

桜島火山の溶岩流(Ⅱ)

—大正溶岩流のシミュレーション—

石原 和弘・井口 正人・加茂 幸介

LAVA FLOWS AT SAKURAJIMA VOLCANO (II) —NUMERICAL SIMULATION OF THE 1914 LAVA FLOWS ON THE WESTERN SIDE OF SAKURAJIMA—

By Kazuhiro ISHIHARA, Masato IGUCHI and Kosuke KAMO

Synopsis

The progress of the 1914 lava flows on the western side of Sakurajima Volcano was examined in detail by analyzing the photographs taken during the eruption and then the extrusion rate of the lava was estimated. The reproduction of the lava flows was tried by the numerical simulation on the assumption that the viscosity of the lava was constant. The simulated lava flows were fairly coincided with the actual ones in their extension with time along the direction of the main stream. The viscosity of the extruded lava was estimated to be $(2-3) \times 10^9$ poises. The reproduced lava flows, however, disagreed with the actual ones in their lateral spreading. The simulated lava flows tend to spread more widely than the actual ones. In the case of the actual lava flows, it is expected that the temperature of the lava flows decreases faster on the sides of the lava flows than in the main stream. Therefore, it is necessary for the numerical simulation of the andesitic lava flows to take into account the effect of the cooling of the lava.

1. はじめに

桜島火山は有史時代において、文明(1471—76)、安永(1779—80)および大正(1914)の3回の巨大山腹噴火を生じ、その度に南岳をはさむ両山腹に生じた火口群から多量の溶岩を噴出し、多くの集落を埋没した。昭和21年(1946)の噴火では、昭和10年代の活動で形成した南岳東斜面の単一の火口から溶岩を流出し2つの集落を埋没した。前報では¹⁾、これら溶岩流の被覆面積と堆積量を噴火前後の地形図の比較等により推算した。

筆者らは、将来の山腹噴火の際の溶岩流の掃過域および流下速度を予測し、災害の軽減に役立つ溶岩流のシミュレーションの手法を確立することを意図してきた。1983年10月の三宅島噴火の際の溶岩流については多くの観察がなされていることから、最初のテストケースとして数値計算による溶岩流の再現を試みた²⁾。³⁾溶岩流を粘性流体とみなし、簡略化した数値計算の方法ではあるが、現実の溶岩流の掃過域をかなりよく再現することができた。

本稿では、三宅溶岩流に適用した数値計算方法を桜島の場合に応用し、その有効性・問題点を検討する。三宅島の溶岩流と桜島の溶岩流を比較すると次のような相違点がある。

- (1) 三宅島の溶岩は玄武岩質であり、桜島火山の場合は安山岩質である。噴出・流下過程での粘性係数は、三宅島の場合が $10^4 \sim 10^7$ poise³⁾ と推定されるのに対して、桜島の場合は $10^6 \sim 10^9$ poise^{1), 5)} と約2桁大きい。桜島の場合は流下速度が小さく、溶岩流の厚みが増す。
- (2) 溶岩の噴出量は桜島の方が数100倍大きい。従って、微小な谷地形等には依存せず流下し、広範囲に

拡がる。

一般的に言えば、流下速度の小さい桜島の溶岩流の場合、流下中の冷却による溶岩の粘性の増大が著しいと考えられる。しかし、冷却は主として溶岩流表面からの放射によって進行すると考えられるので、溶岩流の厚さが大きい場合は、巨視的にみた溶岩流の温度低下の進行は遅くなる。又、安山岩質溶岩は噴出時の温度が玄武岩質溶岩に較べ低く、急速に溶岩流表面が固化し皮殻が形成される。この皮殻は、溶岩流内部からの放熱を減少させる作用をする。溶岩流表面からの放熱による溶岩の温度低下・粘性の増大をシミュレーションに組み込むことも可能であるが、溶岩の粘性の温度依存性等溶岩の物性に関する知識は現在のところ十分ではない。本稿では、桜島の溶岩流の流動中の平均的な粘性係数を把握することを目的に、粘性係数を一定と仮定した場合、どの程度現実の溶岩流が再現可能であるか検討した。

有史時代の溶岩流のうち、溶岩の流下過程を調査資料、写真等により最も詳しく把握できるのは、1914年の桜島西側の溶岩流であるので、これをテストケースとして選んだ。

2. 大正の噴火の経過と溶岩流（桜島西部）

はじめに鹿児島測候所の観察記録⁶⁾を参考に、溶岩流出に至るまでの経過を述べる。

噴火の前兆現象——有感地震の多発・井水の異常等——は桜島においては噴火の2～3日前から認められた。

噴火は1914年1月12日午前8～9時頃山頂火口から白煙が昇ったのが認められた後、午前10時5分桜島西部の寄生火山・引ノ平の北側の谷（標高約400m）付近からの噴煙の放出が始まった。5～10分遅れて、桜島東部の鍋山付近からも噴火が発生した（即ち、両山腹噴火の発生である）。当初は、軽石・火山灰等を爆発音を伴わず放出する噴火であったが、同日午後3時半頃からは爆発音を伴う激しい噴火活動に移行した。噴煙高度は最高約8000mであった。翌13日も終日爆発的噴火が続き、噴煙と東寄りの風のため夕方までは、鹿児島から桜島を望見することができなかった。13日20時14分には西側火口群における最大規模の噴火が発生し、この噴火の際に飛散した噴石により火口群の北西側3～4km以内にあった西桜島村の5つの集落がほぼ同時に炎焼した。Koto⁷⁾およびOmori⁸⁾は、現地調査で火砕流が発生した根拠を見出ししたが、火砕流は13日20時14分の噴火の際に生じたと推定される。この噴火後は爆発音が弱まり、鳴動が断続するに至った。溶岩流の流下が最初に確認されたのは、1月14日午前7時であり、既に桜島西端の台地（袴腰）の背面約600m付近に先端が達していた。桜島西部における溶岩流の噴出開始時刻は前夜13日午後8時頃（噴火開始から約34時間後）と推定された。

桜島は幅約3kmの水道をはさみ鹿児島市に面している。そのため、桜島西側の噴火活動は噴火当初からよく観察されており、多数の写真が鹿児島県立博物館に保存されている。Koto, Omoriおよび鹿児島測候所の調査観察資料とこれらの写真を比較対照することにより、溶岩の被覆範囲および堆積厚の時間的変化を把握することができ、更に溶岩の噴出率を推定することも可能になる。

Photo 1は1月14日正午前に鹿児島市内から撮影された写真である。写真のほぼ中央部、袴腰台地（H：標高72m）の右手（南側）に溶岩流先端が到達しているのが分る。袴腰と同じ標高地点、海拔約70mの地点（海岸線から約1km）まで進出して、前縁部の厚みが70～80mあることが判読できる。**Photo 2**は1月16日午後の写真で、**Photo 1**より南寄りの城山公園から撮影されたものである。既に溶岩流の先端は海中に侵入して島島（K）に向かおうとしている。袴腰の北側では、海岸線から約700m、海拔50m付近まで溶岩流の分岐が伸びているのが分る。溶岩流の厚みは袴腰の上手（背面）で60～70m、先端部近くで30～50mであることも判読できる。

これらの写真から判読した溶岩流の被覆範囲の噴火前の地形図に投影したのが**Fig. 1**である。袴腰の山手側等破線の部分は、写真上で溶岩流前縁部と地表面の境界が確認できない所に相当する。1月17～18日の範囲は、島島に溶岩流が到達したという記録^{7), 8)}から推定し記入した。1月26日の線はKoto⁷⁾の調査結果に

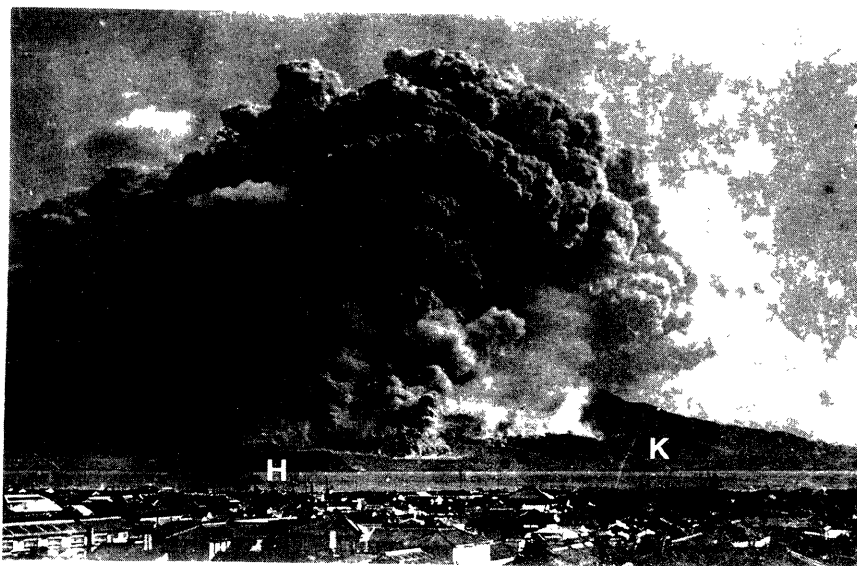


Photo. 1 The view of the western side of Sakurajima taken from Kagoshima on Jan. 14, 1914 (collection of Kagoshima Museum). The symbol "H" and "K" denote Hakamagoshi hill (72 m in altitude) and Karasujima island, respectively. The front of the lava flows was approaching the shore within a distance about 1 kilometer.

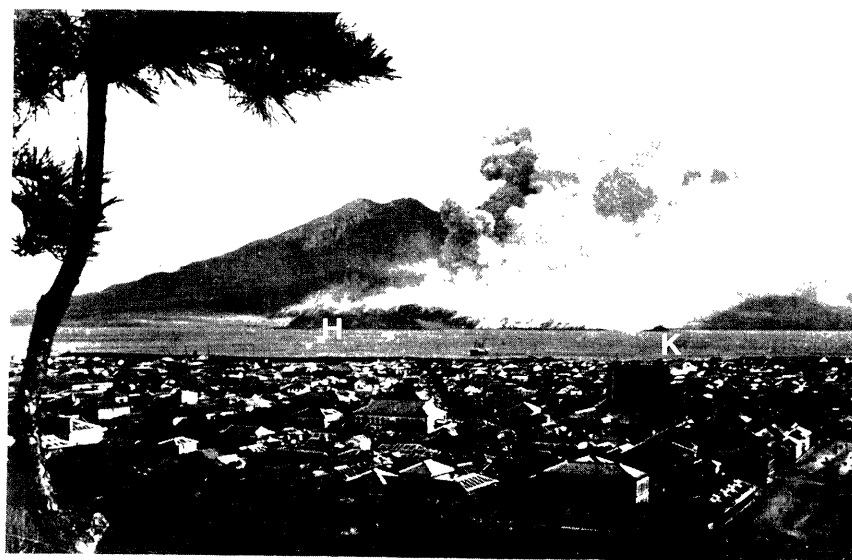


Photo. 2 The view of the western side of Sakurajima taken from Kagoshima on Jan. 16, 1914 (collection of Kagoshima Museum). The front of the lava flows already had crawled into the sea.

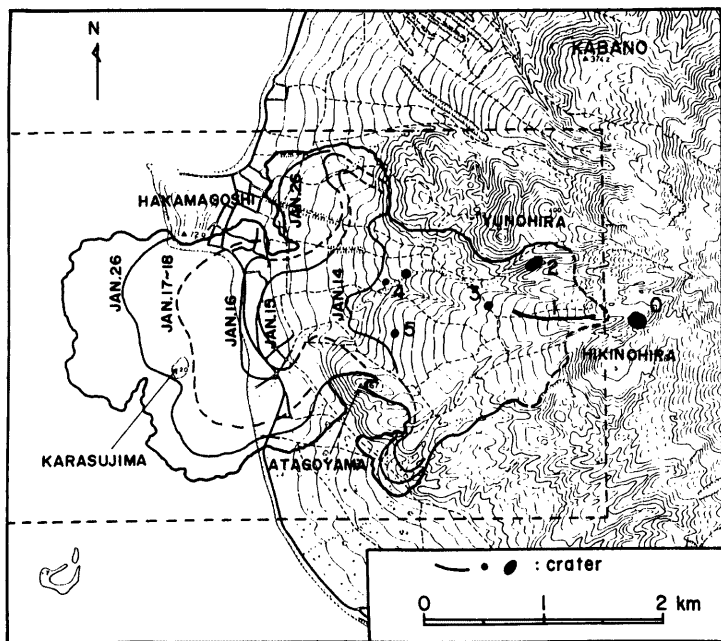


Fig. 1 The progress of the 1914 lava flows on the western part of Sakurajima. The extrusion of the lava began at about 8 P.M. on Jan. 14. The crater No. 0 did not extrude the lava. The broken lines denote the area of the numerical simulation with the dimensions $5 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$.

従って記入した。外側の線は現況の溶岩の堆積域を示す。特徴的なことは、1月15日から16日の間に流下速度が急減していることである。

Fig. 1 に記入した火口の位置は概ね Koto²⁾ の図に従って記入したが 航空写真と現在の地形と比較検討し一部修正をほどこした。これらの火口の多くは現在でも確認することができる。火口 No. 0 は爆裂火口であり溶岩流を噴出した形跡は認められない³⁾。火口群 No. 1 は、小火口が連続的に直線状に配列している。火口 No. 2 は直径が 150~200 m あり、溶岩を流出した最大の火口である。溶岩の噴出は当初の半日は上部の火口群 (No. 1~3) から生じたが、14日以降は次第に下位の火口群 (No. 3~5) へ移行した。

Fig. 1 から見積った溶岩流の被覆面積の時間的変化を Fig. 2 に示した。最終的な溶岩流の被覆面積は 7.4 km^2 である¹⁾。

写真から判読した溶岩流前縁部の厚みから平均堆積厚を仮定し、噴出溶岩総量の時間的変化を調べた結果を Fig. 3 に示した。最終的な噴出総量は 0.25 km^3 と見積られている¹⁾。平均堆積厚を少な目に評価した場合が CASE 1 であり、大きめに見積った場合が CASE 2 である。いずれの場合にしても、溶岩噴出開始から10数時間のうちに、大半の溶岩 (総噴出量の50~70%) が流出したと判断される。当初10数時間の溶岩噴出 rate は $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{sec}$ であったと言える。この図によると、14日から16日かけて溶岩噴出が減少した後6日より再び増大したことになるが、鹿児島測候所の観察記録⁴⁾ (16日に活動が前日より強大になったこと)

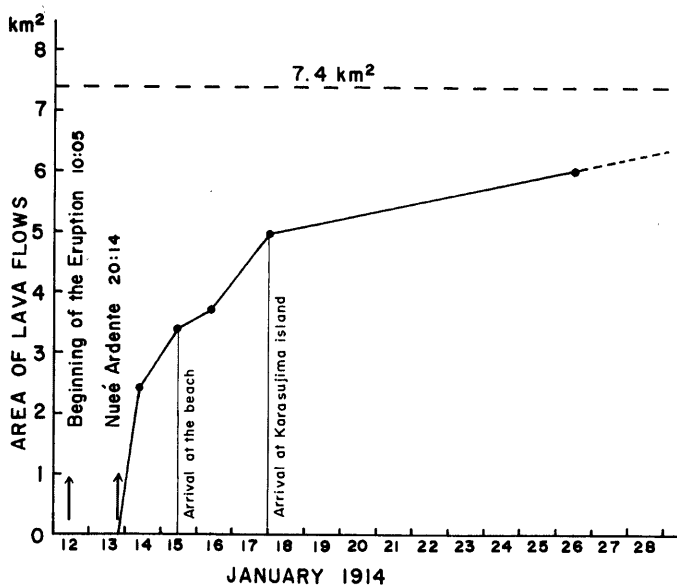


Fig. 2 The changes of the area of the 1914 lava flows on the western part of Sakurajima.

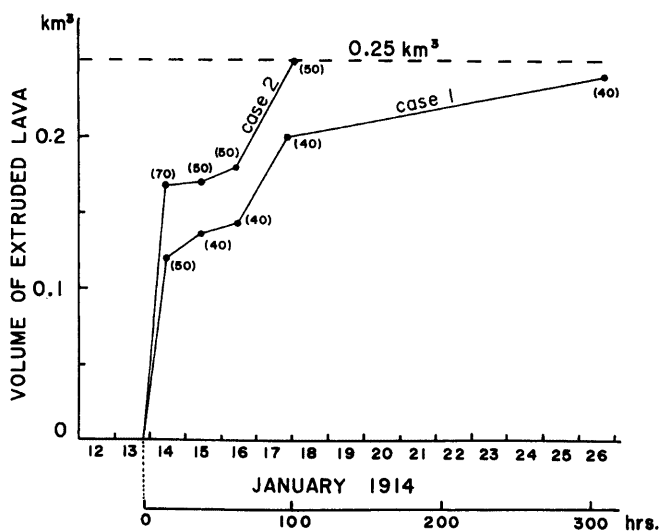


Fig. 3 The volume of the extruded lava on the western part of Sakurajima. The numbers in the brackets denote the mean thickness of the lava flows assumed.

と符号する。桜島西部における噴火活動は約2ヵ月後に終息したが⁶⁾、溶岩を噴出する活動は約2週間で終了したと推定される。

3. 大正西部溶岩流のシミュレーション

溶岩流の数値計算に必要な噴火前の数値化地形データは、前報¹⁾において溶岩流の堆積量を見積る際に作製したものを使用した。明治42年の地形図と明治32年の海図にもとづき作製したもので、標高および水深のサンプリング間隔は50 m×50 mである。実際の数値計算に使用した地形データの範囲はFig. 1において破線で囲まれた部分(東西5 km, 南北3.25 km)である。

数値計算の方法(プログラム)は三宅島溶岩流のシミュレーションの場合と同一である³⁾。

3.1 設定条件

(1) 噴出口の位置

前章のFig. 1に示した位置に噴出口を設定した。火口列1に沿って3カ所の噴出口を想定した。又火口群4は2つの噴出口を想定した。

(2) 噴出 rate および噴出継続時間

前章で述べた噴出量の時間的経過(Fig. 3)に対応して噴出 rate とその時間変化を仮定した。溶岩噴出開始時刻から14時間は上位2つの火口群(No. 1 および No. 2), 14時間から100時間までは下位の火口群(No. 3, No. 4 および No. 5)から溶岩の噴出があったものと仮定した(Table 1)。

(3) 溶岩の物性等

溶岩の密度は2.5 g/cc, 重力加速度は980 cm/sec²と仮定した。溶岩の粘性係数は、当初の14時間の流下範囲が観察と一致するような値, CASE 1 の場合 2×10^9 poise また CASE 2 の場合 3×10^9 poise を与えた。

(4) その他

逐次計算の繰り返しの単位時間(サイクルタイム) Δt は地形勾配, 流動厚および溶岩の物性等を考慮して20秒に設定した。数値化地形の網目から隣接する網目へ溶岩が移動するための流動最小厚を規定する最小流速 v_{cr} ³⁾ は、実際の溶岩流の急傾斜面における堆積厚(10~20 m)を考慮して0.5 cm/sec としている。全体の演算時間は、実際の溶岩流が島島に到達した時間に相当する100時間である。

Table 1 Extrusion rate and viscosity of the lava assumed on the simulation

case 1	Time (h)	Extrusion rate (m ³ /s)						Viscosity (poise)
		crater group					total	
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5			
	0- 14	1190	1190	0	0	0	2380	2 × 10 ⁹
	14- 40	0	0	57	57	57	171	
	40- 66	0	0	28	28	28	84	
	66-100	0	0	153	153	153	459	
case 2	Time (h)	Extrusion rate (m ³ /s)						Viscosity (poise)
		crater group					total	
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5			
	0- 14	1665	1665	0	0	0	3330	3 × 10 ⁹
	14- 40	0	0	7	7	7	21	
	40- 66	0	0	36	36	36	108	
	66-100	0	0	191	191	191	573	

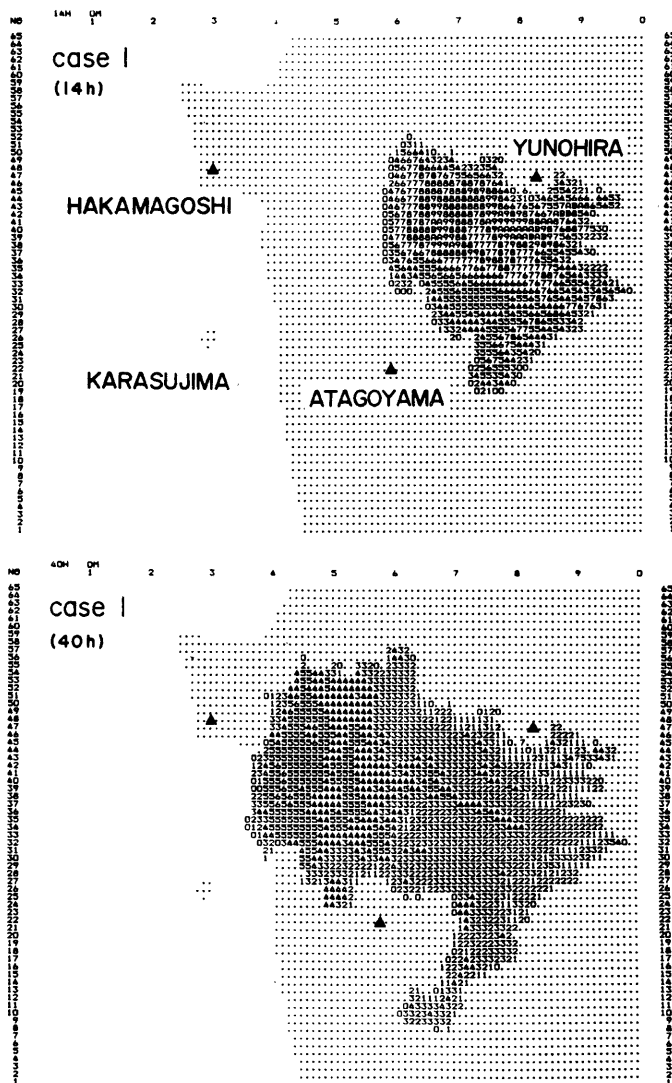


Fig. 4 The 1914 lava flows reproduced by the numerical simulation. Solid triangles denote the tops of the hills. The symbols (0-9, A, B) represent the thickness of the lava flows (unit in 10 m). For example, the symbol "A" represents that the thickness of the lava flows is 100-110 m.

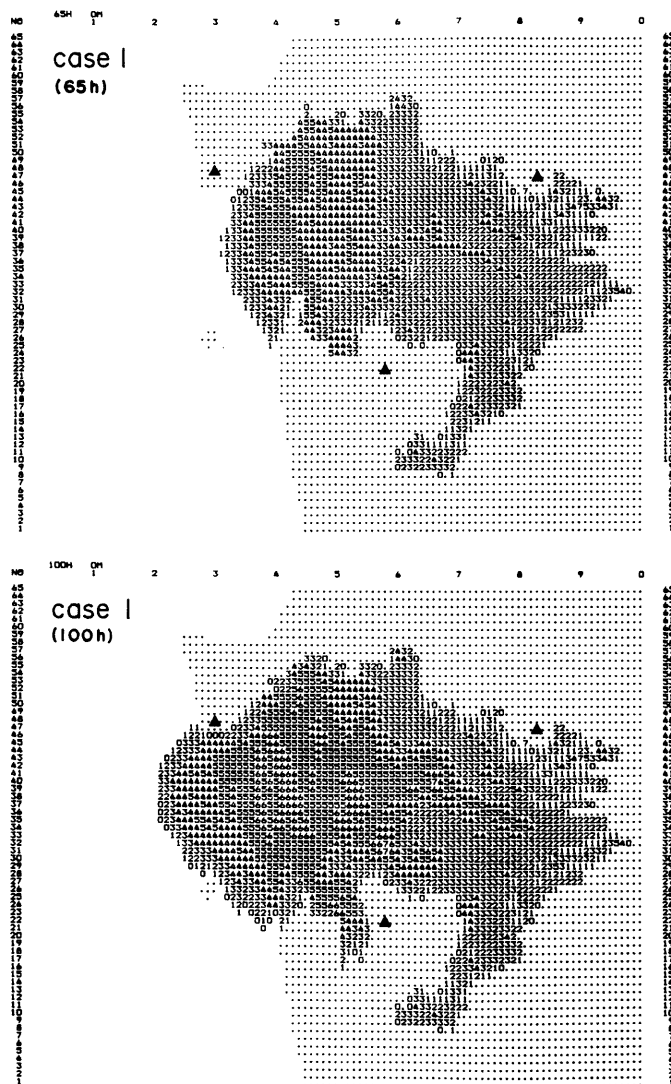


Fig. 5 The 1914 lava flows reproduced by the numerical simulation.

3.2 結果と評価

以上の設定条件に従い、2通りの噴出条件（CASE 1 および CASE 2）について、それぞれ数値計算を行った。噴出条件 CASE 1 の場合の14時間、40時間、65時間および100時間の出力リストを Fig. 4 および Fig. 5 に示した。図中の数値は 50 m×50 m の範囲（数値化地形の網目）の溶岩の 10 m 単位の堆積厚を表わしている。

Fig. 5 の14時間の出力リストのうち、湯ノ平の南側の噴火前の谷筋に相当する部分（標高 150—200 m）の堆積厚は 100—110 m（シンボル A および B）に達している。現在でも湯ノ平の南斜面標高 260 m～340 m の地点には溶岩堤防の根跡が認められることから、噴出当初の溶岩流の厚みが実際に 110 m 以上あったものと推定される。従って、14時間後の数値計算結果は、溶岩流の堆積厚（および被覆域）も含めてよく再現できていると言えよう。

CASE 1 の場合の数値計算にもとづく溶岩流の被覆域と現実の溶岩流の被覆域をならべて Fig. 6 に示した。

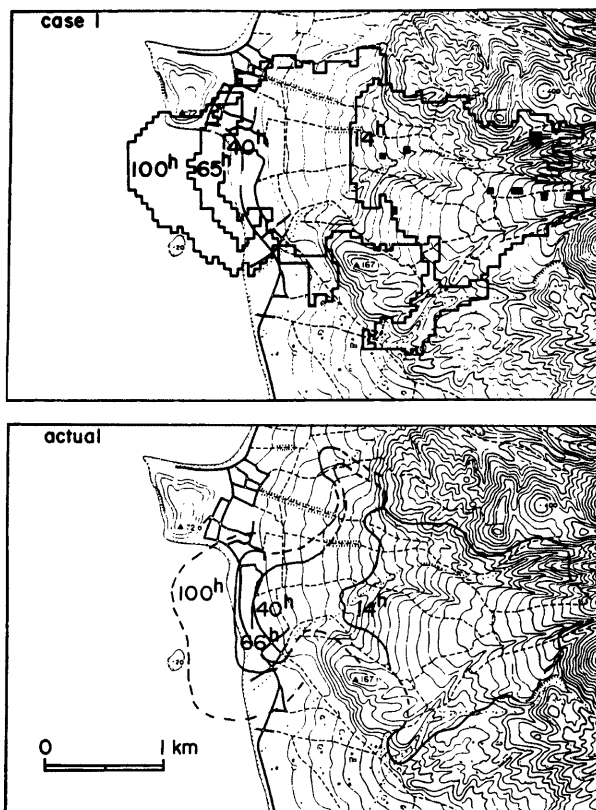


Fig. 6 The comparison between the progress of the 1914 lava flows reproduced by the numerical calculation and that observed. Solid squares in the upper figure denote the craters assumed.

溶岩流の流下方向の中心部についてみると、14時間と100時間（鳥島への到達時刻）における数値計算による溶岩流と現実の溶岩流の到達距離はほぼ一致していると言えるが、海岸に接近、海中に先端が侵入する時刻（40時間および66時間）では、くい遅いが認められる。数値計算結果の方が、距離にして300～500m進みすぎている。時間で言えば、10～25時間はやすぎる。

溶岩流の側縁部についてみると、海拔50m以下の緩傾斜地では、数値計算で再現した溶岩流の方が現実の溶岩流に比べ、拡大していることが分る。その原因の1つは、原地形図（5万分の1）の精度にあると考えられるが、他方、数値計算上の仮定、特に粘性係数一定という条件に問題があると考えられる。実際の溶岩流では、流動速度の小さい側縁部では流動中心より早く冷却が進み、従って粘性係数の増大・流動速度の減少を生じることが期待されるからである。

Fig.7 に実際の溶岩流の被覆面積の増大と、数値計算により再現した溶岩流の被覆面積の増大を併せて示した。14時間後と100時間後の被覆面積はほぼ両者で一致するが、その間には数値計算により再現した溶岩流の被覆面積が20%程度大きくなっている。このくい違いは、主として冷却による溶岩流の粘性増大を考慮し

ていないことによる。66時間（1月16日）から100時間（1月18日）にかけての部分についてみると、実際の溶岩流の被覆面積の増加率が大きくなっている。この現象は、噴出 rate の増大だけでは説明ができず、下位の火口群から噴出した溶岩の粘性が低かった（温度が高い）ことを示唆したものとも考えられる。

4. お わ り に

1914年の大正噴火の際に桜島西部に流下した溶岩流について、その流下過程を噴火に関する資料および写真と比較検討し、定量的に明らかにした。その検討結果にもとづき溶岩の噴出 rate を設定し、溶岩流の粘性係数一定という仮定のもとに数値計算による大正溶岩流の再現を試み、実際の溶岩流の流下過程と比較した。溶岩噴出開始から約半日間の噴出 rate は $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{sec}$ で、噴出時の溶岩の粘性係数は $(2 \sim 3) \times 10^9 \text{ poise}$ あるいは若干小さな値であったと推定される。流下中の冷却による溶岩流の粘性の増大を考慮せず、粘性係数を一定という仮定を行ったため、緩傾斜地における模擬溶岩流の被覆面積の増大という矛盾が生じた。この矛盾を解消するには溶岩流の冷却の過程を織り込んだシミュレーションを行う必要があると考える。しかし、将来の噴火を想定した防災対策上の観点からみれば、現在のシミュレーションの方法でも十分有効であるといえるだろう。

本稿を終えるにあたり、大正の噴火写真を使用するにあたり便宜を計って下された鹿児島県立博物館の方々に厚く御礼を申し上げます。

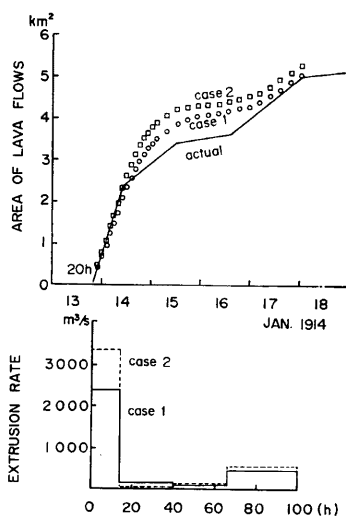


Fig. 7 The enlargement of the area of the 1914 lava flows calculated by the numerical simulation. The lower figure represents the extrusion rate assumed in the calculation (Table 1).

参 考 文 献

- 1) 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一：桜島火山の溶岩流（Ⅰ），京大防災研年報，第24号 B-1，1981，pp. 1-10.
- 2) 石原和弘・井口正人・加茂幸介：数値計算による1983年三宅島溶岩流の再現，京大防災研年報，第27号 B-1，1984，pp. 1-14.
- 3) 石原和弘・井口正人・加茂幸介：玄武岩質溶岩流のシミュレーション——1983年三宅島溶岩流への適用——，火山，第2集，第29巻，1984，pp. S242-S252
- 4) 萩原尊礼・表俊一郎・村内必典・明石和彦・山田重平：昭和21年3月の桜島噴火，震研彙報，第24号，1946，pp. 143-159.
- 5) 永田 武・佐久間修正・福島 直：桜島新噴出溶岩流について，震研彙報，第24号，1946，pp. 161-169.
- 6) 鹿児島県：桜島大正噴火誌，1927，pp. 41-70.
- 7) Koto, B.: The Great Eruption of Sakura-jima in 1914, Jour. College of Science, Imp. Univ. of Tokyo, Vol. 38, Art. 3, 1916, pp. 56-115.
- 8) Omori, F.: The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes, III, Bull. Imp. Earthq. Inv. Com., Vol. 8, No. 3, 1916.