

## 資 料

地調月報 Bull. Geol. Surv. Japan, vol. 30, p. 247-254, 1979

551.24: 551.21 (571.66)

### クリュチェフスコイ火山群地域の地殻の構造、構造運動と火山活動の特徴\*

S. T. Balesta, B. V. Ivanov, V. K. Utnasin, G. I. Anosov\*

岸本文男\*\*訳

活火山地域の地殻の深部構造を把握することは、きわめて重要な課題で、この課題の解決は、火山学上のもっとも複雑な問題の一つ、すなわち、火道の深部構造および火山活動の特徴と噴火の力学的過程と火道深部構造との関係を明らかにすることになる。この課題は、大洋地殻から大陸地殻への移過帯における地殻構造の深部地震探査法による共同研究計画に組み入れられ、火山学研究所が、ソ連科学アカデミー極東科学センター樺太総合科学研究所と共同して、1970-1972年に標記地域で深部地震探査を実施した。探査実施地域の地震探査断面の解析結果、および、それを地質資料、他の地球物理学的資料と比較対照した結果は、十分にその地域の地質構造断面、地体構造様式を組み立てることができるものであり、火山活動と地質構造の相互関係の特徴について多くの判断を行い得るものであった。

#### 1. 研究課題と研究法

深部地震探査法による地震学的研究の課題となったのは、1) 火山群下の地殻と上部マントルの構造の特徴、2) 火道の分布および火道と浅所地質構造との関係を規制する深部構造、3) 火山形成マグマ溜り帯および同マグマ溜り帯とマグマ生成域との関係、を把握することであった。

クリュチェフスコイ火山地域の深部構造は、総延長約 300 km の 3 本の深部地震探査断面を用いて検討された (第 1 図)。

第 1 の断面 (ベズィミャンヌイ断面) は、一般構造方向と交叉し、火山群を東西方向に横断している。第 2 の断面 (コズィレフスク弧断面) は、火山群に平行し、火山群の東方に設定された 1 爆破点 (ハピツァ爆破点) からの地震波が観測され、解析された。この第 2 の断面はその方向を少し変えて、縦方向の深部地震探査パラメータ断面 (I—I' 断面) としても使われ、そのパラメータ断面では整った観測システムが得られたので、観測波動場の特徴を十分に把握することができた。このような断面の配置は、火山群の主方向を横断する、火山群全域直下の深い断面を得るのに役立つ (弧状の断面による地震波の偏りから)。そのほか、火山群の東側 (観測点の反対側) に設けた爆破点からの横断面を検討することによって、地震波による火道「透視」法が役立つ、深部構造の不均一性を明らかにすることができた。

湖底 (水底) での爆破によって発起された震動を記録するには、「Poisk-I-48-KMPV-OV」型磁気録音機と「Taiga」型地震計を備えた地震観測所が利用された。その場合、100 km ばかり隔てて火山群を「打つ」に当たっては、およそ 4-5 t の爆薬が使われた。そして、さらに、C-205 型地震計が 200 m おきを主に、100 m おきを適宜追加して線状に配置された。

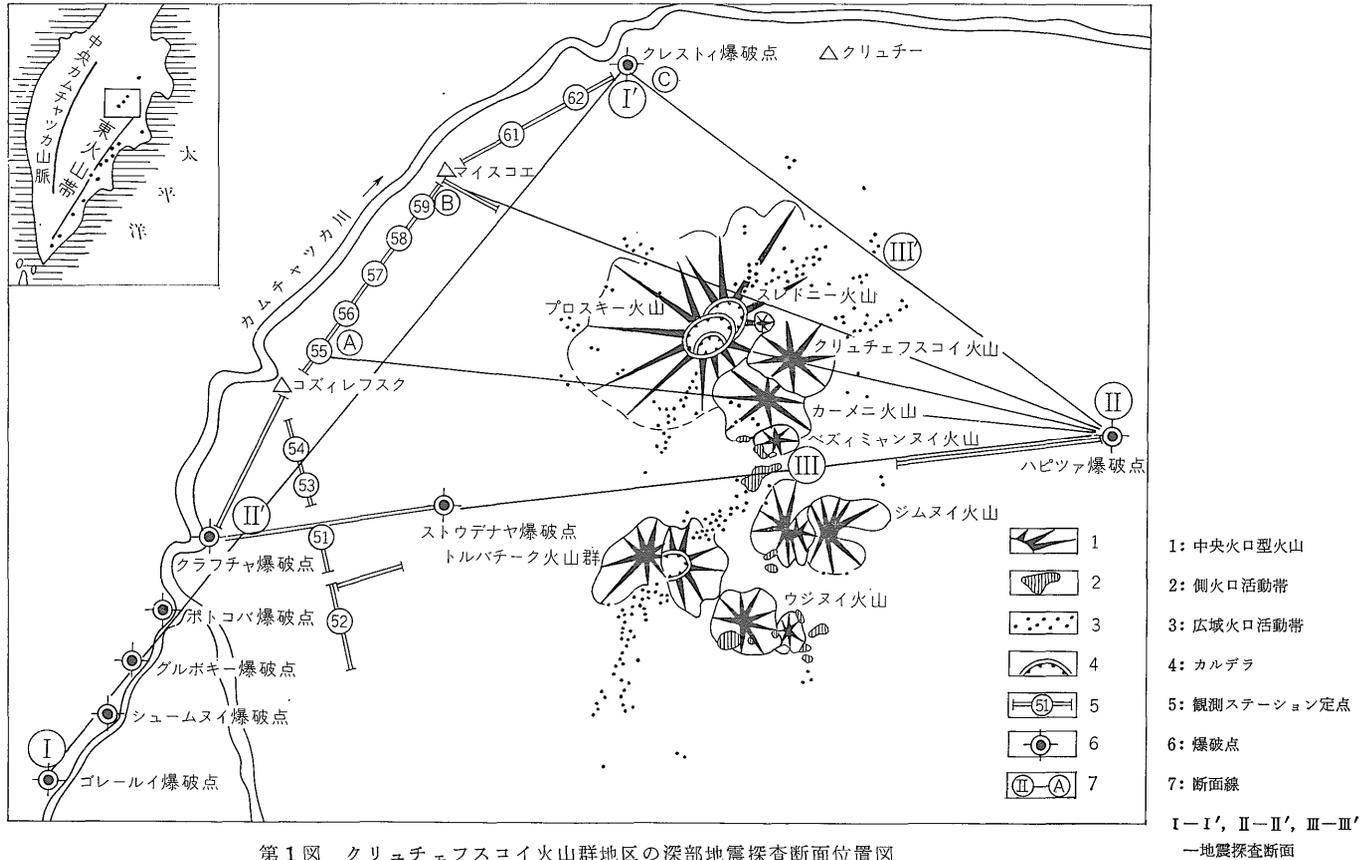
#### 2. 結果の解析

連続波相の対比にもとづく運動力学的な指標から、次のような地震波が分類できた。

1) いくらか速度が低い、互いに連続的に移り変わる、爆破点近くで観測される地震波群。見かけの速度は 1.8

\* S. T. Balesta, B. V. Ivanov, V. K. Utnasin, G. I. Anosov (1977): Строение земной коры района Ключевской группы вулканов, особенности тектоники и вулканизма: 論文集「Глубинное строение, сейсмичность и Вулканизм Ключевской группы вулканов」, стр. 7-16.

\*\* 鉱床部



第1図 クリュチェフスコイ火山群地区の深部地震探査断面位置図

km/秒から 4.0 km/秒で、この地震波で構成され、かつ、火山源岩—堆積岩層上部層の特徴を現わした地震波境界面は、空間的に一定せず、さまざまな落差の断層に切られている。

2) 白亜系基盤岩層 (Cr<sub>2</sub>) の境界面の屈折波。境界面に相当する屈折波速度は 5.0–5.3 km/秒 である。この速度を根拠に、当該境界面は白亜系上部層の上面とすることができる。というのは、カムチャツカ半島の全域で屈折波探査法を実施した結果として、 $V_r=4.9-5.8$  km/秒 の境界面が白亜系上部統基盤岩層とよく一致するからである (Balesta, 1967; Suprunenko, Shvarts, 1968)。

3) 結晶岩基盤岩 (片麻岩, 結晶片岩) の境界からの屈折波。境界速度はかなり早く ( $V_r=6.0-6.5$  km/秒), 変成岩コンプレックスの岩石に相当する。その岩石の性質は、ガナル隆起地区の地表での変成岩露出部分で行われた深部地震探査断面ではっきり決定できた (Balesta *et al.*, 1974)。この境界面が広域にわたり、ほとんど変化しないで拡がっていること、速度が急変し、早くなることは、圧密地殻部分の上面であることを物語っている。

4) 地殻中の大規模な境界面から反射するいくつかの地震波群。条件つきながら、この地震波群はコンラッド不連続面に相当する。

5) 地殻下面からの反射波と屈折波 (モホロビッチ不連続面)。モホロビッチ不連続面の屈折波は、火山の外側を通り、爆破点から 85–100 km へたった調査断面でしか記録できない。なお、モホロビッチ不連続面からの強い反射波の出現に続いて、地殻下部の移過層の境界に相当するような、よく似た見かけの速度をもった、かなり強い地震波群が観察できる。この地震波は、調査地域の上部マントルの強い分化程度に関係がある。

### 3. クリュチェフスコイ火山群地域の深部構造

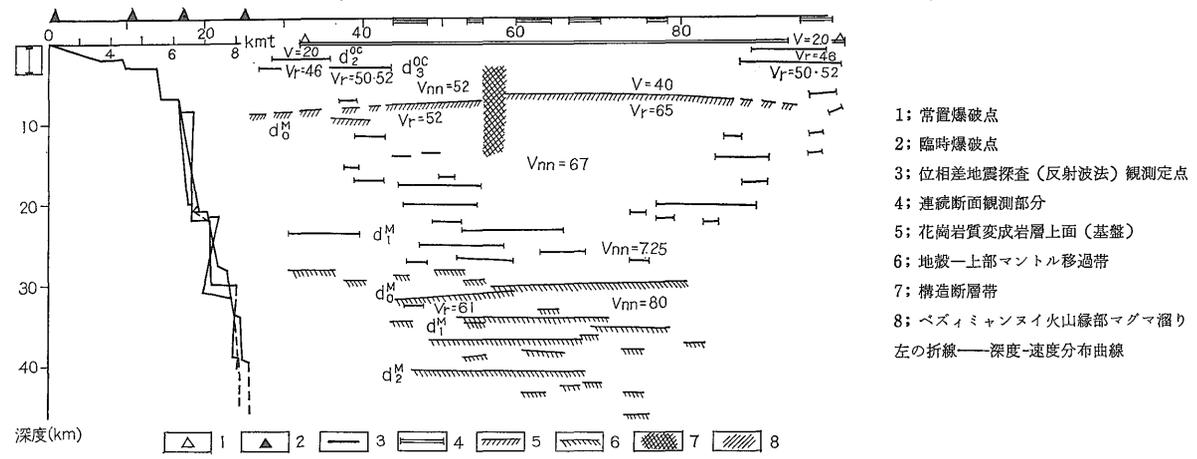
地殻の地震探査断面について得られた資料 (第 2・3 図) は、調査地域が若い地質の地域に特有の多くの特徴を備えているにもかかわらず、かなり長期にわたる地史を経て形づくられたことを証明している。

クリュチェフスコイ火山群地域の地殻は、大陸型構造であることを特徴とする。変成基盤岩層に相当した、 $V_r=6.0-6.5$  km/秒 を有する、広域的な、十分に追跡することができる地震学的境界面の存在は、調査地域が過去の地質時代に複雑な地向斜発展史を経たことを証明している。

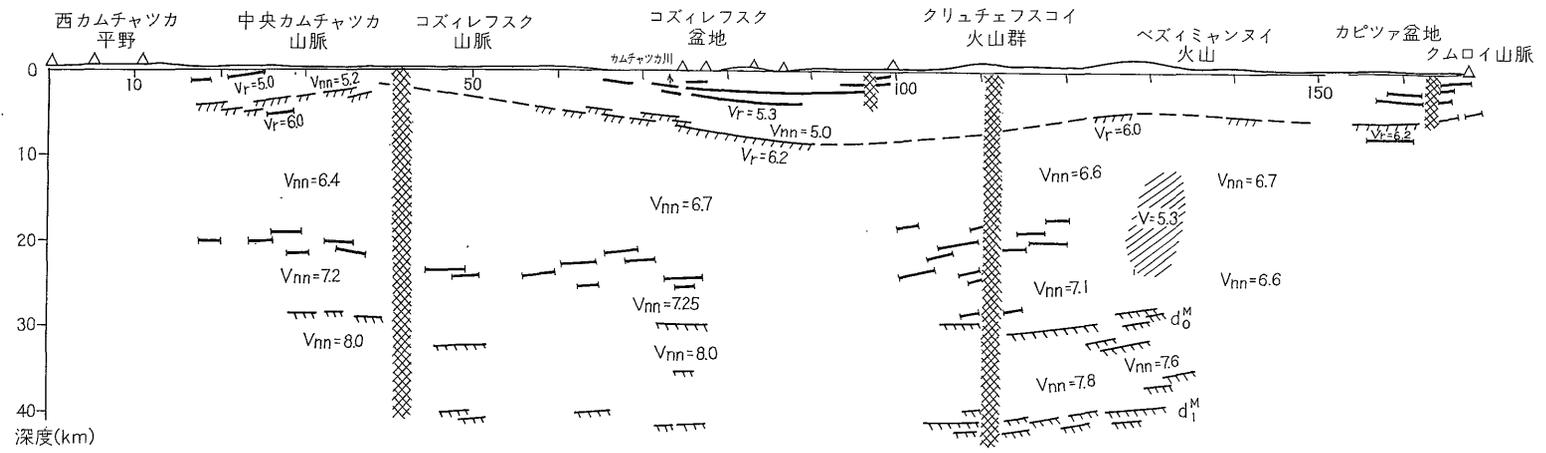
中央カムチャツカ沈降凹地地域のモホロビッチ不連続面は、1つの境界面としては鮮明でない。深さ 28–32 km から 40–42 km に及ぶ、かなり厚い、速度分布の複雑な移過帯が認められる。この場合、火山群の外側では、移過帯が 8.0–8.1 km/秒 という境界と帯内の速度を備えていることは1つの特徴である。それからクリュチェフスコイ火山群地域に向かって速度が減少し、7.6–7.4 km/秒 となる。このような移過帯の構造の重要な特徴となっているのは、中央カムチャツカ沈降凹地部分では移過帯上面からの地震波が、火山群地域では移過帯下面からの地震波がはるかに識別しやすいことである。そして、《玄武岩層》は、厚さ 8–10 km でもって拡がり、その上面は西から東に向かって、《移過帯の起伏》をくりかえしながら、また、クリュチェフスコイ火山群の下に緩傾斜した、あまり鮮明でない複背斜を形づくりながら、ゆるやかに盛り上っている。クリュチェフスコイ火山群下のコンラッド不連続面の分布深度は 18–20 km で、その不連続面の上位には、深部地震探査資料によると、西部では厚さ 12–18 km、東部では厚さ 8–10 km の《花崗岩層》が分布する。以上のように、《花崗岩層》の厚さは、《玄武岩層》よりも少し厚い。ゴズィレフスク凹地の固結地殻の上位層は、はっきりとした向斜プランジを形づくっている。そして、火山群地域では、《花崗岩層》の上面が地表下 4 km に位置し、ゆるやかな複背斜状を呈している。

地質の資料によれば、《花崗岩層》は古生代生成体からなり、物質組成からすると、中央カムチャツカ山脈とガナル山脈の地表やハヴィヴェンスキー丘陵に露出する先中生代変成岩コンプレックスに似ている。

白亜系上部層 (Cr<sub>2</sub>) は、2–4 km の厚さでもって、固結地殻の上面に平行に分布する。ゴズィレフスク盆地とハピツァ盆地の両地区では、白亜系上部層は深度 3.5–4 km まで埋没している。火山群地区の白亜系の存在深度に関する直接的な、地震学的な資料は得られなかったが、固結地殻の上面の位置を考えれば、その白亜系基盤の分布深度は 2 km をこえないと見積ることができる。この場合、火山群の下では、白亜系がかなりゆるやかな複背斜褶曲を形作り、その褶曲軸は、上昇しながら北西に向かって延び、ハルチンスキー火山群の北では、白亜系は地表近くに存在するものと思われる。クリュチェフスコイ火山群地区における白亜系基盤岩層の存在深度 (地表下 2 km 以内) についての地震探査資料は、主として、本調査地域の第三系の厚さに関する以前の情報 (Piip, 1956) をうち消すものとなっ



第2図 カムチャツカ川河谷ぞいの地殻断面 (断面 I—I')



第3図 クリュチェフスコイ火山群に交差する方向の地殻断面図 (凡例は第2図と同じ)

た。地質断面上部の  $V_r=4.6$  km/秒の部分の境界は、おそらく、古第三紀 (Pg) 火山源岩-堆積岩層の上面に相当するだろう。その場合、クリュチェフスコイ火山群下の古第三系系の厚さは 1.0 km である。

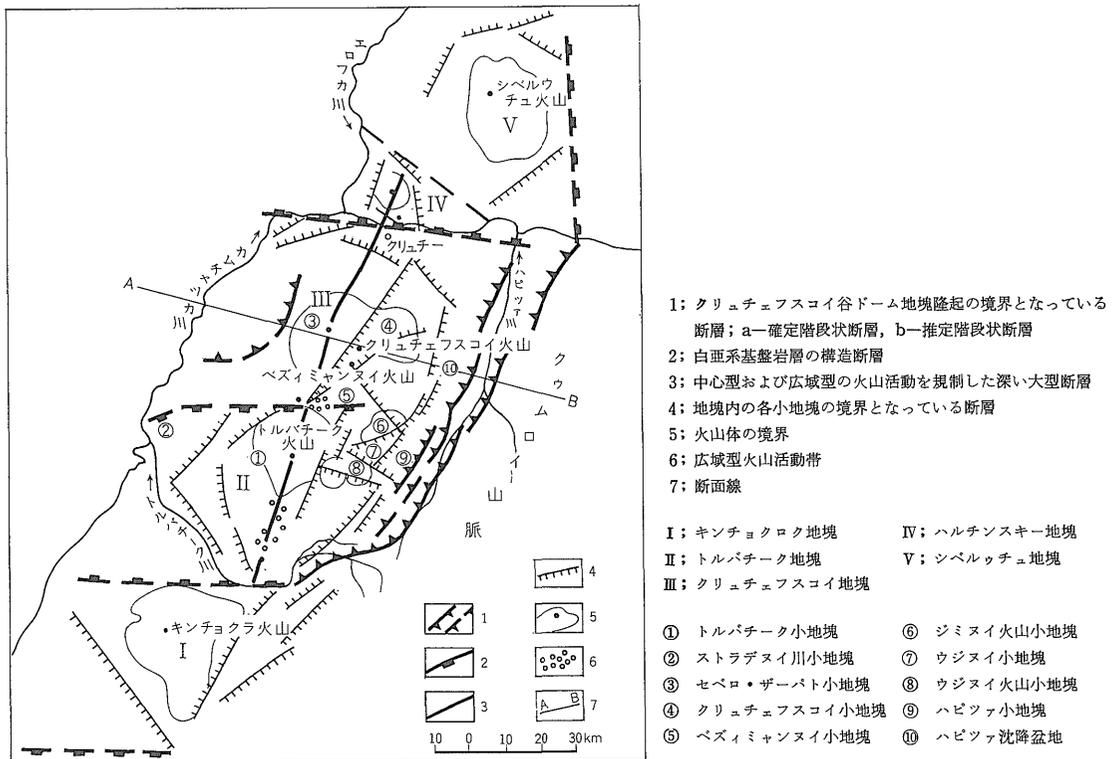
クリュチェフスコイ火山群北東部分の下では、白亜紀-古第三紀-新第三紀の地層が非対称的な向斜褶曲を形成し、クリュチェフスコイ火山の北東に分布する褶曲核部分 (ハピツァ沈降盆地地区) では、新第三系系の厚さが最大となり、2 km に達している。そして、西方と南西方に向かっては、褶曲翼が  $20-30^\circ$  の傾斜でもって膨化している。速度  $V_r=1.8-4.0$  km/秒を有する部分の境界は、各種組成の陸源岩と火山源岩の互層が原因の、新第三系系の不均一部分とみることができる。

#### 4. 地体構造

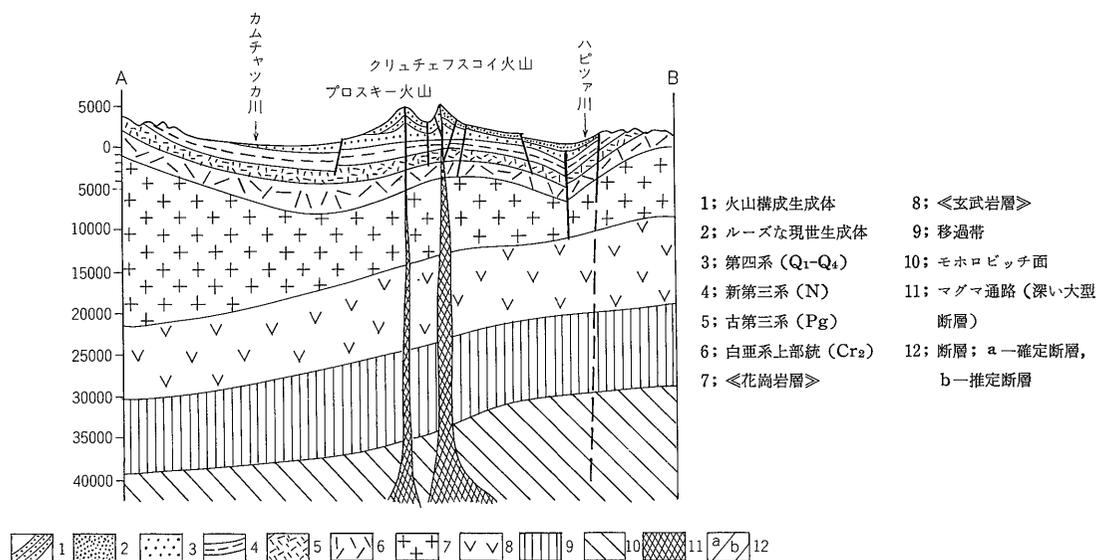
クリュチェフスコイ火山群地域の地質と地球物理の資料の解析結果と深部地震探査資料の検討の結果、以前の資料分析結果 (Piip, 1956; Yermakov, 1970) とは幾らか異なる構造様式が組み立てられた。なお、その組み立ての基礎としては、火山群の基盤のモザイク構造法則 (第 4・5 図) が使われた。

その基盤の複雑なモザイク構造は、カムチャツカ火山帯とアリューシャン列島弧の 2 つの構造の接合部付近という位置が適当なために生じた、広域構造運動力の作用の結果である。

この調査地域の主な構造擾乱状態について述べよう。クリュチェフスコイ火山群の東は、ハピツァ川右岸にそった構造崖の形で現在の地形によく現われている、階段状断層系によって境されている。深部地震探査の資料によると、この断層は深さ 4.0-4.5 km まで入りこみ、この落差は 1,000 m に及んでいる。滑り落ちたのは西翼である。地震研究資料 (Ivanov, Gorel'chik, この論文集に掲載) によると、ハピツァ川の東を走る断層は深部裂かと思われる。そのことを示唆するのが、断層線にそって分布し、かつ、深さ 50-70 km まで上部マントルに入りこんでいる多数の震源の存在である。そして、地震研究の結果は、クリュチェフスコイ火山群の西側の境界に深部裂カが存在するという



第 4 図 クリュチェフスコイ火山群地区の構造地質概念図 (B. V. Ivanov)



第 5 図 A—B 線地質断面図

見解を否定することとなった。そこには、落差 200-500 m で深さ約 2 km の断層が存在するにすぎないのである。この断層にそって中部構造階 (Pg-N) の東部分が上昇し、断層そのものはルーズな第四系に被覆されたが、地形にいくらか現われている。このように、クリュチェフスコイ火山群のドーム地塊構造は、古生代—中生代複背斜隆起体 (Pz-Mz) のドーム部分に属した非対称性構造である。火山群の境界となっている断層は、最終的には、鮮新世—第四紀に、すなわち、クリュチェフスコイ火山群のドーム地塊構造の形成期に形成された。深部地震探査によって把握された、火山活動帯およびオーストルイ—トルバチーク火山、プロスキー—トルバチーク火山を通る全地殻的大型断層<sup>1)</sup>がプロスキー火山まで延び、さらにハルチンスキー火山群に達しているものと思われる。クリュチェフスコイ火山とも同じような関係がある可能性は否定できない。

以上のような本調査地域の地体構造は、先後期白亜紀の基盤の隆起部と沈降部に発達したもので、そのような基盤の配置と構造運動の際に、一連のモザイク地塊が形づくられ、そのモザイク地塊構造がそれぞれの噴火点の分布と火山活動の性格を左右している。

地質資料と地球物理探査資料を総合し、航空写真を解析して、われわれは 5 体のモザイク地塊を区分することができた。すなわち、キンチョクロク地塊、トルバチーク地塊、クリュチェフスコイ地塊、ハルチンスキー地塊、シベルウッチュ地塊の 5 地塊で、調査地域の西部では東西方向および東西に近い方向の断層によって、北部では北西—南東方向の断層によって分けられている。これらの断層の始まりは、おそらく、カムチャツカ構造運動相 (Cz-Pg<sub>1</sub>) に発するものであろう。各地塊を分ける断層線は、一般に、地形的にはトルバチーク川、ストウデナヤ川、カムチャツカ川、イリチネツ川の谷となっている。そのうち、トルバチーク川とカムチャツカ川にそって走る断層は、厚い、ルーズな地層に被覆されている。ストウデナヤ川にそった断層は、その後再び動いているのだが、東部の部分が落差 700 m 前後で北に凸出・湾曲した弧を形づくっている。ある場合 (トルバチーク川とカムチャツカ川にそった両断層の場合) には、狭長な、地溝によく似た、幅 5-10 km の断層帯について触れなくてはならないだろう。そのような断層帯による落差は 1,000 m ないしそれ以上と見積るべきものである。

モザイク型地塊群は、地壘型の構造 (キンチョクロク地塊、クリュチェフスコイもしくは別称ツェントラリヌイ地塊、シベルウッチュ地塊) と、互いに上昇または下降し、それが重力探査結果によく現われている地溝型 (トルバチーク地塊、ハルチンスキー地塊) の構造の 2 群でできている。先白亜紀基盤に対するこれら各モザイク地塊の分布とその地塊相互の関係が、この火山群地域の基本構造の特徴を左右する大きな要素となっている。

1) 訳者註: 英訳すると through-crustal fault である。

上記各地塊内には、その地塊をさらに一連の階段状小地塊に分ける、新第三紀—第四紀の正断層—逆断層型の構造断層と火山成断層が多数発達している。各小地塊の境界は、多くの場合、ところによっては実際に追跡できるし（ジミヌイ火山とウジヌイ火山の両小地塊間の断層）、ところによっては深部地震探査と重力探査の資料から読みとることができる（クリュチェフスコイ火山、トルバチーク火山、ウジヌイ火山と北西小地塊との境界の断層）。これらの正断層—逆断層型断層の落差は 100 m 台である。白亜系基盤に対する小地塊の位置は、第四紀火山岩コンプレックスからなる上部構造階の地質構造の特徴を左右し、局地的な火山活動のいくつかの特徴を左右している。

地震探査資料によると、クリュチェフスコイ火山の下、深度 20–40 km に平面直径が約 2 km の異常部があり、その範囲では地殻および上部マントル中に地震波の伝播による境界がみられない。この異常部は、おそらく、クリュチェフスコイ火山を地殻下部のマグマ溜りから成長させた通路となっている部分に違いない。そのマグマ溜りは、地球物理探査の資料 (Gorshkov, 1956) によると、深さ 50–70 km のところに位置する。

広域火山活動帯を通る、全地殻的大型断層とこのマグマの通路は関係があるのかどうか、プロスキー・トルバチーク活火山とこのマグマの通路は関係があるのかどうか、まだ明らかになっていない。あるいは、北東方向の弱帯に注目する必要があるかも知れない。その弱帯の幅は 10–13 km で、この弱帯の存在は重力場にはっきり現われている (Zubin, 前出)。

ベズィミャンヌイ火山の下、深さ 10–20 km のところに異常帯が認められる。この異常帯はベズィミャンヌイ火山の縁部マグマ溜りと一致するが、上部マントルとは直接の関係がない。というのは、そのマグマ溜りの下、深さ 30–40 km のところに移過層に結びついた地震波伝播境界面がはっきり追跡できるからである。同時に、深部地震探査資料によれば、ベズィミャンヌイ火山からクリュチェフスコイ火山にいたる火山群の下に地震波伝播異常帯が認められる。これは、ベズィミャンヌイ火山直下の深さ 10–20 km のところに認められる、低速度の異常帯が、地震波パラメータをいくらか変化させながら、カーメニ火山とクリュチェフスコイ火山の下に潜りこみ、さらにその先に伸びて上部マントルに入りこみ、上述のクリュチェフスコイ火山のマグマ通路につながっている。ベズィミャンヌイ火山のマグマ溜りの垂直規模は 10 km をこえない。このマグマ溜りは、深部裂か帯にそったクリュチェフスコイ火山のマグマ供給帯につながり、火山の噴火輪廻の同期性もこの結びつきを示唆している。

## 5. 火山活動の特徴

火山地区では、玄武岩—安山岩質玄武岩系と玄武岩—石英安山岩系系の 2 岩系が区分できる (Timerbaeva, 1968; Yermakov, 1970)。玄武岩—安山岩質玄武岩系系の岩石（トルバチーク火山、プロスキー火山、カーメニ火山、クリュチェフスコイ火山、プロスキー・トルバチーク火山、ダルニー・プロスキー火山の台地生成体）は、晶出初期段階の火山岩に特有の多くの特徴を備えている。この岩系に属するのは、B. I. Piip (1956) が出発マグマの非分化生成物とした、すべてのメガ斜長斑岩質熔岩コンプレックスである。

玄武岩—石英安山岩系系の岩石の場合（ベズィミャンヌイ火山、ポリシャヤ・ウジナ火山、マーラヤ・ウジナ火山、ジミヌイ火山）は、分化のいちじるしい火山岩の特徴を備えている。玄武岩—安山岩質玄武岩系系の火山岩の総体積は 3,000 km<sup>3</sup>、玄武岩—石英安山岩系系の場合は 1,000 km<sup>3</sup> である (Yermakov, 1970)。

本調査地域の火山岩の岩石化学的特徴と深部構造・浅所地質構造の特徴を比較・対照すると、全地殻的大型断層と上部マントルに關係のある火山の火山活動のタイプおよび生成岩石の岩石化学的特徴は、本地域の地質構造、地殻のタイプと厚さに直接的な關係がないという結論になる。中間マグマ溜りをもった火山の場合は、ある程度、地域の構造運動様式の特徴、地殻のタイプと厚さに關係がある。

## 6. 結 び

- 1) クリュチェフスコイ火山群地域の地殻は大陸型に属し、その厚さは 28–30 km である。
- 2) その地殻の断面に中生代基盤岩層が存在することは、過去の地質時代にこの地域が複雑な地向斜の成長を経験し、その結果として、《花崗岩層》と《玄武岩層》が生成されたという推定の十分な根拠となる。
- 3) 中生代 (Mz) と古第三紀—新第三紀 (Pg-N) の火山活動は、大陸型地殻に発達したものである。

- 4) この地域の主要な構造単位は、深部構造の状態と方向に規制されている。
- 5) 新第三系 (N) の厚さは、どこも 2 km をこえていない。古第三系 (Pg) と目される地層は 1.0-1.5 km の厚さを有する。白亜系 (Cz) の厚さは 2-4 km である。
- 6) クリュチェフスコイ火山群の北東部の下位、ハピツァ沈降盆地の Cz-Pg-N 層は、向斜褶曲を形づくっている。その心核部は、落差 1,000 m 前後の正断層と逆断層に切られている。
- 7) クリュチェフスコイ火山群のドーム地塊隆起は、古生代-中生代の複背斜隆起のドーム部に属する非対称構造である。クリュチェフスコイ火山群地域は東を階段状断層系で境され、その断層のうちの 1 本は深部裂かである。なお、西側の構造境界線ははっきりしない。
- 8) クリュチェフスコイ火山群地域は、構造地質学的には、小地塊に分割された、新第三紀-古第三紀-白亜紀後期の岩層のモザイク状地塊からなる。これらの地塊と小地塊の配列状態が火山活動の特徴を左右している。
- 9) 全地殻的大型断層によってマントルと直接つながった火山の火道は、構造運動の内容との直接的な結びつきを示していない。しかし、中間マグマ溜りを有する火山の火道は、さまざまな構造運動の度合に規制されている。
- 10) クリュチェフスコイ火山の下、深さ 30-40 km のところからマグマ物質帯が柱状に上昇している。
- 11) ベズィミャヌイ火山の下、深さ 10-20 km のところに異常帯がみられ、これは縁部マグマ溜りに相当する。

#### 文 献

- Balesta, S. T. (1967) Application test of point seismozonding by refracted wave to the research of structure of Avacha volcano. 《Geol. and Geophys.》, no. 8, p. 93-97 (in Russian).
- Balesta, S. T. *et al.* (1974) Structure of earth crust under volcanoes in some kinds of geostructural zones by geophysical data: in book 'Geodynamics of magma-formation and volcanism', Petropavlovsk-Kamchatskii, p. 76-81 (in Russian).
- Gnibidenko, G. S. (1968) Role of metamorphic complexes in the structure of north-western sector of Pacific-ocean belt: in book 'Geology of transitional zone from Asian continent to Pacific ocean', Moskwa, Nauka Press, p. 58-92 (in Russian).
- Gorshkov, G. S. (1956) On the distribution depth of magma chamber of Klyuchevskoi volcano: 《Doklady of USSR Academy of Science》, vol. 106, no. 4, p. 703-705 (in Russian).
- Yermakov, V. A. (1970) Klyuchevskoi volcano group, geological structure and petrogenesis: Petropavlovsk-Kamchatskii, 29p. (in Russian).
- Piip, B. I. (1956) Klyuchevskoi sopka and its eruptions: 《Trudy of Labor. Volcanology》, issue 11, Moskwa, Nauka Press, 311p. (in Russian).
- Suprunenko, O. K. *et al.* (1968) Results of research by complex method of refracted wave in Ust'-Bol'sheretskii basin (Kamchatka): 《Sovietskaya Geologiya》, no. 3, p. 36-42 (in Russian).
- Timerbaeva, K. M. (1967) Petrology of Klyuchevskoi volcanoes at Kamchatka: Moskwa, Nauka Press, 207p. (in Russian).