

持続可能開発目標達成支援事業（aXis）

Aタイプ研究分野「防災」

研究課題名「火山噴火リアルタイムハザード予測の高度化とその社会実装に向けた実証試験」

相手国名：インドネシア

令和2（2020）年度実施報告書

研究期間

2020年4月1日から2022年3月31日まで

研究代表者：井口正人

京都大学防災研究所・教授

# I. 国際共同研究の内容 (公開)

## 1. 当初の研究計画に対する進捗状況

### (1) 研究の主なスケジュール

研究題目・活動	2020年度				2021年度			
	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月
1. 噴出物量推定		ブリアロセンサーの設計・設置	関係式の高度化					
1-1 地震活動	←	→	←	→	←	→	←	→
1-2 地盤変動	←	噴出物量関係式の検討	←	関係式の高度化 * 1	←	→	←	→
1-3 規模検証		←	規模検証観測 (桜島) * 2	→		* 3 規模検証観測	←	→
2. システム構築		←	システムソフトの開発・改良	→	←	システム導入	→	←
2-1 SSDMの改良	←	→		* 4	←	←	←	←
2-2 SSDM-Local導入	←	→		←	←	←	←	←
2-3 統合化	←	→	←	→	←	←	←	←
機材導入 SSDM, SSDM-Local			←	→		←	→	
GNSS, 傾斜計, 空振計, カメラ	←	→	←	→	←	←	←	←
渡航活動			←	→	* 8	←	←	←
					現地打合せ	←	←	←
					GNSS設置	←	←	←
					規模検証のための噴火観測	←	←	←
					観測所の観測データ・情報通信とシステム設置環境調査の調査 (3人・7日)	←	←	←
					システム開発研究推進打ち合わせとCGIMのSSDMの通信環境調査 (2人・7日)	←	←	←
					システムの設置・ソフトの導入 (1人・30日)	←	←	←
					システム開発研究推進打ち合わせとシステム運用ワークショップ (2人・7日)	←	←	←
					システムの運用評価・チューニングとシステム運用ワークショップ (2人・14日)	←	←	←
					研究の総括とシステム運用ワークショップ	←	←	←
					国際コーディネータ派遣	←	←	←

【令和2年度実施報告書】【210531】



- \* 1 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、既存のインドネシアのデータ及び本邦におけるデータを検討した。
- \* 2 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、桜島のブルカノ式噴火を対象に規模検証観測を行った。
- \* 3 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、相手国における規模検証観測を 2021 年度に実施することとした。
- \* 4 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、本邦において調達したワークステーションにシステムを導入した。
- \* 5 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、システムの導入を本邦で実施したため、試験運用も本邦で行うこととした。
- \* 6 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、相手国へのシステムの設置が遅れることになった。
- \* 7 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、相手国における調達の目途が立たなくなり、本邦においてワークステーションを調達した。
- \* 8 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、2020 年度に予定していた相手国での調整やワークショップの開催が遅れることになった。

(2)プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

なし

## 2. プロジェクト成果の達成状況とインパクト (公開)

### (1) プロジェクト全体

コロナ禍の影響で相手国に渡航できていないので、システムの開発にとどまっている。相手国へのシステムの導入とチューニングはもちろんのこと、人材の教育などができておらず、最終的な観測所職員が自立して、科学的根拠に基づいたハザード・ゾーンを評価するという目標には程遠い状況である。一方で、システム開発は着実に進められて、導入を待つだけである。最近、西インド諸島・セントビンセント島で発生した爆発的な噴火に伴う火砕流や、アフリカのニーラゴンゴ火山において発生した溶岩流出は、先行する火山性地震活動の活発化が報告されており、モニタリングデータをもとにハザードをリアルタイムで予測する本プロジェクトのシステムパッケージを活用できる事例である。また、若手日本人研究者を本プロジェクトに参画させることにより、世界的な視点での防災研究を進めさせた。本プロジェクトの研究題目1は大学が、研究題目2は企業が担当し、その連携によりプロジェクトを進めた。このことにより、新たな共同研究にもつながっており、「イノベーション創出に向けた人材、知、資金の好循環システムの構築」にも貢献できた。

### (2) 研究題目1：「観測データによる火山噴火規模と噴出物量推定手法の開発」

研究グループA（リーダー：京都大学・井口正人）

#### ① 研究題目1の当初の計画（全体計画）に対する当該年度の成果の達成状況とインパクト

##### 研究活動1-1 地震活動評価による噴出物量予測経験式の高度化

地震活動から噴出物量を予測する経験式としては SATREPS（火山噴出物の放出に伴う災害の軽減に関する総合的研究、2014年～2019年）において開発した噴出物量の上限を予測する経験式(Iguchi et al., 2019)がある。この経験式は本プロジェクトでも対象とするメラピ火山の過去の噴火活動から導出されたものであり、短期間（概ね30年以内）に噴火を繰り返す火山においては、地震エネルギーから導かれる噴出物量の上限值を噴出物量としてよいことが分かっている。一方、長期の噴火活動の休止期にある火山においては、地震活動のエネルギーは大きく、実際の噴出物量は、予測される上限値よりも桁違いに小さい場合が多い。

本プロジェクトで重点的に取り扱うグントール火山は、19世紀中ごろまで噴火を頻繁に繰り返したが、1847年以降噴火は発生していない。一方、火山性地震の活動は活発であり、観光地と集落が火口からわずか3kmの距離にあることから重点的に監視を行う火山である。火山性地震は、山頂部を形成する北西-南東方向の火口群に沿った深さ5km以浅と、西部のカモジャン地熱地帯とその周辺の断層において発生する。

本プロジェクトでは、研究題目1において予測されるパラメータを研究題目2に受け渡し、噴出物量の予測値をもとにシミュレーションを行ってハザードを予測することを目的とするので、そのための精度の高い基本量（地震エネルギー）の抽出が重要である。SATREPSにおいては火山性震動を監視してリアルタイムで降灰量に換算するソフトウェアEQAを開発した。このソフトウェアは振幅振幅を常時モニタリングするRSAM (Real-time seismic amplitude) と同等であり、時々発生する規模の大きい構造性地震（主に、ジャワ島下へのインド-オーストラリアプレートの沈み込みに起因する）の取り扱いが問題であった。日本国内のように全国に及ぶ稠密地震観測網が展開されている

場合は、火山近傍の多数の観測点を参照することにより、構造性地震の判別は容易であるが、インドネシアのように観測点が少ない場合は、マグニチュード4未満の構造性地震の判定は難しい。

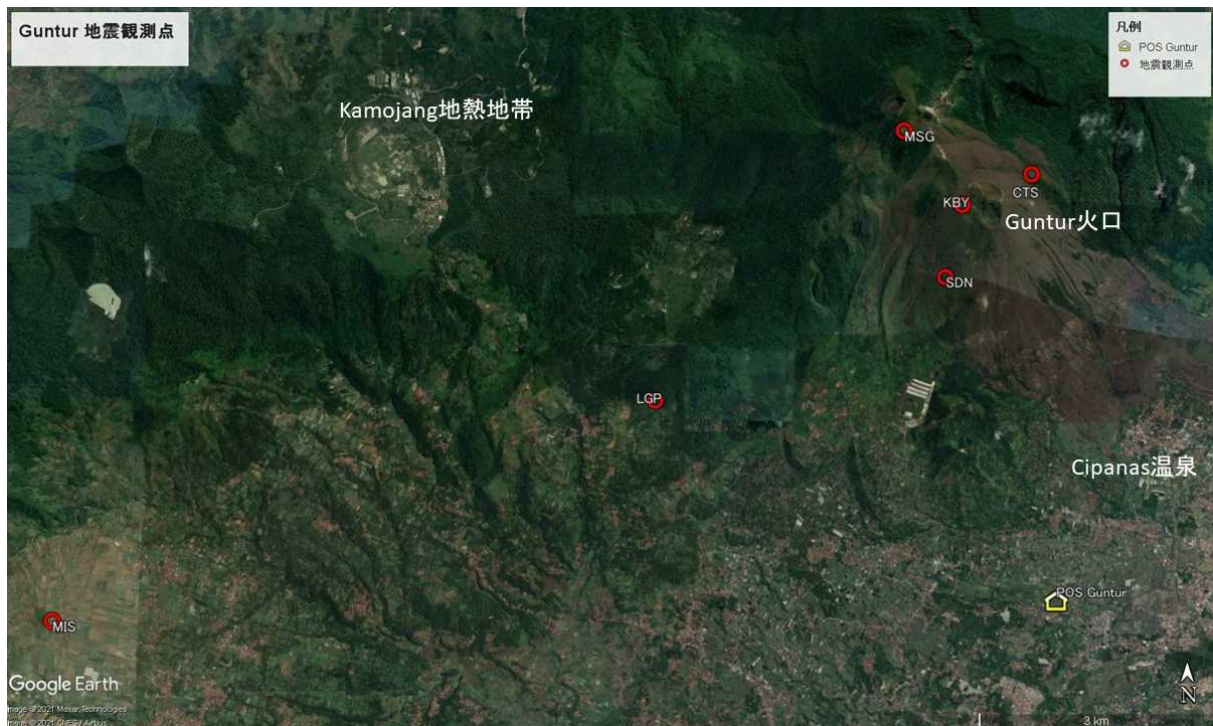


図 1-1-1 グントール火山における地震観測点位置図

グントール火山観測網の場合は、火山近傍の地震観測点は5点、西方に1点あるが（図 1-1-1）、それよりも遠い観測点は南西にあるパパンダヤン火山か、南東にあるガルングン火山の観測点を使うしかないが、データ伝送が不完全であるため、これらの火山の地震記録を参照することができない。そこで、本プロジェクトでは、グントール火山観測網を構成する6点のみから自動的に火山性地震を抽出してそのエネルギーを求め、研究題目2に受け渡すプリプロセッサソフトウェアVSACalcを開発した。VSACalcはオンラインで送信されてくるWINフォーマットパケットを受信することにより、地震の開始と終了を判定してマグニチュードと地震エネルギーを含む地震プロパティを個々の地震ごとに作成するものである。仕様は以下のとおりである。

- 1) リアルタイムで地震観測点からUDPパケット送信される5チャンネル以上のWINフォーマット地震データを受信すること。
- 2) このうち、2チャンネルのデータを主火山性地震チャンネル、副火山性地震チャンネル、それ以外の3チャンネル以上を構造性地震チャンネル（構造性地震チャンネル1，構造性地震チャンネル2，構造性地震チャンネル3・・・）として割り当て、受信するチャンネルごとに地震の開始をSTA/LTAアルゴリズムにより検知し、地震の振幅の絶対値が指定するサンプル数を続けてSTA/LTAを上回った時に、最初に上回った時刻を地震の開始とする。また、地震の振幅の絶対値が指定するサンプル数を続けてSTA/LTAを下回った時に、最初に下回った時刻を地震の終了とする。
- 3) 主火山性地震チャンネルが地震を検知した時、構造性地震チャンネルのいずれかの検知時刻が主

火山性地震チャンネルおよび副火山性地震チャンネルのいずれよりも早いとき、または、構造性地震チャンネルの最大振幅と主火山性地震チャンネルの最大振幅の比が指定する値を超えた時「構造性地震」とする。そうではない時に、指定した時間範囲内に副火山性地震チャンネルが地震を検知したときにステータスを「火山性地震」とする。それ以外は、ノイズとする。

- 4) それぞれの地震について、最大振幅 ( $A$ ) 及び継続時間 ( $t_{F-P}$ ) からマグニチュードを算出する。

$$M_A = \log_{10} A + \log_{10} b \quad (1)$$

$$M_D = c \log_{10} t_{F-P} + d \quad (2)$$

ここで、 $M_A$ は振幅マグニチュード、 $M_D$ は継続時間マグニチュードである。また、以下の式を用い、マグニチュードから地震エネルギー ( $E_A, E_D$ 単位 J) を算出する。

$$\log_{10} E_A = 4.8 + 1.5M_A, \log_{10} E_D = 4.8 + 1.5M_D \quad (3)$$

- 5) スペクトル (0.1~20Hz) を算出し、卓越周波数を求める。  
6) これらのパラメータを地震プロパティとして保存する。  
7) これらの計算は過去に保存された WIN ファイルについても算出できる。

令和 2 年度は現地に渡航できていないので観測点から自動的に送信されるオンラインデータの検証はできていないが、火山性地震の発生が活動的であった 2019 年 10 月に観測された連続地震記録から火山性地震の検出を試み、VSACalc の妥当性を検証した。使用した観測点は CTS (図 1-1-1) である。その結果、検出されたイベントは 765 個であったが、そのうち火山性地震と判定されたのは 395 個であった。これらについて、元記録を参照にして自動判定の成否を検討した。

この 395 個のイベントのうち、元記録から火山性地震と判断されるものは 280 個であり、正答率は 71%であった。残りのうち、19 個が構造性地震、71 個はノイズ、火山性地震かどうかよくわからないものが 25 個あった。火山性地震の振幅マグニチュード ( $M_A$ ) は 2.1 以下であったが、構造性地震のマグニチュードは 0.3~3.2 の間にあり、誤判定は火山性地震のエネルギーの積算に大きな過大評価を与えることになる。

図 1-1-2 と図 1-1-3 に火山性地震と構造性地震の地震波形とそのスペクトルを比較して示す。両者の違いは震源から観測点までの距離の違いであり、それが最大振幅となることが多い S 波の到達時の違いとなって表れている (図 1-1-2、この例では初動付近の P 波が S 波とほぼ同じ振幅を持っているが多くの場合、S 波の方が大きい)。また、遠方からの地震波である構造性地震では低周波成分が優勢となり、高周波成分が減衰する (図 1-1-3)。

そこで、火山性地震の自動判定に以下の条件を付加した。

- ① 高周波成分 (10~20Hz) と低周波成分 (4~4.9Hz) の平均スペクトルの比が 0.25 以上
- ② 最大振幅の発現時刻が地震の検知から 3 秒以内
- ③ 卓越周波数が 0.5~15Hz

なお、条件③は地震動以外のノイズによるイベントを除去するための条件である。これらの条件の付加の結果、VSACalc により火山性地震と判定されたのは 395 個から 278 個に減少したが、元記録との照合により火山性地震考えられるものは 259 個、19 個はノイズ (不明 3 個を含む) と判定されるもの、構造性地震と考えられるものはなかった。正答率は 93%に改善され、地震エネルギーの積

算に大きな影響を及ぼす構造的な地震はすべて除去することができた。

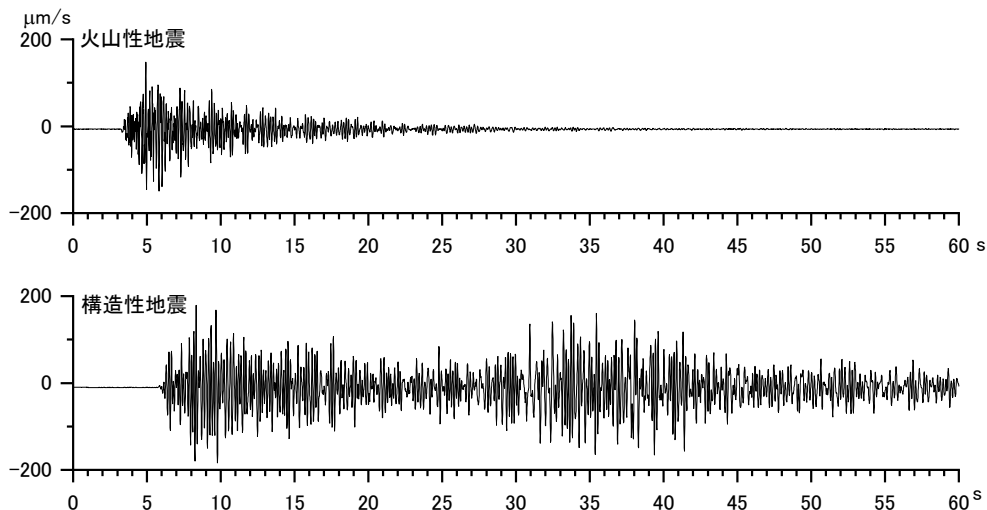


図 1-1-2 火山性地震と構造的な地震の波形の比較

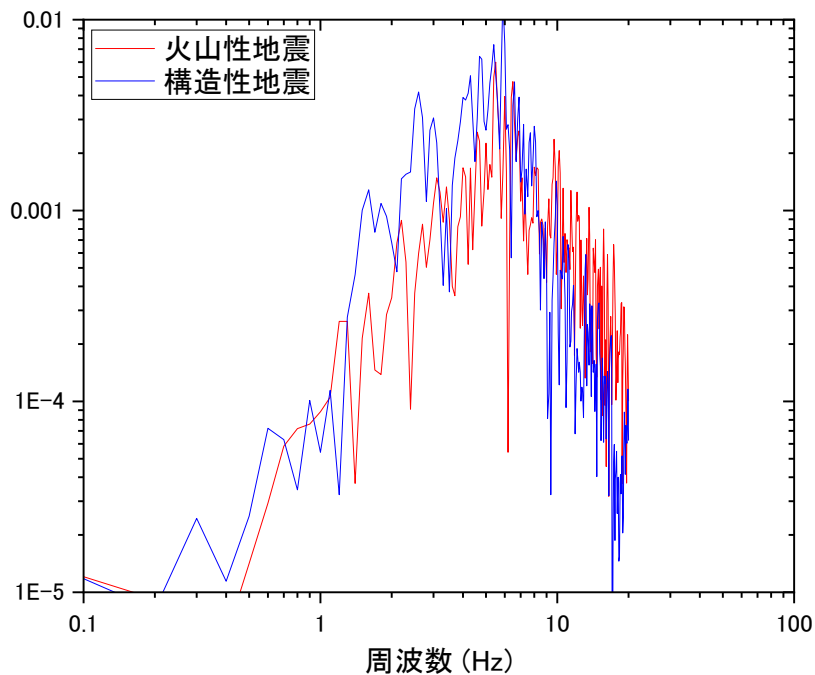


図 1-1-3 火山性地震と構造的な地震のスペクトルの比較

VSACalc により火山性地震と判定された 278 個のイベントを、カウンターパートである火山地質災害軽減センターの観測所職員が読み取った火山性地震リストと比較した (表 1-1-1)。このリストは観測点 KBY (図 1-1-1) のアナログ記録から読み取ったものであるが、観測点は火口に最も近い。278 個のイベントのうち 137 個が火山性地震リストの地震と対応した。VSACalc により火山性地震と判定されたが、火山性地震リストにない 141 個の地震のうち、明らかにノイズと考えられるものが 15 個、地震動の性状がよくわからないものが 3 個あったが、残り 123 個については元記録を照合した結果、火山性地震であることが分かった。VSACalc、火山性地震リストともマグニチュードの最小値は-0.2 であるが、検出数の多さから VSACalc は手動読み取りよりも検出能力が高いことがわかる。

一方、火山性地震リストには 158 個の地震が登録されているが、VSACalc によりノイズ判定されたものは 6 個、検知されなかったものが 7 個あった。また、8 個は構造性地震と判定された。その多く (7 個) は、火山性地震の連続発生によるものであり、先に発生した地震の振動が終わる前に、2 番目の火山性地震が発生し、その規模が大きければ、先の付加条件 2) から構造性地震と判定されるためである。このことは、火山性地震が群発するときに問題となるため、今後検討が必要である。

表 1-1-1 火山性地震の判定結果

	VSACalc 火山性地震	VSACalc 構造性地震	VSACalc ノイズ	VSACalc 非検知
火山性地震 (火山性地震リストにあり)	137	8	6	7
構造性地震	0	—	—	—
ノイズ・不明	15	—	—	—
火山性地震 (火山性地震リストになし)	123	—	—	—

次に、VSACalc により求められた振幅マグニチュード ( $M_A$ )、継続時間マグニチュード ( $M_D$ ) を火山性地震リストに記載されたマグニチュード ( $M$ ) と比較する。なお、VSACalc において  $b=3 \times 10^7$ 、 $c=2.024$ 、 $d=-1.816$  とした。また、マグニチュード ( $M$ ) は、振動継続時間から経験的に算出されたものである (井口・他、1995)。図 1-1-4 に両者を比較したものを示す。振幅マグニチュード ( $M_A$ ) のマグニチュード ( $M$ ) との相関は、継続時間マグニチュード ( $M_D$ ) よりも良い。継続時間マグニチュード ( $M_D$ ) はマグニチュード ( $M$ ) と同じ式を用いて算出されているが、相関が低いことは、STA/LTA アルゴリズムにおける地震の終息判定の精度の低さを示すものと考えられ、VSACalc の使用においては振幅マグニチュードを使用した方がよいことを示す。

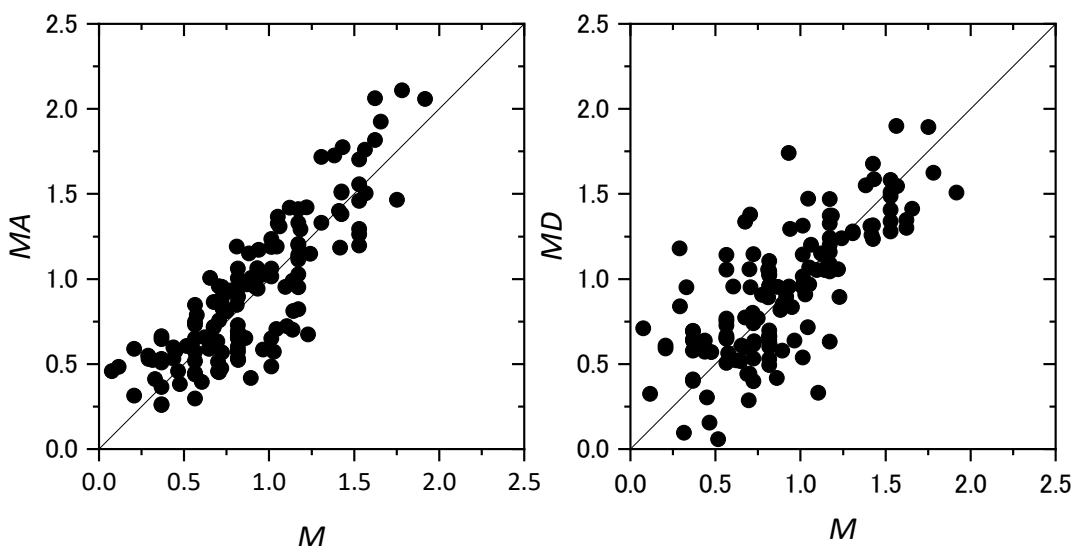


図 1-1-4 VSACalc により求められた振幅マグニチュード ( $M_A$ )、継続時間マグニチュード ( $M_D$ ) と火山性地震リストに記載されたマグニチュード ( $M$ ) の比較

異なる評価手法によるマグニチュードについて 2019 年 10 月の地震エネルギーを積算して図 1-1-5 に示す。火山性地震リストから得られる積算エネルギーは 570MJ であるのに対し、振幅マグニチュードによる積算値は 830MJ となり大きい。これは図 1-1-4 に示すように大きいマグニチュードに

【令和 2 年度実施報告書】【210531】



対しては振幅マグニチュードが大きくなっていることと、より多くの火山性地震を検知していることによる。継続時間マグニチュードを基にした積算値は 650MJ で、火山性地震リストから得られる積算エネルギーに近い。この場合、ばらつきは大きいものの同じ手法を用いているので、1 か月の積算値としては同じような値となるためであろう。

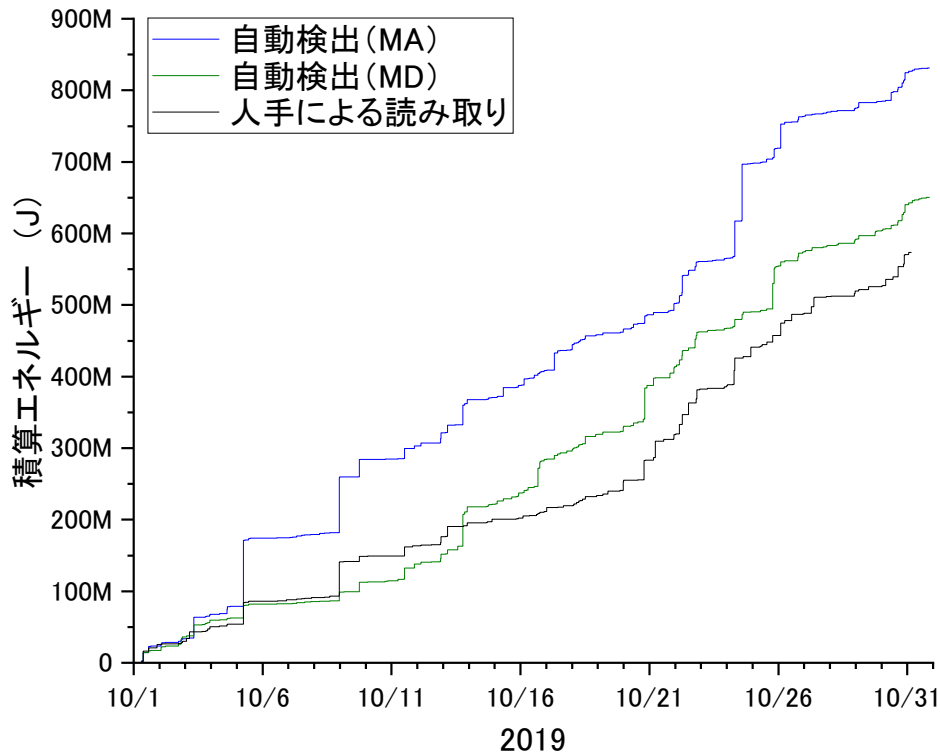


図 1-1-5 異なるマグニチュード評価手法による地震エネルギーの積算値の比較

最後に、過去の地震観測データに基づいて地震エネルギー放出率を評価してみる。グントール火山では 1989 年に図 1-1-1 に示す CTS に地震計が設置され、現在まで定常的に観測が続けられている。1990 年から 2020 年までの 30 年間の月別の地震回数を図 1-1-6 に示す。最も発生回数が多かったのは 2013 年 9 月で 349 回の地震が記録されている。解析対象とした 2019 年 10 月も活動的であり、209 回の地震がカウントされた。これを地震エネルギーで見ると最も活動的なのは 1999 年 5 月で、2.8GJ に達した。5 月 6 日にマグニチュードが 3 に近い有感地震が 2 回発生し、1 日に 60 回の地震が記録された。

1990 年から 2020 年のエネルギーの積算値を図 1-1-7 に示す。1999 年と 2013 年に地震エネルギーの増加が認められるが、それ以外はおおむね 1GJ/年の割合で地震エネルギーが放出されている。グントール火山における最後の噴火は 1847 年で、それ以降噴火はないとされている。約 170 年間の噴火活動休止期における地震活動が最近 30 年間の活動と同様であるとすれば、170 年間のエネルギーの積算値は 170GJ 程度となる。Iguchi et al. (2019) の経験式に基づけば噴出物量の上限は  $10^8\text{m}^3$  オーダーが予想されるので、今後発生しうる噴火は最大でも VEI4 と評価される。2014 年から 2019 年に実施された SATREPS での調査では、グントール火山において発生した噴火は VEI3 であり、VEI4 は上限値であることから、起こりうる噴火は VEI3 程度とするのが現実的であろう。

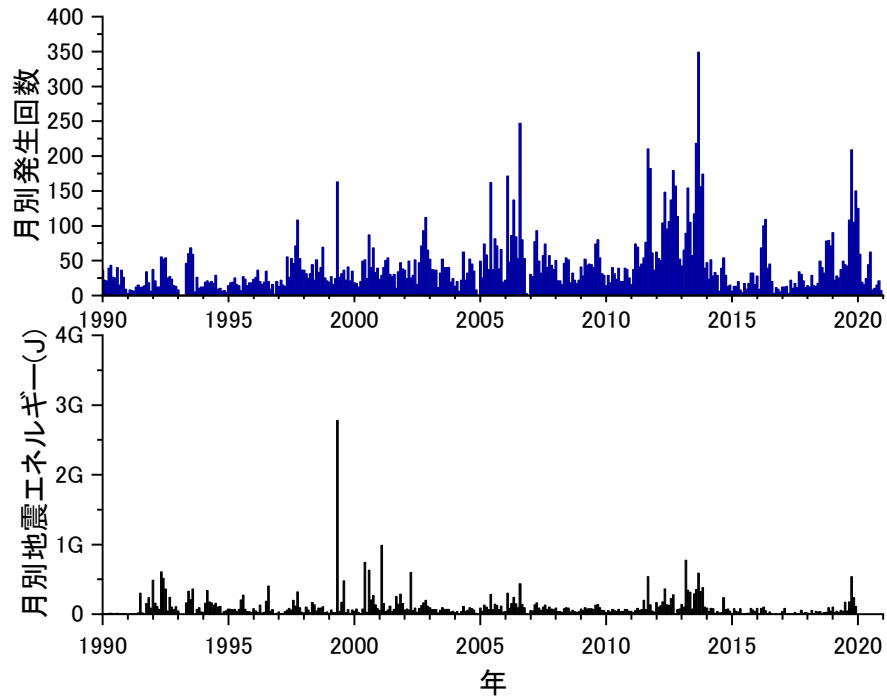


図 1-1-6 1990 年から 2020 年の月別地震回数及び月別地震エネルギー

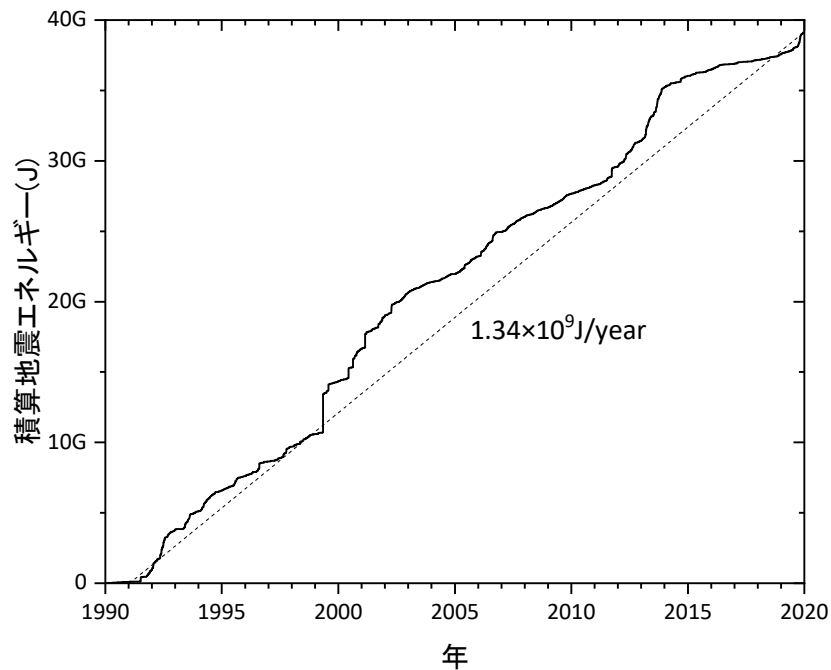


図 1-1-7 1990 年から 2020 年の地震エネルギーの積算値

#### 研究活動 1-2 地盤変動による噴出物量予測経験式の構築

地盤変動から求められる圧力源の体積変化に火山性微動の振幅を考慮することにより、火山灰放出量が経験的に求められることが知られている (Iguchi, 2016)。コロナ禍の影響で渡航できないため、活発なブルカノ式噴火を繰り返す桜島を対象にして、以下の経験式の高精度化を図った。

$$W = \alpha A + \beta V + \gamma \quad (4)$$

ここで、 $W$ は月別の火山灰放出量で、 $A$ は2-3Hz帯域のスペクトルの振幅、 $V$ は噴火に伴う収縮地盤変動から求めた微小球状圧力源の体積変化である。第1項は火山性微動を伴う連続噴火に、第2項は瞬発的なブルカノ式噴火に対応し、係数 $\gamma$ により、地震動のバックグラウンドノイズを補正する。月別の火山灰放出量は桜島から50 km以内にある62点の降灰観測点における降灰重量から求められ、式(4)の第1項から第3項までの線形結合が火山灰放出量と整合するように係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を決定する。

Iguchi (2016)において扱っているのは、2009年から2013年までの昭和火口噴火活動期なので、解析範囲を2014年以降の昭和火口噴火活動期と2017年11月以降の南岳活動期(2020年12月までを対象)に拡張しその妥当性を検証した。地盤変動と地震観測から見積もられる月別の火山灰放出量と降下火山灰量から求めた月別の火山灰放出量の関係を図1-2-1に示す。両者は $\pm 25\%$ の範囲内でおおむね一致している。爆発的なブルカノ式噴火においては式(4)の第2項が卓越するので、火山灰重量は地盤変動により評価でき、地球物理学的観測量では、地盤変動量が火山灰放出量を表すのに最も適している。

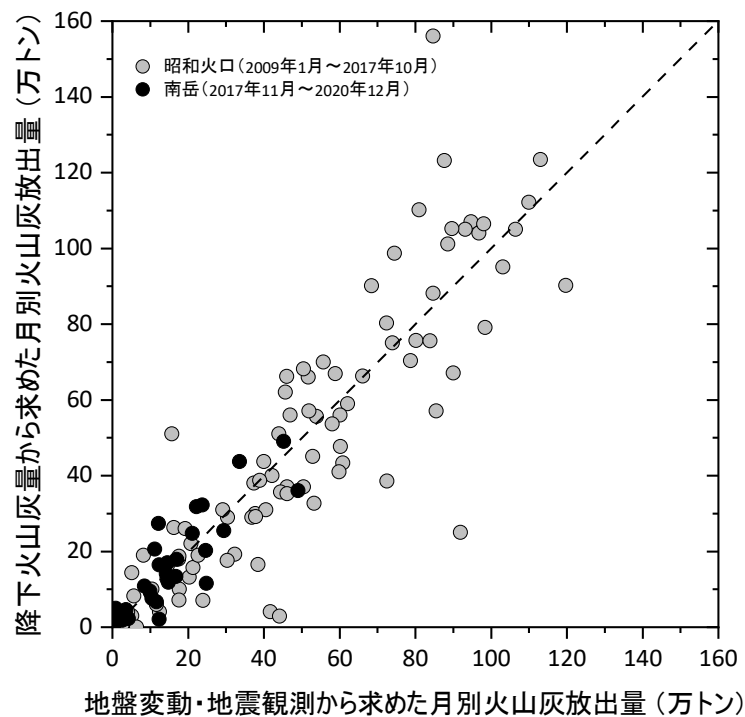


図1-2-1 地盤変動と地震観測から見積もられる月別の火山灰放出量(式(4))と降下火山灰量から求めた月別の火山灰放出量の比較

本節では噴火に先行する地盤の膨張から噴出物量を予測するものであるため、先行地盤膨張と噴火に伴う収縮地盤変動量の関係を検討する必要がある。図1-2-2に有村観測坑道において観測されたひずみ計の直交方向の成分について噴火に先行する膨張ひずみ量と噴火に伴う収縮ひずみ量の関係を示す。収縮量と膨張量が計測できた爆発は4998個であり、爆発発生数の90%に当たる。収縮量と膨張量の比は様々な値をとるが、全体的な傾向としては膨張量と収縮量には相関関係があることがわかる。

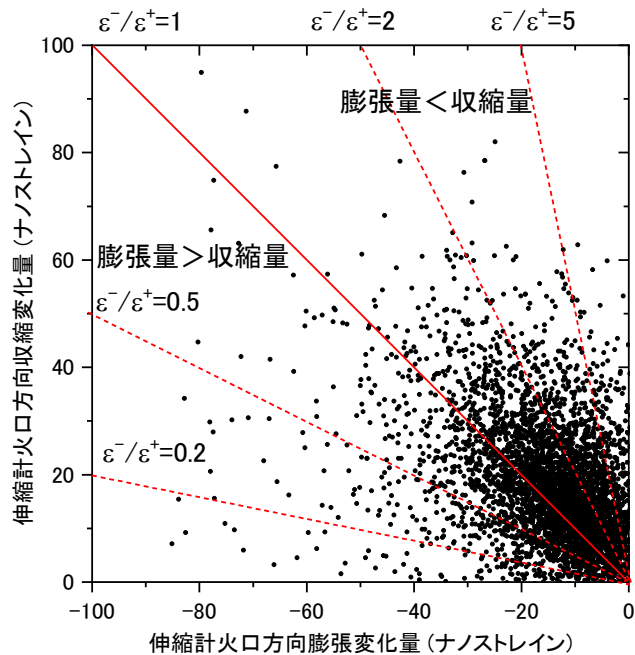


図 1-2-2 噴火に先行する膨張ひずみ量と噴火に伴う収縮ひずみ量の関係。有村観測坑道におけるひずみ計の直交方向の成分について示した。

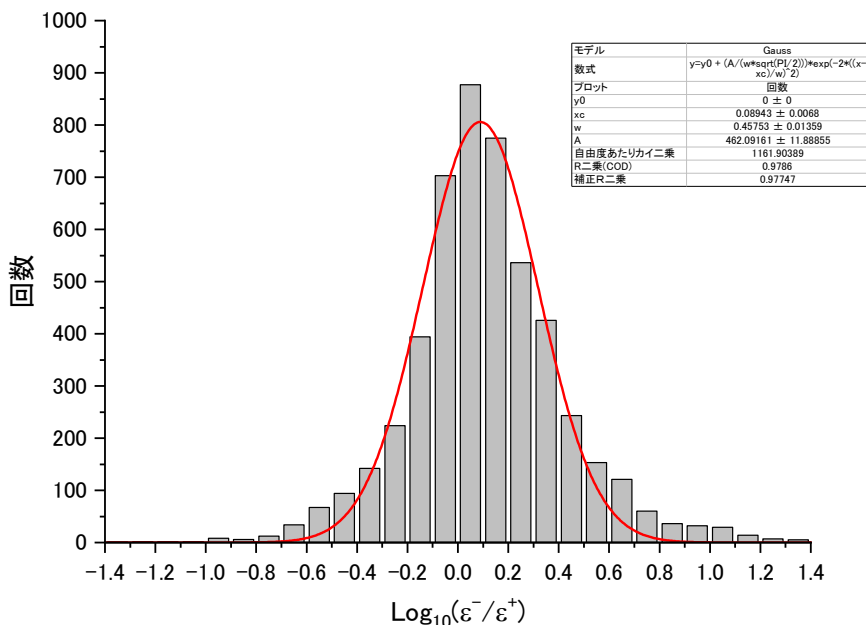


図 1-2-3 対数収縮量／膨張量比の頻度分布

そこで、収縮量と膨張量の比の頻度分布を図 1-2-3 に示す。横軸は収縮量／膨張量比の対数であり、0 が収縮量／膨張量比=1 (収縮量=膨張量)、-1 は収縮量／膨張量比=0.1 (収縮量=0.1×膨張量)、1 は収縮量／膨張量比=10 (収縮量=10×膨張量)であることを示す。対数収縮量／膨張量比は正規分布を示し、最頻値は 0 あたりにあることから、収縮量が膨張量と同じになる場合が最も多い。全体の 70%を占める対数収縮量／膨張量比が-0.2~0.2 となる噴火は、膨張量から予測される収縮量が

63%～158%の間にある。噴出物量が倍半分の誤差で予測できる噴火は70%に上ると考えられる。対数収縮量／膨張量比は正規分布となることは、膨張地盤変動量から噴出物量を確率的に予測できることを意味し、対数収縮量／膨張量比の確率関数は以下の式で記述できる。

$$\phi(\varepsilon) = \frac{A_0}{\sqrt{\pi/2}\sigma} \exp\left(-2\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon$ は対数収縮量／膨張量比で、 $\sigma$ は0.46～0.65程度の値をとる。このことは、研究活動2に渡す噴出物量の予測に確率を付与できることを意味する。70%について膨張量から予測される収縮量が63%～158%となることは、ハザードの予測としては噴火規模＝(0.63～1.58)×膨張量としてよいことを示す。

一方、図1-2-3によれば、1%程度は膨張量から予測される収縮量よりも1桁以上大きい収縮量となる。このことは予測される噴出物量よりも1桁大きい噴出物量となりハザードマップが実際と大きく異なることを意味する。これについて考察する。図1-2-4は火山岩塊が3.3 kmまで飛散し、本来であれば噴火警戒レベルが5に引き上げられるべき2020年6月4日2:59の噴火に前駆する地盤変動である。膨張ひずみ量を直近の噴火後からしばらく経過して発生する膨張の開始時点からの計測とすると、6月2日10:07から6月3日20:51までの5回の噴火で、膨張量に比べて、収縮量が小さくなっているが、2020年6月4日2:59の噴火だけは直近の噴火後の膨張量が11ナノストレイン（ハルタ山火口直交方向のひずみ変化）であるのに対し、収縮量は101ナノストレインで、10倍大きい。収縮したひずみのレベルを考慮すると、2020年6月4日2:59の噴火に前駆する膨張は6月2日10:07の噴火に前駆する6:52から始まったことがわかるが、地盤変動は長期間の現象であることから、常に地盤変動の全容を把握できるわけではないので、注意を要する。

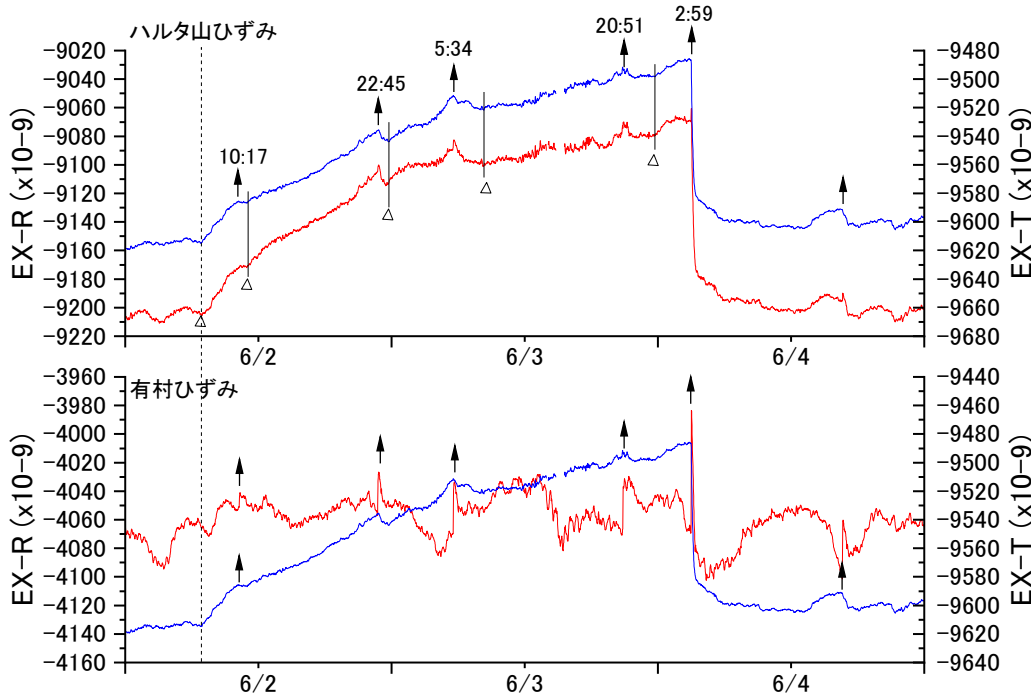


図1-2-4 2020年6月4日2:59の噴火に前駆する地盤変動。赤：火口方向のひずみ。青：著効方向のひずみ。

グントール火山においては火山性地震の活動は活発であるが、地盤変動は顕著ではない。図 1-2-5 に GNSS 観測によるグントール火山の地盤変動を示す。6 年間の観測でも変位量は 1 cm 未満である。グントール火山の圧力源は火口よりも北方に推定されていることから、圧力源をグントール火山の山頂（図 1-1-1 の観測点 MSG）の深さ 5 km に固定して、GNSS 観測点の変位量から圧力源の体積変化を推定し、研究活動 2 に引き渡す予定である。

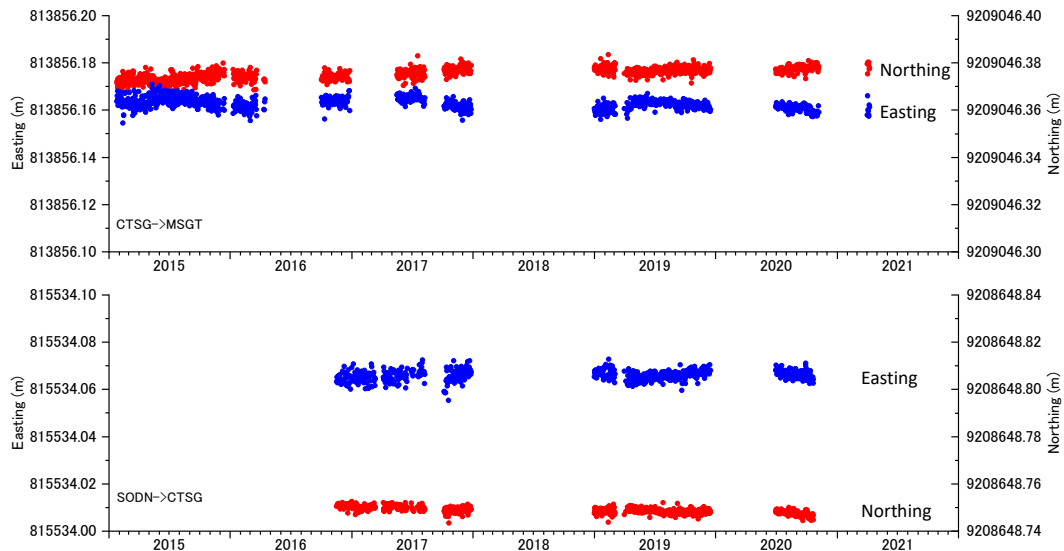


図 1-2-5 グントール火山における地盤変動。GNSS 観測による東向き、北向きの変位を示す。

### 研究活動 1-3 火山噴火観測による経験式の実証

当初の計画では、小規模噴火を頻繁に繰り返しているスメル火山やメラピ火山において火山地質災害軽減センターと協力して観測を行い、研究活動 1-1 および 1-2 により推定された噴出物量の妥当性を火山周辺の降灰量観測等から推定される噴出物量と比較することにより、検証する予定であったが、渡航できないために桜島において検証観測を行った。

桜島火山周辺においては 62 点の降灰観測点があり、1 か月ごとの降灰量データとはいえ、1978 年からのデータの蓄積がある。一方、インドネシアにおいてはキャンペーン観測で降灰量観測を行うことは可能であるが、山体が大きいことや火山体の半分以上が森林におおわれてアクセスできない場所も多いので、中小規模の噴火については現実的ではない。ここでは、噴出物量の把握のために、降灰量からの噴出物量を見積もる方法に代わる手法として、空気振動観測による噴出物量の推定手法を検討した。火山噴火は大気中への噴煙の注入現象であるので、注入の結果はかならず空気振動に現れるはずである。そのような考え方から空気振動観測に着目した。空気振動に必要なのは低周波マイクロホンだけなので、比較的簡便に観測を行うことができ、比較的均質と考えられる大気中における圧力波の伝搬だけを考えればよいので、他の火山への適用も容易と考えられる。研究活動 1-2 において述べたように、桜島火山における観測研究では、火山灰放出に伴う山体収縮と地震動を観測坑道において高精度に捉えることで、観測量に基づく火山灰放出量推定の経験式化がなされている（式 (4)）。特に地盤変動量は火山灰放出量と明瞭な対応関係にある。そこで、他の火山でも比較的容易に展開可能な空気振動観測を行い、地盤変動量を基準として火山灰量推定を試みた。本研究では火山灰放出に伴う空気振動記録全体を用いた振動エネルギー ( $E_v$ ) に着目する。桜島火山の

南岳火口で2017年11月以降に発生した444イベントを対象に、 $E_1$ と地盤変動量、放出火山灰量の関係を検証した。

対象期間における火山活動研究センターの爆発地震リストと連続波形記録から噴火に伴う信号を抽出し、それらを連続的な火山灰放出イベントと、瞬間的なガス放出の後に火山灰が噴出する爆発イベント（ブルカノ式噴火）に分類した。図1-3-1に両イベントの代表的な観測波形記録の例を示す。爆発イベントでは、噴火冒頭のガス放出に伴い大振幅の空気振動が観測される。火山灰放出に伴う空気振動シグナルを抽出するという目的から、爆発イベントの場合は空気振動記録上の初動到達時から5秒以降の時間窓で $E_1$ を計算する。こうして推定した各イベントの $E_1$ と地盤変動量の関係を図1-3-2に示す。両者の相関係数は0.73と求まり、 $E_1$ が観測坑道で得られる地盤変動量に概ね対応する観測量であると評価できる。次に、月毎の各イベントの $E_1$ の総和と、桜島火山の月別降下火山灰量の関係を調べた。両者の相関係数は0.75であり、線形回帰によって推定される変換係数(ton/J)は $2.3 \times 10^{-5}$ である。この係数を用いて $E_1$ から換算した放出火山灰量の推定結果を図1-3-3に示す。概ね良好な推定結果が得られているが、推定結果と実測値の間に大きな乖離が見られる時期もある。2018年1月は推定結果と実測値の乖離が特に大きい。該当時期は2017年10月末に噴火活動が昭和火口から南岳火口に移行して間もない時期であり、他の時期と比べて噴火活動自体の性質が異なる可能性が高い。 $E_1$ と放出火山灰量の関係は火山活動によって変化しうることから、解析対象を拡充することで推定結果の妥当性についてより検討を進める必要がある。

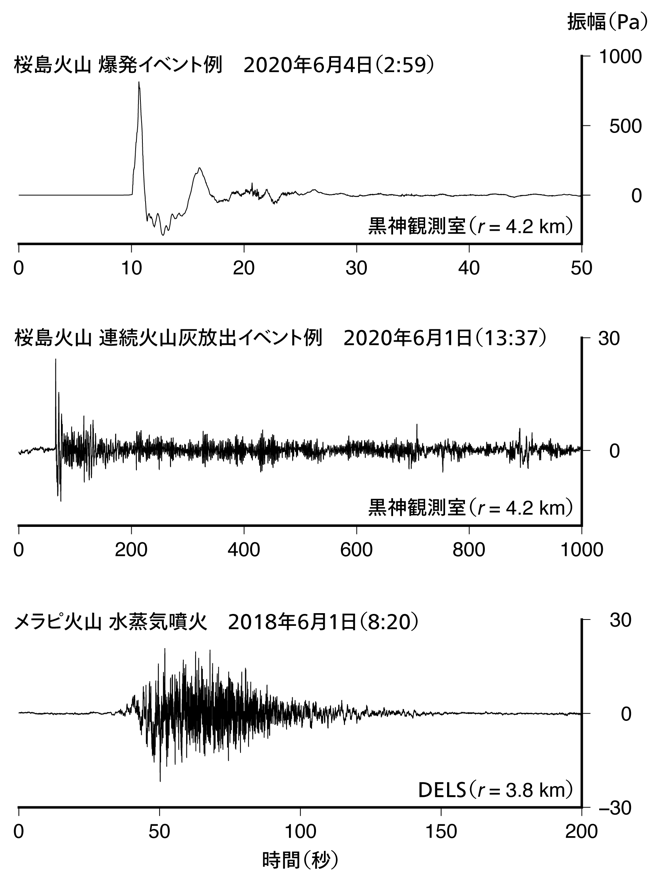


図1-3-1 桜島火山とメラピ火山における空気振動観測波形

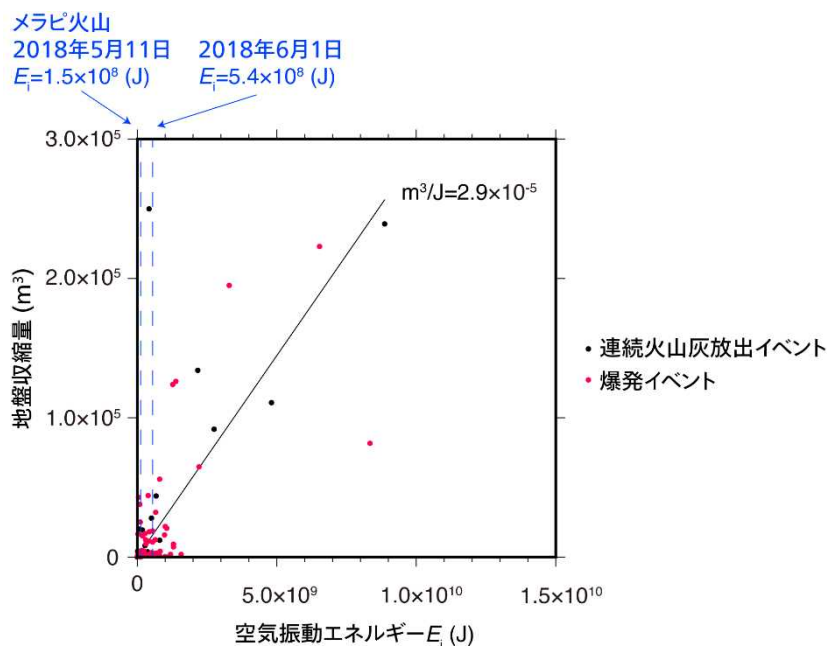


図 1-3-2 空気振動エネルギー $E_1$ と地盤収縮量の関係

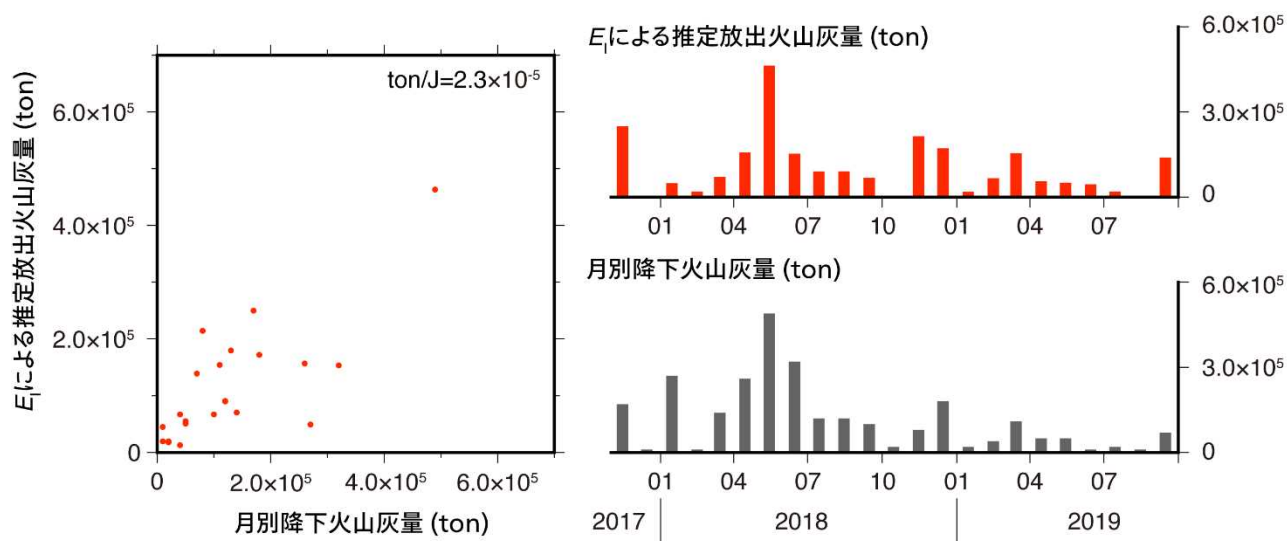


図 1-3-3  $E_1$ による月別放出火山灰量の推定結果

インドネシアのメラピ火山では、2018年8月以降の溶岩ドームを形成する噴火活動に先行し、同年5月から6月にかけて12回の水蒸気噴火が発生した。桜島火山における上記の実証結果に基づく $E_1$ を用いて、メラピ火山の水蒸気噴火の放出火山灰量評価を試みる。図1-3-2には、2018年5月11日と6月1日のイベントにおける $E_1$ を示す。 $E_1$ と変換係数から推定される放出火山灰量はそれぞれ $3.4 \times 10^3$  ton、 $1.2 \times 10^4$  tonに相当し、上記で対象とした桜島火山のイベントの中ではやや小規模の部類に相当する。一方で、メラピ火山のこの水蒸気噴火の最大噴煙高度はそれぞれ火口上2500 mと4000 mに達しており、 $E_1$ が同程度の桜島火山のイベントに比べるとやや高いと言える。噴煙高度については水蒸気噴火の方がブルカノ式噴火に比べると高くなる傾向にあり、 $E_1$ による火山灰量推定



にも噴火様式による違いを反映させる余地があるかもしれない。

#### ② 研究題目 1 の当初計画では想定されていなかった新たな展開

メラピ火山では、2018 年 5 月から約 1 か月水蒸気噴火が 12 回発生したのち、2010 年噴火で形成された火口内に溶岩ドームを形成した。その後、2019 年には、桜島と同様のブルカノ式噴火が何回か繰り返されたので、同様の手法で観測することを考えていた。ところが、2020 年 10 月ごろから山体の変形を伴いながら極めて活発な地震活動が続き、2021 年 1 月 7 日には山頂に新たな溶岩ドームが出現した。その後、溶岩ドームはゆっくりと成長し、小規模な火砕流を頻発させている。この活動は、2006 年以前の溶岩ドームの成長とその後の崩落型火砕流に類似しているが、噴出率が小さい代わりに地震活動が高いとされている。研究題目 1-1 の経験式を再検討する必要もあるが、コロナ禍で渡航できていないので研究が進められていない。

#### ③ 研究題目 1 の研究のねらい（参考）

インドネシアにおいては過去に発生した噴火（プロジェクト実施期間中にお発生する噴火を含む）に前駆する地震活動と地盤変動を火山地質災害軽減センターと協力して解析し、地震エネルギーや圧力源の体積変化などのパラメータと噴出物量の関係を明らかにし、さらに、噴出物量の内、火山灰等のテフラ、火砕流、溶岩流への分配測を経験的に確立する。研究題目 1 によって得られるモニタリングデータから噴出物量の算出手法を用いて見積もられるポテンシャル噴出物量を研究題目 2 へ引き渡す。

#### ④ 研究題目 1 の研究実施方法（参考）

研究活動 1-1 においては、すでに経験式のある前駆地震活動の地震エネルギーと噴出物量の関係式を高精度化する。この経験式は、メラピ火山において 2010 年までに発生した噴火において適用可能なことがわかっているが、2018 年以降の噴火活動では様式が変化してきており、それについて検討する。グントールは火山性地震の活動度が高い火山であり、これまでの火山性地震のデータベースの蓄積がある。この経験式をグントール火山に適用し、噴出物量のポテンシャルを評価する。

研究活動 1-2 では、地盤変動と噴出物量の関係式の構築を図る。グントール火山においては、GNSS 観測点を増設して、深部圧力源における体積変化の、また、スメル火山では山頂に傾斜計を設置して浅部圧力源の体積変化の検出能力の向上を図る予定であったが、コロナ禍の影響で相手国に渡航できないため、活発なブルカノ式噴火を繰り返す桜島を対象にして、関係式の高精度化を図る。また、この関係式を用いて観測データから噴出物量を推定するプリプロセッサを開発して、出力結果を研究題目 2 に引き渡す。また、噴出物量のテフラ、火砕流、溶岩流への多くの火山について検討する。

研究活動 1-3 においては、小規模噴火を頻繁に繰り返しているスメル火山やメラピ火山において火山地質災害軽減センターと協力して観測を行い、推定された噴出物量の妥当性を検証する予定であったが、コロナ禍の影響で相手国に渡航できないため、活発なブルカノ式噴火を繰り返す桜島を対象にして、検証観測を繰り返すこととした。

(3) 研究題目 2 : 「噴火ハザード予測システム SSDM の改良と SSDM-Local との統合化」

研究グループ B (リーダー : 日本工営・宮本邦明)

① 研究題目 2 の当初の計画 (全体計画) に対する当該年度の成果の達成状況とインパクト

研究活動 2-1 SSDM の改良

現行の SSDM は、図 2-1-1 に示すように、ハザードマップデータベースの作成に必要な情報をあらかじめコマンドラインベースで指定するようになっている。また、シミュレーション条件の作成、ハザードマップデータベース作成のための条件設定などはエクセルを使って行うようになっており、シミュレーションに用いるシミュレーションサーバーの指定も必要など、データベース作成に特定の知識やスキルを必要とする。

そこで、SSDM-Local の新規開発に伴い、ハザードマップデータベースの作成と検索を容易なものにするため、システムの基本的な構造は変えずに、(1) データベース構造を一部改良するとともに、(2) ハザードマップデータベースの領域の抽出、(3) 個々の現象(イベント)を反映するシミュレーション条件の設定、(4) 諸現象の時系列的組み合わせの設定、(5) ハザードマップデータベースの作成、の個々のプロセスを構造化し WEB 上で抽出・設定できるように SSDM システムの改良を行なった。具体的には、ユーザーインターフェースの改良、データベース構造の改良に伴うシミュレーションプログラムの改良など広範な範囲に及んだ。

この改良により、ユーザーは発生が想定される可能な現象(イベント)群の設定とその時系列的な組み合わせ(イベントチェーン)を直感的に指定することにより、膨大な数のシミュレーションとそれらシミュレーション結果を格納するデータベース(ハザードマップデータベース)を、シミュレーションサーバーやジョブの管理など作成のためのシステムを意識することなく自動的に実行・作成することができるようになった。

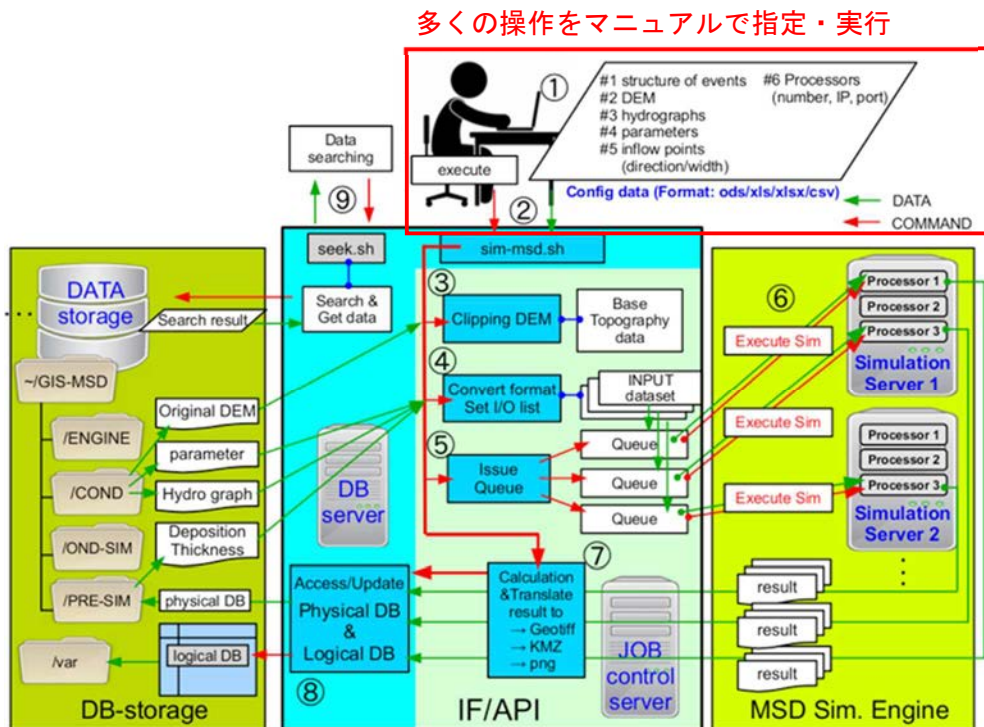


図 2-1-1 現行の SSDM システム

ハザードマップデータベースは具体的には以下の手順で作成される。まず、データベースに格納すべき一連の発生可能と想定される全ての災害現象を包括する領域、すなわちハザードマップデータベースを包括する領域(project 領域)を、(1) SSDM/DDEMs にある DEM データベースの対象火山ディレクトリにある最適な DEM を選択し、(2) その DEM から適切な範囲を抽出することにより設定する。抽出された領域は、project.dem なるファイル名で、SSDM/Projects 下にディレクトリ「対象 project」を作って、その下に格納される。ユーザーは、図 2-1-2 に示すように、表示される DEM データベースにある DEM 群から最適な DEM を選択し、その DEM から project 領域の切り出しを WEB ベースの GUI で直感的に行うことができる。次いで、イベントチェーンシミュレーションを行う計算領域を DEM から抽出した project 領域から抽出する。この操作も同じく GUI 上で直感的に行うことができる。抽出された領域は、イベントチェーンシミュレーションの計算領域を示すディレクトリ subproject 下にファイル dem.dat として格納する。



図 2-1-2 ハザードマップデータベースとシミュレーションの領域の抽出

イベントチェーンの領域が設定されると、その領域で生じる可能性があるとして想定されるイベントの規模や現象の物理パラメータなどを設定し、加えて、計算開始点の情報(開始点の位置、流入方向、勾配など)を設定して、それらを組み合わせて数多くのケースとして取りまとめ、ケースデータベース(SSDM/Projects/対象 project/subproject/case)に格納する。ユーザーは、図 2-1-3 に示すように、規模、パラメータなどの情報は、現象ごとに格納しているパラメータデータベースからパラメトリックに想定する値をそれぞれ抽出・選択し、流入点については GUI 上で設定する。いずれも WEB ベースで直感的に操作することができる。



図 2-1-3 発生が想定されるイベントに対応したケースデータベースの作成

作成したケースファイルデータベースに格納された諸ケース(現象)の時系列的な組み合わせ順序(順列)を、チェーンの深さの数を指定して定めて行い、ハザードマップデータベース(イベントチェーンデータベース)を作成する。次いでシミュレーションを実行、ハザードマップデータベースに計算結果を格納する。ユーザーは、図 2-1-4 に示すように、GUI でイベントチェーンの数を指定し、イベントチェーンシミュレーションの実行を指示する。

シミュレーションの実行数は膨大な数に上るので、計算資源の有効活用のため、ハザードマップデータベースを用いて自動的に分配するジョブコントロールプログラムを新たに開発した。



図 2-1-4 イベントチェーン深さの指定とハザードマップデータベースの作成

以上の手順、図 2-1-2、図 2-1-3、図 2-1-4 の手順(1)～(6)を構造化することにより、一連の手続きとしても、メニューから個別に実行することもできる。個別に実行する場合も含め、メニューから手順の進行状態を確認することができるように改良された。これにより、SSDM システムに関する十分な知識がないユーザーでも、現象に関する多少の知識や経験があれば僅かのトレーニングで直感的にハザードマップデータベースを作成することができるようになった。

また、ハザードマップデータベースの検索については現行のマニュアル検索に加え、SSDM-Local から送られてくる、観測に基づいて予測された噴火規模(研究課題 1 の成果)に基づいて最適なハザードマップをデータベースから自動検索する機能を追加した。

## 研究活動 2-2 SSDM-Local の開発と現地実装

SSDM-Local は、観測所に設置されることを想定したリアルタイムハザードマップ検索システムとして新たに開発した。SSDM-Local は、研究課題 1 の成果を用いて観測所において観測結果から予測される噴火規模に基づいて、SSDM で作成されたハザードマップデータベースから最適なハザードマップを自動検索・表示する。検索に当たって、複数のインデックスが用意され、算出されている。また、それらの算出された検索インデックスはインターネットを経由して SSDM に送信される。

SSDM-Local のブロックダイアグラムを図 2-2-1 に示す。図に示されるように、検索インデックスの計算とハザードマップの検索がこのシステムの心臓部である。検索インデックスの計算とハザードマップに検索は一定間隔で定期的に行われ、検索の結果得られたハザードマップはユーザーインターフェースを介して自動的にディスプレイに表示される。この 2 つのプロセスは観測データベースとハザードマップデータベースを参照する。観測システムから得られる観測結果は観測事象のイベントの発生時、あるいは定期的に観測システムにより観測データバッファに書き込まれる。

SSDM-Local は、バッファに書き込まれたデータを観測データベースに追加する。こうして、刻々と変化する状況に応じて、最適なハザードマップがリアルタイムハザードマップとしてディスプレイに表示される。

そのほか、SSDM-Local は、観測データベースの観測結果や検索インデックスの時系列的変化などの情報を見ることができる。これらの諸情報は WEB ベースのメニューから直感的にアクセスすることができる。

なお、SSDM で作成したハザードマップデータベースの SSDM-Local への移植はデータ量が膨大であり、かつインドネシア国内のネットワークの容量が大きくないことからハードディスクを用いてオフラインで行うことを前提としている。ハザードマップデータベースは SSDM、SSDM-Local それぞれに設定するため、両システム用のデータ(ハザードマップ)移植のためのユーティリティソフトをそれぞれ開発した。

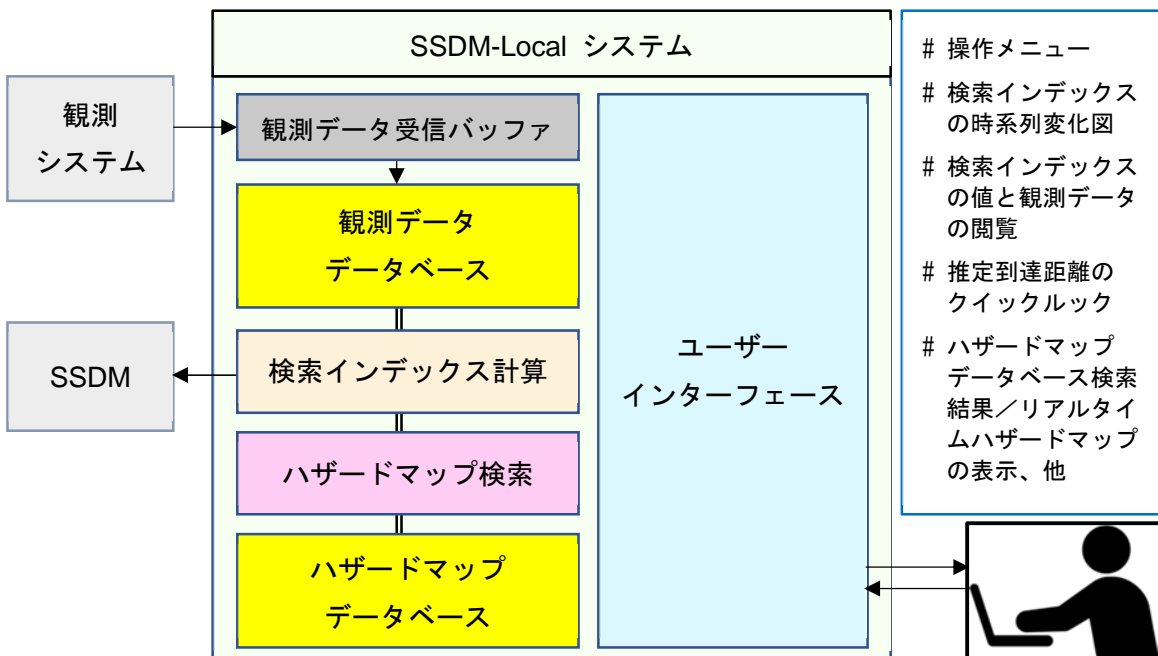


図 2-2-1 SSDM-Local システムのブロックダイアグラム

開発した SSDM-Local の現地実装は日本、インドネシア両国のコロナ禍の影響で実施することができなかった。そこで国内でハードウェアを購入、実装した。SSDM-Local 用のハードウェアとしては、観測所(POS)での使用が前提であることから、観測所内のインターネット資源の節約と、メンテナンスの容易さの両点から単一の PC として組み上げた。記憶装置には膨大な量のデータベースを、信頼性を持って扱うことが要求されることから、データのミラーリングができる RAID 1 を採用した。

### 研究活動 2-3 両システム間の通信 IF の開発と統合化、現地実装

両システム間のデータ交換は、インドネシア国内のインターネット(WAN)通信容量が小さいためインターネットを介しての通信量は最小のものとし、ボリュームの大きいものはハードディスクなどの記憶媒体を用いてオフラインで持ち運ぶことにより行う。SSDM から SSDM-Local へは、SSDM で作

成されたハザードマップデータベースが輸送されるが、研究活動 2-2 にあるように、データ量が膨大なため、ハードディスクを用いてオフラインで行う。幸い、データベースの輸送頻度は極めて小さいため、オフラインでの輸送は実用上問題とならない。一方、SSDM-Local から SSDM へは、観測データに基づく噴火規模予測情報が転送される。噴火規模予測情報はハザード予測上リアルタイム性が要求されるため、インターネット経由での転送が望ましい。一方で、大量のデータ輸送はリアルタイム性を損なうことになるため、1 回の通信で送ることができるように、ハザードマップデータベース検索インデックスを HTTP プロトコルのクエリとして URL に付属させて送信する。

SSDM-Local の現地実装同様、SSDM、通信システムともコロナ禍の影響で現地実装ができなかったため、国内でハードウェアを購入しシステムを実装した。SSDM 用のハードウェアは、ハザードマップデータベース作成に膨大な数のシミュレーションが必要で高性能のハードウェアが必要となる。システムやデータベースの操作はユーザーインターフェースを介して行われるため、操作とインターフェースは、システムへのゲートウェイとしての性格を持ち同じハードウェアであることが望ましい。シミュレーションを実行するハードウェアとゲートウェイのハードウェアは同一でも良いが、シミュレーション用のハードウェアは独立していることが演算上望ましい。また、データを格納するストレージも、この 2 つのハードウェアと独立していることがデータ維持管理上の信頼性やアクセスの良さの点から望ましい。こうして、SSDM のためのハードウェアは機能のブロック化に従って、図 2-3-1 に示すように、ワークステーション 2 台、ネットワークストレージ(NAS) 1 台から構成する。先に述べたように、2 台のワークステーションのうち 1 台(SIM)は、ハザードマップデータベース作成のための膨大な数のシミュレーション実行(計算ジョブのコントロールと計算の実施)に充てる。もう一台(DB)は、データベースの管理・検索、ネットワークゲートウェイ、ハザードマップデータベース作成など SSDM システムの操作に関わるユーザーインターフェース、SSDM-Local からの検索インデックスの受信など、SSDM システム全体のコントロールに充てる。ネットワークストレージ(NAS)は、ハザードマップデータベースや観測データなどのデータベースの本体、SSDM システムのシミュレーションやデータベース管理・検索、ユーザーインターフェースなどの各種プログラムファイルなどを格納する。ストレージには SSDM-Local と同様、信頼性が求められるほか、SSDM-Local より遥かに大量のデータを高速でアクセスする必要があることから、RAID 10 を採用している。SIM、DB、NAS はネットワークの同一セグメント内に配置し、ユーザーはもっぱら DB にアクセス(ログイン)し、ユーザーインターフェースを使ってシステムを操作する。例えば、ハザードマップデータベースを作成するには、ユーザーは DB にログインし、WEB ベースの GUI ハザードマップデータベース作成インターフェースを用いて作成に必要な諸条件を設定し、作成実行ボタンをクリックする。すると、DB は SIM にデータベース作成の制御を渡し、SIM ではシミュレーション計算の順序を定め一連の計算の実行状況をモニターし実行可能性を判断しシミュレーターに計算処理を渡すジョブコントロールプログラムを起動して、膨大な数の一連のシミュレーションを実行、ハザードマップデータベースを完成させる。何らかの都合で SIM に直接アクセスする必要がある場合には DB にログインし、DB から SIM にアクセスする。

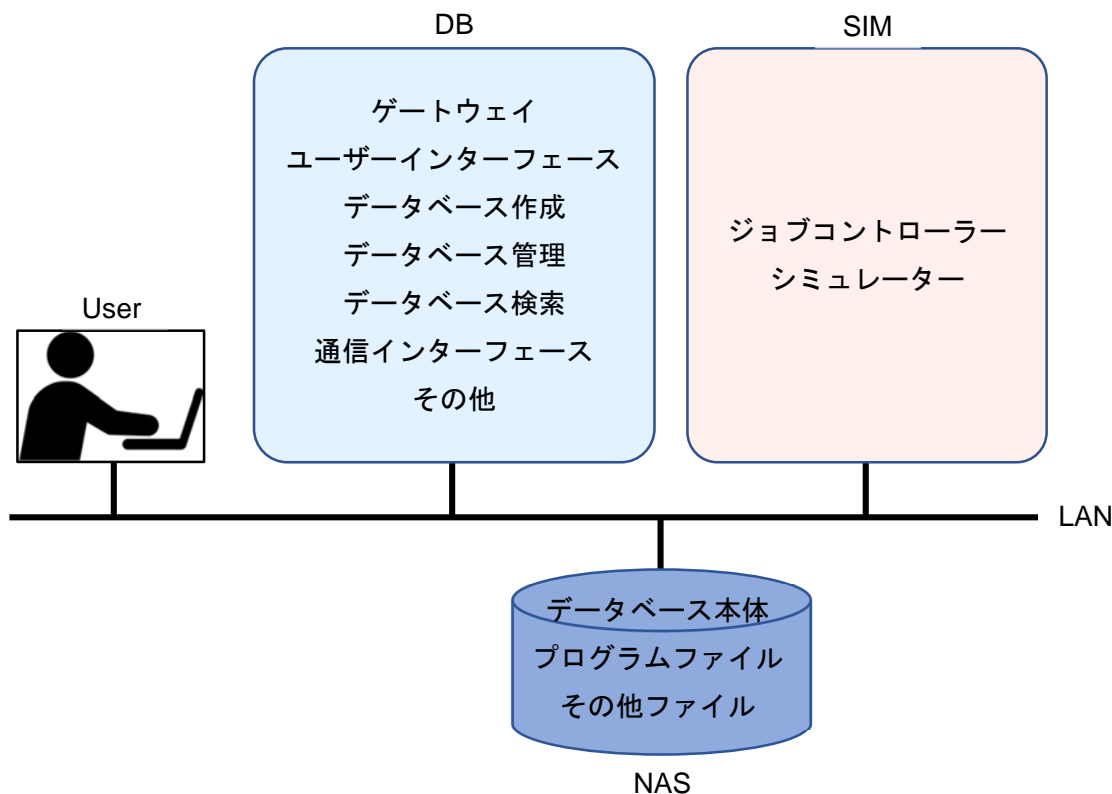


図 2-3-1 SSDM システム

開発したソフト以外のシステム構築に用いたソフトウェアは現行の SSDM 同様、全てオープンソースソフトを用いた。OS は SSDM の両ワークステーション、SSDM-Local の PC とも共通で、ubuntu 20. 0. 4 を用いている。これは現行の SSDM の OS、ubuntu server 14. 04. 03 のバージョンアップ版である。

SSDM、SSDM-Local とともにハードウェアへの実装とテストは京大防災研桜島火山観測所において行った。それぞれの機器にシステムをインストールし、ルーターを用いて SSDM 用のネットワークセグメントを桜島火山観測所のネットワーク内にセットアップし、その下に SSDM、SSDM-Local をセットアップした。インドネシアの現地では SSDM-Local は SSDM と離れた所 (POS) に設置されるため、同一のネットワークセグメントの下には置かれていないが、テスト上は問題ないため桜島火山観測所の SSDM のセグメントの下に SSDM とともにセットアップした。テストは SSDM、SSDM-LOCAL の各機能操作と両システム間のデータ転送など、現地でなければできない事項を除き行い、正常に機能することを確認した。

なお、現行の SSDM システムが持っている現地の他のシステムとの連携や、インターネットワーキングなど、現地でなければ確認できないことはテストできていない。このうち、SSDM に関するインターネットワーキングについては、システムを構成するハードウェアの数が高性能化によって少なくなったことから現地移植・調整には大きな困難を伴わないものと思われる。一方で、SSDM-Local については、POS でのインターネット環境に関する情報が得られていないため、SSDM とのネットワークワーキングも含めて 1 からの調整が必要となる。

現地で実施する予定であったシステムの運用に関する実証試験・検証も、システム構築と同様に、

桜島火山観測所において実施した。2021年3月に桜島の実際の観測データを入力して試験を行った。ハザードマップデータベースを火砕流について規模、発生流下箇所・方向を組み合わせで作成した。この期間に桜島において小規模なブルカノ式噴火が発生した。グントール火山において発生するような地震はなく、火山性地震と判定されたものはほとんど爆発地震であった。地盤変動観測からは妥当な予測噴出物量が出力されるが、噴出物量は少なかったので作成したデータベースが持つハザードマップの最小想定噴出物量以下であった。試験期間以外であるが、2015年8月15日のマグマ貫入イベントでは火砕流となる体積は70万m<sup>3</sup>と出力され、SSDM-Localは距離3kmに達する火砕流ハザードマップを選択した。気象庁はこの時、噴石、火砕流に警戒を要する範囲を火口から3kmとする噴火警戒レベル4を発表した。警戒範囲3kmはSSDM-Localのハザードマップと一致するが、監視機関の発表する警戒範囲としては3.5kmもしくは4kmにすべきであったのかもしれない。このように、規模を想定する観測量が適切に得られればシステムは当初の目的通り機能することが示された。

#### ② 研究題目2の当初計画では想定されていなかった新たな展開

国内における実装試験が終わっており特に問題はないが、今後、相手国側に設置して実装実験を行う段階においてネットワーク環境などの新たな問題が派生してくるものと思われる。また、社会実装に向けたCVGHMとの共同研究や教育は実地で実施する必要があるが、これも今後に残された課題である。

#### ③ 研究題目2の研究のねらい（参考）

現行の噴火ハザード予測システムSSDMはバンドンの火山地質災害軽減センター(CVGHM)の本庁とジョグジャカルタの地質災害技術研究開発センター(BPPTKG)に設置されている。火山観測は火山の近くに設置されているPOSと呼ばれる観測所で行われており、そのデータをすぐにSSDMに反映させることが難しく、せつかくの災害予測情報を中央(CVGHM本局)と現場(POS)が共有して防災情報や警報などの発信を連携して行なうことが不可能に近く、SSDMの効率的な運用には程遠い状況にあった。そこで、本来の、観測データに基づいてハザードマップデータベースから最適なハザードマップを検索し、リアルタイムハザードマップとして表示する、といった目標を達成するため、SSDMで作成されたハザードマップデータベースをPOSで検索するシステム、SSDM-Localを新規に開発導入するとともに、検索に用いた指標をCVGHMに送って同様の検索がSSDM上で行えるよう、機能強化を行い、両システムを統合的に運用できるようにする必要がある。研究題目2の狙いは、このようにリアルタイムハザードマップ作成の一連のプロセスをCVGHMとPOSで統合的に行えるようなシステムの整備を行うことにある。

#### ④ 研究題目2の研究実施方法（参考）

研究題目1の成果をSSDMならびにSSDM-Localに盛り込むべく、開発・改良を加えるとともに、両システムのネットワーク(統合)化を行う。SSDMは、発生が想定される膨大な数の時系列的現象のシミュレーションを実行しハザードマップデータベースを作成する。SSDM-Localは、それぞれの観測所において、研究題目1のプリプロセッサの出力に基づいて、SSDMが作成したハザードマップデ



データベースからその時点で最も可能性の高いケースを検出・抽出し、リアルタイムハザードマップとして表示する。さらに両システムはネットワークを介して統合化する。SSDM については、高機能化や SSDM-Local との統合化に伴うデータベースの改良、SSDM サブシステム間のインターフェースプログラムの改良、ユーザーインターフェースの改良と、シミュレーションプログラムの改良や高分解能化による高精度化を行う、またハードウェアの高性能化が必要とされるため新規マシンの導入を行う（研究活動 2-1）。グントール及びスメル火山観測所には新たに、プリプロセッサ出力をもとに最適なハザードマップをハザードマップデータベースから検索するシステム SSDM-Local をソフト、ハードとも導入する（研究活動 2-2）。その上で、SSDM および SSDM-Local 間の通信インターフェースの開発を行い、SSDM と SSDM-Local に実装する（研究活動 2-3）。実装後、動作を確認し、当初の目的である観測結果に基づくハザード予測が SSDM-Local に出力されることを最終目標とする。

## II. 今後のプロジェクトの進め方、および成果達成の見通し（公開）

新型コロナウイルスの感染拡大の影響を受けて、インドネシアへ渡航できなかつたので設置と調整、またその後の実装実験に関する部分は実施できていない。さらに、運用のための教育も手付かずの状態である。令和3年度に繰り越しことができたので、令和2年度において計画した実施内容の主要な部分を令和3年度に実施することとした。一方、変更した計画が実施できるかどうかは、今後ワクチン接種が進み相手国への渡航が可能かどうかにかかっている。渡航時期が遅れることになれば、計画した内容のうち、プライオリティの高いものから優先的に実施することになる。

## III. 社会実装に向けた課題とそれを克服するための工夫、教訓など（公開）

### (1) プロジェクト全体

インドネシアへ渡航できていないので、プロジェクトの具体的な進め方などの議論が不十分であり、共同作業ができていないので、課題の抽出にも至っていない。これまで実施した SATREPS での教訓から、日本側とインドネシア側で知識と技術力に格差が大きく、システムおよび解析の技術開発はほとんど日本で実施しているため、インドネシア側の研究者に知見と技術力をどう理解してもらい、自立発展につなげていくかが課題であることは認識している。SATREPS の実施により、知識と技術力の格差は徐々に解消されつつあるものの、相手方は人事異動もあるため、知識と技術力が一定レベルか、さらに向上するのは困難である。渡航して人の往来ができない限り、課題は解決できないと思われる。

直近の最大の課題は、機材の輸送である。京都大学は pp19 を持っているのでインドネシアの輸入に際して免税手続きを受けられる。過去のプロジェクトでは、渡航時に同時携行することにより、免税で機材の輸入を行った。また、SATREPS では輸出入手続きはすべて pp19 をもつ JICA が行った。今回、コロナ禍の影響で機材だけを輸送しようとしているが、輸入を行う業者の問題が発生している。輸入業者は事業基本番号（NIB）を持つ必要があり、NIB を持つ業者を見つけることと NIB 所有業者と相手側機関との交渉が十分できていない。時間がかかっているが解決できるものと思われる。

2021年2月の人事異動で、相手側機関のセンター長が交代し、火山ハザード担当部長が転出して不在の状態が続いている。コロナ禍もあって、相手側機関との連携が十分とれない状態が続いている。相手側機関はコロナワクチンの接種を5月に完了したので、この状況は徐々に改善するものと思われる。相手側機関との連絡は e-mail ではなく、WhatsApp などの SNS を多用している。

### (2) 研究題目1：「観測データによる火山噴火規模と噴出物量推定手法の開発」

研究グループ A（リーダー：京都大学・井口正人）

必要な火山活動等に関する情報は順次提供されるが、火山観測データ、特に生データについては多量であるために、取得できない。ネットワーク環境が整えば、生データを日本にリアルタイムで転送することも可能であるが、現段階のネットワークの通信速度と安定性は不十分である。

また、当初予定していた共同観測はできていない。噴出物量を予測するための経験式のプロトタイプはあるが、それぞれの火山の活動と火山活動状況に応じたチューニングが必要であり、そ

の段階に至っていない。

(3) 研究題目2：「噴火ハザード予測システム SSDM の改良と SSDM-Local との統合化」

研究グループ B（リーダー：日本工営・宮本邦明）

コロナ禍が原因で、当初計画していた SSDM、SSDM-Local システムの現地実装と設定、それに合わせたセミナーやワークショップの開催、研修生の受け入れ、相手国研究機関との効果的な実証試験・社会実装の共同が不可能となった。III(1)に記した相手方研究期間の状況に加えて、感染を避けるため、研究者・職員の出勤が制限されており、共同が極めて困難な状況にある。そこで、両システムの組み上げを国内で行い現地に輸出することとした。

一方で、システムの現地到着後に社会実装に向けた実証試験の実施する必要がある、そのためには国内でシステムの実証試験を行っておくことが望ましい。そのため、I, 2, (3), ① に記したように、組み上げたシステムを用いて、観測所において実証試験を行い当初の目的通り機能することが示された。

この実証試験からシステムの持つ普遍性が示されたことになり、本システムを導入することにより種々の火山の比較研究が可能となり、さらにハザードマップや警戒避難情報の提示・発令の方法などについて客観的な議論を可能にするものと期待される。すなわち、本システムが共同研究のプラットフォームとして機能することが期待される。

なお、インドネシアにおけるシステム運用の社会実装の現状としては、SATREPS プロジェクトで導入した SSDM システムの利活用が、BPPTKG における最近のメラピ火山活動に対するハザード評価や、CVGHM におけるいくつかの火山における最近の活発な火山活動に対する火砕流などによるハザード評価など、内部での使用を目的としてなされており、直接的なワーニングの発令に活用されるまでには至っていない。

#### IV. 日本のプレゼンスの向上（公開）

特になし。

#### V. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

#### VI. 投入実績【研究開始～現在の全期間】（非公開）

#### VII. その他（非公開）

以上

V. 成果発表等

(1) 論文発表等【研究開始～現在の全期間】(公開)

① 原著論文(相手国側研究チームとの共著)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)

論文数 0 件  
 うち国内誌 0 件  
 うち国際誌 0 件  
 公開すべきでない論文 0 件

② 原著論文(上記①以外)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)

論文数 0 件  
 うち国内誌 0 件  
 うち国際誌 0 件  
 公開すべきでない論文 0 件

③その他の著作物(相手国側研究チームとの共著)(総説、書籍など)

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件  
公開すべきでない著作物 0 件

④その他の著作物(上記③以外)(総説、書籍など)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件  
公開すべきでない著作物 0 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項

V. 成果発表等

(2) 学会発表【研究開始～現在の全期間】(公開)

①学会発表(相手国側研究チームと連名)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、年月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別

招待講演 0 件  
口頭発表 0 件  
ポスター発表 0 件

②学会発表(上記①以外)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、年月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2020	国際学会	山田大志・井口正人(京大防災研)・藤田英輔(防災科研)、桜島火山での噴煙成長過程定量化の試み、JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual、オンライン形式、2020年7月12日-16日	ポスター発表
2020	国内学会	山田大志・井口正人・為栗健(京大防災研)、空気振動観測による火山灰量推定の試み、桜島火山観測所60周年記念研究集会、鹿児島県鹿児島市(かごしま市民福祉プラザ)、2020年11月11日	口頭発表
2020	国内学会	山田大志・井口正人・為栗健(京大防災研)、空気振動観測による火山灰量推定の試み、令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会、オンライン形式、2021年2月24日	口頭発表

招待講演 0 件  
口頭発表 2 件  
ポスター発表 1 件

V. 成果発表等

(3) 特許出願【研究開始～現在の全期間】(公開)

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する外国出願※
No.1													
No.2													
No.3													

国内特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する国内出願※
No.1													
No.2													
No.3													

外国特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

V. 成果発表等

(4) 受賞等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①受賞

年度	受賞日 (例:2020/4/1)	賞の名称	業績名等 (「〇〇の開発」など)	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2020	2020/10/6	6th JDR Award	インドネシアの火山防災	井口正人	Journal of Disaster Research	その他	本プロジェクトはこの受賞が発展したものである。

1 件

②マスコミ(新聞・TV等)報道

年度	掲載日 (例:2020/4/1)	掲載媒体名	タイトル/見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項

0 件



V. 成果発表等

(5) ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等／実証試験等【研究開始～現在の全期間】(公開)

① ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日 (例:2020/4/1)	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	公開/ 非公開の別	概要

0 件

② 実証試験等

年度	実施期間(実施日)	実証項目	実施場所	概要
2020	2021/3	改良を加えたSSDMとSSDM-Localのシステム統合運用実験を実施	桜島火山観測所	

1 件