



ウェーブレット変換による発破音スペクトル制御法の評価

井清武弘*, 国松 直*, 今泉博*

本報告は、過渡信号の特性を有する段発発破音の特性解析を行う目的で、 $1/N$ オクターブデジタルフィルタやフーリエ変換によるスペクトル解析とウェーブレット変換を適用する三次元スペクトル解析の得失について先ず述べ、ウェーブレット解析の有用性を明らかにする。次いで、石灰石鉱山や採石場で行われるベンチ発破において発生する音の周波数特性を制御することを目的として、雷管の段数の選択使用により起爆時系列を制御したときの発破音について上述の方法による時系列周波数解析を行い、発破音の発生過程及び制御の有効性の検討を行い、起爆時系列の制御により発生する発破音の制御の可能性を示した。

1. 緒言

発破は岩石や鉱物の採掘作業や構造物の解体作業などを非常に効率的に行える手段である。しかしながら、一連の作業過程の爆薬の起爆時に非常に大きな衝撃的な音を伴う。また、一般に発破作業は複数の発破孔を時間差を設けて起爆する段発発破として行われるのが一般的である。本報告では、過渡信号の特性を有する段発発破音の解析に $1/N$ オクターブデジタルフィルタやフーリエ変換によるスペクトル解析とウェーブレット変換を適用する三次元スペクトル解析の得失について先ず述べる。次いで、石灰石鉱山や採石場で行われるベンチ発破において発生する音の周波数特性を制御することを目的として、起爆時系列を制御したときの発破音について上述の方法による時系列周波数解析を行い、発破音の発生過程及び制御の有効性の検討を試みる。

2. 過渡信号の周波数分析

2.1 $1/N$ オクターブデジタルフィルタによるスペクトル分析

デジタルフィルタ処理は、リアルタイム $1/N$ オクターブ分析器の基本技術として長年使用されてきた。このデジタルフィルタ処理のプロセスでは、適用さ

れるフィルタ帯域幅と平均時間は互いに独立であるため、この手法によって急速なデータ収集が可能になる。したがって、マルチスペクトル分析は、リアルタイム $1/N$ オクターブ分析器内蔵のメモリに、検波器から出力されるスペクトルを一定時間（たとえば5 msec）間隔で記憶した後、スペクトルの時間変化を三次元表示することを意味し、過渡現象を調査するためのデータを収集するのに有効である。しかし、過渡信号が短くなるに従い、以下のようなフィルタ/検波のプロセスにおける限界が出現してくる。

- a) 低周波領域において、(1)式に示す通り、フィルタのインパルス応答時間が長くなり、より長い平均時間を必要とする。

$$BT \geq 1 \quad (1)$$

ここで、 B は、フィルタ対域幅 (Hz)で、 T は平均時間 (s)である。

- b) フィルタ処理によって分析過程に周波数依存の時間遅延が伴う。

これらの問題点を示す例として、0.7msのインパルスを $1/3$ オクターブのマルチスペクトルによって分析した時の分布図を、Fig. 1に示す。図では、低周波領域において、フィルタのインパルス応答時間の増大に起因して、周波数に依存する時間遅延およびデータの広がりが見られる。即ち、継続時間が0.7msのインパルスの場合、(1)式を満足するにはバンド

1993年3月18日受理

*工業技術院資源環境技術総合研究所
安全工学部安全システム研究室
〒305 茨城県つくば市小野川16-3
TEL 0298-58-8570
FAX 0298-58-8558

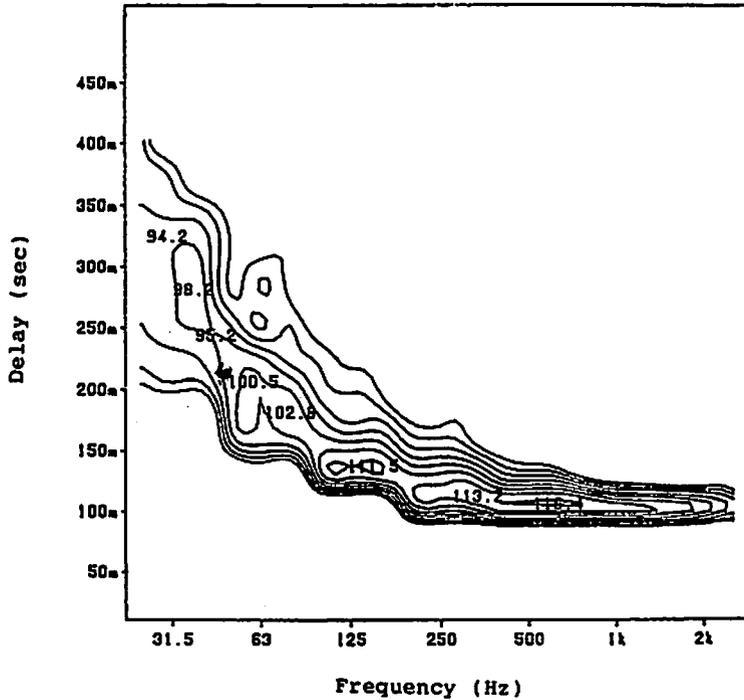


Fig. 1 Multi-spectrum map of a 1/3 octave band analysis of a 0.7ms impulse

幅が約1,430Hz(=1/0.0007)以上のバンド幅となる高い周波数領域,つまり,1/3オクターブバンド中心周波数で6.3kHz以上の周波数でなければ遅延時間が無く,レベル分布もばらつきが少ない分析が出来ない。

2.2 フーリエ変換

フーリエ変換は本来的には連続的な定常信号の解析に用いられるものである。このことはフーリエ変換の定義を示す次式からも明かである。

$$s(f) = \int s(t)e^{-2\pi if t} dt \quad (2)$$

この式に示されるように,解析対象の信号を全時間にわたり積分するため変換結果の時間独立性が失われてしまう。このような特性を有するにもかかわらずフーリエ変換は非定常信号の解析に使用されている。過渡的信号の解析においてフーリエ変換の手法を用いて時間分解能を高める方法として,時間窓 g を適用し,(3)式の定義による短時間フーリエ変換(STFT)を用いる方法が多く採用されている¹⁾。

$$s_x(f) = \int s(t)g(t-x)e^{-2\pi if t} dt \quad (3)$$

STFTは定義や解釈が容易なこともあり,広く用いられるが,この場合もデジタルフィルタと同様に時間分解能と周波数分解能の間に(1)式の制約を免れる

ことは出来ない。

2.3 ウェーブレット変換²⁾

ウェーブレット変換は比較的近年に開発されたもので,高い周波数で幅が狭くなるガウシアン窓によって時間・周波数を分解する方法として表現できるため,騒音測定分野で一般的な1/Nオクターブ分析に使用できる。数学的には,ウェーブレット変換は,次式で表すことができる。

$$S(b,a) = |a|^{-1/2} \int s(t) \Psi((t-b)/a) dt \quad (4)$$

ただし, Ψ は基本ウェーブレットと呼ばれる特殊関数である。これは,時間に変換させ,パラメータ $|a|^{-1/2}$ 次第で大きくなったり,小さくなったりする($a \neq 0$)。厳密な意味では,関数 $S(b,a)$ は,信号スケール a の時間 b 付近の寄与を示すもので,ウェーブレット変換は時間スケールにおける解析である。ウェーブレットを適切に選択することにより,ウェーブレット変換は,信号の時間・周波数表現とすることができる。

Fig. 2に,デルタ関数の1/12オクターブのウェーブレット変換の結果を示す。デルタ関数はその定義³⁾上,時間軸上の x_0 において無限大の振幅を持ちその他の時間では0の関数であり,この性質から,周波数領域では全周波数帯域にわたり等しいパワーを持つ特性を有する。分析結果の特徴として,第1に,ウ

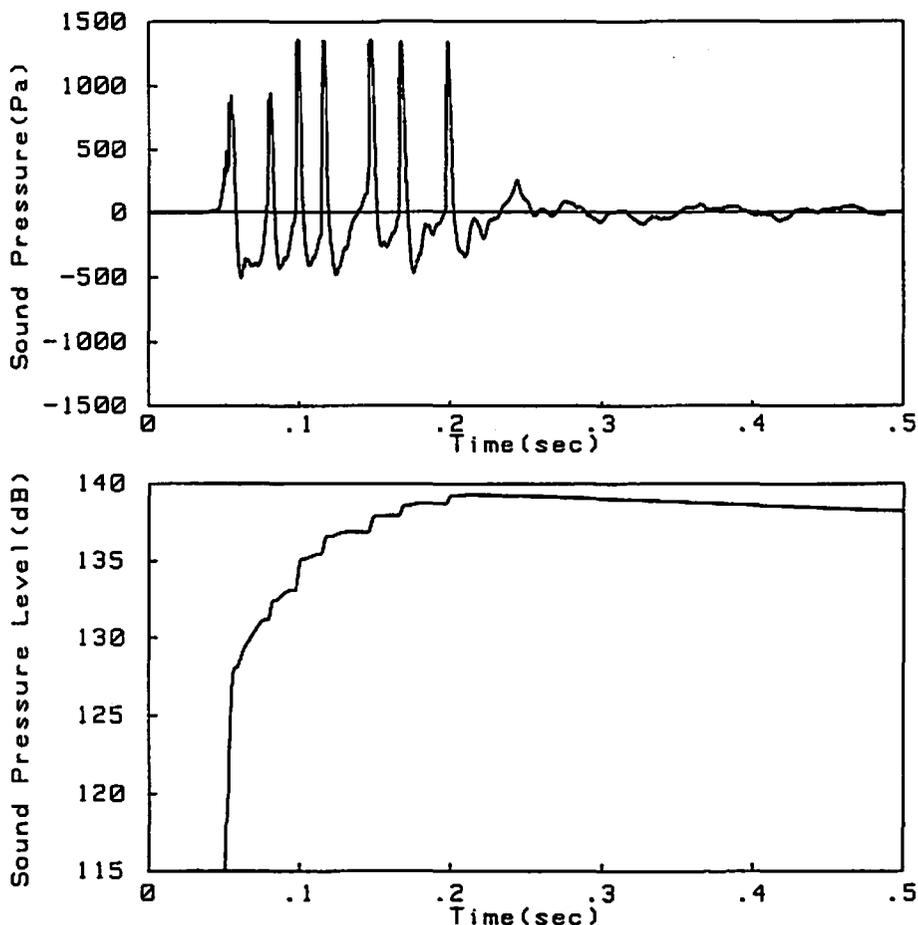


Fig. 3 Measured sound wave form and sound pressure level of a blasting sound at a 50 m point from a blasting bench at a limestone quarry

ウェーブレット変換の結果が、時間遅延を持たないので、分析結果を、時間信号に直接結び付けて説明することができる。

第2に、分析の時間窓は、周波数が上昇するにつれて、限界値に達することなく着実に狭くなる。ウェーブレット変換はRMS検波と平均に代わって、包絡線検波を使用すれば、この窓の長さは、下式によって決定される。このため、ウェーブレット変換が、下式に示す通り、全周波数に対して、もっとも効率よく（当然マルチスペクトル分析より効率よく）動作することになる。

$$BT \geq 1/4\pi \quad (5)$$

3. 段発破音の音圧波形とスペクトル

石灰石鉱山において、7孔の通常のMS段発破を行う高さ10mのベンチ切羽の正面前方50mの地点で計測した時間・音圧波形の例をFig. 3に示す。発破音

の測定においては1 Hzから1000 Hzの間が平坦な特性で計測出来る機器を用いている。図の下側はデジタルシミュレーション⁴⁾により観測波形の音圧レベルを求めた結果（時定数はSLOW, 1s）である。図中、音圧が急峻に立ち上がっている部分が各発破孔の爆薬の起爆に起因する衝撃的な音圧である。この発破で使用された雷管の場合、1段目の雷管の起爆後7段目の雷管が起爆されるまでの遅延秒時は定格では160ms（1段目から5段目までの定格遅延秒時間隔は25ms, 5段目から7段目の定格遅延秒時間隔は30ms）であるが、この発破の場合7段目は1段目の起爆後約150ms後に起爆している。Fig. 3に示した0.5秒間の音圧波形からフーリエ変換によりパワースペクトルを求めるとFig. 4のようになる。全体的な周波数特性としては40Hzから50Hz程度中心とする低周波分が主要部分を占めている。

同じ計測結果を1/3オクターブバンドリアルタイム

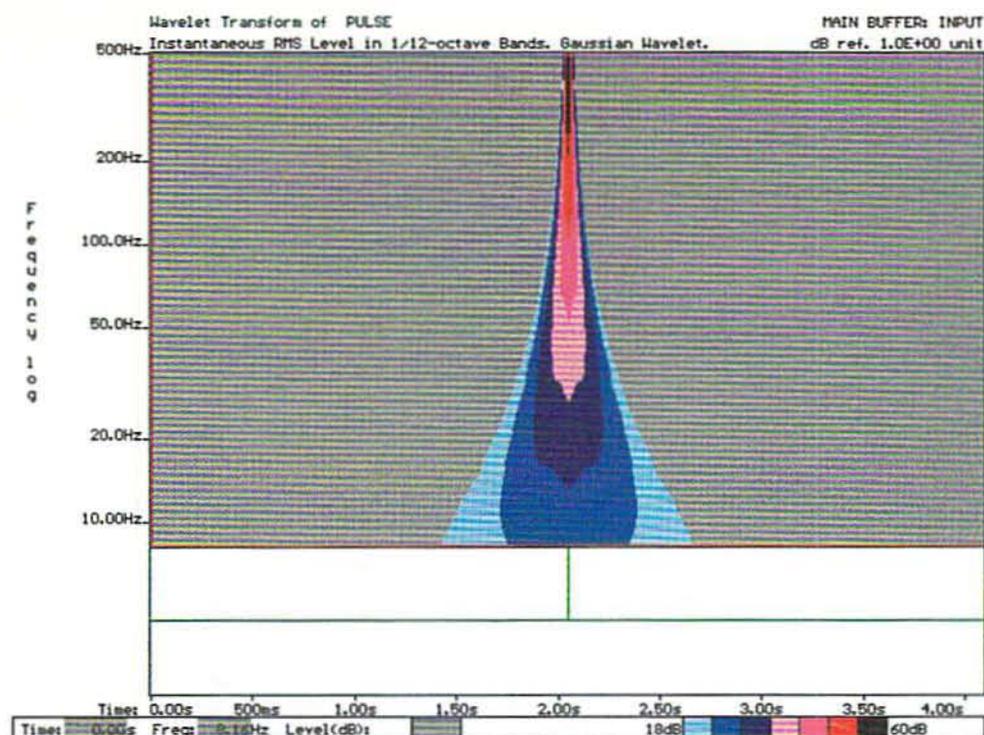


Fig. 2 Analysis of a delta function using a 1/12 octave Wavelet transform

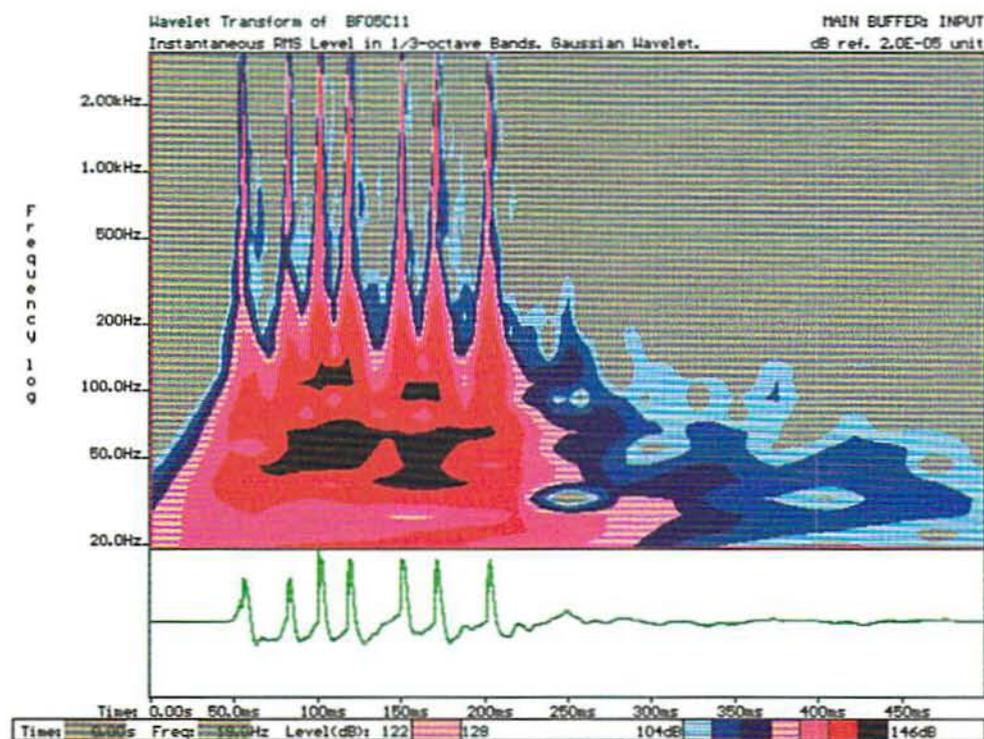


Fig. 6 1/3 octave Wavelet analysis of the wave form shown in Fig. 3

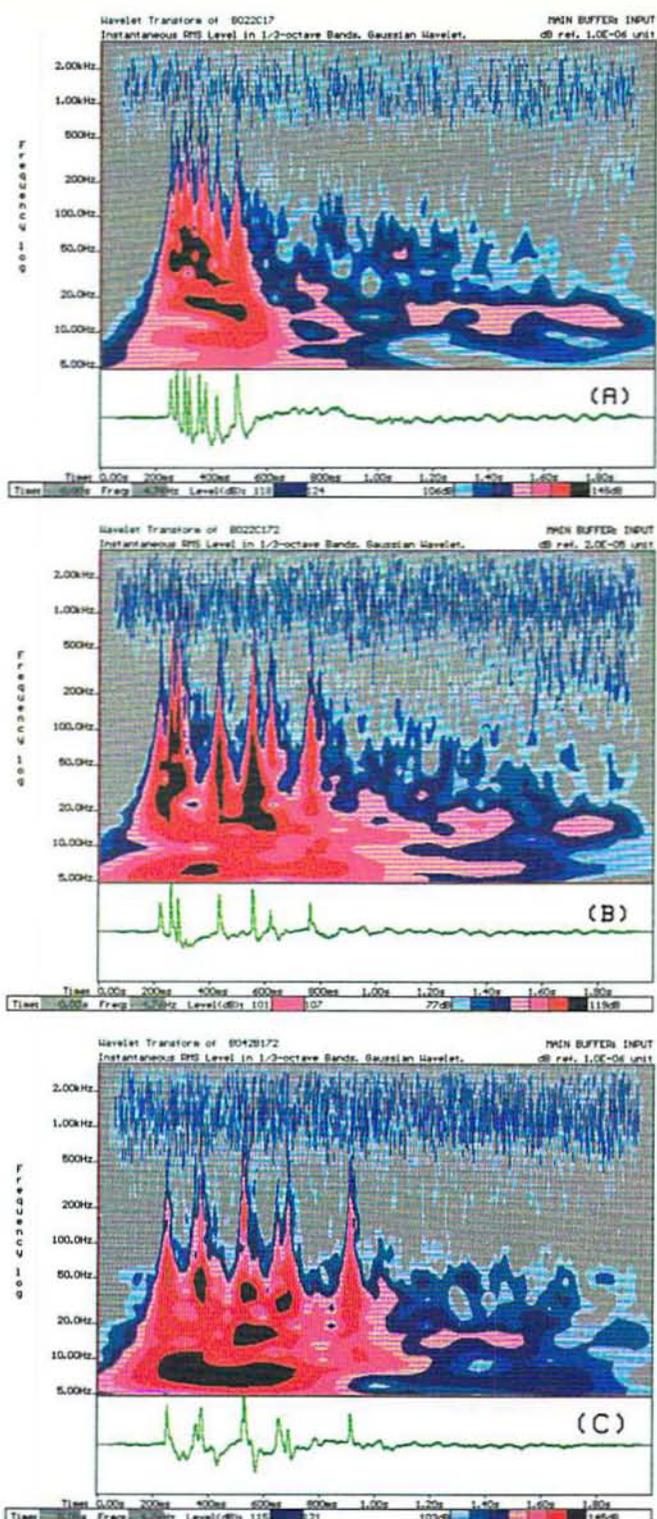


Fig. 10 1/3 octave Wavelet analysis of the wave forms shown in Fig. 7
 (A) Normal delay blasting
 (B) M-sequence delay blasting
 (C) Random delay blasting

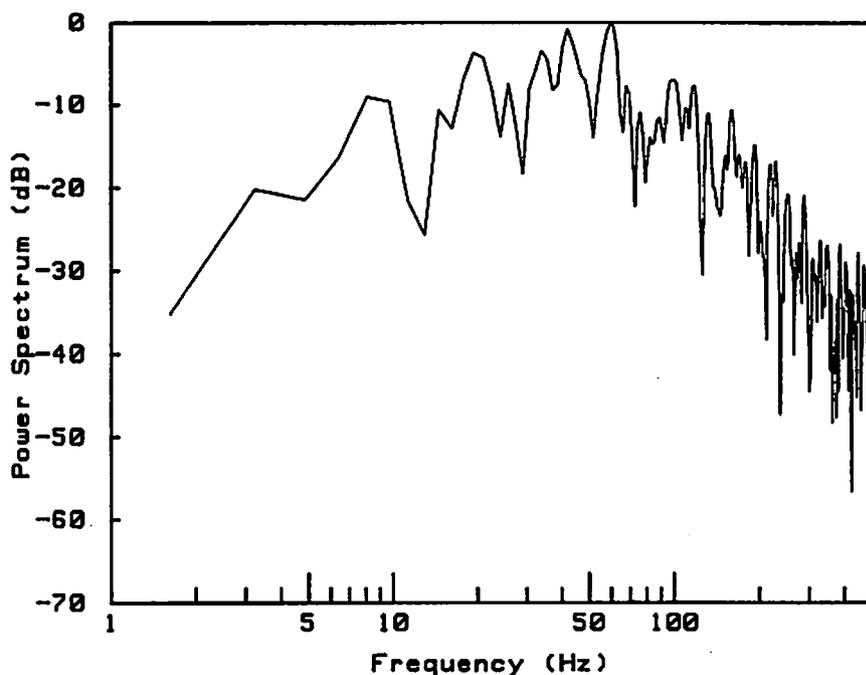


Fig. 4 Power spectrum of the wave form shown in Fig. 3

デジタルフィルターにより分析した結果の例を Fig. 5 に示す。図中(A)は分析の平均時間 T を0.5秒とした場合、(B)は平均時間 T を1.5秒とした場合である。両図の比較で明かなように、31.5Hz程度以下の分析結果が大きく異なっている。これは、先に示した(1)式の制約によるもので、特に低周波領域で周波数分解能を向上させようとすれば時間分解能を犠牲にしなければならないことをこれらの結果は示している。平均時間を長く取ったFig. 5(B)の結果はFig. 4の結果とほぼ同様な結果となっている。

ここで解析の対象とした発破は25ms間隔を基本とするMS遅発雷管により起爆されており、このことに起因して40Hz前後の周波数が卓越することは予想できる。他の周波数成分の発生過程についてはフーリエ変換の解析データのみからでは推定出来ない。

時間的な周波数分解能の優れた手法であるウェーブレット解析によりFig. 3の波形を分析するとFig. 6のようになる。図は横軸が時間、縦軸が周波数、図中の縞状になっているそれぞれの部分が7dB毎のレベル変化を示している。図より各段の雷管が連続して起爆されている間は40Hzから50Hz付近に最も高いレベルが集中しているとともに、各段の雷管が起爆された瞬間は2kHz程度以上までの高い周波数も発生しているのがわかる。最終段の7段目の雷管が起爆された後は時間とともに周波数は50Hz程度より順次低い方へ推

移している。これは、爆薬から発生したガスの膨張とともに起採された岩石が群状に集まって切羽前方へ移動しながら落下することによる低周波分の発生となっていることが推定出来る。このような解析を行うことにより発破が進行する過程の中で発生する音の特性変化が推定可能である。

4. 起爆時系列制御による発破音のスペクトル制御の実験

Fig. 3にも示したように、通常の段発発破の場合、1段から発破孔数に応じて所定の段まで連続して雷管を使用して発破を行う。しかしながらFig. 4からFig. 6でも指摘したとおり、使用する雷管の遅発時間間隔が発破音の周波数特性を大きく支配していることが考えられる。また、発破条件によっては建具のガタツキなどの二次音により苦情が提起される場合もある。このガタツキは発破音の音圧レベルの大小とともに、周波数特性にも依存しているとされている⁵⁾。筆者らは使用する雷管を選択して起爆間隔を制御することにより発破音の特性を制御する可能性について提案を行った⁶⁾。この考えに基づき、8孔の発破を行う場合を想定し、Table 1に示すように、使用する雷管の段数を16段程度以内という条件のほか、掘削条件や装薬条件など他の条件は変えないという前提で、通常の1段から8段の雷管を連続して使用した場合(A) (通常発破)、M系列信号の配列で使用雷管を選定した場合(B) (M系

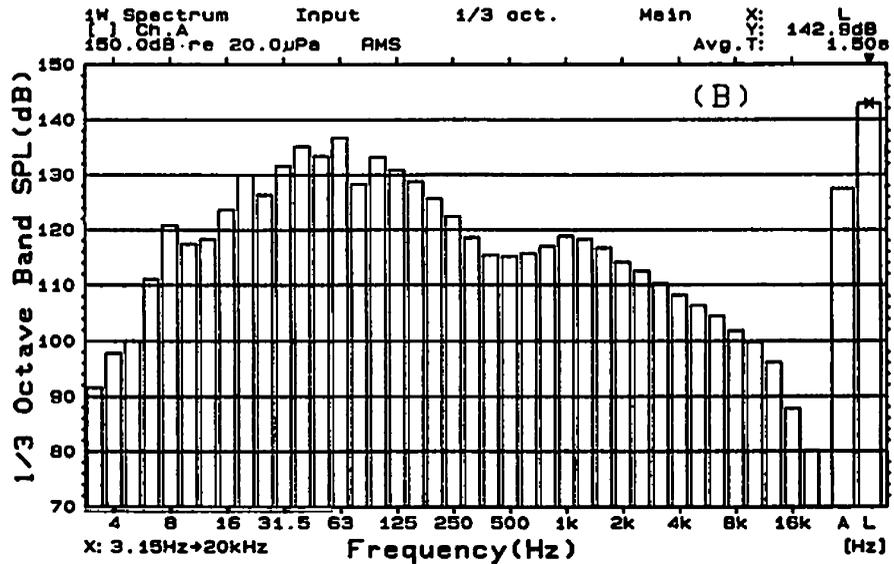
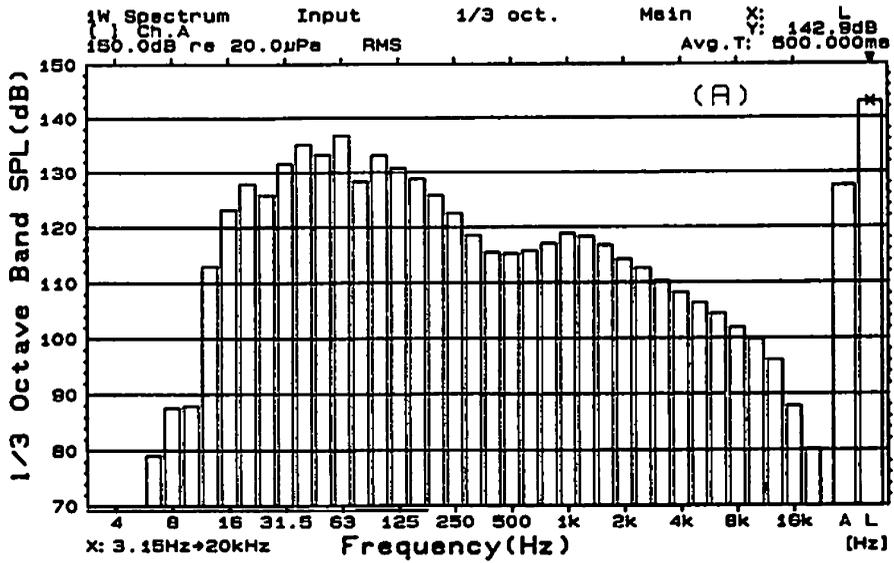


Fig. 5 1/3 octave band analysis of the wave form shown in Fig. 3 using a real time digital filter
 Averaging time: (A)0.5 s
 (B)1.5 s

Table 1 Delay examples for the purpose of blast sound spectrum control at MS delay blasting

Delay step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
(A) Normal Delay	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
(B) M-Sequence Delay	○	○	○	○	-	-	-	○	-	-	○	○	-	○	-	-
(C) Random Delay	○	-	-	-	○	○	-	-	○	○	-	○	○	-	-	○

○ : use of detonator - : no use of detonator

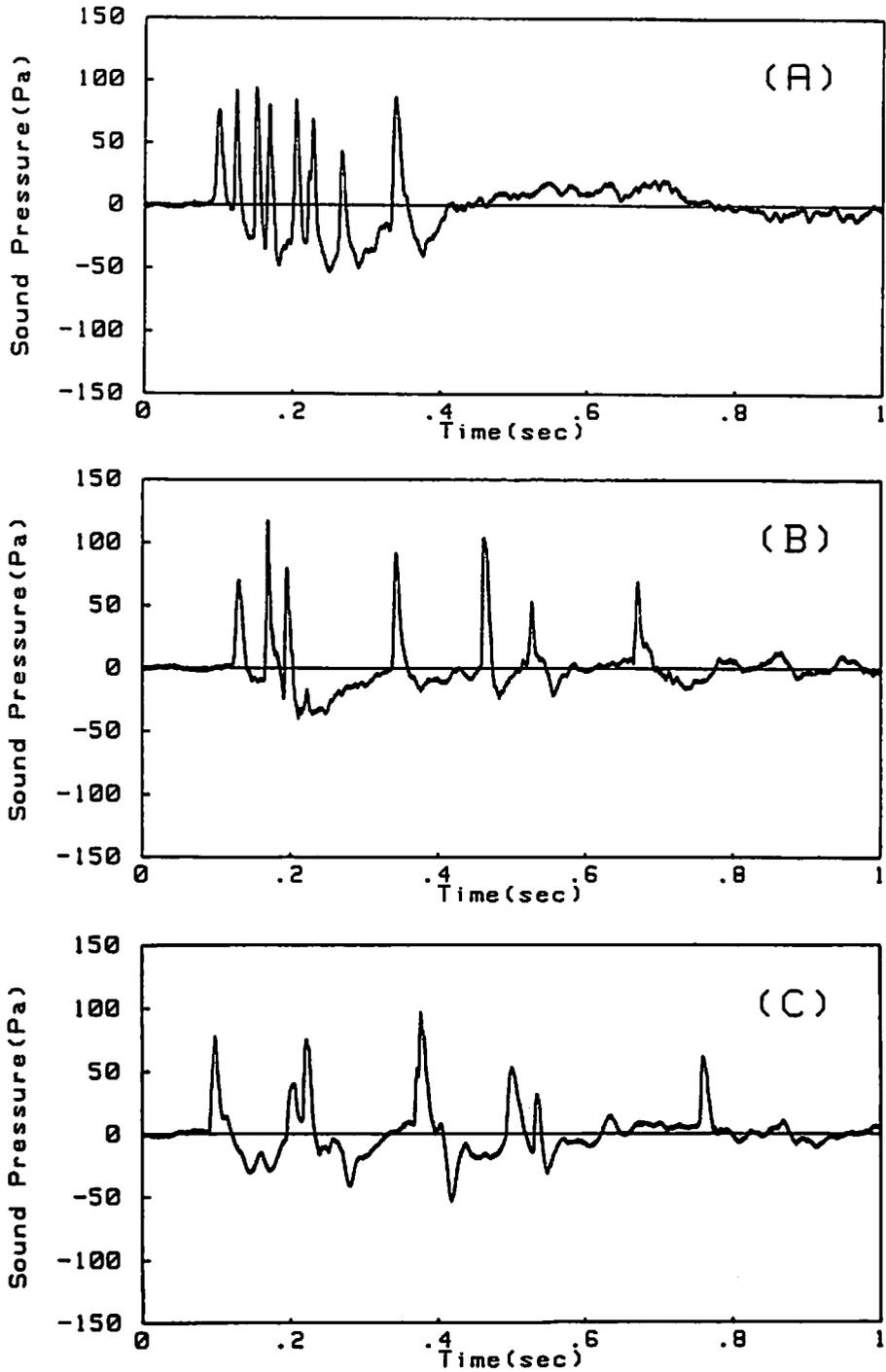


Fig. 7 Measured sound wave forms at each delay step controlled blasting shown in Table 1
 (A) Normal delay blasting
 (B) M-sequence delay blasting
 (C) Random delay blasting

列発破)及び乱数表によりランダムに使用雷管を選定した場合(C)(ランダム発破)の3つのケースについて

実験発破を行った。これらの実験に使用した切り羽の発破条件は次の通りである。

Table 2 Comparison of sound pressure levels of each delay blasting shown in Table 1

SPL(SLOW) (dB)			
Experiment Number	(A) Normal Delay	(B) M-Sequence Delay	(C) Random Delay
1	117.1	118.1	120.2
2	119.1	122.7	118.2
3	119.5	—	—
4	119.6	—	—
Average	118.8	120.4	119.2

発破孔数：8本
 発破孔径：115mm
 発破孔間隔：4.5m
 最小抵抗線：4.2m
 装薬量：13.2kg

実験発破の切羽から100mの地点で計測した時間-音圧波形をFig. 7に示す。この実験発破では通常の段発破(A)は250ms程度で起爆が終了しているが起爆時間を制御した発破の(B)と(C)の場合は600msから700msで全段の起爆が終了している。実験は、通常発破を4回、その他の発破をそれぞれ2回ずつ行ったが、肉眼観察により岩石の起採状況を比較したが、発破効果にはいずれの場合にも大きな差異は認められなかった。実験結果のうち、それぞれの発破の音圧レベル(SLOW)をTable 2に示す。これらの結果より、オーバーオール音圧レベルは各発破方法による大きな差異は認められない。

5. 考察

観測したFig. 7に示すそれぞれの時間-音圧波形のパワースペクトルと1/3オクターブ分析結果を求めてそれぞれFig. 8とFig. 9に示している。Fig. 8のパワースペクトルではそれぞれの発破の卓越周波数は次のようになっている。

- (A) 通常発破：約2Hz
- (B) M系列発破：約6Hz
- (C) ランダム発破：約7Hz

一方、1/3オクターブ分析の結果では50Hz程度以下が卓越していることは判断できるが数Hzの領域では(1)式の制約の関係もあり、細部の解釈は難しい。

同じ結果をウェーブレット変換による解析結果として示すとFig. 10の通りである。図から各発破条件の場合について雷管起爆時系列との関係で発生周波数の

推移を見ることが出来る。これらの結果をそれぞれの実験についてまとめてみると次の通りである。

(A)通常発破：雷管が継続して起爆している間は50Hzと20Hz前後に高レベル帯が集中しており、各段の起爆が完了後約1秒後に20Hzを中心とするの低周波成分が出現している。この低周波分は起採された岩石の動きに伴うものと推定される。

(B)M系列発破：通常発破に比較して雷管が起爆されている間の卓越周波数が50Hzを中心に高い周波数と低い周波数の両側へ広がる傾向が見られる。また、高いレベルの領域は雷管の起爆間隔と比較的短い時間帯に集中している。雷管の起爆完了後の周波数分布も通常発破のような特定周波数への集中は見られず、50Hz程度以下にはほぼ平均して分布している。

(C)ランダム発破：全体的な傾向はM系列発破と類似しているが、雷管の起爆時に特に10Hz以下の低周波分が卓越しているのが特徴である。起爆完了直後は更に周波数分布が平均化している。

M系列発破とランダム発破において、通常発破に比較して卓越周波数が低周波に移行しているのは、それらの全孔の起爆完了までに通常発破の場合の倍程度以上の時間を要しており、岩石移動、落下に要する時間も長くなっていることとも関係していると考えられる。以上の特徴の他、雷管が起爆された瞬間にはいずれの発破方法の場合も数百Hzから1kHz程度までの周波数分布となっている。また、ウェーブレット変換による解析では各段の雷管が起爆された瞬間を含め、発破作業の進行にともなって時間分解能及び周波数分解能の両面から観察・解析することが可能で、発破時の起採岩石の挙動解析と合わせて利用すれば発破に伴う音の制御や発破効果の向上に有用な資料が得られるこ

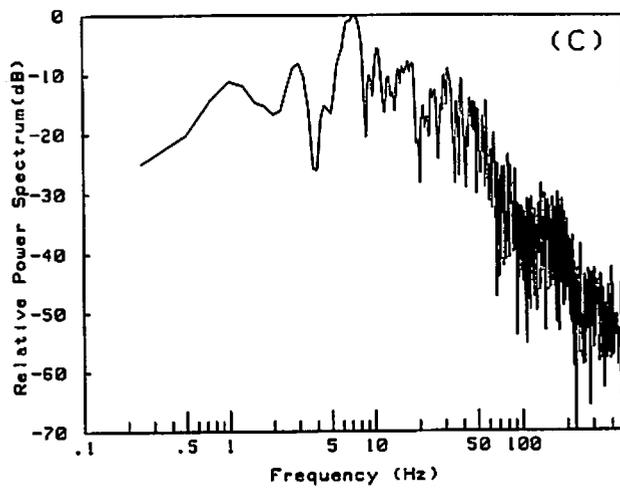
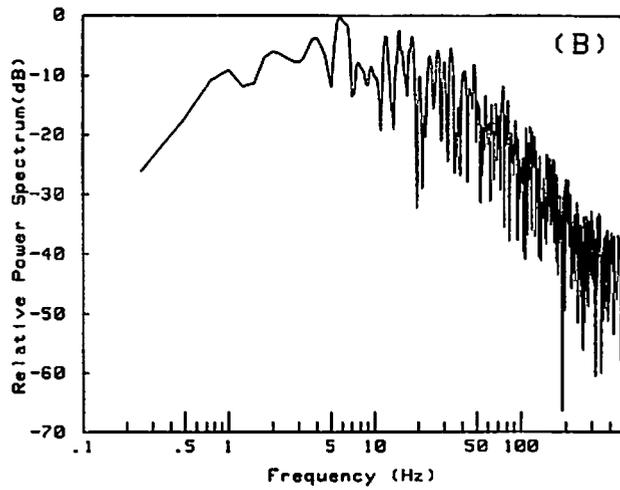
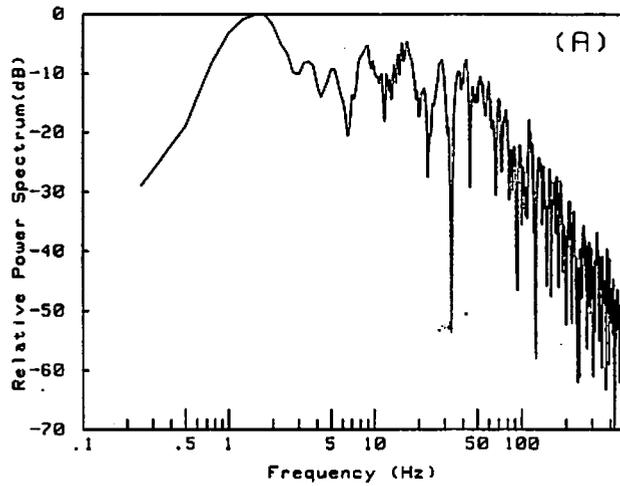


Fig. 8 Power spectrum of the wave forms shown in Fig. 7
 (A) Normal delay blasting
 (B) M-sequence delay blasting
 (C) Random delay blasting

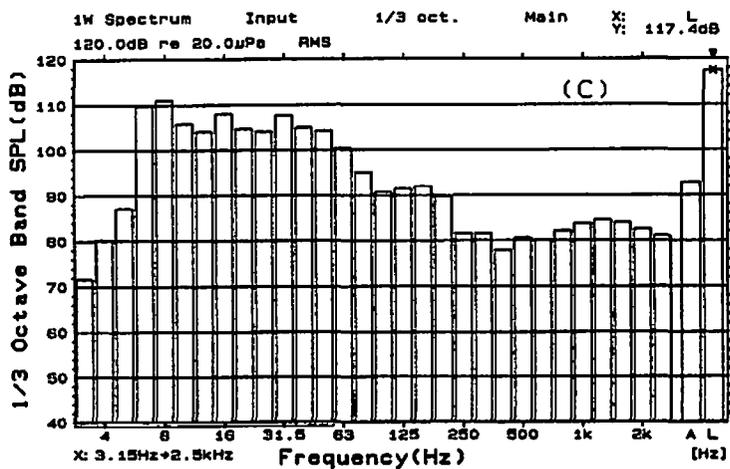
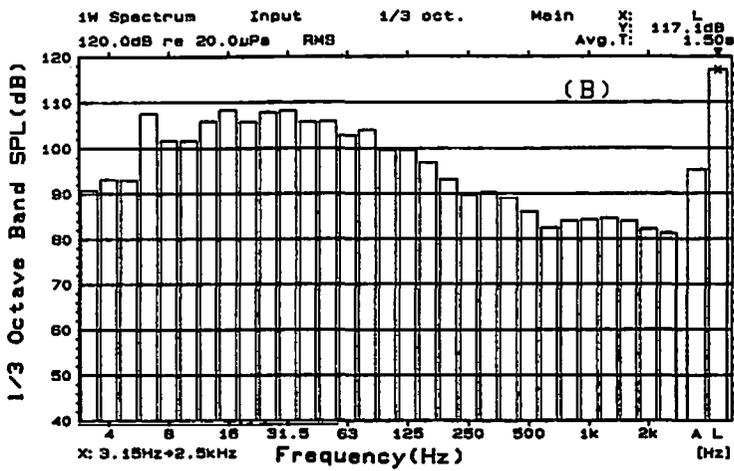
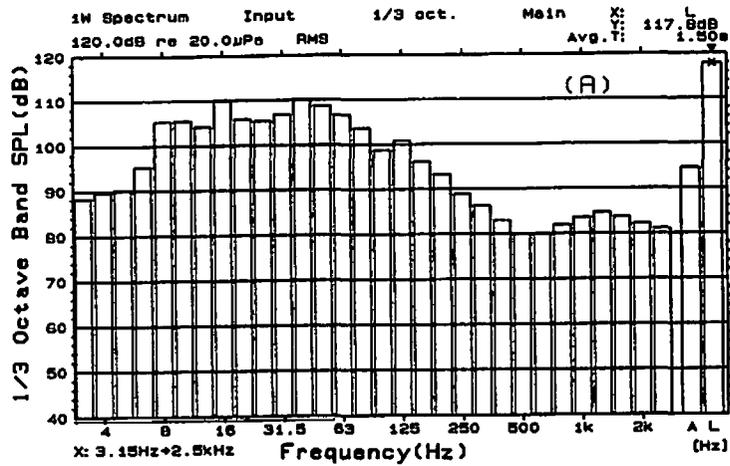


Fig. 9 1/3 octave band analysis of the wave forms shown in Fig. 7
 (A) Normal delay blasting
 (B) M-sequence delay blasting
 (C) Random delay blasting

とを示唆している。

6. 結 論

デジタルフィルタ等を用いたマルチスペクトル分析は過渡信号の3次元的挙動を調べる強力な方法である。しかし、MS段発破など伴う発破音の解析のように時間・周波数の両面から高分解能が求められ、マルチスペクトル分析が限界となる場合に、ウェーブレット変換はこれに代わる方法であることを示した。また、具体的な衝撃的変動音である発破音の測定解析に、マルチスペクトル分析、ウェーブレット変換による発破音発生機構の検討について紹介した。その結果、筆者らが提案している起爆時系列制御により発破時の発生音のスペクトル特性を制御する試みの妥当性が実験的に検証することが出来た。

謝 辞

本報告に関連し、現場での計測実験に御配慮・御協力いただいた武甲鉱業株式会社、武甲鉱業所並びに

吉澤石灰工業株式会社、葛生工場の関係各位に心から感謝いたします。

文 献

- 1) R. M. Upton, S. Daimon, (財)自動車技術会, 学術講演会前刷集 No. 921, pp. 49-52 (1992)
- 2) O. Rioul, M. Vetterli, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 14-38 (1991)
- 3) R. B. Randall, "Frequency Analysis", p. 19 (1987), Buruel and Kjeur
- 4) 国松 直, 井清武弘, 今泉博之, 他, 騒音制御投稿中 (Vol. 17, No. 4あるいはNO. 5に掲載予定, 1993)
- 5) 環境庁大気保全局, 「低周波空気振動調査報告書」(1984)
- 6) 井清武弘, 国松直, 今泉博之, 資源・素材学会誌, Vol. 107, No. 13, pp. 971-976 (1991)

Evaluation of a method for spectrum control of blasting sound by using wavelet transform

by Takehiro ISEI*, Sunao KUNIMATSU* and Hiroyuki IMAIZUMI*

Multispectrum analysis gives us a powerful procedure to analyse transient signals such as blast sound due to blasting. However, the conventional analysis methods such like a digital filter technique or a Fourier transform technique show some limitations in the frequency resolution or the time resolution because of their basic definition. In case beyond the limitation of such way, the Wavelet transform substitutes the way.

For the purpose of control of the frequency spectrum of blasting sound, a new method was examined at the bench blasting face in a limestone quarry. In the experiment blasting, initiation delay intervals of each blast hole have been changed by selecting the step of detonator based on the M-sequence signal theory or a random sequence.

Experimental blast sound signals have been analyzed by the digital filter, the Fourier transform and the Wavelet transform. From the comparison of the observed wave forms of each blasting method, it was shown that the new method is appropriate for frequency spectrum control of blasting sound.

(*System Safety Division, Safety Engineering Department, National Institute for Resources and Environment, 16 - 3 Onogawa, Tukuba City, Ibaraki Pref., 305 Japan)