

オイル&ガスパラントの安全を守るガス爆発シミュレーション技術

Gas Explosion Simulation Technology for Assessing Safety of Oil and Gas Plant

高橋公紀*1

Kiminori Takahashi*1

*1 エンジニアリング本部 ENテクノロジーセンター

*1 EN Technology Center, Engineering Division

要旨

オイルやガスパラントにおけるガス爆発に対する安全性を評価するため、当社が開発したガス爆発シミュレーション・システムは、ガス漏洩拡散、ガス爆発、構造物の変形と応力を予測可能である。本稿では、ガス爆発シミュレーション技術の概要と適用事例について紹介する。

Abstract:

For safety evaluations in connection with explosions in oil and gas plants, an integrated gas explosion simulation is utilized to predict gas dispersions, gas explosions, blast pressures, structural deformation and stresses. This paper presents various numerical simulation methods for gas explosions, and the results for a number of case studies are presented.

1. はじめに

近年、HSE (Health, Safety & Environment) に対する関心が高まっており、エンジニアリング・コントラクターに対して、設計段階や建設段階における HSE 要求が厳しくなっている。なかでも、設計段階におけるプラントのリスク低減対策の一環として、ガス爆発に対する安全性の評価はますます重要となっている。当社は、安全に対する要求に応えるために、ガス爆発シミュレーション・システムを開発した。本稿では、ガス爆発シミュレーション技術の概要と適用事例、加えてガス爆発の発生条件について紹介する。

2. ガス爆発シミュレーションの概要

2.1 ガス爆発のメカニズム

ガス爆発が発生するとガスの温度と圧力が瞬間的に上昇して、広い範囲の建物が破壊され大災害を引き起こす。以下に、ガス爆発が起こるメカニズム^{1),2)}について解説する。

なんらかの原因で空気中において可燃性ガスが燃焼すると、ガス温度が上昇することに

よって圧力が上昇する。しかし、通常は局所的に圧力上昇するものの、すぐに大気圧に戻る。ところが、多くの障害物がある場合は事情が少し異なる。燃焼による圧力上昇によってガスの流れが生じる。ガスが障害物に衝突、またはガスが障害物間の狭い空間を通過することによって、流れに乱れが生じる。そして、乱流の発生によって燃焼が加速される。すなわち、図1に示すように燃焼によって流れが膨張し、乱流が発生し、燃焼が促進される。これらが瞬時に繰り返されることによって、ガス燃焼がガス爆発に発展する。

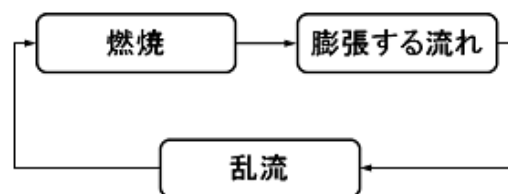


図1. ガス爆発のメカニズム

2.2 従来のガス爆発の予測手法

ガス爆発について検討する場合には、爆風圧の評価が重要となる。爆風圧を予測するために、TNT換算モデルなどの手法^{1)~3)}がよく利用されている。TNT換算とは、爆発で放出されるエネルギー量をTNT爆薬(トリニトロトルエン)の質量に換算する手法である。この手法によって、あらゆるガス爆発時の破壊力を簡易的に評価することができる。しかしながら、このような手法はプラントの配管、機器、構造物などの複雑なレイアウトやサイズの影響を考慮することができない。したがって、複雑なレイアウトやサイズの影響を考慮するためには、数値流体力学^{4),5)}(CFD: Computational Fluid Dynamics)の利用が効果的となる。

2.3 ガス爆発シミュレーションのシステム

ガス爆発シミュレーション・システムは、3次元CAD(Computer Aided Design)、数値流体力学、構造力学(Structural Mechanics)を利用した高度な統合シミュレーション技術^{6)~9)}によって構成されている。

このシステムでは、

- ✓ プラントの配管、機器、構造物のレイアウトを伴う3次元情報
- ✓ 気温、気圧、風向風速などの気象条件
- ✓ 漏洩ガスの種類、流量などのガス漏洩条件

など、多様な条件をもとにコンピュータ上でガス爆発に関する仮想実験を行う。図2に示すワークフローで、ガス漏洩拡散、火災、爆発、爆風圧の伝播、構造物の変形と応力を予測する。これらから得られたデータを反映して、プラント機器や制御建屋の強度を評価して耐爆設計を行う。

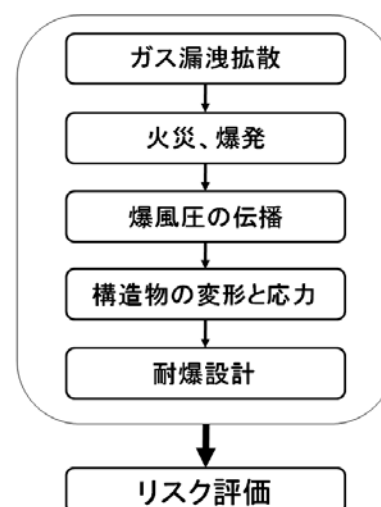


図2. ガス爆発シミュレーションのワークフロー

さらに、爆風圧データなどを利用してリスク評価^{2),10)}を行い、プラント全体の安全性を評価する。図3に、ガス爆発シミュレーションによって得られるガス爆発の様子を示す。

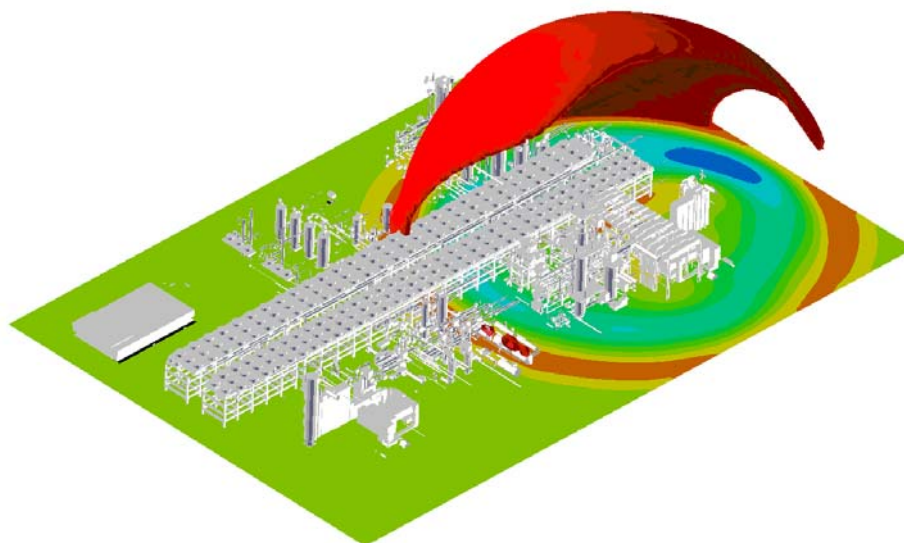


図3. ガス爆発シミュレーションの事例

3. ガス爆発シミュレーションの事例

典型的な LNG プラントにおけるガス漏洩拡散、ガス爆発のシミュレーション事例を紹介する。

3.1 解析モデル

今回の解析で用いた LNG プラントのモデルを図4に示す。このモデルは、3D-CAD から作成され、配管、機器、構造物などの多くの物体を含んでいる。モデルは 300 m x 200 m の広い範囲を対象とした。このプラントにおいて北東側の Gas Leak Area からガスが漏洩拡散し、ガス爆発が発生した場合について、南西側にある制御建屋 (Control Building) の安全性を検討した。

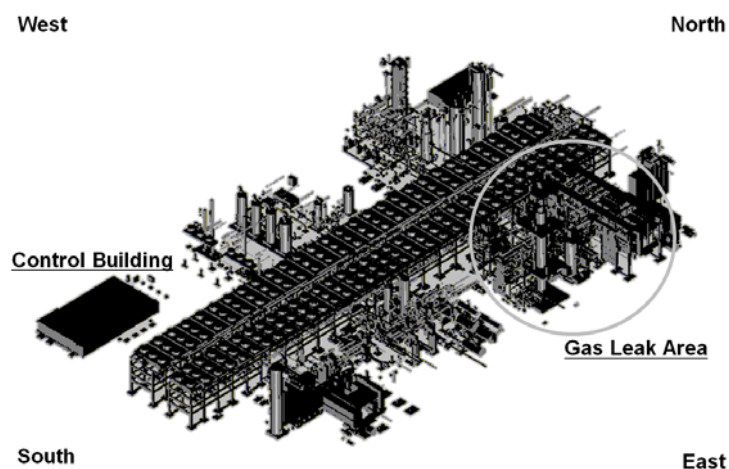


図4. 典型的なLNGプラントの解析モデル

3.2 ガス漏洩拡散

ある気象条件、漏洩条件について、ガスが拡散する状況を予測する。図5にガス拡散の例を示す。本事例において、図中の Release point の配管よりプロパンガスが漏洩した場合、プロパンガスは空気より比重が高いため地上に沿って、また南風によって南側から北側に広がることを確認できた。

3.3 ガス爆発

ガス漏洩拡散シミュレーションから得られたガス濃度分布を用いて、ガス爆発の状況を予測する。図5に示した Ignition point に着火した場合の爆風圧の例を図6に示す。ガス濃度の高い Release point 周辺において、100 kPa を超える高い爆風圧が観察された。この爆風圧は爆発の強さを表す重要な指標である。

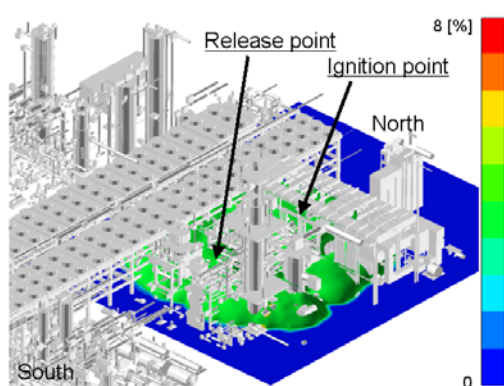


図5. ガス漏洩によるガス濃度分布

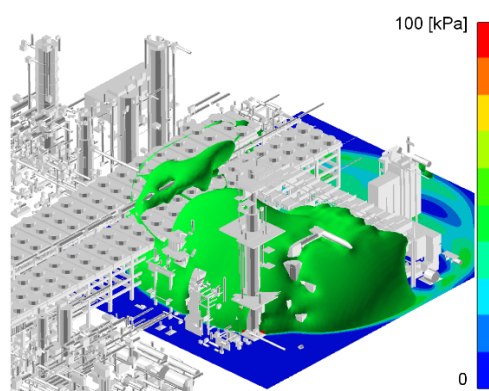


図6. ガス爆発による爆風圧分布

図7に爆風圧の伝播の様子を示す。この例では、爆風圧は制御建屋に着火 1.2 秒以内で到達した。爆風圧の伝播の様子は、ガス爆発の特徴を良く表している。

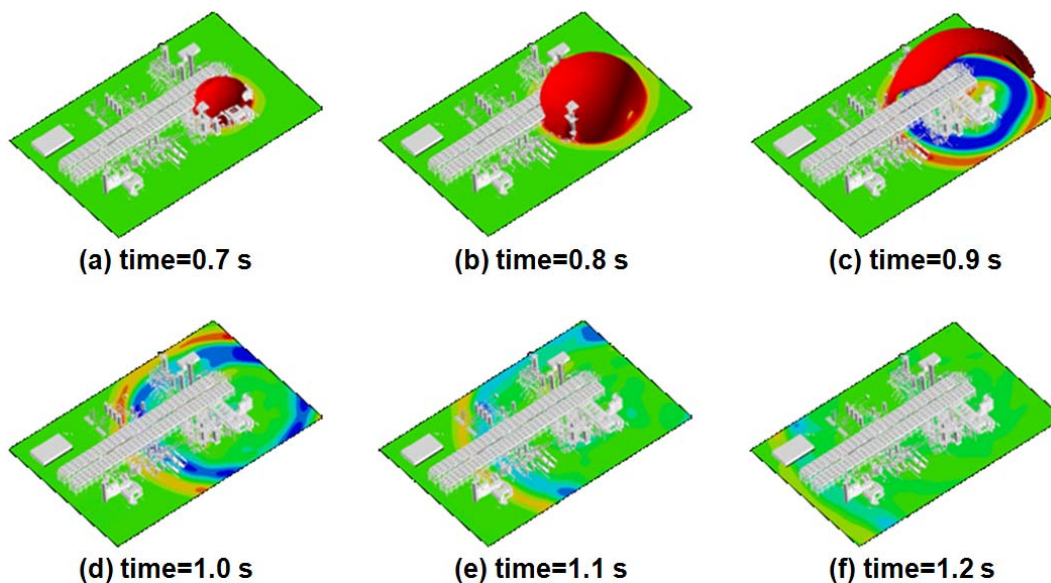


図7. ガス爆発による爆風圧の伝播

(緑は大気圧、赤は正の圧力、青は負の圧力を示す。)

図 8 に爆風圧と制御建屋のゲージポイント位置 (X1, X2, X3, X4)、図 9 に制御建屋の各ゲージポイントにおける爆風圧の時間変化を示す。制御建屋の爆発側壁面 (ゲージポイント X1) では 16 kPa、屋根 (ゲージポイント X2) では 8 kPa となり、爆発側壁面の最大爆風圧は屋根の 2 倍となった。これらの情報が制御建屋の強度検討に利用される。

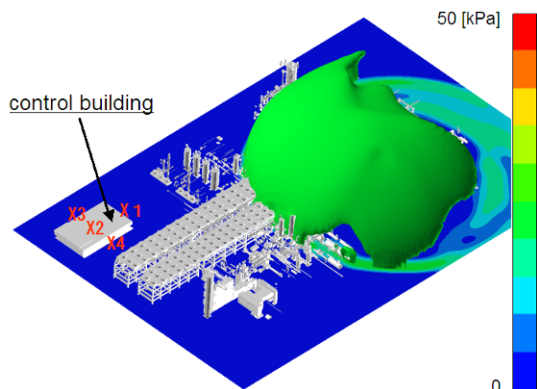


図8.爆風圧とゲージポイント位置

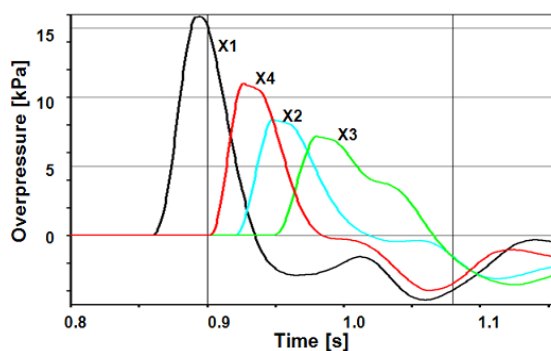


図9.ゲージポイントにおける爆風圧の時間変化

3.4 構造物の強度

構造力学を利用することによって、制御建屋の変形および応力を予測する。図 9 の爆風圧の時間変化を用いて、制御建屋で発生する変形と応力を予測した結果を図 10 に示す。制御建屋の強度を評価し、問題があれば対策について検討できる。

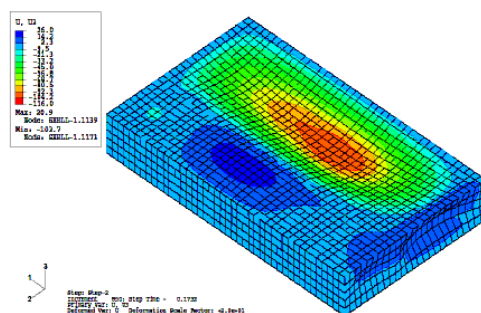


図 10. ガス爆発による制御建屋に発生する変形と応力

4. ガス爆発が発生する条件

図 4 に示した解析モデルを利用して、ガス爆発が発生する条件として①ガス拡散範囲、②ガス濃度、③物体サイズについて検討した。

4.1 ガス拡散範囲

ガス拡散範囲の爆風圧への影響について検討した。図 11 に示すように、ガス拡散範囲は円柱状、着火点はガス拡散範囲の中心とした。ガスはプロパンとした。

円柱状のガス拡散範囲における最大爆風圧を、高さごとに図 12 に示す。その結果、ガス拡散範囲が狭い場合には高い爆風圧を発生するには至らなかったが、ガス拡散範囲が直径 50 m かつ高さ 7 m 以上となる場合には最大爆風圧 500 kPa を超えた。すなわち、高い爆風圧が発生するには十分なガス拡散範囲が必要となることが確認できた。

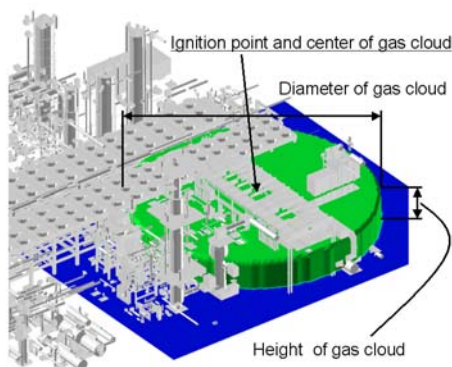


図 11. 円柱状のガス拡散範囲

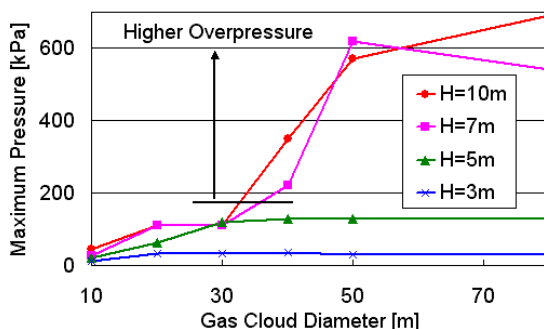


図 12. ガス拡散範囲と最大爆風圧の関係

4.2 ガス濃度

ガス濃度の爆風圧への影響について検討した。解析モデルの全領域でガス濃度を均一とし、図 5 の Ignition point でガスに着火させた。

図 13 に示すように、理論混合比（メタン 9%、プロパン 4%）近くの狭いガス濃度の範囲においてのみ、最大爆風圧 1000 kPa を超える大きな爆風となった。しかしながら、一般的に大気に解放された広い空間ではガス濃度は不均一であり、ガス拡散が広域に及んで理論混合比のガス濃度となることは稀である。

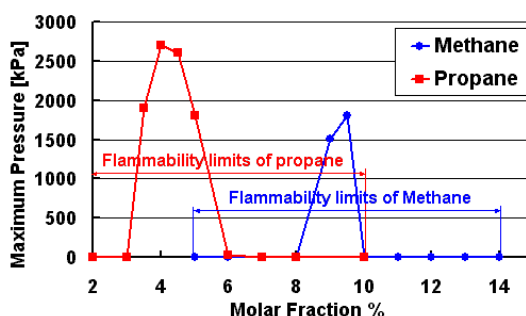


図 13. ガス濃度と最大爆風圧の関係

4.3 物体サイズ

配管、機器、構造物などの物体のサイズと爆風圧の関係について検討した。図 4 の解析モデルから小さい配管、機器、構造物などの物体を削除して、大きな物体のみの解析モデルを新たに作成した。1 m 以上の大きな物体のみ考慮した解析モデルを用いた場合、図 5 と同じガス濃度分布と着火条件において発生する爆風圧分布を図 14 に示す。爆風圧は 100 kPa (図 6) から 0.2 kPa (図 14) に低下した。

次に、ガス濃度を全領域においてプロパンの理論混合比 4%とした場合における、最小の物体サイズと最大爆風圧の関係を図 15 に示す。0.2 m 以下の小さい物体を考慮した場合、最大爆風圧は 1000 kPa を超えた。すなわち、小さい物体と大きい物体が混在することによって、乱流の発生が促進されて爆風圧が高くなることが確認できた。

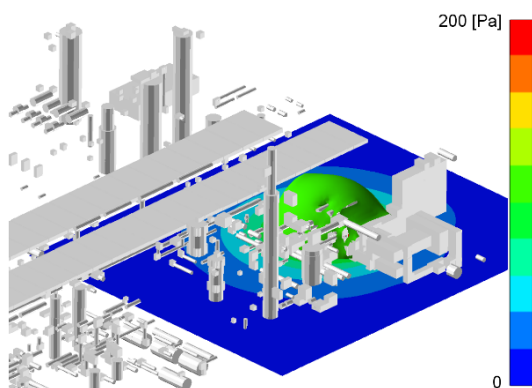


図 14. 大きな物体のみの解析モデルによる爆風圧分布

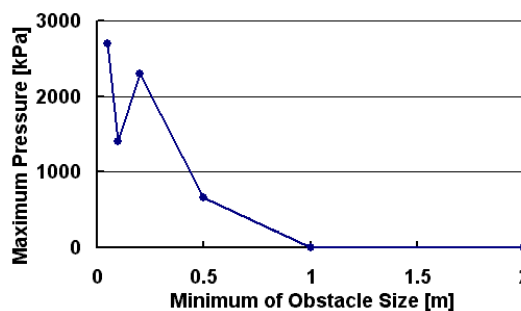


図 15. 最小の物体サイズと最大爆風圧の関係

以上より、プラントで高い爆風圧が発生する条件として、

- 広範囲のガス拡散
- 理論混合比に近いガス濃度
- 小さい物体と大きい物体の混在

が必要となることを明らかにした。上記の三つの条件のうち一つの条件を除くことができれば、爆風圧を下げ、未然にガス爆発の発生を防ぐことができる。このようにガス爆発の現象を理解することによって、プラントの安全性を確保することが可能となる。

5. おわりに

ガス爆発シミュレーション技術の概要と適用事例について紹介した。このガス爆発シミュレーションから得られる情報を利用して、プラント機器や制御建屋の耐爆設計を行うことができる。さらに、ガス爆発シミュレーションから得られる爆風圧を参考として信頼の高いリスク評価を行い、プラント全体の安全性を確保することが可能となる。

また、このガス爆発シミュレーションは、石油精製・石油化学プラント、ガス処理プラント、LNG プラント、さらには洋上液化プラント (LPG FPSO) などの幅広い分野に利用できる。当社は、高度な HSE 技術を幅広く活用することによって、プラントの安全性を高めることで地球環境保全に貢献している。

以上

参考資料：

- 1) 難波桂芳, 爆発防止実用便覧, 株式会社サイエンスフォーラム(1983)
- 2) 上原陽一, 小川輝繁, 衝撃波と爆轟波, 防火・防爆対策技術ハンドブック, 株式会社テクノシステム(2004)
- 3) C. J. H. van den Bosch., Methods for the calculation of physical effects CPR 14E (Part 2), Committee for the Prevention of Disasters, ISBN:9012084870, Committee for the Prevention of Disasters (1997).
- 4) Mercx, W.P.M., Modelling and Experimental Research into Gas Explosions, Overall Final report of the MERGE project CEC contract STEP-CT-0111 (1994).
- 5) Dorofeev S.B. et al., Large scale combustion tests in the RUT facility: Experimental study, numerical simulations and analysis on turbulent deflagrations and DDT, Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon, France, August 17-22 (1997).
- 6) Kiminori Takahashi et al., ADVANCED NUMERICAL SIMULATION OF GAS EXPLOSIONS FOR ASSESSING THE SAFETY OF LNG PLANTS, 15th International Conference & Exhibition on LNG, Barcelona (2007).
- 7) Kiminori Takahashi et al., Advanced Numerical Simulation of Gas Explosions for Assessing the Safety of Oil-and-Gas Facilities, International Conference Safety of Offshore Facilities, Moscow (2007)
- 8) 原、渡邊, プラント設計における爆発シミュレーションを用いた安全性評価, Page 25-29, ペトロテック 第33巻 第5号 (2010)
- 9) Kiminori Takahashi et al., Advanced Numerical Simulation of Gas Explosions for Assessing the Safety of Oil and Gas Plant, Page 376-388, EXAMPLES AND APPLICATIONS IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, NUMERICAL SIMULATIONS, INTECH, ISBN 978-953-307-153-4 (2010)
- 10) NORSOK Standard Z-013 Rev2, Risk and emergency preparedness analysis, Norwegian Technology Centre, (2001)