

坑井間散乱重合法による 坑井間反射面イメージング能力についての検証

松島 潤*・六川 修一**・横田 俊之*³
宮崎 光旗*⁴・加藤 俣史**

Evaluation of the ability of diffraction stacking method for reflector imaging in a cross-well seismic survey

Jun MATSUSHIMA*, Shuichi ROKUGAWA**, Toshiyuki YOKOTA*³,
Teruki MIYAZAKI*⁴ and Yoshibumi KATO**

ABSTRACT

In this paper, we describe the comparison of the ability to image a flat reflector by applying CDP stacking method and diffraction stacking method in a crosswell geometry. We studied the S/N ratio of reflection images by numerical experiments which especially considered the effect of stacking aperture, defined as an angle range of collecting seismic traces. In this case, random or coherent noises were added to crosswell reflection numerical data. Our numerical experiments revealed that the stacking aperture is an important factor to obtain high S/N ratio in case of using a finite width of frequency of wave field, and induced the following results.

(1) Diffraction stacking generally has the ability to produce seismic reflection image with higher S/N ratio than crosswell CDP stacking. This can be explained by Huygens' principle.

(2) Optimum stacking aperture range which gives the highest S/N ratio exists. This can be explained by a fresnel zone.

Key words: diffraction stacking, reflector imageing, S/N ratio

1998年4月2日原稿受付; 1998年8月28日受理
物理探査学会第97, 98回学術講演会にて一部を発表

* 東京大学工学部

〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16

** 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*³ 石油公団石油開発技術センター

〒261-0025 千葉県千葉市美浜区浜田1-2-2

*⁴ 地質調査所

〒305-0046 茨城県つくば市東1-1-3

Manuscript received April 2, 1998; Accepted August 28, 1998

A part of this paper was presented at the 97th, 1997 and 98th SEGJ Conference, 1998.

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo
2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

** Division of Engineering, Graduate School, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

*³ Japan National Oil Corporation, Technology Research Center

1-2-2, Hamada, Mihamaku, Chiba, Chiba, 261-0025, Japan

*⁴ Geological Survey of Japan

1-1-3, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-0046, Japan

1. はじめに

坑井間の幾何的配置において取得される地震探査記録に対するデータ処理法としては、走時トモグラフィ技術が実用化段階の域に達しており、土木分野、石油の生産段階における EOR モニタリング、地熱貯留層断裂系評価、あるいは活断層調査などの各分野に適用されている。走時トモグラフィ技術による解析結果は坑井間の速度分布を与えるため、岩相の変化を把握するのに有効であるが、速度分布のなめらかに変化する長波長成分を反映するため、速度場の不連続部分（例えば、断層、亀裂、岩相の尖滅部など）をイメージングするのは不向きである。

この走時トモグラフィ技術の欠点を補うために、初動以降の後続波（いわゆるアフターフェイズ）の利用によるデータ処理手法が研究されてきている。その例として回折トモグラフィ、フルウェーブトモグラフィ及び本論文で扱う坑井間反射法が挙げられる。回折トモグラフィとフルウェーブトモグラフィは波線論では扱うことのできない散乱波をも利用することによって、走時トモグラフィを超える分解能を実現することを目指している（土家, 1997）。しかしながら、回折トモグラフィにおいては実フィールドから一次散乱波の抽出が困難であること、またフルウェーブトモグラフィにおいては震源パラメータの決定の困難さ、および非線型性の強い問題であるため、初期モデルの影響を受けやすい欠点がある。また両手法を実フィールドデータへ適用した例は極めて少なく、回折トモグラフィでは ROKUGAWA *et al.* (1993) や HARRIS and WANG (1996)、フルウェーブトモグラフィでは SONG *et al.* (1995)、ZHOU and SCHUSTER (1995) および ZHOU and SCHUSTER (1997) であり、今後の研究開発が期待される。

一方、坑井間反射法においてはその手法が考案された初期の段階より実フィールドデータへの適用が行われ (BEYDOUN *et al.*, 1989), HARRIS *et al.* (1992), VAN SCHAACK *et al.* (1992), RECTOR *et al.* (1992), LAZARATOS *et al.* (1992) の一連の論文では坑井間反射法を石油フィールドに適用し、陸上反射法地震探査に比べて極めて高分解能な重合記録を作成した。速度検層記録との対比結果も極めて良好で坑井間反射法の適用可能性を実証した。このように坑井間反射法の適用が成功を収めている背景には坑井間反射法のデータ処理技術が従来の反射法地震探査や VSP 探査のそれらと類似している点が挙げられる。

坑井間反射法のデータ処理法を分類すると以下の 2

つに大きく分けられ、両手法とも基本的に先験的な速度分布（例えば走時トモグラフィ技術により得られる速度分布）を用いる。一つは VSP-CDP マッピング (LAZARATOS *et al.*, 1992) であり、もう一方は重合前マイグレーション (HU *et al.*, 1988; ZHU and McMECHAN, 1988; BEYDOUN *et al.*, 1989; SAM and LARRY, 1992; ROWBOTHAM and GOULTY, 1993; 芦田・佐々, 1993; 今吉ほか, 1994; LI and STEWART, 1996) である。しかし先験的な速度モデルを利用するこれらの手法は以下に述べるようにいくつかの問題点がある。

- ・速度場推定の問題。走時トモグラフィにより得られた速度モデルを利用しても必ずしも反射波イメージングのフォーカシングが合わない (LAZARATOS *et al.*, 1993)。

- ・走時トモグラフィによる速度モデルが得られない坑底以深では、反射面イメージングが得られない、またはイメージング精度が低下する。

これらのデータ処理に対して、筆者等は坑井間の幾何的配置において CDP 重合法ならびに地層を散乱点の集合と仮定する散乱重合法を適用する研究を行ってきた (六川・松島, 1995; MATSUSHIMA *et al.*, 1997)。これらの手法の特徴は既存の速度場情報を必要とせず、重合速度解析を行うことにより、重合効果の高い速度場を各点において決定することができる点である。以下、それぞれ坑井間 CDP 重合法および坑井間散乱重合法と呼ぶ。

坑井間 CDP 重合法の基本的な考え方は、以下に述べるように坑井間の幾何的配置特有の問題を考慮して、地層のある点で鏡面反射するトレースを選び出し重合処理を行う。すなわち坑井間の幾何的配置においては地表反射法地震探査のように全観測記録を CDP アンサンブルに分割して各々のアンサンブルごとに処理を行うことは不可能であるため、各点において CDP アンサンブルを構成するトレースを検索し、それぞれの点においては別々のアンサンブルを用いて処理を行う。

また坑井間散乱重合法の基本的な考え方は重合前マイグレーションの考えに相当する。

これら坑井間 CDP 重合法および坑井間散乱重合法の実フィールドデータへの適用例として大分県の湯坪地熱地帯において新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) によって取得された坑井間地震記録を用いて坑井間 CDP 重合記録ならびに坑井間散乱重合記録を作成した (MATSUSHIMA *et al.*, 1997)。その結果、坑井間散乱重合法適用により良好と思われる断面を得た。地表からの反射法地震探査ならびに走時トモグラフィの結果 (YOKOTA *et al.*, 1995) からは湯坪地熱フィールドは、ほぼ成層構造を成していることが推定されている。坑井

間 CDP 重合断面では反射面をイメージできなかったが、坑井間散乱重合断面においてはいくつかの水平反射面らしきものが確認された。

重合断面作成においては、重合速度解析パネルにおける重合速度ピックの際に主観的になってしまう等の諸問題も残されている。このため両者の重合断面の細部を議論するのではなく、上記の結果からいくつかの“普遍性”を導き出すことを考える。

坑井間 CDP 重合法適用に比較して坑井間散乱重合法適用により良好な重合断面が得られた理由として以下の項目が考えられる。

(1) 坑井間の幾何的配置において CDP 重合法を適用する場合は、坑井間の中央から離れるに従い重合数が減少してしまうため、鏡面反射波のみを解析対象とする坑井間 CDP 重合法適用は不利である。

(2) 坑井間地震探査の特徴は短波長を使用するため、高分解能の重合断面が得られる利点を有すると一般的には考えられているが、短波長ゆえの問題点も生ずる可能

性がある。すなわち長波長では無視できた反射面の凹凸の影響が、短波長では無視できなくなる。凹凸を有する反射面に波動が入射した場合、励起される鏡面反射波は弱められ逆に散乱波が卓越する。このような状況では鏡面反射波を解析対象とする CDP 重合法は不利である。

(3) (2)で述べた反射面ラフネスの影響の無いフラットな反射面に対しても、坑井間散乱重合法自体が坑井間 CDP 重合法に比べて反射面イメージ能力を有する。

本論では、上記 3 項目の内、(3)の項目に関して検討を行った。水平でフラットな反射面をイメージ対象として、坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法を適用し、両手法の反射面イメージ能力の比較を行う。

2. 坑井間 CDP 重合法ならびに坑井間散乱重合法のデータ処理概要

坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法に関する具体的なデータ処理手順は MATSUSHIMA *et al.* (1997) に記述しているので、ここでは簡単にデータ処理の概要を説明する。

いま一つの水平反射面が存在し、坑井間の幾何的配置を利用して坑井間中央における重合記録を作成する状況を考える。Fig. 1(a)は一つの発振点から生じた波線が水平反射面で鏡面反射し、複数の受振点でそれらを観測している様子を示している。図中の太線波線は坑井間中央における鏡面反射波を表している。この場合の共通発振点記録を Fig. 2 に示す。Fig. 2 において坑井間中央における鏡面反射波に相当するトレースを矢印で示している。この場合における CDP 重合法は、複数の共通発

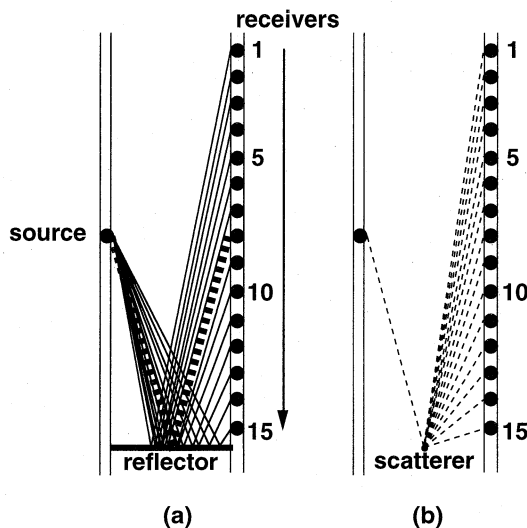


Fig. 1 (a) Ray paths generated from one source spaced on the left-hand side of the model and reflected by a flat reflector and received by 15 receivers spaced in a vertical line down the right-hand side. The dotted line represents reflection at the center of wells, (b) Same single-interface numerical model as shown in (a). Ray paths generated from one source spaced on the left-hand side of the model and reflected by one scatterer and received by 15 receivers spaced in a vertical line down the right-hand side.

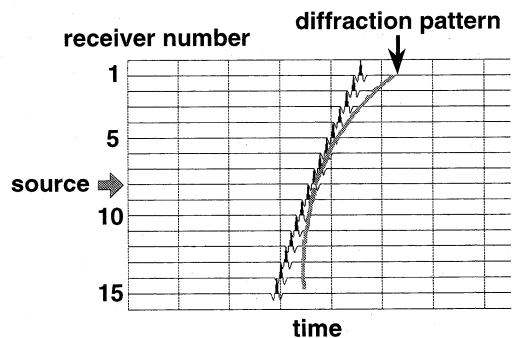


Fig. 2 The reflected wavefield gather calculated for the numerical model shown in Fig. 1 (source position is indicated by the arrow). Diffraction pattern is shown with gray line. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method.

振点記録から着目する地点における鏡面反射波を含むトレースを抽出し(いわゆる CDP アンサンブル), この CDP アンサンブルに対して, 速度解析ならびに CDP 重合を行う。

一方, Fig. 1(b)は一つの発振点から生じた波線が, 坑井間中央に存在する点で散乱し, 複数の受振点でそれらを観測している様子を示している。Fig. 2 に示した共通発振点記録上において, これら散乱波パターンを模式的に灰色線で示してある。散乱重合法はこの灰色線に沿って記録の振幅を加算する。Fig. 2 において散乱波パターンに沿って振幅を加算することは, 信号(この場合は鏡面反射波)以外の振幅も加算してしまうため, 重合効果の観点からは一見不利に思える。なお不利の度合いは周波数に依存する。Fig. 2 に用いたリック-ワグナー波形の中心周波数を 100 Hz, 30 Hz, 10 Hz と低くしていった場合の様子を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より周波数を低くしていくに従い, 波形の時間軸上における冗長性が大きく

なり, 散乱波パターンに沿って加算した際の重合効果が向上することがわかる。この状況はいわば, 波形の冗長性により, みかけ上信号の加算効果が向上することを意味する。

散乱重合法を適用する際の応用として, 重合するトレースを選択することができる。この考え方はマイグレーション処理におけるマイグレーションアパチャーと等価な考え方である。Fig. 4 に示すように網掛け部分のトレースは, 鏡面反射波を中心として任意の角度範囲に含まれるトレースで, これらのトレースを選択的に利用して重合記録を作成できる。このような選択による散乱重合を行うことにより CDP 重合法と散乱重合法との両者の間のギャップを柔軟に埋める処理が行える。このように考えると, Fig. 4 における θ (以下, 重合範囲 θ と呼ぶ) の値が小さいときは CDP 重合寄りの処理になり, 重合範囲 θ の値を大きくしていくと散乱重合寄りの処理になると理解することができる。言い換えると, CDP 重合法は重合前マイグレーションの範疇の特別な場合(重合範囲 θ が無限小)に相当すると理解できる。

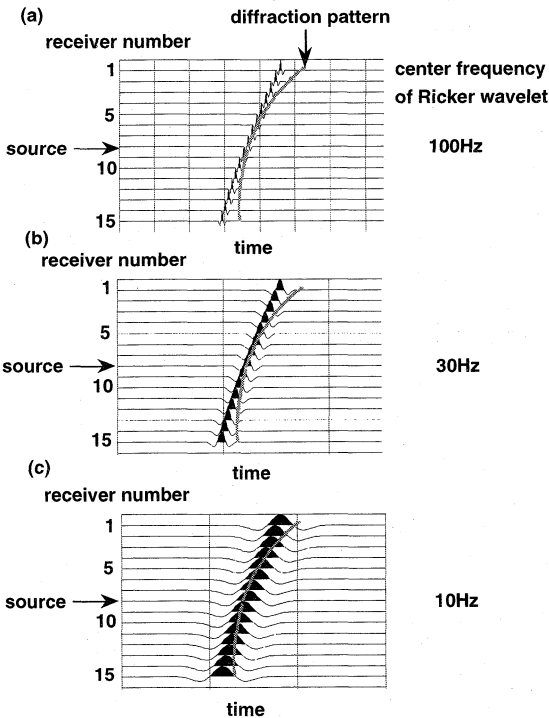


Fig. 3 Three types of the reflected wavefield gathers calculated for the numerical model shown in Fig. 1 (source positions are indicated by the arrows), for various central frequencies, (a) 100 Hz, (b) 30 Hz, (c) 10 Hz. Diffraction pattern is shown with gray line. Reflected waves were produced in the same way as the case of Fig. 2.

3. 坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法における S/N 比の比較

ここでは坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法とでどちらが S/N 比の高い重合記録を作成できるかを評価する。信号としては水平反射面で励起される鏡面反射波を考え, ノイズとしてはランダムノイズとコヒーレントノイズ (P-S 変換反射波) を考える。

3.1 ランダムノイズに対する応答

Fig. 5 に示すように, 均質速度場において一つの水平反射面を有する数値モデルを対象として, 坑井間の幾何的配置を利用した CDP 重合法ならびに散乱重合法を適用する。

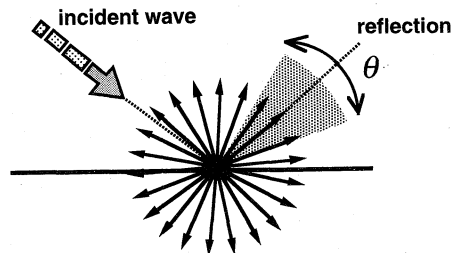


Fig. 4 Diagram illustrating the directivity in case of diffraction stacking. The ray paths going through shadow zone are stacked.

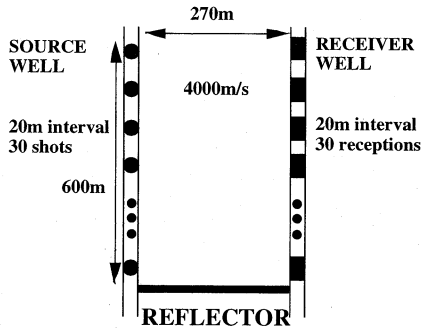


Fig. 5 Single-interface numerical model for crosswell seismic survey and the specifications of data acquisition. Reflector is placed at a depth of 600 m in a medium with constant velocity of 4000 m/s. The separation of boreholes is 270 m. Thirty sources and thirty receivers are spaced 20 m apart. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method.

数値記録は以下に述べるように反射波走時にリッカー波形をコンボリューションする方法により作成した。発震点、反射点、受振点の幾何的配置で決定される波線の距離を速度で除算することにより反射波走時を求める。その走時に相当する箇所インパルスを立て、最後にリッカー波形をコンボリューションする。なおこのときの波形の振幅は波線によらず一定 (=100) とする。リッカー波形の中心周波数は 50 Hz, 100 Hz および 200 Hz の 3 種類用いた。

Fig. 6 に 3 種類の周波数の記録に対する坑井間中央に

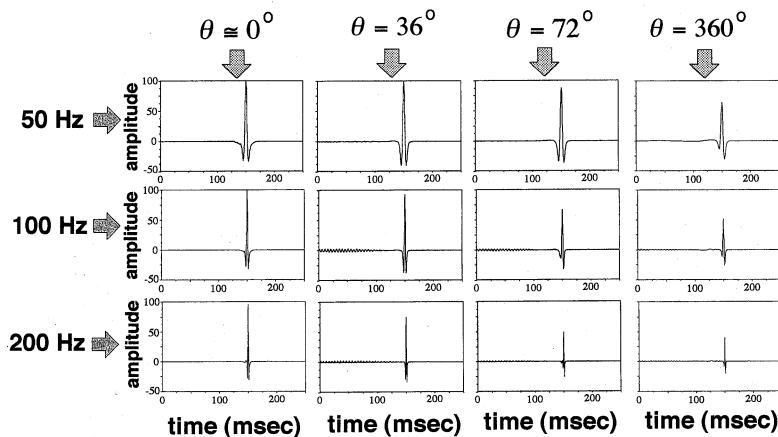


Fig. 6 Results of stacked records at the center of wells, generated only by using the reflections, for various stack coverages θ (0° , 36° , 72° , 360°) and central frequencies (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz). No random noises were added to each prestack trace.

における CDP 重合記録, 散乱重合記録および両者の間 (重合範囲 θ が 36° および 72° の場合) の重合記録を示す。周波数を一定とすれば, CDP 重合から散乱重合するに従い (これは重合範囲 θ を小さい値から大きな値に変化させることに相当する), 重合記録の振幅は減少することがわかる。これは前述したように, 散乱重合寄りの処理になるに従って, 信号 (この場合は鏡面反射波) 以外の振幅も加算してしまうためである。また周波数が高くなるにつれて散乱重合寄りの処理で得られた記録の振幅が小さくなっていくこともわかる。これは前述したように高周波数に比べて低周波数の波形は時間軸上での冗長性が大きいから, 加算効果が大きいからである。ただここで注意が必要なのは, 重合範囲を大きく設定するにしたがって, 重合振幅は小さくなるが, この場合, 信号しか存在しないので S/N 比はどの重合範囲においても無限大であることである。よって以下のようにノイズを定義しない限り重合範囲の優劣をつけることはできない。

ここで, 重合前の記録に対して反射波形と同振幅, 同中心周波数をもつが, 位相がランダムな波形をランダムノイズとして各トレースに 100 個加えた記録を作成した。このようなランダムノイズを加える理由を以下に述べる。Fig. 6 に示したように重合範囲を大きく設定するにしがたい, 重合記録の振幅が小さくなっていくことがわかる。しかし, Fig. 6 に示した場合は前述したように信号のみが含まれているので, S/N 比の観点で考えれば Fig. 6 に示したすべての重合記録の S/N 比は無限大で優劣をつけることはできない。そこで上記のランダム

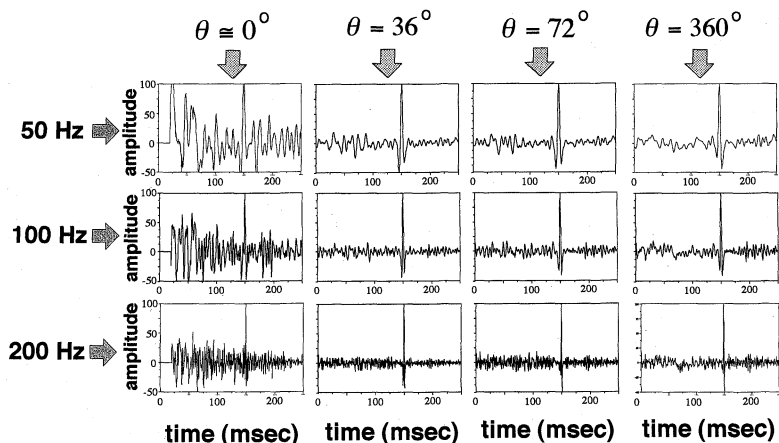


Fig. 7 Results of stacked records at the center of wells, generated by using both the reflections and random noises, for various stack coverages θ (0° , 36° , 72° , 360°) and central frequencies (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz). One hundred random noises were added to each prestack trace.

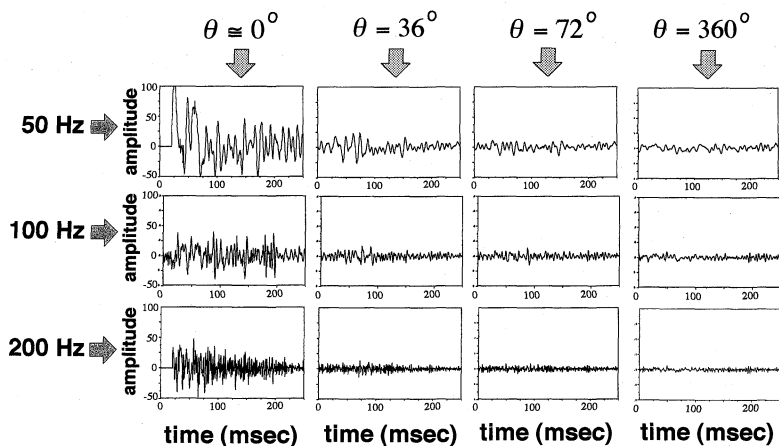


Fig. 8 Results of stacked records at the center of wells, generated only by using the random noises, for various stack coverages θ (0° , 36° , 72° , 360°) and central frequencies (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz). One hundred random noises were added to each prestack trace.

ノイズを加えて S/N 比の議論ができる状況にするためである。

さてランダムノイズを含む記録に対する CDP 重合記録, 散乱重合記録および両者の間 (重合範囲 θ が 36° および 72° の場合) の重合記録を Fig. 7 に示す。なお Fig. 7 の記録において最大振幅ピークを揃えて表示している。Fig. 7 より, CDP 重合記録に比べて散乱重合寄りの記録の方が S/N 比が高い重合記録が得られていることがわかる。

この理由は以下の様を考えることができる。重合記録の S/N 比は信号強調効果とノイズ抑制効果の両方の効

果のバランスで決定される。信号強調に関しては CDP 重合寄りの処理の方が散乱重合寄りの処理より優れるが (Fig. 6), 逆にランダムノイズ抑制効果は散乱重合寄りの方が優れていることである (Fig. 8)。Fig. 8 は重合前の記録に対して前述のランダムノイズのみを各トレースに加えた記録に対する CDP 重合記録, 散乱重合記録および両者の間 (重合範囲 θ が 36° および 72° の場合) の重合記録である。Fig. 8 より散乱重合寄りになるにつれ, ランダムノイズが抑制されていく様子がわかる。S/N 比は信号強調効果とノイズ抑制効果の両効果により決定されるため, CDP 重合と散乱重合の両方

て、これらの効果がトレードオフの関係になっている。次節ではこのトレードオフの関係を定量的に評価する。

3.2 ランダムノイズに対して重合範囲 θ を変化した場合の S/N 比の定量的評価

前節ではいくつかの重合範囲を設定して CDP 重合記録に比べて散乱重合寄りの記録の方が S/N 比が高い重合記録が得られることを示した。ここでは重合範囲 θ を細かく変化した場合の S/N 比について定量的な議論をする。この目的のために以下の数値実験を行った。

Fig. 5 に示した、均質速度場において一つの水平反射面を有する数値モデルをここでも使用する。水平反射面に対する反射波数値記録を 3 種類の中心周波数 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) を有するリッカー波形を用いたコンポリューション法により作成した (30 発振 \times 30 受振 = 900 トレース)。それぞれの中心周波数の記録に対する坑井間中央における重合記録を重合範囲 θ を 0.18 度から 150 度まで 2 度ずつ変化させて作成する。なお重合範囲を 150 度までに制限しているのはここで使用している数値モデル及び観測配置では、この値以上に重合範囲を設定しても実際の重合範囲は 150 度を越えないためである。それぞれの中心周波数の記録に対してこのように作成された重合記録の最大振幅をプロットした結果を Fig. 9 に示す。なお前述と同様に重合記録の振幅は重合数で割って正規化してある。Fig. 9 のグラフは重合範囲 θ を変数とする重合後の信号 (重合波形の最大振幅) の挙動である。Fig. 9 において重合範囲 θ が増加するにつれて、縦軸の重合波形の最大振幅は減少する様子がわかる。また周波数が高くなるほど、減少率が大きいことがわかる。

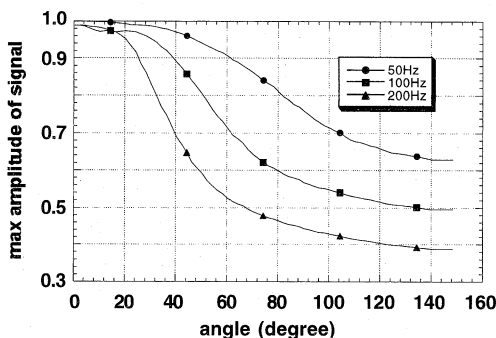


Fig. 9 The variation of max amplitude of signal with angle as a function of frequency. The curve with filled circle is for central frequency of 50 Hz. The curve with filled square is for 100 Hz. The curve with filled triangle is for 200 Hz.

次に重合範囲 θ を変数とする重合後のランダムノイズの挙動を調べるために以下のデータを作成した。Fig. 5 に示した数値モデルにおいて、前述のように重合前の記録に対して反射波形と同振幅、同中心周波数をもつが、位相がランダムな波形をランダムノイズとして各トレースに 100 個加えた記録を作成した (30 発振 \times 30 受振 = 900 トレース)。なおリッカー波形の中心周波数には 3 種類 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) をそれぞれ用いた。それぞれの中心周波数の記録に対する坑井間中央における重合記録を重合範囲 θ を前述と同様に変化させて作成した。なお重合記録の振幅は重合数で割って正規化してある。それぞれの重合範囲に対して、以下の (1) 式に従って重合記録の RMS 振幅を計算し、その値をプロットした結果を Fig. 10 に示す。ここで N は重合記録のデータ数を表す。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \right)^2} \quad (1)$$

Fig. 10 のグラフは重合範囲 θ を変数とする重合後のランダムノイズの挙動である。Fig. 10 より重合範囲 θ が大きくなる (すなわち重合数が増加する) につれて RMS 振幅が減少する、すなわちノイズ抑制効果が大きくなっていくことがわかる。また周波数が高いほどノイズ抑制効果が大きくなることがわかる。

Fig. 9 と Fig. 10 のグラフより 3 種類 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) の中心周波数に対して以下の (2) 式により定義された S/N 比を計算し、それらを重合範囲 θ を変数としてプロットした結果を Fig. 11 に示す。(2) 式にお

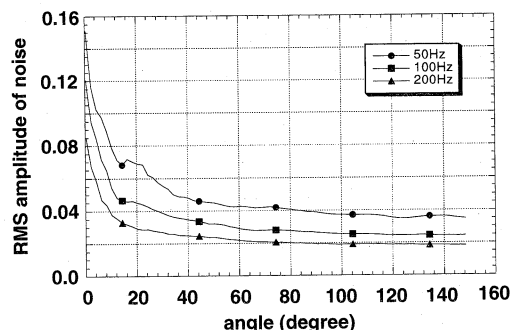


Fig. 10 The variation of RMS amplitude of noise with angle as a function of frequency in case of random noise. The curve with filled circle is for central frequency of 50 Hz. The curve with filled square is for 100 Hz. The curve with filled triangle is for 200 Hz.

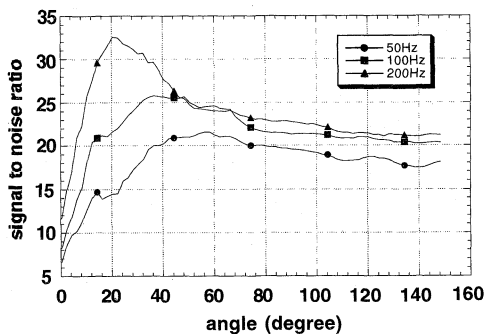


Fig. 11 The variation of signal to noise ratio with angle as a function of frequency in case of random noise. The curve with filled circle is for central frequency of 50 Hz. The curve with filled square is for 100 Hz. The curve with filled triangle is for 200 Hz.

いて S_{MAX} は重合反射波形の最大振幅を表す。

$$S/N = \frac{S_{MAX}}{\sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \right)^2}} \quad (2)$$

Fig. 11において、どの中心周波数の場合においても重合範囲 θ が増加するにつれて S/N 比が向上し、ある重合範囲 θ でピークを迎えさらに θ が増加すると S/N 比が低下する様子がわかる。また3種類の中心周波数に対するプロット同士を比較すると、周波数が高くなるほど全体的に S/N 比が高くなり、さらに S/N 比のピークの位置が重合範囲 θ が小さくなる方向にシフトしていることがわかる。またどの周波数の場合においても CDP 重合 (θ がほぼ 0 度) より散乱重合 (この場合 θ が 150 度) の方が S/N 比が高いことがわかる。

3.3 コヒーレントノイズに対して重合範囲 θ を変化させた場合の S/N 比の定量的評価

前節では重合範囲 θ を変化させランダムノイズに対する S/N 比の定量的評価を行ったが、ここではコヒーレントノイズとして P-S 変換反射波を考え、前節と同様に重合範囲 θ を変化させた場合のコヒーレントノイズに対する S/N 比の定量的評価を行う。この目的のために以下の数値実験を行った。

Fig. 5 に示した、均質速度場において一つの水平反射面を有する数値モデルをここでも使用する。重合範囲 θ を変化させた場合の信号の変化に関する挙動は前節と同様である。

水平反射面に対する P-S 変換反射波数値記録を3種類の中心周波数 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) を有するリッカー波形を用いたコンボリューション法により作成した (30発振 \times 30受振 = 900トレース)。それぞれの中心周波数の記録に対して坑井間中央における重合記録を重合範囲 θ を 0.18 度から 150 度まで 2 度づつ変化させて作成する。参考までに3種類 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) の中心周波数の記録に対して4種類 (0.18 度, 36 度, 72 度, 150 度) の重合範囲を設定した場合の坑井間中央における重合記録を Fig. 12 に示す。このように作成された重合記録に対して (1) 式に従って RMS 振幅を計算し、プロットした結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 のグラフは重合範囲 θ を変数とする重合後のコヒーレントノイズの挙動である。Fig. 13 より重合範囲 θ が大きくなる (すなわち重合数が増加する) につれて、ノイズ抑制効果が大きくなっていくことがわかる。また周波数が高いほどノイズ抑制効果が大きくなることがわかる。

Fig. 9 と Fig. 13 のグラフから3種類 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) の中心周波数に対して (2) 式により定義さ

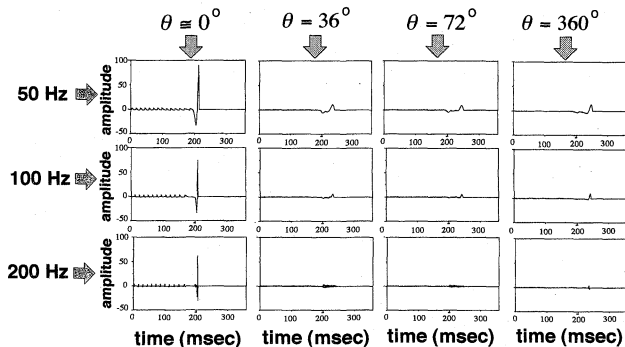


Fig. 12 Results of stacked records at the center of wells, generated only by using the coherent noises (P-S converted reflection), for various stack coverages θ (0°, 36°, 72°, 360°) and central frequencies (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz).

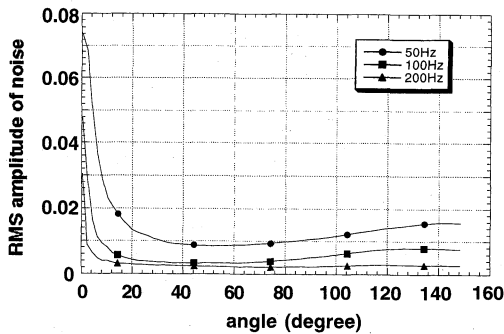


Fig. 13 The variation of RMS amplitude of noise with angle as a function of frequency in case of coherent noise. The curve with filled circle is for central frequency of 50 Hz. The curve with filled square is for 100 Hz. The curve with filled triangle is for 200 Hz.

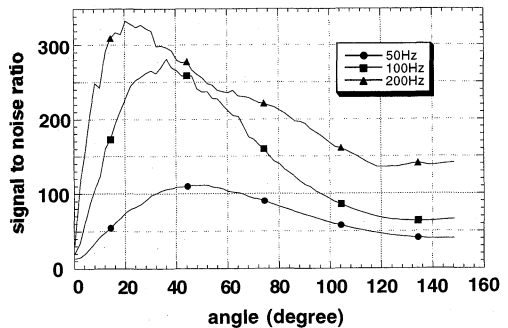


Fig. 14 The variation of signal to noise ratio with angle as a function of frequency in case of coherent noise. The curve with filled circle is for central frequency of 50 Hz. The curve with filled square is for 100 Hz. The curve with filled triangle is for 200 Hz.

れた S/N 比を計算し、それを重合範囲 θ を変数としてプロットした結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 において、3 種類 (50 Hz, 100 Hz, 200 Hz) の中心周波数に対するそれぞれのプロットに着目すると、重合範囲 θ が増加するにつれて S/N 比が向上し、ある重合範囲 θ のときに S/N 比がピークを迎えさらに θ が増加すると S/N 比が低下する様子がわかる。また、周波数が高くなるほど全体的に S/N 比が高くなり、さらに S/N 比のピーク的位置が重合範囲 θ が小さくなる方向にシフトしていることがわかる。またランダムノイズの場合と同様にどの周波数においても CDP 重合 (θ がほぼ 0 度) より散乱重合 (この場合 θ が 150 度) の方が S/N 比が高いことがわかる。

4. 考 察

4.1 インパルス波形を用いた場合の CDP 重合法と散乱重合法適用における S/N 比の考察

ここでは波形としてインパルス波形を用いた場合の S/N 比について考察する。Fig. 15 に示した、均質速度場において一つの水平反射面を有する数値モデルを使用する。Fig. 15 において発震および受振数をそれぞれ変数 X とし、坑井間の中央における重合記録を作成する場合を考える。よく知られているように CDP 重合の場合、 M 回の重合により S/N 比は \sqrt{M} 倍になる。この内訳はコヒーレントな信号を M 回加算すれば M 倍になるが、ランダムノイズを M 回重ねても \sqrt{M} 倍にしかならないのでその比が \sqrt{M} になるということである (石井, 1974)。

同様のことを散乱重合の場合について考える。いま発

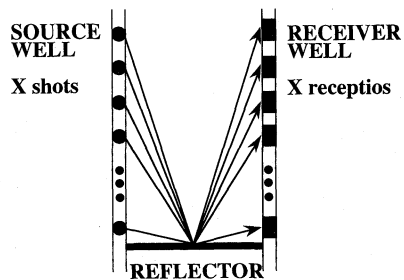


Fig. 15 Single-interface numerical model for crosswell seismic survey and the specifications of data acquisition. Reflector is placed at a depth in a medium with constant velocity. The number of source positions and receiving positions are X , respectively.

震および受振数をそれぞれ M とすると、重合数は M^2 となる。しかし信号は鏡面反射波なので M 回加算されるだけであるので信号は M 倍となる。一方、ランダムノイズは M^2 回重ねられるので M 倍になる。したがって S/N 比は 1 倍である。次に重合範囲 θ を変化させた場合を考える。重合範囲 θ を増加させると基本的に重合数が M から M^2 まで増加する。このとき重合数が M のときは CDP 重合であり、重合数が M^2 のときは散乱重合に相当する。いま重合数を N (M から M^2 までの整数) とする。信号は M 回加算されるので M 倍になる。一方ランダムノイズは N 回重ねられるので \sqrt{N} 倍になる。よって S/N 比は M/\sqrt{N} 倍である。

以上の S/N 比に関する評価を Fig. 15 の数値モデルを実際に使用して考える。発震および受振数に対応する変

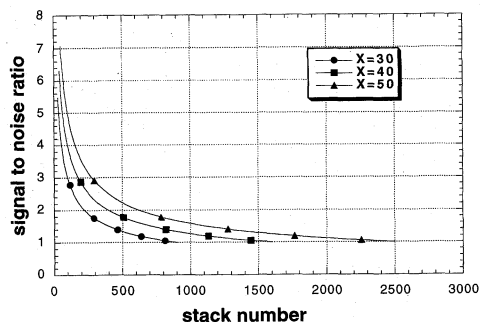


Fig. 16 The variation of signal to noise ratio with stack number as a function of X . The curve with filled circle is for X of 30. The curve with filled square is for X of 40. The curve with filled triangle is for X of 50.

数 X を 30, 40, 50 と変化させると、上述の M はそれぞれ 30, 40, 50 に相当する。そこで CDP 重合（重合数が M に相当）から散乱重合（重合数が M^2 に相当）まで変化させ、坑井間中央における重合記録を作成する場合を考える。そのときの S/N 比をプロットした結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 において M を一定にして考えると CDP 重合から散乱重合に移行するにつれて S/N 比が低下していくのがわかる。また M を 30, 40, 50 と変化させると、CDP 重合の場合は M が増加するにしたがって、 S/N 比が増加するが、散乱重合の場合は前述の評価にあるように M が増加しても S/N 比は増加しない。つまり散乱重合の場合はインパルス波形を使用すれば発震および受振数を増加しても S/N 比は一定であることを意味する。

しかしながら、上記の議論は波形がインパルスの場合に限られ、波形が冗長性を有する（有限周波数帯域を有する）場合においては例えば Fig. 11 あるいは Fig. 14 に示したように CDP 重合より散乱重合の方が S/N 比が向上した重合記録が得られる。この点に関して次節でさらに考察する。

4.2 坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法との反射面イメージング能力の比較

有限周波数を有するリッカー波形を用いた数値実験では、ランダムノイズおよびコヒーレントノイズに対する CDP 重合と散乱重合の応答を比較すると散乱重合の方が CDP 重合適用より S/N 比が高い重合記録が得られることが示された。ここではこの事実をもたらす本質的な原因について考察する。

いま、一つの反射面をイメージングすることを考える

と、この反射面に対して励起される鏡面反射波のみを解析対象とするのが CDP 重合法の考え方である。この考え方は水平反射面をイメージングする場合に広く一般的に受け入れられている考え方である。

一方、ホイヘンスの原理に基づけば、反射面は散乱点の集合であると考えることができる。すると反射面をイメージングする過程を以下のように考えることができる。反射面を散乱点の集合に分解し、それぞれの散乱点に対して独立に散乱重合法を適用し、得られた複数の散乱重合記録を最後に加算する。このようにして得られる散乱重合記録と、反射面をそのままの状態で作成される散乱重合記録とが等価であるならば、反射面を正確にイメージングする作業の根本は散乱点を正確にイメージングする作業と考えることができる。以上の事実を確かめるために、以下の数値実験を行った。

Fig. 17(a) に示すように、均質速度場において傾斜角 45 度を有する傾斜反射面を散乱重合法によりイメージングすることを考える。数値記録は前述のコンポリューションする方法により作成し、リッカー波形の中心周波数は 100 Hz を用いた。Fig. 17(a) のモデルに対して重合速度として 4000 m/s を用いて作成された散乱重合記録を Fig. 18(a) に示す。次に Fig. 17(a) の反射面を離散的な散乱点によってモデル化（散乱点の水平方向間隔 dx は 1 m）したものを、Fig. 17(b) に示す。Fig. 17(b) に示した散乱点の一つ一つ、4000 m/s の重合速度を用いて散乱重合記録を作成し（ここでは反射面を 810 個の散乱点で離散化しているのでそれぞれの散乱点に対する重合記録は 810 記録になる）、最後にこれらの散乱重合記録をすべて加算する。加算して得られた記録を Fig. 18(b) に示す。Fig. 18(a) と (b) を比較して、ほぼ同等な記録が得られ、上述の事実は確かめられた。

さて、ひとつの散乱点を正確にイメージングする作業を重合範囲とホイヘンスの原理への近似度とに関連して考察すると以下ようになる。

Fig. 19(a) に示すように波動の伝播はホイヘンスの原理に基づくので、イメージングの基本は Fig. 19(b) に示すようにホイヘンスの原理を時間軸を逆にした波動の逆伝播であると考えることができる。ここで Fig. 20(a) に示したような重合範囲を定義することは、Fig. 20(b) に示したように波動の逆伝播の際にホイヘンスの原理に対する近似度を制御することに相当する。すなわち重合範囲を 360 度に設定すれば、ホイヘンスの原理を満たすことになるが、重合範囲を小さい値に設定するに従い、ホイヘンスの原理に対する近似度が悪くなり、イメージング能力が低下すると考えることができる。このような考

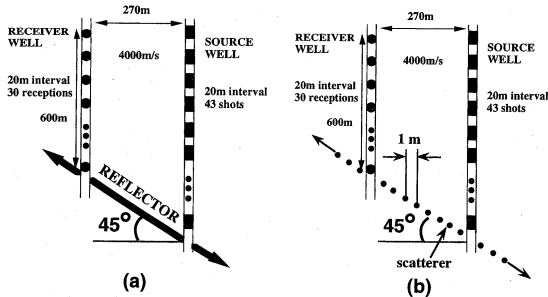


Fig. 17 (a) Dipping single-interface numerical model for crosswell seismic survey and the specifications of data acquisition. Dip angle of a reflector is 45 degrees. The separation of boreholes is 270 m. There are 43 source positions spaced 20 m apart in a vertical line down the right-hand side of the model (indicated by filled rectangles) and 30 receivers spaced 20 m apart on the left (indicated by filled circles). Reflected waves generated by one dipping reflector were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz. This model is called "continuous reflector model".
 (b) Discrete reflector model and the specifications of data acquisition. A set of scatterers is arranged in the dipping line (dip angle is 45 degrees) on a homogeneous background velocity of 4000 m/s. Both arrangements of sources and receivers are the same as (a). Diffracted waves generated by one scatterer were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

えに立てば、坑井間 CDP 重合法は坑井間散乱重合法に比べてホイヘンスの原理に対する近似度が悪いために反射面をイメージングする際の S/N 比が坑井間散乱重合法に比べて低下すると考えることができる。

4.3 S/N 比のピークを与える最適な重合範囲について

ランダムノイズおよびコヒーレントノイズに対する CDP 重合と散乱重合の応答を比較した結果、散乱重合の方が CDP 重合適用より S/N 比が高い重合記録が得られることがわかった。この理由については前節で考察した。しかし、Fig. 11 および Fig. 14 に示したように CDP 重合と散乱重合の間で S/N 比がピークを迎える重合範囲 θ が存在する。S/N 比のピークを与える重合範囲 θ を最適な重合範囲とすれば、このような最適な重合範囲を設定することは重要である。ここではこのような S/N 比のピークが存在する理由について考察する。

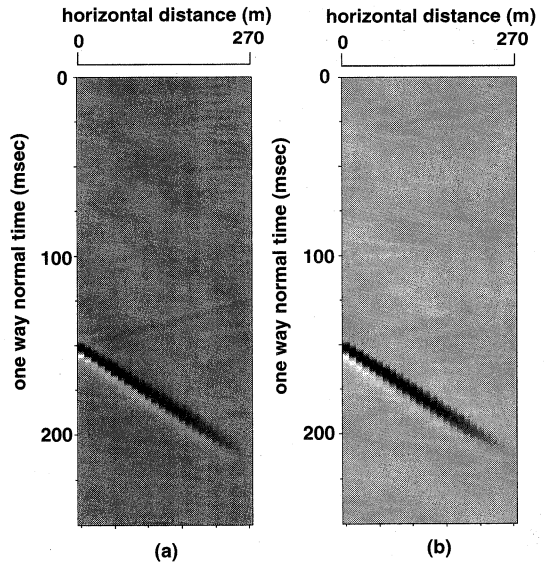


Fig. 18 Comparison of diffraction stacked records between continuous reflector model and discrete reflector model. A diffraction stacked record for discrete reflector model was generated in the method stated in the following. Each diffraction stacked record is made in each scatterer, and all is added in the end.

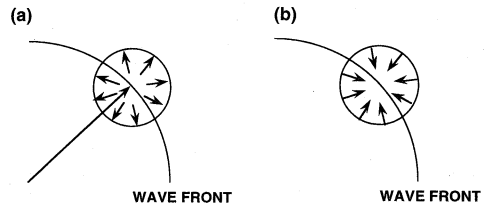


Fig. 19 (a) Huygens' principle. Every point on an advancing wavefront can be regarded as the source of a secondary wave. (b) Back propagation.

S/N 比のピークをもたらす最適な重合範囲の存在は以下に述べるようにフレネルゾーンの考え方で説明できる。Fig. 21(a) に示すように反射波を表現する場合、便宜的に波線で示すが、実際には Fig. 21(b) 及び(c) に示すように周波数に応じたフレネルゾーンが存在する。

信号強調効果の挙動を示した Fig. 9 において、重合範囲 θ の増加に伴って、あまり信号が変化しない領域が重合範囲が小さい値の箇所において存在することがわかる。以降この領域をフラット領域と呼ぶ。一方このフラット領域に相当する重合範囲においてはランダムノイ

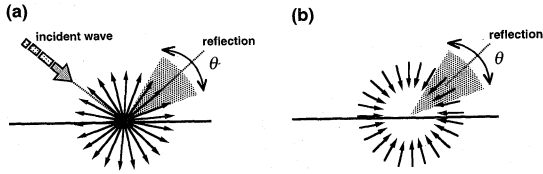


Fig. 20 (a) Diagram illustrating the directivity in case of diffraction stacking. The ray paths going through shadow zone are stacked. (b) Diagram illustrating the directivity in case of back propagation. The ray paths going through shadow zone are back propagated.

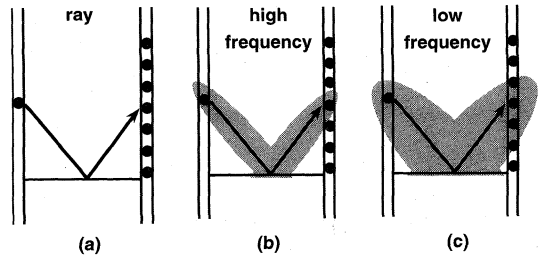


Fig. 21 Illustration of fresnel zones. (a) Ray path. (b) Ray path with a fresnel zone in case of high frequency. (c) Ray path with a fresnel zone in case of low frequency.

ズおよびコヒーレントノイズの RMS 振幅は減少している。すなわち信号はほぼ変化しない状況でノイズは減少するため、この領域において S/N 比がピークとなる。このフラット領域の存在は前述のフレネルゾーンによるものであり、波形が低周波数になるほど、波形の冗長性が増し、みかけ上の信号強調効果が生じることによる。したがって S/N 比がピークとなる最適な重合範囲は波形の冗長性、すなわちフレネルゾーンにより形成されるものであると考えることができる。このような理由により Fig. 11 および Fig. 14 のグラフにおいて周波数が高くなるにつれて、 S/N 比がピークを与える重合範囲 θ の値が小さくなる方向にシフトするのは、周波数が高くなるにつれてフレネルゾーンが狭くなり、フラット領域が

重合範囲 θ の値が小さくなる方向にシフトするためであると理解できる。よって、フレネルゾーンに含まれるトレースのみを重合するように重合範囲を設定すれば、 S/N 比のピークを得ることができる。

4.4 S/N 比の周波数依存性について

ここでは Fig. 11 および Fig. 14 のグラフに見られる S/N 比の周波数依存性について考察する。Fig. 11 および Fig. 14 のグラフに見られる周波数依存性として、波形の中心周波数が高くなると全体的に S/N 比が向上していることがわかる。これに関しては、以下のように考察することができる。

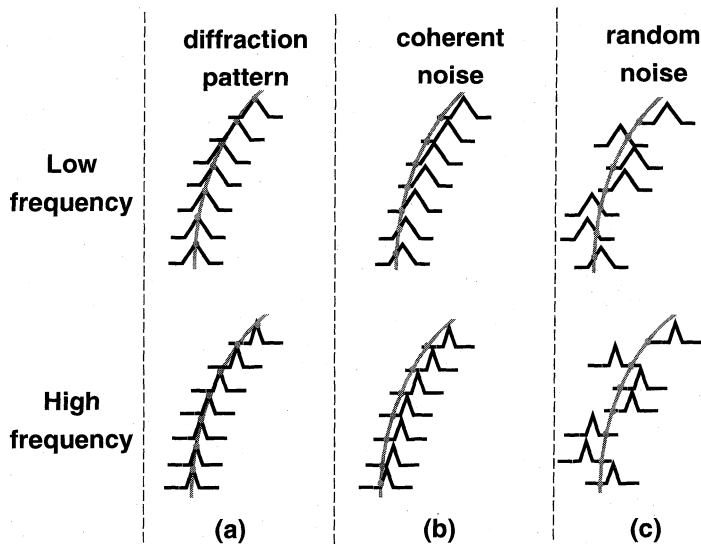


Fig. 22 Comparison of pattern matching errors between the case of low frequency and high frequency. (a) diffraction pattern. (b) coherent noise. (c) random noise.

前述したように反射面をイメージングする作業の根本は散乱点をイメージングする作業と考えることができるので、水平反射面により励起された鏡面反射波も反射面の各点において励起された散乱波に分解して考えることができる。Fig. 22(a)はある点で励起された散乱波を模式的に表現している(上段は低周波数の波形, 下段は高周波数の波形の場合を示す)。また図中の灰色の太線は散乱重合の場合に、この線に沿って振幅を加算する線を意味する。Fig. 22(b), (c)はそれぞれコヒーレントノイズ及びランダムノイズの場合を表現している(Fig. 22(a)と同様に上段は低周波数の波形, 下段は高周波数の波形の場合を示す)。Fig. 22(a), (b), (c)を見比べると、波形が低周波数から高周波数に変化したときに、信号である散乱波パターンに関しては、周波数に関係なく加算効果は変化しないことがわかるが、コヒーレントノイズ及びランダムノイズに関しては低周波数から高周波数に変化するに従い、それぞれのノイズに対する加算効果が減少することがわかる。これは波形が高周波数になるにしたがって、波形の冗長性が減少し、みかけ上の加算効果が減少するためである。このような理由により、高周波数ほど、 S/N 比が高くなる。

5. 結 論

本研究では一枚の水平反射面が存在する簡易な状況を設定し、この反射面をイメージングする場合にどのような重合処理を行えば最も S/N 比が高い重合記録を作成できるかについて述べた。

本論で定義した重合範囲 θ の概念を用いれば、 θ が無限小の場合は坑井間 CDP 重合法と考えることができ、 θ が 360 度のときは理想的な坑井間散乱重合法(あるいは重合前マイグレーション)と考えることができる。このような概念のもとでは坑井間 CDP 重合法は坑井間散乱重合法(あるいは重合前マイグレーション)の特別な場合であると捉えることができる。

ノイズとしてはランダムノイズとコヒーレントノイズ(P-S 変換反射波)を考え、重合範囲 θ を変化させながら坑井間 CDP 重合から坑井間散乱重合までの重合処理を適用し、 S/N 比の定量的な検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) ランダムノイズに対して n 回重合行くと、 S/N 比が \sqrt{n} 倍向上するという周知の事柄は、インパルス波形である前提が必要で、実際の有限周波数帯域を有する波形においては成立せず、周波数依存性を有することがわかった。

(2) ランダムノイズおよびコヒーレントノイズに対し

て、坑井間 CDP 重合法に比べて坑井間散乱重合法のほうが S/N 比の高い記録が得られた。

(3) 坑井間 CDP 重合法と坑井間散乱重合法の間で S/N 比のピークを与える最適な重合範囲が存在し、そのピークを与える重合範囲の値はリッカー波形の中心周波数に依存することが確認された。

(1) に関しては、インパルス波形が極限状態を考えた波形であることによる。インパルス波形を使用すれば散乱重合法を適用する場合は発震および受振数を増加しても S/N 比は一定であるという結果が得られるが、実際の有限周波数帯域を有する波形においてはこのような結果は成立しない。

(2) に関しては、ホイヘンスの原理に基づけば、反射面は散乱点の集合であると考えられるので、反射面をイメージングする作業の本質は一つの散乱点をイメージングする作業に帰着される。すなわちイメージングの基本はホイヘンスの原理における時間軸を逆にした波動の逆伝播と捉えることができる。このような観点に立てば重合範囲を大きく設定することはホイヘンスの原理に対する近似度を向上させることに相当する。坑井間散乱重合法は坑井間 CDP 重合法に比べてホイヘンスの原理に対する近似度が良いため、坑井間 CDP 重合法に比べて S/N 比の高い重合記録を得ることができる。

(3) に関しては、フレネルゾーンが原因であり、いわば波形の冗長性により、みかけ上の信号強調効果が生じるためである。フレネルゾーンに含まれるトレースのみを重合するように重合範囲を設定すれば、 S/N 比のピークを得ることができる。この効果は波形の周波数、観測の幾何学的配置および地下の構造形態等により決定される。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、匿名の査読者の方々には丁寧な査読をしていただき、論文改善に非常に有益な御指摘を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- BEYDOUN, W. B., DEVAUX, J., MENDES, M., NOUAL, G. and TARANTOLA, A. (1989) : Practical aspects of an elastic migration/inversion of crosshole data for reservoir characterization: A Paris basin example, *Geophysics*, **54**, 1587-1595.
- HARRIS, J. M. and WANG, G. Y. (1996) : Diffraction tomography for inhomogeneities in layered background medium, *Geophysics*, **61**, 570-583.

- HARRIS, J. M., RECTOR, J. W., LAZARATOS, S. K. and VAN SCHAACK, M. (1992) : High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: part 1, *presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts*, 35-39.
- HU, L., MCMECHAN, G. A. and HARRIS, J. M. (1988) : Acoustic prestack migration of cross-hole data, *Geophysics*, **53**, 1015-1023.
- LAZARATOS, S. K., RECTOR, J. W., HARRIS, J. M. and VAN SCHAACK, M. (1993) : High-resolution cross-well reflection imaging: Potential and technical difficulties, *Geophysics*, **58**, 1270-1280.
- LAZARATOS, S. K., HARRIS, J. M., RECTOR, J. W. and VAN SCHAACK, M. (1995) : High-resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: part 4-Reflection Imaging, *Geophysics*, **60**, 702-711.
- LI, G. and STEWART, R. R. (1996) : Crosswell seismic imaging: Friendswood, Texas field data, *Journal of Seismic Exploration*, **5**, 323-340.
- MATSUSHIMA, J., S. ROKUGAWA, T. YOKOTA and T. MIYAZAKI (1997) : Cross-well imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with velocity analysis, *BUTSURI-TANSA*, **50**, 107-122.
- RECTOR, J. W., LAZARATOS, S. K., HARRIS, J. M. and VAN SCHAACK, M. (1995) : High-resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: part 3-Wavefield separation of reflections, *Geophysics*, **60**, 692-701.
- ROKUGAWA, S., KATO, Y., TAKAHASHI, I., ISHII, Y., SASADA M. and KIGUCHI, T. (1993) : Potential and problems of seismic tomography in highly fractured area, *BUTSURI-TANSA*, **46**, 469-481.
- ROWBOTHAM, P. S. and GOULTY, N. R. (1993) : Imaging capability of cross-hole seismic reflection surveys, *Geophysical Prospecting*, **41**, 927-941.
- SAM, G. and LARRY, L. (1992) : Cross-borehole tomographic migration, *Journal of seismic exploration*, **1**, 315-324.
- SONG, Z. M., WILLIAMSON, P. R. and PRATT, R. G. (1995) : Frequency-domain acoustic-wave modeling and inversion of crosshole data: Part II-Inversion method, synthetic experiments and real-data results, *Geophysics*, **60**, 769-809.
- VAN SCHAACK, M., HARRIS, J. M., RECTOR, J. W. and LAZARATOS, S. K. (1992) : High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: part 2, *presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts*, 40-44.
- YOKOTA, T., ROKUGAWA, S., MATSUSHIMA, J. and MIYAZAKI, T. (1995) : Application of S-wave tomography to the geothermal area: A case study at Yutsubo geothermal area, *Proceedings of the 3rd SEGJ/SEG International Symposium on Geotomography*, 375-382.
- ZHOU, C. and SCHUSTER, G. T. (1995) : Elastic waveform inversion of pressure field, *65th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 69-72.
- ZHOU, C. and SCHUSTER, G. T. (1997) : Elastic wave equation travelttime and waveform inversion of crosswell data, *Geophysics*, **62**, 853-868.
- ZHU, X. and MCMECHAN, G. A. (1988) : Acoustic modeling and migration of stacked cross-hole data, *Geophysics*, **53**, 492-500.
- 芦田 讓, 佐々宏一 (1993) : 坑井間反射法地震探査データの深度変換, *物理探査*, **46**, 167-174.
- 石井吉徳 (1974) : 土木地震探査と信号改善について, *物理探査*, **27**, 65-75.
- 今吉 隆, 小澤岳史, 石井義郎 (1994) : ディフラクションスタック法による坑井間反射データのマッピング, *物理探査学会第91回学術講演会論文集*, 50-54.
- 土家輝光 (1997) : フルウェーブ・トモグラフィの数値実験 (1)- V_p/V_s 分布の高精度推定-, *物理探査*, **50**, 460-476.
- 六川修一, 松島 潤 (1995) : 坑井間における CDP 重合法適用-数値シミュレーション並びに室内モデル実験による検討-, *物理探査*, **48**, 85-98.