

山口大学工学部 正○国松 直 山口大学工学部 小嶋直哉
宇部興産(株) 今村 威

THE PREDICTION AND THE FREQUENCY CHARACTERISTIC OF AIR BLAST INDUCED
BY THE BLASTING OF OPEN PIT MINING

Sunao KUNIMATSU, Yamaguchi University Naoya KOJIMA, Yamaguchi University
Takeshi IMAMURA, Ube Industries LTD.

Abstract

This study aims to clarify the characteristics of the air blast, and to propose a method for its prediction. The frequency weighting characteristics and/or indicator characteristics of instruments to measure the noise or the low frequency noise are considered in the proposed method. First, the peak sound pressures induced by operating blast are predicted from an equation having the variables of the charge weight per hole, the distance from blasting source and so on. Second, the sound pressure level(SPL) obtained by instruments to measure the noise is predicted by using the predicted peak sound pressure. Finally, as an adequate correlation is estimated from the results of measurements in the relation between the SPL and the sound level(SL) or between the SPL and the SPL of low frequency noise, the SL or the SPL of low frequency noise is predicted by making correction for the predicted SPL.

1. はじめに

ベンチカット発破やトンネル掘進発破により生じる発破音はかなり低い周波数成分を有していることは従来の研究からよく知られている。このことは、発破音に対して発破騒音と低周波音の2つの問題が含まれることを意味する。発破騒音は人間に対してうるささを感じさせる音であり、これに対して、低周波音は耳には聞こえないけれども体感として感じたり、物体を振動させたり、または二次的な騒音を生じさせたりする音である。低周波音について現在の段階では明確な定義がなされていないが、ほぼ周波数として100Hz以下というのが大勢のようである。発破音を公害問題として考えるときこれらの2つの問題について検討を行う必要がある

本研究は発破音の周波数特性を明らかにした後に、その予測方法を提案することを目的としている。本研究では発破騒音、低周波音測定機器がもつ種々の特性、すなわち、周波数補正特性や指示特性までも考慮した音圧レベル、騒音レベル、低周波音圧レベルの予測方法について検討を行った。

2. ベンチカット発破による発破音の特性

(1) 発破音の測定位置および測定方法

霧天掘鉱山内においてベンチカット発破により発生する発破音を3箇所測定した。発破箇所と観測位置との距離は300~800mである。観測位置には発破騒音測定用計器と低周波音測定用計器を併置している。発破騒音測定用計器としては普通騒音計(10Hz~20kHz)または精密騒音計(10Hz~20kHz)、低周波音測定用計器としては簡便な方法として使用されている低周波マイクロホン(1~500Hz)を振動レベル計(1~90Hz)に接続して測定するシステムまたは低周波音レベル計(1Hz~1kHz)を用いて、それぞれ音圧波形をデータレコ

ーダに磁気記録した。データレコーダは（FM方式：DC～650Hz）を使用している。

（2）音圧波形例

図－1は低周波音レベル計で記録した音圧記録の結果である。ベンチカット発破は通常段発破で行われるが、ベンチカット発破による音圧波形は各段ごとの発破による音圧波形を時間差をつけて重ね合わせたような波形として観測されている。従って、そのような波形のピークの数とは段数と対応がとれる場合が多いようである。ちなみに、図－1の例では9段で発破を行っている。

（3）音圧波形の周波数分析結果

図－2は図－1に対応する周波数分析結果である。測定器の周波数帯域は1～1kHzであるがデータレコーダの上限周波数により650Hzまでが平坦特性である。図－2の周波数分析結果から約50Hz以上の高い周波数成分はほとんどなく、卓越周波数が5Hz～20Hzに存在することがわかる。図－3は各音圧波形の卓越周波数をヒストグラムで表した結果であり、卓越周波数が狭い範囲に集中していることがわかる。この理由として、本鉱山のベンチカット発破の秒時差が約70ms（約14Hz）を基準に行われていることも考えられる。

（4）種々のレベルの計算方法

騒音計の指示値は周波数に対する補正（周波数補正特性：例えばF、A、C特性）の選択、継続時間に対する補正（動特性：例えばIMPULSE、FAST、SLOW特性）の選択により大きく異なる。

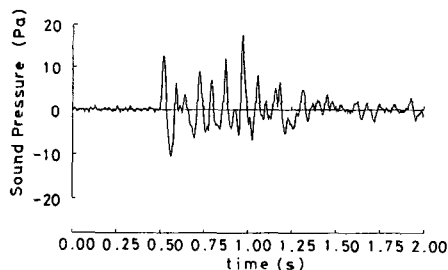
そこで、本研究ではデジタル化された音圧波形から騒音計のシミュレーションプログラム¹⁾を用いて、平坦特性で記録された音圧波形に対して周波数に対する補正および継続時間に対する補正を行うことによって、それぞれの音圧レベル（SPL）と騒音レベル（SL）を求めた。

現在、低周波音の定義およびその測定方法に対する規格は確立されておらず、その検討が学会等で行われている段階である。本研究においては種々の低周波音測定用計器で測定された低周波成分を含む発破音の音圧波形に対して振動レベル計の周波数帯域1～90Hzに補正した音圧波形を低周波音と定義し、その音圧波形から指示特性としてVIBRATION特性（時定数0.63s）により求められた音圧レベルを低周波音圧レベル（LSPL）としている。

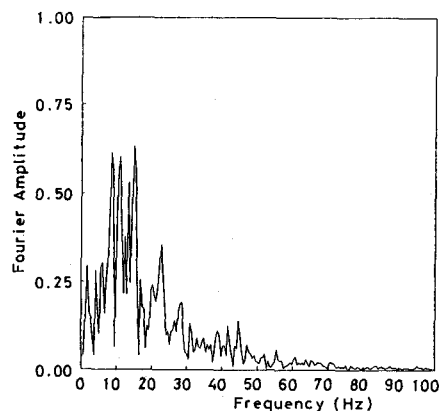
3. ベンチカット発破による発破音の予測方法および予測結果

（1）ピーク音圧値の予測式

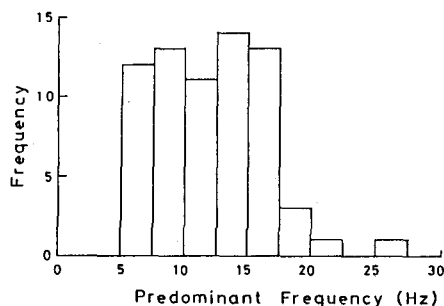
一般に、発破音のピーク音圧値は音源において、装薬量、薬種、発破工法、装薬状態、起爆法などに影響される。次に伝播過程において、伝播距離、地形、気象（気温、風速、湿度）などに影響されるため、その値はかなり変動することが考えられる²⁾。



図－1 音圧波形例



図－2 図－1の周波数分析結果



図－3 卓越周波数の分布

上記の影響因子の中で最も影響があると考えられる装薬量、伝播距離を用いて、発破音のピーク音圧値の推定式として発破振動における最大速度振幅の推定式と同様の次式が使用されることが多い³⁾。

$$P_{PEAK} = K \cdot W^a \cdot D^{-b} \quad (1)$$

ここに、 P_{PEAK} はピーク音圧の予測値(Pa)、 W は装薬量(kg)、 D は爆源からの距離(m)、 K 、 a 、 b は係数である。

しかし、上式にはベンチカット発破に特有の地形の影響やベンチ面の方向によって音の聞こえ方が異なるといった指向性係数が考慮されていない。そこで、新たに次の予測式を提案する。

$$P_{PEAK} = K \cdot W^a \cdot D^{-b} \cdot T^n \quad (2)$$

ここに、 T は観測位置とベンチ面の法線のなす角度 $\theta(^{\circ})$ を用いて次式で定義する。

$$T = \left(\frac{\cos \theta + 2}{3} \right) \quad (3)$$

上式は n の値により変化し、 $n=0$ では無指向性を、 $n=\infty$ では単一指向性を示す。図-4は n の値による指向性の特性を示したものである。一般にマイクロホンの指向性は小さく無視できるような⁴⁾。

また、発破音のピーク音圧の予測に対して音響学的手法を用いた検討⁵⁾も行われているが、本研究では上式のような簡便な式を用いている。

今回測定したデータをもとに式(2)の回帰式を求めた結果、次式が得られた。

$$P_{PEAK} = 7400 \cdot W^{0.72} \cdot D^{-1.4} \cdot T^{-1.1} \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

回帰式を求めるにあたって、 P_{PEAK} として騒音計から得られた値を使用した。また、図-1より測定した発破音が各段毎に対応していることを見なすことができることから装薬量 W としては段当りの装薬量を用いた。回帰式は段当りの装薬量が20~30kg、発破点からの距離が300~800m、 T が0.35~0.99($\theta: 5 \sim 160^{\circ}$)の範囲に対する結果である。今回得られた係数 a 、 b は発破ハンドブック³⁾に記載されている値よりは若干大きいようである。

(2) 音圧レベルの予測式

発破騒音の音圧レベルの測定には2.で述べたように人間の発破音の継続時間に対応する感覚的大きさを補正するために、騒音計の指示特性を変化させることが必要となる。

連続正弦波に対する音圧レベルは実効値表示されることからピーク音圧値を用いて次式で表される。

$$\text{SPL} = 20 \cdot \log_{10} \left((P_{PEAK} / \sqrt{2}) / P_0 \right) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

ここに、 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ であるから、式(4)は次式のように書き改められる。

$$\text{SPL} = 20 \cdot \log_{10} (P_{PEAK}) + 91 \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

ここで、波形の継続時間と騒音計の時定数を考慮すれば発破騒音の音圧レベルは次式で求められることになる⁶⁾。

$$\text{SPL} = 20 \cdot \log_{10} (P_{PEAK}) + 85 + 10 \cdot \log_{10} (1 - \exp(-T_d / \tau)) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

ここに、 T_d はVanmarcke and Lai⁷⁾による波形の継続時間(s)、 τ は時定数(IMPULSE特性:0.035(s)、FAST特性:0.125(s)、VIBRATION特性:0.63(s)、SLOW特性:1.0(s))である。

式(6)において、波形の継続時間が時定数よりも十分大きければ右辺第3項は零に近くなり、騒音計の指示特性の選択は音圧レベルに無関係となる。従って、そのような場合には次式から音圧レベルを予測することが可能であろう。

$$\text{SPL} = 20 \cdot \log_{10} (P_{PEAK}) + 85 \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

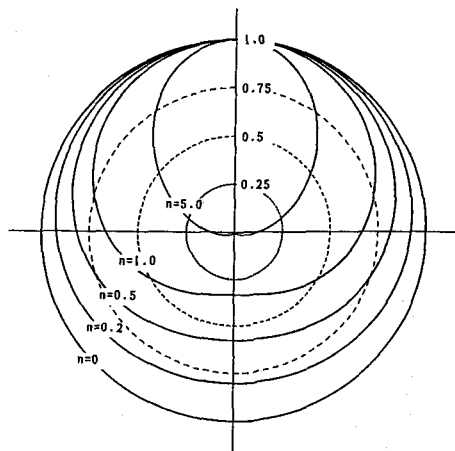


図-4 n の変化による指向特性

そこで、一般に測定されることの多いFAST特性による音圧レベルを用いて騒音レベルおよび低周波音圧レベルとの関係について検討を行う。

図-5は音圧レベル(SPL_{FAST})と式(4)から予測されたピーク音圧値を用いて式(8)から算出した音圧レベル(SPL)の関係を示す。両者の間には高い相関が見られ式(8)の妥当性を示している。

(3) 音圧レベルと騒音レベルとの関係

2. で示したように同一規格での発破から生じる発破音の周波数特性は非常に類似していることから、音圧波形に周波数に対する補正を行った周波数特性も類似したものとなることが予想される。このことは音圧レベルと騒音レベルの間に正の相関があることを示唆している。また、騒音レベルは音圧レベルに周波数補正を行うことから音圧レベルより一般に小さな値となる。以上のことを勘案すれば音圧レベルから騒音レベルを予測する式として次式が考えられる。

$$SL = SPL - \alpha \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

上式の α の値は周波数補正特性(A特性)を考慮すれば卓越周波数が低いような音圧波形に対しては大きくなる。また、同一現場においても音圧波形の卓越周波数がかなり異なるような種々の発破条件での発破を行えば α のバラツキは大きくなるといえる。

図-6に音圧レベル(SPL_{FAST})と騒音レベル(SL_{FAST})との関係を示す。上述のように多少のバラツキはあるもののこれらの間には正の相関があり、 $\alpha=29.0$ と計算された。従って、式(4)は本鉱山では次式の関係で示される。

$$SL = SPL_{FAST} - 29.0 \quad (\text{dB}) \quad (10)$$

この関係を用いて、音圧レベルの予測値($\overline{SPL}$)から騒音レベルの予測値($\overline{SL}$)を算出した。その結果と騒音レベル(SL_{FAST})の関係を図-7に示す。この結果もほぼ妥当な予測結果を与えている。

(4) 音圧レベルと低周波音圧レベルとの関係

3. (3)と同様に、同一規格での発破から生じる発破音の周波数特性が類似していれば騒音計による音圧レベルと低周波音圧レベル($LSPL$)の間にも強い相関があることが予想される。そこで、式(9)と同様な次式を音圧レベルから低周波音圧レベルを予測する簡便な式として提案する。

$$LSPL = SPL + \beta \quad (11)$$

ここで、補正量 β の符号およびその大きさについては卓越周波数、指示特性の選択との関係で変化すると考えられる。しかし、上式は発破騒音の音圧レベルからある補正量 β を考慮するだけで低周波音圧レベルを予測することが可能であり、

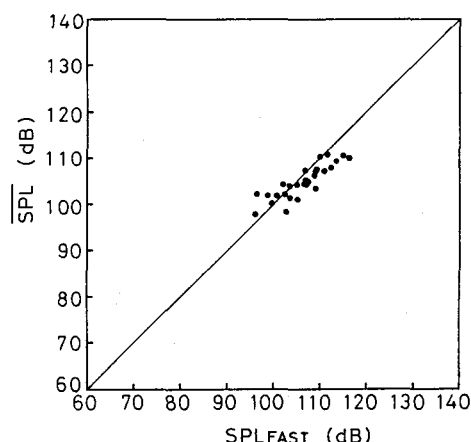


図-5 SPL_{FAST} と SPL との関係

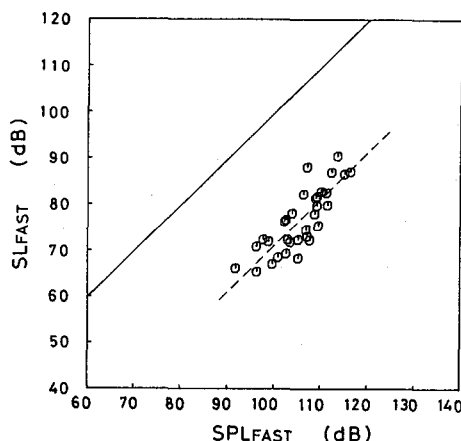


図-6 SPL_{FAST} と SL_{FAST} との関係

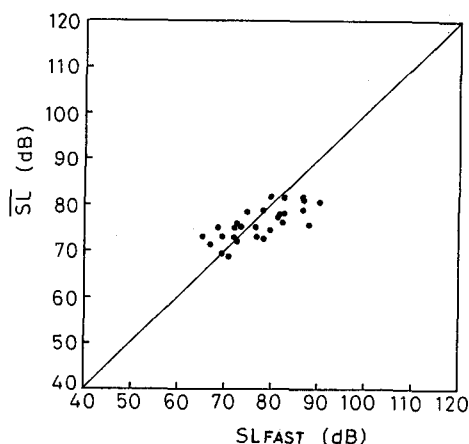


図-7 SL_{FAST} と SL との関係

非常に使い易い式といえる。

図-8に音圧レベル(SPL_{FAST})と低周波音の音圧レベル($LSPL$)との関係を示す。これらの関係にも3章4節で推論したように正の高い相関がみられる。この関係は本鉱山に対して次式のように表せる。

$$LSPL = SPL_{FAST} - 3.3 \quad (dB) \quad (12)$$

この関係を用いて、音圧レベルの予測値(SPL)から低周波音の音圧レベルの予測値($LSPL$)を算出した。その結果と低周波音の音圧レベル($LSPL$)の関係を図-9に示す。この結果も十分に満足のいく予測であるといえる。

4. 結論

本研究は発破音問題のなかに含まれる発破騒音問題と低周波音問題の2つの問題について、発破音の持つ特性を明らかにし、その予測方法について論じたものである。予測にあたっては騒音計、低周波音測定機器の周波数補正特性、継続時間補正特性をも考慮した。

同一規格のベンチカット発破から生じる発破音の騒音レベル、低周波音圧レベルの予測はまずピーク音圧値の予測を行った後、それらの結果を用いて音圧レベルの予測を行う。次に、音圧レベルと騒音レベルの関係、音圧レベルと低周波音圧レベルの関係から求められた補正量を、予測された音圧レベルから引くだけで騒音レベルや低周波音圧レベルを予測できる可能性を示した。

本研究で示した予測方法の手法が他の現場においても適用できるか否か、また補正量の大きさ等については今後のデータの収集が必要といえる。さらに、低周波音に対する対策を講じる上からは低周波音圧レベルの大きさが人体や家屋に与える影響について至急明らかにする必要がある。

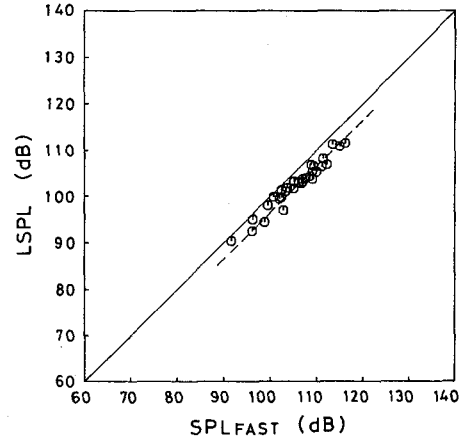


図-8 SPL_{FAST} と $LSPL$ との関係

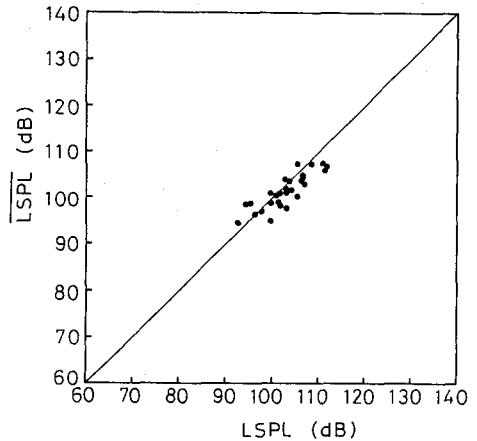


図-9 $LSPL$ と $LSPL$ との関係

参考文献

- 1) 国松 直・小嶋直哉・今村 威・中川浩二: 衝撃音の音圧レベル、騒音レベルの推定のための精密騒音計のシミュレーション, 工業火薬協会誌, VOL. 48, No. 6,
- 2) 日本音響学会編: 音響工学講座4 騒音・振動(上), コロナ社, 1978.
- 3) 工業火薬協会編: 発破ハンドブック, 山海堂, 1976.
- 4) リオン(株) テクニカルレポート: 新型騒音計の特長と性能, 1978.
- 5) 佐々宏一・菊岡栄次・李 義雄・伊藤一郎: ベンチカット発破に起因する発破音の発生機構について, 日本鉱業会誌, 第94巻, 第1085号, pp. 13-17, 1978.
- 6) 国松 直・三浦房紀・今村 威・中川浩二: 速度波形を用いた振動レベルの推定, 土木学会論文集, No. 391, pp. 134-141, 1988.
- 7) Vanmarcke, E. H. and Lai, S. P.: Strong-motion duration and rms amplitude of earthquake records, BSSA, Vol. 70, No. 4, PP. 1293-1307, 1980.