

JAERI - M
83-084

DPRW (Discrete Parcel Random Walk) 法
による大気中濃度分布計算モデル

1983年6月

茅野政道

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。
入手の問い合わせは、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。

JAERI-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, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榑高野高速印刷

DPRW (Discrete Parcel Random Walk) 法
による大気中濃度分布計算モデル

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
茅野政道

(1983年5月18日受理)

緊急時に原子力施設から放出される放射性雲の大気拡散シミュレーションの手法としてDPRW (Discrete Parcel Random Walk) 法の可能性を検討した。

日本では、原子力施設は海岸立地であるとか、複雑な地形上に存在している等の理由で、現実の拡散状況のシミュレーションは難しい。そこで我々は、DPRW法による大気拡散計算モデルを作成しコード化した。このモデルは、放射性雲を多くの粒子群で仮定し、拡散メカニズムを粒子のランダムウォークで表現するものである。

モデルの検証のため、単純な流れの場での瞬時と連続放出の拡散計算を行い解析解と比較した結果、両者はよく一致し、手法として有効であることが確かめられた。また、1980年に原研・東海研で行われた野外拡散実験の結果との比較も行った。

JAERI-M 83-084

Atmospheric Dispersion Model by
DPRW (Discrete Parcel Pandom Walk) Method

Masamichi CHINO

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 18, 1983)

A computer code with DPRW(Discrete Parcel Random Walk) method, is developed for simulating atmospheric dispersion of radioactive cloud from a nuclear power plant in emergency. And the validity of model is investigated.

In Japan, the nuclear power plants are almost located in coastal zone, and some are on complex terrain. So, in this condition, accurate evaluation is difficult. Then, we have developed three-dimensional particle-diffusion code based on DPRW method. In this model, radioactive cloud is presented by many particles and dispersion mechanism is simulated by random walk of these particles.

Calculation by this model is performed for simple wind flow field, in the case of instantaneous and continuous source, and the results are well coincided with the analytic ones. The local tracer experiment at JAERI in 1980 were also used to compare the code against field measurement.

KEYWORDS : DPRW Method, Emergency, Radioactive Cloud,
Particle-diffusion, Tracer Experiment, Computer
Code, Atomospheric Dispersion, Nuclear Power Plants

目 次

1. まえがき	1
2. モデル	1
3. 計算手法	6
4. 計算結果	7
4.1 モデルの検証	7
(1) 瞬時放出	7
(2) 連続放出	7
4.2 拡散係数の検討	8
4.3 内部境界層取扱いの検討	9
4.4 拡散実験との比較	9
5. 考察	11
謝 辞	11
参考文献	11

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Model Discription	1
3. Calculation Method	6
4. Calculation Results	7
4.1 Model Verification	7
(1) Instantaneous Release	7
(2) Continuous Release	7
4.2 Investigation of Diffusion Coefficient	8
4.3 Simulation of Internal Boundary Layer	9
4.4 Comparison with Field Tracer Experiment	9
5. Discussion	11
Acknowledgments	11
Literature Cited	11

1. ま え が き

原子力施設から放出される放射性雲による環境中の被曝評価を行うためには、放射性雲の濃度分布を求めておく必要がある。現在、安全審査等で用いられている濃度評価式は、雲が、放出後風下方向に流れの主軸をのばし軸の周りで正規分布することを仮定した、いわゆるガウス・プルームモデルといわれるものである。この、従来から用いられる濃度評価式は、放出時の放出点での気象条件を用いており、風速場の時間的、地域的変動等の非定常状態に対応できない。このことは、特に原子力施設事故時に放出される放射性雲の拡散状態の推定のように、現実の拡散状況を知る必要がある場合大きな誤差要因となる。

以上の問題を解決する手段として流跡線-パフモデル、PIC (Particle-in-Cell) モデル等が検討されているが、ここではBNWL (Battelle, Pacific Northwest Laboratories) が、米国のHanford Siteにおいて処分される廃棄物の地下水による拡散をシミュレートする際に用いたDPRW (Discrete-Parcel-Random-Walk) モデルを大気拡散に適用し、濃度分布計算コードとしての可能性について検討した。

2. モ デ ル

このモデルはHanfordの廃棄物施設で地中拡散のシミュレーションに用いられている手法⁽¹⁾で、今回はこの手法を三次元化して、大気拡散に応用した。本手法の本質的な工夫は、放射性雲を粒子群で表わし、粒子の移流・拡散による粒子分布の変化で、大気拡散シミュレーションを行う点にある。各粒子の、あるタイムステップ後に決まる新しい位置は、移流 (advection) とランダムウォークによる拡散 (dispersion) の和によって決められる。粒子群を用いた拡散モデルの特徴は、

- ・時間及び空間的に変化する風速場を用いて、複雑な拡散現象を扱うことができる、
- ・常に質量保存が成り立ち、差分手法で表われる、擬似拡散がない、
- ・各粒子に、放射能、経過時間等の指標を付与して、拡散させることができる、

等があげられる。

大気中の拡散現象は、大別して拡散物質の発生、移流、拡散、境界条件に分けられ計算のシーケンスは次の通りである。

- (1) 粒子の初期位置を定義する。
- (2) 移流で決まる新しい位置を求める。
- (3) 移流により決定された位置に、拡散の効果を加える。
- (4) 崩壊・沈着による放射能の変化分を修正する。
- (5) 空間をセルマトリクスに分割し、その中の平均濃度として濃度計算を行う。

次にこれらのステップを詳細に述べる。

(1) 移流 (advection)

粒子群の移流は媒体である大気の流れ (風) に支配される。大気の流れは地形や熱フラックス、気

圧等により決まるもので粒子の性質には無関係とする。空気の流れ（風）は、速度のマトリックス（ u, v, w ）で表わされ、正しい移流のシミュレーションのためには、質量保存の風速場である必要がある。速度コンポネント（ u, v, w ）は大気中を分割した格子の点で与えられ、各粒子の速度は内挿により求める。粒子の移流による Δt 後の新しい位置は、

$$X_p^* = X_p + \Delta t \cdot u \quad (1)$$

$$Y_p^* = Y_p + \Delta t \cdot v \quad (2)$$

$$Z_p^* = Z_p + \Delta t \cdot w \quad (3)$$

で表わされ、ここで*は新しい位置を示す。時間ステップ Δt は、 Δt 間の移動距離が風速場マトリックスの間隔を超えないように決定する。

なお、空間に質量保存則をみたく風速場を与える計算コードは、変分法により別途作成中である。

(2) 拡散 (dispersion)

このモデルの粒子は、分子拡散の分子に当る様な粒子とは本質的に異なるが、実質的にはどちらも統計的にランダムウォークの移動をひきおこす拡散機構にしたがっている。今、一次元で拡散現象を考えると、原点からランダムウォークをはじめた粒子が t 時間後に、位置 x に存在する確率分布関数は、拡散係数を D とすると、正規分布型で以下の様に表わされる。

$$\rho(x, t) = \frac{1}{2 \sqrt{2 \pi D t}} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{4 D t} \right) \right] \quad (4)$$

この関数は独立に3次元で適用できる。(4)式で重要なことは、粒子がランダムウォークにより時間 Δt の間に移動する距離 Δd の二乗平均の平方根 (RMS) は、

$$\Delta d_{\text{RMS}} = \sqrt{2 D \Delta t} \quad (5)$$

で表わされるということで、 y, z 方向についてもそれぞれの D を用いて同様の取扱いができる。本コードでは、拡散係数 D は、水平方向と鉛直方向で異なり各々が大気安定度と粒子の放出からの移動距離に依存する。水平拡散距離 d_h と、鉛直拡散距離 d_v のRMSは、

$$d_{h, \text{RMS}} = \sqrt{2 D_h \Delta t} \quad (6)$$

$$d_{v, \text{RMS}} = \sqrt{2 D_v \Delta t} \quad (7)$$

で、与えられる。すなわち、ある環境のもとで、一点に粒子群が存在しているとすると、 Δt 時間後の拡散による粒子群の分布型は、楕円球になりその分布の水平、鉛直方向のRMSは(6), (7)式で表わされる。

各粒子の拡散による移動距離は次の様なアルゴリズムにより決められる。粒子Pの拡散距離は0に幾何平均をもち(5)式に従うRMSをもつ距離の分布から得られる値でなくてはならない。中心極限定理によれば、正確な拡散距離の分布型が知れなくても、もし平均値とRMSが等しければ、分布型にかかわらず粒子群全体の集積的分布は正規分布に近づく。本コードでは、簡便さのため、一様分布

により拡散距離を与えた。次元 x 方向の拡散ステップによる移動距離 X_p' は、

$$X_p' = [R]_{-\xi}^{+\xi} \quad (8)$$

で、ここで $[R]_{-\xi}^{+\xi}$ は $-\xi$ から $+\xi$ までの一様乱数である。 ξ は X_p' の RMS が (6) 又は (7) の d_{RMS} に等しくなる様に与える。 ξ は次の様に求める。RMS の 2 乗は定義から、

$$X_{\text{RMS}, p}'^2 = \int_{-\xi}^{+\xi} P(X) \cdot X^2 dx \quad (9)$$

ここで $P(X)$ は確率分布関数で、 $-\xi$ から $+\xi$ で一様の場合、

$$P(X) = 1 / 2\xi \quad (10)$$

(10) 式を (9) 式に代入して、

$$X_{\text{RMS}, p}' = \xi / \sqrt{3} \quad (11)$$

この式と (5) 式により、

$$\xi = \sqrt{6 D \cdot \Delta t} \quad (12)$$

したがって (8) 式は、

$$X_p' = [R]_{-\sqrt{6D\Delta t}}^{+\sqrt{6D\Delta t}} \quad (13)$$

0 から 1 の一様乱数を $[R]_0^1$ とすれば (13) 式は、

$$X_p' = \sqrt{24 D \Delta t} (0.5 - [R]_0^1) \quad (14)$$

(6), (7) 式に示した様に水平方向と鉛直方向で拡散が異なると考えると、(14) 式の D は D_h ($h = \text{horizontal}$) におきかえられ、各々 y , z 方向に、

$$Y_p' = \sqrt{24 D_h \cdot \Delta t} (0.5 - [R]_0^1) \quad (15)$$

$$Z_p' = \sqrt{24 D_v \cdot \Delta t} (0.5 - [R]_0^1) \quad (16)$$

となる。以上と (1)~(3) 式により、移流と拡散による粒子の Δt 間の移動は、

$$X_p^* = X_p + u \cdot \Delta t + X_p' \quad (17)$$

$$Y_p^* = Y_p + v \cdot \Delta t + Y_p' \quad (18)$$

$$Z_p^* = Z_p + w \cdot \Delta t + Z_p' \quad (19)$$

で、与えられる。

次に拡散係数の求め方を示す。拡散係数 D は、分布の標準偏差と、

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{2} (d \sigma(x)^2 / d t) \\
 &= \frac{1}{2} (d \sigma(x)^2 / d x) \cdot dx / d t = \sigma(x) \cdot \sigma(x)' \cdot U
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

の関係にあり⁽²⁾、本コードでも20式から算出している。分布の標準偏差 $\sigma(x)$ は、Pasquill-chart⁽³⁾といわれる、大気安定度と風下距離の関数として偏差を示した図から、今井が求めた算出式を用いて計算した。水平方向の標準偏差 σ_y (m) 及び鉛直方向の偏差 σ_z (m) は、それぞれ、

$$\sigma_y = 6.78 \times 10^{-4} \cdot \phi_0 \cdot x (8 - \log x) \tag{21}$$

$$\sigma_z = a_0 \cdot x^{a_1 + a_2 \log x + a_3 (\log x)^2} \tag{22}$$

但し、 $\sigma_z > 1000 \text{ m} \rightarrow \sigma_z = 1000 \text{ m}$

で表わされ、 ϕ_0 、 a_i ($i=1, 2, 3$)、は大気安定度に依存する定数で x は風下距離(m)である。大気安定度の決定法は、風速と日射量等から決定する日本式⁽⁵⁾と、気温の鉛直勾配から決定する米国式⁽⁶⁾等が考えられるが、今回はテストのために、安定度決定のサブルーチンはもたず直接安定度を入力している。大気安定度決定の表を Table 1に示す。

(3) 放出源

本手法では、放出された放射性雲を粒子群でおきかえることにより粒子のランダムウォーク現象から拡散をとらえる。粒子は Δt ステップごとに、適当個発生させ、粒子の最大個数を M_p とすると、時間ステップ ($t, t + \Delta t$) に放出する粒子数 N^* は、

$$N^* = (M_p / T_R) \cdot \Delta t \tag{23}$$

である。ここで T_R は放出継続時間を示す。 Δt 間に発生する粒子は、 $\Delta t / N^*$ の間隔で1個ずつ発生し、 Δt 後の初期分布を与えるために、 Δt を再分割して発生粒子の移動 (sub-movement) を行う。粒子が発生時からもつ性質としては、移行時間、移動距離、放射能である。粒子 p のもつ放射能を Q_p とすると、

Q_p は

$$Q_p = (Q \cdot \Delta t / N^*) \tag{24}$$

で現わされる。ここで Q は放出率 (Ci/s) を示す。放出源が体積源や線源、移動源の様な場合、放出点をそれにしたがって変化させなくてはならない。体積源や線源の場合はモンテカルロ法で、移動源の場合は、その動きに合わせて発生点をかえる。

(4) 境界条件

大気拡散で考えられる境界条件としては(i)放射性雲(粒子)が地面を横切った場合、(ii)粒子が性質が性質の異なる気塊に入射した場合(逆転層、内部境界層)、(iii)対象とする空間から粒子が出た場合、である。各場合について述べる。

(i) 地面に入射した粒子は、その性質により反射する場合と沈着する場合がある。粒子が希ガス系の放射性雲を表わしている場合は反射し、 I_2 等の沈着系のシミュレーションでは、粒子は反射するが粒子のもつ放射能の一部が地面に残る様な方式をとる。ただし今回はモデルのテストの

ため沈着のテストはしなかった。

(ii) 粒子が他の気塊に入射した場合、その気塊の乱流状態により拡散係数が変化するため(14)~(16)式に補正が必要である。ここでは鉛直方向の気層変化を考え、(16)式に着目する。Fig. 1に粒子の移動の模式図を示すが、図中のA点で示す様に粒子が拡散係数 D_2 から D_1 の層に入った場合、距離 Z' のうち $Z_2'^*$ は、

$$Z_2'^* = \sqrt{D_1/D_2} \cdot Z_2' \quad (25)$$

で補正され $Z' = Z_1' + Z_2'^*$ で Z' を修正する。逆に不安定層 (拡散係数 D_1) から安定層 (拡散係数 D_2) に移動する場合、気温減率の関係で安定層への浸入がさまたげられる。この程度を、ここでは便宜上、拡散係数の比の平方根 $\sqrt{D_2/D_1}$ で表わし、0~1の一樣乱数 R (0, 1) との比較により、

$$R(0, 1) \geq \sqrt{D_2/D_1} \quad (26)$$

ならば、粒子を境界面で反射させる。この操作により、 $D_2 \geq D_1$ ならば常に粒子は面を透過する。反射の場合も、反射後の距離は(25)で求める。

大気の乱れの鉛直分布は、鉛直温度分布の各高さでの傾きから Table 1(B)の安定度分類により安定度の形で入力する。

(ii) 対象領域から粒子が出た場合、その粒子のもつ性質は全部消去して、放出源で再利用する。

(5) 計算出力

出力は空間を長方形セルで分割したグリッドセル内の粒子数からセル内の平均濃度として表わす。出力濃度は放出から一定時間後の瞬時濃度、一定間隔の積算濃度である。粒子モデルによる出力は、粒子分布にばらつきがあるので本モデルでは、移動平均法により平滑化を行った。一次元で考えると、セル i の値の平滑化のためには、 ρ_i を生の値、 ρ_i^s を平滑化後の値とすると、

$$\rho_i^s = (\rho_{i-1} + \rho_i + \rho_{i+1}) / 3 \quad (27)$$

で与えられ、この操作を三次元的に行った。次に各出力について述べる。

(i) 瞬時濃度は、ある瞬間に各セル内の粒子のもつ放射能の和をセルの体積で割って求める。すなわちセル (i, j, k) 内に n コの粒子があるとすると、セル内平均濃度 $C(i, j, k)$ は、

$$C(i, j, k) = \frac{\sum_{\ell=1}^n Q(\ell) \cdot e^{-\lambda t(\ell)}}{V} \quad (28)$$

ここで、 λ は崩壊定数、 t は粒子 ℓ の移動時間、 V はセルの体積、 $Q(\ell)$ は粒子 ℓ の放射能を示す。

(ii) 積算濃度

積算濃度は、ステップごとに粒子がどのセル内に存在するか判定し積算していく。すなわちセル (i, j, k) の積算濃度を $A_c(i, j, k)$ とすると、あるステップ Δt でセル内に n 個粒子が存在する場合、

$$A_c(i, j, k) = A_c(i, j, k) + \frac{\sum_{\ell=1}^n Q(\ell) \cdot e^{-\lambda t(\ell)} \cdot \Delta T}{V} \quad (29)$$

で表わされる。

3. 計 算 手 法

本モデルで拡散計算をおこなう場合、気象条件の入力法や結果の出力法によってプログラムの構成が異なる。気象データが予測時間中に変化しない時、及び変化してもあらかじめ値がわかっている場合、また出力が計算の最後に一度だけ行われる場合は、粒子1個を放出から予測予定時まで追跡し、追跡終了後、次の粒子を発生から再び追跡する方式をとる。また、気象データがあらかじめ用意されておらず計算中に入力される場合、及び予測予定時刻まで途中何回か分布を出力させたい場合には、時間ステップごとに順次適当個数ずつ発生させていく必要がある。前者の場合の流れ図をFig. 2に、後者の場合をFig. 3に示す。両構成の主な違いは、(1)前者の場合、時間ステップ Δt が着目粒子の速度によって決まるが後者の場合存在する粒子群中の最大速度をもつ粒子により決まるので計算時間に差がつく、(2)前者の場合、2のモデル説明の放出源の項目で述べた sub-movementが必要ない、という2点である。

今回は、Fig. 2に示した前者の流れ図に従ってコードを作成した。Fig. 2にしたがって構成を述べる。

- (1) 計算パラメータとして、粒子総数、放出開始時間、予測時間、放出場所等を入力する。
- (2) 濃度計算、風速場設定用の空間メッシュを決定しておく。
- (3) 放出源情報として、放出率、放出継続時間等を入力する。
- (4) 発生予定全粒子について(5)~(10)の操作をおこなう。
- (5) 放出時の気象データとして、風向、風速、大気安定度、境界層等を入力する。
- (6) 粒子Iのうける風速を求める。
- (7) 時間ステップ Δt を決定し、拡散による移動分を求め、粒子の新しい位置を決める。また移動時間と移動距離を更新する。
- (8) 各ステップでの粒子位置から、粒子の存在するセルへの濃度寄与を求める。
- (9) 粒子Iの移動時間が予測時間に達したかどうか調べ、達していたら次の粒子の追跡を開始する。
- (10) 予測時間に達していない場合は、移動時間が新しい気象データ入力の時間に達しているかどうか調べ、達していれば、新しいデータをもとに、そうでなければそのままのデータを用いて、次のステップの移動を計算する。
- (11) 以上の操作を全粒子について行なったかどうか調べ全粒子の追跡を終了していたら結果を出力する。

4. 計算結果

4.1 モデルの検証

本モデルの大气拡散への適用の妥当性をみるため、単純な流れの中での瞬時放出の場合の拡散と、連続放出の場合の拡散のシミュレーションを行ない、解析解との比較を行なった。

(1) 瞬時放出

Fig.4は、パフ型モデルについて無限媒質で計算をおこなった例で、拡散係数は $D_x = D_y = D_z = 10.0 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた。ここでは粒子10,000個を計算の始めに原点から同時に発生させ、放出から1,000s後の雲の中心を含む線上の濃度分布を調べた。1,000sに到るまでにかかるステップ数を10, 20, 100の3種類についておこない解析解と比較した。解析解は、分布の中心を原点とすると、

$$C(x, y, z) = \frac{q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \quad (30)$$

で表わされる。ここで q は発生粒子数、 σ は拡散係数と、

$$\sigma^2 = 2 D t \quad (31)$$

の関係にある。ここで t は経過時間を示す。Fig.4より、拡散ステップが少くとも10ステップ程度以上になれば、粒子群の分布はガウス分布になることがわかる。この結果は平滑化をおこなっていない。

Fig.5及びFig.6は、Fig.4と同じ時間中で種々の粒子数についてパフ型分布を計算した例で、平坦地形を模擬した境界条件を入れ、放出点は地上から80mとした。この場合比較する解析解は、30式の $\exp[-z/2\sigma_z^2]$ の部分で、

$$\left\{ \exp(-(z-H)/2\sigma_z^2) + \exp(-(z+H)/2\sigma_z^2) \right\} \quad (32)$$

でおきかえて得られる。ここで H は放出高を表わす。Fig.5は分布の中心を含む風向に直角な水平方向の分布で粒子数が1,000個ではばらつきが大きく、3次元的取扱いは5,000個以上の粒子が必要といえる。Fig.6は、分布の中心を含む鉛直方向の粒子分布で、Fig.5の場合と同様に1,000個発生させた場合のばらつきが大きい。

(2) 連続放出

Fig.7は、プルーム型の場合の計算をおこなった例で、拡散係数は $D_x = D_y = D_z = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 、風速は 2 m/s 一定とした。粒子は、高さ80mの点から1,000s間に10,000個発生させ、放出開始から1,000s後の放出高さでの水平方向の粒子分布を風下825mと1,725mで調べた。この場合、比較に用いた解析式は、

$$C(x, y, z) = \frac{q}{\sqrt{2\pi} \sigma_y \sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (33)$$

である。ここで u は風速を示す。Fig. 5, 6, 7 の結果は平滑化をおこなっていないので、分布にばらつきがあるが、解析解とほぼ一致している。

以上から瞬時放出の場合で 5000 個、連続放出の場合で 10 個/s の粒子を発生することにより、少なくとも、単純な流れの中での拡散は、本モデルを用いて表現できるといえる。複雑な条件下での拡散現象を表現できるかどうかは、野外実験との比較により議論する。

4.2 拡散係数の検討

4.1 では、モデルの検証のために、拡散係数を一定として計算したが、実際の野外での煙の拡散の場合、煙の拡散係数は 20 式に示す様に、煙のスケールと共に増大することが知られている。20 式から得られる拡散係数を用いてプルーム型放出のシミュレーションを行い、21), 22 式から得た σ_y, σ_z を 32 式に代入して得た結果と比較した。さらに、拡散係数を場に一定な値として与えた場合の分布についても同時に比較した。

(i) Fig. 8~Fig.10 は、水平方向の拡散係数を $2.5 \text{ m}^2/\text{s}$, $3.0 \text{ m}^2/\text{s}$, 20 式の大気安定度 D の場合の 3 種の拡散係数について、風速 5 m/s の場に高さ 80 m から粒子 10000 個を連続放出した場合の結果である。それぞれ放出から 1 時間後の、風下 3, 6, 9 km における風向に直角方向の地上粒子分布を示している。各図の実線は 32 式から得た結果で、 σ_y, σ_z は 21), 22 式から求めている。 $D_y = 2.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 及び $3.0 \text{ m}^2/\text{s}$ は、20 式によれば、それぞれ風下 1500 m 及び 2000 m の σ を用いた値にあたる。Fig. 8~Fig.10 でわかる様に、20 式から拡散係数を求めた場合の結果は、32 式から得た解析解とよく一致し、 $D = \text{Constant}$ の場合の結果も、3 km, 6 km ではそれほど誤差なく一致する。しかしながら 9 km では当然のことではあるが、拡散過少の傾向が表われる。以上のことから水平方向に関して 20 式の D_y を用いることが正しいという結論にはならないが、Pasquill chart の拡散巾は一応の評価をうけており本モデルでは以後 20 式により D_y を与える。

(ii) Fig. 11~Fig.12 は、鉛直拡散係数について同様の検討をおこなった結果で、20 式から得られる安定度 D の場合の D_z と $D_z = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ の 2 種類について計算した。放出高および粒子数は Fig. 8~Fig.10 の場合と同様で Fig. 11 は風下 2 km, 図 12 は 7 km における軸上付近の鉛直粒子分布である。 $D_z = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ は風下 2 km 以降の平均値である。各図の実線は 32 式から求め、 σ_y, σ_z は 21), 22 式を用いた。Fig. 8~Fig. 10 の場合と同様に 20 式から計算した D_z を用いた場合は解析解とよく一致するが、 $D_z = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いると風下 2 km で拡散過大となっている。

(iii) 鉛直拡散係数は、地面の影響のため、雲のスケールと共に無限に増大するわけではない。第 13 図に 20, 21), 22 式から求めた D_z を安定度別に風下 7 km まで表わした結果を示す。図中、大気安定度 A, B で存在する変曲点は、22 式の σ_z が 1000 m 一定となった点である。安定度

A, Bでは、放出後早い段階で D_z が $10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ を超えており、このことは現実を正しく表わしているとはいえない。また D_z の異常な増大は、計算の際ステップの時間中の短縮や、積算濃度の不正確さにつながり、不安定A, B, Cの D_z には、上限値 $D_{z, \text{max}}$ を設ける必要がある。具体的な値については詳しい検討が必要であるが、試みとして大気安定度Bの場合について $D_{z, \text{max}} = 30 \text{ m}^2/\text{s}$ と $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ の2種について計算をおこない、風下1000mで比較した。第14図に結果を示す。20式に従えば D_z は1000mで $50 \text{ m}^2/\text{s}$ にあたり、その場合の結果を実線で示した。図14では $D_{z, \text{max}}$ を設けた結果にそれほど差はないが、拡散過少の傾向はみられる。

4.3 内部境界層取扱いの検討

大気中で上空に、気温逆転層が存在し、雲がその層に達した場合、拡散シミュレーションでは、その面で雲が全反射すると仮定することが一般的であった。しかし実際には気温傾度の程度により拡散状態が異なると考え、かならずしも全反射としない方式の方がより現実に近いと思われる。本モデルでは、各層の気温傾度から、第1表(b)にもとづき各層を安定度分類し、それぞれの層での拡散係数 D_z をもとめ、さらに各層の D_z の比の平方根をパラメータとして境界層の取扱いをおこなっている。Fig.15及びFig.16は内部境界層の存在しない場合と存在する場合の鉛直粒子分布の違いを示した図である。高さ80mから10000個の粒子を連続放出して風下1400mと2000mで鉛直分布を調べた。Fig.15は、境界層の存在しない場合で D_z は $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 一定である。Fig.16は、境界層の存在する場合で高さ150m以下で $D_z = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 、150m以上で $D_z = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。図16に示すように150m以上にはあまり拡散しないが少しずつ境界面を越えて進入していく。この取扱いが正しく自然の状態をシミュレートしているかどうかは、拡散実験との比較検討により検証するべきと考えている。

4.4 拡散実験との比較

本モデルを用いて、昭和55年度に原研東海研においておこなわれた大気拡散実験のシミュレーションをおこない、実測値と比較した。大気拡散実験は昭和55年度10月に東海研の周辺10kmを対象に行われ、鉛直濃度分布に着目して線状源を用いた。放出ガスは SF_6 を用い、ヘリコプターで海岸線上の片道5kmを数回往復して90分間放出した。サンプリングは、放出継続時間の後半30分間に行い、4本の係留気球で鉛直分布をとり、他に地上サンプリングを20点でおこなった。また海岸付近の係留気球とヘリコプターによる鉛直温度分布の測定と、パイロットバルーン等による鉛直風速分布の測定も行った。実験時の気象データ及びサンプリング配置、放出ライン等をFig.17に示す。シミュレーションは、比較的データのそろっているRun.4とRun.5をえらんだ。

(i) Run.4

計算条件を以下に示す。東海地区は、多少の起伏はあるが、ほぼ平坦であり、標高は全区域一定とした。風速は、鉛直分布を、放出点(150m)の風速測定値 4.1 m/s とパイロットバルーンによる分布測定値をもとにベキ乗則に従って、

$$u(z) = 4.1 \cdot (z/150)^{0.26} \quad (34)$$

で表わした。また風向は、流跡線観測等から、場全体の平均として北を 0° として 75° を用いた。内部境界層については、鉛直気温分布の測定から Table 1(B) の分類に従い、高さ $0 \sim 100 \text{ m}$ に安定度 C の層、 $100 \sim 200 \text{ m}$ に D の層、 200 m 以上に E の層を設定した。安定度 C の層は、海岸線から陸地に入るに従って発達しているが、ここでは 100 m の高さに固定した。放出は、ヘリコプターの動きに合せた移動源として取扱い、ヘリコプターの旋回分を考慮して片道 6.4 km とした。

Fig. 18 は放出開始後 4950 s (ヘリコプターが 5 往復半終了時) の瞬時濃度分布を地上と放出高の 2 高度で示した図で、実線の帯が地上の $200 \text{ ppt} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{m}^3)$ の等値線、一点鎖線の帯が放出高さ付近での 400 ppt の等値線を示している。瞬時濃度で示してあるので、ヘリコプターの往復運動によるガスの蛇行が表われている。

Fig. 19 は、サンプリングが行われた時間帯での平均地上濃度分布の等値線図で白丸の値は実測値を示している。ほとんどの点で factor $2 \sim 3$ 以内で一致するが、実測で表われる 800 ppt の最大値は、計算では表われていない。

Fig. 20 は、放出ラインの中心の北 1 km からラインに直角にのびた線上の鉛直濃度分布図である。図に示すように 100 m 以下の不安定層で 100 及び 200 ppt の線が地上に急に降下しており、不安定層に入ったガスが急速に混合されている様子を表わしている。また 200 m 以上で安定層により拡散がおさえられる様子も表わしている。実測では、最大濃度線が地上に向かって下がる傾向がみられたが、ここでは表われなかった。

Fig. 21 は、係留気球により測定した鉛直濃度分布と、計算値の比較を示した図である。絶対値は異なるが、分布のパターンは似ており内部境界層の拡散に及ぼす影響もシミュレートされていることがわかる。

(ii) Run. 5

RUN 5 では、ヘリコプターは Fig. 17 の White Pt 1 ~ White Pt 2 の間を飛行した。風速の鉛直分布は、Run. 4 とほとんど同じで風向が場全体平均で $65^\circ \sim 70^\circ$ であった。また内部境界層の形成状態も Run. 4 と同様であった。

Fig. 22 は、サンプリング時間帯の地上での平均濃度分布図で Fig. 19 と同様に実測値を入れてある。Run. 4 と同様に実測値に比べ絶対値が小さく、放出ラインの近距離に表われる高濃度地域が計算上は表われなかった。

Fig. 23 は、鉛直濃度分布の係留気球による実測と計算値の比較で、Fig. 21 と同様に絶対値は実測よりも低い、分布パターンは似ている。

5. 考 察

本報でDPRWモデルによる大気拡散シミュレーション手法について検討したが、このモデルは基本的には、大気拡散の取扱いが可能であり、いくつかの利点をもつことがわかった。すなわち原子力サイトで問題となる海風による内部境界層、風速分布等の考慮が容易であり移動源にも対処できる。また付着機構、地形の考慮、風速場の地域的変動に対する考慮も比較的容易と思われる。現在、質量保存則を満足する風速場を与えるモデルを別に開発中であり、このモデルと結合することにより、より正確な拡散モデルとなりうる。

今後の課題として、

- (1) 粒子に核種としての要素をもたせ付着、崩壊等を考える、
- (2) 拡散係数の取扱い手法を確立する、
- (3) 風速場モデルと地形データを組合せ、複雑地形における拡散シミュレーション手法を確立する、等があげられる。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、御指導を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。また拡散実験のデータ使用に当り、環境第1研究室角田道生氏の助力を得た。深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) Ahlstrom, S.W. and Foote, H.P. ; Multicomponent Mass Transport Model, BNWL-2127, (1977)
- (2) Pasquill, F. ; Atmospheric Diffusion, p126, John. Wiley, New York (1974)
- (3) Pasquill, F. ; The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorol. Mag. 90, 30 (1961)
- (4) 今井和彦 ; 私信 (1976)
- (5) 原子力安全協会 ; 夜間雲量雲型の目視観測の代りに放射収支計を用いる方法の確立, 原安協報告 40 (1973)
- (6) Regulatory Guide 1.23 ; "Qnsite Meteorological Programs", USNRC, (1972)

Table 1 Atmospheric stability classification.

(A) Japanese method

Wind (u) Velocity m/s	Insolation (T) cal/cm ² .h				Radiation (Q) cal/cm ² .h		
	T ≥ 50	T ≥ 25	T ≥ 12.5	T	Q > -1.8	Q ≥ -3.6	Q
u < 2	A	B	B	D	D	-	-
2 ≤ u < 3	A	B	C	D	D	E	F
3 ≤ u < 4	B	B	C	D	D	D	E
4 ≤ u < 6	C	D	D	D	D	D	D
6 ≤ u	E	D	D	D	D	D	D

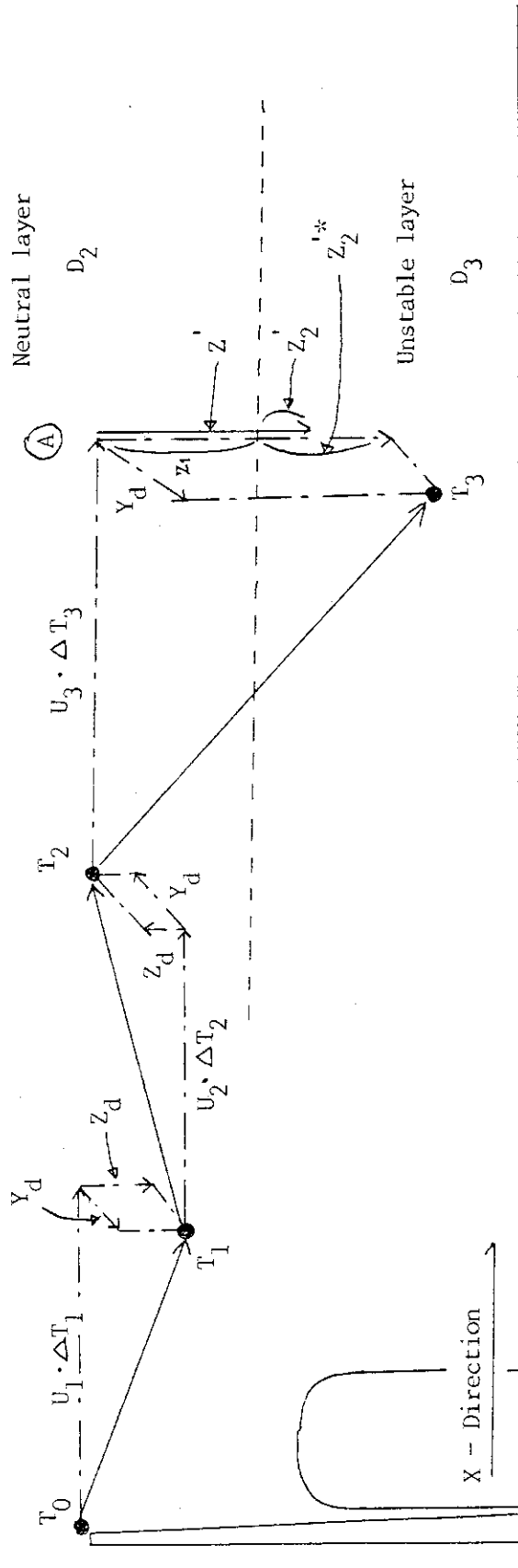
(B) U.S. method

Pasquill Category	R. G. 1.23 $\Delta T / \Delta Z$ (°C/100m)
A	≤ -2.0
B	-1.9 ~ -1.7
C	-1.6 ~ -1.5
D	-1.4 ~ -0.5
E	-0.4 ~ +1.5
F	+1.6 ~ +4.0
G	≥ +4.1

T : Time step
 Z_2' : Length in the unstable layer of Z_2'
 Z_2^{**} : Correct length of Z_2'

U : Wind speed (X-direction)
 Y_d, Z_d : Dispersion length
 D : Diffusion coefficient
 Z' : Dispersion length calculated with D_2

Stable layer
 D_3



Ground

Fig. 1 The outline of particle random walk dispersion mechanism.

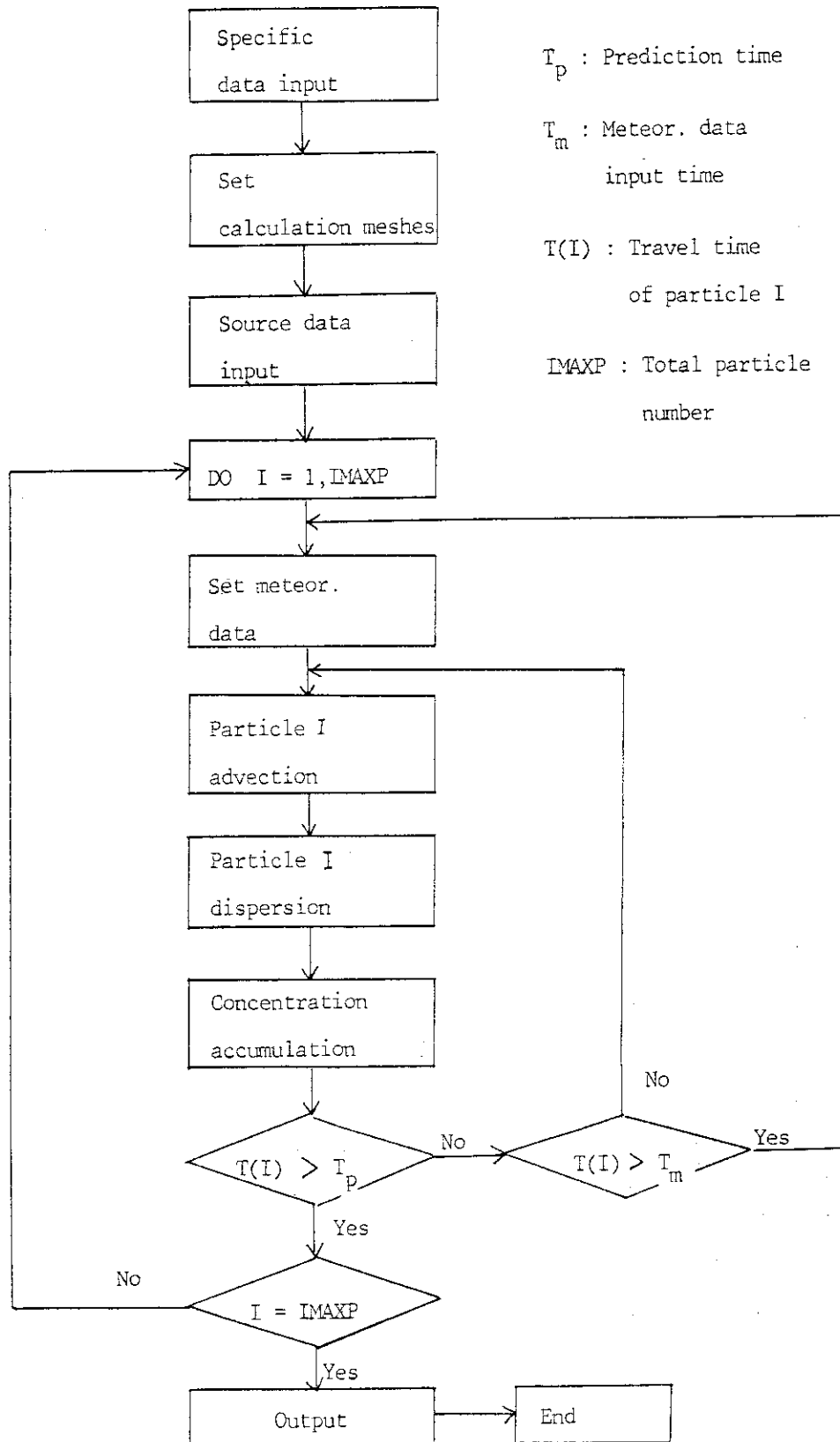


Fig.2 Flow chart example 1.

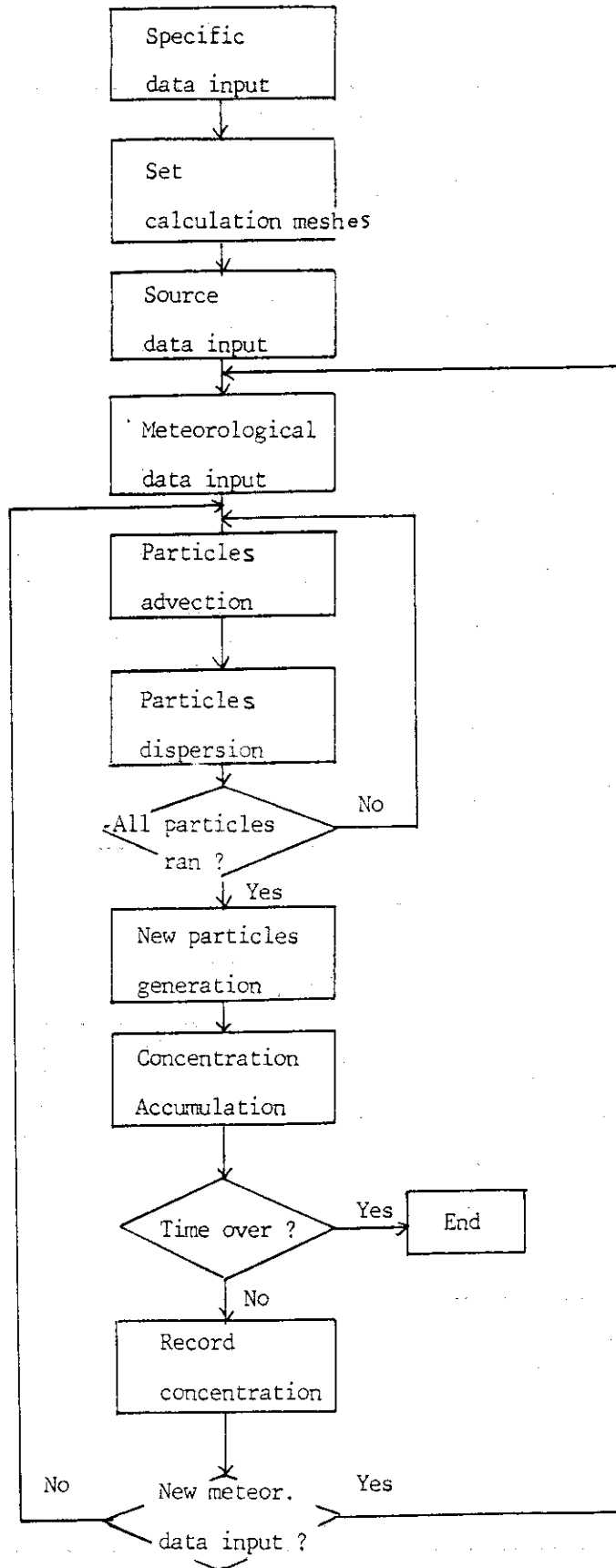


Fig.3 Flow chart example 2.

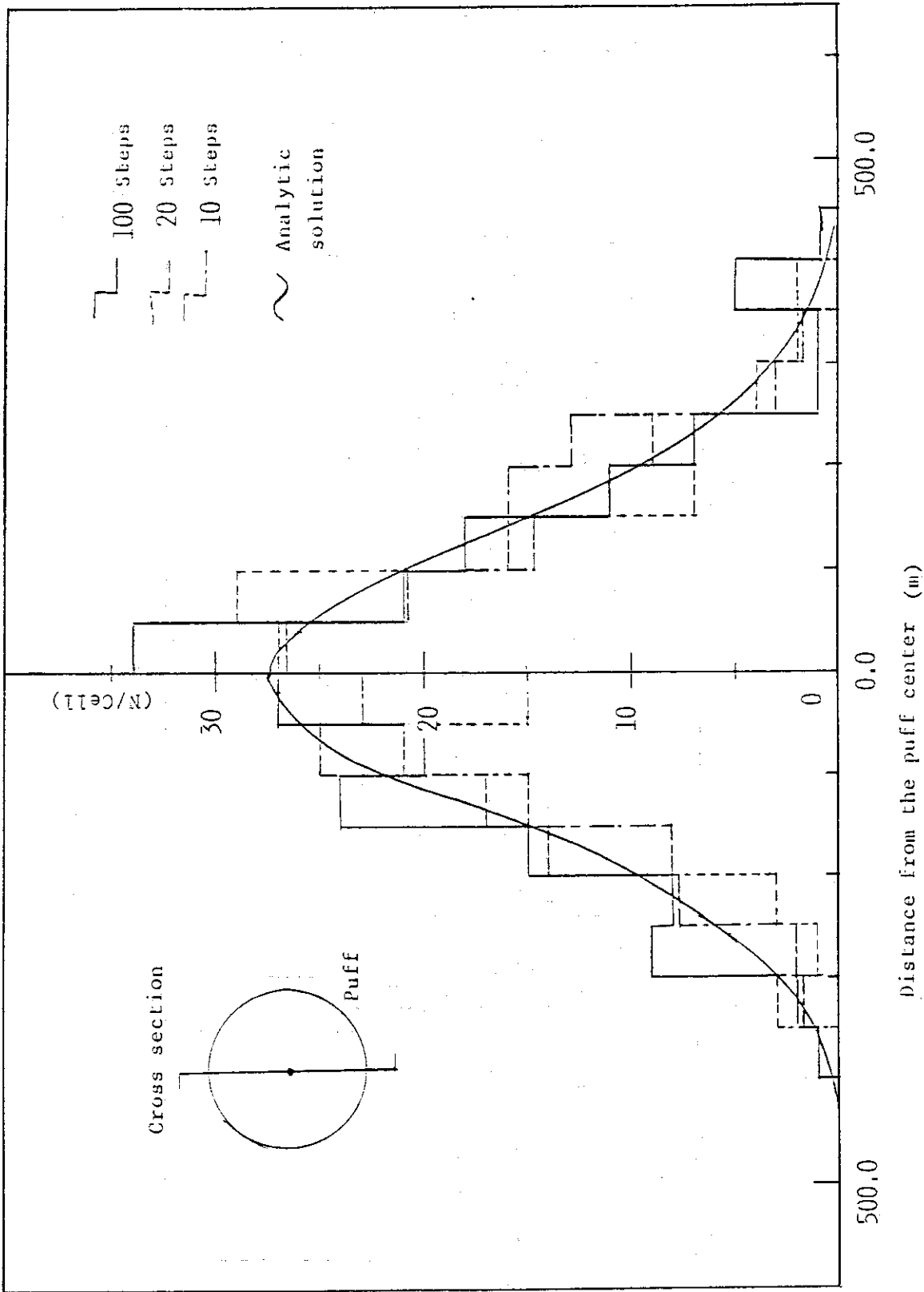


Fig. 4 Comparison of distribution after 10^3 s from the release between 10, 20 or 100 step model solutions and analytic one, instantaneous point source.

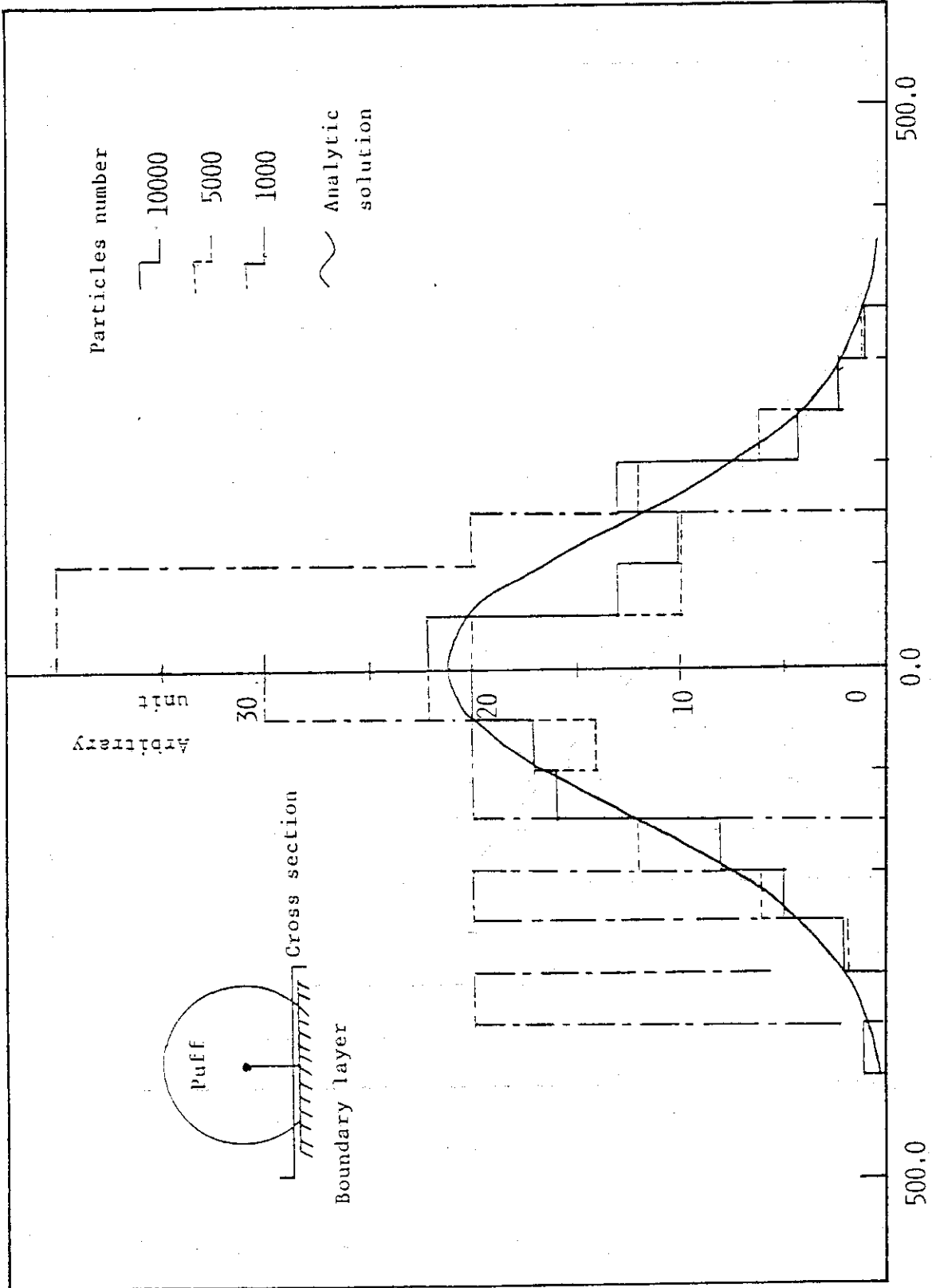


Fig. 5 Comparison of horizontal distribution after 10^3 s from the release between 10^3 , 5×10^3 or 10^4 parcels model solutions and analytic one, instantaneous point source.

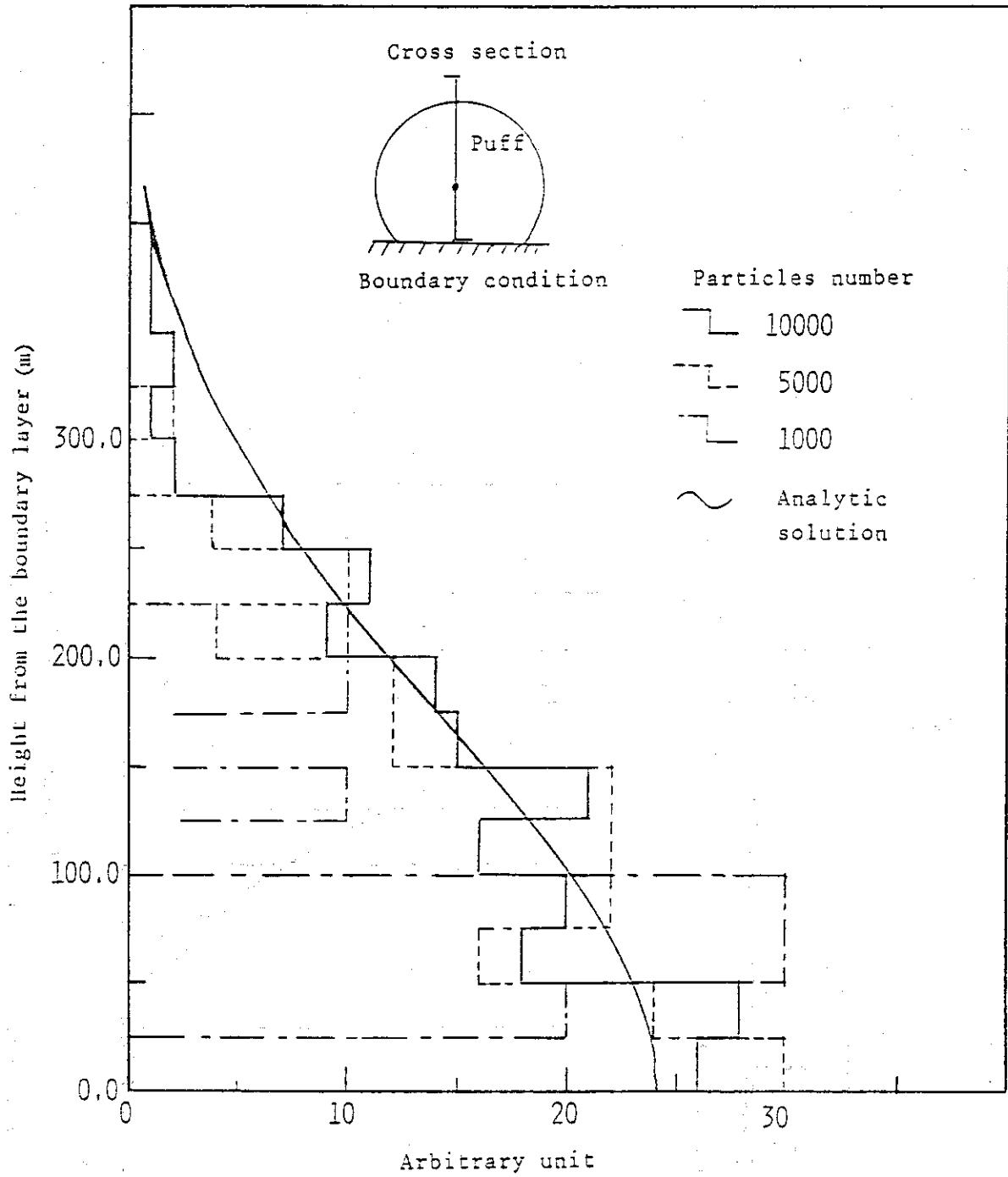


Fig. 6 Comparison of vertical distribution, with the same comparing conditions as those of Fig. 5.

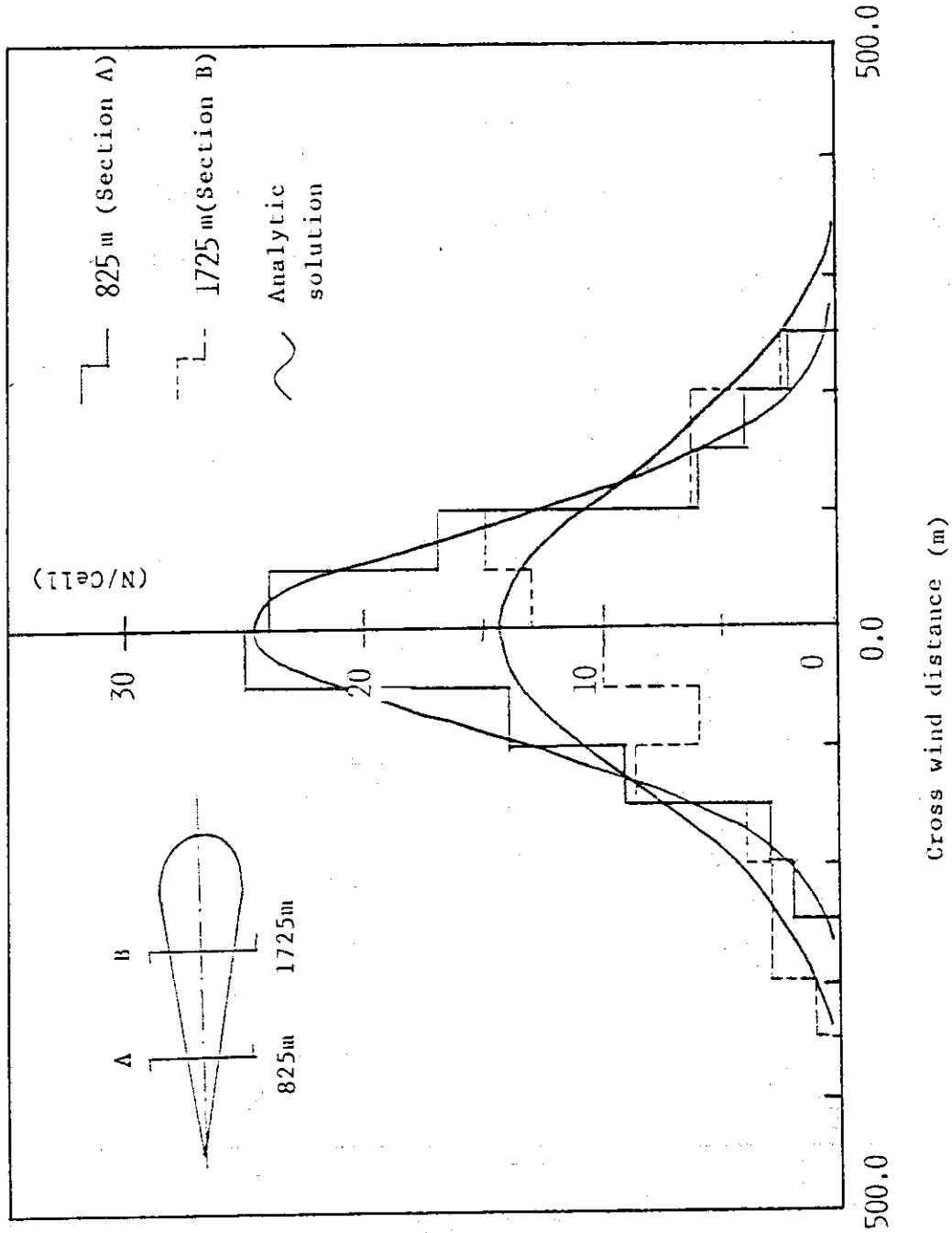


Fig. 7 Comparison of cross-wind distribution on the ground level between the model solution and analytic one, continuous point source in the 2.0 m/s wind flow field.

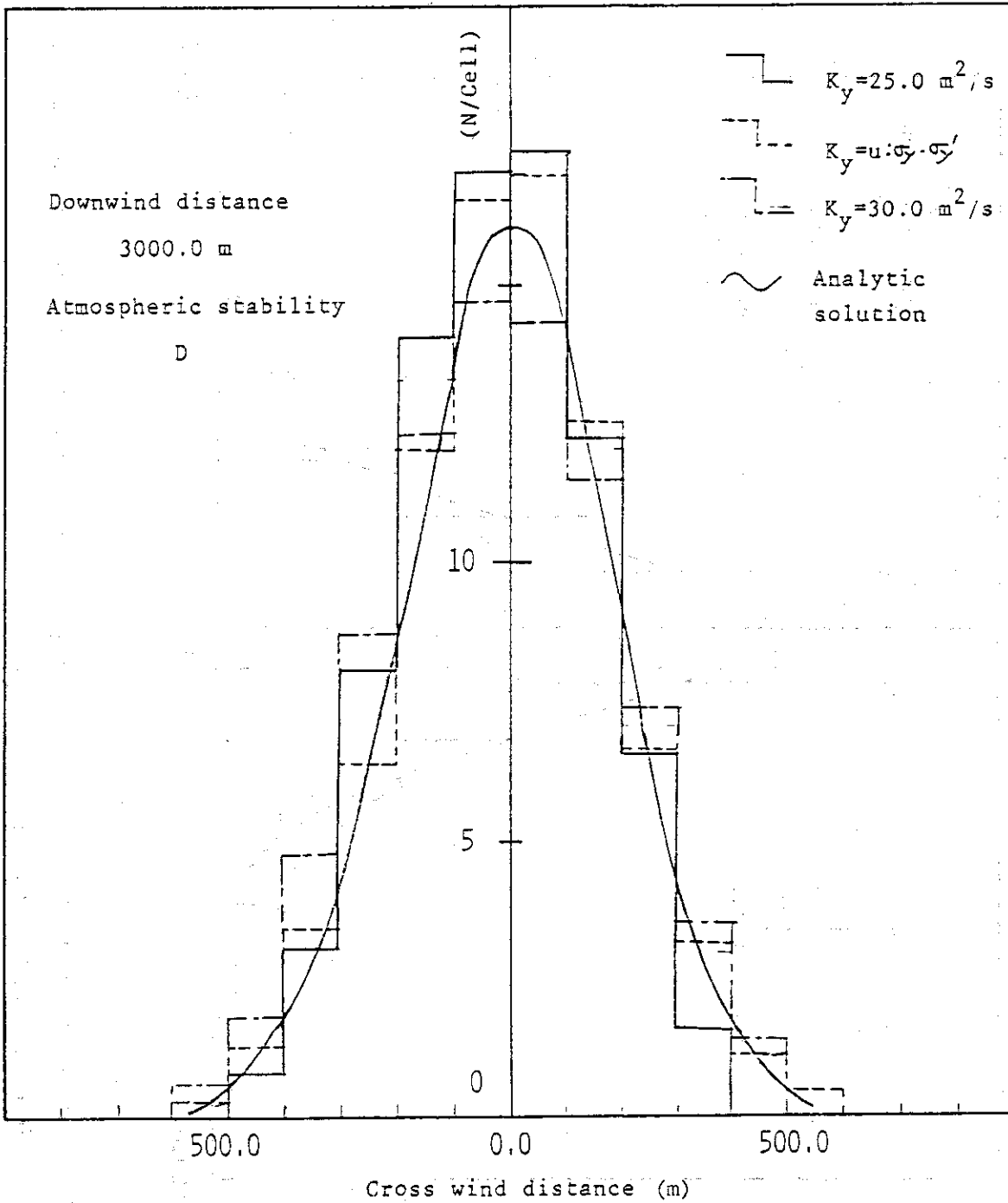


Fig. 8 Comparison of cross-wind distribution on the ground level between various horizontal diffusion coefficients model solutions and analytic one, at the downwind distance 3000m, continuous point source.

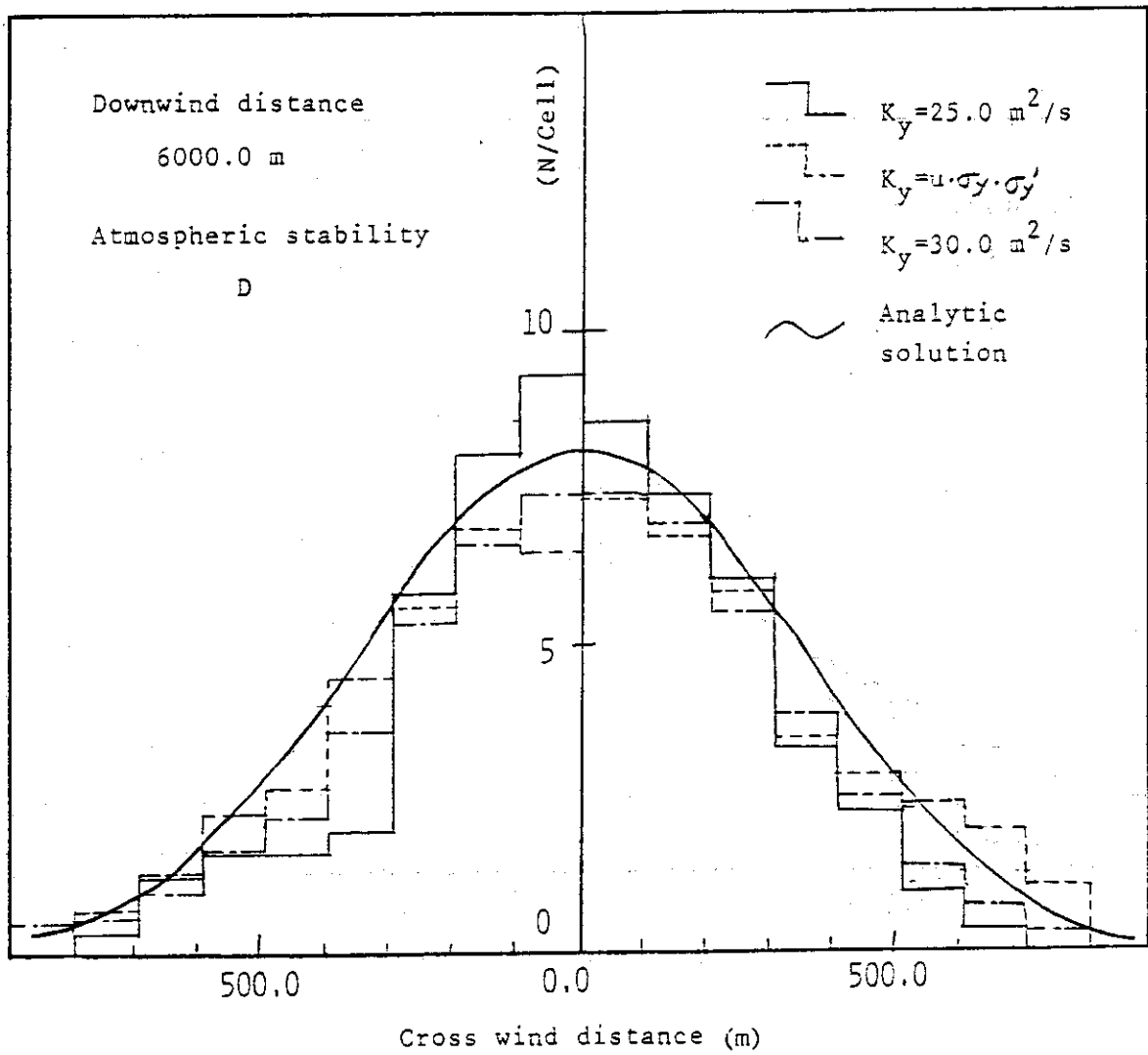


Fig. 9 The same comparison as Fig. 8, at the downwind distance 6000m.

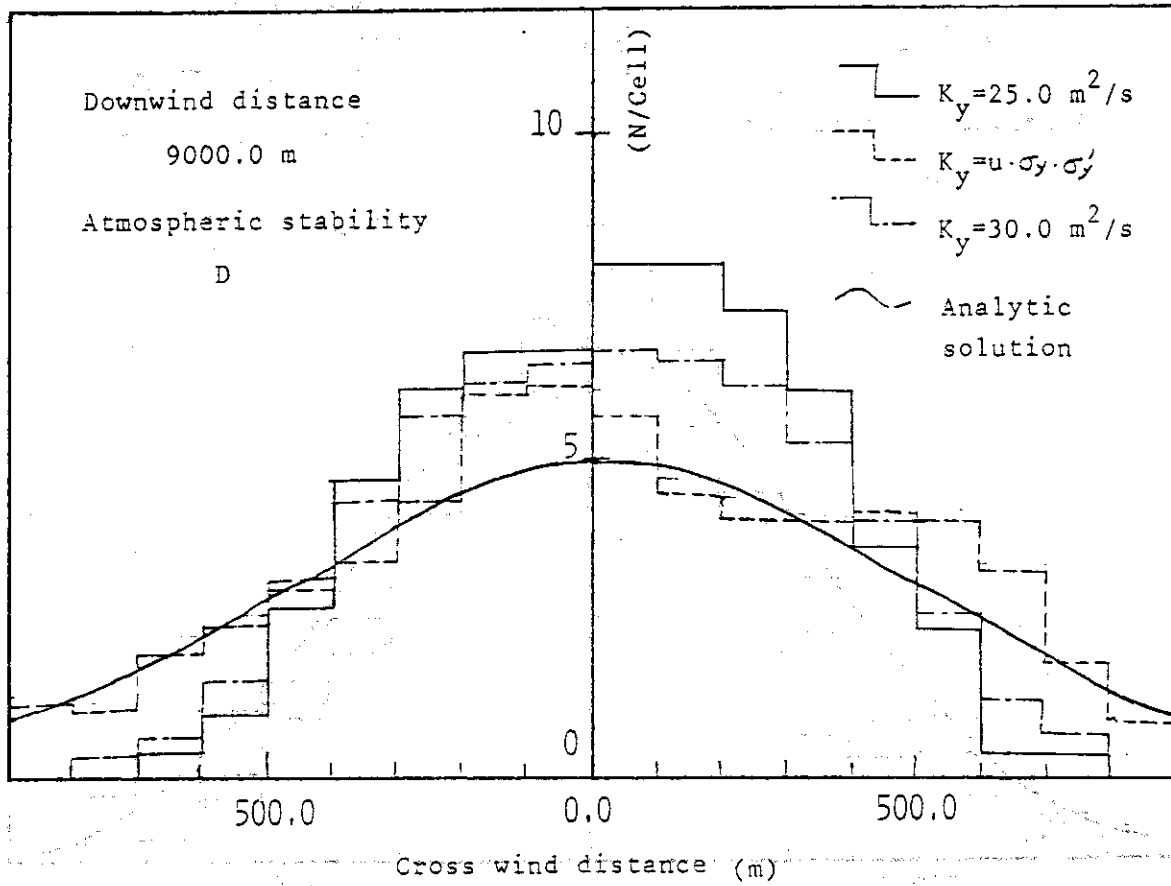


Fig. 10 The same comparison as Fig. 8, at the down wind distance 9000m.

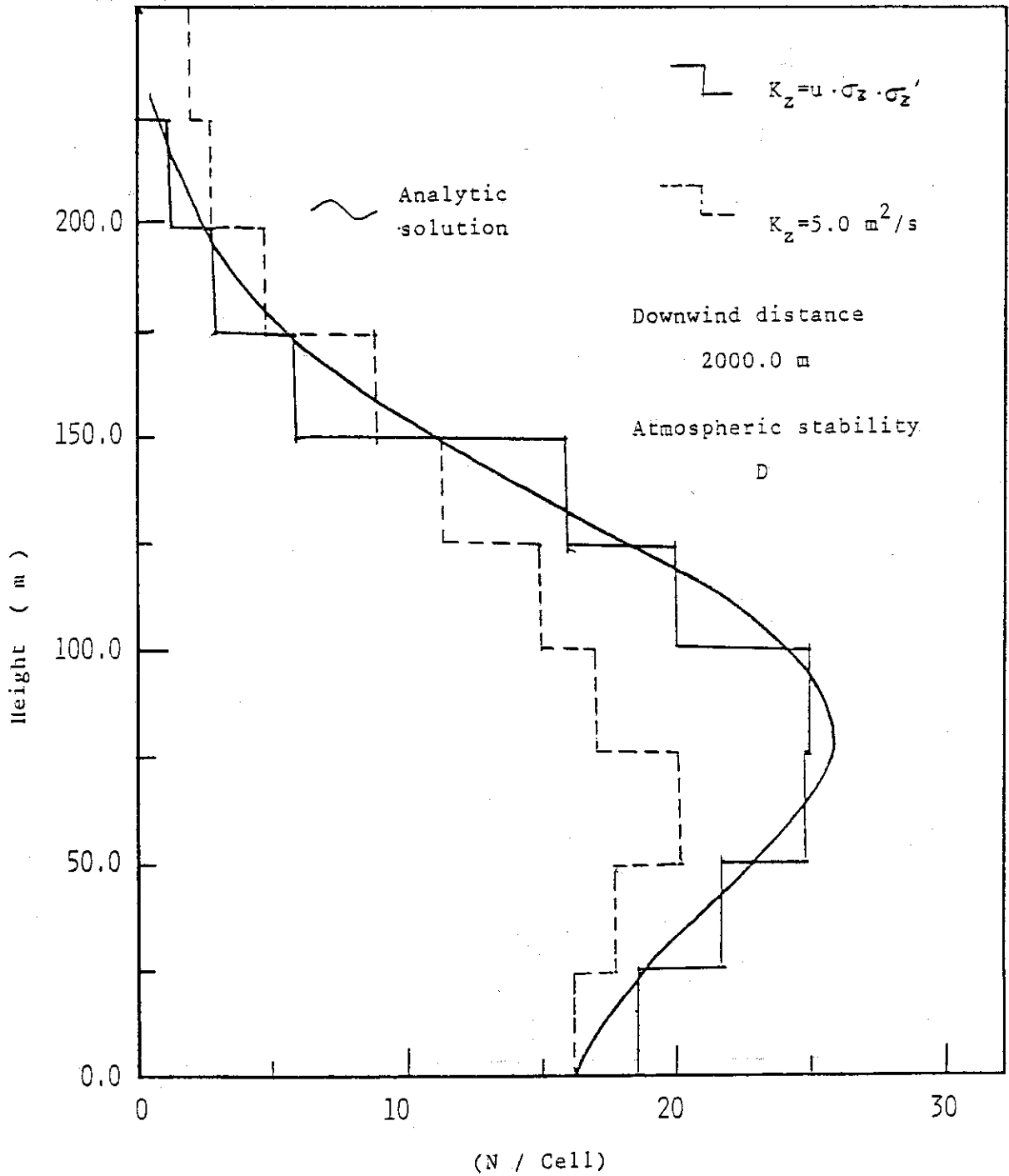


Fig. 11 Comparison of vertical distribution , continuous point source at the 80.0 m height, among various vertical diffusion coefficients, downwind distance 2000m.

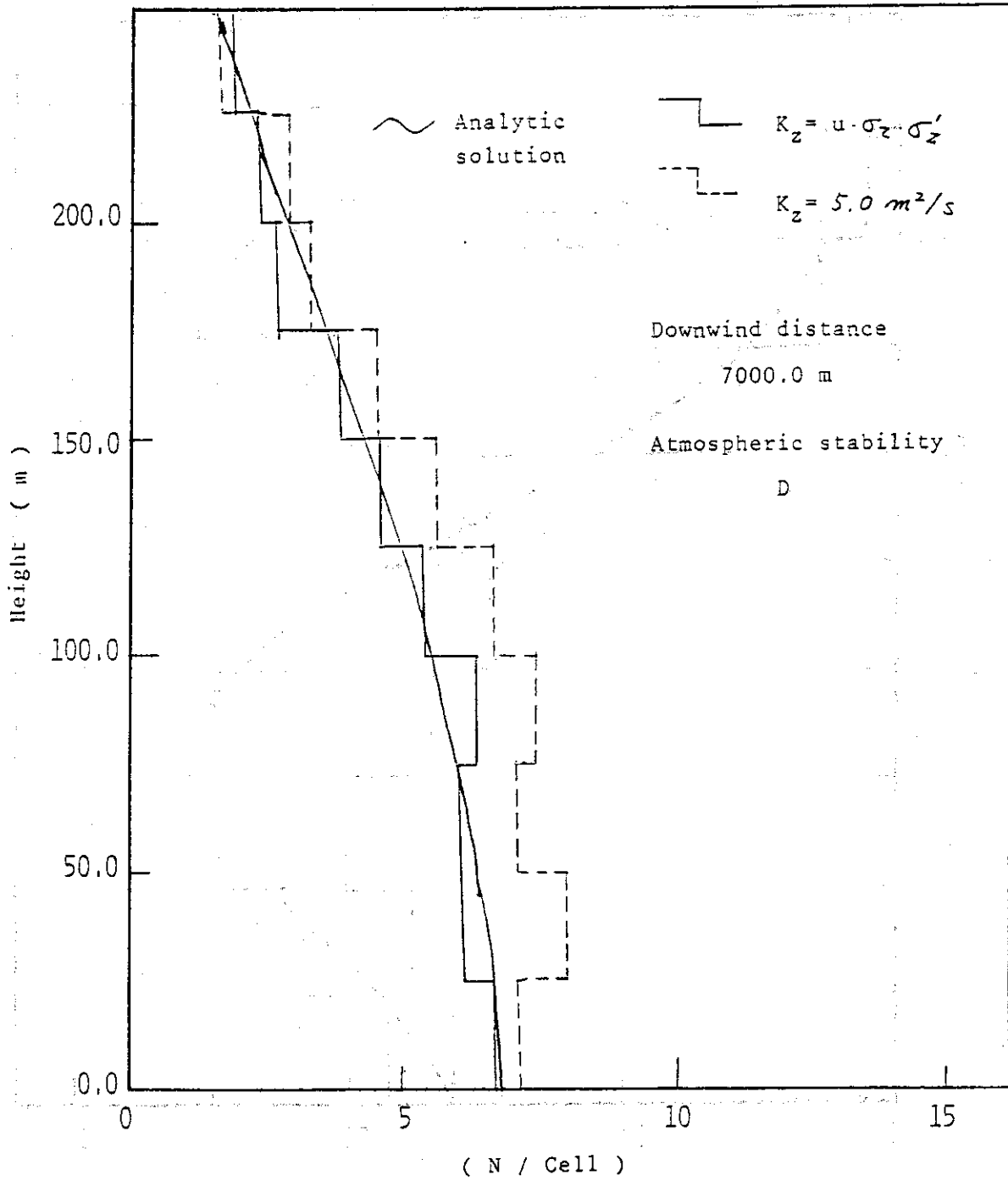


Fig. 12 The same comparison as Fig. 10, at the downwind distance 7000 m.

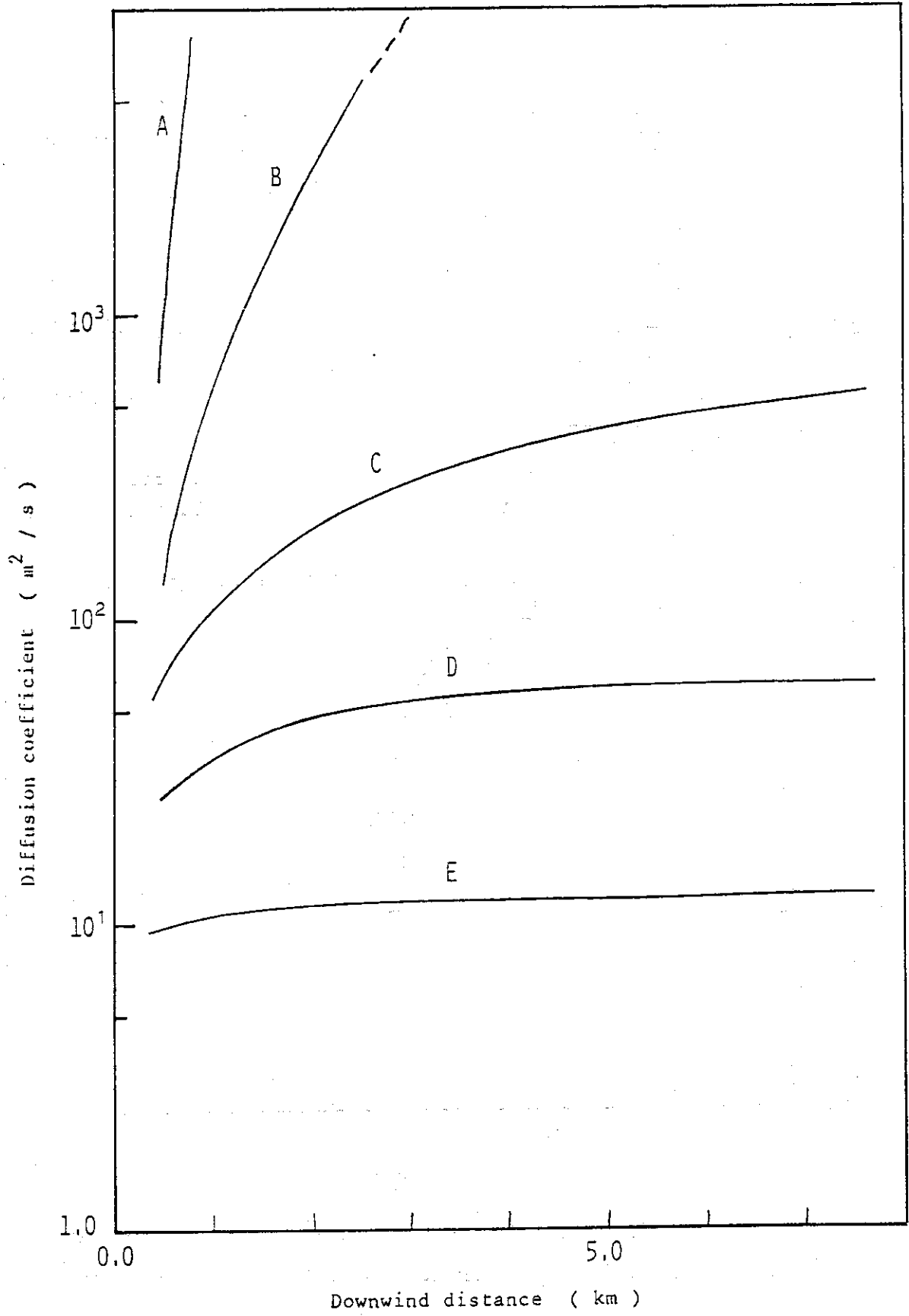


Fig. 13 Variation of vertical diffusion coefficients with the downwind distance.

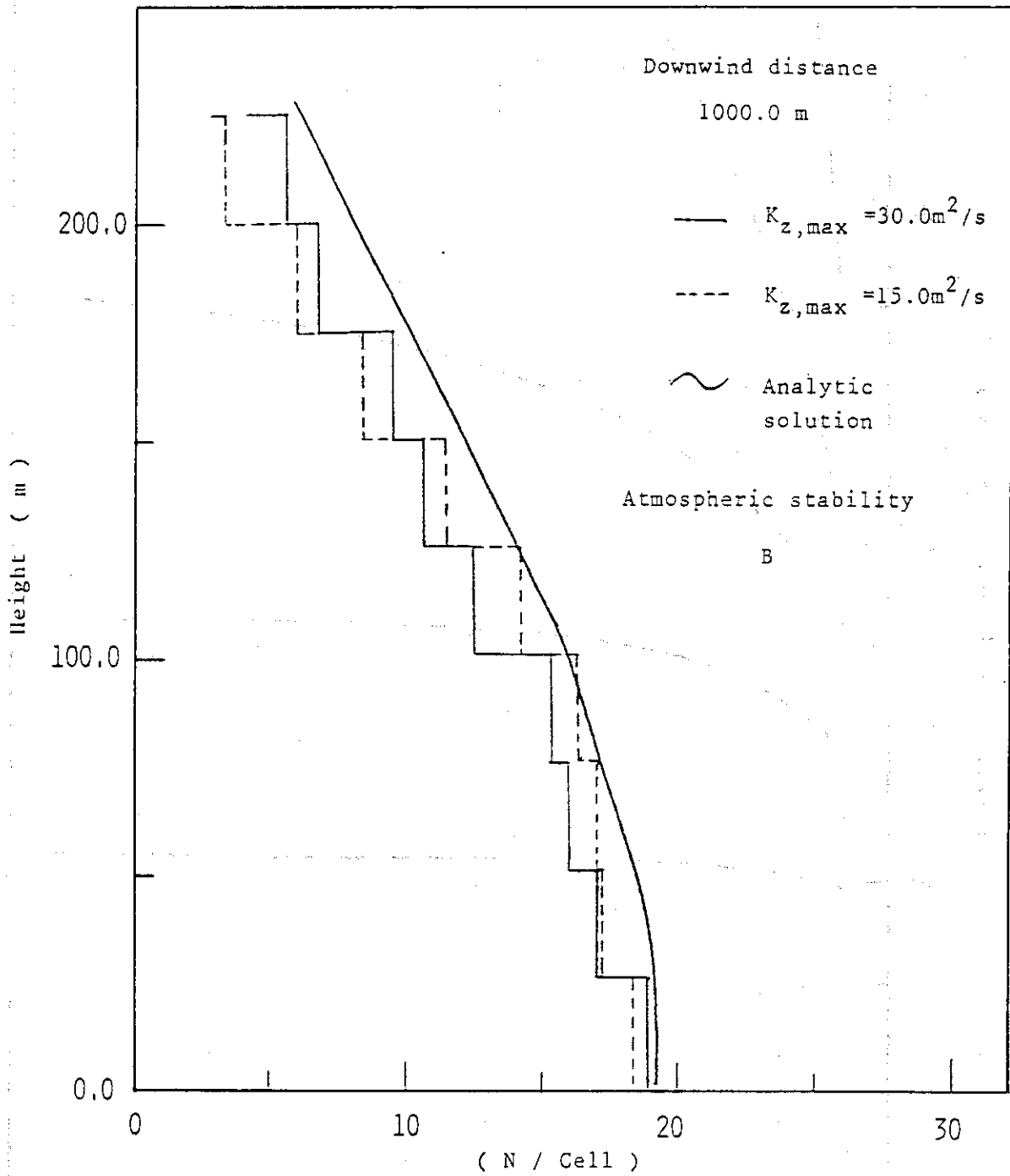


Fig. 14 Comparison of vertical distribution, at the downwind distance 1000m, between maximum vertical diffusion coefficient value $30.0 \text{ m}^2/\text{s}$ or $15.0 \text{ m}^2/\text{s}$ model solution and analytic one, in unstable condition.

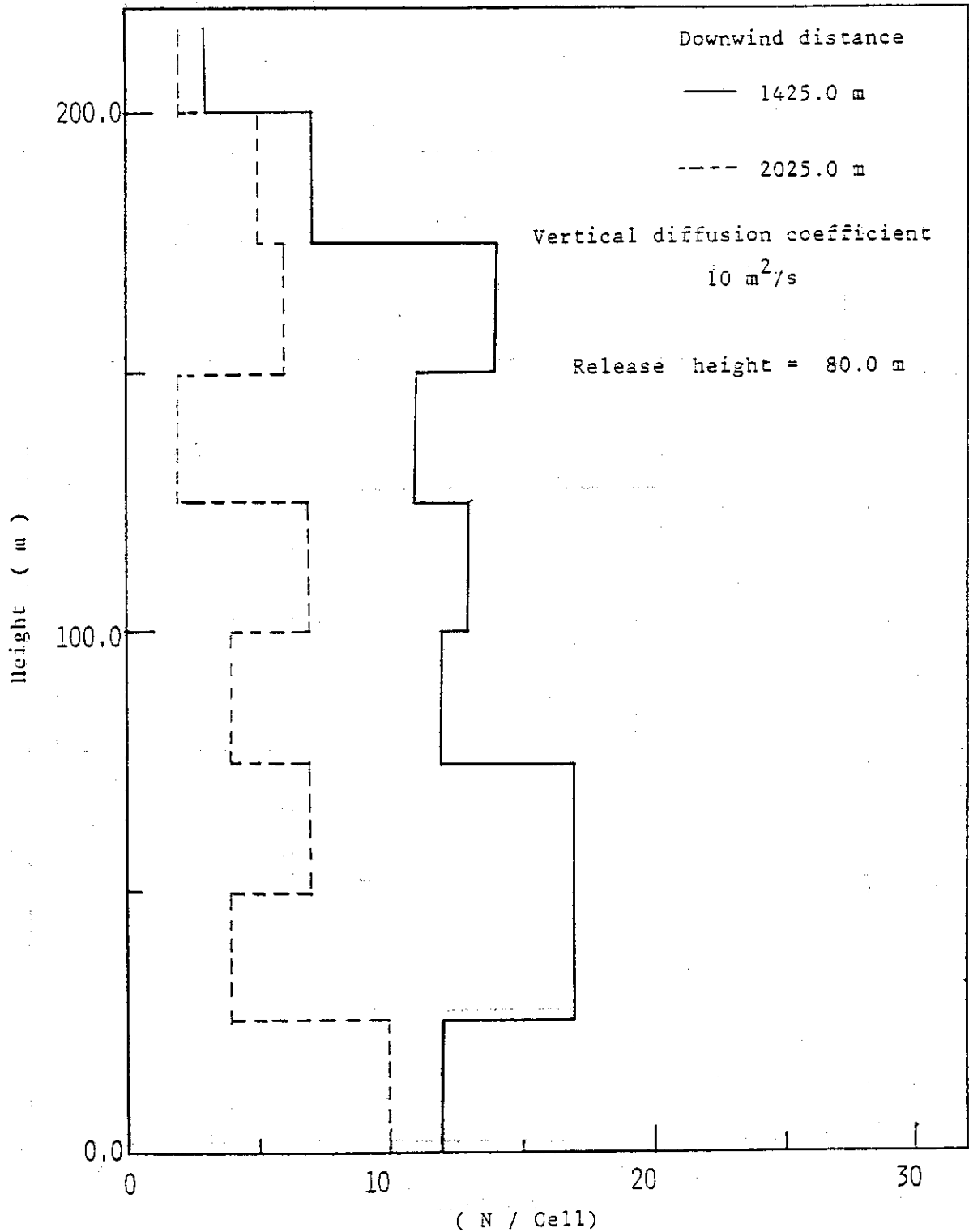


Fig. 15 Vertical distribution in the homogeneous layer, having vertical diffusion coefficient 10 m²/s, at the downwind distance 1000m. This figure is shown in order to be comparison with Fig. 15.

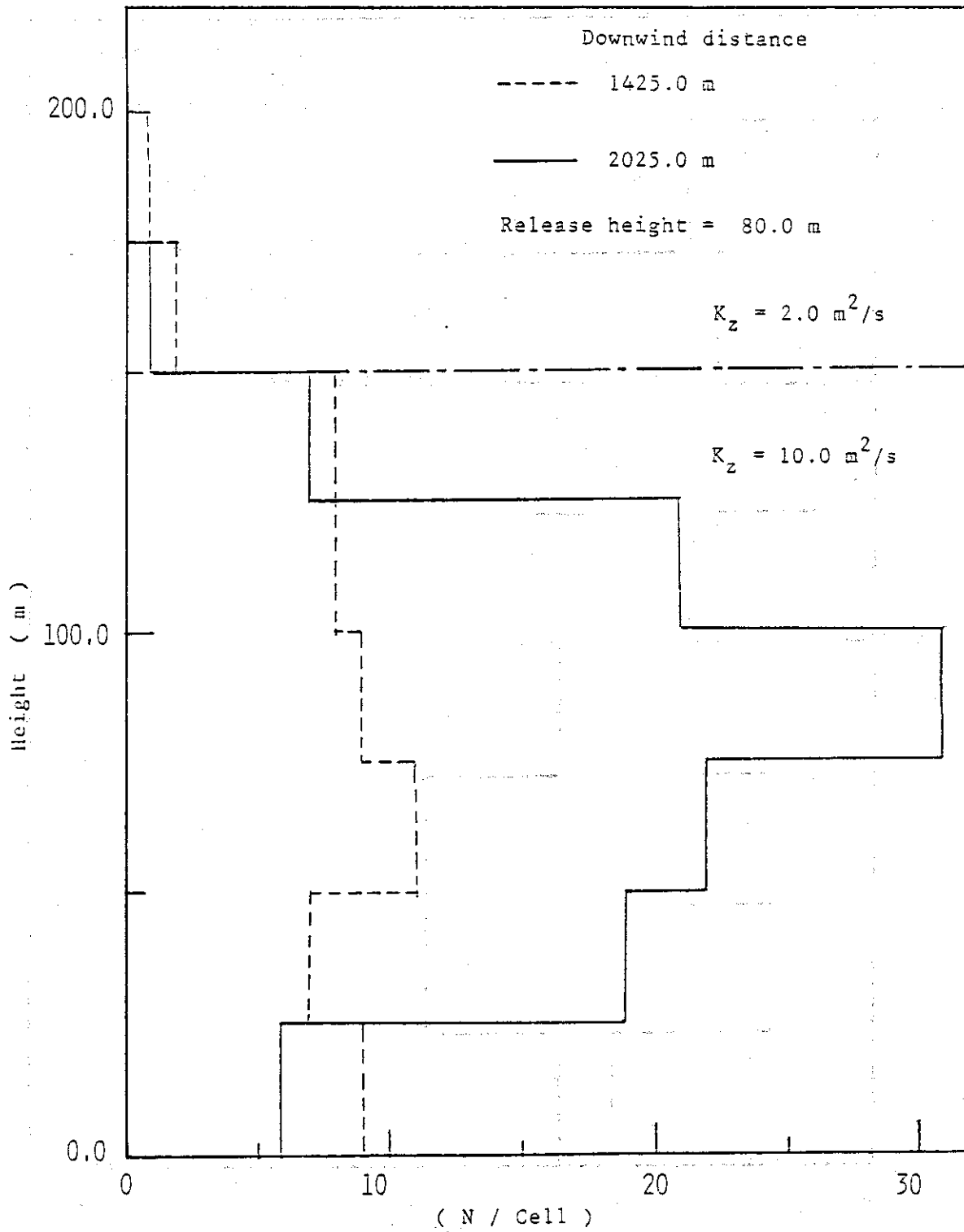
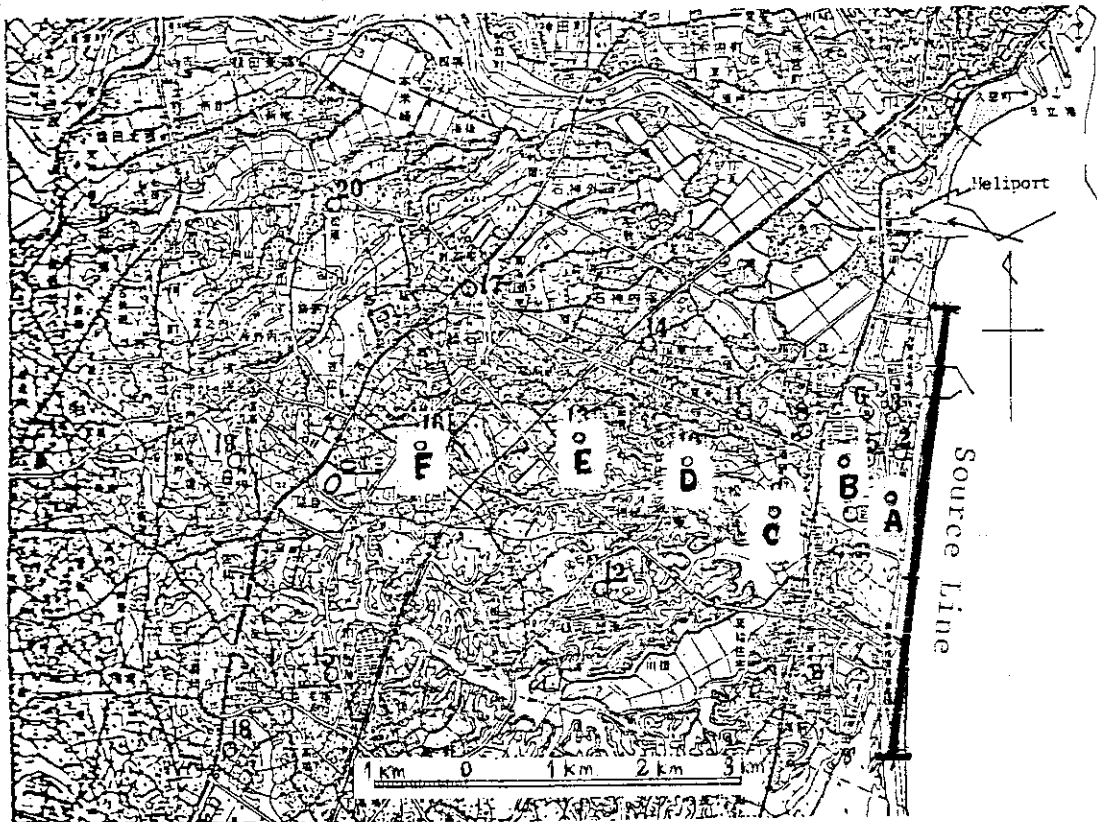


Fig. 16 Vertical distribution in the two different stability layers, vertical diffusion coefficient 10 or $2 \text{ m}^2/\text{s}$, at the downwind distance 1000m.

Meteorological conditions at the field tracer experiments

Run	Stability Class	Wind Data at Source			Sampling
		D (deg**)	S (m/s)	Dv	Time
1	D	63	4.8	15	16:00-16:30
2	C	24	2.6	16	9:00-9:30
3	D	18	2.0	16	15:00-15:30
4	B-C	68	4.1	17	14:00-14:30
5	B	53	3.8	18	11:00-11:30
6	D	45	9.2	18	15:00-15:30
7	D	36	3.1	19	14:00-15:00

D:Wind Direction
S:Wind Speed



Arrangement of kitoons

Fig 17 Outline of Field tracer experiment

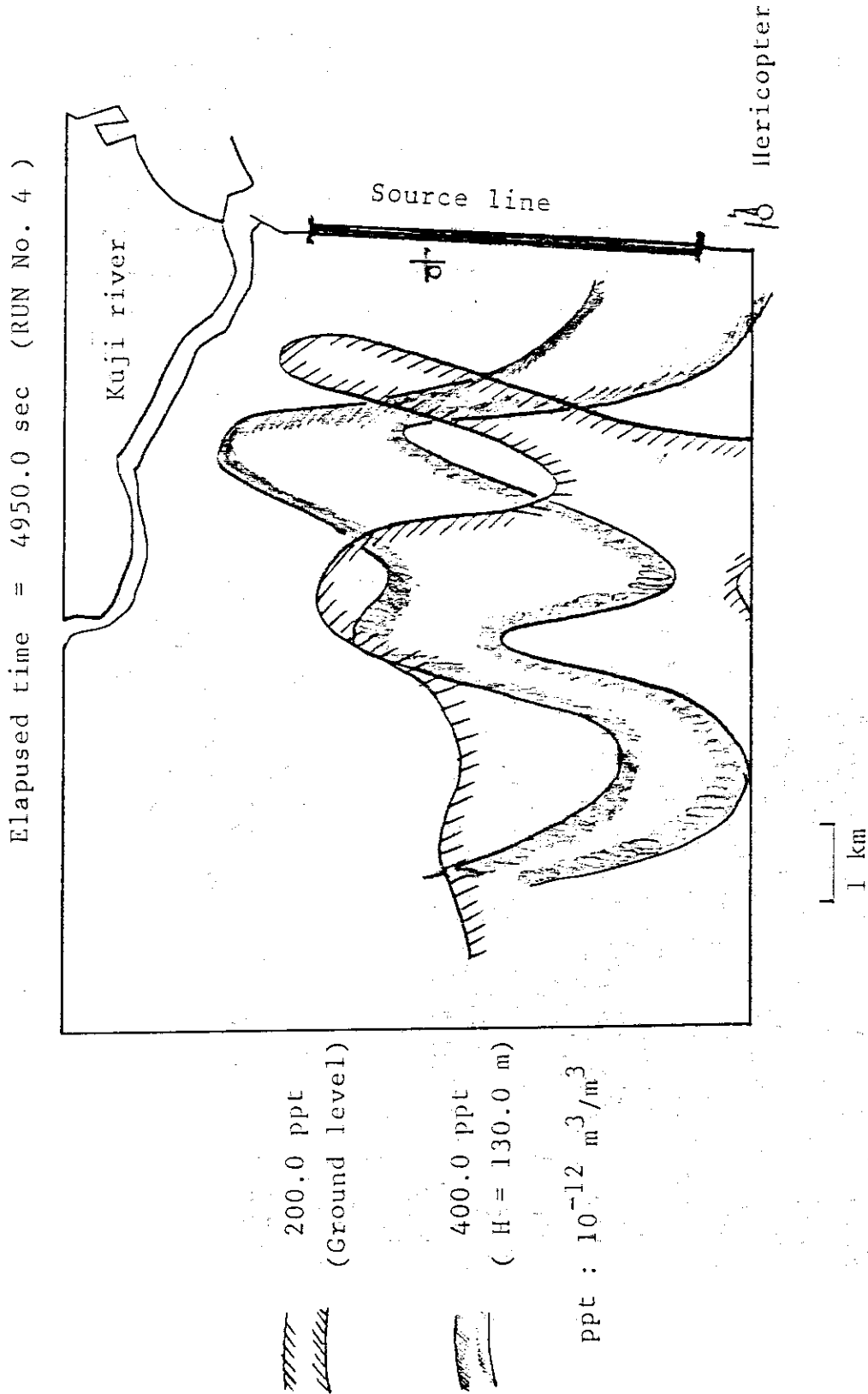


Fig. 18 Instantaneous concentration distribution at the ground and source height levels, after 4950.0 sec from the release start (RUN No.4).

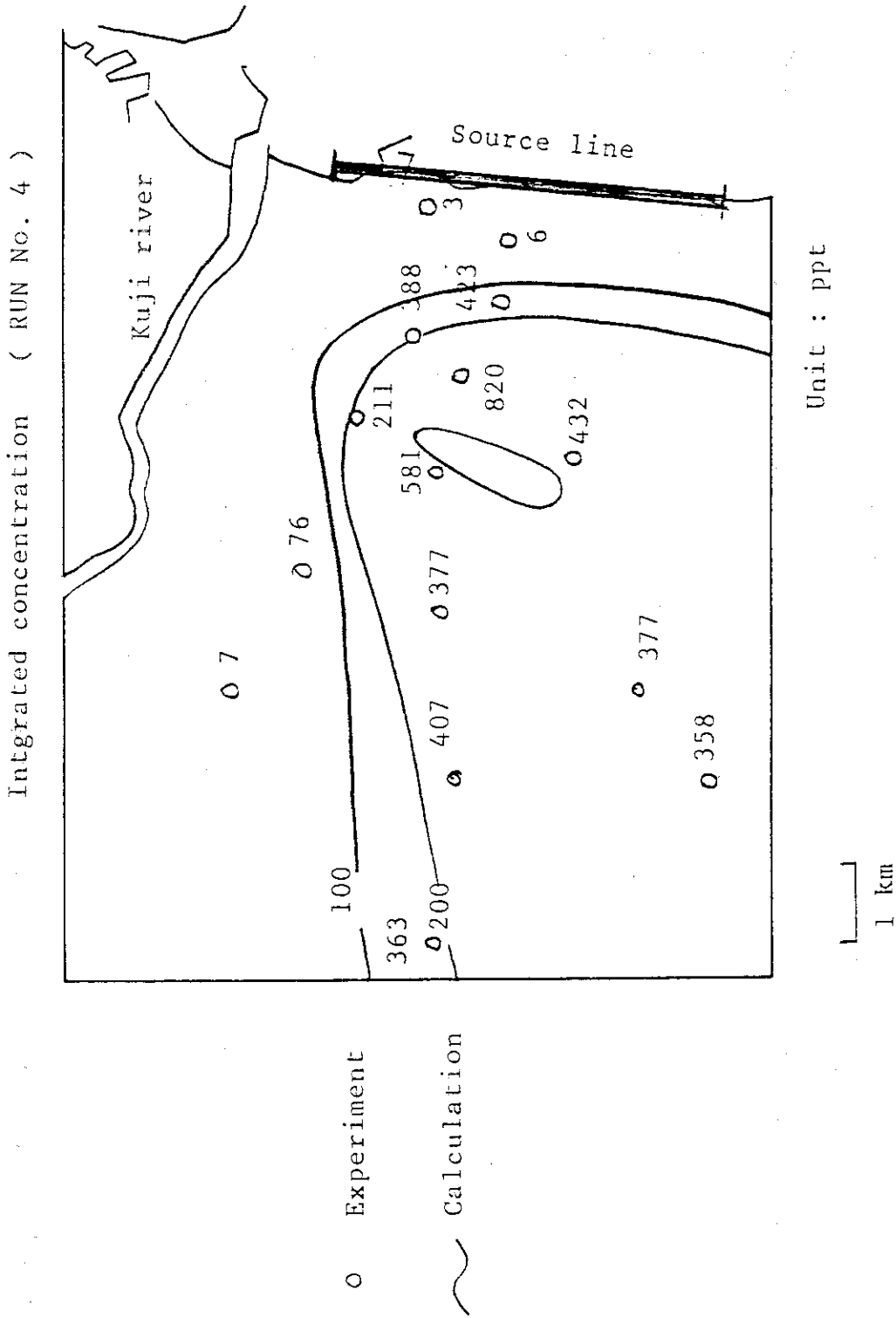


Fig. 19 Comparison of average concentration at the ground level between calculated values and measured ones (RUN No.4).

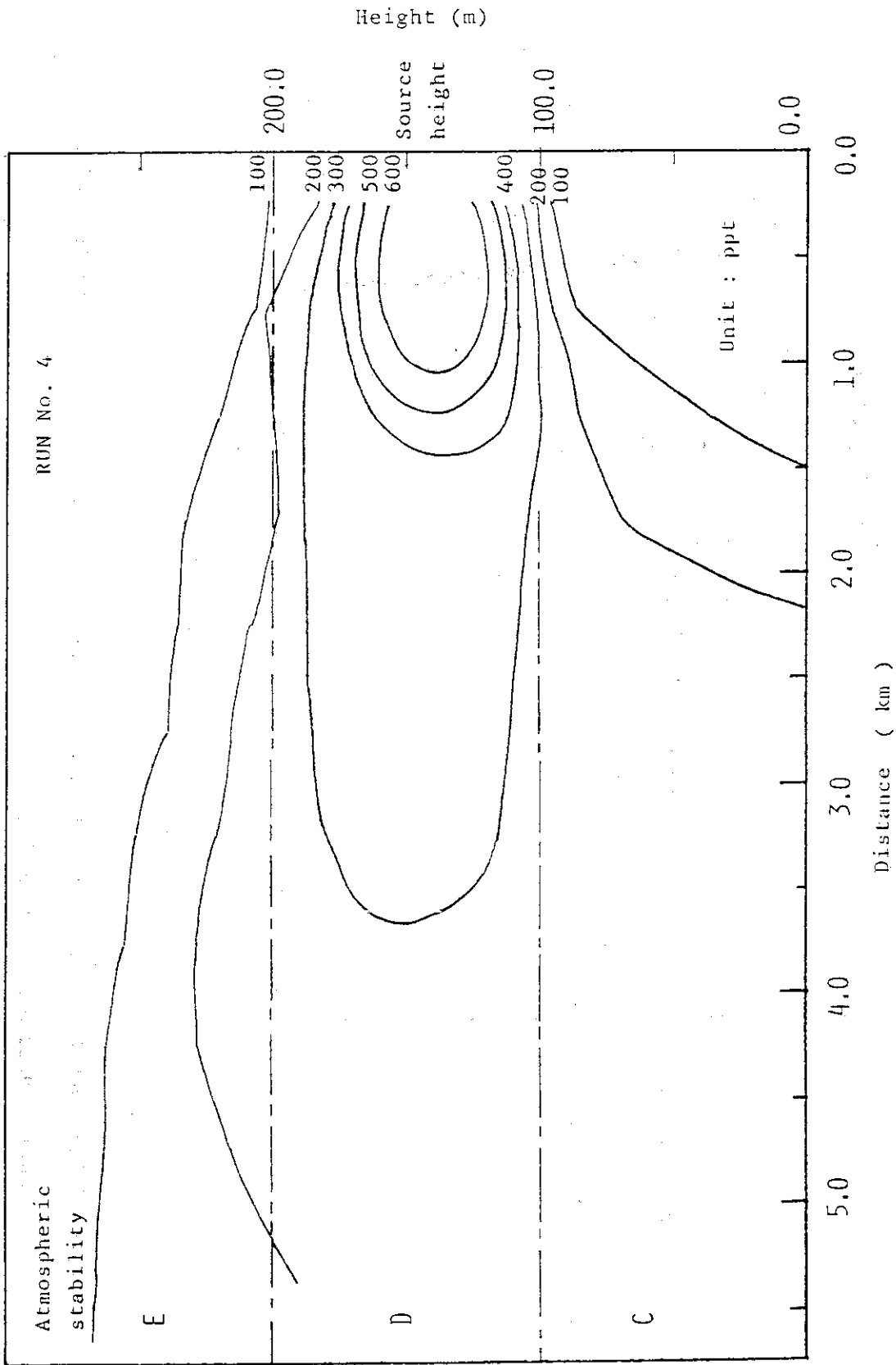


Fig. 20 Isopleth of vertical concentration (RUN No.4).

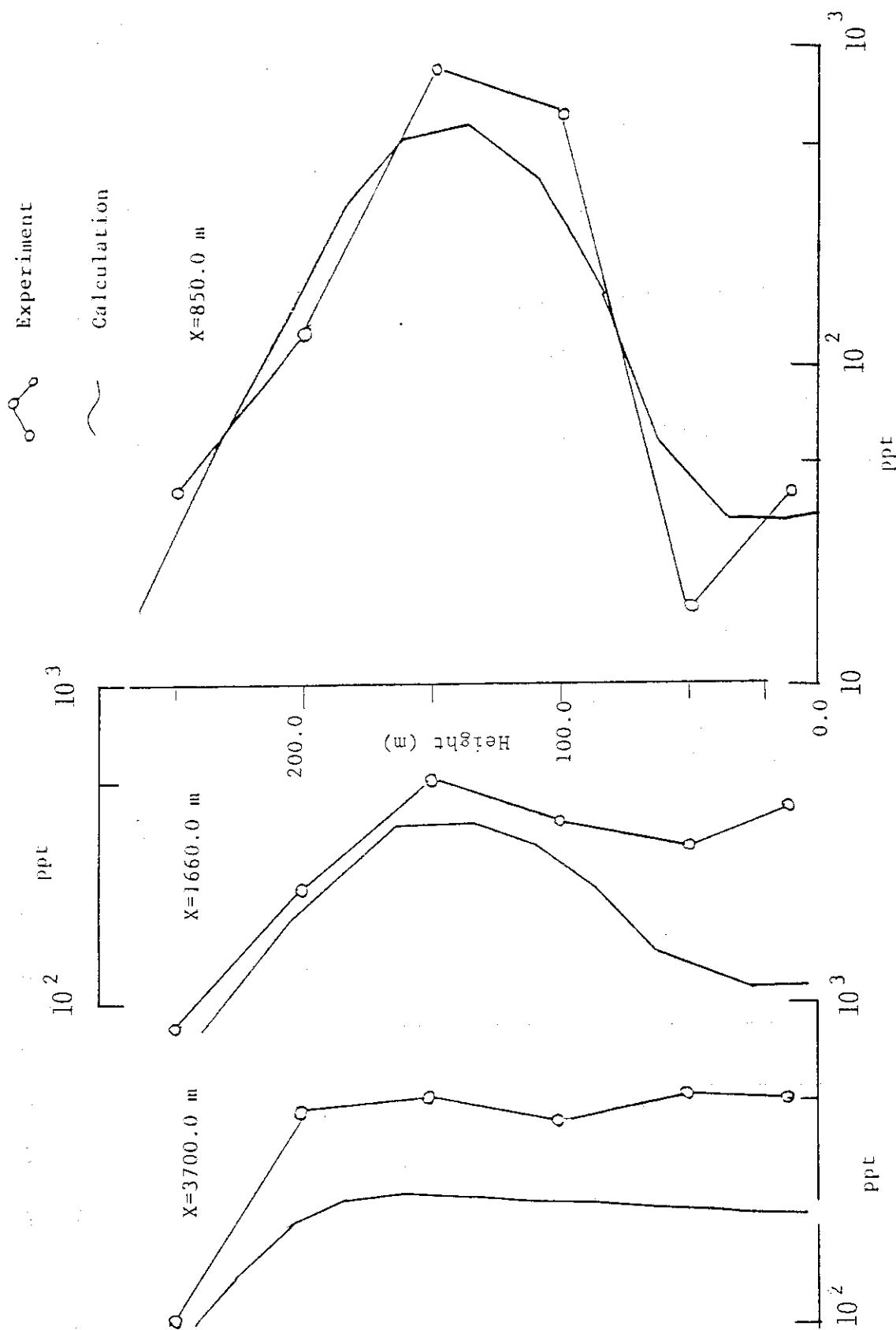


Fig. 21 Comparison of average vertical concentration at the various downwind distances between calculated values and measured ones (RUN No.4).

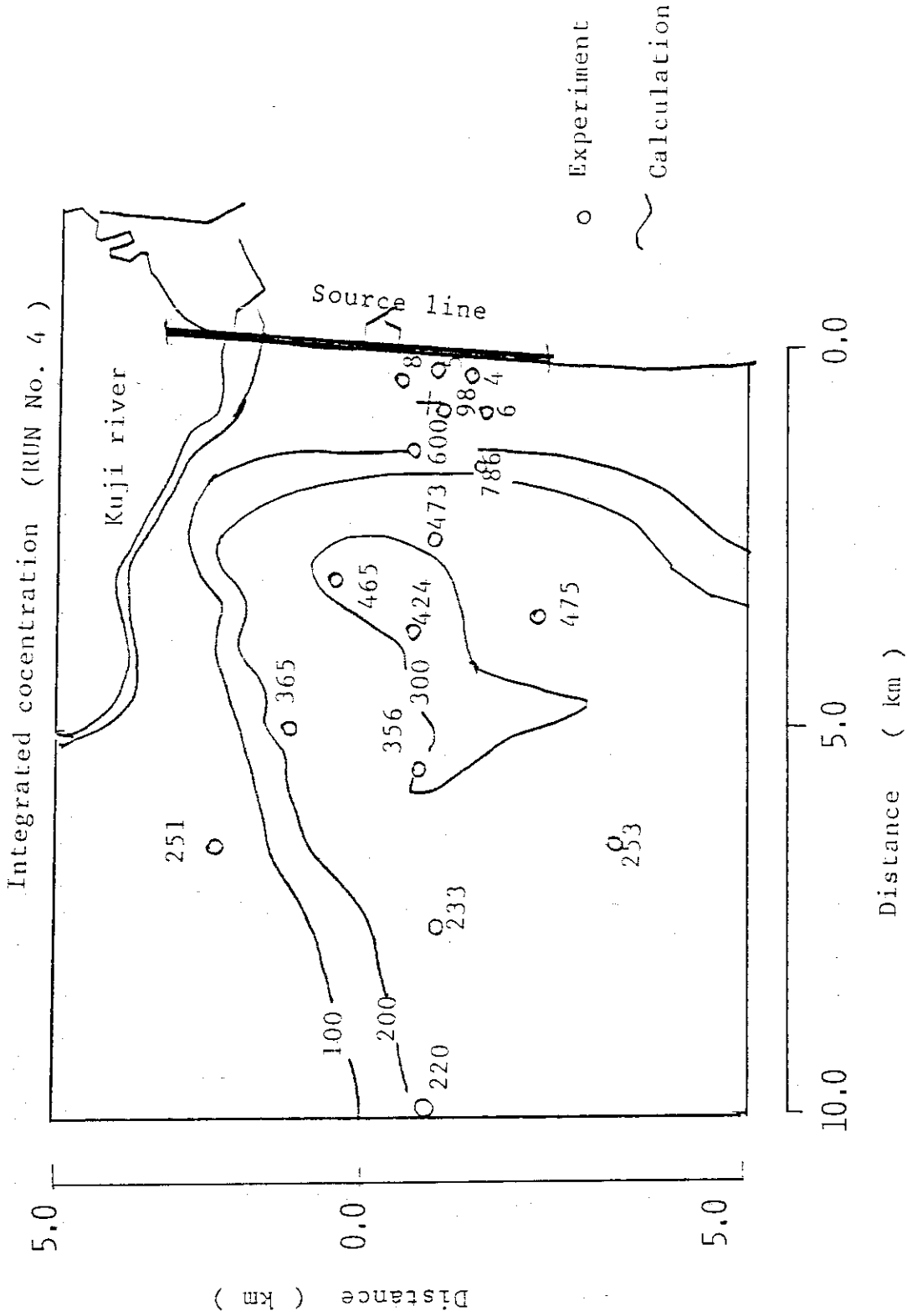


Fig. 22 Comparison of average concentration at the ground level between calculated values and measured ones (RUN No.5).

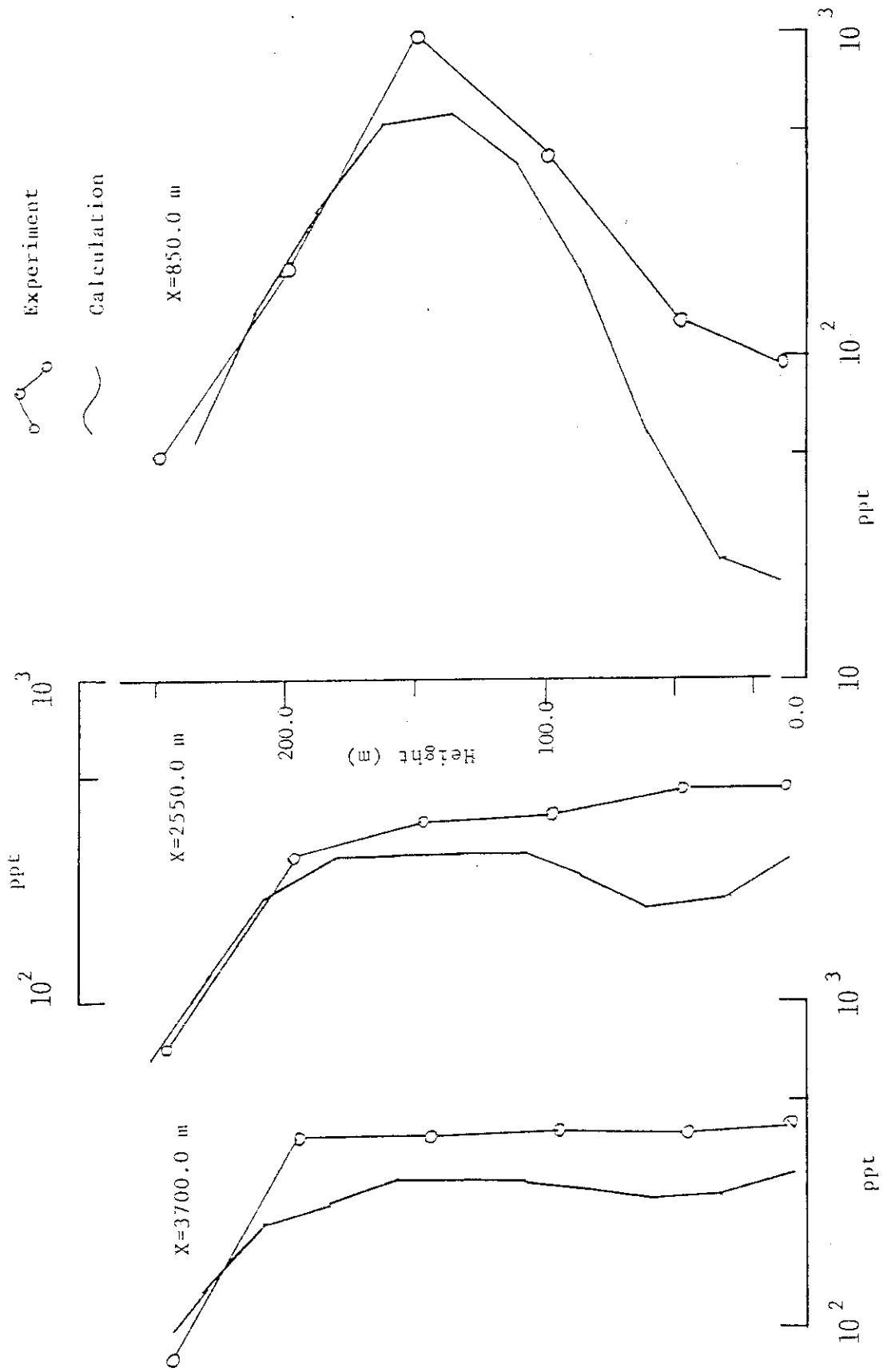


Fig. 23 Comparison of average vertical concentration at the various downwind distances between calculated values and measured ones (RUN No.5).