

# 大気汚染モデルについての考察

成 久 洋 之

岡山理科大学 電子理学科

(昭和59年9月27日 受理)

## 1. まえがき

大気汚染の拡散濃度を予測算定するための計算モデルとしては種々のものが提案されているが、大別すると分布型と差分型とに分れる。分布型モデルはガウス分布を仮定したもので plume model と puff model とが考えられている。差分型モデルは拡散現象のシミュレーションモデルであるため、ある地域の濃度分布を計算するのにかなりの時間がかかる。

一般に分布濃度の算定については、対象とする時間と地域的な広さによりモデル構造は異ってくる。したがって、対象如何によって差分型にするかあるいは分布型にすべきかを使用目的に合致したものとしなければならない。この際、各種モデルの特徴が十分に活かされるように算定モデルを設計すべきであり、分布型と差分型とを適当に混合させたより効率的モデルを考慮すべきである。

本論文では、道路附近における排気ガスの濃度算定において、分布型モデルが使用できるかどうかの検討と、使用可能だとすれば如何なる使い方が望ましいかについて記述するものである。

分布型モデルとして Sutton の拡散方程式に従った分布濃度算定モデルを使用するが、これは本来、工場等の煙突から多量の排煙を出すような現象を対象としたものであるため、自動車排ガス量の少ないしかも拡散地域の狭い範囲の場合にうまく適用しうるかどうかは極めて問題である。

## 2. sutton の分布型モデル

Sutton の拡散方程式はつぎの(1)式で与えられる。

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

ただし、 $C$ ；平均濃度 (ppm)， $Q$ ；煙源の強さ (ppm)， $u$ ；平均風速 (m/s)， $H$ ；煙源の高さ (m)， $\sigma_y$ ； $y$  方向の標準偏差 ( $y$  方向の拡散巾)， $\sigma_z$ ； $z$  方向の標準偏差 ( $z$  方向の拡散巾) をそれぞれ表わしており、煙源と座標軸との関連は図 1 で与えられる。

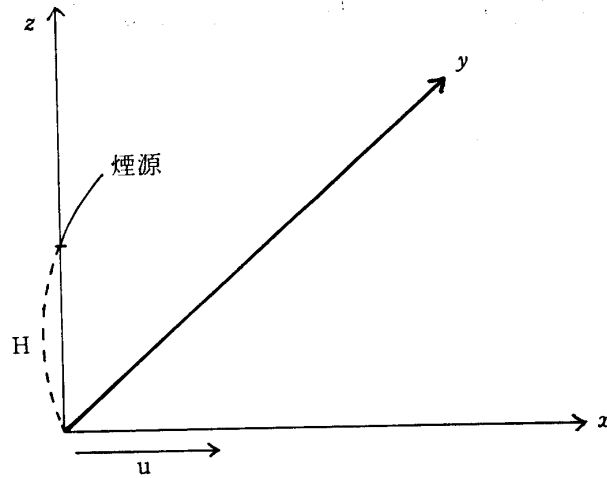


図1 煙源と風速と座標軸

なお、拡散巾  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  については大気の安定度や煙源の高さにより異なるが次式が与えられている。

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} C_y^2 x^{2-n}, \quad \sigma_z^2 = \frac{1}{2} C_z^2 x^{2-n} \quad (2)$$

ただし、 $n$ ,  $C_y$ ,  $C_z$  は大気の安定度等により定まる定数であり、たとえば、煙源高を10m とするとき、

大気；不定定,  $n=0.20$ ,  $C_y=0.37$ ,  $C_z=0.21$

；中立,  $n=0.25$ ,  $C_y=0.21$ ,  $C_z=0.12$

；安定,  $n=0.33$ ,  $C_y=0.12$ ,  $C_z=0.074$

となっている。

(1)式での分布に従う時、風下方向 ( $x$  軸方向) における最大着地濃度  $C_{max}$  とその距離  $x_{max}$  はそれぞれ

$$C_{max} = \frac{2Q}{\pi euH^2} (C_z/C_y) \quad (3)$$

$$x_{max} = \left( \frac{H}{C_z} \right)^{\frac{2}{2-n}} \quad (4)$$

として考えられる。

この濃度分布を検討するために、いま煙源濃度  $Q$  を 3.4704 ppm, 煙源高  $H=10.0$  m, 風速  $u=3.3$  m/s として計算すると図2から図4のようになる。つまり、大気の安定度が高い程濃度の最大点は風下の方に移っている事がわかる。つぎに各断面図における等濃度曲線を調べてみよう。図5から図7は大気が不安定 ( $n=0.2$ ) の場合の濃度分布を  $z=0$ , 10, 20に分けて、 $x-y$  平面における等濃度曲線を示している。 $z=10$  では原点近くに高濃度点が存在するのでその状況を拡大図を添えて示している。図8から図10は大気の安定度が中立の場合、図11から図13は大気が安定な場合 ( $n=0.33$ ) の  $x-y$  平面における等濃度曲線を示すものである。さらに、図14から図16は  $x-z$  平面における等濃度曲線を大気

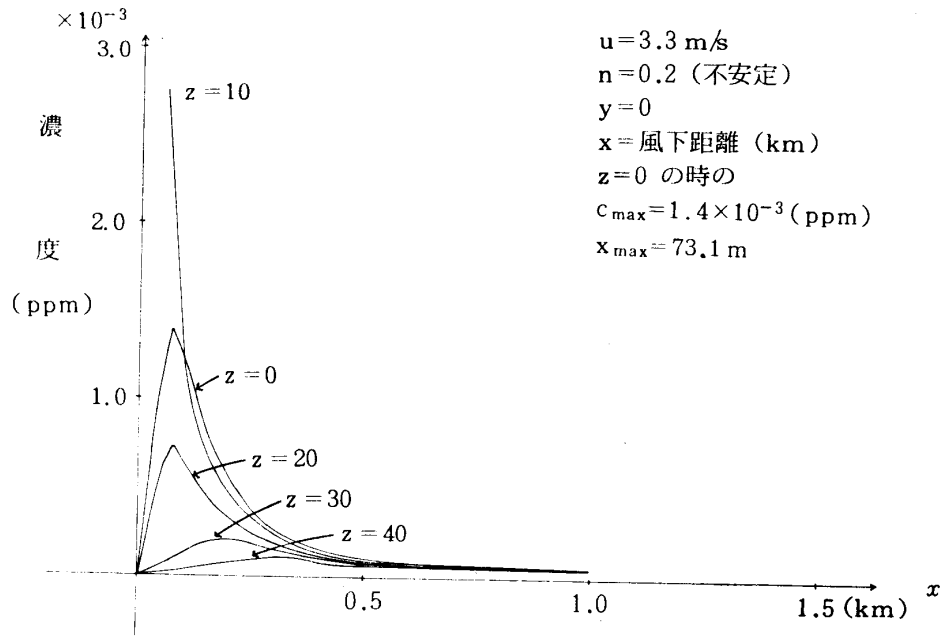


図 2

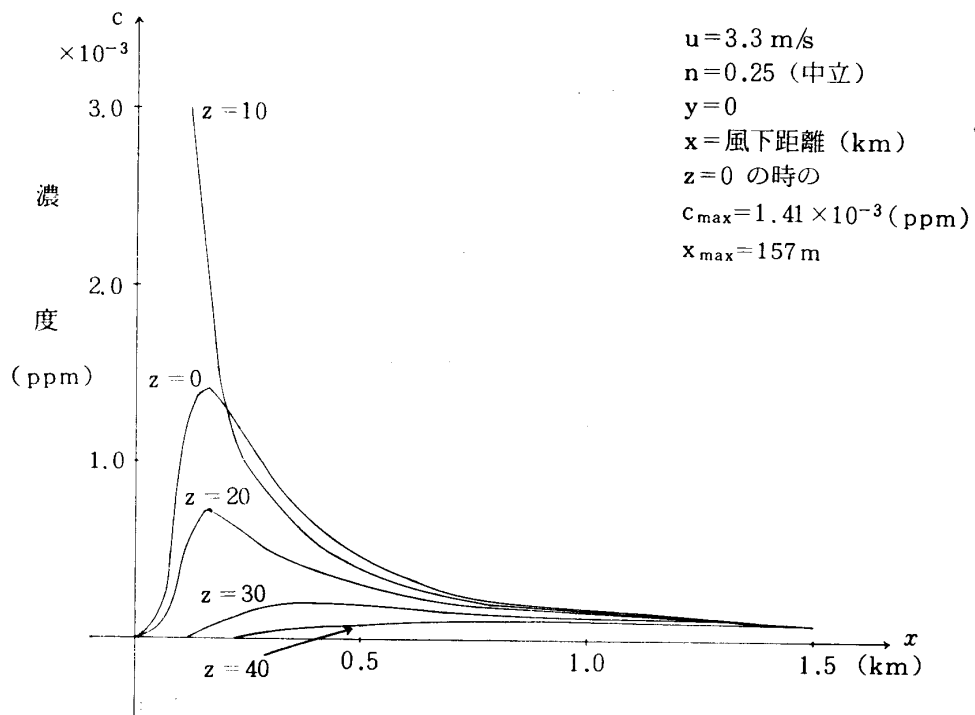


図 3

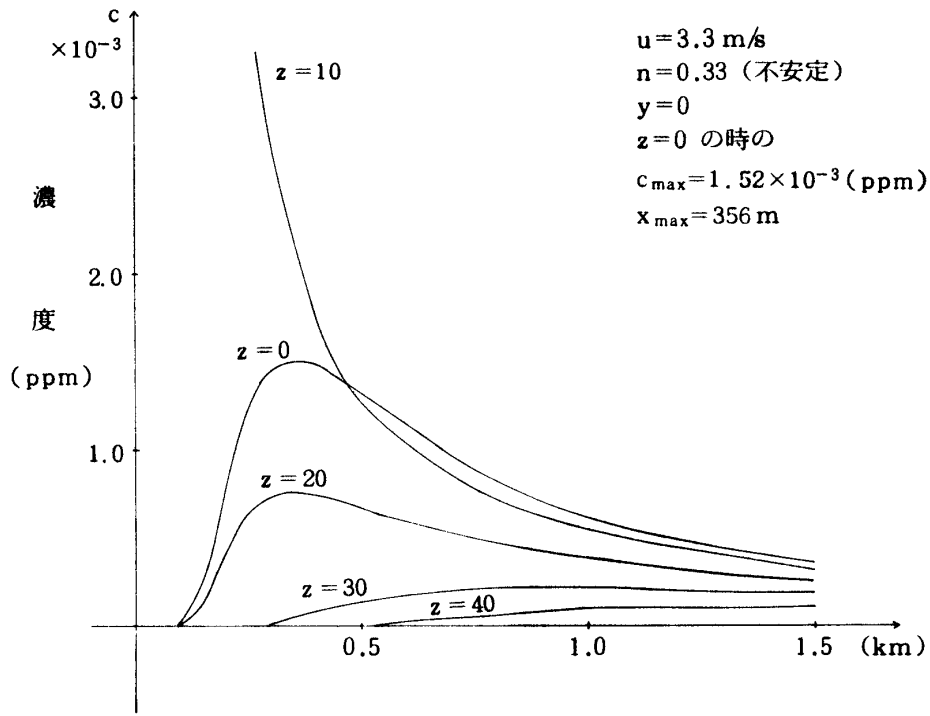


図 4

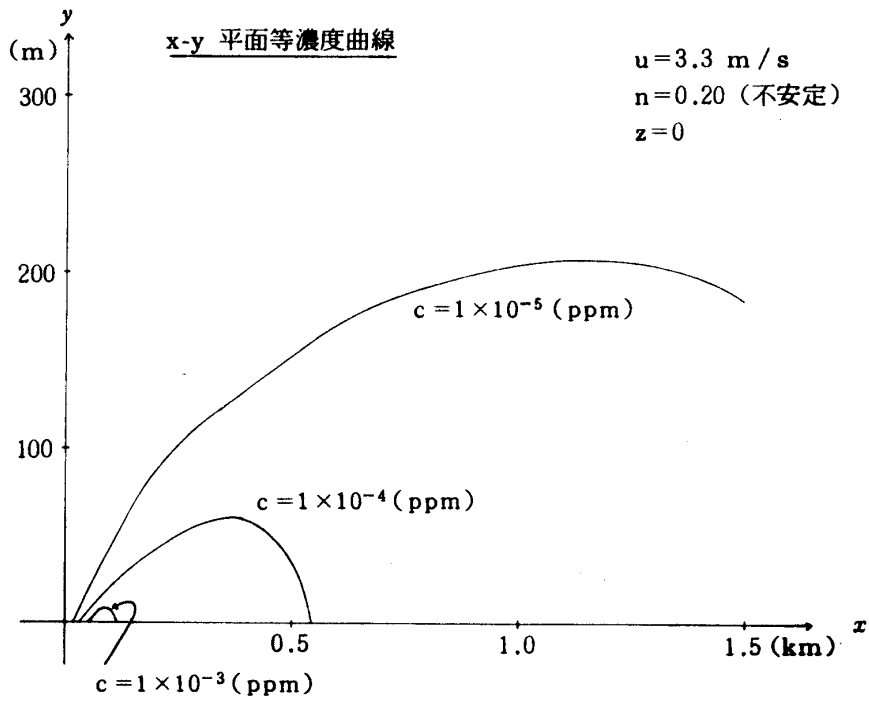


図 5

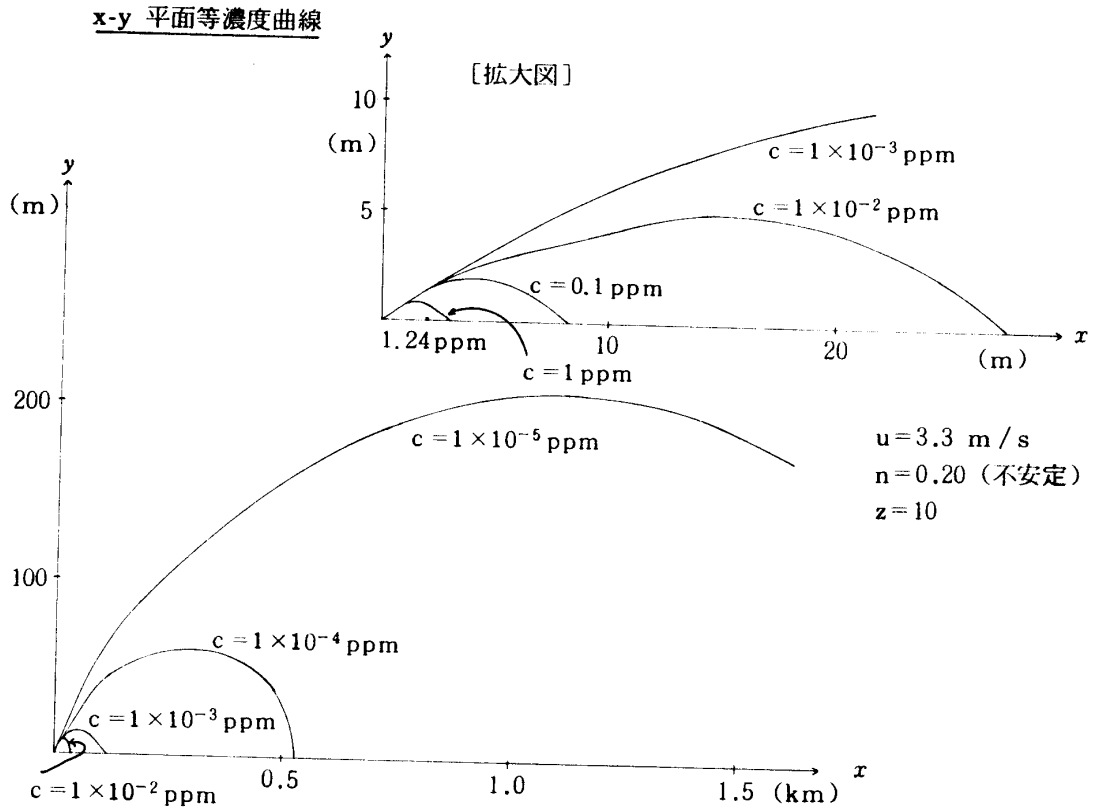


図 6

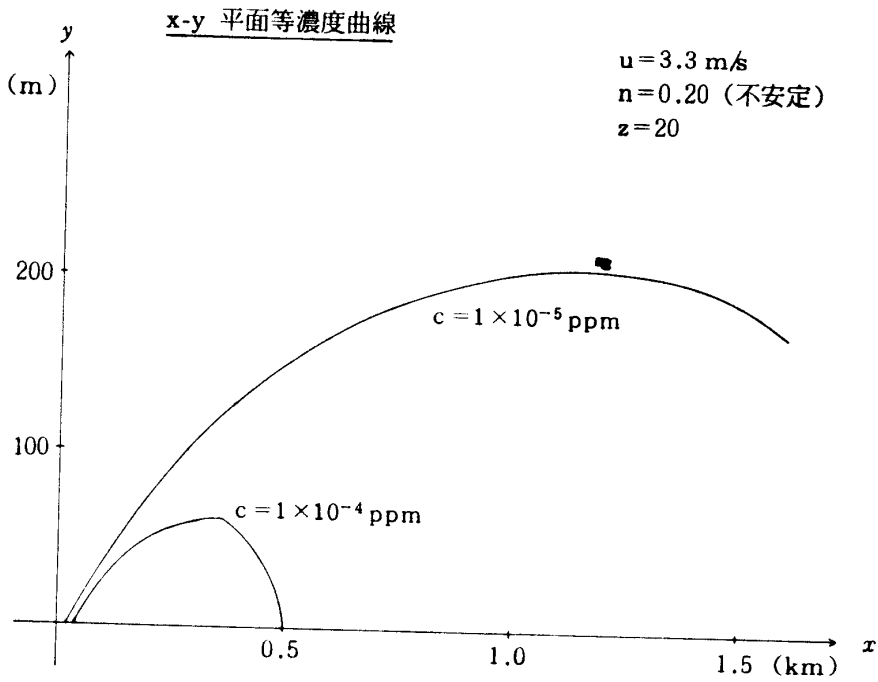


図 7

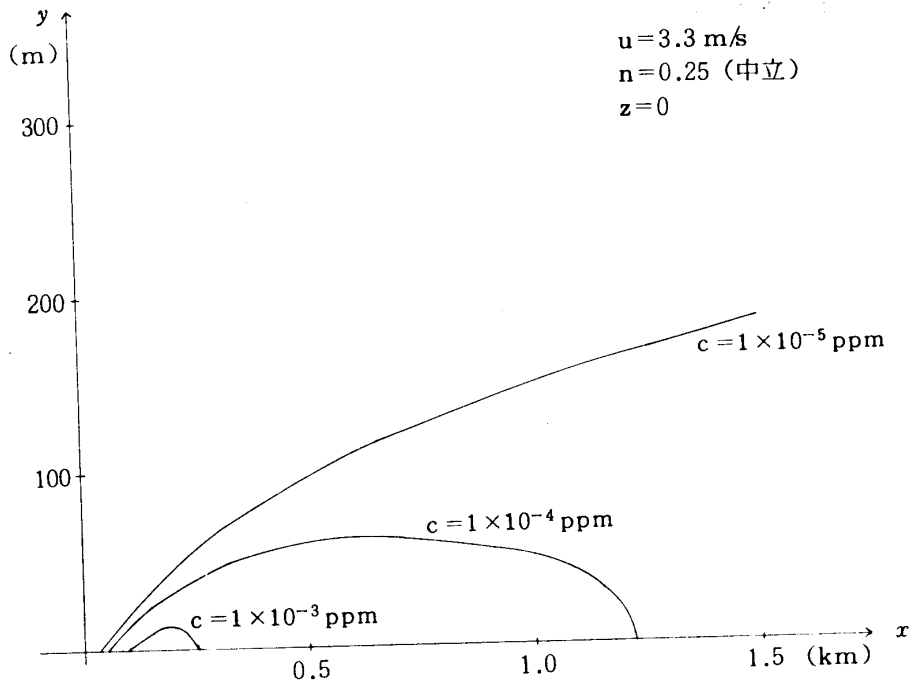


图 8

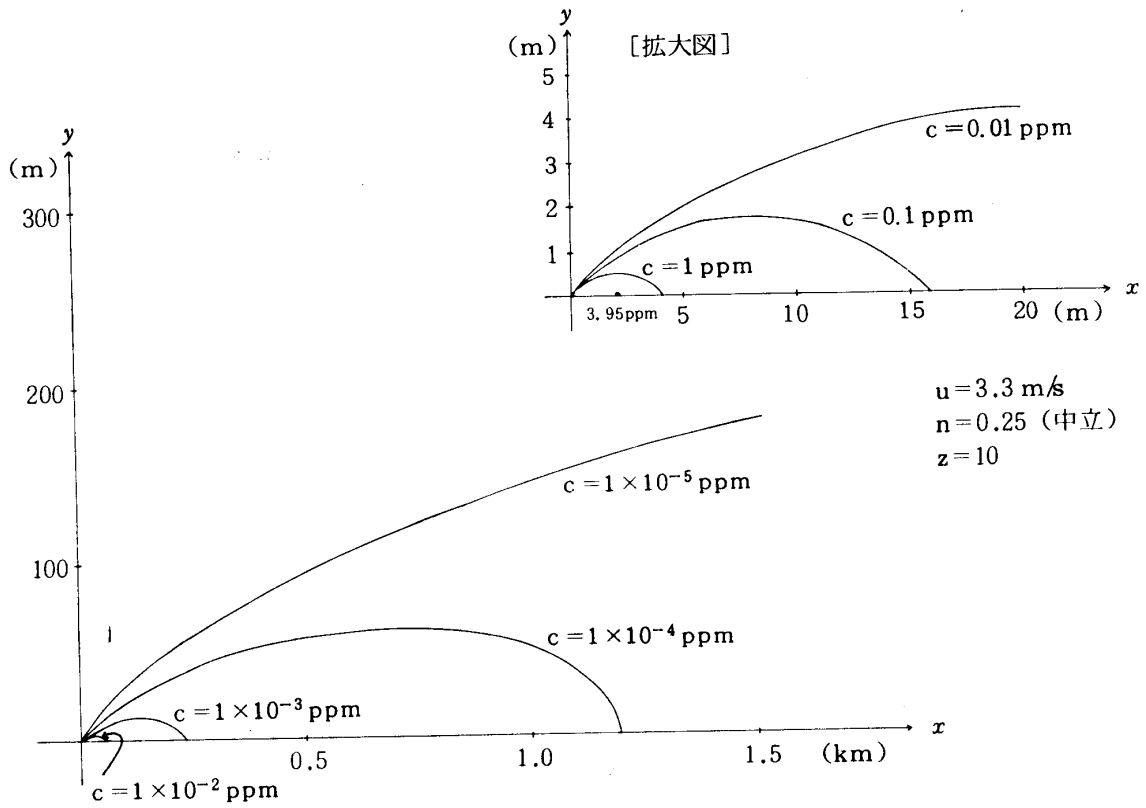


图 9

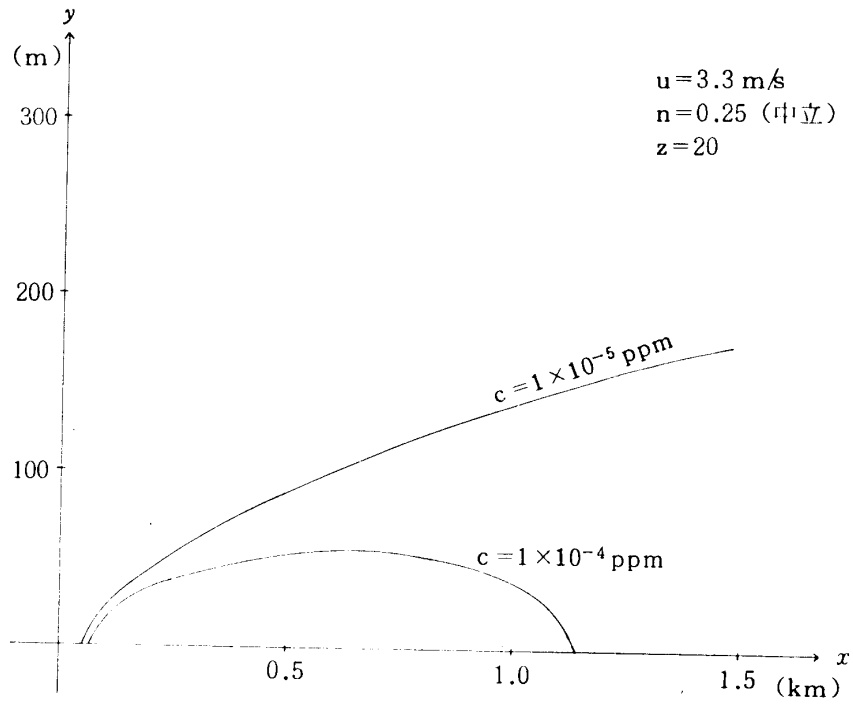


図10

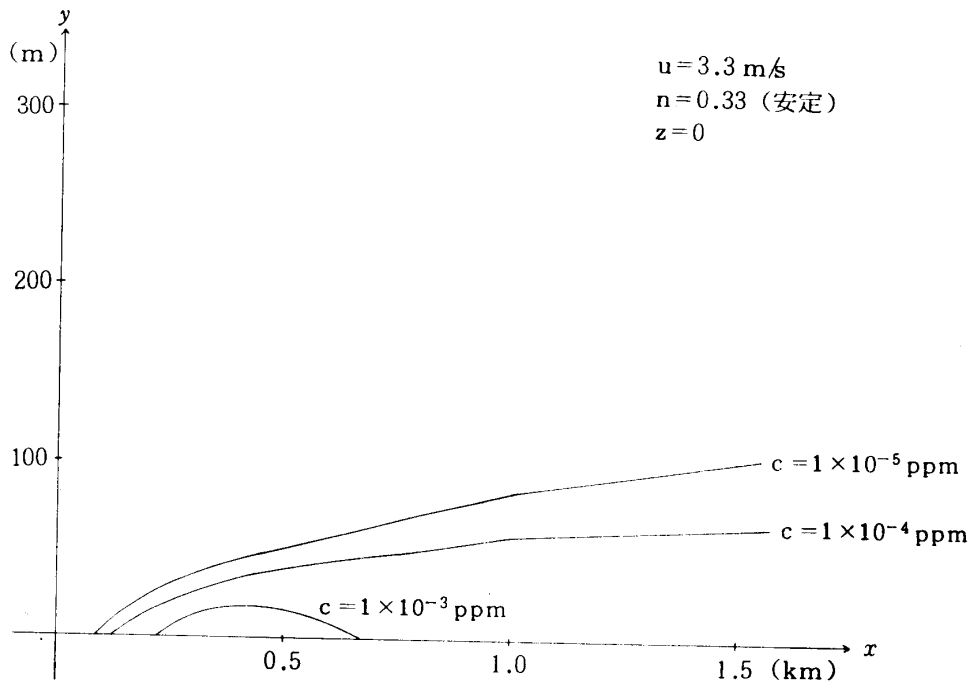


図11

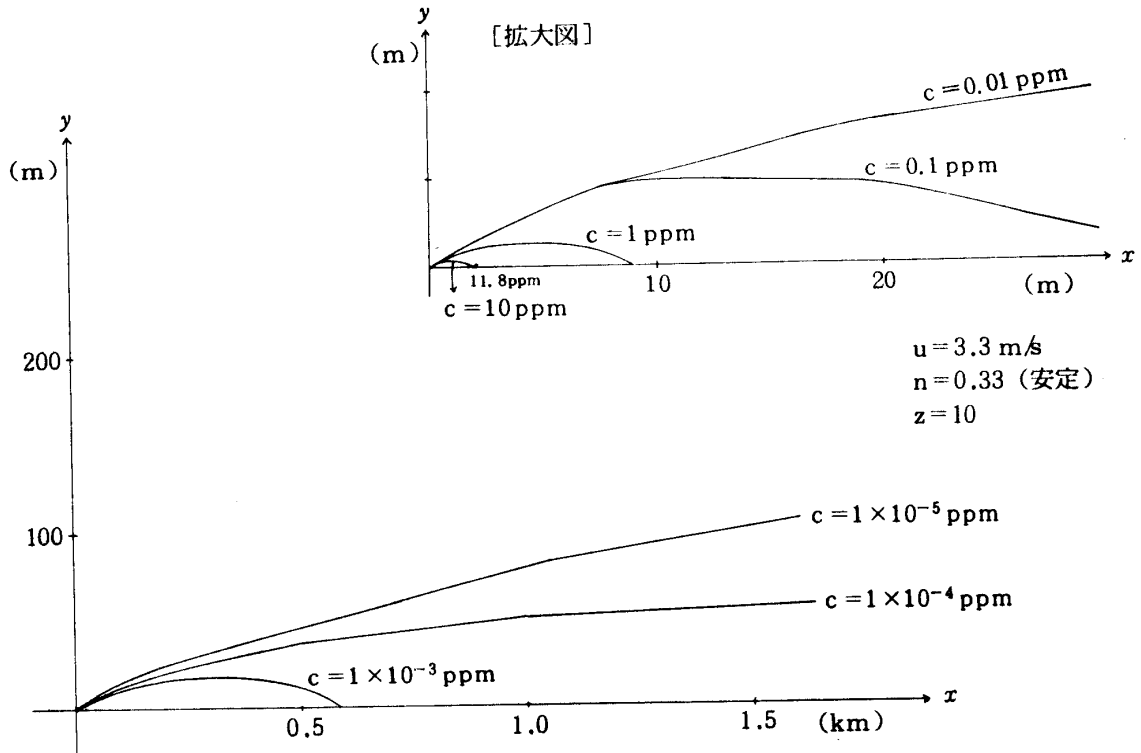


図12

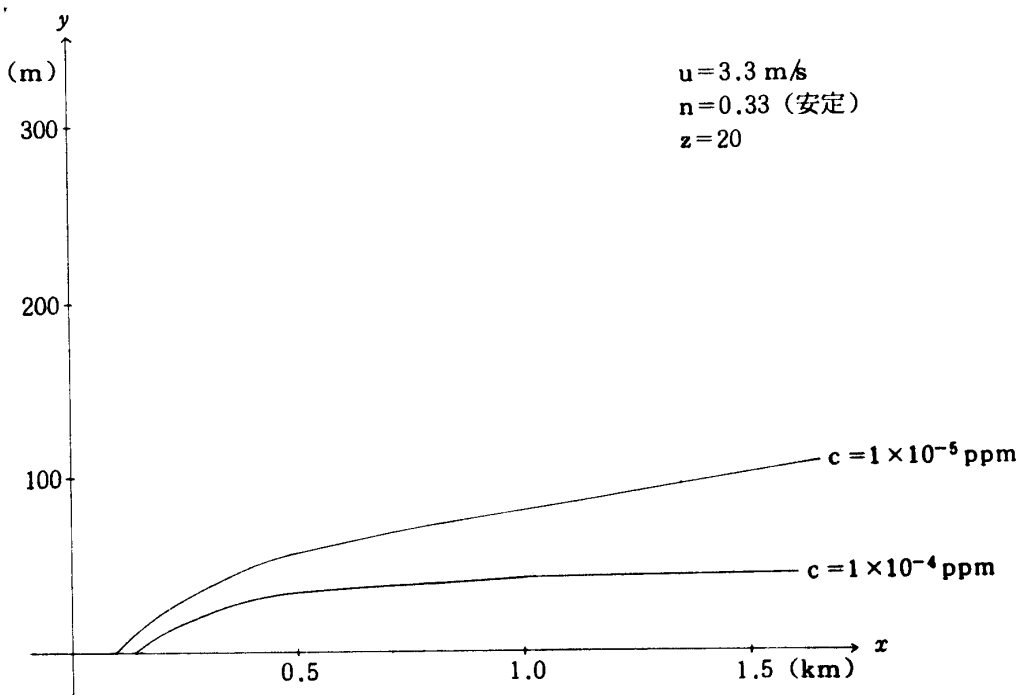


図13



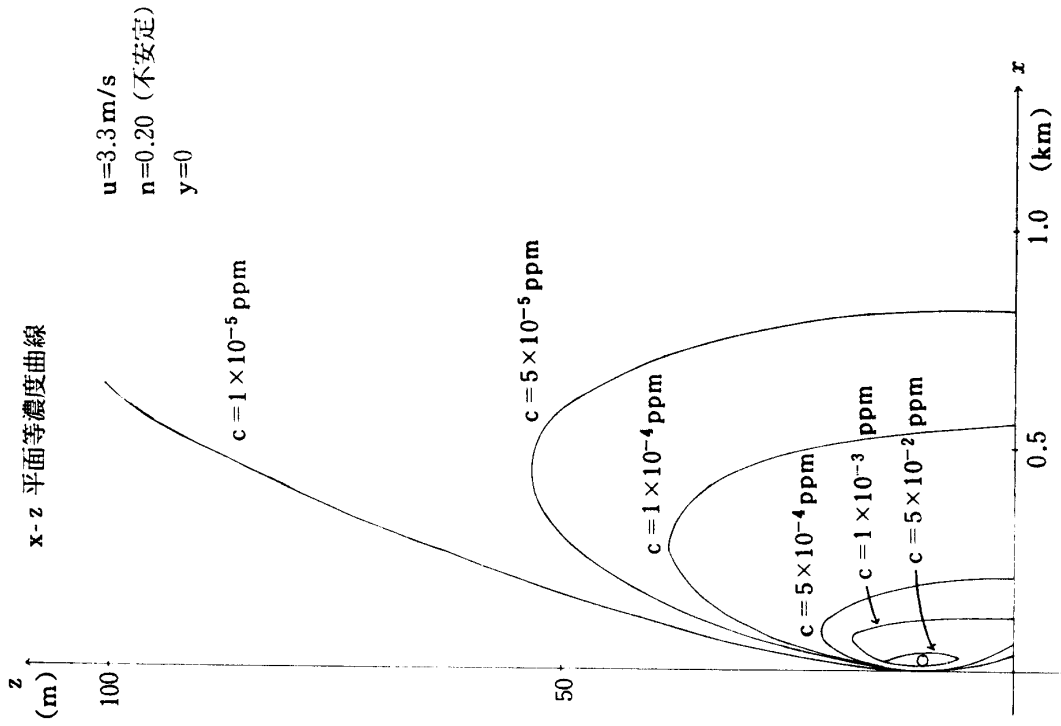


図14

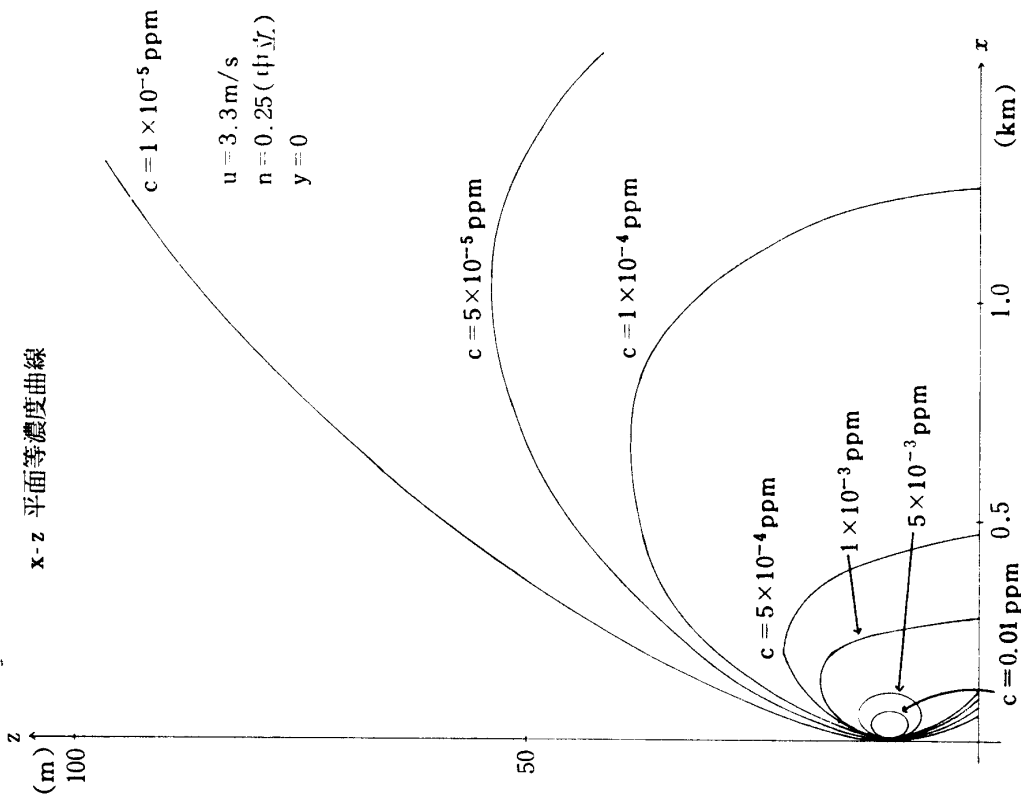


図15

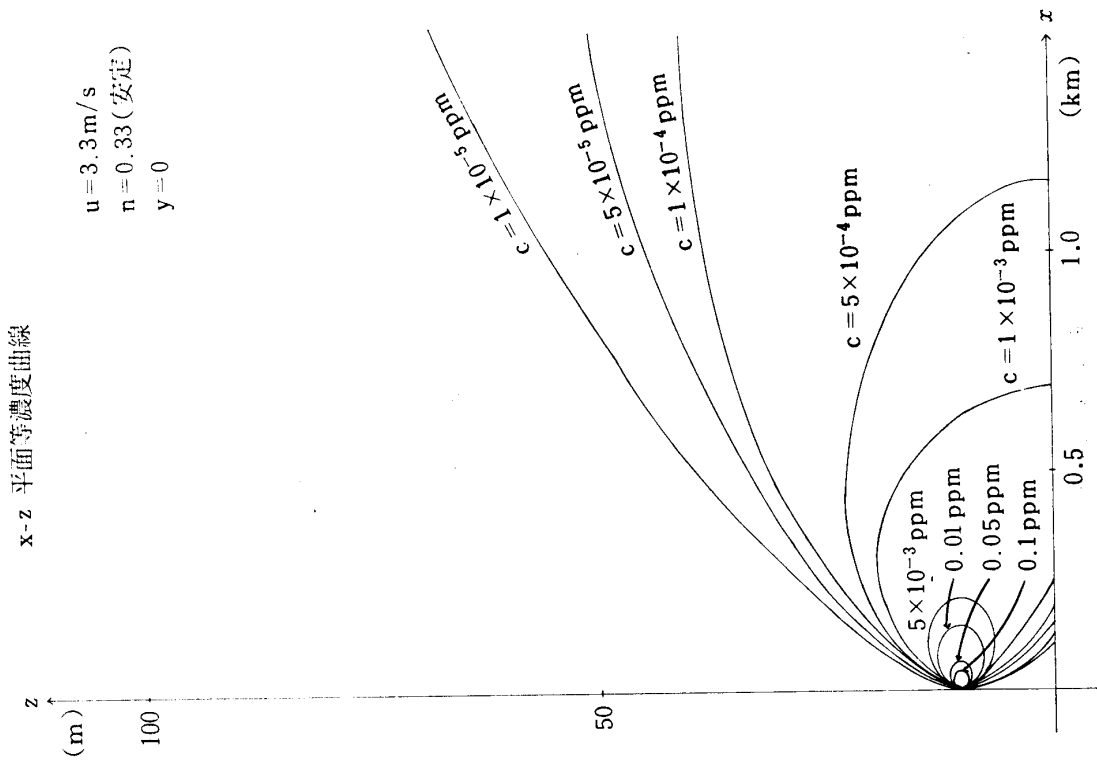


図16

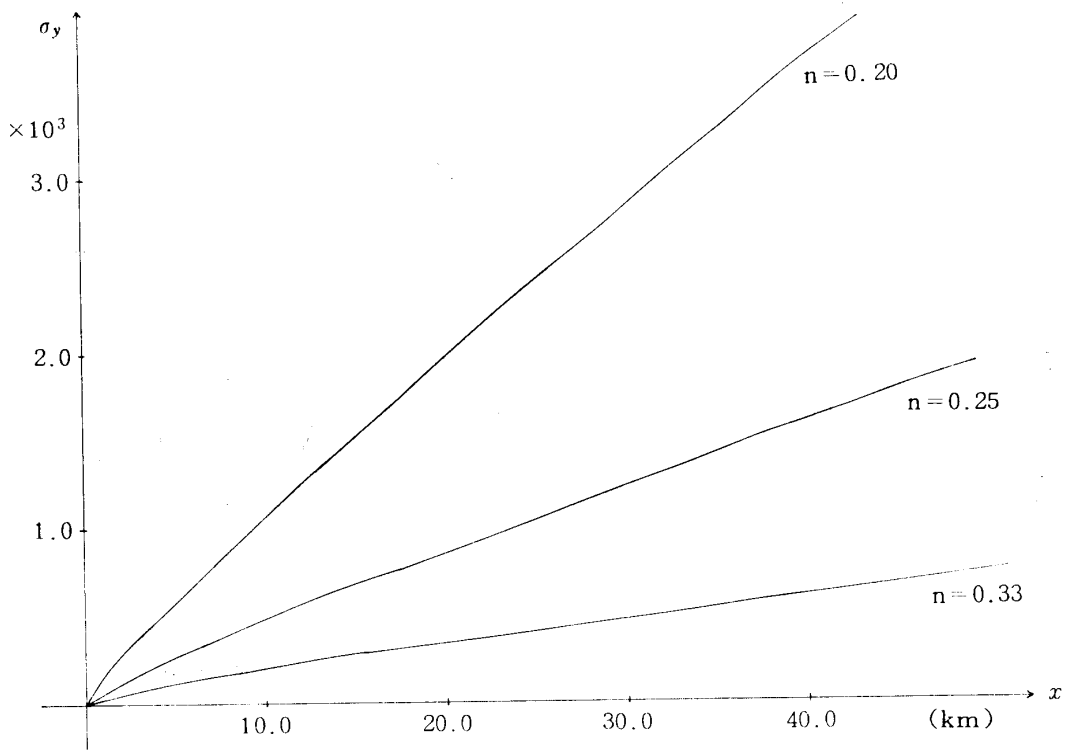


図17

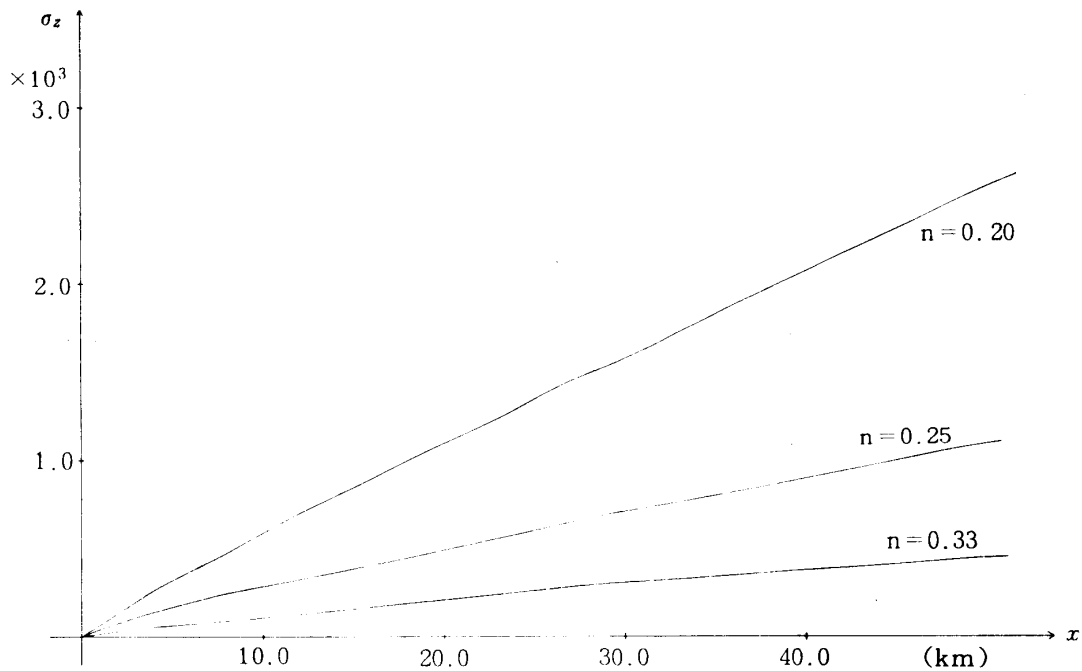


図18

の安定度毎に与えたものであるが、安定状態になるにつれて拡散の状況が小さくなっている事がわかる。

以上において、Sutton の分布型モデルでの濃度算定値を示したが、全体の形はガウス分布に従っており別に問題はないが煙源の近傍でいささか気になる濃度となっている。たとえば、煙源においては座標  $(0, 0, H)$  であるが、(2)式より  $\sigma_y = \sigma_z = 0$  となるので  $Q/(2\pi\sigma_y\sigma_z u)$  の値は  $\infty$  となり、濃度  $C = \infty$  となる。さらに、図9では、座標  $(2, 0, 10)$  において  $n=0.25$  (大気の安定度中立) の時、 $C=3.95$ 、また、 $n=0.33$  の時、 $C=11.8$  になっており、排ガス量  $3.4704 \text{ ppm}$  より大きな値を示している。特に、図10では煙源から  $x$  方向  $4 \sim 5 \text{ m}$  付近まで排ガス量より大きな濃度になっており、現実的でないといえよう。なお図17、図18は大気の安定度と風下距離とが拡散巾に与える影響の度合を示したものである。

### 3. 有効煙突高度

Sutton の分布型モデルでは大気の安定度によりその分布濃度はかなり異なる。表1は拡散巾決定パラメータ値を各煙源高度および大気の安定度毎に与えたものである。これによると、パラメータ値は煙源高度により大きく変っている。そこで、煙源高度決定のための有効煙突高度を如何に算定するかは極めて重要である。

#### 3.1 Bosanquet の煙突高度

煙突から排出されたガスは運動量と浮力とにより上昇するため排ガスの拡散式における

表1 サットンの拡散パラメータ値

煙源高度	n=0.2		n=0.25		n=0.33		n=0.5	
	$C_y$	$C_z$	$C_y$	$C_z$	$C_y$	$C_z$	$C_y$	$C_z$
0	0.37	0.21	0.21	0.12	0.21	0.074	0.08	0.047
10	0.37	0.21	0.21	0.12	0.12	0.074	0.08	0.047
25		0.21		0.12		0.074		0.047
30		0.20		0.11		0.070		0.044
45		0.18		0.10		0.062		0.040
60		0.17		0.095		0.057		0.037
75		0.16		0.086		0.053		0.034
90		0.14		0.077		0.045		0.030
105		0.12		0.060		0.037		0.034

定式を提案している。有効煙突高度を  $H_e$ 、運動量上昇高度を  $H_m$ 、浮力上昇高度を  $H_l$ 、実煙突高を  $H_0$  とすると、

$$H_e = H_0 + 0.65 (H_m + H_l) \quad (5)$$

$$H_m = \frac{4.77}{1 + \frac{0.43u}{V_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_{v1} V_g}}{u} \quad (6)$$

$$H_l = 6.37 g \frac{Q_{v1} \Delta T}{u^3 T_1} \left( \log J^2 + \frac{2}{J} - 2 \right) \quad (7)$$

$$J = \frac{u^2}{\sqrt{Q_{v1} V_g}} \left( 0.43 \sqrt{\frac{T_1}{g(d\theta/dz)}} - 0.28 \frac{V_g}{g} \frac{T_1}{\Delta T} \right) + 1 \quad (8)$$

として与えられる。ただし、 $u$ ；風速 (m/s)， $V_g$ ；吐出速度 (m/s)， $T_1$ ；大気温度 ( $^{\circ}\text{k}$ )， $Q_{v1}$ ；温度  $T_1$  における排ガス量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )， $\Delta T$ ；排ガス温度と  $T_1$  との差， $g$ ；重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )， $d\theta/dz$ ；大気の温位勾配 ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) をそれぞれ意味する。なお  $Q_{v1}$  については煙突直径を  $R(\text{m})$ 、排ガス温度を  $T_2(^{\circ}\text{k})$  とすると

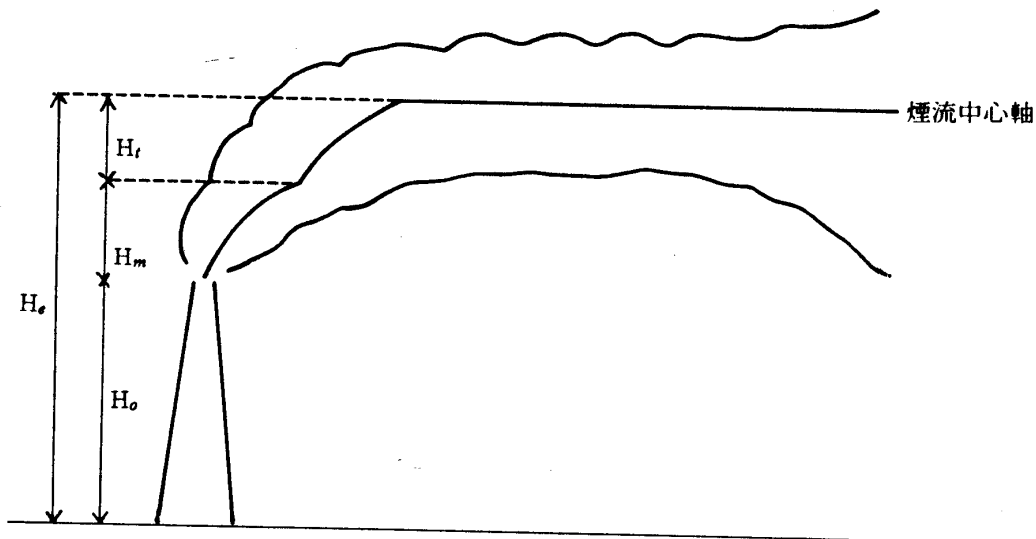


図19 有効煙突高

$$Q_{v1} = \frac{\pi}{4} R^2 V_g T_1 / T_2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (9)$$

となることが知られている。

### 3.2 煙突高度の算定

Bosanquet の有効煙突高度算定例につき検討する。大気温度  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ 、煙突直径  $R = 1.5\text{m}$ 、重力加速度  $g = 9.8\text{ m/s}^2$  として、風速  $u$ 、吐出速度  $V_g$  を一定にしたときの各風速における排ガス温度と上昇高度との関係をプロットしたものである。一般に風速  $u$  が大きくなると、運動量上昇  $H_m$  は減少するが浮力上昇高度  $H_i$  は増大する。この場合、 $H_i$  の増大量の方が  $H_m$  の減少量より大きいので全体として排ガス温度の増加とともに大きくなることがされている。図23から図25までは風速  $u$  を一定にしたときの各吐出速度 (10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s, 50m/s) での排ガス温度と上昇高度との関係をプロットしたものである。図23では、図20の場合と同様に、排ガス温度  $T_2$  が上昇すれば  $H_m$  に減少する傾向を示している。

図27から図29において吐出速度  $V_g$  を一定にした場合の上昇高度と風速との関連性を示している。極めて自然な傾向であるが、風速が大きくなれば上昇高度は減少するし、排出温度  $T_2$  が増加すれば浮力上昇高度は増大し、運動量上昇高度に低下する。図30から図32においては排出ガスの温度を一定にした時の風速と上昇高度との関係を示すものである、すなわち、風速が大きくなれば、上昇高度は低下し、吐出速度  $V_g$  が大きくなれば運動量上昇は大きくなるが浮力上昇高度  $H_i$  は低下する。図33は風速を一定にした時の各排ガス

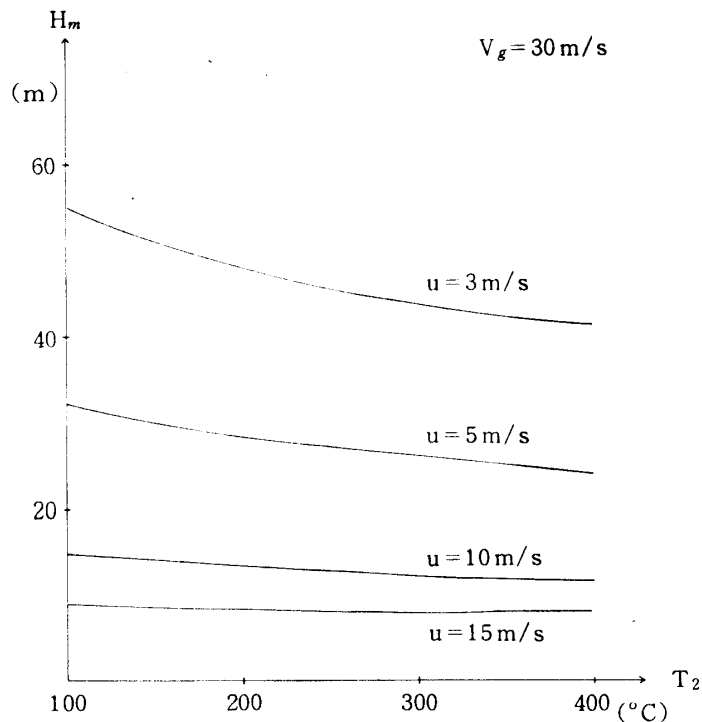


図20 運動量上昇と排ガス温度

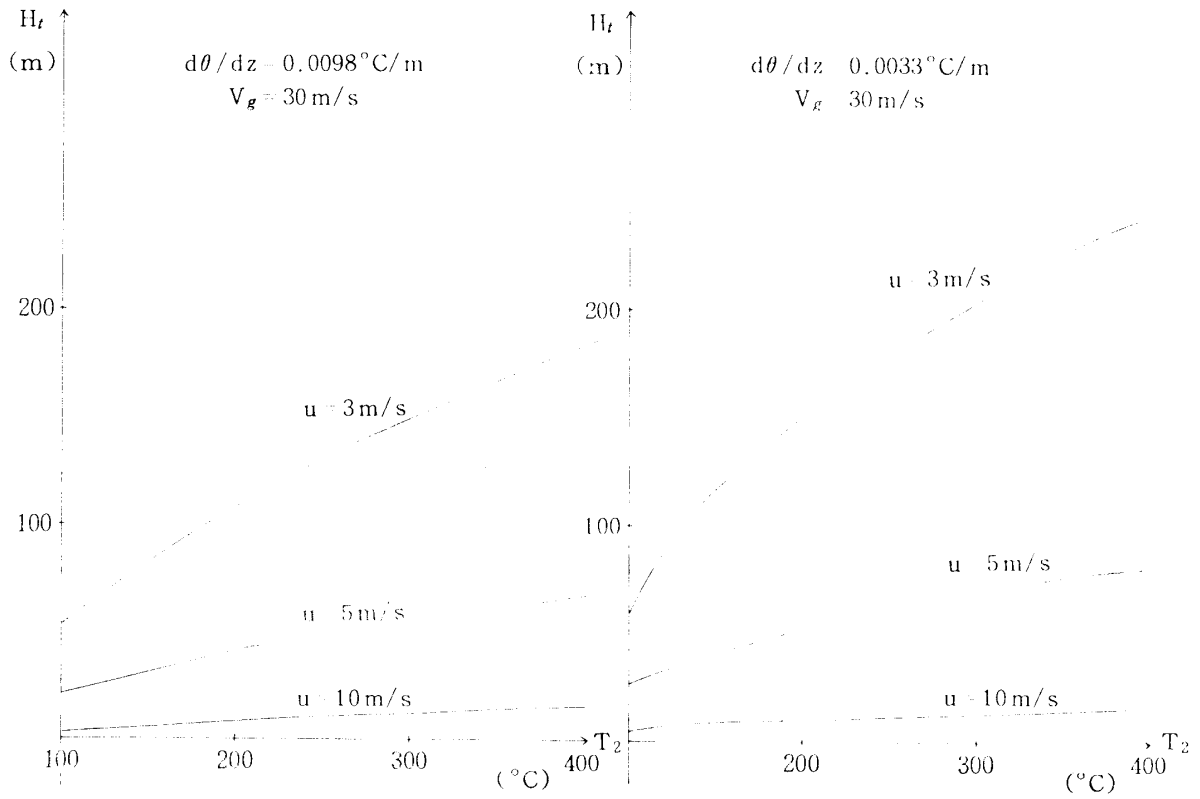


図21 浮力上昇高度と排ガス温度

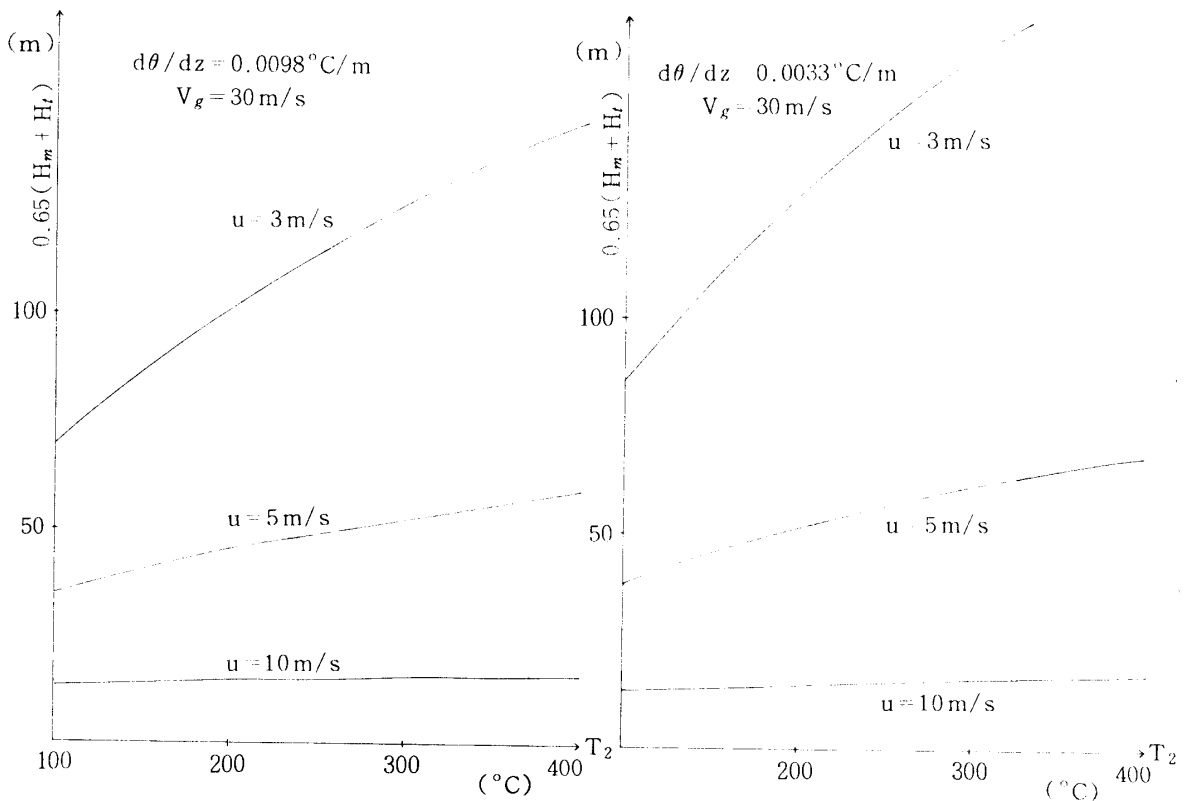


図22 上昇高度と排ガス温度

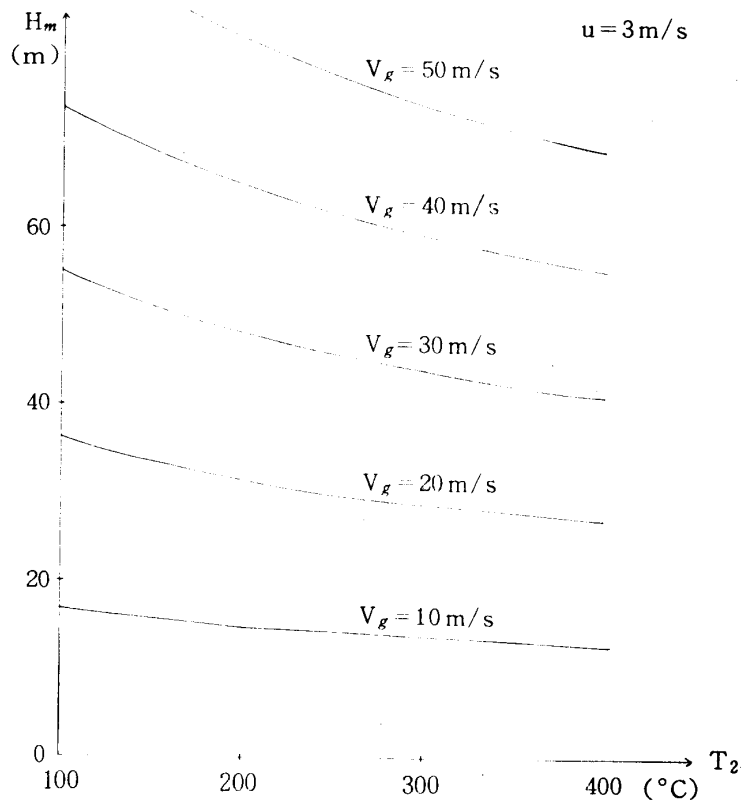


図23 運動量上昇と排ガス温度

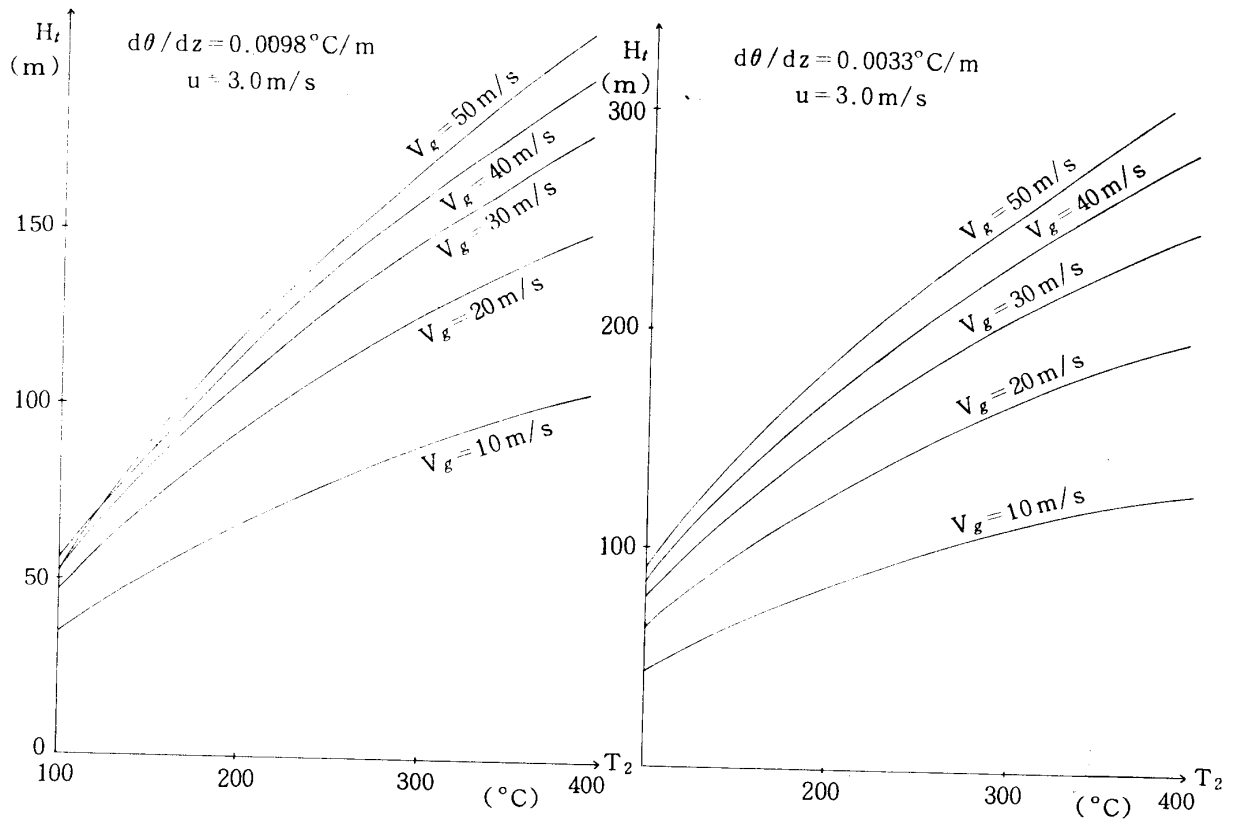


図24 浮力上昇高度と排ガス温度

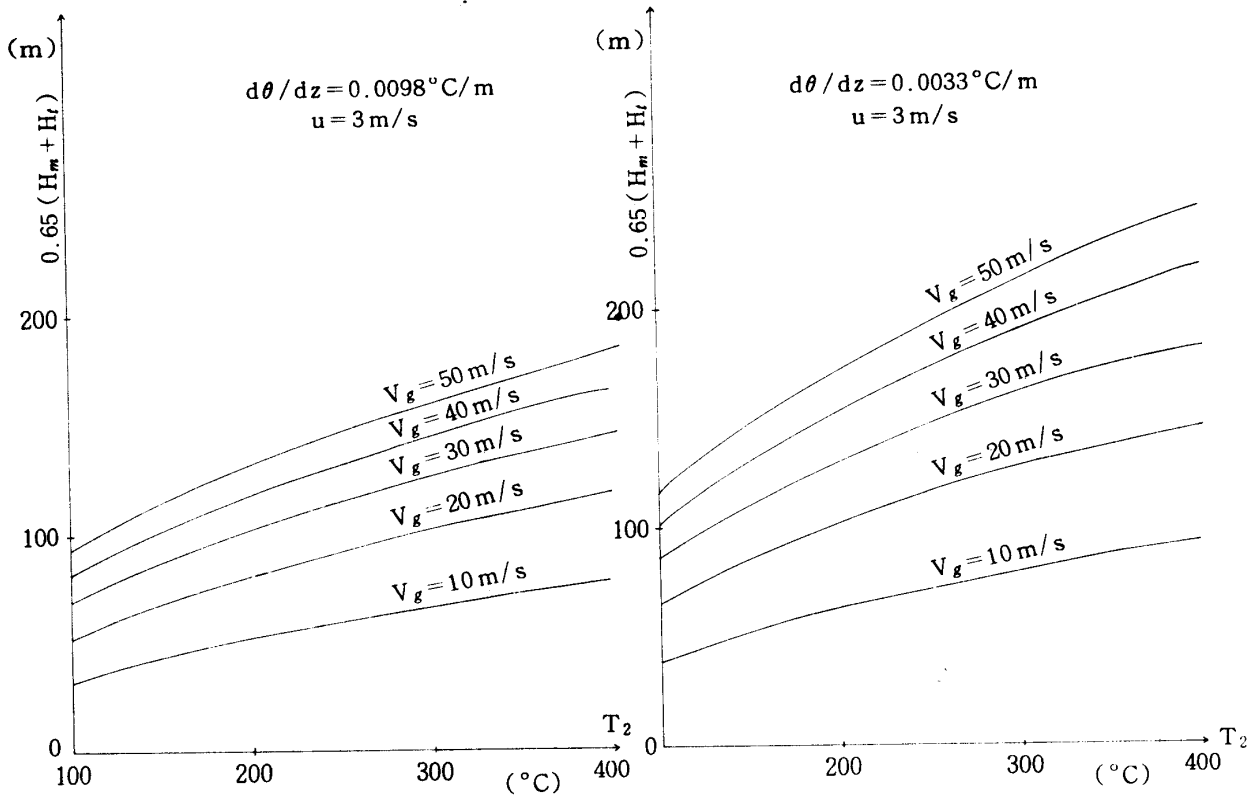


図25 上昇高度と排ガス温度

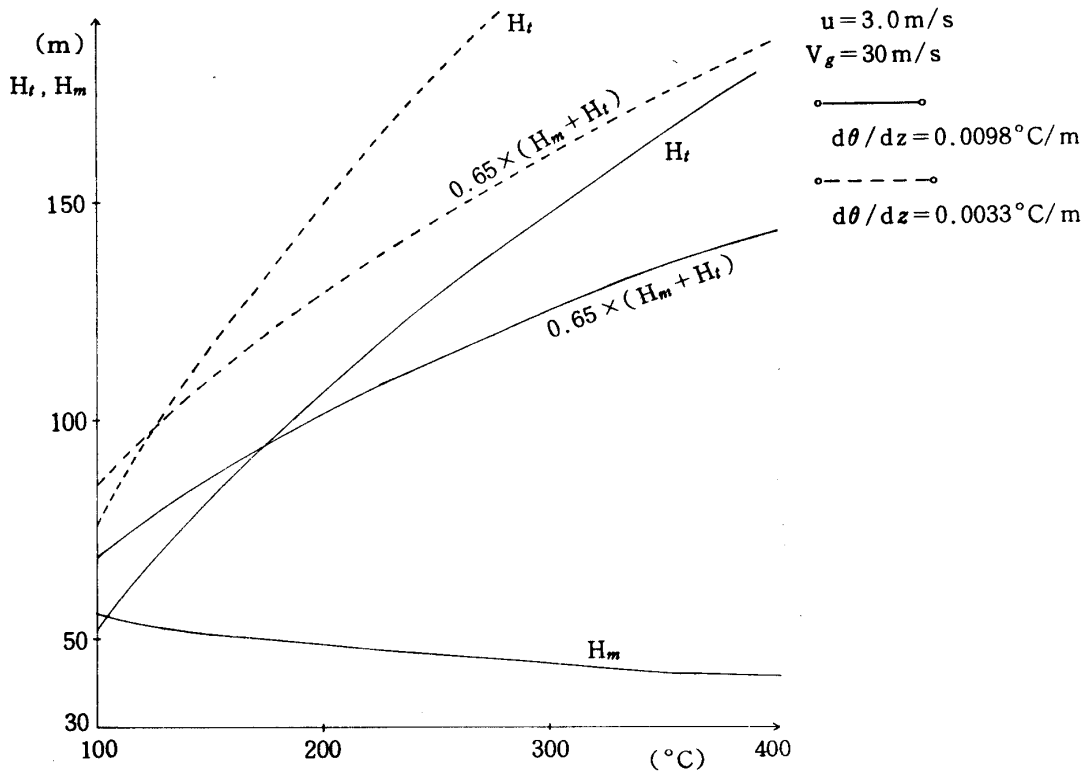


図26 上昇高度と排ガス温度



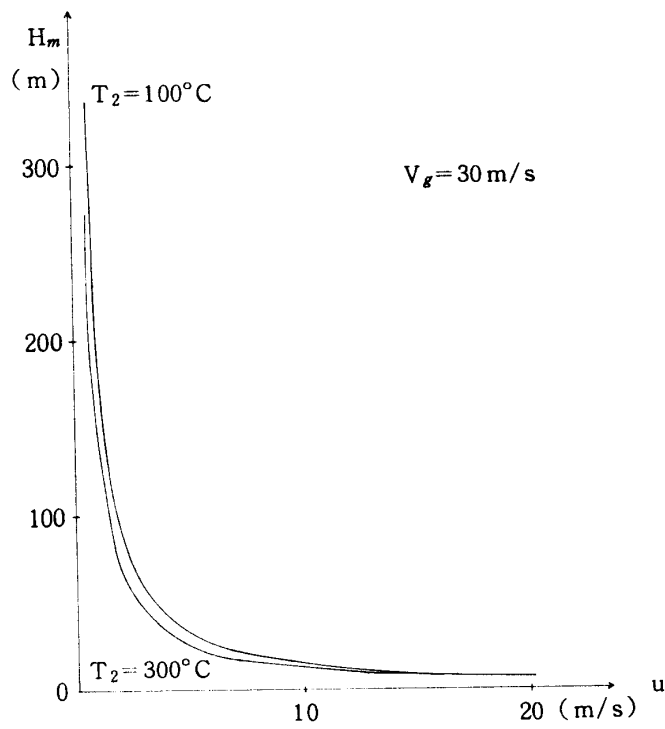


図27 運動面上昇と風速

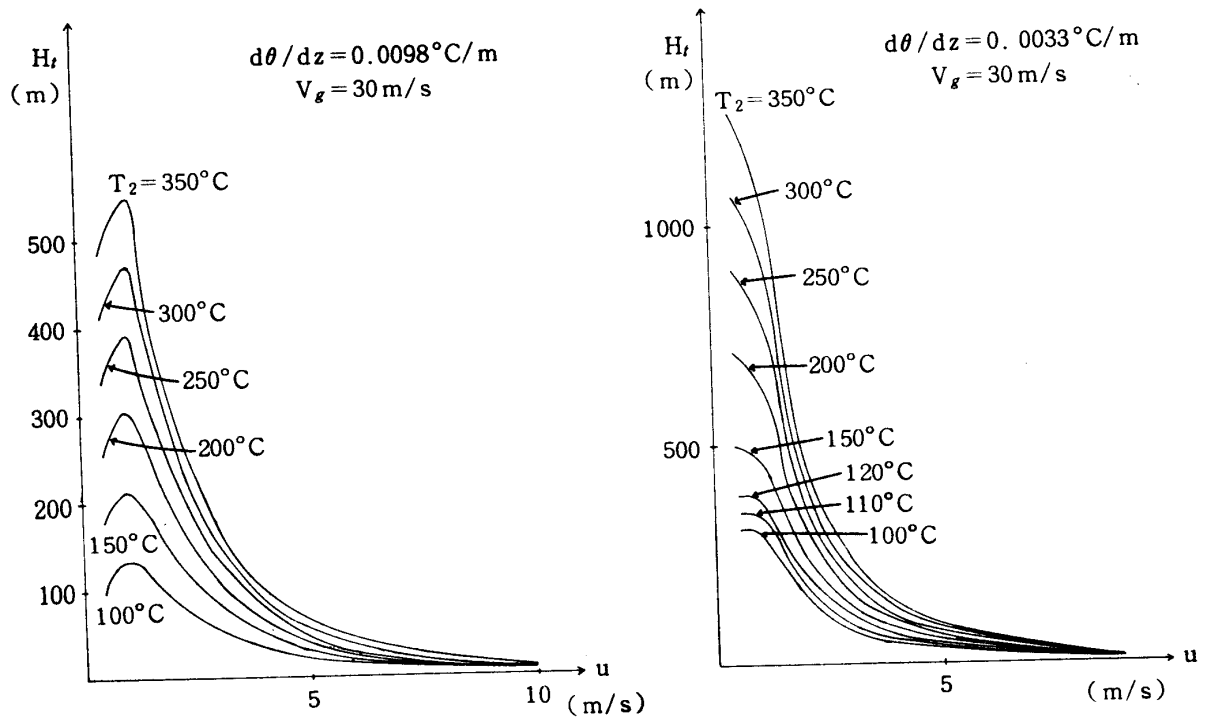


図28 浮力上昇高度と風速

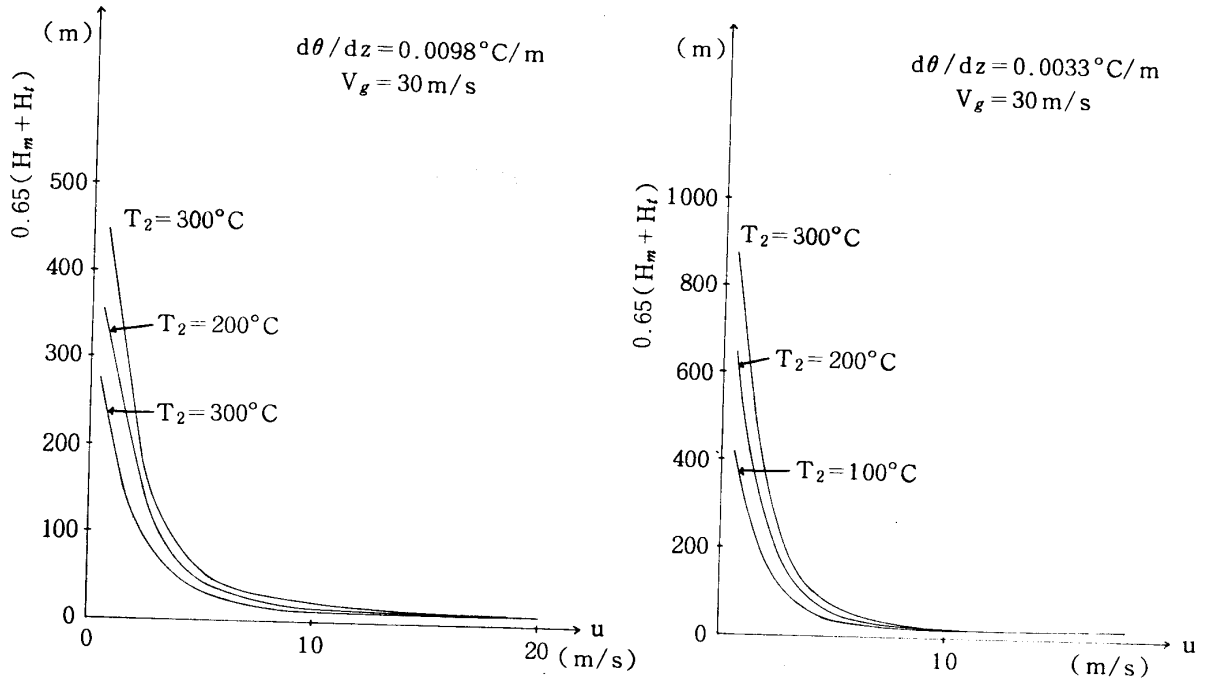


図29 上昇高度と風速

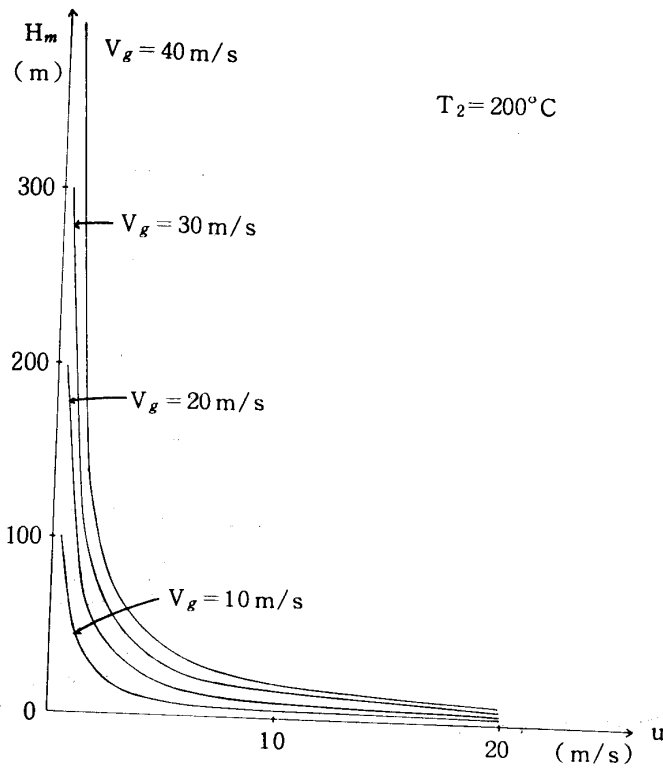


図30 運動量上昇と風速

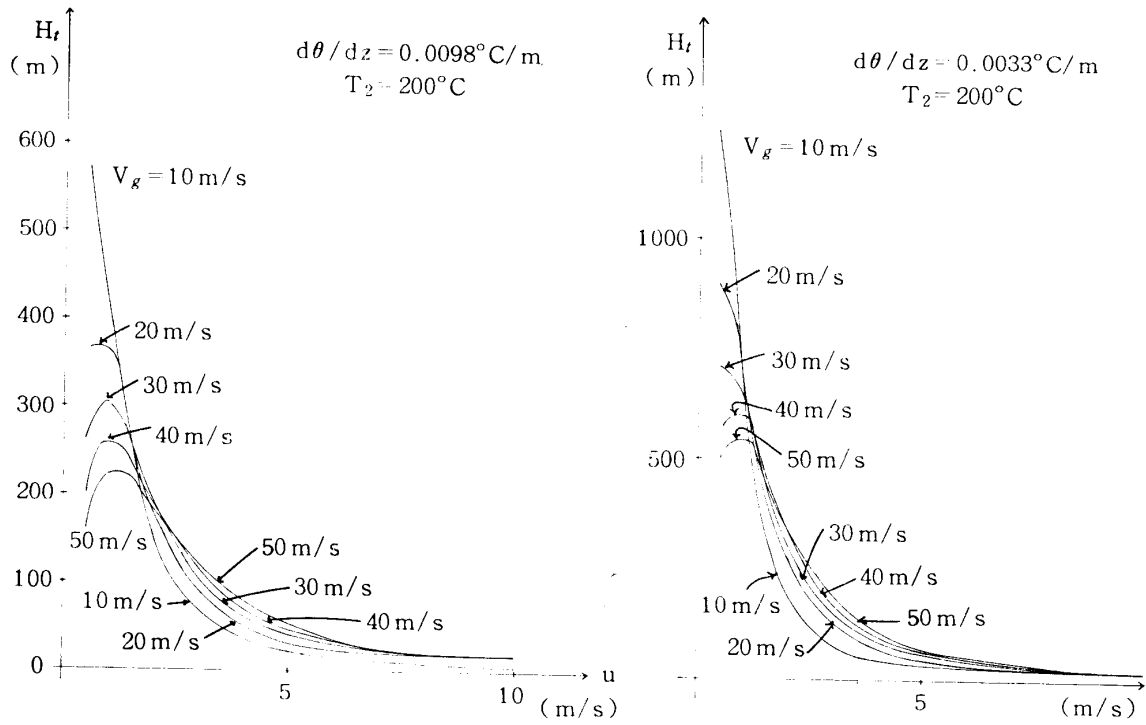


図31 浮力上昇高度と風速

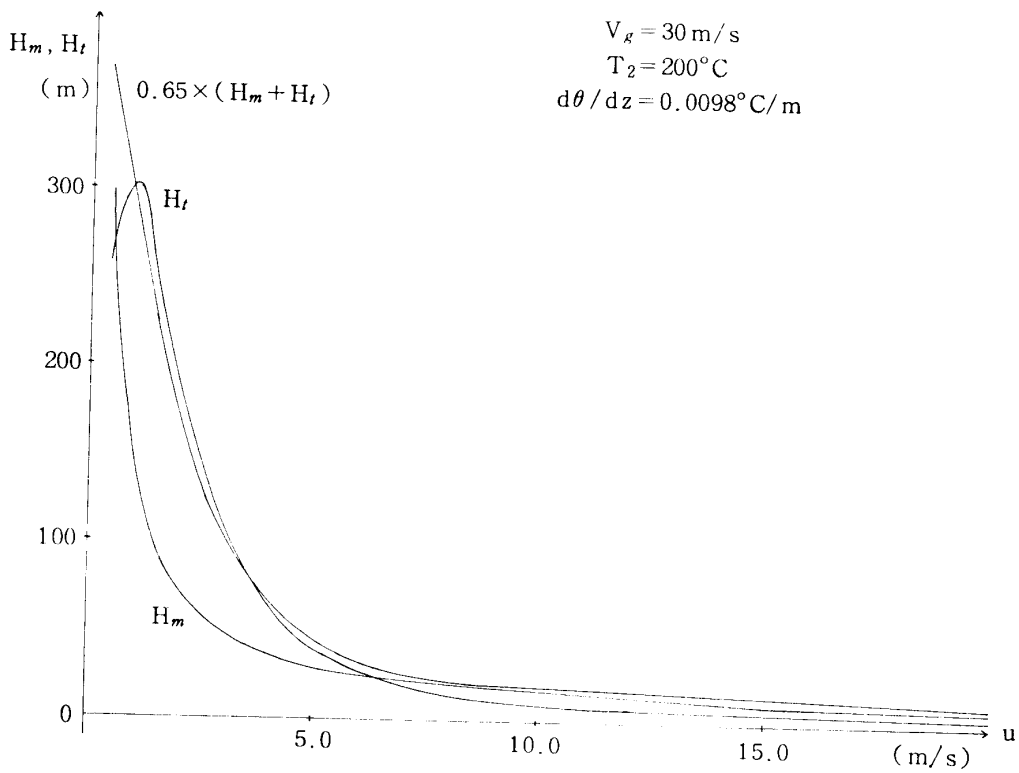


図32 上昇高度と風速

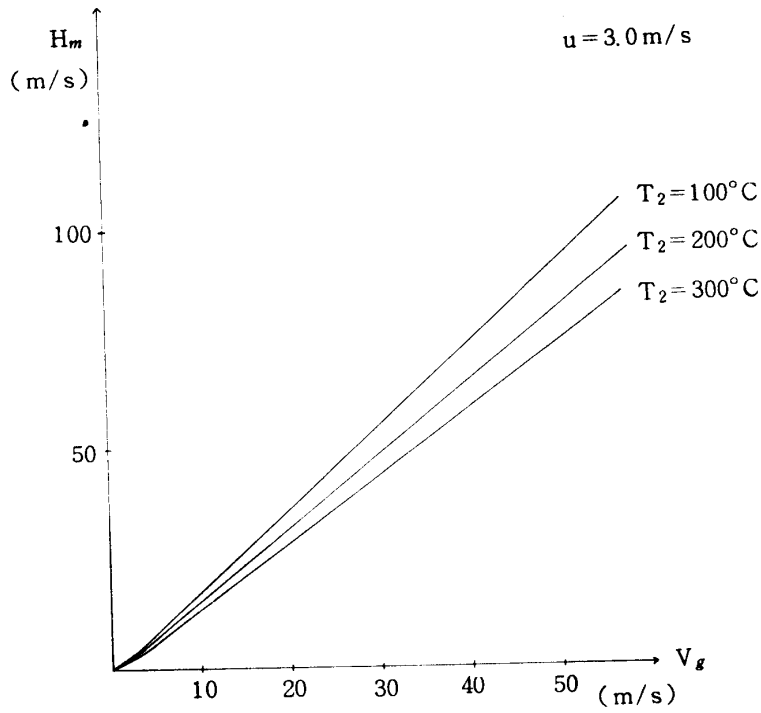


図33 吐出速度と運動量上昇

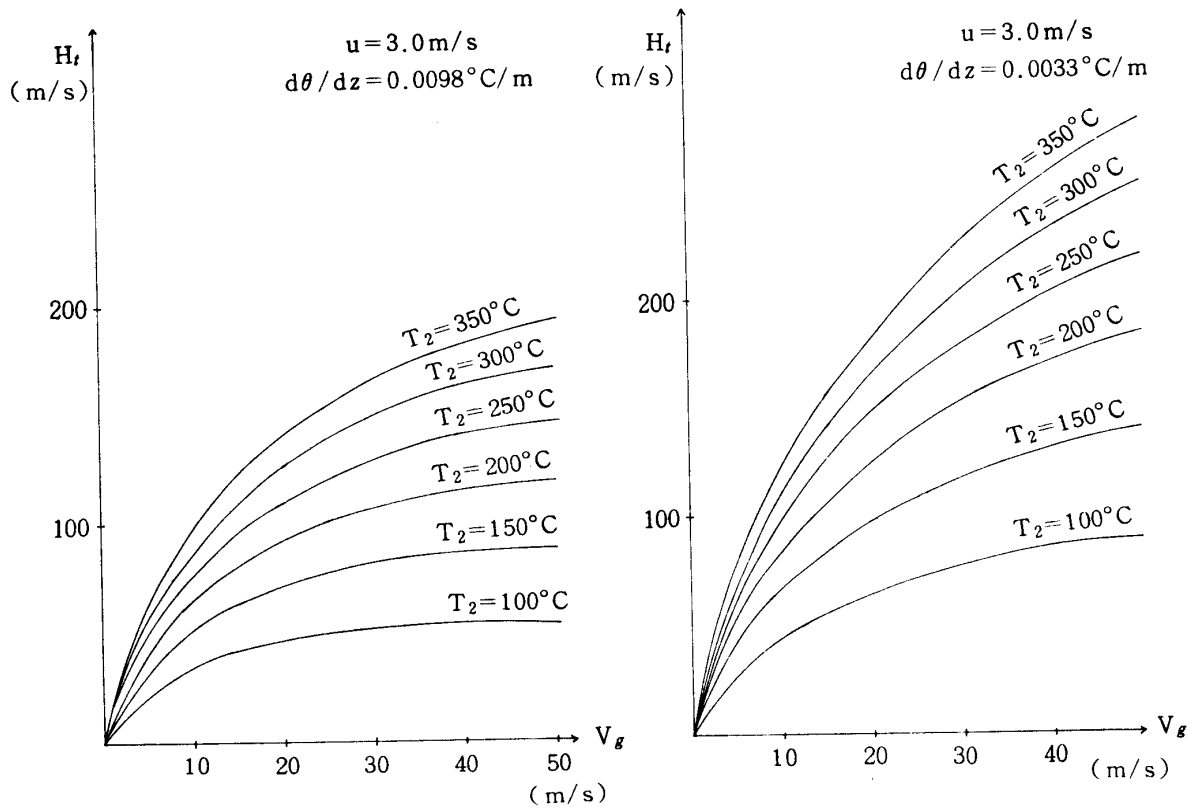


図34 吐出速度と浮力上昇

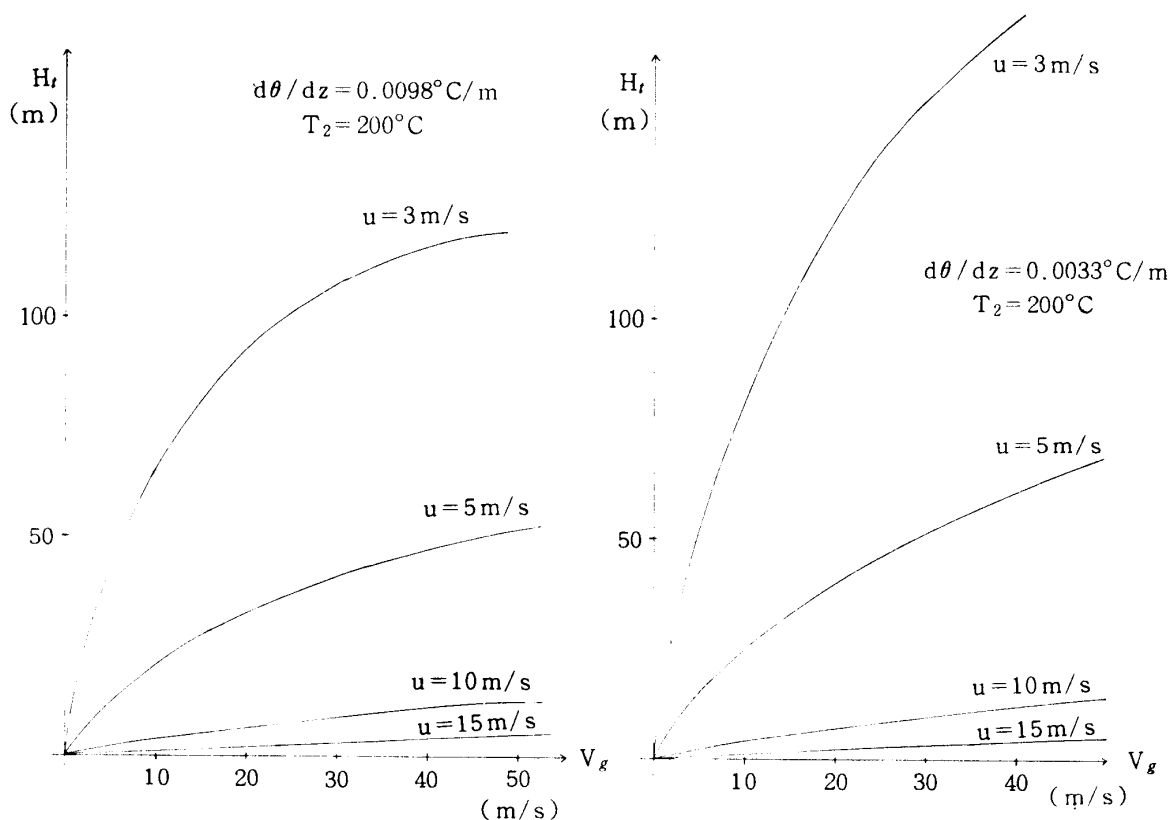


図35 吐出速度と浮力上昇

温度における運動量上昇量高度  $H_m$  と吐出速度  $V_g$  との関連性をプロットしたものである。つまり風速が一定の場合には吐出速度は大きい程  $H_m$  は増大するし、排ガス温度  $T_2$  が低い程  $H_m$  は大きくなる事を示している。

図34では風速一定における各排ガス温度での吐出速度と浮力上昇高度との関係を示すものである。一般に、吐出速度および排ガス温度が上昇すればする程、浮力上昇高度は大きくなる事を示している。

図35では排ガス温度  $T_2$  を一定に保持した場合の、各風速における吐出速度と浮力上昇との関連性を示したものである。図からわかるように、吐出速度が大きくなれば浮力上昇高度は増加し、風速が大きいと浮力上昇高度は低下する極めて当然な傾向を示している。

#### 4. 差分型モデルと分布型モデルとの比較

差分型モデルは拡散現象を微分方程式で表わし、それを差分方程式に変換して計算機で解かせようとするものである。したがって、差分型モデルの場合には分布型に比較して計算時間が長くなる。勿論、それぞれのモデルは利点、欠点をもっているので計算時間が長くても差分型モデルを使用すべき時もあり得る。しかし、一般にはより簡単な取扱いで計算結果が得られる分布型モデルを可能な限り使用する方が得策といえよう。

##### 4.1 差分型モデル

差分型の拡散濃度算定式について説明するが、ここでは道路周辺拡散濃度等に使用され

るモデルにつき記述しよう。まず、基礎となる拡散方程式としては

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (10)$$

として与えられる。これは拡散の微分方程式で、これを差分方程式に変換しなければならない。

(10)式を差分式で表わすとつぎのようになる。

$$\begin{aligned} C^{t+1} = & C^t + \frac{\Delta t \cdot u_{i-1}}{\Delta x} C_{i-1} - \frac{\Delta t \cdot u_i}{\Delta x} C_i \\ & + \frac{\Delta t \cdot v_{j-1}}{\Delta y} C_{j-1} - \frac{\Delta t \cdot v_j}{\Delta y} C_j \\ & + \frac{\Delta t \cdot w_{k-1}}{\Delta z} C_{k-1} - \frac{\Delta t \cdot w_k}{\Delta z} C_k \\ & + \left( \frac{\Delta t \cdot D_{i+1}}{\Delta x^2} C_{i+1} - \frac{\Delta t \cdot D_i}{\Delta x^2} C_i \right) - \left( \frac{\Delta t \cdot D_i}{\Delta x^2} C_i - \frac{\Delta t \cdot D_{i-1}}{\Delta x^2} C_{i-1} \right) \\ & + \left( \frac{\Delta t \cdot D_{j+1}}{\Delta y^2} C_{j+1} - \frac{\Delta t \cdot D_j}{\Delta y^2} C_j \right) - \left( \frac{\Delta t \cdot D_j}{\Delta y^2} C_j - \frac{\Delta t \cdot D_{j-1}}{\Delta y^2} C_{j-1} \right) \\ & + \left( \frac{\Delta t \cdot D_{k+1}}{\Delta z^2} C_{k+1} - \frac{\Delta t \cdot D_k}{\Delta z^2} C_k \right) - \left( \frac{\Delta t \cdot D_k}{\Delta z^2} C_k - \frac{\Delta t \cdot D_{k-1}}{\Delta z^2} C_{k-1} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$u = u_0 (z/z_0)^{7/1} \quad (v = w = 0) \quad (12)$$

$$D_z = k u_* z \quad (D_z = D_x = D_y) \quad (13)$$

$$u_* / (u_* r) = (u/u_r)^{0.9} \quad (14)$$

ただし、 $C^t$  は時刻  $t$  での濃度、 $C_i$ 、 $C_j$ 、 $C_k$  はそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向での各  $i$ 、 $j$ 、 $k$  番目の濃度を示し、 $u$ 、 $v$ 、 $w$  はそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸での風速を表わすものとする。また、 $D_i$ 、 $D_j$ 、 $D_k$  はそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向の各位置における拡散係数を示す。

## 4.2 Sutton モデルとの比較

道路周辺における一酸化炭素（自動車の排気ガス）の濃度分布について、差分型モデルを使用して計算した場合と、分布型モデルとしての Sutton Model により算定した結果について比較検討する。

図36は差分型モデルによる CO 濃度分布を示したものである。これは地上における平均風速を 3.3 m/s とした場合の垂直断面等濃度曲線を示すものである。すなわち地上では 20 m 程度まで 0.2 ppm、55 m までが 0.15 ppm、160 m 程度で 0.199 m の濃度で分布している。

図37では仮煙源の位置を道路端より 50 m の位置におき、道路端の濃度が 0.29 ppm となるように仮煙源の排出量を 118.2 cc/s とした場合の濃度分布を示す。ただし、Sutton モデルにおけるパラメータとして、 $n=0.25$ 、 $C_y=0.4$ 、 $C_z=0.2$ 、仮煙源高 1 m としたものである。この分布状況では地上 10 m から 40 m 程度で図36の差分型分布とかなり良く一致しているが、地表面では煙源より 30 m まで濃度が高く、それ以上では差分型よりも低くなっている。

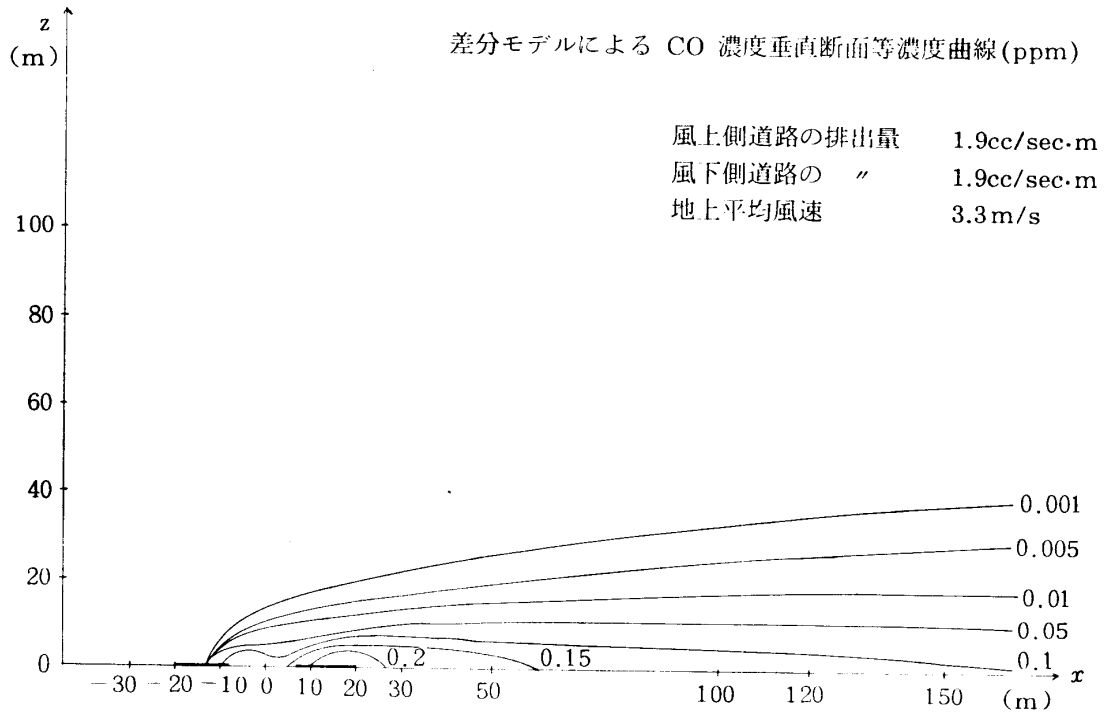


図36

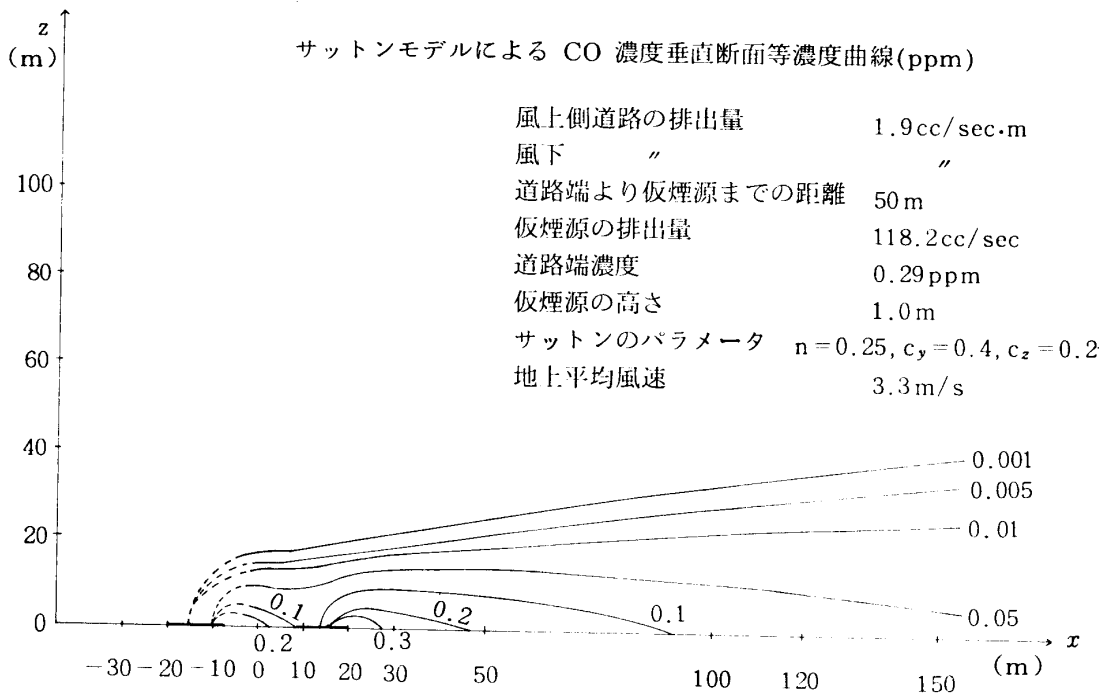


図37

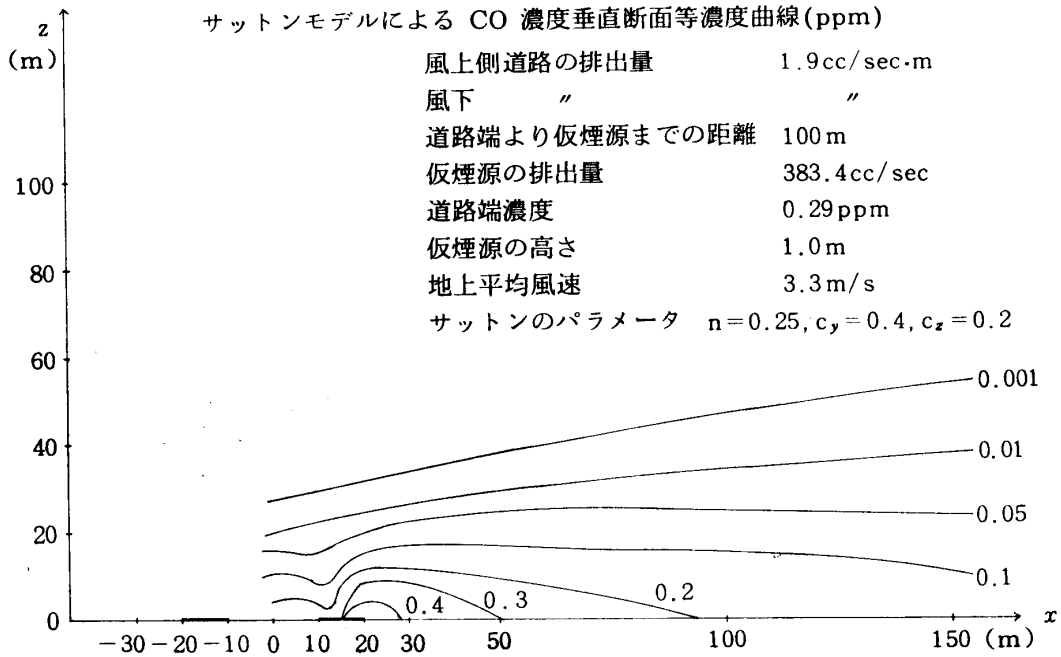


図38

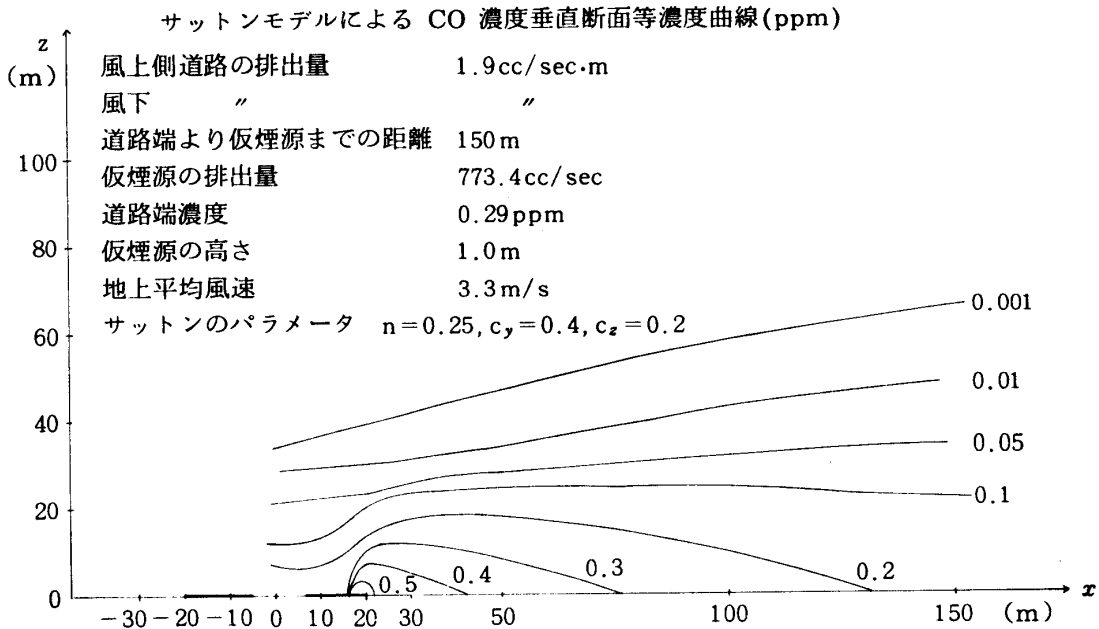


図39



サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線 (ppm)

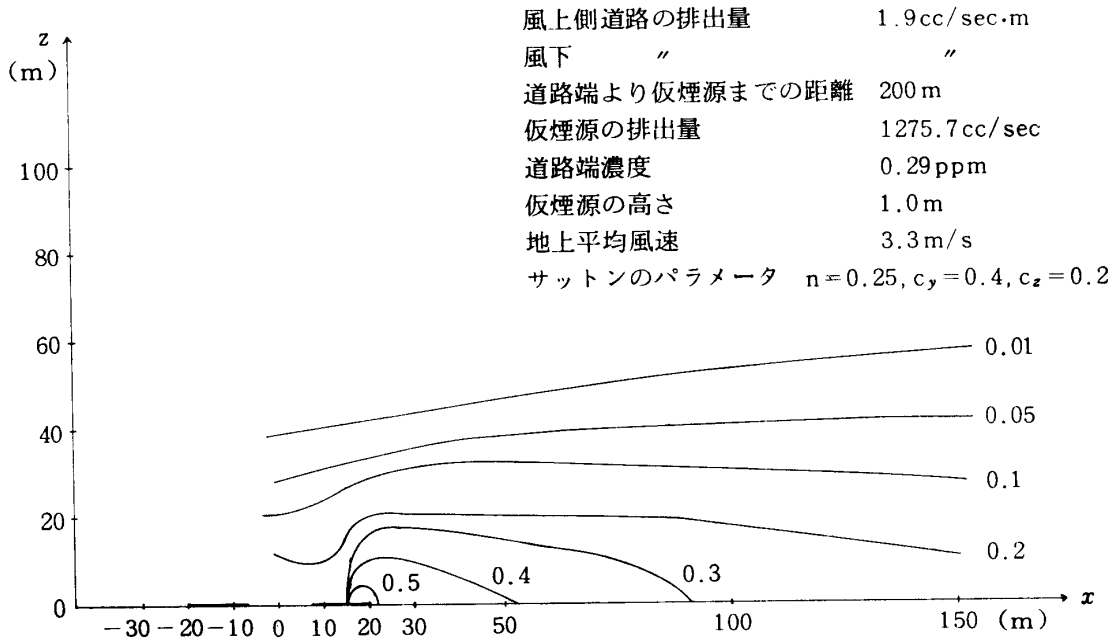


図40

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線 (ppm)

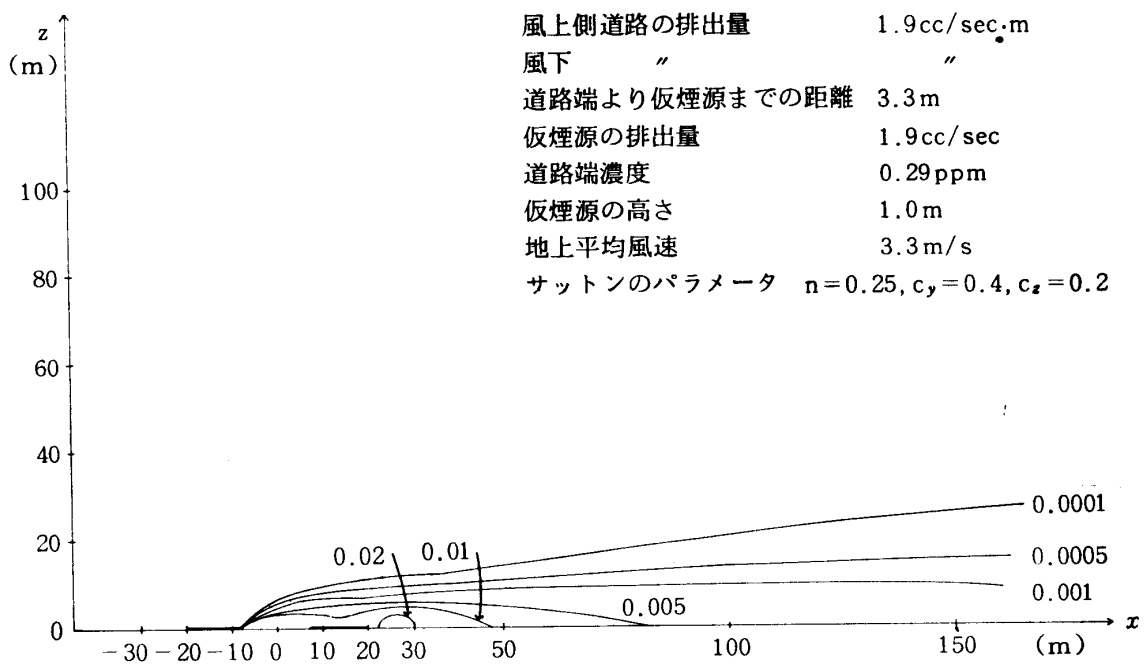


図41

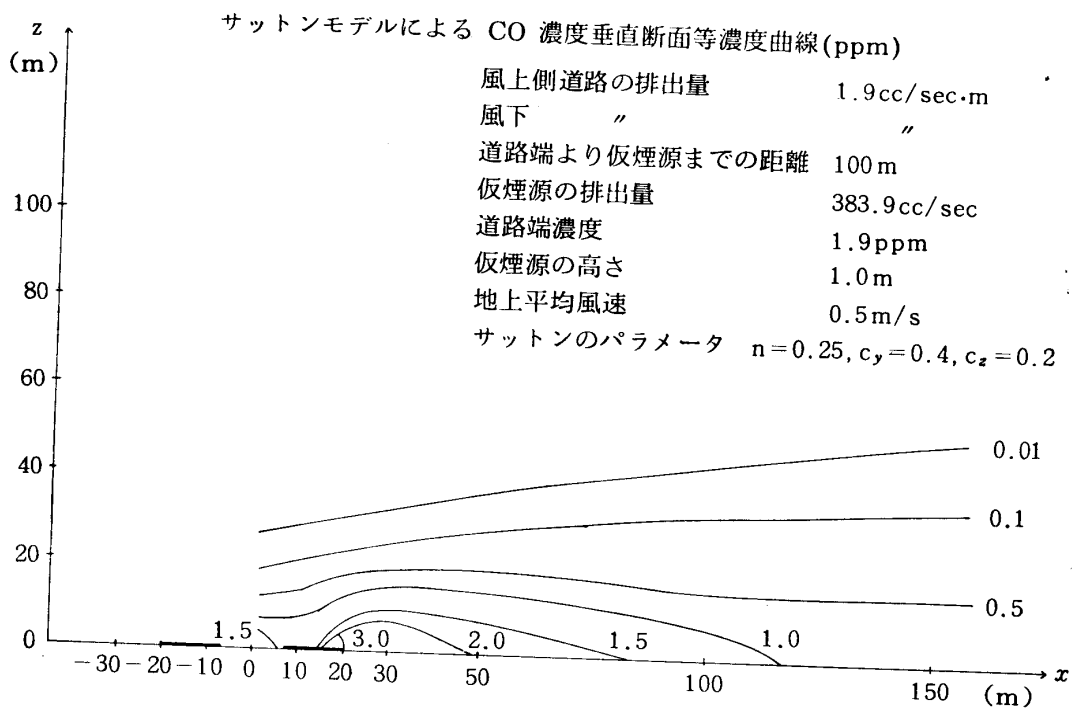


図42

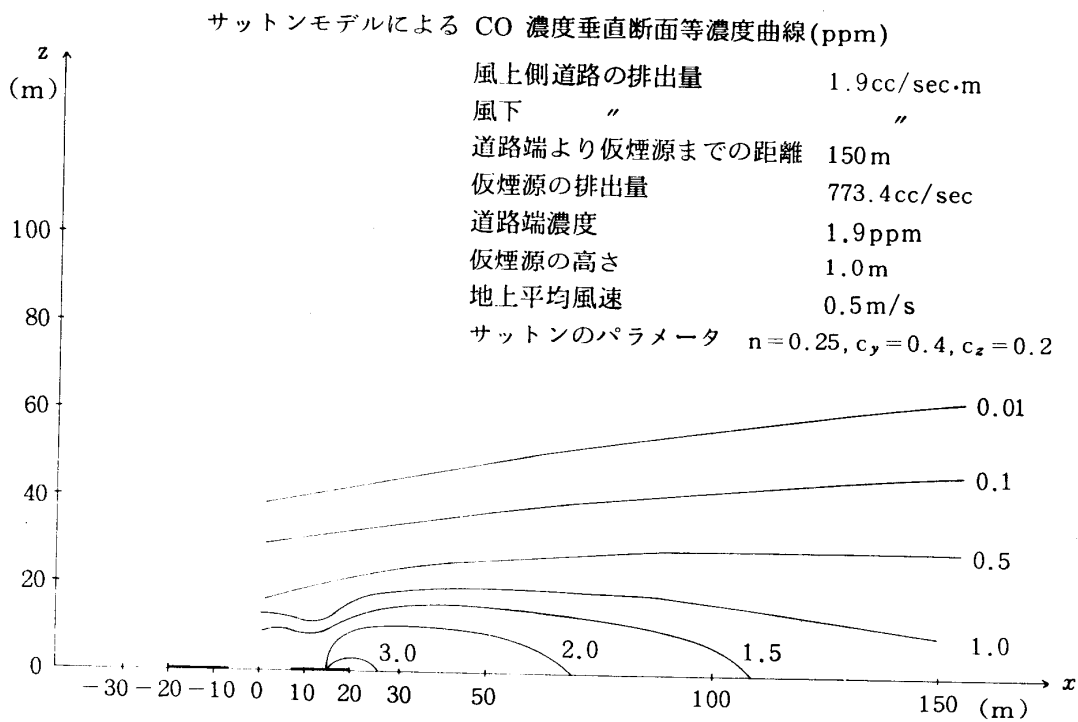


図43

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

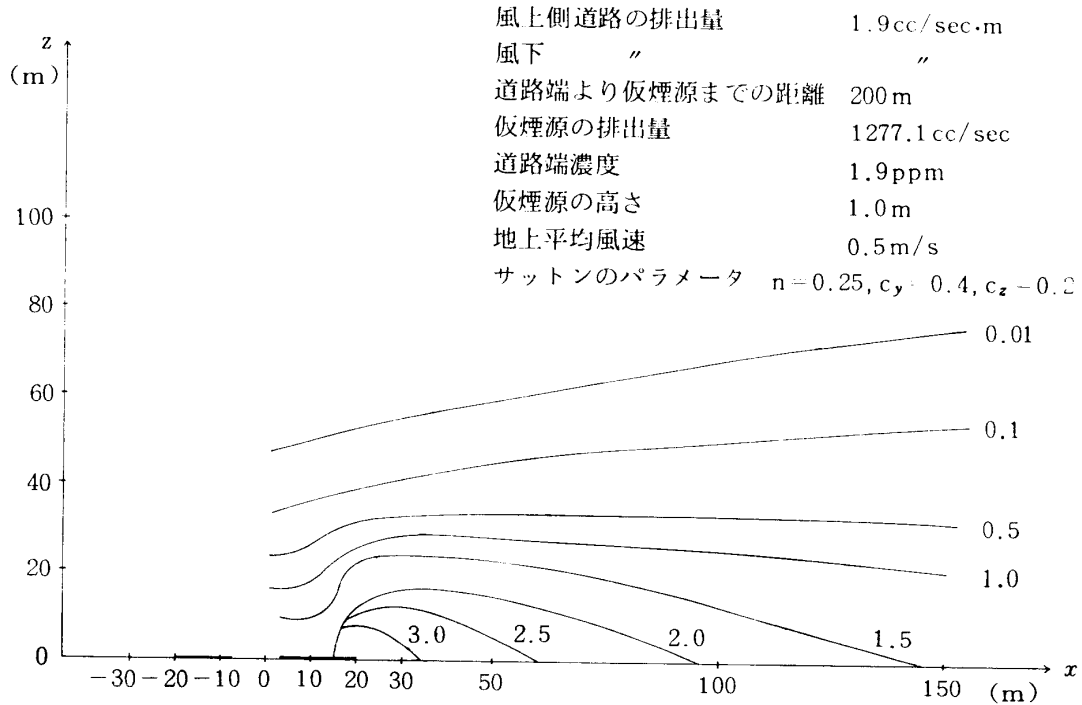


図44

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

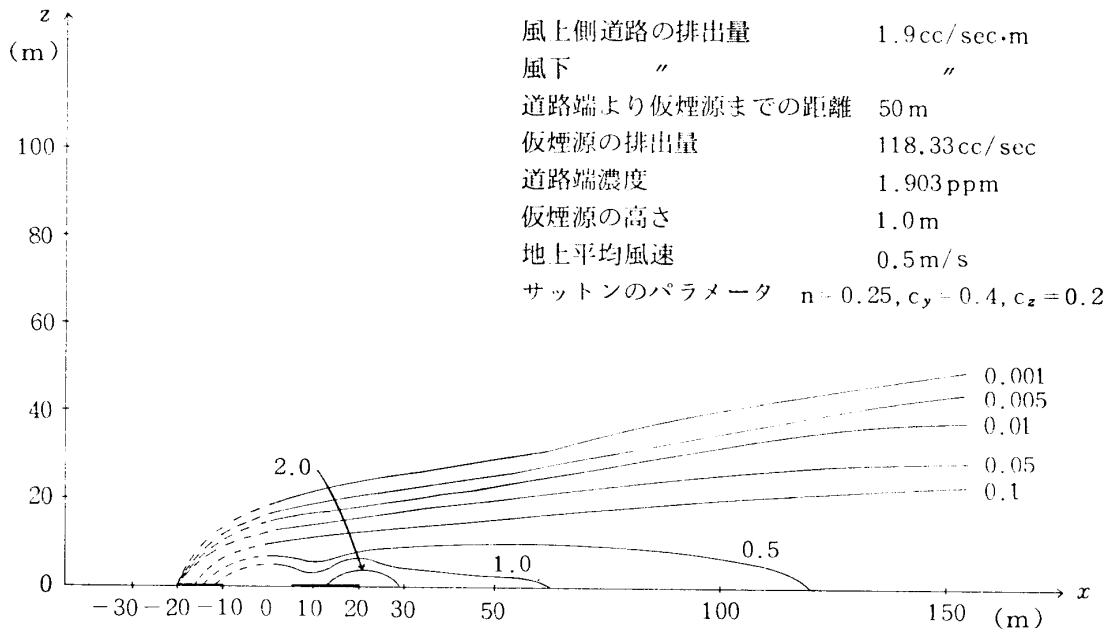


図45

差分型モデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

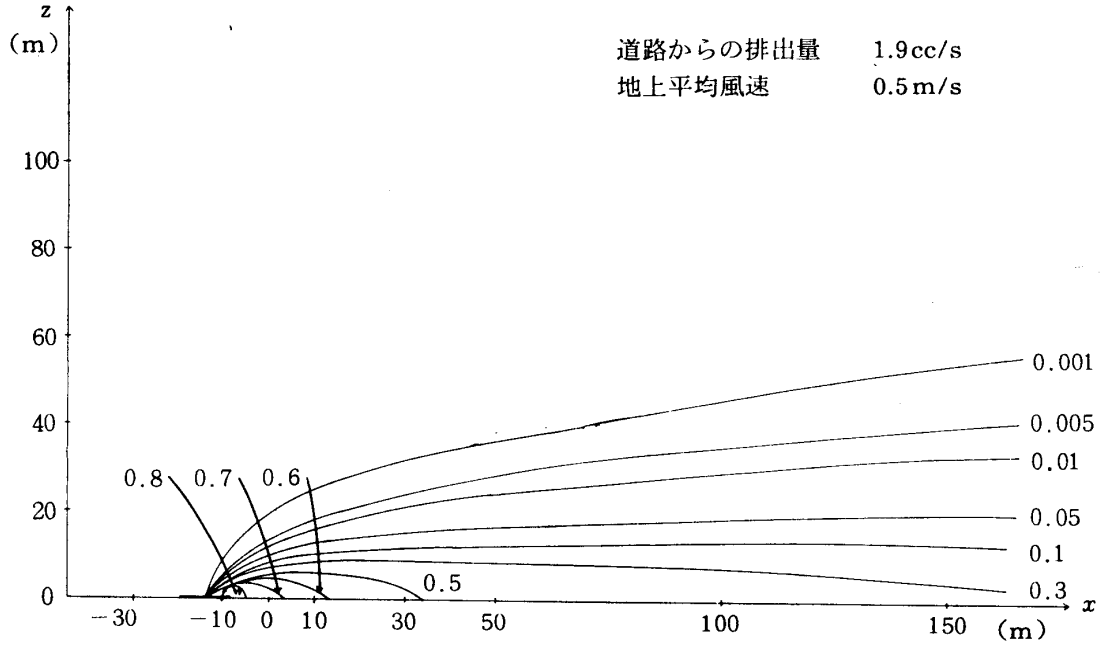


図46

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

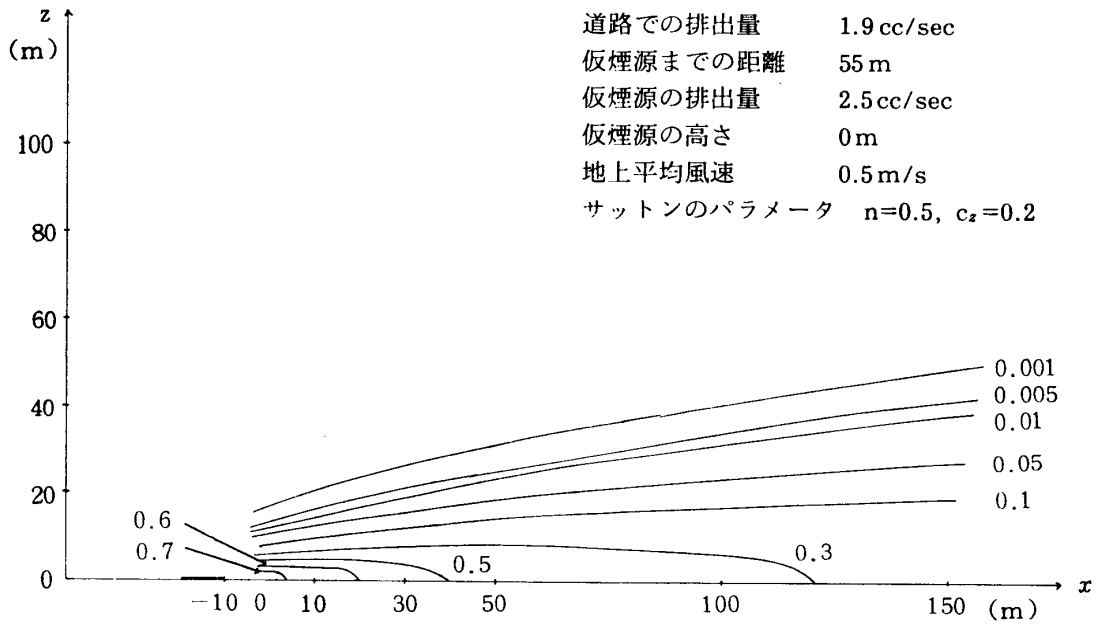


図47

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

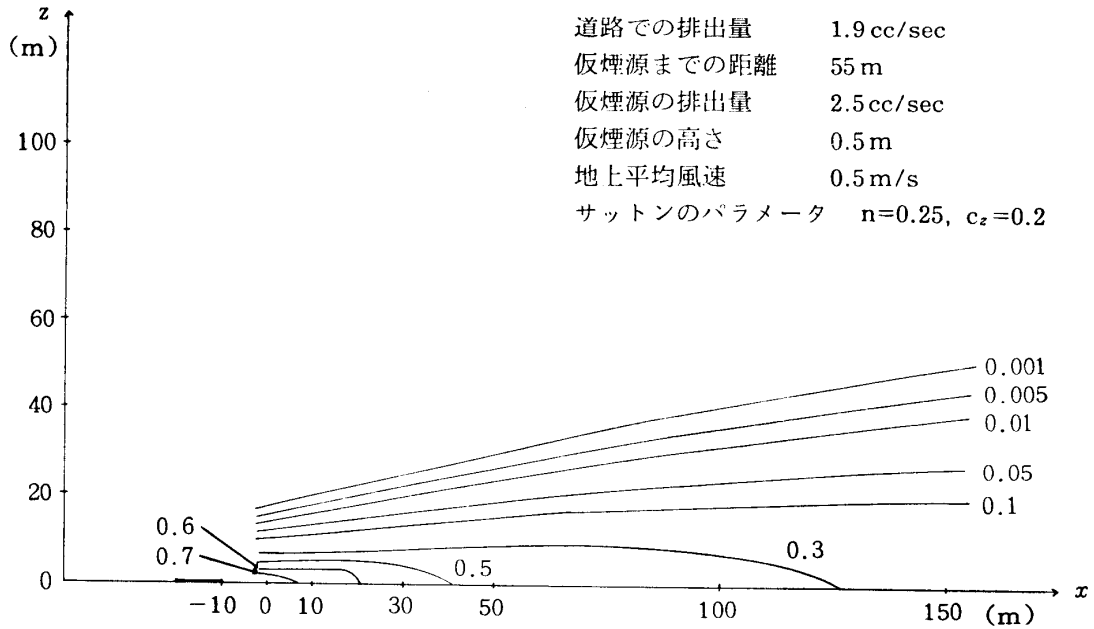


図48

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

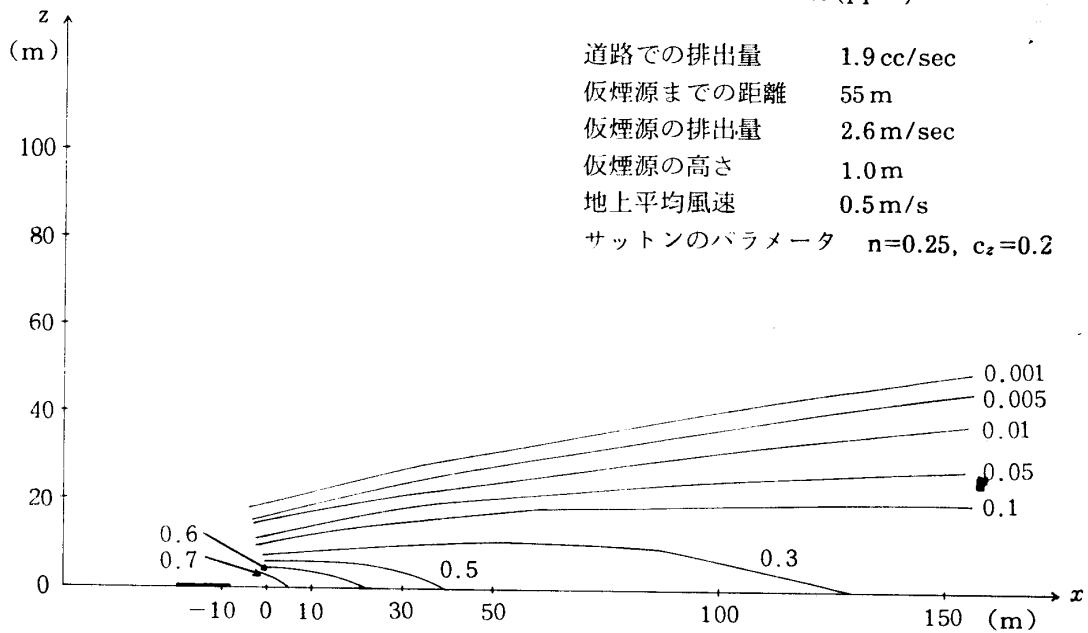


図49

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

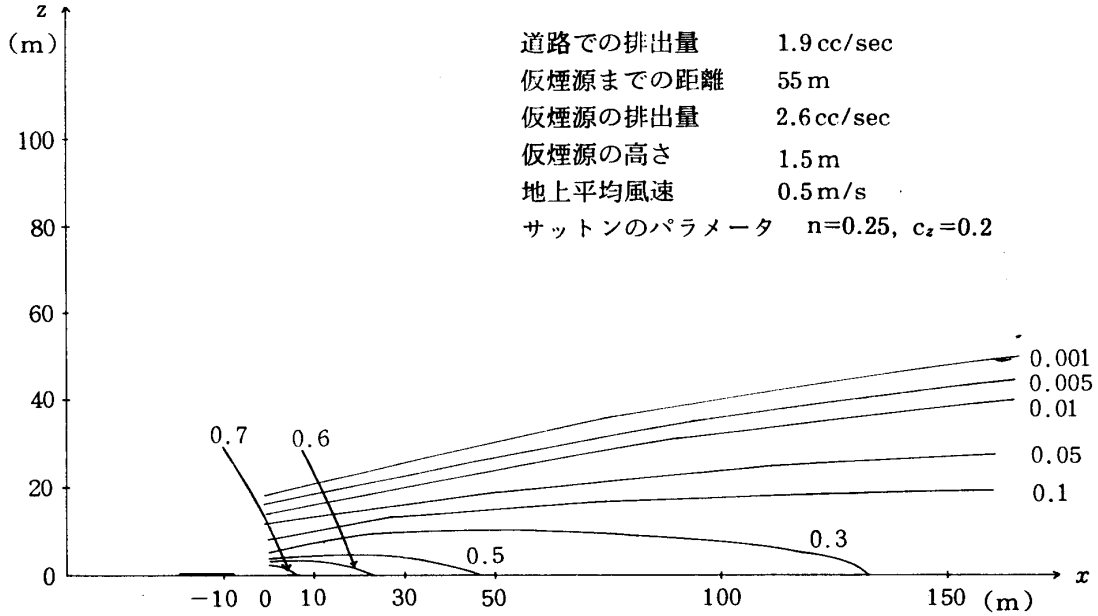


図50

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

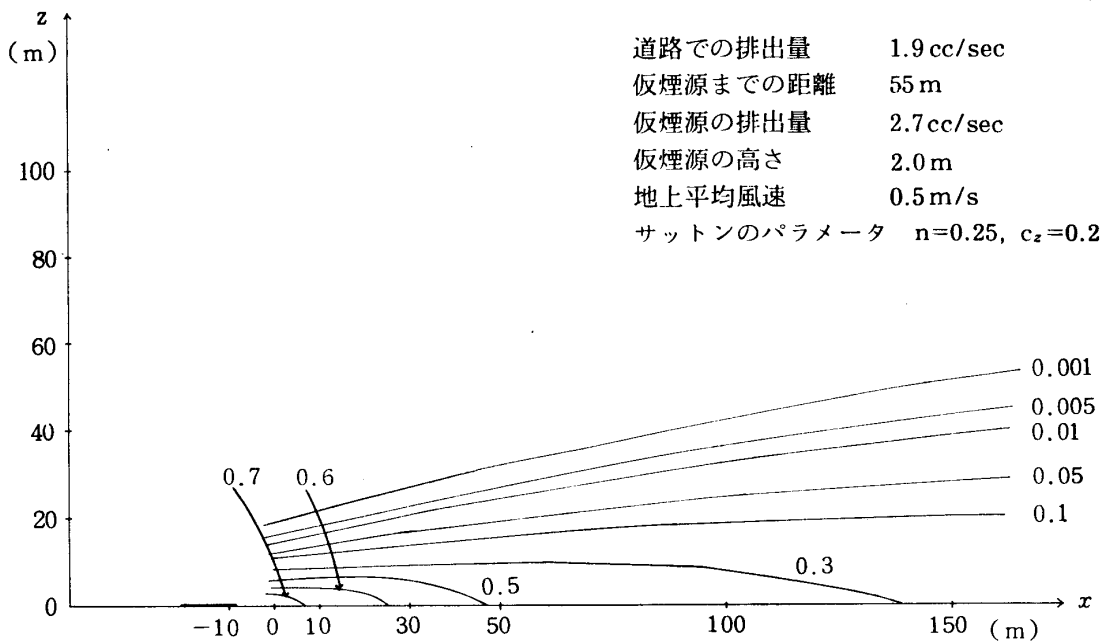


図51

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

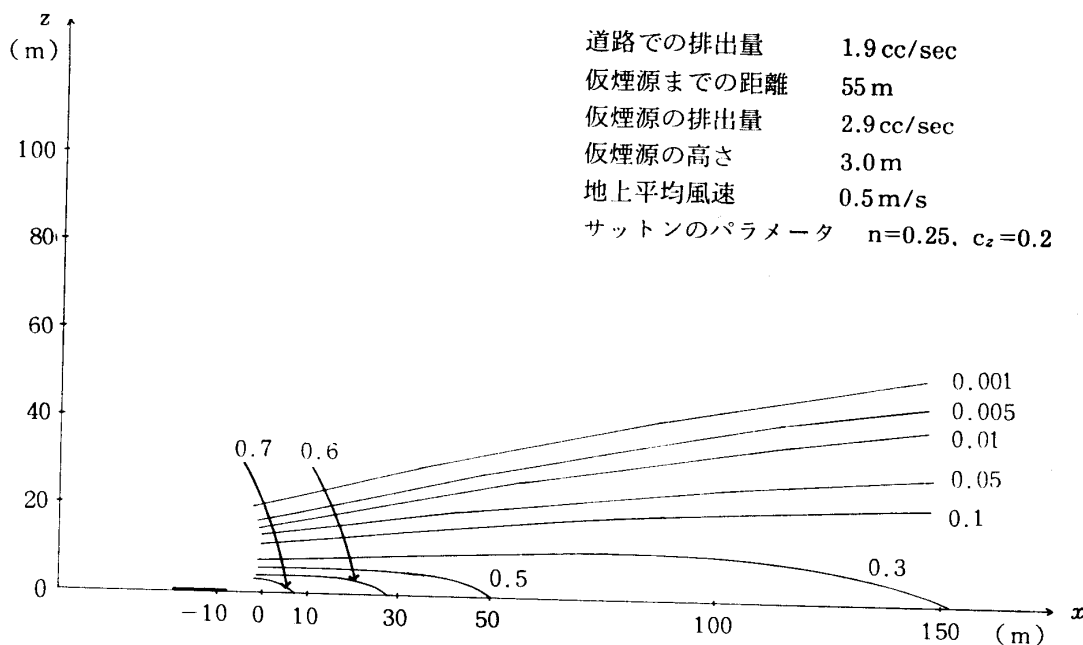


図52

サットンモデルによる CO 濃度垂直断面等濃度曲線(ppm)

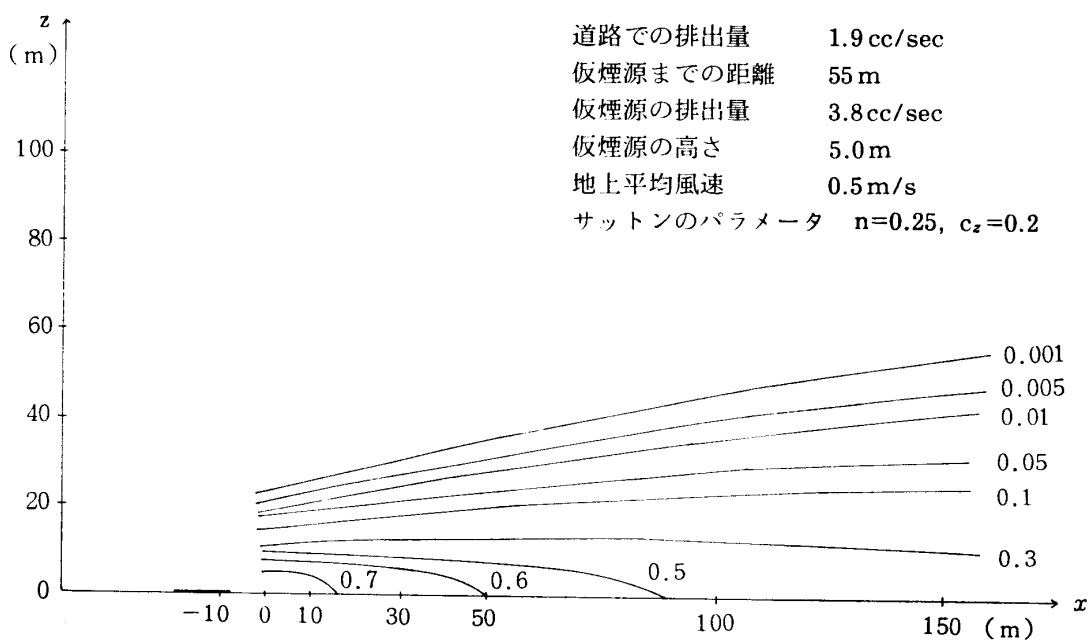


図53

図38では仮煙源の位置を道路端より 100 m の地点におき、その排出量を 383.4 cc/s とした時の濃度分布を与えている。これは地表面でかなり高濃度となっている。図39では仮煙源までの距離をさらに150mとした場合の分布を示し、図40では仮煙源までの距離を200 mとした場合の濃度を与えている。いずれも地表面ではかなり高い濃度分布となっている。一方、図41では仮煙源の位置を道路端より 3.3m においた場合の分布を示す。

図42から図45までは平均地上風速を 0.5 m/s とし、道路端濃度を 1.9 ppm とした時の濃度分布を仮煙源までの位置を変化させた状況を示すものである。

さて、これまでのシミュレーション結果より、分布型モデルを差分型モデルの濃度分布と一致させるためには道路端から仮煙源までの距離を55m程度にする方が望ましい。そこで、今度は仮煙源の距離を55mに保持しながら煙源の高さを変動させてみよう。

図46は差分型モデルによる CO 濃度の分布を示すものであり、地上平均速度 0.5 m/s、道路からの排出量を 1.9 cc/s とした場合の濃度分布を示す。

図47から図53までに、仮煙源高を 0 から 5 m まで変化させた場合の濃度分布を示す。以上の分布状況から、風下のみを考慮して、煙源の高さが 2 から 2.5m 程度、煙源までの距離を55mとした分布型モデルを使用すれば差分型モデルを利用した場合と概略等しい濃度分布と示すことが判明した。

## 5. おわりに

大気汚染の拡散濃度算定モデルとしては差分型モデルと分布型モデルとが考えられている。差分型モデルは大気汚染の拡散現象を微分方程式で捉え、それを計算機で解けるように差分化したものである。したがって、数値計算上、ある収束解を見出すのにかなりの計算時間を要するものである。分布型モデルはガウス分布にしたがった濃度算定モデルであり、しかも plume model を利用すると計算がより簡単で計算時間も少なくて済む。この種の代表的な Sutton の算定モデルにつきその概要を述べたわけである。

本論文では自動車の排気ガス（一酸化炭素）が道路付近で如何なる分布をするかという問題を検討する場合に従来、差分型モデルによるシミュレーション分析法を用いていたのに対し、計算の簡単な分布型が利用可能かどうかを検討したものである。

## 文 献

- [1] 日本自動車研究所, 速報第14号
- [2] Robert, Narco, Kennedy and Croke "Une Modele Pour La Simulation Des Transitoires De La Pollution De L'Air," Second International Clean Air Congress, pp. 1161~1167 (1972)
- [3] Lupwig, Johnson, Moon and Mancuso, "A Practical, Multipurpose Urban Diffusion Model For Carbon Monoxides" SRI Project 784 (1970)
- [4] 鈴木武夫編「大気汚染の機構と解析」, 産業図書 (1980)



## Some Comments on Evaluation of Air Pollution Distribution

Hiroyuki NARIHISA

*Department of Electronic Science  
Okayama University of Science  
Ridaicho 1-1, Okayama700, JAPAN*

(Received September 27, 1984)

Generally, there are two types air pollution diffusion estimation. The one is Gaussian distribution model and the other is a simulation model. Gaussian distribution model is considered that the pollutant density disperse following Gaussian distribution as a function of the distance from the pollutant source. On the other hand, a simulation model represents the air pollution diffusion phenomena as the differential equations with some boundary conditions. Practical point of view, we usually approximate differential equations by difference equations for the sake of easy computation.

Concerning these models, there have been proposed a lot of calculating methods. Consequently, we must select an appropriate computation model which is due match to our purpose. As you can easily imagine, it is very ease to calculate the pollutant density by using Gaussian model because the distribution function is already given. However, the fitness of its distribution is not so good.

In this paper, we present Gaussian plume model of atmospheric diffusion dispersion for estimation of pollutant density around traffic road. As far as concern to the automobil emission gases diffusion density around the traffic road, the different approximate model is used hitherto because of its preciseness.