

P 波初動の偏りから見た阿蘇カルデラの構造

和田 卓彦・西村 敬一

A STRUCTURE OF THE VOLCANO ASO DEDUCED FROM THE AZIMUTHAL DEVIATION OF P-WAVE

By *Tatsuhiko WADA and Keiichi NISHIMURA*

Synopsis

The differences between the epicentral azimuths and the directions of arrivals of the initial phases are determined from the horizontal seismograms of the Volcanological Laboratory of Kyoto University situated inside of the Aso caldera. The recent data in addition to the previous data given by Sassa (1936) exhibit a systematic deviation. We can interpret the deviation by putting forward the following structural model under the Aso caldera. A tectonic line or zone runs across the center of the caldera from east to west and the northern part inclines nearly eastwards with the dip of about 15° , and the southern part inclines toward NNE with the dip of 25° . The chain of the central volcanoes, one of which, the Nakadake, is now active, situates on the tectonic line or zone. And moreover the sky-line of the caldera rim exhibits the similar inclination as mentioned above.

1. 序 論

阿蘇火山は、大きく、形の整ったカルデラを持つことでも有名であるが、このカルデラを地球物理学的に解明しようとした最初の試みは、初動の偏りを扱った Sassa (1936)¹⁾ の研究であろう。この研究において、Sassa は阿蘇カルデラの外からやってくる地震の初動をカルデラ内で観測すると、それが著しい偏りを示し、しかもその到来方向によってかなりの系統性があることを指摘した。そして、カルデラの示す形状から円筒モデルを考えてこの偏りを説明した。その後この問題はそのままの形で今日に至っているのであるが、これは恐らく二つの理由によるものと考えられる。一つは、初動の偏りが、地震学者の間でさほど重要な問題としては取り扱われてこなかったことである。実際、この現象そのものについては同じ頃に中村 (1929)²⁾ 岸上 (1932)³⁾ 及び松沢 (1935)⁴⁾ らが注目しており、地下構造の反映として解釈できることを示したにとどまっている。もう一つの理由は、当時の地殻構造に対する研究の発展段階によるものと思われる。即ち、もっとグローバルな構造に関する知識が問題にされており、そのため最もオーソドックスな研究方法の発展に力が注がれてきたことによるのであろう。ともあれ、初動の偏りを使って具体的に地殻構造への応用を試みたのは、戦後の宇津 (1956)⁵⁾ の研究であるが、この背景には人工地震の大規模な適用が実施されてきたということもあるのであろう。一方、諸外国においてもこの種の研究はあまり見られず、僅かに Ritsema (1959)⁶⁾ が Djakarta において Moho 面の傾きに適用した例が目ぼしいものである。

地殻構造の研究は近年著しい発展を遂げてきている。一つはその成因論つまり歴史的発展史としてみていく方向が定着してきたことによるものであろう。そのため、所によってはかなり詳しい構造、特に lateral な構造の解明が必要とされてきている。例えば筆者らが問題にしている地域も geotectonics という弧状列島の一面であり、特に中部九州という謎の多いところでもある。その上カルデラの構造という課題をも同時にもっていることに注意する必要がある。こういう立場から、もう一度この問題を調べ直してみようというのが筆者らの意図であるが、その意味で、初動の偏りによる解析に新しい役割が与えられるものと思われる。

2. 記録およびその整理

データをできるかぎり多くするためにひとまず 1958 年～1969 年の地震について調べ、また前述の Sassa のデータを継承するために Sassa と同じ Wiechert 大型 (1 ton) 地震計の記録を用いることにした。実際に阿蘇火山研究施設で行なわれている観測ではこの型式の記録が目的に最も適している。水平動二成分から初動の到達方向を決めたので両者の倍率比が問題になるが、地震計の常数は上の期間中常に調べてあるものに従って、できるかぎり厳密に決めたつもりである。また Sassa と同じように Galitzin 型地震計の記録を併用して初動方向を照合した。

初動の明瞭なものを用い、できるかぎり精度のよいものに限ったこともあって今回は 36 個の地震しか選び出せなかった。Table 1 にそれを示してある。

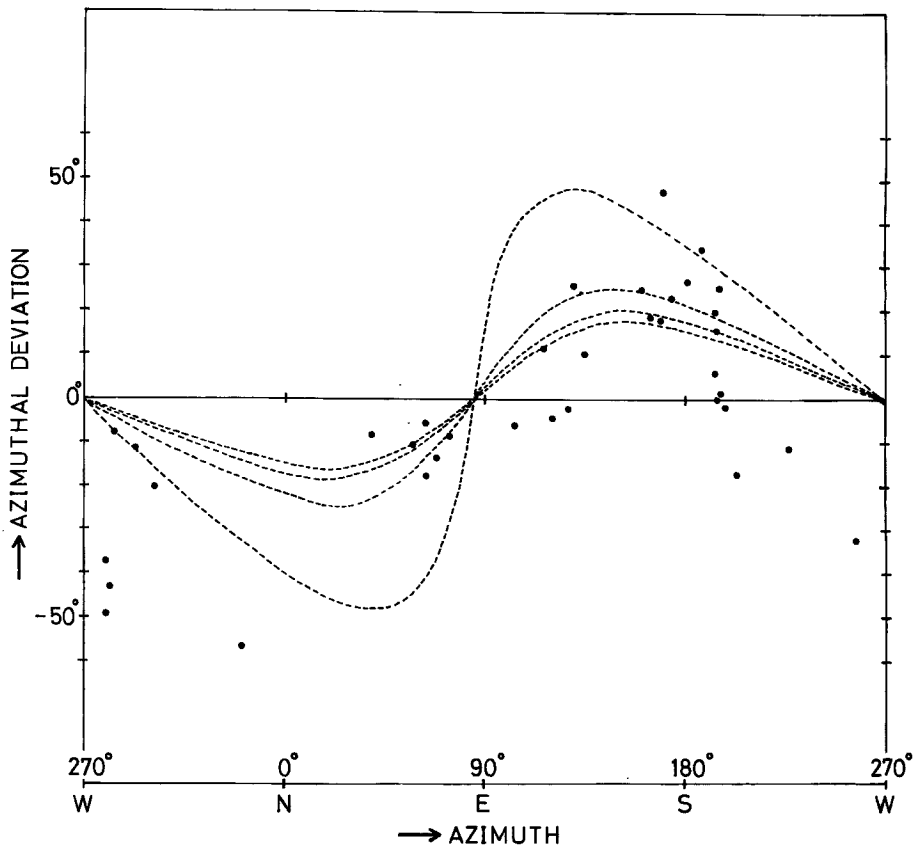


Fig. 1 Additional data of azimuthal deviation of P-wave and curves calculated from the model (B) in Fig. 3.

震央の位置は『地震月報』によったが、この種の問題ではさしあたり十分であると思われる。最も望ましいのは、できるだけ色々な方向からの地震を使えることであるが、当然のことながら地震発生数の少ない方向もあって十分に目的を達するまでには至らなかった。偏りの角度を震央方向の関数としてプロットしたのが Fig. 1 である。大体の傾向は Sassa の示したものと大差はなく系統的な偏りが認められる。

Table 1 List of the additional data shown in Fig. 1.
(The previous data given by Sassa are listed in reference 1)

No.	Date						Epicenter		H km	M	A	r
	Y	M	D	h	m	s	λ	φ				
1	1958	9	8	23	57	17.0	131°54'	33°48'	80		38.9°	- 8.1°
2	1961	5	17	6	45	26.7	132°02'	30°27'	60	5.8	159.9°	24.9°
3		7	18	23	03	37.9	131°46'	29°37'	60	6.6	168.5°	17.9°
4	1962	4	23	4	16	32.0	130°54'	32°10'	160		187.4°	34.1°
5		12	28	13	00	33.7	131°10'	31°41'	0	4.7	173.6°	22.9°
6	1963	10	4	8	24	31.0	132°09'	31°53'	20	6.3	154.2°	10.2°
7	1964	12	24	4	47	59.2	130°14'	30°14'	40	5.1	194.3°	0.4°
8	1965	2	7	0	06	59.9	130°26'	33°11'	0	4.0	302.0°	-20.3°
9		3	24	12	51	45.2	130°02'	33°14'	40	4.2	293.4°	-11.4°
10		12	8	14	25	12.2	130°36'	32°33'	20	4.8	226.3°	-11.4°
11	1966	2	22	11	38	40.2	130°10'	31°14'	0	4.9	203.7°	-17.5°
12		8	1	8	02	13.7	130°17'	33°02'	0	3.8	284.1°	- 7.8°
13	1967	3	2	12	25	26.7	131°22'	31°03'	10	4.9	170.5°	47.1°
14		5	19	8	39	14.8	130°59'	30°44'	70		180.6°	26.7°
15		7	3	5	34	41.6	130°33'	31°14'	120		193.5°	19.8°
16		11	7	9	06	10.3	130°49'	33°21'	10	4.0	341.0°	-56.7°
17	1968	1	12	11	58	35.1	132°30'	33°30'	50	4.8	63.3°	- 5.7°
18		2	21	8	51	37.4	130°43'	32°01'	0	5.7	196.1°	1.5°
19		2	22	19	19	04.5	130°46'	32°00'	0	5.6	193.2°	5.9°
20		2	25	17	49	39.6	130°44'	32°02'	10	4.7	195.5°	25.0°
21		4	1	16	13	14.2	132°23'	32°18'	0	6.3	116.2°	11.5°
22		5	1	21	54	36.8	130°46'	32°04'	20	4.7	194.2°	15.7°
23		5	14	23	05	03.3	129°48'	29°35'	160		197.8°	- 1.9°
24		8	6	11	34	39.0	132°24'	33°20'	40	4.9	68.5°	-13.5°
25		8	8	2	44	02.7	132°22'	33°12'	50	4.4	74.1°	- 8.6°
26		8	8	4	20	13.2	132°22'	33°26'	40	4.2	63.9°	-17.8°
27		8	13	21	39	18.9	130°04'	32°42'	0	4.6	257.4°	-32.5°
28		8	23	22	05	52.2	132°23'	33°18'	40	4.8	69.8°	-12.4°
29		9	28	19	48	39.5	132°11'	32°17'	0	4.6	120.7°	- 4.5°
30	1969	1	30	7	15	31.4	132°12'	32°38'	0	4.5	103.6°	- 5.9°
31		2	5	15	09	15.8	130°14'	33°00'	10	4.2	280.4°	-49.3°
32		4	21	16	19	24.5	132°07'	32°09'	10	6.5	127.7°	- 2.4°
33		4	21	19	59	26.1	132°05'	32°07'	10	4.7	129.8°	25.9°
34		5	2	2	01	06.4	130°47'	32°55'	10	3.5	280.4°	-36.9°
35		6	4	17	37	12.9	130°20'	33°00'	20	3.4	281.9°	-42.9°
36		9	18	3	40	44.8	131°41'	30°56'	0	5.9	163.4°	18.6°

3. 傾斜層による偏り

初動の偏りの原因を地下構造に求めるという考えは当然な方向であり、構成媒質の anisotropy を考慮するにしてもそれは第二段階としてやるのが妥当であると筆者らは考えている。Sassa はカルデラ部分を取扱ったという特殊性のため円筒モデルを採用しているが、その他の研究者はすべて傾斜層による初動の偏りを考えている。これもまた最初に試みるべきモデルとしてはごく自然なものであろう。特に dimension にさえ注意しておけば ray theory で考えることができるだけに尚のことである。勿論、単一の傾斜層でやってい

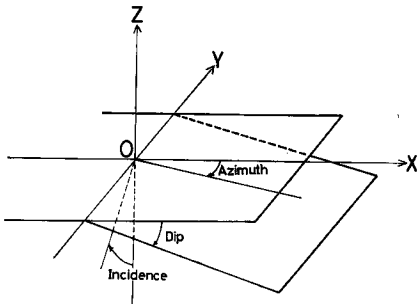


Fig. 2 Illustration of the dipping model for calculation.

superficial なものではなくかなり深い (数 km) もの、つまり基盤 (basement) と考えておくのが妥当である。こういう考えから傾斜面の上と下との P 波速度の比 V_1/V_2 の値を 1.0/1.3~1.0/2.0 の範囲として計算することにした。次に地震波の入射角であるが、まだ一つ一つの地震について詳しい走時曲線が求められる段階にはないので、第一歩として平均的な走時曲線を想定することにした。例えば Sagisaka(1931)⁹⁾ の例からみると、入射角として $15^\circ \sim 75^\circ$ ぐらいの範囲を考えれば今回用いた地震は、その震央距離の範囲からみてほとんど含み得るものと考えることができる。計算は Table 2 に示してある V_1/V_2 の値、傾斜角、入射角のあらゆる組み合わせについて行なったが、そのうち代表的で実際にデータと比較できそうなものを Fig. 3 (A) (B) (C) に示してある。この図をみると (B) と (C) の曲線がよく似たものになっているが、これは当然予想されたことであって、 V_1/V_2 の値と傾斜角の大きさが互いに相補的であることを示している。

計算結果とデータを重ね合わせてみると (B) の場合がよく合うようであり、これを Fig. 1 に破線で示しておいた。しかし到底納得できるものではなく、特にデータの半分に曲線を合わせてみると他の半部分が矛盾してくる傾向が強いことがわかる。これは単一傾斜層モデルが荒っぽすぎることを意味しているものと思われる。

問題が難しいので、Sassa のデータと今回のデータを重ね合わせ、その全体の傾向と最もよく合う第一近似を見つけることにした。データ全体をよく見ると、Fig. 4 に示したように、 $S80^\circ E$, $N80^\circ W$ 付近のデータの分布が単純でなく複合し合っているように思われる。そこでこの点に着目してほぼ北半分と南半分の二

Table 2 List of three parameters, dip angle, incident angle and velocity ratio which classify the dipping models.

V_1/V_2	1.0/1.3, 1.0/1.4, 1.0/1.5, 1.0/1.6, 1.0/1.7, 1.0/1.8 1.0/1.9, 1.0/2.0
Dip	5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30°
Incidence	15° , 30° , 45° , 60° , 75°

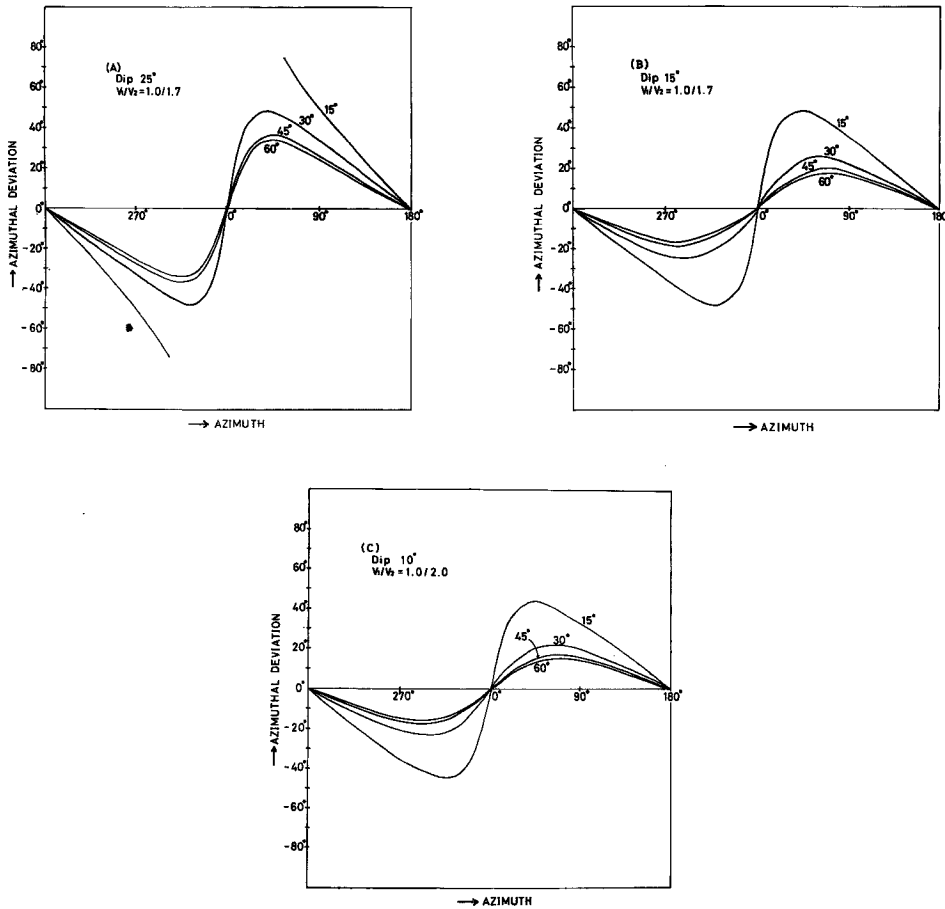


Fig. 3 Azimuthal deviations calculated from the dipping model. Each curve is marked by the value of incident angle.

つのブロックに分け、各ブロック毎に最も適当な曲線を見つけることにした。しかし、両ブロックの V_1/V_2 の値を任意にするのではあまりに artificial であるので V_1/V_2 の値は両ブロックで同じであると考えたことにした。つまり基盤は同じものからできていると考えるのである。その結果、北半分では Fig. 3 (B) の曲線群が、南半分では Fig. 3 (A) の曲線群が最もデータに合うことがわかった。Fig. 4 の破線で示した曲線がそれであり図中の二本の矢印は南北両ブロックの境界を示している。(Fig. 4 の図中、S から少し W 寄りのところに曲線から大きくはずれたものがみられるが、これについては、その走時が異常であり、第 1 phase の読みから再調査する必要があることもわかっているので一応保留しておく。)尚、この場合 V_1/V_2 の値が 1.0/1.7 となっているが、これは前述の Wada and Kamo のモデルから推定するかぎり妥当な値になっている。

Fig. 4 が我々の最良の結果であるということになるが、この結果は次のようなモデルを示している。即ち、阿蘇カルデラはほぼ中央部で北半分と南半分にわけられる。その境界は恐らく一つの zone とみるべきであろうが、西端は立野火口瀬を通り、ほぼ真東の方向に走っている。この zone は中央火口群の並んでいる部分とほぼ完全に一致しており、これは地質学の方で指摘されている大分—熊本断層構造線の一部と考え

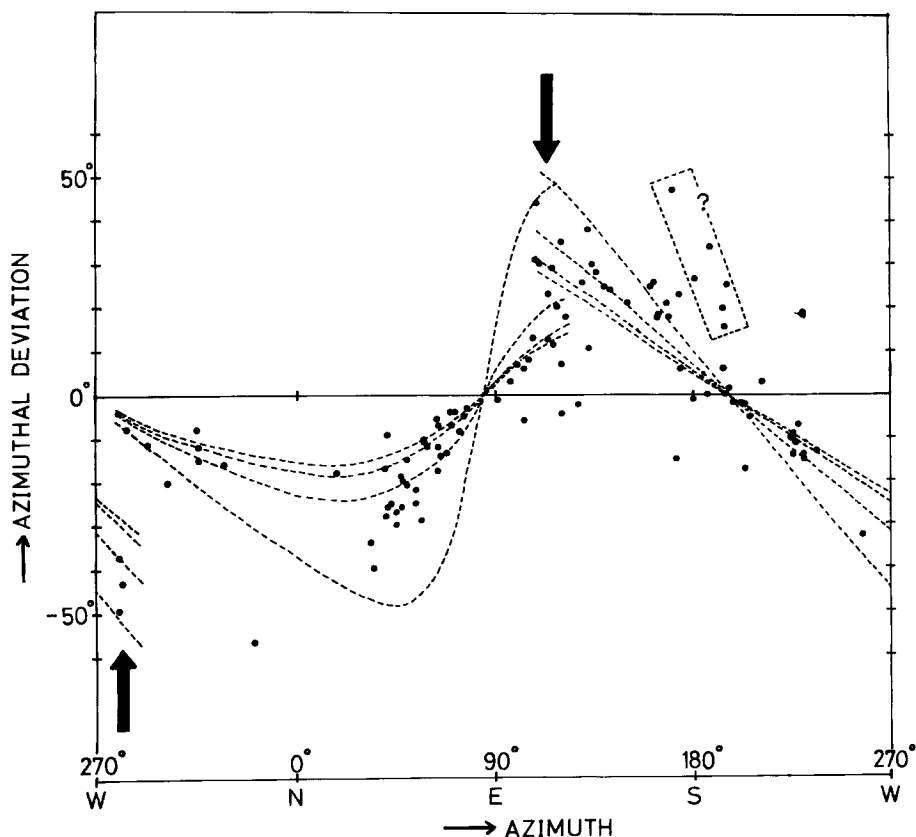


Fig. 4 Total data including the Sassa's as well as the present data and curves from the twin-blocked model. Arrows indicate the boundary of the two blocks.

ることできる。この zone の北側ではほぼ東下りに約 15° 、南側は $N20^\circ E$ を dip 方向として約 25° の傾斜面をそれぞれもっている。以上のモデルを模型的に表わしたものが Fig. 5 である。

地形的にみたときカルデラの北側と南側でははっきりした違いがみられるのであるが、それは上のモデルと関係づけて考えることもできる。試みにカルデラの sky-line をそれぞれ傾斜方向を含む鉛直面上に投影してみる。Fig. 6 の A-A' 及び B-B' が南北両ブロックの傾斜方向を示しており、Fig. 7 は投影の結果を示している。これからわかる通り、斜傾角はずっと小さいけれども外輪山の傾斜方向は南北両ブロックの傾斜方向とほぼ一致している。(但し、外輪山東部では少し高くなっているが、これについては今後の検討が必要である。)今のところ傾斜の角度の違いにまで立ち入ることはできないが、或いはカルデラ形成時とこの fault zone の形成時の前後関係を示唆するものであるかもしれない。即ち fault zone 形成の大きな運動が終ってからカルデラが形成されたとすると、カルデラの sky-line の示す傾斜はその後の傾動のなごりであると考えることもできるわけである。

4. 結 論

阿蘇火山研究所で観測された P 波初動の偏りから阿蘇カルデラの構造について次のような結論を得た。

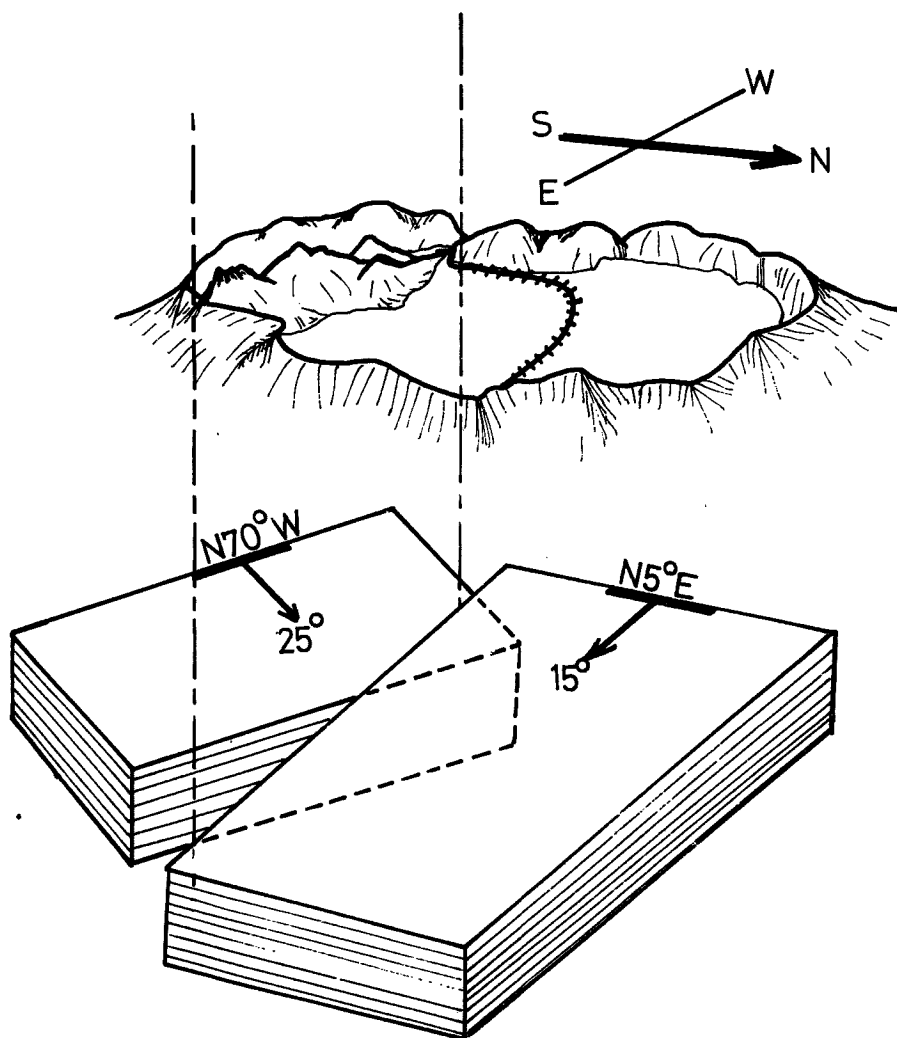


Fig. 5 Schematic representation of the structure under the Aso caldera.

(1) 阿蘇カルデラの中央にほぼ東西方向に一つの断層構造がある。これは地質学で言う大分—熊本断層構造の一部と考えて矛盾はない。

(2) この断層構造部は阿蘇中央火口丘が発達した位置およびカルデラの唯一の欠損個所である立野火口瀬と完全に一致している。

(3) 断層構造部の両側は全く違った運動を行なったと思われる。即ちカルデラの北半部は東へ傾き、南半部は南南西から北北東の方向へ相当強い傾斜で傾いている。カルデラの sky-line の様子からみると、その傾動は断層構造部形成後も続いている可能性がある。

ところでこれらのことからカルデラ形成の難問に対応しようとすると、地球物理学という狭い枠内ではその無力を嘆ずるばかりである。第一に、基盤 (basement) の問題であるが、P 波速度 V_1 に対応するものは

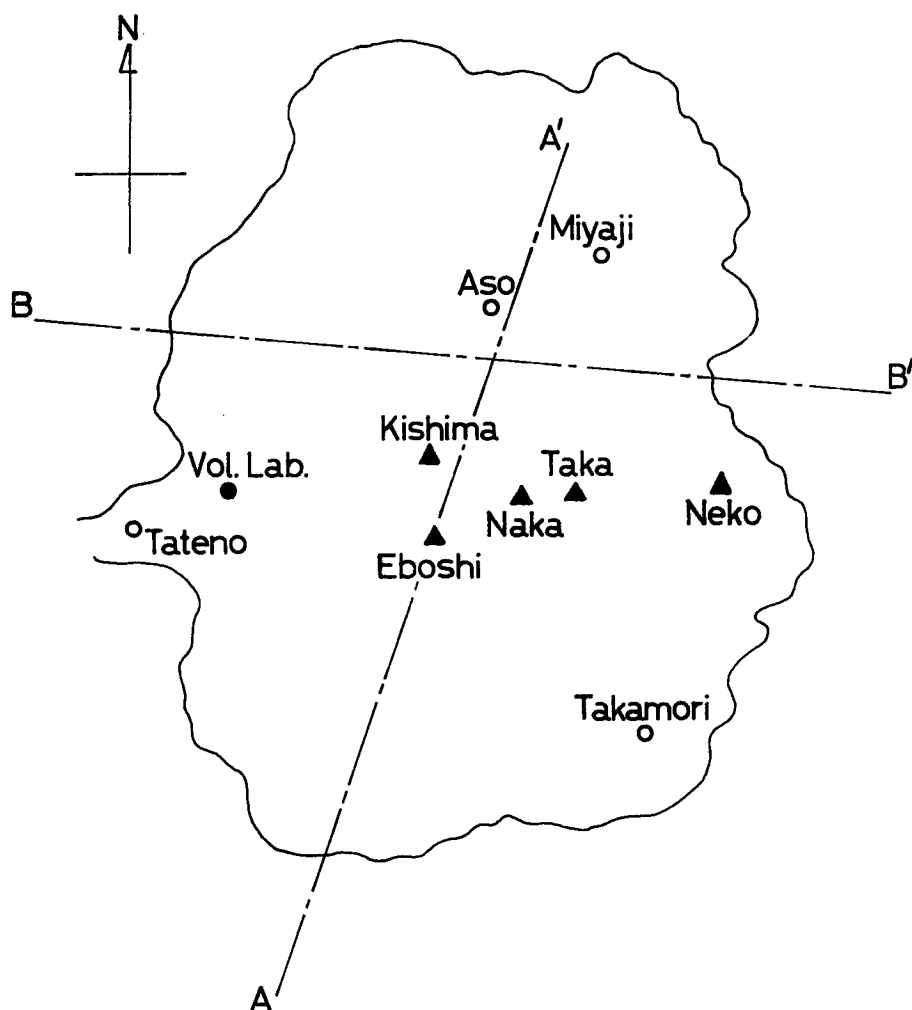


Fig. 6 Topographic map of the Volucano Aso. AA' and BB' show the dip-directions of the southern and the northern block, respectively.

安山岩を中心とする噴出物と考えてよいのだが、 V_2 に相当する基盤岩は今のところ、根子岳の熔岩中の xenolith が crystalline schist であること、カルデラの北壁に近いところでのボーリングで花崗岩が出たことなどが注意すべき事実として指摘できるだけである。これらについては今後の問題として明らかにしていきたいと考える。第二に fault zone 形成の問題である。カルデラの形成時——一般に第四紀の最後の氷期とされ、 C^{14} による年代測定では約 2~3 万年前とされている——より以前に形成されたものは一応うなずけるとしても、proto-Aso の形成とどう関連するかのいう問題にぶつかる。その他、南北両ブロックはどれくらいの dimension をもつか、それと現在のカルデラ壁との関係はどうか、等々の難問が考えられるのであるが、ともあれ、研究の端緒はつかめたとみてもよいと筆者らは考えている。

この研究は、京都大学理学部名誉教授佐々憲三博士の御指導によるもので、終始変らぬ激励を頂いた。ここに感謝の意を表します。また理学部教授小沢泉夫博士には御便宜を賜り、加茂幸介博士はじめ阿蘇火山研

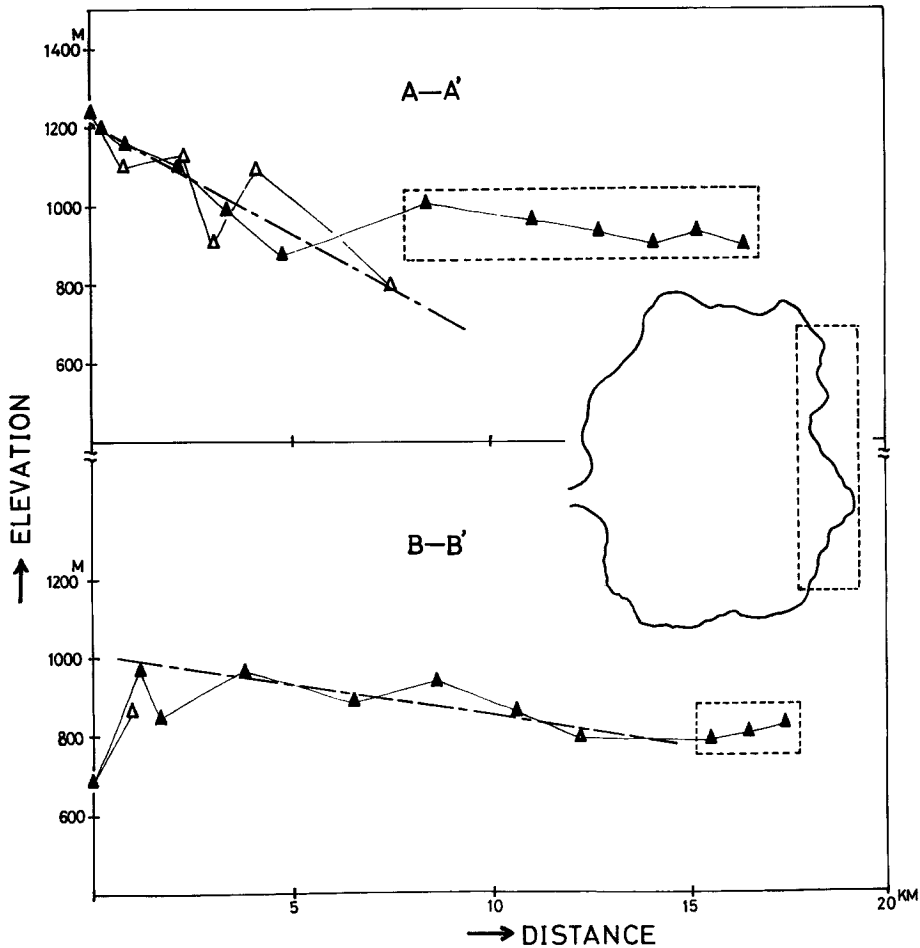


Fig. 7 Profile of the sky-line of the caldera rim projected on the section parallel to AA' or BB'. The northern block has a dip of about 1° and the southern block of about 3° .

究所の方々には記録その他について種々の御面倒をおかけした。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Sassa, K.: Anomalous Deflection of Seismic Rays in Volcanic Districts, The Memoirs of the College of Science Kyoto University, Series A, Vol. 19, No. 2, 1936, pp. 65-78.
- 2) 中村左衛門太郎：活火山と地震，地震，第1巻，第5号，昭4，pp. 16-17.
- 3) 岸上冬彦：関東地方の地震の初動について，地震，第4巻，第1号，昭7，pp. 18-25.
- 4) 松沢武雄：地震の初動のかたよりの例，地震，第7巻，第4号，昭10，pp. 179-184.
- 5) 宇津徳治：初動方向のかたよりについて，験震時報，第21巻，第1号，昭31，pp. 13-20.
- 6) Ritsema, A.R.: Note on the Azimuthal Deviations of P-waves Recorded at Djakarta Station, Geofisica Pura e Applicata, 43, 1959, pp. 159-166.
- 7) 加茂幸介・菊地茂智：阿蘇カルデラ内の人工爆破観測結果について，京都大学防災研究所年報

- 第 11 号 A, 昭43. 3, pp. 111-119.
- 8) Wada, T. and K. Kamo: A Simplified Model of Upper Crust from Seismic Wave Velocities at Volcano Aso, Special Contributions of the Geophysical Institute, Kyoto University, No. 4, 1964, pp. 91-104.
- 9) Sagisaka: On the Velocity of a Seismic Wave in the Upper Layers of the Earthcrust, Geophysical Magazine, Vol. 4, 1931, pp. 147-155.