

ヘンミ計算尺

指導／理学博士 横山長之
通産省工業技術院公害資源研究所



NO.P270

大気汚染用計算尺

Pollution A.

使用法説明書

Pollution A.

カーソル線



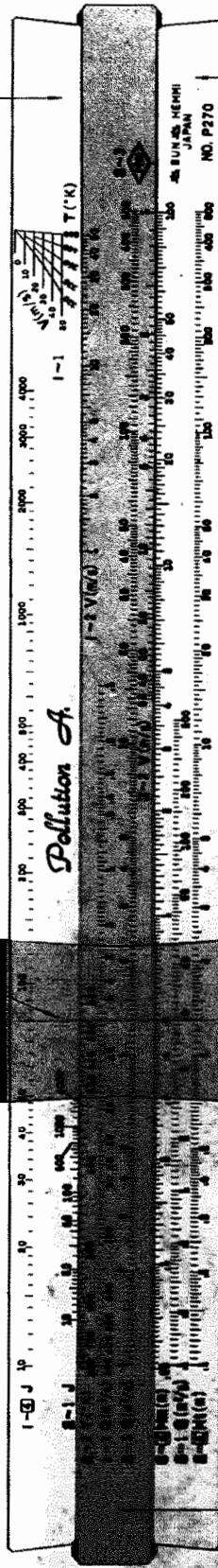
カーソル



■表面

■裏面

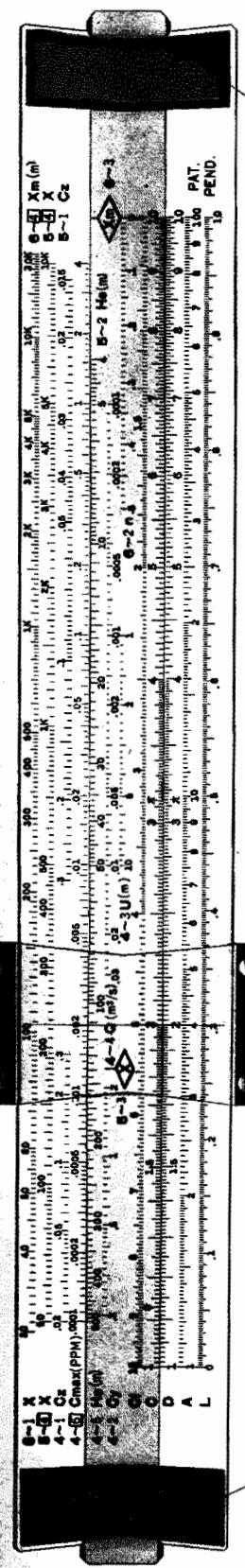
固定尺



■表面

■裏面

固定尺



隅板

ここ数年、産業企業の繁栄と公害問題とは切っても切り離せない事象として、厳しく認識されてきましたが、とりわけ大気汚染はその及ぼす広域性から世界的な問題となっています。わが国においても公害基本法に則り大気汚染防止法の制定、公害防止管理者を企業に義務づけるなど諸対策が講ぜられています。

この大気汚染用計算尺 Pollution A. は汚染物質の上昇と拡散の計算式を中心に、大気汚染関係の計算をより能率

的に簡略化する目的で開発されたものです。企業における公害防止管理者はもとより関連従事技術者に広くお薦めいたします。



目 次

この解説書の使い方 3

計算尺ダイヤグラム 3
Pollution A 取扱上の注意 3

第 1 章 大気中におけるばい煙の拡算の計算 4 ~ 22

§ 1 はじめに 4
§ 2 ばい煙拡散の様相 4
§ 3 有効煙突高度の計算 6
§ 4 拡散式 10
§ 5 計算式(上昇式、拡散式)の限界 19
附記 Sutton の拡散式 20

第 2 章 一般目盛りを利用した大気汚染に関する
各種の計算例 23 ~ 26

§ 1 いおう酸化物の排出基準 23
§ 2 Holland の式 23
§ 3 シグマ式 24
§ 4 比例計算 25
§ 5 C_{max} を許容濃度以下にするために必要な煙突高さ 26

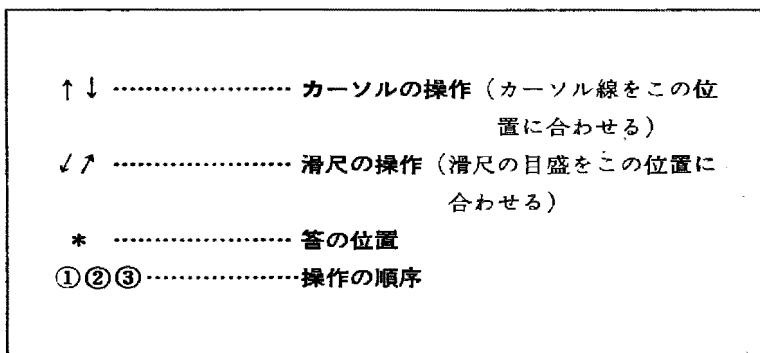
第 3 章 計算尺の基本 27 ~ 31

§ 1 乗除計算 27
§ 2 比例計算 29
§ 3 平方、平方根 29
§ 4 対数 31

この解説書の使い方

この解説書は、3つの章からなり、第一章で、ばい煙の拡散に関する専門的な説明と計算例。第二章において、大気汚染防止管理技術全般の中から、本計算尺で処理できる各種の計算例を示しました。また第三章では計算尺に不慣れな方のために基礎的な使い方を説明しました。第一章、第二章の計算例において、計算尺操作が充分理解できない方は適宜、第三章を参照しながら進めることをおすすめします。

計算尺ダイヤグラム（計算尺操作略図記号）



Pollution A 取扱上の注意

- 60°C以上で熱変形を起こします。
スチームラジエーターの上に乗せたり、強い直射日光にあてたり、熱湯に入れたりすると変形します。
- 計算尺が汚れたら
軟い布に石けん水をつけ、軽く拭いてもきれいになります。
バーバー、クレンザー等の磨き材、アルコール、シンナー等の溶剤は使用しないでください。

第1章 大気中におけるばい煙 の拡散の計算

1. はじめに

大気汚染の現実的な対策には、汚染質の排出量、排出条件と環境における汚染濃度の関係を定量的には握して排出源の制御を行なうことが必要である。排出源と環境濃度を結びつけるのが大気中におけるばい煙の拡散である。汚染源の排出条件の決定にも、また汚染監視を適切に行なうにも大気中におけるばい煙の拡散を理解することが大切である。

煙突の風下における汚染質の着地濃度を定量的に求めるには、排ガスの上昇高度、有効煙突高度を計算し、拡散式を用いて濃度を計算する。大気汚染防止法、施行規則ではこの上昇高度の計算にBosanquetの第1式が使われている。また拡散式にはSuttonの式が最も一般的に用いられている。

これらの上昇式、拡散式の計算は煩雑なものであるが、これを能率よく正確に行なえるようにしたのがこの計算尺（Pollution A.）である。またA,C,CI,D,L 尺を用いれば上昇式、拡散式以外に大気汚染に関連した種々の計算、燃焼計算、汚染質分析に必要な計算ができる。大気汚染防止管理者の受験用としても、また大気汚染に関連した業務に携わる方々にとっても広く使用できる計算尺であろう。

ばい煙の拡散について計算例を入れて説明する。

2. ばい煙拡散の様相

産業排ガスによる大気汚染で最も問題となるのは燃焼に伴い発生するいおう酸化物、ばいじん、窒素酸化物等の有害物質など、大気汚染防止法で云う「ばい煙」であろう。ばい煙による大気汚染の対策として拡散による稀釈が期待でき、各々排出基準が定められている。特に、石油、石炭の燃焼によって発生するいおう酸化物の排出基準には有効煙突高度と云う考えが用いられている。

煙突から排出された煙は吐出速度（運動量）と温度差（浮力）の効果で上昇しながら風に流れされ、しだいに水平に流れつつ拡散する。この上昇の様相を示したのが図一1である。



図-1 煙の上昇と拡散の様相 (H_0 は煙突高度、 H_m は運動量上昇度、 H_f は浮力上昇高度、 H_e は有効煙突高度)

運動量による上昇高度 H_m 、浮力による上昇高度 H_f と煙突の高度 H_0 の和が有効煙突高度 H_e である。

煙突の風下の地上に現れる汚染濃度は排ガスが有効煙突高度 H_e の高さから水平に拡散した場合とほとんど等しくなる。このため、汚染濃度の計算では、まず有効煙突高度 H_e を計算し、ついで排ガスが有効煙突高度から水平に拡散したと仮定して濃度計算を行なう。

大気汚染は汚染質が人間や動植物の生活圏である地上附近へ侵入して来るために発生する。このため、地面上での汚染質の濃度を求めるなくてはならない。これを着地濃度と呼ぶ。

単一の煙突の風下における着地濃度は風向と平行な軸上で最も高く、また煙突からある距離だけ風下のところが最大になる。この主軸上における着地濃度の分布を図-2に示す。

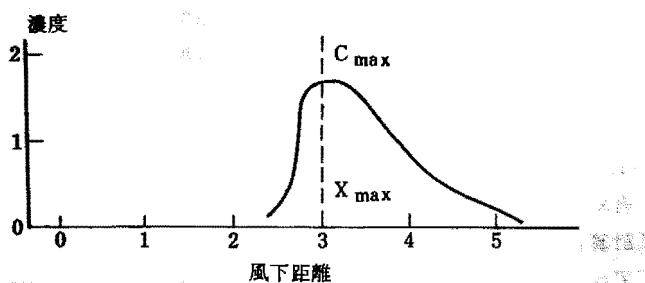
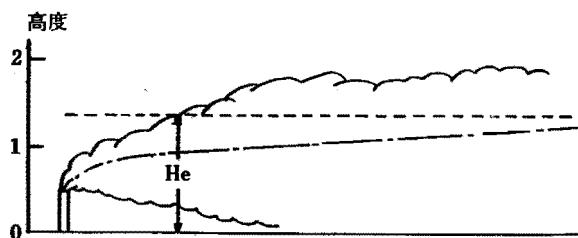


図-2 煙突の風下軸上における排ガス濃度分布と有効煙突高度の関係
(H_e は有効煙突高度、 C_{max} は最大着地濃度、 X_{max} は C_{max} の出現する風下距離、濃度、風下距離、高度は比例単位である)

この主軸上で発生する最大濃度を最大着地濃度と呼び、またその起る距離を最大着地濃度出現距離と呼ぶ。

最大着地濃度を基準値（環境基準値など）以下に保つように排出量、排出条件を制御することによってばい煙による大気汚染を抑えることができる。

最大着地濃度とその出現距離は有効煙突高度、気象条件（風の流れ、風速、温度の鉛直勾配など）、地面粗度などによって広範囲に変化する。

3. 有効煙突高度の計算

排ガスの上昇高度の計算式にはBosanquetの第1式、Hollandの式などいくつかの実験式が知られている。

大気汚染防止法でいおう酸化物の排出基準に用いられているのはこのBosanquetの第1式である。

大気汚染防止法(第3条)ではいおう煙の排出基準が定められている。このうちいおう酸化物の排出基準は同法施行規則(第3条)で次のように規定されている。

いおう酸化物の排出基準は次の式により算出したいおう酸化物の量とする。

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

この式において q 、 K 、および H_e はそれぞれ次の値を表わすものとする。

q いおう酸化物の量(単位、温度0°C、圧力1気圧の状態に換算した量 m^3/h)

K 地域ごとに定められた値

H_e 次の式で計算した高度(有効煙突高度)(m)

$$H_e = H_o + 0.65 (H_m + H_t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$H_m = \frac{0.795 \sqrt{QV}}{1 + \frac{2.58}{V}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$H_t = 2.01 \times 10^{-3} \cdot Q \cdot (T - 288) \cdot (2.30 \log J + \frac{1}{J} - 1) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$J = \frac{1}{\sqrt{QV}} (1460 - 296 \times \frac{V}{T - 288}) + 1$$

これらの式において H_e 、 H_o 、 Q 、 V および T は、それぞれ次の値を表わすものとする。

H_e 補正された排出口の高さ(有効煙突高度、m)

H_o 排出口の実高さ(煙突高度、m)

Q 温度15°Cにおける排出ガス量(m^3/s)

V 排出ガスの排出速度(m/s)

T 排出ガスの温度(°K)

(1)式の K の値は表-1のように定められている。

有効煙突高度の計算例を次に示す。

〔計算例1〕

$T = 350^\circ\text{K}$ 、 $V = 20 \text{ m/s}$ 、 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ のとき、 H_t 及び H_m を求めよ。

(解) 計算尺表面の目盛りは1のグループ(青)、2のグループ(赤)、3のグループ(黒)の3種に分類されています。1のグループでまず J の値を求め、続いて2のグループで H_t 、3のグループで H_m を求めます。各グループに示してある番号1~1、1~2等は目盛りを使う順番を示しています。また1~4、2~4等、□印で囲った番号は、この目盛りに答が出ることを示しています。

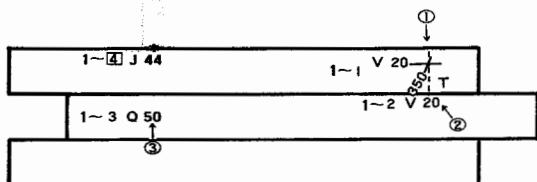
a) 1のグループを使って J を求める。

① 1~1 図表を用い、 $T = 350^\circ\text{C}$ 、 $V = 20 \text{ m/s}$ の交点にカーソル線を合わせる。

- ②滑尺を動かして 1~2 V 尺の 20 をカーソル線に合わせる。
 ②カーソル線を 1~3 Q 尺の 50 に移動すると 1~4 J 尺に $J = 44$ が求められる。

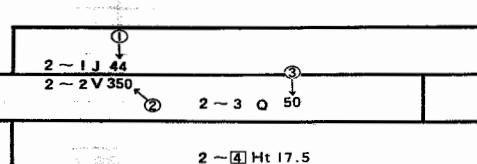
表1 いおう酸化物の一般排出基準

号	県	地 区	旧基準	47.1.5 新基準 (K値)	48.1.1 新基準 (K値)	号	県	地 区	旧基準	47.1.5 新基準 (K値)	48.1.1 新基準 (K値)	
1	北海道	札 蘭	15.8	9.34	9.34	12の2	兵 庫	大 阪	B	17.5	11.7	9.34
1の2	室 吉	小 牧	14.0	9.34	9.34	13	神 戸	戸 等	等	11.7	7.01	6.42
1の3	青 八	森 戸	14.0	14.7	11.7	13の2	板 棚	路 等	等	14.0	9.34	7.59
1の4	八 手	森 戸	26.3	14.0	14.0	13の3	相 生	山 等	等	26.3	18.7	15.8
1の5	岩 手	釜 石	26.3	18.7	18.7	13の4	和 歌 山	和 歌 山	山 等	14.0	9.34	7.59
1の6	宮 城	仙 台・塙 釜 等	26.3	15.8	11.7	13の5	岡 山	岡 山	山 等	26.3	18.7	18.7
1の7	福 岐	石 卷 等	26.3	15.8	14.0	14	岡 岩	倉 敷	A	12.8	7.59	7.59
1の8	秋 川	田 田	26.3	15.8	14.0	14の2	倉 笠	倉 敷	B	12.8	9.34	9.34
1の9	山 形	酒 田	26.3	18.7	18.7	14の3	廣 島	廣 島	廣 島	12.8	12.8	9.34
2	福 岛	郡 酒	17.5	15.8	14.0	14の4	廣 島	廣 島	廣 島	26.3	14.0	9.34
2の3	茨 城	い い き	14.0	14.0	11.7	14の6	三 真	大 里	大 里	23.3	14.0	11.7
2の4	鹿 島	鹿 島 等	12.8	11.7	11.7	14の7	福 岸	大 里	大 里	26.3	18.7	18.7
3	日 立	日 立	17.5	14.0	11.7	14の8	大 里	大 里	大 里	12.8	12.8	9.34
3の2	栃 木	宇都宮・足利 等	15.8	15.8	14.0	15	山 口	山 口	山 口	17.5	11.7	9.34
3の3	群 馬	安 中・高崎 等	14.0	14.0	11.7	15の2	下 關	下 關	下 關	26.3	14.0	11.7
4	埼 玉	川 口・鳩谷 等	15.8	9.34	7.59	15の3	下 關	下 關	下 關	26.3	18.7	15.8
5	千 葉	千葉・市原 等	12.8	7.59	7.59	16	宇 防	宇 防	宇 防	20.4	11.7	9.34
6	東 京	東 京 A	11.7	7.01	6.42	16の2	防 德	防 德	防 德	26.3	15.8	14.0
6の2	神奈川	東 京 B	17.5	11.7	11.7	17	山 田	山 田	山 田	33.3	14.0	9.34
7	横 浜	浜・川崎 等	11.7	7.01	6.42	18	和 木	和 木	和 木	17.5	11.7	9.34
8	新 潟	湯 津 等	20.4	11.7	11.7	18の2	島 田	島 田	島 田	15.8	15.8	11.7
9	富 山	富 山・高岡 等	20.4	11.7	11.7	18の3	香 亂	香 亂	香 亂	14.0	14.0	9.34
9の2	石 川	金 沢	26.3	15.8	15.8	18の4	川 滝	川 滝	川 滝	17.5	11.7	11.7
9の3	福 井	福 井	26.3	15.8	15.8	18の5	島 田	島 田	島 田	14.0	14.0	14.0
9の4	福 岐	賀 富	26.3	15.8	15.8	19	九 州	九 州	九 州	14.0	9.34	7.59
9の5	静 岡	富 士	14.0	7.59	7.59	19の2	福 岡	福 岡	福 岡	26.3	18.7	18.7
9の6	愛 知	清 水	26.3	14.0	9.34	20	大 里	大 里	大 里	17.5	11.7	9.34
10	名 古 屋	古 屋 等	14.0	7.59	6.42	20の2	長 里	長 里	長 里	26.3	11.7	9.34
10の2	豊 田	半 橋	12.8	12.8	11.7	20の3	熊 本	熊 本	熊 本	26.3	18.7	18.7
10の3	瀬 戸	戸 等	12.8	12.8	7.59	20の4	長 荒	長 荒	長 荒	17.5	11.7	9.34
10の4	三 重	四 日	11.7	7.01	6.42	20の5	分 岐	分 岐	分 岐	14.0	9.34	9.34
11	滋 賀	大 津	26.3	15.8	15.8	20の6	宮 延	宮 延	宮 延	26.3	15.8	11.7
11の2	京 都	京 都 等	15.8	9.34	9.34	20の7	鹿 尾 島	鹿 尾 島	鹿 尾 島	26.3	15.8	15.8
11の3	大 阪	大 阪 A	11.7	7.01	6.42		内 延 川	内 延 川	内 延 川	26.3	22.2	22.2
12							その他の地域	その他の地域	その他の地域			



b) 2 のグループを使って H_t を求める。

- ① 2~1 J 尺の 44 にカーソル線を合わせる。
 ② 滑尺を動かして 2~2 T 尺の 350 をカーソル線に合わせる。
 ③ 2~3 Q 尺の 50 にカーソル線を移動すると 2~4 H_t 尺に $H_t = 17.5 \text{ m}$ が求められる。

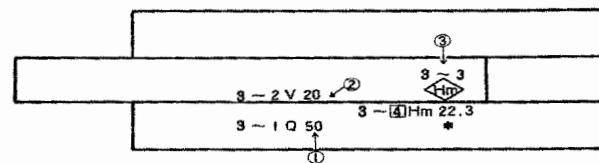


c) 3のグループを使って H_m を求める。

① 3～1 Q 尺の 50 にカーソル線を合わせる。

② 滑尺を動かして 3～2 V 尺の 20 をカーソル線に合わせる。

③ カーソル線を 3～3 Hm 尺印に移動すると 3～4 Hm 尺に $H_m = 22.3\text{m}$ が求められる。



有効煙突高度の計算で、吐出速度と煙突出口の直径が与えられている場合、排ガス量は次式で求めればよい。また排ガス量と煙突出口の直径が与えられている場合には、次式から吐出速度を逆に求めればよい。

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{288}{T} \cdot d^2 \cdot V \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし Q 15°C に換算した排ガス量 (m^3/s)

T 排ガス温度 ($^\circ\text{K}$)

d 煙突の直径 (m)

V 吐出速度 (m/s)

計算例を次に示す。

[計算例 2]

$H_e = 30\text{m}$ 、 $V = 10\text{m/s}$ 、 $T = 488^\circ\text{K}$ 、

煙突出口径 $d = 1.5\text{m}$ のとき、 H_e を求めよ。

[解]

a) 煙突出口断面積 A を求める。

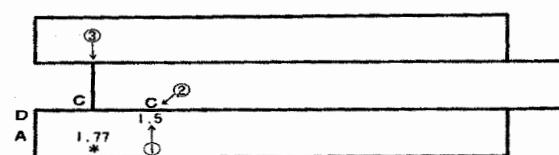
$$A = \frac{\pi}{4} \times 1.5^2 = 1.77$$

計算尺裏面を使用し、

① D 尺の 1.5 にカーソル線を合わせる。

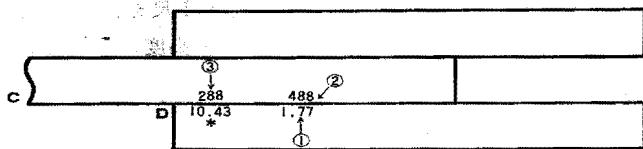
② 滑尺を動かして C 尺のゲージマーク "C" をカーソル線に合わせる。

③ カーソル線を C 尺の基線(1)に移動すると A 尺に $\frac{\pi d^2}{4} = 1.77$ が求められる。



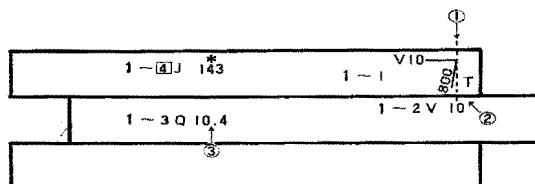
b) 15°Cに換算した排出量Qを求める。

$$Q = A \times V \times \frac{288}{T} = 1.77 \times 10 \times \frac{288}{488} = 10.4 \text{ m}^3/\text{s}$$



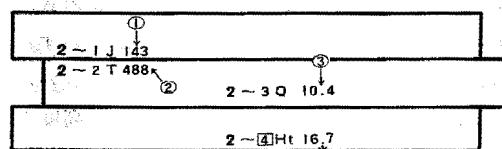
以上でQ、V、Tの条件がそろうので、〔計算例1〕と同様の操作により、J、H_t、H_mを求めることができる。

c) Jを求める。

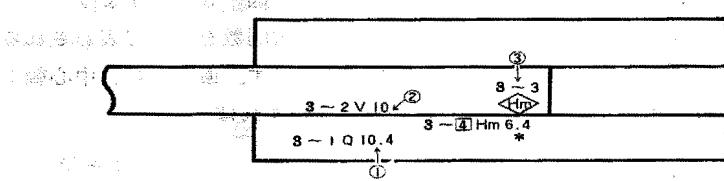


(注) 1~1のグラフを使う場合、温度T=488°Kは切り上げてT=800の線を使ってよい。

d) H_tを求める。

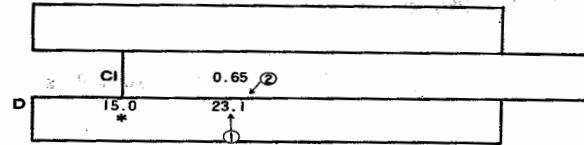


e) H_mを求める。



f) H_eを求める。

$$\begin{aligned} H_e &= H_t + 0.65(H_m + H_t) \\ &= 100 + 0.65(6.4 + 16.7) \\ &= 100 + 0.65 \times 23.1 = 115 \end{aligned}$$



(注) 0.65×23.1 の部分は計算尺 D、C I 尺を利用して計算します。
大気汚染防止法で採用されている上昇高度の計算式は次の Bosanquet の第 1 式から導かれた。

$$H_m = \frac{4.77}{1 + \frac{0.43U}{V}} \frac{\sqrt{QV}}{U} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} H_t &= 6.37 g \frac{Q \Delta T}{U^3 T_1} \left(\log_e J^2 + \frac{2}{J} - 2 \right) \\ J &= \frac{U^2}{\sqrt{QV}} \left(0.43 \sqrt{\frac{T_1}{g(d\theta/dz)}} - 0.28 \frac{V_g T_1}{g \Delta T} \right) + 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

ただし T_1 大気の平均温度 ($^{\circ}\text{K}$)

U 風速 (m/s)

ΔT 排ガスと大気の温度差 ($^{\circ}\text{K}$)

g 重力の加速度 (m/s^2)

$d\theta/dz$ 大気の温位勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

Q 温度 T_1 に換算した排ガス量 (m^3/s)

V 吐出速度 (m/s)

上式で $U = 6 \text{ m}/\text{s}$ 、 $T_1 = 288 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 、 $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 、 $d\theta/dz = 0.0033 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と置いて係数を整理したのが大気汚染防止法で用いられている上昇式である。

Bosanquet の第 1 式の他には Holland の式、Bosanquet の第 2 式、Priestley の式などの実験式があるが、いずれの式においても排ガスの上昇高度は、吐出速度、排ガス量が大きいほど高くなり、また排ガス温度が高いほど、また風速が小さい程高度が増す。

4. 拡 散 式

有効煙突高度から連続的に放出され、水平に拡散するばい煙を考える。1時間程度の平均濃度を取ると煙は図-3に示すような形になる。

ばい煙の濃度分布は一般にガウス分布関数を使って表わされる。水平（横風）方向の濃度分布を図-4に示す。濃度を C 、中心軸上における濃度を C_0 、中心からの距離を y とすれば

$$C = C_0 e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし e は自然対数の底 (2.718……)、

σ_y は濃度分布の標準偏差で拡散幅と呼ばれる。

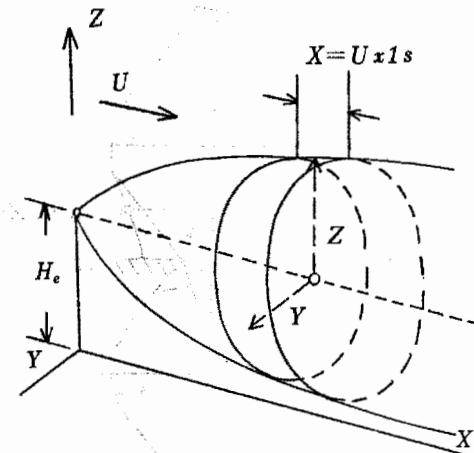


図-3 時間平均を取った煙の形
(x, y, z は座標軸, u は風速, H_e は有効煙突高度, YZ は煙の拡がりを示す)

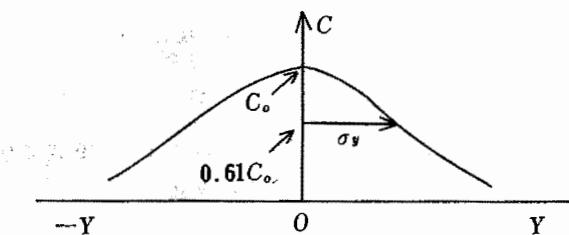


図-4 水平(横風)方向の濃度分布
(C は濃度, C_0 は中心濃度 y は煙の中ぐらの距離,
 σ_y は分布の標準偏差である)

図-4に示すように拡散幅 σ_y は中心濃度 C_0 の $1/\sqrt{e}$ の濃度値になる中心からの距離に等しい。

鉛直方向の濃度分布は、地面でばい煙が反射される場合と吸収される場合で異なる。いおう酸化物などについて反射される場合を標準にする。

この場合濃度分布は2つのガウス分布関数を使って表わされる。すなわち、図-5に示すように地面を鏡面として虚像を実像の濃度に重ねた分布で濃度が表わされる。

地面から Z (m) の高さの所は実像の煙の中心軸から $H_e - Z$ (m)、虚像の煙の中心軸から $H_e + Z$ (m) 離れているから、中心の濃度を C_0 、鉛直方向の煙の拡散幅(濃度分布の標準偏差)を σ_z として濃度 C は次式で表わされる。

$$C = C_0 \left(e^{-\frac{(H_e-Z)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(H_e+Z)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad \dots\dots (9)$$

ただし H_e は有効煙突高度、他の記号は前出のとおりである。

中心における濃度 C_0 は煙の量の保存の条件(連続の条件)から決定される。すなわち、1秒に q (gr, m³, など)だけ汚染質が排出された場合、図-3に示す x 軸の方向(風向と平行)に平均風速 U だけ

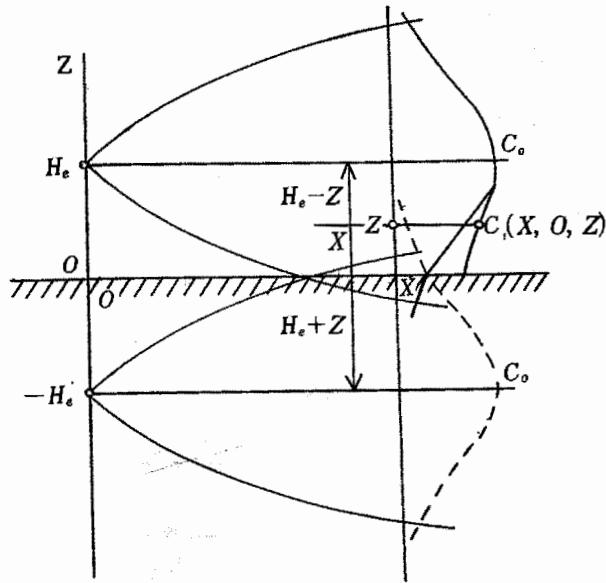


図-5 垂直方向の濃度分布と煙の形（反射の場合）
(C(x, 0, z)は合成されたx軸上の濃度を示す)

引延ばされ、横風方向 y 、鉛直方向 z については(8)、(9)式で与えられるように濃度が分布するから、次の関係が成立つ。

$$q = U \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C dy dz \quad \dots \dots \dots (10)$$

これより中心濃度 C_o は

$$C_o = \frac{q}{2 \pi \sigma_y \sigma_z U} \quad \dots \dots \dots (11)$$

したがって煙源の風下の任意の場所 x 、 y 、 z における濃度 C は次式で与えられる。

$$C = \frac{q}{2 \pi \sigma_y \sigma_z U} e^{-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(H_e - Z)^2}{2 \sigma_z^2}} + e^{-\frac{(H_e + Z)^2}{2 \sigma_z^2}} \right) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ただし C 濃度 (m^{-3})

q 汚染質の排出量 (s^{-1})

σ_y, σ_z 各々横風方向、鉛直方向の拡散幅 (m)

U 風速 (m/s)

H_e 有効煙突高度 (m)

y, z 座標軸で図-3のように取る (m)

汚染質の排出量が m^3/s で与えられる場合、(12)式で計算した濃度を 1000000 倍すれば ppm 単位の濃度になる。

濃度を具体的に計算するには拡散幅 σ_y, σ_z の値を求めなくてはならない。 σ_y, σ_z は煙突からの風下距離と共に大きくなり、風速、大気安定度、地面粗度などの気象と地面の条件によって変化する。

拡散幅 σ_y, σ_z の表わし方の相異によっていくつかの拡散式が分れる。最も一般的に広く使われているのは Sutton の拡散式である。Sutton

の拡散式では σ_y 、 σ_z と風下距離 x の関係は次式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_y = \frac{C_y}{\sqrt{2}} x^{1-\frac{n}{2}} \\ \sigma_z = \frac{C_z}{\sqrt{2}} x^{1-\frac{n}{2}} \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (13)$$

ただし x 風下距離 (m)

C_y 、 C_z 、 n Sutton の拡散パラメータ

(13)式を(12)式に代入すれば Sutton 拡散式になる。煙突の丁度風下(x 軸上)で、着地濃度は(12)、(13)式で $y = z = 0$ と置いて次のように与えられる。

$$C_{\infty} = \frac{2 q}{\pi C_y C_z x^{2-n} U} e^{-\frac{H_e^2}{C_z^2 x^{2-n}}} \dots \dots \dots \quad (14)$$

ただし C_{∞} x 軸上での着地濃度

他の記号は前出のとおりである。

前述した最大着地濃度とその出現距離(図-2参照)は(14)式から求められる。すなわち

$$C_{\max} = \frac{2 q}{e \pi U H_e^2} \left(\frac{C_z}{C_y} \right) \dots \dots \dots \quad (15)$$

$$x_{\max} = \left(\frac{H_e}{C_z} \right)^{\frac{2}{2-n}} \dots \dots \dots \quad (16)$$

ただし C_{\max} 最大着地濃度 (m^{-3})

x_{\max} C_{\max} の出現距離 (m)

q 汚染質の排出量 (s^{-1})

H_e 有効煙突高度 (m)

U 風速 (m/s)

C_y 、 C_z 、 n Sutton の拡散パラメータ

Sutton の拡散パラメータ C_y 、 C_z 、 n は実験によって決定され、これは大気の安定度によって変化する。実測例を表-2に示す。

表2 Sutton の拡散パラメーターの値

地上からの汚染源の高さ (m)	強いてい減 (n=0.20) C_y		弱いてい減または中立 (n=0.25) C_y		中位の逆転 (n=0.33) C_y		強い逆転 (n=0.50) C_y	
	C_z	C_z	C_z	C_z	C_z	C_z	C_z	C_z
0	0.37	0.21	0.21	0.12	0.21	0.074	0.080	0.047
10	0.37	0.21	0.21	0.12	0.12	0.074	0.080	0.047
25	0.21	—	0.12	—	—	0.074	0.074	—
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	—

(Air pollution Handbook, 1956より)

またいおう酸化物の濃度を求める時、代表値として

$$C_y = 0.07, C_z = 0.47, n = 0.25$$

を用いることがある。

いおう酸化物の排出基準(1)式と最大着地濃度(15)式を比較すれば明らかなように C_{max} は K に比例する。

Sutton の拡散パラメータが上に示した代表値で、風速 $U = 6 \text{ m/s}$ の場合、

$$C_{max} (\text{ppm}) = 0.00171K \dots \dots \dots (17)$$

となる。

計算例を次に示す。

〔計算例 3〕

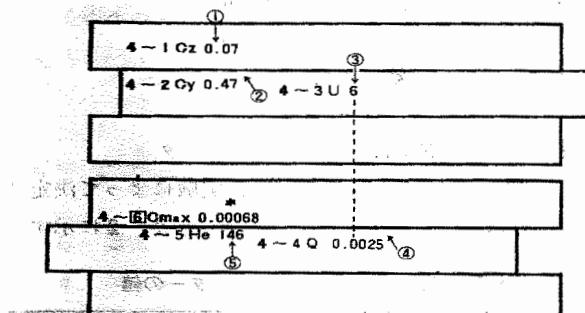
$Q = 0.0025 \text{ m}^3/\text{s}, U = 6 \text{ m/s}, C_y = 0.47, C_z = 0.07, n = 0.25, H_e = 146 \text{ m}$ のとき、 C_{max}, X_{max} を求めよ。

(解)

計算尺裏面の目盛りは、4のグループ(青)5のグループ(黒)6のグループ(赤)に分かれています。4のグループで C_{max} を求めます。5のグループで X_{max} の式のうち $\frac{H_e}{C_z}$ の部分を求め、続いて6のグループで X_{max} を求めます。

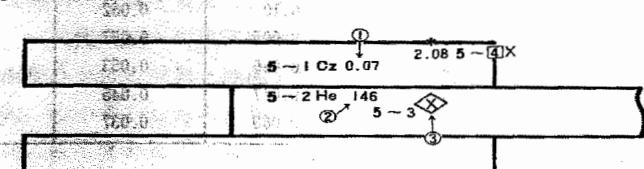
a) 4のグループを使って C_{max} を求める。

- ① 4～1 C_z 尺の 0.07 にカーソル線を合わせる。
- ② 滑尺を動かして 4～2 C_y 尺の 0.47 をカーソル線に合わせる。
- ③ カーソル線を 4～3 U 尺の 6 に移動する。
- ④ 滑尺を動かして 4～4 Q 尺の 0.0025 をカーソル線に合わせる。
- ⑤ カーソル線を 4～5 H_e 尺の 146 に移動すると 4～[6] C_{max} 尺に 0.00068 PPM が求められる。



b) 5のグループを使って $X = \frac{H_e}{C_z}$ を求める

- ① 5～1 C_z 尺の 0.07 にカーソル線を合わせる。
- ② 滑尺を動かして 5～2 H_e 尺の 146 をカーソル線に合わせる。
- ③ カーソルを 5～3 ◇ 印に移動すると 5～[4] X 尺に 2.08 km が求められる。



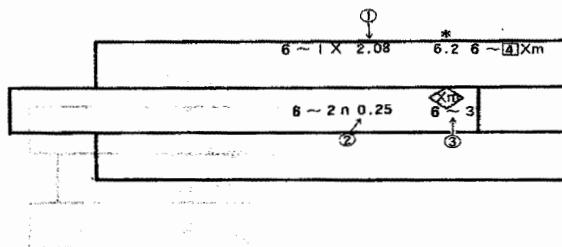
(注) 5~2He 尺は本来黒のグループに属しますが、この目盛りは 4 のグループと共通に使用するため、青色となっています。

c) 6 のグループを使って X_{max} を求める。

① 6~1 X 尺の 2.08 にカーソル線を合わせる。

② 滑尺を移動して 6~2 n 尺の 0.25 をカーソル線に合わせる。

③ カーソル線を 6~3 $\triangle K_m$ 印に移動すると、6~4 Xm 尺に X_{max} = 6.2km が求められる。



(注) 6~1 X 尺と 6~4 Xm 尺は共通目盛りになっています。

上昇式、拡散式を組合せた計算例を次に示す。

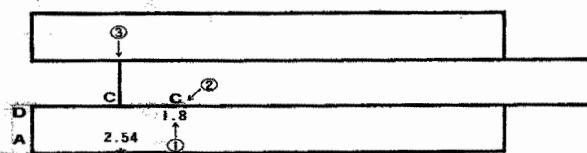
【計算例 4】

$H_o = 50\text{m}$ 、 $d = 1.8\text{m}$ の煙突から 0.1% の SO_2 を含む排気ガスが、 $T = 150^\circ\text{C}$ 、 $V = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ で排出されている。

$U = 5 \text{ m/s}$ 、温度 15°C の大気条件で C_{max} と X_{max} を求めよ。ただし $n = 0.25$ 、 $C_x = 0.10$ 、 $C_y = 0.46$ とする。

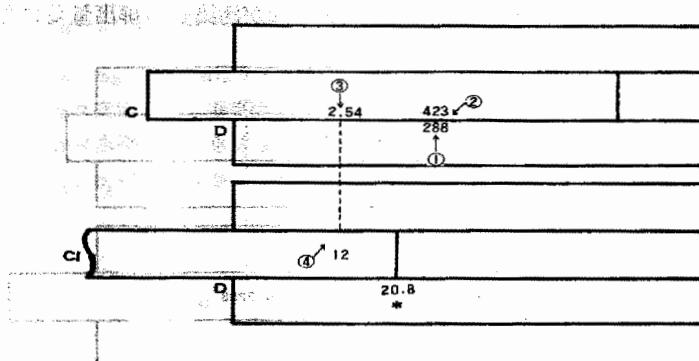
a) 排出口の断面積

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = 2.54 \text{ m}^2$$

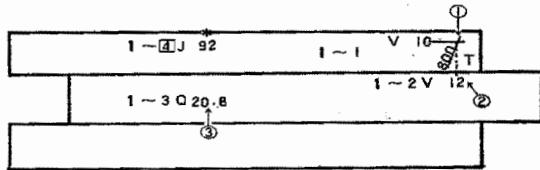


b) 排出量 Q' (15°C に換算)

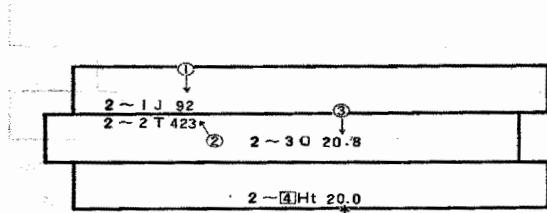
$$Q' = A \times V \times \frac{288}{273 + T} = 2.54 \times 12 \times \frac{288}{423} = 20.8$$



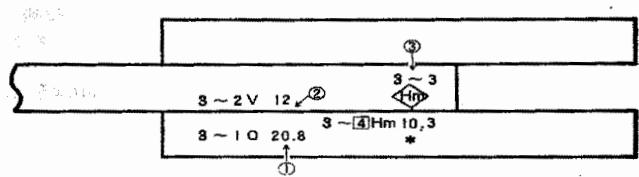
c) $Q = 20.8 \text{m}^3/\text{s}$, $V = 12 \text{m}/\text{s}$, $T = 423^\circ\text{K}$ より J を求める。



d) H_t を求める。

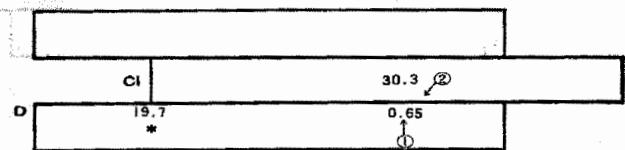


e) H_m を求める。



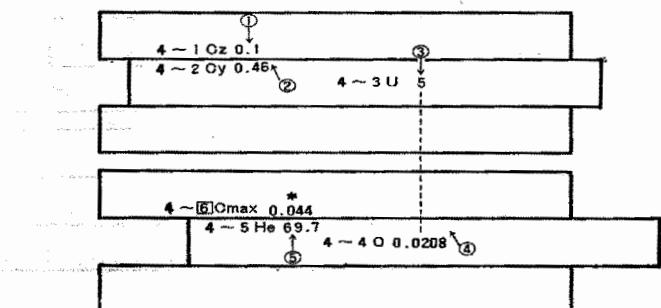
f) H_e を求める。

$$\begin{aligned} H_e &= H_o + 0.65 (H_m + H_t) \\ &= 50 + 0.65 (10.3 + 20) = 69.7 \end{aligned}$$



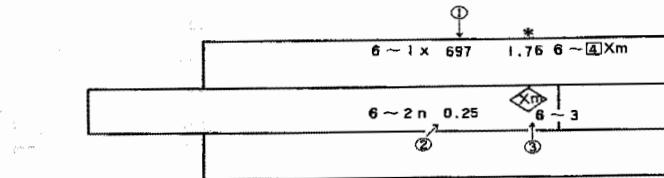
g) C_{max} を求める。

排ガス量 $20.8 \text{の} 0.1\% = 0.0208 \text{m}^3/\text{s}$ が汚染質の排出量 Q になる。



h) X_{max} を求める。

$$\frac{He}{Cz} = \frac{69.7}{0.1} = 697$$



(注) この計算尺の各変数の目盛り範囲は、多くの資料により、充分と思われる幅をとっていますが、特に排出量の大きい煙突の場合、 C_{max} の計算でQ尺の目盛り範囲を越えることがあります。その場合は、Q尺の読みを10倍して計算し、求めた答 C_{max} をやはり10倍すれば正しい答が得られます。

C_y 、 C_z についても同様です。

Suttonの拡散式の他、Pasquillの式、Cramerの式などが用いられる場合もある。いずれも式の型は(12)式と同じで、拡散幅 σ_y 、 σ_z の表わし方が異なるだけである。

いずれも σ_y 、 σ_z は次のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_y = ax^a \\ \sigma_z = \beta x^b \end{array} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

ただし a 、 β 、 a 、 b は定数、 x は風下距離(m)である。

定数 a 、 β 、 a 、 b の表わし方は表-3に示すとおりである。

表3 種々の実用的な拡散式と係数 a 、 β 、 a 、 b の関係

	α	β	a	b
Sutton (1953)	$C_d/\sqrt{2}$	$C_s/\sqrt{2}$	$1-n/2$	$1-n/2$
Leonard (1958)	$C_d/\sqrt{2}$	$C_s/\sqrt{2}$	m_y	m_z
Inoue (1959)	$(v')^{1/2}/U$	$(w')^{1/2}/U$	1	m
Cramer (1957)	σ_A	σ_E	p	q

記号は原著者のものをそのまま用いた。

C_y 、 C_z 、 n 、 m_y 、 m_z 、 m は大気安定度別に数値で与えられる。

v' 、 w' は各々横風方向と垂直方向の風速の変動値、横線は時間平均を示す。

σ_A 、 σ_E は各々水平風向と垂直風向の標準偏差

p 、 q は σ_A 、 σ_E の値別に与えられる。

Pasquillの式では拡散幅 σ_y 、 σ_z は表-4に示すPasquillの安定度別に図-6で与えられる。

表-4 Pasquillの安定度分類

地上風速 (m/s)	日 射 量 (cal/cm ² /h)			本 曇 (8~10) 本 曇 の 夜	夜	
	>50	49~25	<24		上層曇(10~5) 中, 下層曇(7~5)	曇 (4~0)
< 2	A	A~B	B	D	—	—
2~3	A~B	B	C	D	E	F
3~4	B	B~C	C	D	D	E
4~6	C	C~D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D

但し A : 強不安定 B : 並不安定 C : 弱不安定 D : 中立 E : 弱安定 F : 並安定

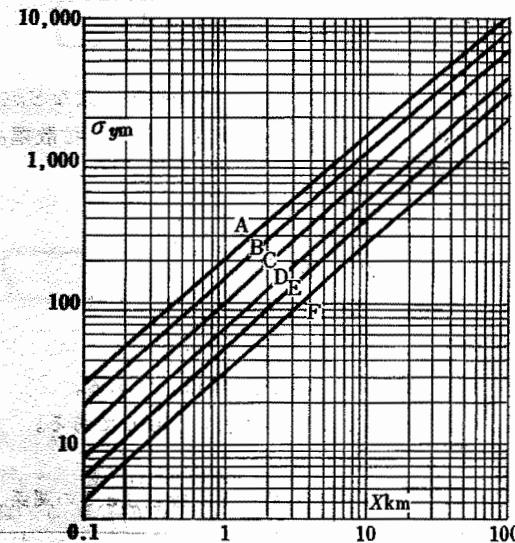


図-6(a) パスキルの水平拡散幅 (A~Fは安定度、表4参照)

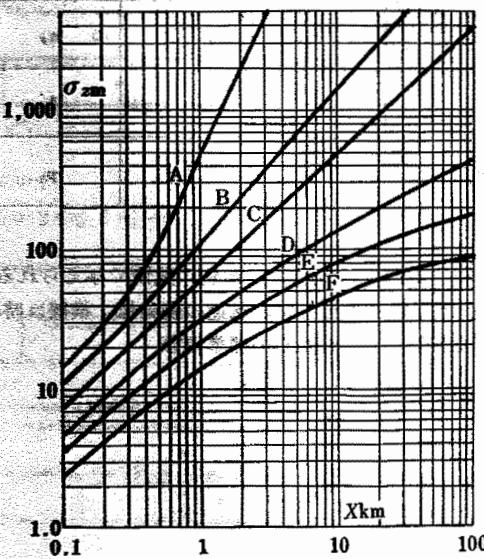


図-6(b) パスキルの垂直拡散幅 (A~Fは安定度、表4参照)

いずれの式でも、(18)式の $a = b$ の場合、次のような変数変換をすることによって、最大着地濃度とその出現距離を計算尺で求めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} n = 2(1-a) = 2(1-b) \\ Cy = \sqrt{2}a \\ Cz = \sqrt{2}b \end{array} \right\} \cdots \cdots \cdots \quad (19)$$

5 計算式(上昇式、拡散式)の限界

上昇式 (Bosanquet の第1式) は平坦地上で一様な風が吹き、温位勾配 ($d\theta/dz$) が正の場合、すなわち安定な大気にのみ適用できる。地形の複雑な場所での上昇高度は上昇気流、下降気流の影響を受けるため計算値と合わなくなる。また大気の温位勾配が零、あるいは負の場合には上昇高度は Bosanquet の第1式による計算値よりずっと高くなる。地形の凹凸ばかりでなく、煙突背後にできる渦に煙がまき込まれて下降するダウンウォッシュや、附近の建物などの背後に発生する渦にまき込まれて煙が下降するダウンドラフトなどの現象が起る場合、上昇式は適用できない。

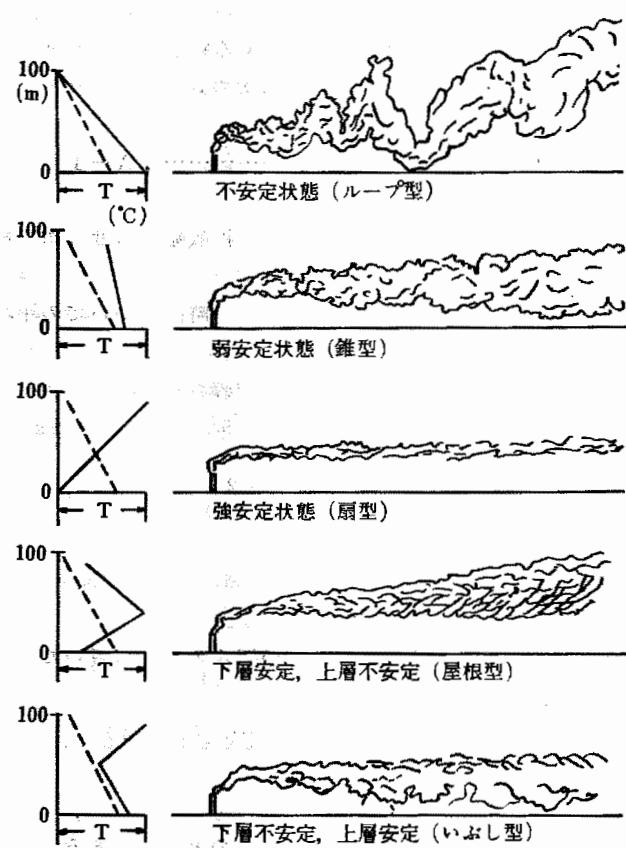


図-7 典型的な煙の形と対応する気温勾配
(点線は断熱減率を示す)

* このようなダウンウォッシュ、ダウンドラフト現象の発生した場合や地形の起伏の激しい場所での上昇高度、有効煙突高度の予測は風洞による模型実験によって行なわれる。

Sutton 式などの拡散式も平坦地で風が一様に吹き、温度の鉛直勾配も高度によらず一定な場合で、平均風向の変化がない場合に適用できるものである。またダウンウォッシュ、ダウンドラフト現象が発生すると有効煙突高度が不正確になり、この場合も拡散式をそのまま適用することはできない。瞬間的な煙の形と温度勾配の関係は図-7に示すようになるが、温度勾配が高さと共に変化している場合（図-7の屋根型、いぶし型）には拡散式による着地濃度と実際の濃度が相当に異なる。図-7の屋根型の場合、着地濃度は極めて小さくなり、逆にいぶし型の場合には計算値より着地濃度は高くなる。

地形の起伏の激しい場合には、一般に平坦地より着地濃度が高くなるが、定量的な予測は風洞による模型実験や現地でのトレーサー実験などによって行なわなくてはならない。

いずれにしても、上昇式、拡散式を用いて汚染濃度の予測を行なうにはこれらの適用限界に十分注意することが大切である。

附記 Suttonの拡散式

Sutton の拡散式は乱流の統計理論に基づいて求められた。乱流の統計理論によれば、煙などの大気中を浮遊する粒子の速度を v (y の方向、図-3参照) とし、その拡散幅 σ_y は次の式で与えられる。

$$\sigma_y^2 = 2 \overline{v^2} \int_0^T (T - \xi) R(\xi) d\xi \quad (A-1)$$

ただし σ_y は放出されてから T 時間後の拡散幅（濃度分布の標準偏差）

$\overline{v^2}$ は粒子の速度、横線は十分長い時間についての平均を取ることを示す。

$R(\xi)$ は速度の自己相関係数で次式で定義される。

$$R(\xi) = \frac{\overline{v(t+\xi)v(t)}}{\overline{v^2}} \quad (A-2)$$

ただし t は任意の時間

ξ はセバレーション時間である。

Sutton は $R(\xi)$ を、次元解析に基づいて次のように置いた。

$$R(\xi) = \left(\frac{v}{v + v^2 \xi} \right)^n \quad (A-3)$$

ただし n は分子拡散係数

n は実験定数、他の記子は前出のとおりである。

(A-3)式を(A-1)に代入し、積分を行なって拡散幅 σ_y は次のように与えられる。

$$\sigma_y^2 = \frac{2\nu^n}{(1-n)(2-n)\bar{v}^2} (\nu + \bar{v}^2 T)^{2-n}$$

$$= \frac{2\nu^n}{(1-n)(2-n)\bar{v}^2} - \frac{2\nu T}{1-n} \quad \dots \quad (A-4)$$

分子拡散係数 ν は $\bar{v}^2 T$ よりずっと小さいから、

$$\sigma_y^2 = \frac{2\nu^n}{(1-n)(2-n)\bar{v}^2} - (\bar{v}^2 T)^{2-n}$$

$$= \frac{1}{2} C_y^2 (\bar{v}^2 T)^{2-n} \quad \dots \quad (A-5)$$

ただし

$$C_y = \frac{4\nu^n}{(1-n)(2-n)U^n} \left(\frac{\bar{v}^2}{U^2}\right)^{1-n} \quad \dots \quad (A-6)$$

ただし U は風速である。

同様に垂直方向の拡散幅 σ_z は v を垂直方向の変動速度 w に置き換えれば求められる。

$$C_z = \frac{4\nu^n}{(1-n)(2-n)U^n} \left(\frac{\bar{w}^2}{U^2}\right)^{1-n} \quad \dots \quad (A-7)$$

係数 n は風速分布と次の関係がある。

$$U(z) = U_1 \left(\frac{Z}{Z_1}\right)^{\frac{n}{2-n}} \quad \dots \quad (A-8)$$

ただし $U(z)$ 、 U_1 は各々高度 z 、 z_1 における風速である。

Sutton の拡散式のパラメータ— C_y 、 C_z 、 n は 2 高度における平均風速 U と横風方向と垂直方向の変動速度 \bar{v}^2 、 \bar{w}^2 の測定値から (A-6)、(A-7) 式を使って算出できる。

Sutton 式による着地濃度 $C(x, y)$ をまとめておく。

(1) 連続点源からの拡散

$$C(x, y) = \frac{2Q}{\pi C_y C_z U x^{2-n}} \exp \left[-x^{n-2} \left(\frac{y^2}{C_y^2} + \frac{H_e^2}{C_z^2} \right) \right] \dots \quad (A-9)$$

(2) 瞬間点源からの拡散

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi^{\frac{1}{2}} C_x C_y C_z x^{\frac{1}{2}(2-n)}} \exp \left[x^{n-2} \left(\frac{x^2}{C_z^2} + \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{H_e^2}{C_x^2} \right) \right] \dots \quad (A-10)$$

(3) 風向と直角に長さ $2y_o$ の連続線源

$$C(x, y) = \frac{Q \exp[-H_e^2 / C_z^2 x^{2-n}]}{\sqrt{\pi} C_x U x^{1-\frac{n}{2}}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y_o - y}{C_y x^{1-\frac{n}{2}}} \right) \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf} \left(\frac{y_o + y}{C_y x^{1-\frac{n}{2}}} \right) \right] \dots \quad (A-11)$$

(4) 風向と直角で無限に長い連続線源

$$C(x, y) = \frac{2Q}{\sqrt{\pi} C_s U_x^{1-n}} \exp \left(-\frac{H_s^2}{C_s^2 x^{2-n}} \right) \dots \dots \dots \quad (A-12)$$

ただし $\exp(-p) = e^{-p}$

$$\operatorname{erf}(p) = \int_p^\infty e^{-t^2} dt$$

他の記号は前出のとおりである。

第二章

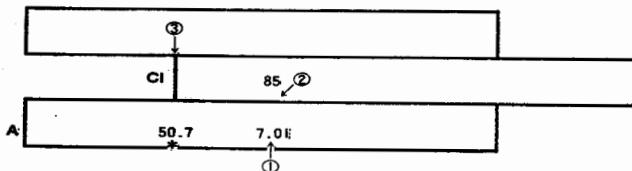
一般目盛りを利用した 大気汚染に関する 各種の計算例

1. いおう酸化物の排出基準

$$q = K \times 10^{-3} \times H_e^2$$

例. $K = 7.01$ (東京の高度汚染地区) $H_e = 85\text{m}$ のとき q を求めよ。

$$q = 7.01 \times 10^{-3} \times 85^2 = 50.7$$



2. Hollandの式

$$Hmt = (1.5V \cdot d + 0.0405Qh) / U$$

$$Qh = Q \times T \times 0.32$$

ただし Q : 排ガス量 (m^3/s)

T : 排ガス温度 ($^\circ\text{K}$)

V : 吐出速度 (m/s)

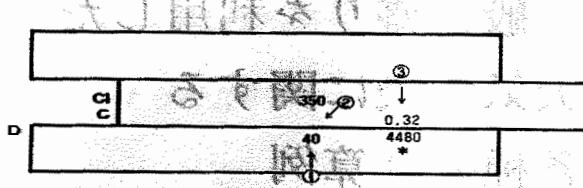
d : 排出口の直径 (m)

U : 風速 (m/s)

Qh : 排ガス熱量 (Kcal/Nm^3)

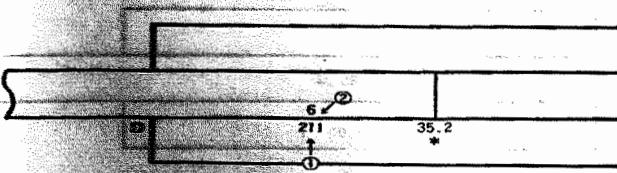
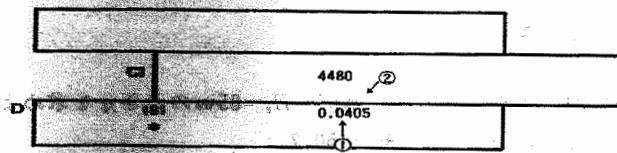
例. $Q = 40 \text{m}^3/\text{s}$, $T = 350^\circ\text{K}$, $U = 6 \text{m/s}$, $V = 20 \text{m/s}$, $d = 1 \text{m}$ のとき H_{mt} を求めよ。

a) $Qh = 40 \times 350 \times 0.32 = 4480$



b) $H_{mt} = (1.5 \times 20 \times 1 + 0.0405 \times 4480) / 6$

$$= \frac{30 + 181}{6} = \frac{211}{6} = 35.2 \text{m}$$



3. シグマ式

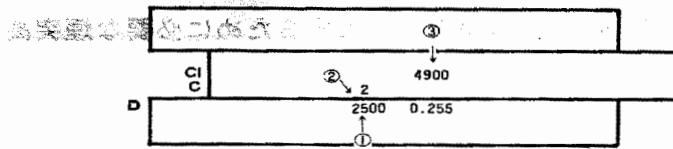
$$C = \frac{4}{2 \times \sigma_s U} e^{-\frac{y}{2 \sigma_s^2}} \left(e^{-\frac{(H_s - Z)^2}{2 \sigma_s^2}} + e^{-\frac{(H_s + Z)^2}{2 \sigma_s^2}} \right)$$

例. $e^{-\frac{y}{2 \sigma_s^2}}$ を計算する。

$\sigma_s = 70 \text{m}$, $y = 50 \text{m}$ のとき

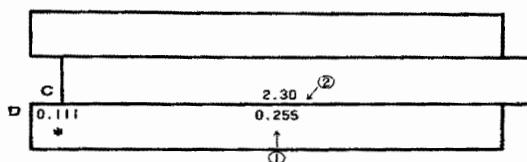
a) 等式を整理する。

$$\frac{y^2}{2 \sigma_s^2} = \frac{50^2}{2 \times 70^2} = \frac{2500}{2 \times 4900} = 0.255$$

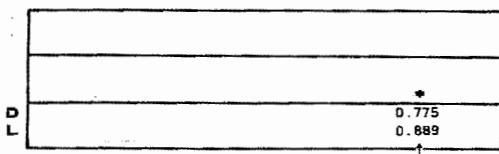


b) $e^{-0.255} = \log_{10} \left(\frac{-0.255}{2.30} \right)$ として計算する。

答 0.775



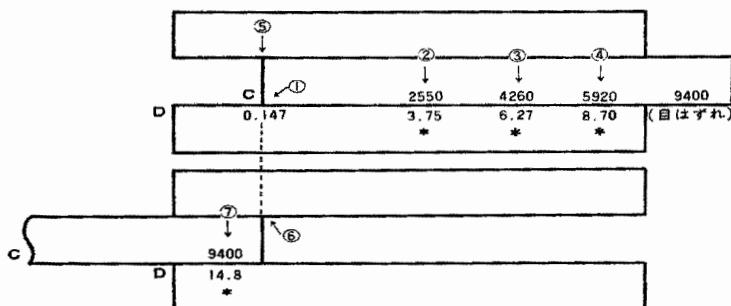
$-0.111 = 1.889$



4. 比例計算

例. ばい煙の排出量 Q (m^3/h) に対し、 SO_2 の比率が 0.147 % であるとき、下表の Q に対する SO_2 量を求めよ。

Q (m^3/h)	2550	4260	5920	9400
SO_2 (m^3/h)	(1)	(2)	(3)	(4)



5. C_{max}を許容濃度以下にするために必要な煙突高さ

$$H_e = \sqrt{\frac{q}{0.585 C_{max}}}$$

ただし H_e : 有効煙突高度 (m)

q : 汚染質の排出量 (m³/h)

C_{max} : 地上最高濃度 (PPM)

例. $C_{max}=0.02$ 、 $q=4.2\text{m}^3/\text{h}$ のとき

$$H_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.585 \times 0.02}} = 18.95 \text{ m}$$

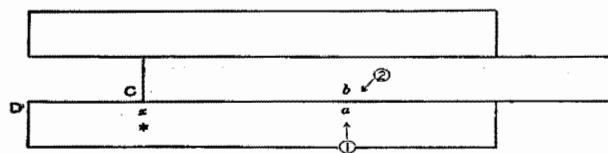
第三章

計算尺の基本

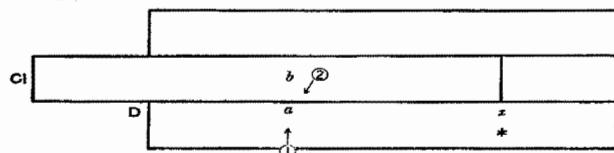
この章では、計算尺の基本的な使い方を略図で示しました。略図においては、数字を省略し、すべて文字で示してあります。一般計算尺の使い方に不慣れな方は、適当な数字を代入して、練習してください。

1. 乗除計算

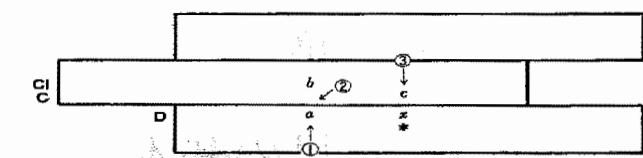
$$a \div b = x$$



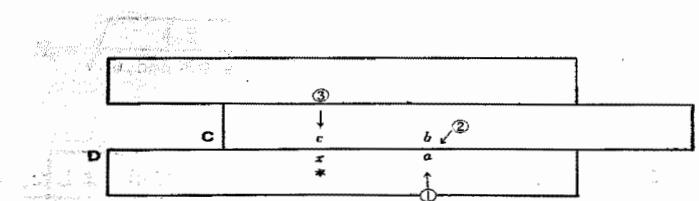
$$a \times b = x$$



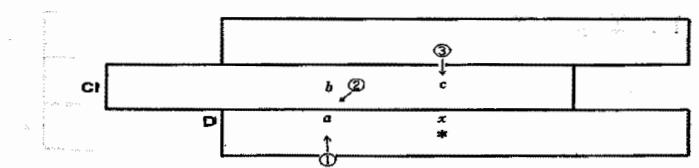
$$a \times b \times c = x$$



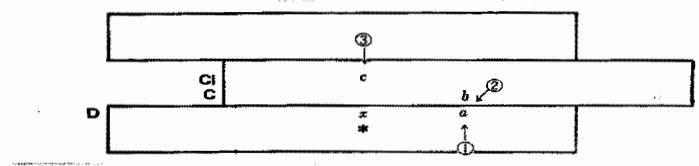
$$a \div b \times c = x$$



$$a \times b \div c = x$$



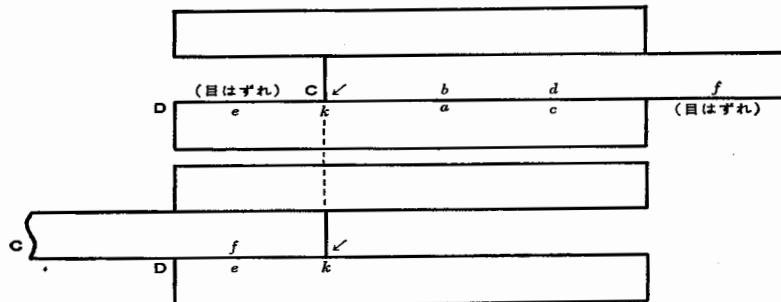
$$a \div b \div c = x$$



2. 比例計算

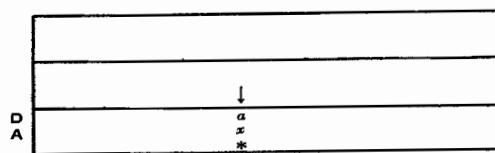
$$a : b = c : d = e : f$$

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{e}{f} = k$$

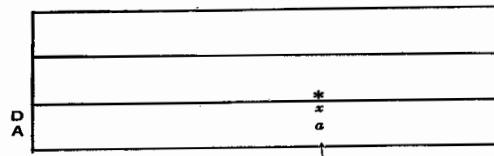


3. 平方、平方根

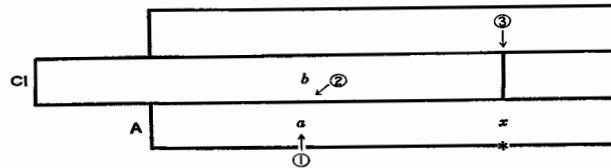
$$a^2 = x$$



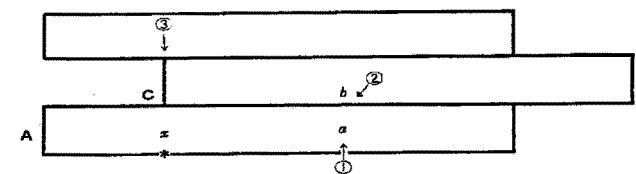
$$\sqrt{a} = x$$



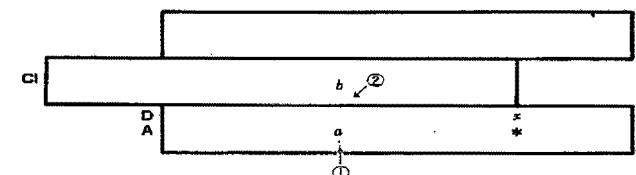
$$a \times b^z = x$$



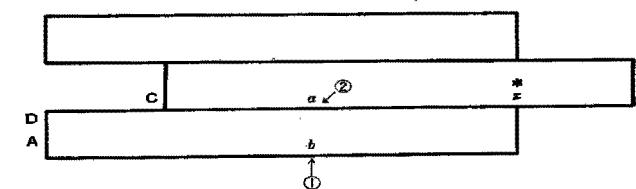
$$a \div b^2 = x$$



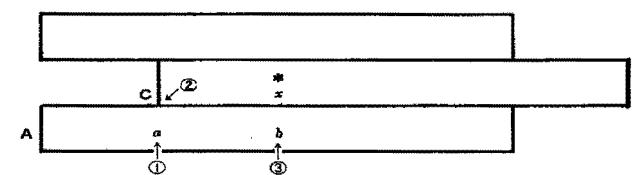
$$\sqrt{a} \times b = x$$



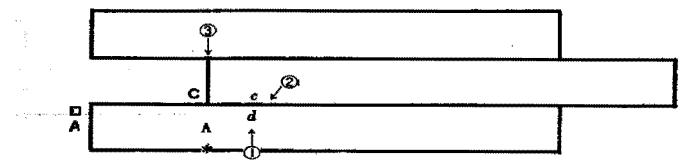
$$a \div \sqrt{b} = x$$



$$\sqrt{a \div b} = x$$

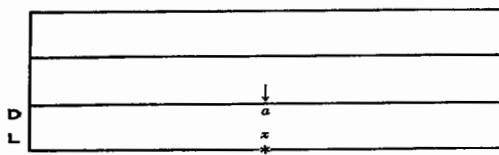


$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{円の面積})$$

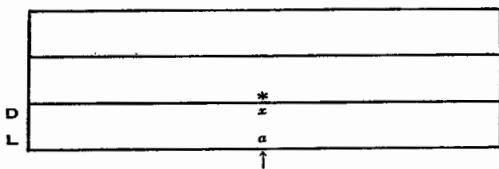


4. 対数

$$\log_{10} a = x$$

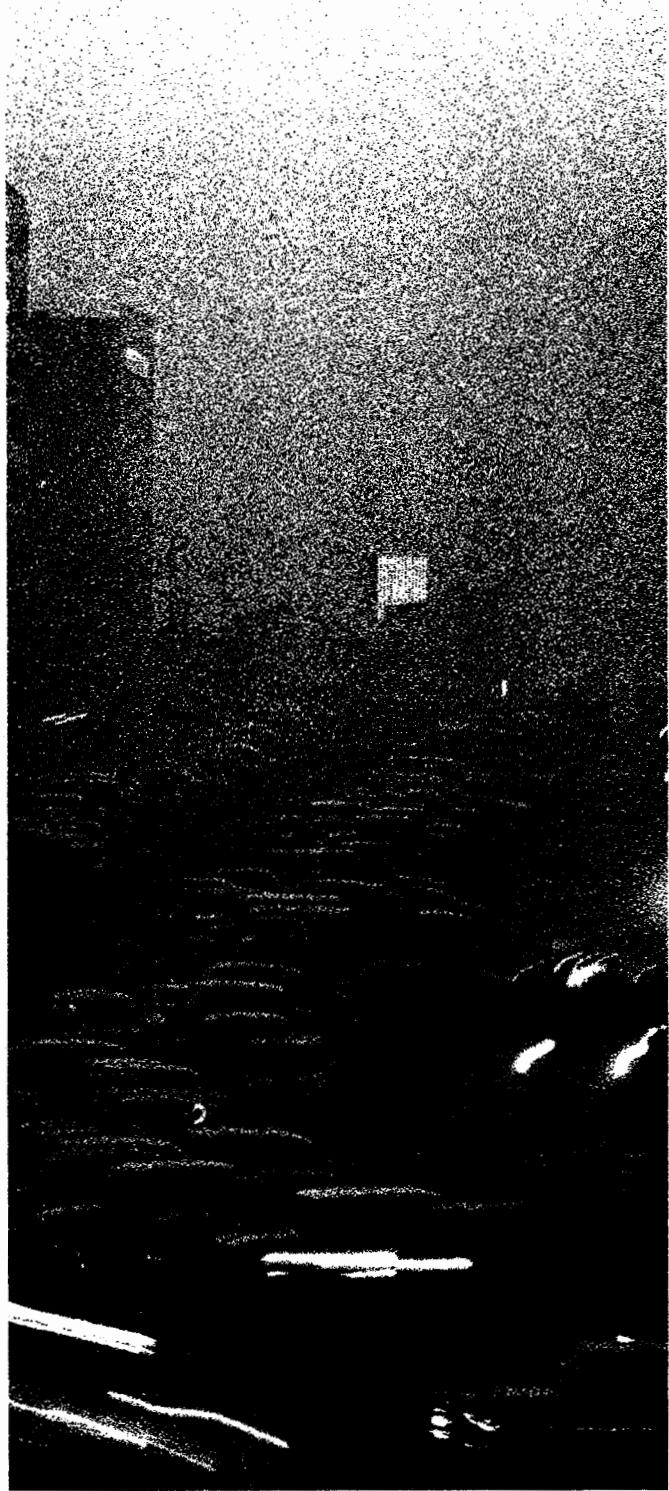


$$\log_{10} a = x \quad (10^x = a)$$



● $\log_e x$ は、 $\log_e x = 2.30 \log_{10} x$ として計算する。

● $\log_e^{-1} x$ (e^x) は $e^x = \log_{10}^{-1} \left(\frac{x}{2.30} \right)$ として計算する。



ヘンミ計算尺株式会社

東京都千代田区神田駿河台4の4

TEL 03-253-2631(代)



公害
なくして
明るい
社会