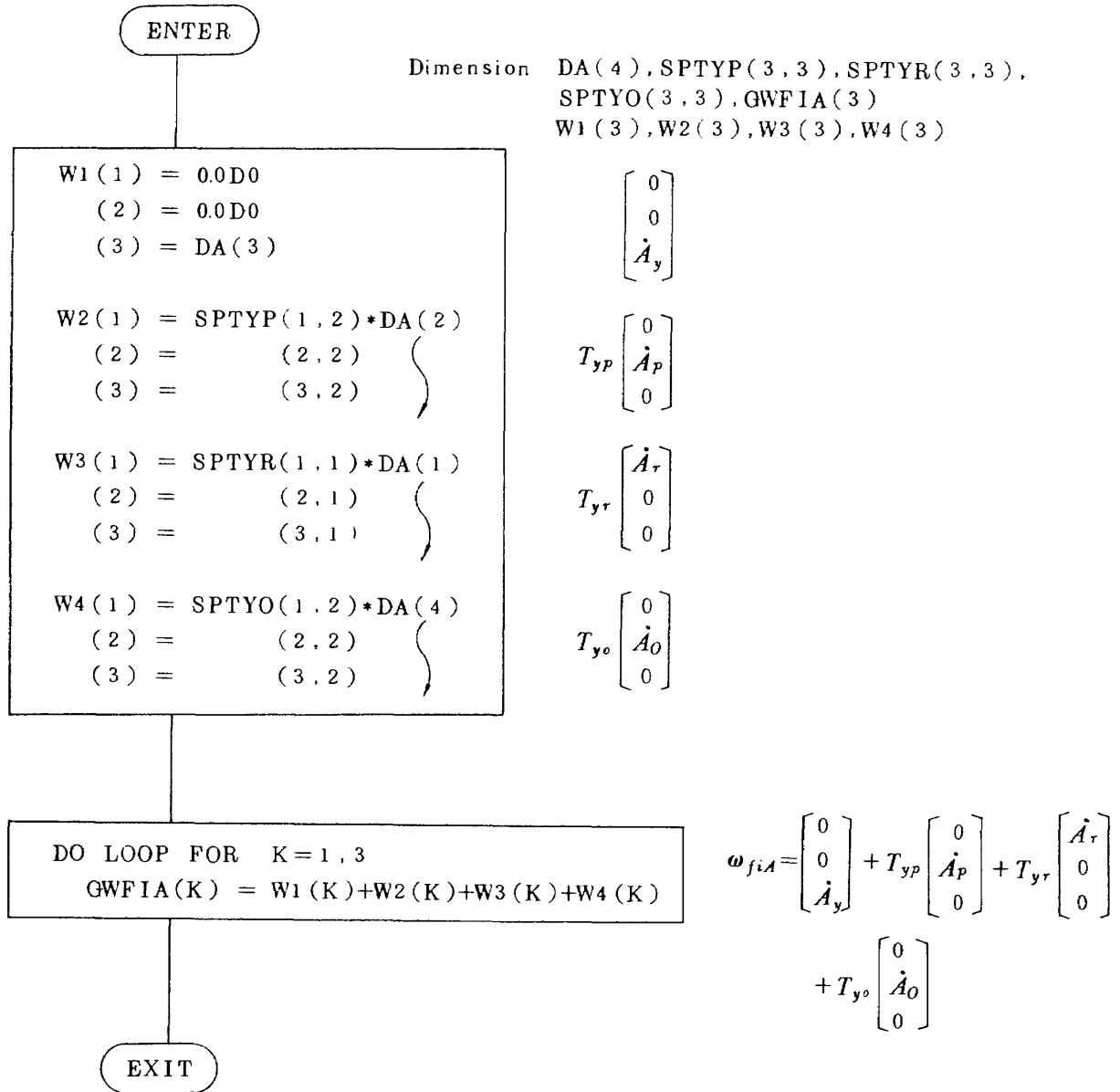
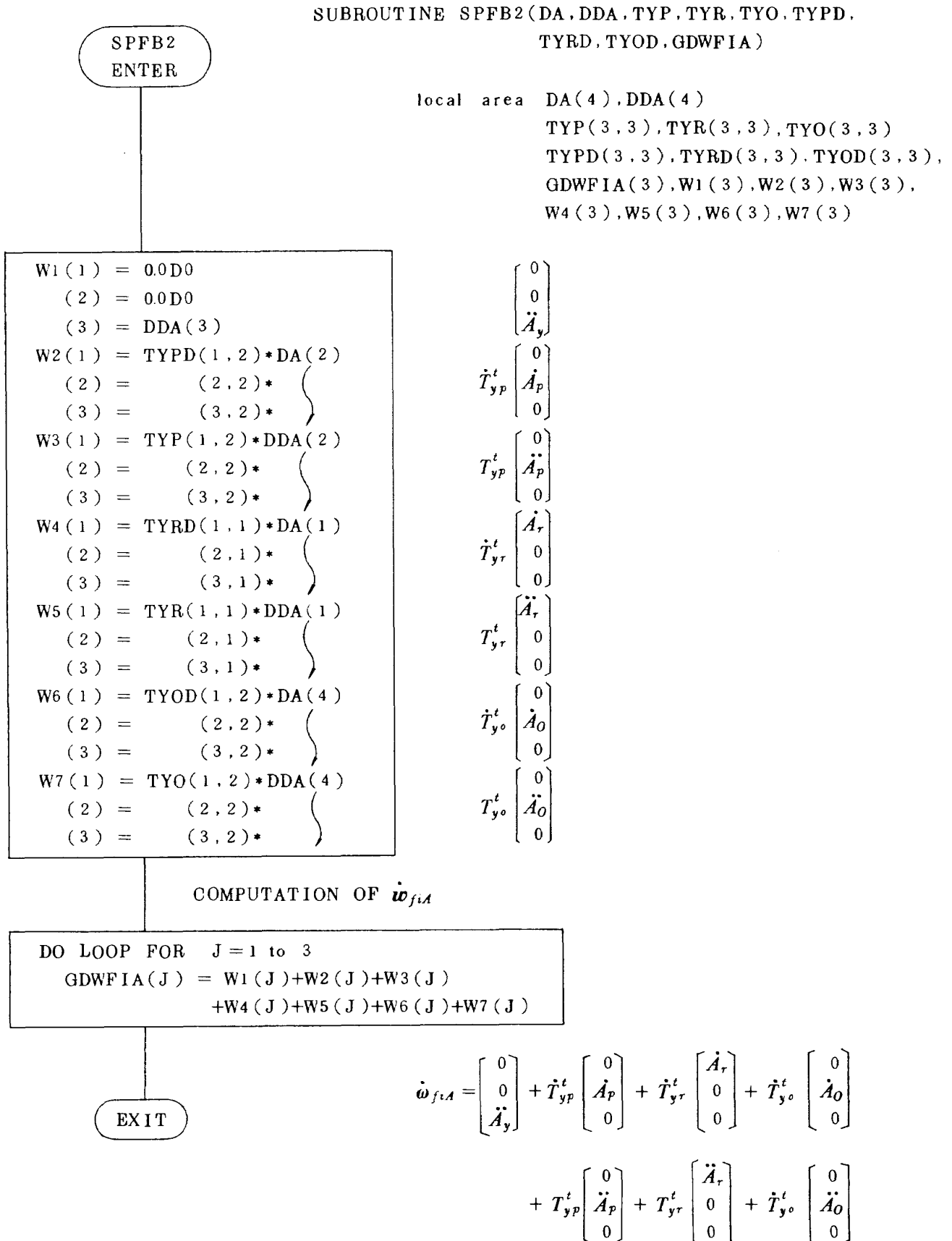


図 15 SPFB1 routine のフロー図

## SPFB2 DETAILED FLOWCHART



## TRANSO DETAILED FLOWCHART

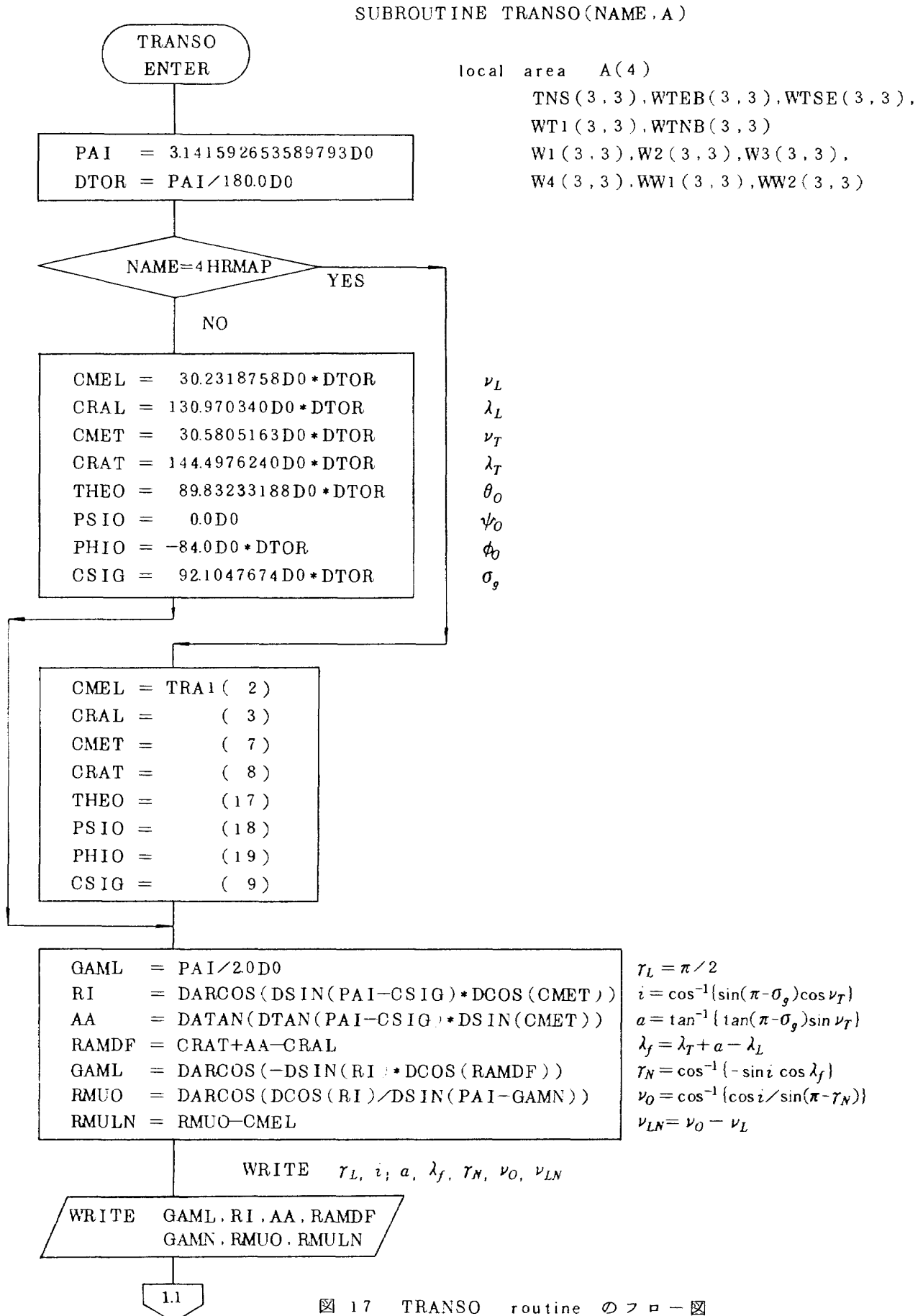
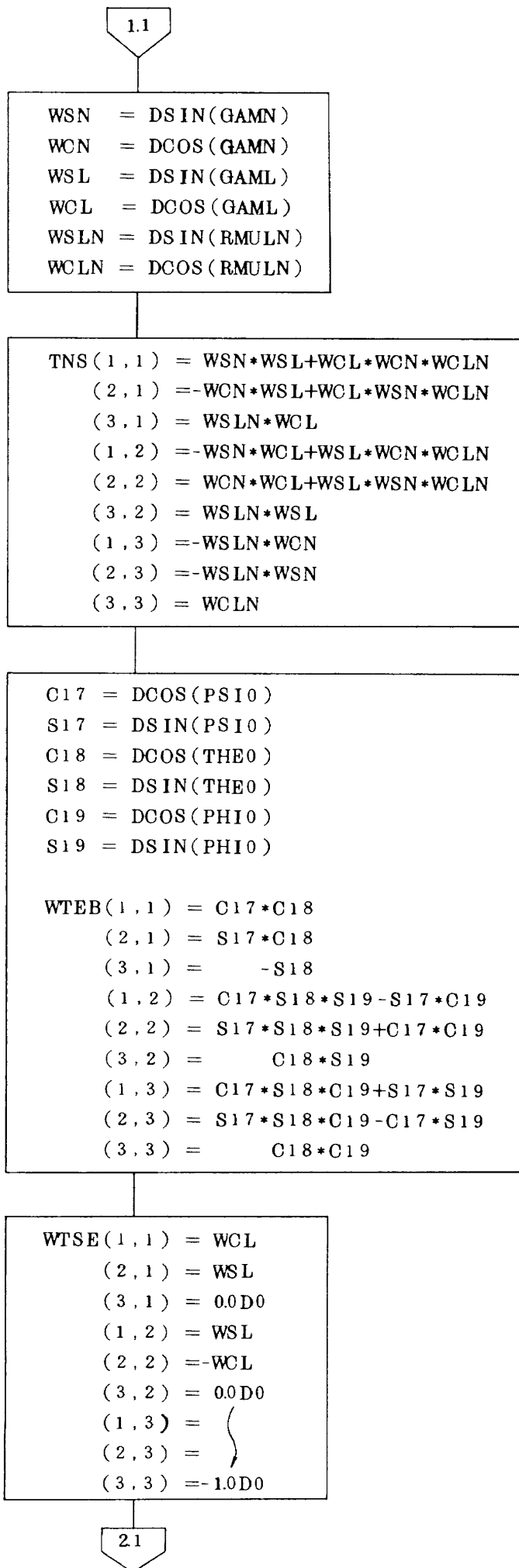
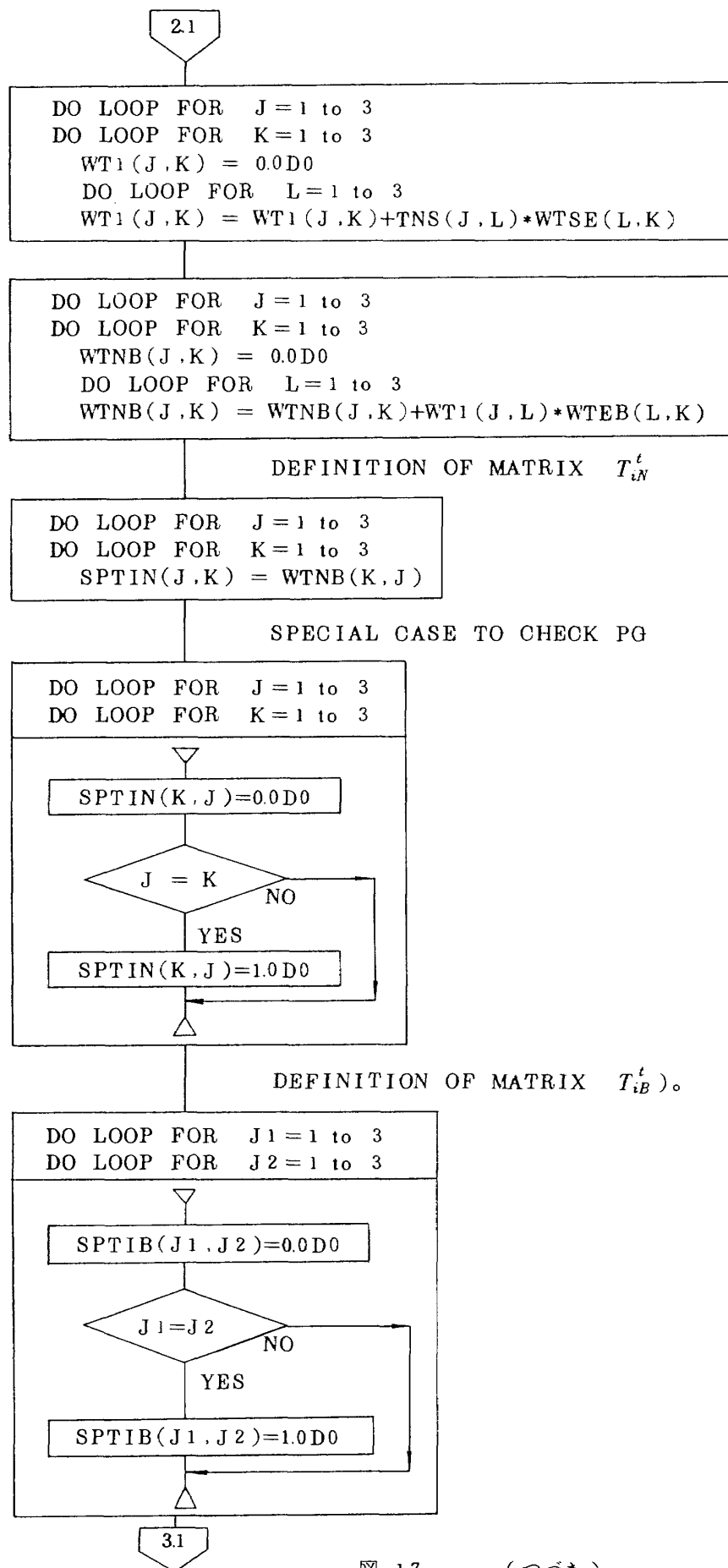
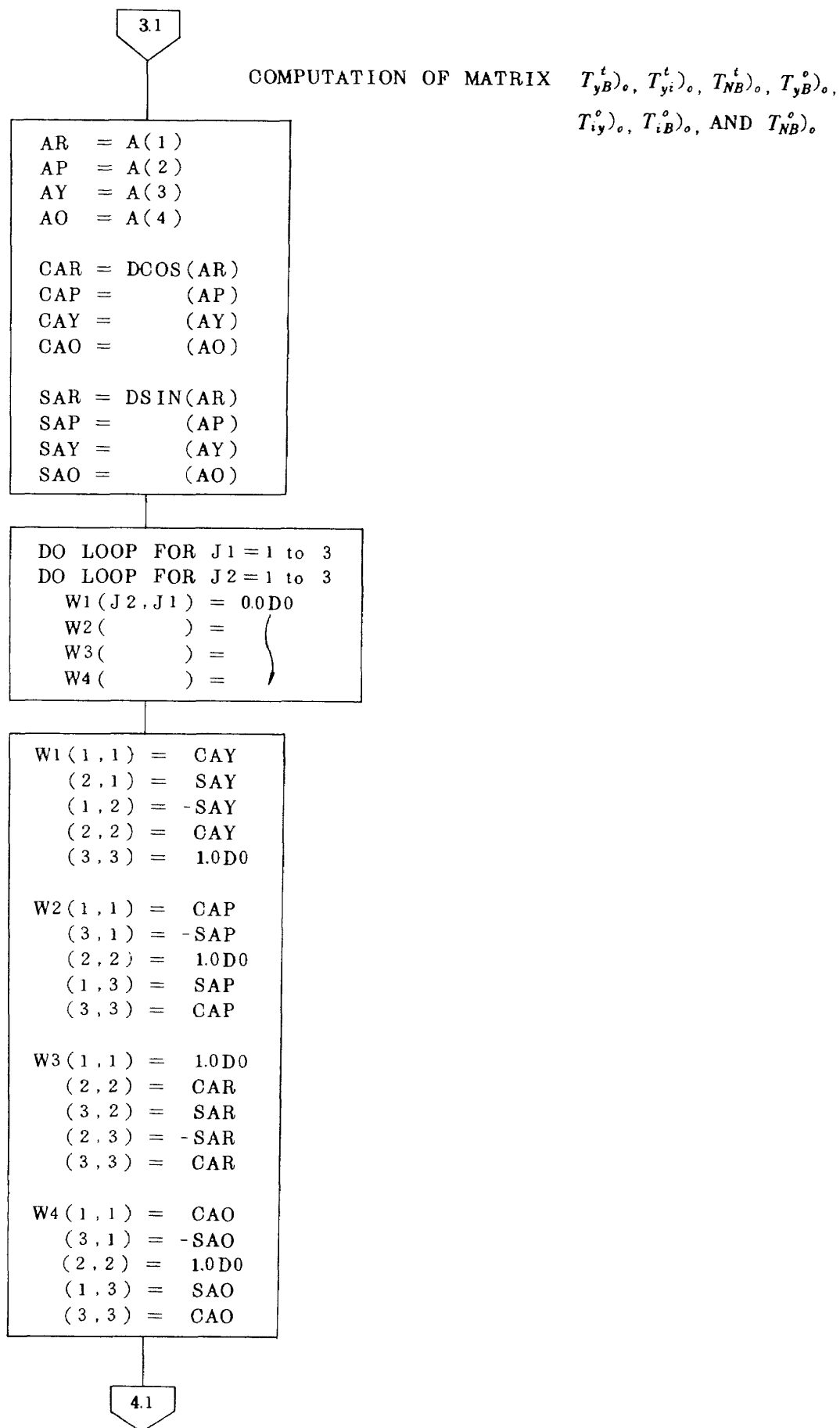


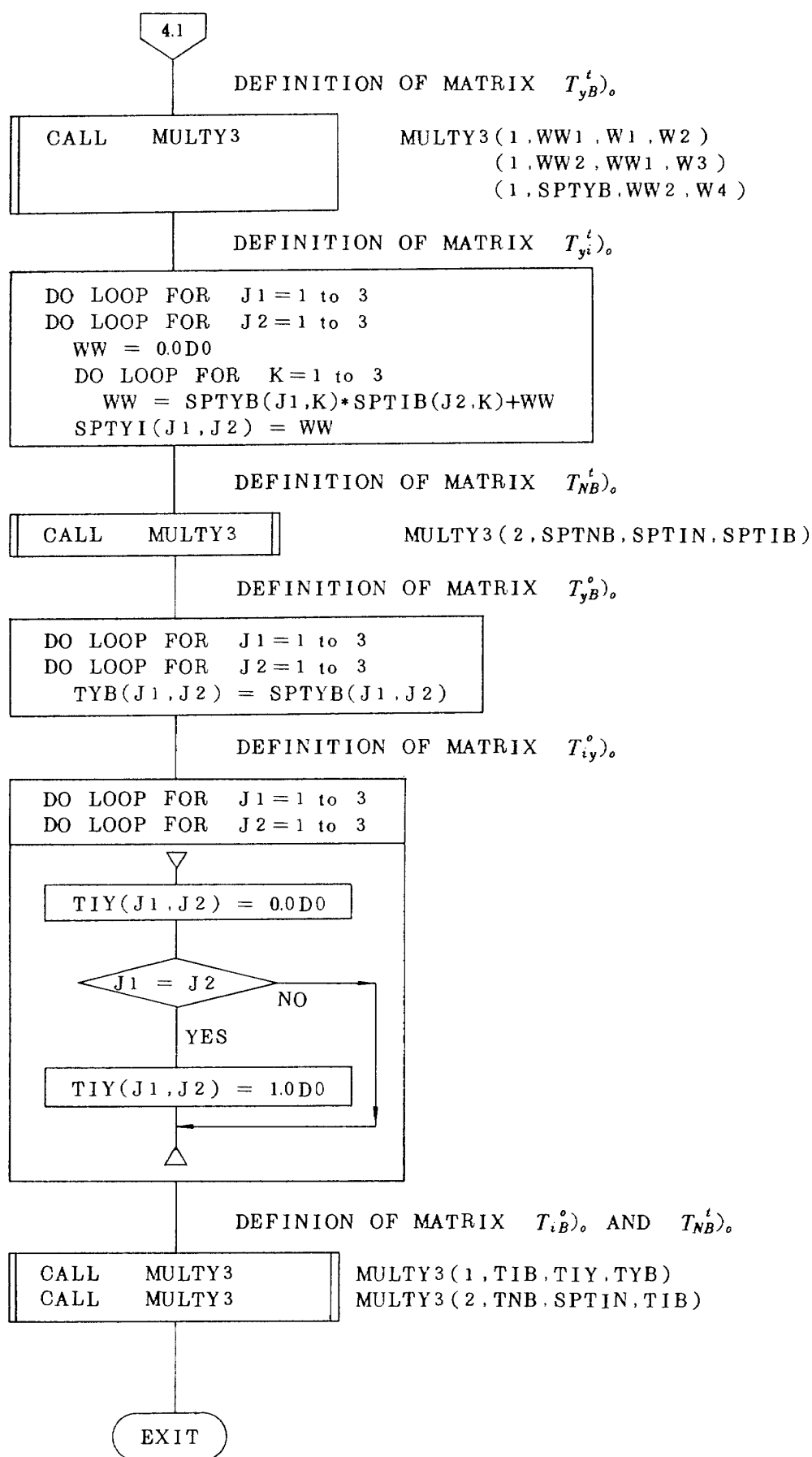
図 17 TRANSO routine のフロー図











☒ 17 (つづき)

## Detailed flowchart of TRANS1

SUBROUTINE TRANS1(A, DA, DDA, F, H, DH, DDH)

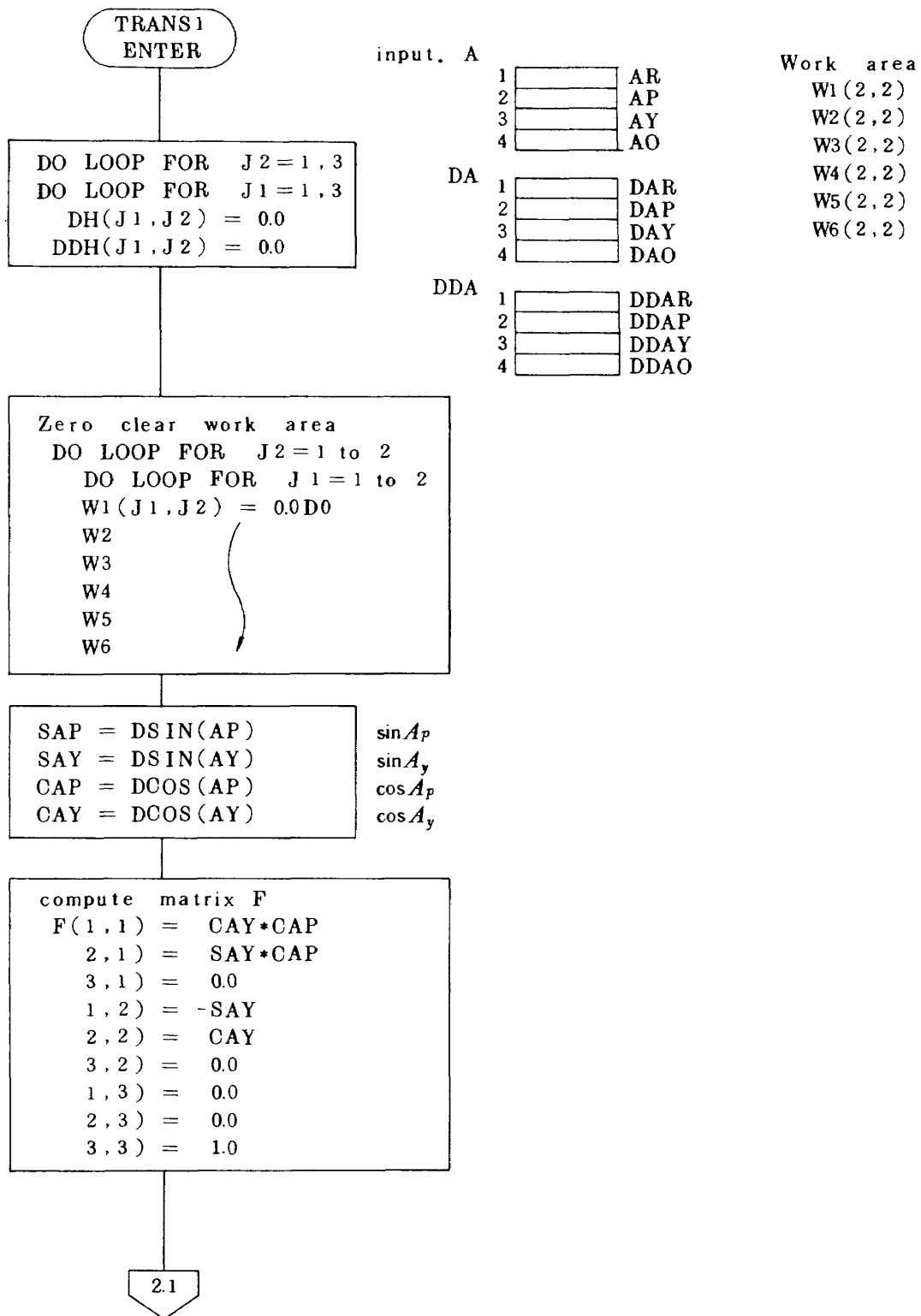


図 18 TRANS1 routine のフロー図

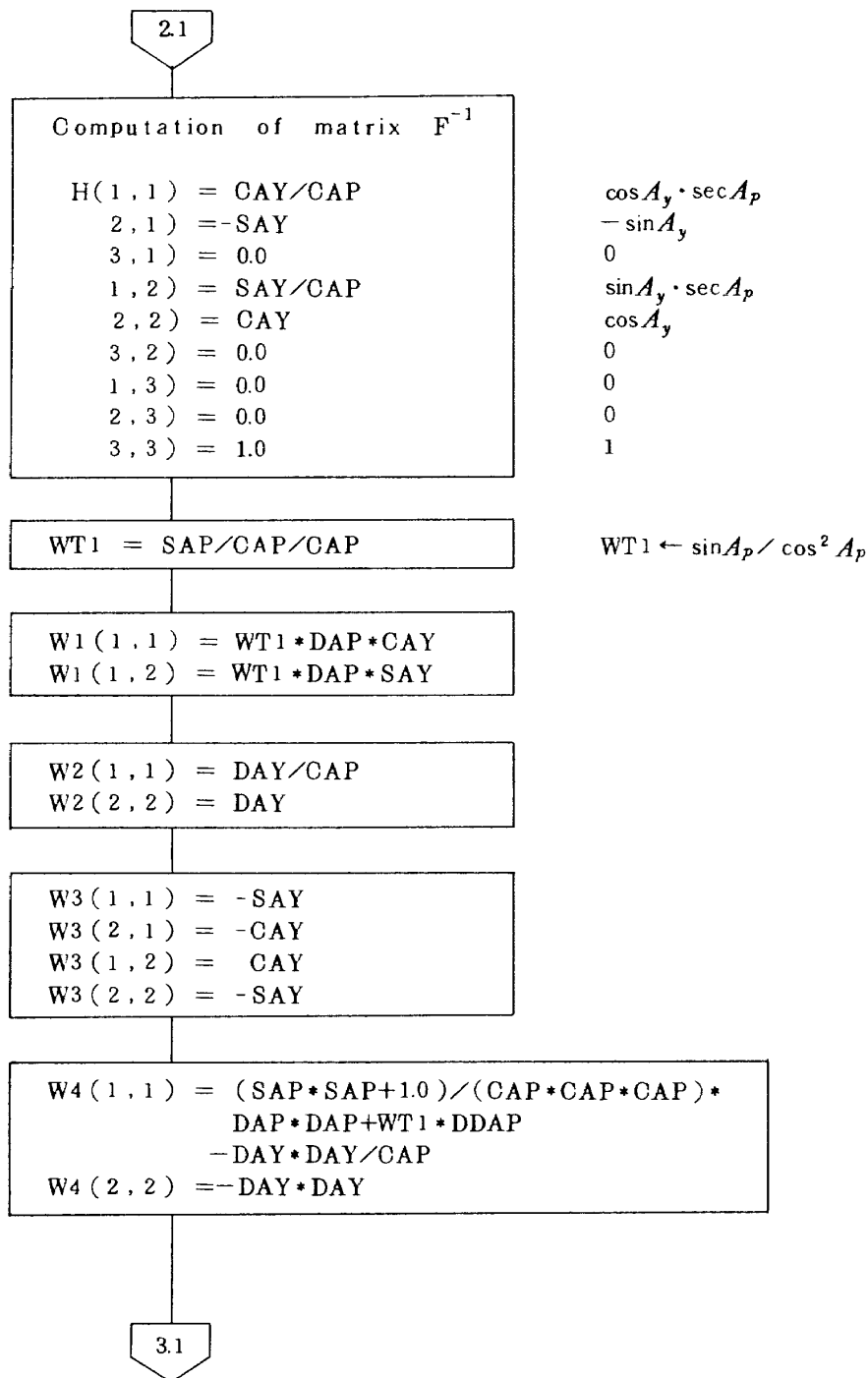


図 18 (つづき)

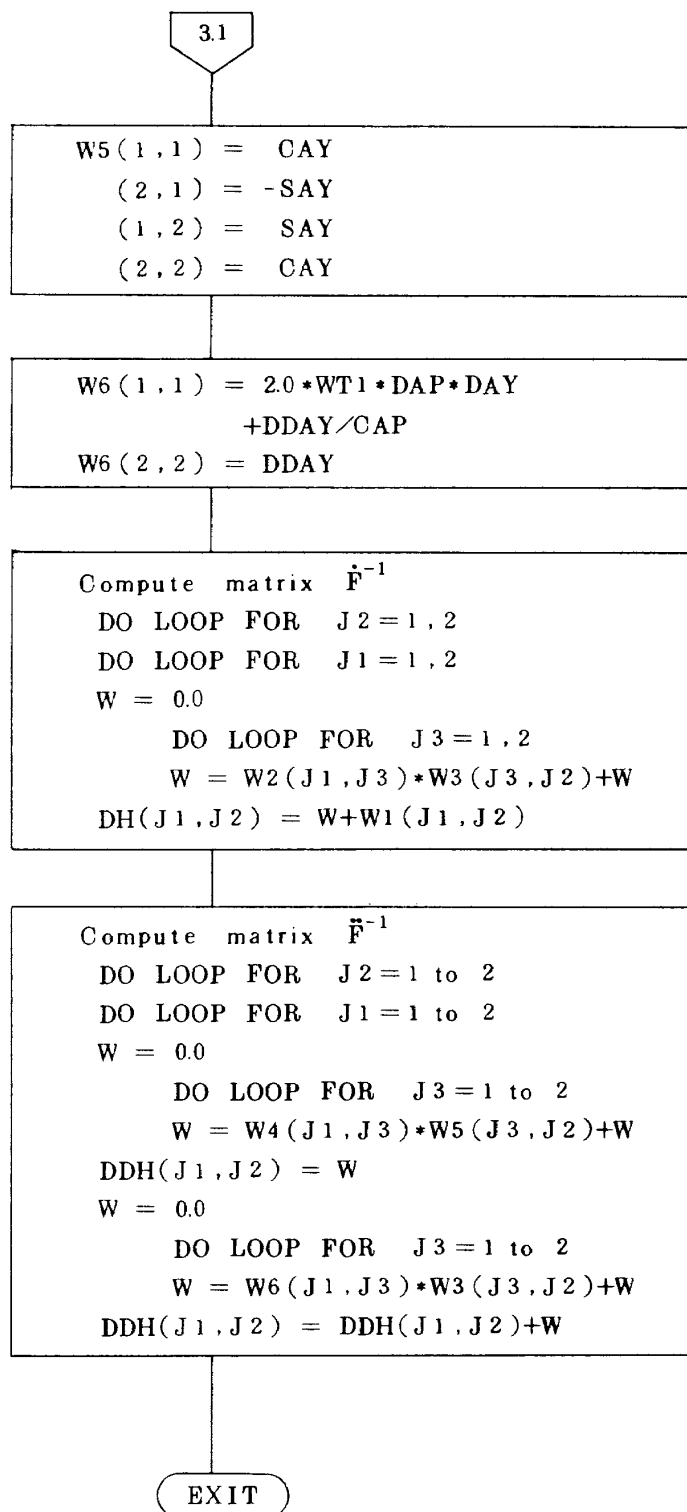
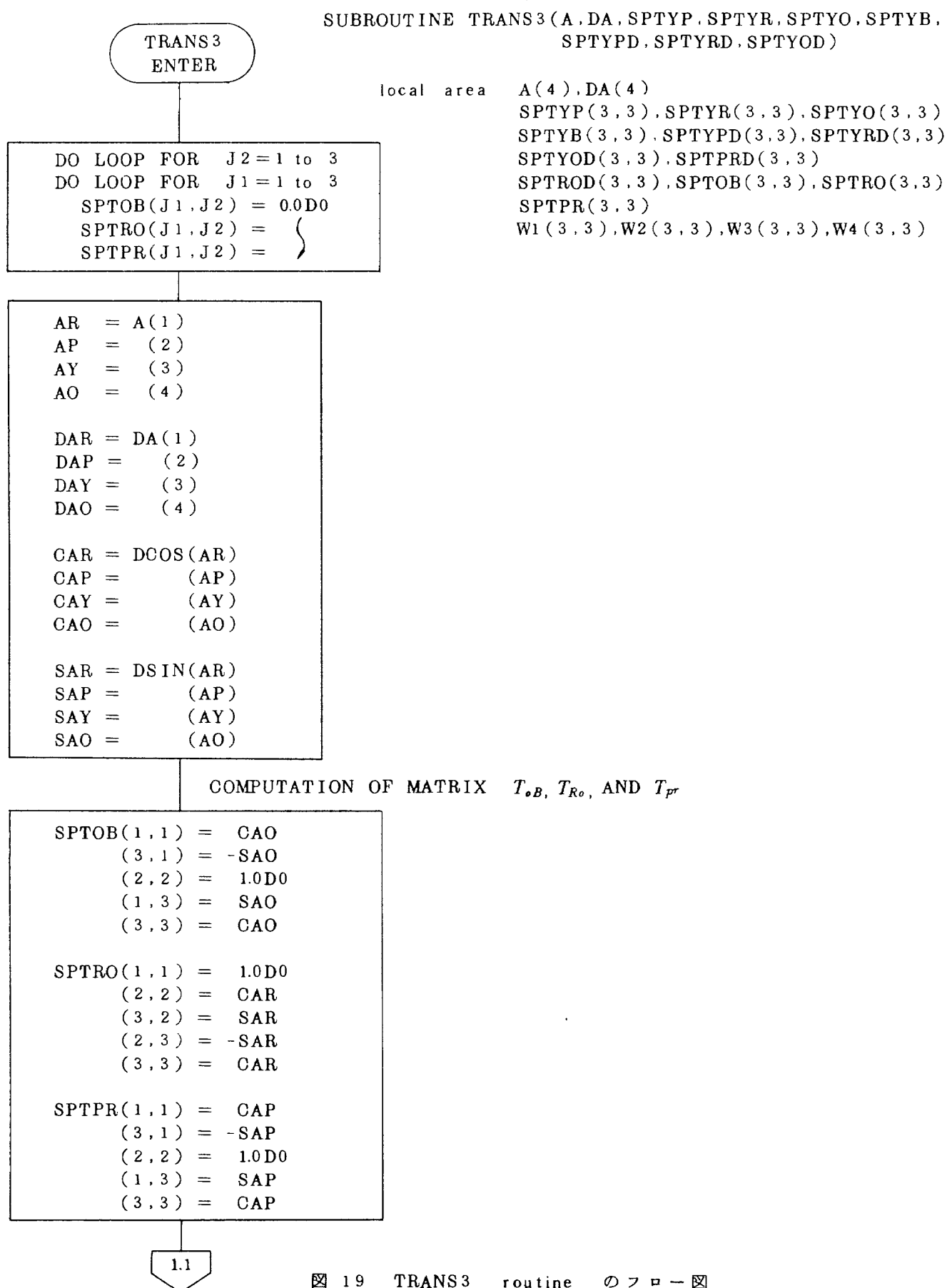
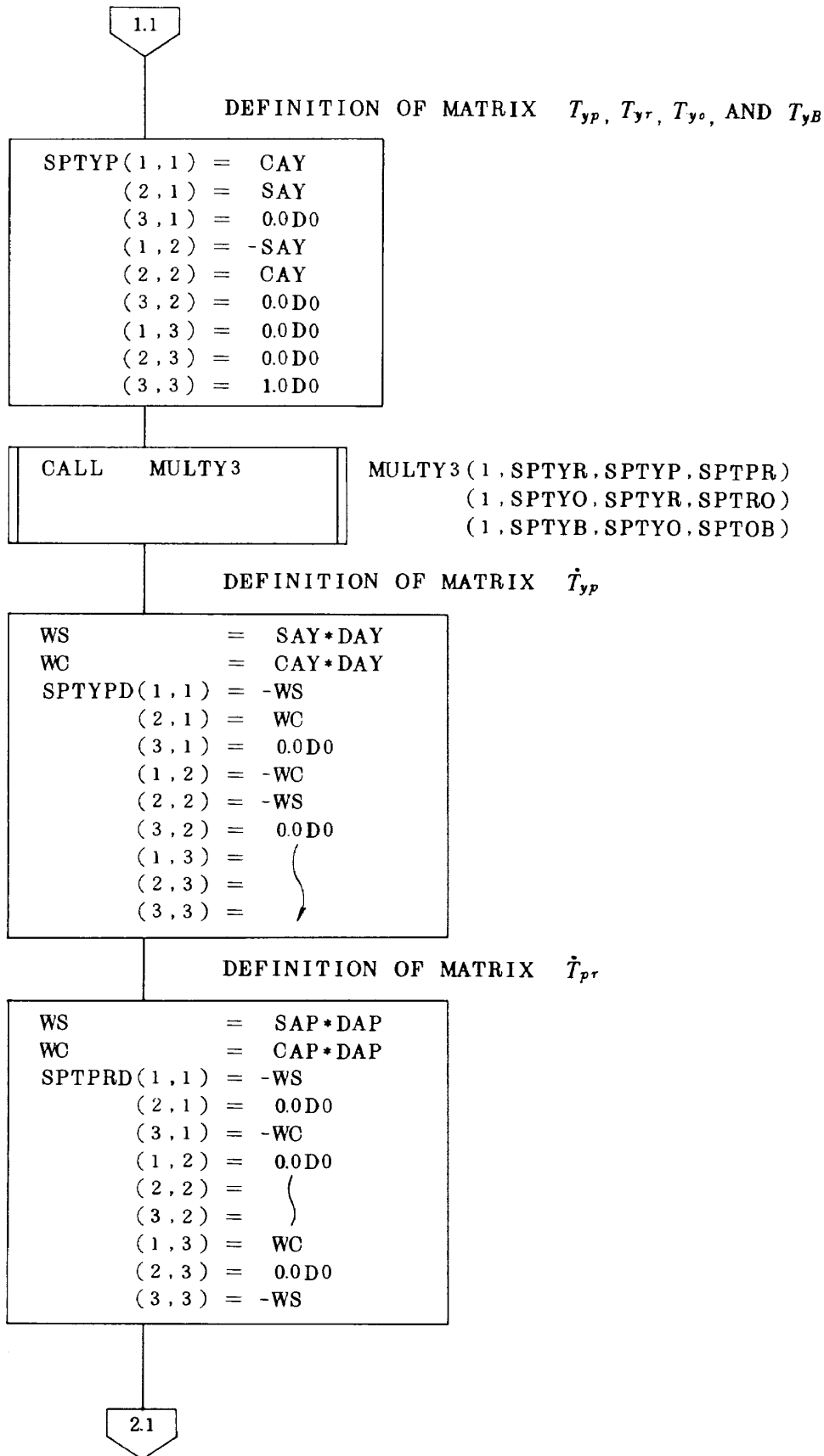


図 18 (つづき)

## TRANS3 DETAILED FLOWCHART







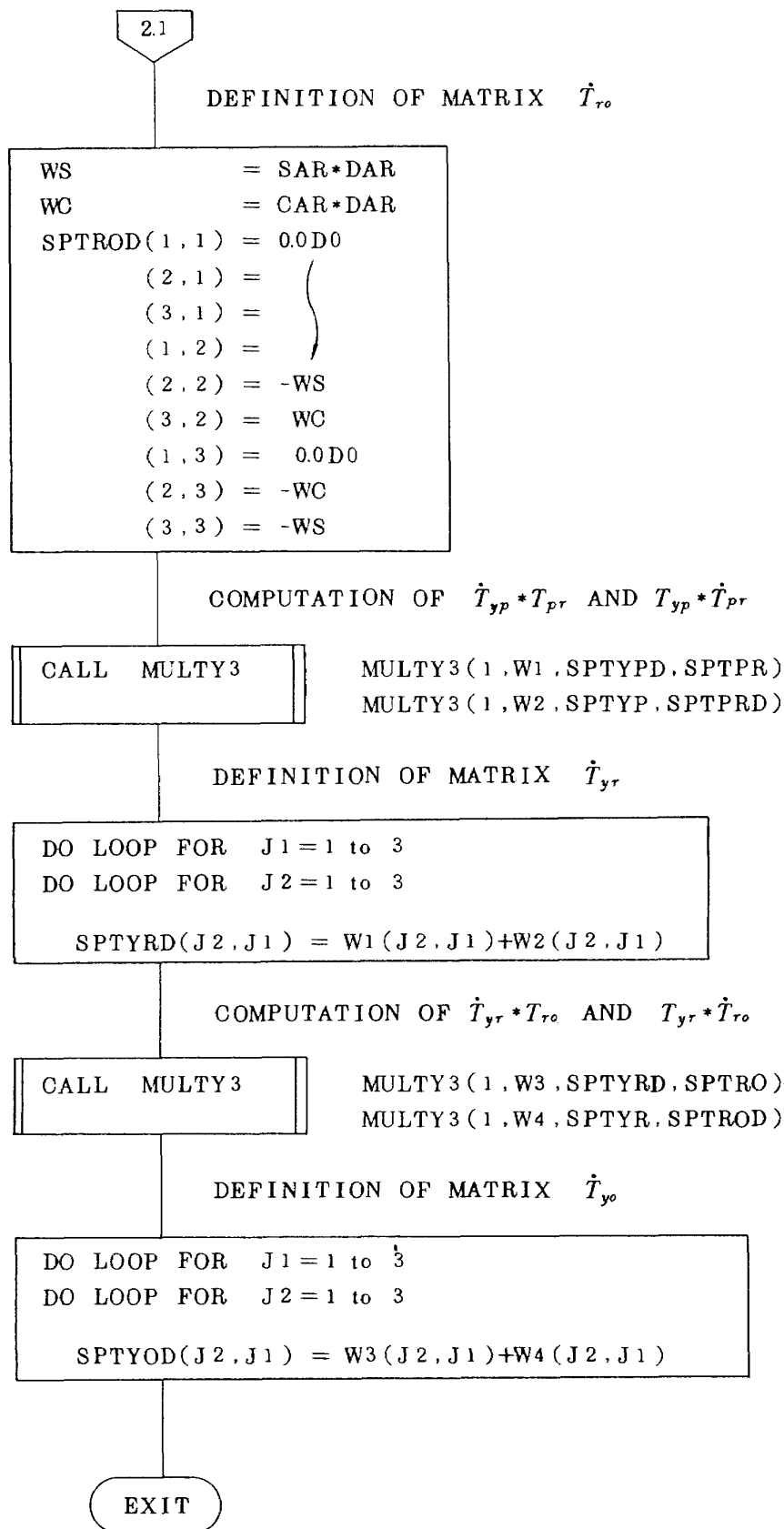


図 19 (つづき)

ACCP1

Detailed flowchart

Subroutine ACCP1(JFLOW, DTSS, PFDATA, AOUT)

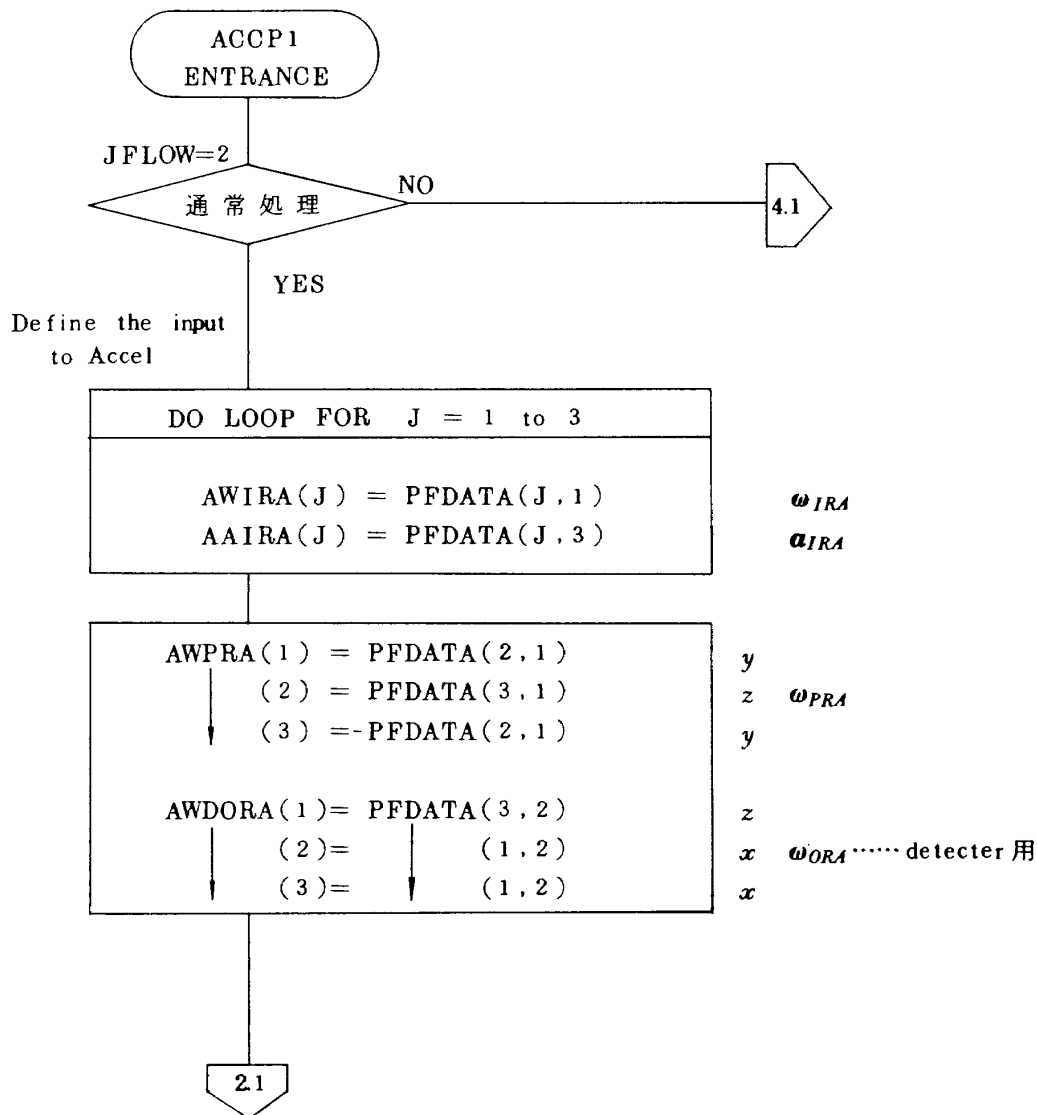
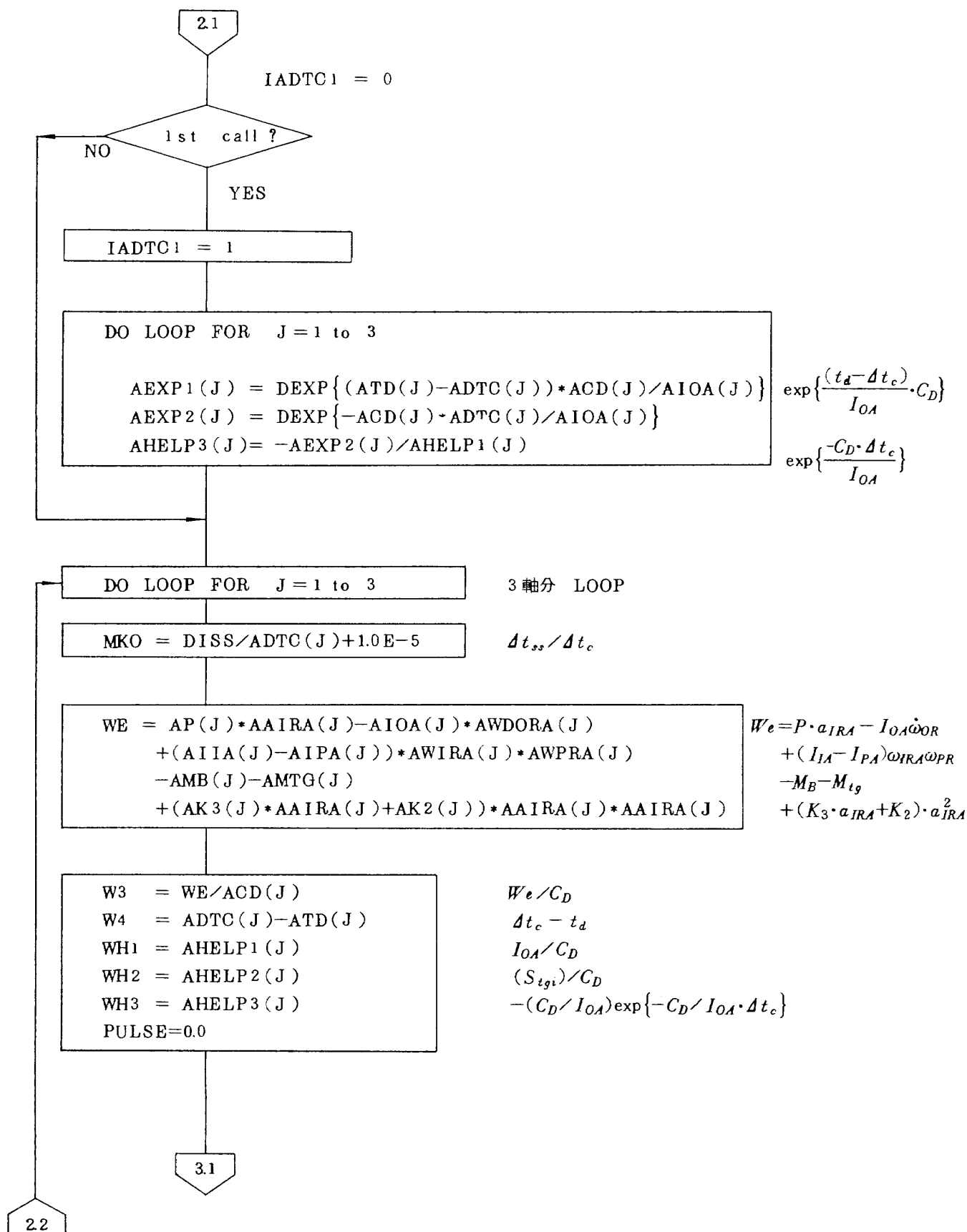


図 20 ACCP1 routine のフロー図



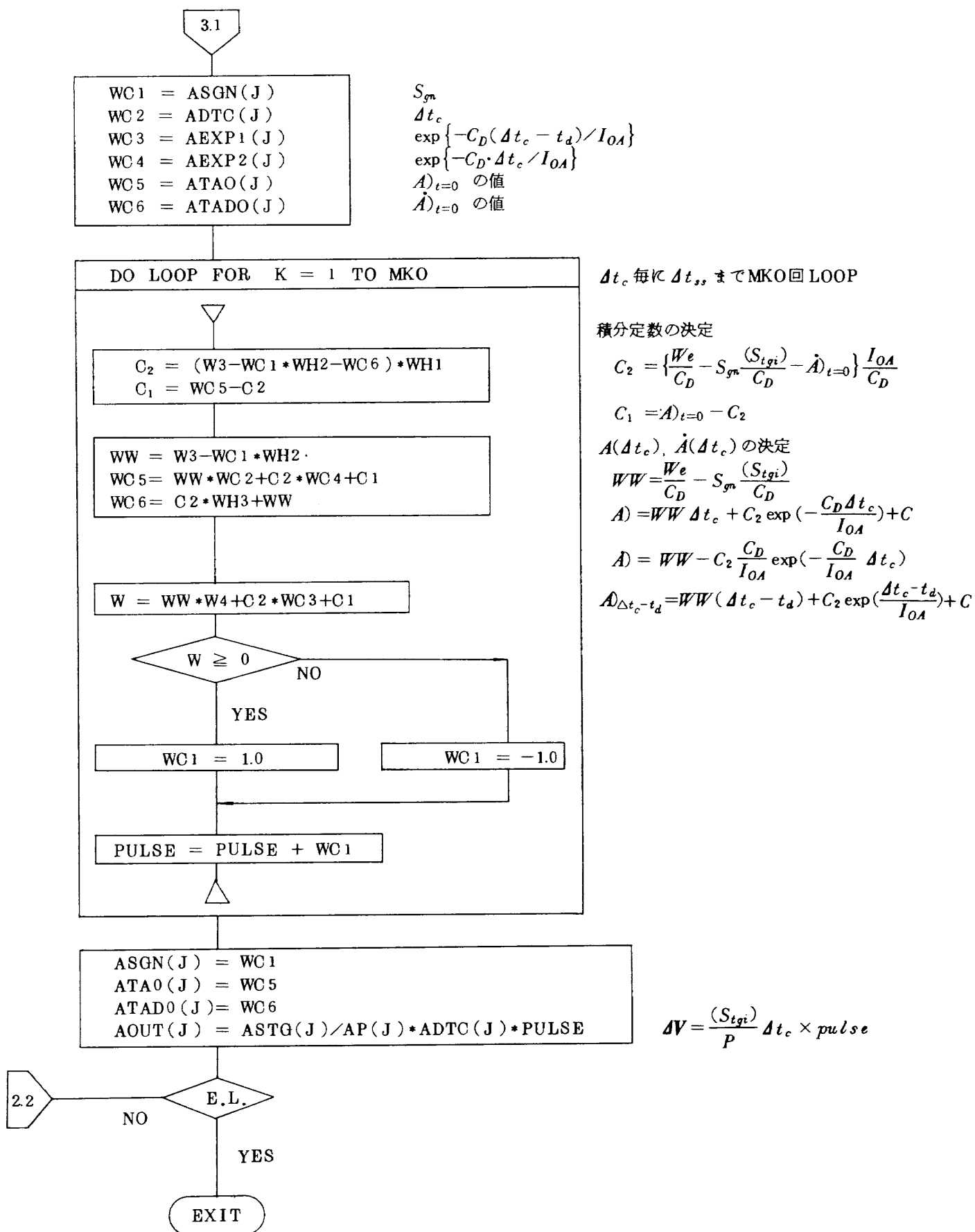


図 20

(つづき)

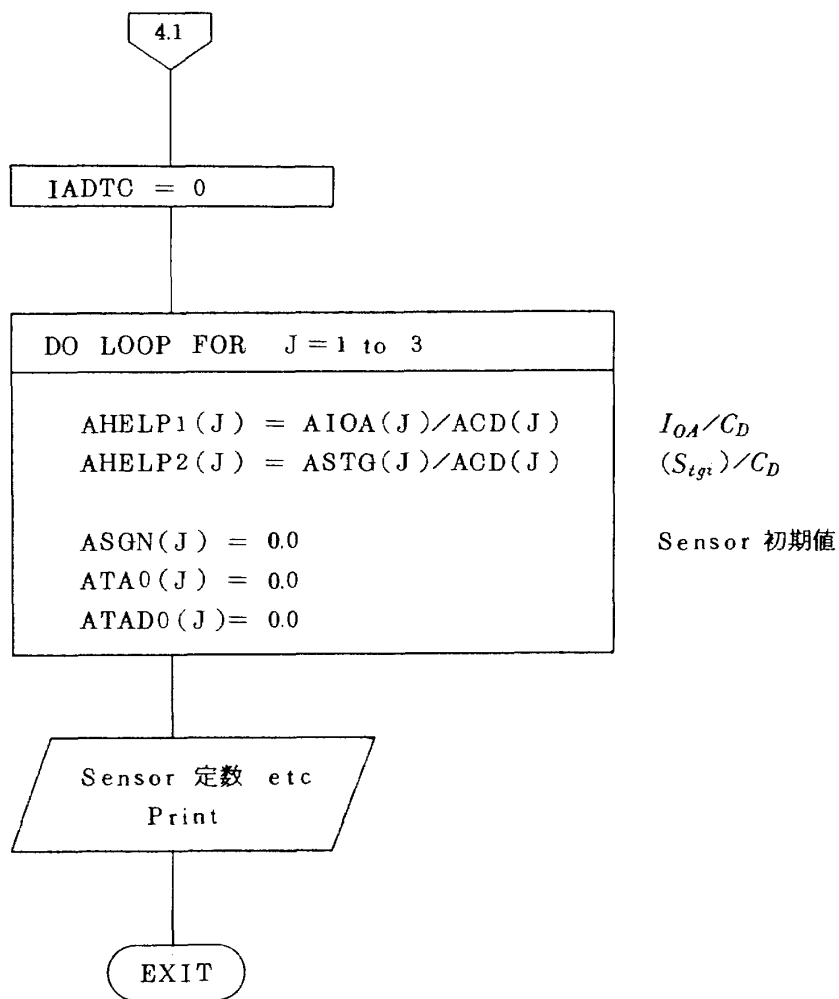


図 20 (つづき)

MULTY1 VO1, LO1

## SUBROUTINE MULTY1

1 形式 MULTY1(JF,Y,T,X)

Dimension T(3,3), X(3) ..... input  
 Y(3) ..... output

2 概要

JF = 1 :  $Y = TX$ = 2 :  $Y = T^{-1}X$ 

$$\begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix}$$

3 Detailed flowchart

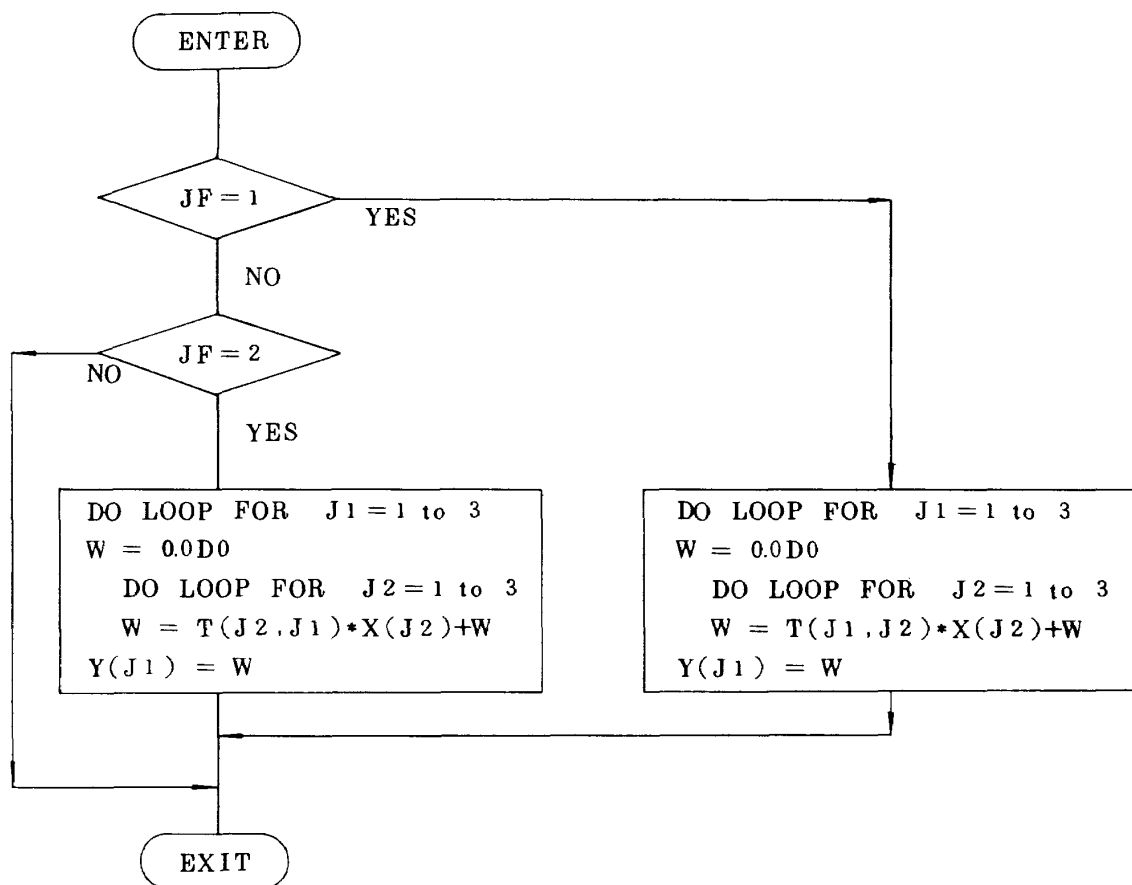


図 21 MULTY1 routine のフロー図

MULTY2 VO1, LO1

SUBROUTINE MULTY2

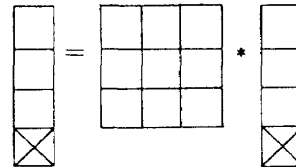
1. 形式 MULTY2(JF,Y,T,X)

Dimension T(3,3), X(4) ..... input  
Y(4) ..... output

2. 概要

JF = 1 :  $Y = T \cdot X$

= 2 :  $Y = T^{-1} \cdot X$



3. Detailed flowchart

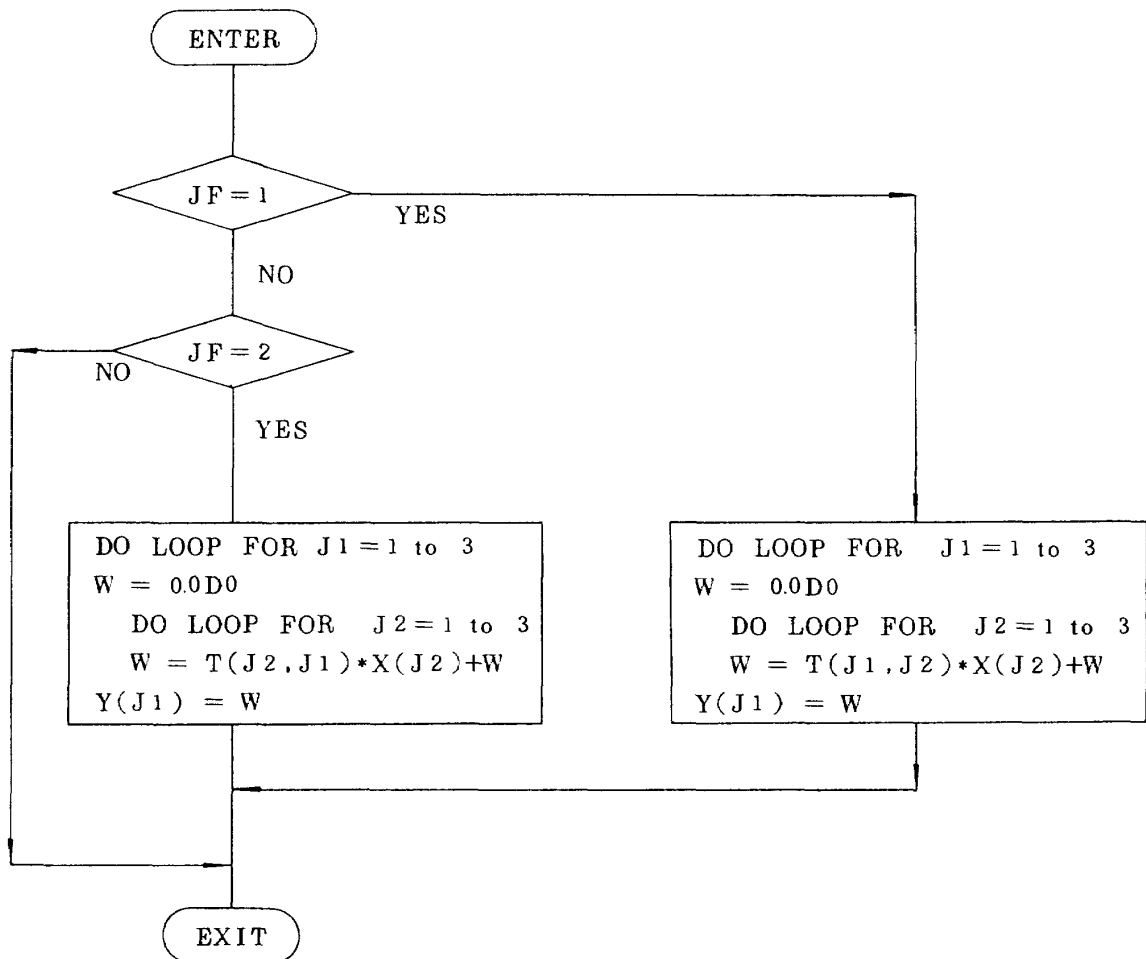


図 22 MULTY2 routine のフロー図

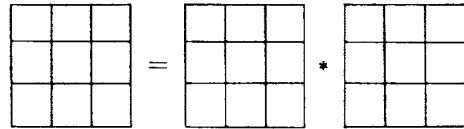
MULTY3 VO1, LO1

SUBROUTINE MULTY3

1. 形式 MULTY3(JF,Y,T,X)

Dimension T(3,3), X(3,3) ..... input  
 Y(3,3), ..... output

2. 概要

JF = 1 :  $Y = T \cdot X$ = 2 :  $Y = T^{-1} \cdot X$ 

3. Detailed flowchart

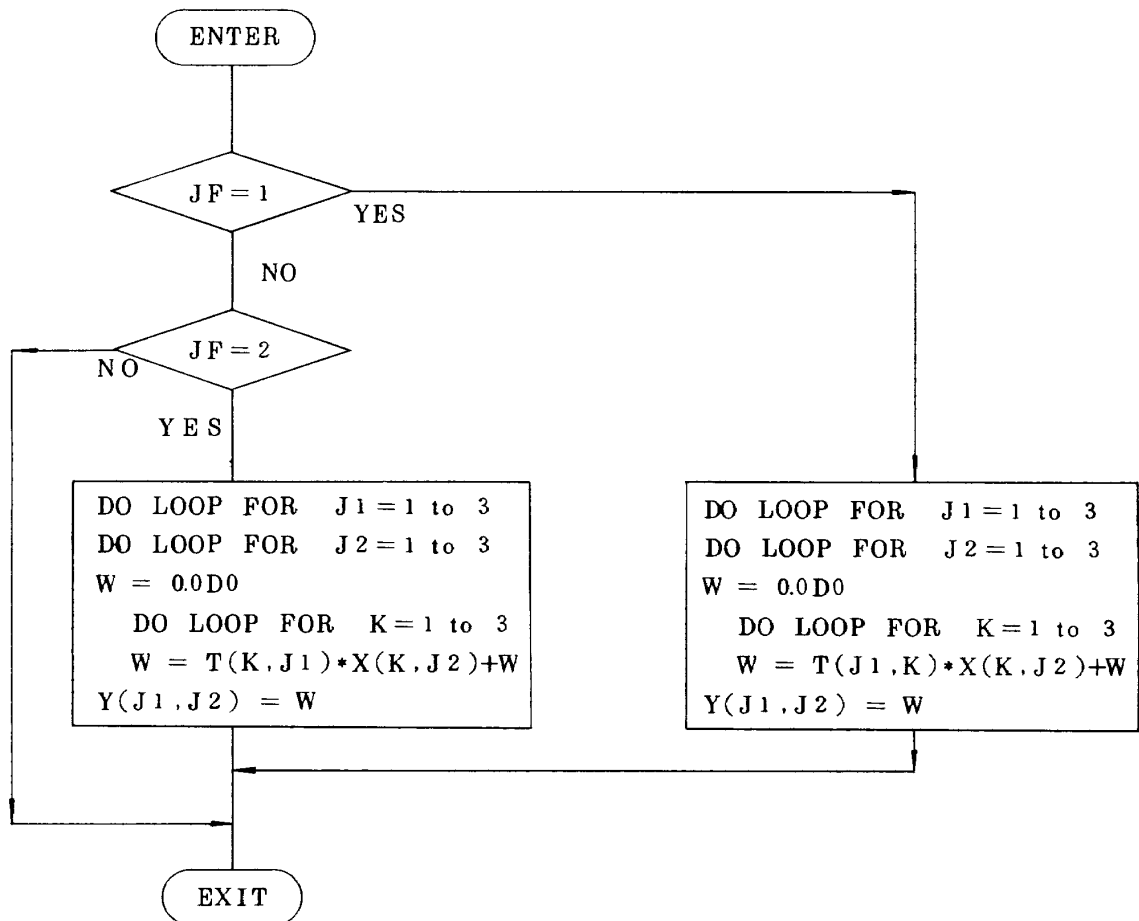


図 23 MULTY3 routine のフロー図



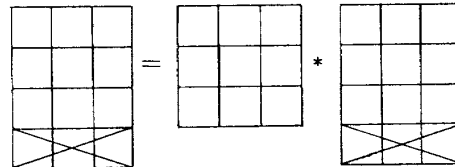
MULTY4 Vol. LO1

SUBROUTINE MULTY4

1. 形式      **MULTY4(JF,Y,T,X)**  
             Dimension     $T(3,3)$ ,  $X(4,3)$  ..... input  
                              $Y(4,3)$  ..... output

2. 概要

$$\begin{aligned} JF = 1 & : Y = T \cdot X \\ & = 2 : Y = T^{-1} \cdot X \end{aligned}$$



3. Detailed flowchart

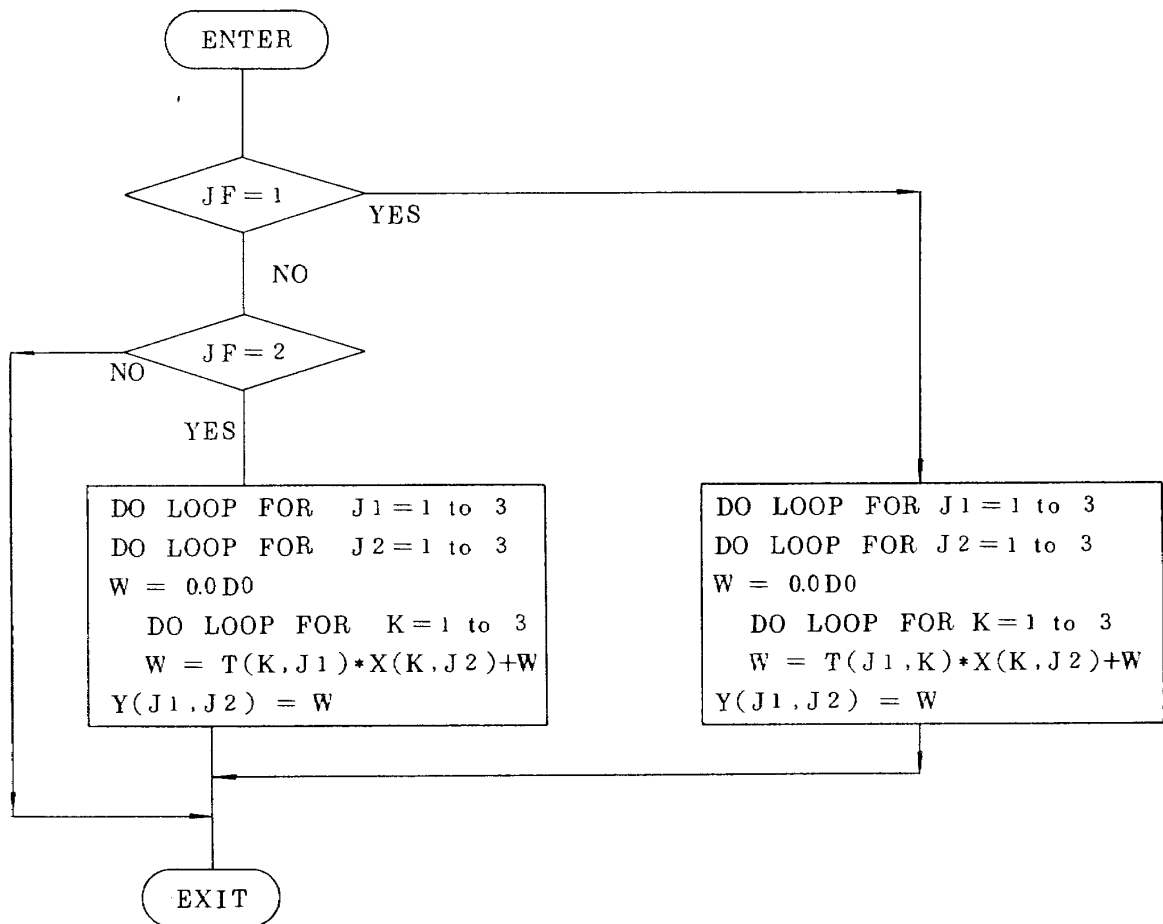
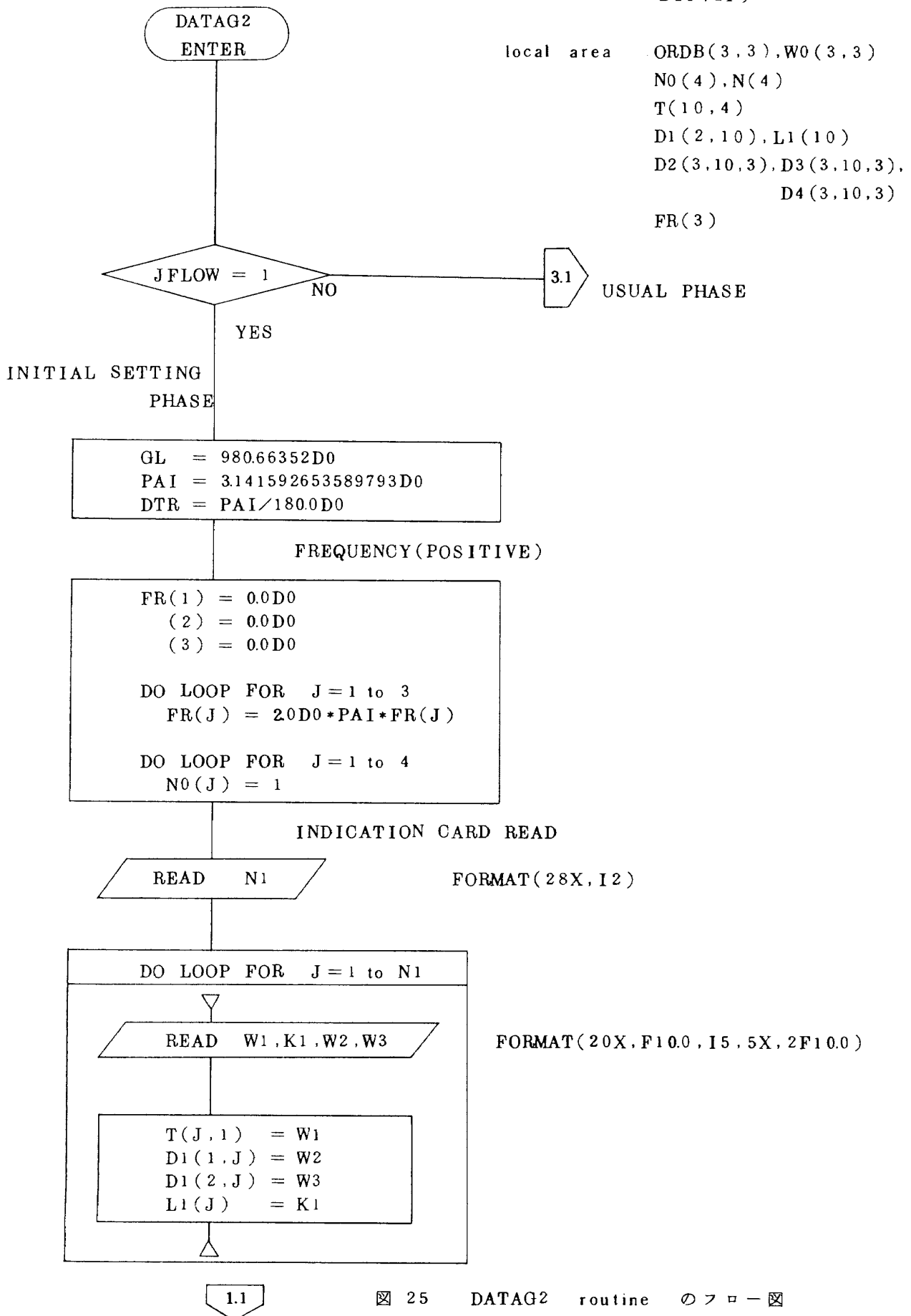


図 24 MULTY4 routine のフロー図

## DATAG2 DETAILED FLOWCHART

SUBROUTINE DATAG2(JFLOW, TIME, ORDB, DTF,  
DTP, IP)



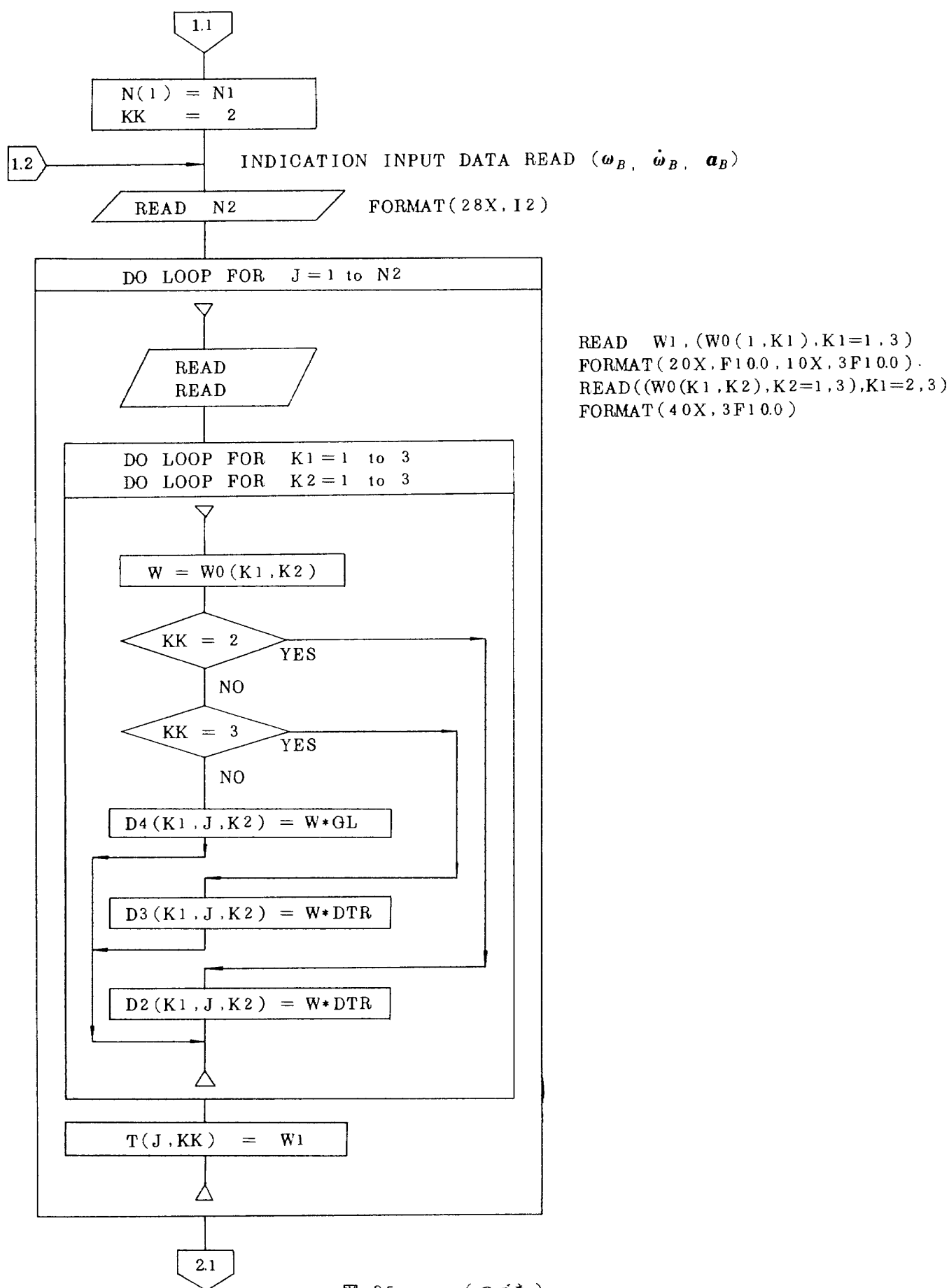


図 25 (つづき)

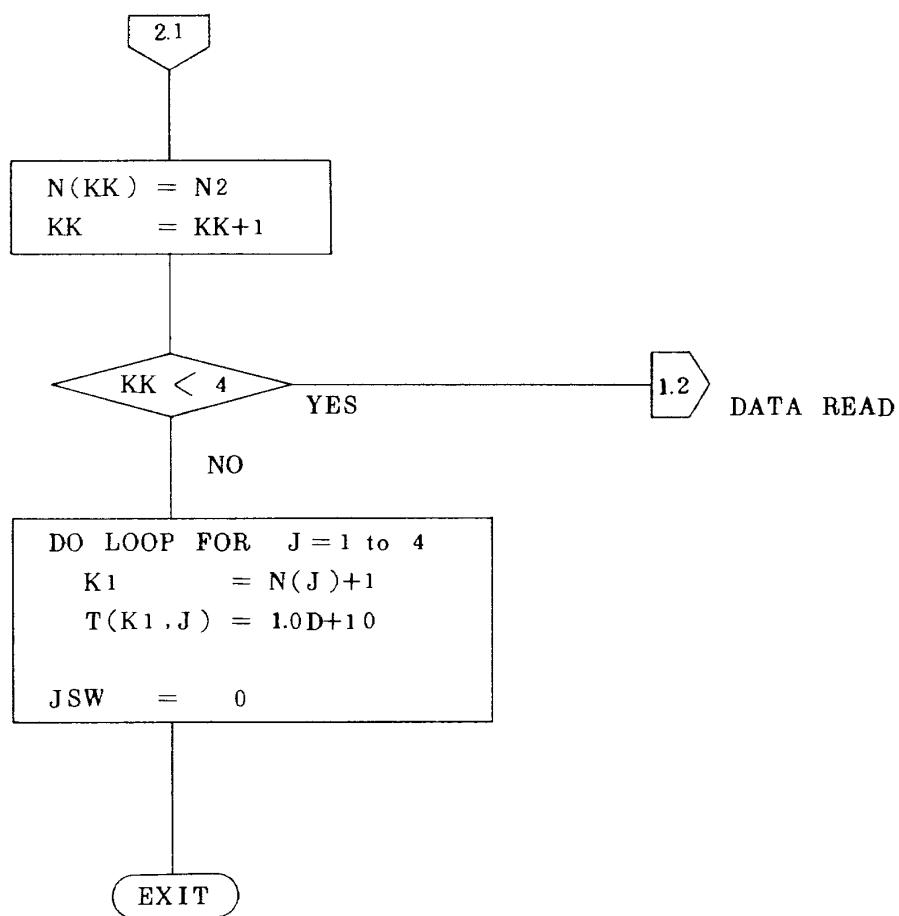
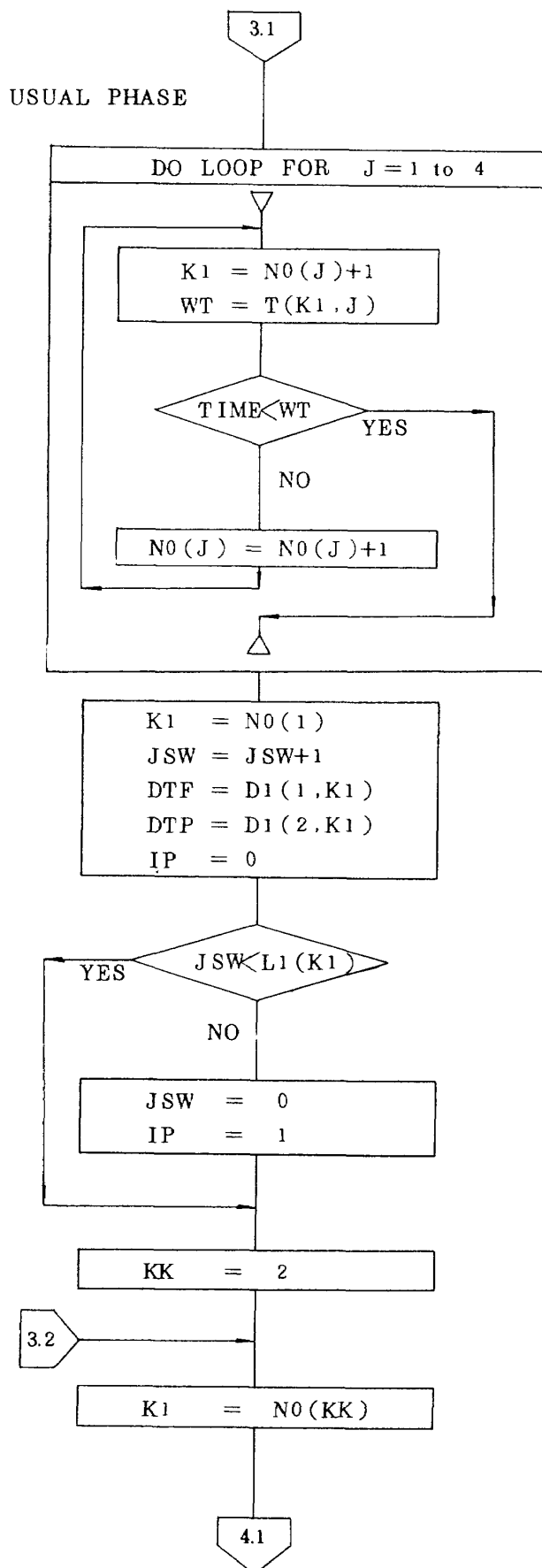
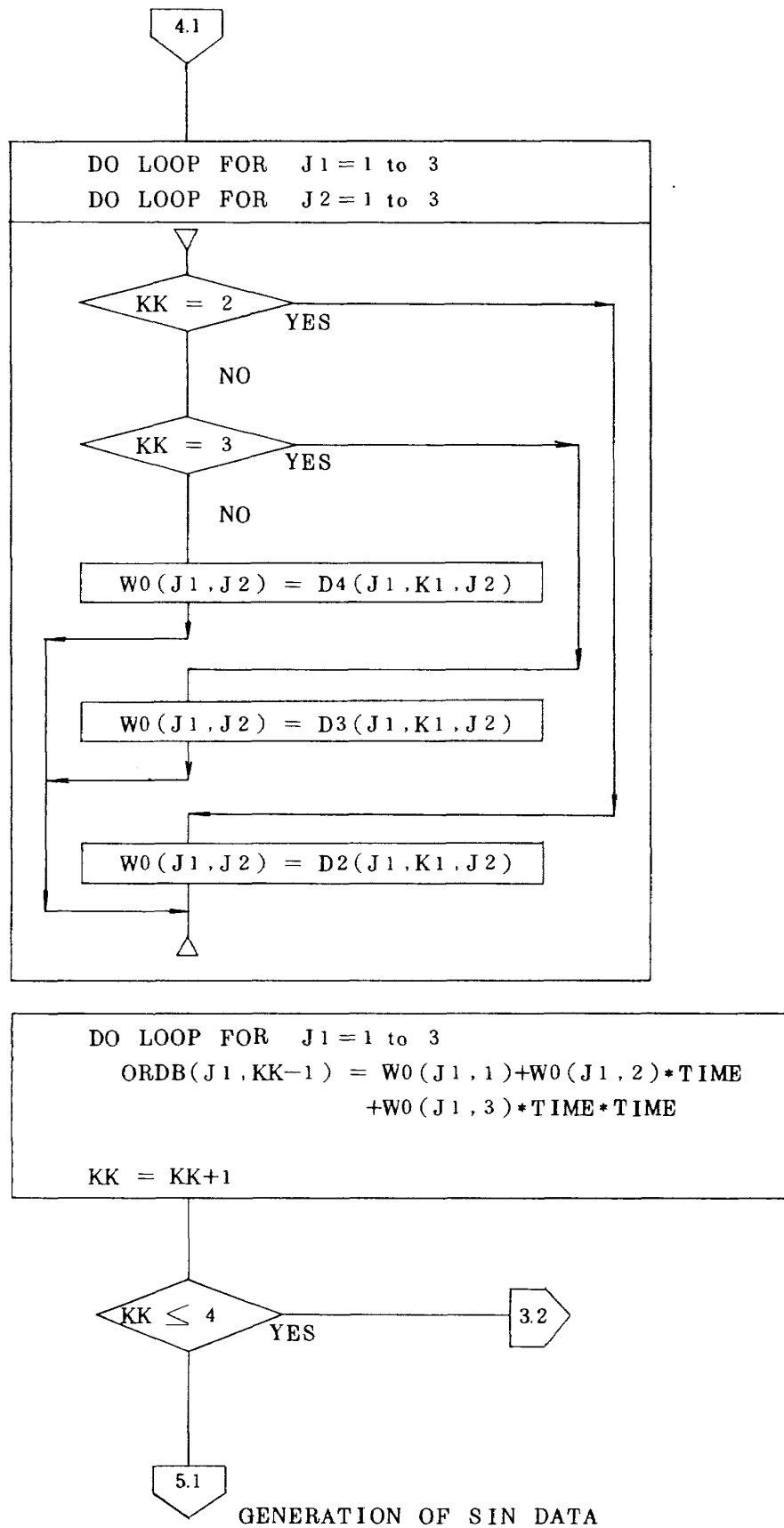


図 25 (つづき)





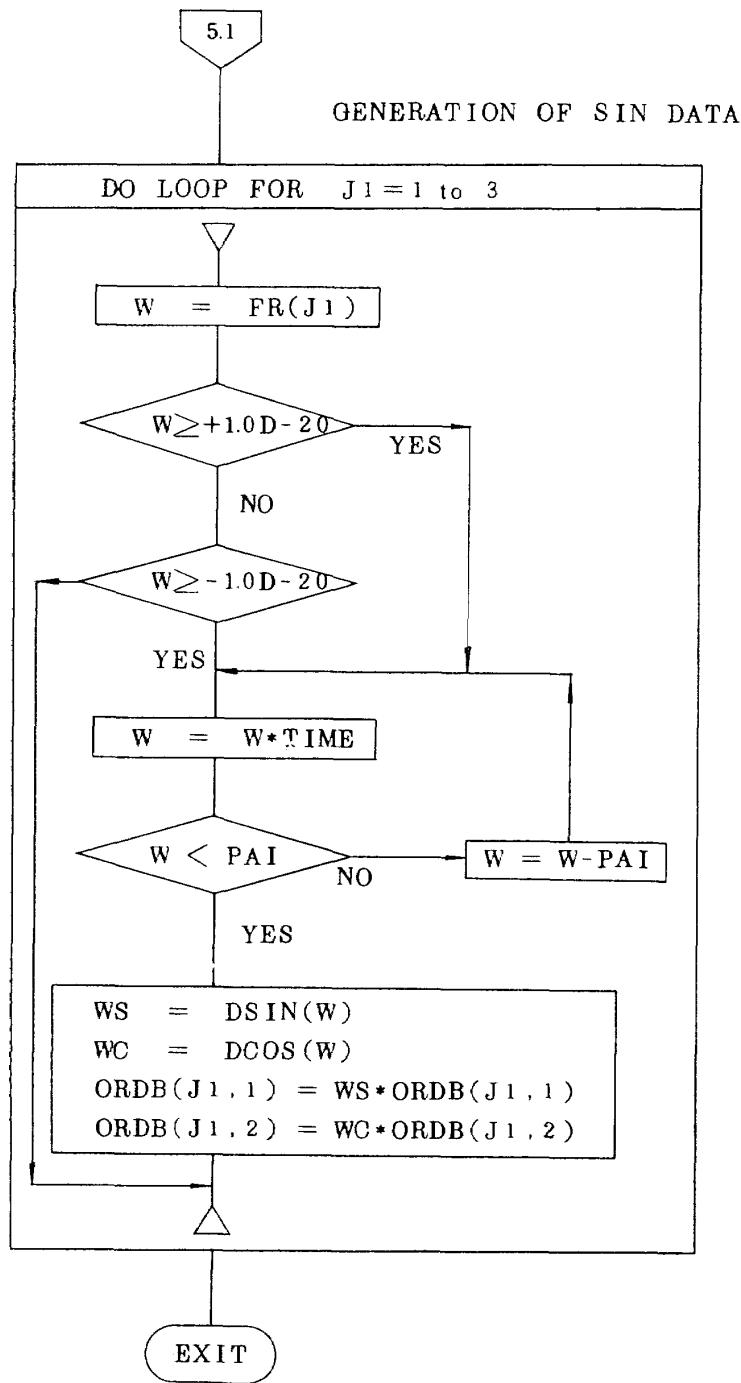


図 25 (つづき)

Detailed flowchart  
of PPOOL3

PAI = 3.141592653589793D0  
RTOD = 180.0/PAI

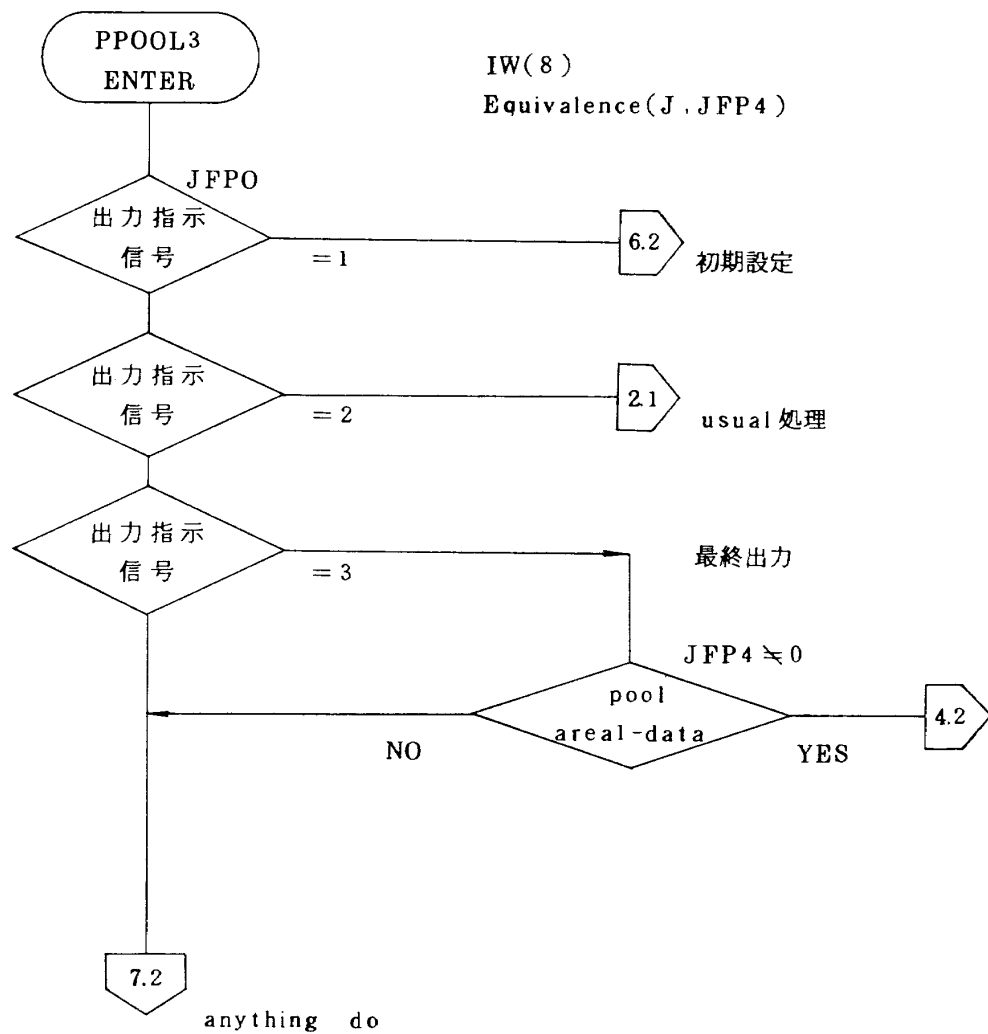
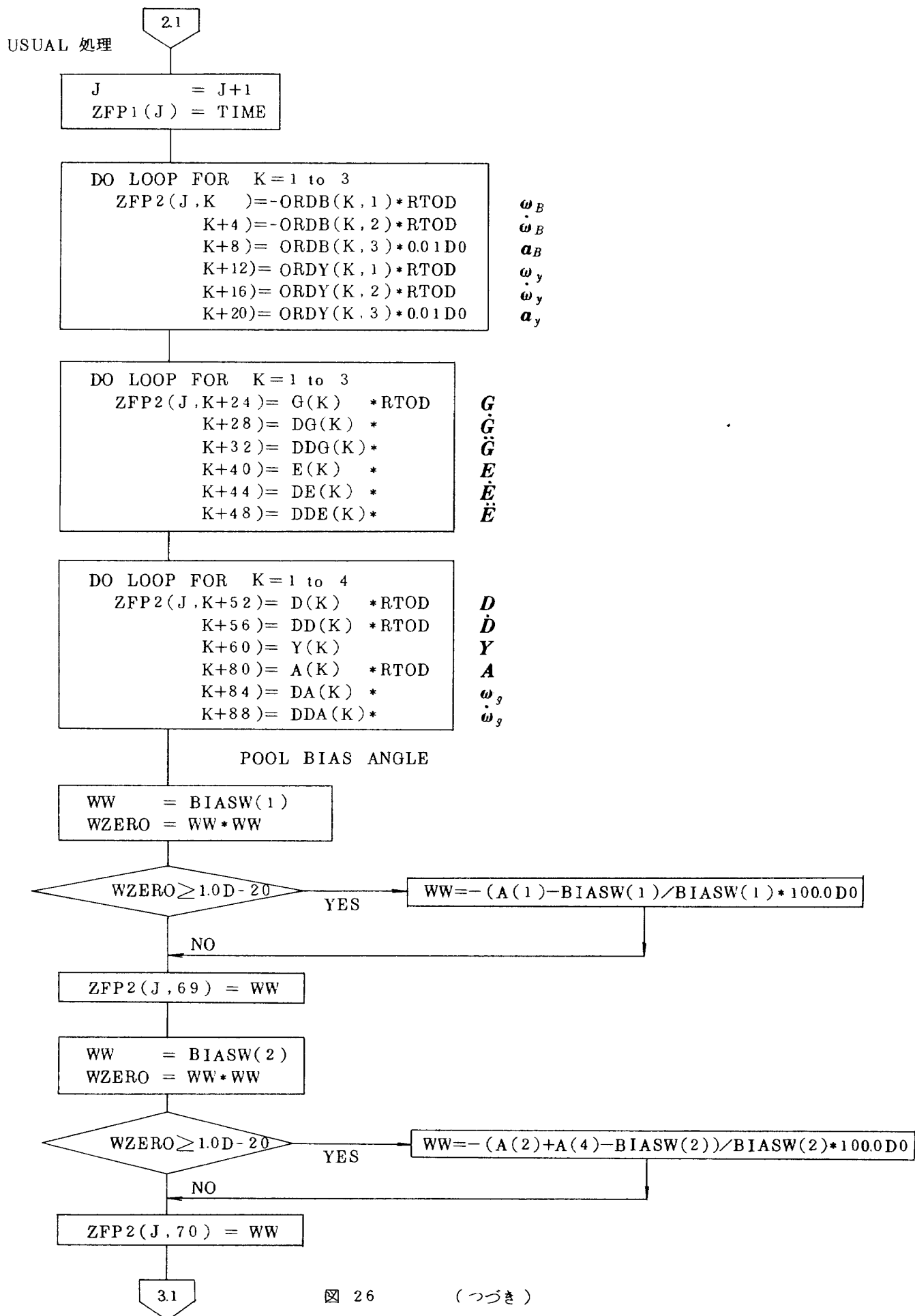
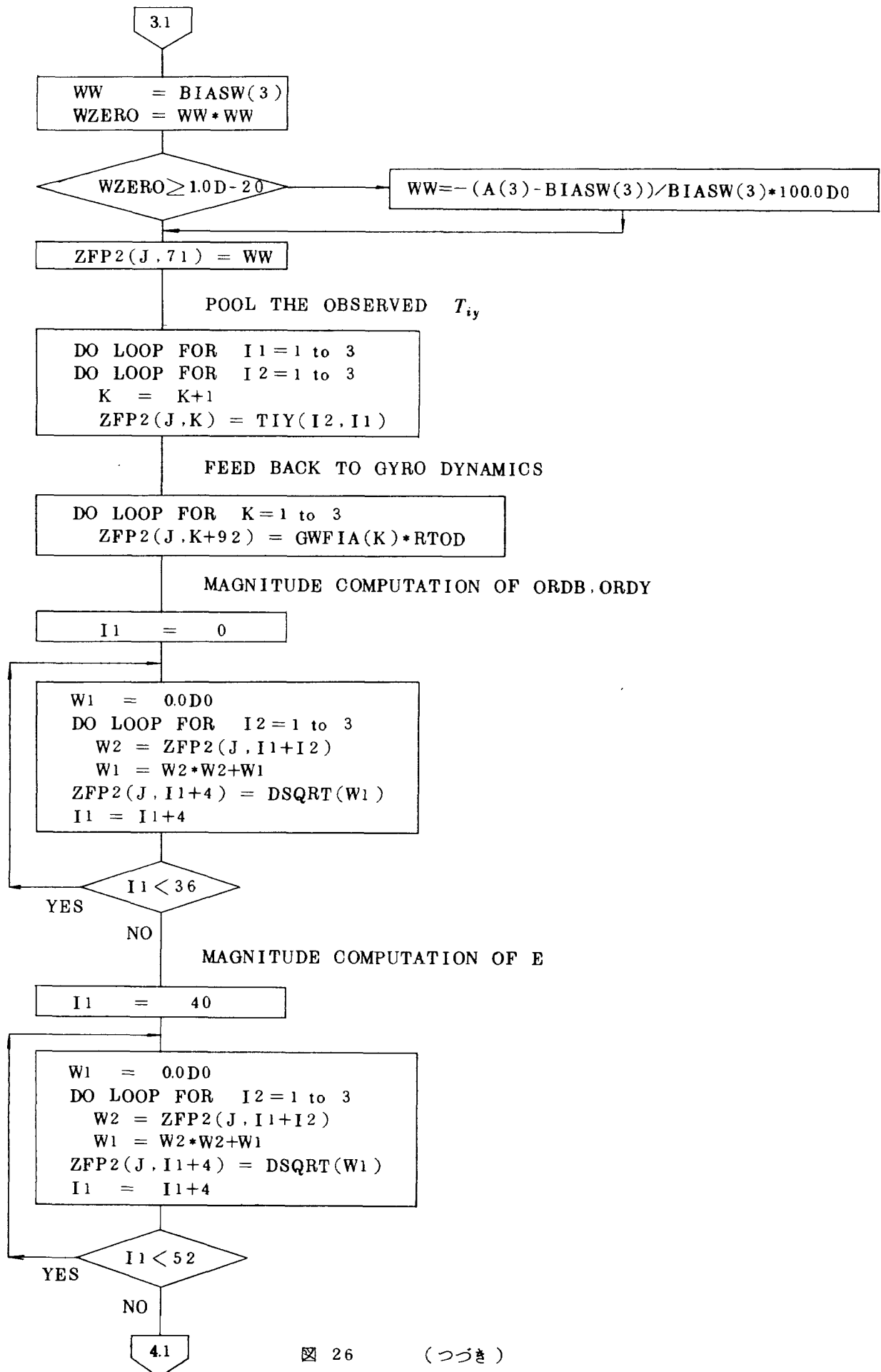
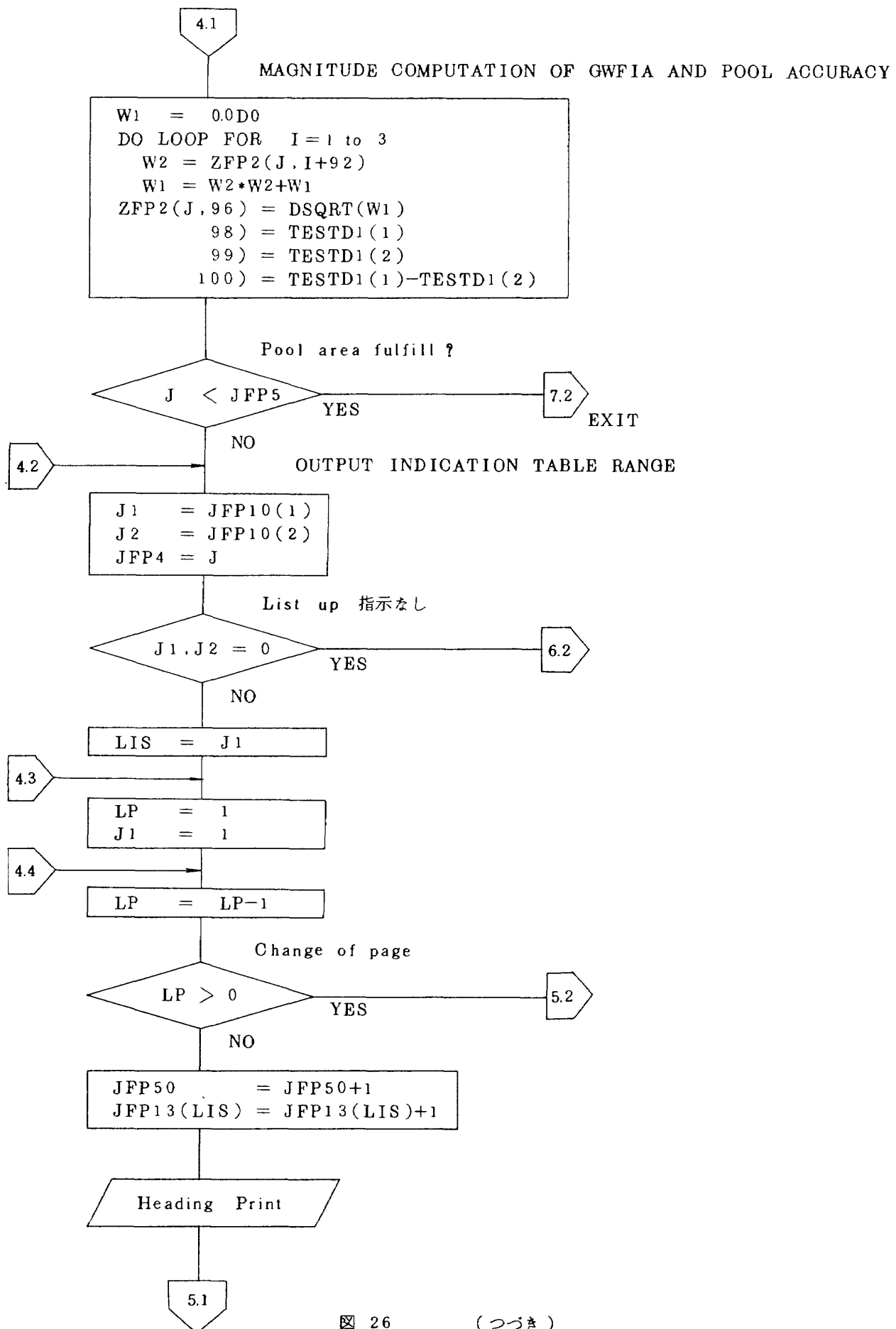


図 26 PPOOL3 routine のフロー図









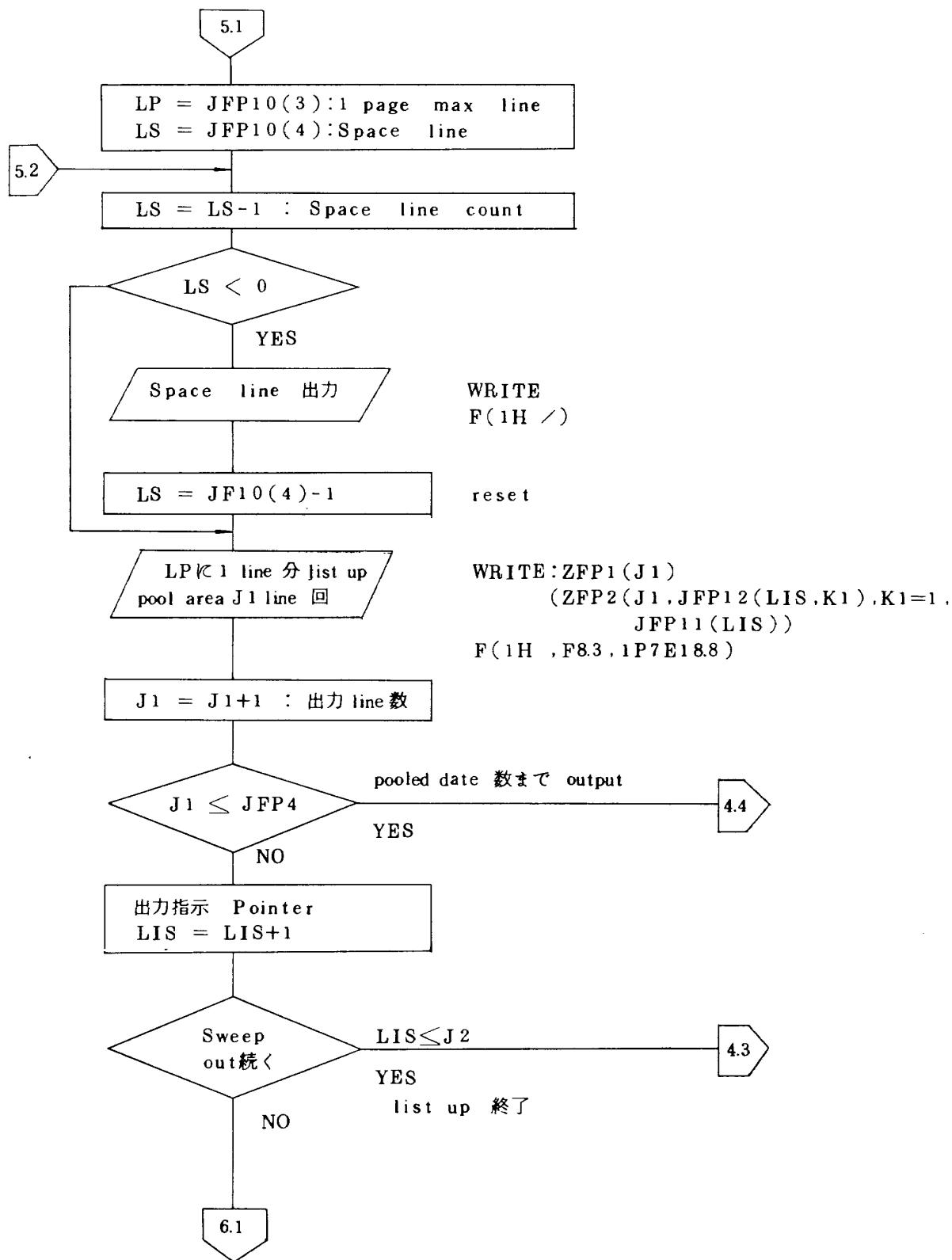
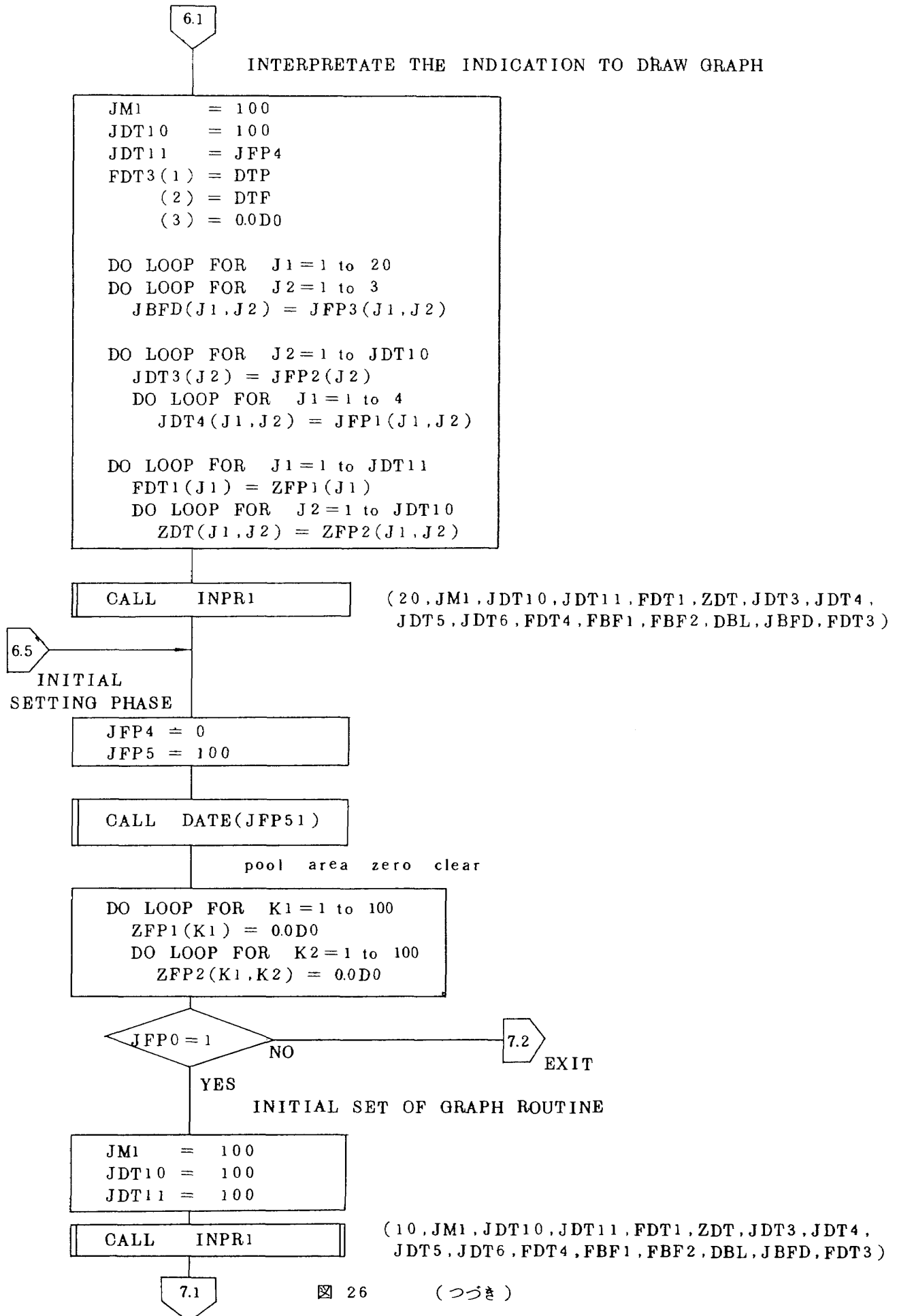


図 26 (つづく)



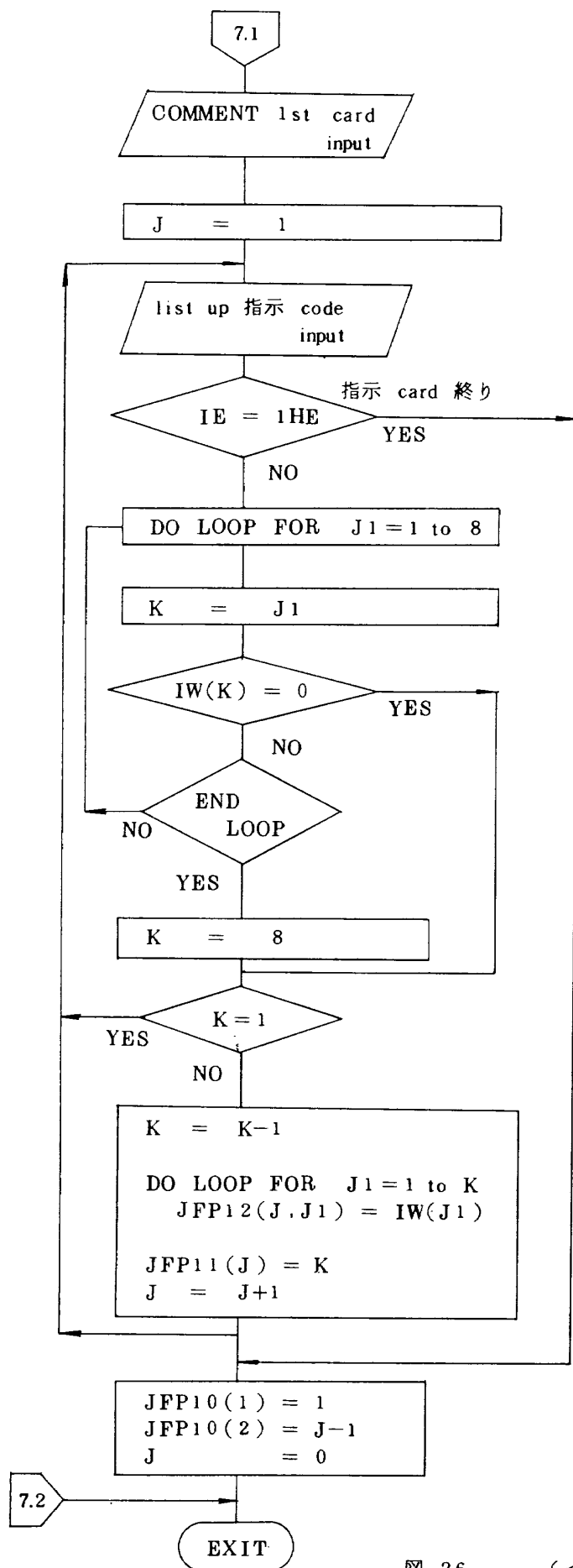


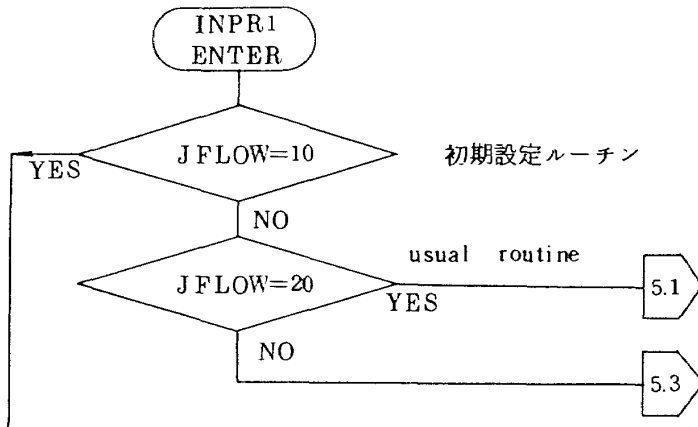
図 26

(つづき)

SUBROUTINE INPR1(JFLOW, JM1, JDT10, JDT11, FDT1, ZDT, JDT3, JDT4, JDT5,  
JDT6, FDT4, FBF1, FBF2, DBL, JBFD, FDT3)

DIMENSION SCV(3), IW(5), ID2(3),  
ID4(4), SD6(2), ITM(35),  
JSC(2)

DATA JDT1/15\*4H /  
JDT2/ 3\*4H /  
JGT3/800\*0 /  
ITM/1H1, ~, 1H9,  
1HA, ~, 1HZ, /



DO LOOP FOR J1=1 TO 50  
DO LOOP FOR J2=1 TO 3  
JBFD(J1, J2) = 4H

initial setting routine

DO LOOP FOR J2=1 TO JDT10  
JDT3(J2) = 1  
DO LOOP FOR J1=1 TO 4  
JDT4(J1, J2) = 4H

DO LOOP FOR J=1 TO 3  
FDT3(J) = 0.0D0

DO LOOP FOR J=1 TO JDT10  
JDT3(J) = 1  
JDT5(J) = 4H  
JDT6(J) = 0

DO LOOP FOR J2=1 TO JDT10  
DO LOOP FOR J1=1 TO 4  
JDT4(J1, J2) = 4H

DO LOOP FOR J2=1 TO JDT10  
DO LOOP FOR J1=1 TO 2  
FDT4(J1, J2) = 0.0D0

DO LOOP FOR J=1 TO JDT10  
KW = J/35  
KK = J-35\*KW  
IF(KK, EQ, 0) KK=35  
JDT5(J) = ITM(KK)

1.1

図 27 INPR1 routine のフロー図

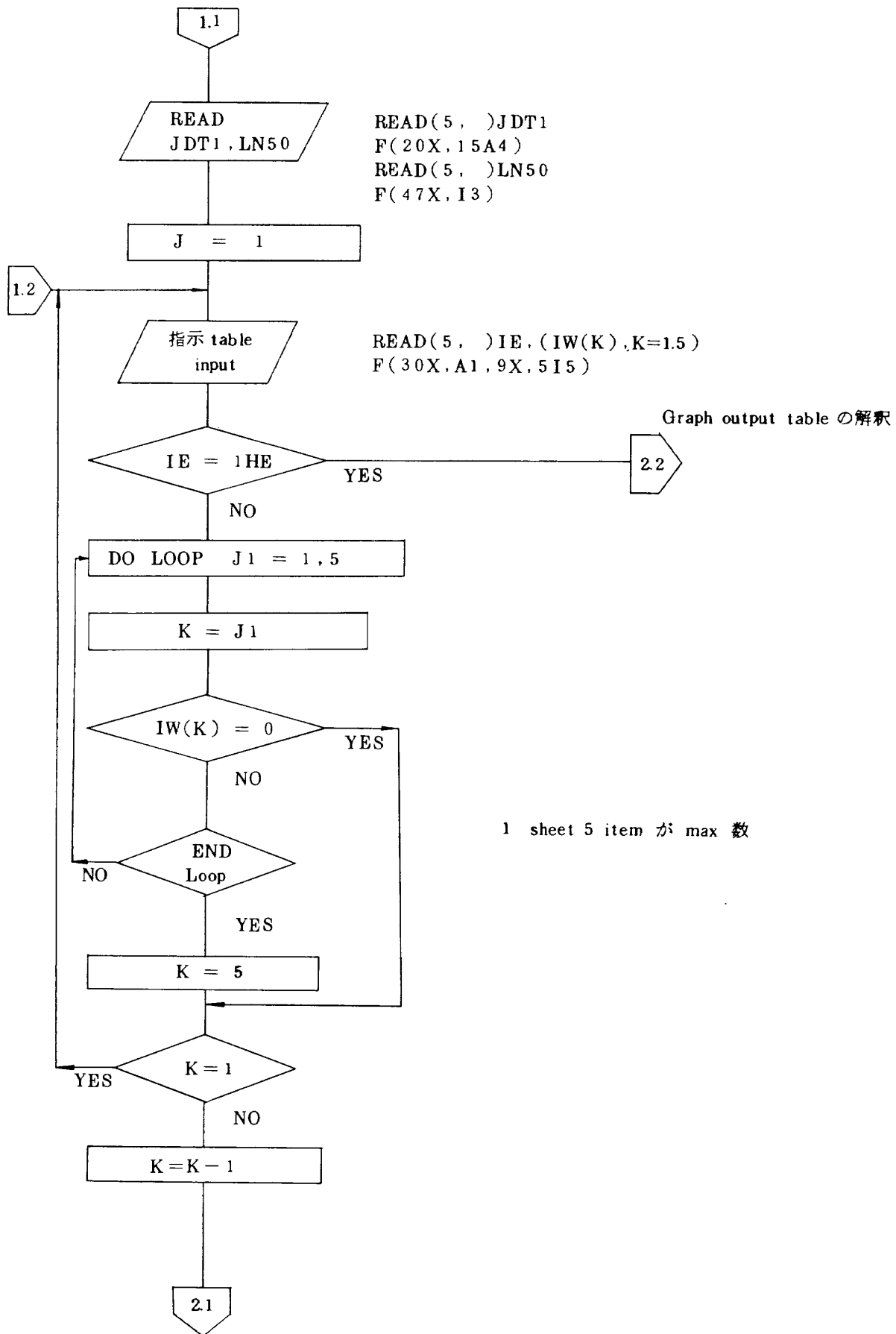


図 27 (つづき)



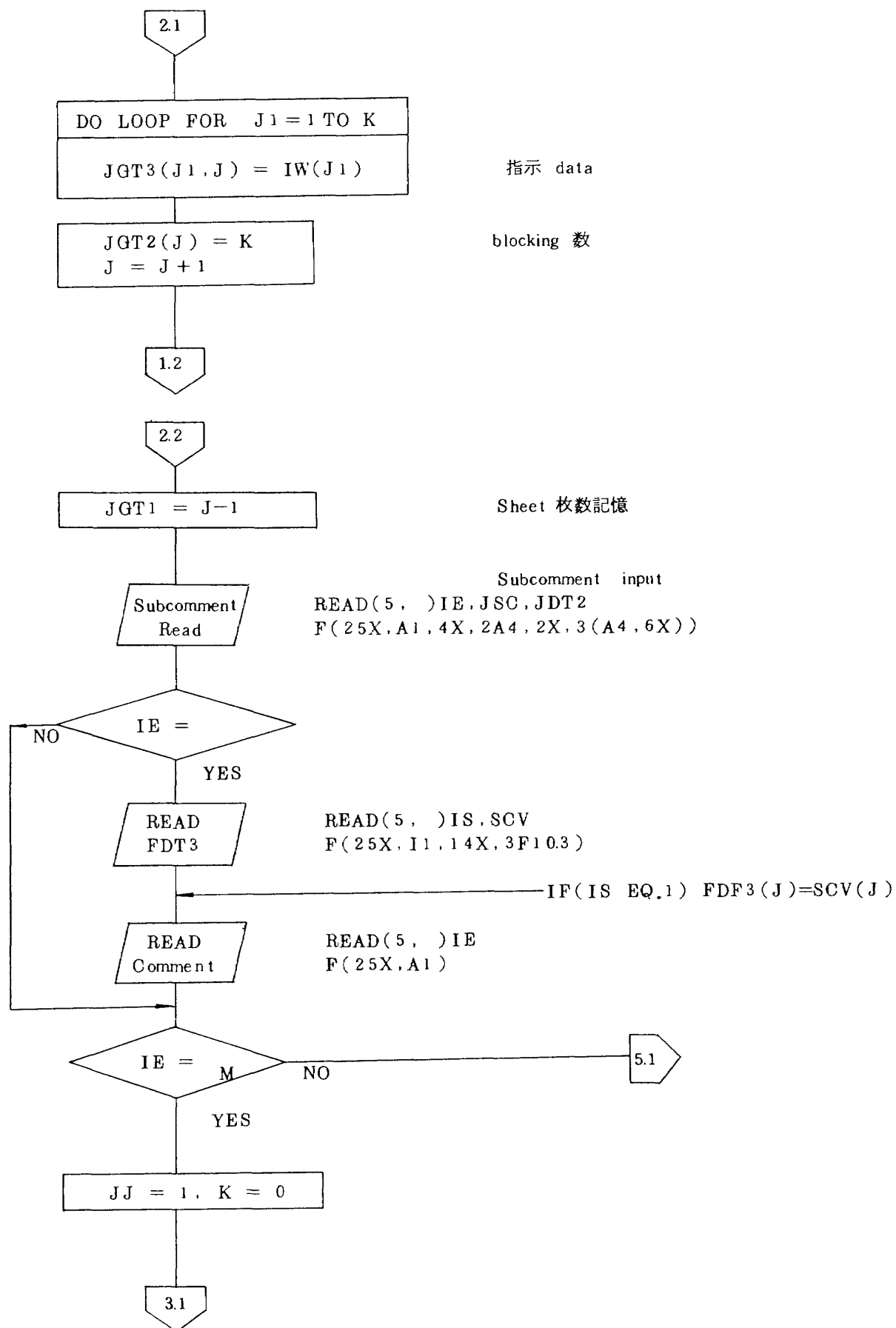
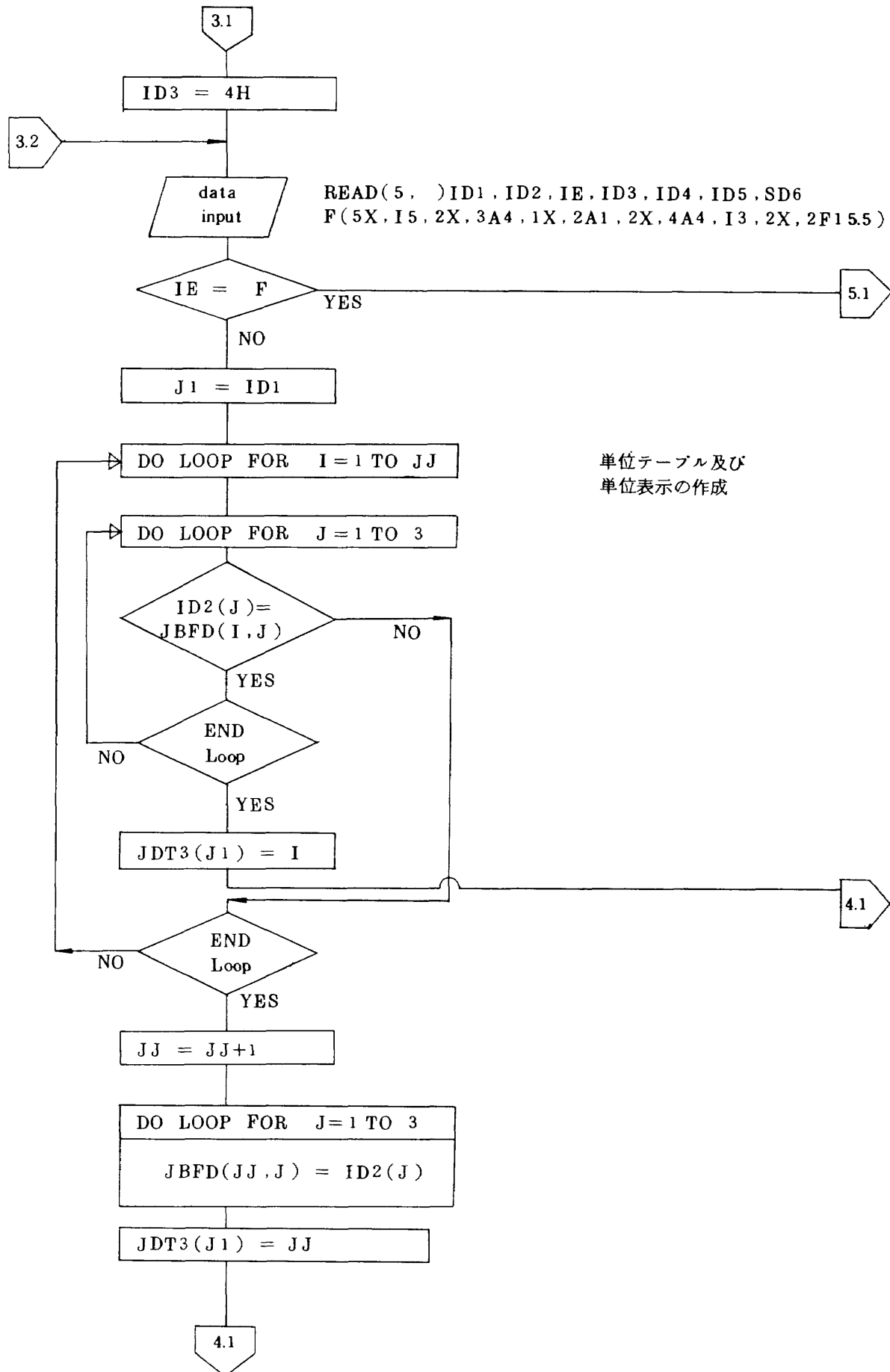


図 27 (つづき)



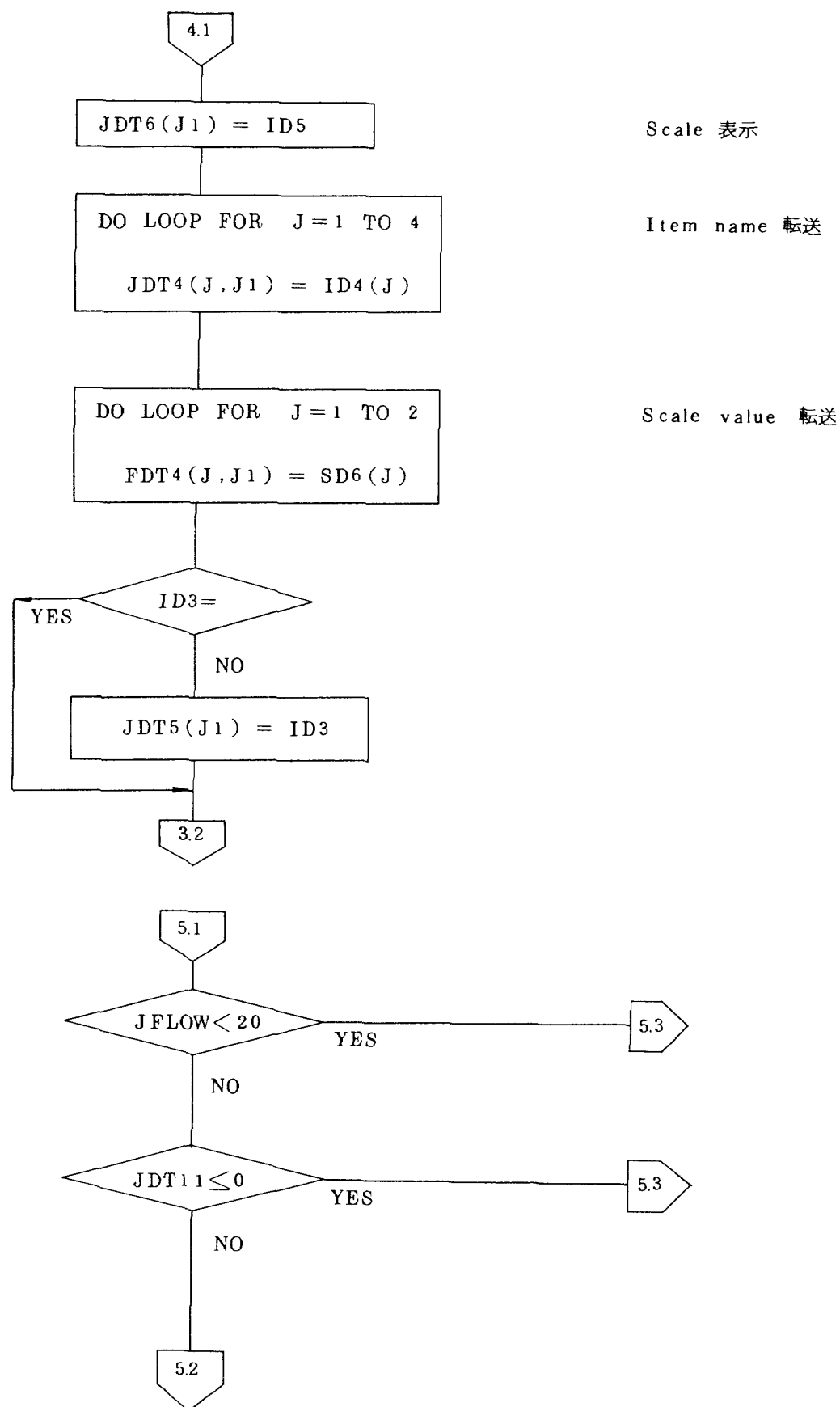


図 27 (つづき)

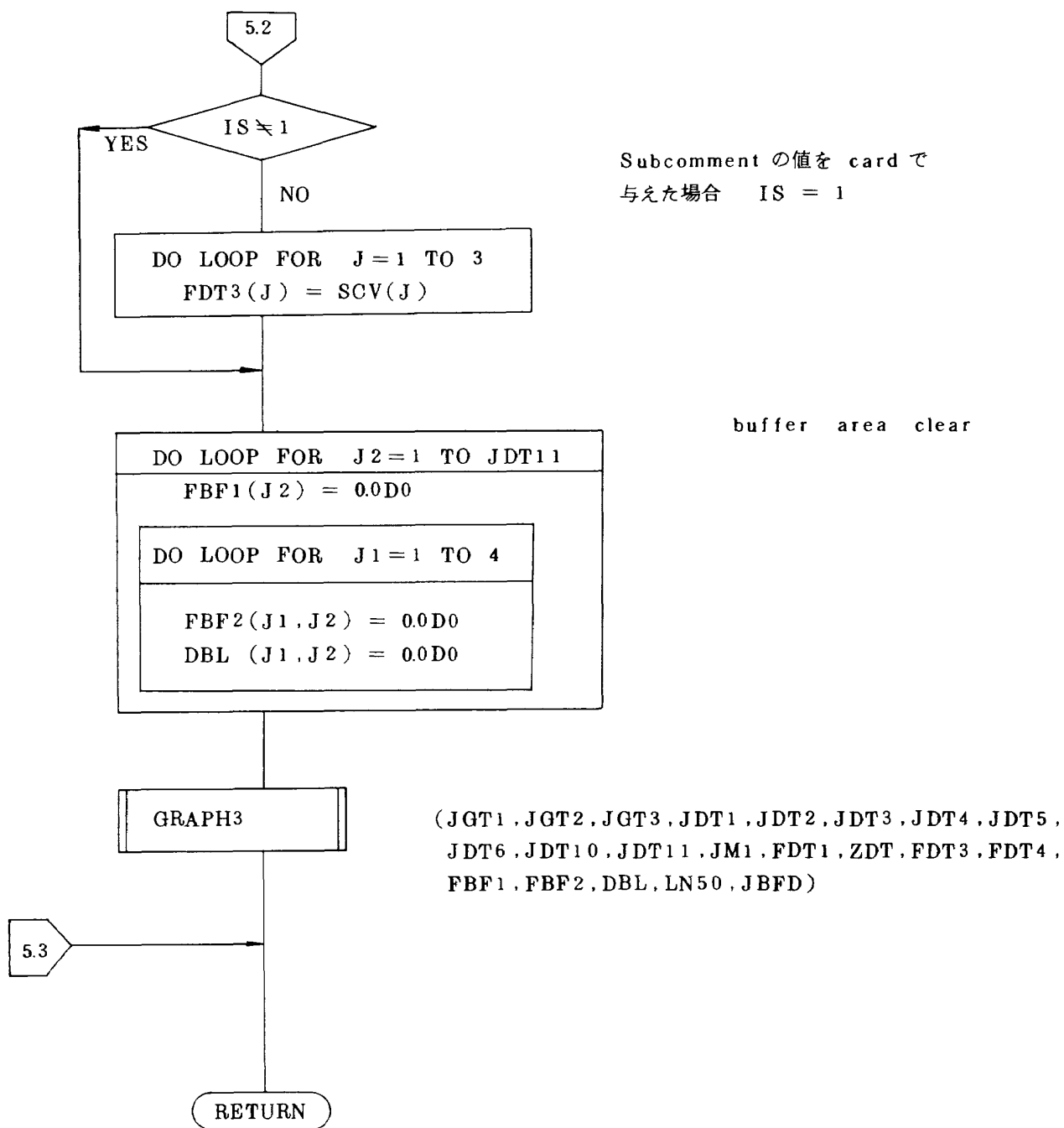


図 27 (つづき)

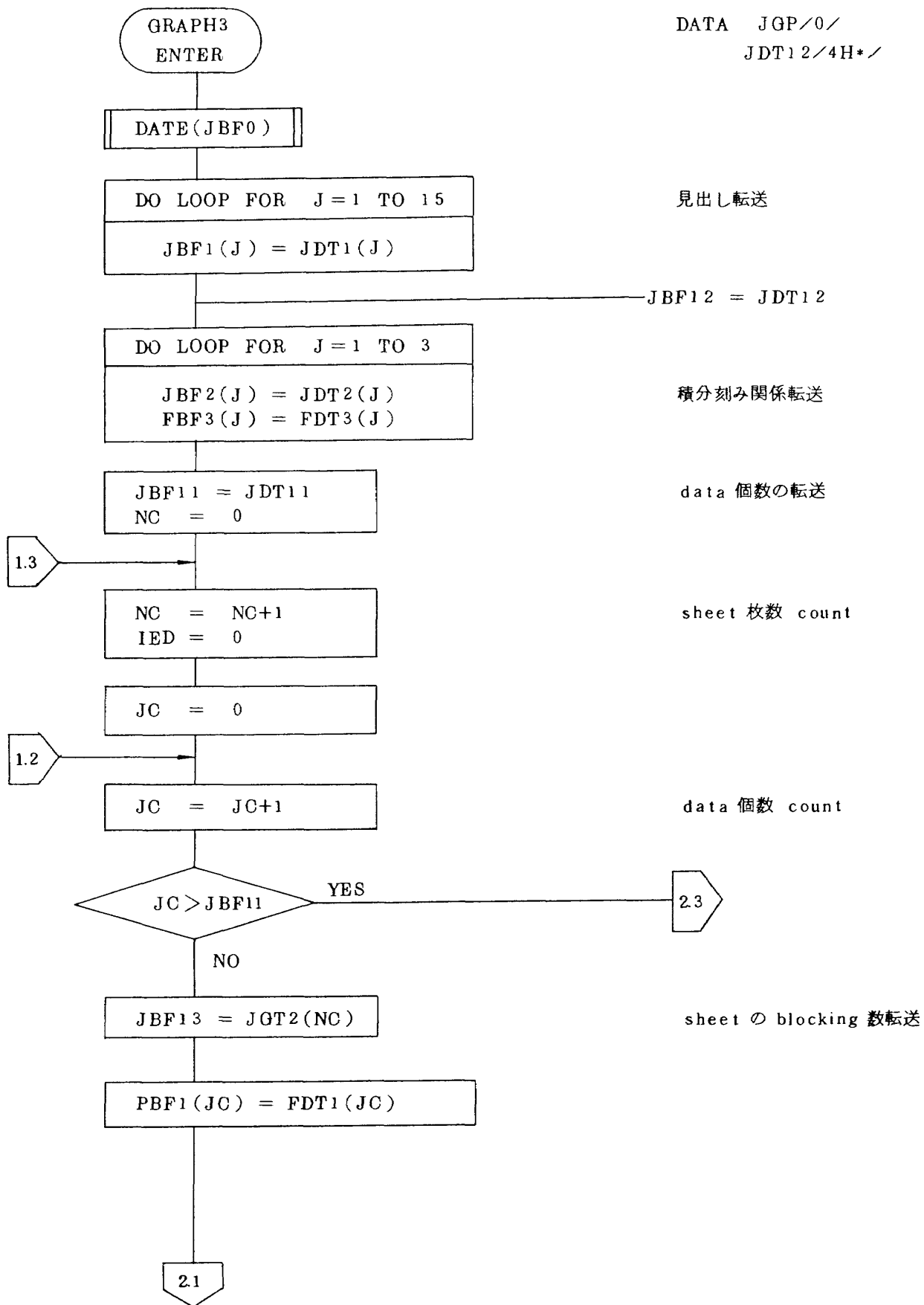


図 28 GRAPH3 routine のフロー図

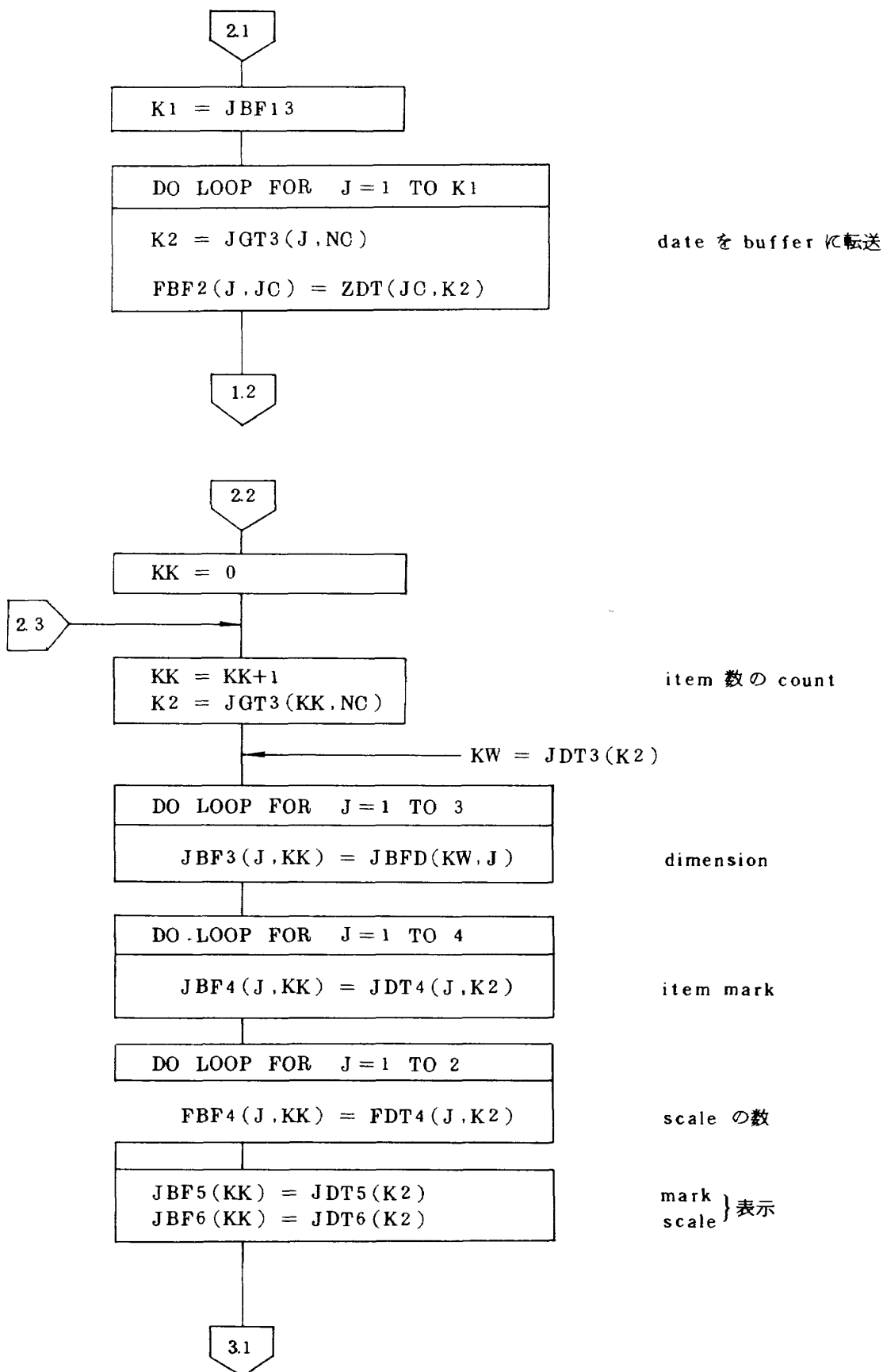


図 28

( つづき )

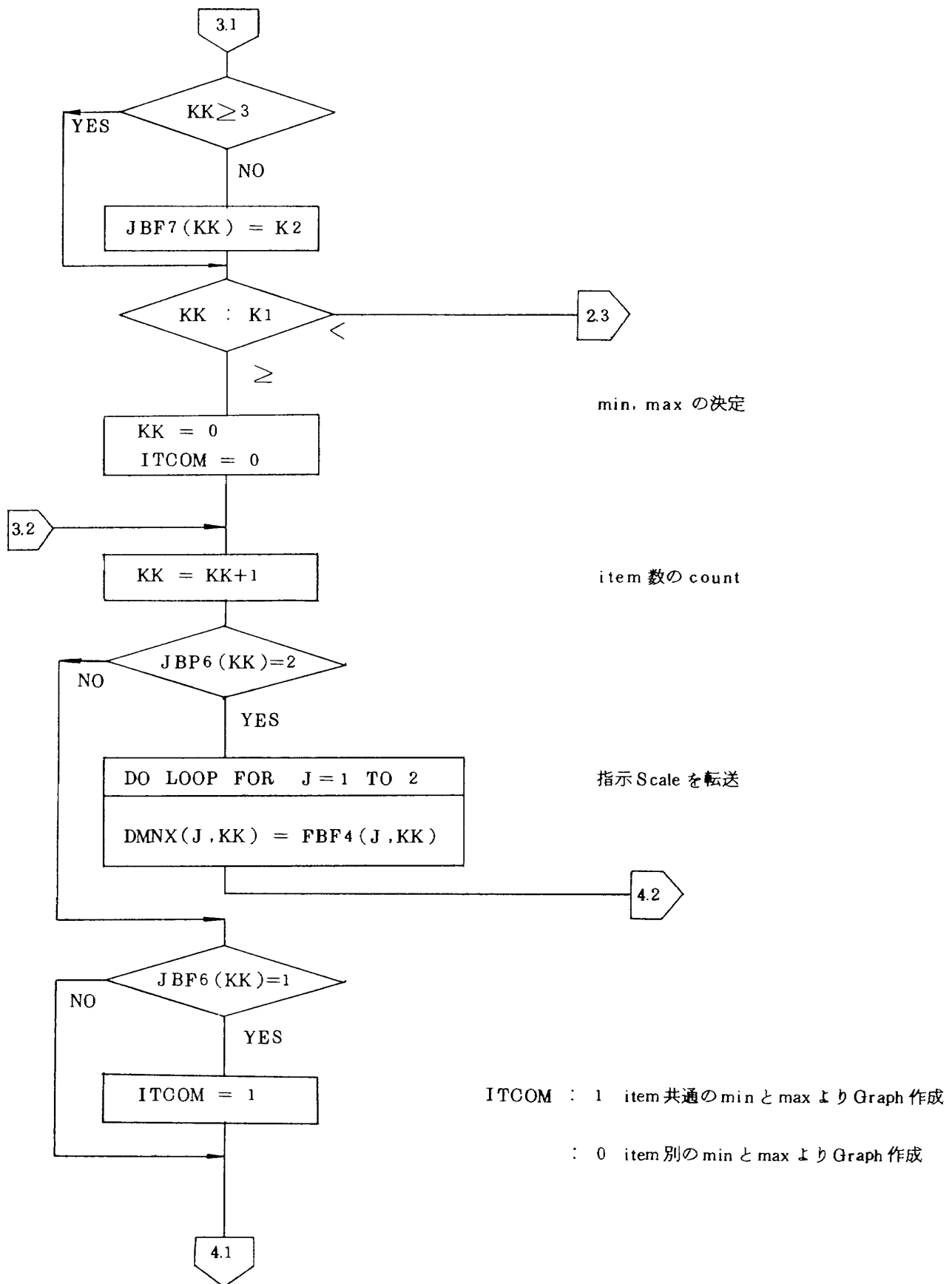
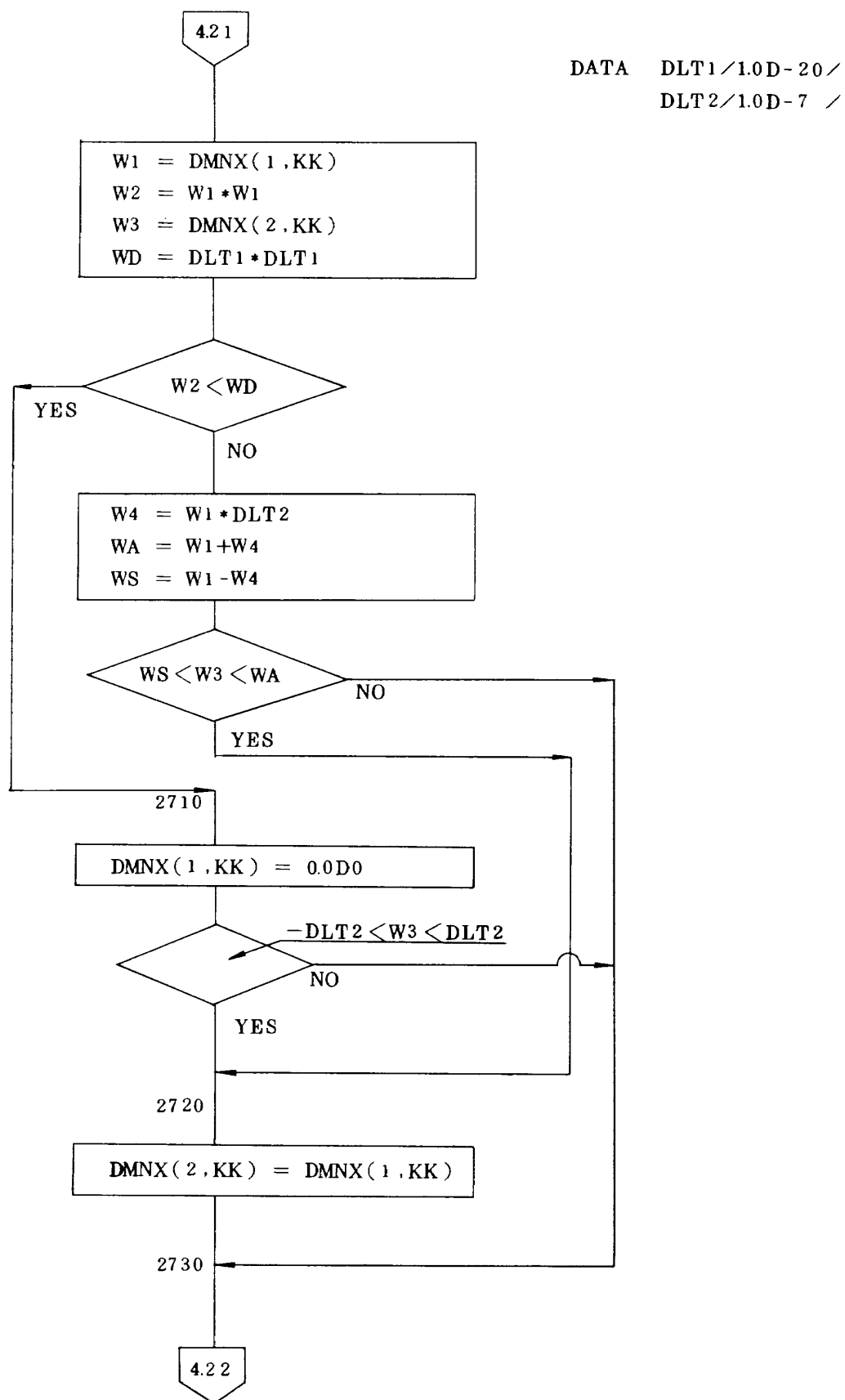


図 28 (つづき)

min, max data check routine





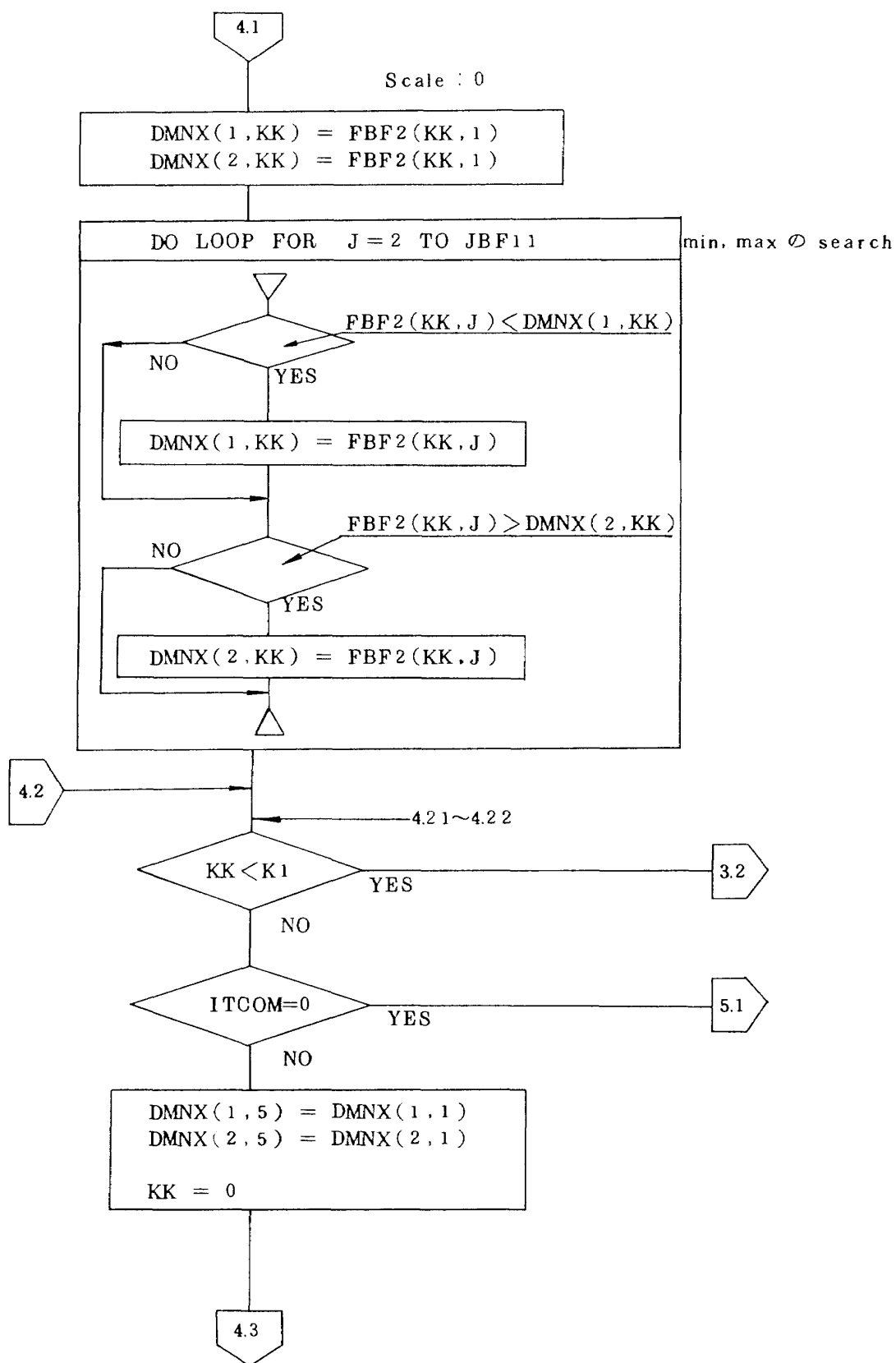
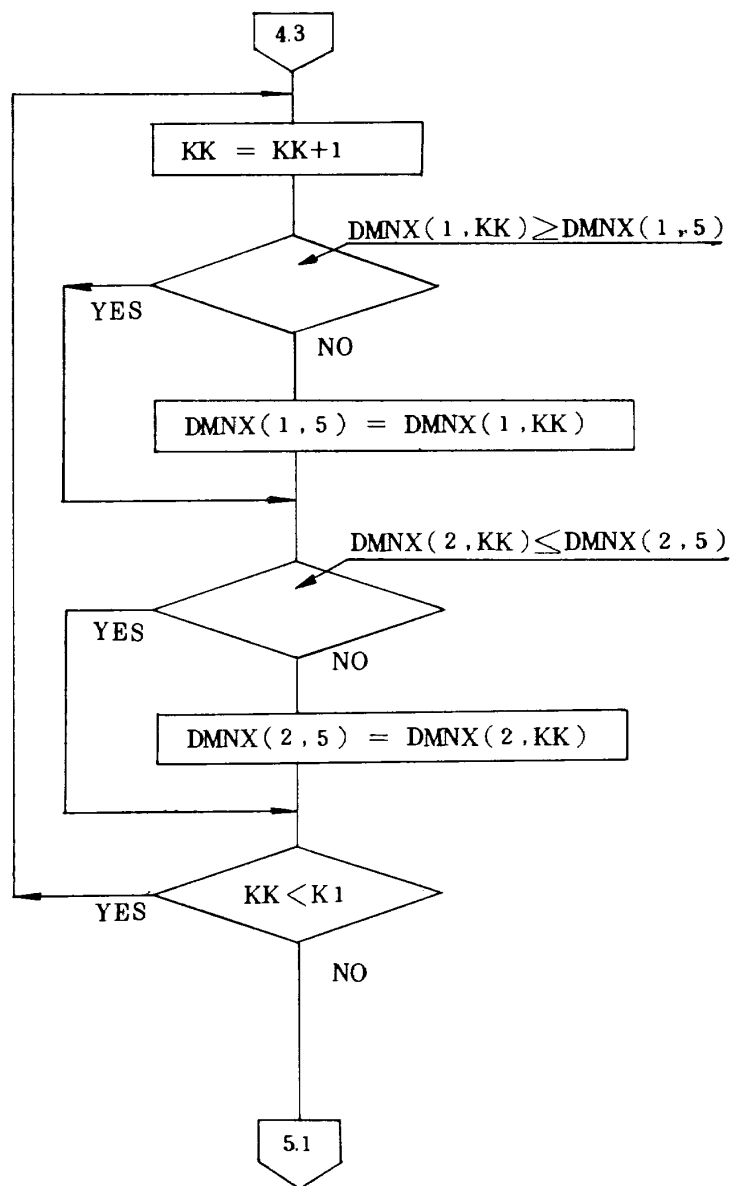


図 28 (つづき)



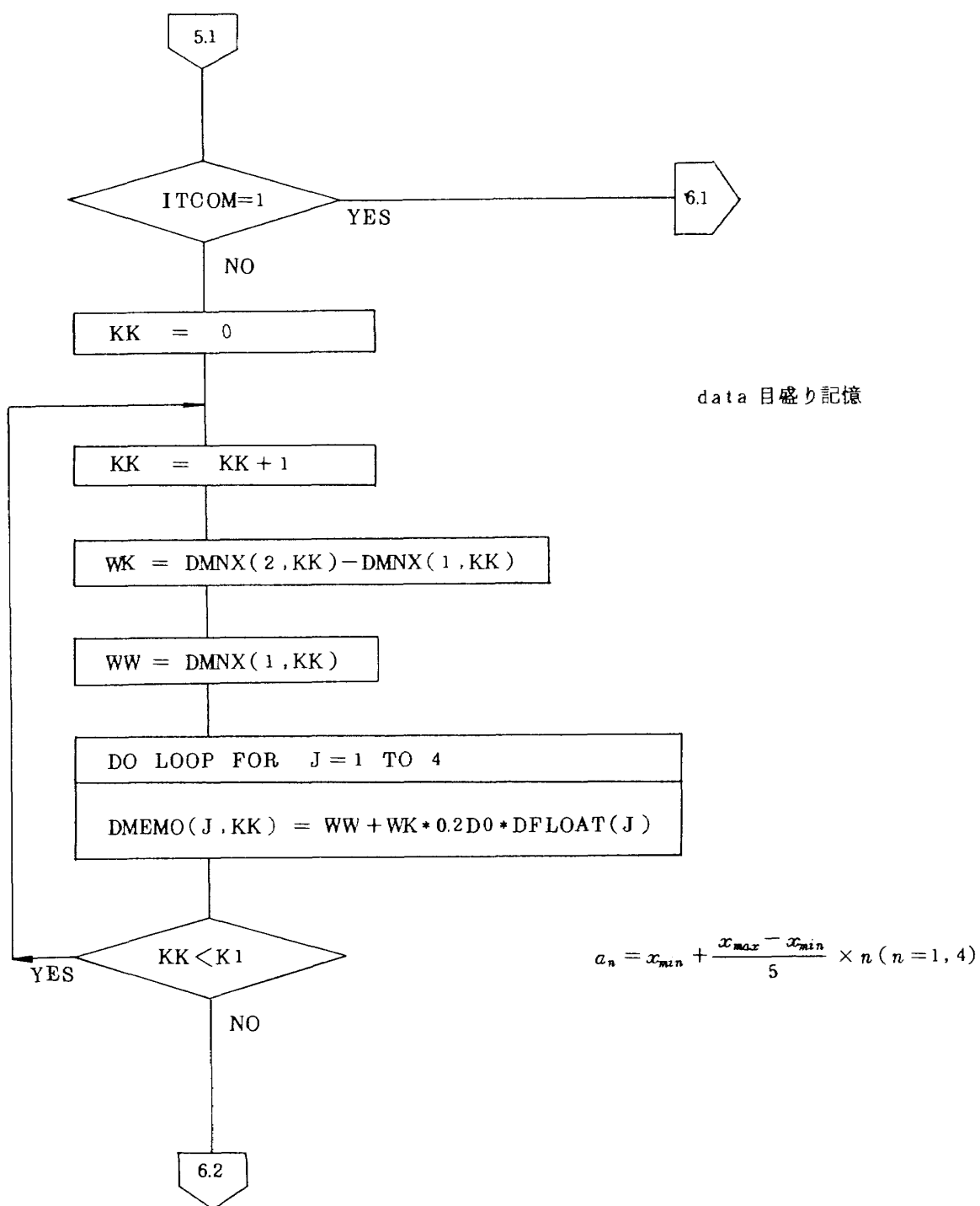
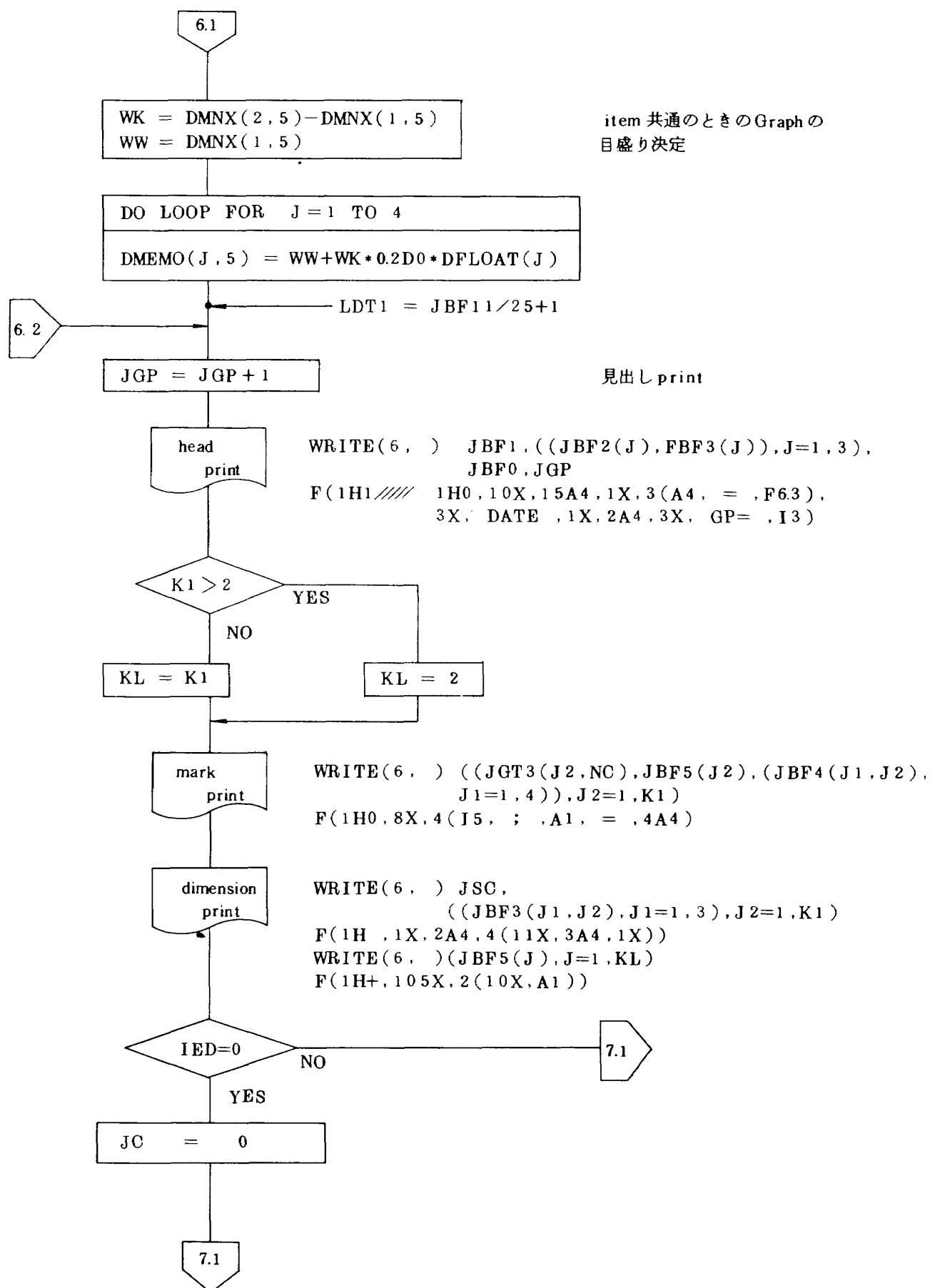
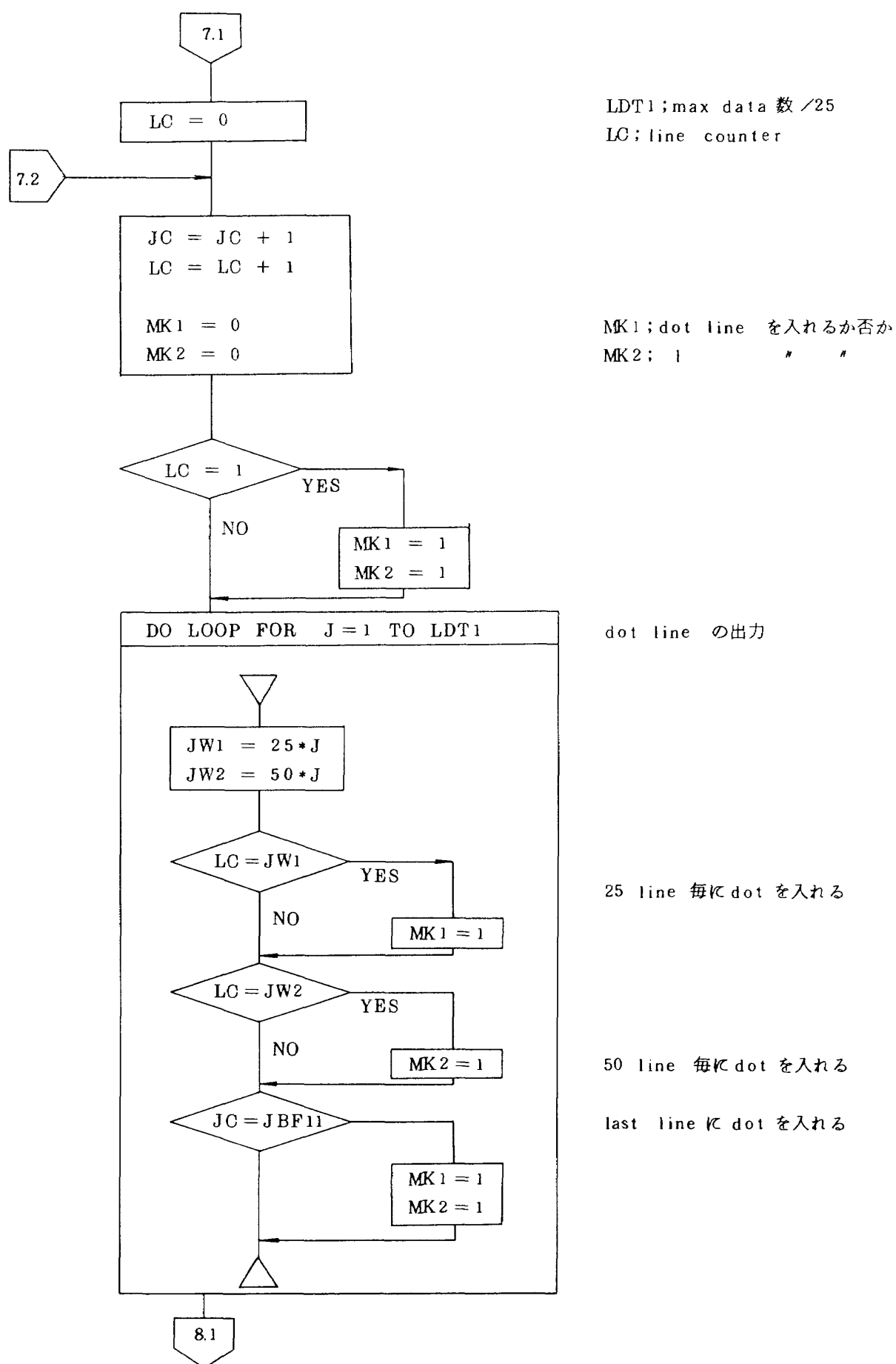


図 28 (つづき)





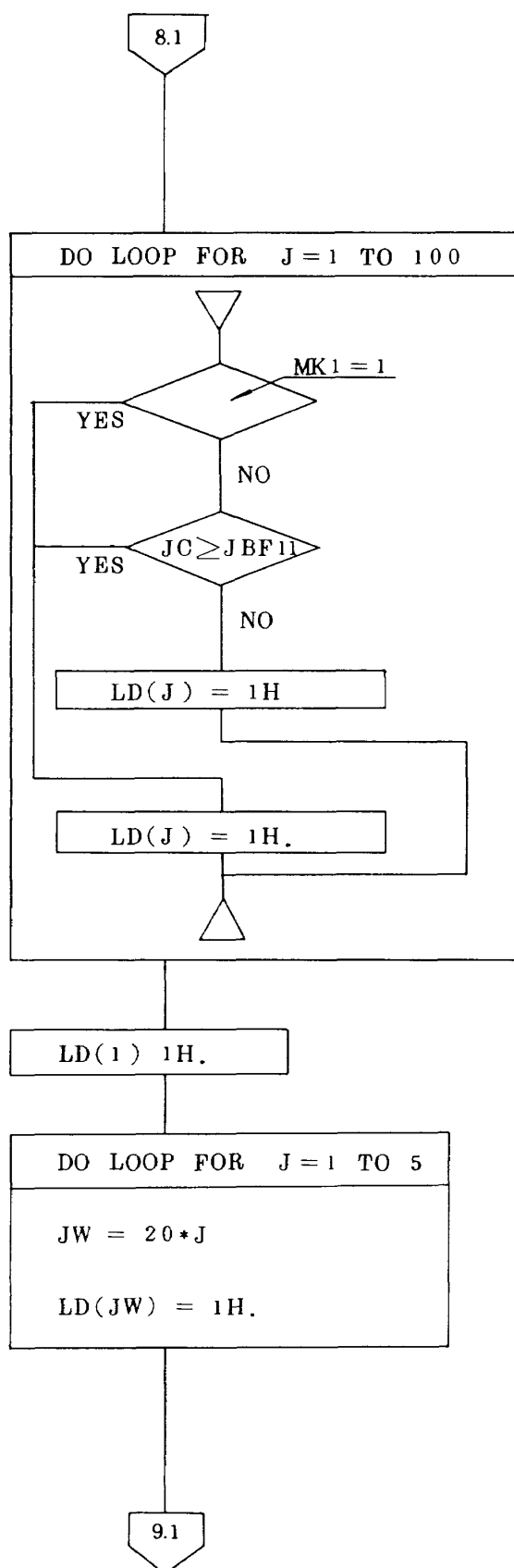
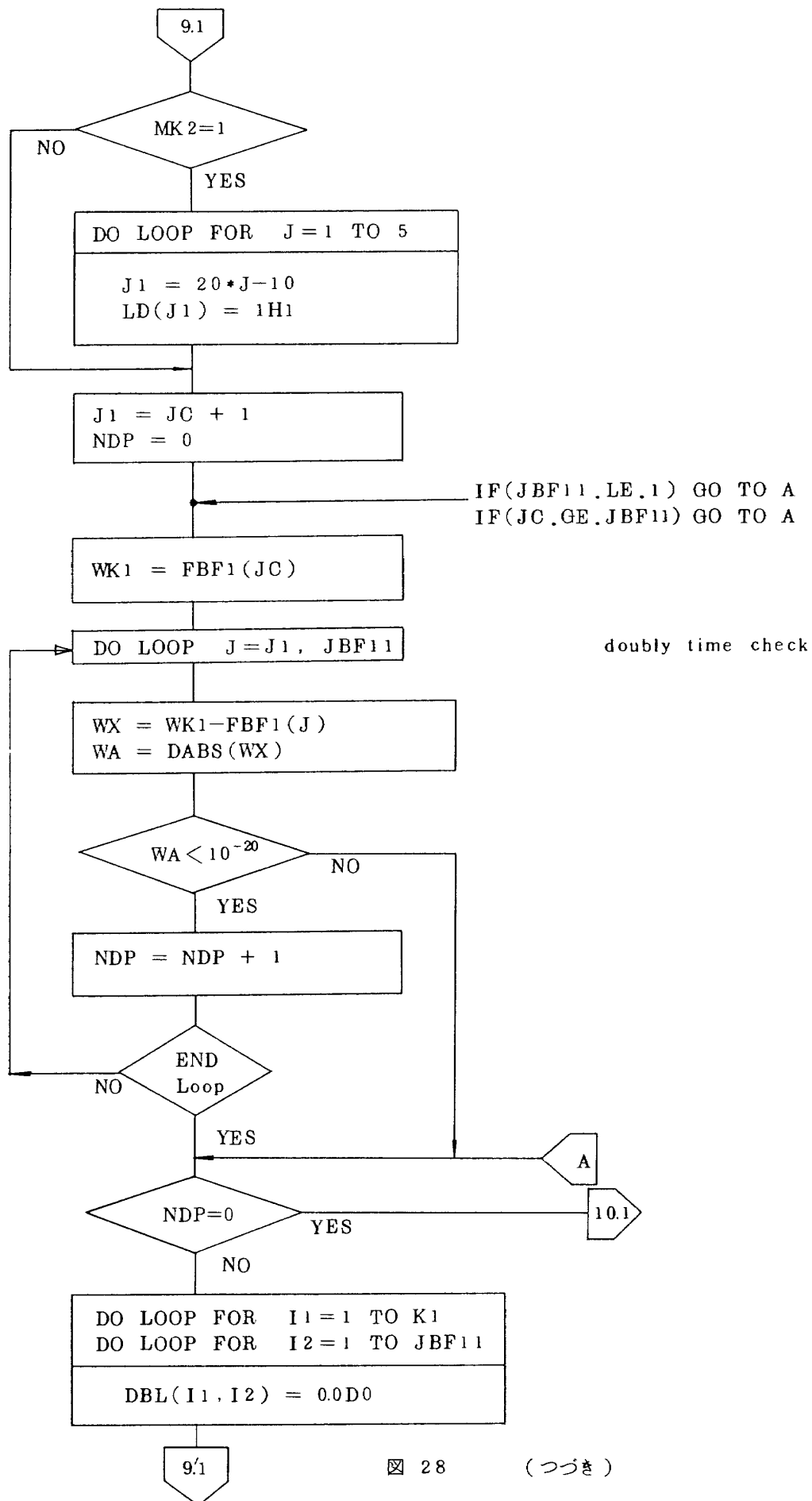
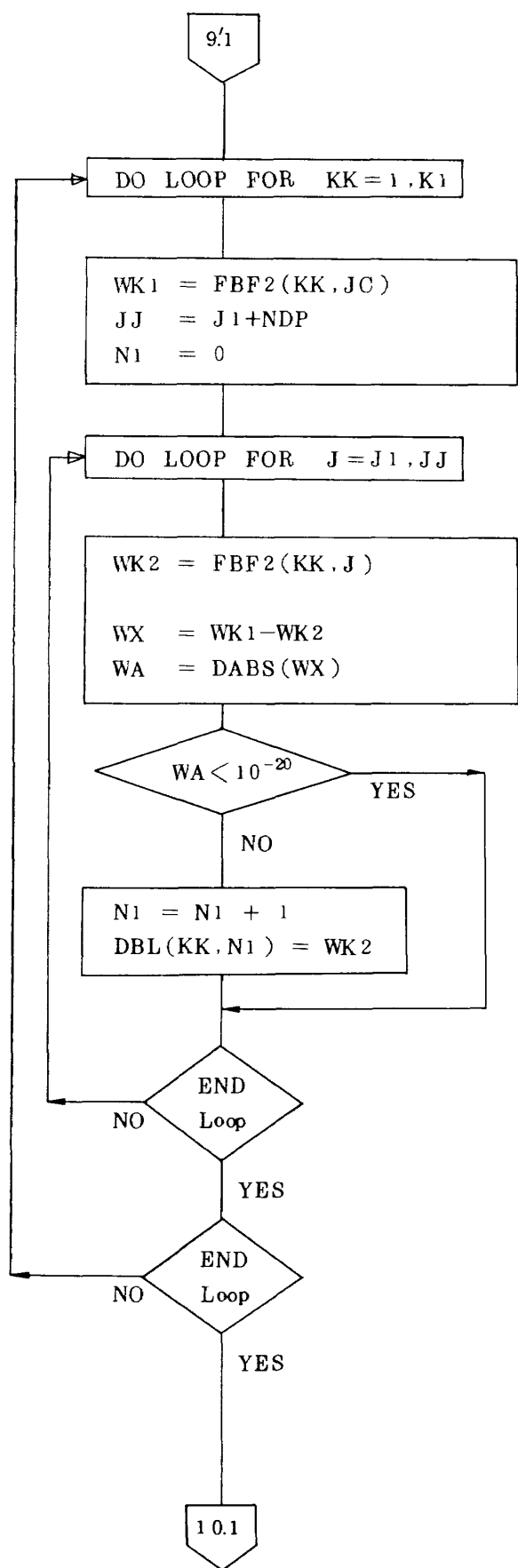


図 28 (つづき)







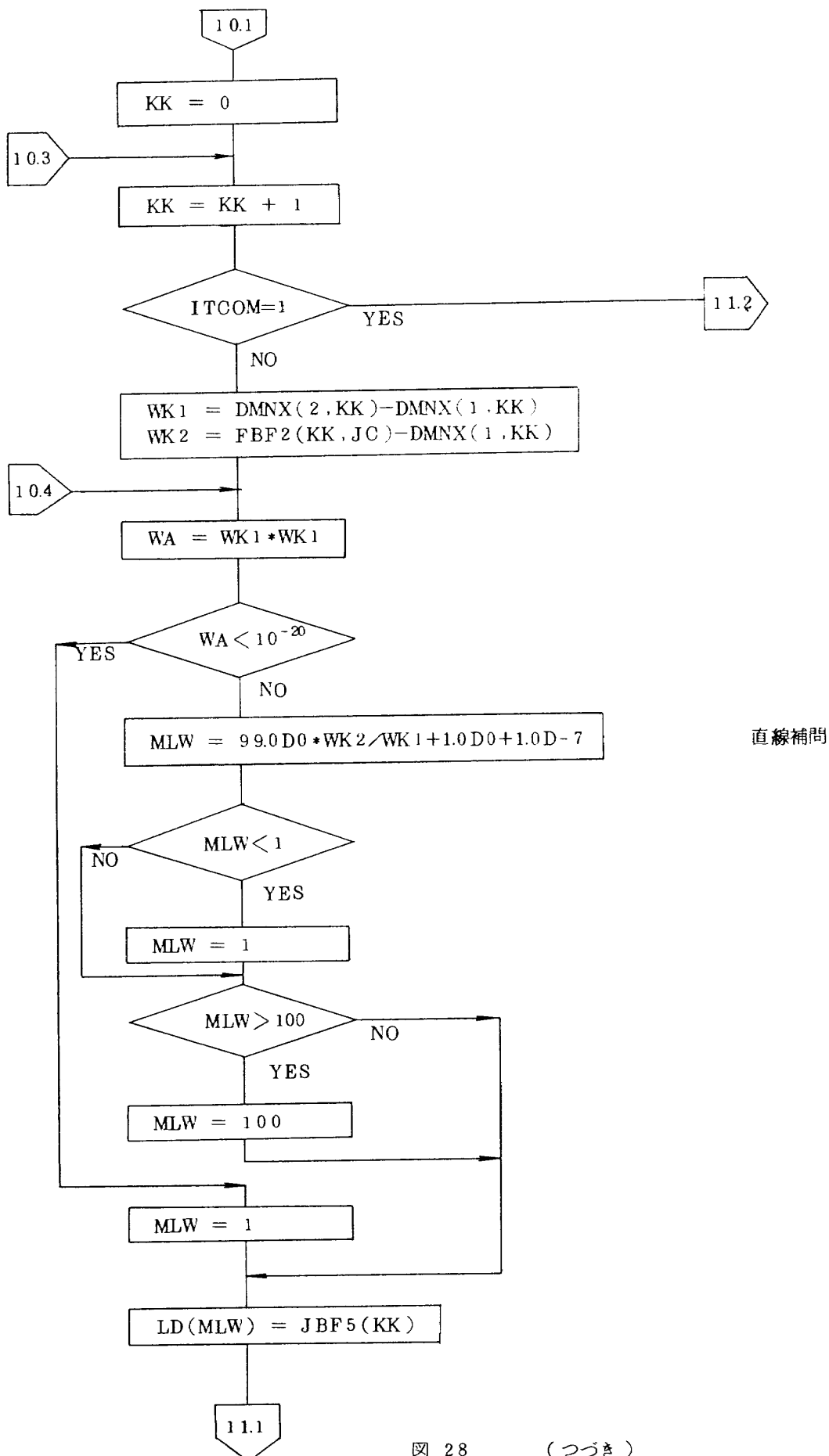


図 28 (つづき)

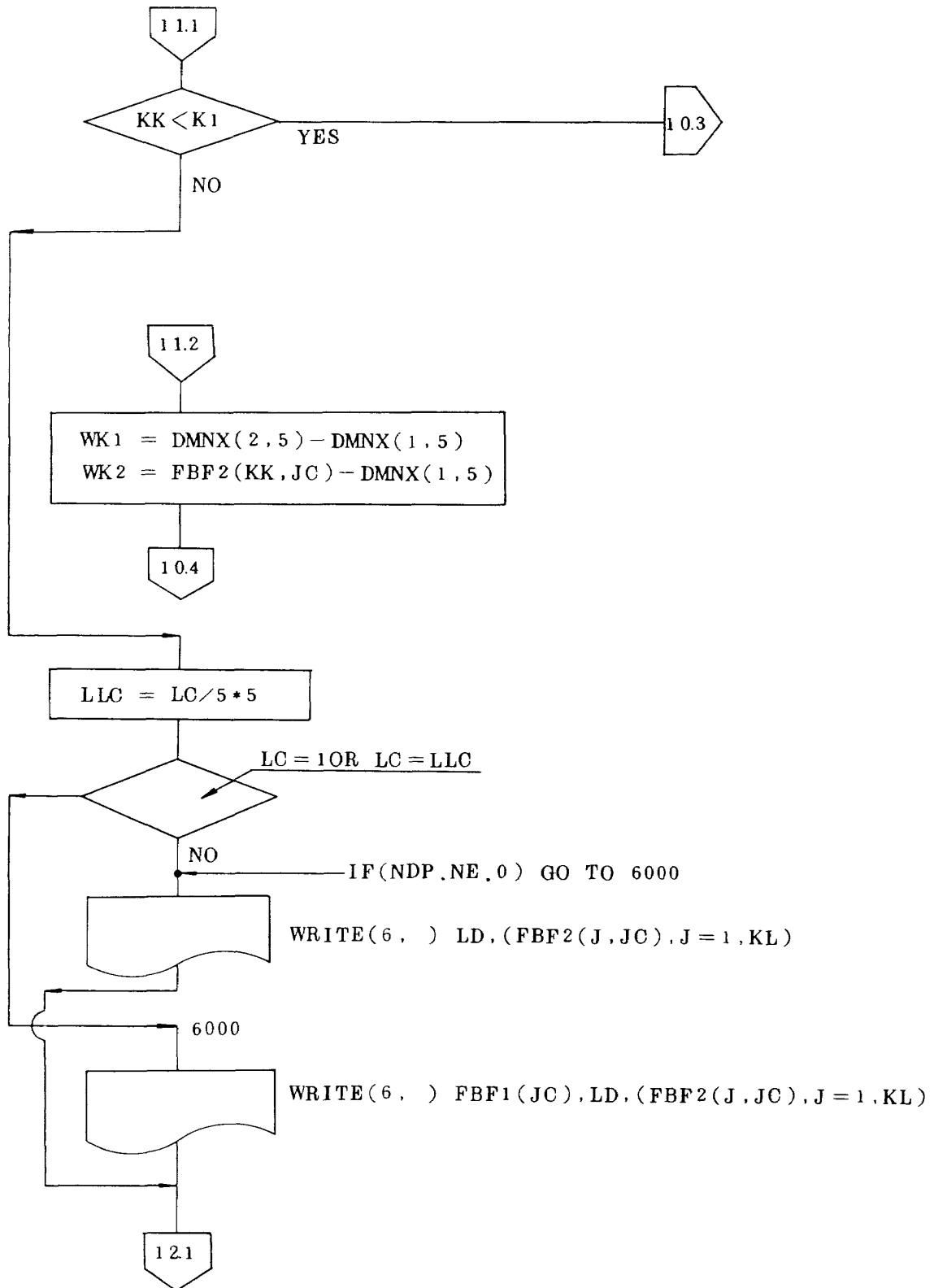
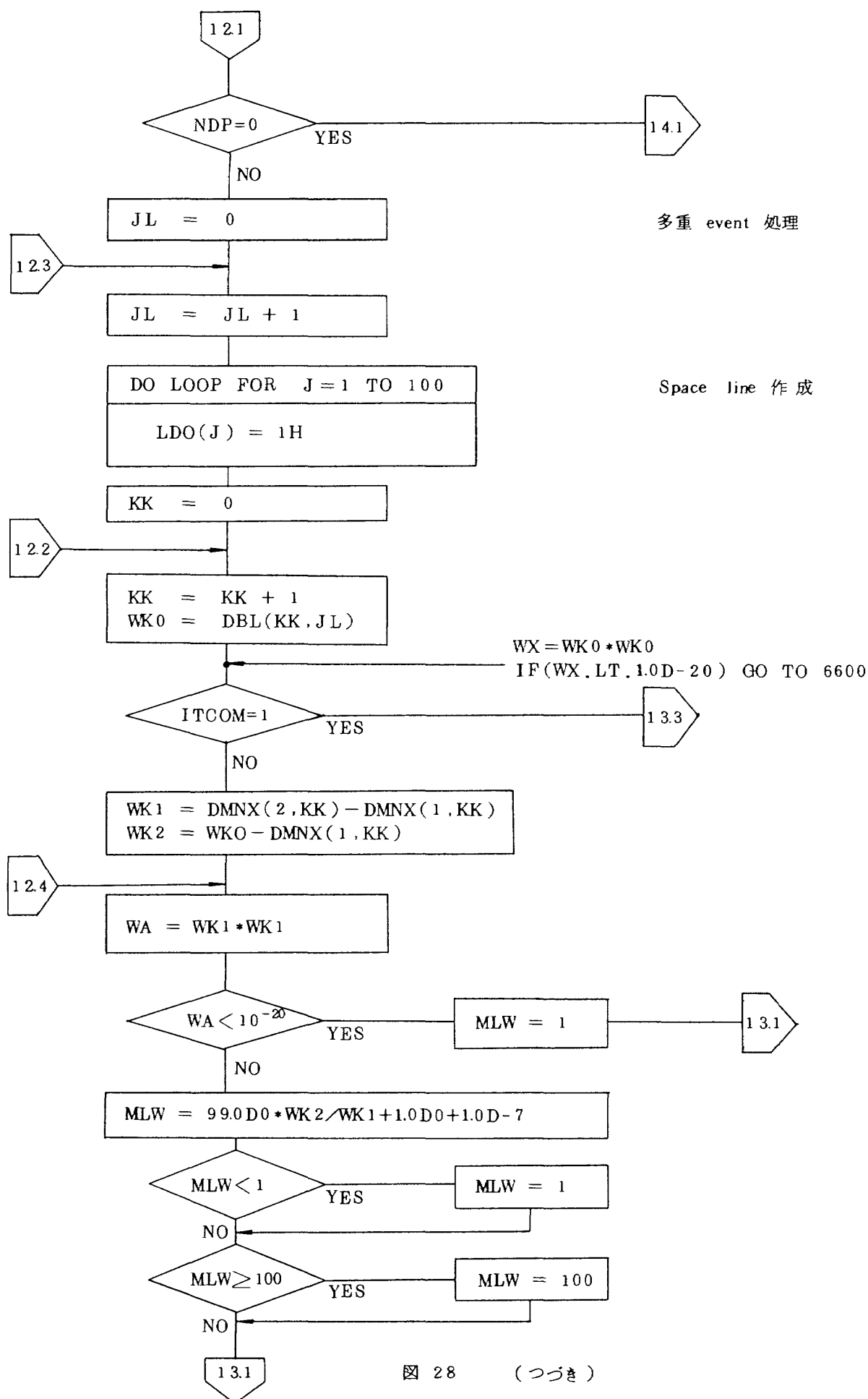


図 28 (つづき)



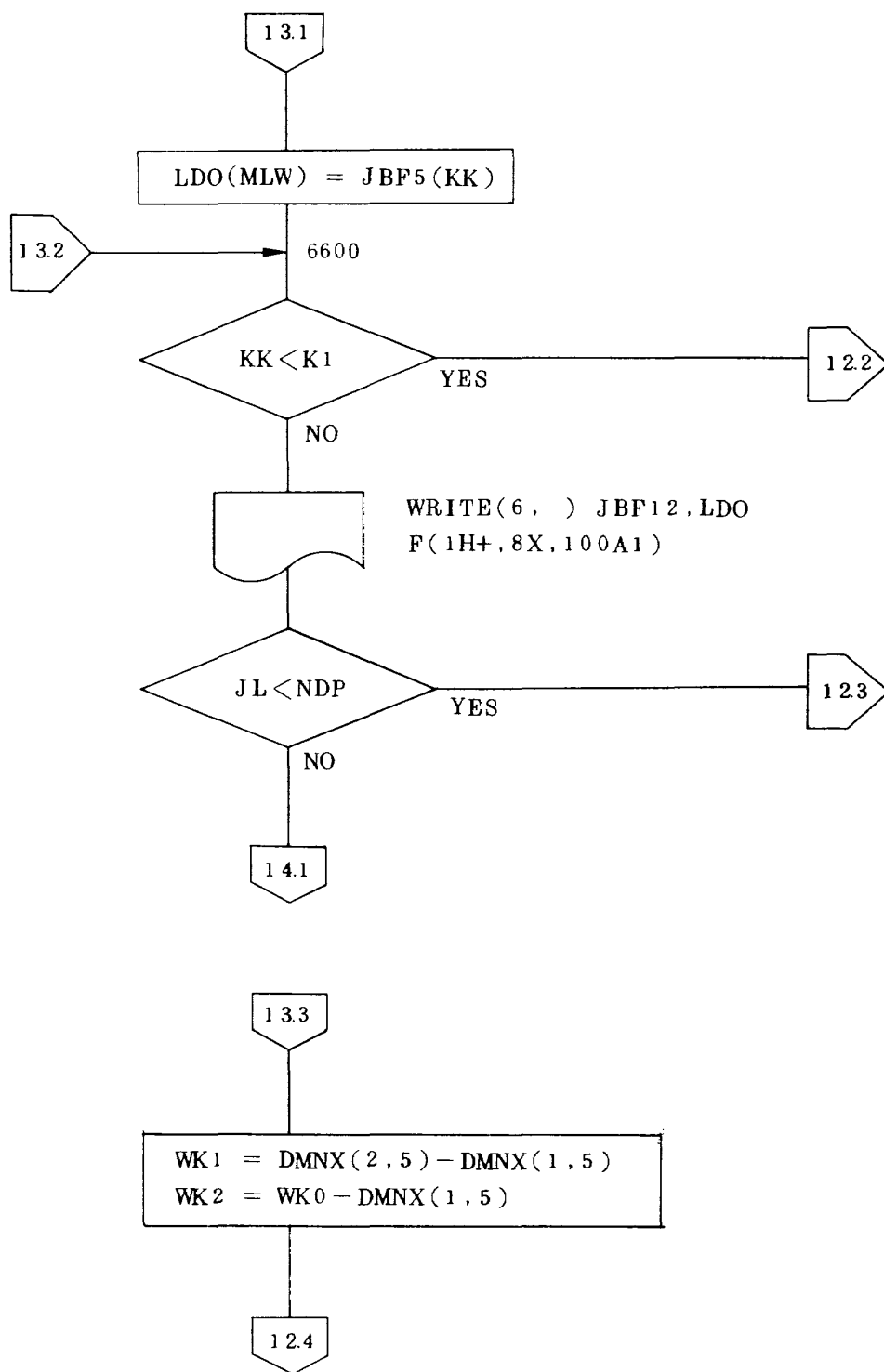


図 28 (つづき)

目盛り出力

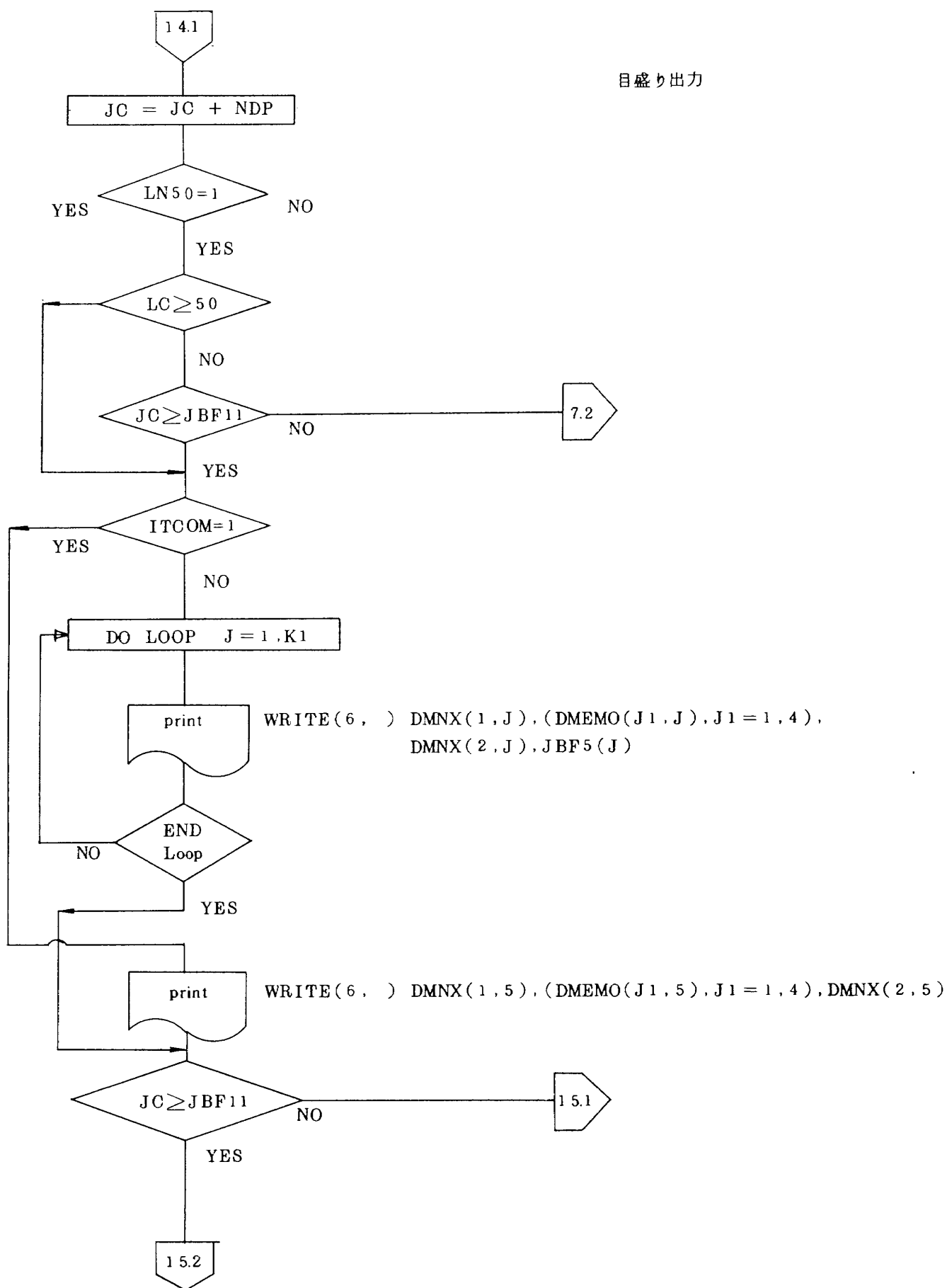


図 28 (つづき)

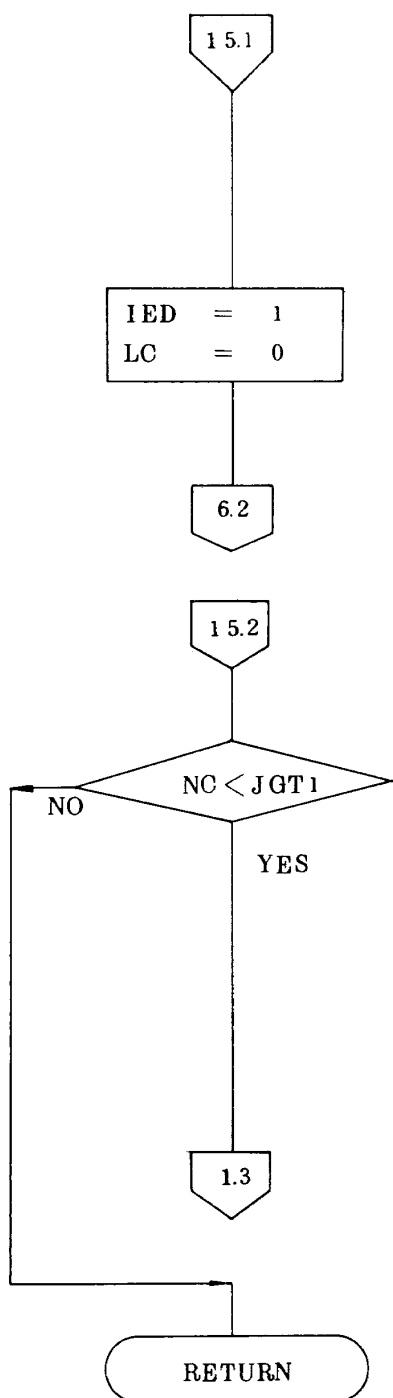


図 28 (つづき)

## 10 プラットホームサーボ系の設計<sup>1)</sup>

これ迄に述べた評価シミュレーションプログラムでプラットフォームの動作ならびに精度の評価を行なうためには、使用するジャイロ、加速度計のパラメータ、各ジンバルの慣性モーメント、サーボモータパラメータ、位相進みや遅れなどの補償回路パラメータなどの値が必要であるが、これらの値の詳細は必ずしも公表されていない。プラットフォーム動作評価シミュレーションを行なうためには、まずサーボ系の設計を行ない各パラメータを決定する必要がある。ジンバルとサーボモータが剛に結合された4ジンバルの

プラットフォームでは、ジャイロ検出量で各ジンバルのサーボモータを駆動する際に、ジンバル座標軸系の間の座標変換が入ってくるので、最適サーボゲインや補償回路パラメータを決めることは、多変数制御系の設計問題となり相当困難なこととなる。

しかし、幸にして、もしロール・ピッチ・ヨーなどの運動が同時に起きることがないような場合には、各軸間のカップリング効果は無視出来るので、サーボゲインや補償回路パラメータを決める場合には、各軸独立した系として決め、プラットフォーム動作のシミュレーション計算時には軸間のカップリング効果を入れて用いることとした。

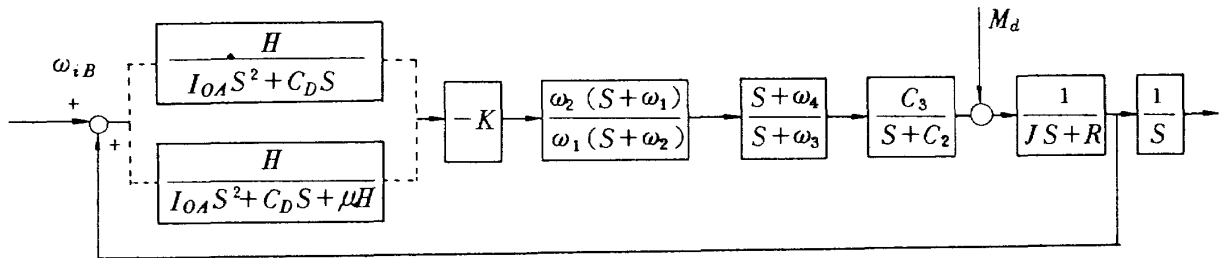


図 29 実際のプラットフォーム(単軸)制御系

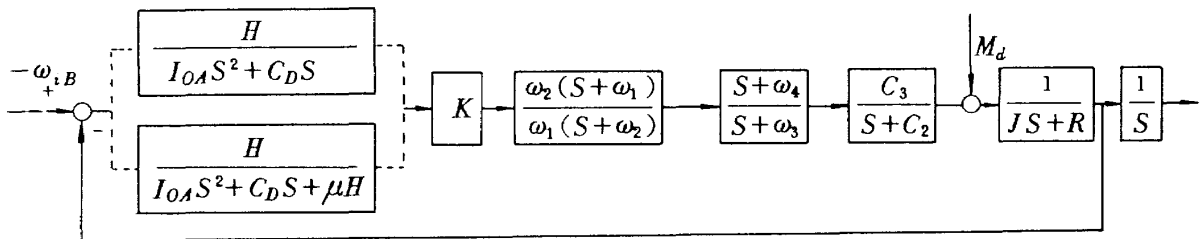


図 30 等価負帰還制御系

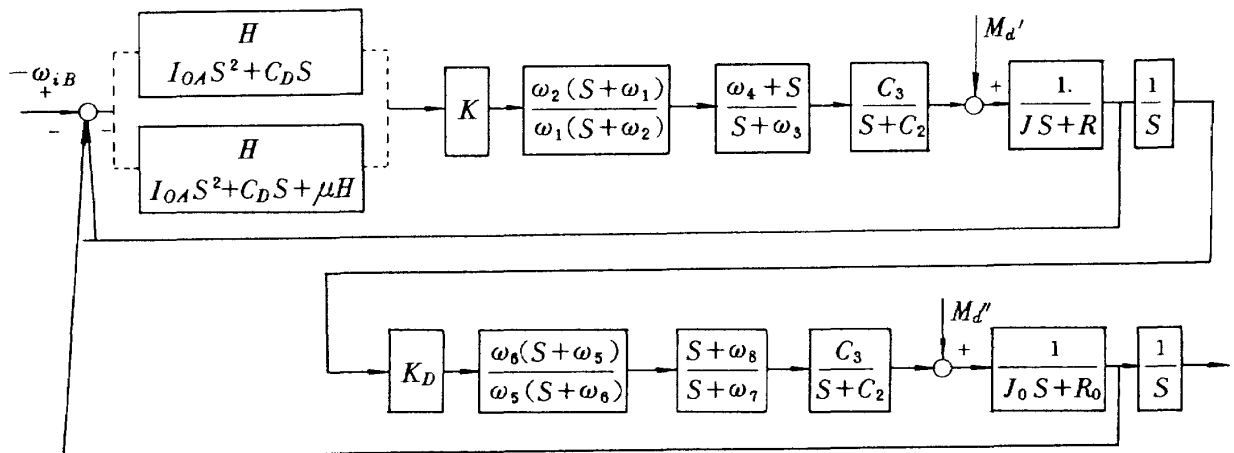


図 31 インナーおよびアウトピッチ軸制御系

以上のような仮定の上で各軸の制御パラメータを決めるわけであるが、実際のプラットホーム制御系は、図29に示すように、形の上では正帰還型回路になっており取扱いにくいので図30のように通常の負帰還型制御回路系に書き直し、以後、プラットホームサーボゲインおよび補償回路パラメータを決める計算には、この形のサーボ系を取扱うことにする。

なお我々のプラットホームの軸の取り方は図5に示すような構成であるので、ロール軸とヨー軸については、図30のような制御系になり、ピッチ軸については、図31のように書ける。

したがって系の応答性と誤差偏差（トルクスティフネス）を考慮し、図30、図31に示された $K$ 、 $K_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ …… $\omega_7$ 、 $\omega_8$ の値を決めることとなる。

#### 10.1 ジャイロをレートモードで使用する場合

位相進み、遅れ回路パラメータと制御ゲインを決めるためには、まず位相進み、遅れ回路の入らない場合の周波数特性を調べておく必要がある。図30、図31から判るように、ロール、インナ・ピッチ、ヨー軸については全く同じ制御構成をとるので、初めにこの3軸についての周波数特性を調べ、その後、インナ・ピッチとアウト・ピッチを組合せたピッチ軸制御について考慮することとする。

レートモードでジャイロを使用する場合で、位相進み、遅れ回路を挿入しない時の開ループ一巡伝達関数 $G$ は次式のように書き表わせる。

$$G = \frac{KH}{I_{0A}S^2 + C_D S + \mu H} \cdot \frac{C_3}{S + C_2} \cdot \frac{1}{JS + R}$$

$$= \frac{(KH C_3 / I_{0A})}{(S - \alpha)(S - \beta)(S + C_2)(JS + R)} \quad (28)$$

ただし

$$\alpha = \frac{-C_D + \sqrt{C_D^2 - 4 I_{0A} \mu H}}{2 I_{0A}}$$

$$\beta = \frac{-C_D - \sqrt{C_D^2 - 4 I_{0A} \mu H}}{2 I_{0A}}$$

$$\text{今, } G_1 = \frac{1}{S - \alpha}$$

$$G_2 = \frac{1}{S - \beta}$$

$$G_3 = \frac{1}{S + C_2}$$

$$G_4 = \frac{1}{JS + R}$$

とおけば、 $G$ の絶対値および位相 $\angle G$ は

$$G = \frac{(KH C_3 / I_{0A})}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2 \omega^2)}} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \angle G &= \angle G_1 + \angle G_2 + \angle G_3 + \angle G_4 \\ &= \tan^{-1}(\omega/\alpha) + \tan^{-1}(\omega/\beta) + \tan^{-1}(-\omega/C_2) \\ &\quad + \tan^{-1}(J\omega/R) \end{aligned} \quad (30)$$

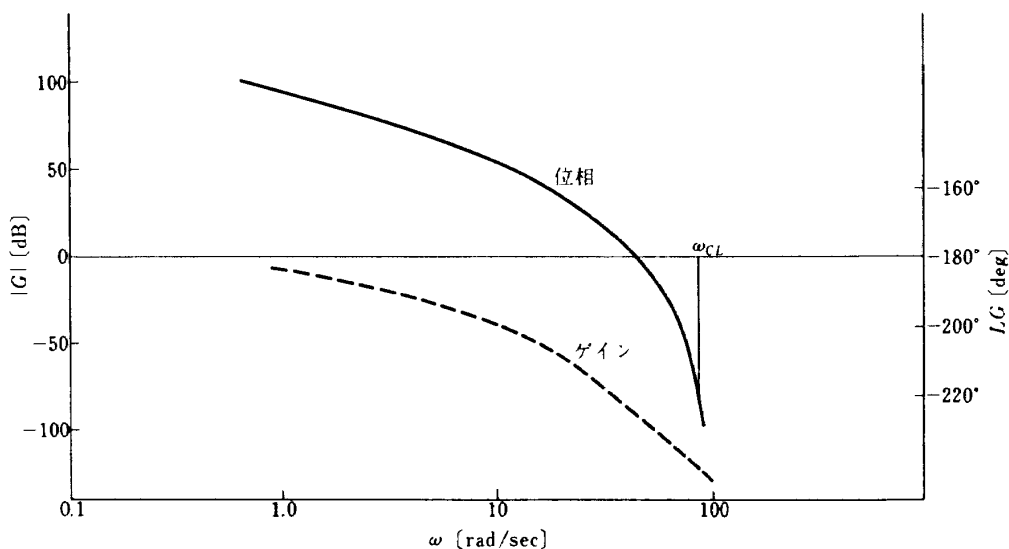


図 3.2 補償回路のないプラットホーム制御系の一巡伝達関数ボード線図



となる。これをボード線図に描くと図32のような形となるが、周波数特性を改善するために図33に示すような特性をもつ位相進み回路が必要となる。位相進み回路( $\omega_2/\omega_1$ )( $(S+\omega_1)/(S+\omega_2)$ )は通常、RC(抵抗-コンデンサ)回路によって構成され<sup>7)</sup>、1段の進み回路ではせいぜい50°程度の進みした期待出来ない。そこで多少余裕をみて、 $\angle G$ が180°よりさらに40°程度位相のまわる周波数を $\omega_{CL}$ にとり $\omega_{CL}$ に位相進みの最大値が来るような回路設計にするものとする。

位相進み回路の伝達関数 $G_{PL}$ は

$$G_{PL} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{S+\omega_1}{S+\omega_2} \quad (\omega_2 > \omega_1)$$

より

$$\begin{aligned} |G_{PL}| &= \frac{\omega_2}{\omega_1} \sqrt{\frac{\omega^2 + \omega_1^2}{\omega^2 + \omega_2^2}} \\ \angle G_{PL} &= \tan^{-1} \left( \frac{(\omega_2 - \omega_1)\omega}{\omega_1 \omega_2 + \omega^2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

で表わされるから(31)式の $\tan^{-1}$ 内の関数を $\omega$ で微分し位相が極大値になる $\omega$ を求めれば

$$\frac{d}{d\omega} \left( -\frac{\omega}{\omega_1 \omega_2^2 + \omega^2} \right) = \frac{\omega_1 \omega_2 - \omega^2}{(\omega_1 \omega_2 + \omega^2)^2} = 0$$

から $\omega^2 = \omega_1 \omega_2 = \omega_{CL}^2$ を得る。すなわち

$$\omega_{CL} = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (32)$$

RC回路の実現性を考慮に入れて<sup>7)</sup> $\omega_2 = 10\omega_1$ になるようにすれば

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_{CL} / \sqrt{10} \\ \omega_2 &= \sqrt{10} \omega_{CL} \end{aligned} \quad (33)$$

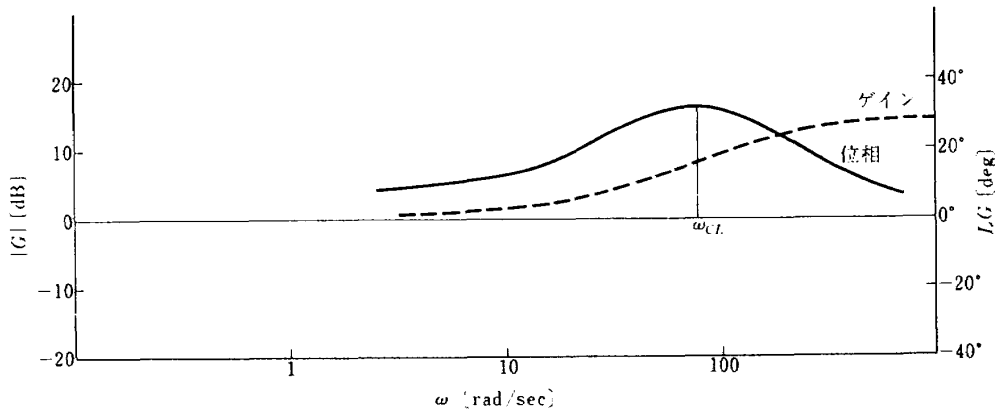


図 33 位相進み回路のボード線図

を得る。

一方トルクスティフネスを増大させ図31の $M_d$ (外乱トルク)の影響が出来るだけ小さくなることが要求される。一般に図34のような外乱のある制御系では

$$V_o = \frac{Y_1 Y_2}{1 + Y_1 Y_2} V_i + \frac{Y_2}{1 + Y_1 Y_2} M_d$$

であるから外乱による定常偏差が出来るだけ小さくなるためには $Y_1(S)$ が $S=0$ 近傍で出来るだけ大きくなるように系を構成することが要求される。

そこで位相遅れ回路 $G_{pg} = (S+\omega_4)/(S+\omega_3)$ 、( $\omega_4/\omega_3$ )がこの目的のため用いられるわけであるが $G_{pg}$ の絶体値と位相は

$$\begin{aligned} |G_{pg}| &= \sqrt{\frac{\omega^2 + \omega_4^2}{\omega^2 + \omega_3^2}} \\ \angle G_{pg} &= \tan^{-1} \left( \frac{(\omega_3 - \omega_4)\omega}{\omega_3 \omega_4 + \omega^2} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

と書ける。ここで注意しなければならないことは、位相遅れが最大となる周波数は、位相進み回路の位相進みが最大

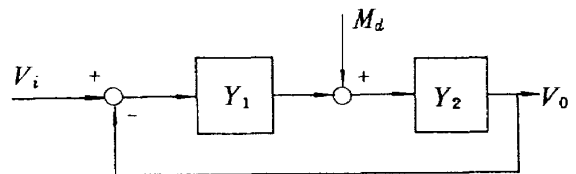


図 34 外乱のある場合の制御系

となる周波数より充分小さな値でなければならない。1つのメジャーとして、位相進み回路を有る一巡伝達関数の高周波側の位相の最大値をとる周波数を $\omega_{cg}$ とし、位相遅れ回路の位相遅れ最大周波数を $\omega_{cg}$ の $1/1000$ 程度にとる(通常 $\omega_{cg}$ は百数十 $\text{radian/sec}$ )ことにして、かつ $RC$ 回路の実現性を考慮し $\omega_4 = 10\omega_3$ になるように定めるものとする

$$\frac{d}{d\omega} \left( \frac{(\omega_3 - \omega_4)\omega}{\omega_3\omega_4 + \omega^2} \right) = \frac{(\omega_3 - \omega_4)(\omega_3\omega_4 - \omega^2)}{(\omega_3\omega_4 + \omega^2)^2} = 0 \quad (35)$$

より

$$\omega^2 = \omega_3\omega_4 \quad (36)$$

となる。したがって $\omega_3, \omega_4$ は

$$\left. \begin{aligned} \omega_{cg} &= 100\sqrt{\omega_3\omega_4} = 100\sqrt{10}\omega_3 \text{ から} \\ \omega_3 &= \sqrt{10}\omega_{cg}/1000 \\ \omega_4 &= \sqrt{10}\omega_{cg}/100 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

となる。

以上でロール、インナ・ピッチ、ヨー軸の制軸パラメータが決まったが、次にアウト・ピッチを含むピッチ軸全系の制御について考えることにする。

インナ・ピッチ回路の伝達関数は(29), (30), (31), (34)式によって定まるのでこの関数を $G_{in}^R(s)$ とすれば

$$G_{in}^R(s) = \frac{KHC_3\omega_2(s+\omega_1)(s+\omega_4)}{(I_{OA}s^2 + C_Ds + \mu H)\omega_1(s+\omega_2)(s+\omega_3)(s+C_2)(Js+R) + KHC_3\omega_2(s+\omega_1)(s+\omega_4)}$$

と書ける。

そこで

$$u^R(s) = (I_{OA}s^2 + C_Ds + \mu H)\omega_1(s+\omega_2)(s+\omega_3)(s+C_2)(Js+R)$$

$$V^R(s) = KHC_3\omega_2(s+\omega_1)(s+\omega_4)$$

とおき、 $u^R(s)$ ,  $\angle u^R(s)$ を求めれば

$$\left. \begin{aligned} |u^R(s)| &= I_{OA}\omega_1\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)(\omega_2^2 + \omega^2)(\omega_3^2 + \omega^2)(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2\omega^2)} \\ \angle u^R(s) &= \tan^{-1}(-\omega/\alpha) + \tan^{-1}(-\omega/\beta) + \tan^{-1}(\omega/\omega_2) + \tan^{-1}(\omega/\omega_3) + \tan^{-1}(\omega/C_2) + \tan^{-1}(J\omega/R) \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ただし

$$\alpha = \frac{1}{2I_{OA}}(-C_D + \sqrt{C_D^2 + 4I_{OA}\mu H})$$

$$\beta = \frac{1}{2I_{OA}}(-C_D - \sqrt{C_D^2 + 4I_{OA}\mu H})$$

また $|V^R(s)|$ ,  $\angle V^R(s)$ を求めれば

$$\left. \begin{aligned} |V^R(s)| &= KHC_3\omega_2\sqrt{(\omega_1^2 + \omega^2)(\omega_4^2 + \omega^2)} \\ \angle V^R(s) &= \tan^{-1}(\omega/\omega_1) + \tan^{-1}(\omega/\omega_4) \end{aligned} \right\} \quad (39) \quad \text{と表わせるから}$$

となり $G_{in}^R(s)$ の分母 $W^R(s)$ は

$$\begin{aligned} W^R(s) &= |u^R|e^{j\angle u^R} + |V^R|e^{j\angle V^R} \\ &= \{ |u^R|\cos(\angle u^R) + |V^R|\cos(\angle V^R) \} \\ &\quad + j\{ |u^R|\sin(\angle u^R) + |V^R|\sin(\angle V^R) \} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\left. \begin{aligned} |W^R(s)|^{-1} &= \frac{1}{\sqrt{\{ |u^R|\cos(\angle u^R) + |V^R|\cos(\angle V^R) \}^2 + \{ |u^R|\sin(\angle u^R) + |V^R|\sin(\angle V^R) \}^2}} \\ \angle W^R(s)^{-1} &= \tan^{-1} \left\{ -\frac{|u^R|\sin(\angle u^R) + |V^R|\sin(\angle V^R)}{|u^R|\cos(\angle u^R) + |V^R|\cos(\angle V^R)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

となる。以上の関係式から $G_{in}^R(s) = V^R(s)W^R(s)^{-1}$ の絶対値および位相は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} |G_{in}^R| &= \frac{KHC_3\omega_2\sqrt{(\omega_1^2 + \omega^2)(\omega_4^2 + \omega^2)}}{\sqrt{\{ |u^R|\cos(\angle u^R) + |V^R|\cos(\angle V^R) \}^2 + \{ |u^R|\sin(\angle u^R) + |V^R|\sin(\angle V^R) \}^2}} \\ \angle G_{in}^R &= \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_4}\right) + \tan^{-1} \left\{ -\frac{|u^R|\sin(\angle u^R) + |V^R|\sin(\angle V^R)}{|u^R|\cos(\angle u^R) + |V^R|\cos(\angle V^R)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 |u^R| &= \omega_1 \sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)(\omega_2^2 + \omega^2)(\omega_3^2 + \omega^2)(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2 \omega^2)} \\
 |V^R| &= KHC_3 \omega_2 \sqrt{(\omega_1^2 + \omega^2)(\omega_4^2 + \omega^2)} \\
 \angle u^R &= \tan^{-1}\left(-\frac{\omega}{\alpha}\right) + \tan^{-1}\left(-\frac{\omega}{\beta}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_3}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{C_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{J\omega}{R}\right) \\
 \angle V^R &= \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_4}\right)
 \end{aligned}$$

そこで図 35 のアウト・ピッチ制御回路系の補償回路を取除いた部分の伝達関数  $G_O(S)$  は

$$\begin{aligned}
 G_O(S) &= \frac{K_O C_3}{(S + C_2)(JS + R)} \\
 |G_O| &= \frac{K_O C_3}{\sqrt{(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2 \omega^2)}} \\
 \angle G_O &= \tan^{-1}(-\omega/C_2) + \tan^{-1}(-J\omega/R)
 \end{aligned} \quad (43)$$

と書けるから、補償回路を入れない場合のアウト・ピッチ制御系の開ループ伝達関数のゲインと位相は

$$\begin{aligned}
 G_n &= (1/S) G_{in}^R G_O \\
 |G_n| &= (1/\omega) |G_{in}^R| \cdot |G_O| \\
 \angle G_n &= -(\pi/2) + \angle G_{in}^R + \angle G_O
 \end{aligned} \quad (44)$$

となる。

ここで、ロール、インナ・ピッチおよびヨー軸制御の場合と同様に、周波数特性を改善し、トルクステフネスを高めるため、再び、位相進み、遅れ回路を使用するものとする。位相進み回路の伝達関数  $Z_{PL}(S)$  は

$$\begin{aligned}
 Z_{PL}(S) &= \frac{\omega_6}{\omega_5} \cdot \frac{S + \omega_5}{S + \omega_6} \quad (\text{ただし } \omega_6 > \omega_5) \\
 |Z_{PL}| &= \frac{\omega_6}{\omega_5} \cdot \frac{\sqrt{\omega_5^2 + \omega^2}}{\sqrt{\omega_6^2 + \omega^2}} \\
 \angle Z_{PL} &= \tan^{-1}\left\{\frac{(\omega_6 - \omega_5)\omega}{\omega_5 \omega_6 + \omega^2}\right\}
 \end{aligned} \quad (45)$$

で表わされるとし、再び、位相進み回路の最大位相をとる周波数  $\omega_{CL}$  を  $G_n$  の高周波側の位相遅れが  $-220^\circ$  になる周波数とし、回路の実現性を考慮に入れて

$$\begin{aligned}
 \omega_5 &= \omega_{CL} / \sqrt{10} \\
 \omega_6 &= \sqrt{10} \omega_{CL}
 \end{aligned} \quad (46)$$

が得られる。また、トルクステフネスを増大させるため  $G_n Z_{PL}$  の位相進みの最大となる周波数を  $\omega_{cg}$  とし、位相遅れ回路の最大位相遅れを示す周波数をこの  $\omega_{cg}$  の  $1/100$  にとり、再び回路の実現性を考えて  $\omega_8 = 10 \omega_7$  とすれば

$$\begin{aligned}
 \omega_7 &= \sqrt{10} \omega_{cg} / 100 \\
 \omega_8 &= \sqrt{10} \omega_{cg} / 10
 \end{aligned} \quad (47)$$

となる。

以上の計算にもとづきボード線図およびニコルズ線図を用いて、開ループのゲイン、位相をプロットし、増幅器の増幅度  $K_O$  を調整すれば、ジャイロをレートモードで使した場合のブラットホームの周波数応答が得られる。

## 10.2 ジャイロをポジションモードで使用する場合

ジャイロをポジションモードで使用する場合にも、10.1 のレートモードでの計算と同様な手順によって補償回路パラメータや制御ゲインを求めれば良い。

したがってここではレートモード時と異なって来る計算式についてのみ記しておく。

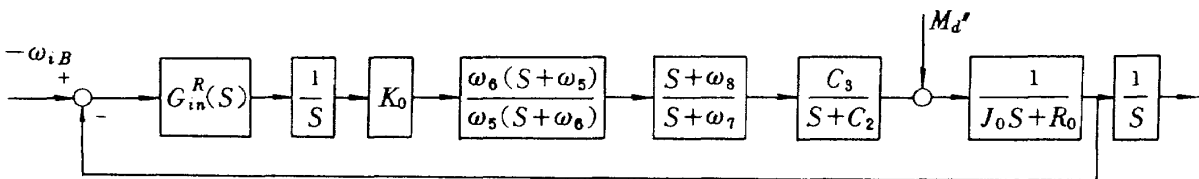


図 35 アウトピッチ制御回路

(28)式に対応し、補償回路を挿入しない時の開ループ—  
巡伝達関数  $G$  は、

$$G = \frac{H}{I_{OA}S^2 + C_D S} \cdot \frac{C_3}{S + C_2} \cdot \frac{1}{JS + R}$$

$$= \frac{KHC_3}{S(I_{OA}S + C_D)(S + C_2)(JS + R)} \quad (48)$$

で表わされる。また (29), (30) 式に対応したゲインと位  
相は

$$|G| = \frac{KHC_3}{\omega \sqrt{(C_D^2 + I_{OA}^2 \omega^2)(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2 \omega^2)}} \quad (49)$$

$$\angle G = -(\pi/2) + \tan^{-1}\left(-\frac{I_{OA}\omega}{C_D}\right) + \tan^{-1}\left(-\frac{\omega}{C_2}\right)$$

$$+ \tan^{-1}\left(\frac{-J\omega}{R}\right) \quad (50)$$

となる。

またアウト・ピッチ制御系を設計する際に必要になるイ  
ンナ・ピッチ制御回路の開ループ伝達関数  $G_{in}^P$  は

$$G_{in}^P = \frac{KHC_3 \omega_3 (S + \omega_1)(S + \omega_4)}{(I_{OA}S^2 + C_D S) \omega_1 (S + \omega_2)(S + \omega_3)(S + C_2)(JS + R) + KHC_3 \omega_2 (S + \omega_1)(S + \omega_4)}$$

と書けるので

$$u^P(S) = (I_{OA}S^2 + C_D S) \omega_1 (S + \omega_2)(S + \omega_3)(S + C_2)(JS + R)$$

$$V^P(S) = KHC_3 \omega_2 (S + \omega_1)(S + \omega_4)$$

と置くと (38) 式に対応して

$$|u^P(S)| = \omega_1 \omega \sqrt{(C_D^2 + I_{OA}^2 \omega^2)(\omega_2^2 + \omega^2)(\omega_3^2 + \omega^2)(C_2^2 + \omega^2)(R^2 + J^2 \omega^2)} \quad (51)$$

$$\angle u^P = (\pi/2) + \tan^{-1}\left(\frac{I_{OA}\omega}{C_D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_3}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{C_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{J\omega}{R}\right)$$

が得られる。また (39) 式に対応して

$$|V^P| = KHC_3 \omega_2 \sqrt{(\omega_1^2 + \omega^2)(\omega_4^2 + \omega^2)} \quad (52)$$

$$\angle V^P = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_4}\right)$$

を得る。したがって  $G_{in}^P(S)$  の分母  $W^P(S)$  は

$$W^P(S) = \{ |u^P| \cos(\angle u^P) + |V^P| \cos(\angle V^P) \} + j \{ |u^P| \sin(\angle u^P) + |V^P| \sin(\angle V^P) \} \quad (53)$$

のようになり、 $W^P(S)^{-1}$  の絶対値および位相は

$$|W^P(S)^{-1}| = \frac{1}{\sqrt{\{ |u^P| \cos(\angle u^P) + |V^P| \cos(\angle V^P) \}^2 + \{ |u^P| \sin(\angle u^P) + |V^P| \sin(\angle V^P) \}^2}} \quad (54)$$

$$\angle W^P(S)^{-1} = \tan^{-1} \left\{ -\frac{|u^P| \sin(\angle u^P) + |V^P| \sin(\angle V^P)}{|u^P| \cos(\angle u^P) + |V^P| \cos(\angle V^P)} \right\}$$

のように与えられ、(42) 式に対応したインナ・ピッチ制御系の閉ループ伝達関数  $G_{in}^P$  は

$$|G_{in}^P| = \frac{KHC_3 \omega_2 \sqrt{(\omega_1^2 + \omega^2)(\omega_4^2 + \omega^2)}}{\sqrt{\{ |u^P| \cos(\angle u^P) + |V^P| \cos(\angle V^P) \}^2 + \{ |u^P| \sin(\angle u^P) + |V^P| \sin(\angle V^P) \}^2}} \quad (55)$$

$$\angle G_{in}^P = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_4}\right) + \tan^{-1} \left\{ -\frac{|u^P| \sin(\angle u^P) + |V^P| \sin(\angle V^P)}{|u^P| \cos(\angle u^P) + |V^P| \cos(\angle V^P)} \right\}$$

となる。また補償回路を入れない場合のアウト・ピッチ制  
御系の開ループ—巡伝達関数は

$$G_n = (1/S) G_{in}^P G_0$$

$$|G_n| = (1/\omega) G_{in}^P \cdot G_0 \quad (56)$$

$$\angle G_n = -\frac{\pi}{2} + \angle G_{in}^P + \angle G_0$$

で表わされる。

## 10.3 評価プログラムに使用するプラットフォーム・

## サーボ系

以上 10.1, 10.2, でプラットフォーム・サーボ系の設計法について述べたが, この計算法を用いて評価プログラム用のプラットフォームの設計を行なった。

プラットフォーム系を決めるためには最低限, ジャイロ, 加速度計のパラメータ, サーボモータ特性, ジンバルの慣性モーメントの値が必要となる。

ジャイロ, 加速度計については, メーカーおよび研究所から不十分ながらいくつかのパラメータが公表されているので, その中で国産化の可能性の高いものを選ぶこととした。

我々の選んだジャイロ, 加速度計は次のようなパラメータを持つ。

ジャイロ, フェランティ社 122MN<sup>2</sup>)

$$I_{OA} = 2.05 \times 10^2 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$$

$$C_D = 8.9 \times 10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$$

$$H = 4.45 \times 10^5 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2 / \text{sec}$$

加速度計NAL試作, 磁気支持型加速度計

$$I_{OA} = 7.13 \times 10 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$$

$$C_D = 9.0 \times 10^3 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$$

$$P = 9.8 \times 10^{-1} \text{ gr} \cdot \text{cm}$$

サーボモータ特性ならびにジンバル慣性モーメントの詳細は公表されたものは見当たらないが, 航空機用として次の値が検討されている例があるのでこの値を用いることとした。<sup>6)</sup>

$$C_2 = 2.5 \times 10^3 \text{ sec}$$

$$C_3 = 3.00 \times 10^6 \text{ dyne} \cdot \text{cm}$$

$$J_r = 2.00 \times 10^5 \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_p = 1.00 \times 10^5 \text{ "}$$

$$J_y = 3.00 \times 10^4 \text{ "}$$

$$J_o = 2.00 \times 10^5 \text{ "}$$

$$R_r = 1.0 \times 10^2 \text{ gr} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$$

$$R_p = \text{ "}$$

$$R_y = \text{ "}$$

$$R_o = \text{ "}$$

これらの値に基づき, (29), (30)式と(49), (50)式とを用いて, 補償回路(位相進み, 遅れ回路)を含まない場合のレートモードおよびポジションモードのロール軸制御系開ループ伝達関数のボード線図を描くと図36, 図37が得られる。この図から判るように, レートモードでは低周波側でかなりの位相余裕があるが, 100radian/sec以上の周波数では, レードモードでも, ポジションモードでもほとんど変りはない。すなわち, 100radian/sec以上の周波数での位相特性はサーボモータならびにジンバル特性によって大きな支配を受けていることが判る。

位相遅れが $-220^\circ$ になる周波数 $\omega_{CL}$ はレートモードでは293.0radian/sec, ポジションモードで287.0radian/secとなるので(31), (33)式を用いて高周波側での位相補償を行なうと図38, 図39のようなボード線図が得られる。高周波側での位相が最大となる周波数

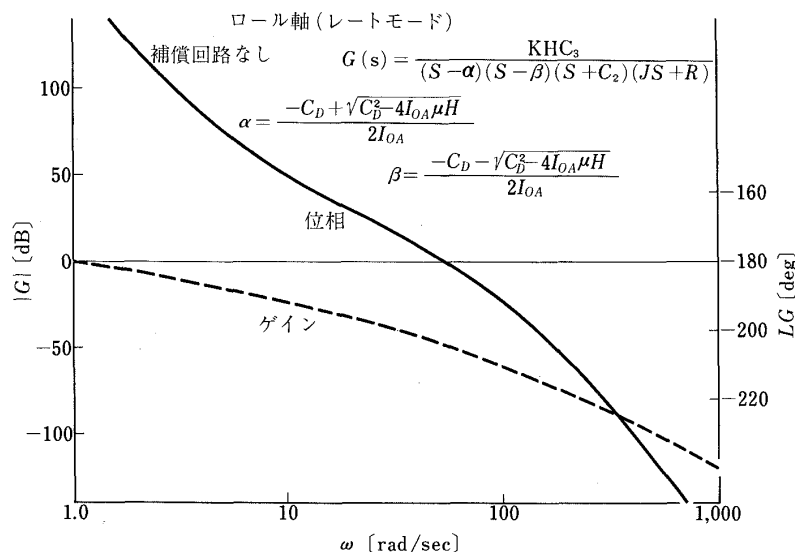


図 36 レートモード無補償時のロール制御系開ループ応答

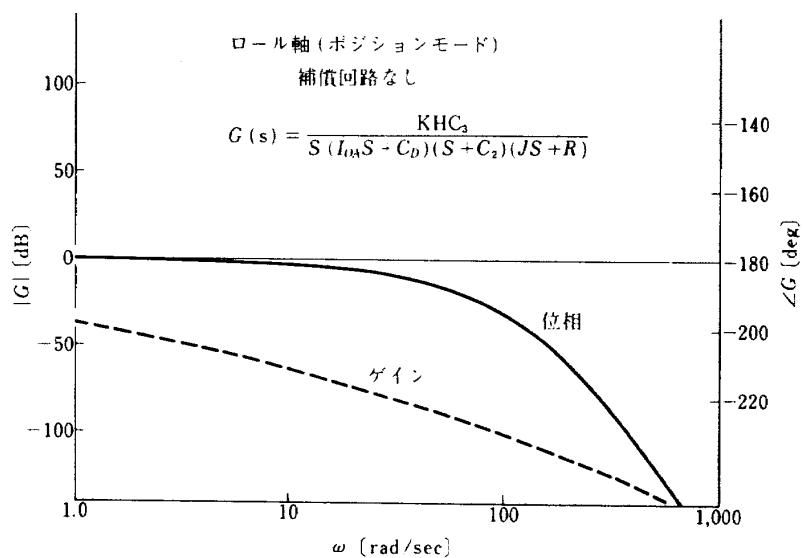


図 37 ポジションモード無補償時のロール制御系開ループ応答

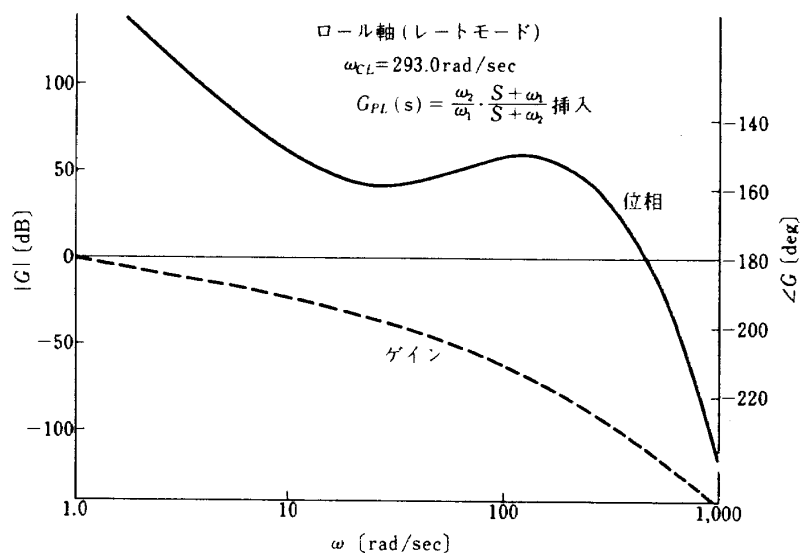


図 38 レートモード位相進み回路挿入時のロール制御系開ループ応答

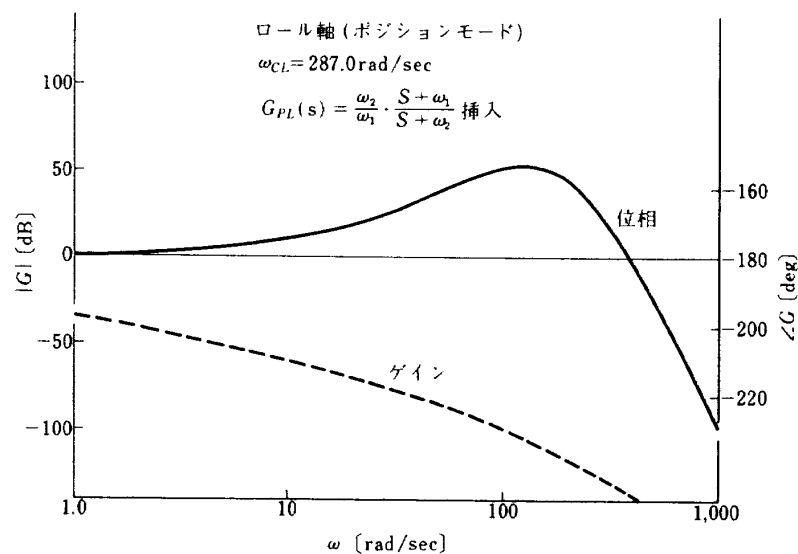


図 39 ポジションモード位相進み回路挿入時のロール制御系開ループ応答

$\omega_{cg}$  はレートモードで122.3 radian/sec, ポジションモードで130.0 radian/secとほとんど同じである。(34)と(37)式を用いてトルクスティフネスを上げるため位相遅れ回路で低周波側のゲインを上げたボード線図が図40, 図41である。

それでこれらのボード線図から系のゲイン余有が, それぞれ20 dBになるように増幅度を調整した上(レートモード:  $K=1.00 \times 10^5$ , ポジションモード:  $K=185 \times 10^5$ ), ニコルズ線図にベクトル軌跡を描けば, 図42, 図43のようになる。

インナ・ピッチ軸, ヨー軸についても同じ手順で系の調整を行なった結果, 増幅器のゲインは次のように定まった。

	レートモード	ポジションモード
ロール軸	$K=1.00 \times 10^5$	$K=1.85 \times 10^5$
インナ・ピッチ軸	$K=5.00 \times 10^4$	$K=9.12 \times 10^4$
ヨー軸	$K=1.50 \times 10^4$	$K=2.8 \times 10^4$

さらにアウト・ピッチ軸系については(44), (56)式を用いて, アウタ・ピッチ軸駆動に補償回路を含まない場合の開ループ伝達関数のボード線図を描けば, 図44, 図45のようになり位相まわりが $-220^\circ$ になる周波数は70

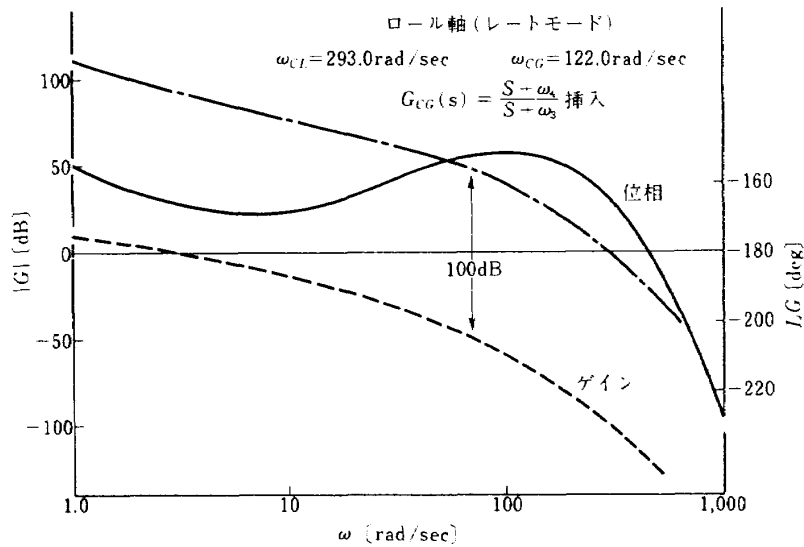


図 40 レートモード全補償回路押入時のロール制御系開ループ応答

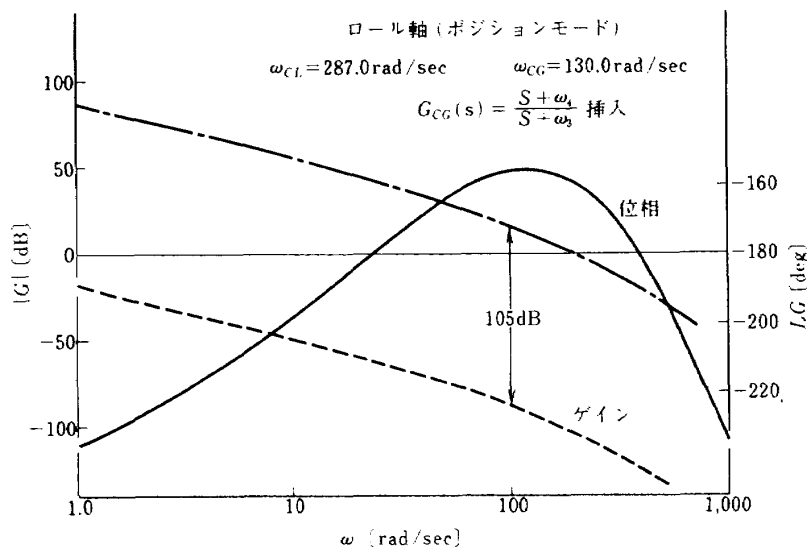


図 41 ポジションモード全補償回路押入時のロール制御系開ループ応答

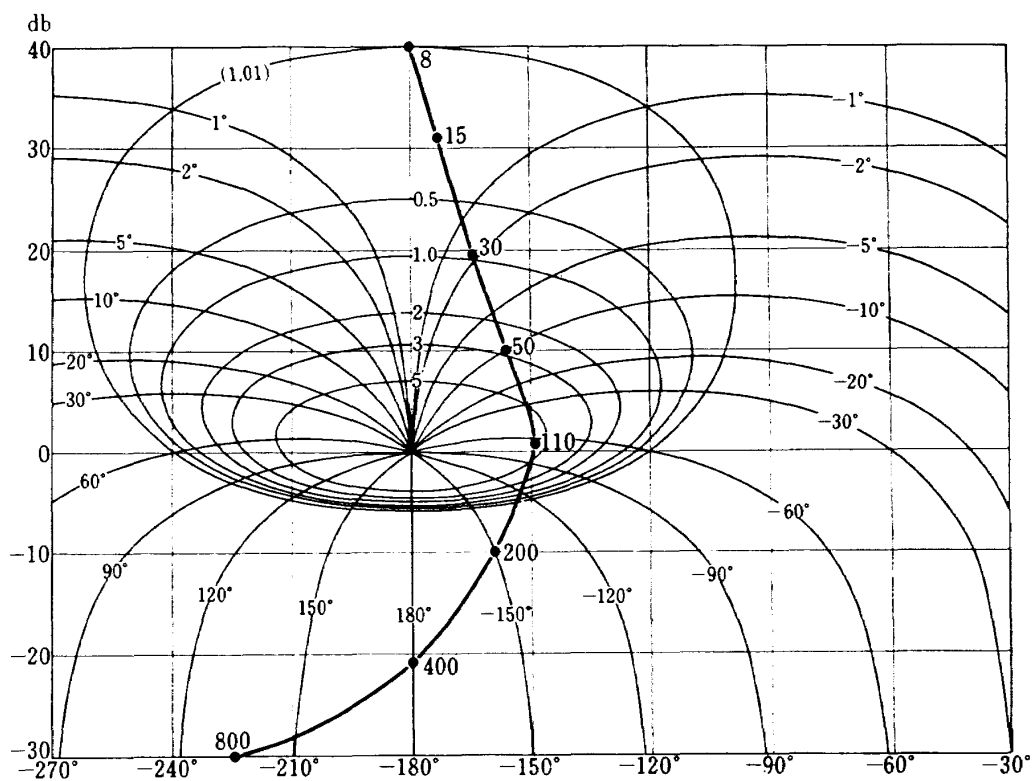


図 42 レートモードロール制御系ベクトル軌跡

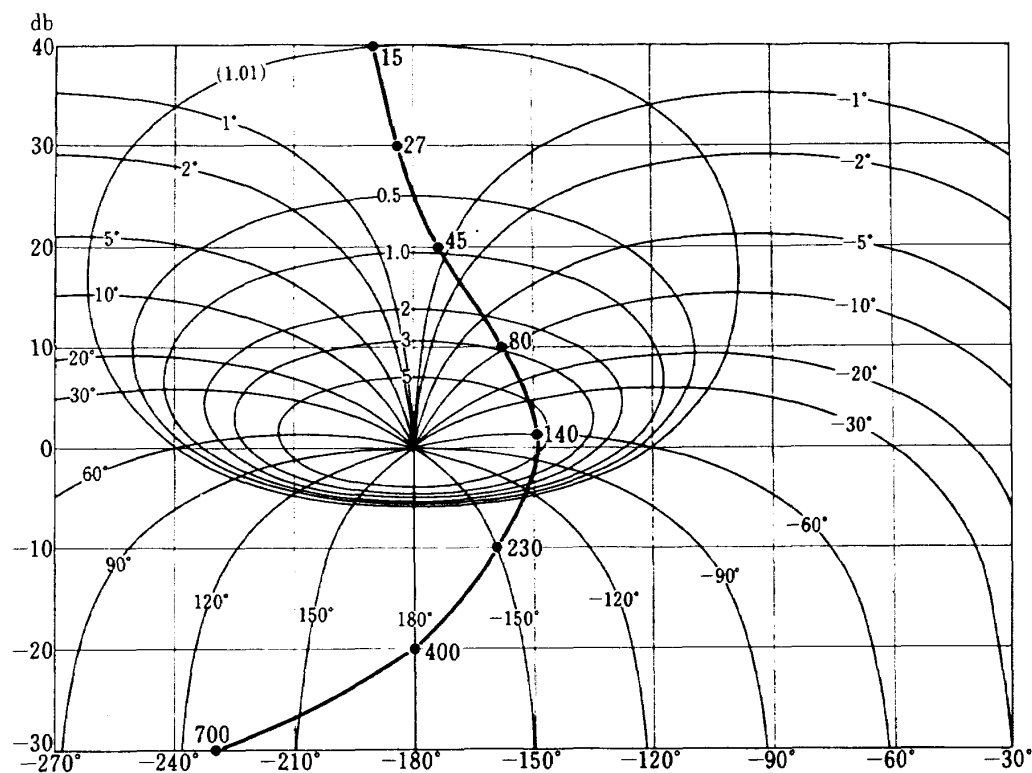


図 43 ポジションモードロード制御系ベクトル軌跡



$\text{radian/sec}$ となる。そこで $\omega_{CL} = 70 \text{radian/sec}$ とし(45), (46)式を用いれば, 位相進み回路パラメータが決まるので, この位相進み回路を挿入した開ループ伝達関数のボード線図を描くと図46, 図47のようになる。このボード線図上で, 位相の最大値は, 周波数が $40 \text{radian/sec}$ の時に得られることが判るので,  $\omega_{cg} = 40 \text{radian/sec}$ とし, (47)式により位相遅れ回路パラメータを計算した後, 系のゲイン余有を $20 \text{dB}$ にするため増幅器の増幅度をレートモードでは $K = 1.6 \times 10^4$ ,

ポジションモードでは $1.4 \times 10^4$ に調整し, ピッチ軸制御系全系の開ループ伝達関数のベクトル軌跡をニコルズ線図に描けば図48のようになる。さらにこのニコルズ線図から閉ループ制御系の周波数応答を求めれば, 図49のようになる。

以上の結果から, ロール, インナ・ピッチ, ヨー軸に関しては $100 \text{radian/sec}$ の応答性をもち, アウタ・ピッチ軸に関しては $15 \text{radian/sec}$ の応答性をもつブラットホームが設計された。

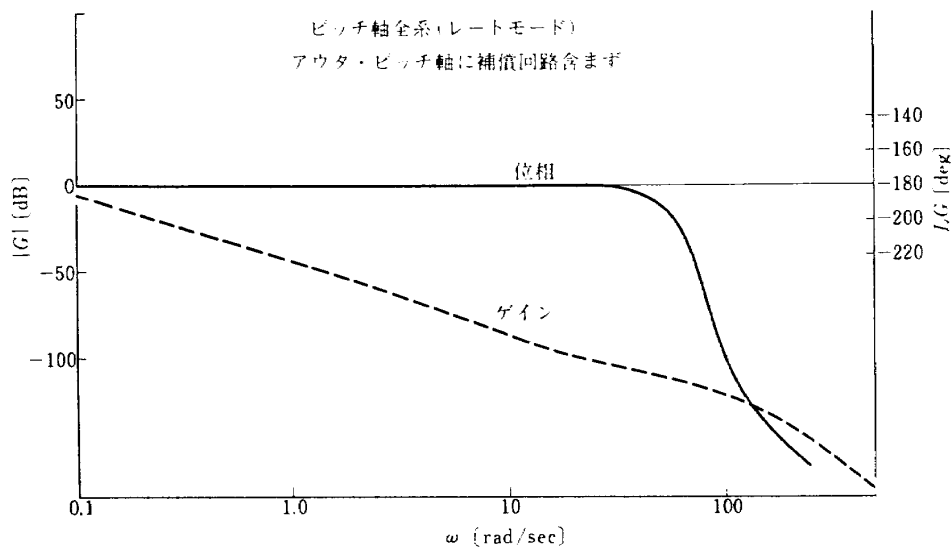


図 44

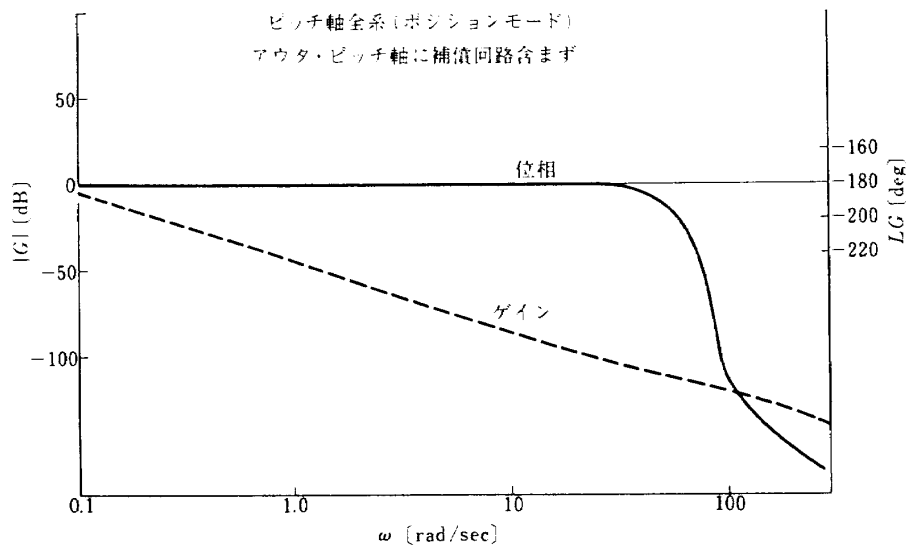


図 45

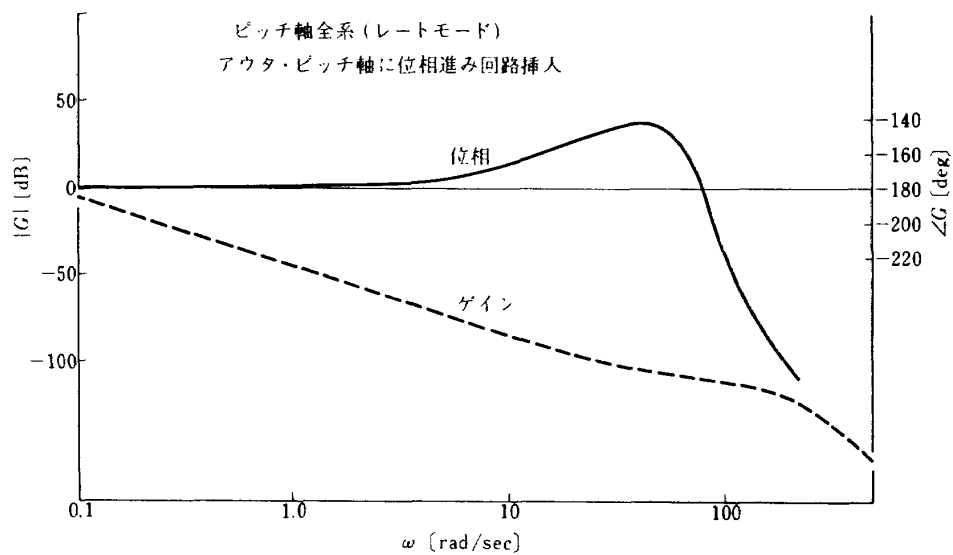


図 46

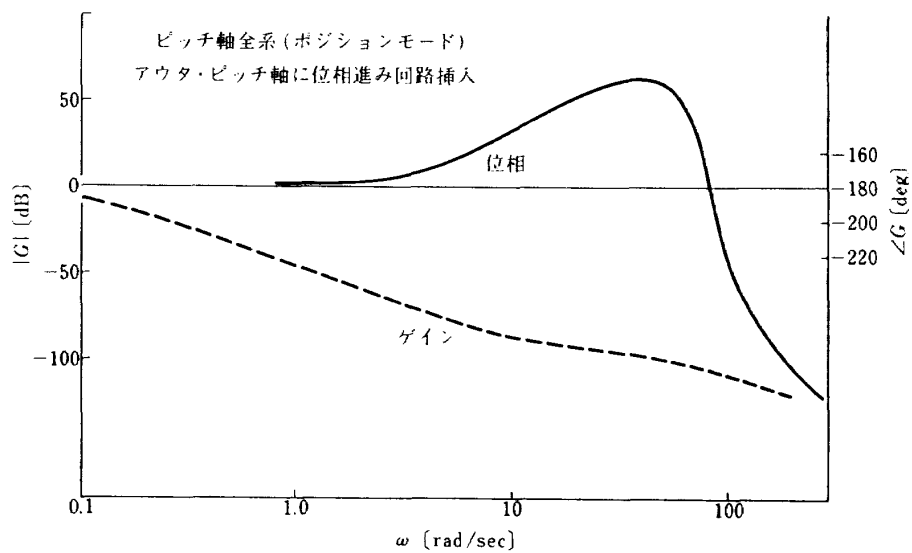


図 47

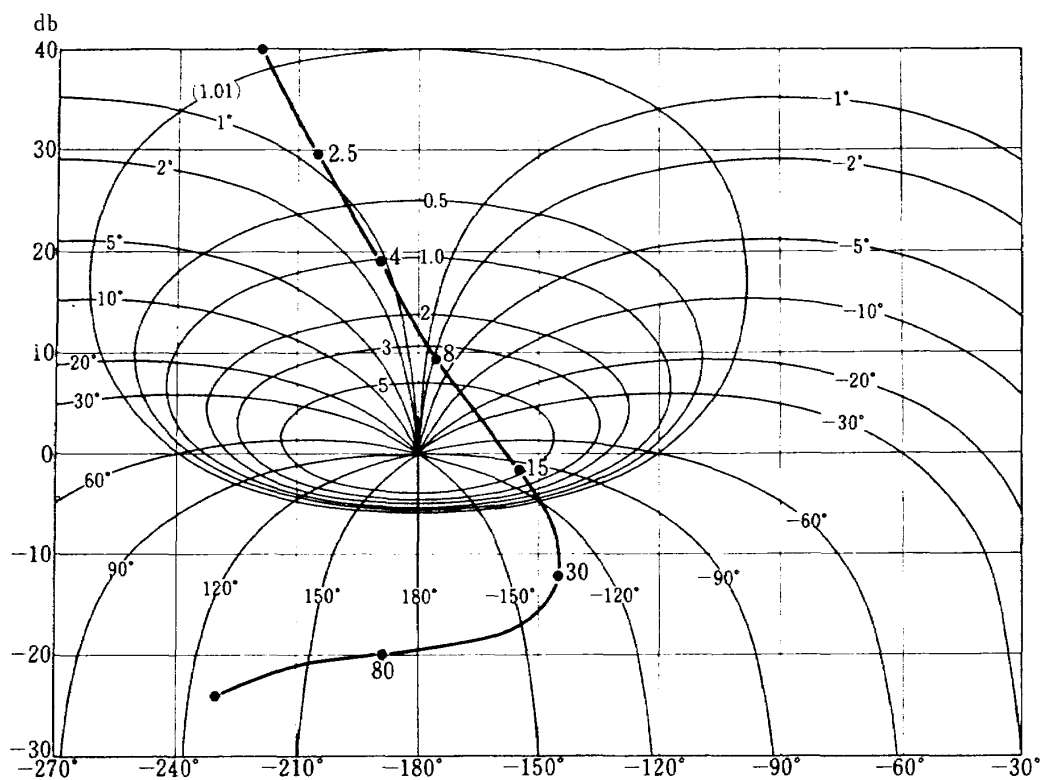


図 48

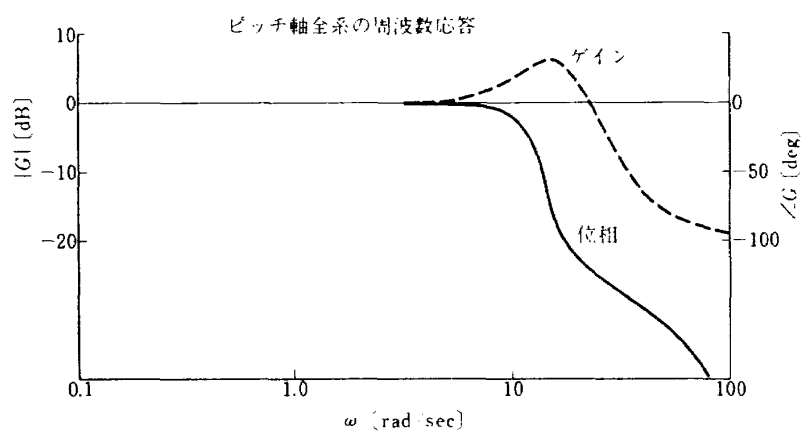


図 49

## 11 プラットホーム動作評価プログラムの検証

10で求められたプラットホームモデルのうちレートモードのパラメータを, 9で述べた評価プログラムに入れて動作シミュレーションを試みた。プラットホーム全系に与える入力としては, 回転速度として

ロール軸  $1.0 \text{ deg/sec}$

ピッチ軸  $0.0 \text{ deg/sec}$

ヨー軸  $0.0 \text{ deg/sec}$

加速度として

ロール軸  $2.0 G$

ピッチ軸  $2.0 G$

ヨー軸  $2.0 G$

を設定した。シミュレーション時間は0～1秒間であり, 計算の時間刻みは1 msで行なった。図50にロール軸, 図51にピッチ軸, 図52にヨー軸まわりの応答を示す。ステップ入力に対し, 0.4秒程度でこのプラットホームは整定していることが判る。また, 図53, 図54, 図55

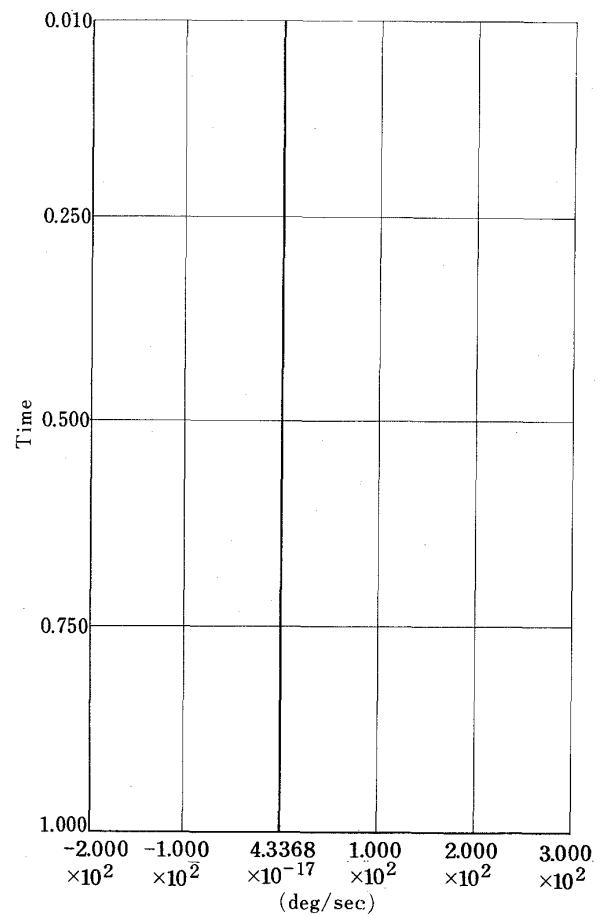


図 51

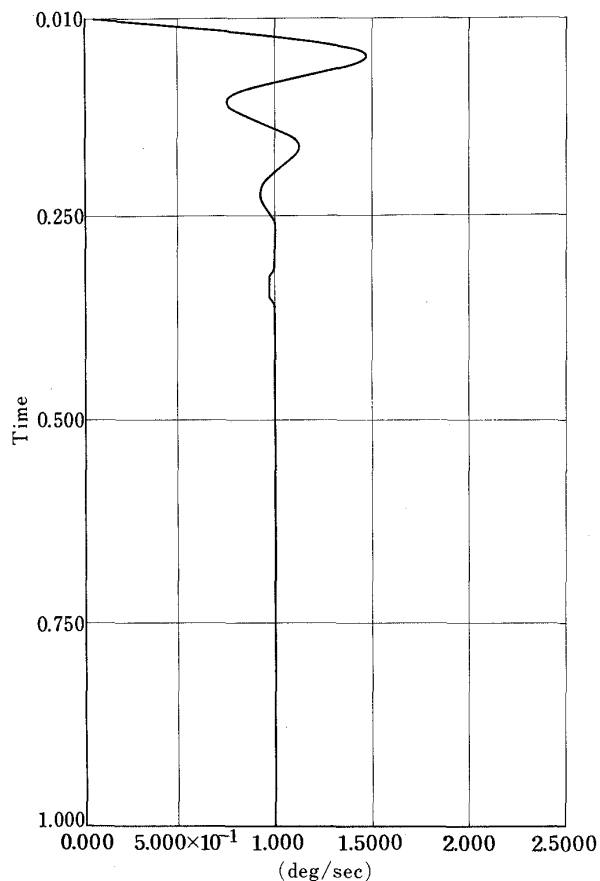


図 50 プラットホームのロール軸応答

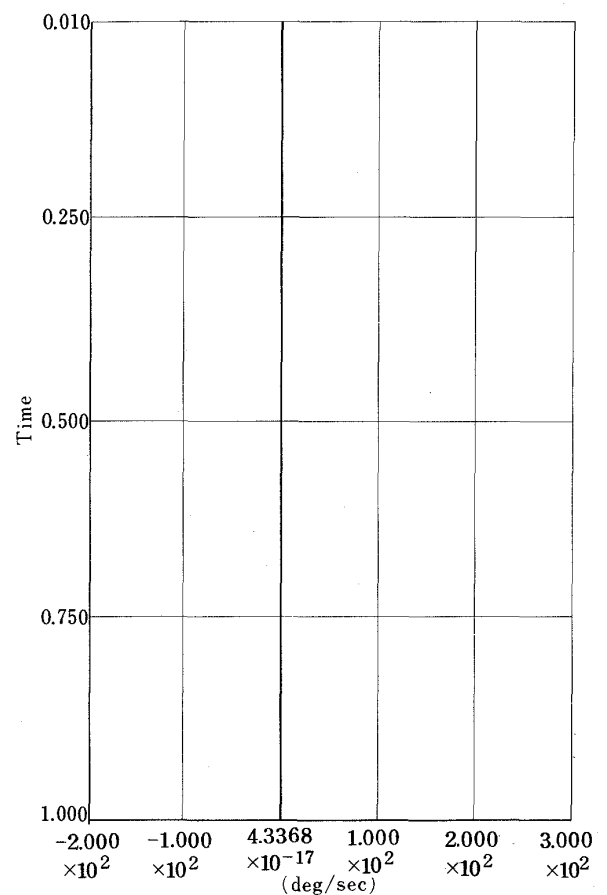


図 52

にプラットフォーム上のロール軸加速度計、ピッチ軸加速度計、ヨー軸加速度計の出力をそれぞれ示す。

以上の計算結果から製作したプラットフォーム評価プログラムは、高精度の慣性誘導システムのプラットフォームIMUの評価に使用出来ることが判明した。さらにこのプラットフォーム評価プログラムを含む、プラットフォーム方式慣性誘導システム総合解析プログラムを製作し、プラットフォーム方式のシステムの総合精度を明らかにするためのシミュレーションを実行している。これについては別報で述べることとするが、Nロケットにこのプラットフォームを搭載しETS-Iミッション軌道に沿って飛しょうさせた場合のプラットフォーム応答をシミュレートした結果の1例を示しておく。表7はETSミッションのイベント、シークエンスで、図56、図57、図58はプラットフォームのロール、ピッチ、ヨージンバルの応答を示す。また、図59、図60、図61にプラットフォームに搭載されたロール軸加速度計、ヨー軸加速度計、ピッチ軸加速度計の出力を示す。これらのシミュレーション結果は、ピッチダウン開始やSOB

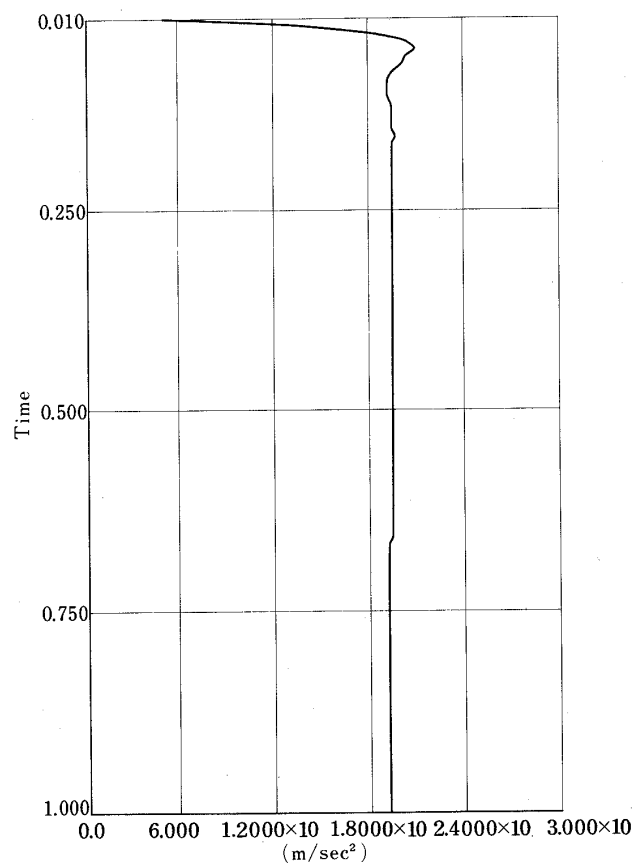


図 54

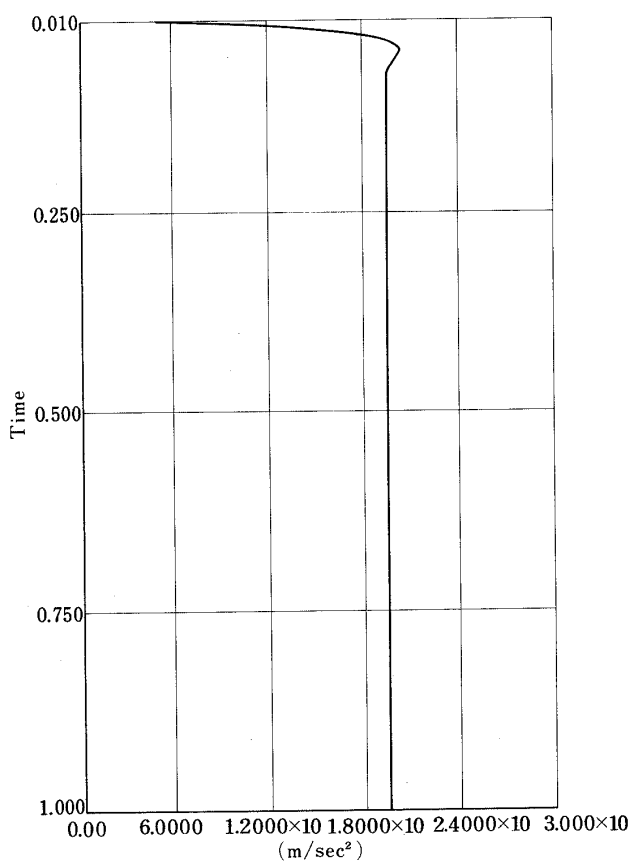


図 53

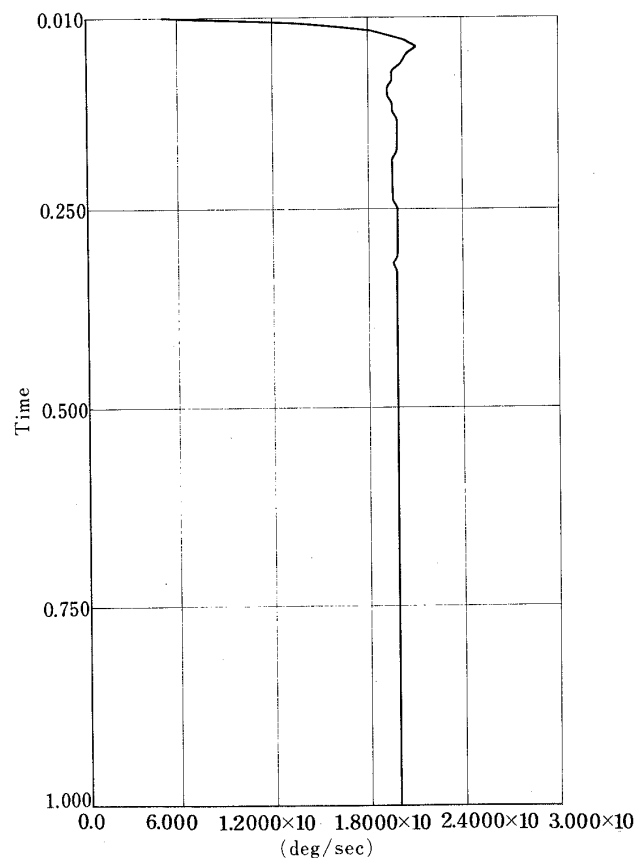


図 55

表7 ETS-1 ミッション インベントシーケンス

EVENT				模擬実験用 ON BOARD COMPUTER からの指令		
FLIGHT MODE	現象の起る 時刻	内 容		現象の起 る時刻	指令 時刻	内 容
1st. GUIDANCE MODE	1ST. STAGE	0.000	LAUNCH MAIN1, SOB, VERNIER : Ignition			
		38.193	SOB: Burn out			
		80.000	SOB: Drop	80.000		SOB: Drop
		218.513	MAIN1: Burn out <218.5>			
		N219.513	MAIN1: 残留 End			
		224.513	VERNIER: Burn out <224.5> Roll Pitch Yaw GAS JET 制御可能に		225.000	Roll Pitch Gasjet : 制御可
		226.013	ULLAGE, RETRO: Ignition SEPARATION ULLAGE: Burn out	226.013	225.500 226.000	ULLAGE, RETRO : Ignition Separation
		228.013	Pitch Yaw GAS JET 制御セズに MAIN2: Ignition	228.013	227.000 228.000	Pitch Yaw Gasjet : 制御不可 MAIN2: Ignition
		242.513	FAIRING COVER: Drop	242.513	242.500	FAIRING COVER : Drop
		461.970	MAIN2: Cut off	$T_i$	?	MAIN2: Cut off
2ND or 2ND TERMINAL 1→2 COASTING GUIDANCE	2ND. STAGE	N463.000	MAIN2: 残留 End Pitch Yaw GAS JET 制御可能に	$T_2 = T_1 + \alpha$	$+\alpha$	Pitch Yaw Gasjet 制御可
		511.513				
		500.513				
		601.513				
		700.513				
		1195.513	SEPARATION	1195.513	1195.500	Separation
		1208.513	MAIN3: Ignition			
		1249.413	MAIN3: Cut off			
2→3 COASTING	3RD. STAGE					

記号: ○: Ignition

●: Cut off or Burn out

●: 残留 End

(  $T_1, T_2$  は 2nd Stage Guidance の結果を  
用いて決定する

(補助固体ロケットブースタ)の燃焼終了などに対する機体の運動に実によく追従している。

## 12. あとがき

ここで述べたプラットフォーム動作シミュレーションプログラムは50年度後半から51年度前半にかけて製作したものであり、将来、ミッションに応じて誘導装置を選択する際のトレードオフのための総合評価計算に有効に使用されるものと思われる。また10で述べたプラットフォームサーボ系のシンセシスは、特に眼新しいものでもないが、このように整理し、プログラムを作成しておけば、新しいプラットフォームを開発する際にも充分利用出来るものと考えられる。

ただここで注意しなければならないのは、このプラットフォームモデルはジンバルとサーボモータが剛に結合した場合のものであり、フリクション結合の場合は別途考慮する必要がある。ただし、どちらのモデルでも、プラットフォームジンバルの動きは大差がないと考えられるのでシステムのシミュレーションには有効である。またストラップダウンIMUの場合と異なり処理時間は大幅に伸びるがシステ

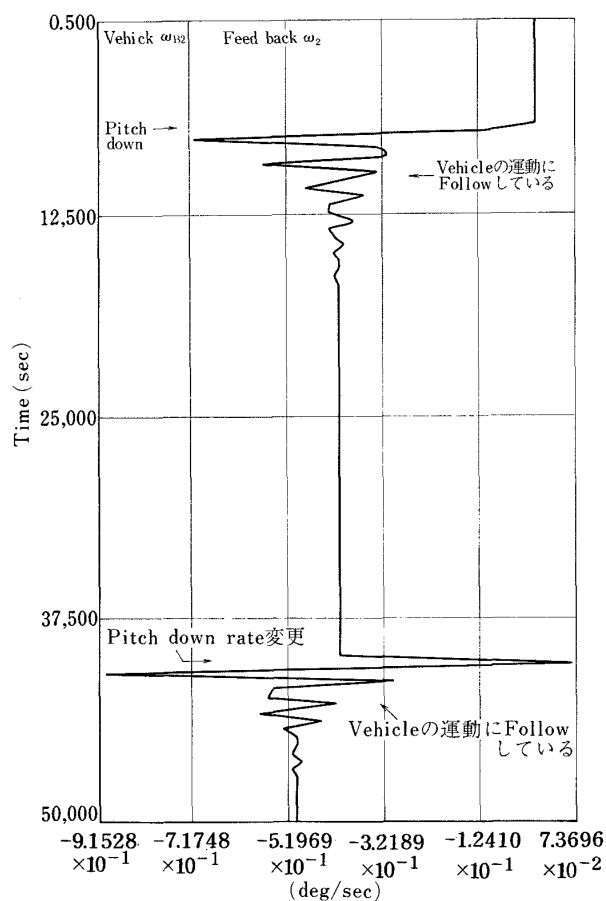


図 57

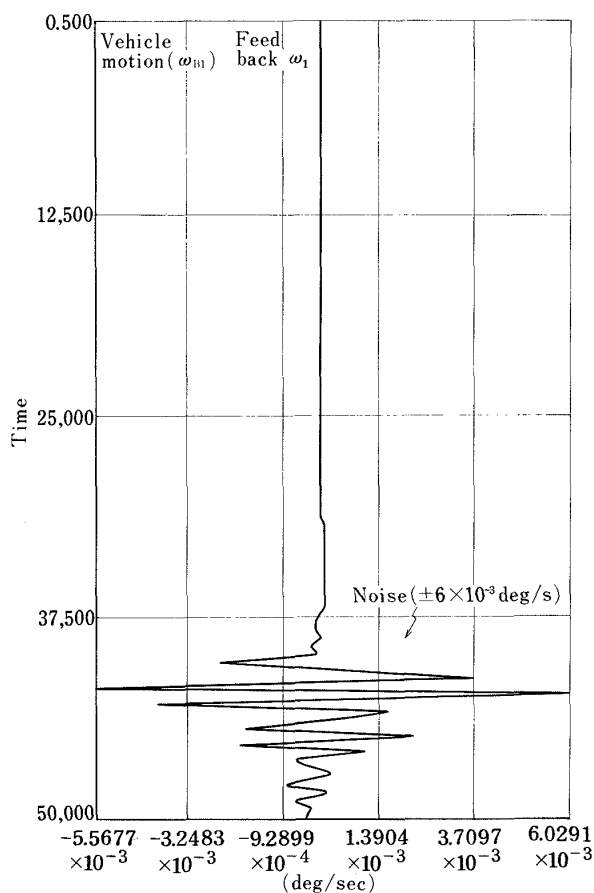


図 56

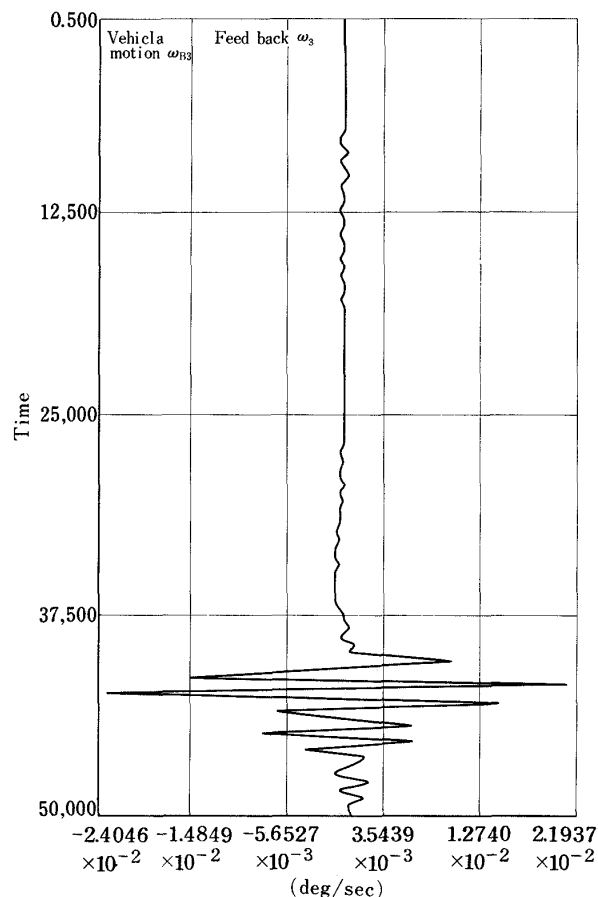


図 58

ムの総合性能評価には必ずしも実時間性を要しないことを考えれば、このような欠点は、それほど気にしなくてもよいものと思われる。

現在、本プログラムを組み込んだプラットホーム誘導システム全体の性能評価プログラムを研究開発中であるが、これが出来上れば、搭載ソフトウェアの精度評価も容易に可能になるものと考えられる。

最後に、本プログラムを研究開発することに関し種々御指導いただいた、前山内所長、現河崎所長に感謝の意を表するとともに、製作に当りSEとして多大の努力をしていただいた大興ファコムデータセンタの谷宗行氏、海老沢正広氏および、大興通信の七田正博氏に深謝するものである。

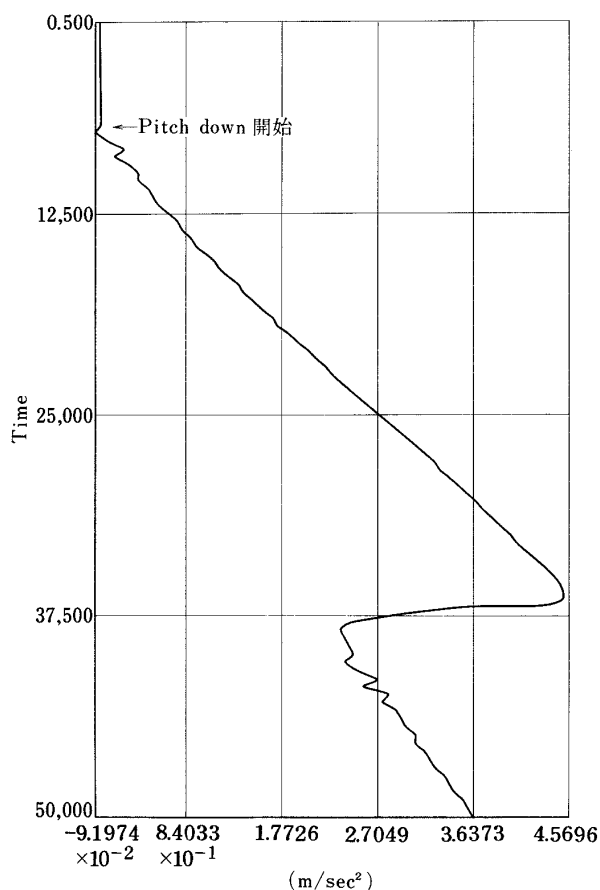


図 60

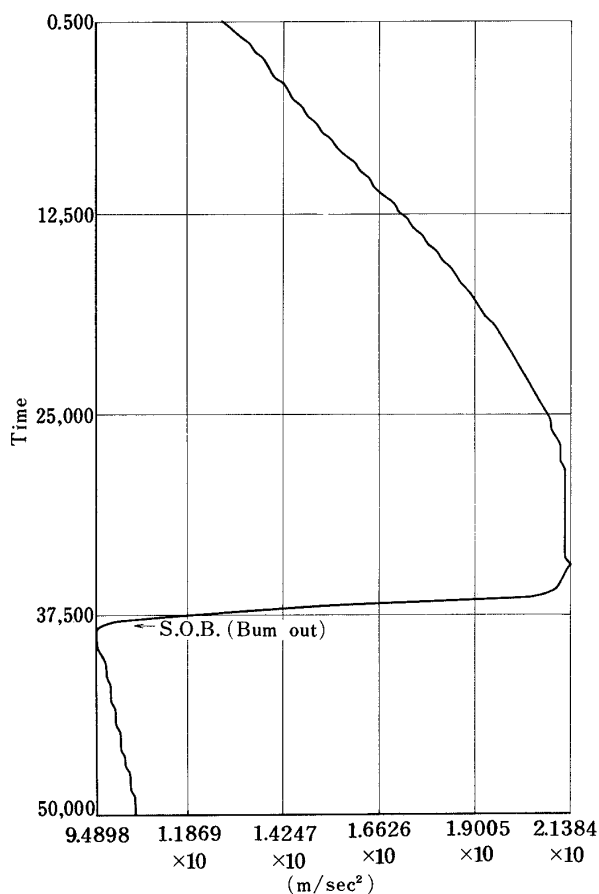


図 59

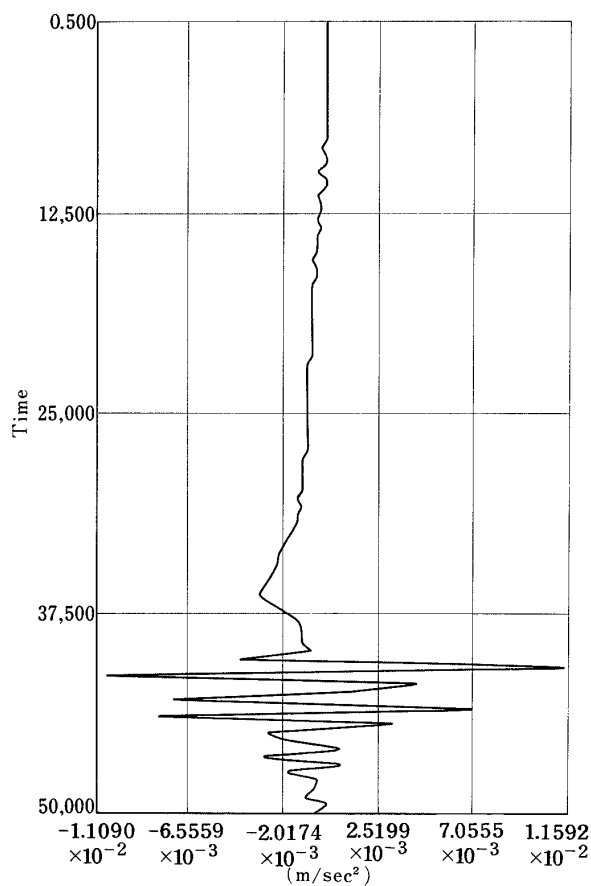


図 61



$(\dot{\mathbf{F}}^{-1})$ ,  $(\ddot{\mathbf{F}}^{-1})$  の計算

$$\begin{aligned}\mathbf{F}^{-1} &= \begin{bmatrix} \cos A_y / \cos A_p & \sin A_y / \cos A_p & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos A_p} \dot{A}_y & 0 & 0 \\ 0 & \dot{A}_y & 0 \\ 0 & 0 & \dot{A}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin A_y & +\cos A_y & 0 \\ -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos A_p} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_y & +\sin A_y & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p \cdot \cos A_y & \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p \cdot \sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

であるから、まず  $\dot{\mathbf{F}}^{-1}$  は、

$$\dot{\mathbf{F}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_y & +\sin A_y & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos A_p} \dot{A}_y & 0 & 0 \\ 0 & \dot{A}_y & 0 \\ 0 & 0 & \dot{A}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin A_y & +\cos A_y & 0 \\ -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

となる。

次に  $\ddot{\mathbf{F}}^{-1}$  は、

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{F}}^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{1 + \sin^2 A_p}{\cos^3 A_p} (\dot{A}_p)^2 + \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \ddot{A}_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_y & +\sin A_y & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p \dot{A}_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin A_y & +\cos A_y & 0 \\ -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p \dot{A}_y + \frac{1}{\cos A_p} \ddot{A}_y & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{A}_y & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{A}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin A_y & +\cos A_y & 0 \\ -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos A_p} (\dot{A}_y)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\dot{A}_y)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\dot{A}_y)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ +\sin A_y & -\cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1 + \sin^2 A_p}{\cos^3 A_p} (\dot{A}_p)^2 + \frac{\sin A_p}{\cos^2 A_p} \ddot{A}_p - \frac{1}{\cos A_p} (\dot{A}_y)^2 & 0 & 0 \\ 0 & -(\dot{A}_y)^2 & 0 \\ 0 & 0 & -(\dot{A}_y)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_y & \sin A_y & 0 \\ -\sin A_y & \cos A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{2 \sin A_p}{\cos^2 A_p} \dot{A}_p \dot{A}_y + \frac{1}{\cos A_p} \ddot{A}_y & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{A}_y & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{A}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin A_y & +\cos A_y & 0 \\ -\cos A_y & -\sin A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

## 参考文献

- 1) "Inertial Navigation System," Charles Broxmeyer, McGraw-Hill, 1964
- 2) "Ferranti Catalogue, 120 Series Floating Gyroscopes."
- 3) "Ferranti Catalogue, Inertial Space Technology."
- 4) "The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro" Edwin W Howe et al, Control Engineering, June 1964, p67-72
- 5) "航法用ジャイロについて" 熊沢俊治, 電子通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会資料 SANE73-6
- 6) "Navigation inertielle Optimale et filtrage statistique." P.Faure et al, Dunod Paris, 1971.
- 7) "自動制御理論" 高橋安人, 岩数全書, 1956.

---

## 航空宇宙技術研究所報告 510 号

昭和 52 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 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---