

影響範囲の算定手法

コンビナート施設において、火災、爆発、漏洩等の災害が発生した場合における影響範囲の算定対象及びその算定方法を次に示す。

1 石油等の流出による液面火災、流出火災

石油等を貯蔵したタンクの火災やタンク、配管等から流出した石油等に着火して火災となった場合には、その火災によって発生する放射熱による周囲への影響が考えられる。液面火災又は流出火災による放射熱による影響範囲を推定する方法について次に示す。

(1) 火災面積と火災形態の想定

石油等の火災時の放射熱は、火炎の温度と火炎の形態から決定される。火炎の形態を決める火災面積の想定方法を次に示す。

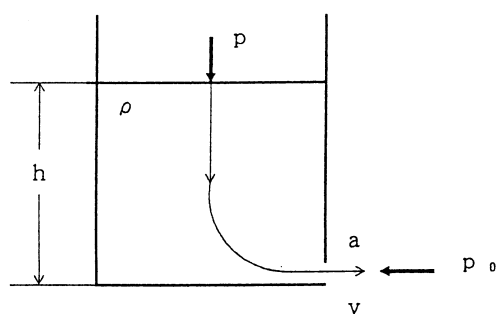
ア 流出火災の想定

石油等がタンク、配管等から漏洩し、漏洩した石油等に着火して火災となる場合がある。

(ア) 流出速度の算定

① タンクからの流出

タンク等に貯蔵されている石油等が側板下部から流出する量 q (m^3/s) については、次により算出することができる。



- a : 破口面積 (m^2)
- h : 液面高さ (m)
- ρ : 液密度 (kg/m^3)
- p : 貯蔵圧力 (Pa)
(液面に係る圧力)
- p_0 : 大気圧 (Pa)
- v : 流出速度 (m/s)
- g : 重力加速度 ($9.8\text{m}/\text{s}^2$)

図3-1 タンク等からの漏洩の場合における概念図

図3-1に示すような状況を想定して、ベルヌーイの定理により液体の流出速度を計算する。ただし、開口部（破口）の面積 a は、タンクの断面積に比べて非常に小さく、漏洩している間、液面の高さ h は変化しないと仮定する。

$$0 + g h + \frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2} + 0 + \frac{p_0}{\rho}$$

$$v = \sqrt{2 g h + \frac{2}{\rho} (p - p_0)}$$

漏洩量 q (m^3/s) は、流出速度に破口面積 a を掛けることにより求める。

$$q = a \sqrt{2 g h + \frac{2}{\rho} (p - p_0)}$$

実際の漏洩量は、上式に流出係数 c_1 とノズル係数 c_2 を掛けて求める。

$$q = c_1 c_2 a \sqrt{2 g h + \frac{2}{\rho} (p - p_0)} \quad (\text{基本式})$$

なお、 c_1 及び c_2 が不明のときは、 $c_1 \times c_2 = 0.5$ とする。

また、 $p = p_0$ のとき（タンク内部を加圧していない場合）は、次式のようになる。

$$q = c_1 c_2 a \sqrt{2 g h}$$

さらに、 $c_1 \times c_2 = 0.5$ 、重力加速度 $g = 9.8 \text{m/s}^2$ として、簡略化すると次式のようになる。

$$q = 2.2 a \sqrt{h}$$

② 水平配管からの流出

配管から石油等が漏洩する場合の漏洩量を、次に示す。

この場合において、配管内の一様な流れの速度を u (m/s)、圧力を p (Pa) とする。

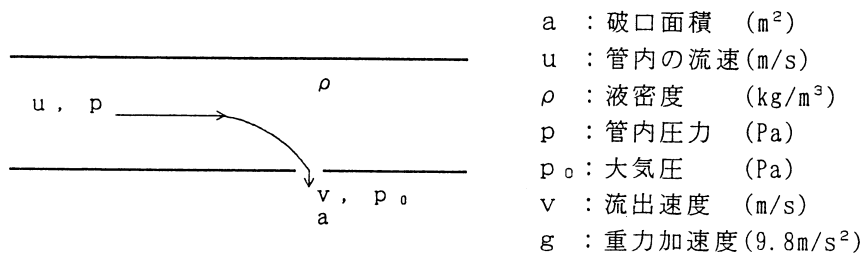


図3-2 配管から流出した場合における概念図

配管の途中で破口が開いた場合に図3-2に示すような流線にベルヌーイの定理を適用し、管内の高さの差を無視すると次式のようなになる。

$$\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2} + \frac{p_0}{\rho}$$

$$v = \sqrt{u^2 + \frac{2}{\rho} (p - p_0)}$$

また、破口面積を a 、流出係数を c_1 、ノズル係数 c_2 として（不明の場合は $c_1 \times c_2 = 0.5$ とする）、漏洩量 q (m³/s) を求めると、次式のようなになる。

$$q = c_1 c_2 a \sqrt{u^2 + \frac{2}{\rho} (p - p_0)} \quad (\text{基本式})$$

さらに、 $p \approx p_0$ とすると、 $v \approx u$ となり、次式のように簡略化することができる。

$$q \approx c_1 c_2 a u$$

(イ) 火災面積の計算

タンク、配管等から石油等が漏洩し、広がった直後に着火した場合の火災面積 S (m^2)は、次式により求めることができる。

$$S = q / v_a$$

ただし、

q : 石油等の漏洩量 (m^3/s)

v_a : 石油等の燃焼速度 (液面降下速度) (m/s)。物質によって固有の値がある。

主な石油等の燃焼速度を表3-1に示す。

表3-1 主要な石油等の燃焼速度 (液面降下速度) v_a

種別	燃焼速度 m/s	種別	燃焼速度 m/s
ガソリン	0.52×10^{-4}	メタノール	0.28×10^{-4}
ガソリン・ナフサ	0.80×10^{-4}	エタノール	0.33×10^{-4}
灯油	0.78×10^{-4}	LNG(メタン)	1.7×10^{-4}
軽油	0.55×10^{-4}	エチレン	2.1×10^{-4}
重油	0.28×10^{-4}	プロパン	1.4×10^{-4}
ベンゼン	1.0×10^{-4}	プロピレン	1.3×10^{-4}
n-ヘキサン	1.2×10^{-4}	n-ブタン	1.5×10^{-4}

(ウ) 火炎の想定

流出火災の場合における火炎については、前述の火災面積の計算式により求めた火災面積 S と等しい円を底面とする円筒形を想定することとし、火炎の高さを底面半径の3倍とする。

イ 液面火災の想定

液面火災としては、タンク火災及び防油堤火災がある。この場合における火災想定を次に示す。

① タンク火災

タンク全面火災として、火炎の底面半径がタンク半径に等しく、高さが底面半径の3倍の円筒形を想定する。

② 防油堤内火災

石油タンクにおいて流出した石油等が防油堤（仕切堤）全域に拡大した後に着火して全面火災となる場合を想定する。防油堤の形状により防油堤（仕切堤）の面積と等しい面積の円を底面とした円筒形の火炎又は防油堤（仕切堤）を長方形として捉え、長方形を底面とする直方体の火炎を想定する。

この場合における火炎の高さは、円筒形にあっては半径の3倍、直方体にあっては短辺の1.5倍とする。

(2) 火炎による放射熱の計算

ア 放射熱の一般式

火炎から任意の相対位置にある面の受ける放射熱Eは、次式で求められる。

$$E = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{J/m}^2\text{s}) \quad (\text{基本式})$$

T : 火炎の温度 (k)

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.6705 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2\text{sk}^4$)

ε : 放射率

ϕ : 形態係数。火炎の形状及び火炎と受熱面の相対位置によって決まる無次元数であり、0.0から1.0の値をとる。

実用上は、燃料が同じであれば、火炎の温度と放射率は変わらないものと仮定し、次の式を用いる。

$$R_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{J/m}^2\text{s})$$

$$E = \phi R_r \quad (\text{J/m}^2\text{s})$$

R_r は、放射発散度と呼ばれている。主要な石油等の放射発散度を、表3-2に示す。

表3-2 主要な石油等の放射発散度

種 別	放射発散度 J/m ² s	種 別	放射発散度 J/m ² s
ガソリン原油	41 × 10 ³	メタノール	9.8 × 10 ³
ガソリン・ナフサ	58 × 10 ³	エタノール	12 × 10 ³
灯油	50 × 10 ³	LNG(メタン)	76 × 10 ³
軽油	42 × 10 ³	エチレン	134 × 10 ³
重油	23 × 10 ³	プロパン	74 × 10 ³
ベンゼン	62 × 10 ³	プロピレン	73 × 10 ³
n-ヘキサン	85 × 10 ³	n-ブタン	83 × 10 ³

イ 放射発散度の減衰

タンクの直径が10mを超えると空気の供給が不足し、このため多量の黒煙が発生して、放射発散度が減衰することが実験により明らかにされつつある。

図3-3及び図3-4に実験の結果から求められた放射発散度とタンク直径との関係を示す。

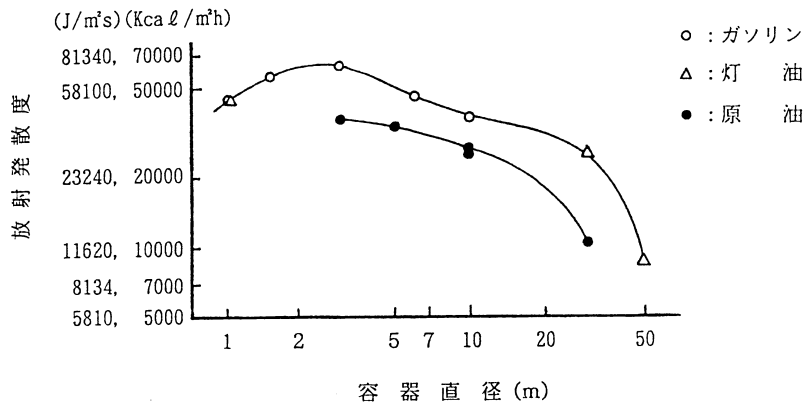


図3-3 放射発散度とタンク直径との関係

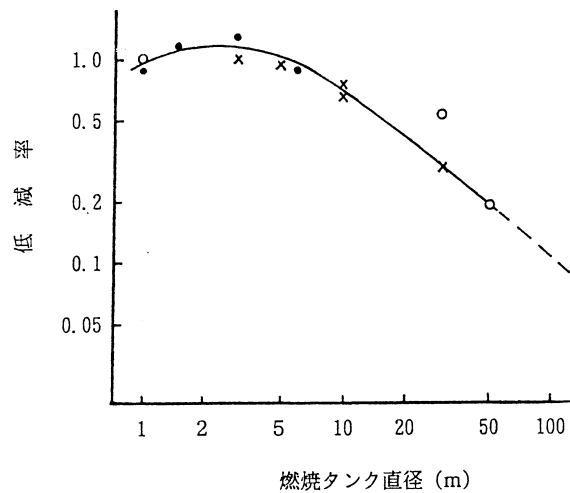


図3-4 燃焼タンク直径と放射発散度の低減率

これらの実験結果を参考として、タンクの直径を考慮して放射発散度を求めることができる。

図3-4に示す燃焼タンク直径と放射発散度の低減率から、ある直径のタンクが火災となった場合の放射発散度の低減率を推定することができる。

これによるとタンク直径が10mになると低減率は約0.6、20mで約0.4、30mで約0.3となる。ただし、タンク直径が大きいものについては、実験データがないため、安全側をとって低減率は0.3とする。

ただし、LNGについては、タンク直径が20mになっても放射発散度の低減はないとの実験結果があるので、低減は行わない。

ウ 円筒形の火炎を想定した場合の形態係数

円筒形の火炎を想定し、図3-5に示す相対位置にある受熱面を考えた場合、形態係数は次式により計算することができる。なお、 $m(H/R) = 3$ の場合の形態係数 ϕ を表3-3に示す。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left[\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right]$$

$$+ \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{A - 2n}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

$$A = (1+n)^2 + m^2 \quad m = H/R$$

$$B = (1-n)^2 + m^2 \quad n = L/R$$

ただし、Hは火炎の高さ、Rは火炎底面の半径、Lは円筒の中心から受熱面までの距離である。

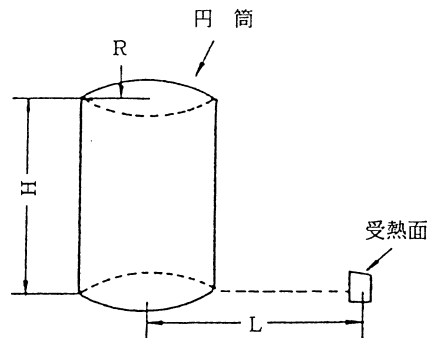


図3-5 火炎と受熱面の相対位置（円筒形の火炎）

表3-3 円筒形の炎に対する形態係数 (m = 3)

n	ϕ	n	ϕ	n	ϕ	n	ϕ
1.05	0.476	3.30	0.132	5.55	0.058	7.80	0.031
1.10	0.455	3.35	0.130	5.60	0.057	7.85	0.031
1.15	0.435	3.40	0.127	5.65	0.057	7.90	0.031
1.20	0.417	3.45	0.124	5.70	0.056	7.95	0.030
1.25	0.400	3.50	0.122	5.75	0.055	8.00	0.030
1.30	0.384	3.55	0.119	5.80	0.054	8.05	0.030
1.35	0.370	3.60	0.117	5.85	0.053	8.10	0.029
1.40	0.356	3.65	0.115	5.90	0.052	8.15	0.029
1.45	0.344	3.70	0.112	5.95	0.052	8.20	0.028
1.50	0.332	3.75	0.110	6.00	0.051	8.25	0.028
1.55	0.321	3.80	0.108	6.05	0.050	8.30	0.028
1.60	0.311	3.85	0.106	6.10	0.049	8.35	0.028
1.65	0.301	3.90	0.104	6.15	0.049	8.40	0.027
1.70	0.292	3.95	0.102	6.20	0.048	8.45	0.027
1.75	0.283	4.00	0.100	6.25	0.047	8.50	0.027
1.80	0.275	4.05	0.098	6.30	0.047	8.55	0.026
1.85	0.267	4.10	0.096	6.35	0.046	8.60	0.026
1.90	0.259	4.15	0.094	6.40	0.045	8.65	0.026
1.95	0.252	4.20	0.093	6.45	0.045	8.70	0.025
2.00	0.245	4.25	0.091	6.50	0.044	8.75	0.025
2.05	0.238	4.30	0.089	6.55	0.043	8.80	0.025
2.10	0.232	4.35	0.088	6.60	0.043	8.85	0.025
2.15	0.226	4.40	0.086	6.65	0.042	8.90	0.024
2.20	0.220	4.45	0.085	6.70	0.042	8.95	0.024
2.25	0.215	4.50	0.083	6.75	0.041	9.00	0.024
2.30	0.209	4.55	0.082	6.80	0.040	9.05	0.024
2.35	0.204	4.60	0.080	6.85	0.040	9.10	0.023
2.40	0.199	4.65	0.079	6.90	0.039	9.15	0.023
2.45	0.194	4.70	0.077	6.95	0.039	9.20	0.023
2.50	0.190	4.75	0.076	7.00	0.038	9.25	0.023
2.55	0.185	4.80	0.075	7.05	0.038	9.30	0.022
2.60	0.181	4.85	0.073	7.10	0.037	9.35	0.022
2.65	0.177	4.90	0.072	7.15	0.037	9.40	0.022
2.70	0.173	4.95	0.071	7.20	0.036	9.45	0.022
2.75	0.169	5.00	0.070	7.25	0.036	9.50	0.021
2.80	0.165	5.05	0.069	7.30	0.035	9.55	0.021
2.85	0.161	5.10	0.068	7.35	0.035	9.60	0.021
2.90	0.158	5.15	0.066	7.40	0.035	9.65	0.021
2.95	0.154	5.20	0.065	7.45	0.034	9.70	0.021
3.00	0.151	5.25	0.064	7.50	0.034	9.75	0.020
3.05	0.147	5.30	0.063	7.55	0.033	9.80	0.020
3.10	0.144	5.35	0.062	7.60	0.033	9.85	0.020
3.15	0.141	5.40	0.061	7.65	0.033	9.90	0.020
3.20	0.138	5.45	0.060	7.70	0.032	9.95	0.020
3.25	0.135	5.50	0.059	7.75	0.032	10.00	0.019

エ 直方体の火炎を想定した場合の形態係数

直方体の火炎を想定し、図3-6に示す相対位置にある受熱面（受熱面からみると平板の火炎）を考えた場合、形態係数は次式により計算することができる。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{X}{\sqrt{X^2+1}} \tan^{-1} \left[\frac{Y}{\sqrt{X^2+1}} \right] + \frac{Y}{\sqrt{Y^2+1}} \tan^{-1} \left[\frac{X}{\sqrt{Y^2+1}} \right] \right\}$$
$$X = H/L$$
$$Y = W/L$$

ただし、

- H : 火炎の高さ
- W : 火炎の前面幅
- L : 火炎の前面から受熱面までの距離

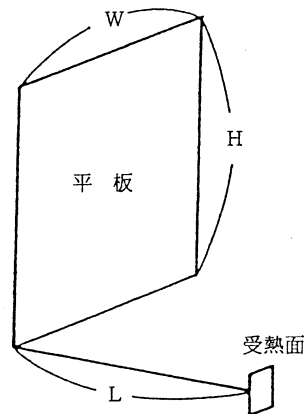


図3-6 火炎と受熱面の相対位置（直方体の火炎）

オ 風による火炎の傾き

風による火炎の傾きを考慮する必要がある場合には、図3-7に示す実験結果に基づいて、求められた次式により火炎の傾斜角を計算することができる。

$$\tan \theta = (u^2 / D)^{0.38}$$

θ : 鉛直方向から測った炎の傾斜角

u : 風速(m/s)

D : 火災面の直径(m)

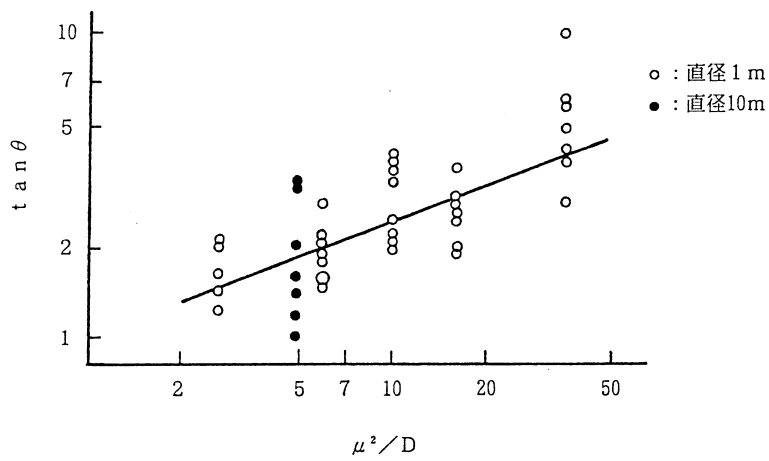


図 3-7 風による火炎の傾き (ガソリン)

2 石油等の漏洩及び流出

石油等の漏洩、流出には、コンビナート施設の種類により、次のようなことが考えられる。なお、漏洩及び流出量の算出は、タンク及び配管からの漏洩に関する計算式を引用する。

(1) タンク

- ① タンクからの防油堤内漏洩
- ② タンクの配管からの防油堤内漏洩
- ③ 流出油等防止堤内への流出
- ④ 特定事業所の敷地内から河川、海等への流出

(2) プラント

- ① 配管からの漏洩
- ② 機器等からの漏洩

(3) パイプライン

- ① 配管からの漏洩
- ② ポンプ・バルブ部分からの漏洩

3 可燃性ガスの漏洩による爆発、ファイヤボール及び拡散

高圧ガスタンク、石油精製プラントなどから可燃性ガスが漏洩した場合、漏洩した可燃性ガスに着火し、火災や爆発が発生することがある。この火災や爆発による放射熱や爆風が周囲に影響を与える。

燃焼の形態は、漏洩した可燃性ガスの量、種類、貯蔵・取扱状態（温度、圧力等）及び着火のタイミングなどによって異なる。

漏洩直後空気と混合する前に着火した場合には火災となる。一方、漏洩後空気と混合した段階で着火した場合には、爆発が発生し、その爆風により周囲に影響を与える場合がある。さらに、爆発に伴ってファイヤボールを形成することもあり、この場合には放射熱による影響が想定される。

また、小さな破断口から徐々に漏洩したような場合には、大気中に拡散した後、その濃度が爆発限界内に入ると着火、燃焼することがある。

可燃性ガスの爆発による爆風圧、ファイヤボールによる放射熱及び拡散による可燃性ガス濃度を推定する方法について以下に示す。

(1) 流出速度の計算

ア 液化ガスの流出速度

液化ガスの流出速度については、石油等の流出速度を計算する式により求めることができる。

圧縮液化ガスが、タンク直近の配管から流出する場合又は配管断面に比べ十分小さい破口から流出する場合は、配管に沿っての圧力降下は小さく、沸騰気化が進行していない、液体に近い状態で流出する（液相噴出）。このため流率は大きく、これらの場合では、流体の流れとして扱った算出式により流出速度を求めることができる。

加圧により液化している可燃性ガスが大気圧下に流出した場合、流出した液体の温度は大気圧の沸点より高いので急速に気化する。このような現象をフラッシュと呼び、気化した液量と流出した液量の比をフラッシュ率と呼んでいる。フラッシュ率は、ガスの物性値から次式により求めることができる。

$$W_f = \frac{W (H_{T_1} - H_{T_2})}{L}$$

W_f / W : フラッシュ率

W_f : 蒸発した気体量(kg)

W : 加圧容器から流出した液体量(kg)

H_{T_1} : 液体の温度 T_1 におけるエンタルピー(J/kg)

H_{T_2} : 液体の沸点 T_2 におけるエンタルピー(J/kg)

L : 液体の蒸発潜熱 (T_2 における気・液エンタルピーの差、J/kg)

フラッシュ率は、液化ガスの種類と流出前の温度により決まり、流出前の温度が高くなるほど大きくなる。液化ガスの種類によるフラッシュ率を、表3-4に示す。

表3-4 液化ガスのフラッシュ率

液化ガスの種類	貯蔵・取扱温度	フラッシュ率
プロパン	21℃	0.364
プロピレン	21℃	0.346
ブタン	21℃	0.124
エチレン	-30℃	0.382
塩素	21℃	0.209
アンモニア	21℃	0.183

流出した圧縮液化ガスの一部はフラッシュ蒸発し、残りは液体として地表面に到達する。漏洩が少量の場合には、流出後、飛散し、大気や大地から熱を奪うことによって気化し拡散する。このため、地表面に液体が留まることはない。

イ 気体の流出速度

高圧状態で貯蔵されたガスが開口部から気体状態で噴出する場合には、圧力変化が大きいため気体の圧縮性を考慮する必要がある。タンクの大きさが開口の面積に比べ十分大きく、かつ、噴出する気体の流れに熱的变化がないと仮定すれば、噴流の流速 V は、次式のようにになる。

$$V^2 = \frac{2}{r-1} \left[\frac{rP}{\rho} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{P_0}{P} \right]^{(r-1)/r} \right\} \quad (\text{基準式})$$

ここで、

- r : 気体の比熱比
- P : タンク内の圧力
- ρ : タンク内の密度
- P_0 : 外側の圧力

をそれぞれ示す。流速 V は圧力差が大きくなるに従って増加し、流速も増加するが、流速 V が音速になると流速はそれ以上増加せず一定となる。音速になるときの外部と内部の圧力比（限界圧力比）は、次式により求められる。

$$\frac{P_0}{P} = \left[\frac{2}{r+1} \right]^{r/(r-1)}$$

圧力比が上式から得られる値より大きいときの流速 V は音速より小さく、同式から得られる値より小さいときの流速 V は音速となる。比熱比 (r) の値に対する限界圧力比を、表3-5に示す。

表3-5 比熱比に対する限界圧力比

γ	P_0/P	γ	P_0/P	γ	P_0/P	γ	P_0/P
1.00	0.606	1.20	0.563	1.40	0.528	1.60	0.496
1.02	0.602	1.22	0.559	1.42	0.525	1.62	0.493
1.04	0.597	1.24	0.556	1.44	0.522	1.64	0.490
1.06	0.593	1.26	0.552	1.46	0.518	1.66	0.488
1.08	0.588	1.28	0.549	1.48	0.515	1.68	0.485
1.10	0.584	1.30	0.545	1.50	0.512	1.70	0.482
1.12	0.580	1.32	0.542	1.52	0.509	1.80	0.468
1.14	0.576	1.34	0.538	1.54	0.505	1.90	0.456
1.16	0.571	1.36	0.535	1.56	0.502	2.00	0.444
1.18	0.567	1.38	0.531	1.58	0.499	2.20	0.422

高圧状態で貯蔵されたガスが破壊口や安全弁等の開口部より気相噴出する場合における吹き出し量の推定については、次式が実用的に用いられている。

① 噴出流速が音速未満の場合

$$W = 1.55 \times 10^{-6} C a P \sqrt{\frac{M}{Z T}} \sqrt{\left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right] \left\{ \left[\frac{P_0}{P} \right]^{2/\gamma} \left[\frac{P_0}{P} \right]^{(\gamma + 1)/\gamma} \right\}}$$

② 噴出流速が音速の場合

$$W = 1.10 \times 10^{-6} C a P \sqrt{\frac{M}{Z T}} \sqrt{\gamma \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}}$$

- w : 流出量 (kg/s)
- C : 流出係数 (0.5)
- a : 開口部面積 (m²)
- P : 高圧ガス圧力 (Pa・abs)
- P₀ : 外部圧力 (Pa・abs)
- M : ガスの分子量
- Z : 圧縮係数
- T : 高圧ガス温度 (K)
- γ : 比熱比

(2) 爆発による爆風圧

爆薬を爆源とする爆風圧の測定は古くから数多く行われ、スケール化距離とピーク圧との関係については、いずれも類似形の曲線が得られていることから、「ホプキンソンの3乗根法則」が「スケール則」として、かなり広い範囲で成り立つことが知られている。(特にTNTについては信頼性が高い。)

すなわち、ピーク圧は薬量の3乗根に比例した距離で同一となり、正圧持続時間も薬量の3乗根に比例する。

ガスを爆源とする爆風圧の強さは一般に、TNT爆発と比較して、TNT収率又はTNT当量から求める方法が使われている。(注参照)

高圧ガス取締法コンビナート等保安規則では、

既存施設 換算距離 $\lambda = 12.0$ (限界強度 約 $1.2 \times 10^3 \text{ kgf/m}^2$ 、 $11.8 \times 10^3 \text{ Pa}$)

新設施設 換算距離 $\lambda = 14.4$ (限界強度 約 $1.0 \times 10^3 \text{ kgf/m}^2$ 、 $9.8 \times 10^3 \text{ Pa}$)

として、次の式により計算することとしている。

$$\text{既存施設} \quad R = 0.480 \sqrt[3]{K W}$$

$$\text{新設施設} \quad R = 0.576 \sqrt[3]{K W}$$

R : 製造施設から保有しなければならない距離

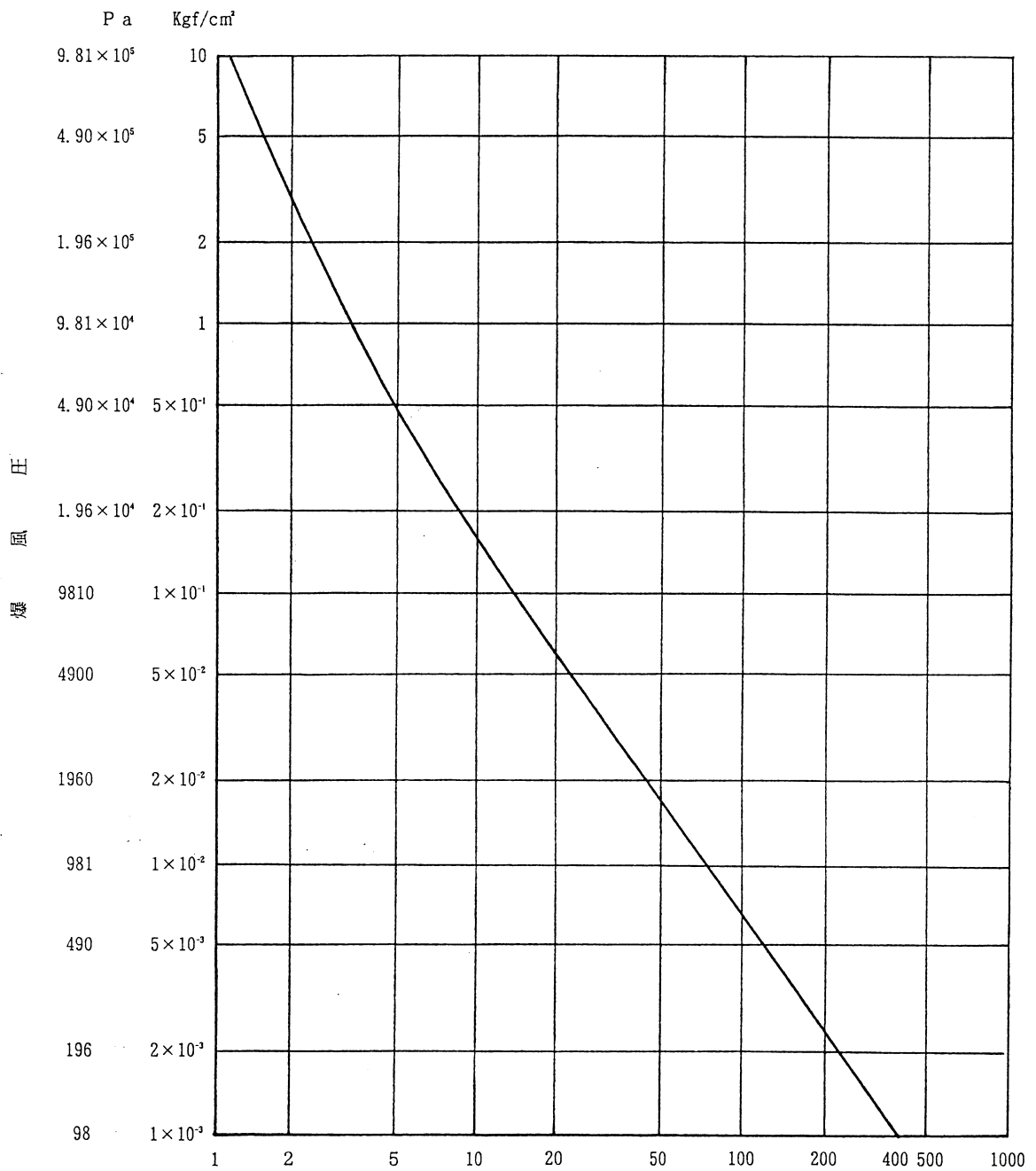
W : ガスの流出量(kg)

K : 発熱量に気化率と爆発に寄与する比率(爆発係数)を掛けた値

(注)

TNT収率は爆発の激しさの尺度であり、爆轟しやすいガスについてはTNT収率が高くなるが、爆風圧又は衝撃波が発生しない燃焼性状のガスもあるなど、ガスの種類によって本来収率が異なるものである。

しかし、ガスの爆発については、実大規模での実験が少なく、ガスの種類に応じたTNT収率の実測値も少ないことから、ガスの種類に関わらず、ガスとしてかなり激しい爆発に対応するTNT収率4~10%の代表値6.4%が採用されている。ただし、今後、そのガスに対応した、より適切なTNT収率が明らかになった場合には、その数値を用いて確認することが望ましい。



換算距離 $\lambda = R / W_{TNT}^{1/3}$ (m/kg^{1/3})

図3-8 爆風圧と換算距離との関係

(3) ファイヤボールの放射熱

噴出した可燃性ガスが空気と混合し、蒸気雲を形成した段階で着火した場合には、ファイヤボールを形成することがある。ファイヤボールは、例えば容器内の液化ガスが火災の熱により高圧となり、容器を破って気化したような場合に発生する。ファイヤボールを生成する場合、爆風圧は激しくなく、熱放射による被害が問題となる。ファイヤボールによる影響範囲を推定する方法を次に示す。

ファイヤボールの放射熱 E (J/m^2s) は、 $E = \varepsilon \sigma T^4 \phi$ で与えられる。

ファイヤボールを直径 D の球形としたときの形態係数 ϕ は、球の中心から受熱面までの距離を X として、次式のようにになる。

$$\phi = (D/2X)^2$$

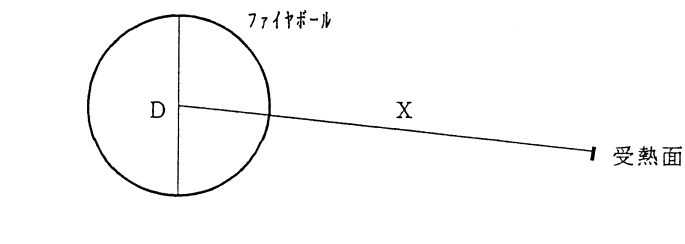


図3-9 ファイヤボールと受熱面の関係

ファイヤボールを温度 $T = 1750$ (K) の完全黒体 (放射率 $\varepsilon = 1$) とし、ステファン・ボルツマン定数 $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} J/m^2sk^4$ とすると、放射熱は次式により計算することができる。

$$E = \varepsilon \sigma T^4 (D/2X)^2 = 1.33 \times 10^5 \times (D/X)^2$$

ここで、ファイヤボールの形成に寄与する可燃性ガス量 W (kg)と、 W の酸化反応に必要となる酸素量との和を混合ガス量 W' (kg)とすると、ファイヤボールの直径 D (m)と混合ガス量 W' (kg)の間には、次の関係式が与えられている。

$$D = 3.77 W'^{0.325}$$

また、ファイヤボールの持続時間を t (秒)とすると、次式が与えられる。

$$t = 0.258 W'^{0.349}$$

プロパンの場合、 W' は可燃性ガス量 W の4.64倍
($C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$)となり、

$$D = 3.77 (4.64 W)^{0.325} = 6.21 W^{0.325}$$

$$t = 0.258 (4.64 W)^{0.349} = 0.44 W^{0.349}$$

その他の可燃性ガスについてもこれに近い式となることから、ガスの種類によらず前式を用いることができる。

(4) 拡散による可燃性ガス濃度

可燃性ガスが漏洩し、大気中に拡散した場合の着火・燃焼範囲を推定するためには、任意の地点の拡散濃度を計算する必要がある。拡散濃度を計算するためのモデルはいくつか提案されているが、流出速度がそれほど大きくない場合には、災害想定や防災アセスメントで一般的に使用されている坂上の拡散式を用い、流出速度が大きい場合には佐藤の式を用いる。

ア 流出速度がそれほど大きくない場合

ガス拡散の発生源としては、

- ① 加圧気体の気体流出
- ② 圧縮液化ガスの液体流出
- ③ 低温液化ガスの流出後の蒸発

が想定されるが、流出量がそれほど多くない場合は、点源として取扱うことができる。ここでは小さな破口から流出するような場合を想定し、連続点源の拡散式を用いることとする。なお、ガスの種類（密度等）は、考慮していない。

連続点源の拡散式は、次式のように表される。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{u} \cdot \frac{e^{-y^2/A}}{\sqrt{\pi A}} \cdot \frac{e^{-(h+z)/B}}{B} \cdot I_0 \left(\frac{2\sqrt{hz}}{B} \right)$$

$$A = q_A [\phi_A x + \exp(-\phi_A x) - 1]$$

$$B = q_B [\phi_B x + \exp(-\phi_B x) - 1]$$

C_{xyz} : (x, y, z)地点のガス濃度(体積比率: m^3/m^3)

Q : 拡散ガス量(m^3/s)

u : 風速(検討対象地域の年間平均風速とする、 m/s)

e : 自然対数の底

h : ガス発生源の高さ(m)で、(0, 0, h)が発生源(点源)の座標となる

x : 風向主軸上の発生源から濃度を求める地点までの水平距離(m)

y : 風向主軸の直角方向の、風向主軸から濃度を求める地点までの水平距離(m)

z : 濃度を求める地点の地表面からの高さ(m)

q_A 、 q_B 、 ϕ_A 、 ϕ_B :

気象条件、発生源の高さにより決まる拡散パラメータ(表3-6参照)

$I_0 \left(\frac{2\sqrt{hz}}{B} \right)$: 0次の変形第1種ベッセル関数

表3-6 拡散パラメータの値

大気安定度	h (m)	ϕ_A	$\sqrt{Q_A}$	ϕ_B	Q_B
安定 ($\xi = 0.4$)	0.5	4.78×10^{-2}	4.26	4.20×10^{-2}	3.50×10^{-1}
	10	4.78×10^{-2}	4.26	4.60×10^{-2}	2.93×10^{-1}
	20	4.78×10^{-2}	4.26	4.71×10^{-2}	2.86×10^{-1}
	30	4.78×10^{-2}	4.26	4.77×10^{-2}	2.83×10^{-1}
中立 ($\xi = 0.0$)	0.5	1.48×10^{-2}	1.56×10	1.10×10^{-2}	5.30
	10	1.09×10^{-2}	2.18×10	2.46×10^{-2}	1.02
	20	1.01×10^{-2}	2.37×10	3.00×10^{-2}	7.00×10^{-1}
	30	0.97×10^{-2}	2.48×10	3.29×10^{-2}	5.65×10^{-1}
やや不安定 ($\xi = -0.1$)	0.5	4.50×10^{-3}	7.59×10	4.25×10^{-3}	3.48×10
	10	2.12×10^{-3}	1.59×10^2	1.48×10^{-2}	2.87
	20	1.80×10^{-3}	1.88×10^2	1.98×10^{-2}	1.61
	30	1.61×10^{-3}	2.09×10^2	2.34×10^{-2}	1.14
不安定 ($\xi = -0.2$)	0.5	1.12×10^{-3}	2.77×10^2	1.30×10^3	3.73×10^2
	10	2.52×10^{-4}	1.24×10^3	7.20×10^3	1.18×10
	20	1.78×10^{-4}	1.73×10^3	1.10×10^{-2}	5.19
	30	1.44×10^{-4}	2.14×10^3	1.40×10^{-2}	3.21

可燃性ガスの拡散による危険範囲については、地表付近の風下方向（X軸方向）の濃度をもって、代表させることができる。この場合、 $y = 0$ 、 $z = 0$ となることから前式は次式のように簡略化される。

$$C_x = \frac{Q}{u} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi A}} \cdot \frac{e^{-h/B}}{B}$$

また、大気安定度は、安定状態の場合に一定濃度の範囲が最も大きくなるが、中立状態となる頻度が最も高いため、この時の気象パラメータを用いるのが一般的である。ガス発生源の高さは、地上付近（ $h = 0.5\text{m}$ ）で漏洩すると仮定し、風速はその地域の平均風速を用いる。

前記の式は、拡散ガス量Qを含んでいるため、次式のように C_x/Q の値を求めるに変形できる。この計算結果を表3-7に示す。

$$\frac{C_x}{Q} = \frac{1}{u} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi A}} \cdot \frac{e^{-h/B}}{B}$$

これを基に、拡散ガス量を推定することにより、拡散源から任意の距離（風下方向）にある地点のガス濃度を求めることができる。

表3-7 風速別のC_x/Qの計算結果 (大気安定度：中立)

距離 (m)	風速					
	1.0(m/s)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
30	69.37	46.24	34.68	27.75	23.12	19.82
40	69.34	46.23	34.67	27.74	23.11	19.81
50	54.87	36.58	27.43	21.95	18.29	15.68
60	41.36	27.57	20.68	16.54	13.79	11.82
70	31.25	20.83	15.62	12.50	10.42	8.93
80	24.01	16.01	12.01	9.60	8.00	6.86
90	18.83	12.55	9.42	7.53	6.28	5.38
100	15.07	10.05	7.53	6.03	5.02	4.31
110	12.28	8.19	6.14	4.91	4.09	3.51
120	10.18	6.79	5.09	4.07	3.39	2.91
130	8.56	5.71	4.28	3.42	2.85	2.45
140	7.29	4.86	3.65	2.92	2.43	2.08
150	6.29	4.19	3.14	2.51	2.10	1.80
160	5.47	3.65	2.74	2.19	1.82	1.56
170	4.81	3.21	2.40	1.92	1.60	1.37
180	4.26	2.84	2.13	1.70	1.42	1.22
190	3.80	2.53	1.90	1.52	1.27	1.09
200	3.42	2.28	1.71	1.37	1.14	0.98
210	3.09	2.06	1.54	1.23	1.03	0.88
220	2.80	1.87	1.40	1.12	0.93	0.80
230	2.56	1.71	1.28	1.02	0.85	0.73
240	2.35	1.57	1.17	0.94	0.78	0.67
250	2.16	1.44	1.08	0.87	0.72	0.62
260	2.00	1.33	1.00	0.80	0.67	0.57
270	1.86	1.24	0.93	0.74	0.62	0.53
280	1.73	1.15	0.86	0.69	0.58	0.49
290	1.61	1.07	0.81	0.64	0.54	0.46
300	1.51	1.01	0.75	0.60	0.50	0.43
310	1.42	0.94	0.71	0.57	0.47	0.40
320	1.33	0.89	0.67	0.53	0.44	0.38
330	1.26	0.84	0.63	0.50	0.42	0.36
340	1.19	0.79	0.59	0.47	0.40	0.34
350	1.12	0.75	0.56	0.45	0.37	0.32
360	1.07	0.71	0.53	0.43	0.36	0.30
370	1.01	0.68	0.51	0.41	0.34	0.29
380	0.96	0.64	0.48	0.39	0.32	0.28
390	0.92	0.61	0.46	0.37	0.31	0.26
400	0.88	0.58	0.44	0.35	0.29	0.25
410	0.84	0.56	0.42	0.34	0.28	0.24
420	0.80	0.53	0.40	0.32	0.27	0.23
430	0.77	0.51	0.38	0.31	0.26	0.22
440	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.21
450	0.71	0.47	0.35	0.28	0.24	0.20
460	0.68	0.45	0.34	0.27	0.23	0.19
470	0.65	0.44	0.33	0.26	0.22	0.19
480	0.63	0.42	0.32	0.25	0.21	0.18
490	0.61	0.41	0.30	0.24	0.20	0.17
500	0.59	0.39	0.29	0.23	0.20	0.17

イ 流出速度が大きい場合

可燃性ガスが気体で取扱われている場合には、取扱い圧力から決まる噴出速度が噴出時のガス濃度に大きな影響を与える。爆発下限界程度の濃度を考慮する場合には、ガスの比重が大きく作用するので、特にこの傾向が強くなる。

このような気体噴出時におけるガス濃度の推定には、V. D. Longの式に噴出ガスの圧力の影響を考慮した佐藤の式を用いる。

$$\frac{C_{xr}}{C_0} = 5.1 \frac{D}{X} \left(\frac{M_{x0}}{M_0} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{b_c r}{X} \right)^2 \right]$$

ここで、

- C_{xr} : 放出口からの距離 X、半径方向への距離 r の点でのガス濃度
- C₀ : ガスの初濃度
- D : 噴出口の直径
- X : 噴出口からの噴出方向距離
- M_{x0} : X、0点でのガスと空気の混合気の平均分子量
- M₀ : 噴出ガスの分子量
- P : ノズル元圧
- P₀ : 大気圧
- b_c : 噴出流の濃度の広がり幅を表す係数
- r : 噴出流の中心軸から半径方向への距離

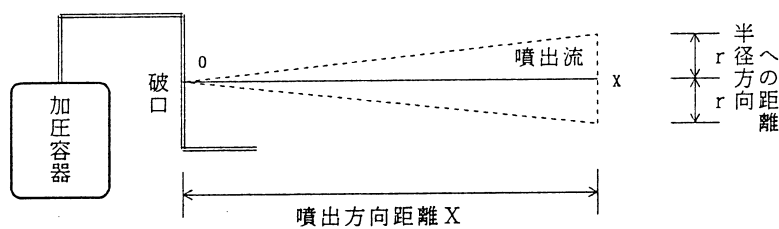


図3-10 気体噴出の概念図

4 毒性ガスの漏洩による拡散

毒性ガスが漏洩し、大気中に拡散した場合、一定以上の濃度となると人体に影響を与える恐れがある。

毒性ガスの拡散濃度についても、基本的には可燃性ガスの場合と同様に計算することができる。