

$DEL TSA \dots\dots = TWI - TSAT$  (deg)

$H \dots\dots\dots$  熱伝達率(9)式 (K cal/m<sup>2</sup> hr deg)

### 3. あとがき

このプログラムに使用した計算には多くの仮定が導入されているので、これをそのまま他の場合へ一般的に適用するのは危険がある。ただし計算の流れは同様なデータ整理をする場合には参考になり得ると思う。

### 参考文献

- 1) 塚原茂司, 一色尚次: 「曲円管内の沸騰熱伝達の実験研究」(サブクール沸騰熱伝達とバーンアウト熱流束) 船研報告第7巻第2号.
- 2) G. W. C. Kaye, and T. H. Laby; Tables of Physical and Chemical Constants, John Wiley.

## E-4 ディーゼル機関の噴射率と熱発生率のデータ処理システムによる解析プログラム

機関性能部 井ノ内一雄・塩出敬二郎・水谷 洋一

### 1. プログラムの目的および概要

ディーゼル機関の熱発生率および噴射率など機関性能におよぼす影響の過大な項目の解析には、従来、人力による計算を行ってきたがデータの読み取り精度が悪く、±2% 程度の誤差をまぬかれない。また計算結果が迅速に処理できないので、ある任意の少数のサイクルの解析にとどまり、多数サイクルの解析値ではないのでサイクルごとの変動が十分に考慮されていなかった。

この他、サイクル内の分割数もクランク角 2° ごとが限度であり、解析に必要な物性値(内部エネルギー、ガス定数)の変化が考慮されておらず、満足できるものではなかった。さらにシリンダ内の熱平衡の計算過程においても熱損失の影響を考慮することが困難な状態であった。

今回、内燃機関のデータ処理システムとして、R-500 データレコーダおよび DP-300 データ処理装置その他が完備されたので、上述の問題点を解決し、正確にかつ迅速に大量のデータを処理できるようになった。

このプログラムはデータ処理装置からの紙テープ出力に合わせて、R-124 2 サイクルディーゼル機関の噴射率および熱発生率その他の値を求めるデータ処理プログラムである。噴射率は圧力・リフト法により、また熱発生率はシリンダ内の熱平衡の計算により解析した。なお熱平衡の計算には、シリンダ壁への熱損失および作動ガスの空燃比、圧力、温度などによる物性値の変化も考慮されている。

### 2. プログラムの内容

(164)

#### 2.1 プログラムの番号、名称

44-010

The Calculation of Injection Rate and Heat Release Rate

#### 2.2 製作者

機関性能部 水谷洋一

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

熱発生率の解析には、熱力学第一法則のエネルギー保存の式により、噴射率は圧力・リフト法により逐次計算する。

使用した計算式は次式である。

$$\frac{dQ}{d\theta} = -\frac{dU}{d\theta} + AP_0 \frac{dV}{d\theta} + \frac{dQ_L}{d\theta} \dots\dots(1)$$

$$\frac{dG}{d\theta} = \mu \cdot f(\theta) \cdot \sqrt{2g(P_0 - P_c)} / 6 \times N \dots\dots(2)$$

ここに、

$Q$  : シリンダ内熱発生量 K cal

$U$  : シリンダ内のガスの内部エネルギー K cal

$P_0$  : シリンダ内のガスの圧力 kg/cm<sup>2</sup> gage

$V_0$  : シリンダ容積 m<sup>3</sup>

$Q_L$  : シリンダ壁への熱損失量 K cal

$G$  : 燃料噴射量 g

$A$  : 熱の仕事当量 K cal/kgm

$\mu$  : 噴射孔の流量係数

$f(\theta)$  : 噴射孔面積 cm<sup>2</sup>

$P_c$  : 燃料噴射圧力 kg/cm<sup>2</sup>

$N$  : 機関回転数 rpm

表-5 入力データ

記号	説明	単位	FORMAT
PCKK	シリンダ内圧力倍率	kg/cm <sup>2</sup> /1000 $\mu$ A	F5.1
PIKK	噴射圧力倍率	kg/cm <sup>2</sup> / 300 $\mu$ A	F6.1
YLKK	ノズルリフト倍率		F7.3
TB	給気温度	°C	F5.1
PB	給気圧力	kg/cm <sup>2</sup>	F5.1
RPM	回転数	rpm	F6.1
KK	サイクル数		I3
LL	ポート閉ジ時期クランク角	deg	I3
PCCC	基準値 (シリンダ圧力)	kg/cm <sup>2</sup>	F5.1
PIII	基準値 (噴射圧力)	kg/cm <sup>2</sup>	F6.1
YLLL	基準値 (ノズルリフト)	mm	F5.1
DD	ノズル孔面積	mm <sup>2</sup>	F6.2
TPS	ピストン温度	°C	F6.1
THD	ピストン・ヘッド温度	°C	F6.1
TLN	ピストン・ライナ温度	°C	F6.1
NOO	実験番号 (零レベル)		I3
NOCAL	実験番号 (CAL. レベル)		I3
NOP	実験番号		I3
XP	プロット用倍率 (シリンダ圧力)		F6.1
XPI	" (噴射圧力)		F6.1
XYL	" (ノズルリフト)		F6.1
XQ	" (熱発生率)		F6.1
XRJ	" (噴射率)		F6.1
NP	プロット用零シフト (シリンダ圧力)		I3
NPI	" (噴射圧力)		I3
NYL	" (ノズルリフト)		I3
NQ	" (熱発生率)		I3
NRJ	" (噴射率)		I3
IPCO	零レベル値 (シリンダ圧力)		I5
IPIO	零レベル値 (噴射圧力)		I5
IYIO	零レベル値 (ノズルリフト)		I5
IPCCA	CAL. レベル値 (シリンダ圧力)		I5
IPICA	CAL. レベル値 (噴射圧力)		I5
IYLCA	CAL. レベル値 (ノズルリフト)		I5
IPC(I)	実験値 (シリンダ圧力)		I5
IPI(I)	実験値 (噴射圧力)		I5
IYL(I)	実験値 (ノズルリフト)		I5

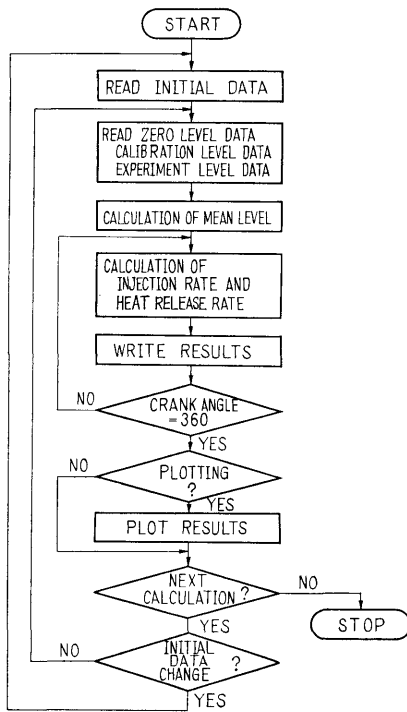


図-21 フローチャート

$\theta$  : クランク角 deg

添字  $d$  はクランク角  $\theta$  あたりの量を示す。

### 2.5 計算の手順

計算の手順は図-21 フローチャートに示す。

### 2.6 入力

計算に必要な入力データとその入力形式 (FORMA

T) を表-5 に示す。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

測定器による誤差は  $\pm 2\%$  から  $\pm 1\%$  にまで上昇した。入力データは符号+4桁, 演算は5桁で行なう。したがって結果は4桁まで有効である。なおプロットの結果は実数型変数を整数型変数に変換しているため小数部を切り捨てた形のものである。

### 3.2 演算時間

データの読み込みは1サイクルあたり0.5分, 演算時間は3.0分, 結果のプロットには1.0分を要する。

### 3.3 制限事項

データを整数型で読み込んで平均値を求めるために総和をとっているが, 総和が32767を越えた時オーバーフローになる。

## 4. プログラムの使用について

### 4.1 オペレート

プログラムの実行は, ¥ BATCH で PT により行なう。入力データも PT である。

### 4.2 プログラムの応用

サブプログラムとして作動ガスの物性値のガス定数, 内部エネルギーが含まれており, 数表としてあるので他の用途に使用できる。

## 5. あとがき

データ処理システムを使用したディーゼル機関における噴射率および熱発生率の解析例を示した。ここで的手法は他の機関に関しても応用でき, 機関性能の改善に寄与するところが大であると思われる。

## N-1 数値解法 (EOS 法) による平板遮蔽体 透過中性子線計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

平板形状遮蔽体に対し定常のボルツマン輸送方程式を数値積分法で解いて, 中性子線の角度束密度を遮蔽体内および背面位置で求め, 遮蔽体内および背面での中性子角度分布, エネルギースペクトルを求めることを目的とする。

### 2. プログラムの内容

(166)

#### 2.1 プログラムの名称

EOS-2

#### 2.2 製作者

原子力船部 竹内 清

#### 2.3 製作年月

昭和 40 年

#### 2.4 理論の概要

定常の中性子ボルツマン輸送方程式は次式のように書き表わせる。

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \Omega N(x, \Omega, E) + \mu_T(x, E) N(x, \Omega, E) \\ &= \sum_i \iint N(x, \Omega', E') n_i(x) \sigma_i(x; \Omega' \rightarrow \Omega, \\ & \quad E' \rightarrow E) dE' d\Omega' + S(x, \Omega, E) \quad \dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここで  $N(x, \Omega, E)$  は中性子角度束密度であり、 $\mu_T(x, E)$  は巨視的全断面積、 $\sigma_i(x; \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E)$  は微分散乱角度分布関数であり、 $S(x, \Omega, E)$  は純線源である。なお右辺の  $i$  についての和は遮蔽体の各領域に含まれる核種についてとられる。散乱現象は非等方取り扱ひの弾性散乱現象と実験室系での等方散乱扱ひとする非弾性散乱現象を考慮に入れる。すなわち弾性散乱積分項と非弾性散乱積分項は次式のように書き現わせる。

$$\begin{aligned} \text{弾性散乱積分項} &= \sum_i \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 n_i(x) \sigma_{el, i}(u') f_i(u', \mu) \\ & \quad \times \exp(u' - u) N(x, \omega', u') d\mu d\phi \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{非弾性散乱積分項} &= 2\pi \sum_i \int_u^{\infty} \int_{-1}^1 n_i(x) \sigma_{in, i}(u') \\ & \quad \frac{g_i(u', u)}{4\pi} \times N(x, \omega', u') \\ & \quad E_0 \exp(u') d\omega' du' \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

上式で中性子束密度  $N(x, \omega, u)$  および散乱角度分布関数  $f(u, \mu)$  をルジャンドル展開近似し、減速関数  $g(u', u)$  を適当な簡単な関数で近似して計算を

すすめるのが EOS 法である。理論式の詳細は文献 1) を参照されたい。

#### 2.5 計算の手順

文献 2) のフローチャートを参照されたい。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

機械語 NEAC 2206

#### 2.7 入力および出力

文献 2) を参照

### 3. プログラムの検定

計算誤差、精度、演算時間、適用範囲および制限事項は文献 2) を参照されたい。

### 4. プログラムの使用について

文献 2) を参照

### 5. あとがき

実際の遮蔽計算結果等は文献 1) および 3) を参照されたい。

### 参考文献

- 1) 竹内 清, 片岡 巖: ボルツマン輸送方程式の数値積分による中性子平板問題の解析, 船研報告, 第 3 巻第 5 号 (1965).
- 2) 竹内 清: EOS-2 コード使用法, 船研報告, 第 3 巻第 2 号 (1965).
- 3) Kiyoshi TAKEUDHI and Iwao KATAOKA: A Method for the Numerical Integration of the Neutron Transport Equation in Slab Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol 3, No. 5 (1966).

## N-2 数値解法 (EOS 法) による平板遮蔽体 透過ガンマ線計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

平板形状遮蔽体に対し定常のボルツマン輸送方程式を数値積分法で解いて、ガンマ線の遮蔽体内および背面における角度エネルギー束密度を求め、遮蔽体内および背面でのガンマ線角度分布、エネルギースペクトルを求めることを目的とする。

### 2. プログラムの内容

- 2.1 プログラムの名称  
EOS-1

### 2.2 製作者

原子力船部 竹内 清

### 2.3 製作年月

昭和 39 年

### 2.4 理論の概要

定常のガンマ線ボルツマン輸送方程式は次のように書き表わせる。

$$\omega \frac{\partial}{\partial x} I(x, \omega, \lambda) + \mu(x, \lambda) I(x, \omega, \lambda)$$

$$= \frac{n(x)}{\pi} \int_{-1}^1 K(\lambda', \lambda) d\beta \int_0^\pi d\varphi I(x, \omega', \lambda') + S(x, \omega, \lambda) \quad \dots(1)$$

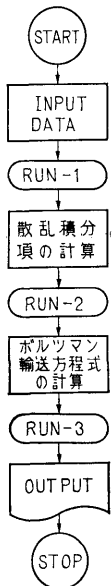


図-22 フローチャート

ここで  $I(x, \omega, \lambda)$  はガンマ線角度エネルギー密度であり,  $\mu(x, \lambda)$  は巨視的全断面積,  $K(\lambda', \lambda)$  はクライン仁科の式から求められる散乱核で,  $S(x, \omega, \lambda)$  は純線源である。  
 $I(x, \omega, \lambda)$  および  $K(\lambda', \lambda)$  をともにもルジャンドル展開近似して計算をすすめるのが EOS 法であり, 詳細は文献 1) を参照されたい。

2.5 計算の手順

図-22 フローチャートに示す。

2.6 プログラム用語および計算機種

機械語 NEAC 2206

2.7 入力および出力

文献 1) を参照

3. プログラムの検定

計算誤差, 精度, 演算時間, 適用範囲および制限事項は文献 1) を参照されたい。

4. プログラムの使用について

文献 1) を参照

5. あとがき

実際の遮蔽計算結果等は文献 1) および 2) を参照されたい。

参考文献

- 1) Iwao KATAOKA and Kiyoshi TAKEUCHI : A Code and Some Results of a Numerical Integration Method of the Photon Transport Equation in Slab Geometry, Papers of Ship Research Institute No. 6 (1965).
- 2) Iwao KATAOKA and Kiyoshi TAKEUCHI : A Method for the Numerical Integration of the Photon Transport Equation in Slab Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 2, No. 1 (1965).

### N-3 数値解法 (SELENE 法) による平板遮蔽体透過ガンマ線計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を SELENE 数値解法で解いて平板形状遮蔽体に対するガンマ線角度エネルギー束密度を求め, 遮蔽体内および背面におけるガンマ線の角度分布, エネルギースペクトルおよび線量を計算することを目的とする。対象とする線源は平板単一エネルギー単一方向線源および平板単一エネルギー分布角度線源であり, 対象となる問題は平板単一エネルギー垂直入射線源問題, 平板単一エネルギー斜入射線源問題, 平板単一エネルギー各方向角度分布線源問題および平板単一エネルギー任意角度分布線源問題である。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

SELENE-1 (単一方向線源用)

SELENE-2 (分布角度線源用)

2.2 製作者

原子力船部 竹内 清

2.3 製作年月

昭和 41 年

2.4 理論の概要

定常のガンマ線ボルツマン輸送方程式は EOS 法による計算コード EOS-1 に同じであり, 線源の与え方および輸送方程式の数値解法が EOS 法と異なる。線源は次のようである。

$$I^{(0)}(x, \omega, \lambda) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \exp(-\mu_0 x) \delta(\omega - 1) \delta(\lambda - \lambda_0) :$$

垂直入射線源

$$I^{(0)}(x, \omega, \lambda) = \frac{\lambda_0}{2\pi |\omega_0|} \exp\left(-\frac{\mu_0 x}{|\omega_0|}\right)$$

$\delta(\omega - \omega_0) \delta(\lambda - \lambda_0) :$  斜入射線源

$$I^{(0)}(x, \omega, \lambda) = \frac{\lambda_0}{4\pi|\omega|} f_{\omega} \exp\left(-\frac{\mu_0 x}{|\omega|}\right)$$

$\delta(\lambda - \lambda_0)$  : 平板分布角度線源

方程式の数値積分法は SELENE 法により, 詳細は参考文献 1) を参照されたい。

#### 2.5 計算の手順

文献 2) のフローチャートを参照されたい。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

機械語 NEAC 2206

#### 2.7 入出力

文献 2) を参照

### 3. プログラムの検定

計算誤差, 精度, 演算時間, 適用範囲および制限事項等は文献 2) を参照されたい。

### 4. プログラムの使用について

文献 2) を参照

### 5. あとがき

実際の遮蔽計算結果の一部は文献 3) に載せてある。

#### 参考文献

- 1) 片岡 巖 :  $\gamma$  線平板多重層遮蔽の解析法の研究, 船研報告, 第3巻第4号 (1966).
- 2) 竹内 清 : SELENE コード使用法, 船研報告, 第4巻第3号 (1967).
- 3) Iwao KATAOKA and Kiyoshi TAKEUCHI : Discrete Ordinates-Numerical Integration Method for Bulk Shielding Calculations, UKAEA Report, AERE-R 5773 (1968).
- 4) Iwao KATAOKA : A Study of the Method for Analyzing Multilayer Gamma-Ray Shields, US AEC Report, ORNL-tr-1671 (1967).

## N-4 数値解法 (MENE 法) による平板遮蔽体 透過中性子線計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を MENE 数値解法で解いて平板形状遮蔽体に対する中性子の角度束密度を求め, 遮蔽体内および背面における中性子の角度分布, エネルギースペクトルを計算することを目的とする。対象とする線源は平板分布エネルギー任意角度分布線源であり, これは境界条件として取り扱われる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

MENE-1

#### 2.2 製作者

原子力船部 竹内 清

#### 2.3 製作年月

昭和 42 年

#### 2.4 理論の概要

定常の中性子ボルツマン輸送方程式は EOS 法による計算コード EOS-2 に同じであるが, 線源の与え方が境界条件として与えられる点と輸送方程式の数値解法が EOS 法と異なり MENE 法によっている点異なる。MENE 法の詳細は文献 1) を参照されたい。

#### 2.5 計算の手順

文献 2) の全プログラムを参照されたい。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN-II NEAC 2206

#### 2.7 入出力

文献 2) を参照

### 3. プログラムの検定

計算誤差, 精度, 演算時間, 適用範囲および制限事項等は文献 2) を参照されたい。

### 4. プログラムの使用について

文献 2) を参照

### 5. あとがき

実際の遮蔽計算結果例は文献 1) および 3) に載せてある。

#### 参考文献

- 1) 竹内 清, 片岡 巖 : Discrete Ordinates 直接数値積分法による中性子平板問題の解析, 船研報告, 第6巻第2号 (1969).
- 2) Kiyoshi TAKEUCHI : The MENE Neutron Transport Code, Papers of Ship Research Ins-

titute No. 29 (1968).  
 3) Kiyoshi TAKEUCHI and Iwao KATAOKA :  
 Discrete Ordinates Numerical Integration Method for Neutron Transport Equation in Slab Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 5, No.

7 (1968).  
 4) Iwao KATAOKA and Kiyoshi TAKEUCHI :  
 Discrete Ordinates-Numerical Integration Method for Bulk Shielding Calculations, UKAEA Report, AERE-R 5773 (1968).

## N-5 有限円柱形状遮蔽体に対する中性子透過計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

定常の積分型輸送方程式を数値積分法で解いて、2次元 (r, z) 円柱座標形状遮蔽体に対する中性子の角度束密度を求め、遮蔽体内および背面における中性子の角度分布、エネルギースペクトルを計算することを目的とする。対象とする線源は円柱形状体積線源であり、これで実際の原子炉の炉心を仮定することが可能となったわけである。

### 2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

PALLAS-CY-1

2.2 製作者

原子力船部 竹内 清

2.3 製作年月

昭和 44 年

2.4 理論の概要

定常の積分型輸送方程式は一般に次のように書き表わせる。

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = & \Phi(\bar{r}-R\bar{\Omega}, \bar{\Omega}, E) \\ & \times \exp\left[-\int_0^R \Sigma_t(\bar{r}-R'\bar{\Omega}, E) dR'\right] \\ & + \int_0^R dR' \cdot S(\bar{r}-R'\bar{\Omega}, \bar{\Omega}, E) \\ & \times \exp\left[-\int_0^{R'} \Sigma_t(\bar{r}-R''\bar{\Omega}, E) dR''\right] \\ & + \int_0^R dR' \left\{ \int_0^{4\pi} d\bar{\Omega}' \int_E^\infty dE' \cdot \Sigma_{si} \right. \\ & (\bar{r}-R'\bar{\Omega}; E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega}) \\ & \times \Phi(\bar{r}-R'\bar{\Omega}, \bar{\Omega}', E') \\ & \left. \exp\left[-\int_0^{R'} \Sigma_t(\bar{r}-R''\bar{\Omega}, E) dR''\right] \right\} \\ & \dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここで  $\Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  は中性子束密度を表わし、 $\Sigma_t(\bar{r}, E)$  は巨視的全断面積を、 $S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$  は純線源

を、 $\Sigma_{si}(\bar{r}, E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \rightarrow \bar{\Omega})$  は巨視的散乱分布関数を表わし、 $i$  についての和は遮蔽体の各領域における核種についてとられる。上式の積分はガウス求積法やニュートンコーツ求積法などの数値積分法によって計算し、方程式は Discrete Ordinates 角度分点法を基にして数値解法で解かれる。一般座標系で解かれた式を2次元 (r, z) 座標で変数を表わしてやれば2次元 (r, z) 形状に対する最終式は求まる。

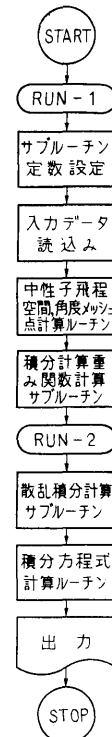


図-23 フローチャート

## 2.5 計算の手順

図-23 のフローチャートに示してある。

## 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTTRAN-II NEAC 2206

## 2.7 入力

- (1) *PROBLEM NAME* 6文字
- (2) *EMAX* 最大エネルギー (*MeV*) E12.5
- (3) *JJ* ≤ 5 エネルギーグループ数 I 4
- (4) *HH* レサジ幅 E12.5
- (5) *II* (1), *II* (2) *z* 方向 1 および 2 領域に対する *r* 方向の領域数 2 I 2
- (6) *MER*(1, 1), *MER*(1, 2) 領域 (1, 1) および (1, 2) に対する *r* 方向メッシュ数  
*MER*(1, 1) + *MER*(1, 2) ≤ 9 2 I 4
- (7) *MEZ* (1) 領域 (1, 1) に対する *Z* 方向メッシュ数 I 4  
*MEZ*(1) + *MEZ*(2) ≤ 9
- (8) *RR*(1, 1), *RR*(1, 2) 領域 (1, 1) および (1, 2) に対する *r* 方向に測った領域の幅 (cm) 2 E12.5
- (9) *ZZ*(1) 領域 (1, 1) に対する *Z* 方向に測った領域の幅 (cm) E12.5
- (10) *MER*(2, 1), *MER*(2, 2) (6)と同様である  
*MER*(2, 1) + *MER*(2, 2) ≤ 9 2 I 4
- (11) *MEZ*(2) (7)と同様である I 4
- (12) *RR*(2, 1), *RR*(2, 2) (8)と同様である 2 E12.5
- (13) *ZZ*(2) (9)と同様 E12.5
- (14) *CRT*(1, 1), *CRT*(1, 2), *CRT*(2, 1), *CRT*(2, 2) 各領域における巨視的全断面積 5 E12.5
- (15) *SZ*(1), ..., *SZ*(9) 体積線源を  $S(r, z, E) = S(r)S(z)S(E)$  と仮定した時の  $S(z)$  の値 5 E12.5
- (16) *SR*(1), ..., *SR*(9)  $S(r)$  の値 5 E12.5
- (17) *SE*(1), ..., *SE*(5)  $S(E)$  の値 5 E12.5
- (18) *NE*(1, 1), *NE*(1, 2), *NE*(2, 1), *NE*(2, 2) 各領域における入力核種の数 4 I 3
- (19) *NEK*(1, 1), *NEK*(1, 2), *NEK*(2, 1), *NEK*(2, 2) 各領域に対する Identification 4 I 3
- (20) *MATERIAL* 領域の物質名 6文字
- (21) *NUCLIDE* 核の名前 6文字
- (22) *RO*(*NUC*) 核の質量の逆数 E12.5

- (23) *AN*(*NUC*) 原子密度 × 10<sup>-24</sup> E12.5
- (24) *SIG*(1, *NUC*), ..., *SIG*(5, *NUC*) 微視的散乱断面積 (バーン) 5 E12.5
- (25) *LL* 散乱分布関数のルジャンドル展開項数 I 4

ただし、水素原子の場合(25)以下は入力不要

- (26) *FNU*(1, 1), ..., *FMU*(*LL*, 1)  
*FMU*(1, 2), ..., *FMU*(*LL*, 2)  
 .....  
*FMU*(1, *JJ*), ..., *FMU*(*LL*, *JJ*)  
 散乱分布関数のルジャンドル展開係数 10 F 7.4

## 2.8 出力

中性子角度束密度  $\Phi(r, z, \omega, \varphi, E)$  が各エネルギーグループごとに、また中性子束密度  $\Phi_0(r, z, E)$  が各エネルギーグループごとに印字される。

## 3. プログラムの検定

## 3.1 計算誤差, 精度

解析解は非常に簡単な問題に限り与えられる。これと計算結果の比較は最大 6.0% の誤差で良く一致している。

## 3.2 演算時間

3 エネルギーグループ 1 領域の簡単な計算では約 30 分であった。

## 3.3 適用範囲

簡単なチェック計算用である。

## 4. プログラムの使用について

## 4.1 オペレート

本プログラムは 2 つの *RUN* より成っており、*RU N1* と *RUN2* は *CALL CHAIN* で結ばれている。

## 4.2 他機種への移行

本プログラムは大型計算機 IBM 360 モデル 75 を目標として作られたテスト用プログラムである。現在 IBM 360-75 に対して書き換え中であり、最終プログラムは当然実際の遮蔽計算が可能な程度に大きくなる予定である。

## 5. あとがき

本プログラムは NEAC 2206 計算機に対し命令語だけでコアメモリ 10K 語を必要とし、磁気テープ装置 4 台を使用する。

本プログラムの他に 2 次元 (*r, z*) 円柱形状遮蔽体中性子透過計算プログラムとして MENE-2 が IBM 360-67 計算機に対して作られている。これは中性子のボルツマン輸送方程式を MENE 数値積分法で解



いて遮蔽体内および背面における中性子角度束密度を求めるプログラムである。詳細は参考文献 1) をまた計算結果は 2) および 3) を参照されたい。

### 参考文献

- 1) Kiyoshi TAKEUCHI : MENE-2, An R-Z Discrete Ordinate Neutron Transport Code, Penn.

State Univ. Report NucE 35 (1968).

- 2) 竹内 清 : 円柱形状遮蔽体に対する中性子輸送方程式の数値解法, 船研報告, 第 6 巻第 3 号 (1969).
- 3) Kiyoshi TAKEUCHI : A Numerical Method for Solving the Neutron Transport Equation in Finite Cylindrical Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 6, No. 8 (1969).

## N-6 直円筒ダクトに対する中性子ストリーミング計算プログラム

原子力船部 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

定常の積分型輸送方程式を数値積分法で解いて, 2 次元 ( $r, z$ ) 円柱座標形状遮蔽体の  $z$  軸を中心とした直円筒ダクトに対する中性子ストリーミングを計算することを目的とする。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

PALLAS-CY-2

#### 2.2 製 作 者

原子力船部 竹内 清

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年

#### 2.4 理論の概要

基礎になる方程式は PALLAS-CY-1 コードと同じであり, 異なる点は線源が円柱体積線源の代りにディスク線源として与えられる点と Discrete Ordinates 角度分点の取り方に特別な技法を採用している点である。

#### 2.5 計算の手順

PALLAS-CY-1 と同じである。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN II NEAC 2206

#### 2.7 入 力

次の入力を除いて PALLAS-CY-1 と同じでよい。すなわち PALLAS-CY-1 の入力の (15), (16), (17) の代わりに次の境界条件

- (15) BC (1, 1), BC (1, 2), ..., BC (1, 6)  
 BC (2, 1), BC (2, 2), ..., BC (2, 6)  
 .....  
 BC (9, 1), BC (9, 2), ..., BC (9, 6),

(172)

を入力とすればよい。

#### 2.8 出 力

PALLAS-CY-1 と同じである。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算誤差, 精度

解析解としては非常に簡単な Line of sight 成分と Ray analysis 成分きり与えられていない。これと計算結果との比較は最大 20% の誤差がある。この原因は計算機のコアメモリの制限から角度方向メッシュを細かくとれなかったことによる。大型計算機ではメッシュをより細かくとることができるからこの誤差を減少させることができよう。

#### 3.2 演算時間

簡単な問題すなわち 1 エネルギグループ 2 領域問題では約 15 分であった。

#### 3.3 適用範囲

ごく簡単なチェック計算のみ

### 4. プログラムの使用について

#### 4.1 オペレート

PALLAS-CY-1 と同様である。

#### 4.2 他機種への移行

45 年度中には大型計算機 IBM 360-75 に対し作り換える予定である。

### 5. あとがき

ダクト問題のような比較的複雑な形状の問題を厳密な計算法で行なうには大型計算機でないとは不可能である。しかし計算法の有用性やプログラムの有効性をチェックするためには中型の計算機でも十分に役に立つことがわかった。

## N-7 板状格子系輸送問題の固有関数展開による解法 (連立特異積分方程式の数値解)

原子力船部 吉 村 富 雄

原子力研究所 桂 木 学・鈴木 友 雄

### 1. プログラムの目的および概要

中性子に関する Boltzmann の輸送方程式を解析的に解く方法として最近注目されているものに、固有関数展開法<sup>1)</sup>がある。輸送方程式が線型であることから、一般解を、その中に超関数も含んだ固有関数の重畳で表わし、展開係数は境界条件から特異積分方程式理論によって求めるという方法である。この方法では、これまで問題であった transient solution の求め方に対する任意性がなく、解が唯一かつ物理的に納得のいく形に求まるので、従来用いられてきた近似法の精度を調べるための基準としても有用となると思われる。

本プログラムは、板状多領域格子系の一郡中性子輸送問題を固有関数展開法で解き、臨界調整を行なって中性子束角分布、中性子流および損失因子を求めるものである<sup>2),3)</sup>。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

TSMR-3, TSMR-4

#### 2.2 製作者

原子力船部 吉村富雄, 原研 鈴木友雄

#### 2.3 製作年月

昭和 40 年 11 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

$n$  層の板状媒質が周期的に並んでいる 1 次元無限体系を考える。単一速度・等方散乱を仮定すると、定常状態における各領域の中性子束角分布  $\Psi_i(x, \mu)$  は次式をみたす。

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial}{\partial x} \Psi_i(x, \mu) + \Psi_i(x, \mu) \\ = -\frac{c_i}{2} \int_{-1}^1 \Psi_i(x, \mu') d\mu' + q_i \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

この方程式の一般解は、離散固有値に属する 2 つの固有関数と連続固有値に属する 1 つの固有関数の重畳によって表わされる。

$$\begin{aligned} \Psi_i(x, \mu) = & e^{-x/\nu_0 i} \varphi_{+i}(\mu) a_{+i} \\ & + e^{x/\nu_0 i} \varphi_{-i}(\mu) a_{-i} \\ & + \int_{-1}^1 e^{-x/\nu} \varphi_{\nu i}(\mu) A_i(\nu) d\nu + \frac{q_i}{1-c_i} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

ここで

$$\begin{aligned} \varphi_{\pm i}(\mu) = & \frac{c_i}{2} \frac{\nu_0 i}{\nu_0 i \mp \mu} \quad \dots\dots(3) \\ \varphi_{\nu i}(\mu) = & -\frac{c_i}{2} \rho \frac{\nu}{\nu - \mu} + \lambda_i(\nu) \delta(\mu - \nu) \end{aligned} \quad \dots\dots(4)$$

境界条件 i) 各領域の境界における連続性:  $\Psi_i(t_i, \mu) = \Psi_{i+1}(-t_{i+1}, \mu)$ , ii) Cell 両端における周期性:  $\Psi_1(-t_1, \mu) = \Psi_n(t_n, \mu)$  をみたすべき展開係数の間に次の連立特異積分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mu) \mathbf{A}(\mu) \vec{\mathbf{A}}'(\mu) + \rho \int_{-1}^1 \frac{\nu}{2(\nu - \mu)} \\ [\mathbf{B}(\nu) \mathbf{C} \vec{\mathbf{A}}'(\nu)] d\nu \\ = -[\mathbf{B}_+ \vec{\Phi}_+(\mu) \vec{a}_+ + \mathbf{B}_- \vec{\Phi}_-(\mu) \vec{a}_- \\ + \vec{\mathbf{S}} \vec{\mathbf{Q}}] \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

ここで、 $\vec{\Phi}_{\pm}$  は 2 つの discrete な固有関数の対角行列、 $\mathbf{B}_{\pm}$  および  $\mathbf{B}(\mu)$  は夫々 discrete および continuous な固有関数に対する境界条件より決まる行列、 $\vec{a}_{\pm}$  および  $\vec{\mathbf{A}}'(\mu)$  は求めようとしている展開係数のベクトル表示である。

連立特異積分方程式(5)を次の 2 つの方法で解く。

イ) べき級数展開法 (TSMR-3)

特異積分方程式をヒルベルト問題に変換し、斉次ヒルベルト問題を Coupling Parameter のべき級数に展開した形で解く。この方法にもとづくプログラムを TSMR-3 とする。

ロ) 第 II 種 Fredholm 型積分方程式への変換

(5)式を次のように変換する。

$$\mathbf{A}(\mu) \vec{\mathbf{A}}'(\mu) + \rho \int_{-1}^1 \frac{\nu}{2(\nu - \mu)} \mathbf{C} \vec{\mathbf{A}}'(\nu) d\nu$$

$$=B^{-1}(\mu)\vec{\Phi}_1(\mu) \quad \dots\dots(6)$$

この式をヒルベルト問題におきかえる。この場合は、齊次ヒルベルト問題の解は explicit に求まるので、展開係数は第Ⅱ種 Fredholm 型積分方程式で表わされる。この数値計算を行なうプログラムが TSMS-4 である。

#### 2.5 計算の手順

参考文献 3) 参照

#### 2.6 用語および計算機

FORTRAN IV, IBM 7044

#### 2.7 入出力

参考文献 3) 参照

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算誤差, 精度

問題の性質上, 極めて高精度を必要とする計算であるが, 結果は TSMA-3, 4 どちらの場合も相対誤差 0.1% 以下で, 十分に要求をみたしている。

#### 3.2 計算所要時間

二領域系の場合, 1例につき TSMR-3 (20 回繰返

し), TSMR-4 ( $\mu: 102$  点,  $\epsilon=10^{-3}$ ) どちらも 5 分程度かかる。 $\mu$  の区分数を少なくすれば計算時間もほとんど比例して減少するが, その場合は  $\mu=\pm 1.0$  近くでの積分に誤差を生じ易いから注意を要する。

#### 4. プログラムの使用について

本プログラムは, IBM 7044 (原子力研究所) 用 FÖRTRAN-IV を用いている。

#### 5. あとがき

連立特異積分方程式の 2 つの解き方は, 内容的にかなり異なる要素を含んでいるが, 数値計算の結果は, 両者非常に近い値を示した。さらに対称性の検討等からも, 本プログラムは十分に精度の良いものであるといえる。

#### 参考文献

- 1) K. M. Case and P. F. Zweifel, Linear Transport Theory, A-W Publ. Comp., 1967.
- 2) 第 6 回船研発表会講演概要, 1966, p. 51.
- 3) 吉村富雄他, JAERI memo 第 2133 号, 輸送理論による板状多領域系の取扱, 原研, 1965.

## N-8 NaI シンチレータの応答のシミュレーション

原子力船部 中 田 正 也

### 1. プログラムの目的および概要

ガンマ線検出体として使用する NaI シンチレータの応答関数行列を, シンチレータの寸法やガンマ線のエネルギー範囲各種にわたって多様に求めたいのが, 実験的に求めるには多大の費用時間人手を要するので電子計算機によるシミュレーションで応答結果を求めるプログラムである。

シンチレータ内部で生起する次の各種物理現象それぞれに単純モンテカルロ法をあて総合したものである。

光電効果・コンプトン散乱・電子対生成・制動放射・可干渉散乱, これに必然的に発生する電子走行による発光陽電子消滅による新ガンマ線の発生を加えたものが取り扱った物理現象である。

ガンマ線投射条件の標準的なものとして, 細く絞った光線をシンチレータ端面に垂直に投射した場合と,

平行に端面全体に均一に分布して垂直に投射した場合とを用意したが, 若干のプログラム変更で斜めに, あるいは端面や側面の指定した範囲に投射した場合にも応用できるので実際に投射条件の異なる場合の応答の比較にも使用した。

このプログラムによる応答関数行列はすでに各種条件の行列が求められ実用に供され, また応用として投射条件の相異による応答の比較もなされたので, 別に船研報告に結果を発表する。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラム名称

MC 0211

#### 2.2 製作者

原子力船部 中田正也

#### 2.3 製作年月

昭和 41 年

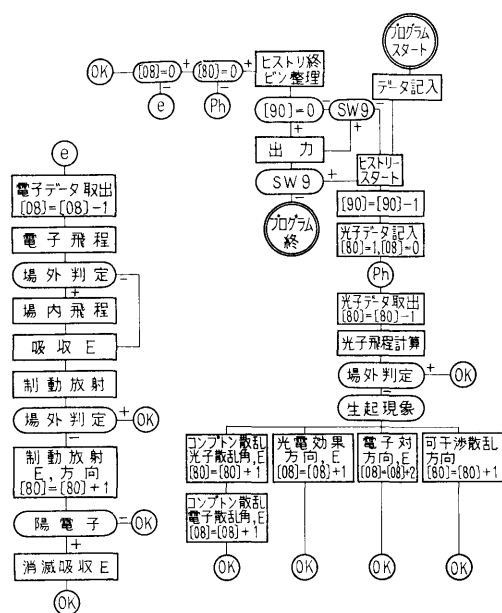


図-24 フローチャート

## 2.4 計算の基礎となる理論の概要

モンテカルロ法によるシミュレーションである。各物理現象をあてはめるに際して、近似方法その他の技術は細部まで説明しきれないので別に船研報告に概略を報告する。

## 2.5 計算の手順

図-24 はマクロチャートである。

## 2.6 用語および計算機

機械語 NEAC 2206

## 2.7 入力

## 2.7.1 センススイッチ

- SW 2 ON:  $\Delta E = E_0/n$  自動的挿入  
 SW 3 ON: 電子飛程を常に 0 とし計算時間を短縮  
 SW 5 ON:  $E_0$  の単一エネルギー投射  
 OFF:  $E_0 - R * \Delta E$  と乱数分布  
 SW 6 ON: 端面全面分布投射  
 OFF: 中心軸上のみ投射  
 SW 8 ON: 投射  $E$  変化して連続 9 回以内  
 OFF: 毎回指定 (MC 0111)

## 2.7.2 データテープ (スタート前に読込ませる)

- H : 結晶高さ, cm (FL)  
 $r_2$  : 結晶半径  $r$  の 2 乗,  $\text{cm}^2$  (FL)  
 $r$  : 結晶半径, cm (FL)  
 $\Delta E$  : 1 ビン当りのエネルギー幅,  $\text{mc}^2$  (FL)

$E_e$  : 打ち切りエネルギー,  $\text{mc}^2$  (FL)

$n$  : ビン数 (区画数) (FX)

## 2.7.3 キーボード打ち込み

$E$  第 1 回分の投射光子エネルギー  $M_e V$  (6)

$N$  計算を要求するヒストリ各回共通 (4)

$R$  第 1 回スタートの際の疑似乱数 (8)

$a$  繰返すステップ段数, 9 以下 (1)

$e$  ステップ毎の増加または減少すべきエネルギーステップ差  $M_e V$  (6)

カッコ内は桁数で  $E$  と  $e$  は浮動小数点法, 他は固定小数点法。SWITCH 8 OFF の際は  $a, e$  は不要。

## 2.8 出力

タイプライタで、投射エネルギー、計算したヒストリ数、bin 毎に分類された光子数をステップ毎に出力し最後に次回に使用すべき疑似乱数を打出す。

## 3. プログラムの検定

## 3.1 計算精度および誤差

3.1.1 統計誤差を考慮した全体の精度は結果を各 bin 100~1000 個の光子を検出する—これは 1 ステップ 40 bin について  $10^4$  ヒストリ程度が実用計算の程度とみたと予想して部分プログラムを用意した。

3.1.2 部分プログラムの精度。sin, cos, log, exp 等のサブプログラムも特に高速を目標に作った。その精度は 1/5000 である。重要なコンプトン散乱計算は角度で  $1^\circ$  以内。あまり重要性をもたぬ電子飛程、制動放射発生等は最大誤差 30% 位から 100% 位であろう。

## 3.2 計算所要時間

(NEAC 2206) 10 MeV のステップで 10 分/1000 ヒストリ, 1 MeV でその半分程

## 3.3 適用範囲

投射光子エネルギー最高 10 MeV

ビンの数 99 ビン以内 (1 ステップのみの時 100 ビン以内)

シンチレータ寸法は実用範囲内で無制限の大きさ

## 4. プログラムの使用法と応用

## 4.1 プログラムのオペレート

SENSE SW 8 OFF で使用するならば 4K メモリの NEAC 2206 基礎装置でよい。ON で連続の時は 5K 必要である。

SENSE SW をセットして、データテープを読込ませた後 500 番地からスタートする、段落毎に PAUSE が入るが構わず再スタートせしめればよい。モンテカルロ計算中はタイプライタを休止せしめてよい。終了

すれば計算不能（オーバフロー）のブザーが鳴るから再スタートすれば出力する。

途中で打ち切りたい時は S. SW 9 を ON にして出力する。この際計算したヒストリ数の出力数値は実計算より 1 個大きいから注意を要する。

#### 4.2 プログラムの応用

機械語で作られているので、途中でジャンプ命令を重ねることで容易に投射条件を変えられる。この性質を利用して、斜めに投射したり、極く部分的に絞って投射したり種々の実験が可能であった。

#### 4.3 他機種への移行

4.3.1 FORTRAN での操作、この機械語プログラムを一連の数表とみなして磁気テープに格納したものを取出して使用する FOTRAN 語の MC 0311 が

作られている。

4.3.2 物理現象の大事な部分プログラムは FORTRAN II のサブプログラムに書換えられた。これを組合わせて他の  $\gamma$  線に関するモンテカルロ計算プログラムに利用されている。

#### 5. あとがき

NEAC 2206 は乗除算が遅いので極力乗除算を排した。この為に関数類は出来るだけ数表内挿法にたよった。この特殊な注文と、4K の基礎装置のメモリでこの大きなプログラムを納めるため機械語で書かれたが FORTRAN で書くとおよそ命令語（2500 語位）が 3 倍位、計算時間で 2 倍位になるのではないかと思われる。

## N-9 原子力船の運転時および事故時における直接線量率分布の計算

原子力船部 吉村 富雄・菅 和子・片岡 巖

### 1. プログラムの目的および概要

原子力船においては、高度の安全性と遮蔽体の軽量小型化のために、特に精度の高い放射線安全評価および遮蔽設計法の確立が要求される。その場合の 1 つの問題点は船体構造物・タンク・各種プラント機器等の遮蔽効果の計算法である。

放射線源や構造体を簡単化し、計算点の数が少なければ RAS 法等による手計算も可能であるが、エネルギースペクトルや角度分布をもった線源に対して、複雑な船体構造物等を扱おうとすると電子計算機による迅速な処理が必要になる。本計算コード、MARINE-1 は、原子力船の船体（または他の構造体）の構造が与えられたとき、運転時および事故時の実際に近い線源分布に対して、船体内外の各点に到達する直接線量率を計算するコードで、NEAC-2206 用にプログラミングされている<sup>1),2)</sup>。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

MARINE-1

#### 2.2 製作者

原子力船部 吉村富雄、菅 和子、片岡 巖

#### 2.3 製作年月

昭和 39 年 3 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

遮蔽体としては、通常の 2 次遮蔽体および格納容器のほかに、船体構造・タンク・各種プラント機器を考える。これらを任意の点を原点とした XYZ 座標で次のように表わす。

イ．格納容器：円筒形 1 個、ただし円筒の中心軸は 3 主軸の何れかに平行とする。円筒面上を 99 個までの領域に分割し、その各々を任意厚さの 3 層までの物質層として指定できる。

ロ．船体構造：各辺が 3 主軸の何れかに平行な矩形平板で表わし、200 個までとれる。構成物質は 4 層までとする。

ハ．タンク類：船体構造と同じ条件の矩形平板 4 枚で囲まれた部分として扱い、内容物質を指定する。

ニ．プラント機器：3 主軸の何れかに平行な軸をもつ 2 個の同軸円筒として表わし、材質は円筒の中間および内部で任意に指定できる。

ホ．2 次遮蔽体：上述遮蔽要素の組合せとみなす。

放射線源は、単一エネルギーの速中性子および  $\gamma$  線

の点線源または面線源とする。面線源としての角度分布は、任意方向を主軸として、一様分布および3乗までの余弦分布の和として表わす。この場合各線源の放出面が両面であるか片面のみであるかも指定できる。線源番号を  $i$  とすると各線源は次式のように表わされる。

$$\text{点線源: } S_i = S_i^i$$

$$\text{面線源: } S_i = S_0^i + \sum_{k=1}^3 S_k^i \cos^k \theta_i$$

ここで  $\theta_i$  は、各線源について任意に指定した主軸と、線源と計算点を結ぶ線とのなす角である。

速中性子の減衰は除去理論によって計算し、 $\gamma$  線の減衰は非衝突線と再生係数によって計算する。ある点での速中性子束または  $\gamma$  線エネルギー束は次式のようにになる。

$$\phi = \sum_i S_i K_i(t_i)$$

ここで  $K_i(t_i)$  は減衰核を表わし、速中性子および  $\gamma$  線に対して夫々次のように計算する。

$$\text{速中性子: } K_i(t_i) = \exp(-\sum_j \sum_{remj} \mu_j t_{ij}) / 4\pi t_i^2$$

$$\gamma \text{ 線: } K_i(t_i) = B_i(t_i) \exp(-\sum_j \mu_j t_{ij}) / 4\pi t_i^2$$

ここで、 $\sum_{remj}$  = 第  $j$  層の速中性子除去断面積

$\mu_j$  = 第  $j$  層の  $\gamma$  線吸収係数

$t_i$  = 第  $i$  線源から計算点至る距離

$B_i(t_i) = t_i$  に沿う物質配置・厚さ・入射角  
に關係する  $\gamma$  線エネルギー再生係数

を表わす。中間の計算は全てエネルギー束で行ない、最後に線量率に換算する。

散乱  $\gamma$  線の効果を表わす再生係数  $B_i(t_i)$  には多くの要素が含まれている。本コードでは、モーメント法によって求めた Peebles の値を物質の種類・透過距離・有限厚さである効果および入射角の関数として整理して用いる。多重層効果は乗積法で考慮する。

事故後の積分線量は次のようにして求める。事故後の  $\gamma$  線源の強さに関する Perkins & King の値を、エネルギー区分および時間区分を適当に選んで近似式  $S(t) = A(t+B)^\alpha$  で表わす。このような変化を仮定して時間積分を行ない、積分線量を計算する。

## 2.5 計算の手順

RUN-1: 遮蔽体および線源に関するデーターを磁気ドラムに計録する。計算点をよみこみ各線源ととの遮蔽体を計算して、その遮蔽体番号・交点の位置・交角を印字し、同時に紙テープに穿孔する。

RUN-2: RUN-1 の出力テープをよみこみ、その

指定にしたがって各物質の  $\gamma$  線吸収係数および再生係数を磁気ドラムからよみだす。各線源から計算点至る放射線の線量率を計算し、それらの総和をとる。

## 2.6 用語および計算機

機械語 NEAC 2206

## 2.7 入力

### 2.7.1 遮蔽体に関する入力

イ. 格納容器: 番号, 円筒軸の方向, 位置, 大きさ, 領域数, 各領域毎の位置・大きさ・材質および厚さ。

ロ. 船体構造: 番号, 平板の方向, 位置, 大きさ, 材質および厚さ。

ハ. タンク: 番号, 位置, 大きさおよび内物質。

ニ. プラント機器: 番号, 軸方向, 位置, 大きさおよび材質。

### 2.7.2 線源に関する入力

種類, 番号, 位置, 射出方向主軸, 片面・両面の別および放射線の強さ。

### 2.7.3 計算点に関する入力

計算点番号および位置。

## 2.7 出力

計算点番号

線源番号,  $\gamma$  線エネルギー束, 線量率

速中性子線量率

$\gamma$  線全線量率および速中性子全線量率

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算誤差, 精度

計算例の主なるものは、原船協試設計船の安全評価<sup>3)</sup>、原船団第1船の予備設計<sup>4)</sup>、航海訓練所進徳丸について<sup>5)</sup>等であるが、これらのうち実験との比較がなされているのは第3例の進徳丸の場合だけである。比較の結果、計算値は多くの場所で実験値の1~5倍の値を示し、本コードは設計のための計算として十分安全側の値を与えることがわかった。

### 3.2 計算所用時間

計算時間は RUN-1 が毎秒 100 点, RUN-2 が毎秒 1 点程度であるが、このほかに入出力のための時間がかかる。

## 4. プログラムの使用について

本コードは、拡張前の NEAC 2206 用にプログラミングされたものであるから、オペレーションには特に注意を要する。

## 5. あとがき

このようなコードの場合、計算精度は試算と経験およびその段階で得られるデーターの質と量に大きく

依存する。本コードは MARINE シリーズの第1次試案として、多くの成果と貴重な経験をもたらした。それにもとづいて改良したのが MARINE-2 である。

### 参考文献

- 1) 船研第1回研究発表会講演概要, 1963, p. 49.
- 2) 原子力学会 38 年年会要旨集, 1963, p. 192.
- 3) 運輸省造船原船安全部会, 原船安全基準(案), 1964, p. 225.
- 4) Engng. Compendium on Radiation Shielding, Vol. II, C. 10, Springer-Verlag, Berlin, New York (in the press).
- 5) AERE-R 5773, Vol. 4, 1968, p. 989.

## N-10 有限遮蔽板によるガンマ線再生係数の計算

原子力船部 山越 寿夫

### 1. プログラムの目的および概要

有限遮蔽板によるガンマ線の散乱場を再生係数の表現でまとめ、その量の板の有限さへの依存性、入射線のエネルギー、入射方向、空間依存性等を調べるためのコードである。計算される量は2回散乱までの散乱ガンマ線エネルギースペクトル、エネルギーフラックスの積分値としての再生係数および遮蔽板の立体角である。有限板による散乱線の場の計算は境界値問題としてのボルツマン輸送方程式を解く事が、境界条件の複雑さのゆえに、困難であるので、ある物理的モデルに基づいて計算をする事にしてある。モデルの妥当性は対象とした問題の範囲では確かめられている。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号、名称

C B F

#### 2.2 製作者

原子力船部 山越寿夫

#### 2.3 製作年月

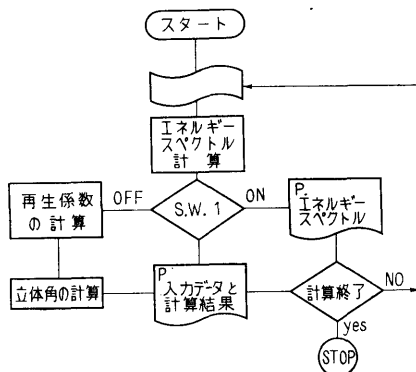


図-25 フローチャート

昭和 44 年 8 月

### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

入射線各々と観測点を含む特性平面という概念を導入し、本来は最高4重積分までの多重積分で表わされる量を特性平面近傍で展開しその結果として4個の因子による単純な表現に帰着せしめた。仮定として遮蔽板の厚さが遮蔽板と観測点との間の距離に比較して十分小さいとしている。また散乱線の場は2回までの遮蔽体内コンプトン散乱を考慮している。

### 2.5 計算の手順

図-25 に計算手順のフローチャートを示す。

基礎物質定数はガンマ線データファイルシステムの磁気テープより受け渡され紙テープから読まれたガンマ線エネルギーや計算中におけるエネルギーに対応した物質定数を決定すべく、ガウスの内挿法により1000エネルギーメッシュにおける物質定数のテーブルを計算機の中に作製し格納する。次に読込まれた観測点の位置に対するエネルギースペクトルを計算しプリントアウトする(ジャンプスイッチ1をオンの場合)。ジャンプスイッチが何らオンになっていない場合は観測点における散乱された全エネルギーフラックスを求め、もし再生係数が定義できる場合は再生係数も次いで求める。さらに観測点に対して遮蔽板が張る立体角を計算する。最後に得られたこれらの量をプリントアウトする。

### 2.6 用語

FORTRAN II 機種 NEAC 2206

### 2.7 入力

磁気テープからの入力は省略する。

以下の量は E12.4 で読み

*XNSH*……遮蔽体X方向の負側境界  
*XPSH*……遮蔽体X方向の正側境界  
*YNSH* … “ Y ” 負 “  
*YPSH*…… “ Y ” 正 “  
*ZNSH*…… “ Z ” 負 “  
*ZPSH*…… “ Z ” 正 “

*GAMMA*…遮蔽体への入射エネルギー

*THETA*…入射線の入射角

*XDTP*……観測点のX座標

*YDTP*…… “ Y ”

*ZDTP*…… “ Z ”

## 2.8 出力

以下の量は E12.4 である。

*XDTP*……観測点のX座標

*YDTP*…… “ Y ”

*ZDTP*…… “ Z ”

*EFLXSP*…エネルギースペクトル

*EFL*……エネルギーフラックス

*BF* ……ビルドアップ係数

$\phi$ *MEGA*…立体角

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度

まず計算精度として使用した物理的モデル全体の妥当性が問題となるがこれは銃身型ナロービームについての計算値と実験値，モンテカルロ計算との比較から妥当な事が判る。計算における近似の各段階での精度は遮蔽体の厚みと遮蔽体観測点間の距離の比の2乗のオーダーの程度である事がチェックにより判明する。

### 3.2 計算時間

観測点1点についての計算時間は約2分である。

## 4. プログラムの使用について

### 4.1 オペレート

ジャンプスイッチ1使用

### 4.2 プログラムの応用

サブルーチンとして使用されている内挿法はガウスの内挿法をプログラムしたものでありカーバチャーとして高次の曲率も入力データで考慮する事ができ、またこまかい表を一担作成してしまうので内挿のための時間も短い。これは今の計算によらず他の計算の際にも利用できる有用なサブルーチンである。また積分のサブルーチンは7点法，10点法，20点法等のガウスの分点法に対する積分のサブルーチンであり，他の計算に利用できる。

### 4.3 他機種への移行

必要ならば考慮する。

## 5. あとがき

この計算プログラムによる計算は有限遮蔽板による散乱ガンマ線の再生係数の性質を研究するためには有用なものである。これらの性質を知る事はさらにより複雑な遮蔽体によるガンマ線の散乱場の解析の手がかりを与えるものと期待される。

## 参考文献

ORNL-TM-2520

On Examination of Several Calculational Models for Use in Computing Gamma-Ray Penetration of Structures.

## N-11 ガンマ線のデータファイルシステム

原子力船部 山 越 寿 夫

### 1. プログラムの目的および概要

遮蔽計算に用いるガンマ線の諸種の物質定数を磁気テープに格納，更新し，他の機会における計算の基礎データを供する事を目的とする。このコードのはたらきは5つある。すなわち，欲するデータに関する検索リストアップ，データの磁気テープへの追加格納，新データによる一部訂正，必要に応じたデータの製表，モンテカルロ計算への入力データの作成並びに他の磁

気テープへの格納等である。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号，名称

GOF system

#### 2.2 製作者

原子力船部 山越寿夫

#### 2.3 製作年月

昭和43年5月



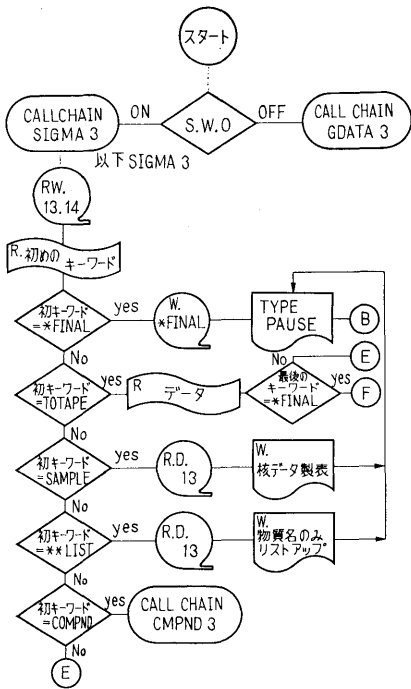


図-26 フローチャート

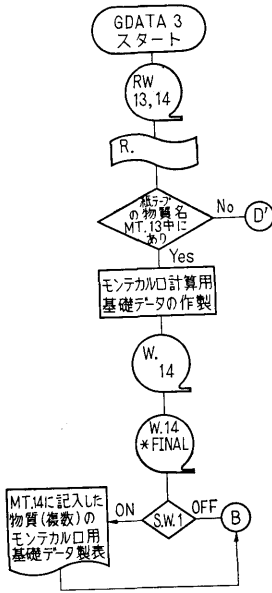


図-27 フローチャート

2.4 計算の基礎となった理論の概要

2.5 計算の手順

図-26~図-29 にフローチャートとして示すごとくこのシステムは機能上3つのサブシステムより成り、

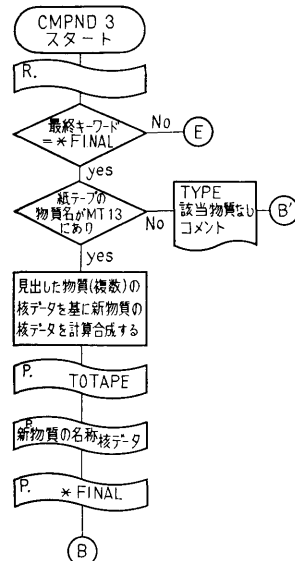


図-28 フローチャート

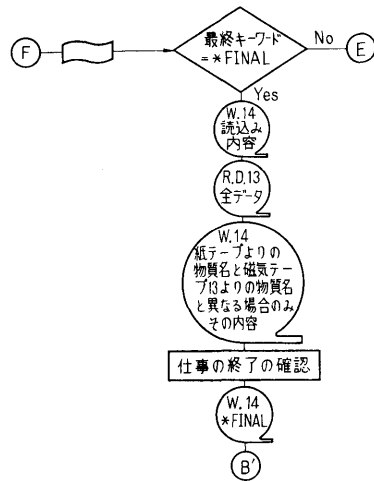
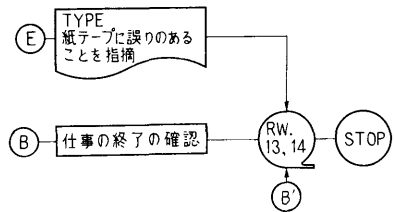


図-29 フローチャート

互いはコールチェーンで結ばれている。それぞれは固有の使命を持ち、ジャンプスイッチと外からの紙テープにより指示された目的とにより使われられる。まずサブシステム SIGMA 3 は、欲しい物質のデータに

関する検索リストアップ、新データによる旧データの一部改訂、新物質のデータの追加、欲するデータの製表等がその役割である。使用される磁気テープはチャンネルナンバー13と14にある。13に旧データ、14には新データが格納される。上記作業をさせるためにはジャンプスイッチ0がオンとなっている必要がある。次に CMPND 3 は上記の状態にて紙テープ上に新物質（これは化合物または混合物である）のデータが欲しい旨パンチがしてあればコールチェーンで呼び出されて来る。13のデータに基づく合成計算が紙テープの指示にしたがって行なわれ、結果は紙テープにパンチアウトされる。もしジャンプスイッチ0がオフになっており代わりにジャンプスイッチ1がオンになっている場合は、モンテカルロ計算用基礎データを計算するサブシステム GDATA 3 が呼び出される。紙テープによる指示にしたがって13の磁気テープを用いた計算が実行され、結果は14に格納されるとともに表としてプリントアウトもされる。もしここでジャンプスイッチ1もオフになっていたものとすれば（即ち、スイッチが全てオフの場合）プリントアウトは省略される。

## 2.6 用語

F $\phi$ RTRAN II 機種 NEAC 2206

## 2.7 入力

### (1) 磁気テープ 13 が全く新しい場合

\*FINAL……データの尾部を意味するキーワード (A6)

### (2) 旧データの改訂、新データの追加

T $\phi$ TAPE……(2)の作業を意味するキーワード (A6)

J $\phi$ BN $\phi$ M……以下対象とする物質数を意味する。(I3)

以下の、NMAT から \*\*\*END までのデータは J $\phi$ BN $\phi$ M 回各物質毎にくり返される。そして全ての入力データの終末を意味するキーワード \*FINAL が最後に来る。

NMAT……物質名 (A6)

単原子分子を成す元素は \*\*\*\*FE の如く、また化合物や二元子分子等の場合は HYDR $\phi$ G 等の如く表現するものとする。

NMAT 以下7個の量は (A9, 2I2, 4E13.3) で読み込まれる。

N $\phi$ ENT……データの与えられているエネルギー点の数

NABN $\phi$ M……ガンマデータのエッジの数

DENS……物質密度

C $\phi$ NV……吸収係数の単位を [gr/cm<sup>3</sup>]

から [cm<sup>-1</sup>] に変換するための係数

AWEIT ……原子量

AM $\phi$ LWE…分子量

二原子分子である H<sub>2</sub> 等は原子量と分子量のそれぞれ対応する値を入れる。

以下のデータでは、I は 1~N $\phi$ ENT まで変化し且つ (7E11.3) として読込まれる。

WC $\phi$ (I) ……コヒーレント散乱を含む散乱に対応した吸収係数

W $\phi$ C(I) ……インコヒーレント散乱に対応したもの

PH $\phi$ (I) ……光電効果による吸収係数

PAI(I) ……電子対創生の成分

T $\phi$ TC(I) ……コヒーレント散乱が含まれた全吸収係数

T $\phi$ T(I) ……コヒーレント散乱を含みぬ全吸収係数

\*\*\*END……該物質の入力データの終末を意味するキーワード (A6)

\*FINAL……(A6)

### (3) データの製表

SAMPLE…(3)の作業を意味するキーワード(A6)

MAT, KEND…製表すべき物質名、キーワードで読み込みは (2A6) である。

例えば、鉄、水素、酸素の全データを表にプリントアウトしたい場合は

\*\*\*\*FE\*\*\*\*END

HYDR $\phi$ G\*\*\*\*END

$\phi$ XYGEN\*\*\*\*END

\*FINAL

と紙テープにパンチする。

### (4) 磁気テープにある物質名のリストアップをする。

\*\*LIST……(4)の作業を意味する。

### (5) 新化合物、混合物の計算

C $\phi$ MPND……(5)の作業を意味するキーワード (A6)

J $\phi$ BN $\phi$ M……計算すべき物質数 (I3)

以下の MATERI より \*\*\*END までのデータは J $\phi$ BN $\phi$ M 回、各物質毎にくり返され最後に \*FINAL で結ぶ。

以下の四個の量は (A6, I2, 2F10.5) で読込まれる。

MATERI ……計算すべき化合物 (混合) 物名

*NSφSEI*.....該物質の組成数

*DENSITY* ..... " 密度

*CφNVFC* .....吸収係数の次元変換係数

以下の量は (A6, F10.5) で *NSφSEI* 回くり返される。

*NBSHTS* .....該物質構成元素 (分子) 名

*RATIφ* ..... " の比,

例えば, 水を酸素と水素のデータから合成計算する場合は以下の如く紙テープにパンチする。

*CφMPND*

*WATER\*2, 1.0, .03344*

*HYDRφG 2.0,*

*φXYGEN 1.0,*

*\*\*\*END*

*\*FINAL*

#### (6) モンテカルロ計算用基礎データ計算

*NMT*...モンテカルロ計算に用いる物質数 (I 2)

以下の *MATERI*, *NEND* は (2A6) で読込まれ, *NMT* 個がそのようにテープにパンチされている。

*MATERI*, *NEND* モンテカルロ計算に用いられる物質名並びにキーワード *\*\*\*END*

#### 2.8 出力

##### (1) 磁気テープ 13 が全く新しい場合

*PAUSE*...(1)の作業の終了を意味するキーワード...がタイプアウトされ, 磁気テープ 13 の頭に *\*FINAL* の文字が書きこまれている。

##### (2) 旧データの改訂, 新データの追加

*PAUSE*...(2)の作業の終了を意味するキーワード...のタイプアウトとともに磁気テープ 14 には(2)の作業の結果としての新しいデータが格納されている。

##### (3) データの製表

(2)の読み込み (入力) データと同一のものがリクエストされた物質の順に表としてプリントアウトされる。

*PAUSE* .....タイプアウト

##### (4) 磁気テープにある物質のリストアップをする。

*PAUSE* .....タイプアウト

##### (5) 新化合物, 混合物の計算

化合物, 混合物についての(3)と同等な表をパンチアウトする。

*PAUSE* .....タイプアウト

以上(1)~(5)までの出力のうちで, 入力の形式にあやまりがある場合, 例えば, あるべき所に *\*\*\*END* とか *\*FINAL* とかのコメントが紙テープにパンチされていない場合は, 出力として *ILLEGAL DATA* と云うコメントがタイプアウトされる。又特に(5)において

磁気テープに無い物質をリクエストした場合の出力は *MATERIAL NφT FφUND* が物質名とともに出る。

#### (6) モンテカルロ用基ンデータ計算

ジャンプスイッチ 1 がオンの場合は

*MATERI* (A6)

*EGY* (I) ...エネルギー点の対数値

*OC* (I) .....全吸収係数に対するコヒーレントなしの吸収係数の比

*Cφ* (I) .....全吸収係数に対するコヒーレントを含む散乱の吸収係数の比

*OH* (I) .....全吸収係数に対するコヒーレント散乱と光電効果を含む吸収係数の比

*TT* (I) .....全吸収係数

が I 行 E11.3 でプリントアウトされるとともに磁気テープに格納される。これが各物質毎に物質名とともにくり返される。

*PAUSE* .....タイプアウト

もし(6)において入力データにあやまりがあればコメントとして *ILLEGAL DATA* がタイプアウトされる。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算誤差, 精度

まず考えられる事は, 化合物又は混合物に対する計算誤差であろう。例を水の計算で示せば有効数字10桁目まで(最高の有効数字において)正しい結果を与える。またデータの入出力の比較において誤りはみとめられない。

#### 3.2 演算時間

### 4. プログラムの使用について

#### 4.1 オペレート

プログラムの実行において *MT-13*, *14* および *PTR*, *HTP*, ジャンプスイッチ 0, 1 を使用する。

#### 4.2 プログラムの応用

このシステムは何らガンマ線のデータ処理格納に限定される必要はなく, 分野の異なる場合にも役立つのである。又遮蔽の計算に話を限定しても入れものの中味の項目を少し変換すればガンマ線以外の放射線の基礎データの格納処理にも有効である。

#### 4.3 他機種への移行

必要とあれば他機種への移行を考えても良い。

### 5. あとがき

何によらず基礎データの格納, 処理の必要性が今後も増大するであろうがその意味でもシステムの一例を成すものであり広く参考意見が開かれれば幸いである。

#### 参考文献

OGRE-G 用データシステム.

## N-12 NaI シンチレータの応答関数の計算プログラム

原子力船部 山 越 寿 夫

### 1. プログラムの目的および概要

NaI シンチレータにガンマ線が入射した結果シンチレータ中の電子に与えられるガンマ線エネルギーについてのエネルギースペクトルを知る事により、逆に実験の入射線のエネルギースペクトルの様子を知る事ができる。

コードに組まれた計算の物理的モデルは以下のようなものである。シンチレータは円筒状で有限の高さを持っている。入射するガンマ線は単色な細いビーム状で円筒の中心軸にそって垂直に入射する。入射したガンマ線はシンチレータ内部でたかだか2回のコンプトン散乱を受け、その際電子にエネルギーが付与される。計算の結果は Berger 等によるビームをしぼった場合のモンテカルロ計算と比較して良い一致を示している。従って2回コンプトン散乱のモデルは可成り良く現実の現象を模擬している。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号, 名称

NAI RESP

#### 2.2 製作者

原子力船部 山越寿夫

#### 2.3 製作年月

昭和 41 年 8 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

シンチレータの中心軸上に入射したガンマ線束は指数関数  $e^{-\mu x}$  で減衰して行くため1回目の散乱が生ずる源も軸上でこれに比例した分布をしていると考える。他方中心軸上の各点では、中心軸を柄とする傘状に1回散乱をしたガンマ線は広がって行きその軸からの広き角(即ち散乱角)  $\theta'$  は電子に与えられるエネルギー  $\epsilon$  と以下の如く結びつく。

$$\epsilon = \frac{E_0^2(1 - \cos \theta')}{1 + E_0(1 - \cos \theta')}, \quad 0 < \epsilon \leq \frac{2E_0^2}{1 + 2E_0}$$

今述べた傘の母線上の各点で同様な傘を考える事ができ、それが2回目の散乱の結果という事になる。あるガンマ線に着目した場合、それがシンチレータの内部で2回の散乱を行なったとするとガンマ線が電子に

与えたエネルギー  $\epsilon$  は

$$\epsilon = \frac{E_0^2(2 - \cos \theta' - \cos \theta'')}{1 + E_0(2 - \cos \theta' - \cos \theta'')}, \quad 0 < \epsilon \leq \frac{4E_0^2}{H4E_0}$$

で与えられる。

$\epsilon$  が  $2E_0^2/(1+2E_0)$  以下であれば当然同じエネルギー量が1回散乱だけで与えられる場合と2回散乱を通じて与えられる場合とがある。他方、シンチレータの大きさは有限であるから、1回目や2回目の散乱の後にシンチレータの外へぬけ出してしまうエネルギーや又 NAI の中で光電効果により吸収されてしまうものもある。従って上記の1回並びに2回散乱により電子に与えられるエネルギーを計算する為には、散乱の生じた位置、散乱後のガンマ線の飛跡の長さに関連した方向等のチェオメトリー因子を重みとする空間積分を行なう必要がある。2回目の散乱の後の散乱線が、つくる円錐に付いてその母線の散乱方位角に関する分布が長短2つの母線の長さの間を直線的に変化すると仮定する事により、此の空間積分は解析的に実行が可能となる。この仮定は散乱線のシンチレータへの逃れる確率を大き目に評価する事になる。此の積分自身は比較的簡単なものであるが積分の領域がシンチレータのチェオメトリーと1回目の散乱角、散乱位置、2回目の散乱の方向等に依存して複雑多岐にわかれており非常に込み入っている為、結果の詳細は割愛する事にするが理論の概要は尽しているはずである。なお此等の積分の結果として、シンチレータの外へガンマ線として逃れ出たエネルギーと1回および2回散乱により電子に与えられた全エネルギー並びにエネルギースペクトルが計算される。入射ガンマ線によりもたらされた全エネルギーと此等のエネルギーとの差は光電効果によりシンチレータに吸収され(電子に与えられ)たエネルギーである。

#### 2.5 計算の手順

図-30 にフローチャートとして示す如くである。

#### 2.6 用語

F $\phi$ RTRAN II 機種 NEAC 2206

#### 2.7 入力

I .....核データのエネルギー点数 (I 3)

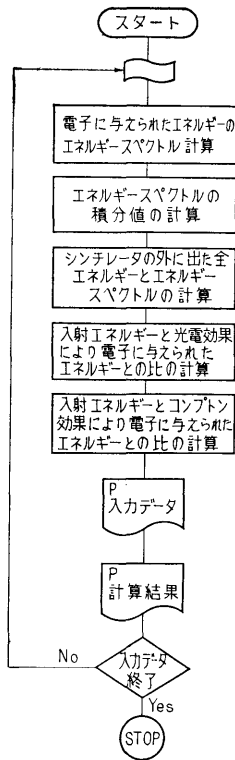


図-30 フローチャート

- $EE(I)$  ……核データのエネルギー (E12.4)  
 $FMYU(I)$  …… $EE(I)$  に対応する全吸収係数 (E12.4)  
 $GAMMA$  ……入射エネルギー (E12.4)  
 $EL$  ……シンチレータの長さ (E12.4)  
 $RR$  ……シンチレータの半径 (E12.4)  
 $ENEMSH$  ……エネルギースペクトル用のエネルギーピンの幅 (E12.4)  
 $J$  ……エネルギースペクトルメッシュ数 (I3)

## 2.8 出力

- $E\phi UT$  ……シンチレータ外に出た全エネルギー (E12.4)  
 $E(J)$  ……エネルギー  
 $ENE(J)$  ……電子に与えられたエネルギーのうちでエネルギーが  $E(J) \sim E(J+1)$

の間の値 (E12.4)

$ENES\phi T$  ……全電子への付与エネルギー (E12.4)

$EPH\phi T$  ……光電効果により電子に与えられたエネルギー

$RATI\phi 1$  ……入射エネルギーと  $EPH\phi T$  との比 (E12.4)

$RATI\phi 2$  ……入射エネルギーとコンプトン散乱により電子に与えられた  $ENET\phi T$  との比

$RATI\phi 3$  …… $RATI\phi 2 + RATI\phi 1$

$GAMMA$  ……既出 (E12.4)

$EL$  ……既出 (E12.4)

$RR$  ……既出 (E12.4)

## 3. プログラムの検定

計算精度は用いた物理的モデルの妥当性と計算自身に伴う精度に分けられるが、計算自身の精度は有効数字8桁まで正しい事が確かめられている。コンプトン散乱による電子の得たエネルギーのエネルギースペクトルに関するモンテカルロ計算との比較では有効数字3~4桁まで正しい事が示され、モデルの妥当性は確かめられる。

## 3.1 計算時間

エネルギーメッシュ40点で1ケースが10秒以内である。

## 3.2 適用範囲, 制限事項

用いた物理的モデルは2回散乱迄を考慮している事に注意。又ブロードビームや斜め入射のビームに対しては別に計算をしなければならない。

## 4. プログラムの使用について

## 4.1 オペレート

## 4.2 プログラムの応用

## 4.3 他機種への応用

## 5. あとがき

モンテカルロ計算のチェックの意味で又、モンテカルロ法よりも迅速な計算によりおおよその予想と見通しを与える為に、シンチレータ中心軸上に入射する細い単色ビームの応答関数の計算コードを作成した。

## N-13 区画構造を持つ遮蔽体からの散乱および透過したガンマ線を計算 (モンテカルロ) するプログラム

原子力船部 山 越 寿 夫

### 1. プログラムの目的および概要

船体等に見られる区画構造を持つ遮蔽体により、外部からの、又は内部の湧源からの、ガンマ線が散乱された場合の放射線線量率等遮蔽研究の上で必要な積分量の空間分布を確率的手法を用いたモンテカルロ法で求める事が目的である。遮蔽体の構成要素、例えば船体のバルクヘッドは、有限な大きさの板として紙テープによる入力で指定される。遮蔽体全体はそれら有限板の空間的組合せとして算機に記憶される。ガンマ線のデテクターの位置並びに大きさは紙テープから入力データとして指定される。その際、デテクターの分布としては、それらは何枚かの仮想的な薄い板上に網目状に分布する様に配慮されるべきである。これはプログラミング上の複雑さが計算機の容量の無駄使いを惹き起す事を避ける為と計算の効率を高めると云う主旨からその様にプログラムが行なわれている為である。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号, 名称

MφNTE-1

#### 2.2 製作者

原子力船部 山越寿夫

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 5 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

下記の文献に手法と原理の解説がある。

A Practical manual on the Monte Carlo method for Random Walk Problems by E. D. Cashwell and C. J. Everett 1959 Pergamon Press.

モンテカルロ法はある積分量を統計確率的手法で計算する方法である。例えば重み関数  $f(x)$  でウェイトをかけた関数  $g(x)$  を  $[a, b]$  区間で積分した値を  $J$  とし、 $J$  の値をモンテカルロ法で求める事で例を示そう。

$$J = \int_a^b f(x)g(x)dx$$

重み関数  $f(x)$  を規格化された確率密度関数とすると以下の表現となる。

$$\int_a^b f(x)dx = 1$$

$f(x)$  からランダム変数  $x$  のある値をサンプリングして決定したとすると (即ち乱数  $R$  に対して

$$R = \int_a^x f(x')dx' = F(x)$$

とおき  $x = F^{-1}(R)$  より  $x$  をきめると) 最初の積分は

$$J = \int_a^b g(x)dF(x)$$

と変形される。 $F(x)$  は累積分布関数である。この変換を行えば、区間  $[0, 1]$  で一様な確率で  $F(x)$  の値を選ぶという事が区間  $[a, b]$  で  $x$  の値を  $f(x)$  に従って選ぶ事になり、従ってモンテカルロ法により求めた  $J$  の値  $\bar{J}$  は、任意のサンプル数  $N$  を用いて以下の如く求まる。

$$\bar{J} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i)$$

実際の計算では、ガンマ線の粒子の一つ一つにつきその誕生から体系外への消滅 (もれ, 吸収等による) までの種々の経歴を位相空間 (位置, 角度, エネルギー等が座標軸を形成している空間) で計算機により追跡し、該デテクターにまで達した粒子のもたらす物理量 (上の議論の  $g(x)$  に相当) を蓄積する事になる。その際大切な事は、ある粒子の振舞は、その粒子の過去の経歴には独立でありただ位相空間で如何なる位置に現在居るかという事のみ依存するという事である。

モンテカルロ法は統計的手法であるから計算で得られた量の精度の統計的評価ができる。その際精度の評価に用いられるのがサンプルバリエーション  $\sigma^2$  で以下の如く表わされる。

$$VAR(\bar{A}) = \sigma^2 = \frac{S^2}{N}$$

$A$  は或るサンプルされた量であり  $N$  はサンプル数である。 $S^2$  は以下の関係から求まる。

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left[ \sum A_i^2 - \frac{(\sum A_i)^2}{N} \right]$$

$\sigma$  は、普通正規分布をしたサンプリングに対して標準偏差と呼ばれている量にあたり、求めた平均値が真

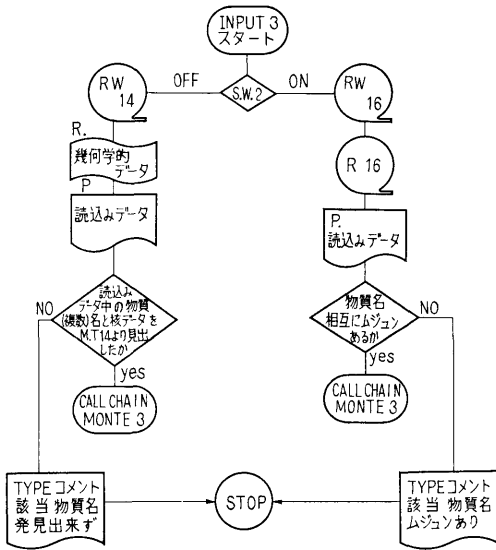


図-31 フローチャート

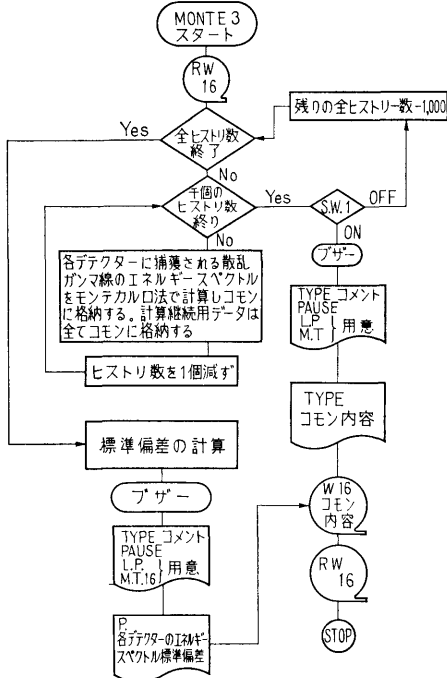


図-32 フローチャート

の平均値から一標準偏差以内にいる確率が約 67% である事を意味している。

2.5 計算の手順

図-31, 32 にフローチャートとして示す如く, 計算

の基礎となる物質定数はガンマ線データファイルシステムからの磁気テープ 14 を通してデータチェックルチーン INPUT 3 に引き渡される。そこではある問題を計算するのが始めてである場合にジャンプスイッチ 2 をオフとする事で, 問題の幾何学的データが紙テープの PTR からの読み込みにより入力される。そしてすべての入力されたデータを必ずプリントアウトする事にしている。モンテカルロ計算のメインルチーンとデータチェックルチーンとはコールチェーンで結ばれて居り, すべての計算の為の基礎データはコモンを通じてメインルチーン MONTE 3 へ受渡される。メインルチーンでは, 種々の理由から計算の中断をしなければならぬ事態の際は, ジャンプスイッチ 1 をオンにする事により計算の切目の良い処で計算の打ち切りとなりスタートに必要な全てのデータの磁気テープ16への格納並びにプリントアウトを行なうようにしている。計算中は周辺装置, 例えば PTR やラインプリンター, オンラインのタイプライター等はすべて停止させてあるので, 計算の終了又は中断の為の手続きの後にはブザーが鳴り更にオンラインタイプライターをオンにする事で必要な周辺装置の始動の指示が得られるようにしている。又, 計算のリスタートの際は PTR による入力は必要がないのでジャンプスイッチ 2 はオンにして置き磁気テープ16に格納されたデータは INPUT 3 に入力されかつプリントアウトされて前にプリントアウトされた結果との照合が行なえるようにしている。又読み込まれた物質名が前の物質名のリストの中にない場合はその物質名とともにコメントとして THIS MATERIAL CAN NOT BE FOUND がタイプアウトされるようにしている。

2.6 用語

FφRTRAN II 機種 NEAC 2206

2.7 入力

(1) 初めてのの場合

NφMED.....物質数 (I 3)

MML(K) ...物質名 (5A6) (K=1~MφMED)

磁気テープ 14 からの入力は省略する。

GAMMA ...入射ガンマ線のエネルギー (mc<sup>2</sup>)

R .....初期ランダムナンバー

ECT .....カットオフエネルギー

XDIREC ...入射線の x 軸に対する方向余弦

$$(E12.4)$$

YDIREC..... " y "

$$(E12.4)$$

*ZDIREC*……入射線の  $z$  軸に対する方向余弦  
(E12.4)

*XPφSIS* …… "  $x$  " 位置

*YPφSTS* …… "  $y$  "

*ZPφSTS* …… "  $z$  "

*NHIST* ……モンテカルロ計算のヒストリ数  
(I7)

*NφREG* ……計算対象の領域数 (I7)

*NXBND*…… $x$  方向の境界の数 (I7)

*NYBND*…… $y$  " "

*NZBND*…… $z$  " "

以下の量は *ZP* まで *NφREG* 回の全体のくり返しとなる。

*LRGNX*……該領域の  $X$  方向の番号 (I3)

*LRGNY*…… "  $Y$  "

*LRGNZ*…… "  $Z$  "

*LMED* …… " に割当てられた物質名 (A6)

*XN* ……該領域の  $X$  方向負側境界 (F10.3)

*XP* …… "  $X$  正側境界 " "

*YN* …… "  $Y$  負 " "

*YP* …… "  $Y$  正 " "

*ZN* …… "  $Z$  負 " "

*ZP* …… "  $Z$  正 " "

*NDTCT*……デテクター総数 (I3)

*NXDT*…… $X$  方向のデテクターナンバー (I3)

*NYDT* …… $Y$  " "

*NZDT*…… $Z$  " "

*XDTN* …… $X$  方向負側の該デテクター境界  
(F10.3)

*YDTN* …… $Y$  " "

*ZDTN*…… $Z$  " "

*XDTP*…… $X$  " 正 " "

*YDTP*…… $Y$  方向正側該デテクター境界

*ZDTP*…… $Z$  " "

(2) 磁気テープから入力後リスタートする場合は省略。

## 2.8 出力

(1) 初めて計算する場合

INPUT 3 に入る入力すべてはコメントとともにプリントアウトされる。

(2) 計算中断の場合

INPUT 3 からメインルーチンに受渡された入力およびメインの中で得られた量例えば、

*NHIS* ……計算は *NHIST* から千個単位で処理

されるので *NHIS* が残されたヒストリ数を表わす。(I7)

*NUMB* ( $I, J$ ),  $I$  番目のデテクターで  $J$  番目のエネルギービンの中にある (蓄積された) ガンマー線粒子数 (I7)

*NABSφ* ……遮蔽体中で吸収された個数 (I7)

*NφUT* ……もれ又はエネルギーカットオフにより考慮からはずされた粒子数 (I7)

*NATDT*……デテクター全体につかまった数  
(I7)

*NPP* ……ペアプロダクションによるものの数  
(I7)

*NVRRRI* ……ヴァリアンス (I7)

等は磁気テープ 16 に格納される。

なお中断の際にオンラインタイプライターから出るコメントは省略する。

(3) 計算終了の場合

プザーの後ラインプリンターをオンにすると(2)と同様なものがラインプリンターで得られる。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算誤差, 精度

ヴァリアンス等の値から単純なチェオメトリーの場合に付いては, 5 万個で誤差が数パーセントにおさまる。まだ複雑な問題はこれから扱う事になるので何ヒストリーでどの程度の複雑さに対してどの程度の誤差におさまるかは明確には言及できない。

### 3.2 計算時間

対象とする物質の密度, チェオメトリー (板の場合その厚み) によっても大きく計算時間は変化する。2 種の厚さの鉄板の場合で千個のヒストリーにつき約平均 9 分である。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

対象とするチェオメトリーが四角形の板の組み合わせである場合は適用出来る。又デテクターの空間的配列もある任意の平面上に配列されている限り適用可能である。

## 4. プログラムの使用について

### 4.1 オペレート

NEAC 2206 用

### 4.2 プログラムの応用

このプログラムは中性子や他の放射線のモンテカルロ計算にも多少の内容の訂正を含めて応用可能である。

### 4.3 他機種への移行



必要があれば移行を考えても良い。

## 5. あとがき

原子力船等の如き区画構造を持つ遮蔽体の遮蔽効果の研究に有力な手段となるものと見て居る。

# N-14 Pb コリメーターを透過してくる $\gamma$ 線の量を計算するプログラム

原子力船部 伊 藤 泰 義

## 1. プログラムの目的および概要

放射線の実験の場合、目的によってはコリメーターを使用する場合がしばしばある。その時、このコリメーターの端部を透過する  $\gamma$  線が実験値を過大に評価させる原因になっている、そのためこの透過  $\gamma$  線量を計算して、実験値を補正するためのプログラムである。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの名称

PBCOL 4

### 2.2 製作者

原子力船部 伊藤泰義

### 2.3 製作年月

昭和 43 年 8 月

### 2.4 計算の基礎となる理論の研究

NaI クリスタルに入射する  $\gamma$  線はコリメーターの孔を透過するものと鉛コリメーターを透過してくるものとの 2 つにわけられる、孔の  $\gamma$  線の効果を幾何学形状効果  $\Omega_G$  と端部効果  $\Delta\Omega$  とする、実効効果  $\Omega_{eff}$  は

$$\Omega_{eff} = \Omega_G + \Delta\Omega \quad \dots(1)$$

で表わされる。

$$\Omega_G = 2\pi \int_{\omega_0}^1 d\omega \quad \dots(2)$$

$$\Delta\Omega = 2\pi \int_0^{\omega_0} e^{-\mu\rho} d\omega \quad \dots(3)$$

$$\omega_0 = \cos \theta_0 = \frac{L}{\sqrt{L^2 + R_0^2}} \quad \dots(4)$$

$$\rho = \frac{L}{\omega} - \frac{R_0}{\sqrt{1-\omega^2}} \quad \dots(5)$$

$$\omega = \cos \theta$$

ここで

$R_0$  : コリメーターの半径

$L$  : コリメーターの厚さ

$\mu$  : コリメーターの全減衰係数

(3)式におなける積分の下限は、1 回散乱の最大角度とした、積分は Simpson の 1/3 公式によった。この

(188)

被積分関数は急激な減少関数であるため、(3)式の積分は 2 つにわけ第一項は 1 と 0.997 を 100 等分し、第二項は 0.997 から 1 回散乱最大角までを等分している。

### 2.5 フローチャート

略

### 2.6 用語および計算機

### 2.7 入 力

i) コリメーターの半径 F 10.5

ii) コリメーターの厚さ F 10.5

iii) 積分分割点 F 10.5

iv) 積分範囲の下限

この値はサブルーチンによって計算される。

v) 鉛の全減衰係数 F 10.6

### 2.8 出 力

実効効果  $\Omega_{eff}$  と端部効果  $\Delta\Omega$  および実効効果と幾何学的効果との比が求められる。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算の精度および誤差

有効数字 3 桁

### 3.2 計算時間

14 秒

### 3.3 適用範囲、制限

別になし

## 4. プログラムの使用法と応用

### 4.1 プログラムのオペレート

コアへ MT1 より PBCOL 4 をロードし実行する。

### 4.2 プログラムの応用

別になし

## 参考文献

第 12 回船舶技研研究発表会、講演概要 (1968. 11).

## N-15 平板線源からの $\gamma$ 線の一回散乱線の 垂直成分を計算するコード

原子力船 伊 藤 泰 義

### 1. プログラムの目的および概要

媒質中で1回散乱をして出てくる  $\gamma$  線は Fano, Spencer 等によって, 色々な形状の線源について解析解が得られているがこの平板形状線からの1回散乱線の垂直成分のみは特異解であるため, その解が得られていない, それでこの垂直成分のみの解を求めそれをコードにした。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

FTST 04

#### 2.2 製 作 者

原子力船部 伊藤泰義

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 4 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

1 回散乱垂直成分の式は

$$\phi = \frac{1}{4\pi \cos \theta} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right) N_e \cdot K(\lambda, \lambda_0)$$

$$\int_0^z e^{-(\mu_0 \sec \theta - \mu)x} dx$$

$\theta$ : 入射角

$\lambda_0$ : 線源放射線のコンプトン波長

$\lambda$ : 散乱後の放射線のコンプトン波長

$N_e$ : 媒質の電子密度 [e/cm<sup>2</sup>]

$\mu_0$ : 線源放射線に対する全減衰係数

$\mu$ : 散乱後の放射線の全減衰係数

$z$ : 媒質の厚さ

$$K(\lambda, \lambda_0) = -\frac{3}{8} \sigma_T \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right) \left[ \frac{\lambda}{\lambda_0} + \frac{\lambda_0}{\lambda} \right.$$

$$\left. + 2(\lambda_0 - \lambda) + (\lambda_0 - \lambda)^2 \right] \\ \sigma_T : \text{Thomson 単位} = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \approx 0.665 \\ \times 10^{-24} \text{cm}^2$$

である。

#### 2.5 計算の手順

#### 2.6 入 力

必要な入力データは

整数: I 3, 実数: F 10.5

i) 入射エネルギーの個数

ii) 媒質の個数

iii) 媒質の厚さ

iv) 入射エネルギー

v) 各エネルギーに対する全減衰係数

#### 2.7 出 力

各入射エネルギーに対する, 個数束およびエネルギー束が得られる。

### 3. プログラムの検定

3.1 精度は有効数字 3 桁

3.2 演算時間

数 秒

### 4. プログラムの使用について

4.1 オペレート

コアに FTST 04 をロードして行なう。

4.2 プログラムの応用

な し

## N-16 汚染雲からの吸収線量を計算するプログラム

原子力船部 伊 藤 泰 義

### 1. プログラムの目的および概要

汚染雲による外部被曝線量を計算するための計算コードを 06 NARC 語で書いた。大気拡散の基本方程式は一般化したガウス分布とし、煙突と逆層層の効果も計算できるようになっている。数値計算例として原子力船の事故を考え、船の近くにいる人の安全に重点を置くことにした。こうして従来の計算法に含まれていない大きな安全係数を容易に評価しうるようにした。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

KUMO 01

A Program for Computing External Dose Rate from a Radioactive Cloud.

#### 2.2 製 作 者

原子力船 伊藤泰義, 山路昭雄

#### 2.3 製作年月

昭和 42 年 6 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

大きなひろがりをもつ雲からの被曝の場合には  $\gamma$  線の被曝が大部分である。エネルギー  $E(\text{MeV})$  なる  $\gamma$  線束からの組織の線量率  $D_A(\text{rad/hr})$  は組織の質量エネルギー吸収係数を  $(\mu_a/\rho)_{\text{tissue}}(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$  とすると

$$D_A = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{100} \times 3600 \times \left( \frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tissue}} \times \phi \times E \quad \dots\dots(1)$$

又照射線量率  $D_B(\text{r/hr})$  は

$$D_B = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{87.7} \times \left( \frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{air}} \times \phi \times E \quad \dots\dots(2)$$

ある地点  $(X, Y, Z)$  での濃度を  $C(\text{curie/m}^3)$  とすると観測点  $(x, y, z)$  での  $\gamma$  線束  $\phi(x, y, z)$  は

$$\phi = 3.7 \times 10^{10} \cdot \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \cdot C(X, Y, Z) dXdYdZ \quad \dots\dots(3)$$

ここで

$$B(\mu r) = 1 + \mu r + \frac{(\mu r)^2}{7E^{2.4}}, \quad 0.5 \leq E \leq 2.0$$

$$r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2}$$

$\mu$ : 空気の吸収係数

(190)

$$C(X, Y, Z) = \frac{4.65 \times 10^{-2}}{\mu \cdot \theta \cdot h \cdot X} \exp \left\{ - \left( \frac{Y}{y_0} \right)^2 \ln 10 - \left( \frac{z}{h} \right)^2 \ln 10 \right\} Q \quad \dots\dots(4)$$

$u$ : 平均風速 m/sec

$h$ : 拡散高度における濃度  $C(X, 0, 0)$  の  $\frac{1}{10}$  の濃度になる高さ

$\theta$ : 拡散角における濃度  $C(X, 0, 0)$  の  $\frac{1}{10}$  の濃度をもつ  $Y$  軸上の点  $y_0$  に対して原点から張る角度の 2 倍

$$y_0 = X \cdot \tan \left( \frac{\theta}{2} \times \frac{\pi}{180} \right)$$

(3)式の空間積分を行なう時、極座標型式に変換して等濃度楕円を考えると、空間積分が 1 つへって 2 次元積分になる、積分はルジャンドルガウスの数値積分 10 点法を使用した。

#### 2.5 フローチャート

略

#### 2.6 入 力

i) 気象安定度  $A, B, C, D, E, F$  をそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5, 6 として与える I 4

ii) 観測点個数 20 点まで取り扱える I 4

iii) 煙突の高さ F 12.7 (m)

放出点は地上、煙突のいずれでも与える事ができる (計算式が異なっている)

iv) 放出量 F 12.5 (curie/hr)

v) 放出エネルギー F 12.5 (MeV)

線源の平均エネルギー

vi) 風速 F 12.5 (m/sec)

vii) 逆層層の高さ F 12.5 (m)

viii) 観測点  $(X, Y)$  5 F 15.10

#### 2.7 出 力

入力で与えられた観測点における吸収線量と照射線量が取り出せる。

##### 3.1 プログラムの検定

積分は無限積分を有限積分で近似しているがその誤差は 1% 以下になっている。

##### 3.2 演算時間

X 方向の分割数を 4 ケ, y 軸方向の分割数を風上, 風下の区域でそれぞれ 2 ケづつとった時, 計算時間は 42 分である。

#### 4.1 オペレート

MT 1 より KUMO 01 をロードして行なう

#### 4.2 プログラムの応用

サブルーチンの中に濃度計算を行なう, プログラム, およびラグランジェ内挿法を用いた吸収係数のプログラムがあり, 独立に使用できる。

### 5. あとがき

原子力船が人口稠密地帯により接近するためには雲による直接被曝を正確に計算されねばならない, これによって原子力船の事故の場合に, 周辺環境の安全を確保する距離を算定する時, この計算値の表, グラフでもあればこの算定が容易になるものと思う。

### 参考文献

汚染雲からの吸収線量を計算するためのコード及び原子力船のための数値計算例, 船研報告, 第 5 巻第 2 号。

## N-17 $\gamma$ 線ビルドアップ係数フィッティングプログラム

原子力船部 金 井 康 二

### 1. プログラムの目的および概要

本プログラムは運転時および事故時の原子力船の直接線量率分布計算プログラム MARINE-2 のライブラリーデータの一部分である“ $\gamma$ 線のビルドアップ係数”を整備するために作成されたものである。今迄多数の研究者によって $\gamma$ 線のビルドアップ係数の近似表示式およびそのパラメータが求められた。しかし精度, 計算法の適用範囲という点で難点があった。代表的な近似表示式は Taylor 型, Berger 型, Capo 型がある。従来 Taylor 型に対してパラメータを求める際

- (1) 物理的に等価な関数を使用して推定する手法
- (2) 仮定した初期値により線形化方程式のくり返し演算による方法

のいずれかの手法であったがともに難点があった。

本プログラムは Cornell によって開発された手法によってプログラム化した。この手法は物理的条件によらず, くり返し計算でもないので短時間で解が出る。一方 Berger 型, Capo 型に対しては従来適用されていた最小二乗法の代りに「ミニマックス法」により精度良いパラメータを得ることができる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの名称

AP 305……(Berger 型) } minimax 法  
 AP 405……(Capo 型) }  
 AP 705……(Taylor 型) Cornell 法

#### 2.2 製作者

原子力船部 金井康二

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 8 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

##### (I) Cornell 法<sup>1)</sup>

Taylor 型のような指数関数の線形結合で表現される近似式はそのパラメータを求めようとするには非線型関数を解かなければならない。Cornell は測定点が同一間隔で与えられるデータを指数関数の線形結合で近似する問題として次のような手法を開発した<sup>1)</sup>。同一測定点  $x_i$  で  $m$  個のデータ  $y_j(x_i)$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) が与えられた場合  $y(x)$  の近似式  $\bar{y}(x)$

$$= \sum_{k=1}^p a_k e^{-\lambda_k x}$$

とすると  $x_i = K_i$  ( $K: \text{const}$ ) ならば

$$(1) y_j(x_i) - \sum_{k=1}^p a_k e^{-\lambda_k x_i} = \varepsilon_j(x_i)$$

$$i=1, 2, \dots, 2pm$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

ここで誤差  $\varepsilon_j(x_i)$  が任意の点  $x_i$  での平均値

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j(x_i) = 0$$

と仮定すると,  $y_j(x_i)$  の平均値  $\mu$

$$(y_j(x_i)) \text{ は } \sum_{k=1}^p \alpha_k e^{-\lambda_k x_i} = \sum_{k=1}^p \alpha_k A_k^i,$$

( $A_k = \exp(1 - \lambda_k K)$ ) に等しい。

さて  $2pn$  個の点を  $2p$  個のグループに分け

$$S_q = \sum_{i=n(q-1)+1}^{qn} \sum_{j=1}^m y_j(x_i), \quad q=1, 2, \dots, 2p$$

とすれば

$$(2) S_q = m \sum_{k=1}^p \bar{\alpha}_k \bar{A}_k^{n(q-1)+1} \frac{1 - \bar{A}_k^n}{1 - \bar{A}_k}$$

$$q=1, 2, \dots, 2p$$

によって  $\alpha_k, A_k$  の推定値  $\bar{\alpha}_k, \bar{A}_k$  の関係式が求まる。今  $\bar{A}_k^n$  を根とする  $X$  の  $p$  次方程式

$$(3) X^p - E_1 X^{p-1} + E_2 X^{p-2} + \dots + (-1)^{p-1} E_{p-1} X + (-1)^p E_p = 0$$

を考えれば

$$(4) E_p S_{r+1} - E_{p-1} S_{r+2} + \dots + [-1]^{p-1} E_1 S_{r+p} = (-1)^p S_{r+p+1}$$

の関係式が求まる。(4)式を  $E_j (j=1, 2, \dots, p)$  の連立方程式と考えて解き(3)式の係数が求まり、従って(3)式の  $p$  次方程式を解けば  $\bar{A}_k^n (k=1, 2, \dots, p)$  が求まり

$$(5) \bar{\lambda}_k = -(1/kn) \ln \bar{A}_k^n \quad k=1, 2, \dots, p$$

により  $\bar{\lambda}_k$  が求められる。また(2)式より  $\bar{\alpha}_k$  が求まる。なお、データが等間隔でないときは内挿法により補充する。

(II) ミニマックス法

線形化できる Capo 型, Berger 型の方程式は次のような数学モデルによつて各パラメータが求められる。ある点  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  に対して、その点に対応する関数値  $B(x_i)$  が与えられた場合  $B(x)$  の近似式  $\bar{B}(x)$  を  $\bar{B}(x) = \sum_{k=1}^m \lambda_k \bar{B}_k(x)$  (ここで  $\lambda_k$ : パラメータ,  $\bar{B}_k(x)$  は線形独立な関数) とするとき

(1)  $B(x_i) - \sum_{k=1}^m \lambda_k \bar{B}_k(x_i) = \epsilon_i B(x_i), i=1, 2, \dots, n$  で最大相対誤差  $\eta = \max_{i=1,2,\dots,n} |\epsilon_i|$  を最小にするのが目的である。ここで  $\lambda_k$  がミニマックス近似のパラメータであれば,

$$(2) B(x) - \sum_{k=1}^m \lambda_k \bar{B}_k(x) = \epsilon(x) B(x), a \leq x \leq b$$

なる方程式は  $m+1$  個の点  $x_j (a \leq x_j \leq b; j=1, 2, \dots, m+1)$  で  $\eta = \max_{a \leq x \leq b} |\epsilon(x)| = |\epsilon(x_1)| = |\epsilon(x_2)| = \dots = |\epsilon(x_{m+1})|$  となることは知られている<sup>2)</sup>。この性質を(1)のような点が離散的に与えられるような場合に拡張する。

(1)の  $n$  個の方程式より適当に  $m+1$  個の方程式を選び出し最大相対誤差  $\eta$  を未知数とし、 $\epsilon_j = S_j \eta (j=1, 2, \dots, m+1)$  により  $S_j$  を誤差の符号とすれば,

$$(3) \begin{pmatrix} \bar{B}_1(\xi_1) & \dots & \bar{B}_m(\xi_1) & S_1 B(\xi_1) \\ \bar{B}_1(\xi_2) & & \bar{B}_m(\xi_2) & S_2 B(\xi_2) \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \bar{B}_1(\xi_m) & \dots & \bar{B}_m(\xi_m) & S_m B(\xi_m) \\ \bar{B}_1(\xi_{m+1}) & \dots & \bar{B}_m(\xi_{m+1}) & S_{m+1} B(\xi_{m+1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \\ \eta \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} B(\xi_1) \\ B(\xi_2) \\ \vdots \\ B(\xi_m) \\ B(\xi_{m+1}) \end{pmatrix}$$

なる連立一次方程式を解くことによってパラメータ  $\lambda_k (k=1, 2, \dots, m)$  が求まり、 $\eta \geq |\epsilon_j| (j=1, 2, \dots, n)$  とすることが可能である。但し  $S_j$  は次式(4)で求まる  $\sigma_j$  の符号である。

$$(4) \sigma_j = (-1)^j$$

$$\begin{pmatrix} B_1(\xi_1) & B_2(\xi_1) & \dots & B_m(\xi_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{B}_1(\xi_{j-1}) & \bar{B}_2(\xi_{j-1}) & & \bar{B}_m(\xi_{j-1}) \\ \bar{B}_1(\xi_{m+1}) & \bar{B}_2(\xi_{m+1}) & & \bar{B}_m(\xi_{m+1}) \end{pmatrix}$$

なお各近似式は次の通りである。

i) Taylor 型  $\bar{B}(x) = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \exp(-\lambda_k x), \alpha_1 + \alpha_2 = 1$

ii) Capo 型  $\bar{B}(x) = \sum_{k=0}^3 \lambda_k x^k$

iii) Berger 型  $\bar{B}(x) = 1 + \lambda_1 x \exp(\lambda_2 x)$

2.5 計算の手順

計算の手順は図-33, 34 のフローチャート参照

2.6 入力

(1) Cornell 法の入力

MFP .....最大 mfp (I 2)

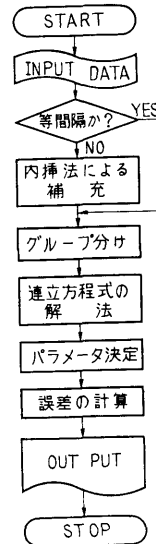


図33 Cornell 法フローチャート