

326 火山噴火による地表面現象の数値計算

Numerical Simulations of Volcanic Eruption Phenomena on the Ground

○正 齋藤務 (室蘭工大)

Tsutomu SAITO, Dept. of Mechanical Systems Eng., Muroran Inst. Tech., 27-1 Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585 JAPAN

Numerical simulations of blast wave generation and its propagation over a real terrain have been carried out. Based on the numerical results, more specifically the maximum overpressure distribution on the ground surface, a hazard map of blast wave damages was created for a fictitious eruption of Mt. Fuji. It demonstrates the usefulness of numerical simulations for establishing safety measures against volcanic hazards. Numerical simulations for investigating the generation of pyroclastic surge are also carried out.

Key Words : Shock Wave, Pyroclastic surge, CFD

1. はじめに

火山予知連絡会は平成 15 年にそれまで 86 とされていた日本の活動的火山を、その定義を見直すことで 108 とした。このうち 25 は気象庁の常時観測対象火山に指定されている。日本では住民の生活圏がこれらの潜在的危険地域の間近にまで迫っているという事情があり、ひとたび噴火が起こると非常に大きな災害を被ることになる。被害規模の点では 1991 年の雲仙普賢岳の噴火が最近では最も大きな被害をもたらしたものであるが、2000 年の三宅島の噴火も住民に長期にわたる避難生活を強い、未だに多量の火山性有毒ガスを噴出している。火山噴火による災害は環境、自然条件、また噴火の形態により様々である。

本報告では、爆発的な噴火によって比較的短時間に大きなエネルギー解放が起きることによって引き起こされる火山現象のうち、地上で観察される空気力学的な現象の解明に数値計算が有用であり、防災にも役立つ情報を提供することを、これまでに行ってきた爆風と火砕サージの 2 つの例について紹介する。

2. 爆風の発生と伝播

爆発的火山噴火によって発生する爆風の発生と伝播の様子を数値計算する。また、実際の地形における災害の分布予測図 (ハザードマップ) を数値計算結果から作成する方法⁽¹⁾を示す。

2-1 数値計算法

本研究では粘性および熱伝導の影響は無視し、非定常 3 次元圧縮性オイラー方程式を基礎式として、完全気体の状態方程式とともに数値模擬を行った。有限体積法を用い Weighted Average Flux (WAF) 法⁽²⁾と HLLC 近似リーマン解法⁽³⁾によって数値流束を計算した。数値格子については国土地理院が発行している数値標高データを用いて地表面の格子を作成し、垂直方向に格子面を積み重ねて 3 次元格子を構築する。

2-2 噴火モデル

これまでに、火口に高温高压領域を置いて初期条件とする高压容器モデルや、火口部に垂直な火道を模擬してその底部に高压部を置き初期条件とする衝撃波管モデル、火口部に垂直速度成分をもつ噴流を置くジェットモデルなどの計算を行い、それぞれのモデルの特徴を調べ、解放されるエネルギーが同じであれば、地表面での爆風圧は衝撃波管モデルでは高压容器モデルの 1/10 程度になることなどを明らかにしてきた⁽⁴⁾。

2-3 数値計算結果

図 1a は、2500 気圧、470K⁽⁵⁾、⁽⁶⁾の空気を $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の高压容器に充填して火口部におく噴火モデルによって計算した、噴火後 7.5 秒の地表の圧力分布を富士山火口週辺を例に示している。火口周辺 5 km 四方の表面計算格子を解像度 50m で作成し、高度 10km までに 80 点の格子を用いたので、全体の格子点数は $100 \times 100 \times 80$ である。

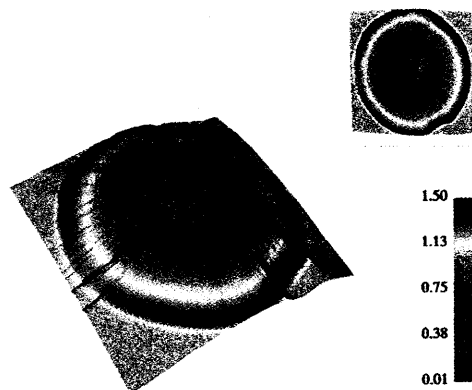


Fig. 1a Overpressure distribution

また図1bは、この数値計算により得られた地表での瞬間最大圧力から爆風災害の程度を分類した⁽⁷⁾災害予測分布図を示す。

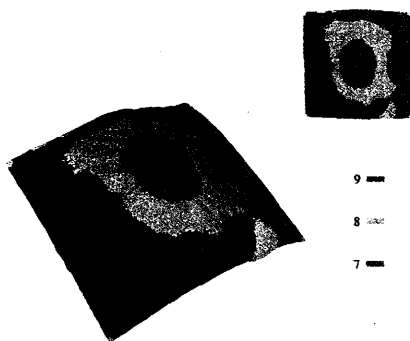


Fig. 1b Hazard map created from maximum overpressure on the ground surface

この例では、地形が円錐形に近い特徴を持っているにもかかわらず、局所的な地形の影響をうけ災害分布の様子は極めて非対称なものとなっていることが分かる。ここでは噴火エネルギーとしてかなり大きな値を用いているが、例えば図中の災害指数8と示された領域は、車両や家屋があれば完全に破壊されてしまう災害程度の範囲を示している。

3. 火砕サージの発生と伝播

多様な火山噴火災害において上述の爆風災害よりも火砕流や火砕サージの方が圧倒的に大きな被害をもたらす事は、歴史上の記録や、また最近では1991年の雲仙普賢岳の例をみても明らかである。火砕サージは、火山斜面に沿う高温の火山礫や火山灰を主体とする高速流れで、火砕流に比べると密度がはるかに小さいため、これを高密度の気体として取り扱うことで数値模擬できると考えることができる。

3-1 基礎方程式

非粘性、非熱伝導かつ密度 ρ_1 および ρ_2 の2種類の完全気体の混合気の密度を $\rho (= \rho_1 + \rho_2)$ として(1)式の質量、運動量、エネルギーに関する積分形保存則を基礎方程式とする。

$$\int_V \mathbf{Q} dv \Big|_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \oint_S (\mathbf{F}_x n_x + \mathbf{F}_y n_y + \mathbf{F}_z n_z) ds dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_V \mathbf{H} dv dt, \quad (1)$$

ここで、 S 、 V は検査体積の表面および体積、 n_x 、 n_y 、 n_z はそれぞれ表面単位法線ベクトルの x 、 y 、 z 方向成分である。さらに \mathbf{Q} 、 \mathbf{F}_x 、 \mathbf{H} は、保存量ベクトル、 x 方向流束ベクトル、および重力項を含む外力ベクトルである(\mathbf{F}_y 、 \mathbf{F}_z は、 y および z 方向の流束ベクトルであるが紙面の都合上 \mathbf{F}_x のみしめす)。

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho_1 \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho u_z \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} \rho u_x \\ \rho_1 u_x \\ \rho u_x^2 + p \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_x u_z \\ (\rho e + p) u_x \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\rho g \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

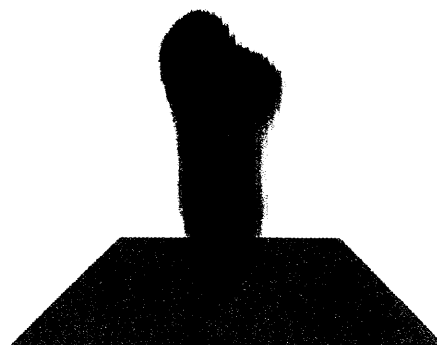
ここで、 u_x 、 u_y 、 u_z は x 、 y 、 z 方向の速度成分、 p は圧力、 e は単位質量あたりの総エネルギー、また g は重力加速度である。

3-2 数値計算結果

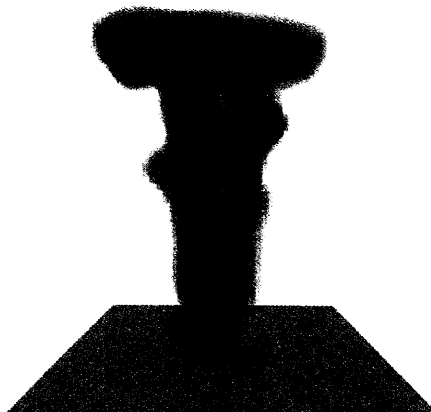
図2に噴火後6、30、60秒後の火山噴出ガスの様子を示す。ここでは、噴出気体の基本的な運動を見ることを目的とし、実際の地形は考慮せず平地に開いた直径49mの模擬火口から垂直方向に流速マッハ数0.5で大気の7倍の密度を持つ(密度比7)火山ガスが噴出する場合を模擬している。縦横高さ5kmの計算領域にそれぞれの方向について格子点数50をとっての比較的粗い計算であるが、噴出ガスが不安定な様相を呈しながら上昇してゆく様子が現れている。図2の場合のほか、噴出気体の密度の異なる場合の計算を行ったが、いずれの場合も噴出気体の形状は予想以上の不安定性を示して複雑な形状となることが分かった。



(a) 6 s after the start of eruption



(b) 30 s after the start of eruption



(c) 60 s after the start of eruption

Fig. 2 Time evolution of volcanic gas jet: Jetting gas density ratio is 7 against the atmosphere; Jet Mach number is 0.5

図3、4、5は同じ噴出速度 (Mach 数 0.5) に対して噴出気体の大気との密度比がそれぞれ7、10、12倍の場合を、噴火後およそ30秒と60秒について比較したものである。予想されるように密度が高くなるにつれて、すなわち図3から4、さらに5になるにしたがい、重力の影響が大きく大量の噴出気体が下方に下りて行く様子が観察される。

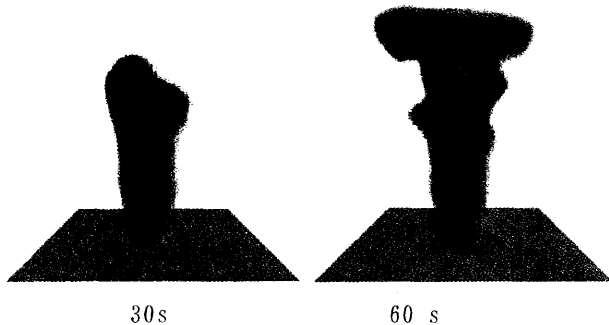


Fig. 3 Erupting gas at differ times:
Density ratio 7

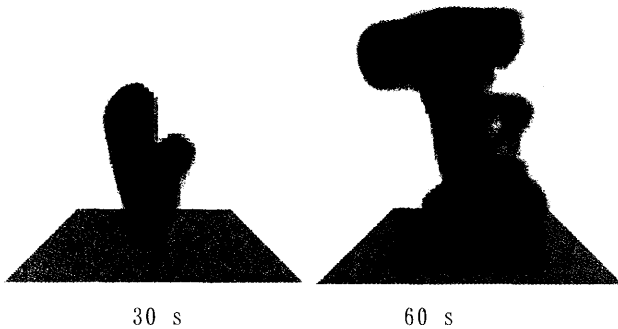


Fig. 4 Erupting gas at differ times:
Density ratio 10

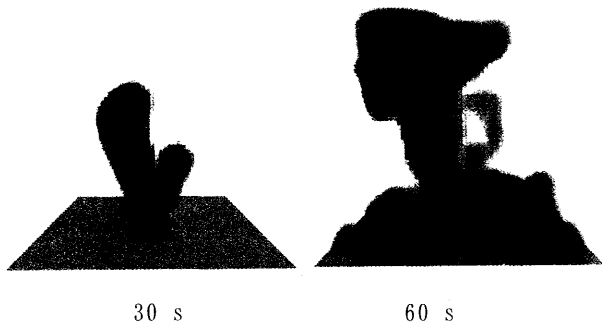


Fig. 5 Erupting gas at differ times:
Density ratio 12

数値計算では、特に初期擾乱などを入れていないにも係らず、流れの不安定な様子が顕著に現れている。これは重い気体が重力に逆らって上昇するという本来不安定な流れが、例えば多次元計算に演算子分割を使っているなどの、数値スキームに含まれるわずかな非対称性にきっかけを得てその性質を現したものと考えている。

今後数学モデルを精密なものとする一方、これら数値計算上の不安定性の影響についても調査を行う予定である。

3-3 災害予測

火砕サージによる災害分布予測を行うことを考えるとき、地形の影響を考慮することが重要になるが、図6に浅間山の地形を取り込んで計算を行った例を示す。さらに火砕サージの場合、風の向きと強さも大きな影響を及ぼすことが予想されるが、これを数値計算に反映させることは容易である。

図6は密度比10の噴出ガスがMach数0.5で噴出する場合を計算したものであり、既に噴出気体が山体をすべり下りようとしている様子が現れている。



Fig. 6 Pyroclasti flow simulation with a realistic terrain.

密度比12に対し、2つの噴出速度で計算した結果を図7と8に示す。噴出速度165m/s (Mach数0.5)の場合で、噴火後30秒及び、78秒後の様子を噴火口を含む垂直面上の密度分布で示したものが図7a, bであり、時間とともに

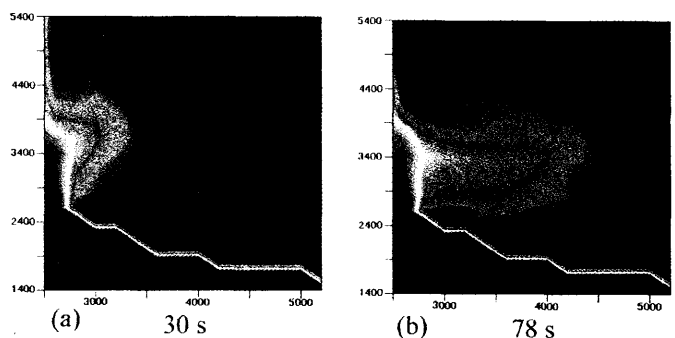


Fig. 7 Density distributions in the vertical plane including crater at two different times:
density ratio; 12, jet velocity; 165 m/s.

火山ガスが、水平方向に広がってゆく様子が示されている。図8a, bは火山ガスの噴出速度が99m/sの場合で、それぞれ噴火後33秒及び80秒後の様子を示している。図8の場合、図7に比べて噴出速度は低いにも係らず、火砕サー

ジの伝播速度は大きいこと、またサージ気体も、より山体表面に沿って流れている様子が分かる。このように災害の観点からすると、必ずしも噴火の激しさそのものと、被害の分布の様子が一致するとは限らず、様々なパラメータの組み合わせについての火砕サージの振舞いを模擬することの出来る数値計算が重要であることがわかる。

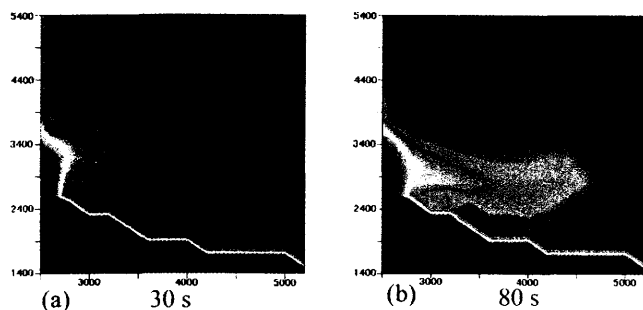


Fig. 8 Density distributions in the vertical plane including crater at two different times: density ratio; 12, jet velocity; 99 m/s.

しかしながら今回開発した方法によって火砕サージによる災害分布予測図を作成する前に、火砕サージに関連する物理が十分考慮され数学モデルに反映されているか、また必要な物性値が正しく選択されているか等、さらに多くの検証作業を行う必要があると考えている。

4. まとめ

爆発的火山噴火により地上に現れる諸現象のうち、比較的短時間のうちに観測される現象として、爆風の発生とその伝播、および火砕サージの発生過程を調べる為の数値模擬を行った。また爆風伝播の数値計算で得られる地表の最大過剰圧分布をから災害予測分布図を作成し、数値計算が災害予測に有効な情報を与えることを示した。

火砕サージの数値模擬では、噴出気体と大気の相互作用をより現実的にするため、粘性や熱伝導の効果を始めとしてさらに多くの検証を行う事が必要であるとともに、これをどのように実際の災害対策に役立てて行くかを検討して行く。

参考文献：

- (1) Saito, T., Eguchi, T., Takayama, K., Taniguchi, H., Hazard predictions for volcanic explosions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 106, 39--51, 2001.
- (2) Toro E F (1989) A weighted average flux method for hyperbolic conservation laws. *Proc Roy Soc Lond A* 423: pp. 401--418.
- (3) Toro E F (1997) Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. Springer, Heidelberg.
- (4) H. Yamashita, T. Saito, K. Takayama (2004) Numerical investigations of volcanic eruption and production of hazard maps, *The 24th Int. Symp. on Shock Waves*, Beijing China, July 11-16, 2004, paper number 2668.
- (5) 谷口 宏充, 大島弘光, 一柳昌義(1998) 火山性爆発計測プロジェクト, pp. 265-270
- (6) 谷口 宏充(1996) 高温流紋岩質溶岩流 - 水接触型マグマ水蒸気爆発の発生機構-, *地質学論集*, 46, pp. 149-162
- (7) 殿谷 敬文 (1983) ガス爆発の効果、爆発 (安全工学協会編), 海文堂. pp. 197-233.