

液化天然ガスの大規模海面流出に伴う蒸気雲拡散解析

岡 秀行*

Consequence Analysis of Vapor Cloud Dispersion Hazards from Large-scale Liquefied Natural Gas Spills on Water

by

Hideyuki OKA

1. はじめに

地球温暖化に対する世界的な懸念の高まりから、二酸化炭素の排出量が最も少ない化石燃料として液化天然ガス(Liquefied Natural Gas; LNG)が注目されている。また、世界のエネルギー使用の増加に伴い、2030年の世界のLNG消費量は2006年の約1.5倍になると推定されている¹⁾。このようなLNG需要の増加を反映し、積載容量が266,000m³の大型LNG輸送船が就航を始めており、また米国では多くのLNG受入基地の新設が計画されている。

LNGの海上輸送においては、1959年以来大きな事故は無く、極めて高い安全性が確保されているが、LNGを取り巻く状況の変化からLNGの輸送、荷役、貯蔵に関するリスクに対して関心が高まっており、LNGが海上に流出した場合を想定した被害影響範囲の推定が近年数多く行われている^{2,4)}。しかし、これらの研究による推定結果はモデル、手法、仮定の差異により大きくばらついており、流出シナリオ及び気象・海象条件などに関して定量的に同一の条件下で検討された例はない。

このような現状を鑑み、これまで提案されている影響評価モデルの特徴を比較するため、詳細なレビューにより3つの主要なモデルを選定し、メンブレン型輸送船から海面上に流出したLNG液面上に大

規模な拡散火炎が形成されるシナリオに対して同一条件下での影響解析を既に行った^{5,6)}。積載容量が125,000m³である従来型のLNG船を対象に、その側面に生じた破口の規模が放射熱による被害範囲に及ぼす影響について感度解析を実施し、各モデルの特性と有効性の限界を明らかにすることにより、米国FERC(Federal Energy Regulatory Commission)により開発された影響解析モデル^{3,7)}が最も妥当な結果を与えることを示した⁵⁾。さらに、最新型LNG船では積載容量が266,000m³と約2倍に大型化しているため、積載容量の増大に伴う影響範囲の拡大程度についても、典型的な破口径に対してFERCモデルによる影響解析を既の実施した^{5,6)}。しかし、最新の大型輸送船からLNGが海面上に流出し、その蒸発ガスが流出源近傍で着火することなく大気拡散するシナリオに対しては、計算負荷の小さい実用的なモデルを用いて検討した例は見当たらない。

そこで本研究では、従来型及び最新型のLNG船を対象に、破口径の差異が燃焼下限界濃度(Lower Flammability Limit; LFL)の最大到達距離に及ぼす影響を評価するため、FERCモデルを用いた感度解析を実施した。

* 海洋リスク評価系

原稿受付 平成22年 8月 7日

審査済 平成22年 8月16日

2. 影響解析手法

LNG の海面流出に係る影響解析モデル及び影響評価に関するほぼ全ての研究において、メンブレン型の LNG 輸送船が対象とされている。Qiao ら⁸⁾は、破口から流出する LNG の流出量に関してのみ、メンブレン型とモス型の形状の差異を評価しているが、液面火災あるいは蒸発ガスの大気拡散による被害範囲の予測までは行っていない。それゆえ本研究においても、Fig.1 に示すようにメンブレン型 LNG 輸送船からの流出を対象とした。

本研究で採用する FERC モデルは、LNG の海面流出から蒸発ガスの大気拡散に至る一連の現象に対し、以下に示す要素モデルから構成されている。

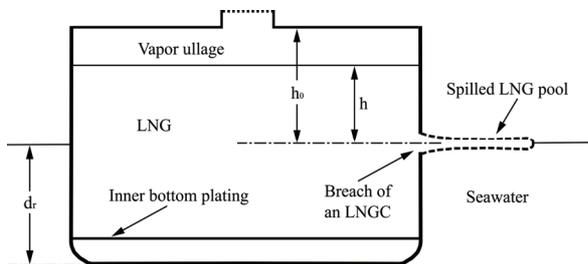


Fig. 1 Schematic view of a cross-section of an LNG carrier with a hole breached on the side. The amount of LNG just above the waterline is released through the hole over seawater⁵⁾

2.1 LNG 流出量算定モデル

LNG 輸送船は完全な二重船殻構造であるが、その構造形状ならびに極低温状態にある LNG の流出過程の物理的影響を考慮した流出量算定モデルは存在しないため、Fig.1 に示すように側面については単船殻構造を仮定し、Orifice モデルを採用している。

タンクからの流出速度は、Bernoulli の定理から極めて簡単に表され、放出係数を乗じることで質量流量は次式で求められる。

$$\dot{M} = C_d \rho_l R^2 \sqrt{2gh} \quad (1)$$

ここで、 \dot{M} は質量流量、 C_d は破口での抵抗を表す放出係数、 ρ_l は LNG の密度、 R は破口の有効半径、 h は喫水線からタンク内 LNG 液面までの高さ、 g は重力加速度である。

放出係数は、粘性及び破口形状に起因する 2 次的な流れの影響により、理論上の流出速度よりも低くなることを表わすために用いられ、流出口の形状とレイノルズ数に依存する。詳細な文献調査の結果、FERC モデルでは放出係数の値として 0.65 を用い

ることを推奨している。

Orifice モデルは LNG 船の多重船殻建造に対応していないため、LNG が破口から流出する速度を過大評価する可能性がある。それゆえ、算出結果は所定の破口規模からの流出速度に対する概算値として解釈すべきであるが、本研究で対象とするような大規模な流出を伴う現象に適用する場合、妥当な結果を与えるモデルとして評価されている⁹⁾。

2.2 LNG 液面の海面上拡大モデル

一般に海面上に流出した液体物質の拡大過程は、船舶からの油流出事故時を想定して開発されたモデル¹⁰⁾が広く用いられており、LNG 流出時の影響解析にも適用されている^{2,11)}。しかし、この液面拡大モデルには理論的な不備があることが指摘されている¹²⁾。FERC モデルでは、LNG 液面の拡大過程を再現する実用モデルとして Webber モデル¹³⁾を採用している。このモデルは、潤滑理論と浅水方程式の自己相似解に基づいており、重力による駆動と摩擦による抵抗を考慮し、次式のように表わされる。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{4\Phi g_r \delta}{r} - C_F, \quad g_r = \frac{\rho_w - \rho_l}{\rho_w} g \quad (2)$$

ここで、 r は液面の半径、 t は時間、 δ は LNG 液面の平均深度、 Φ は液面の厚みを表わす無次元形状因子、 C_F は抗力、 ρ_w は海水密度である。

(2)式を閉じるため、Webber は δ 、 Φ 、 C_F に対する半理論的モデルを構築している¹³⁾。ただし、Webber モデルでは、選択的沸騰(preferential boiling)や液面の分裂に加え、海上風や波浪、潮流の影響について考慮されていない。

海水面に流出した LNG の蒸発過程は、LNG 液面に接する海水からの熱伝達が支配的な要因であるが、現象が非常に複雑であるため、理論的にも実験的にも十分な知見が得られていない。それゆえ、これまでに実施された複数の小規模野外実験の測定値の中から、対象としている現象とのスケールの差異を考慮した選定を行い、膜沸騰に寄与する熱流束を 85kW/m^2 と与えている⁷⁾。

2.3 LNG 蒸発ガスの大気拡散モデル

LNG がタンクから流出した後、直ちに蒸発ガスに着火することなく移流及び拡散によって広がる場合、燃焼下限界濃度(LFL)の蒸気雲が到達する範囲を推定することが重要となる。低温の蒸気雲は常温の空気より密度が高いため、通常の煙

Table 1 Release scenarios for LNG spill from a tank of the conventional and latest LNG carriers

LNG carrier	Conventional	Latest
LNG properties: LNG composition LNG density	Methane 422.5 kg/m ³	
Release assumptions: Total cargo capacity Volume of a cargo tank Total spill volume Initial liquid height above breach Breach size Breach location Pool shape	125,000 m ³ 25,000 m ³ 14,300 m ³ 13 m 0.5 to 15 m in diameter Just above the waterline Semi-circle	250,000 m ³ 50,000 m ³ 28,600 m ³ 13.2 m 13.2 m
Environmental conditions: Air temperature Water temperature Relative humidity Wind speed Pasquill stability class Surface roughness	295 K 294 K 50 % 2.0 m/s F 0.01 m	

のように上下方向と水平方向に広がるのではなく、海面あるいは地面に沿って扁平に流れていく。それゆえ低温液化ガスが大量に蒸発した場合、Pasquill の拡散幅を用いる plume モデルなど通常の大気拡散モデルを用いて濃度分布を予測することはできず、FERC モデルでは空気より重たい気体の大気拡散予測モデルの一つである DEGADIS モデル¹⁴⁾を採用している。なお、DEGADIS は米国 EPA (Environmental Protection Agency) の「大気汚染モデルに関する指針」において次善モデルとして登録されている。

DEGADIS は 1 次元積分モデルであるため、主流方向(x軸)に直交する平面上(y-z平面)の濃度は分布形状を仮定し、次式のように表わされる。

$$c(x,y,z) = \begin{cases} c_c(x) \exp \left[-\left\{ \frac{|y|-b(x)}{S_y(x)} \right\}^2 - \left\{ \frac{z}{S_z(x)} \right\}^{1+\alpha} \right] & \text{for } |y| > b(x), \\ c_c(x) \exp \left[-\left\{ \frac{z}{S_z(x)} \right\}^{1+\alpha} \right] & \text{for } |y| \leq b(x). \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 c は濃度、 c_c は海面あるいは地面 ($z=0$) での主流方向中心軸上の濃度、 b は $y-z$ 平面上の濃度分布の半値幅、 S_y 及び S_z はそれぞれ y 軸及び z 軸方向の尺度パラメータである。また、風速は x 軸方向の成分のみを考慮し、その鉛直分布は α を指数と

するべき乗則に従うと仮定している。

3. LNG 流出シナリオ

積載容量の増大に伴う影響範囲の変化を評価するための LNG 流出シナリオ⁵⁾を Table 1 に示す。ただし、LNG の総流出量の算出は Fay²⁾に従って求め、環境条件については FERC による解析例^{3,7)}で用いられたシナリオを参考に設定した。大気安定度については安全側の評価を行うため、大気の状態が最も安定な条件 (大気安定度 F) を採用した。これは、大気の状態が安定なほど乱流拡散の影響が弱く、LFL 到達距離が遠方にまで及ぶためであり、このような結果は LNG 流出の小規模野外実験においても観察されている¹⁵⁾。

4. 結果及び考察

4.1 LNG 流出過程

破口より高い位置にあるタンク内の LNG が全て流出するまでに要する時間 (以降、流出時間) を Fig.2 に示す。両対数表示をすると、流出時間は破口径に対し勾配-2 の 1 次関数として変化していることが分かる。流出量の算出には簡便な Orifice モデルを用いているため、流出時間 t_s は (1)式から解析的に求まり、次のように表わされる。

$$t_s = \sqrt{\frac{32h_0}{g}} \frac{A_t}{C_d \pi} d^{-2} \quad (4)$$

ここで、 h_0 はタンク内 LNG の初期位置水頭、 A_t はタンクの水平断面積、 d は破口径である。(4)式の両辺の対数を取ると、 t_s は破口径に対して勾配-2の1次関数として変化することが確認できる。また、積載容量の差異による影響については、従来型 LNG 船に比べて最新型 LNG 船では全流出量が2倍で、かつ初期位置水頭 h_0 がほぼ等しいので、流出時間は約2倍となっている。

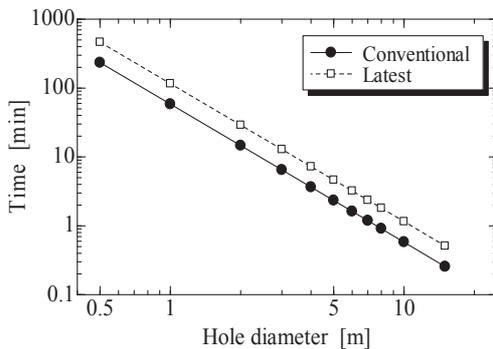


Fig. 2 Effect of hole diameter on the total duration of spill from the conventional and latest LNG carriers under the vapor cloud dispersion scenario

4.2 液面拡大過程

Fig.3は破口径の違いが最大液面半径に及ぼす影響を示している。破口径が小さい場合、最大液面半径は破口径の増加と共に単調に増加している。従来型 LNG 船から流出するシナリオでは破口径が約5 mより大きくなると、液面半径はほぼ一定値に漸近し、最新型 LNG 船では約6 m以上で漸近値に達している。このように一定値に達する破口径が増加するのは、LNG 流出量が2倍になったため、一定量の流出が長時間継続する「連続型流出」と見なすことができる破口径の範囲が広がるためである。

また漸近値を比較すると、最新型 LNG 船から流出した場合の最大液面半径は従来型 LNG 船から流出した場合に比べて約30%増加している。最新型輸送船から流出する総 LNG 容量は従来型船舶の2倍であるにも関わらず、最大液面半径が高々30%程度の増加に止まる理由は次のように説明できる。

Orifice モデルによって計算された LNG 流出率は、(1)式に示すように \sqrt{h} に比例し、初期位置水頭 h_0 は従来型と最新型の LNG 船の間でほぼ等しいため、流出の初期段階においては、最新型 LNG 船か

らの流出率は従来型 LNG 船からの流出率にほぼ等しい。それゆえ、最新の LNG 船では積載容量が2倍になるものの、最大液面半径の著しい増加は見られない。

一方、破口径が約2 m以下の場合、LNG 船の規模により最大液面半径に顕著な差異は見られない。これは、この範囲の破口径では「連続型流出」に近い流出形態になっているためである。

LNG 液面の形状及び拡大速度の双方に、海上風、波浪、潮流等の気象・海象条件が影響すると考えられるが、本研究で用いた液面拡大モデルでは考慮されていない。このような環境条件の影響を定量化する試みがいくつか行われているが、比較検証するための実測値が得られていないため、このようなモデル化の妥当性を検証することは非常に困難である。また、Fay¹⁶⁾は LNG 液面と海面の間に形成される蒸気膜の影響により、液面拡大過程に対する波浪の影響はほとんど無視できる程度であることを示している。

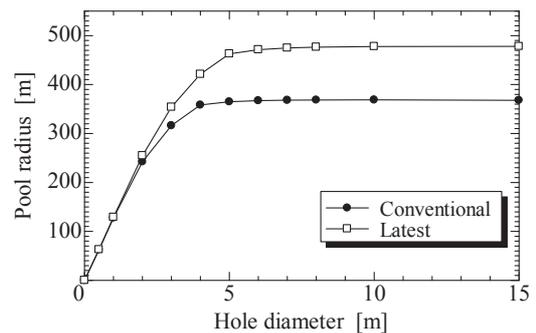


Fig. 3 Sensitivity of the maximum pool radius to the hole diameter under the vapor cloud dispersion scenario. The result for the latest LNG carrier is compared with that for the conventional vessel

4.3 蒸気雲拡散過程

可燃性気体の大気拡散過程では、その燃焼下限濃度 (LFL) の到達距離が危険範囲の推定の目安となる。天然ガス (ここではメタンガスを仮定) の場合、LFL は 5vol%である。破口径に対する LFL 到達距離の感度解析結果を Fig.4 に示す。得られた結果にばらつきが見られるが、Fig.3 に示した最大液面半径と同様、破口径に臨界値が存在し、それ以上の破口径では平均的に見て概ね一定値に漸近している。しかし、最大液面半径の場合の臨界破口径は、従来型 LNG 船からの流出では約5 m、最新型船舶では約6 mであるのに対し、LFL 到達距離ではそれぞれ約3 m及び約4 m以

上でおおむね漸近値に達している。このように破口径の臨界値が小さくなる要因として、海面上に流出した LNG が全て蒸発するまでに要する時間が、この破口径付近で特異的に長くなるためであることを確認している¹⁷⁾。

また、最新型 LNG 船から流出するシナリオでは LFL 到達距離は 6,500 ~ 6,800 m 程度に漸近し、従来型 LNG 船から流出する場合に比べて約 30 % の増加となっている。最新型輸送船から流出する総 LNG 容量は従来型の 2 倍であるにも関わらず、LFL 到達距離の増加率が約 30 % に止まっている理由は、最大液面半径の増加率と同様に説明できる。

また、この増加率は最大液面半径の増加率と一致していることから、低温液化ガスの蒸気雲拡散過程は蒸発ガスの発生源の状態に強く依存すると考えられる。この点については、LNG 流出の小規模野外実験においても確認されている。それゆえ、蒸気雲拡散過程を精度良く予測するには、蒸発ガス発生源の正確な予測値、言い換えれば予測精度の高い液面拡大モデルの開発が重要であることが分かる。

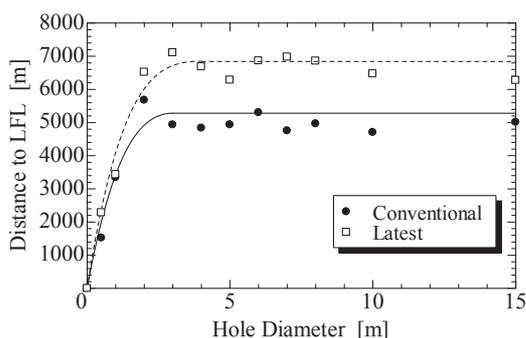


Fig. 4 Sensitivity of the downwind dispersion distance to the lower flammability limit (LFL) to the hole diameter of a single tank for the conventional and latest LNG carriers

5. まとめ

本研究では、最新の大型 LNG 船の 1 タンクに破口が生じて LNG が海面上に流出した結果、蒸発した天然ガスが大気拡散するシナリオを想定し、影響解析を行った。その破口径の違いが流出時間、液面半径ならびに LFL 到達距離に及ぼす影響を FERC モデルを用いて評価したところ、LNG 液面半径及び LFL 到達距離については破口径に臨界値が存在し、臨界破口径以上ではほぼ一定値に漸近した。積載容量が半分である従来型 LNG 船から流出した場合と比較したところ、最新型 LNG 船の場合の臨界

破口径は従来型の場合より 1.2~1.3 倍程度大きくなった。また、最新型 LNG 船では流出量が従来型の 2 倍になっているにも関わらず、漸近値については液面半径及び LFL 到達距離共に 30 % 程度の増加に過ぎないことが分かった。これは、破口位置からタンク内 LNG の液面位置までの初期高さが従来型と最新型の LNG 輸送船で大きな差異が無いことに起因している。

参考文献

- 1) International Energy Outlook 2009, Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, DOE/EIA-0484, Washington, DC 20585
- 2) J. A. Fay, Model of Spills and Fires from LNG and Oil Tankers, Journal of Hazardous Materials, Vol. B96 (2003), pp.171-188
- 3) ABS Consulting Inc., Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, Contract report for the Federal Energy Regulatory Commission, FERC04C40196 (2004)
- 4) M. Hightower et al., Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water, SANDIA REPORT, SAND2004-6258, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2004)
- 5) H. Oka and S. Ota, Evaluation of Consequence Assessment Methods for Pool Fires on Water Involving Large Spills from Liquefied Natural Gas Carriers, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13, No. 2 (2008), pp.178-188
- 6) H. Oka, Consequence Analysis of Pool Fire Hazards from Large-Scale Liquefied Natural Gas Spills Over Water, Hydrocarbon World, Vol. 4, Issue 1 (2009), pp.90-93
- 7) Federal Energy Regulatory Commission, Staff's Responses to Comments on Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, Docket No. AD04-6-000 (2004)
- 8) Y. Qiao et al., Assessment of the Effects of Release Variables on the Consequences of

- LNG Spillage onto Water Using FERC Models, Journal of Hazardous Materials, Vol. 130 (2006), pp.155-162
- 9) A. Luketa et al., Breach and Safety Analysis of Spills Over Water from Large Liquefied Natural Gas Carriers, SANDIA REPORT, SAND2008-3153, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2008)
- 10) D. P. Hoult, Oil Spreading on the Sea, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 4 (1972), pp.341-368
- 11) W. Lehr and D. Simecek-Beatty, Comparison of Hypothetical LNG and Fuel Oil Fires on Water, Journal of Hazardous Materials, Vol. 107 (2004), pp.3-9
- 12) S. Brambilla and D. Manca, Accidents Involving Liquids: A Step Ahead in Modeling Pool Spreading, Evaporation and Burning, Journal of Hazardous Materials, Vol. 161 (2009), pp.1265-1280
- 13) C. J. H. van den Bosch, Pool Evaporation, Methods for the Calculation of Physical Effects (TNO Yellow Book, CPR14E(Part 1), 3rd edn), van den Bosch, C. J. H. & Weterings, R. A. P. M., (Ed.), 3.1-3.126, The Netherlands, (1997)
- 14) T. O. Spicer and J. A. Havens, Field Test Validation of the DEGADIS Model, Journal of Hazardous Materials, Vol. 16 (1987), pp.231-245
- 15) A. Luketa-Hanlin, A Review of Large-Scale LNG Spills: Experiments and Modeling, Journal of Hazardous Materials, Vol. A132 (2006), pp.119-140
- 16) J. A. Fay, Spread of Large LNG Pools on the Sea, Journal of Hazardous Materials, Vol. 140 (2007), pp.541-551
- 17) H. Oka, Consequence analysis of large-scale liquefied natural gas spills on water, Natural Gas, SCIYO, Republic of Croatia (2010), To be published