

湿潤大気場における噴煙ダイナミクスに関する数値実験： 噴煙における水の相変化の効果

○水谷文彦*，中島健介**，坪木和久*，篠田太郎*（*名大地球水循環，**九大院・理）

1. はじめに

爆発的火山噴火に伴って噴煙が形成されると、噴煙の基部では爆発に伴う上昇流を駆動力として噴煙が上昇する。その駆動力を失った後は噴煙が取り込んだ環境場の大気を加熱し膨張することで噴煙全体の密度が環境場より小さくなり、浮力を得ることで噴煙が上昇する。噴煙が浮力を獲得できなかった場合は火砕流として地表を流れる。

湿潤な大気場では、噴煙柱に環境場の水蒸気を取り込まれ、上層へ輸送された後に凝結し潜熱を放出することで、噴煙が浮力をさらに獲得し、乾燥大気場より噴煙高度が増加することが言われている。例えば、Woods(1993)は、湿潤大気場での噴煙の1次元数値実験を行ない、比較的小規模な噴火では、噴煙高度が乾燥大気場での実験と比べて～15%程度増加することを示した。しかし、三宅島2000年噴火では7月噴火では噴煙高度が1500mであったものが、8月になると高度8000m以上(数倍程度)上昇する噴煙が観測された。さらに、噴煙高度は夏季は高く、冬季は低いという季節変動が観測された。これら一連の噴火では現在のところ急にマグマ熱量が変化したと言う報告はなく、つまり伝統的火山学の視点からは噴煙高度がこれほど顕著に変化するとは考えにくい。Woods(1993)の実験は湿潤大気を考慮したものの水蒸気量の少ない標準大気を使用しており、水蒸気量の非常に多い夏季の日本域を考慮した実験ではないので、大気下層に多量に水蒸気が存在する場合を検討する必要があると考えられる。

また8/29噴火では、湿った低温で勢いのない火砕流が発生し、火口から4km先の海岸まで達した。山麓での観測では、火砕流の流速は約10m/sであった。低温火砕流については、地下水がマグマを冷やすことで大気に顕熱を与えられずに噴煙が浮力を獲得できずに火砕流となるwet base surgeが知られている。しかしながら、火砕流について湿潤過程を考慮した研究はこれまでほとんど例がなく、雨滴の蒸発冷却に伴う負の浮力の励起による低温火砕流の発達に対しての効果調べる必要がある。

三宅島2000年噴火の事例をもとに筆者ら（2001年九州支部発表会）は、2次元雲モデルを用いた実験で、噴煙上昇の過程において水蒸気凝結時に発生する潜熱の影響を受け、乾燥大気場での実験と比べ噴煙高度が2倍程度変化し得ることを示した。しかし、この実験は、大気に対して負の浮力を及ぼす火山灰の影響を全く考慮していなかった。

本研究では、2次元雲モデルに火山灰の影響を採り入れ、噴煙のダイナミクスに対する水の相変化の影響を詳細に検討するための数値実験を実行した。

2. 数値モデルの概要

基本方程式

基本方程式のうち力学、熱力学過程はOgura and Phillips(1962)による2次元非弾性方程式系を用いた。運動方程式は、水平方向、鉛直方向の速度をそれぞれ u, w とすると、

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= -(C_p\Theta_0)\frac{\partial\Pi}{\partial x} + D(u) \\ \frac{dw}{dt} &= -(C_p\Theta_0)\frac{\partial\Pi}{\partial z} + b + D(w)\end{aligned}$$

という関係が成り立つ。ここで C_p は定圧比熱、 Θ_0 は温位、 Π は気圧を表す無次元量である。このとき、粘性項 $D(Y)$ 、浮力項 b を、

$$D(Y) = \frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial Y}{\partial x}\right) + \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_0 K\frac{\partial Y}{\partial z}\right)$$

$$b = g\left(\frac{\theta}{\Theta_0} + 0.608q_v - q_c - q_r - q_a - q_l\right)$$

とした。ただし、 g は重力、 θ は温位偏差、また q_v は水蒸気混合比、 q_c は雲水混合比、 q_r は雨水混合比である。さらに本研究では、後で述べる火山灰 q_a 、火山豆石 q_l の混合比についても考えた。連続の式は、

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_0 u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_0 w) = 0$$

である。

熱力学第一法則については次の式が成り立つ。

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Theta_0}{dz}w = \frac{L}{C_p\Pi_0}(C - E_r) + D(\theta)$$

水物質保存の式は、以下のように記述できる。

$$\begin{aligned}\frac{dq_v}{dt} &= -C + E_r + D(q_v) \\ \frac{dq_c}{dt} &= C - P_{rc} + D(q_c) \\ \frac{dq_r}{dt} &= P_{rc} - E_r - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial z}(\rho_0 V_T q_r) + D(q_r)\end{aligned}$$

ここで、水物質の交換量である P_{rc}, E_r については、Kessler(1969)による暖かい雨のパラメタリゼーションを用いて解いた。また、雲水と雨水は自身が落下速度 V_T を持つか否かで区別している。さらに、水蒸気・雲水の交換量 C については、飽和対流調節法を用いた。飽和した時点で火山灰が凝結核となり凝結すると考えられるので、過飽和については考慮しなかった。

火山物質は大気放出時は細粒火山灰のみを考えた。また、火山灰が水分の関与により凝集成長する火山豆石形成過程を考慮して、火山灰(q_a)と火山豆石(q_l)についての保存式を次のように定式化した。

$$\begin{aligned}\frac{dq_a}{dt} &= -A_g - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial z}(\rho_0 V_{aT} q_a) + D(q_a) \\ \frac{dq_l}{dt} &= +A_g - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial z}(\rho_0 V_{lT} q_l) + D(q_l)\end{aligned}$$

ここで、終端落下速度は火山灰(V_{aT})は1m/s、火山豆石(V_{lT})は10m/sとした。また、変換速度 A_g については、 0°C 以上の雲水が存在する領域で時定数(T_a)を用いてパラメタライズした。

実験設定

計算領域は水平50km×鉛直20kmで、格子間隔は水平、鉛直共に100mとした。また、すべての境界でミラーコンディションとした。

環境場の温度湿度に関しては、三宅島2000年噴火の各日9時の八丈島高層気象データを用いた。噴煙高度の季節変動に対する影響を見る実験においては理科年表による各月の統計値を環境場として用いた。

マグマからの顕熱による大気加熱の結果を表現するために、実験領域の水平0km、高さ700mに半径1000mの大きさを持つ温位擾乱を置き実験を開始した。これは、火口から噴出した噴出物が環境場の大気、水蒸気を取り込み、噴煙が浮力を駆動力として上昇し始める時点を想定している。また、温位擾乱を与えた領域に火山灰も存在すると仮定して、与えた温位擾乱に相当する熱量を持つ分だけ火山灰混合比を与えた。

3. 結果

噴煙高度

噴煙が大気下層の水蒸気を取り込む効果を調べる実験として、8/29の環境場を用いて初期に10Kの温位偏差を大気下層に与えた実験の結果を図1に示す。上図は初期擾乱中の水蒸気量を環境場と同じ量与えた実験、下図は初期擾乱中の水蒸気量を0とした実験のそれぞれ25分後の火山灰混合比の鉛直断面図である。これらの図を比較すると噴煙が大気下層の水蒸気量を取り込むことで水蒸気凝結による潜熱放出が噴煙上昇の浮力となり、噴煙高度が2倍以上高くなることを示している。

各月の統計値を基本場として実験した結果から、噴煙高度は水蒸気量の多い夏季は高く水蒸気量の少ない冬季は低くなる傾向がみられた。これは三宅島2000~2001年の観測事例と調和的であり、つまり噴火の規模が同程度であっても水蒸気量が多いほど噴煙高度は増加することが考えられる。

次に、水蒸気爆発によって大気に放出される顕熱と潜熱の割合が変化する場合を想定して、初期擾乱中に与える温位偏差と水蒸気量を変化させる実験を行った。この実験では、大気に対する顕熱、潜熱の与え方が変化するの噴煙が浮力を得る高度が変わることから噴煙高度が変化することが分かった。

さらに、大気中に雲水が存在し火山豆石が形成される場合の生成速度を変化させる実験を行った。豆石生成速度が速ければそれに伴って大気に与える負の浮力を持つ火山灰が噴煙の系から抜け落ちることで、噴煙が浮力を獲得し上昇しやすいことが分かった。

以上の結果を組み合わせると、水蒸気量の多い夏季に噴火が発生すると、マグマ熱量が小さくとも水蒸気凝結による潜熱解放で噴煙が上昇する効果と火山豆石生成による浮力の獲得で噴煙が上昇する効果が重なって、噴煙がかなり上層まで上昇することが考えられる。また、水蒸気爆発時には多量の水蒸気が大気に供給されることで、噴煙が上昇すると雲水も多量に発生し火山豆石が多量に形成することから、噴煙は上昇しやすいと考えられる。

低温火砕流

図1(上)の下層に注目すると、一度上昇した火山灰が下降して火口から水平に3.5km程度流れている。35分後には5km程度まで達した。この様子に着目すると、水平速度は約10m/sで温度は大気とほぼ等温であったことから、8/29の噴火で観測された低温火砕流の性質とよく一致する。図2は、図1(上)の実験と同条件で、雨滴の蒸発項を取り除いた感度実験の結果で、両図を比較すると、火山灰が地表付近を水平に流れる到達距離に明確な差が見られる。これは、雨滴の蒸発冷却による下降流が地表で発散することが、低温火砕流を強化する一因であることを示唆している。本研究で新たに示されたこの火砕流を”moist ash flow”(MAF)と呼ぶ。MAFは上昇した噴煙内での火山灰の負の浮力の効果に通常の積乱雲下で発生する冷氣外出流の物理過程を加えた流れである。

また、多量の地下水がマグマと接する水蒸気爆発を想定した実験を行った結果、地下水がマグマを冷やすことで大気に顕熱を与えられずに噴煙が浮力を獲得できないことで上昇せずに低温火砕流となるwet base surgeも再現できた。

4. まとめ

噴煙のダイナミクスに対する湿潤過程の影響、特に水の相変化の効果を調べるため、暖かい雨や火山灰のパラメタリゼーションを含む2次元非弾性方程式系の数値モデルを用いて実験を行なった。

特に夏季は大気中の水蒸気量が多いことで、凝結潜熱の効果と火山豆石形成の効果により、噴煙高度が増加することが分かった。水蒸気爆発時には、大気に放出される顕熱潜熱の割合が変化することで噴煙高度が変化することが分かった。

一度上昇した噴煙内では火山灰の持つ負の浮力に加えて雨滴の蒸発冷却による負の浮力が励起されることで低温火砕流が発生、発達することが分かった。この低温火砕流をMAFと名付けた。また噴煙が上昇せずに低温火砕流となるwet base surgeも再現することができた。

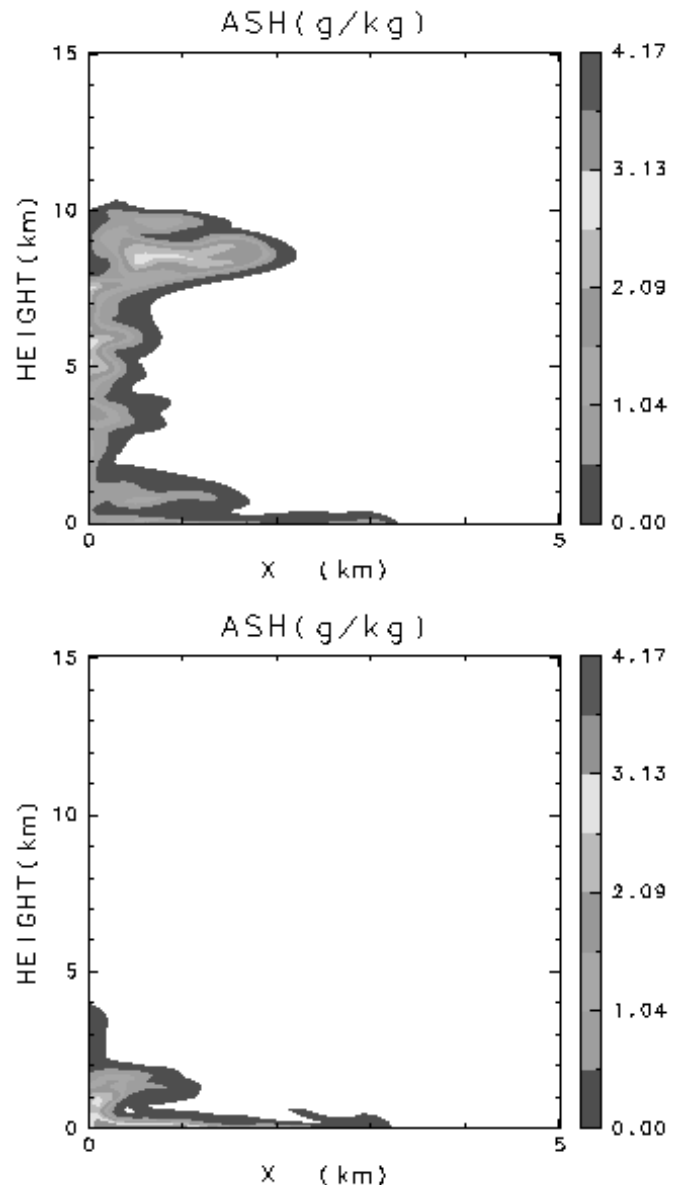


図1 8/29(初期温位擾乱10K)実験開始25分後の火山灰混合比の鉛直断面(上)環境場下層の水蒸気を最大限取り込んだ場合(下)水蒸気をほとんど取り込めなかった場合の感度実験

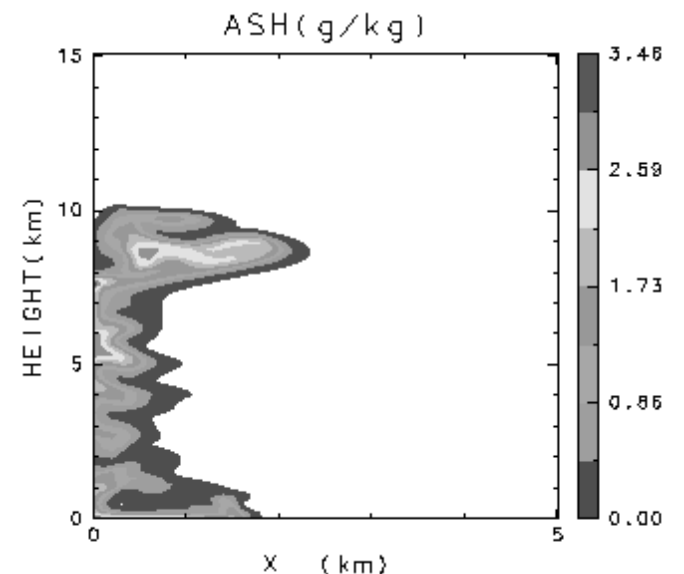


図2 図1(上)の実験より雨滴蒸発項を0にした感度実験 実験開始25分後の火山灰混合比の鉛直断面