

貯槽等で発生した災害事例を参考にしたシナリオでの 爆発・火災等による影響範囲の評価†

佐藤嘉彦*1

貯槽等の化学設備で発生した爆発・火災災害に着目し、災害事例を参考にしたシナリオでの爆発・火災等の影響範囲を評価した。評価した項目は可燃性物質及び毒性物質の拡散範囲、開口部からの火炎の到達距離、貯槽等での内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧及び飛散物の影響範囲であった。可燃性ガスが放出する可能性がある貯槽等周辺でトラブル対処を行う際、大きな開口部が生じる可能性がある場合は、被災防止のためにその貯槽等からある程度離れることが望ましく、一酸化炭素が貯槽等内で発生している可能性があり、開口部が想定される場合は、その開口部が小さくても、貯槽等から相当の距離を確保するか、呼吸用保護具を着用すべきであると考えられた。開口部から噴き出す火炎による被災を防止するためには、開口部が生じる可能性がある箇所から一定の距離を確保するか、耐火・耐熱性を有した作業服を着用することが望ましいと考えられた。貯槽等の破裂等で発生する一次破片は人体に対して危険となる十分大きい運動エネルギーを有しており、貯槽等の内圧が上昇している恐れがある際には、みだりにその周辺に近寄ってはならないと考えられた。

キーワード: トラブル対処作業, 爆発・火災, 被災防止, 影響範囲.

1. はじめに

貯槽等に貯蔵した化学物質が発熱することで発生する異常な温度上昇や煙の発生等のトラブルに対して、作業員等が緊急排出や消火などのトラブル対処作業を行っている際に、爆発・火災が発生し、被災した事例がある¹⁾。例えば、2012年にアクリル酸製造プラントで発生した爆発・火災では、白煙が上がっていた中間タンクへの放水作業及びその準備作業の最中に中間タンクが爆発し、周囲へ同心円状に広範囲で燃焼したアクリル酸廃液が隙間なく飛散し、周囲にいた多くの作業員が燃焼したアクリル酸廃液を浴びて被災した²⁾。また、2003年にRDF貯蔵サイロで発生した爆発・火災では、サイロ内のRDFの燃焼を確認し、注水及びRDFのかき出し作業を行っていたところサイロ内で小爆発が発生し、強い熱風が噴出したため、かき出し作業と監視にあっていた作業員が被災した。さらに、消火活動中にサイロが爆発し、サイロ上部で活動を行っていた作業員が飛ばされる事態となった³⁾。このような事例を防止するためには、発生すると思われる爆発・火災等の影響範囲等を予測しておくことが必要である。これまでに、可燃性ガス等による爆発や火災による影響を解析する手法が開発されているが⁴⁾、多くのデータの収集や複雑なモデルを取り扱う必要があるなど、様々な知識・経験がないと予測することは難しい。これまでに、貯槽等で発生した爆発・火災等に着眼し、災害の原因物質の物性及び生じた現象と被害状況を文献等により調査し、相関の有無や被害状況の傾向を明らかにした⁵⁾。本検討ではそれらの調査結果に基づき、被災者が多く見られた原因物質等について、災害事

例を参考にしたシナリオでの爆発・火災等の影響範囲を評価した。

2. 爆発・火災災害の被害状況の調査

1) 評価物質

貯槽等で発生した爆発・火災災害に着目し、災害の原因物質の物性(引火点、燃焼熱等)等及び生じた現象(爆発、火災)と被害状況との相関の有無を検討した⁵⁾中で、死傷者数が多く見られた原因物質として、以下の5種類の物質を評価対象とした；一酸化炭素、水素、メタン、プロパン、塩化ビニル。

2) 評価対象項目

貯槽等で発生した爆発・火災災害に着目し、災害の原因物質の物性(引火点、燃焼熱等)等及び生じた現象(爆発、火災)と被害状況との相関の有無を検討した⁵⁾中で、多く見られた以下の被災状況について、評価対象項目を検討した。

- ・フラッシュ火災の火炎及び毒性物質へのばく露
可燃性物質の爆発では、火炎や有毒ガスが生じ、その火炎や毒性ガスにばく露することによる被災が装置周辺で生じていた⁵⁾。可燃性物質の爆発での火炎を、可燃性蒸気雲の燃焼であるフラッシュ火災によるものとして、可燃性物質については拡散範囲を評価対象とした。また、毒性ガスについても同様に拡散範囲を評価対象とした。
- ・貯槽等内から噴出した火炎へのばく露
可燃性物質の爆発では、貯槽等の内部が可燃性物質で満たされた状態でトラブル対処のために開けた開口部から空気が流入し、可燃性雰囲気形成するとともに、トラブル対処作業に由来する着火源で着火し、噴き出した火炎により被災する状況が見られた。そのことから、開口部からの火炎の到達距離を評価項目とした。

† 本報の一部は、第54回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 219-220, 2021の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

*1 労働安全衛生総合研究所化学安全研究グループ
連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6
労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ 佐藤嘉彦
E-mail: sato-yoshihiko@s.jniosh.johas.go.jp

・貯槽等の破裂等によって発生する爆風及び飛散物による被災

異常反応による爆発で多く見られた被災状況であり、貯槽等の閉じられた環境で、何らかのトラブルにより化学物質からガス等が発生することにより貯槽等の内圧が上昇すると、貯槽等の耐圧を超える圧力が発生し、貯槽等が損傷・破裂するおそれがある。破裂の際には爆風が生じ、被害をもたらす。また、破裂によって発生した破片が飛散し、その破片により被災する。そのため、貯槽等の内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧と飛散物の影響範囲を評価した。

以上の評価項目の他に、配管等から可燃性ガスが噴出した状況で着火して発生するジェット火災の火炎長さ及び放射熱、蒸気雲爆発による爆風圧や、爆発の際に発生するファイヤーボールの直径・継続時間及び放射熱、プール火災の火炎高さ及び放射熱等が事故影響として考えられるが、文献⁵⁾の調査での被災原因としてはほとんど見られないものであったため、本検討では割愛した。

3) 可燃性物質及び毒性物質の拡散範囲

可燃性物質の爆発では、火災や有毒ガスが生じ、その火災や毒性ガスにばく露することによる被災が装置周辺で生じていた⁵⁾。可燃性物質の爆発での火災を、可燃性蒸気雲の燃焼であるフラッシュ火災によるものとして、ガス濃度が爆発下限界 (Lower Explosion Limit, 以下 LEL)、その濃度の 1/2 (1/2LEL) 及び 1/4 (1/4LEL) となる可燃性物質の拡散範囲を評価した。また、毒性があるガスについては、ばく露限界値の基準値の一つである AEGL-3 (生命が脅かされる健康影響又は死亡すると予測される濃度, AEGL は Access Acute Exposure Guideline Level の略) 及び AEGL-2 (不可逆的又は長期にわたる有害な健康被害が予測される濃度)⁶⁾ となる毒性ガスの拡散範囲を評価した。物質濃度は、米国環境保護庁 (EPA) 及び米国海洋大気庁 (NOAA により開発された影響評価モデル (Areal Locations of Hazardous Atmosphere, 以下 ALOHA)⁷⁾ により評価した。物質の放出速度 (1 時間の連続放出を仮定したとき)、放出量 (瞬時放出を仮定したとき) をパラメータとして、ガスの拡散範囲を評価した。LEL, AEGL-3 及び AEGL-2 の値は、ALOHA に内蔵されているデータベースの値を用いた。表 1 に各物質の LEL, AEGL-3 及び AEGL-2 の値を示す。なお、本検討で用いた AEGL-3 及び AEGL-2 は、1 時間のばく露時間での値である。ALOHA では、放出源直近の物質濃度は、物質分布の不均一性のために信頼性に乏しい⁸⁾とされているが、参考のために放出源直近の物質濃度も評価した。

4) 開口部からの火炎の到達距離

可燃性物質の爆発では、貯槽等の内部が可燃性物質で満たされた状態でトラブル対処のために開けた開口部から空気が流入し、可燃性雰囲気形成するとともに、トラブル対処作業に由来する着火源で着火し、噴き出した

表 1 各物質の LEL, AEGL-3 及び AEGL-2

物質	LEL (%)	AEGL-3 (ppm)	AEGL-2 (ppm)
一酸化炭素	12.5	330	83
水素	4.0	データなし	データなし
メタン	5.0	データなし	データなし
プロパン	2.1	33000	17000
塩化ビニル	3.6	4800	1200

火炎により被災することもある。この状況は、爆発圧力放散設備の開口に伴う火炎の吹き出しと類似している。ガス爆発における爆発圧力放散設備の開口時の火炎の到達距離は式(1)⁹⁾で表される。この到達距離を開口部からの火炎の到達距離として評価した。

$$L_f = 5V^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 L_f は火炎の到達距離、 V は貯槽等の容積である。なお、式(1)は以下の条件で成り立つとされている。

- ・乱流を誘発する要素がないコンパクトな貯槽等で、1つの開口部を持つ
- ・貯槽等の容積 V は $0.1 \text{ m}^3 \leq V \leq 50 \text{ m}^3$ である
- ・爆発圧力放散設備の静的作動圧力 p_{stat} は $p_{\text{stat}} \leq 0.1 \text{ bar}$ である
- ・放散圧力 p_{red} は $0.1 \text{ bar} < p_{\text{red}} \leq 1.0 \text{ bar}$ で、かつ $p_{\text{red}} > p_{\text{stat}}$ である
- ・最大爆発圧力 p_{max} は $p_{\text{max}} \leq 9 \text{ bar}$ である
- ・爆発指数 K_G は $K_G \leq 100 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ である
- ・貯槽等の長さとお内径の比 L/D は $L/D < 2$ である

5) 貯槽等での内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧及び飛散物

貯槽等の閉じられた環境で、何らかのトラブルにより化学物質からガス等が発生することにより貯槽等の内圧が上昇すると、貯槽等の耐圧を超える圧力が発生し、貯槽等が損傷・破裂するおそれがある。破裂の際には爆風が生じ、被害をもたらすことがある。また、破裂によって発生した破片が飛散し、その破片により被災することもある。そのため、貯槽等の内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧と飛散物の影響範囲を評価した。

爆風圧については、大塚らによって提案された爆発の特性長¹⁰⁾を用いて評価した。ランキン-ウゴニオの関係式¹¹⁾から、破裂直後の衝撃波圧 p_2 を用いた爆発の特性長 R_{RH} は以下の式(2)で表される。

$$R_{RH} = \frac{p_2 - p_0}{p_0} \sqrt[3]{V_0} \quad (2)$$

ここで、 p_0 は周囲雰囲気圧力、 V_0 は高圧球形容器の体積である。式(2)を、高圧球形容器の半径 R_0 を用いて表すと式(3)となる¹⁰⁾。

$$\frac{R_{RH}}{R_0} = \frac{p_2 - p_0}{p_0} \sqrt[3]{\frac{4}{3}\pi} \quad (3)$$

また、ランキン-ウゴニオの特性長が距離に反比例するとして比例定数を有効数字一桁で表した結果、破裂後の最大衝撃波圧 p_{max} 、周囲雰囲気圧力 p_0 、ランキン-ウゴニオの特性長 R_{RH} 、距離 R の関係は式(4)で表される¹⁰⁾。

$$\frac{p_{max} - p_0}{p_0} = 0.6 \frac{R_{RH}}{R} \quad (4)$$

ここでは、 p_2 及び p_{max} を貯槽内最大圧力、 p_0 を大気圧、 V_0 を貯槽等の所定の容積として式(3)及び式(4)の値をそれぞれ計算し、その比をとることにより爆風圧が安全限界とされている 2.1 kPa¹²⁾になる地点と、人体に対する被害の限界値とされている 12.3 kPa¹²⁾となる地点の影響範囲(距離)を評価した。また、貯槽等の内容積によって影響範囲は異なってくるため、内容積 1, 5, 10, 50 m³とした時の影響範囲を評価した。

飛散物の到達距離については、貯槽等の破裂時のエネルギー、破片の数、重量や形状、射出角度、初速度により変化することから、事前評価においてこれらの条件を考慮して評価を行うことは困難である。一方、米国国防総省の爆薬安全委員会によれば、危険な破片は 78 J 以上の衝撃エネルギーを持つ破片と定義されている¹³⁾。そのため、運動エネルギーが 78 J となる破片重量と飛散距離の最大値の関係を評価した。

3. 評価結果

1) 可燃性物質及び毒性物質の拡散範囲

図 1 に物質が連続放出したと仮定した際の放出速度と LEL, 1/2LEL 及び 1/4LEL の濃度に達する距離との関係を示す。また、図 2 に物質が瞬時放出したと仮定した際の放出量と LEL, 1/2LEL 及び 1/4LEL に達する距離との関係を示す。図 1 及び図 2 では、LEL と AEGL-3 に達する距離を比較し、LEL の方が、距離が大きくなった水素、メタン、プロパンの結果を示した。その 3 つの物質の中では、水素では小さい放出速度及び放出量でも爆発下限界に至る距離が短く、プロパンになると大きい放出速度及び放出量にならないと爆発下限界には到達しないと推算された。ガスの温度、貯槽等の内部圧力、開口部の面積等にもよるが、算出された放出速度及び放出量となる状況は、開口部が極めて大きく、大量にガスが漏洩している状況である可能性が高いと考えられる。そのため、可燃性ガスが放出する可能性がある貯槽等周辺でトラブル対処を行う際、大きな開口部が生じる可能性がある場合は、被災防止のためにその貯槽等からある程度離れることが望ましい。

図 3 に物質が連続放出したと仮定した際の放出速度と AEGL-3 及び AEGL-2 の濃度に達する距離との関係を示す。また、図 4 に物質が瞬時放出したと仮定した際の放出量と AEGL-3 及び AEGL-2 の濃度に達する距離との関係を示す。図 3 及び図 4 では、LEL と AEGL-3 に達する距離を比較し、AEGL-3 の方が、距離が大きくなっ

た一酸化炭素及び塩化ビニルの結果を示した。一酸化炭素及び塩化ビニルは、爆発下限界よりもばく露限界値の方が小さく、毒性が及ぼす影響の方が大きい。一酸化炭素放出速度が約 2×10^{-3} kg/s、約 5×10^{-4} kg/s となる時(連続放出の時)、また、放出量が約 1×10^{-1} kg、約 3×10^{-2} kg となる時(瞬時放出の時)、それぞれ AEGL-3, AEGL-2 となる放出源からの距離が 20 m と評価された。これらの放出速度及び放出量は小さい開口部の場合でも到達する可能性があると考えられる。そのため、一酸化炭素が貯槽等内で発生している可能性がある場合は、開口部が想定される場合は、貯槽等から相当の距離を確保するか、呼吸用保護具を着用すべきであると考えられる。

2) 開口部からの火炎の到達距離

図 5 に貯槽等の容積と火炎到達距離との関係を示す。容積が 1 m³ の場合は、火炎到達距離は約 5 m となり、

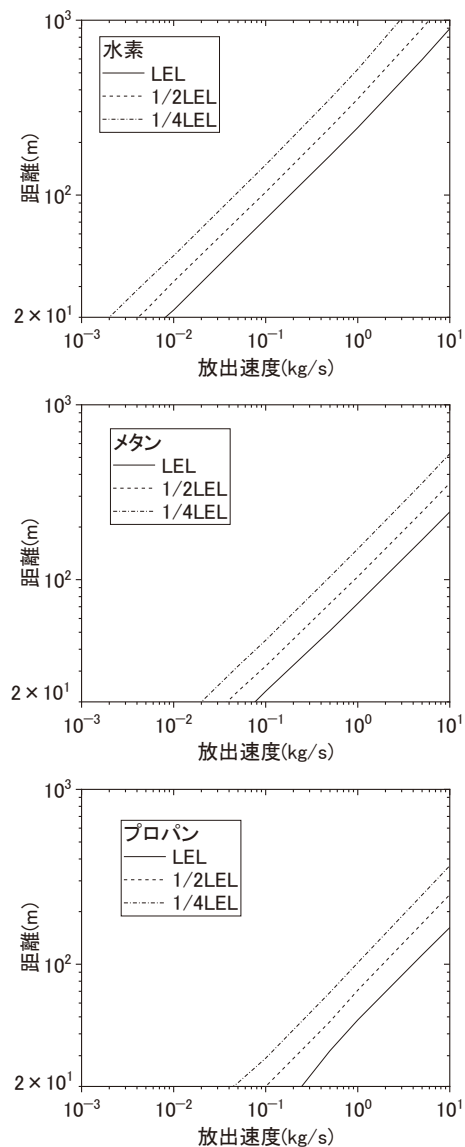


図 1 物質の放出速度(連続放出を仮定したとき)と LEL, 1/2LEL 及び 1/4LEL に達する距離との関係

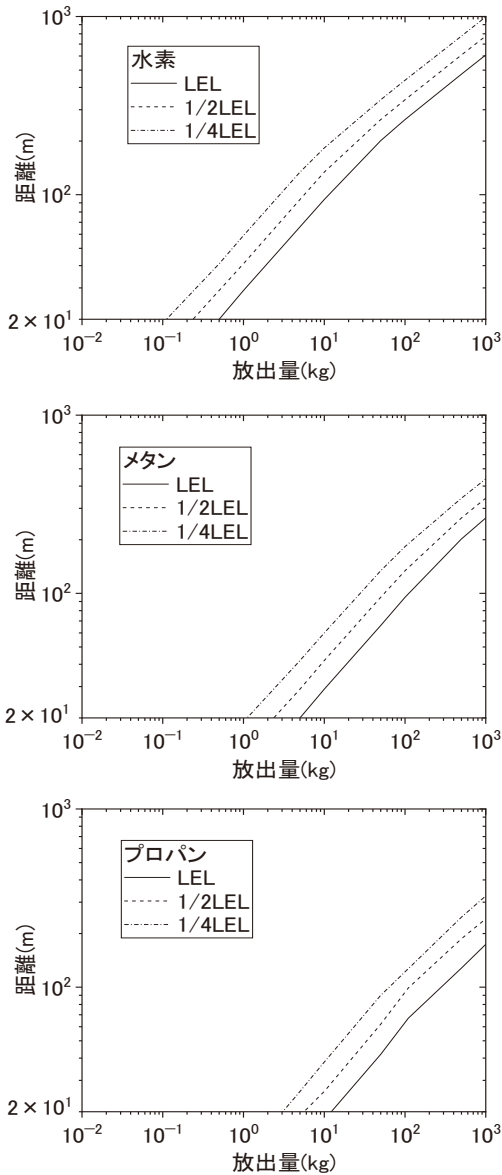


図2 物質の放出量(瞬時放出を仮定したとき)と LEL, 1/2LEL 及び 1/4LEL に達する距離との関係

容積が 50 m³ の場合は、火炎到達距離が約 19 m と推算された。この関係から、開口部から噴き出す火炎による被災を防止するために、開口部が生じる可能性がある箇所から 20 m 程度の距離を確保するか、耐火・耐熱性を有した作業服を着用することが望ましい。

3) 貯槽等での内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧及び飛散物

図 6 に貯槽等の内部の圧力と爆風圧が 2.1 kPa 及び 12.3 kPa となる距離との関係を示す。図 6 には、貯槽等内の容積を 1, 5, 10, 50 m³ とした時の結果を示した。爆風圧が人体に対する被害の限界値とされている 12.3 kPa となる距離は、貯槽等の内圧が 200 kPa (約 2 気圧) の場合、5~18 m 程度であった。従って、内圧が比較的低い状態であっても、その状態で貯槽等が破裂すると、そ

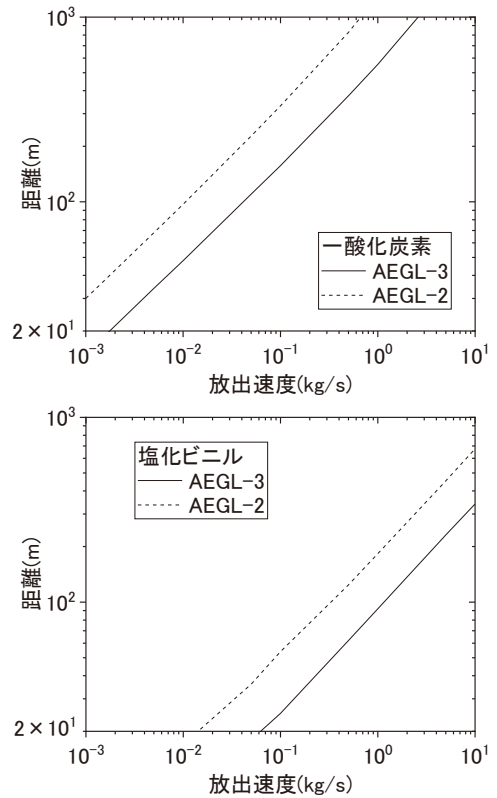


図3 物質の放出速度(連続放出を仮定したとき)と AEGL-3, AEGL-2 に達する距離との関係

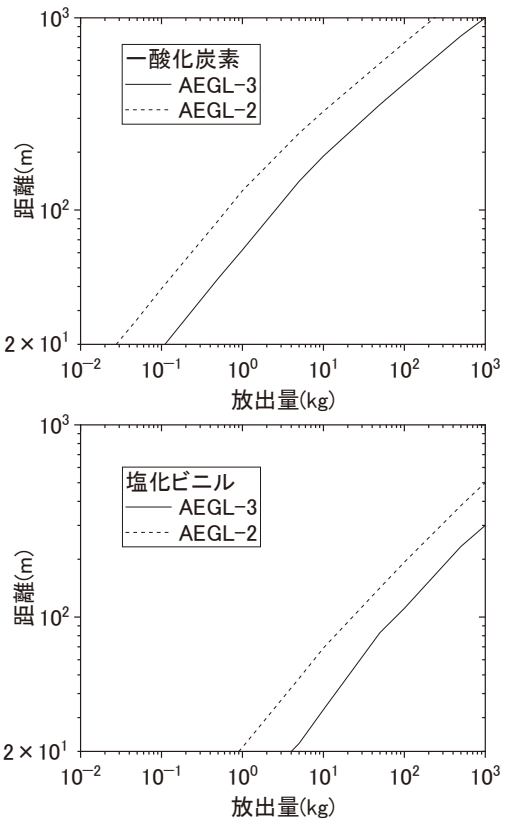


図4 物質の放出量(瞬時放出を仮定したとき)と AEGL-3, AEGL-2 に達する距離との関係

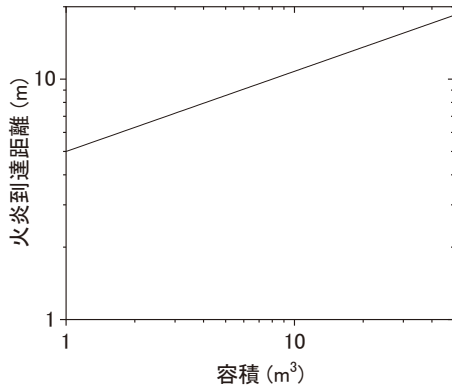


図5 貯槽等の容積と火炎到達距離との関係

の直近では人体に影響を及ぼす爆風圧が発生する恐れがある。そのため、貯槽等の内部でガスが発生する恐れがある場合は、事前に圧力計を設置する等の内部の圧力を監視できる手段を設けておくとともに、トラブル対処の際には距離を確保する、もしくは壁等の遮へい物により防護することが望ましい。また、爆風圧が安全限界とされている 2.1 kPa となる距離は、貯槽等の内圧が 200 kPa (約 2 気圧) の場合は 30~100 m 程度であった。従って、内圧が比較的低い状態であっても、その状態で貯槽等が破裂すると、比較的広範囲に爆風圧の影響が及ぶ恐れがある。爆風圧は、人体への直接の影響の他に、爆風により周囲の物体を加速して吹き飛ばす影響もある。爆風によって吹き飛ばされる物体は二次破片と呼ばれ¹³⁾、その二次破片が人体に影響を及ぼす恐れもある。ガ

ラスが破壊される一般的な圧力は 1 kPa とされている¹²⁾。前述した安全限界とされている 2.1 kPa の爆風圧でも窓ガラスの 10%が破壊する¹²⁾とされており、破壊された窓ガラスの破片が、人体に大きな損傷を与える恐れがあるため、トラブル対処の際に貯槽等の内圧が上昇している恐れのある際には、比較的広範囲に窓ガラスの近傍から退避するような対策も必要になると考えられる。

図 7 に運動エネルギーが 78 J となる破片重量と飛散距離の最大値との関係を示す。図 7 中の網掛けした部分は破片の運動エネルギーが 78 J 以上となる範囲を示している。破片重量が 10 kg である場合、約 1.6 m 以上の飛散距離に達する破片は、人体に対して危険である恐れがある。また、破片重量が 0.1 kg である場合、約 160 m 以上の飛散距離に達する破片は、人体に対して危険である恐れがある。Baker らによって過去の容器の爆発事故において発生した破片の形状、重量、飛散範囲等についての解析結果が報告されている¹⁴⁾。その中で、爆発エネルギーが最も小さい事例における破片の重量と飛散範囲の関係が示されている。この事例では、511.7 kg の円筒容器(プロパン充てん)が爆発して 11 個の破片が発生した。約 20 kg の破片は約 40 m 飛散し、約 190 kg の破片は約 120 m 飛散する関係にあると整理されている¹⁴⁾。また、日本における過去の爆発事例でも、焼成炉の側壁及び前炉の扉などが飛散し、炉の前方にいた作業員等に激突した事例¹⁵⁾などがある。このような爆発物と直接接触している貯槽等などが破碎されて生じる破片は一次破片と呼ばれる¹³⁾が、上記の事例からも、貯槽等の破裂に

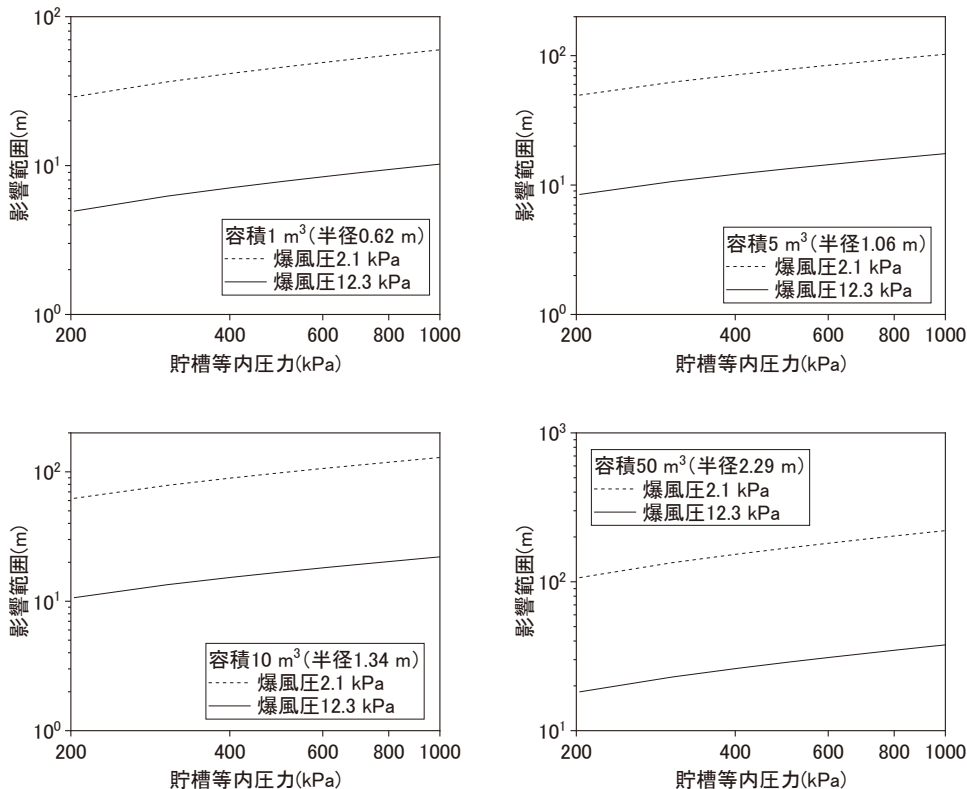


図6 貯槽等の内部の圧力と爆風圧が 2.1 kPa 及び 12.3 kPa となる距離との関係

参 考 文 献

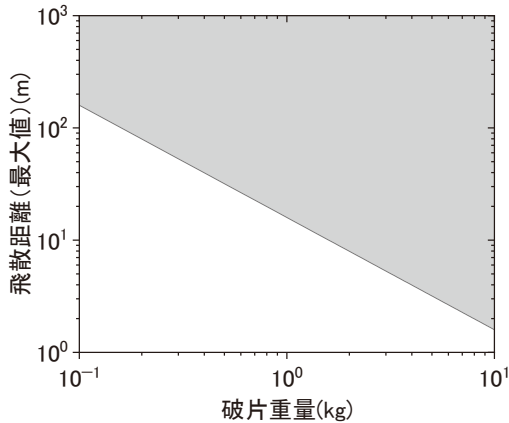


図7 運動エネルギーが78 Jとなる破片重量と飛散距離の最大値との関係

より発生する一次破片は人体に対して危険となる十分大きい運動エネルギーを有していると考えられ、貯槽等の内圧が上昇している恐れのある際には、みだりにその周辺に近寄ってはならないと言える。

4. まとめ

貯槽等に貯蔵した化学物質が発熱することで発生する異常な温度上昇や煙の発生等のトラブルに対して、トラブル対処の戦略を適切に策定し、トラブル対処作業を行っている際の作業員等の被災を防止することを支援することを目的として、貯槽等で発生する爆発・火災等の災害に着目し、被災者が多く見られた原因物質について、拡散範囲を評価した。また、開口部から噴き出す火炎の到達範囲や貯槽等の内圧上昇による貯槽等破裂で発生する爆風圧、飛散物の影響範囲を評価した。

可燃性ガスが放出する可能性がある貯槽等周辺でトラブル対処を行う際、大きな開口部が生じる可能性がある場合は、被災防止のためにその貯槽等からある程度離れることが望ましく、一酸化炭素が貯槽等内で発生している可能性があり、開口部が想定される場合は、その開口部が小さくても、貯槽等から相当の距離を確保するか、呼吸用保護具を着用すべきであると考えられた。開口部から噴き出す火炎による被災を防止するためには、開口部が生じる可能性がある箇所から一定の距離を確保するか、耐火・耐熱性を有した作業服を着用することが望ましいと考えられた。貯槽等の破裂等で発生する一次破片は人体に対して危険となる十分大きい運動エネルギーを有しており、貯槽等の内圧が上昇している恐れのある際には、みだりにその周辺に近寄ってはならないと考えられた。

- 1) 八島正明. 貯槽等における爆発・火災の予測と防止—トラブル対処作業に関連して—. 労働安全衛生研究. 2019; 12 1: 67-71.
- 2) 塚原昌尚. 株式会社日本触媒姫路製造所において発生した火災. 火災. 2014; 64 3: 14-19.
- 3) 八島正明. 三重県の発電所の RDF 貯蔵サイロでの火災と爆発—その 1: 災害の概要, 被害状況—. 安全工学. 2011; 50 3: 169-175.
- 4) 安全工学会監修. 実践・安全工学シリーズ 2「プロセス安全の基礎」, 9. 事故影響解析. 化学工業日報社. 2012; 193-226.
- 5) 佐藤嘉彦, 八島正明. 貯槽等で発生した爆発・火災における被害・周辺影響についての検討. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSSH-SRR-No.52-2-5. 2022.
- 6) 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. 2013; 54-56.
- 7) Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmosphere Administration . ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmosphere). 5.4.7.
- 8) Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D., Reynolds, R.M. NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmosphere) 5.4.4 Technical Documentation. National Oceanic and Atmospheric Administration (Seattle, Washington). 2013.
- 9) BSI. British Standard BS EN 14994:2007. Gas Explosion Venting Protective Systems . British Standards Institution (London). 2007.
- 10) 大塚輝人, 齋藤務, 吉川典彦. 爆発事故定量評価のための Bursting Sphere の数値解析とスケール則. 安全工学. 2014; 53 5: 310-316.
- 11) 生井武文, 松尾泰. 衝撃波の力学. コロナ社. 1983.
- 12) 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. 2013. 2013; 50-53.
- 13) 火薬学会爆発物探知専門部会編. 爆発物探知・CBRNE テロ対策ハンドブック. 丸善出版. 2016; 81-82.
- 14) Baker, W.E., Kulesz, J.J., Ricker, R.E., Westine, P.S., Parr, V.B., Vargas, L.M., Moseley P.K. NASA Contractor Report 3023. Workbook for Estimating Effects of Accidental Explosions in Propellant Ground Handling and Transport Systems. 1978.
- 15) 安全工学会編. 事故・災害事例とその対策—再発防止のための処方箋—. 養賢堂. 2005; 22-26.