

# 噴石飛散シミュレーションと 将来の夢

防衛大学校 電気情報学群 情報工学科

准教授 岩切 宗利

株式会社 GSEC

CTO 竹之上典昭



## はじめに

超高速シミュレーションが実現する世界と題して、多くの事象を同時にシミュレートできる複雑系シミュレーション基盤（SCS：Simulation for Complex Systems）の技術的側面と、その応用例として都市計画シミュレーション、群制御シミュレーション、津波シミュレーションの論理的解説と紹介を行ってきた。

今回はその最終回として火山爆発による噴石の飛散状況をSCSを用いてシミュレートする事象を主題として、研究の背景から世界における火山（噴石飛散）の研究課題に挑戦する噴石飛散シミュレーションの状況について紹介する。

またSCSを用いたシミュレーションが実現する将来の夢として、多くの方が一緒にタグチームを組んだ場合に実現できるであろう仮想空間についても述べることにする。

## 噴石飛散シミュレーション

### (1) 現状と課題

日本国は、太平洋を取り囲む世界最大の環太平洋火山帯上に位置し、現在でも噴火の可能性のある活火山が多数存在する<sup>1)</sup>。これらの活火山は、火山性温泉などの観光資源や熱エネルギー

資源などとして活用されており、人々に数多くの恵みをもたらしている。観光シーズンともなると、火山がもつ素晴らしい景観を求め、数多くの人々が登山や周辺地域を訪れる<sup>2)</sup>。

その一方で、ひとたび火山が噴火すると、噴石の飛散、火砕流などにより大きな災害を引き起こすことは言うまでもない。たとえば、平成26年の御嶽山噴火の際には、死者58名、行方不明者5名、負傷者69名の人的被害が出ている<sup>3)</sup>。

この噴火は、平成26年9月27日11時52分頃に発生したため、秋の行楽シーズンに山頂付近で休憩していた登山客を襲う結果となった。また平成30年1月23日10時2分頃に発生した草津白根山の噴火では、鏡池付近から1 km以上飛散する噴石が確認されており、訓練中の自衛官1名の死亡、重軽傷者11名の人的被害が出ている<sup>4)</sup>。これらのように、火山は、ときおり深刻な被害をもたらすことから、その防災に関する取り組みや研究は、古くから実施されている。

火山噴火により発生する噴石の飛散に関する研究は、電子計算機の開発当初から弾道計算の応用分野としても脚光を浴びたが、弾道計算に関する理論研究の趨勢に合わせて最近ではそれほど関心を集めていない状況<sup>5)</sup>である。Eject!は、この状況と最近の計算機性能の向上から火山噴石の弾道計算を容易に実施できる数値シ

ミュレーションとして開発されたものである<sup>5)</sup>。Ejectl は、火口から噴出した噴石の到達距離を手動設定のパラメータに基づき算出できる。その数値計算を繰り返して得た分布を参考に、噴石飛散による被災範囲の推定が可能であると考えられるが、火口周辺の地形効果を加味した噴石飛散シミュレーションには適用困難であった。

常松ら<sup>6)</sup>は、想定火口からの噴石放出について全体の主軸方向と散らばりを設定することにより地形効果を再現する弾道シミュレータ Ballista を開発した。Ballista の地形効果に関する計算モデルは、噴石放出範囲の分布に円錐形の指向性をもたせるもの<sup>6)</sup>であり、実際の地形モデルから想定される噴石飛散の分布とは必ずしも一致しないため、放出角ごとの噴石飛散分布と実地調査結果の比較を行っている<sup>7)</sup>。また、そのプログラムは、移植性を高めるために Java 言語で記述されている。それにより実行環境 (Java 仮想マシン) の処理性能に限界があり、モデル空間が広域にわたり、多量のデータを処理する大規模な噴石飛散シミュレーションには適していない。Ballista は、地形モデルのグリッドサイズが大きい (100m を超えた) 場合、広域の大規模計算に適応した処理に切り替える機能を有する<sup>6)</sup>。

そこで、文献<sup>8), 9)</sup>の研究では、高精細な地形モデルに基づいて地形効果を再現できる大規模な噴石飛散シミュレーションの開発に取り組み、その応用分野について検討を行ってきた。本節では、これまでに開発してきた3次元の噴石飛散シミュレーションと、それに基づくハザードマップの作成と退避施設のリスク評価に関する提案、噴石飛散に関する数値データを用いた防災教育装置の事例について紹介する。

## (2) 大規模噴石飛散シミュレーションの開発

噴石飛散のエネルギー源となる水蒸気噴火は、地下に密閉された水に高温の熱源 (マグマ等) が接触し、水分の瞬間的な気化とそれに伴

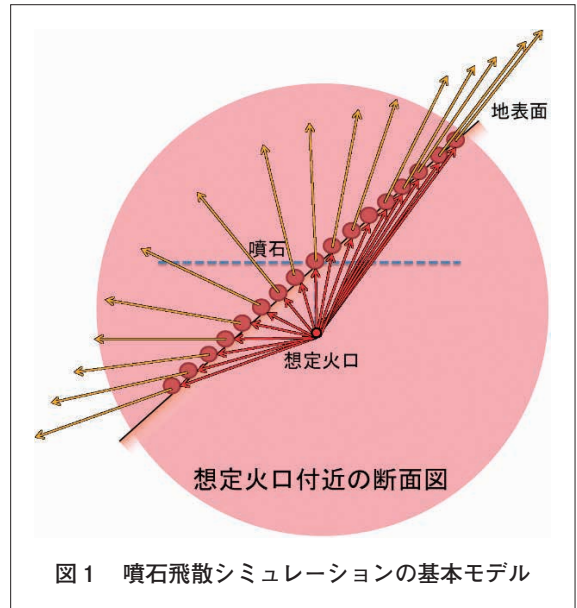


図1 噴石飛散シミュレーションの基本モデル

う体積膨張により発生する。図1は、現在開発中の噴石飛散シミュレーションに用いている基本的なモデルである。シミュレーションモデルでは、地形モデルの地下に爆心地を設け、地表面に存在する噴石それぞれに初速度と放出角を与える。放出された噴石は、空気抵抗と重力の影響を受けながら飛翔し、地表面などの物体に衝突する。噴石衝突までの間、水平方向の到達距離を  $(x, y)$ 、高さを  $z$  とした相対位置  $(x, y, z)$  と速度  $v$ 、水平垂直それぞれの進行角  $(\theta, \phi)$  は、噴石の質量  $m$  と抗力係数  $C_D$  と空気密度  $\rho$ 、断面積  $F$  を用いた関係式、

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = -D \cos \theta \cos \phi \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = -D \cos \theta \sin \phi \\ m \frac{d^2z}{dt^2} = -mg - D \sin \theta \end{cases}$$

$$\text{空気抗力} : D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 F$$

により算出できる。さらに風の影響を考慮することは可能であるが、噴石の質量が大きいこと、噴火時の風向風速が予想できないことから現時点では省略している。

一連の研究<sup>8),9)</sup>では、当初、映像表現など可視化を重視したシミュレーション開発にゲームエンジンとして知られている Unity (<https://unity.com/jp>) や Unreal Engine (<http://www.unrealengine.com/>) に地形モデルや図1の噴石飛散シミュレーションモデルの実現に必要な物理エンジン(剛体運動に関する物理計算処理モジュール)などを適用して開発したが、現在では、さらに高速で大規模な噴石飛散シミュレーションを実施するため、株式会社グローバルセキュリティー (<https://www.gsec.biz/>) のストリームコンピューティング方式<sup>10)</sup>による複雑系シミュレーション基盤(SCS: Simulation for Complex Systems)を用いて開発を進めている。図2は開発中の噴石飛散シミュレーションの実行結果の一例である。

各シミュレーションの地形モデルは、国土地理院が公開(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)している基盤地図情報の中から5mメッシュの数値標高モデルを用いて作成した。噴石の初期位置(高さ)は、地形モデルの頂点をもつ標高値の線形補間により求めた。80,000点の噴石データに関する処理時間は、シングルプロセッサ処理(Intel Core i5、3GHz、1コアのみ使用)で約45秒である。

このシミュレーションは、現在流通している汎用のノート型パソコンや携帯型端末でも動作

可能であり、筆者らの知る限り、同一条件下での噴石飛散シミュレーションとしては世界最高水準の処理性能である。この特長は、発災時の初動対応に資するための情報分析に有用である。

### (3) 応用事例

#### (a) ハザードマップの高精細化

図3は、本研究で開発したシミュレーションによる噴石の衝突位置を可視化したものである。この図の斜面(水色)上に存在する黒領域は想定火口の位置と形状であり、赤点は噴石の着地点である。噴石は火口近傍に多く、火口から離れた地点に少ない傾向が読み取れ、その到達範囲だけではなく分布密度も再現できることから、想定火口周辺の地形を考慮した噴石飛散シミュレーションを活用することにより、高精密なハザードマップを作成可能であることが明らかである。

#### (b) 避難施設のリスク評価

登山可能な活火山には、その噴火に備えて登山道沿いに避難シェルターや山小屋などが設置されている。これらに対する噴石による被害を防ぐため、新たに設置されている避難施設の外壁には補強などの対策が施されている<sup>11)</sup>。しかしながら、狭くて険しい登山道を利用して重量のある補強資材を大量に運搬することは困難であるため、想定火口と避難施設がもつ壁面の位

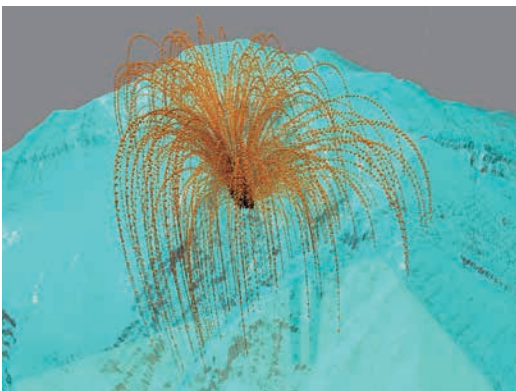


図2 噴石飛散シミュレーションの実行結果

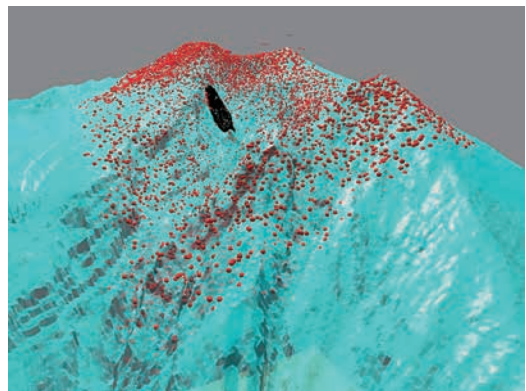


図3 噴石衝突位置の可視化例

置と設置角の関係をモデル化した噴石飛散シミュレーションにより、各壁面のリスク評価を行い、それを参考にして限りある補強資材を有効活用することが考えられる<sup>9)</sup>。

図4は、このリスク評価に関する計算モデルである。図5は、このリスク評価に必要な速度ベクトルなどのパラメータを可視化した一例である。この図では、噴石の衝突位置を赤丸、その時点の速度ベクトルと衝突面の法線ベクトルをそれぞれ赤線と黒線で示した。図4のリスク評価は、噴石飛散シミュレーションの地形モデルに避難施設に関する高密度な立体（表面）モデルを加え、その壁面に対する噴石衝突エネ

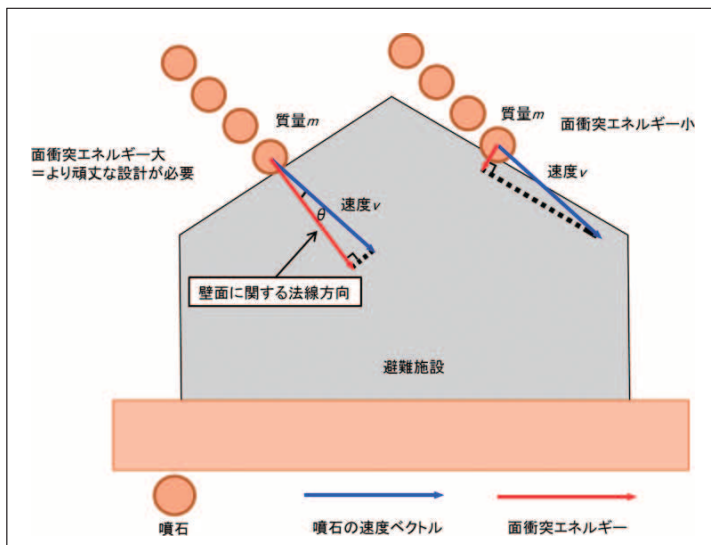


図4 避難施設のリスク評価モデル<sup>9)</sup>

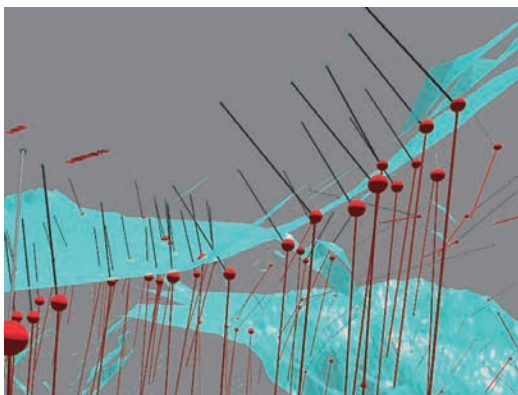


図5 噴石の速度ベクトル可視化例



図6 噴石飛散状況の映像表現例<sup>8)</sup>

ギーをベクトル分解し、壁面の耐衝撃性に関する実験結果<sup>11)</sup>を基礎データとした数値評価により実現できる。

### (c) 火山防災教育

火山噴火に遭遇した際には、速やかに避難施設などを利用して身を守ることが重要である。過去に発生した噴石被弾による受傷の原因として、危機意識の欠如による避難の遅れがあると考えている。そこで、われわれは噴石飛散シミュレーションの結果を可視化することにより、防災教育に役立てることを検討した。たとえば、図6は、噴石が飛来する様子を大型スクリーンにコンピュータグラフィックスを用いて

投影したものである。この噴石飛散に関する数値データは、火山噴火に遭遇した状況をVR装置（ヘッドマウントディスプレイ）を用いて体験させる擬似体験装置にも応用可能である。これらの映像や擬似体験装置を活用した防災教育は、入山を直前とした登山客などの防災意識高揚に役立つものと期待している。

### (4) 今後の展望

本節では大規模な噴石飛散シミュレーションの開発状況と、それを中心として検討してきた応用研究の事例について具体的に紹介した。株式会社

GSECの協力を得て開発中の噴石飛散シミュレーションは、携帯型端末でも実行可能であることから、その特長を活かした応用研究に取り組む予定である。特にシミュレーション結果に基づくハザードマップ作成や避難施設の補強、3次元の可視化表現により、防災対策の効率化が期待できるため、その可能性について精査する予定である。

遭遇機会が少ない火山噴火という災害などに関しては、VR装置などのコンピュータグラフィックスシステムを用いた教育が有効であり、学習者の防災意識高揚や避難行動適正化に役立つと考えている。本研究で開発した噴石飛散シミュレーション結果の可視化とその応用については、火山防災に関する施設や機関などと連携しながら開発を進める予定である。

### 超高速シミュレーションが実現する将来の夢

これまで紹介してきた数々のシミュレーション事例は、処理速度的に、あるいは処理内容が多重化しているため、従来の方式では達成が困難であった分野で大きく貢献しているものである。しかしながら、本連載の1回目に述べたように「社会が模索する新たな安心・安全な社会の創造」や、その具体例である「快適な都市空間の機能と周辺地域との快適性を支えるモビリティの世界」の実現のためには、更なる処理系の多重化が求められる。その様子をイメージ化したのが図7である。

これまで紹介してきたLSS (LandScape Simulator) でさえも、現状では図7の“City & Vehicles”レイヤを実現したに過ぎない。図7の各評価レイヤは、それぞれが大きなシミュレート機能として従来捉えられ個別に考慮されてきた。

自動運転の実現については、都市交通の状況を自動運転車両に伝達し事故を未然に防ぐことが検討され、その意味でもMaaS (Mobility as a Service) に対する期待やそれを支える通信

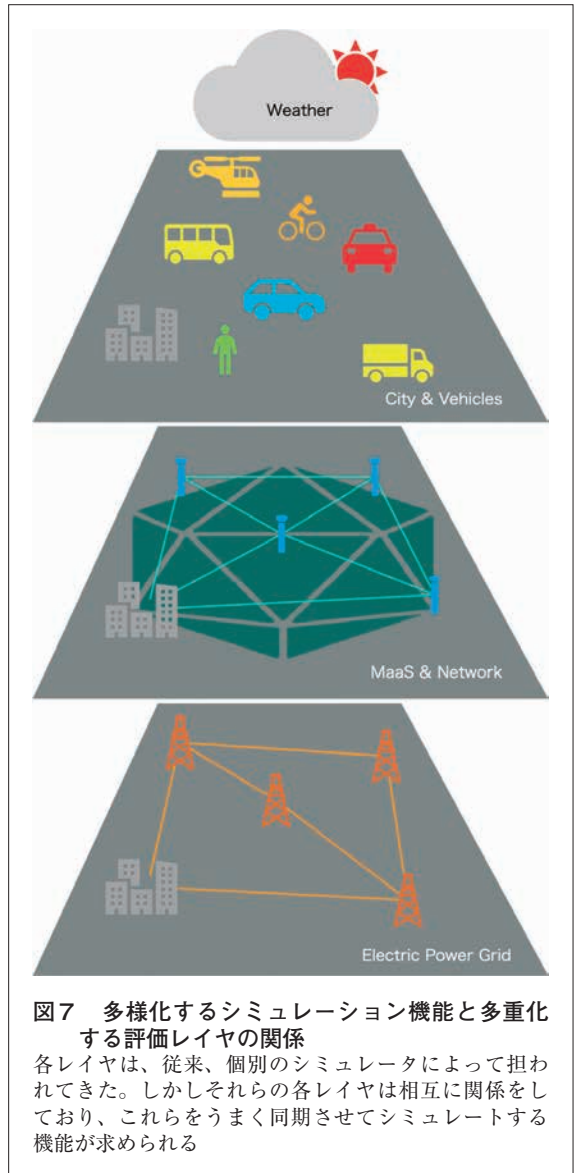


図7 多様化するシミュレーション機能と多重化する評価レイヤの関係  
各レイヤは、従来、個別のシミュレータによって担われてきた。しかしそれらの各レイヤは相互に関係をしており、これらをうまく同期させてシミュレートする機能が求められる

ネットワークへの期待が高まっている<sup>12), 13)</sup>。

そしてSDGsを追い求めるこれからの世界では、脱炭素が声高に求められ“City & Vehicles” “MaaS & Network”の各レイヤの需要に対応した適切な電力供給が求められることになる。この需要と供給のバランスを考慮した社会では、電力供給網の提供が大きな課題であり、シミュレーションを通じて早急に検討される必要性がある。特に、これらの内容は自然環境の中で生じる問題であり、当然のこととして

“Weather” レイヤを考慮せざるを得ない。雨や雪だけでもその電力消費量は大きく変動する。これに災害が加わるともっと大きな対応を求められることになる。

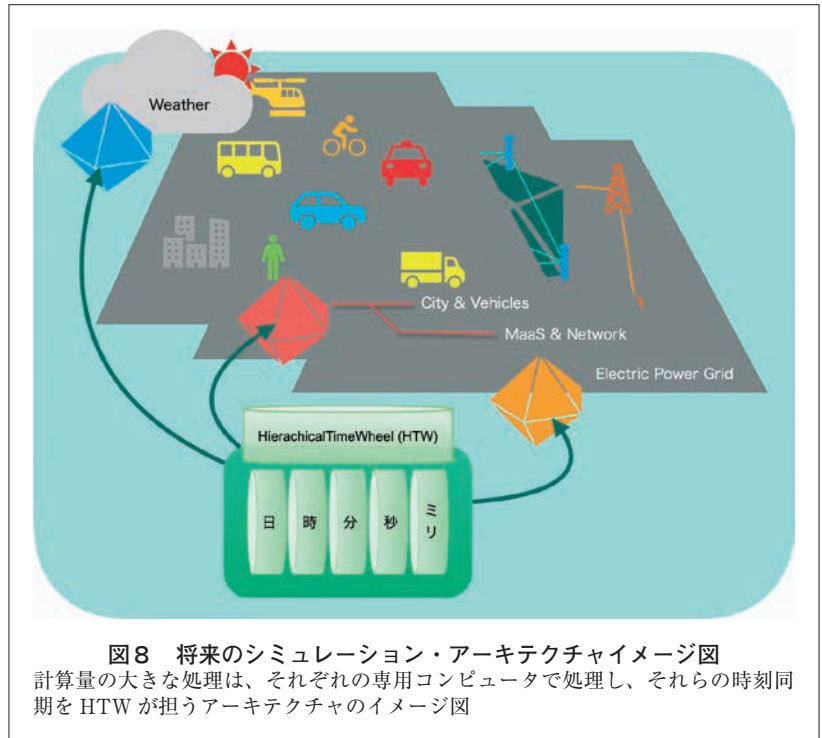
近年の地球の気象環境の急激な変動を考えると、図7に示すような多重の評価レイヤ構造をもつ複雑系シミュレータをいち早く完成させる必要性を痛感している。その中心となるテクノロジーがSCSであると考えている。SCSはこれらの多重化する事象を時空間的にうまく一体化し処理する機能を有していることは、これまでの連載記事を読んでいただいた読者の

方々には容易に想像できると思料する。

しかし一方では、従来、スーパーコンピュータで処理してきた気象などをどのようなモデルとして取り入れるのか、情報通信や電力供給にしてもそのモデル化の方法は、ということが大きな問題として想起されるであろう。そして更なる疑問として、LSSはパソコンで処理できたがこれだけ大きな処理モデルとなるとどれくらいの規模のコンピュータが必要になるのかについても考えなければならない。

その一例が図8に示したアーキテクチャイメージ図である。この例では、メインの処理を“City & Vehicles” “Mass & Network” レイヤを担うコンピュータが処理し、そのイベントの発生に応じたリクエストを“Weather” レイヤのコンピュータに与え回答を得る方式をイメージしている。同様に“Electric Power Grid” レイヤのコンピュータに対しても同様に処理方式をイメージしている。

このイベントのやり取りは、データフローモデルとして捉えデータの揃ったものがイベント



**図8 将来のシミュレーション・アーキテクチャイメージ図**  
 計算量の大きな処理は、それぞれの専用コンピュータで処理し、それらの時刻同期をHTWが担うアーキテクチャのイメージ図

としてHTWに登録される方式になるであろう。

評価する内容によっては、隷下となるコンピュータにはかなり大きなものが必要になるかもしれない。さらにこのイメージの具体化には、メインとなるコンピュータとその隷下となるコンピュータ間の処理速度の設定や具体的なイベントをどのような方式で遅滞なく届けるのか、などのハードウェアおよびソフトウェアの一体設計が必要となるであろう「正に将来の夢」である。

## あとがき

シリーズ「超高速シミュレーションが実現する世界」では、6回にわたって従来のシミュレーション技術では困難であった問題の解決事例とその技術について紹介してきた。現在HTWに支えられたSCSの技術は、陸上自衛隊のシミュレータ<sup>14)</sup>として今も活躍しているが、その他の適用事例はここで紹介したものが

すべてである。

これからの社会の安心・安全を追求する検討にはこのような超高速シミュレーション技術は不可欠であり、実証実験を実施する前のプレスタディーに最適な技術であると思料する。国家レベルの安全保障のみならず、限定した地域のスマートシティ構想のプレスタディーからモビリティ社会の安全性評価、工場内のプラント制御、災害の予測、災害からの避難、物流ネットワーク効率化のケーススタディーなど多くの場面に適用可能な技術である。

\* \*

本誌をお読みいただいている皆様が、このようなシミュレーション技術の存在を認識いただき多くの場面への適用を想起される機会の一助となれば幸いです。特に今回の連載を快くお引き受けいただいた一般財団法人防衛技術協会の山口弘常務理事をはじめ、丁寧な校正をしていただいた防衛技術協会の皆様に感謝いたします。

(完)

### 参考文献

- 1) 気象庁：火山監視・警報センターにおいて火山活動を24時間体制で監視している火山（常時観測火山），気象庁ホームページ（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html>）（2020.11.17 確認）。
- 2) 堀木美告：観光地と災害について考える 一火山の恵みと噴火への備えを切り口に― [コラム vol.280]，日本交通公社ホームページ（<https://www.jtb.or.jp/column-photo/column-volcanohoriki/>）（2020.11.17 確認）。
- 3) 内閣府：御嶽山の噴火状況等について（8月11日17：00現在），内閣府ホームページ（<http://www.bousai.go.jp/updates/h26ontakesan/>）（2020.11.17 確認）。
- 4) 内閣府：草津白根山の火山活動の状況等について（平成30年1月29日18：00 現在），内閣府ホームページ（<http://www.bousai.go.jp/updates/h30kusatsushirane/>）（2020.11.17 確認）。
- 5) Larry G. Mastin: A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions, U. S. Geological Survey Open-File Report 01-45, 16p, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/>（2020.11.17 確認）。
- 6) K. Tsunematsu, C. A. Gomez, R. H. Fitzgerald, B. M. Kennedy, K. Yamaoka: Features of Numerical Model "Ballista"; the Ballistic Simulator of Explosive Volcanic Eruption, JpGUAGU Joint Meeting 2017, SVC49-10, 日本地球惑星科学連合大会（<http://etna.seis.nagoyau.ac.jp/official/center/report/gakkai/JpGU.html>）（2020.11.17 確認）。
- 7) K. Tsunematsu, Y. Ishimine, T. Kaneko, M. Yoshimoto, T. Fujii, K. Yamaoka: Estimation of ballistic block landing energy during 2014 Mount Ontake eruption, Earth Planet Sp 68, 88 (2016), <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0463-8>（2020.11.17 確認）。
- 8) 山田浩之，國武千人，岩切宗利，佐々木寿：3D噴石飛散シミュレーションのハザードマップへの展開，日本火山学会2018年度秋季大会（秋田県，秋田市），日本火山学会2018年度秋季大会講演予稿集，P123, p.249（2018.9）。
- 9) 宮崎裕輔，國武千人，岩切宗利，山田浩之，佐々木寿：3次元噴石飛散シミュレーションを用いた避難施設のリスク評価，映像情報メディア学会冬季大会2019（東京都，調布市），2019年映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集，11C-3（2019.12）。
- 10) 竹之上典昭：ストリームコンピューティング，防衛技術ジャーナル，No.442（2018）。
- 11) H. Yamada, K. Tateyama, H. Sasaki, S. Naruke, H. Kishimoto, M. Yoshimoto: Impact resistance to ballistic ejecta of wooden buildings and a simple reinforcement method using aramid fabric, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.359, pp.37-46（2018）。
- 12) 日経クロステック，“ソニーのクルマ，トヨタの街づくりが示す未来”，19 02 2020. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00007/00095/>.
- 13) 日経クロステック，“MaaS向け自動運転車の無人化に挑む，三菱電機の運行システム”，15 06 2021. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05652/>. [アクセス日：28 06 2021].
- 14) 竹之上典昭，“時間テーブルの異なる事象を包含する複雑系シミュレーションの時間管理方式”，防衛大学校，2011.