

別記 10 石油コンビナートの防災アセスメント指針（抄）

参考資料 2 災害現象解析モデルの一例

4. 火災・爆発モデル

(1) 液面火災

ア. 火災の放射熱

火災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。

$$E = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 14})$$

ただし、

E : 放射熱強度 (W/m²)

T : 火炎温度 (K)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴)

ε : 放射率

ϕ : 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、 $R_f = \varepsilon \sigma T^4$ (W/m²) とおいて次式で計算してよい。

$$E = \phi R_f \quad (\text{式 15})$$

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は表 2 に示すような値をとる。

表 2 主な可燃性液体の放射発散度⁴⁾

可燃性液体	放射発散度 (kW/m ²)	可燃性液体	放射発散度 (kW/m ²)
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 円筒形の火災

円筒形の火災を想定し、図 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 2 のように計算する。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right] \quad (\text{式 16})$$

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

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

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ただし、

H : 火炎高さ

R : 火炎底面半径

L : 火炎底面の中心から受熱面までの距離

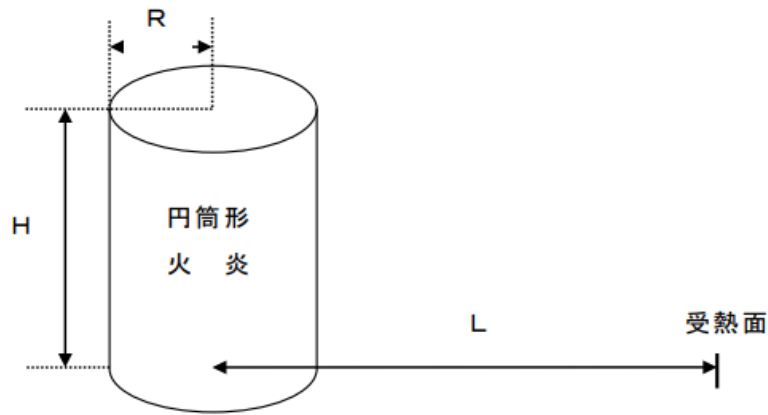


図1 円筒形火炎と受熱面の位置関係

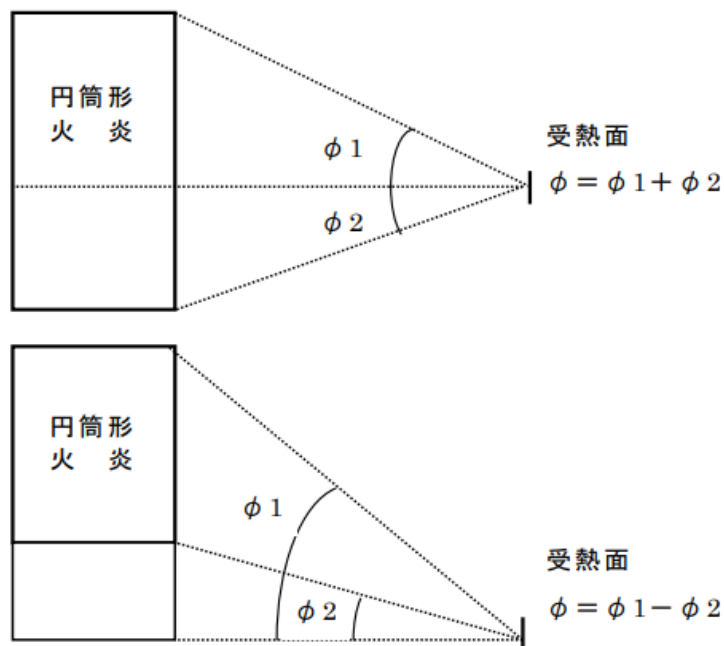


図2 受熱面の高さによる形態係数の計算例

② 直方体の火炎

直方体の火炎を想定したときの形態係数は、図3に示すような受熱面の位置に対して次式により与えられる。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{X^2+1}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2+1}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{Y^2+1}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2+1}} \right) \right] \quad (\text{式 17})$$

$$X = H/L$$

$$Y = W/L$$

ただし、

H：火炎高さ

W：火炎前面幅

L：火炎前面から受熱面までの距離

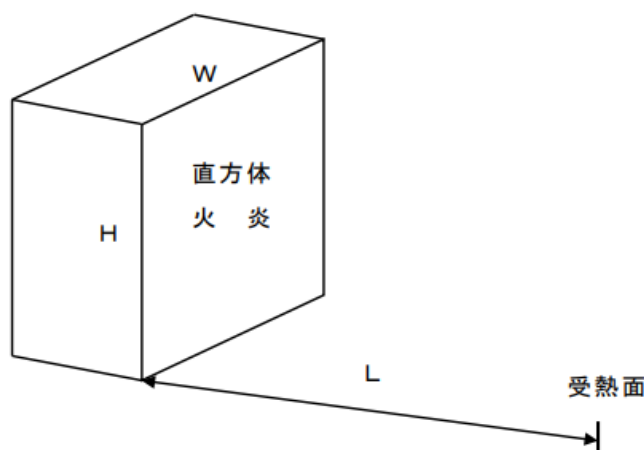


図3 直方体火炎と受熱面の位置関係

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、火災面積は次式で表わされる。

$$S = \frac{q_L}{V_B} \quad (\text{式 18})$$

ただし、

S：火災面積 (m²)

q_L：液体の流出率 (m³/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3に示すとおりである。

流出火災については、式18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 ($m=H/R=3$) の円筒形火災を想定して放射熱の計算を行う。

表3 主な可燃性液体の燃焼速度（液面降下速度）⁴⁾

可燃性液体	燃焼速度 (m/s)	可燃性液体	燃焼速度 (m/s)
カフジ原油	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}

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 ($m=H/R=3$) の円筒形火災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 ($m=H/R=3$) の円筒形火災を想定する。

エ. 火災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、火災規模が大きいときにはかなりの過大評価となる。

実験により得られた火災（燃焼容器）直径と放射発散度との関係を図4に示す。これによると、火災直径が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。

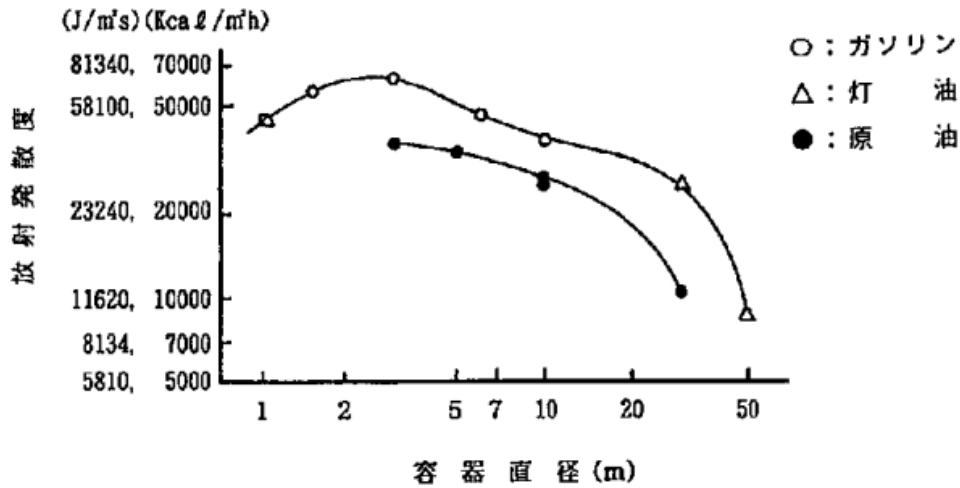


図4 火炎直径と放射発散度との関係⁵⁾

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（図5）。

$$r = \exp(-0.06D) \quad (\text{式19})$$

式19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。

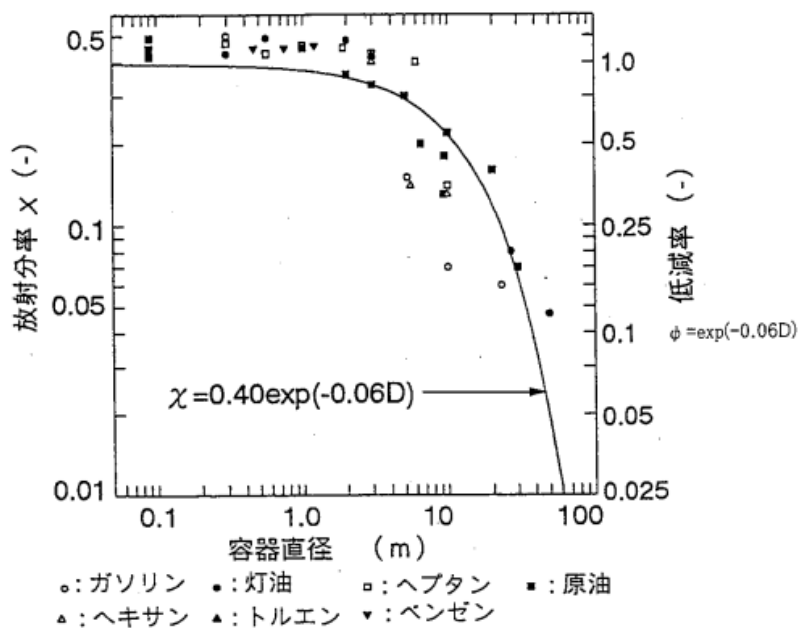


図5 各種燃料の放射分率と容器直径との関係⁶⁾

例 4-1) 2003 年の十勝沖地震で発生したナフサタンク（直径 42.7m、液面高 17.3m）の全面火災による図 6 の受熱面 1、2 の放射熱。

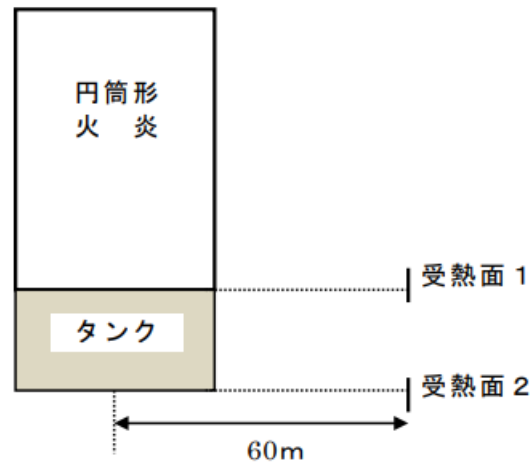


図 6 火炎と受熱面の位置関係

ナフサの放射発散度：58 kW/m²（表 2）

タンク半径：R = D / 2 = 21.4 m

放射発散度の低減率は、

$$r = \exp(-0.06 \times 42.7) = 0.08 \quad (\rightarrow \text{下限の } 0.3 \text{ とする})$$

放射発散度：R_f = 0.3 × 58 = 17.4 kW/m²

受熱面 1 における放射熱は、

$$\text{火炎高さ} : H = 1.5 \cdot D = 64.1 \text{ m}$$

$$m = H / R = 64.1 / 21.4 = 3.0$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 23.5$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 12.3$$

$$\phi = 0.164 \quad (\text{式 16})$$

$$\text{放射熱} : E = 0.164 \times 17.4 = 2.9 \text{ kW/m}^2$$

受熱面 2 における放射熱は、まず、

$$\text{火炎高さ} : H = 64.1 + 17.3 = 81.4 \text{ m}$$

$$m = H / R = 81.4 / 21.4 = 3.8$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 29.1$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 17.8$$

$$\phi_1 = 0.17 \quad (\text{式 16})$$

次に、

$$\text{火炎高さ} : H = 17.3 \text{ m}$$

$$m = H / R = 17.3 / 21.4 = 0.8$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 15.2$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 3.9$$

$$\phi^2 = 0.085 \text{ (式 16)}$$

したがって、

$$\text{放射熱} : E = (0.17 - 0.085) \times 17.4 = 1.5 \text{ kW/m}^2$$