

火山活動のエネルギー

東京大学地震研究所 中 村 一 明

Energies dissipated with Volcanic Activities —Classification and Evaluation.

Kazuaki NAKAMURA

(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Various energies released in relation to a volcanic activity are classified and evaluated based chiefly on YOKOYAMA's and SUGIMURA's works. The energies are classified into four different categories, i.e. 1) heat transferred by solid and gaseous volcanic products (Eth), 2) energy spent in expansion of volcanic gas (mainly water) (Ee), 3) heat lost by underground conduction (Ec), and 4) work done against gravity (Ep).

Eth is estimated at $(1.4 \pm 0.3) \times 10^{10} \cdot M$ (ergs), where M is the total mass of solid eruptive product in grammes. Ee is estimated at $1.5 \times 10^9 \cdot M$ (ergs) in which kinetic energy of explosion and of ground vibration is included. Ec is difficult to estimate in direct connection with M . Ec consists a part of excess value of terrestrial heat flow of volcanic belt over non volcanic one. Therefore, it can be put out of consideration in the discussion where heat flow values are calculated independently. Ep can be almost neglected when we consider the energy economy including the crust and upper mantle as a whole, because compensative work should be done for the gravity, below and around the volcano.

Thus, the order of magnitude of the whole volcanic energies are expressed as $1.6 \pm 0.4 \times 10^{10} \cdot M$ ergs (+Ec) in terms of the total mass of solid volcanic product, which is the only key to the magnitude of past volcanic activities.

まえがき

火山噴火の大きさはいろいろな尺度で表現されうる。爆発の圧力でその強さを示すことについては水上 (1945) の総括がある。TSUYA (1955) は噴火の強さが噴出物の総量に比例するとみて、噴出物の体積による噴火強度階を提案した。噴火現象に関連するエネルギーはそれ以前にも推算されていたが、YOKOYAMA (1956 b, 1957 a·b) は噴火の大きさをその際放出されたエネルギーによつてあらわした。放出されるエネルギーの中では噴出物のもちだした熱エネルギーが断然大きいことを示し、噴出物量から噴火のエネルギーを算出し、個々の噴火のみでなく火山帯についても論じた。火山活動によるエネルギーの時間放出率をみつもつたものには SUGIMURA et al. (1963), NAKAMURA (1964) などがある。

本稿ではまず噴火に際し放出されたエネルギーをみつもつた例を、活動様式の異なる火山に

ついて紹介し、次に各形態のエネルギーの割合についてのやや一般的議論をおこなつて噴出物量と火山活動のエネルギーの関係を求める。

火山活動の3例

(1) 伊豆大島三原山 1953~54 年の活動

この噴火は、次にのべる 1951 年の活動がおさまつていく過程での小規模なもので、53 年 10 月 5 日から翌年 2 月 8 日まで間欠的に計 60 日余りの間おこなわれた。三原火口内にスコリア丘 ($5 \times 10^4 \text{ m}^3$) をつくり、溶岩 ($2.15 \times 10^{15} \text{ m}^3$) を流出した (TSUYA et al., 1956)。

YOKOYAMA (1956 b, 1957 a·b) は Energetics in Active Volcanoes と題する一連の論文の第 1 報でこの噴火を扱つた*。

まず大島測候所 ($\Delta = 4.8 \text{ km}$) の地震計の記録を使つていくつかの仮定を設けて噴火に伴つた脈動のエネルギーを約 $1 \times 10^{19} \text{ ergs}$ とみつもつた。火山性地震は噴火期間中はその前後にくらべるとずつと少い。噴火をはさんだ 1 カ年をとつた場合でもそのエネルギーはたかだか $5 \times 10^{17} \text{ ergs}$ である。

固体としてのこの噴出物がもち出した熱エネルギー (Eth_s) は YOKOYAMA (1957 a) の (5) 式によつて見積られる。

$$\text{Eth}_s = M(\Delta T \times C + H) \cdot 4.18 \cdot 10^7 \text{ (ergs)} \quad (1)$$

ただし M は噴出物量 (gr), H は融解の潜熱 (cal/gr), C は比熱で YOKOYAMA は平均的な値として $0.25 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$ をとつた。

噴出物の総量は溶岩を 2.5 gr/cm^3 , その他の部分を 1 とすると $6 \times 10^{11} \text{ gr}$ となる。 ΔT は $100 (^\circ\text{C})$, H については次のように考えて 10 cal/gr とする。 YOKOYAMA (1957 a) は H として 50 cal/gr を与えたが、これは噴出物が完晶質になつた場合に相当する。実際にはかなりの部分がガラスのままであるからこれよりは小さいと考えられる。ここではガラスが 80% を占めるとしたわけである。以上の値を (1) 式に入れると、 $\text{Eth}_s = 7.1 \times 10^{21} \text{ ergs}$ が得られる。尚 YOKOYAMA (1957 a) の値は密度を小さくみつもつてあるため $6.7 \times 10^{21} \text{ ergs}$ である。

噴火に際して放出された運動エネルギー (Ek) の見積りには噴出物の初速が必要である。適当な data がみあたらないので、溶岩については 5 m/sec , 碎屑物については 50 m/sec と大きめの値を与えると、 Ek は $1.0 \times 10^{18} \text{ ergs}$ 程度となる。

更に YOKOYAMA (1956 a) は噴火開始から 3 カ月の間を含む期間の地球磁場の局所的变化から、マグマ留りの深さと、そこに供給された熱量を推定している。観測された磁場の変化を

* 熱エネルギーについては第 2 報で訂正されている。

地下の双極子によるものとしてその深さをマグマ留りの深さとみなし、海面下 1.6 km を得ている。また、強度の変化を加熱による帯磁の弱化とみなして供給された熱量として 1.9×10^{24} ergs を得た。

噴出物が重力に対してなした仕事 (E_p) としては上記マグマ留りから上だけを考えると 1.3×10^{20} ergs となる (YOKOYAMA, 1956 b の値は 1.6×10^{20} ergs)。

磁場の変化を地下の球体の温度変化に帰する説明の場合、噴火後僅か数カ月間でもとの状態にまで冷却される必要がある、この点がこのモデルでは説明がむずかしい (YOKOYAMA, 1956 b)。UYEDA (1961) はこの点を克服するために、球体のかわりに火口から地下にのびる半径 430 m の円筒形部分が海面下 3 km から順次上方へ 100°C から 350°C へ加熱されていくモデルによつて地磁気偏角の可逆的变化を説明した。このモデルは仮想的なマグマ留りを必要としていないし、無理に短時日の間に冷却する必要もない。また実際に噴火にいたる過程としてもよりもつともらしく思われる。但し次の活動期迄の数年間に、もとの状態まで冷却される過程が必要なことは YOKOYAMA のモデルの場合と同じである。

UYEDA のモデルに基づくと、噴火開始までに地下 3 km 以浅に供給された熱量は 8.4×10^{24} ergs で、YOKOYAMA のモデルの約 5 倍となる。噴出物が重力に対してなした仕事も約 2 倍となる。

以上の 1953~'54 年の活動についてまとめると、噴火に先立つ数カ月間に地下 3 km 以浅の部分に供給された熱量のうち数 100~1000 分の 1 程度が噴火によつて火口から固形噴出物の熱

Table 1. Estimated energies of different forms as released during a single volcanic activity. See text.

Energy released by	Ôshima Volcano, Izu		Usu Volcano (1943-1945) (Showa shinzan) ($\times 10^{24}$ ergs)
	1953-1954 ($\times 10^{21}$ ergs)	1950-1951 ($\times 10^{23}$ ergs)	
heat transferred by solid product (E_{hs})	$7.1 \sim 6.7 \times 10^0$	$9.6 \sim 7.5 \times 10^0$	3.2×10^0
ground vibration (E_v)	tremors 1×10^{-2}	2×10^{-4}	$> 1.8 \times 10^{-5}$
	local shocks 5×10^{-4}	2×10^{-5}	
explosive ejection (E_k)	$< 5 \times 10^{-4}$	$< 7.3 \times 10^{-4}$	5×10^{-4} ($> 3.6 \times 10^{-4}$)
work done against gravity (E_p)	$1.3 \sim 2.5 \times 10^{-1}$	$> 4.2 \sim 3.5 \times 10^{-1}$	2.9×10^{-1}
Energy supplied to the realm of volcanic activity	$1.9 \sim 8.4 \times 10^3$	$> 1.1 \times 10^3$	

エネルギーとして放出され、地面の震動や噴出物の運動エネルギーとして放出された分は更にその数 10～数 100 分の 1 であつた (Table 1).

活動に際して地表から放出されなかつたエネルギーのかなりの部分は、一旦上昇したマグマがより深い部分に逆流することによつて説明されるのではなからうか。このことは地表でさえも Kilauea の噴火などの場合しばしば観察される。逆流が地下数 km までおこるとすれば UYEDA のモデルの難点もきりぬけられるように見える。この場合にはそれ以深にマグマ留りを想定することになる。

(2) 伊豆大島三原山 1950～1951 年の活動

この活動は大島火山の成長史をきざむものと較べると 1 桁小さいが 1777～92 年の安永大噴火以後の噴火としては 1912～14 年の噴火とともに最大の規模のものである (NAKAMURA, 1964). 噴火は 1950 年 7 月 16 日～9 月 23 日 (約 70 日) と翌年 2 月 4 日～6 月 28 日 (125 日) の 2 期にわたつて行なわれ、主として溶岩 ($2.3 \times 10^7 \text{ m}^3$) の流出と火の泉 (fire fountain) 活動 (スコリア丘 $3.6 \times 1.0^6 \text{ m}^3$) とをおこなつた。

YOKOYAMA (1957 a) は 1953～54 年の活動について行なつたのと同じ方法で tremors による放出エネルギーを 2×10^{19} ergs, 局地性地震によるものを約 2×10^{18} ergs 程度とみつめた。固体噴出物のもちだした熱エネルギーは、 $M = 6.3 \times 10^{13} (\text{gr})^*$, $\Delta T = 1100 (^\circ\text{C})$, $C = 0.25 \text{ cal}/^\circ\text{C gr}$, $H = 10 \text{ cal/gr}$ とすると (1) 式から $9.0 \sim 7.5 \times 10^{23}$ ergs となる。YOKOYAMA (1957 a) は $M = 7.6 \times 10^{13}$, $\Delta T = 1000$, $H = 50$ として $E_{\text{ths}} = 9.6 \times 13^{23}$ ergs とした。

運動エネルギー (E_k) については 1953～'54 年活動の場合と同じ仮定で 7.3×10^{19} ergs 程度となる。重力に対する仕事 (E_p) では RIKITAKE (1951) のモデルに従つて 5.5 km とすれば $4.2 \sim 3.5 \times 10^{22}$ ergs となる。供給された熱量についても同じモデルを使えば 1.1×10^{26} ergs となる。しかしこれらの値は前項でのべたように、UYEDA のモデルに従えば当然何倍かに大きくなると考えられる。

いずれにしても放出されたエネルギーの全体としての割合は 1953～'54 年の活動の場合とほぼ同じである (Table 1).

(3) 有珠火山 1943～1945 の活動 (昭和新山)

この活動は 1943 年 12 月 28 日から翌々年の 9 月頃まで約 600 日にわたる多彩な活動であつた (ISHIKAWA, 1947・1950 など). 初期の約 180 日は噴火に先立つ地震期で、はじめの 8

* lava, 2.5 gr/cm^3 , scoria, 1.5 gr/cm^3 とした値。

～9日は有珠火山全域に感じられ、その後は東麓で局所的に感じられる地震が多くなった。同時に東麓の隆起がはじまり、100日目ぐらいから隆起域は北方、後に新山となる地域に移動していった。クライマックスの爆発期は約130日でその間に15回の主要な爆発があり 4.76×10^6 tonの噴出物が放出された(MINAKAMI, 1947)。屋根山の隆起は依然としてつづいた。その後約300日を費やして屋根山の隆起とともにその上に溶岩円頂丘が形成された。この時期には再び顕著な地震群がおこった。

この一連の活動によつてもちだされたエネルギーは次のようにみつめられる。KIZAWA (1957・1959・1960)は先駆地震期および円頂丘形成期の地震群をそれぞれA型およびB型とよんで両者の特徴を研究し、札幌($d = 69$ km)での観測結果からそのエネルギー(E_v)を見積つた。それによるとA型地震群は 11.5×10^{18} ergs, B型は 6.1×10^{18} ergsである。計 1.8×10^{19} ergsであるが、この見積りには札幌で記録されなかつた弱い震動の分や、爆発期の地震(MINAKAMI, 1947)はふくまれていないから実際はこれよりは多少大きいと思われる。

爆発のエネルギー(E_k)は、水上・内堀(1944)によつて15回の主要な爆発の際の噴出物量、平均の初速(120～80 m)とから 3.6×10^{20} ergsとみつめられている。ISHIKAWA (1950)のFig. 7から噴出物量を概算すると 2×10^7 m³で、平均比重を0.5と小さめに見積つても 1×10^7 tonとなり水上内・堀の見積りの約2倍である。これは石川の分布図に小さな爆発によるものが含まれているためと、量の見積りの精度がこの程度のものであることの両方を示しているであろう。

噴出物のもち出した熱エネルギーのうち爆発的噴火による放出物のもちだしたものは、水上・内堀(1944)の記載から $\Delta T = 500^\circ\text{C}$ (平均値としてはやや大きすぎるかもしれない)、 $H = 0$, M として上記2つの値を使うとそれぞれ $E_{ths} = 2.0 \sim 4.2 \times 10^{22}$ ergsとなる。

活動期間中の新山も含めた地表の隆起量は地表近くに上昇してきたマグマの体積を示していると考えられる。根本等(1957)は算出の方法は明らかでないがこの活動に関係した総隆起量を 1.2×10^8 m³とみつもっている。また金子(1950)の第3図(隆起等高線図)を使つて見積ると総隆起量は 1.38×10^8 m³である。根本等(1950)は重力測定と新山溶岩の密度とからマグマの密度は $2.2 \sim 2.3$ gr/cm³と見積つた。新山溶岩の温度は $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ (MINAKAMI, 1947)地下のマグマの温度は 1000°C (MATUO, 1961)と推定されている。(1)式で $M/\rho = 1.3 \times 10^{14}$ cm³, $\Delta T = 1000^\circ\text{C}$, $H = 10$ cal/gr, $\rho = 2.2$ gr/cm³とすると

$$E_{ths} = 2.9 \times 10^{14} (1000 \times 0.25 + 10) \times 4.18 \times 10^7 = 3.2 \times 10^{24} \text{ ergs} \quad (2)$$

となる。ただしこの一部は表面活動終了後20年以上たつた現在も放出されつつあるものであり、厳密ないみでの‘活動時に放出された量’より大きい。

重力に対してなされた仕事 (E_p) は、先駆地震期のいくつかの地震期のいくつかの地震の震源の深さが1ヶをのぞいて 10 km 前後である (KIZAWA, 1960) こと、爆発期の深い地震は 5 km 以浅であること (MINAKAMI, 1947) などから 10 km から上昇した分を考える。総隆起量と同量のマグマが 10 km 上昇したとすれば、

$$E_p = 2.9 \times 10^{14} \times 10^3 \times 10^6 = 2.9 \times 10^{23} \text{ (ergs)} \quad (3)$$

となる。

以上の結果も Table 1 に記入してある。この活動についても、大部分のマグマが爆発的噴火を行わずに固結したために放出されたエネルギーの割合は大島の場合とほぼ同じになっている。

種々のエネルギーの割合*

火山活動、特に過去のその大きさを知る手がかりは地質調査によつて知りうる噴出物の量しかない(しかし、それさえもしばしば非常に困難である)。したがつてすべてのエネルギーが噴出物量 M の関数としてあらわすことができれば好都合である。一方火山活動に伴つて放出されるエネルギーは Table 2 のようにわけて考えられる。本節ではこれらの間の量的な関係を吟味する。

Table 2. Classification and general evaluation of various energies released by volcanic activities. M denotes the total mass of eruptive product

		$\times M(\text{gr}) \times 10^{10}$ ergs
1. Heat transferred by volcanic product		
a. lavas and pyroclastics	(Eth _s)	1.2 ± 0.2
b. gas (water)	(Eth _w)	0.22
c. dissociation of gas from magma	(Ed)	0.003
2. Energy expended in the expansion of gas (water)		0.15
(a. Kinetic energy of explosion	(Ek)	≪ 0.18
(b. ground vibration	(Ev)	(0.01)
		0.01
3. Heat lost by underground conduction (a part of terrestrial heat flow)		[< 0.6 × 10 ⁻⁶ cal/cm ² sec]
Total		1.6 ± 0.4 (+ Ec)
(4. Work done against gravity	(E _p)	0.1 – 10 km) (1 – 100 km)

* 本節はSUGIMURA (in press) におうところが大きい。

(1) 火山噴出物によつて運びだされる熱

これは Table 2 のように 3 つにわけて考えられる。固形噴出物によるもの (Eth_s) は前節で記したが、(1) 式で $\Delta T = 1050 \pm 100^\circ\text{C}$, $C = 0.20 \sim 0.25$ の範囲が考えられる。H は短時間に限つてみれば噴出物がガラスであるか否かを考える必要があるが、充分時間がたてば結晶質になるのであるからそのような時間範囲の問題として考えるときには YOKOYAMA (1957 a) のように 50 cal/gr をとるべきだろう。従つて

$$\text{Eth}_s = 1.2 \pm 0.2 \times 10^{10} \cdot M(\text{gr}) \text{ ergs} \quad (4)$$

となる。

噴火の際に気体として逃げていく火山ガスの熱量 (Eth_w) をみつめるために次のような仮定をする。まずガスはすべて水蒸気とみなし 1 気圧下で冷却凝縮し、更に 20°C まで冷却するものとする。沸点以上の比熱 (C_p) を 0.5 cal/gr とするとその熱量は

$$(950 \times 0.5 + 539 + 80) \times 4.18 \times 10^{17} = 4.6 \times 10^{10} \text{ erg/gr} \quad (5)$$

となる。

今マグマ中の水が 5% であつたとし、水はすべて噴出したマグマ中に含まれていたとすれば、

$$\text{Eth}_w = M \times 5 \times 10^{-2} \times 4.6 \times 10^{10} = 2.2 \times 10^9 M(\text{ergs}) \quad (6)$$

となる。

上記の仮定中には不確かな要素が多い*が、この値は大体の目安を与えるとみてよいであろう。水がマグマから解離する際にうばう熱量 (Ed) には SUGIMURA (in press) の見積りがある。彼は $\text{Ed} = (RT^2/C_0) \partial C_0 / \partial T$ に KENNEDY (1955) のグラフからよみとつた値を入れて 10 cal/gr を得た (R: 気体定数, T: 温度, C₀: 溶解度 5 km で 6.5%)。従つて水蒸気量を 6.5% とすれば

$$\text{Ed} = M \times 10^{-2} \times 6.5 \times 10 \times 4.18 \times 10^7 = 2.7 \times 10^7 \cdot M(\text{ergs}) \quad (7)$$

Eth_s, Eth_w, Ed の 3 つを合計すると結局噴出物によつてもちだされる熱量は、 $1.4 \pm 0.3 \times 10^{10} \cdot M(\text{ergs})$ 程度と見積もられる (Table 2)。

(2) 火山ガス (水蒸気) の膨脹に使われるエネルギー (Ee)

これについては YOKOYAMA (1956 a) による 700 cal/gr というみつもりがある。今これをそのまま使い、Eth_w の時と同じ仮定にたてば、

$$\text{Ee} = M \times 5 \times 10^{-2} \times 700 \times 4.18 \times 10^7 = 1.5 \times 10^9 \cdot M(\text{ergs}) \quad (8)$$

* たとえば村内 (1953) は 1950~'51 年の大島の噴火で水蒸気が流出溶岩の 14 wt% もの割合をしめたる日のあることを推定している。一方水蒸気の比熱として定圧比熱をとつたが、実際は定積比熱との中間の値をとるべきであろうから 0.5 よりはいくらか小さいであろう。

爆発的噴火をおこなう際には E_e のかなりの部分は爆発のエネルギー (E_k) として消費される。地震や脈動によつて放出されるエネルギー (E_v) も E_e の一部とみなすことができる。 E_v は Table 1 では最大の場合でも $E_{ths} \times 1/700$ である。実際にはもう少し大きい場合があるとしてもせいぜい E_{ths} の $1/100$ 程度であろう。

爆発的噴火に伴う運動エネルギー (E_k) は $Mv^2/2$ で与えられる (v は噴出物の初速)。一般には噴出物の一部が爆発的に噴出されるから、 M として全量をとれば、全エネルギー中の E_k の割合としては最大値となる。 v は中爆発で $1 \sim 2 \times 10^4$ (cm) 程度 (MINAKAMI, 1950) である。おそらく目撃された最高の噴煙 (80 km*) である Krakatau, 1883 年の噴火でも、勝井・村瀬 (1960) の式を訂正して使うと、

$$H(\text{km}) \times 10^8 = 2.2 \times v_0^2 (\text{cm/sec})^2 \quad (H \text{ は噴煙の高度}) \text{ から}$$

$$v_0 = 6 \times 10^4 (\text{cm}) \text{ である。}$$

したがつて E_k (の最大値) は、 $\frac{1}{2} Mv^2 = 1.8 \times 10^9 \cdot M (\text{ergs})$, 中程度の噴火では $0.5 \sim 2 \times 10^8 \cdot M \text{ ergs}$ 程度である。 E_k の最大値が E_e とほぼ一致することは甚だもつともらしい。

(3) マグマが発生してから地表に到達するまでの間に伝導によつて失われる熱 (E_c)

E_c が噴出物量とどんな関係にあるか適当なみつもりが困難である。しかしマグマの発生→噴火という条件がこの $10^5 \sim 6$ 年間定期的に行われたものと考えれば、現在の火山帯と非火山帯とにおける熱流量の差、約 $0.6 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ (UYEDA and HORAI, 1964) の中に E_c による寄与がふくまれている筈である。その割合については RIKITAKE and HORAI (1960) のみつきもりがある。それによれば上記の量の過半を E_c に帰することは困難ではないようにみえる。地質学的観察によつて $10^5 \sim 6$ 年間の地下の通路の時間・空間分布 (成層火山の数と寿命) がわかれば M との量的関係がわかる。

(4) 噴出物が重力に対してなした仕事 (E_p)

重力に対する仕事は $Mgh (\text{cm}) = 10^8 H (\text{km}) \cdot M (\text{ergs})$ であるからマグマが深さ 100 数十 km から上昇してくれば $E_p = E_{ths}$ となる。地下浅所にマグマ留りがあり、噴火開始までにやがて噴出するマグマがすでに留りをみたと考えて、前節の議論のように短時間に放出されるエネルギーをみつもる場合には留り以浅について考えればよい。 $H = 10 \text{ km}$ とすれば $E_p = 0.1 \times 10^{10} \cdot M$ となり全体への寄与は小さい。

一方 $10^4 \sim 5$ 年という長さをもつ一成層火山活動全体を考えるような場合にはマグマの発生す

* WILLIAMS (1941)

る深度を問題にしなければならない。しかし火口という狭い範囲だけでなく活動に関係した地殻全体を考えるとすれば E_p はほとんど 0 に近いと考えられる。岩石の破壊強度から考えて地下数 km 以深に空洞はできないと考えられるから、上昇したマグマのもとの体積に相当する負の仕事がなされる筈だからである。但し、歪エネルギーとして蓄えられたり、上昇の際の摩擦として失われる分があると考えられるので全く 0 ではないだろう。

あ と が き

前節の結果はまとめて Table 2 に記入されている。火山活動によつて放出されるエネルギーの総量は、 $1.6 \pm 0.4 \times 10^{10} \cdot M \text{ ergs}$ 程度であり (M は噴出物量 (gr)), その 80% は固形噴出物のもちだす熱エネルギーである。この数字をより正確にするためには、活動時およびその前後に放出される水蒸気の量を知る必要がある。

なおこの他に地下で伝導によつて失なわれ、heat flow の一部となつている分がある。これを別にすれば、過去の火山噴出物の量と時代を知ることによつて、火山活動によるエネルギーの大きさや時間放出率などを推定することができる。

謝 辞

討論をして下さった杉村新氏に感謝する。

文 献

- 石川俊夫 (1947) 有珠火山最近の活動に就いて, 科学と科学教育, **1**, 28-38.
 ISHIKAWA, T. (1950) New Eruption of Usu Volcano, Hokkaido, Japan, during 1943-1945. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. IV*, **7**, 237-260.
 金子政利 (1950) 昭和新山の地形測量報告, 地質調査所報告, No. 136, 1-9.
 勝井義雄・村瀬 瀬 (1960) 支笏火山の活動に関する 2・3 の考察, 地質雑, **66**, 631-638.
 KIZAWA, T. (1957) A Study of Earthquakes in Relation to Volcanic Activity (I), *Pap. Met. Geophys.*, **8**, 150-169.
 ——— (1959) A Study of Earthquakes in Relation to Volcanic Activity (II), *ibid.*, **9**, 204-239.
 ——— (1960) A Study of Earthquakes in Relation to Volcanic Activity (III), *ibid.*, **11**, 30-96.
 MATSUO, S. (1961) On the Chemical Nature of Fumarolic Gases of Volcano Showashinzan, Hokkaido, Japan, *Jour. Earth. Sci., Nagoya Univ.*, **9**, 80-100.
 水上 武・内堀定市 (1944) 有珠火山最近の活動に就いて, 地震研究所速報, No. 3, 1-22.
 水上 武 (1945) 本邦火山の最近の地球物理学的研究, 郷土自然科学の研究, 共立出版。
 MINAKAMI, T. (1947) Recent Activities of Volcano Usu, I, II. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **25**, 65-70, 71-76.
 ——— (1950) On Explosive Activities of Andesitic Volcanoes and the their Forerunning Phenomena, *Bull. Volcanol.*, **10**, 59-88.
 村内必典 (1953) 三原山噴火活動に際して放出された水蒸気量の概算と噴火機構について, 自然科学と博物館, **20**, 70-86.

- NAKAMURA, K. (1964) Volcano-stratigraphic Study of Ôshima Volcano, Izu. *Bull. Earthq. Res. Inst.* **42**, 649-728.
- 根本忠寛・早川正巳・高橋 清・小穴進也 (1957) 昭和新山地熱帯の火山地質および地球物理・地球化学的研究, 地調報告, No. 170, 1-149.
- RIKITAKE (1951) The Distribution of Magnetic dip in Ôshima (Ôsima) Island and its Change that Accompanied the Eruption of Volcano Mihara, 1950. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **29**, 161-181.
- RIKITAKE, T. and HORAI, K. (1960) Studies of the Thermal state of the Earth. The Fourth Paper: Terrestrial Heat Flows related to Possible Geophysical Events. *ibid* **38**, 403-319.
- SUGIMURA, A. (1966 or 67) Spatial Relations of Basaltic Magmas in Island Arcs: Rocks of Basaltic Composition (ed. POLDERVAART & HESS), Interscience Publishers, New York (in press).
- SUGIMURA, A., MATSUDA, T., CHINZEI, K. and NAKAMURA, K. (1963) Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan, *Bull. Volcanol.* **26**, 125-140.
- TSUYA, H. (1955) Geological and Petrological Studies of Volcano Fuji (V). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **33**, 341-384.
- and OKADA, A. and WATANABE, T. (1956) Evolution of Mihara crater, Volcano Oshima, Izu, in the Course of its Activities since 1874. *ibid.* **34**, 33-59.
- UYEDA, S. (1961) An Interpretation of the Transient Geomagnetic Variations Accompanying the Volcanic Activities at Volcano Mihara, Oshima Island, Japan. *ibid.* **39**, 579-591.
- and HORAI, K. (1964) Terrestrial Heat Flow in Japan, *Jour. Geoph. Res.*, **69**, 2121-2141.
- WILLIAMS (1941) Calderas and their origin. *Bull. Geol. Sci., Univ. Calif. Publ.*, **25**, 239-246.
- YOKOYAMA, I. (1956 a) Geomagnetic Studies of Volcano Mihara. 7th Paper., *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **34**, 21-32.
- (1956 b) Energetics in Active Volcanoes. 1st Paper. *ibid* **34**, 190-195.
- (1957 a) Energetics in Active Volcanoes. 2nd Paper. *ibid.* **35**, 75-98.
- (1957 b) Energetics in Active Volcanoes. 3rd Paper. *ibid.* **35**, 99-108.
- 横山 泉 (1958) 大島の地球物理学的研究の総括, 火山第2集, **3** (大島特集号).