

火山現象の数値シミュレーションと火山防災

ふじた えいすけ
藤田 英輔

国立研究開発法人 防災科学技術研究所 上席研究員
(一財)砂防・地すべり技術センター 理事



1. はじめに

火山噴火とそれに伴う火山災害は、複雑な物理的・化学的な要素の組み合わせにより発生する現象であり、これらを総合的に評価することによって、火山噴火予知・推移予測、災害推定などについて精度の高い情報発信が可能となる(図-1)。複雑な現象を総括的に解明するために、数値シミュレーションは有効な手段である。火山観測データや実験データから得られる帰納的情報と理論から導出する演繹的情報を相互にフィードバックさせて、より高度で精度の高いモデルを構築する。

火山活動は地下におけるマグマ等の火山性流体の移動やそれに伴う地震・地殻変動・電磁場・火山ガスなどを様々な手法により観測することで把握することができる。これらの観測データを整合的に説明するような物理モデルを構築し、そのモデルに基づいて地下の発生源で何が起きているかを推測し、その後の火山活動の予測の評価につなげることを目指している。一方、ひとたび、マグマ等が地表に噴出した場合は、直接的な火山災害が発生する危険性があり、その評価が重要である。

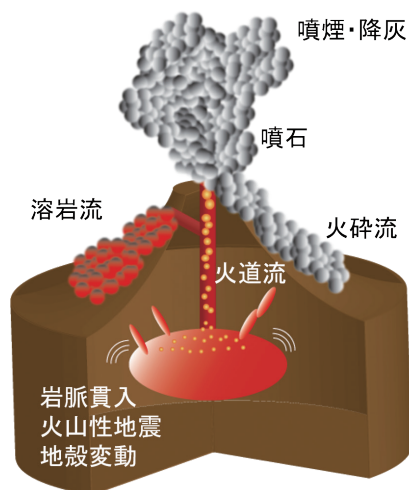


図-1 火山噴火に伴う様々な現象

2. 地下におけるマグマの流動シミュレーション

2.1 火道流シミュレーション

マグマは噴火口から噴出される際に固体・液体・気体が混合した多相流の状態となっており、その組み合わせによって噴火の様式が決まる。そのために、火道流のメカニズムを解明することが重要である。マグマが地下から上昇することに伴い、減圧発泡が促進され、気体成分が析出する。この気体への相転移が急激な体積膨張をもたらす。気体が周辺へ浸透して抜けてしまう場合には爆発性が高まらず穏やかな噴火となるが、急激な発泡と体積膨張で周辺への脱ガスの時間が十分でない時は爆発的な噴火となる。

噴火様式がどのようになるか、事象の分岐をもたらすパラメータの抽出に関するシミュレーション研究が行われている(図-2)。これは3章で示すように、様々な火山ハザードのうち、どれになりうるかを判断するための情報となる。火道流モデルでは気液二相流を定式化し、火道を取り巻く地殻を弾性体として取り扱い、周辺等の応力連接やガス成分の浸透を組み合わせ、観測しうる地殻変動量などの観測量を説明する。例えば、ブルカノ式噴火では、火口直下浅部でのマグマ蓄積・流動過程を浅部マグマ溜りと火道からなるマグマ供給系の数値モデルで再現可能であることが分かってきた。また、プリニー式噴火、溶岩流出噴火についても、

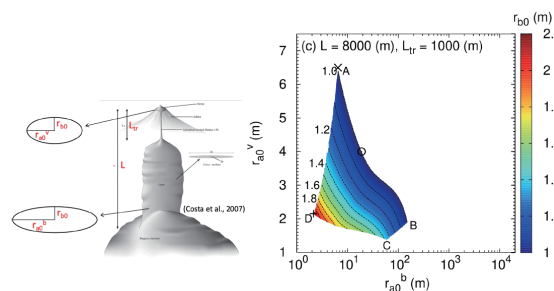
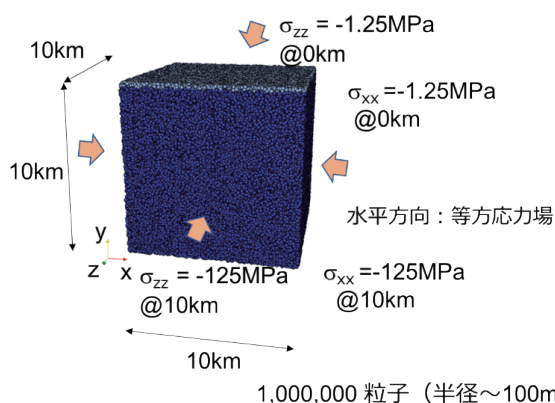


図-2 火道流モデルにおける火道形状の設定の概念図(左)及び1986年伊豆大島サブリー式噴火に相当する火道流の定常解が存在する火道形状の条件(右)

○応力場・過剰圧の設定

(a) 境界条件



(b) 初期条件

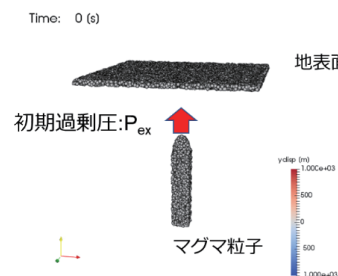


図-3 個別要素法による岩脈貫入シミュレーションにおける応力場・過剰圧の設定

火道流モデルにおけるマグマ物性や火道形状の効果について定量的な評価を踏まえ、噴火様式間の遷移過程の再現が行われている。

2.2 マグマ貫入シミュレーション

地下でのマグマの移動に伴い、火山性地震や火山性の地殻変動が発生する。特に破壊を伴う岩脈貫入について、連続体力学で定式化しようとする場合、マグマと岩石の間で複雑な境界条件に対処する必要があり、上昇経路の選択などについてマグマ貫入過程を柔軟に追跡するのが難しい。多様な条件でマグマ貫入過程のシミュレーションをするには、定式化に幾何学的な制約の少ない粒子法が適している。粒子法の一つとして、個別要素法 (DEM) による岩脈貫入シミュレーションを実施している。DEM では地殻を粒子の集合体として表現する。粒子は間隙ばねで接合され、間隙ばねは normal 方向および shear 方向にそれぞれ弾性ばねとダッシュポットを設定し、normal 方向には閾値、shear 方向には Mohr-Coulomb 条件による破壊判定を組み込む。ミクロスケールでのばね定数はマクロスケールでの剛性率や粘性との対応がつくように圧縮数値試験により求められた値を用い、10 km x 10 km x 10 km の対象領域にランダムに粒子を生成し、重力パッキングを行い、この内部にマグマ領域を設定して、初期過剰圧を与えて岩脈貫入を再現する。また、岩脈貫入のパターン (形状) は周辺の 3 次元応力場 (差応力) を強く反映する。水平方向の境界に広域応力場を設定し、鉛直方向には静岩圧を設定する。今回、水平方向は等方的としている (図-3)。粒子の移動に伴う周辺の応力の変化に着目した。図-4 に噴火未遂の場合、図-5 に噴火に至る場合における岩脈シミュレーションの計算結果を示す。岩脈と周辺地殻の境界域に応力集中と開放が顕著であり、この付近での地震発生が起

こっていることが分かる。この他、岩脈から離れた場所でもランダムに地震が発生する。100 万粒子の場合、1 粒子のサイズは 100 m 程度であり M2 程度に相当する。応力が増加している際にはこの粒子に応力集中が起こり、その後減少したところが地震発生による応力降下を表している。応力降下量は発生する地震の卓越

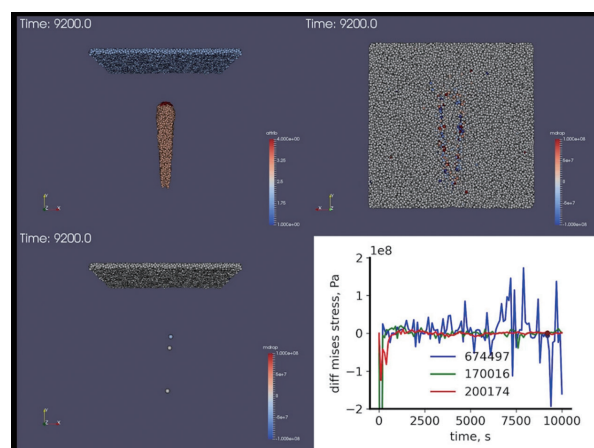


図-4 噴火未遂の場合における岩脈分布 (左上)・Mises 応力変化量 (右上)・参照粒子 (左下)・参照粒子の Mises 応力量変化の時間変化 (右下)

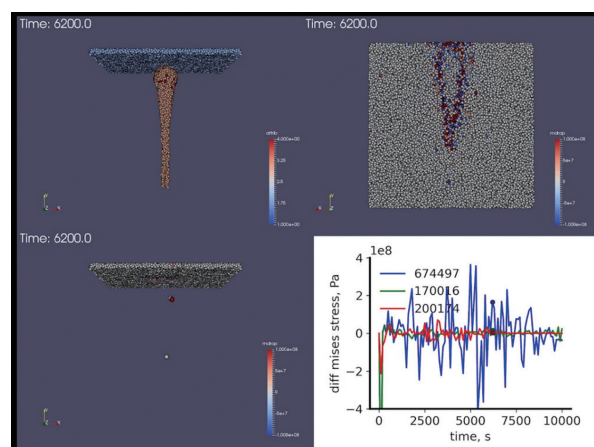


図-5 噴火に至る場合における岩脈分布 (左上)・Mises 応力変化量 (右上)・参照粒子 (左下)・参照粒子の Mises 応力量変化の時間変化 (右下)

周波数と関連しており、小さい場合が低周波、大きい場合は高周波に対応する。岩脈貫入開始時、深部では低周波が卓越するが、上昇に伴って高周波が卓越する傾向があることが分かる。岩脈貫入による噴火／噴火未遂は、主に初期過剰圧量によって決まる。初期過剰圧が不十分で噴火未遂となる場合、深部のほぼ同じ地点で応力集中と降下を繰り返し、継続して低周波が卓越する地震が発生する事象も確認されている。

2.3 地殻変動シミュレーション

観測される地殻変動から、地下のマグマシステムの位置や形状などが推定可能である。

火山地形の効果を考慮した地殻変動を境界要素法による数値計算で求める手法の開発が行われている。一例として、伊豆大島のGNSS観測点に適用したものを示す(図-6)。三原山(山頂の標高758m)の山頂直下に球状圧力源を設置し数値計算によって求めた変位量と、半無限均質弾性体を仮定した標高補正茂木モデルによる変位量を観測点毎に比較している。設置した圧力源の深さが海拔0mより高い場合、三原山周辺の観測点では、数値計算で求めた水平変位量と標高補正茂木モデルで求めた水平変位量の差が大きくなる。一方、圧力源が深くなると、数値計算結果と標高補正茂木モデルの差はわずかとなる。地殻変動データを用いた圧力源の推定結果への地形効果の影響として、数値計算で求めた三原山山頂直下の球状圧力源の膨張によ

るGNSS観測点の水平変位量を観測データと仮定して、標高補正茂木モデルを用いたグリッドサーチにより圧力源の推定を行った結果、圧力源の深さが海面下400mよりも深い場合、標高補正茂木モデルから推定される圧力源の深さは数値計算で設定した圧力源の深さとはほぼ同じになる。圧力源の深さが浅くなると、標高補正茂木モデルによる解析で得られる圧力源の深さは数値計算で設定した圧力源の深さよりも浅くなる。設定する圧力源の深さが標高100mよりも浅い場合、推定される圧力源の深さは設定した深さより100m以上浅くなる。地表付近のごく浅部に圧力源が想定されるような地殻変動データを用いた圧力源推定では、火山地形の効果を考慮することが重要であり、特に噴火直前の評価への影響が大きい。

3. 火山噴火に伴う現象とハザードシミュレーション

火山災害に直結する現象として、溶岩流・火砕流・火山泥流(融雪型含む)・噴煙・噴石などがある。第2章で述べたように、噴出時における気体の多寡が噴火の爆発性を規定し、それに伴い、どの現象が顕著になるかが決まる。穏やかな噴火(非爆発的噴火)の場合には溶岩流になりやすく、爆発的な噴火の場合は噴煙柱が上がる噴火となり、噴石や火山灰が降下する。また、火砕流は噴煙柱が崩壊する際に発生するものと、ガスが抜けた溶岩が火口から斜面に沿って流下する場合に発生するものがある。火山泥流は火山体周辺に透水性の低い火山灰が降り積もり、その上に雨などが降り、周囲の土石や木々などを巻き込んで発生する。これらの流動現象は重力流という共通性があり、現象を記載する方程式系を統一的に扱うことが可能である。また、爆発性が強い場合、噴煙柱が成長し、巻き上げられた噴出物が周辺大気場により流され、火山体近傍のみならず遠方まで噴石や火山灰として降下・堆積する。ここでは溶岩流シミュレーション、降灰シミュレーション、および、土石流評価に資するためのInSAR非干渉性評価を用いた降灰分布の推定と降灰シミュレーションの連携について述べる。

3.1 溶岩流シミュレーション

溶岩流は、マグマの脱ガスがある程度進んだ状態で火口からおよそ1000℃の温度で流出する現象である。地形に沿って流下しながら、大気からの冷却などの影響も受け、固化や再溶融などの現象が発生する。溶岩流の様相は、溶岩そのものが持つ特性と溶岩流が流下する環境(地形や水域)などにより決まる。溶岩の粘性は化学組成、含まれる結晶量、さらにはこれらも依

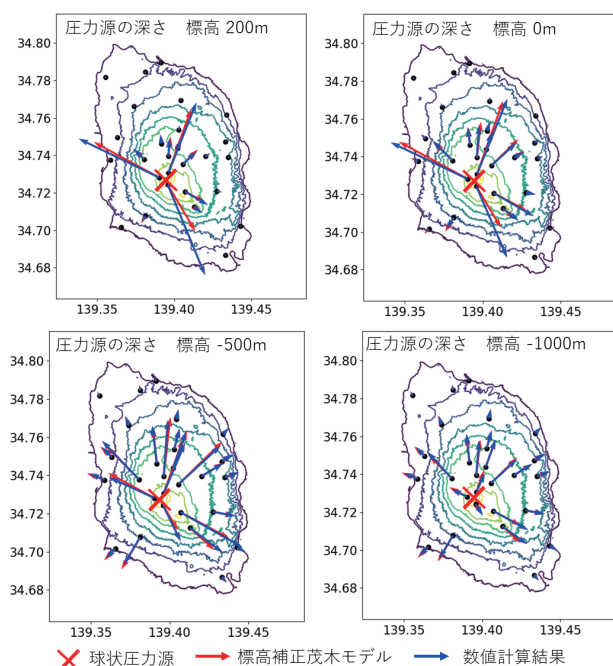


図-6 数値計算で求めた伊豆大島三原山の山頂直下の球状圧力源の膨張による水平変位(青)と標高補正茂木モデルから求めた水平変位(赤)の比較

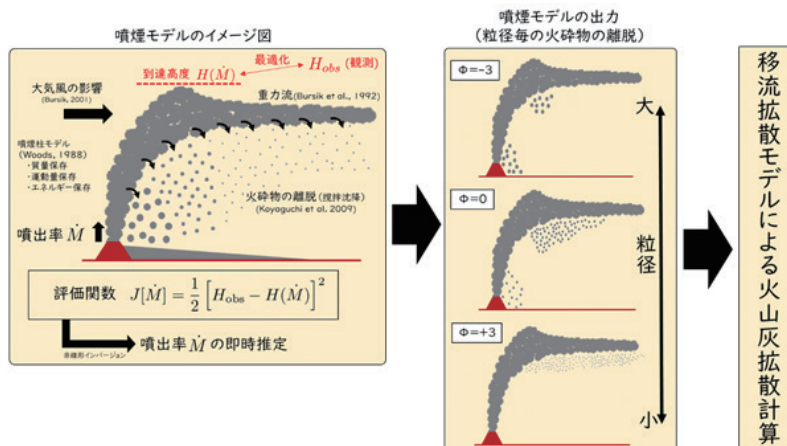


図-7 季節変化する気象場との相互作用などが考慮できる1次元噴煙モデル (NIKS-1D) の概念図

存する温度特性によって規定される。また、溶岩のリキダス・ソリダスの設定で結晶化の効果もある。これらを再現する溶岩流シミュレーション技術は主に2つのアプローチ、すなわち、決定論的手法と確率論的手法がある。前者では、有限差分法や有限体積法による2次元あるいは3次元モデルによりダイナミクスを計算する。流速を地形勾配の関数で表現するものや、水平方向に比較して鉛直方向の変化は少ないものと仮定した浅水波方程式によりモデル化したものなどが広く利用されている。また、溶岩流内部の3次元対流や周辺からの冷却効果を加味したモデルでは、より詳細な現象の再現と評価が可能である。後者は特に防災目的としたものが多く、迅速な溶岩流流下の評価を行うことを目的として、地形勾配のみを最優先に評価するもので、緊急時に有効である。

3.2 降灰シミュレーション

降灰は大規模噴火発生時には火山近傍のみならず、広域におよび、もっとも被害をもたらす危険性がある現象である。空中浮揚の火山灰は航空機の運航などの障害となり、2010年に発生したアイスランド・エイヤフィヤトラヨークトル火山による降灰はヨーロッパ全域の上空に及び、人や物資の移動等、社会的・経済的活動に大きな影響を与えた。降灰は噴火口での噴出量やそのレート、時間変化など発生場の要因に加え、周辺の大気場に依存してその分布が決まる。降灰分布シミュレーションコードは各種提案されている。我々は気象庁において運用されている移流拡散モデル (JMA-ATM) へ、季節変化する気象場との相互作用などが考慮できる1次元噴煙モデル (NIKS-1D) を組み込んだものを用いている (図-7)。

3.3 InSAR 非干渉性評価による降灰分布の推定—土石流の評価への応用

火山噴火によって火山灰が堆積する場合、火山灰は透水性が低いいため、その後の降雨によって山体にしみこむことなく表面を流れ、地表の岩石や木々をなぎ倒して土石流が発生する危険性がある。火山噴火による土石流の危険性評価のためには、降灰量分布を迅速に把握し、土石流発生の予測につなげることが重要である。しかし、降灰量分布の把握は主に現地調査によって行われているのが現状であり、人手や時間がかかり、律速条件となっている。このような問題点を解決するためのアイデアとして、リモートセンシングによって面的に降灰域を把握し、降灰シミュレーションと併せ

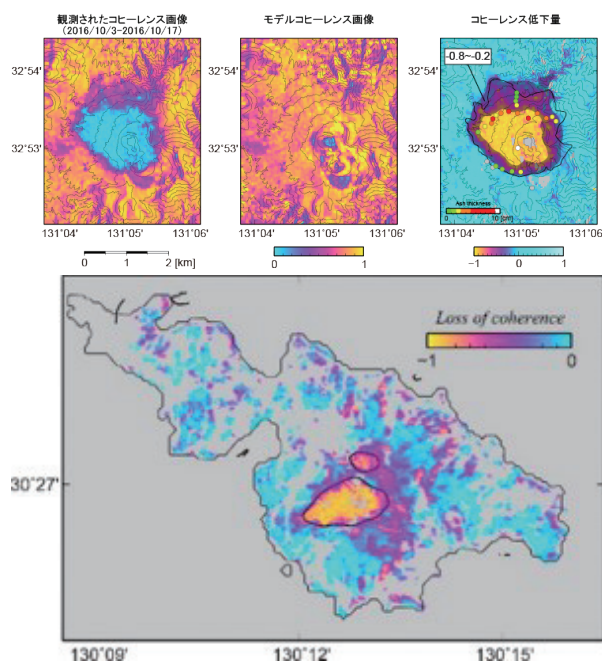


図-8 衛星 SAR 解析および降灰シミュレーションによる広域降灰厚分布把握技術の開発 (阿蘇山 2016 年 10 月 12 日噴火の例)

ることにより、土石流評価のための降灰厚分布の推定を行う試みを実施されている。この手法では、SAR干渉法における干渉性を活用する。干渉性が高い場合は明瞭な干渉縞が見られるが、低い場合は短周期のノイズが顕著になり、干渉縞は不明瞭になる。この干渉性の劣化は、干渉させる2つのSAR画像取得時における地表でのレーダー波の散乱が異なることによって生じる。噴火時を含む干渉ペアのSAR干渉解析において、地表が火山灰に覆われることによるレーダー波の散乱の変化に起因する干渉性劣化域が、火口周辺において良く見られる。このような干渉性劣化と降灰量を定量的に関係付け、SAR干渉解析から降灰量を求めている。阿蘇山2016年10月12日噴火における解析(図-8)では、降灰厚が1~3cmの領域に対応して干渉性が低下することが分かった。火山近傍での降灰分布と整合的なパラメータを用いて、より広域の降灰分布を求める手順の自動化を目指している。

4. 火山ハザードシミュレーションと社会情報のカップリング

4.1 火山ハザードマップのデータベース化

特に3章で述べた、火山ハザードシミュレーションを火山防災に生かすべく、各自治体等が整備しているものが火山ハザードマップである。これらは現象毎にハザードの内容、すなわち到達範囲・到達時間などの情報を提供しているが、その種類として、過去の事例を基に作成する「実績図」、発生位置や規模などを仮定したシミュレーションの実施により作成する「ドリルマップ」、また、複数の計算事例を重ね合わせ、重複した地点(メッシュ)における最大値を取るなどの処理を含めた「ドリルマップの重ね合わせ図」がある。また、「ドリルマップの重ね合わせ図」を拡張し、そ

の包絡線をとったものをハザードマップとして公開している例や、大量のシミュレーション事例をもとに統計処理を実施して確率的表現を行っているものがある。

各火山ハザードのシミュレーションコードには、簡易版から詳細版まで様々なものが提案されている。簡易版は時空間分解能では劣るものの速報性があり、緊急時対応に適しており、リアルタイムハザードマップの実現が可能である。一方、詳細版は詳細な時空間分解能があり、物理現象の再現を精密に行うことが可能であるが、大量の計算リソースを必要とするもの多く、速報性に劣るため、平常時におけるリスク評価に用いられる。また、大量の計算実施による統計処理が困難であり確率表現に結びつけにくい。このため、このような詳細版コードを用いてドリルマップを数多く作成し、これをデータベース化することにより、実際の噴火時対応にも資することができる。

4.2 社会的情報との連携 - 避難シミュレーションへの拡張

これまでは火山の現象そのもののシミュレーションを解説してきたが、さらに社会的な要請に対応するためには、具体的な防災行動に資する内容まで発展させることが期待されている。火山ハザードマップでは、各ハザードの到達範囲や到達時間を把握することができ、各自治体で整備する防災計画の設計に活用することができる。さらに避難計画を含む具体的な防災計画を策定するにあたり、徒歩の避難、車両等による避難の効果、車両の場合はその台数など、避難のロジスティクスまで踏み込んで計画を立てることが有効である。実際の発災時には迅速に効果的な行動を起こすために定量的な情報を提供できる仕組みが必要である。図-9は伊豆大島における溶岩流を道路と重ね合わせて示したものである。溶岩流によって御神火スカイラ

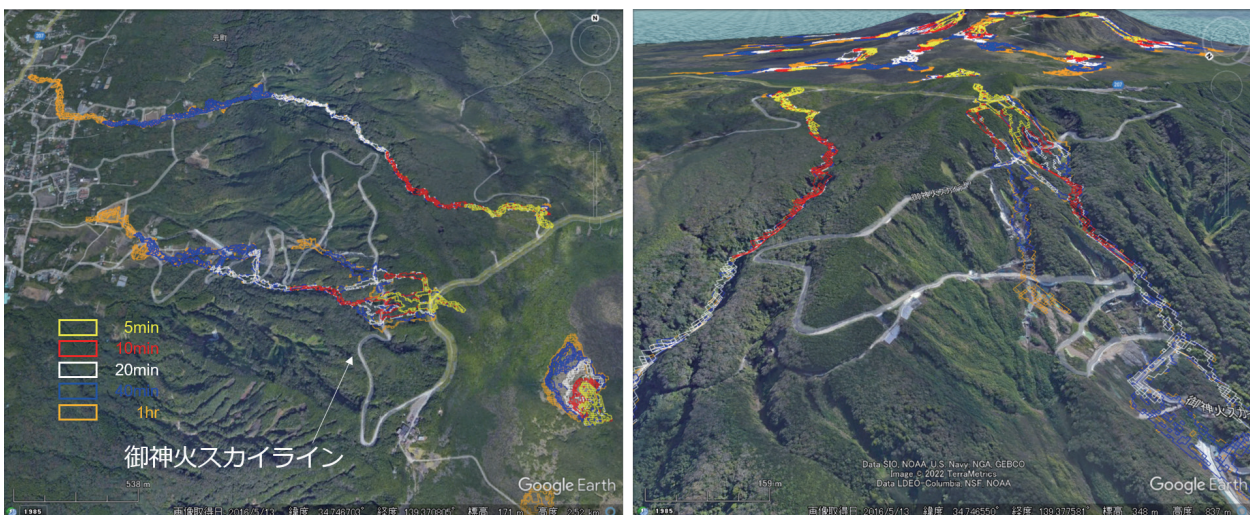


図-9 溶岩流シミュレーションの例(伊豆大島)(Google Earth を利用)

インが通行不可となることが分かる。この場合、山頂からどの方向に避難するのがよいか？また車両等をどう展開するのがよいか？という判断の情報を定量的に示すための避難シミュレーションの例を図-10に示す。このシミュレーションにはマルチエージェントモデルとしてオンラインで利用可能なSUMO (Simulation of Urban Mobility) を活用している。この事例では山頂から30台の乗用車を2分毎に15台出発させ、元町港または岡田港に避難するケースの比較をしている。御神火スカイラインが通行可能な場合に元町港までかかる時間は約36分であるのに対し、御神火スカイラインを回避して元町港に避難完了までにかかる時間は約45分、元町港ではなく北側の岡田港に避難する場合は約46分となった。実際には、複数の通行止め箇所の発生や、また山頂付近の登山者の徒歩避難と車両への集積なども必要となる。様々な状況において適確な対応を迅速にとることができるようになろう。

5. おわりに

火山噴火とそれに伴い発生する火山災害において、各種現象の数値シミュレーションやそれに基づく対応策の提案は、計算アルゴリズムの開発と共に、現場での活用による必要な項目をフィードバックすることで、より実効性のあるものへと進化をしていく。これらに基づき、火山災害から人命・財産を守る研究開発をたゆまなく進めることが重要である。

謝辞

本稿は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業「課題C：火山噴火予測技術の開発（サブテーマ3：シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発）」により実施した成果を中心に紹介しています。また、一部は、第2期戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」において実施しています。共に記して深く謝意を表します。

参考文献

富士山ハザードマップ検討委員会報告書 (2023), https://www.bousai.go.jp/kazan/fuji_map/pdf/report_200406.pdf

Fujita, E., Shimizu, H. A., Nakamichi, H. (2022), High Precision Lava Flow Simulation Using 8K Drone Digital Elevation Data
Journal of Disaster Research 17 (5) 779-790, 2022
<https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0779>

Ishii, K., Nishijo, A., Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J. (2022), A physics-based source model for real-time tephra-dispersal forecasting for weak eruption plumes, J. Appl. Volcanol., 11:15, <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00127-w>



図-10 伊豆大島における車両による避難シミュレーションの例

Kozono, K., Ishibashi, H., Okumura, S., Miwa, T. (2022), Conduit Flow Dynamics During the 1986 Sub-Plinian Eruption at Izu-Oshima Volcano
Journal of Disaster Research 17 (5) 754-767,
<https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0754>

小澤拓, 藤田英輔 (2020), 衛星 SAR を用いた降灰分布推定手法の研究 (その4), 日本火山学会 2020 年度秋季大会, O3-15.

Simulation of Urban Mobility, <https://eclipse.dev/sumo/>

新堀敏基, 石井憲介, (2021), 気象庁移流拡散モデル設計書, 気象研究所技術報告, 84, 146 p, <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.84>

新堀敏基, 石井憲介, 清水慎吾, 小澤拓, 藤田英輔 (2022), 衛星 SAR を用いた降灰量分布推定手法の研究: 降灰シミュレーションによる広域分布推定, JPGU2022, SVC30-P01.