

## LNG またはメタン大規模爆発時の爆風に関する数値予測

### Numerical Prediction of A Blast Wave Caused by Large-scale Explosion of LNG or Methane Fuel

阿部 淳<sup>1</sup>・片山雅英<sup>1</sup>・金 東俊<sup>2</sup>・薄葉 州<sup>2</sup>・CASTILLO, Martin<sup>2</sup>・若槻 雅男<sup>2</sup>・角館 洋三<sup>2</sup>・田中 克己<sup>3</sup>・渡辺 泰秀<sup>4</sup>

ABE, Atsushi<sup>1</sup>, KATAYAMA, Masahide<sup>1</sup>, KIM, Dongjoon<sup>2</sup>, USUBA, Shu<sup>2</sup>, CASTILLO, Martin<sup>2</sup>, WAKATSUKI, Masao<sup>2</sup>, KAKUDATE, Yozo<sup>2</sup>, TANAKA, Katsumi<sup>3</sup>, WATANABE, Yasuhide<sup>4</sup>

<sup>1</sup>伊藤忠テクノソリューションズ 〒100-6080 東京都千代田区霞ヶ関 3-2-5

ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 3-2-5, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-6080, JAPAN

<sup>2</sup>産業技術総合研究所 爆発安全研究コア 〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央 5

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 5, 1-1-1, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN

<sup>3</sup>産業技術総合研究所 計算科学研究部門 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央 2

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, JAPAN

<sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, JAPAN

#### 1. はじめに

偶発的な爆発事故が発生した場合、周囲環境の安全性を検討する上で保安距離の設定は重要事項の 1 つである。この保安距離を正確に見積もるためには、想定される事故シナリオに対して、爆発性物質の爆発・燃焼特性を把握して、その爆発時に生じる爆風の威力を予測する必要がある。この研究では、トンオーダーの LOX(Liquid Oxygen)/LNG 液体燃料に対する偶発的な爆発事故を想定した。この場合、起爆点から数 km の範囲における爆風威力を調査する必要がある。しかし、このような大規模爆発を同スケールで実験的に再現することは現実的に不可能である。そこで我々は数値解析によって爆風伝播過程を最大 3 km の遠方まで模擬した。一方で、混合気の質量・混合比など様々な条件下での数グラムのメタン/酸素混合気による爆発実験を野外で行い<sup>(1)</sup>、これに対応する数値解析を実施した<sup>(2)</sup>。この実験の数値解析と合わせて、爆風のスケール則を適用することにより、大規模爆発時に発生する爆風威力の数値的予測の妥当性を評価した。

#### 2. 数値解析

##### 2.1 解析ケース

解析ケースを表 1 に示す。本研究では、3.4 トンまたは 1 トンの LNG を含む LOX/LNG 液体燃料が混合気または混合液となり、爆発する状況を想定した。混合気及び混合液それぞれにおいて、当量比は 1.4 及び 1.0 のときに爆発時のエネルギーが最大となる。このときの燃料の全質量は表 1 のようになる。一方、爆発実験のうち、質量 5.8g で化学量論比の混合気の実験条件をケース 5 とした。

##### 2.2 解析モデル

本研究では衝撃解析ソフトウェア ANSYS® AUTODYN® の Multi-material Euler ソルバーを使用した。ケース 1～4 においては、1 次元球対称体系モデルとほぼ同等である 2 次元軸対称体系楔形モデルを用いて、爆源から半径 3000m の球状領域をモデル化した。混合物は標準大気で満たされた計算領域の中心に球状に設置、中心起爆とした。なお、ケース 1～4 に対する参考値として、1 次元 Lagrange 型爆風解析コード OBUQ<sup>(3)</sup> による解析も行った。

ケース 5 では、2 次元軸対称体系モデルを用いて、実際の実験空間と同等の軸対称領域をモデル化した。実験では、質量 5.8g の混合気を充填した直径約 200mm の塩化ビニール製球状バルーンを地上からの高さ 675mm に設置、その中心で起爆した。高速度カメラ撮影によって混合気が爆燃したことが観察された<sup>(4)</sup>。計算上は混合気は瞬間的に定容燃焼すると仮定した。圧力評価点は高さ 675mm、バルーン中心より水平方向 18m まで 1m 毎に設置した。

Table 1 Analysis case

Case #	Fuel mass	Fuel condition
1	13 tonnes	Gas
2	3.9 tonnes	Gas
3	17 tonnes	Liquid
4	5.0 tonnes	Liquid
5	5.8 grams	Gas

#### 2.3 材料モデル

AUTODYN で用いた材料モデルについて述べる。混合気に対しては理想気体状態方程式を適用した。爆轟及び定容燃焼パラメータは Gordon-McBride の方法<sup>(4)</sup>によって算出した。混合液に対しては、JWL 状態方程式を適用した。爆轟パラメータは火薬類爆轟特性計算プログラム KHT2003<sup>(6)</sup>で算出した。空気は参照密度 1.225kg/m<sup>3</sup>、比熱比 1.4 の理想気体状態方程式を適用した。

#### 3. 解析結果

実験及び数値解析で得られたピーク過剰圧及びインパルスに対して、以下に示すような爆風に関するスケール則を適用した<sup>(6)(7)</sup>。

$$\bar{p} = \frac{p - p_0}{p_0}, \quad \bar{I} = \frac{I c_0}{E^{1/3} p_0^{2/3}}, \quad \bar{R} = \frac{R}{(E/p_0)^{1/3}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{p}$  は換算ピーク過剰圧、 $\bar{I}$  は換算インパルス、 $\bar{R}$  は換算距離、 $p$  はピーク圧、 $p_0$  は大気圧、 $I$  はインパルス、 $c_0$  は大気中の音速、 $E$  は爆発エネルギー、 $R$  は実距離である。

図 1 及び図 2 に、AUTODYN 及び OBUQ で計算したケース 1～4 までの換算距離と換算ピーク過剰圧及び換算インパルスの関係をそれぞれ示す。AUTODYN 及び OBUQ の曲線は、混合気または混合液それぞれの条件で、ほぼ同一曲線となった。混合液条件の換算ピーク過剰圧及び換算インパルスは、どの距離においても混合気状態よりも約 40～50% 高い。なお、AUTODYN の計算結果は、OBUQ に比べて、換算距離が遠方になるにつれて、換算ピーク過剰圧は次第に低下する傾向が見られる。これらはオイラー法で計算した爆風波の圧力波形が鈍っていくためであり、セル間の移流計算から発生する数値誤差が蓄積し易い Euler 法に特に顕著に見られる現象である。この鈍りの度合はメッシュサイズに大きく依存する。また、図 2 において、AUTODYN の換算インパルスが曲線から急激に外れる箇所が見られるが、メッシュサイズを半分にすることで解消される。これらの影響を除くと、AUTODYN と OBUQ の計算結果は定量的に一致している。開発過程の異なる解析コードによって同等の解が得られたということは、本計算結果の妥当性を示す一つの根拠といえる。

なお、将来的に本爆風問題を、地形効果を含んだ 2 次元または 3 次元体系に拡張する場合、現実的には Euler 法が選択されることになる。原則的には圧力波形の鈍りが微小な範囲における爆風威力を評価することが望ましいが、より広範囲での特性を要する場合は、圧力波形の鈍りを考慮した補正係数を用いて再評価すべきである。

図 3 及び図 4 に AUTODYN と実験で得られた換算距離と換算ピーク過剰圧及び換算インパルスの関係を示す。実験結果は混合気質量 5.8g に加えて 21g の実験結果も実線でプロットした。実験結果及びその解析結果の曲線は換算距離約 5～8 付近でそれぞれ増加している。これは、地面からの反射波が先行波に重なったマッハ反射の影響である。この部分を地上爆発の実験結果と見なし、数値解析結果と比較した。解析での換算ピーク過剰圧は、換算距離 20 付近において、実験値の約 70% 程度と低めに評価された。一方、解析での

換算インパルスは実験値の約 115%程度と高めに評価された。これらの相違も、圧力波形の鈍りに起因するものだと考えられる。

トンオーダーの曲線とグラムオーダーのマッハ反射後の曲線を比較すると、トンオーダーの換算ピーク過剰圧の曲線は、換算距離約 10 以降において、グラムオーダーの曲線よりも低く評価されている。これはメッシュサイズ依存性による圧力波形の鈍りや衝撃波の地面との反射形態の影響が大きい。換算ピーク過剰圧に関するスケール則の妥当性については、定性的には一致する傾向を示しているが、もう少し慎重に検討する必要がある。一方、トンオーダーの換算距離—換算インパルス曲線は、グラムオーダーの曲線と傾きも等しく、定性的にはほぼ一致すると考えられる。これは圧力波形が若干鈍ってもインパルス量はあまり変化しないことを意味する。換算インパルスに関してはスケール則の成立を示すことができた。

なお、以上での議論は完全に無風の静的状態中を爆風が伝播する状況にのみ成立する。実際には爆源から数 km 以遠におけるピーク過剰圧は音圧程度まで減衰すると考えられ、現実的な風や気象条件の影響を強く受ける。また、地形や植生のような地表面の状態なども影響要素となる。これらが爆風に与える影響については、また別途議論する必要がある。

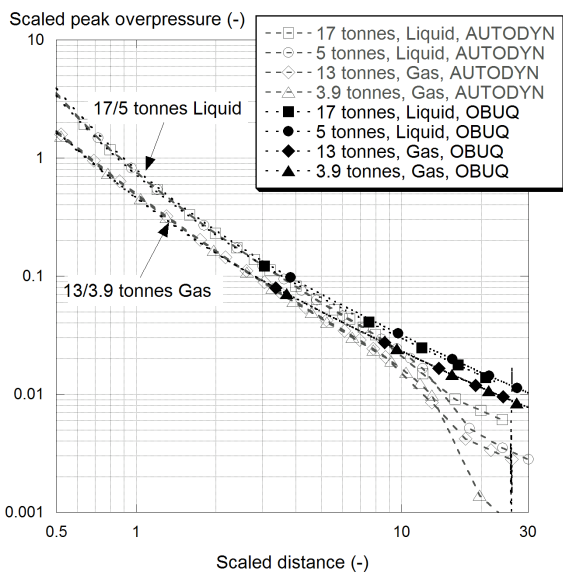


Fig.1 Comparison of numerical relationships between scaled peak overpressure and scaled distance.

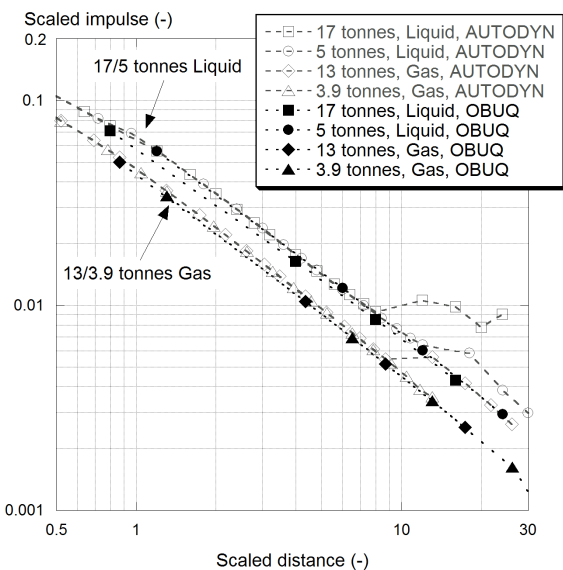


Fig.2 Comparison of numerical relationships between scaled impulse and scaled distance.

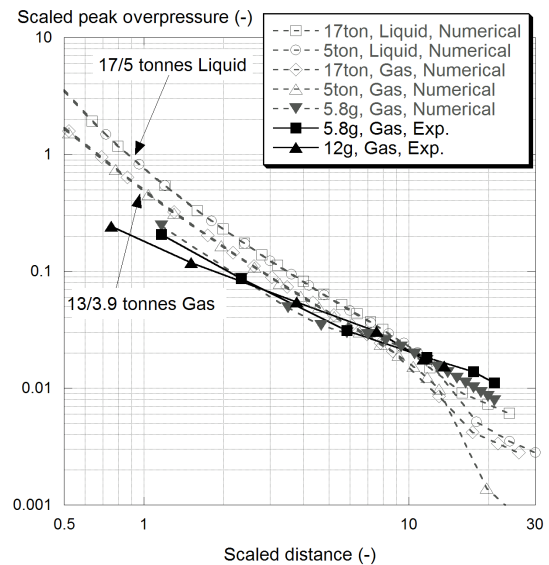


Fig.3 Comparison of numerical and experimental relationships between scaled peak overpressure and scaled distance.

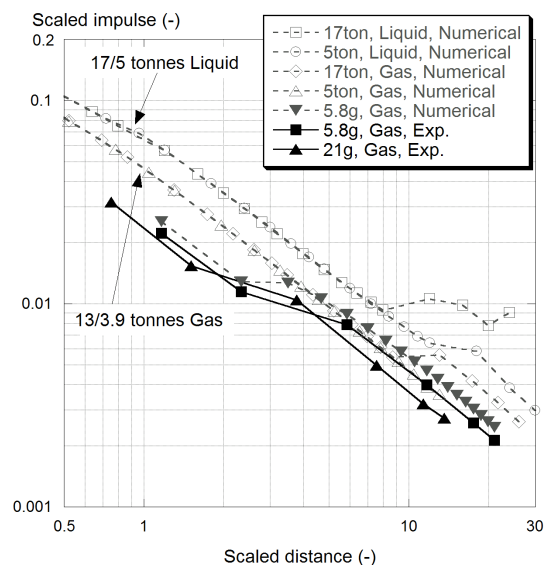


Fig.4 Comparison of numerical and experimental relationships between scaled impulse and scaled distance.

#### 4 まとめ

大量のLOX/LNG液体燃料の偶発的な爆発事故の数値予測を行った。また、縮小スケール実験に対する数値模擬を行った。得られたピーク過剰圧及びインパルスについて、スケール則の成立を示し、大規模爆発時に発生する爆風威力を定量的に評価した。

#### 5 文献

1. 金東俊他 4 名、火薬学会 2008 年度年会講演要旨集、pp.29-30(2008)
2. A. Abe et al., Proc. International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading (IB'08) (2008)
3. 田中克己、化学技術研究所報告、第 85 巻、第 6 号、pp.209-215(1990)
4. B. J. McBride et al., NASA TM-4557, Lewis Research Center (1994)
5. 田中克己、Sci. and Tech. Energetic Materials, Vol. 64, No. 4, pp.167-174(2003)
6. W. E. Baker, Explosions in Air, Univ. of Texas Press, Austin, Texas, USA (1973)
7. 齋藤寛泰他 9 名、日本機械学会論文集 (B 編)、73 巻、728 号、pp.1099-1106、(2007)