化学プラントの災害シミュレーション[†]

座 古

勝*

Disaster Simulation for Chemical Plants

by

Masaru ZAKO*

A disaster simulation program by using a personal computer has been developed in order to investigate the safety evaluation for accidents in plants. The devised matters for program are as follows ;

- (1) The difference of the effects of location, capacity and kind of tanks on disaster can be calculated.
- (2) The effect of dyke height on disaster can be calculated.
- (3) The computational results can be graphically shown by personal computer.
- (4) The affected region for human body by heat and explosive pressure can be calculated.

If a tank and pipes in plant have been destroyed by earthquake and so on, the gas or liquid in it will be leaked and fire or explosion will occur. The effects of the damaged tank on another ones are calculated by both heat and pressure of explosion.

As an example, the damage progression with time for a model petrochemical plant has been calculated. As a result, the effects of oil dyke and location of tanks on disaster have been analyzed. It is revealed that this program is very useful for safety evaluation and selection of site of fire monitoring system for plants.

Key words : Disaster, Explosion, Fire, Simulation, Reliability

1 緒 言

原料や精製品を備蓄し、集中・効果的に活用するものとしての石油精製・石油化学コンビナートが、拡張・増大している。したがって、万一、石油コンビナート内の一部で事故が発生した場合、その災害はコンビナート内で拡大するだけでなく、周辺の住宅地域にまで被害を広げていく恐れがある。特に、有毒ガス漏出の場合にはその影響が大きいと考えられる。

最近の事故例として、1984年12月インドのボパールでイソシアン酸メチルが漏出・拡散し1400人以上の死者、同年11月メキシコ市ではタンク火災の発生により死者264人、負傷者500人、1985年11月イタリアのナポリでは、石油コンビナートの爆発による165人以上の死傷者を出したものがあげられる。

かかる理由から、化学コンビナート内の一における不慮災害の拡大状況をパーソナルコンピュータ（以下パソコン）を用いて容易にシミュレーション化し、その安全性を確認することが非常に重要と考え、そのシミュレーションプログラムを作成することを本研究の目的とした。

2 シミュレーション法

シミュレーションは、崩壊タンクを入力することから始まり、1分ごとにプラント内の各タンクがどのような状態であるかを計算し、パソコンCRTにその状態を示すことにした。また、プログラム作成においては、次のことを考慮した。

- 1) 既設プラントに対しては、その内容物・容量・配置により、プラント内の各タンクの災害拡大に与える影響度の違いを示せること。
- 2) 建設予定のプラントに対しては、指定され敷地内に必要なタンクの基数を設置する場合において、タンク配置やタンクヤードを許容範囲内で変えることにより、想定災害の拡大差をシミュレーションできること。
- 3) 防液堤の高さの防災効果を示せること。

2・1 災害について

災害は、貯蔵状態により次のように分類できる。

- 1) 流出時（常温常圧下）に液体の場合
静電気が帯電し発火するか、または、構造物衝撃の発火によりプール火災を起こす。
- 2) 流出時に液体と気体の混合の場合
気化した気体の濃度が、プラント内のボイラ・

† 原稿受理 平成元年3月20日 Received Mar. 20 1989

* 正 会 員 三重大学教育学部 津市上浜町, Faculty of Education, Mie University, Kamihama-cho, Tsu

発電機等の着火源地点において爆発下限界以上であれば、気体分がファイアボールまたは爆発となり、それにより引火し、液体分がプール火災となる。

3) 流出時に気体の場合

着火源地点において爆発下限界以上であれば、ファイアボールまたは爆発となる。

プール火災については、一般に、火炎形状は円筒型として取り扱われ、熱的影響領域は、火炎に対する任意位置における単位面の受けるふく射強度として算定される。そこで、本研究ではプール火災について次の点を考慮した。

- (1) ふく射強度
- (2) 火災の継続時間
- (3) 人体危険範囲
- (4) プラント内の他のタンクに与える影響

2・1・1 ふく射強度 ふく射強度については、ステファン・ボルツマンの法則を用いて¹⁾

$$E = \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

となる。ここで、 E は火炎に対し任意の位置にある面の受けるふく射強度 (W/m^2)、 ε は射出率、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)、 T は火炎表面絶対温度 (K)、 ϕ はタンク高さ、半径を H 、 R とすると次式によって求められる形態係数である。

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

ただし、 $m = H/R$ 、 $n = L/R$ 、 $A = (1+n)^2 + m^2$ 、 $B = (1-n)^2 - m^2$ である。

実用上、ふく射発散度 $R_f (\text{W/m}^2)$ を、

$$R_f = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

と定義し、燃烧物質物性値として定数化して取り扱う。したがって、ふく射強度 E は、

$$E = \phi \cdot R_f \quad (4)$$

により算出される。

2・1・2 継続時間 プール火災の継続時間については、火炎が出すふく射熱量の全てを火円筒に接した黒体の円筒が吸収するものと考えその吸収熱量が、着火から鎮火までにその燃烧物が出す全熱量に等しいとして算出した。

$$h_c = \frac{E_x \cdot W}{H_i} \quad (5)$$

ここで、 h_c は継続時間 (h)、 E_x は発熱量 (kJ/kg)、 W は質量 (kg)、 H_i は円筒の受熱量である。ただし、火災は鎮火まで定常状態で燃

え続けるものとする。

2・1・3 人体危険範囲 医学的に 10~20 秒で苦痛を感じるふく射強度は、約 4652 W/m^2 であり、10~20 秒で火傷となるのは約 8141 W/m^2 とされている²⁾。そこで、人体危険ふく射強度をファイアボールでは 4652 W/m^2 、プール火災では火災源が固定しているので逃げられるという状況を考慮し、 8141 W/m^2 として危険範囲を算出することにした。したがって、ファイアボールの場合の人体危険距離は、式 (4) より、

$$\phi = 8141 / R_f \quad (6)$$

を算出し、次いで式 (2) から n 値を求め、次式により計算することができる。

$$L = n \times R_f \quad (7)$$

ただし、 L は 8141 W/m^2 のふく射熱を受ける距離である。

2・1・4 他のタンクに与える影響 2・1・1 で述べた算出方法によって、プール火災の中心から任意の位置にある単位面のふく射強度を算出できるが、実際に単位面が吸収するふく射エネルギー E は、式 (1) から求まる。つまり、火災より単位面積当たり射出されたふく射強度 E は、それを受ける面において、 ε_1 だけ吸収され $(1-\varepsilon_1)$ が反射されることになる。具体的には、圧延鋼板の場合、 50°C において $\varepsilon_1 = 0.56$ であるので、これをタンク壁面の射出率として用いることにした。このようにして求められたふく射エネルギーを、Fig. 1 に示す位置にある面で吸収され则认为。したがって、タンク 1 とタンク 2 の中心間距離を D 、タンク 2 の半径を R_t としたとき、

$$L = D - R_t \quad (8)$$

として、式 (2) より ϕ を算出し、式 (1) より単位面積当たりの吸収されるふく射エネルギー E が算出される。

Fig. 1. Symbols and distance of each tank.

つぎに、タンク 2 の垂直断面積 S_t を、

$$\text{円筒タンクの場合} \quad S_t = 2R_t \cdot H_t$$

$$\text{球形タンクの場合} \quad S_t = \pi R_t^2$$

$$\text{ポンペの場合} \quad S_t = 2R_t \cdot H_t$$

とし、単位時間当たりにタンク 2 の受熱面に吸収される熱量 q (W) を次式により算出する。

$$q = S_t \cdot E \quad (9)$$

ここで、 H_t は地面からのタンク高さである。しかし、実際のプラントでは他のタンクに遮られふく射熱を受けない場合がある。そこで、プール火災に対して任意の位置にあるタンクの受熱面が、他のタンクによってふく射熱を遮られずに何割程度吸収できるかを Fig. 2 に示すように 2 次元的に求めることにした。 Ψ を Fig. 2 のように 9 等分すれば、2 つの接線を含めて 10 本の直線を引くことができる。各直線と x 軸のなす角 γ は、

$$\gamma = (\Psi - \theta/2) + \theta/9 \quad (10)$$

となり、 γ とタンク 1 の座標を用いて、それぞれの直線式を求めると、

$$y = x \cdot \tan \gamma + (y_1 - x_1 \cdot \tan \gamma) \quad (11)$$

となる。また、タンク 3 の円の式が、

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = R_t^2 \quad (12)$$

であることから、式 (11) と式 (12) の判別式 D は、

$$D = 4[\tan \gamma (y_1 - x_1 \tan \gamma - y_3)]^2 - 4(1 - \tan^2 \gamma) \{y_3^2 + x_3^2 + R_t^2 + (y_1 \gamma - 2y_3)\} \quad (13)$$

となる。よって、 $D > 0$ のとき、タンク 1 からタンク 2 が受けるふく射熱の 1/10 がタンク 3 によって遮られると考えると、タンク 2 がタンク 1 より受けることのできるふく射受熱面の割合 n が求められる。したがって、単位時間当たりにタンク 2 が吸収する熱量 q (W) は、

$$q = n \cdot S_t \cdot E_t = n \cdot S_t \cdot \varepsilon_t \cdot \phi \cdot R_t \quad (14)$$

となる。

つぎに、ふく射熱を受けたタンクの壁温度ならびに内容物温度上昇を考える。プール火災が発生してから h 時間が経過したとき、タンク 2 は、

$$Q = q \cdot h \quad (\text{kJ}) \quad (15)$$

の熱量をプール火災から吸収している状態にある。

よって、タンク壁上昇温度 T_w (°C) は、

$$T_w = \frac{Q}{A \cdot t \cdot \rho \cdot C_p} \quad (16)$$

により求められる。ここで、 A はタンク壁の表面積、 t はタンク壁の平均肉厚、 ρ は密度、 C_p は比熱 (≈ 0.55467 (kJ/kg · K)) である。このような状態において内容物温度は、壁温度の上昇による熱伝導と熱ふく射の両方から熱量が与えられ上昇するものとする。

熱伝導により与えられる熱量 q_i (W) は、

$$q_i = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_w - T_i}{R} \quad (17)$$

により得られる。ここで、 λ は内容物の熱伝導度、 T_i は内容物の温度、 R はタンクの半径である。ふく射により与えられる熱量 E_t (W) は、

$$E_t = \varepsilon_t \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_w + 273)^4 \quad (18)$$

となる。ここで、 ε_t は内容物のふく射率 (=1 とする)、よって、経過時間が h のとき、内容物に吸収されている熱量 Q_i (kJ) は、

$$Q_i = (q_i + E_t) \times h \quad (19)$$

となり、内容物の温度 T_i (°C) は、

$$T_i = \frac{Q_i}{W_i C_i} + T_0 \quad (20)$$

$$(W_i = V_q \times \rho_q + V_l \times \rho_l)$$

として得られる。ただし、 W_i は気化している分も含めた内容物の総重量、 C_i は内容物の比熱 (kJ/kg · K)、 T_0 は貯蔵温度、 V_q はタンク内気相部の体積、 V_l はタンク内液相部の体積、 ρ_q は気体密度、 ρ_l は液体密度である。

また、タンク壁から内容物への熱移動により、タンク壁温度の上昇が抑制され熱移動を考慮した場合のタンク壁温度 T_w' は、式 (16) より、

$$T_w' = \frac{Q - Q_i}{A \cdot t \cdot \rho \cdot C_p} \quad (21)$$

となる。

プール火災のふく射熱を受けたタンクの崩壊については、次の 2 点から考察した。実際には安全バルブ等の設備があるが、誤動作や爆発による故障等を考慮することは難しいので、今回は安全バルブ等が無いこととして圧力上昇を解析した。

- ① タンク壁温度 T_w' が、Fig. 1 に示すような内容物の発火点に達した場合に、内部発火して爆発・

Fig. 2. Calculation of effect of heat on tank location.

崩壊する。

- ② 式 (20) で求めた内容物の温度の上昇により、上昇したタンク内圧力により崩壊する。ただし、この場合、次の2点を考慮した。

- タンク形状による耐圧性の違い
- タンク壁温による引張強度の変化（引張強度を温度の関数として数式化した）

2・2 ファイアーボール

ファイアーボールの直径と燃焼量の関係は次式で表される。²⁾

$$D_F = 3.77 W^{0.235} \quad (22)$$

ただし、 D_F はファイアーボールの直径 (m)、 W は燃焼量である。

また、ファイアーボールの持続時間については

$$h_F = 0.258 W^{0.349} \quad (23)$$

と示されている。²⁾

そこで、本研究ではファイアーボールについて、

- ふく射熱による災害想定
- 風向・風速による災害想定
- プラント内のタンクに与える影響

に関して考察するとにした。

2・2・1 ふく射熱による災害想定 ふく射熱による災害想定に関しては、高圧ガス保安協会²⁾によって、無煙火薬コルダイトを用いたファイアーボールの熱ふく射による被害の安全距離について提示された Jarrett の報告を基に、各燃料についての換算値 (Fuel Factor) を推定して、安全距離を算定し図式化したものがあるのでそれを使用した。

$$F_F = \frac{W_E}{W} = \frac{W_F \cdot T_F^4}{2500^4} \quad (24)$$

ここで、 F_F は燃料換算値、 W_F は 2500 K のファイアーボールの反応物質質量、 T_F はファイアーボールの火炎温度である。

このようにして求められた Fuel Factor と内容物の重量の積 W_E を用いて、人体・建物・装置に対する危険限界距離を求めることができる。

人体における危険距離 R (m)

$$R = 7.0618765 W_E^{0.3178} \quad (25)$$

$$W_E < 1440$$

建物における危険距離 R (m)

$$R = 3.7546749 W_E^{0.3152} \quad (26)$$

$$W_E < 25$$

装置における危険距離 R (m)

$$R = \frac{1}{2.3398269} W_E^{0.445} \quad (27)$$

$$W_E < 1000$$

ただし、人体に対するふく射強度は、10～20 秒で苦痛を感じる強度である 4652 W/m^2 を用いた。また、

タンクは装置として考えるものとする。

2・2・2 風向・風速による災害想定 ファイアーボールは、その発生の際わずかであるが爆風を伴うと考えられる。しかし、持続時間に対して爆風を生じている時間はきわめてわずかであるので、爆風の後、ファイアーボールが大気の流れで移動するものと考えられる。よってファイアーボールの持続時間内における移動距離 D_m (m) は、次式で求められる。

$$D_m = k \cdot h_F \cdot V \quad (28)$$

ここで、 V は風速 (m/sec)、 k はファイアーボールの大気流れに対する抵抗係数で最悪の状態を想定して今回は、 $k=1$ として計算した。

2・2・3 他のタンクに与える影響 プラント内のタンクが、ファイアーボールの危険範囲内にある場合、ふく射熱により崩壊し、2次災害に発展していくものと考えられる。そこで、ファイアーボールの危険範囲を大気の流れに沿って移動させ、危険範囲内にタンクの全体もしくは一部が存在すれば、2次災害に発展していくと考え計算を続行させる。

2・3 爆発

可燃性ガスの大気中における爆発時には、破壊的な爆風圧を生じる。その爆風圧による災害想定に関して、高圧ガスおよび火薬類保安審議会の答申「今後の高圧ガス保安体制のあり方」(昭和 49 年 7 月 30 日)において、実験的に検討されている。そこで、本研究では、その答申を基に

- 爆風圧による災害想定
- 人体危険範囲
- プラント内のタンクに与える影響

について考慮する。

2・3・1 爆風圧による災害想定 前述した答申では、TNT について、ガス重量と爆風圧と爆発中心からの距離との実験結果を基に、TNT 以外の各燃料については TNT への換算量をまず求め、爆風圧算出する方法が報告されている。それによると TNT 爆発における爆風圧は、

$$\lambda = \frac{R}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad (29)$$

によって得られた換算距離 λ の値から実験結果を基に求める。ただし、 R は爆心からの距離、 W_{TNT} は TNT 量である。また、TNT 以外の各燃料の TNT 量への換算は、

$$W_{TNT} = \frac{W_0 \cdot \zeta \cdot e \cdot Q \cdot \beta}{1000} \quad (30)$$

により求める。ここで、 W_0 は漏えい量、 ζ は Table II に示す爆発係数、 e は気化率、 Q は単位量当りの燃焼熱量、 β は TNT 収率 (=0.064) である。

実際には爆風圧力と換算距離との関係は実験的に求

Table I. Ignition point for each materials.

	Propane	Ethylene	Benzene	Hexane
Ignition point (°C)	432	450	489	223

Table II. Coefficient of explosion.

Class	Coefficient of explosion (%)	Kinds of gas
1	15	Acetylene, Vinylacetylene, Carbon dioxide
2	10	Ethylene, Ethylene oxide, Hydrogen, Carbon monoxide
3	8	Ethane, Piopane, Propylene, Propylene oxide, Acroleine, Acetaldehyde, Butadiene
4	6	Methane, Butane, Butylene, Hexane, Pentane, Naphtha, Aceton, Cyclohexane, Vinyl chloride
5	4	Ammonia, Methanol

められている。その結果を Fig. 3 に示す。手順としては、災害想定爆風圧を決定し、その爆風圧に対応する換算距離 λ を Fig. 3 より求め式 (31) により R を計算する。災害想定爆風圧と災害の関係を Table III に示す。

2・3・2 人体危険範囲 人体に対して安全とされている圧力は、 9.8×10^4 Pa 以下とされているが、破片物の飛散が、化学プラント内では発生するので上記圧力以下でも人体危険爆風圧となる可能性がある。また、前述した答申では、人体危険爆風圧を 1.225×10^4 Pa と定めてある。しかし、本研究では、高压ガス保安協会が「一次的な鼓膜障害を生ずる人がでても長い異常は残らない値」として人体に対する危険距離の基

Fig. 3. Relation between explosion pressure and λ value.

Table III. Explosion pressure for state of disaster.

Pressure $\times 10^4$ Pa	Parts of damage and condition of disaster
~ 0.59	Window (may be)
0.78 ~ 0.98	Window
1.47 ~ 1.96	Window frames, shutters (may be)
2.45 ~ 3.43	Window frames and shutters
3.92 ~ 4.92	Collapse of roof tiles
5.88 ~ 6.86	Collapse of roofs and columns
14.7 ~	Collapse of houses (which of floor sapace are about 45 m ²)
~ 9.8	Safety for human
9.8 ~ 29.4	Slight injury
29.4 ~ 49.2	Serious injury
49.2 ~ 88.2	Mortal wound
88.2 ~	Instantaneous death

準とした爆風圧 1.96×10^4 Pa を採用した。

したがって、爆風圧 1.96×10^4 Pa のとき、換算距離 λ は 8.3 となるから人体危険距離 R (m) は、

$$R = 8.3 \sqrt[3]{W_{TNT}} \quad (31)$$

として求められる。

2・3・3 他のタンクに与える影響 プラント内の爆発中心から任意の位置にあるタンクが受ける力 F は、

$$F = \Delta P \times S_t \quad (32)$$

となる。ここで、 ΔP は爆心から任意の位置での爆風圧、 S_t はタンクの垂直断面積である。この力によるタンクの接地部に働くモーメントから、各アンカーボルトに生じる応力を求め、タンク転倒の判定を考えた。ただし、本シミュレーションにおいては、アンカーボルトは高力ボルトが使用されているものとして、破断応力を 485 MPa とした。

3 解析結果

解析に使用した模擬プラントを Fig. 4 に示す。また、気象条件は、西風毎秒 1 m とした。

Fig. 5 は、No. 22 のタンクが引火した場合の 1 時間後の結果を示す。外側の円は、人体危険範囲を示す。

Fig. 6 は、中央の 4 つのタンクを右に移動した場合の結果を示す。Fig. 5 の結果より災害範囲が極めて少なくなることが分かる。このような手法によりタンク

Fig. 4. Example plant for simulation.

Fig. 5. State of damage after 1 hour's.

の配置最適化が行えるものと考ええる。なお、計算時間は、いずれの場合も PC-9801 で約 5 分であった。

4 結 論

本解析では消火や安全弁、災害タンクから他のタンクへの油の移動等の作業は行っていないので実際の災害は、このような状態にはならないと考える。しかし、大地震等では、消火活動が充分に行えない等の最悪の状態が発生する可能性もあるので、安全対策を考える上でのプラント災害をシミュレーションできたと考える。特に、災害に対する防液堤、タンク配置等の影響を解析できるので配置並びに防液堤高さ等の最適値を求めることができると考える。また、本プログラムの利用として、災害の時間経過が解析できるのでテレビモニターなどの監視設備配置場所の選定や不慮の災害等への教育システムへの適用などが考えられる。³⁾

なお本研究論文は、構造物の安全性および信頼性に

Fig. 6. State of damage after 1 hour's
in case of moving center tanks.

において発表したものをまとめたものである。論文作成に際し、東京大学柴田碧教授に討論頂いたことをここに記し、厚く謝意を表する。また、データ処理等に関して協力を得た草川哲郎、北原輝之両君（元三重大学教育学部技術科機械工学課程）に対し謝意を表する。

（昭和63年12月16日 第8回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) 日本火災学会編, “火災便覧(新版)” (1984).
- 2) コンビナート保安・防災技術指針(化学工場における地震対策), KHK E 007-1974, 高圧ガス保安協会(1974).
- 3) 座古 勝, 第1回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム, 1, 253 (1987).