

個別要素法を用いた中-高粘性マグマの噴出シミュレーション

酒井 望*・楠本成寿**・清水賀之***

(2012年3月8日受付, 2013年9月2日受理)

Numerical Simulations of Middle-high Viscous Magma Extrusion
by Means of Discrete Element Modeling

Nozomi SAKAI*, Shigekazu KUSUMOTO** and Yoshiyuki SHIMIZU***

We developed a discrete element model to describe extrusion of middle-high viscous lava at the surface. We set the viscosity of magma at 10^7 to 10^{10} Pa s for the numerical simulations and arbitrarily set the rising velocity to be constant to the bottom of the conduit, as an extrusion model of magma. The conditions under which the lava dome or lava flow will form depend on not only the viscosity of the magma but also its rising velocity in the conduit. The velocity at which the lava dome is formed is dependent on the viscosity of magma, with magma of lower viscosity requiring higher rising velocity in order to form a dome. The inside structure of the lava dome is a concentric circle and is similar to those formed in previous analogue experiments.

Key words: discrete element modeling, lava flow, lava dome, PFC2D

1. はじめに

マグマの緩やかな噴出は、地表に溶岩ドームや溶岩流を形成する。

溶岩ドームを形成するマグマは、玄武岩質から流紋岩質まで幅広い(例えば, Siebert *et al.*, 2010)。溶岩ドームの形成・発達には、内成的と外成的の2つの様式がある。内成的成長は、新鮮な溶岩が表面に出ることなくドームを膨張させる成長様式のことであり、外成的成長は、上昇してきたマグマがドームの殻を突き破り、新鮮な溶岩がドーム表面に付け加わることで成長する様式のことである(例えば, 中田, 1996)。溶岩ドームの形成や成長過程を解明するために、これまで多くの野外調査やアナログ実験、数値シミュレーションが行われてきた(例えば, Blake, 1990; Nakada *et al.*, 1995; Balmforth *et al.*, 2000; Zavada *et al.*, 2009)。Fink and Griffiths (1990) は、殻の形

成がドームの成長に重要な役割を果たすことを、Hale and Wadge (2008) は、ドーム底部と火道の分岐点に形成されるシアーバンドの発達でドームの内成的成長から外成的成長への転換をもたらすことを、それぞれ明らかにしている。

一方、溶岩流についても野外調査やアナログ実験、数値シミュレーションが行われてきている(例えば, Walker *et al.*, 1973; Blake and Bruno, 2000; Filippucci *et al.*, 2010)。Dragoni *et al.* (2005) は、ニュートン流体よりもビンガム流体の方が溶岩流先端部の勾配が急になることや、粘性が高いほど溶岩流が厚くなることを明らかにしている。

このように、これまで、それぞれの構造や形成プロセスについて多くの研究成果が挙げられてきているが、溶岩流と溶岩ドームの形状は連続的なものであり、このよ

* 〒930-8555 富山市五福 3190
富山大学理学部地球科学科
Department of Earth Science, Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555, Japan

** 〒930-8555 富山市五福 3190
富山大学大学院理工学研究部(理学)
Graduate School of Science and Engineering for Research (Science), University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-

shi, Toyama, 930-8555, Japan

*** 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1
東海大学海洋学部
School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, 424-8610, Japan

Corresponding author: Shigekazu Kusumoto
e-mail: kusu@sci.u-toyama.ac.jp

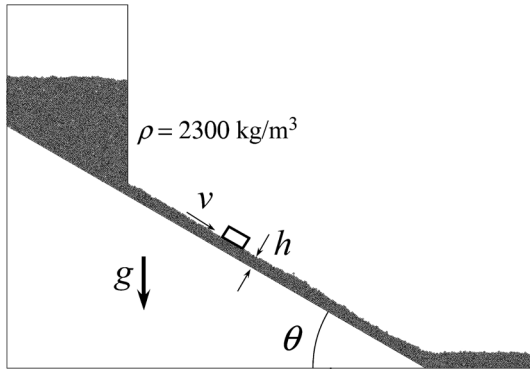


Fig. 1. Schema of magma flow and numerical experiment parameters, including viscosity. Length of slope is 400 m.

うな構造の違いは、溶岩の物性、噴出率、地形によって支配されることが知られている（例えば、中田, 1996）。溶岩の物性や噴出率は、温度に依存するため、地表に噴出した溶岩形状の議論をこれらのパラメータで行なうことは難しい。しかしながら、このことを理解した上で、溶岩の物性や噴出率と溶岩形状の関係を議論することは、後のより進んだ研究に有用であろう。

そこで本研究では、重要ではあるが、条件を複雑にする温度の効果にはひとまず目をつぶり、マグマの粘性や上昇速度が、地表に噴出する溶岩形状に与える影響を数値シミュレーションにより議論した。数値シミュレーションには、媒質の大変形や破壊、流動の動的解析が可能な個別要素法に基づく2次元粒状体挙動解析ソフトウェア PFC2D ver. 4.0 (Itasca, 2008) を用いた。

2. パラメータ設定

個別要素法とは、粒子同士の接触と力と変位の関係から接触力を求め、個々の粒子に作用する力からその運動を、陽解法を用いて逐次追跡していく数値解析手法である（例えば、Cundall and Strack, 1979）。2次元個別要素法では、物体を弾性ばね（間隙ばね）で繋がれた剛体円盤の集合で表現する。本研究で用いる PFC2D では、物体の力学的性質は、剛体円盤を繋ぐ垂直方向とせん断方向の間隙ばねのばね定数、剛体円盤間の摩擦係数、さらに固体材料の強度を制御するボンドとよばれるパラメータにより表現される。固体材料をモデル化するには、解析者が材料に設定したい弾性定数や強度となるよう、計算機中で2軸圧縮試験を行い、これらのパラメータを試行錯誤的に決定する。

本研究ではマグマを剛体円盤粒子の集合体としてモデル化（以降、本シミュレーションで用いるモデル化され

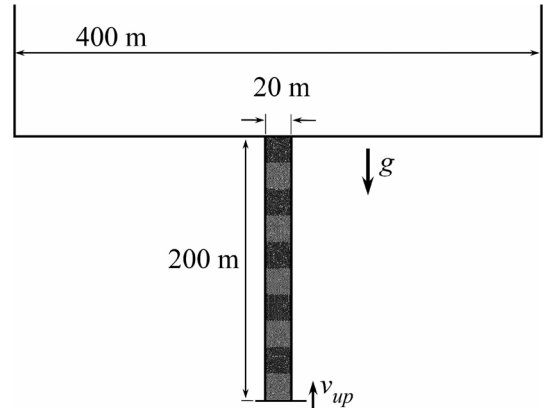


Fig. 2. Schema of magma extrusion, showing the numerical experiment parameters.

たマグマのことを、モデルマグマとよぶ) し、この集合体を流体として振舞わせる。そのため、粒子の半径をモデルの規模 (Fig. 1 and 2) に対して十分小さく (0.5-0.6 m) とし、ボンドを 0 とした。

一般に、間隙ばねのばね定数が大きくなると、外力に対し、粒子の運動が鈍くなる。本シミュレーションの場合、粘性が大きくなる。また、せん断方向の間隙ばねのばね定数を、垂直方向のそれより小さくすると、流動しやすくなる。これらの特性を考慮し、間隙ばねのばね定数（垂直方向： k_n 、せん断方向： k_s ）の組合せを変化させることで、モデルマグマの粘性を変化させた。なお本研究では、粒子の移動速度が小さいため、加速運動をする粒子のみ減衰させる（収束が速い）Local damping（例えば、Itasca, 2008）を採用している。したがって、間隙ばねにダッシュポット要素は含まれていない。

モデルマグマの粘性 η は、傾斜角 θ の坂を流れ下るモデルマグマの表層速度 v を計測する (Fig. 1) ことで、(1) より推定される（例えば、Turcotte and Schubert, 2002）。

$$\eta = \frac{\rho g h^2}{2v} \sin \theta \quad (1)$$

ここで g は重力加速度 (9.81 m/s^2) であり、 ρ はモデルマグマの密度である。また h は流れ下るモデルマグマの厚さである。

本研究では、剛体円盤間の摩擦係数を 0.6、 $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ とし、 $\theta = 30^\circ$ の坂を流れ下るモデルマグマの厚さ h と表層速度 v を計測した。表層速度 v は、Fig. 1 中の四角領域を通過する要素の速度を計測することで求めた。

Table 1 に作成したモデルマグマ (Model 1-4) のパラメータと粘性を示す。粘性より、Model 1 は安山岩質マグマ、Model 2 と 3 はデイサイト質マグマ、Model 4 は流

紋岩質マグマに相当する。

なお、いずれのモデルマグマにおいても、ポアソン比が0.5という流体の基本的性質は維持されている。

3. シミュレーション方法

本研究では、水平な地表面に一定速度でモデルマグマを噴出させる (Fig. 2)。シミュレーションは二次元で行なった。

火道は地表面に垂直であり、その幅と長さ (深さ) はそれぞれ 20m と 200m である。したがって、モデルマグマの噴出は、火道上端から 200m 分のモデルマグマが上方に押し出されることによって実現される。実際のシミュレーションでは、火道底部に水平な壁を作成し、その壁を速度 v_{up} で持ち上げることにより、モデルマグマを地表面に押し出した。なお、重力加速度 (9.81 m/s^2) は、シミュレーションを行っている間、常に下向きに作用させた。

Table 1. Viscosities of magma models and combinations of normal and shear stiffness of springs between particles for modeling the viscosities shown.

	η [Pa s]	k_n [N/m]	k_s [N/m]
Model 1	4.9×10^7	1.0×10^7	1.0×10^6
Model 2	2.0×10^8	4.0×10^7	3.5×10^6
Model 3	2.1×10^9	5.0×10^8	5.0×10^7
Model 4	1.2×10^{10}	1.0×10^{10}	2.5×10^9

4. 結果と考察

モデルマグマが、 $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ という速度で地表面に押し出された時の溶岩の形状を Fig. 3 に示す。

Fig. 3a と Fig. 3b は、それぞれ、Model 1 と Model 2 のモデルマグマが地表面に噴出したときの形状であり、Fig. 3c と Fig. 3d は Model 3 と Model 4 のモデルマグマが噴出したときの形状である。Model 1 と Model 2 は、いずれも地表面に噴出した溶岩は薄く広く分布しているが、Model 3 と Model 4 では、モデルマグマは、噴出した場所周辺に留まっている。

溶岩流と溶岩ドームの形状は連続的なものであるが、溶岩の噴出した高さとの比 (アスペクト比) が $1/8$ 、すなわち 0.125 以上となるものを溶岩ドームとする区分法がある (例えば、横山・他, 1979; 中田, 2003)。この区分法によると、Model 1 と Model 2 は溶岩流を形成し (Fig. 3a and 3b)、Model 3 と Model 4 は、溶岩ドームを形成していることになる (Fig. 3c and 3d)。

本シミュレーションで再現された溶岩ドームの形状は、一定の傾斜をもつのではなく、ドーム頂部付近と裾野の傾斜が急で、その間の部分は緩やかである (Fig. 3c and 3d)。また溶岩ドーム内部は、噴出初期の溶岩が外側に、新しい溶岩が内側に同心円状に分布している。これは、地下からのマグマの上昇によって、当初、上方に向かって成長したドームが、側方に崩れ落ちた痕跡であり、Reyer (1888) によるアナログ実験結果とよく似ている。したがって、本シミュレーションは、溶岩ドーム形成の基本的な部分は再現できていると考えてよいと判断できる。

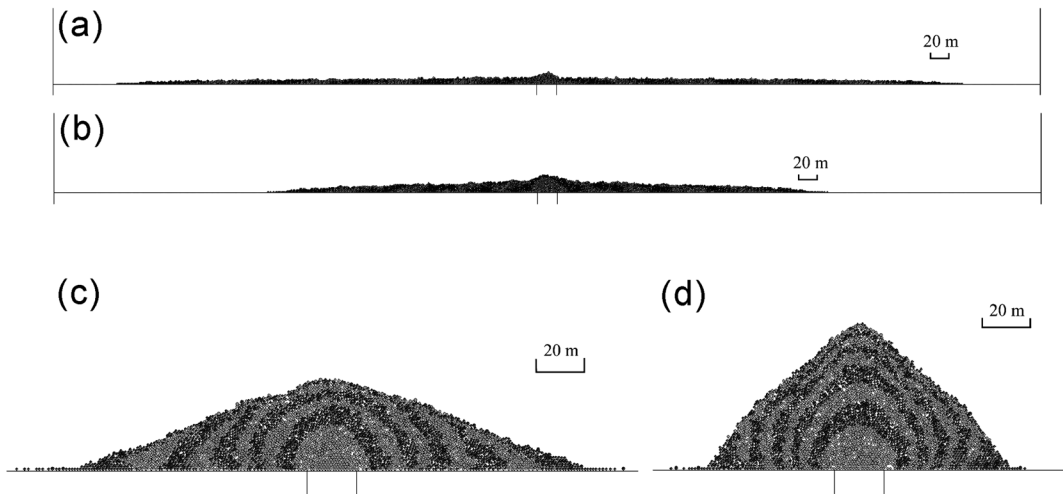


Fig. 3. Lava dome formation and lava flow at the surface with rising velocity set to $v_{up} = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. The ratio of length to breadth is 1 : 1 in all figures. (a) Lava flow, $\eta = 4.9 \times 10^7 \text{ Pa s}$. (b) Lava flow, $\eta = 2.0 \times 10^8 \text{ Pa s}$. (c) Lava dome, $\eta = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa s}$. (d) Lava dome, $\eta = 1.2 \times 10^{10} \text{ Pa s}$.

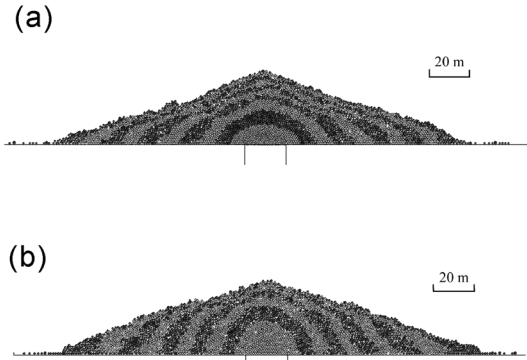


Fig. 4. Lava dome can be formed by an increase in the rising velocity of magma. The ratio of length to breadth is 1 : 1 in all figures. (a) Lava dome formed when the rising velocity of magma is 4.5×10^{-2} m/s (Model 1). (b) Lava dome formed when the rising velocity of magma is 1×10^{-2} m/s (Model 2).

Fig. 3 に示された結果より、モデルマグマの上昇速度が 1×10^{-3} m/s である場合、粘性の高い Model 3 や Model 4 は溶岩ドームを形成し、これらより粘性の低い Model 1 や Model 2 のモデルマグマは溶岩流を形成することが分かった。しかしながら、実際には Model 1 の粘性に相当する安山岩質マグマの溶岩ドームが存在している。

幾つかの観測事例より、溶岩ドーム形成時のマグマの噴出率には、2 桁程度の幅のあることが知られている（例えば、中田, 1996）。中田 (1996) の第 2 表に示される噴出率 m^3/s を、同表記載の火道径を用いて上昇速度 m/s に換算したところ、概ね、 $1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s} - 6.4 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ であり、 SiO_2 の比率が低い程、上昇速度が大きくなる傾向がみられた。

そこで、マグマの上昇速度として、Model 1 に $4.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、Model 2 に $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ を与えて再計算を行ったところ、Fig. 4 に示すような溶岩ドームが形成された。これらの結果より、 10^7 Pa s や 10^8 Pa s 程度の粘性のマグマであっても、上昇速度が大きくなると溶岩ドームが形成され得る可能性のあることが示された。

そこで、Model 1-4 について、上昇速度を変化させて、アスペクト比がおよそ 0.125 となるときモデルマグマの上昇速度と粘性の関係を調べた。その結果、溶岩ドームを形成するためには、低粘性のモデルマグマほど大きな上昇速度が必要とされることが分かった (Fig. 5)。Fig. 5 に示される結果は、粘性が低い程 (SiO_2 の比率が低い程)、上昇速度が大きくなるという、先述の傾向と調和的である。Fig. 5 に示されるデータから、溶岩ドームを形成するために必要な上昇速度 (v_{up}) とモデルマグマの粘

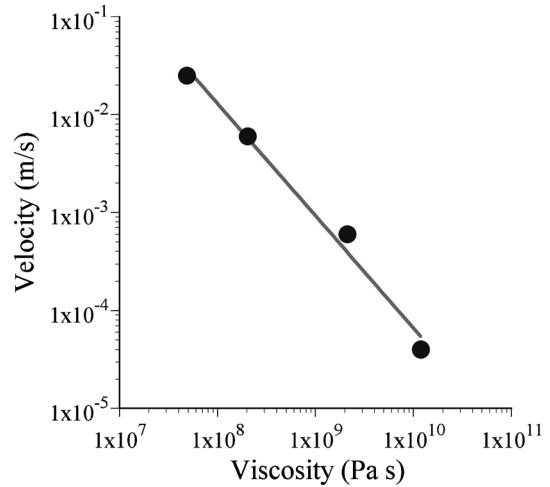


Fig. 5. Relationship between viscosity and rising velocity of magma required for forming a lava dome (aspect ratio, more than 0.125).

性の関係は、最小二乗法により、

$$\log v_{up} = -1.15 \log \eta + 16.8 \quad (2)$$

と推定された。

本シミュレーションでは、噴出したマグマが冷えて殻を形成するプロセスが考慮されていない。したがって、本シミュレーションで示された溶岩ドームは、形成途中のいわゆるスナップショットを見ていることになる。そのため、実際に観測される溶岩ドームの形状との直接比較は難しい。実際、中程度の粘性のマグマが、上昇速度が大きくなることで溶岩ドームが形成され得る可能性が出てくるというのは直感と合わない。これは、マグマの冷却固化の効果が含まれていないため、マグマの上昇が早く、見かけ上、溶岩ドームのようになったと考えられる。

本シミュレーション結果は、地表に噴出したマグマの挙動や、溶岩ドーム形成の初期プロセスの議論に有用であると思われる。今後は、モデルマグマの温度に応じて間隙はね定数を変化させ、粘性の変化や殻の形成をモデルに組み込んでいくことが課題である。本研究は、今後の進んだシミュレーションを行う際の基本パラメータ設定等で、幾らかの指標となり得るであろうと考えている。

5. まとめ

二次元個別要素法を用いて $10^7 - 10^{10} \text{ Pa s}$ オーダーのモデルマグマの地表への噴出シミュレーションを行った。本シミュレーションではマグマの冷却固化が考慮されて

いないため、得られた結果に直感と合わない部分もあるが、概ね高粘性マグマは溶岩ドームを作りやすく、その内部はこれまでのアナログ実験結果と調和的であった。

また、溶岩ドームと溶岩流の境界の目安である、噴出溶岩のアスペクト比が1/8以上となるマグマの上昇速度を調べたところ、溶岩ドームを形成するためには、粘性が低いほど大きな上昇速度が要求され、その速度はマグマの粘性の関数になっていることが示された。

謝 辞

査読いただいた、防災科学技術研究所藤田英輔 博士、および産業技術総合研究所 下司信夫博士から、非常に有益な助言やコメントをいただき、本稿は大幅に改善されました。心より感謝致します。また、本稿をご担当下さいました、編集委員青木陽介 博士にも深く感謝致します。

引用文献

- Balmforth, N. J., Burbidge, A. S., Craster, R. V., Salzig J. and Shen, A. (2000) Visco-plastic models of isothermal lava domes. *Jour. Fluid. Mech.*, **403**, 37-65.
- Blake, S. (1990) Viscoplastic models of lava domes, In *Lava flows and domes. Emplacement mechanisms and hazard implications* (Frink, J. H., ed.), Springer-Verlag, New York, 88-126.
- Blake, S., and Bruno, B. C. (2000) Modelling the emplacement of compound lava flows. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 181-197.
- Cundall, P. A., and Strack, O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, **29**, 47-65.
- Dragoni, M., Borsari, I. and Tallarico, A. (2005) A model for the shape of lava flow fronts. *Jour. Geophys. Res.*, **110**, doi : 10.1029/2004JB003523.
- Filippucci, M., Tallarico, A. and Dragoni, M. (2010) A three-dimensional dynamical model for channeled lava flow with nonlinear rheology. *Jour. Geophys. Res.*, **115**, doi : 10.1029/2009JB006335.
- Fink, J. H., and Griffiths, R. W. (1990) Radial spreading of viscous gravity currents with solidifying crust. *Jour. Fluid. Mech.*, **221**, 485-509.
- Hale, A. J., and Wadge, G. (2008) The transition from endogenous to exogenous growth of lava domes with the development of shear bands. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **171**, 237-257.
- Itasca. (2008) PFC2D - Particle Flow Code in 2 Dimensions, ver. 4.0, Minneapolis, Minnesota.
- 中田節也 (1996) 溶岩ドーム噴火の特徴と普賢岳ドームの成長モデル. *地質学論集*, **46**, 139-148.
- 中田節也 (2003) 噴出物から読みとる噴火. *地球科学の新展開3 マグマダイナミクスと火山噴火* (東京大学地震研究所編集 鎌山恒臣 編). 朝倉書店, 156-179.
- Nakada, S., Miyake, Y., Sato, H., Oshima, O., and Fujinawa, A. (1995) Endogenous growth of dacite dome at Unzen volcano (Japan), 1993-1994. *Geology*, **23**, 157-160.
- Reyer, E. (1888) *Theoretische Geologie*. E. Schweizerbart'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 867p.
- Siebert, L., Simkin, T., and Kimberly, P. (2010) *Volcanoes of the world*. 3rd edn., University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California, 551p.
- Turcotte, D. L., and Schubert, G. (2002) *Geodynamics*. 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge, 456p.
- Walker, G. P. L., Huntingdon, A. T., Sanders, A. T., and Dinsdale, J. L. (1973) Length of lava flows [and discussion]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **274**, 107-118.
- 横山 泉・荒巻重雄・中村一明 編 (1979) 火山. 岩波講座地球科学, **7**, 294p.
- Zavada, P., Kratinova, Z., Kusbach, V., and Schulmann, K. (2009) Internal fabric development in complex lava domes. *Tectonophys.*, **466**, 101-113.

(編集担当 青木陽介)