反射地震記録による層位解析の一手法*

井川 猛**・太田 陽一**

大西 正純**・鳥羽 武文***

(昭和60年11月14日受理, 60年11月21日受付)

An Approach to Seismic Stratigraphic Analysis

By

Takeshi IKAWA, Yoichi OHTA, Masazumi ONISHI and Takefumi TOBA

Abstract: For the seismic stratigraphic analysis, Seismic Impedance Process (SIMP) by trace integration method is studied. Filter effect in this process is carefully examined by model impedance. Actual seismic data both in shale basin and carbonate basin are analyzed with the correlation to well log data. It is found that this method is very simple and useful for the stratigraphic analysis of seismic data if the data has a sufficiently wide spectrum of frequency.

1. はじめに

Seismic stratigraphy という言葉は, AAPG Memoir 26 (1977) が出版されて以来, 極めてポピュラーなものとなってきた。この出版の中の典型的論文の一つは Sangree and Widmier によるものであり, この論文の改訂版は Geophysics (1979) にも発表されている。この論文で代表される seismic stratigraphy の概念は, 反射地震記録の振幅, 周波数, 連続性等を総合的に見たパターン分類から地層の堆積状況と岩質の変化を解釈するものである。もちろんこの時, 既存の坑井における密度検層と音波検層から作られる合成地震記録との対比によって反射波の同定が行われることが望ましく, このような対比例を増すことによって, この解釈技術の確度は高められる。

同時に単に全体的パターンの分類より, より厳密に地震記録を調べて, 岩相変化等の議論を行う試みも数多く行われている。この時使用される方法は, 反射波の列としての地震記録そのものよりもむしろこれから逆算する形で推定される (seismic inversion と呼ばれる) 地層の音響インピーダンス (acoustic impedance あるいは seis-

mic impedance と呼ばれる) を用いるというものである。これらの手法はインピーダンスに寄与する要素がほとんど地層の音波速度 (sonic velocity) であることから, pseudo velocity log (LAVERGNE 他, 1977), synthetic sonic log (LINDSETH, 1979等) と呼ばれている。

理想的なデータ処理が行われたと仮定すると1本の地震記録時系列 (これをトレースと呼ぶ) x_i は, 同じ等時間間隔で定義された地層の反射系数列 R_i と地層の効果等を含んだフィルタオペレータ F_i のコンボリューション (*で表現する) で表される。

$$x_i = \sum_j F_j \cdot R_{i-j} \equiv F * R \quad (1)$$

ここで R_i は地層の第 i 層と第 $i+1$ 層の音響インピーダンス Z_i, Z_{i+1} のコントラストとして次のように表される。

$$R_i = (Z_{i+1} - Z_i) / (Z_{i+1} + Z_i) \quad (2)$$

さらに音響インピーダンスは地層の密度 ρ_i と音波速度 V_i の積として定義される。

$$Z_i = \rho_i V_i \quad (3)$$

(2)式から逆に第 n 層のインピーダンスを求める式は,

$$Z_n = Z_{n-1} \cdot (1 + R_n) / (1 - R_n) \quad (4)$$

または

$$Z_n = Z_1 \cdot \prod_{i=1}^{n-1} \{ (1 + R_i) / (1 - R_i) \} \quad (5)$$

となる。ところが(1)で表されるトレース x_i から R_i を求めることは極めて難しい問題である。一つの理由はフ

* 昭和60年6月4日, 第50回石油技術協会総会, 地質・探鉱部門シンポジウムにて講演

** 地球科学総合研究所

*** 石油資源開発総研 (現, 地球科学総合研究所)

Fig. 1 Sequence of the generation of synthetic seismogram from well log data of shale basin example.

ィルタオペレータ F が厳密にはわからないことであり、またこのフィルタ効果によってトレース x_i には極めて低い周波数（数 Hz 以下）および高い周波数の両方が失われているのでこれらの回復は困難なことである。上記 2 論文では、 R_i のかわりに x_i を近似的に (4) または (5) 式に代入し、低周波数の回復には地震記録の速度解析結果の情報を加算するという方法を用いているが、余り厳密な議論ではない。第一の問題は、フィルタのかかったトレース x_i を (4) または (5) 式に代入しても結果として同じフィルタのかかったインピーダンス $Z * F$ を求めていることにはならないことである。

一方このフィルタ効果をより一貫した方法、linear programming 法および autoregressive 法と称するもので地震トレースからインピーダンスを求めること (OLDENBERG 他, 1983; WALKER 他, 1983) も提案されているが、これとても地震トレースから失われている周波数成分を回復するには無理がある。この小論では従来から比較的簡便に用いられている積分法 (trace integration) によって近似的インピーダンス (正確にはインピーダンスの対数) を求める方法について、モデルと実例を用いて検討する。地震トレースからインピーダンスや音波速度の正確な絶対値を求めようとする場合、どうしても無理が生じる。ストラティグラフィを議論するには地層の横方向の変化だけを相対的に議論するだけで十分な場合が多く、その意味では積分法は簡便で良い方法である。この方法の持つ意味とフィルタの効果については BERTUSSEN (1983) によっても論じられているが、これをもう少し簡潔に整理してみたいと考える。

2. 合成地震記録 (synthetic seismogram)

音波検層や密度検層から (2) 式および (1) 式を用いて合成地震記録を作り、これを反射地震記録と対比することは古くから行われている。現在のようなデジタル計算機の利用できなかった頃にはアナログ式計算機をこの目的のために作成することも試みられた (PETERSON 他, 1955)。最近ではほとんどの検層データがデジタル磁気テープの形で入手でき、合成地震記録の作成はルーチン化されている。Fig. 1 には国内の坑井データを用いた合成地震記録作成のプロセスを示す。これは左から順に

- リソロジーの概略
- ガンマ線検層 (参考のために付されている)
- 密度検層
- 音波検層
- 前 2 者の積としてのインピーダンス

○このインピーダンスにハイカットフィルタを適用したもの

○時間軸へ変換したインピーダンス (フィルタ後)

○これから計算した反射係数列

○反射係数列に 5~50Hz のフィルタをかけたもの (合成地震記録)

である。ここで、深度領域でインピーダンスにあらかじめハイカットフィルタをかけておくことは重要なことである。すなわち通常の検層では 0.5 ft ごとにデータが取られているが、これに合成地震記録を作る時の時間領域の代表的サンプル間隔 2 ミリ秒に比して遙かに細いサンプル間隔に相当し、このフィルタ操作なしでは、深度—時間変換によってサンプルの逸失が起こるからである。また、この深度—時間変換のためには音波検層そのものの値を用いるのであるが、音波検層は、ソフトフォーメーションによる波の減衰、坑壁の崩壊その他の理由でエラーのあることがあり、坑井内垂直速度測定 (ウェルシューティングまたはチェックショットともいわれる) で校正しておく必要がある。しかし、このような校正を行ってもなおかつ、合成地震記録と反射地震記録では時間の絶対値は合致しないことがあり、また深い層準で両者の波形を対応させると浅い層準でずれる (大抵反射地震記録上の区間の方が大きい) ということもある。これらの理由は

○ウェルシューティングに於ける地表基準面と反射地震記録の基準面が一致していない。

○上記のデータ取得に於けるシステムに差がある。

○合成地震記録の作成には音波検層という極めて短い区間 (3 ft および 5 ft 等) を通過する波を用いているのに対し、反射記録では往復数千 m の経路を通過する波を用いているので地層の非弾性的吸収を強く受けている。

○反射地震記録のデータ処理が必ずしも完全ではない。

等が考えられる。音波検層にもしばしばエラーのあることも考えるとむしろ全層準に対して合成地震記録と反射地震記録が完全に一致することの方が稀であると考えられる。実用的にはわれわれは対象とする比較的短い区間での波形の対応ができれば、反射地震記録上の波形を、合成地震記録作成の逆のプロセスをたどることによって特定の層準と対比できる。Fig. 2 はこのような合成地震記録を反射地震記録の中に挟み込んだものであり、1.4 秒付近の波形を対応させたものである。これを見ると 0.9 秒付近では少しお互いにずれているようである。

さて合成地震記録の作成においてはしばしば密度検層が利用できないことがある。このような時によく用いら

Fig. 2 Seismic section correlated with synthetic seismogram.

れるのが GARDNER の関係式(1974)である。GARDNER によれば岩塩やアンハイドライト等を除けば大多数の堆積層に対しその密度 ρ_i と音波速度 V_i の間には次のような経験式が成り立つという。

$$\rho_i = K V_i^C \quad (6)$$

ここで速度を feet/sec, 密度を g/cc で表すと $K=0.23$, $C=0.25$ で, 速度を m/sec で表すと $K=0.31$, $C=0.25$ である。今このことを確かめるため, 前述の坑井において $\log \rho_i$ (横軸), $\log V_i$ (縦軸, m/sec) のクロスプロットを行ったものか Fig 3 の a, b, c である。ここで

- a は 800m~2,800m の広い区間で泥岩, 砂岩, 凝灰岩さらに一部に石英安山岩を含む
- b はこの内 1,300~2,200m の区間で主として泥岩, 砂岩から成り, 一部に凝灰岩を挟む
- c は a の内 2,200~2,800m の区間で主として石英安山岩質凝灰岩, 石英安山岩から成る

である。これらデータから比較的精度良く

$$\rho_i = 0.11 V_i^{0.25}$$

なる関係が求められ, $C=0.25$ という値はここでも当てはまる。 K については地域差があると考えられるが(6)

式を(3)式に代入すると

$$Z_i = K V_i^{1.25} \quad (7)$$

となり, これを(2)に代入すると

$$R_i = (V_{i+1}^{1.25} - V_i^{1.25}) / (V_{i+1}^{1.25} + V_i^{1.25}) \quad (8)$$

となり, K の値は何であってかまわない。(8)式を用いて音波検層のみから合成地震記録を作れるが, もちろんこれは近似であって, 個々のケースでは当てはまらないことはある。

3. 積分法によるインピーダンスの計算

さてここでは積分法によって第2章とは逆に地震記録からインピーダンスを求める方法について議論する。

(5)式の両辺の対数をとると

$$\log Z_n = \log Z_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \log \{ (1+R_i) / (1-R_i) \} \quad (9)$$

となる。ここで $-1 < R_i < 1$ であるのでテーラー展開により

Fig. 3 Cross plots between density and velocity.

a : 800~2,800 m, b : 1,300~2,200 m, c : 2,200~2,800 m

Fig. 4 Impedance model and corresponding synthetic seismograms with various filters

$$\log \{ (1+R_i)/(1-R_i) \} = 2(R_i + R_i^3/3 + \dots + R_i^{2m+1}/(2m+1) \dots) \quad (10)$$

となるが、実際には $|R_i| > 0.5$ になることはなく、極めて良い近似で

$$\log \{ (1+R_i)/(1-R_i) \} \doteq 2R_i \quad (11)$$

とすることができ、これを(9)式に適用して

$$\log Z_n \doteq \log Z_1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} R_i \quad (12)$$

が求められる。

ところで(12)で示されるインピーダンスの対数 $\log Z_n$ にフィルタ F をかける (コンボリューション) ことを考え、右辺の第2項の和については R_i にフィルタをかけた時系列 (すなわち(1)式) の和に等しくなる。(Appendix-A) すなわち

$$(F * \log Z_i)_n = F * \log Z_1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} x_i \quad (13)$$

となる。ここで $\log Z_1$ は定数であり(12)で示される時系列の直流成分に相当するので(13)式で示される時系列に対してその最初の部分だけに影響を与える。すなわち実用的には、反射地震記録の和の時系列 (積分) はイン

ピーダンスの対数にフィルタをかけたものに相当する。厳密にいうと(13)は

$$\{ F * \log (Z_i/Z_1) \}_n = 2 \sum_{i=1}^{n-1} x_i \quad (14)$$

となるので、反射時系列の和の2倍は Z_1 によってノーマライズされたインピーダンスの対数にフィルタをかけたものである。

さてこのトレース積分の効用についてモデルを用いて考察する。Fig. 4は左からモデルインピーダンス、これに対する反射時系列およびこれに各々0~40, 0~60, 0~400, 20~40, 20~60, 20~400 Hzのフィルタを適用した合成地震記録を示している。これらの反射係数列および合成地震記録のトレース積分を行ったものがFig. 5に示されている。Fig. 5の左端にはFig. 4と同一のモデルトレースが示されている。この結果を考察して言えることは、われわれは合成地震記録を見るより、トレース積分を行ったものの方が遙かに地層の解釈がしやすいことがわかる。ただし、Fig. 4の中でフィルタが0~400 Hzの時のように広域であればほとんど元のインピーダンスの形がそのままわかるが、十分な高周波数を含まな

いと、非常に薄い層は十分復元されない。また、20~40 Hz のように極めて狭域のフィルタになると、それに対応する合成地震記録が単に時間のずれ(位相のずれ)を起こしているように見える。このことはトレース積分のフーリエ変換がもとのトレースの低周波数を強調する他にその位相を90度遅らせる働きがあるからである。すなわちフィルタが狭域であると単に90度位相遅れを起こさせるだけになる。

4. インピーダンス変換による解析例

今までに述べてきた積分法によるインピーダンス変換をここでは単に Seismic Impedance Process (SIMP) と呼ぶことにし、実例を用いて検討する。

まず、Fig. 1 で用いた坑井のデータについて、合成地震記録との比較を行ったものを Fig. 6 に示す。左端は反射系数列で右端はその SIMP 処理であり、中央の二つは各々に現実の地震記録に含まれるような周波数(この場合10~50Hz)のフィルタを適用したものである。これを見ると一見両者に大差が無いように見えるが、SIMP処理したものの方がより単純化されており、また、元のイ

ンピーダンス情報(図の右端)をより忠実に反映している。この坑井データからの SIMP 記録を現実の地震記録による SIMP セクションに対比した図を Fig. 7 に示す。この図は前出 Fig. 2 の通常地震記録に比べて、より解釈しやすいものとなっている。すなわち Fig. 7 ではインピーダンスの相対的变化を直接的に読みとることができる。(黒塗りの正振幅の方向が相対的に高インピーダンスに相当する。)これを各層準にしたがって岩質の記述と対比してみる。

A層: 990msec により上部。おもに粗粒砂岩よりなるという。インピーダンスの変化は割合大きく、高インピーダンスのピークは凝灰岩等の挟みに対応すると考えられる。

B層: 990~1,340msec おもにシルト質泥岩からなるという。インピーダンスの変化も小さくまた横方向の連続性は悪い。ただし、坑井の左右で差があり、たまたま坑井を境として堆積状況が多少異なるようである。

C層: 1,340~1,840msec 上部は泥岩と砂岩の互層よりなり、これを反映してインピーダンスの変化

Fig. 5 Impedance model and integrated results of synthetic seismograms shown in Fig. 4.

Fig. 6 Comparison between synthetic seismogram and its integrated results from the well log data.

Fig. 7 Seismic impedance section by trace integration correlated with well log data.

SEISMIC SECTION, 5-60HZ

Fig. 8 Seismic section of carbonate basin example.

SIMP SECTION, 5-60 HZ

Fig. 9 Seismic impedance section by trace integration correlated with well data, which corresponds to Fig. 8.

も大きい。また横方向の連続性は極めて良い。(1,340~1,540msec) 中部は凝灰岩を挟む粗粒砂岩, 下部はおもにシルト質泥岩からなり砂岩, 凝灰岩を挟む層であるが, 横方向に均質とは考えられない。

D層: 1,840msec 以深, トップ(C層の最下部かも知れない)は凝灰岩層でこれに対応する高インピーダンスの波形が見られ, この下には約1,900 msec まで泥岩に対応する低インピーダンス層が見られるが, この深度になると構造の変化と相俟って横方向の変化が激しく, C層とD層の境界も厳密には追跡できない。1,900~2,140 msec まではおもに石英安山岩質凝灰岩からなり, インピーダンス変化の大きい不連続な岩体を表すパターンとなっている。2,140msec からは石英安山岩層に対応し, 音響基盤を形成している。

さて, もう一つの実例として, 前者に比して比較的広帯域の周波数を含んだ炭酸塩岩地域の記録について考察する。Fig. 8は通常地震記録である。これに対してSIMP処理を行ったものがFig. 9に示されている。Fig. 9には坑井データから求めたフィルタあり/なしの両方のインピーダンスが挟み込まれている。ここでB層は硬質の石灰岩であり, 連続した高インピーダンスの層であることがよくわかる。D層はリーフ的な石灰岩であり, 相対的に低インピーダンスで, その中に数回の発達状況が読み取れる。E層はリーフの基底部に堆積した比較的均質で高インピーダンスの石灰岩であり, リーフの発達に伴って断面の右の方向に階段状に発達しているのがよくわかる。F層は厚い頁岩層で低インピーダンスであるが, 余りに厚いので極めて低周波数(2~3 Hz)まで使わないと復元できない。D層の上部には極めて薄い頁岩層(C層)があるが, これはもっと高周波数を使わないと表現できない。このように制限条件はあるものの, SIMPセクションの方が遙かに岩質, 層序の解釈には便利なのがわかる実例である。

5. おわりに

反射地震記録から岩相, 層序の解析を行う場合の一つの方法として, トレース積分を行ってインピーダンスの相対変化を求めることの意味について吟味してきた。この方法は極めて簡単で, またあいまいな仮定が入っていないという意味で極めて有用である。しかし, どのような方法でインピーダンス変換を行うにせよ, 原記録を狭帯域のフィルタを用いて取得したり, また, 基本となるデータ処理がまずければ良い結果は得られない。また地

域や地質環境による差異も大きく, ケーススタディーを増してゆきたいと考える。

Appendix—A

反射系数列 R_i の積分を I_n とする

$$I_n = \sum_{i=1}^{n-1} R_i \quad (\text{A-1})$$

である。

R_i の積分の後にフィルタ F をかけた結果を A_n, R_i にフィルタ F をかけた後に積分した結果を B_n とすると, A_n, B_n はそれぞれ以下のように表される。

$$A_n = \sum_j F_j \cdot I_{n-j} \quad (\text{A-2})$$

$$B_n = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_j F_j R_{i-j} \right] \quad (\text{A-3})$$

(A-1)式を(A-2)式に代入し変形すると

$$\begin{aligned} A_n &= \sum_j F_j \left[\sum_{i=1}^{n-j-1} R_i \right] = \sum_j F_j \left[\sum_{i=j+1}^{n-1} R_{i-j} \right] \\ &= \sum_j F_j \left[\sum_{i=1}^{n-1} R_{i-j} - \sum_{i=1}^j R_{i-j} \right] \end{aligned}$$

となる。ここで, $R_i (i \leq 0) = 0$ であることを用いると, 結局,

$$A_n = \sum_j F_j \left[\sum_{i=1}^{n-1} R_{i-j} \right] = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_j F_j R_{i-j} \quad (\text{A-4})$$

を得る。

(A-3)式と(A-4)式から, $A_n = B_n$ となり, 積分操作とフィルタ操作は, その順序に関係しないことがわかる。

さらに以上のことをZ変換を用いて説明する。一般的な時系列 $a_i (i=1 \sim n)$ に対して, a_i を係数とする変数 Z の多項式を考える。これを $A(Z)$ とすると,

$$A(Z) \equiv \sum_{i=1}^n a_i Z^{i-1} \quad (\text{A-5})$$

で定義され, 時系列 a_i のZ変換と呼ぶ。

時系列 a_i に, 時系列 b_i をコンボリューションした結果 C_i は, それぞれのZ変換を $A(Z), B(Z), C(Z)$ とすると,

$$C(Z) = A(Z)B(Z) \quad (\text{A-6})$$

と表現できる。

また, a_i の積分の時系列を I_n とすると

$$I_n = \sum_{i=1}^{n-1} a_i \quad (\text{A-7})$$

であり, これをZ変換で表現すると,

$$I(Z) = \sum_k Z^k A(Z) \quad (\text{A-8})$$

となる。

以上の準備の後, 積分とフィルタ操作(コンボリューション)の順序について考える。

R_k の積分後, フィルター操作 F を施した結果の Z 変換を $P(Z)$, フィルター操作後の積分結果を $Q(Z)$ とすると

$$\begin{cases} P(Z) = F(Z) \sum_k Z^k R(Z) = F(Z) R(Z) \sum_k Z^k \\ Q(Z) = \sum_k Z^k F(Z) R(Z) = F(Z) R(Z) \sum_k Z^k \end{cases}$$

となり, $P(Z) = Q(Z)$ であることがわかる。

参 考 文 献

- BECQUEY, M., LAVERGNE, M., and WILLM, C., 1979: Acoustic impedance logs computed from seismic traces. *Geophysics*, (44), 1485-1501.
- BERTEUSSEN, K.A. and URSION, B., 1983: Approximate computation of the acoustic impedance from seismic data. *Geophysics*, (48), 1351-1358.
- CLEMENT, W.A., 1977: A case history of geoseismic modeling of basal Morrow-Springer sandstones, Watonga-Chikasha Trend: Geary, Oklahoma-T13N, R 10W. Seismic Stratigraphy—application to hydrocarbon exploration, AAPG Memoir 26, 451-476.
- GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W., and GREGORY, A.R., 1974: Formation velocity and density—the diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, (39), 770-780.
- LINDSETH, R.O., 1979: Synthetic sonic log—a process for stratigraphic interpretation. *Geophysics*, (44), 3-36.
- LAVERGNE, M., and WILLM, C., 1977: Inversion of seismograms and pseudo velocity logs. *Geophysical Prospecting*, (25), 231-250.
- OLDENBURG, D.W., SCHEUER, T., and LEVY, S., 1983: Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms. *Geophysics*, (48), 1318-1337.
- PETERSON, R.A., FILLIPPONE, W.R., and COKER, F. B., 1955: The synthesis of seismograms from well log data. *Geophysics*, (20), 516-538.
- SANGREE, J.B., and WIDMIER, J.M., 1979: Interpretation of depositional facies from seismic data. *Geophysics*, (44), 131-160.
- WALKER, C., and ULRYCH, T.J., 1983: Autoregressive recovery of the acoustic impedance. *Geophysics*, (48), 1338-1350.