

研究論文

爆発による微粒子の飛散過程に関する解析

三浦啓晶^{*†}, 武田仁己^{*}^{*}防衛省技術研究本部 〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1

Phone: 03-5721-7005 (ext: 6517)

[†]Corresponding author: hmiura@cstrdi.mod.go.jp

2013 年 11 月 14 日 受付 2014 年 8 月 7 日 受理

要旨

本研究では、事故等で爆発直後にCBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosives) 物質を想定した粒状物質が飛散し、その後に物質が大気中を拡散する過程に対して非圧縮性流体力学に基づく拡散シミュレーションを実行する前段階として、初期の飛散粒子分布や気流物理量分布の条件を設定するための指針を得ることを目的として圧縮性流体力学シミュレーション及び粒子の飛散予測を実施した。単純な形状の建物内での爆発を想定し、建物壁の有無が粒子の飛散挙動に与える影響について数値解析結果から検討を行った。

1. 緒論

2011 年 3 月に発生した福島第 1 原子力発電所における原子力緊急事態では初期に水素爆発が発生し、多量の放射性物質が周囲に飛散した。その後、放射性物質は気流により大気中を広域に渡って拡散した。こうした粒状物質が大気中を拡散する現象を扱ったシミュレーションコードとしてSPEEDI¹⁾が有名である。ただし、今回の原発事故のような爆発現象による粒子の初期飛散過程は、非圧縮性流体力学モデルの数値シミュレーションでは通常考慮されない。しかし、初期爆発が放射性物質及び放射能汚染された粒状物質の大気拡散過程に与えた影響は重大であったと考えられ、拡散範囲と脅威の予測にはこうしたシミュレーション手法に加えて、別途、爆発現象を再現する圧縮性流体力学モデルを考慮する必要がある。上記原発における水素爆発の現象を詳細にシミュレートした例としてIshikawaらの研究²⁾が挙げられる。この研究では着火源位置や水素濃度条件の影響検討及び燃焼圧力による天井の開閉過程と火炎伝播の挙動に注目して施設内部及びその近傍における圧縮性流体力学の現象を扱っており、施設内部の汚染物質を含む燃焼ガスの長期的な外部への拡散過程やその範囲を見積もったものではない。

爆発によるCBRNE物質からなる粒子の拡散過程において、気流に圧縮性を考慮すべき時間スパン(初期拡散過程の時間スケール)は全体から見ると極めて短い、そこで予測される物質の拡散挙動は、その後の低速気流を非圧縮性流体モデルで解析するための初期値を決定し、拡散物質の軌跡に大きな影響を与える。このため、気流の圧縮性を考慮した初期の拡散予測結果を非圧縮性流体モデルによる大気拡散予測に反映させる必要がある。ここで、初期拡散過程は非定常性が強く、また、気流速度がCBRNE粒子

の速度に比べてはるかに大きい、ためCBRNE粒子は即座にこれに追従できないが、一方で後の低速拡散過程においてCBRNE粒子は気流に追従すると考えることができる。このように、爆発による初期拡散過程において精度良くCBRNE粒子の飛散挙動を見積もるためには、気流とCBRNE粒子の速度差を考慮して解析する必要がある。

汚染物質の大気拡散過程を精度良く予測する技術の開発が防災や都市及び環境流体の分野で進められている一方で、爆発により建物内部の微粒子が外部へ飛散する際にどの程度の飛散範囲になるかといった状況を見積もるといった研究はほとんど知られていない。爆発後に汚染物質が大気中を長時間浮遊して他の地域においてどの程度影響を及ぼすか精度良く見積もるためには、大気拡散予測をする際の初期条件設定の指針を立てることが必要とされる。そこで本研究では、大気拡散予測をする際に必要となる初期条件設定のための指針を提案することを目的とする。本報告では爆発現象による粒状物質の初期飛散に着目して圧縮性流体力学モデルによる数値解析を行い、定性的に流れ場を評価してその後の大気拡散予測計算に反映すべき設定条件に関して検討を行う。

2. 解析対象及び解析手法

解析対象とする単純建物モデルFigure 1 に示す。本研究では解析を単純化するため二次元軸対称系を仮定し、円筒形状建物から粒状物質が放出される現象を想定した。建物のサイズは福島第 1 原子力発電所の建屋を想定したものとし、建物は爆発圧力により天井が抜けて側壁が残る条件及び爆発により壁全てが消失する条件を想定する。建物の内径を 20m、高さを 40m、容積を約 1257m³ とする。

なお、建物側壁及び地面は剛体とみなす。流体解析には

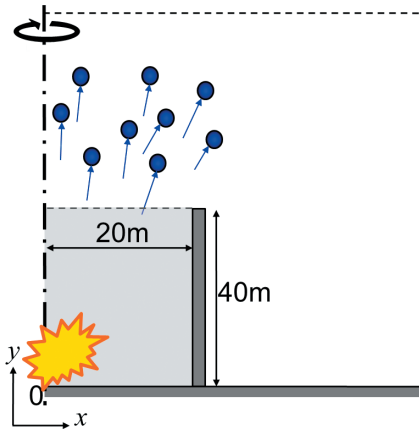
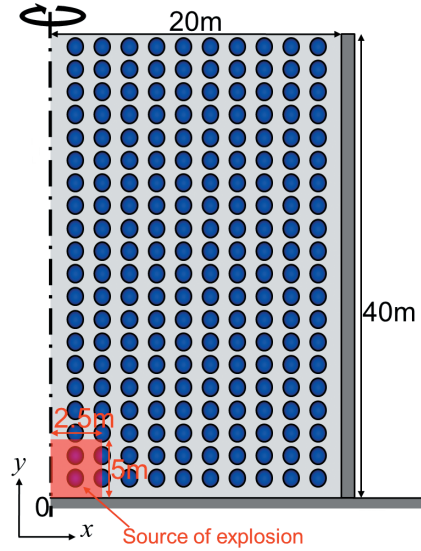


Figure 1 Simulation model.

(Left : Explosion of 1t TNT inside the building and blown particles,
Right : Initial location of the particles and high energy source.)



二次元軸対称非粘性圧縮性流体の支配方程式と理想気体の状態方程式を用いた。解析領域は637m(高さ)×237m(半径)とした。福島第1原子力発電所における水素爆発事故の規模を想定し、建物内部における爆発エネルギーはTNT 1t相当とする。TNT爆轟ガスの比内部エネルギーを4.2MJ/kgとし、これを高圧の圧縮空気置き換えて爆発源(原点を中心とする爆発を想定)を模擬した^{3), 4)}。

本解析では流体(気相)の支配方程式における対流項の離散化にMUSCL法(Monotone Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)によって3次精度化されたSHUS(Simple High resolution Upwind Scheme)⁵⁾を用い、時間積分には2段階のRunge-Kutta法を用いた。半球状爆風の実験におけるスケール化距離と爆風圧の関係を表すKingery式⁶⁾及び本計算手法による結果はFigure 2に示すように良い一致を示し、計算手法の妥当性が確認されている。また、粒子の追跡にはLagrangian表記による運動方程式を用いた。粒子濃度が十分小さい現象を想定するため、粒子は気流から影響を受けるが気流は粒子から影響を受けないという仮定に基づくone-way法を採用し、粒子に働く外力として重力と気体から受ける空気抵抗(相間抗力)を考慮した。粒状物質は相変化や変形を起こさないとすると、球形を仮定した各粒子の運動方程式は以下のようになる。

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F} + \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) m_p \mathbf{g} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \frac{1}{2} C_D \rho (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p| A \\ &= \frac{3}{4} C_D m_p \frac{\rho}{\rho_p} \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{D_p} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \\ m_p &= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 \\ A &= \pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

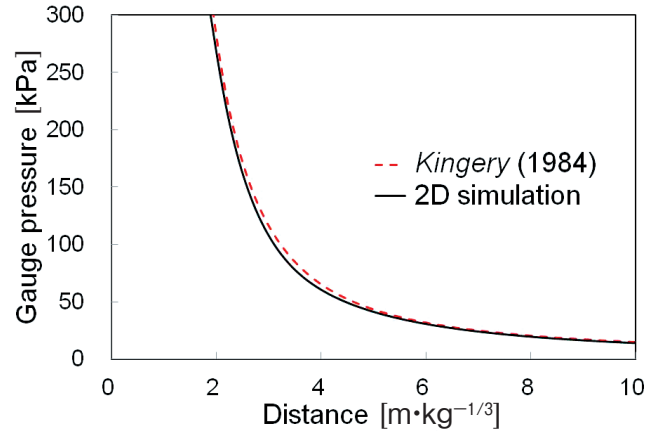


Figure 2 Comparison of peak overpressure of blast wave under hemisphere explosion.

ここで粒子の直径 D_p 、密度 ρ_p 、質量 m_p 、速度ベクトル $\mathbf{u}_p$ 、流体の密度 ρ 、流速ベクトル $\mathbf{u}$ 、投影面積 A 、重力加速度ベクトル $\mathbf{g}$ とする。ゆえに、粒子の加速度は次の式のようにになる。

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\rho}{\rho_p} \left\{ \frac{3}{4} C_D \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{D_p} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \mathbf{g} \right\} - \mathbf{g} \quad (2)$$

時間積分には2段階のRunge-Kutta法を用いた。粒子に働く抗力係数 C_D として過去の研究³⁾から $C_D = 0.68$ を用いた。これは、過去の研究³⁾において衝撃波と微粒子の干渉現象をシミュレートした際、ガスから粒子へのエネルギー輸送過程に関して実験結果を最もよく再現していた抗力係数が $C_D = 0.68$ であったことによる。格子幅は爆源付近において $\Delta x = 0.1\text{m}$ (爆薬量 $W = 1000\text{kg}$ のとき格子幅の換算距離は $\Delta z = \Delta x / W^{1/3} = 0.01\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)⁴⁾ とした。粒子は初期において建物内部に200個(20×10個)を一様に配置した。なお、地面と粒子との間に働く摩擦力は無視し、地面境界($y = 0$)をスリップ条件とした。

検討する解析条件として、粒子の直径 D_p 、粒子の物質密度 ρ_p 、建物側壁の影響を考える。ここでは粒子直径を

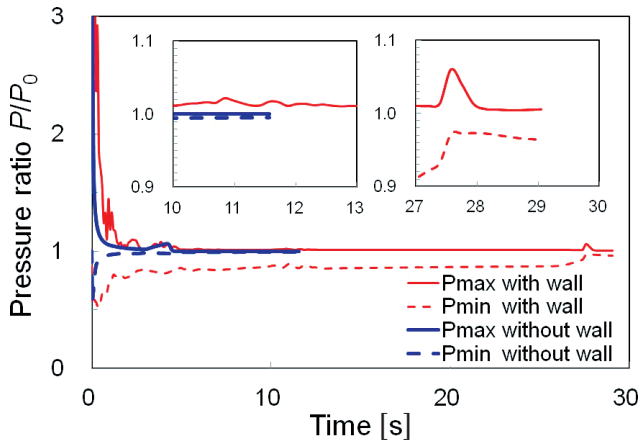


Figure 3 Time histories of the maximum pressure $P_{\max}$ and the minimum pressure $P_{\min}$ in the simulation area (P_0 is the atmospheric pressure).

$1\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ の 3 種類, 粒子の物質密度を $2000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $200\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $20\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の 3 種類計算し比較を行った。本シミュレーション上では Figure 3 に示すように気相の流れ場に関して, 側壁が有る場合は約 29s 経過後に, 側壁が無い場合は約 11s 経過後に圧力分布がほぼ一様 (大気圧から $\pm 5\%$ 以内の分布) に戻っており, 流速分布も非圧縮性流体と見なせる速度 (マッハ数が 0.3) を下回った。このため, ここまでを圧縮性流体の考慮を必要とする気相の流れ場の情報として, 拡散する粒子の運動計算に時間発展的に用い, これ以降は気相計算における最終時間の気相物理量分布を用いた。

3. 解析結果及び考察

以下では, 数値計算によって得られた, 飛散する粒子群の最大高度及び群中心高さ (体積平均の高度), 水平方向到達距離に注目し, 飛散範囲に関する検討を行った。

3.1 側壁が有る場合の解析結果について

はじめに, Figure 1 のような側壁が有る場合に関して, 粒子密度 ρ_p が $2000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ のときに粒径 D_p のみを変化させた粒子の最大到達高度 (Top) 及び粒子群中心高度 (Center) の時間履歴を Figure 4 に示す。爆発直後における粒子最大高度は時間に対し増加の傾向を示し, この過程は粒径に依らず同等である。その後, 粒子は最大高度まで上昇しその高度で滞空する。最大高度は粒径条件に依存し, 粒径が $100\mu\text{m}$ のときに到達高度が最も高くなった。これは次の理由による。爆発後, 建物内部から放出された粒子群は噴流により高度を上げながら建物中心軸より外側に向かって飛散するが, 粒子質量が最も大きい $100\mu\text{m}$ の場合は一部の粒子が中心軸上に留まり噴流によって上昇が維持され到達高度が最も高くなった。その後, 噴流が弱まると重力によって粒子は下降し, 粒子の最大高度は他の粒径条件よりも低くなる。一方, 粒子群の中心高さの推移を比較すると, 粒径が小さいほど高くなっている。(2)式より粒径が小さい程気流から受ける加速力が大きくなるため, 平均的に見ると粒径が小さい場合に粒子群が高く上昇したといえる。Figure 5 に粒径 D_p が $10\mu\text{m}$ のときに粒子密度 ρ_p

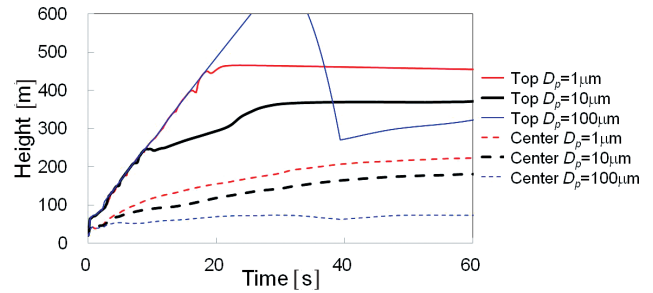


Figure 4 The maximum altitude of the particles and the altitude of the particles center by particle diameter ($\rho_p = 2000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

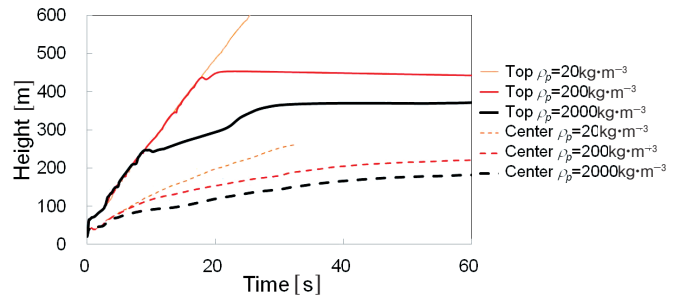


Figure 5 The maximum altitude of the particles and the altitude of the particles center by particle density ($D_p = 10\mu\text{m}$).

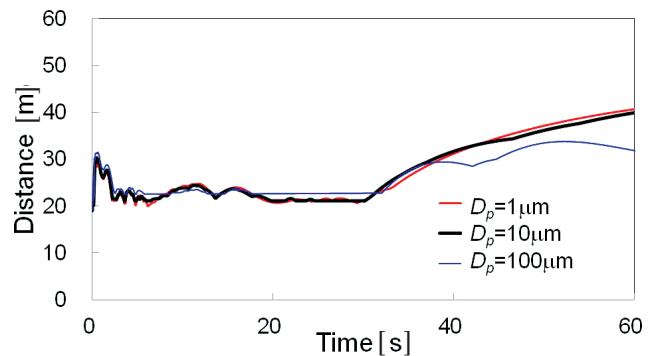


Figure 6 The maximum distance by particle diameter ($\rho_p = 2000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

のみを変化させた粒子の最大到達高度及び粒子群中心高度の時間履歴を示す。密度を小さくしたときは到達高度が高くなるが, これは粒子が受ける重力が小さくなったためである。粒子群の中心高さも同様に, 密度が小さいほど高くなる。Figure 6 は粒径 D_p のみを変化させたときの水平方向の粒子飛散範囲の時間履歴である。 $t = 60\text{s}$ までに水平方向は最大 40m 程度しか飛散しておらず, これ以降も大きく飛散範囲が増大することは考えにくい。よって, 初期の時点で粒子群は鉛直方向に比べて水平方向にはほとんど飛散しないことが分かる。すなわち, 開口部における爆発時の噴流の影響を強く受け, 粒子群は主に鉛直上向きに飛散した。初期において開口部付近で粒子が不規則な挙動を示している。 $t = 30\text{s}$ 付近から水平方向の飛散範囲が徐々に増加するのは, 天井から噴出した爆風の後流が噴出口上空で渦輪を形成するが, 粒子がこの領域に到達すると渦輪の流れに乗って滞空し, 徐々に外側に向かって拡散するためである。粒子直径による差異はほとんど見られない。Figure 7 は粒子密度 ρ_p のみを変化させたときの水平方向

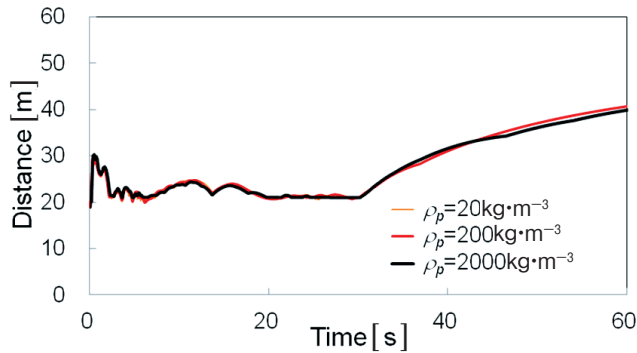


Figure 7 The maximum distance by particle density ($D_p = 10\mu\text{m}$).

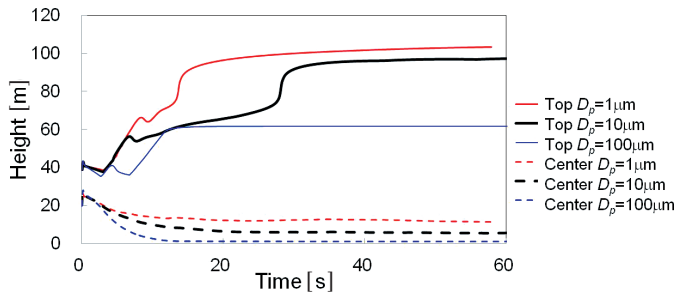


Figure 8 The maximum altitude of the particles and the altitude of the particles center by particle diameter in the case without side wall ($\rho_p = 2000\text{kg/m}^3$).

の粒子飛散範囲の時間履歴である。水平方向に関しては密度による差異は小さい。ゆえに、側壁が存在する場合の水平方向への飛散距離は、粒子直径および密度条件から受ける影響は小さいといえる。

3.2 側壁が無い場合の解析結果について

次に、Figure 1 の側壁が無い場合に関して計算を行った。粒子密度 $\rho_p = 2000\text{kg/m}^3$ として粒径 D_p のみを変化させた粒子の最大到達高度及び粒子群中心高度の時間履歴をFigure 8 に示す。粒子直径が小さいほど到達高度が大きいことが分かる。ただし側壁が無い場合、半球状の爆風波面が地上で等方的に広がるため、側壁がある場合と比べて鉛直方向への気流速度誘起が弱くなる。この結果、粒子の到達高度及び粒子群の中心高さは側壁がある場合と比べて低くなる。本条件では高度 100m 付近までに気流の速度が急激に減衰するために、粒子がそれ以上上昇することは見られない。Figure 9 に側壁が無い場合に $D_p = 10\mu\text{m}$ として粒子密度 ρ_p のみを変化させた粒子の最大到達高度及び粒子群中心高度の時間履歴を示す。粒子密度を小さくしても到達高度はほとんど変わらない。以上のように側壁の有無で粒子の挙動が異なるのは、爆発後の流れ場の差異が粒子の加速に大きな影響を与えているためである。なお、Figure 10, 11 に示すように、側壁が無い場合における水平方向の粒子拡散範囲の履歴は、鉛直方向とほぼ同様の結果となった。 $t = 5\text{s}$ 付近で水平方向の飛散範囲が増加するのは、次の理由による。爆発後に急激な膨張のため爆源では負圧が生じ、外側へ向かって流れていた気体がその中心へ引き戻される。この過程により爆源付近の圧力は大気圧に戻る。この際、爆源上空では初期の強い上昇流に続いて

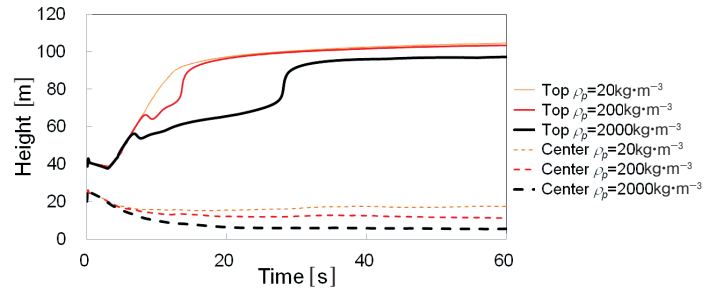


Figure 9 The maximum altitude of the particles and the altitude of the particles center by particle density in the case without side wall ($D_p = 10\mu\text{m}$).

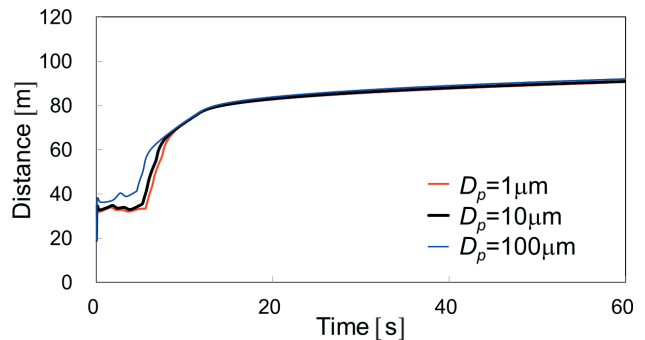


Figure 10 The maximum distance by particle diameter in the case without side wall ($\rho_p = 2000\text{kg/m}^3$).

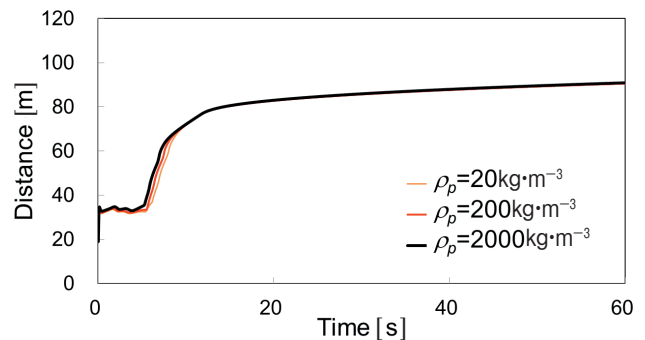


Figure 11 The maximum distance by particle density in the case without side wall ($D_p = 10\mu\text{m}$).

下降流が発生し、上空にあった粒子が地表面に向かって吹き流されて、地表面に到達すると爆源から外側へ流される。

3.3 考察

本解析より、障害物がなく粒子濃度が小さい場合には、粒径及び密度条件に依らず爆発直後の流れ場の状況が把握できれば、初期における粒子群の位置はおおよそ予想できると考えられる。一方で、側壁の存在によって粒子の最大到達高度が、無い場合に比べ 5 倍程度増加する結果が得られた。粒子群の到達高度が増すとより広範囲への長期的な大気拡散が想定されるため、粒子飛散の到達高度を下げ、危険物質の広域拡散を抑制するための対策が望まれる。解析対象のような施設の爆発による粒状物質の大気拡散を考える場合、爆発後の建物形状を考慮した流れ場と粒子飛散分布を見積ることが、その後の大気拡散予測時の初期条件を設定する上で必要になるといえる。

本計算は圧縮性流体モデルを用いて圧力分布がほぼ一様になるまでの過程をシミュレートしたものである。ただし、

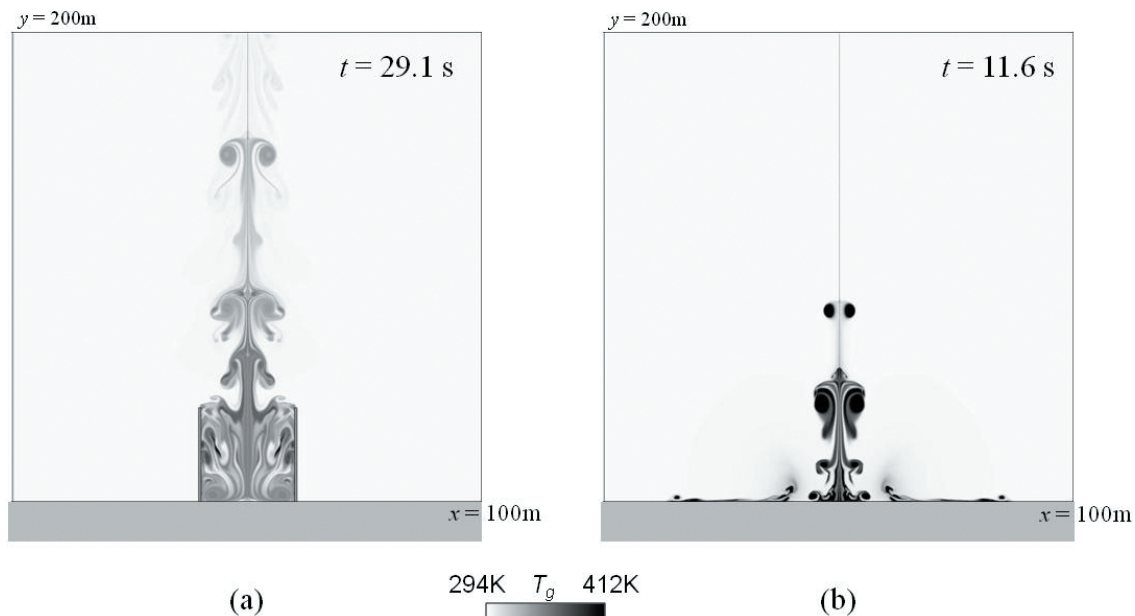


Figure12 Gas temperature distribution when the gas pressure gets back to the atmospheric pressure.
(a): With side wall, (b): Without side wall.

Figure12に示すように、この時刻において爆源付近には爆発直後に高温であったガスが依然として滞留しているため、気体温度分布及び密度分布に関しては一様になっていない。本計算では実際の爆発物の爆轟ガスを空気に置き換えて考えているため、特定の物質の爆発後における温度分布及び密度分布を定量的に模擬しているわけではないが、一般的な爆発物の場合の爆源付近の状態は定性的に模擬されているといえる。この高温領域におけるガスが後に浮力によって上昇気流を生じ、依然として浮遊している粒状物質の運動に影響を与えると考えられる。そのため、次の解析フェイズとなる非圧縮性流体モデルによる大気拡散シミュレーションの初期条件において、この高温領域を考慮し反映させる必要があるといえる。

今後の研究課題として、多様な粒子条件に対する抗力モデル（抗力係数等）の妥当性検証を非定常流体現象の実験等を通して行っていく必要がある。

4. 結論

本報告ではCBRNE物質等の粒状汚染物質に対する、爆発後の大気拡散予測を実施する際に必要となる初期条件設定を与えるため、爆発現象を扱う圧縮性流体力学解析及び粒子飛散挙動計算を行い、計算結果より以下の指針を得た。爆発直後はガスの流速が大きく粒子に働く加速力が大きいいため、相対的に重力の影響は小さく、粒子の飛散方向及び到達範囲は気流場に強く依存する。このことから爆発直後における流れ場の時間変化を十分考慮した粒子飛散範囲を

見積もり、大気拡散予測計算の初期条件を設定する必要があるといえる。爆源付近に障害物がない場合における粒子の拡散範囲に粒径及び密度条件が与える影響は小さいが、建物壁面が存在する場合、爆風で誘起される流れ場が大きく変化するため、地形及び建物条件が粒子の到達高度に及ぼす影響は重大であることがわかった。また、爆源付近に滞留する高温ガスは後に上昇気流を生む要因となるため、これを大気拡散予測計算の初期条件で考慮する必要がある。

参考文献

- 1) H. Nagai et al. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 41, 777–785 (1999), (in Jananese.)
- 2) D. Ishikawa, A. Matsuo, D. Makarov, and V. Molkov, 9th International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (2012)
- 3) H. Miura and A. Matsuo. H22 Symposium on Shock Wave in Japan 87–90 (2011), (in Jananese.)
- 4) H. Miura et al., Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.26, Issue2, p.329–337 (2013)
- 5) E. Shima and K. Kitamura, 19th AIAA Computational Fluid Dynamics, AIAA Paper 2009–3544 (2009)
- 6) C. N. Kingery and G. Bulmash, “Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst,” ARBRL–TR–02555, Ballistics Research Laboratory (1984)

Numerical analysis on process of particulates dispersion by explosion

Hiroaki Miura^{*†} and Masaki Takeda^{*}

The dispersion processes of particles such as CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosives) materials blown by the explosion on the ground are simulated using the compressible fluid dynamics simulation code. These simulations provide the initial condition of particles and gas flow properties for the incompressible fluid dynamics simulation to predict the long term dispersion process of the particles. The effect of the side walls on the particles dispersion process is estimated in the simulations of explosion inside the building with simplified wall.

Keywords : CBRNE, particulates, CFD

^{*}Technical Research & Development Institute, Ministry of Defense,
2-2-1 Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo, 153-8630, JAPAN
Phone : +81-3-5721-7005 (ext : 6517)

[†]Corresponding author : hmiura@cs.trdi.mod.go.jp