



Title	5. 爆破地震観測のSN比改善について
Author(s)	窪田, 将; KUBOTA, Susumu
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 12, 55-67
Issue Date	1964-08-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.12.55
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13874
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_p55-67.pdf



5. 爆破地震観測の SN 比改善について

窪 田 将*

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 39 年 4 月受理 —

I. ま え が き

1. 携帯用磁気 Tape 地震記録器の試作

特に野外観測に適するように小型軽量化を目標に磁気 tape による地震波動記録器を試作した。電気回路には全て transistor を用いその周波数特性も地震観測に適するように 0.3 c/s 程度まで十分に記録できるようにした。

2. 爆破地震動の観測

上記の装置を 1961 年 11 月 10 日の爆破地震動研究グループの人工地震観測¹⁾ に使用し、震源距離 244.43 km の観測点で地震波を記録することができた。その記録を周波数分析器²⁾ によって分析し noise 及び signal の spectrum より各周波数の SN 比を求め、その曲線に基づいて最適周波数特性がえられた。

II. 磁気 Tape 記録器

1. 変調方式

Tape を用いる場合普通の音声信号の直接録音方式では最低周波数が 40 c/s 程度であるから地震波のような 1 c/s 前後の低周波をとり扱う場合には変調しなければならない。普通に行なわれる変調方式には周波数変調 (FM. 入力信号の level に応じて搬送波の周波数を変える方式) と pulse 幅変調 (PWM. 入力信号の level に応じて一定周期の矩形波の幅を変える方式) とがある。

ここでは pulse 幅変調方式を採用したがその長所として、(a) Tape 速度のむら (wow, flutter) による影響を FM 方式に比較して受け難い。すなわち FM 方式においては送りむらは波形の歪みを生じるが PWM 方式では信号の周波数が多少変化することはあっても波形歪みはほとんど生じない。(b) 回路が比較的簡単であり安定に働く。(c) 直線性及び SN 比の点で優れている。(d) 容易に digital 信号に変換できる、等があげられるが一方短所として、(e) Tape 速度を比較的大きくとらなければならない。(f) Tape のきず或いは継ぎ目等が記録の上に大きい gap

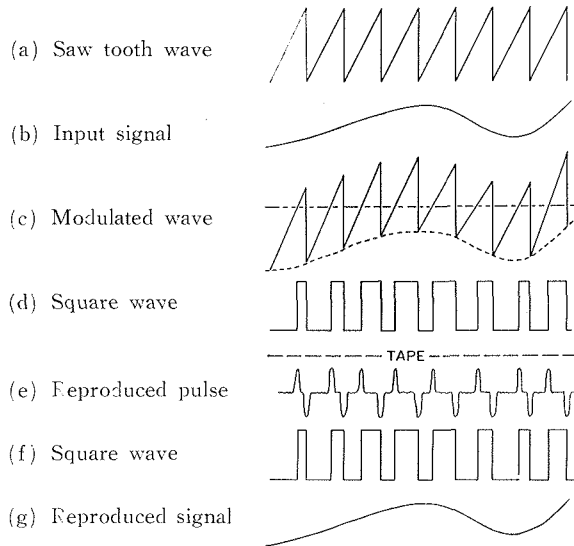
* 現在、東京大学地震研究所

1) 爆破地震動研究グループ；紫雲寺・安中・河津爆破観測報告，地震学会講演会 (Nov. 9, 1963)

2) 堀田 宏；周波数分析装置の試作，北大地球物理学研究報告，10 (1963), 135.

を生じる、等がある。このうち特に (e) は重要であるが、今回は観測時間が比較的短いからそれ程大きい障害とはならない。

Pulse 幅変調にも数種の方法があるがここで用いた方式は、第 1 図に示すように鋸歯状波と信号波を重ね合せて一定 level で検出し、信号電圧を pulse 幅に変換するものである。なおこの図で左側に記した記号は回路図 (第 3 図、第 5 図) 中の記号に対応する。

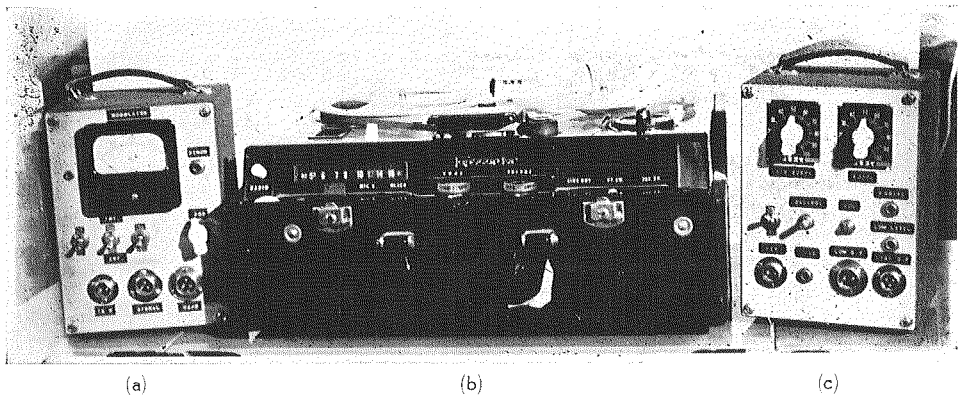


第 1 図 Pulse 幅変調の各部波形 (記号は回路図参照)

Fig. 1. Wave forms in pulse width modulation.
(Signs correspond to circuit diagrams.)

2. 変調器

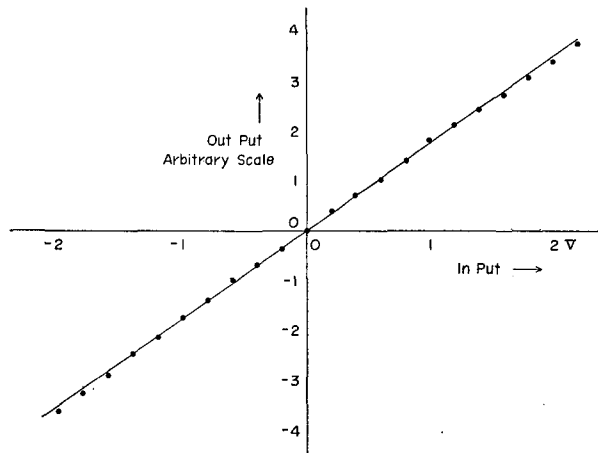
変調器の外観を第 2 図 (a) の写真に、またその回路を第 3 図に示した。



第 2 図 記録装置の写真
(a) 変調器 (b) Tape recorder (c) 復調器

Fig. 2. Photograph of recording apparatus.
(a) Modulator (b) Tape recorder (c) Demodulator

第3図で transistor $TR_1 \sim TR_4$ は鋸歯状波発生回路である。ここで繰返し周波数 800 c/s, 振幅 5.5 V の鋸歯状波を発生し次段に供給する。鋸歯状波の形は変調の直線性に重要な関係があるので、出来るだけ良好な波形がえられるように注意した。その結果第4図に示すような直線性がえられた。この鋸歯状波と入力信号はC点(第3図参照)で重ね合わされて第1図(c)のような波形となる。更に TR_7, TR_8 に導きある一定 level で検出し、入力信号の level に応じた幅の矩形波を発生させる。これで入力信号は pulse 幅変調されたことになる。



第4図 変調器の直線性

Fig. 4. Linearity of modulator.

この矩形波は整形、増幅された後 tape recorder の head に導かれる。Transistor を用いたため head には特に低 impedance のものが要求されるが、今回は 27 mH の inductance をもつ head を使用し、記録時には約 18 mA の正負の矩形波電流を与えて磁気 tape を強く励磁し、正負いずれかの方向に飽和する。したがって pulse 信号の録音と同時に磁気 tape 上の古い録音は消去され、普通の録音のように特に消去 head を必要としない。

3. Tape Recorder

Tape recorder は普通の市販品を用い、head のみ低 impedance のものとりかえた。当初附属していた head は往復録音用の 1 channel head であったが、今回は地震波と同時に time signal も録音する必要上、いわゆる stereo 用の 2 channel head を用いた。電源には交流 100 V を使用し、tape recorder 自体の重量は 15 kg あって携帯に便利とはいえないが、より小型の portable tape recorder でも tape 送りの機構がしっかりしていれば十分に使用することができ、地震計も含めて装置全体を一人で移動することも容易である。

Tape は 6.3 mm 幅を用い、tape 送り速度は 19 cm/sec とした。

4. 復調器

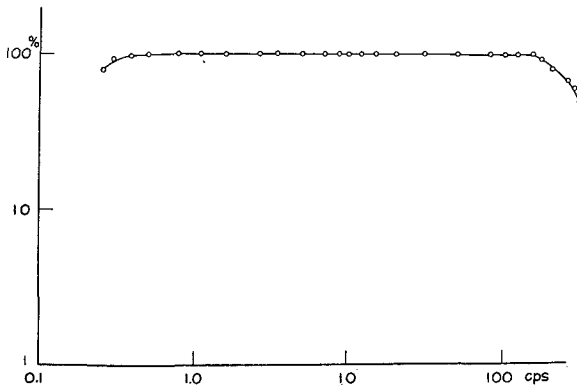
復調器の回路図を第5図に示した。

矩形波を記録した tape を再生すると head からえられる再生波形は第 1 図 (e) におけるような正負の pulse となる。これは磁気 tape と head の微分特性によるものである。この pulse は TR₂, TR₃ で約 40 db 増幅された後 TR₄~TR₆ の整形回路に与えられる。ここで一定 level 以下の noise はとり除かれ同時になまった形の pulse は鋭い pulse に変換される。この pulse を TR₇, TR₈ の multivibrator に与えて、(f) のように録音 head に与えた電流と同じ形の矩形波を作る。

更に high cut filter によって信号分以上の高域を遮断し、G 点に元の信号波形をとり出す。このようにしてえられた信号は更に増幅し Brown 管 oscillograph 又は電磁 oscillograph によって元の波形を再現する。Brown 管上では幾分搬送波の 800 c/s が ripple として残っているが galvanometer に固有周波数 100 c/s 又は 300 c/s のものを使用するから印画紙上には ripple は全く現われない。

5. 総合特性

この記録器の総合周波数特性は第 6 図のようになっている。この特性で周波数の上限は high cut filter の特性によるものである。PWM では原理的には直流分を信号としてとり扱うこともできる。この装置でも周波数特性の下限を規制するのは第 3 図 B 点に用いている 200 μ F の condenser のみであり、0.3 c/s までは十分に記録できる。



第 6 図 周波数特性
Fig. 6. Frequency characteristic.

B 点に与えた信号の振幅と G 点からとり出される出力信号の振幅はほとんど同一で、装置全体としては増幅作用は余りない。したがって地震計と B 点の間で増幅する必要がある。今回はこの間で 80~90 db 増幅している³⁾。周波数特性はむしろここで用いられる増幅器の特性に左右される。

この装置の SN 比は新しい tape を使用したときは 50 db 以上、以前の記録を消去しながら録音するときは古い signal が僅かながら残っているため約 40 db になる。すなわち記象の上で

3) 田 望; 地震観測用の諸計器の試作, 北大地球物理研究報告, 10 (1963), 143.

最大振幅を 10 cm とすれば noise は 1 mm となり、これは増幅率の増幅器の内部雑音よりも小さいので実際には問題とならない。

この記録装置の大体の仕様をまとめると次のようになる。

- 1) Channel 数; signal channel 1, time channel 1
- 2) 入 力; 最大 3.7 V_{P-P} 入力抵抗約 4 k Ω
- 3) 出 力; $\left\{ \begin{array}{l} \text{high O.P. 最大 } 6.8 \text{ V}_{P-P} \text{ 出力抵抗約 } 1.5 \text{ k}\Omega \\ \text{low O.P. 最大 } 0.65 \text{ V}_{P-P} \text{ 出力抵抗約 } 100 \Omega \end{array} \right.$
- 4) 周波数範囲; 0.25~150 c/s ± 1 db 以内
- 5) SN 比 ; 40 db 以上
- 6) Tape ; 6.3 mm 幅, 速度 19 cm/sec
- 7) 電 源; Tape recorder AC 100 V
変調器, 乾電池 DC 12 V 32 mA
復調器, 蓄電池 DC 12 V 29 mA

6. 周波数分析器²⁾

上記の tape 記録装置でえられた波動記録は周波数分析器によってその spectrum を求めた。ここに用いた分析器の詳細については脚注 2) の論文に記載されているが、その基本的特性は次の様になっている。

- a) 周波数は 1 c/s 乃至それ以下まで使える。
- b) 選択度 Q が充分高く、同調周波数 f_0 に対して選択度及び増幅度が変らない。
- c) 安定である。

特に (b) の条件は振動の解析に重要な意味がある³⁾。

III. 爆破地震動の観測

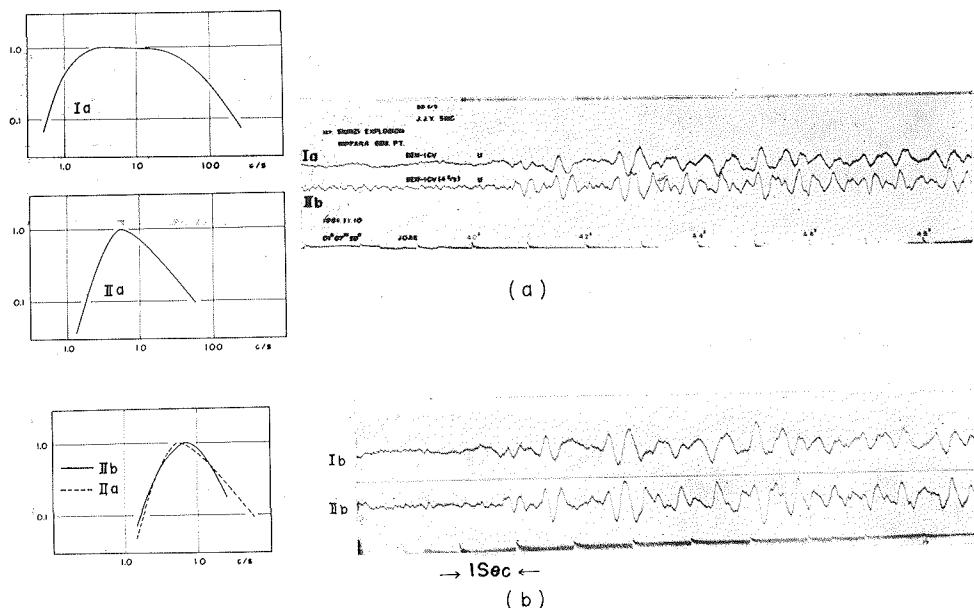
1. 測線及び観測点

II で述べた記録装置をもって 1961 年 11 月 10 日の爆破地震観測に参加した。この観測は日本の地下構造を調べるために爆破地震動研究グループが毎年実施しているもので、今回は測線を新潟~伊豆の方向にとった。発破点は新潟県紫雲寺町で 1.5 ton の dynamite を深さ 40 m の boring 孔 16 本に埋め、11 月 10 日 01 時 07 分に点火した。我々の観測点は東京都西多摩郡奥多摩町日原の石灰石鉱山の坑道で震源距離は 244.43 km である。

2. 再生記象

第 7 図 (a) の記象は観測の際に電磁 oscillograph でとった地震動の波形である。地震計は 2 個使用し、どちらも上下動で速度計として用いているが、このうち I_a の trace は左に示す特性曲線のように 2~20 c/s でほぼ平坦な周波数特性を持ち II_a は 6 c/s 附近に peak のあるかなり

4) 田 望; 地震動波形の周波数分析について, 北大地球物理研究報告, 9 (1962), 87.



第 7 図 爆破地震動記録波形
(a) 原記象 (b) 再生記象

Fig. 7. Seismograms of seismic waves by explosion.
(a) Original seismogram. (b) Reproduced seismogram.

鋭い周波数特性を持たせてある。3 c/s における振幅倍率はどちらも 10^7 倍である。

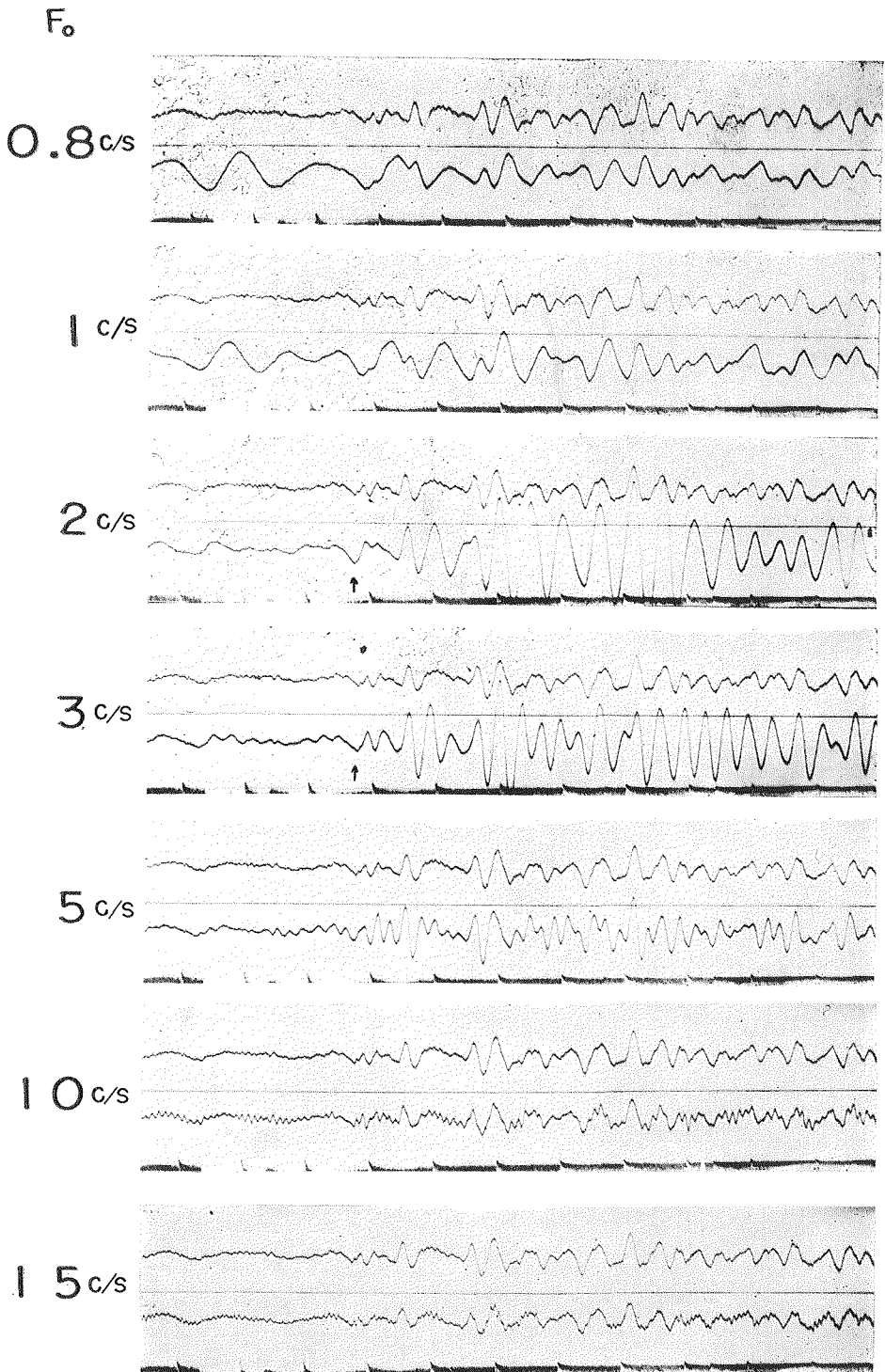
第 7 図 (b) の記象は I_a の trace から parallel に信号をとり出し tape に記録したものの再生波形である。このうち I_b は直接 (filter を用いずに) 再生した trace であり I_a とよく一致している。また II_b は左の実線に示したような II_a の特性 (破線) に合せて作った filter を通した trace であり II_b と非常によく似ていることは注目すべきである。この事実は逆にいえば周波数特性が異なると同一の地動に対して全く別の記象がえられることを意味しており、観測結果の解析に later phase を用いる場合は各観測点で記録器の特性を一致させることが特に重要である。

3. 周波数分析

Tape 記録の周波数成分を求めるため前述の周波数分析器にかけて記象を作った。分析の対象とした周波数範囲は 0.1~40 c/s であるが、第 8 図にその一部を示した。ここで各記象の上の trace は比較のための filter 等を通さない再生波形であり、下の trace が周波数分析器を通した波形である。この場合、分析器の選択度 Q は 17 とした。

この結果第 9 図に示すような spectrum がえられた。ここで G.N. は初動到達以前の ground noise の、 I_{st} は初動部分の spectrum を示し以下第 4 phase までの spectrum である。(第 8 図参照)

Ground noise (G.N.) については 0.9 c/s に peak があるが、低域部分で低下しているのは地震計その他の特性 (第 7 図参照) によるもので実際の ground noise よりも低周波の波動が優勢



第 8 図 周波数分析器を通した再生波形 ($Q=17$)

Fig. 8. Seismograms through the frequency analyzer. ($Q=17$)

であると推定される。

Signal の spectrum のうち初動 (I_{oz}) については 2 c/s に peak を持つが curve の傾斜は later phase の spectrum に比較して緩やかである。

この図で破線は signal の spectrum を noise の spectrum で割った SN 比の curve で、3 c/s 附近に peak があり、2~7 c/s で $S/N > 1$ となっている。第 2 phase, 第 3 phase は 3.0 c/s に peak を持つが第 4 phase では初動とほとんど等しく 2.1 c/s に peak を持っている。ただしその spectrum curve の形は初動に比較して非常に鋭い。第 4 phase は振幅についても signal のうち最大であり energy も最大と考えられる。

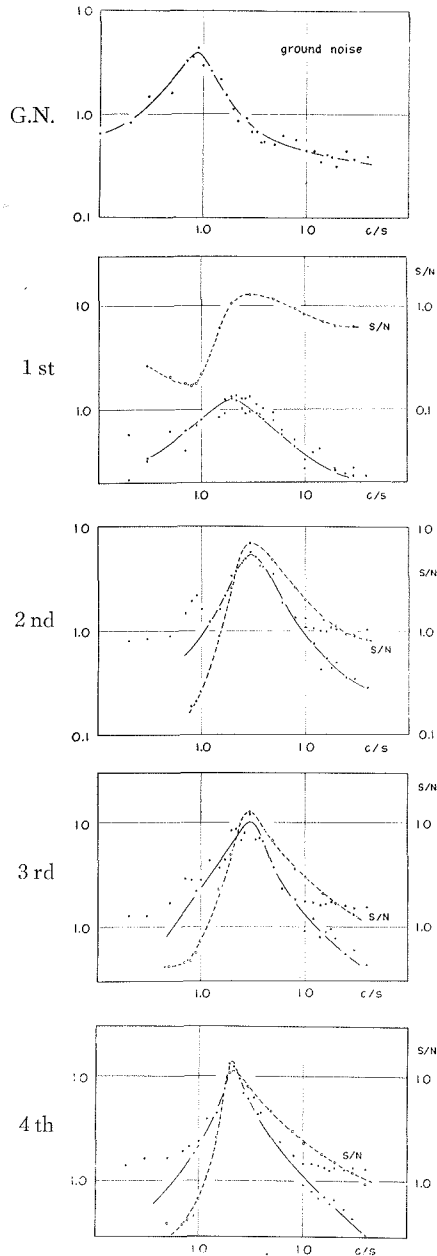
4. Filtering

ここにえられた SN 比の curve に基づき主として初動をより鮮明に出す目的で種々の特性の filter を用い記象を作った。

第 10 図で記象 (a) は左端に示したように初動の SN curve (破線) に合せた特性の filter によって再生した波形である。矢印で示した位置に初動がはっきりと現われている。記象 (b) は peak はほぼ SN curve に一致させたがやや緩やかな傾斜の特性曲線を持つ filter による再生波形で (a) に比し幾分不鮮明である。このように特性の band 幅が広すぎると、signal とともに noise も増幅するため SN 比を悪化させ signal が見難くなる。(第 10 図参照)

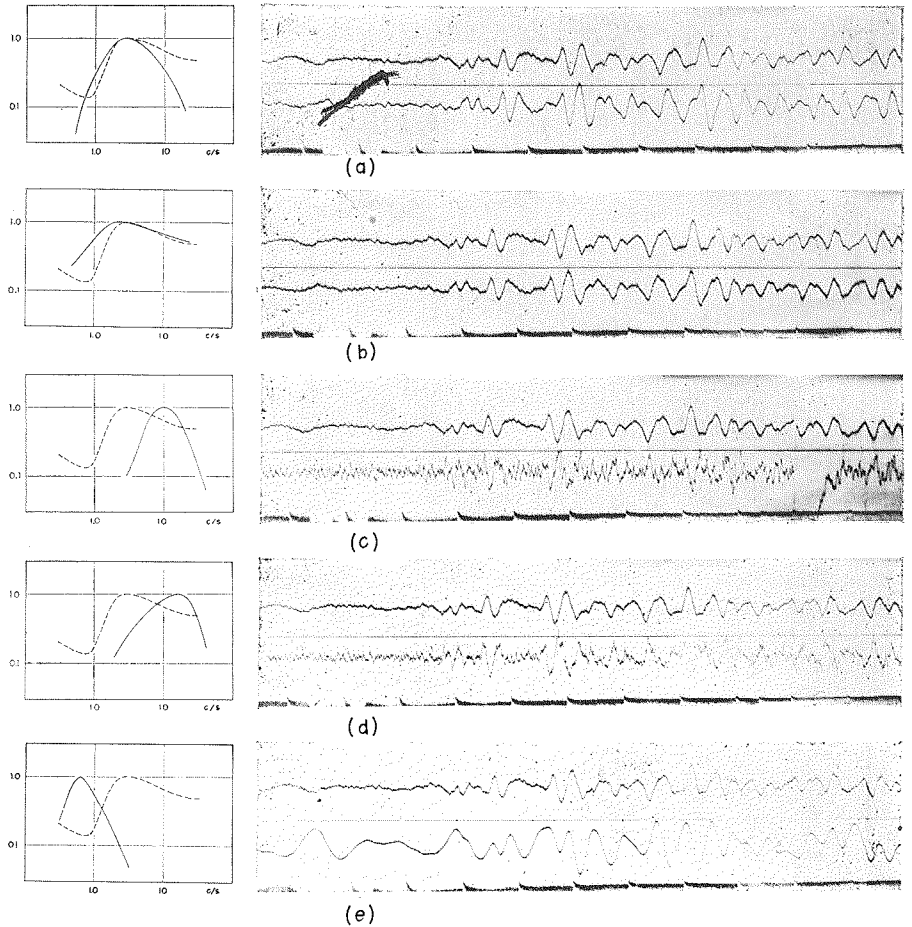
この他にも種々の filter を用いたが、その特性としては peak を合せると同時に curve の傾斜も重要であることがわかった。

記象 (c) (d) (e) は初動に不適当な filtering の例である。(c) は peak を 10 c/s にとった場合、(d) は 16 c/s にとった場合でどちらも短周期の noise が卓越し、初動部分を適確に押えることは難かしい。また (c) は少し極端な例ではあるが peak を 0.63 c/s と低い方へずらした場合でほとんど signal の波形がわからない。



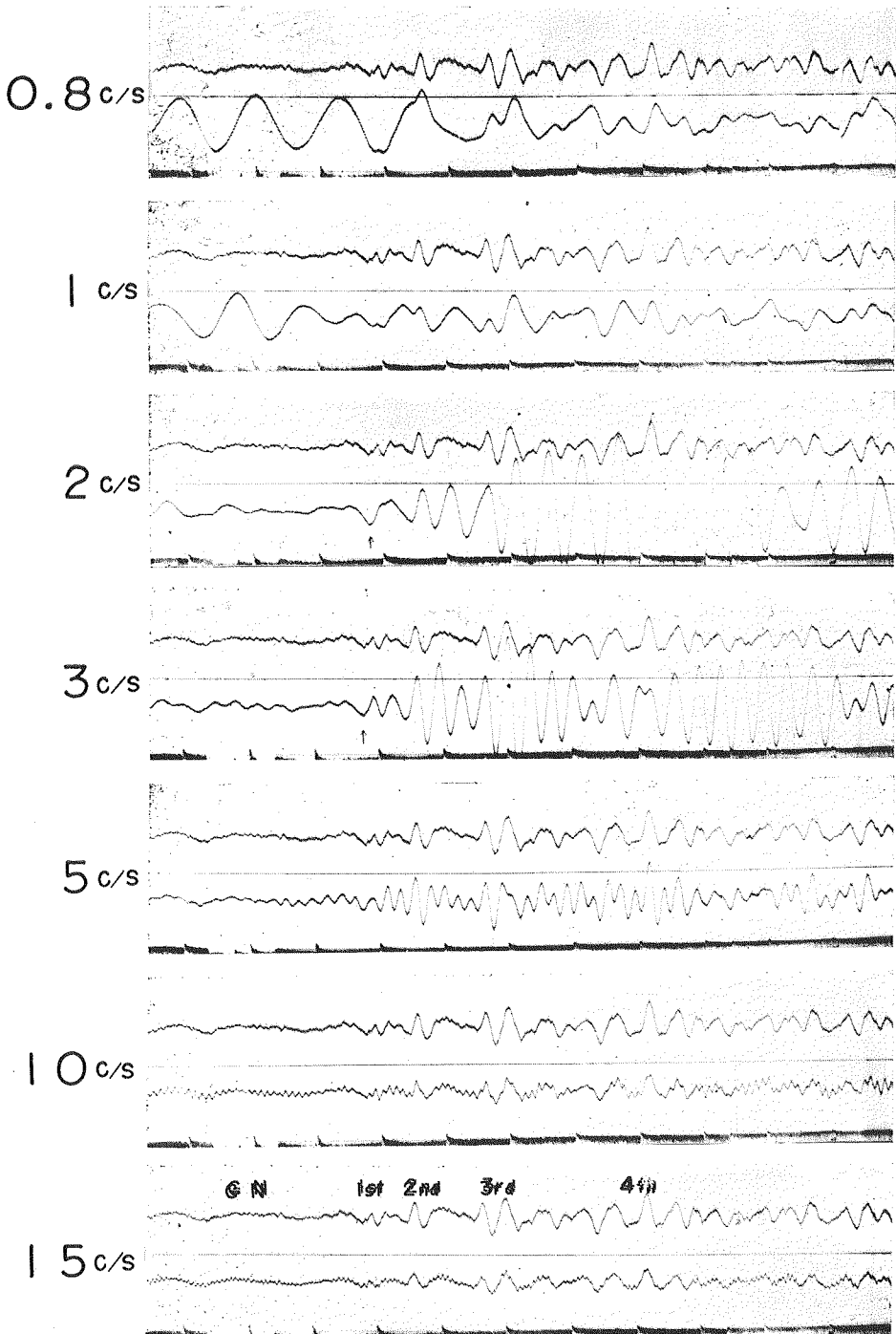
第 9 図 爆破地震動の周波数成分

Fig. 9. Spectra of seismic waves by explosion.



第10図 種々の filter を用いた再生波形
 Fig. 10. Seismograms through various filters.

第8図は分析器の特性曲線を非常に鋭く、すなわち Q 値を17にとった場合の各共振周波数に対する記象であったが、第11図に比較のため Q 値を5に下げて、すなわち特性の curve を緩やかにした場合の記象を示す。共振周波数が2 c/s 及び3 c/s の記象について初動部分に着目すると、第8図より第11図の方が見易いが、初動と第2 phase の区別が判然とせず、また立上りも悪く、第10図(a)の SN curve に合せた filter による記象よりは不鮮明である。このように第10図(b)の例とは逆に特性の band 幅が signal に対して狭すぎると noise とともに signal も減衰し、その結果 SN 比を悪化する。



第11図 周波数分析器を通した再生波形 ($Q=5$)

Fig. 11. Seismograms through the frequency analyzer. ($Q=5$)

5. 理論的検討

Filter 理論^{5,6)}によれば signal の spectrum を $S(\omega)$ とし, noise の power spectrum^{4,5,6)} を $N_i(\omega)$ とした場合, signal 対 noise の比を最大にするような filter の伝達函数 $Y(\omega)$ は

$$Y(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{N_i(\omega)} e^{-i\omega t} \quad (\text{III-1})$$

である。ただし $S^*(\omega)$ は $S(\omega)$ の共役複素数である。またこの際の signal 対 noise の最大値は

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S(\omega)|^2}{N_i(\omega)} d\omega} \quad (\text{III-2})$$

で与えられる。

このように signal をより鮮明に出すためには SN 比の curve に合せた特性の filter が適当であると考えられるが, ここにえられた SN がどの程度の信頼性があるかについては議論の余地がある。

Signal については各 phase の継続時間 D がここで用いた分析器の選択度できまる時間 T_Q より短い。すなわち

$$D < T_Q = \frac{Q}{\pi f_0} \quad (\text{III-3})$$

であること, 及び選択度が signal の spectrum の band 幅よりも数倍に鋭いことから, ここにえられた spectrum は signal の性質を正しく伝えていると見なしてよいであろう。ただしより高い選択度の filter を用いた方が正確な読みとりができる。

しかし ground noise については, その継続時間が長いことから signal と同様に扱うことはできない。特に検定したわけではないが記録の様子からみて, 今回の観測における ground noise が Gaussian noise⁵⁾であったとみるのはそれ程無理がないであろう。Gaussian noise は周波数標本点における振幅分布が正規分布をなしているが, 振幅実効値の 4 倍を越える尖頭値を示す確率は 3.2×10^{-5} になる⁷⁾。すなわち極端に大きな尖頭値を示すことは長時間にもほとんどないといってよい。普通視察により初動を判定する場合にも信号波の特徴を考慮に入れることは勿論であるが, noise のこのような性質も暗々裡に想定していると言えよう。

Gaussian noise の spectrum については田望・堀田宏⁸⁾によって詳しい検討がなされているが, それによると spectrum curve が分析に用いる filter の特性に比較してゆるやかな場合には, 無限に続く振動のある有限時間 T だけ filter を通して観測することによりその filter 出力から元の振動の power spectrum を推定することが可能である。ただし真の power spectrum との誤差を小さくするためには filter の選択度 Q を不必要に大きくすることなく, また観測時

5) S. GOLDMAN; Information Theory, (1953), Prentice Hall.

6) 宮脇一男; 雑音解析 (1961), 朝倉書店

7) 関 英男; 雑音 (1958), 岩波

8) 田 望・堀田 宏; 地震動波形の周波数分析について (その 2) 北大地球物理研究報告 11 (1963), 103.

間 T を充分大にとることが必要である。

このような観点から今回の解析における filter の出力波形を視察すると ground noise に対しては十分に平滑化の役割を果しているといえる。(第 8 図 $F_0=0.8$ c/s, 1.0 c/s 参照) したがってここにえられた spectrum は noise の平均化 spectrum を正しく表現しているものとみなされるであろう。

IV. あとがき

ここで求めた spectrum は ground noise にしても, signal にしても今回の観測点に固有のものであって, 他の観測にそのまま適用できるものではない。今回のような観測では signal の周波数は距離とともに高周波分が減衰し, その結果低周波分の卓越することが一般に知られているが, その変化の様子は発破点の諸条件, 測線の地質等が影響するものと推定され, かなり複雑である。また ground noise に至ってはより多くの資料を集めなければ正確な議論はできないが, 今回のような広い周波数特性をもった観測を数多く実施し noise 及び signal の研究を積み重ねれば爆破地震観測の方法にも有益な資料となることが期待できる。

終りに終始御指導をいただいた北大田望助教授, 観測及び資料整理に際し献身的な御協力を惜しまれなかった北大岡田広, 堀田宏, 高橋時雄* の諸氏に深く感謝する次第である。

* 現在 日本電子測器株式会社

5. Improvement of Signal to Noise Ratio in Explosion Seismology

By Susumu KUBOTA*

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

A portable magnetic tape recorder has been designed for the purpose of observing seismic waves in the field. The system is modulated by pulse widths and the frequency range lies between 0.25 c.p.s and 150 c.p.s.

The present apparatus was used in the explosion seismology of the Research Group for Explosion Seismology on Nov. 10, 1961. The seismic signals recorded were analyzed with a frequency analyzer, resulting in spectra of the signal and of the ground noise. The most preferable frequency characteristics to the filter have been found on the basis of signal to noise ratios.

* at present; Earthquake Research Institute, University of Tokyo.