

阿蘇カルデラ内の人工爆破観測結果について

加 茂 幸 介・菊 池 茂 智

SOME SEISMOMETRIC RESULTS FROM ARTIFICIAL SHOTS IN THE CALDERA OF ASO VOLCANO

By Kôsuke KAMO and Shigetomo KIKUCHI

Synopsis

Three dynamite explosions were fired in the caldera of Aso Volcano. One was for construction working in the caldera and the others for quarrying at the inside margin of the caldera-rim. Their seismic effects were observed with the routine net, spanned in Aso area, and the tripartite net at the Aso Volcanological Laboratory, for volcanic-earthquakes. In the case of Tochinki Shot, the observation of seismic refraction profile along the line from the shot point to the eastern tip over the central cones was carried out. The travel-times of seismic waves, the particle motion of ground surface and the anomalous deflection of seismic ray in the caldera are discussed. The obtained results are as follows: (1) comparing to the apparent velocity (3.2 km/sec) obtained from 10 km seismic refraction profile in the caldera, the value of $V_p' = 4.8$ km/sec is obtained from 8 km span in the somma region; (2) orbital motion of waves caused by artificial explosion is examined and SH phase is clearly seen; (3) no anomalous deflection of seismic waves is observed at Volc. Lab. in the case of artificial explosions fired within the caldera and these phenomena favour Sassa's theory that anomalous deflection of seismic waves occurs at the caldera-rim; (4) the value of P-wave velocity, 2.8 km/sec, which has been conventionally used for that of upper layer in the caldera is firmly examined in these analysis.

1. 序

火山における地震学的研究では、火山地域の地下構造がよくわからないため詳しい議論のできない場合が多い。地下構造を知る目的で、火山の大きさに応じて地震探査や大爆破観測の実施が望まれているが一部の火山^{1), 2)}を除いては、殆どなされていない。阿蘇火山では、かつて火口周辺で小規模な地震探査³⁾が行なわれたが、火山の大きさから云って不十分で大爆破観測が期待されていた。幸い今回阿蘇カルデラ内で土木工事および採石の目的で dynamite 300~1000 kg を用いた合計 3 回の人工大爆破がおこなわれた。それを機会に、京大火山研究所の火山性地震観測網と 3 点観測網を用いさらに臨時観測点を設けて観測を実施した。爆破の目的が我々のものと異っていることに加えて火山地帯の特性である人工爆破による地震波発生効率のわるさ、火口周辺の観測網では火山性微動の擾乱を受けて信号の検出がむづかしかった事および観測点の数の不十分さによって、観測結果については定性的な事にとどめた。

2. 人工爆破と観測態勢

規模の比較的大きい人工爆破は3回行なわれた。栃木爆破(A)は県道補修のため阿蘇カルデラの北部立野火口瀬の近くで行なわれた。現場は阿蘇白川に沿った西向きの崖の上部で、深さ20mのboring孔十数本に火薬が装填された。的石 No.1(B)および No.2(C)爆破は、採石のため西北部のカルデラ縁の内側、南東向きの露頭岩の崖の根元に奥行20mのT字状隧道の両袖の端を火薬室として行なわれた。爆破実施の日時および薬量については Table 1 に、爆破点および観測点の位置については Fig. 1 にそれぞれ示した。

Table 1 Summary of the events.

Event	Symbol	Date	Shot time (J. S. T.)	Quantity of dinamite
Tochinoki shot	A	June, 06 1967	14:30:16.42	300 kg.
Matoishi No.1 shot	B	Oct., 12 1967	17:29:—	900 kg.
Matoishi No.2 shot	C	Nov., 15 1967	15:32:02.14	990 kg.

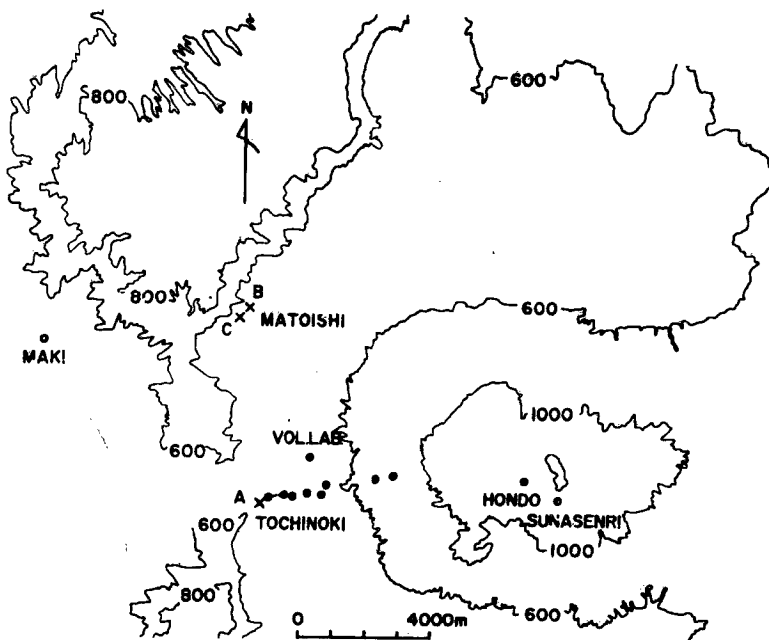


Fig. 1 Location of observing and shot points.

それぞれの爆破の場合によって多少観測態勢をかえたが、火山性地震と火山性微動を目的とした常時観測網はいづれの場合にも共通して用いられた。即ちカルデラ外側の真木、カルデラ内側の火山研究所、本堂、砂千里および火山研究所構内の3点観測網がそれで、それぞれの位置は Fig. 1 に示してある。実際にはこの外火口周辺に多くの観測点があるがすでに述べた理由で明瞭な地震波が観測されていないので Fig. 1 に

は、その位置を示していない。栃木爆破の場合は特に爆破点よりほぼ東向きに湯の谷温泉まで、 seismic refraction profile を展開したが震央距離、地震計の種類等は Table 2 に詳しく示した。的石 No.1 爆破では、データレコーダーにより火口周辺での地震波の検出に努めたが成功しなかった。的石 No.2 爆破では火山研究所において、3成分観測に主力をおいた。常時観測網は P. K. P. 1 c/s 地震計（勝島製作所製）と transistor 増巾器を用いた煤書き記録方式、3点観測、3成分観測およびその他の特殊な観測はデータレコーダーを用いた記録方式でおこなった。爆破の origin time は、点火器からの誘導電流、或は親 dynamite の爆発による導線の切断の方法をとり、J. J. Y. 標準時で較正出来るよう同一記録紙上に記録させて決めた。的石 No.1 爆破の場合は正確な origin time が決定出来なかった。

3. 走時と orbital motion

Table 2 に詳しく掲げた seismic refraction profile と常時観測網で観測した栃木爆破 (A) による走時が Fig. 2 の主体をなしている。火山研究所と真木の観測点はこの測線から、はづれているのでそれぞれ L および M の文字を付けて、区別してある。次に各爆破について考えてみよう。

Table 2 Seismic refraction profile for Tochinoki shot.

ob. pt.	Δ ; m.	seismometer	travel time	recorder
1	240 m	E. T. L. 14 c/sV	0.26 s	oscillograph No. 1
2	320		0.28	
3	400		0.30	
4	480		0.33	
5	550		0.35	
6	630			
7	710		0.38	
8	970	P. K. P. 1c/sV	0.40	
8	970	P. K. P. 1 c/s V with T. R. amp.	0.40	oscillograph No. 2
9	1410		0.56	
10	1830		0.65	
11	2110		0.77	
12	3480		1.12	
13	4010		1.29	

i) 栃木爆破 $\Delta=240$ m から 80 m 間隔に E. T. L. 14 c/s 上下動の pick-up 7 台を並べ、 $\Delta=970$ m に P. K. P. 1 c/s の上下動地震計を置いた爆破点に近い span と、 $\Delta=970$ m で地震計を重複させて $\Delta=4010$ m まで P. K. P. 1 c/s の上下動地震計を 6 台置いた遠い span の臨時観測点および砂千里、火山研究所、真木の常時観測点で走時が読まれ Fig. 2 に plot してある。爆破点に近い span のものは栃木爆破点から約 500 m の地点に有線で集められ oscillograph No.1 で、遠い span のものは火山研究所に近い乙ヶ瀬部落に有線で集められ oscillograph No.2 で記録された。

Fig. 2 をみると (1) 充分爆破点に近い観測点が設けられていないため地表層に相当する伝播速度の極く小さい層の走時はみられない、(2) 見かけの伝播速度は 3.1 km/sec で始まり近い span の終り頃から速くなって、遠い span に入り再び近い span でみられた値に戻っている、(3) 砂千里、火山研究所の走時は少しははづれているが 3.2 km/sec の走時曲線上に乗っている、(4) 外輪山にある真木の走時は速い方に大きくはづれて現われていることがわかるであろう。

(ii) 的石 No.2 爆破 臨時観測点を設けなかったもので、利用出来る観測点は 2 点しかない。的石 No.1 爆破の場合は origin time が不正確なので省略したが、的石爆破点と栃木爆破点から観測点への地震波伝播経路は全く異なっている。的石 No.2 爆破による研究所の走時は $V_p=3.2$ km/sec の走時曲線に良く乗っているが、真木の走時は栃木爆破の場合と同様に速い方に大きくはづれている。

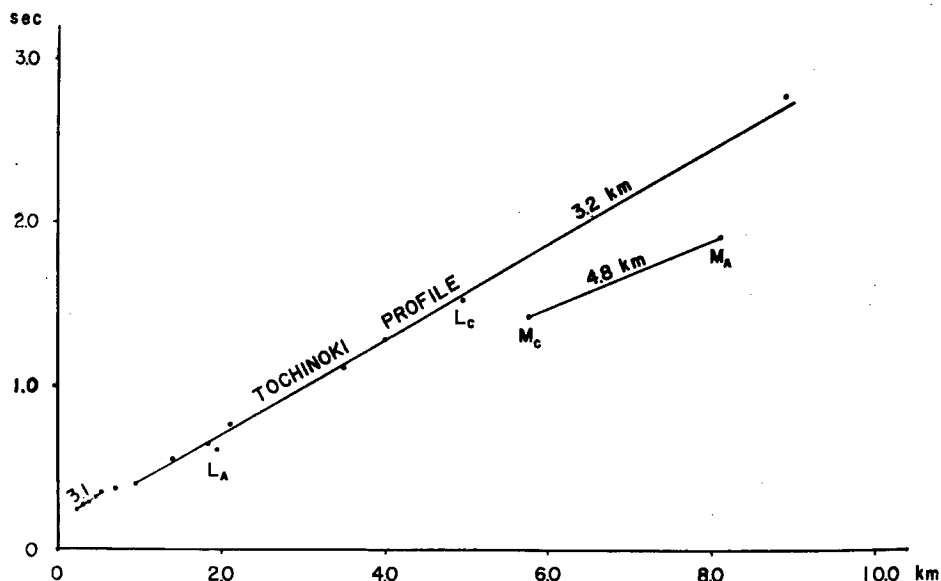


Fig. 2 Time-distance curve of artificial explosion.

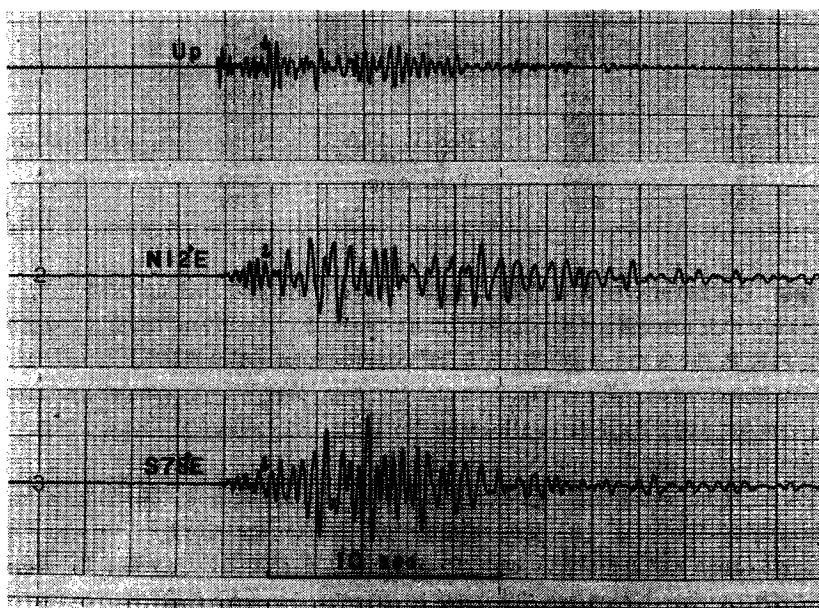


Fig. 3 Three component seismogram of Matoishi shot No. 2 (C) recorded at Volcanological Laboratory.

このような走時のあらわれ方から次のようなことが考えられる。 $\Delta=700$ m にあらわれる走時のずれは、その附近の下に局地的に伝播速度の速い層が存在することで説明される。逆測線もなく従って地下構造も容

易には推定しかねるのでこの走時曲線には高度補正を行なっていないが、それにもかかわらず真木を除いて、 $V_p=3.2$ km/sec の走時曲線にかなり良く乗っている。この事は中央火口丘を含むカルデラ内の第一層である伝播速度のおそい層があまり厚いものでなく、 $V_p=$ 約 3 km/sec の層の下に予想される伝播速度の早い層はかなり深い所に存在することを物語っているようである。もっともこの測線には逆測線がないので確定的なことは云えない。外輪山に設けた唯一の観測点である真木の走時曲線に関しては、他に観測点がなく又同様に外輪山を通っていると云っても地震波伝播径路が異なるので、Fig. 2 にみられるような走時曲線を引いて $V_p'=4.8$ km/sec という値を信じて良いか疑問がある。しかし、カルデラ内にくらべて伝播速度の速い層がかなり浅い所に存在していることは確かなようである。

(iii) **orbital motion** 火山の爆破地震に関連して火山地帯での人工爆発による地表の orbital motion を調べた。Fig. 3 は火山研究所で行った的 No. 2 の 3 成分観測の記録である。又記録を早送りにして水平面での orbital motion を作って Fig. 4 に示した。Fig. 4 (C) にみられるように SH-type⁴⁾ と考えられる相がかなり明瞭にあらわれていて、これに対応する部分を Fig. 3 に矢印で示した。上下動成分にもはっきりとこの相がみられ、あるいは S 波らしいとも考えられ仮に震央距離がわかっているので大森常数を求めてみると、従来阿蘇火山地域の比較的浅い層に用いられる値に近い $k=2.4$ が得られる。

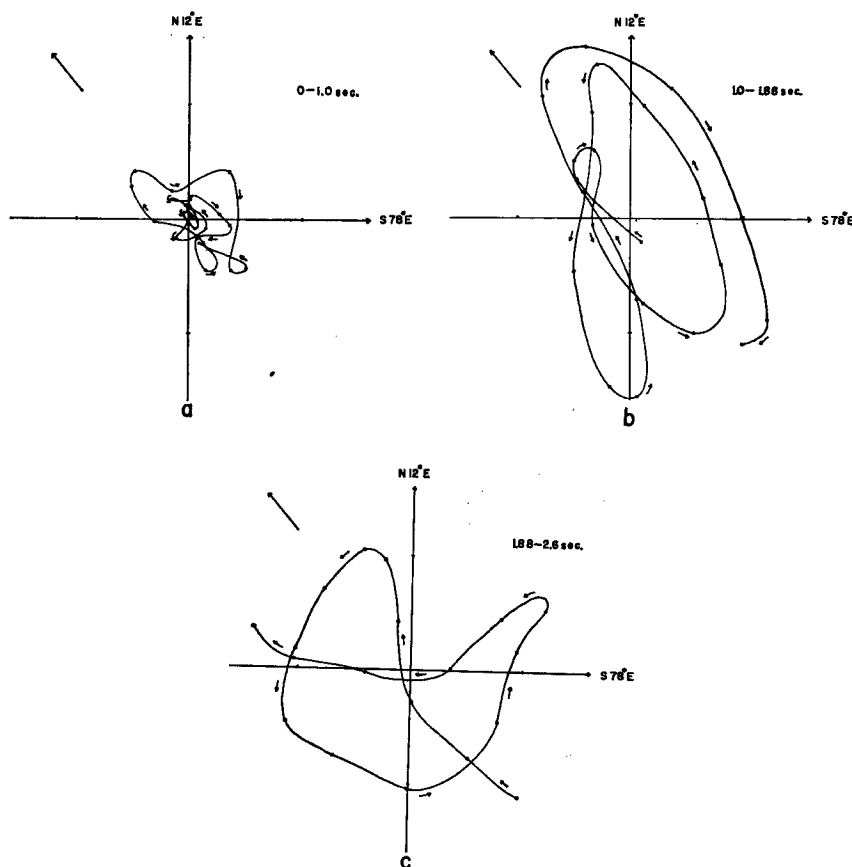


Fig. 4 Orbital motion in horizontal plane of Matoishi shot No. 2

(C) recorded at Volcanological Laboratory. Arrows indicate the direction of the shot point.

4. カルデラ内の地震波伝播

佐々⁵⁾は、阿蘇カルデラ外に起った遠地、近地震を調査して、観測点(火山研究所)からみた実際の震央の方向と地震波が観測点へ入射してくる方向が系統的にいくちがうことを見出した。又このことは阿蘇カルデラを形づくっている円柱状の火山体とその外輪を構成している物質と異った密度をもちその境界で地震波が屈折すると考えれば説明されることを示した。今回の一連の人工爆破はカルデラ内で行なわれているのでこの事を確めるに好都合であろう。そこで水平動の初動が明瞭でないので佐々の方法とは異なるが、上下動による3点観測より地震波の到来方向と見かけの速度を調べた。

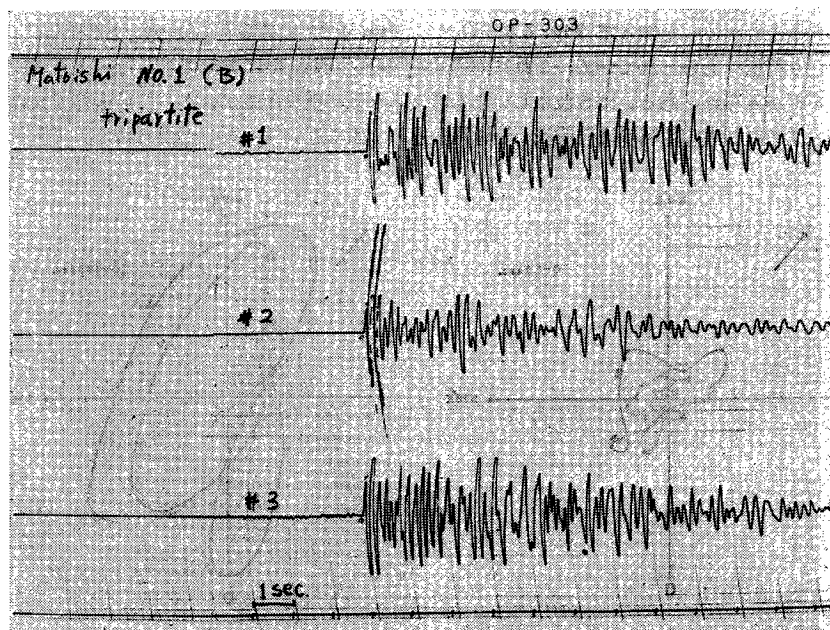


Fig. 5 Seismogram of Matoishi shot No.1 (B) obtained by tripartite net at Volcanological Laboratory.

Table 3 The results of observation by tripartite-net.

Event	Azimuth of shot pt. from Laboratory	Coming direction of seismic wave	Apparent velocity
(A) Tochinoki shot	223°	220°~230°	2.3 km/sec
(B) Matoishi No.1 shot	336.5°	334°	2.7 km/sec
(C) Matoishi No.2 shot	332°	330°	2.6 km/sec

Azimuth and direction are measured from the North clock-wisely.

Fig. 5 にデータレコーダーによる3点観測の記録の例を示した。実際には再生時に時間軸を引き伸ばしたものを用いて解析するので方位にして数度、伝播速度にして数百米の誤差で到来方向とみかけの速度を決

め得る。それぞれの爆破の場合について、爆破点の方位、地震波の到来方向および見かけの速度を **Table 3** に示した。ここで方位および方向は北より時計廻りに測っており、3点観測網の水平面に対する補正をした値を示した。栃木爆破の場合だけは、水平動による3点観測結果であり、初動に不明瞭な所があり、地震波の到来方向に巾が出ている。この事をわかりやすく **Fig. 6** に図示した。図中爆破点を×印で示し、地震波の到来方向を、見かけの速度を用いてベクトル表示とした。**Table 3** および **Fig. 6** で見られるように、的

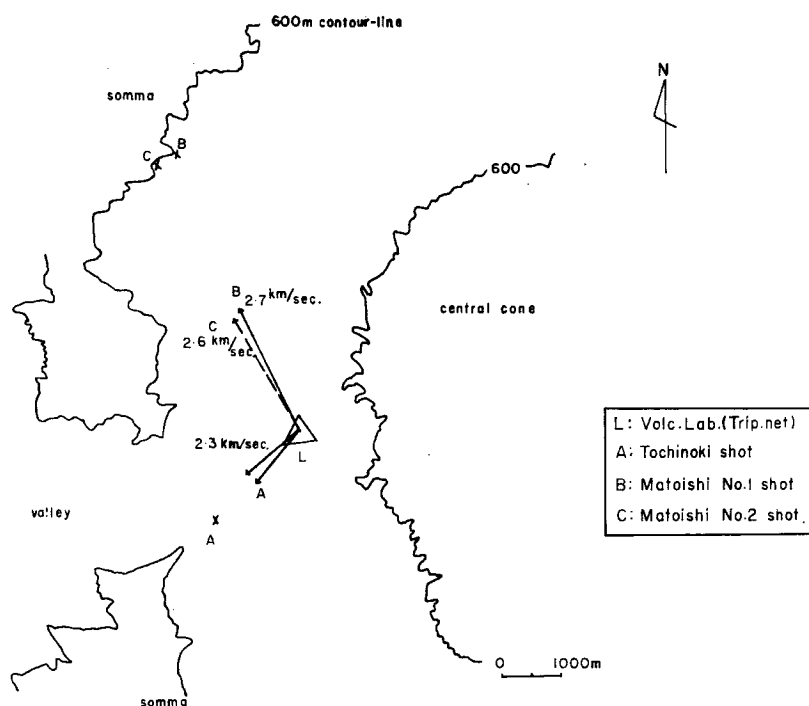


Fig. 6 Apparent velocity and the coming direction of wave of each shot obtained by tripartite net at Volcanological Laboratory.

石爆破の場合は、2回とも爆破点の方位と地震波到来方向が一致しているとみて差支えなかろう。又栃木爆破については、初動の不明瞭さはあるが両者の方位が大体一致内至は到来方向が爆破点方位より最大 $+7^\circ$ づれることになる。次に佐々の結果と比較してみよう。**Fig. 7** に佐々の結果を示した。図中横軸に研究所を中心として北より時計廻りに方位がとっており、縦軸に「地震波入射方位—震央方位」がとってある。図中点線で示した曲線は地震波の円柱面への incident angle の異った場合の計算値をあらわす。又それぞれの爆破点方位を矢印で示した。この図に示されている値と今回の観測結果を考え併せると、的石の方位ではカルデラ外より入射してくる地震波は屈折して観測されるが、カルデラ内で発生する地震波については屈折が観測されないとみてよかろう。

一方栃木の方位即ち SW 方向については佐々²⁾も指摘しているように観測値は計算値より大きく偏っている。この方位には阿蘇で唯一の外輪山の切れ目即ち立野火口瀬と呼ばれる深い谷がある。阿蘇火山を東西に走る大構造線上にありその成因は陥没と考えられていて、その影響で地震波の入射方向の anomalous deflection の値が計算値と合わないと考えられている。栃木爆破点もこの方位にあるが、爆破現場が既に述べたように阿蘇白川の北側で上記の構造の影響の少ない地点と考えられる。従って今回の観測結果から観測誤差があるがほぼ地震波伝播の anomaly はないと推定される。このような観測が各方位についてなされる

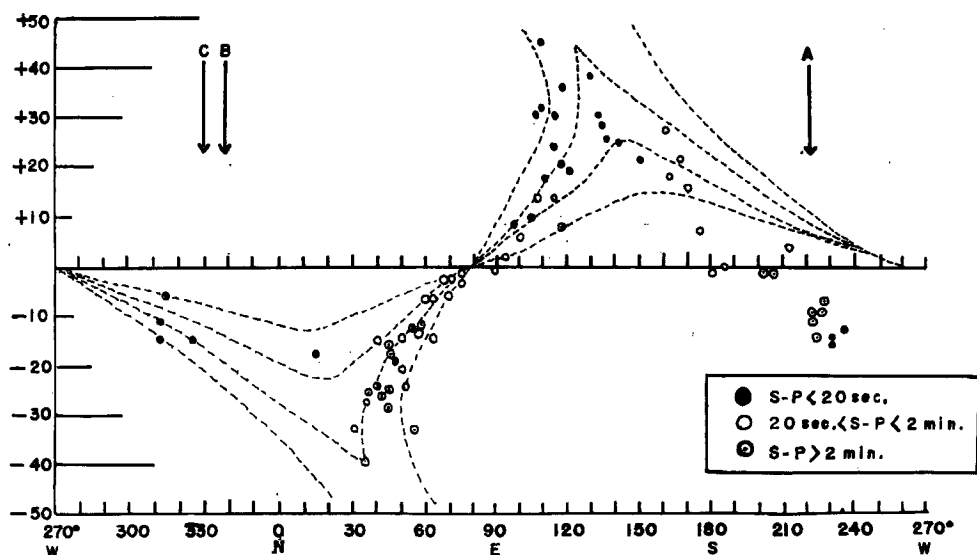


Fig. 7 Azimuthal distribution of anomalous deflection of seismic rays observed at Volcanological Laboratory. (after K. Sassa)

ことが望ましいが、今回の観測結果からだけみても阿蘇火山で円柱状のカルデラ内外で密度の異った火山体を考えることは妥当のように思われる。

次に3点観測で決められた地震波のみかけの伝播速度は、Table 3に示したが、従来火山性地震や自然地震の研究⁶⁾で推定されて、解析に使用されて来た値と矛盾するものではない。Fig. 2で示されている走時曲線と3点観測から決定されたみかけの速度の違いがあるがこれについては更にデータを取得して議論したい。

5. 結 語

阿蘇カルデラ内で行なわれた人工爆破を利用して、今後の基礎資料を得る目的で観測を行ない解析した。その結果は次の通りである。

(1) カルデラ内では測線を10 km としても地震波伝播速度の早い層は検出されなかった。一方外輪外側では8 kmの震央距離で $V_p = 4.8$ km/secの値が得られた。

(2) 火山の爆発地震に関連して、人工爆破地震波による ground motion を調べたが、SH- 相が明瞭に検出された。

(3) カルデラ内だけでは地震波の anomalous deflection が起らないことが確かめられ、いわゆる佐々の阿蘇カルデラのモデルを支持する結果が得られた。

(4) カルデラ内の地下構造の上の層については従来用いられて来た $V_p = 2.8$ km/secの値が確かめられた。

この種の人工爆破は採石場が次々とカルデラ縁に建設されている現状から今後も観測の機会に恵まれるものと思われる。他力発破で我々の目的に合致するものではないが、今後も観測を行ないデータを得たいと考えている。終りにこの一連の観測に従事された火山研究所職員に、又爆破現場で御協力戴いた熊本県阿蘇土木事務所、阿蘇町役場、九州産業KK爆破施行部および南九州採石KKの方々にお礼申し上げます。この研究の一部は文部省科学研究費によったものである。

参 考 文 献

- 1) D. P. Hill : Crustal structure of the Island of Hawaii from the seismic refraction

measurements. Personal communication.

- 2) 根本忠寛, 早川正巳, 高橋清, 小穴進也: 昭和新山報告, 地質調査所報告第170号, 1957, 135 ~ 141.
- 3) 吉川宗治, 加茂幸介, 狐崎長琅: 阿蘇火山中岳火口周辺における地震探査, 火山, 第4巻, 第1号, 1959, 20~32.
- 4) C. Kisslinger, E. J. Mateker, Jr., and T. V. McEvilly: SH motion from explosions in soil, Journal of Geophysical Research, Vol. 66, 1961, 3487—3496.
- 5) K. Sassa: Anomalous deflection of seismic rays in volcanic districts, The Memoirs of the College of Science Kyoto University, Series A, Vol.19, No.2, 1936, 65—78.
- 6) T. Wada 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, 91—104.