

JAERI-M  
9340

モンテカルロ法輸送計算コードによる  
トーラス形状の取り扱い

1981年2月

山内 通則\*・飯田 浩正

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

モンテカルロ法輸送計算コードによるトーラス形状の取り扱い

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

山内 通則\*・飯田 浩正

(1981年1月27日受理)

核融合炉の核設計においてトーラス形状を厳密に模擬することは、プラズマ近傍の核特性を評価する上で重要である。実験炉 JXFR 等のストリーミング計算で重要な役割を果たしたモンテカルロ法輸送計算コード MORSE-GG は、従来物質の境界面を 2 次以下の空間方程式によってしか扱えなかった。従って MORSE-GG コードを核融合炉の核設計に対して一層有効な計算コードとするために、一般的な 4 次方程式を解き、トーラス形状を厳密に扱うことが可能なようにプログラムを改良した。

---

\*) 外来研究員：東京芝浦電気株式会社

Exact Modeling of the Torus Geometry with Monte Carlo  
Transport Code

Michinori YAMAUCHI<sup>\*</sup> and Hiromasa IIDA

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 27, 1981)

It is valuable to model torus geometry exactly for the neutronics design of fusion reactor in order to assess neutronics characteristics such as tritium breeding ratio, heat generation rate, etc, near the plasma. Monte Carlo code MORSE-GG which plays important role in the radiation streaming calculation of fusion reactors had been able to deal with the geometry composed of second order surfaces. The MORSE-GG program is modified to be able to deal with torus geometry which has fourth order surface by solving biquadratic equations, hoping that MORSE-GG code becomes more effective for the neutronics calculation of the Tokamak fusion reactor.

Keywords; Monte Carlo Method, Transport Calculation Code, Tokamak Fusion Reactor, Torus Geometry, Biquadratic Equation, Neutronics Calculation

---

<sup>\*</sup>)On leave from Tokyo Shibaura Electric Corporation

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 計 算 式 .....	1
2.1 トーラスの方程式 .....	1
2.2 4次方程式の解法 .....	3
2.3 4次方程式を解くか否かの判別 .....	7
2.4 トーラス線源の発生 .....	9
3. トーラス形状処理プログラム .....	11
3.1 各サブルーチンの概要 .....	11
3.2 各サブルーチンの階級と計算の流れ .....	12
3.3 COMMONの構成と変数の内容 .....	12
4. 4次方程式解法ルーチンの計算時間 .....	13
5. トーラス形状入力形式 .....	14
謝 辞 .....	16
参考文献 .....	16
付 録 プログラム・リスト .....	17

## C o n t e n t s

1. Introduction.....	1
2. Method for Treating Torus Geometry.....	1
2.1 Formulation of Torus Surface Equation.....	1
2.2 Solution of Biquadratic Equation.....	3
2.3 Determination of Existance of Significant Solution for Biquadratic Equation.....	7
2.4 Generation of Uniformly Distributed Torus Geometry Source.....	9
3. Description of Subroutines Dealing with Torus Geometry.....	11
3.1 Outline of Subroutines.....	11
3.2 Calculational Flow of Dealing with Torus Geometry.....	12
3.3 List of Commons.....	12
4. CPU Time for solving Biquadratic Equation.....	13
5. Input Format for Torus Geometry Routine.....	14
Acknowledgement.....	16
References.....	16
Appendix : Program List.....	17

## 1. 序 論

モンテカルロコードMORSE-GG<sup>1)</sup>は米国のオークリッジ国立研究所で開発された3次元モンテカルロコードである。従来のMORSE-GGコードは媒質や領域の境界面を3次元空間における2次以下の方程式によって表わし、これによって複雑な炉の構造をほとんど模擬することができた。しかし今日最も有望とされているトカマク型の核融合炉においては、炉の本体が4次方程式によって表わされるトーラス形状となっており、従来のMORSE-GGコードでは厳密に扱うことができない。イタリアのNicksはFINTOR炉のNBIを含む1モジュール分を取り出して、斜めに切断した円柱によってトーラスを模擬し、MORSE-GGによるダイバータからのストリーミング計算を行なってダイバータ磁場コイルの損傷を評価した<sup>2)</sup>。遮蔽計算のように一般にプラズマから遠くまでの計算ほどトーラス効果の取り扱いが粗くて良いが、第1壁やブランケット等プラズマ周辺機器の核特性を詳細に検討するためには4次方程式によりトーラスを厳密に表わす必要がある。Macdonaldらは粒子のエネルギーを連続的に減速させるモンテカルロコードMCNにトーラスの取り扱いルーチンを組み込んでブランケットの計算を行ない、トーラス効果が小さくはないと述べている<sup>3)</sup>。

今回はMORSE-GGコードを核融合炉の核設計を対象とするさらに有効なモンテカルロコードとするために、一般的な4次方程式を解くプログラムを作成してトーラス形状の取り扱いを可能にした<sup>4)</sup>。なおトーラス形状入力データのチェックコードとしてはすでにTOPICコード<sup>5)</sup>が作られている。

4次方程式の解き方はEulerの解法<sup>6)</sup>によった。方程式の解を求める際には解の存在する範囲を積極的に判定し、不用な解が生じる無駄な計算を極力省略するように工夫した。以下第2章ではトーラス形状の取り扱いに必要な基礎式を説明し、第3章ではプログラムの内容について述べる。第4章でテスト計算例を示し、第5章で入力形式を示す。付録にはトーラス形状を扱うためのプログラム・リストを掲げる。

## 2. 計 算 式

### 2.1 トーラスの方程式

トーラスの回転軸はz軸とする。xz又はyz平面で切断したトーラスの断面図をFig. 2.1に示す。トーラスの大半径をR、楕円断面のz軸に垂直方向の半径をa、平行方向の半径をbとすると方程式は次のようになる。

$$\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}-R}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1 \quad (2.1)$$

## 1. 序 論

モンテカルロコードMORSE-GG<sup>1)</sup>は米国のオークリッジ国立研究所で開発された3次元モンテカルロコードである。従来のMORSE-GGコードは媒質や領域の境界面を3次元空間における2次以下の方程式によって表わし、これによって複雑な炉の構造をほとんど模擬することができた。しかし今日最も有望とされているトカマク型の核融合炉においては、炉の本体が4次方程式によって表わされるトーラス形状となっており、従来のMORSE-GGコードでは厳密に扱うことができない。イタリアのNicksはFINTOR炉のNBIを含む1モジュール分を取り出して、斜めに切断した円柱によってトーラスを模擬し、MORSE-GGによるダイバータからのストリーミング計算を行なってダイバータ磁場コイルの損傷を評価した<sup>2)</sup>。遮蔽計算のように一般にプラズマから遠くまでの計算ほどトーラス効果の取り扱いが粗くて良いが、第1壁やブランケット等プラズマ周辺機器の核特性を詳細に検討するためには4次方程式によりトーラスを厳密に表わす必要がある。Macdonaldらは粒子のエネルギーを連続的に減速させるモンテカルロコードMCNにトーラスの取り扱いルーチンを組み込んでブランケットの計算を行ない、トーラス効果が小さくはないと述べている<sup>3)</sup>。

今回はMORSE-GGコードを核融合炉の核設計を対象とするさらに有効なモンテカルロコードとするために、一般的な4次方程式を解くプログラムを作成してトーラス形状の取り扱いを可能にした<sup>4)</sup>。なおトーラス形状入力データのチェックコードとしてはすでにTOPICコード<sup>5)</sup>が作られている。

4次方程式の解き方はEulerの解法<sup>6)</sup>によった。方程式の解を求める際には解の存在する範囲を積極的に判定し、不用な解が生じる無駄な計算を極力省略するように工夫した。以下第2章ではトーラス形状の取り扱いに必要な基礎式を説明し、第3章ではプログラムの内容について述べる。第4章でテスト計算例を示し、第5章で入力形式を示す。付録にはトーラス形状を扱うためのプログラム・リストを掲げる。

## 2. 計 算 式

### 2.1 トーラスの方程式

トーラスの回転軸はz軸とする。xz又はyz平面で切断したトーラスの断面図をFig. 2.1に示す。トーラスの大半径をR、楕円断面のz軸に垂直方向の半径をa、平行方向の半径をbとすると方程式は次のようになる。

$$\left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - R}{a} \right)^2 + \left( \frac{z}{b} \right)^2 = 1 \quad (2.1)$$



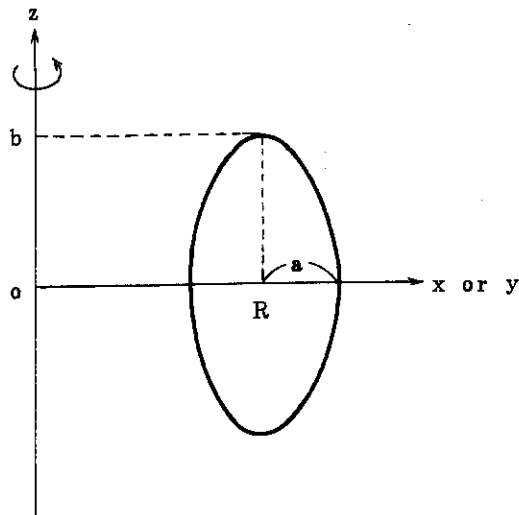


Fig. 2.1 Vertical Section of Torus

今粒子の散乱と散乱の間の1つの行程を例に採る。散乱点の座標を  $(x_1, y_1, z_1)$  とする。次に  $(x_1, y_1, z_1)$  の存在する媒質が空間的に無限に広がっていると仮定した場合の次の散乱点の座標 (曲面と粒子の交点を求めるルーチンに入る前に粒子の平均自由行程から確率的に決定されている) を  $(x_2, y_2, z_2)$  とする。

これらの座標の差を次の様に置く。

$$u = x_2 - x_1 \quad (2.2)$$

$$v = y_2 - y_1 \quad (2.3)$$

$$w = z_2 - z_1 \quad (2.4)$$

粒子の行程とトーラス面との交点の座標を  $(x, y, z)$  とすれば、パラメータ  $k$  によって  $x, y, z$  はそれぞれ次のように表わされる。

$$x = ku + x_1 \quad (2.5)$$

$$y = kv + y_1 \quad (2.6)$$

$$z = kw + z_1 \quad (2.7)$$

(2.5) ~ (2.7) 式を (2.1) 式に代入して整理すれば  $k$  についての4次方程式が得られる。以下に (2.1) 式から4次方程式導出までの経過を示す。

(2.5), (2.6) 式より

$$x^2 + y^2 = (u^2 + v^2)k^2 + 2(ux_1 + vy_1)k + x_1^2 + y_1^2 \quad (2.8)$$

$p, q, r$  を次のように置く。

$$p = u^2 + v^2 \quad (2.9)$$

$$q = ux_1 + vy_1 \quad (2.10)$$

$$r = x_1^2 + y_1^2 \quad (2.11)$$

(2.8) ~ (2.11)式を用いて(2.1)式を整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \left(p + \frac{a^2}{b^2} w^2\right) k^2 + 2\left(q + \frac{a^2}{b^2} w z_1\right) k + r + R^2 + \frac{a^2}{b^2} z_1^2 - a^2 \\ = 2R \sqrt{p k^2 + 2qk + r} \quad (2.12) \end{aligned}$$

A, B, Cを次のように置く。

$$A = \left(p + \frac{a^2}{b^2} w^2\right) / (2R) \quad (2.13)$$

$$B = \left(q + \frac{a^2}{b^2} w z_1\right) / R \quad (2.14)$$

$$C = \left(r + R^2 + \frac{a^2}{b^2} z_1^2 - a^2\right) / (2R) \quad (2.15)$$

(2.13) ~ (2.15)式を(2.12)式に代入し, kについて整理すると次式が得られる。

$$A^2 k^4 + 2ABk^3 + (B^2 + 2CA - p)k^2 + 2(BC - q)k + C^2 - r = 0 \quad (2.16)$$

(2.16)式が粒子の行程とトーラス面との交点を1つ求める毎に解かなければならない4次の方程式である。

## 2.2 4次方程式の解法

4次方程式の解法は1500年代にFerrariに発見されたことになっている。ここでは後にEulerが導いた方法<sup>6)</sup>を示し, 解のうちの興味のある実根のみを求める方法を具体的に述べる。次の4次方程式を解く。

$$x^4 + ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad (2.17)$$

未知数xについて

$$x = y - \frac{a}{4} \quad (2.18)$$

とすれば方程式から3次の項は消える。P, Q, Rを次のように定義する。

$$P = -\frac{3}{8}a^2 + b \quad (2.19)$$

$$Q = \frac{1}{8}a^3 - \frac{ab}{2} + c \quad (2.20)$$

$$R = -\frac{3}{256}a^4 + \frac{a^2b}{16} - \frac{ac}{4} + d \quad (2.21)$$

この時方程式は次のようになる。

$$y^4 + Py^2 + Qy + R = 0 \quad (2.22)$$

ここで

$$2y = u + v + w \quad (2.23)$$

とすると,  $u^2, v^2, w^2$  は3次方程式

$$t^3 + 2Pt^2 + (P^2 - 4R)t - Q^2 = 0 \quad (2.24)$$

の3根となる。それらを  $t_1, t_2, t_3$  とすると方程式 (2.22) の4根  $y_1, y_2, y_3, y_4$  は

$$y_1 = \frac{1}{2} (\sqrt{t_1} + \sqrt{t_2} + \sqrt{t_3}) \quad (2.25)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} (\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2} - \sqrt{t_3}) \quad (2.26)$$

$$y_3 = \frac{1}{2} (-\sqrt{t_1} + \sqrt{t_2} - \sqrt{t_3}) \quad (2.27)$$

$$y_4 = \frac{1}{2} (-\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2} + \sqrt{t_3}) \quad (2.28)$$

となる。従って  $A=2P, B=P^2-4R, C=-Q^2$  とすれば問題は3次方程式

$$t^3 + At^2 + Bt + C = 0 \quad (2.29)$$

を解くことになる。

方程式 (2.29) に

$$t = y - \frac{A}{3} \quad (2.30)$$

を代入して整理し,  $p, q$  を次のように置く。

$$p = \frac{A^2}{9} - \frac{B}{3} \quad (2.31)$$

$$q = -\frac{1}{27}A^3 + \frac{AB}{6} - \frac{C}{2} \quad (2.32)$$

この時解くべき方程式は

$$y^3 - 3py - 2q = 0 \quad (2.33)$$

となる。ここで

$$y = u + v \quad (2.34)$$

を代入して整理すると次式のようになる。

$$u^3 + v^3 + 3(uv - p)(u + v) - 2q = 0 \quad (2.35)$$

この式を満足する  $u$  と  $v$  ならどの値を求めても良いことになるが, 最も得易い値は

$$u^3 + v^3 - 2q = 0 \quad (2.36)$$

$$uv - p = 0 \quad (2.37)$$

を満足する値である。この時  $u^3, v^3$  は次の2次方程式

$$t^2 - 2qt + p^3 = 0 \quad (2.38)$$

の2根となる。今興味があるのは方程式 (2.17) の実根であるが, 方程式 (2.38) の実根の有無によりその求め方が幾らか異なってくる。次にそれぞれの場合において解法を進める。

(A)  $q^2 - p^3 \geq 0$  のとき

方程式 (2.38) は 2 つの実根  $\alpha, \beta$  ( $\alpha \geq \beta$ ) を持つ。  $\alpha, \beta$  は  $p, q$  により次のように表わされる。

$$\alpha = q + \sqrt{q^2 - p^3} \quad (2.39)$$

$$\beta = q - \sqrt{q^2 - p^3} \quad (2.40)$$

$u, v$  は  $\alpha, \beta$  の 3 乗根であり、それぞれ次のようになる。

$$u = \sqrt[3]{\alpha}, \quad \sqrt[3]{\alpha} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right), \quad \sqrt[3]{\alpha} \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \quad (2.41)$$

$$v = \sqrt[3]{\beta}, \quad \sqrt[3]{\beta} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right), \quad \sqrt[3]{\beta} \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \quad (2.42)$$

(2.41), (2.42) 式により  $u, v$  の組合せは 6 通りできるが、(2.36)(2.37) 式を同時に満足する組合せは一通りしかない。その組合せにより方程式 (2.33) の 3 根  $y_1, y_2, y_3$  を求めると次のようになる。

$$y_1 = \sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta} \quad (2.43)$$

$$y_2 = \sqrt[3]{\alpha} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) + \sqrt[3]{\beta} \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \quad (2.44)$$

$$y_3 = \sqrt[3]{\alpha} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) + \sqrt[3]{\beta} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \quad (2.45)$$

(2.30) 式によると方程式 (2.29) の 3 根  $t_1, t_2, t_3$  は次のようになる。

$$t_1 = \sqrt[3]{2} + \sqrt[3]{\beta} - \frac{A}{3} \quad (2.46)$$

$$t_2 = -\frac{1}{2}(\sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta}) - \frac{A}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt[3]{\alpha} - \sqrt[3]{\beta})i \quad (2.47)$$

$$t_3 = -\frac{1}{2}(\sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta}) - \frac{A}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt[3]{\alpha} - \sqrt[3]{\beta})i \quad (2.48)$$

(2.46) ~ (2.48) 式をながめると、 $t_1$  は実根であるが  $t_2$  と  $t_3$  は互いに複雑な根であることがわかる。ここで複素数の性質により  $\sqrt{t_2}, \sqrt{t_3}$  も複素共役であることに注目すると、(2.27), (2.28) 式によって表わされる根  $y_3, y_4$  は複素根となり興味の対象からはずれることになる。 $y_1, y_2$  に関しては  $t_1$  の符号により実根か複素根かに分かれる。 $t_1 \geq 0$  の時方程式 (2.22) は 2 実根を持つ。

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\left\{-\frac{1}{2}(\sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta}) - \frac{A}{3}\right\}^2 + \left\{\frac{3}{2}(\sqrt[3]{\alpha} - \sqrt[3]{\beta})\right\}^2} \\ &= \sqrt{y_1^2 + \frac{1}{3}Ay_1 + \frac{1}{9}A^2 - 3p} \quad (2.49) \end{aligned}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \left\{-\frac{1}{2}(\sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta}) - \frac{A}{3}\right\} / r \right] \quad (2.50)$$

とすれば

$$\sqrt{t_2} + \sqrt{t_3} = 2\sqrt{r} \cos \frac{1}{2}\theta \quad (2.51)$$

となる。故に(2.18)式を用いて方程式(2.17)の2根  $x_1, x_2$  は次のようになる。

$$x_1 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\sqrt{\alpha} + \sqrt[3]{\beta} - \frac{A}{3}} + \sqrt{r} \cos \frac{1}{2}\theta - \frac{a}{4} \quad (2.52)$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\sqrt{\alpha} + \sqrt[3]{\beta} - \frac{A}{3}} - \sqrt{r} \cos \frac{1}{2}\theta - \frac{a}{4} \quad (2.53)$$

(B)  $q^2 - p^3 < 0$  の時

方程式(2.38)は互いに複素共役な2根となる。すなわち

$$t = q \pm \sqrt{p^3 - q^2} \cdot i \quad (2.54)$$

ここで

$$r = p\sqrt{p} \quad (2.55)$$

$$\theta = \cos^{-1}(q/p\sqrt{p}) \quad (2.56)$$

とすると  $u, v$  はそれぞれ次のようになる。

$$u = \sqrt[3]{r} \left( \cos \frac{1}{3}\theta + i \sin \frac{1}{3}\theta \right),$$

$$\sqrt[3]{r} \left\{ \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi \right) + i \sin \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \right\},$$

$$\sqrt[3]{r} \left\{ \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi \right) + i \sin \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi \right) \right\}, \quad (2.57)$$

$$v = \sqrt[3]{r} \left( \cos \frac{1}{3}\theta - i \sin \frac{1}{3}\theta \right),$$

$$\sqrt[3]{r} \left\{ \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi \right) + i \sin \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \right\},$$

$$\sqrt[3]{r} \left\{ \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi \right) + i \sin \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi \right) \right\}, \quad (2.58)$$

6通りある  $u, v$  の組合せのうち(2.36), (2.37)式を同時に満足するのは、互いに複素共役なもの組合せのみであることが容易にわかる。そして方程式(2.33)の根  $y$  は  $u$  と  $v$  の和だから複素項が打ち消し合い次のようになる。

$$y_1 = 2\sqrt[3]{r} \cos \frac{1}{3}\theta \quad (2.59)$$

$$y_2 = 2\sqrt[3]{r} \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \quad (2.60)$$

$$y_3 = 2\sqrt[3]{r} \cos \left( \frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi \right) \quad (2.61)$$

(2.30)式により方程式(2.29)の3根  $t_1, t_2, t_3$  は次のようになる。

$$t_1 = 2\sqrt[3]{r} \cos \frac{1}{3}\theta - \frac{A}{3} \quad (2.62)$$

$$t_2 = 2^3 \sqrt{r} \cos\left(\frac{1}{3}\theta + \frac{2}{3}\pi\right) - \frac{A}{3} \quad (2.63)$$

$$t_3 = 2^3 \sqrt{r} \cos\left(\frac{1}{3}\theta + \frac{4}{3}\pi\right) - \frac{A}{3} \quad (2.64)$$

$t_1 \sim t_3$  を用いれば方程式 (2.22) の 4 根は (2.25) ~ (2.28) 式によって表わされる。式の形からわかるように、今興味のある実根が得られるのは  $t_1 \sim t_3$  のすべてが 0 か又は正の場合である。 $t_1 \sim t_3$  のうち 1 つ以上が負になれば 4 根はすべて虚根となる。但しどれか 2 つのみが負で絶対値が等しければ、(2.25) ~ (2.28) 式で表わされる 4 根のうち 2 つは虚根、2 つは実根 (重根) となる。しかしこの場合は  $q^2 - p^3 = 0$  に相当し、すでに述べた (A) の検討内容からも容易にこの結論が導かれる。

### 2.3 方程式を解くか否かの判別

トラス面と粒子の飛行経路との交点を求めるために (2.16) 式を解くわけであるが、実数の解  $k$  が存在しない事が分った場合は解く必要がない。また解  $k$  が零と 1.0 の間に無い事が分った場合も、粒子が面に遭遇する前に次の散乱を起こした事になり 4 次方程式を解く必要はない。4 次方程式を解くルーチンは計算時間をかなり要し、不必要な場合はバイパスする様にしておかないと、極めて好ましくない計算時間の増大をもたらす。以下に 4 次方程式を解く回数を減らす方法について述べる。

今解くべき 4 次方程式を次のように表わす。

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0 \quad (2.65)$$

解の判別を行なうために (2.65) 式の左辺の 1 次及び 2 次の微分形を次の様に求めておく。

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (2.66)$$

$$f'(x) = 4ax^3 + 3bx^2 + 2cx + d \quad (2.67)$$

$$f''(x) = 12ax^2 + 6bx + 2c \quad (2.68)$$

ここでは (2.65) 式を解くためにサブルーチン B I Q U A D を作成した。解を判定して方程式を解くために B I Q U A D を呼ぶまでの計算の流れを Fig. 2.2 に示す。以下図に基づいて判定の内容を説明する。

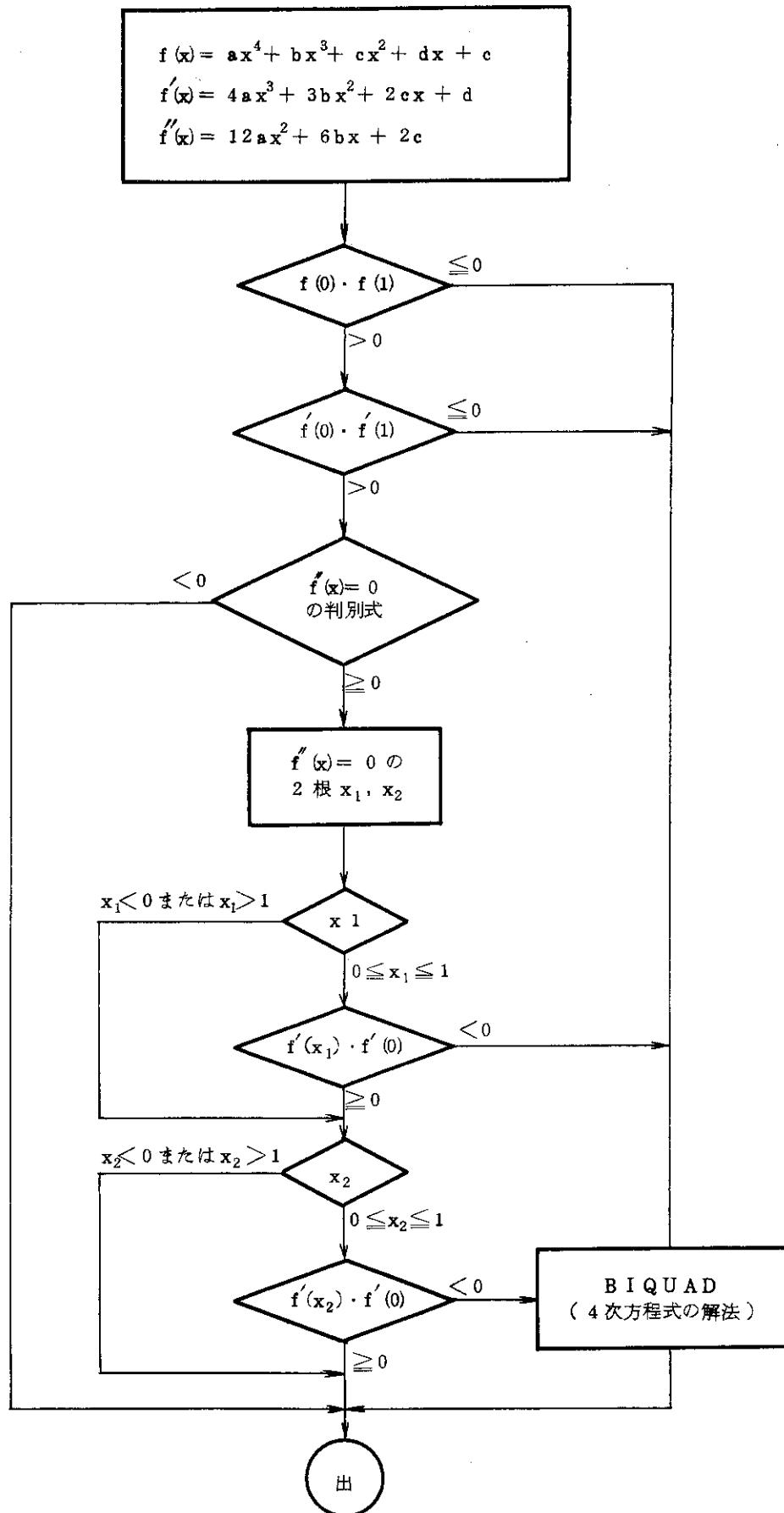


Fig. 2.2 4次方程式を解くかどうかの判別の流れ

(A)  $f(0) \cdot f(1) \leq 0$  の場合

0 と 1 の間に解は必ず 1 個以上存在するので方程式を解く。

(B)  $f(0) \cdot f(1) > 0$  の場合

以下の判定を継続する。

(B-1)  $f'(0) \cdot f'(1) \leq 0$  の時

0 と 1 の間の解の有無はわからないが方程式は解く。

(B-2)  $f'(0) \cdot f'(1) > 0$  の時

以下の判定を継続する。

方程式  $f''(x) = 0$  の根の判別式を D とする。

(a)  $D < 0$  ならば関数  $f'(x)$  は単調増加また単調減少である。従って (B-2) の条件より 0 と 1 の間に  $f'(x) = 0$  の根はないことになり関数  $f(x)$  もまた単調増加または単調減少である。(B) の条件よりこの場合は 0 と 1 の間に解がない。

(b)  $D \geq 0$  ならば関数  $f'(x)$  は方程式  $f'(x) = 0$  の 2 根  $x_1, x_2$  の値で極大または極小となる。 $x_1$  がもし  $0 \leq x_1 \leq 1$  ならば  $f'(x_1) \cdot f'(0)$  の符号を判定し、負ならば (B-2) の条件により方程式  $f'(x) = 0$  は 0 と 1 の間に根がある。この時 0 と 1 の間に関数  $f(x)$  の極大または極小値があり、0 と 1 の間に解を持つ可能性が有るから 4 次方程式  $f(x) = 0$  を解く。

$f'(x_1) \cdot f'(0)$  の符号が正ならば (B-2) の条件により方程式  $f'(x) = 0$  は 0 と 1 の間に根がない。この時 0 と 1 の間に関数  $f(x)$  の極大または極小値は無く、(B) の条件を考慮すれば方程式  $f(x) = 0$  は解く必要がない。 $x_1$  が  $x_1 < 0$  かまたは  $x_1 > 1$  ならばこの時も 0 と 1 の間に関数  $f(x)$  の極大または極小値があるとは言えず、方程式  $f(x) = 0$  は解く必要がない。

$x_2$  についても同様の判定を行なう。 $x_1$  と  $x_2$  に関する両方の判定から 0 と 1 の間で方程式  $f'(x) = 0$  が根を持たなければ、(B) の条件により 4 次方程式  $f(x) = 0$  も 0 と 1 の間に解がないことになる。

## 2.4 トーラス線源の発生

トーラス形状をした線源 (プラズマ) から均一に粒子を発生させる方法について述べる。

Fig. 2.3 に示した変数,  $\theta, \varphi, r$  の順にサンプリングし, それを  $x, y, z$  座表に変換する。以下の説明中  $\xi_m$  は 0.0 ~ 1.0 で均一に発生される乱数である。また  $R_0$  はプラズマ主半径  $r_0$  は小半径である。

A.  $\theta$  のサンプリング

与えられた範囲  $\theta_1 < \theta < \theta_2$  で次の様に均一にサンプリングする。

$$\theta = \xi_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \theta_1 \quad (2.69)$$

B.  $\varphi$  のサンプリング

$\varphi$  のサンプリングは 0 から  $\pi$  の間で均一にならない。Fig. 2.4 に示した微小体積  $dv$  に比例してサンプリングすべきである。 $dv$  は次の様に求められる。



$$\begin{aligned}
 dv(\varphi) &= \int_0^{r_0} (R_0 - r \cos \varphi) d\theta \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr \\
 &= \left[ \frac{r^2}{2} R_0 - \frac{r^3}{3} \cos \varphi \right]_0^{r_0} d\theta d\varphi \\
 &= \left[ \frac{r_0^2}{2} R_0 - \frac{r_0^3}{3} \cos \varphi \right] d\theta d\varphi \quad (2.70)
 \end{aligned}$$

$dv$  が最大になるのは  $\cos \varphi = -1$  , すなわち  $\varphi = \pi$  の時である。その時の  $dv$  は

$$dv_0 = \left( \frac{r_0^2}{2} \cdot R_0 + \frac{r_0^3}{3} \right) d\theta d\varphi \quad (2.71)$$

である。効率良く  $\varphi$  をサンプリングするためには、先ず 0 から  $\pi$  の間で  $\varphi$  を均一にサンプリングし ( $\varphi = \xi_2 \cdot \pi$ )、 $1 - \frac{dv(\varphi)}{dv_0}$  の確率で rejection してやれば良い。

$$1 - \frac{dv(\varphi)}{dv_0} = 1 - \frac{3R_0 - 2R_0 \cdot \cos \varphi}{3R_0 + 2R_0} \quad (2.72)$$

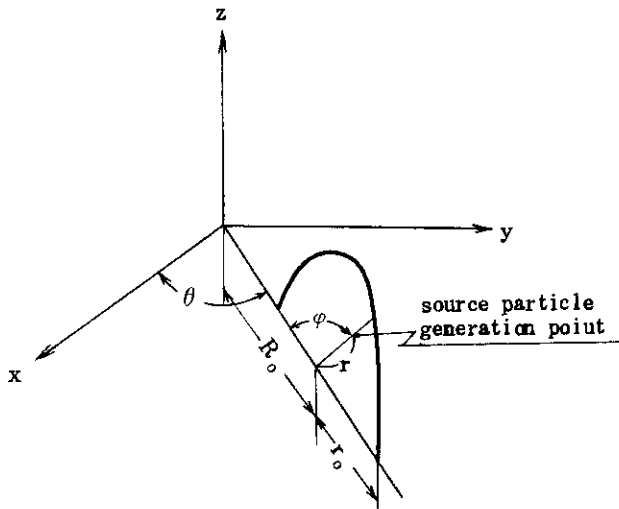


Fig. 2.3 Coordinates for Source Particle

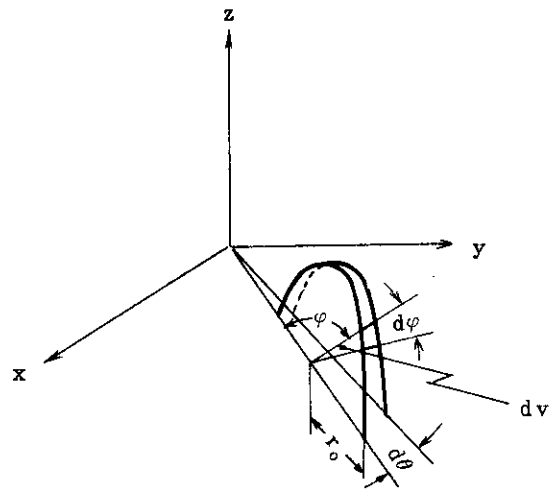


Fig. 2.4 Sampling of Variable  $\rho$

### C. $r$ のサンプリング

$r$  のサンプリングも 0 から  $r_0$  の間で均一では無い。Fig. 2.5 に示した微小面積  $ds$  に比例してサンプリングすべきである。  $ds$  は次の様に求められる。

$$ds(r) = (R_0 - r \cos \varphi) d\theta \cdot r \cdot d\varphi \quad (2.73)$$

$ds$  が最大になるのは  $r$  が

$$r_{\max} = \frac{R_0}{2 \cos \varphi} \quad (2.74)$$

の時であり  $ds$  は

$$ds_{\max} = \frac{R_0^2}{4 \cos \varphi} \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

となる。また  $r_{\max} > r_0$  の場合は  $r = r_0$  の場合に  $ds$  は最大となり

$$ds_{\max} = (R_0 - r_0 \cos \varphi) d\theta \cdot r_0 \cdot d\varphi \quad (2.75)$$

となる。

従って効率よく  $r$  をサンプリングするためには、先ず  $r$  を 0 から  $r_0$  の間で均一にサンプリングし ( $r = \xi_3 \cdot r_0$ )、次に  $1 - \frac{ds(r)}{ds_{\max}}$  の確率で rejection すれば良い。

最後に変数  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $r$  から粒子発生座表  $x$ ,  $y$ ,  $z$  をプラズマ断面が非円形の場合も考慮して次の様に求める。

$$x = (R_0 - r \cos \varphi) \cdot \cos \theta \quad (2.76)$$

$$y = (R_0 - r \cos \varphi) \cdot \sin \theta \quad (2.77)$$

$$z = \pm a \cdot r \sin \varphi \quad (2.78)$$

ここで  $a$  は非円形度である。

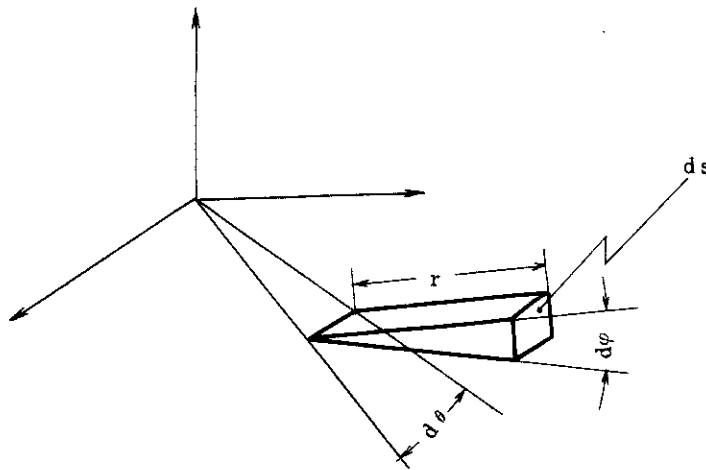


Fig. 2.5 Sampling of Variable  $r$

### 3. トーラス形状処理プログラム

#### 3.1 各サブルーチンの概要

トーラス形状を扱うために3つのサブルーチンを新たに作り、さらに従来の MORSE-GG コードに使われていたサブルーチンのうち幾つかには機能の追加を行なった。以下に新たに作成又は追加した各サブルーチンの機能を示す。

##### JOM77 (作成)

粒子の経路がトーラス面に当たった場合に前回の散乱点からその交点までの距離を計算する。まずトーラスの寸法を表わすパラメータ値 ( $R$ ,  $a$ ,  $b$ ) から4次方程式の係数を計算し、サブルーチン BIQUAD を呼んで方程式を解く。また方程式を解く前に解を判別し、不用な方程式の解析を最大限に取り除く。

##### BIQUAD (作成)

Euler の解法に基づき、一般的な4次方程式の根を求める。虚根の場合には  $1.0 \times 10^{10}$  がセットされるように作られている。

$$ds_{\max} = (R_0 - r_0 \cos \varphi) d\theta \cdot r_0 \cdot d\varphi \quad (2.75)$$

となる。

従って効率よく  $r$  をサンプリングするためには、先ず  $r$  を 0 から  $r_0$  の間で均一にサンプリングし ( $r = \xi_3 \cdot r_0$ )、次に  $1 - \frac{ds(r)}{ds_{\max}}$  の確率で rejection すれば良い。

最後に変数  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $r$  から粒子発生座表  $x$ ,  $y$ ,  $z$  をプラズマ断面が非円形の場合も考慮して次の様に求める。

$$x = (R_0 - r \cos \varphi) \cdot \cos \theta \quad (2.76)$$

$$y = (R_0 - r \cos \varphi) \cdot \sin \theta \quad (2.77)$$

$$z = \pm a \cdot r \sin \varphi \quad (2.78)$$

ここで  $a$  は非円形度である。

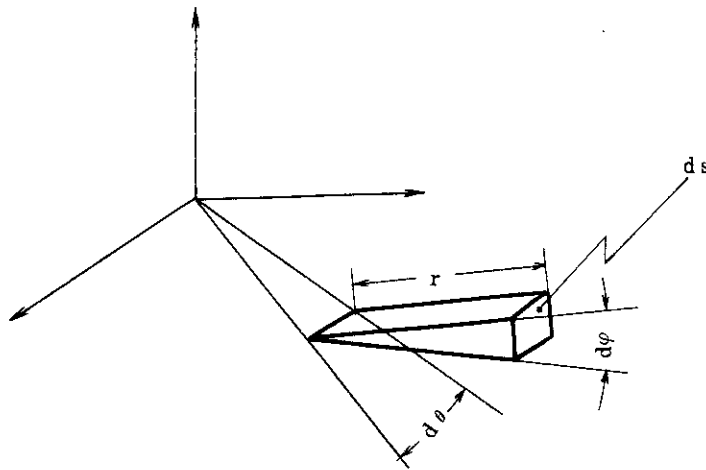


Fig. 2.5 Sampling of Variable  $r$

### 3. トーラス形状処理プログラム

#### 3.1 各サブルーチンの概要

トーラス形状を扱うために3つのサブルーチンを新たに作り、さらに従来の MORSE-GG コードに使われていたサブルーチンのうち幾つかには機能の追加を行なった。以下に新たに作成又は追加した各サブルーチンの機能を示す。

##### JOM77 (作成)

粒子の経路がトーラス面に当たった場合に前回の散乱点からその交点までの距離を計算する。まずトーラスの寸法を表わすパラメータ値 ( $R$ ,  $a$ ,  $b$ ) から4次方程式の係数を計算し、サブルーチン BIQUAD を呼んで方程式を解く。また方程式を解く前に解を判別し、不要な方程式の解析を最大限に取り除く。

##### BIQUAD (作成)

Euler の解法に基づき、一般的な4次方程式の根を求める。虚根の場合には  $1.0 \times 10^{10}$  がセットされるように作られている。

SOURCE (作成)

トーラス形状で一様な密度分布の線源という条件で粒子を発生させる。

JOM12 (機能の追加)

曲面の方程式を読み込むルーチンである。トーラスの寸法を表わすパラメータ R, a, b も読み込めるようにした。

JOM5 (機能の追加)

粒子が突き当たる媒質の境界がトーラス面であるかどうかを判定し、トーラス面である場合には JOM77 を呼ぶ。

JOM8 (機能の追加)

座標の値を境界の方程式に代入し、問題とする座標が境界面のどちら側にあるかを表わす符号を求める。境界面がトーラスの場合にも計算できるように拡張した。

3.2 各サブルーチンの階級と計算の流れ

トーラス形状を扱うためのサブルーチンの階層を Fig. 3.1 に示す。

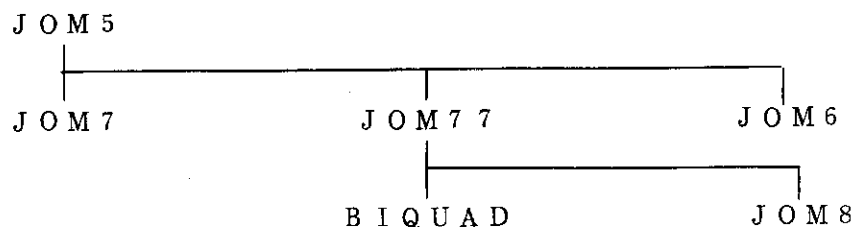


Fig. 3.1 Hierarchy of Subroutines for Torus Geometry

JOM7 は従来からあるサブルーチンで、粒子が 2 次以下の曲面に当たった時の座標を計算する。2 次以下の曲面かトーラス面かは JOM5 で判別し、トーラス面の場合は JOM77 が呼ばれる。なおサブルーチン SOURCE は MSOUR で、サブルーチン JOM12 は JOMIN で CALL される。

3.3 COMMON の構成と変数の内容

MORSE-GG コードを扱うための計算機種が FACOM 230/75 から FACOM M200 へ変更されるのに伴ないトーラス形状処理用の COMMON も幾らかの修正が加えられた。ここでは後者のプログラム中の COMMON について述べる。

```
COMMON/GEOM7/      XONE, YONE, ZONE, XTWO, Y TWO, Z TWO,
                   DIST, NCR
```

XONE, YONE, ZONE : 処理の対象とする飛行経路の最初の散乱点 (始点) の座標

XTWO, Y TWO, Z TWO : 処理の対象とする飛行経路の2度目の散乱点(終点)の座標  
DIST : 飛行経路の始点と、曲面との交点の間の距離。但し始点と終点との間の距離を1.0とした単位である。

NCR : 粒子が2度目の散乱を起こすまでに曲面を横切ったかどうかを表わす指数

COMMON/GEOM70/DUM1(5) U, V, W, DUM2(5)  
DUM1, DUM2 : 2次曲面を処理する過程のパラメータ値  
U, V, W : 粒子の飛行経路の方向余弦

COMMON/JOMIN8/NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ  
2次曲面の方程式  $ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + exz + fyz + gx + hy + iz + j = 0$  の係数が記憶されているブランクCOMMON中の番地

COMMON/GEOM77/SGNF, SGNF2, NBOUND, NBD2  
SGNF : 粒子が横切る曲面方程式に対する始点側の方程式の符号  
SGNF2 : 粒子が横切る曲面方程式に対する終点側の方程式の符号  
NBOUND : 最後に衝突した曲面の番号  
NBD2 : 衝突した曲面の番号

COMMON/TORUSI/NOBD, NOB4, NOBT  
NOBD : 2次曲面数  
NOB4 : トーラス曲面数  
NOBT : 全曲面数 (= NOBD + NOB4 )

COMMON/TORUSD/COFT(3, 30)  
COFT : トーラス面を決定する定数

#### 4. 4次方程式解法ルーチンの計算時間

トーラス形状を扱う際には、粒子の散乱点と飛行経路がトーラス面を横切る点との距離を求めるために4次方程式を解かなければならない。従って4次方程式を解くのにどのくらい時間がかかるかが重要な関心事となってくる。4次方程式解析プログラムBIQUADをコントロールし、代表的な4次方程式を解くのにどのくらい時間がかかるかをFACOM230/75を対象として調べた。Table 4.1にその結果を掲げる。

XTWO, Y TWO, Z TWO : 処理の対象とする飛行経路の2度目の散乱点(終点)の座標  
DIST : 飛行経路の始点と、曲面との交点の間の距離。但し始点と終点との間の距離を1.0とした単位である。  
NCR : 粒子が2度目の散乱を起こすまでに曲面を横切ったかどうかを表わす指数

COMMON/GEOM70/DUM1(5) U, V, W, DUM2(5)  
DUM1, DUM2 : 2次曲面を処理する過程のパラメータ値  
U, V, W : 粒子の飛行経路の方向余弦

COMMON/JOMIN8/NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ  
2次曲面の方程式  $ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + exz + fyz + gx + hy + iz + j = 0$  の係数が記憶されているブランクCOMMON中の番地

COMMON/GEOM77/SGNF, SGNF2, NBOUND, NBD2  
SGNF : 粒子が横切る曲面方程式に対する始点側の方程式の符号  
SGNF2 : 粒子が横切る曲面方程式に対する終点側の方程式の符号  
NBOUND : 最後に衝突した曲面の番号  
NBD2 : 衝突した曲面の番号

COMMON/TORUSI/NOBD, NOB4, NOBT  
NOBD : 2次曲面数  
NOB4 : トーラス曲面数  
NOBT : 全曲面数 (= NOBD + NOB4 )

COMMON/TORUSD/COFT(3, 30)  
COFT : トーラス面を決定する定数

#### 4. 4次方程式解法ルーチンの計算時間

トーラス形状を扱う際には、粒子の散乱点と飛行経路がトーラス面を横切る点との距離を求めるために4次方程式を解かなければならない。従って4次方程式を解くのどのくらい時間がかかるかが重要な関心事となってくる。4次方程式解析プログラムBIQUADをコントロールし、代表的な4次方程式を解くのどのくらい時間がかかるかをFACOM230/75を対象として調べた。Table 4.1にその結果を掲げる。

Table 4.1 Consumed Time to Solve the Biquadratic Equation

Case No.	Equation	Solution	Time ( $\mu\text{sec}$ )
1	$x^4 - 10x^3 + 35x^2 - 50x + 24 = 0$	$x=1, 2, 3, 4$	205
2	$x^4 - 4x^3 - 79x^2 + 166x + 1680 = 0$	$x=-5, -6, 7, 8$	203
3	$x^4 + 12x^3 + 22x^2 + 21x + 10 = 0$	$x=-1, -10$	171
4	$x^4 + x^3 - x - 1 = 0$	$x=1, -1$	170
5	$x^4 - 3x^3 + 0.75x^2 - 0.25x + 3.75 = 0$	$x=1.5, 2.5$	170
6	$x^4 - 11x^3 - 9,990x^2 + 110,000x - 100,000 = 0$	$x=1, 10, 100, -100$	214

表から、実根が4個の場合約210  $\mu\text{sec}$ 、実根が2個の場合約170  $\mu\text{sec}$ かかることがわかる。

## 5. トーラス形状入力形式

### (5) トーラス面の入力

形状データの入力の後、2次曲面及びトーラス面の方程式はサブルーチンJOM12によって以下の形式で読み込まれる。

Card GP(2I5, 16A4, A2)

NOBD : 全体系で定義される2次曲面(SURFACE)の総数

NOB4 : 全体系で定義されるトーラス面(SURFACE)の総数

DUM(I) : ダミー

Card GQ(4(D10.5, A4, 1X, A1)) (NOBD枚必要)

COF(J) : 2次方程式の各項の係数

BCD1(J) : 2次方程式の各項の変数

変数としてはXSQ ( $x^2$ を意味する), YSQ, ZSQ, XZ, ZX, XY, YX, YZ, ZY, X, Y, Zまたはブランクがある。但しブランクは定数であることを表わす。

BCD2(J) : ブランクにすると次の項が加えられる。ブランクでなければ式が終了したことを意味する。すなわち2次方程式=0とされる。例として、原点を中心とする半径10 cmの球の2次方程式( $x^2 + y^2 + z^2 - 100 = 0$ )は次のようになる。

1.0XSQ 1.0YSQ 1.0ZSQ -100.0 \$

Card GR(4(D10.5, 6X)) (NOB4枚必要)

COFT(I) : トーラス主半径 R

Table 4.1 Consumed Time to Solve the Biquadratic Equation

Case No	Equation	Solution	Time( $\mu$ sec)
1	$x^4 - 10x^3 + 35x^2 - 50x + 24 = 0$	$x=1, 2, 3, 4$	2 0 5
2	$x^4 - 4x^3 - 79x^2 + 166x + 1680 = 0$	$x=-5, -6, 7, 8$	2 0 3
3	$x^4 + 12x^3 + 22x^2 + 21x + 10 = 0$	$x=-1, -10$	1 7 1
4	$x^4 + x^3 - x - 1 = 0$	$x=1, -1$	1 7 0
5	$x^4 - 3x^3 + 0.75x^2 - 0.25x + 3.75 = 0$	$x=1.5, 2.5$	1 7 0
6	$x^4 - 11x^3 - 9,990x^2 + 110,000x - 100,000 = 0$	$x=1, 10, 100, -100$	2 1 4

表から、実根が4個の場合約210 $\mu$ sec、実根が2個の場合約170 $\mu$ secかかることがわかる。

## 5. トーラス形状入力形式

### (5) トーラス面の入力

形状データの入力の後、2次曲面及びトーラス面の方程式はサブルーチンJOM12によって以下の形式で読み込まれる。

Card GP(2I5, 16A4, A2)

NOBD : 全体系で定義される2次曲面(SURFACE)の総数

NOB4 : 全体系で定義されるトーラス面(SURFACE)の総数

DUM(I) : ダミー

Card GQ(4(D10.5, A4, 1X, A1)) (NOBD枚必要)

COF(J) : 2次方程式の各項の係数

BCD1(J) : 2次方程式の各項の変数

変数としてはXSQ ( $x^2$ を意味する), YSQ, ZSQ, XZ, ZX, XY, YX, YZ, ZY, X, Y, Zまたはブランクがある。但しブランクは定数であることを表わす。

BCD2(J) : ブランクにすると次の項が加えられる。ブランクでなければ式が終了したことを意味する。すなわち2次方程式=0とされる。例として、原点を中心とする半径10cmの球の2次方程式( $x^2 + y^2 + z^2 - 100 = 0$ )は次のようになる。

1.0XSQ 1.0YSQ 1.0ZSQ -100.0 \$

Card GR(4(D10.5, 6X)) (NOB4枚必要)

COFT(I) : トーラス主半径 R



COFT(2) : トーラス小半径  $a$

COFT(3) : トーラス小半径  $\times$  非円形度  $b$

トーラス形状のパラメータ  $R$ ,  $a$ ,  $b$  については Fig. 2.1 を参照

(2) トーラスソースの入力

線源に関する入力データはサブルーチン SOINP によって読み込まれる。トーラスソースの入力データを読み込ませるためには、Card SA におけるパラメータ NSORCE を 4 と置き、Card SC を次の形式で入力する。

Card SC (10X, 6F10.4)

XL : トーラス主半径  $R$

XR : トーラス小半径  $a$

YL : 非円形度  $b/a$

YR : 扇形の正方向角度 (ラジアン)  $\theta_1$

ZL : 扇形の負方向角度 (ラジアン)  $\theta_2$

トーラス形状のパラメータ  $R$ ,  $a$ ,  $b$  については Fig. 2.1 を参照,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  については Fig. 5.1 を参照。

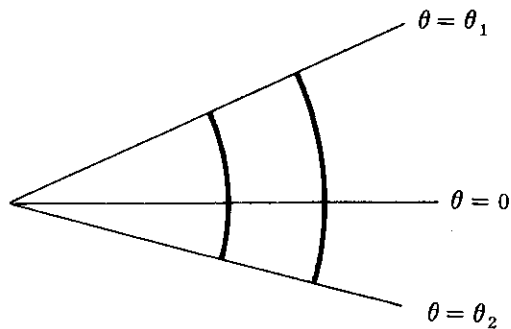


Fig. 5.1 Horizontal Section of Torus

## 謝 辞

トーラス形状を扱うサブルーチンの作成，本体への組み込みは筆者2人が行ったが，その後炉設計研究室の関泰氏には，線源発生ルーチンの誤りを発見していただくなど有益なコメントをいただいた。またセンチュリー・リサーチ・センターの川崎弘光氏にはFACOM230/75からFACOM-M200への変換や，入出力関係の整備などをしていただいたので感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) E. A. Straker, P. N. Stevens, D. C. Irving and V. R. Cain  
" The MORSE Code - A Multigroup Neutron and Gamma-Ray Monte Carlo Transport Code ", ORNL-4585 (1970)
- 2) R. Nicks, C. Ponti, G. Realini and R. Van Heusden, " Shielding Problems in the FINTOR Design ", Proc. of the Fifth Int. Conf. on Reactor Shielding, p.512 (1977)
- 3) J. L. Macdonald, E. D. Cashwell, and C. J. Everett, " Calculation of Toroidal Fusion Reator Blankets by MONTE CARLO ",  
ibid, p622 (1977)
- 4) 飯田 浩正, 山内 通則, 昭和53年日本原子力学会炉物理炉工学分科会予稿集B35
- 5) 飯田 浩正, 川崎 弘光, " -TOPIC- トーラスモンテカルロ形状入力チェック計算コード ", JAERI-M 8289 (1979)
- 6) 高木 貞治, 代数学講義 共立出版

## 謝 辞

トラス形状を扱うサブルーチンの作成，本体への組み込みは筆者2人が行ったが，その後炉設計研究室の関泰氏には，線源発生ルーチンの誤りを発見していただくなど有益なコメントをいただいた。またセンチュリー・リサーチ・センターの川崎弘光氏にはFACOM230/75からFACOM-M200への変換や，入出力関係の整備などをしていただいたので感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) E. A. Straker, P. N. Stevens, D. C. Irving and V. R. Cain  
" The MORSE Code - A Multigroup Neutron and Gamma-Ray Monte Carlo Transport Code ", ORNL-4585 (1970)
- 2) R. Nicks, C. Ponti, G. Realini and R. Van Heusden, " Shielding Problems in the FINTOR Design ", Proc. of the Fifth Int. Conf. on Reactor Shielding, p.512 (1977)
- 3) J. L. Macdonald, E. D. Cashwell, and C. J. Everett, " Calculation of Toroidal Fusion Reator Blankets by MONTE CARLO ",  
ibid , p622 (1977)
- 4) 飯田 浩正, 山内 通則, 昭和53年日本原子力学会炉物理炉工学分科会予稿集B35
- 5) 飯田 浩正, 川崎 弘光, " -TOPIC- トラスモンテカルロ形状入力チェック計算コード ", JAERI-M 8289 (1979)
- 6) 高木 貞治, 代数学講義 共立出版

## 付録 プログラム・リスト

トラス形状を扱うために追加・修正したプログラムのリストを以下に示す。

```

ISN 00001      SUBROUTINE B1QUAL (AA,BX,CX,DX,EX,X1,X2,X3,X4)
CBIQD      ** A BIQUADRATIC EQUATION IS SOLVED HERE **
C          DOUBLEPRECISION A,B,C,D,PP,QQ,RR,AA,BB,CC,P,Q,R,DD,P3,T1,T2,T3
C          DOUBLEPRECISION Y ,COS1T,COS2T,TT,RT1,RT2,RT3,SGRTT,RTRCST,
C          1          THETA1,THETA2,THETA3,PA1,PA123,A2,AA2
C          DOUBLEPRECISION AX,BA,CX,DX,EX
ISN 00002      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,D-Z)
ISN 00003      PA1=3.14159265358979320
ISN 00004      PA123=PA1*2.0/3.0
ISN 00005      X1=0.0
ISN 00006      X2=0.0
ISN 00007      X3=0.0
ISN 00008      X4=0.0
ISN 00009      X1=1.00+10
ISN 00010      X2=1.00+10
ISN 00011      X3=1.00+10
ISN 00012      X4=1.00+10
ISN 00013      A=BX/AX
ISN 00014      B=CX/AX
ISN 00015      C=DX/AX
ISN 00016      D=EX/AX
ISN 00017      IF(DABS(A).GT.1.0D20) WRITE(6,600) A,B,C,D,AA,BX,CX,DX,EX
ISN 00018      IF(DABS(B).GT.1.0D20) WRITE(6,600) A,B,C,D,AX,BX,CX,DX,EX
ISN 00019      IF(DABS(C).GT.1.0D20) WRITE(6,600) A,B,C,D,AX,BX,CX,DX,EX
ISN 00020      IF(DABS(D).GT.1.0D20) WRITE(6,600) A,B,C,D,AX,BX,CX,DX,EX
ISN 00021      600 FORMAT(1H0,5X,'BIQUAL',5X,1PYE10.3)
ISN 00022      A2=AA
ISN 00023      PP=-0.375*A2+B
ISN 00024      QQ=0.125*A2+A-0.5*A+B+C
ISN 00025      RR=-0.01171875*A2+A2+0.0625*A2+B-0.25*A+C+D
ISN 00026      AA=2.0*PP
ISN 00027      BB=PP*PP-4.0*RR
ISN 00028      CC=-QQ*QQ
ISN 00029      AA2=AA*AA
ISN 00030      P= AA2/9.0-8B/3.0
ISN 00031      Q=-AA2+AA/27.0+AA*BB/6.0-0.5*CC
ISN 00032      P3=P+3
ISN 00033      DD=Q*Q-P3
ISN 00034      IF(DD.LE.0.0) GO TO 50
ISN 00035      DD=DSQRT(DD)
ISN 00036      T1=Q+DD
ISN 00037      T2=Q-DD
ISN 00038      Y =OCBRT(T1)*OCBRT(T2)
ISN 00039      TT=Y -AA/3.0
ISN 00040      IF(TT.LT.-1.0E-07) GO TO 60
ISN 00041      IF(TT.LT.0.0) TT=0.0
ISN 00042      R=DSQRT(Y*Y + AA*Y /3.0+ AA2/9.0-3.0*P)
ISN 00043      COS2T=(-0.5*Y -AA/3.0)/R
ISN 00044      COS1T=DSQRT(1-COS2T+1.0)/2.0
ISN 00045      SGRTT=DSQRT(TT)
ISN 00046      IF(QQ.GT.0.0) SQRTT =-SQRTT
ISN 00047      RTRCST=DSQRT(R)*COS1T
ISN 00048      X1=0.5*SQRTT+RTRCST-0.25*A
ISN 00049      X2=0.5*SQRTT-RTRCST-0.25*A
ISN 00050      GO TO 60
ISN 00051      50 Y=Q/DSQRT(P3)
ISN 00052      THETA1=DAKCCS(Y)/3.0
ISN 00053      THETA2=THETA1+PA123
ISN 00054      THETA3=THETA2+PA123
ISN 00055      R=DSQRT(P)*2.0
ISN 00056      T1=R*DCOS(THETA1)-AA/3.0
ISN 00057      T2=R*DCOS(THETA2)-AA/3.0
ISN 00058      T3=R*DCOS(THETA3)-AA/3.0
ISN 00059      IF(T1.LT.-1.0E-07) GO TO 60
ISN 00060      IF(T2.LT.-1.0E-07) GO TO 60
ISN 00061      IF(T3.LT.-1.0E-07) GO TO 60
ISN 00062      IF(T1.LT.0.0) T1=0.0
ISN 00063      IF(T2.LT.0.0) T2=0.0
ISN 00064      IF(T3.LT.0.0) T3=0.0
ISN 00065      RT1=DSQRT(T1)
ISN 00066      RT2=DSQRT(T2)
ISN 00067      RT3=DSQRT(T3)
ISN 00068      IF(QQ.GT.0.0) RT1=-RT1
ISN 00069      X1=0.5*( RT1+RT2+RT3)-0.25*A
ISN 00070      X2=0.5*( RT1-RT2-RT3)-0.25*A
ISN 00071      X3=0.5*(-RT1+RT2-RT3)-0.25*A
ISN 00072      X4=0.5*(-RT1-RT2+RT3)-0.25*A
ISN 00073      60 CONTINUE
ISN 00074      RETURN
ISN 00075      END

```

```

ISN 00076          SUBROUTINE JOM12(NAOD)                                JOM00100
C                 REAL*8 X,COF                                         JOM00200
                 DOUBLE PRECISION X,COF,COFT                            JOM00300
ISN 00077          DIMENSION X(1)                                       JOM00400
ISN 00078          DIMENSION BCD1(4),BCD2(4),COF(4),IC(17)              JOM00500
ISN 00079          COMMON X                                              JOM00600
ISN 00080          COMMON/JOMIN8/NA,NB,NC,ND,NE,NF,NG,NH,NI,NJ          JOM00700
ISN 00081          COMMON/GEOMH/HMALE,FEMALE,HIT,COMMA,ZONE,BLOCK,MEDIA,SURFAC, JOM00800
ISN 00082          %SECTOR,COFS(13),REGION,SIR,HMADAM,HMISS,HMARR,SINGLE   JOM00900
                 COMMON/GEOMD/NGEOM,GECMD                               JOM01000
ISN 00083          COMMON/JOMINX/NIN,NDUT                                JOM01100
ISN 00084          EQUIVALENCE(COFS(10),BLANK)                            JOM01200
ISN 00085          COMMON /TORUS1/ NDBD,NDB4,ND&T
ISN 00086          COMMON /TORUS0/ COFT(3,30)
ISN 00087          C
C
ISN 00088          READ (NIN,8000) NDBD,NDB4,(ID(I),I=1,16)              JOM01800
ISN 00089          WRITE(NDUT,8005) NDBD,NDB4,(IO(I),I=1,16)            JOM01900
ISN 00090          8000 FORMAT(2I5,15A4,A2)                               JOM02000
ISN 00091          8005 FORMAT(1H0,2I5,15A4,A2)                           JOM02100
ISN 00092          NDBD1=NDBD+1                                          JOM02200
ISN 00093          NDBT=NDBD+NDB4                                         JOM02300
ISN 00094          IF(NDBT.LE.0) GO TO 130                                JOM02500
ISN 00095          NA=NAOD/2                                              JOM02600
ISN 00096          NB=NA+NDBD                                             JOM02700
ISN 00097          NC=NB+NDBD                                             JOM02800
ISN 00098          ND=NC+NDBD                                             JOM02900
ISN 00099          NE=ND+NDBD                                             JOM03000
ISN 00100          NF=NE+NDBD                                             JOM03100
ISN 00101          NG=NF+NDBD                                             JOM03200
ISN 00102          NH=NG+NDBD                                             JOM03300
ISN 00103          NI=NH+NDBD                                             JOM03400
ISN 00104          NJ=NI+NDBD                                             JOM03500
ISN 00105          M = NJ + NGBD                                           JOM03600
ISN 00106          NAOD = 2 * M + 1                                       JOM03700
ISN 00107          DO 100 I=NA,M                                           JOM03800
ISN 00108          100 X(I+1)=0.000                                         JOM03900
ISN 00109          IF (NGEOM.NE.0) GO TO 140                               JOM04000
ISN 00110          DO 125 I=1,NDBD                                         JOM04100
ISN 00111          105 READ(NIN,8010) (COF(J),BCD1(J),BCD2(J),J=1,4)      JOM04200
ISN 00112          8010 FORMAT(4(D10.5,A4,1X,A1))                          JOM04300
ISN 00113          DO 120 J=1,4                                             JOM04400
ISN 00114          DO 110 K=1,13                                            JOM04500
ISN 00115          IF(BCD1(J).EQ.COFS(K)) GO TO 115                       JOM04600
ISN 00116          110 CONTINUE                                             JOM04700
ISN 00117          WRITE(NDUT,8015) I, (COF(JJ),BCD1(JJ),BCD2(JJ),JJ=1,J)  JOM05000
ISN 00118          8015 FORMAT(1X,15,5X,4(E13.5,A4,1X,A1))                JOM05100
ISN 00119          CALL JOM13(8)                                           JOM05200
ISN 00120          115 IF(K.GT.10) K=K-7                                    JOM05300
ISN 00121          NL=NA+(K-1)*NDBD+I                                       JOM05400
ISN 00122          X(NL)=X(NL)+COF(J)                                       JOM05500
ISN 00123          IF(BCD2(J).NE.BLANK) GO TO 125                          JOM05600
ISN 00124          120 CONTINUE                                             JOM05700
ISN 00125          WRITE(NDUT,8015) I, (COF(J),BCD1(J),BCD2(J),J=1,4)      JOM05850
ISN 00126          GO TO 105                                                JOM05900
ISN 00127          125 WRITE(NDUT,8015) I, (COF(JJ),BCD1(JJ),BCD2(JJ),JJ=1,J) JOM06000
                 IF(NDB4.LE.0) GO TO 130
ISN 00128          DO 200 I=1,NDB4                                         JOM06200
ISN 00129          I1 = 1+NDBD                                             JOM06300
ISN 00130          READ (NIN,8020) (COFT(J,I),J=1,3)                       JOM06500
ISN 00131          WRITE(NDUT,8070) I1, (COFT(J,I),J=1,3)                  JOM06600
ISN 00132          200 CONTINUE                                             JOM06700
ISN 00133          8020 FORMAT(1X,4(D10.5,6X))                               JOM06800
ISN 00134          8070 FORMAT(1X,15,5X,4(1PE13.5,6X))                    JOM06900
ISN 00135          130 RETURN
ISN 00136          C
C                 DUCT GEOMETRY
ISN 00137          140 CALL JDUCT(NDBD)                                       JOM06600
ISN 00138          GO TO 130                                               JOM06700
ISN 00139          END                                                    JOM06800

```

```

ISN 00140      SUBROUTINE JOM5                00036530
C              INTER                          00036540
C              IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)       00036550
ISN 00141      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z) 00036560
C              REAL*4 R,DUM1,DUM2,DUM4,DUM6,RGBD,SGNF,SGNF2,AND 00036570
ISN 00142      REAL*4 R,DUM1,DUM2,DUM4,DUM6,SGNF,SGNF2 00036580
ISN 00143      INTEGER*4 RGBD,REG
C
ISN 00144      DIMENSION X(1),N(1),R(1)        00036590
ISN 00145      COMMON/NRC/NR(31)              00036600
ISN 00146      COMMON X                       00036610
ISN 00147      COMMON/GEOM4/XONE,YONE,ZONE,XTWO,YTWO,ZTWO,DIST4,DIST, 00036620
                2 NCUE,NCR                   00036630
ISN 00148      COMMON/GEOM9/NZ,NBL,NXBL,NYBL,NZBL 00036640
ISN 00149      COMMON/GEOM56/RGBD,NBD0,REG    00036650
ISN 00150      COMMON/JOMINS/DUM1(13),NS,NE,DUM2(6) 00036660
ISN 00151      COMMON/GEOM7/X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,DIST1,NCR1 00036670
ISN 00152      COMMON/GEOMA/ID,NSTAT         00036680
ISN 00153      COMMON/GEOMC/DUM5(6),DUM7(3),DUM4,NMED,DUM6 00036690
ISN 00154      COMMON/GEOM77/SGNF,SGNF2,NBDUND,NBD2 00036700
ISN 00155      COMMON/TORUS1/ NMAX,NDB4,NDBT
ISN 00156      COMMON/TORUSG/ CGFT(3,30)
ISN 00157      EQUIVALENCE(R(1),NR(1)),(NRGBD,RGBD)
ISN 00158      EQUIVALENCE(X(1),N(1))
C
ISN 00159      IF(ID.GT.1) GO TO 100          00036730
ISN 00160      CALL JOM6(XONE,YONE,ZONE,1,NEWMED) 00036740
C
ISN 00161      JOM6 IS FINDR                  00036750
ISN 00162      NS1=NS+NZ                      00036760
ISN 00163      NB1=NB+NZ                      00036770
ISN 00164      NS2=N(NS1)+NBL                 00036780
ISN 00165      NB2=N(NB1)+NBL                 00036790
ISN 00166      NDS=N(NS2)                    00036800
ISN 00167      NBD=N(NB2)                    00036810
ISN 00168      IF(NEWMED.EQ.NMED) GO TO 100  00036820
ISN 00169      NMED=NEWMED                   00036830
ISN 00170      XTWO=XONE                      00036840
ISN 00171      YTWO=YONE                      00036850
ISN 00172      ZTWO=ZONE                      00036860
C
ISN 00173      DIST=0.000                     00036870
ISN 00174      NCR=1                          00036880
ISN 00175      GO TO 130                       00036890
ISN 00176      100 IF(NGS.GT.0) GO TO 110     00036900
ISN 00177      NCR=0                          00036910
ISN 00178      105 NBUND=0                    00036920
ISN 00179      SGNF=0.                       00036930
ISN 00180      GO TO 130                       00036940
ISN 00181      110 DIST=0.000                 00036950
ISN 00182      DIST2=1.000                    00036960
ISN 00183      X1=XONE                        00036970
ISN 00184      Y1=YONE                        00036980
ISN 00185      Z1=ZONE                        00036990
ISN 00186      115 X2=XTWO                    00037000
ISN 00187      Y2=YTWO                        00037010
ISN 00188      Z2=ZTWO                        00037020
ISN 00189      NCR=0                          00037030
ISN 00190      DO 120 I=1,NGS                 00037040
ISN 00191      IF(1AND(NRGBD,NR(I)).EQ.0) GO TO 120 00037050
ISN 00192      NBD1=NBD+1                     00037060
ISN 00193      IF(N(NBD1).GT.NMAX) GO TO 116  00037070
ISN 00194      CALL JOM7(N(NBD1))
ISN 00195      GO TO 117
ISN 00196      116 CALL JOM77(N(NBD1))
ISN 00197      117 CONTINUE
C
ISN 00198      JOM7 IS CROSS                   00037080
ISN 00199      IF(NCR1.LE.0) GO TO 120       00037090
ISN 00200      NCR=NCR1                       00037100
ISN 00201      NDBD=1                          00037110
ISN 00202      DIST2=DIST2+DIST1              00037120
ISN 00203      120 CONTINUE                   00037130
ISN 00204      IF(NCR.EQ.0) GO TO 105        00037140
ISN 00205      NBUND=NB2                     00037150
ISN 00206      SGNF=SGNF2                     00037160
ISN 00207      CALL JOM6(X2,Y2,Z2,2,NEWMED)  00037170
ISN 00208      JOM6 IS FINDR                  00037180
ISN 00209      IF(NMED.NE.NEWMED) GO TO 125  00037190
ISN 00210      X1=X2                          00037200
ISN 00211      Y1=Y2                          00037210
ISN 00212      Z1=Z2                          00037220
ISN 00213      DIST=DIST+DIST2               00037230
ISN 00214      DIST2=1.000-DIST              00037240
ISN 00215      GO TO 115                       00037250
ISN 00216      125 NMED=NEWMED                00037260
ISN 00217      XTWO=X2                       00037270
ISN 00218      YTWO=Y2                       00037280
ISN 00219      ZTWO=Z2                       00037290
ISN 00220      DIST=DIST+DIST2               00037300
ISN 00221      130 RETURN                      00037310
ISN 00222      END                            00037320

```

```

ISN 00219      FUNCTION JDM6(XDNE,YDNE,ZONE,IC)                                00038940
C                                                       00038950
C IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)                                00038960
ISN 00220      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)                    00038990
C                                                       00038966
C REAL*8 JDM8                                             00038970
ISN 00221      DOUBLE PRECISION JDM8                                00039000
ISN 00222      DIMENSION X(1)                                       00039010
ISN 00223      COMMON X                                           00039020
ISN 00224      COMMON /JDM18/NA,NB,NC,ND,NE,NF,NG,NH,NI,NJ
ISN 00225      COMMON /TORUS1/ NBD,NUB4,NDBT
ISN 00226      COMMON /TORUS0/ COFT(3,30)
C
ISN 00227      IF(ID.LE.NBBD) GO TO 10
ISN 00228      IX=10-NBBD
ISN 00229      R=COFT(1,IDX)
ISN 00230      A=COFT(2,IDX)
ISN 00231      B=COFT(3,IDX)
ISN 00232      V=(DSQRT(XDNE*XDNE+YDNE*YDNE)-R)/A
ISN 00233      Q=ZDNE/B
ISN 00234      JDM6=P+Q+G-1.000
C
ISN 00235      WRITE(6,600) R,A,B,P,Q,JDM6,NBBD,IC
600 FORMAT(1H0,5X,'CONTENTS OF JDM6',5X,1P6E12.4,215)
C
ISN 00236      RETURN
ISN 00237      10 LA=NA+IX                                          00039030
ISN 00238      LB=NB+IX                                          00039040
ISN 00239      LC=NC+IX                                          00039050
ISN 00240      LD=ND+IX                                          00039060
ISN 00241      LE=NE+IX                                          00039070
ISN 00242      LF=NF+IX                                          00039080
ISN 00243      LG=NG+IX                                          00039090
ISN 00244      LH=NH+IX                                          00039100
ISN 00245      LI=NI+IX                                          00039110
ISN 00246      LJ=NJ+IX                                          00039120
ISN 00247      JDM6=(X(LA)*XDNE+X(LD)*YDNE+X(LE)*ZONE+X(LG))*
        IXDNE+(X(LB)*YDNE+
        X(LF)*ZONE+X(LH))*YDNE+(X(LC)*ZONE+X(LI))*ZONE+X(LJ)
        RETURN
ISN 00248      END
ISN 00249      SUBROUTINE JDM77(IX)                                     JDM00100
ISN 00250      CROSS FOR TORUS GEOMETRY                             JDM00200
C                                                       JDM00300
ISN 00251      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)                    JDM00400
ISN 00252      REAL SGNF,SGNF2                                       JDM00500
ISN 00253      DOUBLE PRECISION JDM8                                 JDM00600
ISN 00254      DIMENSION X(4)                                         JDM00700
ISN 00255      COMMON/GEOM77/XDNE,YDNE,ZONE,XTWO,YTWO,ZTWO,DIST,MCR
ISN 00256      COMMON/GEOM70/P,C,FUN,F1,DISCR,U,V,W,AU,BV,CW,AUDVEW,BVFW
ISN 00257      COMMON/JDM18/NA,NB,NC,ND,NE,NF,NG,NH,NI,NJ
ISN 00258      COMMON/GEOM77/SGNF,SGNF2,NBOUND,NBZ
ISN 00259      COMMON /TORUS1/ NBD,NUB4,NDBT
ISN 00260      COMMON /TORUS0/ COFT(3,30)
ISN 00261      DATA IDENT/0/
ISN 00262      DATA JDENT/0/
C                                                       JDM01200
C                                                       JDM01300
C
ISN 00263      IX=IX-NBBD
ISN 00264      R=COFT(1,IDX)
ISN 00265      A=COFT(2,IDX)
ISN 00266      B=COFT(3,IDX)
ISN 00267      XX=XDNE+XDNE
ISN 00268      YY=YDNE+YDNE
ISN 00269      ZZ=ZONE+ZONE
ISN 00270      U=XTWO-XDNE
ISN 00271      V=YTWO-YDNE
ISN 00272      W=ZTWO-ZONE
ISN 00273      PQ=U*U+V*V
ISN 00274      QQ=U*XDNE+V*YDNE
ISN 00275      KD=XX+YY
ISN 00276      AB=A/B
ISN 00277      AB=AB*AB
ISN 00278      AQ=0.5*(PU+AB*W*W)/R
ISN 00279      BQ=(QQ+AB*W*ZDNE)/R
ISN 00280      CQ=0.5*(RU*AB+ZZ-A*A+R*R)/R
ISN 00281      AX=AU*AU
ISN 00282      BX=2.0*AO*BO
ISN 00283      CX=BU*BU+2.0*CO*AO-PU
ISN 00284      DX=2.0*(BO*CO-QU)
ISN 00285      EX=CO*CO-RO
ISN 00286      IF(DABS(AX) .LT. 1.E-15) GO TO 5
ISN 00287      FO=EX*(AX+BX+CX+DX+EX)
ISN 00288      IF(FU.LE.0.0) GO TO 3
ISN 00289      F1=DX*(4.0*AX+3.0*BX+2.0*CX+DX)
ISN 00290      IF(F1.LE.0.0) GO TO 3
ISN 00291      D11=9.0*BX*BX-24.0*AX*CX
ISN 00292      IF(D11.LT.0.000) GO TO 7
ISN 00293      D11=DSQRT(D11)
ISN 00294      X11=-3.0*BX+D11
ISN 00295      X11=X11/12.0/AX
ISN 00296      DL 100 I=1,2
ISN 00297      IF(X11.LT.0.000) GO TO 100
ISN 00298      IF(X11.GT.1.000) GO TO 100
ISN 00299      F11=(4.0/3.0*CX-BX+BX/2.0/AX)*X11+(DX-CX*CX/b.0/AX)
ISN 00300      F11=F11+DX
ISN 00301      IF(F11.LT.0.000) GO TO 3
ISN 00302      100 X11=X11/6.0/AX
C 100 CONTINUE

```