

噴火の長期予知*

P. I. TOKAREV

岸本文男**訳

噴火予知と火山災害予知の方法を開発することは、火山学の重要課題の一つである。噴火予知には、長期予知と短期予知がある。

長期予知は、数10年後という時間の範囲で噴火の確率を見積ることである。長期予知法の開発には、二つの道があると思われる。第一の道は、地球の外の現象(宇宙現象——太陽の活動、太陽・地球・月・惑星の相対的な運動に結びついた地球の潮汐輪廻、など)と噴火との関係の研究にもとづく道である。第二の道は、火山の噴火頻度の統計的な分析及びその火山活動の諸法則性にもとづく道である。

1. 火山活動のいくつかの法則性

火山活動、それは地球が平衡状態を確立する過程での物質とエネルギーの垂直運動の1形態で、しかも構造運動と違って、火山活動の際には高塑性の物質(マグマ)が火道及び裂かにそって移動し、その移動は常に地球の中心から外方に向かう方向をとる。噴火、それは地表へのマグマの噴出であり、その自然の量的な尺度となるのは噴出物の量(m)である。噴火はほとんど常に時間的には断続し、さまざまに経過する。

ある場合には熔岩が静かに溢流し、またある場合にはきわめて粘性の大きいマグマがドームの形で押し出され、またある場合には爆発の形をとり、多くはこれらの諸現象のさまざまな組み合わせである。ある火山では、マグマの溢流が火口から連続的に行われ、その噴火は長い静穏な期間をおいて行われる。また、ある火山では、爆発がさまざまな間隔をおいて断続し、その一つづきの爆発は比較的長い静穏な期間をおいて行われる。ある研

究者たちは前者の場合を単独噴火(independent eruption)、後者の場合を系統噴火(serial eruption)とよんでいるが、このように、「噴火」の概念は正確にはまだ定まっていない。

噴火は、抛出物の厚さや量によって分類されることもある。きわめて弱い噴火のときには、数10ないし数100 m^3 のマグマを地表に抛出することしかできず、きわめて強い噴火の場合には数10ないし数100 km^3 ものマグマを抛出することができる。このように、抛出物の量は7-9桁の範囲で変動することがあり得る。このことから明らかなように、それぞれの火山の活動を分析するに当っては、「噴火」の言葉にどのような意味をもたせるか、正確に定める必要がある。しかし、さまざまな編者によって編集された、世界の火山噴火のリストには、多くの場合、明瞭な「噴火」の定義づけがみられない。そのため、リストのデータを噴火特性の分析もしないで利用することは、とくに噴火の事実そのものが使われる場合には、誤まった結論が導き出されることになりかねない。

筆者は、噴出物の量(m)によって噴火を、微弱($m \leq 10^{10} kg$)、弱($10^{10} < m < 10^{11} kg$)、中($10^{11} < m < 10^{12} kg$)、大($10^{12} < m < 10^{13} kg$)、巨大($m > 10^{13} kg$)に区分する。

噴火現象の性質と噴出物質の量によって、複成中央火山の噴火は3タイプの基本型に区分される。第1型は微弱噴火から中噴火までのもので、マグマが火道から火口底に現われるか、あるいは火山ドームの一部での爆発か、火口中に小規模な溢流ドームが成長するタイプである。これは、激発間型(interparoxysmic type)とよばれることが多い(B. I. Piip, 1956)。火山によっては、この激発間型噴火は数カ月をおいて、あるいは数10年をおいて発生し、多くはかなり長く続く。このような噴火は、火口から多くとも10 km しか離れていない、火山の近辺に破壊をもたらすだけである。

第2型は中噴火と大噴火の場合で、火口全体からマグ

* П. И. Токарев (1979): Долгосрочный прогноз извержений вулканов: «Вулканология и сейсмология», no. 3, стр. 77-90 (P. I. Tokarev (1979): Long-term prognosis of eruptions of volcanoes: «Vulkanologiya i seismologiya», no. 3, p. 77-90, in Russian)

**鉱床部

マが流出するタイプである。このタイプの噴火の結果として、火口底全体が口を開き、激発間型噴火によって集積していた全集積物が拋出される。このような噴火は激発型(paroxysmic type)噴火とよばれる(B. I. Piip, 1956)。このタイプの噴火は激烈で、しかも短時間に終り、火山によっては数10年おきから数100年おきの開きがある。噴火は、火山から数10 kmの範囲に破壊をもたらす。

第3型は巨大噴火の場合で、おそらく、このタイプは浅い、側縁のマグマ溜りの爆発によるものであろう。その結果として、成層火山は部分的ないし全体的に破壊され、その場所に巨大な凹地、すなわちカルデラを生じる。このタイプの噴火は数万年ないし数10万年の間隔で発生し、短時間かつきわめて激烈に進行して、火山から数10 kmないし数100 kmにわたる範囲が破壊される。

上述の噴火タイプ区分の指標はごく一般的なもので、個々の具体例ではそれぞれ個有の特性があり、一般的な指標との間にずれがあり得ることを指摘しておきたい。

さて、複成火山の場合、2種の基本的状態、すなわち静穏状態と噴火状態に区分でき、先の噴火状態の終了から次の噴火状態の終了までの時間は噴火輪廻期間 T とよばれる。

大部分の火山の場合、噴火継続時間 τ_i と噴火輪廻期間 T の比 τ_i/T で決まる活動度係数(activity coefficient) K は、 <0.05 である。噴火輪廻(cycle of volcanic eruption)のほか、著者(P. I. Tokarev, 1971₂)は活動度輪廻(activity cycle)という概念を導入した。それは、パーレット(F. Perret, 1924)によって導入された噴出輪廻(explosion cycle)の概念に近い。多くの火山では、激発型噴火後にはその前の噴火のすでに固結した火口充填物が火口から完全に(もしくはかなり)なくなってしまう。それから、1系列の激発間型噴火がおこり、その結果として火口は再び次第に埋められて、火道の閉塞が進み、次の激発型噴火への条件がつくられていく。火道内の圧力が熔岩岩栓の耐性の限界をこえると、新たな激発型噴火が始まる。

以上のように、火山の状態変化には一定の法則性がみられる。火山が以前と全く同じ状態もしくはよく似た状態にかえる火山活動過程の総体を我々は火山の活動輪廻とよび、その期間を火山の活動輪廻期間とよぶ。それぞれの火山には、火道を閉塞する熔岩岩栓の耐性に特有の限界があり、全体としてその限界値の範囲は比較的せまい。マグマの発生移動速度が一定していれば、火山の活動輪廻期間は同一火山では似たようなもので、激発型噴火はほぼ同じ期間間隔で行われるはずである(P. I. To-

karev, 1971₂, 1977₂)。いくつかの論文(P. I. Tokarev, 1971₂, 1977₂; G. N. Kovalev et al., 1971)では、個々の活動輪廻期間と平均値との偏差は正規分布法則にしたがうことが指摘されている。活動輪廻がほかの指標によって区分できることも指摘しておきたい(P. I. Tokarev, 1977₂)。

歴史時代における世界の多くの複成中央火山の噴火を分析して、筆者は次のような結論に到達した(P. I. Tokarev, 1970, 1971₂, 1977_{1,2})。

(1) 噴火時における地表への物質の移動は、時間的には平均して数100年ないし数1000年かかって行われる。

(2) マグマ溜り中でのマグマの発生は、一定の速度で進む。

(3) 噴火の断続性は、地表に物質が溢り出す条件が周期的に変化し、噴火と噴火の間に余剰のマグマを蓄積できる能力があるためと解される。

(4) 火道内の圧力は時間の経過にしたがって直線的に上昇する。

(5) それぞれの火山には、熔岩岩栓に個有の限界耐性があり、したがってマグマ溜りと火道内にたまることのできるマグマの量にもその過剰圧力にも個有の限界がある。

(6) マグマの発生・移動速度が一定し、熔岩岩栓の耐性に限界があることは、いくつかの噴火タイプそれぞれに特定の周期性をもたらし、その際の平均周期値との偏差は正規分布法則にしたがう。

(7) そのような法則性は、諸噴火タイプ別の噴火時期の長期予知と予想マグマ量の長期予知に利用できる。

2. 噴火長期予知法

火山噴火(ないし火山活動)の長期予知の物理的基礎となるのは、長期的にみると時間的に等分された、マグマの地表への上昇(火山の平均活動量 α の一定性)、及び火山噴火(ないし火山活動)の周期性である。火山の過去の噴火を詳しく分析することによって、火山の平均活動量 $\alpha = \Sigma m_i / \Sigma T_i$ (m_i は噴火物の量、 T_i は第 i 回目の噴火輪廻の期間)が決定でき、噴火輪廻(ないし噴火活動輪廻)が区分でき、その期間 T_i が決定でき、平均期間値 $T = \Sigma T_i / n$ とその散布度 $\sigma^2 = \Sigma (T_i - T)^2 / n$ が決定でき、期間 T_i の分布則が決定できる。

平均活動量 α に相当する場合、その火山の活動は定常的過程、噴火輪廻(火山活動輪廻)の期間が平均値とはっきり異なる場合、それは偶発的過程とみることができ

上に述べたように、火山活動輪廻の期間が正規分布則

にしたがう。その場合、噴火の確率密度分布は、

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{t-T}{2\sigma^2}}$$

に等しく、時間間隔 $t_2 - t_1$ における噴火の確率は、

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t-T}{2\sigma^2}} \cdot dt$$

に等しい。ただし、時間 t は次輪廻の噴火の瞬間から、または前輪廻の噴火終了の瞬間から数える。

火山活動の時期外の観測期間が限定され、一般にきわめて数少ない輪廻しか観測されていないので、近い将来には、散布度によって複合散布度 $\sigma^2 = \Sigma(T_i - T)^2 / (n-1)$ が用いられ、選択散布とよばれるようになるだろう。 σ は選択の平均二乗偏差である。

噴火の長期予知の際には、もっとも確率の高い噴火時刻 $t_0 = T$ と噴火期間 $\tau_2 = t_2 - t_1$ (ただし、 $t_1 = T - \sigma$ 及び $t_2 = T + \sigma$) が決定されるだろう。この場合、噴火の確率 $P_2 = 2/3$ とする。このような条件の場合には、 $\tau_2 = 2\sigma$ である。近い将来、 τ_2 は予知噴火時間とよばれるようになるだろう。次の噴火の瞬間 (もしくは先の火山活動輪廻の終了時点) から予知された噴火の開始時点までの時間は τ_2/τ_1 であらわし、その時間内での噴火の確率は P_1 であらわすことにしよう。 P_1 は $\leq 1/6$ である。時間の単位としては、かなりの正確さでもって、月ないし年を用いることができる。

予期される噴火の噴出物の量は激発噴火時における最大量 m_p か、 $m = \alpha T$ の関係から見積られる。噴火の総エネルギー E は、 $E = mQ$ である (Q —マグマの含熱率) (Tokarev, 1977)。

あり得べき噴火の場所は、火山の地形学的研究によって確かめることができる。中央火口丘型火山の場合には、噴火の確率が大きい場所となるのは中央火口である。ある火山で側噴火が特徴であれば、あり得べき噴火の区域を示すことができるにすぎない。

火山の過去の噴火の特徴、火山の地形と構造、予期される噴火物の量、噴火物のあり得べき堆積、集塊岩流 (agglomeratic stream)・熔岩流・熱泥流の移動可能な経路を解析することによって、噴火災害を見積り、危険帯を識別することができる。

多くの火山では、有史以来、それほど多くの噴火がわかっているわけではなく、その量的な特徴の記録も乏しいので、噴火の統計的な分析にだけ頼ることは必ずしも合理的ではない。噴火予知の重要な要素となるべきものは、火山の活動の綿密な分析、噴火タイプの識別、その時間的経過の性質の解明である。

予知の有効性を判定することは、きわめて重要であ

る。このような概念は、構造性地震に対してグーセフ (A. A. Gusev, 1974) が導入したものである。それと同じように、予知有効率として $I_1 = p_2/p$ 値を採用しよう。この値は当該火山の噴火の平均確率密度 p よりも予知された噴火までの時間 τ_2 の間の噴火の平均確率密度 p_2 の方が何倍か大きいことを示している。正規分布の場合、噴火の平均確率密度は $p = 1/2T$ である (T —噴火の平均輪廻期間)。 $\tau_2 = 2\sigma$, $P_2 = 2/3$ とすれば、

$$p_2 = \frac{P_2}{\tau_2} = \frac{1}{3\sigma}$$

$$I_1 = \frac{p_2}{p} = \frac{2}{3} \times \frac{T}{\sigma} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{\gamma}$$

となる (ただし、 $\gamma = \sigma/T$)。予知は $I_1 > 1$ の場合のみ、すなわち、 $\gamma < 2/3$ の場合にのみ成り立つ。近い将来には、 $I_1 \geq 1.33$, すなわち $\gamma \leq 0.5$ であれば、条件つきながら、十分に有効な予知とみなされ、 $\gamma \leq 0.5$ の火山の場合だけ噴火予報が出されることになるだろう。

実際の有効度 I_2 は、実際に行われた予知の分析結果から、次のような式にしたがって求めることができる。

$$I_2 = \frac{N_2}{\Sigma t_{Ri}} : \frac{N_1}{\Sigma t_i}$$

ただし、 N_2 —適中した予知回数、 t_{Ri} —第 i 次噴火までの予測時間、 N_1 —分析対象期間 Σt_i の間に行われた噴火回数。

予知正当率 β を割り出すことも重要である。それには、 $\beta = n_2/n_1$ を用いる (n_1 —総噴火回数、 n_2 —予知した期間の噴火回数)。予知の理論正当率 β_0 は 67% に等しい。予知法がうまく機能している限りでは、 β/β_0 比が意味をもってくる。

上述の方法を用いて、1969年末に筆者はカムチャツカ半島の6火山 (第1表の No. 1—No. 6)、1972年6月にカムチャツカ半島と千島列島の8火山に対する噴火の時期、量、性質の長期予知を行った (Tokarev, 1964, 1970, 1971)。カムチャツカ半島と千島列島の残る諸火山の場合には、現有の資料では予知に十分でない。噴火が近々5年の間に予期される火山に対しては、地質調査が大々的に行われ、火山観測が強化され、航空撮像解析がくりかえされた。

噴火予報を非公式に伝え始めたときから1978年6月までの間、それぞれ予測した時期に噴火したのが、1970年のカリムスキー火山、1974年のクリューチェフスコイ火山 (側火口)、1975年のトルバチーク火山 (側火口)、1976年のピーク サルィチュバ火山である。一方、噴火しなかったのは、クリューチェフスコイ火山 (主火口)、ジュパノフスキー火山、ムトノフスキー火山である。こ

第1表 カムチャツカ半島・千島列島諸火山の火山活動の旧長期予知

番号	火 山	T (年)	σ (年)	t_e (年)	$t_e \pm \sigma$ (年)	m (t)	噴 火 の 性 質
1	シェベルーチュ	22	4	1966	1981-1991	2×10^8	激発間型. 火口中にドームが成長
2	クリューチェフスコイ(主火口)	26	4	1971	1967-1975	1.5×10^9	激発型
3	〃 (側火口)	5	3	1971	1968-1974	10^8	側噴火型
4	プロスキートルパチーク	30	7	1971	1965-1975	5×10^7	主火口と側火口
5	カルィムスキー(活動輪廻の始まり)	10	1	1970	1969-1971	5×10^8	ブルカノ型. 熔岩流の溢流, 1972-1974年に最大の活動
6	アバチンスキー	40	10	1970	1960-1980	1×10^9	激発型
7	ジュパノフスキー	15	2	1971	1969-1973	?	中央火口. ブルカノ型
8	ムトノフスキー	12	3	1974	1971-1977	?	同上
9	アライト	38	2	2010	2008-2012	?	中央火口ないし側火口
10	エベコ	35?	4	1966?	1992-2000	?	ブルカノ型中央火口
11	セベルギナ	43	10	1976	1996-1986	?	中央火口. 爆発型. ドーム成長の可能性あり
12	ピークサルィチェバ	16	2	1975	1973-1977	?	ストロンボリ型中央火口
13	ゴリヤシチャヤツボカ	32	2	1976	1974-1978	?	中央火口. 熔岩溢流の可能性あり
14	ベルガ	53	6	2004	1998-2010	?	中央火口の爆発噴火

のように、7火山のうち、予測時期に噴火したのは4火山で、予知正当率は57%、 β/β_0 は0.85、有効率 I_2 は3.0であった。

9年間(1969-1978年)にわたる噴火長期予知の経験は、その方法がかなり高い正当率と有効率を備えていることを示している。その予知は、いくつかの火山で噴火のはるか以前に補足観測が組織され、継続されたことが有効であったことを示している。たとえば、トルパチーク火山の噴火の確率が大きいため、1971年から1975年の噴火の初めまで、夏季に、毎年補足的な地震観測が行われ、静穏期におけるその地震活動度についての貴重な資料が得られた(Tokarev, 1976)のに対し、噴火の確率が小さいためにシェベルーチュ火山では1980年まで地震観測の拡大が計画にのっていない。かくして、噴火の長期予知は火山研究の合理的な計画立案を助け、噴火の確率が大きい火山への研究の集中を促がしている。また同時に、実際に行われた予知の不十分さも明らかになった。予知有効度が高かったにもかかわらず、ジュパノフスキー火山とムトノフスキー火山の噴火は起らなかったのである。トルパチーク火山の場合、噴出物の量の予測ははずれてしまった。考えられるその原因は、ジュパノフスキー火山とムトノフスキー火山の場合、弱い噴火が予知に使われたことにあり、トルパチーク火山の場合、火山噴出量の計算に役だつ資料が少なすぎたことにある。クリューチェフスコイ火山主火口の噴火遅滞の原因は、おそらく、側噴火の際にマグマの内圧が急減したことにあるだろうが、そのことが配慮されなかったのである。今

後は、火山活動をさらに綿密に分析し、資料が少ない場合には予知でなく、できる限りの予知的なものとする方が合理的であろう。このことは、火山の活動についての我々の概念が実際と一致する限り、将来とも評価できるに違いない。

3. いくつかの火山での噴火予知

噴火予知のための資料は、1955年以前分に関しては主として世界活火山目録(Catalogue....., 1955, 1958, 1959, 1962)から集め、それ以後の分については各種の出版物と筆者自身の観測(カムチャツカ半島の火山の場合)から選んだ。残念なことに、多くの火山の場合、資料が不完全かつ少量で、予知に用いることができなかつた。数少ない例として、しかも主として最近の数10年間の例として、噴火物の量に関する情報があるにすぎないが、筆者はそのような情報によって火山の平均噴出量を算定した。そのため、多くの場合、火山噴出物の量を決定した値の絶対誤差が50%に達していることもあり得る。多くの場合、世界活火山目録には噴火の日付だけしか書かれていないが、火山活動の性質、噴火のタイプ、活動の法則性についての概念が組み立てられる、詳しい記載がなされている場合もある。

シェベルーチュ(Sheveluch)火山

この火山の正確に月日まで記録がある噴火は、1854年2月18日(第2型、激発噴火)、1879-1883年(第1型、激発間噴火)、1896-1897年(第1型)、1925-1930年(第

1型), 1944-1945年 (第1型), 1964年11月12日 (第2型) におこっている。メニャイロフ (A. A. Menyailov, 1955) の1944-1948年噴火の記載によれば, その第1型噴火の際, 地表におよそ 10^{11} kg の処女物質 (juvenile material) が送りだされている。また, 筆者はこの火山の平均噴出量を950 kg/秒 (推定誤差50%) と見積っている (Tokarev, 1977_{1,2})。この火山とその噴火は, A. A. メニャイロフ (1955), ゴルシュコフとドゥビク (G. S. Gorshkov and Yu. M. Dubik, 1969) の論文及び世界活火山目録にかなり十分な内容で記載されている。G. S. ゴルシュコフと Yu. M. ドゥビクは, シェベルチュ火山の過去の噴火の年代と性質を分析し, おそらく1980-1995年の間に新たな噴火が起るに違いない, という結論を出した。

正確に年代が付された, 噴火のおそれが大きい期間は, 110年というその火山活動の1輪廻内にある。この火山の激発噴火は1854年と1964年に起り, いずれも短時間で, 激しかった。1964年の噴火のときには, 処女物質が70分間におよそ 1.6×10^{12} kg ほど抛出された。噴火に先だって, 多数の火山性地震が起り, それによって噴火の開始が予知できた (Tokarev, 1967)。その火山活動輪廻は4期の長く持続する激発間噴火期 (2-6年) を含み, その噴火期には火口内熔岩ドームの成長, 爆発, 集塊岩流の溢流, 熱雲を伴い, 1964年の噴火時にはその火口ドームが火口からほぼ完全にふきとばされてしまった。これらの火山現象は時間的にはかなり規則正しく行われ, 次期噴火の長期予知を可能にしてくれた。

第1型と第2型の噴火を総合すれば, 1噴火輪廻の平均期間 T は22年, σ は5年である。次期の激発間噴火の開始は, 確率2/3をもって1981-1991年と予想できる。その中でもっとも確率が高い噴火時期は, 1986年である。計算による予知の有効度 I_1 は2.9である。処女物質の噴出予想量はおよそ 2×10^{11} kg である。噴火は数年続き, 火口内熔岩ドームの成長, 爆発, そして高度8,000-10,000 mまでの火山灰噴煙の上昇, 集塊岩流, 距離10,000 m近くまで熱風が伴われ, 冬期には小規模な泥流が伴われるであろう。破壊帯 (zone of destruction) は火山南部, 火口から10,000 m近くの地区まで及ぶであろう。噴火に先だって, おそらく, エネルギー 10^9 - 10^{10} J の火山性地震がおこり, 噴火の開始は数日間の地震データから予知できるに違いない。次の激発間噴火は1986年 $+22n \pm 5$ 年 ($n = 1, 2, 3$) と考えられる。

観察が1活動輪廻だけに限られ, 次の激発噴火の予知に十分な資料がないので, その予知がこうではないかと思われる, 一つの形を示してみよう。この火山の次の活動輪廻は, $T = 22$ 年, $\sigma = 5$ 年の, 3-5激発間噴火期

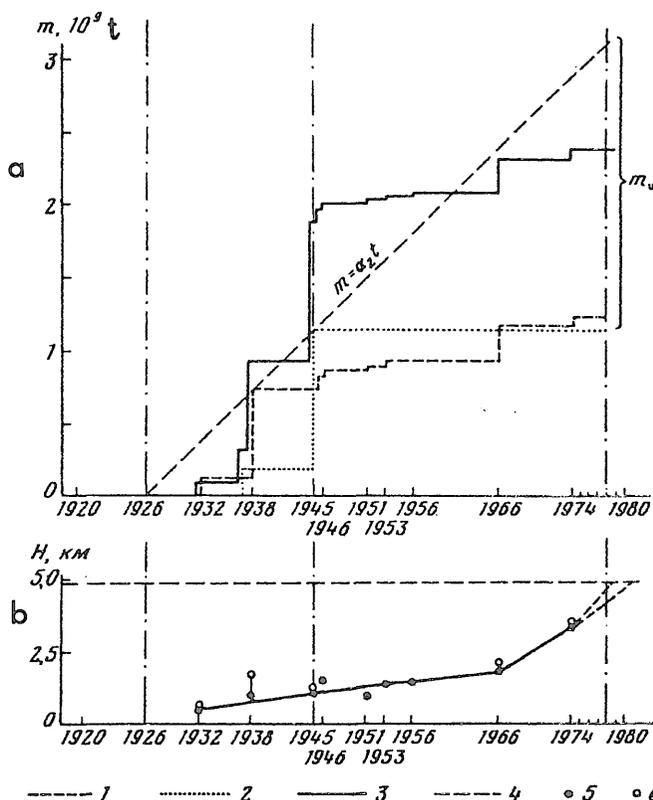
を含むもの, と推定できる。次の激発噴火が確率2/3であれば, それは2074 \pm 27年と予測しなくてはならない。計算による予知有効性は $I_1 = 2.7$, 処女物質予測量は $m \approx 1.5 \times 10^{12}$ kg である。噴煙は高度15,000-20,000 mまで上昇するだろう。集塊岩堆積・完全破壊帯 (zone of agglomeratic material sedimentation and complete destruction) は, 火口から最大20 kmの間の火山南部全域を占め, 冬季では泥流がカムチャツカ川までとどくであろう。風下50 kmにわたって火山灰が積もり, その厚さは最大10-20 cmになるだろう。噴火に先だって, エネルギー最高 10^{12} J の火山性地震が起り, 少なくとも噴火前3週間に始まり, その地震資料から噴火開始時期と予想噴出量が予知できるであろう。火口から10 km以内のところは, 震度が8-9バールとなるだろう。

クリューチェフスコイ (Klyuchevskoi) 火山

この火山とその噴火の記載は, ピープ (B. I. Peep, 1956) の論文が詳しい。彼のデータによると, 激発噴火は, 1737年, 1762年, 1790年, 1821年, 1853年, 1878年, 1904年, 1926年, 1945年に起っていて, その平均間隔は26年である。激発間噴火は最小数カ月, 最大数年と不規則で, その噴火期と次の噴火期との間隔は1年から数年までである。そのような側噴火が1932年, 1938年, 1945年, 1946年, 1951年, 1953年, 1956年, 1966年, 1974年にそれぞれみられた。筆者の見積りによると (Tokarev, 1977_{1,2})、側火口の平均噴出量は1926-1973年の間で $\alpha_1 = 930$ kg/秒であり, 主火口と側火口をあわせて $\alpha_2 = 2,100$ kg/秒である。1945年を過ぎてからは中央火口での激発噴火がおこらなかったため, 中央火口からの平均噴出量としてその前の活動輪廻 (1926-1945年) での平均噴出量1,900 kg/秒を採用する方がより正しい。したがって, クリューチェフスコイ火山 (主火口と側火口) の平均噴出量は $\alpha_3 = 2,800$ kg/秒とする方がより正しい。この推算誤差は50%をこえない。

第1図に掲げたのは, 側噴火, 主火口噴火, 両者併せた場合の噴出物累積図であり, $m = \alpha_2 \cdot t$ 直線図 ($\alpha_2 = 1,900$ kg/秒, すなわち主火口平均噴出量) である。1932-1974年におけるクリューチェフスコイ火山の山麓と山腹の活動側火口の開口高度も示してある。

クリューチェフスコイ火山主火口の激発噴火の長期予知は1969年に出されたが, その内容は第1表に示した通りである。1活動輪廻期間 T は26年, $\sigma = 4.3$ 年, $r = 0.19$, $I_1 = 3.5$, 1978年における噴火物の予測量 m_e は 2×10^{12} kg で, 推定誤差は50%である。もっとも確率が高い噴火時期は1971年である。確率0.7の噴火が1967-1975



第1図 クリュエフスコイ火山の噴出物 m 積算図(a)と側火口開口点の標高(b)

- 1—側噴火
- 2—中央火口噴火
- 3—中央火口噴火・側噴火総合
- m_p —中央火口噴火の予測噴出量
- 4—クリューチェフスコイ火山の標高
- 5—塔岩溢流点の標高
- 6—爆発壁頂の標高

年に予想されていた。中央火口に対する観測の結果は、1945年の噴火後に火口の深さが450-500mになったことを示していた。一連の激発間噴火の結果として、1978年7月9日には、火口がほとんど完全に閉そくされ、火道の内圧が 8×10^6 パスカル以上に増大していた。このことは、激発噴火が間近い可能性があることを示している。側火口の開口高度が規則正しく高くなっていく状態(第1図参照)も、この2年の間に中央火口から熔岩が溢流し、激発噴火が始まる可能性があることを示している。その噴火のときには、噴煙が高さ15,000-20,000mまで上るはずである。火口から50kmの範囲には、厚さ5cmの火山灰層が積る可能性がある。冬季では、泥流が生じ、それがカムチャツカ川に達するであろう。噴火に先だって、おそらく、火山性地震が多発するに違いないが、その発生の時間的な法則性は明らかでなく、噴火

の短期予知は困難であろう。おそらく、その火山性地震の発生状況は、安山岩質火山の噴火前に観測されている例(Tokarev, 1967)とよく似ているだろう。クリューチェフスコイ火山の激発間噴火の長期予知は、まず不可能であろう。

クリューチェフスコイ火山側火口の噴火の長期予知は、1969年に著者が、1973年にキルサノフ(I. T. Kirsanov)らが行っている。I. T. キルサノフらの論文では、側火口開口高度の時間的に規則正しい増大状況と噴火の反復状況にもとづいて、2種の予知がなされている。第1の予知によると、次の(1966年以後)側噴火は標高2,000-2,400mのところと予測され、その時期は未定であった。第2の予知によると、噴火は標高500-700mのところ、1973±1年と予測されていた。実際の噴火は1974年、標高3,600-3,400mのところ、筆者の

予知によれば(第1表参照), 確率0.7の噴火が1968-1974年に予測され, 噴火の場所は示されていない。しかし, その理論有効度はきわめて小さく, $I_1 = 1.11$, $r = 0.6$ である。

さらに詳しい側火口噴火の分析結果は, 側噴火と次の側噴火との時間間隔が2年以内の噴火群にまとめるのが適当であることを示している。このことについては, B. I. ピープ(1956)も指摘しているところである。そこで1945年と1946年の側噴火, 1951年と1953年の側噴火がそれぞれ1群にまとめられ, 当該群の噴火開始時期として1945年と1951年が採用された。そのほか, 時間の単位としては, 年でなく, 月が採用されている。この場合, 1噴火輪廻は $T = 85$ カ月, $\sigma = 22.7$ カ月, $r = 0.27$, $I_1 = 2.5$ である。もっとも確率の高い噴火時期は, 1980年9月である。確率 $2/3$ での噴火は, 1978年10月から1983年8月までの期間と予測される。そして, 噴火物の予測量は, $m_e \approx 1 \times 10^{11}$ kgである。側噴火の火口の位置が高くなる傾向がそのまま持続すれば, 次の噴火は中央火口近くのどこかで行われるはずである。しかし, そのような噴火は激発噴火と結びつき, 激発噴火直前もしくは直後に側噴火した事例が知られていないので, それは確かではない。

アバチャ(Avacha)火山

この火山の噴火は, 1737年, 1772年, 1779年, 1827年, 1855年, 1878年, 1881年, 1894年, 1901年, 1909年, 1926年, 1938年, 1945年に生じている。そのうち, とくに激しい噴火だったのは1737年, 1772年, 1827年, 1901年, 1945年の場合で, その噴火はこの火山での激発噴火であり, 残りは激発間噴火と考えられる。筆者の見積り(Tokarev, 1977₁)では, この火山の平均噴出量は540 kg/秒である。

筆者は, この火山の噴火長期予知を行った。その火山活動輪廻は, 強い噴火と弱い噴火をグループ分けすることによって区分され, 次の火山活動輪廻は3回の噴火を含んでいると想定し, そのそれぞれの噴火について予知を試みた。その結果が示しているように, 弱い噴火を詳細に検討し, 噴火予知に利用することは無益である。上述の論文では, もっとも確率の高い時期(1978年)の噴火に対してだけ予知を行うべきであったし, 1970年と1986年に噴火の可能性があった, あるいはあることを示すべきであった。

噴火の詳細な分析結果は, アバチャ火山の1活動輪廻が1期の激発噴火と最多3期の激発間噴火を内容とし, 一般に, 後者の持続期間は前者の場合よりもはるかに長

いことを示している。現有の資料では, 激発間噴火の長期予知はできない。激発噴火の場合は, T_i が42年, 48年, 28年, 46年, 44年に等しい。 $T = 41.6$ 年, $\sigma = 7.9$ 年, $r = 0.19$ である。次の激発噴火のもっとも確率が高い時期は1986年9月(1945+41.6年, 1945年2月25日から起算)である。確率 $2/3$ の噴火は1978-1993年の間におこるはずである。予知の理論有効度は $I = 3.5$, 噴火物の予測量は $m_e = 7 \times 10^8 t$, 噴火の際の噴煙は高度15,000-20,000mまで上り, 火山灰と噴石は火口から風下に最大30 kmにわたって最大30-40 cm積もり, 降灰帯の軸帯で火山灰がみられなくなるまでの範囲は200-300 kmに達する可能性がある。降灰帯における空気の強い帯電と放電が送電線や低電圧諸装置に損傷を与えるかもしれない。火砕岩流・熱雲・完全破壊帯は15 kmに達する可能性がある。冬季では, 泥流が火山南西部の場合にはアバチャ川まで, 南東部の場合には太平洋岸まで到達するだろう。噴火に先だって, その噴火開始の少なくとも2週間前から, エネルギー最大 10^{11} - 10^{12} Jの火山性地震がおこり, その地震のデータによって噴火開始時期が数日前に予知できるはずである。その地震は直距20-30 kmの範囲に震度最大5パールの震動を感じさせるが, エリゾボとペトロバプロフスク・ナ・カムチャツキーの町が危険にさらされることはないだろう。

激発噴火の前後に $m \leq 10^8 t$ の激発間噴火の可能性があり, その開始時期及びエネルギーは, おそらく, 地震の資料によって予知できるだろう。アバチャ火山の山腹及び山麓では, 火山ドームの成長と熔岩流の溢流を伴った側噴火の可能性がなくもない。

その噴火の場所と時期も, 噴火開始前1-3日間の地震資料によって予知できるはずである。

ハワイのキラウエア火山とマウナロア火山

ハワイ火山群の噴火に関する資料は, 世界活火山目録に1750年からのものが掲載されている。古い時代の噴火の記録は, 完全ではない。1894年からは噴火の記録に欠落がなく, その上, すべての噴火に対して噴出物の量(体積)も掲載され, それによって火山の噴出量のポテンシャルを確実に決定することができた。キラウエア火山のすぐ近くで, 1911年からハワイ火山観測所が観測を続け, その年からすべての噴火が多く文献に詳しく記載されている。その総括的な報告“Volcanoes of the National Parks in Hawaii”(MacDonald, Hubbard, 1975)には, 1974年末までの噴火に関するすべての資料が掲載されている。両火山の最近の噴火は1975年であった。両火山の場合の特徴は, 中央火口でも, 中央火口から50 km

第2表 キラウエア火山とマウナロア火山の活動輪廻

活動輪廻と活動相の番号	活動輪廻と活動相の開始時期と終了時期 (年・月)	活動輪廻と活動相の持続期間 (年)	火山噴火の回数	
			キラウエア火山	マウナロア火山
I	1790・?—1840・5	50	3	1
I ₁	1790・?—1822・2	33	0	—
I ₂	1823・2—1840・5	17	3	1
II	1841・5—1894・7	54	8	21
II ₁	1841・5—1867・4	28	0	8
II ₂	1868・4—1894・7	26	8	13
III	1895・7—1934・9	40	14	9
III ₁	1895・7—1917・2	24	0	6
III ₂	1918・2—1934・9	16	14	3
IV	1935・9—1975・11	41	29	7
IV ₁	1935・9—1951・6	18	0	6
IV ₂	1952・6—1975・11	23	29	0
Σ		185	54	38

離れたリフト帯(側噴火)でも同じような噴火(熔岩の溢流)をすることにある。1894-1976年の間の平均熔岩噴出量は、キラウエア火山の場合が $\alpha_1 = 940$ kg/秒、マウナロア火山の場合が $\alpha_2 = 1,710$ kg/秒、両火山合わせて2,650 kg/秒である。この噴出量の決定誤差は50%をこえない。一連の論文(Wright, 1971; Moore, 1971; Swanson, 1972; Tokarev, 1977₁)で、両火山は一つの共通した出発マグマだまりを有し、したがって両火山の活動の法則性を研究するには両者合わせて検討する必要がある、とされている。両火山の噴火時における地表へのマグマ噴出量の積算図が第2表として示してある。

キラウエア火山とマウナロア火山の1790-1978年における活動は、期間が40年から54年の4期(I期, II期, III期, IV期)の活動輪廻に分けられる。各活動輪廻は、それぞれ2活動相(I₁相, I₂相, ……)からなっている。第1活動相では、マウナロア火山が噴火し、キラウエア火山は静穏なままであるが、その火口はしばしば熔岩湖に満たされる。第2活動相では、キラウエア火山が噴火し、マウナロア火山は静穏なままであるか、もしくはいくらか噴火する。活動輪廻の区分と各活動輪廻の基本的な特徴は、第2表と第2図に示した通りである。輪廻Iと輪廻IIにはいくつか噴火の欠落がある。

第2表のデータを利用すると、2種の長期予知が可能である。

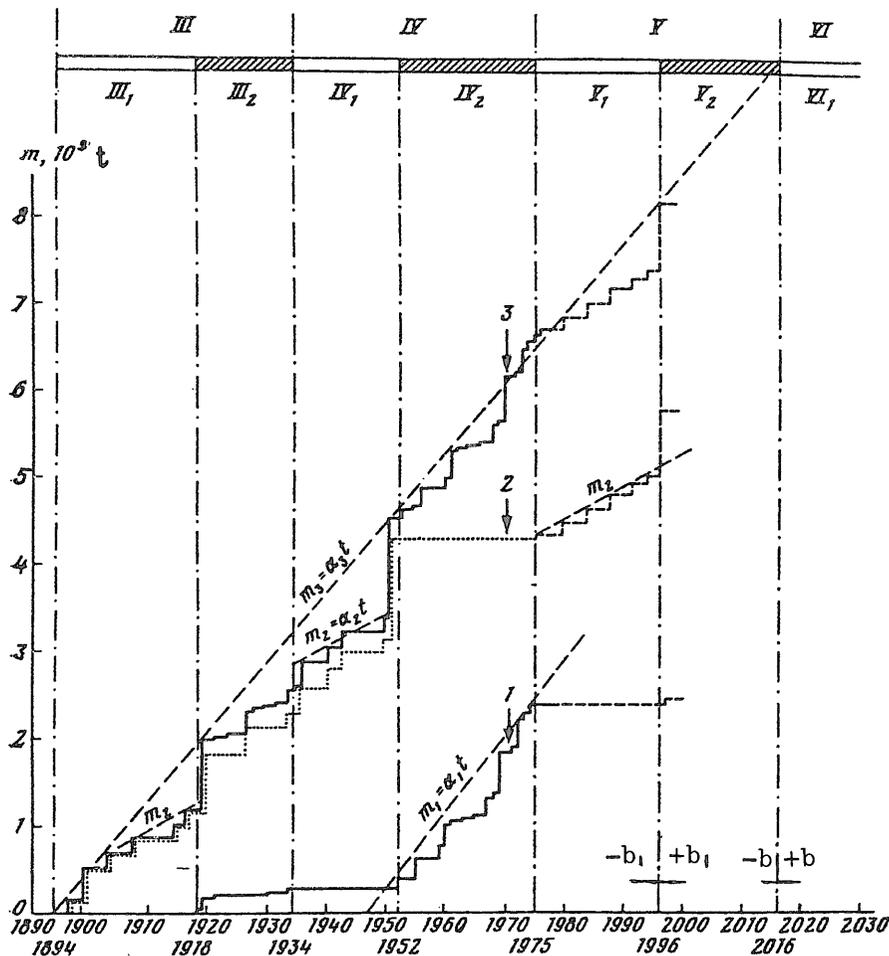
第1種 活動輪廻I-IVのデータによると、 $T = 46.2$ 年、 $\sigma = 6.8$ 年、 $\gamma = 0.15$ である。第1活動相の平均持続期間は、 $T_1 = 25.7$ 年、 $\sigma_1 = 6.3$ 年、 $\gamma_1 = 0.25$ 、第2活動相の平均持続期間は、 $T_2 = 20.5$ 年、 $\sigma_2 = 4.8$ 年、

$\gamma_2 = 0.23$ である。第1活動相のもっとも確率が高い終了時期は、1975年±25.7年=2001年である。確率2/3でのその終了時期は1995-2007年になる。この予知の理論有効度は、 $I_1 = 2.7$ である。第2活動相のもっとも確率が高い終了時期は2021年で、確率2/3での終了時期は2014-2027年、 $I_2 = 4.5$ である。

第2種 比較的信頼度の高い活動輪廻IIIとIVの資料によれば、その活動輪廻の期間は $T = 40.5$ 年、 $\sigma = 7.1$ 年、 $\gamma = 0.18$ である。第1活動相の平均持続期間は $T_1 = 21$ 年、 $\sigma_1 = 4.2$ 年、 $\gamma_1 = 0.20$ であり、第2活動相の場合は $T_2 = 19.5$ 年、 $\sigma_2 = 4.9$ 年、 $\gamma_2 = 0.25$ である。第1活動相のもっとも確率が高い終了時期は1996年、確率2/3とした第1活動相終了時期は1991-2000年となり、 $I_1 = 3.3$ である。第2活動相のもっとも確率が高い終了時期は2016年、確率2/3としたその終了時期は2009-2022年で、 $I_2 = 3.8$ である。

両種は似た値をとることがわかるだろう。第2活動相の開始と活動輪廻の終了の有効度は、2.7よりも小さくはない。第2図に掲げたのは、1975年以後の活動輪廻(活動輪廻V)と活動相を第2種にしたがって予知した図である。その予知によると、1976-1991年の期間におけるキラウエア火山の噴火の確率は1/6をでない。同じ期間に、マウナロア火山も5-8回噴火する可能性がある。1991-2000年の期間に、マウナロア火山が大噴火して、(5-12)億tの熔岩を溢流し、キラウエア火山の次のシリーズの噴火、すなわち第2活動相の噴火を始めるはずである。

マウナロア火山の大噴火前の第1活動相では、噴出量



第2図 キラウエア火山とマウナロア火山の1894—1977年噴出量 m 積算図

- 1—キラウエア火山
- 2—マウナロア火山
- 3—キラウエア火山・マウナロア火山総合
- α —平均噴出量
- ローマ数字—活動輪廻番号
- ローマ数字右下の数字—活動相番号
- 破線—予測噴火と予測噴出量

が 1,600 kg/秒台、すなわち、同火山の平均噴出量よりも少なく、1976-1991年の間に 8 億 t の熔岩を溢流することになるだろう。マウナロア火山の第2活動相では、第2表で明らかなように、噴火することもあるし、噴火しないこともあり得る。それに対し、キラウエア火山はひんぱんに、ほとんど毎年噴火するだろう。その平均噴出量 α_3 は、第2活動相では 2,500 kg/秒まで増大するだろう。第2図では、第2種の予知による活動相 V_1 と V_2 、活動輪廻 V と VI の境界時点での $\pm\sigma_1$ と $\pm\sigma$ が矢印で示してある。予想される活動輪廻 V の期間での両火山の噴火時には、およそ 38 億 t (体積およそ 1.5 km^3) の熔岩

が溢流するものと思われる。

活動相 II_1 , III_1 , IV_1 でのマウナロア火山の噴火は 1-7 年の間隔で生じている。その噴火間の平均間隔は、 $T = 3.5$ 年、 $\sigma = 2.0$, $\gamma = 0.57$ である。次の、確率が高最も高い噴火時期は 1979 年、確率 $2/3$ での噴火は 1977-1980 年となるはずである。

活動輪廻 II-IV の検討によって、キラウエア火山とマウナロア火山の活動に次のような法則性が認められる。すなわち、この 3 期の活動輪廻全体 (1840-1975 年) の平均噴出量は $\alpha_3 = 2,610$ kg/秒、活動輪廻 II では $\alpha_3 = 2,550$ kg/秒、活動輪廻 III では $\alpha_3 = 2,060$ kg/秒、活動輪廻 IV で

第3表 カムチャツカ半島, 千島列島, 日本の火山噴火の新長期予知

火山とその噴火年	T (年)	σ (年)	γ	t_e (年)	$t_e \pm \sigma$ (年)	噴火の性質及び備考
プロスキートルバチーク火山 1740, 1769, 1793, 1904, 1939, 1975	31	5.6	0.18	2006	2001-2011	中央火口の噴火. 側噴火もありうる. 19世紀の噴火が脱落
アライト火山 1790-1793, 1854-1860, 1894, 1933, 1972	45.5 39.3	12.3 1	0.27 0.02	2017 2011	2005-2028 2010-2012	中央火口ないし側火口の噴火. 1854- 1972年の間の噴火によれば, 第2種予 知
ピークサルィチェバ火山 1828-1930, 1946, 1960, 1976	16	2	0.12	1992	1991-1994	中央火口のストロンボリ型噴火. 強い 爆発. 熔岩流の溢流の可能性あり
ゴリヤシチャソプカ火山 1842-1849, 1881-1883, 1914, 1944	34	4.6	0.14	1978	1974-1982	中央火口ないし山腹の噴火. 熔岩の溢 流と火山ドームの成長の可能性あり
十勝火山(北海道) 1857, 1887-1889, 1925- 1928, 1962	35	4.4	0.13	1997	1993-2001	中央火口ないし山腹の噴火. 強い爆 発. 熱泥流. $m_e \approx 30 \times 10^6 t$
有珠火山(北海道) 1768, 1822, 1853, 1910, 1943, 1977	41.8	12.6	0.30	2019	2007-2031	中央火口ないし側火口の噴火. 火山ド ームの成長. 凝灰集塊岩流, 熱泥流

は $\alpha_3 = 3,230$ kg/秒, 各活動輪廻の平均噴出量の誤差は25%をこえない. さらに, 各活動輪廻の第1活動相では, 両火山の噴出量が第2活動相の場合よりもいちじるしく少ない(第2図参照). 活動相 IV₂ では, マウナロア火山が噴出せず, キラウエア火山の噴出量 $\alpha_1 = 2,590$ kg/秒が1840-1975年の期間の平均噴出量 $\alpha_3 = 2,610$ kg/秒に実際上等しかった, という大きな特徴が認められる. 他方, 活動相 III₂ では, キラウエア火山の噴出量が非常に少ないのに, マウナロア火山は噴火して, その総噴出量 α_3 は1840-1975年間の平均噴出量に近かった. このことは, 両火山が同じ一次マグマ溜りに「涵養」され, そのマグマ溜りからのマグマの「供給」は両火山交互に, あるいは同時に行われるという見解を再度証明している.

その他の火山

ジュパノフスキー火山, ムトノフスキー火山, エベコ火山, ベルガ火山の噴火の精密分析の結果は, 多くの場合, かつて起った噴火が弱く, それらに対して将来の噴火の確度高い予知が不可能であることを物語っている. カルィムスキー火山の場合, かつての予知(Tokarev, 1977₂)がまだ生きている. この火山の次の活動輪廻は, 1980年の中頃土1年に始まるはずである. ある程度考えられるものとして, セベルギナ火山に対し, $T = 44$ 年,

$\sigma = 9$ 年, $\gamma = 0.21$, $t_e = 1933$ 年+44 年 = 1977 年, $\tau = 1968-1986$ 年, $I_1 = 3.1$ という予知がなされている. その中噴火ないし大噴火は中央火口で起るだろう. おそらく, その噴火は熔岩ドームの突出を伴うに違いない.

第3表に掲げたのは, できる限り試みてみた諸火山の中噴火もしくは大噴火の予知の内容である. これら諸火山の大部分では, 噴出量が決定できず, したがって噴出物の予測を示すことができない.

4. むすび

噴火の長期予知は, 火山帯区分と火山災害予測に欠くことができない. また, その予知は各火山に対する合理的な研究計画の立案を可能にし, ある期間に噴火の確率が高い火山に対して噴火の短期予知のための観測網を組み立てるのに役立つ.

活火山目録に集録されている, 過去の噴火に関する現在の資料が貧弱なため, また噴火型式が多様で, 噴火エネルギーに大きな開きがあるため, 火山活動の解析やその噴火の長期予知に統計法を形式的に適用することはよい結果をもたらしてくれない. 個々の火山の活動とその噴火型式を綿密に分析することが必要である. その際, 過去の噴火が少ないときでも, 火山活動のいくつかの法則性を正しく見つけることができる. 弱い噴火の場合の

長期予知はむしろのこと、短期予知も、おそらく無理だろう。中噴火と大噴火は、多くの場合、時間的に規則正しく、その場合だけ長期予知を確実に行うことができる。噴火の輪廻、火山の活動輪廻は長期にわたる火山輪廻に重なり、それが火山活動の正確な理解を困難にしている。そこに個々の失敗もでてくるわけであるが、その失敗を予知法発展の妨げとしてはならない。1969-1978年における噴火長期予知法研究の経験は、その方法の有効性と実証性がかなり高いことを示すと同時に、今後の研究で配慮すべき、いくつかの欠陥を明らかにしている。

文 献

- GORSHKOV, G. S., DUBIK, YU. M. (1969) Directional explosion on the Sheveluch volcano: in book "Volcanoes and eruptions", Nauka Press, Moskwa, p. 3-37 (in Russian)
- GUSEV, A. A. (1974) Prognosis of earthquakes by statistics of seismicity: in book "Seismicity and seismic prognosis, characters of upper mantle and their relation with volcanism in the Kamchatka", Nauka Press, Novosibirsk, p. 109-119 (in Russian)
- KIRSANOV, I. T., PONOMAREV, G. P., SHTEINBERG, G. S. (1973) Some regularities of eruptions of Klyuchevskii volcano: "Bull. of Volcanologic Station of Novosibirsk", Nauka Press, no. 49, p. 93-98 (in Russian)
- KOVALEV, G. N., KALASHNIKOV, L. V., SLEZIN, YU. B. (1971) On the relations between eruption energy and calm periods of active volcanoes: in book "Geology and geophysics", Novosibirsk, Nauka Press, p. 137-141 (in Russian)
- MENYAILOV, A. A. (1955) Sheveluch volcano—its geological structure, composition and eruptions: "Trudy of volcanological laboratory of USSR Academy of Science", issue 9, Moskwa, Press of USSR Academy of Science, p. 263 (in Russian)
- ПИП, B. I. (1956) Klyuchevskaya copka and its eruptions in 1944-1945 and in the past: "Trudy of Volcanological Laboratory", issue 11, Moskwa, Press of USSR Academy of Science, p. 211 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1967) Eruption prognosis of volcanoes: "Izvestiya of USSR Academy of Science, series of Physics of the Earth", no. 9, p. 11-22 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1971₁) On the long-time prognosis of eruptions of Avacha volcano: "Bull. of Volcanological Station of Moskwa, Nauka Press, no. 47, p. 33-36 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1971₂) On the some regularities of volcanic process: "Doklady of USSR Academy of Science", vol. 199, p. 422-425 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1976) Forecasting places and times of the biggining of Bol'shoi Tolbachik eruption in July, 1975: "Doklady of USSR Academy of Science", vol. 229, p. 439-442 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1977₁) Some regularities of volcanic process: in book "Magmaformation and its reflection to the volcanic process", Moskwa, Nauka Press, p. 25-40 (in Russian)
- TOKAREV, P. I. (1977₂) Regularities of volcanic process and prognosis of volcanic eruptions: in book "Volcanism of Island Arcs", Moskwa, Nauka Press, p. 85-94 (in Russian)
- Catalogue of the Active Volcanoes of the World including Solfatara Fields: Intern. Volcanol. Assoc. Napoli, Italia, 1955, part 3; 1958, part 7; 1959, part 11 (in English)
- MACDONALD, G. A., HUBBARD, D. H. (1975) Volcanoes of the National Parks in Hawaii: Honolulu, Hawaii, U.S.A., p. 60 (in English)
- MOORE, J. G. (1971) Relationship between subsidence and volcanic load, Hawaii: "Bull. Volcanol.", T. 34, p. 562-577 (in English)
- PERRET, F. (1924) The Vesuvius eruption of 1906: "Carnegie Inst. Wash.", Publ. no. 339 (in English)
- SWANSON, D. A. (1972) Magma supply rate at Kilauea volcano, 1952-1971: "Science", no. 4018, p. 169-170 (in English)

WRIGHT, T. L. (1971) Chemistry of Kilauea and
Mauna Loa lava composition in space

and time: "U. S. Geol. Survey Prof.
Paper", vol. 735 (in English)