

# 複数のキャスクを含む空間体系の線量率空間分布を計算する MANYCASK コードユーザーズマニュアル

山越 寿夫\*

## User's Manual of MANYCASK Code for Calculation of Spatial Distributions of Radiation Dose Rates in a System Composed of Many Spent-Fuel-Shipping Casks

By

Hisao YAMAKOSHI

### Abstract

A calculation code MANYCASK is designed for evaluation of spatial distributions of radiation dose rates in ships loaded with a lot of spent fuel shipping casks.

Principle of the calculation method adopted in this code is different from that of ordinary codes, and is advantageous for calculating highly reliable dose rate distributions with a very short calculation time. Basic concept of the principle has been described in other reports in detail.

A brief description of the principle will be included in the present report along with a technique named Shadow Technique in this report, in addition to format descriptions of output data as well as input data. Results of sample calculations are compared with measured results in figures so as to show how the calculation method adopted is valid.

For the purpose of making this code popular among many people, the author writes the user's manual in the present report in Japanese for domestic users, and in English in another report for people in abroad.

## 1. 計算コード MANYCASK の概要

### 1.1 作成のねらい

使用済核燃料輸送容器 (以下ではキャスクと呼ぶ) を専用運搬船に数多く積載した場合の船内線量率空間分布を、キャスクの空間的配置、各キャスクの幾何形状と表面線量率をもとに、詳細かつ迅速に評価し乗員、作業員等、船内関係者に対する放射線安全性を確保することを作成のねらいとしている。

MANYCASK コードの計算法に対する信頼性が高

いことと、その計算法は簡単にマイクロコンピュータにも適していること、さらに計算結果も他の、同様な目的で作成された計算コードに比較してはるかに短時間で得られるので、キャスク発送前検査を終了した段階で、表面線量率測定データを用い船内線量率空間分布の予測に活用することも可能である。

### 1.2 主な計算手法上の特徴

MANYCASK コードと同様な目的で作成された従来の計算コードとして、QAD コードが広く使われているが、MANYCASK コードに用いられている計算法の原理は QAD コードのそれとはやゝ異なっている。この原理の相異が計算時間縮小化の要因となっている。

\* 原子力船部

原稿受付：昭和61年1月13日

原理の相異は大きく分けて言えば二つある。第1のものは、単一なキャスクのまわりの線量率分布計算法そのものにあり、第2のものは、多数キャスクの空間配列効果の考慮をする際の手法にある。

先ず前者についてであるが、従来の計算法では線量率を求めるべく空間内を選んで計算点へもたらされるキャスクからの放射線々量率の寄与を計算する際は、線源領域全体を多数の体積素片に分割し、各素片からの放射線の寄与を逐一加算すると言った方法が採られている。この加算操作は単純であり、一見、短時間で加算は終了しそうであるが、実はこの積分操作の精度を良くする為に素片の数が膨大となっておりかなりの計算時間がかかる。

一方、MANYCASK で用いられている手法では、線源からの寄与の積分は既に終了したかたちとして、線量率空間分布が単純な解析関数<sup>(1),(2),(3)</sup>で表わされている。

ところでこの単純な解析関数の計算時間は上記数値積分の時間と比較して無視できるほどに短いものである。したがって計算原理の相違は計算時間の大差の要因となっている。

つぎに後者についてであるが、従来の計算法では、着目したキャスクの体積素片から出た放射線が着目計算点にもたらす線量率の寄与を、素片毎に加算する際に、素片と計算点とを結ぶ線上にキャスクが存在するか否かを判定し、存在する場合はキャスクを貫いている線分の長さを幾何学的計算から算出している。この判定と幾何学的計算はすべてのキャスクに於けるすべての素片に対して行なわれるので、かなりの計算時間を要する。

一方、MANYCASK コードでは、キャスクが多数、空間配列されている場合は、キャスクから発する放射線を光にたとえれば、他のキャスクによる影が生じ、いわば光と影の複雑な絵模様が空間に映し出されることに着目し、影の方程式及び、線量率計算点から見た着目キャスクが一部分、他のキャスクにより欠けて見える効果を記述する立体角減少率（以下では Redudion Weight\*と呼ぶ）を求め、すべてのキャスクが完全に他のキャスクからの影響を受けないとした場合への補正を行なうと言った手法を採っている。影の方程式のパラメタの計算および Redudion Weight の計算は解析的に簡単に行なうことができ計算時間は極めて短い。計算プログラムでは、あらかじめすべての計算点の Redudion Weight を 1 としているので、完全な影の領域と一部分が影となる領域のみを方程式か

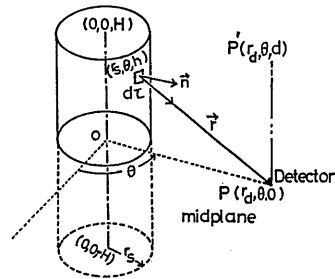
ら決定し、その Redudion Weight を計算している。

この様な光と影の領域に対する Redudion Weight を用いることにより計算時間の大幅な短縮化がはかられている。

### 1.3 計算手法の概略

#### 1.3.1 単体キャスク周辺の空間線量率分布計算法

Fig.1 に示すように、キャスク長軸中央で長軸に垂直にキャスクを 2 分する平面（図では mid-plane と記している）を考え、この平面に垂直に距離  $d$  を採る。長軸から径方向に距離  $r_d$  を採れば、 $d$  と  $r_d$  を指定することにより線量率を計算すべき位置が記述される。（図では  $p'(r_d, \theta, d)$  として表わしてある。）



$$I = \int_0^d \frac{dr(n \cdot r) / r'}{4\pi r'^2}$$

Fig.1 Coordinate system, cask midplane and detector positions  $p$ , and  $p'$

キャスク全長を  $ZH$  (m) とすれば、座標  $(r_d, d)$  における線量率  $D(r_d, d)$  は、 $d$  が  $H$  よりも大きいかなにかに依り、その関数形としての表現の異なった式で与えられる。Fig.2 に示すように無次元パラメタ  $\xi \equiv r_s / (H \pm d)$  と  $\eta \equiv r_d / (H \pm d)$  を導入すれば、以下のごとく  $D(r_d, d)$  は、 $\xi, \eta$  の関数として与えられる。<sup>(2),(3)</sup>

$$D(r_d, d) \equiv \frac{D_0}{\pi} [G(\xi, \eta) + G(\xi, \eta)] \sin^{-1}(r_s / r_d), \text{ for } d \leq H \quad (1a)$$

$$D(r_d, d) \equiv \frac{D_0}{\pi} [G(\xi, \eta) - G(\xi, \eta)] \sin^{-1}(r_s / r_d) \text{ for } d > H \quad (1b)$$

ただしここで、 $D_0$  はキャスク表面上の線量率であり、実測値の場合もあるし、キャスクタイプと収納燃料の物質データ並びに線源データが与えられる場合は SMART コードにより計算<sup>(1),(4)</sup>から与えられる場合もある。また  $r_s$  はメートル単位で表わしたキャスク半径である。

関数  $G(\xi, \eta)$  は、Fig.2 に示すようにパラメタ  $\xi,$

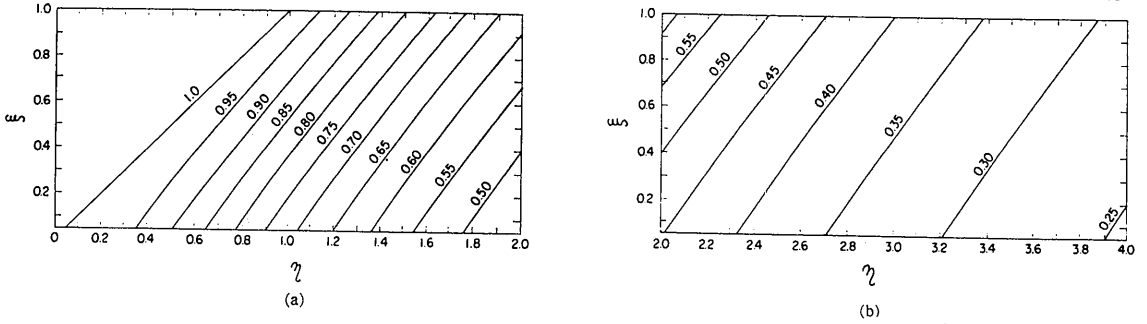


Fig. 2 Contour map of function  $G(\xi, \eta)$

Table 1 Function  $G(\xi, \eta)$

$\eta - \xi$	$\xi$							
	0.0001	0.2	0.6	1.0	1.6	2.4	3.2	4.0
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.2	0.9795	0.9669	0.9447	0.9250	0.8990	0.8694	0.8441	0.8219
0.4	0.9275	0.9063	0.8716	0.8430	0.8078	0.7701	0.7396	0.7140
0.6	0.8566	0.8318	0.7926	0.7617	0.7247	0.6865	0.6562	0.6312
0.8	0.7800	0.7551	0.7164	0.6865	0.6512	0.6152	0.5869	0.5637
1.0	0.7063	0.6832	0.6474	0.6197	0.5874	0.5545	0.5288	0.5078
1.4	0.5806	0.5625	0.5340	0.5119	0.4858	0.4593	0.4384	0.4213
1.8	0.4851	0.4714	0.4493	0.4319	0.4111	0.3897	0.3728	0.3588
2.2	0.4134	0.4029	0.3856	0.3718	0.3551	0.3376	0.3237	0.3121
2.6	0.3586	0.3504	0.3368	0.3256	0.3119	0.2975	0.2858	0.2760
3.0	0.3159	0.3094	0.2984	0.2892	0.2779	0.2657	0.2558	0.2474
3.6	0.2674	0.2626	0.2543	0.2473	0.2385	0.2289	0.2210	0.2142
4.2	0.2314	0.2277	0.2214	0.2159	0.2088	0.2010	0.1945	0.1890
4.8	0.2037	0.2009	0.1958	0.1914	0.1856	0.1792	0.1738	0.1691
5.4	0.1819	0.1796	0.1755	0.1718	0.1671	0.1617	0.1571	0.1530
6.2	0.1591	0.1573	0.1541	0.1512	0.1474	0.1430	0.1392	0.1359
7.0	0.1413	0.1399	0.1373	0.1350	0.1318	0.1282	0.1251	0.1223
7.8	0.1270	0.1259	0.1238	0.1219	0.1193	0.1162	0.1135	0.1112
8.6	0.1154	0.1144	0.1127	0.1111	0.1098	0.1063	0.1040	0.1019
9.8	0.1014	0.1007	0.0993	0.0980	0.0963	0.0942	0.0923	0.0906

$\eta$  に関して比較的弱い依存性を持ち<sup>(1),(3)</sup>, MANYCASK コードでは, Table 1 に示すような内蔵数表から内挿法によりその値が決定される。

(1a) 式 (1b) 式が成立する条件として, 表面線量率  $D_0$  の値がキャスク長軸に関して一様分布をすること, キャスク表面からの放射線角度分布が, いわゆる Cosine 分布をすることが要請されている。これらの条件は実際のキャスクでは良い近似で成立しているものと考えることができる。<sup>(1),(2),(3),(4)</sup>

### 1.3.2 複数キャスクから成る体系の空間線量率分布計算法

既に述べた如く, 多数のキャスクが船内積載された場合は, 各キャスクから発した放射線は他のキャスクによりさえぎられ, Fig. 3 に例示するよくな光と影の複雑な絵模様を周辺の空間に描き出す。

空間線量率の分布計算では, 先ず船の長軸方向に関する中心軸を含む垂直平面を考え, この垂直平面における線量率分布を求める。さらに, この平面に平行な他の垂直平面における線量率分布を求めて行く。この

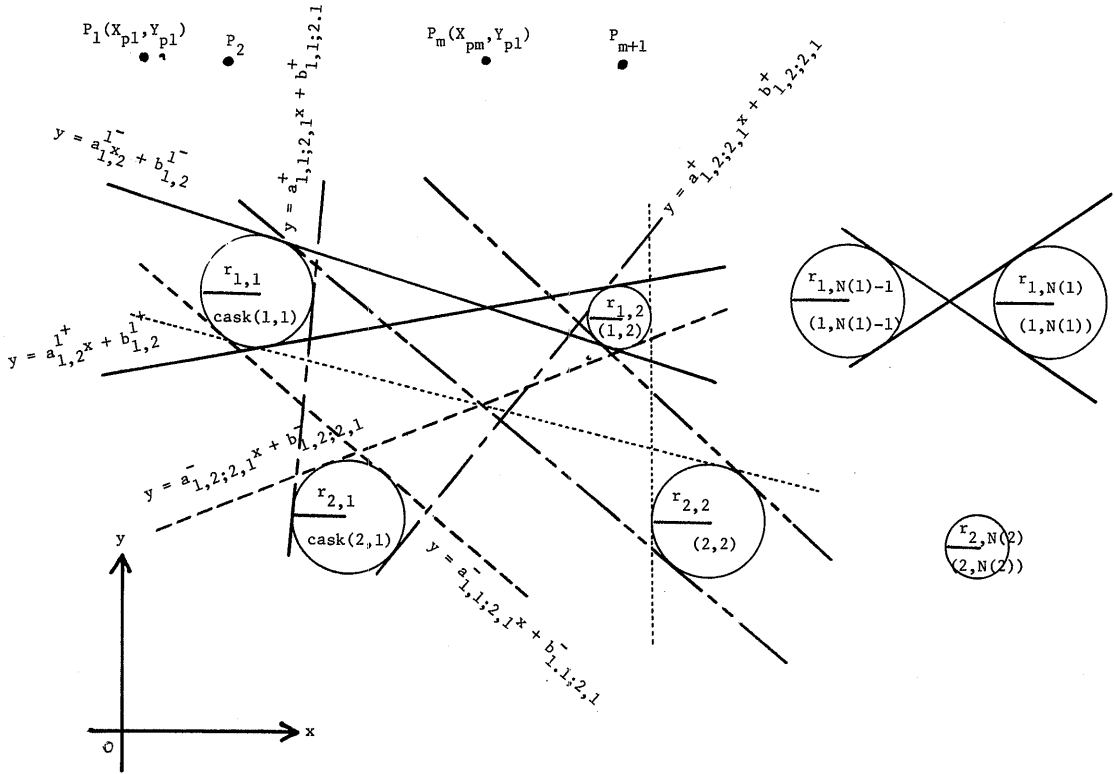


Fig. 3 Equations describing shadows of casks

手続きの全体の結果として、3次元的空间分布が得られることになる。

最初の垂直平面内では、Fig. 3に示すようにキャスクの影は直線の方程式で表わされる。したがって、各直線の特徴づける2個のパラメタを影毎に求めることになる。

垂直平面上で水平な直線を考えその水平直線上に計算点が並んでいるものとすれば、各キャスクによる放射線の光と影により、この水平直線は光と影のまだら模様塗りに塗り分けられる。したがって、水平直線の垂直方向に関する高さ  $Y_{pi}$  ( $Y_{pi}$ は最初の水平直線を意味する)と影の方程式とから容易に、水平直線上の各計算点  $P_1, P_2, \dots, P_m$  が各キャスクを直視できるか否かが決定される。

各キャスクが部分的に他のキャスクに隠れる場合は立体角減少率として Redudion Weight を算出する。なお、Redudion Weight の値は  $Y_{pi}$  が変われば変わるので、計算点の垂直平面内における2次元の広がりに対応して、2次元の行列量である。しかしながら、最初の垂直平面につき求めて置けば、他の垂直平面内では

(200)

その値は変わることが無いと考えられる。

1.3.2.1 影方程式のパラメタ計算式

Fig. 3の例を考えることにする。一般に、上から第  $k$  段目、左から第  $s$  番目のキャスクにより、上から第  $l$  段目、左から第  $t$  番目のキャスクから発した放射線が影となる場合、その影を記述する2本の直線のパラメタを  $a^{\pm}_{k,s,l,t}$  および  $b^{\pm}_{k,s,l,t}$  で表わす。ただし直線の方程式は以下の如く表わされるものとする。

$$y = a^{\pm}_{k,s,l,t}x + b^{\pm}_{k,s,l,t} \tag{2a}$$

垂直平面上における各キャスクの中心位置を水平方向成分  $x_{k,s}, x_{l,t}$  および垂直方向成分  $y_{k,s}, y_{l,t}$  で記述し、キャスク半径を  $r_{k,s}, r_{l,t}$  で表わすことにすれば、上記の各パラメタは以下の如く表わされる。

$$a^{\pm}_{k,s,l,t} = \frac{(y_{k,s} - y_{l,t}) Q_{k,s,l,t} \pm (x_{k,s} - x_{l,t}) (r_{k,s} + r_{l,t})}{(x_{k,s} - x_{l,t}) Q_{k,s,l,t} \mp (y_{k,s} - y_{l,t}) (r_{k,s} + r_{l,t})} \tag{2b}$$

$$b^{\pm}_{k,s,l,t} = \left\{ \begin{array}{l} (y_{k,s} + r_{k,s} y_{l,t} / r_{l,t}) \\ - (x_{k,s} + r_{k,s} x_{l,t} / r_{l,t}) a^{\pm}_{k,s,l,t} \end{array} \right\} R_{k,s,l,t} \tag{2c}$$

たゞし、

$$\begin{cases} Q_{k,s,l,t} \equiv [(x_{k,s} - x_{l,t})^2 + (y_{k,s} - y_{l,t})^2 \\ \quad - (r_{k,s} + r_{l,t})^2]^{1/2} & (3a) \\ R_{k,s,l,t} \equiv [I + r_{k,s}/r_{l,t}]^{-1} & (3b) \end{cases}$$

である。

(2b) 式で与えられるパラメタの符合のうちで、いずれか一方に対して値が $\infty$ となる場合は、以下の式が適用される。

$$x = (x_{h,s} + r_{h,s}x_{l,t}/r_{l,t}) R_{k,s,l,t} \quad (2b)$$

上記(2)式、(3)式は、特に同一段に属すキャスク相互間に対しては、簡単な添字表現法で表わすことにする。例えば、上から第*i*段目のキャスクに着目した場合、水平方向(すなわち*x*方向)に*N(i)*個のキャスクが存在するものと仮定すれば、

$$y = a_{j-1,j}^{\pm} x + b_{j-1,j}^{\pm}, \quad N(i) \geq j \geq 2 \quad (4a)$$

$$a_{j-1,j}^{\pm} = \frac{(y_{i,j} - y_{i,j-1}) Q_j^{\pm} \pm (x_{i,j} - x_{i,j-1})(r_{i,j} + r_{i,j-1})}{(x_{i,j} \times x_{i,j-1}) Q_j^{\pm} \mp (y_{i,j} - y_{i,j-1})(r_{i,j} + r_{i,j-1})} \quad (4b)$$

$$b_{j-1,j}^{\pm} = \left\{ \begin{array}{l} (y_{i,j} + r_{i,j}y_{i,j-1}/r_{i,j-1}) \\ - (x_{i,j} + r_{i,j}x_{i,j-1}/r_{i,j-1}) a_{j-1,j}^{\pm} \end{array} \right\} R_j^{\pm} \quad (4c)$$

と表わすことができる。

1.3.2.2 影効果としての立体角減少率の計算式

Fig. 4 を例に、中心座標が垂直平面上で  $(x_2, y_2)$  と与

えられる半径  $r_2$  のキャスクから放射線が出ている場合を考える。<sup>\*)</sup> 同一の垂直平面上にある線量率計算点 *D* に放射線が到るものとする。

すべてのキャスクは上記垂直平面上では円で表わされるので、以下では、円として扱うことにする。

中心座標が  $(x_1, y_1)$  で半径  $r_1$  のキャスクが点 *P* と着目キャスクとの間に割って入った状態においては、点 *P* から見た着目キャスクの一部が欠けてしまう。割込みの程度によって欠ける大きさが種々に変わる。

キャスク表面は発する放射線で一様に輝いているとみなせるので、着目キャスクが点 *P* から完全に見通せる場合は長方形の板となって見える。この場合、長方形の短辺は  $2r_2$  の長さであり、それに対応した立体角となって見えていると考えられる。

Fig. 4 の如く、着目キャスクの中心点を  $O_2$  と表わすことにする。点 *P* と  $O_2$  とを結ぶ線分に直角に、点  $O_2$  から直線を引き延ばすことにする。割込みキャスクに接する様に点 *P* から直線を引き、特に着目キャスクに近い方の接線を長く延長させ、上記の点  $O_2$  から延ばして来た直線と交わらせる。この交点と点  $O_2$  との間の距離を *l* とする。

Fig. 4 のケース(i)のような場合は割込みが充分ではなく、 $l > r_2$  となっているが、このような状態では点 *P* からキャスク全体が完全に見通せ、したがって立体角減少は無いので考慮の対象から外することができる。

点 *P* からの直線が割込みキャスクに接する点は2個処、すなわち Fig. 4 に示す点 *T* と *T'* が存在する。

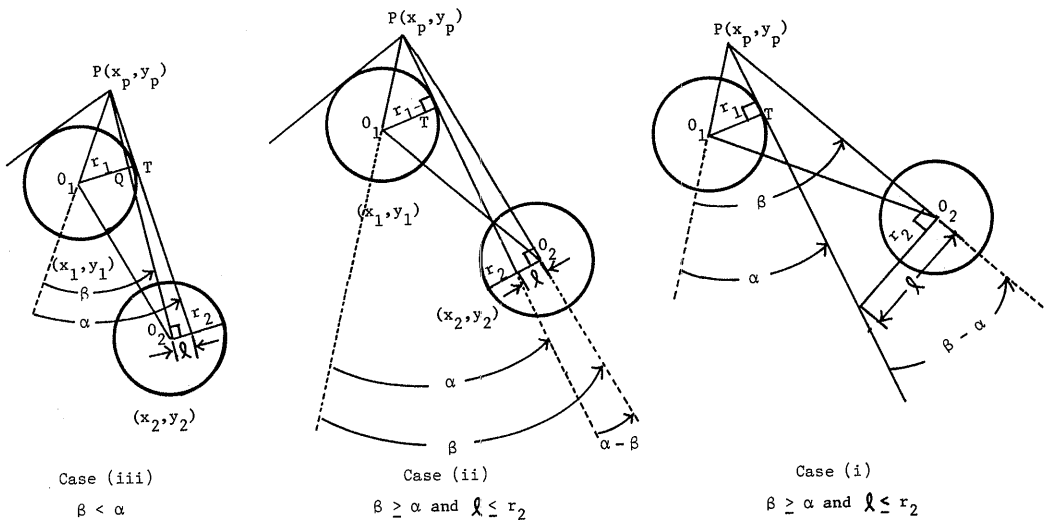


Fig. 4 Three cases of cask shading

このうちで重要な接点は、割込みキャスクの中心点 $O_1$ が点 $P$ と点 $O_2$ とを結ぶ線の左側に存在する場合は、 $x$ 座標の大きな方の接点であり、中心点 $O_1$ が右側にある場合は $x$ 座標の小さな方の接点である。Fig. 4では重要な方の接点を $T$ で表わしてある。

接点 $T$  (又は $T'$ ) が重要な接点として決まると、点 $P$ と重要接点とを結ぶ直線が決まる。この直線が前に述べた接線である。

接線に対して点 $O_2$ と点 $O_1$ とが同一の側に存在する場合はFig. 4に示すケース(iii)であり、相互に異なる側に存在する場合はケース(ii)である。したがって、接線の式に対して点 $O_1$ と点 $O_2$ の $y$ 座標が同符合の場合がケース(iii)、異符合の場合が(ii)であると判定される。

以下では具体的に、2本の接線の方程式に対するパラメタと接点の $x$ 座標の計算式を示すこととする。

接線の式を記述する2個のパラメタに対する式を導く際は、(2a)式と(2b)式において半径 $r_{k,s}$ の円が点に変化したものと考え、 $\lim_{r_{k,s} \rightarrow 0}$ の極限操作を行なうこととする。

$$y = a_{\bar{p},1} x + b_{\bar{p},1} \tag{5a}$$

$$a_{\bar{p},1} \equiv \lim_{r_{k,s} \rightarrow 0} a_{\bar{k},s,t} \tag{5b}$$

$$b_{\bar{p},1} \equiv \lim_{r_{k,s} \rightarrow 0} b_{\bar{k},s,t} \tag{5c}$$

ここで、 $a_{\bar{p},1}$  或いは  $b_{\bar{p},1}$  のいずれか一方の値が発散する場合には、(2b')式が適用される。

2個の接点に対する $x$ 座標の式は、パラメタ $a_{\bar{p},1}$ の符号に対応させた符号を付けて $x_{\bar{k}}$ と表せば、

$$x_{\bar{k}} = \frac{a_{\bar{p},1} (y_p + y_1 - 2b_{\bar{p},1} - a_{\bar{p},1} x_p) + x_1}{1 + (a_{\bar{p},1})^2} \tag{6}$$

で与えられる。

以上のようにして、立体角減少率を計算する為の幾何学的配置を記述するパラメタが決定され、ケース(ii)と(iii)への振り分けが確定される。

以下では、ケース(ii)と(iii)に対する立体角減少率の計算式を示す。

$$\rho_1^2 \equiv (x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 \tag{7a}$$

$$\rho_2^2 \equiv (x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2 \tag{7b}$$

$$\rho_{i2}^2 \equiv (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \tag{7c}$$

$$l = \rho_2 \frac{(\rho_1^2 + \rho_2^2 - \rho_{i2}^2) r_1 - \sqrt{(\rho_1^2 - r_1^2)} (4\rho_1^2 \rho_2^2 - (\rho_1^2 + \rho_2^2 - \rho_{i2}^2)^2)}{-(\rho_1^2 + \rho_2^2 - \rho_{i2}^2)^2} \tag{7d}$$

(202)

$$\text{減少率} = 1 + \frac{l}{r_2}, \text{ (ii) の場合} \tag{7e}$$

$$= 1 - \frac{l}{r_2}, \text{ (iii) の場合} \tag{7f}$$

### 1.4 隔壁等による放射線減度効果の取り扱い

船の甲板、隔壁による放射線減度は、中性子の場合には、鉄板等の中性子平的自由行程の大きさと実際の甲板、隔壁の厚さとの比較から、無視できるものと近似している。ガンマ線の場合は、キャスクから放射されるガンマ線のエネルギー分布は約 $2MeV$ 前後のエネルギー領域で主要成分占めているものと考えられるので、 $2MeV$ のガンマ線の減衰率を用いている。

### 1.5 計算の流れ

計算の大まかな流れをFig. 5に示した。内容は9個

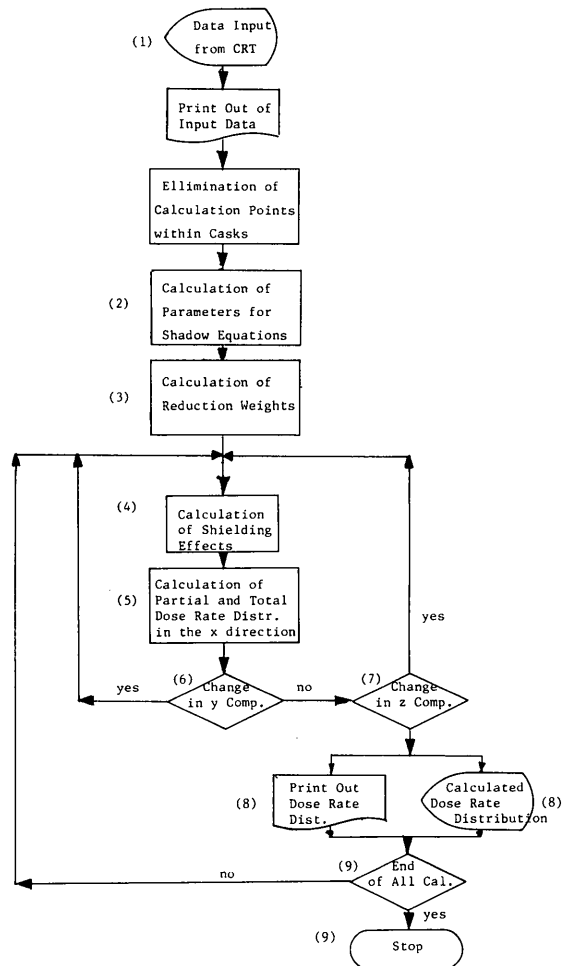


Fig. 5 Flow Chart

のステップに大別される。

(1) 入力データの読み込み

入力データの読み込みと、読み込み値の再確認の為に、読み込み値出力とが含まれている。

(2) 計算パラメタの決定

長軸方向の船体中央軸を含む垂直平面においてキャスクを表わす円内に計算点が存在する場合は座標成分として 9999.0 を与えることにより計算点を排除する操作を先ず行ない、次いで影方程式のパラメタの値を、各キャスクの中心位置と半径とを考慮して決定する。

影方程式のパラメタはキャスクの  $x$  軸、 $y$  軸方向に関する配列番号に関して 2 次元的に配列した行列値として記憶される。

(3) Reduction Weight の決定

指定された  $y$  軸座標を持ち  $x$  軸に平行な直線上に配列された線量率計算点に対し、接線方程式のパラメタと接点の  $x$  座標を各キャスク毎に決定し、Reduction Weight を決定する。

影でない計算点に対してはあらかじめ Weight の値を 1 に与えてあるので特に Weight の値を求める必要はなく、一部分、キャスクがかくれる計算点へと次々に計算対象点が移動する。

Reduction Weight の値は、計算点が配列している直線の  $y$  座標が変わる毎に変わるので、計算点の 2 次元的配列に対応して、2 次元的行列として記憶される。

なお、Reduction Weight の計算の際には、計算点をはさんで  $x$  の正の方向と負の方向にそれぞれ入力データで指定された値の幅を設け、 $x$  座標がその範囲に存在するキャスクから発する放射線に対して影の効果を正確に扱おう操作が採られている。この操作は、遠方キャスクからの放射線の寄与が無視し得る場合にまで精密に影効果を扱う必要は無いとの考え方に基づいており、計算時間の短縮化に役立たせている。

(4) 隔壁等の遮蔽効果の決定

放射線が船の隔壁、甲板を透過する様な計算点配列の場合に対し、ガンマ線の減衰率を算出する。

(5)  $x$  軸に平行な線分上の線量率分布の決定

先ず、各キャスクが仮に完全に計算点から見通せる仮想状態に対して、内蔵の  $G$ -関係の値を用いた解析式から、線量率を決定する。次いで Reduction Weight や隔壁等による放射線減衰率による補正を行ない、各キャスクによる線量率分

布が行列として記憶される。同時に、全キャスクによる線量率分布も計算され記憶される。

(6)  $x$  軸に水平な線分の  $y$  座標の変更

入力データの指示に従って決められた  $y$  座標を持つ、 $x$  軸に水平な線分上に並ぶ計算点を記憶から呼び出す。

(7) 垂直平面の位置の変更

入力データの指示に従って、船腹外向き ( $z$  軸) 方向へ指定された幅だけ垂直平面の位置をずらす操作を行なう。これ以上、位置をずらす操作を行わず計算を停止すべきか否かの判断も、入力データの指示に従って行なう。

(8) 線量率分布の出力

入力データの指示に従って、全キャスクによる線量率分布のほかに、各キャスクからの線量率分布への寄与の内訳も出力するか否か判断しつつ、出力する。

(9) 計算の停止

後述の第 2 章でふれる入力パラメタ NPART の値により、ガンマ線或いは中性子のみの出力の後に中性子或いはガンマ線の場合の出力も追加するか否かを判断しつつ、線量率空間分布を出力する。

すべての出力を終了したと判断した場合に、計算を停止する。

以上述べたステップは縦方向の流れとして有機的につながっているが、特に、ステップ(7)と(8)は、その作業を終了した後にステップ(3)へとフィードバックされる。

Table 2 Sample Input for MANYCASK Code

```

-----*-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----
0100  SAMPLE INPUT FOR MANYCASK CODE ; ANALYSIS OF GAMMA-RAY DOSE RATE
0200  DISTRIBUTION IN HINDOURA MARU LOADING THREE CASKS
0300  1      1
0400  2      2
0500  3      1  -71
0600  0      0      0
0700  14.0    14.0
0800  2.0     2.57   -2.57   2.57   1.05   1.10
0900  6.8     2.57   -2.57   2.57   1.05   1.01
1000  14.0    2.17   -2.17   2.17   0.651  3.80
1100  0.0     1.50    3.0
1200  1.87
1300  0.2
*** END OF DATA SET ***
    
```

2. データ入力型式

Table 2には、計算実行に必要な入力データの入力型式を示した。以下では、そこに現われるパラメタにつき説明する。

パラメタ

TITLE	問題の性格、計算の日付等を明確にするタイトル文を入れる。
IRTYPE	計算対象とする放射線の種類別のインデックスを表わす。IRTYPE=1ではガンマ線のみの計算を意味し、=2では中性子のみの計算を、また=3では中性子の計算をガンマ線の計算の後に続けて行なうことを意味する。
NPART	出力コントロールのインデックスである。NPART=0では、各キャスクからの線量率分布への寄与の成分は出力しない。NPART=1では、全キャスクからの寄与による空間分布と共に、各キャスクからの寄与の内訳も出力する。
NYCASK	各キャスクの配列が垂直方向(Y軸方向)に幾段あるかを示す。最大値は6とする。
NXCASK(N)	各段毎に水平方向(X軸方向)に存在するキャスクの個数を表わす。最大15とする。
NZDTCT	船のながて方向に垂直に広がる平面の枚数を表わす。各垂直平面上には、2次元的に計算点が配列している。船の中心軸を含む垂直平面を含めて数えた枚数であり、最大で20とする。特にこのパラメタの値を空白とした場合は、値として1が

デフォルト値となる。

NYDTCT	Y軸方向の計算点メッシュ数であり、最大で20とする。
NXDTCT	X軸方向の計算点メッシュ数であり、最大値は90である。

NZDTCT, NYDTCT, NXDTCTのどれかが負整数の場合は、対応して後に出て来る実数型パラメタZDTCT, YDTCT, XDTCTの値自身が、きざみ幅を与える事を意味する。正整数の場合は、逐一、ZDTCT, YDTCT, XDTCTの対応するパラメタにおいて計算点配列のZ座標成分, Y座標成分 X座標成分を詳細に与える事を意味する。

ISHLZ	Z軸に垂直な鉄板の数であり最大値は6とする。
ISHLDY	Y軸に垂直な鉄板の数であり最大値は6とする。
ISHLDX	X軸に垂直な鉄板の数であり最大値は6とする。

ISHLZ, ISHLDY, ISHLDXのいずれかが零の場合は、対応するZSHLD, YSHLD, XSHLDおよびWZ, WY, WX等のパラメタを省略する事ができる。

XWIDP Reduction Weightを計算する際に、計算点をはさんでX軸正方向にXWIDPメートルの幅の範囲を考え、その範囲に中心軸のX成分座標を持つキャスクに対しては、そこから発生する放射線の影効果を正しく取り扱う。

XWIDN 同じく計算点からX軸負方向にXWIDNメートルの幅の範囲を考え、その範囲内に中心軸のX成分座標を持つキャスクに対しては、そこから発生する放



射線の影効果を正しく取り扱う。

- XCASK(I,J) 各段毎に記述するパラメタであり、水平方向に配列されたキャスクの中心点の $x$ 座標を、値の小さい方から大きい方へ順序良く並べていく。座標の単位はメートルとする。
- YCASK(I,J) 上記XCASKに対応した中心点の $y$ 座標を与える。
- HP(I,J) キャスク有効部先端の $Z$ 軸正方向の座標。
- HN(I,J) キャスク有効部先端の $Z$ 軸負方向の座標(符号を含めた値)。
- なお、キャスク有効長は $HP-HN$ として求められる。
- RCASK(I,J) 水平方向に配列されたキャスクの半径であり、各段毎に順序よく指定してゆくものとする。
- DCASK(I,J) 水平方向に配列されたキャスクの表面線量率の値であり、各段毎に順序良く指定するものとする。
- ZDTCT(I) 計算点が配列している垂直平面の $Z$ 方向座標を与える。メートル単位で与えるものとする。
- YDTCT(I) 垂直平面内で水平方向に配列された計算点に対する $y$ 座標成分である。
- XDTCT(I) 垂直平面内で水平方向に配列された計算点の $x$ 座標である。

前記パラメタNZDTCT, NYDTCT, NXDTCTのうちのどれか、負整数の場合は、対応するZDTCT, YDTCT, XDTCTの値自身がきざみ幅を与える事は既に述べた通りであるが、その場合の計算点の座標の初期値は0(メートル)とする。また、きざみ幅で計算点位置を変えた場合に計算点がキャスクの内部に存在する事態が生じた際は、計算点の $x, y$ 座標として9999,0を与え、キャスク内から排除する操作が実行される。

- ZSHLD(I)  $Z$ 軸に垂直な鉄板の位置。(メートル単位)
- WZ(I) 上記鉄板の厚さ。(メートル単位)
- ZSHLXP(I) 上記鉄板の $X$ 軸上正方向への広がりを記述する為の端点座標。
- ZSHLXN(I) 上記鉄板の $X$ 軸負方向への広がりを記述する端点座標。
- ZSHLYP(I)  $Y$ 軸に関する、ZSHLXPと同様な量。
- ZSHLYN(I)  $Y$ 軸に関する、ZSHLXNと同様な量。

- YSHLD(I)  $Y$ 軸に垂直な鉄板の位置。(メートル単位)
- WY(I)  $Y$ 軸に垂直な第1鉄板の厚さ。(メートル単位)
- YSHLXP(I)  $Y$ 軸に垂直な上記鉄板の $X$ 軸正方向の端点座標。
- YSHLXN(I)  $Y$ 軸に垂直な上記鉄板の $X$ 軸負方向の端点座標。
- YSHLZP(I)  $Y$ 軸に垂直な上記鉄板の $Z$ 軸正方向の端点座標。
- YSHLZN(I)  $Y$ 軸に垂直な上記鉄板の $Z$ 軸負方向の端点座標。
- XSHLD(I)  $X$ 軸に垂直な鉄板の位置。(メートル単位)
- WX(I)  $X$ 軸に垂直な第1鉄板の厚さ。(メートル単位)
- XSHLYP(I)  $X$ 軸に垂直な上記鉄板の $Y$ 軸正方向の端点座標。
- XSHLYN(I)  $X$ 軸に垂直な上記鉄板の $Y$ 軸負方向の端点座標。
- XSHLZP(I)  $X$ 軸に垂直な上記鉄板の $Z$ 軸正方向の端点座標。
- XSHLZN(I)  $X$ 軸に垂直な上記鉄板の $Z$ 軸負方向の端点座標。

Table3に実際の入力例を示す。この例は後述のFig.7に示す船内線量率分布計算の為の入力例である。

### 3. 出力型式

入力データの確認の為、説明コメント付きで入力データの再出力を先ず行なう。次いで、計算点の座標と共に、全キャスクによる線量率分布が出力される。

出力コントロールパラメタNPARTがNPART=1の場合には、各キャスクによる線量率空間分布への寄与の内訳が追加出力される。

Table4に出力例を示す。

### 4. 計算例

Fig.6に単体キャスクのまわりの中性子、ガンマ線の線量率空間分布を<sup>(1)</sup>、またFig.7には、キャスク専用運搬船に3体のキャスクが積載された場合の船倉天井部におけるガンマ線々量率分布を計算し、実測値<sup>(5)</sup>と比較した例<sup>(6)</sup>を示す。

特にFig.7では船の長軸中心線上と、それに平行に1.5mおよび3m離れた線上に分布する線量率分布を、

**Table 3** Input Description for MANYCASK Code

(A)	(2 cards)	FORMAT (8A10)	: TITLE(N), N=1, 16
(B)	(1 card)	FORMAT (215)	: IRTYPE, NPART
(C)	(1 card)	FORMAT (715)	: NYCASK, NXCASK(N), N=1, NYCASK
(D)*	(1 card)	FORMAT (315)	: NZDTCT, NYDTCT, NXDTCT
(E)	(1 card)	FORMAT (315)	: ISHLDZ, ISHLDY, ISHLDX
(F)	(1 card)	FORMAT (2E10.3)	: XWIDP, XWIDN
(G)	(1 ~ 90 cards)	FORMAT (4E10.3)	: [(XCASK(N, M), YCASK(N, M), HP(N, M), HN(N, M), RCASK(N, M), DCASK(N, M)), N=1, NXCASK(M)], M=1, NYCASK
(H)	(1 ~ 4 cards)	FORMAT (5E10.3)	: ZDTCT(N), N=1, NZTDCT
(I)	(1 ~ 4 cards)	FORMAT (5E10.3)	: YDTCT(N), N=1, NYDTCT
(J)	(1 ~ 4 cards)	FORMAT (5E10.3)	: XDTCT(N), N=1, NXDTCT

If either integer in the (E) card is zero, corresponding cards in the following can be omitted.

(K)	(1 ~ 2 cards)	FORMAT (6E10.3)	: [ZSHLD(N), WZ(N), ZSHLXP(N), ZSHLXN(N), ZSHLYP(N), ZSHLYN(N)], N=1, ISHLDZ
(L)	(1 ~ 2 cards)	FORMAT (6E10.3)	: [YSHLD(N), WY(N), YSHLZP(N), YSHLZN(N), YSHLXP(N), YSHLXN(N)], N=1, ISHLDY
(M)	(1 ~ 2 cards)	FORMAT (6E10.3)	: [XSHLD(N), WX(N), XSHLYP(N), XSHLYN(N), XSHLZP(N), XSHLZN(N)], N=1, ISHLDX

\* If either integer in the card (D) is negative, corresponding data in cards (H), (I) and (J) should be considered as mesh-width data.

**Table 4** Sample Output from MANYCASK Code

```

PRINT OUT OF INPUT DATA FOR VERIFICATION
NPART= 1 NYCASK= 2 NXCASK(1)= 2 NXCASK(2)= 1
NZDTCT= 3 NYDTCT= 1 NXDTCT= -71 IRTYPE= 1 ISHLDZ= 0 ISHLDY= 0 ISHLDX= 0
XWIDP= 0.1400E+02 XWIDN= 0.1400E+02
I=1, J=1 XCASK= 0.2000E+01 YCASK= 0.2570E+01 RCASK= 0.1050E+01 DCASK= 0.1100E+01
I=1, J=2 XCASK= 0.6800E+01 YCASK= 0.2570E+01 RCASK= 0.1050E+01 DCASK= 0.1010E+01
I=2, J=1 XCASK= 0.1400E+02 YCASK= 0.2170E+01 RCASK= 0.6510E+00 DCASK= 0.3800E+01
ZDTCT(1)= 0.0 ZDTCT(2)= 0.1500E+01 ZDTCT(3)= 0.3000E+01
YDTCT(1)= 0.1780E+01
XDTCT(1)= 0.2000E+00

XCOMPONENT=0.0 YCOMPONENT=0.1780E+03 ZCOMPONENT=0.0 TOTAL DOSE RATE =0.2763E+00
PARTIAL CONTRIBUTIONS D1=0.2250E+00 D2=0.3629E-01 D3=0.1499E-01

XCOMPONENT=0.2000E+02 YCOMPONENT=0.1780E+03 ZCOMPONENT=0.0 TOTAL DOSE RATE =0.2991E+00
PARTIAL CONTRIBUTIONS D1=0.2454E+00 D2=0.3833E-01 D3=0.1541E-01

XCOMPONENT=0.4000E+02 YCOMPONENT=0.1780E+03 ZCOMPONENT=0.0 TOTAL DOSE RATE =0.3235E+00
PARTIAL CONTRIBUTIONS D1=0.2671E+00 D2=0.4052E-01 D3=0.1587E-01

XCOMPONENT=0.6000E+02 YCOMPONENT=0.1780E+03 ZCOMPONENT=0.0 TOTAL DOSE RATE =0.3494E+00
PARTIAL CONTRIBUTIONS D1=0.2901E+00 D2=0.4295E-01 D3=0.1634E-01

XCOMPONENT=0.8000E+02 YCOMPONENT=0.1780E+03 ZCOMPONENT=0.0 TOTAL DOSE RATE =0.3762E+00
PARTIAL CONTRIBUTIONS D1=0.3138E+00 D2=0.4553E-01 D3=0.1683E-01

```

XCOMPONENT=0.1000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.3375E+00	ZCOMPONENT=0.0 D2=0.4836E-01	D3=0.1734E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4032E+00
XCOMPONENT=0.1200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.3596E+00	ZCOMPONENT=0.0 D2=0.5146E-01	D3=0.1787E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4290E+00
XCOMPONENT=0.1400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.3795E+00	ZCOMPONENT=0.0 D2=0.5477E-01	D3=0.1843E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4527E+00
XCOMPONENT=0.2000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1046E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.4505E-01	D3=-.3343E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1163E+00
XCOMPONENT=0.2200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1051E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.4733E-01	D3=-.3365E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1188E+00
XCOMPONENT=0.2400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1067E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.4974E-01	D3=-.3388E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1225E+00
XCOMPONENT=0.2600E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1094E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.5230E-01	D3=-.3412E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1276E+00
XCOMPONENT=0.2800E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1091E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.5499E-01	D3=-.3441E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1296E+00
XCOMPONENT=0.3000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1086E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.5782E-01	D3=-.3496E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1315E+00
XCOMPONENT=0.3200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1081E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.6082E-01	D3=-.3552E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1334E+00
XCOMPONENT=0.3400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1064E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.6399E-01	D3=-.3610E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1343E+00
XCOMPONENT=0.3600E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1037E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.6732E-01	D3=-.3670E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1343E+00
XCOMPONENT=0.3800E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1004E+00	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.7082E-01	D3=-.3733E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1339E+00
XCOMPONENT=0.4000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.9674E-01	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.7444E-01	D3=-.3722E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1340E+00
XCOMPONENT=0.4200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.9286E-01	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.7799E-01	D3=-.3705E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1338E+00
XCOMPONENT=0.4400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.8889E-01	ZCOMPONENT=0.3000E+03 D2=0.8162E-01	D3=-.3688E-01	TOTAL DOSE RATE =0.1336E+00
XCOMPONENT=0.3800E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.2141E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1169E+00	D3=0.8817E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4191E+00
XCOMPONENT=0.4000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1956E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1269E+00	D3=0.9030E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4129E+00
XCOMPONENT=0.4200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1789E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1380E+00	D3=0.9252E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4095E+00
XCOMPONENT=0.4400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1638E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1504E+00	D3=0.9484E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4090E+00

XCOMPONENT=0.4600E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1504E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1642E+00	D3=0.9725E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4118E+00
XCOMPONENT=0.4800E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1382E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1796E+00	D3=0.9981E-01	TOTAL DOSE RATE =0.4177E+00
XCOMPONENT=0.5000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1273E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.1966E+00	D3=0.1025E+00	TOTAL DOSE RATE =0.4263E+00
XCOMPONENT=0.5200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1174E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.2150E+00	D3=0.1053E+00	TOTAL DOSE RATE =0.4377E+00
XCOMPONENT=0.5400E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1086E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.2348E+00	D3=0.1082E+00	TOTAL DOSE RATE =0.4516E+00
XCOMPONENT=0.5600E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.1006E+00	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.2554E+00	D3=0.1113E+00	TOTAL DOSE RATE =0.4673E+00
XCOMPONENT=0.5800E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.9340E-01	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.2788E+00	D3=0.1146E+00	TOTAL DOSE RATE =0.4848E+00
XCOMPONENT=0.6000E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.8689E-01	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.2973E+00	D3=0.1180E+00	TOTAL DOSE RATE =0.5022E+00
XCOMPONENT=0.6200E+03 PARTIAL CONTRIBUTIONS	YCOMPONENT=0.1780E+03 D1=0.8096E-01	ZCOMPONENT=0.1500E+03 D2=0.3160E+00	D3=0.1213E+00	TOTAL DOSE RATE =0.5183E+00

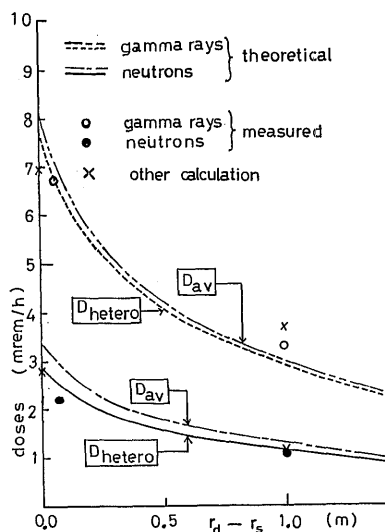


Fig. 6 Calculated example of dose rate distributions for neutrons and gamma rays around a wet type cask.  $D_{av}$  and  $D_{hetero}$  stand for modeling conditions of radiation source distributions actually loaded with heterogeneous configuration in the cask.

全キャスクによる線量率分布および各キャスクからの寄与の内訳について、あわせて示してある。

いずれの例も遮蔽板を透過しない様な計算点の配列に対する場合であるが、測定値と可成り良く一致していると考えられ、計算に対する信頼性の高さを証拠立て、いると考えられる。

線量率分布の計算精度を大きく左右する因子として、計算の為に入力したキャスク表面線量率の精度が果たす役割が最も大きい。Fig. 6 に示した計算では、キャスク壁部の物質、構造、収納した使用済核燃料に対する物質データおよび線源データが詳細にわたって明確にわかっていたので、キャスク表面線量率評価コード SMART<sup>(1),(4)</sup> を適用することにより、計算から表面線量率を決定することができた。したがって、この計算値を入力データとして使用することができた。

Fig. 6 には、収納燃料の線源強度が大きく異なる場合の燃料配置効果を考慮した場合と考慮しない場合の両方につき、線量率分布を示してあるが、いずれにせよ、この図は、MANYCASK コードに使用されている、解析関数法に基づく線量率分布計算法の妥当性を証明しているものと考えられる。

Fig. 7 に示した計算では、実測に基づくキャスク表面線量率が入力されている。この場合、キャスクの表面上の線量率は周方向に関しては一定ではなく、横置

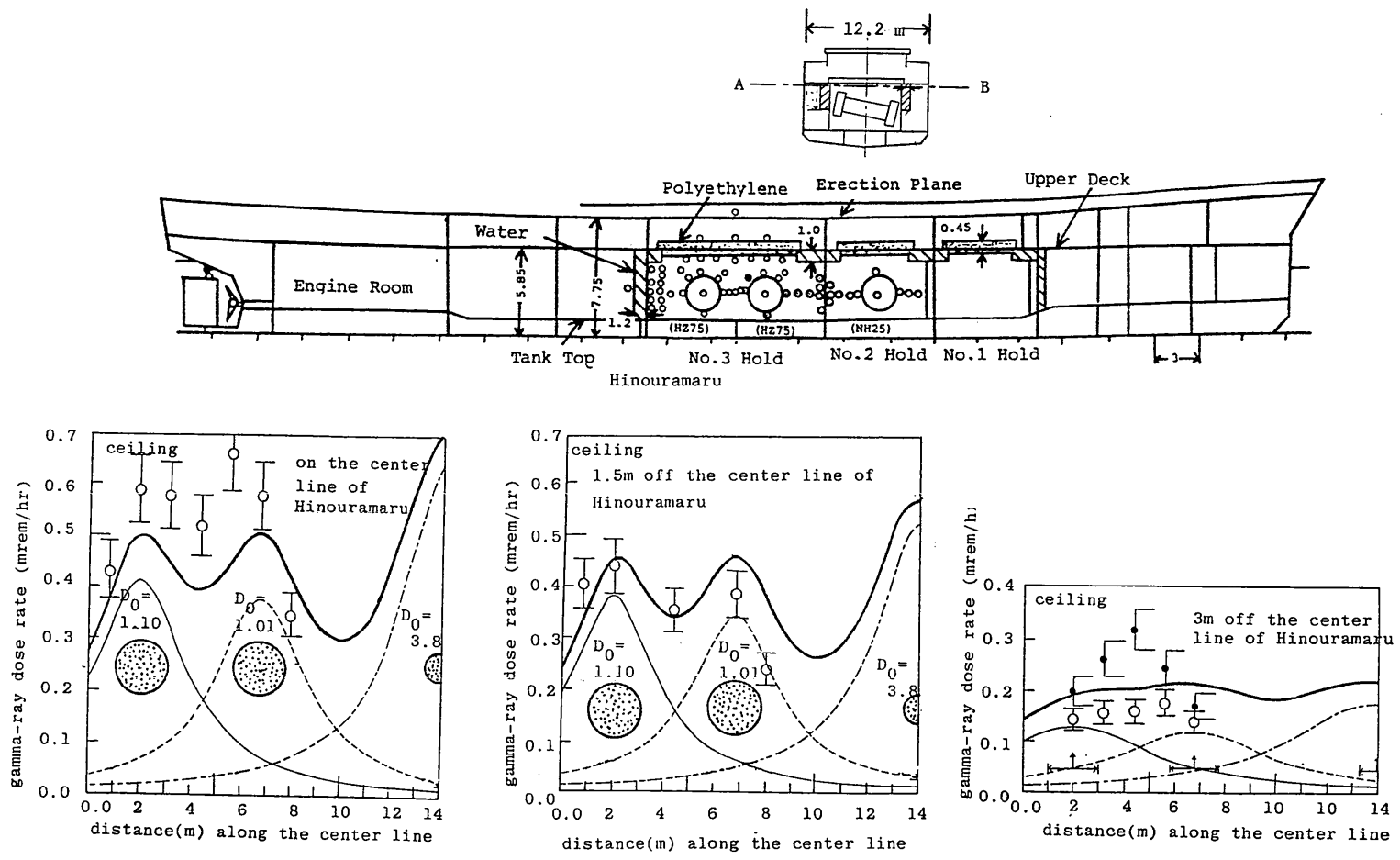


Fig. 7 Calculated example of dose rate distributions on the plane at the ceiling shown by the line segment A-B in the Hinouramaru figure.

きの上部において高い値となっている。ところで、計算と比較すべき測定値は天井部で得られており、キャスクからや、遠く離れた位置において測定が行なわれていた。そのようにキャスクに対して上方位置にあり、しかも離れた位置に対しては上記の高い線量率をもたらすような放射線成分が線量率分布に大きく寄与するものと判断し、入力データとしては横置きキャスク上部の高い表面線量率を選んでいる。

以上に述べたように、入力すべき表面線量率の値の決定の際は、注意が必要である。

## 5. 結 論

MANYCASK コードは、既存の計算コード QAD に比較しても十分に少ない計算時間で詳細な線量率空間分布を、高い精度と信頼性で与えることができる。

この原因の一つとして、キャスク表面積分を実施した結果に対して簡単な解析関数による表現がコードに採用されていることが挙げられる。さらには、Reduction Weight の概念と影方程式を採用することにより、従来の様な各キャスクの体積線源素片と計算点とを結ぶ線上の量に関する数値積分を逐一行なう手間を省いた点も計算時間の短縮化にひと役買っていると言える。

MANYCASK コードの利用に際し、プラグラミング上のより良い改善を想い付かれた方は、筆者に御連絡を賜りたい。本コードのより良い改善の一助として所存である。

## 参 考 文 献

- 1) 山越寿夫：“使用済核燃料輸送容器の周辺線量率評価法の研究”，船研報告別冊 8 号168頁(昭和61年 1 月)
- 2) H. Yamakoshi：“A Simple Expression for Radiation Dose Rate Distributions around a Cylindrical Shell Source with a Finite Height”，Nucl. Sci. Eng.,88, 110 (1984)
- 3) H. Yamakoshi：“Simple Formula for Expression of Dose Rate Distributions around Spent Fuel Shipping Cask”，Jour. Nucl. Sci. Tech.,22, 697 (1985)
- 4) H. Yamakoshi：“Concept of Shielding characteristics for Spent Fuel Shipping Casks”，Nucl. Sci. Tech., 87, 152 (1984)
- 5) 山路昭雄，植木紘太郎：船舶技術研究所報告第19 巻第 5 号309頁(昭和57年)
- 6) 山越寿夫：“解析関数表示式の応用によるキャスク運搬船内線量率分布の解析”，日本原子力学会昭和60年秋の分科会