地震反射記録と検層資料(速度および密度)の関係について

石井 吉徳*・加藤 俣史*

(昭和50年3月19日受理)

A Study on the Relationship between Seismic Reflections and Logging Data, Velocity and Density

By

Yoshinori ISHII and Yoshibumi KATO

Abstract: It is well known that seismic reflection events are originated by a sequence of subsurface reflecting interfaces which is represented by a series of reflection coefficients. For the investigation of the reflection phenomenon, the so-called synthetic seismogram which is calculated from the reflection coefficients series, is used. Each reflection coefficient is connected to both velocity and density logging data. However the density data are not always available, then the synthetic seismograms have been quite often calculated only by velocity data, approximately neglecting the density variations in comparison with the velocity changes without sufficient examinations. Accordingly the reflection coefficient computed with velocity data and with or without density data is investigated in detail. Furthermore the resulting synthetic seismogram is also studied from this point of view. In addition to the aboves, the distributions of velocity vs. density are investigated with actual well logging data. Certain dependence of the variance of reflection coefficients upon the multiple events is studied using an artificial reflection coefficient series simulated by a sequence of random numbers.

1. 緒 言

地下にガス層が存在する場合、反射波の振幅変化、位相反転等の現象が生ずることに着目し、地震反射記録とくに反射振幅に注意をした処理を行ない、これを直接探知する技術(いわゆるブライツ・スポット)が進められている。このため従来以上に記録を詳細に調べるが必要となってきた。また、反射記録と坑井での検層記録との対比も大切である。この目的に合成地震記録が用いられることが多いが、通常これを作成するにあたり、密度検層資料入手の困難さのためか、密度変化は速度変化に比べてきわめて小さいと考えて、密度変化は無視して速度検層資料だけで作成されることが多い。しかしこれは余り具体的に検討されたことがないので、従来のように密度を一定とした記録と密度変化を考慮した記録とを作成し、両者を比較し記録への密度の影響について調べた。

一方、地震探鉱記録から地層の物理的变化、岩質の判

別を行なうためには、記録を坑井資料や地質資料と照合して総合的解釈を行なっていく必要がある。また最近の傾向として各種検層機器、技術の向上に伴いコア掘りが少なくなってきた。したがってコアの入手が増々困難となり、今後は地下の岩石物性の調査研究は検層資料に頼らざるを得なくなる。このような観点から坑井検層資料による地下での速度と密度の関連性について考察を行なった。

2. 検層資料と合成地震記録

図-1 音響インピーダンスおよび反射係数、透過係数

* 東京大学工学部資源開発工学科

合成地震記録は坑井における速度、密度検層資料を用いて計算作成される。ここではその作成手順について簡単に説明する。図-1に示すような隣接する2つの地層(I), (II)において、その速度をそれぞれ v_1, v_2 密度を ρ_1, ρ_2 とすると、おのおのの地層の音響インピーダンス z は

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \rho_1 \times v_1 \\ z_2 &= \rho_2 \times v_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表われ、これより(I), (II)の地層境界の反射係数 R および透過係数 T を次のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \\ T &= 1 - R = \frac{2z_1}{z_2 + z_1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図-2は実際の坑井の速度、密度検層記録と、このようにして求めた反射係数の分布を示したものである。次の

でこの1次反射係数に多重反射を加味し、さらに時間スケールに変換した反射時系列 $x(\tau)$ と適当なウェーブレット $f(\tau)$ とをコンボリューションして合成地震記録 $y(t)$ を作成する。今回用いたウェーブレットはリッカー・ウェーブレット (Ricker wavelet) であり、反射時系列とのコンボリューションは時間領域でのフィルター操作に等しく次式で表わされる。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

図-3は多重反射を含んだ時間スケールの反射時系列と、これとリッカー・ウェーブレット (20Hz, 片側走時) とをコンボリューションした結果を示したものである。このようにして求められた合成地震記録は地震探鉱における重複反射や層位トラップ等の複雑な構造、細部にわたる構造の解明に役立っている。

以上のように本来音響インピーダンス、さらには反射

図-2 検層記録と反射係数列 (坑井-C)

図-3 反射時系列と合成地震記録 (坑井-C)

係数、合成地震記録は速度、密度両検層資料を用いて計算されるべきものである。しかしながら実際には密度検層実施深度区間が速度検層のそれに比べて短かいことが多く、完全な密度検層記録の入手が困難である。また地層の密度変化は速度変化に比べてきわめて小さいとの考え方もあり、従来密度検層資料を使用せずに速度検層資料のみから次式を用いて反射係数の計算が行なわれている。

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (4)$$

そこで反射係数列、合成地震記録を細部にわたって検討してみた。すなわち、従来のような考え方で速度より作成したものと、密度変化を考慮し両検層資料を用いて作成したものとを比較し、密度の影響の程度、密度考慮の必要性について攻究してみた。

3. 密度の影響および速度と密度の関係

(1) 記録への密度の影響

対象とした坑井は北海道・美唄での国の基礎試錐「空知」と新潟地域の3本の坑井-A, B, Cである。なお各

坑井資料はすべて次のような整理および処理を施したものを使用して行なっている。通常検層図は1/200あるいは1/500の縮尺で記録されている。しかしながら検層図そのものの伸縮もあり、さらに検層実施時のケーブルの伸長の差等による深度誤差も考えられる。そこで多くの場合両検層の特徴的部分が非常に良好に相関するという傾向を利用し、一方の検層図上に他方のものをずれを補正しながら複写し、両者が深度に対して正確に対応するようにした。以上のような補正処理を行なった検層図(1/200)を、デジタル・トレーサーを用いて通常1 mm 間隔(スケール1/200のとき深度に換算して20 cm)でサンプリングデータとした。また計算の都合上データ数が多過ぎる場合には必要に応じてロー・パスフィルタリング後、そのものの統計的意味を失なわない程度に適当にリサンプリングして数を減らしている。

図-4～図-7は密度の影響についての比較を行なうために2通りの方法で計算した結果を示したものであり、図-4は空知、図-5、図-6、図-7は坑井-A, B, Cについてあらわしたものである。なお各国とも速度のみで計算した1次反射時系列が(1), 同じく速度と密

図-4 「空知」の反射係数時系列および合成地震記録(20Hz)

- (1), (1') 速度のみの1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
- (2), (2') 密度考慮した1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
- (3), (3') 速度のみの反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
- (4), (4') 密度考慮した反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録

図-5 坑井-Aの反射係数時系列および合成地震記録(40Hz)

- (1),(1') 速度のみの1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (2),(2') 密度考慮した1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (3),(3') 速度のみの反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (4),(4') 密度考慮した反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録

図-6 坑井-Bの反射係数時系列および合成地震記録(40Hz)

- (1),(1') 速度のみの1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (2),(2') 密度考慮した1次反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (3),(3') 速度のみの反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録
 (4),(4') 密度考慮した反射時系列(スパイク系列)と合成地震記録

図-7 坑井-Cの反射係数時系列および合成地震記録（40Hz）

- (1), (1') 速度のみの1次反射時系列（スパイク系列）と合成地震記録
 (2), (2') 密度考慮した1次反射時系列（スパイク系列）と合成地震記録
 (3), (3') 速度のみの反射時系列（スパイク系列）と合成地震記録
 (4), (4') 密度考慮した反射時系列（スパイク系列）と合成地震記録

度とで計算したものが(2)，そしておのおのの多重反射を加味したもの（反射時系列）が(3)，(4)である。また，これらの時系列にリッカー・ウェーブレットをコンボリューションした合成地震記録がそれぞれ(1')，(2')，(3')，(4')であり，いずれも片側走時で表わしてある。なお各坑井とも図示するように時系列の間隔はそれぞれ異なり，また反射係数時系列および合成地震記録おのおの4トレースの最大値を求め，振幅を比較可能のように各最大値でスケールしている。

いずれの坑井も波形を眺めた場合，速度のみのものと密度を含んだものとの余り大きな差異はなく，密度の影響は少ないようである。しかしながら細部について眺めると，例えば各図中の矢印で示したような部分で多少の差異が認められる。このような違いはその検層図で見ると，速度変化と密度変化が相関がない部分や負の相関を示す部分に認められる。またここで用いた各坑井に共通した傾向として，速度，密度がともに急激に増加を示す特徴的部分の岩相は凝灰質のものであった。一方振幅の大きさに着目して記録を眺めた場合，速度のみのものと密度を含んだものとは後者の方がその平均的振幅が大きいことがわかる。このことは速度変化と密度変化との相関に起因している。この両者の相関については後項で

取扱い詳しく述べる。

以上のように今回対象とした4本の坑井すべて反射係数時系列，合成地震記録を速度検層資料のみを使用して作成した場合と密度も用いて作成した場合とで，細部で波形に多少の差異は生じている。しかしながら一般的地震探鉱での解釈という意味からすればこの程度の差は無視でき，結論的にいえば両者の波形は非常によく似ているといえる。したがって反射波の絶対振幅そのものを対象とせず，波形の時間的変化に着目する限り，密度変化は考慮せずに従来行なわれているように速度検層資料のみを用いて合成地震記録を作成しても，ほとんど問題はないといえよう。

一方2通りの方法で求めた記録は振幅の平均的大きさでは両者に差があり，密度を含んだものの方が大きい。これらの結果は次の2つの理由から説明できる。すなわち，従来考えられていたように速度変化に比して相対的密度変化が少ないこと，および両者の値の変化に良好な相関があるためである。

(2) 速度と密度の関係

そこで対象とした各坑井について速度と密度の関連について調べることにする。とくに両検層記録の相関係数を基にして両者の関係について細かい検討を加えた。相

関係数の値をある幅のウィンドーについて計算し、これを移動させて行った。これらのウィンドーは各図に W で示したポイント数である。例えば図-8-2の $W=70$ ポイントとはウェイブレットの周期40Hzとした場合の1波長に相当し、 $W=7$ はその1/10である。すなわち、40Hzのウェイブレットを基準にして1波長、1/10波長相当の長さのウィンドーを2種選んでいる。はじめに空知について述べる。図-8-1に速度と密度の分布状態を、また図-8-2に検層記録および検層記録の相互相関を示す。用いた資料についていうと深度209m～1,595m間で密度検層が、209m～3,700m間で速度検層が実施されており、対象とした深度は両検層の実施されている209m～1,595m間である。図-8-1はそのうち209m～1,282m間の石狩層群の幌加別層、登川層（・印）と1,282m～1,595mまでの中部エゾ層群上部層（×印）とに分割し両者の関連を示した。また図-8-2の下図において(1)および(2)はそれぞれ1波長、1/10波長相当のウィンドーポイント数(W)で相互相関を取った結果である。また図中には相互相関係数の平均値(ϕ_c)も示してある。両図から石狩層群では速度と密度の関係は両者の増減が対応し良好な相関を示す。これに対して中部エゾ層群では密度分布が2.6g/cc付近に集中し、両検層記録の相関はほとんどない状態といえる。また、図-4(2)に示した如く、反射係数列を見ても石狩層群（～250ms）では大きなものが数多く存在するのに対し、中部エゾ層群（250ms～）ではこれに比して反射係数はきわめて小さいものばかりである。これらのことを地質、岩相的に考えてみよう。石狩層群は砂岩、泥岩、シルト岩やこれらの凝灰質のものおよび凝灰岩の互層が主であり、かつ数多くの夾炭層を含んでいる。このため反射係数としては大きな値を示すものが現われ、また両者の変化が大きくその増減も良好に対応し相関がよい。一方、中部エゾ層群の場合、夾炭層はなく砂質シルト岩、シルト岩、泥岩および砂岩等の地層が比較的厚く堆積し岩相的には変化が乏し

図-8-1 「空知」における速度と密度の関連（～209m～1595m）

・印：石狩層群，×印：中部エゾ層群上部層

図-8-2 「空知」における速度と密度の相関

図-9-1 坑井-Aにおける速度と密度の関連
(-500m~2,000m)

図-9-2 坑井-Aにおける速度と密度の相関

図-10-1 坑井-Bにおける速度と密度の関連
(-2,150m~3,350m)

図-10-2 坑井-Bにおける速度と密度の相関

図-11-1 坑井-Cにおける速度と密度の関連および各層準の両者のヒストグラム（-800m～2,550m）
Ny: 西山層, Sy: 椎谷層, Td: 寺泊層, Nt: 七谷層, Tg: 津川層, Mk: 三川層

いことが坑井資料から窺える。またこの層群は白亜紀層であり堆積岩としては古い地層であることから、圧密、再結晶の進行、孔隙率の減少等により一般的堆積岩での最大値に近い密度を有しており、速度の変化も乏しいことから、反射係数そのものも大きな値を取り得ないことが推定される。また両者の相関の悪いこともこれに関連しているであろう。なお坑井全体にわたっての速度変化に対する相対的な密度変化の比率は0.43程度である。

次に坑井-A, B, Cについて両者の関係を調べ図示したものが図-9, 図-10, 図-11である。いずれの坑井も速度・密度両検層の実施されている範囲を対象としており、坑井-Aは深度500m～2,000m、坑井-Bは2,150m～2,350m間である。また坑井-Cは800m～2,550mであり、各層準ごとに速度・密度分布を詳しく調べそのヒストグラムについても図示している。表-1には対象とした各坑井の平均速度(a)および平均密度(b)、ならびに速度・密度の標準偏差をおおのこの平均値で割ったもの(c), (d)と、速度変化に対する相対的密度変化の比(d/c)を示している。さらに下部に坑井-Cにおける各層準のこれらの値を示している。

坑井-Aは椎谷層および寺泊層が対象範囲である。速度分布は深度とともに多少増加している傾向が見られるが、密度分布に関しては特異な坑井といえ、比較的新

図-11-2 坑井-Cにおける速度と密度の相関

表-1 坑井別および坑井-Cの層準別速度・密度について

坑井名・地層名	平均速度(a) km/sec	平均密度(b) g/cc	速度の標準偏差(c) 平均速度	密度の標準偏差(d) 平均密度	d/c	深度・層厚 m
空知	4.21	2.53	0.14	0.06	0.43	209～1,595 1386
坑井-A	3.45	2.43	0.13	0.03	0.23	500～2,000 1500
坑井-B	3.45	2.43	0.20	0.06	0.30	2,150～3,350 1200
坑井-C	3.05	2.35	0.19	0.05	0.26	800～2,550 1750
平均 0.305						
西山層	2.42	2.23	0.09	0.032	0.355	800～1,390 590
椎谷層	2.88	2.33	0.08	0.029	0.363	1,390～1,640 250
寺泊層	2.86	2.30	0.12	0.036	0.300	1,640～1,690 50
七谷層	2.89	2.33	0.08	0.042	0.525	1,690～1,930 240
津川層	3.39	2.41	0.10	0.027	0.279	1,930～2,480 550
三川層	4.18	2.51	0.09	0.017	0.189	2,480～2,550 70
平均 0.333						

しい堆積であるにもかかわらず変化が乏しく2.4~2.5g/cc付近に分布が集中し、両者の相関は必ずしも良好とはいえない。また坑井-Bについては、速度・密度両検層が比較的深い部分で実施されており、対象範囲の地層は椎谷層から七谷層までである。両者の関連は検層図に見られるように速度が急激に増加する部分で密度も増大し、速度・密度の相関も良好な坑井である。一方、坑井-Cについては坑井-Bと同様に速度の増減と密度の増減がきわめて良好に対応し、かつ深度とともに両者が比較的単調に増加する傾向の認められる坑井である。なお図-12は図-11-1を速度のみ対数スケールにプロットしなおしたものであり、両者の相関はほぼ指数函数的傾向を示しているといえる。

図-12 坑井-Cにおける速度と密度の関係（-800m~2,550m、縦軸は対数目盛）

図-13 密度の影響（反射係数時系列，2 ms 間隔）

以上の如く坑井によって、さらには同一坑井でも地層の埋没深度、年代等によって両者の分布状況、関連は色々である。検層記録を徹視的に見れば、両者がまったく相関しない部分や逆に負の相関を示す部分もちろん存在する。しかしながら、平均的には各図に示した相関の値の平均値に見る如く、両者の相関は良好であり充分正の相関を持つことがわかる。一方各坑井の速度変化に対する相対的な密度変化の比率 (d/c) は表-1に示したように通常 $\frac{1}{3}$ 程度である。これを(2)式の反射係数 R を近似的に

$$R \div \frac{\Delta(\rho v)}{2\rho v} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta v}{v} \right) \quad (5)$$

と書いた式との関連で考えるとわかりやすい。すなわち、反射係数は密度と速度の相対的变化の和で表現されている。したがって反射係数は $\Delta v/v$ 項が $\Delta\rho/\rho$ に比しておおむね3倍程度大きいことになり、主として反射係数は速度により左右されていることが判断される。しかもこの両者の相関は良いのだからなおさらである。しかし、前述のように相関の悪い部分もありることがわかっている。それではそのような部分について $\Delta v/v$ の項が大きいことはどのように影響しているであろうか。今、速度、密度がまったく相関のない系列であった時、それぞれの相対変動の大きさによって合成地震記録はどう変化するのだろうか。これは互いに独立な乱数を用いて調べられる。

(3) 乱数によるシミュレーション

仮りに検層記録より求めた反射係数列がランダムと考察してみよう。また対象とした坑井の反射係数列を統計的に見ると一様乱数というよりも正規乱数的である。そこ

図-14 密度の影響（合成地震記録40Hz, 2 ms 間隔）

で電子計算機より発生させた各250個の2組の乱数A, Bを用意し, それぞれ速度および密度のみからなる反射係数列と仮定する。次に一方の反射係数列Bにある係数をかけ振幅変化させたものをAに加算する。これは反射係数が(5)式で示した如く速度と密度の相対的变化の和で表わされるという性質に基づいている。係数として7種類 $1, \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{20}$ を用いた。すなわち, これらは速度変化に対する相対的な密度変化の比率を意味している。このようにして計算した結果が図-13であり, 図中の分布のうちAが従来の考え方による速度検層資料のみより成る反射係数列に当り, 一方密度変化を考慮したものが(1)~(7)に相当することになる。このうち両者の相対的变化の比率が1の場合が(1)の分布であり, 以下その比率が減少し $1/20$ の場合が(7)の分布である。なお各分布は間隔が2 ms とみなし, 多重反射は考慮せず1次反射のみについて比較したことになっている。また図-14はこれらの時系列にリッカー・ウェイブレット(40Hz)をコンボリューションした結果である。次にAの分布と(1)~(7)の分布との相互相関を取った結果を図-15に示す。なお相互相関を計算するに当たってのウィンドーのポイント数は, リッカー・ウェイブレット(40Hz)のポイント数と同じ25ポイントですべて行なった。反射係数時系列の状態での相互相関結果とリッカー・ウェイブレットコンボリューション後の合成地震記録状態でのそれとは, ほぼ一致した結果となることがわかっている。ここでは合成地震記録についての結果である。なお図には相互相関係数の平均値を示した。図の如く速度変化に対する相対的密度変化の比率が $\frac{1}{3}$ 以下では, 統計的に見て波形では相関が0.9以上の値を持っている。また比率

図-15 密度の影響（速度のみと密度考慮との相関結果）

が1の場合には当然のことながら相関は0.5である。前述の如く対象とした坑井について密度変化は速度のそれに比して $\frac{1}{3}$ 程度であった。この乱数のシミュレーションの結果を考え併せれば, 密度分布を考慮しなくとも合成地震記録に余り影響のないことは当然といえる。まして両者がまったく独立であってもこのようなことがいえるのであるから, 互いに正の相関のある実際の場合にはなおのことである。

合成地震記録は時間スケールの多重反射を含んだ反射時系列と適当なウェイブレットをコンボリューションすることによって作成されることは前に述べた。しかしながら図-5~図-7に示したように坑井-A, B, Cでは多重反射を考慮した効果がなく, 1次反射のみのものと多重反射を含んだものとが互いに酷似している。一方図-4に示した空知の如く1次のものと多重反射を含んだものとが異なり, 多重反射の効果の大きい坑井もある。

これは各坑井の反射係数の大きさ（統計的には標準偏差によって表わされる）と密接な関係があることが推定できる。そこで正規乱数を擬似反射係数列として、その標準偏差を各種変化させ多重反射の効果について一種のシミュレーションにより検討してみた。使用した乱数は電子計算機により作成した150個で、その統計的値は次のようなものである。総和 -0.273 ，平均値 -0.182×10^{-2} ，最大値 0.612 ，最小値 -0.766 ，分散 0.447×10^{-1} ，標準偏差 0.2114 であり、その分布状況と自己相関を示した

図-16 正規乱数(a)とその自己相関(b)

ものが図-16である。この乱数にある係数をかけ、標準偏差の異なる13種類の乱数を作成し、それらのおおのの多重反射を含む反射時系列を計算した。図-17がその結果であり、左側の数字は1次の場合の標準偏差を表わす。また右の合成地震記録は左の時系列（2 ms 間隔と見做す）に40Hzのリッカー・ウェイブレットをコンボリューションしたものである。図のように標準偏差が増大するに従って徐々に多重反射の影響が生われてくる。次にこの変化を1次反射時系列(A)と多重反射を含んだ反射時系列(1)~(13)との相互相関を取ることによって調べた。なおウィンドー数は再び、すべてリッカー・ウェイブレット（40Hz）のポイント数と同数25ポイントで行なった。その結果が図-18であり、相互相関係数の平均値をプロットしたものが図-19である。両図から標準偏差が0.04程度から記録の後半に多重反射の影響が現われ始め、0.075程度以上ではその効果は顕著である。また0.03以下の標準偏差ではその効果が少なく、1次のものと多重反射を含んだ反射時系列とで0.9以上の相関がある。もちろんこれは記録として比較的短時間の範囲についての議論であるが、いずれにしても多重反射は反射係数列の標準偏差に左右される。新潟地域の3坑井A, B, Cでの標準偏差は平均0.016と小さいことから、

図-17 1次反射と多重反射

反射係数列
(=1次反射時系列)

反射時系列
標準偏差

* リッカー・ウェイブレット (40Hz)

図-18 1次反射系列と反射系列(多重反射を含む)の相関
標準偏差

図-19 多重反射の効果

1次の時系列と多重反射を含んだ時系列とが一致し、一方空知ではこれらの坑井に比較して標準偏差が3倍程度大きく0.05近いことから、多重反射の影響が無視できぬことがわかる。

4. 結 語

反射係数列、および合成地震記録に対する密度の影響について考察した。また多重反射と検層データとの関連、さらに速度、密度検層記録の相関について、実際の坑井例および乱数を用いたシミュレーションから検討した結果を報告した。結論的に述べると、反射係数列、合成地震記録は密度を一定としたものと密度を考慮したものとで、1次反射のみの場合はもちろんのこと多重反射を含めても、一般的地震探鉱での解釈の立場からは両者は酷似していると見て良く、密度考慮の効果がほとんどなかった。また、多重反射は反射係数の大きさ(統計的には標準偏差によって表わされる)と密接な関係があり、標準偏差が大きいと多重反射の影響は大きい。反射係数列、合成地震記録が密度を一定としたものと密度変化を考慮したものとできわめて類似したものとなった主たる要因として、速度変化に対する相対的密度変化が小さいこと、および両変化の相関が良いことが挙げられる。なお両者の相関の良いことは合成地震記録の振幅にも関連がある。反射係数列、合成地震記録の振幅に着目すると、平均的には密度を考慮したものの方が振幅が大きい。しかし反射の絶対振幅に注目するのではないかぎり余り重要なことではないと考えられる。なお、速度・密度検層いずれも行なわれている時には、両方の資料を用いるのが好ましいのは当然である。

坑井資料は石油開発公団、ならびに石油資源開発株式会社 の好意によるものであり感謝の意を表わす。また本研究は文部省科学研究費によるものであることを申し添える。

参 考 文 献

- 1) A.T. Dennission (1960): An introduction to synthetic seismogram techniques. *Geophysical Prospecting*, Vol. VIII.
- 2) R.A. Peterson., et al. (1955): The synthesis of seismograms from well-log data. *Geophysics*, Vol. XX, No. 3.
- 3) N.A. Anstey (1960): Attacking the problem of the synthetic sismogram. *Geophysical Prospecting*, Vol. VIII.
- 4) A. Papolis (1962): The fourier integrl and its applications. McGraw-Hill.
- 5) E.A. Robinson and S. Treitel (1964): Principles of digital filtering. *Geophysics*, Vol. XXIX, No. 3.
- 6) 松沢 明 (1961): 堆積岩の密度と地質構造。物理探鉱, Vol. 14, No. 4, Vol. 15, No. 1

- 7) G.H.F. Gardner., et al. (1974): Formation velocity and density—The diagnostic basic for stratigraphic traps. *Geophysics*, Vol. 39, No.6
- 8) 大久保 彪・寺崎 晃 (1971) : 岩石の物理的性質と弾性波速度。土と基礎, Vol. 19, No.7