

LNG 貯蔵施設の防災評価技術

Evaluation Technique of Loss Prevention in Storage Facility of Liquefied Natural Gas

技術本部 大場 良二^{*1} 河内 昭紀^{*2}
武野 計二^{*3}
機械事業本部 永井 英彰^{*4} 小椋 和正^{*5}

LNG 貯蔵施設の防災評価では、万一、タンクから LNG が漏えいした場合を想定して、蒸発ガスの拡散予測を行い、蒸発ガスの濃度が敷地境界で可燃限界濃度を超えないことを確認する必要がある。この拡散予測では、解析的な計算式を用いた拡散計算と同時に、構造物の模型を用いた風洞実験が実施されている。本報では、従来、実施されてきた拡散計算及び風洞実験の内容について説明するほかに、当社が新しく開発した風洞実験技術と米国から導入した数値計算技術についても紹介する。数値計算結果と風洞実験結果は相互に比較され、良く一致することが確認された。また、LNG 蒸発ガス濃度を低減するための防災対策として利用されている水幕と高発泡剤についても、それらの濃度低減効果を模型実験で確認した。

It is necessary to confirm that the concentration of LNG spill will not be higher than the value of critical flammable concentration at the boundary of a storage facility, when the evaluation of loss prevention in the storage facility of LNG is performed. In the present paper, we explain the outline of diffusion calculation and a wind tunnel experiment which we have conducted in the past years, and introduce our developed new technique of wind tunnel experiments and a numerical calculation method derived from U.S.A. The results of experiments and calculations were compared with each other and were found to be in good agreement. We confirmed the quantitative effect of mitigating concentration by water curtain and Hi-expansion foam with model experiments.

1. ま え が き

LNG 貯蔵施設では、大規模な自然災害が発生しても、施設の安全性が維持されるように各種の防災対策を講じているが、これらの防災対策の効果を定量的に評価し、安全性を確認するために、図 1 に示すような内容の防災評価が実施されている。この防災評価では、万一、タンクから LNG が漏えいした場合を想定して、蒸発ガスの拡散予測を行い、蒸発ガスの濃度が敷地境界で可燃限界濃度を超えないことを確認する必要がある。この拡散予測では、高压ガス保安協会が制定した技術指針⁽¹⁾に基づく解析的な計算式を用いた拡散計算と同時に、構造物の縮尺模型を用いた風洞実験が実施されてきた。

LNG 蒸発ガスは、大気圧で蒸発直後、 -160°C 程度であり空気よりも重いガスであるが、 0°C 程度まで温度が上昇すると空気よ

りも軽くなる特性がある。このため、拡散計算及び風洞実験でもガスの浮力効果を考慮する必要があることが、多くの文献⁽²⁾で指摘されてきた。

そこで、本報では、従来、実施されてきた拡散計算及び風洞実験の内容について説明するほかに、当社が新しく開発した風洞実験技術と米国から導入した数値計算技術についても紹介する。

2. 発 災 想 定

高压ガス保安協会の技術指針（以下、KKH 指針と称す）では、地上式 LNG タンクのような液化ガス低温貯槽について、次のような漏えい条件を想定している。

第一段階：液配管破壊口から液体の流出

第二段階：流出液の地表での拡大及び液体の蒸発による発生気体の拡散

KKH 指針では、上記第一段階で破壊口の形状と位置については特に限定していないが、従来の防災評価では安全側を考えて受け入れ配管の 100% 破断を想定してきた。この条件は、LNG 基地の稼働実績及び現在の設計基準から見ても極めて厳しい条件であり、確率的にはほとんど起こり得ない条件である。

一方、発生気体の拡散を支配する気象条件について、KKH 指針では風速 1 m/s で大気安定度が中立状態を想定し、平地上を空気と等密度のガスが拡散すると仮定している。タンク等の構造物の影響下で、空気と異なる密度のガスが拡散する現象を予測するためには、風洞実験が有効であるので、従来、KKH 指針の計算式を補完するために風洞実験が実施されてきた。

3. 防災評価計算モデル

LNG 貯蔵施設における防災評価では、KKH 指針に基づいて

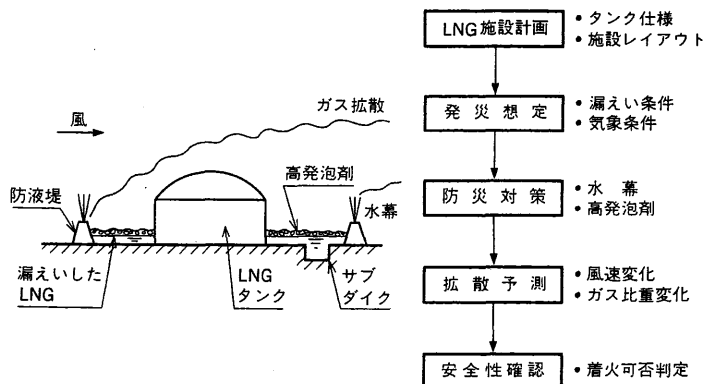


図 1 防災評価の内容 防災評価の手順と各検討項目を示す。
Contents of safety assessment

*1 長崎研究所流体・伝熱研究室主査 工博

*2 長崎研究所流体・伝熱研究室

*3 長崎研究所火力プラント研究推進室 工博

*4 化学プラント技術センタープロジェクト部

プロセスグループ主務

*5 化学プラント技術センタープロジェクト部

プロセスグループ

LNGの漏えいを想定し、蒸発ガスの拡散予測を行っている。この章では KHK 指針に基づいた蒸発ガス拡散の予測手法を紹介する。

3.1 漏えいモデル

LNG 貯蔵施設の配管から LNG が漏えいする場合、その漏えい量は次式を使って計算する。

$$q = C_1 \cdot C_2 \cdot a \cdot \sqrt{2gh} \quad (1)$$

ここで、

q : 配管からの流出量 (m^3/s)

C_1 : 流出係数

C_2 : ノズル係数

a : 流出口面積 (m^2)

g : 重力加速度 ($=9.8 \text{ m/s}^2$)

h : 流出圧力 (液面高さ) (m)

3.2 液面拡大モデル

漏えいした LNG は、液面拡大しつつ接触面等からの入熱により蒸発する。この場合、KHK 指針に記載されている液面拡大の理論では、漏えい面が同心円状に広がると仮定しており、漏えい開始 t 秒後における液面半径 r (m) は次の式で表されるとしている。

$$r(t) = \sqrt{2 \cdot g \cdot V(t) / \pi} \cdot t + R_0^2 \quad (2)$$

ここで、

$V(t)$: t 秒後までの全流出液量 (m^3)

R_0 : はじめの液面拡大半径 (m)

3.3 蒸発モデル

地表面上に広がった LNG は、地面からの入熱により蒸発する。その蒸発速度 (液面減少速度) v (m/s) は一次元の非定常熱伝導方程式を基礎として導くことができる。例えば、流出面が半無限の厚さを有する地面であると仮定した場合、漏えい t 秒後の蒸発速度は次式ようになる。

ただし、LNG 中の温度こう配、地面と LNG 間の蒸気膜形成の効果は考慮していない。

$$v(t) = \frac{(T_\infty - T_{\text{LNG}})}{L \rho_{\text{LNG}}} K \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

ここで、

T_∞ : 初期地面温度 ($^\circ\text{C}$)

T_{LNG} : LNG の温度 ($^\circ\text{C}$)

L : 液化ガス蒸発潜熱 (kcal/kg)

ρ_{LNG} : LNG 密度 (kg/m^3)

K : 見かけの熱伝導度 [$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C})$]

実際には LNG は式(2)で表されるように液面半径を拡大させながら蒸発していく。液面拡大と蒸発の両方を考慮すると、液面半径が r の時刻における蒸発ガス量 Q (m^3/s) は次式で表される。

$$Q(r) = \int_0^r 2 \pi \xi v[t(r) - t(\xi)] d\xi + \pi \beta r^2 \quad (4)$$

ここで、

$t(r)$: 液面拡大半径が r になる時間 (s)

ξ : 半径 ($0 < \xi < r$)

β : 太陽ふく射・空気対流による蒸発速度 (m/s)

サブダイクを1段有する防液堤内において、LNG が漏えいした場合を想定して、その蒸発量を式(1)から式(4)を用いて計算した例を図2に示す。グラフ中の8 s付近のピークは流出液がサブダイクの全底面に広がった時刻に対応し、450 s付近のピークは流出液がサブダイクからあふれて防液堤の全面に広がった時刻に対応している。

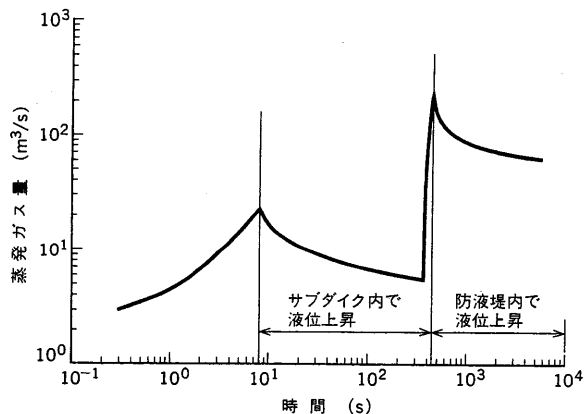


図2 蒸発ガス量計算結果例 サブダイク1段を有する防液堤内で LNG が漏えいした場合の蒸発ガス量の時間変化を示す。
Calculation result of vaporization rate

3.4 拡散モデル

ガスの拡散濃度計算は、蒸発したガスが空気と同じ密度を持つ (対空気比重 $\gamma = 1.0$) と仮定して導き出された坂上式を用いて行う。次式はその基礎となる坂上の瞬間点源の式である。

$$C = \frac{Q_p}{uB\sqrt{\pi A}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-ut)^2 + y^2}{A}\right] \cdot \exp\left(-\frac{H+z}{B}\right) \cdot I_0\left(\frac{2\sqrt{Hz}}{B}\right) \quad (5)$$

ここで、

H : 拡散源高さ (m)

x, y, z : 風下, 横風, 高さ方向の座標 (m)

u : 風速 (m/s)

A, B : 坂上の拡散パラメータ (気象条件等から決定)

I_0 : 0 次の変形第一種ベッセル関数

この式は平地上で時刻 $t=0$ において瞬間的に Q_p (m^3) のガスが点源から放出された場合の t 秒後における濃度分布 C を与える式である。式(5)に時間積分や空間積分を施すことにより、拡散源が点源、線源、面源といった形状の場合の濃度予測や、ガス放出量が時間変化する場合の濃度の時間変化の予測にも適用可能である。

4. 風洞実験

実際に LNG 蒸発ガスが拡散する場合には、ガス密度が空気とは異なっており、また、LNG タンクや防液堤等の障害物の影響を受ける。しかし、KHK 指針のモデルや、後述の FEM 3 モデルでそのような影響を考慮に入れることは実用的に困難である。そのような影響を定量的に評価するためには風洞実験が有効である。

4.1 実験方法

風洞実験は当社が開発した温度成層風洞で行っている。この風洞の大きな特徴は、

- 大気安定度 (高さ方向の温度分布) が制御可能
 - 超低風速 (最低風洞風速 0.1 m/s) が再現可能
- という点である。

空気と密度が異なるようなガスの拡散を風洞内で模擬する場合には、次のフルード数 (Fr) を相似則として一致させる必要がある。

$$Fr = \frac{u^2}{gL(\gamma-1)} \quad (6)$$

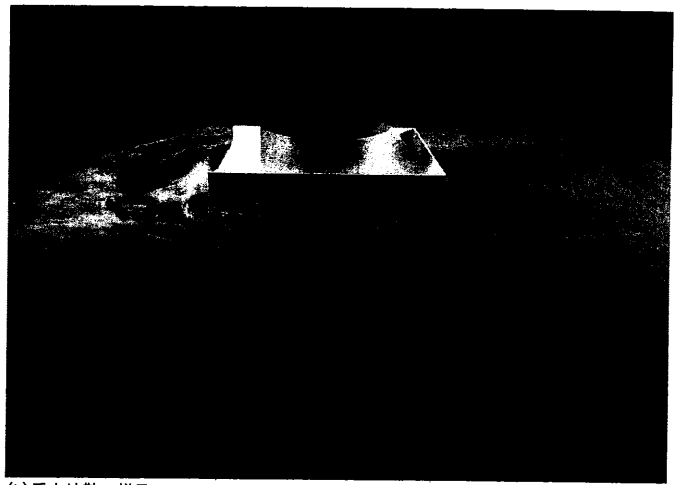
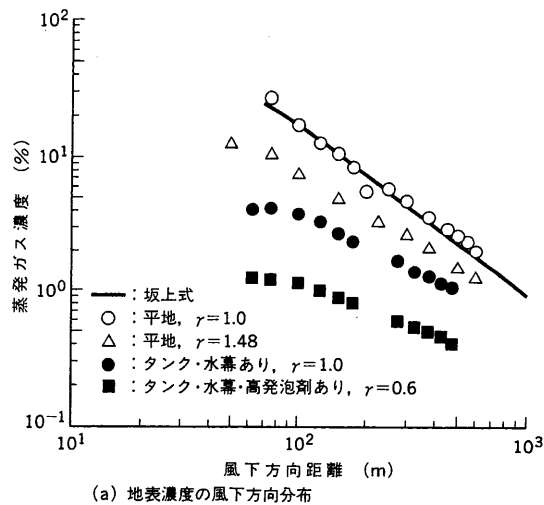


図3 風洞実験結果 (a)は、水平面源からのLNG蒸発ガスの漏えいを想定した風洞実験結果とKHK指針による計算結果を示す。(b)は、空気より重いガスの拡散を風洞実験で可視化したもの(風向きは左から右。水幕、高発泡剤はなし)。
Result of experiment in wind tunnel

ここで

- L : 代表長さ
- γ : ガスの対空気比重
- g : 重力加速度

4.2 実験結果

防液堤を想定した正方形の面源から、LNG蒸発ガスが拡散した場合の風洞実験結果及び坂上式(水平面源式)による計算結果を図3(a)に示す。また図3(b)は空気より重いガス($\gamma=1.48$)が拡散する様子を可視化したものである。

風洞風速は各ケースにおいて高濃度が出現すると考えられる風速を想定して設定している。また、実験では高発泡剤を使用する場合の効果、昇温効果(約0℃に達する)によりガスの対空気比重 γ が1より小さくなるものとして模擬しており、水幕の効果は、水幕高さ相当の金網を設置することによって模擬している。

図3(a)をみると、平地上での拡散を模擬した実験結果($\gamma=1.0$)とKHK指針(坂上式)による計算結果が良く一致していることが分かる。また、この実験により、水幕や高発泡剤を防災対策として使用した場合に、風下における蒸発ガス濃度が低減されることが確認された。

5. 数値計算

前述のKHK指針に基づく拡散計算だけでなく、米国から数値計算コードFEM3⁽²⁾を導入して防災評価の際の拡散予測に使用している。FEM3は対空気比重が1でないガスの拡散濃度を予測するために米国LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)で開発された数値計算モデルである。FEM3は米国Gas Research Institute(GRI)の研究⁽³⁾によって、平地でのLNG蒸発ガスの拡散計算において現在、最も予測精度が高いと評価されている。

5.1 計算方法

FEM3は、質量保存、運動量保存、エネルギー保存の流体の基礎方程式に加えて、拡散物質の質量分率の保存方程式を有限要素法(修正ガラキン法)で解くことで拡散計算を行っている。

5.2 計算結果

今回、FEM3を用いて前述の風洞実験(平地実験)を模擬した数値計算を行った。空気より重いガス($\gamma=1.48$)の拡散計算結果

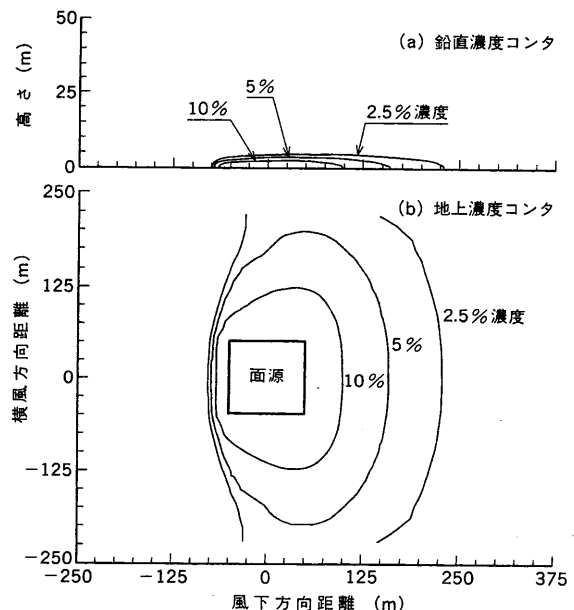


図4 FEM3による空気より重いガスの拡散計算結果
平地上の拡散, $\gamma=1.48$.
FEM3-calculation result of dense gas dispersion
(flat terrain)

を図4に示す。この場合、重いガスが重力の影響を受け、風下方向だけでなく横風方向にも地面をはうように拡散する(図3(b)参照)、いわゆる重力拡散の様子が再現できている。

FEM3による計算結果と風洞実験結果の比較を図5に示す。実験結果と計算結果は比較的良く一致している。

FEM3はタンクや防液堤を考慮した場合の計算も可能である。タンクと防液堤を考慮に入れた場合の計算結果($\gamma=1.48$)を図6に示す。しかし、このように障害物を考慮に入れた場合には、計算時間が多く掛かるという実用面での難点がある。

6. 防災対策

6.1 一般的な対策

既存のLNG貯蔵施設では、主として火災に伴う被害を低減するために、次のような防災対策が施されている。

- ① タンク防液堤：漏えいした液を全量、貯留する。

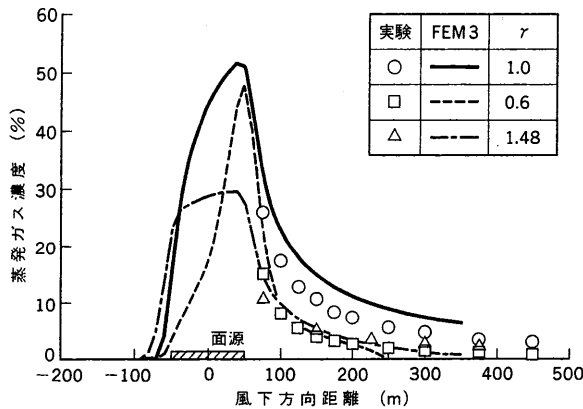


図5 FEM 3 による計算結果と実験結果の比較 平地上の拡散。
Comparison of ground level concentration between FEM 3-calculation and wind tunnel experiment

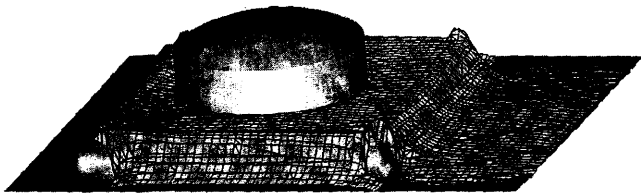


図6 FEM 3 による空気より重いガスの拡散結果 タンク、防液堤がある場合の計算結果 ($\gamma=1.48$), 2.5%の等濃度面を示している。
FEM 3-calculation result of dense gas dispersion (with dike and tank, 2.5% contour)

- ② タンク散水装置：火災からの熱ふく射を低減する。
- ③ サブダイク：防液堤内で蒸発過程を平均化する。
- ④ 水幕：防液堤上に水幕を作り、熱ふく射を低減する。
- ⑤ 高発泡剤：火災を泡で覆って消火する。

以上の防災対策の中で、④ 水幕と⑤ 高発泡剤は、LNG 蒸発ガスの拡散を促進し、地上濃度を低減する効果が期待できるので、次の方法で、各対策の効果を確認し、拡散予測に使用している。

6.2 水 幕

水幕がガス濃度を低減する効果として、次の3種類がある。

- ① 遮風効果：ガスの流れをせき止めて、拡散幅を拡大する。
- ② 攪拌効果：水幕の噴流でガスを攪拌する。
- ③ 昇温効果：低温ガスへ散水の熱が伝わり、ガス温度が上昇する。

米国ガス研究所は、野外拡散実験と風洞実験を実施し、以上の効果を定量的に確認している(図7)⁽⁴⁾。

数百分の一の縮尺の風洞実験で、水幕を再現するのは困難であるので、風洞実験では前述①の遮風効果のみを再現するために、水幕を金網で置換えた。この結果、金網後流側の風速は、前流側の約50%となり、野外実験結果とほぼ一致することが確認された。

6.3 高 発 泡 剤

LNG の上に高発泡剤を散布した場合、初期段階で蒸発ガス量は増加するが、泡とガスの熱交換によってガス温度が上昇し、ガスの対空気比重が小さくなる可能性がある。このような昇温効果を

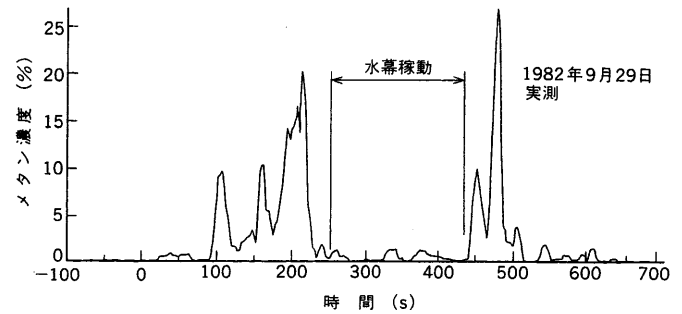


図7 水幕風下地上濃度の野外実測結果 水幕稼働時には、LNG 蒸発ガスの地上濃度が低下することが確認された。
Field observation of gas concentration behind water curtain

確認するため、小規模な室内実験が、過去に米国ガス研究所⁽⁶⁾及び九州電力・三菱重工⁽⁶⁾で実施されている。また、LNG の代わりに液体窒素を用いて、蒸発面積を9 m²とした中規模実験が三菱重工で実施された⁽⁷⁾。これらの実験結果では、蒸発ガスの温度は高発泡剤上面で約0℃まで上昇することが確認された。

7. む す び

本報では、LNG 貯蔵施設の安全性確認のために実施されている防災評価技術について紹介した。海外では、可燃性ガスの拡散予測に関する研究が現在も幅広く実施されており、実測データが多数公開されている。今後、これらの知見を活用して、防災評価に使用する計算モデル及び模型実験の予測精度向上を図って行く必要があると考えられる。

なお、本研究で紹介した防災評価技術の開発に関して、東京工業大学岡本哲史名誉教授及び米国アーカンソー大学 Havens 教授ほかに御指導頂いたことに対して、ここに謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 高圧ガス保安協会、コンビナート保安・防災技術指針、本編 KHK E 007-1974
- (2) Stevens, T.Chan, FEM 3-A Finite Element Model for the Simulation of Heavy Gas Dispersion and Incompressible Flow, User's Manual, Lawrence Livermore Laboratory UCRL-53397 (1983)
- (3) Havens, J. A. et al., Evaluation of 3-D Hydrodynamic Computer Models for Prediction of LNG Vapor Dispersion in the Atmosphere, Gas Research Institute GRI-87-0173
- (4) Kiran, M. Kothari, Dispersion of LNG Vapor Clouds with Water Spray Curtains, Phase-2 Wind Tunnel and Small-scale Spill Test, Gas Research Institute GRI-83/0019 (1983)
- (5) Ted, A. Williams, High Expansion Form for LNG Vapor Mitigation, Gas Research Institute GRI-90/0003 (1990)
- (6) 石井國義ほか、高発泡剤の LNG ガス拡散効果、火力原子発電 vol.39 No.2 (1988)
- (7) Takeno, K. et al., Effects of High Expansion Foam Dispersed onto Leaked LNG on the Atmospheric Diffusion of Vaporized Gas, J. Loss Prev. Process Ind. (to be published)