

1-11 G-EVER 火山災害予測支援システムによる火山重力流と 降下テフラのハザード評価

宝田晋治¹

Volcanic hazard assessment of volcanic gravity currents and tephra falls using G-EVER Volcanic Hazards Assessment Support System

Shinji Takarada¹

¹Geological Survey of Japan, AIST, Site 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba 305-8567 Japan. Corresponding author.

E-mail: s-takarada@aist.go.jp

産総研地質調査総合センターでは、G-EVER 火山災害予測支援システムの開発を進めている。本システムは、火山噴火史、火山データベース、数値シミュレーションの統合化を図り、火山ハザード評価の支援ツールとしての活用を目指している。本システムは、オンライン上で動作する WebGIS により、国際標準 (OGC) の WMS, WCS, WPS 等を利用し、ユーザーが利用しやすいインターフェイスを提供している。ここでは、火砕流や岩屑なだれ等の火山重力流用にエナジーコーンと Titan2D、降下テフラ用に Tephra2 のオンラインシミュレーションが実行できる。システム上に 30m 解像度の全球標高データ (ASTER G-DEM)、国内用に 10m 解像度の国土地理院標高データが用意されており、世界中のほぼすべての第四紀火山で、ハザード評価を行うことができる。また、地図上に表示された第四紀火山から、直接主要な火山データベース (スミソニアン Global Volcano Program, 産総研日本の火山, VOGRIPA, 火山衛星画像, WOVOdat) に掲載された各火山の詳細情報 (火山噴火履歴や衛星情報, モニタリングデータ等) を閲覧できる。本システムで得られたシミュレーション結果を地図や地質図上に表示、またダウンロードし GIS ソフトや Google Earth 上に表示することで、各種の火山ハザード・リスク評価に活かすことが可能である。

1. はじめに

火山ハザード評価手法はこの数 10 年間に大きく進歩してきている (例えば, Loughin et al., 2015; Jenkins et al., 2014; Papale, 2015)。火砕流のハザード評価は、1980 年代前半の質点力学によるエナジーコーンモデル (Malin and Sheridan, 1982; Sheridan, 1980) に始まり、1990 年代後半からは、物理モデルを考慮した Titan2D (Pitman et al., 2003; Sheridan et al., 2004) や LAHARZ (Schilling, 1998) などが開発されている。さらに、3 次元のダイナミクスを考慮したモデル (例えば, Esposti Ongaro et al., 2008; Esposti Ongaro et al., 2012) も出てきている。降下テフラのハザード評価は、PUFF (Searcy et al., 1998), Tephra 2 (Connor and Connor, 2006; Bonadonna et al., 2002), Hazmap (Macedonio et al., 2005), Fall3D (Folch et al., 2009; Costa et al., 2010), Ash3d (Schwaiger et al., 2012) など多数開発されている。また、世界各地の気象庁でも HYSPLIT, NAME, JMA-GATM など独自の降灰予想モデルを用いている (新堀, 2016)。確率論的な火山災害予測については、イベントツリー (例えば, Newhall and Hoblitt, 2002; Neri et al., 2008), 長期 BET_VH (Bayesian Event Tree for Volcanic Hazard; 例えば, Marzocchi et al., 2010; Selva et al., 2010),

短期 BET_VH (例えば, Selva et al., 2014) 等がある。オンラインで、火山シミュレーションを行い、各種情報共有を行うシステムとして、Vhub (Palma et al., 2014) があり、火山関係者の間で広く利用されている。

産総研地質調査総合センターでは、2012年にアジア太平洋地域地震火山リスクマネジメント (G-EVER) コンソーシアムを立ち上げ、地震火山津波等のハザード・リスク軽減を目的として、東南アジアを始め各国の国々の研究機関と活動を行っている (<http://g-ever.org>; Takarada et al., 2014)。産総研内の G-EVER 推進チームが活動の中核となっている。G-EVER では、東アジアの研究機関と協力し、2016年に東アジア地域地震火山災害情報図 (Takarada et al., 2016) を出版した (地質調査総合センターの地質図カタログからダウンロード可)。この内容は、個別の GIS データとして、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム (<http://ccop-geoinfo.org/G-EVER/>) 上で閲覧できる。それらの多くのデータはダウンロードすることが可能となっている。G-EVER 火山災害予測支援システム (<http://volcano.g-ever1.org/>) は、ユーザーにとって利用しやすいオンライン火山ハザード評価支援システムを目指して、2012年から開発を進めている。

2. 火山災害予測支援システムの概要

火山災害予測システムは、火山ハザード・リスク評価のため、火山噴火史、火山データベース、数値シミュレーションを統合化したシステムを目指している (図 1; Takarada et al., 2014)。火山データベースは、過去の火山実績を示しているが、将来起こりうるすべての噴火シナリオを示しているわけでは

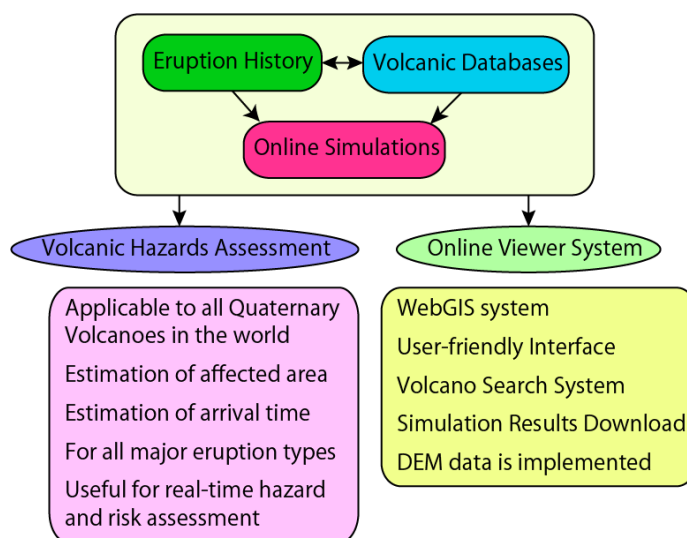


図 1. 火山災害予測支援システムの概念図

ない。そのため、より精度の高い火山ハザード評価のためには、パラメータをコントロールした上での数値シミュレーションが不可欠となる。このシステムでは、火山現象によって影響をうける可能性がある範囲をシミュレーションにより評価することが可能である。また、シミュレーションによって得られた結果を、WebGIS を使い直接オンライン上や、ダウンロードの上 GIS ソフトウェア上で、道路や家屋、避難施設、避難経路などの図上に重ね合わせて示すことで、災害時のリスク軽減に役立てることができる。WebGIS は、インターネット上で GIS を扱うための仕組みであり、Open Geospatial Consortium (OGC; <http://www.opengeospatial.org/>) が、国際標準を策定しており、Web Map Service (WMS) , Web Coverage Service (WCS), Web Processing Service (WPS) 等の機能がある。火山災害予測支援システムでは、現在の所、Energy Cone, Titan2D, Tephra2 の数値シミュレーションが利用できる。システムには、

ASTER の Global DEM (30m 解像度) が用意されており、ほぼ全世界の第四紀火山の評価が可能となっている。ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) は、経済産業省が開発した地球観測センサであり、NASA の地球観測衛星 TERRA に搭載され 1999 年 12 月から運用が続けられている。産総研では、2016 年 4 月よりこの衛星データの付加価値データ (ASTER-VA) の配信を行っている (<https://gbank.gsj.jp/madas/>)。国内では、国土地理院が提供する 10m メッシュの標高データを利用できる。

3. 検索システムと背景地図

火山災害予測支援システムでは、全世界の第四紀火山の検索が可能である。本システムで表示される全世界の第四紀火山の分布は、スミソニアン GVP (<http://volcano.si.edu/>)、世界の第四紀火山データベース VOGRIPA (<http://www.bgs.ac.uk/vogripa>)、日本の火山データベース (<https://gbank.gsj.jp/volcano>) に基づいている。ここでは、3つのデータベースに掲載されている火山データから検索ができる。火山リストタブをクリックすると、すべての火山がメニューの左側にリストアップされる。現在は、3,166の火山が登録されている (図 2)。リストの地域名から順次検索するか、上部の検索窓へ英語で火山名の一部を入力すると、候補火山のリストが表示される (図 3)。該当する火山名をクリックするとその火山が地図上に表示される。直接 Google Map からズームして該当火山を表示することもできる。

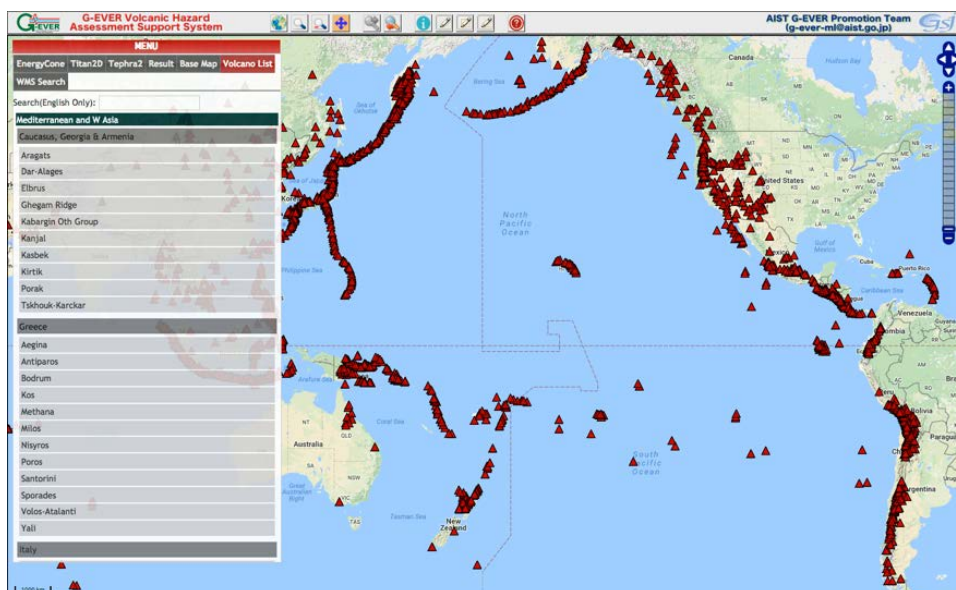


図 2. 第四紀火山の検索画面。地域毎に区分されている。検索窓から火山名 (英語) を入力して絞り込みができる (<http://volcano.g-ever1.org/>)。

背景地図は、地図表示タブから選ぶことができる。現在、Google maps (satellite, street and physical), Bing maps (aerial), Landsat と MODIS の衛星画像, ASTER GDEM が表示できる。国内では、20 万分の 1 日本シームレス地質図や 2 万 5 千分の 1 国土地理院の地形図を表示できる。さらに、WMS レイヤ検索のタブから、WMS サービスに対応した地図を検索し、表示させることができる。例えば、地質調査総合センターでは、WMS による配信サービス (<https://gbank.gsj.jp/owscontents/>) を進めており、これらの地質図等を背景図として表示できる。したがって、例えば、富士山火山地質図を表示させ、過去の堆積物の分布とシミュレーション結果を比較することが可能である。

4. 主要火山データベースの参照機能

火山災害予測支援システムでは、情報ボタン (i で示されたボタン) を選択してから、地図上に表示された火山をクリックすることで、主要火山データベースへのリンクが表示される。現時点では、VOGRIPA, スミソニアン GVP, 火山衛星画像 (<https://gbank.gsj.jp/vsidb/image/>), 日本の火山, WOVodat (<http://www.wovodat.org/>) の 5 つのデータベースへのリンクが表示される (図 3)。各データベースの該当火山の情報が直接表示されるため、火山毎の噴火史, 最近の噴火被害, 衛星画像データ, モニタリングデータなどを検討できる。

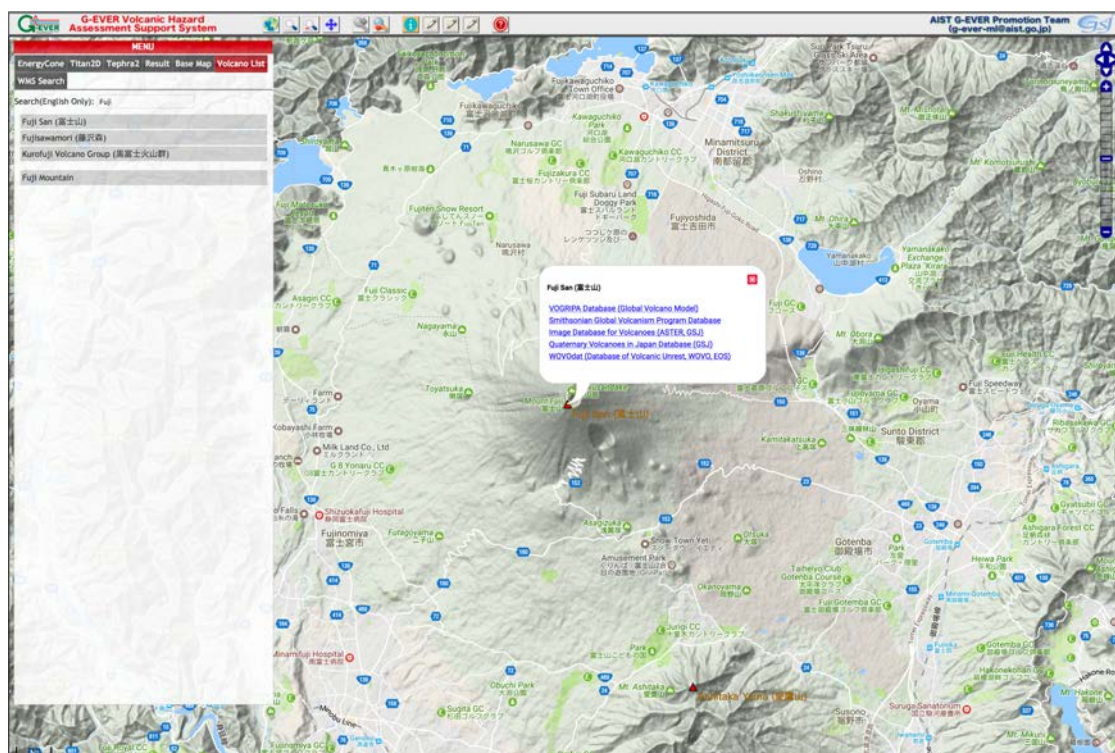


図 3. 主要火山データベースへのリンク機能

4. エナジーコーンシミュレーション

エナジーコーンモデルは、Malin and Seridan (1982) が開発したシミュレーションであり、エナジーライン (Heim, 1882) を 3 次元的に展開したものである。火口からの噴出物の位置エネルギーが運動エネルギーに変換され、斜面を駆け下る時、運動エネルギーが摩擦によって減少し、エネルギーが 0 になったときに停止する。出発地点 (火口の高さ+噴煙柱崩壊高度 (Hc)) と停止地点の比高 (H) と流走距離 (L) の比 (H/L) が見かけの摩擦係数 (等価摩擦係数) と等しくなる。このエナジーコーンと実際の地形の上下関係で、火砕流が到達するかどうかを表示する。従って、等価摩擦係数 (H/L) と噴煙柱崩壊高度 (Hc) の 2 つのパラメータのみで、迅速に火砕流や岩屑なだれなどの到達可能範囲を予測できるため、利用価値が高い。

エナジーコーンのタブを選んだのち、利用する標高データを選択する。北緯 83 度から南緯 83 度をカバーする ASTER GDEM (30m 解像度) と、10m 解像度の国土地理院標高データ (国内のみ) を選択できる。鉛筆マークの形をしたスタート地点指定アイコンを選んだのちに、マウスでスタート地点を地図上でクリックすると、噴火開始地点を指定できる (緯度経度の手入力は不可)。そして、噴煙柱崩壊高度 (Hc) と等価摩擦係数 (H/L) の最大値, 最小値, 計算ステップを入力する。エナジーコーンが地形障壁の影に当たる部分 (shadow zone) についても表示するかどうかを選択することができる。火砕流は必ずしも出発地点から放射状に流れるわけではなく、地形障壁部分では、谷などに沿って回り

込むこともあるため、影の部分も検討しておく必要があるケースも評価できる。実行時間は通常 30 秒以内であるが、広い範囲や標高の高い火山などでは、1 分以上かかることもある。PNG 標高タイル技術を使い、実行時間を大幅に短縮したバージョンも公開している (<http://g-ever1.org/quick/>)。エネルギーコーンモデルでは、あくまでも位置エネルギー的に到達しうるすべての範囲を表示する。多くの場合、火砕流や岩屑なだれ等の火山重力流は、谷筋などを流れ下り、その一部を覆うことになることに注意が必要である。また、火砕流から分離した火砕サージは、異なる見かけ上の摩擦係数で流走するため、火砕流として予測した範囲を大きく超えて分布する可能性があり、この点にも十分注意が必要である。このシミュレーションの表示には、WMS, WCS などの WebGIS 技術を利用している。図 4A にシミュレーション結果の一例を示す。シミュレーション結果はすぐに地図上に表示され、計算結果タブをク

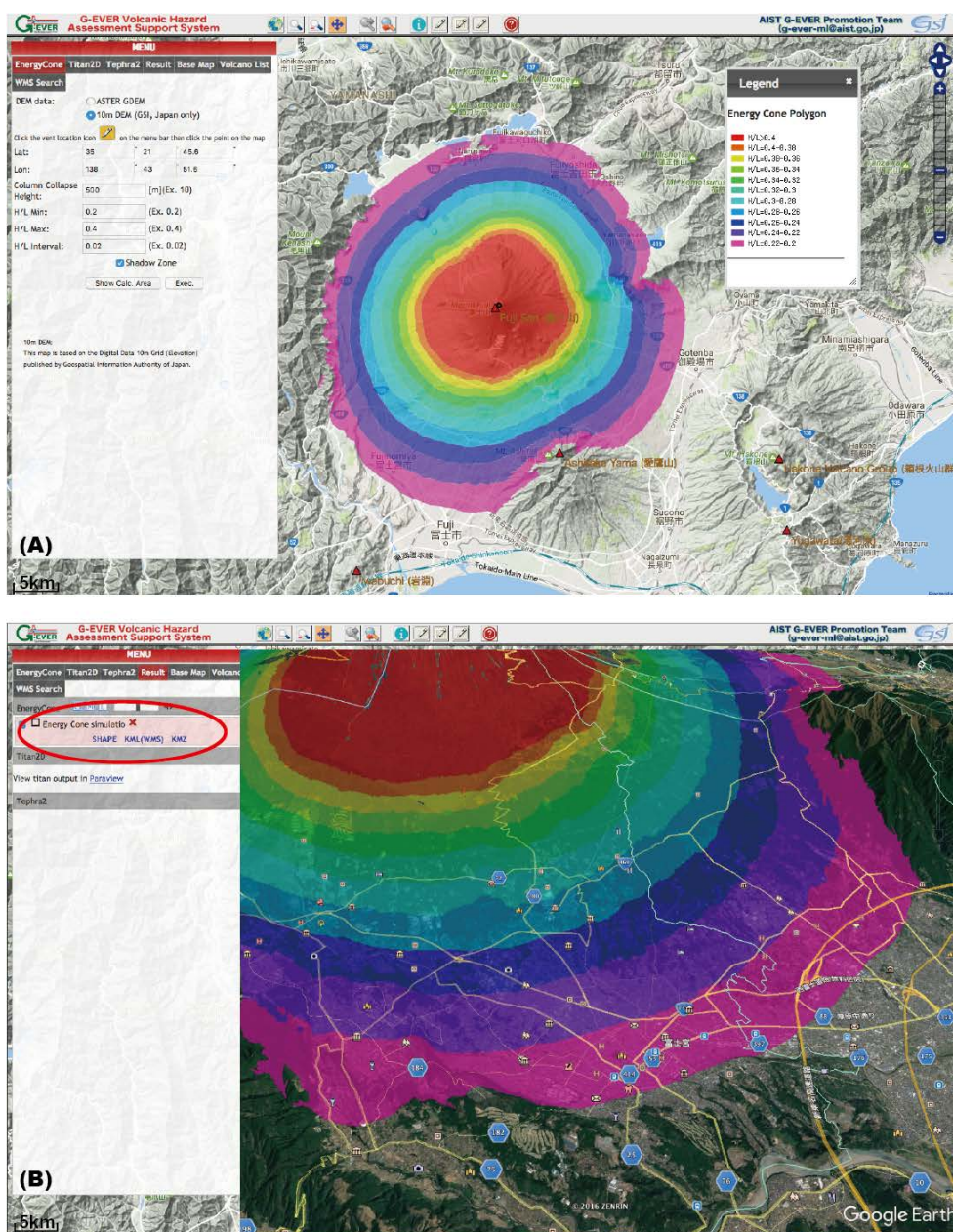


図 4. エネルギーコーンモデルによるシミュレーション。富士山の一例。A. 入力画面、B. 実行結果表示ダウンロード画面。

リックすると透明度を変更し、凡例を表示することができる (図 4B)。結果は、GIS 形式の Shape ファイルや Google Earth 用の KML, KMZ ファイルとしてダウンロードできる (図 4B)。ダウンロードしたデータは、ArcGIS や QGIS の GIS ソフトウェア、Google Earth 上でさまざまな情報と重ね合わせて比較検討できる。

5. Titan2D シミュレーション

Titan2D のシミュレーションコード (Patra et al., 2005) は、主にニューヨーク州立大学バッファロー校のメンバーが中心となり開発したものであり、Savage and Hutter (1989), Iverson (1997), Denlinger and Iverson (2001)らによって提案された浅水波モデルを利用している。x, y 方向の速度分布は深さに対しては平均流速とし、計算の高速化を図っている。

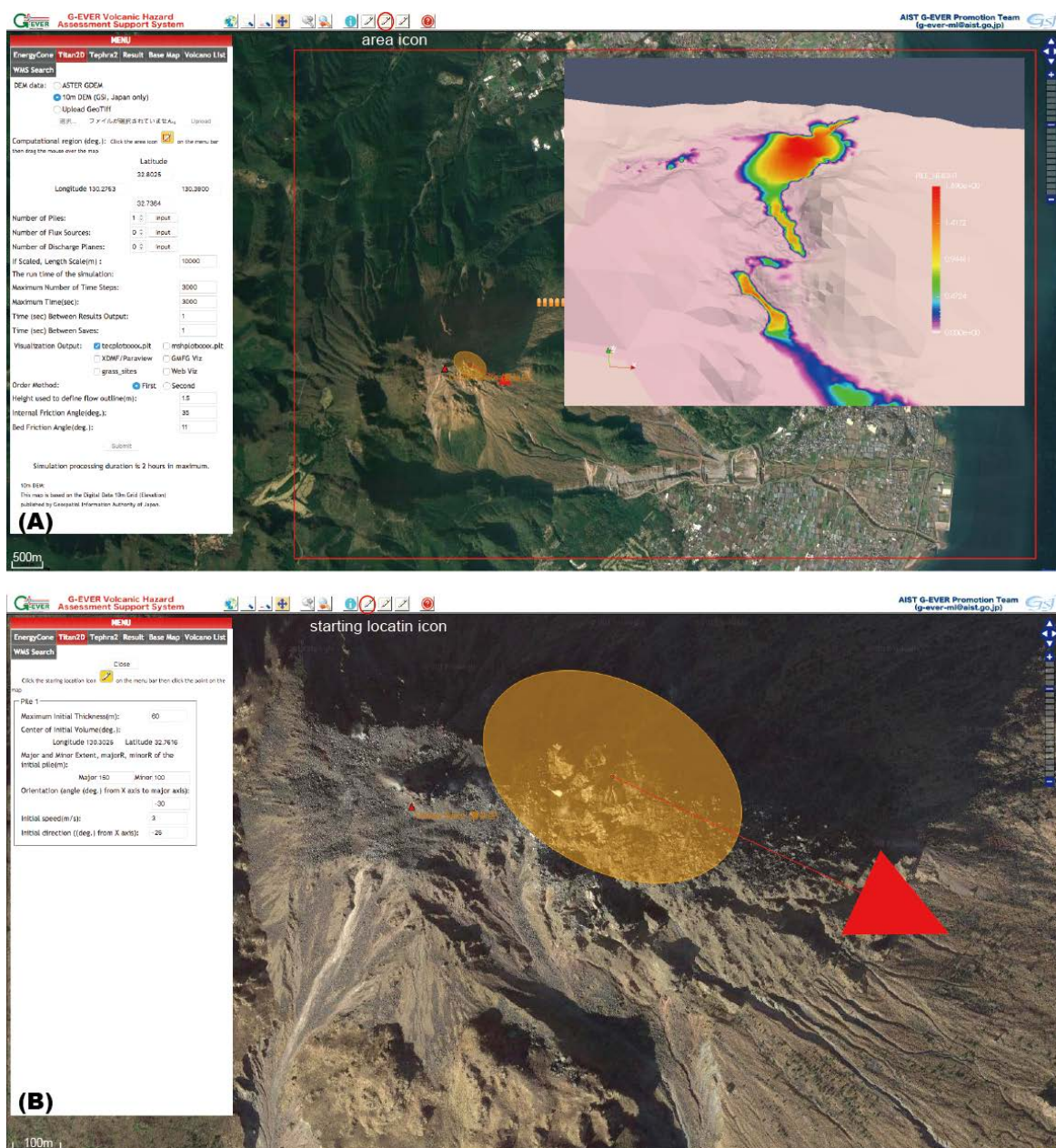


図 5. A. Titan2D のシミュレーション画面。雲仙火山の例。B. スタート地点の位置、サイズ、形状、初速の方向と速度は、衛星画像などと重ね合わせて確認できる。計算結果はダウンロードの上、Paraview などのソフトウェア上で可視化する (A 右上)。

このモデルでも、ほぼ全球をカバーする ASTER GDEM と、国内をカバーする国土地理院の 10m メッシュ標高データを選択できる。また、ユーザー自身の標高データを Geotif 形式でアップロードし、計算に用いることができる。ユーザーは、上部のエリアアイコンを選択したのち、地図上をマウスでドラッグすることにより、計算領域を指定する (図 5A)。溶岩ドーム崩壊型 (pile)、噴煙柱崩壊型 (flux source) を選ぶことができる (それぞれ 3 箇所まで)。また、流量を計算する断面線の位置を指定できる。予想される到達距離、計算ステップ数の最大数、最大計算時間、結果出力の時間間隔、結果を保存する時間間隔、可視化アプトブットの形式、シミュレーション精度、重力流の層厚、内部摩擦角、底面摩擦角を入力する。溶岩ドーム崩壊型の場合のパイル (半球ドーム状の形状) のパラメータは、最大層厚、パイル(楕円)の長軸と短軸の長さ、パイル長軸の x 軸に対する角度、流下開始時の初速、流下方向と x 軸からの角度を入れる。発生域の中心の座標は、上部の出発地点アイコンを選択したのちに、地図上 (衛星画像が分かりやすい) でマウスクリックすることで指定する (緯度経度の手入力は不可)。これらのパラメータの値を入力すると、地図上に自動的に発生域 (パイル) の範囲と、初速の方位と速度 (矢印の向きと長さ) が表示される。この機能により、ユーザーは比較的容易に、画面上で確認しながら発生域の位置・サイズ・伸びの方向、初速の方位と流速の指定を行うことができる (PC 版や Vhub 版では、すべて緯度経度やサイズを手入力するため、意図した場所かどうかの確認が難しい)。シミュレーションは、通常、数分から 1 時間以内に完了するが、噴煙柱崩壊型など条件によっては 1 時間以上かかることがある (占有を避けるため、本システムの実行時間は最大 2 時間としている)。結果は、計算結果タブをクリックしてダウンロードし、Paraview 等のフリーソフトで可視化した上で、ハザード評価を行う (図 5A 右上)。

6. Tephra2 シミュレーション

Tephra2 は、オイラー型の移流拡散型シミュレーションである (Connor and Connor, 2006; Bonadonna et al., 2002)。Suzuki (1983) による移流拡散の式を用いている。Tephra2 は、Connor et al. (2001) によって Tephra として開発されたものであり、南フロリダ大などが中心となり改良が図られて現在の形になっている (Bonadonna et al., 2005)。降下テフラの堆積物の層厚や粒径分布が得られることが特徴の 1 つであり、実際の堆積物と比較検討ができる。最近では、インバージョンにより、堆積物の層厚や粒径分布から噴煙柱内部の状態を復元する試みも行われている (例えば、Mannen, 2014)。

火山災害予測支援システムでは、Mannen (2014) による改良版を用いている。通常の Tephra2 では、粒径分布は、ガウス分布と考え中央粒径と標準偏差を入力するが、本システムでは任意の粒径分布を与えることが可能である。Tephra2 のタブを選び、風データと、粒径分布データ (オプション) をアップロードする (図 6A)。標高データは ASTER GDEM から作成した 300m, 600m, 900m のメッシュデータ、国土地理院 10m メッシュから作成した 100m, 200m, 300m から選択できる (地理院のデータは国内のみ)。シミュレーションの範囲は、上部の計算範囲アイコンを選択してから、マウスでドラッグすることにより指定する。噴煙柱高度、噴出量、最大粒径、最小粒径、中央粒径、標準偏差、渦拡散係数、拡散係数、落下時間境界値、岩片の密度、軽石の密度、噴煙分割数、噴煙分割割合などのパラメータを入力する。実行ボタンを押すと、通常 5-10 分程度で計算が終了する。しかし、広域のシミュレーションやメッシュサイズによっては 30 分以上かかることもある。計算結果は、shape と text ファイル形式でダウンロードし、GIS ソフト上でコンター図を描くことができる (図 6B)。メッシュ地点毎の層厚や粒径分布データは、GIS データとして確認できる。各種のデータや地形図と重ね合わせたり、演算を行うことでハザード・リスク評価に役立てることが可能である。

7. 議論

G-EVER 火山災害予測支援システムの利点は、(1) ASTER GDEM により、世界中の第四紀火山に適

用可能, (2) リアルタイムのハザード・リスク評価に利用可能, (3) エナジーコーン, Titan2D, Tephra2のシミュレーションにより, 主要な火山現象(火砕流, 岩屑なだれ, ラハール, 降下テフラ)に適用可能, (4) Google Mapなどの背景地図(道路地図と衛星画像)が利用可能, (5) 主要火山データベースの直接参照機能などが挙げられる. また, ユーザーにとって利用しやすいシステムとして, (1) 全世界の第四紀火山の検索機能, (2) シミュレーションの出発地点や計算範囲の分かりやすい入力機能, (3) 計算結果のダウンロード機能などを提供している.

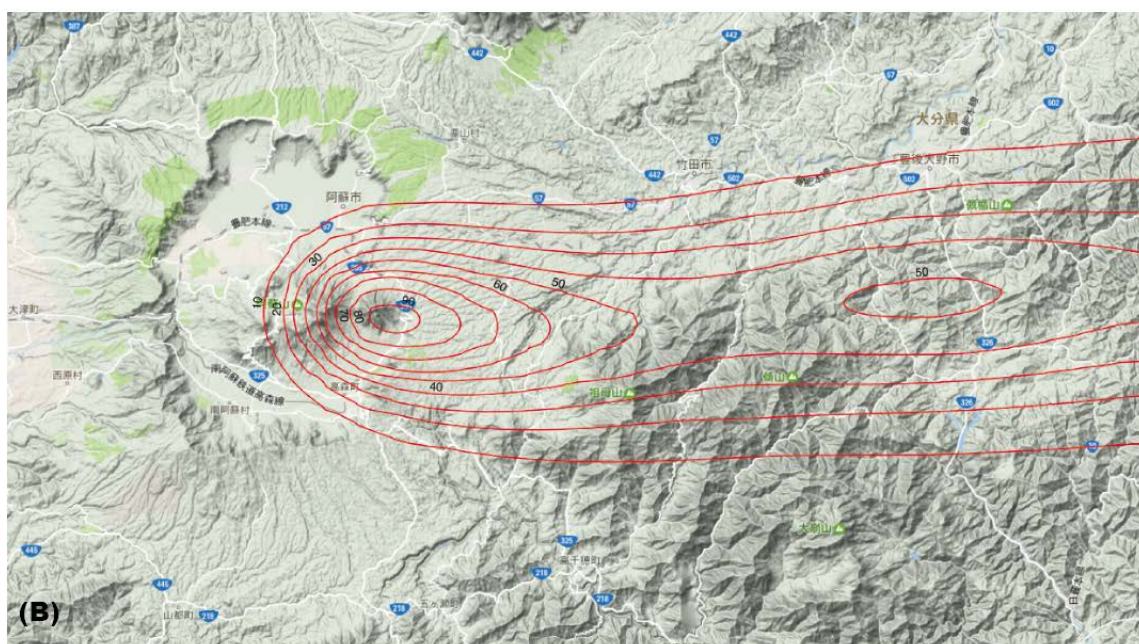
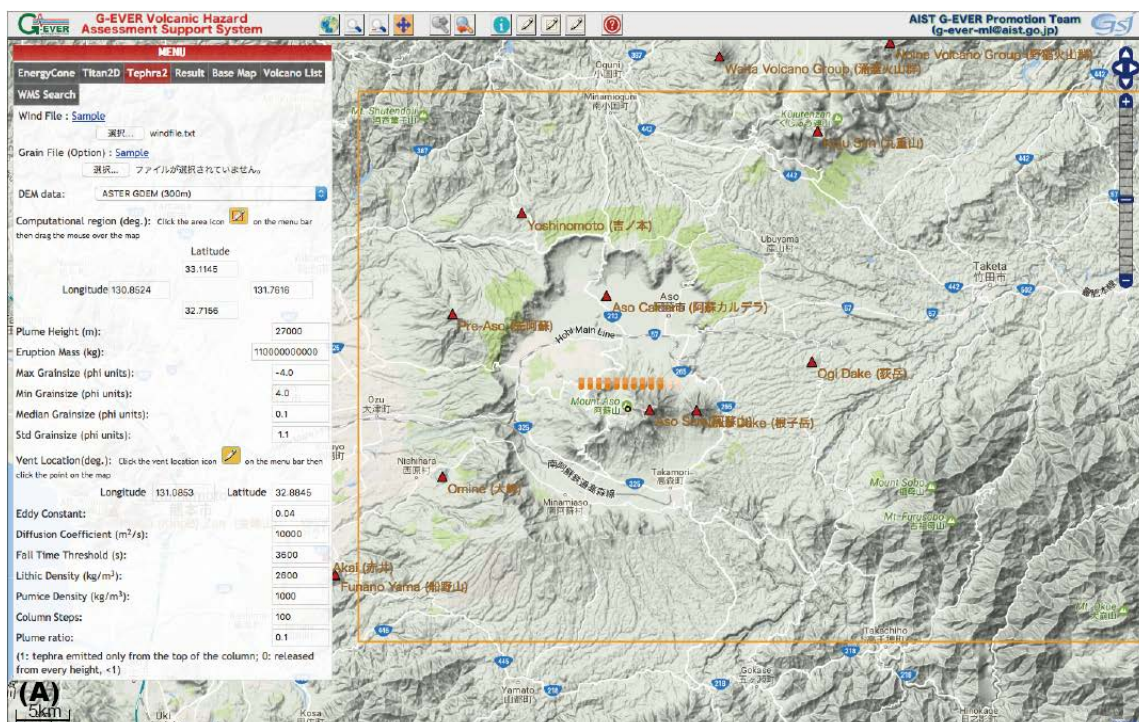


図6. A. Tephra2によるシミュレーション(阿蘇火山). B. QGISでシミュレーション結果のコンターを表示.

火山災害予測支援システムは、ブラウザとインターネット環境があれば利用できるため、より多くの方に利用していただけたらと考えている。例えば、野外調査をベースとする火山研究者、発展途上の火山観測所のスタッフ、各種の防災関係者、火山現象に興味がある学部生等にもご利用いただけたらと考えている。また、噴火開始後のリアルタイムハザード評価や、火山防災マップの改訂などにも利用できる。Vhub (Palma, 2014) でも同様の機能は提供されているものの、ユーザー自身で標高データを用意し、出発地点を UTM の緯度経度で手入力するなど、やや複雑な操作が必要であり、対象はシミュレーションを日常的に行うような火山専門家に限られる傾向がある。

今後は、Titan2D と Tephra2 のシミュレーション結果を直接ブラウザの地図上に表示するシステムを用意する予定である。また、Puff, Hazmap, Fall3D, Ash3D, Downflow (溶岩流シミュレーション; Tarquini and Favalli, 2011) や確率論的火山災害予測機能 (例えば, PyBetVH; Tonini et al., 2015) を導入することを検討している。

References

- Bonadonna, C., Macedonio, G. and Sparks, R. S. J. (2002) Numerical modelling of tephra fallout associated with dome collapses and Vulcanian explosions: Application to hazard assessment on Montserrat. In *The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T. H. and Kokelaar, B. P. eds), 517-537. Geol. Soc. (London) Memoir, 21.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., and Hincks, T. K. (2005) Probabilistic modeling of tephra-fall dispersal: hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Jour. Geophys. Res.*, 110, B03203, doi:10.1029/2003JB002896.
- Bonadonna, C., Connor, L. J., Connor, C. B., and Coutland, L. M. (2014). Tephra2. VHub resource. <https://vhub.org/resources/tephra2>.
- Connor, C. B., Hill, B. E., Winfrey, B., Franklin, N. M., La Femina, P. C. (2001) Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Nat. Hazards Rev.*, 2, 33-42.
- Connor, L. J., and Connor, C. B. (2006). "Inversion is the solution to dispersion: understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout", in *Statistics in Volcanology*, eds. H. M. Mader, S. Coles, C. B. Connor, and L. J. Connor (IAVCEI 1: Geological Society of London), 231-242.
- Croweller, H. S., Arora, B., Brown, S. K. Cottrell, E., Deligne, N. I., Natalie Ortiz Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Lowndes, J., Nayembil, M., Siebert, L., Sparks, R. S. J., Takarada, S., and Venzke, E. (2012) Global database on large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE). *J. Applied Volcanol.* 1:4. doi:10.1186/2191-5040-1-4.
- Denlinger, R. P., and Iverson, R. M. (2001) Flow of variably fluidized granular material across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests. *J. Geophys. Res.* 106, 533-566.
- Folch, A., Costa, A. and Macedonio, G. (2009) Fall3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers & Geosciences*, 35, 1334-1342.
- Heim, A. (1882) Der Bergsturz von Elm. *Z. Dtsch. Geol. Ges.* 34, 74-115.
- Iverson, R. M. (1997) The physics of debris flows. *Reviews Geophysics* 35, 245-296.
- Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C. R., Miller, V., Stewart, C., Marzocchi, W., and Boulton, M. (2015) Volcanic ash fall hazard and risk: Technical Background Paper for the UNISDR 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. *Global Volcano Model and IAVCEI*. 1-43.
- Loughlin, S. C., Sparks, S., Brown, S. K., Jenkins, S. F., and Vye-Brown, C. (2015) *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge University Press.
- Macedonio, G., Costa, A., and Longo, A. (2005) A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Computers & Geosciences* 31, 837-845.
- Malin, M. C. and Sheridan, M. F. (1982) Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 217, 637-640.
- Mannen, K. (2014). Particle segregation of an eruption plume as revealed by a comprehensive analysis of tephra dispersal: Theory and application. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 284, 61-78.
- Marzocchi, W., Sandri, L., and Selva, J. (2010) BET_VH: a probabilistic tool for long-term volcanic hazard assessment. *Bull. Volcanol.* 72, 705-716.

- Marlin, M. C., and Sheridan, M. F. (1982) Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 13, 637-640.
- Neri, A., Aspinall, W. P., Cioni, R., Bertagnini, A., Baxter, P. J., Zuccaro, G., Andronico, D., Barsotti, S., Cole, P. D., Esposti Ongaro, T., Hincksh, T. K., Macedonio, G., Papale, P., Rosi, M., Santacroce, R., and Woo, G. (2008) Developing an Event Tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 397-415.
- Newhall, C. G., and Hoblitt, R. P. (2002) Constructing event trees for volcanic crises. *Bull. Volcanol.* 64, 3-20.
- Palma, J. L., Courtland, L., Charbonnier, S., Tortini, R., and Valentine, G. (2014) Vhub: a knowledge management system to facilitate online collaborative volcano modeling and research. *J. Applied Volcanol.* 3, doi: 10.1186/2191-5040-3-2
- Papale, P., and Shroder, J. F. (eds.) (2015) *Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier.
- Patra, A. K., Baer, A. C., Nichita, C. C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Stinton, A. J., Namikawa, L. M., and Renschler, C. S. (2005) Parallel adaptive simulation of dry avalanches over natural terrain. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 1-22.
- Pitman, E. B., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M., and Bursik, M. (2003) Computing debris flows and landslides. *Phys. Fluids*, 15, 3638-3646.
- Savage, S. B., and Hutte, K. (1989) The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mechanics* 199, 177-215.
- Schwaiger, H. F., Denlinger, R. P. and Mastin, L. G. (2012) Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Jour. Geophys. Res.* 117, B4, doi: 10.1029/2011JB008968
- Searcy, C., Dean, K. and Stringer, W. (1998) PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 80, 1-16.
- Selva, J., Costa, A., Marzocchi, W. and Sandri, L. (2010) BET_VH: exploring the influence of natural uncertainties on long-term hazard from tephra fallout at Campi Flegrei (Italy). *Bull. Volcanol.* 72: 717. doi:10.1007/s00445-010-0358-7
- Selva, J., Costa, A., Sandri, L., Macedonio, G., and Marzocchi, W. (2014) Probabilistic short-term volcanic hazard in phases of unrest: A case study for tephra fallout. *Jour. Geophys. Res.* 119, doi: 10.1002/2014JB011252
- Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly, P. (2010) *Volcanoes of the world*, third edition. University of California Press.
- Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, A. and Nichita, C. C. (2004) Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 89-102.
- Suzuki, T. (1983) "A theoretical models for dispersion of tephra", In *Arc Volcanism: Phys. Tectonics*, ed. D. Shimozuru, and I. Yokoyama (Tera Pub), 95-113.
- 新堀敏基 (2016) 火山灰輸送：モデルと予測. *火山*, 61, 299-427.
- Takarada, S., Bandibas, J. C., Ishikawa, Y. and G-EVER Promotion Team (2014) Global Earthquake and Volcanic Eruption Risk Management Activities, Volcanic Hazard Assessment Support System and Asia-Pacific Region Hazard Mapping Project in G-EVER. *Episodes* 37, 321-328.
- Takarada, S., Ishikawa, Y., Maruyama, T., Yoshimi, M., Matsumoto, D., Furukawa, R., Teraoka, Y., Bandibas, J.C., Kuwahara, Y., Azuma, T., Takada, A., Okumura, K., Koizumi, N., Tsukuda, E., Solidum, R. U., Daag, A. S., Cahulogan, M., Hidayati, S., Andreastuti, S., Li, X., Nguyen, H. P., and Lin, C-H. (2016) *Eastern Asia Earthquake and Volcanic Hazards Information Map*. Geological Survey of Japan, AIST.
- Tarquini, S., and Favalli, M. (2011) Mapping and DOWNFLOW simulation of recent lava flow fields at Mount Etna. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 204, 27-39.
- Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Zaccarelli, L., Di Vito, M. A., Sulpizio, R. and Marzocchi, W. (2016) Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy). *Bull. Volcanol.* 78, doi: 10.1007/s00445-016-1073-9
- Tonini, R., Sandri, L., and Thmpson, M. A. (2015) PyBetVH: A Python tool for probabilistic volcanic hazard assessment and for generation of Bayean Hazard curves and maps. *Computers & Geosciences* 79, 38-46.