

点減衰核積分法によるクラウド・ガンマ線量
の計算コード(PLUTO説明書)

PLUTO-A Program to Compute Cloud Gamma Dose
by Point-Kernel Integration

June 1977

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

Tokai Works
Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

複製あるいは入手については、下記にお問い合わせください。

茨城県東海村 〒319-11

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所技術部研究管理課

Tel. 東海(02928)2-1111 内線238

Enquiries about copyright and reproduction
should be addressed to ;

Tokai Works, Power Reactor and Nuclear
Fuel Development Corporation,
Tokai, Ibaraki, Post No. 319-11, Japan.

Ⓜ

点減衰核積分法によるクラウド・ガンマ線量の
計算コード(PLUTO説明書)

実施責任者 平山昭生^{*}
報告者 岸本洋一郎^{*}
成田脩^{*}
篠原邦彦^{*}
田村栄悦^{**}(協力者)

期 期 1977年2月1日～1977年5月25日

目 的 排気筒から放出された放射性希ガスによる照射線量を計算するために作成した計算プログラムの説明書である。

要 旨 このプログラムは、排気筒から放出された放射性希ガスによる照射線量、いわゆるクラウド・ガンマ線量を計算するために作成したものである。大気拡散は、正規型分布式により表わしており、照射線量の計算は点減衰核積分法によっている。

このプログラムの特徴は次のとおりである。(i)鉛直方向の拡散について、逆転層反射を取扱うことができる。(ii)照射線量は、地表面上の半無限空間内の任意の位置において計算可能である。(iii)放出口近傍における線源近似、放出点より遠方における浸漬近似、無限平板線源近似等の近似計算が可能である。

* 安全管理部環境安全課

** 日本アイビーエム株式会社

PNCT843-77-05
June, 1977

PLUTO-A Program to Compute Cloud Gamma
Dose by Point-Kernel Integration

Akio HIRAYAMA*
Yoichiro KISHIMOTO*
Osamu NARITA*
Kunihiko SHINOHARA*
Eietsu TAMURA**

Abstract

A computer program has been written to calculate the exposure dose at an arbitrary point in the atmosphere caused by the emission of radioactive materials from a stack. The dispersion of materials in air is expressed by the Gaussian plume model with ground surface and inversion lid reflections. The exposure or absorbed dose in air is calculated by the spatial integration of point-kernels. Several approximate methods, such as homogeneous-infinite-slab approximation, submersion approximation, etc, have been incorporated as well.

* Environmental Protection Section, Health and Safety Division, Tokai-Works
** IBM, Japan.

目 次

1. 序	1
2. 計 算 方 法	2
2.1 大気拡散計算	2
2.2 ガンマ線照射線量計算	5
2.2.1 基礎となる計算式	5
2.2.2 ビルドアップ係数	6
2.2.3 減衰係数および吸収係数	9
2.2.4 数値積分の方法	9
2.2.5 近似計算方法	11
(i) CSA 近似	11
(ii) 均質無限平板雲近似	11
(iii) 浸漬近似	12
(iv) 半直線雲近似	12
3. プログラムの説明	14
3.1 プログラムの概要	14
3.2 データ入力	17
参 考 文 献	20
付 録 - I	24

目 录

Table 1.	Constants for σ_y and σ_z equations.....	4
Table 2.	Energy deposition buildup factors in air (Point isotropic source, infinite medium).....	7
Table 3.	Polynomial coefficients for buildup factors in air.....	7
Table 4.	Energy deposition buildup factors in air for Krypton-85 (E=0.514 MeV) (Point isotropic source, infinite medium).....	8
Figure 1.	Geometric Relations between coordinate Systems, (x, y, z) and (s, θ, ξ)	21
Figure 2.	Homogeneous-Infinite-Slab Cloud Approximation.....	21
Figure 3.	Geometric Correction Factor for Submersion Approximation.....	22
Figure 4.	Overall Structure of the Program : PLUTO.....	23

1. 序

このプログラムは、排気筒から放出された放射性希ガスによる照射線量、いわゆるクラウド・ガンマ線量を計算するために作成したものである。大気拡散は、正規型分布式により表わしており、照射線量の計算は点減衰核積分法によっている。

このプログラムの特徴は次のとおりである。(i)鉛直方向の拡散について、逆転層反射を取扱うことができる。(ii)照射線量は、地表面上の半無限空間内の任意の位置において計算可能である。(iii)放出口近傍における線源近似、放出点より遠方における浸漬近似、無限平板線源近似等の近似計算が可能である。

2. 計算方法 (Method of Calculation)

2.1 大気拡散計算 (Atmospheric Diffusion Calculation)

排気筒から放出された放射性物質の大気中の拡散は、正規型分布により表わされると仮定し、次式により計算する。

$$X(x, y, z) = \frac{Q'}{u} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} R(z, \sigma_z, H) \quad (1)$$

ただし、各記号の意味は次のとおりであり、放射能減衰はないとする。

x, y, z : 原点を排気筒基点にもつ風下軸、風下軸に対する横方向および鉛直方向の各座標 (m)

$X(x, y, z)$: 位置 (x, y, z) における空气中放射性物質濃度 (Ci/m^3)

Q' : 放射性物質の放出率 (Ci/sec)

$$Q' = Q / 3600$$

Q : 放射性物質の放出率 (Ci/hr)

u : 放出点における風速 (m/sec)

σ_y, σ_z : y 方向および z 方向の拡がりの標準偏差 (m)

H : 放出点の高さ (m)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} R(z, \sigma_z, H) : z \text{ 方向への拡散項}$$

σ_y および σ_z は、風下距離 x の関数として表わされる次式⁽¹⁾を用いる。

$$\sigma_y = k \theta_1 x (8 - \log_{10} x) \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 (10^{-3} x)^{p_0 + p_1 \log_{10}(10^{-3} x) + p_2 [\log_{10}(10^{-3} x)]^2} \quad (8)$$

ただし、 $k, \theta_1, \sigma_0, p_0, p_1$ および p_2 の値は Table 1 に掲げるとおりとし、また $\sigma_z > 1,000$ (m) であれば、 $\sigma_z = 1,000$ (m) とする。

(1) 式中の z 方向への拡散を表わす部分の関数 $R(z, \sigma_z, H)$ は、地表面および逆転層の高さにより様々に表現される。

一般的表現は、

$$R(z, \sigma_z, H) = \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{H_{g,i}^2}{2\sigma_z^2}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{H_{l,i}^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (4)$$

であり、右辺の第 1 項は直接寄与項、第 2 項は地表面反射項、また第 3 項は逆転層反射項である。第 2 項の $H_{g,i}$ および第 3 項の $H_{l,i}$ は、逆転層の放出源の高さより高い $z = L$ (m) の位置にあるとして、それぞれ次のように表わされる。

$$H_g, i = (i-1+m)L+H+(-1)^{i-1}Z \quad (5)$$

$$H_l, i = (i-m)L-H+(-1)^i Z \quad (6)$$

ただし、 $i=1, 2, \dots$; $m=(i+1) \text{ modulo } 2$ である。逆転層が放出点よりも低い場合、すなわち $0 < L < H$ の場合は、第2項において $i=-1$ とし、第3項はないとすればよい。

関数 R の一般的表現としては、(4)式の外に、次のような表わし方もある。(2)

$$R(z, \sigma_z, H) = \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(2iL+H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(2iL+H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right. \\ \left. + \exp\left[-\frac{(\overline{2i+1}L-H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(\overline{2i+1}L-H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (7)$$

着地濃度のみが必要であれば、 $z=0$ とし、次式になる。

$$R(0, \sigma_z, H) = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(2iL+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(\overline{2i+1}L-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (8)$$

また、逆転層が非常に高い場合または逆転層のない場合には、

$$R(z, \sigma_z, H) = \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (9)$$

となる。プログラム中では(4)、(7)、(8)または(9)式を適宜用いている。

Table 1. Constants for σ_y and σ_z equations

風下距離 $X \geq 200m$ のとき

大気安定度	σ_0	p_0	P_1	P_2
A	768.1	3.9077	3.898	1.7330
B	122.0	1.4132	0.49523	0.12772
C	58.1	0.8916	-0.001649	0.0
D	31.7	0.7626	-0.095108	0.0
E	22.2	0.7117	-0.12697	0.0
F	13.8	0.6582	-0.1227	0.0

風下距離 $X < 200m$ のとき

大気安定度	σ_0	p_0	P_1	P_2
A	165.	1.07	0.0	0.0
B	83.7	0.894	0.0	0.0
C	58.0	0.891	0.0	0.0
D	33.0	0.854	0.0	0.0
E	24.4	0.854	0.0	0.0
F	15.5	0.822	0.0	0.0

大気安定度	k	θ_1
A	} 6.7775×10^{-4}	50
B		40
C		30
D		20
E		15
F		10

2.2 ガンマ線照射線量計算 (Exposure Dose Calculation)

2.2.1 基礎となる計算式 (Fundamental Equations)

大気中に拡散した放射性物質をより生ずる空気中の任意の位置 (x_0, y_0, z_0) における照射線量 $D(x_0, y_0, z_0)$ は、点減衰核を空間全体にわたって積分することにより求められる。すなわち、

$$D(x_0, y_0, z_0) = K_0 \mu_a E \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{B(E, \mu r) e^{-\mu r}}{4\pi r^2} e^{-\lambda \frac{x}{u}} X dy dz dx \quad (10)$$

である。ただし、各記号の意味は次のとおりである。

$D(x_0, y_0, z_0)$: 位置 (x_0, y_0, z_0) における照射線量率 ($\mu R/hr$)

K_0 : 放射能から照射線量率への換算係数

$$K_0 = 1.88 \times 10^9 \left(\frac{\text{dis} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu R}{\text{MeV} \cdot \text{Ci} \cdot \text{hr}} \right)$$

μ_a : 空気中の線吸収係数 (m^{-1})

E : ガンマ線のエネルギー (MeV/dis)

r : 線源から位置 (x_0, y_0, z_0) までの距離 (m)

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

μ : 空気中の線減衰係数 (m^{-1})

$B(E, \mu r)$: 空気中のビルドアップ係数

λ : 放射性物質の壊変定数 (sec^{-1})

X : 空気中の放射性物質濃度 (Ci/m^3)

$$X \equiv X(x, y, z) \quad (11)$$

(1), (4) および (10) 式をまとめて書くと次のようになる。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty G(r) e^{-\lambda \frac{x}{u}} \times \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \sum_{i=1}^\infty \left[\exp\left(\frac{H_{z,i}^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{H_{z,i}^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \right\} dy dz dx \quad (12)$$

ただし、上式中の K および $G(r)$ は次のとおりである。

$$K \equiv \frac{K_0 \cdot \mu_a \cdot E \cdot Q}{8\pi^2 \cdot 3600 \cdot u} \quad (13)$$

$$G(r) \equiv \frac{B(E, \mu r) e^{-\mu r}}{r^2} \quad (14)$$

00式は、排気筒より大気中に放出された放射性物質による照射線量を正確に計算するための基礎となる式である。基本的には、00式を適切な方法により数值的に計算すれば照射線量が得られる。

2.2.2 ビルドアップ係数 (Buildup Coefficient)

照射線量を計算するための空気中のビルドアップは、無限媒質の空気中の点線源に対するエネルギー沈着ビルドアップ係数により表わされる。この係数は、Table 2に示すように、離散値としてすでに求められている。⁽³⁾ また、計算の便宜上、これらの値は、 μr (平均自由行程を単位として測った距離) について次に示す3次の多項式により近似されている。⁽⁴⁾

$$B(E, \mu r) = \alpha_0 + \alpha_1(E) \mu r + \alpha_2(E) (\mu r)^2 + \alpha_3(E) (\mu r)^3 \quad (04)$$

係数 α_0 , α_1 , α_2 および α_3 の値ならびに04式による近似の最大誤差を、Table 3に示す。プログラムでは、04式を用い、さらにエネルギーEについては線型補間を行うようにしている。

なお、 ^{85}Kr ($E = 0.514 \text{ MeV}$) の場合の正確な値と近似値との比較をTable 4に示した。

Table 2. Energy deposition buildup factors in air
(Point isotropic source, infinite medium)

E ₀ (MeV)	BF						
	1	2	4	7	10	15	20
0.01	1.17	1.25	1.36	1.46	1.54	1.58	1.91
0.02	1.41	1.62	1.94	2.25	2.51	2.75	3.51
0.03	2.24	3.19	4.87	7.09	9.21	12.5	16.5
0.04	3.33	5.86	11.5	21.1	32.2	54.3	81.5
0.05	4.25	8.72	20.8	46.1	80.7	162.0	279.0
0.05	4.75	10.8	29.4	74.6	144.0	327.0	620.0
0.08	4.81	12.0	38.2	115.0	252.0	675.0	1463.0
0.10	4.48	11.4	38.5	124.0	285.0	811.0	1835.0
0.15	3.72	9.20	31.7	106.0	252.0	745.0	1730.0
0.20	3.27	7.73	25.6	83.9	196.0	564.0	1278.0
0.30	2.85	6.22	18.6	54.4	116.0	293.0	592.0
0.40	2.60	5.37	14.9	40.3	81.5	193.0	370.0
0.50	2.44	4.82	12.5	31.3	59.5	130.0	233.0
0.60	2.33	4.45	10.9	26.0	47.7	99.6	172.0
0.80	2.12	3.94	8.86	19.3	33.4	64.2	104.0
1.0	2.08	3.60	7.59	15.6	25.7	46.8	72.5
1.5	1.92	3.09	5.85	10.8	16.6	27.6	39.7
2.0	1.81	2.78	4.92	8.55	12.5	19.8	27.4

Table 3. Polynomial coefficients for buildup factors in air

Energy, MeV	Polynomial Coefficients ⁽¹⁾			Maximum Error, %
	α_1	α_2	α_3	
0.01	0.010390	0.001476	-0.00005806	
0.015	0.15203	-0.014692	0.00048165	+ 3.0
0.02	0.37474	-0.033582	0.0010654	- 4.8
0.03	1.2270	-0.062247	0.0020127	- 3.3
0.04	2.2543	0.0087363	0.000024697	- 0.7
0.05	2.7914	0.50776	0.0020590	- 1.8
0.06	2.8286	0.95464	0.021414	- 1.5
0.07	2.7311	1.1531	0.065927	
0.08	2.5499	1.2031	0.11115	- 2.8
0.09	2.3605	1.1929	0.13581	
0.10	2.2857	1.0838	0.16117	- 3.6
0.15	1.8347	0.76133	0.16473	- 4.0
0.20	1.5119	0.66560	0.11792	- 2.9
0.30	1.1522	0.65758	0.037897	+ 0.4
0.40	1.0503	0.53489	0.016602	+ 0.7
0.50	0.98982	0.45070	0.0038726	- 0.7
0.60	0.96881	0.37066	0.00030405	- 0.7
0.70	0.95120	0.30658	-0.0018535	
0.80	0.94226	0.25805	-0.0025008	- 1.4
0.90	0.91047	0.22280	-0.0030863	
1.0	0.91686	0.18630	-0.0027652	- 2.6
1.5	0.85069	0.091974	-0.0019336	- 1.7
2.0	0.77928	0.050457	-0.0011975	- 1.5
3.0	0.66827	0.0085488	-0.0015847	
4.0	0.57420	-0.0061698	0.00021643	
5.0	0.50899	-0.014566	0.00046705	

(1) $\alpha_0 = 1$; for all energies.

Table 4. Energy deposition buildup factors in air for krypton-85 ($E=0.514$ MeV)
(Point isotropic source, infinite medium)

P N C T 8 4 3 - 7 7 - 0 5

	μr						
	1	2	4	7	10	15	20
Exact values	2.42	4.76	12.2	30.3	57.3	124.2	221.3
polynomial approximation on μr and linear inter- polation on E	2.430	4.749	12.195	30.60	58.19	126.07	223.52
Polynomial approximation on μr and Aitken-Lagrange interpolation on E	2.427	4.749	12.147	30.44	57.71	124.48	219.77

2.2.3 空気中の減衰係数および吸収係数 (Attenuation and Absorption Coefficients in Air)

空気中におけるガンマ線の質量減衰係数および質量吸収係数の値は、Table 5に掲げるとおりである。⁽³⁾プログラムでは、これらの値を用いてエネルギーについてAitken-Lagrange補間⁽⁵⁾を行い、得られた値に空気の密度を乗じて線減衰係数および線吸収係数を計算するようになっている。

2.2.4 数値積分の方法 (Numerical Methods of Integration)

⑧式を数値的に積分するにはさまざまな手法が考えられるが、ここでは、被積分関数の特性を考慮した見通しのよい積分が行なえるよう、Figure 1に示すような変数変換を行う。まず、y方向およびz方向については、放射性物質の空気中の分布が、y=0およびz=H等の拡散軸を中心としてそれぞれ正規分布をなすことを考慮し、この軸のまわりの角度方向 θ および軸からの半径方向 s に変換する。⁽⁶⁾すなわち、

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{2s} \sigma \cos \theta \\ h &= \sqrt{2s} \sigma \sin \theta \end{aligned} \tag{9}$$

なる変換を行う。ただし、 $i = 1, 2, \dots$ について

$$h = \begin{cases} z-H & \text{(直接寄与)} \\ Hg, i = (i-1+m)L+H+(-1)^{i-1}z & \text{(地表面反射)} \\ Hz, i = (i-m)L+H+(-1)^i z & \text{(逆転層反射)} \end{cases}$$

であり、 $m = (i+1) \text{ modulo } 2$ である。すなわち、変換⑩は、次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{2s} \sigma \cos \theta \\ z &= \text{sign}(\sqrt{2s} \sigma \sin \theta + H') \end{aligned} \tag{10}$$

ただし、 sign および H' は、次のとおりである。

	sign	H'
直接寄与	1	H
地表面反射 ($i = 1, 2, \dots$)	$(-1)^{i-1}$	$-(i-1+m)L-H$
逆転層反射 ($i = 1, 2, \dots$)	$(-1)^i$	$-(i-m)L+H$

この変換に対するヤコビアンは次のように計算される。

$$J \equiv \frac{\partial(y, z)}{\partial(s, \theta)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial z}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \text{sign} \sigma \sigma$$

Table 5. Mass attenuation and absorption coefficients in air

Energy (MeV)	μ/ρ (cm^2/g)	μ_a/ρ (cm^2/g)
0.01	4.82	4.54
0.015	1.45	1.25
0.02	0.691	0.502
0.03	0.831	0.145
0.04	0.229	0.0622
0.05	0.196	0.0376
0.06	0.179	0.0287
0.08	0.162	0.0234
0.10	0.151	0.0233
0.15	0.134	0.0250
0.2	0.123	0.0268
0.3	0.106	0.0288
0.4	0.0954	0.0296
0.5	0.0868	0.0297
0.6	0.0804	0.0296
0.8	0.0706	0.0289
1.0	0.0635	0.0280
1.5	0.0517	0.0256
2.0	0.0444	0.0238
3.0	0.0358	0.0211
4.0	0.0308	0.0194
5.0	0.0276	0.0181

次に、x 方向については、 $x = x_0 + \xi$ なる変換により、 ξ に関する積分とする。こうすると、(10)式は次のように書き直される。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{j=1}^4 G(r_j) + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\text{sign}_i \sum_{j=1}^4 G_r(r_{i,j}) + \text{sign}_i \sum_{j=1}^4 G_l(r_{i,j}) \right] \right\} \times e^{-\lambda d \theta ds} \times \exp\left(-\lambda \frac{x_0 + \xi}{u}\right) d\xi \quad (17)$$

ただし添字 g は地表面反射、 l は逆転層反射を表わし、 $r_{i,j}$ は次のとおりである。

$$\left\{ \begin{aligned} r_{1,1} &= \sqrt{R^2 - 2\sqrt{2s} \left[(\text{sign } z_0 - H') \sigma_x + y_0 \sigma_y \cos \theta \right]} \\ r_{1,2} &= \sqrt{R^2 - 2\sqrt{2s} \left[(\text{sign } z_0 - H') \sigma_x + y_0 \sigma_y \cos \theta \right]} \\ r_{1,3} &= \sqrt{R^2 + 2\sqrt{2s} \left[(\text{sign } z_0 - H') \sigma_x + y_0 \sigma_y \cos \theta \right]} \\ r_{1,4} &= \sqrt{R^2 + 2\sqrt{2s} \left[(\text{sign } z_0 - H') \sigma_x + y_0 \sigma_y \cos \theta \right]} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

ただし、

$$R^2 = \xi^2 + y_0^2 + (z_0 - \text{sign } H')^2 + 2s (\sigma_x^2 \cos^2 \theta + \sigma_y^2 \sin^2 \theta) \quad (19)$$

である。

プログラムでは、(10)式または、地表面・逆転層反射の部分について、(10)式で用いている(4)式のかわりに、(17)式の表現を用いた式を用いている。数値積分手法としては、変数 S については Gauss-Laguerre 公式⁽⁷⁾を、また変数 θ については Gauss-Legendre 公式⁽⁷⁾を用いている。変数 ξ に関する積分については、さらに $\xi = \xi_0 e^{\eta}$ なる変換を行い、 η 軸上で等間隔に積分するようにしてある。(付録-1 参照)

2.2.5 近似計算手法 (Approximation Methods)

以上により照射量の計算が行えるが、条件によっては必ずしも厳密な計算を行う必要がない場合もあると考えられるため、プログラムには、次に述べる幾通りかの近似計算手法を組みこんでいる。

(i) CSA 近似 (Constant-Sigma Approximation)

y 方向および x 方向への拡散を表わすパラメータ σ_y および σ_x は、放出点からの進行距離 x の関数であるが、これを一定とみなし、計算位置における値で代表させる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_y(x_0) \\ \sigma_x &= \sigma_x(x_0) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

と置く。

(ii) 均質無限平板雲近似 (Homogeneous-Infinite-Slab Cloud Approximation)

放射性物質は、地表面および逆転層の2つの平行平面の間に一様に分布すると考え、その濃度は、計算位置における濃度、すなわち $x_0 = x(x_0, y_0, z_0)$ により代表する。Figure 2 に示す計算位置 P_1 、 P_2 および P_3 における照射線量は次式により計算される。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K_0 \mu_0 E \phi \quad (21)$$

ただし、 ϕ は以下に示すとおりであり、他の記号の意味は前と同様である。

$$L = \sqrt{r^2 + (z_0 - z)^2} \text{ として、}$$

P_1 において

$$\phi = \frac{x_0}{2} \int_0^L \int_z^\infty \frac{B(E, \mu L) e^{-\mu L}}{L} dL dz \quad (22)$$

P_2 において

$$\phi = \frac{x_0}{2} \left[\int_0^{z_0} \int_{z_0-z}^\infty \frac{B(E, \mu L) e^{-\mu L}}{L} dL dz + \int_{z_0}^L \int_{z-z_0}^\infty \frac{B(E, \mu L) e^{-\mu L}}{L} dL dz \right] \quad (23)$$

P_3 において、

$$\phi = \frac{x_0}{2} \int_0^L \int_{z_0-z}^\infty \frac{B(E, \mu L) e^{-\mu L}}{L} dL dz \quad (24)$$

(iii) 浸漬近似 (Submersion Approximation)

放射性物質は、地表面上の半無限空間に一様に分布すると考え、その濃度は、計算位置における濃度、すなわち $X_0 = X(x_0, y_0, z_0)$ により代表する。照射線量は次式により計算される。

$$D(x_0, y_0, z_0) = g K_0 E X_0 \quad (25)$$

ただし、 g は幾何学的係数であり、Figure 3 に示すように、 $z_0 = 0$ で $g = 1/2$ 、 $z_0 \rightarrow \infty$ で $g \rightarrow 1$ となる適切な値である。 g の関数型の例は次のとおりである。

$$g(z_0) = 1 - \frac{1}{2} e^{-k \mu z_0} \quad (26)$$

$$g(z_0) = \begin{cases} \frac{1}{2} (1 + k \mu z_0) & (0 \leq z_0 \leq \frac{1}{k \mu}) \\ 1 & (z_0 > \frac{1}{k \mu}) \end{cases} \quad (27)$$

$$g(z_0) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3}{2} k \mu z_0 - \frac{1}{2} k^3 \mu^3 z_0^3 \right) \quad (28)$$

k は適当な定数である。プログラムには、(26)式を組み入れてある。

(iv) 半直線雲近似 (Semi-Infinite Line Cloud Approximation)

排気筒から出た放射性物質は、 y 方向および x 方向には全く拡散せず、 x 方向に半直線状の線源をなすと考えられる。照射線量は次式により計算される。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K_0 \mu_e E \phi \quad (29)$$

ただし、 ϕ は、 $a = \sqrt{y_0^2 + (H - z_0)^2}$, $L_0 = \sqrt{a^2 + x_0^2}$, $\theta_0 = \sin^{-1}(\frac{|x_0|}{L_0})$ として、次のとおりである。

$x_0 \leq 0$ のとき

$$\phi = \frac{Q}{3600u} \cdot \frac{1}{4\pi a} \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} B(E, \mu a \sec \theta) d\theta \quad (30)$$

$x_0 > 0$ のとき

$$\phi = \frac{Q}{3600u} \cdot \frac{1}{4\pi a} \left[\int_0^{\theta_0} B(E, \mu a \sec \theta) d\theta + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta_0} B(E, \mu a \sec \theta) d\theta \right] \quad (31)$$

以上の4種類の近似計算が有効な場合は、次のように考えられる。

計 算 方 法	積 分 次 数	近 似 手 法 が 有 効 と 思 わ れ る 例
厳 密 な 計 算	3	
CSA 近 似	3	$\frac{d\sigma_r}{dx}$, $\frac{d\sigma_e}{dx}$ が小, すなわち, 大気安定度が安定側 のとき。
均質無限平板雲近似	2	x_0 が大, すなわち排気筒より遠方のとき。
浸 漬 近 似	0	x_0 が大, すなわち排気筒より遠方のとき。 ビルドアップの小さいとき。
半 直 線 雲 近 似	1	x_0 が小, すなわち排気筒の近傍。

3. プログラムの説明 (Program Description)

3.1 プログラムの概要 (Outline of the Program)

プログラム全体の構造は、Figur 4に示してある。各プログラムの概要は以下のとおりである。

(a) MAIN

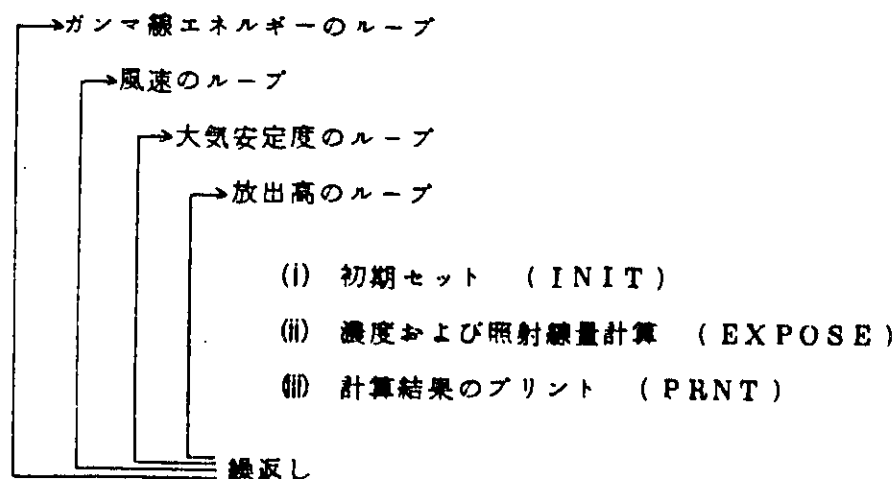
全体のコントロールを行う主プログラム。

(b) INPUT

カード入力プログラム。

(c) CALC

カード入力により指定された次数のガウス・ルジャンドルおよびガウス・ラゲール積分公式の定数をセットしたのち、濃度および照射線量計算部分のコントロールを次のように行う。



(d) INIT

ガンマ線エネルギーの関数である空気中の減衰係数 μ および吸収係数 μ_a の値を定める (GETMU)。また σ_0 および σ_1 を計算するための係数 $k, \theta_0, \sigma_0, a_0, a_1$ および a_2 を、指定された安定度の値としてセットする。

(e) GETMU

ガンマ線エネルギー E を与えて、 μ および μ_a を計算するルーチンである。 μ および μ_a のテーブルは、 cm^2/g の単位で持っている。 E についての内挿は、線型補間または Aitken-Lagrange 補間により行う。後者の補間を行う場合には、サブルーチン ATSG および ALI (いずれも SSP⁽⁸⁾) を用いる。補間方法は、呼出し時のパラメータの値により選ばれる。

計算結果の μ および μ_a の単位は m^{-1} である。単位変換に用いられている空気の密度値 (変数名 RH0) は、GETMU 内のデータステートメントにより定義されている。

(f) EXPOSE

主たる計算部分をコントロールするルーチンであり、以下のステップにより計算を行う。

- (i) 角度方向 (θ 方向) の積分に適用されるガウス・ルジャンドル公式の分点の値に対応する $\cos \theta$ および $\sin \theta$ の値をセットする。
- (ii) 濃度計算および照射線量計算の定数部分をセットする。
- (iii) 積分の収束判定用の ϵ (変数名 EPS) の値をセットする。
- (iv) 以下、EXPOSEの最後 (ステップ00) までが観測地点のループで、NOBS (入力値) 回繰返される。
- (v) 観測地点の X 座標値 (変数名 X0) が負であれば、ステップ00までスキップする。そうでなければ観測地点における σ_r , σ_a および空気中濃度を計算する。逆転層がある場合の濃度は、サブルーチン LCONC で計算する。
- (vi) 計算オプション ICALC (入力値) が 2 の場合は、厳密な計算のみを行い、ステップ (X) までスキップする。ICALC が 2 であれば、①均質無限平板雲近似計算 (サブルーチン ASLB) および②浸漬近似計算を行う。
- (vii) 吹上高さ DELH (入力値) がゼロまたは負であれば、次のステップへ移る。そうでなければ、吹上げ部分からの照射線量を、線源が鉛直の有限直線であるとして近似し計算する。
- (viii) ③半直線雲近似計算を行う (サブルーチン LINS A)。計算オプション ICALC (入力値) が 1 であれば、次の厳密な計算は行わず、最後のステップ00へ移る。
- (ix) このステップで④OSA 近似計算 (ICALC=3 の場合)、または⑤厳密な計算 (ICALC=0 または 2 の場合) を行う。このステップの主たる部分は、X 方向の積分に関するコントロールおよび X 方向のロンバーグ積分手順である。X 上を等間隔に分けた区間ごとにロンバーグ手法が適用され、ひとつの区間は積分が収束するまでさらに小区分に区分される。半径 S 方向および角度 θ 方向の積分は、逆転層がない場合にはサブルーチン GDOSE により、また逆転層がある場合には、サブルーチン HDOSE および CFCT により実行される。
- (x) ステップ (iv) へ戻る。

(g) LOONC

逆転層がある場合の観測地点における空気中濃度を計算する。計算式(4), (5)および(6)を用いている。

(h) ASLB および ZQGL

均質無限平板雲近似計算を行う。サブルーチン ASLB では、まず逆転層の有無および逆転層の高さと放出点の高さの大小関係ならびに観測地点の高さと逆転層の高さの大小関係によ

り、Z方向の積分区間を定め、次にZ方向の積分のコントロールおよびZ方向のロンバーグ積分を行う。I方向の積分はサブルーチンZQGLで行っており、ガウス・ラゲール公式を適用している。

(i) L I N S A

半直線雲近似計算を行う。 θ 方向の積分はロンバーグ積分によっている。

(j) H D O S E および C F C T

CSA近似および厳密計算について、逆転層が存在するときのS方向および θ 方向の積分を行う。サブルーチンHDOSEでは、地表面反射および逆転層反射の総和コントロールを行い、サブルーチンCFCTでは (s, θ) に関する積分を行う。

(k) G D O S E

CSA近似および厳密計算について、逆転層が存在しないときの (s, θ) に関する積分を行う。

(l) P L R I S E

放出点における吹上げ部分からの照射線量を計算する。この部分の線源形状は、鉛直の有限直線とし、その長さは、DELH(入力値)で、上端の高さがH0(入力値)であるとしている。

また、線源強度SLは、排気流量VF(入力値)および排気口径DIAM(入力値)より計算される排気初速度VSを用い、 $SL = Q(\text{放出率}) / VS$ であるとしている。

(m) P R N T

計算結果をプリントする。計算オプションICALCにより指定されなかった部分については、ゼロが出力される。

(n) S I G Y Z

大気安定度および放出点からの風下距離を指定し、 σ_z, σ_y を計算する。

(o) G

点減衰核関数(13式)

(p) B L D U P および B L D U P F

ガンマ線エネルギーを与えて空气中ビルドアップ係数を計算する。関数サブプログラムBLDUPFは、26通りのエネルギーそれぞれについての3次多項式近似式(式04およびTable3)を内蔵する。関数サブプログラムBLDUPは、BLDUPFを用いて必要なエネルギーについてのビルドアップ係数を、線型またはAitken-Lagrange補間により求める。26点からのサーチには、部分的にバイナリサーチ法を用いている。

3.2 データ入力 (Data Input)

データ入力 (カード入力) の方法は、以下に示すとおりである。

カードセット の 順 序	変 数 名	内 容	FORMAT
# 1	TITLE	タ イ ト ル	(18A4)
# 2	KE	ガンマ線エネルギーセットの数 (≤ 5)	(10I5)
	KU	風速セットの数 (≤ 10)	
	KSTB	安定度セットの数 (≤ 6)	
	KH0	放出高セットの数 (≤ 10)	
# 3	IN	入力オプション { =0 : (x, y, z) で観測 位置を入力 { =1 : (r, θ , z) で観測 位置を入力	(10I5)
	IPRNT	プリントオプション { =0 : EXPOSEルーチンで 計算の途中結果をプリ ント { =1 : 計算の最終結果のみを プリント	
	L\$	ϕ についての積分次数または ガウス・ラゲール公式の積分次 数 ($2 \leq L\$ \leq 12$)	
	M\$	θ についての積分次数または ガウス・ルジャンドル公式の積 分次数 ($3 \leq M\$ \leq 12$)	
	K\$	η についての区間幅 (付録 I 参照) (default : $K\$ = 2$)	
	N\$	ロンバーグ積分における積分 分区間の最大分割回数 + 1 $5 \leq N\$ \leq 17$	

カードセット の 順 序	変 数 名	内 容	FORMAT
	ICALC	計算オプション =0: 厳密な計算およびCSA 近似以外の近似計算 =1: CSA 近似以外の近似計 算のみ =2: 厳密な計算のみ =3: 近似計算のみ	
# 4	ET	ガンマ線エネルギー (MeV) (KE個)	7 E 1 0.3
# 5	UT	風速 (m/sec) (KU個)	7 E 1 0.3
# 6	Q	放射性物質放出率 (Ci/hr)	7 E 1 0.3
	XLAMD	減衰定数 (sec ⁻¹)	
	XI0	ξ_0 (付録 I 参照) (default: XI0=1.0)	
	S0	収束条件設定値 (付録 I 参照) (default: S0=100.)	
	HINV	逆転層の高さ (m)	
	ZETA	浸漬近似における k の値 (図式参照)	
# 7	DLTH	吹上げ部分の高さ (m) (DLTH ≤ 0 であればこのカード不要。)	
	VF	排気流量 (m ³ /hr)	7 E 1 0.3
	DIAM	排気筒出口の内径 (m)	
# 8	NSTBT	大気安定度の指定 (KSTB個) A : 1 B : 2	1 0 I 5

カードセット の 順 序	変 数 名	内 容	FORMAT
		C : 3 D : 4 E : 5 F : 6 (右側の数字で指定)	
# 9	HOT	放出源の高さ (m) (KH0個)	7E10.3
# 10	NOBS	観測地点すなわち照射線量 を計算する地点の点数 ≤ 100 NOBS ≤ 0 ならば、前ケー スで用いた観測点位置を用 いる。	1C15
# 11	P1 P2 P3	x_0 又は r_0 y_0 又は θ_0 z_0 又は z_0 ↑ IN $\neq 0$ のとき ↑ IN $=0$ のとき	7E10.3

このカードをNOBS枚繰返す。

以上のカードセット#1~#11を任意回繰返す。

参 考 文 献

- (1) 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針(案), 原子力委員会原子炉安全技術専門部会, 昭和52年3月
- (2) Meteorology and Atomic Energy 1968. David H. Slade, Editor, July 1968, U.S. Atomic Energy Commission, (TID-24190).
- (3) Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. I, Shielding Fundamentals and Methods, Edited by R.G. Jaeger, et. al., Springer-verlag 1968
- (4) R.E. Cooper, EGAD-A Computer Program to Compute Dose Integrals from External Gamma Emitters, DP-1304, Sep. 1972.
- (5) System/360 Scientific Subroutine Package (360A-CM-037) Version III, programmer's Manual, H20-0205-3, IBM corporation, 1968
- (6) K.Imai and T.Iijima, Assessment of Gamma-Exposure Due to a Radioactive Cloud Released from a Point Source, Health Physics, Vol. 18, pp. 207-216, 1970.
- (7) Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, National Bureau of Standards AMS 55, 1972

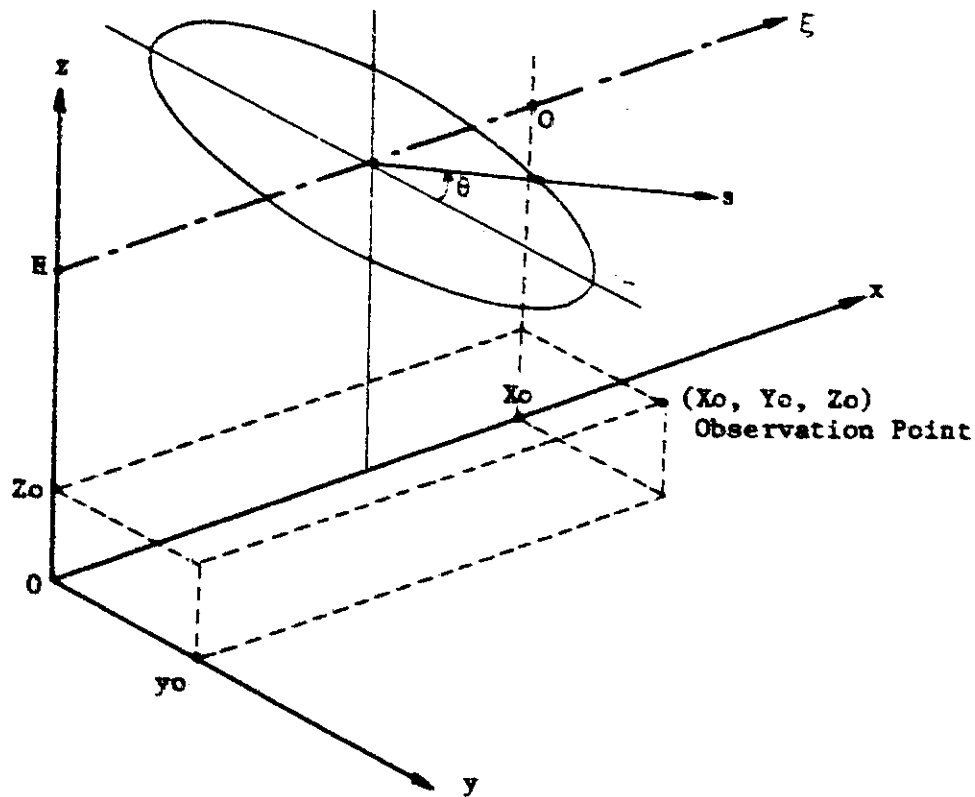


Figure 1. Geometric Relations between Coordinate Systems ; (x,y,z) and (s,θ,ξ)

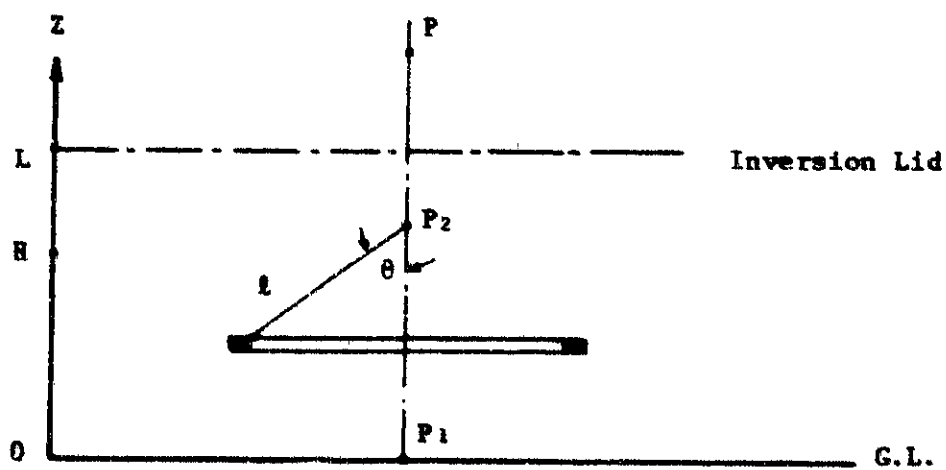


Figure 2. Homogeneous-Infinite-Slab Cloud Approximation

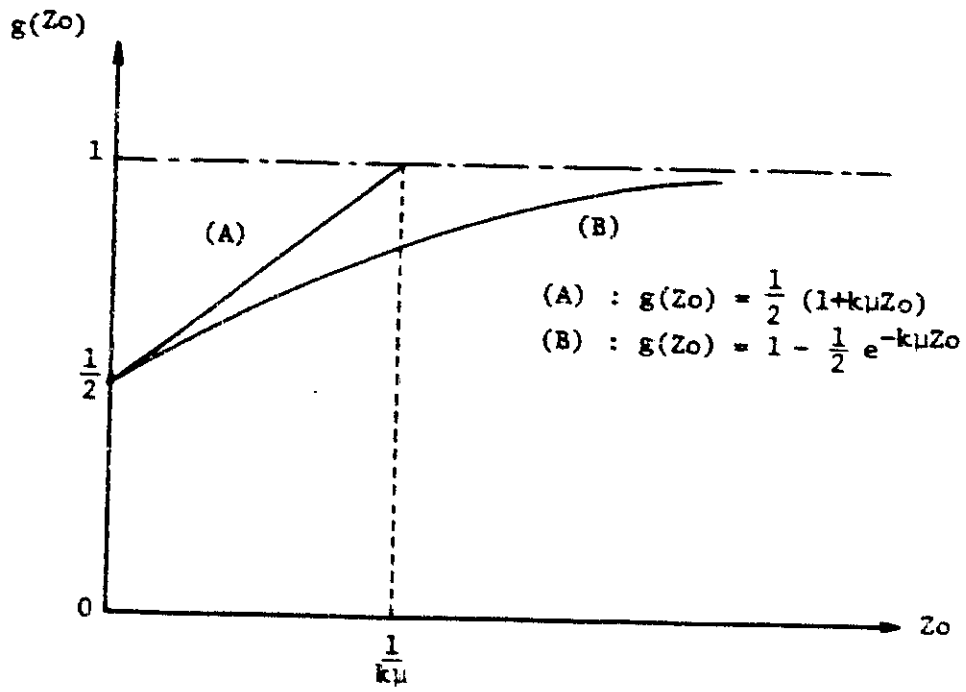
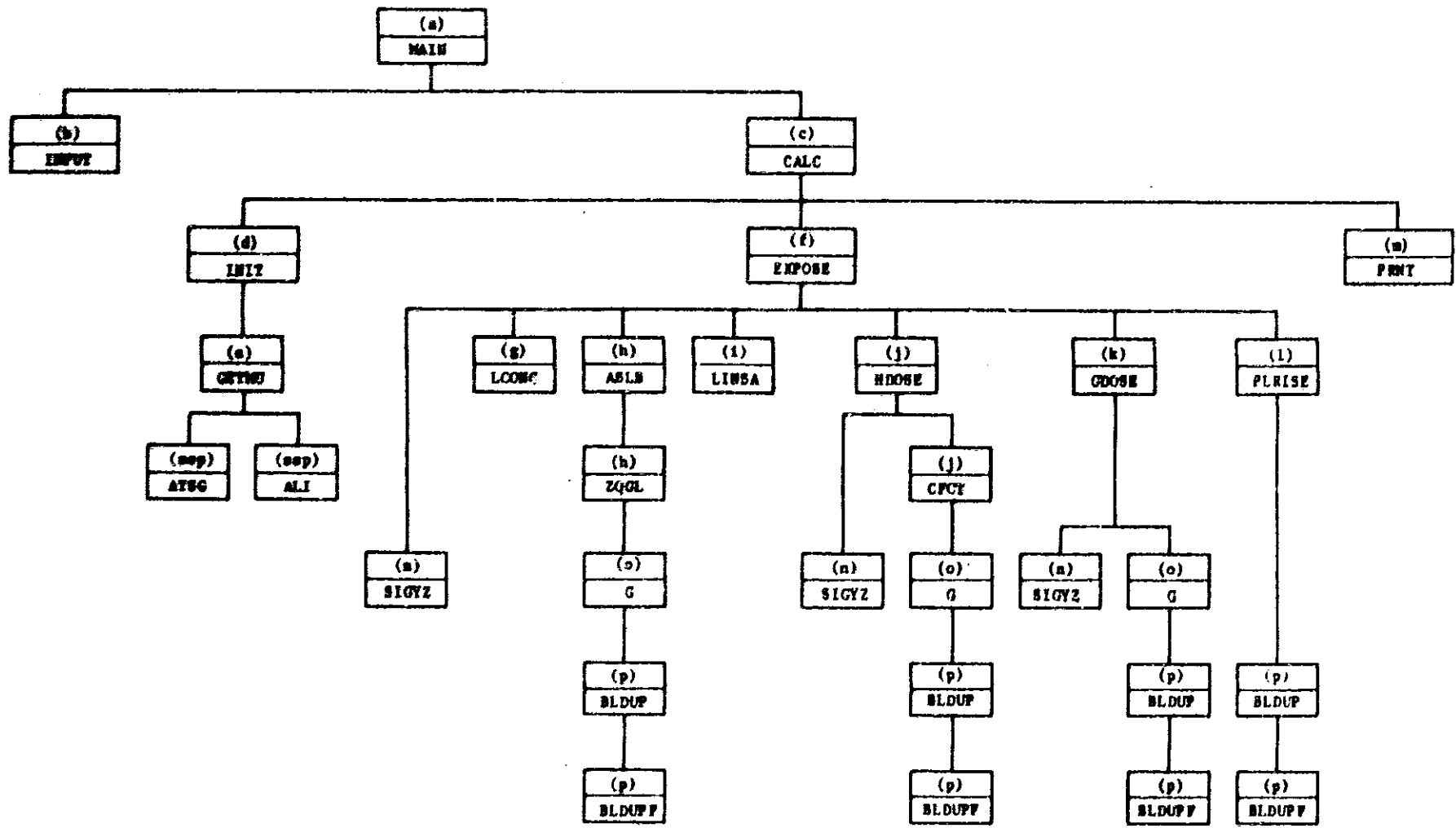


Figure 3. Geometric Correction Factor for Submersion Approximation



— 83 —

Figure 4. Overall Structure of the program : PLUTO

付録 - I X 方向の積分について

風の主軸上の放出点（排気筒）からの距離を表わす独立変数 x に関する積分は、次の変換により、変数 η に関する積分として扱う。

$$x = x_0 + \epsilon$$

$$\epsilon = \epsilon_0 e^\eta$$

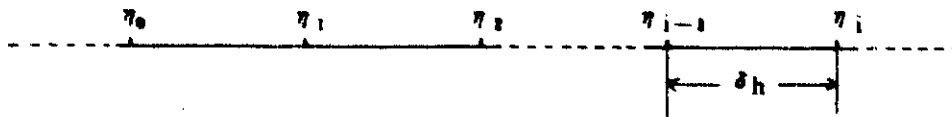
ただし x_0 （変数名 X 0）は、照射線量率を計算する位置の x 座標（入力値）であり、 x 座標の原点は、排気筒（Z 軸）の $x-y$ 平面との交点である。 x_0 の単位は m としている。

上記の換における ϵ_0 （変数名 X 1 0）は、入力により定められる正の定数である。 ϵ_0 の default 値は、1.0 である。

変数 η の積分範囲は、変数 x の積分範囲 $(0, \infty)$ に対応して次のとおりである。

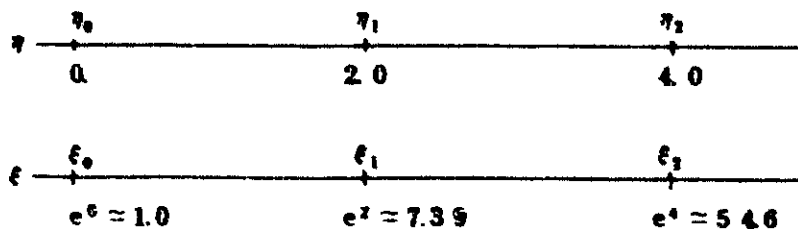
- (i) $x_0 < 0$ のとき $\text{Loge} \left(\frac{x_0}{\epsilon_0} \right) \leq \eta < \infty$
- (ii) $x_0 \geq 0$ のとき $\epsilon < 0$ であれば $\eta_0 \leq \eta < \text{Loge} \left(\frac{x_0}{\epsilon_0} \right)$
 $\epsilon \geq 0$ であれば $\eta_0 \leq \eta < \infty$

η_0 は本来 $-\infty$ であるがプログラムでは $\eta_0 = 0$ としてある。さらに計算精度を必要とする場合は、 η_0 を負の側へ大きくすればよい。 η は、プログラムでは、次のように等間隔に分割され、それぞれの区間 $[\eta_{i-1}, \eta_i]$ について Romberg 積分を行うようにしてある。



区間幅 $\delta_h = \eta_i - \eta_{i-1}$ の初期値（変数名 DELH）としては、入力変数 K \$ の値が用いられる。k \$ の default 値は 2 である。 δ_h （変数名 HH）は、Romberg 積分のループ内で、積分が収束するまで、または、指定した最大分割回数に達するまで次々に 2 分割される。

η の分割例を次に示す。 ϵ_0 (X 1 0) = 1.0, $\delta_h = 2.0$ とする。



前述のように、 $x_0 \geq 0$ のときは、 $\eta_0 = 0$ とすることにより $|\epsilon| < 1$ の範囲は積分範囲から除かれている。このことにより積分精度が悪くなるかも知れないので、当面、プログラムでは $K \$ = 1$ かつ $|x_0| < \frac{1}{\mu}$ であれば $\eta_0 = -1.0$ とするようになっている。

Romberg 積分の収束判定に用いる値 ϵ (変数名 EPS) は、次のように計算して定めている。

$$\epsilon = 10 \times \frac{\mu_a EQ}{u} S_0 \quad (\mu R/hr)$$

S_0 (変数名 S0) は入力値で、 ϵ の値を増減するために用いる。

S_0 の default 値は 100 である。 $S_0 = 10$, $E = 0.5$ (MeV), $Q = 1.0$ (Ci/hr) $u = 1.0$ (m/sec) であれば $\mu_a = 384 \times 10^{-3}$ (m^{-1}) と計算され、 $\epsilon = 0.06$ ($\mu R/hr$) となる。

Romberg 積分における積分区間 $[r_{i-1}, r_i]$ の最大分割回数は、入力変数 N\$ の値から 1 を減じた値である。N\$ の値は、 $5 \leq N\$ \leq 17$ の範囲で入力により指定される。