

波動の地表入射角の決定における -p 変換の優位性とマイグレーションに及ぼす効果

川林 徹也*・三ヶ田 均**・後藤 忠徳**・武川 順一**・尾西 恭亮*³

要 旨

反射法地震探査におけるマイグレーション処理において、マイグレーションのイメージ範囲を制限することは、マイグレーションノイズを抑制する上で大変重要である。フレネルボリュームマイグレーションでは、弾性波の周波数によって定められるフレネルボリュームと呼ばれる空間領域を通してエネルギーが伝播すると考え、このフレネルボリュームをイメージ範囲の基準にする。フレネルボリュームマイグレーションで重要となるのが、フレネルボリュームの位置決定であり、受振器への弾性波入射角を精度よく求める必要がある。

これまでの研究では、トンネル切羽前方探査や VSP 探査などで三軸の受振器データより得られたスローネスベクトルを用いて弾性波の入射角を推定したフレネルボリュームマイグレーション処理が報告されている。また、1 成分計の受振器では、複数の受振器で相互相関を取ることで弾性波の入射角を推定しようと試みられてきた。しかし、この手法は複数の入射波が同時に受振器に到達した場合、弾性波の入射角を見誤ってしまい、フレネルボリュームの位置決定を誤ることとなる。

本研究では、このような場合にも安定して、入射角決定を行うために、-p 変換を用いた弾性波の入射角決定を行った。この入射角決定を用いたフレネルボリュームマイグレーション手法を点モデルと傾斜モデルの 2 つの 2 次元数値モデルへ適用し、スローネスベクトルで入射角決定を行ったマイグレーション結果と比較・検討した。その結果、両手法ともにマイグレーション処理に適用できる入射角決定手法であり、さらに、-p 変換を入射角決定に用いることで、三軸受振器を入射角決定に用いるより安定してフレネルボリュームの位置決定が行えた。

キーワード: フレネルボリューム・マイグレーション・パーティクルスローネスベクトル・-p 変換・入射角決定

1. はじめに

反射法地震探査において、マイグレーション処理は複雑な地下構造を表現するために必要な処理手法ではあるが、同時にマイグレーション後データにマイグレーションノイズを加えてしまうこととなる(例えば, Vermeer, 1999)。データ取得の際の空間的制限などに起因するマイグレーションノイズを抑制するには、マイグレーション

のイメージ範囲を物理的に制限することが有効であることが知られている (Luth, et al., 2005)。中でも、フレネルボリュームマイグレーションでは、地下を伝播する弾性波が有限周波数であることに着目し、弾性波の周波数によって決定される空間的な広がりを持つフレネルボリュームをイメージ範囲の制限の基準として、このイメージ範囲に合わせてマイグレーションの重み係数を定義し、この重み係数をマイグレーション処理に用いること

2011 年 4 月 12 日原稿受付; 2012 年 7 月 9 日受理

* 京都大学大学院工学研究科
(現在: 石油資源開発株式会社)
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂

** 京都大学大学院工学研究科
〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂

*³ 京都大学大学院工学研究科
(現在: 秋田大学大学院工学資源学研究所)
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂

第 120 回(平成 21 年度春季)学術講演会,
第 121 回(平成 21 年度秋季)学術講演会,
第 122 回(平成 22 年度春季)学術講演会にて一部を発表

でマイグレーションノイズを低減させる (Luth, et al., 2005; Buske et al., 2009)。このイメージ範囲を決定する際に必要となるのが、フレネルボリュームの位置情報であり、波動の地表入射角情報を用いることで決定することができる。この入射角決定が不安定だと、イメージ範囲の制限も不安定となり偽像を生み出してしまふ。このため、フレネルボリュームマイグレーション処理に安定した入射角決定手法を導入し、それが処理結果に及ぼす効果を検討する必要がある。

フレネルボリュームマイグレーションに関してはこれまでいくつかの手法が研究、開発されてきており、到来波の入射角決定もいくつか適用されている。Takahashi (1995)は、重合前マイグレーションに5 m深度に設置した三軸受振器により推定された到来方向が適用できることを、2次元および3次元の数値計算により示した。Schleicher et al. (1997)は2次元数値計算による合成データに対してマイグレーションに用いるトレース数をフレネルボリュームを考慮して制限することで、計算時間を減らし、S/N比を向上させた。Luth et al. (2005)はトンネルデータにおいて反射波波線の水平入射角から、フレネルボリュームに対応する重み係数を開発することでキルヒホッフ型重合前マイグレーションでの振幅の振り分け範囲を理論的に決定することに成功した。さらに、Buske et al. (2009)は受振器近傍でのスローネス解析に相互相関処理を用いて求めた入射角を用いることで、一軸受振器に関してもフレネルボリュームマイグレーションを適用することに成功した。しかしながら、Schleicher et al. (1997)ではS/N比しか考慮しておらず、Takahashi (1995)やLuth et al. (2005)は三軸受振器でのみ可能な入射角決定方法である。また、Buske et al. (2009)が用いた入射角決定手法である受振データの相互相関処理は処理に用いる受振器の数が制限される。一方、到来方向の推定に関して、これまでに特に地震学の方野で様々な研究が行われてきた。フレネルボリュームマイグレーション処理に適用可能な手法としては、到来方向の推定を安定させるためにセンブル係数を用いて -P 変換を行う semblance enhances stack 処理を用いて、自然地震と発破による人口地震の信号地震波散乱体の分布を求めた研究 (松本ほか, 1999)。パイプレータによる非爆発型震源による semblance enhances stack 処理を用いた短波長不均質構造のイメージングの研究 (松本ほか, 2002)。山崎ほか(2009)による ACROSS 信号のアレイ観測を行い、得られたデータを -p 変換することによって ACROSS 信号の到来方向を推定した研究がある。ノイズがシグナルに対して大きい場合や、複数の入射波が同時に受振器に到達した場合、相互相関処理より複数の受振器を入射角決定に用いることができる -P 変換を用いた入射角決定手法は入射角を誤認するリスクは小さくなる。本研究では、地表で到来方向を推

定のためのスローネス解析にノイズ除去効果も期待される -P 変換を用いた入射角決定手法を用いたフレネルボリュームマイグレーションを、点モデルと傾斜モデルの2つの2次元数値モデルへ適用し、Luth et al. (2005)が行った三軸受振器で得られたスローネスベクトルによる入射角決定を行う場合のマイグレーション処理結果と比較・検討を行う。

2. 手法

2.1. 第1フレネルボリューム

第1フレネルボリュームとは、発振点から受振点に至る波線経路の長さが2分の1波長以内の範囲で波長が強め合う空間である。Fig.1のように、入力波形の周期(T)では、空間上のある点までの走時(T_{sr})が、発震点から地下空間内の任意の点までの走時(T_s)と受振点からその点までの走時(T_r)に対して、式(1)を満たすとき、その点は第1フレネルボリュームに含まれる。

$$|T_s + T_r - T_{sr}| < T/2 \quad (1)$$

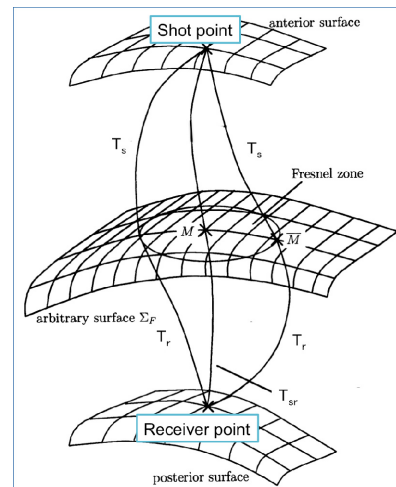


Fig.1. Conceptual diagram of Fresnel volume.

2.2. フレネルボリュームマイグレーション

フレネルボリュームマイグレーションでは、反射波シグナルをその反射点として考えられる式(1)を満たす点に振り分けていく。キルヒホッフ型重合前深度マイグレーションと同様、発震点から地下空間内の任意の点までの走時(T_s)と受振点からその点までの走時(T_r)を、媒質の弾性波速度を用いて精度よく求める。また、フレネルボリュームの中心として入射波の到来方向から地下速度構造を用いて決定される点までの走時(T_{sr})も求める。Fig.2に示すように、得られた合計時間(T_s + T_r)とフレネルボリュームの中心である点での往復時間(T_{sr})を用いて、マイグレーションの重合範囲を式(1)を満たす範囲内に限定し、トレース上のデータをその振幅や位相

に補正を加えた上で (Yilmaz, 1987) 振り分ける。この操作を地下空間内のすべての点に対して行うとフレネルボリュームに含まれる等走時間が形成され、さらにこの一連の操作をすべての入力トレースに対して行い、重ね合わせていくことで反射面がイメージされていく。

このフレネルボリュームに含まれる反射面の情報を多く含んだデータのみをマイグレーションに用いることで、S/N 比が高い結果を期待できる。また、重合範囲を狭くすることで計算時間を短くすることができる。

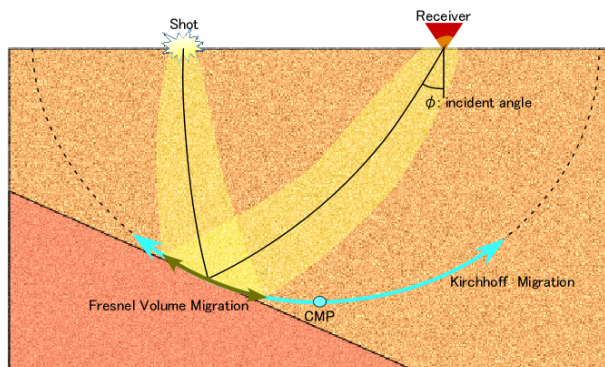


Fig.2. Fresnel volume migration using a receiver's incident angle. The Yellow zone expresses Fresnel volume, which position is estimated using the receiver's incident angle.

2.3. 入射角決定

フレネルボリュームマイグレーションにおいて、マイグレーションにおける受振データの振り分け範囲を決定するフレネルボリュームの位置決定が不安定だとイメージ範囲の制限も不安定となり偽像を生み出してしまふ。そのため、フレネルボリュームマイグレーション処理には安定した入射角決定手法が必要である。本研究では、三軸受振器で受振することを仮定したパーティクルスローネスペクトルによる入射角決定と、入射波を平面波近似する -p 変換による入射角決定とを行い、比較・検討した。

2.3.1. 三軸受振器による入射角決定

三軸受振器による入射角決定を行うには、受振データの鉛直成分と水平成分から導かれる推定入射角が反射波の入射角と一致する必要がある。自由端境界と考えられる地表面などで得られた受振データには、入射波のほかに地表で反射した P 波と S 波が含まれている。地表で発生した反射波によるズレを考慮して入射角を推定することは可能である(大熊ら, 2002)。しかし、この手法をフレネルボリュームの位置決定のみを目的として行うには、入射波の補正処理が複雑であるため大変手間がかかってしまい、この手法を入射角決定に用いることは現実的でない。このため、三軸受振器による入射角決定を用いたフレネルボリュームマイグレーションを適用する

ことができる対象は受振器を設置している空間が到来波の波長に比べて十分小さいと扱えるトンネル (Reshetnikov et al. 2010) や坑井内 (Luth et al. 2004) と制限される。しかし、-p 変換のような受振記録の前処理が必要でないために、三軸受振器による入射角決定の方が計算量は少ないという利点がある。

Fig.3 に示すようなトンネルや坑井内に設置された三軸受振器において反射波が受振された場合、水平方向を \mathbf{x} 、鉛直方向を \mathbf{z} とするような \mathbf{xz} 空間において地表面を $\mathbf{z}=0$ とし、受振された波動場を \mathbf{U} と定義すると、反射波の入射角 ϕ は、以下の式(2)によって導かれる。

$$\phi = \arctan(\mathbf{U}_{\text{vertical}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) / \mathbf{U}_{\text{horizontal}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t)) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{U}_{\text{vertical}}$ は受振記録の鉛直方向での振幅とし、 $\mathbf{U}_{\text{horizontal}}$ は受振記録の水平方向での振幅である。

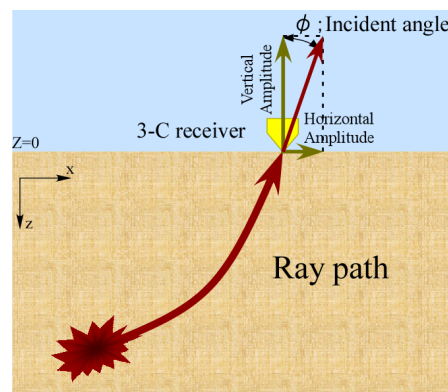


Fig.3. Polarization using observed 3C amplitude. The incident angle is calculated using vertical and horizontal amplitude of the 3-C center.

Luth et al. (2005) はトンネルの坑壁に 2~3 m の穴を掘って埋めた三軸の受振器データにより得られたスローネスペクトルを用いてフレネルボリュームの位置を決定した。これは、三軸受振器による入射角決定を行うことができる条件として、境界反射波が発生しないために受振器を設置している空間が到来波の波長に比べて十分小さいことを満たす必要があり、自由境界である地表面で受振する通常の反射法地震探査では得られたデータを直接フレネルボリュームの位置決定に適用すれば、境界反射波による誤差が発生してしまうためである。また、受振器が一軸である場合や、ノイズが大きい場合、あるいは P-P 反射波が P-S 変換波と被る場合などでは、鉛直方向と水平方向とのノイズの受け方の違いから入射角を正確には決定できない。その結果、フレネルボリュームの位置決定を誤ることとなり、フレネルボリュームマイグレーション処理を行うことにより偽像を生み出すこととなる。

2.3.2. -p 変換による入射角決定

本研究では、ノイズが大きい場合や、一軸のデータしかない場合でも安定して、フレネルボリュームマイグレーション処理を行うために、-p 変換を用いた入射角決定によるフレネルボリュームの位置決定を行った(Fig.4)。-p 変換による入射角決定では、まずデカルト座標系において得られた受振記録を、平面波のスローネスベクトル(平面波の進行方向を示すベクトル)によって規定される座標系へ変換する。この座標変換は、水平方向のスローネス p_x と intercept time である(走時線の逆延長がゼロ地点を切る時刻)の関数として表される - p_x 領域において行われる。

水平方向を x 、鉛直方向を z とするような xz 空間において地表面を $z=0$ と表し、受振された波動場を $U(x,z,t)$ と定義すると、地表面 $z=0$ に配置された受振器で取得される記録 $U(x,z=0,t)$ の、 x 方向への - p_x 変換(RU)(τ, p_x) は式(3)のように表され、 $t = \tau + p_x x$ となる。

$$(RU)(\tau, p_x) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \dot{U}(x, z=0, \tau + p_x x) \tag{3}$$

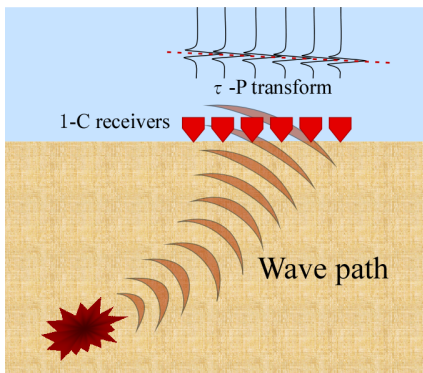


Fig.4. Polarization using τ -P transforms. The incident angle is calculated using several receivers' amplitude of 1-C or 3-C censers.

本研究では、式(3)から - p_x 領域で決定される結果を直接には入射角決定に用いない。任意の受振器に対して、任意の時間で -p 変換の結果から最も信頼される $p_x(x,t)$ が決定される。受振器の設置された地表面近傍での P 波のスローネスベクトル p_p が既知である場合、式(2)と同義の式である以下の式(4)から受振器で取得された波動場の入射角 ϕ を決定することが出来る。

$$\phi = \arcsin\left(\frac{p_x}{p_p}\right) \tag{4}$$

三軸受振器による入射角決定では、任意の受振器の任意の時間における受振された波動場の受振器への入射角は1つの受振器の三成分から決定される。対して -p 変換による入射角決定では到来波を平面波近似できる空間内の複数の受振器の1成分もしくは3成分と受振器近傍

の P 波速度から決定される。

VSP(Miao et al., 1995; Cosma et al., 2010)やトンネル切羽前方探査において、三軸受振器によって水平2成分、鉛直1成分を得ることは可能ではある(Ashida, 2001; Petronio et al., 2007)。しかし、壁面に三軸受振器を設置した場合、受振される鉛直成分は、三軸受振器の重量が大きく壁面に対して水平であるため、S/N比の低いデータとなってしまう(楠見ら, 2003; 武川ほか, 2003)。受振器近傍の P 波速度を入射角決定の計算に用いることで、比較的軽量な一軸受振器を壁面に取り付けて、最も S/N 比の高い壁面と鉛直方向の受振データを用いて入射角決定を行うことが出来る。

3. 点モデルによる入射角決定精度の検討

3.1. 点モデルの概要と二成分のショットギャザー

フレネルボリュームの空間領域は任意の受振トレースに対して、

- 発震器の位置情報
- 受振器の位置情報
- 地下の速度構造
- 受振トレースに含まれる反射波のピーク周波数
- 受振器への反射波の入射角

から一意に決定される。フレネルボリュームマイグレーションでは、マイグレーションの重合範囲をこのフレネルボリュームに設定して反射波の受振データを振り分ける。通常の反射法地震探査では、発震器と受振器の位置情報は既知であり、マイグレーション処理の対象となる反射波のピーク周波数は受振トレースから抽出可能である。フレネルボリュームマイグレーションも同様に、一般の深度マイグレーションと同じく、地下の速度構造を与えることで処理結果を得て、その結果が改善するように与えた速度構造を更新していく。本研究では、フレネルボリュームマイグレーションは、マイグレーションに適用する速度構造と推定した受振器への反射波入射角を用いて、フレネルボリュームの位置を決定している。

ここでは、フレネルボリュームマイグレーションを行う上で必要な情報である受振器への反射波の入射角を、三軸受振器による入射角決定と τ -p 変換による入射角決定の2つの方法を点モデルに用いてその精度の比較・検討を行う。

Fig.5 は入射角決定精度の検討に用いた点モデルの概念図であり、Table 1 は検討に用いた点モデルのパラメータである。今回の点モデルでは三軸受振器による入射角決定と τ -p 変換による入射角の決定精度を評価するため、解析領域の中央、深度 600m に点の速度異常を与えた。発震位置は速度異常体から水平方向に 480m 付近とし、受振器は精度評価のために通常の反射法地震探査よりも狭い範囲で 2.4m 間隔とした。また、三軸受振器に

よる入射角決定を行うためには受振器を設置している空間が到来波の波長に比べて十分小さい必要があるが、実際に設置することを考慮して、今回の 2 次元数値モデルでは自由端境界である地表面に受振器を配置し、境界反射波が含まれた到来波にホワイトノイズを加えた受振データをを用いて入射角決定精度を検討する。

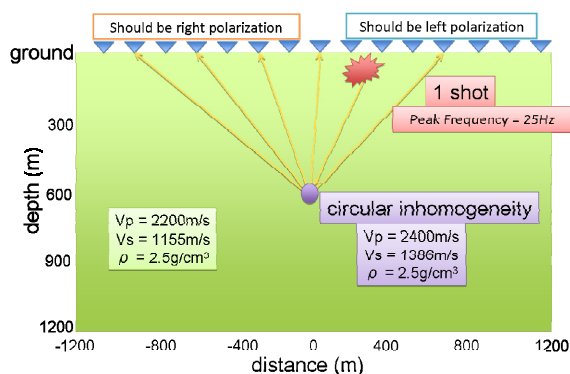


Fig.5. Circular boundary model. The circular inhomogeneity is located in midpoint of calculation area.

Table 1. Parameter of Circular boundary model.

seismic source	Ricker wavelet
peak frequency	25(Hz)
receiver interval	2.4(m)
max offset	1560(m)
sampling rate	0.32(ms)
data length	1.000(s)

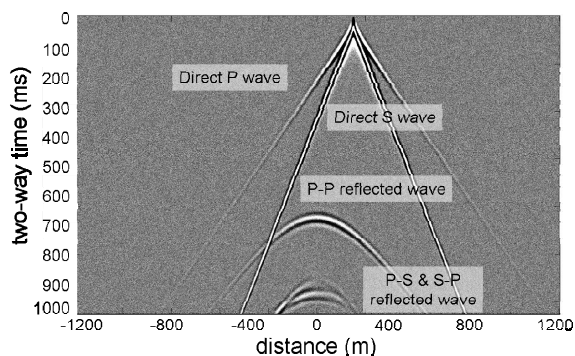


Fig.6. Received vertical amplitude shotgather.

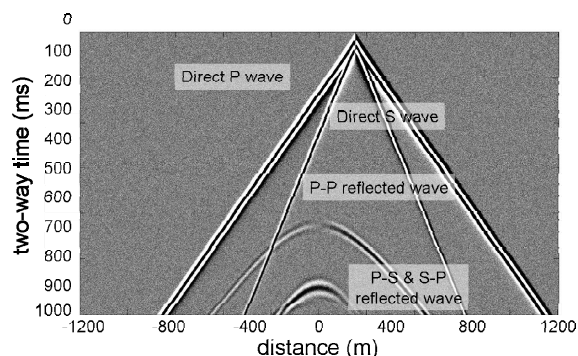


Fig.7. Received horizontal amplitude shotgather.

Fig.6 は点モデルから得られた鉛直成分のショットギャザーである。両図とも横軸を点の速度異常体からのオフセット距離、縦軸を往復走時としている。Fig.6を見ると、点の速度異常の直上、往復走時 0.70 秒を中心に明瞭な反射波が確認できる。点の速度異常体から左右の受振器は、下方からの反射波に対して受振器の鉛直成分では振幅、位相ともに同様の挙動を示している。

Fig.7は得られた水平成分のショットギャザーである。Fig.6と同様の位置、往復走時において、反射点からの反射波が確認できるが、点の速度異常体を基準に左右で位相が逆転していることが分かる。

以降では、この 2 成分のショットギャザーを用いて入射角決定の精度評価を行う。

3.2. 点モデルによる入射角決定の精度評価

三軸受振器による入射角決定では、入射角決定を行う受振器の鉛直方向 (Fig.6) と水平方向 (Fig.7) の受振記録を用いた。また、 τ -p 変換による入射角の決定では、一軸受振器でも用いることが可能であるように入射角決定を行う受振器に対して近傍の 20 個の受振記録の鉛直成分 (Fig.7) を用いた。発震を点の速度異常体から右に 360m の地表で行った場合のショットギャザーの形で、式(2)、式(3)により求められた受振器への入射角をカラーズペクトルで表示する。Fig.8 は三軸受振器による入射角決定を行った結果であり、Fig.9 は τ -p 変換による入射角決定を行った結果である。なお、図の上部に、速度異常点と受振点の位置関係から算出した入射角のカラーズペクトルを表示している。上部に示した想定されるカラーズペクトルと推定された入射角が示す色が同じであれば、地震波の到来方向を正しく推定できていると言える。

三軸受振器による入射角決定結果 (Fig.8) を見てみると、定性的には往復走時 0.70 秒から始まる P-P 反射波の初動の立ち上がりにあたる部分においては、想定されるカラーズペクトルと同色を示しているが、その後すぐに推定した入射角が想定されるカラーズペクトルと異なる挙動を示しており、安定して入射角決定が出来ていないことが分かる。この理由としては、前述したように三軸受振器による入射角決定を行うには、受振器を設置している空間が到来波の波長に比べて十分小さいと扱えることがあるが、現実的な設置状況を考慮して自由境界である地表面に受振器を配置しているため、初動のみ推定入射角が正解と一致し、その後の反射波は地表面から反射して来た境界反射波が干渉しているため、到来波の入射角と推定される入射角にズレが生じるためと考えられる。

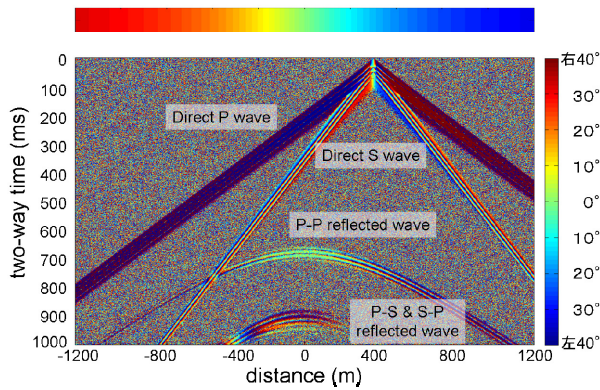


Fig.8. Polarization using observed 3C amplitude.

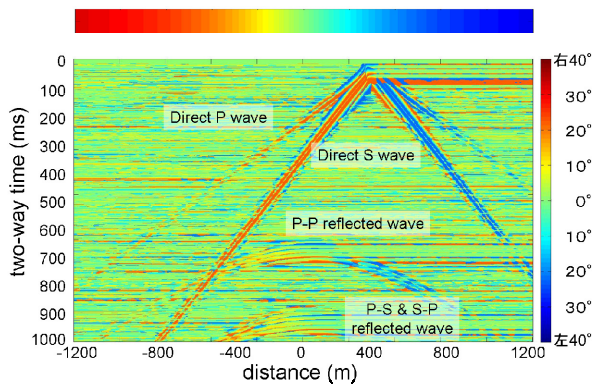


Fig.9. Polarization using τ -P transform.

次に、 τ -p 変換による入射角決定結果 (Fig.9) を見ると、定性的には往復走時 0.70 秒から始まる P-P 反射波の初動の立ち上がりにあたる部分と反射波の振幅の大きな部分においては、推定されるカラースペクトルと同色を示しているが、反射波の振幅が小さくなる走時では、到来波の入射角と推定される入射角にズレが生じていることが、同色を示していないことから分かる。これは、 τ -P 変換に用いた式(3)は強振幅面を捉えて到来方向を推定するため、振幅の弱い部分では τ -P 変換に用いた他の受振器の強振幅の影響を受けて安定して到来方向を推定できないためである。

この二つの手法の結果を比較するために、両手法の結果から P-P 反射波に当たる箇所の推定入射角を抽出し、速度異常点と受振点から想定される入射角との誤算の最小二乗平均 (以下, RMSE) を計算した。結果を Table 2. に示す。 τ -P 変換を用いた入射角決定手法が、P-P 反射波全体でより精度よく入射角を推定している。

以上の三軸受振器による入射角決定の結果と、 τ -p 変換による入射角決定の結果を比較した結果、三軸受振器による入射角決定でも、境界反射波の影響を受けない P-P 反射波の初動の立ち上がりにあたる部分を用いれば入射角を推定できる。一方で、 τ -p 変換による入射角決定では、複数の受振データの振幅情報を各受振器の入射

角決定に用いるため、三軸受振器による入射角決定より境界反射波の影響を受けにくく、P-P 反射波の立ち上がり部分だけでなく強振幅の部分においても安定して入射角決定が出来ていると考えられる。

Table 2. RMS Error of incident angles estimated using observed 3C amplitude and τ -P transform

	RMSE
3C amplitude	0.124 °
τ -p transform	0.071 °
ratio(τ -p / 3C)	0.573

4. 傾斜モデルによるマイグレーション処理の検討

フレネルボリュームマイグレーションを行う上で必要な情報である受振器への反射波の入射角を、三軸受振器による入射角決定と τ -p 変換による入射角決定の二つの方法を傾斜モデルに用いて得られた入射角をフレネルボリュームマイグレーション適用時に利用し、マイグレーション結果を比較・検討する。

4.1. 傾斜モデル

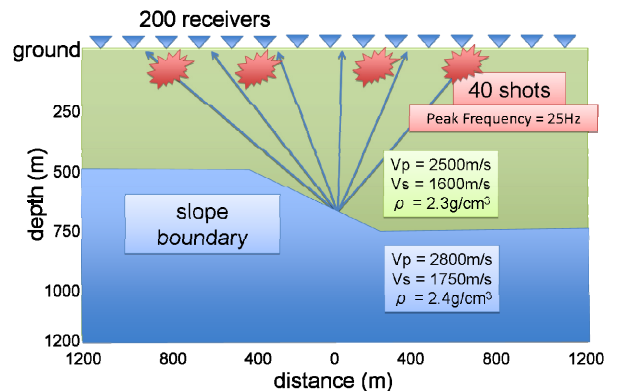


Fig.10. Slope boundary model. Shallow side of the slope boundary is 500m depth. Deep side of the slope boundary is 750m depth.

Table 3. Parameter of the slope boundary model.

seismic source	Ricker wavelet
peak frequency	25(Hz)
shot interval	24(m)
receiver interval	12(m)
max offset	1680(m)
sampling rate	0.32(ms)
data length	1.000(s)

Fig.10 は用いた傾斜モデルの概念図であり、Table 3 はこの傾斜モデルのパラメータをまとめた表である。今回の傾斜モデルでは三軸受振器による入射角決定と -p 変換による入射角決定がフレネルボリュームマイグレーション処理結果にどのように寄与するかを評価するため、2つの水平成層を深度 500m と深度 750m に設け、その間の水平距離 800m 垂直距離 250m を傾斜層でつないで、解析領域を二層構造に分割した。

発震位置は傾斜層の中心から両側に 24m 間隔で 40 個とし、受振器は 12m 間隔で 200 個とした。この地下構造では、受振器の一部に傾斜層からの反射波と、深度 750m の水平成層からの反射波が重なるものが出てくるため、複数の弾性波が重なった受振データに対しても入射角決定を精度よく行えるかどうかを確認することができる。また、今回の傾斜モデルでも同様に実際に設置することを考慮して、今回の 2 次元数値モデルでは自由端境界である地表面に受振器を配置し、反射波が含まれた到来波を用いて、マイグレーション結果を比較・検討する。なお、反射波に対して S/N 比が 1 となるホワイトノイズを受振データに加えている。

Fig.11 は、傾斜モデルから得られた受振記録の鉛直成分である。点モデルの場合と同じく、横軸を傾斜層の中心からのオフセット距離、縦軸を往復走時としている。今回はさらに、得られた受振記録にホワイトノイズとガウシアンノイズを加えて、ノイズがどのように 2 つの入射角決定に作用するのかを確認した。なお、発震位置が傾斜層の中心から右に 480m の位置である場合のショットギャザーを例として表示している。

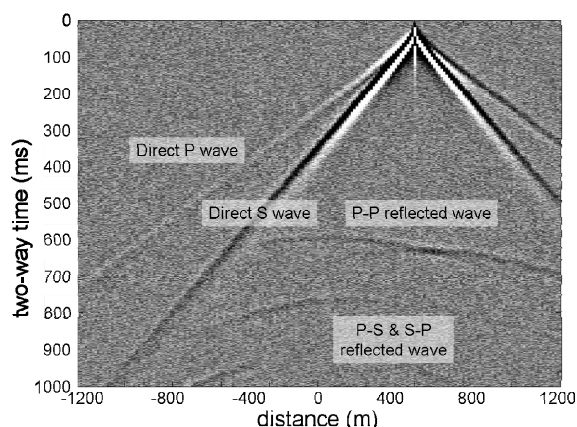


Fig.11. Slope boundary model. Signal to Noise ratio is one by adding White noise.

Fig.11 を見てみると、往復走時 0.6 秒付近から 2 つの反射波が確認できる。左側の反射波は傾斜層からの反射波であり、右側の反射波は 750m 深度にある水平成層からの反射波である。また、往復走時 0.75 秒付近から P-S 変換波と S-P 変換波も確認できる。

この鉛直成分のショットギャザーと水平成分のシ

ットギャザーを用いて、三軸受振器と -p 変換による入射角決定を行う。ここでも、三軸受振器による入射角決定では、二成分の受振記録を用いた。また、-p 変換による入射角の決定では、一軸受振器でも用いることが可能であるように受振記録の鉛直成分のみを用いた。

4.2. フレネルボリュームマイグレーションの適用

傾斜モデルにより得られた受振記録に、三軸受振器によって推定された入射角を用いてフレネルボリュームマイグレーション処理を行った記録が Fig.12 であり、-p 変換によって推定された入射角を用いてフレネルボリュームマイグレーション処理を行った記録が Fig.13 である。

三軸受振器によるマイグレーション処理後記録 (Fig.12) を見ると、傾斜モデルで与えた二層構造の境界を正確に表現できている。しかし、フレネルボリュームマイグレーションでは本来小さくなるはずのマイグレーションノイズが傾斜層部分の中心から左上に向けて伸びていることが確認される。これは、Fig.10 において確認された 2 つの反射波が重なる箇所、三軸受振器による入射角決定がうまくできていないことに起因すると考えられる。また、500m 深度の水平成層と傾斜層の境目である箇所から 100m 深い箇所において偽像が出現している。これは、P-S 変換波と S-P 変換波によるものだと考えられる。

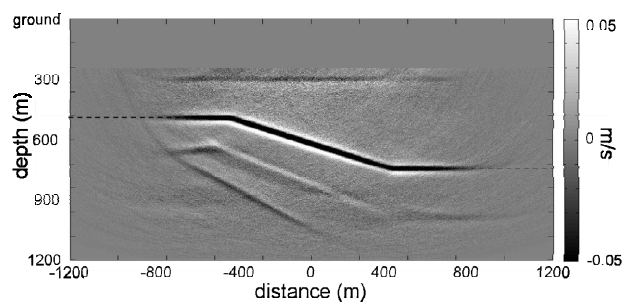


Fig.12. Migration data using incident angles estimated by observed 3C amplitude. Black dot-line position expresses the slope boundary.

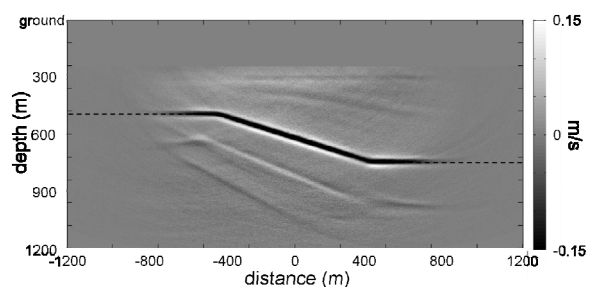


Fig.13. Migration data using incident angles estimated by the tau-P transforms. Black dot-line position expresses the slope boundary.

-p変換によるマイグレーション処理後記録(Fig.13)を見ると、三軸受振器と同様に傾斜モデルで与えた二層構造の境界を正確に表現できている。さらに、マイグレーションノイズもほとんど発生しておらず、安定して入射角決定が出来ていることが確認できる。また、500m深度の水平成層と傾斜層の境目である箇所から100m深い箇所において、三軸受振器によるマイグレーション処理後記録と同様に、P-S変換波とS-P変換波によるものと考えられる偽像が確認される。

4.3. マイグレーション適用結果の評価

三軸受振器によって推定された入射角と-p変換によって推定された入射角をそれぞれ、フレネルボリュームマイグレーション処理に適用した結果を比較・検討するために、マイグレーション断面を第2層の水平部、および傾斜部中央の3箇所において、深度方向に振幅をプロットした。Fig.14は傾斜部中央から左側に480m、Fig.15は傾斜部中央、Fig.16は傾斜部中央から右側に480mの箇所でマイグレーション断面を深度方向に振幅をプロットしたものである。

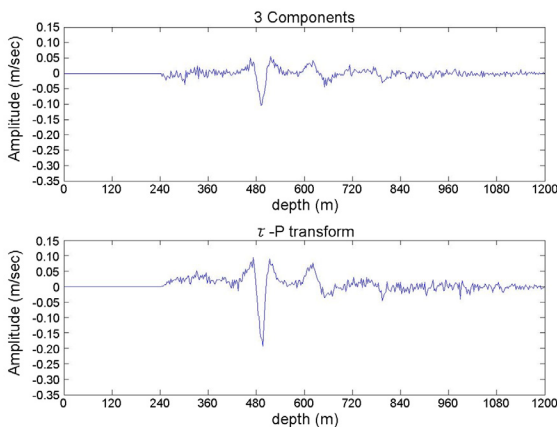


Fig.14. Amplitude vs. Depth plots extracted from migration data at 480m left from the midpoint of slope.

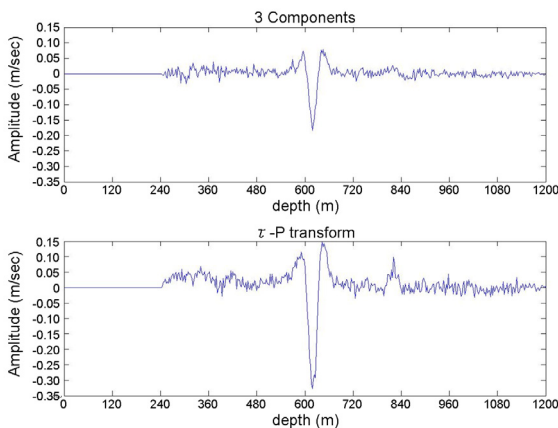


Fig.15. Amplitude vs. Depth plots extracted from migration data at the midpoint of slope.

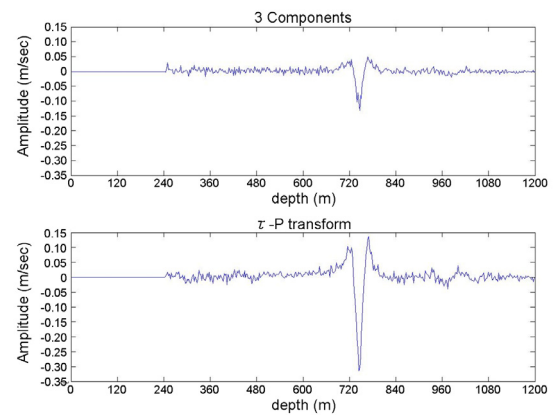


Fig.16. Amplitude vs. Depth plots extracted from migration data at 480m right from the midpoint of slope.

Fig.14, Fig.15, Fig.16において、三軸受振器による入射角決定手法、-P変換による入射角決定手法ともに、それぞれ想定される深度500m、625m、750mで最大振幅を示している。ただし、-P変換による入射角決定手法を用いたマイグレーション処理結果の最大振幅は、三軸受振器による結果の2倍程度の値を示しており、点モデルによる入射角決定の精度評価の結果を考慮すれば、入射角決定の安定性において複数の受振器を入射角決定に用いることが可能な-P変換による入射角決定は、より安定性に優れているためであると考えられる。また、両手法のマイグレーション断面において、ノイズの値に大きな違いは認められなかった。

ただし、P-S変換波とS-P変換波による偽像については、両手法の結果ともに、Fig.14, Fig.15中でそれぞれ620m,820m付近に確認されている。

以上、点モデルと傾斜モデルに対し、三軸受振器によって推定された入射角を用いた場合と、-p変換によって推定された入射角を用いた場合の2つのフレネルボリュームマイグレーション適用結果を比較した。その結果、後者のほうが入射角決定の安定性に優れていること、その結果、後者を入射角決定に用いることで、マイグレーション断面のS/N比が向上した。

5. まとめ

フレネルボリュームマイグレーションを行うためには、すべての受振トレースに対して、弾性波がどのように伝播してきたのかを把握しなければならない。本研究では弾性波の入射角を、受振器の鉛直成分と水平成分のスローネスベクトルから求める方法と、-p変換を用いた弾性波入射角決定による方法とでフレネルボリュームの位置決定を行った。

今回の成果として以下の3点が挙げられる。

・ 三軸受振器による入射角決定でも、境界反射波の影響を受けない P-P 反射波の初動の立ち上がり部分を用いれば入射角を推定できる。

・ 一方、-p 変換による入射角決定では、複数の受振データの振幅情報のみを各受振器の入射角決定に用いるため、三軸受振器による入射角決定より境界反射波の影響を受けにくく、P-P 反射波の立ち上がり部分だけでなく強振幅の部分においても安定して入射角決定が出来る。

・ 入射角決定の安定性に優れる -p 変換を入射角決定手法に採用することで、マイグレーション断面の S/N 比が向上する。

以上の結果から、入射角決定の安定性とマイグレーション断面の S/N 比の向上の面から -p 変換による入射角決定の方が優位であると結論することができた。今後の課題としては、現場データに適用してマイグレーション処理への -p 変換による入射角決定の適用性についてさらに検討していくことがあげられる。

謝 辞

匿名の査読者の方々には、詳細な査読をしていただき、論文改善のための有益なご指摘を頂きました。感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Ashida, Y. (2001): Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **38**, 823-831
- Buske, S., Gutjahr, S., and Sick, C. (2009): Fresnel volume migration of single-component data, *Geophysics*, **74**, WCA47-WCA55
- Cosma, C., Balu, L., and Enescu, N. (2010): 3D VSP migration by image point transform, *Geophysics*, **75**, S121-S130.
- 楠見晴重, 芦田譲, 松岡俊文, 野口哲史, 佐野信夫, 伊熊俊幸 (2003): 破碎帯が連続した岩盤におけるトンネル切羽前方探査の適用性, 土木学会論文集 **743/3-64** 2003.9.21 pp.229-234
- Luth, S., Goertz, A., Buske, S., and Giese, R. (2004): Fresnel-volume migration of elastic seismic data with low spatial coverage, Proceedings, 10th European Meeting, *Environmental and Engineering Geophysics*, **Z-99** (2004).
- Luth, S., Buske, S., Giese, R., and Goertz, A. (2005): Fresnel volume migration of multicomponent data, *Geophysics*, **70**, S121-S129.
- 松本聡, 小原一成, 吉本和生, 斎藤竜彦, 長谷川昭, 伊東明彦, 短スパンアレイ観測による奥羽脊梁山地周辺の地殻不均質構造のイメージング, 地震, **52**, No.2, 283-297, 1999.10.
- 松本聡, 小原一成, 木村尚紀, 中村めぐみ, アレイ観測による 2000 年鳥取県西部地震震源域周辺の短波長不均質構造のイメージング, 地震, **55**, No.2, 229-232, 2002.10.
- Miao, X., G., Moon, W., M., and Milkereit, B. (1995): A multioffset, three-component VSP study in the Sudbury Basin, *Geophysics*, **60**, 341; doi:10.1190/1.1443770
- 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典 (2002): 宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, **696** / I-58, pp.261-272
- Petronio, L., Poletto, F., and Schleifer, A. (2007): Interface prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSWD) method, *Geophysics*, **72**, G39; doi:10.1190/1.2740712
- Reshetnikov, A., Kummerow, J., Buske, S., and Shapiro, S. A. (2010): Microseismic imaging from a single geophone: KTB, *SEG Expanded Abstracts*, **29**, 2070; doi:10.1190/1.3513252
- Schleicher, J., Hubral, P., Tygel, P., and Jaya, M. S. (1997): Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration, *Geophysics*, **62**, 183-194.
- Takahashi, T. (1995): Prestack migration using arrival angle information, *Geophysics*, **60**, 154-163.
- 武川順一, 楠見晴重, 芦田譲 (2003): トンネル切羽前方探査における受振器配置の影響, 物理探査学会第 109 回学術講演会論文集, 115-116.
- Vermeer, G.J.O. (1999): Factors affecting spatial resolution, *Geophysics*, **64** (3), E942-E953.
- 山崎賢志, 渡辺俊樹, 山岡耕春, 中道治久, 羽佐田葉子 (2009): 鳳来アレイ観測による土岐, 豊橋, 森町に設置された弾性波 ACROSS 信号の解析, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, 252-255.
- Yilmaz, O. (1987): Seismic Data Processing, *Investigations in Geophysics*, **2**

Availability of the τ -p transform detection using seismic reflection incident angles and impacts on Fresnel volume migration

Tetsuya Kawabayashi* Hitoshi Mikada**, Tada-nori Goto**, Junichi Takekawa** and Kyosuke Onishi*³

ABSTRACT

Appropriate restriction of a migration aperture decreases migration noise of a seismic migration method. The Fresnel volume migration chooses the migration aperture considering the Fresnel volume of the received elastic wave. The Fresnel volume is regarded as the energy propagation space and determined by the propagating wave frequency and the incident angle to the receiver. Robust estimation of the Fresnel volume position leads to robust migration aperture restriction. Thus, estimation of the incident angle with maximum accuracy enhances signal to noise ratio of the Fresnel volume migration result.

In recent researches, some Fresnel volume migration methods estimate incident angles using three components slowness vectors in TSP, VSP, etc. Other methods estimate incident angles by analyzing the correlation of one component sensors for surface seismic data. Though, these method may miss-choose incident angles either when signal to noise ratio does not reach to estimate and when analyzing sensor receives several waves at the same time.

In this study, we used τ -p transforms to estimate incident angles stably even in such cases. We applied the Fresnel volume migration using τ -p transforms to 2D simulation data of point and slope model. As the result, we find that two methods are robust methods to use for the Fresnel volume migration. Also, comparing with slowness vector method, τ -p transform estimation can restrict migration aperture more stably.

Keywords: Fresnel volume • migration • particle slowness vector • tau-P transform • Incident angle estimation

Manuscript received April 12, 2011; Accepted July 9, 2012.

* Kyoto University (Now at Japan Petroleum Exploration Co.)
Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

** Kyoto University
Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

*³ Kyoto University (Now at Akita University)
Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540,
Japan

A part of this paper was presented at the 120th SEGJ spring conference, 2010, the 121st SEGJ fall conference, 2010 and the 122nd SEGJ spring conference, 2010.