

JAERI-M
83-233

緊急時環境線量情報予測システムSPEEDI
による野外実験シミュレーション (I)

— 線状源による実験の場合 —

1984年1月

茅野 政道・石川 裕彦・角田 道生

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
申しこしてください。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, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI
による野外実験シミュレーション (I)
- 線状源による実験の場合 -

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
茅野 政道・石川 裕彦・角田 道生

(1983年12月19日受理)

放射能異常放出時の安全確保に関する研究の一環として、計算コード・システム SPEEDI の開発と、SPEEDI で用いられる計算コードの検証を目的とした野外実験が1980年から行われている。

この報告は、昭和55、56年度に行なわれた線状源による実験の数値シミュレーションについて述べてある。この実験の目的は、内部境界層存在時の鉛直拡散の研究であり、現象及び放出源形状の複雑さを考慮して、SPEEDI の詳細計算 WIND 04 / PRWDA を用いて計算を行った。WIND 04 は、変分法を用いて3次元の質量保存風速場を計算するコードで、PRWDA は、計算された風速場を用いて、粒子拡散法により3次元濃度分布を計算するコードである。

シミュレーションの結果、WIND 04 / PRWDA により、風速場が地域的、時間的に変動したり、内部境界層が存在するような条件での、複雑な拡散現象を表現できることが確認された。

The Numerical Simulation(I) of Field Tracer Experiment by a System
for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (SPEEDI)
— Field Experiment with a Line Source —

Masamichi CHINO, Hirohiko ISHIKAWA and Michio KAKUTA

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 19, 1983)

In the study about the health protection against accidental release, the development of a code-system SPEEDI and a series of field tracer experiments for the validation of calculation model in SPEEDI have been performed since 1980.

This report describes about numerical simulations of field tracer experiments with a line source in 1980 and 1981 whose aim is to study the vertical diffusion in a thermally induced boundary layer(TIBL). To the simulation, WINDO4/PRWDA, which are detail calculation codes in SPEEDI, were used, considering the speciality of TIBL structure and release mode of gas tracer. WINDO4 calculates three-dimensional mass-consistent wind field by a variational method, and PRWDA calculates three-dimensional concentration distribution by a particle diffusion method, combined with WINDO4.

Calculated results show that WINDO4/PRWDA can simulate complex diffusion, like that the wind distribution changes with time and that the thermally induced boundary layer exists.

Keywords: Numerical Simulation, Field Tracer Experiment, Accidental Release, SPEEDI, WINDO4/PRWDA, Thermally Induced Boundary Layer

目 次

1. 緒 言	1
2. SPEEDI の概要	1
2.1 モジュラ・コード・システム	1
2.2 風速場計算コード WIND 04	2
2.3 濃度計算コード PRWDA	3
3. 拡散実験の概要	4
3.1 昭和 55 年実験	4
3.2 昭和 56 年実験	4
4. シミュレーション結果	5
4.1 計算法	5
4.2 計算結果	6
4.3 考 察	9
5. おわりに	10
参考文献	11
Appendix 1	60

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Outline of SPEEDI	1
2.1 Modular code system	1
2.2 Wind calculation code WINDO4	2
2.3 Concentration calculation code PRWDA	3
3. Outline of field tracer experiment	4
3.1 1980's experiment	4
3.2 1981's experiment	4
4. Simulated results	5
4.1 Calculation method	5
4.2 Results	6
4.3 Discussion	9
5. Concluding remarks	10
References	11
Appendix 1	60

1. 緒 言

原子炉事故時等の緊急時に正確な線量予測を行うことの重要性は、米国 TMI-2 の原子炉事故以後、特に認識されてきた。このため原子力安全委員会の環境放射能安全研究専門部会は「環境放射能安全研究年次計画」のなかで、「放射性物質異常放出時の安全確保に関する研究」として、いわゆる緊急時関連の 5 ケ年計画を示した。

被曝線量の予測は、大別してモニタリングと計算により行うが、本報のシステム SPEEDI は、この研究計画の中の計算予測部分を受けもつもので、昭和 55 年度より開発を開始した。システム開発は大別して、線量予測のための風速場、濃度、線量の計算コード群と、各コードを合理的に取扱うためのモジュラ・コード・システム⁽¹⁾の開発に分かれる。モジュラ・コード・システムについては、第 3 版がほぼ完成し、基本構造の作成を終了した。また計算コードの開発については、日本の原子力サイトが沿岸立地であったり複雑な地形上に存在することが多いことから、複雑な拡散現象を現実的にシミュレートする詳細計算コードと簡易的に計算を行うコードの開発をほぼ終了し、野外実験との比較による計算コードの性能評価、及び改良・整備を行う段階に入った。

緊急時計画の中では、システム開発と並行して、計算コード開発に資するために、昭和 55 年度から 6 カ年計画で野外拡散実験が行われている。本報では、一連の野外実験のうち初めの 2 年間に茨城県東海村で行われた、鉛直拡散調査のための線状源実験のシミュレーション結果を示す。放出源の形状が特殊なため、簡易計算コードによるシミュレーションは難しいので、ここでは、システムのうちの詳細計算コード群を用いた。

2. SPEEDI の概要

2.1 モジュラ・コード・システム

本システムは、大気中放出物に起因する一般環境での被曝線量を予測する計算コード群を、有効に結合し、計算要請に臨機応変に対応することを目的としている。

本システムを緊急時に使用するために留意した項目は、

- (i) 使用の容易性を考え、放出情報の入力、計算項目や計算コードの選択、図形表示等の命令がすべて計算機との会話形式で行えること、
- (ii) 標高、土地利用等の地域データ、サイト位置データ等が、統一的な形式で記録されたデータ・ベースをもつこと、
- (iii) 緊急時モニタリングと防災対策のための基礎情報を提供することを目的として、各種の図形出力機能をもつこと、
- (iv) 計算コードに対してモジュラ性をもち、計算コードの内容やコード数の変更に伴う、シ

システムの変更がほとんどないこと、
 等である。次に、シミュレーションに用いた風速場計算コード WIND 04⁽²⁾ と濃度計算コード PRWDA⁽³⁾ の計算モデルの概略について述べる。

2.2 風速場計算コード WIND 04

本コードの目的は、気象観測データを入力として、質量保存則を束縛条件にした変分解析により、地形を考慮した三次元の風速場を推定することにある。計算手順を Fig. 1 に示す。計算の前半 Step. 1 では、気象観測データをもとにして、計算領域内の各格子点の風速ベクトルを単純な内挿・外挿により求める。次に Step. 2 では、Step. 1 で得られた格子点データが適切な推定であるという仮定のもとに、この風速場に最小量の修正を施すことにより質量保存則を満たす風速場を作り出す。この際に、地表面のグリッドセルに生ずるみかけの発散を修正することにより地形の効果が風速場に反映される。質量保存則である

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

を束縛条件として、観測から内外挿値 (u_0, v_0, w_0) に加える修正が最小となるような風速値 (u, v, w) は、汎関数、

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left[\alpha_1^2 (u - u_0)^2 + \alpha_1^2 (v - v_0)^2 + \alpha_2^2 (w - w_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dx dy dz, \quad (2)$$

を極小にするような、(u, v, w) を求める変分解析の問題となる。ここで α_1, α_2 は、修正の水平、鉛直成分の相対的大きさを規定する。また λ はラグランジェ未定乗数で修正成分を与える一種の速度ポテンシャルである。E を極小とする条件、すなわち E の変分がゼロとなる条件を各変数について求めると、境界条件、

$$n_x \cdot \lambda \cdot \delta u = 0, \quad (3)$$

$$n_y \cdot \lambda \cdot \delta v = 0, \quad (4)$$

$$n_z \cdot \lambda \cdot \delta z = 0, \quad (5)$$

とともに、4つのオイラーラグランジェ方程式、

$$u = u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x}, \quad (6)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y}, \quad (7)$$

$$w = w_0 + \frac{1}{2 \alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

を得る。 n_x, n_y, n_z は計算領域の境界面に垂直な外向き単位ベクトルの方向余弦である。(9)式に(6), (7), (8)式を代入する事により, λ についてのポアソン型の偏微分方程式,

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2 \alpha_1^2 \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right), \quad (10)$$

を得る。この(10)式を用いて λ を解くことにより, (6), (7), (8)式に λ を代入して (u, v, w) を得る。(10)式は差分近似により解かれる。

2.3 濃度計算コード PRWDA

このコードの目的は, 複雑な地形上で, 放出物の三次元的な移流・拡散の時間変化を詳細に追跡し, 濃度の空間分布を求めることである。本コードで用いている粒子拡散モデルは, ラグランジュ型モデルとオイラー型モデルを組合せたもので, Fig. 2のようにオイラーグリッドを通過するラグランジュ粒子群で, 放出物質の空間分布が表現される。放出された粒子群の時間ステップごとの移動は, WIND 04 コードから得られた3次元の風速場による移流項と, 大気乱流に起因する拡散項の和で表わされる。各粒子の移流の成分は, 空間内に設けたオイラーグリッドの格子点に与えられた3次元風速場から, 内挿により求める。拡散については, ランダムウォーク法⁽⁴⁾とPICK (Particle - in - Cell K - theory) 法⁽⁵⁾が考えられる。これらの手法は, 大気拡散で用いられる3次元の移流・拡散方程式,

$$\frac{d\chi}{dt} = - \vec{u}_A \cdot D\chi + D(\vec{K} \cdot D\chi), \quad (11)$$

を粒子群を用いて解くという点で本質的な違いはない。ここで \vec{K} は拡散係数, χ は濃度である。PICK法とランダムウォーク法の違いはPICK法では拡散に各セル間の濃度勾配を用いるのに対して, ランダムウォーク法では, 各粒子の拡散は独立に行われる。したがってPICK法では, 正しい拡散のためには各セルに十分な粒子数が必要となるのに対して, ランダムウォーク法では, 粒子数の影響は濃度計算の統計誤差のみに表われる。これはランダムウォーク法の利点であり, 本コードもこの手法を用いているが, 鉛直拡散係数が高度の関数で与えられる場合, 上下方向の拡散確率の等しいランダムウォークでは, 拡散係数の小さい所に粒子がたまりこむことがある。この点を改良するために, 本コードでは, 鉛直方向の拡散についてはPICK法を用いている。

このモデルの特徴は,

- (1) 各粒子に放射能, 移流時間等の情報を付与できること,
- (2) 質量保存則が常に成り立ち, 差分解法等にみられる擬似拡散がないこと,

(3) 拡散係数に鉛直分布をもたせ、内部境界層、上層逆転等の現象を表現できること、等である。

3. 拡散実験の概要

55年から6年計画で開始した拡散実験のうち当初2年間は、実験方法の困難さのために国内外で実測データの乏しい沿岸地域における濃度の鉛直分布の測定⁽⁶⁾に主眼を置いた。

3.1 昭和55年実験

55年度の実験は、海水と地面の温度差が年間で最も少ないと思われる秋季(10月)に行った。実験配置の模式図を Fig. 3 に示す。SF₆トレーサガスは、ヘリコプタの高度150mの往復運動により90分間、2ℓ/sの割合で連続放出した。これは、トレーサの水平方向の拡散成分を補償させるためである。放出ラインは5kmでヘリコプタの施回分を含めると約6.5kmになる。またヘリコプタは約14m/sの速度で飛行した。鉛直サンプリングは、風下5kmまでに配置した4台の係留気球により、高度400mまで50, 100, 150, 200, 400m高の計5点で行った。その他に地上サンプリングを風下10kmまでに21地点で行った。空気の捕集時間は定常状態での分布を測定するために放出中の90分が終了する前30分間とし、エアバックは10ℓのものを使用した。分析はガスクロマトグラフィで行った。

実験時の気象観測は、(1)係留気球昇降時の気温鉛直分布測定、(2)ヘリコプタの飛行測温、(3)測風気球による高度1000mまでの風向、風速鉛直分布、(4)高度150mの流跡線測定、(5)風下10km以内8点の地上風測定、(6)海岸における日射量、放射収支量、気温、気圧、雲量である。サンプラーの配置を Fig. 4 に示す。

実験は、10月15日から19日までの間に7ラン行い、その間に、ヘリコプタ回転翼の下降気流がトレーサガスに影響しないことを確認するために、可視煙放出による実験も行った。放出コースは、風向に応じて Fig. 4 に示すように3コース用意した。

3.2 昭和56年実験

56年度の拡散実験は、沿岸地区特有の気象現象である内部境界層のしやすい夏季に行った。実験の目的が、昭和55年の実験と同じであるため、概略は3.1と同様である。55年と異なる点は、以下の通りである。

- (1) 放出ラインの長さを6.6km(北コース)、又は7.5km(南コース)とし、施回時は放出を停止した。
- (2) ヘリコプタ速度を40m/sとし、往復回数を増やした。
- (3) 鉛直サンプリングを高度300mまで50mごとに7高度で行った。
- (4) 気象観測を海上でも実施した。

実験は8月20日から8月24日までの間に、10ランを実施した。

4. シミュレーション結果

4.1 計算法

(1) 放出条件

放出条件については、ほとんど実験条件を再現しているが、放出源の移動については、ヘリコプタの速度変化を考慮せず、ラン中の平均速度を用いて一定速度として扱った。55年度の実験では、施回分を考慮して線長を6.6 kmとし、56年度実験の施回時の放出停止は計算上も再現している。Fig. 5は、粒子群で表わされた、放出ガスの流れ(蛇行)を示している。

(2) 環境データ

本シミュレーションで用いる気象データは、風向・風速データ、大気の乱れに関するデータである。風向・風速データは1時間ごとに、システムの気象データベースに記録して利用する。観測データは、茨城県公害技術センターが茨城県内で常時観測を行っている既存観測点データ(地上風向・風速のみ)と、前述の上層風向・風速データを含む特別気象観測データに分けて保存した。これは、入力データの影響を調査するためである。上層風向・風速については、15分毎に行われている測風気球のデータを平均して使用した。

大気の安定状態の分布は、鉛直方向のみに考慮して気温の鉛直分布測定から、Table 1のような米国式の大気安定度分類⁽⁷⁾により、大気を安定度別に最高3層に分類し、

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t, N)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(r, N)}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (12)$$

により、層別に鉛直拡散係数Kを与えた。ここでrは、粒子の飛行距離、 $\sigma(r, N)$ は距離r、大気安定度Nでの標準偏差であり、気象指針⁽⁸⁾に与えられた式から求めた。内部境界層の高さは、通常、海岸線から内陸に向かって増大するが、ここでは海岸から発達する不安定層の、場所による分布変化は考慮せず一定として、内陸10 kmまでの分布の平均を用いた。このデータは、システムから会話形式で入力できる。

地形データは標高データを1 km × 1 km × 25 kmの平板ブロック単位の形に変換して、使用している。

(3) 出力形式

濃度分布は、領域内を分割する三次元直方体セル群内の平均値として表わされ、セルの大きさは水平方向が1 km × 1 km、鉛直方向が25 mである。濃度値は、放出後半30分間の平均濃度が出力される。図形出力はSPEEDIシステムの保有する図形出力ルーチンを用いている。

4.2 計算結果

シミュレーションは、55年度分7ラン、56年度分8ランの合計15ラン行った。各ラン実験時の気象条件の特徴をTable 2に示す。これらのランは、気象条件別に分類すると、

- (1) 気温の鉛直分布から判断して地面付近で不安定、放出高付近で中立、上空で安定の状態にあると思われるグループ及び地面から100m程度まで中立、上空で安定の状態にあると思われるグループ（グループ1）、
- (2) 風が比較的弱く、時間的、空間的な変化の大きいグループ（グループ2）、
- (3) 内部境界層が存在せず、中立又は弱不安定の状態が上空まで継続し、風向・風速の分布が、時間的・空間的に安定しているグループ（グループ3）、

に分かれる。各ランをグループ分けすると、

- (1) グループ1 …… S55（ラン4, 5, 6）, S56（ラン2, 4, 5, 7, 8）
- (2) グループ2 …… S55（ラン3, 7）
- (3) グループ3 …… S55（ラン1, 2）, S56（ラン1, 6, 9）

となる。以下に各グループ別に計算結果を示す。

4.2.1 グループ1

このグループの気象条件は、55, 56年度野外実験の大きな目的である、内部境界層形成時の鉛直拡散調査に合致しており、天気は晴れで、東よりの海風により海岸線から明らかな内部境界層がみとめられた。Fig. 6に、係留気球により測定された各ランの鉛直気温分布を示す。計算モデルでは、前述のように温度分布から、空間を鉛直方向に大気安定度別に分け、拡散係数をかえる多層モデルを用いて、内部境界層を表現している。測定結果からは、温度傾度の異なる気層の境界の高度が場所により異なるものもかなりあるが、ここでは、一定とした。各ランで設定した、高度別の安定度は、Fig. 6'（Table 1を図示したもの）をもとにしてTable 2の通りとした。各層の高度設定の及ぼす影響をみるため55年のラン4, 5では、最下の不安定層の高度をかえた計算も行った。風向・風速は、55年のラン4で高度300m以上で陸風にかわる他は、すべて高度500m以上まで海風で、時間的、空間的に分布は安定していた。風速場計算には、茨城県の既存データと、上層データを含む特別気象観測データを用いた。計算結果をランごとにFig. 7～Fig. 14に(a)放出開始時の風向・風速観測データのベクトル表示、(b)観測データから計算コードWIND 04を用いて計算により求めた、放出高度（海拔150m）の風向・風速水平分布のベクトル表示、(c)地上サンプリング結果と、平均地上濃度分布の計算結果の等値線による比較、(d)鉛直濃度分布の実測と計算の比較の順に図に示す。参考のため56年のラン2には、放出高度と海拔250mの濃度分布計算結果も示す。濃度の水平分布の比較において、実線は計算結果、破線は実験結果であり、各等値線の値は、図右上段に等値線内側から順番に示してある。単位は、ppt ($\times 10^{-12} \text{ m}^3 / \text{m}^3$)で、等値線値の右に*がついているものは、計算結果の等値線のみ示されていることを意味する。また鉛直濃度分布の比較図では、実線が計算値、破線が実測値で、55年ラン4, 5に示した一点鎖線は、最下の不安定層の厚さを100

mから50mにかえた時の計算結果である。D. D. は風下距離である。55年ラン6については強風により係留気球を浮揚できなかったため鉛直濃度分布の比較はできなかった。

水平分布については、風速場が安定しており100 pptの地上等値線図からもわかるように、流れの方向と広がりはよく一致している。

鉛直分布については、一層モデルによるガウス・プルーム式で地上付近の大気安定度のみを用いて計算を行った場合に比べて、本モデルの結果は、明らかに改善される。Fig. 15(a), (b)は、56年のラン4とラン8について風下地上濃度分布の実測、ガウス・プルームモデル、本モデルの結果の比較である。内部境界層形成時に、上層の安定層から放出されたガスは、小さな拡散で風下に移流し、下層の不安定層にトラップされると急激に拡散して地上に高濃度をもたらす。そのため最大濃度地点は地上付近の大気安定度から推定される地点より遠方になるが、地上付近の大気安定度を用いたガウス・プルームモデルでは、この現象は表現できない。一方、本報で述べた内部境界層のモデルでは、図に示したように、上記の傾向を表現できる。

内部境界層のモデル高度については、55年のラン5をみると、鉛直分布図のD. D. = 1.66 kmにおける比較でわかるように、現実には高度200 m以下の混合が、計算より進んでおり、地上付近の不安定層上面を50 mから100 mに設定をかえると結果が改善される。また55年のラン4、56年のラン4, 5, 8についても、安定状態の分類をかえることで、結果の改善が期待できる。各層の高度、大気安定度の設定に関する結果の感度解析については、今後進めていく予定であるが、各ランの鉛直分布の比較や56年ラン2の高度別水平濃度分布の比較でわかるように、高度200 m以上の安定層への拡散の抑制が、計算でもよく表現されており、多層モデルによる内部境界層モデルリングが有用であるといえる。しかしながら、内部境界層高が風下方向に大きく変化したり、途中で消滅するような場合、本モデルでは対応しきれず、今後、改良する必要がある。

また56年のラン2で風下2.55 kmと3.7 kmの高度150 m以下の濃度分布が、風下1.45 kmのそれに比べてかなり小さい。これは地上濃度分布等値線からわかるように、なんらかの理由で風下2.55 kmと3.7 kmに設置された係留気球の高度0~150 mあたりで、係留気球位置を迂回する流れがあったためと思われるが、集めた気象データからだけでは、この原因を説明するものは得られなかった。

4.2.2 グループ2

このグループの気象条件の特徴は、風向・風速の地域的、時間的な変化が大きい点である。ここでは、茨城県が常時収集を行っている地上風向・風速のみを用いて計算を行った場合と、それに鉛直500 mまでの上層風向・風速観測データを含む実験時の特別観測を加えた場合の2ケースについて計算を行い、弱風で風向・風速が変化しやすい場合の入力気象データ数、配置等に関する検討も若干行った。

ラン3の結果をFig. 16(a)から(h)に示す。Fig. 16(a)は放出開始時の県の既存観測点データで、(b)は特別気象観測データ*である。またFig. 16(d)は、放出開始から1時間後の特別観測デー

* 特別気象観測図の矢羽の見方は Appendix 1 に示す。

タで、この図で特徴的なことは、県データの風向・風速ではみられない陸風が、風下距離 3 km 以上で特別観測により測定されている点である。これは内陸に県のデータがないためでありこの時刻の放出高度での風速場計算の結果、既存データのみ用いた場合 Fig. 16 (e)に示すようにほぼ東よりの風が計算されるのに対して、特別観測データを加えると同図(f)のように北風となり、求める濃度分布の形は大きく異なる。Fig. 16 (g)は、Fig. 17(f)をもとに計算された地上濃度分布であるが、計算でもガスは南に流されているもの実際には、その傾向は、もっと強い。Fig. 16(h)は、鉛直濃度分布を、実測と前述の 2 ケースについて比較した図で、破線が実測、実線が特別観測を考慮した場合、一点鎖線が既存観測点データのみ用いた場合である。実測では、風下 2.55 km と 3.7 km でトレーサガスは北の風により高度 100 m 以上でほとんど検出されず、3.7 km での最大は 80 ppt であった。既存観測点の気象データのみで計算を行った場合、東風により高度 100 m 以上もかなり高濃度が算出されるが、特別観測データを加えることでかなり改善されることがわかる。

ラン 7 は、上層風向が、地上風向とまったく異なる場合の例である。Fig. 17(a)~(d)は、放出開始時及び開始 1 時間後の気象データで(a), (c)は県の既存観測点データ、(b), (d)はパイロットバルーンによる上層風観測データである。これらの図から明らかなように、風向は上空に行くほど半時計回りにずれ、放出高で地上と 2~3 方位、200 m 以上では、180° 以上変化している。また放出開始時の風速は、放出高度の風速が地上風速より弱く、一連の実験の中で特殊なケースといえる。このランでは、高度 100 m に気温の逆転層があり、100 m 以下で大気安定度 D、それ以上で E とした。上層風を考慮して計算を行った場合、風速場は Fig. 17(e)に示すように海拔 50 m で東、(f)に示すように 200 m で北西寄りの風速場が得られる。Fig. 17(g),(h)は上層風を考慮した風速場に基づく濃度分布計算結果である。(g)は地上濃度分布、(h)は高度 250 m の分布で、地上に濃度が出現する領域は放出ラインの西側であるのに対して、上空ではラインからほぼ真南に分布の中心がある。Fig. 17(i)は鉛直濃度分布ラン 3 の Fig. 16(h)と同様の比較図であるが、風下距離 3.7 km で明らかなように実測では上層の風向の違いによる濃度の減少がみられ、上層風を考慮した場合、この傾向が同様にみられる。実測の絶対値については、最大値が風下に行くほど大きくなる結果となっているが、これは、放出高が安定状態で、風下 1.66 km に 50 m 単位で設定されたサンプラーの間を出軸が通過したためではないかと思われる。今回の一連の実験では、グループ 3 のようなケースは少なかったが、これは目的が内部境界層形成時の鉛直拡散調査にあったからであり、グループ 3 のように風向・風速の変動が大きいような条件は弱風時や海陸風交替時には、よく現われると思われる。この様な場合、放出高度の 2 倍程度以上までの気象観測が必要となることは、上記 2 ケースより明らかである。

4.2.3 グループ 3

このグループは、得られた気象条件から判断して、風向・風速が、時間的、空間的に変化が少なく、気温鉛直分布の傾度にも大きな変化がなく、比較的シミュレーションしやすい状況と思われた。計算結果を、グループ 1 と同様の順に Fig. 18 ~ Fig. 22 に示す。55 年ラン 2 は、風向きが悪く、56 年のラン 1, 9 は強風のため係留気球が浮揚できず、鉛直データは得られなかった。従来このような気象条件では、濃度分布は、ガウス分布型等で数式化されてきたが、5

ラン中、鉛直分布の測定が行われた55年ラン1と56年ラン6では必ずしも分布はガウス型でなく、特にラン1では、風下1.66 kmですでに、放出高の濃度が少なく地上濃度が最大となった。各ランの地上濃度分布100 pptの等値線比較でわかるように、トレーサの流れる方向は、現実をとらえているものの、上記の鉛直分布のような実測データや数値モデルからは判断のつきかねるケースもあり、計算コードの性能を超える気象現象といわざるを得ない。

4.3 考 察

本報告で述べた一連の野外実験は、主目的が海風による内部境界層形成時の鉛直拡散におかれており、それに付随して、中立状態での拡散、風向・風速変動の大きい場合の拡散に関するデータが得られている。鉛直拡散調査を主体としたため水平方向の拡散を補償するような、ヘリコプタの往復運動によるトレーサガス放出という、特殊な放出形式となった。粒子拡散モデルでは、放出源の形状を任意にとることができるため、放出形式をそのまま数値的に再現し、絶対値で結果の比較を行うことができた。

内部境界層の取扱いについては、多層モデルを用いることにより、従来使用されてきた気温の逆転層でトレーサガスが全反射することを仮定したモデルよりも合理的にフュミゲーションを表現できるようになった。本モデルでは、各層の高度が地域的に変化しないことを仮定しているため海風による内部境界層のように、地域的な変化が大きい場合や、内陸で消滅する場合適用範囲が狭く限定される。また、各層の乱れの程度をA～Fの6ランクで表現したが、鉛直温度分布測定5地点の値をもとに層を分割し各ランクを設定する作業は、各地点の分布状況が異なる場合、かなり主観が入るため大きな誤差要因となる。これらのことから、層の高度、乱の高度、乱れのランクに関する感度解析を行い、層の設定基準を決定していく必要がある。

風が弱く風向・風速の空間的・時間的変動が大きい場合は2ケース存在したが、このような場合、計算結果の精度は風速場計算に輸入するデータの数や代表性に大きく依存する。海岸付近では地上付近で海風の場合でも、内陸や上空では陸風が卓越している場合がかなりあり、今回の計算コードに対して放出点からはなれた地域や、放出高度の2倍程度上空までの風向・風速・気温等の測定が重要であることが確められた。今回の実験地域は、平坦で狭域であったため上層の風向・風速データは、観測点1点の鉛直データの入力である程度の効果を上げたが、今後目的としている複雑地形でのシミュレーションを行う場合には、数点の鉛直入力データを反映できるように風速場計算コードの改良を進める必要がある。また弱風で時間的変動が大きい場合には入力データの入力時間間隔を短くする必要がある。

その他、大気安定度の中立の状態が上層までつづき、風向・風速の変化が少なく、計算によりシミュレートしやすいと思われるランもいくつか存在したが、このような場合でも、今回の数値シミュレーション法では表現し難いような実測結果がいくつかあった。このような結果は、同時に行っている気象観測データからも説明がつかず、非常に局所的な気象現象に起因するものと思われる。

地上最大濃度出現地点に関しては、Fig. 23に示すように全15ラン中、1ランの風下距離を除き、出現地点の風下距離と最大値の実測と計算の比較は、ファクタ2で一致した。内部境界

層が存在する場合最大濃度出現風下距離は、放出高度を150 mとしたガウス・プルームモデルを用いて計算した大気安定度CとDの場合の結果の中間に位置している。これは地上付近で不安定であっても放出点付近は、中立又は安定状態であるため、この点からも、高所放出の場合に上空の乱れの測定が重要といえる。

5. お わ り に

筆者らは、緊急時関連の研究の一環として、計算コードの作成、モデル検証のための野外実験、計算によるシミュレーションを進めてきた。今回報告した研究の結果として

- (1) 内部境界層等、乱れの程度の異なる気層が上空に存在している場合、多層モデルは有効な手段であるが層の高度を一定として扱うことは、計算領域が広い場合や層高度の変化が大きい場合、誤差要因となる。
- (2) 海岸地域では、高所放出の場合に地上の風向・風速と乱れの状態が放出高度のそれと違う場合があるため、放出高度の2倍程度までの風向・風速及び乱れのパラメータを最低1点海岸から少し離れたところで測定したデータを用意することが重要である。

等である。

野外実験は、本報に述べた55, 56年分に引き続き57, 58年に東海村で点線源を用いて、放出点周辺15 km程度までの水平、鉛直拡散の調査を実施した。さらに59年以降、複雑地形における野外実験を計画している。計算システムでは、これらの実験のシミュレーションを順次行い、モデルの改良・整備を進めて行く予定である。

本研究の遂行にあたって、各方面の方々からの協力を得た。標高データは国土庁の国土数値情報を用いたが、使用にあたり国土庁国土情報整備室の協力を得た。シミュレーションに用いた気象データの一部は、茨城県公害対策課と原子力安全対策課の御厚意で使用することができた。ここに上記の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

また本報告をまとめるにあたり御指導いただいた環境安全研究部長今井和彦氏及び環境第1研究室長森内茂氏に感謝致します。

参考文献

- (1) 原子力コード委員会原子力コード総合化専門部会編：最近の原研コードシステム，
JAERI-M 83-208 (1983)
- (2) 石川裕彦：変分法を応用した3次元風速場計算コード，JAERI-M 83-113
(1983)
- (3) 茅野政道，他：原子力学会誌投稿中
- (4) Diel, S. R. et al.: Random-walk Simulation of Gradient-Transfer Processes
Applied to Dispersion of Stack Emission from Coal-Fired Power Plants, Journal
of Applied Meteor., 21 (1982)
- (5) Lange, R.: ADPIC - A Three-Dimensional Particle-in-Cell Model for the
Disposal of Atmospheric Pollutants and its Comparison to Regional Tracer
Studies, Journal of Applied Meteor., 17 (1978)
- (6) 角田道生，他：拡散実験による沿岸地域の濃度鉛直分布，1983年気象学会春季大会予稿
集，273 (1983)
- (7) USNRC: Onsite Meteorological Programs, Regulatory Guide 1.23 (1972)
- (8) 原子力委員会：発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針，pp 28 (1977)

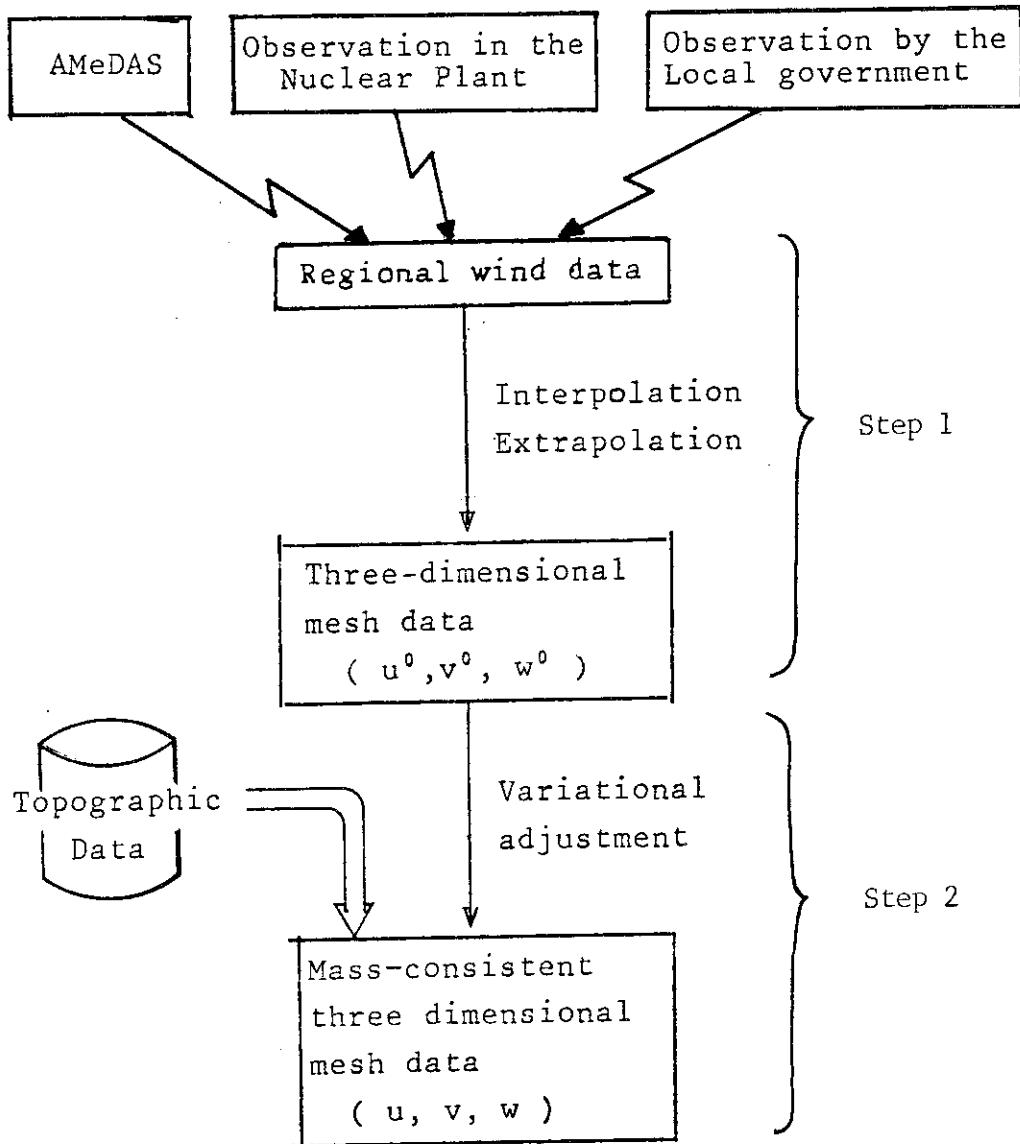


Fig. 1 The overall concept of the method of three-dimensional mass-consistent wind field.

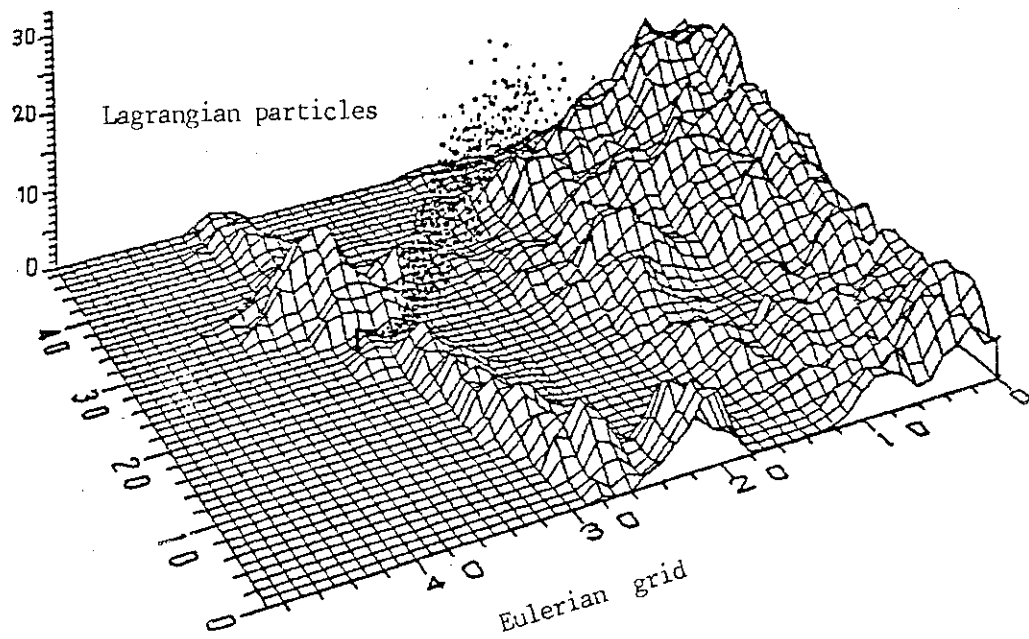


Fig. 2 Conceptual representation of particle diffusion method.

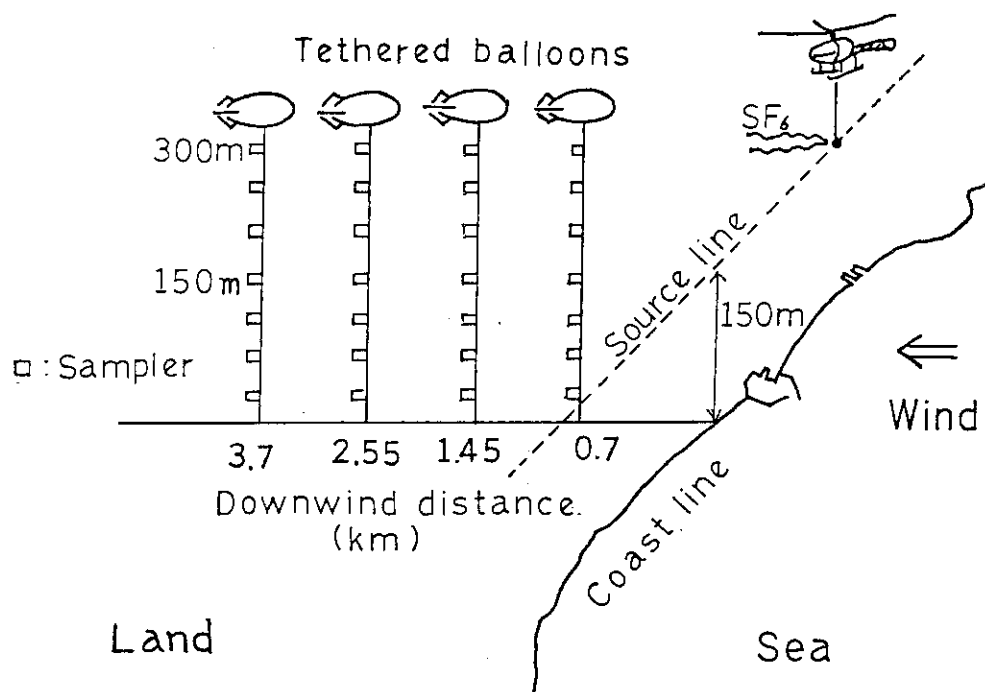
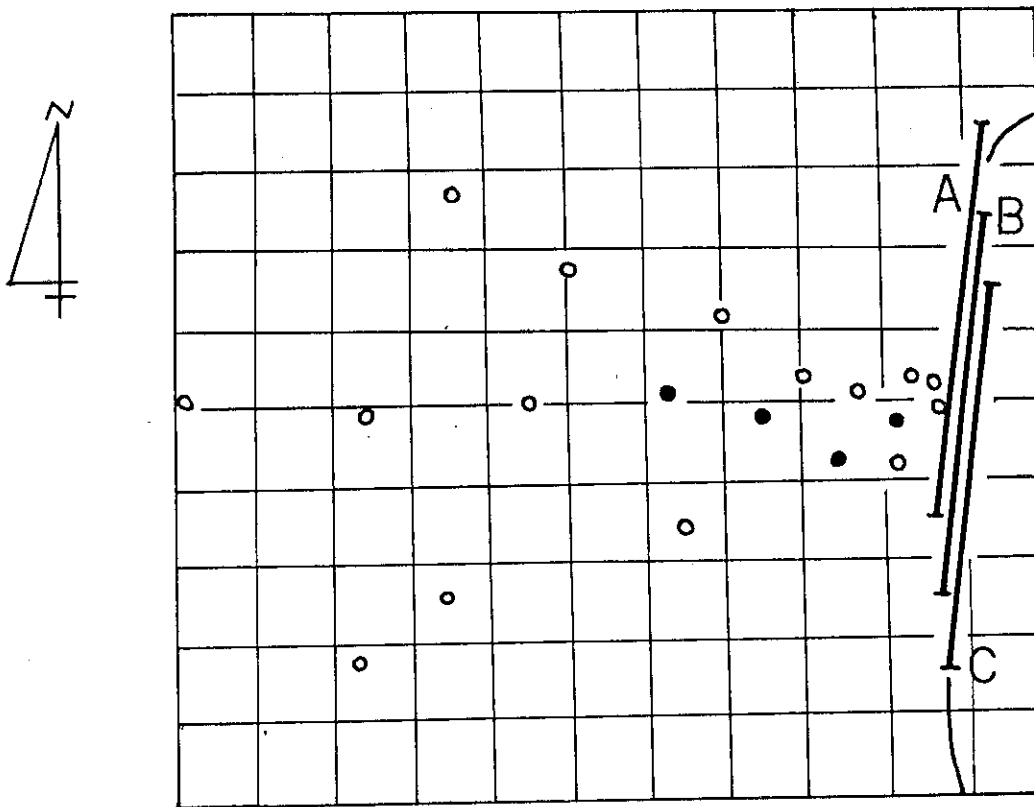
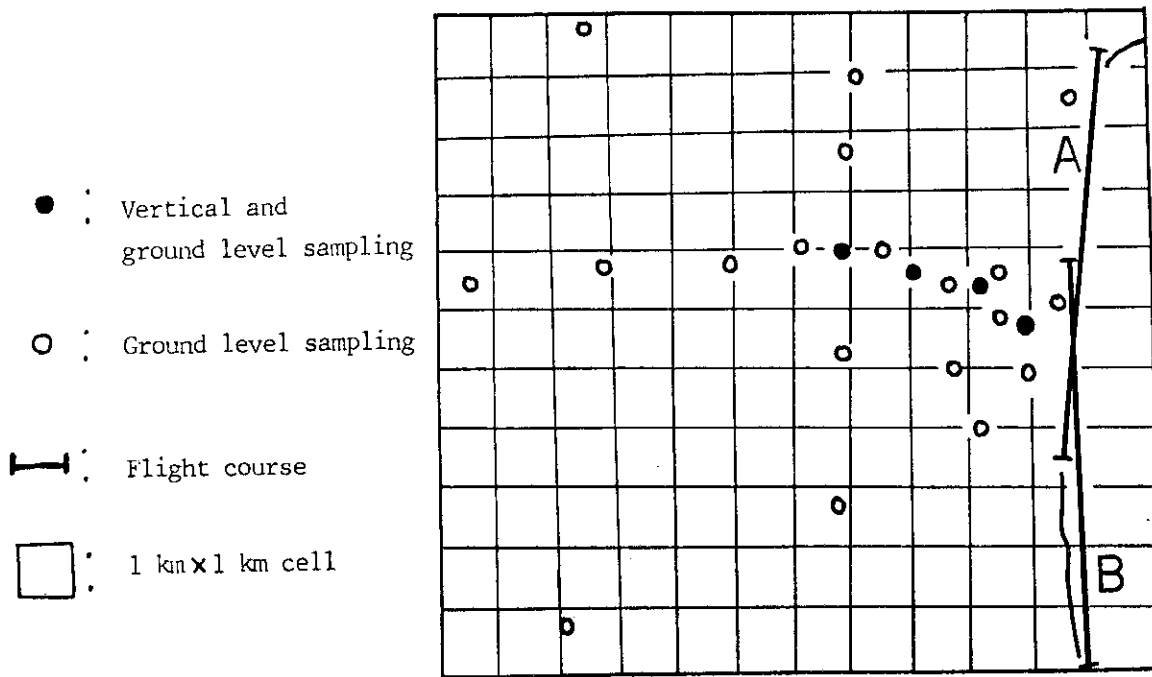


Fig. 3 The outline of field tracer experiment.



(a) '80's field tracer experiment



(b) '81's field tracer experiment

Fig. 4 Sampling net of field tracer experiment.

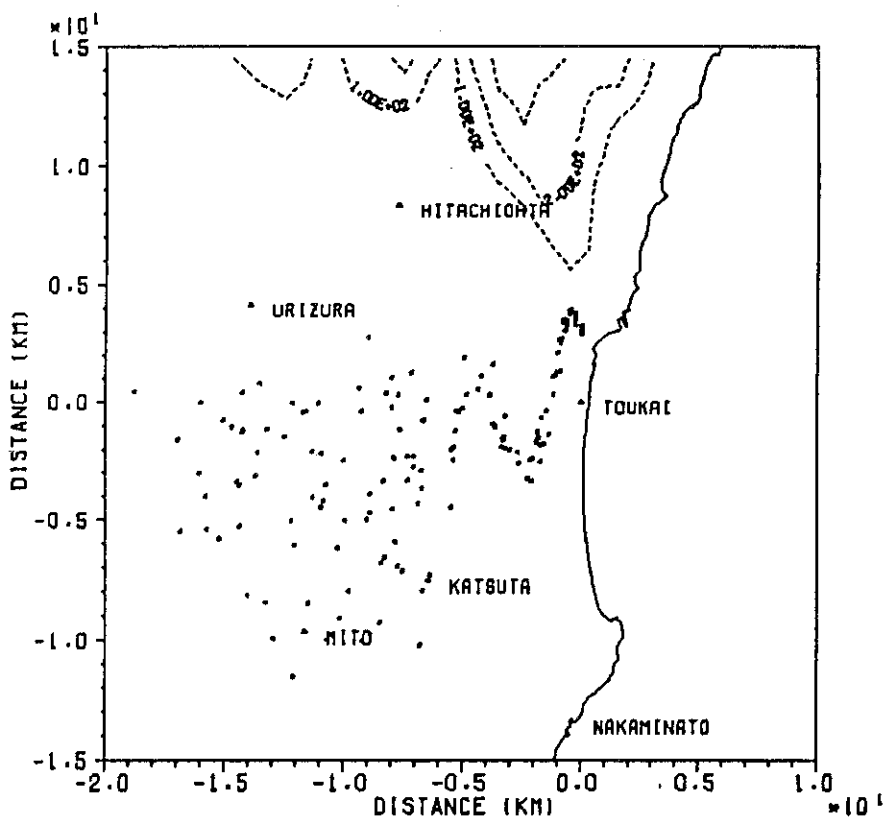


Fig. 5 Example of tracer gas flow which is simulated with many particles.

Table 1 Classification of atmospheric stability (U.S. method)

Classification	Pasquill categories	σ_{θ}^* (degrees)	ΔT ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)
Extremery unstable	A	25.0°	< -1.9
Moderately unstable	B	20.0°	-1.9 to -1.7
Slightly unstable	C	15.0°	-1.7 to -1.5
Neutral	D	10.0°	-1.5 to -0.5
Slightly stable	E	5.0°	-0.5 to 1.5
Moderately stable	F	2.5°	1.5 to 4.0
Extremely stable	G	1.7°	> 4.0

* Standard deviation of horizontal wind direction fluctuation over a period of 15 minutes to 1 hour.

Table 2 Outline of Meteorological data at the experiments

Year	Time	Run No.	Wind field	Turbulence	Flight course
'80	10/15 15:00	Run 1	Moderate and uniform (ENE)*	Uniform	A
	10/16 8:00	Run 2	Weak and uniform (NNE)	Uniform	B
	10/16 14:00	Run 3	Variable with region	Uniform	B
	10/17 13:00	Run 4	Moderate and uniform (ENE)	TIBL**	C
	10/18 10:00	Run 5	Moderate and uniform (NE)	TIBL	A
	10/18 14:00	Run 6	Strong and uniform (NE)	TIBL	A
	10/19 13:00	Run 7	Weak and extremely variable with height	TIBL	A
'81	8/20 9:30	Run 1	Strong and uniform (NE)	Uniform	A
	8/20 15:00	Run 2	Moderate and uniform (NE)	TIBL	A
	8/24 10:00	Run 4	Moderate and uniform (ESE)	TIBL	A
	8/24 13:30	Run 5	Moderate and uniform (ENE)	TIBL	A
	8/24 16:30	Run 6	Moderate and uniform (ENE)	Uniform	A
	8/25 8:30	Run 7	Moderate and uniform (E)	TIBL	A
	8/25 12:30	Run 8	Moderate and uniform (ESE)	TIBL	A
	8/25 15:30	Run 9	Moderate and uniform (SE)	Uniform	B

* Dominant wind direction at the coast line when the release start.

** Thermally induced boundary layer

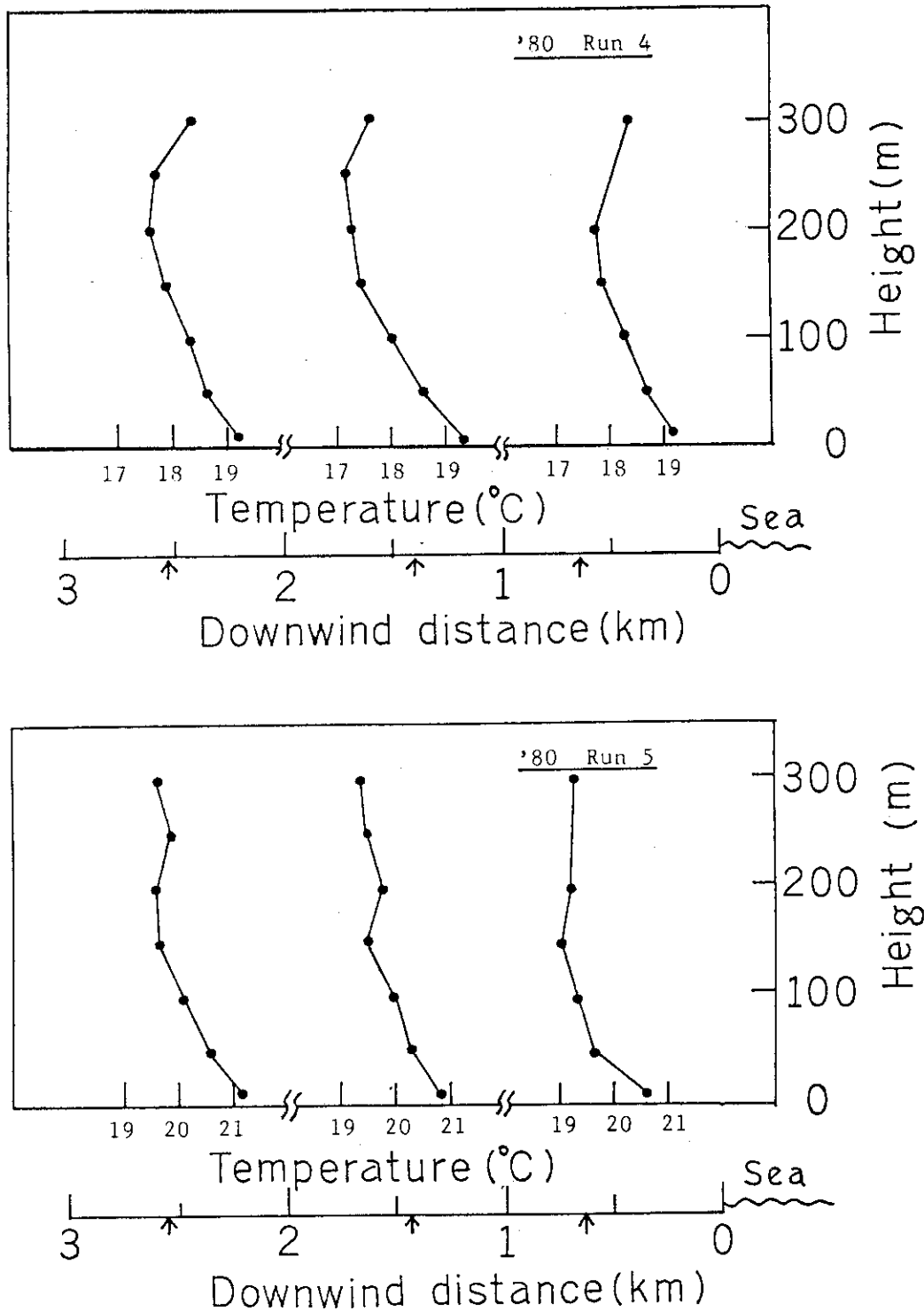


Fig.6 Observed vertical temperature profile (1). (Run 4 and Run 5 of '80)

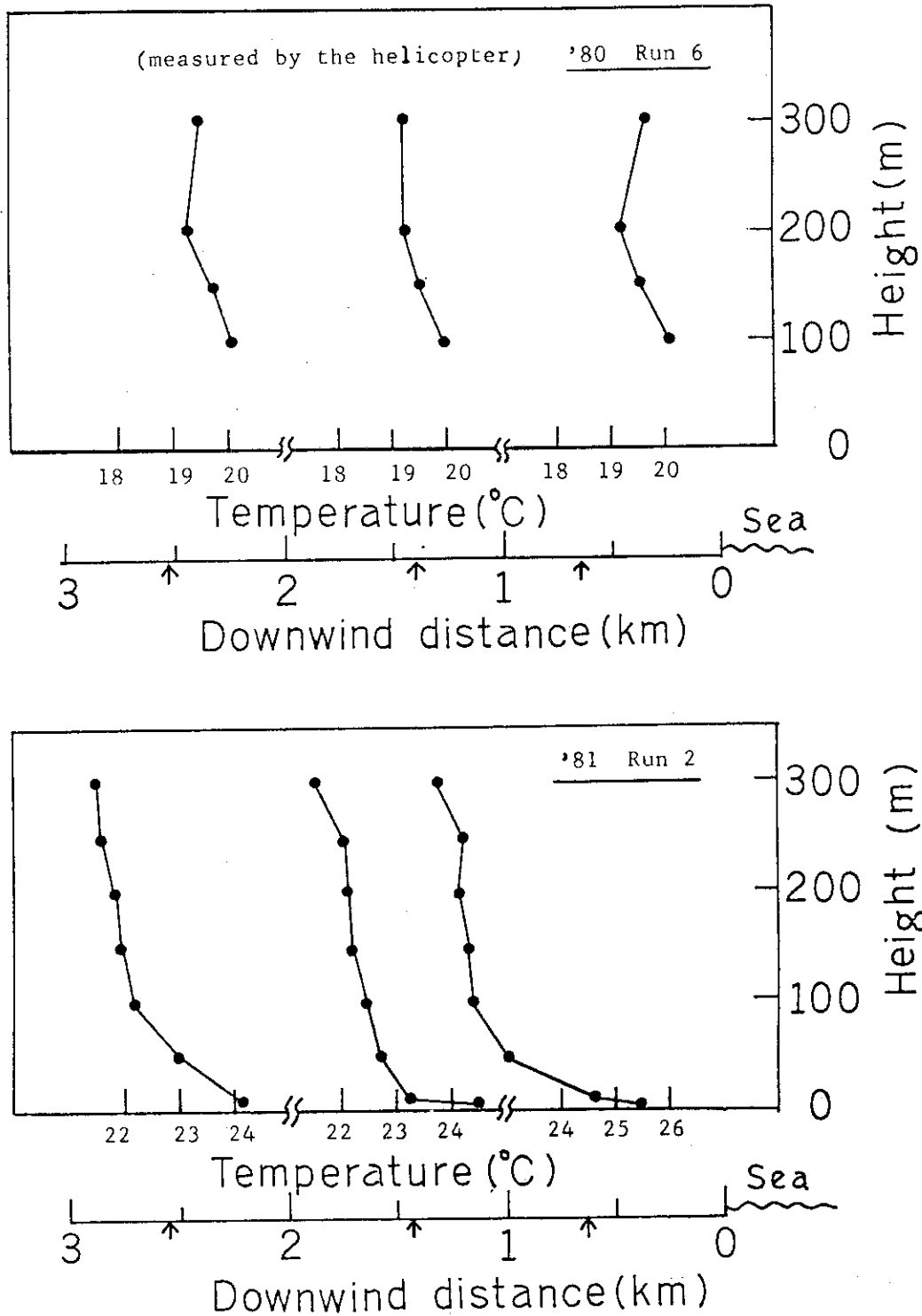


Fig.6 Observed vertical temperature profile (2). (Run 6 of '80 and Run 2 of '81)

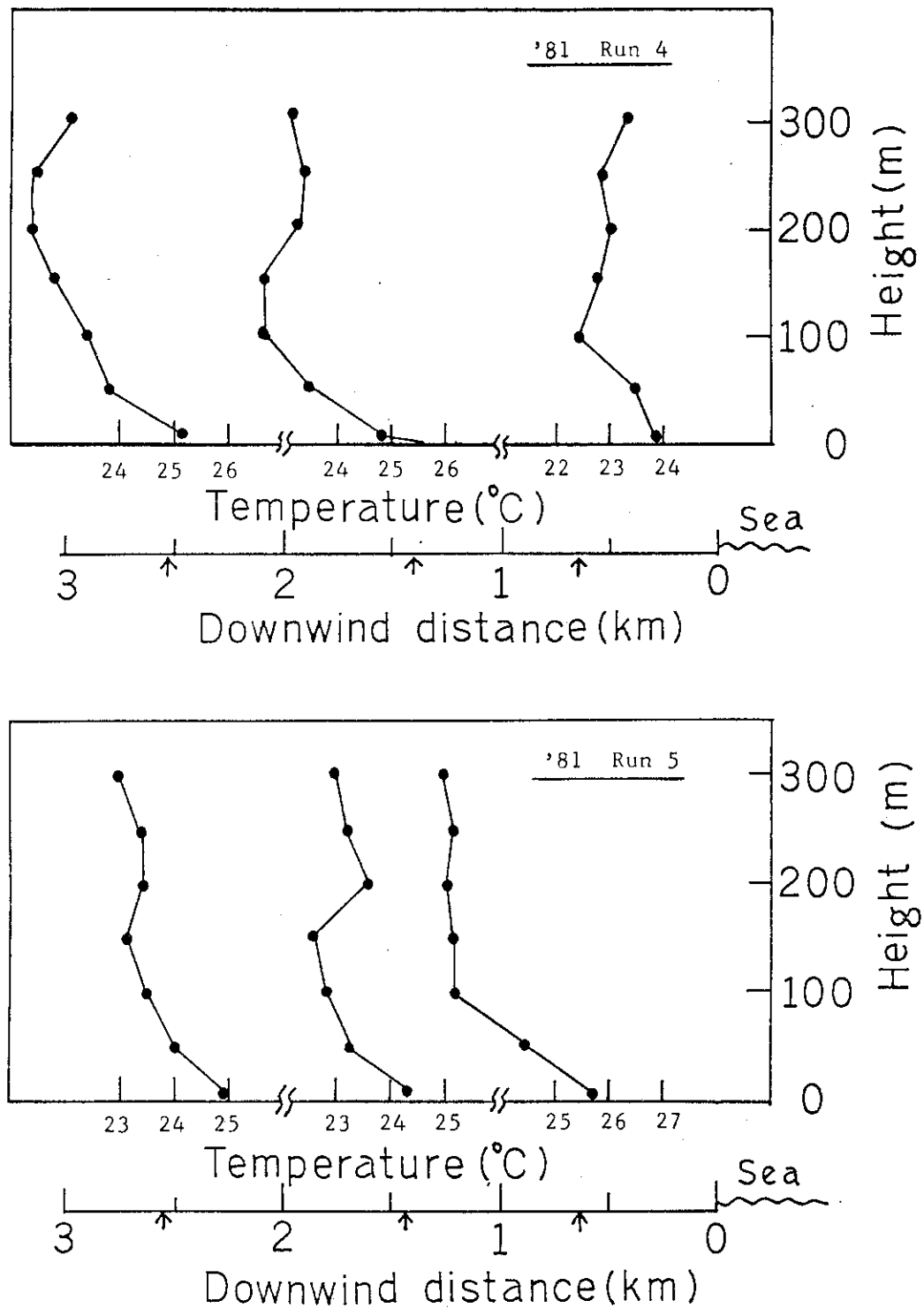


Fig.6 Observed vertical temperature profile (3). (Run 4 and Run 5 of '81)

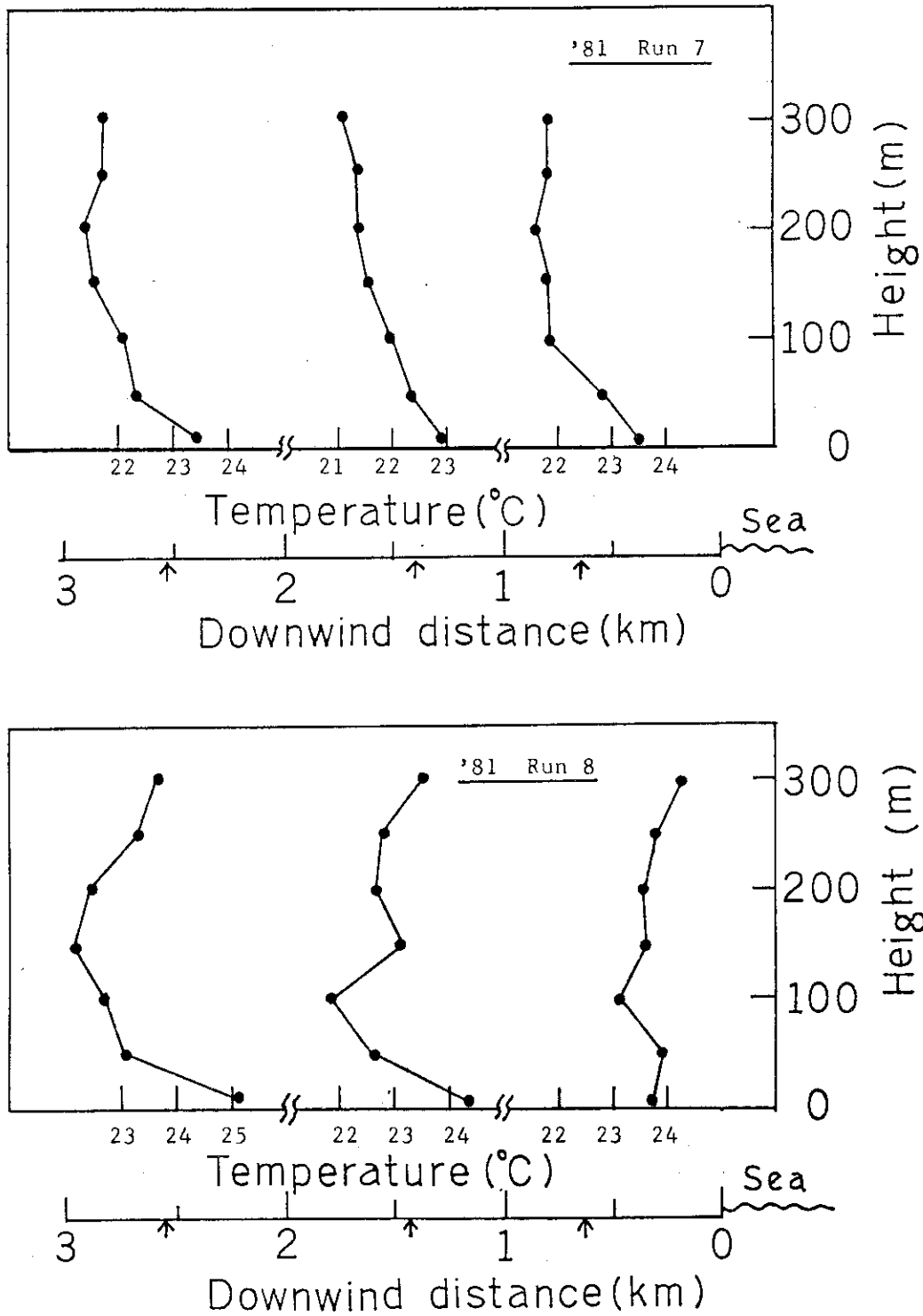


Fig.6 Observed vertical temperature profile (4). (Run 7 and Run 8 of '81)

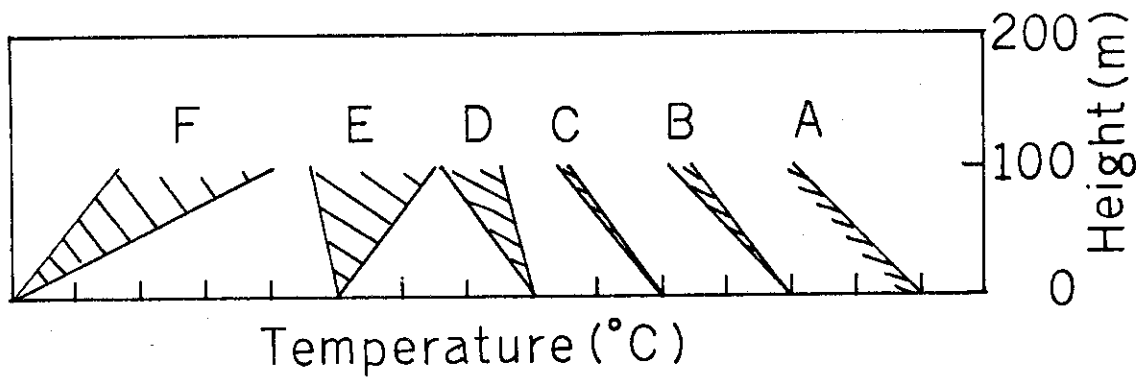
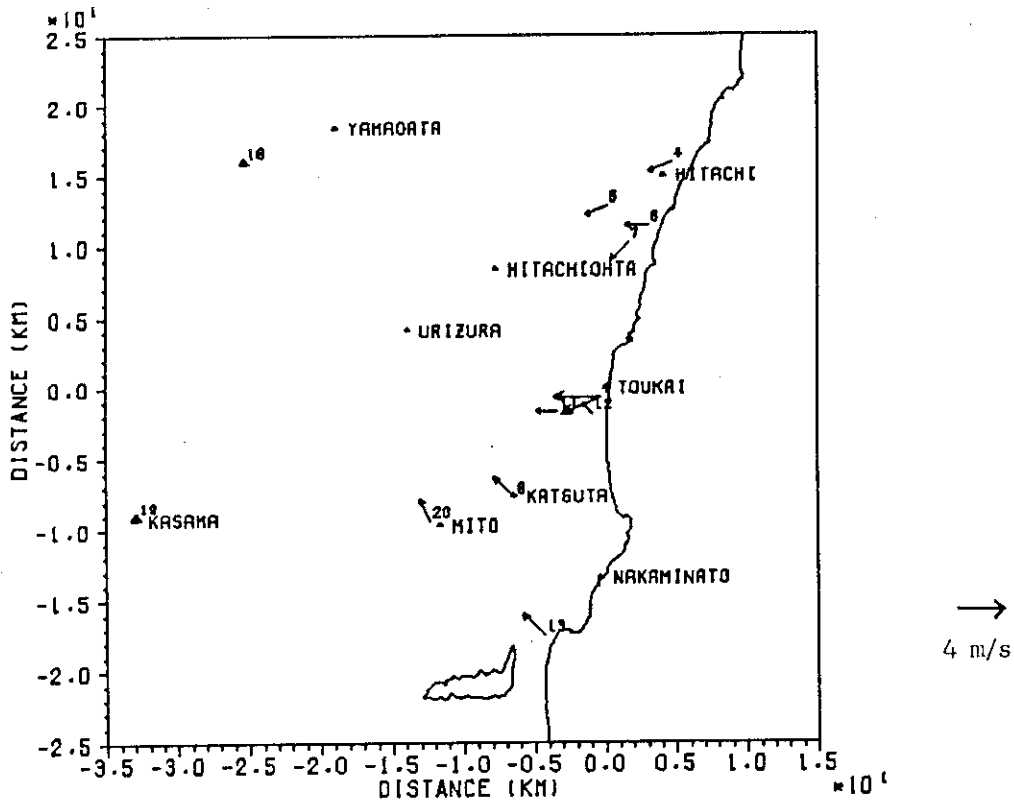


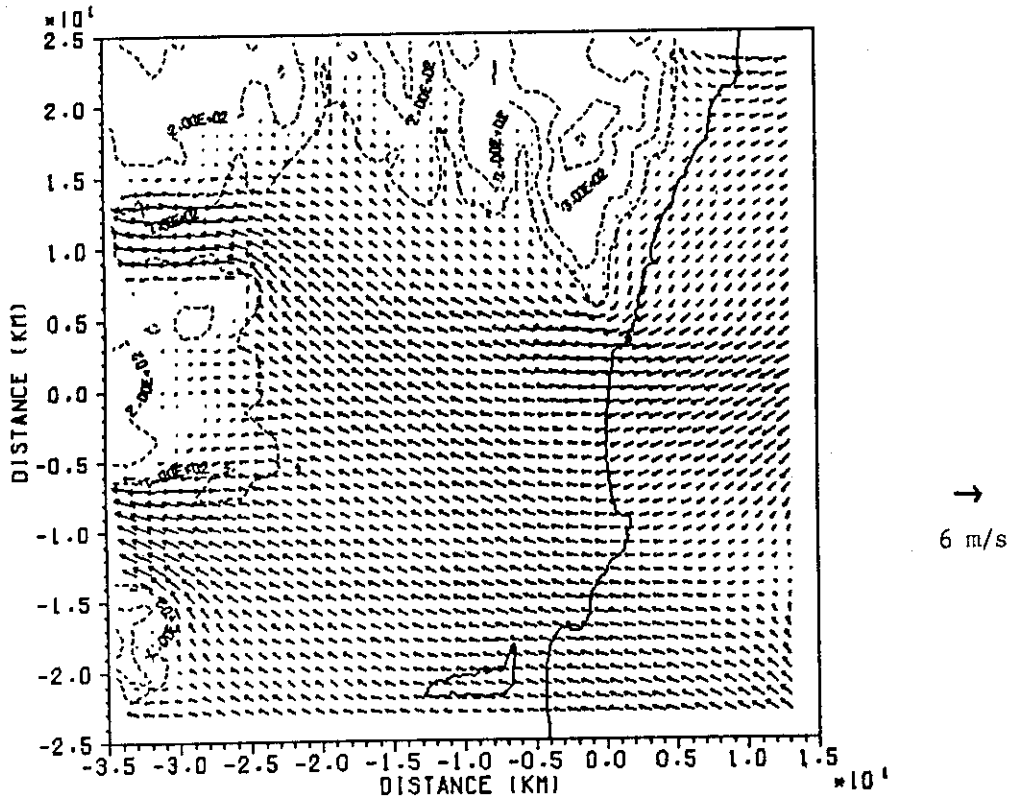
Fig. 6' Graphic display of table 1.

Table 3 Model thermally induced boundary layer.

Run No.	Model stability height
'80 Run 4	0 ~ 100 ~ 200 m ~ C D E
Run 5	0 ~ 100 ~ 200 m ~ C D E
Run 6	0 ~ 150 m ~ D E
'81 Run 2	0 ~ 50 ~ 150 m ~ C D E
Run 4	0 ~ 80 ~ 180 m ~ A D E
Run 5	0 ~ 50 ~ 100 m ~ C D E
Run 7	0 ~ 50 ~ 180 m ~ B D E
Run 8	0 ~ 50 ~ 100 m ~ B D E

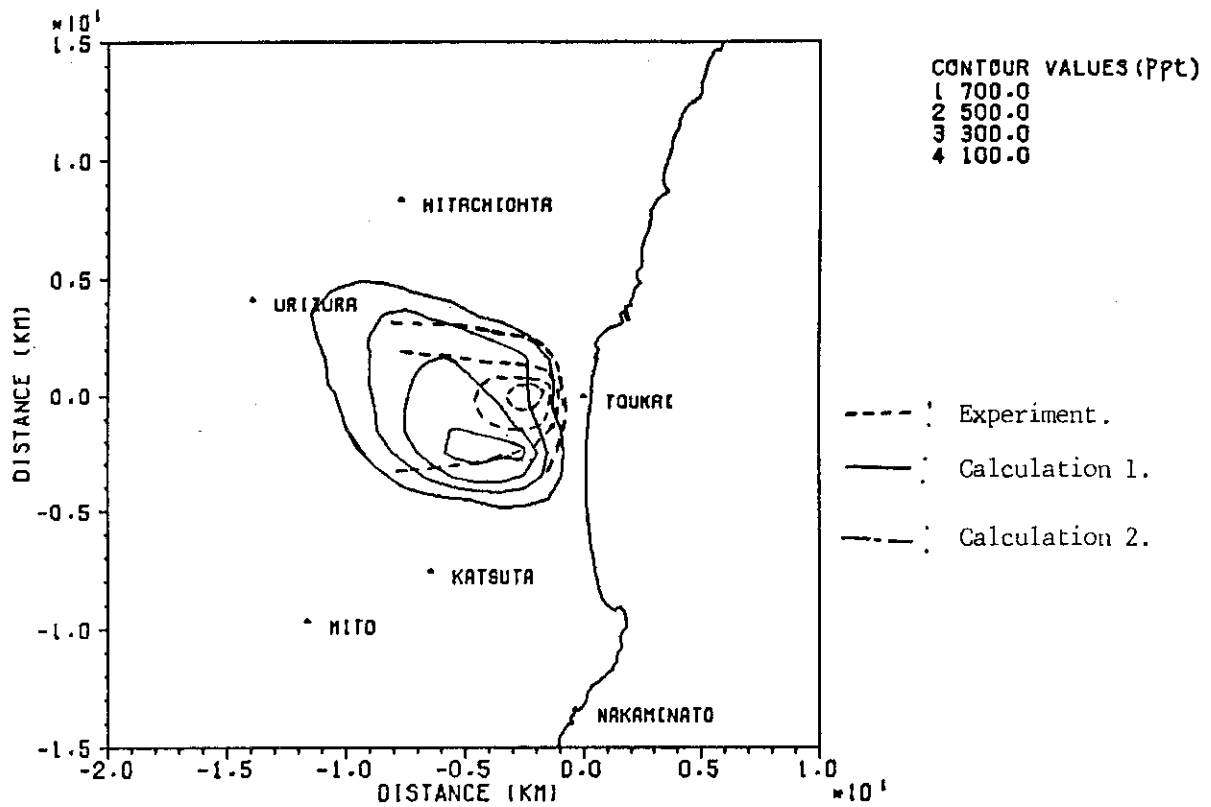


(a) Observed wind data when the release start.

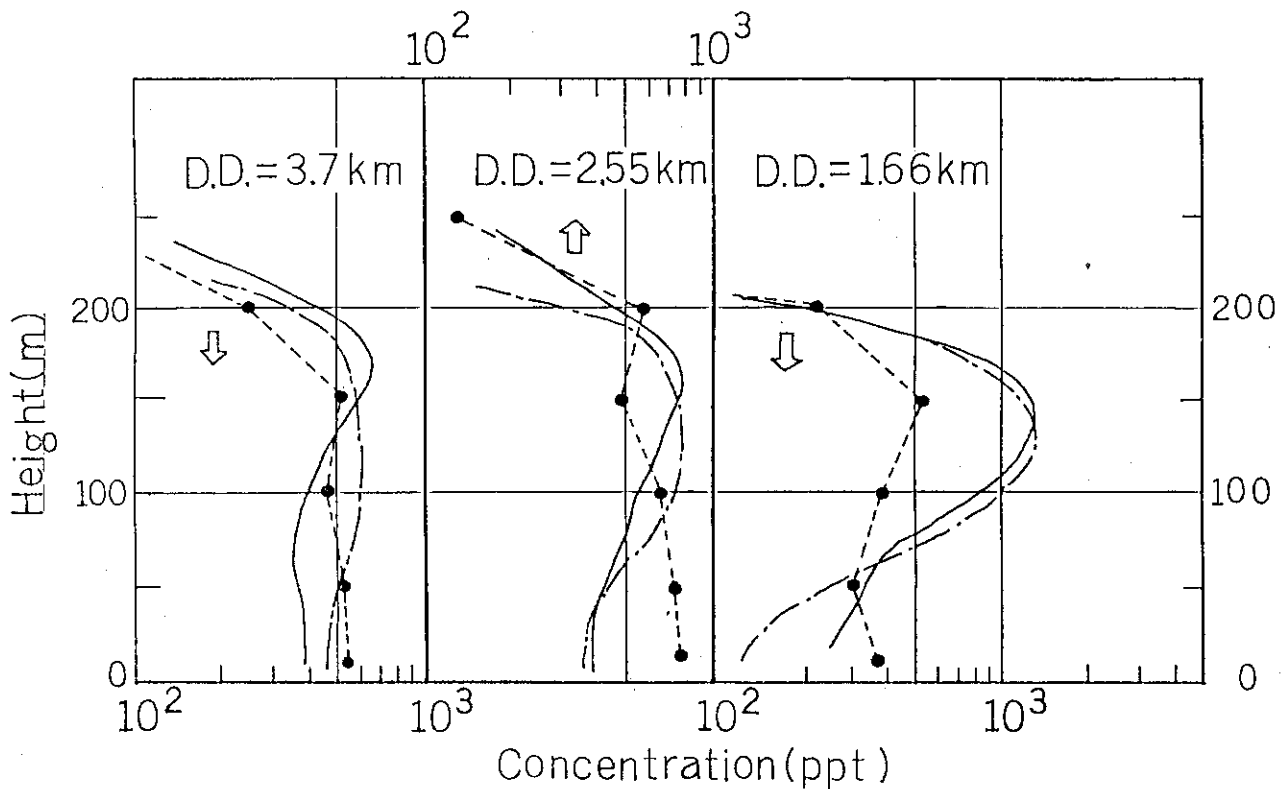


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.7 Simulated results of Run 4 of '80's experiment (1).

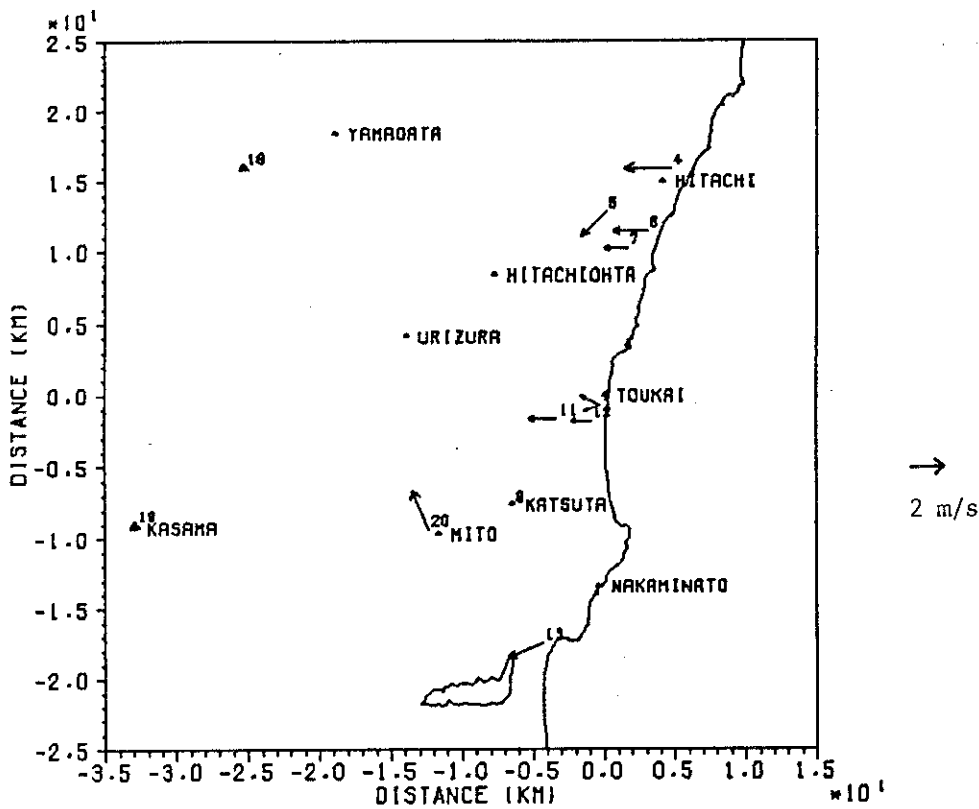


(c) Comparison of the ground level concentration.

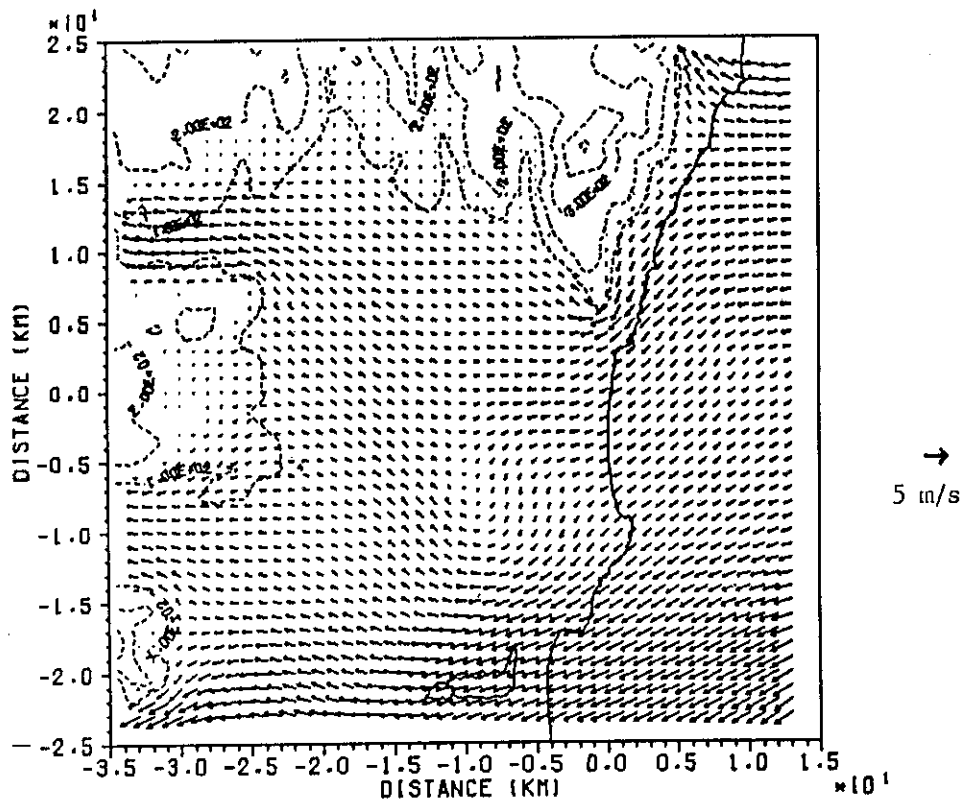


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.7 Simulated results of Run 4 of '80's experiment (2).

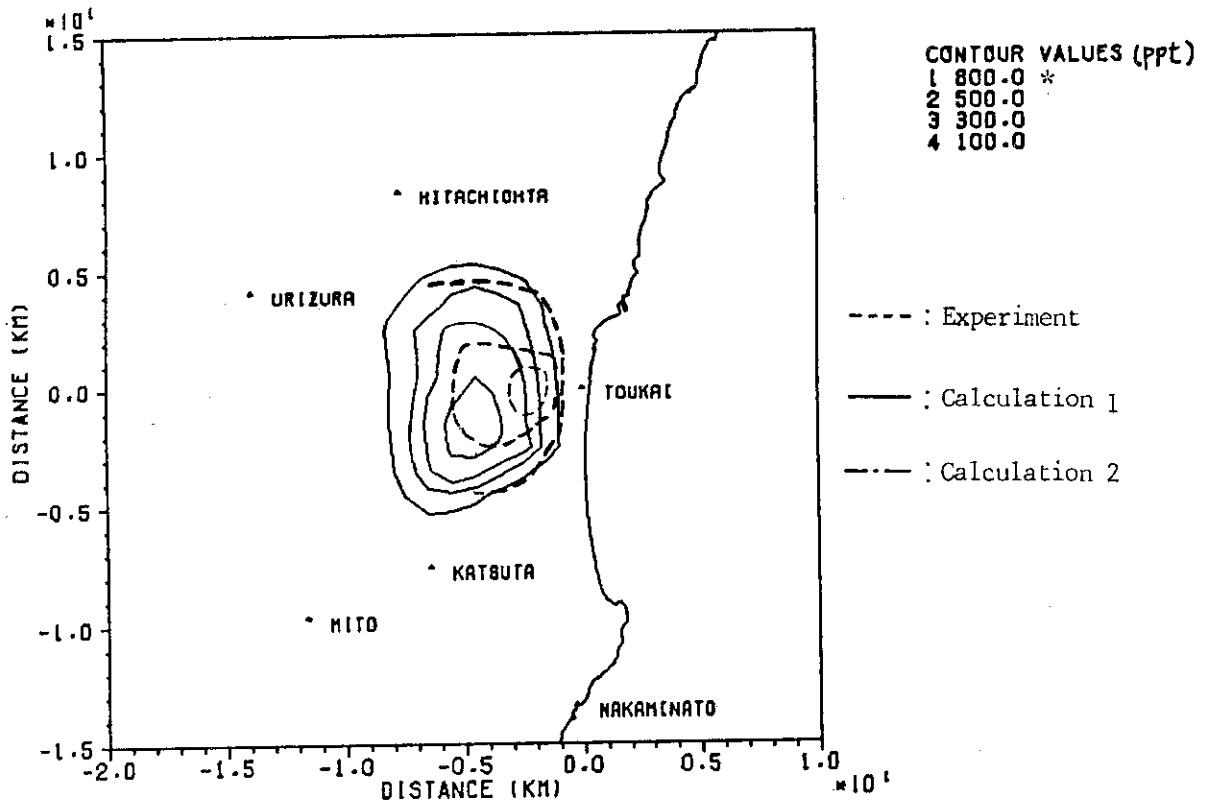


(a) Observed wind data when the release start.

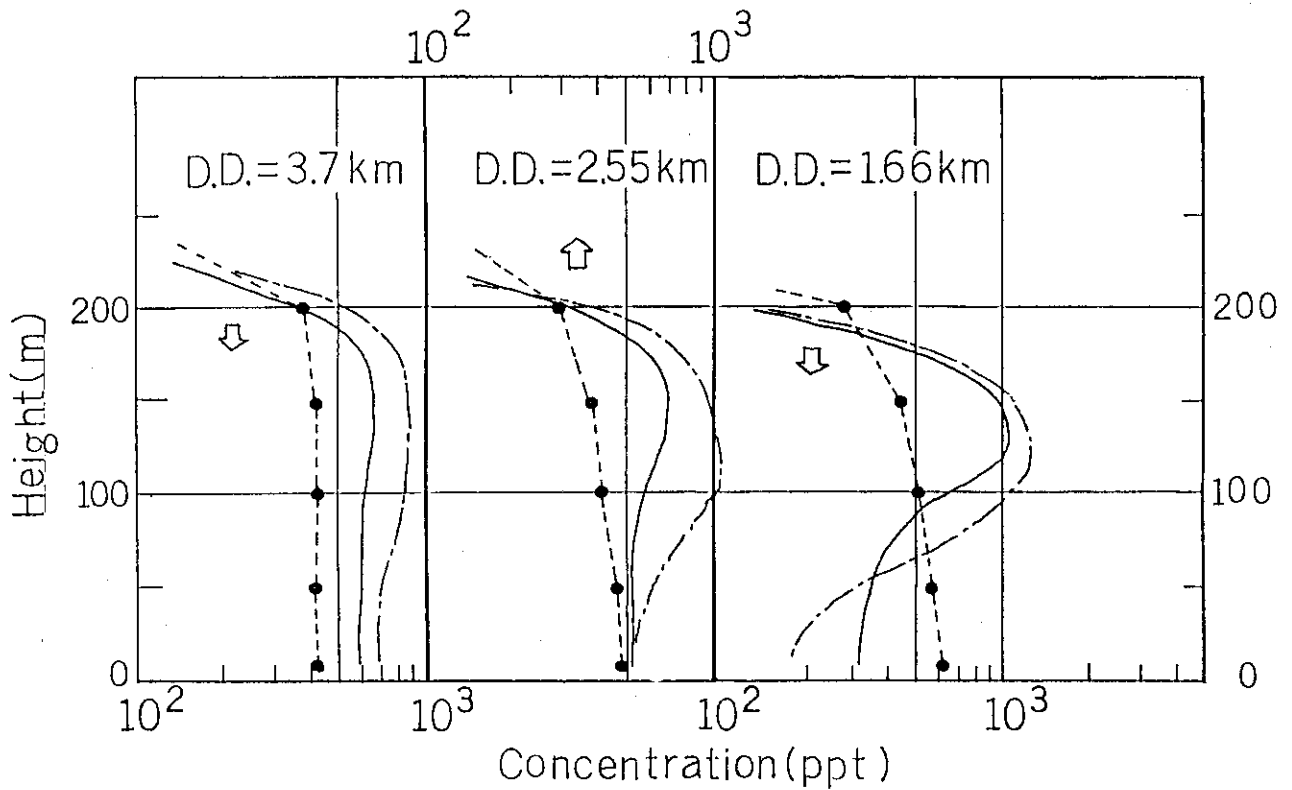


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.8 Simulated results of Run 5 of '80's experiment (1).

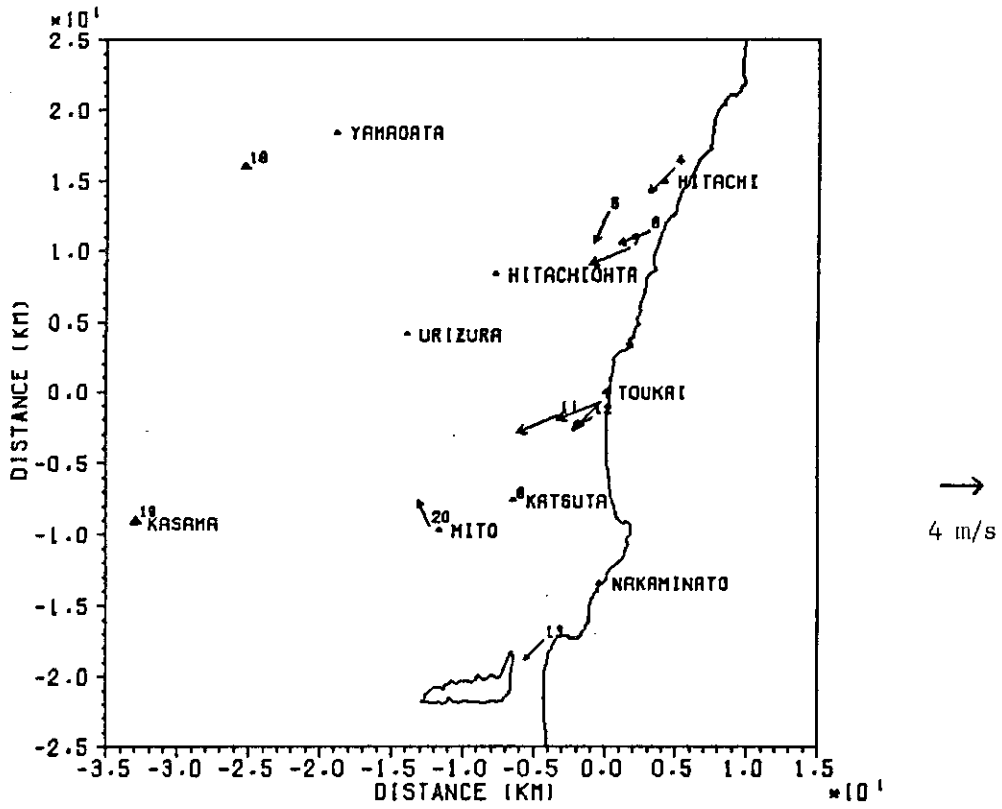


(c) Comparison of the ground level concentration.

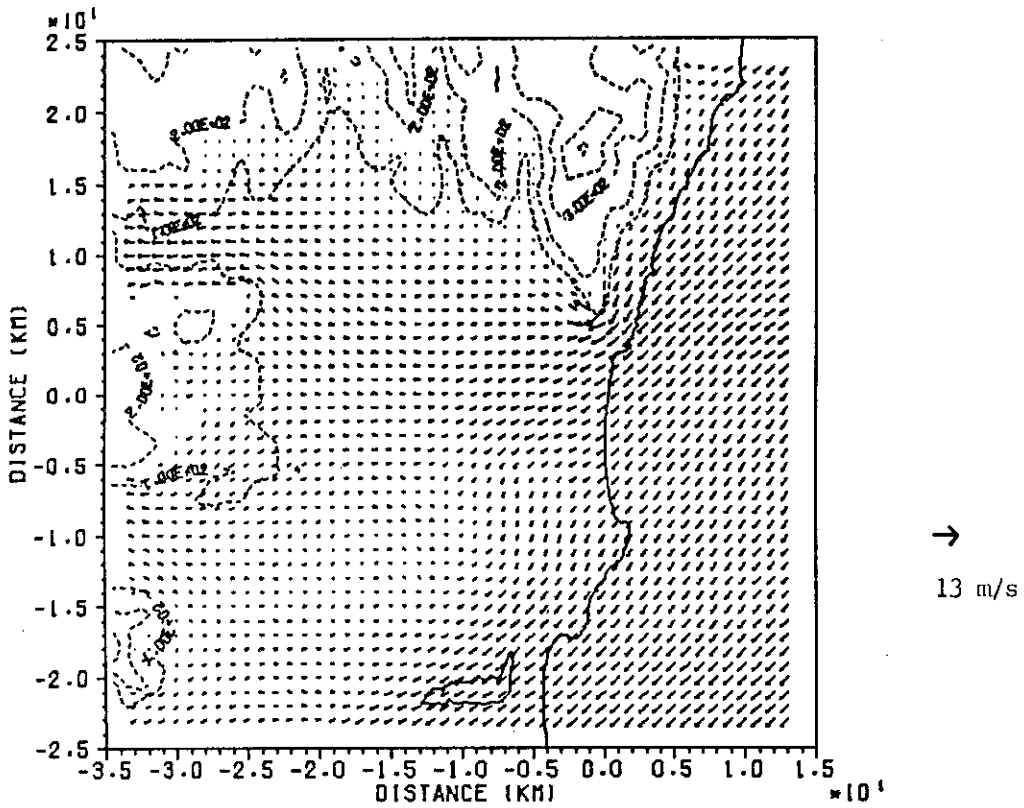


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.8 Simulated results of Run 5 of '80's experiment (2).

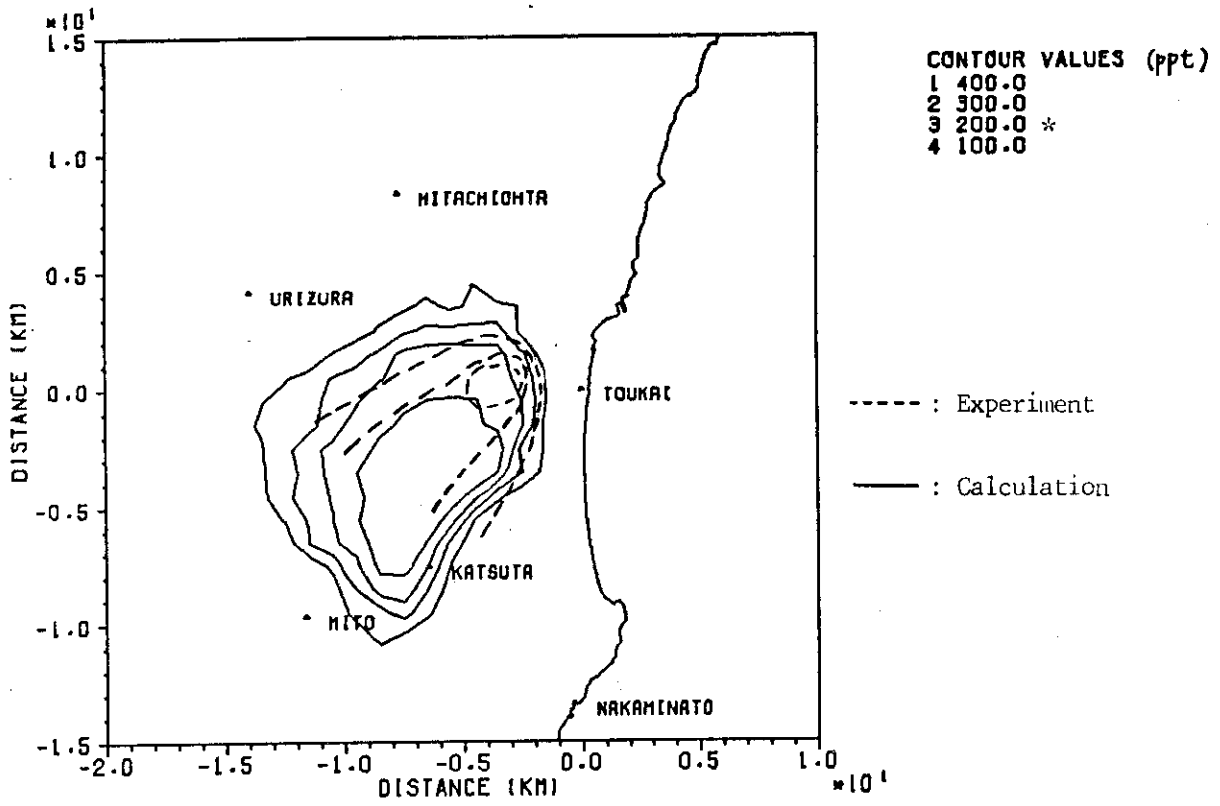


(a) Observed wind data when the release start.



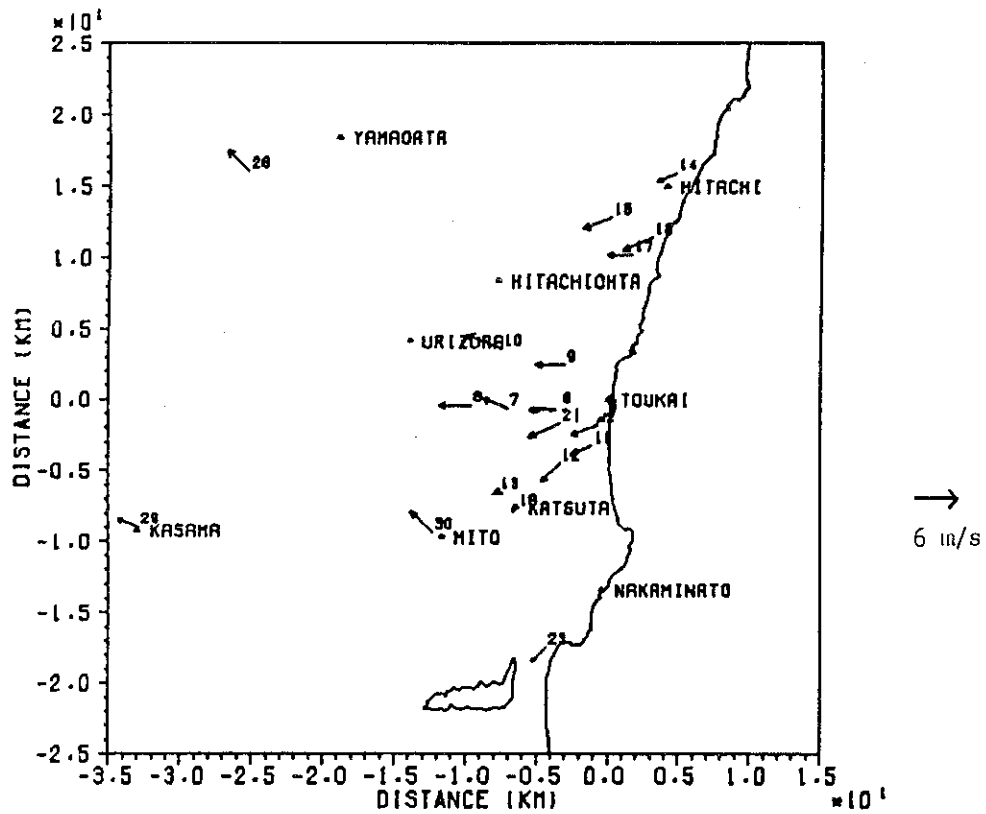
(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.9 Simulated results of Run 6 of '80's experiment (1).

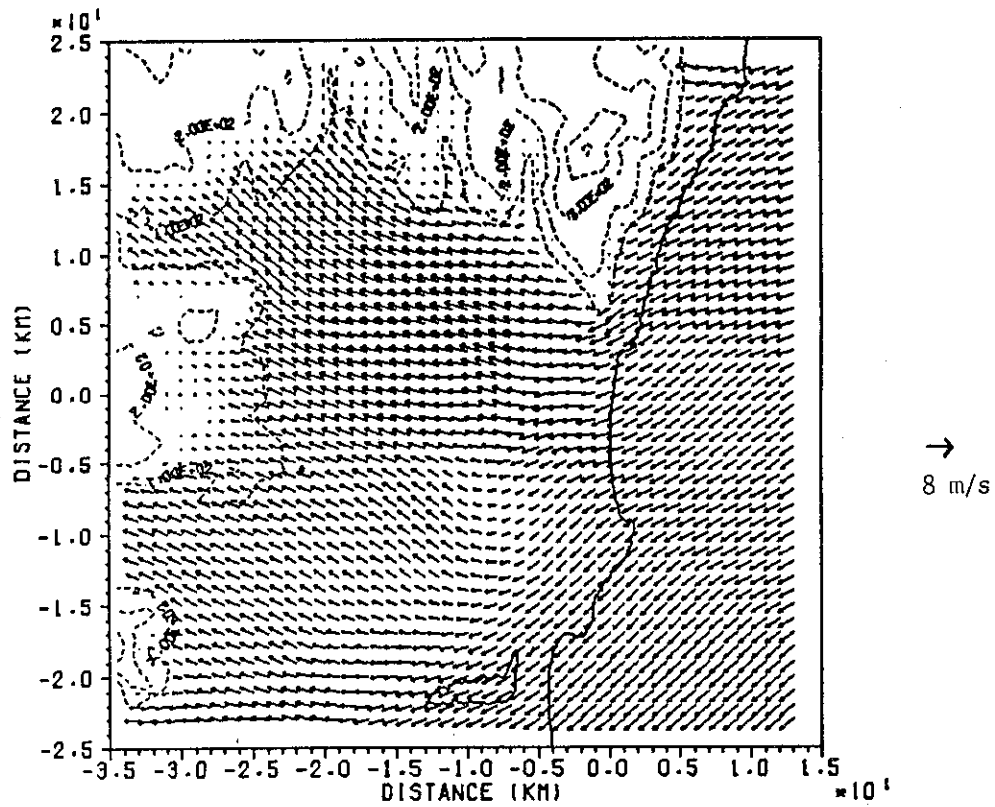


(c) Comparison of the ground level concentration.

Fig.9 Simulated results of Run 6 of '80's experiment (2).

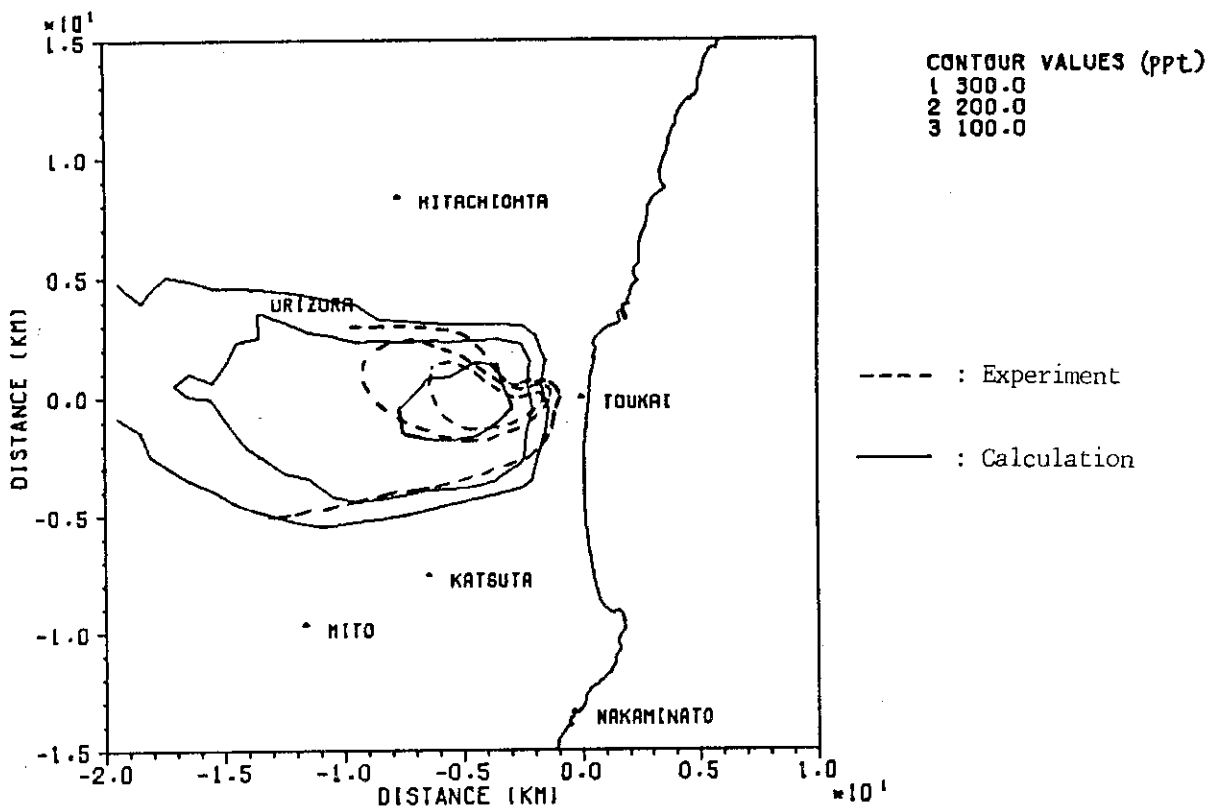


(a) Observed wind data when the release start.

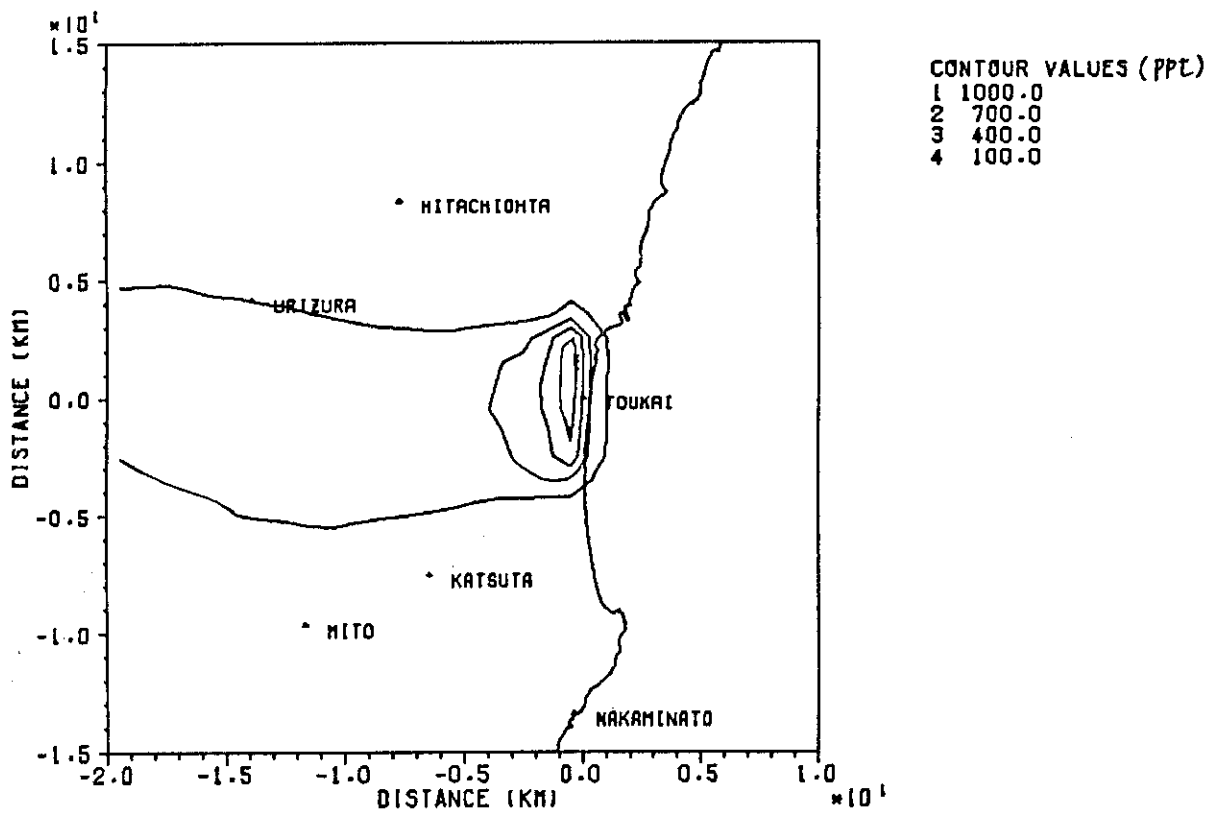


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.10 Simulated results of Run 2 of '81's experiment (1).

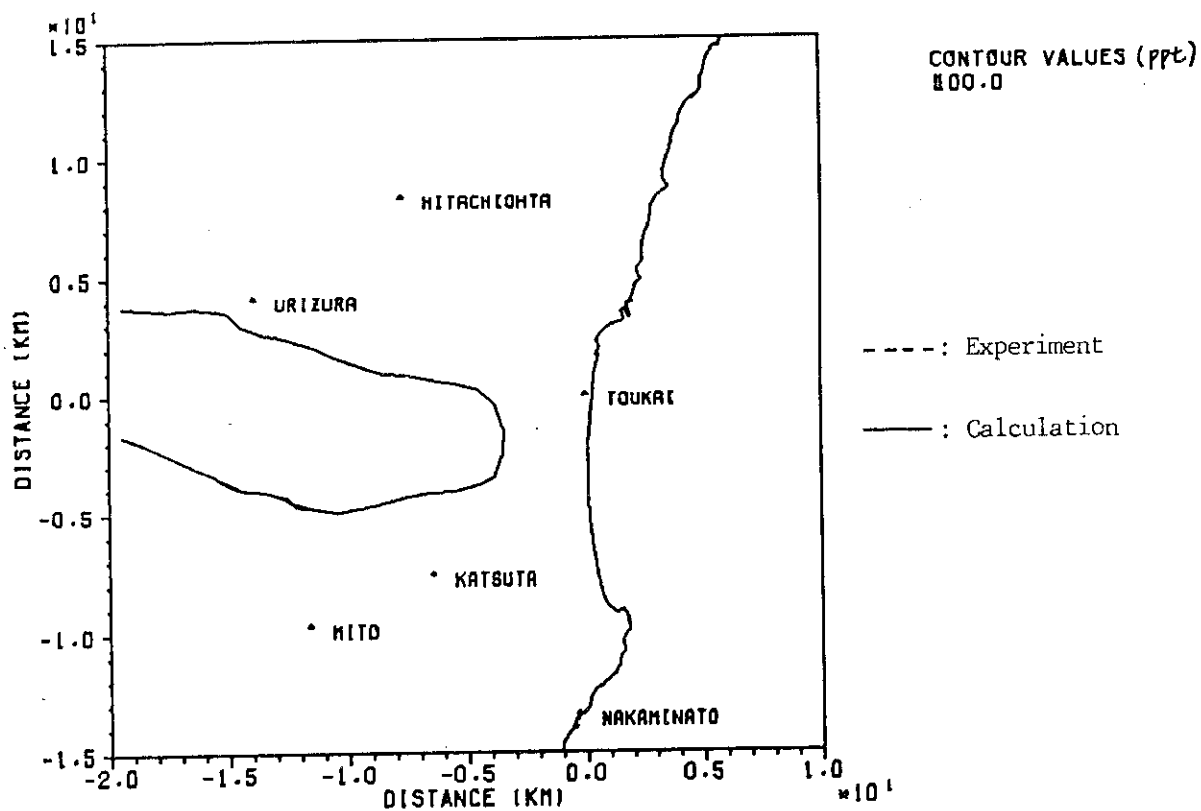


(c) Comparison of the ground level concentration.

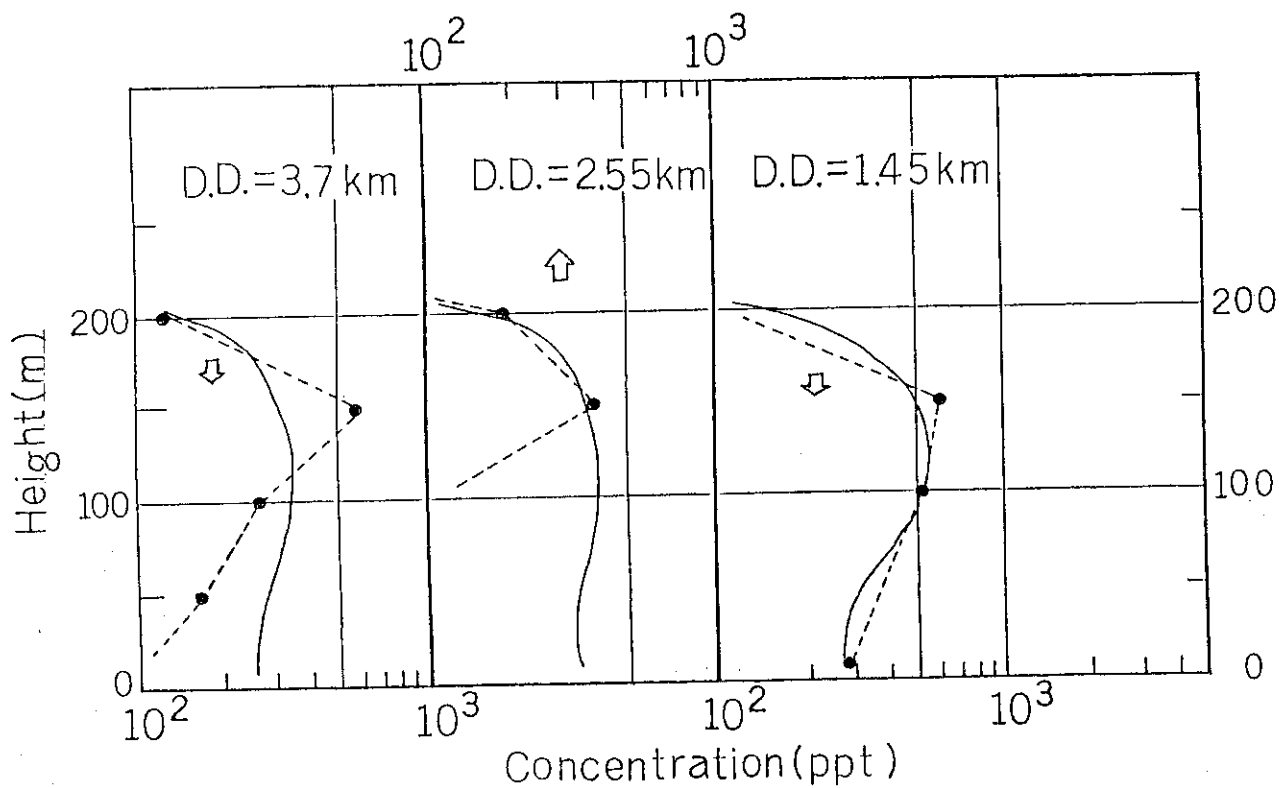


(d) Calculated concentration distribution at the release height.

Fig.10 Simulated results of Run 2 of '81's experiment (2).

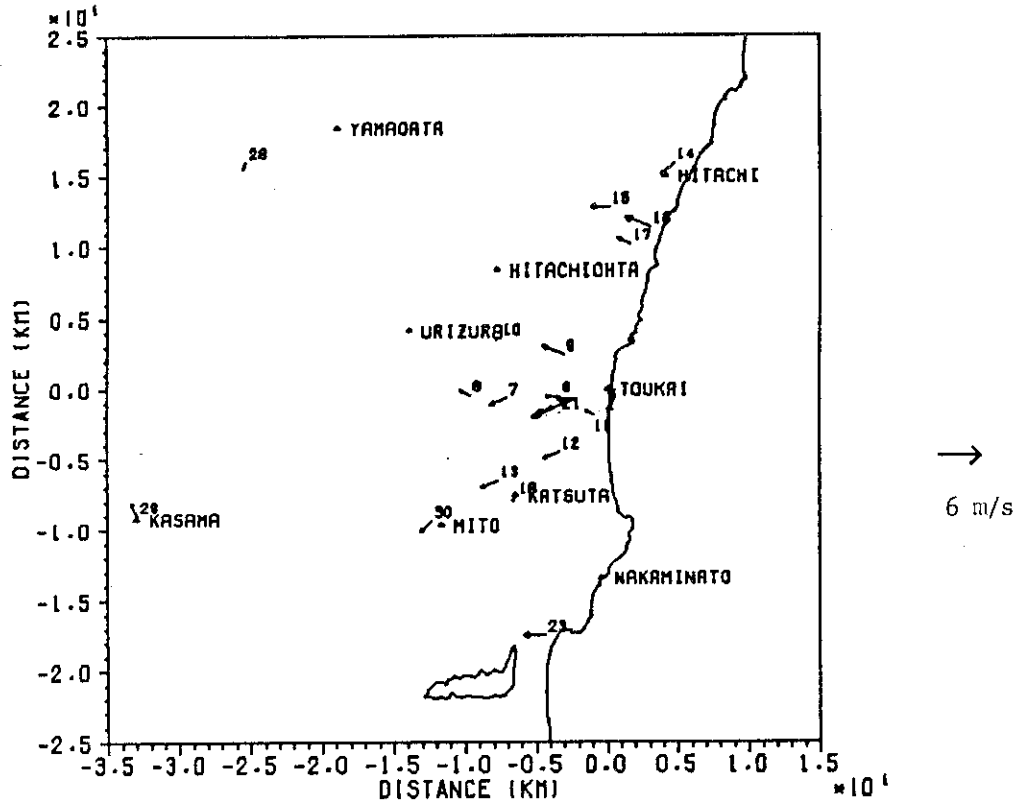


(e) Calculated concentration distribution at 250 m height.

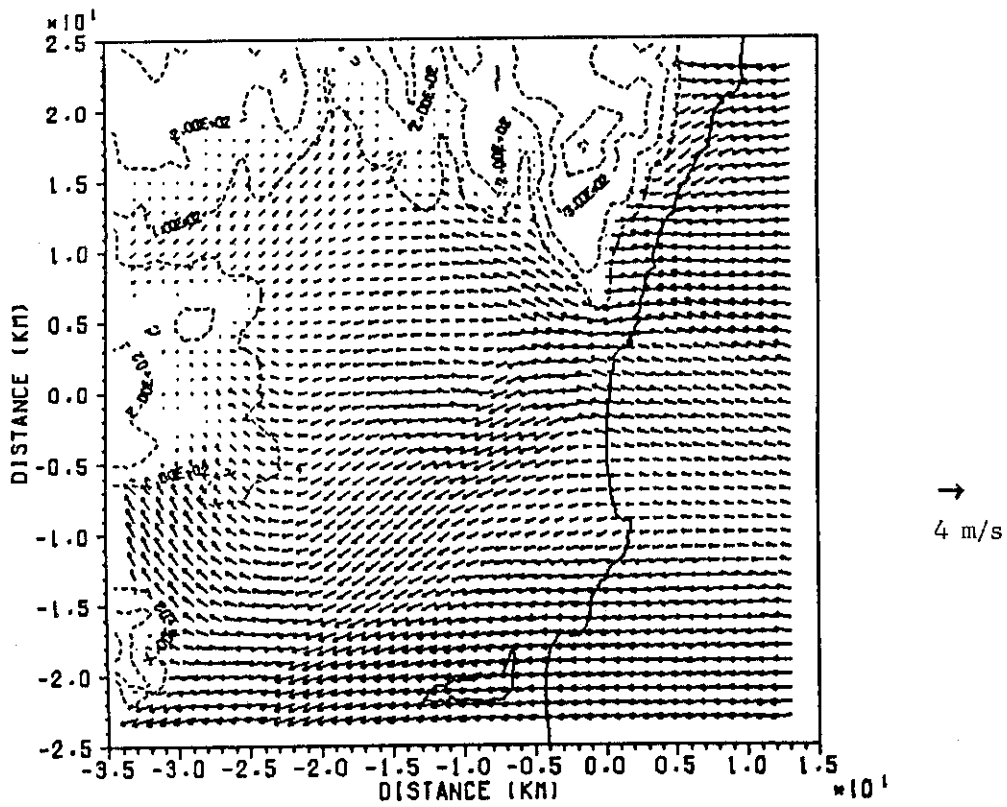


(f) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.10 Simulated results of Run 2 of 81's experiment (3).

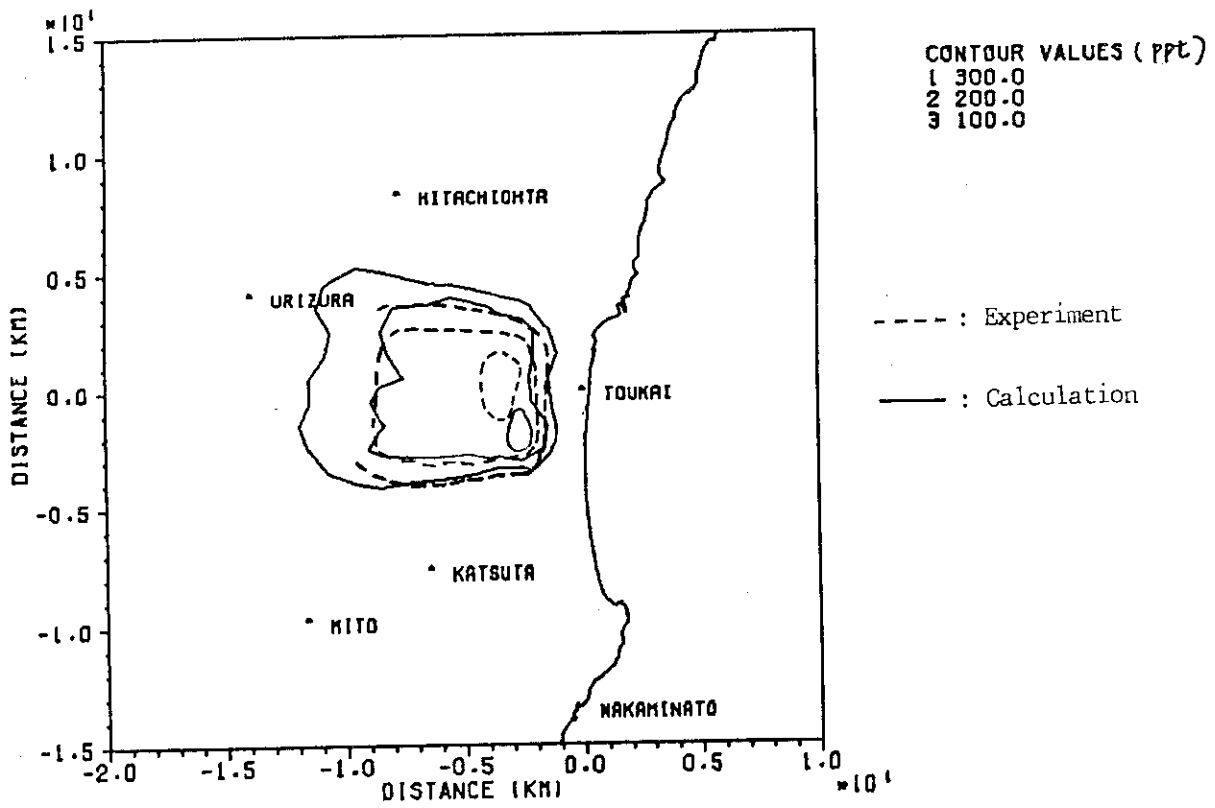


(a) Observed wind data when the release start.

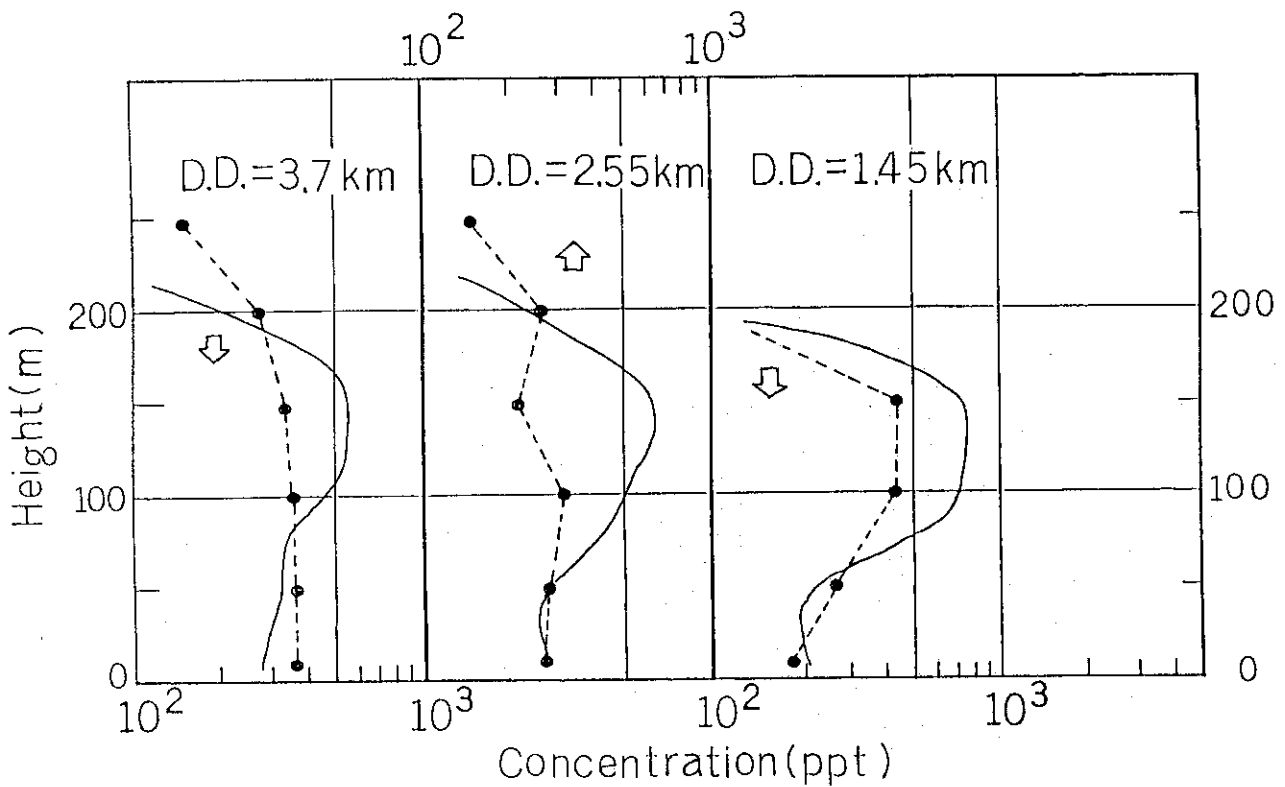


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.11 Simulated results of Run 4 of '81's experiment (1).

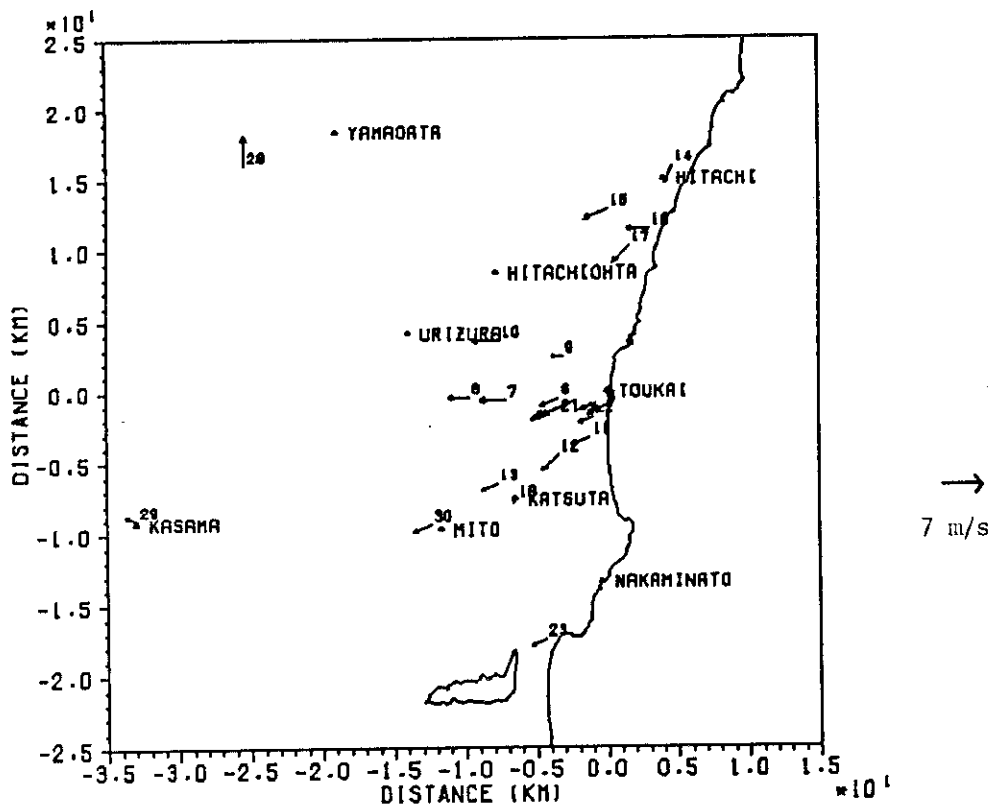


(c) Comparison of the ground level concentration.

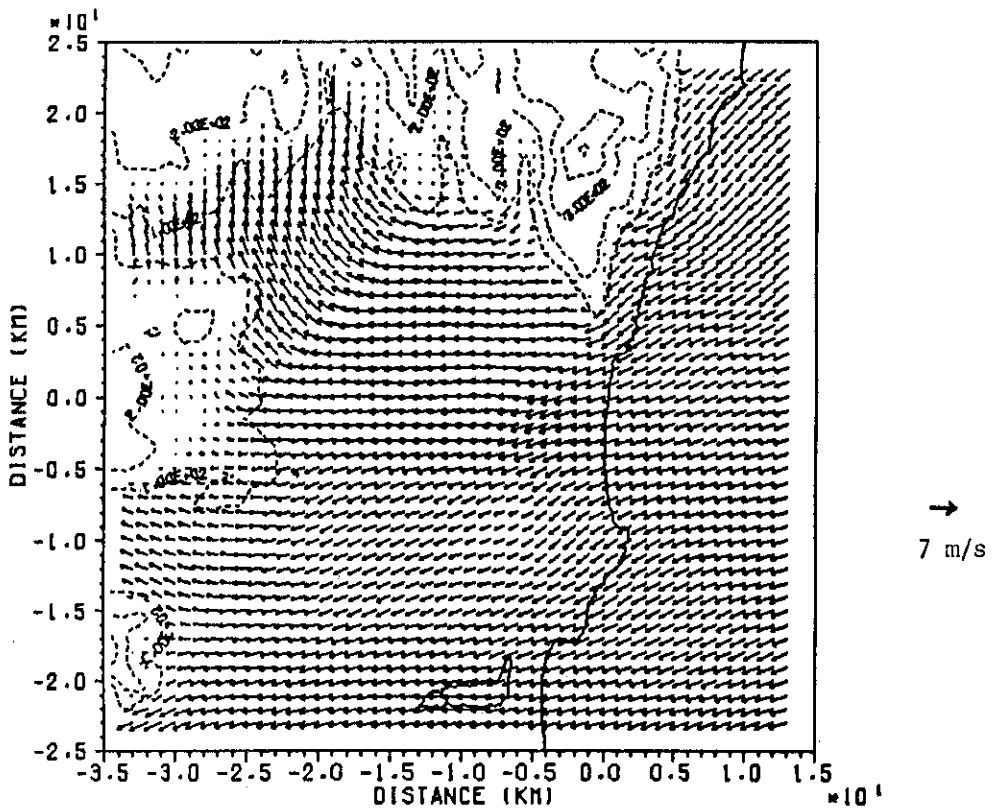


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.11 Simulated results of Run 4 of '81's experiment (2).

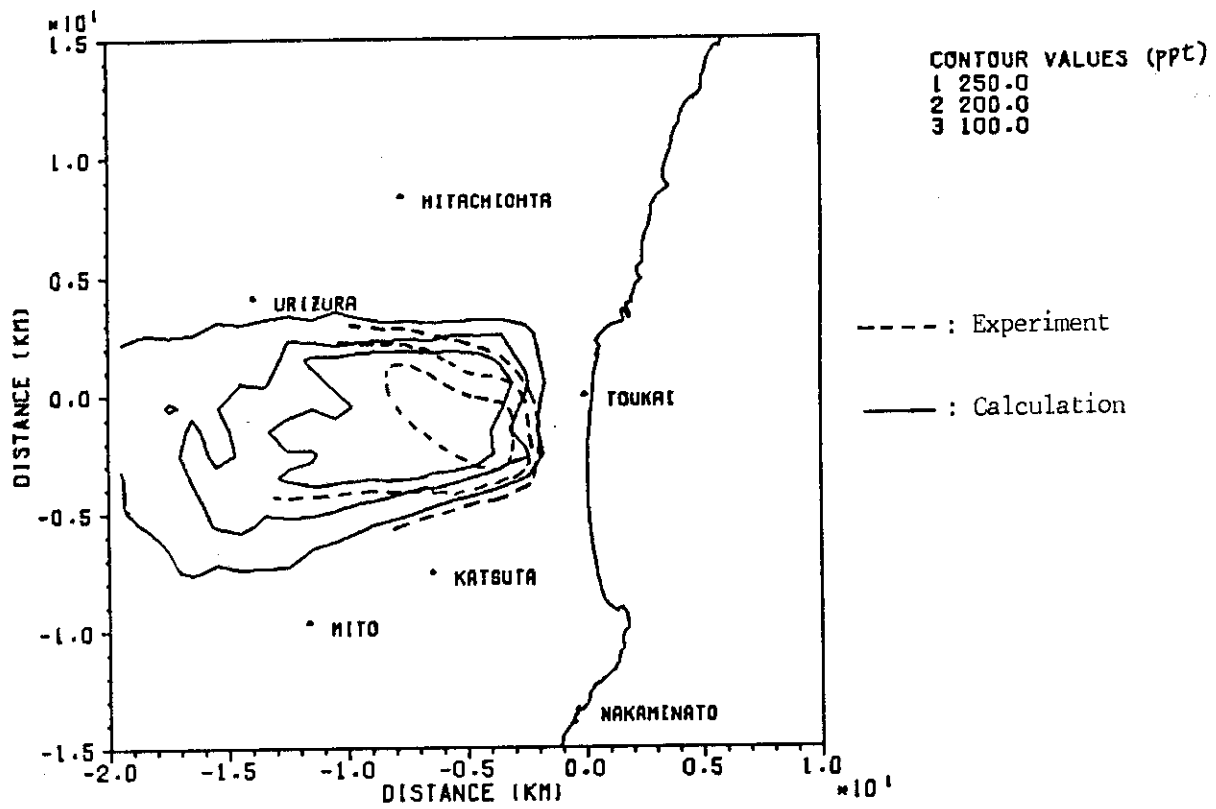


(a) Observed wind data when the release start.

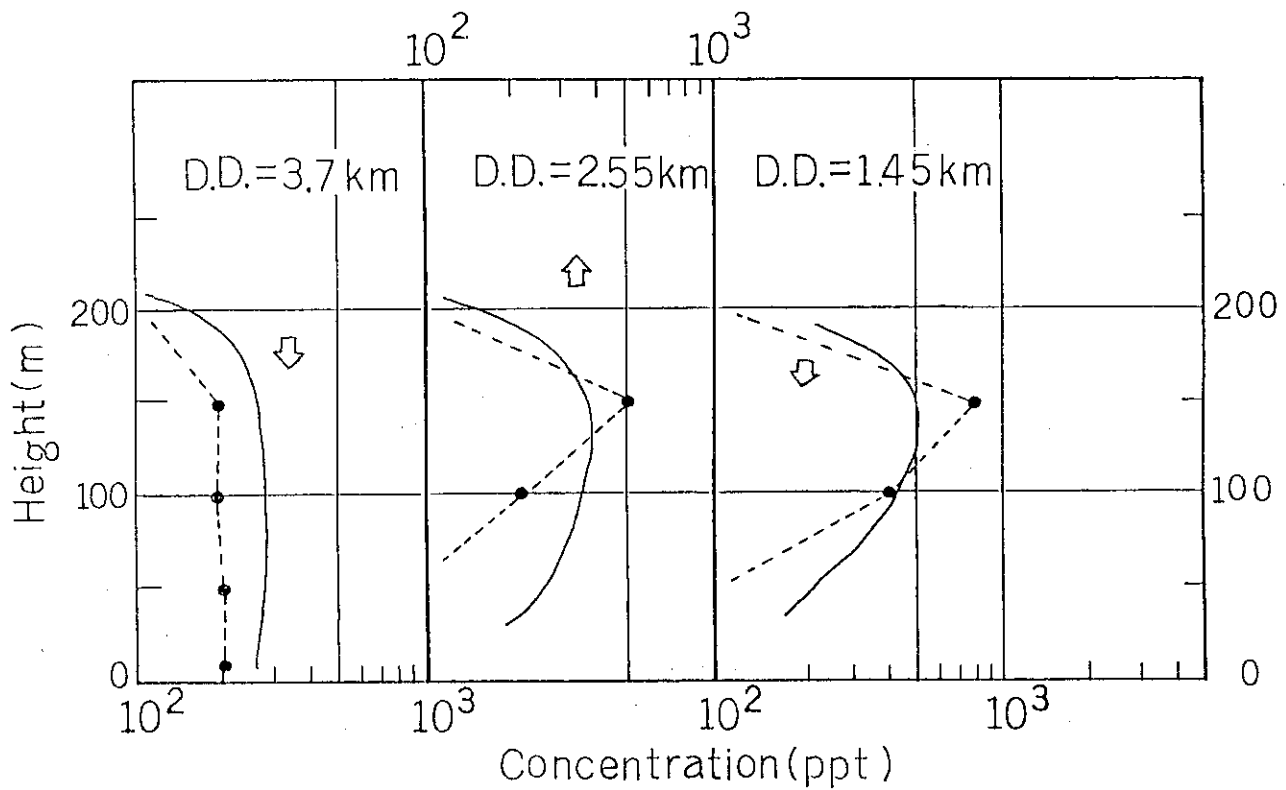


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.12 Simulated results of Run 5 of '81's experiment (1).

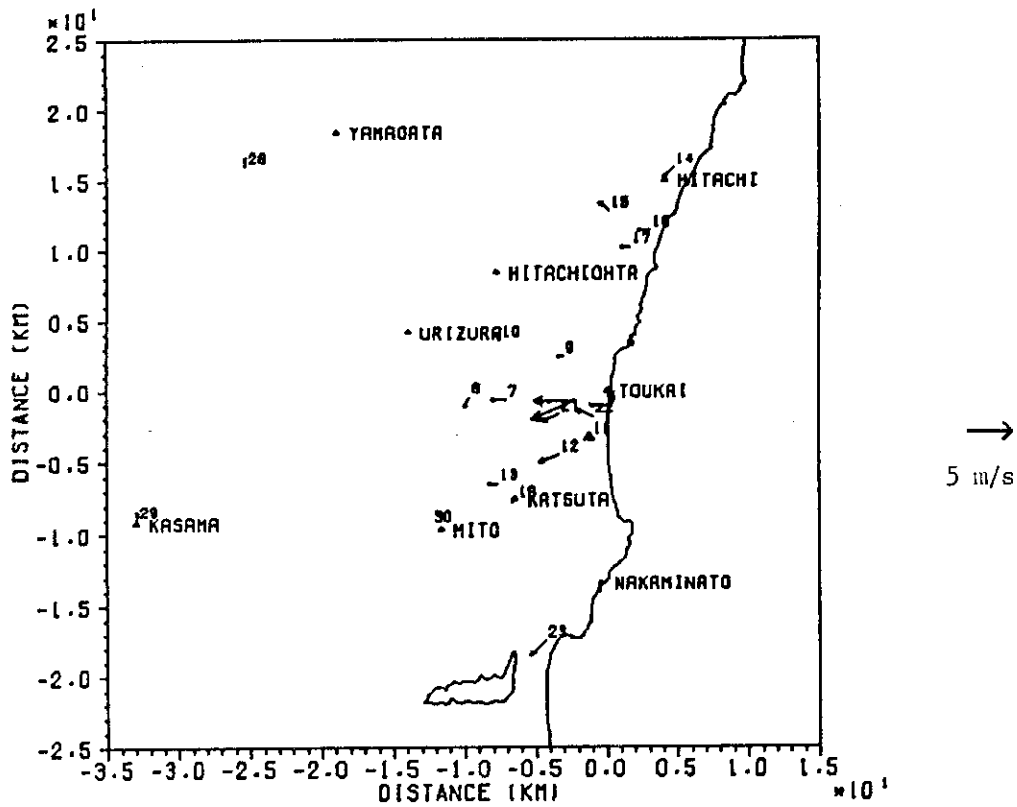


(c) Comparison of the ground level concentration.

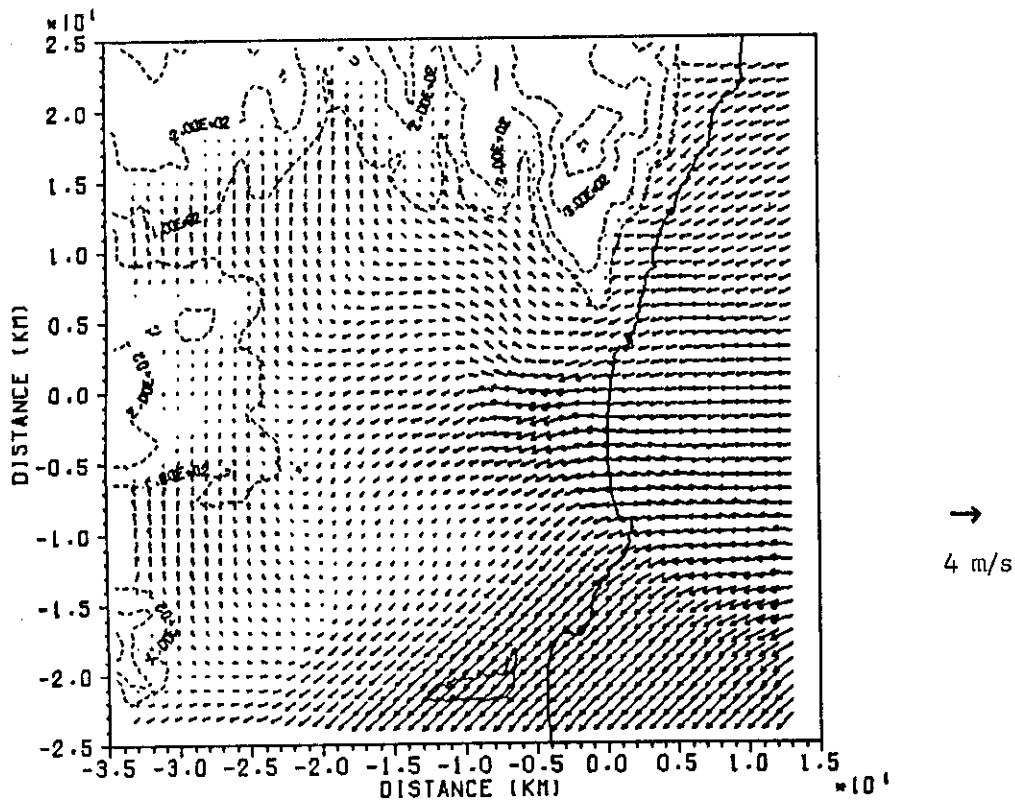


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.12 Simulated results of Run 5 of '81's experiment (2).

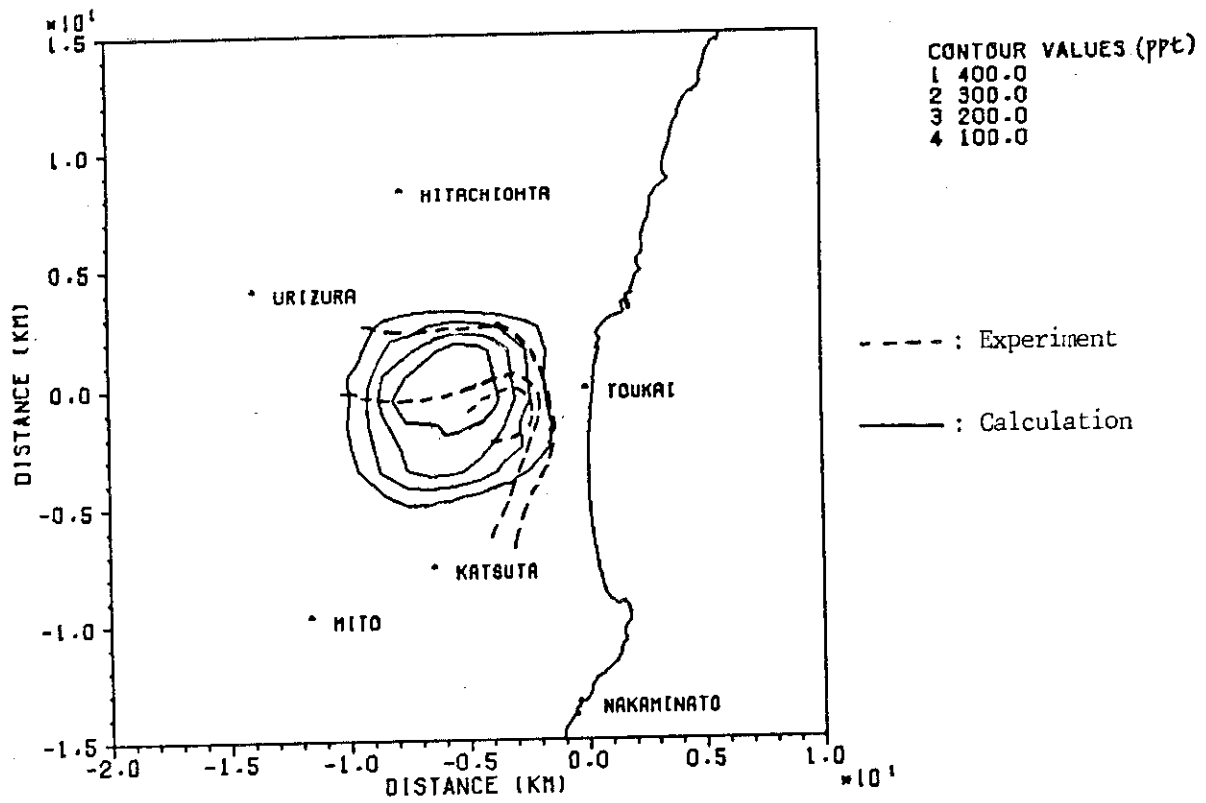


(a) Observed wind data when the release start.

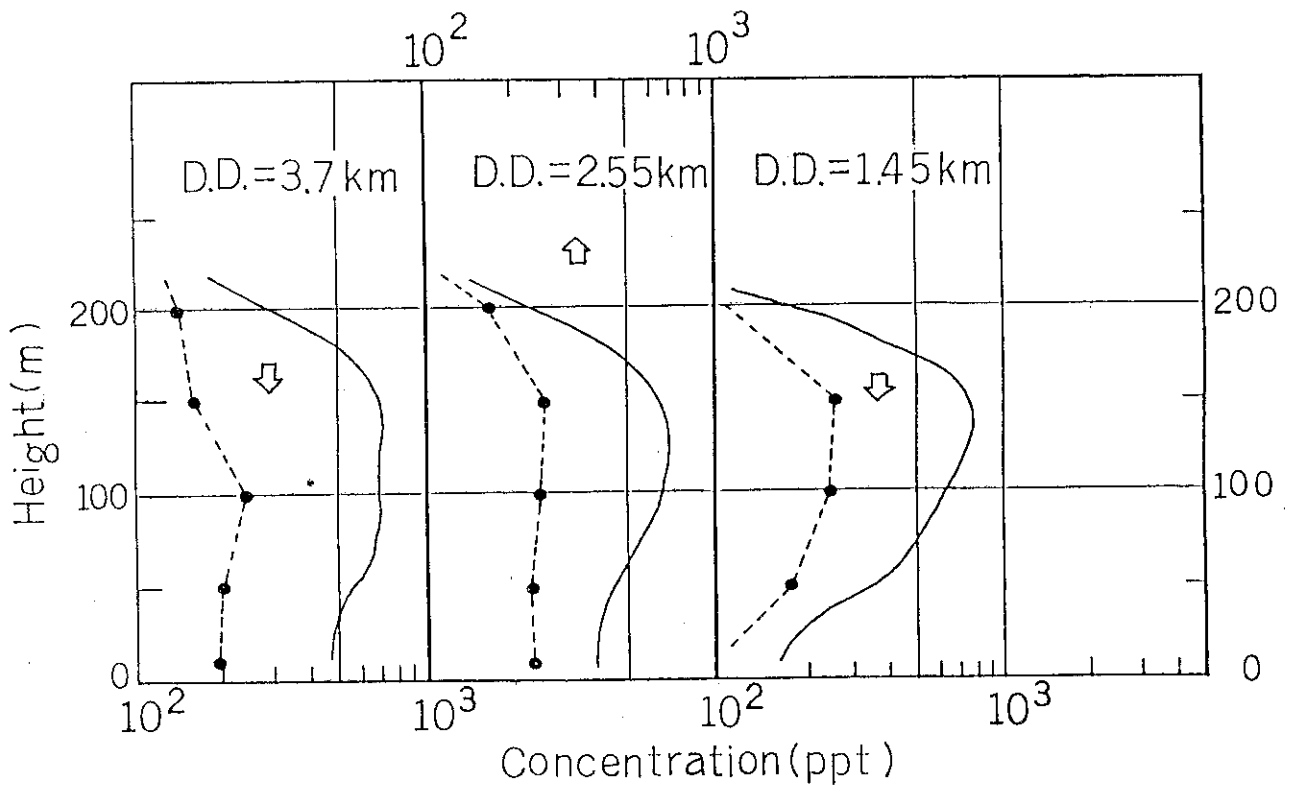


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.13 Simulated results of Run 7 of '81's experiment (1).

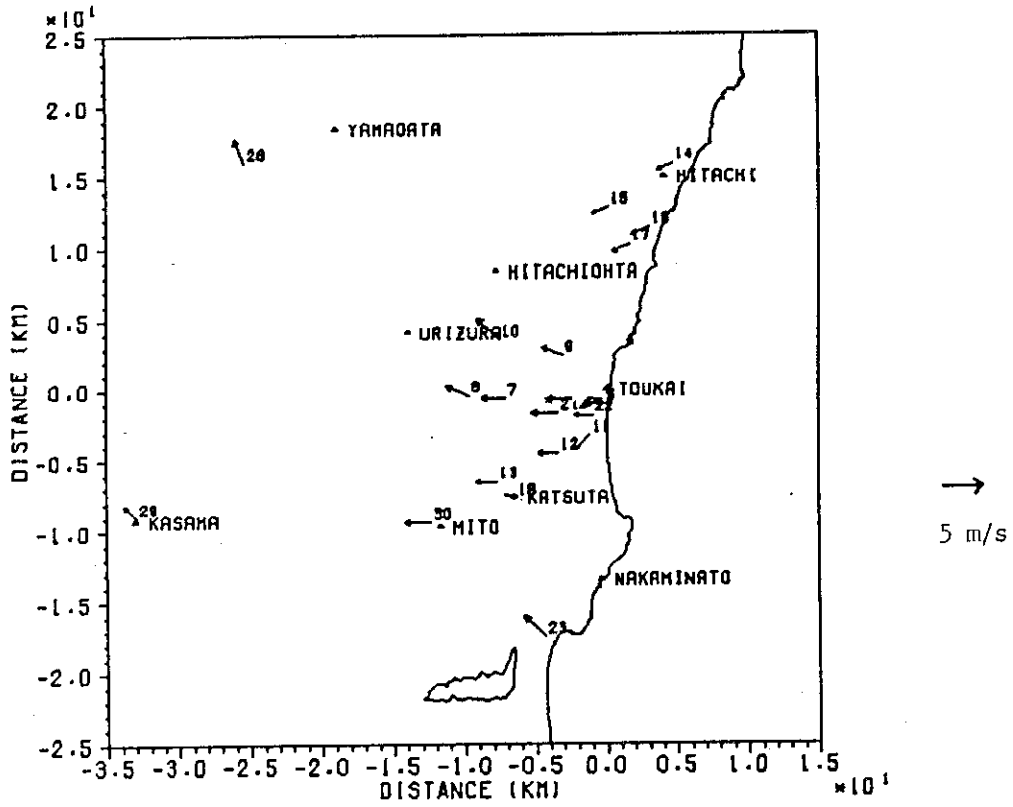


(c) Comparison of the ground level concentration.

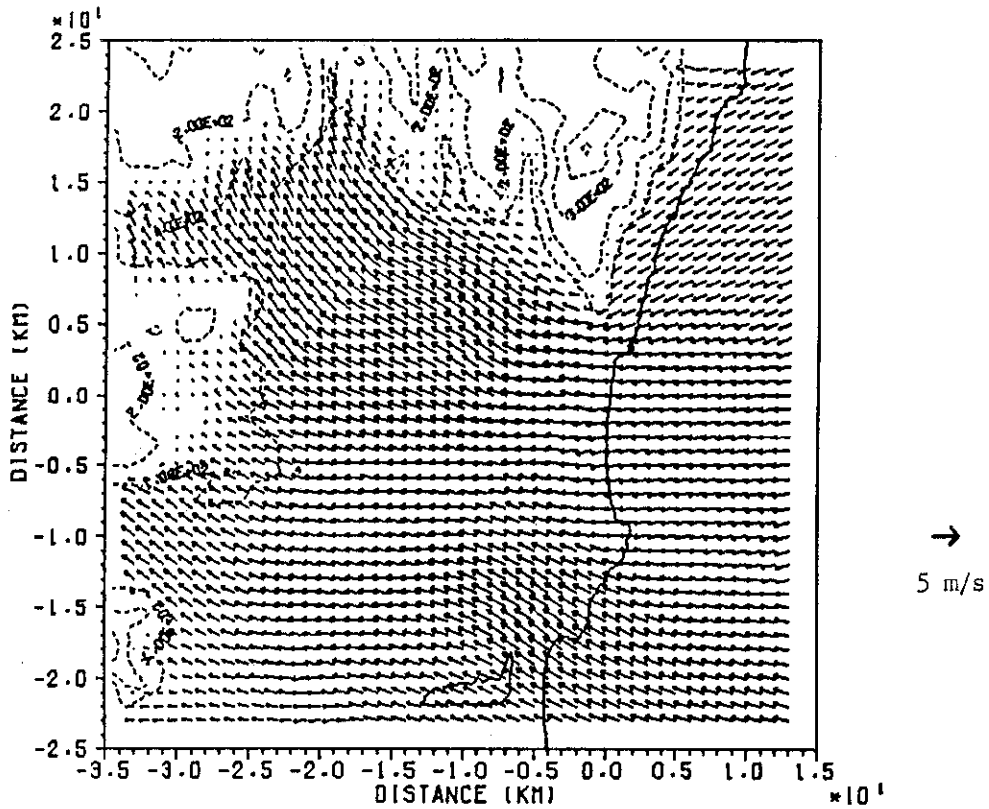


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.13 Simulated results of Run 7 of '81's experiment (2).

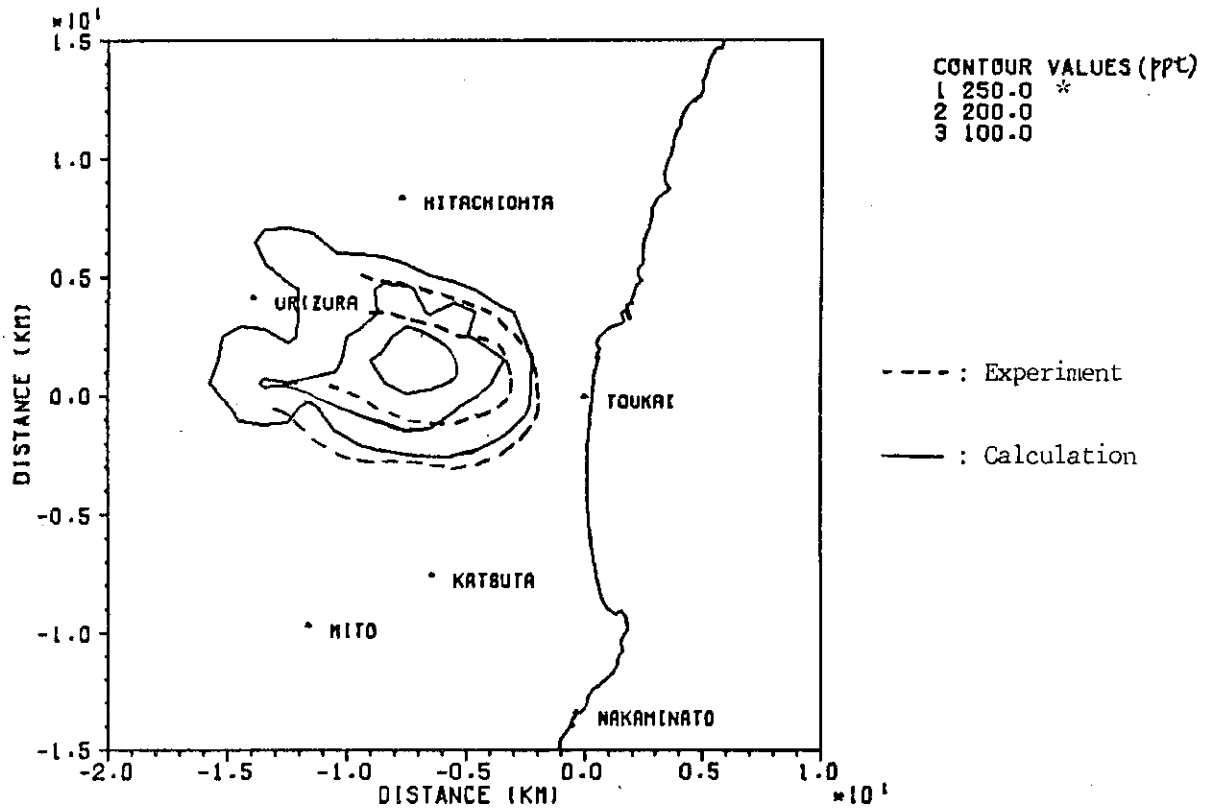


(a) Observed wind data at the release start.

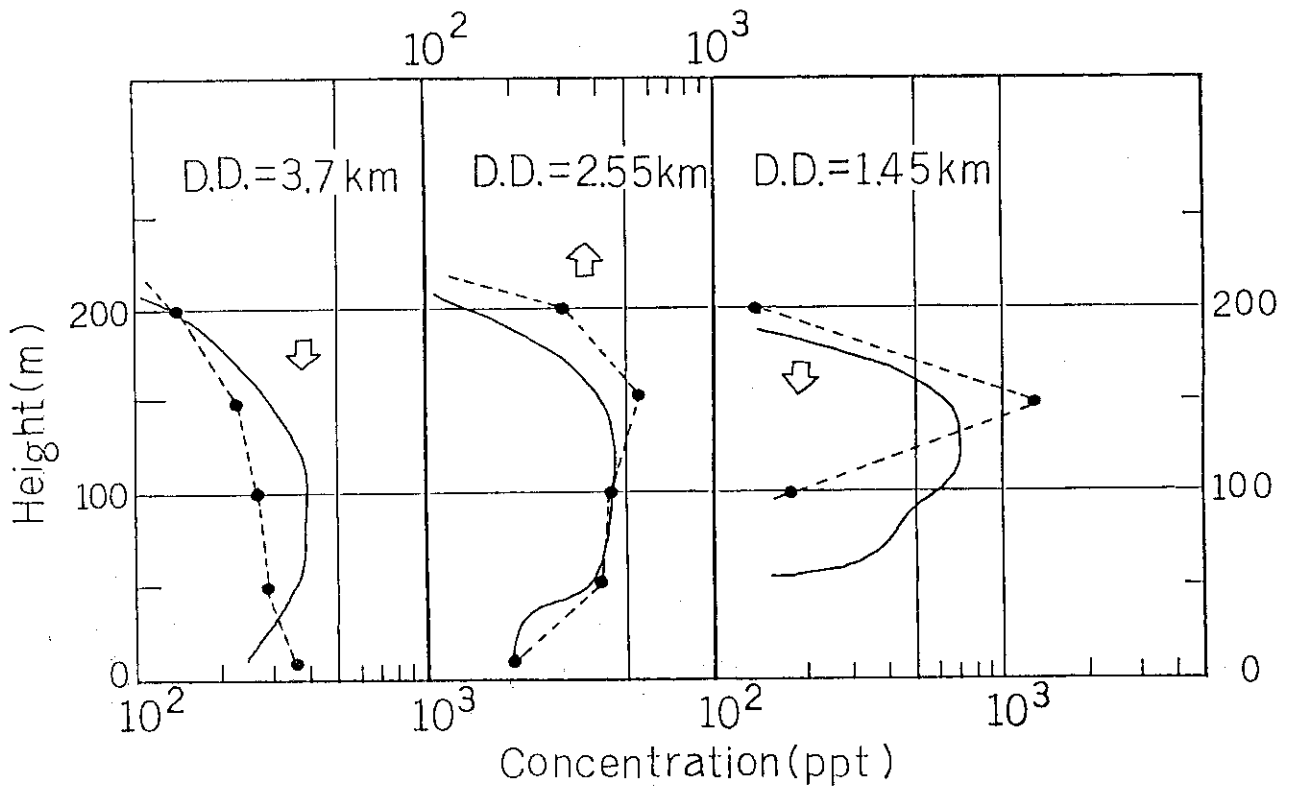


(b) Calculated wind field of run 8 at the release height.

Fig.14 Simulated results of Run 8 of '81's experiment (1).

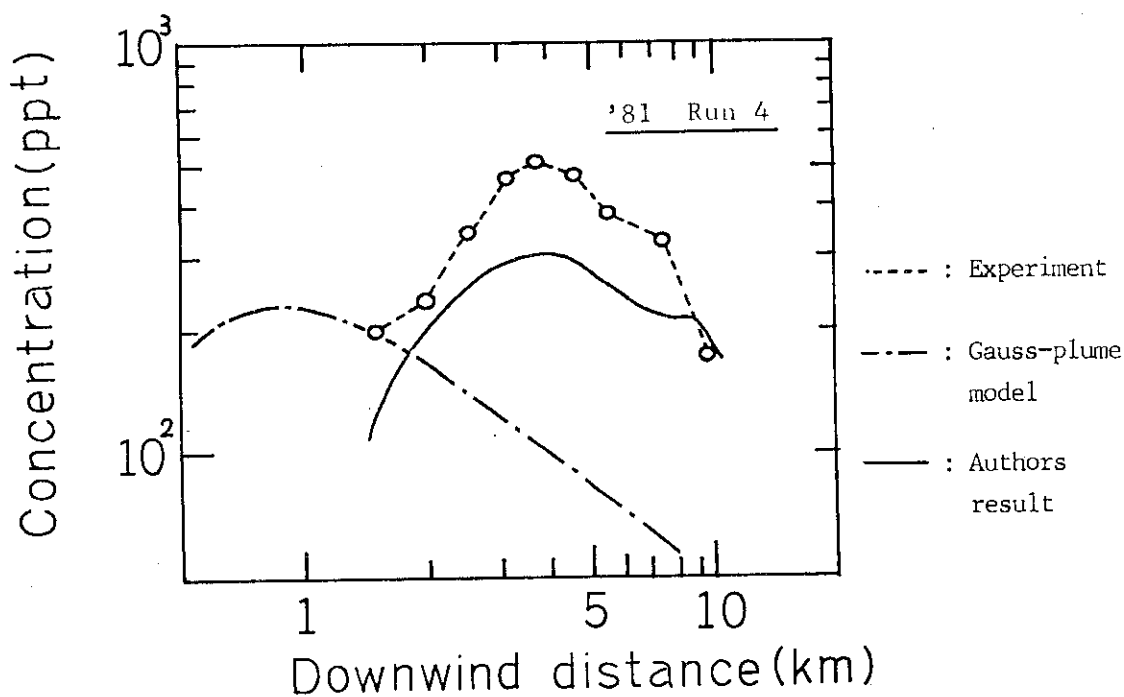


(c) Comparison of the ground level concentration.

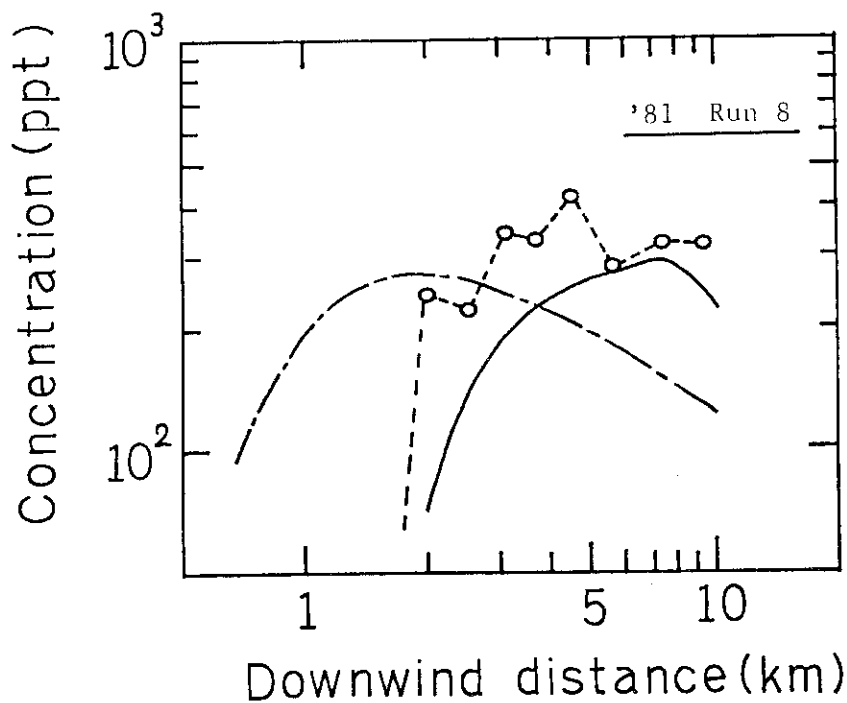


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.14 Simulated results of Run 8 of '81's experiment (2).

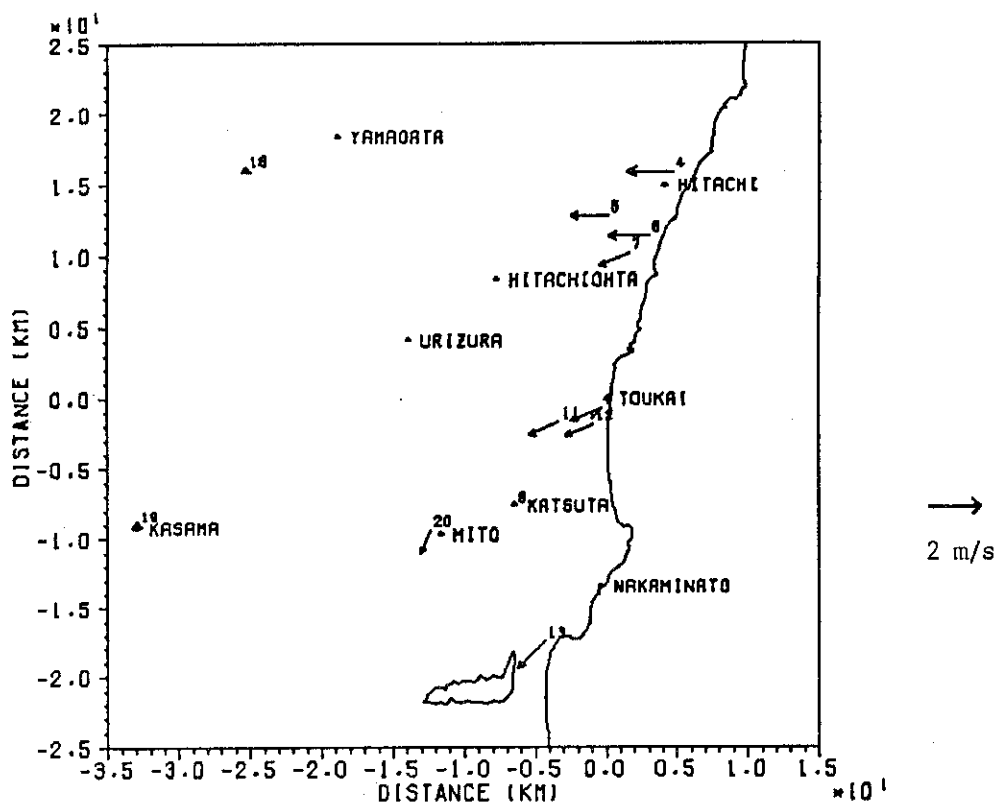


(a) Run 4 of '81's experiment.

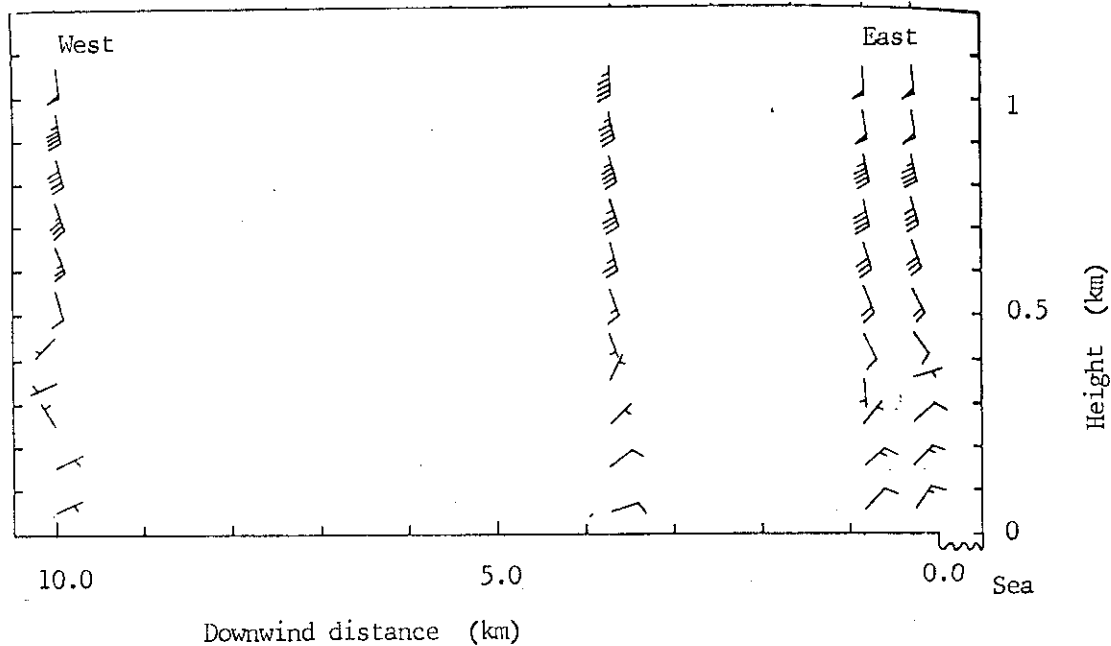


(b) Run 8 of '81's experiment.

Fig.15 Comparison of downwind concentration distribution by calculation with observed data at the ground level.

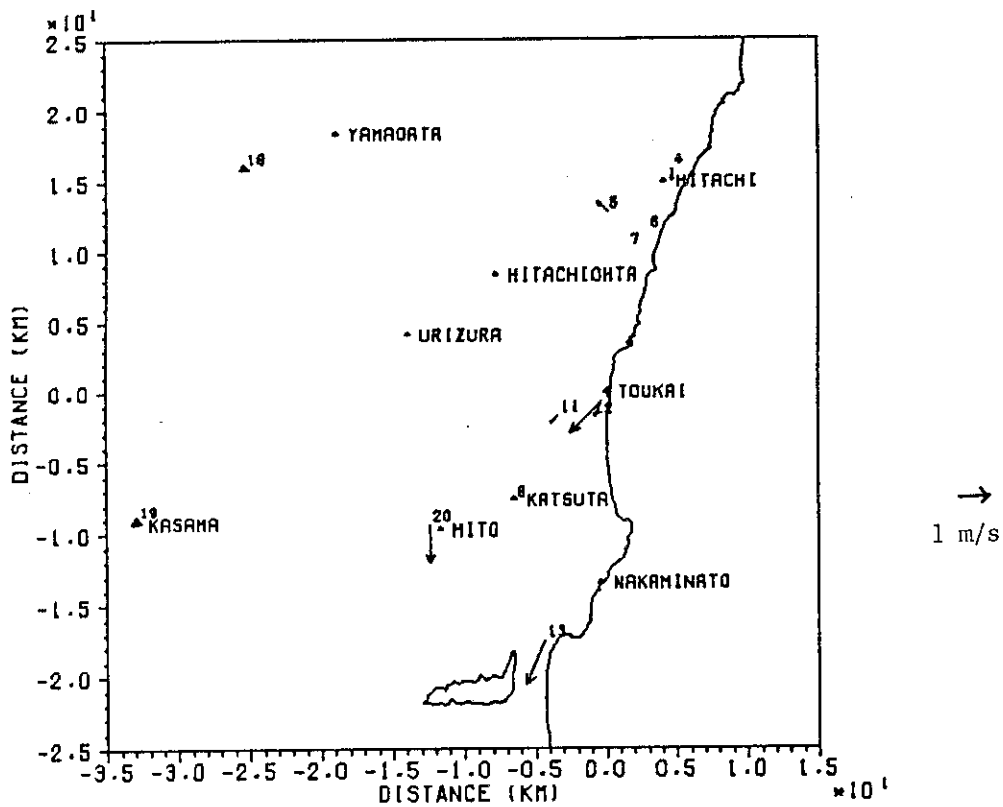


(a) Observed ground level wind data when the release start.

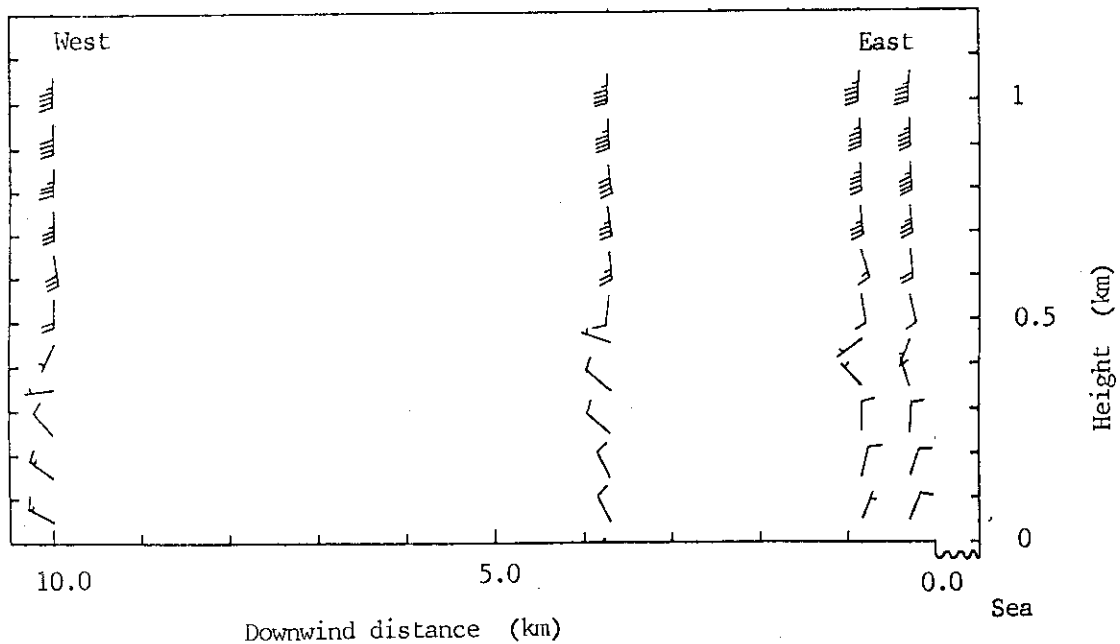


(b) Observed vertical wind profile when the release start.

Fig.16 Simulated results of Run 3 of '80's experiment (1).

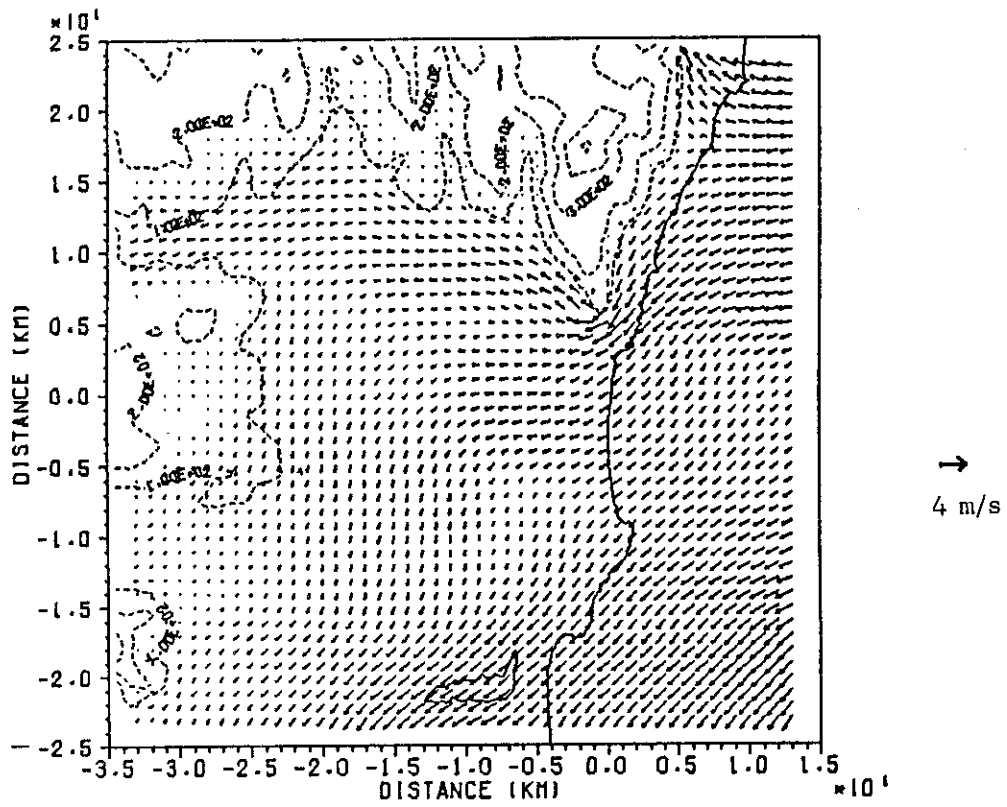


(c) Observed ground level wind data after 1 hour from the release.

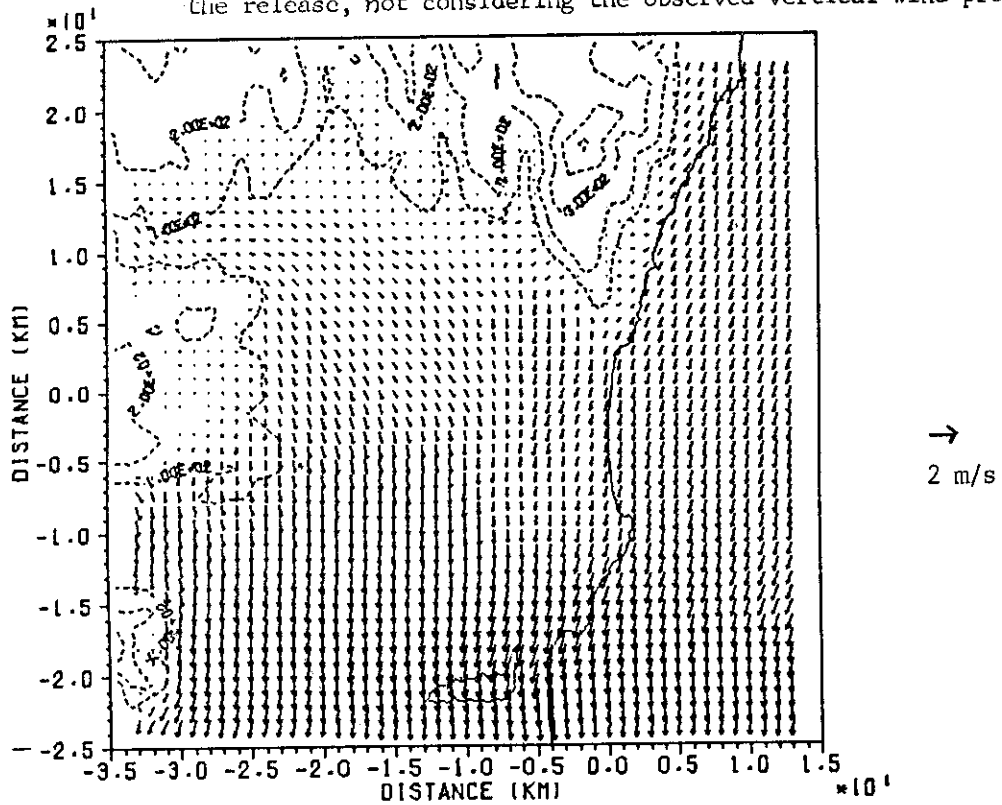


(d) Observed vertical wind profile after 1 hour from the release.

Fig.16 Simulated results of Run 3 of '80's experiment (2).

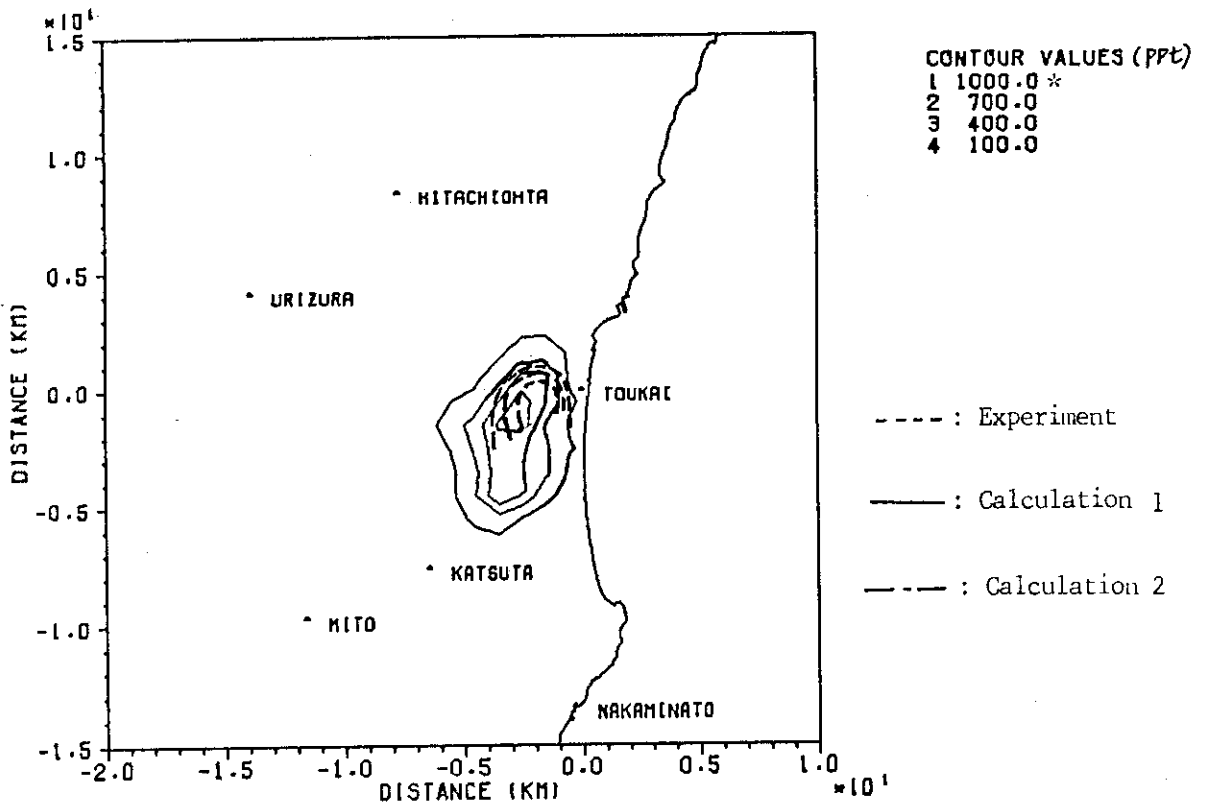


(e) Calculated wind field at the release height after 1 hour from the release, not considering the observed vertical wind profile.

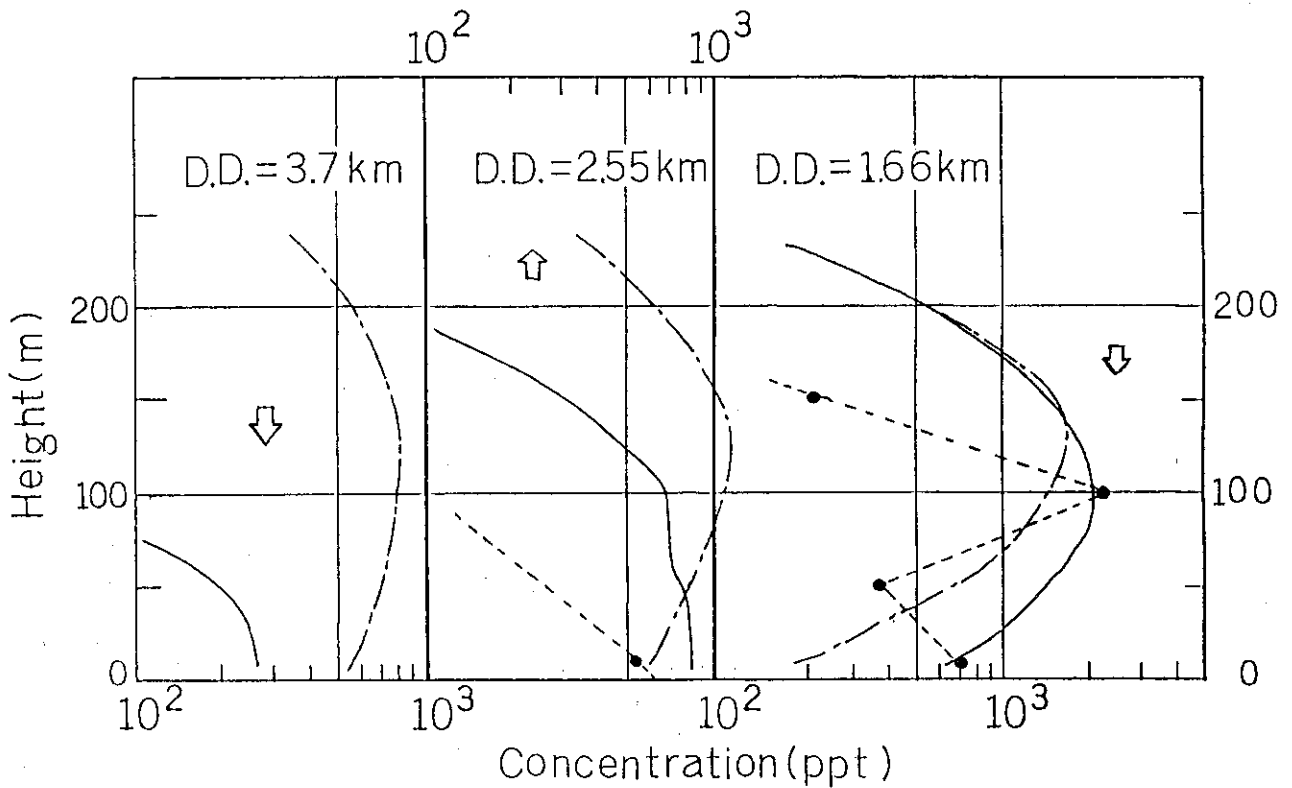


(f) Calculated wind field at the release height after 1 hour from the release, considering the observed vertical wind profile.

Fig.16 Simulated results of Run 3 of '80's experiment (3).

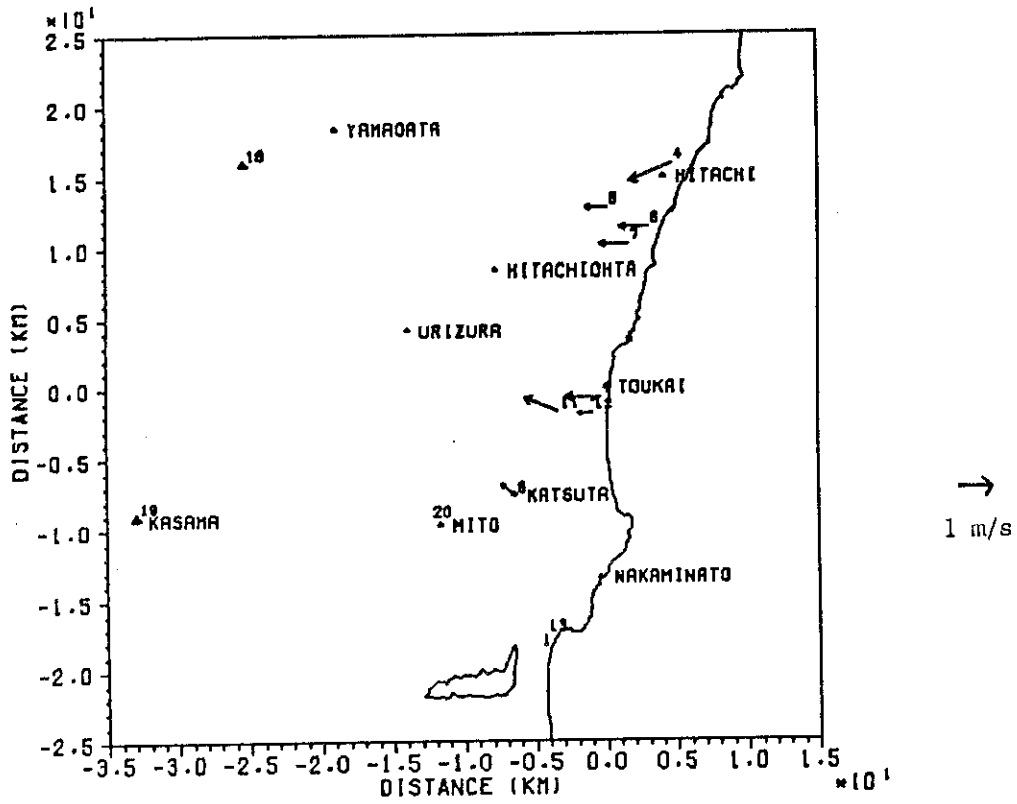


(g) Comparison of the ground-level concentration.

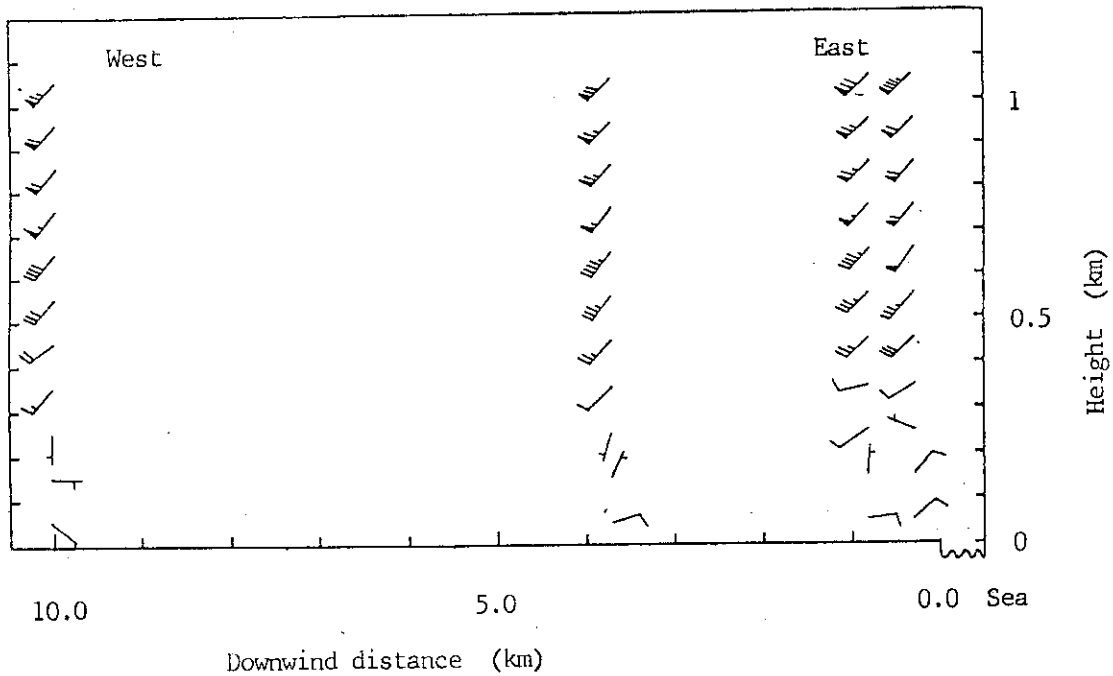


(h) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.16 Simulated results of Run 3 of '80's experiment (4).

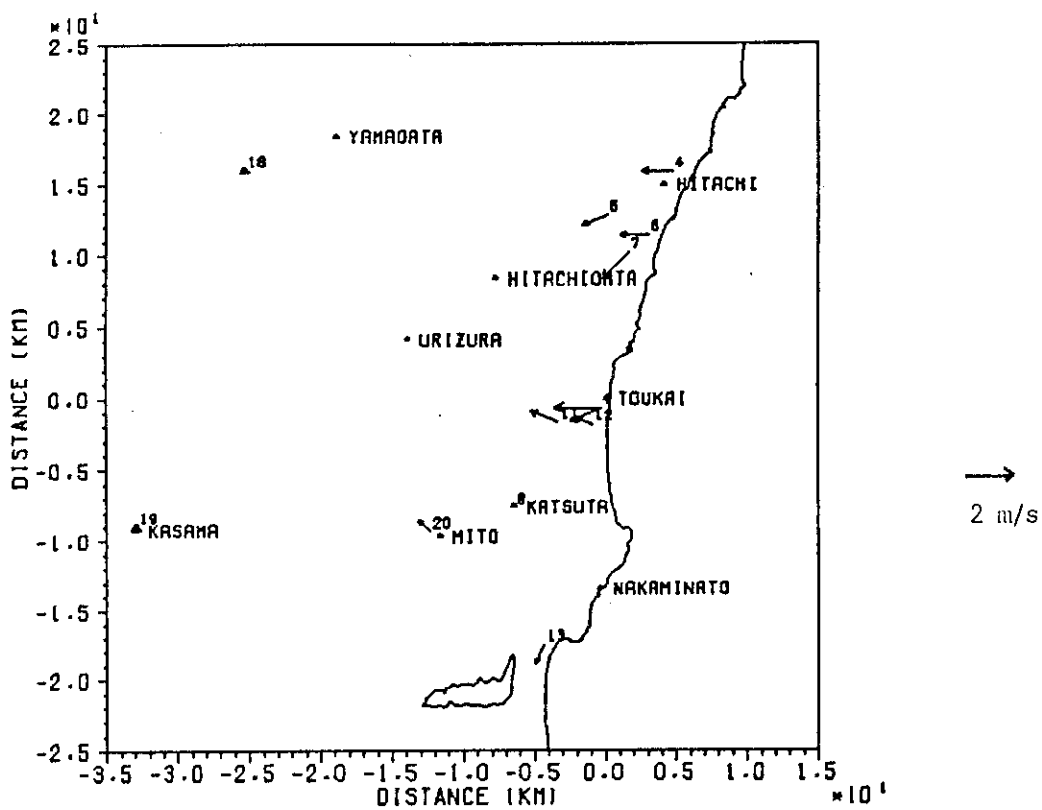


(a) Observed ground level wind data when the release start.

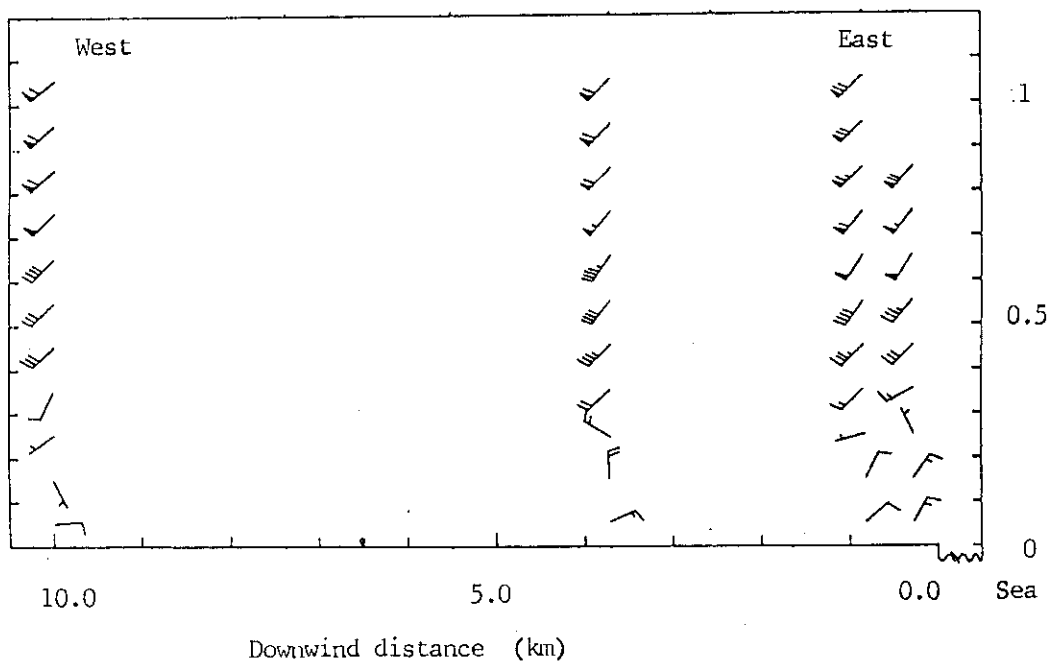


(b) Observed vertical wind profile when the release start.

Fig.17 Simulated results of Run 7 of '80's experiment (1).

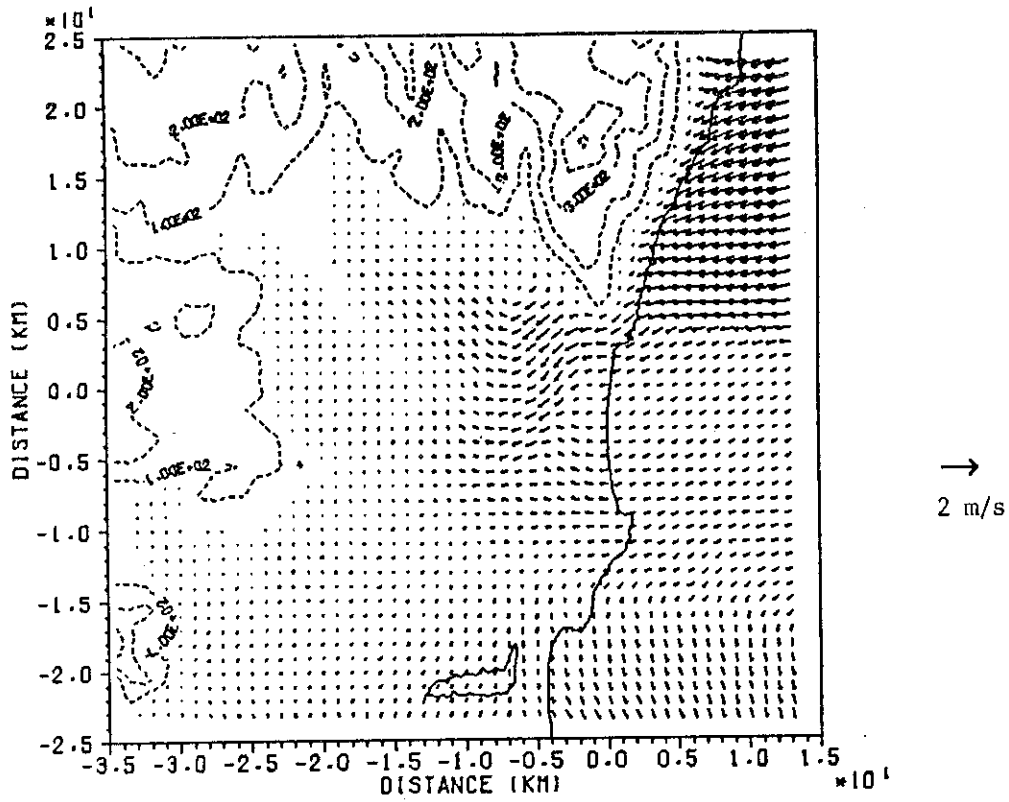


(c) Observed ground level wind data after 1 hour from the release.

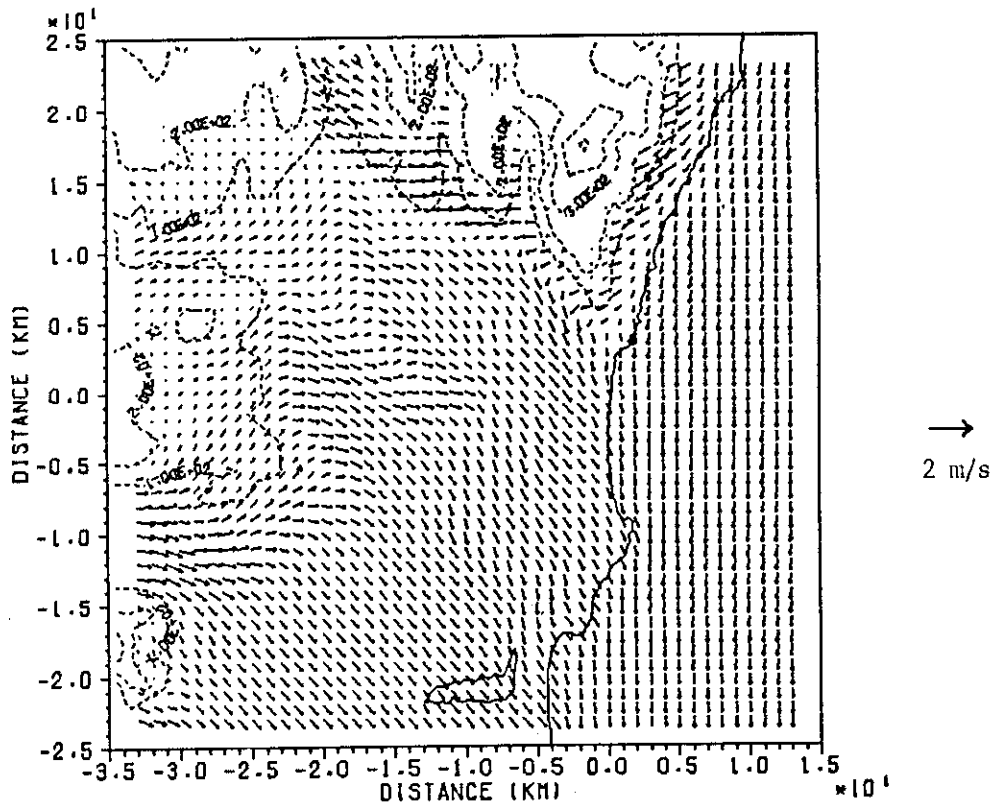


(d) Observed vertical wind profile after 1 hour from the release.

Fig.17 Simulated results of Run 7 of '80's experiment (2).

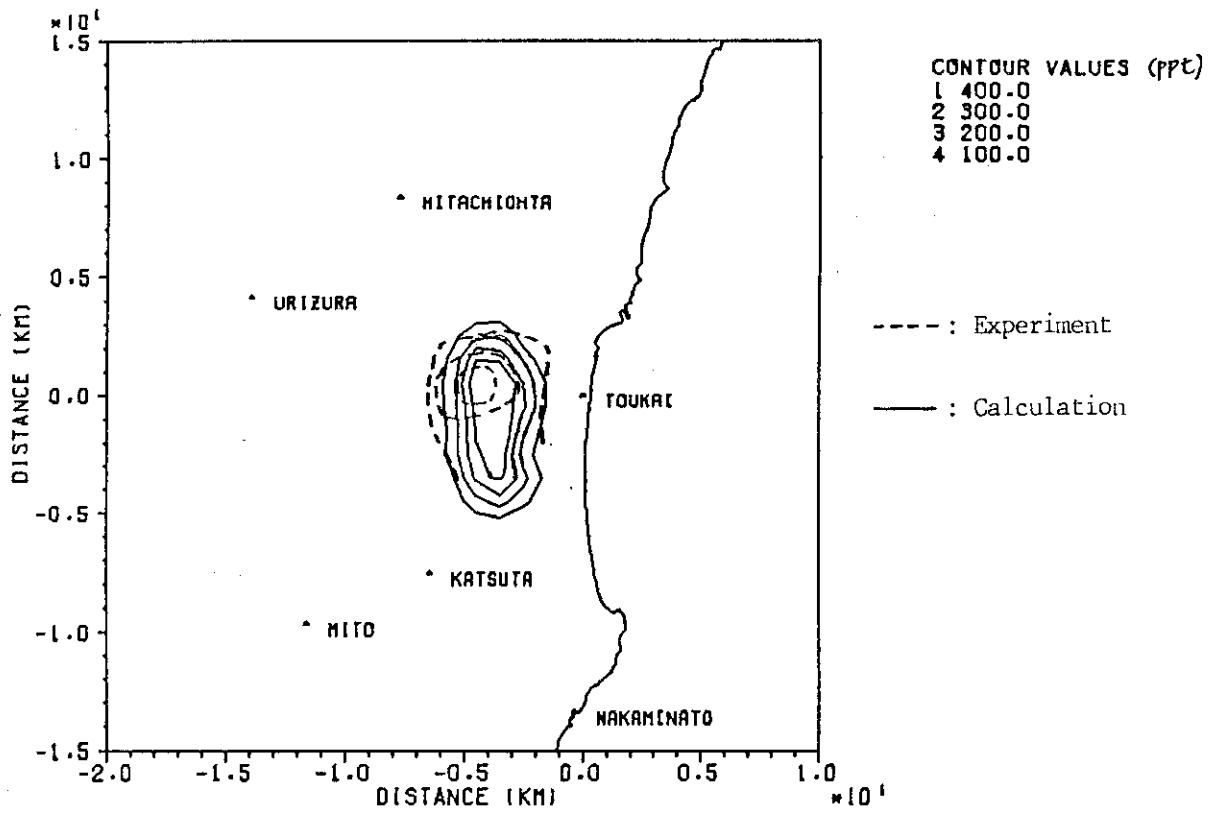


(e) Calculated wind field at 50 m height from sea level when the release start, considering the observed vertical profile.

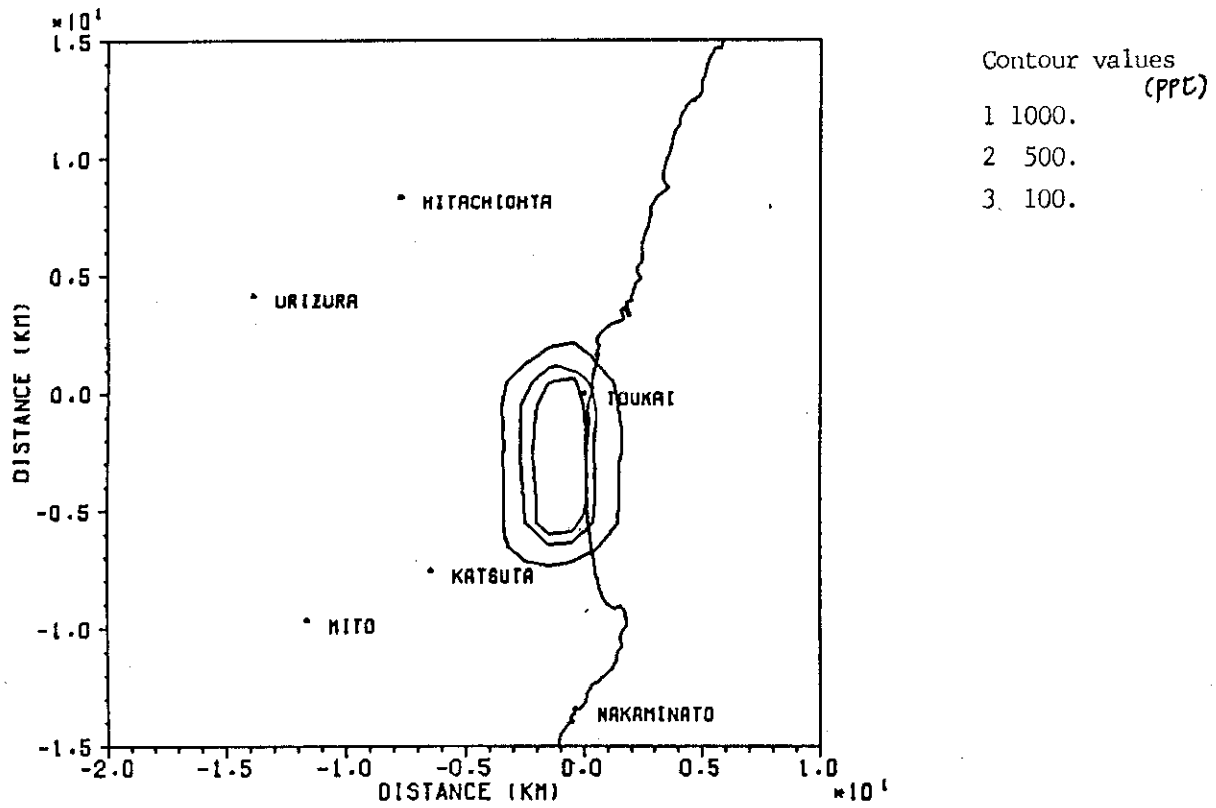


(f) Calculated wind field at 200 m height from sea level when the release start, considering observed vertical profile.

Fig.17 Simulated results of Run 7 of '80's experiment (3).

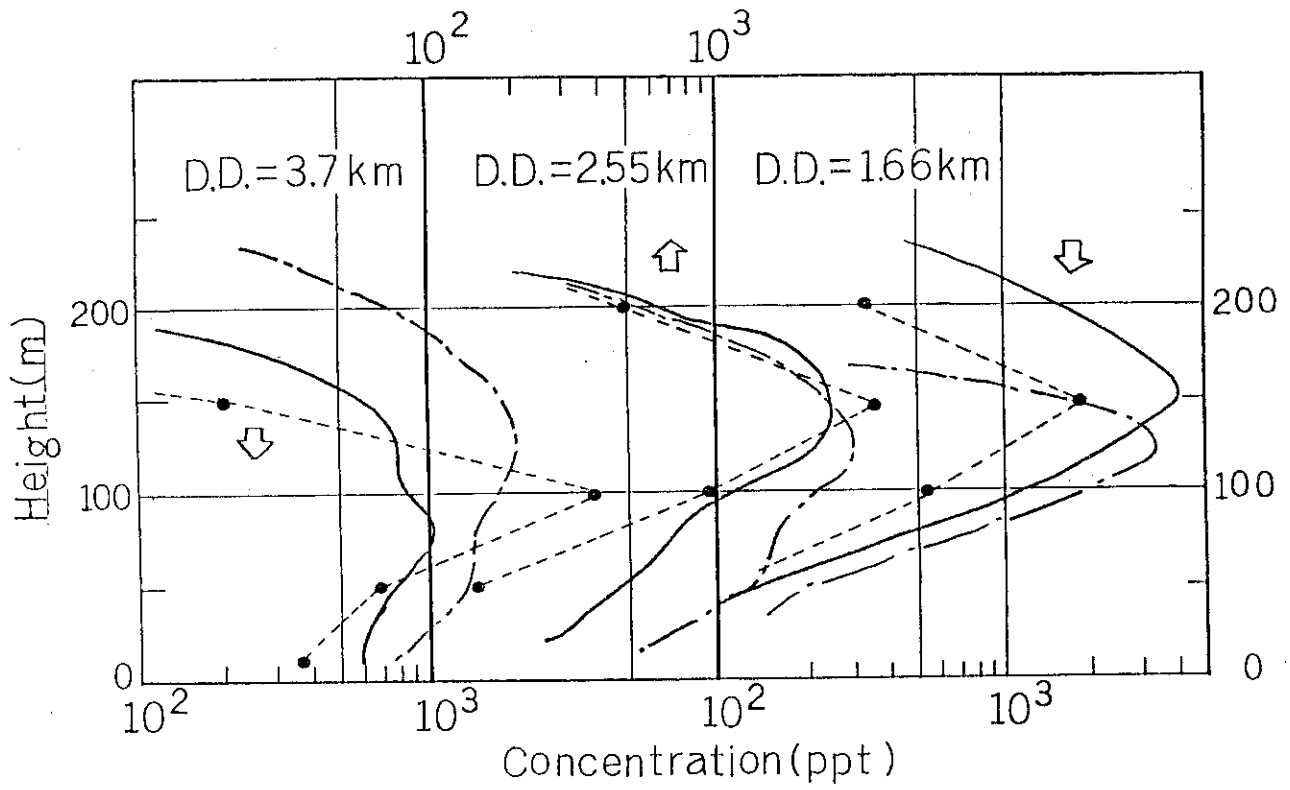


(g) Comparison of the ground level concentration.



(h) Calculated concentration distribution at 250 m height.

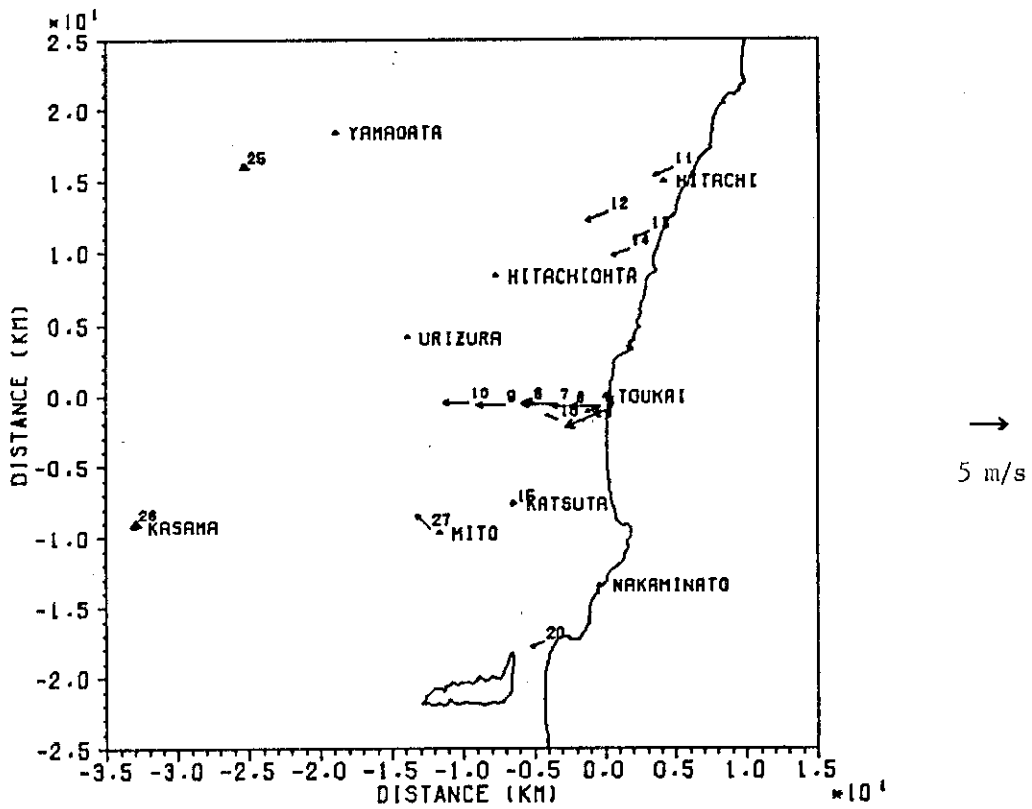
Fig.17 Simulated results of Run 7 of '80's experiment (4).



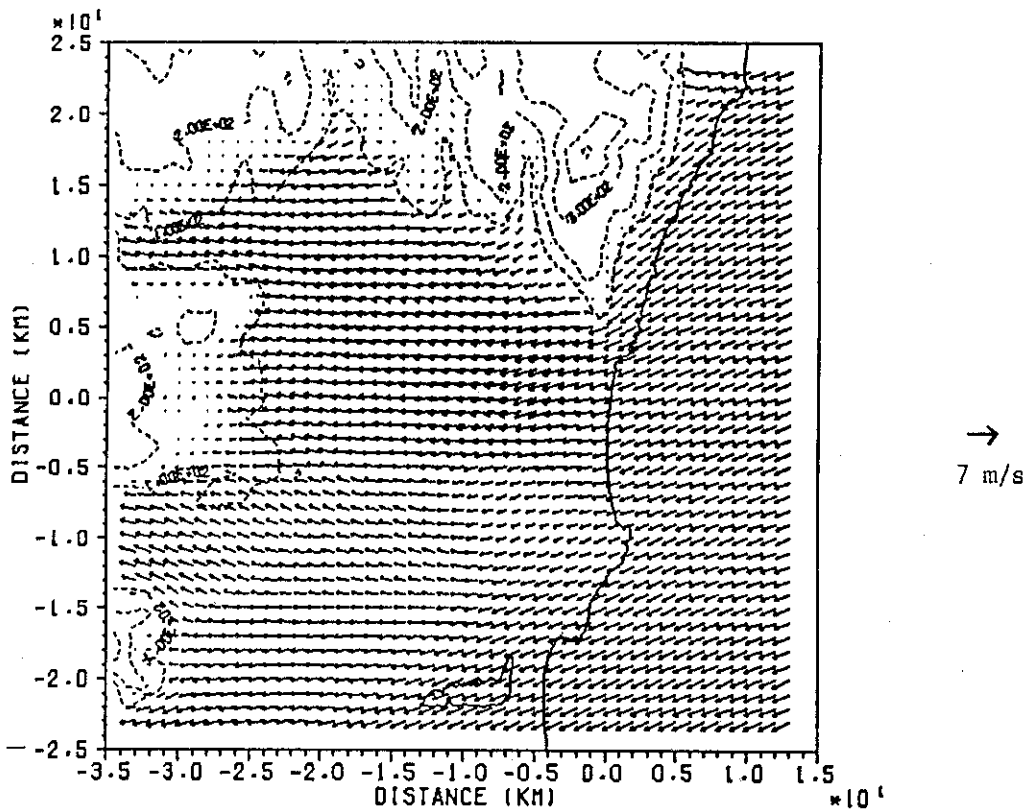
----- : Experiment, — : Calculation 1, -.-.- : Calculation 2

(i) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.17 Simulated results of Run 7 of '80's experiment, (5).

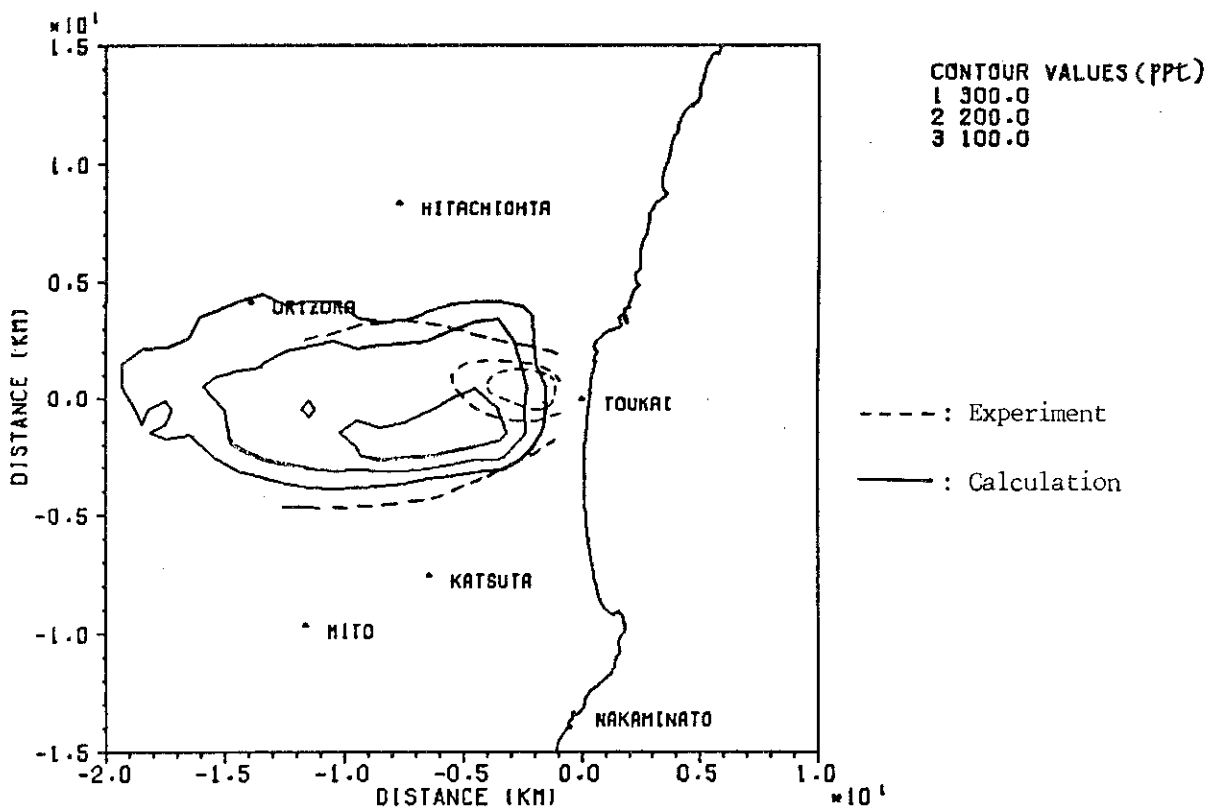


(a) Observed wind data when the release start.

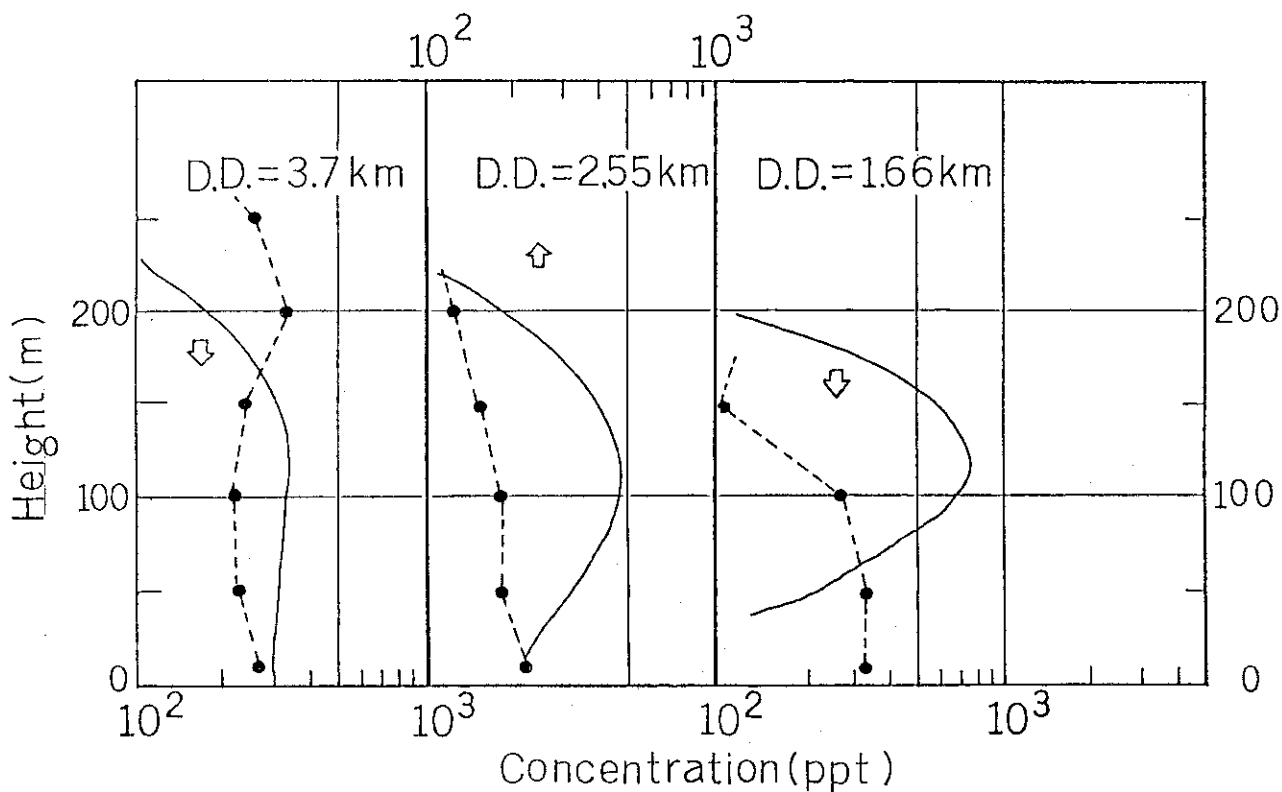


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.18 Simulated results of Run 1 of '80's experiment (1).

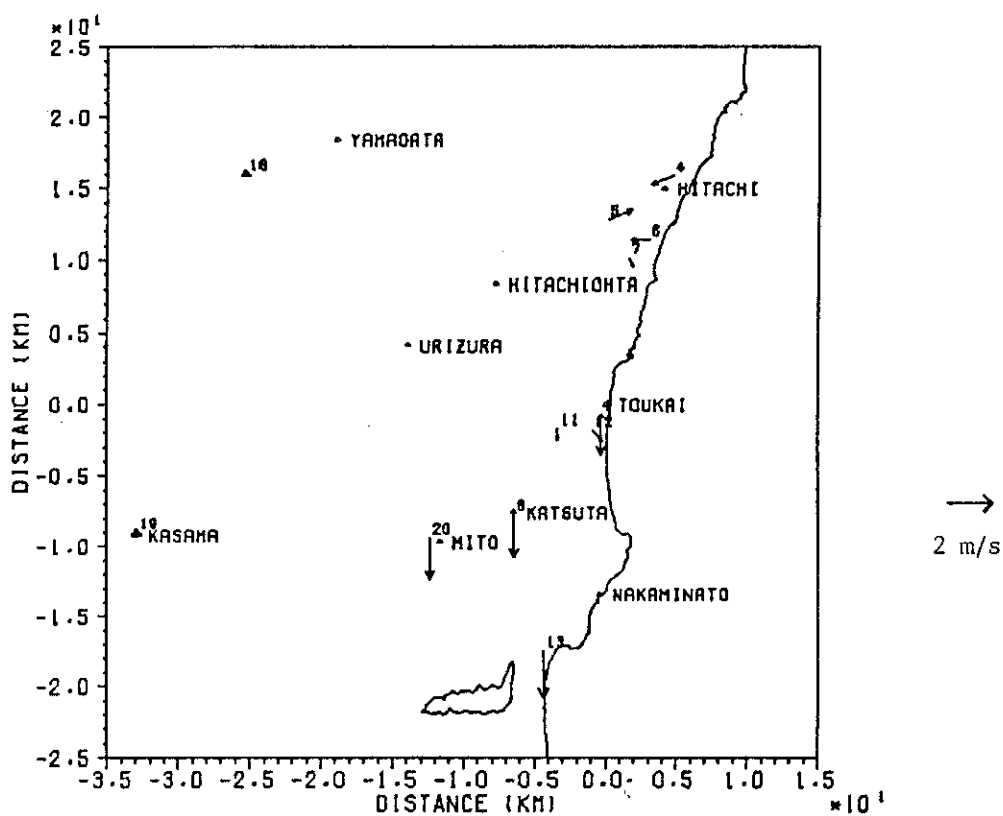


(c) Comparison of the ground level concentration.

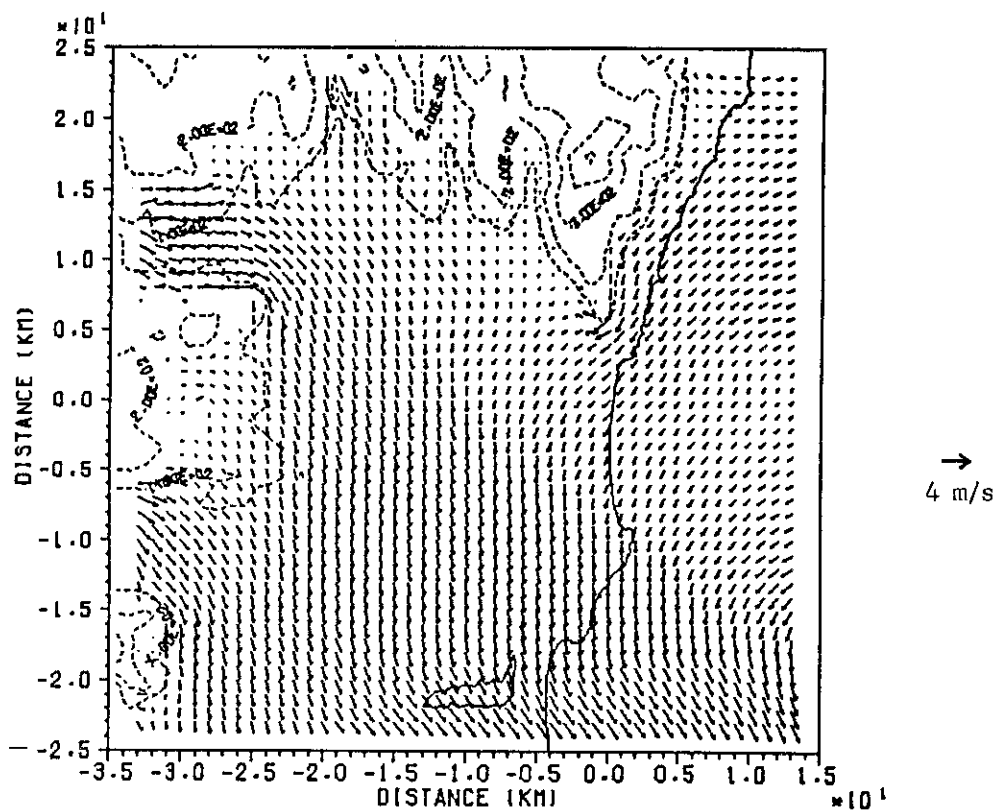


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.18 Simulated results of Run 1 of '80's experiment (2).

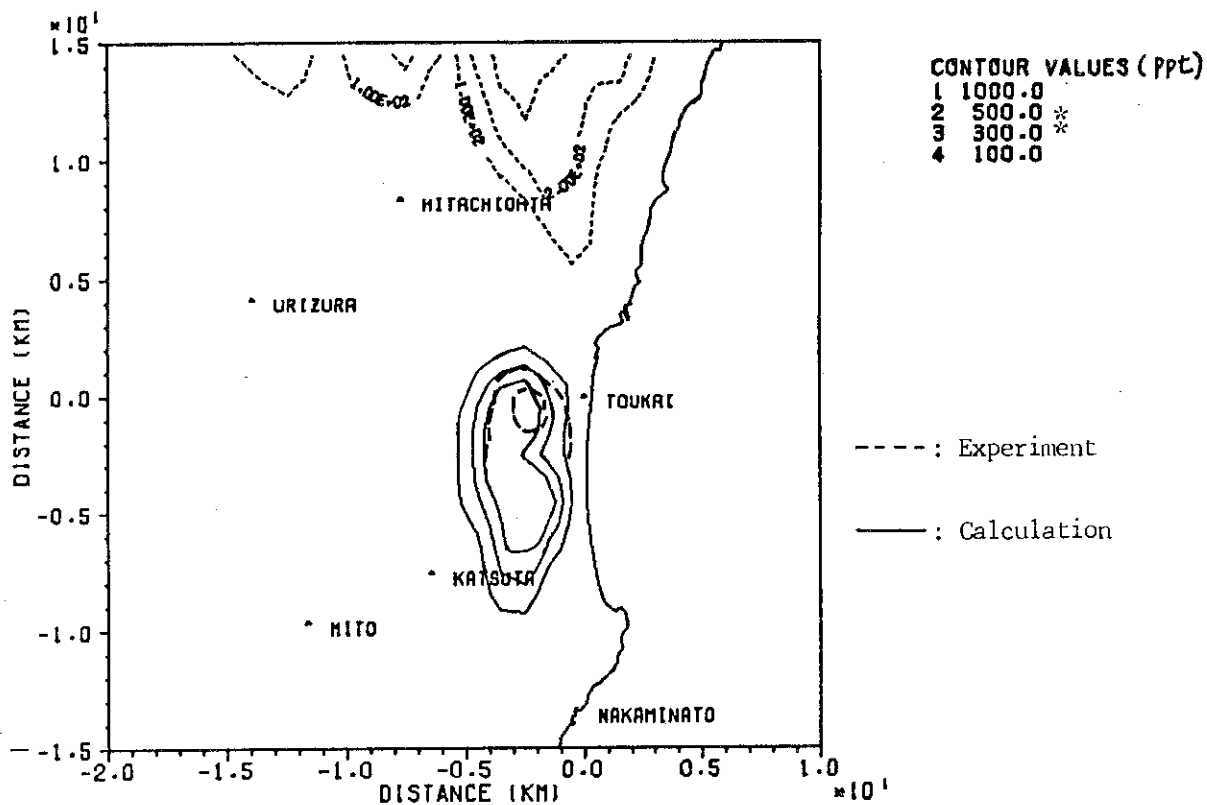


(a) Observed wind data when the release start.



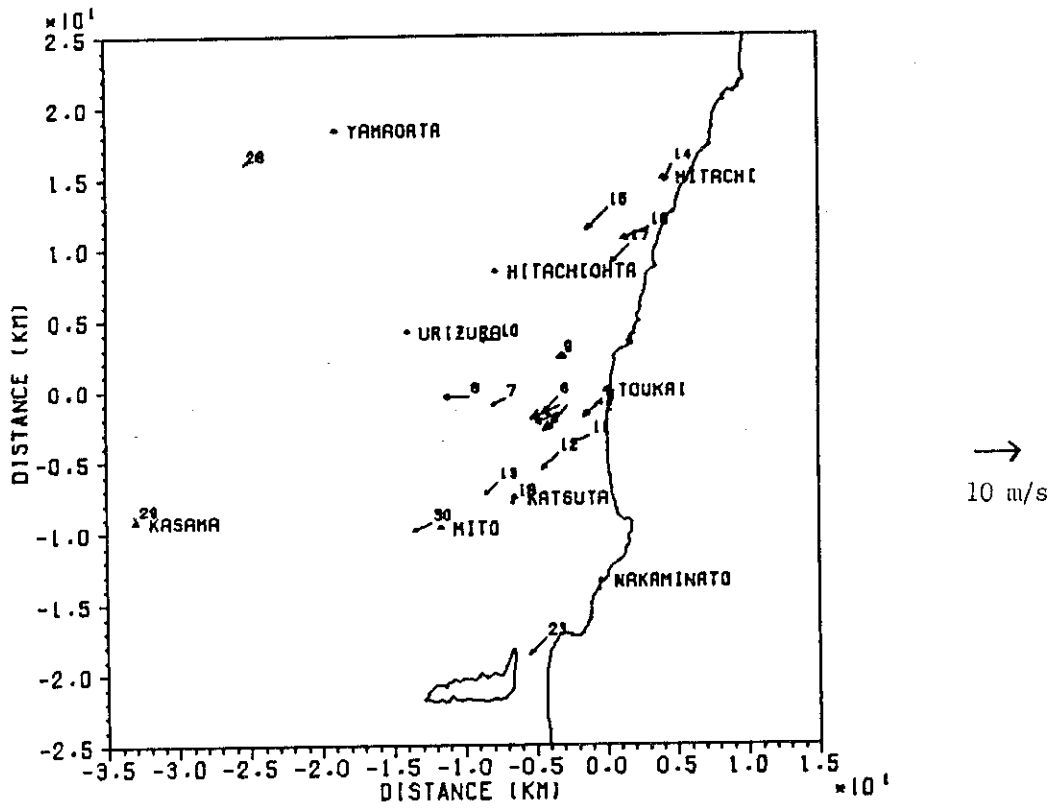
(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.19 Simulated results of Run 2 of '80's experiment (1).

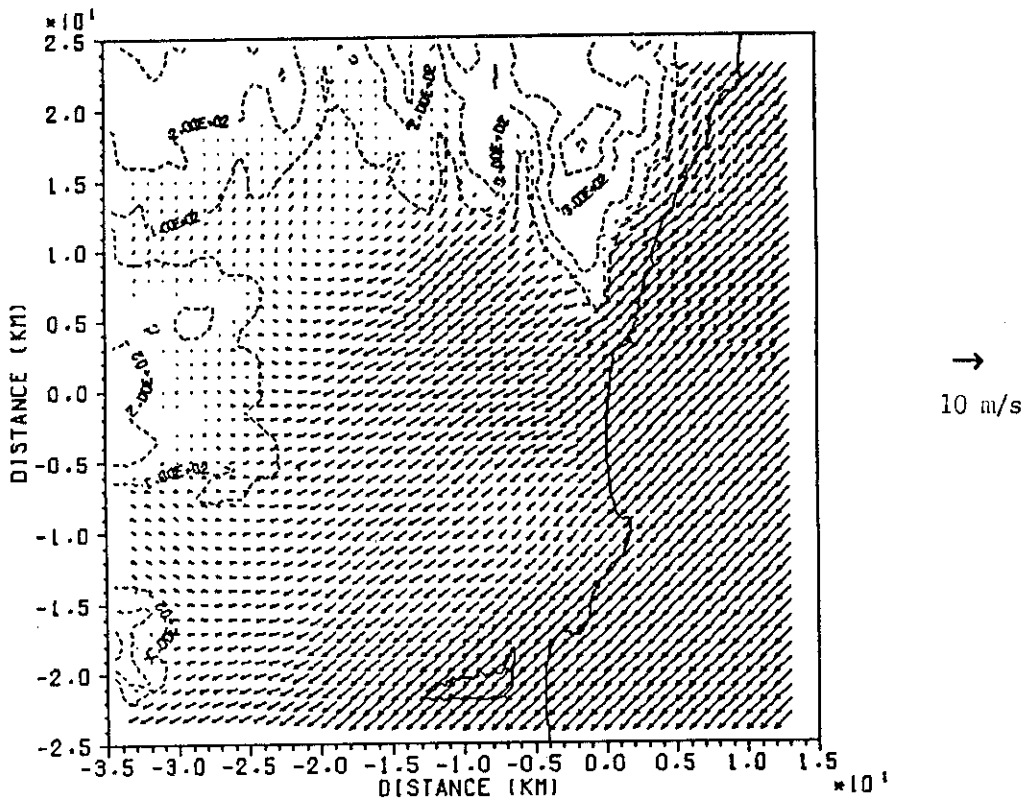


(c) Comparison of the ground level concentration.

Fig.19 Simulated results of Run 2 of '80's experiment (2).

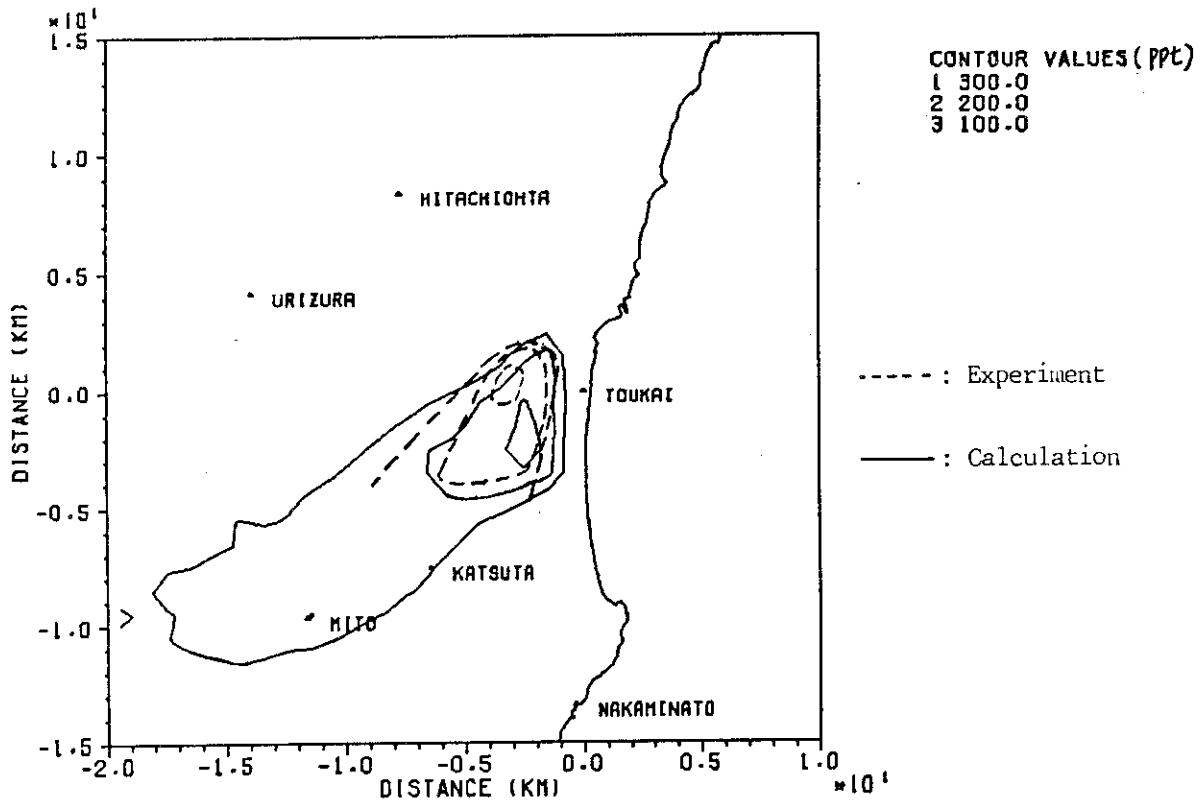


(a) Observed wind data when the release start.



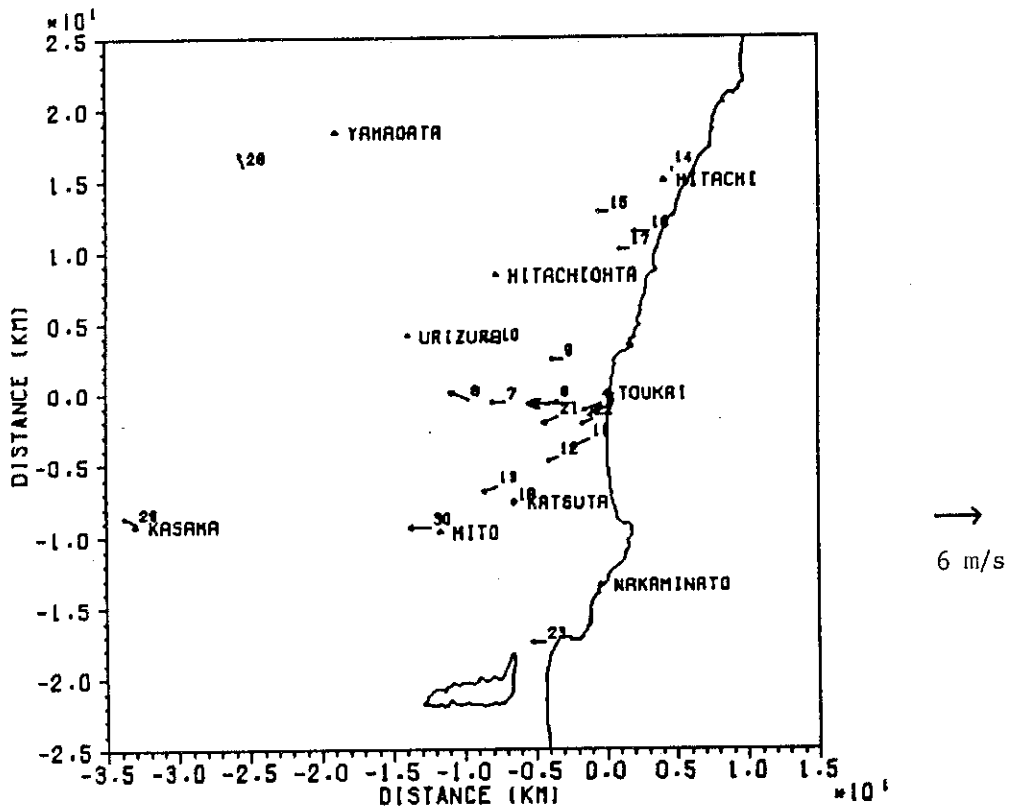
(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.20 Simulated results of Run 1 of '81's experiment (1).

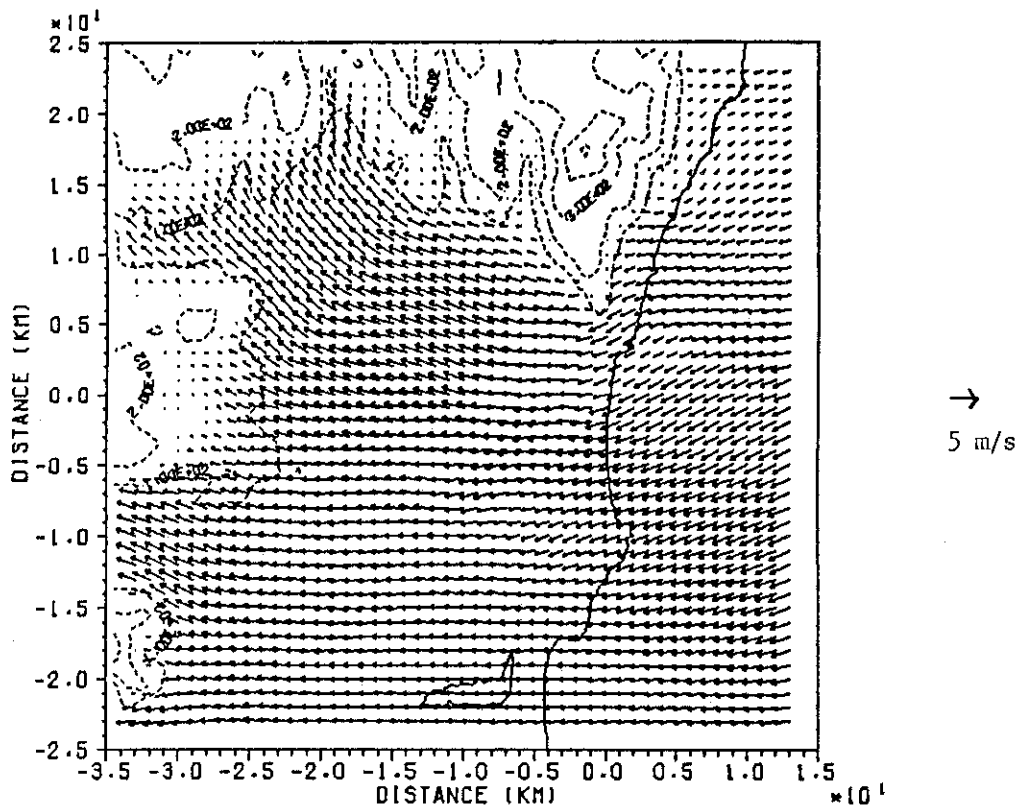


(c) Comparison of the ground level concentration.

Fig.20 Simulated results of Run 1 of '81's experiment (2).

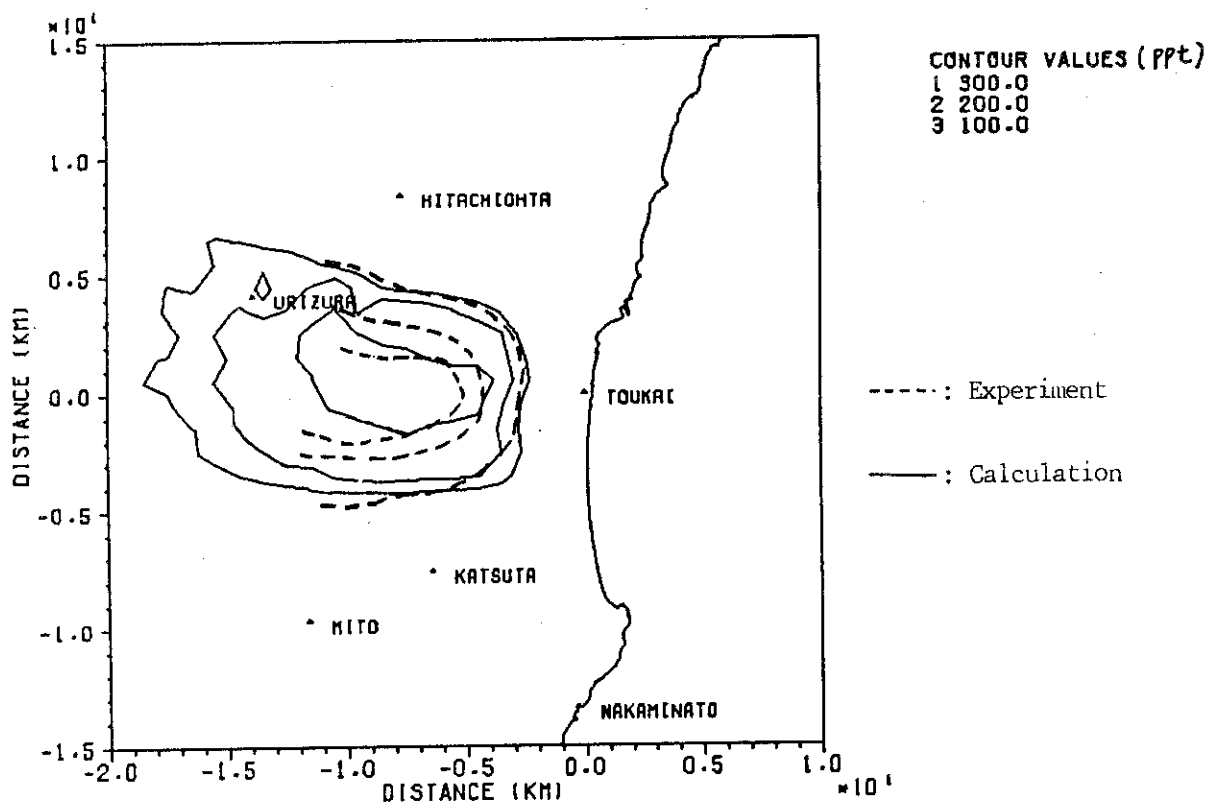


(a) Observed wind data when the release start.

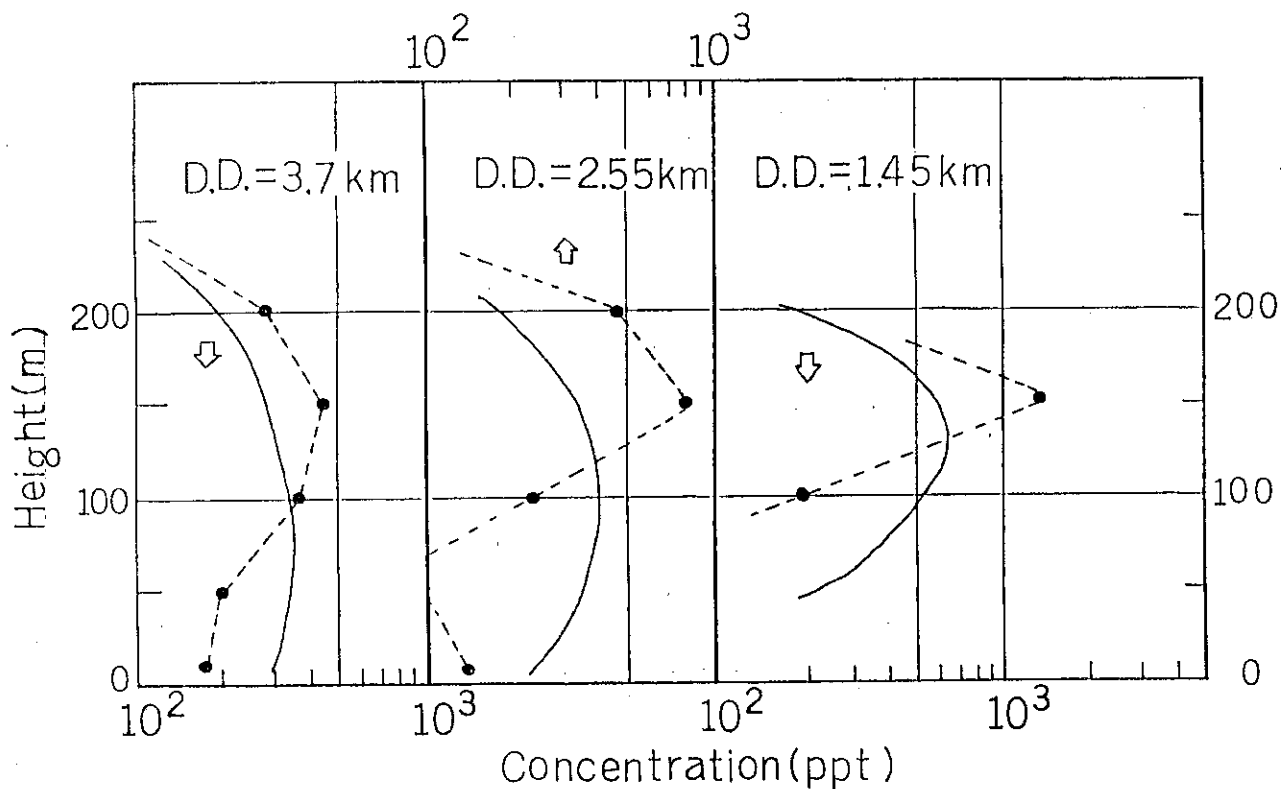


(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.21 Simulated results of Run 6 of '81's experiment (1).

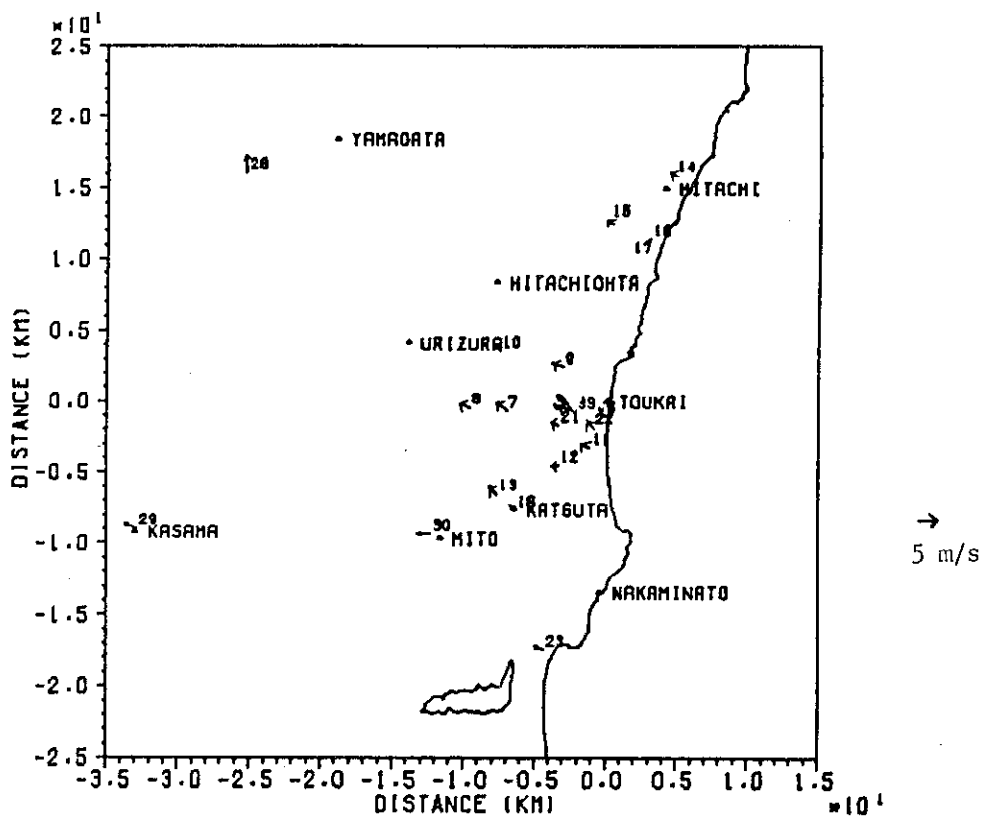


(c) Comparison of the ground level concentration.

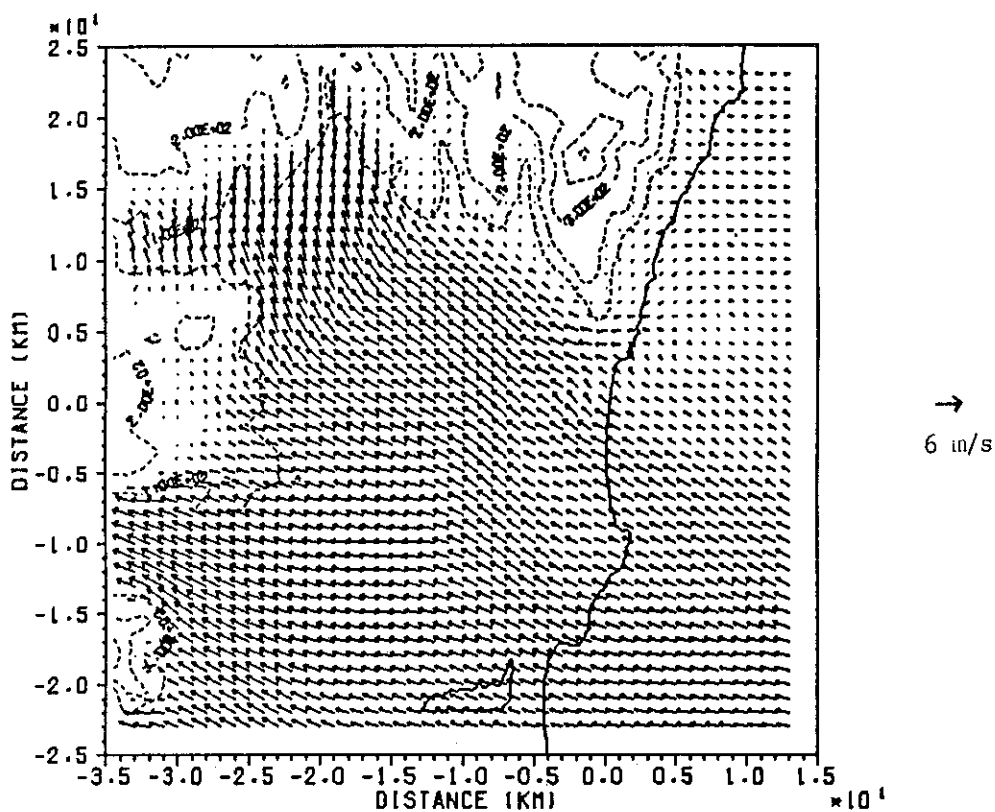


(d) Comparison of vertical concentration distribution.

Fig.21 Simulated results of Run 6 of '81's experiment (2).

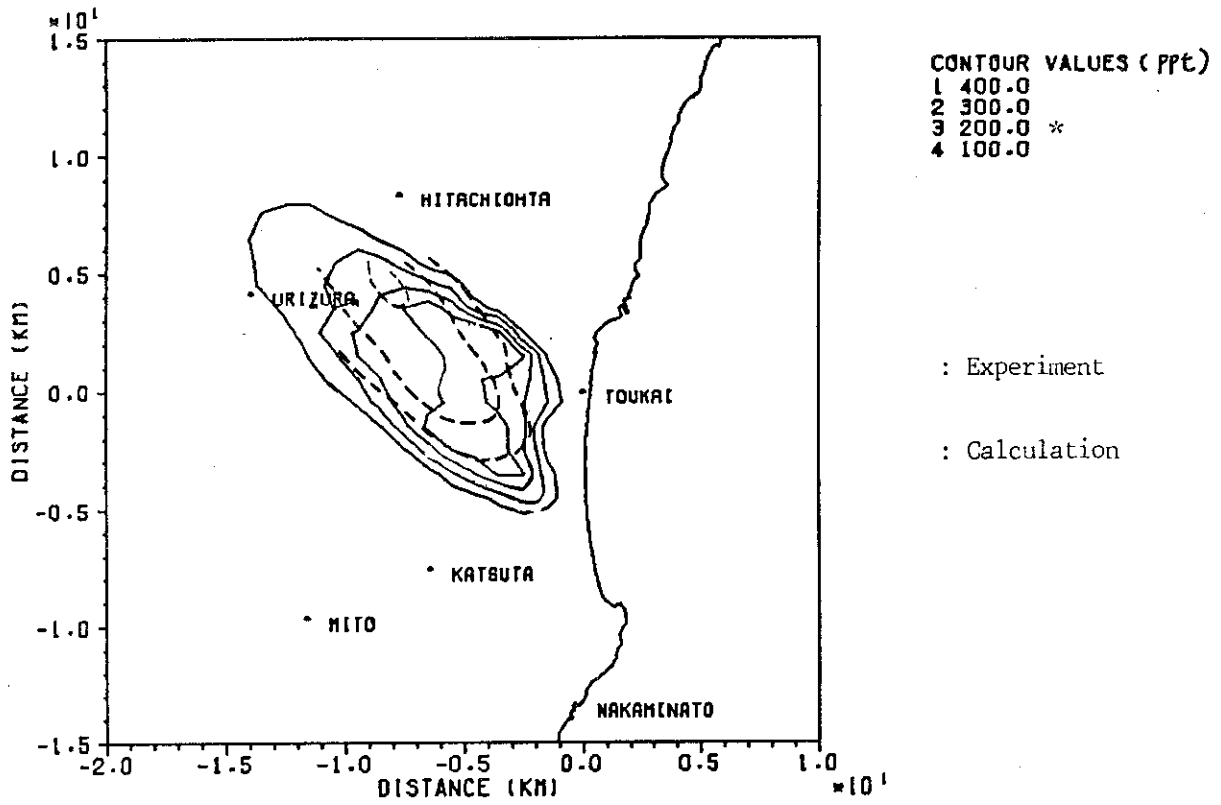


(a) Observed wind data when the release start.



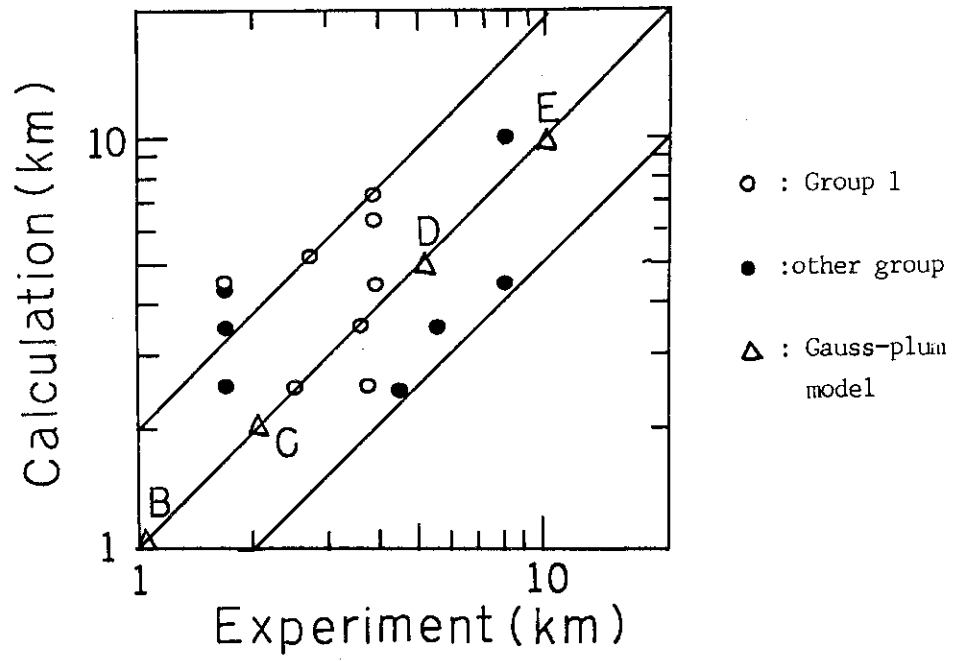
(b) Calculated wind field at the release height.

Fig.22 Simulated results of Run 9 of '81's experiment (1).

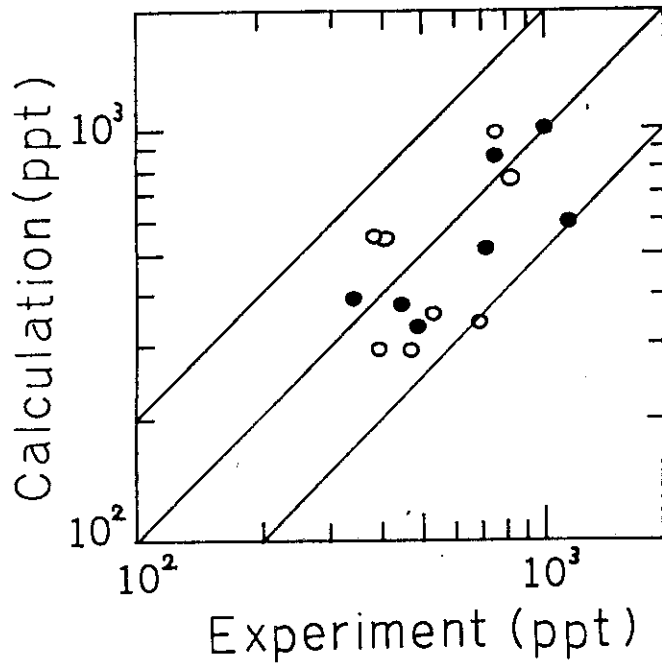


(c) Comparison of the ground level concentration.

Fig.22 Simulated results of Run 9 of '81's experiment (2).



(a) Downwind distance where maximum point appeared.



(b) Maximum concentration value.

Fig.23 Comparison of maximum concentration between experiment and calculation.

Appendix 1 Meaning of symbol in Fig.16 (b),(d) and Fig.17 (b),(d).

Wind speed		Symbol
0.0 ^{m/s}	—	0.3 ^{m/s} C
0.4	—	1.5
1.6	—	2.5
2.6	—	3.5
3.6	—	4.5
4.6	—	5.5
5.6	—	6.5
6.6	—	7.5
7.6	—	8.5
8.6	—	9.5
9.6	—	10.5
10.6	—	11.5
11.6	—	12.5
12.6	—	13.5
13.6	—	14.5
14.6	—	15.5
15.6	—	16.5
16.6	—	17.5
17.6	—	18.5
18.6	—	19.5
19.6	—	20.5

