

11 - 17 火山構造的な地震で知る火山活動過程

Volcanic processes inferred from volcano-tectonic earthquakes

森田 裕一 (東京大学・現防災科研)

Yuichi MORITA (ERI, Univ. of Tokyo, Present Affiliation: NIED)

火山周辺では、マグマや熱水の移動や振動によって発生する地震、火山の爆発による地震など火山特有の地震が発生するが、最も多く観測されるのは断層運動による通常の地震、いわゆる火山構造的な地震である。火山構造的な地震のうち、マグマが上昇して岩体を破壊する場合は、規模が大きくて活発な群発地震になる。また、深部でのマグマが蓄積による応力変化により、そこから離れた場所で地震活動度が変化する場合がある。前者の例として、静岡県伊東市沖の群発地震、後者の例として伊豆大島での火山性地震がある。ここではこの二種類の火山構造的な地震の活動を紹介する。

1930 年以来長い間静穏期であった静岡県伊東市沖は、1978 年から群発地震が毎年のように発生するようになり、1989 年には海底噴火が発生した。群発地震の頻発に伴い、東京大学地震研究所は伊東沖にケーブル式海底地震計を設置したことから、1998 年の群発地震活動では震源域の海側に海底地震観測計があり、極めて良好なデータが得られた。Hayashi and Morita¹⁾ は、陸上観測点と併せて海底地震計の波形データも用いて波形相関に基づく DD 法により精密な震源を再決定した。マグマの移動は震源移動として捉えられ (第 1 図)、ダイク (ほぼ鉛直の板状のマグマ) 貫入現象の詳細が明らかになった。図中の色は発震時を示し、赤から青に時間経過を示している。群発活動の初期は、最終的な活動中心の北北西約 3 km の深さ 7.5 km からほぼ鉛直に 6 km まで上昇する浅部への移動があり、震源はそこからほぼ水平に移動して深さ約 5.5 km を中心としたほぼ鉛直の薄い円盤上に分布する主活動に移行する。主活動の中心には地震活動が見られない狭い領域があり、そこから時間経過とともに徐々に外側に広がり、内側では地震は発生しなくなる。この震源移動のパターンはマグマが深さ 7.5 km より深い場所から浮力で上昇し、周辺岩体との密度差が無くなる 5.5 km 付近で浮力の中立を迎え、上下、左右に広がるという典型的なダイク貫入過程を示している。このように発震時の情報からダイクの拡大が時々刻々追跡できる。この時期、伊東市内の数か所に 1 周波 GPS 受信機を臨時に配置して観測していた。GEONET 観測点のデータと同時に解析することにより、ダイクの過剰圧の時間変化を精度よく推定できた²⁾。その結果、活動期間 10 日間でダイク内の過剰圧はほぼ一定に推移したことが明らかになった。この活動は、マグマが地下から上昇して貫入する際に、その先端での応力集中により群発地震活動となり、震源移動がマグマの移動を示す好例と言える。

伊豆大島火山では 1986 年 11 月に開始した前回の噴火は 1990 年頃までにほぼ終息し、現在は顕著な表面活動は見られない。しかし、それ以来マグマの再蓄積を示す地下約 5 km に圧力源を持つ山体膨張が観測されている。伊豆大島周辺で発生する地震活動を最近約 20 年間観測したところ、活動パターンの異なる 2 種類の火山構造的な地震に分類できることが明らかになった。一つは、伊豆大島の沿岸付近深さ 4 ~ 8 km で、時々バースト的活動をおこなうに群発性の地震群である。もう一つは伊豆大島カルデラ浅部の深さ 1 ~ 2 km で、常に発生している小さな地震群である (第 2 図)。ここでは、後者の地震群に注目して、地震活動度と火山内部状態の関係を紹介する。この地震群は P 波速度が 4.5 km/s 以下の層で発生してことが特徴であり³⁾、以下に述べるこの地震群の活動の特質は、地震発生域の媒質の強度が関与しているかも知れない。

2003 年の地震及び GNSS 観測網高度化以降、この地震群の $M > -0.8$ 以上の地震についてはその震源がもれなく推定できるようになり、その活動度は平均約 600 回/年であることがわかった。同時に山体膨張・収縮の様子が精度よく捉えられるようになった。この地震群はマグマ溜まりの増・減圧による山体膨張・収縮と明瞭な相関を持って活動度が変化する(第 3 図)。この現象を速度状態依存則で説明できないかを検討した。その際、地震群の最も活発な地点での典型的な発震機構解を用いて観測された地震活動度と比較した(第 4 図)⁴⁾。この解析では仮定する地震の発震機構が重要であるが、地震の分布に広がりがあり個々の地震の発震機構解はばらばらであること、地震断層面に働く応力のうち時間変化するのはマグマ溜まりの増減圧による断層面上の法線応力であることから、マグマ溜まりによるクーロン応力変化を用いて計算しても差し支えないと考えた。第 4 図で示すように $A \sigma = 20 \text{KPa}$ の場合に地震活動度の変化を非常に良く説明できることが明らかになった。また、これまで火山性地震の b 値の変化や潮汐と地震活動度の相関を、個々のケースで火山活動との関連を調査した研究はいくつかあった。この地震群では、両者を併せて調べることができた。静穏期である最近約 20 年間では、2011 ~ 2013 年に b 値が上昇し、それが元に戻った 2014 ~ 2017 年に潮汐と地震活動度に強い相関があらわれる。それらの因果関係については未解明であるが、火山性地震として良く知られる 2 つの現象が続けて発現したことは、火山の内部状態がこの時期に変化したことを反映しているものと思われ、今後も注目すべき事象である。⁵⁾

火山構造性地震は、単にその活動度によって火山活動を評価するのは適切でない。上述のようにマグマの移動による周辺岩体の破壊で発生するものや震源域から少し離れたマグマ溜まりの増減圧による応力変化により発生するものなど発生原因に違いがある。地震の発生原因から火山内部状態の把握に結びつけることで、火山活動を評価する上で火山性地震の価値が一層高くなるであろう。

謝辞

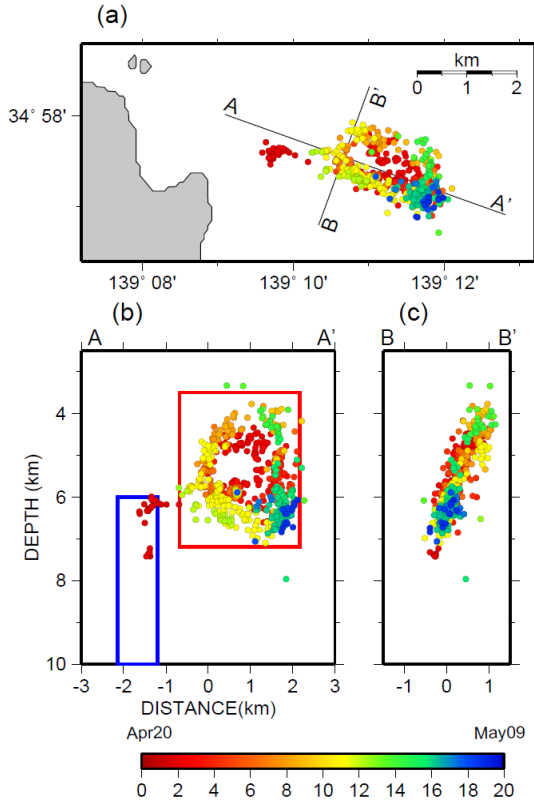
気象庁、防災科研の地震波形データを利用させて頂いた。国土地理院の GNSS 観測点のデータを利用させて頂いた。記して謝意を述べる。

(森田 裕一)

MORITA Yuichi

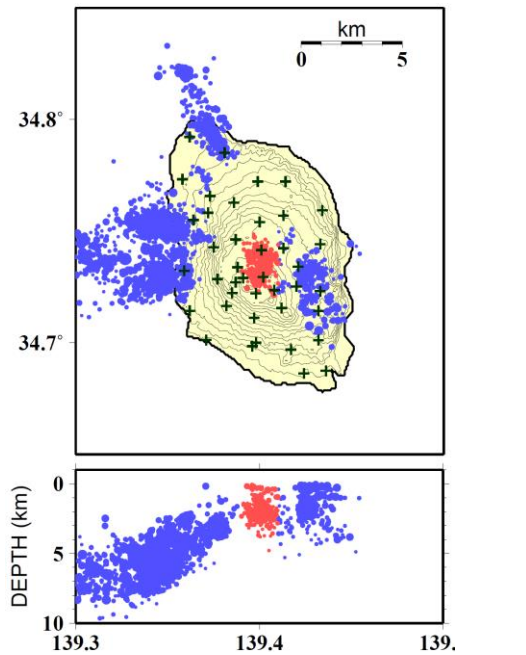
参考文献

- 1) Hayashi, Y. and Y. Morita (2003), *Geophys. J. Int.*, **153**, 159. An image of a magma intrusion process inferred from precise hypocentral migrations of the earthquake swarm east off the Izu peninsula.
- 2) Morita, Y., S. Nakao, Y. Hayashi (2006), *J. Geophys. Res.*, **111**, dio.10.102.2005JB003860, A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula.
- 3) 森田裕一・他 (2023), *地震研究所彙報*, **96**, 11, 2009 年海中発破実験による伊豆大島及びその周辺の地震波速度構造.
- 4) 森田裕一 (2016), 日本地球惑星連合 2016 年大会, SVC-47-18, 火山性地震定量化のための地震活動モデルの検証.
- 5) 森田裕一・鶴岡弘 (2016), 火山学会 2016 年秋季大会, A2-26, 火山性地震の応力応答 - 潮汐による影響.



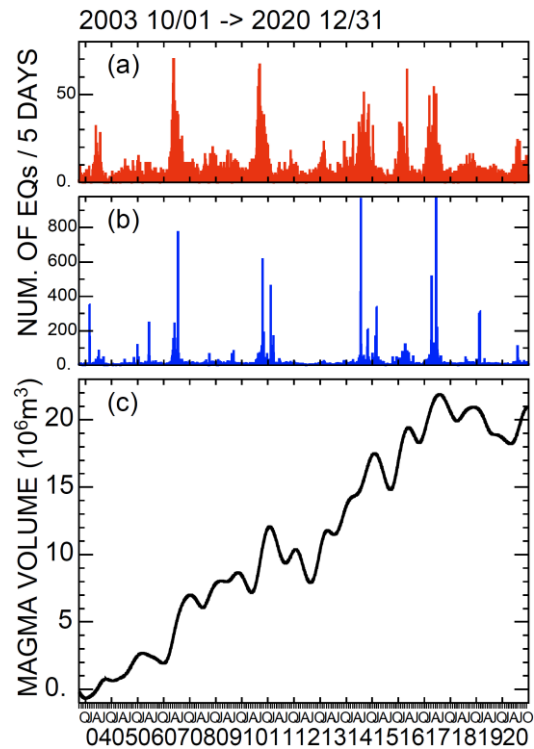
第 1 図 1989 年伊東市沖群発地震. 左: 震源分布とその移動. 震源のプロットは活動開始からの時間経過で色分けしている. (a) 震央分布図, (b)A-A' 断面, (c)B-B' 断面.

Fig. 1 Hypocentral distribution of the 1998 earthquake swarm at the east-off Izu Peninsula. Colors indicate time lapse after the beginning of the activity. (a) Epicenter map. (b) Cross-section of A-A' shown in (a). (c) Cross-section of B-B'.



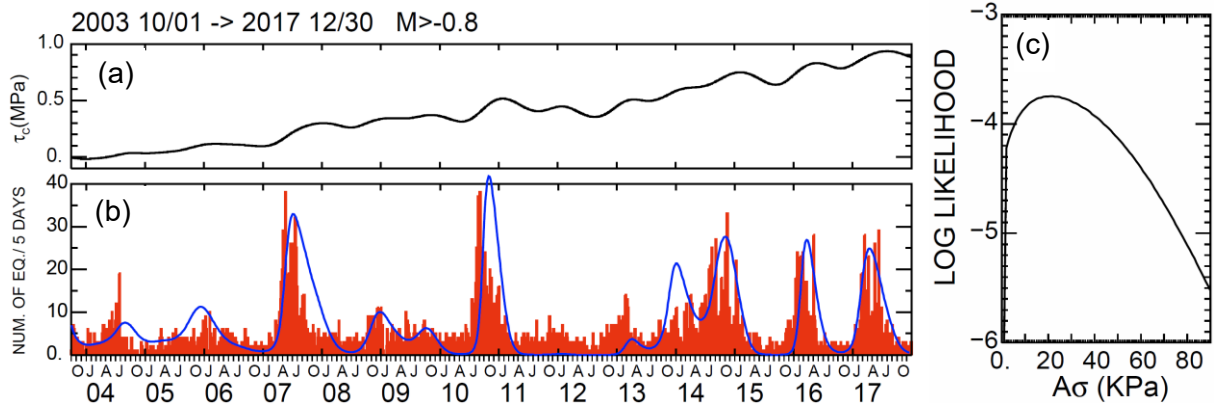
第 2 図 最近の伊豆大島火山の震源分布. 活動パターンによりバースト的に発生する地震群 (青色) と継続的に発生する地震群 (赤色) に分けられ, 両者の分布位置には明瞭な差異がある.

Fig. 2 Hypocenter distribution at Izu-Oshima volcano. Hypocenters are classified into two types from the activity pattern. Blue dotted events have burst-type activity with larger magnitudes. Red dots are concentrated at shallow beneath the caldera region with smaller magnitudes and relatively constant activity.



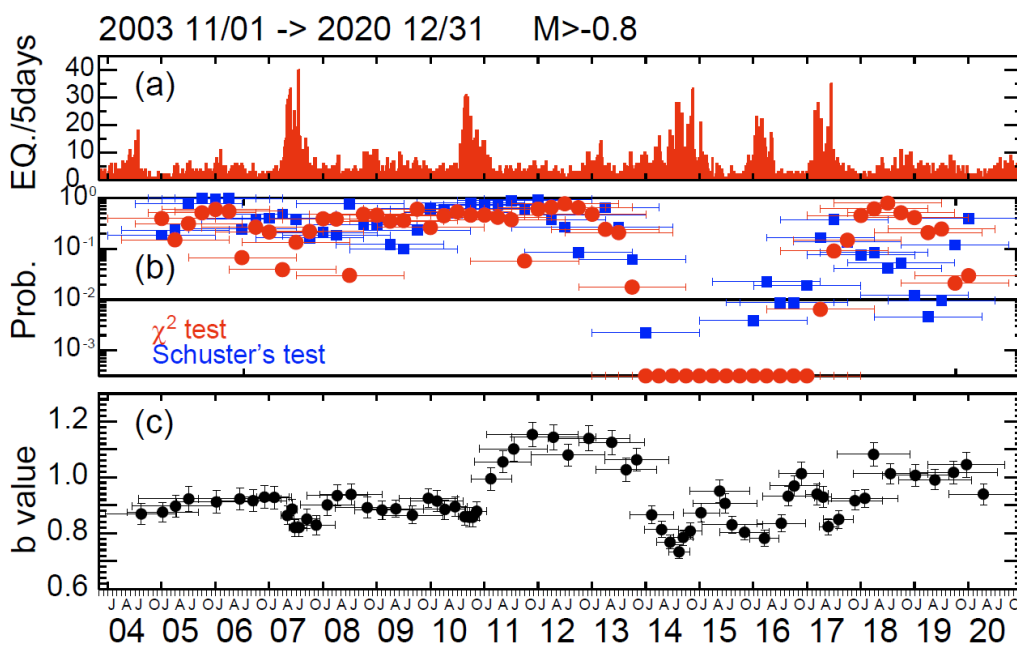
第 3 図 地震活動度とマグマ蓄積の関係. (a) 第 2 図赤点の地震群の 5 日ごとの地震発生数. (b) 青点の地震群の同様図. (c) 地殻変動データから推定した伊豆大島カルデラ北部地下 5 km と推定されるマグマ溜まりの体積変化時系列. 山体膨張時に地震が増加する.

Fig. 3 Temporal variation of seismicity for earthquakes shown by red dots (a), and by blue dots (b) in Fig.2. (c) Temporal variation of the estimated magma volume beneath the volcano inferred from GNSS measurement. The seismicity increases when the volume inflates.



第 4 図 伊豆大島カルデラ内浅部で発生する火山性地震活動に速度状態依存則を適用した例。(a) 地殻変動観測から推定した仮定した断層面でのクーロン応力の時間変化。(b) 地震活動度の時間変化(赤棒線)と(a)のクーロン応力から $A\sigma=20KPa$ として速度状態依存則を用いて推定した地震活動度(青)。(c) (a)のクーロン応力と観測された地震活動度から $A\sigma$ を推定した時の尤度分布。 $A\sigma=20KPa$ が最尤値となった。

Fig. 4 An example of application the rate-and-state-friction-law to seismicity at Izu-Oshima volcano. (a) Estimated temporal variation of coulomb stress at the assumed fault plane (See text in detail). (b) Observed seismicity (red) and calculated one based on the rate-and-state-friction-law model with $A\sigma=20KPa$. (c) Likelihood function of parameter $A\sigma$ from estimated coulomb stress shown in (a) and observed seismicity (red bar in (b)). Maximum likelihood value is $A\sigma=20KPa$.



第 5 図 伊豆大島カルデラ内浅部で発生する火山性地震活動の潮汐応答と b 値の時間変化。(a) 5 日毎の地震数。(b) 潮汐との応答。地震発生数が潮汐による伸張力に依存しないとした帰無仮説を棄却する有為水準。赤は χ^2 検定、青は Schuster 検定の結果。1%を下回っている潮汐との相関が有意であると言われており、2014 ~ 2016 年は明らかに地震活動と潮汐に相関があることを示している。(c) b 値の時間変化。2011 ~ 2013 年に有為に高くなっている。

Fig. 5 Temporal variation of tidal response and b value of volcano-tectonic earthquakes at Izu-Oshima volcano. (a) Number of earthquakes every five days. (b) Results of χ^2 test (red) and Schuster's test (blue) for the hypothesis that the seismicity is independent of tidal stress. This diagram shows that seismicity is strongly depend on tidal stress between 2014 and 2017. (c) Temporal variation of b value. High b value appears between 2011 and 2013.