

## 6 硫黄酸化物の排出基準に係る計算例

### (1) ばい煙の拡散

#### ア ばい煙の拡散

ばい煙発生施設からの排出ガスは、巻き込み現象が起きなければ図1のように運動量（注1）と浮力の効果で上昇しながら、風に流され、風下方向に水平に流れつつ拡散される。

煙突の高さに、運動量と浮力の効果による上昇分を加えた有効高さを求める式が上昇式といわれているものである。

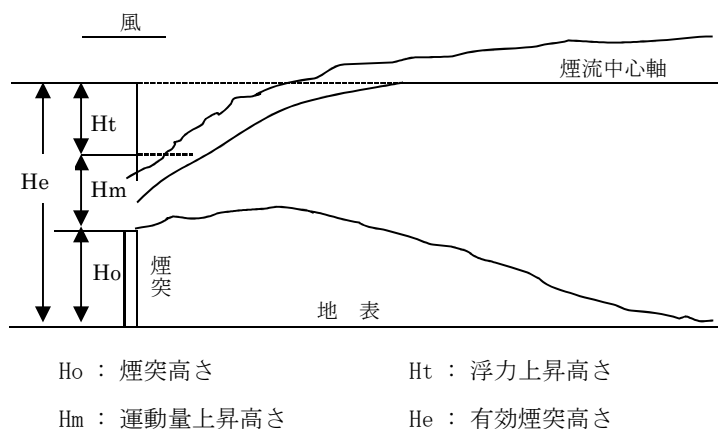


図1

#### イ 拡散と地上濃度

前述のように煙が拡散されると、煙突の風下の地上における濃度は、図2のように、煙突に近いところでは、まだ煙が地表まで達してこないため小さく、距離が大きくなるにつれて次第に大きくなり、最大着地濃度 ( $C_{max}$ ) に達してから、さらに遠方では、拡散によって次第に小さくなる。排出ガス量が同じなら高い位置から排出された汚染物の着地濃度は、同一の拡散条件のもとでは、低い位置からの濃度に比較して小さくなる。

この着地濃度を求める式が拡散式といわれているものである。

一般的には、着地濃度は排出量に比例し、有効高さの2乗及び風速に反比例する。

厳密には、個々の煙源ごとに、大気の状態などにより拡散状態が異なる。

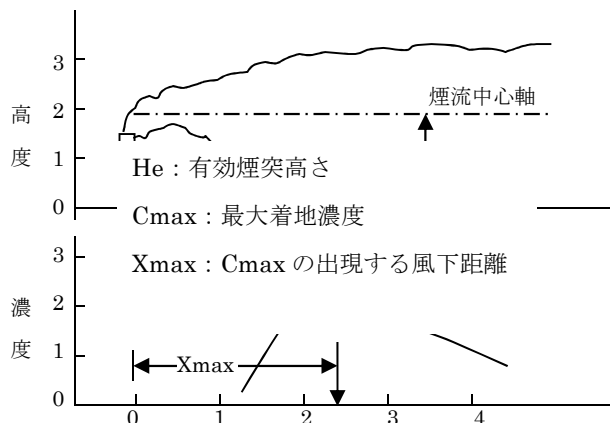


図2

ウ K 値規制

大気汚染防止法では、硫黄酸化物に係る環境基準が達成されるように、地域の汚染の実情に応じて、個々のばい煙発生施設から排出される硫黄酸化物の最大着地濃度を制限している。この限度の指標となるものがK 値であり、政令により地域を指定して定められている。

最大着地濃度の K 値との関係は、

$$C_{max} \text{ (ppm)} = 0.0017K \text{ である。 (注 2)}$$

また排出基準は、

$$q = K \times 10^{-3} \times He^2 \text{ で表されている。}$$

上記のように、 $C_{max}$  (ppm) は K 値と比例している。汚染状態がいちじるしい地域では、個々のばい煙発生施設からの  $C_{max}$  (ppm) を小さくする。すなわち K の値を小さくすることによって、施設からの排出量 (q) を抑制して汚染を防止しようとするものである。(注 3)

(注 1)

Hm : 排出ガスの運動量による上昇高さ

排出ガスの上向き吐出速度が大きい時には、風に打ち勝って上昇するが、排出ガスの噴流の周りの空気と混合して次第にエネルギーを失い、遂に上向きの速度がなくなり、上昇高さは上限 Hm に達することになる。

Ht : 排出ガスの密度差が浮力となって上昇する高さ

排出ガス温度が周りの空気よりも非常に高いとガスの密度が大気密度よりも小さくなり、その密度差が浮力となって働き、その密度差がなくなるまで上昇する。

(注 2)

大気汚染防止法では、拡散式として Sutton の式、上昇式として Bosanquet の(1)式を採用している。これら 2 式は比較的取り扱いが容易なこと。一般的な拡散理論が組み込まれていること、従来から使用されていることなど理由により用いられた。

Sutton の式によれば、

$$C_{max} = \frac{2Q}{\pi eUHe^2} \left[ \frac{C_z}{C_y} \right] \dots\dots\dots (1)$$

(1) より

$$Q = \frac{1}{2} C_{max} \times \pi e \times UHe^2 \left[ \frac{C_y}{C_z} \right] \dots\dots\dots (2)$$

<p><math>C_{max}</math> : 最大着地濃度 (<math>m^2/m^2</math>)</p> <p>Q : 排出量 (<math>m^2/s</math>)</p> <p><math>\pi</math> : 3.14.....</p> <p>e : 2.718... (自然対数の底)</p> <p>U : 風速 (m/s)</p> <p>He : 有効煙突高さ</p> <p><math>C_y</math>、<math>C_z</math> : 拡散パラメータ</p>
--

(2) の式中の Q の単位  $Nm^3/h$ 、 $C_{max}$  の単位を ppm に換算し、大気の状態を ( $U=6m/s$ 、 $C_y=0.47$ 、 $C_z=0.07$ 、気温を  $15^\circ C$ ) 設定すると、

$$q \text{ (Nm}^3\text{/h)} = \frac{1}{2} C_{\text{max}} \text{ (ppm)} \times 3.14 \times 2.72 \times 6 \times \text{He}^2 \times \frac{0.47}{0.07} \times 3,600 \times 10^{-6} \times \frac{273}{288}$$

$$q \text{ (Nm}^3\text{/h)} = 0.587 C_{\text{max}} \text{ (ppm)} \times \text{He}^2 \cdots \cdots (3)$$

ここで  $C_{\text{max}}$  の値をあらかじめ定めて定数化すると  $q$  は  $\text{He}$  により決まることになる。  
 地域に応じて、この定数を定めたものが  $K$  値である。  
 大気汚染防止法による排出基準式は、

$$q \text{ (Nm}^3\text{/h)} = K \times 10^{-3} \times \text{He}^2 \cdots \cdots (4)$$

この式で計算した  $q$  が許容排出量である。 $K$  値と  $C_{\text{max}}$  の関係は(3)と(4)から  $C_{\text{max}} \text{ (ppm)} = 0.0017K$  となる。

なお、上昇式である Bosanquet の(1)式については、大気状態を拡散式と同様に設定し、かつ実状に合わせて(※)修正して用いている。

※ 上昇式は煙が最終的に上昇する高さを与える。しかし実際には、最大着地濃度が出現する距離よりも後方で最終上昇高度になることが多く、上昇高さとしては過大である。この修正方法としては、 $(H_m + H_t)$  の 50~75%をとるのが普通で、大気汚染防止法では 65%を用いている。したがって  $\text{He}$  は次式で表される。

$$\text{He} = H_o + 0.65 (H_m + H_t)$$

## (2) 硫黄酸化物の排出基準に係る計算例 (K 値規制の場合)

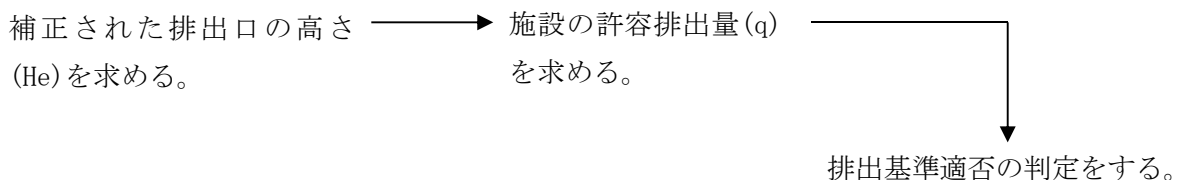
### ア 届出例

届出 年月日	施設名	定格 能力 (L/h)	使用燃料			排出口		排出ガス 温度 (°C)	着手予定 年月日
			種類	比重	含有 S 分 (%)	$H_o$ (m)	$\phi$ (m)		
H2. 3. 26	ボイラー	219	A 重油	0.86	0.3	18	0.5	200	H2. 6. 1

上記に掲げてある施設を大分市以外に新たに設置しようとする。

大分市以外の  $K$  値は 17.5 である。

### イ 排出基準適否判定の順序



### ウ 補正された排出口の高さ (He) を求める。

(実際の燃焼による派生する硫黄酸化物法施行規則第3条第2号による。)

の量  $(q) = He$  を求める。  $(H_m + H_t)$

$$H_m = \frac{0.795\sqrt{Q \times V}}{1 + \frac{2.58}{V}}$$

$$H_t = 2.01 \times 10^{-3} \cdot Q \cdot (T - 288) \cdot \left( 2.301 \log J \frac{1}{J} - 1 \right) +$$

$$J = \frac{1}{\sqrt{Q \times V}} \left( 1,460 - 296 \frac{V}{T-288} \right) + 1$$

He : 補正された排出口の高さ (m)

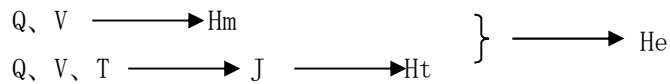
Ho : 排出口の実高さ (m)

Q : 15°Cにおける排出ガス量 (m³/s)

V : 排出ガスの排出速度 (m/s)

T : 排出ガスの温度 (絶対温度° K)

(イ) 計算の順序



(ウ) Qを求める

重油 1 L の燃焼により、13 Nm³ (注 1) の排出が発生するものとするれば、重油 219 L/h 燃焼させると、排出ガス量 (湿り) は、  
 $219 \times 13 = 2,847$  (Nm³/h) となり  
 15°C で 1 秒あたりの排ガス量は

$$Q = 219 \times 13 \times \frac{273 + 15}{273} \times \frac{1}{3,600} = 0.834 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

(エ) Vを求める。

$$\text{排出速度} = \frac{\text{排出口での排出ガス量}}{\text{排出口の断面積}}$$

排出ガス温度が 200°C であるから、このとき 1 秒当たりの排出量は、

$$219 \times 13 \times \frac{273 + 200}{273} \times \frac{1}{3600} = 1.37 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

排出口の断面積  
 は、 $\frac{1}{4} \times \pi \times 0.5^2$  であるので

$$V = 219 \times 13 \times \frac{273+200}{273} \times \frac{1}{3,600} \times \frac{1}{\frac{1}{4} \pi \times 0.5^2} = 6.98 \text{ (m/s)}$$

(オ) (ウ)(エ)の結果から Hm、Ht、He を求める。

Q = 0.834 (m<sup>3</sup>/s)、V = 6.98 (m/s)、T = 273 + 200 = 473 (K)であるので

$$J = \frac{1}{\sqrt{(0.834 \times 6.98)}} \left( \frac{1,460}{296} - \frac{6.98}{473-288} \right) + \frac{1}{1} = 602.2$$

$$H_m = \frac{0.795 \sqrt{(0.834 \times 6.98)}}{1 + \frac{2.58}{6.98}} = 1.40 \text{ (m)}$$

$$\log J = \log 602.2 = 2.78$$

log (常用対数)

$$H_t = 2.01 \times 10^{-3} \times 0.834 \times (473 - 288) \times \left( 2.30 \times \frac{1}{602} - 1 \right) = 1.67$$

2.78+

(m)

$$H_e = H_o + 0.65 (H_m + H_t) = 18 + 0.65 (1.40 + 1.67) = 20.0 \text{ (m)}$$

エ 施設の許容排出量 (大気汚染防止法施行規則第 3 条による排出基準、q) を求める。

q = K × 10<sup>-3</sup> × He<sup>2</sup> だから、この届出の例では、

$$q = 17.5 \times 10^{-3} \times 20^2 = 7.0 \text{ (Nm}^3/\text{h)} \text{ となる。}$$

オ 実際の燃焼によって発生する硫黄酸化物の量 (q') を求める。

硫黄が、空気により燃焼すると、硫黄酸化物 (亜硫酸ガス (SO<sub>2</sub>) 及び微量の三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>)) が発生する。仮に、硫黄が 1kg 燃焼したとしたら 0.7 Nm<sup>3</sup> (注 2) の硫黄酸化物が発生する。

この届出に係る施設 (ボイラー) では発生した亜硫酸ガスが、施設内、処理施設で吸脱着 (注 3) せず、燃料以外からは、亜硫酸ガスが加わらないと考えてさしつかえないから、施設を定格能力で運転した時に発生する q' は、

$$q' = \text{燃料の燃焼能力 (定格 L/h)} \times \text{比重 (注 4)} \times \text{含有硫黄分割合} \times 0.7 \text{ だから}$$

$$= 219 \times 0.86 \times \frac{0.3}{100} \times 0.7 = 0.40 \text{ (Nm}^3/\text{h)} \text{ となる。}$$

カ 排出基準の適否

エとオの結果から許容排出量 (q) > 実際排出量 (q') であるので、届出施設は、排出基準に適合する。

(注 1)

液体燃料の場合、原則的には使用燃料中の元素組成、低位発熱量、空気比、排風機の処理能力などが明確に把握できる場合は、これらにより排出ガス量の算出を行う。ただし、これらによる算出が困

難な場合は、燃料 1L の燃焼により発生する排出ガス量（湿り）については 13 Nm<sup>3</sup>としてもよい。

なお、固体燃料、気体燃料については、燃料の種類により差が著しいので、燃料中の元素組成、低位発熱量、空気比、排風機の処理能力などから個々に算出する。

参考：燃料中の元素組成等からの燃焼排ガスの算出方法の一例

(1) 液体及び固体燃料の場合

燃料 1kg 中の炭素、水素、酸素、窒素、硫黄及び水分の含有量 (kg/L) を (C)、(H)、(O)、(N)、(S)、及び (w) とすると、

① 理論空気量 (A<sub>o</sub> Nm<sup>3</sup>/kg-fuel)

$$A_o = 8.89 (C) + 26.7 \left\{ (H) - \frac{(O)}{8} \right\} + 3.33 (S)$$

② 理論燃焼ガス量

ア 湿り燃焼ガス量 (G<sub>o(w)</sub> Nm<sup>3</sup>/kg-fuel)

$$G_o(w) = A_o + 5.6 (H) + 0.7 (O) + 0.8 (N) + 1.24 (w)$$

イ 乾き燃焼ガス量 (G<sub>o(d)</sub> Nm<sup>3</sup>/kg-fuel)

$$G_o(d) = A_o - 5.6 (H) + 0.7 (O) + 0.8 (N)$$

③ 実際燃焼ガス量

空気過剰係数（空気比）を m とすると、

ア 湿り燃焼ガス量 (G(w) Nm<sup>3</sup>/kg-fuel)

$$G(w) = G_o(w) + (m-1) A_o$$

イ 乾き燃焼ガス量 (G(d) Nm<sup>3</sup>/kg-fuel)

$$G(d) = G_o(d) + (m-1) A_o$$

$$\therefore m \doteq \frac{21}{21 - (\text{残存酸素濃度}\%)}$$

(2) 気体燃料の場合

燃料 1Nm<sup>3</sup> 中の水素、一酸化炭素、メタン、エチレン、アセチレン、ベンゾール蒸気、その他気相炭化水素、酸素、二酸化炭素及び窒素の容積 (Nm<sup>3</sup>) を (H<sub>2</sub>)、(CO)、(CH<sub>4</sub>)、(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)、(C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)、(O<sub>2</sub>)、(CO<sub>2</sub>) 及び (N<sub>2</sub>) とすると、

① 理論空気量 (A<sub>o</sub> Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>-fuel)

$$A_o = \frac{1}{0.21} \left\{ 0.5 (H_2) + 0.5 (CO) + 2 (CH_4) + 3 (C_2H_4) + \left( x - \frac{Y}{4} \right) (C_xH_y) - (O_2) \right\}$$

② 理論燃焼ガス量

ア 湿り燃焼ガス量 (G<sub>o(w)</sub> Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>-fuel)

$$G_o(w) = 1 + A_o - \left\{ 0.5 (H_2) + 0.5 (CO) - \frac{Y}{4} - 1 \right\} (C_xH_y)$$

イ 乾き燃焼ガス量 (G<sub>o(d)</sub> Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>-fuel)

$$G_o(d) = G_o(w) - \{ (H_2) + 2(CH_4) + 2(C_2H_4) + \frac{Y}{2} (C_xH_y) \}$$

③ 実際燃焼ガス量

空気過剰係数（空気比）を m とすると、

ア 湿り燃焼ガス量  $G(w) \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3\text{-fuel}$

$$G(w) = G_o(w) + (m-1) A_o$$

イ 乾き燃焼ガス量  $d(G(d) \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3\text{-fuel})$

$$G(d) = G_o(d) - (m-1) A_o$$

$$\therefore m = \frac{1}{1 - 3.76 \times \frac{\langle\langle O_2 \rangle\rangle - 0.5 \langle\langle CO \rangle\rangle}{\langle\langle N_2 \rangle\rangle - (N_2) \times \frac{\langle\langle CO_2 \rangle\rangle + \langle\langle CO \rangle\rangle}{(CO) + (CO_2) + (CH_4) + 2(C_2H_4) + x(C_xH_y)}}$$

ここで、 $\langle\langle CO_2 \rangle\rangle$ 、 $\langle\langle CO \rangle\rangle$  及び  $\langle\langle O_2 \rangle\rangle$  は排ガス分析による濃度  
よって  $\langle\langle N_2 \rangle\rangle = 100 - \{ \langle\langle CO_2 \rangle\rangle + \langle\langle CO \rangle\rangle + \langle\langle O_2 \rangle\rangle \}$

(3) 概略計算方法

$$G = G_o + (m-1) A_o$$

G : 実際燃焼ガス量

G<sub>o</sub> : 理論燃焼ガス量

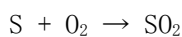
A<sub>o</sub> : 理論空気量

m : 空気過剰係数（空気比）

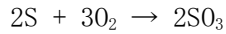
定発熱量 H L s G<sub>o</sub> 及び A<sub>o</sub> との関係

燃料	G <sub>o</sub>	A <sub>o</sub>
固体燃料	$(\frac{0.89H_1}{1,000} + 1.65) \text{ Nm}^3/\text{kg}$	$(\frac{1.01H_1}{1,000} + 0.5) \text{ Nm}^3/\text{kg}$
液体燃料	$\frac{1.11H_1}{1,000} \text{ Nm}^3/\text{kg}$	$(\frac{0.85H_1}{1,000} + 2.0) \text{ Nm}^3/\text{kg}$
低熱量気体燃料 (H <sub>1</sub> = 500~3,000Kcal/m <sup>3</sup> )	$(\frac{0.725H_1}{1,000} + 1.0) \text{ Nm}^3/\text{kg}$	$\frac{0.875H_1}{1,000} \text{ Nm}^3/\text{kg}$
高熱量気体燃料 (H <sub>1</sub> = 4,000~7,000Kcal/m <sup>3</sup> )	$(\frac{1.14H_1}{1,000} + 0.25) \text{ Nm}^3/\text{kg}$	$(\frac{1.09H_1}{1,000} - 0.25) \text{ Nm}^3/\text{kg}$

(注 2)



及び



硫黄 1 グラム原子から 1 モル及び 2 グラム原子から 2 モルの硫黄酸化物が生じる。

つまり、硫黄 1 グラム原子から 1 モルの硫黄酸化物が生じる。

よって、硫黄 1kg が燃焼したとき生じる硫黄酸化物の気体としての標準状態 (0°C 1 気圧)での体積は、

$$\frac{22.4(L) \text{ (硫黄酸化物 1 モルの標準状態での体積)}}{32(g) \text{ (硫黄 1 グラム原子)}} \times 1,000 (g) \\ = 700 (NL) = 0.7 (Nm^3)$$

(注 3)

セメント焼成炉、セメント原料乾燥炉、石灰焼成炉、黒液回収ボイラー、キューポラ、骨材乾燥炉などについては、工程中に硫黄酸化物の吸着、脱硫効果があるので、測定実績等により、脱硫効率等の認定をする。

キューポラ、骨材乾燥炉については、次の脱硫効率を目安とする。

キューポラ 75%

骨材乾燥炉 65%

(注 4)

ばい煙発生施設における硫黄酸化物の排出量の算出等に際して、重油等の比重は、原則として次のとおりとする。

灯油 0.80

軽油 0.84

A 重油 0.86

B 重油 0.91

C 重油 0.94

ただし、燃料メーカーの成績表による比重がこれらの値より高い場合は成績表による値を採用するものとする。

また、2 種類以上の燃料を混合して使用する場合は、当該複数の燃料の比重を加重平均した値とする。