

巨大火山噴火の影響範囲評価のための地理情報システム構築

山元孝広*・千葉達朗**・松永義徳**・宮本 輝**・田中倫久**

(2008年10月7日受付, 2009年2月4日受理)

GIS-based Quantitative Assessment for Hazard Area of Gigantic Volcanic Eruptions in Japan

Takahiro YAMAMOTO*, Tatsuro CHIBA**, Yoshinori MATSUNAGA**,
Akira MIYAMOTO** and Michihisa TANAKA**

High-level radioactive waste has to be disposed in a stable geological formation at a depth of more than 300 meters. Infrequent geological and climate processes and their effects, however, can not be perfectly ignored in 10^5 - to 10^6 -years long-term future assessments. Therefore, we must evaluate the hazard area and probability of infrequent disruption which will not be excluded by the selection program of the final repository site. This study deals with gigantic volcanic eruptions, forming large collapse calderas, as one of the assessments and constructs the GIS-tool for its scenario analysis. Our GIS-tool is composed of (1) database of eruptive history of large-caldera volcanoes in Japan during Quaternary time and (2) program to calculate two-type circular hazard areas. The first hazard area is defined as a crustal deformation zone due to growth of the magma chamber using a sill model. The second hazard area shows a run-out distance of a large-volume of pyroclastic flow on the ground using a subcritical flow model (Bursik and Woods, 1996).

Key words: caldera, pyroclastic flow, high-level radioactive waste, hazard area, GIS

1. はじめに

例えば、高レベル放射性廃棄物の地層処分のような10万年を超える長期の将来予測においては、通常の防災目的の予測では対象にされないような低頻度の地質現象についても考慮が必要である(産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 2007)。特に発生頻度が低いが、一度発生すると地質環境に与える影響が甚大な事象ほどその取り扱いが難しくなる。ここではそのような低頻度事象の代表として大型の陥没カルデラを生じるような巨大火山噴火を取り上げる。すなわちこの噴火は、 100 km^3 を超えるマグマが一気に地表に噴出することにより、噴出物は火砕流となって100 km以上流走し広範囲に地表を破壊、噴出源には直径10 kmを超える陥没カルデラが形成される現象である。阿蘇カルデラや始良カルデラ

の位置する九州中南部では最近10万年間に数回の頻度で巨大火山噴火が発生しており(町田・新井, 2003)、低頻度とは言えその頻度は他地域よりも大きい。地層処分の安全評価に必要な予測期間内に国内のどこかで複数回の巨大火山噴火が起こることは確実であり、その影響を被る地域が立地選定で適切に排除されている必要がある。地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構(2002)は、概要調査地区選定の要件として、「第四紀火山の中心から半径15 kmの円の範囲内にある地域は含めない」としている。しかしながら、この半径15 kmは日本の陸域にある成層火山の側火口の分布頻度(核燃料サイクル開発機構, 1999)から導かれたもので、巨大火山噴火を念頭に置いたものではない。

火山活動の長期的予測手法に関しては、火山の分布位

* 〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-17-1
独立行政法人原子力安全基盤機構規格基準部
Japan Nuclear Energy Safety Organization, Safety
Standard Division, 3-17-1, Toranomom, Minato-ku,
Tokyo 105-0001, Japan
現在の所属: 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7
産業技術総合研究所地質情報研究部門
Geological Survey of Japan, AIST. Central 7, Higashi

1-1-1, Tsukuba 305-8567, Japan
** 〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺1-2-2
アジア航測株式会社
Asia Air Survey Co. Ltd, 1-2-2, Manpukuji, Asao-ku,
Kawasaki, Kanagawa 215-0004, Japan

Corresponding author: Takahiro Yamamoto
e-mail: t-yamamoto@aist.go.jp

置をもとに確率密度関数（カーネル法など）を導入して評価対象地域内の火山出現確率を求めるモデル（Connor and Hill, 1995 など）や、火山周辺におけるサイトへの岩脈貫入交差確率をモンテカルロ法を用いて求めるモデル（Perry *et al.*, 2001; Sheridan, 1992）などがある。この種の確率評価手法は単成火山群活動域である Yucca Mountain での地層処分計画（YMP）を推進する米国を中心に研究が進められてきた経緯がある。しかし、米国エネルギー省（DOE）が YMP で実施した総合システム性能評価（TSPA-SR）における火山活動の確率評価には、批判も根強い。例えば Smith *et al.* (2002) は、単成火山群の噴火活動は一樣ではなく、時間的にも空間的にも偏在しており、活動の高まりを考慮に入れない DOE の確率値は明らかに過小評価であると主張している。Smith らの反論は火山活動の成因まで踏み込んだ考察なしには、科学的に信頼性のある確率評価が出来ないことを強調するものであり、考察なしに予測手法だけを他地域に応用しても通用するものではないことも意味している。また、カーネル密度推定を行う場合には平滑化パラメータとして適切なバンド幅を選択する必要がある。岩脈貫入のモンテカルロ分析においても適切な岩脈長を別途与える必要がある。単成火山群のように、比較的噴火規模の揃った現象を対象とするなら、影響範囲を適切に与え確率値を導くことは比較的容易かもしれない。DOE が行った TSPA-SR でも、評価対象は単成火山群に限定され、カルデラを形成するような巨大火山噴火は想定しないことが評価の前提として与えられている。しかしながら日本での将来の火山活動を考える際には、巨大火山噴火を無視することは出来ず、噴火頻度が数百から数千倍、噴出マグマ量が数千倍から数万倍の桁違いの差がある現象を評価の対象としなければならない。このような極端な事象群に対して、はたして適切なバンド幅のようなものを定義して分布関数だけから一定の確率評価が出来るのかは実データをもとに検討しておく必要がある。

本報の目的は、原子力安全基盤機構（JNES）が日本における巨大火山噴火の影響評価シナリオ作成を支援するツールとして試作した地理情報システム（GIS）の紹介である。本システムは、代表的なカルデラ火山の第四紀噴火履歴データベースと影響範囲表示プログラムを含んでおり、ArcGIS（ArcView 9.2 SP4 3DAnalyst）上で動作する。このうち噴火履歴データベースでは、カルデラ位置と噴火履歴の GIS 上での表示と検索ができるようにしている。また、影響範囲表示プログラムでは、マグマ溜まり形成による地殻変形範囲と火砕流到達範囲が各カルデラ中心から同心円で表示されるようにしている。これらは、ある地点を選定したときその場所に対して影響を

及ぼす巨大火山噴火がどのような頻度で起きたのか？ 将来の噴火ではどのような影響を考慮する必要があるのか？ を考えるための基礎となるものである。作成したシステムについては JNES から希望者への無償提供を予定しており、広く活用されることを望むものである。

2. カルデラ火山の第四紀噴火履歴データベース

本データベースでは、第四紀の巨大火山噴火の発生履歴に関する既存データの収集を行い、ArcGIS 上に得られた情報を集約している。その内容は ① 巨大噴火で形成されたカルデラの位置の ArcGIS 上での図示、② 個々の噴火の名称・発生年代・噴火規模（マグマ噴出量）・マグマの性質（化学組成・温度・含水量）等の表示と ArcGIS 上での検索機能、③ 個々の噴火の影響範囲実績の ArcGIS 上での図示、④ 文献情報の表示である。

対象としたのは、以下の 22 のものである。

北海道地方：屈斜路，阿寒，十勝，支笏，洞爺

東北地方：八甲田，十和田，沖浦，玉川，鬼首，白河

中部地方：白沢天狗，穂高，上宝，箱根

九州地方：阿蘇，耶馬溪，加久藤，小林，始良，阿多，

鬼界

これらは、主に地理的理由をもとに選んでおり、日本列島でカルデラ分布がなるべく偏りないようにしている（図 1）。そのためカルデラによっては、個々の噴火事例に関する情報が著しく不足しているものも取り上げている。そのようなものはデータ欄を空白のままにしている（図 2）。

噴火の規模については、岩石換算の総マグマ噴出量（ $\text{km}^3 \text{DRE}$: Density Rock Equivalent）を目安として用いる。噴出物は一般に火砕流堆積物とその同源降下火砕堆積物（co-ignimbrite ash fall）に分かれて定置しており、総マグマ噴出量は両堆積物を合算したものととなる。しかし多くの文献においては、遠方に薄く飛散・散逸した同源の灰雲降下火砕堆積物を確認することが困難であるため、その体積は推定されていない。上野・安達（2004）は結晶法を用い算出した火砕流堆積物と同源の灰雲降下火砕堆積物の量比を整理し、噴火規模にかかわらず量比が 7:3~5:5 であることから、総マグマ噴出量は火砕流堆積物単体の 1.4 倍~2 倍以上になるとした。そこで本システムでは、上野・安達（2004）の報告の中間値を採用し、灰雲降下火砕堆積物体積不明のものについては火砕流堆積物単体の量の 1.7 倍を火砕流噴火の総マグマ噴出量としている。

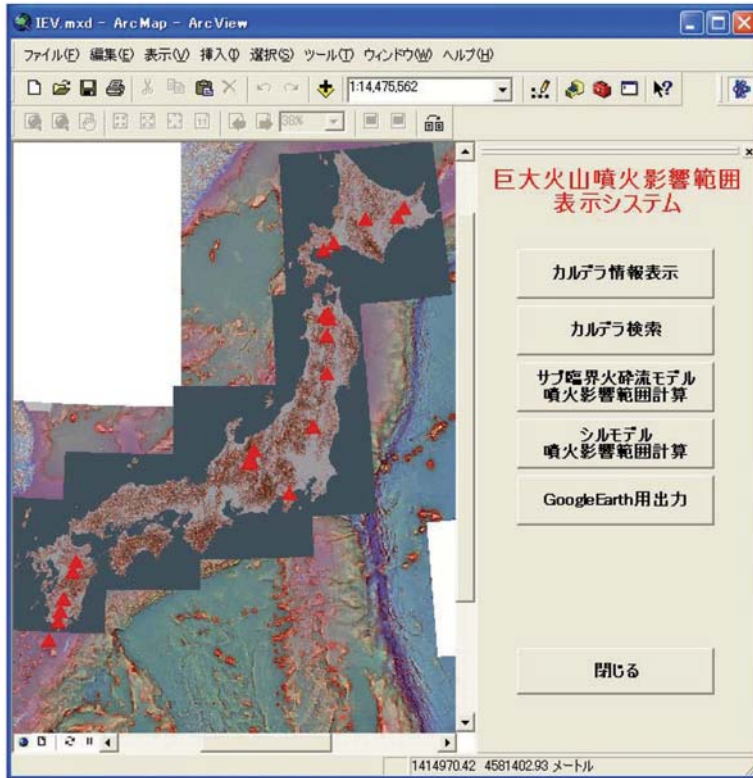


Fig. 1. The first page of the GIS system for hazard area of gigantic volcanic eruptions in Japan. Red triangles show caldera volcanoes on the Red Relief Image Map for the Japan islands.

図 1. システム表示画面と収録カルデラの位置. カルデラ位置は赤三角で、背景には赤色立体地図を使用.

3. 巨大火山噴火影響範囲表示プログラムの作成

3-1 影響範囲の考え方

巨大火山噴火が周辺の地質環境に与える影響は、1) マグマの蓄積による地殻の変形（先行隆起）、2) マグマの貫入による地殻の加熱、3) 噴出物による地表の被覆と加熱、4) カルデラ陥没による地殻の破壊に大きく分けられる（図3）。1)の先行隆起は噴火に先行して長時間かけて起こると期待される現象で（pre-caldera tumescence; Smith and Bailey, 1968）、範囲内の地殻の機械的な変形と新たな断裂形成をもたらし得る。2) 貫入マグマによる過熱は、マグマからの熱伝導と地熱流体を介した熱対流で起こるが、熱の運搬は圧倒的に後者の方が効率よく、影響範囲が大きくなる。例えば上部地殻の熱拡散率 D は $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であるので、拡散距離 $(Dt)^{1/2}$ は、時間 t が 100 万年間でも $10^{0.5} \text{ km}$ 程度にしかならない。従って、100 万年間存続できるような巨大なマグマ溜まりが地殻深部にあっても、熱伝達だけではほとんど地表地殻に熱的影響を及ぼすことがない。一方、熱対流が起きるためには地熱流体の通路となる断裂系が必要となるが、火山活動

により新たに断裂が形成される範囲は先行隆起範囲内であり、2)の影響範囲は1)の影響範囲内に包含されることになる。既存の断裂系を通じてより遠方にまで対流が及ぶようなケースもあろうが、これは地域固有の地質特性によるものであり、立地調査によって解決すべき課題である。3)の噴出物には、既に述べたように、火砕流堆積物と灰雲降下火砕堆積物からなる。このうち、巨大火山噴火の灰雲降下火砕堆積物は列島規模の分布を持っている（町田・新井, 2003）。しかし、この灰雲降下火砕堆積物は大気中で十分冷却された後に地表に定置すること、厚さは大部分が1mに満たないことから地下地質環境への影響は少ない。一方、火砕流堆積物はマグマ温度からあまり冷えないまま、谷地形を数10～数100mの厚さで埋めるため、地表加熱による地下水流動、特に地下水の涵養への影響が無視できなくなろう。4)のカルデラ陥没は、空になったマグマ溜まりの天井部が支えを失い陥没する現象で、当然ながらその影響範囲は先行隆起域の内側にある。

上記をまとめると、巨大火山噴火の評価シナリオの設

鬼首カルデラ

項目	細目	値または図の場所	分析手法	文献
カルデラ位置	地図	阪口・山田 (1988)-第1図	-	阪口・山田 (1988)
	主火道	緯度 38.830	-	日本の第四紀火山カタログ
		経度 140.695	-	
	大きさ	直径約15km	-	土谷ほか (1996)
噴火年代	池月凝灰岩	0.25+/-0.07Ma	ジルコンフィッシュ シントラック	土谷ほか (1996)-第7表
	下山里凝灰岩	0.21+/-0.09Ma		
	池月	240-270ka		町田・新井 (2003)
化学組成 (wt%)	SiO ₂	65.1-70.7		日本の第四紀火山カタログ
火砕流の分布	池月凝灰岩	阪口・山田 (1988)-第2図		阪口・山田 (1988)
	下山里凝灰岩	土谷ほか (1996)-第30図		土谷ほか (1996)
噴出体積	池月凝灰岩	現存bulk 18km ³ の数倍 (ここでは3倍と仮定)	36 km ³	溶結-非溶結(中間)1600 kg/m ³
	池月凝灰岩 co-ig	-	25 km ³	換算値(上野・安達 2004)
	下山里凝灰岩	-	-	池月凝灰岩より薄い
マグマ温度	-	文献なし	-	文献なし
含水量	-	文献なし	-	文献なし
マグマ溜り深度	-	文献なし	-	文献なし
マグマ溜り厚さ	-	文献なし	-	文献なし
文献				
阪口圭一, 山田當三 (1988). 鬼首カルデラ周辺の火砕流堆積物—いわゆる北川石英安山岩—の再検討. 地質調査所報告, 28, p37-59				
土谷信之, 伊藤順一, 関陽児, 巖谷敏光 (1997). 岩ヶ崎地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅). 地質調査所, 96p				
町田 洋, 新井房夫 (2003). 新編 火山灰アトラス. 東京大学出版会, p216-217				
第四紀火山カタログ委員会編. 日本の第四紀火山カタログ, 286. 池月凝灰岩 (http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/volcano/kobetsu/id-286.htm)				
第四紀火山カタログ委員会編. 日本の第四紀火山カタログ, 255. 下山里凝灰岩 (http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/volcano/kobetsu/id-255.htm)				

Fig. 2. An output image of data table for a caldera volcano.

図 2. カルデラ情報の表示例.

定に最低限必要な影響範囲としては、先行隆起の範囲とその外側の火砕流の到達範囲が設定できれば良い、すなわち、①両範囲外については、影響を考えなくても良い領域、②先行隆起範囲と火砕流到達範囲の間は、地表を被覆する高温の火砕流堆積物が与える水文地質学的変化を考慮すべき領域、③先行隆起範囲内は、地表の高温火砕流堆積物と地殻の変形による地下での新たな割れ目形成の両方による水文地質学的変化を考慮すべき領域となる。

3-2 システムの概要

作成したシステムでは、先行隆起範囲をシルモデル (Sun, 1969) で、火砕流到達範囲をサブ臨界火砕流モデル (Bursik and Woods, 1996) で計算し、ArcGIS 上の各既存カルデラにおいてこれらを同心円ポリゴンで表示できるようにプログラムを作成している。両範囲の計算に当たっては関与するマグマの体積 (= 噴火の規模) を共通入力パラメータに選び、その他の入力パラメータについては過去の各カルデラの履歴を反映したものがまず参考

値として表示され、これを見ながら入力値が決められるようにしている。また、計算に用いたパラメータを保存し、再利用することが出来るプログラム、影響範囲の同心円ポリゴンを、Google Earth (フリーソフト) 用のデータ (kml・kmz 形式) に出力するプログラムも併せて作成している。

3-3 先行隆起範囲

影響範囲表示システムでは、対象カルデラ一覧で選択したカルデラに対して、以下のパラメータを設定して地表面の垂直変位量 W の同心円を作成する。

- マグマの体積 V_m (km³ DRE)
- マグマ溜まりの深さ h (km)
- マグマ溜まりの厚さ B (km)
- マグマ溜まりの半径 a (km)

マグマ溜まりについては水平な回転楕円体を仮定し (シルモデル)、カルデラ形成噴火に至るマグマ溜まりの体積変化がもたらす地表変位について Sun (1969) の解析

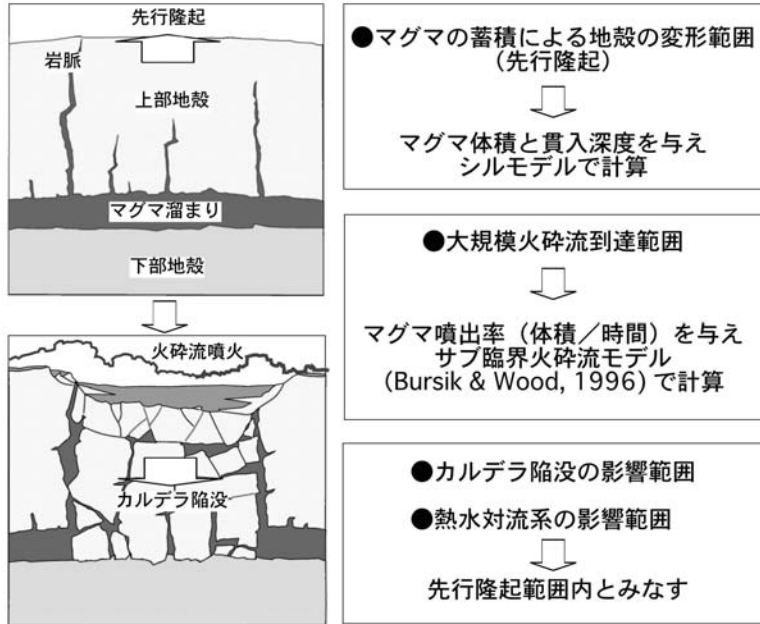


Fig. 3. Basic concept for hazard area of a gigantic volcanic eruption forming a large collapse caldera. Schematic sections of caldera collapse are taken from Whitney and Stormer (1986).

図 3. 巨大火山影響範囲の考え方. カルデラの模式断面図は Whitney and Stormer (1986) による.

解を使用し計算を行った. この解析解は, 溜まりの半径に対し深さが小さくなると実際の変位との誤差が大きくなるものの, 本システムでの参考値はそのような条件にはない. 計算に当たっては, 以下の Sun (1969) の式 (16) を使用し任意の地点の半径 r と垂直変位量 W の関係を求めた.

$$W = B \left(\sqrt{k} \sin(\theta/2) - \frac{h}{a\sqrt{k}} \cos(\theta/2) \right)$$

代数 θ については以下の式 (15)

$$\theta = \arccot \frac{r^2 + h^2 + a^2}{2ah}$$

を代入し, 代数 k については Sun (1969) に示してある以下の式

$$\sqrt{k} = \left[\left(\frac{r^2}{a^2} + \frac{h^2}{a^2} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2h}{a} \right)^2 \right]^{1/4}$$

を代入した. なお, プログラム上では上の式 (15) の解 θ が計算不能とならないよう, \arccot の変数部が 0 の際は, 解 θ を $\pi/2$ とした. あわせて解 θ が負の値となる際は, 解に π 加えたものを θ とした.

本計算に必要なマグマ溜まりの半径 a と厚さ B につ

いての情報は, 既存文献では皆無である. そのため本プログラムにおいては, マグマ溜まり半径=カルデラ半径と仮定し, 入力したマグマの体積からマグマ溜まりの厚さを概算できるようにしている. なお, この仮定は Accocella (2007) のカルデラ形成室内実験の総括と矛盾しない. マグマの体積は総マグマ噴出量と同じで, 巨大カルデラ噴火によりマグマ溜まりは底まで空になるものと仮定している (Whitney and Stormer, 1986). あわせて, システムではユーザーが任意の値を入力することもできるようにしている. 出力結果については, 垂直変位量 W が 100, 10, 1, 0.1 m の同心円ポリゴンとして表される (図 4).

3-4 火砕流到達範囲

影響範囲表示システムでは, 対象カルデラ一覧で選択したカルデラに対して, 以下のパラメータを設定して火砕流到達範囲の同心円を作成する.

- 総マグマ噴出量 (km³ DRE)
- 噴出時間 (s)
- 初期 fountain 半径 r_0 (km)
- マグマ温度 T (K)
- 初期ガス質量分量 n_0
- 火砕物終端速度 \bar{V}_s (m/s)
- 大気温度 T_a (K)
- 大気ガス定数 R (J/K·kg)

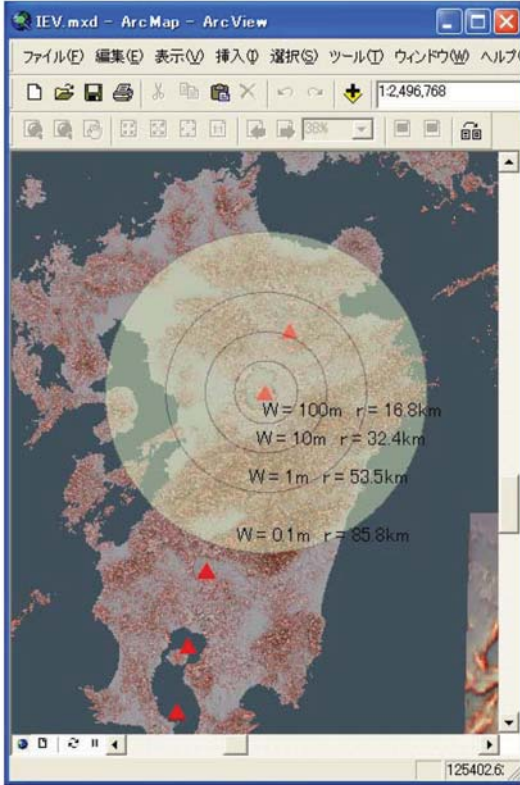


Fig. 4. An output image of pre-caldera uplifting area for the Aso 4 pyroclastic flow case (magma volume: $300 \text{ km}^3 \text{ DRE}$; depth of magma chamber: 15 km). W and r are vertical dislocation and radius of uplifted area, using sill model.

図 4. シルモデルによる先行隆起範囲の出力例。阿蘇 4 火砕流（マグマの体積 $300 \text{ km}^3 \text{ DRE}$ 、マグマ溜まりの深さ 15 km）。

- ・大気密度 α (kg/m^3)
- ・大気圧 $\alpha \cdot R_a \cdot T_a$ (N/m^2)

Bursik and Woods (1996) の火砕流到達域モデルは給源から同心円上に広がる大規模火砕流を対象にしたもので、その最大到達距離は一定の噴出率と混相流からの粒子堆積率で記述される。密度成層した境界層流れの不安定性を表す無次元数リチャードソン数が 1 以下の場合は大気の取り込みによる浮力効果が著しい超臨界火砕流に、1 より大きい場合はその効果が無視し得るサブ臨界火砕流となる。最大到達距離は同じ噴出率でサブ臨界火砕流の方が大きく、ほとんどの火砕流事例もこれに属するので、今回の計算には彼らのサブ臨界火砕流の式を用いた。計算においては Bursik and Woods (1996) の式 (19)

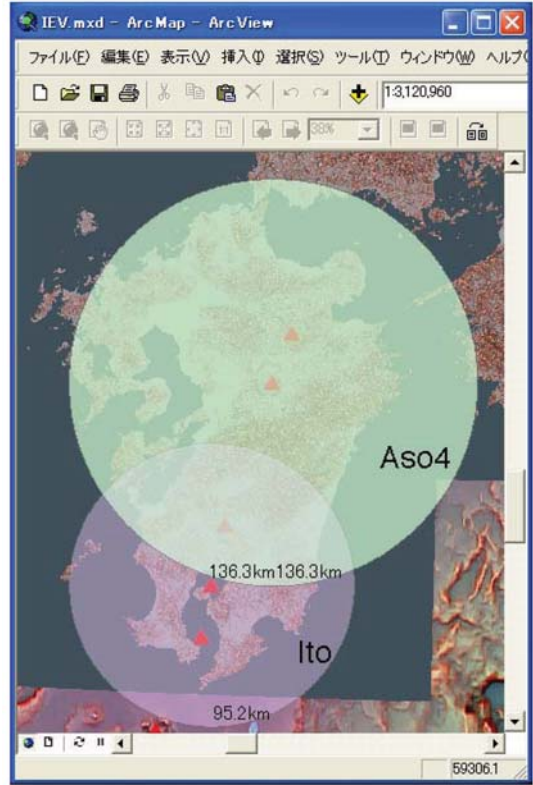


Fig. 5. An output image of run-out area for the Aso 4 pyroclastic flow case (magma volume: $300 \text{ km}^3 \text{ DRE}$; eruption time: 40000 s) and the Ito pyroclastic flow area (magma volume: $146 \text{ km}^3 \text{ DRE}$; eruption time: 40000 s), using Bursik and Woods (1996) model.

図 5. サブ臨界火砕流モデルによる火砕流到達域の出力例。阿蘇 4 火砕流（マグマの体積 $300 \text{ km}^3 \text{ DRE}$ 、噴火継続時間 40000 s）、入戸火砕流（マグマの体積 $146 \text{ km}^3 \text{ DRE}$ 、噴火継続時間 40000 s）。

$$r_t^2 = r_0^2 + \frac{2V}{V_s} \ln \left(\frac{(1-n_0)T_a}{n_0(T-T_a)} \right).$$

および式 (20) を修正した式

$$M_f = \beta_0 V = \frac{\alpha R_a T_a}{n_0 R T} V$$

の 2 つの式相互の関係を求めることにより、任意の噴出率 (M_f : 噴出質量流量) の際の到達半径 r_f を算出した。 (V : 噴出体積流量; β : 容積密度)

必要なパラメータのうち初期 fountain 半径についてはカルデラ半径を参考値として用いている。また、火砕物終

端速度については、単一粒径を仮定し、Bursik and Woods (1996) と同様に参考値として 1m/s を用いている。その他の使用するパラメータについては、文献から収集したデータもしくは常識的な一般値とし、ユーザーが任意に入力できるものとした。マグマ噴出率 M_f については、Bursik and Woods (1996) の仮定のように一定とし、 $M_f = (\text{総マグマ噴出量}) / (\text{噴出時間})$ で与えている。噴出時間については、大規模火砕流の多くが $10^3 \sim 10^5$ s の範囲にあることを Bursik and Woods (1996) が指摘しており、参考値には 10^4 s (2.7 時間) がデフォルトとして表示されるようにしている。この値は約 50 km^3 DRE のマグマを噴出し、直径 6~7 km のカルデラを形成したタンボラ火山 1815 年噴火の破局噴火継続時間 (4 月 10 日深夜~11 日早朝; Sigurdsson and Carey, 1989) と同程度である。実際にデータベースに収録したカルデラ形成火砕流事例の多くは、噴火時間を 10^4 s 程度にしたときに到達範囲実績との対応が良い。例えば、九州の阿蘇 4 火砕流や入戸火砕流のような大規模なものについては継続時間が 40000 s (約 11 時間) で、到達範囲同心円と噴火実績との一致がよい (図 5)。

4. ま と め

本システムが提供する日本の巨大火山噴火に関する既存文献データや影響範囲表示プログラムは、高レベル放射性廃棄物最終処分地選定における文献調査での利用を念頭に置いたもので、次の段階の概要調査において解決すべき課題・重点調査項目の設定が客観的に行えるようにすることを目的としている。実際のサイトを対象とした巨大火山噴火の影響評価のためには、立地調査によって具体的なパラメータが取得されるべきであり、本システムでの評価の考え方が必要なパラメータの抽出に役立つことを期待している。一方で、これまで日本で整備された火山ハザードマップは、成層火山などの活火山を想定しており、カルデラ火山は検討されていない。本システムで表示される火砕流到達範囲は、ハザードマップに描かれた火砕流可能性範囲よりもはるかに広く、これと同列には扱えないことは指摘しておく必要がある。ある地点が到達域内に含まれたとしても発生頻度の点から通常の防災の対象となるものではないし、大規模火砕流が何の前兆もなく突然発生するものでもない。巨大火山噴火にはマグマの蓄積過程が事前に必要であり、本システムで表示される先行隆起があるものと期待される。カルデラの再生隆起に伴う地殻変動は Yellowstone や Long Valley カルデラで顕著に観測されており (例えば下鶴ほか, 1995, p. 427-428), 先行隆起についてもこれが発現した際には現在の観測体制で見落とされることはありそ

うにもない。

謝 辞

本システムは、JNES 交付金事業「平成 19 年度地質及び気候関連事象の極低頻度シナリオの安全評価モデル化に関する検討」で作成したものである。なおプログラム作成では、東京大学地震研究所の小園誠史さんに有益な助言を頂いた。また、宝田晋治さんと匿名査読者のコメントは、本稿改善に有益であった。以上の方々に、お礼申し上げます。

引用文献

- Accocella, V. (2007) Understanding caldera structure and developments: an overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth Sci. Rev.*, **85**, 125-160.
- Bursik, M.I. and Woods, A.W. (1996) The dynamics and thermodynamics of large ash flows. *Bull. Volcanol.*, **58**, 175-193
- Connor, C.B. and Hill, B.E. (1995) Three nonhomogeneous Poisson models for the probability of basaltic volcanism: application of the Yucca Mountain region, Nevada. *J. Geophys. Res.*, **100**, 10107-10125.
- 原子力発電環境整備機構 (2002) 概要調査地区選定上の考慮事項. 22p.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次とりまとめ—。分冊 1 わが国の地質環境. JNC TN1400 99-021
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編 火山灰アトラス 日本列島のその周辺。東大出版会, 360p.
- Perry, F.V., Valentine, G.A., Desmarais, E.K. and Wolde-Gabriel, G. (2001) Probabilistic assessment of volcanic hazard to radioactive waste repositories in Japan: intersection by a dike from a nearby composite volcano. *Geology*, **29**, 255-258.
- 産業総合技術研究所深部地質環境研究センター (2007) 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—。地質調査総合センター研究資料集, no. 459.
- Sheridan, M.F. (1992) A Monte Carlo technique to estimate the probability of volcanic dikes: high-level radioactive waste management. In: *Proceedings of the Third Int. Conf.*, 1992, Las Vegas, Nevada, 2033-2038.
- Sigurdsson, H. and Carey, S. (1989) Plinian and cognimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Bull. Volcano.*, **51**, 243-270.
- 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明 (1995) 火山の事典。朝倉書店, 590p.
- Smith, E.L., Keenan, D.L. and Terry, P. (2002) Episodic volcanism and hot mantle: implications for volcanic hazard studies at the proposed nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, **12**, 4-9.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A. (1968) Resurgent cauldrons. *Geol. Soc. Am. Mem.*, **116**, 613-662.

Sun, R.J. (1969) Theoretical size of hydraulically induced horizontal fractures and corresponding surface uplift in an idealized medium. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5995–6011.

上野龍之・安達裕介 (2004) 大規模火砕流堆積物と cognimbrite ash の量比. 日本火山学会講演予稿集 2004

年秋季大会, 132–132.

Whitney, J.A. and Stormer, Jr., J.C. (1986) Model for the intrusion of batholiths associated with the eruption of large-volume ash-flow tuffs. *Science*, **231**, 483–485.

(編集担当 大場 司)