

宮崎地殻変動観測所における発破観測 —発破振動の伝播特性と地殻変動観測への影響—

古澤 保・尾上 謙介
寺石 眞弘・赤松 純平

OBSERVATION OF GROUND VIBRATIONS GENERATED BY BLASTS AT THE MIYAZAKI CRUSTAL MOVEMENT OBSERVATORY —CHARACTERISTICS OF PROPAGATION OF GROUND VIBRATIONS AND THE EFFECTS OF BLASTS ON THE OBSERVATION OF GROUND STRAINS—

By *Tamotsu FURUZAWA, Kensuke ONOUE,*
Masahiro TERAISHI and Junpei AKAMATSU

Synopsis

Ground vibrations by blasts were observed to investigate their effects on the observation of ground strains at the Miyazaki Crustal Movement Observatory. The geology around the Observatory is mudstone formation with thin sandstone layers of the Miyazaki group in Neogene.

V_p and V_s of the non-weathered rocks were found to be 3.6 km/sec and 1.6 km/sec, respectively. Q_p and Q_s were estimated to be around 10 and 14, respectively. These values were discussed with relation to the observational facts of large attenuation in high frequency contents of seismic waves from local earthquakes.

Many steps recorded by extensometers at the blasts and earthquakes were mainly attributable to mechanics of extensometers.

1. はじめに

宮崎地殻変動観測所では1976年11月以来、地殻変動の連続観測と短周期地震計3成分による地震観測が行なわれている¹⁾。1980年11月より、当観測所西方約60mに位置する月ノ輪谷川に砂防ダムが建設されることになり、その基礎工事で岩盤の掘削のために発破が使用されることになった。工事現場と観測所の観測坑道間の距離は、最も近いところで約50m、最も離れたところで約150mで、発破振動による地殻変動観測への影響が予想された。その影響を予測するために、予備的な試験発破を行なうことが計画されて、1980年11月19日にその発破振動の観測が実施された。

又、宮崎観測所での短周期地震計による地震観測では、他の観測点、例えば嶺峰等に較べて、地震波形の4Hz以上の高周波成分の極端な減衰が見られる。このことは観測所周辺の地質構造に起因するものと考えられる²⁾。このことから、発破振動の観測から、その伝播特性、特に減衰を調べることに興味もたれた。ここでは、発破振動の観測から、その伝播特性と地殻変動観測への影響について調べた結果について報告する。

2. 発破振動の観測

宮崎地殻変動観測所周辺の地質は新第三紀中新統の海成層で、宮崎層群と称する泥岩主体の砂岩との互層で構成されている。観測坑道は、この地質構造の山体に掘られており、入口から 168.5 m の奥行がある。観測坑道の被覆厚は坑道の入口より奥に行くほど厚くなっており、直角二等辺三角形を形づくっている主要な観測坑道の部分では被覆厚が 60 m 以上で、最も奥の部分では、それが 80 m 以上である。今回の発破点は坑道と同じ山体にある。発破点の位置決めは精密測量によって行なわれた。Fig. 1 に発破点の位置と観測坑道を示す。発破振動の観測のための換振器は、観測坑道全体の周辺の振動の伝播特性を調べるために、合計 12 成分の上下動成分を坑道内ではほぼ均一に分布するように配置した。又、波の振動方向を調べるために、3 成分の地震計による発破観測を、発破点と最も離れた SITE I と、最も近い SITE II で行なった。換振器の坑道内での設置場所を Fig. 1 に示す。観測に使用した換振器の固有振動数は 25 Hz である。換振器からの出力信号は増幅器、フィルターを通し、上下動 12 成分は電磁オシログラフに、SITE I, II の 3 成分は FM 式データ・レコーダに記録された。使用した計器を Table 1 に示す。

発破は合計 7 回実施された。その発破時刻と薬量、そして表面で観察された破壊の程度を Table 2 に示す。第 1 回の薬量 50 g の発破は、観測系の感度を合わせるための試験に用いた。第 6, 7 回

Table 1 Instruments used for observation of ground vibrations by blasts.

Geophone	NEC UP-202 $F_0=25$ Hz
Amplifier	TOSHIBA ST-2600A
Oscillograph	SANEI MR-102A
Galvanometer	SANEI G500A $F_0=500$ Hz
FM Data Recorder	PHILIPS ANA-LOG 7

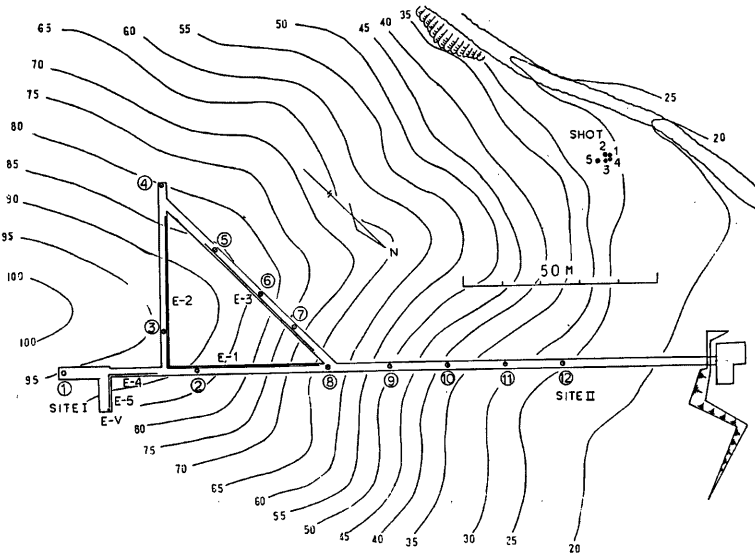


Fig. 1 A contour map with location of blasts and the observation vault at the Miyazaki Crustal Movement Observatory. Arrangement of geophones and extensometers are shown.

Table 2 Time, charge and surface fractures at the blasts.

No.	Time		Charge g	Fracture	Comment
	H	M			
1	11	03	50		Test blasting
2	11	48	50		
3	14	15	100	Remarkable	Popping
4	14	41	200	Remarkable	
5	15	21	400	Slight	
6	15	52	800		Popping
7	16	43	400		Popping

は小割発破であるが、薬量がそれぞれ 800 g と 400 g と大きく、影響があると考えられたので、これらについても観測を行なった。

3. 発破振動の伝播特性

3.1 P波, S波の伝播速度

Fig. 2 は、第 5 回発破 (400 g) の電磁オンログラムからトレースした記録例である。この図に見られるように、P 波初動の立ち上がりは鋭く、その到達時刻の読み取りは容易であるが、S 波初動については、P 波 coda に影響されていたり、又 S 波と表面波の見分けが明瞭でないために、その読み取りは困難である。S 波を判定するために、SITE I, II の 3 成分を用いて、radial, transvers 成分に座標変換を行ない、radial 方向の particle motion を描いた。Fig. 2 の上部に 1, 2, 3 の枠で示した区間についての P 波初動から S 波付近までの particle motion を Fig. 3 に示す。同図で 1 は P 波初動とそれに続く波群の particle motion で、初動は水平に近い角度で入射しており、ほぼ発破点の方向と一致している。同図の 3 は P 波初動の入射角に対してはほぼ垂直方向に polarize していることから、SV 波であると判定されるが、その立ち上がりは P 波 coda に影響されている。このように、S 波の立ち上がりの時刻の読み取りは困難であるので、実際の読み取りは、particle motion から判定した S 波群の位相の山谷で行なった。Fig. 2 に S 波群の読み取りの位相の山谷を示す。Fig. 4 に第 5 回発破の P 波群(下部)と S 波群(上部)の読み取り箇所と、それぞれの

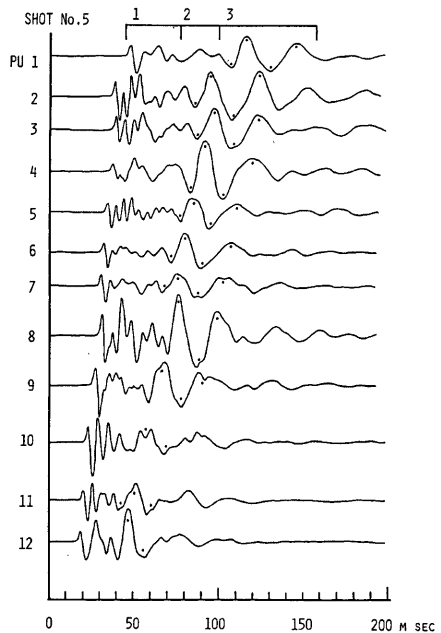


Fig. 2 An example of traced seismograms. The time intervals on the upper most trace are used for particle motion diagrams shown in Fig. 3. The dots show the peaks and troughs of S wavelet for travel time analysis.

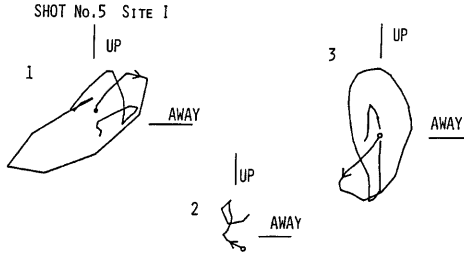


Fig. 3 Particle motion diagrams for P, P coda and S wave group in the vertical plane. The time intervals for diagrams are shown in Fig. 2.

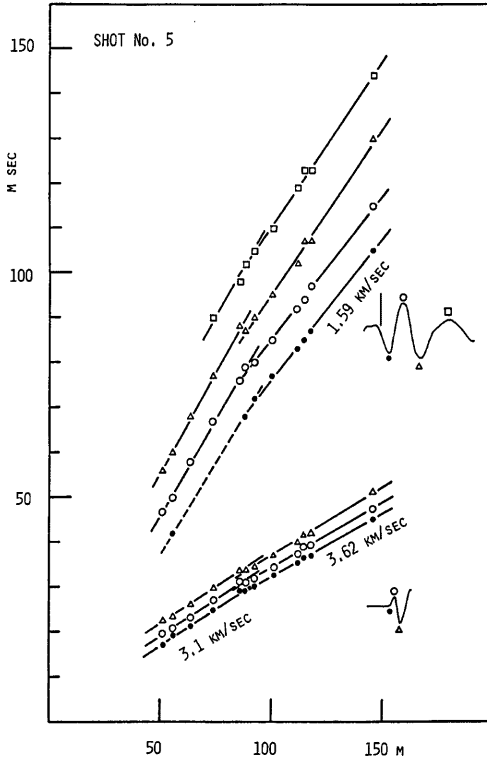


Fig. 4 Travel time diagrams for P and S waves. Peaks and troughs of later phases are shown by the symbols in the inset.

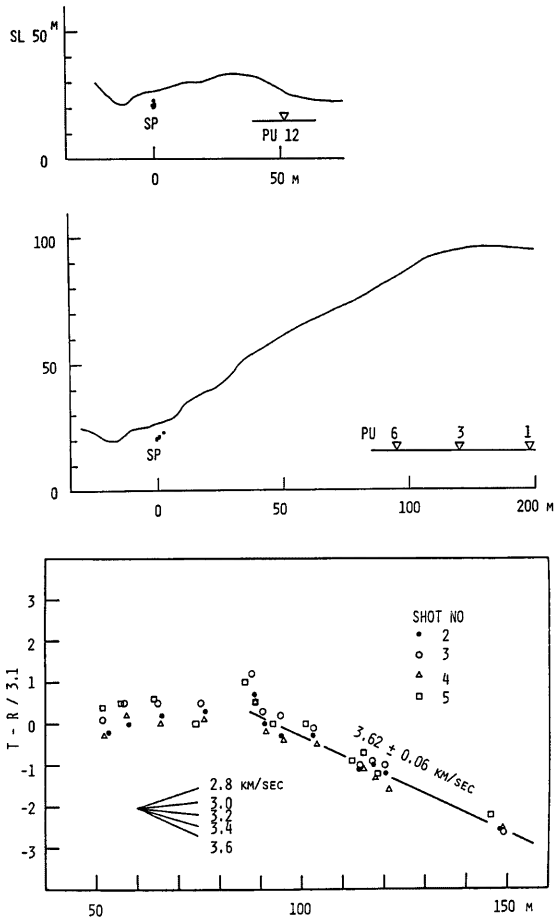


Fig. 5 Reduced travel time diagrams of P wave and vertical sections between blast points and geophones.

走時を示す。同図に示されたP波群の各山谷の読み取りから得られた走時はほぼ同じである。このことはS波群についても同様である。又、Fig. 4を見ると、約90 m付近でS波では明瞭に、P波ではやや不明瞭ではあるが、見掛の速度が異なっているように見られる。やや不明瞭なP波について、このことを詳細に調べるために、3.1km/secでreduceした走時を求めた。その結果をFig. 5に示す。同図から、P波の見掛速度が約90 m付近で明瞭に変化していることがわかる。Fig. 5の上図に地形の断面を示す。同図の上部は発破点と、最も発破に近い観測点②を通る線、下部は最も発破と離れた観測点①を通る断面図である。Fig. 1の地形と、Fig. 5の断面を見ると、各観測点で山の被覆厚が大きく異なる。したがって、発破点か

ら約 90 m 以内の距離には、地表面近くの風化された岩相が分布しており、それ以上離れた地域は風化による影響が小さくなっていると考えると、見掛速度の変化が説明できると考えられる。Fig. 4, 5 から、P 波の遅い速度は約 3.1 km/sec で、速い速度は約 3.62 km/sec、S 波の遅い速度は約 1.25 km/sec で、速い速度は約 1.59 km/sec と見積ることができる。ここでは、P 波、S 波の見掛の速い速度が、観測坑道周辺の伝播速度と考えることができるだろう。

3.2 減衰

Fig. 6 に、各発破での P, S 初動の距離による減衰の大きさを示す。同図で、観測点④における P 波の振幅が異常に小さいが、全体にみると、P, S 波の振幅は距離に比例して減少しており、これは発破の薬量に依存していない。観測点④の異常は S 波には見られず、原因については不明である。

この地域の減衰を調べるために、減衰を $\exp(-K \cdot R)$ の項で表わすと、振幅 A は、

$$A \propto \frac{1}{R} \exp(-K \cdot R) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、R: 距離, K: 減衰係数

で表示される。両辺の対数をとると、

$$\log A \propto -K \cdot \log_{10} e \cdot R \dots\dots\dots(2)$$

で表わされる。減衰係数 K は最小二乗近似から求めることができる。更に、減衰定数 Q は、

$$Q = \frac{\pi \cdot F}{K \cdot V} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、V: 位相速度, F: 周波数

で表示されるので、P 波と S 波の Q は、それぞれの卓越周波数、位相速度、そして(2)式から求められた K を(3)式に代入することにより得られる。なお、距離による減衰係数 K は風化層の影響が考えられる観測点④、⑩、⑪、⑫と異常な④を除く観測点から求めたものを使用した。得られた結果を Table 3 に示す。今回得られた Q 値は、P 波が約 10、S 波が 14 である。この値は他の地域について得られている Q 値³⁾と比較

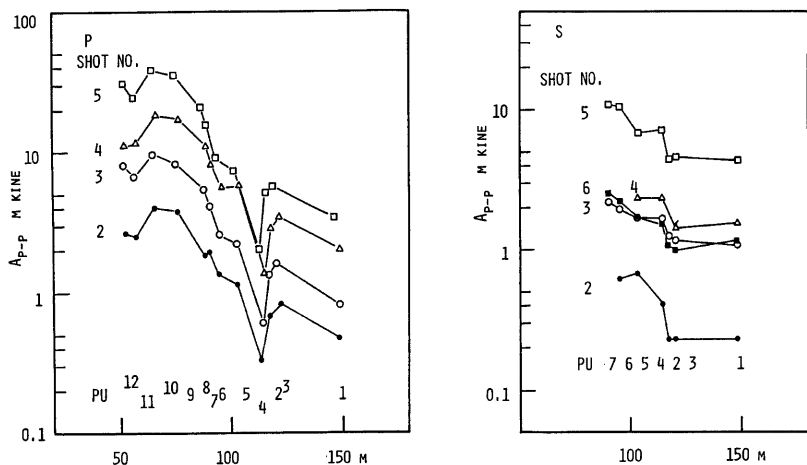


Fig. 6 Attenuation of initial P and S waves with distance.

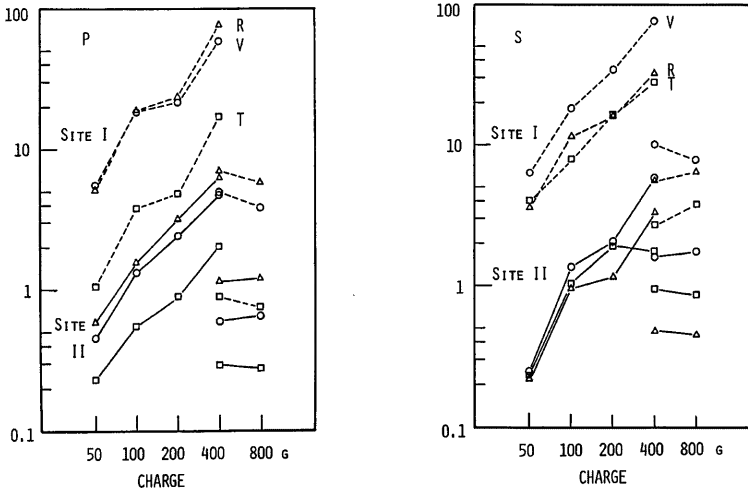


Fig. 7 Amplitude growth of initial P and S waves with charge amounts.

Table 3 Predominant frequency, phase velocity and Q for P and S waves.

	F (Hz)	V (km/sec)	Q
P	200	3.6	9.9
S	55	1.6	14

して若干小さいものと考えられる。当観測所で観測される微小地震の 4 Hz 以上の高周波成分の減衰が、この Q 値と関連しているものと考えられる。しかし、減衰については、吸収、散乱等の減衰のメカニズムから周波数によって異なっているという議論¹⁾もあるので直接比較するには問題があると考えられる。更に広い周波数領域について吟味する必要があると考えられる。

3.3 発破振動の振幅と薬量

地震変動観測への発破の薬量の違いによる影響を調べるために、発破の薬量と振動振幅の関係について調べた。

Fig. 7 に、SITE I, II における P 波(左図)、S 波(右図)初動の振幅と発破の薬量の関係を示す。同図から、P、S 波とも発破の薬量が増すと、それに比例して振動振幅が大きくなるのがわかる。小割発破では、薬量が多いにもかかわらず、振幅は P、S 波とも小さい。P、S 波群の振幅を周波数領域について調べた。Fig. 8 に、バンドパスフィルターを通した波形の P、S 波群の最大振幅を示す。P 波の卓越周波数は 100~

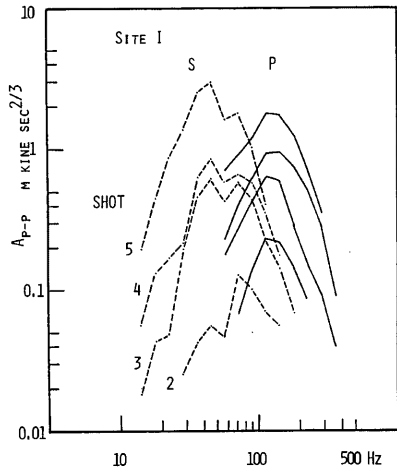


Fig. 8 Amplitude spectra of P and S waves obtained by band pass filters.

150Hz にあって、これは葉量によらずほとんど変化しない。S 波は 70 Hz と 40 Hz にピークが見られる。この2つのピークのレベルを比較すると、葉量が 100 g 以上になると、低い周波数の 40 Hz のピークが卓越してくる。このように、葉量のちがいは 40 Hz の振幅変化に顕著に現われていることがわかる。

4. 地殻変動観測への影響

宮崎地殻変動観測所では伸縮計 6 成分、水管傾斜計 3 成分、そして水平振子型傾斜計 4 成分で地殻変動の連続観測を行なっている¹⁾。このうち感度の高い伸縮計 E-1, E-2, E-3 (Fig. 1) に、発破振動によると見られる“とび”が記録された。Fig. 9 に、“とび”が顕著に見られる E-3 の印画紙による記録例を示す。Fig. 10 は伸縮計の光電変換装置を用いたデジタル自記記録で、20分間隔のサンプリングである。同図で、E-3, E-1, E-2 に“とび”が認められる。これらの“とび”の発生と、その大きさを Table 4 の右側にまとめて示す。“とび”の大きさは E-3 の第 4 回発破 (200 g) によるものが最大で、約 1.6×10^{-8} のひずみに相当する。

Table 4 に見られるように、“とび”の大きさはかならずしも葉量と比例してはいない。又、この“とび”の大きさは、発破振動の振幅とも比例していないし、Fig. 8 のスペクトルとも明瞭な比例関係は見られない。発破振動によると考えられる“とび”の方向は、それまでの伸縮計の secular な動きの方向に発生しやすい傾向にある。これらのことから、ここでの“とび”は strain step のような物理的な量を示しているとは考えにくい。したがって、発破振動による“とび”は計測器の機構に起因すると考えられる。その一つの考えとして、計測器の機構に起因する“ひずみ”が発破振動により解放されて、“とび”が発生する。この“とび”が充分な場合には、次に大きな発破振動があっても、それほど大きな“とび”の発生にはならない。即ち、“とび”の履歴により、次にくる“とび”の発生が決定されうると考えられる。“とび”の発生の回数をみると、発破振動の場合、E-3, E-1, E-2 の順となっている。Table 4 の左側に、1973年から1982年までの期間の各年の自然地震に対応すると考えられる“とび”の回数を示す。SUM は 1979~1982年までの合計である。“とび”の発生回数は垂直成分の E-V を除くと、今回の発破振動により発生したと考えられる“とび”の傾向とほぼ一致している。このことから、自然地震の“とび”の発生についても、計測器の機構に起因するものが多く含まれていると考えられる。

5. ま と め

発破振動の観測から次のことが確認された。

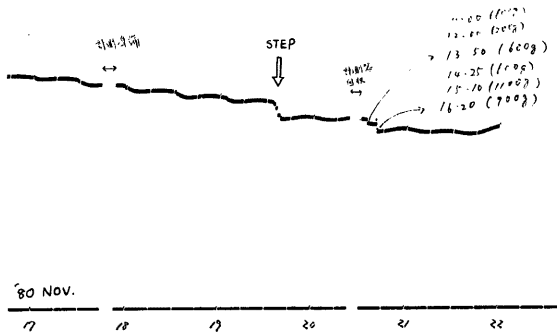


Fig. 9 An example of steps recorded by extensometers (E-3) at the blasts.

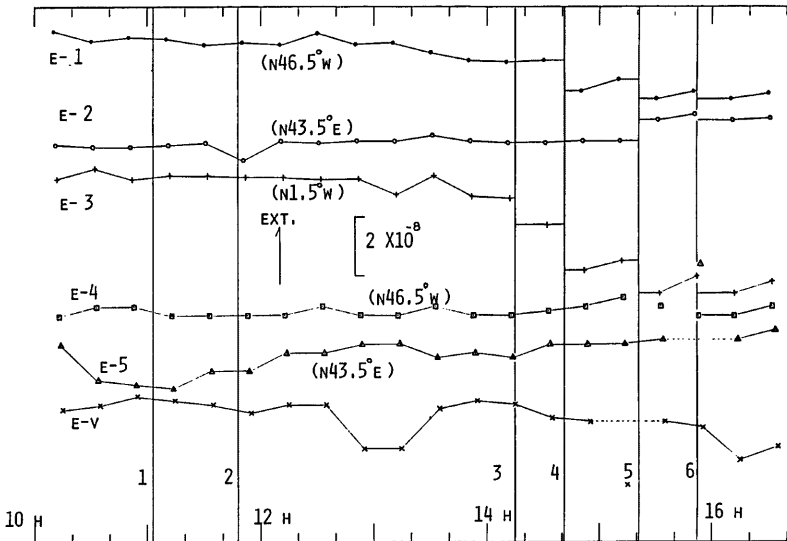


Fig. 10 Reproduction of digital strain data observed by photoelectric digital recording system of the extensometers. Note the steps at the blasts.

Table 4 Steps observed by extensometers.

Left: numbers of steps associated with earthquakes.

Right: amount of steps at the blasts.

	'79	'80	'81	'82	Sum	No. 1 50 g	No. 2 50 g	No. 3 100 g	No. 4 200 g	No. 5 400 g	No. 6 800 g	No. 6 400 g
E-1	8	13	15	9	45				-14	-10	-4	
E-2	12	5	7	7	31					11	-3	
E-3	8	25	17	12	60			-14	-24	-17	-9	
E-4	0	3	3	4	10							
E-5	3	4	6	6	19							
E-v	16	32	36	57	141							

1 dig = 6.5×10^{-10}

- (a) 観測所周辺のP波の伝播速度は3.62 km/sec, S波は1.59 km/secである。
- (b) 観測所周辺の減衰定数Q値は, P波が10, S波が14で, 宮崎層群のQ値を反映していると考えられる。
- (c) 伸縮計に発破振動によると考えられる“とび”が観測された。この“とび”は観測計器の機構に起因すると考えられる。

終りに、観測に御協力いただいたダム建設関係者各位に感謝の意を表します。又、観測を手伝っていただいた園田保美技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高田理夫・古沢 保・竹本修三・尾上謙介・寺石真弘・園田保美：宮崎地殻変動観測所における地殻変動観測(第1報)，京大防災研年報，第22号 B-1，1979，pp. 61-77。
- 2) 古澤 保・寺石真弘：宮崎地殻変動観測所における地震観測—観測点の特性と周辺地域の地震活動—，京大防災研年報，第27号 B-1，1984，pp. 55-62。
- 3) Hatherly, P. J.: Attenuation Measurements on Shallow Seismic Refraction Data, *Geophysics*, Vol. 51, No. 2, 1986, pp. 250-254.
- 4) Akamatsu, J.: Seismic Zoning and Seismic Ground Motion in the Southern Parts of Kyoto, Southwest Japan, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 36, Part 1, 1986, pp. 1-42.