

## 資 料

552.3 : 552.1

### 火山学理論の若干の問題について\*

G. S. Gorshkov

小 西 善 治 訳

#### I

現代火山学の主要問題の1つは、火山のマグマ溜の深度に関する問題である。この問題は、火山学ばかりでなく、動力学的地質学 (dynamic geology)・鉱床生成理論・地球の物理学・地球構造学の多くの関連問題の解明を運命づけている。

火山学文献では以前から、マグマ溜が浅所に分布しているという考え方が支配している。しかしこのような伝統的な考え方は、多少異なるが、勝手な前提によつているか、なんらかの地球物理学的観察で基礎づけられていない。著者は、明らかにされた横波の *eclan* 現象を利用して、千島火山のマグマの深度評価を試みた。

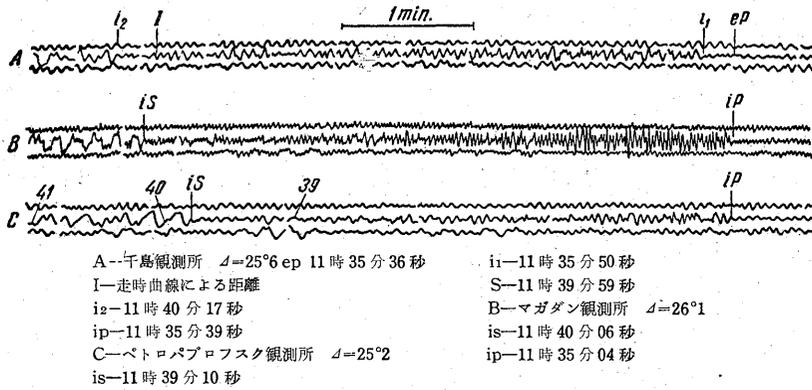
ソ連科学アカデミーのカムチャッカ火山観測所(その後千島)で、1948年秋から始まつた地震観測で求められた *seismograph* には、100回以上にわたる局地・遠隔地震を記録した。局地地震は、他の地域の地震と本質的には異ならなかつた。すなわち、小規模震源の場合には  $\bar{P}$ 、 $P^*$  と  $P$ 、および  $\bar{S}$ 、 $S^*$  と  $S$  とが到達することは、カムチャッカ地域における地殻の構造が、他の大陸地域の地殻構造と異なることを立証している。すなわちカムチャッカ地域は、著しい厚さの花崗岩・安山岩層をもっている。

大規模の遠隔地震では、 $P$ 、 $S$  相が明確に観測され、地殻の下部に流体状マグマを欠失していることを示している。このような現象は、地殻の厚さがきわめて厚いので、全横波の *eclan* が、不可避的に起るためであろう。この種の関係の例外は、日本列島のある地域に起る地震だけである。すなわち北海道および北部本州地域の地震は、完全に記録される。しかし震央が日本南部にある地震は、20回以上記録されているが、千島観測所では、縦波 ( $P$ 、 $PP$  とその他)のみが、*seismograph* に記録され、横波  $S$  を欠失している。日本と同一方位に位するが、さらに遠隔地域に発生する地震(フィリピン、セレベス)は、 $S$  相がふたたび *seismograph* に明確に認められる。

*seismograph* に  $S$  波が表われない可能な原因としては、震原の“起震力”に対して観測所が好ましくない (unfavorable) 位置にあることがあげられるであろう。しかし最近の研究成績にみられるように、東部アジアの島弧地域に発生する大多数の地震の震原は、大陸縁端部に対して(近似的に)垂直の方向——千島観測所で横波を記録するのに最も好都合な方向——に移動している。日本の地震の震原から、千島観測所と同一方向に大体位置しているペトロパヴロフスク観測所の記録には、明確な  $S$  相が存在する。したがつて、上述の推定原因が事実と一致しないことは、まったく明らかである。

対応震原の深さにおいて、波(地震)のエネルギーが著しく減少する可能な場合については、詳しく解析されていない。これは他の地域に発生する同一の震原の深さの地震、例えば(日本アラスカ)に発生する地震では、明確な  $S$  相が表われるからである。日本地震の震原から、千島観測所と同一距離に位置するマガタン観測所では、千島観測所と異なり、明確な  $S$  波が記

\* Горшков, Г. С.: Некоторые вопросы теории вулканологии, Известия, Академии наук СССР, Серия геологическая, No. 11, 1958



第1図 1953年11月27日, 11時30分 (0.8±2秒) に日本で発生した地震の seismograph

録されている。問題は、震原の深さでないことは明らかである。すなわち、南部日本の地震では、千島観測所の seismograph に S 波を欠失する(第2)の推定原因は、事実と一致しないことを示している。第1図はこのことを明らかにしている。

seismograph に横波を欠くのは、明らかに局部的な原因によるものである。すなわち観測所の周辺に特異な“eclan”が存在するためである。地震の震原—seismograph に S 相を欠く—は、千島観測所から 213~230° の方位で、24° から 48~50° の距離に存在する。この方向に千島火山群が走っている。したがって、最も自然な、かつ本当らしい解釈としては、次のことが考えられる。すなわち横波(直接)に対して地震学的“影”の発生原因としては、流体状マグマ溜の“eclan”作用があげられる。

いま火山の頂までの距離、すなわちマグマ溜と地表面とを結び付けて、火道までの距離を知り、eclan 波の出現角度を決定すれば、eclan (マグマ溜)の深度を容易に計算できる。さまざまな震原の深さの P 波の出現角度は、多くの参考書に掲げられてある。簡単な計算では、縦波と横波とが同一通路に沿って伝播すると、普通推定されている。しかしその速度が異なるから、このような状態が起りえないことが先験的にいいえられる。すなわち、与えられた震原の深さでは、縦波と横波との到達角度は異なる。したがって現在の数表およびグラフでは、P 波の到達角度に利用できないから、S 波の出現角度を決定することが必要である。この値は走時曲線を微分すれば決定できる。

$$\cos e = \frac{dT}{d\theta} \cdot V_s, \quad (1)$$

e—出現角度 T—震原の深さ θ の波の走時時間  
Vs—地表面附近の横波の伝播速度

第2図には、グラフの形態で S 波の出現角度の計算値が掲げられている。この図では、また P 波の出現角度曲線も示されてある。この図から明らかなように、各震原の深さに対する P 波と S 波との出現角度差はきわめて顕著である。

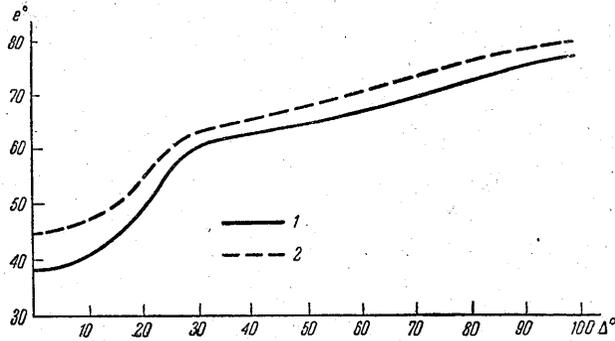
走時曲線図に現われている実験曲線を微分しても、絶対的に精確な結果が求められないことを附加しておくことが必要である。われわれの目的に対して十分な精度は、一層簡単な方法、すなわち終端増分 (end increment) の導関数の比に置き換えて求められる。この場合(1)式に  $V_s=3.5 \text{ km/sec}$  値を入れると、次のようになる。

$$\cos e = 3.5 \frac{\delta T}{d\theta}, \quad (2)$$

km を degree に換算すると

$$\cos e = 0.031 \frac{\delta T}{\delta \theta^\circ}, \quad (3)$$

千島観測所の横波の eclan 作用は、震原の深さが 24° から 48~50° の場合に発生する。第2



第2図 1—横波の出現角度 2—縦波の出現角度 e—出現角度値 Δ—震原の深さ

図によると、この震原の深さに対しては、57.5~64.5°のS波の出現角度が対応している。

l長まで水平に packing されている場合の“eclan”深度  $H$  は次式で算出される。

$$H = l \operatorname{tg} e, \quad (4)$$

そこで観測点から千島火山までの距離が 33 km の場合には、マグマ溜の深度は 50~70 km の interval で決定される(この値は実際上地殻の限界値である)。アジアの東部縁辺地域で最近行なわれた研究によつて、地殻の厚化は 60 km までであることが確かめられているのを想起してほしい。

“地震学的影”の限界を検討すると、マグマ溜の規模と形態とについて、ある種の観念が求められる。地震学的影は、楕円錐(elliptical cone)の形態をもち、地表面下に約 60°の角度で拡がっている。垂直断面(a)における generatrix (母量)間の角度は 7°であるが、水平面の投影では 15~17°である。

したがつてマグマ溜の形態は凸レンズの形態、おそらくは緯度線方向に伸長し、子午線方向に扁平な3軸楕円体形態であることが推定される。マグマ溜の延長とその厚さは 25~35 km、容積は約 1~2 万  $\text{m}^3$  である。

マグマ溜の実形態は、もちろん一層複雑な形態を示し、多様な“枝”、“足”をもっているであろう。

## II

多くの日本地震の 8~14 秒後の記録には、S波の欠失後に明白な二次的波(第1図の  $i_2$ )の到達が観察される。この二次波は、マグマ溜で屈折する交換波——SKS型——とみなされ、SRSで表わされる。この波は回折波 P: (PRP)(第1図の  $i_1$ )の到達後 14~19 秒を経て到達する性質をもっているようである。

直接波と交換波との到達時間差を利用すれば、マグマ溜における交換波の速度が決定できる。すなわち次の式によれば、この値は容易に誘導される。

$$V_R = \frac{VH}{H + V\Delta t}, \quad (5)$$

$V_R$ —マグマ溜における交換波の速度

$V$ —マグマ溜の境界面における直接波の速度

$H$ —マグマ溜における交換波の伝播径路長

$\Delta t$ —直接波と交換波との到達時間差

$H=30\sim35$  km,  $V_P=7.8$  km/sec,  $V_S=46$  km/sec

$\Delta t$  は S 波では 12~14 秒, P 波では 18~19 秒である。

このデータによれば、 $V_R$  は 1.6~1.8 km/sec の間で決定される。この速度は水中または脆弱な岩層(普通の地圧下)中を伝播する速度に近い。

マグマ溜における物質の転位 module  $\mu$  が 0 に等しいか、あるいは 0 に近いことに留意すべし。

ば、次式が求められる。

$$V_R = \sqrt{\frac{K}{\rho P}}, \quad (6)$$

$K$ —物質の圧縮係数  
 $\rho$ —マグマ溜の物質密度 (3.4 g/cm<sup>3</sup>)

$$K = \rho V^2, \quad (7)$$

したがって  $K = 1 \cdot 10^{11}$  ダイン/cm<sup>2</sup>, すなわち  $1 \cdot 10^5$  バールである。

圧縮率—逆数—(B)は  $10 \cdot 10^{-6}$  バール<sup>-1</sup> と決定される。求められた圧縮率は標式的固体と標式的流体(地殻では  $B = 0.8 \cdot 10^{-6}$  バール<sup>-1</sup>, 水では  $48.9 \cdot 10^{-6}$  バール<sup>-1</sup>) との圧縮率値の中間値である。

このように, seismograph を研究すれば, マグマ溜における物質の弾性定数に関して, ある種の観念が与えられる。

### III

マグマ溜の深度と形態, およびマグマ物質の弾性定数に関する問題の上述解は, きわめて予測的なものと考えられる。しかしこのような考え方は, 火山学の一般的なある種の問題を略述する基礎に役立つものには充分である。

1. マグマ溜が地殻の境界面, おそらくは地殻の上方に賦存するのは, 少しも偶然ではない。すなわち Gutenberg は, この深度 (80 km) で地震波が減衰 (したがって弾性定数が低くなる) することを最近明らかにした。この種現象が最も発生し易い原因としては, 晶質状態から潜晶質状態への移行が考えられる。他方において Linbinov は, ある深度間隔の地殻の上方部分では, 地球の温度曲線と, 物質の熔融曲線とがほとんど一致すると考えている。したがって地殻の上方部分では, 熱力学的条件が変わると, 物質が流体状態へ移行するために, とくに好都合な条件が支配する。局地的に圧力低下か, または温度の上昇を伴うような大規模な造構擾乱は, マグマ溜の発生を不可避的に誘導するはずである。

したがって, 現代の火山活動と, とくにアルプス造山帯との結び付きが, まつたく自然に誘導されるはずである。

2. 一度形成された流体状マグマは, 上方に絞り出されるが, 地表面に達しないで, 岩脈および層状貫入の形態で凝固するであろう。地殻に超深所破砕帯 (60~80 km) が発達している場合には, 流体状マグマは, 噴出火山活動のそれぞれの形態をとって, 地球の表面に表われる。このように火山活動は, 地殻の深所破砕帯と常に結び付いている。そのうえ, この種の破砕帯は最近の造山帯と一致するか, すでに凝固した Plate-forme または古期山岳地域を切るかは, 火山活動の原因としてみれば同じことである。任意の場合における深所破砕帯の形成 (60~80 km) は, 火山の生成を条件づける。満洲, チベット, 東部アジアにみられる火山, およびきわめて若い北東部アジアの火山は, この種の現象の形成を明らかに裏付けている。

3. マグマ溜がきわめて深所に賦存—深所ではマグマ物質の化学的組成には著しい差異が存在しない—することは, 広域マグマの性質が驚くべきほど類似していることを, きわめて簡単に明らかにしている。小規模マグマ溜の場合には, 例えば延長数 1,000 km にわたる縁太平洋の地向斜地帯にみられる熔岩の性質の同一性を解明することが不可能である。それとともに, 大陸の縁辺部に対して垂直方向において, 熔岩の化学的機構が変わることは, 地殻の海洋, 地向斜または Plate-forme 性質, すなわち主要地質学的発達階梯—地向斜の形成とある一定方向への発達—によつて, 地殻の上方, または下方の組成が変わってくることを示している。したがって, 例えば満洲内陸火山の熔岩の組成は, 東部アフリカの内陸火山の熔岩のそれに近く, 隣接の日本の地向斜地山から噴出された熔岩とは著しく異なっている。

4. 火山学の理論的構成において, 大きな役割を占めるのは, 周辺マグマ溜仮説である。この仮説は, すでに 17 世紀に Kircher によつて提唱され, Stübel はこの仮説を復活させた。火

山発達の合法則性に関する Stübel の考え方は、すでに古くなっている。しかし周辺マグマ溜の考え方は、多くの識者が現在においてももっている。

こゝでは、この考え方を詳細に検討しない。たゞ次の事実を指摘しておこう。すなわち南部カムチャッカ、および北部千島列島で地震が発生する場合には、地震深度は約 30 km で、地震波は千島火山群を経て伝播し、なんらの異常が現われない。すなわちこの深度には、ある程度広域マグマ溜が存在しないようである。

千島火山地域に発生する浅発(3~10 km 深度)局地(短周期)地震でも、なんらの異常が認められない。局地地震の S 波の周期は 0.2~0.4 秒である。この波は 500~1,000 m の流体層で、すでに eclan されているようである。したがって地震学的データは、周辺マグマ溜が浅所に存在する可能性をくつがえしている。この結論は一般的な意味をもたずである。この規則の例外は、きわめてまれに出会い、ヴェスヴィヤス火山でみられるように、炭酸塩質岩層の交代、置換現象とのみ結び付いているようである。

5. 10 年または 100 年間の間隔で発生する噴火では、熔岩組成の著しい分化が普通認められる。すなわち酸性軽石に始まり、塩基性熔岩に終っている(クラカタウ火山・ヘクラ火山)。1 噴出期の噴出産物の総容積は、まれに数 km<sup>3</sup> を超える。深度 60 km の火道の容積は、少なくとも 60~80 km<sup>3</sup> になる。時間的には迅速に、化学的機構については顕著な突発的分化作用が火道におけるマグマの(上昇)過程で条件づけられることは、まつたく明らかである。

マグマ溜において、一層緩慢に分化作用が行なわれると、1 千年、1 万年間にわたって、アルカリ側へ化学的機構の変化が徐々に起る。分化作用の両型の見事な実例は、Zavaritsuki がヴェスヴィヤスの岩石について解明している。

6. 同一火山帯の火山が、噴火時に異なる変化を蒙むことは、火道過程で条件づけられる。このような噴火は、無秩序に発生するか、または各火山が隣接火山の(噴火)リズムとなんらかの関係のない、固有の噴火リズムをもっているからである。この種の噴火には、普通深度 5 km の浅発地震を伴う。

7. 1 火山地域、または数火山地域の多くの火山が、同時に爆発する原因としては、一層深度オーダの共通の巨広域マグマの活動によるか、ときにはマグマ溜群に遊呈的作用が同時に働くためであろう(カムチャッカ、千島 1945~1946 年)。この種の原因はまだ明らかにされていないが、造構運動の活性化と関連性がある。このことは、数火山の同時的爆発にしばしば先行して、深度 60~100 km の中間地震が発生することが示しているようである。

新火山(パルクチン)の形成または死活山の活動の復活(カムチャッカのベズイムヤ火山)は、またマグマ溜の活動の活性化と関連性をもち、深発中間地震を伴う。

8. マグマ溜が著しい深所に存在し、周辺マグマ溜を欠失していることは、火山学理論の若干問題を解くのに役立つ。例えば、この観点からみれば、カルデラの形成が、マグマ溜の天井が破壊されて発生するものでないことは明らかである。Escher の古い説——カルデラが大爆発に先行して解放状態となつた火道壁の破壊によつて形成される——は、この点からみて、本当らしいように思われる。