

JAERI - M

84-006

任意の濃度分布をもつ放射性雲からの
外部被曝線量計算コード (CIDE)

1984年2月

甲斐倫明

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAFRI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

任意の濃度分布をもつ放射性雲からの
外部被曝線量計算コード (CIDE)

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

甲斐倫明

(1984年1月10日受理)

原子力施設から放出される放射性物質のうちで、大気中に拡散していく放射性雲からの一般公衆の被曝線量評価は、放射性物質の大気中濃度としてガウス分布を仮定するガウスプルームモデルが用いられている。しかし、事故時には短時間の風向変化などを非定常に取り扱える拡散モデルが求められる。したがって線量計算モデルは任意の濃度分布からの評価を行えることが必要となる。本コードは、PICモデルから得られる空間を任意に分割したセル内の平均濃度からの線量を計算するものである。

モデルの妥当性を評価するために、ガウスプルームのときに得られる数値積分結果との比較を行った。その結果、良い一致が得られた。そのとき、計算結果の精度に影響するセルサイズについて考察した。

A Computer Code for Calculating a γ -External
Dose from a Randomly Distributed Radioactive Cloud

Michiaki KAI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 10, 1984)

A computer code (CIDE) has been developed to calculate a γ -external dose from a randomly distributed radioactive cloud. Atmospheric dispersion of radioactive materials accidentally released from a nuclear reactor needs to be estimated considering time-dependent meteorological data and terrain heights. Particle-in-Cell model is useful for that purpose, but it is not easy to calculate the dose from the randomly distributed concentration by numerical integration.

In this study the mean concentration in a cell evaluated by PIC model was assumed to be uniformly distributed over that cell, which was integrated as a constant concentration by a point kernel method. The dose was obtained by summing the attributable cell doses. When the concentration of plume had a Gaussian distribution, the results of CIDE code well agreed with those of GAMBLE, which was the code for calculating the dose from the Gaussian distribution.

The choice of cell sizes affecting the accuracy of the calculated results was discussed.

Keywords: γ -external Dose, Atmospheric Dispersion, Radioactive Cloud, Particle-in-cell Model, Gaussian Distribution, Nuclear Reactor, Computer Code, Environment

目 次

1. はじめに	1
2. 計算方法	2
2.1 線量セルモデルについて	2
2.2 寄与セル線量の計算	3
2.3 計算に用いたデータ	5
3. 計算コードの概要	7
4. 計算結果の比較	7
4.1 ガウス型の濃度分布からの線量	7
4.2 任意濃度分布からの線量	8
5. まとめ	9
謝 辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation Method	2
2.1 Dose Cell Model	2
2.2 Calculation of Attributable Cell Dose	3
2.3 Data Used in Calculation.....	5
3. Construction of Computer Code	7
4. Results and Discussion	7
4.1 Comparison with the Exact Dose from the Gaussian Distribution	7
4.2 Comparison with another dose model	8
5. Conclusion	9
Acknowledgements	9
References	10

1. は じ め に

原子力施設から放出される放射性物質のうちで、大気中に拡散していく放射性雲からの一般公衆の被曝は古くから評価されてきた。これは、大気拡散によって放射性物質が環境中に広く分布するため、それからの被曝線量評価が原子力施設の安全評価の要となるものだからである。

現在までに行われてきた放射性雲からの被曝線量評価は、大気中移行拡散による放射性物質の大気中濃度としてガウス型の分布式を用いているのが特徴である。 γ 線の外部被曝線量の計算においては空間的に広がった濃度分布を3次元的に積分する際に、解析解が得られないために数値積分する方法がとられる。このため、実用的観点から各種の計算コードが開発されてきた^{1) 2)}。放射性物質の大気中濃度分布をガウス型の式で表現するガウスプルームモデルは、原子力施設が平常時に定常放出する放射性物質からの γ 線の外部被曝線量の年間平均値としては比較的よく一致することが確かめられている。

事故時に原子力施設から大気中に放出される放射性物質からの被曝は平常時の場合と次の点で異なる。

- ① 平常時は放出源の制御によって被曝を制限することができるが、事故時は放出源の制御が不可能であるので防災対策のみによってしか被曝を制限できない。
- ② 平常時の被曝は放射線管理の対象として評価され、ICRPの線量制限体系が適用されるのに対し、事故時の被曝はあらかじめ設定された対策レベル（または介入レベル）を参考に対策を講じるかどうか判断される。

したがって、事故時の被曝は、平常時のように安全側の仮定で平均的な値を評価するのではなく、緊急により現実的な評価が要求される。これは、被曝線量評価が作業や操業の計画・立案を目的としている平常時と異なり、危険性を算定し、退避や避難などの救済措置を講ずるかどうかの判断の情報となるものだからである。

ガウスプルームモデルは、定常放出を仮定していることや空間的に一様な気象条件を想定しているために、短時間の風向変化や大気の乱れなどの非定常な取り扱いができない。また、複雑な地形の変化に対応できない欠点がある。したがって、事故時に放出される放射性物質の大気中移行拡散を取り扱うのにガウスプルームモデルでは十分でない。1979年3月に起きたThree Mile Island原子力発電所2号炉の事故のときには、LLNLの開発したARAC (Atmospheric Release Advisory Capability) システムが放射性物質の大気拡散による濃度分布の推定に用いられた。このARACシステムは3次元風速場計算を行うMATHEWコードとそれに基づきPIC (Particle In Cell) モデルで大気中濃度分布計算を行うADPICコードとからなる³⁾。

原研においては、昭和55年度から緊急時環境線量情報予測計算コードシステムの開発に着手した。現在までに原研で作成した3次元風速場計算コードWINDO4⁴⁾および3次元粒子型拡散コードPRWDA⁵⁾によって、大気中濃度分布の詳細計算を行うことができる。こうして得られる濃度分布は数値的に求まるものであるため、ガウス型の濃度分布からの線量計算のように積分すべき一般的な関数型を得ることができない。こうした任意濃度からの線量計算法としては次の2つが考えられる。

- ① 任意の点の濃度が内外挿によって得られるならばその値を用いて数値積分を行う。
- ② 濃度分布が任意のメッシュ空間（セル）に離散量として得られるとき、そのセル内での濃度を

一様として積分計算を行う。

①の方法では内外挿法の問題のほかに数値積分を行うのに計算時間を要する欠点がある。②の方法は、セル内を一様な濃度と仮定するための誤差を伴うのが、単位セル濃度あたりの積分計算をあらかじめ行っておくことで実際の線量計算は簡単な積の和で表わされるので計算時間を要しないという特徴がある。

本研究で対象とする濃度分布はPICモデルによって得られるものである。PICモデルでは、放射性雲を粒子で模擬し、対象空間を分割したセル内の粒子数からセルの平均濃度を計算する。したがって、PICモデルの計算結果を用いて線量計算を行うには、空間の各点の濃度でなくてセル内の平均濃度を用いることから②の方法が適当である。本研究では、②の方法で行う線量計算を線量セルモデルとよぶことにする。原子力施設の事故時に大気中に放出される放射性物質からの γ 線の外部被曝線量評価として、WINDO4とPRWDAとの組合せで得られる大気中濃度分布から迅速に計算を行う線量セルモデルを用いた計算コードCIDE (Cell Integral Dose Evaluation) を作成したので報告する。

2. 計 算 方 法

2.1 線量セルモデルについて

放射性雲からの γ 線の照射線量率は点減衰核法によって次の式から求められる。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K \cdot \mu_{en} \cdot E \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(E, r) \chi(x, y, z) dx dy dz \quad (2.1)$$

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

K : 照射線量率への換算係数 $\left(\frac{\text{dis} \cdot \text{m}^3 \cdot \mu R}{\text{MeV} \cdot \text{Ci} \cdot \text{hr}} \right)$

μ_{en} : 空気の γ 線のエネルギー吸収係数 (m^{-1})

μ : 空気の γ 線の線減衰係数 (m^{-1})

E : γ 線の初期エネルギー (MeV)

r : 放射線雲中の微小体積要素から評価点までの距離 (m)

$B(E, r)$: 空気に対する γ 線のビルドアップ係数

$\chi(x, y, z)$: 点 (x, y, z) における放射性物質の濃度 (Ci/m^3)

線量セルモデルは、評価対象となる空間を任意のメッシュで分割し、各々のセル内の濃度を一様と仮定して線量計算を行うものである。セル内の濃度を一様と仮定するので、単位濃度あたりの各々のセルからの寄与線量を濃度分布とは関係なく計算しておくことができる。したがって、単位濃度あたりのセルからの寄与線量(寄与セル線量)をあらかじめ計算してテーブル化しておきこの値を用いるのが線量セルモデルの特徴である。これによって計算時間の短縮が達成できる。

線量セルモデルから求められる線量は次のように表わされる。(Fig.1)

一様として積分計算を行う。

①の方法では内外挿法の問題のほかに数値積分を行うのに計算時間を要する欠点がある。②の方法は、セル内を一様な濃度と仮定するための誤差を伴うのが、単位セル濃度あたりの積分計算をあらかじめ行っておくことで実際の線量計算は簡単な積の和で表わされるので計算時間を要しないという特徴がある。

本研究で対象とする濃度分布はPICモデルによって得られるものである。PICモデルでは、放射性雲を粒子で模擬し、対象空間を分割したセル内の粒子数からセルの平均濃度を計算する。したがって、PICモデルの計算結果を用いて線量計算を行うには、空間の各点の濃度でなくてセル内の平均濃度を用いることから②の方法が適当である。本研究では、②の方法で行う線量計算を線量セルモデルとよぶことにする。原子力施設の事故時に大気中に放出される放射性物質からの γ 線の外部被曝線量評価として、WIND04とPRWDAとの組合せで得られる大気中濃度分布から迅速に計算を行う線量セルモデルを用いた計算コードCIDE (Cell Integral Dose Evaluation) を作成したので報告する。

2. 計 算 方 法

2.1 線量セルモデルについて

放射性雲からの γ 線の照射線量率は点減衰核法によって次の式から求められる。

$$D(x_0, y_0, z_0) = K \cdot \mu_{en} \cdot E \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(E, r) \chi(x, y, z) dx dy dz \quad (2.1)$$

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

K : 照射線量率への換算係数 $\left(\frac{\text{dis} \cdot \text{m}^3 \cdot \mu R}{\text{MeV} \cdot \text{Ci} \cdot \text{hr}} \right)$

μ_{en} : 空気の γ 線のエネルギー吸収係数 (m^{-1})

μ : 空気の γ 線の線減衰係数 (m^{-1})

E : γ 線の初期エネルギー (MeV)

r : 放射線雲中の微小体積要素から評価点までの距離 (m)

$B(E, r)$: 空気に対する γ 線のビルドアップ係数

$\chi(x, y, z)$: 点 (x, y, z) における放射性物質の濃度 (Ci/m^3)

線量セルモデルは、評価対象となる空間を任意のメッシュで分割し、各々のセル内の濃度を一様と仮定して線量計算を行うものである。セル内の濃度を一様と仮定するので、単位濃度あたりの各々のセルからの寄与線量を濃度分布とは関係なく計算しておくことができる。したがって、単位濃度あたりのセルからの寄与線量(寄与セル線量)をあらかじめ計算してテーブル化しておきこの値を用いるのが線量セルモデルの特徴である。これによって計算時間の短縮が達成できる。

線量セルモデルから求められる線量は次のように表わされる。(Fig. 1)

$$D_c(x_i, y_j, 0) = \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \chi(\ell, m, n) \cdot AD(i-\ell, j-m, n) \quad (2.2)$$

$D_c(x_i, y_j, 0)$: セル $(i, j, 1)$ の地表面の中心点 $(x_i, y_j, 0)$ における照射線量率 ($\mu R/hr$)

$\chi(\ell, m, n)$: セル (ℓ, m, n) の濃度 (Ci/m^3)

$AD(i-\ell, j-m, n)$: セル (ℓ, m, n) から評価点 $(x_i, y_j, 0)$ への単位濃度あたりの寄与セル線量 ($\mu R/hr/Ci/m^3$)

L, M, N : x, y, z 座標それぞれの総セル数

寄与セル線量 $AD(i-\ell, j-m, n)$ は次の式から求められる。

$$AD(i-\ell, j-m, n) = \int_{(i-\ell-\frac{1}{2})DX}^{(i-\ell+\frac{1}{2})DX} \int_{(j-m-\frac{1}{2})DY}^{(j-m+\frac{1}{2})DY} \int_{(n-1)DZ}^n \frac{K \cdot \mu_{en} \cdot E \cdot e^{-\mu r}}{4 \pi r^2} \cdot B(E, r) dx dy dz \quad (2.3)$$

ただし, DX, DY, DZ はそれぞれ x, y, z のセルサイズ

2.2 寄与セル線量の計算

(2.3) 式から求められる寄与セル線量の計算には数値積分としてモンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法による数値積分は、独立な変数列 x_1, x_2, \dots, x_n が確率密度関数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に従うとき、関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の期待値

$$\int \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.4)$$

を乱数を用いて計算機で求めるものである。(2.4) 式において、 $x_i \in [0, 1]$ ($i=1, 2, \dots, n$) として $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を一様分布とするととき (2.4) 式は次のようになる。

$$\int_0^1 \dots \int_0^1 f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2.5)$$

一般に任意の積分領域 $x_i \in [a_i, b_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$) では (2.5) 式の積分値を I_0 とすると、そのときの積分値は変数変換により

$$I = \prod_{i=1}^n \frac{1}{(b_i - a_i)} \cdot I_0 \quad (2.6)$$

となる。

$[0, 1]$ に属する独立な乱数列を $\{\xi_i\}$ とすると、 I_0 は $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の期待値であるから次のようにして求められる。

$$I_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\xi_{1i}, \xi_{2i}, \dots, \xi_{ni}) \quad (2.7)$$

以上のように、モンテカルロ法を用いた積分計算は多変数問題を容易に取り扱うことができる。また簡単な工夫によって計算精度を上げることができるので計算時間の節約にもつながる。

モンテカルロ法によって得られる結果は常に統計的変動を伴うので誤差の評価をする必要がある。(2.7) 式で N が大きいとき I_1 は中心極限定理により正規分布に従うので、 I_0 の 99% 信頼区間は次のようになる。

$$I_1 - 2.576 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}} < I_0 < I_1 + 2.576 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}} \quad (2.8)$$

$$\text{ただし, } \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left\{ I_1 - f(\xi_{1i}, \xi_{2i}, \dots, \xi_{ni}) \right\}^2$$

(2.8) 式から積分値 I_0 の推定誤差は $N^{-1/2}$ に比例するので、精度を上げるためには N を非常に大きくする必要がある。 N をあまり増大させずに精度を上げる方法がいくつか知られているが⁶⁾、本計算では層別抽出による比較的簡単な方法で行った。層別抽出とは、標本調査において用いられるサンプリング方法で、母集団をいくつかの層に分けて各層より任意抽出して母集団の母数の推定を行うものである。

積分領域 R を k 個に分割する。

$$R = \bigcup_{i=1}^k R_i \quad (R_i \cap R_j = \phi, \quad i \neq j)$$

このとき、 I_0 は次のようにかける。

$$I_0 = \sum_{i=1}^k \int_{R_i} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2.9)$$

R_i に属する一様乱数列 $\{\eta_{ij}\}$ を用いて I_0 の推定値として

$$I_2 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f(\eta_{1j}, \eta_{2j}, \dots, \eta_{nj}) \quad (2.10)$$

を得る。その分散は、

$$\begin{aligned} \text{Var}(I_2) &= \sum_{i=1}^k \text{Var} \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} f(\eta_{1j}, \eta_{2j}, \dots, \eta_{nj}) \right) \\ &= \sum_i \frac{1}{N_i} \text{Var} (f(\eta_{1j}, \eta_{2j}, \dots, \eta_{nj})) \\ &= \sum_i \frac{1}{N_i} \cdot \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

となる。

$$\text{ただし } \sigma_i^2 = \left[\dots \int_{R_i} \left\{ f(x_1, x_2, \dots, x_n) - I_{oi} \right\}^2 dx_1 dx_2 \dots dx_n \right. \\ \left. (I_{oi} = \int_{R_i} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n) \right]$$

今、 $N = \sum N_i$ と一定とすると推定値の分散を最小にするには $N_i \propto \sigma_i^2$ とすればよい。 σ_i^2 を小さくすることは、言い換えれば R_i の範囲内で f の値の変化がなるべく小さくなるようにすることである。

本計算では、(2.3) 式の被積分関数を $f(r)$ とするとき、 f の r に対する変化量すなわち f の微係数の R_i での平均値

$$FDIF_i = \frac{1}{r_{i\max} - r_{i\min}} \int_{r_{i\min}}^{r_{i\max}} \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right) dr \quad (2.12)$$

ただし $r_{i\max}$: R_i での r の最大値

$r_{i\min}$: R_i での r の最小値

を推定値の分散の目安とした。したがって、 R_i でのサンプリング数 N_i は次の式で求められる。

$$N_i = \frac{FDIF_i}{\sum_i FDIF_i} \cdot N \quad (2.13)$$

モンテカルロ法による計算精度を①任意抽出、②層別抽出、③効率化した層別の3つに分けて調べた結果を Table 1 に示す。計算対象は、解析解との比較を行えるようにするため極座標を用いた次の式とした。

$$I = \int_{r=0}^{100} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \frac{K \cdot E \cdot \mu_{er} \cdot e^{-\mu r} \cdot B(\mu r)}{4\pi r^2} \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\phi dr \quad (2.14)$$

Table 1 は光子エネルギーが 1 MeV のときの結果である。99%信頼限界の値から明らかなことは、任意抽出では精度を2倍上げるのにサンプリング数を約4倍にする必要があるが、層別抽出を行うと任意抽出に比べて $N = 300$ で約4倍、 $N = 1200$ で約7倍の精度が得られた。また、層別抽出も効率的なサンプリングを行うことでさらに精度はよくなることがわかる。

2.3 計算に用いたデータ

(2.1) (2.14) 式に用いる K の値は次のようにして求められる。

$$K = 3.7 \times 10^{10} \times 3600 \times 1.6022 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\rho} \times \frac{1}{r} \quad (2.15)$$

$$\left(\frac{\mu R \cdot \text{dis} \cdot \text{m}^3}{\text{hr} \cdot \text{MeV} \cdot \text{Ci}} \right) \left(\begin{array}{c} \text{dps} \\ \text{Ci} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{sec} \\ \text{hr} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{erg} \\ \text{MeV} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{m}^3 \\ \text{kg} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \mu R \\ \text{erg/kg} \end{array} \right)$$

ただし ρ : 空気の密度

$$r = \frac{2.58 \times 10^{-4}}{1.6022 \times 10^{-19}} \times 33.7 \times 1.6022 \times 10^{-12} \times 10^{-6}$$

$$= 0.0869$$

1気圧, 20°Cの空気の密度 1.205 kg/m³ を用いて, $K = 2.04 \times 10^9$ とした。

ビルドアップ係数は, 無限の空気媒体中で定義される式で μr のべき関数

$$B(\mu r) = 1 + \alpha \mu r + \beta (\mu r)^2 + \gamma (\mu r)^3 \quad (2.16)$$

を用いた⁷⁾。 α , β , γ の係数を Table 2 に示す。

空気の γ 線エネルギー吸収係数 μ_{en} , γ 線の線減衰係数 μ を Table 3 に示す。

照射線量から線量当量への換算は次の式に従って求められる。

$$H = D_{air} \times 0.869 \times \frac{(\mu_{en}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \times g \quad (2.17)$$

- H : 線量当量 (μ rem)
 D_{air} : 照射線量 (μ R)
 μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数 (cm²/g)
 g : 幾何学的ファクター

幾何学的ファクターは, 身体の遮蔽効果や身体が存在することによる放射線場への影響を表わすものである。

1982年UNSCEAR報告では $\frac{(\mu_{en}/\rho)_{tissue}}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \times g$ の値を 0.7 としている⁸⁾。しかし, こ

の値は光子エネルギーが 0.1 MeV 以下では大きくずれてくる。これは 0.1 MeV 以下では, 光子の線減衰係数が大きくなり平均自由行程が短くなることに寄因している。ここで問題となることは, 身体のどこの線量当量を評価するのかである。外部被曝の場合, いわゆる全身線量当量は全身均等被曝として定義されるが, 実際には着目する身体の器官によって g 値が異なる。そこで, 全身線量当量として次の3つの評価値を当てることが考えられる。

- ① 全身平均線量当量
- ② 実効線量当量
- ③ 中軸線量当量

全身平均線量当量は全身に吸収されたエネルギーを全身の質量で除して評価される量である。実効線量当量はリスク荷重線量で 1977年の ICRP Pub. 26⁹⁾ で勧告されているものである。中軸線量当量は, 体幹部の中心軸における線量であり, NCRPが外部被曝の影響評価のための線量として提示している¹⁰⁾。

これら3つの線量当量を等方的な照射を受ける場合の照射線量(R)を単位とする値で評価した結果を Fig. 2 に示す¹¹⁾。これは ICRP 勧告で提示されている標準人¹²⁾を数学的ファントムで模擬したときの結果である。傾向としては実効線量当量が最も大きく, 中軸線量当量が最小となる。また, 0.08 MeV ~ 2.0 MeV ではほぼ一定な値であるのに対し, 0.05 MeV 以下では3つの線量当量ともに

急激に小さくなる。実際には一般環境での公衆の被曝条件、たとえば照射角度分布、エネルギースペクトルを考慮した場合にはFig.2の結果より小さくなることや乳幼児も考える必要があることなど代表値を設定することは困難である。本コードは、過小評価を避けるために大人の等方的照射条件のときの結果をもとに、Fig.2に実線で示した値を採用した。

次に、セル線量モデルの寄与するセルの加算範囲については、サブマージョンのときの積分半径に対する線量の変動傾向を示したFig.3を参考に、計算時間および計算精度を考慮して評価点から1000～2000mを基準とした。

3. 計算コードの概要

線量セルモデルコードCIDEは、セルサイズに応じた単位濃度セルあたりの寄与線量をあらかじめ計算するためのコードDUC (Dose Unit Cell) と組合せて用いられる。DUCとCIDEの計算フローをFig.4に示す。

4. 計算結果の比較

線量セルモデルは一定の大きさのセルの濃度を一樣と仮定するために誤差を伴う。理論的にはセルサイズを計算機の制約（計算時間、記憶容量など）の許す限り小さくすることで誤差を最小にすることができる。ここでは、実用的なサイズを選択して他の線量モデルとの比較検討を行った。

4.1 ガウス型の濃度分布からの線量

ガウス型の濃度分布からの線量計算は、数値積分によって正確な評価が行われている。GAMPUL¹⁴⁾はガウス型濃度分布からの線量計算コードの相互比較の標準用に関与されたコードであり、精度の高い結果を得ることができる。

(1) セルの平均値濃度からの計算

粒子型拡散コードPRWDAを用いて計算されるガウス型濃度分布はセルの平均値濃度である。この結果を用いて線量セルモデルコードCIDEによって得られる線量の計算結果とGAMPULの計算結果の風向軸上での比較をFig.5～Fig.12に示す。計算条件は、風速は1m/sec、放出率を1Ci/hrとし、(2.1)式に用いるKの値はGAMPULでは 1.88×10^9 としているので比較の際にはこの値を用いた。また、以下の比較では光子エネルギーを全て1MeVとしてある。

z方向（鉛直方向）のセルサイズを25mとするとき、放出高がセルサイズよりも大きい60m以上では、x、y方向のセルサイズが100mで非常によい一致が認められる。x、y方向のセルサイズが250mでは放出点から1km以内で放出高が低くなるにつれて誤差が大きくなる。x、y方向のセルサイズが1000mでは安定度Dで放出点から10km以内では過小評価になりGAMPULとの適合度がかなり悪い。プルームの広がり小さい安定度Fの場合には適合度の悪さがおよそ30kmにまで延びる。したがって、風向軸上での線量だけから見てもx、y方向が1000mのセルサイズで

急激に小さくなる。実際には一般環境での公衆の被曝条件、たとえば照射角度分布、エネルギースペクトルを考慮した場合にはFig.2の結果より小さくなることや乳幼児も考える必要があることなど代表値を設定することは困難である。本コードは、過小評価を避けるために大人の等方的照射条件のときの結果をもとに、Fig.2に実線で示した値を採用した。

次に、セル線量モデルの寄与するセルの加算範囲については、サブマージョンのときの積分半径に対する線量の変動傾向を示したFig.3を参考に、計算時間および計算精度を考慮して評価点から1000～2000mを基準とした。

3. 計算コードの概要

線量セルモデルコードCIDEは、セルサイズに応じた単位濃度セルあたりの寄与線量をあらかじめ計算するためのコードDUC (Dose Unit Cell) と組合せて用いられる。DUCとCIDEの計算フローをFig.4に示す。

4. 計算結果の比較

線量セルモデルは一定の大きさのセルの濃度を一樣と仮定するために誤差を伴う。理論的にはセルサイズを計算機の制約（計算時間、記憶容量など）の許す限り小さくすることで誤差を最小にすることができる。ここでは、実用的なサイズを選択して他の線量モデルとの比較検討を行った。

4.1 ガウス型の濃度分布からの線量

ガウス型の濃度分布からの線量計算は、数値積分によって正確な評価が行われている。GAMPUL¹⁴⁾はガウス型濃度分布からの線量計算コードの相互比較の標準用に関与されたコードであり、精度の高い結果を得ることができる。

(1) セルの平均値濃度からの計算

粒子型拡散コードPRWDAを用いて計算されるガウス型濃度分布はセルの平均値濃度である。この結果を用いて線量セルモデルコードCIDEによって得られる線量の計算結果とGAMPULの計算結果の風向軸上での比較をFig.5～Fig.12に示す。計算条件は、風速は1m/sec、放出率を1Ci/hrとし、(2.1)式に用いるKの値はGAMPULでは 1.88×10^9 としているので比較の際にはこの値を用いた。また、以下の比較では光子エネルギーを全て1MeVとしてある。

z方向（鉛直方向）のセルサイズを25mとするとき、放出高がセルサイズよりも大きい60m以上では、x、y方向のセルサイズが100mで非常によい一致が認められる。x、y方向のセルサイズが250mでは放出点から1km以内で放出高が低くなるにつれて誤差が大きくなる。x、y方向のセルサイズが1000mでは安定度Dで放出点から10km以内では過小評価になりGAMPULとの適合度がかかなり悪い。プルームの広がり小さい安定度Fの場合には適合度の悪さがおよそ30kmにまで延びる。したがって、風向軸上での線量だけから見てもx、y方向が1000mのセルサイズで

急激に小さくなる。実際には一般環境での公衆の被曝条件、たとえば照射角度分布、エネルギースペクトルを考慮した場合にはFig.2の結果より小さくなることや乳幼児も考える必要があることなど代表値を設定することは困難である。本コードは、過小評価を避けるために大人の等方的照射条件のときの結果をもとに、Fig.2に実線で示した値を採用した。

次に、セル線量モデルの寄与するセルの加算範囲については、サブマージョンのときの積分半径に対する線量の変動傾向を示したFig.3を参考に、計算時間および計算精度を考慮して評価点から1000～2000mを基準とした。

3. 計算コードの概要

線量セルモデルコードCIDEは、セルサイズに応じた単位濃度セルあたりの寄与線量をあらかじめ計算するためのコードDUC (Dose Unit Cell) と組合せて用いられる。DUCとCIDEの計算フローをFig.4に示す。

4. 計算結果の比較

線量セルモデルは一定の大きさのセルの濃度を一樣と仮定するために誤差を伴う。理論的にはセルサイズを計算機の制約（計算時間、記憶容量など）の許す限り小さくすることで誤差を最小にすることができる。ここでは、実用的なサイズを選択して他の線量モデルとの比較検討を行った。

4.1 ガウス型の濃度分布からの線量

ガウス型の濃度分布からの線量計算は、数値積分によって正確な評価が行われている。GAMPUL¹⁴⁾はガウス型濃度分布からの線量計算コードの相互比較の標準用に関与されたコードであり、精度の高い結果を得ることができる。

(1) セルの平均値濃度からの計算

粒子型拡散コードPRWDAを用いて計算されるガウス型濃度分布はセルの平均値濃度である。この結果を用いて線量セルモデルコードCIDEによって得られる線量の計算結果とGAMPULの計算結果の風向軸上での比較をFig.5～Fig.12に示す。計算条件は、風速は1m/sec、放出率を1Ci/hrとし、(2.1)式に用いるKの値はGAMPULでは 1.88×10^9 としているので比較の際にはこの値を用いた。また、以下の比較では光子エネルギーを全て1MeVとしてある。

z方向（鉛直方向）のセルサイズを25mとすると、放出高がセルサイズよりも大きい60m以上では、x、y方向のセルサイズが100mで非常によい一致が認められる。x、y方向のセルサイズが250mでは放出点から1km以内で放出高が低くなるにつれて誤差が大きくなる。x、y方向のセルサイズが1000mでは安定度Dで放出点から10km以内では過小評価になりGAMPULとの適合度がかかなり悪い。プルームの広がり小さい安定度Fの場合には適合度の悪さがおよそ30kmにまで延びる。したがって、風向軸上での線量だけから見てもx、y方向が1000mのセルサイズで

は10～20 kmの狭域の線量評価には使えない。

放出高がz方向のセルサイズより小さい10 mの場合では、x、y方向のセルサイズが10.0 mにおいても放出点から1 km以内では過小評価になる。安定度D放出高が10 mの場合についてさらにセルサイズを変えて調べた結果をFig.13に示す。x、y方向のセルサイズを100 mのままにして、z方向のセルサイズを25 mから5 mに変えた場合よりも、x、y方向のセルサイズを100 mから50 mに変えた方が放出点付近でGAMPULとのよりよい適合度が得られることがFig.12からわかる。これは、z方向のセルサイズ25 mを小さくすることよりもx、y方向のセルサイズ100 mを小さくすることの方が評価点付近のセル平均濃度がより適切に表現されるからである。

Fig.14～17に安定度F、放出高100 mのプルームの横軸方向でのGAMPULとの比較を示す。Fig.18～19には安定度F、放出高が0 mのときの比較を示す。図に示すセルサイズでは、プルームの横軸方向の線量分布はGAMPULとの良い一致が認められる。

(2) セルのメジアン濃度からの計算

本コードは、セルの平均濃度を計算するPICモデルの線量計算用に開発したものであるが、任意の濃度分布を計算できても簡単に線量評価を行えないPICモデル以外の濃度モデル用に、線量セルモデルを適用してみる。セルの中心点における濃度（メジアン濃度）をそのセルの平均濃度とみたときの線量計算結果の比較をFig.20～26に示す。

セルの平均値濃度を用いたときと比べるとセルサイズに関係なく全体的に過大評価になる。また、セルの平均値濃度の場合と逆に放出高が低いとき程風下軸上では良い一致が認められる。しかし、放出高や大気安定度に結果の信頼性が大きく依存する傾向がメジアン濃度を用いたときには認められるので、結果の信頼性に充分注意して用いるべきである。

4.2 任意濃度分布からの線量

ガウス型分布以外の任意濃度分布からの線量を精度よく評価した例が従来なかった。濃度計算のPICモデルは、放射能をもった粒子の移動を模擬しているので、それぞれの粒子を点線源とみなすことで点減衰核法によって線量を計算することができる。この方法によって得られた結果はガウス型分布の場合、GAMPULとよく一致することが確かめられている¹⁵⁾。この粒子型の線量計算と線量セルモデル計算との結果を比較することで任意濃度分布からの線量計算の性能を評価することにする。

両者の線量計算モデルともにPICモデルを用いた拡散移行による濃度を用いているが、線量セルモデルはセル内平均濃度を用いているので濃度値の精度がセルサイズに影響される点が異なる。

比較計算には島根サイトを選び、地形を考慮した風速場計算、濃度計算、さらに線量計算を行い、複雑で非定常な放射性物質の拡散移行における比較計算を行った。Fig.27にPRWDAによる濃度分布結果を示す。計算条件は、大気安定度がD、放出高を100 mとし、仮定の観測データをもとに風速場を評価してある。CIDEのセルサイズは水平方向を250 m、鉛直方向を25 mとする。結果は、緊急時環境線量情報予測システムSPEEDIの出力図をそのまま示してある。Fig.28、29に線量セルモデルCIDE、粒子型モデルGAMRWの計算結果をそれぞれ示す。図中の点線は地形の等高線を示しており、濃度計算モデルで評価された山による蛇行を2つの線量モデルともに的確に表現している一方、線量分布を示す等値線はかなり良い一致が認められる。ただし、放出点付近はGAMRWの等値線の広がり小さいのに対し、CIDEの結果はガウス型分布の線量計算で見られるような等

値線を描いている。この比較計算によって、任意濃度分布からの線量計算としてセル線量モデルの妥当性が確認された。

5. ま と め

任意の濃度分布をもつ放射性雲からの γ 線外部被曝線量計算方法として線量セルモデルを作成し、そのコード化および性能評価としての比較計算を行った。線量セルモデルは、粒子拡散モデルによって計算されるセルの平均濃度を用いて計算される。したがって、計算結果の精度はセルサイズに大きく依存する。ガウス型濃度分布のときのGAMPULとの比較計算によって、放出点から数10 kmまでの狭域では水平方向250 m、鉛直方向25 mのセルサイズでも十分な精度の結果が得られることが確かめられた。ただし、放出点から1 km以内では放出高が10 m以下のように低い場合には過小評価となるため、評価地点、評価条件に応じて適切なセルサイズを選択することが望ましい。その場合、GAMPULとの比較計算結果を参考にして、結果の信頼性およびセルサイズの選択を考慮すればよい。

粒子拡散モデル以外で計算される任意濃度分布からの線量計算を行う場合には、セルの平均濃度を評価することは普通は困難なのでセル内の中心濃度（メジアン濃度）を用いることになる。この場合にも比較的良い結果が得られることが確かめられたが、計算条件によって結果の信頼性が大きく変わるため充分注意して用いる必要がある。

実際の原子力サイトでの放射性物質の大気拡散を模擬した比較計算では、任意濃度分布の特徴を的確に表現することが確かめられ、結果はGAMRWとの比較で良い一致が認められた。

線量セルモデルコードC I D Eは事故時の非定常な濃度分布からの線量を計算するために、計算時間および計算精度を考慮して開発したものである。したがって、一方のみを重視することなく、両方のバランスに配慮して本コードを用いることが開発の主旨であることを改めて明記しておく。

謝 辞

本報告書の作成に際し御指導いただいた環境安全研究部今井和彦部長と、環境第1研究室長森内茂氏に感謝します。風速場計算コードWIND04および粒子型拡散コードPRWDAの実行にあたり環境第1研究室石川裕彦氏、茅野政道氏の助力を得た。深く感謝します。

値線を描いている。この比較計算によって、任意濃度分布からの線量計算としてセル線量モデルの妥当性が確認された。

5. ま と め

任意の濃度分布をもつ放射性雲からの γ 線外部被曝線量計算方法として線量セルモデルを作成し、そのコード化および性能評価としての比較計算を行った。線量セルモデルは、粒子拡散モデルによって計算されるセルの平均濃度を用いて計算される。したがって、計算結果の精度はセルサイズに大きく依存する。ガウス型濃度分布のときのGAMPULとの比較計算によって、放出点から数10 kmまでの狭域では水平方向250 m、鉛直方向25 mのセルサイズでも十分な精度の結果が得られることが確かめられた。ただし、放出点から1 km以内では放出高が10 m以下のように低い場合には過小評価となるため、評価地点、評価条件に応じて適切なセルサイズを選択することが望ましい。その場合、GAMPULとの比較計算結果を参考にして、結果の信頼性およびセルサイズを選択すればよい。

粒子拡散モデル以外で計算される任意濃度分布からの線量計算を行う場合には、セルの平均濃度を評価することは普通は困難なのでセル内の中心濃度（メジアン濃度）を用いることになる。この場合にも比較的良い結果が得られることが確かめられたが、計算条件によって結果の信頼性が大きく変わるため充分注意して用いる必要がある。

実際の原子力サイトでの放射性物質の大気拡散を模擬した比較計算では、任意濃度分布の特徴を的確に表現することが確かめられ、結果はGAMRWとの比較で良い一致が認められた。

線量セルモデルコードC I D Eは事故時の非定常な濃度分布からの線量を計算するために、計算時間および計算精度を考慮して開発したものである。したがって、一方のみを重視することなく、両方のバランスに配慮して本コードを用いることが開発の主旨であることを改めて明記しておく。

謝 辞

本報告書の作成に際し御指導いただいた環境安全研究部今井和彦部長と、環境第1研究室長森内茂氏に感謝します。風速場計算コードWIND04および粒子型拡散コードPRWDAの実行にあたり環境第1研究室石川裕彦氏、茅野政道氏の助力を得た。深く感謝します。

値線を描いている。この比較計算によって、任意濃度分布からの線量計算としてセル線量モデルの妥当性が確認された。

5. ま と め

任意の濃度分布をもつ放射性雲からの γ 線外部被曝線量計算方法として線量セルモデルを作成し、そのコード化および性能評価としての比較計算を行った。線量セルモデルは、粒子拡散モデルによって計算されるセルの平均濃度を用いて計算される。したがって、計算結果の精度はセルサイズに大きく依存する。ガウス型濃度分布のときのGAMPULとの比較計算によって、放出点から数10 kmまでの狭域では水平方向250 m、鉛直方向25 mのセルサイズでも十分な精度の結果が得られることが認められた。ただし、放出点から1 km以内では放出高が10 m以下のように低い場合には過小評価となるため、評価地点、評価条件に応じて適切なセルサイズを選択することが望ましい。その場合、GAMPULとの比較計算結果を参考にして、結果の信頼性およびセルサイズの選択を考慮すればよい。

粒子拡散モデル以外で計算される任意濃度分布からの線量計算を行う場合には、セルの平均濃度を評価することは普通は困難なのでセル内の中心濃度（メジアン濃度）を用いることになる。この場合にも比較的良い結果が得られることが認められたが、計算条件によって結果の信頼性が大きく変わるため充分注意して用いる必要がある。

実際の原子力サイトでの放射性物質の大気拡散を模擬した比較計算では、任意濃度分布の特徴を的確に表現することが認められ、結果はGAMRWとの比較で良い一致が認められた。

線量セルモデルコードCIDEは事故時の非定常な濃度分布からの線量を計算するために、計算時間および計算精度を考慮して開発したものである。したがって、一方のみを重視することなく、両方のバランスに配慮して本コードを用いることが開発の主旨であることを改めて明記しておく。

謝 辞

本報告書の作成に際し御指導いただいた環境安全研究部今井和彦部長と、環境第1研究室長森内茂氏に感謝します。風速場計算コードWIND04および粒子型拡散コードPRWDAの実行にあたり環境第1研究室石川裕彦氏、茅野政道氏の助力を得た。深く感謝します。

参考文献

- 1) Clarke, R. H. ; The WEERIE Program for Assessing the Radiological Consequences of Airborne Effluents from Nuclear Installations. Health Phys., 25, 267 (1973)
- 2) Imai, K. and Iijima, T. ; Assessment of Gamma-Exposure due to a Radioactive Cloud Released from a Point Source. Health Phys., 18, 207 (1970)
- 3) Dickerson, M. H. and Orphan, R. C. ; Atmospheric Release Advisory Capability. Nuclear Safety, 17, 281 (1976)
- 4) 石川裕彦 ; 変分法を応用した3次元風速場計算 (WIND04)
JAERI-M 83-113 (1983)
- 5) 茅野政道 ; DPRW(Discreet Parcel Random Walk) 法による大気中濃度
分布計算モデル JAERI-M 83-084 (1983)
- 6) 津田孝夫 ; モンテカルロ法とシミュレーション. 培風館 (1974)
- 7) Chabot, G. E. Jr. et al. ; Notes on Buildup Factor and Utilization of a Power Function Analysis Representation of the Buildup Factor. Health Phys., 21, 471 (1971)
- 8) UNSCEAR Report (1982)
- 9) ICRP Publication 26 ; Recommendation of the International Commission on Radiological Protection (1977)

- 10) NCRP Report-39 ; Basic Radiation Protection Criteria
(1971)
- 11) O'Brien, K. and Sanna, R. ; The Distribution of Absorbed
Dose-rates in Human from Exposure to Environmental Gamma
Rays. Health Phys., 30, 71 (1976)
- 12) ICRP Publication 23 ; Reference Man : Anatomical,
Physiological and Metabolic Characteristic (1975)
- 13) to be published.
- 14) 林隆, 白石忠男 ; 排気筒から放出される放射性雲からの γ 線照射線量率,
JAERI-M 8793 (1980)
- 15) Chino, M., to be published.

Table 1 Comparison of numerical integrations using different sampling methods with analytical solution.

	analytical solution	random sampling N=300	stratified sampling N=300*2)	stratified sampling N=1200*3)	stratified sampling N=300*2)	stratified sampling N=1200*3)	optimized stratified sampling N=300*2)	optimized stratified sampling N=1200*3)
estimate ($\times 10^5$ mR/hr/Ci/m ³)	2.9614	2.9437	3.0079	2.9274	2.9679	2.9409	2.9659	
error*1)		0.2090	0.1067	0.0498	0.0152	0.0473	0.0147	
CPU (sec)		0.62	0.90	0.67	0.92	0.72	1.15	

*1) 99 % confidence limit

*2) Integrated intervals of r, θ and ψ coordinates were divided into 5 sections.

*3) Integrated intervals of r, θ and ψ coordinates were divided into 8 sections.

Table 3 Values of the mass attenuation coefficient and the mass energy absorption coefficient in air. *1,*2)

energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ (m ⁻¹)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)	μ (m ⁻¹)
0.02	0.691	0.08327	0.511	0.06158
0.03	0.318	0.03832	0.148	0.01783
0.04	0.229	0.02759	0.0668	0.008049
0.05	0.196	0.02362	0.0406	0.004892
0.06	0.179	0.02157	0.0305	0.003675
0.08	0.162	0.01952	0.0243	0.002928
0.10	0.151	0.01820	0.0234	0.002820
0.15	0.134	0.01615	0.0250	0.003013
0.20	0.123	0.01482	0.0268	0.003229
0.30	0.106	0.01277	0.0287	0.003453
0.40	0.0954	0.01150	0.0295	0.003555
0.50	0.0868	0.01046	0.0296	0.003567
0.60	0.0804	0.009688	0.0295	0.003555
0.80	0.0706	0.008507	0.0289	0.003482
1.00	0.0635	0.007652	0.0278	0.003350
1.50	0.0517	0.006230	0.0254	0.003061
2.00	0.0444	0.005350	0.0234	0.002820

*1) Air : 0.755 N, 0.232 O, 0.013 Ar, by weight.

*2) This table includes the attenuation coefficient and the

energy absorption coefficient when a typical value is

given ($\rho_{air} = 0.001205 \text{ g/cm}^3$: 20°C, 760mmHg)

Table 2 Values of the parameters α, β and γ in the expression,

$$B(\mu r) = 1 + \alpha \mu r + \beta (\mu r)^2 + \gamma (\mu r)^3$$

energy (MeV)	α	β	γ
0.02	0.382	-0.0392	0.0014
0.03	1.219	-0.0673	0.0025
0.04	2.251	0.0905	-0.0002
0.05	2.852	0.5033	0.0015
0.06	2.960	0.9283	0.0215
0.08	2.719	1.1714	0.1095
0.10	2.485	1.0343	0.1600
0.15	2.042	0.6942	0.1651
0.20	1.602	0.6458	0.1167
0.30	1.117	0.6743	0.0366
0.40	1.045	0.5391	0.0163
0.50	1.000	0.4492	0.0038
0.60	0.995	0.3654	0.0004
0.80	0.983	0.2491	-0.0023
1.00	0.948	0.1824	-0.0028
1.50	0.878	0.0879	-0.0019
2.00	0.798	0.0487	-0.0012

*) This table was quoted from reference 7.

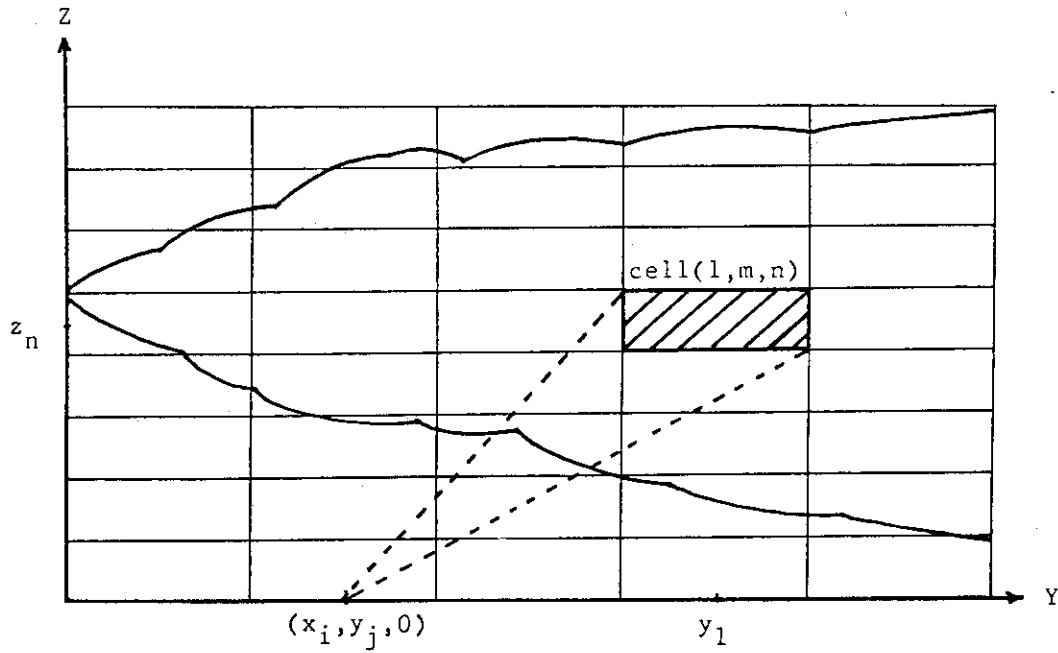


Fig. 1 Outlook of cell integral dose model used by the present study.

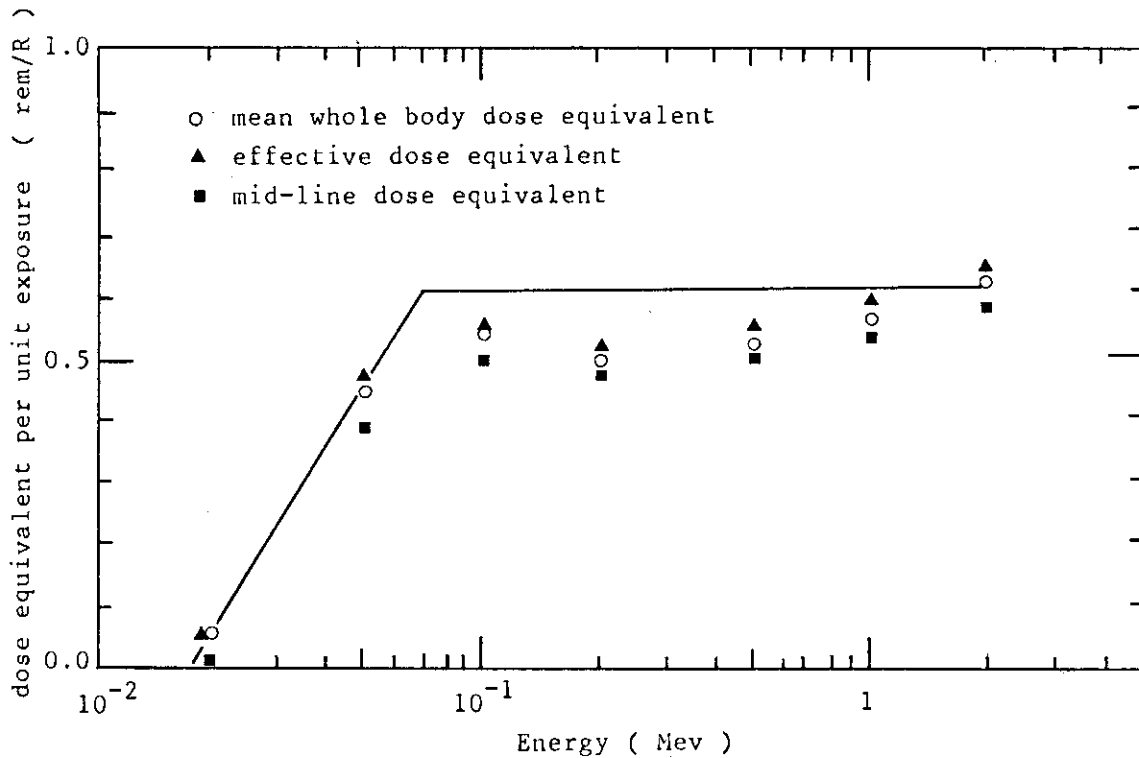


Fig. 2 Conversion factor of exposure (roentgen) into dose equivalent (rem) used by CIDE code, which is shown by solid line. Symbols express three types of dose equivalent in case of isotropic irradiation obtained by Monte Carlo method.

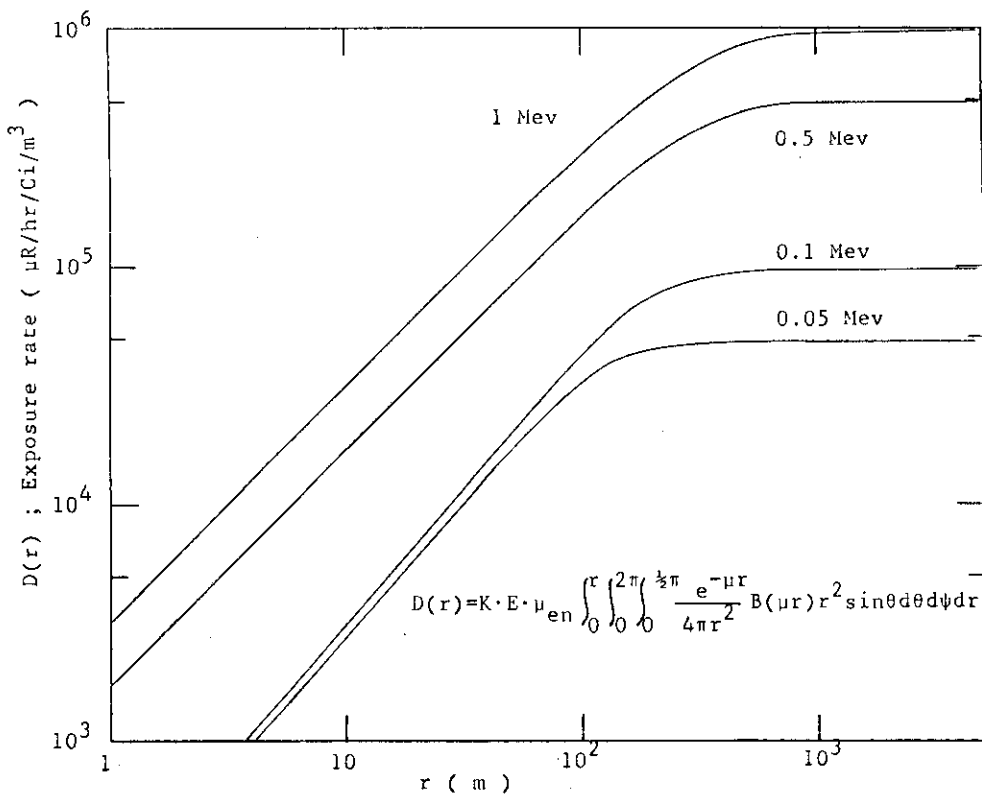


Fig. 3 The relationship between integrating radius and exposure rate in case of infinite cloud uniformly distributed.

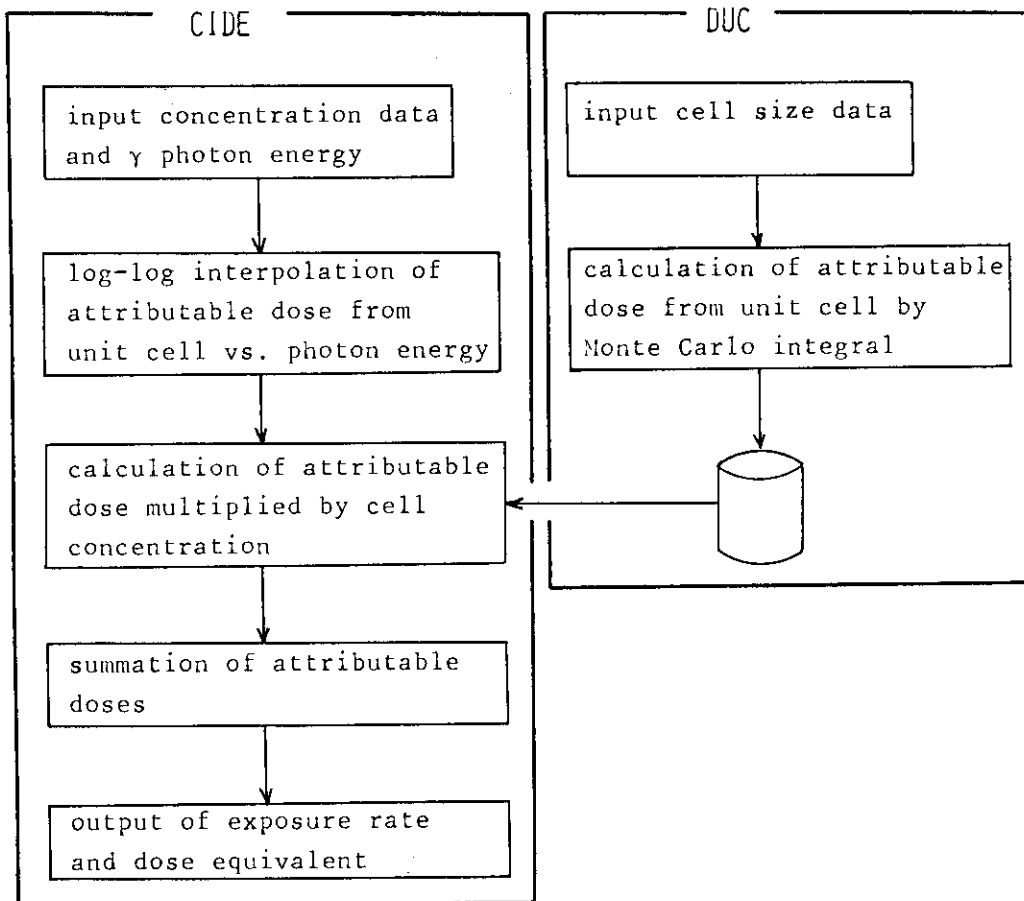


Fig. 4 Flow chart of CIDE and DUC code used for calculating dose from randomly distributed concentration.

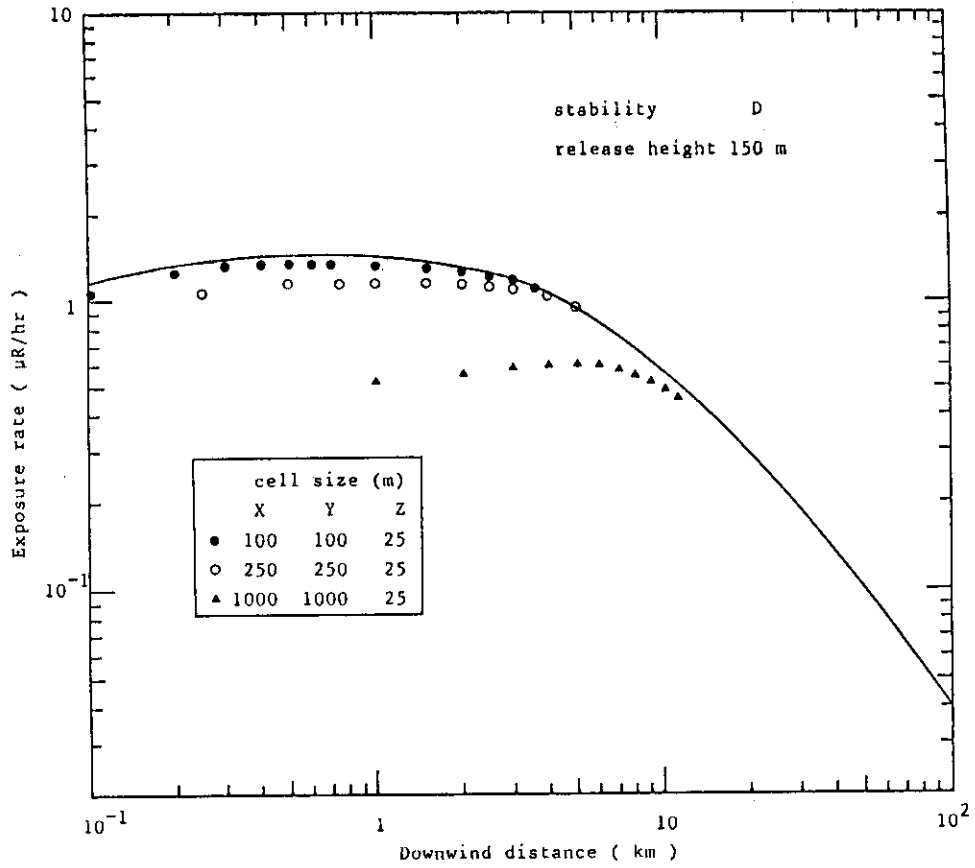


Fig. 5 Comparison of distribution on the downwind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

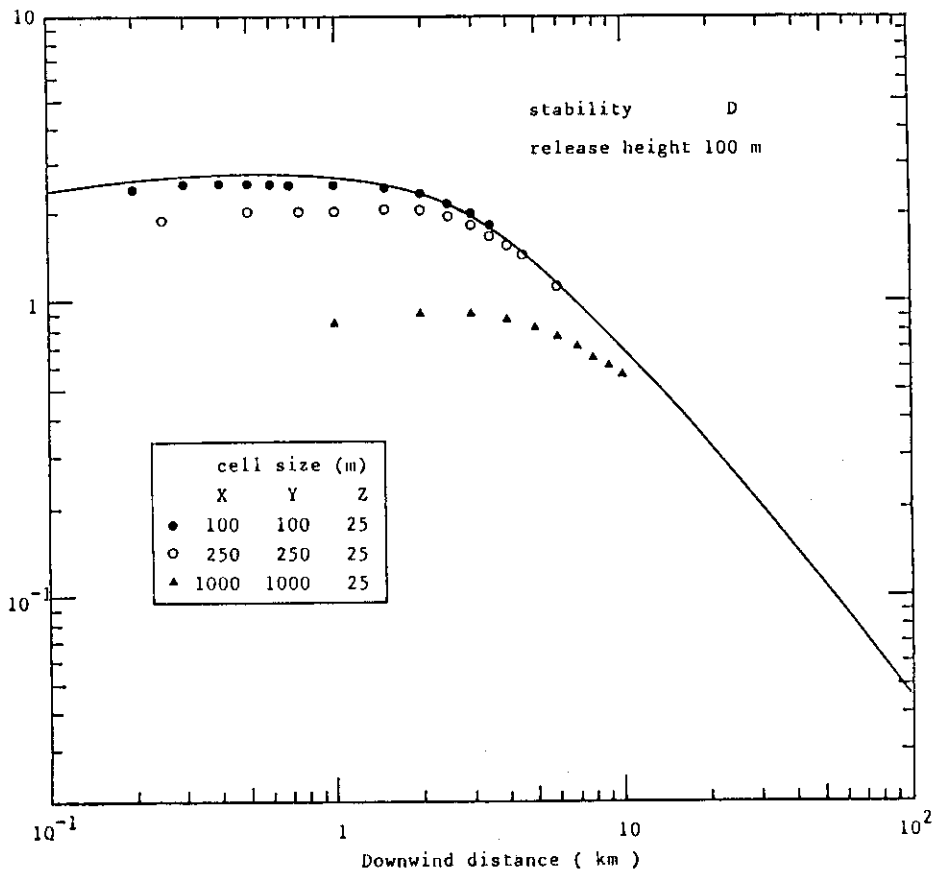


Fig. 6 Comparison of distribution on the downwind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

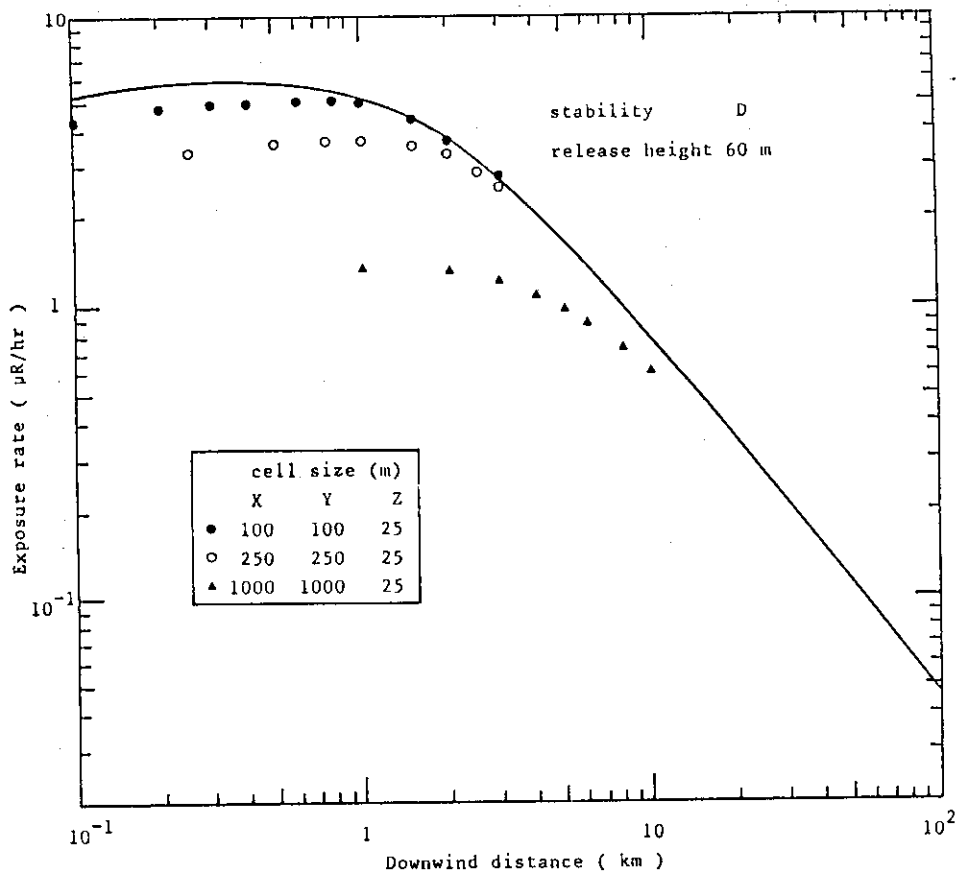


Fig. 7 Comparison of distribution on the downwind axis between the results of CIDE and CAMPUL in case of Gaussian distribution.

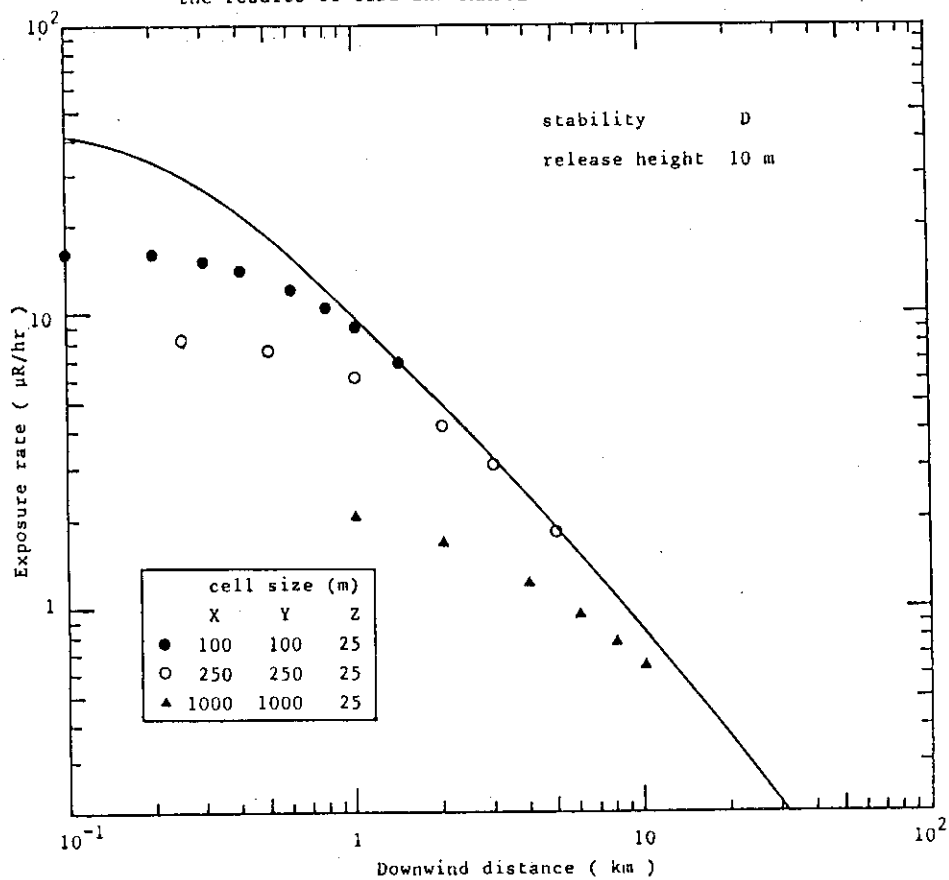


Fig. 8 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and CAMPUL in case of Gaussian distribution.

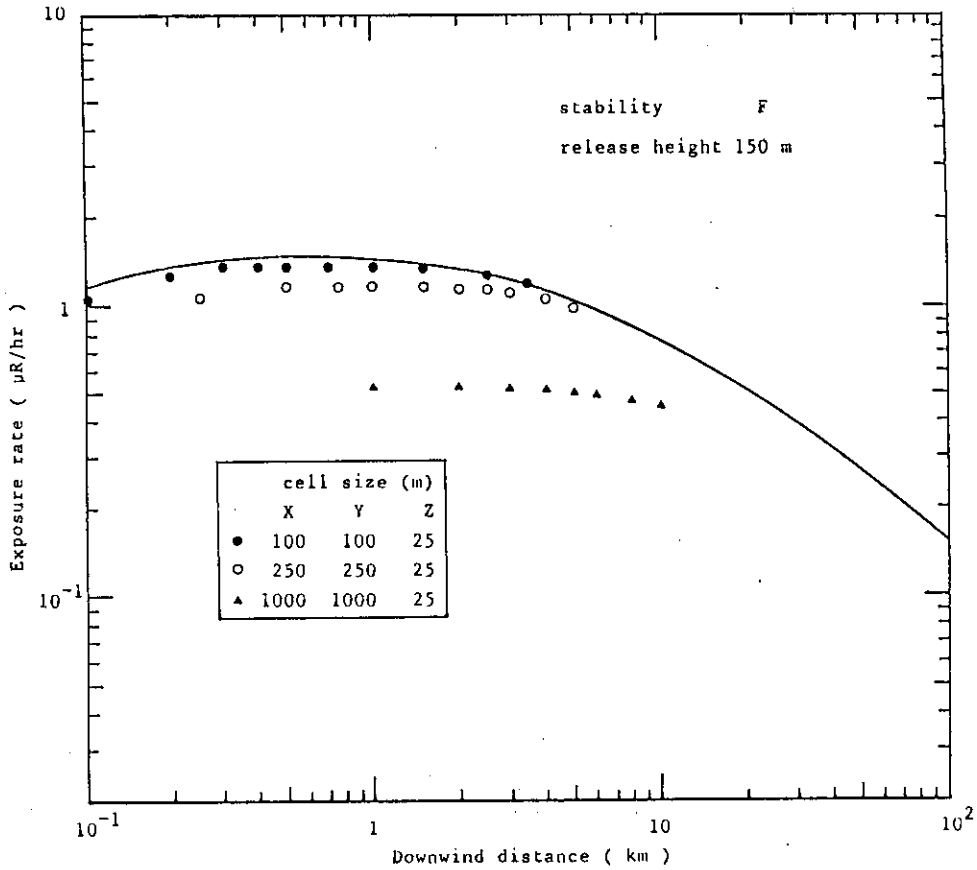


Fig. 9 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

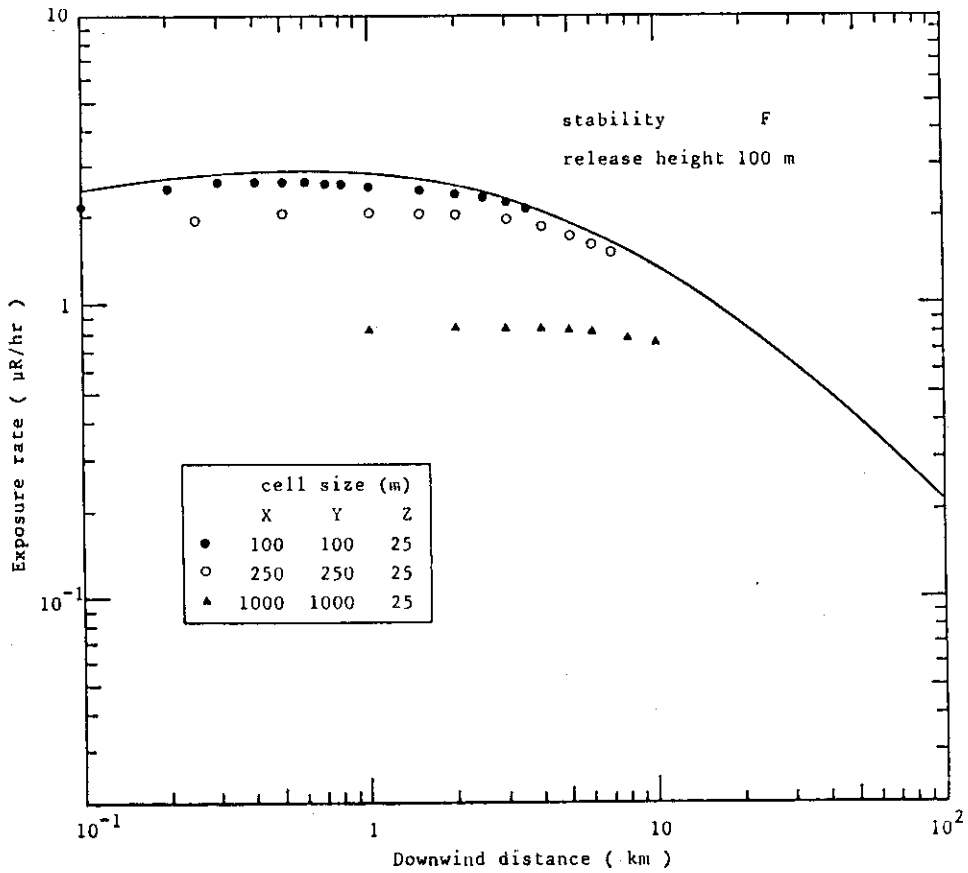


Fig. 10 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

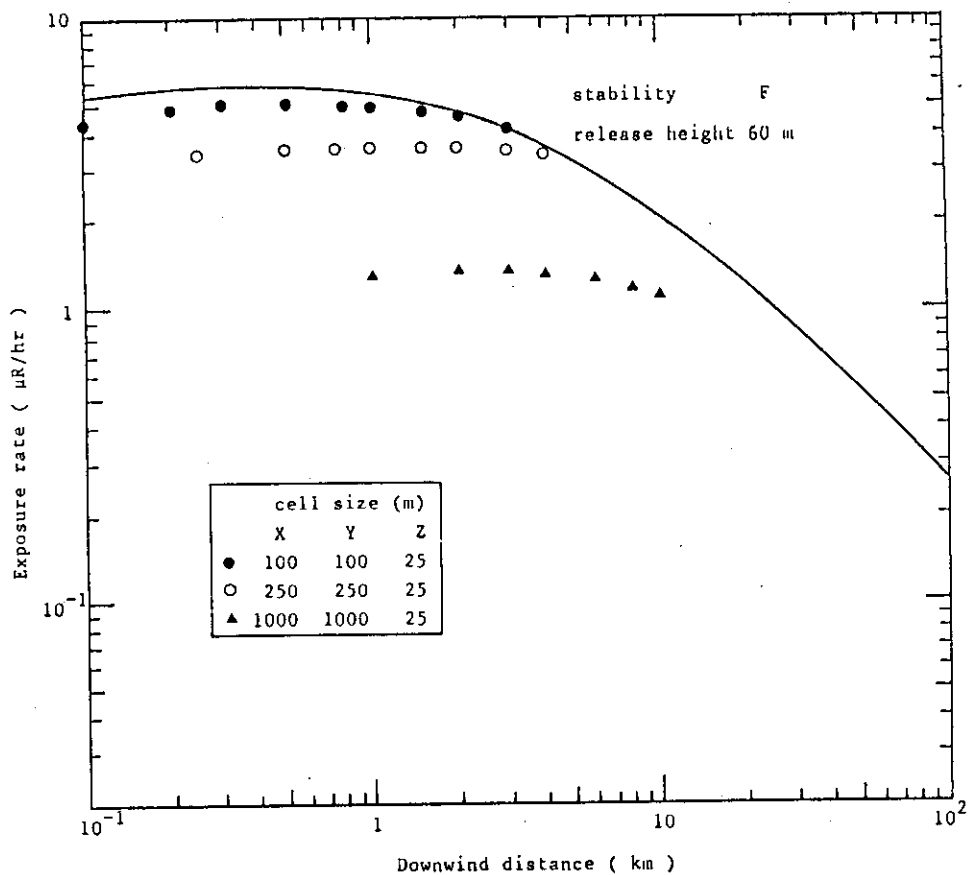


Fig. 11 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and GANPUL in case of Gaussian distribution.

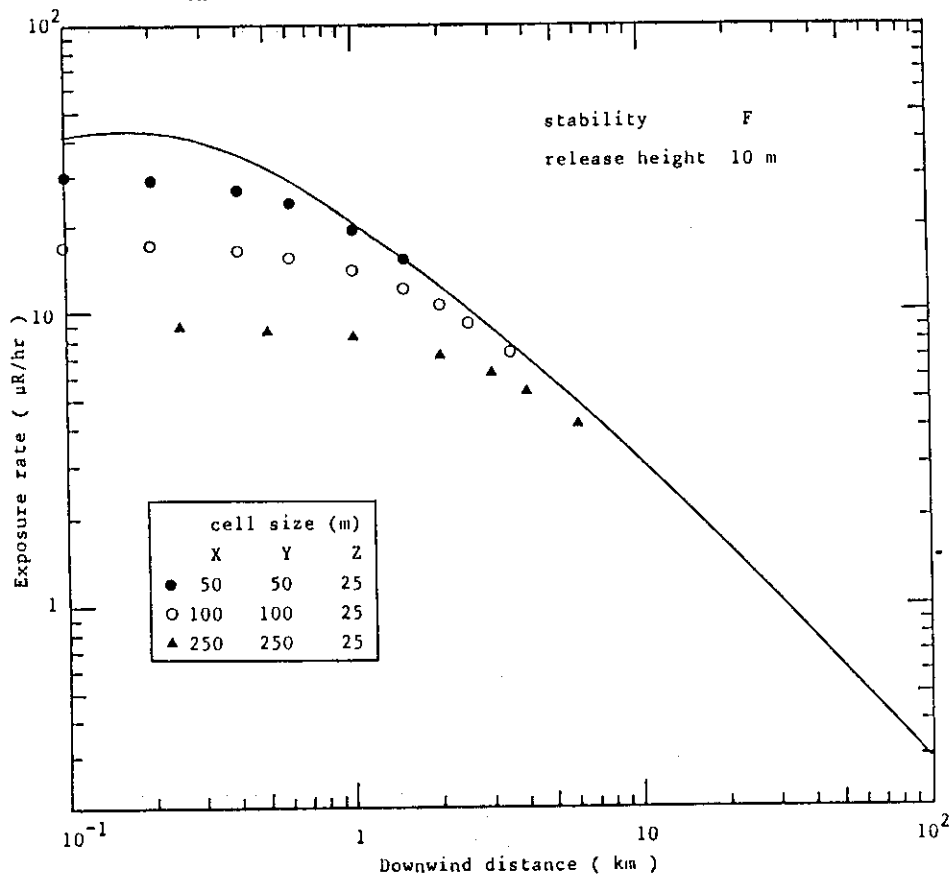


Fig. 12 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and GANPUL in case of Gaussian distribution.

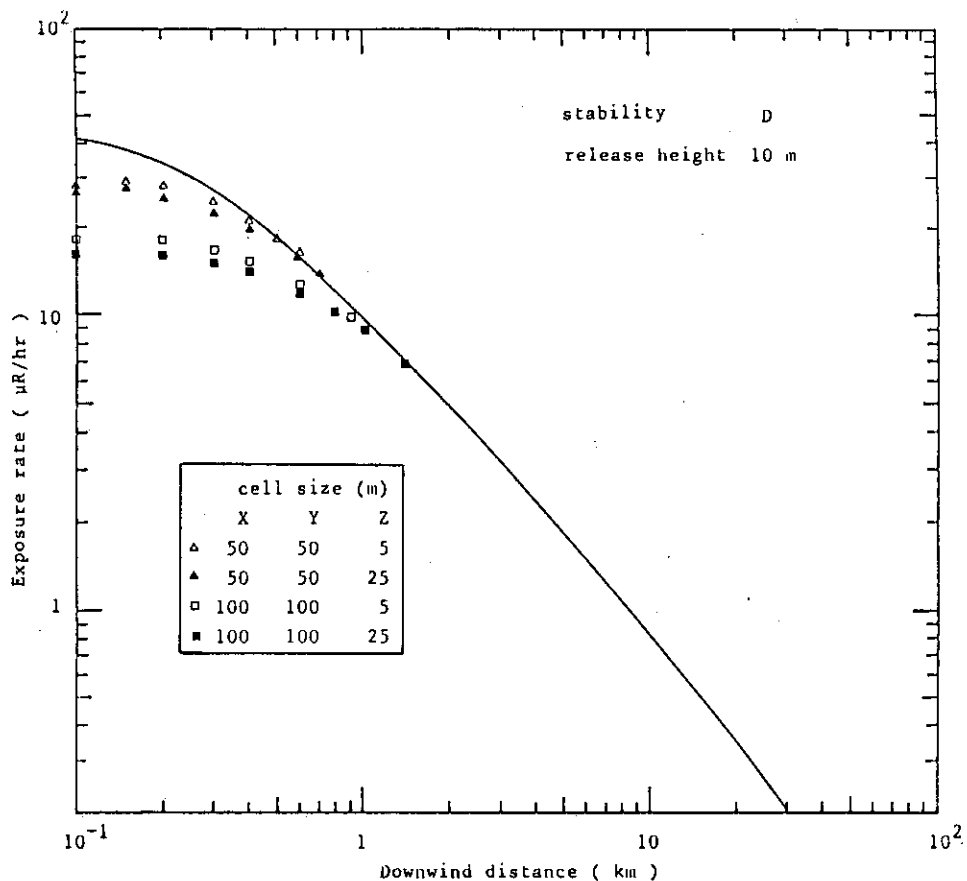


Fig. 13 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of CIDE and GANPUL in case of Gaussian distribution.

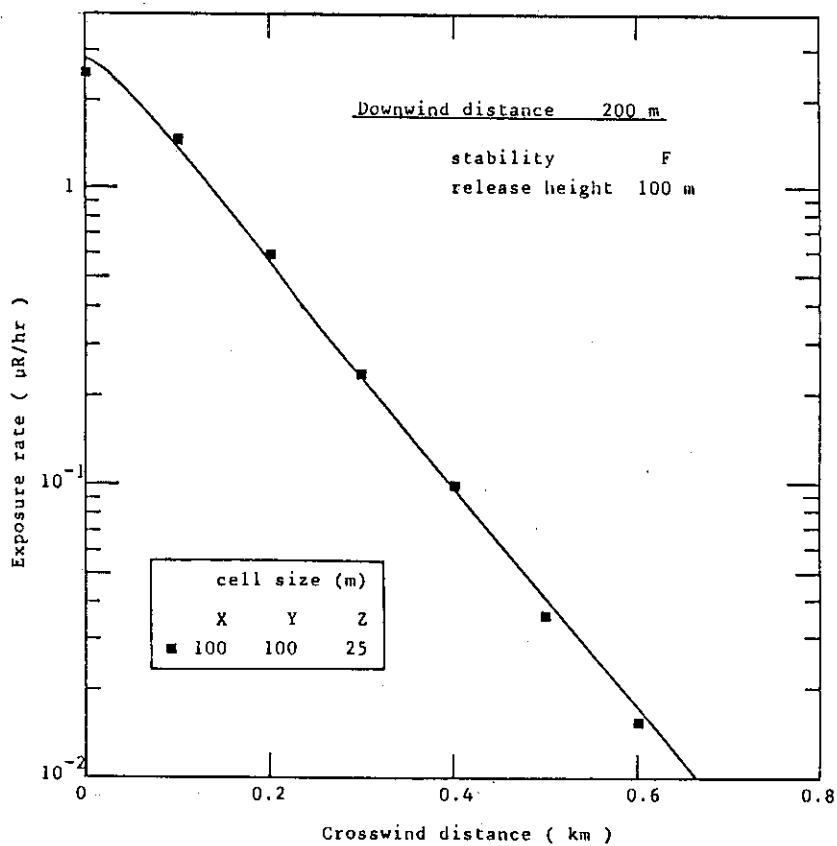


Fig. 14 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CIDE and GANPUL in case of Gaussian distribution.

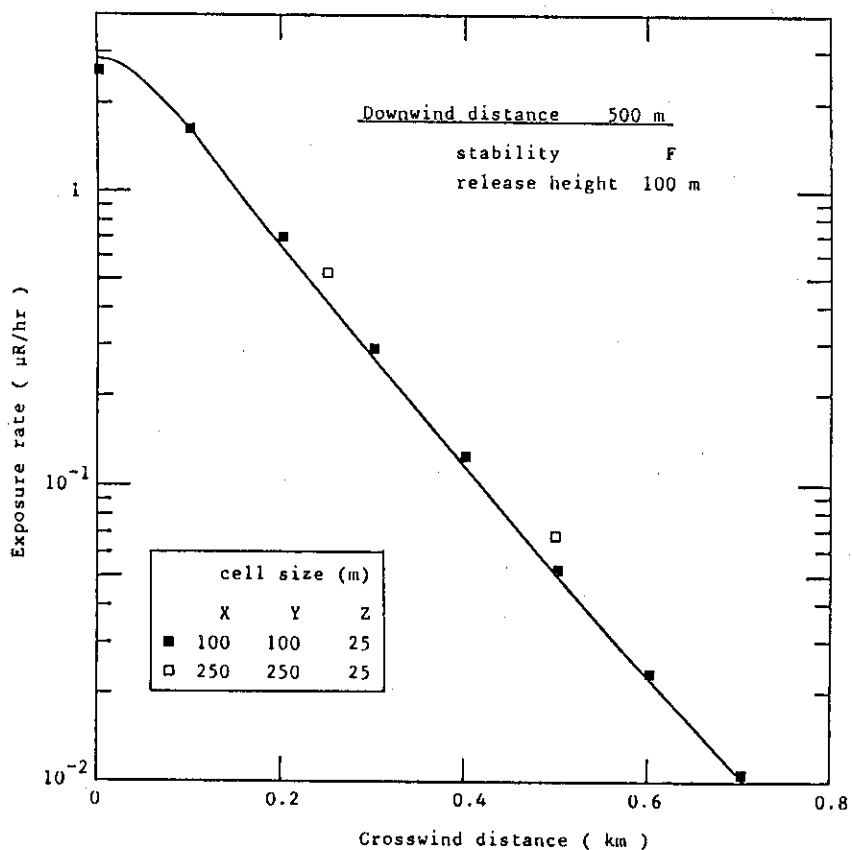


Fig. 15 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

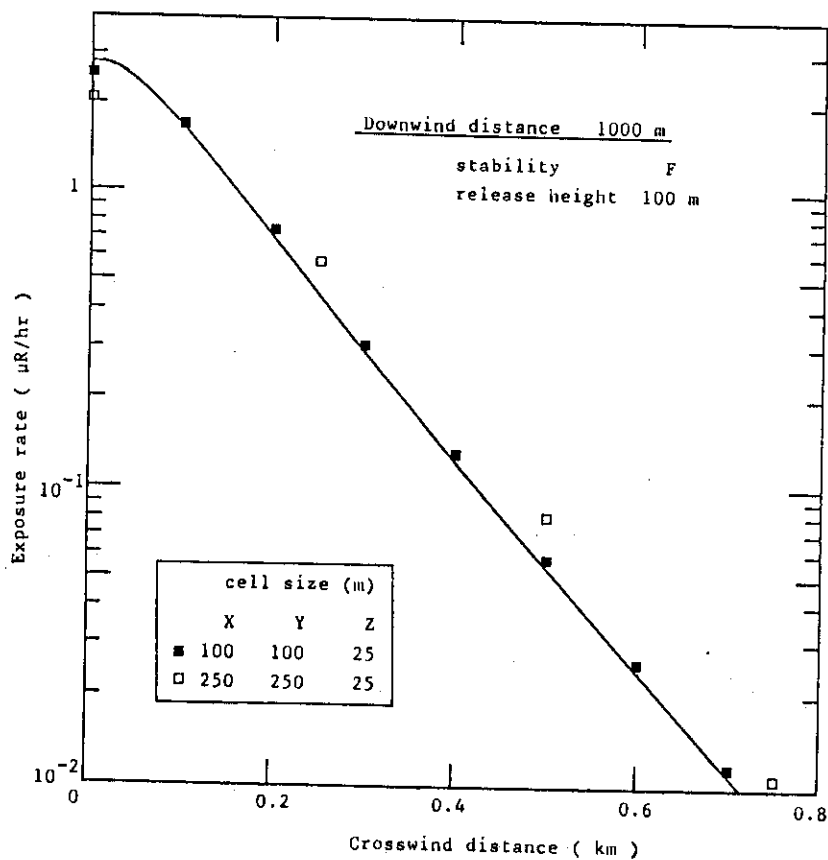


Fig. 16 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

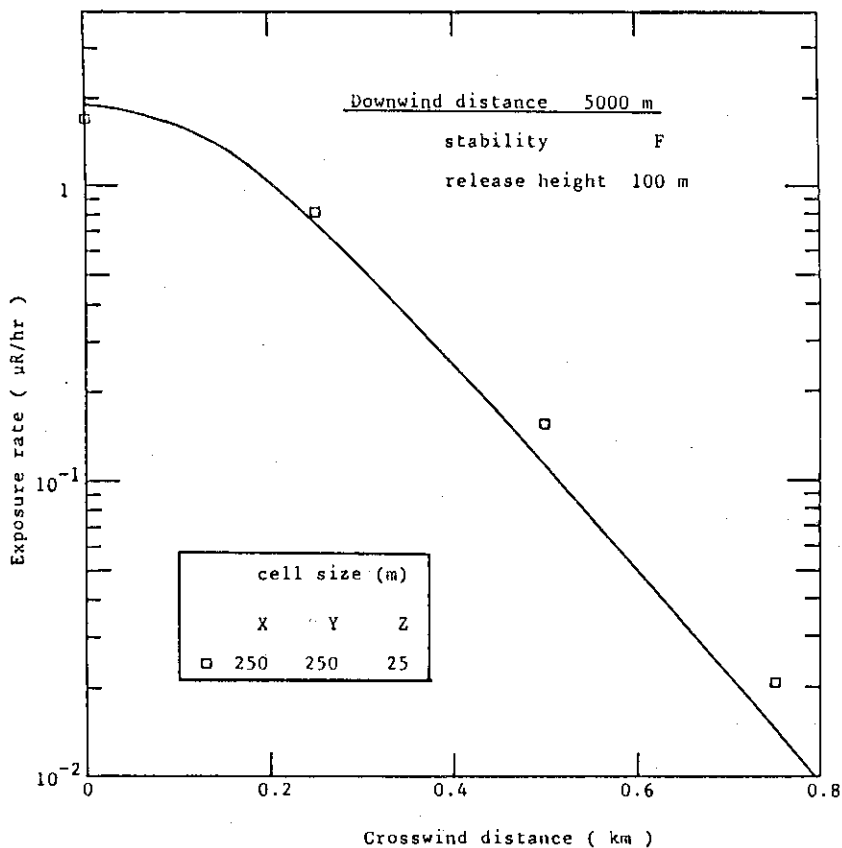


Fig. 17 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CLDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

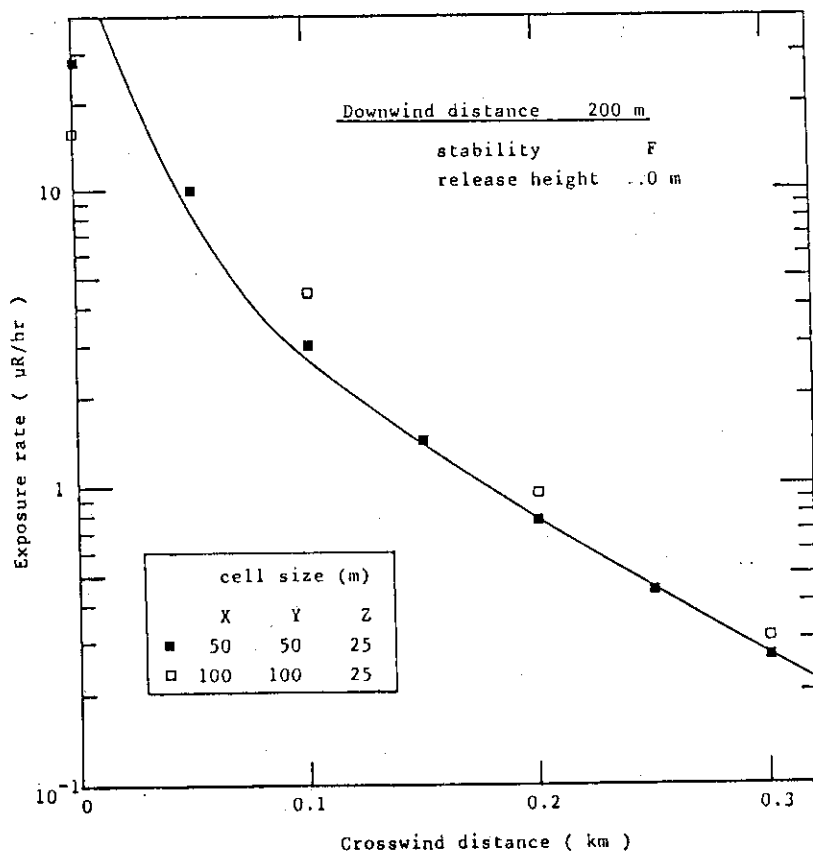


Fig. 18 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CLDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

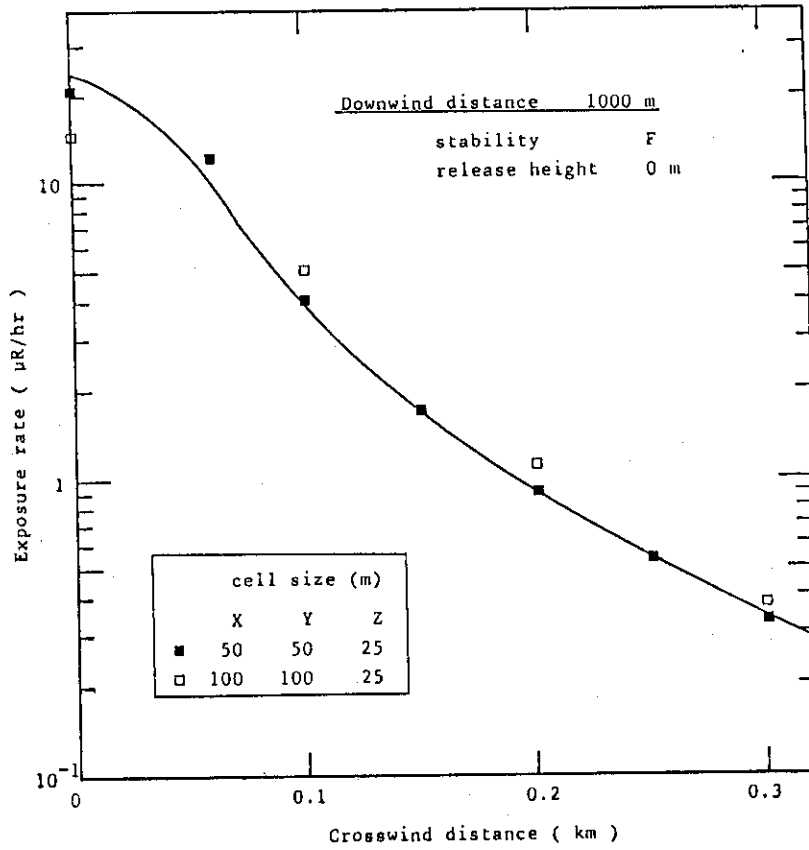


Fig. 19 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of CIDE and GAMPUL in case of Gaussian distribution.

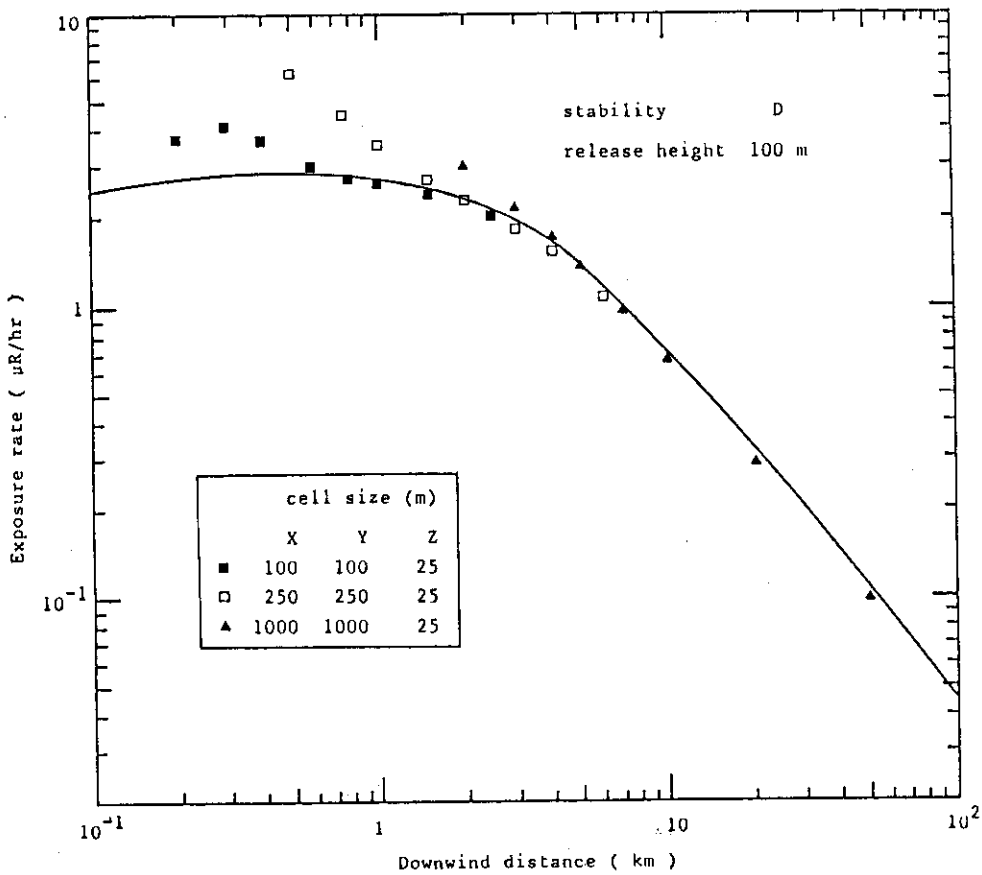


Fig. 20 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

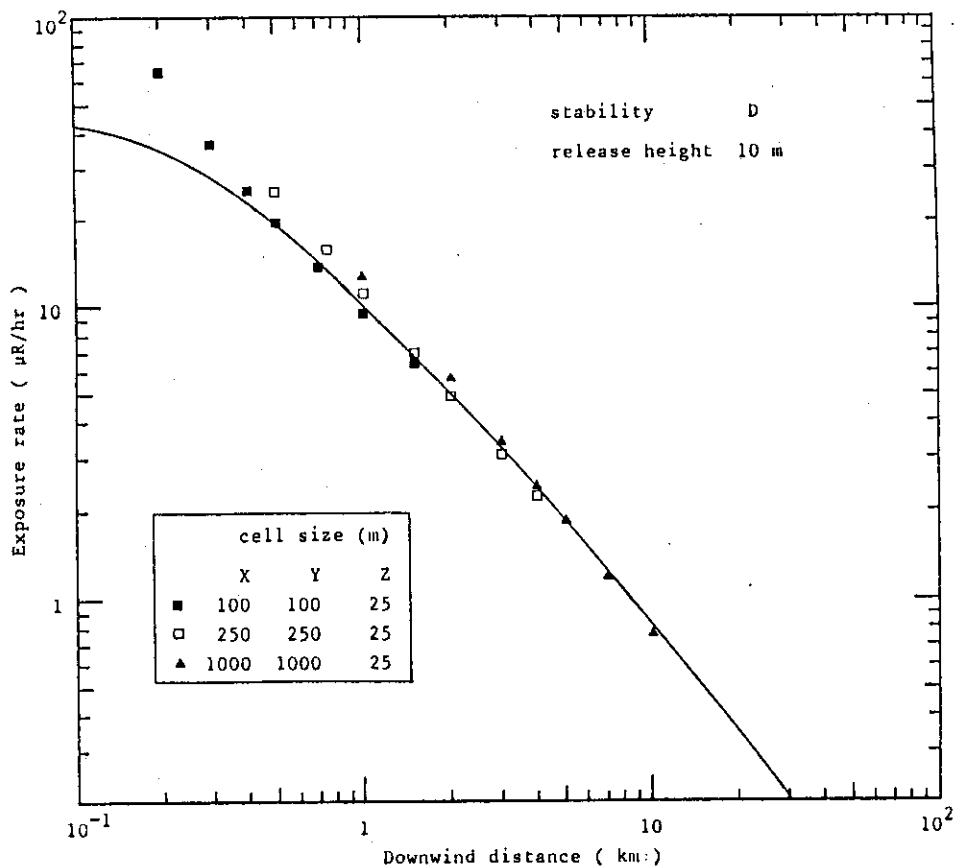


Fig. 21 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

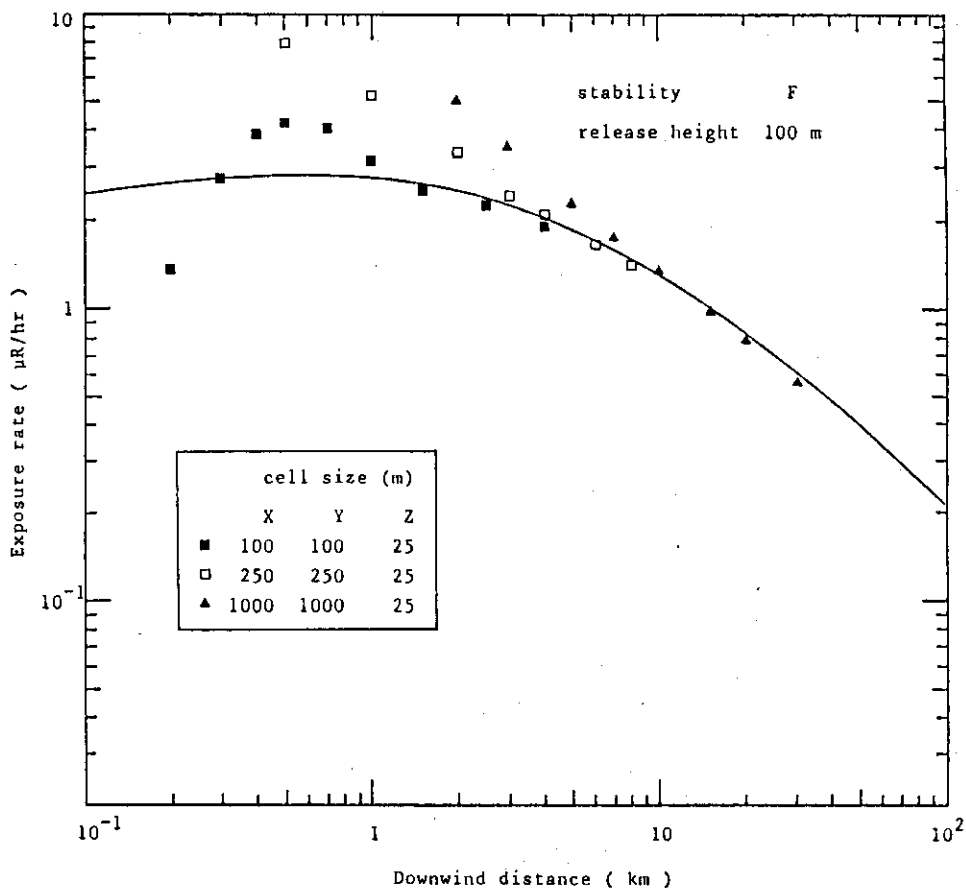


Fig. 22 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

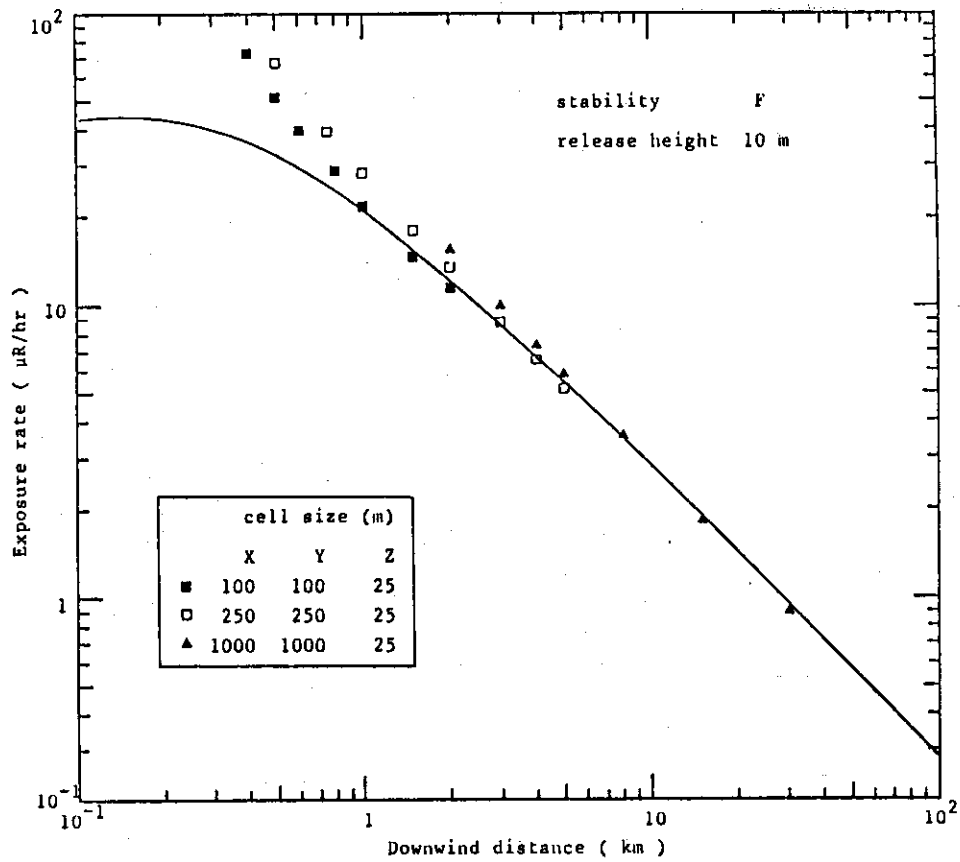


Fig. 23 Comparison of distribution in the downwind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

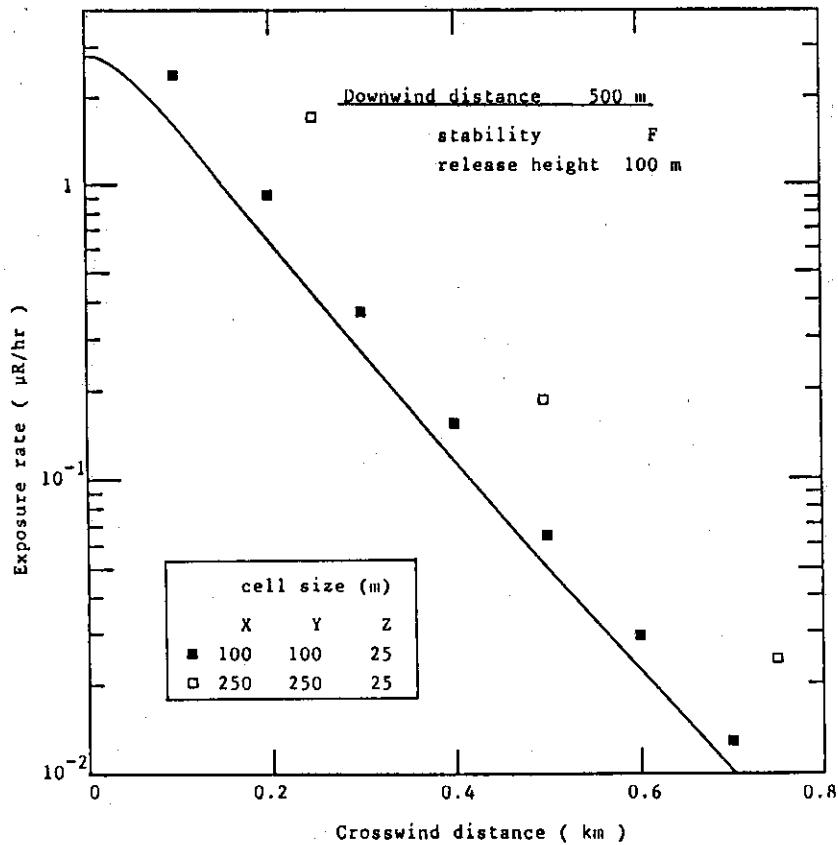


Fig. 24 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

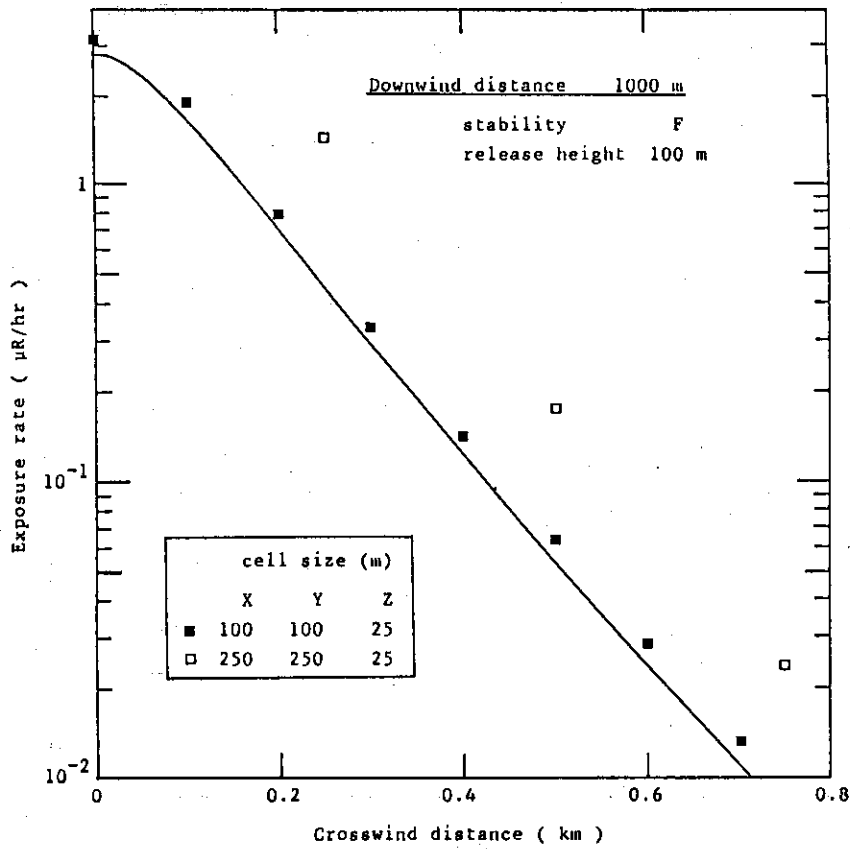


Fig. 25 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

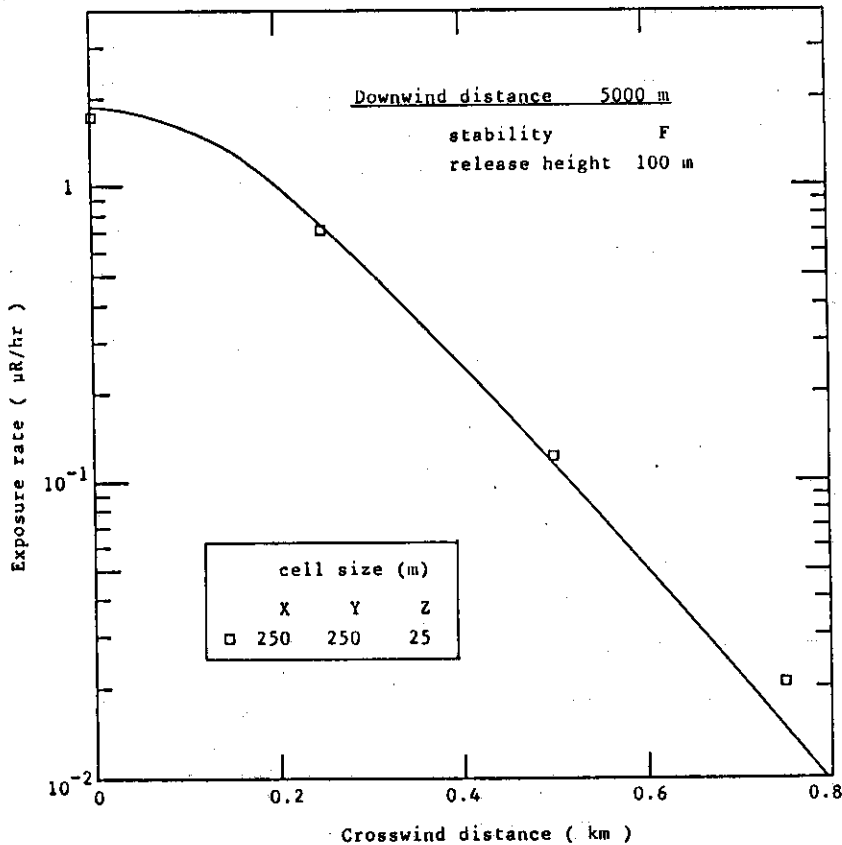


Fig. 26 Comparison of distribution in the crosswind axis between the results of GAMPUL and CIDE using median concentrations

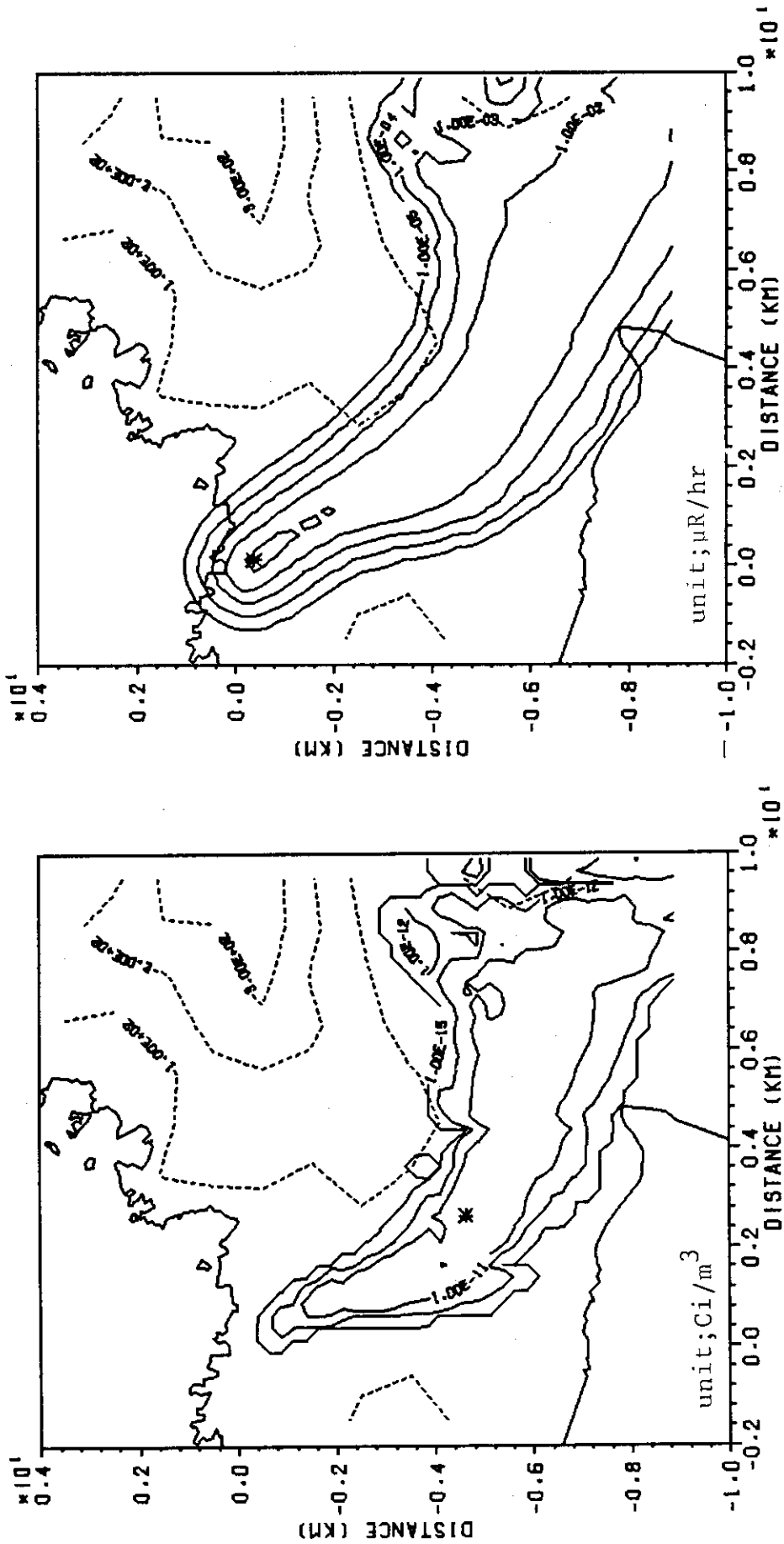


Fig. 27 Isopleth of mean concentration in cell at the ground level which is calculated by PIC model code PRWDA.

Fig. 28 Isopleth of exposure rate at the ground level which is calculated by cell dose model code CIDE.

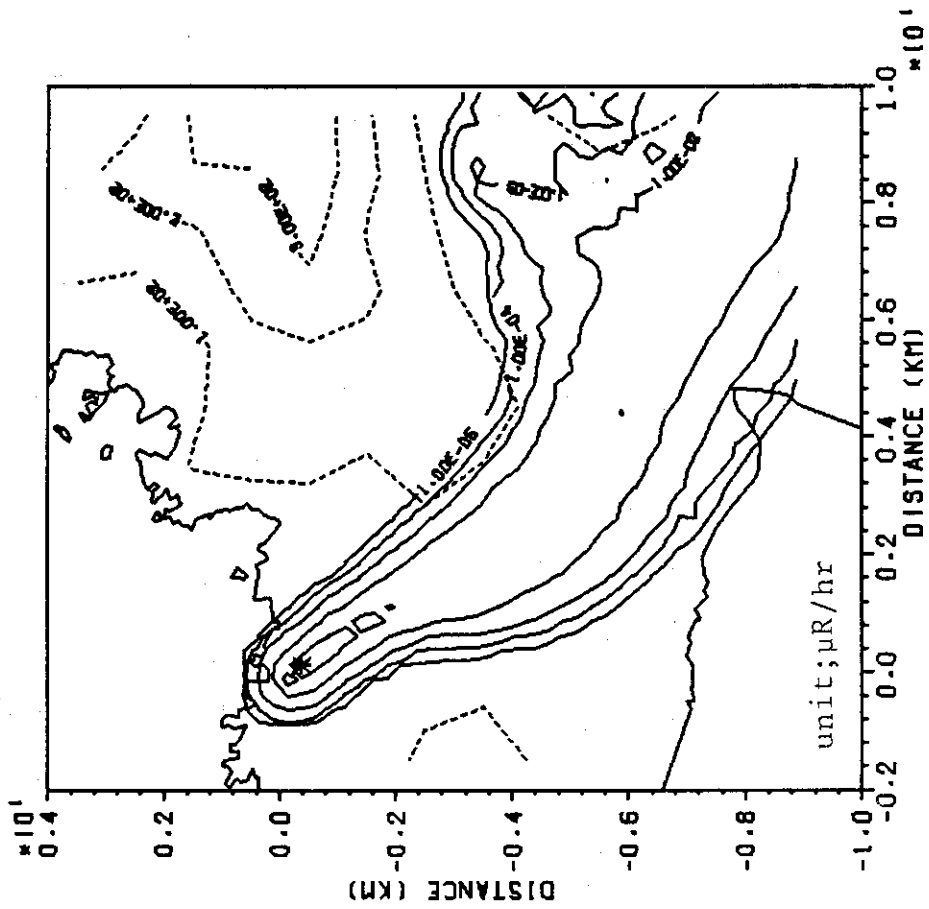


Fig. 29 Isopleth of exposure rate at the ground level which is calculated by particle dose model code GAMRW.