

# 土木研究所資料

## 3次元有限要素法によるトンネル坑口 付近の排気ガス拡散状況の予測

昭和61年 3 月

建設省土木研究所  
道路部トンネル研究室

「Copyright © (1986) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

# 3次元有限要素法によるトンネル坑口 付近の排気ガス拡散状況の予測

|         |      |
|---------|------|
| トンネル研究室 | 水谷敏則 |
|         | 秋山清  |
|         | 真下英人 |
| 中部地方建設局 | 猪熊明  |

## 要 旨

道路トンネルにおいては、自動車の排出ガスがトンネル坑口から集中的に放出されるため、坑口付近で局所的な大気汚染がしばしば問題となるが、地形、気象、交通量などの要因が複雑にからむため、その予測は困難となる場合が多い。

本報告書は、これらの要因をある程度考慮することのできる坑口付近の大気汚染の予測手法の一つとして、3次元有限要素法を適用した汚染物質の拡散予測プログラムの開発を行うとともに、実際のトンネルで実施された現場拡散実験を対象にした試計算の結果を紹介するものである。

結論として、本プログラムにより得られる計算値は実測値と全体的には整合性の良いものであることが確認された。

キーワード：トンネル，排出ガス，拡散現象，流体力学，3次元有限要素法

## まえがき

本報告書は、土木研究所トンネル研究室がトンネル坑口からの自動車排気ガスの拡散予測手法の一環として研究を進めてきた3次元有限要素法を用いた拡散予測手法に関する一連の成果を取りまとめたものである。

トンネル坑口付近の排気ガス拡散の予測には、地形、気象、交通条件などの要因が複雑にからむため、取り扱いが困難となる場合が多いが、3次元有限要素法を適用することによりこれらの要因をある程度考慮できるものと考えられる。本報告書では、3次元有限要素法による大気汚染物質の拡散予測プログラムの開発、およびその過程における実際のトンネルのデータに基づく試計算を紹介するものである。結論として、本プログラムにより比較的整合性の良い結果が得られることを確認した。しかし、数値解析を行う場合に必要となる入力物性値に関しては現時点では不明確な点もあり、今後の研究の成果を待つ部分も多い。これらの点に関してはさらに研究を続けることにより結論を得るよう努力したいと考えている。

本報告書が、道路トンネル計画の策定あるいは坑口周辺環境対策の検討の一助となれば幸いである。

|               |     |      |
|---------------|-----|------|
| トンネル研究室       | 室長  | 水谷敏則 |
|               | 研究員 | 秋山清  |
|               | 研究員 | 真下英人 |
| 中部地方建設局道路部    |     |      |
| 道路計画第二課長      |     | 猪熊明  |
| (元トンネル研究室研究員) |     |      |

# 目 次

まえがき

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第1章 緒 論 .....                      | 1   |
| 第2章 数値解析プログラム .....                | 2   |
| 2.1 概 説 .....                      | 2   |
| 2.2 流れ場の解析プログラム .....              | 4   |
| 2.3 拡散解析プログラム .....                | 6   |
| 第3章 現地計測データを用いたプログラムの検証 .....      | 11  |
| 3.1 概 説 .....                      | 11  |
| 3.2 一方向交通トンネルの場合 .....             | 11  |
| 3.3 対面交通トンネルの場合 .....              | 68  |
| 第4章 結 論 .....                      | 126 |
| 4.1 境界条件および入力物性値の設定方法についての提案 ..... | 126 |
| 4.2 適用上の留意事項 .....                 | 131 |

## 第1章 緒 論

道路トンネルにおいては、トンネル内で排出された自動車の排気ガスがトンネル坑口から集中的に放出されるため、坑口付近で、しばしば局所的な大気汚染が問題となることがあり、トンネル坑口付近における排気ガスの拡散予測手法の確立が近年望まれてきた。

排気ガスの拡散予測手法は大別すると i) 模型を用いた風洞実験 ii) 数値解析 iii) 拡散現場実験の三手法に分類される。

i) の風洞実験においては相似則の設定が難しい、費用、時間がかかるなどの難点があり、また iii) の拡散現場実験はトンネル建設が計画されている地点と気象、地形、交通量等の諸条件の類似している既設トンネルのデータから拡散状況を類推しようとする性格のものであり、汎用性を持たせるには膨大な量のデータの蓄積が必要となるが、現在はまだデータの蓄積を行っている段階にある。これに対して比較的手軽に、しかも汎用性を持たせて行える予測手法としては ii) の数値解析による方法が挙げられる。

数値解析予測手法としては従来条件を単純化したブルームモデル、パフモデル等による方法が一般的に用いられてきたが、坑口付近は地形が複雑な場合が多く、また、このため気流の乱れが著しい場合が多いことを考慮すれば、従来の数値解析予測手法では必ずしも十分精度のよい予測が行えるとはいえない。

本研究では以上のような観点から坑口付近の排気ガス拡散予測手法の一つとして3次元有限要素法による数値解析手法の適用を試み、プログラムの開発を行った。

プログラムは、対象とする領域内の大気の流れの状況（流れの場）を有限要素法で最初に解き、得られた風速と風向を新たに入力条件として対象領域内の大気汚染物質の拡散状況（拡散の場）を再び有限要素法で解くことにより、坑口から排出される排気ガスの坑口付近の濃度分布を求めるという構成になっており、数値解析プログラムの説明は第2章で行う。

ところで、数値解析を行う場合には数多くの入力物性値が必要となり、本研究の数値解析プログラムでも、渦動粘性係数、拡散係数などの入力物性値あるいは境界条件の設定が必要となる。しかし、これら入力物性値に関しては、現在のところ未解明の部分が多く、また境界条件も計算結果に大きな影響を及ぼすため、これらの設定方法は非常に重要である。そこで第3章ではこれらの点について現場を対象にした試計算を行うことにより検討を加えた。すなわち、過去にトレーサガス拡散現場実験が行われた一方向交通の A、B トンネル、対面交通の C、D トンネルを対象にして、本研究の数値解析プログラムによる試計算を行い、実測値と整合性の良い計算結果を得るための境界条件および渦動粘性係数、拡散係数など入力物性値の設定方法について考察し、本プログラムの現場への適用性について検討を加えた。

最後に第4章では本研究の結論として、本研究で開発した数値解析プログラムを適用する場合に必要な入力物性値、境界条件の設定方法に関する一提案を行うとともに、現場への適用上の留意事項について述べた。

## 第2章 数値解析プログラム

### 2.1 概 説

現在、大気中の拡散予測に用いられる数値解析手法として数種の手法が開発されているが、これらの手法を、解析上の仮定や数式に基づいて分類すると表-2.1のようになる。この表の中で、(1)ブルームモデル(2)パフモデル(3)噴流モデルはいずれも流れの計算は行っておらず、流れ場を仮定している。その結果、坑口付近の地形が比較的平坦で噴流が発達している場合には、かなりよい整合性を示すが、そうした条件が満足できていない場合には十分な予測ができないことが考えられる。実際の拡散は、拡散物質が大気の流れにのって運搬される、いわゆる移流拡散がその大部分を占めるから流れ場を計算せずに仮定すると、地形が複雑な場合には実際との整合性が悪くなる。したがって、複雑な地形に対しても適用できるといったような汎用性を考慮すれば、流れの式を実際に計算で解くことにより流れ場を設定することができる(4)差分法あるいは(5)有限要素法が数値解析予測手法として望ましいと考えられる。

表-2.1 数値解析予測手法の分類

|             | 手 法                             | 流れの式  | 拡散の式       |
|-------------|---------------------------------|-------|------------|
| (1) ブルームモデル | 仮定を設けて拡散の式を解いた解析解である            | 仮定する  | ある条件下で計算する |
| (2) パフモデル   | 仮定を設けて拡散の式を解いた解析解である            | 仮定する  | ある条件下で計算する |
| (3) 噴流モデル   | 仮定を設けて排ガスの保存則のもとで解いた解析解である      | 仮定する  | 仮定する       |
| (4) 差分法     | 変数を離散化して微分を差分に置きかえて解く           | 計算できる | 計算できる      |
| (5) 有限要素法   | 変数を離散化して重みつき残差法を用いて微分方程式を積分して解く | 計算できる | 計算できる      |

ところで、トンネル坑口は一般に山の斜面に設けられるから、坑口付近の地形にかなりの凹凸があり、数値解析は3次元的に解く必要がある。ところが、差分法ではその手法上、節点は直交する座標面に平行な面上に等間隔に持ってくるため計算は簡単になるが、図-2.1のように境界は階段上になり斜面地形はうまく表現できない。これに対し有限要素法は任意の形状に領域の分割ができるため斜面地形であってもうまく表現できる(図-2.1)。ただし、有限要素法では計算が複雑となるのが欠点で、実際に計算するには容量が大きく計算時間の速い電子計算機が必要となる。しかし、この点については電子計算機の進歩により大きい問題とはならなくなっている。

以上を総合した結果、本研究ではトンネル坑口付近の排気ガス拡散予測数値解析手法として、流れ場の計算を行うことができ、しかも斜面地形などにも適用することのできる有限要素法が適当である

と判断し、有限要素法による排気ガス拡散予測数値解析プログラムの開発を行うこととした。プログラムは、流れの式を解くプロセスと拡散の式を解くプロセスから構成されており、流れの計算によって得られる風速、風向を新たな入力項として拡散の式を解くという手法を用いている。本プログラムの構成及び本プログラムで必要とする入力物性値、境界条件などを合せて図-2.2に示す。

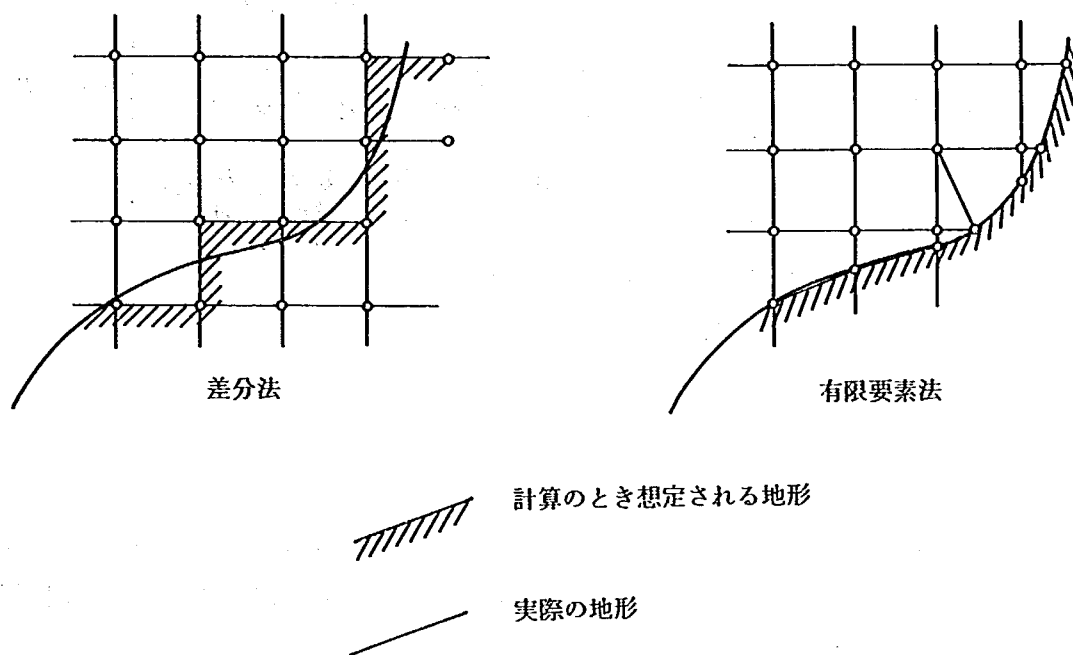


図-2.1 斜面境界の要素分割図

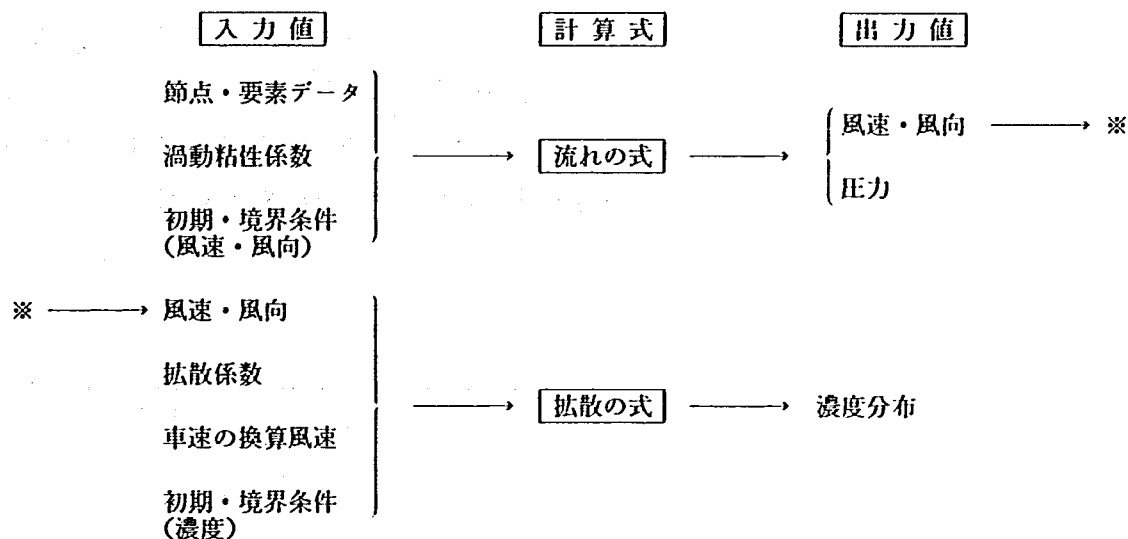


図-2.2 プログラムの構成及びプログラムに必要な入力値

## 2.2 流れ場の解析プログラム<sup>1)2)</sup>

流れ場の解析方法については文献 1) で詳述しているのので、ここでは概略を述べる。

流れ場の基礎方程式としては次式で表される Navier-Stokes の式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.1)$$

ただし、 $x, y, z$  :  $z$  が鉛直方向となる直交座標系

$u, v, w$  : 風速の  $x, y, z$  成分

$p$  : 圧力

$\rho$  : 密度

$\nu$  : 動粘性係数

また、本研究で取扱うような流れ場では考えられる風速が音速と比較して十分小さく、また、圧力の変化は十分小さいため、空気は非圧縮性とみなして良いという仮定を設ける。この仮定のもとでは流れは次式 (2.2) の連続の式を満足しなければならない。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

したがって、本プログラムでは基本的には式 (2.1)~(2.2) を連立させて 4 個の未知数  $u, v, w, p$  を各点において求めることになる。

ところでトンネル坑口付近の流れは強い乱流であると考えられるので、なるべくレイノルズ数の大きい Navier-Stokes の式を解く必要があるが、実際に高レイノルズ数での時間的空間的な微小変動を追うことはできない。そこで本プログラムでは微小変動を時間的空間的に平均するという方法、すなわち Boussinesq の渦動粘性係数の考え方を導入した。具体的には次式 (2.3)~(2.4) に示されるように風速をその平均値と変動量に分け、変動量の積を平均値の差分で表わすときの係数として渦動粘性係数を定義している。

$$\left. \begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho \bar{u}^2 &= -\rho \epsilon_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ \rho \overline{u'v'} &= -\rho \epsilon_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \\ \rho \overline{u'w'} &= -\rho \epsilon_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ : 平均値

$u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ : 変動量

$\epsilon_x$ : x 方向渦動粘性係数

$\epsilon_y$ : y 方向渦動粘性係数

$\epsilon_z$ : z 方向渦動粘性係数

式 (2.4) に相当する渦動粘性係数の項を式 (2.1) に代入すると式 (2.1) は動粘性係数が渦動粘性係数に, 風速が平均風速に置き換わった式となり最終的には要素内で平均化された流れに関する Navier-Stokes の式 (2.5) が得られ, これと式 (2.2) を連立させて解くことになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_x \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_y \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \epsilon_z \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots (2.5)$$

Navier-Stokes の式を有限要素法で解くにあたっては, 現在のところ次の 3 つの方法が用いられ, それぞれの得失がある。

i)  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$  を変数とする方法

変数変換を行わずに解く方法のため各節点につき自由度が 4 であり, 節点数が多くなるにつれ, 計算時間が加速度的に上昇する。

ii) ペナルティ関数を用いる方法

圧力項を風速に置き換えて自由度を減少させる方法であるが, 計算時間が多くなる可能性がある。

iii) 流れ関数と渦度を用いる方法

変数を流れ関数と渦度に変換して自由度を減少させる方法であるが, 3次元計算への拡張が難しい。

上記 3 手法の優劣については, 現在のところ, 決定的な判定を下すことはできないが, 本研究ではそれぞれの得失を総合的に判断して i) の  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$  を変数とする方法により Navier-Stokes の式を解くことにした。なお, 計算上は非定常解を順次求めて行き, 解がある値に収束するのを待ち, その収束値をもって定常解と考える方法をとった。したがって, 解の収束状況については十分な注意を払う必要がある。

### 2.3 拡散解析プログラム<sup>3)</sup>

拡散計算の基礎方程式としては、拡散物質の化学変化などがなく、保存されるものとして次式の Fick 型の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ただし、 $x, y, z$  :  $z$  が鉛直方向となる直交座標系

$u, v, w$  : 風速

$c$  : 濃度

$k_x, k_y, k_z$  : 拡散係数

$Q$  : 汚染物質の負荷量

$t$  : 時間

ここで式 (2.6) に連続式 (2.2) を用いて変形すると次式が得られる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q \quad \dots (2.7)$$

したがって、本プログラムでは最終的には式 (2.7) を有限要素法により解くことになる。現在までのところ、式 (2.7) を有限要素法により解く手法として数種の手法が発表されているが、本研究ではこの中から比較的容易にプログラムに導入できる手法として i) ガレルキン法 ii) 田端の上流有限要素法 iii) 人工拡散係数法を選定した。

以下に上記 3 手法の説明を行う。

#### i) ガレルキン法

まず、式 (2.7) をアイシュタインの総和規約<sup>4)</sup>で書き改めると次式が得られる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_j c^n)_{,j} = (k_j c^n)_{,j} + Q^n \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

式 (2.8) において  $\partial c / \partial t \doteq (c^{n+1} - c^n) / \Delta t$  で近似し、重み  $c^*$  を乗じて領域  $V$  で積分すると次式のようになる。

$$\int_V c^* \frac{c^{n+1} - c^n}{\Delta t} dv + \int_V c^* (u_j c^n)_{,j} dv = \int_V c^* (k_j c^n)_{,j} dv + \int_V c^* Q^n dv \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで本研究では  $n' = n$  のときを explicit 法と呼び、 $n' = n + \frac{1}{2}$  (ただし  $c^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(c^{n+1} + c^n)$ ) で表わした場合 implicit 法と呼ぶことにする。式 (2.9) の右辺第 1 項に Green の定理を適用すると次式が得られる。

$$\int_V c^* (k_j c^n)_{,j} dv = \int_S c^* k_j c^n n_j ds - \int_V c^*_{,j} k_j c^n dv \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

注) 一つの項の指標の繰返しはその指標について取り得る範囲にわたる総和を示す。

式 (2.10) を式 (2.9) に代入すると

$$\begin{aligned} \int_V c^* c^{n+1} dv = \int_V c^* c^n dv + \Delta t [ \int_S c^* k_{ij} c_{,j}^{n'} n_j ds \\ - \int_V c^* k_{ij} c_{,j}^{n'} dv - \int_V c^* (u_j c^n)_{,j} dv + \int_V c^* Q^n dv ] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで濃度  $c$  および  $c^*$  を節点で内挿するために各項別に次のような内挿関数を導入する。

1) 質量マトリックス  $\int_V c^* c dv$

$$\begin{aligned} c &\doteq \bar{\Phi}_\alpha c_\alpha \\ c^* &\doteq \bar{\Phi}_\lambda c_\lambda^* \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

2) 移流項  $\int_V c^* (u_j c)_{,j} dv$

$$\begin{aligned} c &\doteq \hat{\Phi}_\alpha c_\alpha \\ c^* &\doteq \hat{\Phi}_\lambda c_\lambda^* \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

3) 拡散項  $\int_S c^* k_{ij} c_{,j} ds - \int_V c^* k_{ij} c_{,j} dv$

$$\begin{aligned} c &\doteq \hat{\Phi}_\alpha c_\alpha \\ c^* &\doteq \hat{\Phi}_\lambda c_\lambda^* \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

4) 排出項  $\int_V c^* Q dv$

$$\begin{aligned} Q &= \bar{\Phi}_\alpha Q_\alpha \\ c^* &= \bar{\Phi}_\lambda c_\lambda^* \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

ここに内挿関数  $\bar{\Phi}_\beta$ ,  $\hat{\Phi}_\beta$  は次のとおりである。

$\bar{\Phi}_\beta$  : 節点  $\beta$  の重心領域で 1, 他の領域で 0 (図-2.3(a)参照)

$\hat{\Phi}_\beta$  : 節点  $\beta$  で 1, 他の節点で 0 の屋根形関数 (図-2.3(b)参照)

式 (2.12)~(2.15) を式 (2.11) に代入し,  $c_\lambda^*$  に節点  $\lambda$  で 1, 他の節点で 0 になる関数を選ぶと式 (2.8) は最終的には次式 (2.16) に離散化される。

$$\bar{M}_{\lambda\alpha} c_\alpha^{n+1} = \bar{M}_{\lambda\alpha} c_\alpha^n + \Delta t [ S_{\lambda\alpha j} k_{ij} c_\alpha^{n'} - O_{\lambda\alpha j} k_{ij} c_\alpha^{n'} - N_{\lambda\alpha j} (u_j c^n)_\alpha + \bar{M}_{\lambda\alpha} Q_\alpha ] \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

ただし,

$$\bar{M}_{\lambda\alpha} = \int_V \bar{\Phi}_\lambda \bar{\Phi}_\alpha dv \quad S_{\lambda\alpha j} = \int_S \hat{\Phi}_\lambda \hat{\Phi}_{\alpha j} n_j ds$$

$$O_{\lambda\alpha j} = \int_V \hat{\Phi}_{\lambda j} \hat{\Phi}_{\alpha j} dv \quad N_{\lambda\alpha j} = \int_V \hat{\Phi}_\lambda \hat{\Phi}_{\alpha j} dv$$

## ii) 上流有限要素法

上流有限要素法は、式 (2.13) 移流項の重み関数  $c^*$  の内挿関数に図-2.3(c)に示される節点  $\beta$  の上流要素で1、他の要素で0となるような関数を用いる手法である。したがって、上流有限要素法は次式 (2.17) で表される。

$$\bar{M}_{\lambda\alpha} c_{\alpha}^{n+1} = \bar{M}_{\lambda\alpha} c_{\alpha}^n + \Delta t [S_{\lambda\alpha j} k_j c_{\alpha}^{n'} - O_{\lambda\alpha j} k_j c_{\alpha}^{n'} - N_{\lambda\alpha j} (u_j c^{\alpha'})_{\alpha} + \bar{M}_{\lambda\alpha} Q_{\alpha}^n] \quad (2.17)$$

ただし、

$$\bar{M}_{\lambda\alpha} = \int_V \bar{\Phi}_{\lambda} \bar{\Phi}_{\alpha} dv \quad S_{\lambda\alpha j} = \int_s \hat{\Phi}_{\lambda} \hat{\Phi}_{\alpha j} n_j ds$$

$$O_{\lambda\alpha j} = \int_V \hat{\Phi}_{\lambda j} \hat{\Phi}_{\alpha j} dv \quad N_{\lambda\alpha j} = \int_V \bar{\Phi}_{\lambda} \hat{\Phi}_{\alpha j} dv$$

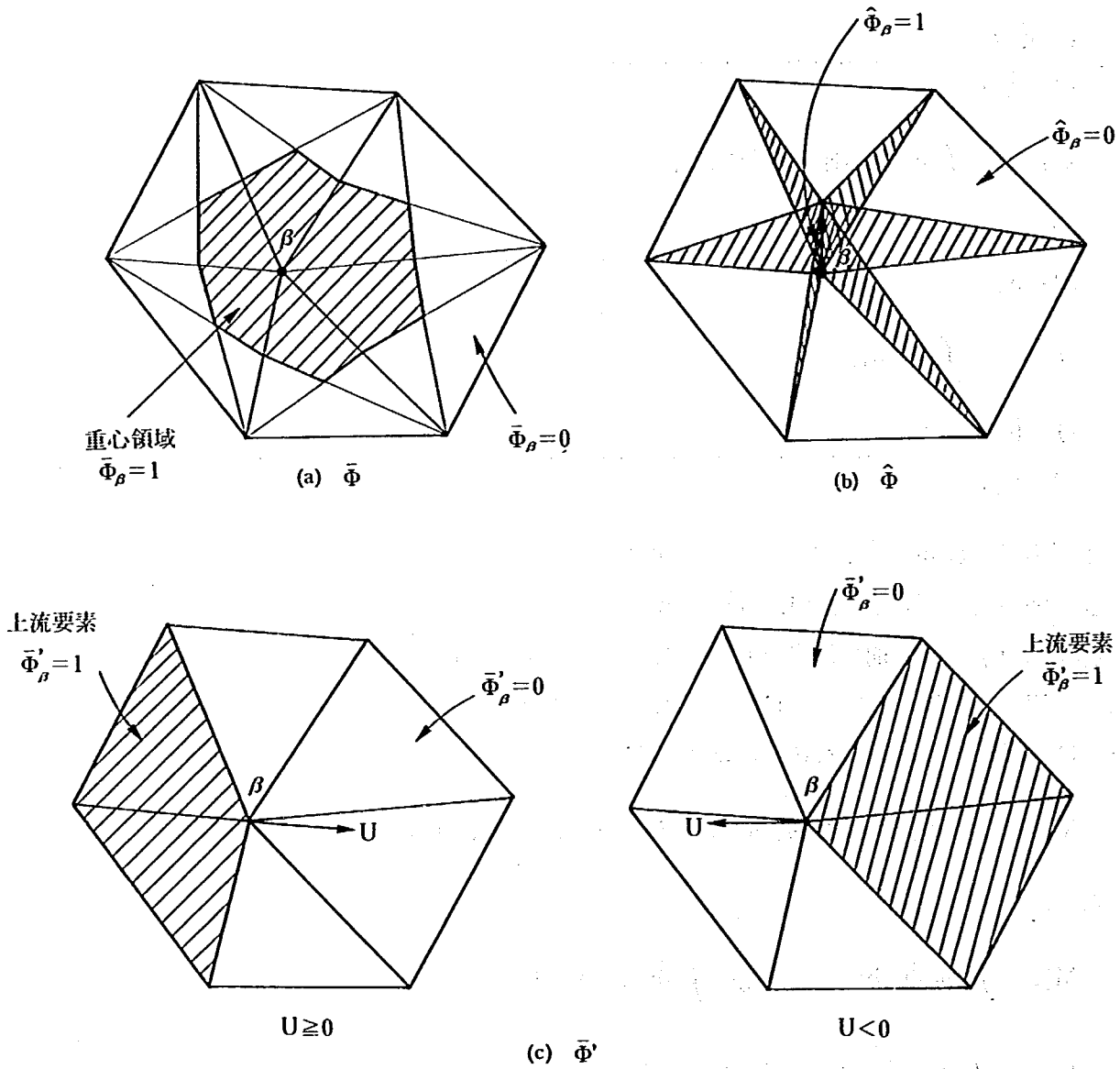


図-2.3 内挿関数模式図

### iii) 人工拡散係数法

人工拡散係数法は、移流方程式を  $t$  について離散化したときの打ち切り誤差が、拡散項の order と同程度になる場合に修正項として人工拡散を考慮したものである。今、移流方程式の打ち切り誤差を考える。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_j c^n)_{,j} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

濃度  $c$  を  $\Delta t$  近傍で Taylor 展開すると

$$c(t + \Delta t) = c(t) + \Delta t \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} + o(\Delta t^3) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

通常  $\partial c / \partial t$  を前進差分で表現すると式 (2.19) の右辺 3 項以下は打ち切られる。したがって拡散項に比べて右辺 3 項以下が無視できない場合には誤差が大きくなると考えられる。そこで式 (2.18) より  $\partial^2 c / \partial x^2$  を評価する。

$$\frac{\partial^2 c}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} (-u_j c^n)_{,j} = -u_k (-u_j c^n)_{,jk} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

ただし、ここでは  $u_j$  は定数とみなしている。式 (2.19) において  $\Delta t^3$  以上の項を省略すると式 (2.20) を用いて

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{c(t + \Delta t) - c(t)}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2} u_k (u_j c^n)_{,jk} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

と書ける。したがって、人工拡散係数法は  $\partial c / \partial t$  を式 (2.21) のように近似して解く方法である。ここで式 (2.21) を式 (2.8) に代入し、ガレルキン法と同様の数式処理を行うと次式になる。

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\lambda\alpha} c_\alpha^{n+1} = & \bar{M}_{\lambda\alpha} c_\alpha^n + \Delta t [S_{\lambda\alpha j} k_j c_\alpha^{n'} - O_{\lambda j\alpha j} k_j c_\alpha^{n'} - N_{\lambda\alpha j} (u_j c^n)_\alpha \\ & + \frac{\Delta t}{2} \{ T_{\lambda\alpha k} u_j u_k c_\alpha^{n'} - P_{\lambda j\alpha k} u_j u_k c_\alpha^{n'} \} + \bar{M}_{\lambda\alpha} Q_\alpha \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\lambda\alpha} &= \int_V \bar{\Phi}_\lambda \bar{\Phi}_\alpha dv & S_{\lambda\alpha j} &= \int_S \hat{\Phi}_\lambda \hat{\Phi}_{\alpha j} n_j ds \\ O_{\lambda j\alpha j} &= \int_V \hat{\Phi}_{\lambda j} \hat{\Phi}_{\alpha j} dv & N_{\lambda\alpha j} &= \int_V \hat{\Phi}_\lambda \hat{\Phi}_{\alpha j} dv \\ T_{\lambda\alpha k} &= \int_S \hat{\Phi}_\lambda \hat{\Phi}_{\alpha k} n_j ds & P_{\lambda j\alpha k} &= \int_V \hat{\Phi}_{\lambda j} \hat{\Phi}_{\alpha k} dv \end{aligned}$$

次に上記 3 手法の特徴について簡単に述べる。

#### i) ガレルキン法

ガレルキン法については、Pe 数（ペクレ数  $= \frac{V \Delta s}{k}$ ；ここに、 $V$ ：代表風速、 $\Delta s$ ：代表長さ、 $k$ ：拡散係数）が小さい場合には解析解と比較してほぼ妥当な解が得られるが、Pe 数が大きくなると物理的

には存在しない負の濃度が発生する。

ii) 上流有限要素法

この方法は、ガレルキン法のように  $Pe$  数が大きくなっても負の濃度は発生しない。しかし、精度を比較すると他の 2 法に比べて精度は落ちる。

iii) 人工拡散係数法

この方法はガレルキン法、上流有限要素法と比較して精度は非常によくなるが、 $Pe$  数が大きくなると負の濃度が発生する。

本研究ではこれらの手法の長短を比較するため 1 次元、2 次元、3 次元の簡易モデルで拡散の試計算を行い、その結果と厳密解を比較した。それにより以下のことが明らかとなった。

(i) implicit 法、explicit 法の比較において、精度的には implicit 法の方がガレルキン法では良いが、人工拡散係数法ではほとんど差がない。

(ii) マスマトリックスの集中化については implicit 法では解の厳密さについて集中化した場合としない場合でほとんど差はないが、explicit 法では非集中化の場合には  $\Delta t$  の制約条件が厳しくなる。

以上のことを総合的に判断して、本研究では以下の手法を用いることとした。

i) 内挿関数の集中化および解の explicit 法、implicit 法に関しては、節点数が非常に大きいため、計算機容量、計算時間の点からマスマトリックスは集中化し、explicit 法を用いる。

ii) 負の濃度に対する対策方法として、物理的に不適当な負の濃度が発生しない上流有限要素法を用いる。

## 参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所道路部トンネル研究室：「3次元有限要素法による流れの数値解析」土木研究所資料 第1719号
- 2) 今田徹，水谷敏則，猪熊明：「トンネル坑口付近の排ガス拡散状況の予測手法（その1）—3次元の流れの式の有限要素法による解析—」，土木技術資料第23巻第3号 1981.3
- 3) 水谷敏則，猪熊明：「トンネル坑口付近の排ガス拡散状況の予測手法（その2）—3次元の拡散の式の有限要素法による解析—」土木技術資料第23巻第12号 1981.12

### 第3章 現地計測データを用いたプログラムの検証

#### 3.1 概説

数値解析により排気ガスの拡散予測を行う場合には、種々の入力物性値及び境界条件の設定が必要となり、また、これらの設定方法がプログラム適用上の大きな問題点となる。本研究におけるプログラムも数多くの入力物性値、境界条件を必要とし、また、これらの値を現場で得られる地形、交通量、気象等のデータからどのようにして求めるかが問題となるが、本研究では特に次の2点が計算結果に及ぼす影響が大きいものと考えられる。

まず第一に、本研究では流れの式と拡散の式を有限要素法で解いているため、各方程式に現われる係数、すなわち渦動粘性係数、拡散係数の影響は当然のことながら非常に大きく、これら入力物性値の設定方法は重要となってくる。

第二点としては、走行している自動車の影響をプログラムにおいてどのように表現するかという問題点が挙げられる。すなわち、自動車走行の影響としては道路上において自動車走行による乱れに起因する拡散が発生することと、道路上において自動車走行による風が発生することの2点が主として考えられるが、これらをプログラム上でどう取り扱うかということである。このような自動車走行の影響の取り扱いについては3.2節以降で詳述するが、本研究では基本的には前者の道路上における拡散の発生については道路上の拡散係数の値を大きく与えることにより、また、後者の風の発生については発生する風速に相当する風速を流れの計算結果の自動車走行領域に重ね合わせることで対応する方針で検討を加えている。

以上、本プログラムにおいては、渦動粘性係数、拡散係数の設定方法と自動車走行の影響の評価方法が重要であることを指摘したが、この2点以外にも初期、境界条件の与え方等も計算結果に微妙な影響を及ぼすものと考えられる。しかし、現在の技術水準ではこれら解析に必要な入力物性値、境界条件はいずれも明確に定めることはできない。そこで本研究ではトレーサーガスを用いて行われた坑口拡散の現場実験を対象にしたパラメトリックスタディを行うことにより、入力物性値、境界条件の設定方法について検討を加えた。すなわち、過去にトレーサーガス拡散現場実験が行われたA、B、C、Dの4つのトンネルを対象にした試計算を行い、計算値と実測値との誤差（主として道路方向における濃度減衰で比較）が許容される範囲に収まるまで入力物性値、境界条件を変化させて最適な入力物性値、境界条件を得ようというものである。具体的な計算例は3.2節以降に示すが、計算はA、B、C、Dトンネルの順で行っており、入力物性値、境界条件の設定方法はDトンネルに近づくほど、明確なものになってくる。

#### 3.2 一方向交通トンネルの場合

##### 3.2.1 Aトンネル

###### 1) 現場実験の概要

Aトンネルは高速道路用の山岳トンネルであり、坑口付近の地形は図-3.1に示されるようにトンネ

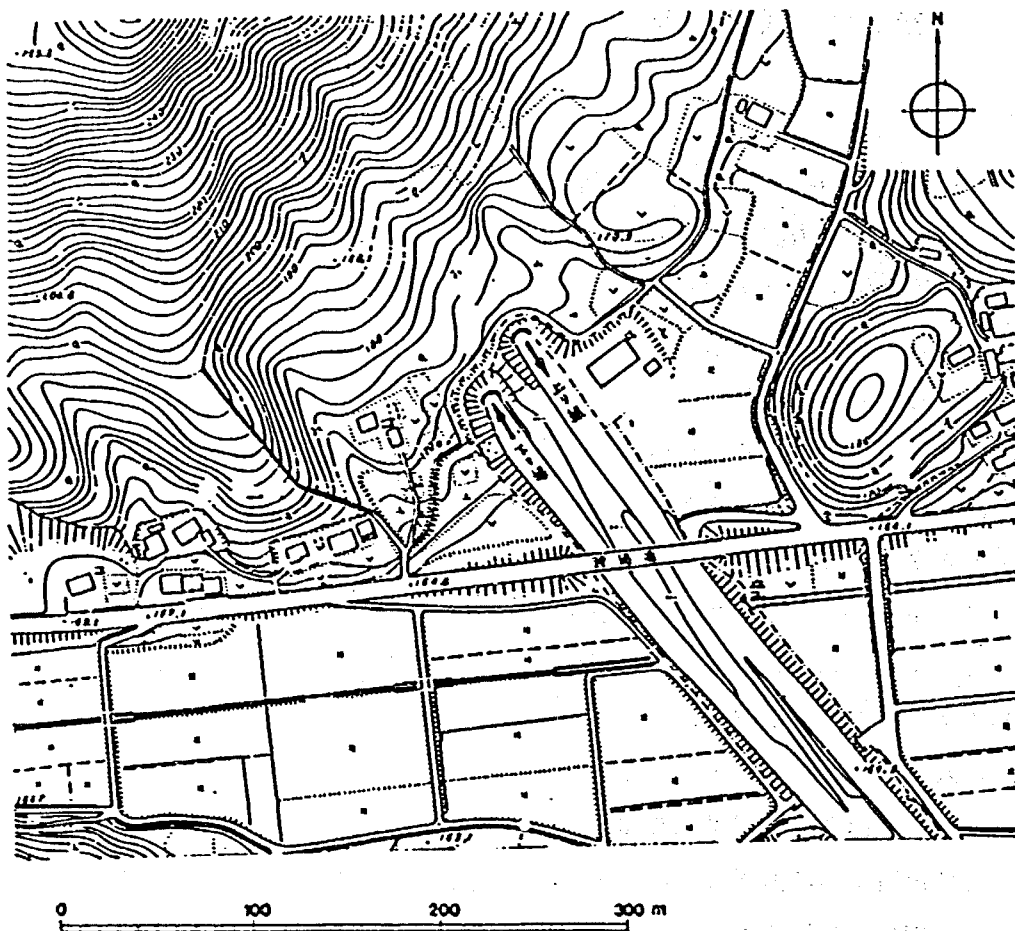


図-3.1 Aトンネル坑口付近地形図

ル坑口の地形としては比較的平坦な地形となっている。

トレーサーガス拡散現場実験は、トレーサーガスをトンネル内で放出し、それが坑口からどのように拡散するかを坑外で濃度計測を行うことにより調べるという手法を採用しており、図-3.1の上り線坑口周辺で、1回の計測時間が30分の拡散実験を、条件を変えてRun 1~Run 10までの10ケース行っている。本研究ではこれら10ケースのトレーサーガス拡散現場実験の中からトンネルに対する風向、風速を考慮し、表-3.1に示される諸条件を持つ7ケースを選定して計算の対象とした。

## 2) 計算条件

### (1) 要素分割

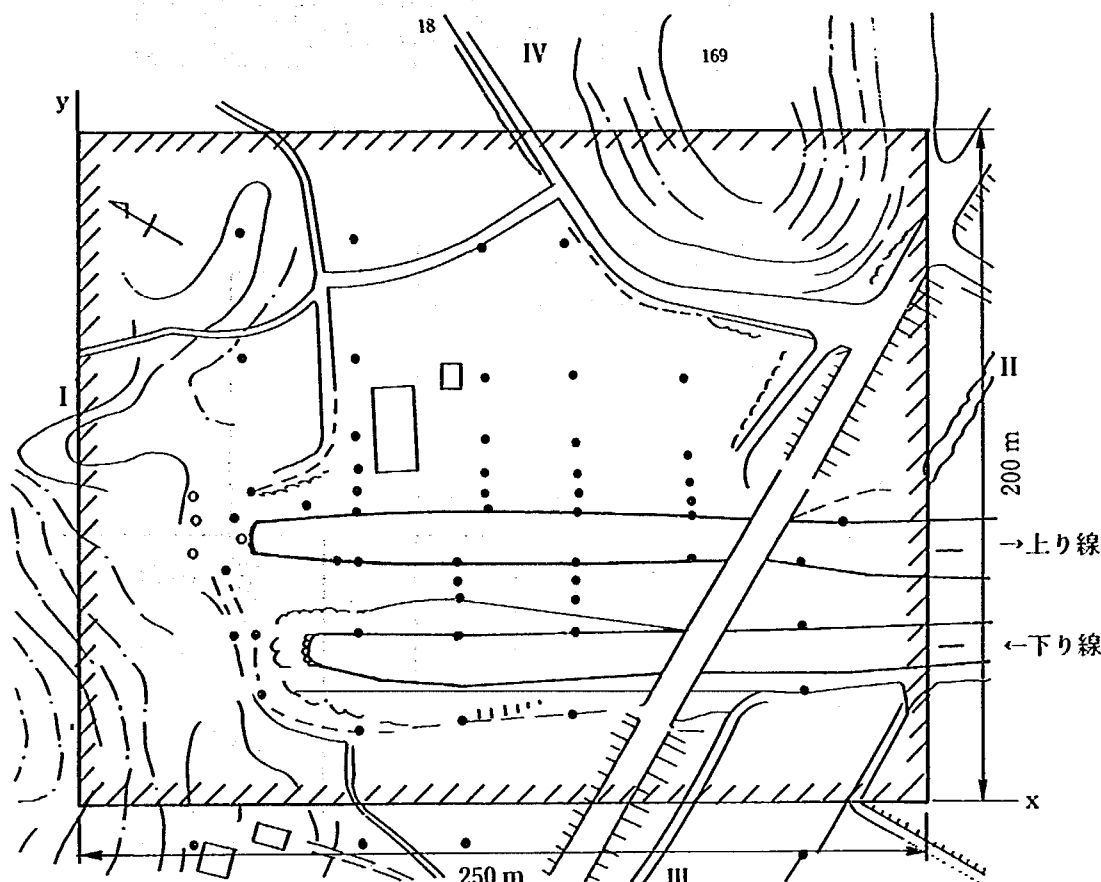
計算対象領域は図-3.2に示されるような坑口を中心とした $200 \times 250 \times 80$  (高さ) mの直方体に近い3次元空間となっており、要素分割の水平断面図は図-3.3のようになる。総節点数は2827、要素数は三角柱要素が4351、四面体要素が454である。

### (2) 流れの計算条件

3.1節でも述べたように、本研究ではプログラムで必要とする入力物性値、境界条件の最適値をパラメトリックスタディを行うことにより求める。パラメータの変化のさせ方は無数に考えられるが、Aトンネルを対象にした試計算における流れの計算条件は主として以下の点に重点を置いて変化させた。

表-3.1 Aトンネルトレーサガス拡散現場実験時の条件

| Run. NO. | 坑 外 風                   |           | 坑口風速(上り)  |           | 交通量(大型車混入率)    |                | 大気安定度 |
|----------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|-------|
|          | 風向 (自動車走行方向)<br>に対する風向) | 風速<br>m/s | 路側<br>m/s | 天端<br>m/s | 上り<br>台/30分(%) | 下り<br>台/30分(%) |       |
| 1        | NNE (追い風)               | 3.6       | 4.4       | 3.8       | 247(27)        | 189(22)        | D     |
| 2        | SSW (向い風)               | 2.5       | 3.4       | 2.6       | 179(26)        | 165(25)        | D     |
| 3        | SW (横 風)                | 6.0       | 4.1       | 3.4       | 289(33)        | 206(22)        | C~D   |
| 4        | N~S (追い風)               | 1.9       | 4.0       | 6.0       | 223(28)        | 192(18)        | B     |
| 5        | 無 風                     | 0.5       | 3.7       | —         | 227(33)        | 203(30)        | G     |
| 6        | N (追い風)                 | 2.2       | 3.6       | 2.6       | 219(13)        | 194(19)        | B     |
| 7        | NNE (追い風)               | 3.3       | 3.8       | 3.2       | 221(19)        | 232(17)        | B~C   |



注) I, II, III, IVは境界面を表わす

図-3.2 Aトンネル計算対象領域

### ①境界条件

計算対象領域の形状を3次元直方体と考えると、境界条件としては地表面、上空面と4つの鉛直境界面からなる計6つの境界面における風向、風速、圧力と坑口における風速が必要となる。このうち、6つの境界面についてはどの境界面に風向、風速、圧力を与えたらよいか、また、与えるにしてもどのような与え方が最適かということが検討課題となる。この点に関しては本研究では図-3.4のような流

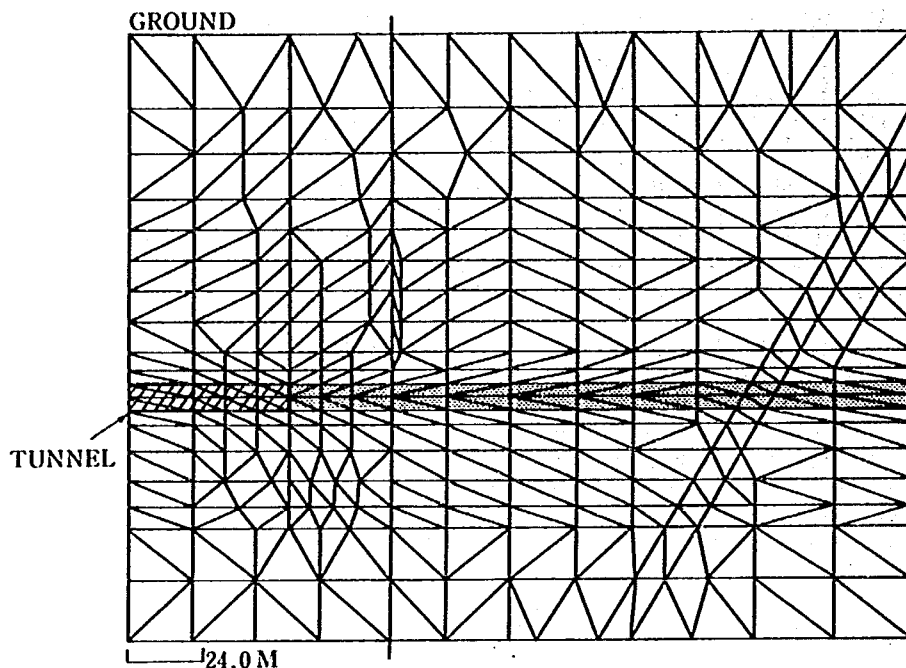


図-3.3 Aトンネル要素分割水平断面図

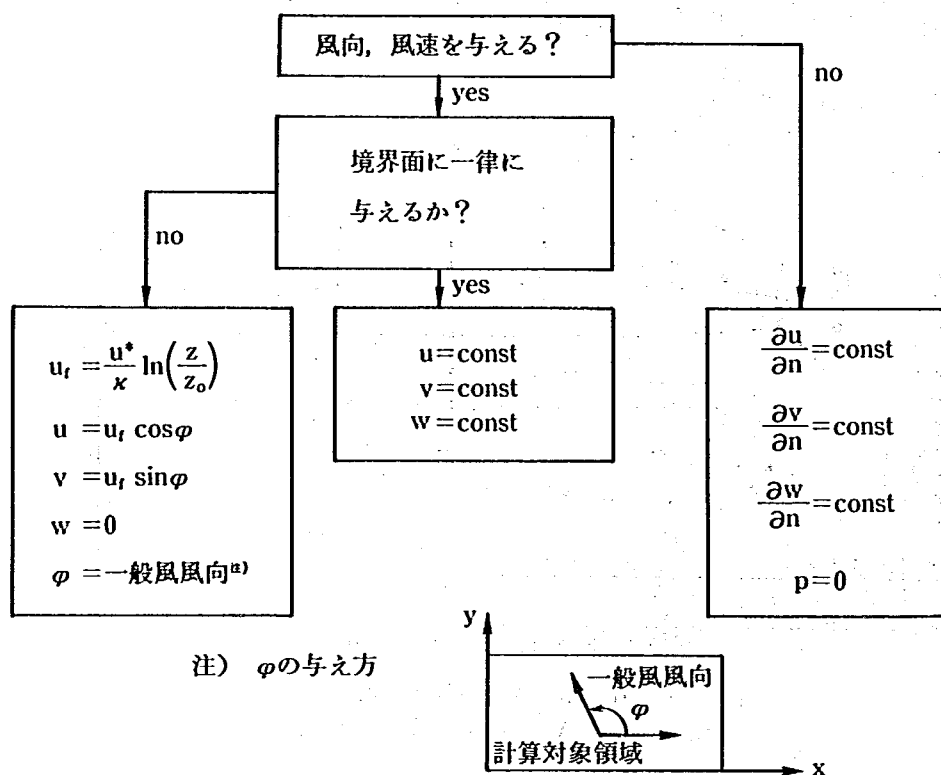


図-3.4 境界面における条件の与え方

れに従い、試計算を行った。まず、6つの境界面を風向、風速を与える面とそうでない面の2つに分ける。風向、風速を与える面が決まれば、次にその与え方が問題となるが、与え方としては境界面で一般的な風速を与える手法か、あるいは風速の鉛直分布に対数則が成立することを仮定した次式を用いて

与える手法のどちらかを選定し、比較計算を行った。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\ u &= u_r \cos \varphi, \quad v = u_r \sin \varphi, \quad w = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 $u_r$ ：一般風<sup>注)</sup>の風速

$\kappa$ ：カルマン定数 (=0.41)

$\varphi$ ：計算対象領域の x 軸の正方向から左回りにとった角度

$u^*$ ：摩擦速度

$z_0$ ：地表面の粗度

$z$ ：地表面からの高さ

なお、上述の  $u^*$ 、 $z_0$  は基本的には計算対象領域の代表地点における高さの異なる 2 点以上の一般風の実測値をもとに  $u_r$  と  $\ln z$  の関係を最小二乗法により求め、係数、切片から求めるものとする。

風向、風速を与えない境界面においては風速自由境界面、圧力固定面として次式で与えた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial n} &= \text{const}, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = \text{const} \\ \frac{\partial w}{\partial n} &= \text{const}, \quad p = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

ただし、 $n$ ：境界面に対して垂直な方向の座標系

坑口における風速については与える場合と与えない場合を考え、与える場合については基本的に表-3.1 中の路側の坑口風速により坑口風速を代表させて図-3.5 に示されるような与え方を試み、比較検討した。

## ②渦動粘性係数

鉛直方向の渦動粘性係数  $\varepsilon_z$  については①境界条件で述べた手法と同様の手法を用いて実測値より摩

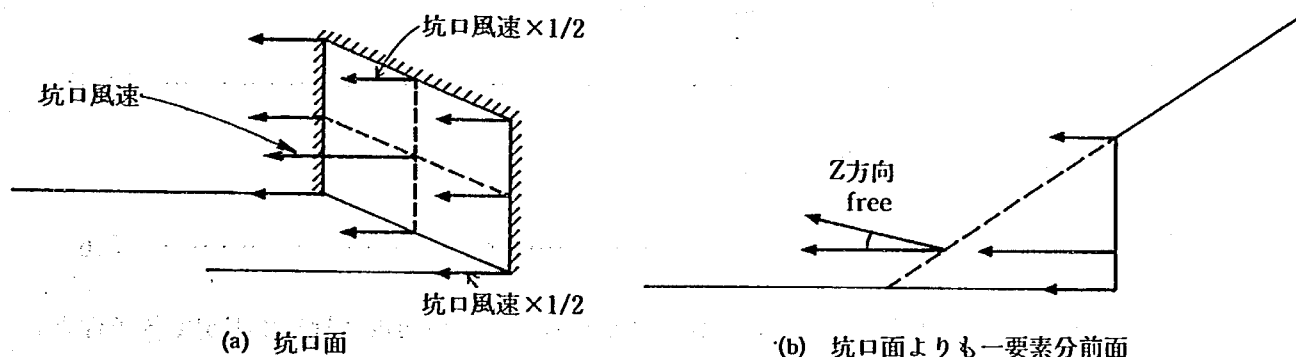


図-3.5 一方向交通時の坑口風速の与え方

注) 坑口から十分離れて坑口の影響を受けない地点の風を一般風と定義する。

擦速度  $u^*$  と粗度  $z_0$  を求め、次式で与える手法の妥当性について検討した。

$$\epsilon_z = \kappa u^* (z + z_0) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

水平方向の渦動粘性係数  $\epsilon_x, \epsilon_y$  については上記の鉛直方向の渦動粘性係数の値を整数倍したものを  $\epsilon_x, \epsilon_y$  の値として与える手法と、パスキルチャートから大気の安定度別に拡散幅  $\sigma_y$  を読み取り、次式により与える手法との比較検討を行った。

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2t} = \frac{\sigma_y^2}{2x} \times u \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし、 $x = 100 \text{ m}$ 、 $u$  については一般風の風速を代表させる。

以上に述べたような点に比較検討の重点を置き、A トンネルを対象にして行った具体的な流れの計算条件を示せば表-3.2 のようになる。この表からもわかるようにパラメトリックスタディは以下の手順に従っている。すなわち、まず初めに Run 1 を対象にして境界条件、渦動粘性係数を変化させた計算 (CASE 1-1~1-8) を行い、次に Run 2 を対象にして境界条件のみを変化させた計算 (CASE 2-1~2-2) を行う。ただし、Run 2 においては後述する走行車両の影響を考慮した計算 (CASE 2-3) も 1 ケースだけ行っている。Run 1, 2 を対象とした計算から比較的整合性の良い結果を得るための境界条件、入力物性値の設定方法を求め、その手法を Run 3, 4, 5, 6, 7 の計算時に適用することにより妥当性を検証するという手順で進めた。

### (3) 拡散の計算条件

拡散の計算を行う場合には以下の点に重点を置いて表-3.3 の拡散計算条件を設定し、パラメトリックスタディを行った。

#### ①境界条件

拡散の計算を行う場合には、濃度が境界条件として必要となるが、本研究では濃度の与え方についてはパラメトリックスタディの対象とはせず、各計算ケースを通じて次のような与え方をした。まず、濃度の固定境界としては坑口濃度の影響を受けない風上側の鉛直境界面または辺に対して固定値 0 を与え、その他の鉛直境界面及び上空面については

$$\frac{\partial c}{\partial n} = \text{const} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

とした。また、地表面は反射境界すなわち

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

とした。坑口濃度については計算上の坑口部分に含まれるすべての節点に対して固定境界条件として均一に与えるものとし、相対濃度で表示する場合は 1.0 を、絶対濃度で表示する場合は坑口濃度の実測値または排出量、流速、断面積から算出した理論坑口濃度を与えるものとした。

#### ②拡散係数

拡散係数の与え方は基本的には渦動粘性係数の与え方と同じものにした。すなわち、鉛直方向の拡

表-3.2 Aトンネル流れの計算条件

| CASE | 坑口風速                                | 車速の入力                                                                                                                                                                                                                                          | 6つの境界面における境界条件                                                                                                                                                                                    | 渦動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s) |                |                                                                  | 計算対象<br>とした<br>現場実験 | $\Delta t(\text{sec})$<br>ステップ数 | 検討点        | 整合性 |
|------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------|-----|
|      |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                   | $\epsilon_1$               | $\epsilon_2$   | $\epsilon_3$                                                     |                     |                                 |            |     |
| 1-1  | 中央 4.4 m/s<br>壁面 2.2 m/s            | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面<br>I $\begin{cases} u=3.1 \text{ m/s} \\ v=-1.8 \text{ m/s} \\ w=0 \text{ m/s} \end{cases}$<br>III<br>IV<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○II<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$                     | $2\epsilon_1$              | $2\epsilon_2$  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=2.0 \text{ m/s}$<br>$x=0.41$<br>$z_0=0.03$ | Run 1               | 0.1<br>100                      |            |     |
| 1-2  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面<br>I $\begin{cases} u=3.5 \text{ m/s} \\ v=-2.0 \text{ m/s} \\ w=0 \text{ m/s} \end{cases}$<br>III<br>IV<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○II<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$                     | $20\epsilon_1$             | $20\epsilon_2$ | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=2.0$<br>$z_0=0.03$                         | Run 1               | 同上                              | 渦動粘性<br>係数 |     |
| 1-3  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上                                                                                                                                                                                                | 6.0                        | 6.0            | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.25$<br>$z_0=0.03$                        | Run 1               | 同上                              | 同上         |     |
| 1-4  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面<br>$\begin{cases} u=3.5 \text{ m/s} \\ v=2.0 \text{ m/s} \\ w=0 \text{ m/s} \end{cases}$<br>○I, II, IV<br>地表面付近では $u_i$<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○III<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$     | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 1               | 同上                              | 境界条件       |     |
| 1-5  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面<br>I<br>IV<br>地表面<br>同 上<br>○II, III<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$                                                                                                                                 | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 1               | 同上                              | 同上         |     |
| 1-6  | なし                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面 I, IV<br>$\begin{cases} u=u_i \cos \varphi \\ v=u_i \sin \varphi \\ w=0 \text{ m/s} \\ \varphi=328.4^\circ \end{cases}$<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○II, III<br>$p=0$                | 1.15                       | 1.15           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.226$<br>$z_0=0.03$                       | Run 1               | 同上                              | 同上         |     |
| 1-7  | 中央 4.4 m/s<br>壁面 2.2 m/s            | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上                                                                                                                                                                                                | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 1               | 同上                              | 同上         |     |
| 1-8  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上                                                                                                                                                                                                | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 1               | 0.1<br>150                      | 同上         | 良   |
| 2-1  | 中央 3.4 m/s<br>壁面 1.7 m/s            | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面 II, III<br>$\begin{cases} u=u_i \cos \varphi \\ v=u_i \sin \varphi \\ w=0 \text{ m/s} \\ \varphi=132.5^\circ \end{cases}$<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○I, IV<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$ | 0.8                        | 0.8            | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.178$<br>$z_0=0.03$                       | Run 2               | 0.1<br>100                      |            |     |
| 2-2  | 同上                                  | なし                                                                                                                                                                                                                                             | ○上空面 I, IV<br>$\begin{cases} u=u_i \cos \varphi \\ v=u_i \sin \varphi \\ w=0 \text{ m/s} \\ \varphi=132.5^\circ \end{cases}$<br>○地表面<br>$u=v=w=0 \text{ m/s}$<br>○II, III<br>$p=0 \text{ kg/m}^2$ | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 2               | 0.1<br>120                      | 境界条件       | 良   |
| 2-3  | 同上                                  | 坑口<br>$\begin{cases} \rightarrow 1.7 \text{ m/s} \\ \rightarrow 3.4 \text{ m/s} \\ \rightarrow 1.7 \text{ m/s} \end{cases}$<br>$\begin{cases} \rightarrow 1 \text{ m/s} \\ \rightarrow 2 \text{ m/s} \\ \rightarrow 1 \text{ m/s} \end{cases}$ | 同上                                                                                                                                                                                                | 同上                         | 同上             | 同上                                                               | Run 2               | 0.1<br>100                      | 換算風速       |     |
| 3-1  | 中央 4.1 m/s<br>壁面 2.05 m/s           | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上<br>(但し, $\varphi=112.3^\circ$ )                                                                                                                                                                | 1.92                       | 1.92           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.376$<br>$z_0=0.03$                       | Run 3               | 0.1<br>120                      |            | 良   |
| 4-1  | 上 6.0 m/s<br>中 4.0 m/s<br>下 2.0 m/s | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上<br>(但し, $\varphi=62.8^\circ$ )                                                                                                                                                                 | 3.97                       | 3.97           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.129$<br>$z_0=0.03$                       | Run 4               | 0.1<br>100                      |            |     |
| 5-1  | 中央 3.7 m/s<br>壁面 1.85 m/s           | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上<br>(但し, $\varphi=124.7^\circ$ )                                                                                                                                                                | 0.04                       | 0.04           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.046$<br>$z_0=0.03$                       | Run 5               | 0.1<br>120                      |            |     |
| 6-1  | 中央 3.6 m/s<br>壁面 1.8 m/s            | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上<br>(但し, $\varphi=346.3^\circ$ )                                                                                                                                                                | 3.97                       | 3.97           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.140$<br>$z_0=0.03$                       | Run 6               | 0.1<br>120                      |            | 良   |
| 7-1  | 中央 3.8 m/s<br>壁面 1.9 m/s            | なし                                                                                                                                                                                                                                             | 同上<br>(但し, $\varphi=334.5^\circ$ )                                                                                                                                                                | 5.96                       | 5.96           | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.226$<br>$z_0=0.03$                       | Run 7               | 0.1<br>120                      |            | 良   |

表-3.3 A トンネル拡散の計算条件

| CASE  | 流れ場 | 車 速 の 入 力                                                     | 拡散係数 (m <sup>2</sup> /sec) |       |                                                                    | 計算対象とした<br>現場実験 | $\Delta t$ (sec)<br>ステップ数 | 検 討 点                | 整合性 |
|-------|-----|---------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----|
|       |     |                                                               | $k_x$                      | $k_y$ | $k_z$                                                              |                 |                           |                      |     |
| 1-5-1 | 1-5 | なし                                                            | 1.15                       | 1.15  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.226$<br>$z_0=0.03\text{m/sec}$             | Run 1           | 0.1<br>4,000              |                      |     |
| 1-5-2 | 1-5 | なし                                                            | 0.64                       | 0.64  | 同 上                                                                | Run 1           | 同 上                       | 拡散係数                 |     |
| 1-6-1 | 1-6 | なし                                                            | 1.15                       | 1.15  | 同 上                                                                | Run 1           | 同 上                       | 流れ場                  |     |
| 1-7-1 | 1-7 | なし                                                            | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 1           | 同 上                       | 同 上                  |     |
| 1-8-1 | 1-8 | なし                                                            | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 1           | 同 上                       | 同 上                  |     |
| 1-8-2 | 1-8 | なし                                                            | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.452$<br>$z_0=0.03$                         | Run 1           | 同 上                       | 拡散係数                 |     |
| 1-8-3 | 1-8 | 上り F=5の換算風速<br>下り なし                                          | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.226$<br>$z_0=0.03$                         | Run 1           | 同 上                       | 拡散係数<br>換算風速         | 良   |
| 1-8-4 | 1-8 | 上り F=3の換算風速<br>下り なし                                          | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 1           | 同 上                       | 換算風速                 | 良   |
| 2-1-1 | 2-1 | 上り 中心4.05m/s<br>上・下2.025m/s<br>下り 中心-3.37m/s<br>上・下-1.88m/s   | 0.8                        | 0.8   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.178$<br>$z_0=0.03$                         | Run 2           | 同 上                       |                      |     |
| 2-2-1 | 2-2 | 上り 中心4.05m/s<br>上・下2.025m/s<br>下り 中心-0.377m/s<br>上・下-0.188m/s | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 2           | 同 上                       | 流れ場                  |     |
| 2-3-1 | 2-3 | なし                                                            | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 2           | 同 上                       | 同 上                  |     |
| 2-2-2 | 2-2 | 上り 中心4.05m/s<br>上・下2.025m/s<br>下り 中心-0.377m/s<br>上・下-0.188m/s | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=1.78$<br>$z_0=0.03$                          | Run 2           | 0.2<br>4,000              | 拡散係数                 |     |
| 2-2-3 | 2-2 | 上り F=30の換算風速<br>下り なし                                         | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.178$<br>$z_0=0.03$                         | Run 2           | 0.1<br>4,000              | 換算風速<br>拡散係数         |     |
| 2-2-4 | 2-2 | 上り F=30の換算風速<br>下り なし                                         | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.178$<br>上り道路上<br>$u^*=1.780$<br>$z_0=0.03$ | Run 2           | 同 上                       | 道路上の<br>拡散係数         |     |
| 2-2-5 | 2-2 | 上り F=20の換算風速<br>下り なし                                         | 同 上                        | 同 上   | 同 上                                                                | Run 2           | 同 上                       | 換算風速                 | 良   |
| 3-1-1 | 3-1 | 上り F=28の換算風速<br>下り なし                                         | 1.92                       | 1.92  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.376$<br>上り道路上<br>$u^*=5.264$<br>$z_0=0.03$ | Run 3           | 同 上                       | 道路上の<br>拡散係数         | 良   |
| 3-1-2 | 3-1 | 上り F=30の換算風速<br>下り なし                                         | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.376$<br>上り道路上<br>$u^*=3.76$<br>$z_0=0.03$  | Run 3           | 同 上                       | 換算風速<br>道路上の<br>拡散係数 | 良   |
| 5-1-1 | 5-1 | なし                                                            | 0.040                      | 0.040 | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.046$<br>$z_0=0.03$                         | Run 5           | 0.2<br>4,000              |                      |     |
| 5-1-2 | 5-1 | 上り F=18の換算風速<br>下り なし                                         | 同 上                        | 同 上   | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.011$<br>上り道路上<br>$u^*=0.095$<br>$z_0=0.03$ | Run 5           | 同 上                       | 拡散係数<br>換算風速         |     |
| 5-1-3 | 5-1 | 上り F=3の換算風速<br>下り なし                                          | 0.160                      | 0.160 | 同 上                                                                | Run 5           | 同 上                       | 換算風速                 |     |
| 6-1-1 | 6-1 | なし                                                            | 3.97                       | 3.97  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.140$<br>$z_0=0.03$                         | Run 6           | 0.1<br>4,000              |                      |     |
| 6-1-2 | 6-1 | なし                                                            | 0.70                       | 0.70  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.140$<br>$z_0=0.03$                         | Run 6           | 0.1<br>4,000              | 拡散係数                 |     |
| 6-1-3 | 6-1 | 上り F=4の換算風速<br>下り なし                                          | 0.70                       | 0.70  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=0.750$<br>$z_0=0.03$                         | Run 6           | 0.1<br>4,000              |                      | 良   |
| 7-1-1 | 7-1 | 上り F=4の換算風速<br>下り なし                                          | 1.06                       | 1.06  | $xu^*(z+z_0)$<br>$u^*=1.00$<br>$z_0=0.03$                          | Run 7           | 0.1<br>4,000              | 拡散係数                 | 良   |

散係数は次式

$$k_z = \kappa u^* (z + z_0) \dots\dots\dots (3.7)$$

で、また、水平方向の拡散係数については式 (3.7) の値を整数倍したものを与えるか、あるいは次式

$$k_x = k_y = \frac{\sigma_y^2}{2x} \times u \dots\dots\dots (3.8)$$

で与え、比較検討を行った。なお、水平方向の拡散は乱れ強さによる乱流拡散よりも平均風速による移流拡散の方が主であると考えられるため、大気安定度を実際の大気安定度にかかわらず D として、水平方向拡散係数を式 (3.8) から求めて与えるということも一部の CASE (CASE 6-1-2, 6-1-3) について行っている。

### ③自動車走行の影響について

3.1 節で述べたように自動車走行の影響としては、自動車走行により道路上で拡散が発生することと、風が発生することの 2 点が考えられる。A トンネルでは前者の影響についてはこの影響が大となる向い風、横風のケースに対して道路上の鉛直方向の拡散係数として道路以外の領域の拡散係数の 10 倍程度の値を与える計算を行い、その妥当性を検証した (CASE 2-2-4, 3-1-1)。後者の影響については換算風速の概念を導入することによる処理を試みた。すなわち次式 (3.9) により自動車走行に起因する風速を換算し、流れの計算結果にこの換算風速を図-3.6 のように重ね合せることとし、この手法の妥当性を試算により検証した (CASE 1-8-3, 1-8-4, 2-2-3, 2-2-5, 3-1-2, 5-1-2, 5-1-3, 6-1-3)。この手法を適用する場合には、式 (3.9) 中の換算係数 F の値が重要となってくるため、特に F の値の決め方に重点を置いて試算を行っている。

$$U_r = \frac{\sqrt{A} \times V}{L} \times F \dots\dots\dots (3.9)$$

ただし、 $U_r$ ：換算風速 (m/s)

A：自動車の等価抵抗面積 (m<sup>2</sup>) を表わし、大型車に対して 5.37 m<sup>2</sup>、小型車に対して 1.07 m<sup>2</sup> として大型車混入率 r を用いると、 $A = 5.37 \times r + 1.07 (1-r)$  で表される<sup>2)</sup>

V：車速 (m/s)

L：車頭間隔 (m)

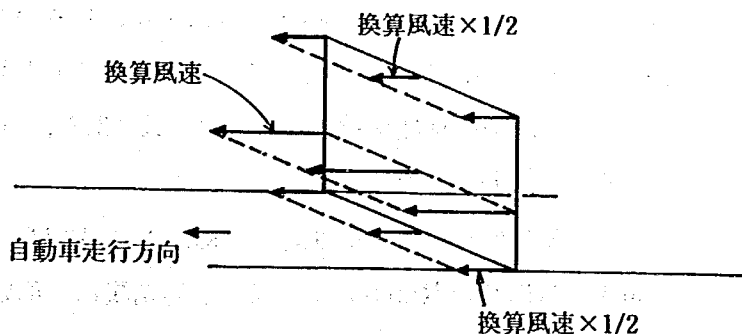


図-3.6 一方向交通時の車速の換算風速の与え方

F：換算係数

なお、車頭間隔  $L$  は車速  $V$  と交通量  $N$  (台/s) を用いると、 $L=V/N$  で表されるため次式によって、換算風速を求めることもできる。

$$U_r = \sqrt{A} \times N \times F \quad \dots\dots\dots (3.9')$$

#### ④流れ計算結果の影響について

拡散計算においては、上記①～③の項目の他に、流れ場も重要となってくる。そこで、流れ場が異なったときの影響を調べるため、拡散計算の入力項として用いる流れの計算結果を変化させた計算を一部の CASE (CASE 1-6-1, 1-7-1, 1-8-1, 2-2-1, 2-3-1) で行っている。

### 3) 比較検討及び評価

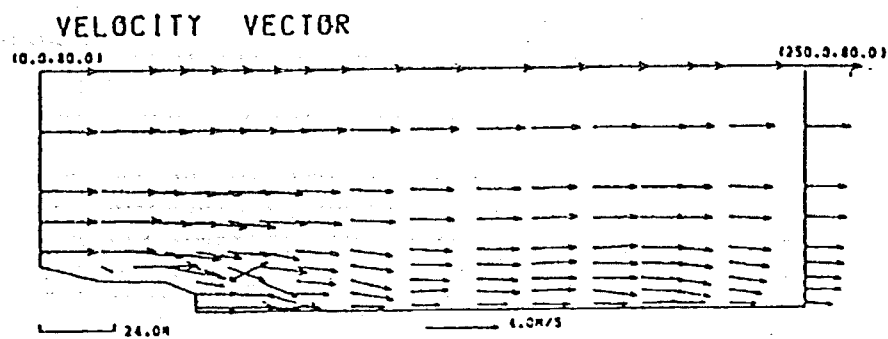
#### (1) 流れ計算

図-3.7～3.14 は Run 1 に対して境界条件及び渦動粘性係数を変化させて行った流れ計算の結果を示したものである。CASE 1-1 (図-3.7) ～1-3 (図-3.9) は主として渦動粘性係数の与え方の影響を調べたものであるが、図からもわかるようにいずれも流れ場の一部に発散が現れ整合性はよくない。そこで、CASE 1-3 (図-3.9) ～1-5 (図-3.11) においては主として境界面における境界条件の与え方の影響を調べた。境界条件の影響は渦動粘性係数の場合とは異なっておりかなり大きく、境界条件を変化させることにより流れ場の整合性が向上することが図からもよくわかる。CASE 1-6 (図-3.12) ～1-8 (図-3.14) は、流れ場の整合性をさらによくするために地表面の境界条件を  $u=v=w=0$  m/s に固定し、また、渦動粘性係数を求めるための風速の代表地点を変え、さらには坑口風の与え方の影響を調べたもので、最終的には Run 1 に対しては図-3.14 に示される CASE 1-8 において最も良い整合性が得られた。

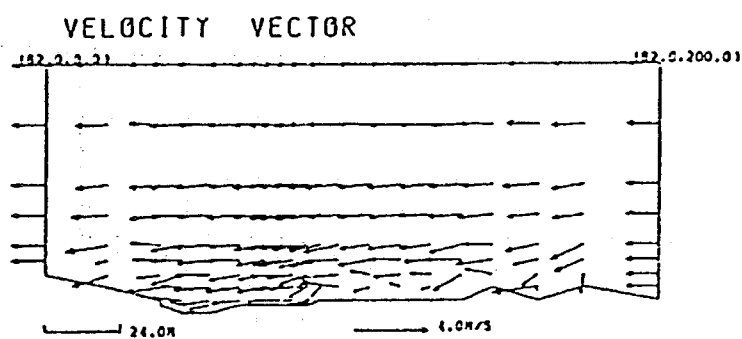
図-3.15～3.17 は、Run 2 を対象にして行った流れ計算の結果である。流れ場の計算に及ぼす影響は渦動粘性係数よりも境界条件の方が大きいことが Run 1 の計算結果から判明しているため、Run 2 を対象にした計算は境界条件の設定方法の確認と、自動車走行の影響を流れの計算時に入力した場合の効果調べることに焦点を絞ったが、結果としては自動車走行の影響を入力しない CASE 2-2 (図-3.16) において最も良い整合性が得られた。

以上、Run 1, 2 の計算結果から、境界条件の与え方としては上空面及び流況が穏やかな 2 面の鉛直境界面に対しては式 (3.1) を、地表面に対しては  $u=v=w=0$  m/s を、残りの 2 面の鉛直境界面に対しては式 (3.2) を、坑口風速については図-3.5 に示される方法で実測された坑口風速を、それぞれ与えるのが良いことがわかった。また、渦動粘性係数については、式 (3.3), (3.4) によりそれぞれ与えた場合に良い結果が得られることがわかった。

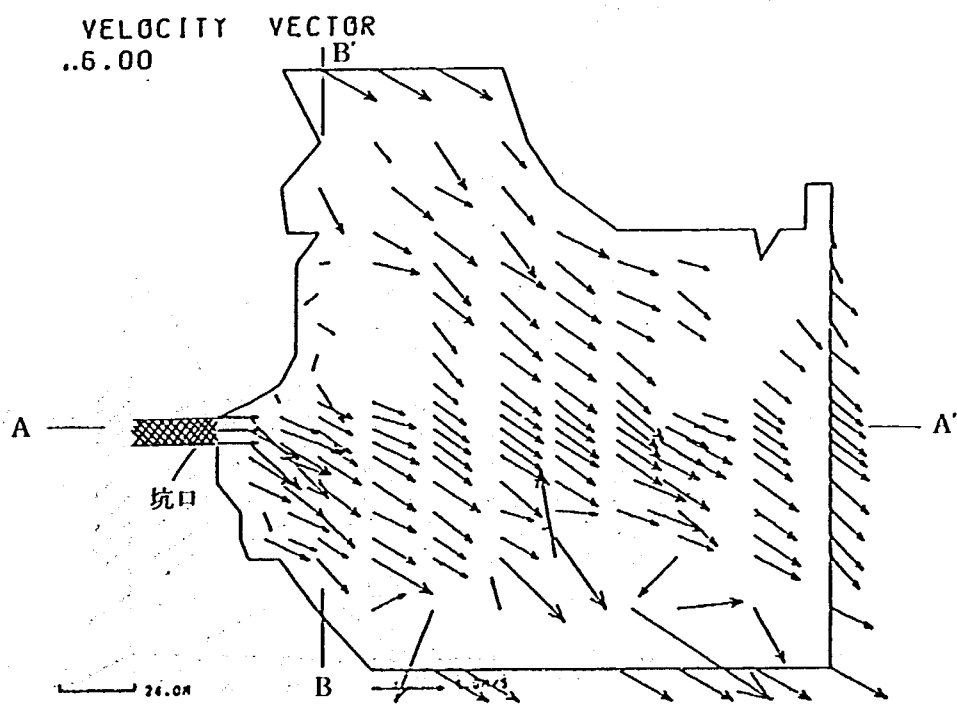
図-3.18～3.22 はこれらの手法の妥当性を検証する目的で、Run 3～7 を対象にして行った計算結果である。風向変動の激しい Run 4 と無風時の Run 5 においては計算結果に一部収束性の悪い部分が見られるが、その他の Run においては比較的整合性の良い結果が得られており、上述した設定法はほぼ妥当であることがわかる。



(a) 縦断面 A-A'

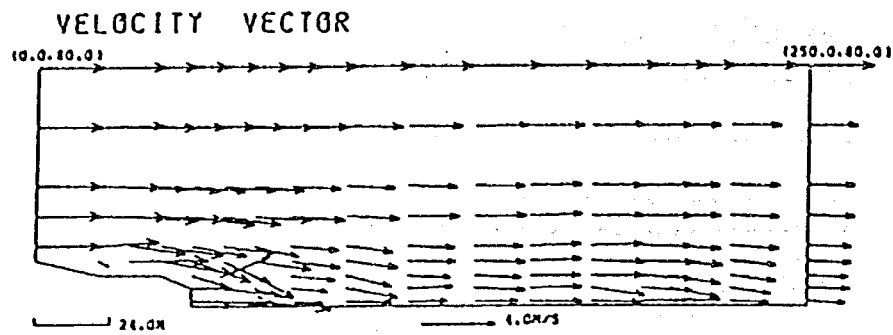


(b) 縦断面 B-B'

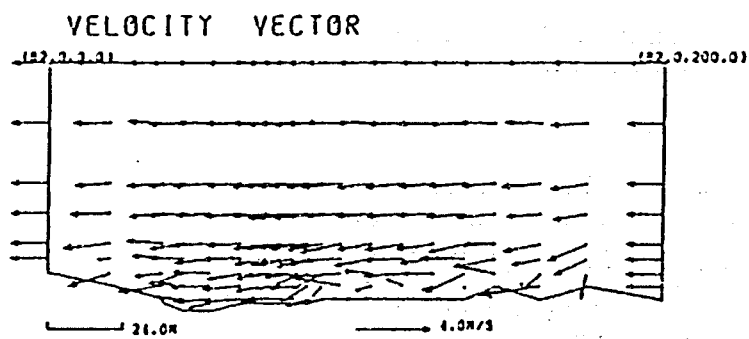


(c)

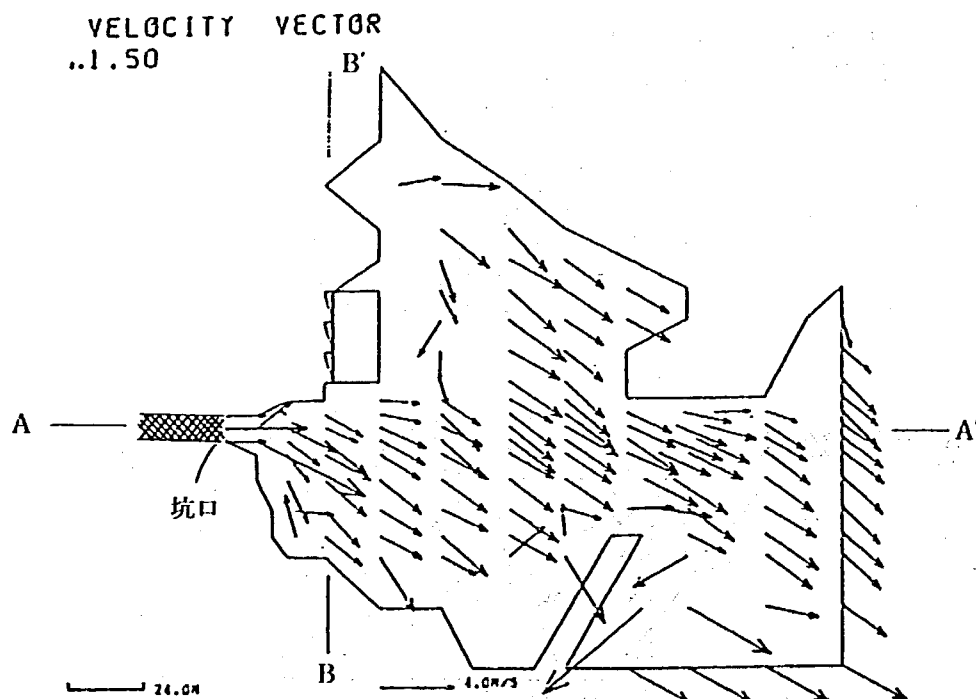
図-3.7 流れの計算結果 CASE 1-1



(a) 縦断面 A-A'

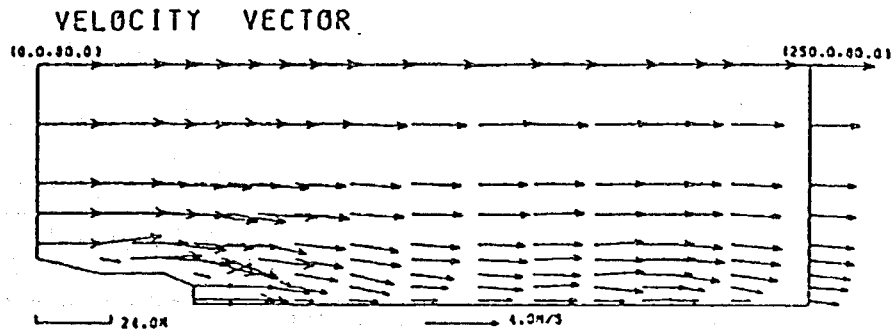


(b) 縦断面 B-B'

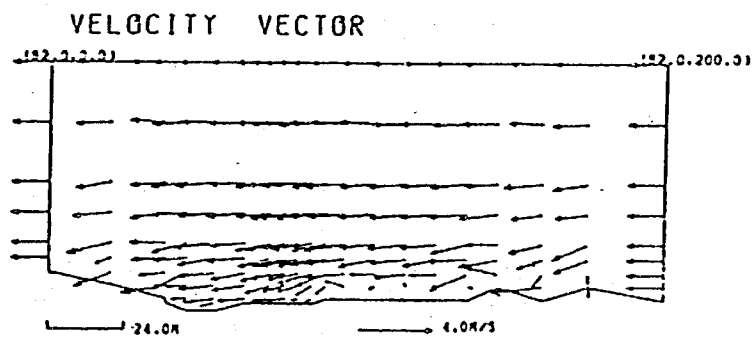


(c)

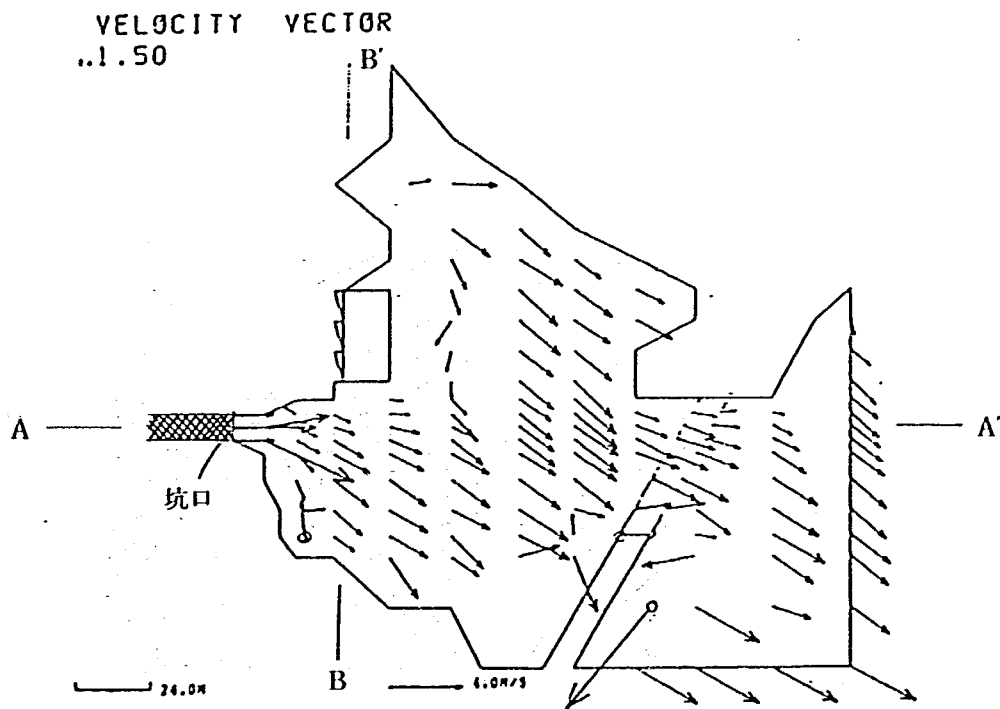
図-3.8 流れの計算結果 CASE 1-2



(a) 縦断面 A-A'

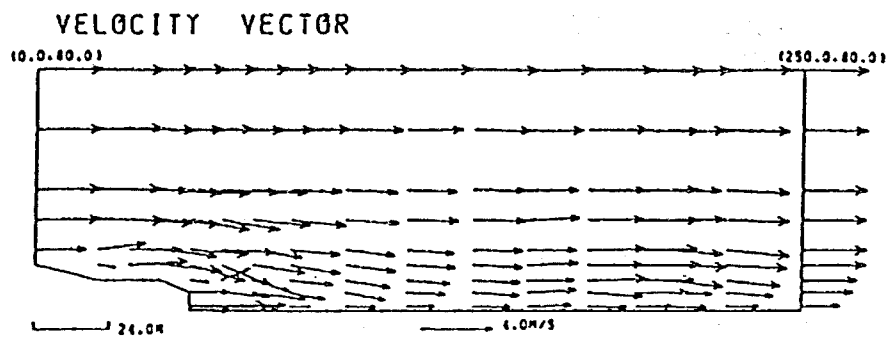


(b) 縦断面 B-B'

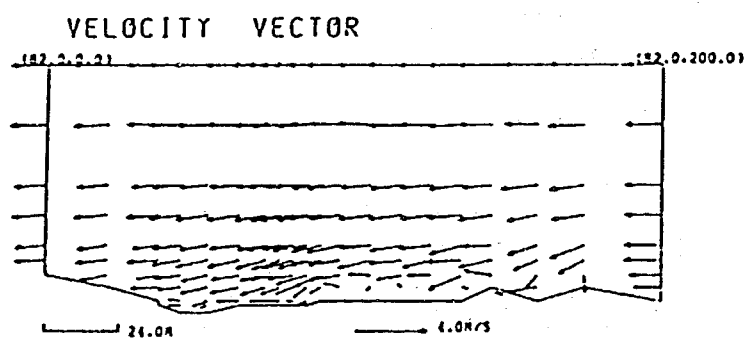


(c)

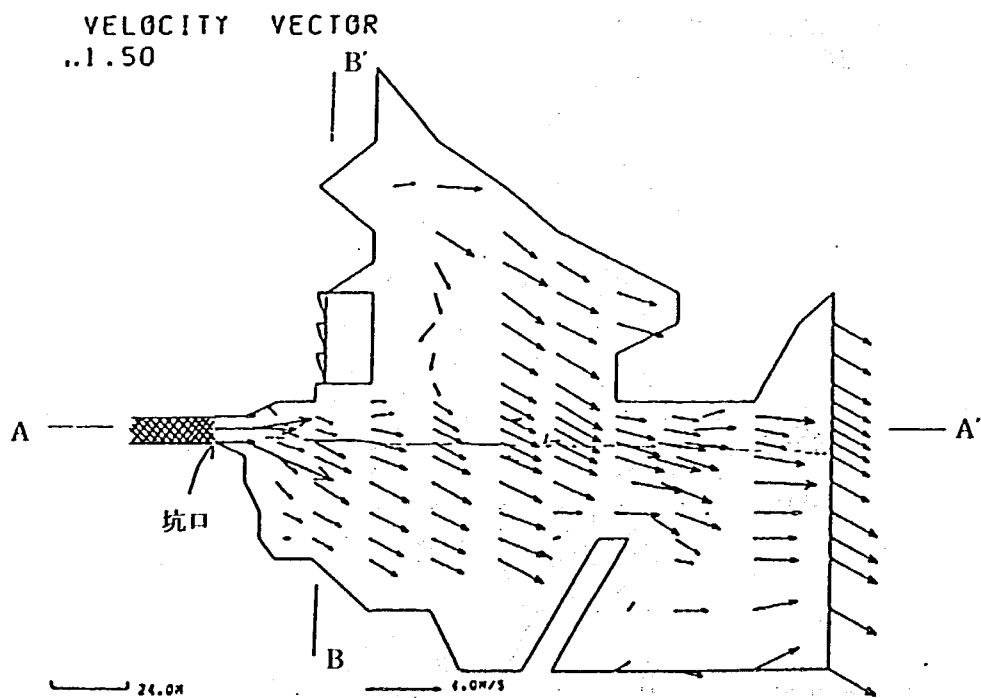
図-3.9 流れの計算結果 CASE 1-3



(a) 縦断面 A-A'

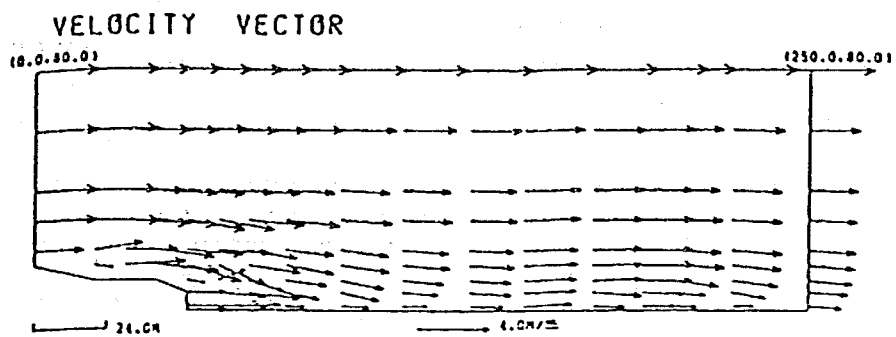


(b) 縦断面 B-B'

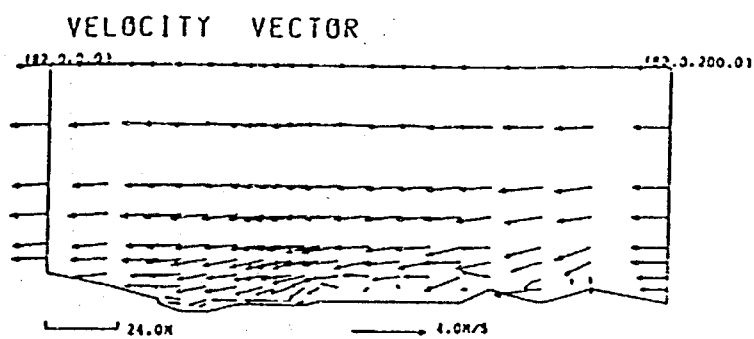


(c)

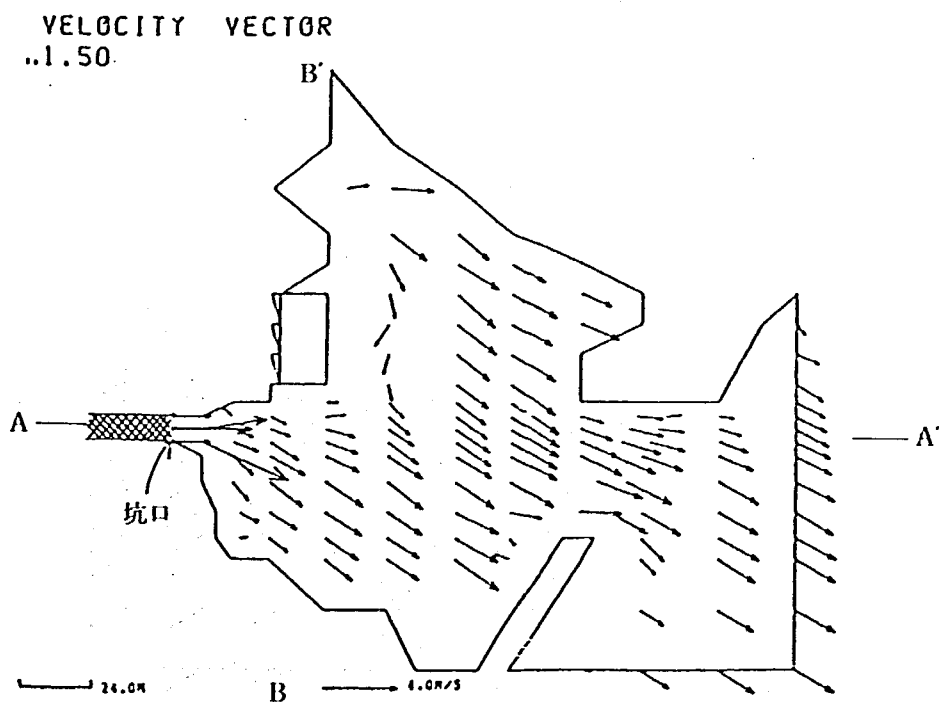
図-3.10 流れの計算結果 CASE 1-4



(a) 縦断面 A-A'

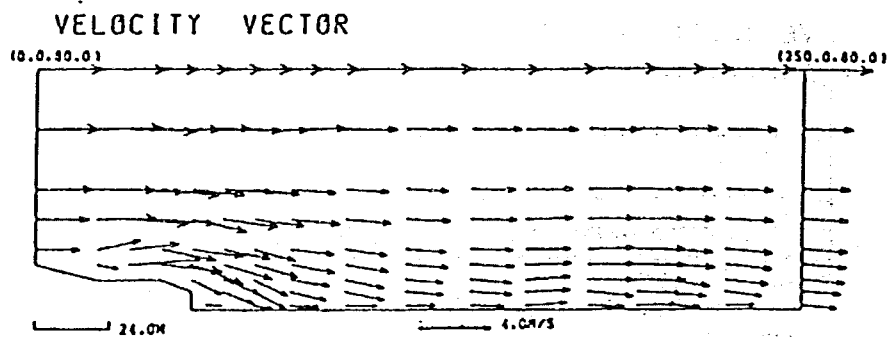


(b) 縦断面 B-B'

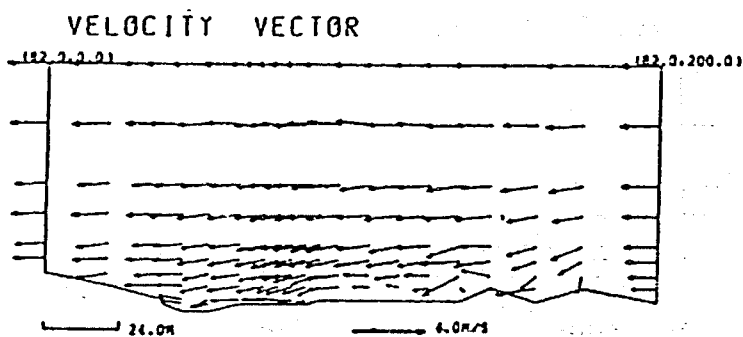


(c)

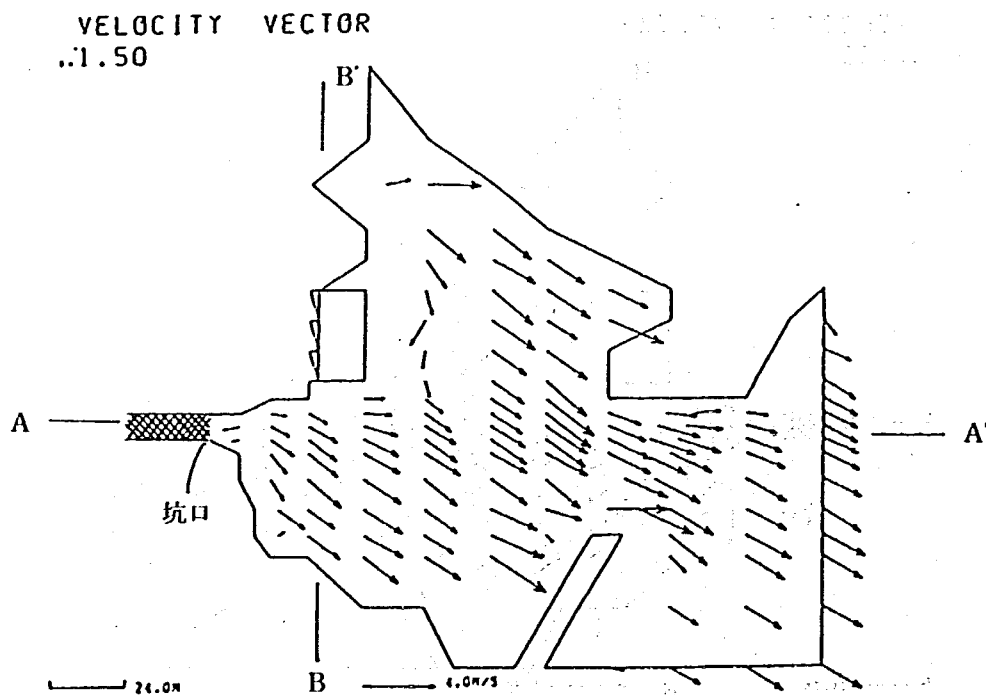
図-3.11 流れの計算結果 CASE 1-5



(a) 縦断面 A-A'

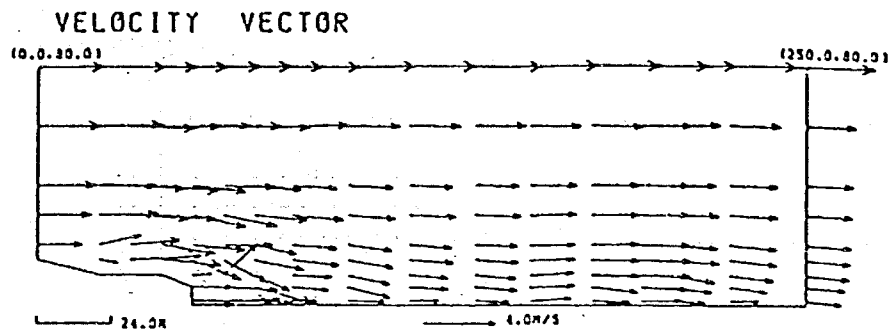


(b) 縦断面 B-B'

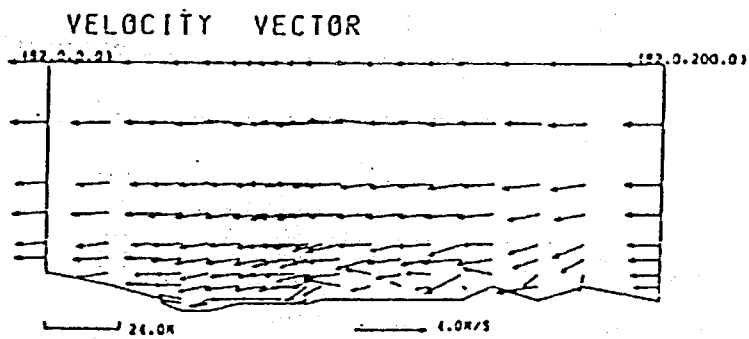


(c)

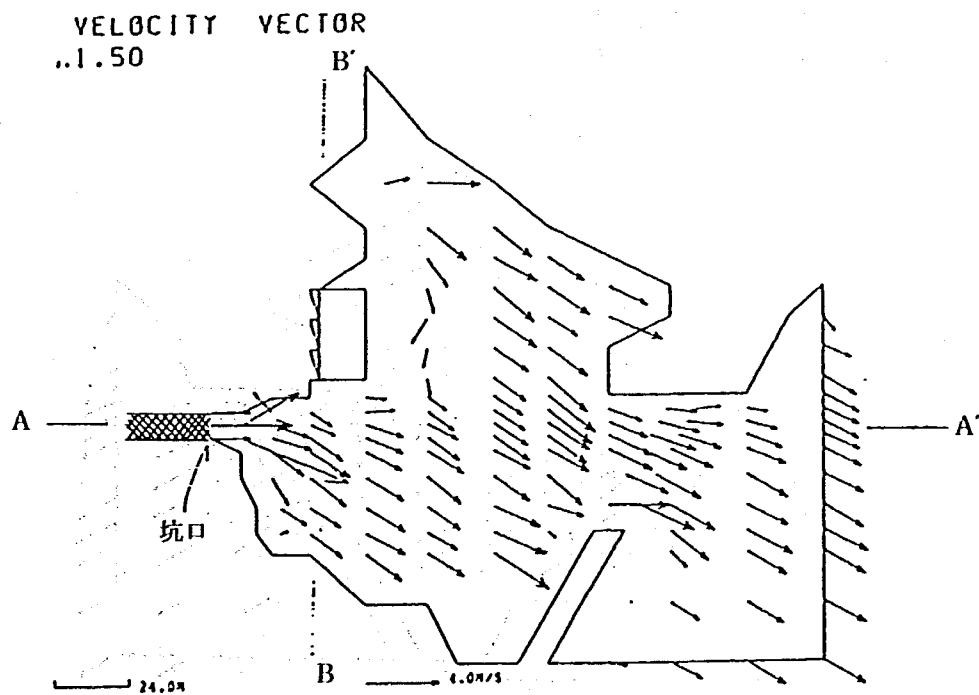
図-3.12 流れの計算結果 CASE 1-6



(a) 縦断面 A-A'

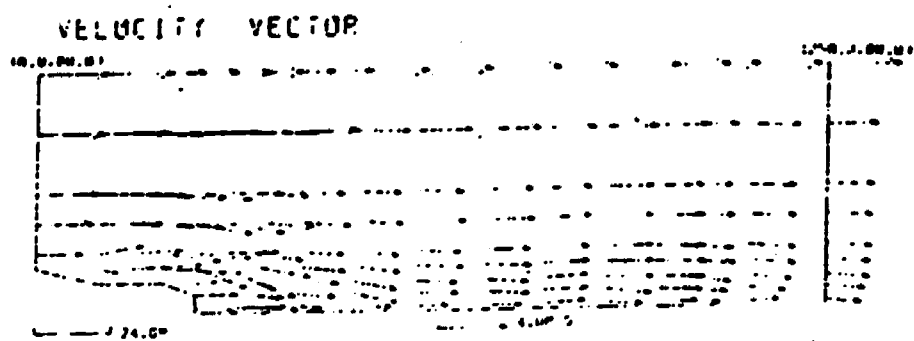


(b) 縦断面 B-B'

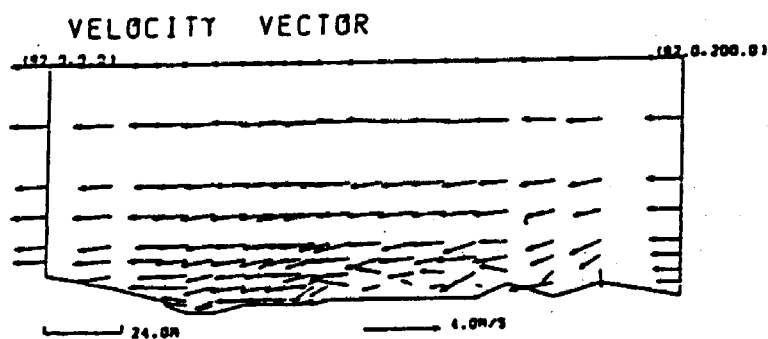


(c)

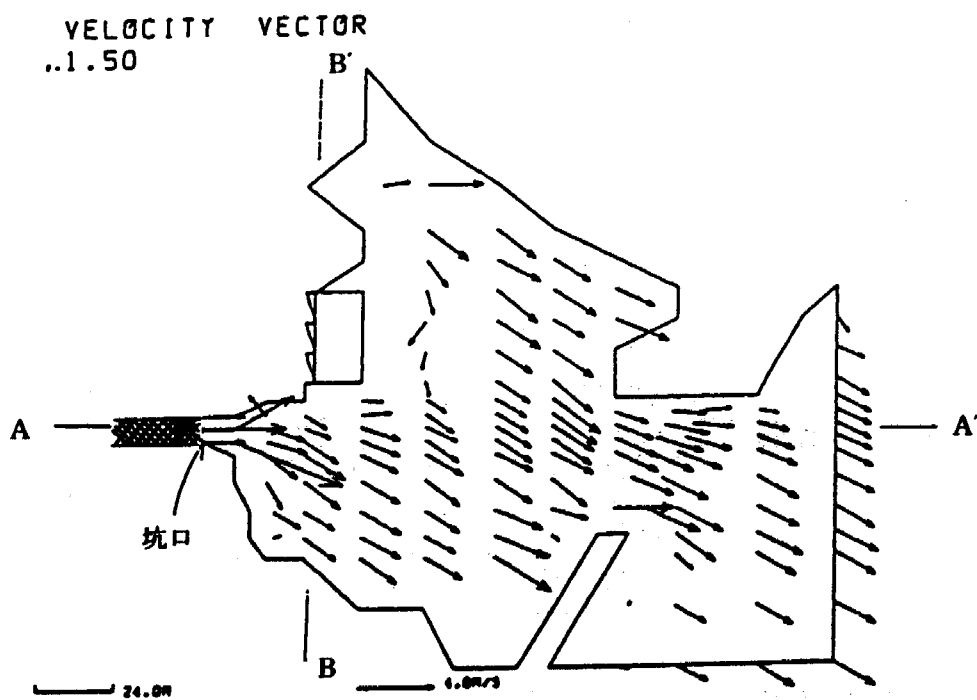
図-3.13 流れの計算結果 CASE 1-7



(a) 縦断面 A-A'

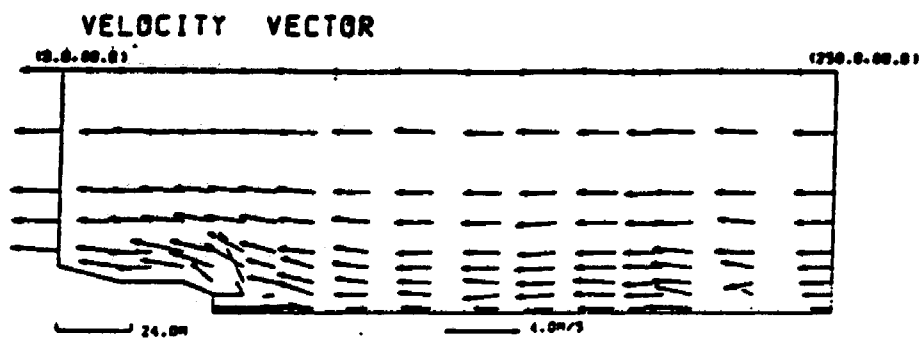


(b) 縦断面 B-B'

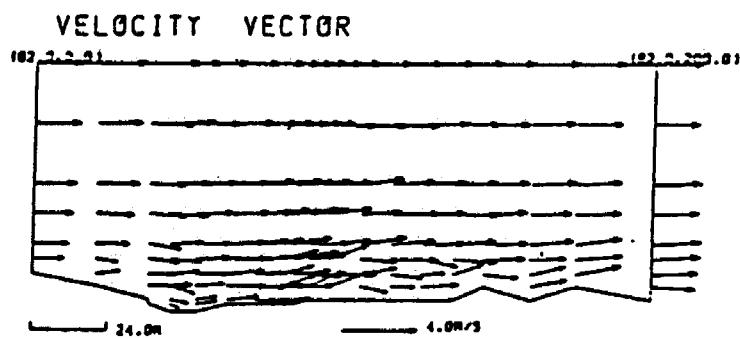


(c)

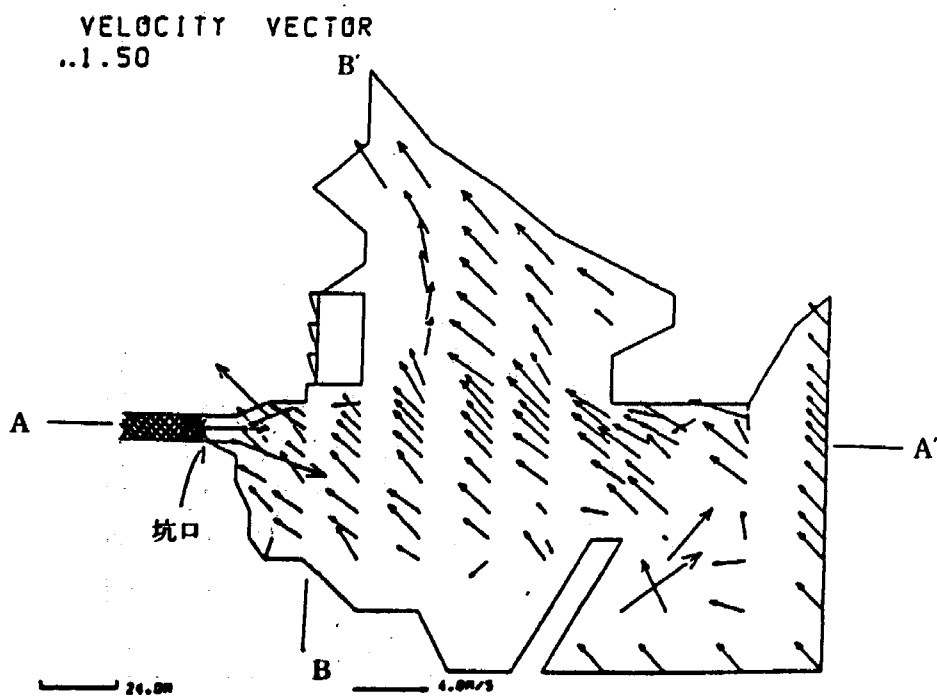
図-3.14 流れの計算結果 CASE 1-8



(a) 縦断面 A-A'

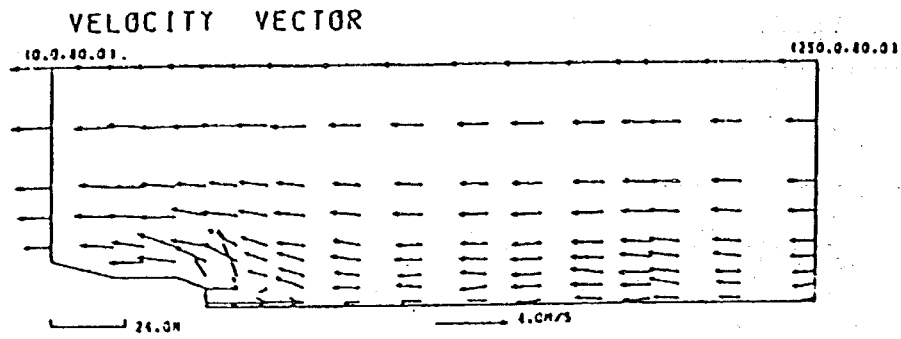


(b) 縦断面 B-B'

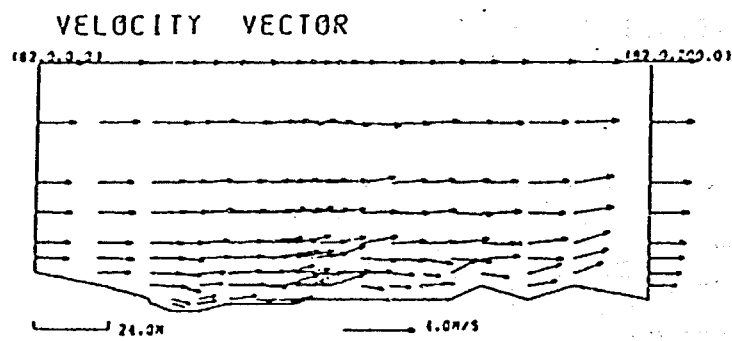


(c)

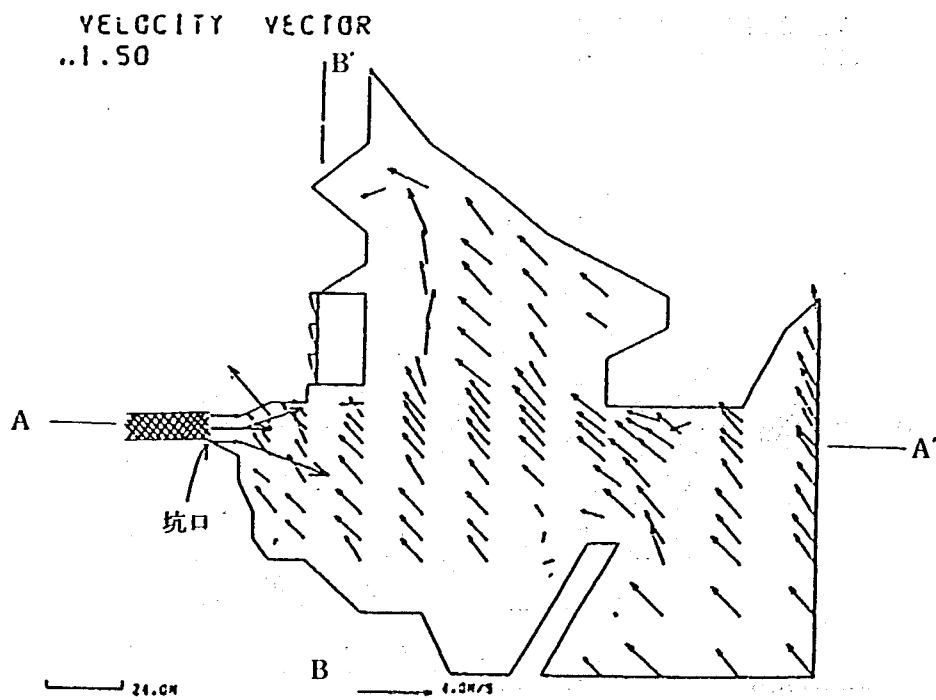
図-3.15 流れの計算結果 CASE 2-1



(a) 縦断面 A-A'

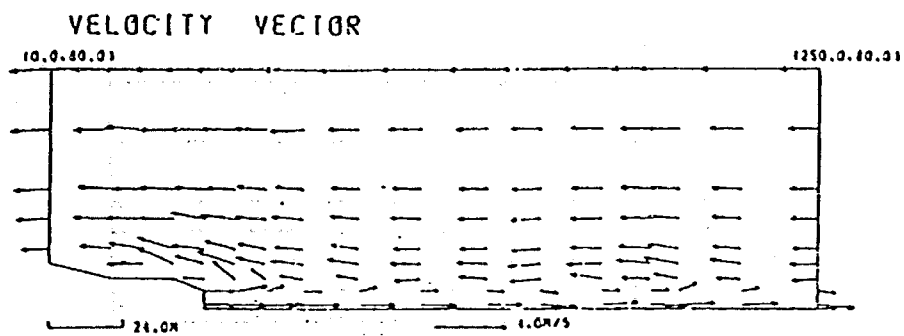


(b) 縦断面 B-B'

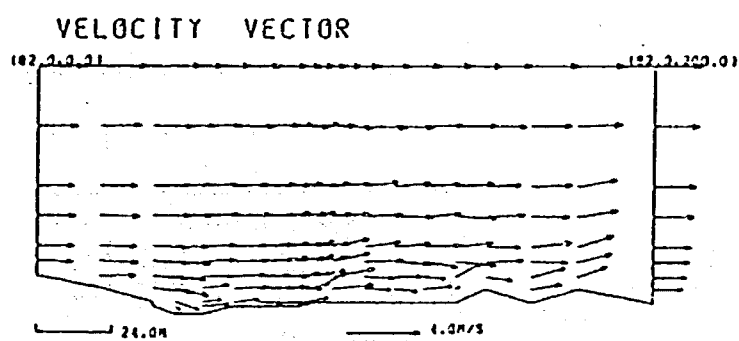


(c)

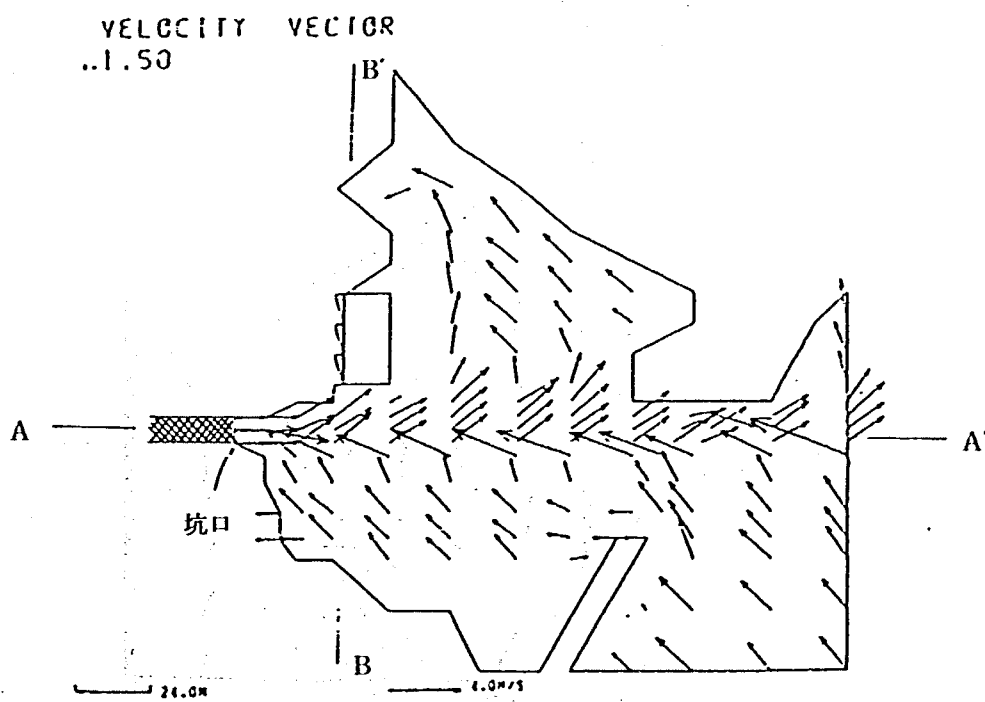
図-3.16 流れの計算結果 CASE 2-2



(a) 縦断面 A-A'



(b) 縦断面 B-B'



(c)

図-3.17 流れの計算結果 CASE 2-3

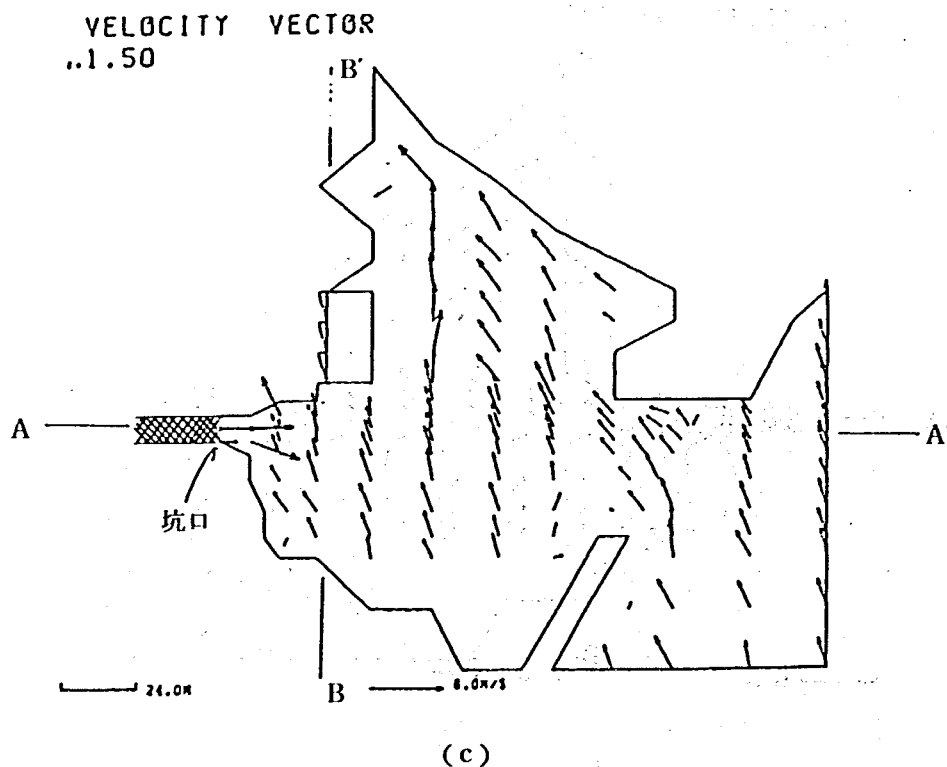
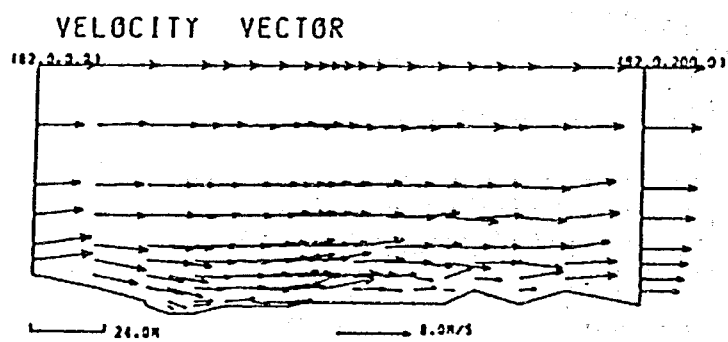
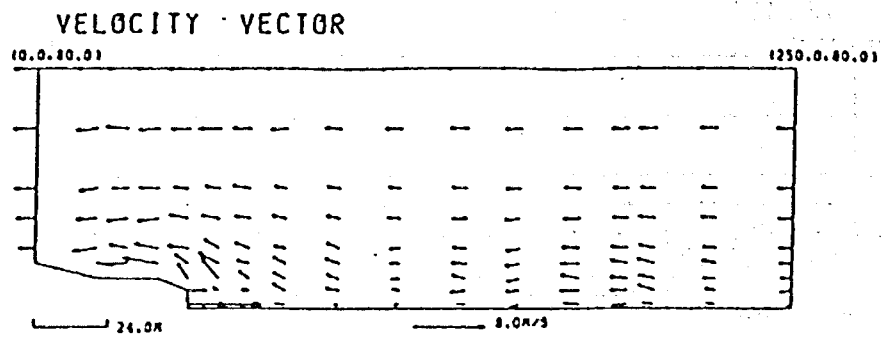
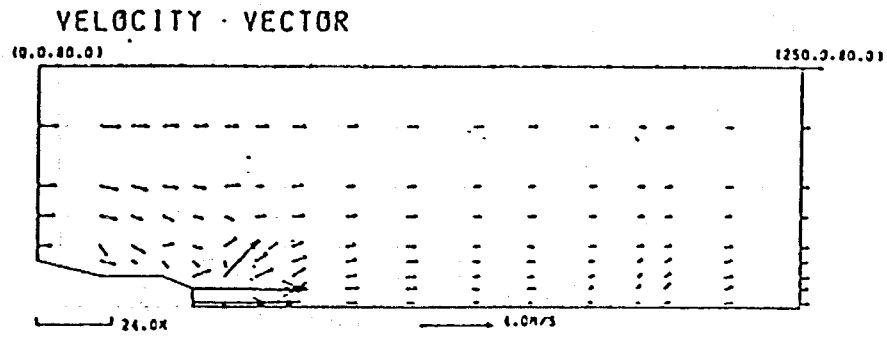
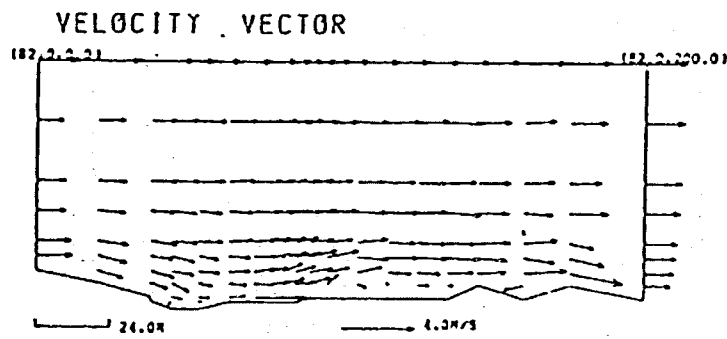


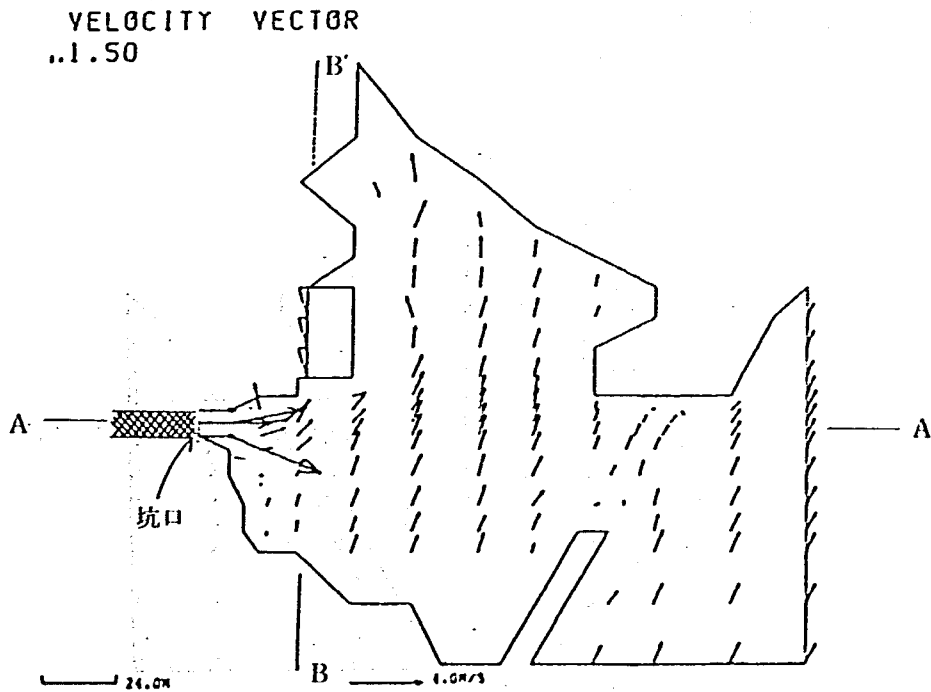
図-3.18 流れの計算結果 CASE 3-1



(a) 縦断面 A-A'

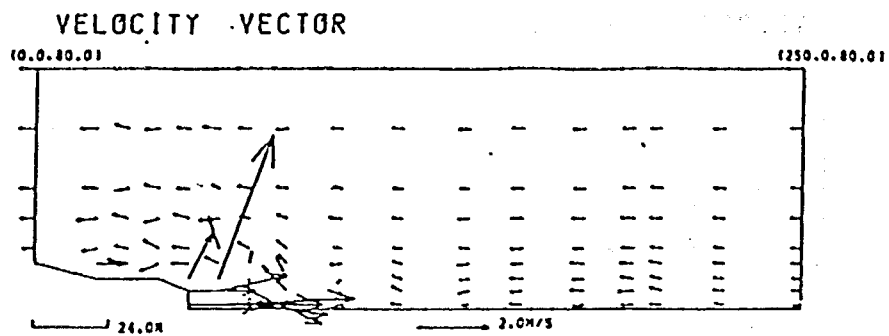


(b) 縦断面 B-B'

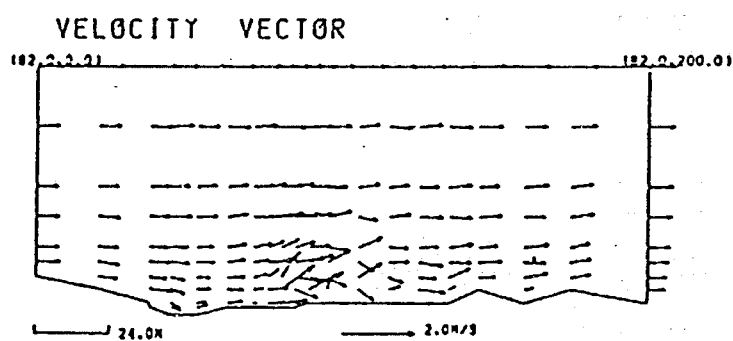


(c)

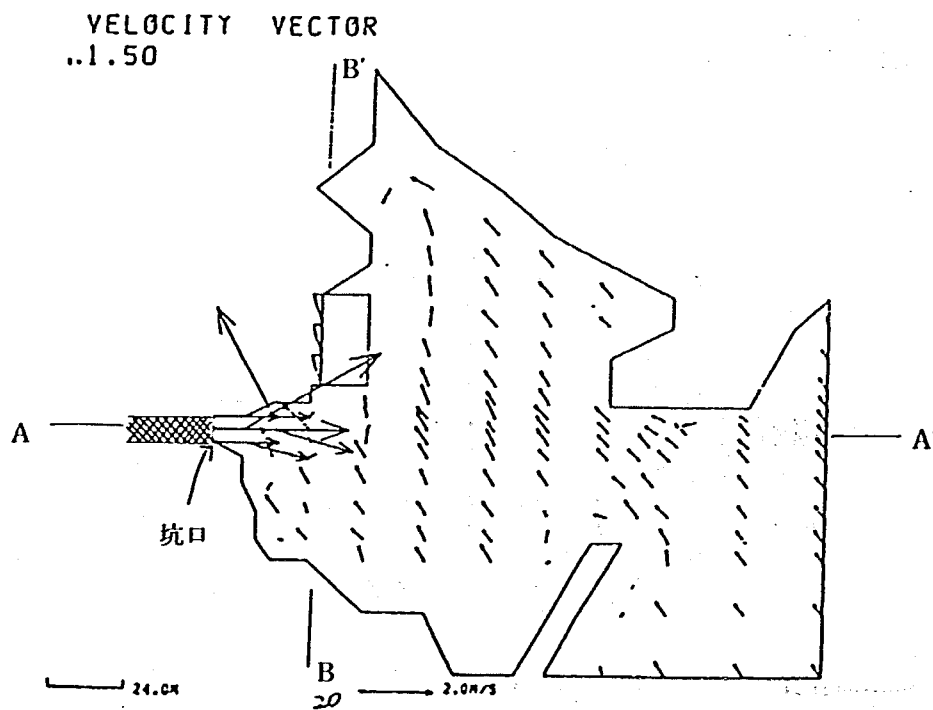
図-3.19 流れの計算結果 CASE 4-1



(a) 縦断面 A-A'

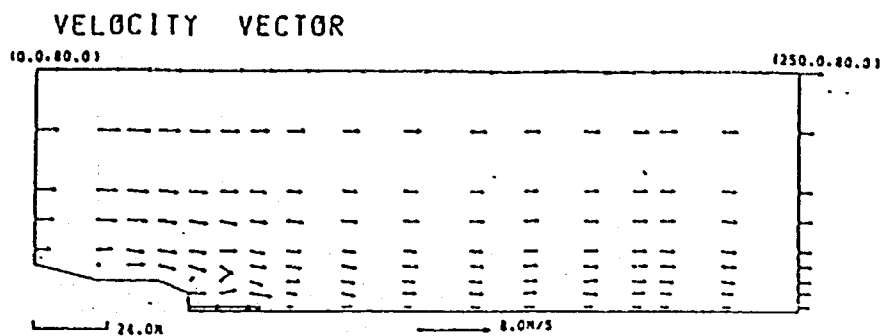


(b) 縦断面 B-B'

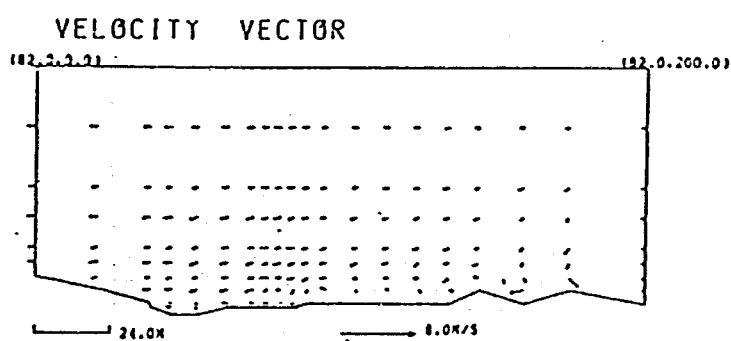


(c)

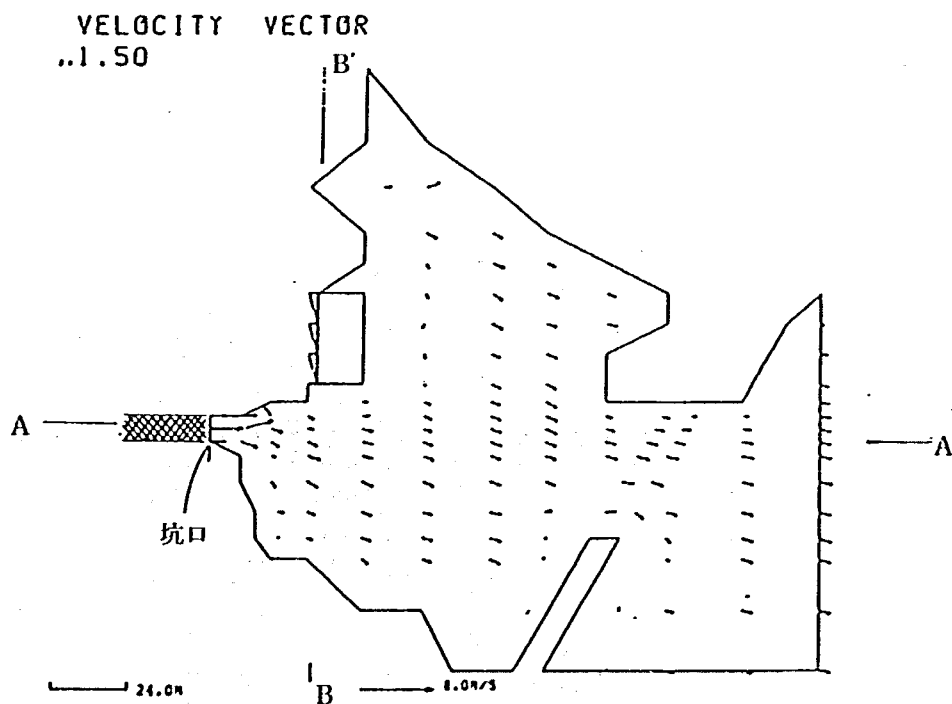
図-3.20 流れの計算結果 CASE 5-1



(a) 縦断面 A-A'

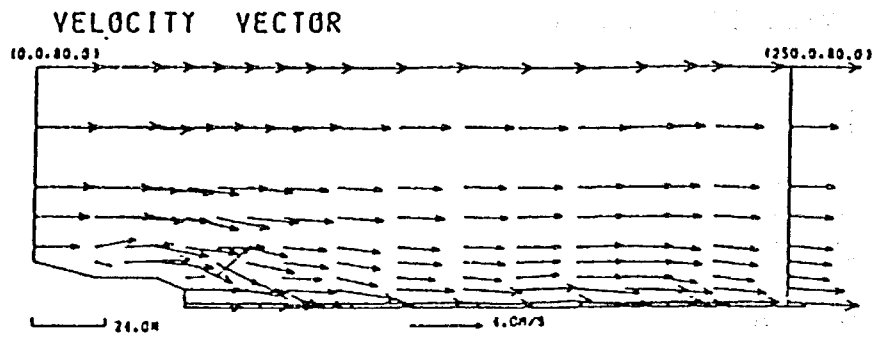


(b) 縦断面 B-B'

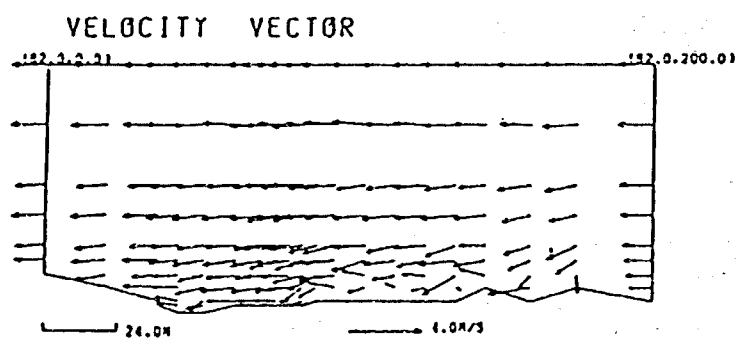


(c)

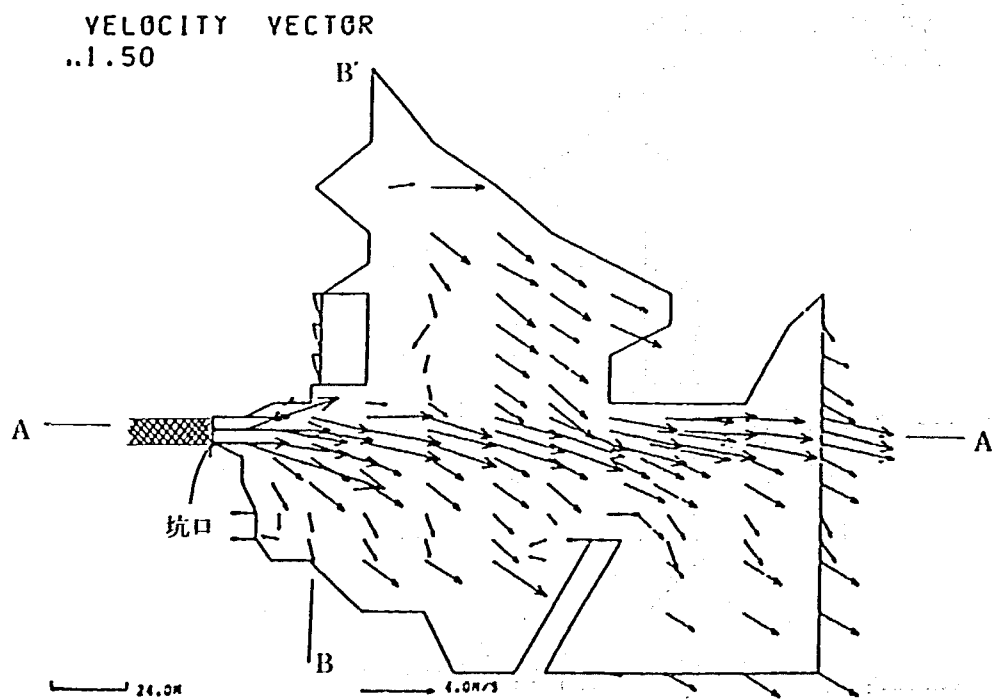
図-3.21 流れの計算結果 CASE 6-1



(a) 縦断面 A-A'



(b) 縦断面 B-B'



(c)

図-3.22 流れの計算結果 CASE 7-1

## (2) 拡散計算

図-3.24 は Run 1 に対して行った拡散計算結果と実測値との比較を坑口濃度を 1.0 とした濃度減衰について図-3.23 に示される A ライン, B ライン上 (地表面からの高さ 1.5 m) で行ったものであるが, CASE 1-5-1~1-7-1 はいずれも拡散計算の入力項として用いる流れ計算結果に整合性の良くない計算結果 (CASE 1-5, 1-6, 1-7) を用いていることもあって, 計算結果と実測値との整合性はあまり良くない。一方, CASE 1-8-1~1-8-4 は拡散計算の入力項に比較的整合性の良い流れ計算結果 CASE 1-8 を用いたものである。走行自動車の影響としての換算風速を考慮していない CASE 1-8-1~1-8-2 においては整合性はあまり良くないが, 換算風速を考慮することにより (CASE 1-8-3~1-8-4), 整合性が向上することがわかる。

次に, Run 2 に対して行った拡散計算結果を図-3.25 に示す。CASE 2-1-1, CASE 2-3-1 は, 入力項としての流れ場に整合性の悪い CASE 2-1, CASE 2-3 をそれぞれ用いているため整合性は良くない。一方, CASE 2-2-1~2-2-5 ではいずれも入力項に整合性の良い CASE 2-2 を用いて計算を行ったもの

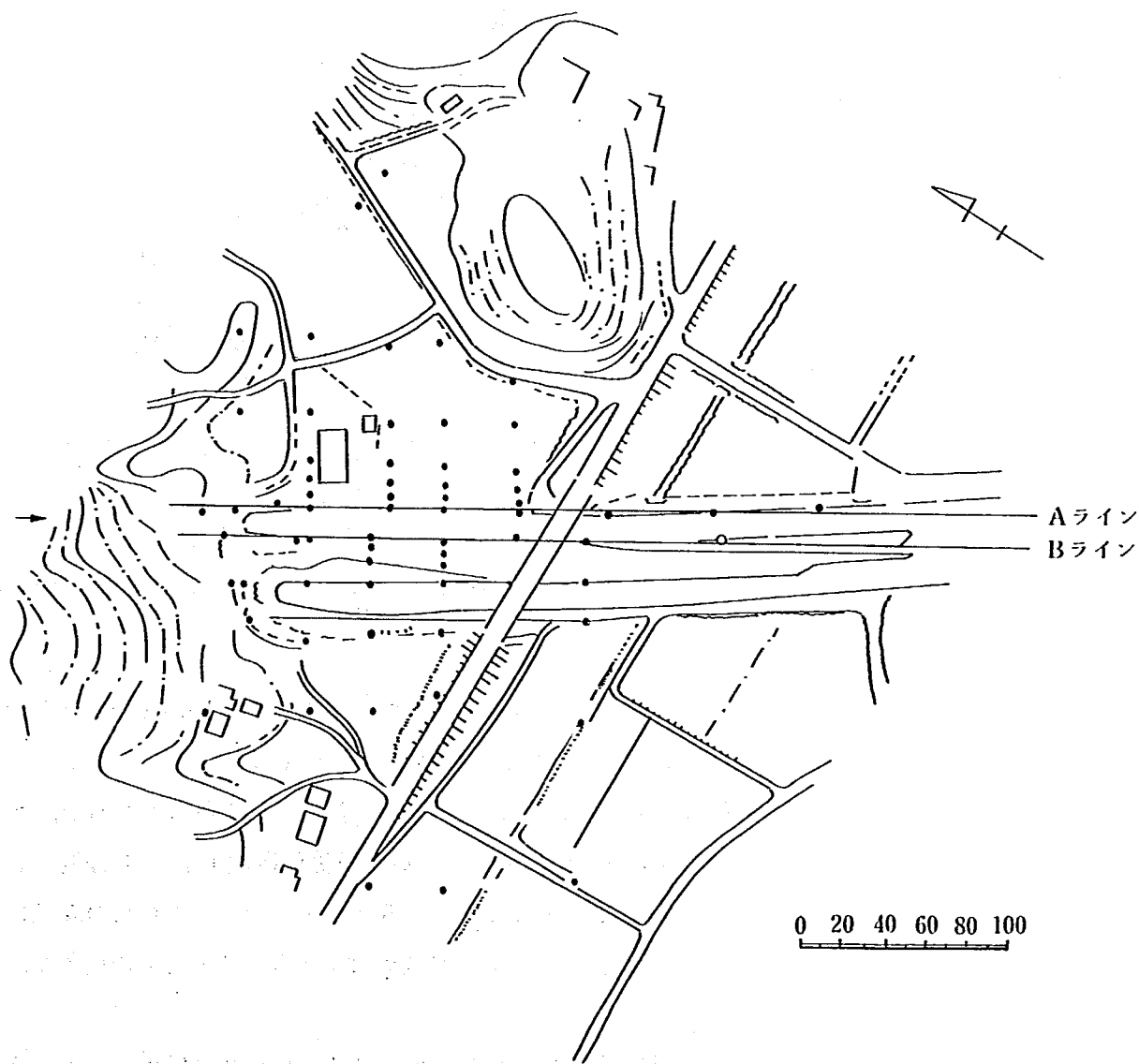


図-3.23 濃度減衰評価点

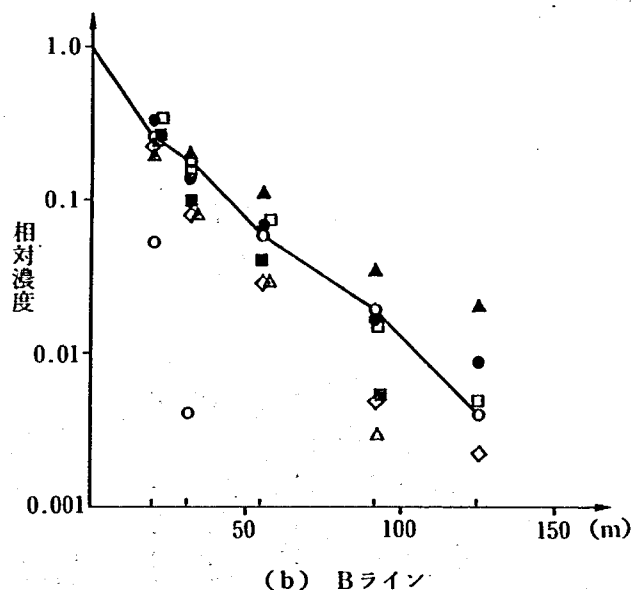
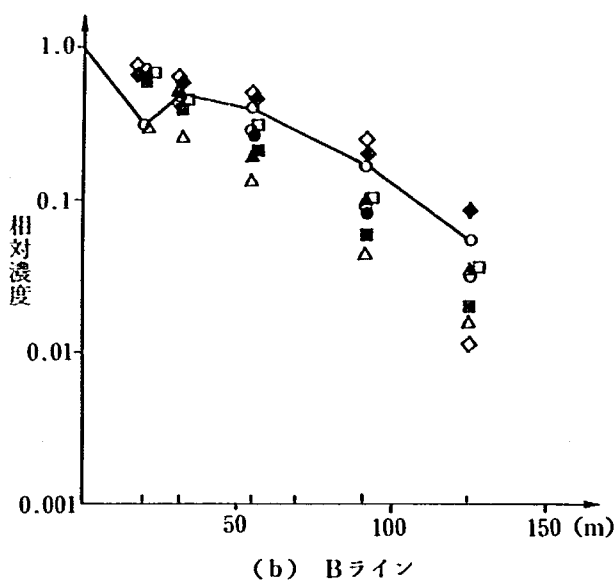
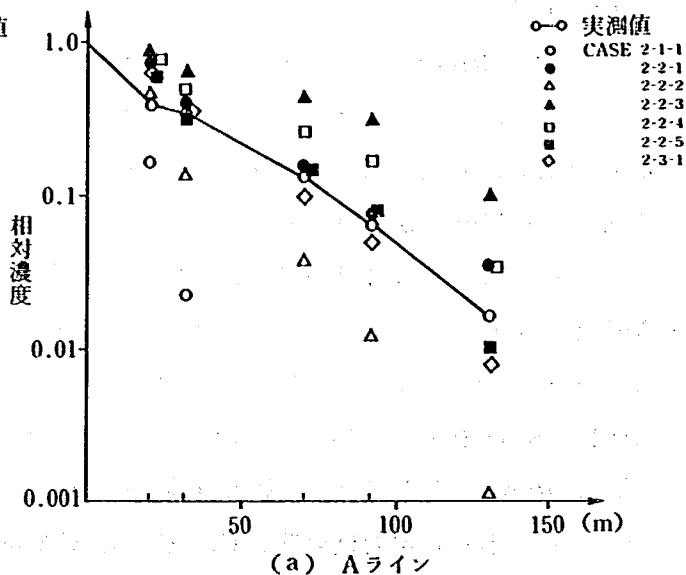
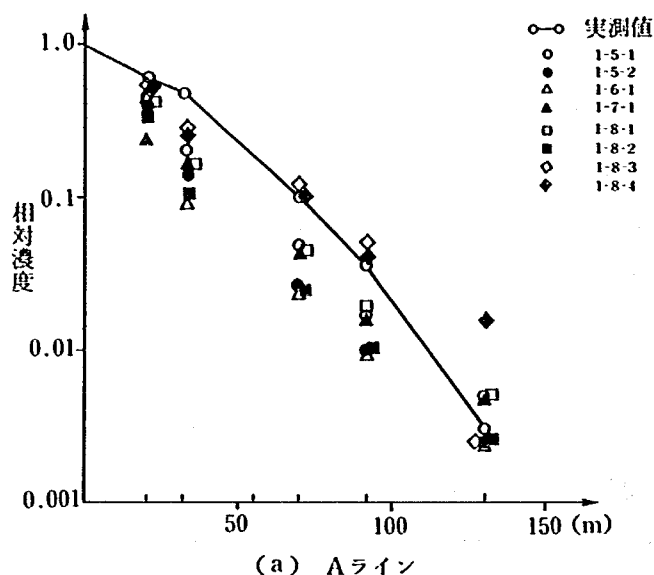


図-3.24 Aトンネル道路方向濃度減衰図  
Run 1

図-3.25 Aトンネル道路方向濃度減衰図  
Run 2

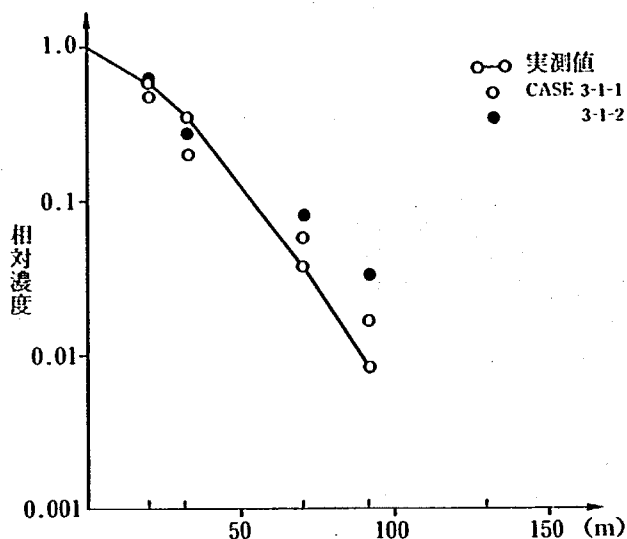
であり、これらのCASEにおいては次の点に検討の焦点を絞った。すなわち、Run 2のような向い風の場合には自動車走行の影響が特に大きくなり、道路上の拡散が大きくなると予想されるが、その評価手法として道路上の鉛直方向の拡散係数を他の領域よりも大きくすることは妥当であるか、また、Run 1の計算結果から換算風速の必要性が認められたが、その場合換算係数値Fはどの程度の値を用いればよいかなどである。CASE 2-2-1からCASE 2-2-5までの5ケースだけで、これらの課題に対する完全な解を得ることは困難ではあるが、それでも道路上の拡散係数を大きくすることの結果や、Fの値の影響が大きいことは十分認められる。

図-3.26はRun 3に対して行った拡散計算結果を示したものである。Run 3は横風であるために、向い風のRun 2の場合と同様、自動車走行の影響による道路上の拡散評価が問題となる。そこで、

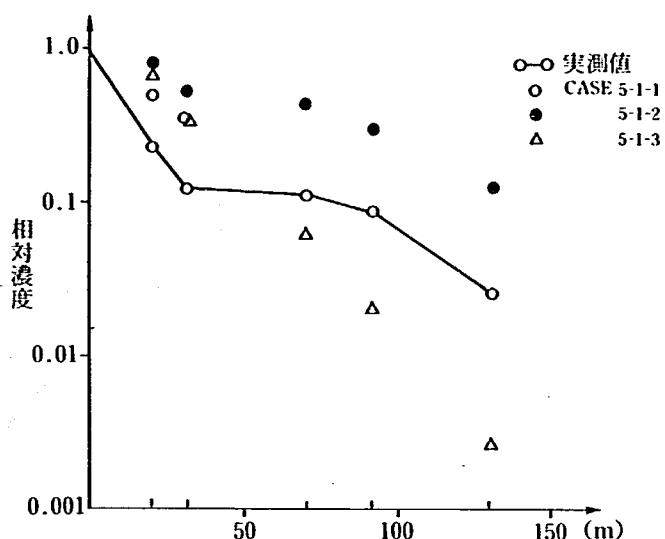
CASE 3-1-1, 3-1-2 では道路上の鉛直方向の拡散係数をそれぞれ他の領域の 14 倍, 10 倍としたが, 結果は両ケースとも比較的良好であった。

図-3.27 は無風時の Run 5 の拡散計算結果である。無風時を対象にした計算は, 3.2.4 項の D トンネルでも行っているが, 前述したように無風時は流れ場の整合性が悪く, したがって拡散計算結果の整合性も良くない。

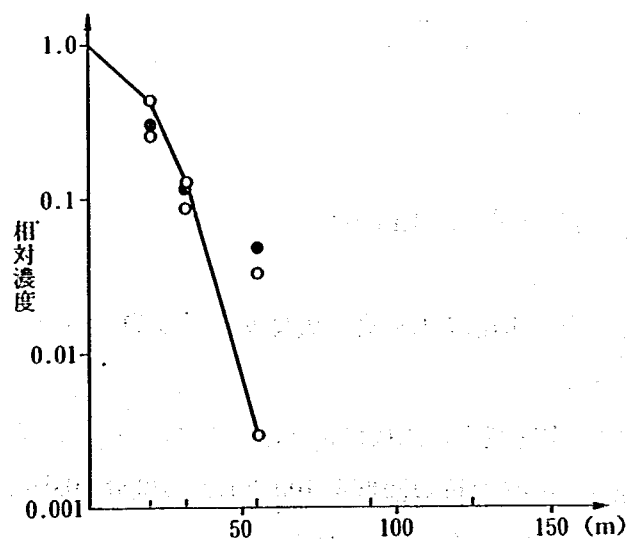
図-3.28 はこれまでの Run とは異なり, 大気安定度が B である Run 6 の拡散計算結果を示したものである。この Run については, 水平方向の拡散係数の値を決める時に必要な大気安定度を気象データから得られた B にした場合と, B であるにもかかわらず D と仮定した場合の比較計算を行っており, 大気安定度を D にして, 換算風速を考慮した CASE 6-1-3 の計算結果の方が良好である。



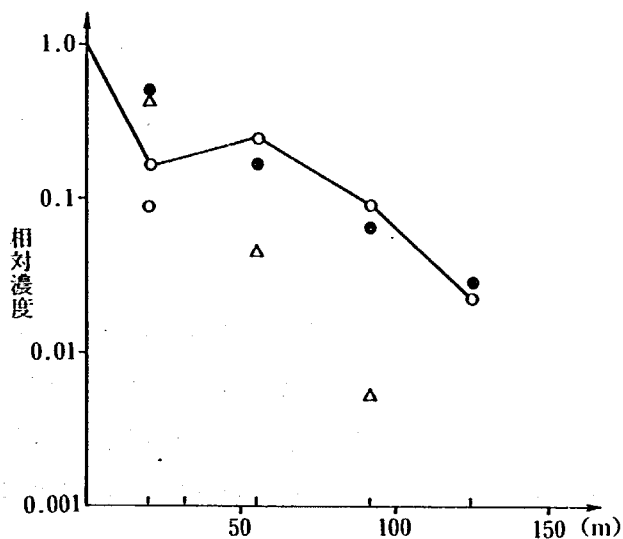
(a) Aライン



(a) Aライン



(b) Bライン



(b) Bライン

図-3.26 A トンネル道路方向濃度減衰図  
Run 3

図-3.27 A トンネル道路方向濃度減衰図  
Run 5

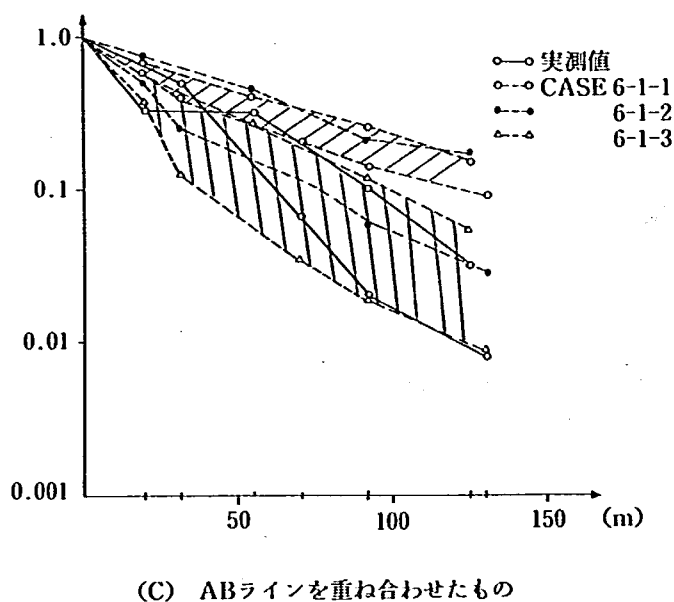
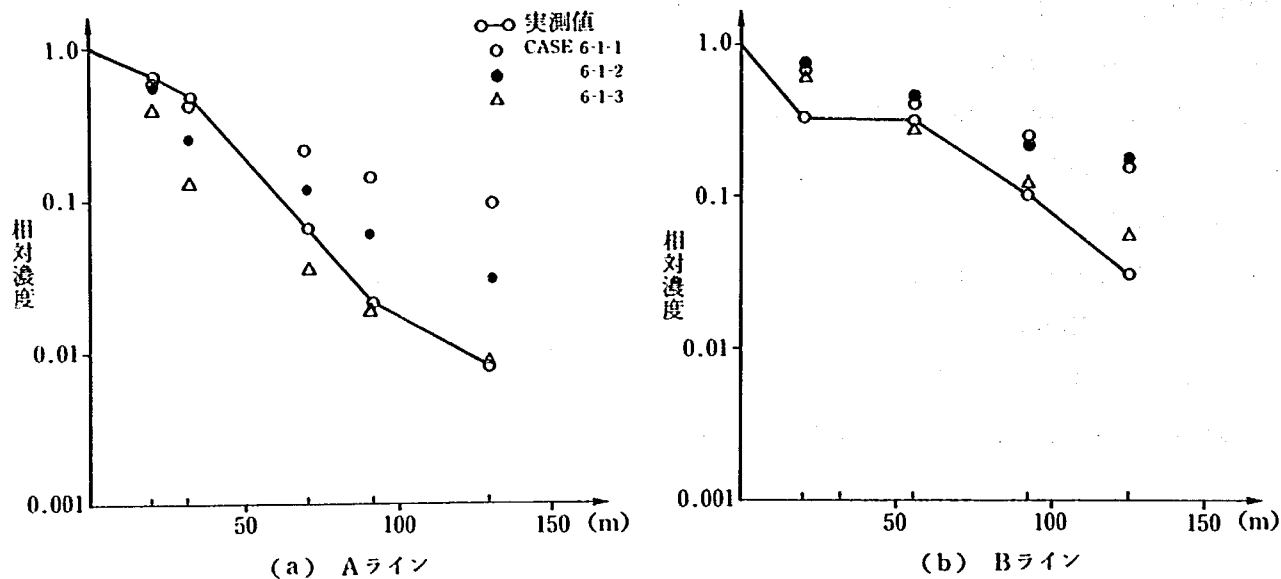
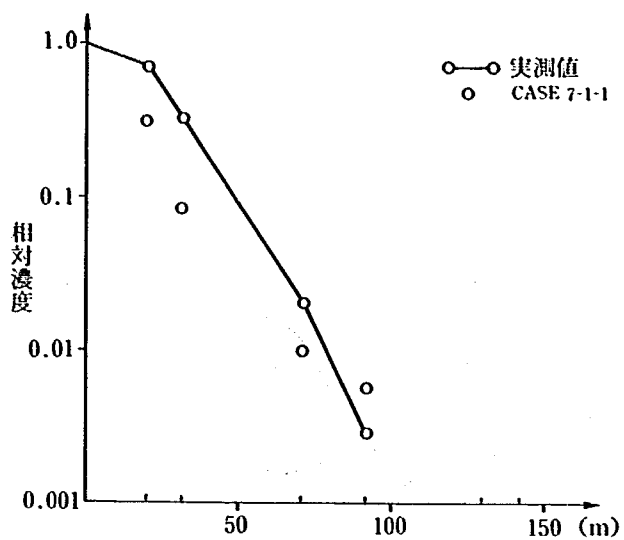


図-3.28 A トンネル道路方向濃度減衰図 Run 6

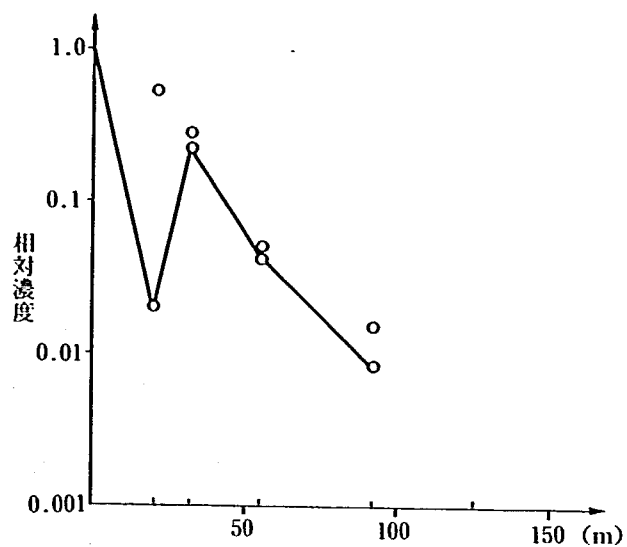
Run 7に対する拡散計算結果は図-3.29に示すとおりで、Run 7の場合も大気安定度はDではないが、Dを用いた計算結果CASE 7-1-1は比較的整合性が良い。

以上、各Runに対する拡散結果の整合性を道路方向の濃度減衰の比較により述べてきたが、以上の拡散計算において比較的良好な整合性が得られたRunについての坑口濃度を100とした濃度分布図を、トレーサガス拡散現場実験との比較の形で示すと図-3.30~3.34のようになる。

なお、流れの計算、拡散計算の各計算において比較的良好な結果が得られているケースについては、表-3.2, 3.3の各計算条件の整合性の欄に良の印で示した。

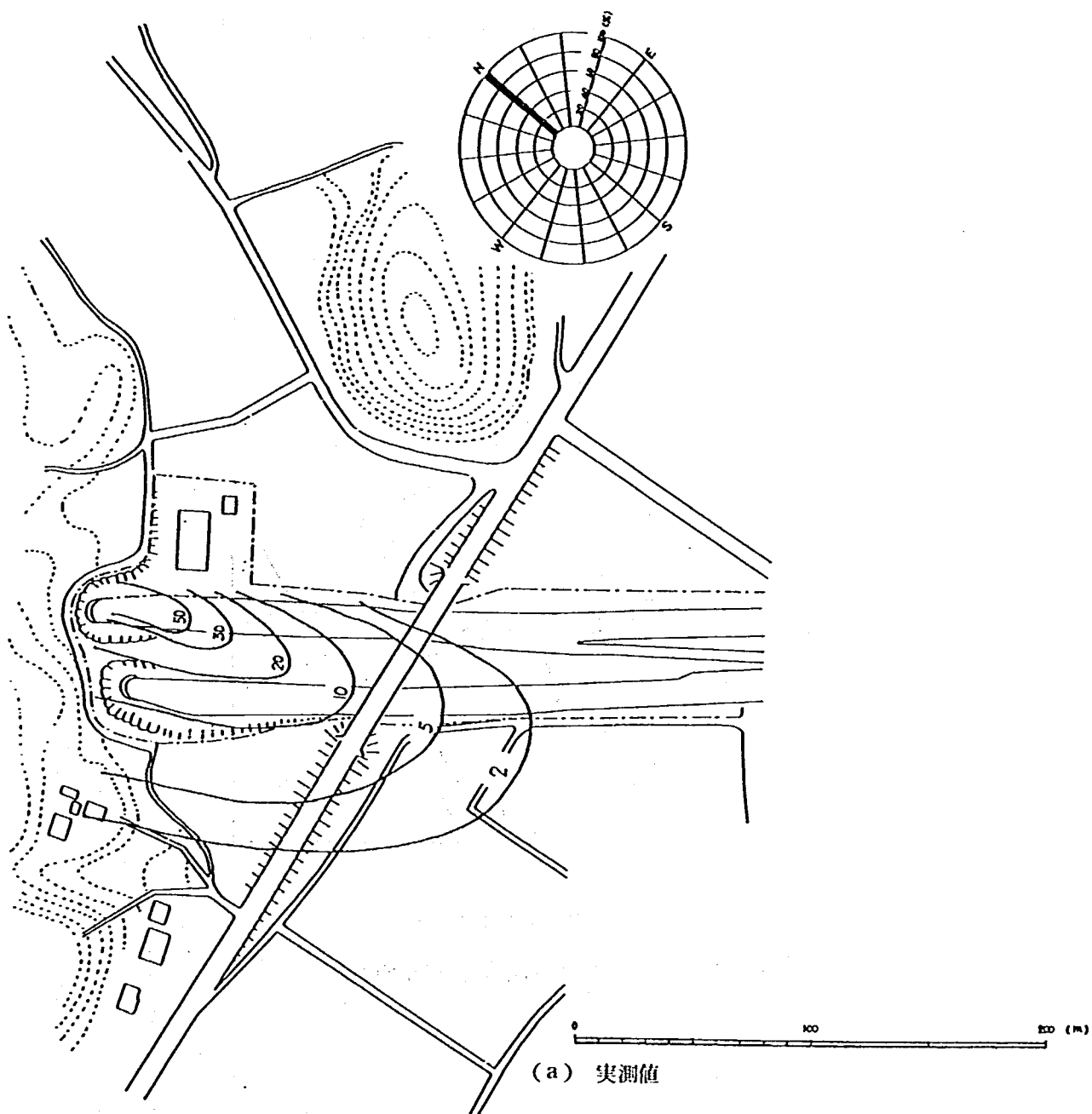


(a) Aライン

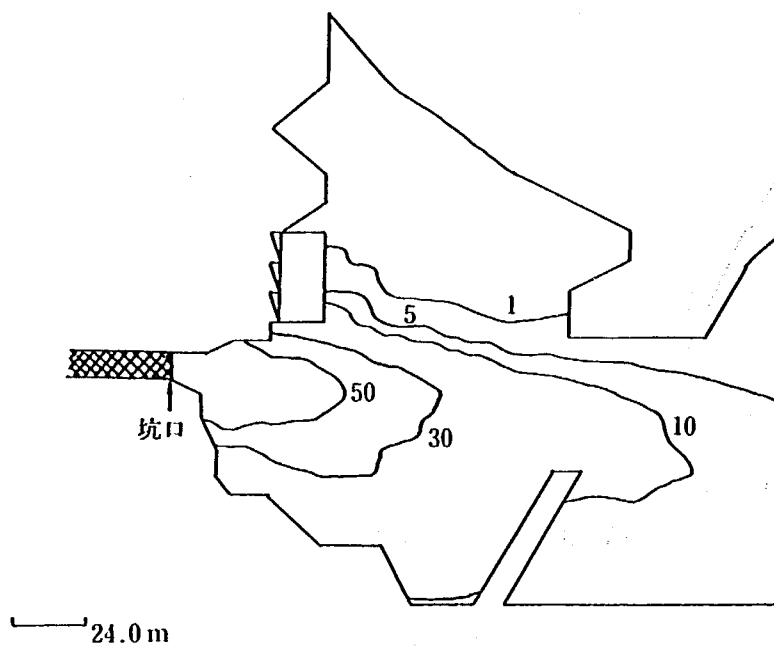


(b) Bライン

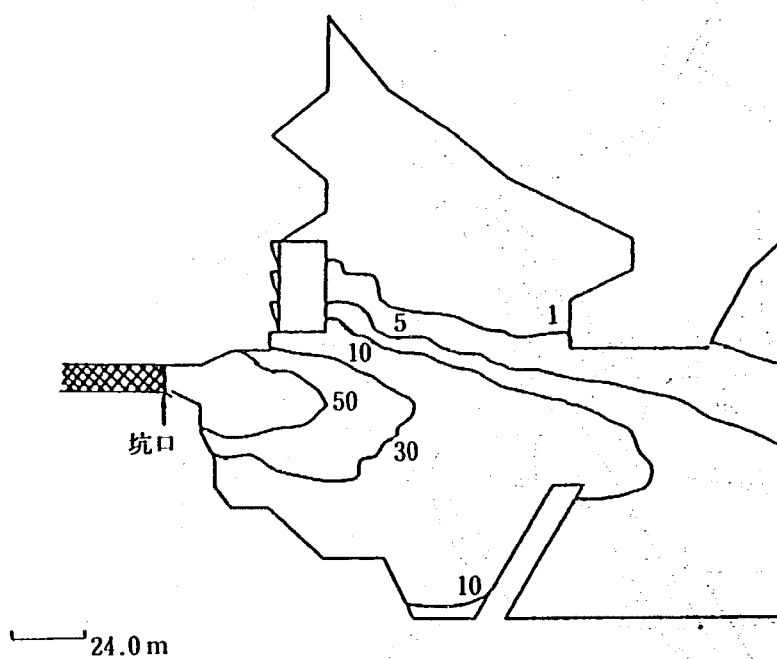
図-3.29 Aトンネル濃度減衰図 Run 7



(a) 実測値



(b) 計算値 CASE 1-8-3



(c) 計算値 CASE 1-8-4

図-3.30 Aトンネル濃度分布図 Run 1

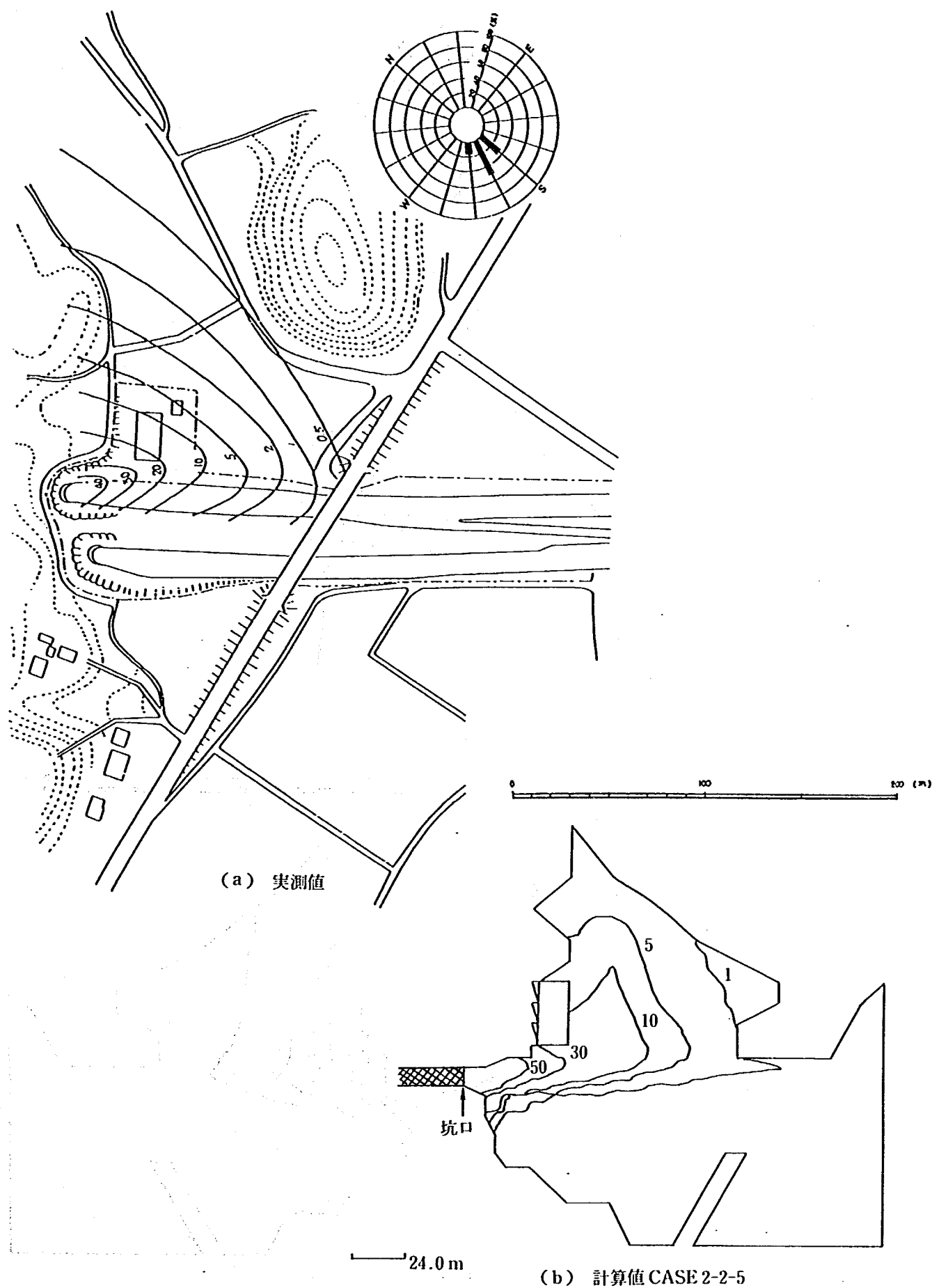
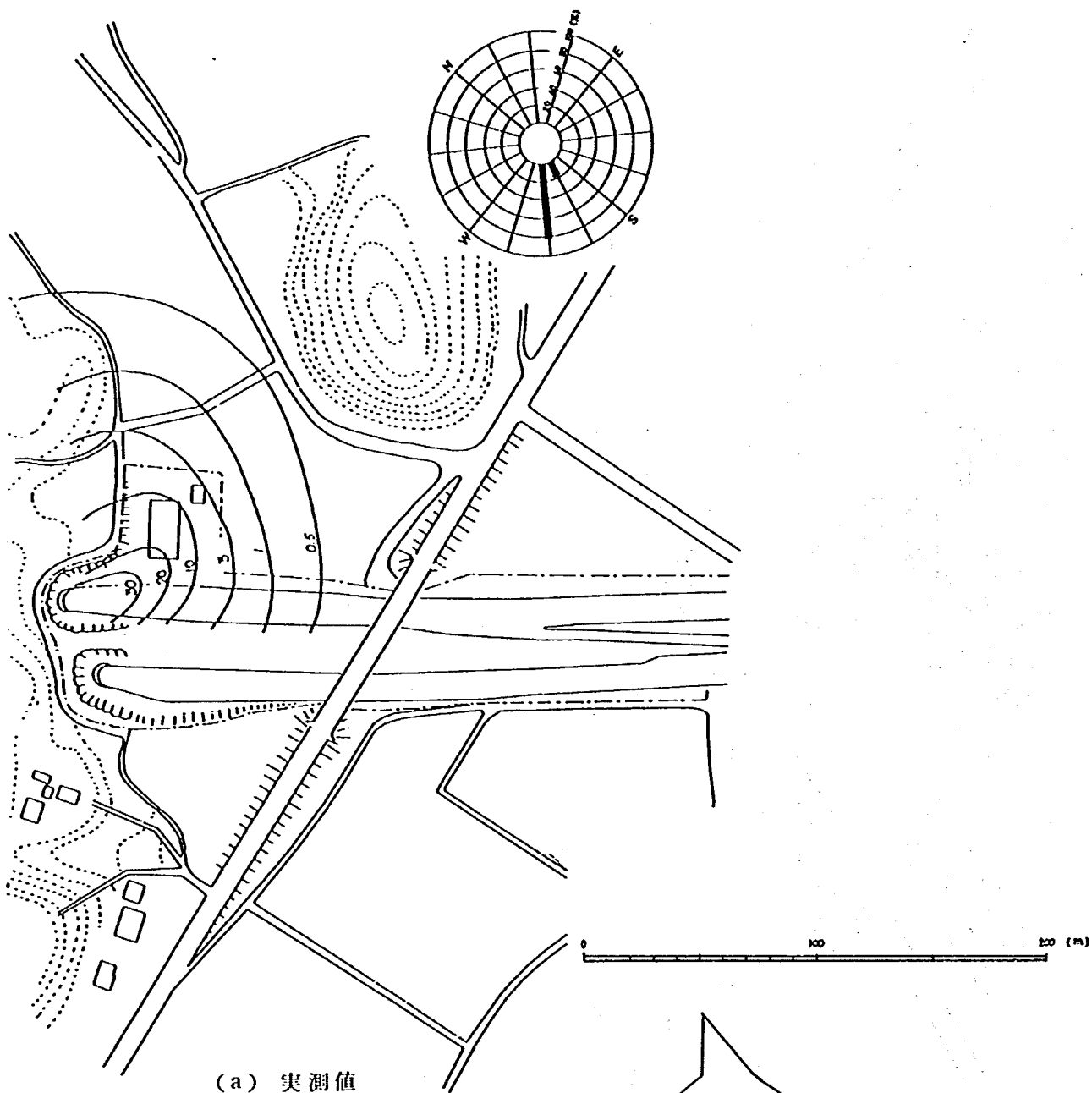
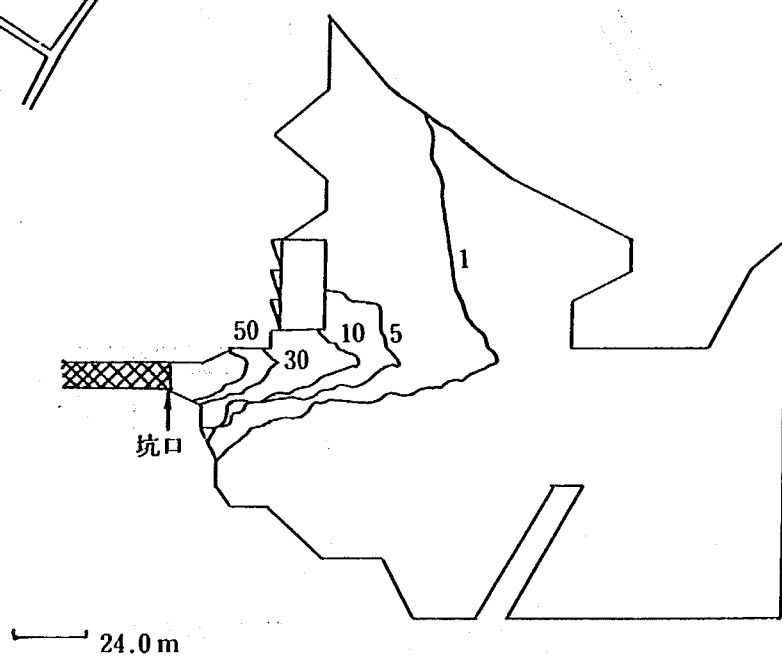


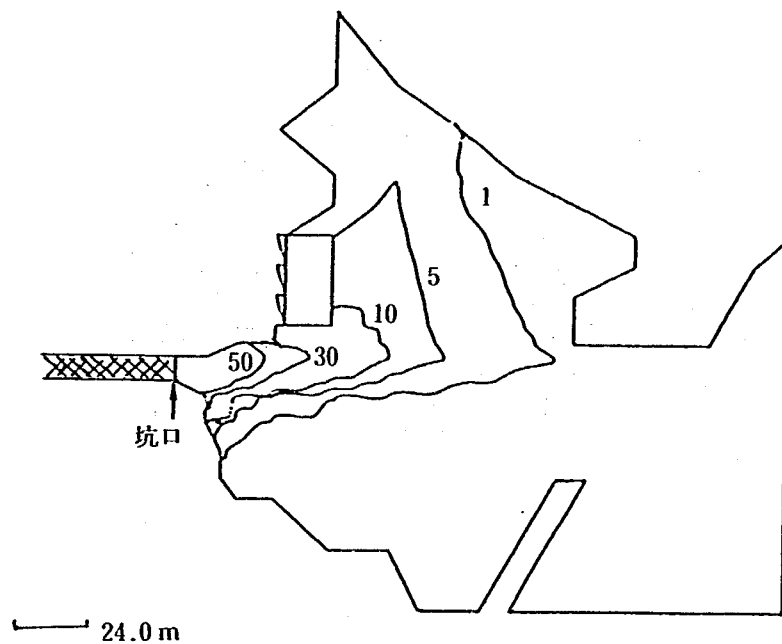
図-3.31 Aトンネル濃度分布図 Run 2



(a) 実測値



(b) 計算値 CASE 3-1-1



(c) 計算値CASE 3-1-2

図-3.32 Aトンネル濃度分布図 Run 3

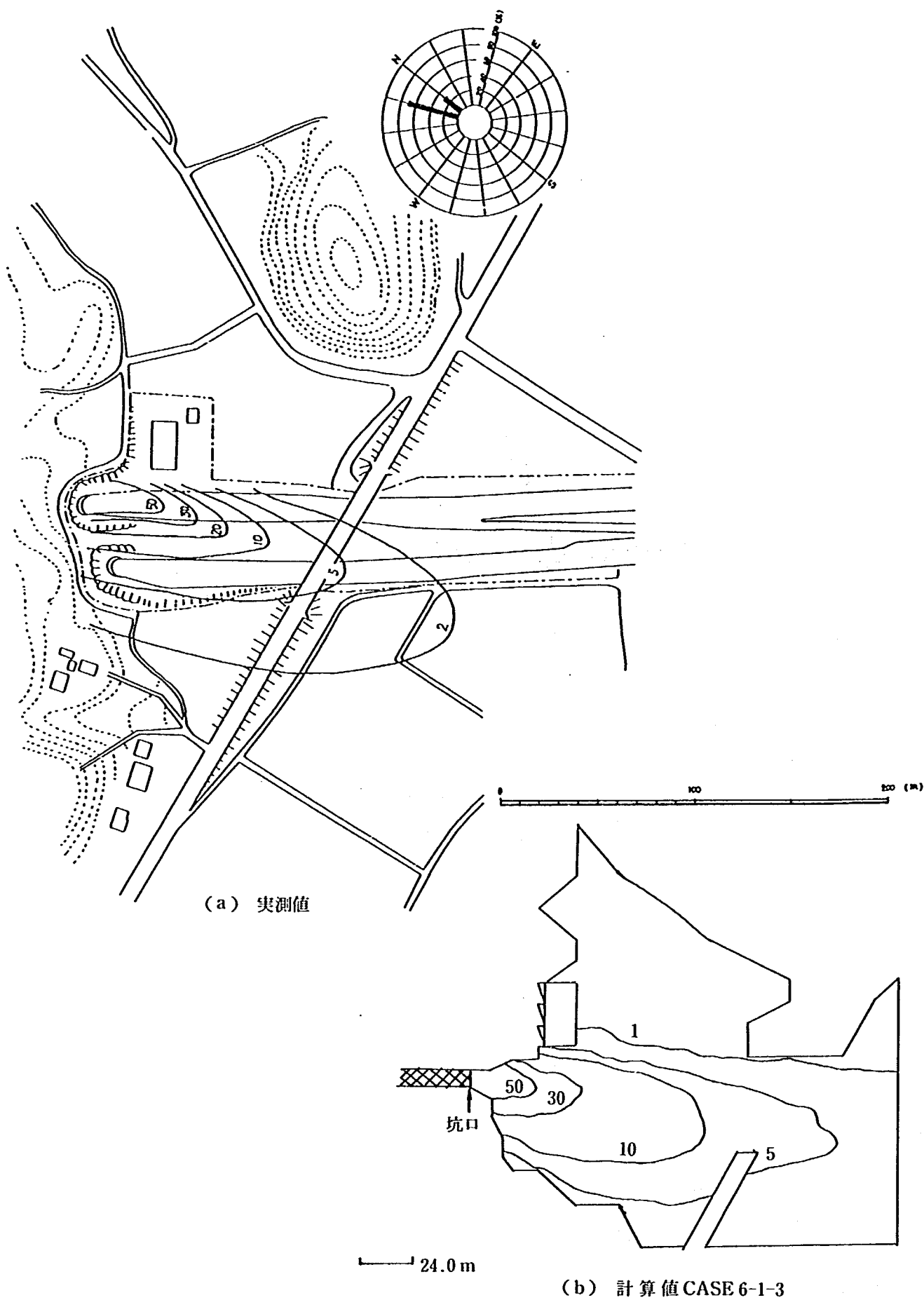


図-3.33 Aトンネル濃度分布図 Run 6

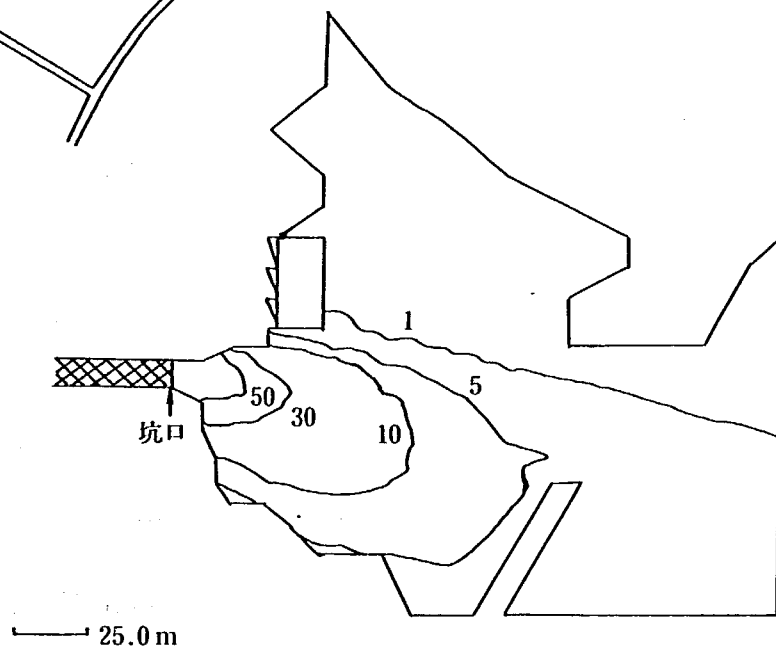
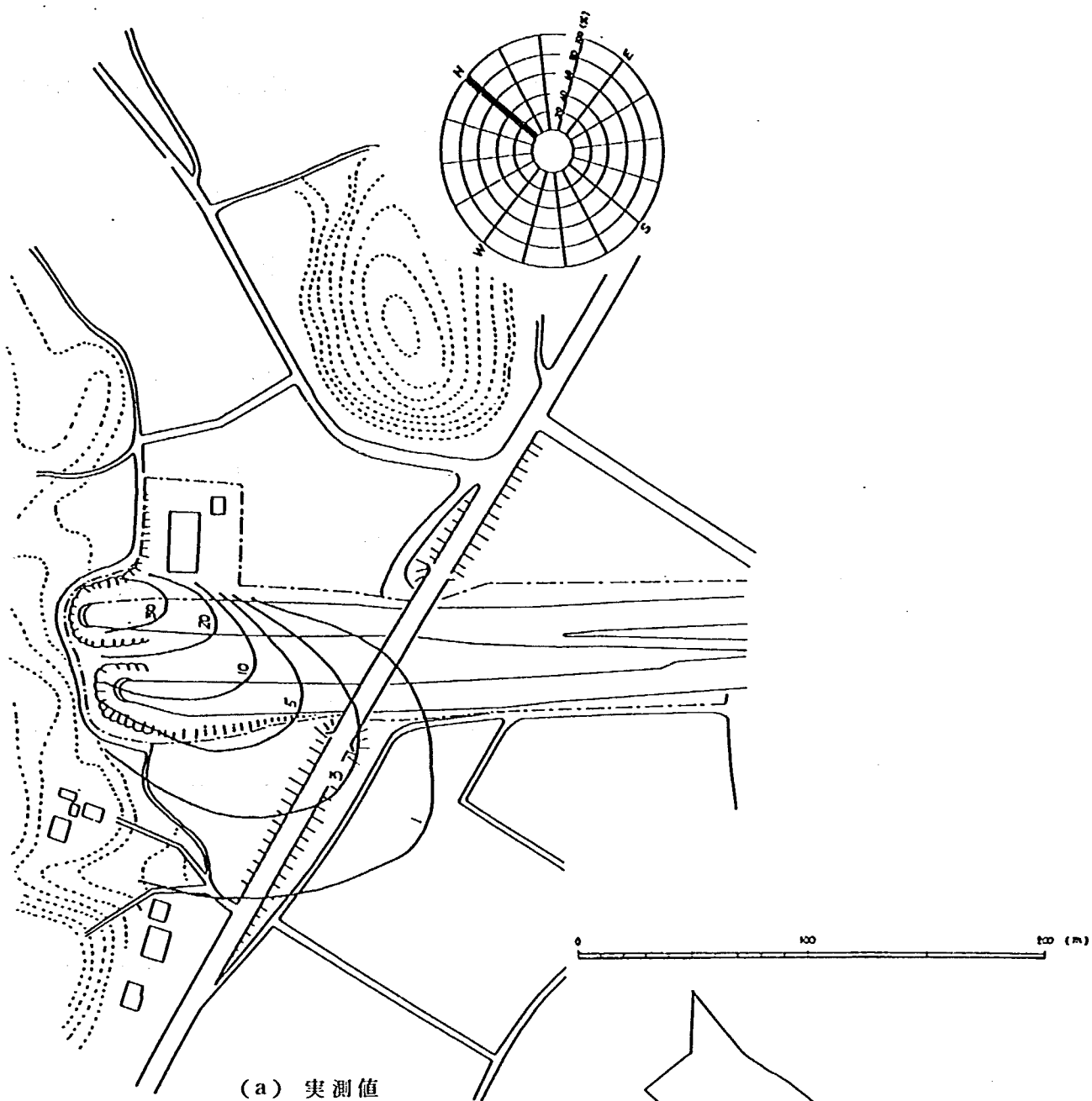


図-3.34 Aトンネル濃度分布図 Run 7

#### 4) まとめ

A トンネルのトレーサーガス拡散現場実験を対象にして行った試計算の結果から、本研究の数値解析プログラムにおいては以下に述べるような境界条件および入力物性値の設定方法が望ましいと考えることができる。

##### (1) 流れ計算

境界条件の与え方としては、上空面及び流況が穏やかな2つの鉛直境界面に対しては

$$\left. \begin{aligned} u_t &= \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\ u &= u_t \cos \varphi, \quad v = u_t \sin \varphi, \quad w = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 $\kappa$ ：カルマン定数 (=0.41)

$\varphi$ ：計算対象領域の x 軸の正方向から左回りにとった角度

$u^*$ ：摩擦速度

$z_0$ ：地表面の粗度

$z$ ：地表面からの高さ

を、地表面に対しては

$$u = v = w = 0 \text{ m/s} \dots\dots\dots (3.10)$$

を、また、残りの2つの鉛直境界面に対しては

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial n} &= \text{const}, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = \text{const} \\ \frac{\partial w}{\partial n} &= \text{const}, \quad p = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

をそれぞれ与えるのが望ましい。

坑口風速については、実測された坑口風速を代表させて、図-3.5に示される形状のものを境界条件として与えればよい。

渦動粘性係数については、鉛直方向の渦動粘性係数  $\epsilon_z$  は、

$$\epsilon_z = \kappa u^* (z + z_0) \dots\dots\dots (3.3)$$

を、また、水平方向の渦動粘性係数  $\epsilon_x, \epsilon_y$  は

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2 \kappa} \times u \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし、拡散幅  $\sigma_y$  はパスキルチャートから安定度別に読み取る  
を与えるのが良い。

## (2) 拡散計算

拡散計算を行うときに、入力項として用いる流れの計算結果については整合性の良い流れ場を用いなければならない。すなわち、入力項として用いた流れの計算結果の整合性が悪ければ、拡散係数や境界条件をいくら変化させても整合性の良い拡散計算結果は得られない。

拡散係数の与え方は、鉛直方向の拡散係数については

$$k_z = \kappa u^* (z + z_0) \dots\dots\dots (3.7)$$

で、また、水平方向の拡散係数については

$$k_x = k_y = \frac{\sigma_y^2}{2x} \times u \dots\dots\dots (3.8)$$

で与えるのが良い。なお、上式中の拡散幅  $\sigma_y$  は大気安定度別にパスキルチャートにより読みとるものであるが、水平方向の拡散は、乱れ強さによる乱流拡散よりも平均風速による移流拡散の方が主であると考えられるため、大気安定度を実際の大気安定度にかかわらず D として式 (3.8) から  $k_x$ 、 $k_y$  を求めた方が計算結果の整合性は良くなる。また、向風及び横風の場合には、自動車走行による乱れによって道路上に発生する拡散効果が特に大きくなるため、道路上の鉛直方向の拡散係数値は他の領域の 10 倍程度にする方が良い。

自動車走行によって発生する風の評価については

$$U_r = \frac{\sqrt{A} \times V}{L} \times F \dots\dots\dots (3.9)$$

ただし、A：等価抵抗面積

V：車速

L：車頭間隔

F：換算係数

で求まる換算風速  $U_r$  を流れの計算結果に重ね合せたものを、入力項として用いる手法を採用すれば良いが、換算係数 F 値の与え方については課題として残る。

### 3.2.2 B トンネル

#### 1) 現場実験<sup>3)</sup>の概要

B トンネルは自動車専用道路の山岳トンネルであり、トンネル周辺の地形図を図-3.35 に示す。図からもわかるように、B トンネル周辺は A トンネルに比べてかなり起伏の多い地形となっている。

トレーサーガス拡散現場実験は、図-3.35 中の西行線坑口周辺で、1 回の計測時間が 1 時間として各種条件下で合計 8 Run 行っており、計算に必要な風向、風速データは図-3.35 中の換気塔屋上より 5 m 上空点、及び換気塔周辺の数カ所における地表面より 1.2 m 上空点でそれぞれ得られているが 1 地点で鉛直方向の 2 点以上において風向、風速を実測したという地点は存在しない。なお、B トンネルで得られた 8 Run はすべて自動車走行方向に対する風向が斜め向い、あるいは追い風となっており、本研究ではこの中から代表的な風速を示す表-3.4 に示される Run 1, 2 を選定して B トンネルの計算

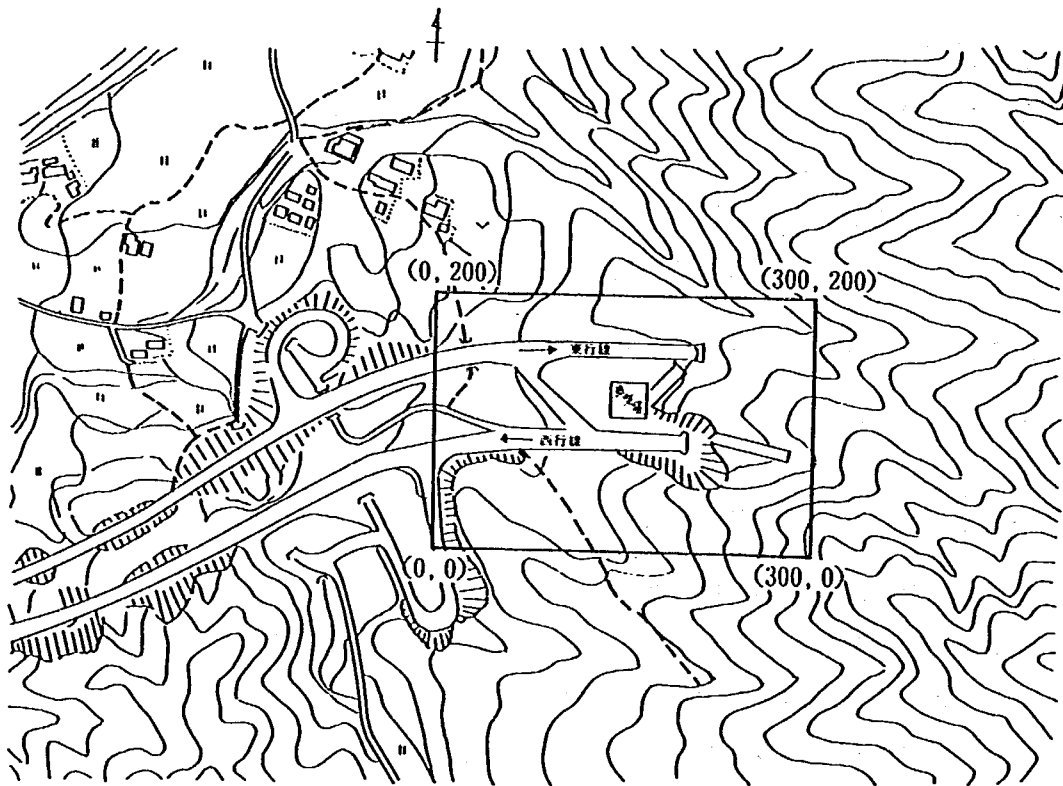


図-3.35 Bトンネル西側坑口付近の地形図  
(枠内は計算対象範囲)

表-3.4 Bトンネルトレーサガス拡散現場実験時の条件

| Run. NO. | 坑 外 風                  |           | 坑口風速<br>m/s | 交通量(大型車混入率) |      |
|----------|------------------------|-----------|-------------|-------------|------|
|          | 風向 (自動車走行方向<br>に対する風向) | 風速<br>m/s |             | (台/hr)      | (%)  |
| 1        | NW(斜め向い風)              | 6.6       | 3.7         | 446         | (60) |
| 2        | E(追い風)                 | 2.9       | 6.6         | 491         | (43) |

対象ケースとした。

## 2) 計算条件

### (1) 要素分割

計算対象領域は図-3.35に示されるような坑口を中心とした $300 \times 200 \times 126$  (高さ) mの3次元空間である。要素分割の水平断面図を図-3.36に示すが、総節点数は4964、要素数は三角柱要素が7994、四面体要素が824となっており、道路のカーブと勾配は非常に小さいものとして無視している。

### (2) 流れの計算条件

Aトンネルの計算結果では流れ計算時の境界条件として、4つの鉛直境界面のうち、流れの穏やかな2つの鉛直境界面と上空面において式(3.1)で与えられる風速を固定するのが望ましいという結論が導かれた。Bトンネルを対象とする計算においては、風速を固定する鉛直境界面の選定方法をより明確にする目的で、鉛直境界面を風が流入する側と流出する側の2種類に分類し、この分類により風速

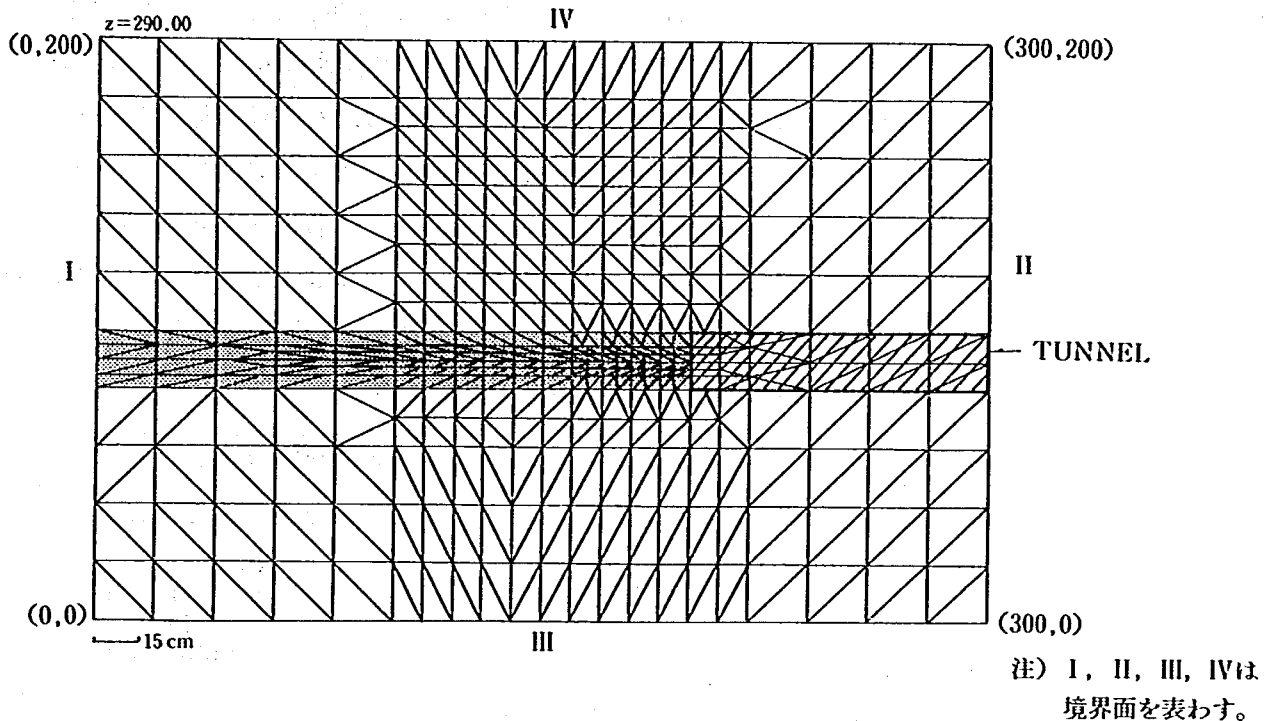


図-3.36 Bトンネル要素分割水平断面図

を固定する境界面を選定することができないかを検討した。また Run 2 は坑外風の風向が計算対象領域の 2 つの境界面に行平なこれまでにないケースとなっており、このようなケースに対する境界条件の設定方法についても検討を加えた。

渦動粘性係数の与え方については基本的には A トンネルの計算結果より得られた手法を用いたが、道路上の渦動粘性係数の与え方については若干の修正を加えた。すなわち、道路上、特に坑口付近など風速が大きい領域ではペクレの安定条件

$$Pe = \frac{|U| \cdot \Delta S}{\varepsilon} \leq 6 \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

ただし、 $|U|$  : 風速 (m/s)

$\Delta S$  : 最大節点間隔 (m)

$\varepsilon$  : 渦動粘性係数 ( $m^2/s$ )

が成り立たない場合が多く、発散した流れが生じやすい。そこで、これらの領域においては渦動粘性係数を大きく与えて、上記の安定条件を満足させることを試みた。

また、水平方向の渦動粘性係数  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  を求める時に必要となる拡散幅  $\sigma_y$  は安定度別にバスキルチャートより読み取るのが良いという結論を A トンネルの計算結果で得ているが、本研究で計算対象としている領域は数百メートルとなっており、この程度のオーダの場合には広域的気象条件の安定度が流れ場に及ぼす影響は小さく、流れ場そのものは中立と見なしてよいことや、拡散係数を求める時には実際の安定度にかかわらず、安定度を D と見なした方がよいことを考え合せ、B トンネルの場合には  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  を求める場合の大気安定度はすべて D と見なした。

坑口風速、上空面、地表面など上記以外の計算条件については、A トンネルの計算結果より得られ

た計算条件の設定方法に従って与えており、Bトンネルの流れの計算条件をまとめると表-3.5になる。

なお、境界条件及び渦動粘性係数を与える場合に必要な粗度  $z_0$ 、摩擦速度  $u^*$  は3.2.1項で述べたように、基本的には計算対象領域から1地点を代表させ、その地点における鉛直方向の2点以上の一般風の実測値から最小二乗法により求めるものであるが、Bトンネルにおいては気象データ数が少なく、前述したように同一地点で高さの異なる2点以上の点において風速、風向データを実測したという測定地点は存在しない。したがって、Bトンネルにおいては換気塔より5m上空点において測定された

表-3.5 Bトンネル流れの計算条件

| CASE | 計算対象とした現場実験 | 風速境界条件                                                                                                                                         | 圧力境界条件                 | 渦動粘性係数 ( $m^2/s$ )            |                                                                                       | 検討点                                  |
|------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|      |             |                                                                                                                                                |                        | $\epsilon_x, \epsilon_y$      | $\epsilon_z$                                                                          |                                      |
| 1-1  | Run 1       | 上空面, I・IV面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 315^\circ$      | II・III面において<br>$p = 0$ | 2.11                          | $x u^*(z + z_0)$<br>$x = 0.41$<br>$u^* = 0.705$<br>$z_0 = 0.0029$                     |                                      |
| 1-2  | Run 1       | 上空面, II・III面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 315^\circ$    | I・IV面において<br>$p = 0$   | 2.11                          | $u^* = 0.705$                                                                         | 境界条件を引っぱる方向にする                       |
| 1-3  | Run 1       | 同上<br>ただし $z_0$ を $\frac{1}{10}$ 倍する                                                                                                           | 同上                     | 同上                            | 同上                                                                                    | 風速の鉛直分布を変更する                         |
| 1-4  | Run 1       | 上空面, II・III面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 315^\circ$    | I・IV面において<br>$p = 0$   | 2.11<br>ただし<br>西行線上では<br>21.1 | $x u^*(z + z_0)$<br>$z_0 = 0.0029$<br>$u^* = 0.306$<br>ただし<br>西行線上では<br>$u^* = 30.6$  | $u^*$ を変更<br>道路上で $\epsilon$<br>を10倍 |
| 2-1  | Run 2       | 上空面, II・III・IV面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 180^\circ$ | I面において<br>$p = 0$      | 0.93                          | $x u^*(z + z_0)$<br>$x = 0.41$<br>$u^* = 0.303$<br>$z_0 = 0.0023$                     |                                      |
| 2-2  | Run 2       | 同上                                                                                                                                             | 同上                     | 0.93                          | $u^* = 0.131$                                                                         | $u^*$ を変更                            |
| 2-3  | Run 2       | 上空面, I・III・IV面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 180^\circ$  | II面において<br>$p = 0$     | 同上                            | 同上                                                                                    | 境界条件を押し込む方向にする                       |
| 2-4  | Run 2       | 上空面, I・III・IV面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \cos \varphi, v = u_t \sin \varphi$<br>$w = 0, \varphi = 180^\circ$  | II面において<br>$p = 0$     | 0.93<br>ただし線上では<br>9.30       | $x u^*(z + z_0)$<br>$z_0 = 0.0023$<br>$u^* = 0.131$<br>ただし<br>西行線上では<br>$u^* = 1.310$ | $u^*$ を変更<br>道路上で $\epsilon$<br>を10倍 |

注) 境界条件の欄でI面とは  $x = 0$ , II面とは  $x = 300$ , III面とは  $y = 0$ , IV面とは  $y = 200$  を示す。

共通条件  $\Delta t = 0.1(\text{sec})$  ステップ数 = 100

風速と、換気塔周辺の地表面より 1.2 m 上空点における風速が図-3.37 に示すように同一地点で観測されたものと仮定して、 $u^*$ 、 $z_0$ を求めた。なお、地表面より、1.2 m 上空の風速観測地点は数点存在するが、計算ではこれらの測点の中から適宜選んで  $u^*$ 、 $z_0$ の算定を行った。

### (3) 拡散の計算条件

拡散係数の与え方については基本的には A トンネルの計算結果から得られた手法、すなわち式 (3.7)、式 (3.8) によって与え、式 (3.8) を用いる際に必要な大気安定度は実際の大気安定度にかかわらず D とした。なお、A トンネルにおいては、向かい風及び横風の場合には自動車走行による乱れの影響が大きくなるため、この影響の評価のために道路上の鉛直方向の拡散係数を他の領域の 10 倍程度にするのが良いという結論を得ている。しかし、この手法は鉛直方向の拡散係数は高さに比例するという仮定が妥当な場合にのみ良い結果を生むわけで、逆に実際にはこの仮定が妥当でない場合には誤差が拡大される可能性もあり道路上での濃度値を過大に計算してしまうおそれがある。実際、B トンネルにおいても道路上の鉛直方向の拡散係数の値を大きく与えて計算してみたところ、道路上での濃度を過大に計算する傾向が現れた。したがって、B トンネルの拡散計算においては道路上の鉛直方向の拡散係数を他の領域の 10 倍程度にするという手法は用いず、領域全体に一律に与えた。

自動車走行により発生する風の評価（換算風速）については、A トンネルと同様の入力方法により与え、換算係数 F 値の与え方について検討を加えた。

以上のように、B トンネルを対象にした拡散計算の条件設定は、換算係数 F 値のみを変化させたものとなっており、それらは表-3.6 に示される。

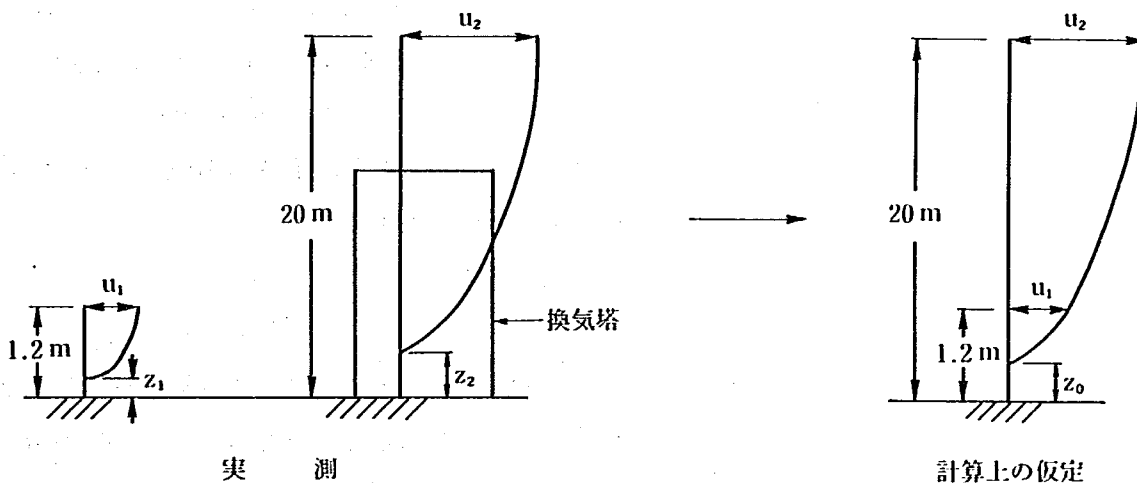


図-3.37 風速分布の仮定

表-3.6 Bトンネル拡散の計算条件

| CASE  | 流れ場 | 計算対象<br>とした<br>現場実験 | 換算風速(m/s)<br>( )内はFの値 | 拡散係数(m <sup>2</sup> /s) |                                                                     |
|-------|-----|---------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|       |     |                     |                       | $k_x, k_y$              | $k_z$                                                               |
| 1-4-1 | 1-4 | Run 1               | 4.75 (20)             | 2.11                    | $\kappa u^*(z+z_0)$<br>$\kappa=0.41$<br>$u^*=0.306$<br>$z_0=0.0029$ |
| 1-4-2 | 1-4 | Run 1               | 3.56 (15)             |                         |                                                                     |
| 1-4-3 | 1-4 | Run 1               | 2.37 (10)             |                         |                                                                     |
| 1-4-4 | 1-4 | Run 1               | 1.19 ( 5)             |                         |                                                                     |
| 2-4-1 | 2-4 | Run 2               | 0.93 ( 4)             | 0.93                    | $\kappa u^*(z+z_0)$<br>$\kappa=0.41$<br>$u^*=0.131$<br>$z_0=0.0023$ |
| 2-4-2 | 2-4 | Run 2               | 0.70 ( 3)             |                         |                                                                     |
| 2-4-3 | 2-4 | Run 2               | 0.47 ( 2)             |                         |                                                                     |
| 2-4-4 | 2-4 | Run 2               | 0.23 ( 1)             |                         |                                                                     |
| 2-4-5 | 2-4 | Run 2               | 0.0 ( 0)              |                         |                                                                     |

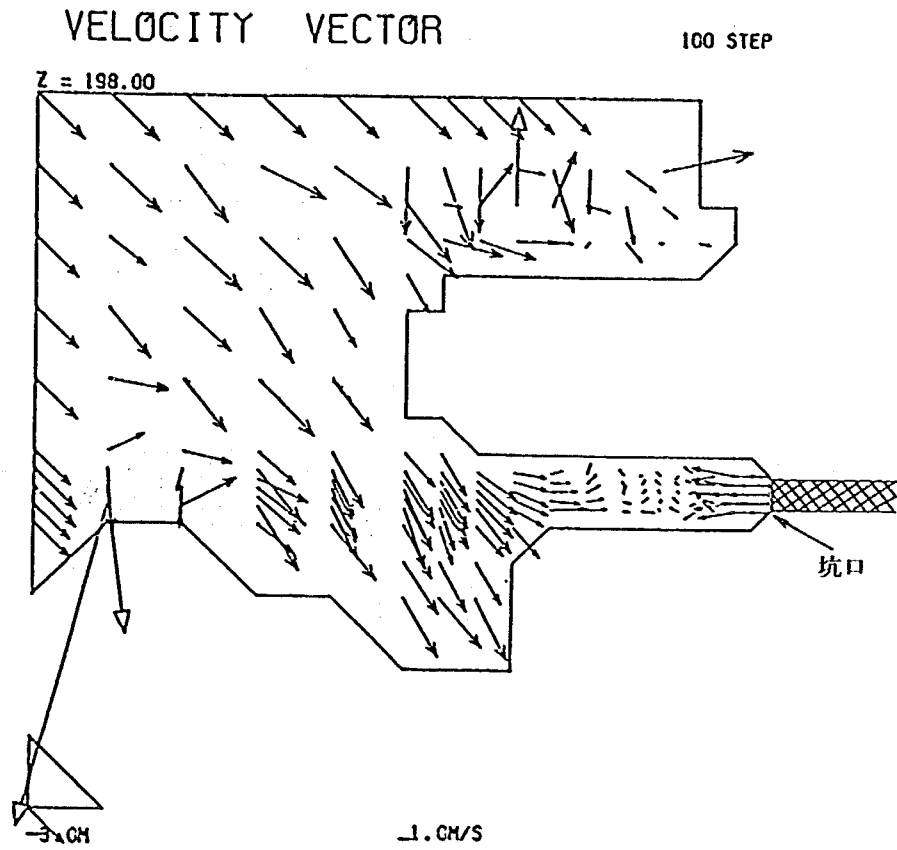
共通条件  $\Delta t=0.1$  (sec) ステップ数=4000

### 3) 比較検討及び評価

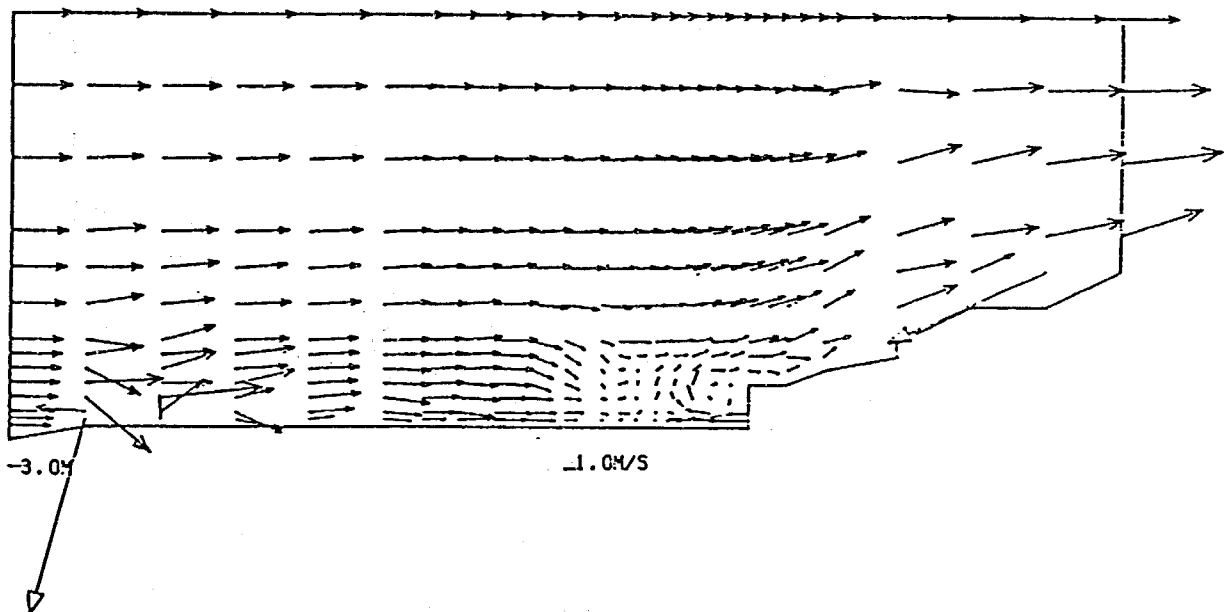
#### (1) 流れ計算

図-3.38~3.41 は Run 1 に対して行った流れ計算の結果を示したものである。まず、CASE 1-1 と CASE 1-2 では4つの鉛直境界面における境界条件の設定方法として、流入側2つと流出側2つのうち、どちらの2つの境界面の風速を固定した方が望ましいかを調べるための計算を行っているが、図からもわかるように地表面が高い流出側の境界面の風速を固定した CASE 1-2の方が部分的に見られる発散は少なくなっており、流れ場の整合性は CASE 1-1 よりは望ましいものとなっている。しかし、CASE 1-2においても依然坑口付近においては部分的な発散現象が見られるため、CASE 1-3、CASE 1-4では風速の鉛直分布の与え方を変更するなどしてこれら発散現象の解消を図った。その結果、一般風速の選び方を変え、さらには道路上の渦動粘性係数として他の領域の10倍もの値を与えた CASE 1-4において、坑口付近に見られた部分的な発散現象が解消された。

図-3.42~3.45 は Run 2 を対象にして行った流れ計算の結果を示したものであり、いずれのケースも風向に平行な鉛直境界面は式(3.1)で与えられる風速を与え、固定境界面としている。CASE 2-1 (図-3.42) と CASE 2-2 (図-3.43) は一般風速のとり方を変えて計算を行ったもので、CASE 2-1に現れる発散現象の一部(東行線道路の北部)は、CASE 2-2で解消されているのがわかる。CASE 2-3 (図-3.44) は CASE 2-2においても解消されない坑口付近の発散現象を解消するため、CASE 2-2とは逆の流出側の境界面に固定風速を与えたものであるが、それほど明確な効果は現れておらず、Run 2のように風向が計算対象領域に平行な場合には流出側、流入側どちらの境界面に固定風速を与えても、計算される流れ場は大差ないことがわかる。一方、CASE 2-4 (図-3.45) は CASE 2-3の計算条件に、道路上の渦動粘性係数を他の領域の10倍にするという条件を付け加えて計算したもの

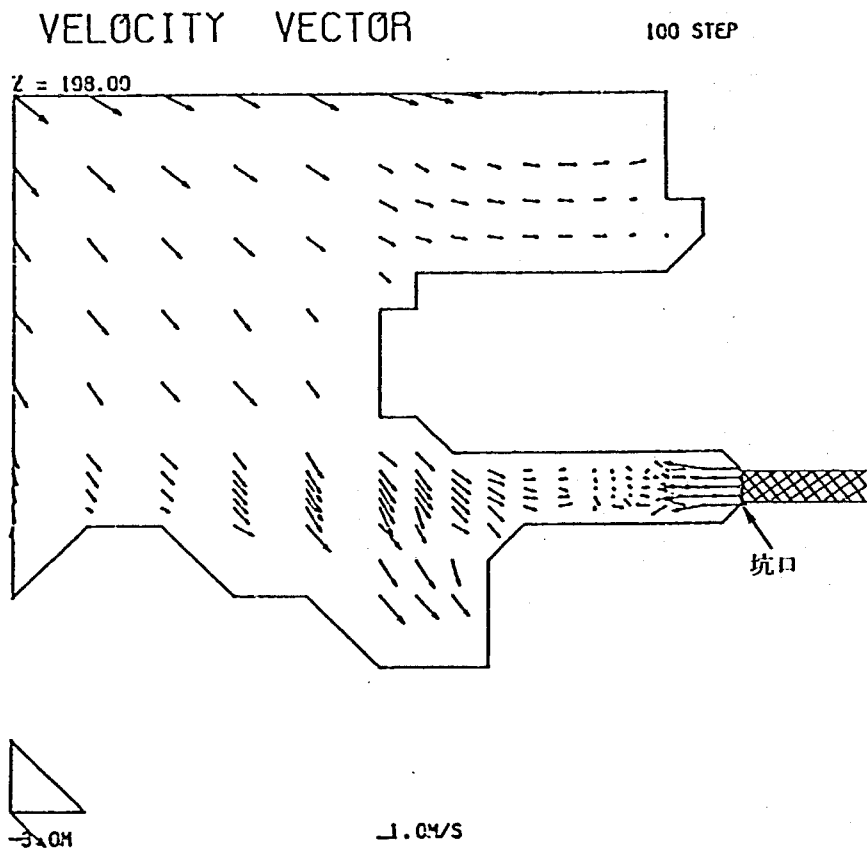


(a) 水平断面 (路面上 2 m)

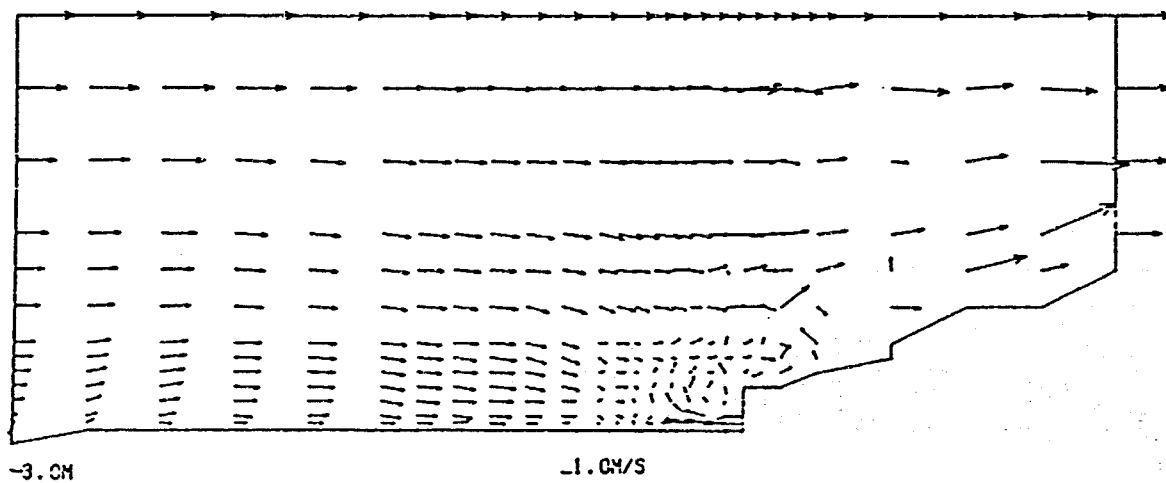


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.38 流れの計算結果 CASE 1-1

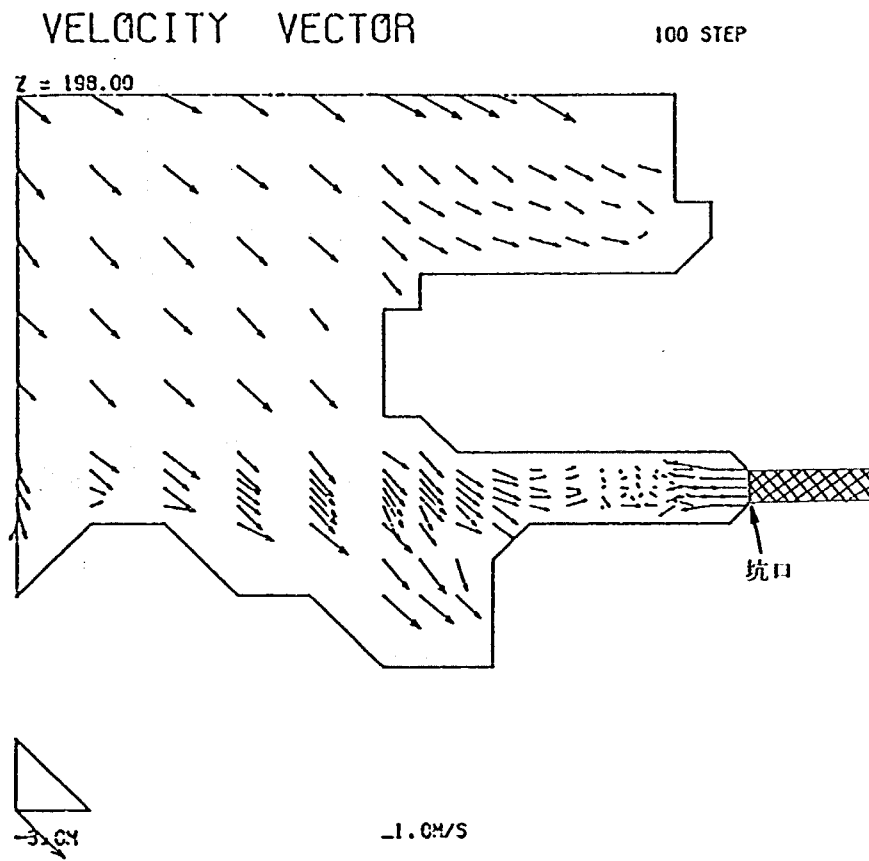


(a) 水平断面 (路面上 2 m)

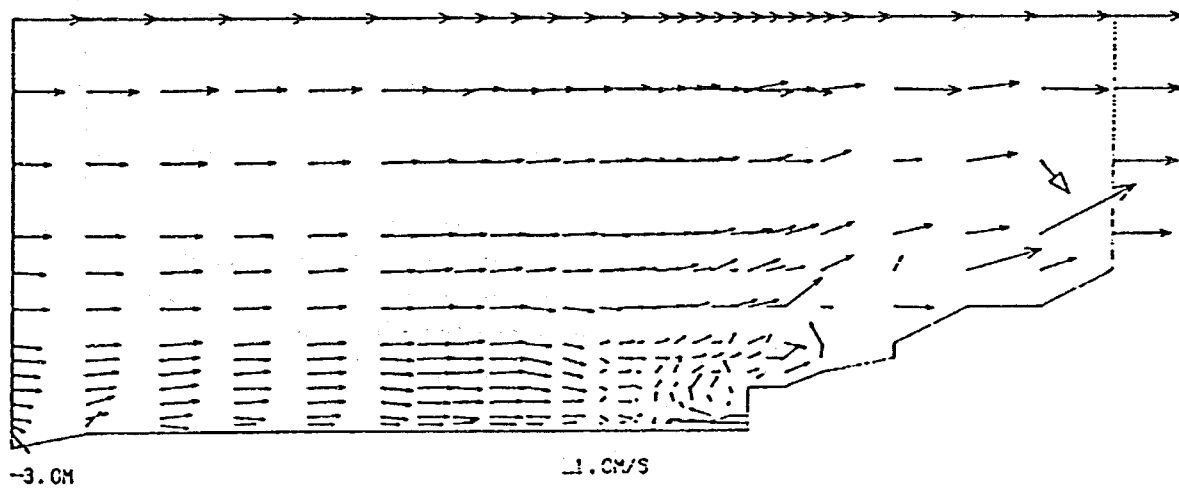


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.39 流れの計算結果 CASE 1-2

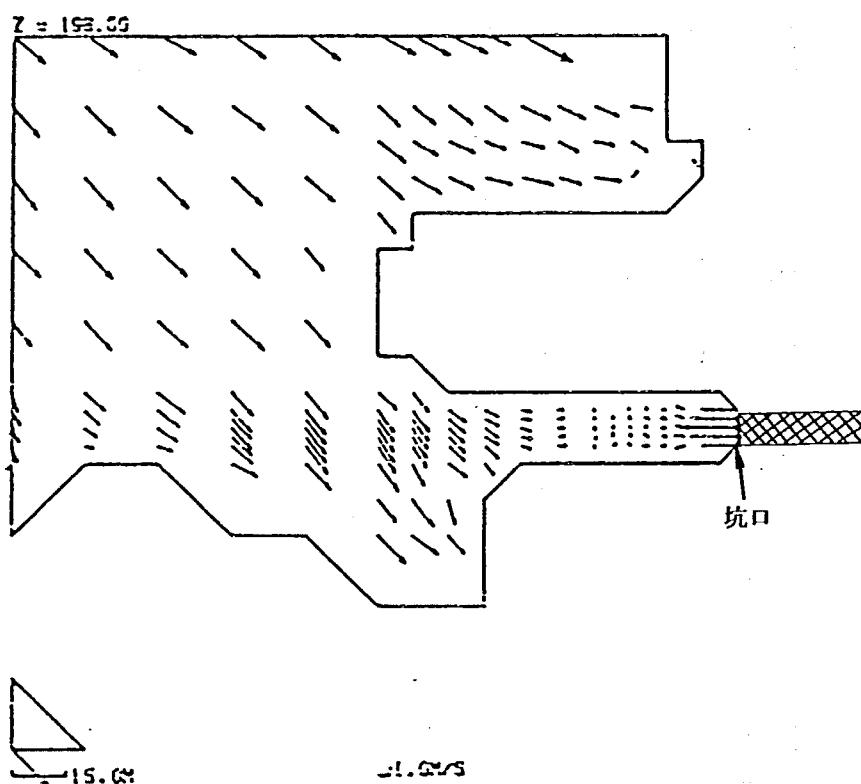


(a) 水平断面 (路面上 2 m)

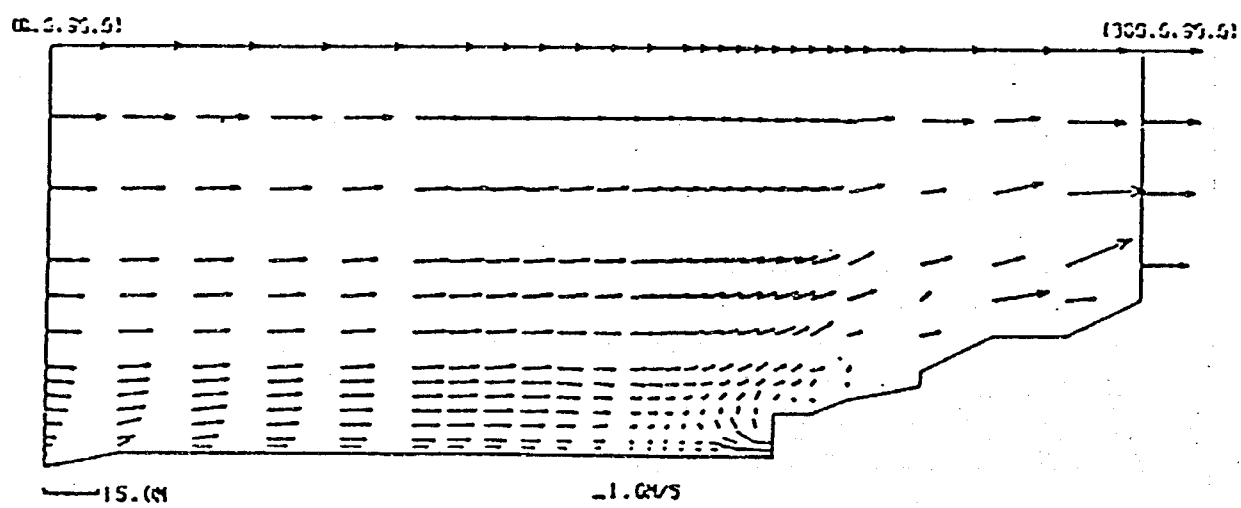


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.40 流れの計算結果 CASE 1-3

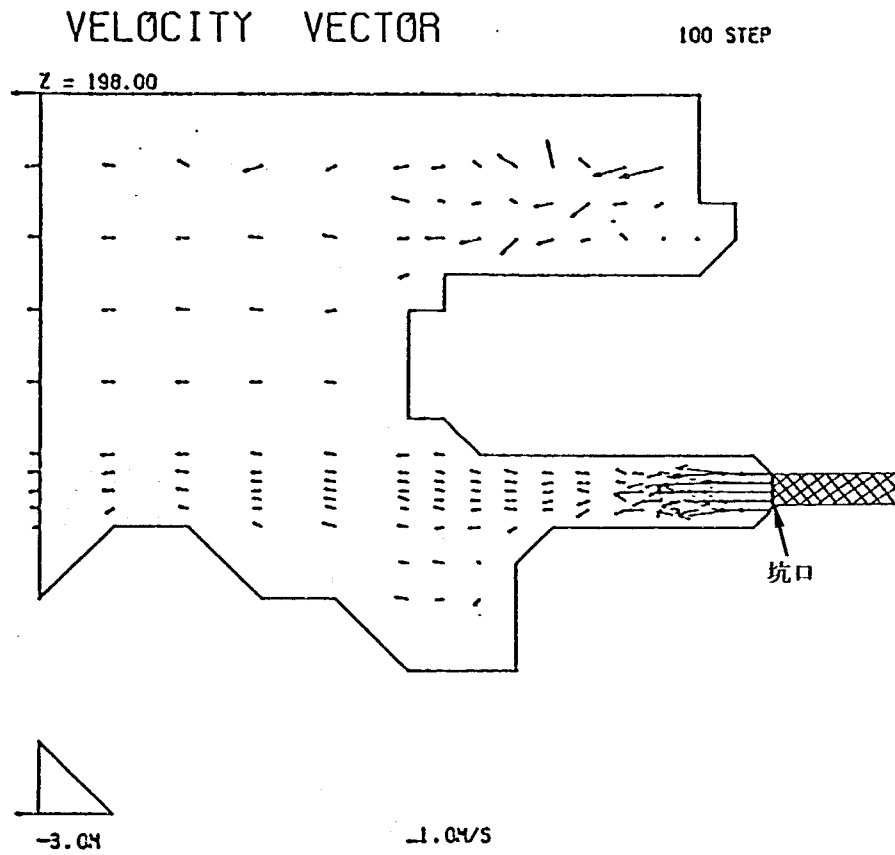


(a) 水平断面 (路面上 2 m)

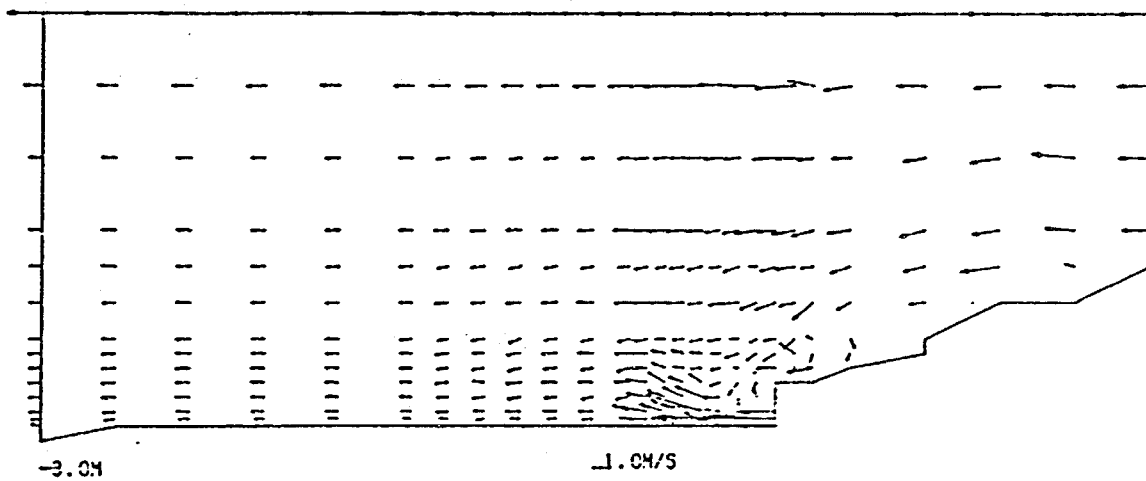


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.41 流れの計算結果 CASE 1-4



(a) 水平断面 (路面上 2 m)



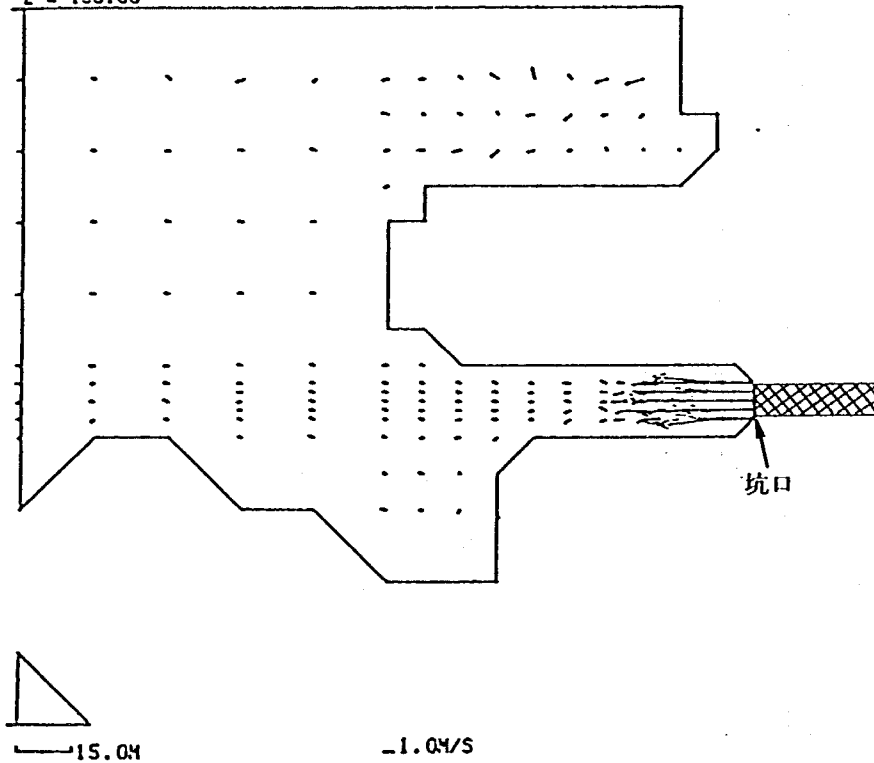
(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.42 流れの計算結果 CASE 2-1

# VELOCITY VECTOR

100 STEP

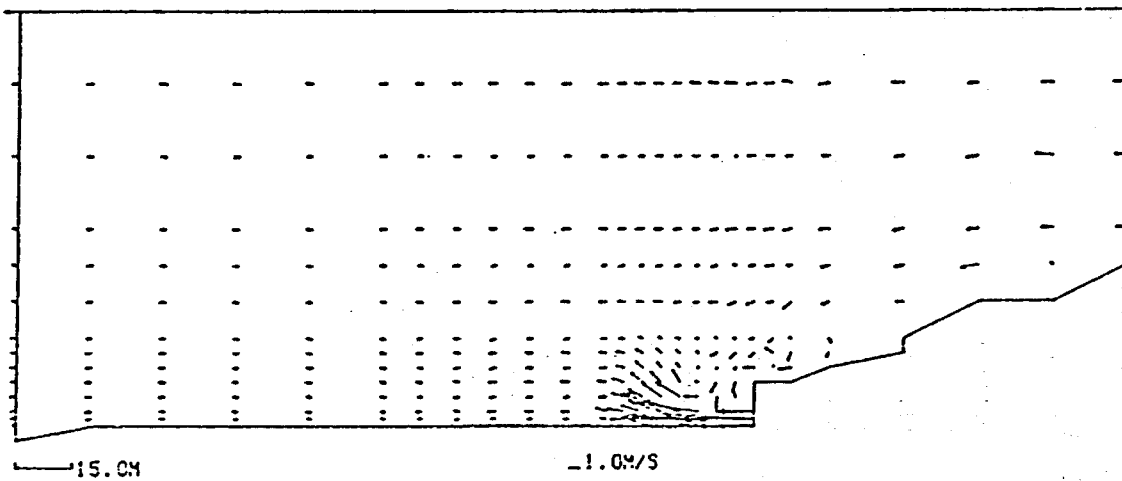
Z = 198.00



(a) 水平断面 (路面上 2 m)

(0.0, 90.0)

(300.0, 90.0)

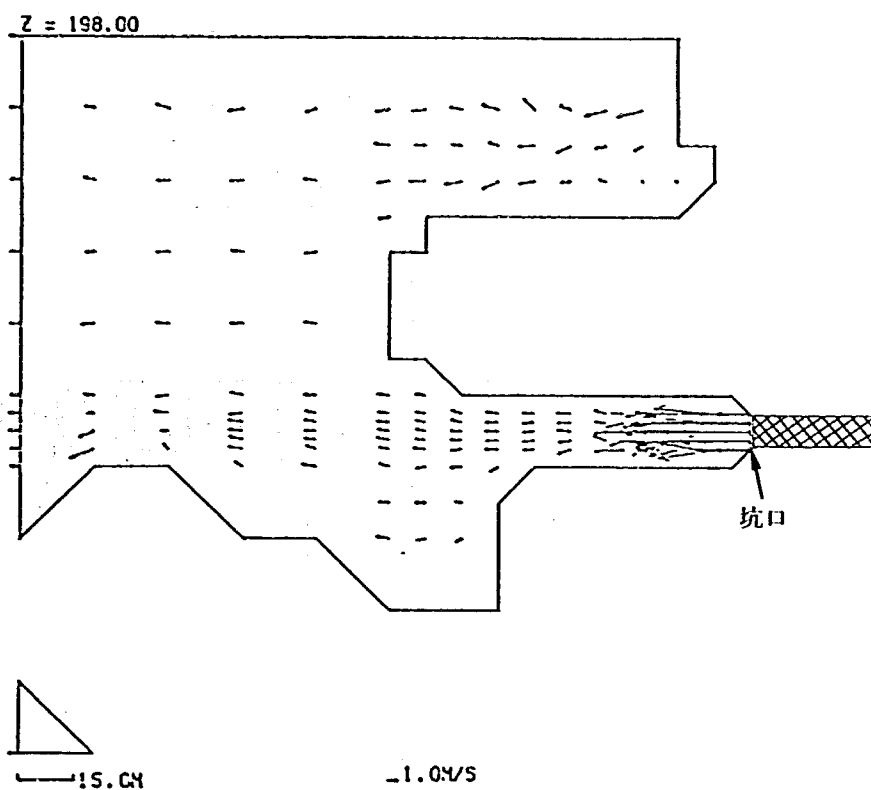


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

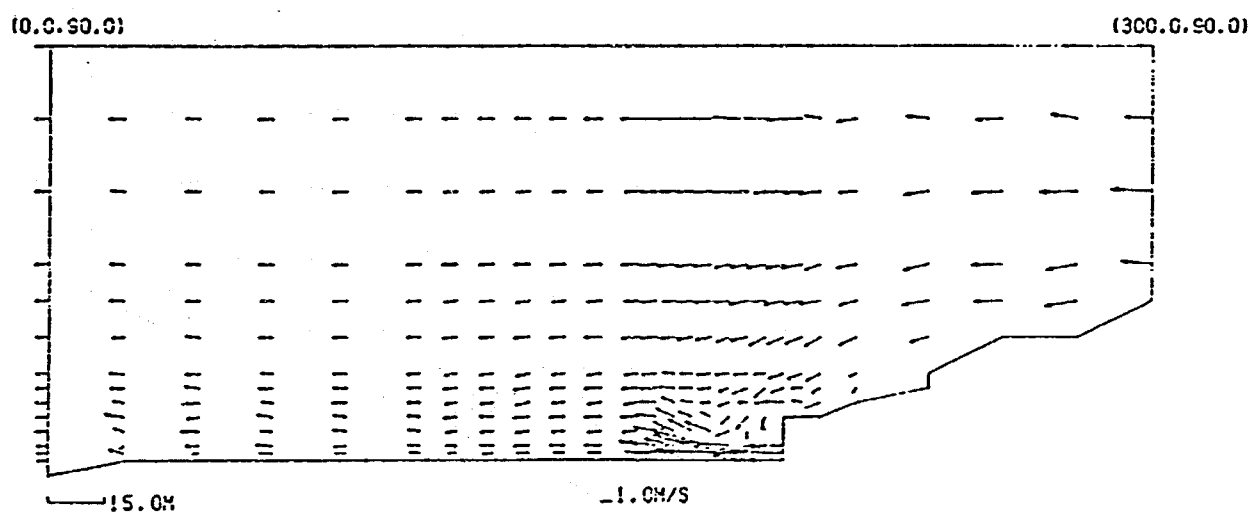
図-3.43 流れの計算結果 CASE 2-2

# VELOCITY VECTOR

100 STEP

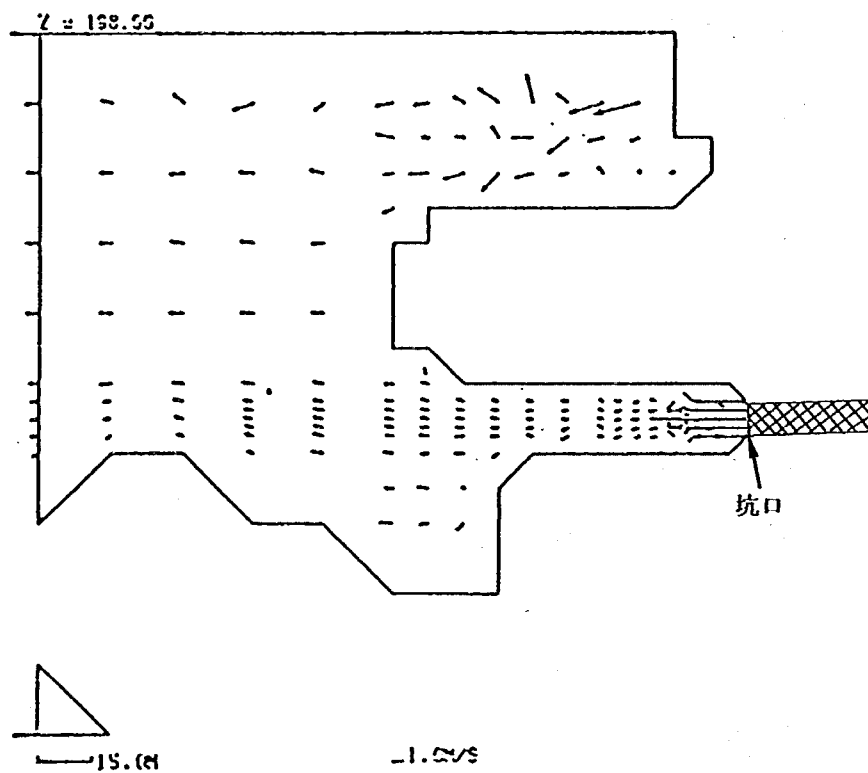


(a) 水平断面 (路面上 2m)

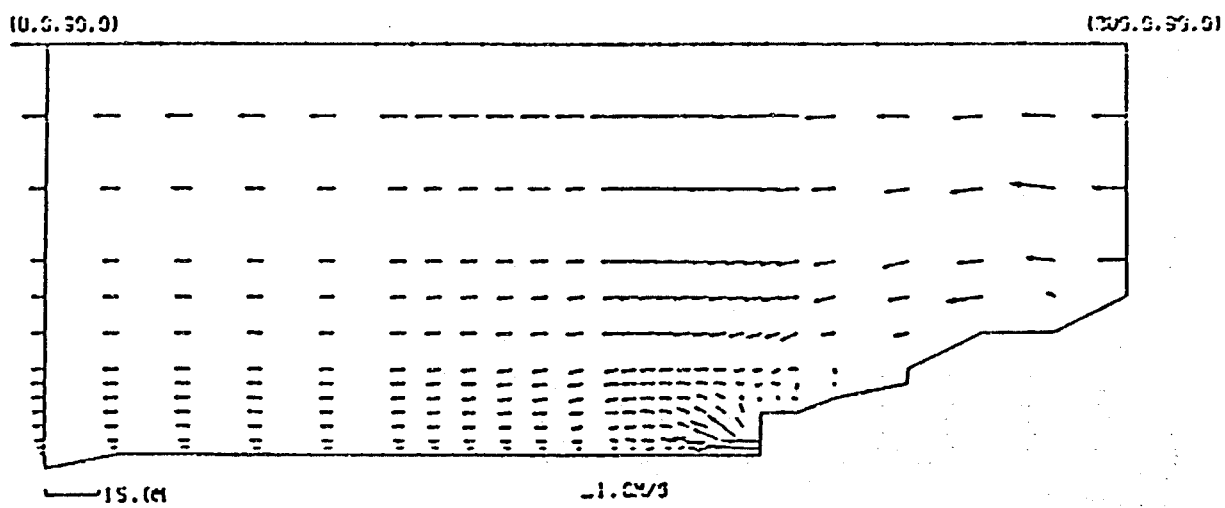


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.44 流れの計算結果 CASE 2-3



(a) 水平断面 (路面上 2m)



(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.45 流れの計算結果 CASE 2-4

であるが、このケースでは坑口付近に現れていた発散現象もかなり改善されていることがわかる。

なお、流れ計算を行うにあたってはいずれも前述したように実際の気象安定度に関係なく気象安定度はDであると見なして水平方向の渦動粘性係数  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ を与えているが、この操作の影響により発生したと考えられる乱れた流れは認められない。

## (2) 拡散計算

図-3.46は、入力項として流れ計算結果CASE 1-4を、また、図-3.47はCASE 2-4をそれぞれ用いて行ったRun 1, 2の拡散計算結果(地表面からの高さ1.2m地点の道路方向濃度減衰)である。前述したように拡散計算を行うにあたっては、Bトンネルでは計算対象全領域において一律の拡散係数を与えており、Aトンネルのように道路上の拡散係数値を大きく与えるといったような手法は採用していない。図からもわかるようにRun 1, 2とも全体的には比較的良好な整合性が得られているが、Run 1においては坑口付近の濃度値が過大に計算されている。これは、Run 1においては風向が斜め向い風となっているため、Aトンネルで述べたように自動車走行の影響により坑口付近の道路上の拡散が、速くなっていると推測されるにもかかわらず、全領域に一律の拡散係数を与えていることに起因するものと考えられる。しかし、道路上の拡散係数に関する詳しい情報が得られていない現段階ではどの程度の値のものを拡散係数値として与えてよいかわからず、Aトンネルのように10倍程度の値を与えて見るのも整合性を良くするための一つの手段であると考えられるが、Bトンネルでは全領域に一律の拡散係数を与えても図-3.46, 3.47に示される程度の整合性は得られること、図-3.47に示される実測値には坑口付近に相対濃度が1.0を越える地点が見られ信頼性に若干欠けること、拡散係数あるいは渦動粘性係数を求めるためには前述したような風速分布の仮定を行っており気象データの信頼性が高くないことなどを考え合せると、道路上に大きな拡散係数値を与える拡散計算はBトンネルでは適当でないと考えられる。換算係数F値の影響に関しては、図-3.46に見られるようにRun 1の場合はかなりの影響を受けている。一方、Run 2の場合は図-3.47に見られるように、F値の影響はRun

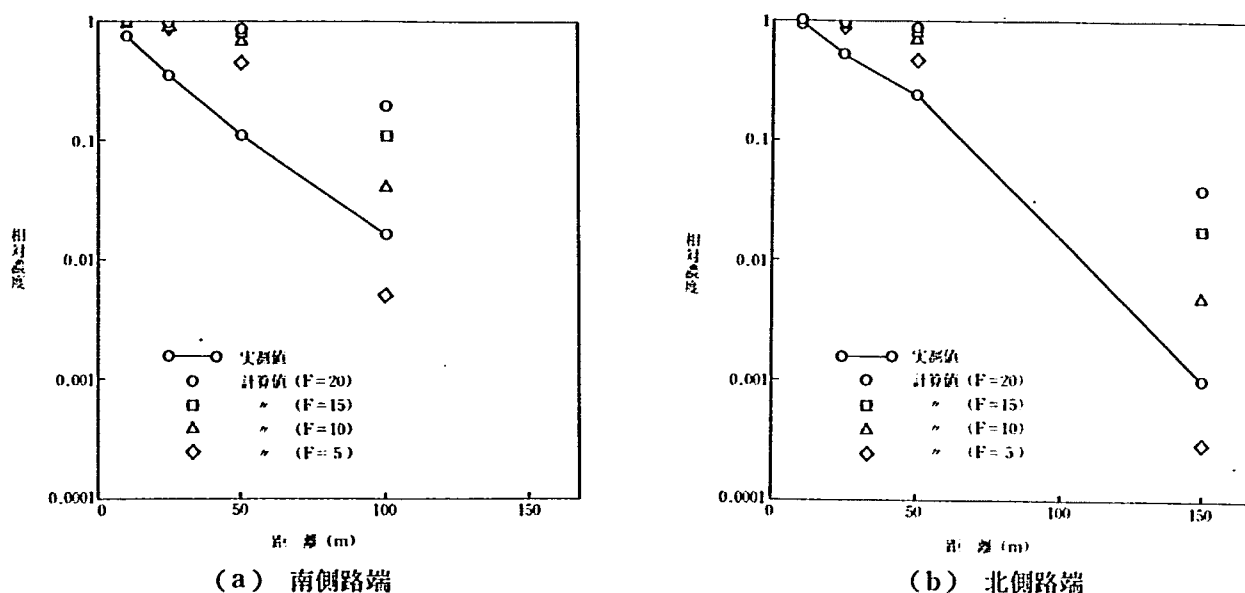


図-3.46 Bトンネル道路方向濃度減衰図 Run 1

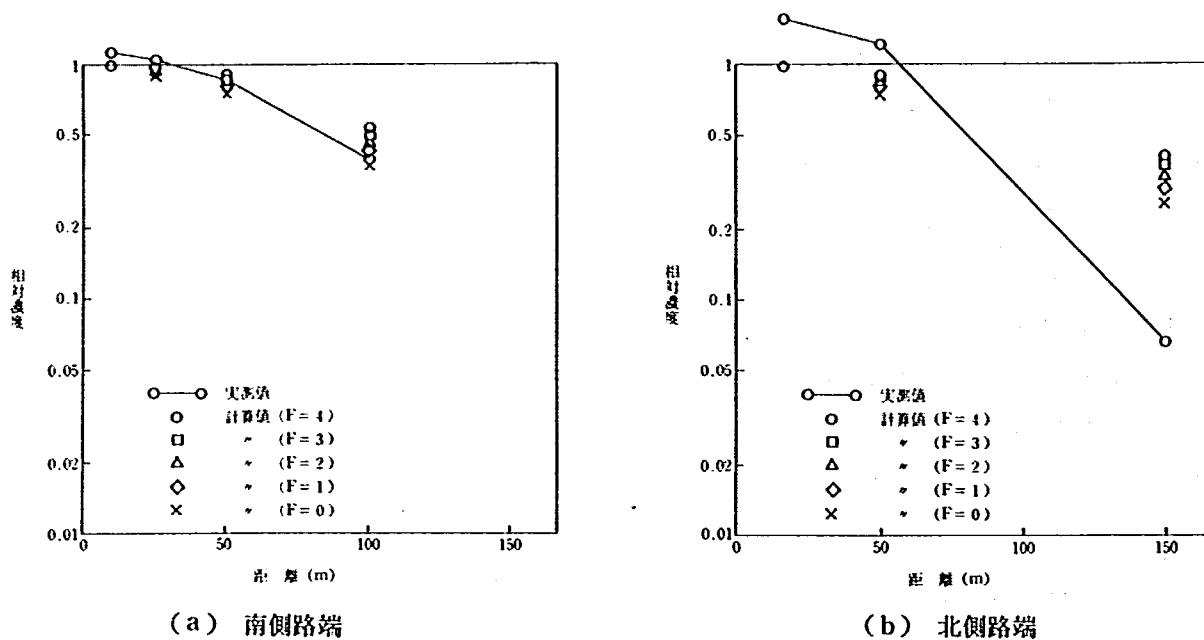
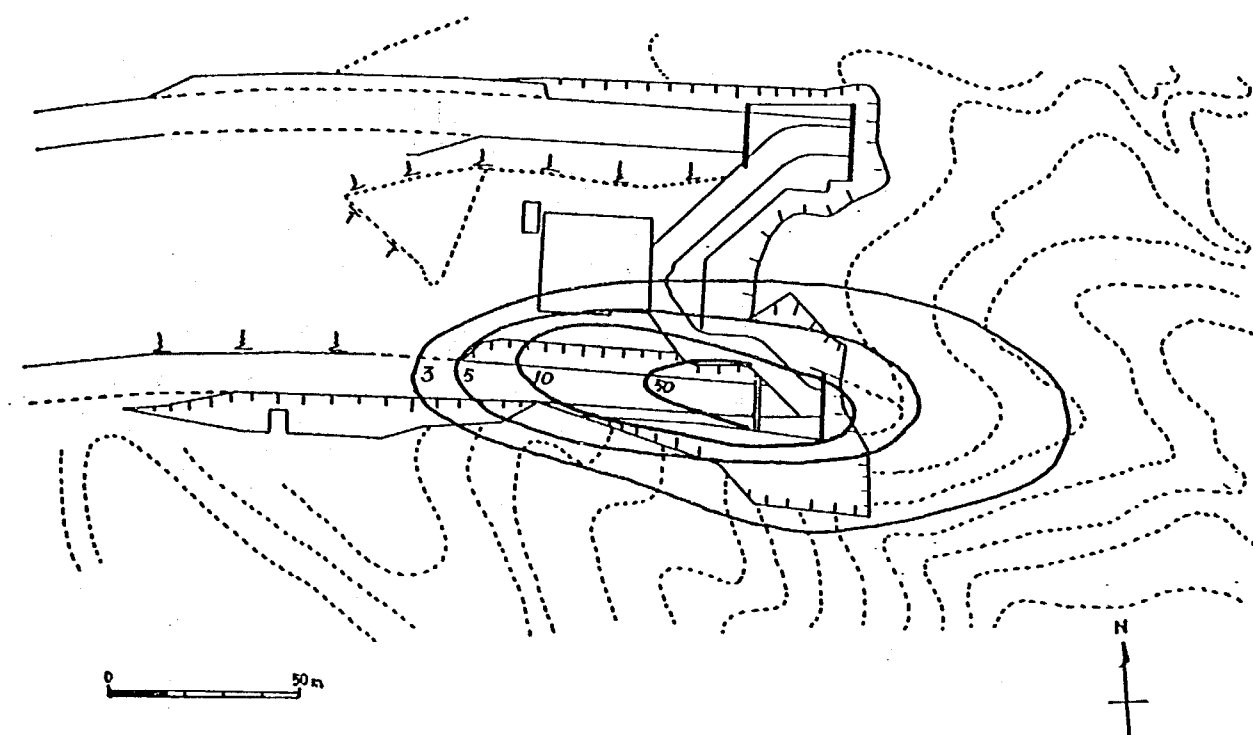
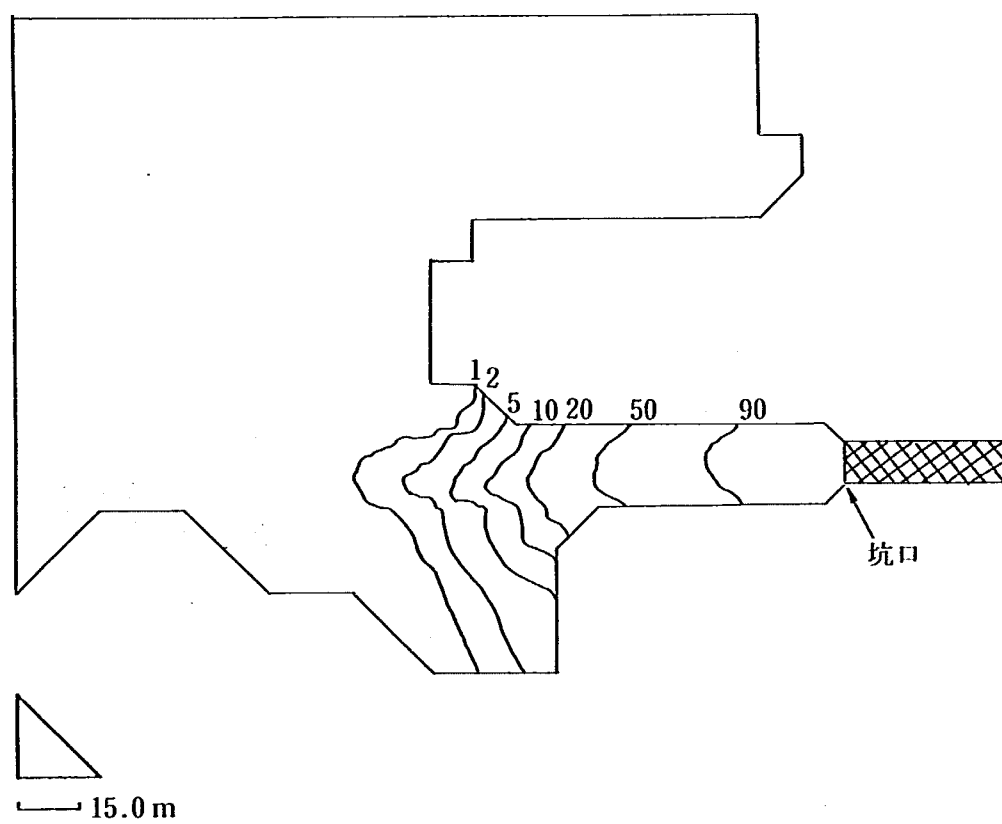


図-3.47 Bトンネル道路方向濃度減衰図 Run 2

1の場合程大きくはないが、若干の変化は見られ、 $F=0$  すなわち換算風速を与えないときの整合性が良いようである。なお、図-3.48は $F=10$ の場合のRun 1、図-3.49は $F=0$ の場合のRun 2の拡散計算結果からそれぞれ、濃度分布図を描き、実測値との比較を行ったものである。

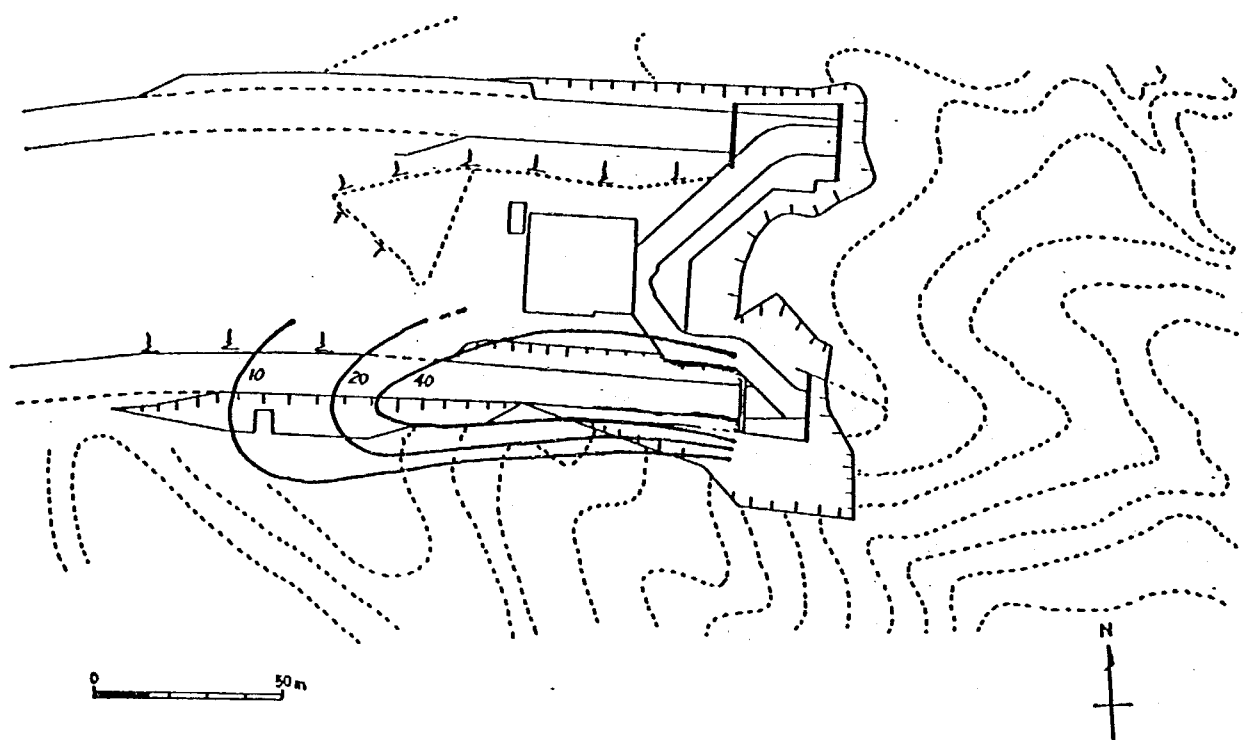


(a) 実測値

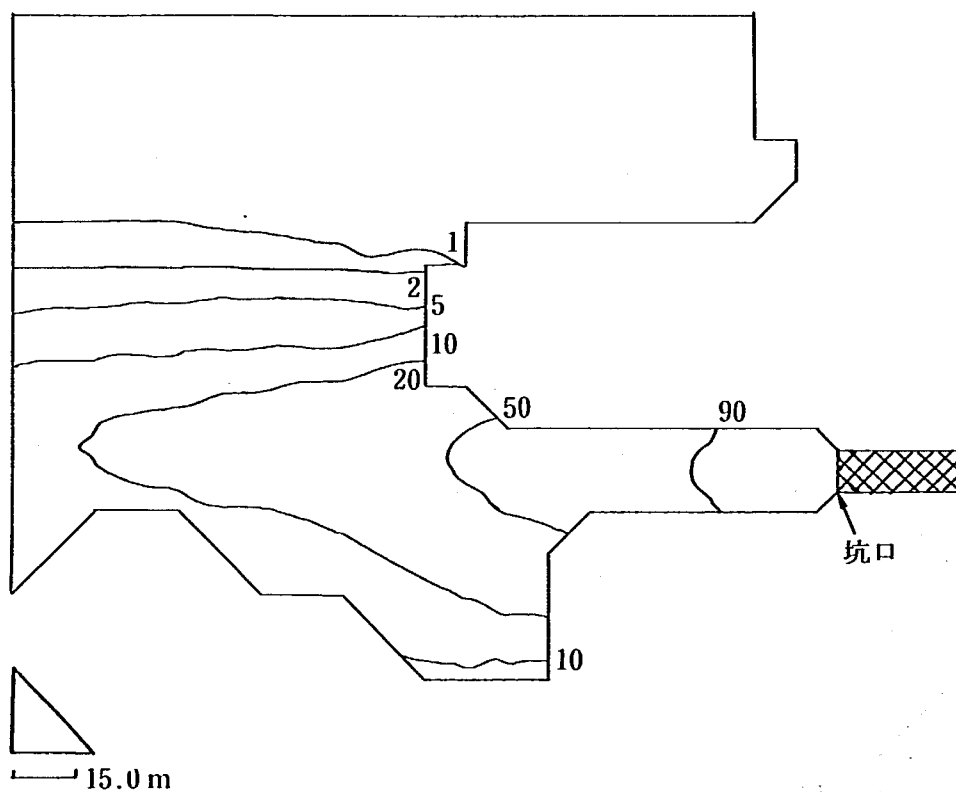


(b) 計算値 CASE 1-4-3

図-3.48 Bトンネル濃度分布図 Run 1



(a) 実測値



(b) 計算値 CASE 2-4-5

図-3.49 Bトンネル濃度分布図 Run 2

#### 4) まとめ

##### (1) 流れ計算

境界条件として、4つの鉛直境界面のうち、流出側と流入側のどちらの境界面の風速を式(3.1)で固定すれば良いかという問題に関しては、Run 1のように風向が計算対象領域を囲む四角形の辺に平行でない場合には、地表面が高い流出側の境界面を固定した方が流れ場の整合性は良かった。また、Run 2のように風向が計算対象領域を形成する4つの鉛直境界面のうち2つに平行な場合は、平行な2つの鉛直境界面の風速を式(3.1)で固定すれば、流入側、流出側どちらの風速を式(3.1)で固定しようとも計算される流れ場到大差はない。

坑口周辺の流れ場に部分的な発散現象が現れる場合には、道路上の渦動粘性係数を他の領域よりも大きく与えることによりベクレの安定条件が満たされ易くなり、発散現象はかなり改善される。

水平方向の渦動粘性係数  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  を求める際の大気安定度は、実際の大気安定度に関係なくすべて D とみなしても、それほど問題となる流れは発生しない。

##### (2) 拡散計算

B トンネルにおいては斜め向い風の場合に計算対象領域に一律に拡散係数を与えても、比較的良好な計算結果が得られており、必ずしも A トンネルのように道路上の拡散係数を大きくする必要はない。

換算係数 F 値が拡散計算に及ぼす影響は風速、風向によりその程度は異なり、 $V=6.6$  m/s 斜め向い風の Run 1 では大きく、 $V=2.9$  m/s 追い風の Run 2 では小さかった。また、換算係数 F 値は Run 1 においては  $F=10$ 、Run 2 においては  $F=0$  の場合に、実測値と最も整合性の良い結果を与えた。

### 3.3 対面交通トンネルの場合

#### 3.3.1 Cトンネル

##### 1) 現場実験<sup>3)</sup>の概要

実験を実施した場所は前項 3.2.2 と同じ B トンネルの西側坑口付近である。ただし、前項で計算対象とした実験では交通形態が方向分離の 4 車線（トンネルでは 2 車線一方向交通×2 本）となっているのに対して、本項で計算対象とする実験は、トンネルの一方（図-3.50 中北側のトンネル）が通行止めとなっていたため、南側のトンネルを対面交通にて供用している状況にあったものである。トレーサーガス拡散現場実験は 1 回の計測時間が 1 時間のものを条件を変えて合計 5 Run 行っているが、5 Run とも風向は西行線に対して向い風あるいは斜め向い風となっているため本研究ではこの中から代表的な風速を示すものを選定し表-3.7 に示される諸条件下における 3 Run の実験結果を計算対象とした。

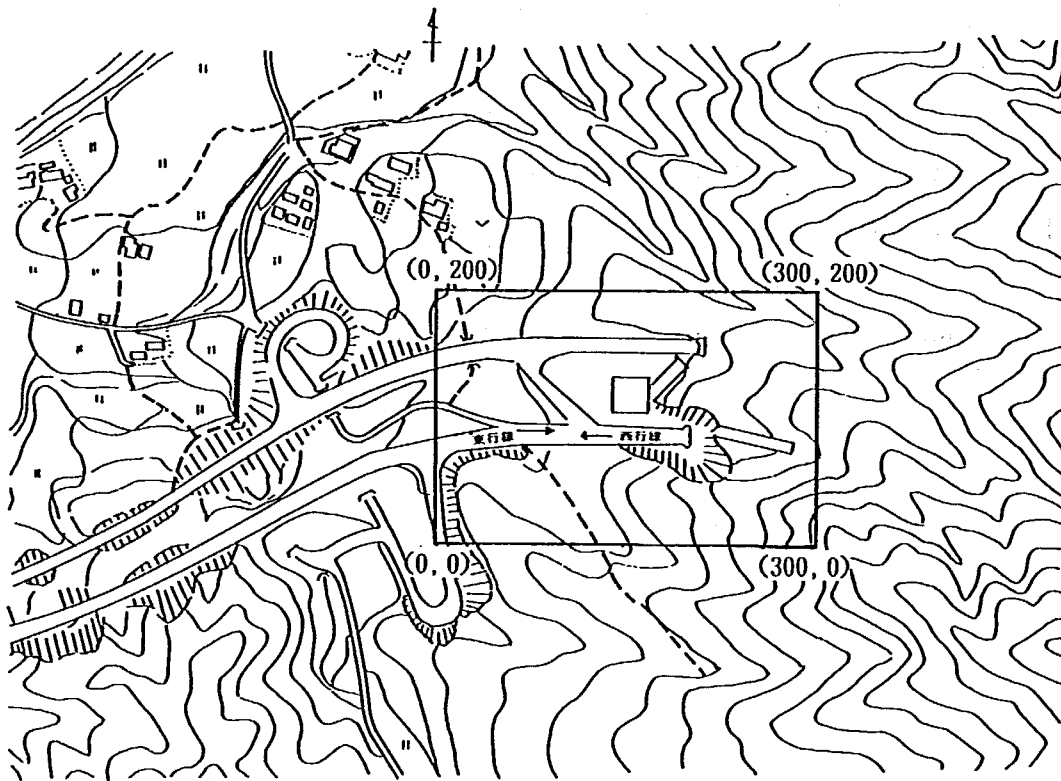


図-3.50 Cトンネル西側坑口付近の地形図 (1/5000) (枠内は計算対象範囲)

表-3.7 Cトンネルトレーサーガス拡散現場実験時の条件

| Run. NO. | 坑 外 風                            |             | 坑口風速(m/s) |      | 交通量 台/hr(大型車混入率%) |         |
|----------|----------------------------------|-------------|-----------|------|-------------------|---------|
|          | 風向<br>(西行線<br>自動車走行方向<br>に対する風向) | 風速<br>(m/s) | 西行線       | 東行線  | 西行線               | 東行線     |
| 1        | WNW(斜め向い風)                       | 3.4         | 2.98      | 1.12 | 487(43)           | 433(42) |
| 2        | W(向い風)                           | 5.7         | 3.94      | 0.22 | 563(59)           | 571(60) |
| 3        | W(向い風)                           | 3.8         | 4.05      | 1.28 | 402(47)           | 426(40) |

注) ○西行線はトンネルから出る方向, 東行線はトンネルへ進入する方向

○坑口風速は坑口より出る風速を正として表示

なおCトンネルにおいても、鉛直方向の2点以上において風向、風速を計測した地点はなく、風向、風速の測定点は、換気塔屋上より3m上空地点及び換気塔周辺の数地点における地表面より1.2m上空点となっている。

## 2) 計算条件

### (1) 要素分割

要素分割については、3.2.2項Bトンネルと同一のものを使用した。

### (2) 流れの計算条件

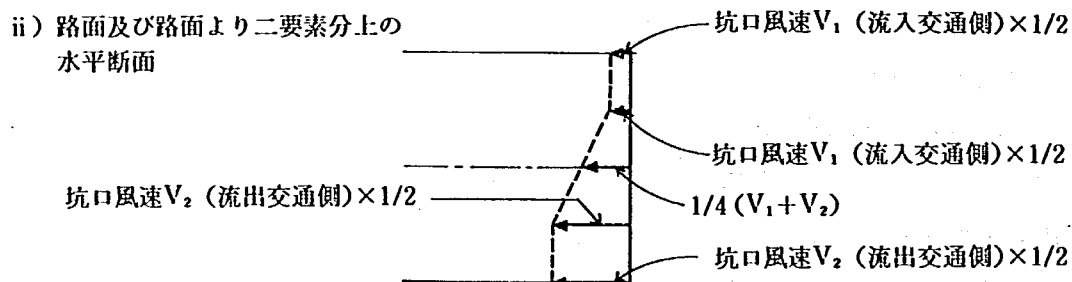
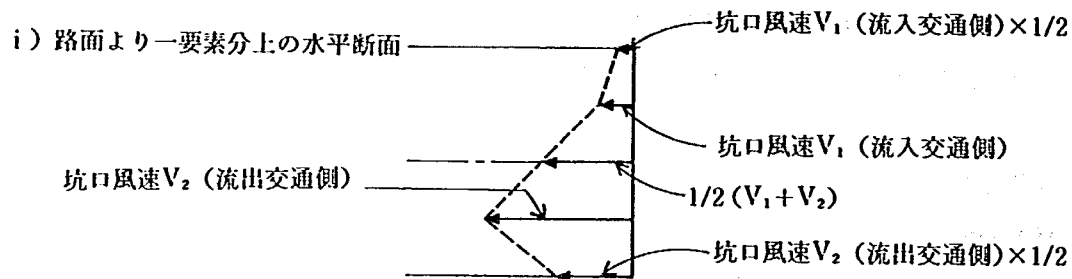
境界面に設定する境界条件については、Bトンネルの計算結果から得られた手法を用いて条件設定を行った。すなわち、地表面は $u=v=w=0\text{ m/s}$ で、また、上空面は式(3.1)で与えられる風速で境界面を固定した。残りの4つの鉛直境界面については、境界面を流出側と流入側の2組に分類し、どちらか1組の境界面を固定すれば良いのであるが、Run1の斜め向い風の場合はBトンネルRun1と同じ風向であるため、BトンネルRun1の計算結果を参考にして地表面の高度が高い方の流出側の境界面の風速を式(3.1)で固定した。Run2, 3の場合は追い風となり、風向は計算対象領域を形成する4つの鉛直境界面のうち、2つの境界面と平行となるため、この風向と平行な2つの鉛直境界面及び地表面の高度が高い流出側の境界面の風速を式(3.1)で固定した。

境界条件としての坑口風速の与え方に関しては、Cトンネルの場合は対面交通となるので、一方向交通のAトンネルやBトンネルの計算時に用いた手法をそのまま適用することはできない。対面交通時には車がトンネルに進入する車線(流入交通側)とトンネルから出る車線(流出交通側)とでは坑口風速に表-3.7で示されるように大きな差があり、一方向交通時のように一つの風速で坑口風速を代表させることは実際の現象からかなりはずれたことになるからである。対面交通時に対しても、一方向交通時に用いたような手法により境界条件としての坑口風速を設定しようとするならば、流入交通側と流出交通側の坑口風速を区別して設定することが必要と考えられる。そこで、Cトンネルでは対面交通時の坑口風速の与え方として、図-3.51に示されるように、道路上の要素分割を一方向交通時よりも更に細かく行い、流入交通側、流出交通側で実測された坑口風速をそれぞれの車線に与えることを試み、この手法の妥当性について検討した。

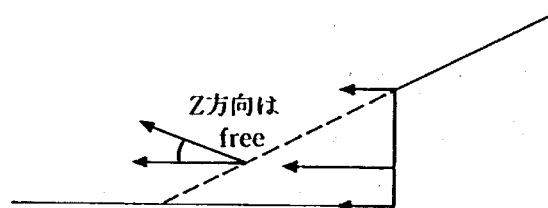
渦動粘性係数についてはA, Bトンネルと同様に実測風速から $u^*$ ,  $z_0$ を求め式(3.3), (3.4)により与えた。ただし、部分的に発生する発散現象を解消するには、道路上の渦動粘性係数を他の領域よりも大きく与えるのが良いという結論がBトンネルの計算結果から得られているため、道路上の渦動粘性係数は他の領域の10倍の値のものを与えた。

また、Bトンネル計算結果を踏まえて、水平方向の渦動粘性係数を求める際の大気安定度はすべてDと見なしている。表-3.8はCトンネル、流れの計算条件をまとめたものである。

なお、Cトンネルの場合もBトンネルの場合と同様に前述したように、鉛直方向の2点以上において風向、風速を実測した地点が存在しないため、 $u^*$ ,  $z_0$ を求めるにあたり、換気塔屋上より3m上空点で実測された風速と、換気塔周辺の1地点の地表面から1.2m上空点で実測された風速は同一地点で測定されたという仮定を設けている。したがって、このような仮定のものとで求めた $u^*$ ,  $z_0$ を用



(a) 坑口面 (平面図)



(b) 坑口面よりも一要素分前面

図-3.51 対面交通時の坑口風速の与え方

表-3.8 Cトンネル流れの計算条件

| CASE | 計算対象とした<br>現場実験 | 風速境界条件                                                                                                                              | 圧力境界条件                | 渦動粘性係数(m <sup>2</sup> /s) |                                                                               | 備 考                     |
|------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|      |                 |                                                                                                                                     |                       | $\epsilon_x, \epsilon_y$  | $\epsilon_z$                                                                  |                         |
| 1    | Run 1           | 上空面・II・III面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \sin \phi, v = u_t \cos \phi$<br>$w = 0, \phi = 337.5^\circ$ | I, IV面において<br>$p = 0$ | 1.09<br>ただし道路上では<br>10.9  | $xu^*(z+z_0)$<br>$z_0 = 0.130$<br>$u^* = 0.277$<br>ただし道路上では<br>$u^* = 2.770$  | 一般風は、斜め向<br>かい風 3.4 m/s |
| 2    | Run 2           | 上空面・II・III・IV面において<br>$u_t = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_t \sin \phi, v = u_t \cos \phi$<br>$w = 0, \phi = 0^\circ$  | I面において<br>$p = 0$     | 1.82<br>ただし道路上では<br>18.2  | $xu^*(z+z_0)$<br>$z_0 = 0.133$<br>$u^* = 0.466$<br>ただし道路上では<br>$u^* = 4.660$  | 一般風は風かい風<br>5.7 m/s     |
| 3    | Run 3           | 同 上                                                                                                                                 | 同 上                   | 1.22<br>ただし道路上では<br>12.2  | $xu^*(z+z_0)$<br>$z_0 = 0.0527$<br>$u^* = 0.262$<br>ただし道路上では<br>$u^* = 2.620$ | 一般風は向かい風<br>3.8 m/s     |

注) 境界条件の欄でI面は $x=0$ , II面は $x=300$ , III面は $y=0$ , IV面は $y=200$ の面をそれぞれ示す。  
共通条件 $\Delta t=0.1(\text{sec})$ , ステップ数=100

いて設定された境界条件，渦動粘性係数及び拡散係数の値には信頼性に欠ける部分が含まれていることを付記する。

### (3) 拡散の計算条件

坑口濃度の与え方は，一方向交通トンネルの場合と同様に，計算上の坑口部分に含まれるすべての節点に対して固定境界条件として均一に与えた。

拡散係数の与え方は，Bトンネルで適用した手法をそのまま用いており，道路上の拡散係数についてもBトンネルの項で述べたのと全く同様の理由から，他の領域と同一の値のものを与えた。

換算風速の与え方に関しては，Cトンネルの場合はA，Bトンネルとは異なり対面交通となるため，これまでの手法をそのまま適用することはできないが，これに若干の修正を加えることにより対処した。すなわち，東行線，西行線では交通量，自動車走行方向の風向に対する相対風向が異なるため，一般的に両車線では換算風速の大きさは異なる。そこで，道路を西行線，東行線に分離し，各車線ごとに換算風速  $U_{r1}$ ， $U_{r2}$  を求め，それを図-3.52に示されるような形で流れ計算から得られた流れ場に重ね合わせた。この場合，風向が西行線に対して追い風ならば，東行線に対しては向い風になるから，換算係数F値は当然両車線では異なり，各車線ごとに自動車走行方向と風向との関係を考え，それぞれの車線に見合った換算係数F値を与えなければならない。したがって，Cトンネルを対象にした拡散計算でも，Bトンネルの場合と同様に換算係数F値の与え方に焦点を絞り，比較的整合性の良い結果を得るために必要なF値の概略値を風速，風向別に得ることを目的として表-3.9に示されるような各F値に対する計算を行い検討した。

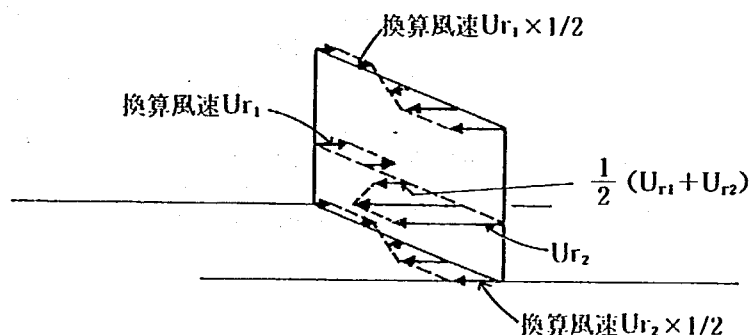


図-3.52 対面交通時の車速の換算風速の与え方

表-3.9 Cトンネル拡散の計算条件

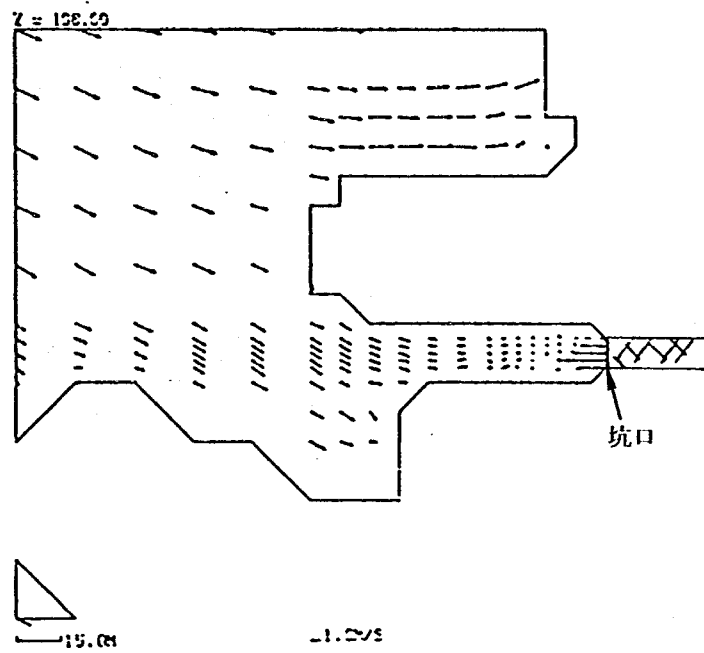
| CASE | 流れ場 | 計算対象とした現場実験 | 換算風速(m/s) ( )内はFの値 |          | 拡散係数(m <sup>2</sup> /s) |                                                          |
|------|-----|-------------|--------------------|----------|-------------------------|----------------------------------------------------------|
|      |     |             | 西行線側               | 東行線側     | $k_x, k_y$              | $k_z$                                                    |
| 1-1  | 1   | Run 1       | 6.94 (30)          | 0.81 (4) | 1.09                    | $xu^*(z+z_0)$<br>$x=0.41$<br>$u^*=0.277$<br>$z_0=0.130$  |
| 1-2  | 1   | Run 1       | 6.94 (30)          | 0.41 (2) |                         |                                                          |
| 1-3  | 1   | Run 1       | 5.78 (25)          | 0.81 (4) |                         |                                                          |
| 1-4  | 1   | Run 1       | 5.78 (25)          | 0.41 (2) |                         |                                                          |
| 1-5  | 1   | Run 1       | 4.63 (20)          | 0.81 (4) |                         |                                                          |
| 1-6  | 1   | Run 1       | 4.63 (20)          | 0.41 (2) |                         |                                                          |
| 1-7  | 1   | Run 1       | 2.31 (10)          | 0.81 (4) |                         |                                                          |
| 1-8  | 1   | Run 1       | 2.31 (10)          | 0.41 (2) |                         |                                                          |
| 2-1  | 2   | Run 2       | 8.91 (30)          | 1.21 (4) | 1.82                    | $xu^*(z+z_0)$<br>$x=0.41$<br>$u^*=0.466$<br>$z_0=0.133$  |
| 2-2  | 2   | Run 2       | 8.91 (30)          | 0.61 (2) |                         |                                                          |
| 2-3  | 2   | Run 2       | 7.42 (25)          | 1.21 (4) |                         |                                                          |
| 2-4  | 2   | Run 2       | 7.42 (25)          | 0.61 (2) |                         |                                                          |
| 2-5  | 2   | Run 2       | 5.94 (20)          | 1.21 (4) |                         |                                                          |
| 2-6  | 2   | Run 2       | 5.94 (20)          | 0.61 (2) |                         |                                                          |
| 3-1  | 3   | Run 3       | 5.90 (30)          | 0.79 (4) | 1.22                    | $xu^*(z+z_0)$<br>$x=0.41$<br>$u^*=0.262$<br>$z_0=0.0527$ |
| 3-2  | 3   | Run 3       | 5.90 (30)          | 0.39 (2) |                         |                                                          |
| 3-3  | 3   | Run 3       | 4.92 (25)          | 0.79 (4) |                         |                                                          |
| 3-4  | 3   | Run 3       | 4.92 (25)          | 0.39 (2) |                         |                                                          |
| 3-5  | 3   | Run 3       | 3.93 (20)          | 0.79 (4) |                         |                                                          |
| 3-6  | 3   | Run 3       | 3.93 (20)          | 0.39 (2) |                         |                                                          |

共通条件  $\Delta t=0.1$  (sec) ステップ数=4,000

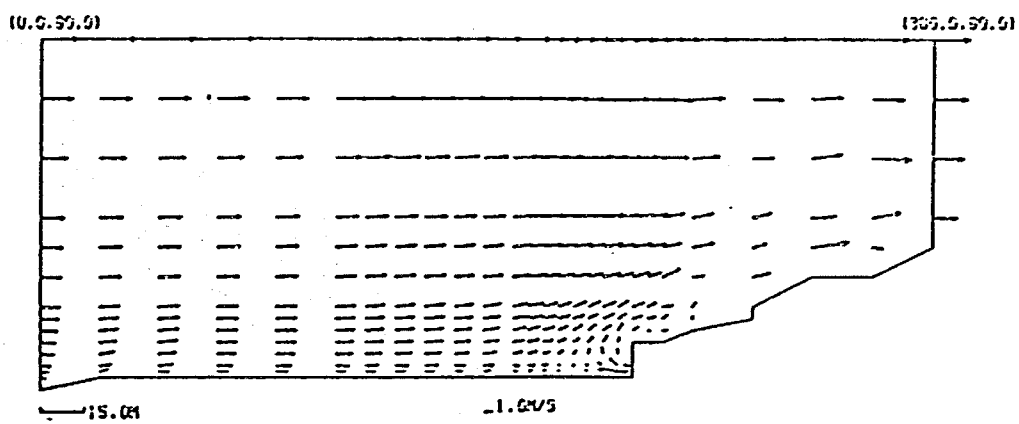
### 3) 比較検討及び評価

#### (1) 流れ計算

Run 1~3 に対して行った流れ計算の結果を図-3.53~3.55 にそれぞれ示す。風速の大きい CASE 2 (図-3.54) においては部分的な発散現象が見られるが、これも拡散計算に与える影響はほとんどないと判断され、全体的には前述したような流れ計算の条件設定方法が十分適用できるものと考えられる。

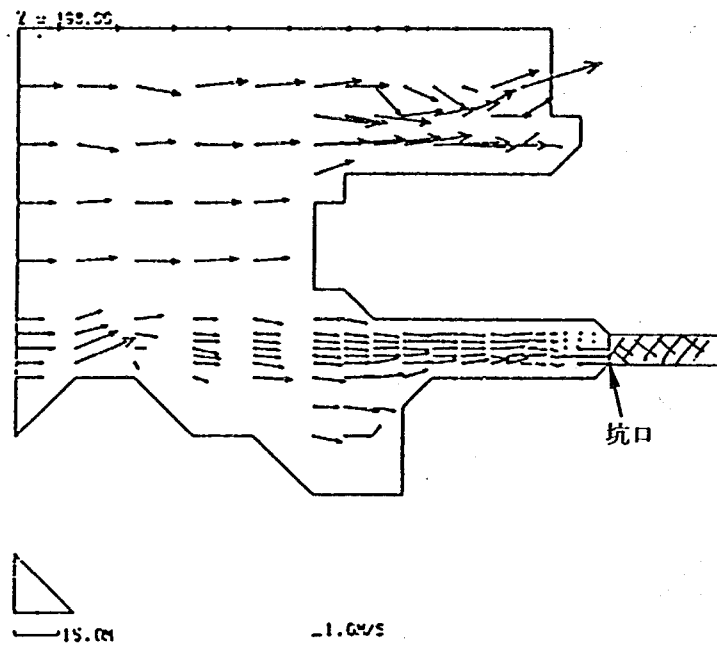


(a) 水平断面 (路面上2m)

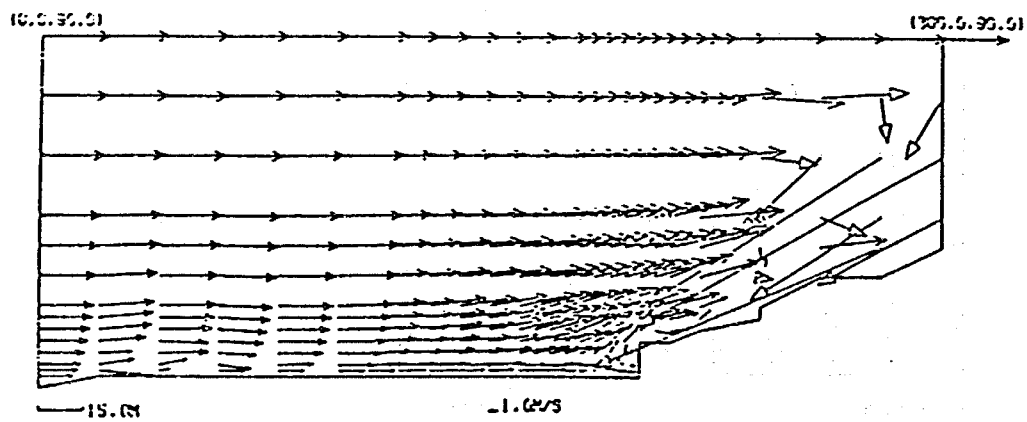


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.53 Cトンネル流れの計算結果 CASE 1

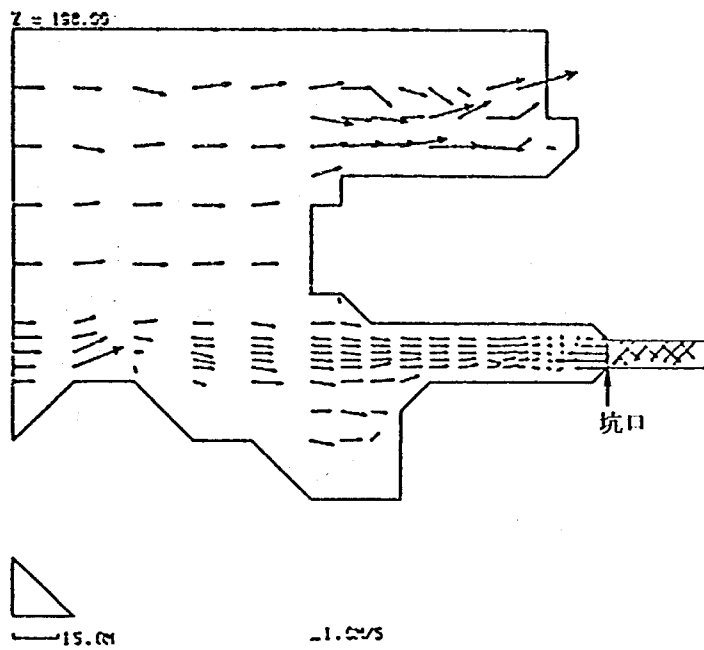


(a) 水平断面 (路面上 2m)

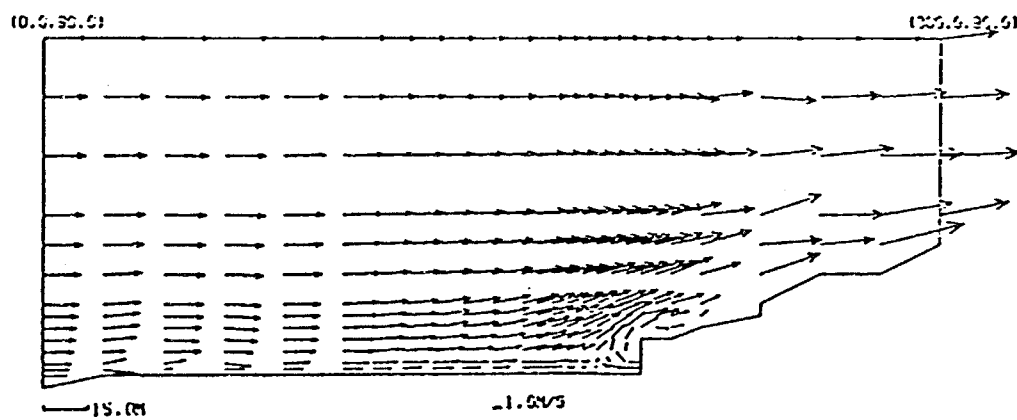


(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.54 Cトンネル流れの計算結果 CASE 2



(a) 水平断面 (路面上 2 m)



(b) 鉛直断面 (道路中心線)

図-3.55 C・トンネル流れの計算結果 CASE 3

## (2) 拡散計算

図-3.56~3.58は換算係数F値を変化させた場合の拡散計算値と実測値との比較を、道路沿いの濃度減衰（地表面からの高さ1.2m）について行ったものである。図からもわかるように、各RunともF値を変えることにより計算値と実測値の差はある程度までは縮まるが、差が全く解消されるケースは見当らない。この原因の一つとして計算条件の設定方法が未だ不十分であることが考えられるが、その他にも実測濃度にも問題があると思われる。すなわち、濃度減衰は坑口濃度に対する相対濃度で表わしているにもかかわらず、一部のRunでは坑口付近の実測濃度が1よりも大きな値を示しており、実際の現象からは考えられない結果となっている。以上のような点を考慮し、さらには道路の南側（西行車線）と北側（東行車線）の濃度減衰に実測値と同じような対面交通の影響に起因する差異が生じていることを考え合わせるならば、道路沿いの濃度の減衰傾向として、計算値は妥当な値を与えているものと思われ、各Runにおいて最も整合性の良い結果を与えるF値を用いた場合の計算結果と実測値との濃度分布の比較を示せば図-3.59~3.61のようになる。

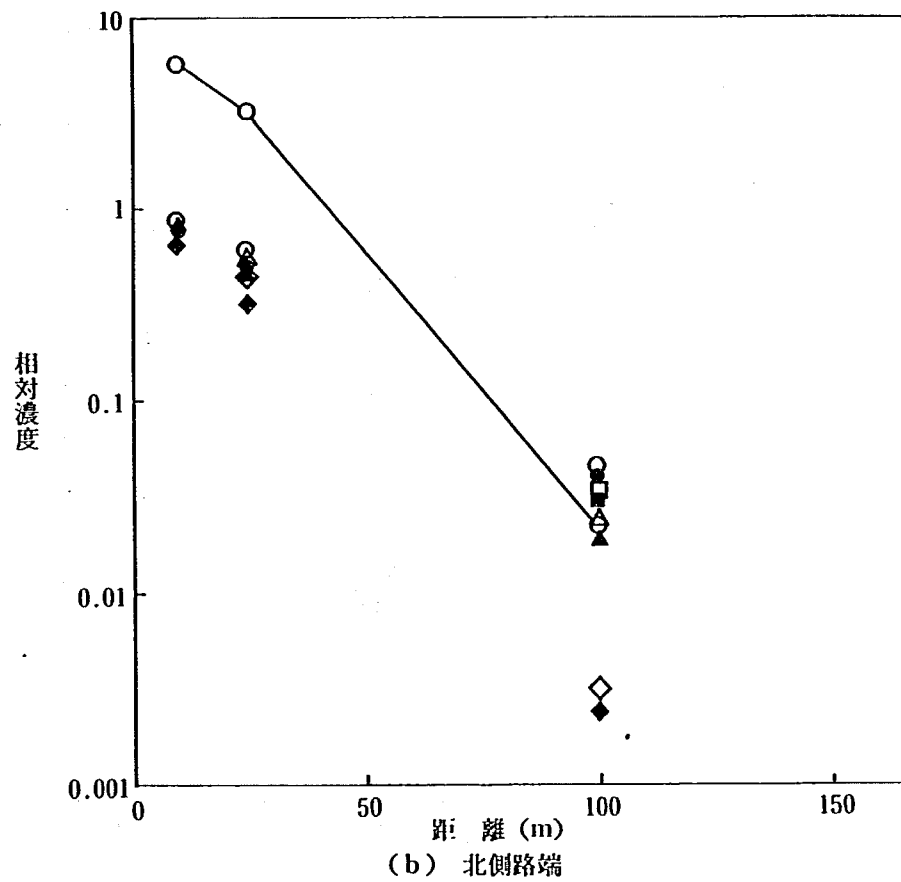
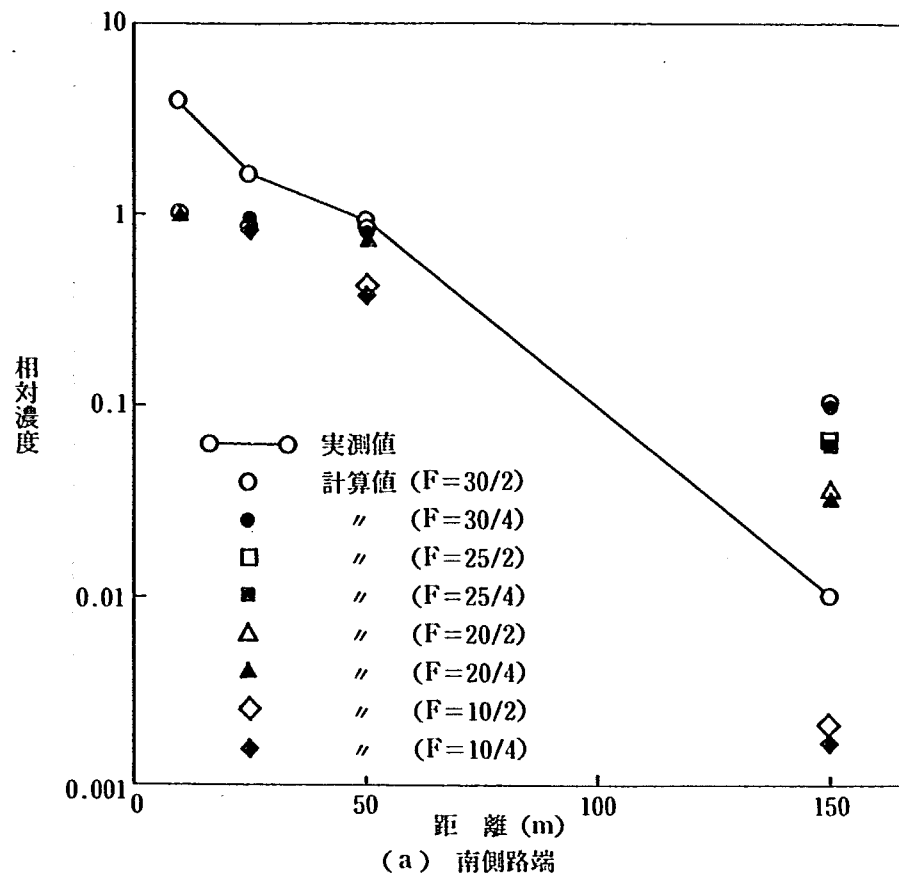
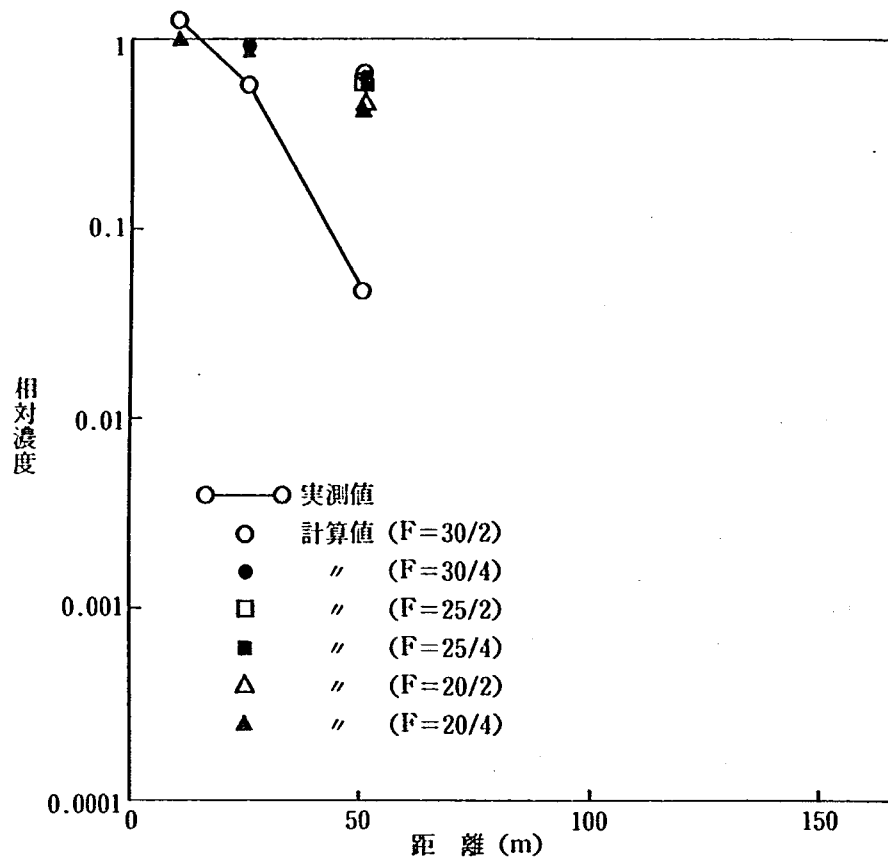
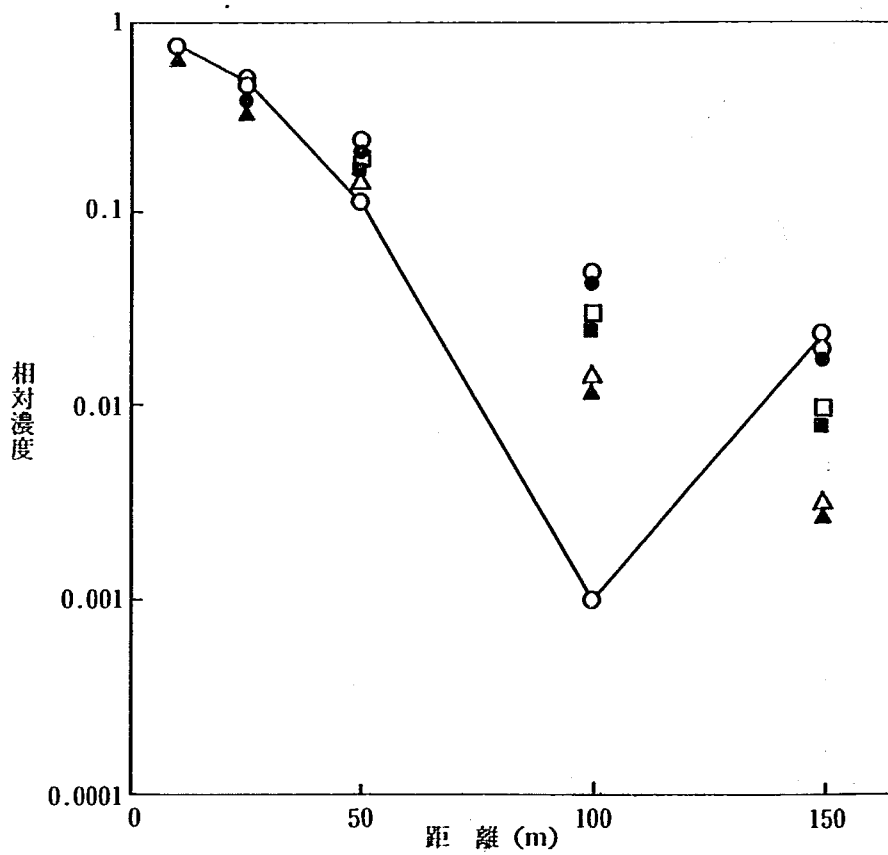


図-3.56 Cトンネル道路方向濃度減衰図 Run 1



(a) 南側路端



(b) 北側路端

図-3.57 Cトンネル道路方向濃度減衰図 Run 2

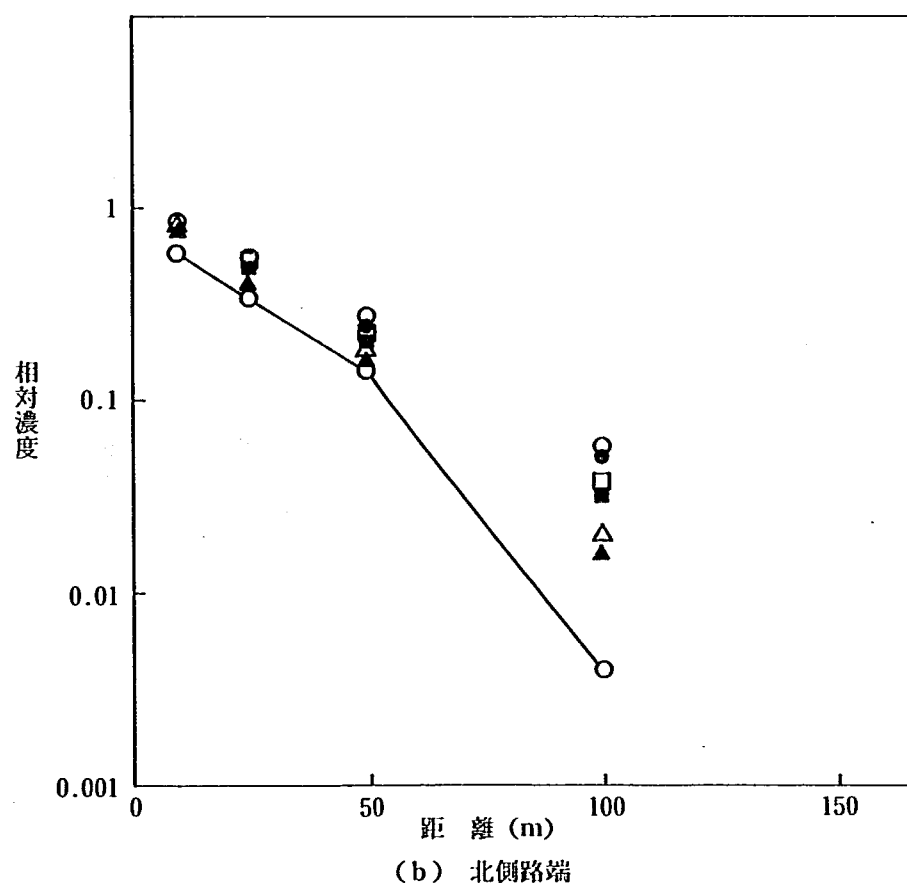
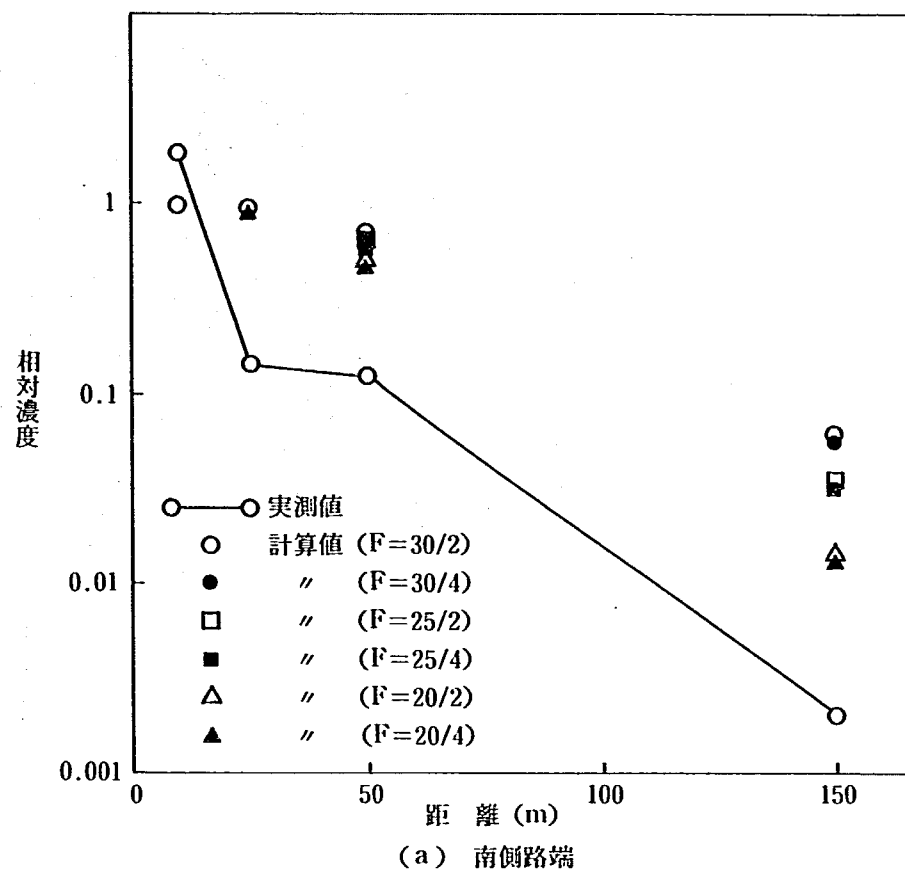
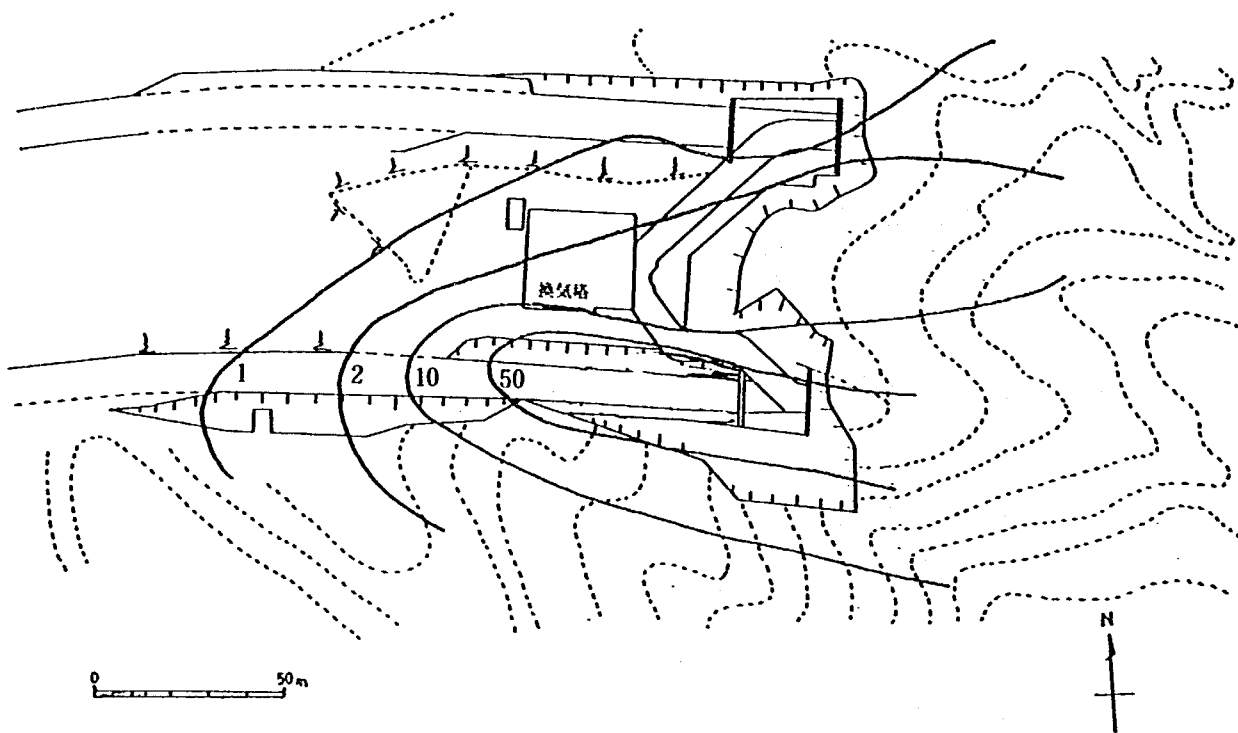
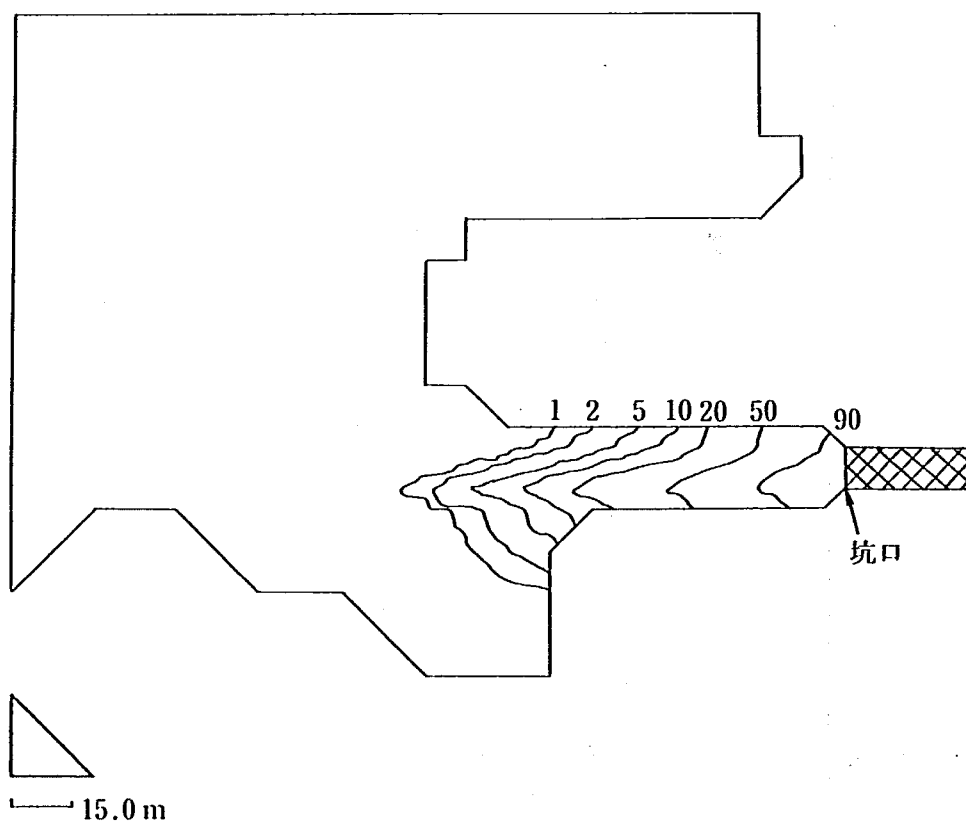


図-3.58 Cトンネル道路方向濃度減衰図 Run 3



(a) 実測値



(b) 計算値CASE 1-8

図-3.59 Cトンネル濃度分布図 Run 1

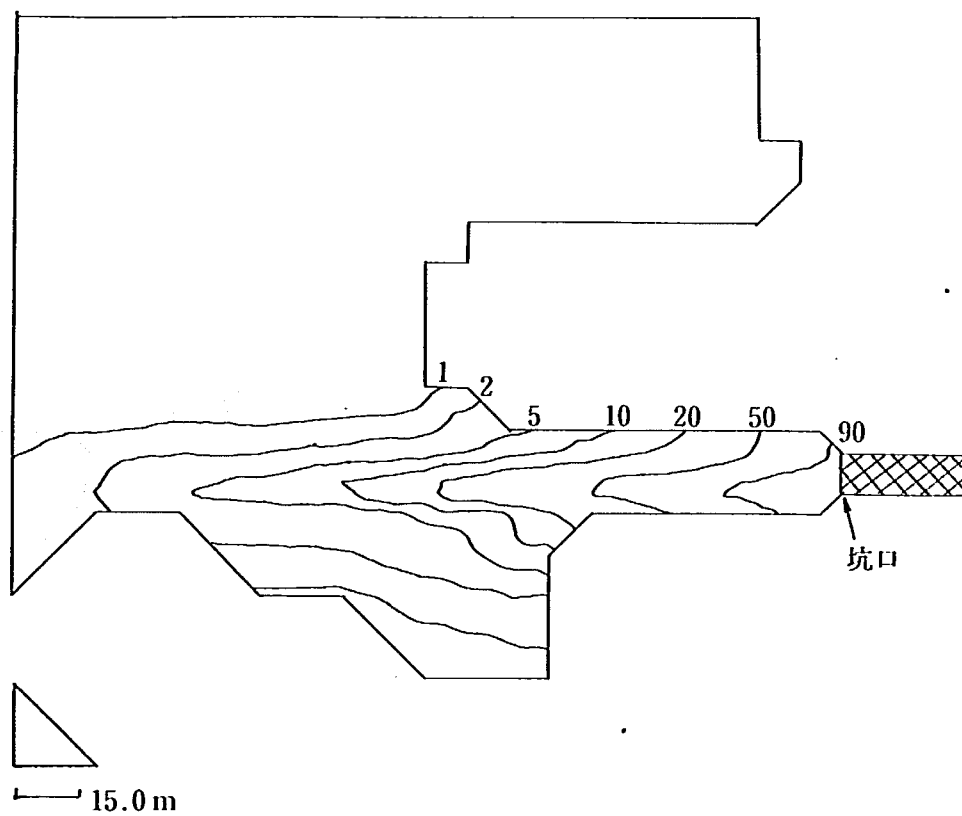
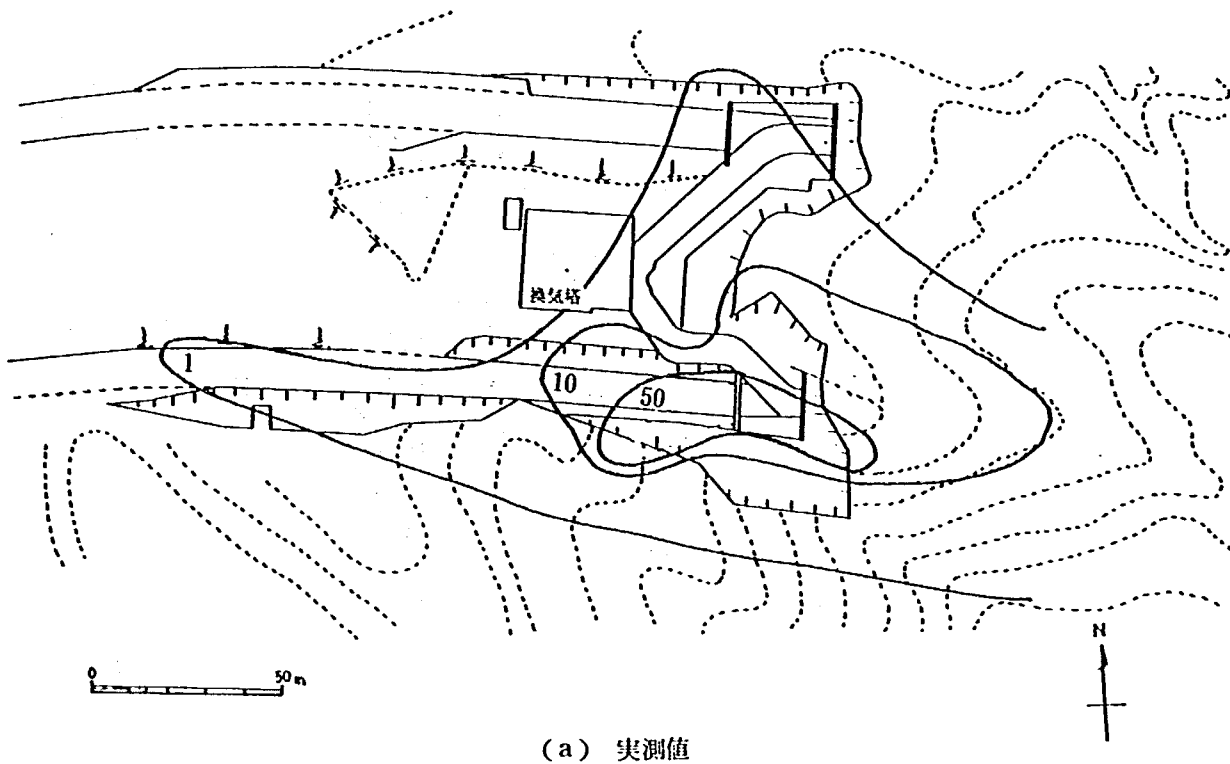


図-3.60 Cトンネル濃度分布図 Run 2

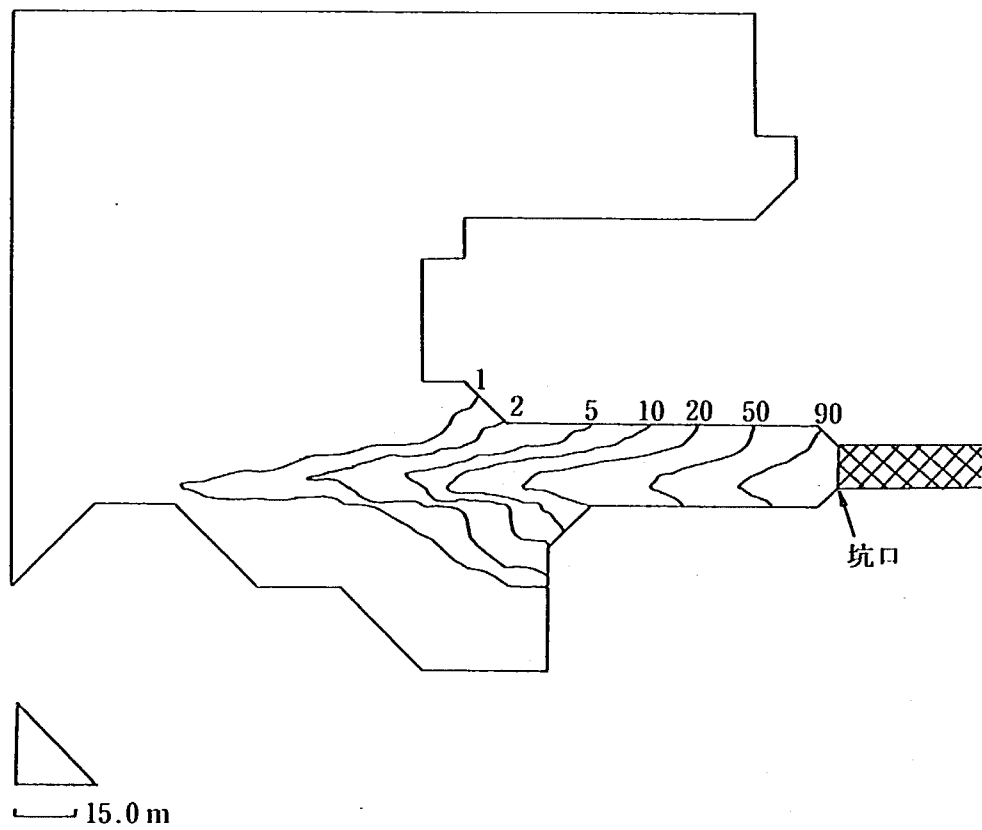
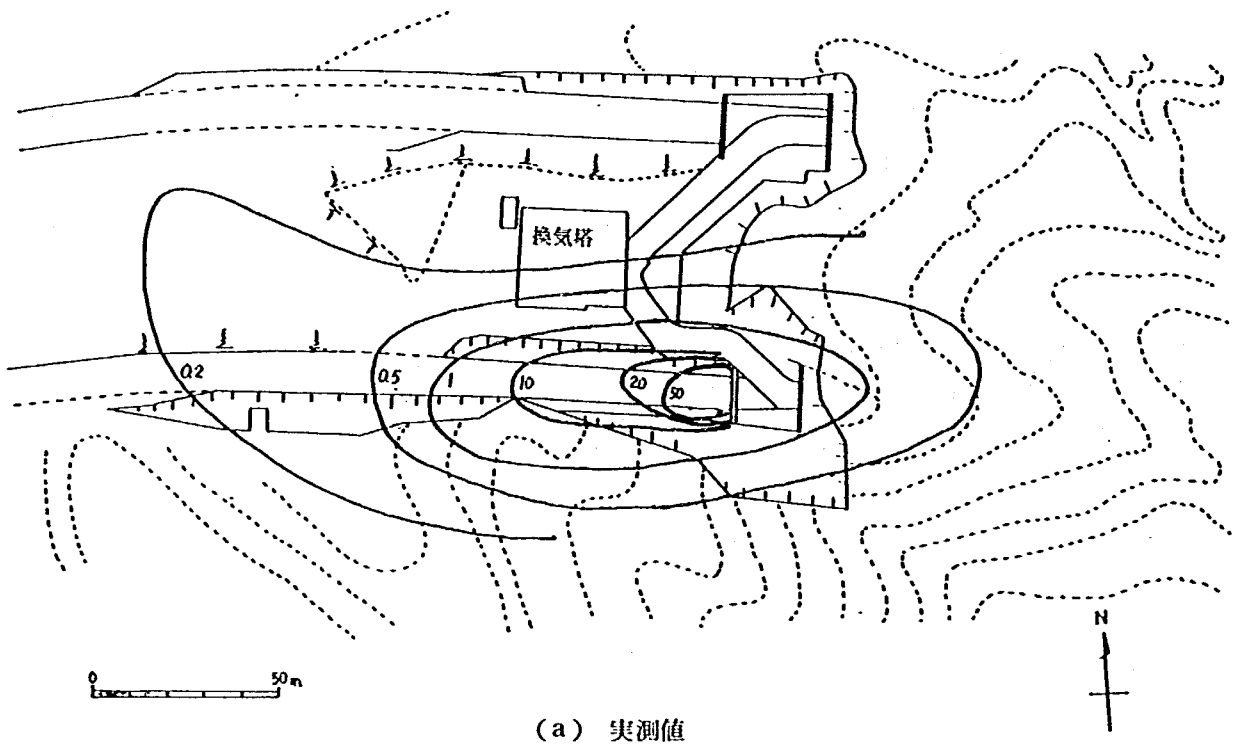


図-3.61 Cトンネル濃度分布図 Run 3

#### 4) まとめ

##### (1) 流れ計算

六つの境界面における境界条件の設定方法及び渦動粘性係数に関しては、一方向交通 B トンネルで得られた手法をそのまま適用しても問題となるような流れは発生しなかった。

坑口風速の設定方法については、一方向交通時の手法を修正し、道路を坑口に対する流入交通側と流出交通側の 2 車線に分離して各車線で実測される坑口風速を境界条件として与えたが、問題となるような流れは発生せず、ほぼ妥当な結果が得られた。

##### (2) 拡散計算

拡散係数に関しては B トンネルと同様の与え方を行い、特別に道路上の拡散係数を大きく与えるようなことは行っていないが、拡散計算結果は実測値と比較的整合性が良かった。

換算風速の与え方は、一方向交通の A, B トンネルに用いた手法を対面交通用に修正し、道路を西行車線、東行車線に分離し、それぞれの車線に見合う換算風速を与える手法を用いたが結果は比較的良好であった。なお、換算風速を計算する際に必要な換算係数値は、風速  $V=3.4$  m/s で西行線および東行線に対してそれぞれ風向が斜め向い風および斜め追い風の場合には、 $F=10$  および 2 の時に、 $V=5.7$  m/s で向かい風および追い風の場合には  $F=30$  および 2 の時に、 $V=3.8$  m/s で向かい風および追い風の場合には  $F=20$  および 2 の時に、実測値と最も整合性の良い計算結果が得られた。

### 3.3.2 D トンネル

#### 1) 現場実験<sup>1)</sup>の概要

D トンネル坑口付近の地形図を図-3.62 に示す。D トンネルの場合はこれまでの B, C トンネルの場合とは異なり、坑口周辺の地形は比較的平坦な水田地帯となっている。

トレーサーガス拡散現場実験は 1 回の測定時間が 30 分間のものを合計 60 Run 行っている。また、トレーサーガス拡散現場実験時の風向、風速データ測定に関しては、図-3.62 中の A (平地)、B (山沿い) 地点ではともに地表面から 2 m, 10 m 上空点における値が、C 地点 (道路際) では地表面から 2 m, 7.5 m 上空点における値が得られている。D トンネルでは上述した 60 Run の中から計測期間中の風向、風速の変動が少ないものを選び、さらにそれらの中からトンネルに対する風向、風速を代表する表-3.10、図-3.63 の 7 Run を選定して計算の対象とした。

#### 2) 計算条件

##### (1) 要素分割

計算対象領域は図-3.64 に示されるような坑口を中心とした 300 (道路方向) × 360 (道路直角方向) × 80 (鉛直方向) m の 3 次元空間であり、要素分割は総節点数が 4535、要素数は三角柱要素が 7309、四面体要素が 581 となっている。図-3.65 は D トンネルで用いた要素分割の水平断面図である。

##### (2) 流れの計算条件

これまでの A, B, C トンネルでは、トレーサーガス拡散現場実験時の気象データ数が乏しかったため、坑外風すべてを一地点のデータで代表させ、渦動粘性係数も一部の補正操作を除いて計算対象領

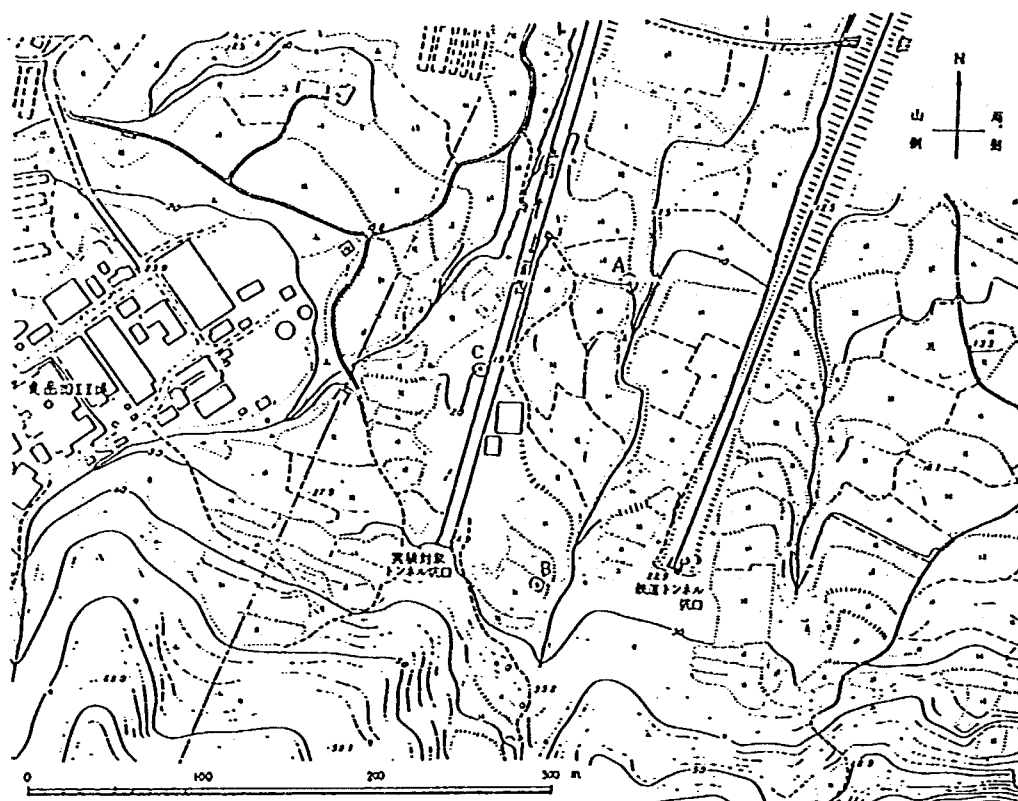


図-3.62 Dトンネル坑口周辺地形図

表-3.10 Dトンネルトレーサーガス拡散現場実験時の条件

| Run No. | 坑 外 風 (平地10m上空点) <sup>1)</sup> |        | 坑 口 風 速 <sup>3)</sup> m/s |                   | 交通量 台/hr(大型車混入率%) |            |
|---------|--------------------------------|--------|---------------------------|-------------------|-------------------|------------|
|         | 風向 (北行線自動車走行方向に対する風向)          | 風速 m/s | 北行線 <sup>2)</sup>         | 南行線 <sup>2)</sup> | 北行線               | 南行線        |
| 1       | NNW (斜め向い風)                    | 1.2    | 1.9                       | 0.4               | 403 ( 8.4)        | 536 ( 4.3) |
| 2       | 不 定                            | 0.3    | 2.4                       | 2.5               | 104 (14.4)        | 75 ( 173)  |
| 3       | SW (斜め追い風)                     | 3.6    | 3.1                       | 2.3               | 414 ( 7.7)        | 369 ( 8.7) |
| 4       | SE (斜め追い風)                     | 4.9    | 2.5                       | 1.3               | 380 (11.1)        | 356 ( 7.9) |
| 5       | SE (横 風)                       | 5.5    | 2.3                       | 1.2               | 362 ( 7.2)        | 377 (10.1) |
| 6       | ESE (横 風)                      | 2.2    | 1.9                       | 0.6               | 401 ( 7.7)        | 358 (10.9) |
| 7       | S (追 い 風)                      | 2.6    | 3.0                       | 2.1               | 335 (12.8)        | 321 ( 8.1) |

注) 1) Run 7に限って道路際7.5m上空点の風向, 風速を示す。

2) 北行線はトンネルから出る方向。南行線はトンネルへ進入する方向である。

3) 坑口より出る風速を正として考える。

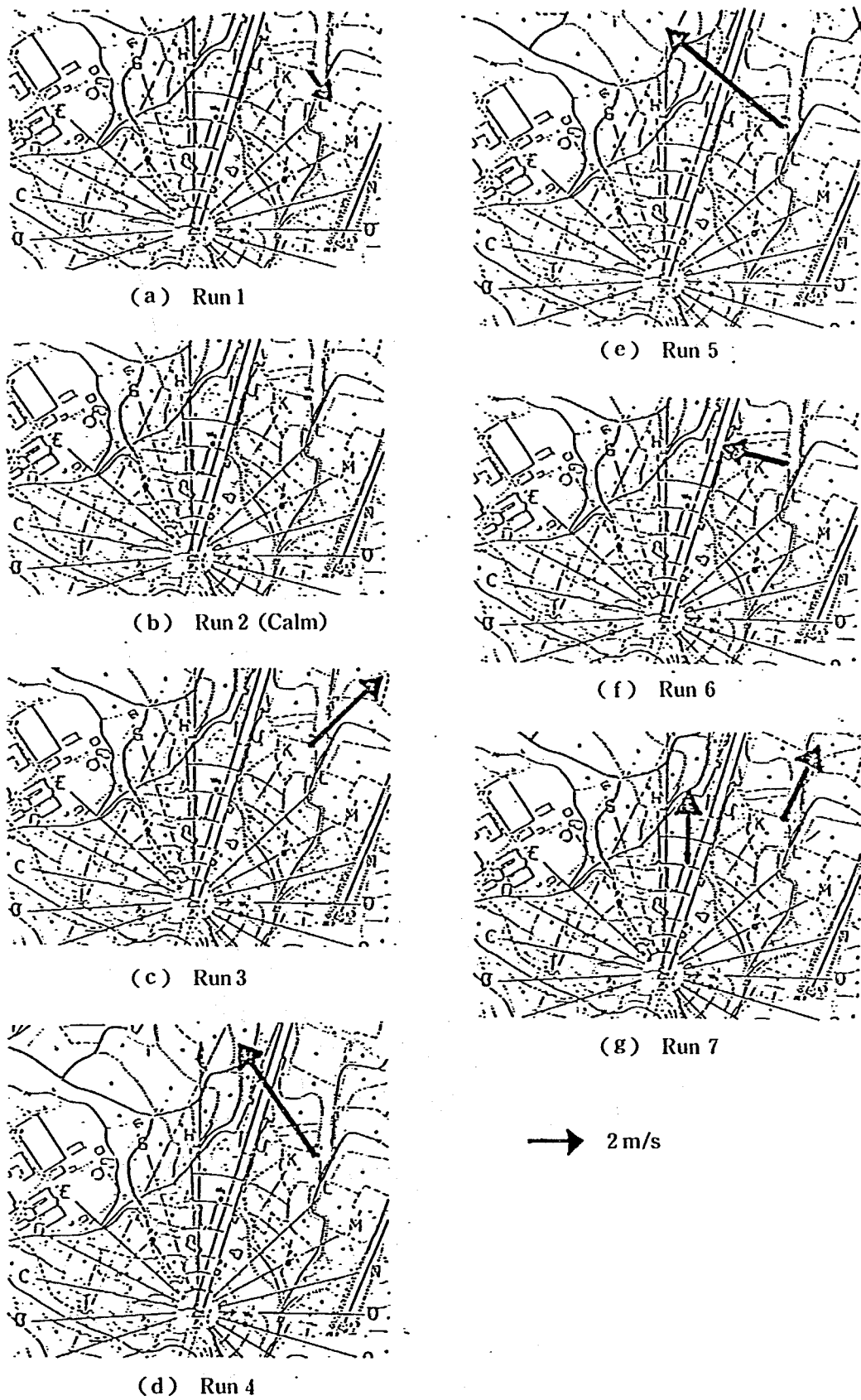


図-3.63 各ランの坑外風向, 風速

(Run 1~Run 6はA点(高さ10 m), Run 7はA点(高さ10 m), C点(高さ2.5 m))

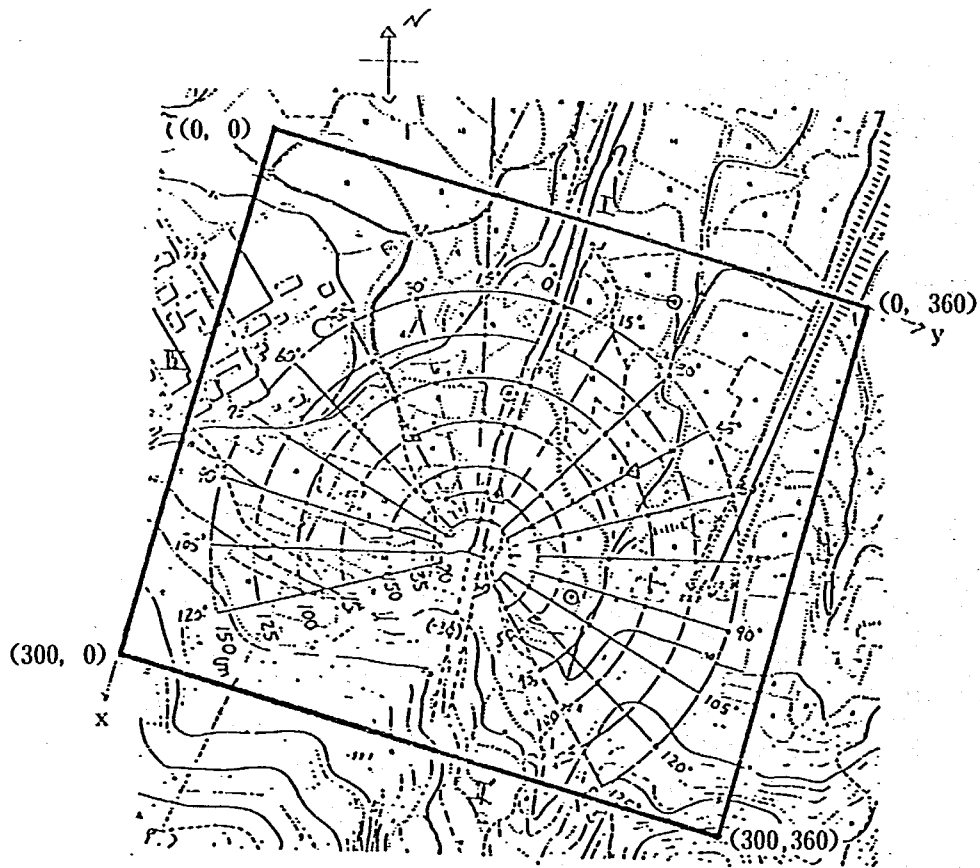


図-3.64 Dトンネル計算対象領域

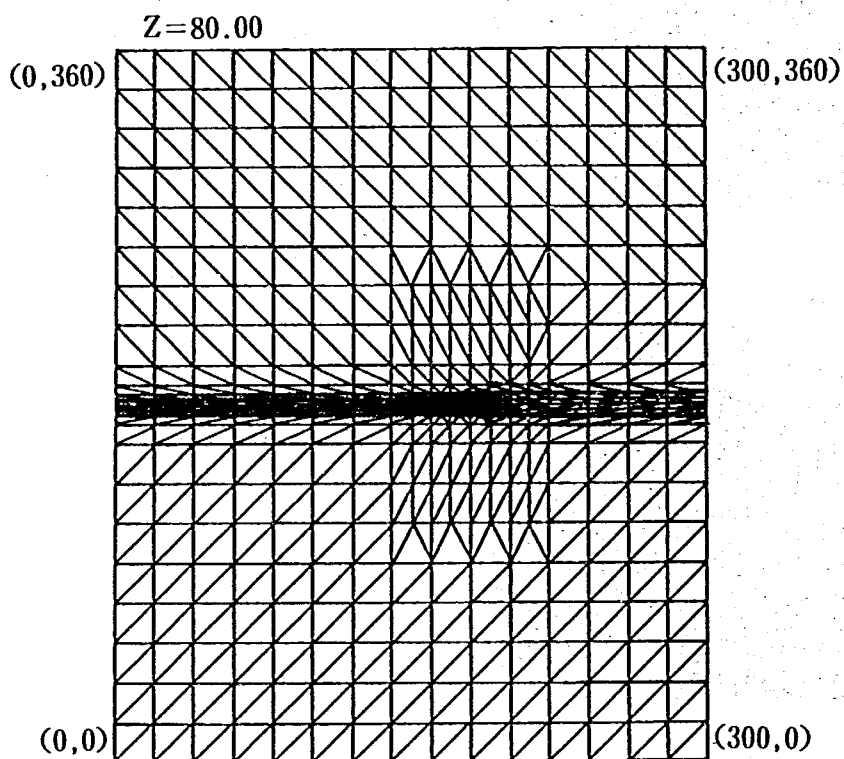


図-3.65 Dトンネル要素分割図（水平断面）

域全体に一律の値を用いざるを得なかった。これに対して D トンネルのトレーサーガス拡散現場実験では前述したように、風向、風速のデータが複数の地点（山沿い、平地、道路際）で、しかも各地点とも鉛直方向の 2 点で得られている。そこで、D トンネルを対象にした流れ計算では、各 Run に対して主として次のような 2 通りずつの条件設定を行った。

a) 流れ場の風速境界条件は 1 地点（原則として平地）のデータで全体を代表させる。渦動粘性係数（鉛直、水平両方向とも）も一地点のデータから求めた値で代表させ、道路上に大きな値を与えるといった補正操作は行わない。

b) 流れ場の境界条件、水平方向渦動粘性係数は 1 地点（原則として平地）のデータで代表させるが、鉛直方向渦動粘性係数は計算対象領域を図-3.66 に示す平地、山沿い、道路上の 3 つの領域に分割して 3 地点（平地、山沿い、道路際）のデータからそれぞれ求めた値を与える。

表-3.11 は以上のような条件設定を行う場合に必要な摩擦速度  $u^*$ 、粗度高さ  $z_0$  を、各 Run に対して各地点ごとに風速データから求めたものである。ただし、Run 1, 2 においては鉛直方向の風速の値が 0 または負となっているために、 $u^*$ 、 $z_0$  が求まらない地点がある。これらの Run では、いずれも風速が小さく、風向変動が大きい条件となっており、風速の対数分布近似からのずれが大きくなっているものと考えられる。本研究ではこれら  $u^*$ 、 $z_0$  が求まらない地点に対しては次のような方法により  $u^*$ 、 $z_0$  の推定を行った。まず  $z_0$  については、 $z_0$  は本来地点の関数であるべきことを利用して、他の 5 Run の平均値を各地点の  $z_0$  の代表値とした。次に  $u^*$  については、このようにして得られた  $z_0$  と高さ 10 m（道路際の測定地点では 7.5 m）の風速から対数分布仮定に基づいて求めた。表-3.11 ではこの方法で求めた値に（ ）をつけて示している。

表-3.12 は、D トンネル流れ計算の設定条件をまとめたものであるが、表中の各ケースの枝番号 1 は上記の渦動粘性係数の設定条件 a) に、枝番号 2 は b) に対応している。ただし、前述した理由により CASE 1-1 では山沿いの値を、CASE 2-1 では道路際の値をそれぞれ代表風速として使用し、CASE 1-2,

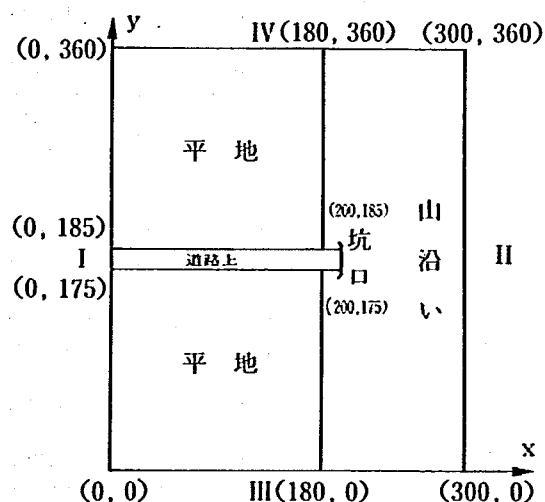


図-3.66 各風速測定点に代表させた範囲

CASE 2-2 では表-3.11 中の推定により求めた  $z_0$ ,  $u^*$  を用いた。また, Run 7 では枝番号 3 のケースが設定しているが, これはトレーサーガス実験で得られた濃度分布から推定される主風向が平地で得られた風向データと明らかに食違っているために風向, 風速の設定条件を改めたもので, 境界条件及び水平方向渦動粘性係数設定に必要な代表風速を平地に代えて道路際のデータにより与えたものである。なお, D トンネルでは風速を固定する鉛直境界面は, すべて流出側とし, 坑口風速の与え方は C トンネルと全く同様の手法によった。

表-3.11 風速データと摩擦速度, 粗度高さ

| Run. No. | 測定点 | 風 速 デ ー タ (m/s) |                        | 摩擦速度 $u^*$<br>(m/s) | 粗度高さ $z_0$<br>(m)    |
|----------|-----|-----------------|------------------------|---------------------|----------------------|
|          |     | 高さ 2m           | 高さ 10m<br>(道路際のみ 7.5m) |                     |                      |
| 1        | 平 地 | 1.2             | 1.2                    | — (0.092)           | — (0.047)            |
|          | 道路際 | 1.6             | 1.1                    | — (0.093)           | — (0.059)            |
|          | 山沿い | 0.8             | 1.6                    | 0.204 (0.230)       | 0.40 (0.576)         |
| 2        | 平 地 | 0.3             | 0.3                    | — (0.023)           | — (0.047)            |
|          | 道路際 | 0.1             | 0.4                    | 0.093 (0.034)       | 1.29 (0.059)         |
|          | 山沿い | 0.3             | 0.3                    | — (0.043)           | — (0.576)            |
| 3        | 平 地 | 2.4             | 3.6                    | 0.306               | 0.080                |
|          | 道路際 | 2.1             | 3.1                    | 0.311               | 0.125                |
|          | 山沿い | 1.2             | 3.1                    | 0.484               | 0.724                |
| 4        | 平 地 | 3.9             | 4.9                    | 0.254               | 0.0037               |
|          | 道路際 | 2.5             | 3.5                    | 0.310               | 0.073                |
|          | 山沿い | 1.7             | 2.7                    | 0.255               | 0.130                |
| 5        | 平 地 | 3.6             | 5.5                    | 0.484               | 0.095                |
|          | 道路際 | 3.2             | 4.6                    | 0.434               | 0.097                |
|          | 山沿い | 1.3             | 3.3                    | 0.510               | 0.703                |
| 6        | 平 地 | 1.7             | 2.2                    | 0.127               | 0.0084               |
|          | 道路際 | 1.9             | 2.1                    | 0.062               | $7.0 \times 10^{-6}$ |
|          | 山沿い | 1.0             | 2.8                    | 0.459               | 0.818                |
| 7        | 平 地 | 2.1             | 3.0                    | 0.230               | 0.047                |
|          | 道路際 | 2.3             | 2.6                    | 0.093               | $7.9 \times 10^{-5}$ |
|          | 山沿い | 1.2             | 2.6                    | 0.357               | 0.504                |

( )内は他のケースを参考にした推定値

表-3.12 Dトンネル流れの計算条件

| CASE | 計算対象<br>とした<br>現場実験 | 風速境界条件                                                                                                                                  | 圧力境界<br>条 件                | 渦動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s) |                                     |                                             |                                | 備 考                                                           |
|------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|      |                     |                                                                                                                                         |                            | $\epsilon_1 \epsilon_2$    | $\epsilon_2 = \kappa u^* (z + z_0)$ |                                             |                                |                                                               |
|      |                     |                                                                                                                                         |                            |                            | 平 地                                 | 道路上                                         | 山沿い                            |                                                               |
| 1-1  | Run 1               | 上空面・II・IV面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 58^\circ$   | I・III面<br>において<br>$p = 0$  | 0.38                       | $z_0 = 0.40$<br>$u^* = 0.204$       |                                             |                                | ・斜向風 1.2 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                         |
| 1-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 0.38                       | $z_0 = 0.047$<br>$u^* = 0.092$      | $z_0 = 0.059$<br>$u^* = 0.093$              | $z_0 = 0.576$<br>$u^* = 0.230$ | ・斜向風 1.2 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用<br>( $z_0$ は推定値)        |
| 2-1  | Run 2               | 上空面・I・III・IV面におい<br>て<br>$u = v = w = 0$                                                                                                | II面に<br>おいて<br>$p = 0$     | 0.096                      | $z_0 = 1.29$<br>$u^* = 0.093$       |                                             |                                | ・一般風 calm<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                            |
| 2-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 0.096                      | $z_0 = 0.047$<br>$u^* = 0.023$      | $z_0 = 0.059$<br>$u^* = 0.034$              | $z_0 = 0.576$<br>$u^* = 0.043$ | ・一般風 calm<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用<br>( $z_0$ は推定値)           |
| 3-1  | Run 3               | 上空面・I・IV面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 149^\circ$   | II・III面<br>において<br>$p = 0$ | 1.15                       | $z_0 = 0.080$<br>$u^* = 0.306$      |                                             |                                | ・斜追風 3.6 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                         |
| 3-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 1.15                       | $z_0 = 0.080$<br>$u^* = 0.306$      | $z_0 = 0.125$<br>$u^* = 0.311$              | $z_0 = 0.724$<br>$u^* = 0.484$ | ・斜追風 3.6 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用                         |
| 4-1  | Run 4               | 上空面・II・III面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 231^\circ$ | II・IV面<br>において<br>$p = 0$  | 1.57                       | $z_0 = 0.0037$<br>$u^* = 0.254$     |                                             |                                | ・斜追風 4.9 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                         |
| 4-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 1.57                       | $z_0 = 0.0037$<br>$u^* = 0.254$     | $z_0 = 0.073$<br>$u^* = 0.310$              | $z_0 = 0.130$<br>$u^* = 0.255$ | ・斜追風 4.9 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用                         |
| 5-1  | Run 5               | 上空面・I・III面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 245^\circ$  | II・IV面<br>において<br>$p = 0$  | 1.76                       | $z_0 = 0.095$<br>$u^* = 0.484$      |                                             |                                | ・横風 5.5 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                          |
| 5-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 1.76                       | $z_0 = 0.095$<br>$u^* = 0.484$      | $z_0 = 0.097$<br>$u^* = 0.434$              | $z_0 = 0.703$<br>$u^* = 0.510$ | ・横風 5.5 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用                          |
| 6-1  | Run 6               | 上空面・I・III面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 269^\circ$  | II・IV面<br>において<br>$p = 0$  | 0.70                       | $z_0 = 0.0084$<br>$u^* = 0.127$     |                                             |                                | ・横風 2.2 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                          |
| 6-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 0.70                       | $z_0 = 0.0084$<br>$u^* = 0.127$     | $z_0 = 7.0 \times 10^{-6}$<br>$u^* = 0.062$ | $z_0 = 0.818$<br>$u^* = 0.459$ | ・横風 2.2 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用                          |
| 7-1  | Run 7               | 上空面・I・VII面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 172^\circ$  | II・III面<br>において<br>$p = 0$ | 0.96                       | $z_0 = 0.047$<br>$u^* = 0.230$      |                                             |                                | ・追風 3.0 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は一点の値で代表                          |
| 7-2  |                     | 同 上                                                                                                                                     | 同 上                        | 0.96                       | $z_0 = 0.047$<br>$u^* = 0.230$      | $z_0 = 7.9 \times 10^{-5}$<br>$u^* = 0.093$ | $z_0 = 0.504$<br>$u^* = 0.357$ | ・追風 3.0 m/s<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用                          |
| 7-3  |                     | 上空面・I・III面において<br>$u_i = \frac{u^*}{x} \ln \frac{z}{z_0}$<br>$u = u_i \cos \phi$ , $v = u_i \sin \phi$<br>$w = 0$ , $\phi = 196^\circ$  | II・IV面<br>において<br>$p = 0$  | 0.83                       | 同 上                                 | 同 上                                         | 同 上                            | ・追風 2.6 m/s<br>(代表風向風速に道<br>路際の値を使用)<br>・鉛直渦動粘性係数<br>は三点の値を使用 |

注) 境界条件の概で、I面は  $x=0$ 、II面は  $x=300$ 、III面は  $y=0$ 、IV面は  $y=360$  の各境界を示す。共通条件  $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$  ステップ数 = 100

### (3) 拡散の計算条件

拡散係数の与え方に関しては、基本的には流れの計算で設定した条件を受けて、各 Run に対して次のような2通りずつの条件設定を行った。

a') 入力項としての流れ場には、流れの計算条件 a) に基づく計算結果を与え、拡散係数も1地点(原則として平地)のデータから求めた値で代表させ、計算対象領域に一律に与える。この場合、道路上の拡散係数を大きく与えるといったような補正操作は行わない。

b') 入力項としての流れ場には、流れの計算条件 b) に基づく計算結果を与え、水平方向拡散係数は1地点、鉛直方向拡散係数は3地点(平地、山沿い、道路際)のデータからそれぞれ求めた値を与える。

なお、Run 2 a') については次のような特別を扱いを行った。この Run は風速が  $0.3 \text{ m/s}$  と極めて小さいため、この値を用いて式 (3.4) により水平方向拡散係数を求めると、 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  にも満たない値になる。一般的な水平拡散係数の値としては、文献 4) によれば概ね  $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$  の値が示されており、このケースでは過小である可能性が十分考えられる。後述の拡散計算結果でも、坑口付近の濃度減衰が過大となっており、拡散係数が過小であることの可能性を支持している。そこでこの Run については、水平方向拡散係数を変化させることにより、その影響を把握することを試みた。ただしこれは、風速が極めて小さい場合に拡散係数(特に水平方向)の算出方法を別途定める必要性を検討するための試算として行ったもので、変化させた値が何らかの物理的意味をもつというものではない。

換算風速の与え方に関しては、その入力方法は対面交通の C トンネルの場合と同様の手法を採用し、Run 1 においては上記計算条件 a') の場合に、Run 3~7 においては上記計算条件 b') の場合に対してそれぞれ換算係数  $F$  の値を変化させ、 $F$  値の与え方の検討を行った。

表-3.13 は以上の考えに基づいて行った拡散の計算条件を示したものである。

表-3.13 Dトンネル拡散の計算条件

| CASE  | 流 れ 場 | 換算風速(m/s) ( )内はFの値 |           | 拡 散 係 数 (m <sup>2</sup> /s)     |                                                 |                                                               |                                                | 備 考                                                           |
|-------|-------|--------------------|-----------|---------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|       |       |                    |           | k <sub>x</sub> , k <sub>y</sub> | k <sub>z</sub> = $\alpha u^*(z+z_0)$            |                                                               |                                                |                                                               |
|       |       | 北行線側               | 南行線側      |                                 | 平 地                                             | 道 路 上                                                         | 山 沿 い                                          |                                                               |
| 1-1-1 | 1-1   | 2.68 (20)          | 0.67 (4)  | 0.38                            | z <sub>0</sub> =0.40<br>u <sup>*</sup> =0.204   |                                                               |                                                |                                                               |
| 1-1-2 | 1-1   | 1.34 (10)          | 1.00 (6)  |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 1-2-1 | 1-2   | 2.68 (20)          | 0.67 (4)  |                                 | z <sub>0</sub> =0.047<br>u <sup>*</sup> =0.092  | z <sub>0</sub> =0.059<br>u <sup>*</sup> =0.093                | z <sub>0</sub> =0.576<br>u <sup>*</sup> =0.230 | z <sub>0</sub> は推定値                                           |
| 2-1-1 | 2-1   | 0.075 (2)          | 0.075 (2) | 0.096                           | z <sub>0</sub> =1.29<br>u <sup>*</sup> =0.093   |                                                               |                                                |                                                               |
| 2-1-2 | 2-1   | 0.075 (2)          | 0.075 (2) | 0.96                            |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 2-1-3 | 2-1   | 0.075 (2)          | 0.075 (2) | 9.6                             |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 2-2-1 | 2-2   | 0.075 (2)          | 0.075 (2) | 0.096                           | z <sub>0</sub> =0.047<br>u <sup>*</sup> =0.092  | z <sub>0</sub> =0.059<br>u <sup>*</sup> =0.093                | z <sub>0</sub> =0.576<br>u <sup>*</sup> =0.230 | z <sub>0</sub> は推定値                                           |
| 3-1-1 | 3-1   | 0.54 (4)           | 2.46 (20) | 1.15                            | z <sub>0</sub> =0.080<br>u <sup>*</sup> =0.306  |                                                               |                                                |                                                               |
| 3-2-1 | 3-2   | 0.54 (4)           | 2.46 (20) |                                 | z <sub>0</sub> =0.080<br>u <sup>*</sup> =0.306  | z <sub>0</sub> =0.125<br>u <sup>*</sup> =0.311                | z <sub>0</sub> =0.724<br>u <sup>*</sup> =0.484 |                                                               |
| 3-2-2 | 3-2   | 1.35 (10)          | 2.46 (20) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 3-2-3 | 3-2   | 1.35 (10)          | 3.69 (30) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 4-1-1 | 4-1   | 1.31 (10)          | 1.17 (10) | 1.57                            | z <sub>0</sub> =0.0037<br>u <sup>*</sup> =0.254 |                                                               |                                                |                                                               |
| 4-2-1 | 4-2   | 1.31 (10)          | 1.17 (10) |                                 | z <sub>0</sub> =0.0037<br>u <sup>*</sup> =0.254 | z <sub>0</sub> =0.073<br>u <sup>*</sup> =0.310                | z <sub>0</sub> =0.130<br>u <sup>*</sup> =0.255 |                                                               |
| 4-2-2 | 4-2   | 1.31 (10)          | 2.34 (20) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 4-2-3 | 4-2   | 1.31 (10)          | 3.51 (30) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 5-1-1 | 5-1   | 1.18 (10)          | 1.28 (10) | 1.76                            | z <sub>0</sub> =0.095<br>u <sup>*</sup> =0.484  |                                                               |                                                |                                                               |
| 5-2-1 | 5-2   | 1.18 (10)          | 1.28 (10) |                                 | z <sub>0</sub> =0.095<br>u <sup>*</sup> =0.484  | z <sub>0</sub> =0.097<br>u <sup>*</sup> =0.434                | z <sub>0</sub> =0.703<br>u <sup>*</sup> =0.510 |                                                               |
| 5-2-2 | 5-2   | 2.36 (20)          | 2.56 (20) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 5-2-3 | 5-2   | 2.36 (20)          | 3.84 (30) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 6-1-1 | 6-1   | 1.32 (10)          | 1.23 (10) | 0.70                            | z <sub>0</sub> =0.0084<br>u <sup>*</sup> =0.127 |                                                               |                                                |                                                               |
| 6-2-1 | 6-2   | 1.32 (10)          | 1.23 (10) |                                 | z <sub>0</sub> =0.0084<br>u <sup>*</sup> =0.127 | z <sub>0</sub> =7.0×10 <sup>-6</sup><br>u <sup>*</sup> =0.062 | z <sub>0</sub> =0.818<br>u <sup>*</sup> =0.459 |                                                               |
| 6-2-2 | 6-2   | 2.64 (20)          | 2.46 (20) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 6-2-3 | 6-2   | 1.98 (15)          | 1.85 (15) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 7-1-1 | 7-1   | 0.47 (4)           | 2.12 (20) | 0.96                            | z <sub>0</sub> =0.047<br>u <sup>*</sup> =0.230  |                                                               |                                                |                                                               |
| 7-2-1 | 7-2   | 0.47 (4)           | 2.12 (20) |                                 | z <sub>0</sub> =0.047<br>u <sup>*</sup> =0.230  | z <sub>0</sub> =7.9×10 <sup>-5</sup><br>u <sup>*</sup> =0.093 | z <sub>0</sub> =0.504<br>u <sup>*</sup> =0.357 |                                                               |
| 7-2-2 | 7-2   | 0.24 (2)           | 3.18 (30) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 7-3-1 | 7-3   | 0.47 (4)           | 2.12 (20) | 0.83                            | z <sub>0</sub> =0.047<br>u <sup>*</sup> =0.230  |                                                               |                                                | z <sub>0</sub> =7.9×10 <sup>-5</sup><br>u <sup>*</sup> =0.093 |
| 7-3-2 | 7-3   | 0.24 (2)           | 1.06 (10) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |
| 7-3-3 | 7-3   | 0.0 (0)            | 1.06 (10) |                                 |                                                 |                                                               |                                                |                                                               |

共通条件  $\Delta t=0.1$  (sec) ステップ数=4,000

### 3) 比較検討及び評価

#### (1) 流れ計算

図-3.67～3.81 は、各 Run の流れ計算の結果を風速分布の形でそれぞれ示したものである。図からもわかるように、ケースによっては部分的にやや発散した流れ（例えば図-3.75 c）道路上）が示されているが、いずれも坑口からかなり離れており、拡散計算への影響はほとんどないと見てよい。次に 7 つの Run について、枝番号 1 と 2 のケースを比較すると、これらの図からは明確な差を読みとることができず、数値で比較しても概ね 2～3% 程度の差となっている。したがって、D トンネルの場合は鉛直方向の渦動粘性係数の相違が流れ計算結果に与える影響は非常に小さいと判断される。また、計算対象領域に一律の渦動粘性係数を与える条件 a) の場合でも、道路上の渦動粘性係数に B、C トンネルで行ったような特別な補正を加えなくても整合性の良い結果が得られているが、これは D トンネル坑口付近の地形が比較的平坦となっており、部分的な発散した流れが発生しにくい地形となっているためと思われる。

なお、Run 2 については一般風の境界条件を 0 としているため、流れ場は坑口風のみ支配されていることがわかる。

Run 7 については、主風向を変えた CASE 7-3（図-3.81）を見ると、CASE 7-1～7-2（図-3.79～3.80）と明らかに異なった結果となっている。この Run については、実験時に風向分布が得られておらず、ここでは検証ができないため、拡散計算をもとに検証することとする。

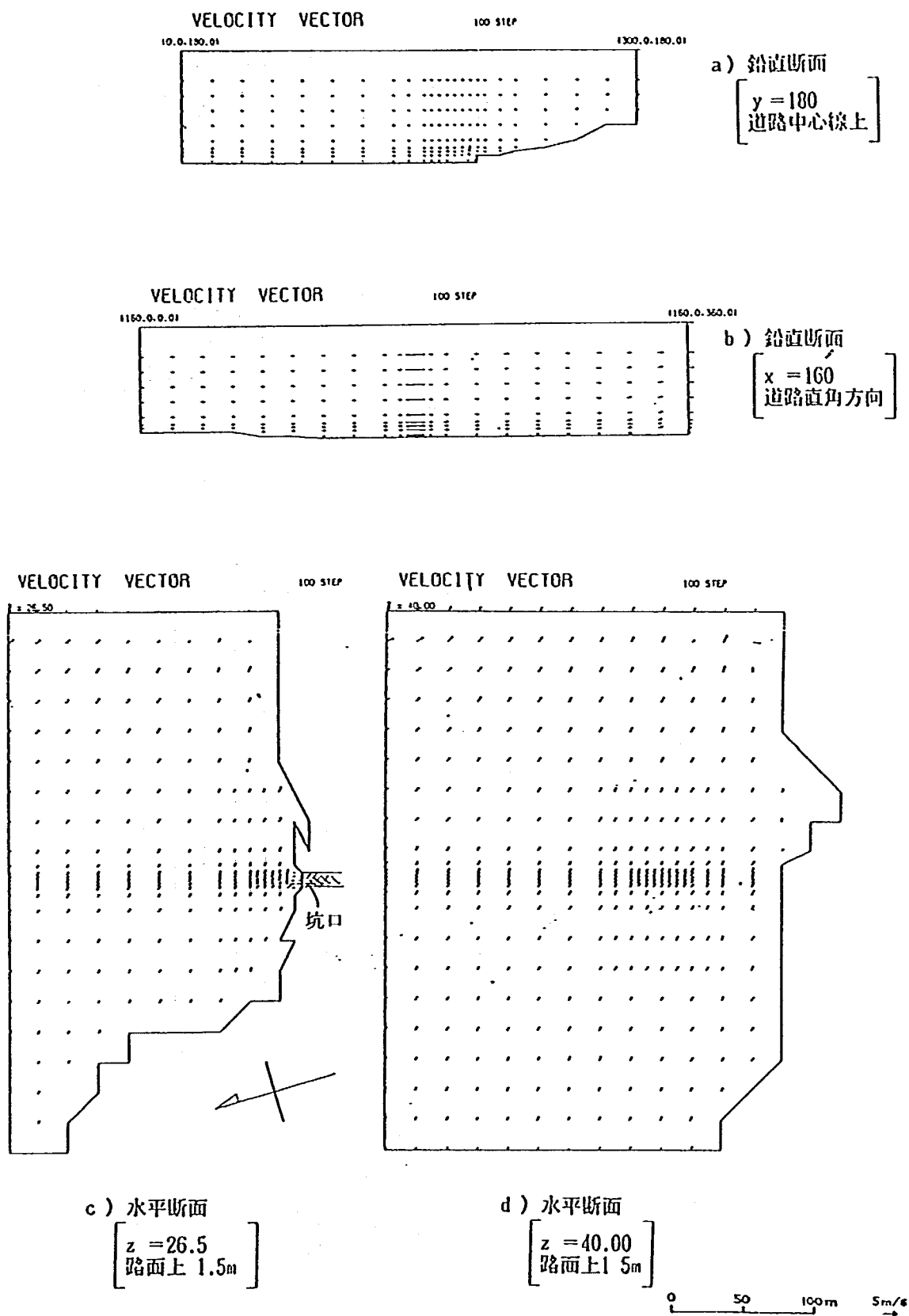


図-3.67 D トンネル流れの計算結果 CASE 1-1

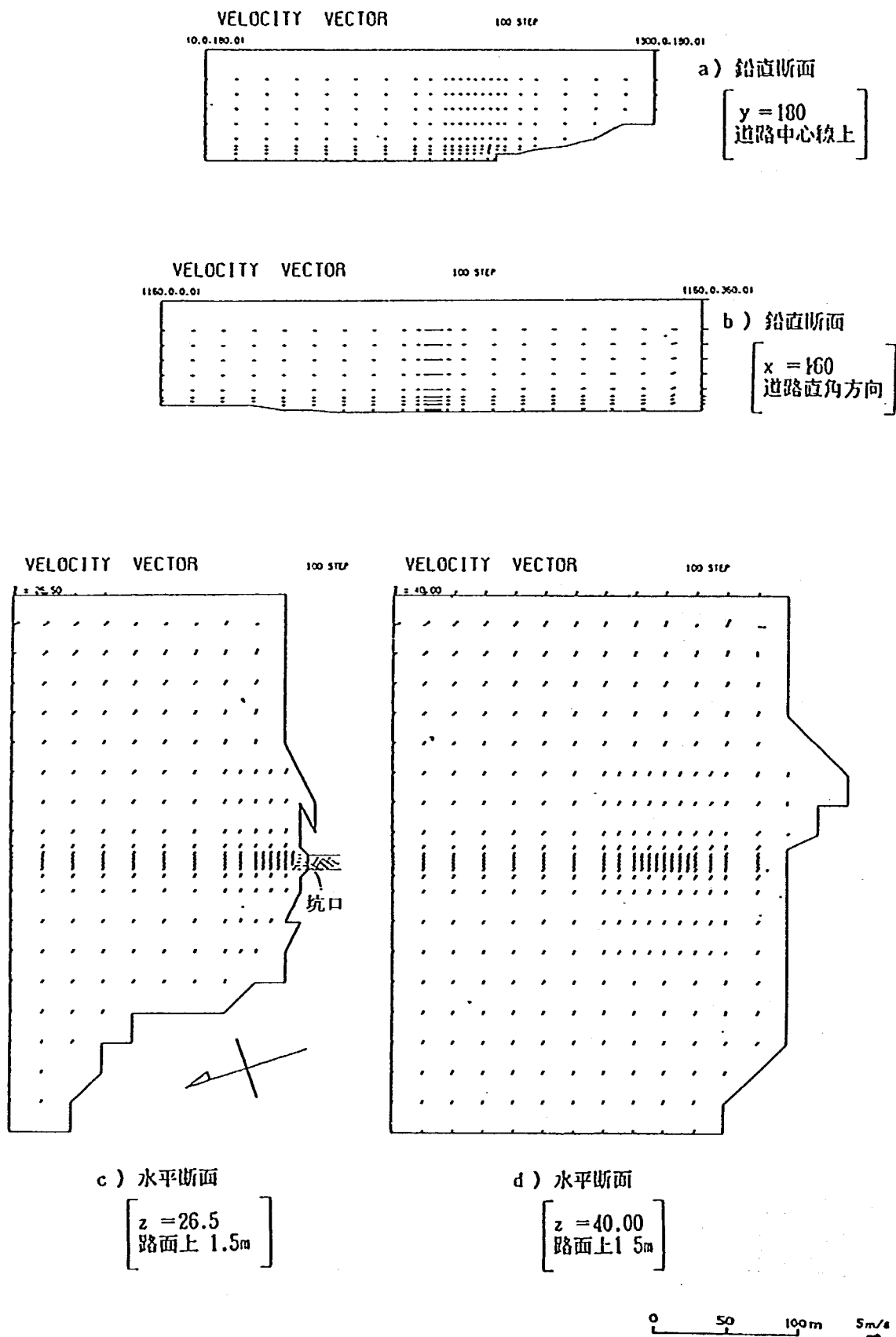


図-3.68 Dトンネル流れの計算結果 CASE 1-2

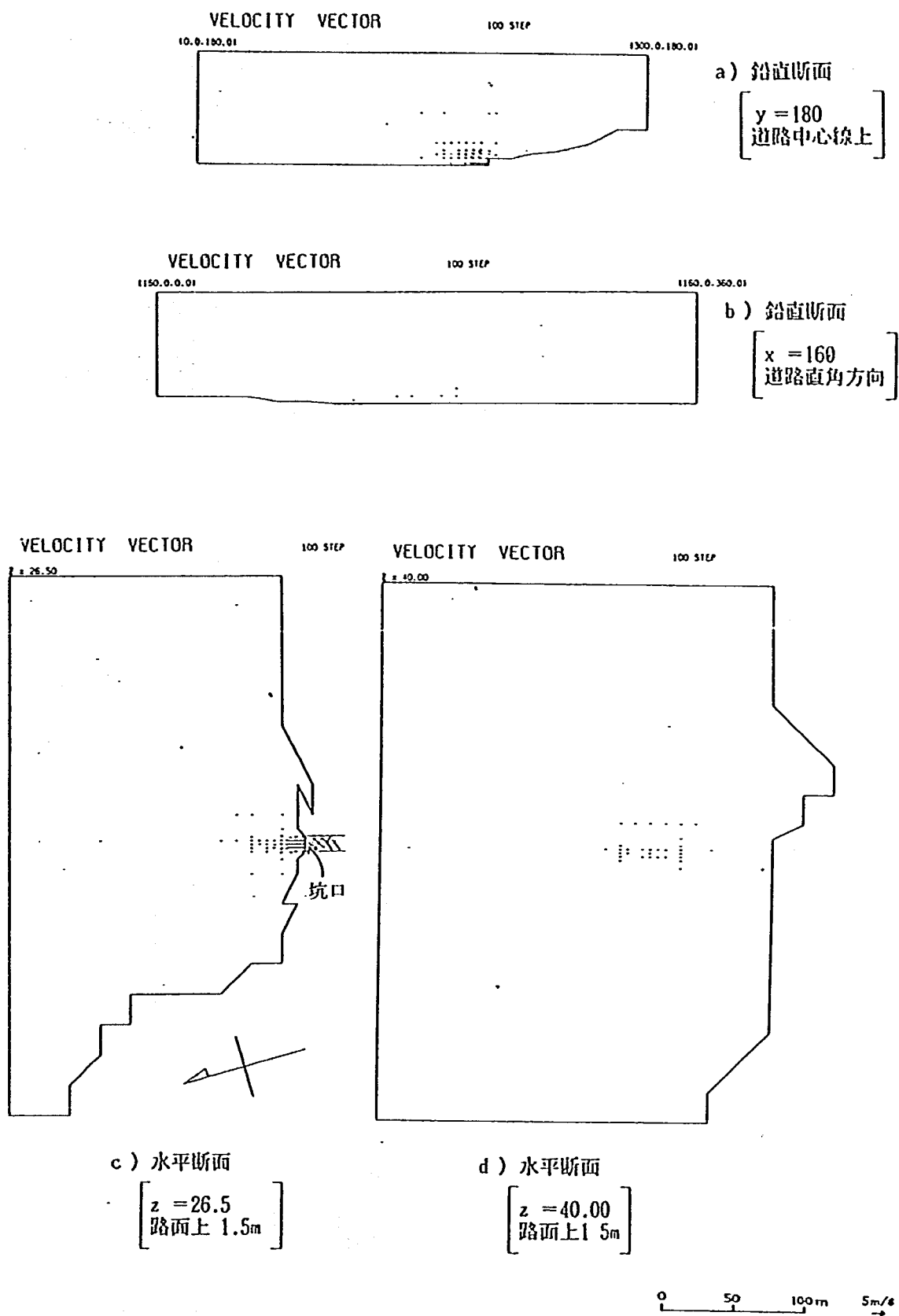
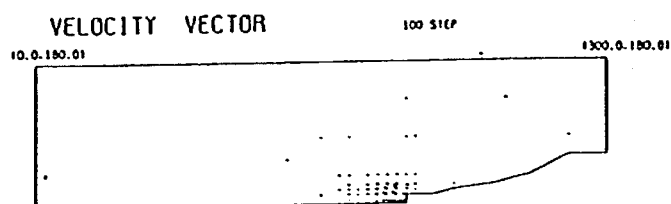
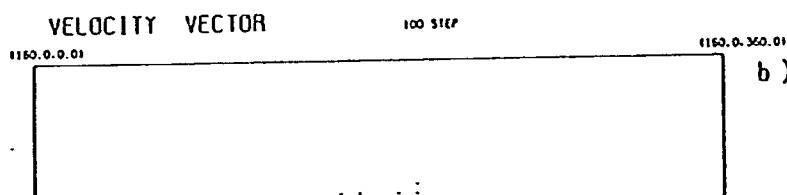


図-3.69 Dトンネル流れの計算結果 CASE 2-1



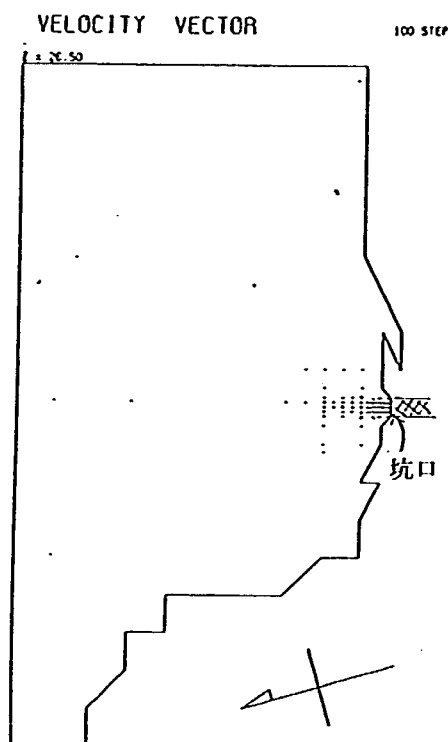
a) 鉛直断面

$y = 180$   
道路中心線上



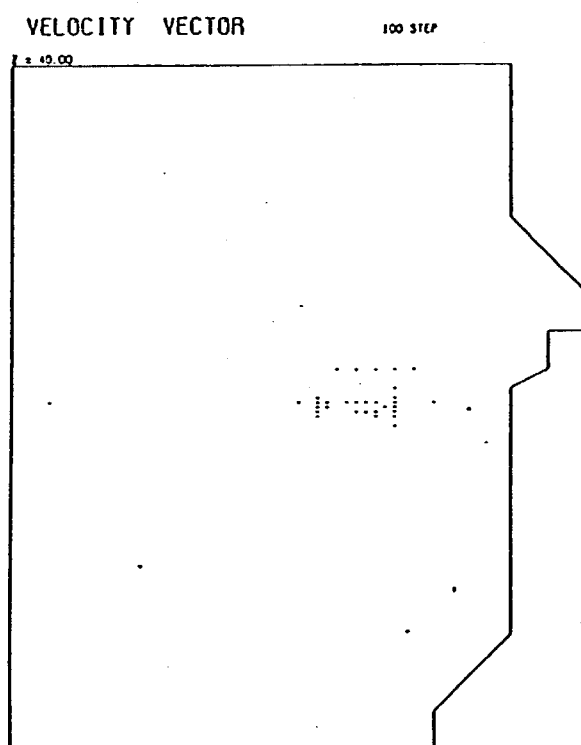
b) 鉛直断面

$x = 1150$   
道路直角方向



c) 水平断面

$z = 26.5$   
路面上 1.5m



d) 水平断面

$z = 40.00$   
路面上 5m

0 50 100m 5m/s

図-3.70 D トンネル流れの計算結果 CASE 2-2

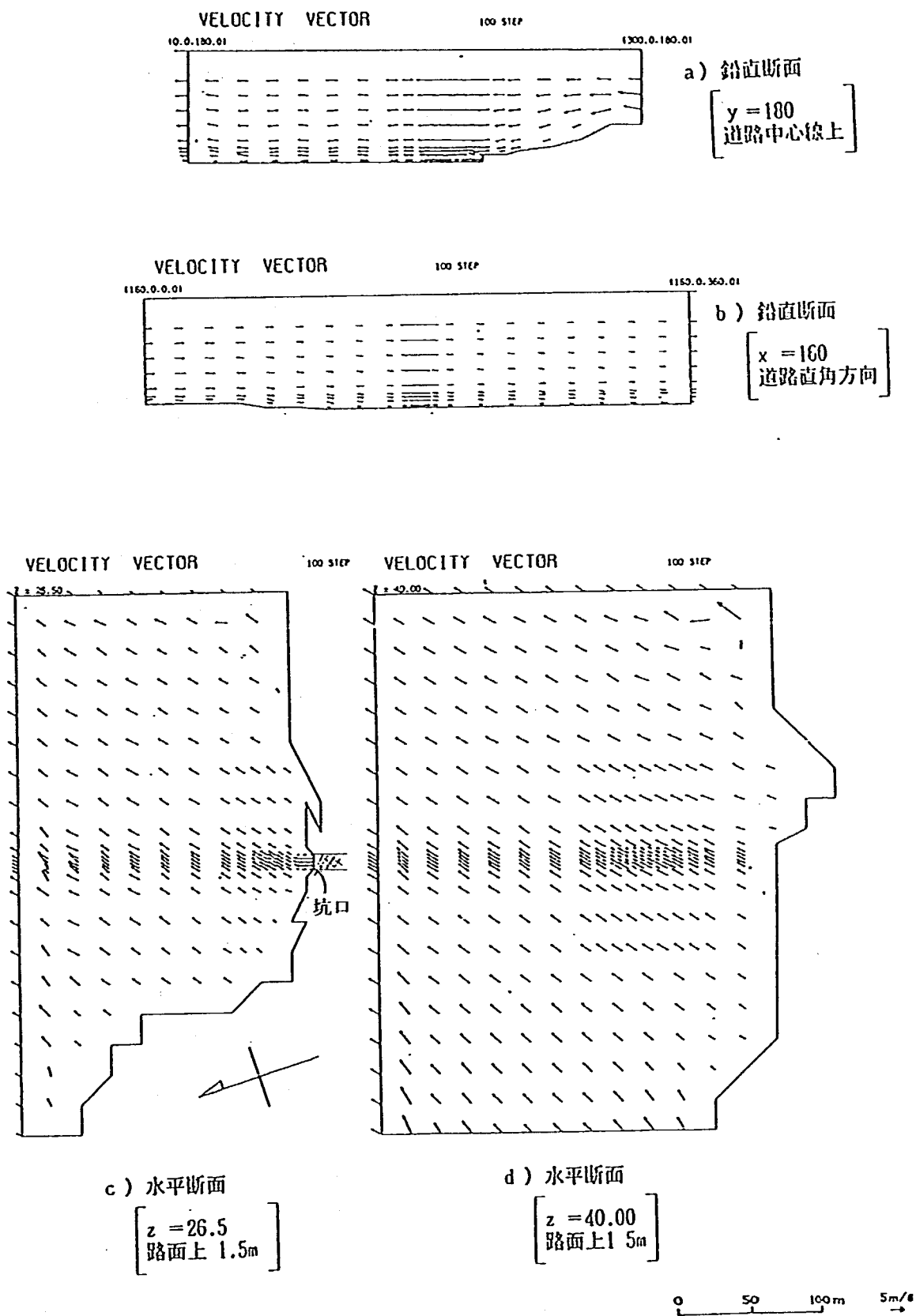


図-3.71 Dトンネル流れの計算結果 CASE 3-1

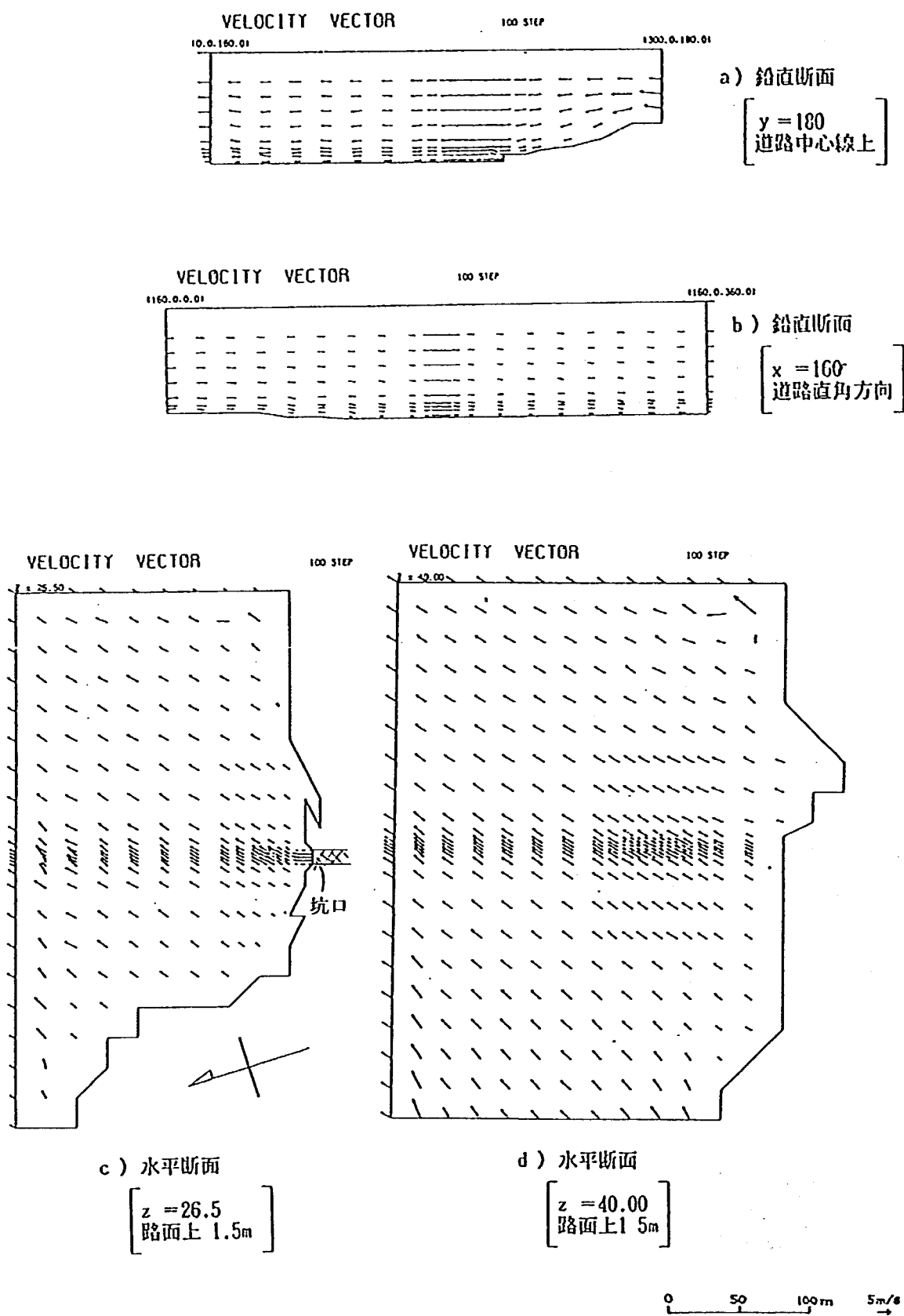


図-3.72 Dトンネル流れの計算結果 CASE 3-2

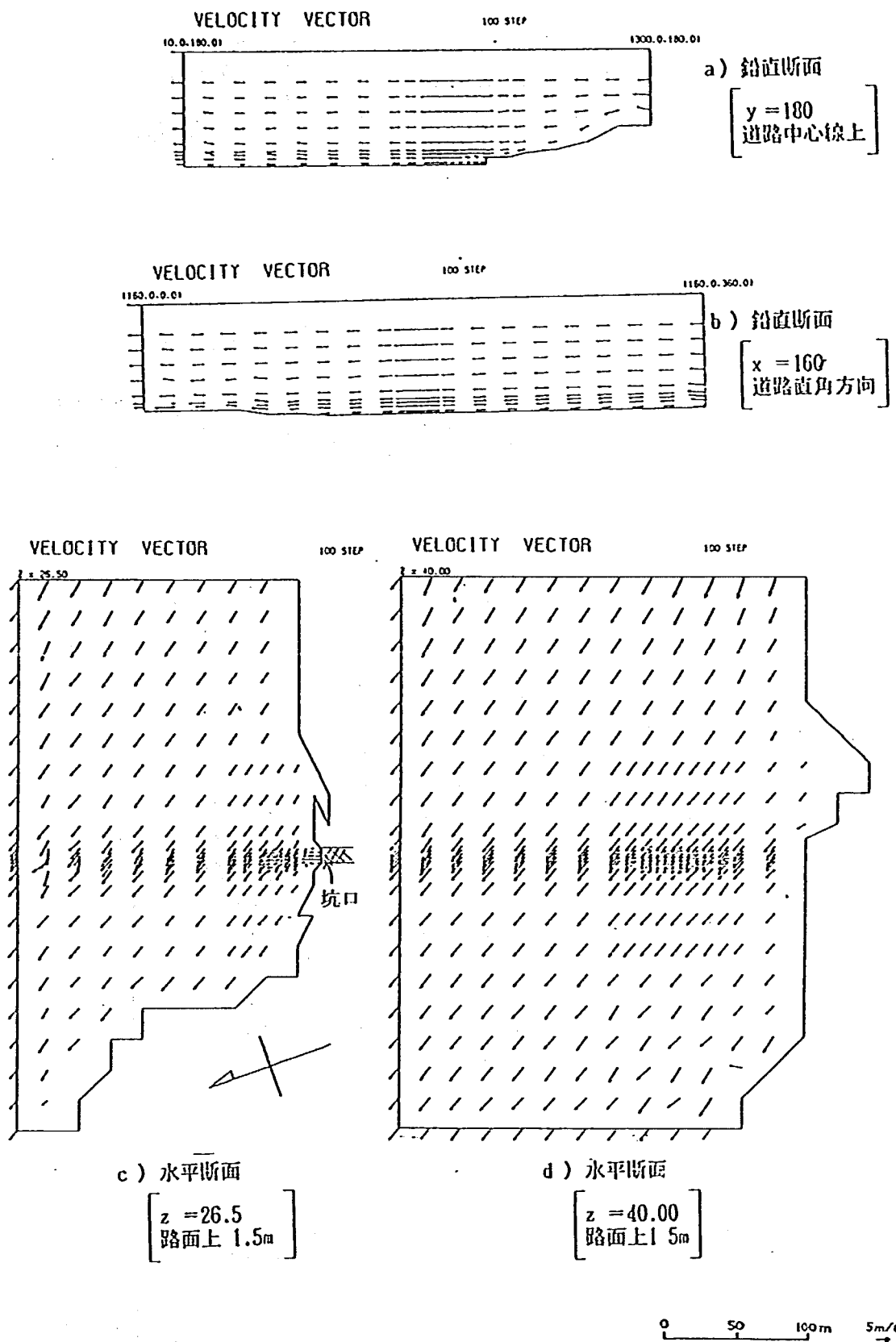


図-3.73 Dトンネル流れの計算結果 CASE 4-1

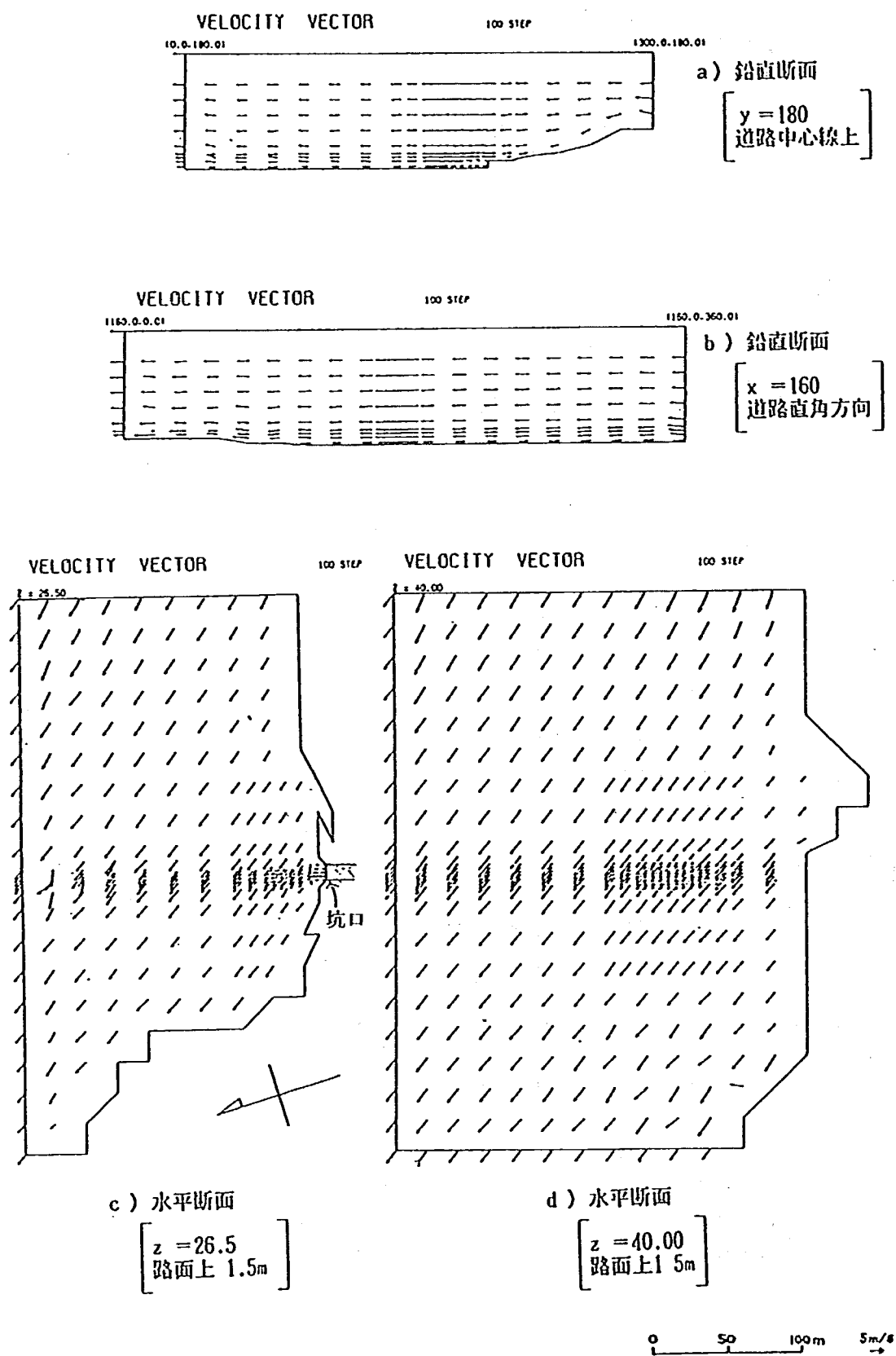


図-3.74 Dトンネル流れの計算結果 CASE 4-2

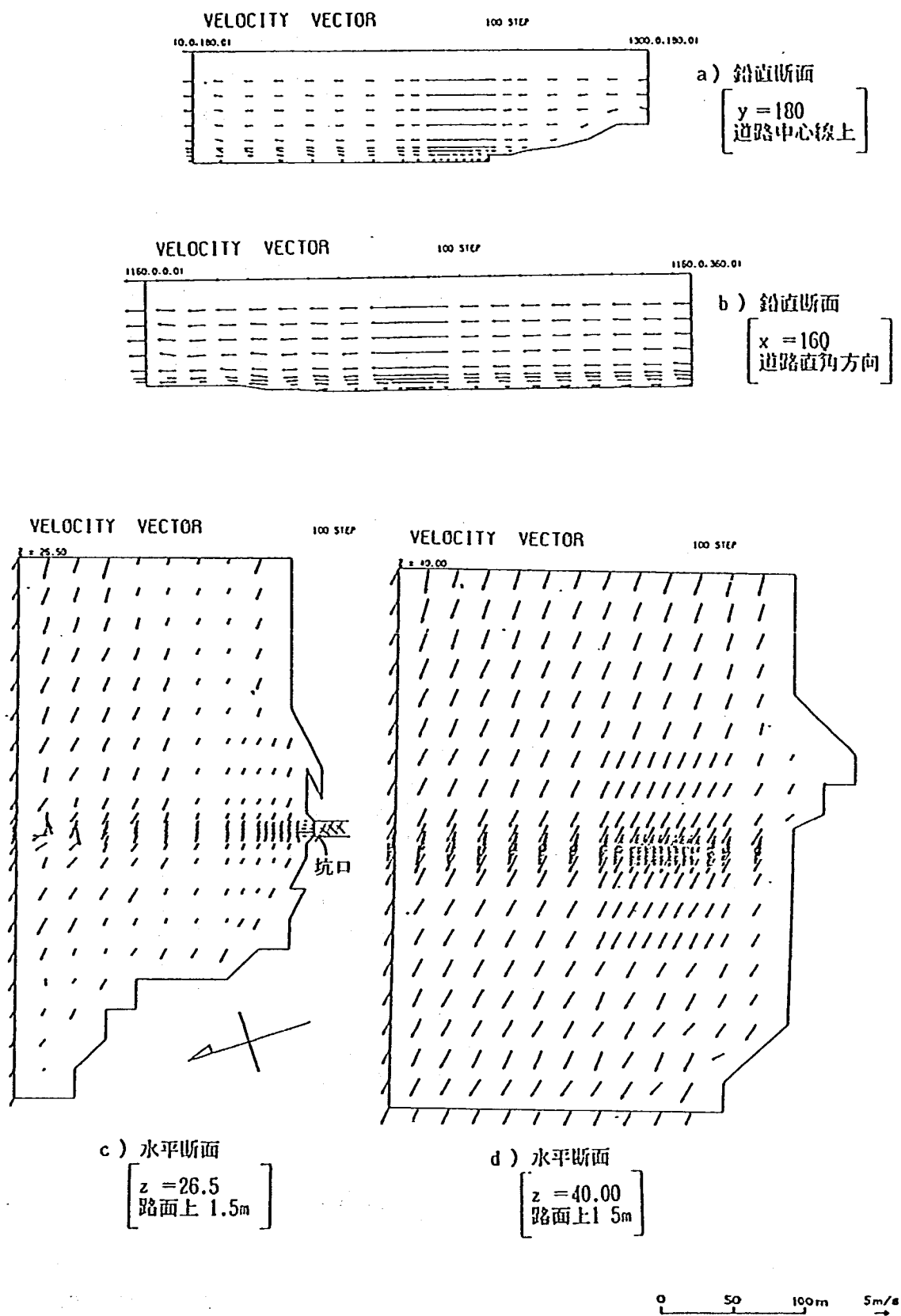
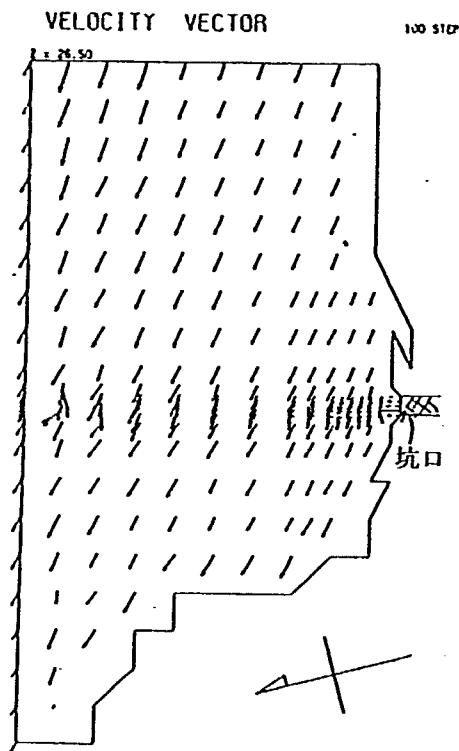
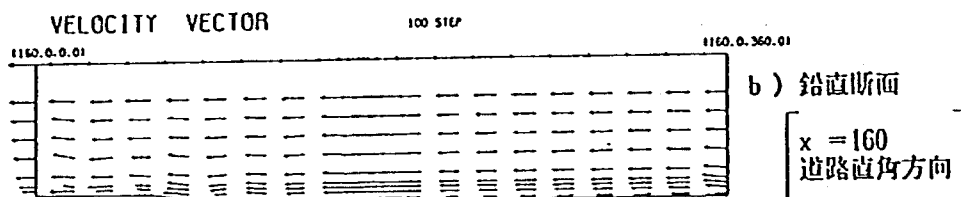
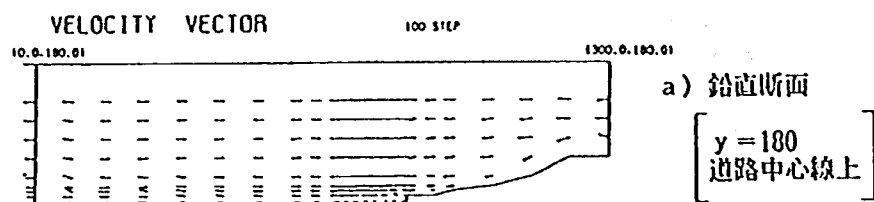
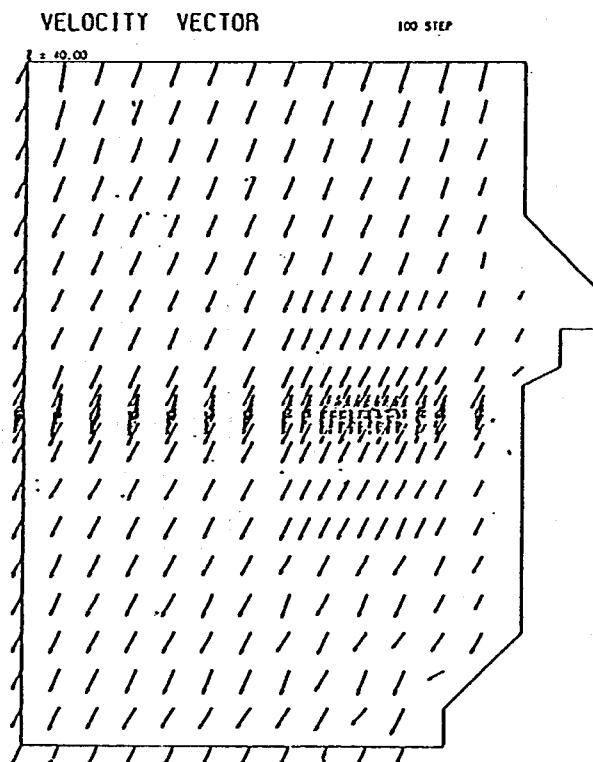


図-3.75 Dトンネル流れの計算結果 CASE 5-1



c) 水平断面

$z = 26.5$   
路面上 1.5m



d) 水平断面

$z = 40.00$   
路面上 1.5m

0 50 100m 5m/s

図-3.76 Dトンネル流れの計算結果 CASE 5-2

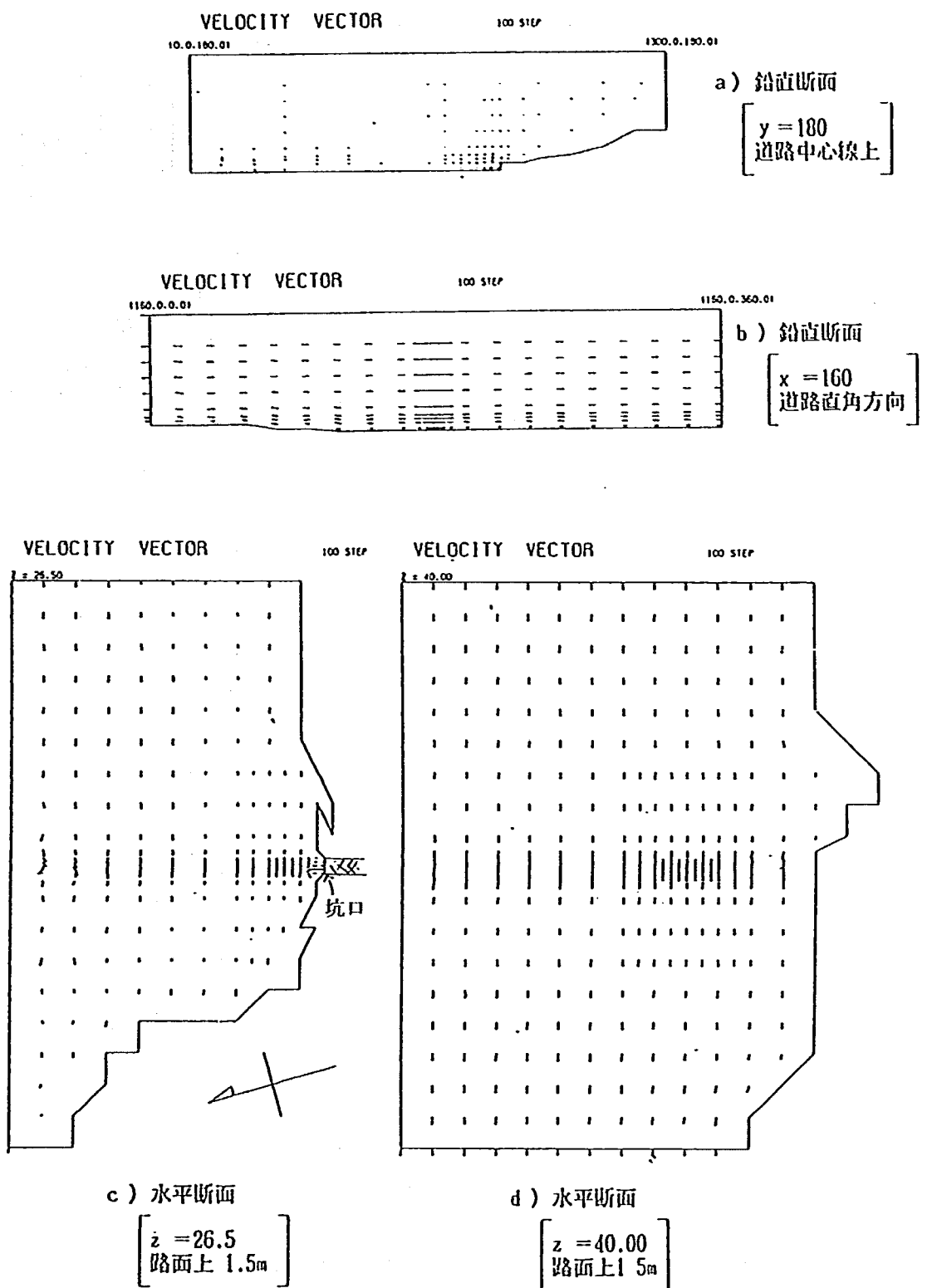


図-3.77 Dトンネル流れの計算結果 CASE 6-1

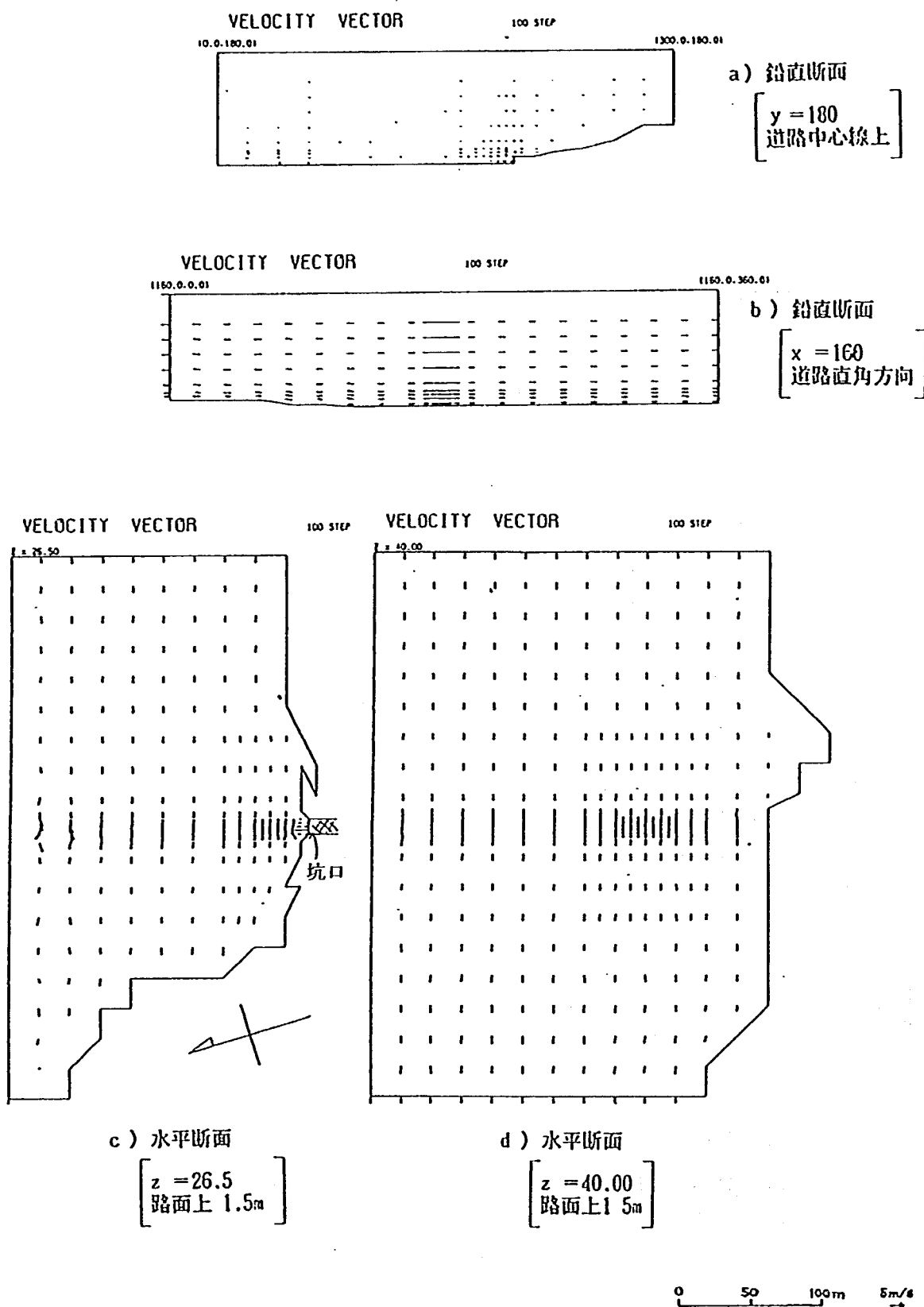


図-3.78 Dトンネル流れの計算結果 CASE 6-2

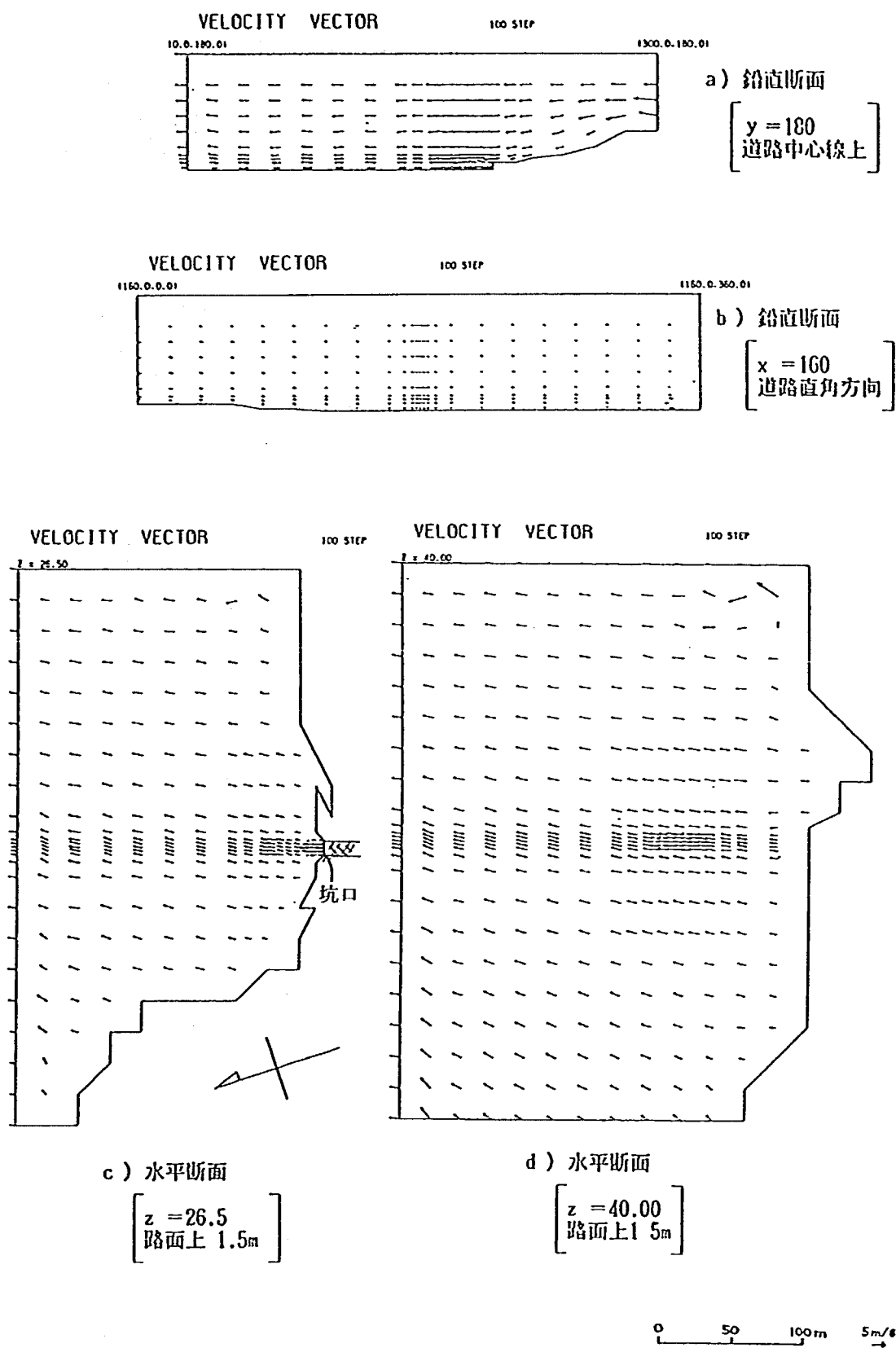


図-3.79 Dトンネル流れの計算結果 CASE 7-1

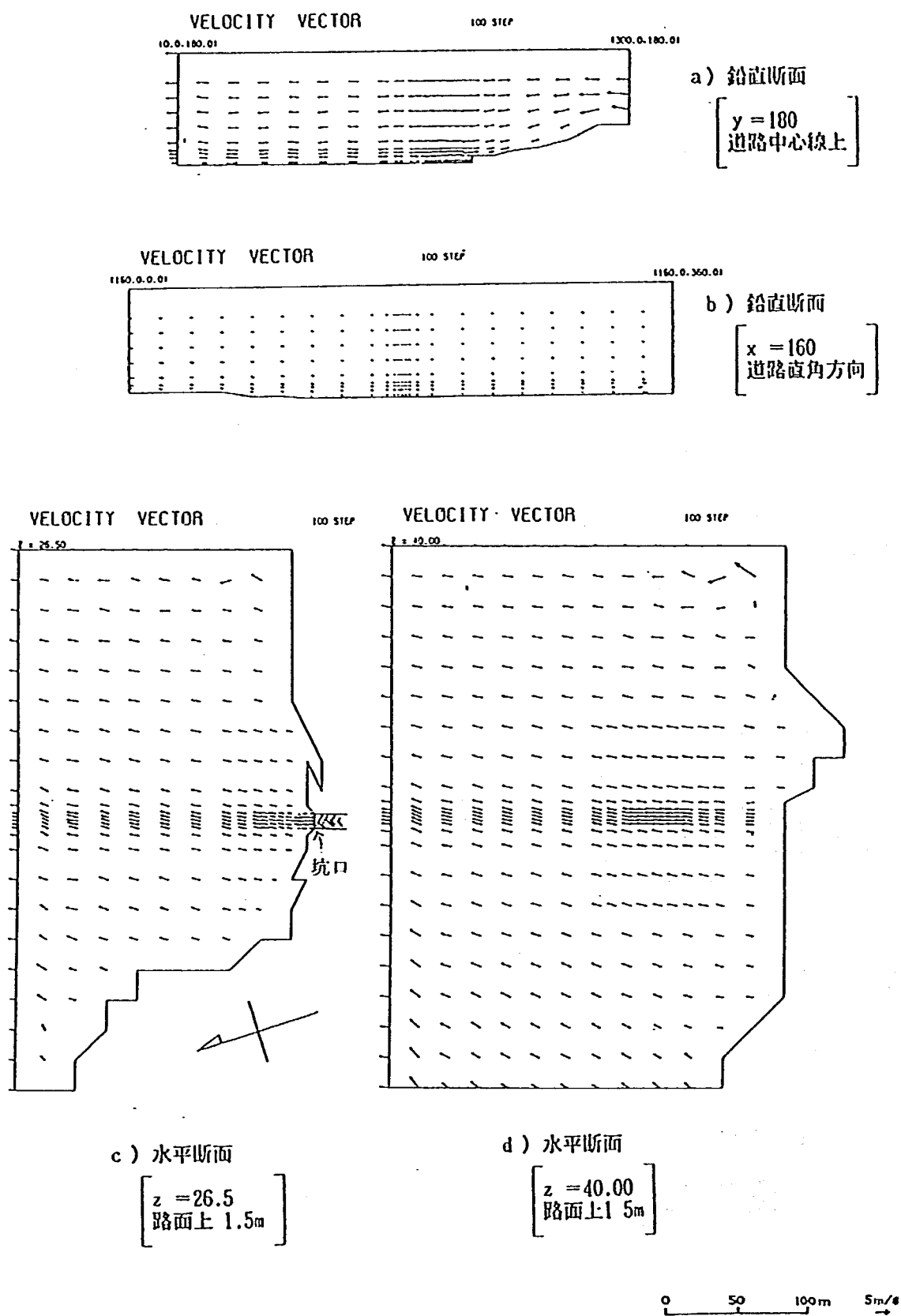


図-3.80 Dトンネル流れの計算結果 CASE 7-2

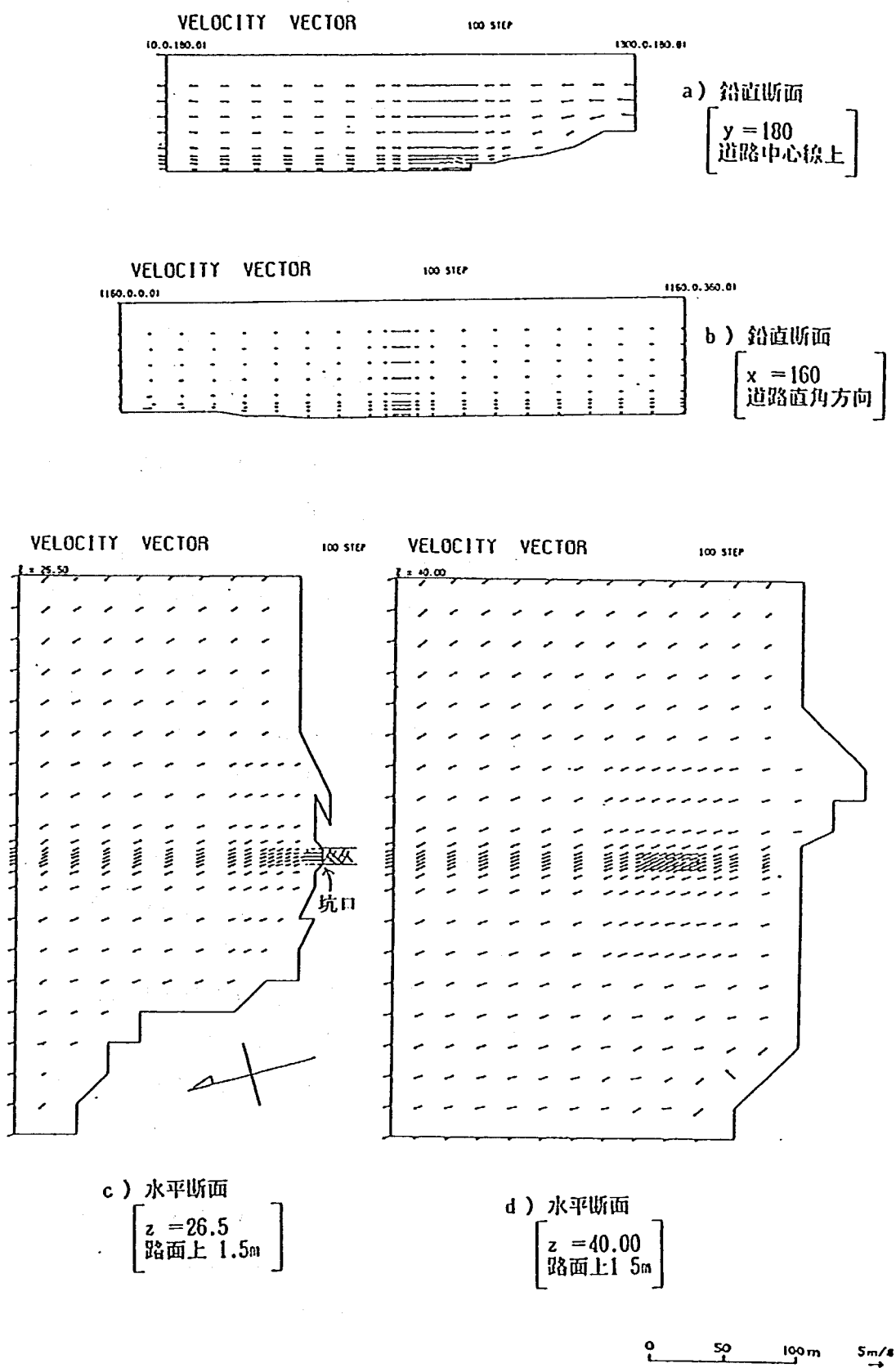


図-3.81 Dトンネル流れの計算結果 CASE 7-3

## (2) 拡散計算

図-3.82～3.89 は拡散計算結果と実測値との比較を道路方向の濃度減衰（地表面からの高さ 1.5 m）に関して行ったものである。

図からもわかるように、鉛直方向の拡散係数を 1 地点の風速データから求めた値で代表させた場合と、3 地点の風速データから求めた値を用いた場合とでは、各 Run を通じてあまり大きな差は認められず、3 地点の風速データから求めた値を用いることに、予想されたほどの効果は認められない。この原因としては、Run 3～7 の 5 Run では横風から追い風の条件であるため、坑口から明り部に向けての濃度分布に対しては移流項の寄与が大きく、拡散係数にはあまり依存しないことが考えられる。したがって、逆に向い風の条件の場合には、拡散係数の影響が大きくなるものと考えられ、事実、向い風の条件である Run 1 では計算結果に拡散係数による差異が坑口から離れるに従って大きく現れている様子もうかがえる。

以上のように、D トンネルでは複数の地点の風速データからそれぞれ求めた鉛直方向の拡散係数を用いることの効果は道路方向の濃度減衰に関しては明確には見出せないが、表-3.11 に示されるように鉛直方向の拡散係数は特に山沿いでは平地とは大きく異なった値をとっており、坑口より山側の濃度分布が重要となる場合や、前述した向い風の条件の場合には複数の地点の風速データから得られるならばそれらを利用する方が望ましいと考えられる。

換算風速を与える場合の換算係数  $F$  値に関しては、計算結果に及ぼす影響は大きく、またその度合は各 Run によって異なるが、最終的には表-3.14 に示されるような値を各 Run に対してそれぞれ与えた場合に実測値との整合性が最も良いことが分かった。図-3.90～3.96 にはこれらの値を用いた濃度分布図を実測値とともに示した。

Run 2 の場合に関しては、水平方向拡散係数を変化させることにより、整合性に明らかな向上が認められる（図-3.83 参照）。また、Run 2 では全体的に特に整合性が悪いが、この原因の多くは、流れ計算において一般風の境界条件を 0 としているために、流れが坑口風の上に支配されていることにあると思われる。実際には、図-3.91(a)のトレーサーガス拡散実験結果の濃度分布からもわかるように、流れの影響と思われる歪みが見られ、特定方向の移流成分が寄与していることを示している。しかし、本研究で用いている計算方法では、風向不定の場合には風の境界条件が入力できず、無風と見なさざるを得ない。したがってこのような無風時の境界条件の設定方法および水平方向の拡散係数については今後の課題として残される。

Run 7 の代表風向については、図-3.96 (b), (c)の比較からもよくわかるように、道路際の測定点の風向、風速データを用いた場合の方が良好な整合性が得られている。この原因としては、平地での計測データに読み取り誤差があったことが考えられるが、確定は困難である。

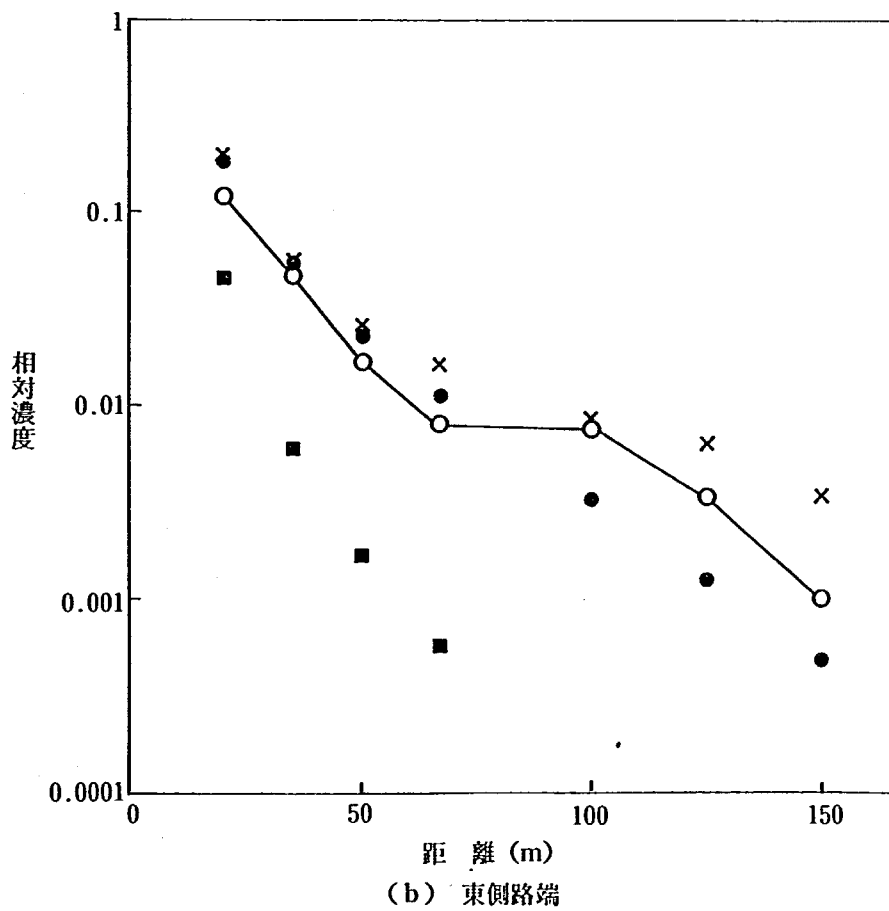
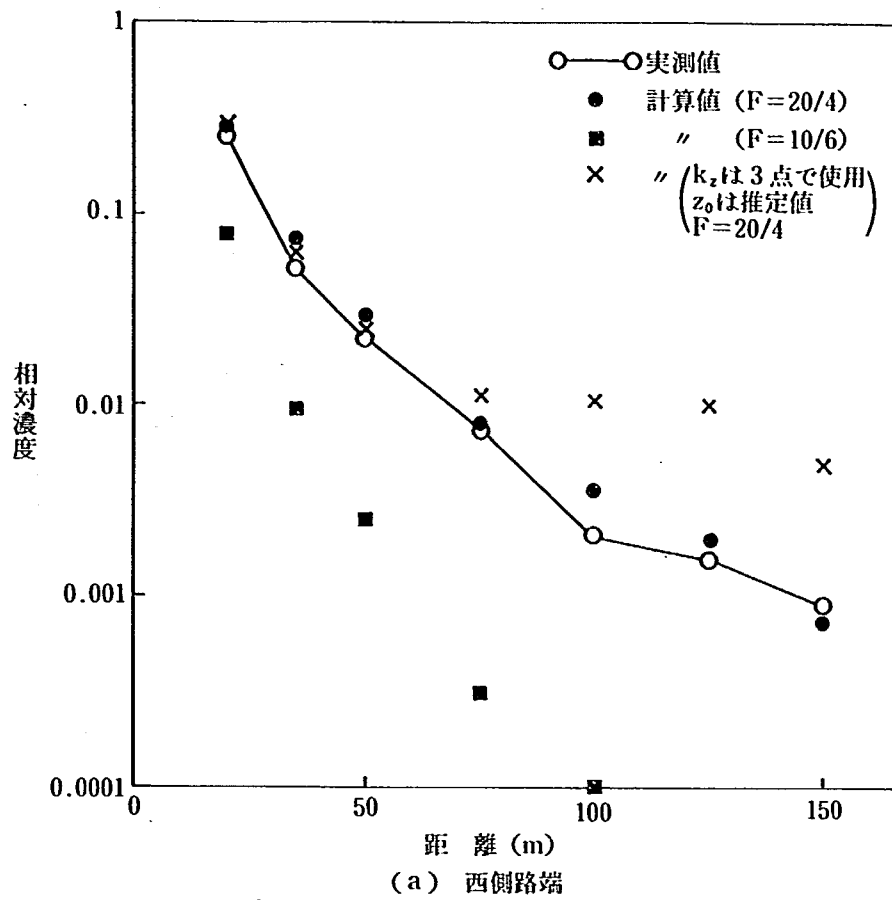


図-3.82 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 1

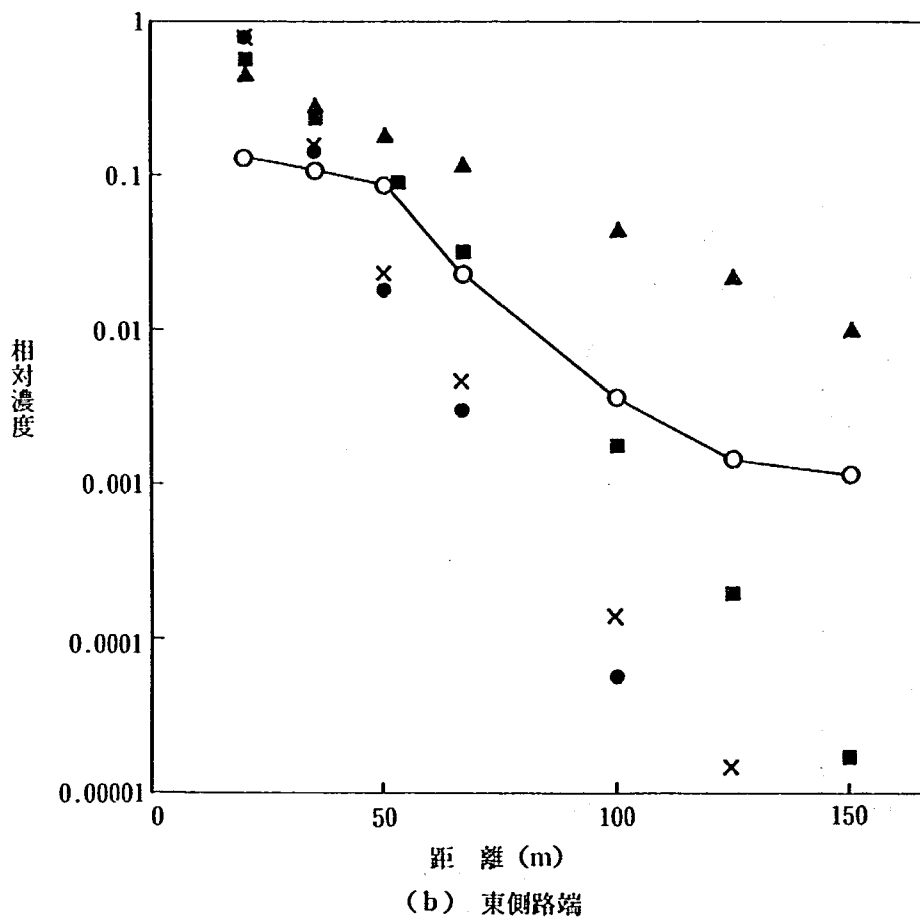
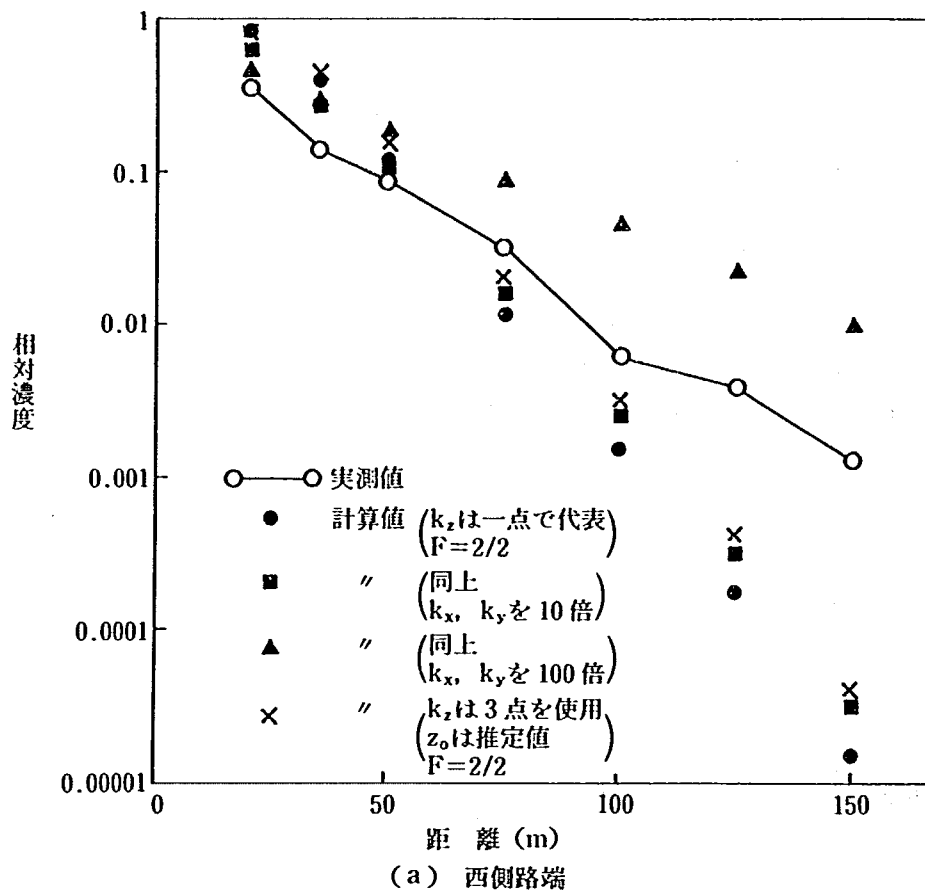


図-3.83 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 2

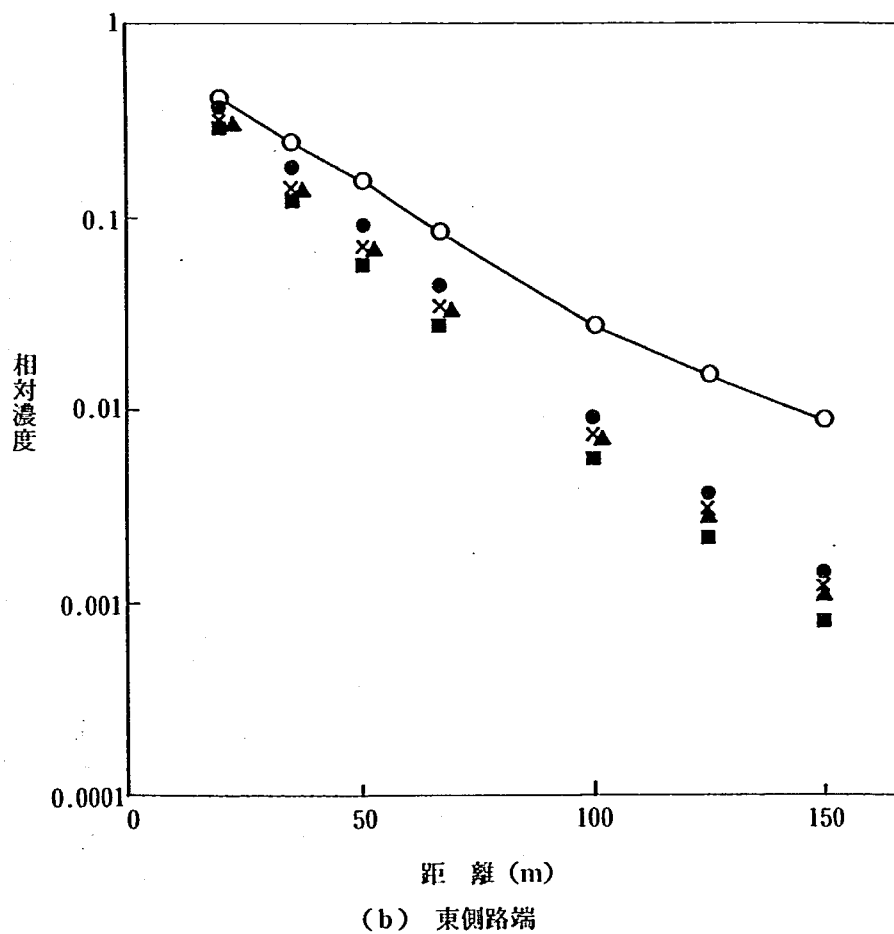
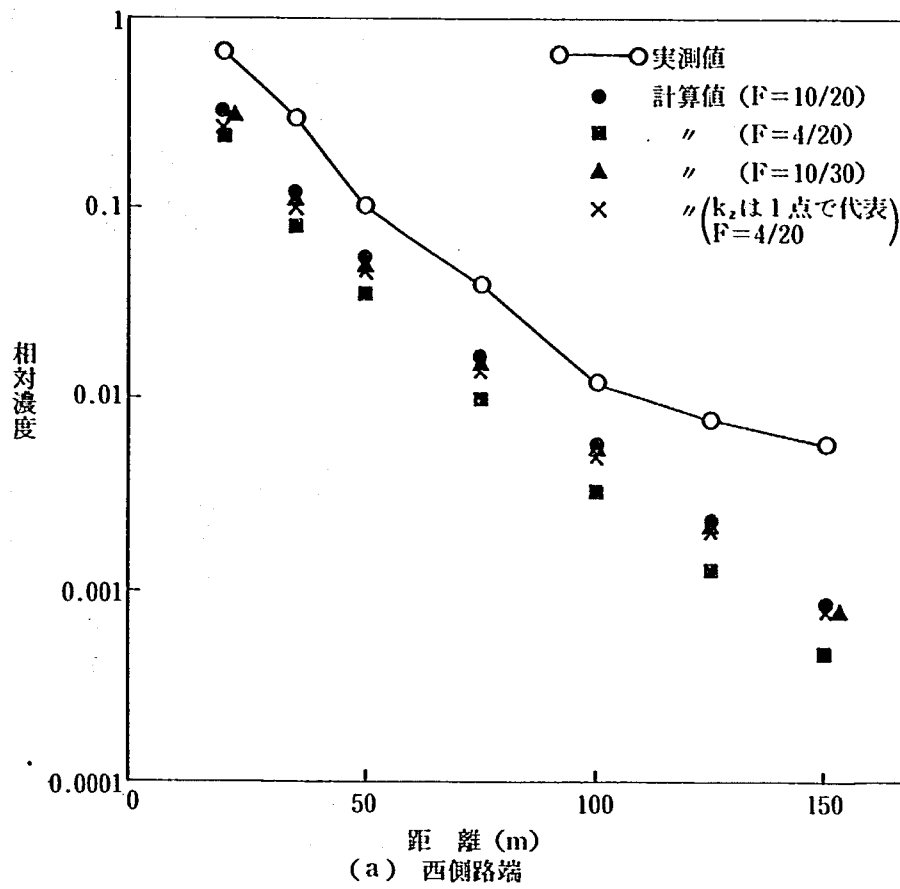


図-3.84 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 3

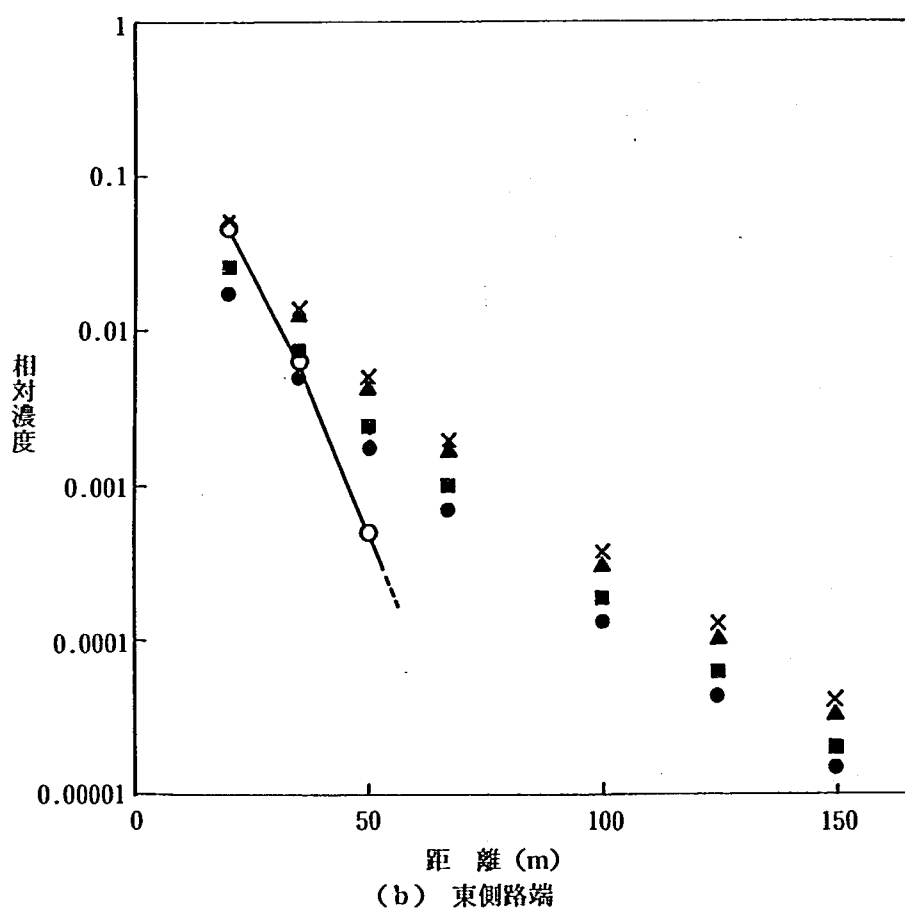
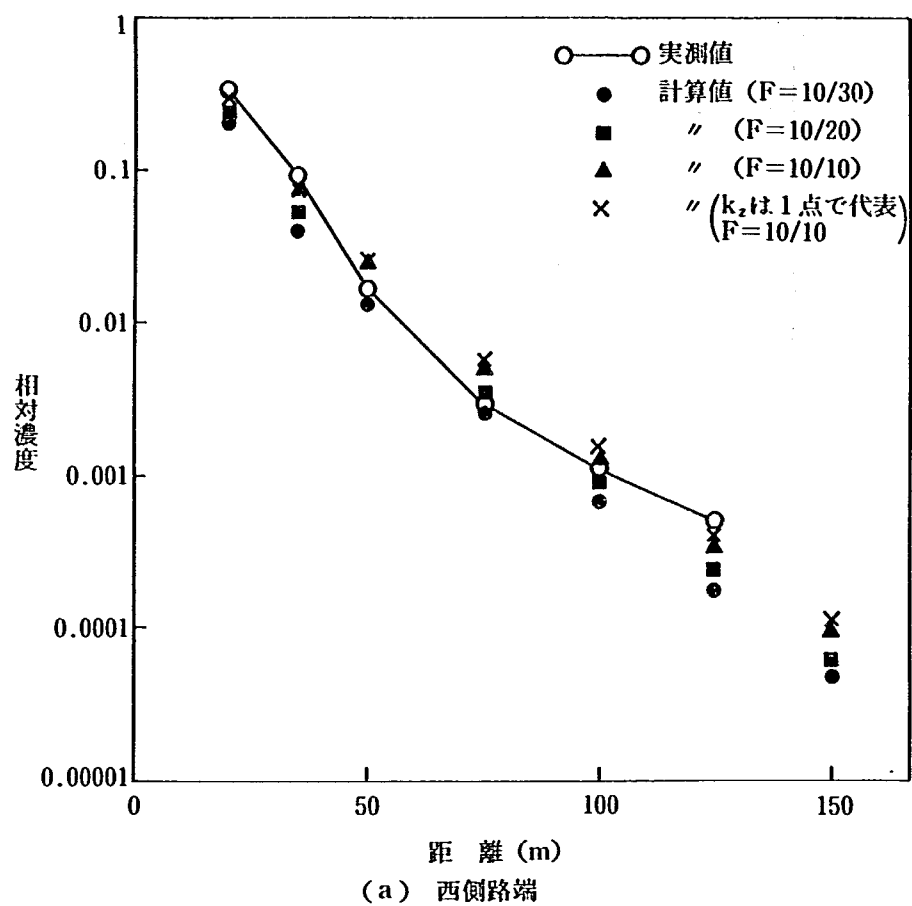


図-3.85 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 4

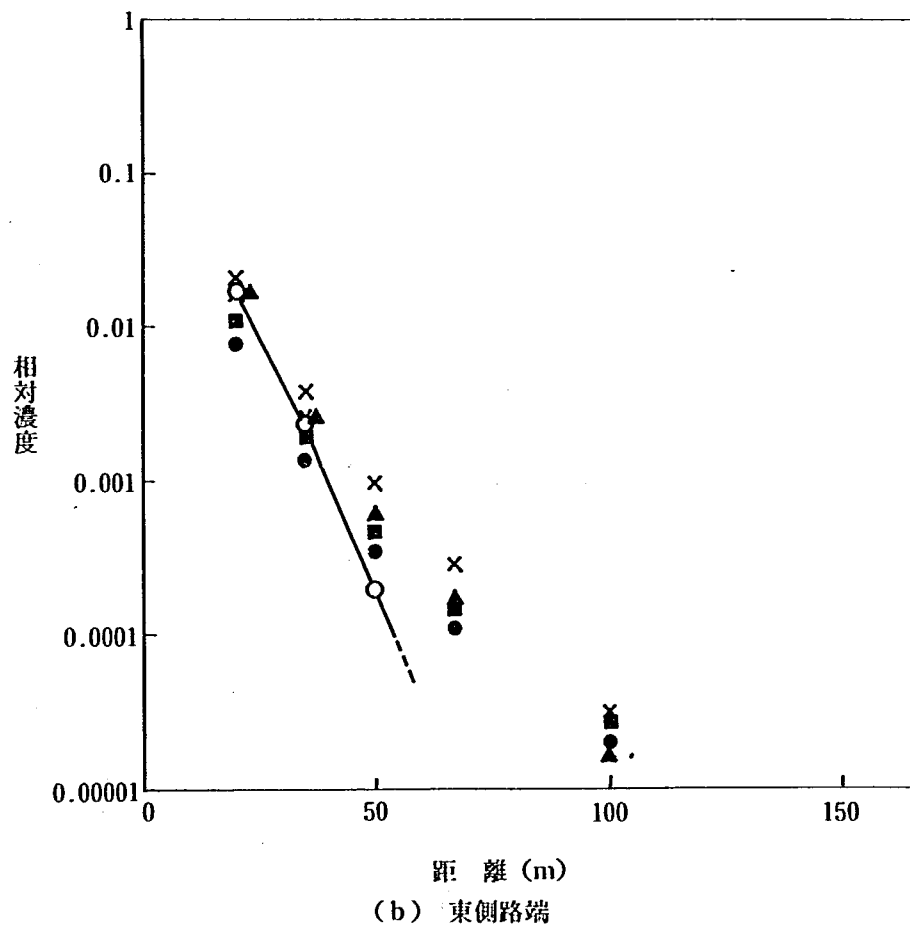
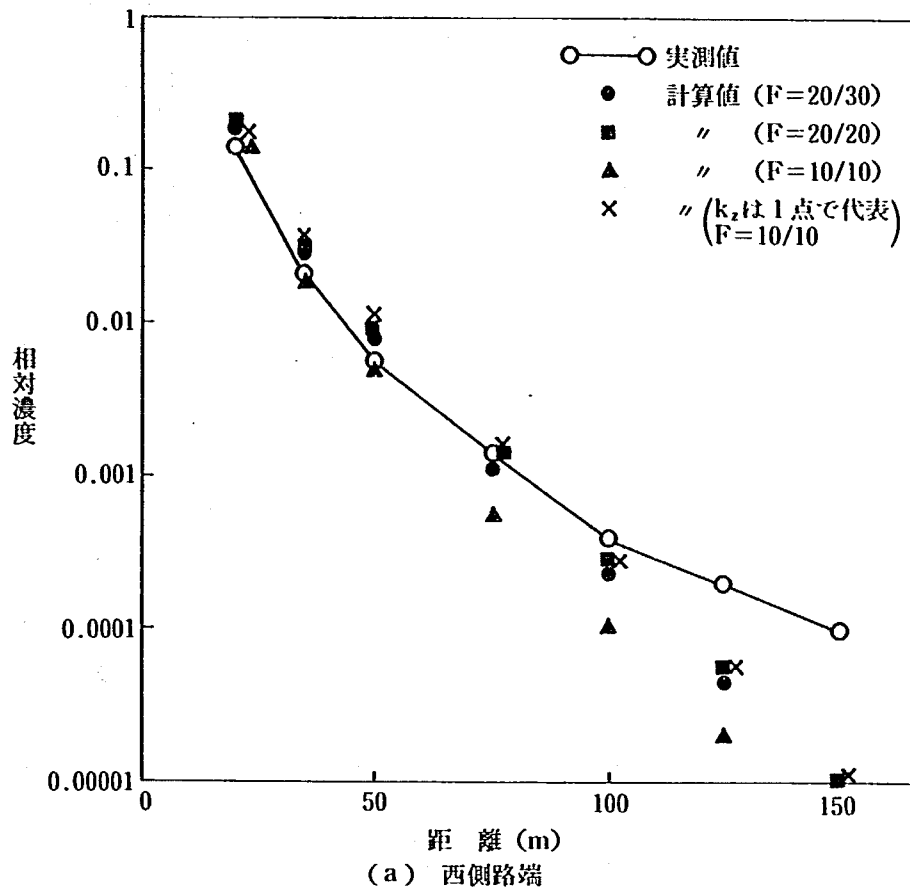


図-3.86 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 5

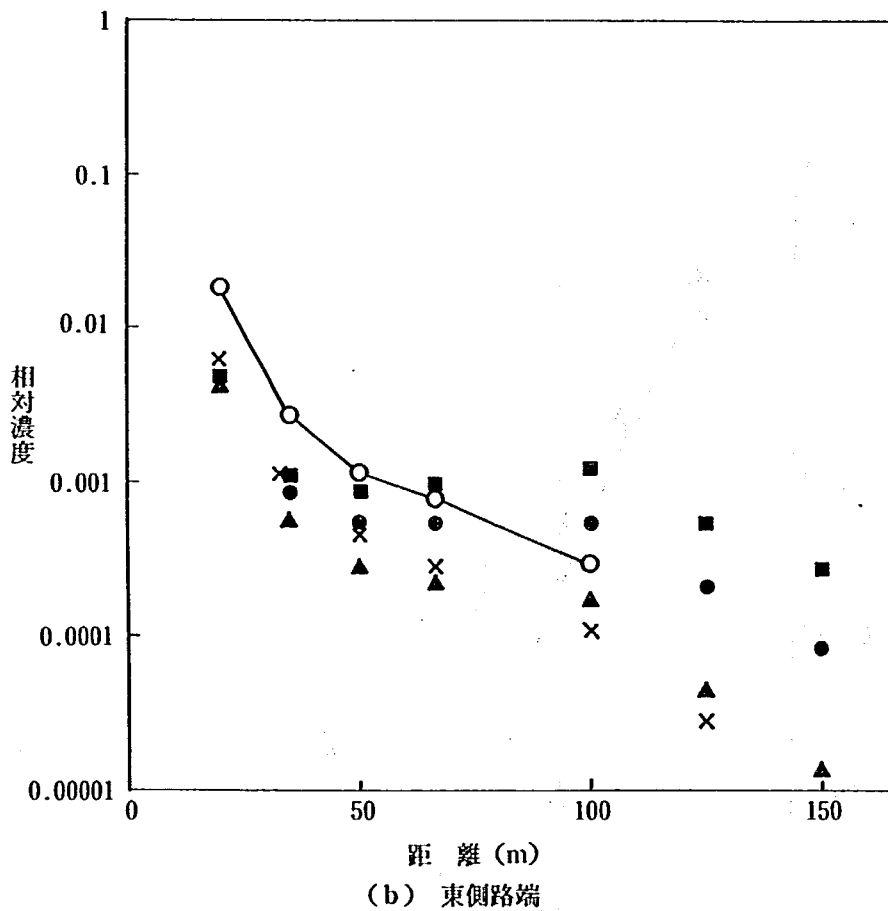
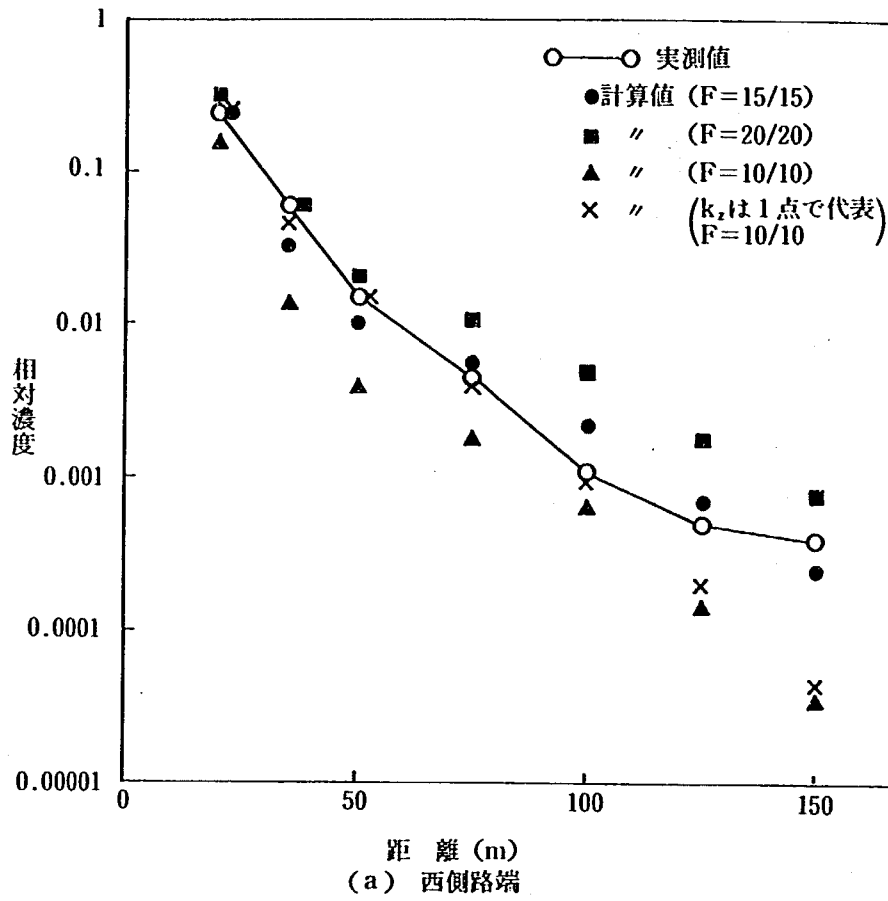
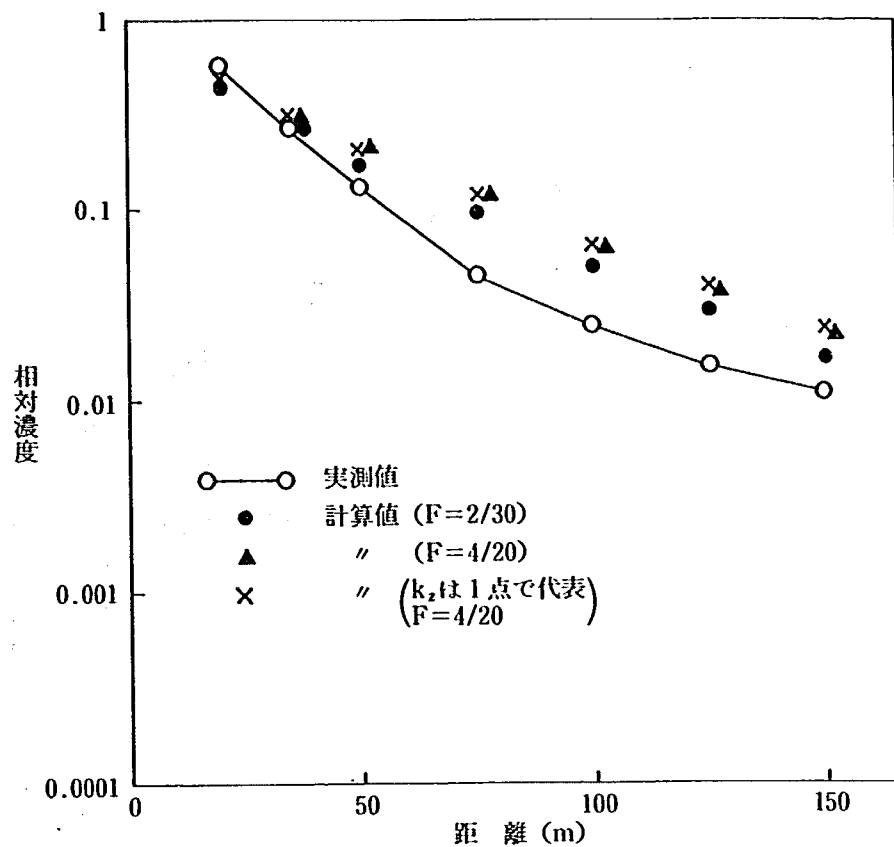
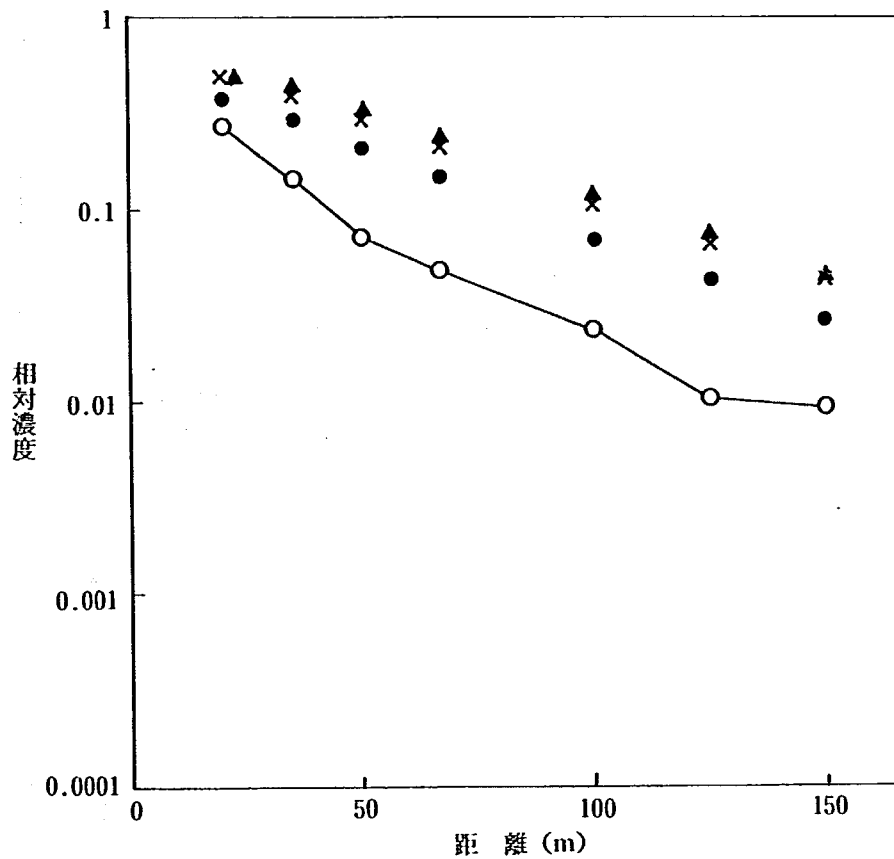


図-3.87 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 6



(a) 西側路端



(b) 東側路端

図-3.88 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 7

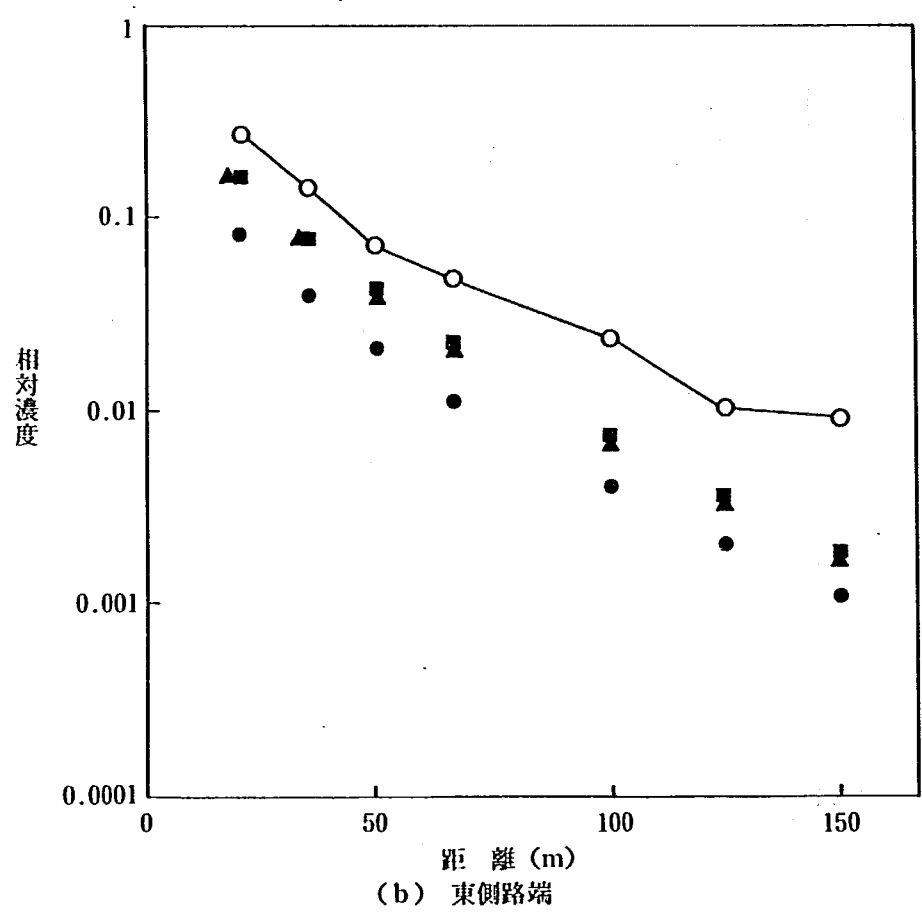
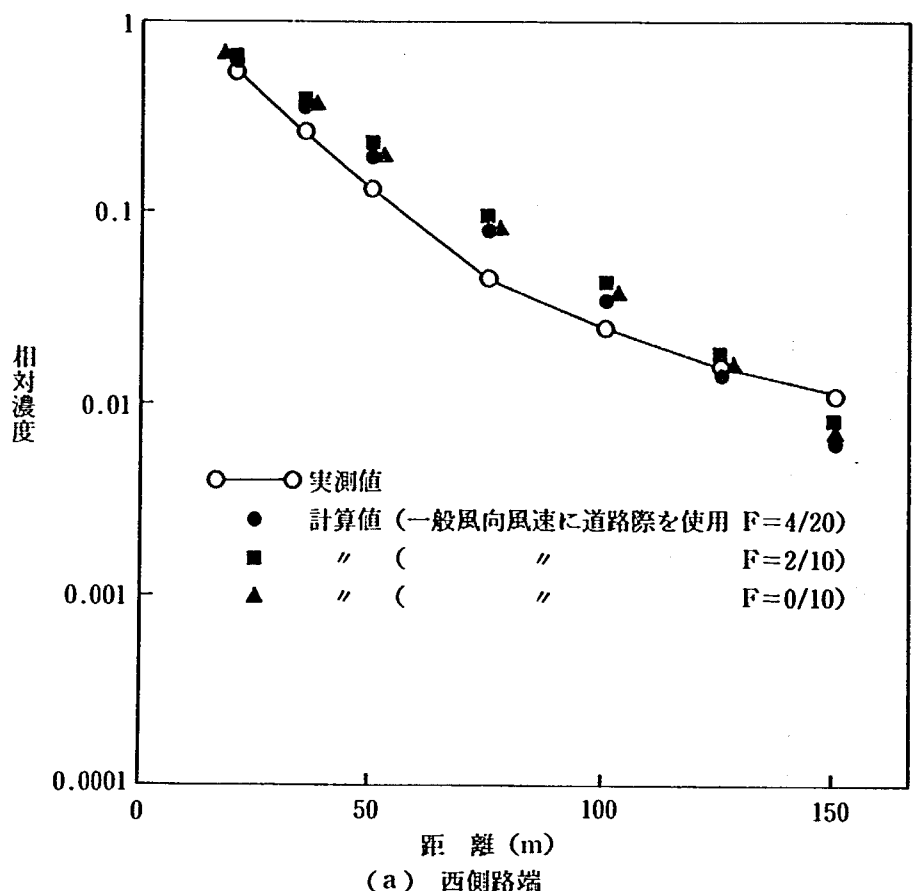
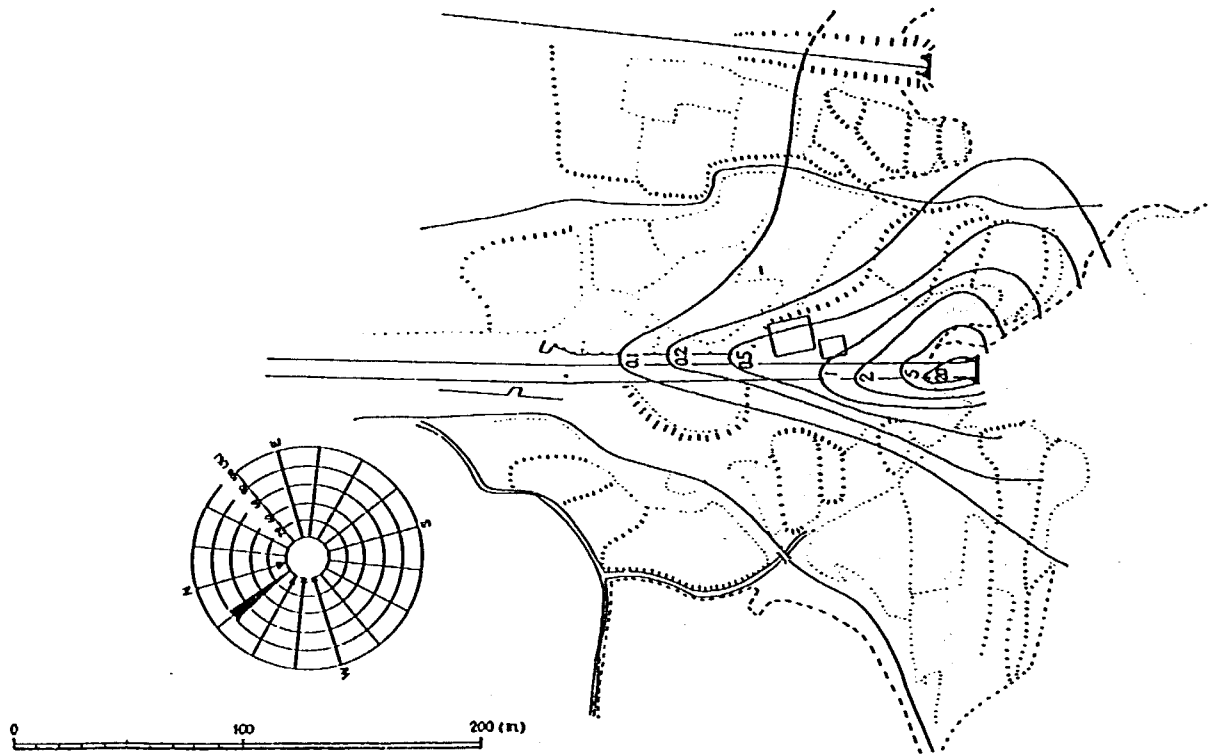


図-3.89 Dトンネル道路方向濃度減衰図 Run 7

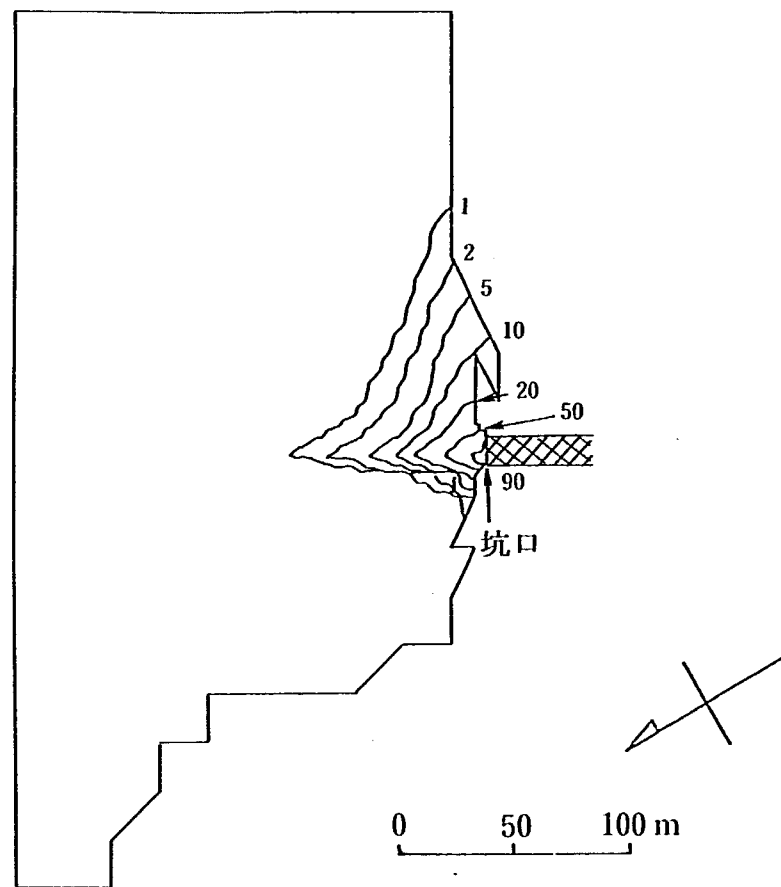
表－3.14 実測値との整合性が最も良い時の F の値

| Run. No. | 坑口風に対する風向 | 風 速     | F (北行/南行) |
|----------|-----------|---------|-----------|
| 1        | 斜め向かい風    | 1.2 m/s | 20/ 4     |
| 2        | 不 定       | 0.3 m/s | 2/ 2      |
| 3        | 斜め追い風     | 3.6 m/s | 10/30     |
| 4        | 斜め追い風     | 4.9 m/s | 10/30     |
| 5        | 横 風       | 5.5 m/s | 20/30     |
| 6        | 横 風       | 2.2 m/s | 15/15     |
| 7        | 追 い 風     | 3.0 m/s | ( 2/30)   |
| 7*       | 追 い 風     | 3.0 m/s | 0/10      |

\*) 一般風向を道路際の測定値により与えた場合

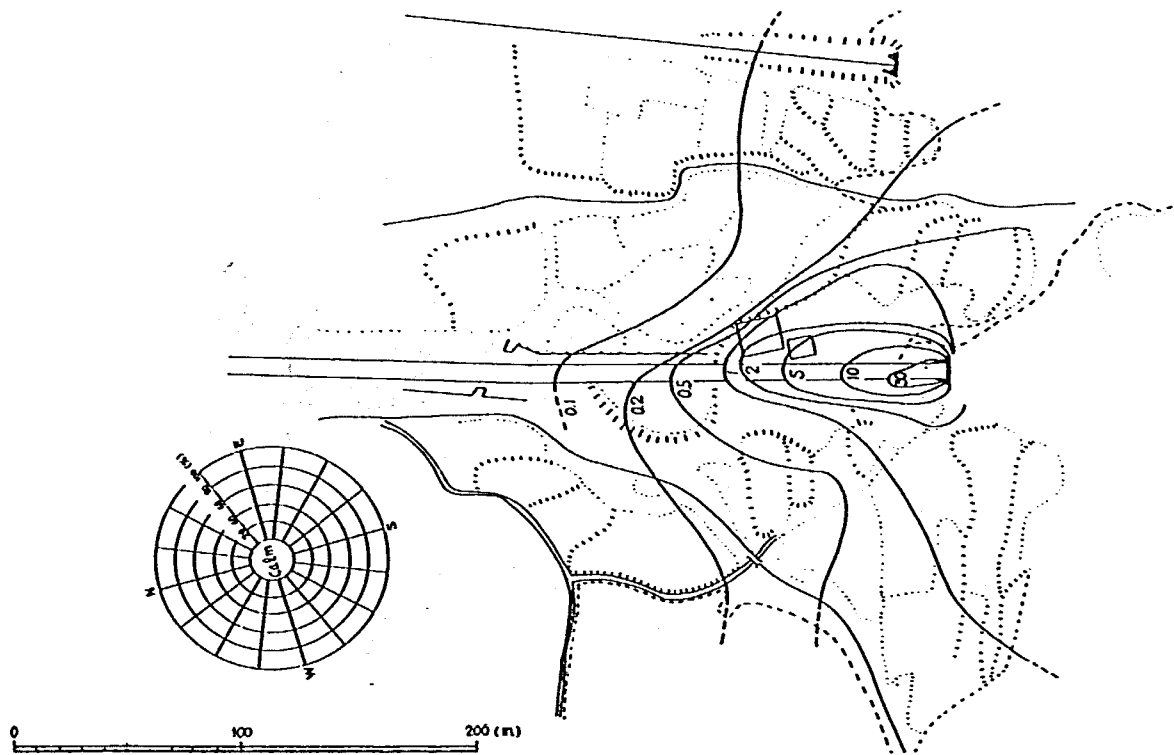


(a) 実測値

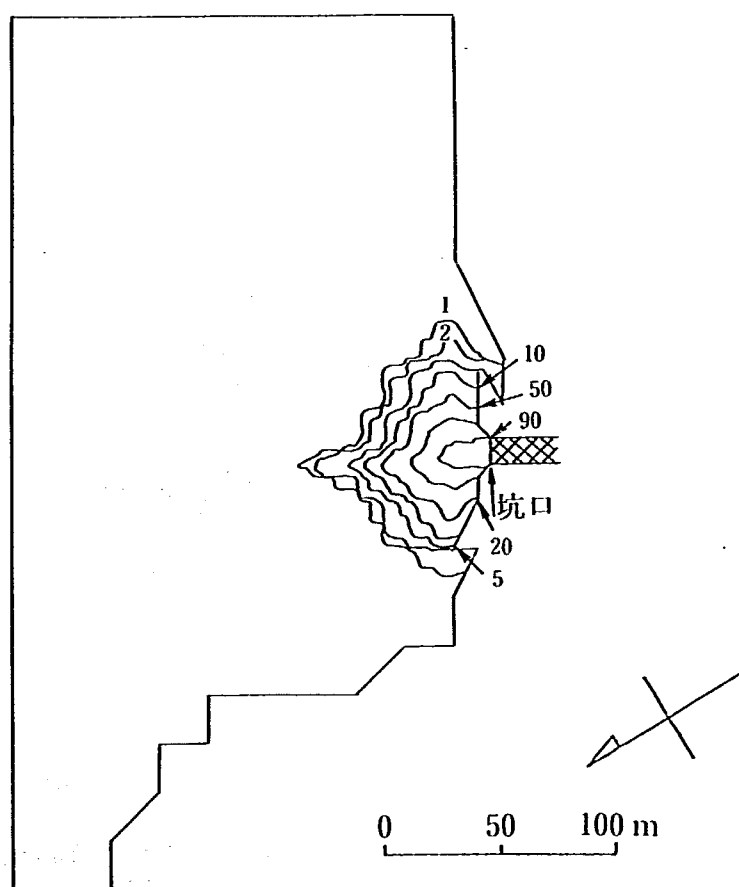


(b) 計算値 CASE 1-1-1

図-3.90 Dトンネル濃度分布図 Run 1

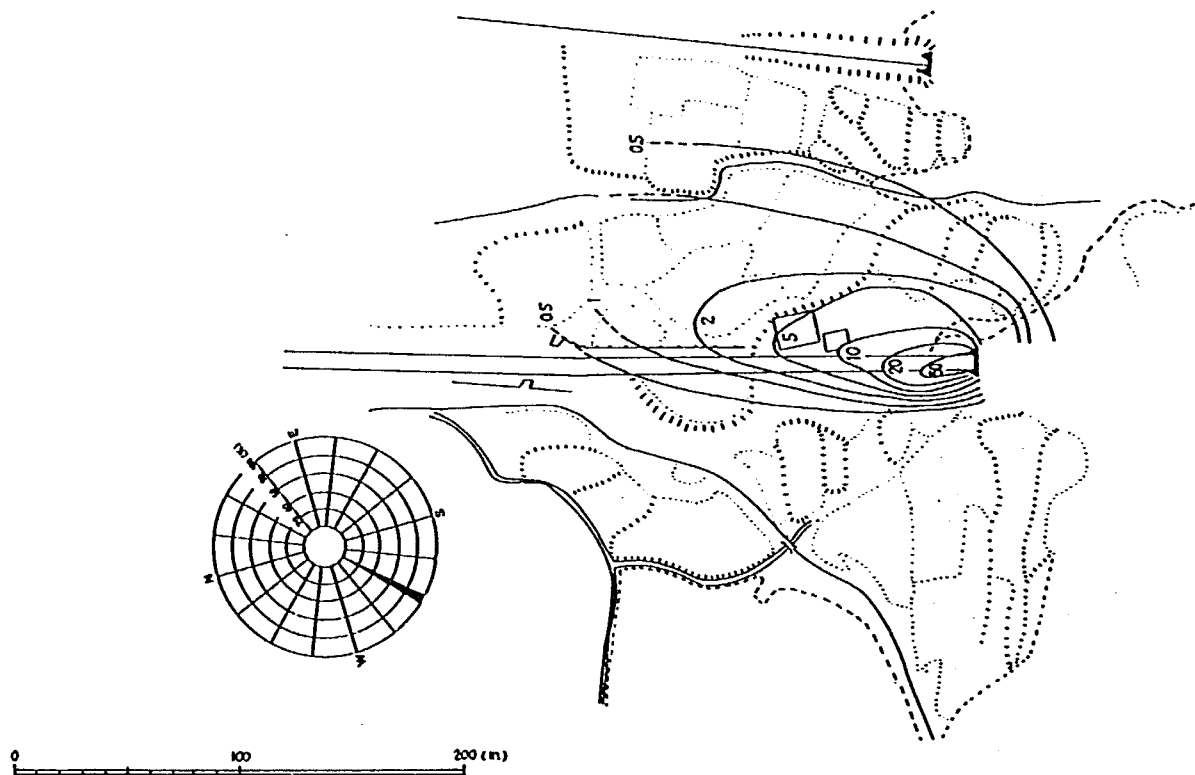


(a) 実測値

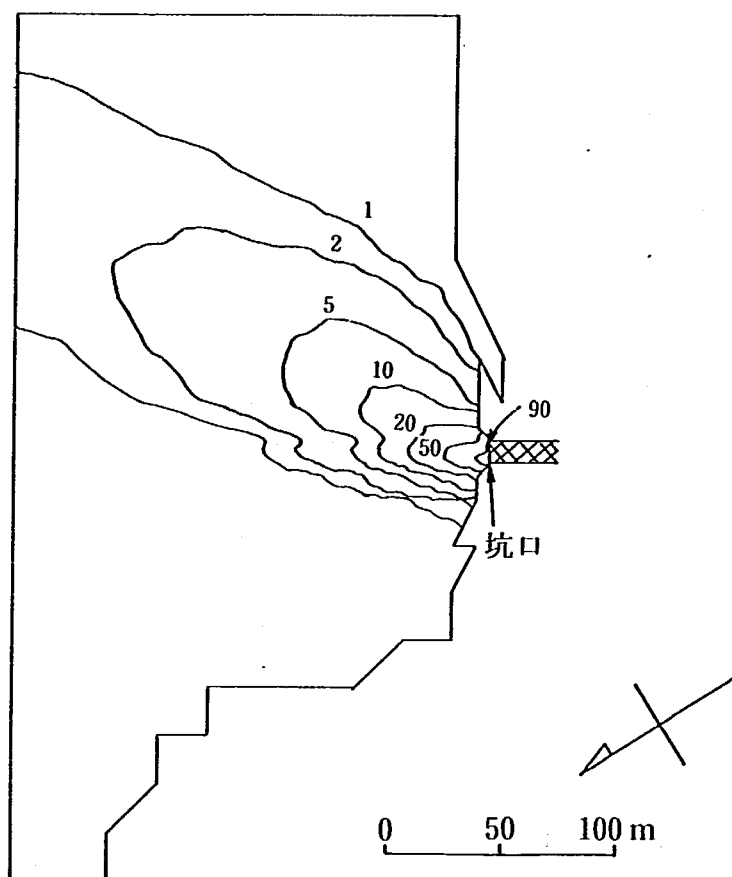


(b) 計算値 CASE 2-1-1

図-3.91 Dトンネル濃度分布図 Run 2

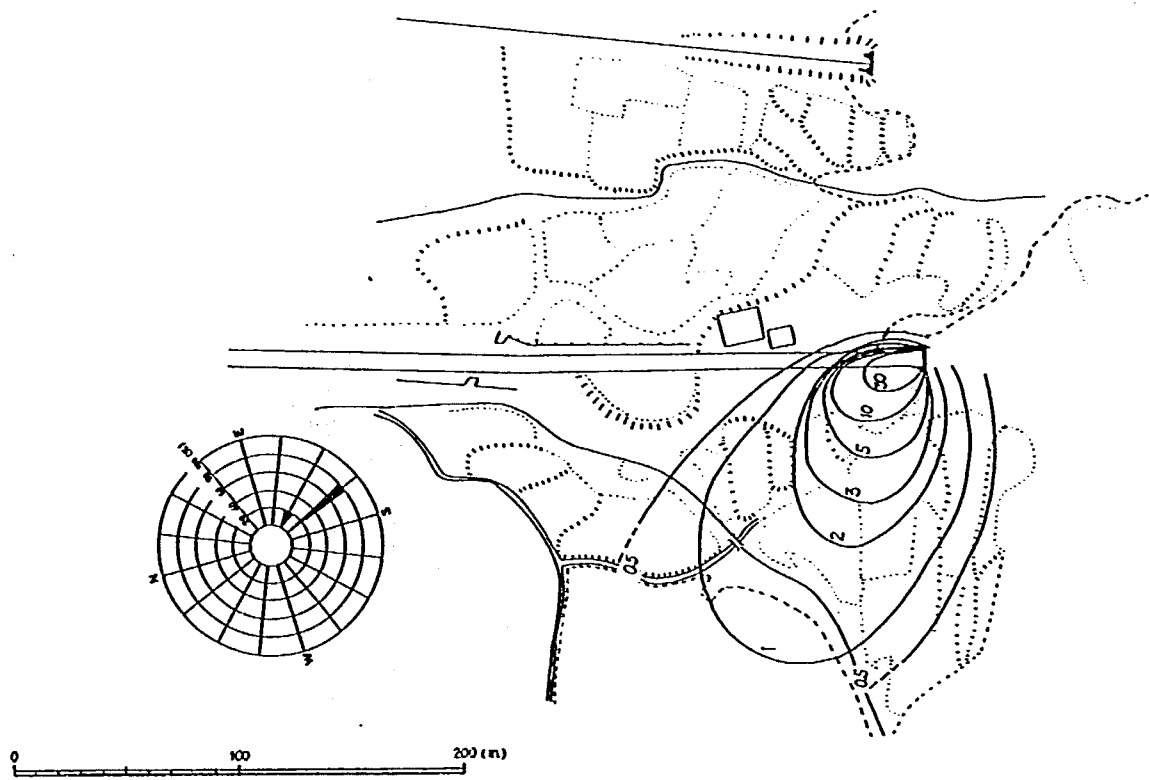


(a) 実測値

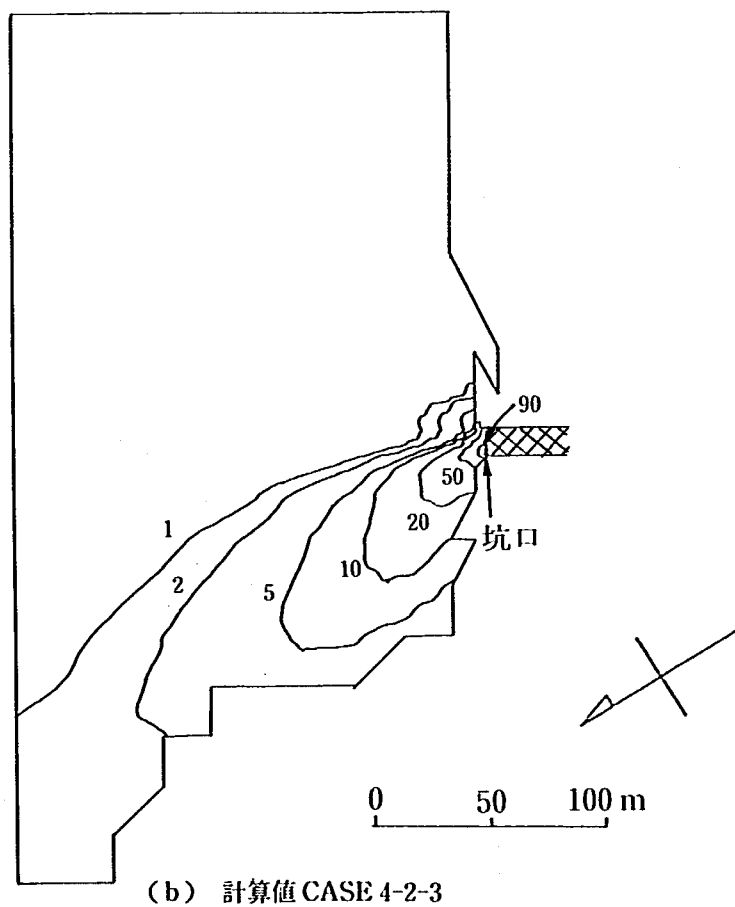


(b) 計算値 CASE 3-2-3

図-3.92 Dトンネル濃度分布図 Run 3

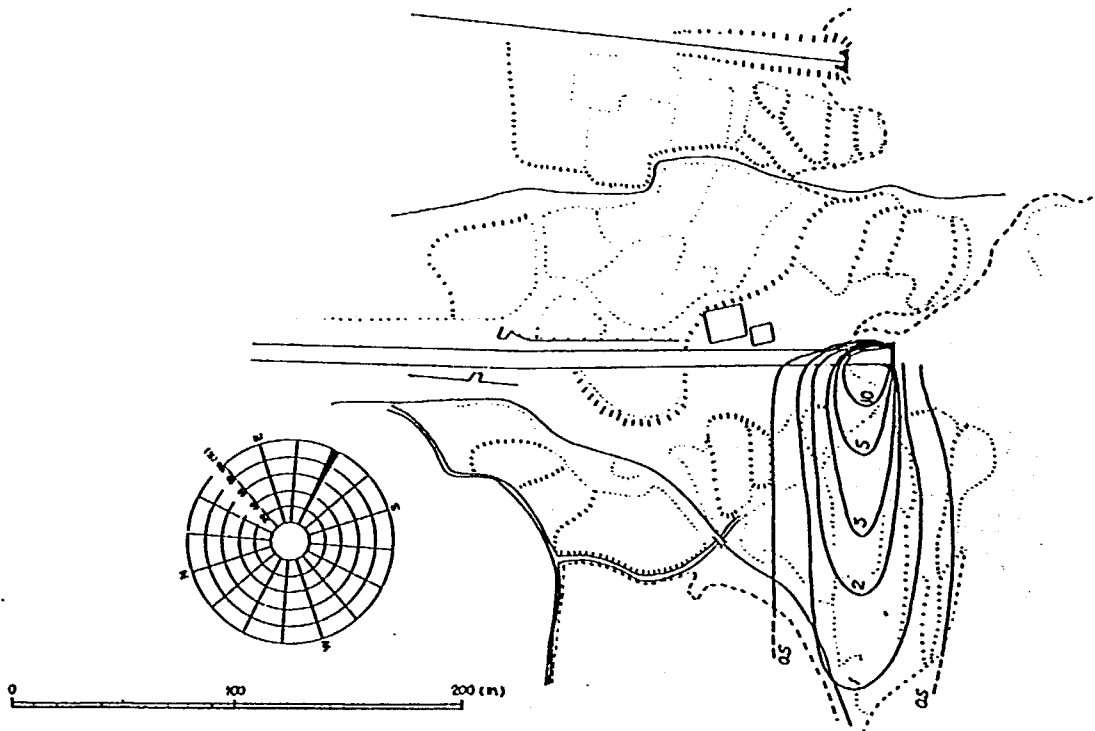


(a) 実測値

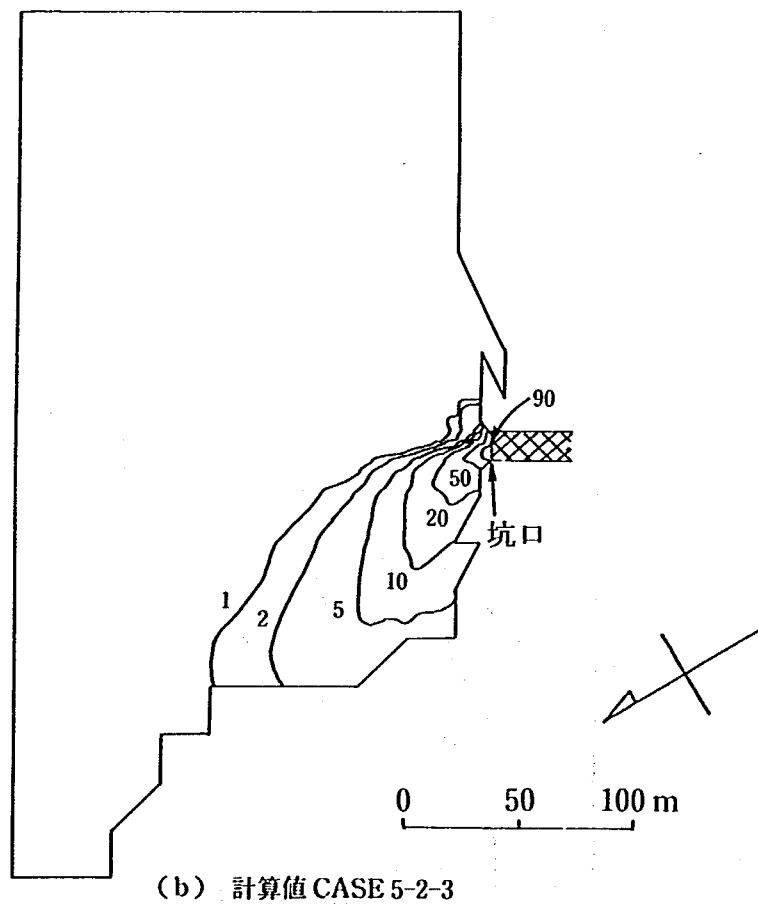


(b) 計算値 CASE 4-2-3

図-3.93 Dトンネル濃度分布図 Run 4

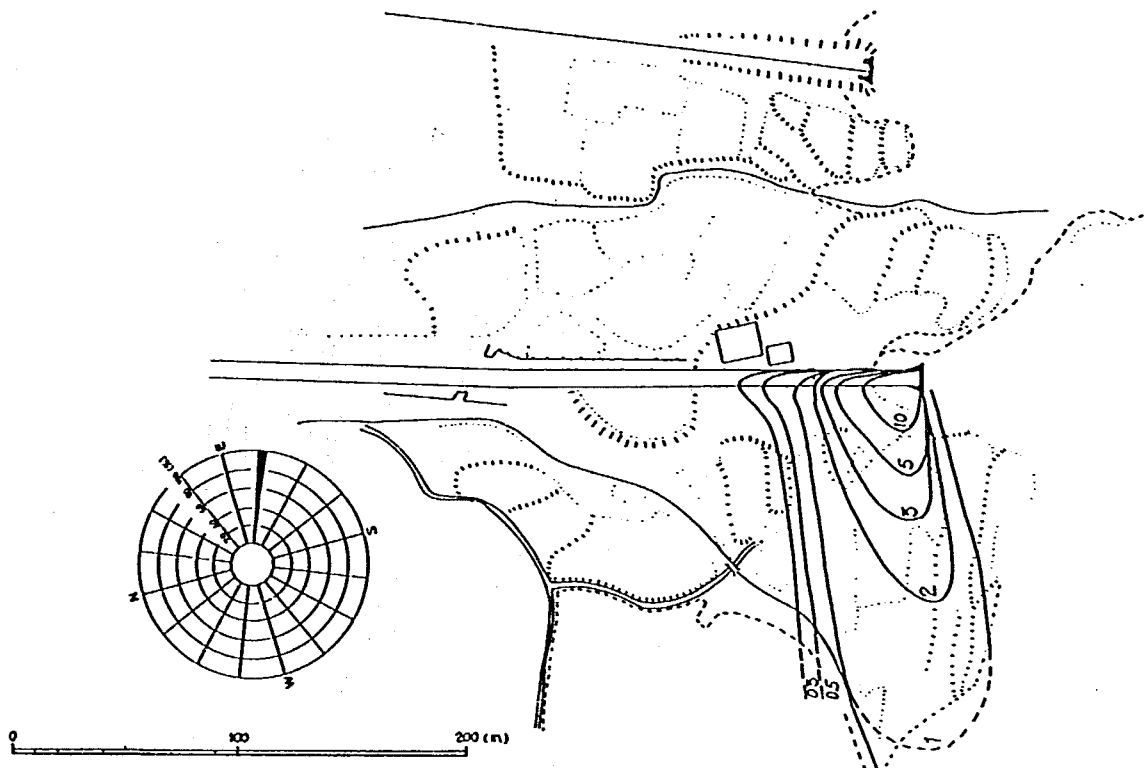


(a) 実測値

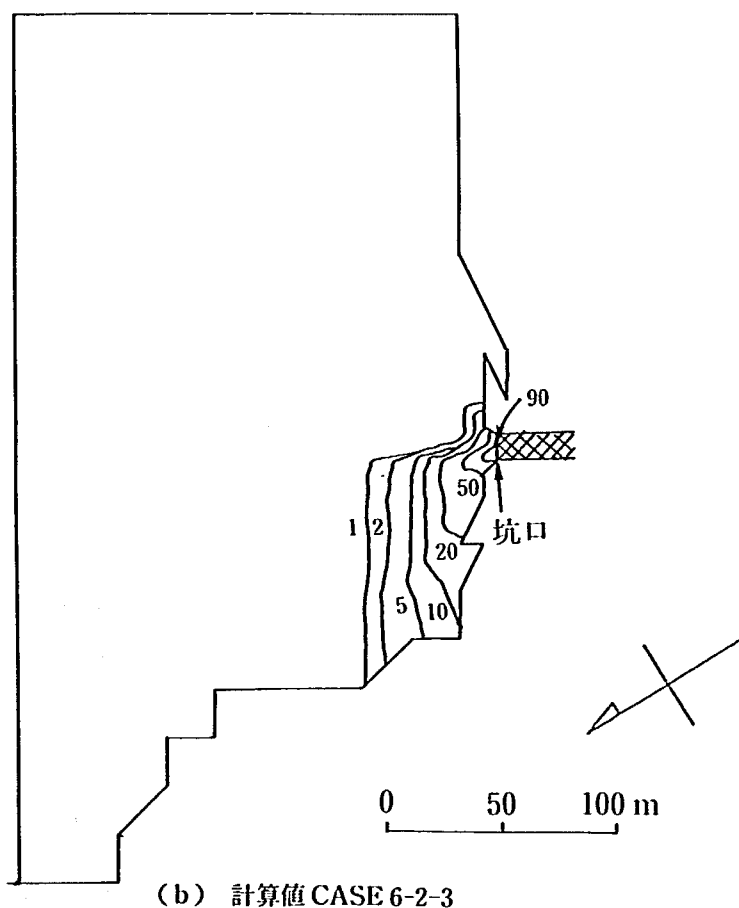


(b) 計算値 CASE 5-2-3

図-3.94 Dトンネル濃度分布図 Run 5

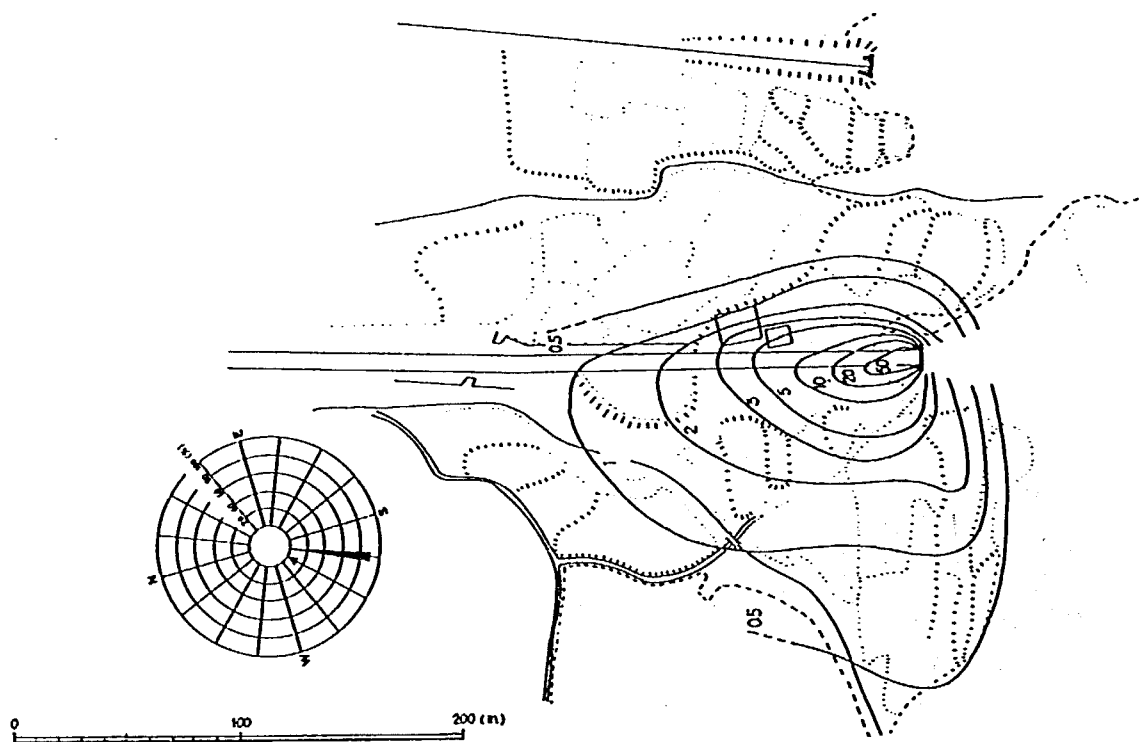


(a) 実測値

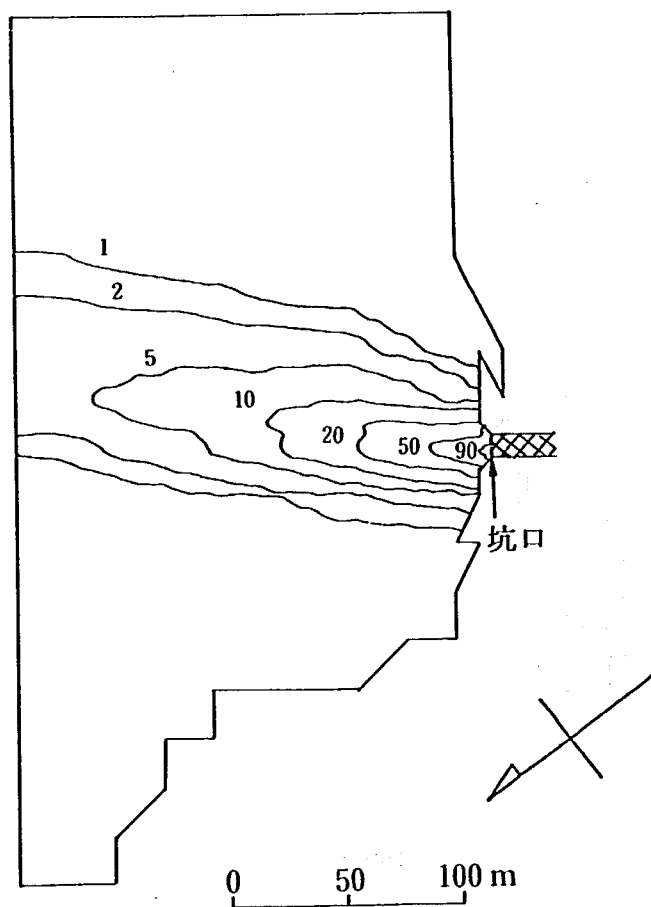


(b) 計算値 CASE 6-2-3

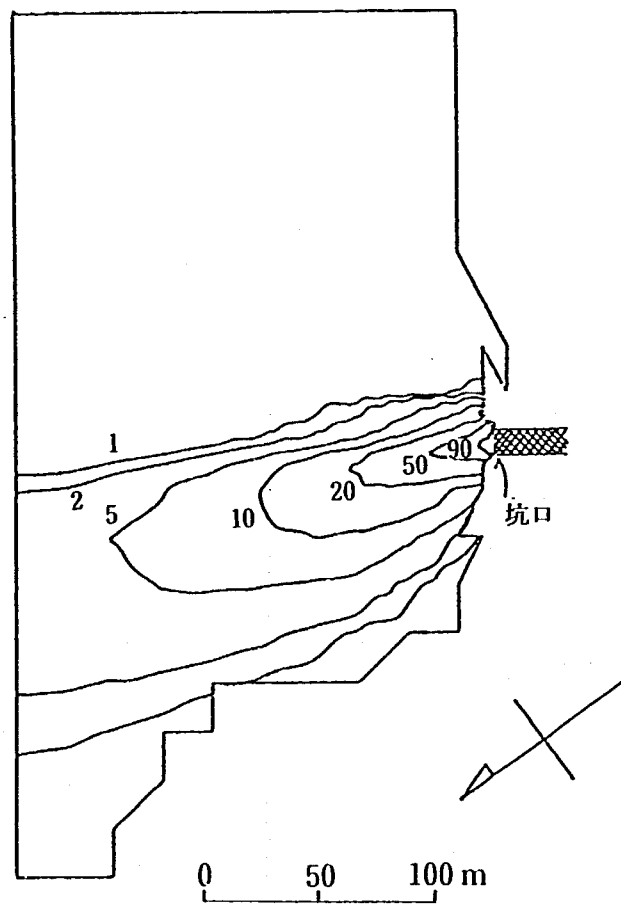
図-3.95 Dトンネル濃度分布図 Run 6



(a) 実測値



(b) 計算値 CASE 7-2-2



(c) 計算値 CASE 7-3-3

図-3.96 Dトンネル濃度分布図 Run 7

#### 4) まとめ

##### (1) 流れ計算

鉛直境界面における境界条件として、流出側 2 つの鉛直境界面の風速を固定したが、問題となるような部分的な発散現象は現れなかった。

鉛直方向の渦動粘性係数と  $\varepsilon_2$  の与え方として、1 地点の値で計算対象全領域を代表させる方法と計算対象領域を平地、山沿い、道路上の 3 領域に分割して与える方法の比較を行ったが、明確な差は認められなかった。しかし、これは坑口付近の地形が平坦な D トンネルに対してのみ言えることであり、地形が複雑な場合には検証を行っていないので断定はできないが、一般的には複数地点での  $\varepsilon_2$  が得られるならば、計算対象領域を分割してそれぞれの  $\varepsilon_2$  を与えるのが望ましいと思われる。また、1 地点の値で代表させる場合においても、D トンネルのように坑口付近の地形が平坦な場合には B、C トンネルのように道路上の渦動粘性係数を大きくとるといった補正を行わなくても問題となる発散は道路上に発生しなかった。

坑口風速の与え方については、C トンネルで用いた手法がそのまま適用できた。

##### (2) 拡散計算

鉛直方向の拡散係数の与え方として、1 地点の値で全領域を代表させる方法と、3 領域に分割させて与える手法の比較を行ったが、予想された程の効果は認められなかった。しかし、向い風の条件の場合や、坑口より山側の濃度分布が重要視される場合には各領域ごとに使い分ける方が望ましいと考えられる。

換算風速の与え方として、C トンネルと同様の手法を用いたが、特別な問題も発生せず換算係数 F 値については各 Run について表-3.14 に示される最適値が得られた。

なお、無風の場合に関しては、本研究のプログラムの適用性に問題が残ることが判明した。

#### 参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所道路部トンネル研究室：「道路トンネル坑口付近における排気ガス拡散実験調査報告 (III)」土木研究所資料第 2217 号
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説，昭和 60 年 12 月
- 3) 建設省土木研究所道路部トンネル研究室：「道路トンネル坑口付近における排気ガス拡散実験調査報告 (II)」土木研究所資料第 1374 号
- 4) F. B. Smith: "Turbulence in the Atmospheric Boundary Layer" SIC. PROG., OXF Vol. 62. 1975 pp127.

## 第4章 結 論

本章においては、第3章で行ったA、B、C、Dトンネルを対象にした計算結果に基づき、本研究で開発した数値解析プログラムで必要とする境界条件および入力物性値の設定方法を提案するとともに、本プログラムの適用上の留意事項について述べる。

### 4.1 境界条件および入力物性値の設定方法についての提案

#### 4.1.1 流れ計算の諸定数

##### 1) 境界条件

流れ計算を行う場合に必要な境界条件は、計算対象領域となる3次元直方体状の空間を形成する6つの境界面における風速、風向、圧力と、坑口部における風速である。

6つの境界面における風速、風向、圧力の設定方法については以下のような手法を用いることにより、部分的な発散現象が現れにくく、比較的整合性の良い流れ場が得られる。

##### ①上空面境界

まず、上空面については風速の対数分布法則が成り立つものと仮定し、次式(4.1)で風速、風向を固定する。

$$\left. \begin{aligned} \text{上空面: } u_r &= \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \\ u &= u_r \cos \varphi, \quad v = u_r \sin \varphi, \quad w = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、 $\kappa$ : カルマン定数 (=0.41)

$\varphi$ : 計算対象領域 x 軸の正方向から左回りにとった角度

$u^*$ : 摩擦速度

$z_0$ : 地表面の粗度

$z$ : 地表面からの高さ

を表し、 $u^*$ 、 $z_0$ は基本的には計算対象領域の代表地点における鉛直方向の2点以上の一般風の実測値から  $u_r$  と  $1 \text{ m/s}$  の関係を最小二乗法により求め、係数、切片から求めるものとする。

##### ②地表面境界

次に地表面については次式(4.2)で風速、風向を設定する。

$$\text{地表面: } u=v=w=0(\text{m/s}) \dots\dots\dots (4.2)$$

##### ③側面境界

残りの4つの鉛直境界面については、鉛直境界面を流出側2面と流入側2面に分類し、流出側2面の風速、風向を式(4.1)により設定する。また、流入側の2面については圧力、風速勾配を次式(4.3)で設定する。

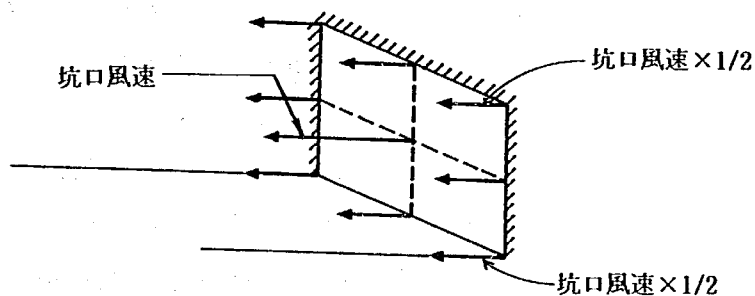
$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial n} &= \text{const}, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = \text{const} \\ \frac{\partial w}{\partial n} &= \text{const}, \quad p = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.3)$$

ただし、 $n$ ：境界面に対して垂直な方向の座標系

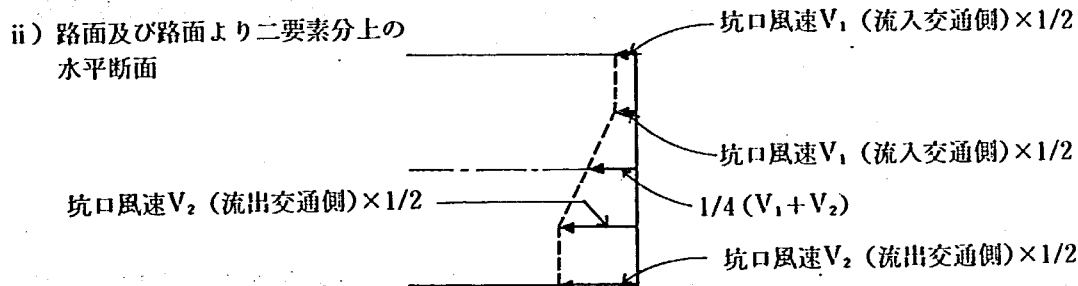
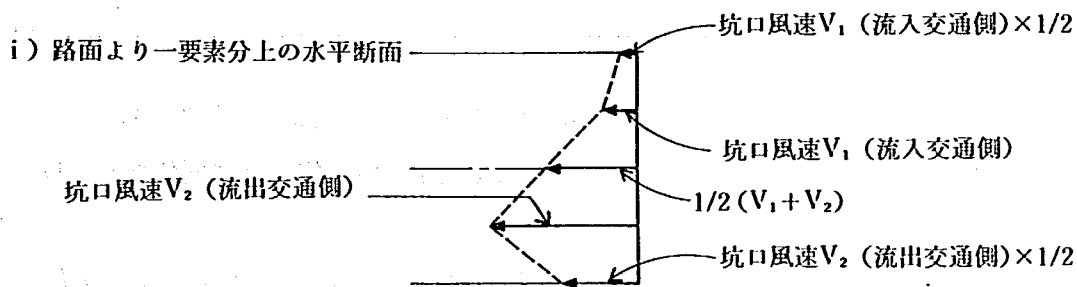
なお、一般風の風向が4つの鉛直境界面のうち2面に平行な場合には、この2面及び残りの2面のうち1面の合計3面の風速、風向を式(4.1)で設定し、残り1面の境界面については式(4.3)により、圧力、風速勾配を固定する。

#### ④坑口境界

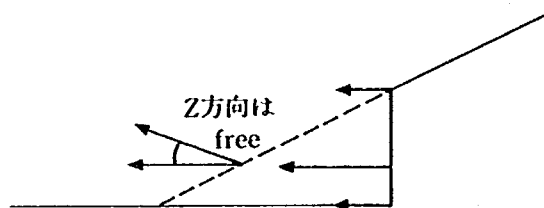
坑口部の風速の取り扱いについては、一方向交通時には、換気計算などから求まる坑口風速を代表させて図-4.1(a)(c)に示される形状で、対面交通時には道路を流入交通側と流出交通側に分離し、各車線に対応する坑口風速をそれぞれ代表させて図-4.1(b)(c)に示される形状で与える。



(a) 坑口面（一方向交通時）



(b) 坑口面（対面交通時）



(c) 坑口面よりも一要素分前面（一方向時，対面交通時共通）

図-4.1 坑口風速の与え方

## 2) 渦動粘性係数

鉛直方向の渦動粘性係数の設定方法は，基本的には1)境界条件の設定の場合に求めた摩擦速度  $u^*$ ，粗度  $z_0$ を用いて次式

$$\epsilon_z = \kappa u^* (z + z_0) \dots\dots\dots (4.4)$$

で与える。なお，式(4.4)中の  $u^*$ ， $z_0$ を求めるにあたって必要な風速データが複数地点で得られている場合には，計算対象領域を分割して，分割された各領域ごとに  $\epsilon_z$ を求め，それぞれ与える方がより望ましいが，坑口付近の地形が平坦である場合には，代表的な1地点のデータをもとに得た  $\epsilon_z$ を用いることとしても結果に与える影響は少ない。しかし，坑口部での風速が大きい，あるいは地形の起伏が激しい場合には計算結果に坑口部で部分的な発散現象が現れやすくなる。このような場合には道路上の  $\epsilon_z$ に他の領域の10倍程度のものを与えてやれば，部分的な発散現象がかなり解消される。

水平方向の渦動粘性係数の設定方法は，パスキルチャートから安定度別に拡散幅  $\sigma_y$ を読み取り，次式(4.5)により計算対象領域全体に一律に与えるのがよい。

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2t} = \frac{\sigma_y^2}{2x} \times u \dots\dots\dots (4.5)$$

ただし， $x=100\text{ m}$ とし， $u$ については1地点における一般風の風速を代表させる。

なお，拡散幅  $\sigma_y$ を求めるにあたり，便宜上，大気安定度を実際の安定度に関係なく，Dと見なしても実用上，大きな問題はない。

また，坑口部での風速が大きい，地形の起伏が激しいなどの理由により坑口部に部分的な発散現象が現れやすい場合には道路上の  $\epsilon_z$ と同様に道路上の  $\epsilon_x$ ， $\epsilon_y$ も他の領域よりも大きく与えることによりこれら部分的な乱れの発生がかなり解消される。

### 4.1.2 拡散計算の諸定数

#### 1) 境界条件

拡散計算を行う場合に必要な濃度に関する境界条件は以下のように与えるのがよい。

##### ①側面境界および上空面境界

坑口濃度の影響を受けない風上側の鉛直境界面または辺に対しては

$$c=0 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

その他の鉛直境界面及び上空面については

$$\frac{\partial c}{\partial n} = \text{const} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

## ② 地表面境界

地表面は反射境界すなわち

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

とする。

## ③ 坑口境界

坑口濃度については計算上の坑口部分に含まれるすべての節点に対して境界条件として均一の濃度値を与えればよい。

### 2) 拡散係数

鉛直方向の拡散係数  $k_z$  の与え方は基本的には鉛直方向の渦動粘性係数  $\epsilon_z$  の与え方と同様に、次式(4.9)で与える。

$$k_z = \kappa u^* (u + z_0) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

上式中の  $u^*$ ,  $z_0$  を求めるにあたり複数地点での風速データが得られている場合には、計算対象領域を分割して、分割された各領域ごとに  $k_z$  を求め、それぞれ与えることを原則とするが、ケースによっては複数地点での  $k_z$  を用いることの効果がそれほど期待できない場合もある。しかし、坑口からの排気ガス流出方向に対して風向が向い風となる場合や坑口よりも山側の濃度分布が重要となる場合には  $k_z$  を各領域ごとに与えることは効果的であると思われる。

1 地点での風速データしか得られていない場合には、この地点のデータから求まる  $k_z$  を計算対象全領域に一律に与えることになる。この場合、計算対象となるケースによっては後述する自動車走行の影響を考慮して、道路上の  $k_z$  を他の領域よりも大きくとるといったような補正が必要となる。

水平方向の拡散係数  $k_x$ ,  $k_y$  については水平方向の渦動粘性係数  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  と同様に次式のように与える。

$$k_x = k_y = \frac{\sigma_y^2}{2x} \times u \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

なお上式中の拡散幅  $\sigma_y$  は、式(4.5)の場合と同様に大気安定度に基づきルチャートより読み取るものであるが、水平方向の拡散は乱れ強さによる乱流拡散よりも平均風速による移流拡散の方が主であると考えられるため、大気安定度は実際の大気安定度にかかわらず  $D$  として式(4.10)により  $k_x$ ,  $k_y$  を求めた方が整合性の良い結果が得られる。

### 3) 自動車走行の影響

自動車走行の影響としては、道路上において自動車走行による乱れに起因する拡散が発生すること

と、道路上において自動車走行による風が発生することの2点が考えられる。

前者の影響の取り扱いに関しては、風向が自動車走行方向に対して向い風、横風の場合には、この影響が特に大きくなるため、道路上の鉛直方向の拡散係数を特別に大きくすることにより実測値との整合性が向上するケースがある。しかし、道路上の拡散係数も含め、拡散係数に関する明確な情報が得られていない現段階ではこのような操作を行うことにより、整合性が逆に悪くなるケースも多い。したがって、現段階においては基本的には自動車走行による乱れに起因する拡散の影響については特別な考慮をせず、整合性があまりにも悪い場合のみ道路上の鉛直方向の拡散係数を大きくとることを検討する方法が妥当であると考える。

後者の影響の取り扱いに関しては、次式(4.11)により自動車走行に起因する風速を換算し、流れの計算後、計算結果の道路上にこの換算風速を図-4.2に示される形で重ね合せる方法を採用。

$$U_r = \frac{\sqrt{A} \times V}{L} \times F \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

ただし、 $U_r$ ：換算風速 (m/s)

$A$ ：等価抵抗面積 (m<sup>2</sup>)

大型車混入率を  $r$  とすれば  $A = 5.37 \times r + 1.07 \times (1 - r)$  で表される。

$V$ ：車速 (m/s)

$L$ ：車頭間隔 (m)

$F$ ：換算係数

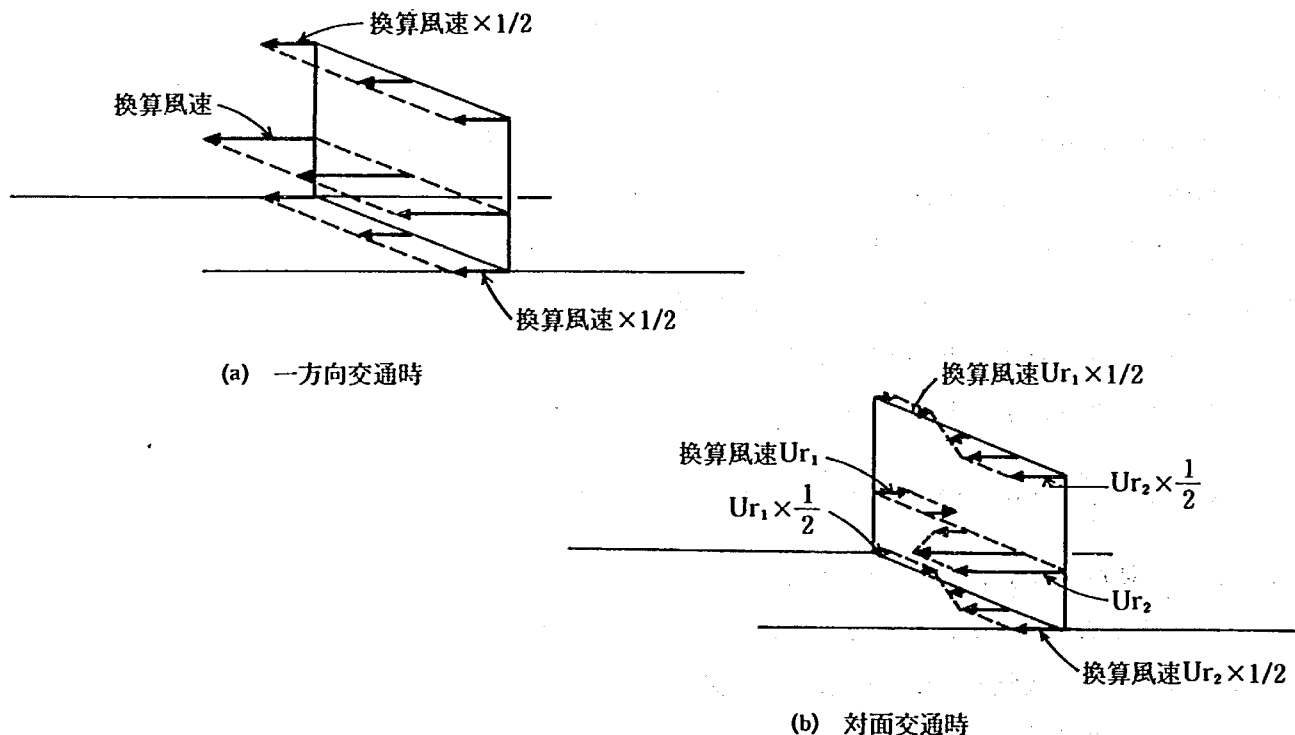


図-4.2 換算風速の与え方

なお、上式中の換算係数  $F$  は風速及び自動車走行に対する一般風の相対風向により決まる係数で、これまでの計算結果から概ね表-4.1 に示される数値を用いればよいものと考えられる。

表-4.1 車速の換算係数  $F$  値

| 風速<br>風向 | 0~1 m/s         | 1~3 m/s | 3 m/s 以上 |
|----------|-----------------|---------|----------|
| 向かい風     | 2 <sup>a)</sup> | 10~20   | 10~30    |
| 横 風      |                 | 4~20    | 10~30    |
| 追 い 風    |                 | 0~ 4    | 0~10     |

注) 本研究で解析の対象とした微風時の現場計測 Run は風向変動が激しく、風向不定であった。

## 4.2 適用上の留意事項

本研究で開発したプログラムの適用について前節に述べたが、これらの結論はこれまでの研究成果を基にひとつの私案を示したものであり、現場に適用する場合にはさらに以下の点に留意する必要がある。

- 1) 計算対象となるトンネルの坑口付近の地形の起伏が著しい場所等に発生する部分的な流れは計算上追うことができないため、このような場所における計算結果の誤差は大きくなる傾向がある。
- 2) 計算を行う場合に必要となる渦動粘性係数、拡散係数に関しては、現段階では明確な評価方法は定まっておらず、本研究で提案する手法も限られた実測データとの整合性の判断から当面定めたもので絶対的なものではない。現に、渦動粘性係数、拡散係数の値が不適当であることが原因と見られる計算値の不整合がいくつかのケースで見られている。したがって、本研究で提案する手法により渦動粘性係数、拡散係数の一応の値を求めることはできるが、今後、拡散現象の理学的な解明、実測データの蓄積に基く検証を行い、必要とあれば本研究で提案する設定方法を適宜修正する必要がある。
- 3) 微風速で風向が不定 (calm) の場合については、本研究で開発したプログラムの適用に問題点が残る、今後の検討が必要である。
- 4) 本研究で用いた手法は検証に用いた実測データが時間変動も含めた平均的な値であることを前提として検討している。しかし、実際には風速、風向とも時間とともに変動しているわけで、このような時間変動の取り扱いについては今後の課題として残る。

## 付近の排気ガス拡散状況の予測

道路部トンネル研究室

中部地方建設局：猪熊 明

## 要 旨

本報告書は、これらの要因をある程度考慮することのできる坑口付近の大気汚染の予測手法の一つとして、3次元有限要素法を適用した汚染物質の拡散予測プログラムの開発を行うとともに、実際のトンネルで実施された現場拡散実験を対象にした試算計の結果を紹介するものである。結論として、本プログラムにより得られる計算値は実測値と全体的には整合性の良いものであることが確認された。

キーワード：トンネル，排出ガス，拡散現象，流体力学，3次元有限要素法

郵便はがき

$$\boxed{3} \boxed{0} \boxed{5} - \boxed{\phantom{0}} \boxed{\phantom{0}}$$

四門切下手をい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地  
建設省土木研究所  
トシネル研究室御中

No. 001

No. 001

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料第 2308 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

○