

## 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

### Integrated Study on Mitigation of Multimodal Disasters Caused by Ejection of Volcanic Products

井口正人・中道治久・中田節也<sup>(1)</sup>・宮本邦明<sup>(2)</sup>・大石 哲<sup>(3)</sup>・藤田正治

Masato IGUCHI, Haruhisa NAKAMICHI, Setsuya NAKADA,  
Kuniaki MIYAMOTO, Satoru OISHI and Masaharu FUJITA

(1) 東京大学地震研究所

(2) 筑波大学大学院生命環境科学研究科

(3) 神戸大学都市安全研究センター

(1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(2) Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba

(3) Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

#### Synopsis

As archipelago country, Indonesia contains over 127 active volcanoes. Volcanic eruptions produce many kinds of material, such as volcanic ash, pyroclastic flow and lava flows. The volcanic products completely destroy their deposit area and volcanic ash is widely dispersed beyond borders of countries. In addition, deposited volcanic ash induces lahars triggered by heavy rain and the lahars cover not only neighboring of volcanoes but also distant place from the volcanoes. Furthermore, the slope of volcanoes is eroded by the lahars and multimodal sediment disaster is induced such as shallow landslide, deep landslide, flush flood and so on. Indonesia is one of the highest risk countries, which are suffered by such multimodal disasters generating by volcanic eruptions. We are conducting a project "Integrated study on mitigation of multimodal disasters caused by ejection of volcanic products" under SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) to solve the problems. (1) Total observation system to mitigate multimodal disasters induced by volcanic eruptions. The total system is composed of instruments to monitor ground movement of volcanoes, weather and sediment movement. X-band MP radar is a core part of the system and is used for monitoring not only local heavy rain but also volcanic ash cloud. (2) Early warning system of volcanic eruptions based on prediction and real-time estimation of discharge rate of volcanic products. (3) Early warning system of multimodal sediment disaster. The main engine of the system is an integrated GIS based simulators for multimodal sediment, such as pyroclastic flow, lava flow, mud flow, flush flood and so on. (4) Early warning system of volcanic ash. A threshold level for the early warning will be proposed. (5) Finally above mentioned system will be integrated into Support system of decision making for mitigation of multimodal disasters.

**キーワード:** 地球規模課題対応国際科学技術協カプログラム, インドネシア, 火山噴火, 噴火発生予測, 土砂災害, 航空機安全, 意思決定支援システム

**Keywords:** SATREPS, Indonesia, volcanic eruption, forecasting volcanic eruption, sedimentary disaster, aviation safety, Support system for decision making

## 1. はじめに

火山噴火はいったん発生すれば、その噴出物である火砕流、火山灰の堆積、溶岩流などによって堆積域を壊滅的に破壊し、多くの犠牲者を出すだけでなく、大気中を浮遊する火山灰は国境を越えて拡散し、多額の経済的損失をもたらす。2010年アイスランドのエイヤフィヤトルヨークトル火山の噴火はヨーロッパの航空網を停止させた(安田・他, 2011)。また、一旦堆積した火山灰や軽石などもその後の降雨などによって土石流・泥流となり、火山近傍はもとより、河川に沿って火山から遠く離れた地域までを土石流で覆ってしまう。1985年コロンビアのネバド・デル・ルイス火山の噴火では融雪泥流により山頂から40kmも離れたアルメロで25,000人が犠牲となった(Pierson et al., 1990)。さらに土石流は過去に堆積した噴出物までも表層崩壊や深層崩壊により浸食させ、土砂災害の拡大を招く。火山噴火による噴出物がもたらす土砂移動現象の複雑さとそれに起因する災害についてFig. 1にまとめた。このような複合土砂災害は、噴火活動の活発な環太平洋地域はもとより欧州、アフリカ、カリブ海地域など活火山を有する地域でもどこでも起こりうることであり、地球規模課題として抜本的な対策が求められる。

この課題の解決のために当たっての科学技術上の問題は以下のように4項目に集約できる。

1つ目は人的被害を防止するために火砕流等の直接的な噴出物を避難行動によって回避する際に生じ

る問題である。火山噴火は開始時点で小規模なものであっても、その後、異なる噴火様式へ移行、あるいは噴火規模が爆発的に増大することはよくあることであり、すみやかに避難区域の拡大などにより防災対応を拡充・高度化させなければならないが、噴火活動の発展過程はいまだに解決されていない。

2つ目は噴出物の多様性の問題である。山体に堆積する噴出物は火山灰、火砕流、溶岩流などであり、その流動のメカニズムが異なる。さらに崩壊により生じた堆積物やそれによる河床変動が土砂流動を複雑にする。個々の形態の噴出物の移動について予測できても、複合的な移動形態についての研究が進んでいない。

3つ目は噴火発生後の土砂移動は降雨によって引き起こされることが多いが、世界的に気候変動が進んだ結果、異常な降雨によりこれまでの経験を超えた土砂災害の危険性が高まっている。

4つ目はこれまでの研究分野の問題である。我が国はこれまで多くの火山噴火と土砂災害を経験し、火山噴火予測に関する研究と土石流、斜面崩壊などの研究とその対策技術が発展してきた。火山噴火予測における研究ではその直前現象を捕捉し、発生する噴火の様式と規模を予測しているが、それらが即時的に災害予測に活用されることはなかった。一方、土砂災害に関する研究では、災害原因となる土砂が堆積していることが研究の出発点であった。しかし、火山噴火は長期間にわたることもあり、その間に降雨量等の土砂災害誘発原因も時々刻々と変化するも

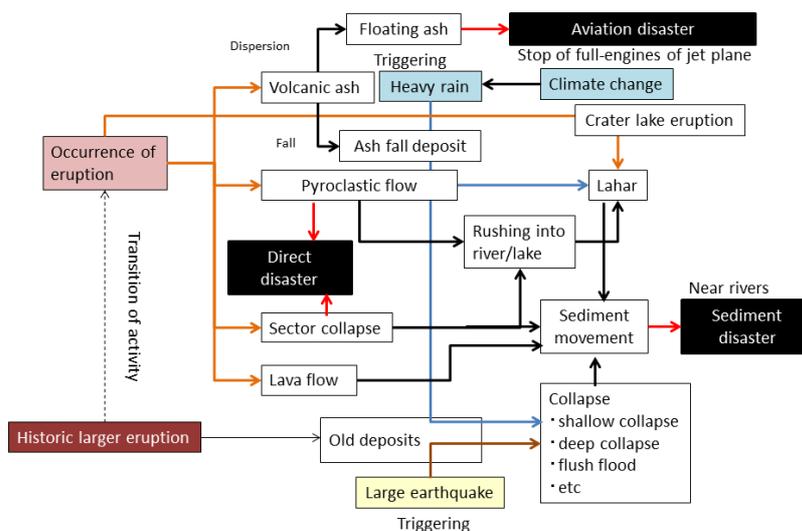


Fig. 1 Disaster induced by volcanic eruptions

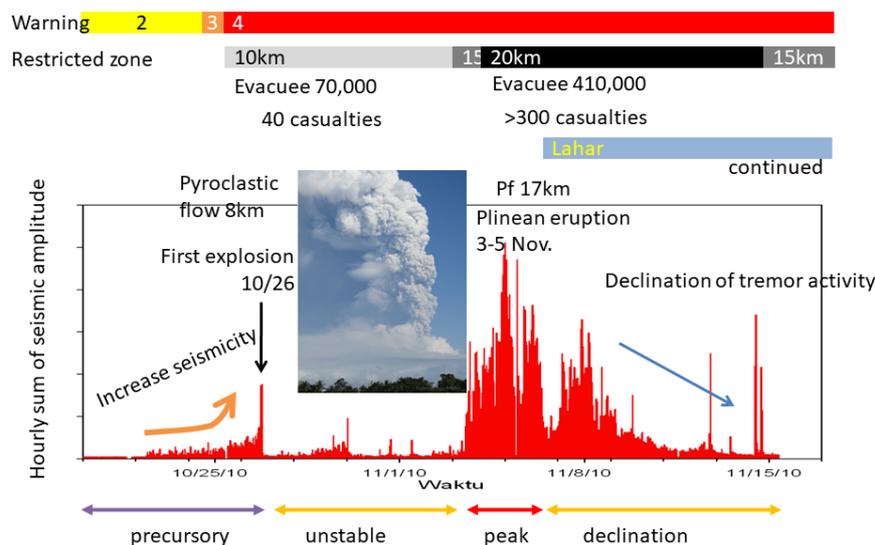


Fig. 2 Process of volcanic phenomena and disasters due to eruption in 2010 at Merapi volcano

のである。山体崩壊、火口湖における噴火、火砕流の河川や湖への突入は噴火発生と同時に土砂災害を引き起こす。このことは、火山噴火発生後に土砂災害の研究をはじめても手遅れになる可能性があることを意味する。また、発生する土砂災害の規模や航空機の安全運航のための火山灰粒子密度は火山噴火の強度に根本的に依存するにもかかわらず、これまでの多くの研究では、土砂移動メカニズムと大気中での移流の問題としてしか扱われていない。

以上のことから、火山活動の推移予測を高度化させ、複合的な土砂移動を予測する手法を開発したうえで、火山噴出物の放出率を入力条件とした土砂移動現象の予測を行い、それに基づいた災害対策について研究する必要がある。地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) の防災分野に火山噴火予測と土砂災害予測・火山灰拡散予測の研究を融合した研究計画「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」を申請したところ、2013年度に採択された。2013年度の暫定研究期間を経て、プロジェクトを2014年度から2018年度まで実施する予定である。本稿では、プロジェクト実施の最終年度を迎えるにあたり、プロジェクトの目的、実施体制、2017年度までの主要な研究成果について述べる。

## 2. インドネシアの火山噴火と災害

インドネシアには127の活火山があり、1年に10火山程度が噴火している。異常豪雨などの常襲地域である同国では、噴火後に多様な土砂移動現象が発生し、しばしば甚大な土砂災害に見舞われてきた。特に、人口密度の高いジャワ島では火山周辺にも多くの住民が居住し、過去に大規模な火山災害が発生し

たことから、火山噴火に起因する災害に対しての総合的な防止対策への期待が高い。

ジャワ島の中部にあるメラピ火山では、山頂に溶岩ドームが形成され、その崩落による火砕流が数年おきに繰り返されてきたが、2010年10月～11月に発生した火山噴火は140年ぶりの大規模噴火であっただけでなく、複雑な噴火活動の推移を示した (Surono et al., 2012)。火山活動の推移をFig.2に示す。10月26日の最初の爆発では、先行する火山性地震の群発と山頂付近の地盤の急速な膨張が観測されたため、インドネシアの火山活動の監視官庁であるエネルギー・鉱物資源省地質庁火山地質災害軽減センター (CVGHM) は10月25日早朝に山頂から10km以内を対象に避難を勧告するAwesの警報を発表し、約7万人の住民が避難した。翌10月26日17時に山頂の溶岩ドームを破壊する爆発が発生し、火山噴火予知と避難は成功した。これまでの噴火活動ではこれで終わるのであるが、2010年の噴火活動はさらに大きな進展をみせた。11月3日から5日にかけて、10月26日の爆発で開口した火口から噴出した火山灰は10km上空まで達し、最大17kmの距離にまで流下した火砕流により300名以上が犠牲となった。また、放出された噴出物量も1億立方メートルを超えるものであった。後続した噴火活動については顕著な前兆現象は検出されず、噴火活動の発展過程の予測の難しさを改めて浮き彫りにした。この危機的な状況においてインドネシア政府は大使館を通じて日本政府に火山専門家の派遣を要請したようにこの問題についてのニーズは高く、日本政府も本稿の筆頭著者である井口・他3名をJICA国際緊急援助隊として派遣した。その後、雨季に入ると、火砕流と火山灰が厚く堆積した南南東のGendol川および南西のPutih川に沿って土石流

が頻繁に発生するようになってきた。特に、火砕流の堆積した南部ではこれまで洪水の少なかった河川でも橋梁が破壊されるなど多くの災害が発生した(藤田・他, 2012)。

火山噴火の発生とその後の長期間にわたる土砂災害の発生はインドネシアの多くの火山においてみられる。噴火活動が継続的なスメル火山(Iguchi et al., 2008)や20~30年おきに噴火が繰り返されるケルト火山の下流域においてはしばしば土砂災害が発生する。また、1919年のケルト火山の噴火は火口湖から噴火が発生し、噴火の発生と同時に土石流が発生し、5160人が犠牲となった(Badan Geologi, 2011)。1990年のケルト火山の噴火では多量の火山灰が火山周辺に堆積し(Bourdier et al., 1997)、それによる河川への影響は今でも残っており、特に、ブランタス川流域では頻繁に洪水が発生している。さらに、現在活動中でなくても火山噴出物からなる山体は崩壊を起こしやすい。2004年にはスラウェシ島のジェネベラン川源流にあるパワカラエン山において豪雨による大規模な崩壊が発生し、2億5千万m<sup>3</sup>にも及ぶ土砂が流出し、死者・行方不明者は32名に達した(Yamakoshi et al., 2008)。約40km下流には、ピリピリダムがあり、堆砂問題を含めて大規模崩壊発生後の土砂管理が問題になっている。

火山灰の拡散の問題もインドネシアではきわめて深刻である。1982年に発生した西ジャワのガルングン火山の噴火は英国航空のB747型機のジェットエンジンをすべて停止させ(小野寺・他, 1997)、世界中の航空関係者に火山灰の脅威を最初に知らせた出来事であった。また、2010年のメラピ火山の噴火では国際線を含む多くのフライトがキャンセルされるか到着空港の変更を行った。さらに、2017年11月のバリ島のアグン火山噴火ではデンパサール国際空港が閉鎖されたため、長期間にわたってバリ島の観光業は打撃を受けた。

### 3. プロジェクトの目的

インドネシアでは火山噴火の早期警戒とそれに起因する土砂災害の防止軽減に関する両方のニーズが高い。また、噴火により放出された火山灰は国境を越えて大気中を拡散するので、グローバルな問題でもある。本研究課題ではこのような火山噴火が引き起こす一連の連鎖的災害の防止と軽減を目的とする。災害の防止と軽減には政府と地方自治体があたるが、そのための災害対策を立案するために有効な複合土砂災害対策意思決定支援システム(SSDM, Support System of Decision Making)を構築する。これには、リアルタイムハザードマップや警戒避難システムへ

の情報提供が期待される。SSDMは、総合観測システム、火山噴火早期警戒システム、統合GIS複合土砂災害シミュレータ、浮遊火山灰警戒システムからなり、それぞれは以下の目的を持つ。

1) 総合観測システムは地盤変動センサー、XバンドMPレーダー、水文センサー群からなるが、これらは土砂災害を誘発する基本量を把握するために設置される。

2) 火山噴火早期警戒システムは、火山活動推移モデルと火山灰放出率の現状把握と予測に基づいている。これは、火山情報発表責任機関であるCVGHMが発表する噴火警報レベルに即時的に活用されることを目的とする。

3) 統合GIS複合土砂災害シミュレータは、1)、2)のデータをもとに、土砂移動現象を予測するものである。統合GIS複合土砂災害シミュレータは、SSDMの中核となるものであり、リアルタイムハザードマップや警戒避難システムへの情報提供を目的とする。

4) 浮遊火山灰警戒システムは、航空機の運航の安全確保を目的とする。

本研究課題の最終目標は、「火山噴火早期警戒システム、統合GIS複合土砂災害シミュレータ、浮遊火山灰警戒システムが統合してSSDMとして動作し、業務官庁等に対して情報提供できる状態にある」ことである。

### 4. プロジェクトの実施体制

自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点である防災研究所は火山災害の複合性にも対応できるので、本プロジェクトにおいても代表機関として研究を推進した。先に述べた目的を達成するために5つの研究グループを組織した(Fig.3)。グループ1は総合観測システムを設置し、観測を継続することを目的とする。火山観測、水文観測、レーダー観測を行う3つのサブグループから構成される。グループ2は地質調査から火山活動推移モデルを構築し、グループ1の総合観測システムが提供する地震と地盤変動データに基づいて火山灰等の放出率の現状把握と噴出物量の予測を行う火山噴火早期警戒システムを担当する。グループ3はグループ2が提供する噴出物量の予測値やグループ1の総合観測システムが提供する雨量や水位データ土砂移動現象を予測する統合GIS複合土砂災害シミュレータの開発を行う。グループ4はグループ2が提供する火山灰の放出率のリアルタイム評価値を初期値として気象モデルに基づいて火山灰の拡散範囲を予測するとともに、レーダーを用いて火山灰の拡散範囲や濃度を評価する。グループ5はグループ1から5が出力する値を統合化した

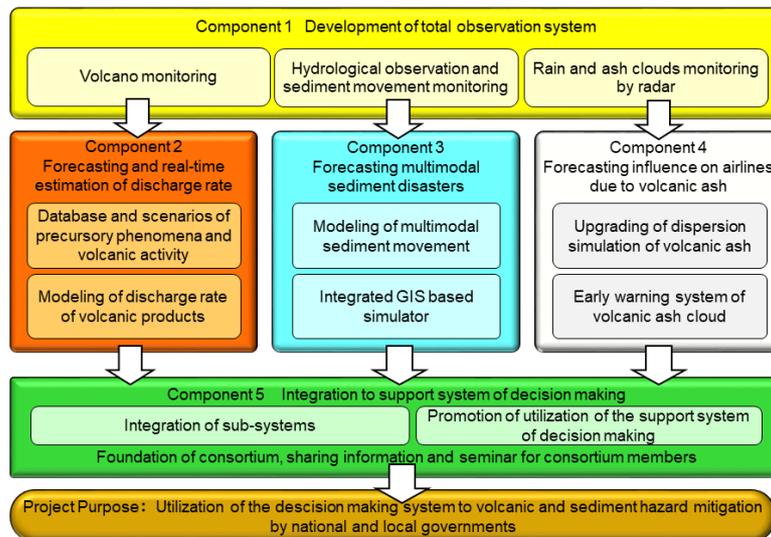


Fig. 3 Configuration of groups to conduct the project

SSDMを開発するとともに、国や地方自治体の防災担当者にその利活用を働きかける。

各グループのリーダーは以下の通りである。

研究代表者：井口正人（防災研究所）

グループ1リーダー：中道治久（防災研究所）

グループ2リーダー：中田節也（東京大学）

グループ3リーダー：宮本邦明（筑波大学）

グループ4リーダー：吉谷純一（防災研究所），2015

年に大石哲（神戸大学）に交代

グループ5リーダー：藤田正治（防災研究所）

上記の機関以外の参加機関は以下の通りである。

グループ1：新潟大学など

グループ2：東北大学，富士山科学研究所など

グループ3：立命館大学など

グループ4：鹿児島大学など

グループ5：三重大学など

一方、インドネシア側では火山活動および噴火の警報情報についてはエネルギー・鉱物資源省が発令し、土砂災害の防止軽減対策については公共事業省が中心となって進めている。また、土砂災害対策の研究についてはメラピ火山に近いガジャマダ大学など多くの大学が進めている。防災研究所はエネルギー・鉱物資源省地質庁とは1993年からの共同研究の実績があるので、その傘下のCVGHMをインドネシア側の代表機関とした（研究代表者：Kasbaniセンター長，プロジェクト開始時はMuhamad Hendrastoセンター長）。CVGHMは主にグループ1および2を構成する。公共事業省水資源研究所傘下のBalai Saboはメラピ火山近くのジョグジャカルタに砂防実験所を持っているので、ガジャマダ大学とともにグループ3を構成する。火山灰の拡散についての情報発表は気象気候地球物理学庁が担当しているため、同庁がグループ4

を構成する。ガジャマダ大学のDjoko Legono教授は、メラピ火山周辺の地方自治体やNGOなどと太いパイプがあるので、グループ5のリーダーとなり、CVGHM傘下の火山観測技術開発センター（BPPTKG）とBalai SaboがSSDMの利活用を推進する。インドネシア側ではガジャマダ大学を除き、省庁に属する研究者が中心メンバーとなっているのは、プロジェクトの最終成果の実装を見据えたものである。

## 5. プロジェクト実施期間中の火山活動

本プロジェクトでは、まず、グントール、ガルングン、メラピ、ケルト、スメルジャ島の5火山を研究対象とした（Fig.4）。

グントール火山は、防災研究所がインドネシアの地質庁と共同研究の協定を1993年に締結した後、最初に連続観測を着手した火山である（井口・他，1996）。1847年の噴火を最後に170年間噴火が発生していないが、火口からわずか3kmの距離に居住地域と観光地があるために極めてリスクの高い火山である。火山構造性地震の発生頻度が高く、地震の群発が活動火口のGunturから山頂のMasigitにかけての地震帯において数年おきに繰り返されている（Sadikin et al., 2007）。1998年，2011年には有感地震も発生した。2013年9月には332回の地震が発生したが、その後減少傾向にある。

ガルングン火山は、VEI（Newhall and Self, 1982）4級の大規模噴火を100年弱の間隔で繰り返している（Badan Geologi, 2011）。最後の噴火は1982年でVEIは4であった。この噴火により放出された火山灰雲に英国航空のB747型機が突入し、ジェットエンジンがすべて停止した（小野寺・他，1997）。火口湖を形成



Fig. 4 Location of target volcanoes in this project. The volcanoes are indicated by red triangle.

しており、噴火が発生すれば、ラハールが発生する可能性が高い。2011年5月には火山性地震の発生回数が70回まで増加し、火口湖の水温も上昇し、一時的に活発化した。その後、火山性地震の発生回数は減少し、2017年はわずか6回の地震しか発生していない。

メラピ火山はジャワ島において最も活動的な火山の1つで、数年おきに山頂に溶岩ドームが形成され、ドームの崩壊により火砕流が発生する。2010年10月～11月の噴火は、1872年以来のVEI4の大規模噴火であり、火山灰は10km上空まで達し、火砕流はGendol川に沿って最大17kmの距離にまで到達した (Surono et al., 2012)。本プロジェクトにおいて最も重点的に研究計画を実施する火山である。2013年と2014年には水蒸気噴火が発生した。2018年5月11日から水蒸気噴火が繰り返されるようになり、6月1日までに12回の噴火が発生した。

ケルト火山は15～40年の間隔でVEI4級のプリニー式噴火を繰り返している (Badan Geologi, 2011)。代表的な噴火は1901年、1919年、1951年、1966年、1990年に発生した。山頂に火口湖が形成されているので、噴火に伴いラハールが発生する。1919年の噴火では5160人が犠牲になった。2007年には山頂の火口湖の中に溶岩ドームが形成された (井口・森田, 2009)。2014年2月13日に発生したプリニー式噴火は溶岩ドームを完全に破壊し、噴煙は17kmの高度に到達した。また、火砕流も発生し、西側に3.5km流下した (Maeno et al., 2017)。火山灰は主に西方に拡散し、ジャワ島の6つの空港が1週間にわたり閉鎖された。また、噴火発生後はラハールが頻繁に発生した。

2007年の噴火はeffusiveであり、溶岩の噴出量も

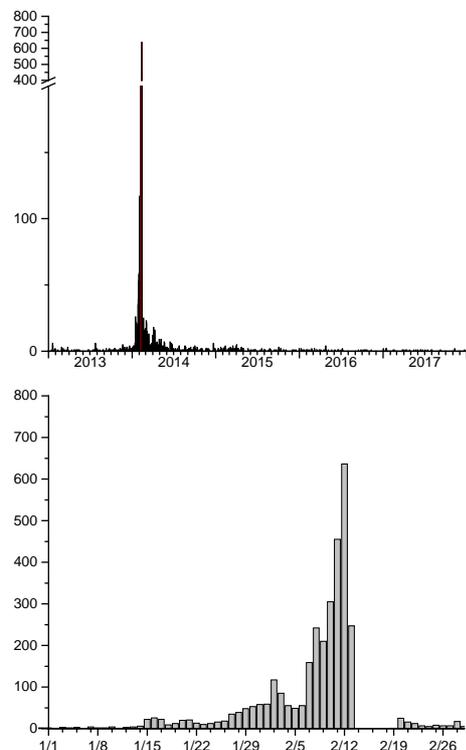


Fig. 5 Daily number of volcanic earthquake at Kelud volcano from 2013 to 2017 (top) and during the crisis from January 1 to February 28 in 2014 (bottom).

2700万 $m^3$  (石原・他, 2011) と少なかったため、プロジェクト実施期間中に噴火が発生する可能性は高いとして準備を進めてきたが、2014年噴火が発生したのは暫定契約期間中であり、残念ながらプロジェクトで投入する予定機材は間に合わなかった。

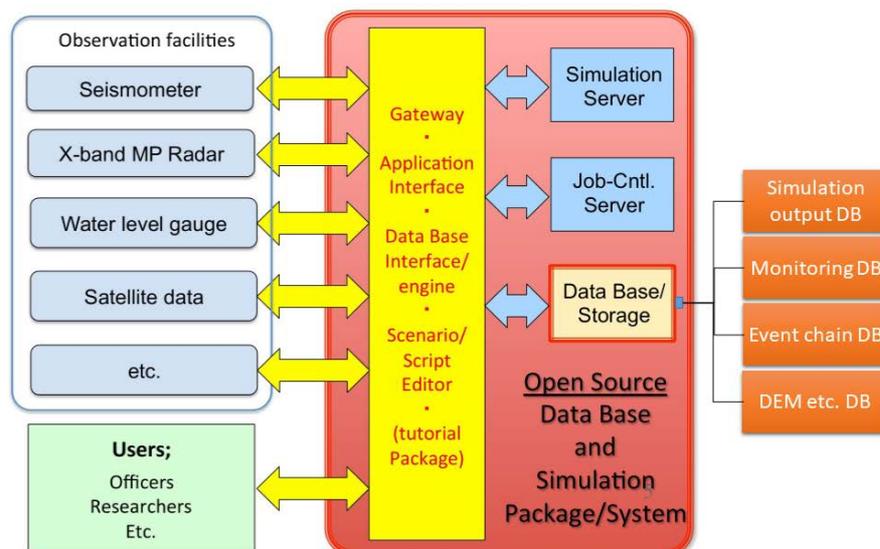


Fig. 6 Outline of Support System of Decision Making (SSDM)

2014年2月13日噴火に先行して1月中旬から地震活動が活発化し、2月1日にレベル2、2月11日にレベル3、噴火発生の90分前にレベル4に引き上げられ、避難が始まった。Fig.5に火山性地震の目録回数を示す。噴火直後は地震の発生回数は多かったが、その後、徐々に減少し、2017年には29回の地震しか発生していない。

スメル火山はジャワ島の最高峰(3657m)であり、活発な噴火活動を続けている。時々火砕流が発生し、1994年2月の噴火では7人が犠牲となった(石原・他, 1995)。ラハールの発生も多い(Starheim et al., 2013)。2009年4月までは火山灰を含んだ小規模なブルカノ式噴火を15分程度の間隔で繰り返してきたが、数か月の静穏期を挟んで2009年9月からは山頂のJonggring Seloko火口内において溶岩ドームが成長するようになった。溶岩ドーム成長期の活動は、火山灰を少量しか含まない小規模な火山ガス放出現象である。このような噴火は2015年以降、1日100回程度の割合で繰り返されている。2015年までの火山性地震の発生回数は少ないが、2016年以降、増加傾向にある。

これらジャワ島の5火山に、北スマトラのシナブン火山を研究対象火山に2017年に加えた。シナブン火山の噴火活動が活発化したまま継続し、土石流が頻発したためである。シナブン火山は2010年8月に有史以降、初めての噴火が発生した(Iguchi et al., 2011)。2010年には水蒸気噴火が7回発生した。静穏期を経て2013年9月には噴火活動が再開した。9月の噴火は水蒸気噴火であったが、11月ごろから火山灰に新鮮なマグマ物質が混じるようになり、12月には山頂に溶岩ドームが形成された。2014年1月には溶岩ドームが

崩落して火砕流が頻発するようになり、溶岩としても流出した(Nakada et al., 2017)。

2015年11月頃までは溶岩ドームの崩落型の火砕流が大半を占めていたが、2015年12月ごろからは、火砕流の発生を伴わず噴煙柱のみが上昇する噴火が頻発するようになった。噴煙高度は山頂から2000~5000mの高度まで到達するが、爆発音はほとんどなく山頂から8km離れた観測所ではマイクロホンで検出できないレベルである。この時のマグマ噴出率は0.5 m<sup>3</sup>/s以下である。この間、溶岩ドームは山頂部で成長と崩落を繰り返すために、体積はほとんど変化しなかった。また、2018年2月19日には、2013年からの活動で最大規模の爆発的噴火が発生した。溶岩の化学組成は、2月19日の噴出物も含めて、爆発期以前とほとんど変化がない。通常の溶岩ドーム噴火と異なり、噴出率低下後も爆発的イベントが起こるのは、火口を覆う溶岩の荷重が十分でないために起こると推定された。また、この時に大きな溶岩ドーム崩壊による急減圧が起こると規模の大きな爆発的イベントも起こりうるものと考えられる。

## 6. 複合土砂災害対策意思決定支援システム(SSDM)

SSDMはデータを取得するための総合観測システム、火山噴火早期警戒システム、統合GIS複合土砂災害シミュレータ、浮遊火山灰警戒システムを統合した総称であるが、その中枢はFig.6に示すようなシミュレーションサーバー、ジョブコントロールサーバー、データベース及びインターフェースから構成される。シミュレーションサーバーは火砕流の流動、

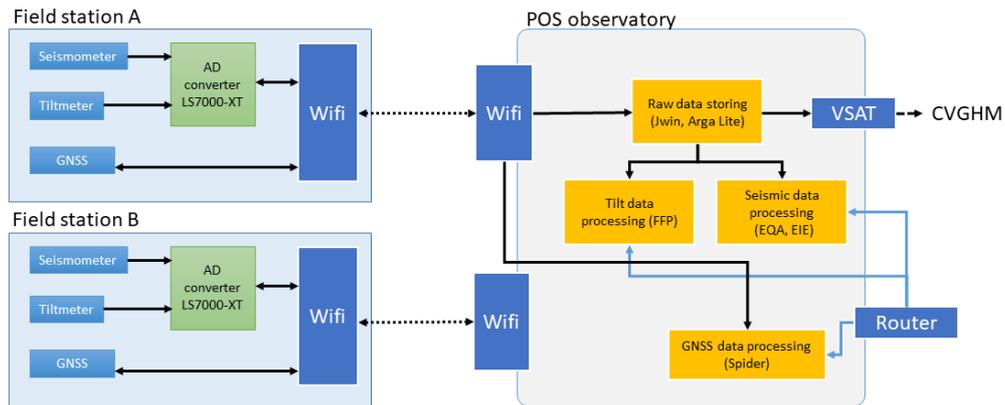


Fig. 7 Volcano observation system and real-time data analysis

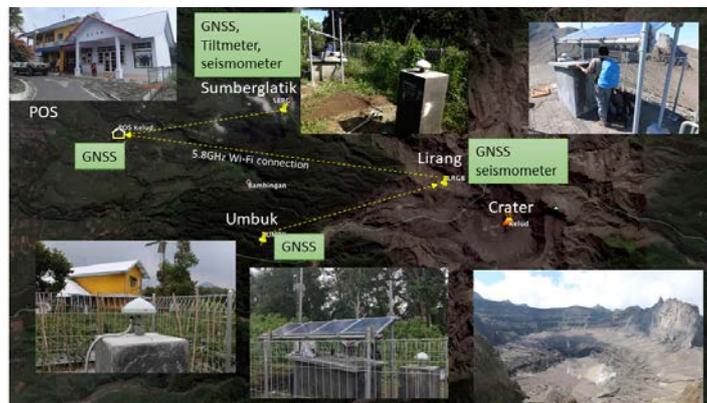


Fig.8 Installation of instruments at field stations

ラハールの流動など個別の事象のシミュレーションを実行するシミュレーションエンジンから構成される。データベースは総合観測システムから送信される観測データ、それを解析した結果のデータ、シミュレーションエンジンによってシナリオに基づき事前に火砕流の流動やラハールの氾濫域がシミュレーション結果としてまとめられたプレアナリシスデータ、火砕流やラハールの発生などを個別イベントとし、それらを事象発生の変遷として結合させたイベントチェーンデータベース、および地形等のシミュレーションエンジン稼働のために必要なデータから構成される。イベントチェーンにおける1つのシミュレーションの結果を次のシミュレーションの入力として順次、イベントチェーンを実行していくのがジョブコントロールサーバーである。インターフェースの主な機能は、観測データの受信、シミュレーションエンジンやデータベースとのやり取り、グラフィカルインターフェースを含むユーザーとやり取りである。

Fig.6に示したSSDMの中核装置はCVGHMの本所(バンドン)とその傘下でメラピ火山の監視に当た

るBPPTKG(ジョグジャカルタ)に設置されており、関係する機関からサーバーにアクセスし、データを取得したり、シミュレーションを行うことが可能である。

## 7. 総合観測システム

### 7.1 火山観測システム

主に地震計、傾斜計及びGNSSにより構成される火山観測システムをプロジェクトの対象火山すべてに設置した。火山活動監視を義務とするCVGHMは、プロジェクトの対象とする火山ではいずれも4点以上の地震計を設置して火山性地震の震源位置を決定ができる体制をもつが、いずれもFM無線伝送によるアナログシステムであり、振幅の大きい振動では振り切れてしまい、地震動の規模を算出できない。本プロジェクトでは、地震動が振り切れないようにデジタルシステムを構成した。システムの概要をFig.7に、観測点の設置状況をFig.8に示す。データ伝送にはWi-Fi(5.8GHz帯)を使用した。地震計(1Hz、3成分)及び傾斜計(Jewell製、701-2)の信号はデータロ

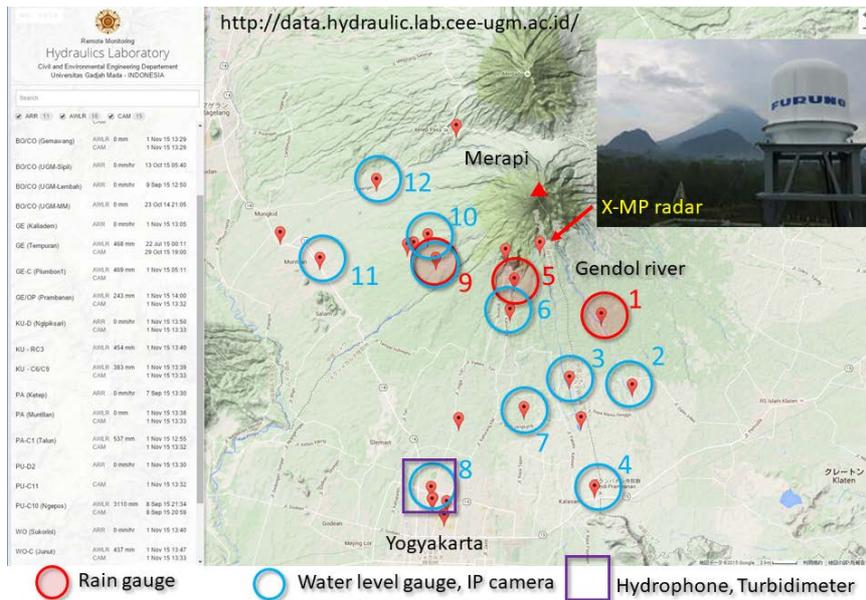


Fig. 9 Hydrological observation system at Merapi volcano

ガー (白山工業株製, LS7000XT) により100Hz, 24bitの分解能でデジタル化され, WINフォーマットの packets が観測所へUDP/IP伝送される. データはCVGHMが開発したArga Liteまたは本プロジェクトでpacket落ちの防止と多点への転送のために開発した地震データ伝送収録システム (JWin) によりデータファイルとして保存される. 地震データについては本プロジェクトで開発したEQAにより, 振動エネルギーやスペクトルが自動解析され, さらに火山灰相当量が算出される. 火山性地震を用いた噴火切迫度評価装置 (EIE) の導入も進めた. 傾斜計データについてはFFPにより平滑化処理が行われる. また, GNSS (Leica Geosystems, GR10またはGR30) のデータはTCP/IP接続により, 観測所に設置したデータ解析装置に収録され, GNSS Spider (Leica Geosystem) により自動基線解析が行われ, RIP (Geosurf) により基線解析結果が表示される. 解析されたデータはSSDMに自動転送される.

## 7.2 水文観測システム

メラピ火山を源流とするWoro, Gendol, Kuning, Boyong, Code, Putih, Pabelanの7つの河川の上流, 中流, 下流域に雨量計, 水位計, 流砂量計 (濁度計・ハイドロフォン), IPカメラから構成される観測点を整備した. メラピ火山の水文観測網に含まれる観測点の位置をFig.9に示す. これらのデータはガジャマダ大学の以下のサイトに掲載されている.

<http://data.hydraulic.lab.cee-ugm.ac.id/>

さらに, シナブン火山における土石流モニタリングのためにタイムラプスカメラを, 2017年8月にBorus川沿いの4地点 (下流からGurkinayan, Gamber,



Fig.10 X-band MP radar at POS observatory of Sinabung volcano

天然ダム上流, Sukanalu) に設置した. 火砕流の流下範囲にあるGamberと天然ダム上流地点は, 立ち入りが制限されるため, 間欠的にしかデータが取得出来ないが, GurkinayanとSukanaluでは連続的にデータが取得出来ている. 両地点ともに, 2018年2月19日の噴火後に比較的大きな規模の土石流が頻発し, 河床が上昇した. Sukanaluでは, 3月1日の土石流の発生後著しく河床が上昇した. これは, Cam4の地点の下流にある天然ダムの背水の影響ではないかと推測される.

## 7.3 レーダー観測システム

小型Xバンド二重偏波ドップラ気象レーダー (古野電気製, WR2100) をメラピ火山の南麓およびケルート火山の北東麓に設置し, 降雨観測をした. 気象レーダーは火山灰雲も検知できることが知られており (Maki et al., 2016), これらのレーダーによる雨雲と火山灰雲の検知技術の改良に反映させるために,

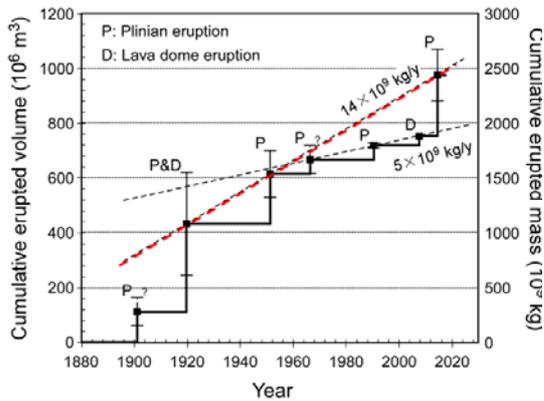


Fig.11 Cumulative eruptive volume and weight of eruptions in 20<sup>th</sup> and 21<sup>th</sup> century of Kelud volcano

噴火が頻発する桜島から15km離れた地点に同型のレーダーを設置して観測を行っている (Oishi et al., 2016) . ケルフト火山に設置したXバンドMPレーダーは2017年9月にシナブン火山に移設した (Fig.10) . 2018年2月19日の噴火では火口上9km付近まで上昇する噴煙を検知することにインドネシアではじめて成功した. このデータは火山灰の噴煙のみならず, 斜面を下る火砕流の様子も克明に記録している.

### 8. 噴火活事象系統樹と階段ダイアグラム

メラピ, ケルフト, グントール, スメル, ガルングンのジャワ島の5火山とシナブン火山について噴火事象系統樹を作成した. ここでは最近特徴的な噴火が発生した火山について紹介する.

2014年2月13日にケルフト火山においてVEI4のプリニー式噴火が発生した. まず, 噴火の推移から噴火シナリオの検討を行った. クライマックスのプリ

ニー式噴火の前に, 2007-08年噴火によって火口底に形成された溶岩ドームを吹き飛ばし, 圧力鍋の圧力弁から圧が抜けるように, 横殴りに火砕サージが始めに発生していたことが明らかになった (Maeno et al., 2017) .

次に, 噴火データのコンパイル及び現地調査と採取した炭化木片試料の年代測定を行うことにより, 20~21世紀の噴火を含めた過去1000年間の噴火履歴を検討した. また, 噴出量・噴出率の履歴など, 将来の活動予測のためのデータ収集と解析を行うことにより, 階段ダイアグラムの高精度化を図った. 具体的には, 2014年噴火の堆積物と実施の噴火現象の対応付け, 噴火推移の解明, テフラ解析手法の適用と評価を実施した. また, 20世紀の噴火については, 2014年噴火の解析手法と知見をもとに, 文献記録と記載データから再解析を試みた. 階段ダイアグラムをFig.11に示す. 2014年噴火と同じ手法は1901年と1966年の噴火には適用することが難しかったが, 1920年, 1951年, 1990年のプリニー式噴火については, 噴出物量を見積もりなおすことができた. 1920年と1951年噴火の噴出物量はこれまで過小評価していたと考えられるが, 1990年噴火についてはやや過大評価であったという結果が得られた. 階段ダイアグラムには, 中長期的噴出率が2種類あるか, 噴出率が増加した後, 徐々に減少する過程を繰り返しているようにも見える. 少なくとも 石原・他 (2011)) で示された一定の噴出率では説明できず, 長期的にはより高い噴出率 $14 \times 10^8 \text{kg/年}$ をも考慮する必要がある.

噴火事象系統樹をFig.12に示す. ケルフトの山頂には火口湖があるので, 湖水の有無, また, 火口の中の溶岩ドームの有無および噴出率により分類した. 噴出率によりプリニー式噴火, 火砕流噴火, マグマ水蒸気噴火, 溶岩ドーム, 水蒸気噴火に分けられる. マ

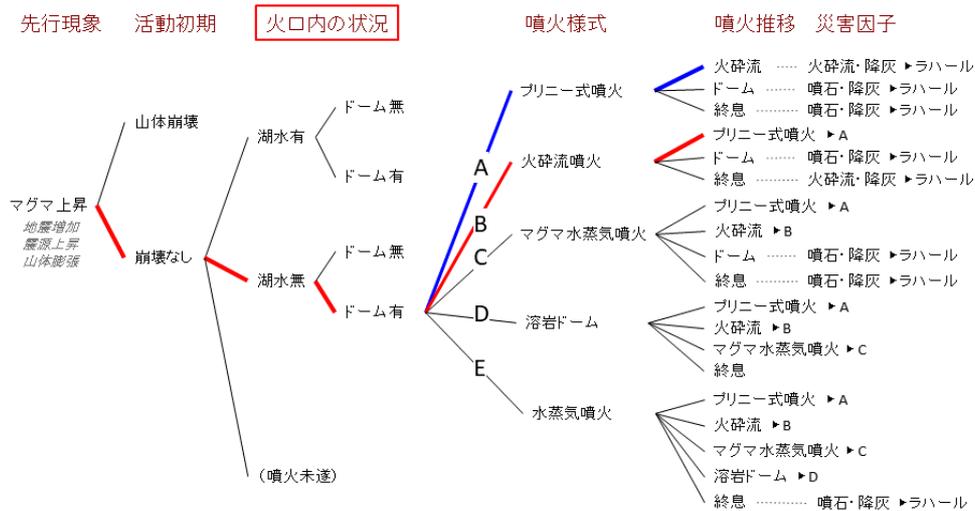


Fig.12 Event-tree of eruptions at Kelud volcano

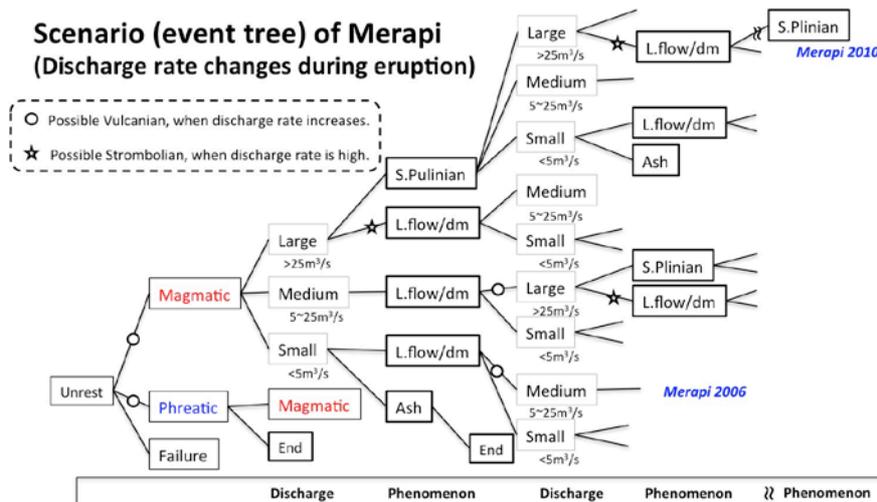


Fig.13 Event-tree of eruptions at Merapi volcano

グマ水蒸気噴火、溶岩ドーム、水蒸気噴火のような低い噴出率から噴火が開始しても、より噴出率の高い噴火様式に移行することもみられる。2014年噴火は火砕流噴火から始まり、プリニー式噴火に移行した。一方、1951年噴火はプリニー式噴火から始まり、火砕流噴火に移行した。

噴火開始後に噴出率が増加することはメラピ火山においてよくみられる。噴火継続中に噴出率変化が起こることを考慮した噴火事象系統樹を作成した (Fig.13)。2006年噴火では、4月26日に溶岩ドームが山頂に現れ成長を続けたが、噴火開始直後の噴出率は $5\text{m}^3/\text{s}$ 以下と小さかったが、5月27日に発生した構造性地震の後は2倍程度に増加した。2010年噴火では10月26日の爆発的噴火から始まったが、11月3日～5日には火砕流を伴うサブプリニー式噴火が発生し、噴出率が急増した。

## 9. 噴出率のリアルタイム評価と噴出量予測

火山噴火早期警戒システムは、噴出率の現状をリアルタイムで把握できる手法を開発するとともに、噴火シナリオと合わせて火山活動推移予測をモデル化し、モデルに基づき観測量から噴出量や噴出率を予測するものである。

### 9.1 噴出率のリアルタイム評価

火山性微動の振幅や地盤変動などのモニタリングデータから噴出率をリアルタイムで評価する経験式は桜島において得られている (Iguchi, 2016)。一方、この経験式は地盤変動の評価項に高感度の観測坑道内の傾斜計及び伸縮計から得られる圧力源の体積変化量を用いているので、VEI2以下の小規模噴火では

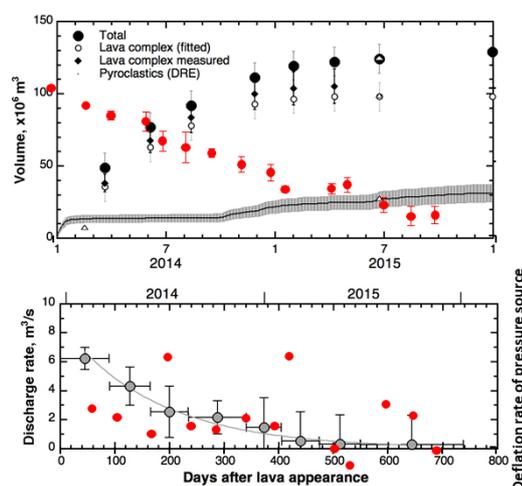


Fig.14 Comparison of erupted volume and deflation of ground deformation. Top: Cumulative eruptive volume and deflation volume of pressure source (red dots). Bottom: Discharge rate of magma and deflation rate of pressure source (red dots).

現状のインドネシアにおける観測システムには適用できない。

一方、噴火の規模が大きければGNSSによって地盤変動が検出可能になる。シナブン火山では、2013年12月に山頂に溶岩ドームが出現し、2014年1月からは溶岩が流出するとともに、崩落による火砕流が頻繁に発生した。測量を繰り返すことにより、 $6\text{m}^3/\text{s}$ と噴出当初は大きかった溶岩の噴出率が、時間とともに減少してきていることが明らかになった (Nakada et al., 2017)。シナブン火山に設置されたGNSSによって検出された地盤変動から圧力源の体積変化が求めら

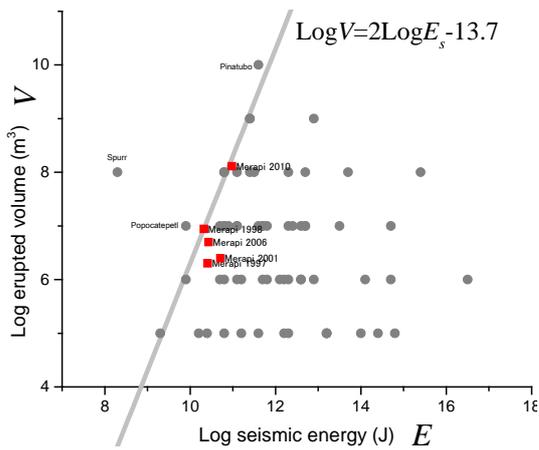


Fig.15 Relation of seismic energy prior to eruptions with erupted volume. Red squares indicate eruptions at Merapi volcano.

Table 1 Volume of eject and seismic energy of volcanic earthquakes prior to eruptions at Merapi volcano

Year	Volume ( $\times 10^6 \text{m}^3$ )	Seismic energy ( $\times 10^{10} \text{J}$ )
1997	2.0	2.6
1998	8.8	2.1
2001	2.5	5.1
2006	5.0	2.7
2010	130	9.5

れるが (Hotta et al., 2017), 圧力源の収縮率と溶岩の噴出率は整合的である (Fig.14). したがって, GNSS を使えば, 溶岩の噴出率をリアルタイムで評価することが可能である. 圧力源の体積変化は指数関数により近似することが可能であり, 溶岩の噴出率の低下あるいは噴出の停止を予測するための指標として提示できる.

## 9.2 噴出率および噴出量予測

メラピ火山の2006年噴火と2010年噴火に先行した地盤変動から山頂部の溶岩ブロック運動と地形を考慮したモデリングから球状圧力源を推定して噴火直前の球状圧力源の体積変化を推定して比較したところ, 2006年の溶岩ドーム形成噴火では体積変化が減速しているが, 2010年の爆発的噴火では加速したことが分かった (Aisyah et al., 2018). このことはマグマの貫入率と噴火に伴う噴出率には関係があり, マグマの貫入率から噴出率を経験的に予測可能であることを示す.

ケルト火山においては2007年に溶岩ドームを形成する噴火, 2014年にはプリニー式噴火と異なる様

式の噴火が相次いで発生したが, 2014年噴火により噴出された軽石の組成は2007年ドーム溶岩と同じであり, マグマの貫入速度が両者で大きく異なっていたことが両噴火の様式の違いの原因であることが推定できる. 貫入速度の違いは噴火に先行した地震エネルギーの放出率の時間変化様式と総量の違いにも反映されている. 2007年噴火に先行する火山性地震の総エネルギーは $3 \times 10^9 \text{J}$ で, ほぼ一定速度の地震エネルギーの放出であったが, 2014年噴火に先行する火山性地震の総エネルギーは $2.2 \times 10^9 \text{J}$ とほぼ1桁大きく, 噴火が近づくにつれて加速したところに特徴がある (Nakamichi et al., 2017). 2007年噴火の溶岩ドームの体積は $2.7 \times 10^7 \text{m}^3$ であるのに対し, 2014年噴火の噴出量は $1.4 \times 10^8 \sim 2.8 \times 10^8 \text{m}^3$  (DRE) (Maeno et al., 2017) と, 1桁大きい. 噴出量と噴火に先行する火山性地震のエネルギーには相関があることが予想される.

同様の傾向は最近のメラピ火山についてもいえる. Table 1に1997年以降の噴火について, 噴出量と先行する火山性地震のエネルギーをまとめた. 先行する地震エネルギーが大きいほど, 噴出量も多くなる傾向がある.

White and McCausland (2016) は世界の火山噴火について, 先行する火山性地震の規模等の特性についてまとめている. White and McCausland (2016) のTable1をもとにVEIを噴出量に換算し, 先行する火山性地震のエネルギーとの関係をFig. 15にまとめた. Fig.15にはメラピ火山の噴火事例 (Table 1)などを追加した. 全体的にばらつきが大きい, 地震エネルギーから見た時に噴出量の上限があることがわかる. さらに, メラピ火山の場合は, 上限付近に分布する. このことは, 噴火に先行する火山性地震のエネルギーから噴出量の上限を予測することが可能であることを意味し, メラピ火山の場合は, 噴出量の予測値は上限付近にあることが言える. ここでは, この上限値を噴出ポテンシャル量と呼ぶ.

## 10. 土砂移動予測

### 10.1 火砕流の流下範囲予測

シミュレーションによる火砕流の予測には, 流出開始地点, 流下方向, 規模, 発生時期の4つの条件を与える必要がある. 噴出物の量は, Fig. 15に示した先行する火山性地震エネルギーの積算値と噴出ポテンシャル量の関係式から噴出ポテンシャル量として求めることができる. 火砕流の規模は噴出ポテンシャル量の1/4とすれば, 地震エネルギーから火砕流の規模を関係づけられる.  $3 \times 10^6 \text{m}^3$ ,  $5 \times 10^6 \text{m}^3$ ,  $30 \times 10^6 \text{m}^3$ ,

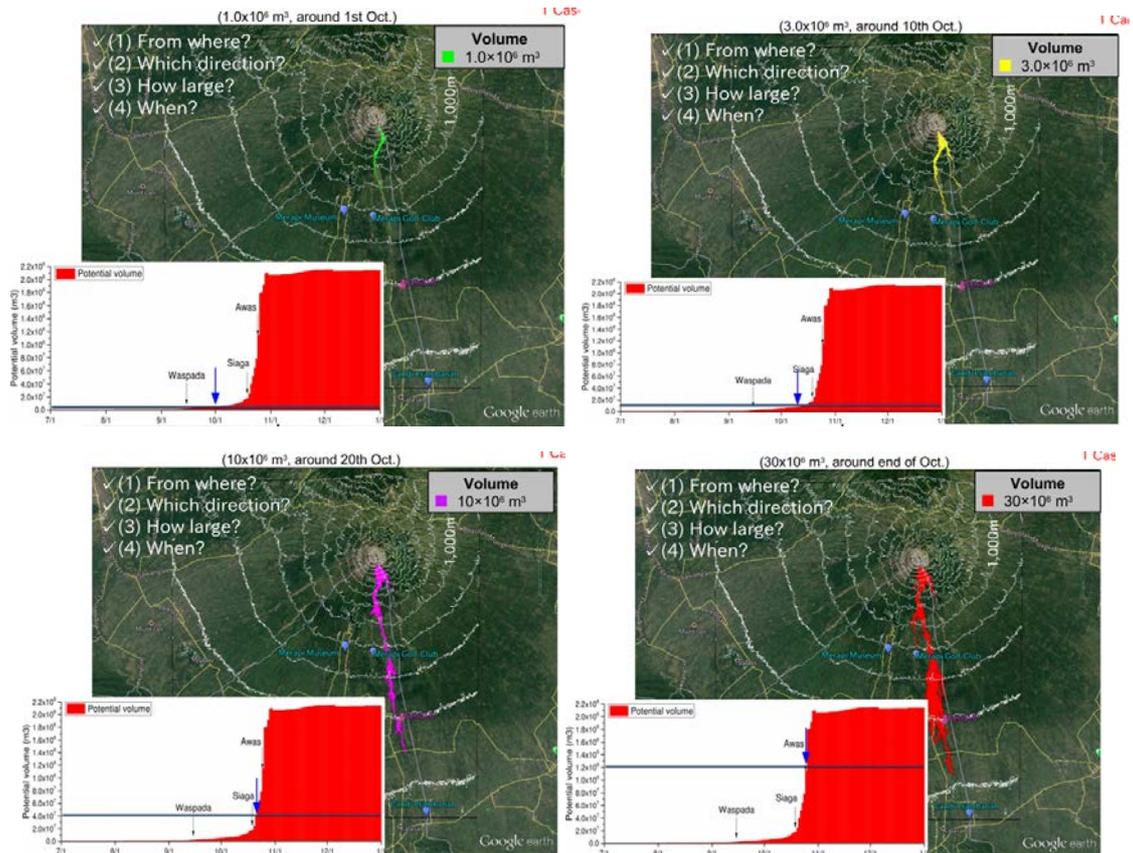


Fig.16 Relation of seismic energy prior to eruptions with erupted volume. Red squares indicate eruptions at Merapi volcano.

50×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>の噴出ポテンシャル量は、2010年噴火前の10月1日、10日、20日、25日における地震エネルギーに相当する。逆に、モニタリングから得られる地震エネルギーから噴出ポテンシャル量を決め、対応するデータベースを参照することにより、Fig.16のように準リアルタイムで更新されるハザードマップを提供することができる。さらに、火砕流規模を評価しデータベースと照合することができていたとすれば、10月26日の初期噴火に加え、11月5日に発生した最大火砕流に対しても数値シミュレーションに基づく火砕流到達範囲を示すことができる。モニタリングデータから算出される規模を初期条件として、このような到達範囲の出力を可能とすることが本プロジェクトで開発する多様な観測システムと数値シミュレータで構成される統合システムの最大の特徴である。

## 10.2 イベントチェーンによる予測

シナブン火山は2010年以降噴火活動が継続し頻繁に火砕流を発生させている。2016年5月には30回の火砕流が発生し、その総量は火砕流の到達距離と火砕流の規模の間の経験式から5.6×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>と推定されている。特に、5月21日には1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>と推定される規模の火砕流により近隣の村で死者を出している。連続

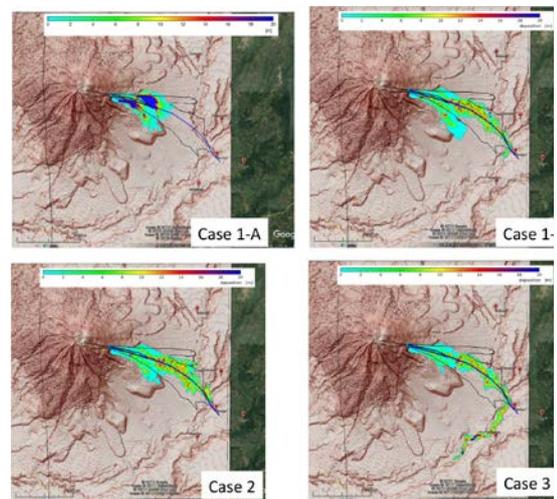


Fig.17 Thickness of pyroclastic flow obtained by simulation. Area surrounded by bold lines are actual inundation area of pyroclastic flow.

して発生する火砕流では、その堆積により地形が変化するので、火砕流の予測には地形変化の追跡が重要になる。

そこで、2016年5月の30回の火砕流に対して、30の個別の火砕流イベントとしてイベントチェーンを作

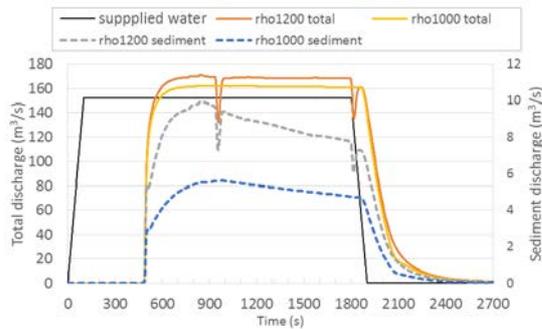


Fig.18 Results of simulation for overflow and destruction of natural dam

成して行うケース (Case1-A), 30の火砕流を30分の時間インターバルで1つのイベントとして圧縮して扱うケース (Case1-B), 30の火砕流を時間インターバルなしで1つのイベントに圧縮して扱うケース (Case2), 30の火砕流の流量を平均して1つのイベントとして扱うケース (Case3) の4ケースを設定してシミュレーションを実施した。

Fig.17は30回の火砕流による火砕流の堆積厚をケースごとに比較したものである。推定される火砕流到達範囲に近いものはCase1-B, Case2であるが、到達距離が大きい火砕流については、CVGHMによる規模の推定が過小評価である可能性もある。体積範囲の外縁部は最大到達範囲に対応する。総量は同じでも火砕流の取り扱い方によって最終的な到達範囲が大

きく異なっており、1つの連続的な火砕流イベントとされるものについても現象に応じた取り扱いを検討する必要がある。

### 10.3 ラハール氾濫予測

シナプンの火山活動により形成された発生したBorus川の天然ダムが決壊した場合の下流への影響について、河道の河床条件 (移動床と固定床) に着目した土石流数値シミュレーションをKANAKO (Nakatani et al., 2011; 2012) で実施した。まず、2m解像度のDEMに天然ダム地形を反映させて、天然ダムの越流決壊について計算を行った。得られた下流のハイドログラフをFig.18に示す。天然ダムの上流から、ラハールが現地が発生した2017年4月18日の日雨量10mmと天然ダム上流の流域面積55km<sup>2</sup>から合理式 (流出係数1.0) で算出したピーク流量152m<sup>3</sup>/sを1,800秒間供給した。土砂の代表粒径は0.2m, 流体密度は細粒土砂の液相化を考慮した $\rho=1,200 \text{ kg/m}^3$ と液相化を考慮しない $\rho=1,000 \text{ kg/m}^3$ の2ケースを設定した。 $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$ のケースは流出土砂量が2倍程度多く、それに伴い総流出量 (水+土砂) も大きくなっている。

上記の結果を供給条件として天然ダム下流での河床変動シミュレーションを行った。現地調査から河道上には土砂の堆積が確認される箇所が多くみられたため、侵食可能厚3m, 並びに固定床の2ケースの条

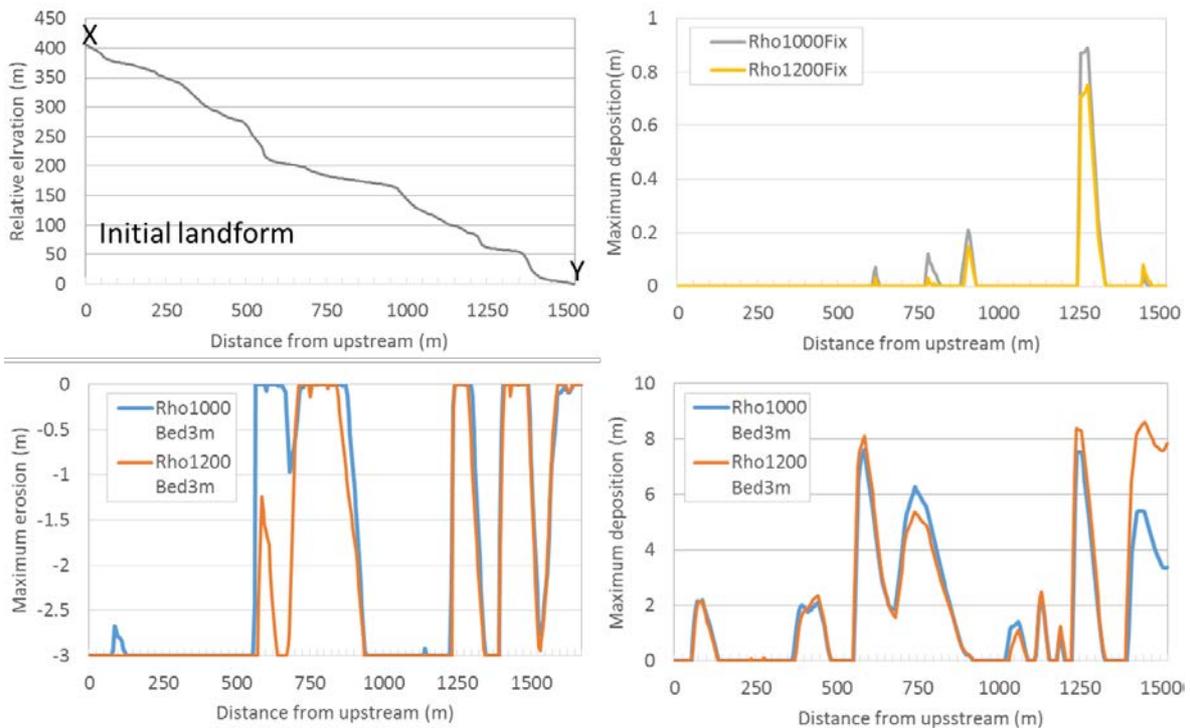


Fig.19 Cross-section shape (upper left), maximum sedimentation depth of calculated results (fixed bed: upper right, moving floor: lower right), maximum erosion depth of calculated results (moving bed: lower left).

件を設定した。また河道幅はこれも、現地状況から25mとして計算を実施した。Fig.19に縦断形状とあわせて計算結果を示す。固定床条件では、流体密度に関わらず移動床3mと比較して最大堆積深は1m未満と小さく、 $\rho=1,000\text{kg/m}^3$ のケースの方がやや堆積が大きい。これは、 $\rho=1,200\text{kg/m}^3$ のケースでは流動性が高く、土砂がさらに下流まで流出したことを示す。移動床3mのケースでは、 $\rho=1,000\text{ kg/m}^3$ よりも $\rho=1,200\text{ kg/m}^3$ のケースで侵食、体積とも強く生じ、最大堆積深は最大で8m程度と固定床と比較して大きく、顕著な河床上昇が発生する危険性が確認された。細粒土砂の液相化を考慮した土石流シナリオは、流動性が高くなり、さらに下流の河道に侵食可能土砂が存在する場合はより下流側でのリスクが高くなることがわかる。

## 11. 火山灰の拡散予測

大気中での火山灰移流・拡散予測モデルとして実績のあるPUFF (Tanaka and Yamamoto, 2002) モデルを、桜島、グントール、ガルングン、メラピ、ケルート、スメルスの6火山に適用し、筑波大学のサーバーにおいて気象庁GPV風向・風速情報を用いたリアルタイムの火山灰拡散予測を行っている。2014年のケルート火山の噴火によって拡散した火山灰の分布を考慮し、傘雲を反映するように改良を行った (Tanaka et al., 2016) 。火山灰拡散予測は以下のサイトで閲覧できる。

<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/~tanaka/webpuff/satreps.html>

また、2017年9月に火山性地震活動が活発化し、11月に噴火が発生したバリ島のアグン火山についても緊急的に適用した。

桜島については、地盤変動から見積もられる球状圧力源の体積変化量と火山性微動振幅から求められる火山灰放出率 (Iguchi, 2016) の1分値とそれから推定される噴煙高度に基づいた定量的な火山灰拡散予測を行っている (Fig.20) 。大気中の拡散だけでなく、地上降灰量も示している。

インドネシアの火山については、噴煙高度が60,000ftに常に達しているとしてシミュレーションを行っている。また、PUFFモデルをBMKGに設置したコンピュータにも移植して、BMKGのスタッフが利用できるようにした。2016年に噴火したロンボク島のリンジャニ火山の噴火に伴う火山灰拡散予測に利用された。

## 12. ラハール警報

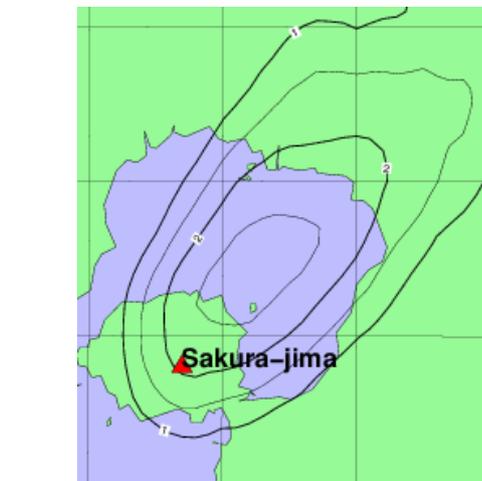
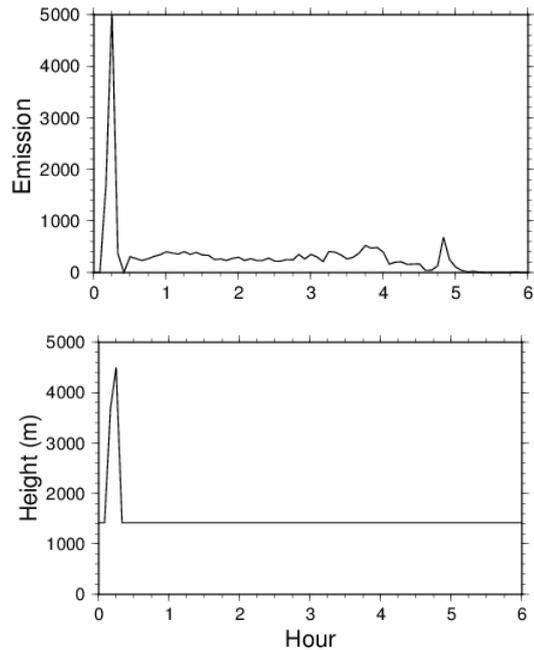


Fig.20 Simulation of volcanic ash dispersion. Top: emission rate. Middle: Height of plume. Bottom: Result of simulation. Weight of volcanic ash deposits (unit of  $\text{g/m}^2$  in logarithmic scale) is shown by contour.

スネークラインを用いた豪雨による土砂災害危険度情報を作成するために必要な土砂災害発生危険基準線 (以下CL, Critical Line) を設定することを目的に、Balai Sabo が運用する、Putih 川流域上流Gunung Maron観測点の2010年以降の降雨観測データをRBFN (Radial Basis Function Network) 解析した。算出された等RBFN曲線と、2012年2月25日および12月25日に発生したラハールのスネークラインを比較した結果、2つのラハール発生イベントを100%捕捉しつつ、非発生降雨超過率 (空振り率) が最小となる、RBFN値=0.6の曲線がラハールのCLとして適当であることが分かった (Fig.21) 。

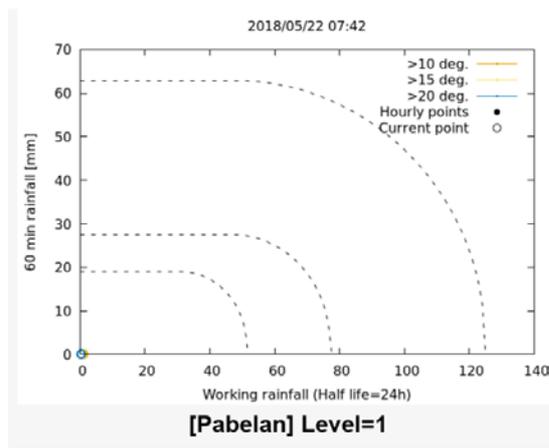


Fig.21 Critical lines on 60-min rainfall – working rainfall plane

リアルタイムレーダー雨量データを用いれば、ラハール発生の危険性を評価することができる (Syarifuddin et al., 2017) . そのための情報提供ツールを導入した。このシステムは、スレマン県、クラテン県、マグラン県、ボヨラリ県内の河川流域に対して運用される。ラハールの発生は、時間雨量と実効雨量を二つの軸とする Fig.21 に示す平面上に、CL をあらかじめ引いておき、時々刻々入手されるレーダー雨量データから時間雨量と実効雨量を瞬時に計算し、それを連ねた線 (スネークラインと呼ぶ) をリアルタイムで表示する。スネークラインが CL を超えたときラハールの発生危険性が高いと判定される。CL は過去の地上流量データとラハール発生時の降雨条件から求めたが、今後、レーダー雨量データとラハールの発生降雨条件データの蓄積により、CL の改訂を適切な時期に行う必要がある。

### 13. コンソーシアム・メラピ

SSDM の利活用を推進するために、コンソーシアム・メラピをメラピ火山周辺の研究機関と地方自治体等を構成メンバーとして立ち上げた。まず、2015 年 6 月 8 日の合同調整会議において、ガジャマダ大学の Djoko Legono 教授をリーダーとしたコンソーシアム・メラピの設立準備会議の設置が報告され、その後、ワークショップの開催を経て、11 月 11 日に設立式を行った。設立の MOU に、大学関係からガジャマダ大学、ジョクジャカルタ・ムハマディア大学、政府機関からは BPPTKG 及び Balai Sabo、4 つの地方防災局 (スレマン県、ボヨラリ県、クラテン県、マグラン県) と 3 つの NGO が署名した。2016 年には準備会議のワークショップを 4 回開催し、本プロジェクトの成果を紹介した。2017 年 1 月には正式にコンソーシアム・メラピとして発足した。

我が国では、2014 年御嶽山噴火後に、活動火山対

策特別措置法の一部が改正され、活火山に火山防災協議会の設置が義務付けられた。桜島においては 2006 年の昭和火口の噴火活動再開後に発足した桜島火山防災連絡会が協議会の実体である。コンソーシアム・メラピのメンバー構成は桜島火山防災連絡会と類似しているので、地方自治体の防災担当者 14 名を含むコンソーシアム・メラピのメンバーを鹿児島市に招聘し、情報と意見の交換を行った。

### 14. 今後の展望

本研究プロジェクトの最終プロダクトは SSDM である。観測データをもとに噴出率を見積もる、あるいは予測することにより、火砕流、火山灰等の移動現象をシミュレートすることにより、ハザードを予測するものである。SSDM の設置は終了し、稼働はすでに始まっているが、インドネシア側で十分使いこなせるだけのレベルに達していない。今後、能力を高めていくとともに、火山活動の現場において、より実践的に活用できるプログラムが必要である。

SSDM が観測データをもとにリアルタイムでハザードを評価する限り、観測の高精度化は必須である。現在の観測機器は VEI2 以上の噴火であれば、火山性地震の発生や山体の膨張といった前兆を捉えられるが、それ以下であれば感度が不足している。一方、規模の小さい噴火は発生頻度が高いはずであり、より規模の小さい噴火への対応が必要である。小規模の噴火であっても火口付近では多くの犠牲者がでる可能性があることはすでに 2014 年御嶽山噴火で証明済みである。メラピ火山は 2006 年まで溶岩ドームの形成と崩落による火砕流の発生を繰り返し、2010 年には 140 年ぶりの大規模噴火を発生させた。VEI2 以上の噴火であれば、前兆活動を把握することができ、SSDM によりハザード予測まで高められることは本稿で述べた。一方、2018 年 5 月から山頂において繰り返されている小規模な水蒸気噴火については、前兆現象を検出するに至っておらず、観測の高精度化が求められる。桜島においては、マグマ量  $1 \text{万 m}^3$  以下の小規模噴火であっても、観測坑道に設置した傾斜計及び伸縮計により噴火発生前の火山体の膨張を捉えることができているので (Kamo and Ishihara, 1989, Iguchi, 2013) , 技術的には解決可能である。

SATREPS プロジェクトは相手国への実装を通して研究開発を進めるものであるが、その成果はわが国にフィードバックされるべきである。特に、火山噴火のような低頻度現象は海外を含めて事例を積み重ねなければ、わが国だけでは噴火の事例が不足している。わが国では 1914 年の桜島大正噴火を最後に VEI4 以上の大規模噴火は発生していないが、インド

ネシアでは21世紀においてもVEI4以上の噴火がメラピ、ケルト火山などにおいて発生している。しかし、我が国の火山活動を過去に遡って考えてみれば近い将来の大規模噴火の発生は必然であり、インドネシアの火山から火山活動そのものの理解を深化させ、災害対応においては危機管理と対策を学ぶ努力をすべきである。

## 謝 辞

本プロジェクトはSATREPSの研究課題として実施されているものである。科学技術振興機構および国際協力機構に御礼申し上げます。

本研究プロジェクトは以下の研究者の共同研究として実施されている。主としてグループ1: 中道治久, 為栗健, 堤大三, 宮田秀介, 大倉敬宏, 権田豊, 甲山治。

主としてグループ2: 中田節也, 吉本充宏, 前野深, 外西奈津美, 嶋野岳人, 鈴木由希, 常松佳恵, 西村太志, 堀田耕平。

主としてグループ3: 宮本邦明, 笹原克夫, 里深好文, 中谷加奈, 下村誠, Leslie Jamie Cobar。

主としてグループ4: 大石哲, 吉谷純一, 味喜大介, 田中博, Magfira Syarifuddin, 眞木雅之, 桃谷辰也, 村西将英, 鈴木雄治郎。

主としてグループ5: 藤田正治, 山野井一輝, 山田孝, 石塚忠範, 桃谷辰也。

インドネシア側の研究者は以下の通りである。主としてグループ1: Hendra Gunawan, Kristianto, Akhmad Basuki, Heri Kuswandarto, Umar Rosadi, Iyan Mulyana, Cahya Patria, IGM Agung Nandalca, Nurudin, Anton Susilo, Rachmad Jayadi, Sutikno, William Putuhena, Riris Adriyanto, Akhyar Musthofa, Djati Iswandoyo, Rachmad Javadi, Cosmas Bambang Sukotjo, Ratih Indri Hapsari, Dian Sisinggih。

主としてグループ2: Agus Budianto, Subandriyo, Dewi Sri Sayudi, Kushendratno, Hetty Triastuti, Sofyan Primulyana, Novi, Agung Harijoko, Wayan Wannada, M. Nugraha Kartadinata, Nia Haerani, Anjar Hariwaseso, Oktory Prambada, Sri Sumarti, Rokhmat, Andi Subiyanto, Lucas Donny。

主としてグループ3: Adam Pamudji Rabardjo, Teuku Faisal Fathani, Jazaul Ikhsan, Istiarto, Ardian Alfianto, Andi Subiyanto, Pudji Harsanto, Adhi Kumiawan, Tata Yunita, Diah Ayu Puspitasari。

主としてグループ4: Nurhayati, Riris Adriyanto, Andersen L Panjaitan, Kerniaji, I Kadek Nova, Arif Munandar, Mustari Heru Jatmiko, Imam Muthohar。

主としてグループ5: Djoko Legono, Untung Budi

Santosa, Achmad Yusuf, Adam Pamudji Rahardjo, Radianta Triatmadja, Muhammad Sulaiman, Supliyati D Andrestuti, Imam Santosa, Dwi Kristianto。

## 参考文献

安田成夫・梶谷義雄・多々納裕・小野寺三朗 (2011) アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱, 京都大学防災研究所年報, 第54号A, pp.59-65。

井口正人・石原和弘・高山鐵朗・グデ スアンティカ・ウィンピー チェチュップ・ラデン スクヒャール・イガン スタウィジャジャ・オニー スガンダ (1996) インドネシア・グントール火山における地震活動, 京都大学防災研究所年報, 第39号B-1, pp. 161-171。

井口正人・森田裕一 (2009) 火山災害評価のための火山噴火のモデル化に関するアジア国際シンポジウム, 火山, 第54巻, pp. 37-41。

石原和弘・井口正人・グデ スアンティカ・ラデン スクヒャール (1995) インドネシアSemeru火山の火山性地震・微動, 京都大学防災研究所年報, 第38号B-1, pp. 173-182。

石原和弘・Surono・Muhamad Hendrasto・Sri Hidayati (2011) 火山噴火の長期予測—インドネシア・ケルト火山の場合—, 京都大学防災研究所年報, 第54号B-1, pp. 209-214。

小野寺三郎・井口正人・石原和弘 (1997) 火山噴火による航空機災害の防止と軽減, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-1, pp.73-81。

藤田正治・宮本邦明・権田豊・堀田紀文・竹林洋史・宮田秀介・Djoko Legono・Muhammad Sulaiman・Faisal Fathani・Jazaul Ikhsan (2012) 2010年インドネシア・メラピ火山噴火災害, 京都大学防災研究所年報, 第55号A, pp. 171-180。

Aisyah, N., Iguchi, M., Subandriyo, Santoso, A., Hotta, K., Sumarti, S. (2018) Combination of a pressure source and block movement for ground deformation analysis at Merapi volcano prior to the eruptions in 2006 and 2010, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 357, pp. 239-253。

Badan Geologi (2011) G. Galunggung, Data Dasar Gunung Api Indonesia, Second Edition, pp.242-265。

Badan Geologi (2011) G. Kelud, Data Dasar Gunung Api Indonesia, Second Edition, pp.372-399。

Bourdier, J-L., Pratomo, I., Thouret, J-C., Boudon, G., Vincent, P. M. (1997) Observations, stratigraphy and eruptive processes of the 1990 eruption of Kelut volcano, Indonesia, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 79, pp. 181-203。

Gunawan, H., Surono, Budianto, A., Kristianto, Prambada,

- O., McCausland, W., Pallister, J., Iguchi, M. (2017) Overview of the eruptions of Sinabung eruption, 2010 and 2013-present and details of the 2013 phreatomagmatic phase, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (in press)
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T., Hendrasto, M., Gunawan, H., Rosadi, U., Kriswati, E. (2017) Magma intrusion and effusion at Sinabung volcano, Indonesia, from 2013 to 2016, as revealed by continuous GPS observation, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (in press)
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M., Hirabayashi, J. (2008) Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 178, pp.1-9.
- Iguchi, M., Ishihara, K., Surono and Hendrasto, M. (2011) Learn from 2010 eruptions at Merapi and Sinabung volcanoes in Indonesia, *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 54B, pp. 185-194.
- Iguchi, M. (2016) Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash – case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan –, *Jour. Disast. Res.*, No. 11, pp. 4-14.
- Maeno, F., Nakada, S., Yoshimoto, M., Shimano, T., Hokanishi, N., Zaennudin, A., Iguchi, M. (2017): A sequence of a Plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on 13 February 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits, *Volcanol. Geotherm. Res.* (in press)
- Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I. (2016), Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res.*, No. 11, pp. 15-30.
- Nakada, S., Zaennudin, A., Yoshimoto, M., Maeno, F., Suzuki, Y., Hokanishi, N., Sasaki, H., Iguchi, M., Ohkura, T., Gunawan, H. and Triastuty H. (2017): Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013–2016, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (in press)
- Nakamichi, H., Iguchi, M., Triastuty, H., Hendrasto, M., Mulyana, I. (2017): Differences of precursory seismic energy release for the 2007 effusive dome-forming and 2014 Plinian eruptions at Kelud volcano, Indonesia, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (in press)
- Nakatani, K., Wada, T., Matsumoto, Y., Satofuka, Y., Mizuyama, T. (2011) Development and Application of GUI Equipped 1-D and 2-D Debris Flow Simulator, applied to Mixed-Size Grains, *Ital. J. Eng. Geol. Environ.* Vol.3, pp.735-743.
- Nakatani, K., Iwanami, E., Shigeo, H., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2012) Development of "Hyper Kanako", A Debris flow simulation system based on laser profiler data, 12th Congress INTERPRAEVENT-Grenoble, France. Conference Proceedings, 2012.
- Newhall, C. G., Self, S. (1982) The volcanic explosivity index (VEI) : An estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87 (C2), pp.1231 - 1238.
- Oishi, S., Iida, M., Muranishi, M., Ogawa, M., Hapsari, R. I., Iguchi, M. (2016), Mechanism of volcanic tephra falling detected by X-band multi-parameter radar, *Jour. Disast. Res.*, No. 11, pp. 43-52.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J-C, Borrero, C. A. (1990) Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 41, pp. 17-66.
- Sadikin, N., Iguchi, M., Hendrasto, M. and Suantika, G. (2007) Seismic activity of volcano-tectonic earthquakes at Guntur volcano, West Java, Indonesia during the period from 1991 to 2005, *Indonesian Journal of Physics*, Vol. 18, No.1. pp. 21-28.
- Starheim, C. C. A., Gomez, C., Davies, T., Lavigne, F., Wassmer, P. (2013) In-flow evolution of lahar deposits from video-imagery with implications for post-event deposit interpretation, Mount Semeru, Indonesia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 256, pp. 96-104
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M. F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, A., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C., Lavigne, F. (2012) The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano- '100-year'event, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 241-242, pp.121-135.
- Syarifuddin, M., Oishi, S., Legono, D. Hapsari, R. I., Iguchi, M. (2017) Integrating X-MP radar data to estimate rainfall induced debris flow in the Merapi volcanic area, *Advances in Water Resources*, Vol. 110, pp. 249-262.
- Tanaka, H. L., Yamamoto, K. (2002) Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model,

- Earth, Planets and Space, Vol. 54(7), pp. 743-752.
- Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S. (2016) Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, Jour. Disast. Res, Vol. 11, pp. 31-42.
- White and McCausland (2016): Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 309, pp. 139-155.
- Yamakoshi T., Shimizu, Y., Osanai N., Sasahara K., Tsutsui K. (2008) Erosion processes of the collapsed mass of the gigantic landslide of Mt.Bawakaraeng, Sulawesi, Indonesia in 2004 revealed by multi-temporal satellite images, Proc. of The Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008, pp. 645-650.

(論文受理日 : 2018年6月13日)