

火山噴火の長期予測 —インドネシア・ケルウト火山の場合—

石原和弘・SURONO*・Muhamad HENDRASTO*・Sri HIDAYATI*

* インドネシア共和国地質庁・火山地質災害軽減センター

要 旨

インドネシアのケルウト火山では、約2ヶ月の前駆地震活動を経て2007年11月に、17年ぶりの噴火が発生した。その活動は山頂火口内に溶岩ドームを形成するという意外な結果で終わった。過去の噴火記録、地震活動等の研究調査資料を分析し、今後の噴火の可能性・切迫性を評価するとともに、今後の観測のあり方や予想される噴火形態等を検討した。今回の噴火による噴出物量は過去の噴火活動から予想されるマグマの蓄積量の約半分程度にとどまり、潜在的に噴出する能力を有するマグマが地下に残存している可能性が高い。また、地震の発生頻度は2010年から増加に転じていて、新たなマグマの供給・蓄積が既に始まっていると推察される。これらのことから、10年以内に火山活動が活発化し噴火発生に至る可能性が高い。

キーワード: ケルウト火山, 噴火予測, 噴火ポテンシャル, 噴火シナリオ

1. はじめに

山頂カルデラが陥没した 2000 年三宅島の例のように、火山は歴史時代未経験の様式の噴火を発生することがある。ジャワ島東部の Kelud 火山は過去 700 年間、数 10 年毎に火砕流と火山泥流を伴う噴火を山頂火口で繰り返してきたが、2007 年 11 月の噴火は火口内に溶岩ドームが出現するという予想しない事態となった (Photo 1)。次の噴火は溶岩ドームを破壊する爆発的な噴火になるのではないかと危惧されている。本稿では、噴火発生の可能性・切迫性と噴火予測のために必要な観測等について、既存の資料、データ、研究成果をもとに検討した。

2. Kelud火山の概要

Kelud火山はジャワ島東部に位置する標高1731mの安山岩質火山である (Fig.1)。西側山麓は約40km離れたKediri市付近まで、扇状地状の緩やかな傾斜地となっている。直径約600mの山頂火口内には火口湖が存在する (Photo 2)。ジャワ島にあるMerapi火山やSemeru火山とともに歴史時代頻繁に噴火し、噴火泥流による甚大な被害をたびたび引き起こした。そ

のため、オランダ統治時代から地質調査所により精力的な調査研究がなされた。

14世紀以来の噴火発生間隔は3年から75年、平均26年である。過去100年余は15年から32年の間隔で噴火が発生している (Table 1)。



Photo 1 Lava dome extruded by the 2007 eruption of Kelud volcano in December, 2007 (M. Hendrasto)

2.1 20世紀の噴火と災害の概要

20世紀には、1919年、1951年、1966年及び1990年の4回の大噴火が発生し、1億～2億 m^3 の火砕物を噴出した。多量の火山灰軽石を噴出し、火砕流の発生も伴ういわゆるプリニー式噴火であった。山頂火口

には多量の水が貯留していて、噴火と同時に泥流が発生しやすい。1919年の噴火では火山泥流が40km近く流下し、9,000戸の家屋が破壊され、5,110人の犠牲者が出た。この噴火後、火口湖の水位を下げて火山泥流の発生を抑えるため、火口湖から火口外を結ぶ排水トンネルがいくつも掘削された。その効果があって、その後の噴火による泥流被害は大幅に減少したが、1966年の噴火の際は、事前の湖水の排水が不十分であったために火山泥流が発生、30km余流下し被害が出た。1990年2月の噴火では、火山局（現火山地質災害軽減センターCVGHM）は噴火の約半日前から始まった微小地震の群発を手掛かりに直前に避難勧告を発令、噴火予知には成功したが、多量の火山灰・軽石堆積により家屋が倒壊し、32名の犠牲者が出た（Lesage and Surono, 1995）。



Fig.1 Location of Kelud volcano in Java, Indonesia



Photo 2 The crater lake of Kelud volcano in October, 2007 (Center for Volcanology and Mitigation of Geological Hazards)

2.2 2007年噴火の概要

2007年の噴火については、火山地質災害軽減センター（CVGHM）が1989年から継続している地震観測や火口湖の調査観測、異変が確認された以降の観測強化により、活動の推移が的確にとらえられ、迅速な火山情報の発表がなされた（Hidayati et al, 2009）。

2007年8月以降火口湖の色の変化、9月に入ってから火口直下のやや深い部分での地震（A型地震）の発生が確認され、CVGHMは9月10日に警戒レベルⅡ（注意）を発令した。9月下旬には火山性地震（A型地震）の頻発し、9月29日にレベルはⅢ（警戒）に引き上げられた。10月16日に至り、震源の浅いA型地震に加えて、B型地震の群発と火山性微動が観測され同日CVGHMはレベルⅢ（避難勧告）を発令した。

10月31日からは大振幅の火山性地震が群発し、11月2日にいったん静穏化ものの8時間後から連続微動が始まり急速に振幅が増大し、火口湖の水温も急激に上昇した。翌3日は、雨天のため山頂が目視できなかったが、1午後に地震計の記録が大振幅の微動により振り切れ、山麓の河川を熱水が流下した。このときに爆発が発生し、溶岩の出現が始まったと推定されている。11月4日には、火口湖の中央に溶岩ドームが出現していることがCCTVカメラで確認された。CVGHMは、観測データの分析と現地調査をもとに、溶岩ドームの成長は続いているものの大規模な噴火の危険性は低下したと判断して10月8日にレベルをⅢに下げ避難勧告を解除した。溶岩の噴出は翌2008年4月まで緩やかに継続し、溶岩ドームの直径は約500m、高さ216mとなった。

3. Kelud火山の噴火ポテンシャル評価

2007年噴火によって火口湖を埋めた溶岩ドームの出現はKelud火山の歴史では初めての事態であり、世界的に見てもまれな例である。この溶岩ドームが今後の火山活動にどのような影響を及ぼすかが関心事の一つである。具体的にいえば、次の噴火の発生時期は遅れるのか早まるのか、あるいは長い休止期間に入るのか、また、次の噴火の様式はどのようなになるのか等である。ここでは、これまでの観測データ等をもとに噴火ポテンシャル（Ishihara, 2006）、具体的にいえば、今後の噴火発生の可能性及びその切迫性を検討する。

3.1 マグマ噴出率からの評価

噴出物量の推定がなされている20世紀以降の噴火から見て今回の噴火はどのようにとらえられるか見てみる。Table 2に示したように、1919、1951、1966及び1990年噴火による噴出物は軽石等火砕物を中心に1億～2億 m^3 である。これに対して2007年の噴出物は溶岩を主体としている。その体積は1500万～2700万 m^3 であり、それ以前の噴火に比して、約1桁小さい。1990年以前の火砕物を主体とする噴出物の平均密度を $0.8 \times 10^3 kg/m^3$ 、2007年の溶岩を主体とする噴出物の密度を $2.0 \times 10^3 kg/m^3$ と仮定して噴出物の累積

を示したのがFig. 2 である。1919年から1990年の噴火までの累積値を連ねる直線を引くと、 $5 \times 10^9 \text{ kg/y}$ ($5 \times 10^6 \text{ ton/y}$) となる。マグマの体積に換算すると約200万 m^3 /年である。第1近似としてこの値は過去100年間のKelud火山の深部からのマグマの平均的供給率を示していると考えられる。わが国の火山と比較すると伊豆大島の約2倍、桜島の約1/5である。この直線の延長と2007年噴火時点での累積値との間には有意なギャップがある。約200万 m^3 /年でマグマの供給が続いていると仮定すると、2007年の噴火では過去17年間に火山の地下に蓄積されたマグマの約半分しか噴出しなかったことになる。

もし、蓄積したマグマの半分のKelud火山の地下に残っているのであれば、これまでの噴火より短期間のうちに同程度の規模の噴火が発生する可能性がある。あるいは、休止期間が従来のように20年程度、あるいはそれ以上長ければ、より規模の大きな噴火発生の可能性が高くなる。

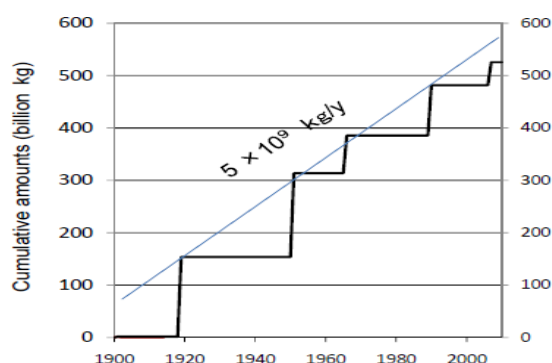


Fig.2 Cumulative amounts of volcanic materials ejected by eruptions.

3.2 地震活動からの評価

前節で述べたように、潜在的に噴出する能力を有するマグマが火山の地下に存在し、更に深部からのマグマ供給が続いているのであれば、地震の発生頻度に何らかの兆候が認められるはずである。逆に、マグマの供給が止まったならば、火山性地震の発生頻度の減少が予想される。前回の噴火が発生した1990年から2011年9月末までのKelud火山の火山性地震の年別発生回数をFig.3に示した。

約1億 m^3 の火砕物を噴出した1990年噴火の場合は、直後から火山性地震の発生頻度は急減し、1991年からの5年間はまったく発生していない。1996年からは火山性地震が間欠的に発生、2007年噴火の2年前には約50回発生している。2007年噴火後は、1990年噴火とは異なり、発生頻度が漸減した。注目すべきことは、2010年には増加に転じて9月末時点で既に50

回以上発生していることである。このような地震活動の経緯は、前節で述べたように、2007年噴火では1990年噴火以降に蓄積したマグマがすべて放出されたわけではなく、また深部からのマグマ供給・蓄積が既に始まっていることを強く示唆している。

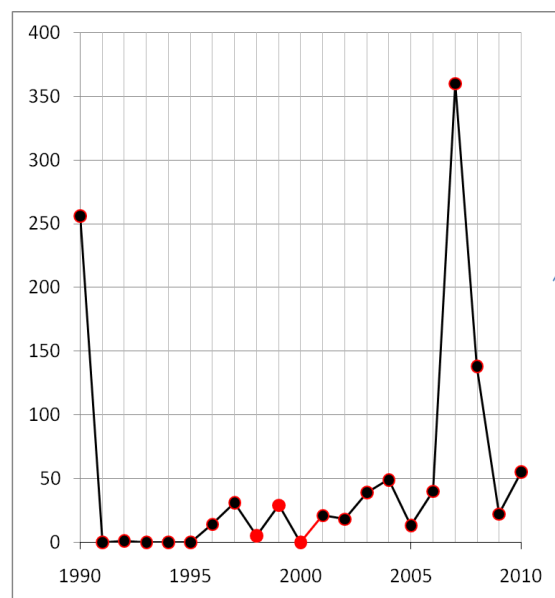


Fig.3 Annual number of volcanic earthquakes observed at Kelud volcano during the period from January 1990 to September 2010. Red circles in 1998, 1999 and 2000 denote the lack of data.

3.3 Kelud火山の噴火ポテンシャル

14世紀以降の噴火の発生間隔、20世紀以降のマグマ噴出率と2007年の噴火による噴出物量の関係、及び火山性地震の発生頻度から考えて、今後もKelud火山の噴火は避けがたいと考えられる。噴火の発生時期の予測は中々に困難であるが、同火山の地下には相当量の潜在的噴火能力を有するマグマが残存し、地震活動が2010年から増加に転じたことから、今後概ね10年間で2007年噴火直前に相当するマグマを蓄積すると推定される。

4. 今後の火山観測について

以上の検討結果を踏まえて、今後のKelud火山の観測のあり方および想定される噴火形態等について述べる。

4.1 マグマ供給率の評価

前節までに、これまでの噴火による噴出物量データおよび1990年以降の火山性地震の発生頻度からマグマ供給・蓄積が既に始まっている可能性を指摘した。Kelud火山について、実際にマグマの蓄積が進行

しているかどうか検証し、定量的に噴火ポテンシャルを評価するための方策のひとつを提案する。

Fig.4に2007年噴火前後のKelud火山の火山性地震の震源分布を示した。震源は、山頂火口直下から鉛直状に約6km延びている。海拔-1kmから-2kmの部分に地震の発生頻度が少ない部分がある。このような震源分布は、桜島やMerapi山などいくつかの活動的安山岩質火山でも認められる。これらの火山では震源分布の下限付近にマグマ溜まりがあり、鉛直状の震源分布の中で地震がほとんど発生しない領域 (Seismicity gap)に噴火活動に直接的に係る線部のマグマ溜まりがあると解釈されている (加茂他, 1994)。

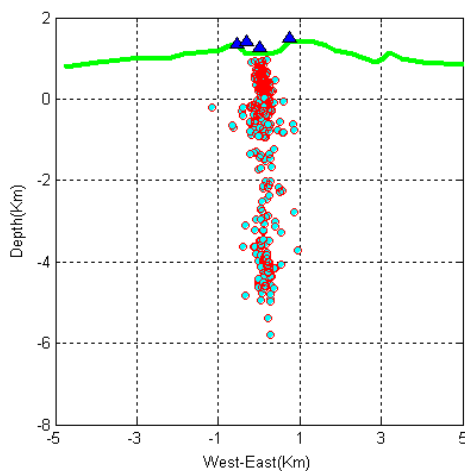


Fig. 4 Location of volcano-tectonic earthquakes associated with the 2007 eruption of Kelud volcano (an Internal report of Center for Volcanology and Volcanic Hazard Mitigation, 2007). Triangles denote location of seismometers.

前節でマグマの供給は次の噴火に向けて既に開始されている可能性を指摘した。そうであれば、マグマ蓄積に対応したKelud火山の地盤の隆起膨張が進行していることが予想される。桜島やMerapi山と同様に、Kelud火山の場合も火山性地震の震源分布の下限、6kmにマグマ溜まりが存在し、地下深部から上昇したマグマがそこに蓄積した場合に期待される地盤変動を求めてみた。マグマ溜まりを球状の力源、いわゆる茂木モデルと仮定して、マグマの蓄積率を3.1で述べた年間200万 m^3 の場合の地表面の変形を計算した。その結果をFig.5に示した。

この計算結果によれば、火口から約7kmにある観測所に対して山頂付近の地盤が年間約5mm程度隆起し、山頂を挟む測線で年間約8mm程度の伸長が生じることが期待される。これらの変化量は水準測量及びGPSによって十分検出することができる。マグマ

の蓄積の有無を検証し、次の噴火の規模を定量的に予測するためには、できるだけ速やかに水準測量とGPS観測を開始することが望ましい。

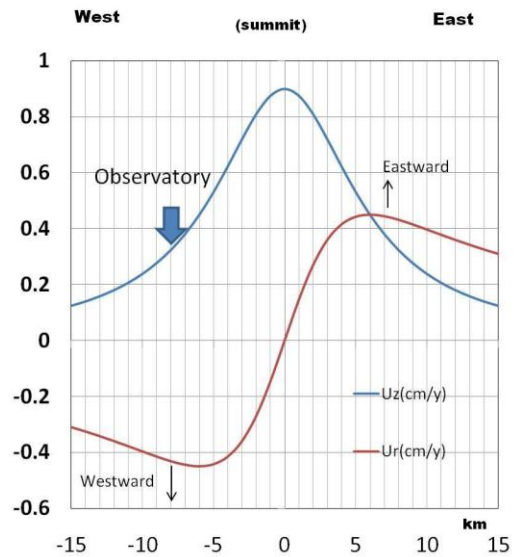


Fig.5 Ground deformation of Kelud volcano expected from magma accumulation with the rate of 2 million cubic meters per year at the depth of 6 km under the summit of the volcano

4.2 噴火様式等について (噴火シナリオ)

2007年噴火により火口内に溶岩ドームが出現して火道を塞いでいること、Kelud火山の地下の状況や溶岩ドームの内部構造に関する知見がないこと等から、次の噴火の発生地点や噴火様式を前もって見定めるのは誠に困難である。

次の噴火に至るプロセスと噴火様式は種々考えられるが、噴火の発生場所を中心に大別すれば、以下のようになるであろう。

- (1) 火口内での噴火：溶岩ドームが火道を塞いでいるので、溶岩ドームと火口壁 (外輪部) との間からのプリニー式噴火、あるいは溶岩ドームを破壊する爆発的噴火。前者の場合は溶岩ドームの一部を破壊する可能性が高い。突発的に噴火するのではなく、1990年や2007年の噴火のように、種々の前駆現象や前駆噴火を伴うことが考えられる。噴火の兆候として、これまでのように、溶岩ドーム周辺の湖水の変色や温度上昇も期待できる。また、地下の圧力増加による溶岩ドームの変形や崩落も生じるかもしれない。もちろん、大噴火発生に至らず、顕著な異変を伴わず、少量のマグマを小出しにする小規模な噴火の繰り返し・継続もありうる。
- (2) 火口外での噴火：火道のやや深部まで溶岩

等が固化している場合にはマグマが既存の火道を利用して噴出することが難しくなり、火口外での噴火発生の可能性が高くなる。そのような場合には、(1)に比べて地震活動がより顕著になり、火口外を震源とする地震が多発するであろう。また、噴火直前には火口の外を震源とする顕著な地震活動が認められる可能性がある。

- (3) 火口壁(外輪山)の崩壊: もし、噴出しようとするマグマ上部の粘性が高い、あるいは固化していて、しかも相当の大きさを有するとすれば、外輪山の一部崩壊を伴う噴火の可能性が出てくる。その場合には噴火直前に顕著な地震や外輪山の顕著な変形を伴うであろう。

次の噴火が、上記3つのシナリオのいずれになるか、あるいはまったく別の様式になるのかは現時点では見当がつかない。

2007年の噴火では、噴火の2ヵ月前の地震は深さ2~5kmで山頂から半径約2kmの範囲で散発的に発生していたが、噴火の直前には、2km以浅の地震を含め山頂直下のより狭い領域で集中的に発生した(Hidayati et al, 2009)。この経験を踏まえて、震源分布をふくめ地震活動の推移に注意を払い、状況に応じた観測項目の追加、観測点の拡充を図ることが的確な噴火予測にとって、また、適切な防災対応を行う上で肝要である。

5. おわりに

2007年のKelud 火山の噴火は、火口湖内に溶岩ドームが出現するという同火山の歴史において特異な活動であった。火山研究者のみならず一般にとっても誠に興味深く、Kelud火山の溶岩ドームはいまや観光スポットとなっている。

しかしながら、同火山の噴火の歴史と観測データを分析する限りでは、近い将来の噴火、あるいは顕著な火山活動は不可避と推定される。2010年からの火山性地震の発生頻度の増加~推察すると、過去100年間の噴火発生間隔より短い期間で、具体的にいえば、10年以内に有感地震の多発等顕著な地変、あるいは顕著な噴火が発生する可能性も否定できない。

本稿では、噴火発生の可能性を定量的評価するための水準測量やGPSによる地盤変動観測の迅速な開始と、想定される噴火形態と予想される噴火の兆候

の概略を述べた。すみやかに、次期噴火への取り組みに着手することを期待したい。

謝 辞

本研究の調査と共同研究者との研究討議の実施に当たっては、JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」(研究代表者: 佐竹健治)の経費を用いた。Kelud火山の火山性地震のデータ整理についてはCVGHMのNana氏に協力いただいた。また、1990年噴火については、当時Kelud火山観測所に駐在し、避難勧告発令を行ったSuratman氏、活動評価に係ったSuparto Siswidjojo博士およびWimpy Tjetjep博士からは、当時の切迫した状況について懇切丁寧な説明を受けるとともに、資料の提供を受けた。これらの方々に記して謝意を表します。

参考文献

- 加茂幸介・石原和弘・井口正人・ウィンピー W チェチェップ・スバンドリヨ・スハルノ・アントニウス ラドモブルボ・オニー K. スガンダ (1994): インドネシアMerapi火山の噴火機構に関する研究(序報), 京大防災研年報, No.37 B-1, pp. 157-170.
- Direktorat Vulkanologi (1979): Data Dasar Gunungapi Indonesia (Catalogue of References on Indonesian Volcanoes with Eruptions in Historical Time). 819p.
- Direktorat Vulkanologi (1990): Report on Eruption of Kelud volcano, 10 February 1990 (in Indonesian).
- Hadikusumo, D. (1974): The rise and drop of Mt. Kelut crater bottom after paroxysmal eruptions, Tectonophysics, Vol.23. pp.341-347.
- Hidayati, S.Basaki, A.,Kristianto and Mulyana, I. (2009): Emergence of lava dome from the crater lake of Kelud volcano, east Java, Jurnal Geologi Indonesia, Vol.4, Np.4, pp.229-238.
- Ishihara, K. (2006): Evaluation of eruption potential, Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.49C, pp.61-68.
- Lesage, Ph and Surono (1995): Seismic precursors of February 10, 1990 eruption of Kelut volcano, Java, Jour. Volcanology and Geothermal Research, Vol.65, pp.135-146.

Table 1 Chronology of historical eruptions at Kelud volcano

Year of eruption	Repose time (years)	Year of eruption	Repose time (years)	Year of eruption	Repose time (years)	Year of eruption	Repose time (years)
1311		1462	11	1776	5	1864	13
1334	24	1481	19	1785	9	1901	37
1376	32	1548	67	1811	26	1919-1920	18
1385	9	1641	38	1825-1826	14	1951	31
1395	10	1716	75	1835	9	1966	15
1411	16	1752	36	1848	13	1990	24
1451	40	1771	19	1851	3	2007	17

Based on the catalogue of Indonesian volcanoes (Direktorat Vulkanologi, 1979)

Table 2 Volume and estimated mass of ejected materials by eruptions of Kelud volcano since 1901

Year of eruption	Repose time (years)	Volume (10^6 m^3)	Mass ($10^9 \text{ kg}/10^6 \text{ ton}$)	references
1901	37	2	1.6*	Direktorat Vulkanologi(1990)
1919-1920	18	190	152*	Kemmerling(1921)
1951	31	200	160*	Hadikusmo(1974)
1966	15	90	72*	Hadikusmo(1974)
1990	24	120	96*	Direktorat Vulkanologi(1990)
2007	17	27	54**	Hendrasto

*assumed density (pumice) : 0.8 ton/m^3 , ** assumed density (lava): 2.0 ton/m^3

Long-term Forecasting of Volcanic Eruption in Case of Kelud Volcano, Indonesia

Kazuhiro ISHIHARA, SURONO*, Muhamad HENDRASTO* and Sri HIDAYATI*

* Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Geology Agency, Indonesia

Synopsis

In November, 2007, Kelud volcano, which had repeated plinian eruptions, unexpectedly extruded lava and formed lava dome in the crater lake. The eruption potential at present are evaluated using geological and seismic data. (1) Magma extruded by the 2007 eruption is estimated approximately a half of magma accumulated after the 1990 eruption. (2) Volcanic earthquakes turned to increase in 2010, which suggests magma accumulation is in progress under the volcano. The volcano has already prepared the next eruption, which will occur probably in 10 years. Eruption scenarios and a method of quantitative evaluation of eruption potential were proposed.

Keywords: Kelud volcano, eruption forecasting, Eruption potential, Eruption scenario