

大規模地震による石油化学コンビナートの被害に対する影響評価

Lanurak Phongnumkul	大阪大学大学院
常安 平	大阪大学大学院
椿野 隆宣	大阪大学大学院
石丸 裕	大阪大学大学院
向山 和孝	大阪大学大学院
花木 宏修	大阪大学大学院
倉敷 哲生	大阪大学大学院

Analysis of the damage caused by large-scale earthquake in the petrochemical complex.

Lanurak Phongnumkul	Graduate School of Engineering, Osaka University E-mail: lanurak@mit.eng.osaka-u.ac.jp
Taira TSUNEYASU	Graduate School of Engineering, Osaka University
Takanobu TSUBAKINO	Graduate School of Engineering, Osaka University
Hiroshi ISHIMARU	Graduate School of Engineering, Osaka University
Kazutaka MUKOYAMA	Graduate School of Engineering, Osaka University
Koushu HANAKI	Graduate School of Engineering, Osaka University
Tetsusei KURASHIKI	Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

The Japan industrial zone has experienced a large amount of damages from hazardous materials caused by large scale earthquakes. During the occurrence of earthquakes, the roof of large flat bottom tanks fall off which causes a full surface tank fire. The collapse of spherical tanks causes fires and the destruction of adjacent tanks and pipes. Furthermore, vapor clouds explosions have occurred. Finally, fires ignite the spilled oil on the liquid surface and spread to residential areas which expand the damage to a wide range. Also, in other countries, there are reports about cases of wide range diffusion leakage of toxic substances that leads to serious damage. Looking from the point of view that the Tonakai earthquake might happen in the near future and that appropriate countermeasures must be prepared, we aim to propose and study a simulation method and the impact of having hazardous toxic substance storage facilities in Osaka Bay area where residences and factories are concentrated. We also try to verify the effectiveness of existing mitigation methods.

In this paper, we report the simulation results of the distribution of radiant heat caused by a broad range of oil fires, the fire behavior on water surfaces, the effects of the physical substances properties of the substance on the gas leakage diffusion and the efficiency of mitigation equipment.

1 緒 言

石油精製、石油化学などのコンビナートでは、様々な形式の大型貯槽が存在する。日本ではこれらの大型施設は海浜地区に立地していることが多く、さらには住宅、商業地域が隣接する場所も少なくない。こうした地域で大規模地震が発生すると、揺れによる機器のずれ、機械的な破壊、倒壊、接合部の破壊、多量の液体を内蔵する設備では液のスロッシングによる破壊などが経験されている。地盤の移動、沈下あるいは液状化は設備の傾きや沈下を生じ配管やフランジなどの損傷をきたす。津波はその圧力だけではなく浸水による浮力が設備の転倒や移動をもたらす、隣接する機器の損壊や接合部での破断を生じ得る。また、電気、計装用エア、水、窒素な

どのユーティリティの停止はプロセスを不安定にしたり、設備の安全な運転停止を妨げたりすることもあり得る。

過去の大規模地震では、危険物や毒物を保有する設備では、こうした設備トラブルや損傷により火災や漏えいによる様々な物理的危害が発生している。特に水系への漏えいは拡散範囲が広く、下水道を介して住宅地にまで流出、さらには着火し、火災が広い範囲で発生したという例も経験されている。

このような地震によるコンビナートの被害の予測と対策の検討には、深刻度の異なるいくつかの災害シナリオをもとにモデルを作成してシミュレーションを事前実施し、広く監督省庁、工場関係者だけではなく地域住民を含めて事態の情報やリスクを共有することが必要である。

2 コンビナート災害の状況

石油化学プラントでは、可燃性や爆発性、毒性が高い物質が貯蔵されたタンクが密集している場合が多く、自然災害や設備トラブルにより内容物が漏洩した場合には、火災もしくは流出・拡散により周辺地域に多大なる被害を与える恐れがある。そのため、石油化学プラントでは安全性を確保するための様々な対応がとられてきた。Fig.1 に化学プラントの一例である石油コンビナートにおける事故の発生件数の推移¹⁾を示しているが、事故・災害の発生は以前跡を絶たないのが現状である。近年における事故発生数の増加は、設備の老朽化や熟練技術者の減少といった問題が原因であると考えられている。

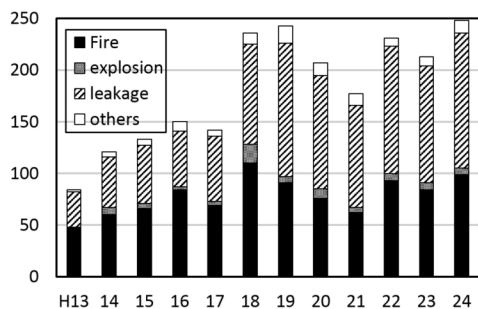


Fig.1 Number of accident outbreak in a petrochemical complex

また、我が国では住宅が化学プラントに近接している事が多いため、安全対策や被害進展状況の把握を重要視しなければならず、各自治体で防災計画が進められている。既存の市街地においても、人口、諸機能の集中化が進行しているため、貯蔵施設の安全性は重要課題の一つである。さらに、阪神大震災に代表されるような大災害に備えて、化学プラントのより厳しい安全運営面から防災計画の見直しが進められており、起こり得る災害の危険性とその影響範囲を把握し得る評価手法の開発の必要性が高まっている。

現在、その評価手法として主に消防庁の防災指針に基づいた解析法が用いられている。しかしながら、石油化学プラントにおける災害発生および被害拡大状況は、気象条件やタンク内貯蔵物などにより左右されるため、本指針により種々の条件を網羅し起こり得る災害領域を推定することは容易ではない。実験的手法を適用するとしても膨大な試行回数を要する点から、推定は非常に困難であることは言及するまでもない。そこで、災害発生後の被害状況を時刻歴で表示できるシミュレーション技術の確立が防災計画から期待されている。しかしながら、シミュレーション技術による石油化学プラントの安全性を評価した例は少ない。我が国においては高圧ガス保安協会がタンク等の設計指針²⁾を公開しており、火災・爆発や気体拡散などの現象については多くの知見を得ることができるが、それに準拠したシミュレーションシステムは未だ構築されていない。

著者らは、石油化学プラントにおける事故は Fig.2 のフローチャートのように進展することを想定している。まず、自然災害や人為的ミス等により事故が発生し、タンクから内容物が漏洩・流出し、蒸発、拡散する。ここで、消防庁の発表によると、事故の発生原因は、管理面や操作面などの人的要

因が 51%、設備の劣化や故障などの物的要因が 41.6%であり、人的要因による災害も多くみられると報告されている³⁾。次に、漏洩および流出後は、内容物の種類により 2 通りに分類されるが、流出・拡散した貯蔵物が可燃性である場合は、流出・拡散した後に着火・引火することにより、爆発・火災へと事故が進展する。貯蔵物が有毒性である場合は、拡散により周辺地域が汚染される。貯蔵物が可燃性である場合は、さらに 2 通りに分類され、流出・拡散した貯蔵物が陸上で着火・引火する場合は、陸上火災が発生し、貯蔵物が水面上で着火・引火する場合は、水面火災が発生すると考えられる。

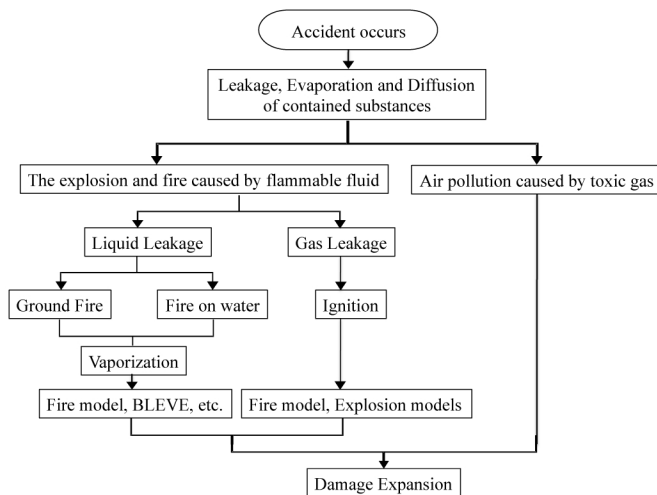


Fig.2 Flow chart of accident occurrence in chemical complex

陸上火災について、タンク火災事故では、2003年の十勝沖地震によって発生した出光興産(株)北海道製油所のタンク全面火災が石油精製プラントにおける防災意識へ大きな影響を与えた。浮屋根式タンクでの全面火災はこの事故が国内初であったが、これにより、それまでの消防設備・消防基準では不十分であることが判明した。我が国では石油コンビナート等災害防止法により災害時の行動計画を検討し、警防計画を策定することが義務付けられている。本防止法では、プラント内の全てのタンクについて災害時に周囲に与える熱影響の評価が求められており、そのためにはタンク火災時のふく射熱の評価が必要となる。ふく射熱の評価を行う際は一般に Hamilton による形態係数評価式などが用いられている。しかしながら、現在用いられている評価式は、タンクの形状などが簡易化されており、より実現象に近い条件における評価が求められている。

水面火災について、大規模地震はタンクおよび配管の破壊に留まらず、津波などの二次災害を引き起こすことが知られている。近年、我が国で発生した大規模地震の1つに、2011年3月に起きた東日本大震災が挙げられる。被害の大きかった宮城県仙仙沼市では、大規模火災による市街地の延焼面積は推定14haと極めて広い⁴⁾。これは、津波による浸水地域に、地震によるタンク破損によりタンク内の油が流出し、水面上を油が拡散・着火することで広範囲に火災が広がったためであると考えられる。津波による火災の広がりについて、過去

には 1964 年の新潟地震においても同様の事例が確認されており、水面に流出した油が発火し、津波浸水域に火災が広がっている⁵⁾。津波が低頻度災害であることから、津波を想定した災害の発生・拡大シナリオによる被害対策が十分でなかったが、近年は東日本大震災をきっかけに防災アセスメント指針の見直しも行われている。しかしながら、見直しに伴う水面上での油の拡散に関する研究は多く行われているが、水面上、特に海上での火災挙動に関する研究は少ないのが現状である。これは海上での火災は波の動きや海上での風の影響の考慮が難しいことが理由だと考えられる。

有毒性気体による汚染について、昭和 61 年に発生した四日市のガスボンベ爆発事故がその典型例である。化学プラントにおいて事故が発生し、内容物の漏洩、拡散が起こると、周辺に多大な被害を及ぼす。その被害を軽減化するためにも、化学プラントの安全性評価や災害時の事故の進展を評価することは重要であり、化学プラントの安全性評価を考える上では、漏洩物質がどのように拡散するかばかりではなく、如何に食い止めるかという減災の観点からの評価が必要不可欠である。これまでも拡散濃度の評価手法が構築されているが、既存の研究では化学プラントにおける漏洩・拡散の減災に関する評価手法は十分に検討されていないのが現状である。

本研究では、数値流体解析コードを用いて、陸上火災と比較した水面火災の燃焼挙動の評価を実施した。それに加えて、従来の毒性気体拡散の評価手法の課題を検討した。さらに、減災の観点からウォーターカーテンによる遮断効果を考慮したシミュレーションにより、漏洩拡散に対する減災設備の効果を評価した。以下にその詳細を記述する。

3 大型原油タンク火災のふく射熱評価

3.1 既存のふく射熱評価および形態係数評価手法

湯本らの研究⁶⁾によると、タンク直径が大きい場合の任意点におけるふく射熱 $E(\text{W}/\text{m}^2)$ は、火炎温度や放射率は変わらないものと仮定して式(1)によって求めることができる。

$$E = \phi \cdot R_D \quad (1)$$

ここで、 ϕ は形態係数とよばれる熱放射面と受熱面の相互の幾何学的位置関係により決まるパラメータである。一方、ふく射発散度 $R_D(\text{W}/\text{m}^2)$ は燃料の種類によって決まる定数であるために、火炎からのふく射熱を計算するためには形態係数 ϕ を求めればよいことになる。

既存の形態係数評価は、日本では高圧ガス保安協会の保安・防災技術指針²⁾や、消防庁特殊災害室の石油コンビナートの防災アセスメント指針⁷⁾の中に示された評価式によって行われている。海外の指針としては、オランダ応用科学研究所(TNO)から出版されている Yellow-Book⁸⁾に示された評価式が広く用いられている。また、モンテカルロ法を用いた形態係数評価手法が吉田らによって考案されており⁹⁾。地形や障害物の影響を考慮することが可能となっている。

3.2 数値流体解析を用いた評価手法

著者らの研究によるふく射熱評価手法¹⁰⁾は、3つの段階に

分けることができる。第1段階はタンクの実条件に応じたタンク火災のモデル化および火炎性状の火炎解析コード FDS(Fire Dynamics Simulator)による数値流体解析を用いた評価である。ここではタンク全面火災を想定し、タンク外延部における高さ方向のふく射熱分布を求めた。第2段階として、得られた火炎近傍でのふく射熱分布に応じた火炎モデルの作成を行う。従来の手法では火炎が単純な円筒でモデル化し、その表面から一様にふく射熱が放射されると模擬されていたが、高さに応じてふく射熱を変化させることでより現実に近い火炎モデルを作成する。第3段階はモンテカルロ法を用いた倉敷の方法^{11,12)}によりこれまで作成したモデルを用いて地表面で受けるふく射熱を評価する。これにより、従来の円筒形火炎モデルでは評価が困難なタンク内容物の液面高さや、タンク直径が与える影響を考慮したふく射熱の分布を評価可能となった。また、直径 10m タンクを用いた燃焼実験の結果と本手法を比較することで、その評価手法の妥当性を示すとともに、既存手法を用いた評価結果が実験結果と大きく異なることを指摘している。本手法のように、数値解析を活用することで様々な条件下での火災を評価可能となる。例として、火炎と煙の挙動について実験結果と解析結果の比較例を Fig.3 に示す。

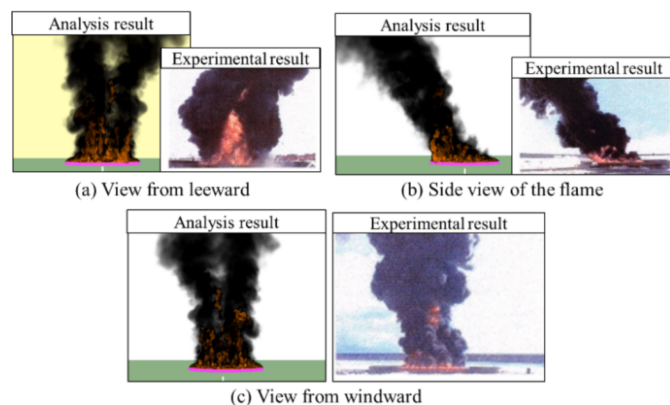


Fig.3 Behavior of flame and smoke

次章では、従来手法では評価することが困難な水面火災に対して、数値解析を用いた評価を試みた。

4 陸上火災と水面火災の燃焼挙動評価

陸上における火災と水面上における火災の大きな違いとして、水面と陸上での油膜からの熱伝導率の違いに着目した¹³⁾。そこで、陸上火災と水面火災のそれぞれについて簡易モデルを作成し、流出油が接している物質の比熱や熱伝導率の違いにより、燃焼挙動に与える影響を FDS を用いて評価する。

4.1 解析モデル

陸上火災は原油タンクからの油の漏洩などにより、地上に油が流出して発生した火災を想定する。地表面はコンクリートの物性値を用い、流出した油は簡易のためエタノールの物性値を用いた。油膜の厚さは 9.0mm としている。水面火災は漏洩した油が水面に流出した後に着火することを想定している。今回は簡易のため油膜から水面への熱伝導のみを考え、

波や油の拡散，エタノールの水への溶解などは考慮しない。作成した解析モデルを Fig.4(a), (b)に示す。解析範囲は，流出油の中心を原点とし，X 軸方向，Y 軸方向に-0.6m~0.6m，Z 軸方向に 0.0m~2.4m とする。メッシュの分割は 24×24×48 とし，メッシュサイズが 5.0cm の立方体となるようにした。境界条件は地表面・水面を除き全て解放としている。なお，ふく射熱を (X, Y, Z) = (0, 0, 0.5), (0.5, 0, 0.5) の 2 点で測定した。

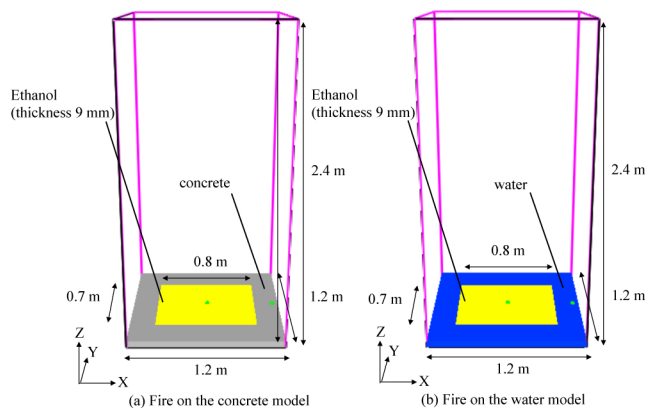


Fig.4 Numerical model

4.2 解析結果および考察

解析により得られた陸上火災と水面火災それぞれの，時間変化に対する燃料の厚みおよび 2 点でのふく射熱の大きさを Fig.5 ~Fig.7 に示す。

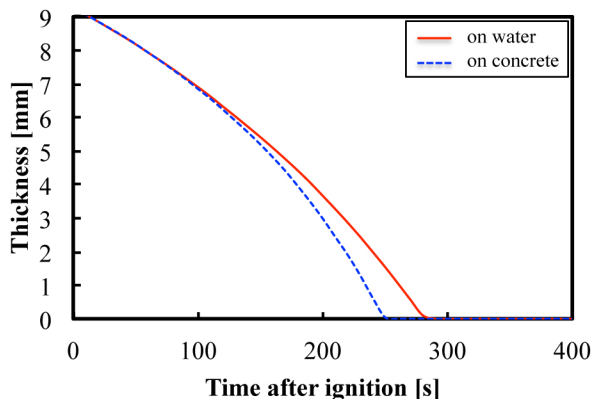


Fig.5 Thickness of fuel slick

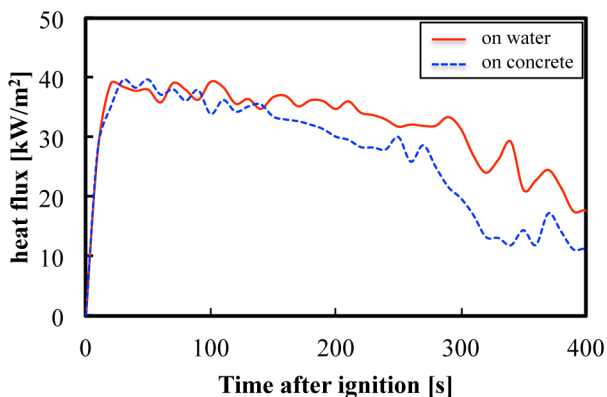


Fig.6 Strength of the heat flux at (x,y,z)=(0,0,0.05)

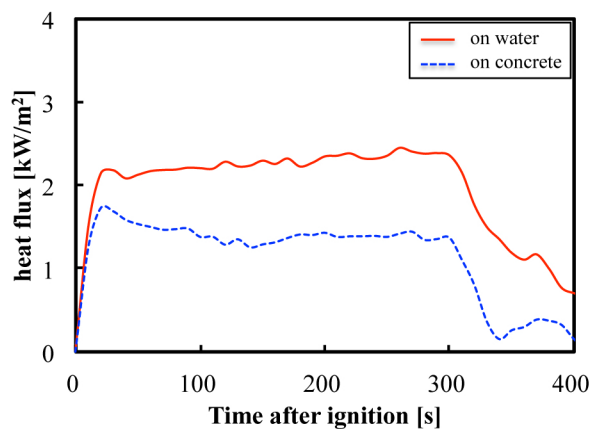


Fig.7 Strength of the heat flux at (x,y,z)=(0.5,0,0.05)

Fig.5 より，コンクリート上での燃焼の方が水上での燃焼に比べて燃焼速度が速いことが分かる。これは，水の比熱がコンクリートに比べて大きく，かつ油膜からコンクリート表面への熱伝達と比べ油膜から水面への熱伝達が大きいため，コンクリート上油膜の温度が上昇しなかったためであると考えられる。これにより油膜の温度上昇が抑制され，結果として燃焼速度に差が生じたと推察される。Fig.6, Fig.7 より，コンクリート上での燃焼に比べて，水上での燃焼によって放射されるふく射熱の値の方が大きい。このことから，油膜の下部に接する物質の物性値は燃焼速度だけでなく，周囲へのふく射熱にも影響を与えることがわかる。火災発生時の防災対策において，周囲へのふく射熱の放射を評価することは非常に重要である。今後は，油膜および水の対流による熱輸送などを考慮することでより現実に近い水面火災の評価を行う。

5 気体拡散の評価手法

石油化学プラントでの危険物漏洩に伴う大気拡散モデルとして，国外においてはブルームモデル，国内においては坂上モデルがよく用いられている。それぞれのモデルの詳細を以下に記す。

5.1 プルームモデル

ブルームモデル¹⁴⁾は，大気拡散濃度の予測のために最も広く使用されており，Fick の 3 次元拡散方程式を解析的に解き，気体が風下に流されつつガウス分布に従った濃度分布を示すモデルであり，式(2)で表される。

$$C = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left\{-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad (2)$$

ここで， C は地点(x, y, z)における拡散濃度， q は発生源の気体発生量(kg/s)， u は風速(m/s)， He は有効煙突高度(m)， σ_y は y 軸方向の拡散幅(m)， σ_z は z 軸方向の拡散幅(m)である。

5.2 坂上の気体拡散モデル

実現象として，拡散係数は地上から上空に向かうにつれて大きくなり，地面に近いところでは鉛直方向の拡散係数は高

さに比例することが知られている。この現象を考慮して解析的に導かれた気体拡散式として坂上のモデル¹⁵⁻¹⁸⁾がある。これは、Fickの3次元拡散方程式を解析的に解いた代入方程式であり、任意の地点(x, y, z)における拡散濃度Cを算出することができる。本式は高圧ガス保安協会によるコンビナート保安・防災技術指針²⁾や、消防庁の石油コンビナートの防災アセスメント指針⁷⁾において貯蔵物の漏洩事故の評価手法として用いられている。連続点源の拡散の概略をFig.8に、連続点源における坂上の拡散式を式(3)に示す。

$$C = \frac{q}{u} \frac{1}{\sqrt{A\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{A}\right) \frac{1}{B} \exp\left(-\frac{h+z}{B}\right) J_0\left(i \frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (3)$$

$$J_0(ix) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \quad (4)$$

ここで、qは発生源の気体発生量(m³/s)、uは風速(m/s)、hは発生源の高さ(m)である。また、式(3)中のJ₀(ix)は式(4)で定義するベッセル関数であり、A、Bは気象条件によるパラメータである。

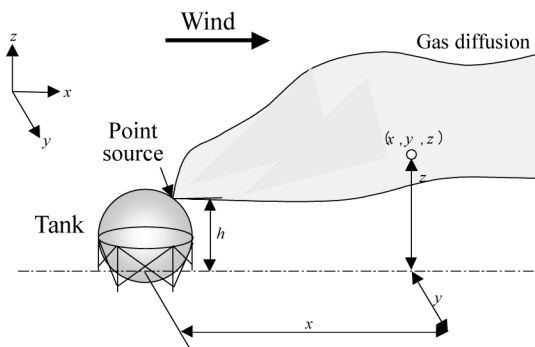


Fig.8 Diffusion of gas in case of point source

6 従来手法の課題

プルームモデルや坂上モデルといった従来の評価手法は簡易化されたモデルに基づく評価法のため、比重等の物質の特性と緩和設備の影響は考慮されていないといった課題が挙げられる。ここでは、任意の物質に対してプルームモデルと坂上モデルを適用し、得られる拡散濃度の結果を比較することで、物質の比重と大気安定度による影響の大きさを考察する。漏洩シナリオは気体が連続点源として流出することを想定し、地表の状態は周囲に障害物のない平地とする。解析条件をTable 1に示す。

Table 1 Analysis Condition

Concentration Measuring Point	(X, 0, 0)
Wind Speed	2.0 m/s
Release Rate	0.1 m ³ /s
Height from ground to Release Point	0.5 m
Air Temperature	20 °C

6.1 比重の影響

物質の比重の影響を考察するために、中立ガスであるメチルアミン、中立ガスより軽いアンモニア、中立ガスより重い塩素が流出するそれぞれの場合を計算した。大気安定度は中立とした。各ガスの比重をTable 2に、得られた拡散濃度の計算結果をFig.9に示す。

Table 2 Gas Density

Ammonia Density	Methylamine	Chlorine
0.771 kg/m ³	1.1 kg/m ³	2.49 kg/m ³

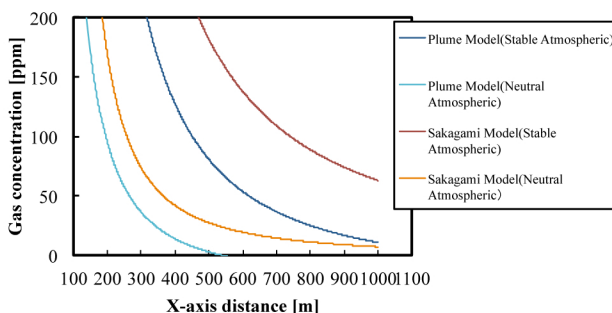


Fig.9 The comparison of Plume and Sakagami Model based on relation between gas concentration and X-axis distance

Fig.9に示すように、中立ガスである場合は坂上モデルとプルームモデルのは一致するが、そうでない場合は大きな差が生じていることがわかる。これは坂上モデルとプルームモデルの発生源の気体発生量の定義の違いが原因である。坂上モデルでは、式(3)に示すように、発生源の気体発生量は体積として求めるため、物質の比重が変化しても、拡散濃度は変化しない。その一方で、プルームモデルでは、式(2)に示すように、発生源の気体発生量は重さとして求めるため、比重が変化すると、拡散濃度も変化すると考えられる。

6.2 大気安定度の影響

大気安定度の影響を考察するために、中立大気と安定大気においてガスが流出するそれぞれの場合を計算した。流出物質をメチルアミンとし、その拡散濃度の計算結果をFig.9に示す。

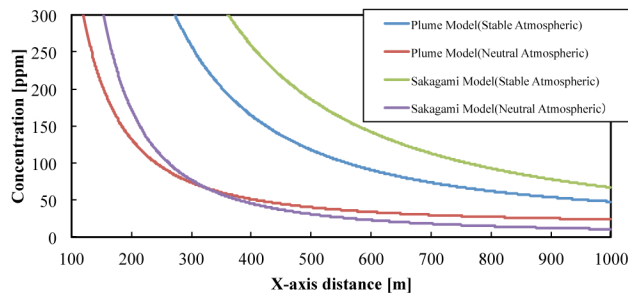


Fig.10 The comparison of Methylamine concentration based on relation between gas concentration and X-axis distance

Fig.9に示すように、いずれのモデルにおいても安定大気中の拡散濃度は中立大気中のそれより大きくなる。また、ブルームモデルと坂上モデルの同条件の結果をそれぞれ比較すると、計算結果に差が生じている。この結果から、大気安定度の影響が確認されたため、陸上の大気状態と異なる海上気体拡散の評価においては大気安定度を考慮する必要がある。

7 流体解析ソフトによる減災設備の影響評価

大気拡散を扱うソフトウェアは数多く存在するが、多く使われるソフトウェアの例として、アメリカ EPA の ALOHA, SAFER SYSTEM 社の TRACE や DNV Technica 社の PHA-ST などが挙げられる。しかしながら、これらのソフトウェアでは、拡散濃度の評価手法にブルームモデルなどを使用しており、減災設備の影響が考慮されていない。そこで、本研究では、汎用流体力学解析ソフトウェアである ANSYS-CFX を用いて解析を行い、減災設備の効果を考察する。

7.1 解析モデル

空気雰囲気下において、ある箇所からアンモニアが連続点源として流出することを想定する。また、流出源から風下方向 2.5m に多数のノズルにより構成されたウォーターカーテンを設置して、アンモニアを遮断する。ノズル間の距離を 20cm、水量を 15 l/s とする。その他の解析条件は Table 3 に示している。なお、水によるガス吸収は考慮せず、水流による流れの効果のみを評価する。解析モデルの概要図を Fig.11 に示す。

Table 3 Analysis Condition for ANSYS

Concentration Measuring Point	(X, 0, 0)
Wind Speed	2.0m/s
Release Rate	100 m ³ /s
Height from ground to Release Point	0.5 m
Air Temperature	20 °C

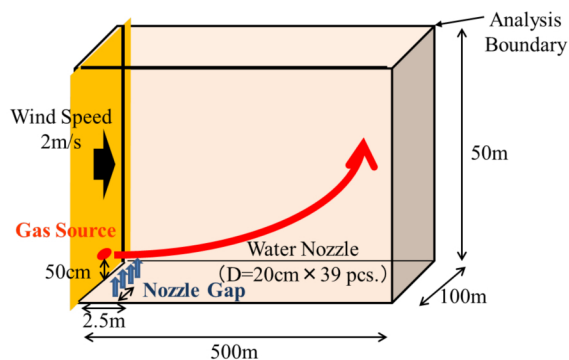


Fig.11 Model Image

ウォーターカーテンの影響を評価するために、ノズルがある場合とない場合の解析結果を比較した。解析により得られたモル分立分布の結果を Fig.12, 13 にそれぞれ示す。

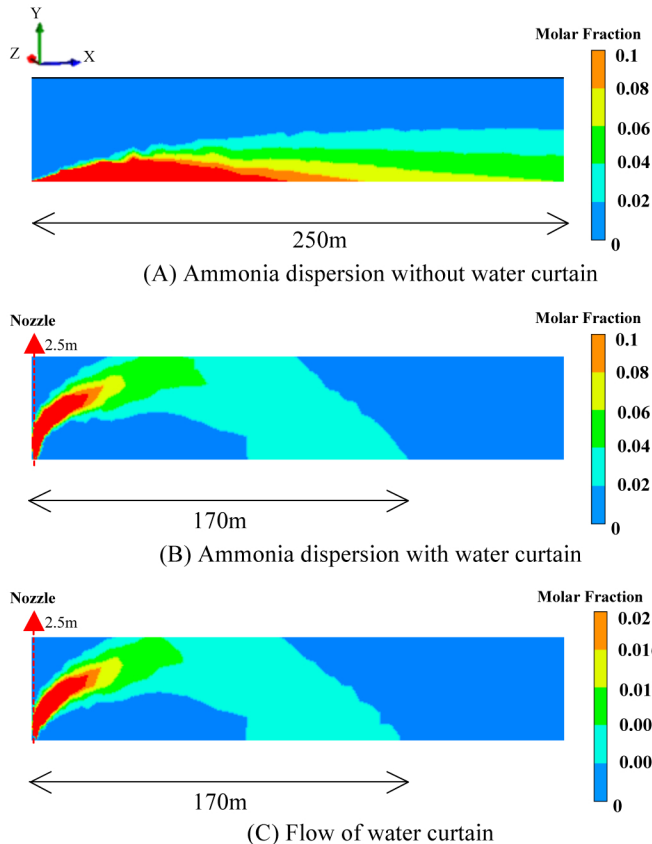


Fig.12 Side view of molar fraction distribution

Fig.12 より、ウォーターカーテンの影響により、アンモニアが水の流れにより巻き込まれ、拡散範囲が 170m にまで短くなるのがわかる。次に、Fig.12 に地面におけるウォーターカーテンがある場合とない場合の拡散濃度の遷移を示す。

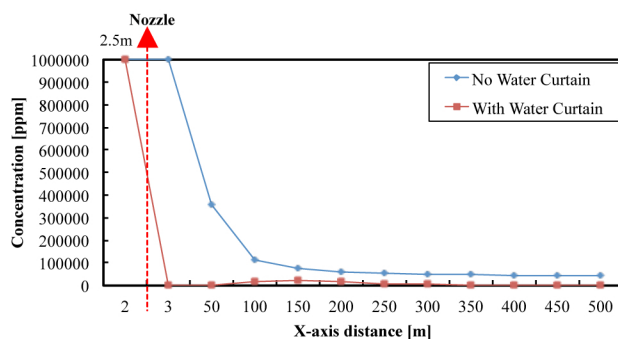


Fig.13 Concentration comparison with water curtain setting case

Fig.13 では、ガスがウォーターカーテンを通過した後、拡散濃度が大幅に低下することが示されている。また、Fig.13 の拡大図である Fig.14 では、ウォーターカーテンがある場合は 150m 付近で拡散濃度が上昇する挙動が確認できる。これは、ウォーターカーテンにより舞い上げられた気体が降下するためと考えられる。

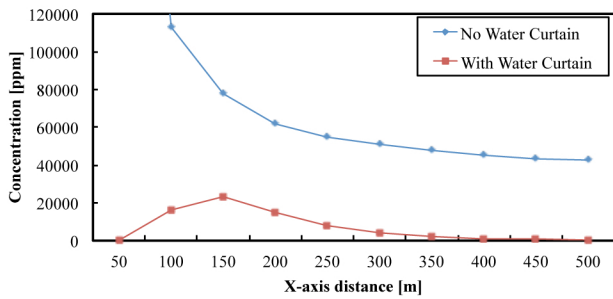


Fig.14 Concentration comparison with water curtain setting case

また、ウォーターカーテンの効果を考察するために、ウォーターカーテンがある場合とない場合との拡散濃度を比較し、拡散濃度の低下割合を評価した。その結果を Fig.15 に示す。

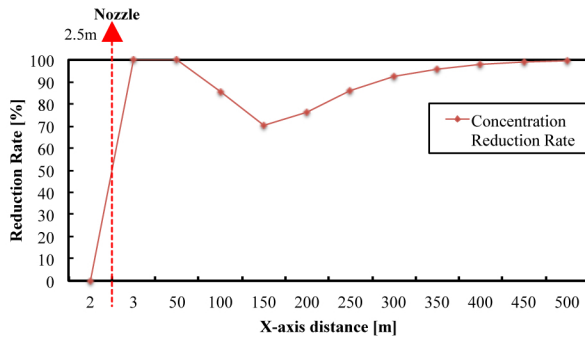


Fig.15 Gas concentration reduced by water curtain

Fig.15 より、ウォーターカーテンを超えた 3.0m 付近では低下割合が 100% となり、拡散濃度の大幅な低下が確認できる。その後、50m から 150m 間では低下割合が減少し、拡散濃度は上昇するが、それ以降は低下割合が上昇し、拡散濃度が再び大幅に低下することが確認できる。流出源からの距離 50m から 150m 間における低下割合が減少した理由として、Fig.12(B), 12(C) から確認できるとおり、水の流れに巻き込まれ、上方に拡散したガスが降下する領域であるためと考えられる。本結果より、ウォーターカーテンによる減災効果が確認できる。

8 結 言

本研究では、従来の災害影響評価手法に代わる防災減災対策ガイドラインの構築を目的として、火災解析コード FDS を用いた水面火災の燃焼挙動の評価を試み、陸上火災との違いを考察した。それに加えて、坂上モデルとブルームモデルによる拡散濃度の結果を比較し、従来の気体拡散評価手法の課題を確認した。また、汎用流体力学解析ソフトウェア ANSYS-CFX を用いて減災設備による気体拡散の減災効果を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 水面火災は陸上火災と比べ、燃焼速度や周囲へのふく射熱が異なり、火災発生時の防災対策の観点から、今後の検討課題であると考えられる。
- 2) 気体拡散の評価において、ブルームモデルと坂上モデルの拡散濃度の結果をそれぞれ比較すると、中立性ガスの場合では結果がほぼ一致するが、中立性ガスでない場合は気体の比

重の違いにより、大きな差が生じた。

- 3) ブルームモデルと坂上モデルによる気体拡散評価において、大気安定度が変化すると、拡散濃度の結果に差が生じ、大気安定度の影響が確認された。この結果から、陸上の大気状態と異なる海上の気体拡散の評価においては大気安定度を考慮する必要があると考えられる。
- 4) アンモニアガスの拡散に対するウォーターカーテンの減災効果を拡散濃度の低下割合により評価したところ、ウォーターカーテンを超えた 3.0m 付近では低下割合が 100% に達し、ウォーターカーテンの減災効果が確認できた。

参考文献

- 1) 総務省消防庁，“消防白書”，2013
- 2) 高圧ガス保安協会，“コンビナート保安・防災技術指針”，KHK E007-1974，1974
- 3) 消防庁，“消防白書（平成 19 年度版）特集 消防組織の体制強化-国民の安心・安全を確保する消防防災体制の確立，ぎょうせい，2007
- 4) 廣井悠，山田常圭，坂本憲昭，“東日本大震災における津波火災の概要と特徴”，地域安全学会便覧集 No.29，2011，
- 5) 岩渕洋子，今村文彦，越村俊一，“1964 年新潟地震津波にみる港湾域での複合災害の実態と今後の課題”，海岸工学論文集，第 53 巻，2 号，pp.1326-1330，2006
- 6) 湯本太郎，“石油タンク火災における炎からのふく射”，消防研究所報告，33 号，pp.23-30，1971
- 7) 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
- 8) TNO，Yellow-Book，“Method for the calculation of physical effects resulting from releases of hazardous materials”，Committee for the Prevention of Disasters，CPR-14E，the Hague，1997
- 9) 吉田美樹，河村祐治，瀬瀬満“モンテカルロ法によるタンク火災における熱放射到達率分析の解析”，安全工学会，vol.34，No2，pp.94-101，1995
- 10) 椿野隆宣，倉敷哲生，生和光明，石丸裕，花木宏修，向山和孝，“大型タンク火災のふく射熱評価手法の構築”，安全工学，Vol.54，No.2，pp.131-138，2015
- 11) 倉敷哲生，上田裕之，山野井喜記，座古勝，“モンテカルロ法によるタンク全面火災ふく射シミュレーションシステムの開発”，安全工学，Vol.49，No.1，pp.20-27，2010
- 12) 小末祐輝，倉敷哲生，座古勝，生和光朗，“モンテカルロ法によるタンク全面火災ふく射熱シミュレーションの開発”，安全工学シンポジウム，2010
- 13) 新井雅隆，Kozo Saito，Robert A. Altenkirch，“水面に浮遊した燃料の液面燃焼（第 2 報 水の沸騰の開始）”，日本機械学会論文集（B 編），57 巻，537 号，pp.1893-1898，1991
- 14) 岡本眞一，“大気環境予測講義”，ぎょうせい，2001
- 15) Jiro Sakagami，“On the Turbulent Diffusion in the Atmosphere near the Ground”，Natural Science Report of the Ochanomizu University，Vol. 5，No.1，pp.79-91，1954
- 16) Jiro Sakagami，“On the Atmospheric Diffusion of Gas on Aerosol near the Ground”，Natural Science Report of the Ochanomizu University，Vol.7，No.1，pp.25-61，1956

- 17) Jiro Sakagami, "On the analyses of the data of the Tokai experiments", Natural Science Report of Ochanomizu University, Vol.12, No.1, pp.7-27, 1961
- 18) Jiro Sakagami and Makiko Kato, "Diffusion and Vapor-Rise of Methane Vapor from Areal Source in Air Stream", Natural Science Report of the Ochanomizu University, Vol.19, No.2, pp.59-66, 1968