

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

終 了 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

- *1 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかつたため、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つたため、桜島と諏訪之瀬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つたため、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が、実施できなかつた。
- *4 コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかつたため、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つたため、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つたため、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つたため、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つたため、実施できていない。

(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。2021年に西インド諸島・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 Nyiragongo 火山およびカナリア諸島・ラパルマ島の Cumbre Vieja 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

東ジャワのスメル火山において2021年12月4日に山頂の Jonggring Seloko 火口において溶岩ドームが崩壊し、火砕流が南東山麓を約16km流下した。この火砕流の発生による死者・行方不明者は約50名に達し、国道の橋が落ちたために通行止めとなった。雨期であったため、火砕流に前後して泥流も発生した。共同研究機関の CVGHM によると崩壊量は約600万 m³と推定されている。研究題目1では、これまでメラピ火山において発生した噴火の1年以内に前駆する火山性地震のエネルギーから噴火ポテンシャル体積を求める経験式を高精度化する研究計画を立案したが、2021年12月にスメル火山において発生した火砕流では、1年以内に発生した火山構造性地震は118回で、2021年5月以降はほとんど観測されておらず(図1-1-1)、この経験式の見直しを迫られた。今年度は、スメル火山を対象に経験式の見直しを行った。ただし、コロナ禍で渡航できていないので火山性地震の元記録まで遡れていないので不十分かもしれない。

令和2年度の研究により、西ジャワのグントール火山において1991年から2020年までに15,641回の火山構造性地震が発生し、地震エネルギーの積算値は40GJに達していることが明らかになっている。火山性地震1回あたり平均2.56MJのエネルギーが放出されたことになる。スメル火山において2021年12月4日の火砕流発生前の1年間には118回の火山構造性地震が観測されているので、火山性地震1回あたり平均エネルギーがグントールとスメル火山で同じと仮定すると、地震エネルギーは約302MJになる。地震エネルギー(E_s)から噴出物量の上限(V_p)を与える以下の経験式(Iguchi et al., 2019)に基づけば、噴出物量の上限はわずか千 m³のオーダーにしかならない。

$$\log_{10} V_p = 2 \log_{10} E_s - 13.7 \quad (1-1-1)$$

【終了報告書】

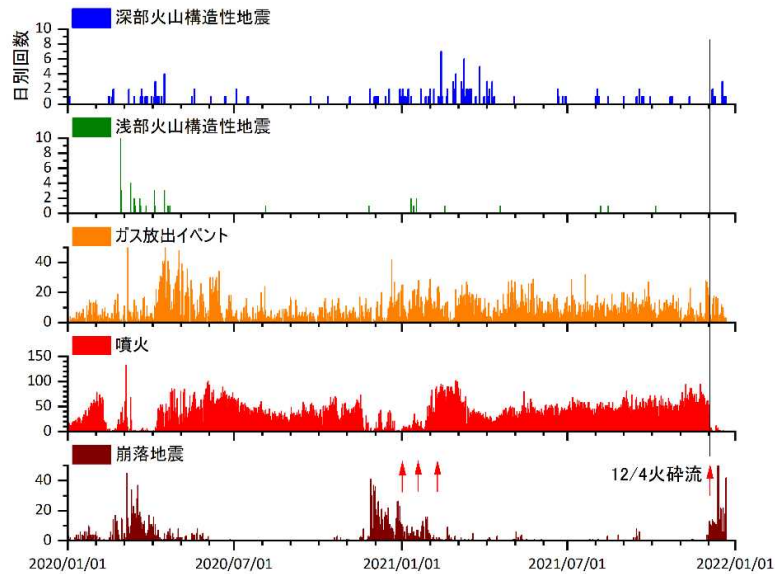


図 1-1-1 スメル火山における火山性地震日別発生回数（2020年1月1日～2021年12月4日）

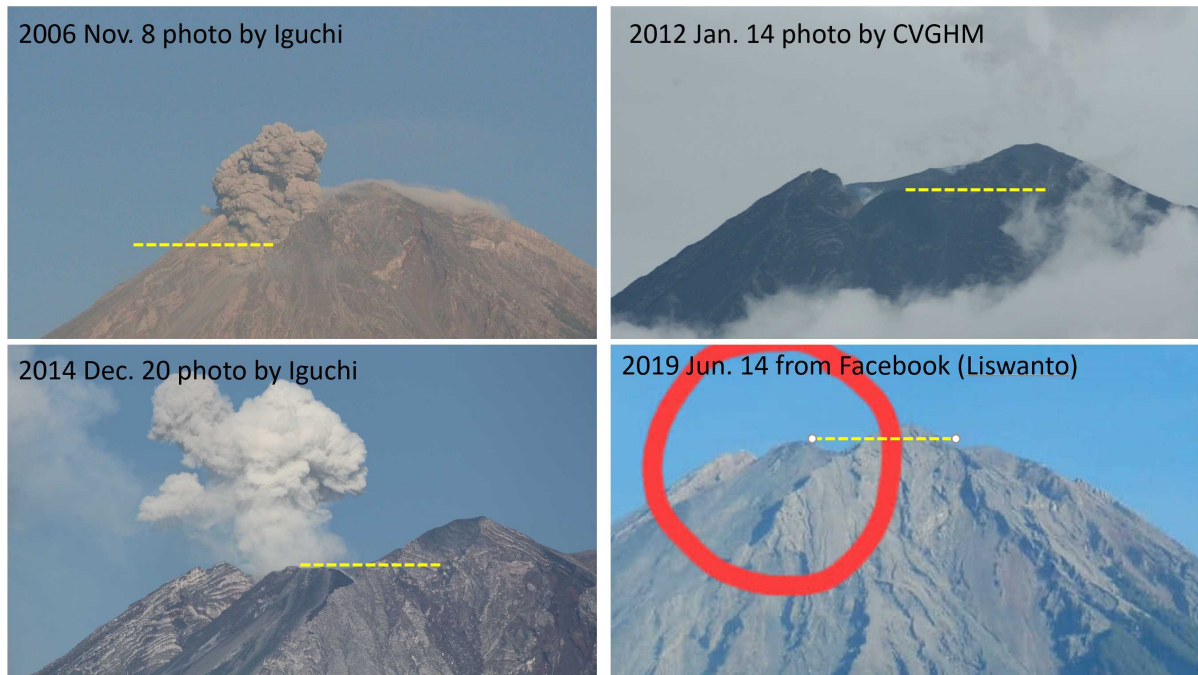


図 1-1-2 火口内の溶岩ドームの成長。破線は溶岩ドームの高さを示す。

一方、図 1-1-2 に示すように山頂の Jonggring Seloko 火口において溶岩ドームは 2009 年 8 月以降、成長を続けていることが知られており、SATREPS の研究課題「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」による 2017 年 11 月時点の調査では、火口内の溶岩ドームの体積は約 1,700 万 m^3 と見積もられている。溶岩ドームがすべて崩壊したわけではないが、溶岩ドームの崩壊が火砕流発生の原因である以上、地震活動を評価する期間は、溶岩ドームが成長を始めた 2009 年 8 月以降の 12 年間とすべきである。

図 1-1-3 に 2009 年以降の火山性地震の月別発生回数を示す。この期間に火山構造的な地震は 1,312 回発生しているが、火山構造的な地震の増加期に同期して溶岩ドームの崩壊による地震動（崩落地震）

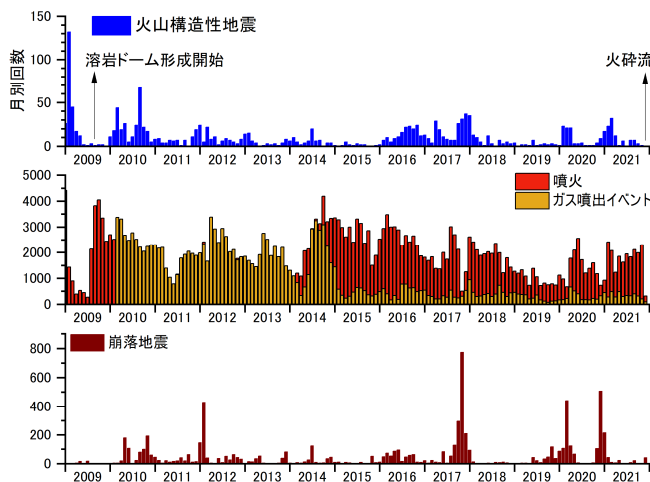


図 1-1-3 火山性地震の月別発生回数

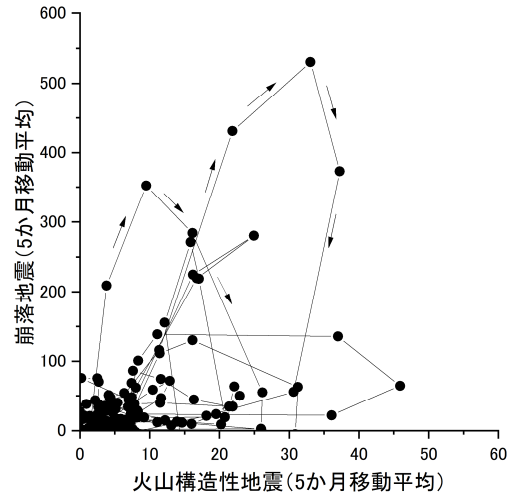


図 1-1-4 火山構造的な地震と崩落地震の発生回数の関係

の発生回数が増加している（図 1-1-4）。このことは、マグマの貫入速度の増加により地下では、応力の増加による地震の発生、地表では溶岩ドームの成長速度の増加により崩落地震が増加したものと解釈される。

式 (1-1-1) より、2009 年 8 月以降の 12 年間における地震エネルギーは 3.4GJ、噴出物量の上限は 23 万 m^3 となるが、それでも火口内の溶岩ドームの体積約 1,700 万 m^3 に比べて 2 桁小さい。式 (1-1-1) はマグマの貫入が火山性地震を引き起こすことを前提とした経験式であるが、この前提が成り立つのは、マグマの貫入速度が速く、貫入と同時に火山構造的な地震を引き起こす場合である。実際、経験式 (1-1-1) のもととなったメラピ火山のマグマの貫入速度は 2006 年噴火では 0.38M m^3 /日、さらに規模の大きい 2010 年噴火では 3.16M m^3 /日 (Aisyah et al., 2018) と大きい。一方、スメル火山の場合は 2009 年から 2017 年の 8 年間かけても溶岩ドームの体積は 1,700 万 m^3 にしかなく、マグマの貫入速度は 0.006M m^3 /日と 2~3 桁小さい。

火山性地震の発生回数が 948 回、地震エネルギー積算値が 2.4GJ となる 2009 年 8 月から 2017 年 11 月までの溶岩噴出量を 1,700 万 m^3 とするためには式 (1-1-1) を以下のように改訂する必要がある。

$$\log_{10} V_p = 2 \log_{10} E_s - k \quad (1-1-2)$$

$$k = 11.5$$

本来、パラメータ k はマグマの貫入速度の関数となるべきものかもしれないが、火山構造的な地震の発生を伴わずにマグマの貫入が起こる桜島の場合、マグマの貫入速度は 0.1M m^3 /日以下なので、ここでは暫定的にマグマの貫入速度が 0.1M m^3 /日以上の際は $k = 13.7$ 、それ未満の際は $k = 11.5$ とする。

2017 年 11 月時点において溶岩ドームの体積は約 1,700 万 m^3 に達していた。図 1-1-3 に示すように 2009 年以降、火山性地震や噴火活動に大きな変化はないので、マグマの供給速度はほぼ一定と考えられる。したがって、2021 年 12 月 4 日の火砕流発生直前には、2,500 万 m^3 程度には達していたことが推測される。崩壊量は約 600 万 m^3 と推定されているので、約 1/4 が崩壊したことになる。スメル火山では 1967 年以降、2021 年 12 月以前と同様に噴火が頻発しているため、過去の噴火記

【終了報告書】

表 1-1-1 スメル火山における流下距離 9 km以上の火砕流

発生年月日	流下距離 (km)	流下河川	崩壊量 (Mm ³)	備考
1977年12月1日	10	Besuk Kembar	6.4	1967年から溶岩ドームが成長。山頂と同程度の高さに達した。
1981年3月28日	10	Besuk Bang	6.2	噴火と崩壊頻発。Lava tongueから崩壊
1994年2月3日	11.5	Besuk Kobokan	6.8	Lava tongueから崩壊。死者9名。地震活動活発化、ハーモニック微動
2002年12月29日	9	Besuk Bang	—	地震活動活発化、ハーモニック微動。ラハール発生。
2021年12月4日	16*	Besuk Kobokan	6.0	2009年から溶岩ドームが成長。地震活動の活発化なし。ラハール発生。

*八千代エンジニアリング私信

録に遡って、同様の溶岩ドームの崩壊による火砕流発生事例を DATA DASAR GUNUNGAPI INDONESIA に基づいて調べてみた。表 1-1-1 にその結果を示す。

1967年以降に、火砕流が9 km以上流下した事例が5例あった。以下に注目すべき点を列記する。

- (1) 1977年の火砕流でも10年間かけて溶岩ドームが成長したことがわかる。溶岩ドームの成長に注目する必要があるが、成長速度がメラピ火山やシナブン火山に比べて遅いため、地形変化として認識しづらい。精密な計測が必要である。
- (2) 崩壊量はいずれも600万 m³程度である。Jonggring Seloko 火口の地形が大きく変わらなければ、600万 m³を9 km以上流下する火砕流発生の閾値として用いることができる。溶岩ドームの1/4程度が崩壊するとすれば、溶岩ドームの体積が2,500万 m³程度に達すれば、火砕流が9 km以上流下する危険性が高まったと判断できる。標高が高く、メラピ火山よりも困難ではあるが、スメル火山でも溶岩ドームの量を直接的に計測することができるので、溶岩ドームの体積の1/4を研究活動2に引き渡す火砕流の体積として用いることができる。
- (3) 1994年と2002年の火砕流では、いずれも前駆した地震活動の活発化とハーモニック微動の発生が観測されている。一方、2021年の火砕流はこれらの前駆現象なしに発生した。
- (4) これらの火砕流はいずれも雨季に発生している。多量の雨の溶岩ドームへの侵入が溶岩ドームの崩壊のトリガーとなった可能性が指摘できる。
- (5) 崩壊量は精密な測量により求められたものではないが、崩壊量が同等であるにもかかわらず、2021年の火砕流の流下距離は有意に長い。流下距離を延長させるメカニズムが働いた可能性がある。これについては研究活動2-3で議論する。

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

グントール火山においては、GNSS 観測点を増設することにより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り、地盤変動と噴出物量の関係式の構築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

【終了報告書】

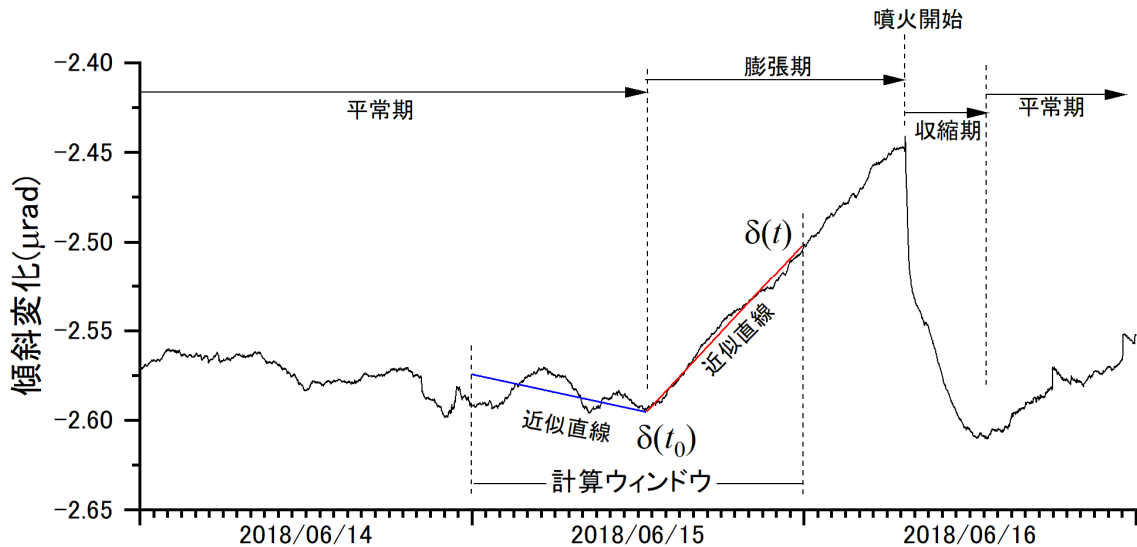


図 1-2-1 マグマの貫入による膨張と噴火による収縮を示した地盤変動（傾斜変化）と膨張開始時刻の式 (1-1-2) を用いた同定

め、活発なブルカノ式噴火を繰り返す桜島を対象にして、関係式の高精度化しようとした。しかしながら、桜島の噴火回数が 2021 年 6 月以降、激減し十分な量の降灰を観測することができなかった。したがって、地盤変動と噴出物量の関係式は令和 2 年度と同じである。

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 に引き渡すことを検討した。プリプロセッサのプロトタイプはすでに開発してある。傾斜計、ひずみ計火口方向、ひずみ計直交方向のデータを入力し、火口方向の隆起、または、膨張ひずみを検知し、傾斜およびひずみ変化量を時々刻々解析する。これらの変化量の比から微小球状圧力源 (Mogi, 1958) の深さとその体積変化 (ΔV) を求める。次式より、噴出物体積の予測値であるポテンシャル重量 (W_p) を求める。

$$W_p = \beta \Delta V \quad (1-2-1)$$

ここで、 β は密度の単位をもち、桜島の火山灰降下量の分析から $2,600\text{kg/m}^3$ とする。

一方、インドネシアでは桜島のように複数の成分の地盤変動観測ができないために、GNSS による水平変位か傾斜計変化を単独で用いるしかない。この場合、微小球状圧力源の深さを固定する必要がある。幸いにグントール火山では微小球状圧力源の深さは 4.4~6.2 km、スメル火山では浅い (< 0.6 km) であることが分かっている (Iguchi et al., 2012)。また、隆起・膨張の開始時点の同定は、初期段階において誤差が大きいという問題がある。桜島においては、5 分間の傾斜またはひずみ変化量が閾値を超えた時点を隆起・膨張の開始とするが、インドネシアの観測では測定誤差が大きいことを考慮しなければならない。マグマの貫入による膨張と噴火による収縮地盤変動を模式的に図 1-2-1 に示す。膨張が進行している時点では、それ以前の地盤変動は、平常期と膨張期の 2 つの直線で近似できるものとする。膨張期の時間関数は、下に凸となる変動が加速する関数形、上に凸となる減速する関数形も考慮すべきであるが、ここでは一定の速度の直線と仮定する。すなわち、変動の時間関数 $\delta(t)$ は以下の様に記述される。

$$\begin{aligned} \delta(t) &= a_n(t - t_0) + \delta(t_0) & (t < t_0) \\ \delta(t) &= a_i(t - t_0) + \delta_0(t_0) & (t \geq t_0) \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

【終了報告書】

表 1-2-1 過去の噴火におけるテフラ、火砕流、溶岩流のマグマ換算体積 (DRE) とその比

火山名	発生年	テフラ (m ³)	火砕流 (m ³)	溶岩流 (m ³)	合計 (m ³)
桜島	764	3.5×10 ⁷ 1)	量不明	8.7×10 ⁸ 2)	9.0×10 ⁸
		4%		96%	
桜島	1471-1476	2.8×10 ⁸ 1)	量不明	4.7×10 ⁸ 3)	7.5×10 ⁸
		37%		63%	
桜島	1779	1.0×10 ⁸ 1)	量不明	1.6×10 ⁹ 3)	1.7×10 ⁹
		6%		94%	
桜島	1914	2.1×10 ⁸ 1)	量不明	1.3×10 ⁹ 3)	1.5×10 ⁹
		14%		86%	
桜島	1946	5.7×10 ⁵ 4)	0	1.7×10 ⁸ 3)	1.7×10 ⁸
		1%未満		99%以上	
桜島	2018/6	1.4×10 ⁵ 5)	1.2×10 ⁴ 6)	0	1.5×10 ⁵
		92%	8%		
新燃岳	2011	1.0×10 ⁷ 7)	7.0×10 ⁴ 8)	1.6×10 ⁷ 7)	2.6×10 ⁷
		38%	1%未満	61%	
口永良部島	2015	2.3×10 ⁵ 9)	9.2×10 ⁴ 10)	0	3.2×10 ⁵
		71%	29%		
アグン	1963/2	2.4×10 ⁷ 11)	1.9×10 ⁷ 11)	1.1×10 ⁸ 11)	1.5×10 ⁸
		16%	13%	71%	
アグン	1963/3	1.0×10 ⁷ 11)	7.7×10 ⁶ 11)	0	4.8×10 ⁷
		57%	43%		
ケルート	2014	1.2×10 ⁸ 12)	7.7×10 ⁶ 12)		1.3×10 ⁸
		94%	6%		
スプリエール	1979	1.4×10 ⁷ 13)	量不明	4.8×10 ⁷ 12)	6.2×10 ⁷
		22%		78%	

1)~14)はマグマ換算体積 (DRE) の見積りに根拠となった文献。密度を 2600kg/m³とした。

1)産業技術総合研究所(2013)、2)味喜・小林(2016)、3)石原・他(1981)、4) 鹿児島測候所(1951)、5)式(1-2-1)による、6)流下距離に基づくシミュレーション、7)Nakada et al.(2013)、8) Nakada et al.(2013)、Maeno et al.(2013)の記述に基づく推定、9)Tanaka and Iguchi (2016)、10)Geshi and Itoh(2018)、11) Zen and Hadikusumo (1963)、12)Maeno et al.(2019)、13)Brazier et al.(1982)、14)Huppert et al. (1982)

ここで、 t_0 は膨張開始時刻、 a_n は平常期の変動速度、 a_i は膨張期の変動速度であり、式 (1-1-2) と観測データの差が最小になるように、これらのパラメータを決定すればよい。

さらに、噴出物量のテフラ、火砕流、溶岩流への配分を過去の噴火に遡って検討した。マグマ換算体積 (DRE) にしたものを表 1-2-1 に示す。桜島の山腹噴火については、溶岩流への配分が多い。その中でも文明噴火 (1471 年~1476 年) はテフラの量が多いことが注目される。1955 年以降の南岳の山頂噴火では、ほぼテフラへ配分される。新燃岳 2011 年噴火、1963 年アグン火山噴火の初期フェーズ、1979 年スプリエール火山噴火では、テフラと溶岩流に近い量となっている。2015 年口永良部島噴火、1963 年アグン火山噴火の第 2 フェーズ、2014 年ケルート火山噴火では、噴出物はテフラと火砕流で占められている。ケルート火山の噴火は 20 世紀以降に発生した他の大規模噴火でも同様であるが、2007 年の噴火は例外的に溶岩ドームの形成だけであった。

火砕流の配分比に注目してみると、概ね 30%以下である。例外的に 1963 年アグン火山噴火の第 2 フェーズが多く、火砕流の発生により多くの犠牲者を出した。SATREPS の研究課題では、メラピ火山における火砕流の配分比を 25%として火砕流のシミュレーションを行ってきたが、この配分比

【終了報告書】

は他の火山の例と比べても妥当であるといえる。

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国内の火山や過去にインドネシアで発生した火山噴火を対象に、噴火に伴う空気振動から噴出物量を求める研究を行った。

桜島では、伸縮計で捉えられる地盤収縮と地震動振幅の線形結合が放出火山灰量の推定に有効であることが示されている (Iguchi, 2016)。地盤変動と地震動の高品位な観測記録を得るためには観測坑道や観測井が必要であるが、インドネシアを含めた多くの火山では現実的でない。空気振動は大気中への放出、注入現象に伴う波動であるため、放出火山灰量を反映する可能性がある。低周波マイクロフォンや微気圧計による空気振動観測は比較的簡便に展開が可能であり、地盤変動や地震動と同じく観測記録をリアルタイム伝送することができる。ここではまず空気振動振幅と火山灰放出量の関係を調べ、次に得られた関係に基づいて空気振動振幅と噴煙到達高度の関係を検討する。

空気振動観測による火山灰放出量推定の先行研究として、Fee et al. (2017)があるが、噴火開始時の増圧相は火口底のガス溜まりの破裂によって引き起こされるため (Yokoo et al., 2009)、増圧相は火山灰放出ではなくガス放出を強く反映していることが想定される。火山灰放出に伴う空気振動振幅を抽出するため、ここでは増圧相以降の後続相に着目する。後続相振幅の例として、本章で対象とする各火山での空気振動観測波形の例を図 1-3-1 に示す。また、検討に用いた使用データと参照

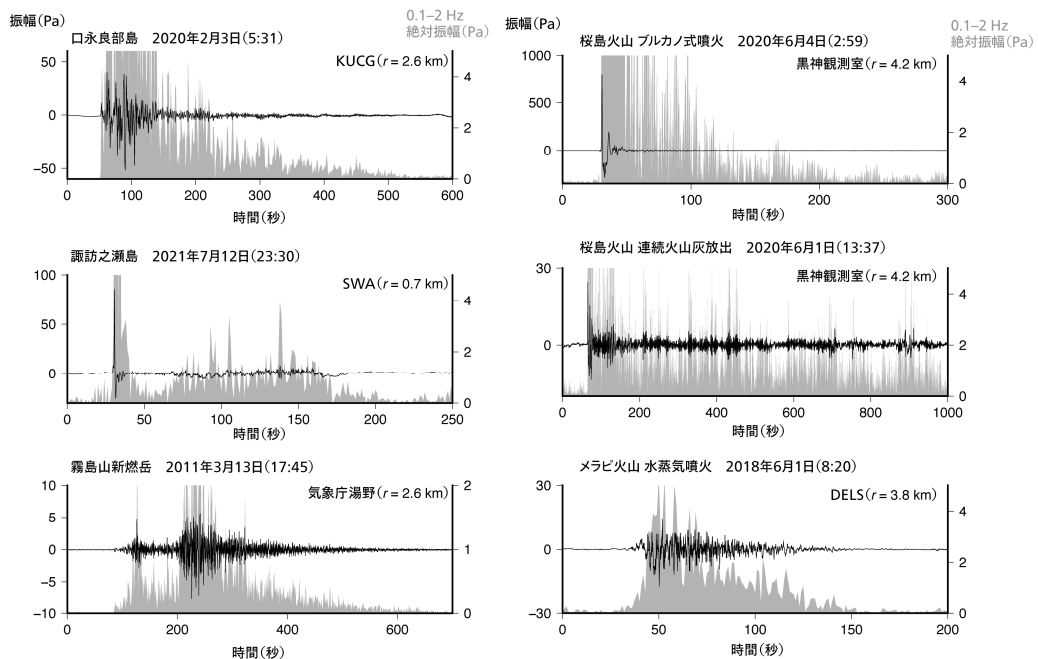


図 1-3-1 対象とした各火山における空気振動波形の例。灰色は本章での解析に用いる 0.1–2 Hz の帯域の絶対振幅を示す。

【終了報告書】

表 1-3-1 火山毎の使用データ

	地盤収縮量	空気振動記録観測点 と火口からの距離	火山灰放出量	噴煙到達高度	大気密度 観測点
桜島南岳	有村観測坑道 ハルタ山観測坑道	黒神 (SI104) 4.2 km	鹿児島県集計 結果に基づく	気象庁資料	鹿児島
霧島山	Ueda et al., 2013	気象庁湯野 (Type7144) 2.6 km	Maeno et al., 2014 西来・他, 2013	新堀・他, 2013 気象庁	鹿児島
口永良部島	—	KUCG (SI104) 2.6 km	長井・他, 2019 長井・他, 2020	京都大学 防災研究所, 2020	鹿児島
Merapi	—	DEL (SI104) 3.8 km	—	CVGHM 発表	Surabaya
諏訪之瀬島	—	SWA (SI104) 0.7 km	—	気象庁資料	名瀬

文献を火山毎に表 1-3-1 にまとめた。

距離伝搬を補正した振幅二乗積算値である空気振動エネルギーを指標として、放出火山灰量との関係を検討した。まず、放出火山灰量と良い相関がある地盤収縮量との関係を調べた。図 1-3-2 に、桜島南岳と霧島山新燃岳噴火について、における地盤収縮量と空気振動エネルギー関係を示す。5桁程度の幅広いスケールで着目すれば両者の比は概ね一定の関係（相関係数 0.96、比例係数 6.2×10^{-5} ）にあるので、空気振動エネルギーは放出火山灰量を反映する観測量であるといえる。

次に、降灰調査等により放出火山灰量が推定されている桜島南岳、霧島山新燃岳、口永良部島火山の噴火事例における、空気振動エネルギーと放出火山灰量との関係を図 1-3-3 に示す。桜島南岳の放出火山灰量は鹿児島県の月毎の集計値から推定しているため、空気振動エネルギーも月毎の総和とした。多少のばらつきは存在するものの、空気振動エネルギーと放出火山灰量の間には相関関係があり、比例係数は 0.02–0.1 の範囲にある。

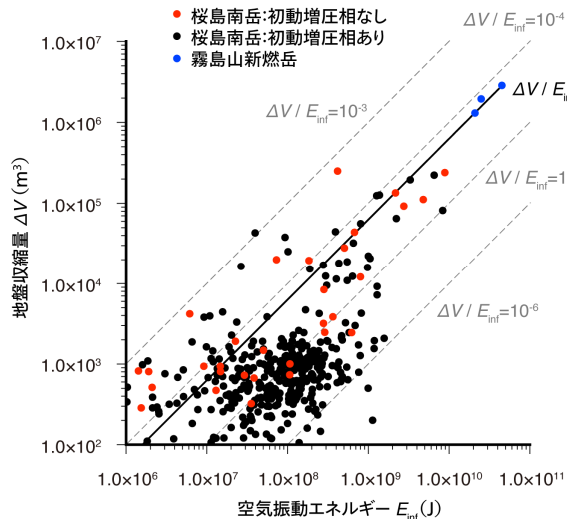


図 1-3-2 空気振動エネルギーと地盤収縮量との関係。黒で示した桜島南岳の噴火は噴火開始時に顕著な増圧相を有するため、空気振動記録の初動到達 5 秒後以降の時間窓から計算している。

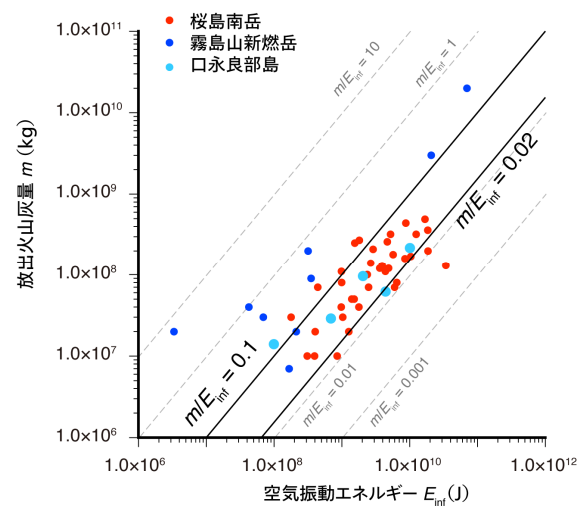


図 1-3-3 空気振動エネルギーと放出火山灰量との関係

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

スメル火山において 2021 年 12 月 4 日に山頂の Jonggring Seloko 火口において溶岩ドームが崩壊し、火砕流が南東山麓を約 16km 流下した。この火砕流の発生による死者・行方不明者は約 50 名に達し、国道の橋が落ちたために通行止めとなった。雨期であったため、火砕流に前後して泥流も発生した。CVGHM によると崩壊量は約 600 万 m^3 と推定されている。研究題目 1 では、これまでメラピ火山において発生した噴火に前駆する火山性地震のエネルギーから噴火ポテンシャル体積を求める経験式を高精度化する研究計画を立案したが、2021 年 12 月にスメル火山において発生した火砕流では、前駆する火山構造性地震は火砕流発生前の 8 か月間にはほとんど観測されておらず、この経験式の見直しを迫られた。今年度は、スメル火山を対象に経験式の見直しを行った。ただし、コロナ禍で渡航できていないので火山性地震の元記録まで遡れていないので不十分かもしれない。

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）

研究題目 1 においては、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。

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、溶岩流への配分を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、日本国内の噴火活動の活発な火山や過去のインドネシア国内の火山噴火を対象にして、噴出物量の妥当性を検討することとした。

(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をコマンドラインベースで実行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も含み広範な範囲に及んだ。

ユーザーは、この改良により発生が想定される現象(イベント)群の設定とその時系列的組み合わせ(イベントチェーン)を直感的に指定することができるようになった。システムは指定されたイベントチェーンに従って膨大な数のシミュレーションを実行し、その結果をデータベース(ハザードマップデータベース)に格納する。ユーザーは、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。

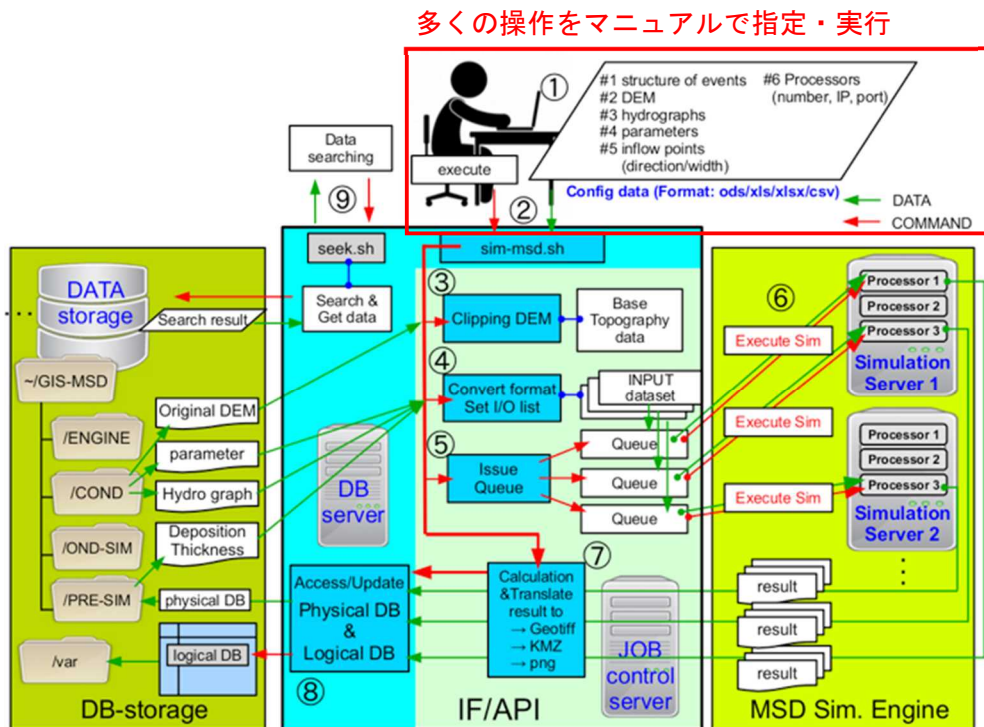


図 2-1-1 現行の SSDM システム

ハザードマップデータベースは、新しい SSDM で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、想定される全ての一連の災害現象が生起する領域 (subproject 領域)を、(1) SSDM/DEMs にある DEM データベースから最適な 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 subproject 領域は、dem.dat なるファイル名で、SSDM/Projects/project_name/subproject_name の下に格納される。具体的には、図 2-1-2 に示すように、対象とする火山ごとに SSDM/DEMs に格納されている DEM 群から最適な DEM を選択する。すると、選択した DEM が、SSDM/projects/project_name の下に project.dem として登録される。ついで、その DEM から subproject 領域を抽出・登録するが、これは WEB ベースの GUI で直感的に行うことができる。



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、subproject 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全ての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/ project_name/subproject_name/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しう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。

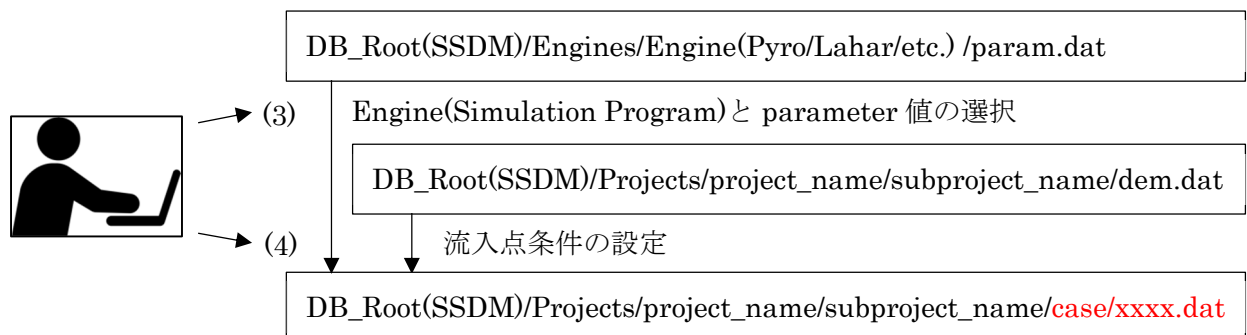


図 2-1-3 発生が想定されるイベントに対応したケースデータベースの作成

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。

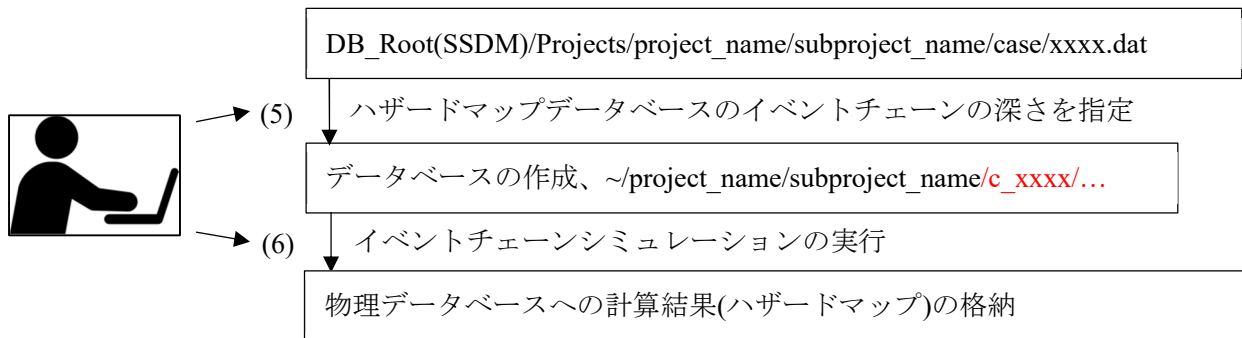


図 2-1-4 イベントチェーン深さの指定とハザードマップデータベースの作成

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個別のプロセスとしても、メニューから GUI で実行することができる。ユーザーは、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設計されている。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)に基づく、最適なハザードマップの自動検索機能を追加した。

研究活動 2-2 SSDM-Local の開発と現地実装

SSDM-Local を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、観測結果から噴火規模を予測し、その予測に基づいて、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を用意し、算出することができる。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の検索は一定間隔で行われ、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

【終了報告書】

エ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の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 では、観測データベースに格納されている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。

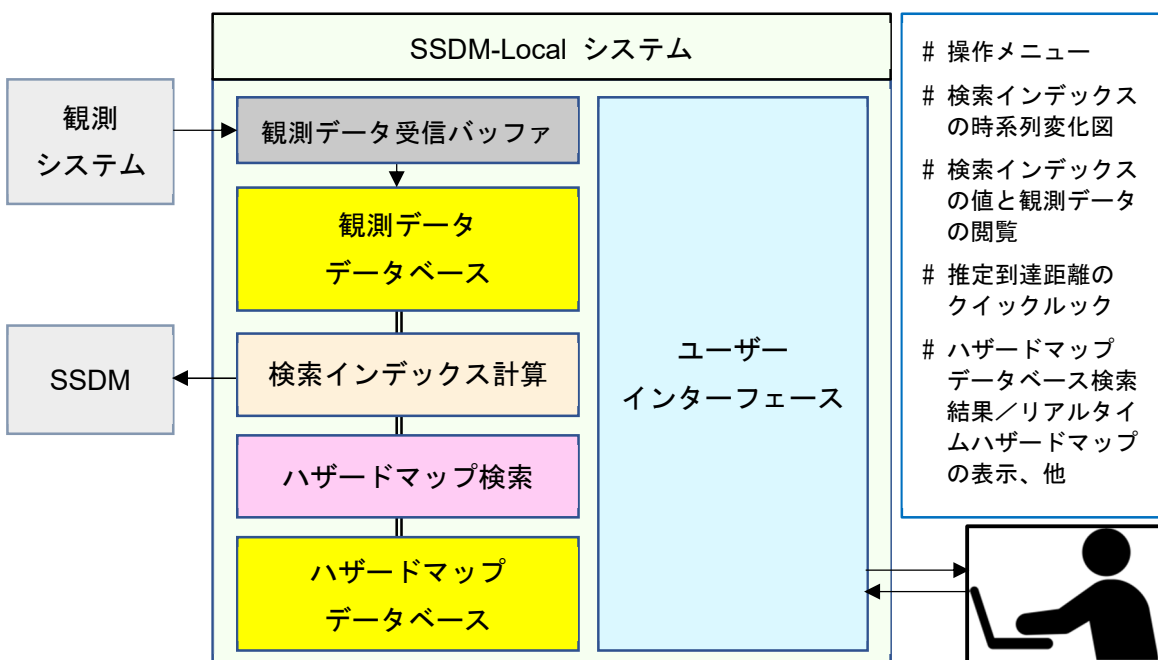


図 2-2-1 SSDM-Local システムのブロックダイアグラム

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ことを想定している。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通信容量の点から難しいため、1回の通信で送ることができるよう、ハザードマップデータベース検索インデックスのみを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 台から構成した。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て一連の計算の実行状況をモニターし実行可能性を

【終了報告書】

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。

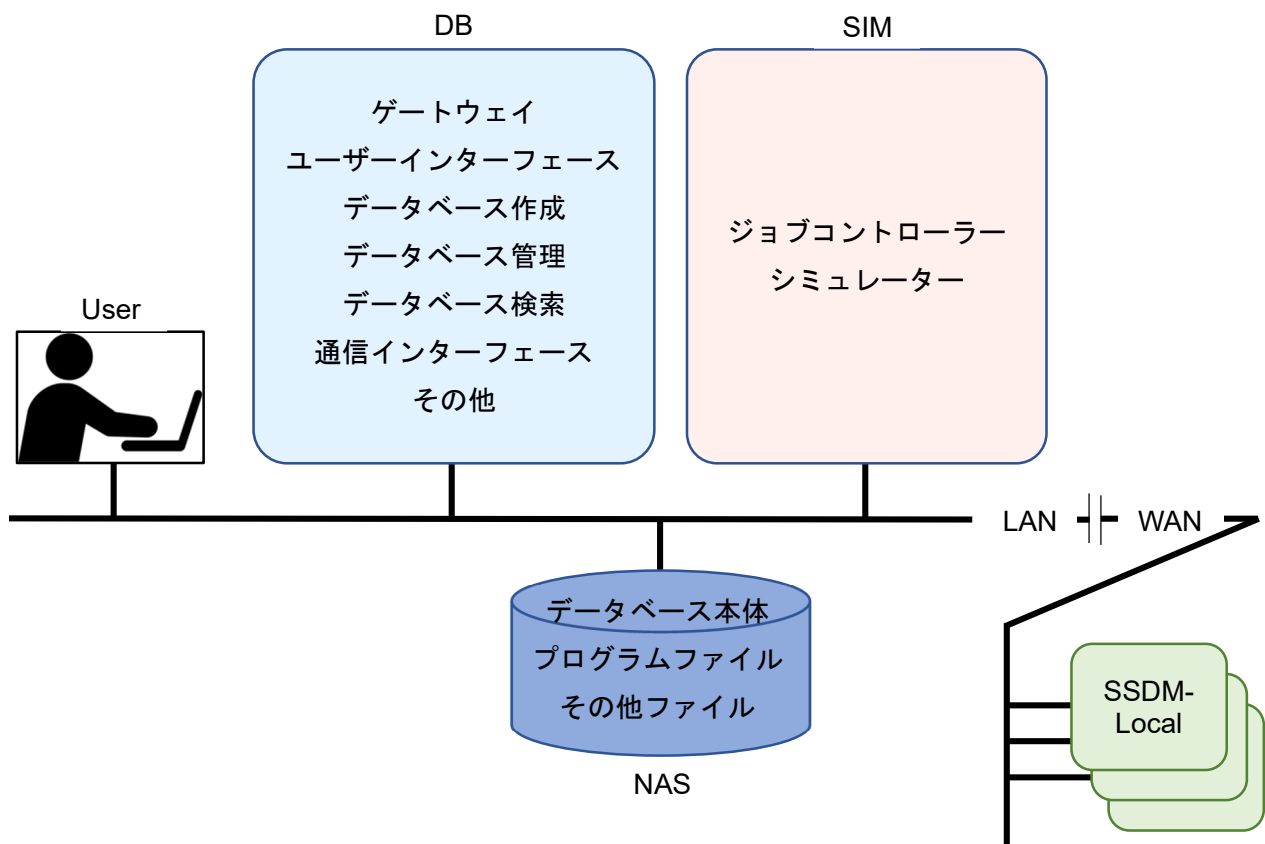


図 2-3-1 SSDM、SSDM-Local システム

シミュレーションプログラムなどの開発したソフト以外のシステム構築には、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もある。

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、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 の各機能の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

【終了報告書】

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現行のものより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とのネットワーキングも含めて1からの調査・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可能な範囲で実施し正常に機能することを確認した。

現地スタッフのSSDMシステムの具体的な運用に関するノウハウやスキルの獲得を目的に現地スタッフに対してトレーニングを実施する計画であったが、ついにその機会を作ることができなかった。この点については、SSDM、SSDM-Local両システムの操作マニュアルを作成することで代えることにしたが、それだけでスキルやノウハウの獲得は難しい。さらに、両システムに日本から直接アクセスすることがインドネシア側のネットワークポリシーでできないため、システムのサポートさえ難しい。

そこで、ノウハウやスキルの獲得支援ができるよう、運用に関するインドネシア側との連携を強化のため桜島観測所内に同様のシステムを構築した。システムの対象とする火山として、現在観測所が集中観測を実施している桜島に加え、霧島山、開聞岳、薩摩硫黄島、口永良部島、中之島、諏訪之瀬島の計7火山を設定した。7火山の観測データは桜島火山観測所に転送・1次処理され、地震エネルギーとして得られている。したがって、インドネシアで導入する観測所用のSSDM-Local用のハードウェアは必要としない。そこで、SSDM-Localの機能をSSDMに統合化した。加えて、桜島観測所のネットワーク調査を行い、データ通信を含め桜島でのSSDMシステムのネットワーク構築を行なった。また、SSDM、SSDM-Localの統合化および観測火山7火山を対象として、データベース構造を最適化した。

桜島観測所の既存の観測システムではインドネシアと異なり1地震イベント毎のデータがリアルタイムに記録され、より詳細な累積地震エネルギーの集計が可能となる。そこで、7火山の地震データを10分おきに再集計し、より短期間の変動まで追跡可能となるよう累積時間の最小分解能を1時間とするようにプログラムを組み直した。なお、集計する累積時間は、インドネシア版SSDM-Localの日単位、7日、14日、30日(1カ月)、60日(2カ月)、90日(3カ月)、180日(半年)、365日(1年)、730日(2年)、1,825日(5年)、3,650日(10年)に加え、時間単位でより短期間の24時間(1日)、48時間(2日)、72時間(3日)を設定した。これにより、10分間隔のより詳細な時間分解能を持つ地震エネルギー集計結果が得られる。

桜島観測所用のSSDMシステムのハードウェア構成は、インドネシアと同様、ワークステーションがデータベース管理・ユーザーインターフェース用(DB)とイベントチェーンシミュレーション用(SIM)の2台と、データストレージ用のNAS1台である。前述のように、SSDM-Localの機能はデータベース管理・ユーザーインターフェース用のワークステーション(DB)に統合・実装した。

桜島観測所用のSSDMは既存の桜島観測所のネットワーク環境に対して独立性を持たせてアクセスを制限するように設定した。具体的には、新たにルーターを設置してSSDMを独立のセグメントとし、SSDMセグメントの外からはSSDMに制限的にアクセスできるが、内から外に対してはアクセスできないように設定した。

SSDMへの外のセグメントからのアクセスは、次の3つのケースに集約される。

【終了報告書】

- (1) 観測所スタッフによる観測所の京大ネットワーク内からのアクセス、
- (2) 地震観測システムからの地震エネルギーデータの転送、
- (3) 観測所外からのインターネットを通じたアクセス。

既存のネットワークに対して、2 台のワークステーションと 1 台の NAS で構成される SSDM システムを上記のように半ば隔離された形で接続するため、既存のネットワークとの間に新たにルーターを設け、SSDM システムを独立のセグメントとして配置した。

具体的なルーティングを図 2-3-2 に示す。図から分かるように、インドネシア用の SSDM のルーティング、図 2-3-1 とはかなり異なる。

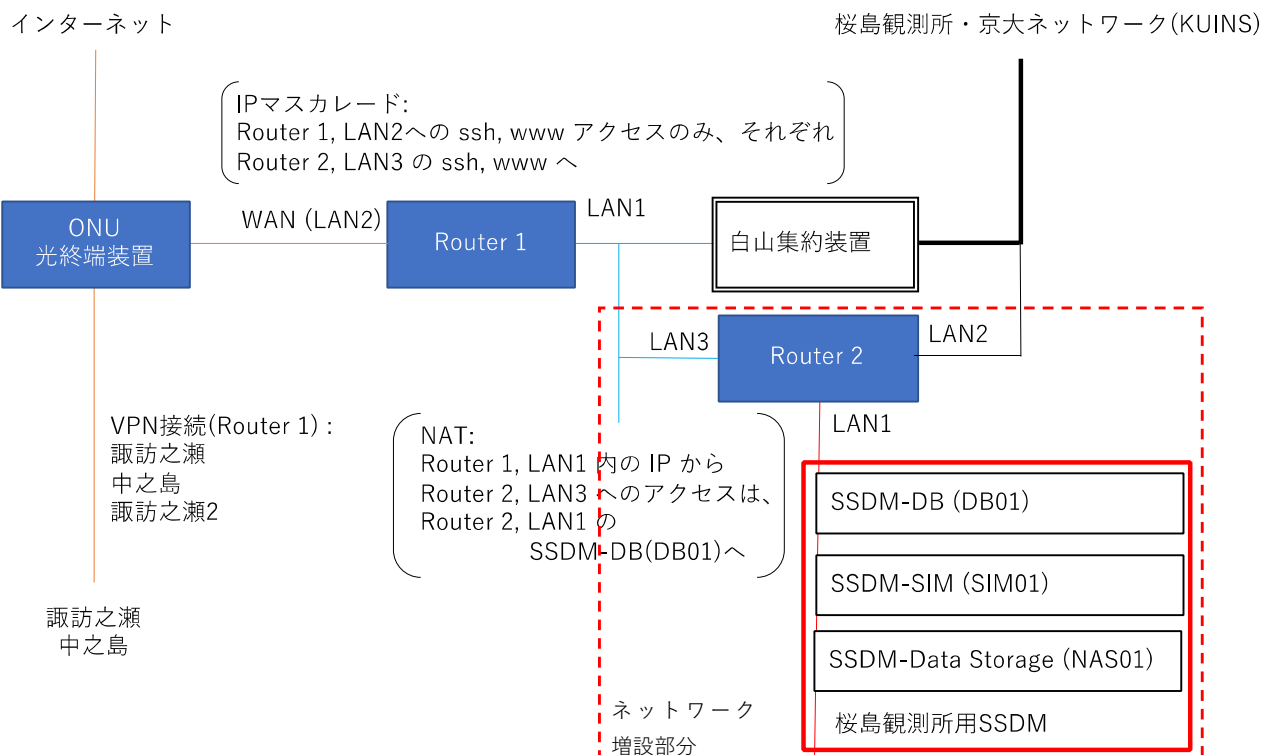


図 2-3-2 桜島 SSDM システムのネットワーク・ルーティング

2 台のワークステーションと 1 台の NAS で構成される SSDM システムは、新たに導入した Router2 を介して観測所の京大のネットワークおよび既存のネットワークに対して隔離された形で接続される。すなわち、SSDM は Router2 の LAN1 のセグメントに配置され、京大のネットワークのセグメントとは LAN2 で、LAN3 で Router1 の LAN1 や白山集約装置などと共通の、京大ネットワークと外のインターネットとの間のセグメントと接続している。

既存のルーティングの特徴として、白山集約装置がある。白山集約装置は観測データを集約しており、ここには、観測データが、桜島観測所内の観測装置からのみならず、観測所外の観測装置からもインターネット経由でリアルタイムに送られてくるため、白山集約装置は観測所の京大ネットワークのセグメントだけでなく、Router1 の LAN1 側のセグメントに接続している。

観測所の京大のネットワークセグメントから SSDM へのアクセスは、Router2 の LAN2 を介し

てのほか、後述のように白山集約装置を介して Router2 の LAN3 を経由することもできる。なお、Router2 の LAN3 へのアクセスは Router2 によって LAN1 を通って SSDM の DB(DB01)へ転送される。

観測所の外からインターネット経由での SSDM へのアクセスは前述のように ssh と www でのみアクセスが許されており、それは、Router1 で、LAN2 (インターネット・WAN 側) からの ssh あるいは www アクセスを Router2 の LAN3 へ ssh あるいは www アクセスとして転送する。Router2 の LAN3 へのアクセスは前述のように自動的に LAN1 を介して SSDM-DB(DB01)に転送され、インターネットからの ssh、www アクセスは、SSDM セグメントの SSDM-DB(DB01)への ssh、www アクセスとしてそれぞれ転送される。

白山集約装置からの SSDM へのデータ転送は、京大のネットワークを介さず、すなわち Router2 の LAN2 を通してではなく、LAN3 を通して実行される。白山集約装置からの SSDM システムへのアクセスと、白山集約装置が京大のネットワークセグメントに接続していることから、京大のネットワークセグメント内から白山集約装置経由で SSDM システムにアクセスすることが可能である。これは、白山集約装置のように、中間セグメントと京大ネットワークセグメントの両方に接続しているデバイスがあれば、それらのデバイス経由でもアクセスが可能であることを示している。加えて、観測所のスタッフは、白山集約装置のような中間セグメントのデバイスに京大ネットワークセグメントからアクセスすることには慣れており、中間セグメント経由での接続も多いものと想定される。

いずれにしても、SSDM への京大のネットワークセグメント外からのアクセスは、京大のネットワークを通ることなく実行される。

このシステム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・方向を組み合わせて作成した。この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による地震であった。地盤変動観測からは妥当な予測噴出物量が出力されたが、いずれも噴出量が少なく、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m³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。

SSDM の運用については、システムとその操作の習熟以外にも課題がある。それは、データベースの更新である。イベントチェーン・シミュレーション・データベースの更新は操作の習熟で可能であるが、元データ、例えばシミュレーションに使う地形データ(DEM)などについてはその更新が重要となる。とりわけ活火山の山頂近くや山腹では地形の凹凸が小さく、谷地形の発達や流域が不明瞭な場合が多く、容易に流域を超えて氾濫するとともに、侵食・堆積による微地形変化が大きく、越流や分流とそれに伴う下流の流域への流量分配の変化が大きい。また、多少でも谷地形が発達すると流れが集中し、侵食が進みより明瞭な谷地形が形成される場合がある。その結果、流れの集中

【終了報告書】

がさらに進み、谷を超えて越流氾濫する量が減少していき、ついには谷地形に沿って流下してゆくようになる。谷地形を流下する規模が大きくなると、その到達距離も伸びる。したがって、妥当なシミュレーション結果を得るためには、少なくとも、適切な地形データを得ることが重要で、そのため、地形データの更新時期や範囲を見定めることが重要となる。

かつて、SATREPS プロジェクト下で、スメル火山のイベントチェーン・データベースの試作を行い、説明のセミナーを開催した。その際、シミュレーション結果は近年発生した火砕流の流下・到達傾向をうまく説明していることに加えて、上記のようなことを説明し、地形データとその更新の重要性を説明した。昨年末、スメルで発生した火砕流がその規模に対して到達距離が大きく、他流域への越流氾濫が見られなかったことは、そのような事例が生じたことを示している。

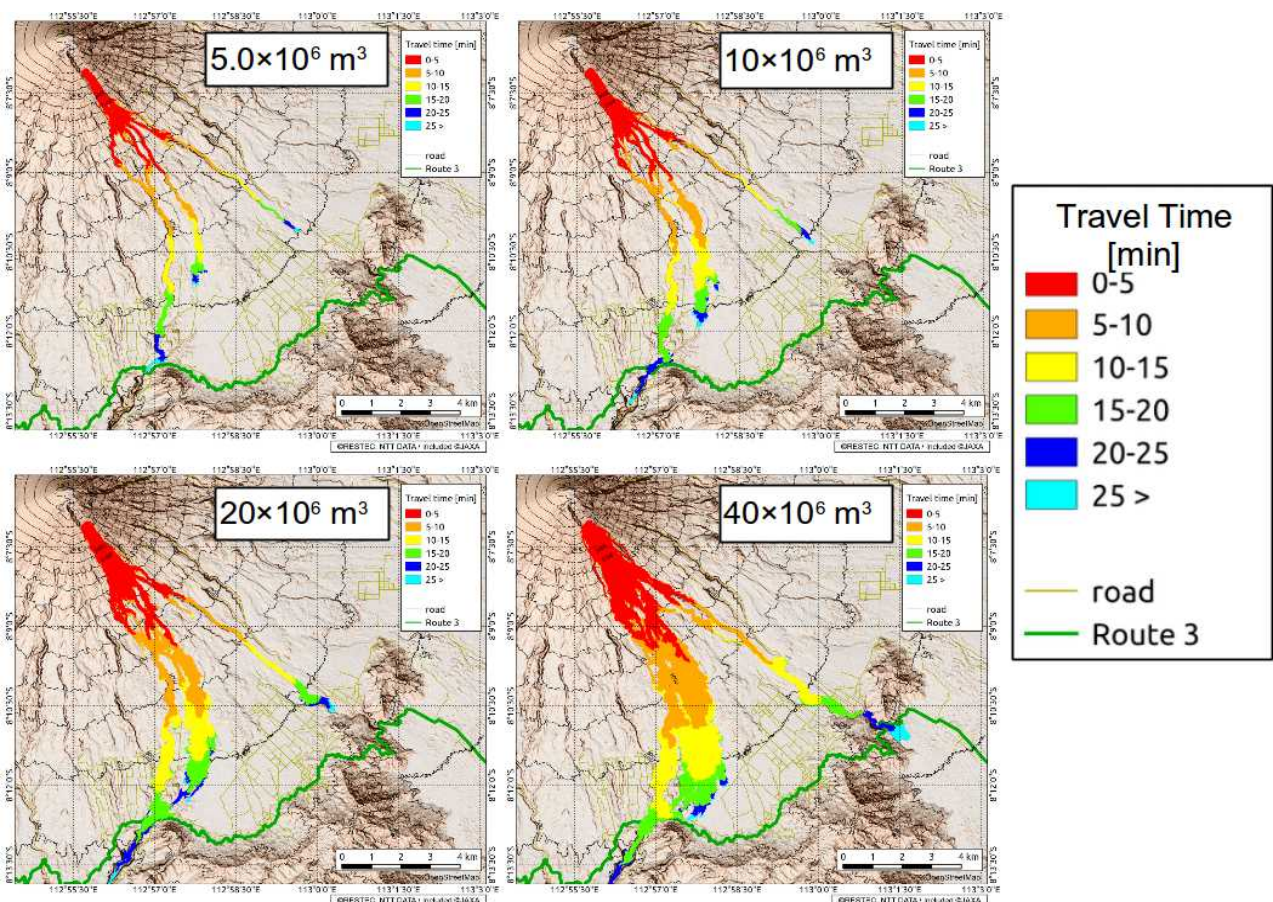


図 2-3-3 スメル火山の火砕流シミュレーションケースと結果 (SATREPS 報告書)

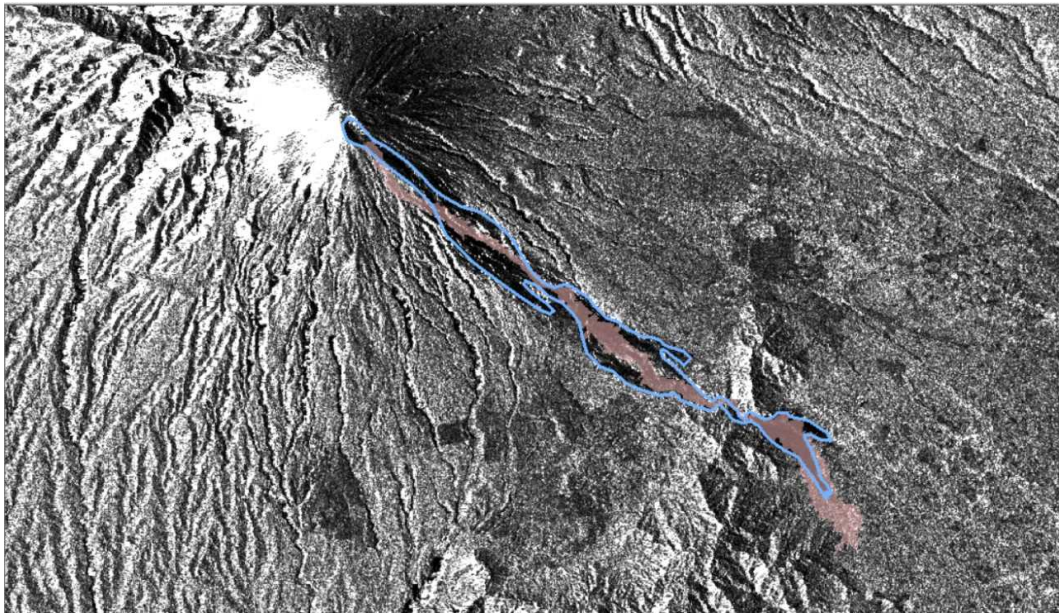


図 2-3-4 火砕流の流下・到達域 (CVGHM)

図 2-3-3 は SATREPS プロジェクトで試作したスメルのイベントチェーン・データベースの火砕流の氾濫・堆積範囲を示したものである。山頂から最も北側の火砕流の流下コースに沿って谷地形が形成されており、火砕流の規模が大きくなるにつれ北側の流路からの越流流量が増加し、特に、1 千万 m^3 を超えると急激に分流流量の割合が増大している様子が見てとれる。

一方、CVGHM によると、昨年末にスメル火山で発生した火砕流の規模は約 600 万 m^3 と推定され、火砕流は図 2-3-4 に示すように国道 3 号線を越えて到達している。図 2-3-3 のシミュレーションでは今回の火砕流規模では国道 3 号線のはるか上流で停止している。その一方で、この程度の規模であってもかなりの量が幅広く越流・氾濫している。この越流のため、もっとも北側の谷地形が形成されている溪流に沿って流下する火砕流規模が小さくなり、国道 3 号線のかかなり上流までしか到達しなかったことが推察される。シミュレーションによると、国道 3 号線まで到達するためには、4 千万 m^3 以上の規模である必要がある。しかしながら、越流氾濫によりかなりの量が北側の沢の外に流出しており、北側の沢を流下した火砕流の体積を知らなければ今回の火砕流の到達範囲を理解することができない。そこで 4 千万 m^3 のシミュレーション結果から、北側の沢を流下した火砕流の体積を見積もってみる。北側の沢を流下した火砕流の体積と越流した火砕流の堆積の比を氾濫面積の比で近似すると、1:10 程度と推定される。すなわち火砕流全体の 1 割程度の 5 百万 m^3 程度が北側の沢を流下したことになる。この値は今回の火砕流の規模(体積)と同オーダーであり、5 百万 m^3 程度の規模の火砕流でも、全量が北側の沢を流下すると国道 3 号線まで到達する可能性があることを示している。これらのことから、このシミュレーションで用いている地形はすでに現状に合わなくなっており、シミュレーション結果は北側の沢では過小評価、より南側の越流した斜面では過大評価となっていることが推察される。氾濫範囲、到達範囲の推定・予測を合理的なものとするには、地形などの元データの更新が重要であり、今回のスメル火山での火砕流は、そのことが示された好例といえる。

加えて、到達距離についていえば、力学的には火砕流の摩擦がその支配的な要因である。摩擦が

【終了報告書】

大きければ到達距離は伸びず、小さければ到達距離が大きくなる。火砕流の材料特性として摩擦(摩擦係数)が等しくても、雨季の火砕流では、乾季に比べ見かけ上摩擦係数が小さくなることが推察される。今回の火砕流が発生したのが雨季にあたることも考慮に入れると摩擦の変化を考慮に入れる必要がある可能性は高い。見かけの摩擦係数が小さくなるメカニズムは以下のようなものである。谷の溪床に土砂が堆積していると、雨季には間隙水が豊富に含まれ、場合によっては表流水が生じていることもある。このような堆積層に高温の火砕流が触れ、さらに、火砕流と堆積土砂が混合すると、表流水や間隙水が瞬時に蒸発し火砕流の粒子間隙を上方に向かって吹上げていく。蒸発した水蒸気の体積は、元の水の体積の約 1,000 倍にもなるため、溪床での急激な水の蒸発は一種の爆発に近い現象となる。水蒸気が溪床から火砕流の間を上方に向かって噴き上がっていくと、火砕流の粒子に上向きの力が働き、その結果、摩擦力が小さくなる。これは、見かけ上の摩擦係数の減少として評価される。減少する割合は、火砕流の温度、粒径、溪床堆積物間隙の含水率などの因子によって左右されるため実際の減少率を予測することは難しいが、条件を定めると推定することは難しくない。その結果、極端な例として堆積層が飽和している場合を想定すると、火砕流と溪床堆積層の土砂の交換速度が大きく水蒸気が効率的に発生すると摩擦係数が 5 割程度は減少することも十分にありうると推定される。

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

システム開発の面からは、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 および SSDM-Local に盛り込むべく、開発・改良を加えるとともに、

【終了報告書】

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)。グントールおよ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が長期化したことによりインドネシアへ渡航できなかったため設置と調整、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。今後、別の予算の獲得を目指し、実現していきたい。

スメル火山における火山構造性地震の活動の低さは、溶岩の低噴出率を反映したものであることがわかった。これを解決するためには、地盤変動観測を強化するとともに、ドローンなどを用いて地表における溶岩ドームの地形変化を頻繁に把握しておく必要がある。また、地形変化の把握は、火砕流などのシミュレーションに必須である。

本提案研究課題は、SDGs のうち、「目標 11 (持続可能な都市) 包摂的で安全かつ強靱(レジリエント)で持続可能な都市及び人間居住を実現する)」に関係するものである。我が国においては御嶽山噴火以降、火山災害は火口周辺の被害として矮小化されがちであるが、日本およびインドネシアのような人口密度の高い国においては火山と都市の問題ととらえるべきであり、桜島と鹿児島市、メラピ火山とジョグジャカルタ特別区の関係がその典型例として挙げられる。本研究により、降灰予測に基づく、効果的な降灰除去手順の検討や、都市域への土石流等の土砂の突入や洪水に対するハード的な河川域の強靱化や、土砂流出予測に基づくソフト的な避難計画の立案などへの貢献が見込まれる。

SATREPS では監視機関本所の研究者レベルへの実装を目指した。しかし、火山監視の現場は火山近くの観測所であり、緊急時には観測所職員による警報の発表も監視機関の警報運用に定められている。このことを考えると、現場の実務者レベルの実装を考える aXis は有効といえる。

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

【終了報告書】

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。

(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。ネットワーク環境を整えば、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機関の状況に加えて、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。また、システムの操作マニュアルの整備も同時に行なった。

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り、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。

加えて、インドネシアでの社会実装の支援を念頭におきながら、我が国での社会実装も進めつつ課題を抽出するため、九州南部 7 火山を対象に、観測所用の SSDM システムを導入した。導入にあたっては観測所のネットワーク環境に合わせてシステムの改良を行った。また桜島用 SSDM システムを用いて桜島の最近の観測に基づく試験を行い動作の確認と結果の評価を行ない、試験

【終了報告書】

運用に資することができることが確認された。

この実証試験からシステムの持つ普遍性が示され、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ることが示された。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、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、一定の運用がなされているが、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
2021	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放出火山灰料推定と噴煙到達高度の検討、日本火山学会2021年秋季大会学術講演会、オンライン形式、2021年10月22日	口頭発表

招待講演 0 件
口頭発表 3 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

0 件