

# 露天掘鉱山における振動レベルの推定

国松 直\*・中川浩二\*・三浦房紀\*・今村 威\*\*・坂本匡規\*\*\*

## Estimation of the Vibration Level Caused by Open Pit Blasting

Sunao KUNIMATSU, Koji NAKAGAWA, Fusanori MIURA, Takeshi IMAMURA  
and Masanori SAKAMOTO

### Abstract

The purpose of this study is to propose a predictor of the vibration level (VL).

First, we measured hundreds of accelerograms of ground vibration caused by open pit blastings. VLs were obtained from these accelerograms by the vibration level meter.

To estimate the VL, three variables that were considered to be closely connected with VL were chosen, namely, average charge/detonator,  $W$  (kg), average time delay,  $T$  (ms), distance from the source,  $D$  (m), and we assumed the predictor for the VL as follows;

$$VL = KW^\alpha D^{-\beta} T^{-\gamma}$$

Then, we carried out multi-regression analysis using the above equation. The result was

$$VL = 156 W^{0.136} D^{-0.228} T^{-0.029}$$

The coefficient of determination of this equation is 0.75.

It should be emphasized that the attenuation factor of the VL is 0.228, and this magnitude is nearly one-tenth of the average value for the peak particle velocity,  $\beta = 2.0$ .

### 1. まえがき

低コストで破碎効果の大きい発破は建設工事における岩盤掘削や鉱山における採鉱工程において欠かすことのできない作業である。しかし、最近では市街地の近傍や人家、構造物が近接して存在するような場所での発破計画、実施が多くなってきており、発破によって発生する振動が問題となり、その操業が思うままにならない場合が多くなりつつある。特に、日常操業として発破を実施している露天掘鉱山においては、採掘の進行に伴う鉱区近傍での発破による振動問題が深刻化してきている。

このような発破振動に対する規制は、振動規制法(昭和51年制定)に公害振動の評価法として定義された振動レベルが用いられることが多くなっている。従って、効果的でしかも経済的な発破計画、実施を行なう上で、振動レベルに対する合理的な推定式の確立が必要にし

て不可欠となってくる。

しかしながら、従来の発破振動の推定式は最大速度振幅をその対象として種々の提案がなされているのみで、振動レベルに対する推定式の検討はほとんどなされていないのが実状である。

そこで、今回、石灰石露天掘鉱山において操業発破時の地盤振動波形を記録する機会を得たので、本研究はこの記録から振動レベルを算出し、振動レベルの推定式の提案を行うとともに、その妥当性について検討を行なったものである。

### 2. 振動レベルの定義

JIS Z 8735(振動レベル測定方法)ではJISC 1510(振動レベル計)で定められた振動レベル計を用いてその指示値により振動レベルを測定することが規定されている<sup>1)</sup>

JISC 1510では振動レベル(VL)を次のように定義している。

$$VL = 20 \log_{10}(a/a_0) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここに、 $a_0$ は基準の振動加速度であり、 $a_0 = 10^{-5}$

\*建設工学科

\*\*宇部興産(株)

\*\*\*大学院土木工学専攻

$m/s^2$ である。また、 $a$ は人体が振動を感じる感じ方(人体感覚)に対して補正を行なった加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$a = \sqrt{\sum a_n^2} \times 10^{c_n/10} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $a_n$ は周波数 $f_n$ (Hz)成分の振動加速度実効値( $m/s^2$ )であり、 $c_n$ は周波数 $f_n$ (Hz)に対する補正值(相対レスポンス)を表す。この相対レスポンスは周波数に依存し、Fig.1に示すような周波数特性を有す<sup>1)</sup>ここで、特に $c_n = 0$ の場合を振動加速度レベル(VAL)と呼ぶ。

従って、振動レベル計はこの周波数に対する補正のためにFig.1の特性を示す振動感覚補正回路を備えていなければならないと規定されている。

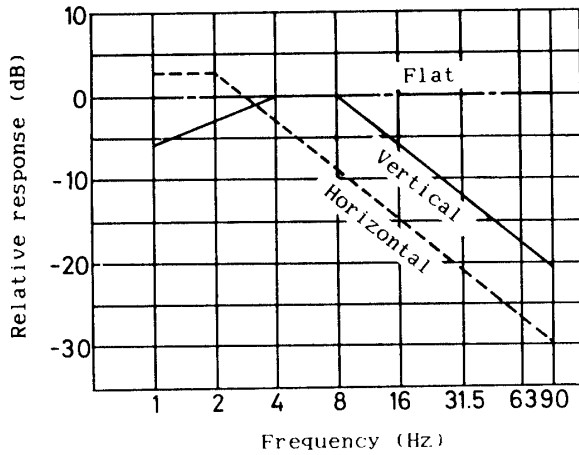


Fig. 1 Frequency characteristics of relative response.

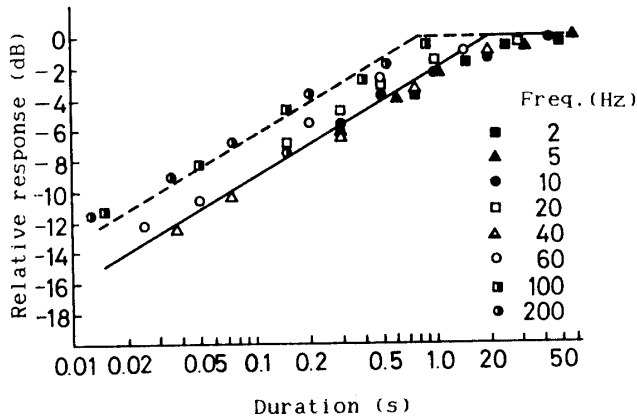


Fig. 2 Response for the single tone burst signal.

一方、衝撃正弦振動の継続時間と人体が感じる振動の大きさとの間にはFig.2に示すような関係があるとされている<sup>1)</sup>この実験結果をもとに振動レベル計の指示特性は整流回路の平滑時定数が0.6秒に相当するように規定されている。Fig.2において、時定数0.6秒に相当する指示特性は破線(比較的高周波成分)と

実線(比較的低周波成分)のほぼ中間のレスポンスを持つことになるようである。

このように、振動レベルは人体が感じる振動の大きさをより忠実に表わし得るように考慮して規定された評価単位である。

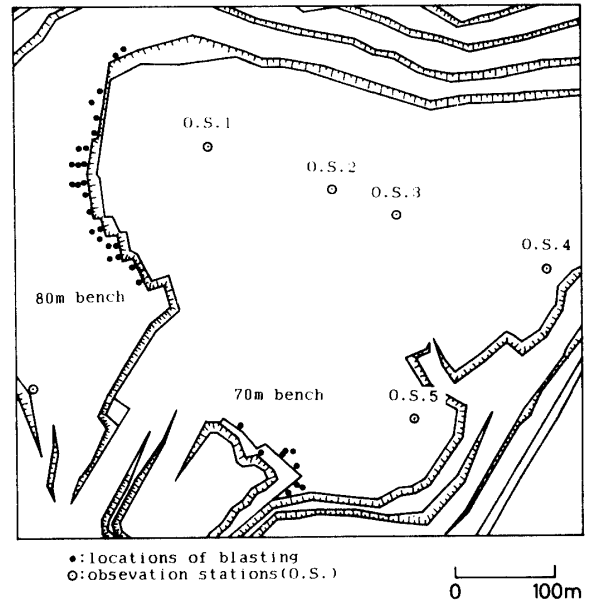


Fig. 3 Plan view of ISA mining site and locations of pickups and blasts.

### 3. 振動測定

振動の測定は宇部興産伊佐鉱山内のほぼ均質な石灰石岩盤上において、6日間、34回の発破に対して行なわれた。1発破当りの鉱量は数百ton~数千tonであり、ベンチ高さは10mである。発破は穿孔長12mの1つの発破孔毎に電気雷管2ケを用い、同時に数孔をMS1からDS10までの電気雷管によって爆破させる段発発破である。

Fig.3は発破位置と観測点の配置を平面図に示したものである。観測点は海拔80mの平坦な岩盤上に5ヶ所配置した(図中○印)。また、記録した発破振動は70mベンチ、80mベンチの発破(図中●印)によるものである。

発破振動は圧電型加速度ピックアップ(リオン社製、PV-87、周波数範囲1~3000Hz)を使用し、上下成分のみを記録した。ピックアップの設置方法は山口ら<sup>2)</sup>の方法を参照し、発破振動による地盤振動に正しく追従するように岩盤内に穿孔し、その孔に石コウで長さ30cmの鋼管を固定した後に、その鋼管上にはりつけた鋼板に加速度ピックアップを磁石で固定した。

使用した計測機器類を Table 1 に示す。

Table 1 Apparatus used in the experiments

Accelerometer	Rion KK.	PV-87
Pre-amplifire	Rion KK.	VP-14A
Amplifire	Sanei-Sokki KK.	6L02
Recorder	TEAC KK.	R-61

4. 加速度記録からの振動レベルの算出法

振動レベルは2章で述べたように JIS Z 8735 において JIS 規格を満足する振動レベル計を用いて測定することが規定されている。そこで、同時に多くの測定地点で振動レベルを求めたい場合には測定数だけの振動レベル計が必要となる。

この方法は、振動レベルを即座に求めたい場合には有利であるが、発破振動そのものの特性をさらに詳しく調べたいときには、一旦データレコーダにこれを記録しておき、これから振動レベルを算出する方が有利なことが多い。

そこで、ここでは、データレコーダに記録された加速度波形から振動レベルを算出することを試みた。

リオン社製の公害振動用振動レベル計 VM-14B (JIS 検定品) には加速度ピックアップ (PV-83A) が付属しており cal. 信号により簡単に校正をとることができる。しかし、他の電圧感度を持つ加速度ピックアップとアンプの組み合わせより得られた加速度波形記録については簡単に校正を行なうことができない。

一般に、加速度ピックアップの電圧感度が  $a$  mV/G ( $a$  mV は実効値) の場合、ファンクションジェネレータより  $a \times 1000/980$  mV の正弦波を出力すれば、この電圧は実効値で 1000 gal (定義上 VAL = 120 dB) の加速度波形に対応する。そこで、この正弦波をデータレコーダに記録した後、その再生信号を振動レベル計のファンクション切換器を VAL に設定した状態で振動レベル計へ入力する。この時、振動レベル計の指示値を 120 dB へ合わせる。

以上の校正の後、振動レベル計のファンクション切換器を VL に設定し、記録した加速度波形を振動レベル計へ入力する。その時の振動レベル計の指示値を適切なレンジにより読みとる。その読みとり値をもとに、アンプの倍率を考慮して次式により振動レベルを得ることができる。

$$\text{振動レベル} = \text{読みとり値} - 20 \log_{10} (\text{倍率}) \quad (3)$$

この方法を用いることにより、通常の加速度ピックアップとアンプを用いて多くの測点でデータレコーダに記録された加速度記録をもとに、振動レベル計1台

を用いて振動レベルを求めることが可能となる。

5. 測定結果および検討

5.1 測定結果

34回の発破によって生じた発破振動について、5ヶ所の観測点で加速度波形を記録した。Fig. 4 は加速度波形の1例である。Table 2 は4章で述べた方法により振動レベルを算出した結果である。なお、これに先

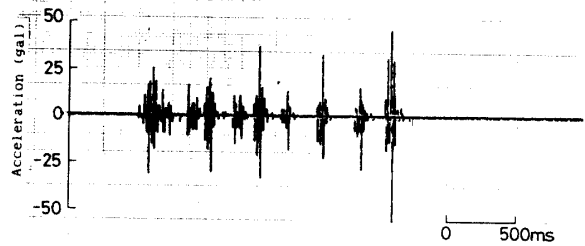


Fig. 4 An example of vibration record (accelerogram).

Table 2 List of vibration levels

No.	Observation station				
	1	2	3	4	5
1	56.5			54.9	69.2
2	59.3			37.9	37.5
3	59.9			46.4	45.5
4	65.6			47.6	52.3
5	62.0			44.5	46.2
6		61.4	62.1	59.4	68.9
7		58.6	60.1	61.4	67.6
8		56.1	54.1	51.8	44.2
9		56.9	56.6	53.6	51.3
10		52.4	51.7	48.4	44.9
11		54.0	52.9	51.4	43.2
12		55.2	53.9	51.4	42.6
13		61.5	62.0		69.8
14	59.0	53.1	51.2		46.7
15	60.4	53.4	51.2		49.6
16	61.6	52.9	51.1		42.9
17	64.1	54.7	52.3		41.0
18	64.1	52.9	51.0		41.0
19	54.3	60.5	61.5	57.7	68.9
20	55.6	61.2	60.9	58.9	69.9
21	68.4	57.9	55.5	53.2	45.7
22	64.3	52.5	50.9	49.2	39.6
23	57.5	53.4	53.5	51.9	48.9
24	60.1	52.7	52.3	50.4	45.7
25	64.8	54.7	53.0	52.4	44.8
26	54.4	61.3	60.0	62.8	69.6
27	62.2	54.8	52.9	50.3	48.2
28	62.5	55.3	53.3	53.8	51.3
29	67.0	55.3	53.4	52.3	42.9
30	52.1	60.5	62.6	58.7	68.5
31	51.1	55.5	56.6	56.2	66.4
32	59.9	54.0	53.5	51.1	45.7
33	61.6	54.9	51.9	51.5	43.0
34		56.9	54.9	50.6	43.7

立ち別途振動レベル計による測定結果と4章で提案した方法による測定結果との比較を行なったところ、その差は1dB以下と非常に小さく、本研究で提案した方法、すなわち通常の加速度ピックアップとアンプの組み合わせを用いても十分に精度よく振動レベルが求まることを確認している。

表中の空欄はデータ収録状態が悪かったために解析できなかったものである。この結果、測定データ数は合計145個である。

5.2 段発破の初段を用いた検討

Fig. 5は説明をわかりやすくするために、段発破を模擬した間欠正弦波形を振動レベル計へ入力したときの振動レベル計の指示値の出力波形である。この図にみられるように、段発破の場合、2段以降の後段の発破は振動レベル値に前段の影響を受けることがわかる。

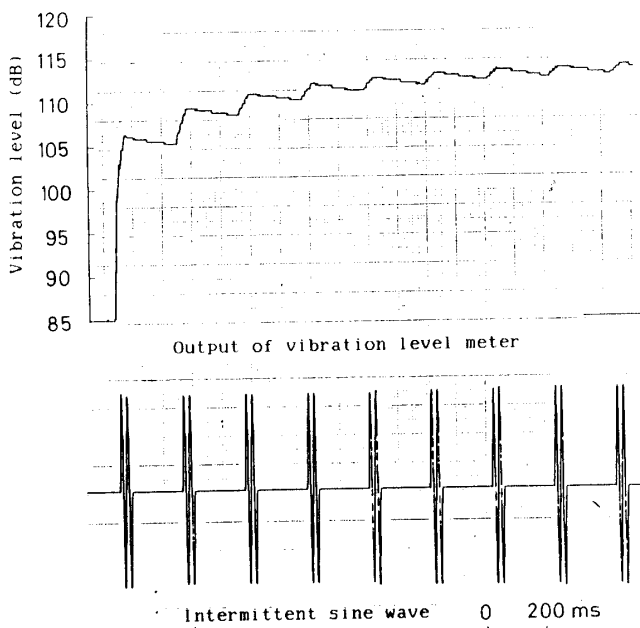


Fig. 5 An example of output record of vibration level meter for the intermittent sine wave input.

従って、このような影響を受けない単発破の振動レベルに関して考察を行なう。この単発破の振動レベルは最大速度振幅の推定式と同様に、薬量と距離という少ない変数で表わすことができ、より複雑な段発破の推定式に関して基礎的な知見を与えてくれることが期待できる。

そこで、単発破による発破振動とみなせる初段の

部分に着目し、初段の発破による加速度波形が後段のものとは明確に分離している記録について、初段の発破による最大速度振幅と振動レベルを算出し、検討を行なった。

5.2.1 最大速度振幅による検討

従来より提案されている発破振動の推定式は最大速度振幅 (PPV (cm/s)) を対象としており次式が用いられている<sup>3)</sup>

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta} \quad (4)$$

ここで、Kは使用する火薬類の種類や性能、発破条件、地盤条件によって定まる定数、Wは薬量 (kg)、Dは発破点からの距離 (m) である。なお、上式中の $\alpha$ は0.5~1.0、 $\beta$ は2.0前後の値をとる場合が多いようである。

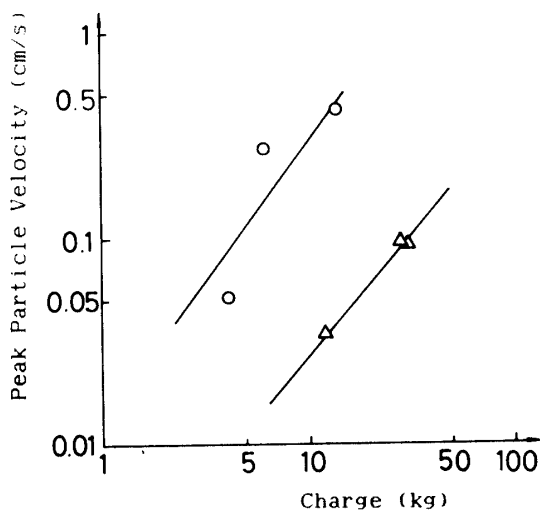


Fig. 6 The relationship between the charge and the peak particle velocity.

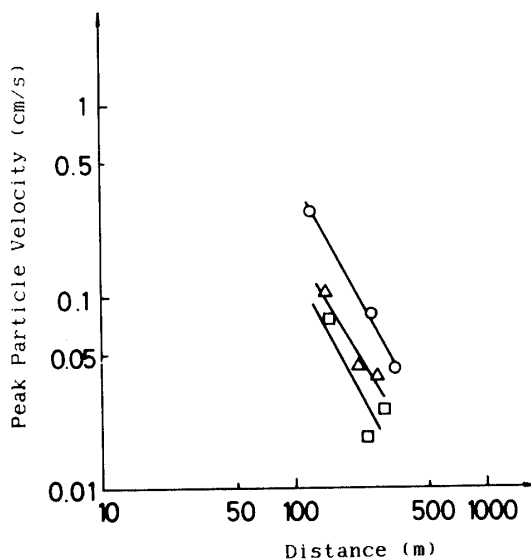


Fig. 7 The relationship between the distance and the peak particle velocity.

今回記録した振動波形は加速度波形であるので最大速度振幅について検討するためには加速度波形を積分し、速度波形へ変換する必要がある。そこで、線形加速度法<sup>4)</sup>によって加速度波形を直接積分し、初段の発破に対応する最大速度振幅を求めた。Fig. 6はこのようにして求めた最大速度振幅と初段の薬量との関係をほぼ同一距離のデータについてプロットしたものであり、 $\alpha \cong 1.0$ の勾配を有していることがわかる。また、Fig. 7は最大速度振幅と距離との関係を同一発破の結果について表わしたものであり、 $\beta \cong 2.0$ という結果が得られている。以上より $\alpha$ 、 $\beta$ の値は従来から述べられている値と矛盾しないことがわかる。

5.2.2 振動レベルによる検討

振動レベルの推定に関する研究がほとんど行なわれていないことは先に述べた通りである。しかし、実施工程において予測が必要となる場合には、便宜的に最大速度振幅の推定式を用いて次のようにして振動レベルを推定しているようである。すなわち、最大速度振幅と振動レベルの間には人力を連続正弦振動とした場合、8 Hz 以上では理論的に次式が成立する<sup>2)</sup>

$$VL = 91 + 20 \log_{10}(PPV) \quad (5)$$

そこで、上式の PPV に(4)式を代入すれば次式が得られ、これが振動レベルの予測に使用されている。

$$VL = (91 + 20 \log_{10} K) + 20 \alpha \log_{10} W - 20 \beta \log_{10} D \quad (6)$$

しかし、(5)式は上述したように、連続正弦振動をその対象としており、発破振動のように一過性の波動に対して、最大速度振幅のように波形のピーク値に対しては問題はないが、パワーとして得られる振動レベルに対しては(6)式による推定は過大な評価を与えることになる。そこで、ここでは PPV を通してではなく、直接振動レベルの推定値が最大速度振幅の推定式と同様に次式で表わされるものと仮定してみた。

$$VL_s = KW^\alpha s D^{-\beta s} \quad (7)$$

ここに、 $VL_s$ は単発発破の振動レベルを表わす。

(7)式の仮定が妥当であるかどうかを調べるため、

5.2.1で使用したデータを用いて、振動レベルと薬量、距離との関係について検討を行なった。Fig. 8は縦軸に振動レベル、横軸に薬量を取りプロットした結果であり、Fig. 9は同様に横軸に距離を取りプロットした結果である。両図とも両対数目盛上ではほぼ直線とみなせることができ、上式の仮定を満足しているものと思われる。また、薬量の効果については正の勾配、距離の効果については負の勾配を持つようであるが、より詳細な検討は単発発破のデータ数を増やして行なう必要がある。また、(6)式との対応関係に関する検討も今後の課題である。

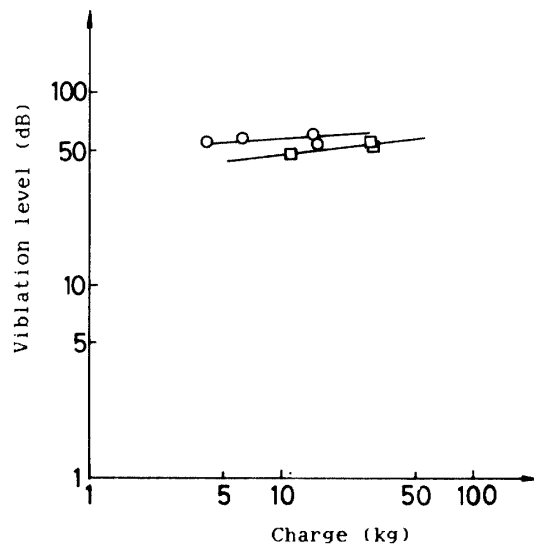


Fig. 8 The relationship between the charge and the vibration level.

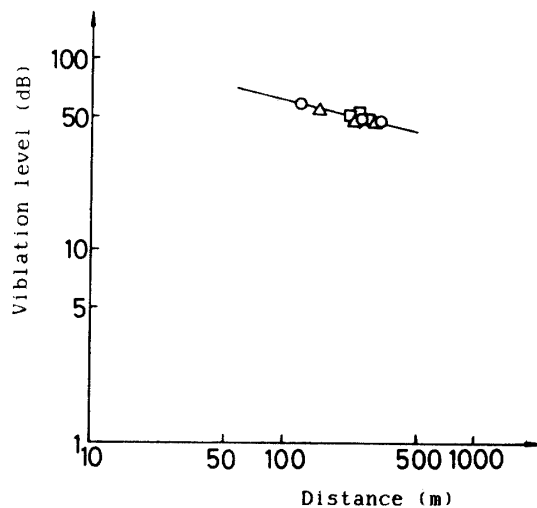


Fig. 9 The relationship between the distance and the vibration level.

6. 段発発破の推定式

6.1 変数の選択

5章において、初段の波形を用いて、振動レベルが薬量と距離を変数として(7)式で推定できる可能性を示した。しかし、段発発破の振動レベルに影響を及ぼす要因には薬量、距離の他に種々のものが考えられる。

段発発破による振動レベルに影響を及ぼす要因として考えられる主なものとしては薬量、秒時差、発破点からの距離があげられる。しかし、段発発破の場合、薬量に関しては単発発破のように唯一に定めることができず、各段において薬量が異なるというのが実情で

Table 3 List of variables

No.	Variables*												
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	
1	10	10	24.89	24.89	29.60	29.60	94.4	354.4				334.6	137.4
2	3	6	21.85	10.93	26.10	15.00	170.0	115.4				478.0	436.0
3	6	12	24.48	12.24	26.10	15.00	209.1	131.0				487.8	477.2
4	5	10	27.10	13.55	29.10	15.00	138.9	138.0				438.0	351.0
5	7	14	27.31	13.66	28.85	15.75	176.9	137.0				467.0	390.6
6	11	11	26.54	26.54	30.35	30.35	94.4		311.0	302.0		346.0	148.4
7	5	5	23.75	23.75	29.60	29.60	175.0		256.0	265.2		348.0	176.2
8	6	12	23.06	11.53	26.10	15.00	207.3		251.2	319.2		479.8	423.0
9	5	10	25.10	12.55	29.10	16.00	138.9		197.2	247.2		390.0	289.6
10	6	12	26.81	13.40	29.85	16.75	159.1		238.0	300.0		454.4	372.6
11	6	12	27.93	14.00	29.35	15.25	159.1		250.4	317.2		476.2	412.0
12	6	12	21.52	10.76	26.10	15.00	207.3		254.8	325.6		487.4	461.8
13	9	9	22.31	22.31	25.85	25.85	93.8		304.0	292.2			134.0
14	7	13	26.11	14.06	28.25	16.50	216.7	144.4	227.0	284.0			324.0
15	5	10	28.72	14.36	29.50	14.75	138.9	144.4	245.6	307.6			379.0
16	5	10	27.07	13.54	27.85	14.10	138.9	131.8	248.2	314.0			403.8
17	6	12	25.85	12.93	26.10	18.00	209.1	132.0	257.2	325.0			427.8
18	6	12	23.68	11.84	26.10	15.00	209.1	116.8	249.0	319.0			445.2
19	5	5	27.76	27.76	30.01	30.01	75.0	337.0	283.8	274.6	322.6		128.8
20	10	10	29.11	29.11	30.51	30.51	83.9	321.8	274.2	269.8	328.0		139.2
21	6	12	23.89	11.95	26.10	15.00	159.1	123.2	252.2	321.2	482.6		432.2
22	6	12	24.02	12.01	26.10	15.00	159.1	126.6	259.0	329.2	491.8		459.8
23	3	5	19.59	9.80	29.01	15.00	117.5	154.0	216.8	269.2	414.2		313.0
24	6	12	28.00	14.00	17.50	15.50	159.1	144.4	217.0	272.4	419.8		324.8
25	6	12	29.39	14.69	29.01	16.50	159.1	136.8	257.0	323.8	482.4		417.0
26	10	10	28.16	28.16	29.26	29.26	94.4	319.2	270.6	265.2	324.0		135.6
27	6	11	25.09	13.69	29.26	15.75	167.0	142.8	239.4	300.0	453.0		367.4
28	5	10	28.26	14.13	28.26	14.25	138.9	150.8	235.2	294.0	443.2		349.8
29	6	12	25.93	12.97	26.10	15.00	159.1	130.2	259.0	328.2	489.6		437.6
30	4	4	25.88	25.88	29.26	29.26	50.0	334.0	278.6	268.4	316.0		122.8
31	5	5	25.21	25.21	28.51	28.51	112.5	303.6	266.8	269.4	340.6		160.8
32	6	12	26.01	13.01	26.01	14.00	159.1	142.8	234.0	293.2	444.4		357.0
33	6	12	26.01	13.01	26.01	14.00	159.1	141.8	262.2	328.8	488.2		421.1
34	6	12	21.06	10.53	26.10	16.50	159.1		264.0	331.8	492.4		433.2

\*Var.1:number of boreholes                      Var.5:max. charge/borehole  
 Var.2:number of detonators                  Var.6:max. charge/detonator  
 Var.3:average charge/hole                    Var.7:average time delay  
 Var.4:average charge/detonator            Var.8:distance from the source

ある。また、秒時差は段発発破の振動レベルと密接に関連していることが示されている<sup>5)</sup>が、各段の秒時差は一定ではなく使用雷管により種々の間隔で起爆されている。

以上のことを考慮して、段発発破の振動レベルに影響を及ぼすであろうと考えられる変数として次のものを考えた。孔数(本)、雷管数(個)、1孔当りの平均薬量(kg)、1雷管当りの平均薬量(kg)、1孔当りの最大薬量、1雷管当りの最大薬量(kg)、平均秒時差(ms)、発破点からの距離(m)の8変数である。上記の変数のうち、伊佐鉾山では1孔に2種類の雷管を使用している場合があるので、孔数と雷管数は異なった値をとることもある。8変数のうち薬量に関係するものは4変数である。Table 2はこれら各変数の一覧表である。これらの各変数について、回帰分析を行ない振動レベルと相関が高く、段発発破の振動レベルを評価するのに最もよい変数の組み合わせとして、1雷管当りの平均薬量、平均秒時差、発破点からの距離の3変数を採用

することとした。これらの変数と振動レベルとの関係

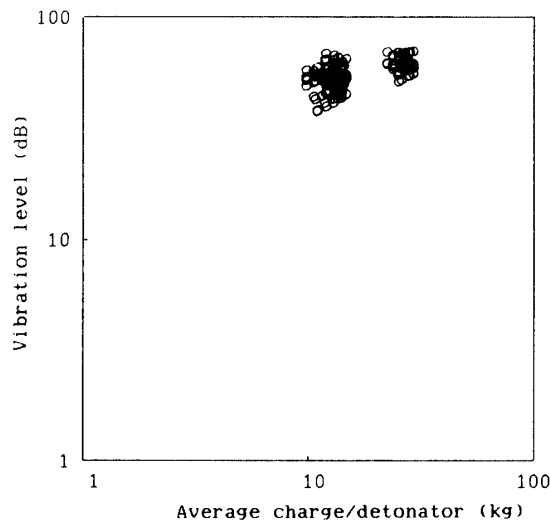


Fig. 10 The relationship between the average charge/detonator and the vibration level.

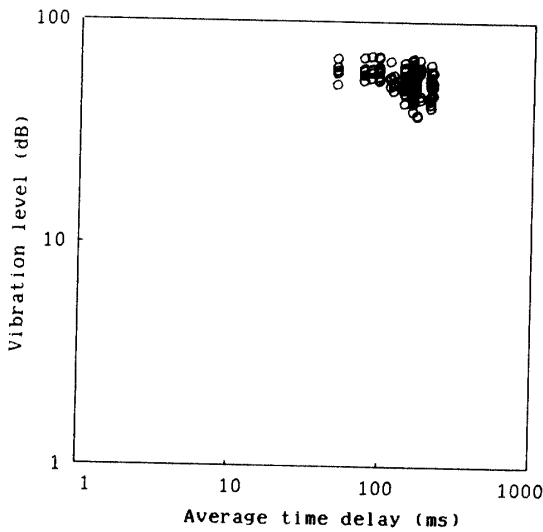


Fig. 11 The relationship between the average time delay and the vibration level.

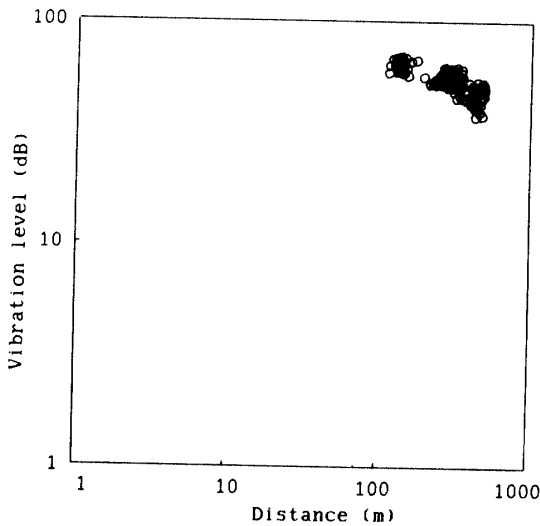


Fig. 12 The relationship between the distance from the source and the vibration level.

を両対数目盛上でプロットしたものが Fig. 10 ~ Fig. 12 である。各変数と振動レベルとの相関係数について t 検定<sup>(6)(7)</sup>を行なったところすべて有意水準 1% で有意と判定された。Fig. 10 ~ Fig. 12 によれば振動レベルとの間に薬量については正、平均秒時差については負、距離については負の相関がみられる。そこで、これらの結果に基づいて次の推定式を考えた。

$$VL_d = KW^{\alpha_d} D^{-\beta_d} T^{-\gamma} \quad (8)$$

ここに、 $VL_d$  は段発発破の振動レベル、 $K$  は定数、 $W$  は 1 雷管当りの平均薬量 (kg)、 $D$  は発破点からの距離 (m)、 $T$  は平均秒時差 (ms) である。

### 6.2 鉱山内の振動レベルの推定式

145 個の全データを用いて (8) 式の変数による重回帰

分析<sup>(8)</sup>を行ない、次の結果を得た。

$$VL_d = 156W^{0.136} D^{-0.228} T^{-0.029} \quad (9)$$

上式の寄与率は 0.75 である。上式について F 検定<sup>(6)(7)</sup>を行なったところ有意水準 1% で有意と判定された。重回帰分析に当って使用した各変数の範囲は  $W$ : 9.80 ~ 28.16 kg、 $D$ : 115.4 ~ 492.4 m、 $T$ : 50 ~ 216.7 ms である。

上式における薬量の指数部  $\alpha_d$  および距離の指数部  $\beta_d$  は最大速度振幅の推定式のそれに比べてかなり小さくなっている。

Fig. 13 は縦軸に実測値、横軸に (9) 式による推定値をとりプロットした結果である。図中の ○印は測点 1、△印は測点 2、□印は測点 3、▽印は測点 4、◇印は測点 3 のデータである。また、図中の破線は推定値に対する 95% 信頼限界曲線である。振動レベルが低い値で推定値が実測値より高めに評価されているものを除けばほぼ 1:1 に対応していると言えるようである。

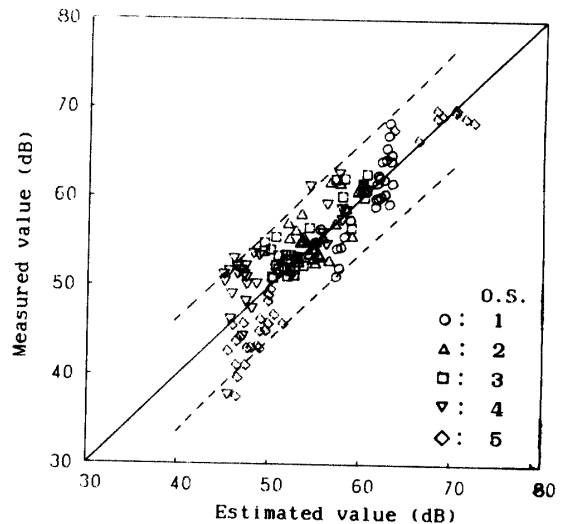


Fig. 13 The relationship between the estimated and measured values. (o.s.: observation station)

(9) 式によれば振動レベルの低減には 1 雷管当りの薬量を少なくし、平均秒時差を大きくした段発発破を実施すれば良いといえる。また、距離による低下がそれほど大きくないということは振動レベルの距離減衰特性として重要であろう。この理由としては以下のようなことが考えられよう。PPV には高い振動数の寄与が高いと考えられるが、この高い振動数は距離減衰が大きい。一方の振動レベルには Fig. 1 から明らかなように低い振動数の寄与が高く、この低い振動数は距離減衰が小さく、しかも、距離の増大とともに継続時間も長くなり、結果としてトータルパワーは距離とともに

にそれほど低下せず、振動レベルも大きく低下しないのであろう。

以上より、今回、伊佐石灰石鉱山で得られた発破振動をもとに振動レベルの推定式として(9)式を得たが、当鉱山での操業発破においては推定式の変数の幅が狭いこと、また均質な石灰石岩盤上で得られた振動波形を用いていることより、(9)式を一般的な推定式として用いるにはいくつかの問題があると思われる。この点について、今後サイトを変えた異なる岩種のもとで、また種々の発破条件、発破規格のもとでのデータを蓄積して検討を行なっていく予定である。

## 7. 結 論

本研究は伊佐石灰石鉱山内で測定した加速度波形145成分を用いて、発破振動の振動レベルの推定の提案を試みたものである。まず段発破の初段による加速度波形を用いて単発破の振動レベルに対して検討を行なった。その結果、単発破の振動レベルが最大速度振幅の推定式と同様に薬量、発破点からの距離の指数形で表わされることを示した。

次に、この結果をもとに操業発破（段発破）の振動レベル ( $VL_a$ ) の推定式を指数形で表わすこととし、それを支配する変数について重回帰分析を用いて検討した結果、1 雷管当りの平均薬量： $W$ (kg)、平均秒時差： $T$ (ms)、発破点からの距離： $D$ (m) の3変数が適当であるとの結論を得た。そこで、145成分の全データを用いて重回帰分析を行なった結果、次の推定式を得た。

$$VL_a = 156W^{0.136}D^{-0.228}T^{-0.029}$$

上式の推定式についてF検定を行なった結果、高度に有意であると判定された。また、推定式の寄与率は0.75である。この推定式より振動レベルを低減させるための発破方法は1 雷管当りの平均薬量を少なくし、段発破の秒時差を大きくとれば良いということ

がいえ。

得られた推定式によれば振動レベルの距離減衰は最大速度振幅のそれよりはかなり小さいようである。

今回得られた発破振動レベルの推定式は伊佐石灰石鉱山の操業発破をもとに得られた推定式であり、当該鉱山に特有のものである可能性も否定できない。従って、本研究で提案した推定式に一般性をもたせるためには今後多くのデータの蓄積をはかって漸次検討、改良していく必要があるものと思われる。

最後に、発破振動の測定を実施するに当たり、秋山剛二、原田晋作両氏はじめ、宇部興産伊佐セメント工場採鉱部の方々に便宜を計って頂いた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、公害防止の技術と法規編集委員会編：新版・公害防止の技術と法規〔振動編〕、通商産業省立地公害局 (1980)
- 2) 山口梅太郎・下谷高瀧・久保田誠・竹内達也：日本鉱業会誌、95—1097, 393 (1979)
- 3) たとえば、工業火薬協会編：発破ハンドブック、山海堂 (1983) P.334
- 4) 大崎順彦、地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会 (1980) P.193
- 5) 国松 直・中川浩二・三浦房紀：第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1985) P.116
- 6) 小林龍一：相関・回帰分析法入門 (新訂版)、日科技連出版社 (1984)
- 7) 本間 仁・春日屋伸昌：次元解析・最小2乗法と実験式、コロナ社 (1979)
- 8) 渡 正克・岸 学：多度量解析プログラム集、工学図書 (1981)

(昭和60年4月15日受理)