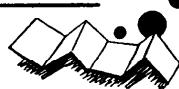


**解 説****石油資源探査における計算機利用†**

佐 原 啓 二†

**1. はじめに**

拙文を草するために若干の資料を捜していると、世界で初の石油の採掘のための商業井が 1859 年に掘削されたと年表にあるのを見つけた。更に大衆型乗用車のフォード T 型モデルが発売されたのが 1908 年である。サウジアラビアで石油が発見されたのは第二次世界大戦後であり、当時我が国では石油産業は壊滅状態であったから、今日の石油関連産業の発展を思えば如何に大きなエネルギー消費構造の変化が過去数十年間の間に産業全体に生じたかちょっと信じられないくらいである。そのうえ産業革命と石油の利用開始とは百年以上の時間差がある。石油の工業的利用開始こそ人類の歴史においては産業革命にも匹敵するかなり重大な転機であったのではないかと思われる。

石油産業が電子計算機産業を生んだと言えば驚く人が多いかと思うが、これは本当である。今やテキサスの巨人などと呼ばれるテキサスインスツルメンツ社はもともと石油の探鉱サービスを行っているジェオフィジカルサービスという会社の機器製作部門が独立して出来た会社である。我が国でも日立製作所は日立の鉱山会社の機械製作部門であったという事である。

またアレイプロセッサという積和など特定の演算を通常の計算機の百倍程度の速度で処理するハードウェアはもっぱら石油会社の地震探鉱のデータを処理するために開発されたと聞く。

石油探鉱のここ十数年間の技術的躍進は後述する反射法地震探鉱法のディジタル計測法および処理法によってもたらされた。人工地震を起こし、その振動の地下からの反射波を地表の受震器で記録し、地下構造の断面を反射波の振幅の強弱により描くという原理の地

震探鉱法はディジタル化したことにより更に精度が向上し、今や石油鉱床の直接探知も夢ではないと言われている。

本解説では石油の探鉱に用いられる物理探鉱技術について略述する。それらは、先述の地震探鉱法に加えて重力探鉱法や磁気探鉱法などであるが、他に本解説では割愛するものとしてリモートセンシング技術、坑内物理探査法（検層技術）などがある。発表の場を考慮し、なるべく計算機的応用面について述べるべく努力したが、自然現象相手の探査技術ゆえ、地質学などという場違いな学問についても説明のため頁を割く必要があった。

**2. 石油鉱床**

石油鉱床は地質年代に堆積した有機物に富んだ地層が、堆積の進行と共に適当な深度に埋没し、そこで熟成に要する温度と圧力との条件下で長時間経た後、原石油物質が地層間隙水と共にしぶり出され、比重差や地下水水流を動力源として移動し、移動中に石油の集積に適したドーム構造や、岩相変化などによって生じた捕集構造が存在すれば、そこに集積して生じたものである。要約すると、石油鉱床の生成のためには次の 4 条件が必要である。

- 1) 良好な母岩（有機物に富んだ堆積物）
- 2) 適当な統成環境\*（温度・圧力・時間）
- 3) 良好な貯留岩（多孔質な砂岩・石灰岩等）
- 4) 集油構造（ドーム、断層等、図-1 参照）

物理探査技術では上記項目のうち 4) の集油構造の発見に重点を置いている。そして近い将来 3) の貯留岩の性質までを地表から判定すべく鋭意研究中である。1), 2) の項目についても石油探鉱のために不可欠の情報であるが、これは地質学および地化学の分野であり、本解説では割愛した。ここでは、地質学、地化学の分野においても計算機による自動マッピング（作図）技術やデータベース等、情報のコンパイルに計算機が利用されているという事を記すに止めるだけとす

† Computer Applications in Petroleum Exploration by Keiji SAHARA (Geophysics Laboratory, Technology Research Center, Japan National Oil Corporation).

†† 石油公团石油開発技術センター物理探査研究室

\* 統成作用とは、沈降に伴う圧密作用および地熱による変成作用の事である。

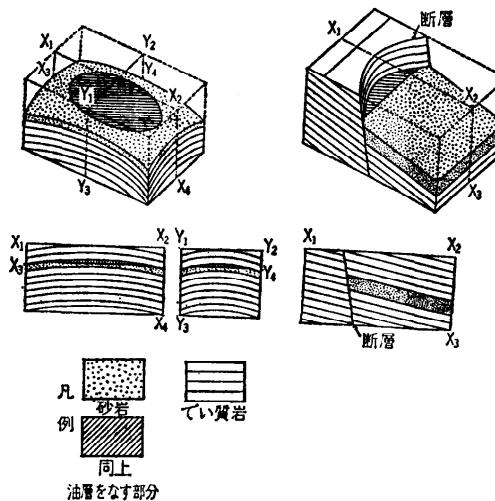


図-1 集油構造概念図、石油鉱業技術講座  
(基礎編) (1973)<sup>1)</sup> より

る。

### 3. 物理探鉱法

物理探鉱法とは種々の地球物理学的手法を用いた地下資源探査法の総称である。純粹地球物理学からは、まつとうな学問と見なされず、通常屋号を姓名の代りに名乗る物探屋と称する連中の興味の対象である。筆者のような者は物探屋の中でもリサーチ屋として特異の目で見られ、屁理屈をこねる人間とされる。ことほど左様に経験的側面の多い技術である。確かに自然現象を対象とする技術だけに総ては蔽の中であるが、近代的理論のバックアップがないわけではない。

以下、この章では主として計測法を略述し、次の章で、データ処理法について触れる事とする。

#### 3.1 反射法地震探鉱法

図-2 および図-3 に陸域および海域における地震探鉱法の実施概念図を示す。震源としてダイナマイトを用いる事は現在ではほとんどなく、より安全性の高い爆薬を陸域探鉱で用いる場合の他は、陸上ではパイプロサイズという機械振動による人工震源、海上ではエアガンという圧縮空気による震源を用いて公害の排除に努めている。概念図では発生した振動があたかも線のごとく地中を伝わり反射してくるように描かれているが、現実には波動は球面波となって

伝わって行き、地中での反射はいたる所で発生している。波線は単に反射が最も早くかつ強く生じる反射径路を示すに過ぎない。現在でも我々は、この波線を想定して地震探鉱記録の処理を行っている。このような考え方を波線理論 (ray theory) と呼ぶ。一方厳密に波面を考慮して処理する考え方もあり、これを波動理論 (wave theory) と呼ぶ。波動理論はより複雑であるが、精度の高い解析に有用である。

反射法地震探鉱技術の改良点で重要なものは、

- 1) 多重チャネル記録化 (重合処理)
- 2) デジタル化
- 3) デコンボリューション (後述)
- 4) マイグレーション (後述)

などである。このうち 1) と 2) は計測技術に関するものであり、3) と 4) はデータ処理技術に関するものである。通常の観測法では 1~4 ミリ秒のサンプリング間隔で 12~48 チャネルの多重チャネル記録をとる事が多い。但し、ここで言うチャネル数とは長いケーブルに接続した受震器群の数の事である。この震源と異なった間隔を取って配置した受震器群が重要な役割を果している。用いられているアナログディジタル変換器は高速かつ高精度であり、その無歪記録範囲は 120 デシベル (百万倍) 程もある。データは記録器の中で浮動小数点化されて記録される。

#### 3.2 重力探査法

地下に重い物質が存在すれば、地表で測定した重力

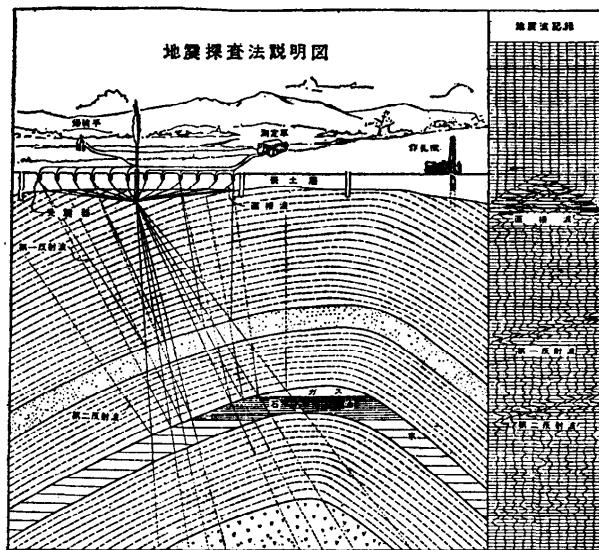
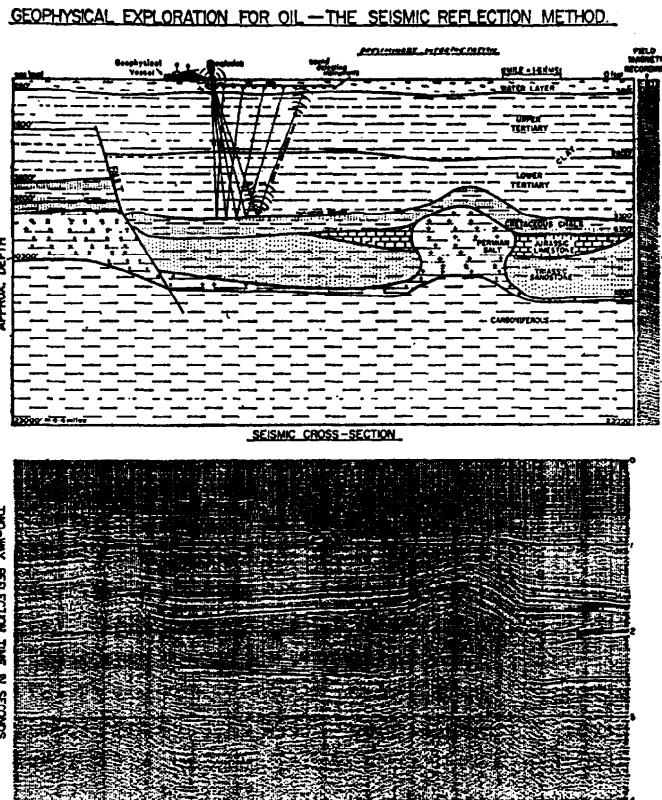


図-2 陸上地震探鉱法概念図、物理探鉱十周年特別号 (1958)<sup>2)</sup> より

図-3 海上地震探鉱法概念図、石油鉱業の技術講座(1976)<sup>11)</sup>より

値は大きく測定される。重力の単位はガリレオの名から取ってガルと呼ぶ。1ガルは $1\text{ cm/sec}^2$ である。地球表面での重力は約980ガルであるが、地球が回転楕円体であるため、重力は緯度により若干異なっている。我々は精密な国際重力標準式として、

$$g = 978.049 (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi) \quad \varphi: \text{緯度} \quad (1)$$

を用いて補正を行っている。というのは、我々が知りたいものは数百~数ミリガルの標準重力値からの偏りであるからである。重力計は種々考案されているが、ばね計り式のもの、振動子の振動変化を計るも

の、重錘の落下速度を計るものなどがある。広く用いられているのはばね式のものである。重力計の精度はかなり良く、有効数字6~8ケタの計測ができる。石油集積に関連した地下構造としてドーム構造、断層などがあるが、それらの構造が地表で測った重力値のわずかな標準値からの偏りとして観測されるわけである。現在では船上重力計が開発され、船のゆれや進行速度による遠心力効果などをキャンセルするような連動計算機による自動補正が行われ、精度1ミリガル程度の船上観測が可能である。(図-4 参照)

### 3.3 磁気探査法

磁気探査は地下で強く帶磁している岩体を探査する目的で行われる。地磁気は磁極付近で0.7ガウス、赤道付近では0.35ガウス程度の強さがある。これも重力と同様に国際標準磁気式がある。我々の知りたいのは標準値からの観測値の偏りである。我々の目的にはガウスでは単位が大き過ぎるので10万分の1の単位のガンマを用いている。大体観測される偏差値は数ガンマ

から数万ガンマ程度の値である。磁力計も種々考案されたが、現在では核磁気の歳差運動による誘導を利用して地磁気を計測するプロトン磁力計が全盛である。磁力計は磁性体による誘導にさえ気を付ければ、飛行機に搭載することも出来、非常に能率良く調査が出来る。海上における観測では地震反射、重力、磁気の同時観測が行え、総合的な探鉱が可能となっている。(図-5 参照)

### 4. データ処理法

長々と石油鉱業から説き起こし、計測法まで探査屋

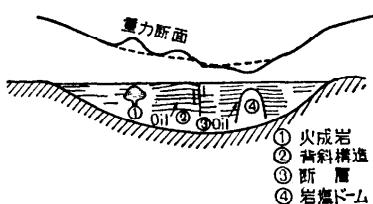


図-4 重力と地下構造、石油鉱業の技術講座より

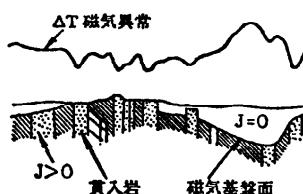


図-5 地磁気と地下構造、石油鉱業の技術講座より

しか関心の無さそうな事柄を書き連ねたが、いよいよ情報処理らしきところまで来た。現代物理探鉱法の面目躍如たるところはこのデータ処理法にある。特に地震探鉱法のデータ処理は、情報工学を最も活用した応用技術の例であろう。先述の地震探鉱・重力・磁気のデータはすべてデジタル処理される。通常の教科書的手順ではまずサンプリング理論から始めるべきかも知れないが、これは公知の事として略述するに止める。要点は、サンプリング間隔（これは時間的・空間的な間隔である）とデータの間には一定の関係があり、これはデータの周波数スペクトルとの関連で理解される。デジタルサンプリングされた記録の持つ周波数スペクトルは次式によって与えられるナイキスト周波数を限界としてそれ以下の周波数成分を持つ。

$$f_N = 1/(2\Delta t)$$

$f_N$ : ナイキスト周波数

$\Delta t$ : サンプリング間隔 (2)

この事は時間・空間共に同様なので、我々は後述する処理法では空間の周波数（これを以下波数と呼び、時間の周波数と同様に扱う）の概念を用いることがある。

#### 4.1 地震探鉱データ処理

図-6 にデータ処理のフローチャートを示す。以下

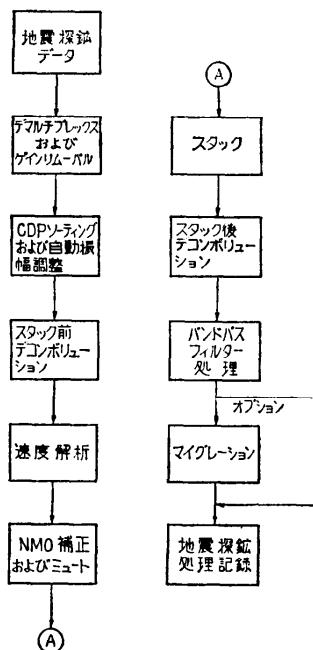


図-6 地震探鉱データ処理フロー

そのフローチャートに沿って説明を加える。

#### 4.1.1 デマルチプレックスおよびゲインリムーバル

記録された多重チャネルの反射データは時間ごとにチャネル数分のデータが一団としてテープに書き込まれている。これをソートしてチャネルごとに順次時間を追ってデータが入るように配列しなおすと同時に、増幅器のゲイン情報から、記録を真の振幅に戻す。こうして観測したデータは圧力 (BAR) または速度 ( $m/sec$ ) として物理的な単位を持った値となる。参考のためデータ量の一般的な目安を述べると、データ一点が一語長であり、48 チャネルで 2 ミリ秒サンプリングで 5 秒間反射波を記録すると、一回の発震で 12 万語のデータが取られる。海上の探鉱の場合、船は 25 m または 50 m 間隔で一回発震を行い進行するから (船速 4~5 ノット) 仮に 100 km 走って調査を行ったとすると、総発震数 4,000 回となり (25 m 間隔発震の場合)、総データ量は 4.8 億語となる。この程度の調査はごく普通である。このように多量なデータを扱うような計算作業は多分他に例がないのではないかと思われる。

#### 4.1.2 CDP ソーティング

CDP とは共通反射点 (Common Depth Point) の略で、先述のデマルチプレックスでチャネルごとに時間順次で並べられたデータを、地下で共通な反射点を通ったグループにまとまるようソートする。図で示すと図-7 のようになるグループを一つの集団にまとめ操作である。このグループを震源と受震器間の距離の小さいものから並べて表示すると図-8 のようにな

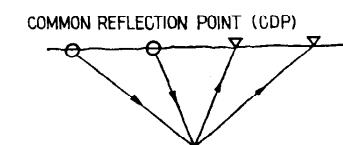
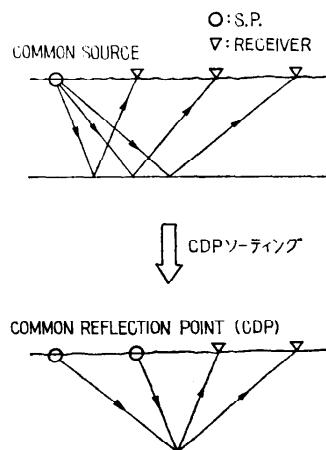


図-7 CDP ソーティング概念図、石油鉱業の技術講座より

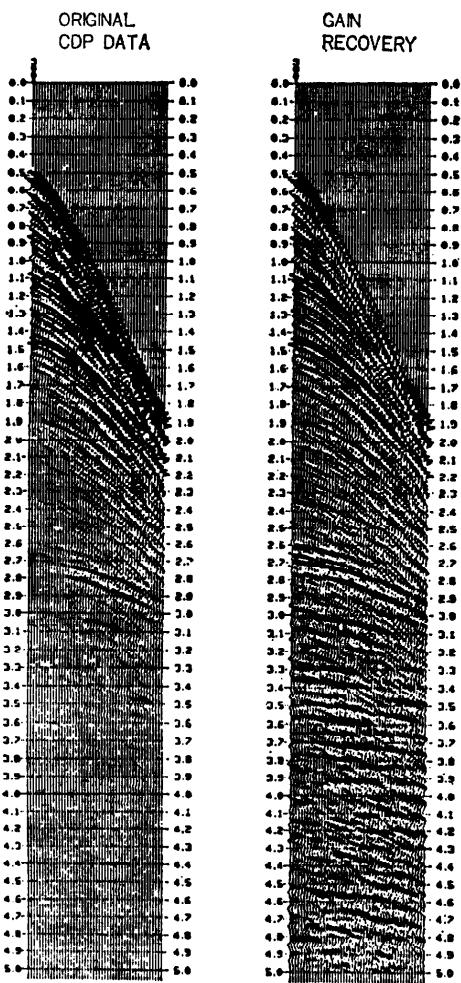


図-8 CDP グループ(左)と、それを自動振幅調整して表示したもの(右)石油資源開発(株)提供

る。図では曲線の縞模様が見られるが、これは一つの曲線が一つの反射点からの反射を表す。それぞれのチャネルは震源と異なる距離でとられているから、震源と受震点との距離を  $X$  とし、そこで反射が戻ってくる時間を  $T$  とすると、

$$T = \sqrt{T_0^2 + X^2/V^2}$$

$T_0$ : 反射が震源直下から戻ってくる時間

$V$ : 地層の RMS 速度\* (3)

という式になる。このように、一つの反射点から反射した波は震源との距離に対して双曲線を描く。この事を利用して我々は未知の値、地層の音波伝播速度を求める事ができる。共通反射点を求める時に我々の用

\* RMS: root mean square

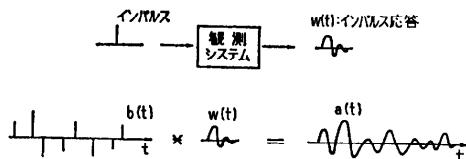


図-9 コンボリューション概念図

いているのは波線理論である。

#### 4.1.3 デコンボリューション

デコンボリューションこそは情報理論の産物である。これは Wiener, N.<sup>4)</sup> の予測理論を元に Robinson, E. A.<sup>5)</sup> が提唱した予測誤差フィルター理論の応用である。これは周波数スペクトルとの関連でも非常に整理された美しい理論となっている。

デコンボリューションとはコンボリューションという術語からの造語であり、コンボリューションの逆操作を意味する。線形システム理論的に説明すると、我々は、現象  $b(t)$  をある観測システム  $w(t)$  を通じて観測し、観測値  $a(t)$  を得ている。その関係は図-9 のようなものである。 $w(t)$  は観測システムのインパルスレスポンスを表わし、通常インパルス入力後、尾を引いたような波形となって現われる。これを我々は基本的な波形の単位という意味でウェーブレットと呼んでいる。連続的に観測システムに入力があった場合、その出力は、

$$a(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) b(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

という式で表わす事ができる。上式はデュアメル積分と呼ばれているが、我々は次の演算記号を用い

$$a(t) = w(t) * b(t) \quad (5)$$

と表わし、これをコンボリューション演算と呼んでいる。勿論我々は離散的なデータを用いて有限の範囲でこれを行う。積分記号を和になおして

$$a(N) = \sum_{I=0}^M w(I) b(N-I) \quad (6)$$

という演算を行う事になる。ここで積分範囲を正の方だけにしたのは、通常の観測システムでは入力以前に出力が存在するような奇妙な事は生じないためである。この事を因果律と呼ぶ。

観測システムが飽和したり経時変化を生じない限り総ての観測システムはコンボリューションで表現できる。いささか哲学的になるが、あるリサーチ屋さんは自然現象総てコンボリューションであるとまで極言している。筆者もそれを信じつつあるところである。

さて、コンボリューションで関係付けられる諸量の

フーリエ変換対の間には

$$A(w) = W(w) \cdot B(w) \quad (7)$$

という関係がある。つまり周波数スペクトルの積で結ばれる関係がある。デコンボリューションとは周波数スペクトル間での割り算を実行し

$$B(w) = A(w) / W(w) \quad (8)$$

として、我々の欲する値  $b(t)$  を求めようというものである。但し、我々はフーリエ変換を用いないでこれを行っている。そして、ある仮定を導入する事により  $w(t)$  を知っている必要もない。すなわち観測値  $a(t)$  のみを知って入力  $b(t)$  を求めるという曲芸的な処理を行っている。

具体的に話を進めるために、地震探鉱に話を戻すと  $a(t)$  は地表での観測値、 $b(t)$  は地中の反射面である。 $w(t)$  は震源の波形、記録機の特性その他もろもろの我々には不要な成分である。

今、Wiener, N. の予測理論により時間  $t$  までの出力を知り単位時間先の出力値  $a(t+1)$  を予測するような重み関数  $f$  を求めたい。

$$a_{(t+1)} = f_{(0)} a_{(t)} + f_{(1)} a_{(t-1)} + \cdots + f_{(N)} a_{(t-N)} \quad (9)$$

この定式化は自己回帰式として知られており、解法の一つとして Yule-Walker 方程式を解く方法がある。我々物理探鉱の分野では同一の手法を Wiener-Levinson の方法と呼んでいるが、両者はまったく同じ方法である。

さて、細かい事は予測理論の教科書でも見ていただくとして、とにかく、我々は一つ先の出力を予測する重み関数を求めることができる。これを我々の術語によりフィルターと呼ぶ。Robinson, E. A. の唱えた予測誤差フィルターとは真の出力値と予測値との差を出力するようなフィルターである。すなわち、

$$\{1, -f_{(0)}, -f_{(1)}, -f_{(2)}, \dots, -f_{(N)}\} \quad (10)$$

のような重みのフィルターである。実はこのフィルターがデコンボリューションフィルターである。このフィルターを用いて観測値とのコンボリューション演算を行う事により我々はシステムレスポンスを除去する事ができる。デコンボリューションフィルターのスペクトルは我々がウェーブレットと呼ぶ観測システムのスペクトルの逆スペクトルとなっている。

但し、このような事ができるためには次の二つの仮定が必要である。

- 1) 地下の反射面  $b(t)$  はランダムである事
- 2)  $w(t)$  は入力後速やかに出力を開始し、速や

かに減衰するようなシステムである事。

上記、1) の仮定は観測値  $a(t)$  の自己相関関数でシステム  $w(t)$  の自己相関関数とするために必要な仮定である。2) の仮定は厳密な術語では最小位相仮定と呼ばれ、所与の自己相関関数から元の関数をユニークに求めるために必要な仮定である。2)の方は確率過程の実現問題と呼ばれるようだが、筆者の経験ではこれ以上にうまい仮定は見つかっていない。

デコンボリューションについて長々と説明してきたが、これがデータ処理の根幹となる手法であって、我々は後にもっと広義のデコンボリューションの例を見る事になる。最後にデコンボリューション処理の例を図-10 に示す。処理前と処理後の差異は歴然である。この例は陸上の火薬震源記録に対してデコンボリューション処理を行ったものである。

ちなみに、地震探鉱データ処理で一番時間がかかるのがこのデコンボリューション処理で、アレイプロセッサを使用しなければならない理由もここにある。4.8 億語のデータに数百回の積和演算を行う処理を普通の中型計算機で試みた事があるが、数日経っても終らなかった。アレイプロセッサがあれば一時間程度で処理できる。

#### 4.1.4 速度解析

これは、CDP ソーティングの項で述べたように、地下の音波伝播速度を求める処理である。原理はある

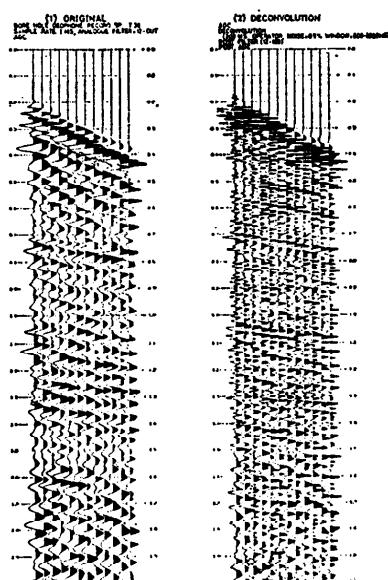


図-10 デコンボリューション処理前の記録（左）と  
処理後の記録（右）石油資源開発(株)提供

## CONSTANT VELOCITY SCAN

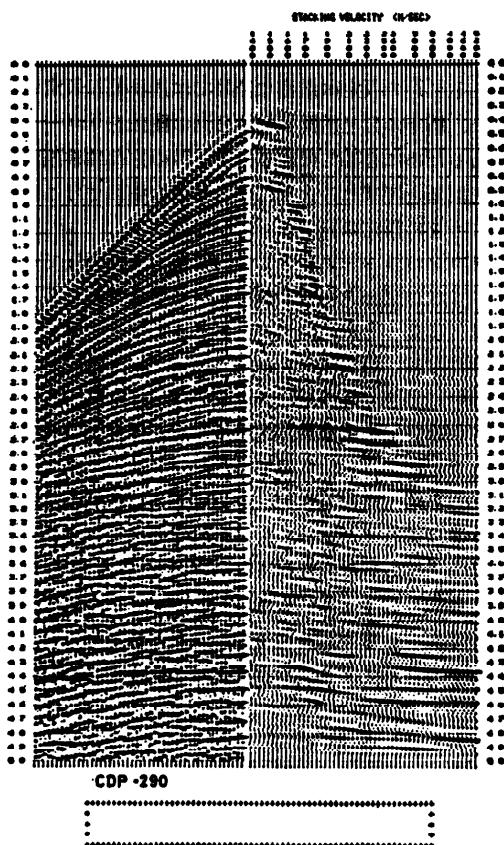


図-11 速度解析の例、石油資源開発(株)提供

地層速度に対して(3)式で決る反射の双曲線に沿って反射を水平になるように移動させる(ムーブアウト補正)ものである。速度を細かく変化させながらこの操作を時間軸方向にもしらみつぶしに行う。これをペロシティスキャンと呼ぶ。反射が水平に並んだ時の速度が適当な速度である。その例を図-11に示す。反射が水平になったかどうかを判定するには全チャネルの記録を加え合せれば良い。水平になつていればその和は大きな値となり、なつていなければ他の反射と打ち消し合って小さな値となる。この処理も時間がかかるので普通全点では行わず、1 km 間隔ぐらいで行い中間点は内挿して速度を求めている。地層の速度情報は岩質の判定にも有用であり、かつ次に述べるノーマルムーブアウト補正のためにも重要である。

こうして求まる速度は RMS 速度\*である。RMS 速度といわゆる我々が地層の物性と関連して言う区間速

度との間には、

$$V_i^2 = (V_{Ri}^2 T_i - V_{Ri-1}^2 T_{i-1}) / (T_i - T_{i-1}) \quad (11)$$

$V_i$ : 区間速度

$V_{Ri}$ : RMS 速度

$T_i$ : 反射の戻って来た時間

という関係がある。我々は砂岩の場合 2,000 m/sec ~ 3,000 m/sec の音波伝播速度という事を知っているので、区間速度は岩質の判定に役立つ。

## 4.1.5 ノーマルムーブアウト補正およびミュート

通常頭文字を取って NMO 補正と呼んでいる。これは、速度解析の項で述べたような、双曲線が水平になるよう各チャネルの記録をシフトさせる操作を、速度解析で求めた速度を用いて全 CDP グループについて行う操作である。これと同時に、震源から遠い方の受震器に記録される屈折波の除去のために記録の上端部の切り取りを行う。これをミュート処理と呼んでいる。(図-12 参照)

## 4.1.6 スタック(重合)

NMO 補正された CDP グループを足し合せる処理である。こうすると水平に並んだ真の反射波は強調され雜音は打ち消し合い弱められる。48 チャネルの記録を重合した場合 S/N 比は 16 デシベル向上すると言われている。NMO-スタック処理の特徴は一種の速度フィルターともなっている事で、ランダム雜音を弱めるのみならず、定在性の雜音も見掛け速度の違いを利用して消去できる事である。例えば、海面と海底での重複反射波や回折波、陸上の自動車等による移動性雜音も見掛け速度の違いから消去できる。(図-12 参照)

## 4.1.7 バンドパスフィルター処理

重合を行った地震反射記録はほぼ最終のものに近いが、我々はこの記録を更に見やすくするためにバンドパスフィルターをかける。これは記録のちらつきをなくし反射面を連續性良く見るためである。

ディジタルフィルタリングの特徴は、通常の物理的フィルターでは実現不可能な特性のフィルターを設計し、かける事ができる事である。

我々は極形式でフィルターを設計し、時間領域での重み関数に変換して、コンボリューション演算によるフィルター操作を行っている。これは一般に行われている重み付き移動平均法に他ならないが、通過周波数帯域やカットオフレートまで厳密に指定して設計できる。しかもこの手法はバンドパスフィルターのみならず、ローカット、ハイカット、ノッチフィルターなどの設計と共に通して用いる事ができる。ディジタルフィ

\* RMS: root mean square

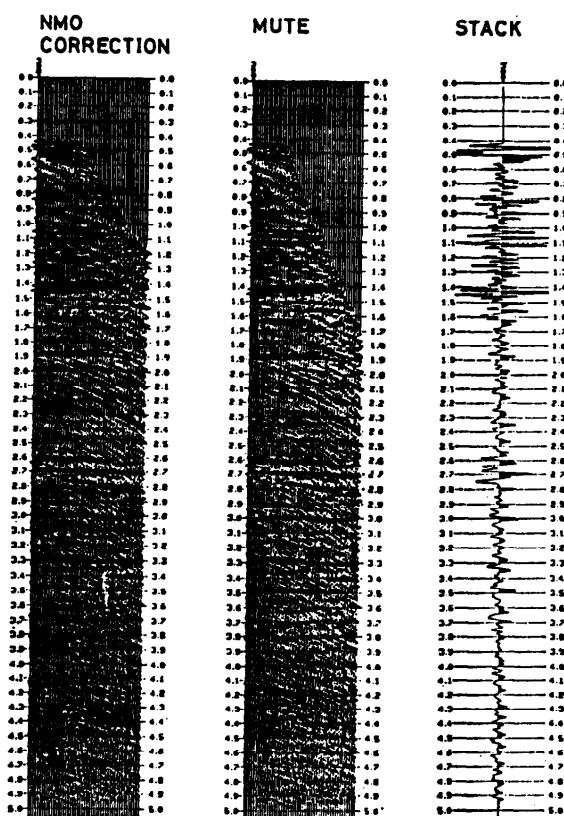


図-12 NMO 補正、ミュート、スタックの例、石油資源開発(株)提供

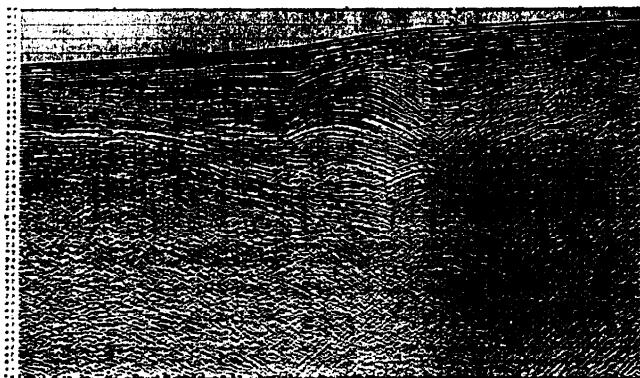


図-13 フィルター処理後の記録、石油資源開発(株)提供  
ルターの一番の特徴は位相歪みゼロのフィルターが実現できる事である。我々は任意の振幅スペクトルを与える、ゼロ位相特性のフィルターを計算する。手順は極形式からの逆変換である。

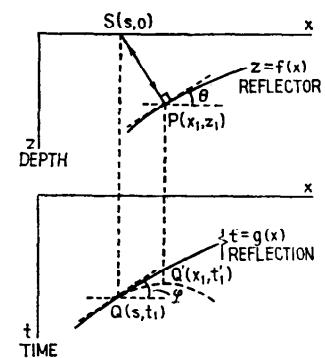


図-14 見掛け反射面(下)と真の反射面(上)との位置関係

なぜこのようなフィルターが物理的には実現不可能かというと、先のデコンポリューションの項で述べた事と関連するが、このフィルターは入力以前に出力があるシステムだからである。フィルターの重みは時間ゼロを中心に両側に対称な値を持つ。

フィルター処理後の記録を図-13 に示す。黒い縞模様が地下構造の境界を表わす。

#### 4.1.8 マイグレーション

地下の地層界面が傾斜している場合、地震探鉱の記録断面は地下構造と同一のパターンを示さない。それは、反射が斜め方向から来たものを真正下にプロットしているからである。波線を考えてこの関係を表わしたもののが図-14 に示す。マイグレーションとは、反射を見掛けの位置から元の位置に戻す操作である。

この処理を波動理論から導いた手法が現在広く用いられている<sup>6)</sup>。音圧場のスカラーポテンシャルによる波動方程式は、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (12)$$

と表わされる。ここで  $P$  は圧力ポテンシャル、 $C$  は媒質に関する定数で、地層の音波伝播速度である。 $P$  は位置と時間の関数となっている。

以下、このスカラー波動方程式を時間方向、 $x$  方向、 $y$  方向について 3 重フーリエ変換を行う。但し  $z$  方向が地下の深度の方向で、符号は下向きが正である。まず時間方向での変換を行う。

$$\frac{\partial^2 P(x, y, z, \omega)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, \omega)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, \omega)}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{C^2} P(x, y, z, \omega) = 0 \quad (13)$$

次に  $x$  方向の変換を行う。

$$\frac{\partial^2 P(K_x, y, z, \omega)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(K_x, y, z, \omega)}{\partial z^2} + \left( \frac{\omega^2}{C^2} - K_x^2 \right) P(K_x, y, z, \omega) = 0 \quad (14)$$

但し  $K_x$  は空間での周波数に対応するものである。次に  $y$  方向の変換を行う。

$$\frac{\partial^2 P(K_x, K_y, z, \omega)}{\partial z^2} + \left( \frac{\omega^2}{C^2} - K_x^2 - K_y^2 \right) P(K_x, K_y, z, \omega) = 0 \quad (15)$$

(15)式は一次元のヘルムホルツ方程式で、その解は

$$P(K_x, K_y, z, \omega) = K(K_x, K_y, z) e^{\pm j K_x z} \quad (16)$$

である。但し  $K(K_x, K_y, z)$  は未定係数で

$$K_x = \sqrt{\frac{\omega^2}{C^2} - K_x^2 - K_y^2} \quad (17)$$

である。

地表 ( $z=0$ ) での境界条件より

$$P(K_x, K_y, 0, \omega) = K(K_x, K_y, \omega) \quad (18)$$

となる。この事は、地表での音圧が与えられれば、3重フーリエ領域での地下の各点の音圧は

$$P(K_x, K_y, z, \omega) = P(K_x, K_y, 0, \omega) e^{\pm j K_x z} \quad (19)$$

で与えられる事を示している。この式から我々は地表の音圧分布から地下の音圧分布を外挿する事ができる。音圧の高い部分は反射の強い部分であるから、外

挿後の記録はそのまま地下構造を代表するものと見なせる。

もっとも筆者の導いたのは最も簡単な波動方程式の解法であり、他にも差分方程式として解く方法や、積分形解法等種々の方法がある。(19)式で注目すべき事は、ここでもデコンポリューションの概念が現われる事である。コンポリューション演算は周波数領域では積として表現されるが、(19)式もまた、周波数領域での積となっている。この事は地下の音圧分布を求める外挿演算は時間・空間領域でのデコンポリューションに外ならぬ事が判る。

屈曲屈はさておき、マイグレーション処理の一例を図-15に示す。処理前と処理後の差異は歴然である。

#### 4.2 重力探査データ処理法

重力計によって計測された生の重力値から重力図という重力の等高線図を作成するまでの処理フローを図-16に示す。

##### 4.2.1 地形補正

観測点付近の地形の凹凸に対して、その重力値への影響を補正するものである。観測点が平坦な所であればその必要はない。

##### 4.2.2 錆度補正

観測値から3.2で述べた国際標準重力の式により、標準重力値を差し引く操作である。

##### 4.2.3 高度補正

観測点と地球の平均海面との高度差を補正するものである。高度差(標高)を  $H$  とすると、平均海面になおした観測値は、元の観測値に  $0.3086H$  ミリガルだけ加えたものとなる。

##### 4.2.4 ブーゲー補正

観測点と平均海面との間に存在する物質の重力値に対する影響を取り除く操作である。標高を  $H$  としてその間に存在する物質の密度を  $\rho$  とすると、元の観測値より  $0.0419\rho H$  ミリガル引いた値が補正された重力値となる。

##### 4.2.5 等重力線図作成

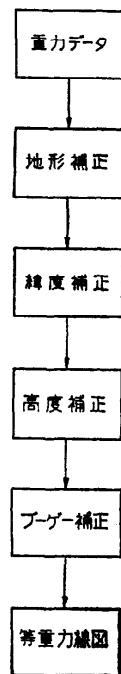
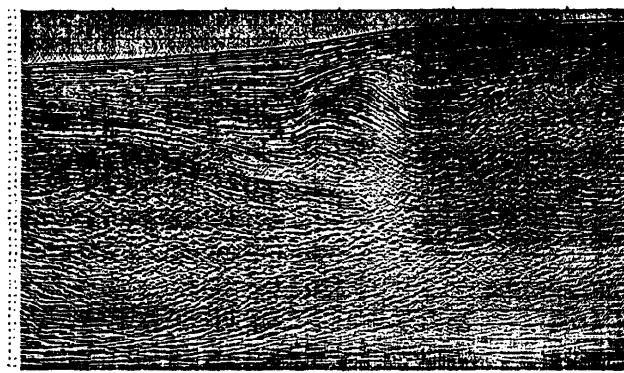


図-16 重力データ処理のフロー

計算機による自動作図プログラムが用いられている。通常この等高線図作成プログラムはグリッド化されたデータの入力を必要としている。そこで、作図に先立ち、不等間隔で計測された記録を等間隔グリッドに内挿するような処理が必要となる。この方法も種々提案されているが、 $x-y$  座標の多項式を用いて特定グリッド点周辺の値に対し、傾向面を重み付き最小自乗法で求め内挿する方法が一般に用いられている。

重力データの処理としては、この辺で終了する事が多いが、更に空間的二次元フィルターを用いて高重力または低重力の傾向を強調させる処理も行われる。また、4.1.8で述べたポテンシャルの考え方から地下の密度分布を直接求める方法もある。略述すると、重力ポテンシャル（我々の観測する重力値は重力ポテンシャルのZ方向成分である）は次のポアソン方程式を満足する。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -4\pi G\sigma \quad (20)$$

$\phi$ : 重力ポテンシャル

$G$ : 引力定数

$\sigma$ : 密度

この式も波動方程式と同様の手順で解く事ができる。但し我々の求めたいのは、地中での重力ポテンシャルの分布ではなく、密度 $\sigma$ の分布である。これも地表での境界条件（地表の密度分布は既知）から導く事ができる。ここで、再び空間でのデコンボリューションの概念が出てくる事に注目したい。一般にポテンシャルデータの内挿または外挿問題は空間でのデコンボリューションとして統一的に扱われる<sup>2)</sup>。

先に述べた自然現象は総てコンボリューションであるという格言が生き生きとしてくる次第である。

#### 4.3 磁気探査データ処理法

磁気探査データの処理フローを図-17に示す。以下順に説明する。

##### 4.3.1 日変化補正

地磁気は時間によりその強さが変化する。そこで、地上に基準観測点を設置し、そこでの磁気変動分を差し引く事により補正を行う。

##### 4.3.2 交点補正

位置測量等の誤差により、同一点を2度計ってもその値が一致しない事がある。そのような時に誤差を分配するような補正を行う。

##### 4.3.3 基準磁界補正

観測値より国際標準磁気の値を差し引く補正である。

##### 4.3.4 等磁気線図作成

方法は重力の場合とまったく同様である。磁気の場合も磁気ポテンシャルとして重力と同様のポアソン方程式で表現されるが、重力と異なるのは、地磁気そのものは偏角と伏角をもったベクトル量であるという事である。この場合、重力における密度に対応するものとして磁気モーメント密度、重力ポテンシャルに対応するものとして擬重力ポテンシャルという概念を導入すると統一的に扱う事ができる。

## 5. 解釈法

理論的にはかなり美しく整理されたデータ処理法に比較して解釈法は依然として密室での作業である。自然現象は我々の単純化した数学モデルを上回って複雑な様相を呈している。各種のデータから総合的に地質構造の判定を行うという作業は、最も計算機の苦手とするパターン認識の分野である。

現代の探鉱データ解釈法の一つの方向としては、グラフィックディスプレイを用いた会話形式の解釈法の採用がある。これはリモートセンシングの映像処理技術とも共通に用いられる技術である。これは、最終的なパターンの判断は人間が行い、計算機は高速な数値処理能力でこれを補佐するという手法である。効率や精度などから考えて、将来的にも完全自動解釈を行い地質構造や石油鉱床そのものを直接求めて来るようなコンピュータプログラムの登場は期待薄である。

もう一つの解釈法の方向として、シミュレーションがある。これは計算機の得意とする分野で、前述のパターン認識の手法と同様に会話的にシミュレーションが行える端末装置を用いる事により、解釈の能率を飛躍的に向上する事が出来る。一例として重力・磁気・反射法地震探鉱の記録を、与えられた地下構造の幾何的なモデルから合成値として求め、実際の観測値と比較して構造解釈を行った例を図-18に示す。このように、自然現象の解析には2通りの方法があり、一つは、観測値から求める値を抽出しようという方法であり、これは線形システム理論（または、もっと拡張した主旨でのコンボリューション演算と、その逆演算）

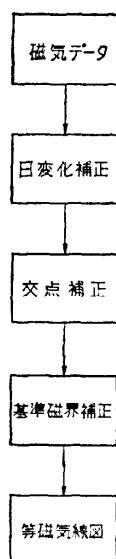


図-17 磁気データの処理フロー

で統一的に扱う事ができる。これを我々は直接法またはインバースモデリングと呼んでいる。そしてもう一つは、シミュレーションによる方法で、これを我々は間接法またはフォワードモデリングと呼んでいる。

現在のところ、如何なる解釈問題においても、この二つのカテゴリーから外れた手法は存在しないものと思われる。筆者は石油探鉱以外の分野における計測および解釈の問題については不勉強であるが、必ずこのカテゴリーのうちいずれかの手法が用いられているものと思う。そして、直接法と間接法は併せて用いる事により更に解析全体の精度を向上させる事ができる。

## 6. 将来技術

石油探査のために開発された技術は今後他分野にその応用を見い出していくものと思われる。その中には医学分野、工学分野での非X線透視法、石油以外の資源探査、土木工学方面への応用などがあげられる。また、今後の石油探鉱が更に複雑な地質構造を目指して行われるため、それに対応した三次元的探査法の開発などが行われようとしている。一つにはホログラフィーの応用、波動方程式の全面採用による処理法の開発などが考えられる。安価で大容量の計算機の普及がこの10年間に石油探鉱技術を飛躍的に進歩させたが、今後10年間にそれ以上の変革が行われるかも知れない。筆者がそう考える根拠には、世界的に見てこの石油探鉱技術分野に投入されている人的資源の豊富さにある。探鉱技術そのものが、まだ成長段階にあると言えよう。

## 7. おわりに

与えられた紙面を多少オーバーして、手前味噌的解説となってしまったが、とりわけ我が国において馴染の少ない石油の探鉱開発に関する技術について、多少なりとも一般の御理解を得たいという筆者の願望からであった。資源探査技術に対する一般的の御理解が「山師」的なものの見方から、一つの総合的な自然現象の計測処理技術であるというように再認識していただければ本稿の目的は達成されたと思う。

最後に紹介の場を与えて下さった情報処理学会各位

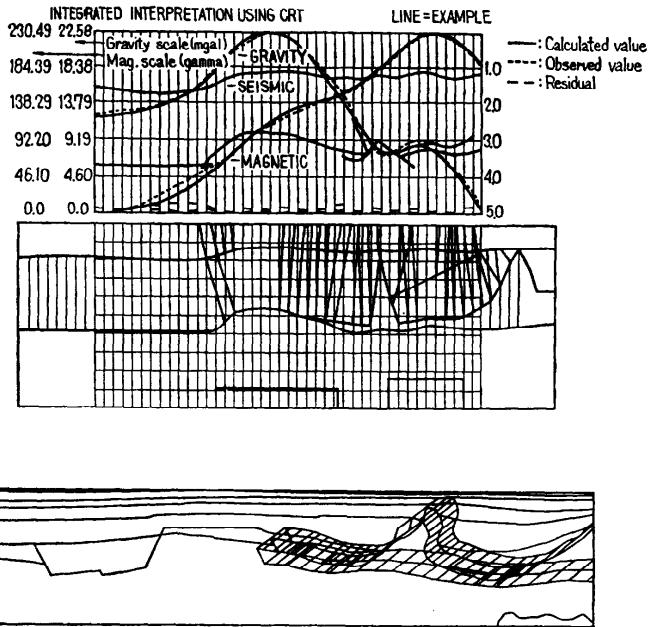


図-18 幾何的モデルによる地下構造シミュレーション  
図上段は観測値の曲線とモデルから求めた曲線、中段は幾何的に近似した地下構造の断面、下段は最終的に解釈された地下構造を示す  
に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 石油鉱業技術講座(基礎編) 石油公団・石油開発技術センター編 (1973).
- 2) 物理探鉱10周年特別記念号, 物理探鉱技術協会編 (1958).
- 3) 石油鉱業の技術講座, 石油公団・石油開発技術センター編 (1976).
- 4) Wiener, N.: The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, MIT press (1949).
- 5) Robinson, E. A.: Predictive Decomposition of Time-series with Applications to Seismic Exploration, Ph. D. Thesis, MIT, Cambr, Mass (1954).
- 6) Berkhout, A. J. et al.: Migration in Terms of Spatial Deconvolution, Presented at 40th meeting of E. A. E. G., Dublin (1978).
- 7) 加藤元彦: 重力・磁力分布の解析法の基礎, 物理探鉱協会誌連載講座 Vol. 30, No. 1—Vol. 31, No. 2 (1978).
- 8) Sahara, K.: Integrated Geophysical Models Using Interactive Computer Graphics, Report of Technology Research Center, J. N. O. C. No. 5 (1977).

(昭和54年6月7日受付)