

## 参考資料 1 災害現象解析モデル<sup>1</sup>

### 1.1 流出モデル

#### (1) 液体流出

危険物質を液相で貯蔵した容器（または付属配管で容器に近いところ）が破損したときの流出率は次式で与えられる。ただし、容器の大きさに比べて流出孔が十分に小さく、流出が継続する間は液面の高さは変化しないことを前提とする。

$$q_L = ca\sqrt{2gh + \frac{2(p - p_0)}{\rho}} \quad (1)$$

ただし、

- $q_L$  : 液体流出率 (m<sup>3</sup>/s)
- $c$  : 流出係数 (不明の場合は 0.5 とする)
- $a$  : 流出孔面積 (m<sup>2</sup>)
- $p$  : 容器内圧力 (Pa)
- $p_0$  : 大気圧力 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)
- $\rho$  : 液密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $g$  : 重力加速度 (= 9.8m/s<sup>2</sup>)
- $h$  : 液面と流出孔の高さの差 (m)

長い配管から流出するような場合には、配管内壁と流体との摩擦による圧力損失を考慮すべきであるが、これを無視して次式により安全サイドの評価として概算することができる。

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

ただし、

- $v$  : 配管内の流速 (m/s)
- $p$  : 送出圧力 (Pa)

#### (2) 気体流出

容器内に物質が気相で存在する場合の流出率は次式で与えられる。ただし、容器のサイズに比べて流出孔が十分に小さく、気体の噴出に熱的变化がないことを仮定している。

①流速が音速未満( $p_0 / p > \gamma_c$ )のとき

<sup>1</sup> 消防庁特殊災害室,「石油コンビナートの防災アセスメント指針」,平成 25 年 3 月

$$q_G = cap \sqrt{\frac{2M}{ZRT} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left\{ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (3)$$

②流速が音速以上 ( $p_0 / p \geq \gamma_c$ ) のとき

$$q_G = cap \sqrt{\frac{2M}{ZRT} \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

ただし、

$$\gamma_c = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$$

- $q_G$  : 気体流出率 (kg/s)
- $c$  : 流出係数 (不明の場合は0.5 とする)
- $a$  : 流出孔面積 (m<sup>2</sup>)
- $p$  : 容器内圧力 (Pa)
- $p_0$  : 大気圧力 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)
- $M$  : 気体のモル重量 (kg/mol)
- $T$  : 容器内温度 (K)
- $R$  : 気体定数 (=8.314 J/mol・K)
- $\gamma$  : 気体の比熱比
- $Z$  : ガスの圧縮係数 (=1.0 : 理想気体)

## 1.2 蒸発モデル

常温の揮発性液体が流出して矩形の囲いの中に溜まった場合、液面からの蒸発量は風速に支配され次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$w = 0.033 \rho_G u \left( \frac{p_v}{p_0} \right) \left( \frac{\nu}{ul} \right)^{0.2} \quad (5)$$

ただし、

- $w$  : 蒸発率 ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
- $\rho_G$  : 周辺温度における蒸気密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- $p_v$  : 液面温度での飽和蒸気圧 (Pa)
- $p_0$  : 大気圧 ( $=0.101 \text{ MPa}=0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$ )
- $u$  : 風速 (m/s)
- $l$  : 風方向の囲いの長さ (m)
- $\nu$  : 空気の動粘性係数 ( $=0.151 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} : 20^\circ\text{C}$   
 $=0.154 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} : 25^\circ\text{C}$ )

### 1.3 拡散モデル (坂上モデル)

ガスが流出して大気中で拡散したときの濃度分布を計算するための簡易モデルとしてガウシアンモデルがある。このモデルは、ガスの進行方向 (風下方向) に対して直角方向の濃度分布を正規分布と仮定して解析するものである。ガウシアンモデルにはいくつかのものがあるが、海外ではプルームモデル (Pasquill-Gifford モデル)、国内では坂上モデルがよく用いられている。ここでは、坂上モデルを示す。

坂上モデルには、ガスの発生源が点源と面源、ガスの発生時間が連続的と瞬間的の計 4 種類がある。点源の式は小さな開口部からガスが流出するような場合、面源の式は流出した液化ガスが防液堤に溜まって蒸発するような場合に適用される。以下に、よく用いられるガスの発生が連続的な点源と面源の式を示す。防液堤に溜まって蒸発するような場合でも、防液堤から遠いところでは面からの蒸発ガス量が 1 点から発生するとして点源の式を用いてもよい。

なお、ガウシアンモデルでは、対象とするガスの密度が周囲の空気密度と同程度であることを仮定している。空気よりも非常に軽いガスや重いガスの場合には、実際の拡散距離とガウシアンモデルによる算定値にかなりの差が生じるものと考えられ、注意が必要である。

#### ①連続点源の式

連続点源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(\frac{-y^2}{A}\right) \exp\left(\frac{-(h+z)}{B}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (6)$$

$$A = q_A \{\varphi_A x + \exp(-\varphi_A x) - 1\}$$

$$B = q_B \{\varphi_B x + \exp(-\varphi_B x) - 1\}$$

ただし、

- $C_{xyz}$  : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度 (体積比率)  
 $x$  は水平風下方向、 $y$  は水平風横方向、 $z$  は鉛直方向にとった座標 (m)  
 $Q$  : 拡散ガス量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $u$  : 風速 (m/s)  
 $h$  : ガス発生源の高さ (m) (0, 0, h) が発生源の座標となる。  
 $q_A, q_B, \varphi_A, \varphi_B$  : 拡散パラメータ  
 $I_0$  : 0 次の虚数単位ベッセル関数、( $I_0(X)=J_0(iX)$  :  $J_0$  は 0 次ベッセル関数)

拡散パラメータは拡散源の高さと大気安定度によって決まり、表 1.1 で与えられる。

表 1.1 坂上モデルの拡散パラメータの値<sup>2)</sup>

大気安定度	h[m]	$\varphi_A$	$\sqrt{q_A}$	$\varphi_B$	$q_B$
安定	0.5	4.78E-02	4.26	4.20E-02	3.50E-01
	10	4.78E-02	4.26	4.60E-02	2.93E-01
	20	4.78E-02	4.26	4.71E-02	2.86E-01
	30	4.78E-02	4.26	4.77E-02	2.83E-01
中立	0.5	1.48E-02	1.56E+01	1.10E-02	5.30
	10	1.09E-02	2.18E+01	2.46E-02	1.02
	20	1.01E-02	2.37E+01	3.00E-02	7.00E-01
	30	9.70E-03	2.48E+01	3.29E-02	5.65E-01
やや不安定	0.5	4.50E-03	7.59E+01	4.25E-03	3.48E+01
	10	2.12E-03	1.59E+02	1.48E-02	2.87
	20	1.80E-03	1.88E+02	1.98E-02	1.61
	30	1.61E-03	2.09E+02	2.34E-02	1.14
不安定	0.5	1.12E-03	2.77E+02	1.30E-03	3.73E+02
	10	2.52E-04	1.24E+03	7.20E-03	1.18E+01
	20	1.78E-04	1.73E+03	1.10E-02	5.19
	30	1.44E-04	2.14E+03	1.40E-02	3.21

液体で流出したときには、式(1)、(2)で求められる流出率  $q_L$  (m<sup>3</sup>/s) をもとに、式(7)により拡散ガス量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) を計算し、これを式(6)に代入して拡散ガス濃度を計算する。

$$Q = \frac{q_L f \rho R T}{M p_0} \quad (7)$$

ただし、

- $f$  : フラッシュ率
- $\rho$  : 液密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $R$  : 気体定数 (= 8.314 J/mol·K)
- $T$  : 大気温度 (K)
- $p_0$  : 大気圧 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)
- $M$  : 気体のモル重量 (kg/mol)

小量流出の場合には、すべて気化するとして  $f = 1$  としてよい。また、気体で流出したときには、式(3)または式(4)で求められる流出率  $q_G$  (kg/s) をもとに、次式により拡散ガス量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) を計算する。

$$Q = \frac{q_G RT}{M p_0} \quad (8)$$

なお、風下方向・地表面 ( $y=0, z=0$ ) の濃度のみ計算する場合には、式(6)は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(-\frac{h}{B}\right) \quad (9)$$

## ②連続面源の式

連続面源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Q \exp\left(\frac{z+h}{B}\right) \sqrt{A}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{y+m}{\sqrt{A}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-m}{\sqrt{A}}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \right\} \quad (10)$$

$$\Lambda(\eta) = \eta \operatorname{erf}(\eta) + \eta + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2)$$

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt \quad (\text{誤差関数})$$

ただし、

- $C_{xyz}$  : 任意の地点 ( $x, y, z$ ) のガス濃度 (体積比率) (kg/m<sup>2</sup>s)
- $Q$  : 単位時間、単位面積あたりの拡散ガス量 (kg/m<sup>2</sup>s)
- $m$  : 風に直角方向の面源の幅の1/2 (m)
- $n$  : 風方向の面源の幅の1/2 (m)

であり、その他の記号は点源式と同じである。

なお、風下方向・地表面 ( $y=0$ 、 $z=0$ ) の濃度のみ計算する場合には、次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Q \exp\left(\frac{h}{B}\right) \sqrt{A}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ 2 \operatorname{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{A}}\right) \right\} \quad (11)$$

## 1.4 火災・爆発モデル

### (1) 液面火災

ア. 火炎の放射熱

火炎から任意の相対位置にある面が受ける放射熱は次式で与えられる。

$$E = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

ただし、

$E$  : 放射熱強度 ( $\text{W/m}^2$ )

$T$  : 火炎温度 (K)

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 ( $=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$\varepsilon$  : 放射率

$\phi$  : 形態係数 (0.0~1.0 の無次元数)

実用上は、燃焼液体が同じであれば火炎温度と放射率は変わらないと仮定し、 $R_f = \varepsilon \sigma T^4$  ( $\text{W/m}^2$ )

とにおいて次式で計算してよい。

$$E = \phi R_f \quad (13)$$

ここで  $R_f$  は放射発散度と呼ばれ、主な可燃性液体について表 1.2 に示すような値をとる。

表 1.2 主な可燃性液体の放射発散度<sup>2)</sup>

可燃性液体	放射発散度	可燃性液体	放射発散度
	[kW/m <sup>2</sup> ]		[kW/m <sup>2</sup> ]
カフジ原油	41	メタノール	9.8
ガソリン・ナフサ	58	エタノール	12
灯油	50	LNG(メタン)	76
軽油	42	エチレン	134
重油	23	プロパン	74
ベンゼン	62	プロピレン	73
n-ヘキサン	85	n-ブタン	83

イ. 形態係数

① 円筒形の火炎

円筒形の火炎を想定し、図 1.1 に示すように火炎底面と同じ高さにある受熱面を考えたとき、形態係数は次式により与えられる。また、受熱面が火炎底面と異なる高さにある場合の形態係数の計算は図 1.2 のように計算する。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \right) \right] \quad (14)$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2$$

$$m = H / R$$

$$n = L / R$$

ただし、

$H$  : 火炎高さ (m)

$R$  : 火炎底面半径 (m)

$L$  : 火炎底面の中心から受熱面までの距離 (m)

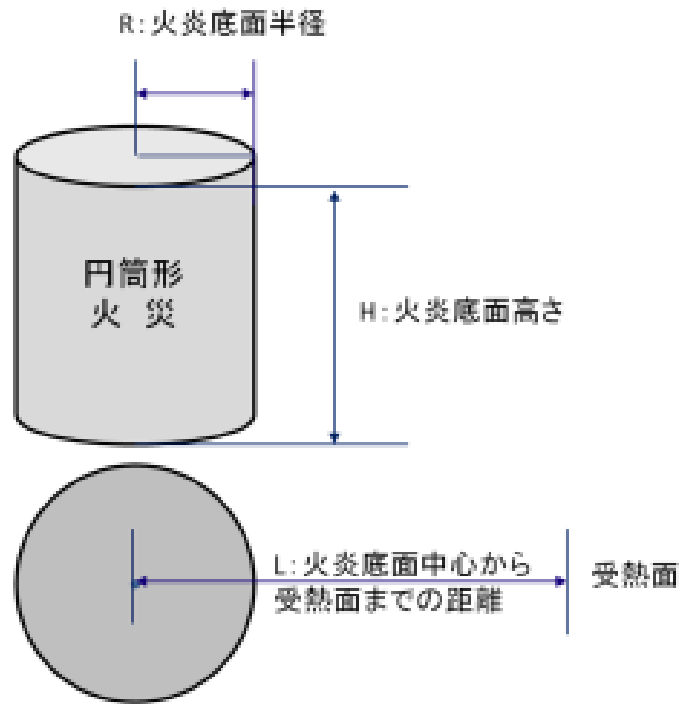


図 1.1 円筒火災と受熱面の位置関係

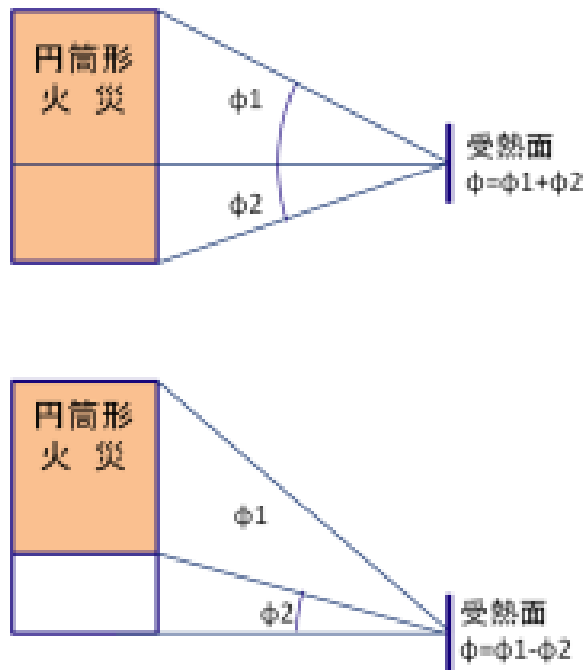


図 1.2 受熱面の高さによる形態係数の計算例



ウ. 火炎の想定

液面火災による放射熱を計算するためには火炎の形状を決める必要があり、一般に次のような想定がよく用いられる。

① 流出火災

可燃性液体が小さな開口部から流出し、直後に着火して火災となるような場合には、火炎面積は次式で表せる。

$$S = \frac{q_L}{V_B} \quad (15)$$

ただし、

- $S$  : 火災面積 (m<sup>2</sup>)
- $q_L$  : 液体の流出率 (m<sup>3</sup>/s)
- $V_B$  : 液体の燃焼速度 (液面降下速度 : m/s)

燃焼速度は、可燃性液体によって固有の値をとり、主な液体については表 1.3 に示すとおりである。流出火災については、式(15) で得られる火災面積と同面積の底面をもち、高さが底面半径の 3 倍 (m=H/R=3) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

表 1.3 主な可燃性液体の燃焼速度(液面降下速度)<sup>3)</sup>

可燃性液体	燃焼速度	可燃性液体	燃焼速度
	[m/s]		[m/s]
カフジ原油	5.20E-05	メタノール	2.80E-05
ガソリン・ナフサ	8.00E-05	エタノール	3.30E-05
灯油	7.80E+03	LNG(メタン)	1.70E-04
経由	5.50E-05	エチレン	2.10E-04
重油	2.80E-05	プロパン	1.40E-04
ベンゼン	1.00E-04	プロピレン	1.30E-04
n-ヘキサン	1.20E-04	n-ブタン	1.50E-04

② タンク火災

可燃性液体を貯蔵した円筒形タンクの屋根全面で火災となった場合には、タンク屋根と同面積の底面をもち、高さが底面半径の3倍 ( $m=H/R=3$ ) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

③ 防油堤火災

可燃性液体が流出し防油堤や仕切堤などの囲いの全面で火災となった場合には、囲いと同面積の底面をもち、高さが底面半径の3倍 ( $m=H/R=3$ ) の円筒形火炎を想定する。

エ. 火炎の規模による放射発散度の低減

液面火災では、火災面積（円筒底面）の直径が10mを超えると、空気供給の不足により大量の黒煙が発生し放射発散度が低減する。したがって、このことを考慮せずに上記の手法で放射熱を計算すると、火災規模が大きいためにかなりの過大評価となる。

実験により得られた火炎（燃焼容器）直径と放射発散度との関係を図1.3に示す。これによると、火炎直径が10mになると放射発散度の低減率は約0.6、20mで約0.4、30mで約0.3となる。

ただし、アルコールやLNGは燃焼しても黒煙が発生しにくいいため、放射発散度は低減しないものとするのが妥当である。

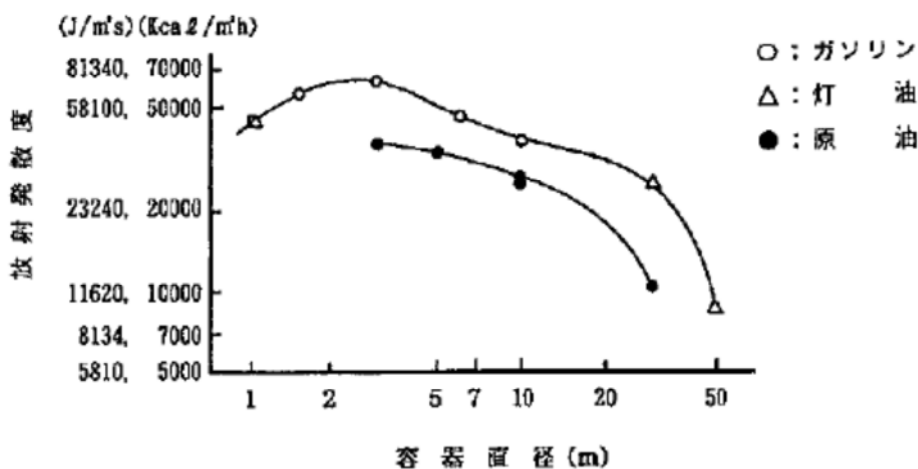


図 1.3 火炎直径と放射発散度との関係<sup>4)</sup>

一方、平成10年から11年に石油公団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）が消防研究所（現消防庁消防大学校消防研究センター）等と共同で行った燃焼実験の結果、燃焼容器直径（D）と放射発散度の低減率（r）の関係として次式が示されている。

$$r = \exp(-0.06D) \tag{16}$$

式(16)によると、D=20m に対して r=0.3、D=30m に対して r=0.17 という低減率になるが、火炎直径の大きいところでのデータが少ないため、r=0.3 程度の値を下限としたほうがよいと考えられる。

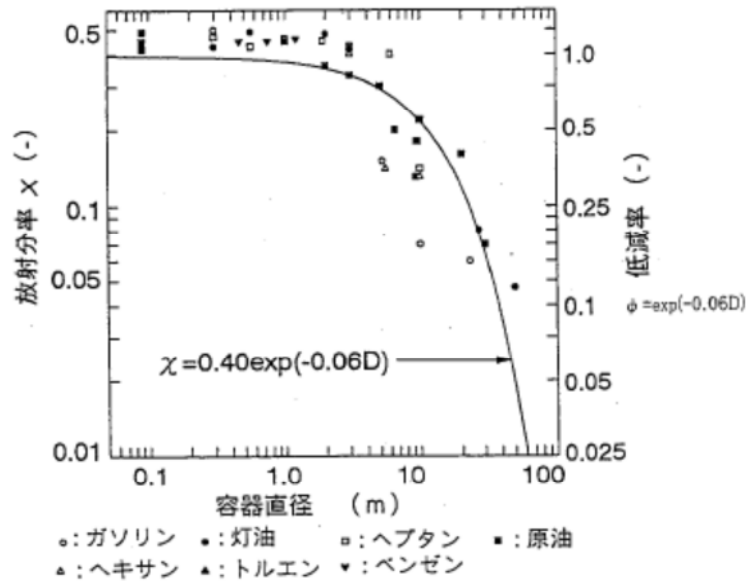


図 1.4 各種燃料の放射分率と容器直径との関係<sup>5)</sup>

## (2) 蒸気雲爆発

流出した可燃性ガス（液化ガスを含む）が拡散し、空気との混合が進んだ後に着火した場合、激しい爆風圧を発生する爆轟が起こる可能性がある。この際の爆風圧と爆発中心からの距離との関係は、TNT 等価法による次式で与えられる。

$$L = \lambda \sqrt[3]{W_{TNT}} = \lambda \sqrt[3]{\frac{W_G f \psi Q_G \gamma}{Q_{TNT}}} \quad (17)$$

ただし、

- $L$  : 爆発中心からの距離 (m)
- $\lambda$  : 換算距離 (m/kg<sup>1/3</sup>)
- $W_{TNT}$  : 等価のTNT 火薬量 (TNT 当量 : kg)
- $W_G$  : 可燃性ガス（液体）の流出量 (kg)
- $Q_G$  : 可燃性ガスの燃焼熱量 (J/kg)
- $Q_{TNT}$  : TNT 火薬の燃焼熱量 (=4.184×10<sup>6</sup> J/kg)
- $f$  : 流出したガスの気化率（フラッシュ率）
- $\psi$  : 爆発係数 (=0.1)
- $\gamma$  : TNT 収率 (=0.06)

爆発係数 $\phi$ は流出・気化したガスのうち爆発に寄与するガスの割合であり、通常 0.1 (10%) が用いられる。また、TNT 収率 $\gamma$ は爆発に寄与したガスの総エネルギーと、この場合に生じた爆風圧に相当する TNT 当量のエネルギーの割合であり、通常安全側の評価を見込んで 0.064 (6.4%) が用いられる。

換算距離 $\lambda$ は爆風圧 (Pa) と対応する。換算距離 ( $\lambda$ ) と爆風圧 (P) との関係は次のような近似式で表すことができる (ただし爆風圧の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )<sup>6)</sup>。

- $P < 0.035$  :  $\lambda = 2.7944P^{0.71448}$
- $0.035 \leq P < 0.2$  :  $\lambda = 2.4311P^{0.75698}$
- $0.2 \leq P < 0.65$  :  $\lambda = 3.143P^{0.59261}$
- $P \geq 0.65$  :  $\lambda = 3.2781P^{0.48551}$

なお、高圧ガス保安法では、式(17) を次式のように表し、K の値を HYO のようにガスの種類ごとに示している (燃燒熱量の単位を  $\text{kcal/kg}$  で表しており  $Q_{\text{TNT}}$  は  $1,000\text{kcal/kg}$  としている。また K 値に  $10^3$  が掛かるのは  $W_G$  をトンで表しているためである)。

$$L = 0.04\lambda\sqrt[3]{KW_G} \quad (18)$$

$$K = f\psi Q_G 10^3$$

この式では、TNT 当量を次のように見積もっていることになる。

$$W_{\text{TNT}} = \frac{0.064KW_G}{1000} \quad (19)$$

同法では、既存施設に対しては $\lambda=12.0$  (爆風圧 11.76kPa)、新規施設に対しては $\lambda=14.4$  (爆風圧 9.8kPa) を限界強度として保安距離を確保するものとしている。

### (3) ファイヤーボール

蒸気雲爆発にはファイヤーボールを伴うことがある。特に、東日本大震災での事例で見られたように、LPG タンクが BLEVE により破損した場合には、巨大なファイヤーボールが形成され、主に放射熱によって周囲に大きな影響を与える恐れがある。

#### ア. ファイヤーボールを形成する可燃性ガス量

沸点以上の温度で圧力をかけて液化したガスが漏洩して瞬間的に気化する現象をフラッシュと呼び、気化する液量と流出した液量の比をフラッシュ率と呼ぶ。フラッシュ率はガスの種類と流出前の温度によって決まり、次式で与えられる。

$$f = \frac{H - H_b}{h_b} = C_p \frac{T - T_b}{h_b} \quad (20)$$

ここで、

- $f$  : フラッシュ率
- $T$  : 液体の貯蔵温度 (K)
- $H$  : 液体の貯蔵温度・圧力におけるエンタルピー (J/kg)
- $T_b$  : 液体の大気圧での沸点 (K)
- $H_b$  : 液体の沸点におけるエンタルピー (J/kg)
- $C_p$  : 液体の比熱 ( $T_b \sim T$  の平均 : J/kg K)
- $h_b$  : 沸点での蒸発潜熱 (J/kg)

ただし、BLEVE によるファイヤーボールを想定した場合、フラッシュ率より大きな割合の可燃性ガスがファイヤーボールを形成すると考えられる。長谷川・佐藤はファイヤーボールを形成する可燃性ガスを、フラッシュ率を基に次のように想定している<sup>7)</sup>。

$$W_G = r_{fb} W_t \quad (21)$$

ただし、

$$r_{fb} = 1 \quad (f \geq \frac{1}{3})$$

$$r_{fb} = 3f \quad (f < \frac{1}{3})$$

ここで、

- $W_G$  : ファイヤーボールを形成する可燃性ガス量 (kg)
- $r_{fb}$  : ファイヤーボールを形成する可燃性ガスの割合
- $W_t$  : ガス貯蔵量 (kg)

イ. 直径・継続時間

ファイヤーボールの直径と継続時間に関する算定式には次のようなものがある。

①旧指針 (平成 6 年)、コンビナート保安・防災技術指針<sup>8)</sup>

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

$$t = 0.258W^{0.549}$$

ここで、

- $D$  : ファイヤーボール直径 (m)  
 $t$  : 継続時間 (s)  
 $W$  : 燃焼ガス量 (燃料と理論酸素量の和 : kg)

ただし、 $W$ は可燃性ガス量 ( $W_g$ ) と酸素量の合計である。例えばプロパンの場合、燃焼の反応式は  $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$  であるから、完全燃焼ではプロパン (44g/mol) 1mol に対して酸素 (32g/mol) 5mol が必要となる。したがって  $W$  は  $W_g$  の 4.64 倍 ( $(44+32 \times 5) / 44$ ) となり、上式は次のように書ける。

$$D = 6.21W_g^{0.325}$$

$$t = 0.44W_g^{0.549} \quad (22)$$

②AICHE ( 2010 ) 9)

$$D = 5.8W_g^{1/3}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0.45W_g^{1/3} \quad (W_g < 30,000kg) \\
 &= 2.6W_g^{1/6} \quad (W_g > 30,000kg)
 \end{aligned} \quad (23)$$

また、ファイヤーボール中心の高さ ( $H$ ) は次式により与えられる。

$$H = 0.75D \quad (24)$$

なお、ファイヤーボールの直径及び継続時間と燃料量との関係については、実験に基づきいくつかのモデルが提案されているが、上式はそれらの平均値を与えるものである。

ウ. 放射熱

ファイヤーボールから受ける放射熱は、ステファン・ボルツマンの法則に基づいた次式で表される。

$$E = \phi R_f = \phi \epsilon \sigma T^4 \quad (25)$$

ここで、

- $E$  : ファイヤーボールから受ける放射熱 (W/m<sup>2</sup>)
- $R_f$  : ファイヤーボールが発散する放射熱 (=  $\varepsilon \sigma T^4$  : W/m<sup>2</sup>)
- $T$  : ファイヤーボールの温度 (K)
- $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (=  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)
- $\varepsilon$  : 放射率
- $\phi$  : 形態係数

形態係数  $\phi$  は、ファイヤーボールを球形と仮定し、球の中心に正対した受熱面を想定すると次式で表される。

$$\phi = \left( \frac{D}{2L} \right)^2 \quad (26)$$

ただし、

- $D$  : ファイヤーボール直径 (m)
- $L$  : ファイヤーボール中心から受熱面までの距離 (m)

式(23) で、ファイヤーボールを 1750K の完全黒体 ( $\varepsilon = 1.0$ ) とし、形態係数として式(24)を代入すると次のようになる。

$$E = 1.33 \times 10^5 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \quad (27)$$

#### (4) フラッシュ火災

フラッシュ火災とは、可燃性蒸気雲の燃焼で火炎伝播速度が比較的遅く過圧が無視できるものをいう。この場合、爆風圧よりも放射熱が問題になるが、放射熱の影響を算定するためのモデルはほとんど開発されていない。そのため、燃焼プロセスが穏やかで持続時間が短いこと、ガス雲の熱膨張は浮力により鉛直上方に起こることを仮定して、ガス濃度が爆発下限界またはその 1/2 以上となる範囲を危険とする評価がよく用いられる。主な可燃性物質の爆発下限界濃度を表 1.4 に示す。

表 1.4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度

可燃性物質	爆発下限界	可燃性物質	爆発下限界
アクリロニトリル	3.0 %	エチルアミン	3.5 %
アクロレイン	2.8 %	エチルアルコール	3.3 %
アセチレン	2.5 %	エチルエーテル	1.9 %
アセトアルデヒド	4.0 %	エチルベンゼン	0.8 %
アセトン	2.5 %	エチレン	2.7 %
アンモニア	15.0 %	塩化エチル	3.8 %
一酸化炭素	12.5 %	塩化ビニル	3.6 %
イソプレン	1.5 %	キシレン	1.1 %
イソプロピルアルコール	2.0 %	クメン	0.9 %
エタン	3.0 %	クロルメチル	8.1 %

(5) 容器破裂

圧力上昇に伴う容器等の破裂に関しては、破裂前後の圧力の違いから放出エネルギーを計算し、これと等価な TNT 火薬量 (TNT 当量) を求めて、式(17) によりある地点の爆風圧を推定することができる。破裂の際に放出されるエネルギーを求める式としては次のものがある<sup>9)</sup>。

① Brode の式 (1959)

$$E = \left( \frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V \quad (28)$$

② Crowl の式 (1992)

$$E = PV \left[ \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) - \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (29)$$

ここで、

- $E$  : 破裂により放出されるエネルギー (J)
- $P$  : 破裂前の容器内圧力 (絶対圧 : Pa)
- $P_0$  : 破裂後の圧力 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)
- $V$  : 内容積 (m<sup>3</sup>)
- $\gamma$  : 容器内の気体の比熱比



タンクの破裂を前提とした場合、タンク気相部の容積が大きい（タンク貯蔵量が少ない）ほど爆風圧の推定値は大きくなり、蒸気雲爆発を前提とした場合と逆の傾向を示す。また、推定値は貯蔵量が相当に少ない場合を除いて、蒸気雲爆発を前提としたほうが大きくなり安全側の評価といえる。

#### (6) 飛散物

容器の破裂による破片の飛散範囲は、破裂エネルギーのほか、破片の数、重量や形状、射出角度や初速度により異なってくる。

LPG 容器の BLEVE に伴う破片の飛散範囲に関しては、次のような簡易式が示されている。

$$L = 90M^{0.333} \quad (\text{容積 } 5\text{m}^3 \text{ 未満の容器})$$
$$= 465M^{0.10} \quad (\text{容積 } 5\text{m}^3 \text{ 以上の容器})$$

ただし、

- $L$  : 破片の最大飛散範囲 (m)  
 $M$  : 破裂時の貯蔵物質量 (kg)

なお、プラントの異常反応に伴う容器破裂に関しては、上式は適用できないため、過去の事故事例などをもとに推定する。

#### 参考文献

- 1) 佐藤公雄：揮発性液体の風による蒸発，安全工学, Vol.18, No.2, 1979
- 2) 坂上治郎：坂上式の拡散パラメータと二,三の計算式について，高圧ガス，Vol.19, No.4, 1982
- 3) 石油コンビナート防災診断委員会：石油コンビナート災害想定の手法（消防地第 180 号），1980
- 4) 湯本太郎他：大規模石油火災からの放射熱の推定，安全工学, Vol.21, No.4, 1982
- 5) 石油タンク等の災害想定について，石油公団・危険物保安技術協会, 2002
- 6) 安全工学協会編：安全工学講座 2・爆発, 1983
- 7) K. Hasegawa and K. Sato, : Study on the Fireball following Steam Explosion of n-Pentan, Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industries, 1977
- 8) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針, 1974
- 9) CCPS AICHe : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition, 2010