

天然の溶岩流は様々形態をしており、それらがどのようなパラメータによって規定されるかを総合的に理解するためには計算機実験は有効であると考えられる。これまでいくつかのシミュレーションコードが提出されており、実際の溶岩流の流域・厚さ等のある程度再現することに成功している。溶岩流の形状を左右する主要な要素としては、供給速度、地形、マグマ物性が挙げられる。溶岩流シミュレーションコードに用いられている粘性率等の物性については温度依存性等、室内実験等で得られた関係が用いられているが、その詳細については必ずしも十分検討されていないように思われる。ここでは主にマグマの物性の観点を中心にこれまで行われている溶岩流シミュレーションコードの特徴を検討し、それらの問題点について述べる。

表 1 に各シミュレーションコードの特徴について記した。溶岩流シミュレーションは 1980 年代の計算機の発達に伴って日本、英国、イタリア等で開始されたようである。基本的には Navier-Stokes 方程式、質量保存式、エネルギー保存式、を用いてセル間の流量、温度変化等を計算するものである。初期のものでは慣性項を無視したが、近年のものでは慣性項も組み込んだものになっている。日本の溶岩流では一般に流速は小さく ($<1\text{m/s}$)、慣性項は無視できる場合が多い。多くのコードは、溶岩流の深さを平均した物性を扱い二次元の計算を行うが、Hidaka et al.(2005)では深さ方向も 1m 単位のセルを考え、3 次元の計算を行い表面の固化、内部の対流を扱っている。エネルギー保存について、溶岩流の放熱は一般に表面からの放射、大気への対流、地面への熱伝導の 3 種があるが、これらのうちでは放射冷却の効果が大きい。Ishihara et al.(1989), Miyamoto & Sasaki(1997)では放射冷却のみを扱っている。Harris & Rowland(2001)では、3 種の放熱機構の他に、降雨の気化熱、結晶化の潜熱、Viscous heating の項を考慮している。また表面の状態をクラスト表面温度、高温が露出した部分の温度とその割合の 3 つのパラメータで評価している。ただこのコードは、channel 状の斜面を流れる溶岩を考え、その幅と深さについては一定として計算するもので、任意の地形についてのシミュレーションはできない。Costa & Macedonio(2005)は 3 種の熱輸送の他に Viscous heating の項も入れた扱いを行っている。冷却に伴い溶岩が結晶化する点について、Harris and Rowland(2001)は冷却に伴う石基結晶

度(ϕ)を溶岩流走距離に伴う溶岩の冷却の割合の関数として与えている。多くのコードではマグマをビンガム流体として扱っており、粘性率、降伏応力に対する結晶度の効果は温度を通した形で間接的に扱うようになっており直接的には扱っていない。ただ、Harris & Rowland は粘性率、降伏応力を温度、結晶度の関数として与えている。

それぞれのコードは、その実用性を確認するために噴火が観測された溶岩流を再現することを試みている。Ishihara et al.(1990) は、三宅島 1983 年溶岩流、伊豆大島 1986 年噴火の B I、BIII、C 溶岩流、桜島 1914 年西側溶岩流の再現を行い、ほぼ $\pm 15\%$ 程度の精度で被覆面積を再現している。Hidaka et al.(2005)でも同様の精度で被覆面積を再現した溶岩流厚さも数 10%以内の精度で再現している。ただ、リキダス温度を 1100°C 、ソリダス温度を 1000°C とし、有効固化温度を 1050°C としていながら、初期噴出温度は $1050.7\sim 1051.2^{\circ}\text{C}$ と設定されて計算をおこなっており、実際の溶岩が斑晶を僅かにしか含んでいないことと必ずしも整合的ではない。これは、溶岩流の冷却・固化過程のモデル化が不十分である可能性が考えられる。実際、海野(2007)が指摘しているように、島弧マグマは元々数%以上の水を含んでおり、噴火時に火道を上昇しながら発泡・脱ガスしそのため過冷却状態で溶岩が地表に達するために冷却しなくても、結晶化が時間と共に進展しそのために溶岩流がある時点以降急速に固化してしまう過程が考えられ、その点についてのシミュレーションコードへの組み込みが必要になると思われる。この問題は、より珪長質な溶岩流のシミュレーションに於いて重要になる。Harris & Rowland(2001)でも Mauna Loa 1984, Puu Oo 1997 の再現実験では、 1143°C 、 1150°C 、その出発粘性係数は 1000Pa s としている。しかし実際には 1 気圧のリキダス 1170°C では、 100Pa s 程度で噴出することが考えられ、その差の説明は行われていない。以上のように、これまでの溶岩流シミュレーションコードでは初期設定の粘性係数がリキダス付近での値と比べると 1 桁以上大きな値を設定しており、これは流走途中での冷却に伴う粘性増大が不十分であるため、被覆面積を天然に合わせるために辻褄合わせとしてとられた措置と考えることもできる。今後、流走中の熱輸送のモデルと併せて過冷却状態からの遅延結晶作用の検討が必要と思われる。

< 参考論文 >

- Costa, A, Macedonio, G. (2005) Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations. Geophys. Res. Lett., 32, L05304, doi:10.1029/2004GL021817.
- Costa, A., Macedonio, G. (2005) Computational modeling of lava flows: a review. Geol. Soc. America Special Paper 396, 209-218.
- Harris, AJL, Rowland, SK (2001) FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel. Bull. Volcanology, 63, 20-44.
- Hidaka, M., Goto, A., Umino, S., Fujita, E. (2005) VTFS project: development of the lava flow simulation code

- LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading, and solidification. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 6, Q07008, doi:10.1029/2004GC000869
- Ishihara, K., Iguchi, M., Kamo, K. (1990) Numerical simulation of lava flows on some volcanoes in Japan. In Proc. Volcanol., 2, 174-207
- Miyamoto, H. Sasaki, S (1997) Simulating lava flows by an improved cellular automata method. Computers and Geosciences, 23, 283-292.
- 海野進(2007) 富士山溶岩流の特性. 荒牧重雄他編「富士火山」、山梨県環境科学研究所、269-283.

Author	year	Name	basic equation	energy equation	Cell Dimension	viscosity	yield strength
Ishihara et al	1990	-	NS equation, no inertia moment	radiation	2D (3D)	Linear T dependence	Linear T dependence
Young & Wedge	1990	FLOWFRONT					
Miyamoto & Sasaki	1997	-	NS equation, no inertia moment	radiation	2D (3D)	$\eta(T)$	$F(T)$
Harris & Rowland	2001	FLOWGO	NS equation for channel flow	radiation, conduction, convection, rate crystallization, viscous heating	1D	$\eta(T, \phi)$	$F(T, \phi)$
Crisci et al.	2004	SCIARA-hex1			hexagonal		
Hidaka et al.	2005	LavaSIM	NS equation	radiation, conduction, convection	3D	WLF $\eta(T, c)$	constant?
Costa & Macedonio	2005	(SWE)	NS equation	radiation, conduction, convection, vis	2D (3D)	$\eta(T)$	?

Author	year	Example	Initial temperature	starting η (Pa s)	crystallinity	Yield strength (Pa)	character
Ishihara et al	1990	Miyakejima Oshima	1000-1100	$3 \times 10^3 - 5 \times 10^3$	-	$10^2 - 10^4 \eta(T)$	orthodox
Young & Wedge	1990						
Miyamoto & Sasaki	1997	Miyakejima	1047	850	-	225	diagonal cell flux, thickness variation
Harris & Rowland	2001	Mauna Loa Pua Oo Etna	1140	1000	0-0.4	$10^2 - 10^4 \eta(\phi, T)$	full for channelled lava flow
Crisci et al.	2004	Etna	1100				
Hidaka et al.	2005	Oshima	1051	5000, 1.5×10^3	-		full 3D, lava tunnel, crust etc
Costa & Macedonio	2005	Etna	1080	1000	-	?	