

厚さのある反射層からの反射

— 深部物理探査研究 第4報 —

金子 徹 一*

Reflection Signal from a Layered Refractor

by
Tetsuichi Kaneko

Abstract

Reflection signal from a simple layered refractor and transmission signal were obtained by using the conception of sampling filter as shown in Figs. 3, 5 and Fig. 6. Then the characteristics, amplitude and phase, of reflection and transmission were illustrated in Figs. 7, 8 and Fig. 9. Figs. 10, 11 and Fig. 12 demonstrate the wave forms of reflection and transmission signals from and through the layered refractor, when reflection coefficient is 0.2 or 0.4, incident original signal being Ricker's wavelet. If there was a change of thickness of the refractor, the reflection and transmission signals would be deformed as shown in Fig. 13.

1. はじめに

反射を起こす境界面が1つでなく、層の上面と下面とから起こるような場合が知られている。たとえば挟まれた凝灰岩層・熔岩層・砂岩層などこの種のものと考えられる。このときは、反射される signal は境界における反射係数によるばかりでなく、層の厚さがその振幅、型に影響する。この種の問題についてはDixは彼の教科書のなかでも述べているが（彼は内部多重反射の影響は小さいとして無視した場合を述べている）、こゝでは波形の変化などをさらに詳しく調べてみることにした。

ある厚さの反射層に対して入射 signal の方向が垂直でない一般の場合には、それぞれの境界面でS波の発生を伴ない、事柄は複雑になる。この場合反射および透過係数の理論的計算についてはMatumoto (1953) の発表がある。こゝではDixと同じように入射 signal は両境界面に対して垂直に入射する平面波の場合だけを考えることにする。

計算の方法は青木 (1957) と同じように sampling filter の方法を用い、反射層の反射特性をしらべ、同時に反射 signal の変形の様子を検討することにした。近年反射法においては反射波を検出してその走時および時

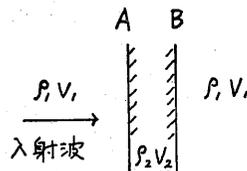
刻差 (move-out time) から反射面の形を調べるほかに、その反射 signal の質 (振幅、形など) をしらべて、反射層に関する情報を得ようとする試みが実用化されている。このためには、ある種のモデルについて反射 signal の変形がどのようになるかを調べて、大体の特徴を頭に入れておくことは記録を見るときに参考になると思われる。

なお、最近 Berrymann et al. (1958) が巧みな方法で速度が層内で連続的に変化する場合の反射現象をしらべている。

2. Sampling filter の型

反射層の両境界面をそれぞれ A, B とし、外部の速度、密度を V_1, ρ_1 , 層内部の速度、密度を V_2, ρ_2 とする (第1図)。この場合、境界面での反射係数 k は

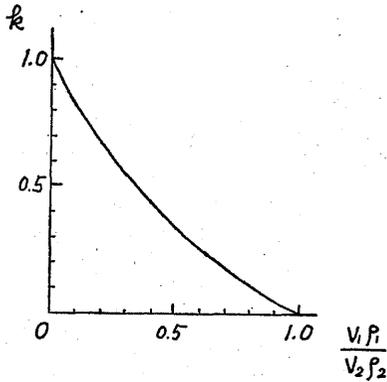
$$k = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (1)$$



第1図

* 物理探査部

で与えられる。 $\rho_1 V_1, \rho_2 V_2$ は音響インピーダンスと呼ばれる量であるが、便宜のため2つの音響インピーダンスの比 $\rho_1 V_1 / \rho_2 V_2$ と k との関係をしらべると第2図のようになる。通常の場合この比の値は0.5以下のときが多いので k の値も0.4以下の値が多いと考えてよからう。この意味からここでは $k=0.4$ と $k=0.2$ の場合について考察することにする。

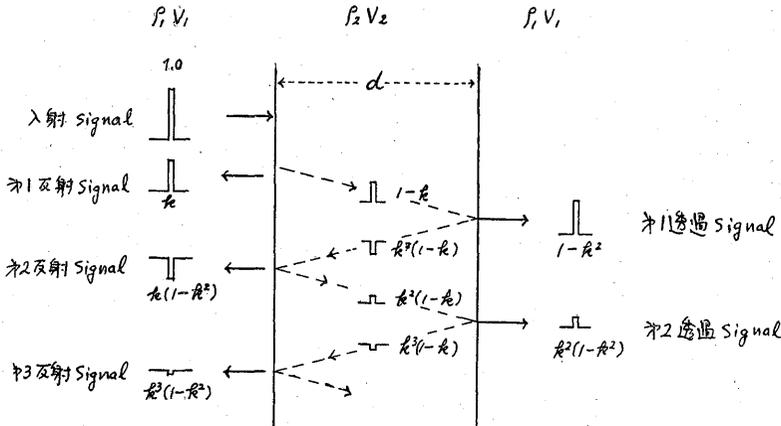


第2図 反射係数 k と音響インピーダンス $V\rho$ との関係

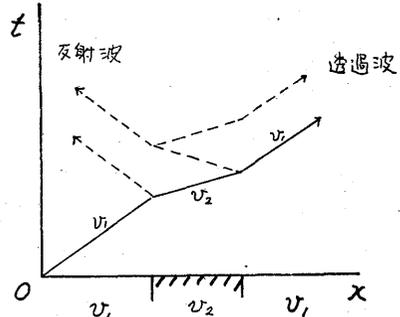
いま $\rho_1 V_1 < \rho_2 V_2$ の場合について考えよう。新第三系の地層中に熔岩層や安山岩質の凝灰岩層が挟まれている場合などがこの場合に相当する。

入射 signal を振幅1.0の unit pulse の形で模式的に表現すると、第3図のように、反射 pulse と透過 pulse がある一定間隔 dt で次々に反射され、透過されることになる。このときの走時図は第4図のように表現される。反射 pulse の間隔 $dt=2d/V_2$ 、ただし d は反射層の厚さである。この際、反射 pulse の位相は2番目以後

$$\rho_1 V_1 < \rho_2 V_2$$



第3図 入射 signal を unit pulse としたときの反射、透過、内部反射の模式的標示 d は層の厚さ (1) $\rho_1 V_1 < \rho_2 V_2$ の場合



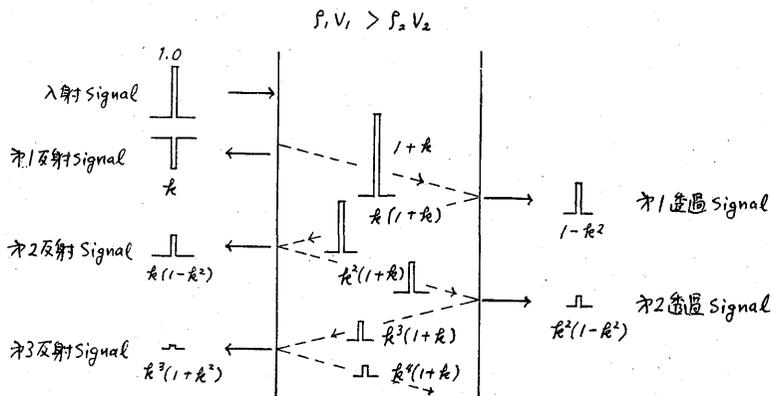
第4図 厚さのある反射層のあるときの走時曲線

は反転し、その振幅は $k, k(1-k^2), k^3(1-k^2), \dots$ と減少する。これに対し透過波はどれも同じ位相で、その振幅は $1-k^2, k^2(1-k^2), k^4(1-k^2), \dots$ と減衰する。

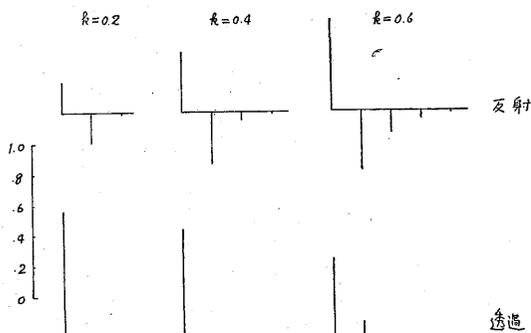
次に、反射層の音響インピーダンス $\rho_2 V_2$ が上下の層のそれよりも小さい場合、すなわち $\rho_1 V_1 > \rho_2 V_2$ のときを第5図に示す。透過波については第3図の場合とまったく同じであるが、反射 pulse については押しと引きとを反転すればまったく同形になる。

反射係数 k の値は (1) 式に示すように、地層の音響インピーダンス ρV によって決まるものであるが、その値のいかによって sampling の重みの様子は異なってくる。第6図にいろいろの k の値について重みの様子を示した。すなわち、 k の値の小さい場合には第2反射 pulse は第1反射 pulse に対して比較的大きく、第3以下の反射 pulse は急激に小さくなる。これに反して、 k の値の大きいときは第2反射 pulse は小さく、第3以下のものの減少率も比較的に小さい。このことは反射係数の大きいときには、内部多重反射が相当長く続き、Dix の説明のように無視することはできないわけである。

厚さのある反射層からの反射 (金子徹一)



第5図 第3図と同じで(2) $\rho_1 V_1 > \rho_2 V_2$ の場合



第6図 反射係数が 0.2, 0.4, 0.6 の場合の反射および透過の sampling の大きさ

3. 特性

sampling filter の特性は次式で表わされる。

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{\infty} a_K e^{-j\omega K \Delta t} \quad (2)$$

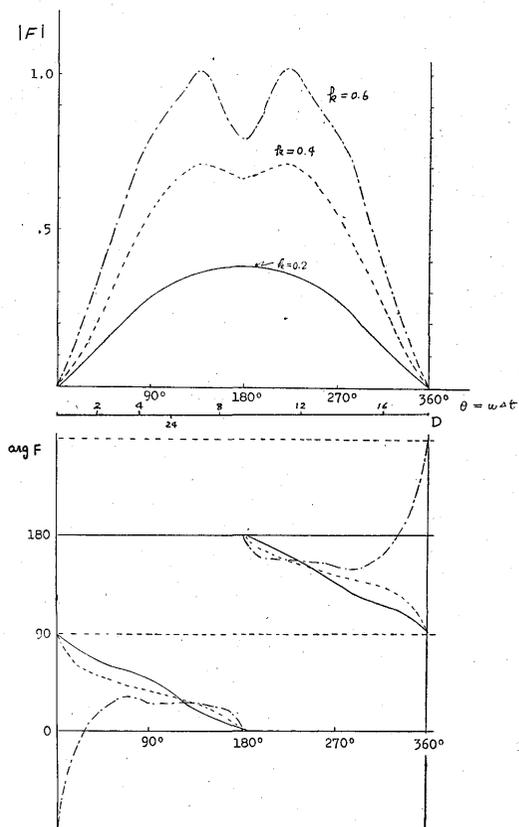
ただし $N = \sum_{K=0}^{\infty} a_K$, $\omega = 2\pi f$

(2) 式に従って反射の場合 $k=0.2, 0.4, 0.6$ について計算したのが第7図で実線が $k=0.2$, 点線が 0.4 , 破線が 0.6 の場合を表わす。また上図が $|F(\omega)|$ で振幅特性を, 下図が $\arg F(\omega)$ で位相特性を示す。

$|F(\omega)|$ はいずれも band-pass filter の形を示すが, 左の部分だけを考えて low-cut filter の形を表わす。 $k=0.2$ のときはその形は簡単であるが $k=0.4, 0.6$ と値が大きくなると中央部に凹を生じ形が複雑になる。そしていずれもその最大値は $2k$ の値よりも少し小さい値になっている。位相特性の $\arg F(\omega)$ は $k=0.2$ のときはほとんど直線に近いものであるが, k の値が大きくなるに従い複雑な曲線になる。このことは反射係数の大きいものでは, 小さいものに較べて内部多重反射の影響が

大きく反射 signal の変形も複雑になることと一致する。しかし, 実際には後に述べるように 0.2 と 0.4 の相違程度では波形の形でそう大きな相違はみられない。

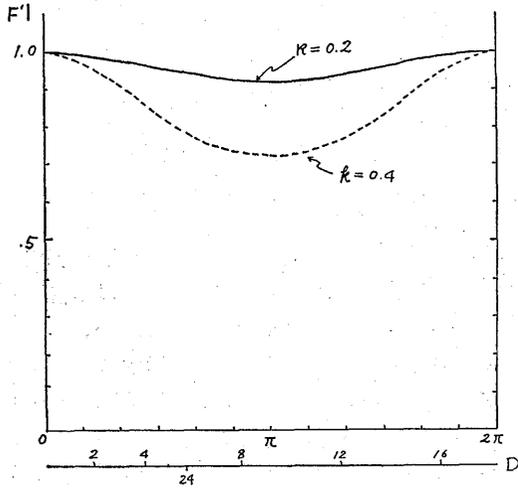
$|F(\omega)|$ の曲線の中央付近で最大値を示すことは, 物理的には半波長ずれた波がちょうど同じ位相で加算されるときに振幅が最大になることを意味している。すなわち, この場合には反射層の厚さが signal の波長の $\frac{1}{4}$ に



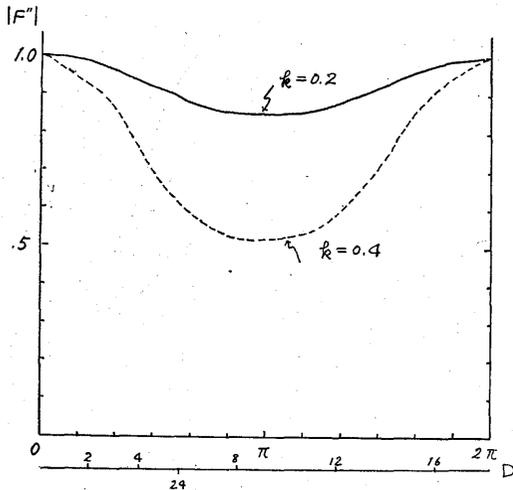
第7図 反射の場合の特性 (振幅: 上段, 位相: 下段)

相当することになる。

反射層の存在する場合、透過波としてわれわれが観測するのは反射層を一度透過し、さらに下層の反射面で反射して、ふたたびこの反射層を透過する波である。すなわち問題の反射層を上から下に、下から上にと2回透過することになる。1回透過の場合の特性 $|F'(\omega)|$ を第8図



第8図 1回透過の場合の振幅特性



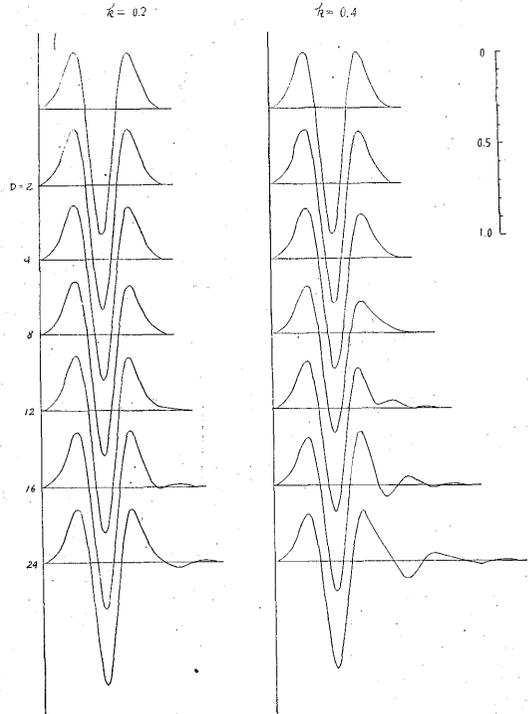
第9図 2回透過の場合の振幅特性

に、2回透過した場合の特性 $|F''(\omega)|$ を第9図に示す。その形は当然のことであるが中央部が小さいものになり左側の部分だけ考えれば一種の low-pass filter になる。いうまでもなく k の値が大きくなるほど filter 作用は強くなる。

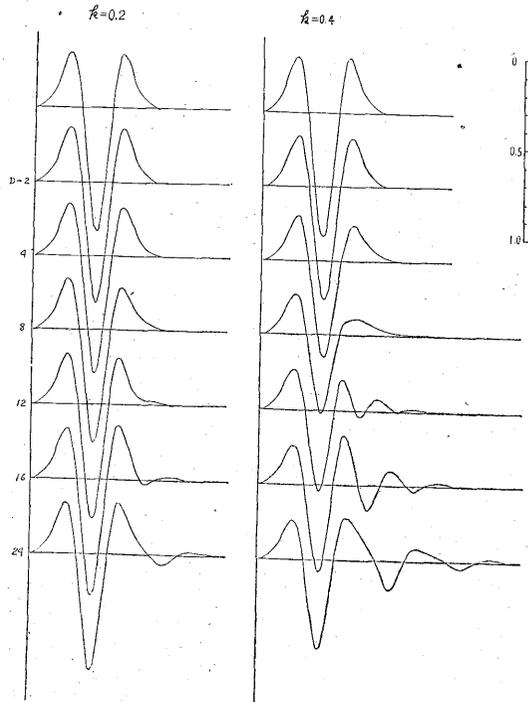
4. Signal の変形

前記のような反射層により反射した波、透過した波の

波形がいかに影響されるかについて次に調べてみよう。入射 signal としてどのような形を選ぶかは任意である



第10図 1回透過の場合の wavelet の変形、最上段は wavelet



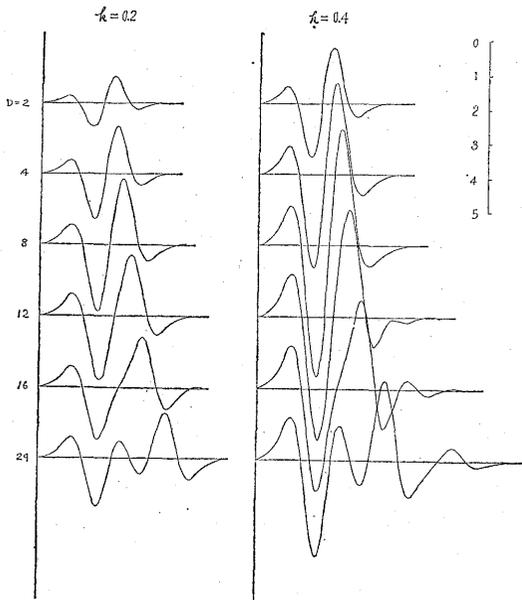
第11図 2回透過の場合の wavelet の変形

厚さのある反射層からの反射 (金子徹一)

第 1 表

D	1 回 透 過						2 回 透 過						反 射					
	0.2			0.4			0.2			0.4			0.2			0.4		
	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂
2	.99	.99	1.00	.95	.95	1.00	.99	.98	1.01	.92	.92	1.00	.12	.14	.86	.20	.36	.56
4	.97	.96	1.01	.85	.88	.96	.94	.94	1.00	.74	.79	.94	.26	.26	1.00	.49	.55	.89
8	.93	.94	.99	.73	.80	.91	.85	.90	.94	.52	.65	.80	.38	.38	1.00	.70	.71	.99
12	.94	.95	.99	.77	.81	.95	.89	.90	.99	.60	.66	.91	.34	.35	.97	.69	.66	1.02
16	.99	.96	1.03	.95	.82	1.16	.98	.92	1.07	.92	.69	1.33	.12	.29	.41	.25	.55	.45
24	.94	.96	.98	.78	.84	.93	.87	.92	.95	.60	.70	.86	.33	.19	1.74	.65	.40	1.63

註) A₁ は特性曲線から求めた値, A₂ は第10~12図の波形より求めた最大振幅



第12図 反射の場合の wavelet の変形

が、こゝでは対象形の wavelet (Ricker, 1953) を用いることにする。この際、合成の間隔 Δt 、したがって反射層の厚さと層内の速度とによって合成された波形は変わる。すなわち、 $\Delta t = 2d/V_2$ で与えられる。いま合成時間間隔を wavelet の卓越周期の $1/18$ を単位として表わして透過波・反射波の変形を調べたものが第10~12図である。これらの図の D の値は $\Delta t = D \cdot T_0/18$ で表わされる数で (T_0 は wavelet の卓越周期)、したがって D の小さい値は反射層の厚さが薄い場合を、大きい値は厚い場合に相当する。

その一例として $T_0 = 0.02$ sec, $V_2 = 3,000$ m/sec の場合には $d = 3.3$ m に当る。したがって、 $D=2$ のときは厚さ $d=3.3$ m に、 $D=12$ のときは $d=20$ m, $D=24$ のときは $d=40$ m に該当する。

まず反射層を一回透過した場合の波の変化をみることにしよう。第10図の最上段の波はもとの wavelet である。これがいろいろの厚さの反射層 (反射係数 $k=0.2$ が左側、 $k=0.4$ が右側) を透過した波の様子を厚さの順に上から下に表わされている。いうまでもなく、反射係数の小さい $k=0.2$ の場合には、大きい 0.4 に較べて一般に変形は少ないが、その差は非常に小さく、厚さの薄い上段部のものであればいずれも実際的には変形はほとんど無いといってもよい。そして wavelet の対象性もよく保たれている。 $D=12 \sim 24$ 程度になると少し尾部で ringing を示すようになるが、それもとくに問題にする程度ではない。

2回透過の場合、前述のように地表で観測するときはこの場合が問題になるのであるが、変形は1回透過に対して大きくなる。それにしても $k=0.2$ の場合には実際的には問題にするに足りないようである。 $k=0.4$ になると多少問題になり、 $D=8$ 以上になると ringing がかなり目立ってくる。

透過波に対して反射波の場合にはその変形は著しい。すなわち、 $k=0.2$ と $k=0.4$ の場合ともに wavelet の対象性は消失して微分したような^{註1)} 非対象形を示している。そして、初動の振幅は小さくなり、第3動の振幅が大きくなる。このことは観測記録をみるうえで注意してよいことであろう。反射層の厚さが増して $D=12$ 以上になると透過波の場合と同様に ringing がみられるようになり、 $D=24$ 以上になると2つの wavelet に次第に分離される傾向が表われる。

signal の振幅の変化を調べる場合には、第7~9図に示した振幅特性図と対比して考察するのが便利である。

註1) 第6図にみられるように k の値の小さい場合にはほとんど完全な時間に関する微分形である。このことは記録の波形から反射層の地質的解釈をするときに大変よい参考になると考えられる。

これらの図の横軸の下の直線に第10~12図の操作の D の値を示してある。これらの D に対する $|F|, |F'|, |F''|$ の値と、第10~12図の波形の最大振幅と比較したものが第1表である。この表から明らかなように、 D の小さい値のとき、すなわち比較的薄い反射層の場合には特性曲線で求められる値によって、signalの振幅の値を表わしても誤差は小さい。しかし、 D の値が12以上になると必ずしも一致しない。この点に関しては前に筆者(1959)および川島(1959)が調べているように、waveletのような孤立波の sampling 操作による振幅の変化の一般的性質とよく似ている。

卓越周期についてはかなり複雑である。反射波の場合には D が大きくなるに従い一般に卓越周期は延びる傾向にあり、 $D=16$ の場合は $D=2$ に対して約1.5倍になっている。このことはかなり著しい事実であって注目される。しかし、 $D=24$ の場合には2つの wavelet に分離され、ふたたび $D=2$ の場合の卓越周期にもどる。

透過波のときは、反射波の場合に反し、卓越周期の変化は僅かであり、実際的にはないといってもよい。

5. 地震探査における考察

第1節において述べたように厚みのある反射層は実際に多く存在することが知られている。この際、その厚さ

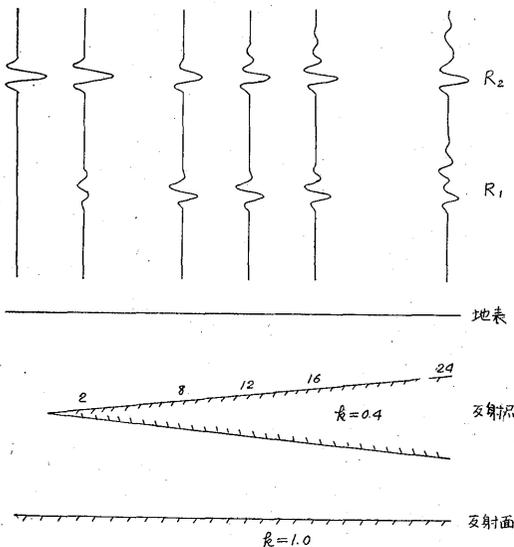
の変化あるいは比重、速度の変化による反射係数の変化が水平的に起こることが考えられる。多くの調査においてみられるような、部分反射や記録上での反射波が次第に変化する現象の重要な原因の1つが、反射層の厚さや反射係数の水平方向での変化にあるものと思われる。例えば反射層がその厚さを水平的に変化しているとすれば、上記の考察から第13図のような波形、卓越周期および振幅の変化が期待される。この図の上段に反射係数 $k=0.4$ の反射層の厚さが $D=0\sim 24$ に変化したときの反射波および反射層の下に完全反射面 ($k=1.0$) があるとしたときの反射波を模式的に示してある。すなわち R_1 は反射層からの反射波を、 R_2 は下部の反射面からの反射波である。

波の変形については前項において述べたとおりである。実際の反射層にあってはもちろん2つの簡単な境界面で境されたようなものでなく、複雑なものであることは速度検層からも知られているところである。しかし、ここで仮定するような単純な場合に示される反射波の定量的な考察は厚みのある反射層一般についての反射波の定性的な考察に役立つものと考えられる。

(昭和35年4月稿)

文 献

- 1) 青木治三：平面波の多重反射，地震，Vol. 10, No. 2, 1957
- 2) Berrymann, L. H., Goupilland, P. L. & Waters, K. H.: Reflection from multiple transition layers, Geophysics, Vol. 23, No. 2, 1958
- 3) Dix, C. H.: Seismic prospecting for oil, p. 219~222, New York, Harper, 1952
- 4) 金子徹一：地震探査における群設置法と多孔爆発法の研究，地質調査所報告，No. 180, 1959
- 5) 川島 威：サンプリングフィルターによる反射波形の変形，地質調査所月報，Vol. 10, No. 7, 1959
- 6) Matumoto, T.: Transmission and reflection of seismic waves through multilayered elastic medium, B. E. R. I., Vol. 31, Part. 4, 1953



第13図 反射層が次第に厚くなる場合の反射波と2回透過波とを模式的に示したもの、 R_1 : 反射層からの反射波、 R_2 : 下部の反射面 ($k=1.0$) からの反射波